

가상방음벽 구성을 위한 야외공연장 음향 제어 기술 개발

Development of Sound Control Technology of
Virtual Noise Barrier for Outdoor Concert Hall

2017. 06. 23

광주과학기술원

문화체육관광부

제 출 문

문화체육관광부장관 귀하

본 보고서를 ‘2014년도 선정 문화기술 연구개발 지원사업’

‘가상방음벽 구성을 위한 야외공연장 음향 제어 기술 개발’ 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017 년 6 월 23 일

주관연구기관명 : 광주과학기술원 (직인)

주관연구책임자 : 왕세명 (직인)

공동연구기관명 : 한국과학기술원 (직인)

공동연구책임자 : 김양한 (직인)

공동연구기관명 : 호남대학교 산학협력단 (직인)

공동연구책임자 : 김홍식 (직인)

공동연구기관명 : 전자부품연구원 (직인)

공동연구책임자 : 이종설 (직인)

문화체육관광 연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제29조(연구개발결과 공개 등)에
따라 보고서 공개에 동의합니다.

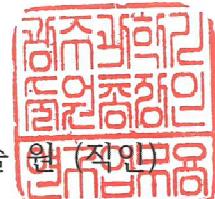
제 출 문

문화체육관광부장관 귀하

본 보고서를 ‘2014년도 선정 문화기술 연구개발 지원사업’

‘가상방음벽 구성을 위한 야외공연장 음향 제어 기술 개발’ 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017년 6월 23일



주관연구기관명 : 광주과학기술원 (직인)

주관연구책임자 : 왕세명 (직인)



공동연구기관명 : 한국과학기술원 (직인)

공동연구책임자 : 김양한 (직인)



공동연구기관명 : 호남대학교 산학협력단 (직인)

공동연구책임자 : 김홍식 (직인)



공동연구기관명 : 전자부품연구원 (직인)

공동연구책임자 : 이종설 (직인)



문화체육관광 연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제29조(연구개발결과 공개 등)에 따라 보고서 공개에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 번호	R2014110001					
과제명	국문	가상방음벽 구성을 위한 야외공연장 음향 제어 기술 개발				
	영문	Development of Sound Control Technology of Virtual Noise Barrier for Outdoor Concert Hall				
주관연구기관	기관명	광주과학기술원	사업자등록번호	410-82-07550		
	기관유형	특정연구기관	법인번호	204271-0000871		
주관연구책임자	성명	왕세명	직급(직위)	교수		
	전화번호	062-715-2390	전자우편	smwang@gist.ac.kr		
	휴대전화번호	*****	팩스번호	062-715-2384		
	과학기술인 등록번호	10169679	직장주소	광주광역시 북구 첨단과기로 123		
총 연구기간	2014. 12. 15 ~ 2017. 03. 31(28개월)					
연구개발비 현황(단위: 천원)						
연도	정부출연금 (A)	자체부담금				
		현금 (B)	현물 (C)	소계 D=(B+C)		
1차 연도	800,000	-	-	-		
2차 연도	763,327	-	-	-		
3차 연도	776,041	-	-	-		
합계	2,339,368	-	-	-		
공동 연구기관	기관명	총 참여기간		책임자 연락처		
	한국과학기술원	14.12.15 ~ 17.03.31 (28개월)		김양한 042-350-3025		
	호남대학교	14.12.15 ~ 17.03.31 (28개월)		김홍식 062-940-5455		
	전자부품연구원	14.12.15 ~ 17.03.31 (28개월)		이종설 031-931-8911		
위탁연구						
요약	(1) 야외 공연장 방사음향 특성분석 SW개발: 항공, 도로, 철도, 공장 소음만 예측 가능한 기존 소음지도 프로그램에 공연 소음을 예측 가능하도록 공연 소음을 모델링 하였으며 소음 노출 인구 산정 연구도 수행					
	(2) 사운드 포커싱 기반 공연소음 억제기술: 기존 공연음향 시스템이 아닌 새로운 공연음향 시스템을 제안하는 연구로, 객석과 객석 외부의 음압차를 최대화 시키는 연구와 객석에는 최적의 음향을 제공하며 외부로 전파하는 소음을 감소시키는 연구를 함께 수행					
	(3) 무대 스피커 기반 공연소음 억제기술: 기존 공연 음향시스템을 최대한 활용하면서 객석 외부로 유출되는 소음을 저감					
	(4) 개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술: 능동소음제어 기술을 이용하여 객석 외부로 유출되는 소음을 저감					
	(5) 야외공연장 실시간 음향 모니터링 시스템: 공연장 내부 음향을 무선 및 실시간으로 모니터링 하는 시스템 개발					

가. 연구 개발 결과

구분	연구 개발 목표	연구 개발 수행 내용	연구 결과
1 차 연 도	야외 공연장 방사음향 특성분석 SW개발: 야외공연장 방사음향분석 및 모델링	<ul style="list-style-type: none"> ○ Target 야외공연장 선정 ○ 신뢰성 있는 야외환경 소음 예측식 선정 ○ 소음지도 모델링 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 소규모(200석)/대규모(1000석) Target 야외공연장 선정완료 ○ ISO 9613에서 제시하는 야외 Wave Propagation 소음예측식 보고서 ○ 국내외적으로 인정되는 상용 프로그램 Sound PLAN이용, 공연장 주변소음지도 모델링 사례 보고서
	사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술 [Double-layer 스피커 어레이]: 사운드포커싱 기술의 적용 가능성 검토	<ul style="list-style-type: none"> ○ 내부 스테레오 사운드 구현기술 ○ 내외부 음압차 형성기술 ○ 어레이 형상에 따른 제어가능영역 예측 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 협대역에서 스테레오 구현가능성 확인 보고서 ○ 협대역에서 음압차 형성 가능성 확인 보고서 ○ “2D-array 제어” 또는 “1D-array 조합제어”의 특징을 이론적으로 검증
	사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술 [Acoustic parasol 기반]: 사운드포커싱 기술의 적용 가능성 검토	<ul style="list-style-type: none"> ○ Acoustic parasol의 이론 확립 및 소규모 실험 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Acoustic parasol 개발을 위한 사운드 포커싱 기술 검토 ○ 공연장 내외를 구분 음향 에너지대비 극대화 방법 적용 검토 ○ Zone control 실험 연구노트
	무대 스피커 기반 공연소음 억제기술: 무대 스피커 기반의 음장제어 가능성 검토	<ul style="list-style-type: none"> ○ 공연용 스피커의 특성분석 (알고리즘 분석) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 라인어레이(액티브) 스피커 지향성 특성분석 결과 ○ 우퍼스피커 동특성 분석 및 지향성 특성분석 결과
	개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 [개방공간용 능동소음제어]: 공연소음 감쇄를 위한 기술 검토	<ul style="list-style-type: none"> ○ 저주파 공연소음의 감쇄 가능성 여부 및 10% 기여도 달성 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 개방공간 소음제어용 ANC 알고리즘 검토 및 주요인자 분석보고서
	개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 [임피던스 차이기반 차음시스템]: 공연소음 감쇄를 위한 기술 검토	<ul style="list-style-type: none"> ○ 임피던스 부정합 가능한 주파수별 분석 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1차원에 대한 임피던스 부정합 이론 개발 및 실험 결과 ○ 임의의 평면에 대한 이론 정립 연구노트
	야외공연장 실시간 음향 모니터링 시스템: 야외공연장 모니터링 시스템 설계	<ul style="list-style-type: none"> ○ 야외공연장의 음향에 대해 측정 및 모델링 방법을 분석하고, 이를 실제 공연장에 적용방안 도출 ○ 야외공연장 모니터링 시스템의 기초를 설계 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 10종의 관련 시스템을 비교/분석하였음 ○ 실제 공연장 적용을 위해서 5가지의 음향 특성 측정에 대한 결론 도출하고 이에 기반하여 시스템 설계
2 차 연 도	야외 공연장 방사음향 특성분석 SW개발: Target 야외 공연장구조 모델링 및 방사음향 특성 분석 알고리즘 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ Target 야외 공연장 공연시 소음지도 모델링 ○ Target 야외 공연장 및 광주시내 대형 야외 공연 소음도 실측 ○ 야외 공연장 방사음향 특성 분석 SW의 알고리즘 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 야외 음원 전파 해석 상용 프로그램인 Cadna이용, Target 야외 공연장에서 공연시 주변 소음지도 모델링 ○ Target 야외공연장 및 광주시내 대형 야외 공연 소음도 실측 보고서 ○ 야외 공연장 방사음향 특성 분석 SW의 플로우 차트
	사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술 [Double-layer 스피커 어레이]: 사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술 알고리즘 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 공연 영역 형성 음장과 유출음 사이의 성능 조절 가능 알고리즘 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 실측 기반의 Double-layer 스피커 어레이 수치모델 ○ 공연 영역 형성 음장과 유출음 사이의 성능 조절 가능 알고리즘

	<p>사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술 [Acoustic parasol 기반]: 사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술 알고리즘 개발</p>	<ul style="list-style-type: none"> o Double-layer 스피커 어레이 구성을 통해 음향대조법(contrast control) 성능 극대화 o 실험실 내 축소 규모 경우에 대한 24채널 double-layer 어레이 시스템 구현 	<ul style="list-style-type: none"> o Double-layer 어레이 적용 가능성에 대한 이론 정립 및 시뮬레이션 결과, 24채널 double-layer 어레이 시스템 구성에 대한 연구노트 o Double-layer 어레이 적용 시 음향대조법 제어 결과를 출력하는 MATLAB 기반 컴퓨터 시뮬레이터
	<p>무대 스피커 기반 공연소음 억제기술: 무대 스피커 기반 공연소음 억제기술 알고리즘 개발</p>	<ul style="list-style-type: none"> o 공연 스피커 및 제어 스피커 지향성 성능분석 o 제어주파수 선정 및 주파수 대역확장 o 무대기반 스피커 지향각 제어용 스피커 배치설계 o 무대기반 스피커의 음원 방사 지향각 제어 알고리즘 개발 	<ul style="list-style-type: none"> o MACKIE사의 모델 SRM650(공연스피커) 및 Cambridge audio사의 MINX min11(제어스피커) 지향성 분석완료 o 공연스피커의 특성을 기반한 제어주파수 선정(160Hz~3kHz)완료 o 공연스피커의 지향각제어를 위한 스피커 배치 설계 및 주파수 대역확장을 위한 최적화 문제 정의완료 o 공연스피커의 지향각 제어를 위한 새로운 알고리즘 제안 및 검증완료
	<p>개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 [개방공간용 능동소음제어]: 개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 알고리즘 개발</p>	<ul style="list-style-type: none"> o 능동공연소음 감쇄 시스템의 빠른 제어 응답속도를 갖는 SW 개발 	<ul style="list-style-type: none"> o 3차원 능동 소음 제어 온/오프라인 알고리즘 비교 분석 o 시간 기반의 오프라인 능동 소음 제어 알고리즘 & 온/오프라인 통합 알고리즘 제안
	<p>개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 [임피던스 차이기반 차음시스템]: 개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 알고리즘 개발</p>	<ul style="list-style-type: none"> o 사운드 포커싱 기반 기술 적용 시 (double-layer 어레이 음향대조법 적용) 임피던스 부정합 형성 확인 o 스피커 개수, 제어 영역이 주어졌을 때 주파수 별 성능 지표(contrast) 검토 (약 1kHz 이하에서 10dB 이상의 contrast 구현 가능) 	<ul style="list-style-type: none"> o Double-layer 어레이를 통한 음향대조법 구현 시 임피던스 부정합 확인, 주파수 별 제어 성능, 실내에서 제어 결과 등에 대한 연구노트 o 주파수별 성능지표(contrast)를 출력하는 MATLAB 기반 컴퓨터 시뮬레이터
	<p>야외공연장 실시간 음향 모니터링 시스템: 야외공연장 실시간 음향 모니터링 시스템</p>	<ul style="list-style-type: none"> o 음향 측정 및 분석 시스템을 구성하고 8채널에 대해서 테스트를 수행함 o 그래픽 처리 엔진을 개발함 (2개 이상의 출력형태를 가짐) 	<ul style="list-style-type: none"> o 개발한 두 시스템이 결합되어 실제로 8채널의 입력을 받으면서 그 결과가 그래피컬하게 웹을 통해서 게시되는 시스템을 완성 o 개발결과물에 대한 두 가지 보고서를 제출함
3 차 연 도	<p>야외 공연장 방사음향 특성분석 SW개발: Target 야외공연 소음 저감용 스피커 최적배치 설계 시뮬레이터 SW 개발</p>	<ul style="list-style-type: none"> o 야외공연장의 소음도를 미리 예측할 수 있는 시뮬레이터의 초기 모델 개발 o Cadna 프로그램을 이용한 비교 분석 	<ul style="list-style-type: none"> o 소음지도 작성 프로그램(Cadna)에서 야외공연장 음원을 정의하기 위한 시뮬레이터 소프트웨어 개발 o Cadna와 개발한 야외공연장 음원 시뮬레이터를 이용해 Target 야외 공연장의 소음지도 작성 후 실측치와 예측치 비교분석
	<p>사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술 [Double-layer 스피커 어레이]: 공연영역 음질 최소화 및 외부 소음 저감 알고리즘 개발</p>	<ul style="list-style-type: none"> o Double-layer 스피커 어레이의 이산화 및 배치 연구 o 음질 저하 최소화 연구 	<ul style="list-style-type: none"> o 공연 영역과 조용한 영역의 음압차 10dB o 공연영역 음질 영향 최소화
	사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술	<ul style="list-style-type: none"> o Acoustic parasol 시스템 시뮬레이션 o 2개 층의 Double-Layer 스피커 어레이 	<ul style="list-style-type: none"> o Acoustic parasol 시스템 설계 시뮬레이션 프로그램 작성, 실측 결과 동

<p>[Acoustic parasol 기반]: Acoustic parasol 시스템을 통한 음향 대조비 극대화</p>	<p>이를 통한 contrast control 구현 o 3차원 상의 Dark zone 제어를 위한 contrast control 알고리즘 개발</p>	<p>영상 o 시뮬레이션과 실측 결과 모두 contrast 20dB이상 확보</p>
<p>무대 스피커 기반 공연소음 억제기술: 기존 무대음향 시스템 기반의 소음억제 시스템 통합</p>	<p>o 야외공연장의 무대스피커 기반 지향성 제어 알고리즘 적용 및 분석 o 무대스피커 및 지향각 제어스피커의 배치에 따른 소음저감 기여도 확인 및 분석</p>	<p>o 야외실험을 통한 무대스피커 기반 소음억제 시스템 성능 확인 o 방사음원 지향각 제어 기여도 40%, 공연영역 대비 조용한 영역 음압차 8dB</p>
<p>개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 [개방공간용 능동소음제어]: 개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 개발</p>	<p>o 야외공연장(Test bed)의 공연소음 감쇄 알고리즘 적용 및 분석 o 제어 스피커 개수 및 위치 변화에 따른 소음 제어 성능 분석</p>	<p>o 공연 소음 감쇄 SW 제출 o 공연 소음 감쇄 SW에 대한 성능 분석서 제출</p>
<p>개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 [임피던스 차이기반 차음시스템]: 개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 알고리즘 극대화</p>	<p>o 공연장 상황에 맞춘 제어 가능한 주파수 범위 확인 o 시뮬레이션을 통한 임피던스 부정합 확인</p>	<p>o 사운드 포커싱 기반 기술 적용 시 임피던스 부정합 형성을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해 확인 o 주파수 영역 50Hz에서 1000Hz까지 제어가 잘 됨을 확인</p>
<p>야외공연장 실시간 음향 모니터링 시스템: 야외공연장 음향 모니터링 시스템 최적화</p>	<p>o 결과 디스플레이 모듈에서 8가지 이상 출력 결과 보임 o 음향 측정을 통해서 음향적 문제에 대한 정보를 제공하는 모듈 작성 o 시스템 최적화</p>	<p>o 다양한 형태의 결과 출력이 가능하도록 개발함 o 음향 정보를 분석하여 문제점이 발생할 시 쉽게 알 수 있도록 정보를 제공하는 기능을 개발함 o 시스템 최적화를 진행하고, 다양한 활용을 위해 라즈베리 파이 기반의 독립 시스템을 구성함</p>

나. 연구개발 목표의 달성도

○ 평가항목별 달성도

연구개발 목표	평가항목	단위	개발목표치 대비 실적					
			1차 연도		2차 연도		3차 연도	
			목표	실적	목표	실적	목표	실적
야외 공연장 방사음향 특성분석 SW개발	야외 공연장 방사음향 특성분석 SW개발 진척도	%	20% (영향요 인분석)	20%	60% (알고리 즘 개발)	60%	100% (SW개발)	100% (SW개발)
	야외 공연장 음원 모델링의 정확도	%	60%	60%	70%	70%	80%	80%
사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술	공연영역 대비 조용한 영역 음압차 (Double-layer 스피커 어레이)	dB	6dB	6dB	8dB	8dB 이상	10dB	10dB 이상
	공연영역 대비 조용한 영역 음향 대조비 (Acoustic parasol)	dB	3dB	3dB 이상	10dB	10dB 이상	20dB	20dB
무대 스피커 기반 공연소음 억제기술	무대스피커 방사음원 지향각 제어기여도	%	10% (가능성 확인)	16.67%	20% (알고리 즘 개발)	41.6% (160Hz ~1kHz)	30% (Testbe d적용)	40 %
	공연영역 대비 조용한 영역 음압차	dB	3dB	3.6dB	5dB	9.6dB (160Hz ~1kHz)	6dB	약 8dB
개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술	동시 제어 가능한 능동감쇄 시스템 수	개	1개	1개	2개	2개	3개	3개
	저주파 공연소음의 감쇄 기여도	dB	1dB (가능성 확인)	-	3dB (알고리 즘 개발)	3dB	5~6dB (Testbe d적용)	5~6dB
	임피던스 차이기반 차음시스템 차음성능	dB	3dB	3dB 이상	10dB	10dB 이상	20dB	20dB
야외공연장 음향 실시간 모니터링 시스템	측정 입력 채널 수	개	-	-	8개	8개	8개	8개
	결과 출력 형태	개	-	-	2개	2개	8개	8개

○ 정량적 성과목표별 달성도

구분	논문(건)				지식재산권				표준화 (건)	사업화			고용 창출 (명)	
	SCI	비 SCI		특허출원		특허등록		기타	표준 특허	건수(건)		관련매출 (백만원)		
		국내	국외	국내	국외	국내	국외			기술 이전	직접 사업화			
1차 연도	목표	1	1	1	1	0	0						0	
(실적)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	
2차 연도	목표	4	2	2	2	1	0						1	
(실적)	(0.5)	(3)	(3.3)	(1)	()	()	()	()	()	()	()	()	(1)	
3차 연도	목표	6	2	2	4	4	3						1	
(실적)	()	(7)	(2)	(1)	()	()	()	()	()	()	()	()	(2)	
전체 연도	목표	11	5	5	7	7	5	3					2	
(실적)	(0.5)	(10)	(5.3)	(2)	()	()	()	()	()	()	()	()	(3)	

다. 연구 성과

○ 국내외 논문 게재(학술지)

번호	수행기관명	논문명	학술지명	호	주저자명	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	광주과학기술원	Electroacoustic Absorber Using Disturbance-Observer-Type Velocity Estimator 야외공연장 공연 시 주변소음지도 작성 및 음원의 영향에 관한 연구	IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS		조영은	SCI	16.02
2	호남대학교		대한건축학회지		김홍식	비SCI	16.10

○ 국내외 논문 게재(학술대회)

번호	수행기관명	논문명	학술대회명	개최국	주발표자명	발표일
1	광주과학기술원	[Keynote Lecture] Sound focusing and its practical applications	International Congress on Sound and Vibration 22	이탈리아	왕세명	15.07.12
2	광주과학기술원	[Keynote Lecture] Sound Projection and Capture	APVC 2015	베트남	왕세명	15.11.24
3	광주과학기술원	라우드스피커 어레이를 이용한 개인 음향 시스템의 재생 정확성 평가에 대한 연구	2015년도 춘계 소음진동 학술대회	한국	유호민	15.04.22
4	광주과학기술원	Reproduction accuracy evaluation at the audible region of loudspeaker array beamforming	International Congress on Sound and Vibration 22	이탈리아	유호민	15.07.12
5	광주과학기술원	The influences of the bright zone objective function on the sound field control	Inter-Noise 2015	미국	유호민	15.08.09
6	한국과학기술원	The concept of "Spatial Equalizer" and its applications	Inter-Noise 2015	미국	김양한	15.08.09
7	광주과학기술원	라우드스피커 어레이를 이용한 영역 집중 기술의 음향 학적 밝은영역 설정 방식에 따른 성능 비교	2015년도 추계 소음진동 학술대회	한국	유호민	15.10.28
8	전자부품연구원	음향적 전문성과 이어폰의 주관적 기준 음 특성 관계에 관한 연구	대한전자공학회 추계학술대회	한국	김현갑	15.11.27
9	전자부품연구원	5.1채널 협믹싱 사운드 평가를 위한 사용자 테스트	대한전자공학회 추계학술대회	한국	이명춘	15.11.27
10	전자부품연구원	Comparison of the frequency-domain FxLMS and the time-domain FxLMS for ASQC system	IWAIT 2016	한국	박윤정	16.01.08
11	광주과학기술원	스피커의 지향성제어를 위한 null steering 알고리즘에 대한 연구	2016년도 춘계 소음진동 학술대회	한국	김기현	16.04.21
12	광주과학기술원	포트 앤 클로저가 적용된 능동 흡음기에 대한 흡음 성능 분석 연구	2016년도 춘계 소음진동 학술대회	한국	조영은	16.04.21
13	전자부품연구원	메모리 품을 사용한 귀마개의 밀도 · 경도에 따른 주파수 응답 특성 분석	전자공학회 학계학술대회	한국	장달원	16.06.22

14	광주과학기술원	Regional focusing in a large space	International Congress on Sound and Vibration 23	그리스	유호민	16.07.11
15	광주과학기술원	Performance Comparison of filters designed in time and frequency domains for personal audio	2016 AES International Conference on Sound Field Control	영국	유호민	16.07.19
16	광주과학기술원	Directivity control of a large loudspeaker by Multi-zone control using a small loudspeaker array	Inter-Noise 2016	독일	김기현	16.08.23
17	광주과학기술원	Study on the effect of vent on the electroacoustic absorber	Inter-Noise 2016	독일	조영은	16.08.23
18	광주과학기술원	야외공연장 단일스피커의 방사소음 최소화를 위한 제어스피커 어레이 적용에 대한 연구	2016년도 추계 소음진동 학술대회	한국	김기현	16.10.20
19	광주과학기술원	야외공연장의 공연소음 억제를 위한 가상방음벽 기술 소개	2016년도 추계 소음진동 학술대회	한국	유호민	16.10.20
20	광주과학기술원	야외공연장 저감을 위한 다채널 능동소음제어 시스템 설계	2016년도 추계 소음진동 학술대회	한국	이자승	16.10.20
21	호남대학교	야외공연장 주변 소음지도 제작 및 노출인구 산정에 관한 연구	2016년도 추계 소음진동 학술대회	한국	조순형	16.10.20
22	전자부품연구원	야외 공연장 세팅을 위한 음향 모니터링 시스템	2016년도 추계 소음진동 학술대회	한국	장달원	16.10.20
23	광주과학기술원	특정방향의 스피커 음원제거 알고리즘개발 및 야외공연장의 방사소음억제 적용	2016년 한국음향학회 추계학술발표대회	한국	김기현	16.11.03
24	광주과학기술원	큰 공간에서의 라우드스피커 어레이를 이용한 영역집중 기술	2016년 한국음향학회 추계학술발표대회	한국	유호민	16.11.03

○ 특허 출원

번호	수행기관명	특허명	출원국	출원번호	출원일
1	전자부품연구원	음향 모니터링 시스템 및 방법	대한민국	10-2016-0037575	16.03.29
2	전자부품연구원	복수의 단말을 이용한 음향 모니터링 시스템 및 방법	대한민국	10-2016-0165619	16.12.07

○ 특허 등록

해당 없음

○ 기타 지식재산권(프로그램 등록, 실용신안, 디자인, 상표, 서적 등)

해당 없음

○ 표준특허

해당 없음

○ 표준화

해당 없음

○ 사업화

- 기술이전(기술실시)

해당 없음

- 제품/서비스 출시, 매출 등
해당 없음

○ 기타 성과

라. 향후 사업화 계획



- 과제 종료 후부터 결과활용기업인 에펠/인켈/소비코 등을 중심으로 기술 개발 결과물을 적용한 제품 개발을 시작함
- 개발 제품이 가진 특성인 더블레이어/단일 스피커 어레이 기반 음장제어기술의 경우, 전통적인 산업용 음향기기 시장에서 두각을 나타낼 수 있는 제품으로 전 세계에서 개최되는 오디오 장비 전시회 참가를 통해 제품을 적극적으로 홍보해 판매로 이어질 수 있는 교두보를 마련
- 전시회 등의 기회를 통해서 해외의 음향 생산 기업과의 접촉으로 새로운 시장창출을 위한 협의를 진행
- 사업 후 완성된 음향시스템과 음향 모니터링 엔진의 판촉 및 개발수요 단체 기술이전 협약 및 카오디오 및 기타 휴대용 IT제품에 접목하는 방안과 해외 유명 브랜드와 협업을 통해 B2C뿐만 아니라 B2B에서도 성공적인 사업모델 발굴
- 사업 개발 후 산출물에 대한 이전 개발기술과의 명확한 성능비교를 통한 적정 가격을 산출하고, 가격 대 성능비 도출
- 지자체 등과 협력한 시범 사업을 실시하여 기술능력을 홍보
- 개발기술을 부분적 또는 전체적 패키징하여 음향 설치업체 및 관련 기업들에 홍보함
- 음향 모니터링 시스템의 경우 음향 설치업체에 대한 홍보/기술이전을 실시하여 음향 모니터링 시스템
 - 스피커 시스템 - 음향 설치 서비스가 전폭적으로 융화되는 완전 순환형 비즈니스 모델 구성
- 국산 기술에 대한 브랜드 가치 제고를 위해 사용자들이 기능에 만족할 수 있도록 철저한 VOC 분석과 별도 전문가 Web 커뮤니티 공간
- 국내 스피커 제조 회사는 소수에 불과 하며, 개발 인력의 부족으로 연구 개발 능력이 낮음
 - 결과활용 사업화 기관과 원천기술 개발진의 학연산간 연구 협력을 통한 원천기술의 사업화 및 제품 개발력 향상

- 국산 제품 및 기술에 대한 배타적인 사업 진행
 - 국내 공연장 음향 기술연구진을 통한 개발 기술에 대한 홍보 진행
 - 국내 음향 전시회를 통한 제품/개발 전시, 홍보 활동 진행
- 해외 시장에서의 국내 제품에 대한 인지도가 낮고 대표적인 브랜드가 없음
 - 결과활용기업들을 중심으로 공동으로 개발 제품에 대한 공동 쇼케이싱 선도를 통한 제품 상품력 강화
 - 개발 기술에 대한 대표 브랜드화 추진
 - 선도기술 쇼케이싱을 통한 확고한 시장선점 지배력 발휘
 - 해외 유수의 전시회 참가 : 미디어 활용 방안 극대화 및 이슈화

< 요 약 문 >

연구의 목적 및 내용	<p>최종목표: 야외공연장용 가상방음벽을 형성하기 위한 공연소음 제어 기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 공연음향의 지향성 및 음장 제어 기술을 통한 공연소음 억제 기술 개발 - 공연소음 누설패턴 분석/예측을 통한 개방공간용 능동 공연소음 감쇄 기술 개발 				
연구 개발 성과	<p>(1) 야외 공연장 방사음향 특성분석 SW개발: 항공, 도로, 철도, 공장 소음만 예측 가능한 기존 소음지도 프로그램에 공연 소음을 예측 가능하도록 공연 소음을 모델링 하였으며 소음 노출 인구 산정 연구도 수행. 야외 공연 전 공연이 있을 시 지역별 소음 분포를 예측 가능.</p> <p>(2) 사운드 포커싱 기반 공연소음 억제기술: 기존 공연음향 시스템이 아닌 새로운 공연음향 시스템을 제안하는 연구로, 객석과 객석 외부의 음압차를 최대화 시키는 연구와 객석에는 최적의 음향을 제공하며 외부로 전파하는 소음을 감소시키는 연구를 함께 수행.</p> <p>(3) 무대 스피커 기반 공연소음 억제기술: 기존 공연 음향시스템을 최대한 활용하면서 객석 외부로 유출되는 소음을 저감.</p> <p>(4) 개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술: 능동소음제어 기술을 이용하여 객석 외부로 유출되는 소음을 저감. 주로 저주파영역의 소음 제어에 효과적</p> <p>(5) 야외공연장 실시간 음향 모니터링 시스템: 공연장 내부 음향을 무선 및 실시간으로 모니터링 하는 시스템 개발.</p>				
연구 개발 성과의 활용 계획 (기대 효과)	<ul style="list-style-type: none"> - 야외 공연장 방사음향 특성분석 SW를 통해 야외 공연 전 공연소음을 미리 예상 가능하므로 공연 전 소음 피해 규모를 예상할 수 있고 공연장 선정에 활용 가능 - 개방공간용 능동 소음감쇄 기술을 공연장 뿐만 아니라 공항, 경기장 등에도 활용 가능할 것임 - 음향 모니터링 시스템을 이용하면 음향 설치 및 무대 운영을 전문으로 하는 기업에서 적은 인력으로 최대의 효과를 낼 수 있을 것임 				
핵심어 (5개 이내)	가상방음벽	스피커 또는 스피커어레이의 지향성제어 기술	개방공간을 위한 능동소음제어 기술	소음지도	

⟨ SUMMARY ⟩

Purpose & Contents	<p>Final goal: Development of outdoor concert noise control technology to form a virtual sound barrier for outdoor theaters concert hall</p> <ul style="list-style-type: none"> - Development of outdoor concert noise suppression technology through directivity and sound field control technology of performance sound - Development of Active Noise Reduction Technique for Open Space by Analyzing / Prediction of Leakage Noise Pattern 				
Results	<p>(1) Analysis of radiation sound characteristics of outdoor concert SW development: Modeling concert noise to predict concert noise in existing noise map program which can predict only airplane, road, railway and factory noise, and also studying noise exposure population. It is possible to predict local noise distribution when there is an outdoor performance.</p> <p>(2) Noise suppression technology based on Sound Focusing: This study suggests a new performance sound system that is not an existing performance sound system. It is a research that maximizes the difference in sound pressure outside the audience and seats, and provides the best sound to the audience. Do research together to reduce noise.</p> <p>(3) Noise suppression technology based on stage speaker: Reducing the noise emitted to the outside of the auditorium while maximizing the existing performance sound system</p> <p>(4) Active noise reduction technology for open spaces: Using active noise control technology, noise emitted to the outside of the audience is reduced. It is mainly effective for noise control in low frequency range.</p> <p>(5) Real-time sound monitoring system of outdoor concert hall: Development of a system for wireless and real-time monitoring of sound inside a concert hall.</p>				
Expected Contribution	<ul style="list-style-type: none"> - Analysis of radiation sound characteristics of outdoor concert SW can anticipate the noise before the outdoor concert and predict the noise damage before concert and can be used to select the outdoor concert area - Active noise reduction technology for open spaces will be available for airports, stadiums, etc. - With the acoustic monitoring system, companies that specialize in sound installation and stage operation will be able to achieve the maximum effect with fewer people. 				
Keywords	virtual noise barrier	directional/radiation loudspeaker array	active noise cancellation for open space	noise map	

〈 목 차 〉

제1장. 연구 개발 과제의 개요	14
제2장. 국내외 기술 개발 현황	17
제3장. 연구 수행 내용 및 결과	18
제4장. 목표 달성을 및 관련 분야에의 기여도	148
제5장. 연구 결과의 활용 계획 등	151
제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	153
제7장. 연구 개발 성과의 보안 등급	156
제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구 시설·장비 현황	156
제9장. 연구 개발 과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ..	156
제10장. 연구 개발 과제의 대표적 연구 실적	156
제11장. 기타 사항	157
제12장. 참고 문헌	158

<별첨> 자체 평가 의견서

제1장. 연구 개발 과제의 개요

1. 연구 개발 목적

야외공연이 가진 개방성은 도심 속 광장이나 공공장소, 야외공연장과 같은 열린 장소에서 많은 사람들에게 기쁨과 감동을 주지만, 야외공연에 사용되는 고출력 앰프로 인한 소리는 관객들이 아닌 공연장 주민들에게 소음공해가 된다. 본 과제의 연구 개발 목적은 야외공연장 주변이나 주거지역으로 전달되는 공연소음을 감소시키거나 최대한 차단하기 위하여 기존의 물리적 방음설비에 의존하지 않고 전기적 신호처리 기술을 이용한 가상방음벽을 형성하여, 공연장의 관객에게는 최적의 음향을 제공하고, 공연장 외부의 사람에게는 소음원에 해당하는 전달되는 소리를 최대한 억제하는 것이다.

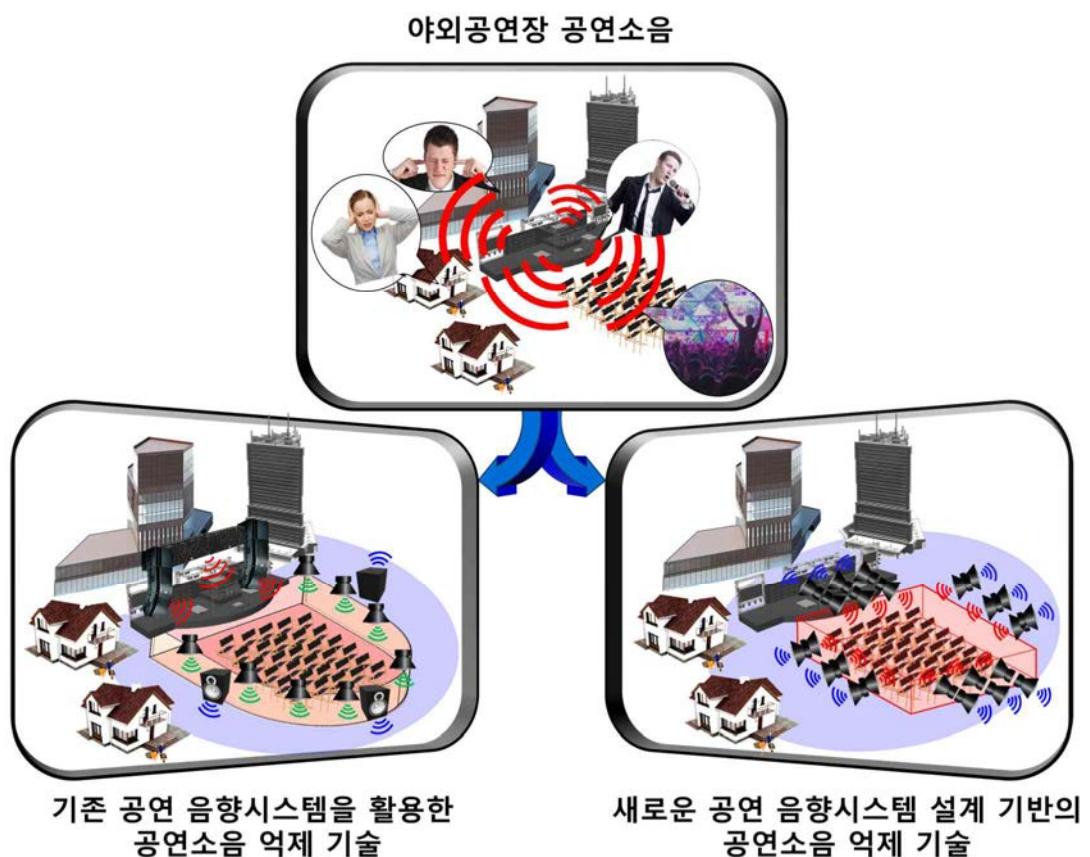


그림 1 야외공연장 공연소음 문제 및 공연소음 억제 기술 개발 목표

그림 1은 야외공연장의 공연소음을 억제하기 위한 접근방법을 나타낸다. 기존의 야외공연장 음향시스템을 활용하면서 핵심기술을 개발하는 접근방법과, 이를 고려하지 않고 새로운 야외공연장 음향시스템을 설계하고 이를 기반으로 핵심기술을 개발하는 접근방법을 동시에 수행함으로써, 단기적으로는 기존 시스템을 활용하고, 장기적으로는 최적의 야외공연장 음향시스템을 제시하고자 한다.

2. 연구 개발의 필요성

야외공연장은 개방성/확산성/상호교감성/축제성 등의 이점으로 계속 늘어나고 있으나 공연 중 발생하는 소음에 대한 민원이 많아 잘 만들어진 야외공연장이 방치되는 사례가 빈번하다. 지자체를 중심으로 다양하게 전개되고 있는 축제 등에서 상설/비상설 야외공연장이 설치되어 운영되고 있으나, 소음문제 때문에 방치되거나 재대로 이용되지 못하고 있으므로 소음문제를 적기에 해결함으로써 경제적 활용가치를 극대화할 필요가 있다.

2010년 소음진동민원은 53,718건으로 전년 대비 26.7% 증가하였으며 환경관련 전체민원과 대비하여 35.4%로 여전히 높은 편으로 (2010년 소음진동 관리시책 시도별 추진실적 평가, 환경부) 공연소음 민원은 꾸준히 증가하고 있다. 한 예로 중앙환경분쟁조정위원회는 광장에서 발생하는 공연소음으로 인한 독서실 영업 및 정신적 보상을 요구한 사건에 대하여 광장 사용승인자인 여수시로 하여금 370여만 원을 배상하도록 결정(2012. 6.3)한 공연소음에 대한 배상판결 사례도 있다. 또한 표 1에 따르면 국내 소음 허용 한도가 미국이나 일본에 비해 높기 때문에 하향 조정될 확률이 높으며 이로 인한 소음관련 민원이 앞으로 증가될 것으로 예측된다. 공연소음으로 인한 사회적 분쟁 및 경제적 손실을 줄이기 위해서라도 가상방음벽 기술의 개발은 필요하다.

표 1 국내외 소음규정

	대상지역	주간	야간
국제표준화기구 권장치	주거전용지역, 병원 및 요양시설	45 dB(A) 이하	40 dB(A) 이하
	교외 주거지역, 소도로 지역	50 dB(A) 이하	45 dB(A) 이하
	도시 주거지역	55 dB(A) 이하	50 dB(A) 이하
미국 캘리포니아 주	일반적인 야외 소음 규제 주거공간 외부	55 dB(A) 이하	50 dB(A) 이하
일본	AA (정숙이 요구되는 지역: 요양시설 및 복지시설 밀집 지역)	50 dB(A)이하	40 dB(A) 이하
	A and B (주거지역)	55 dB(A) 이하	45 dB(A) 이하
	C (상업 및 산업지역)	60 dB(A) 이하	50 dB(A) 이하
한국	주거지역	65 dB(A) 이하	60 dB(A) 이하
	그 밖의 지역	70 dB(A) 이하	60 dB(A) 이하

그림 2는 가상방음벽 기술이 야외공연 소음 억제를 위해 사용되는 설계 예시를 나타낸다. ‘대상 지역’별로 다르게 지정돼 있는 공연소음 허용 한도를 충족시킬 수 있도록 가상방음벽이 작동 하는 시나리오를 보여준다.

◆공연소음 억제기술 설계 예시

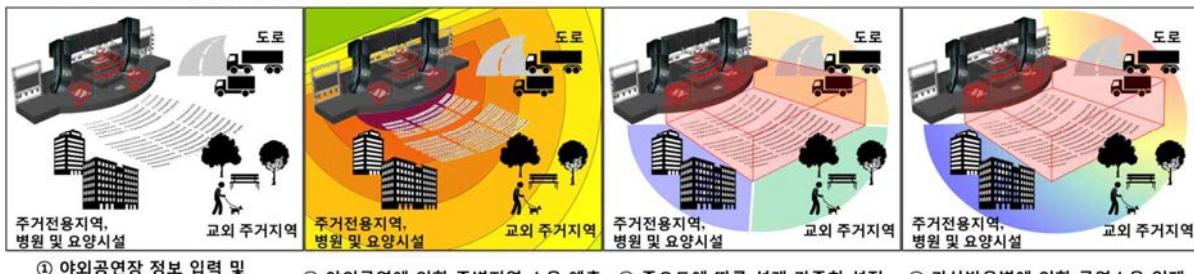


그림 2 가상방음벽 기술을 이용한 공연소음 억제기술 설계 예시

야외공연 중 발생하는 소음에 대한 민원이 폭주하여 잘 만들어진 야외공연장이 제 기능을 발휘하기 힘든 실정이다. 하지만 야외 공연장의 활용도를 높이기 위한 소음제어 콘텐츠 제작 기술에 대한 연구/개발이 전무한 실정이므로, 국책과제를 통해 관련 핵심 기술을 개발함으로써 관련 음향 및 공연 콘텐츠 산업을 활성화 시킬 필요가 있다. 야외공연장 소음문제를 해결하고 야외공연문화를 활성화시키기 위한 능동적인 공연소음문제 해결책이 필요하며, 본 과제를 통해 세계 최초의 야외공연장 가상방음벽 기술을 개발하여 세계시장을 선점할 필요가 있다. 전기적인 가상방음벽 기술은 구현 난이도가 높지만 성공 시 그 효과가 상당한 HRHR (High Risk High Return) 기술이기 때문에, 한류 콘텐츠 공연문화산업 등과 같은 공연산업 활성화를 위하여 기술 개발을 추진함으로써 세계최초 야외공연장 음향신호 및 소음제어 솔루션을 개발할 필요가 있다.

3. 연구 개발 범위

- 1) 야외공연장 구조 및 스피커 배치에 따른 방사음향 모델링 및 분석 기술 개발
- 2) 공연소음 억제를 위하여 공연음향용 스피커 어레이와 제어 알고리즘을 개발하여 공연소음을 제어하는 사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술 개발
- 3) 기존의 공연음향 시스템을 활용하여 스피커 어레이의 지향성과 재생영역을 제어하는 기술을 이용하는 무대스피커 기반 공연소음 억제기술 개발
- 4) 공연소음의 누설패턴 및 예측을 이용하여 누설되는 공연소음을 2차로 제거하는 개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 개발
- 5) 공연장의 관객에게 최적의 음향이 제공되는지 확인하기 위한 야외공연장 실시간 음향 모니터링 시스템 개발

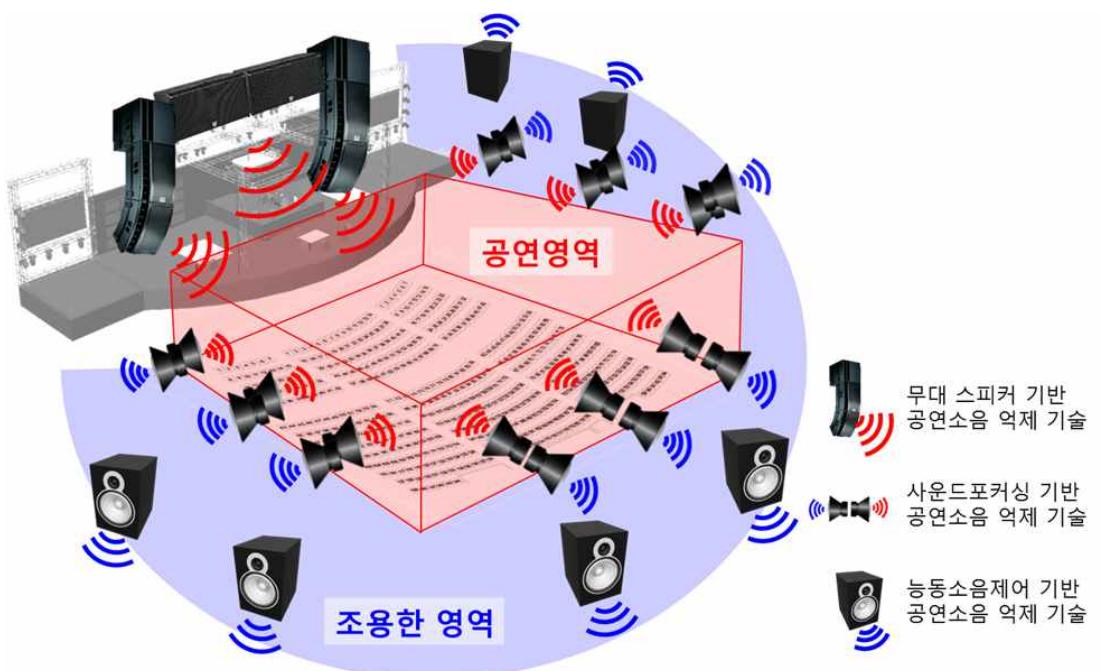
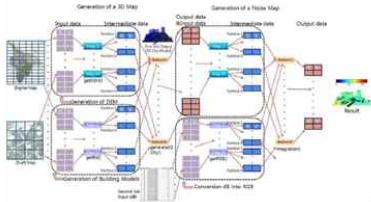
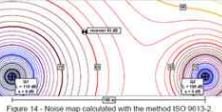


그림 3 가상방음벽 기술 개념도

제2장. 국내외 기술 개발 현황

국내 기술 현황	국외 기술 현황	연구 결과가 국내외 기술 개발 현황에서 차지하는 위치
서울 시립대학교은 클라우드 컴퓨팅 장치를 이용한 소음지도 가시화 방법 개발	독일의 DataKustik 사는 예측식을 이용한 공장 주변의 소음지도 작성 방법 개발   	기존의 국내외 기술은 야외공연에 맞는 음원 모델이 없기 때문에 공연이 있기 전에 미리 소음도를 예측하기 어려웠음. 본 연구의 결과는 야외공연장의 음원을 모델링하여 공연이 있기 전에 미리 소음지도를 작성하고, 이를 통해 야외공연의 소음문제를 미리 예측할 수 있다는 점에서 기존의 기술들과 차이를 갖음.
삼성전자 등에서 선형스피커 어레이 방식의 독립음장 제어 기술을 연구 중	Harman에서 개인 오디오 제어를 차량 시스템에 적용 방안 연구 중	개인오디오 제어를 차량 오디오 시스템에 적용(국내특허) 및 데모버전 구현 (현대자동차, 한국과학기술원)
능동소음 제어 기술을 이용한 소음저감 시스템을 야외 환경 한 연구 사례는 도로 소음(한국건설기술연구원)이 있음	이탈리아에서 능동 소음 방음벽을 이용한 발전기 소음 제어 사례가 있으며 캐나다에서는 프로펠러 항공기의 run-up 소음 감쇄를 위한 능동소음제어 시스템을 개발하였음	기존의 능동방음벽 개념을 기반으로 시스템을 구성하되, 그동안 시도되지 않았던 공연소음 저감을 위한 개방공간용 능동소음제어 시스템 개발을 목표로 수행하였음. 이는 기존의 능동소음제어 시스템이 적용되지 않았던 분야인 만큼 연구의 난이도가 높을 뿐만 아니라 학문적 가치 또한 높다고 할 수 있음. 한편 대부분의 개방공간용 능동소음제어 시스템들의 경우, 현재 진행되고 있는 연구들에 비해 실제 적용된 사례는 많지 않음. 즉 실제 적용을 위한 단계에서도 풀어야하는 문제가 많음.
국내에서는 무대 및 스피커 설치 등의 분야만 진행될 뿐 모니터링 시스템에 대한 개발은 본 연구 이외에 진행되고 있지 않음	독일의 AFMG 등이 관련 기술을 축적하고 있음 스피커의 특성을 파악하고, 이를 이용한 시뮬레이션, 시뮬레이션을 활용한 무대설치 등의 기술을 지속적으로 개발하고 있음	연구 결과는 음향 전문가가 아닌 일반 사용자를 대상으로 활용 가능한 기술로, 국내에서는 따로 연구된 바가 없고, 국외 기술과 비교시, 다채널에 대한 결과를 한눈에 볼 수 있다는 장점을 가짐.

제3장. 연구 수행 내용 및 결과

1. 연구 개발 추진 전략 및 방법

○ 야외 공연장 방사음향 특성분석 SW개발

- 광주지역 200석(소) 및 1,000석(대) 규모의 상설공연장 선정
- 국내외 관련 소음예측식 이론 검토 및 분석
- Sound PLAN 또는 Cadna 활용 200석 규모의 상설공연장 대상 주변 소음지도 작성 및 요인 분석
- 200석 및 1,000석 규모 Target 야외 공연 시 상설공연장 주변 소음지도 작성 및 소음도 실측조사
- Sound PLAN 또는 Cadna를 활용한 야외공연장구조 및 스피커배치 등 주요 요인별 소음도 영향 분석
- 야외공연장 전용 방사음향특성분석 알고리즘 개발
- (Target 야외상설공연장을 대상으로) 상용프로그램(Sound PLAN 또는 Cadna)을 활용하여 개발SW의 신뢰성 검증

○ 사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술

■ Double-layer 스피커 어레이

- 실험실 레벨의 Double-layer 어레이 축소모델 구축 후 사운드포커싱 이론 적용 및 검증
- 어레이 구성모양에 따른 제어영역 음장의 이론적 모델 구축
- 제어영역 크기 변화에 따른 제어성 분석 및 소음억제력 분석
- 제어영역의 음장 분포를 일정하게하기 위한 이론적 연구 및 분석 수행
- 제어 음원의 수를 최소화하기 위한 Double-layer 어레이의 이산화 방법 연구
- 어레이 스피커의 수를 줄이는 국내외 연구 검토

■ Acoustic parasol

- 어레이의 높이와 공연영역 사이의 관계규명(주파수 밴드별)
- 어레이의 높이와 공연영역 경계면에 분포한 스피커 어레이의 분포 관련 관계 규명
- Dark Zone을 조용한 영역으로 Bright Zone을 공연영역으로 하였을 때 스피커 어레이의 분포, 높이에 따른 각 스피커의 위상과 입력 크기 추정 방법론 개발
- 개발 방법론의 실험적 검증
- 관련 연구의 원천 특허 확보

○ 무대 스피커 기반 공연소음 억제기술

- 무대 스피커의 음장형성에 관한 국내외 연구 검토
- 실험실 레벨의 축소모델 구축을 통한 기술 개발 및 검증
- 야외공연장(Test bed)에서 무대 스피커의 음원 방사 분석을 위한 다채널 신호분석 기술 구축
- 스피커 어레이의 제어주파수 확장에 관한 국내외 연구 검토
- 지향각 제어를 위한 스피커 최적배치 방법 연구
- 무대 스피커 및 지향각 제어스피커의 소음억제력 분석

○ 개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술

■ 개방공간용 능동소음제어

- 개방공간용 소음 감쇄기술 국내외 연구 검토 및 분석
- 마이크 및 스피커 배치를 위한 예측 모델 연구
- 빠른 제어 응답속도를 갖는 알고리즘 연구

- 스피커 개수 및 위치 변화에 따른 소음억제력 분석
- 임피던스 차이기반 차음시스템
- 임피던스 부정합을 이용한 차음 가능성 검토를 위한 이론 확립
- 이론의 실험적 검증
- 공연장 적용 가능성을 보기 위하여 원통형 공연장의 경우 검토
- 유한 원통형에 대한 이론적 실험적 검증
- 공연장 형상에 따른 적용 가능성을 어레이 스피커의 배열위치 등의 함수로 분석 연구

○ 야외공연장 실시간 음향 모니터링 시스템

- 공연장 내 음향 모델링을 위해서 음향 측정의 이론적 토대를 연구/분석
- 고조파왜곡, 주파수응답 등 주요 측정 항목 현실화
- 측정 결과 전달을 위한 출력 방법 설계
- 사용자 인터페이스 개발
- 음향 측정 결과에서 정보 추출 및 데이터 구조화
- 안정적인 프로그래밍

○ 자문단 구성 및 필드테스트를 통한 보완

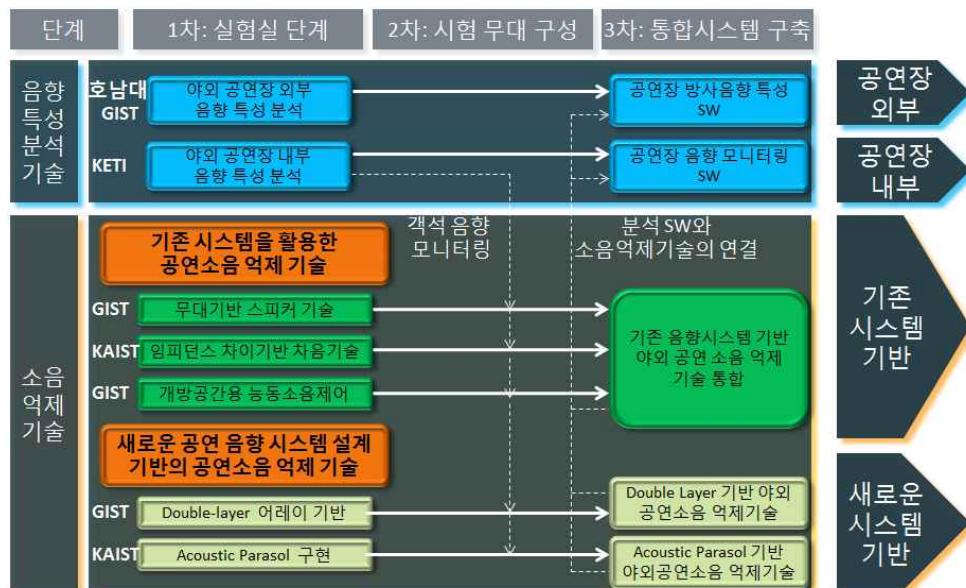
- 공연 및 소음 전문가로부터 자문
- 전문가의 자문을 기술개발에 반영
- 필드테스트 수행

○ 구현 가능성 높은 시스템 선정 및 집중개발

- 연구개발 항목들을 모두 개발하기보다는 효율적이며 구현 가능성이 높은 기술을 선정
- 선정된 기술 집중 개발

2. 연구 개발 추진 체계

가. 연구개발 추진체계도



나. 기관별 연구개발 추진체계

구분	주관연구기관 (광주과학기술원)	공동연구기관1 (한국과학기술원)	공동연구기관2 (호남대학교)	공동연구기관3 (전자부품연구원)
1차 연도	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기존 공연 음향 시스템을 활용하는 소음감쇄 기술(무대 스피커 기반 공연소음 억제 기술)과 새로운 공연 음향 시스템(사운드포커싱 기반 공연 소음 억제기술) 개발을 위한 실험실 레벨의 가능성 검토 및 인자 분석 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Acoustic parasol 시스템과 공연장 경계 임피던스 제어 시스템을 이용한 최대 공연장 음압 분포 획득 방법 확보를 위한 이론적 검증을 하며 관련 인자로서 공연장의 크기, 공연영역 음압대비 조용한 영역 음압의 비율을 극대화 할 수 있는 방법 확립을 주파수별로 분석하여 그 적용 기반을 확보 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 야외 음원 전파용 (wave propagation) 소음예측식의 요인분석 ○ 야외공연 소음도 예측에 영향을 미치는 주요 요인 분석 (Sound PLAN 또는 Cadna 활용 200석 규모 공연장 주변소음지도 작성 사례 분석) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전체 기술개발 내용에 대해서 평가를 진행할 수 있는 야외공연장 실시간 음향 모니터링 시스템을 설계
2차 연도	<ul style="list-style-type: none"> ○ Target 야외상설공연장 소음 측정 ○ 야외공연장 구조 및 스피커 배치에 따른 방사음향 특성 분석 알고리즘 개발 ○ 야외공연장(Test bed)에 적용하기 위한 공연소음 억제 기술들의 알고리즘 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 공연영역과 조용한 영역의 음압대비(contrast) 최대화 알고리즘을 확보하여 이의 적용 가능성을 축소규모 경우에 실험으로 검증하고 평가 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Target 야외상설공연장에 대한 Sound PLAN 또는 Cadna 활용 컴퓨터 시뮬레이션 ○ 야외공연장 소음도 예측 주요 요인별 영향 분석 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전체 기술개발 내용에 대해서 평가를 진행할 수 있는 야외공연장 실시간 음향 모니터링 시스템을 개발
3차 연도	<ul style="list-style-type: none"> ○ 야외공연장 공연소음 저감 용 최적배치설계 시뮬레이터 SW개발 ○ 공연소음 억제 기술들의 최적화 및 강건성 확보 ○ 기존 공연 음향 시스템을 활용하는 소음감쇄 기술들의 통합 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 공연장에 acoustic parasol 개념 단독 적용 시 확보되는 공연 영역 대비 조용한 영역 음압차(contrast)를 확인 ○ 공연장 경계 임피던스 부정합을 최대화 할 경우 얻을 수 있는 contrast를 추정하고 ○ 위 두 기술을 동시에 적용하였을 때 얻을 수 있는 이점을 활용하는 방안 도출 및 실제 구현 	<ul style="list-style-type: none"> ○ (Target 야외상설공연장 대상으로) 상용프로그램(Sound PLAN 또는 Cadna)을 이용한 개발SW의 신뢰성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 소음감소 SW와 연계하여 야외공연장 실시간 음향 모니터링 시스템을 최적화

3. 연구 내용 및 결과

3-1. 야외 공연장 방사음향 특성분석 SW개발

가. 1차연도 연구 내용 및 결과

연구 목표	야외 공연장 방사음향 분석 및 Target 야외 상설공연장 선정/모델링 기초연구
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 소규모(200석) 및 대규모(1,000석) 야외상설공연장 선정(담당기관: GIST) - 야외 음원 전파용 적정 소음예측식 선정(담당기관: 호남대) - 야외 공연 소음도 예측에 영향을 미치는 주요 요인 분석(담당기관: 호남대)
연구 결과	<ul style="list-style-type: none"> - 소규모(200석)/대규모(1000석) Target 야외공연장 선정완료 - ISO 9613에서 제시하는 야외 Wave Propagation 소음예측식 선정 - 국내외적으로 인정되는 상용 프로그램 Sound PLAN [1] 이용, 공연장 주변소음지도 모델링 사례 제시

■ 야외상설공연장 선정

야외공연장에서 방사되는 소음을 모델링하기 위해서는 실제 야외공연장 모델과 야외공연 시 발생하는

소음의 실측정보가 필요하다. 이러한 정보들을 통해 실제 야외공연장에서 야외공연 시 주변의 거주공간에 미치는 소음도를 파악하고 향후 개발된 가상방음벽을 설치하였을 때 감쇠되는 소음도를 예측 할 수 있다.

1차적으로 야외공연장과 주변 환경을 모델링하고 야외공연 시 실측 소음도를 측정하기 위한, Target 야외상설공연장을 선정한다. 선정기준은 소규모(200석) 및 대규모(1,000석)의 야외공연장을 각 1개소 씩 확보하는 것이다. Target 야외공연장선정을 위한 고려사항은 다음과 같다.

- 1) Target 야외공연장의 규모를 만족
- 2) 주변에 소음피해를 입히는 거주공간이 존재
- 3) 야외공연이 자주 개최되는 장소
- 4) 원활한 연구수행을 위한 수행기관과의 거리(위치)

따라서 광주광역시에 존재하는 상설야외공연장 6곳을 조사하여 아래에 정리하였으며, 조사된 자료를 바탕으로 Target 야외 상설공연장을 “쌍암공원 야외공연장”으로 선정하였다.

번호	시설 명	기관	규모	관리부서	공연횟수 (2014)	주변 거주 공간 유무
1	시립미술관 야외공연장	시립미술관	3000석	시립미술관	7	○
2	환경공단 야외공연장	환경공단	100석	효천 하수 처리장	0	○
3	승촌공원 야외공연장	환경공단	100석	하천사업소	5	X
4 (Target)	쌍암공원 야외공연장	광산구	200석 1000석	광산구청 공원녹지과	52	○
5	수완호수 야외공연장	광산구	300석	광산구청 공원녹지과	29	○
6	승촌보 야외공연장	수자원공사	500석	수자원공사	10	X

그림 3.1.1 광주광역시의 상설야외공연장 조사

① 시립미술관 야외공연장



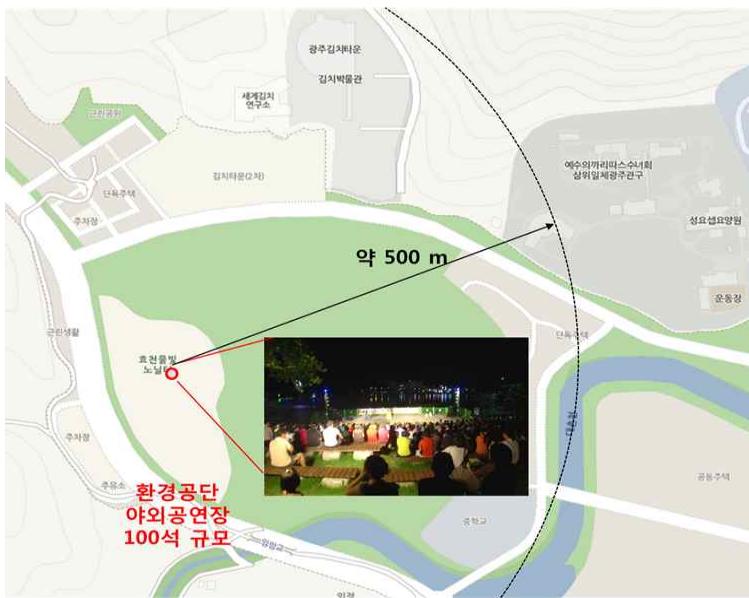
그림 3.1.2 시립 미술관 야외공연장



[시립 미술관 야외공연장 (사진)]

- 규모: 대규모 (3000석)
- 주변 거주공간 있음
- 야외공연 횟수(2014년) : 7회

② 환경공단 야외공연장



[환경공단 야외공연장 (사진)]

- 규모: 소규모 (100석)
- 주변 거주공간 있음
- 야외공연 횟수(2014년) : 0회

그림 3.1.3 환경공단 야외공연장

③, ⑥ 승촌공원, 승촌보 야외공연장

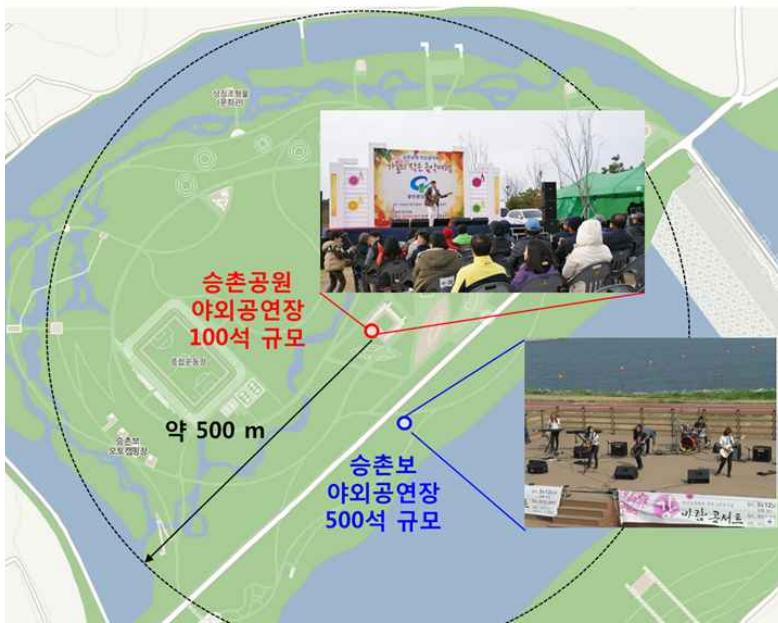


그림 3.1.4 승촌공원, 승촌보 야외공연장



[승촌공원 야외공연장 (사진)]

- 규모: 소규모 (100석)
- 주변 거주공간 없음
- 야외공연 횟수(2014년) : 5회



[승촌보 야외공연장 (사진)]

- 규모: 소규모 (500석)
- 주변 거주공간 없음
- 야외공연 횟수(2014년) : 10회

④ 쌍암공원 야외공연장

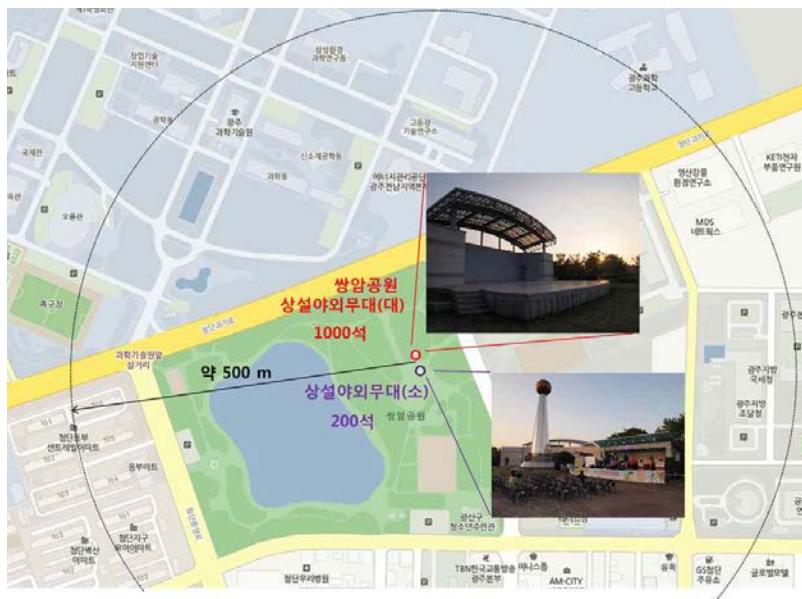


그림 3.1.5 쌍암공원 야외공연장



[쌍암공원 상설야외무대 (대) (사진)]



[쌍암공원 상설야외무대 (소) (사진)]

- 규모: 소규모(200석), 대규모(1000석)
- 주변 거주공간 있음
- 야외공연 횟수(2014년) : 52회

⑤ 수완호수 야외공연장



그림 3.1.6 수완호수 야외공연장



[수완호수 야외공연장 (사진)]

- 규모: 소규모 (300석)
- 주변 거주공간 있음
- 야외공연 횟수(2014년) : 29회

조사결과 쌍암공원 야외공연장이 소규모, 대규모 공연장을 모두 갖추고 있어 선정기준을 만족하고, 주변 500m내에 소음피해를 입히는 거주공간이 존재한다. 또한 2014년 열린 야외공연이 52회로 조사한 모든 야외공연장 중에 가장 많고 연구수행기관(GIST)와 가장 가까운 거리에 있기 때문에 향후 연구수행에 용이하다. 그러므로 “쌍암공원 야외공연장”을 Target 야외공연장으로 선정하였다.

- 야외공연장의 소음지도를 작성하기 위한 소음예측프로그램 Sound PLAN에 적용되는 ISO-9613의 예측식 분석

소음예측식 ISO-9613[2]은 다음의 기본 식과 같다.

$$L_{ft}(DW) = L_w + D_c - A$$

수음원 위치에서 옥타브 대역 음압 레벨 $L_{ft}(DW)$ 는 다음과 같은 식으로부터, 63 Hz ~ 8 kHz의 중대역 주파수에서 8개의 옥타브 대역에 대해 계산한다.

L_w 는 음원에 의해 만들어지는 옥타브 대역 음압 레벨이다. D_c 는 지향성 보정량으로, 전지향성 점 음원의 경우 0 dB이다.

A 는 감쇠이며, 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc}$$

감쇠식은 다음과 같은 항목으로 주어진다.

- A_{div} : 기하학적 발산에 의한 감쇠
- A_{atm} : 대기 감쇠
- A_{gr} : 지표면 감쇠
- A_{bar} : 방음벽에 의한 감쇠
- A_{misc} : 기타 영향에 의한 감쇠

기하학적 발산에 의한 감쇠는 점 음원으로부터 자유 음장까지의 전파로 인한 거리 감쇠이다.

$$A_{div} = [20\log(d/d_0) + 11] dB$$

d 는 소음원에서 수음원까지의 거리이며, d_0 는 기준거리(1 m)이다.

대기 감쇠는 거리 $d(m)$ 를 전파하는 동안 대기 흡수에 의한 감쇠이다. 이 감쇠는 기상 조건이 균일한 대기에서 적용된다.

$$A_{atm} = \alpha \times d$$

α 는 대기 흡수에 의한 감쇠 계수(m/dB)이다.

감쇠 계수는 다음과 같은 4개 변수의 합으로 주어진다. 팔호 안의 범위는, ±10%의 범위의 정확성으로, 감쇠 계수가 적용되는 범위이다.

- 음의 주파수 (40 Hz ~ 1 MHz)

- 주변 대기 온도 (253.15 K ~ 232.15 K)
- 수증기의 물 농도 (0.05~5 %)
- 주변 대기압 (0 ~ 200 kPa)

대기 흡수에 의한 감쇠 계수는 다음으로부터 계산된다.

$$\alpha = 8.686 f^2 \left[1.84 \times 10^{-11} \left(\frac{p_a}{p_r} \right)^{-1} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1/2} \right] + \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-5/2} \times \left\{ 0.01275 \left[\exp \left(-\frac{2239.1}{T} \right) \right] \left[f_{rO} + \left(\frac{f^2}{f_{rO}} \right)^{-1} \right] + 0.1068 \left[\exp \left(-\frac{3352.0}{T} \right) \right] \left[f_{rN} + \left(\frac{f^2}{f_{rN}} \right)^{-1} \right] \right\}$$

p_a 는 주변 대기압, p_r 은 기준 환경 대기압(101.325 kPa)이다. T 는 주변 대기 온도, T_0 는 기준 공기 온도 (293.15 K(20°C))이다. f 는 주파수, f_{rO} 는 산소의 이완 주파수, f_{rN} 은 질소의 이완 주파수이다. 산소와 질소의 이완 주파수는 다음 식으로부터 계산된다.

$$f_{rO} = \frac{p_a}{p_r} \left(24 + 4.04 \times 10^4 h \frac{0.02 + h}{0.391 + h} \right)$$

$$f_{rN} = \frac{p_a}{p_r} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1/2} \times \left(9 \times 280h \times \exp \left\{ -4.170 \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1/3} - 1 \right] \right\} \right)$$

h 는 수증기의 물 농도이다. 보통 습도 데이터는 상대 습도로 제공되는데, 이를 수증기의 물 농도로 변환 하려면 다음과 같은 방법으로 변환해야 한다.

$$h = h_r \left(10^{-6.8346(T_{01}/T)^{1.261} + 4.6151} \right) / (p_a/p_r)$$

대기 감쇠의 경우 중요한 변수는 주변 온도와 상대 습도이다. (주변 대기압은 감쇠 계수에 식의 첫 항에 위치하는데, 10^{-11} 만큼의 계수가 곱해져 있으므로 상대적으로 중요도가 적다) 특히 상대 습도의 경우 지역 특성에 따라 변동이 심하므로, 중요하게 적용해야 할 지표이다.

지표면 감쇠는 소음원에서 수음원까지 음 전파 중, 지표면에서의 반사음으로 인해 나타나는 감쇠이다. 지표면 효과의 계산방법은 지표면이 수평이거나 일정한 기울기를 갖는 평坦한 곳에서만 오직 적용된다.

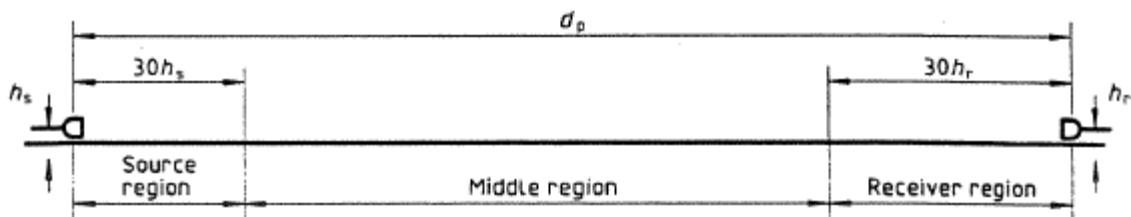


그림 3.1.7 지표면 감쇠를 결정하기 위한 3개 지역

지표면 감쇠는 3개의 지역으로 나누어서 계산한다. 3개의 지역은 음원 지역, 수음 지역 그리고 중간 지역이다. 음원지역은 음원으로부터 수음원 방향으로 $30h_s$ 의 거리(h_s : 음원의 높이)이며, 수음 지역은 수음원으로 부터 음원 방향으로 $30h_r$ 만큼의 거리(h_r : 수음원의 높이)이다. 그 외 지역을 중간 지역이라 하며, 음원 지역과 수음 지역이 가까워 겹칠 경우 중간지역은 없다.

지표면 감쇠는 다음 식으로 주어진다.

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m$$

A_s 는 음원 지역에서의 감쇠, A_r 은 수음 지역에서의 감쇠, A_m 은 중간지역에서의 감쇠이다.

지표면 감쇠에서 각 항은, 중대역 주파수별로 다음과 같은 식을 갖는다.

표 3.1.1 옥타브 대역에서 지표면 감쇠 기여 A_s , A_r 그리고 A_m 계산에 사용되는 표현

중대역 주파수 (Hz)	A_s 또는 A_r (dB)	A_m (dB)
63	-1.5	-3q
125	$-1.5 + G \times a'(h)$	
250	$-1.5 + G \times b'(h)$	
500	$-1.5 + G \times c'(h)$	
1000	$-1.5 + G \times d'(h)$	
2000	$-1.5(1-G)$	
4000	$-1.5(1-G)$	
8000	$-1.5(1-G)$	

지수 G 는 지표면의 음향 특성을 나타내는 계수이며, 다공성 영역이 얼마나 있는지에 따라 0에서부터 1 사이의 값을 갖는다. $G=0$ 일 때는 단단한 지표면(ex 물, 얼음, 콘크리트 등 낮은 다공성을 갖는 표면), $G=1$ 일 때는 다공성 지표면(ex 잔디, 나무 농장 등 높은 다공성을 갖는 표면)이다. 지표면이 단단한 지표면과 다공성 지표면을 포함하고 있다면, G 값은 다공성 지표면의 비로서 결정된다.

방음벽의 감쇠에서는 상단부 모서리와 수직면 모서리 근처에서의 회절 현상으로 계산되는데, 그 식은 다음과 같다.

$$A_{bar} = D_z - A_{gr}(\text{상단부}) \quad A_{bar} = D_z(\text{수직면})$$

D_z 는 각각의 옥타브 대역에 대한 방음벽 감쇠이며, 위의 경우 A_{bar} 는 0보다 큰 값을 가져야 한다.

방음벽 감쇠 D_z 는 다음과 같이 계산된다.

$$D_z = 10\log[3 + (C_2/\lambda) C_3 z K_{met}] dB$$

C_2 는 일반적으로 20을 갖는 상수이며, 지표면 반사가 영상 음원으로 각각 고려되는 특별한 경우는 40을 갖는다. C_3 는 단일 회절인 경우 1이며, 이중 회절의 경우 다음과 같은 값을 갖는다.

$$C_3 = [1 + (5\lambda/e)^2] / [(1/3) + (5\lambda/e)^2]$$

e값은 그림 1-2 에서와 같이 구할 수 있다.

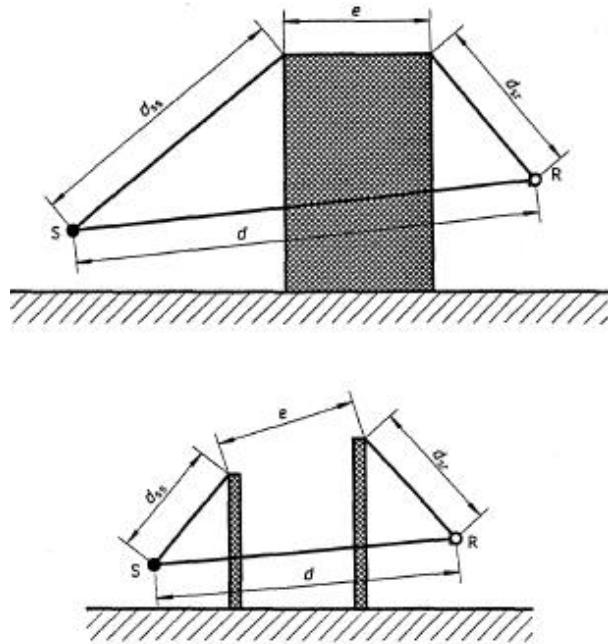


그림 3.1.8 이중 회절에 대해 경로 차를 결정하는
기하학적 양

z 는 각 모서리에 대해 다음과 같은 식의 평균으로 계산되는 회절과 직접 음향의 경로차이다.

$$z = [(d_{ss} + d_{sr})^2 + a^2]^{1/2} - d$$

d_{ss} 는 음원으로부터 회절 모서리까지의 거리, d_{sr} 은 회절 모서리에서 수음원까지의 거리이다. a 는 음원과 수음원 사이의 방음벽 모서리에 평행한 거리의 성분이다. 만약 음원과 수음원 사이의 선이 방음벽 상단 모서리 위로 통과하는 경우, z 는 음의 부호로 주어진다.

이중회절에서 z 값은 다음과 같이 계산된다.

$$z = [(d_{ss} + d_{sr} + e)^2 + a^2]^{1/2} - d$$

K_{met} 은 기상 조건에 대한 보정 요소로, 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$K_{met} = \exp [-(1/2000) \sqrt{d_{ss} d_{sr} d(2z)}] \quad (z > 0),$$

$$K_{met} = 1 \quad (z \leq 0)$$

- 나뭇잎

나뭇잎에 의해 작은 양의 감쇠가 제공된다. 거리는 아래 그림과 같이 지표면에 대해 15도의 각도로 떨어지도록 설정한다. d_1 과 d_2 는 나뭇잎에 의해 경로가 겹쳐지는 거리이다.

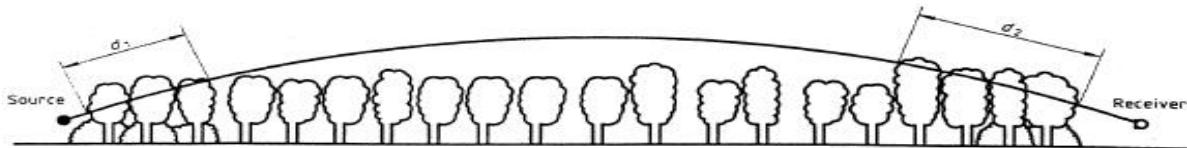


그림 3.1.9 나뭇잎을 통한 전파길이 d_f 에 선형적으로 증가되는 나뭇잎을 통한 전파에 의한 감쇠

전파길이 d_1 과 d_2 의 합인 d_f 를 통해, 다음과 같은 옥타브 대역 감쇠를 갖는다. d_f 가 200 m 이상일 경우, 200 m에 대한 감쇠 값을 갖는다.

표 3.1.2 밀집한 나뭇잎을 통한 전파거리 d_f 에 의한 옥타브 대역 감쇠

전파 길이 d_f (m)	중대역 주파수 Hz							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$10 \leq d_f \leq 20$	(감쇠, dB)							
	0	0	1	1	1	1	2	3
$20 \leq d_f \leq 200$	(감쇠, dB/m)							
	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.09	0.12

- 공장 지대

공장 지역이 A_{bar} 식에 들어가거나, 공장 지역이 음원일 경우를 제외하면, 설치물에 의한 산란으로 인해 감쇠가 발생할 수 있다. 이 값은 현장의 형태에 의존적이기 때문에 측정으로 결정하는 것을 권장한다. 대략적으로 추정한 값은 다음 표와 같다.

표 3.1.3 산업 공장의 설치물을 통한 전파 동안의 옥타브 대역 음의 감쇠 계수

중대역 주파수, Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$A_{site}, dB/m$	0	0.015	0.025	0.025	0.02	0.02	0.015	0.015

- 주택

소음원과 수음원 적어도 둘 중 하나가 주택 지역에 위치할 때, 주택에 의한 차단에 의해 감쇠가 발생한다. 이 효과는 주택 사이로 음이 전파하거나, 근처 다른 집으로부터 반사로 인해 작은 감쇠만 일으킨다.

주택에 의한 A-가중 감쇠는 다음과 같은 두 개의 항을 갖는다. 단, 10dB를 초과하지 않는다.

$$A_{hous} = 0.1Bd_b dB - 10\log[1 - (p/100)] dB$$

경로길이 d_b 는 나뭇잎에 의한 감쇠에서의 d_f 와 같은 방법으로 계산된다. B는 경로 안에 있는 주택의 밀도이다. 두 번째 항은 도로, 철도와 비슷한 통로 근처에 위치한 일련의 주택이 있을 경우에 부가적으로 포함한다. 단, 이러한 주택이 주택 중간 높이와 같은 위치에서 방음벽을 설치했다 가정할 경우, 그 방음벽의 삽입 손실보다 작을 경우에만 포함한다. 여기에서 p는 부근의 도로 또는 철도의 총 길이에 대한 건물의 정면 길이의 비율이다. 이 p가 90%보다 작을 경우에만 적용한다.

■ 예측식 분석을 통한 소음지도 모델링

쌍암공원에서의 소음원은 상설야외무대(대)와 상설야외무대(소) 2곳에서 발생하며, 분석에 사용된 음원 설정은 오케스트라 연주를 기준으로 진행한다. 일반적으로 오케스트라 연주는 환경부 국립환경과학원에 제시한 자료에 따르면 약 100dB의 음압레벨이 발생하며(표(2-1) 참조), 이에 따른 주파수별 Relative Level은 다음과 같다. 그림(2-1) 참조.

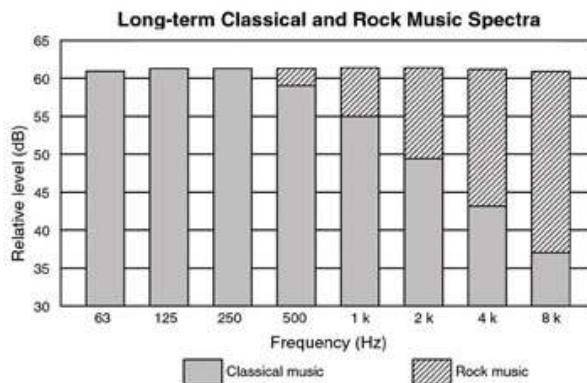


그림 3.1.10 오케스트라 연주의 주파수별 Relative Level

표 3.1.4 생활주변 소음의 음압레벨

음압(Pa)	음압레벨(dB)	예
0.00002	0	최저가청음압
0.000063	10	나뭇잎의 살랑거림
0.0002	20	방송국 스튜디오
0.00063	30	심야의 침실
0.002	40	도서관
0.0063	50	조용한 사무실
0.02	60	대화(1 m 떨어졌을 때)
0.063	70	보통 크기의 라디오 소리
0.1	74	교통소음
0.2	80	공장소음
0.63	90	지하철 소음
2.0	100	교향악(fortissimo)
6.3	110	Rock band
20.0	120	항공기 이륙 소음
200.0	140	통증을 느끼는 음압

- SoundPLAN 해석 시 소음 예측식으로는 ISO:9613을 적용하였고, 소음지도의 격자는 5x5m 단위, 예측지점은 지면 위 1.5m 높이로 한다. Reflection Order는 3으로 설정한다.
- 쌍암공원 내 호수의 Ground Absorbtion(G)는 0.0으로, 잔디의 Ground Absorbtion(G)는 1.0으로 설정한다.

- 소음원은 상설야외무대(대)만 적용할 경우(Case A)와 상설야외무대(소)만 적용할 경우(Case B), 2개 모두 적용할 경우(Case C)로 나누어 분석하였으며, 이때 상설야외무대(대)만 적용할 경우에는 외벽면(옆면부, 후면부) 및 천장형 반사판의 적용 유(Case A-1)/무(Case A-2)로 나누어 진행하였다.
- 소음분석은 쌍암공원 부지 내에서의 소음도를 소음지도로 나타내고, 주변 부지경계선 및 거주지역 6개 소에 수음원을 선정하여 비교한다.
- 소음 분석지점은 쌍암공원 부지경계선 5개 지점과 거주 지역 1개 지점이다.
- 지면 위 1.5m 높이에서 평가하였다.
- 쌍암공원 주변현황과 분석지점은 그림(2-2)에 나타내었다.



구분	위치	소음원에서의 직선거리(m)
부지경계선	① 남측	222
	② 동측	76
	③ 북측	171
	④ 서측	362
	⑤ 최장거리	395
거주 지역	⑥ 첨단동부 센트래빌아파트 105동	426

그림 3.1.11 쌍암공원 음원위치 및 평가지점

분석 결과

- 분석지점별로 소음도를 예측한 결과(표(2-3) 참조), Case A-1과 Case A-2를 비교할 시 소음도의 최대 차이는 ⑤부지경계선 최장거리 지점을 기준으로 각각 40.4 dB(A) 51.1 dB(A)로 나타나 10.7 dB(A)

까지 차이가 나는 것으로 분석되었다. 이는 야외무대에서 소음 발생시 반사판의 적용 여부가 소음분포에 어느정도 영향을 준다는 것을 의미한다.

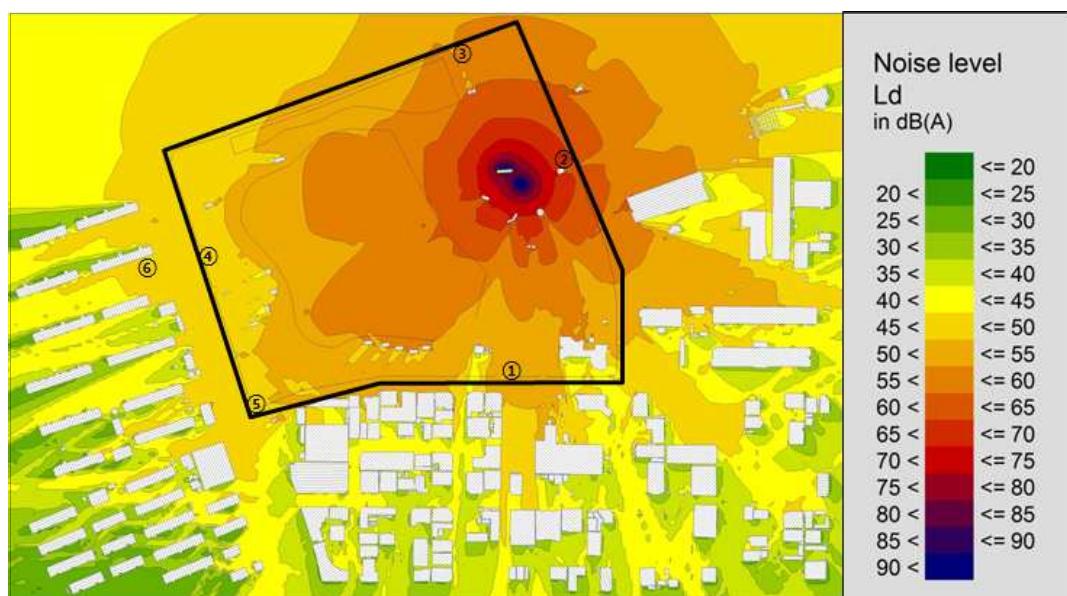
- 음원으로부터의 거리에 따라 ②부지경계선 동측(87 m)과 ⑤부지경계선 최장거리(395 m), ⑥첨단동부센트레빌아파트(426 m)를 비교 시 약 15.0 dB(A) ~ 20 dB(A)정도 차이가 나는 것으로 나타났다.
- 상설야외무대(대)+외벽/반사판(有)을 적용할 경우(Case A-1)와 상설야외무대(소)만 적용할 경우(Case B)를 비교할 시, Case B의 소음도가 전체적으로 약 5.0 dB(A) ~ 8.0 dB(A)까지 높은 것으로 분석되었다 (그림(2-4) 참조).
- Case C는 상설야외무대(대)+외벽/반사판(有)과 상설야외무대(소)를 동시에 음원으로 하였을 때의 소음도를 나타내고 있으며, Case A-1 및 Case B와 비교 시 상대적으로 높은 소음분포를 보이는 것으로 나타났다.

표 3.1.5 분석지점별 예측소음도

[단위: dB(A)]

평 가 지 점	예측 소음도			
	Case A-1	Case A-2	Case B	Case C
① 부지경계선 남측	44.6	55.0	52.9	53.5
② 부지경계선 동측	60.6	66.9	65.9	67.0
③ 부지경계선 북측	52.2	57.9	54.7	57.1
④ 부지경계선 서측	45.4	52.4	49.6	51.0
⑤ 부지경계선 최장거리	40.4	51.1	48.7	49.3
⑥ 첨단동부 센트레빌아파트	43.7	50.6	47.9	49.5

예측소음도 분석을 통한 소음지도



(d) 상설야외무대(대)+상설야외무대(소) 적용 [Case C]

그림 3.1.12 쌍암공원 소음지도

연구내용	1차연도 월별 추진일정											
	0월	0월	0월	0월	0월	0월	0월	0월	12월	1월	2월	3월
야외상설공연장 선정												
소음예측식 ISO-9613 분석												
ISO-9613을 적용한 소음예측프로그램을 통한 예측도 분석 및 소음지도 작성												

<1차연도 야외 공연장 방사음향 특성분석 SW개발 연구개발 추진 일정>

나. 2차연도 연구 내용 및 결과

연구 목표	Target 야외공연장 구조 모델링 및 방사음향 특성 분석 알고리즘 개발
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - Target 야외상설공연장 주변 소음지도 작성 및 실측 - 야외공연 소음도 예측 주요 요인별 영향 분석 - 야외공연장 구조 및 스피커 배치에 따른 방사음향 특성 분석 알고리즘 개발
연구 결과	<ul style="list-style-type: none"> - Target 야외 공연장 공연 시 소음지도 작성 - Target 공연장 및 주변 야외무대의 공연시 소음 실측 - 방사음향 특성 분석용 인터페이스 SW 플로우차트 제시

■ Target 야외 공연장 공연 시 소음지도 모델링

쌍암공원 내 위치한 소음원으로부터 배출되는 소음 정도와 관련 변수를 파악하고, 쌍암공원 부지와 그 주변에 전달되는 소음의 영향을 분석하는데 목적이 있다.

-분석 대상현황

쌍암공원은 광주광역시 광산구 쌍암동에 위치하고 있으며, 주변으로 첨단중앙로 및 첨단과기로가 인접하고 있다.

- 쌍암공원 내 소음발생 가능 위치는 최대 1,000석 규모의 상설야외무대(대)와 200석 규모의 상설야외무대(소)이며, 주 발생 소음은 오케스트라 연주, 음악 공연 등으로 추정, 이로 인한 소음은 쌍암공원 전체 및 주변 주택공간에 충분히 영향을 줄 수 있을 것으로 파악된다.
- 쌍암공원 및 부지주변 현황도는 그림 3.1.13과 같다.



그림 3.1.13 쌍암공원 및 주변 현황도

① 분석항목 및 방법

- 쌍암공원에서의 소음원은 상설야외무대(대)에서 발생하며, 분석에 사용된 음원 설정은 실제 쌍암공원에 음원을 설치하여 rock band music을 이용하여 측정한 값을 가지고 진행하였으며 이에 따른 주파수별 Relative Level은 다음과 같다. (그림 3.1.14 참조)

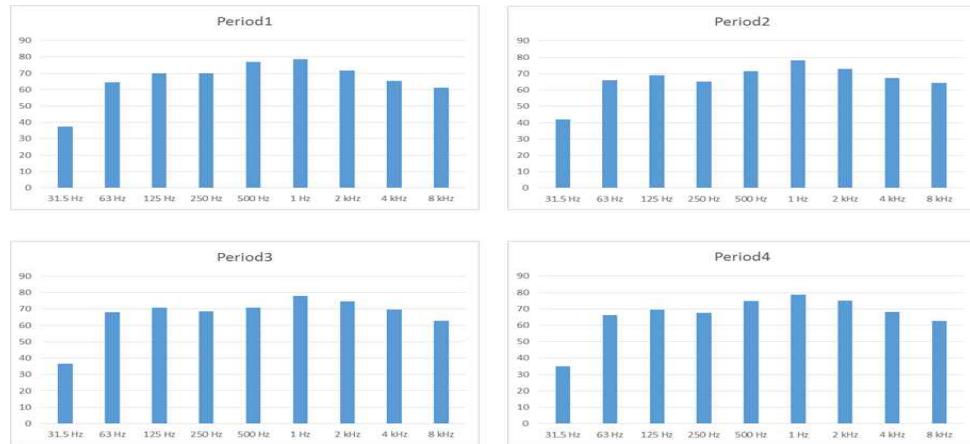


그림 3.1.14 주파수별 Relative Level

- Cadna-A 프로그램을 이용한 해석 시 소음 예측식으로는 ISO:9613을 적용하였고, 소음지도의 격자는 5x5m 단위, 예측지점은 지면 위 1.5m 높이로 하였다.
- 쌍암공원 내 호수의 Ground Absorbtion(G)는 0.0으로, 잔디의 Ground Absorbtion(G)는 1.0으로 설정하였다.
- 소음원을 상설야외무대[대]의 15m를 기준으로 실측값, 예측값을 적용할 경우를 비교 분석 하여 신뢰성을 검토 하였다.
- 실측값과 예측값의 소음분석은 쌍암공원의 상설야외무대[대]에서의 소음도를 소음지도로 나타내고, 상설야외무대(대)를 기준으로 15m 거리에서 각각 0°, 45°, 90°, 135°, 180°을 선정하여 수음원을 넣어 비교하였다.
- 이에 신뢰성 검토를 한 후 소음원을 상설야외무대[대]만 적용할 경우 (A Case), 상설야외무대[소]만 적용 할 경우 (Case B), 상설야외무대[대, 소] 모두 적용한 경우 (Case C)로 나누어 예측값을 분석 하였다.
- (A Case), (Case B), (Case C)의 소음분석은 쌍암공원 부지 내에서의 소음도를 소음지도로 나타내고, 쌍암공원을 중심으로 쌍암공원 부지경계선 5개 지점과 거주 지역 1개 지점에서 수음원을 넣어 분석하였다.

② 분석지점

- 소음 분석지점은 실측소음도와의 비교분석을 위하여 상설야외무대(대) 15m 떨어진 방위면 5개 지점이고 주변 소음도를 예측하기 위해 6개의 지점을 선정하였다.
- 상설무대 주변 측정 및 예측지점의 위치는 그림 3.1.15과 같다. (표 3.1.6, 그림 3.1.17 참조)
- 야외 공연장 주변 소음도 분석 지점의 위치는 그림 3.1.16과 같다. (표 3.1.6 참조)

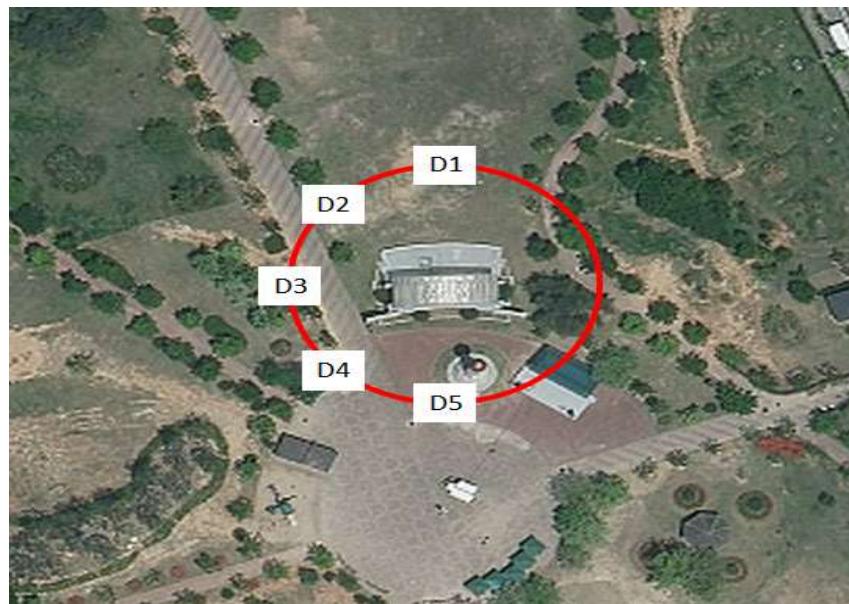


그림 3.1.15 상설무대 주변 측정 및 예측지점 위치



그림 3.1.16 야외 공연장 주변 소음도 분석 지점

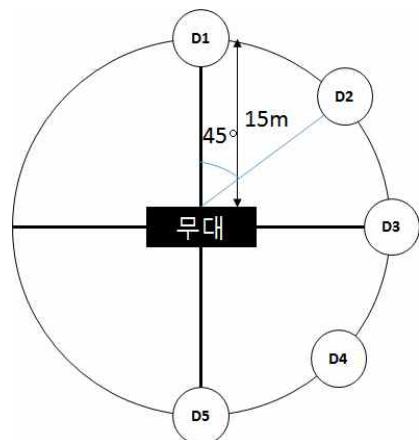


그림 3.1.17 1000석 규모 야외상설무대의 실측할 수음점 위치

표 3.1.6 상설무대 주변 측정 지점의 소음점 위치 및 이격거리

구분	위치	소음원에서의 직선거리(m)
상설야외무대[대] 주변	D1 0°	15m
	D2 45°	
	D3 90°	
	D4 135°	
	D5 180°	
야외공연장 주변 소음	① 남측	222m
	② 동측	76m
	③ 북측	171m
	④ 서측	362m
	⑤ 최장거리	395m
	주거 지역	⑥ 첨단동부 센트레빌아파트 105동
		426m

- 소음지도 분석결과

① 1000석 규모의 상설무대 주변 측정값과 예측치의 비교·분석

0°에서 예측된 값은 86.8 dB로 오차율 1.3%, 45°에서 예측된 값은 85.1 dB로 오차율 0.5%, 90°에서는 79.6 dB의 오차율 2.3%, 135°에서는 예측값 74.1 dB로 오차율 1.9%, 180°에서 예측값은 66.8 dB로 오차율 4%를 나타내고 있다.

실측값과 예측값은 표 3.1.7과 같다.

표 3.1.7 실측값과 예측값의 비교·분석 (15m 기준)

측정 위치	실측도	예측도	오차값(오차율)
D1 (0 degree)	85.7 dB	86.8 dB	+1.1 dB (1.3%)
D2 (45 degree)	85.5 dB	85.1 dB	-0.4 dB (0.5%)
D3 (90 degree)	81.5 dB	79.6 dB	-2.9 dB (2.3%)
D4 (135 degree)	75.6 dB	74.1 dB	-1.5 dB (1.9%)
D5 (180 degree)	69.6 dB	66.8 dB	-2.8 dB (4%)

$$* \text{오차율} = [(\text{실측값} - \text{예측값}) / \text{실측값}] \times 100$$

- 실측도와 예측도를 비교 시 실측도와 예측도의 차이가 ±3 dB이내로서 높은 정확도를 나타내고 있다
- 실측값과 예측값의 오차율은 0.5%~4%로 일반적인 정확도 판단기준인 5% 이내의 높은 신뢰성을 갖고 있는 것으로 나타났다.

② 분석지점별 Case A, B, C의 예측값 비교·분석

- 소음 분석지점은 쌍암공원 부지경계선 5개 지점과 거주 지역 1개 지점을 예측평가 하였을 때 Case A, B, C의 예측값과 예측값에 대한 환경소음기준과의 비교·분석은 표 3.1.8와 같으며 야외공연장 무대 주변 소음지도는 그림3.1.18과 같다.

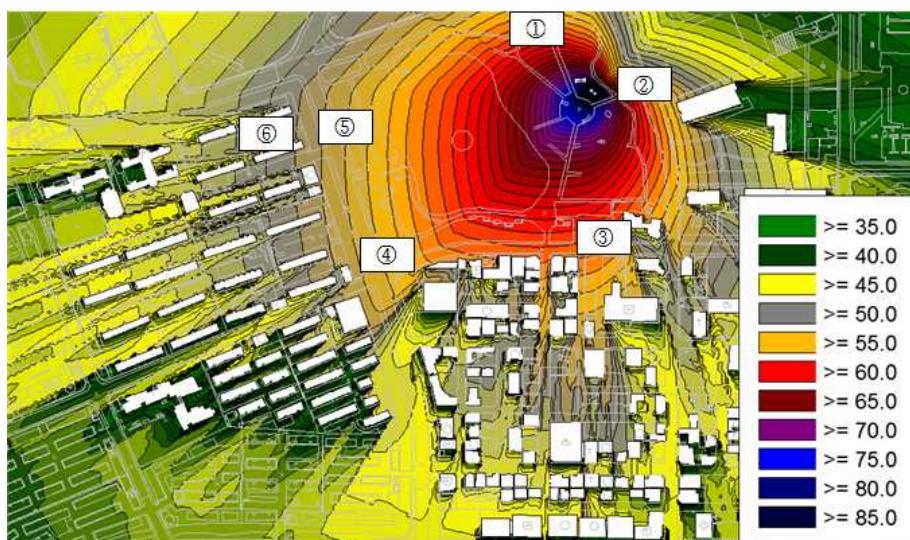
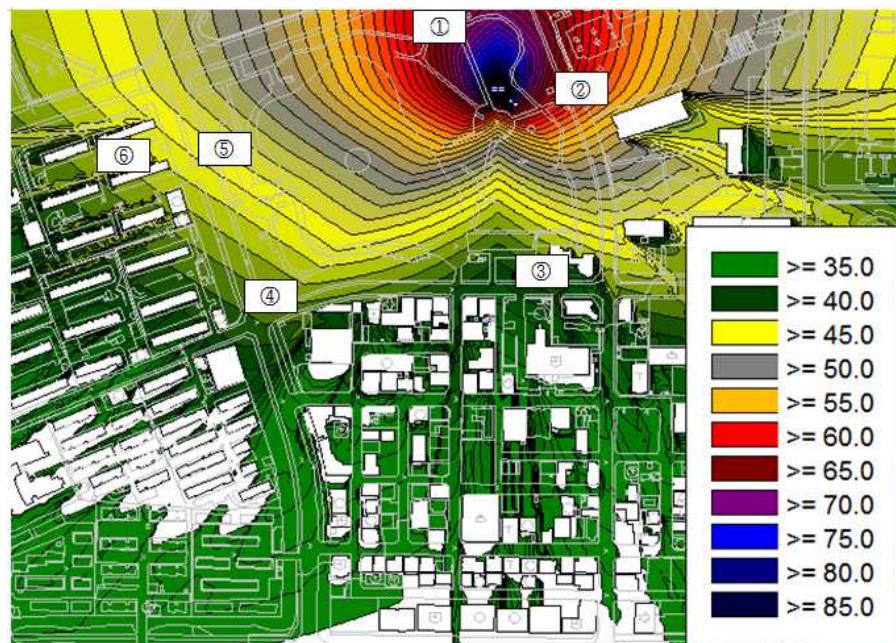
표 3.1.8 쌍암공원 음원위치 및 예측값과 환경소음기준의 비교·분석 (단위 : dB)

구분	위치	예측치 (A Case)	주간 기준 (환경부)	야간 기준 (환경부)	주간 만족 여부	야간 만족 여부
부지경계선	① 지점	64.0	65dB	60dB	만족	불만족
	② 지점	61.0			만족	불만족
	③ 지점	39.9			만족	만족
	④ 지점	41.8			만족	만족
	⑤ 지점	45.8			만족	만족
	거주 지역	⑥ 지점			만족	만족
구분	위치	예측치 (B Case)	주간 기준 (환경부)	야간 기준 (환경부)	주간 만족 여부	야간 만족 여부
부지경계선	① 지점	54.7	65dB	60dB	만족	만족
	② 지점	55.5			만족	만족
	③ 지점	57.7			만족	만족
	④ 지점	54.2			만족	만족
	⑤ 지점	52.8			만족	만족
	거주 지역	⑥ 지점			만족	만족
구분	위치	예측치 (B Case)	주간 기준 (환경부)	야간 기준 (환경부)	주간 만족 여부	야간 만족 여부
부지경계선	① 지점	64.4	65dB	60dB	만족	불만족
	② 지점	62.1			만족	불만족
	③ 지점	57.8			만족	만족
	④ 지점	54.5			만족	만족
	⑤ 지점	53.6			만족	만족
	거주 지역	⑥ 지점			만족	만족

- 소음 분석지점은 쌍암공원 부지경계선 5개 지점과 거주 지역 1개 지점을 평가 하였을 때 주간과 야간

으로 나누어 환경부에서 고시한 생활환경소음지표의 기준을 만족여부를 평가하였다.

- Case A 의 경우 부지경계선 5개의 지점과 거주지역 1개 지점은 주간의 경우 주간평가 생활환경소음지표의 기준을 모두 만족하였지만 야간평가의 경우 ① 지점, ② 지점의 경우 각각 4dB, 1dB 더 높게 측정되어 소음대책의 수립이 필요한 것으로 나타났다.
- Case B 의 경우 부지경계선 5개의 지점과 거주지역 1개 지점은 주·야간평가 의 기준을 모두 만족하였다.
- Case C 의 경우 부지경계선 5개의 지점과 거주지역 1개 지점은 주간의 경우 주간평가 생활환경소음지표의 기준을 모두 만족하였지만 야간평가의 경우 ① 지점, ② 지점의 경우 각각 4.4dB, 1.1dB 더 높게 측정되어 소음대책의 수립이 필요한 것으로 나타났다.
- 각각의 사례를 통해 상설야외무대[대]와 상설야외무대[소]는 다음과 같은 결과에 따라 무대 스피커의 지향방향과 음원의 크기 영향으로 상설야외무대[대]가 주변지역에 더 영향을 끼치는 것으로 나타났다.



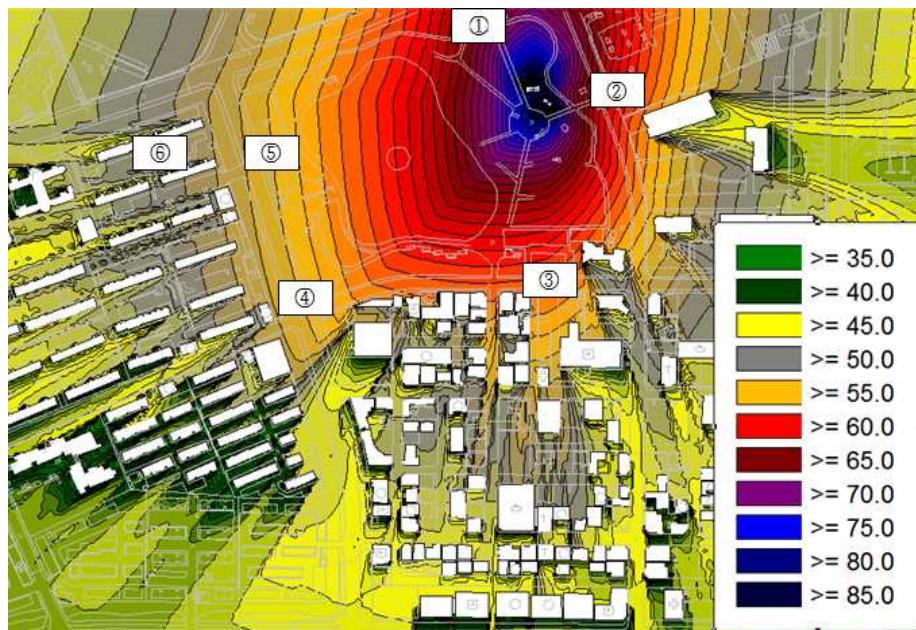


그림 3.1.18 상설야외무대의 적용조건별(Case A, B, C) 소음지도

■ 야외공연 소음도 예측 주요 요인별 영향 분석

① 지향성에 의한 영향 분석

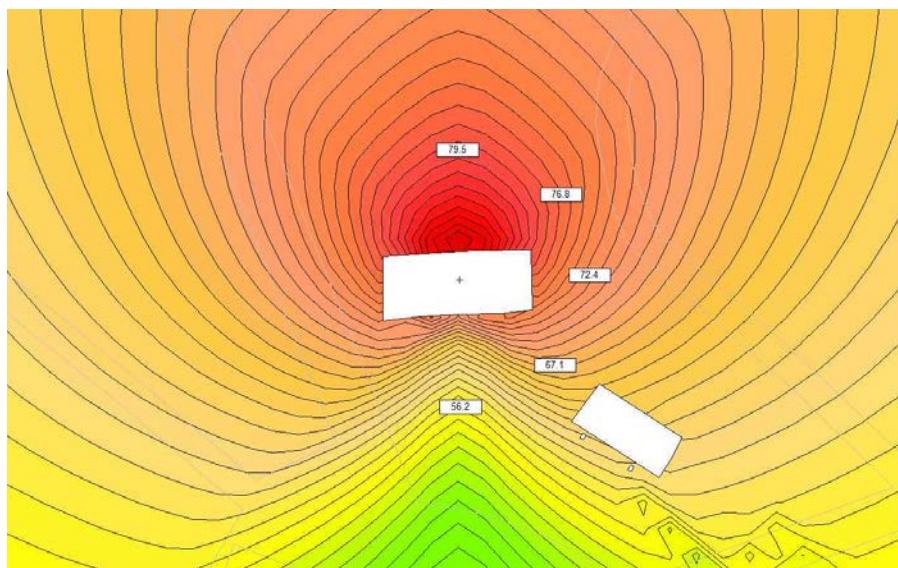


그림 3.1.19 지향성에 의한 영향 분석을 위한 소음지도

표 3.1.9 지향성에 따른 실측값

수음점	지향각	실측값
D1	0°	85.7 dB
D2	45°	85.5 dB
D3	90°	81.5 dB
D4	135°	75.6 dB
D5	180°	69.6 dB

지향성에 따른 예측소음도 분석결과, 지향성이 없는 0°(스피커 전면)와 45°의 차이는 1.7dB, 0°와 90°의 차이는 7.2 dB를 보이며 0°와 135°의 차이는 12.7 dB, 0°와 180°의 차이는 20dB로서 스피커 전면부인 0°를 기준으로 지향성방향의 각도를 크게 할수록 값의 차이가 점점 많은 것으로 나타났다. 즉, 동일한 음원에 대해서 지향성의 변화에 따라 수음점의 위치별로 1.7 dB~ 20 dB의 많은 차이가 발생함을 보이고 있다. 이는 야외공연장 소음의 경우, 무대부 스피커의 지향성이 주변 소음도에 매우 크게 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다.

■ Target 야외 공연장 공연 시 소음도 실측

야외공연장에서 발생하는 소음이 주변에 미치는 영향을 예측하기 위해서는 실제 야외공연장에서 발생하는 소음의 실측정보가 필요하다. 이러한 실측정보들을 통해 야외공연장의 모델을 구성하고 실제 야외공연 시 발생하는 소음이 주변지역에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 따라서 본 과제의 2차년도에는 광주광역시의 대형 야외공연장 두 곳과 Target 야외공연장에서 발생하는 공연소음을 실측했다.

소음의 측정방법은 환경부에서 고시한 [환경기준 중 소음측정방법(ES 03301.1)]를 참고하여 소음계를 설정하였고 측정위치를 결정하였다[3]. 총 5개의 소음계로 공연장 근접지역과 주변 주요지역의 공연시간동안 5분 등가 소음도를 측정하였다.

소음 측정방법

- 일반사항
 - 매회 교정(Calibration) 실시
 - 주파수 보정: A
 - 동특성 Fast 모드
- 측정점
 - 일반지역: 반경 3.5m 이내에 장애물이 없는 지점의 지면 위 1.2~1.5m
 - 도로변 지역: 건축물로부터 도로 방향으로 1m 떨어진 지점의 지면 위 1.2~1.5m
- 측정조건
 - 삼각대를 설치하여 측정하는 것이 원칙
 - 손으로 소음계를 잡고 측정할 경우, 몸으로부터 0.5m 이상 떨어져야 함.
 - 소음계의 마이크로폰은 주 소음원 방향으로 향해야 함.
 - 풍속이 2m/s 이상일 경우 반드시 방풍망 부착
- 측정 시간 및 지점
 - 낮 시간대(06:00~22:00): 각 측정지점에서 2시간 이상 간격으로 4회 이상 측정 하여 산술평균
 - 밤 시간대(22:00~06:00): 2시간 간격으로 2회 이상 측정하여 산술평균
- 분석
 - 소음도의 계산과정에서는 소수점 첫째 자리수를 유효숫자로 하고, 최종 소음도 값은 소수점 첫째 자리수에서 반올림한다.
 - 샘플주기를 1초 이내에서 결정하고 5분 이상 측정하여 계산한 등가소음도를 그 지점의 측정소음도로 한다.

그림 3.1.20 소음측정방법 (ES 03301.1)

소음을 실측한 야외공연은 광주 유니버시아드 개막제, 피크닉 록 뮤직 페스티벌의 대형 야외공연 두 곳

과, Target 야외공연장인 쌍암공원으로 총 세 곳이다.

① 광주 하계 유니버시아드 개막제(2015.07.02) - 전남대학교

2015년 7월 2일에 있었던 광주 하계 유니버시아드 개막제의 공연소음을 실측했다. 공연은 약 1시간 동안 성악, 록, 힙합, 등의 다양한 장르로 구성되었고, 소음 측정지점은 공연장 주변 세 지점과 주변 주택지역 두 지점을 선정하였다. 공연장 주변에 많은 관객들이 몰려서 공연장 주변의 측정지점에서는 공연 전과 후 모두 70dB이상의 매우 높은 소음도가 측정되었다. 주변주택지역은 공연장에서 230m 떨어진 원룸촌에서 공연 중 소음진동 관리법의 기준인 60dB가 넘는 68dB의 소음도가 측정되었다. 그러나 공연장에서 490m 가량 떨어진 아파트 단지에서는 공연 전과 후 모두 법을 위반하지 않는 소음도가 측정되었다. 이는 공연장에서 거리가 충분히 멀리 떨어져 있는 것과 공연장 주변에 많은 상가 건물들에 의해 소음이 감쇄된 것의 영향으로 보인다.



그림 3.1.21 전남대학교 U대회 전야제 소음측정

② 피크닉 Rock 페스티벌(2015.07.13) - 상무 시민공원

2015년 7월 13일 상무 시민공원에서 있었던 광주 피크닉 Rock 페스티벌의 소음을 측정하였다. 공연의 성격이 Rock 장르가 주로 구성된 공연이었고 주변에 많은 아파트 단지들이 있어서 야외공연의 문제를 파악할 수 있는 주요 사례라고 판단되었다. 측정지점은 공연장 주변 두 지점과 주변 주택단지 두 지점 그리고 공연장 주변 통행로인 육교 한 지점으로 선정하였다. 공연장 주변 2지점에서는 공연 전 60dB의 소음이 공연 중 80dB가 넘게 증가하여 공연의 영향을 파악할 수 있었다. 주변 주택단지에서는 두 곳 모두 공연 중 소음진동 관리법의 기준인 60dB가 넘는 62dB이상의 소음도가 측정되었다. 이러한 측정 결과는 많은 세대가 거주하는 아파트 단지의 특징상 거주민들의 큰 불편이 발생했을 것으로 파악된다. 주변 통행로인 육교에서도 주택단지와 비슷한 수준의 소음도가 실측 되었다.

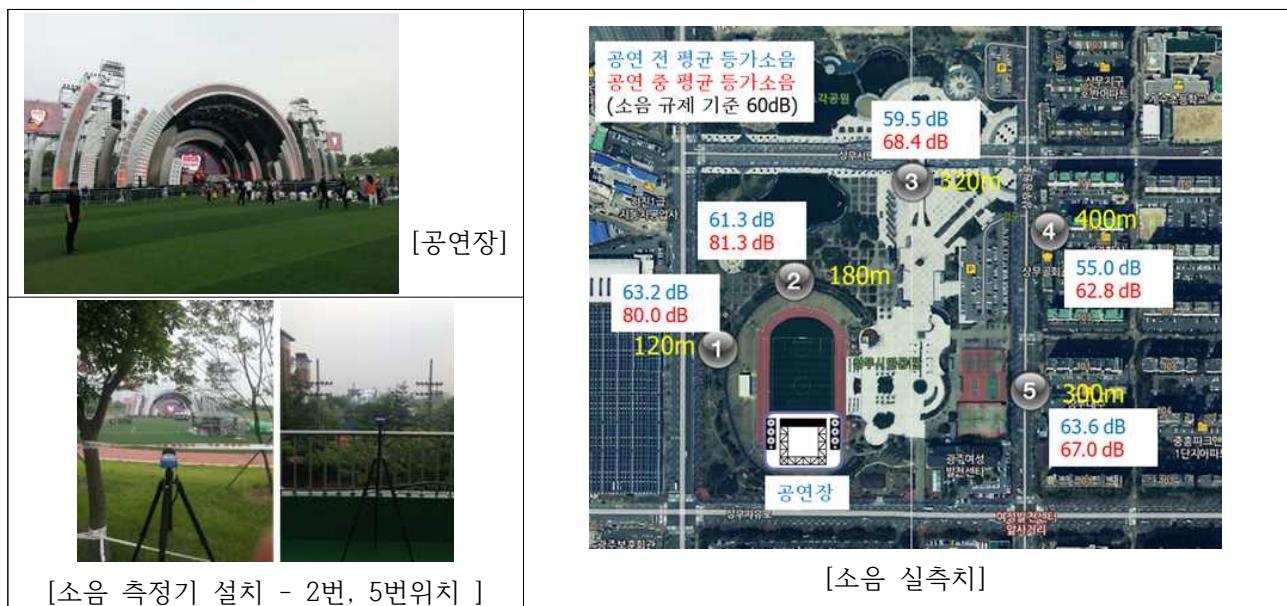


그림 3.1.22 피크닉 Rock 페스티벌 소음측정

③ Target 야외공연장(2015.09.14~15) - 쌍암공원

Target 야외공연장에서 야외공연이 있을 시의 소음도를 파악하기 위해 2015년 9월 14일과 15일에 소음도를 실측하였다. 당시에는 실제 계획된 야외공연이 없어서 본 실험실에서 보유한 공연용 스피커 (어레이 스피커 VSA 1250, 우퍼 스피커 SRM 1850) 각각 두대로 야외공연의 음향팀이 사용하는 테스트 음악을 재생하여 야외공연을 모사하였다. 측정 지점은 공연장 근처 한 곳과 주변 주택단지, 병원, 상가, 학교 등 네 곳을 선정하였다. 공연장 근처에서는 공연 전과 공연 중 25dB 정도의 소음도 차이가 발생했다. 공연장 주변 주택단지, 상가, 병원에서는 공연 전과 공연 중 소음도 차이가 거의 없었는데, 이는 공연장이 향하고 있는 방향의 뒤쪽에 위치해 있기 때문이다. 따라서 공연장의 방향이 주변 주택지역의 소음도에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 보인다. 반면에 공연장 앞쪽에 위치한 학교의 측정지점에서는 공연 전과 후 7dB의 소음도 차이를 보였다. 또한 이 지점에서는 소음진동관리법의 기준인 60dB에 근접한 57dB의 소음이 측정되었는데, 출력이 상대적으로 작은 야외공연을 모사한 환경에서 측정된 소음도 인것을 감안하면 출력이 큰 실제 야외공연에서는 기준을 위반할 것으로 보인다. Target 야외공연장의 실측치는 호남대 팀에 제공하였다.



그림 3.1.23 Target 야외공연장 소음측정

정리하면 2차년도 연구 수행기간 동안 총 세 곳의 야외공연장에서의 소음도를 실측했다. 두 번의 대형 야외공연장에서는 야외공연 중 주변 주택단지에서 소음진동관리법의 기준인 60dB가 넘는 소음도가 측정되었으며 야외공연이 주변 주요지역에 미치는 소음피해를 파악할 수 있었다. Target 야외공연장의 소음실측에서는 공연장의 방향이 주변지역의 소음도의 주요 인자인 것을 파악했고, 실측치는 호남대 팀에 제공하였다.

■ Sound PLAN 또는 Cadna 프로그램에 기반한 야외 공연장 구조 및 스피커 배치에 따른 방사음향 분석 인터페이스 개발

야외공연장에서 발생하는 소음을 미리 예측하고, 공연 스피커의 배치에 따른 방사음향을 분석하기 위해서는 SoundPLAN[1] 또는 Cadna[4] 같은 소음지도 작성 소프트웨어를 이용해야 한다.



그림 3.1.24 소음지도 작성프로그램 (Cadna)

SoundPLAN과 Cadna는 공장, 교통, 항공, 철도 소음등의 넓은 공간에서 전파되는 환경소음의 소음을 파악하기 위해 제작된 소프트웨어이다. 이러한 소프트웨어들을 이용하여 야외공연에서 발생하는 소음을 예측하기 위해서는 두 가지 문제점이 있다. 먼저, 소음지도 작성 소프트웨어들은 주로 환경소음을 예측하는데 사용되기 때문에 공연 소음을 모델링 할 수 있는 기능을 제공하지 않는다. 또한 소프트웨어의 알고리즘은 음파의 위상정보가 없는 기하 음향학에 기반하기 때문에, 본 과제에서 제안하는 기술들의 기초인 음파의 간섭현상을 구현 할 수 없다. 따라서 야외공연의 소음을 예측하기위해 공연 스피커 음원과 간섭현상을 구현할 수 있는 음원의 모델링이 필요하다.

때문에 야외공연장의 음원을 모델링하기 위해, 공연장 내부와 외부를 각각 파동음향학에 기반한 해석적 방법과 기하음향학에 기반한 수치적 방법으로 모델링 하는 알고리즘을 고안하였다. 이 방법은 공연장 내부에서는 파동음향학을 사용하여 공연 스피커의 간섭현상을 구현할 수 있고, 공연장 외부에서는 소음지도 작성프로그램을 사용하여 넓은 공간에서의 소음 전파를 계산할 수 있기 때문에 큰 장점을 갖는다.

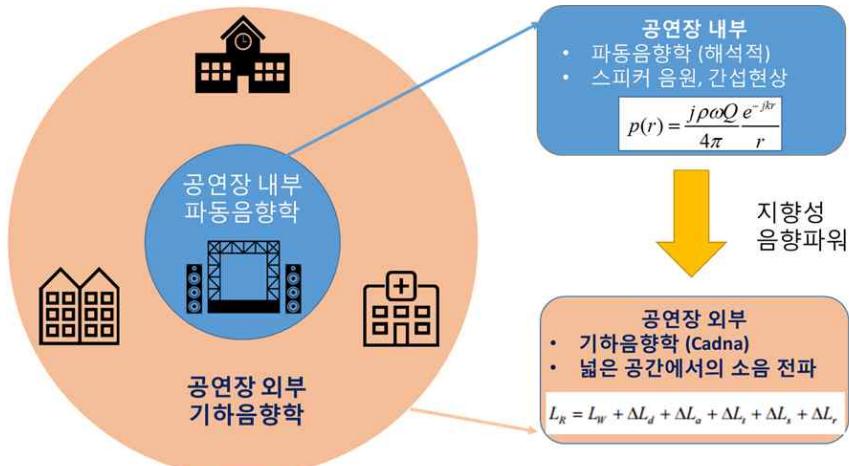


그림 3.1.25 제안하는 알고리즘의 개념도

공연장 내부의 음원전파는 Image source 방법을 사용하여 해석적으로 계산된다.[5] 계산하는 프로그램은

MATLAB과 같은 수치계산 소프트웨어를 이용하여 작성된다.[6] 아래의 그림은 이 방법의 개념과 수식을 나타낸다. 여기서 p 는 음압을 의미하며, r 은 공간상에서의 위치벡터를 의미한다.

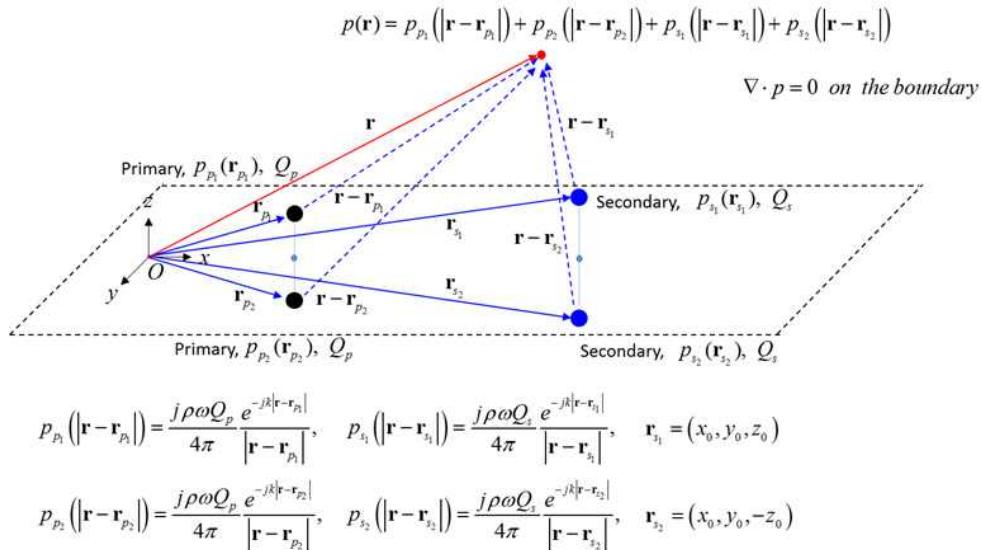


그림 3.1.26 공연장 내부 음장 계산방법 - Image source

공연장 외부에서는 소음지도 작성 프로그램의 음원의 입력변수인 음향파워레벨과 지향성지수를 입력하여 구현할 수 있다. 지향성 지수(Directivity Index, DI)와 음향파워레벨(Source power level, PWL)은 공연장 내부와 외부의 경계지역에서 아래와 같은 수식으로 계산된다.[7]

$$L_w = L_p + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right)$$

L_w : 음원의 PWL (Power level)
 L_p : 소리의 SPL (Sound pressure level)
 Q : 지향성 Factor ($Q=1$, 지향성이 없을 경우)
 r : 음원으로부터 거리

[음원의 음향파워레벨 계산 식]

$$L_w - L_p = 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right)$$

$$\frac{(L_w - L_p)}{10} = \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right) \quad \Rightarrow \quad DI = 10 \log Q$$

$$10^{\frac{(L_w - L_p)}{10}} = \frac{Q}{4\pi r^2}$$

$$Q = 4\pi r^2 10^{\frac{(L_w - L_p)}{10}}$$

그림 3.1.27 음원의 지향성 지수 계산 식

제안하는 알고리즘은 아래와 같은 플로우차트로 표현할 수 있다.

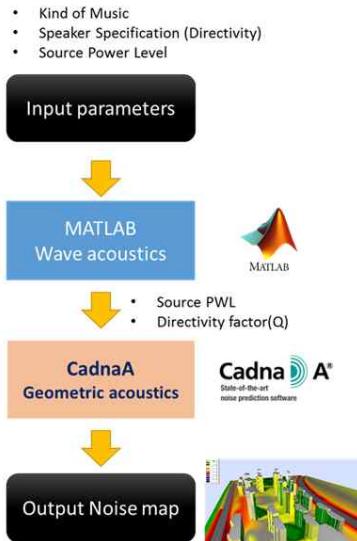


그림 3.1.28 제안하는 알고리즘의 플로우차트

1. 입력변수로 음악의 종류, 공연 스피커의 제원, 음원의 파워를 입력한다.
2. MATLAB에서 작성된 프로그램을 이용하여 공연장 내부의 음장을 계산한다.
3. 계산된 공연장 내부 음장을 이용하여 음원의 파워레벨과 지향성지수를 계산한다.
4. 계산된 수치들을 소음지도 작성 프로그램인 Cadna에 입력하여 공연장 주변의 소음지도를 작성하여 소음도를 파악할 수 있다.

연구내용	2차연도 월별 추진일정											
	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월
Target 야외상설공연장 주변 소음지도 작성 및 실측												
야외공연 소음도 예측 주요 요인별 영향 분석												
야외공연장 구조 및 스피커 배치에 따른 방사음향 특성 분석 알고리즘 개발												

<2차연도 야외 공연장 방사음향 특성분석 SW개발 연구개발 추진 일정>

다. 3차연도 연구 내용 및 결과

연구 목표	야외공연장 방사음향 특성분석 SW개발
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 야외공연장 음원 시뮬레이터 소프트웨어 개발 - 개발한 SW를 이용한 Target 야외공연장 주변 소음지도 작성 및 분석
연구 결과	<ul style="list-style-type: none"> - 야외공연장 음원 시뮬레이터 개발 - 작성된 소음지도와 실측치의 정확도 분석

■ 야외공연장 음원 시뮬레이터 SW 개발

공연 소음 저감을 위한 스피커 최적배치를 위해서는, 공연장의 소음 방사를 정확히 예측해야 한다. 이를 위해서, 공연이 시작되기 전 공연장의 방사 소음을 정확히 예측할 수 있는 기술이 필요하다. 기존의 소음지도 프로그램(Cadna[4] 또는 SoundPLAN[1])은 소음이 발생하는 지역을 음원의 특성(파워레벨, 지향성지수)을 갖는 요소로 정의를 한다. 이 때, 음원의 특성은 실측을 통해 개발된 소음 예측식에 기반한다. 하지

만 기존의 프로그램에서는 야외공연장 환경 하 실측을 통한 음원의 특성이 정의되어 있지 않다. 따라서 기존의 프로그램(Cadna 또는 SoundPLAN)으로는 야외공연장의 정확한 소음도 예측에 많은 어려움이 있다. 3차년도 연구에서는 이러한 어려움을 해결하기 위하여, 공연소음 예측 시뮬레이터 SW를 개발하였다. 개발된 시뮬레이터 SW는 소음지도를 작성하여 계획중인 야외공연이 주변 소음이 미치는 소음도를 미리 예측 할 수 있다. 또한 가상방음벽 적용을 위한 공연소음 억제 효과를 미리 파악하여, 소음 저감을 위한 최적의 스피커 배치를 수행하는 데 기반을 마련하였다.

① 공연소음 예측 시뮬레이터 SW의 흐름도

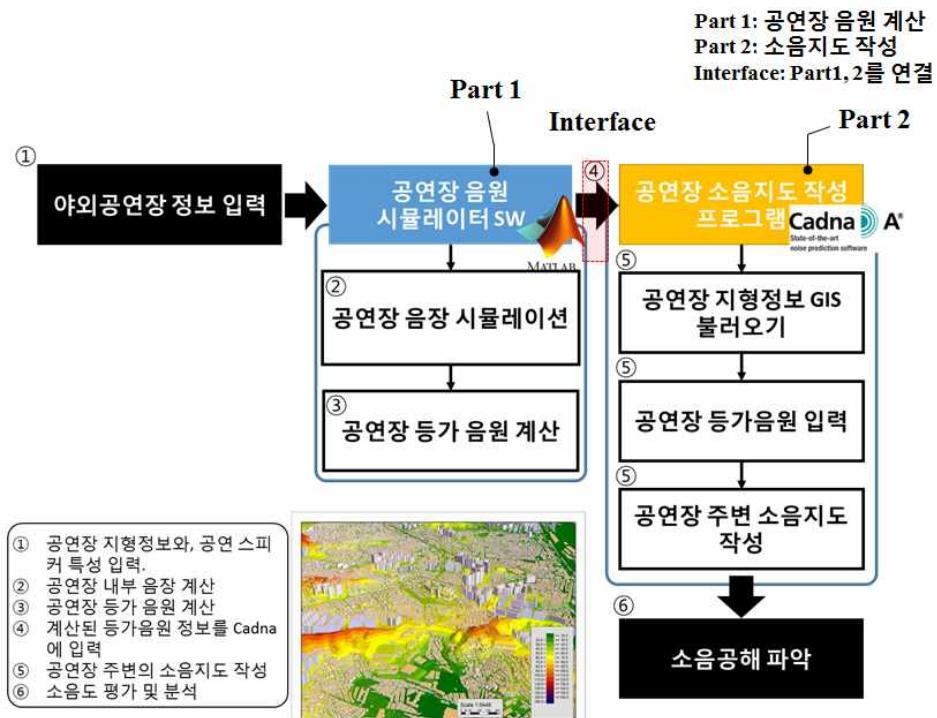


그림 3.1.29 공연소음 예측 시뮬레이터의 흐름도

위 그림은 개발된 공연소음 예측 시뮬레이터 SW의 전체적인 흐름도를 나타낸다. 첫 번째로 야외공연장의 정보(공연 스피커 특성, 공연장 지형정보)를 입력한다. 이후 공연장의 정보를 기반으로, Part 1에서는 공연장 음원 시뮬레이터 SW를 통하여 공연장 내부 음장을 계산하고, 계산된 공연장 내부 음장을 통하여 공연장 등가 음원의 특성(파워레벨, 지향성 지수)을 계산한다. 계산된 공연장 등가 음원의 특성은 Interface 모듈을 통하여 공연장 소음지도 작성 프로그램(Cadna)의 입력으로 정의된다. Part 2에서는 Part 1에서 계산된 공연장 음원의 특성(파워레벨, 지향성 지수)과 공연장 및 주변의 지형정보를 기반으로 소음작성 프로그램(Cadna)을 이용하여 공연장의 방사 소음을 예측한다.

② 공연장 음원 시뮬레이터 SW

앞서 설명하였듯이, 개발된 공연소음 예측 시뮬레이터 SW에서는 야외공연장을 하나의 등가음원으로 모델링 하는 과정이 필요하다. 이는 공연장 음원 시뮬레이터 SW를 통하여 수행되며, 아래 그림은 야외공연장을 등가음원으로 정의하는 방법을 개념적으로 보여준다.

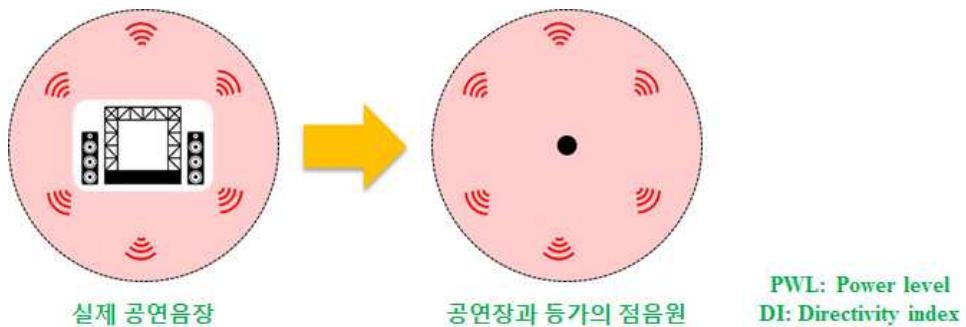


그림 3.1.30 공연장의 등가음원 모델링 개념도

공연장 음원 시뮬레이터 SW에서는 실제 야외공연장에서 방사되는 소음을 하나의 점 음원으로 정의한다. 이 때 점 음원의 방사 특성은 공연장의 무대를 포함하는 반경에서 특정된 음향학적 특성을 기반으로 한다. 따라서 정의된 등가 점 음원은 야외공연장의 음향 파워레벨(PWL)과 지향성 지수(DI)를 갖는다.[7, 8] 이 때, 음향 파워레벨과 지향성 지수는 거리 감쇠식에 기반하여 아래와 같이 계산된다.

1) 파워 레벨 (PWL, L_w)

$$L_w = L_p + \left| 10\log\left(\frac{D}{4\pi r^2}\right) \right|$$

L_w : 음원의 PWL
 L_p : 음압 레벨
 D : 지향성 factor
 r : 음원으로부터 거리

2) 지향성 지수 (DI)

$$D = 4\pi r^2 10^{-10}, DI = 10\log D$$

아래 그림은 공연장 음원 시뮬레이터 SW의 실행 결과를 나타낸다. 본 시뮬레이터 SW에서 야외공연장의 스피커 특성을 입력하면 등가음원의 음향 파워레벨(PWL)과 지향성 지수(DI) 및 음압레벨(SPL)을 계산한다. 주요 계산 결과들은 실행 창에서 그래프 형태로 확인 할 수 있으며, 등가음원의 방사 형태 또한 음압 레벨 분포도를 통하여 확인 할 수 있다. 이후 음원 파일 출력 버튼을 통하여, 음원의 특성은 소음지도 작성 프로그램(Cadna)에서 입력 가능한 형태(Excel 파일 기반)로 출력된다.

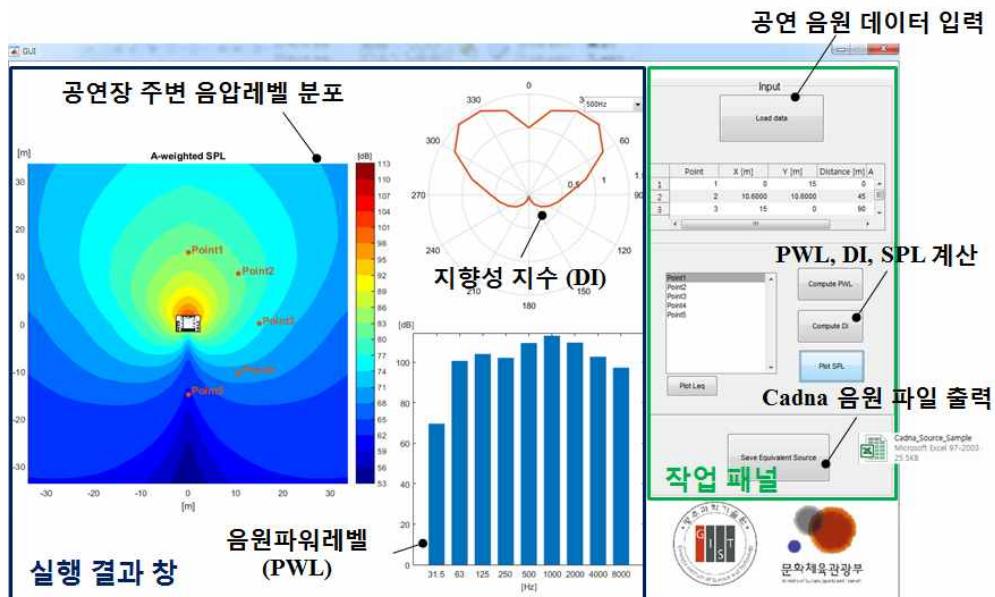


그림 3.1.31 공연장 음원 시뮬레이터 SW

공연장 음원 시뮬레이터 SW를 통하여 출력된 Excel 형태의 등가음원 특성은 소음지도 작성 프로그램 (Cadna)의 음원 정보로 입력된다. 아래 그림은 쌍암공원 야외공연장의 등가음원 특성을 바탕으로 음원 시뮬레이터 SW를 실행한 결과이다. 공연장 음원 시뮬레이터 SW를 통하여 예측한 등가음원의 음압과 실측 값의 차이가 3dB 미만의 차이를 보이고 있다. 따라서 개발된 공연장 음원 시뮬레이터 SW가 매우 정확하게 야외 공연장의 음원을 모델링 할 수 있다.

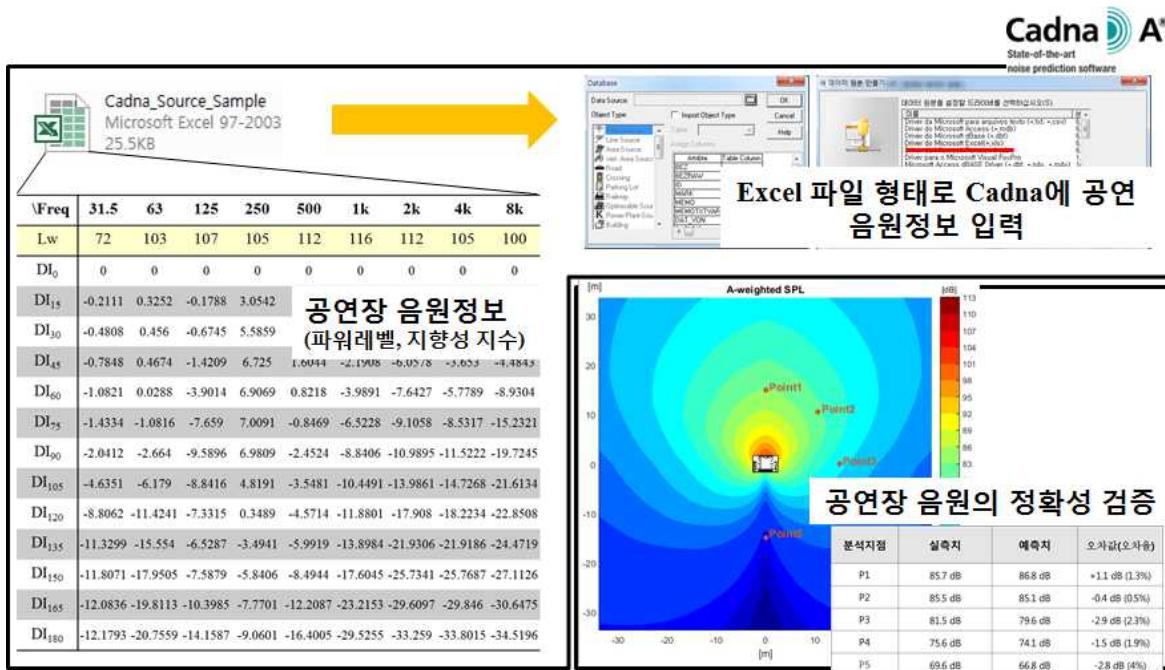


그림 3.1.32 공연장 음원 시뮬레이터 SW의 검증

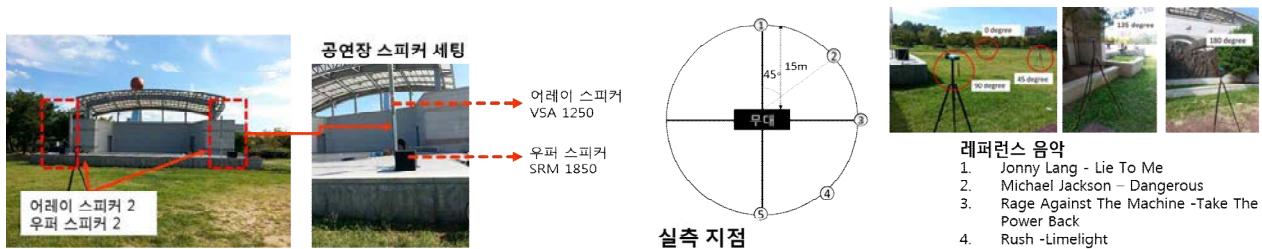
■ Sound PLAN 또는 Cadna 프로그램과의 비교분석

본 단원에서는 개발된 공연장 음원 시뮬레이터 SW를 이용하여 야외공연장의 소음을 예측하고 실측치와 비교분석하는 것을 목표로 한다. 개발된 소음예측 시뮬레이터 SW와 기하음향학 기반의 상용프로그램인 Cadna를 이용하여 야외공연장 주변의 소음지도를 작성하여 예측하고 실측값과의 비교분석하는 것이 목적이다. 야외공연장의 소음지도를 작성은 Target 야외공연장을 기준으로 진행하였다. 소음지도 작성은 Target 야외공연장 스피커 음원 실측, 공연장 음원 시뮬레이터 SW를 이용한 등가음원 파라미터 산출, Cadna에 Target 야외공연장의 지형정보, 공연장 음원 입력, 소음지도 작성 순서로 이루어진다. 공연장 음원 시뮬레이터 SW를 이용한 소음지도 작성의 자세한 과정은 아래에서 설명된다.

① 공연장 음원 시뮬레이터 SW와 Cadna를 이용한 소음지도 작성 예 (Target 야외공연장)

Step1: Target 야외공연장 스피커 음원 실측

공연장 음원 시뮬레이터 SW를 이용하여 정확한 공연장 음원 파라미터를 산출하기 위해서는, 공연장과 유사한 환경의 소음도를 실측해야 한다. 따라서 소음지도 작성의 첫 번째 단계로서 Target 야외 공연장에 스피커를 배치하여 야외공연장 인근에서의 소음도를 측정하였다. Target 야외공연장과 야외공연장 내의 스피커 및 마이크의 배치는 아래와 같다.



공연장 음원 시뮬레이터에서 등가음원의 음향 방사패턴을 파악하기 위해 야외 공연장을 중심으로 반원 형태의 5개 지점에서 음압레벨 (sound pressure level)을 측정하였다. 야외공연장을 중심으로 15m거리에서 측정한 옥타브밴드와 지향각에 따른 소음도는 아래와 같다.

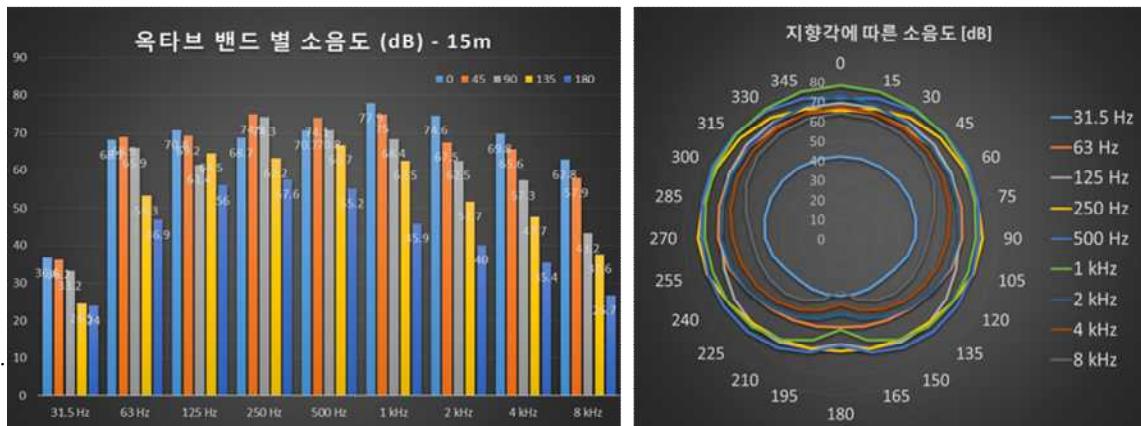


그림 3.1.34 야외공연장을 중심으로 실측한 음원데이터

실측한 공연장 소음도와 공연장 음원 시뮬레이터를 이용하여 공연장과 등가의 음원 파라미터를 산출할 수 있다. 아래그림은 공연장 음원 시뮬레이터 SW로 얻어진 Taget 야외공연장과 등가인 음원의 음압레벨 분포와 파워레벨 그리고 지향성지수를 나타낸다.

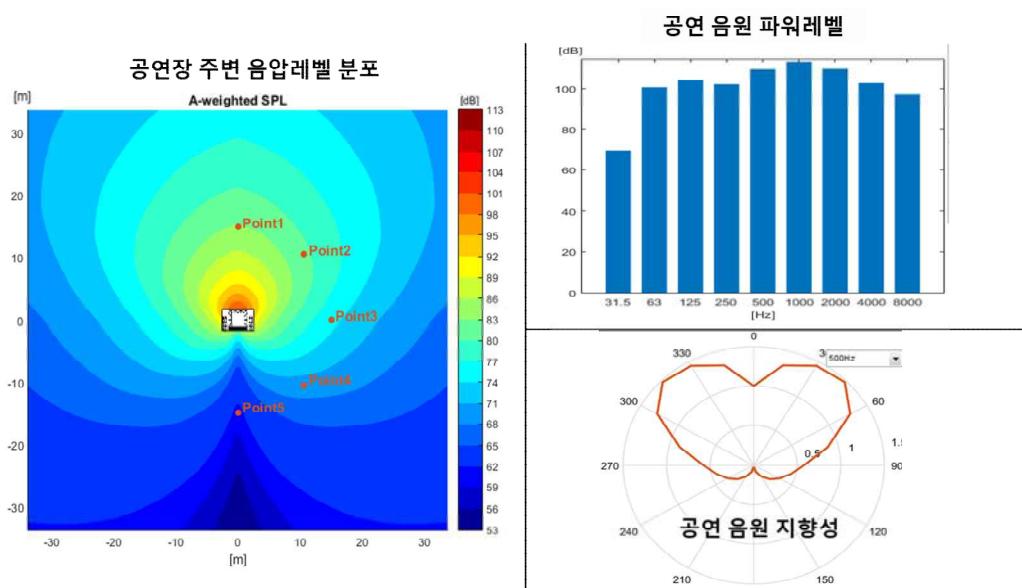


그림 3.1.35 공연소음 예측 시뮬레이터 SW 해석결과

그림의 좌측은 공연장을 중심으로 한 음압레벨의 분포를 나타내며, 우측은 옥타브밴드별 음원 파워레벨과 지향성지수를 나타낸다.

Step3: 산출된 등가음원 정보를 Cadna에 입력

산출된 등가음원의 정보를 Cadna에 입력하여 야외공연장의 음원을 정의할 수 있다. 이렇게 정의된 음원을 이용하여 야외공연장 주변의 상가지역 및 주거지역의 소음지도를 얻을 수 있다 아래 그림은 등가모델에 대한 정보를 Cadna에 입력하는 화면을 나타낸다.

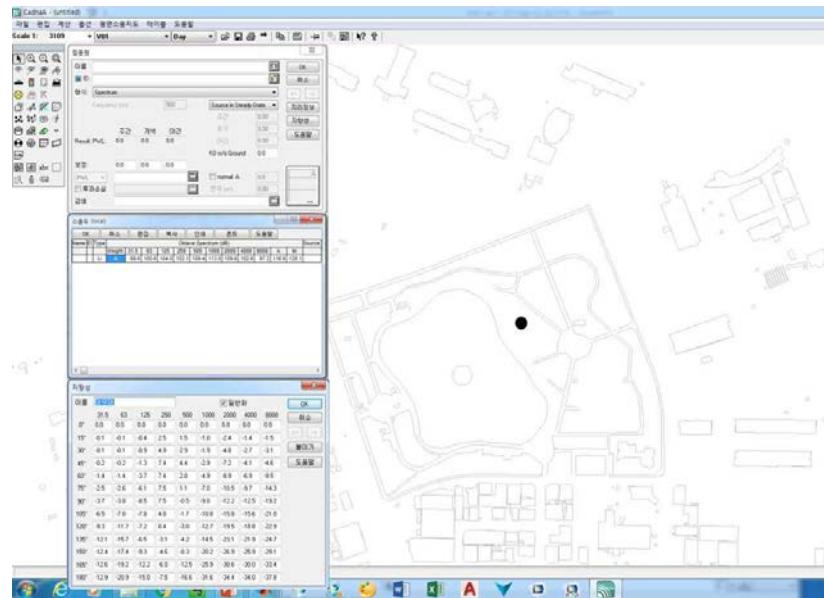


그림 3.1.36 Cadna에 공연장 등가 음원 대한 정보 입력

Step4: 소음지도 작성

아래 그림은 소음예측 시뮬레이터로 산출된 등가음원의 정보를 이용하여 계산된 Cadna의 소음지도를 나타낸다. Point 1~5는 실측에 사용된 수음점의 위치를 도식적으로 표현한 것이다.

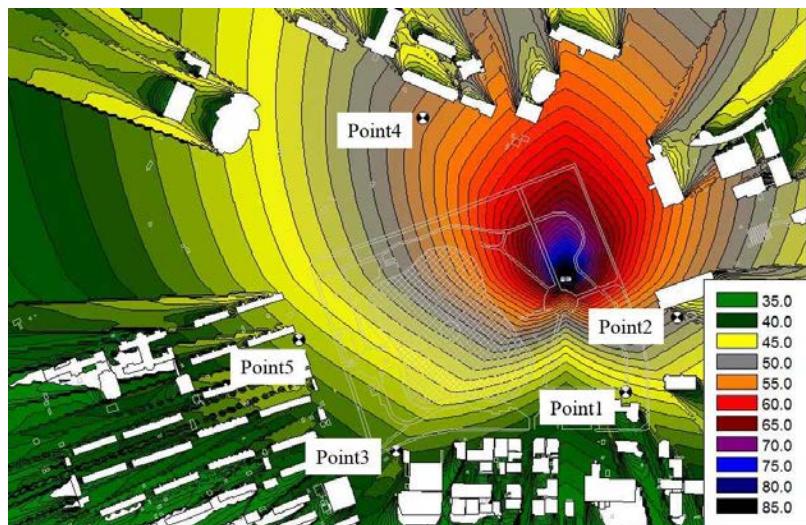


그림 3.1.37 Cadna를 통해 작성된 야외공연장 주변 소음지도

Step5: 작성된 소음지도의 예측치와 실측치 비교분석

아래 그림은 소음지도에서 나타낸 수음점에서의 소음을 실측하여 예측치와 비교한 결과를 나타낸다. 각

수음점에서의 오차는 2%이하로 나타났고 이를 통해 프로그램이 매우 정확하다는 것을 확인할 수 있었다.

	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
예측치	45.1	50.5	41.8	52.5	43.4
실측치	50.1	56.3	51.4	50.0	60.5
	53.3	56.4	53.0	56.7	61.2
배경소음 + 예측치	51.3	57.3	51.8	54.4	60.5
오차	2	0.9	1.2	2.3	0.7

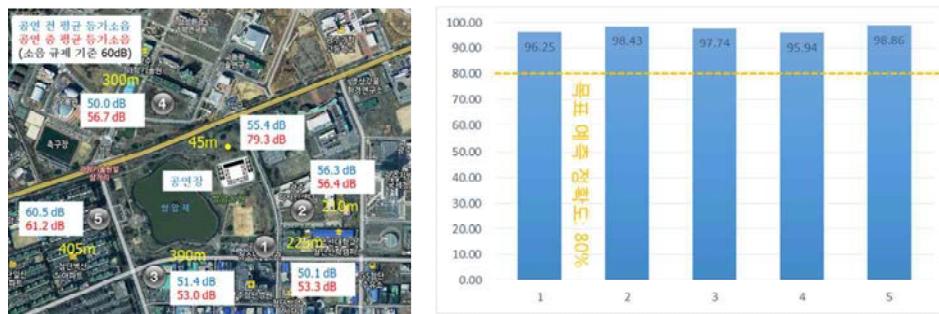


그림 3.1.38 Cadna를 통해 계산된 야외공연장 주변 소음 지도

② 소음노출인구 산정

작성한 소음지도를 더욱 활용하기 위해 소음노출인구 산정 연구를 수행했다. 소음노출인구 산정을 통해 야외공연장의 소음이 주변 주거지역 및 지나다니는 행인들에게 어느 정도의 피해가 예상되는지 파악할 수 있으며 공연장 소음을 초기에 대응할 수 있다.[8] 소음노출인구 산정은 소음지도 작성 프로그램인 Cadna를 통하여 산정방법별로 진행하였다. 연구대상지역은 Target 야외공연장이 위치한 광주광역시의 쌍암동의 쌍암공원을 대상으로 실시하였다.

첫 번째 소음노출인구 산정 방법은 평면소음지도를 이용한 산정방법(Grid Noise Map ; GNM)으로 공간통계분석의 지리정보시스템에서 폴리곤으로 형성된 행정구역의 면적을 객체지향적 방식의 Avenue언어와 Map calculator를 이용하여 면적을 계산하여 폭로면적과 인구밀도의 상관분석을 통해 소음 노출인구를 구한다. 두 번째 방법은 1인당 주거면적을 이용하는 산정방법(Living space per 1person ; LSP1)으로 건물의 총 연면적을 1인당 최소 주거면적(10m²)으로 나누어 계산하여 소음노출인구를 구한다 세 번째 방법은 단위주거건물 연면적당 거주인구를 이용한 산정방법(Total architectural area ; TAA)으로 대상 행정 구역의 실제 총 인구수와 건물의 총 연면적을 알아낸 후 총 인구수를 총 연면적으로 나누어 1인당 현실적으로 차지하는 바닥면적을 알아낸 후 실제 거주인구수를 계산하여 1인당 차지하는 바닥면적으로 나누어 소음노출인구를 구한다. 이때 소음노출인구산정의 총 인구수는 통계지리정보서비스(SGIS)에서 통계자료로 제공하는 최소 통계구역 단위로 인구주택 총조사의 통계지도를 활용하였다

소음노출인구 산정방법별로 산정한 결과는 다음 표와 그래프와 같다

구분(dB(A))	노출인구(명)			비고		
	min	max	GNM	Per 1person	total	
45			100	189	49	
45	50		952	2879	754	
50	55		3392	12769	3344	
55	60		3515	15199	3783	
60	65		1257	4580	1200	환경기준 초과
65	70		312	189	0	

표 3.1.10 산정방법 별 소음노출인구

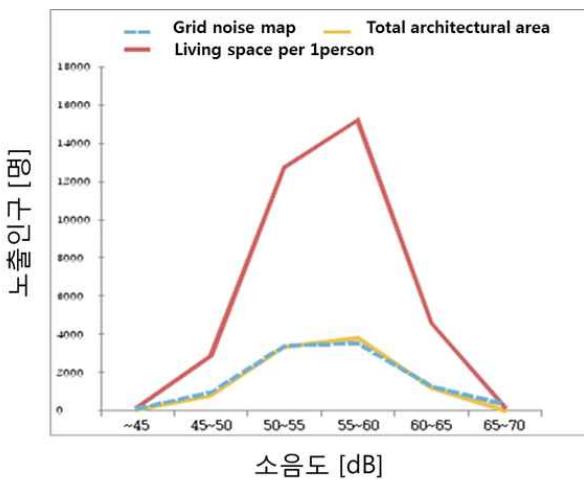


그림 3.1.39 산정방법 별 소음노출인구 그래프

위 그래프를 보면 Total architectural area, Grid noise map은 비슷한 양상을 보였지만 Living space per 1person의 경우 총인구수가 실제 거주인구수가 아닌 일정공간에 일괄적으로 1명씩 입력하게 되어 실제 인구수보다 더 많은 인구수가 산출됨으로 판단되었다. 노출인구 산정은 평면소음지도를 이용한 산정방법과 단위 주거건물 면적당 거주인구를 이용한 산정방법을 이용한 결과, 두 방법은 소음도별로 약간의 차이는 발생하나 거의 비슷한 분포를 나타냄을 알 수 있었다. 그 결과 두 방법은 신뢰성이 높은 것으로 보이며 소음 노출인구를 산정하는 방법은 앞으로 연구를 지속해야 할 것으로 보인다.

연구내용	1차연도 월별 추진일정											
	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월
야외공연장 음원 시뮬레이터 소프트웨어 개발	■	■		■								
개발한 SW를 이용한 Target 야외공연장 주변 소음지도 작성 및 분석							■	■	■	■	■	■

<3차연도 야외 공연장 방사음향 특성분석 SW개발 연구개발 추진 일정>

라. 연구개발 성과

○ 국내외 논문 게재(학술지)

번호	수행기관명	논문명	학술지명	호	주저자명	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
2	호남대학교	야외공연장 공연 시 주변소음지도 작성 및 음원의 영향에 관한 연구	대한건축학회지		김흥식	비SCI	16.10

○ 국내외 논문 게재(학술대회)

번호	수행기관명	논문명	학술대회명	개최국	주발표자명	발표일
22	호남대학교	야외공연장 주변 소음지도 제작 및 노출인구 산정에 관한 연구	2016년도 추계 소음진동 학술대회	한국	조순형	16.10.20

○ 기술 요약정보

- 기술 명: 야외 공연장 방사음향 특성분석 SW

- 요약 내용: 소음지도를 이용하여 야외공연장의 방사소음을 예측하는 기술이다. 야외공연장 음원을 정의하는 소프트웨어와 소음지도 작성 소프트웨어로 구성된다. 기존의 소음지도 프로그램(Cadna 또는 SoundPLAN)을 이용하여 야외공연장 주변의 소음지도를 작성하여 소음도를 파악할 수 있다.
- 기술 완성도: 기술 개발 진행 중

마. 연구 결과

- 기술적 성과: 본 기술은 야외공연장의 음원 데이터를 실측하여 음원 모델링을 통해 소음지도를 작성하는 방법에 대한 기술이다. 현재 국내와 국외에서 소음지도와 관련하여 실측 데이터를 이용한 mapping 방법과 소음원 모델을 이용한 예측 방법들이 개발돼 있다. 그러나 야외공연장에 대한 실측 사례는 매우 미비 하며 소음원 모델 또한 개발되어 있지 않다. 이러한 배경에서 본 기술은 야외공연의 음원을 모델링하여 상용 소음지도 작성 프로그램(Cadna, SoundPLAN 등)에서 활용할 수 있다는 점에서 개발의 의의가 있다. 개발한 내용은 향후 야외공연장의 소음도 예측과 방지를 위한 기술 개발에 활용될 수 있으며, 야외공연의 법적 소음 규제기준 및 실행방법을 마련하는 데에도 이용될 수 있다. 개발한 기술은 대한건축학회지와 2016 추계 소음진동 학술대회에 발표했다.

3-2. 사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술 1: Double-layer 스피커 어레이

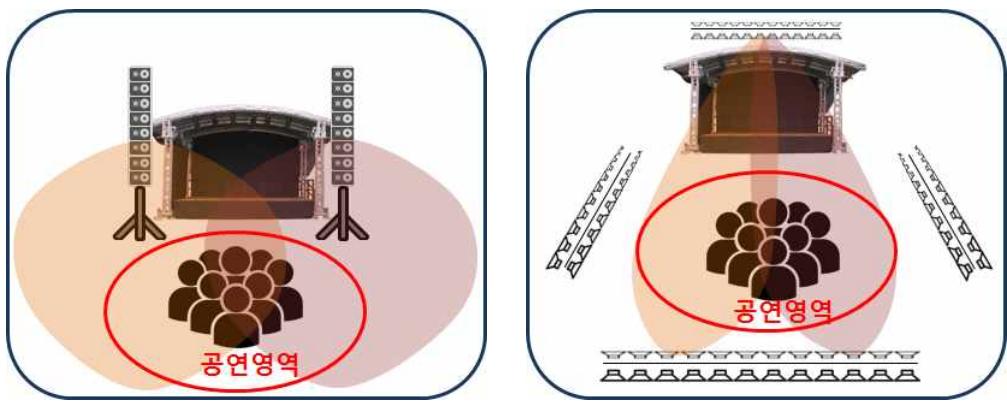
가. 1차연도 연구 내용 및 결과

연구 목표	사운드포커싱 기술의 적용 가능성 검토
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 축소모델을 이용한 내부 스테레오사운드 구현기술 개발 및 내외부 음압차 형성기술 개발 - 효율적인 음장제어를 위한 Double-layer 스피커어레이의 모양과 제어영역 음장 간의 관계규명
연구 결과	<ul style="list-style-type: none"> - 스테레오 구현 가능성 및 음압차 형성 가능성 확인 - “2D-array 제어” 또는 “1D-array 조합제어”의 특징을 이론적으로 검증

■ 축소모델을 이용한 내부 스테레오사운드 구현기술 개발 및 내외부 음압차 형성기술 개발

Double-layer 스피커 어레이 기반 야외공연장 누설소음제어는 새로운 야외공연장 음향시스템을 제안하는 것으로 스피커의 Double-layer 어레이구조 및 이를 활용하기 위한 알고리즘개발에 초점이 맞춰져 있다.

기존 야외공연장 음향시스템은 그림 3.2.1 (a)와 같이 무대 정면에 위치한 스피커 시스템이 청중이 위치한 공연영역에 넓고 고른 음압이 재생되도록 운영되기 때문에 공연장 외부로 누설되는 소음을 차단할 수 없다. 그러므로 본 연구팀이 제안하는 그림 3.2.1 (b)는 야외공연장에서 공연영역에 음압을 재생하는 동시에 외부로 누설되는 음압을 차단하는 역할이 수행 가능하도록 스피커 구조 및 알고리즘을 개발하는 것이 목표이다.



(a) 기존 스피커 시스템 개념도
 (b) 제안하는 스피커 시스템 개념도
 그림 3.2.1 야외공연장의 기존 스피커 시스템 대비 제안하는 스피커 시스템의 개념도

① Double-layer 스피커 어레이의 내부에 스테레오 사운드 구현

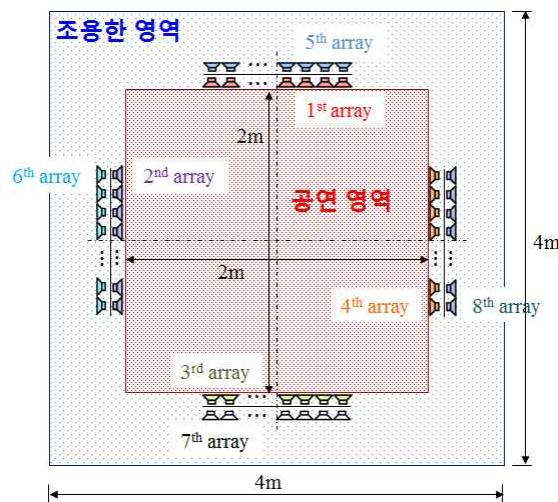
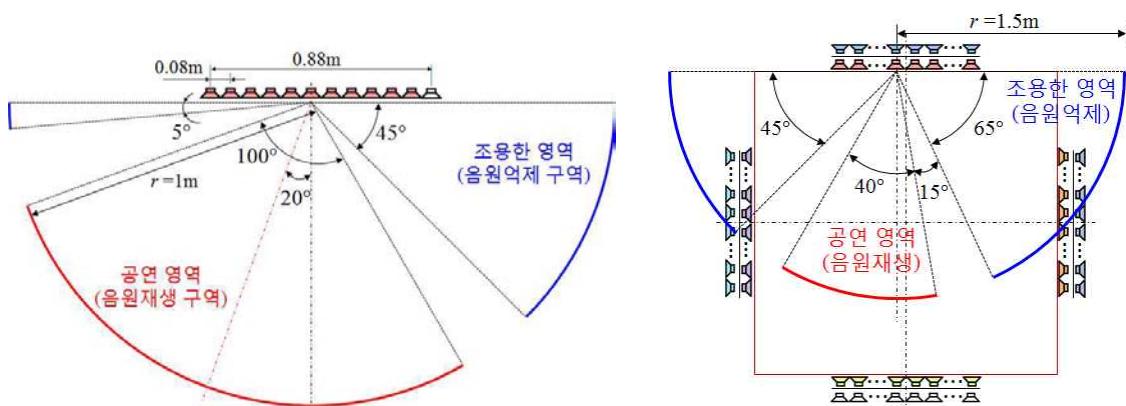


그림 3.2.2 Double-layer 스피커 시스템의 축소모델

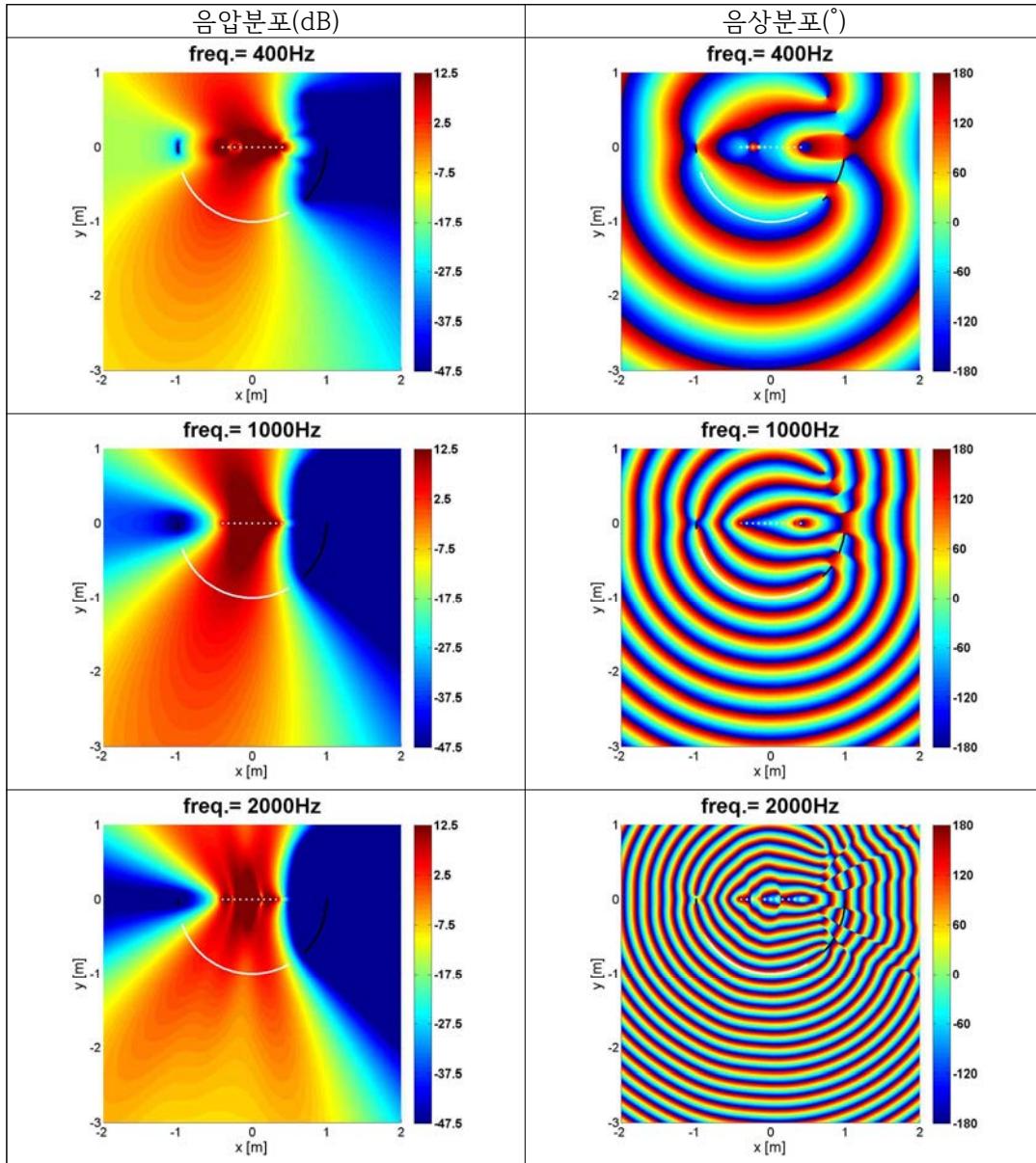


(a) 1st array를 이용한 넓은 빔폭의 제어 가능성 검증구성 (b) 선형어레이 조합의 영향 검증구성
 그림 3.2.3 알고리즘 개발에 적용된 시뮬레이션구성

스테레오 음원을 형성하기 위하여 그림 3.2.2와 같이 좌측으로 20° 또는 10° 로 조향된 빔을 형성시킬 수 있는지 여부, 공연영역의 음상이 균일하게 형성되는지 여부로 스테레오 사운드 구현가능성을 검토하였다.

- 1st 선형어레이가 넓은 빔폭 형성 및 음압차 유지 가능성에 대한 알고리즘 검토

표 3.2.1 넓은 빔폭을 갖도록 설계된 선형어레이 스피커시스템의 시뮬레이션 결과
(시뮬레이션 구성 그림 3.2.3 (a)참조)

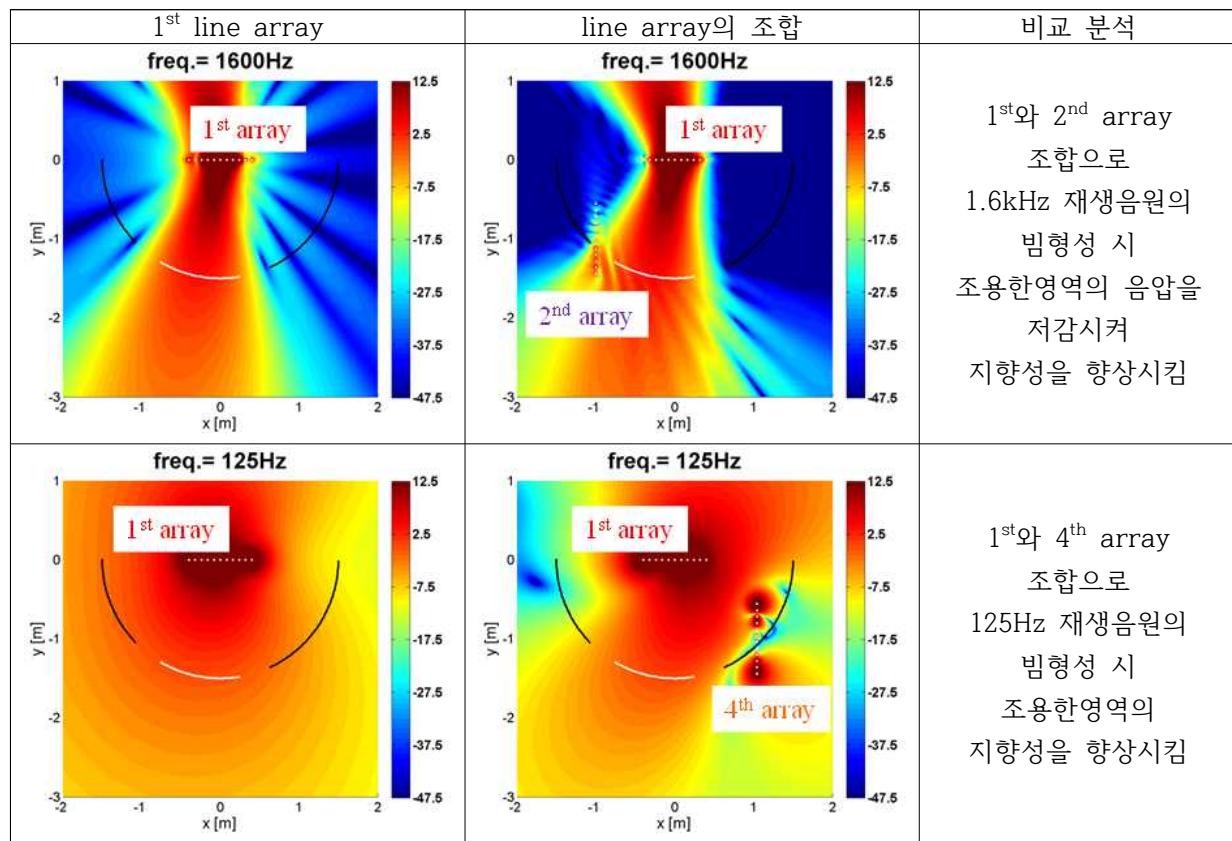


스피커 간격대비 높은 주파수에서도 비교적 넓은 빔폭으로 빔 형성 및 고른 음상 분포가 가능함을 확인 할 수 있다.

- Double-layer 스피커 어레이를 구성하는 선형어레이의 조합에 따른 내부 공연영역의 제어가능성 검토

그림 3.2.2와 같이 Double-layer 스피커 어레이의 축소모델을 성립하여 공연영역의 제어가능성을 검토하였으며, 1st array만으로 제어되는 것 대비 선형어레이의 조합으로 제어하였을 때 어떠한 특징이 나타나는지 시뮬레이션으로 확인 하였다.

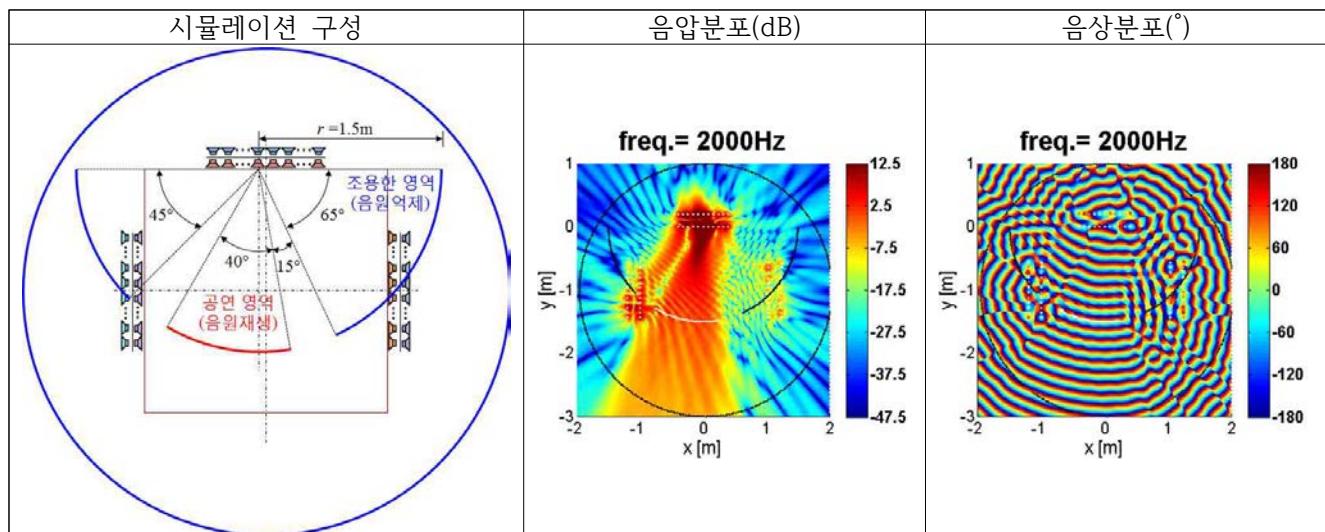
표 3.2.2 선형어레이 조합제어가 갖는 특징 비교 시뮬레이션 결과
(시뮬레이션 구성 그림 3.2.3 (b)참조)



선형 스피커 어레이의 조합을 통해 갖게 되는 장점을 활용하여 Double-layer 스피커 어레이기반의 운영알고리즘 개발에 특성을 반영, 특정주파수에서는 각 선형어레이의 선형조합을 통하여 최적의 빔형성 생성이 가능함을 확인하였다.

② 내·외부 스피커 어레이간의 음압차 형성

표 3.2.3 내외부 음압차 형성 시뮬레이션 결과



본 기술의 핵심은 조향된 빔이 비교적 균일한 음상을 유지하고 또한, 외부에 위치한 스피커 어레이 제어를 통해 내·외부 음압차를 형성시키는 것이 가능하며 구현할 수 있는가에 대한 것이다. 시뮬레이션 결과를 통해 1st&5th, 2nd&6th 및 4th&8th 조합의 double-layer 스피커어레이 시스템이 원하는 방향으로 빔을 형성시키고 다른 방향에서는 음압을 최소화하는 것이 가능함을 확인 하였다.

■ 효율적인 음장제어를 위한 Double-layer 스피커어레이의 모양과 제어영역 음장 간의 관계규명

본 연구에서는 공연영역과 조용한 영역을 효율적으로 운영하기 위하여 Double-layer 스피커 어레이 시스템을 제안하였다. 스피커 어레이 시스템에서 “제어 영역”은 “스피커를 어떻게 배치하느냐”와 “스피커에 어떤 입력신호(음압, 위상차)를 넣어주느냐”에 따라 바뀌게 된다. 사각형으로 구성된 공연영역을 효율적으로 운영하기 위하여 그림 3.2.4와 같이 2D-array 제어 와 1D-array 조합제어의 장·단점을 이론적으로 확인하였다. 그리고 선택된 제어방식을 통하여 최종적으로 어레이 형상에 따른 제어가능영역 예측에 활용되었다.

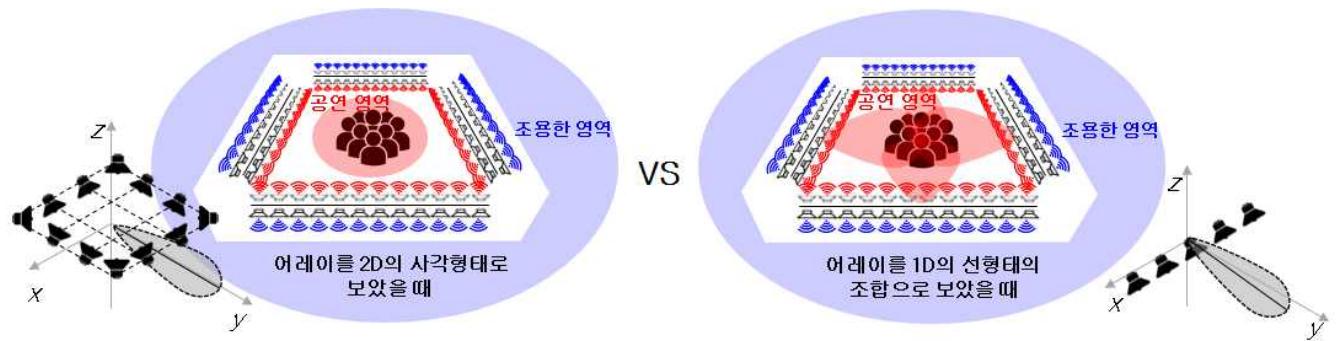


그림 3.2.4 공연영역을 효율적으로 운영하기 위한 제어방식선택: 2D-array 제어 vs. 1D-array 조합제어

스피커 어레이에 의한 제어영역의 형상(빔 패턴)은 주파수에 따라 다음의 식으로 정의 된다.

$$B(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n^* \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} [p_{x_n} \sin \theta \cos \phi + p_{y_n} \sin \theta \sin \phi + p_{z_n} \cos \phi]\right) \quad (3.2.1)$$

w_n : 스피커의 순번에 따른 필터의 복소 계수(스피커의 입력신호와 연관됨)

λ : 주어진 주파수에서 파장의 길이

p_{xn} , p_{yn} , p_{zn} : 스피커의 위치

θ : 스피커 어레이 중심에서 제어영역의 편각

ϕ : 제어영역의 방위각

$B(\theta, \phi)$: 특정 주파수에서 편각과 방위각에 따른 음압의 크기

본 연구에서는 “2D-array 제어” 또는 “1D-array 조합제어”를 선택하기 위하여 어레이 성능을 평가하는 평가지수인 “어레이 이득(Array Gain)”과 “지향성(Directivity)”을 검토하였다. 여기서 어레이이득은 “한 개의 신호잡음비(SNR)에 비해 어레이의 신호잡음비가 얼마나 증가하였는가”를 의미하며, 지향성은 “평균 방사에너지에 대비 목표하는 방향의 방사에너지 비율”을 의미한다.

① 어레이 이득

각 스피커의 입력

$$\tilde{x}_n(t) = f(t) + n_n(t) \quad (n=0, \dots, N-1) \quad (3.2.2)$$

여기서 $f(t)$ 는 원 신호이며 $n_n(t)$ 는 노이즈이다. 아래첨자 n 은 스피커의 순번을 뜻한다.

이 신호에 필터 계수를 곱한 후 어레이에 의한 제어영역의 특정 지점에서 음압은 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{y}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h^T \tilde{x}(t - \tau - \tau_n) d\tau \quad (3.2.3)$$

여기서 h 는 전달함수이며, τ_n 은 스피커 위치에 따른 도달 시간의 차이이다.

출력 스펙트럼

$$S_y(\omega) = H^T(\omega) S_x(\omega) H^*(\omega) = \mathbf{w}^H S_x(\omega) \mathbf{w} \quad (3.2.4)$$

여기서 $S_x(\omega)$ 는 입력 스펙트럼을 의미한다.

입력신호의 신호와 잡음을 각각 S_f , S_n 으로 표현하면 어레이 이득은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\text{SNR}_{\text{Array}}(\omega)}{\text{SNR}_{\text{Sensor}}(\omega)} = \frac{\frac{1}{\|\mathbf{w}\|^2} \frac{S_f}{S_n}}{\frac{S_f/S_n}{S_f/S_n}} = \frac{1}{\|\mathbf{w}\|^2} \quad (3.2.5)$$

그러므로 어레이 이득은 입력신호가 목표하는 방향에서 온전히 출력신호로 나타나는 가정 하에서 필터 계수의 유클리디안 놈(Norm)의 자승에 역수가 되게 된다.

② 지향성

$$\text{정의} \quad D = \frac{\left| B(\theta_T, \phi_T) \right|^2}{\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |B(\theta, \phi)|^2 \sin \theta d\theta d\phi} \quad (3.2.6)$$

여기서 아래첨자 T 는 Target(목표하는 방향)의 약자이며 B 가 정규화 되어있다고 가정하면 분자항은 1이 되게 된다.

스피커가 바닥에 있어 2D평면에 있다고 가정한다면 빔 패턴은 다음과 같다.

$$B(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n^* \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} [p_{x_n} \sin \theta \cos \phi + p_{y_n} \sin \theta \cos \phi]) \quad (3.2.7)$$

식(6)의 분모항을 DEN 이라 정의 후 다음과 같이 표현가능하다.

$$\begin{aligned} DEN &\doteq \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |B(\theta, \phi)|^2 \sin \theta d\theta d\phi \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} w_n^* w_m \int_0^\pi \frac{1}{2} \sin \theta \int_0^{2\pi} \frac{1}{2\pi} \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta [p_{nm} \cos(\phi - \phi_{nm})]\right\} \sin \theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (3.2.8)$$

$$\text{여기서 } p_{nm} = \sqrt{\Delta p_{x_{nm}}^2 + \Delta p_{y_{nm}}^2}, \quad \phi_{nm} = \tan^{-1} \frac{\Delta p_{x_{nm}}}{\Delta p_{y_{nm}}}$$

식(3.2.8)을 베셀함수로 표현하여 정리하면 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$DEN = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} w_n^* w_m \operatorname{sinc}\left(\frac{2\pi}{\lambda} p_{nm}\right) \quad (3.2.9)$$

식(3.2.9)의 sinc함수 내부를 살펴보면 p_{nm} 이 존재하는데 이것은 위에서 정의한 n번째 스피커와 m번째 스피커들 간의 거리를 뜻한다. sinc함수의 특징으로 내부가 π 의 정수배가 되면 0이 되는 특징을 갖고 있다.

표 3.2.4 2D-array 제어와 1D-array 조합제어의 차이점

구분	2D 사각형 어레이	1D 선형 어레이 조합
제어영역 형상	$B(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n^* \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} (p_{x_n} \sin \theta \cos \phi + p_{y_n} \sin \theta \sin \phi + p_{z_n} \cos \theta))$	
Array Gain		$\frac{SNR_{Array}(\omega)}{SNR_{Sensor}(\omega)} = \frac{1}{\ w\ ^2}$
Directivity	$D = \frac{1}{\sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} w_n^* w_m \operatorname{sinc}\left(\frac{2\pi}{\lambda} p_{nm}\right)}$	$p_{nm} \text{이 } \lambda/2 \text{의 정수 배로만 이루어지도록 만들 수 없음. 따라서 } D \neq 1/\ w\ ^2$
결론	Array Gain \neq Directivity	Array Gain = Directivity

그리므로 Double-layer스피커 어레이기반의 소음제어 개발 시 “1D-array 조합제어” 방식이 협대역에서 어레이 이득 및 방향성을 동시에 향상시킬 수 있는 장점을 이론적으로 검증되었기 때문에(표 3.2.4 참조) “1D-array 조합제어”로 제어방식을 선정하였다.

<1차연도 Double-layer 스피커 어레이 연구개발 추진 일정>

연구내용	1차연도 월별 추진일정											
	0월	0월	0월	0월	0월	0월	0월	0월	12월	1월	2월	3월
실험실 레벨의 Double-layer 스피커 어레이 축소모델 구축												
Double-layer 스피커 어레이 구성모양에 따른 제어영역 음장의 변화도 파악												

나. 2차연도 연구 내용 및 결과

연구 목표	사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술 알고리즘 개발
연구 내용	- 공연 영역 형성 음장과 유출음 사이의 성능 조절 가능 알고리즘 개발
연구 결과	- 공연 영역 형성 음장과 유출음 사이의 성능 조절 가능 알고리즘

■ 공연 영역 형성 음장과 유출음 사이의 성능 조절 가능 알고리즘 개발

공연영역 내부에서는 고른 음장이 형성되어야 하며, 공연영역 외부에서는 음압이 저감되어야 하는 것이 Double-layer 스피커 어레이 시스템의 목적이다. 우선

① 공연 영역에 형성되는 음장과 유출음 사이의 관계 분석

간단한 모델을 통해 공연영역 내부에 형성되는 음장과 유출음 사이의 관계를 분석하였다. 조건은 스피커 어레이 시스템에 입력되는 신호의 입력 파워와 공연영역 내부의 출력 크기에 제한이 걸렸을 경우이며 공연영역 내부에 형성되는 음장의 고른 정도에 따른 유출음의 크기를 비교하였다. 공연영역 내부에 형성되는 음장은 제어영역 설정 방식에 의해 결정된다.

제어영역 설정 방식에 따라 공연영역 내부와 외부지역의 음압차에 끼치는 영향은 그림 3.2.5에 나타나 있으며, 제어영역 설정 방식에 따라 공연영역에서의 음장 형성 오차에 끼치는 영향은 그림 3.2.6에 나타나 있다. LCMV1은 공연영역 내부에 형성되는 음장이 고르지 않으면서 내외부 음압차가 최대로 형성되며, LCMV2는 공연영역 내부에 형성되는 음장이 고르며 내외부 음압차가 크지 않게 형성된다.

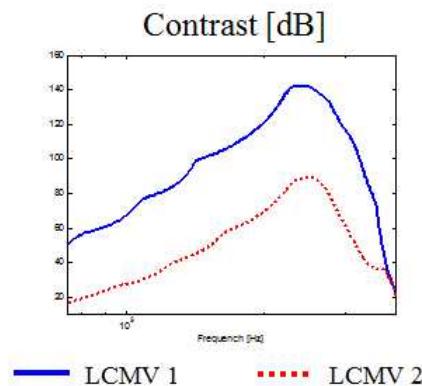


그림 3.2.5 제어영역 설정 방식에 따른 공연영역 내부와 외부의 음압차

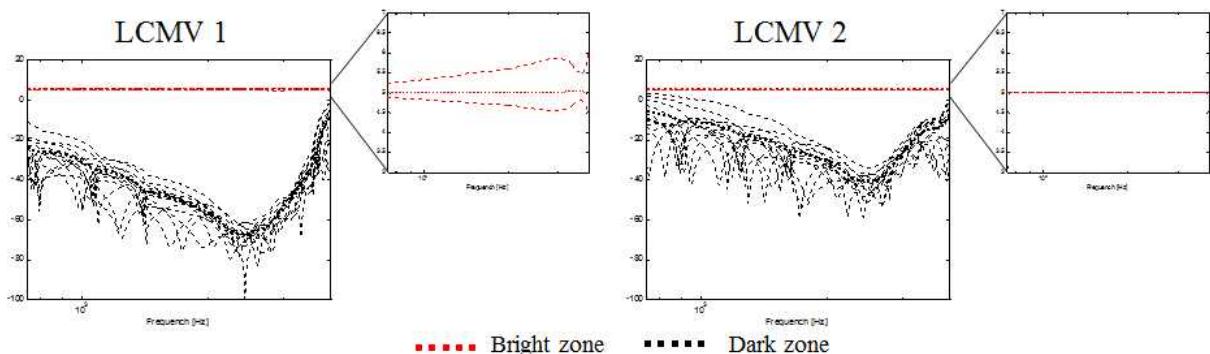


그림 3.2.6 제어영역 설정 방식에 따른 공연영역 내부에서의 음장 형성 결과

이를 통해 내외부 음압차 형성과 공연장 내부 음장 형성 사이에는 trade-off 관계가 있음을 확인하였다. 물리적인 한계로 내외부 음압차를 크게 형성하며 동시에 공연장 내부에는 고른 음장을 형성하는 것은 어려우며, 내부 음장 형성과 외부 유출음 사이의 중요도를 결정하는 알고리즘을 개발하는 것이 필요하다.

② 음장제어 알고리즘의 요구조건 및 제한조건

- 요구조건: 공연영역 내부 고른 음상, 내외부 음압차 형성

음장제어 결과, 공연영역 내부에는 고른 음상이 형성되어야 하며 내부와 외부의 음압차가 형성되어야 한다. 하지만 고른음상 형성과 음압차 형성 사이에는 trade-off 관계가 있다.

- 제한조건: 공연영역 출력, 스피커시스템 입력파워

음장제어 결과, 공연영역에서는 일정 출력을 내야하며 스피커시스템에 입력되는 파워는 일정량 이하여야 한다.

위 요구조건과 제한조건을 고려하여 개발한 알고리즘의 목표는 제한조건을 만족시키고, 두 요구조건 사이에 성능을 조절하는 것이다.

③ 공연 영역 형성 음장과 유출음 사이의 성능 조절 가능 알고리즘 개발

공연영역의 출력크기 제한을 우선적으로 만족시키며 스피커시스템 입력파워, 공연영역 내부 고른 음상, 내외부 음압차 형성 성능 조절이 가능한 알고리즘을 개발하는 것이 목표이다. 어레이 시스템의 입력 파워와 공연영역으로 출력되는 출력이 제한조건으로 걸리면서 공연영역 내부 음압의 오차를 조절하며 전체 성능을 조절할 수 있다. 그림 3.2.7과 그림 3.2.8의 WSM은 공연영역 내부 음장이 3% 이하 오차를 갖도록 제어한 결과이다. 공연영역 내부 음장이 일정수준 이하의 오차가 발생되며, 음압차가 형성되는 결과를 보인다.

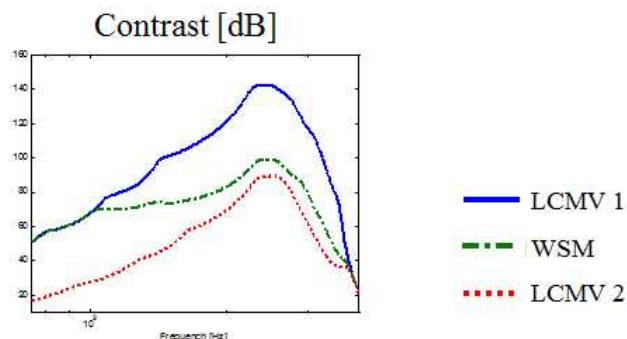


그림 3.2.7 제어영역 설정 방식에 따른 공연영역 내부와 외부의 음압차 (녹색: 개발한 알고리즘)

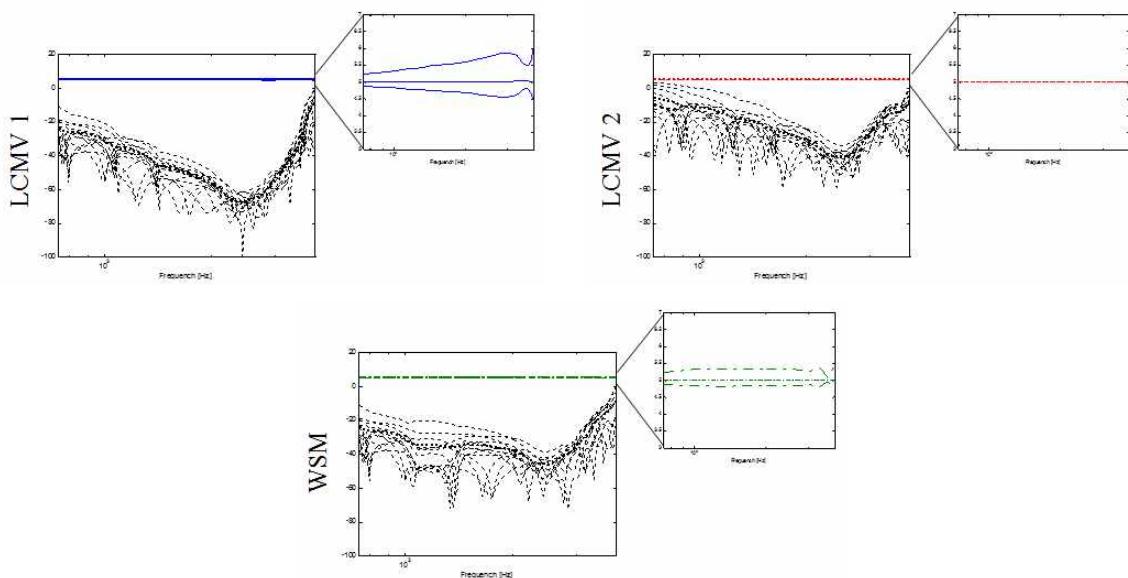


그림 3.2.8 제어영역 설정 방식에 따른 공연영역 내부에서의 음장 형성 결과 (녹색: 개발한 알고리즘)

개발된 알고리즘을 통해 최대 음압차와 공연영역에서 큰 오차를 가지는 제어방법(LCMV1)과 최소 음압차와 공연영역에서 작은 오차를 가지는 제어방법(LCMV2)에서 중간 설정된 성능을 만족시키는 제어해(WSM)를 찾을 수 있다. 요구되는 성능을 우선적으로 만족시킬 수 있는 제어 알고리즘이 확인됐다.

④ 공연 영역 형성 음장과 유출음 사이의 성능 조절 가능 알고리즘

알고리즘 개발에 사용된 목적함수는 다음과 같다.

$$\min . J = (1-\kappa) \left[\eta(\mathbf{t} - \mathbf{G}_b \mathbf{q})^H (\mathbf{t} - \mathbf{G}_b \mathbf{q}) + (1-\eta)(\mathbf{t} - \mathbf{b} \mathbf{G}_b \mathbf{q})^H (\mathbf{t} - \mathbf{b} \mathbf{G}_b \mathbf{q}) \right] \\ + \kappa (\mathbf{G}_d \mathbf{q})^H (\mathbf{G}_d \mathbf{q}) + \beta \mathbf{q}^H \mathbf{q}$$

\mathbf{G}_b

\mathbf{G}_d

\mathbf{q}

\mathbf{t}

(3.2.10)

: 스피커 시스템으로부터 공연영역으로의 전달함수

$$\mathbf{q} = \left[(1-\kappa) \left\{ \eta \mathbf{G}_b^H \mathbf{G}_b + (1-\eta) (\mathbf{b} \mathbf{G}_b)^H (\mathbf{b} \mathbf{G}_b) \right\} + \kappa \mathbf{G}_d^H \mathbf{G}_d + \beta \cdot \mathbf{I} \right]^{-1} (1-\kappa) \left[\eta \mathbf{G}_b^H \mathbf{t} + (1-\eta) (\mathbf{b} \mathbf{G}_b)^H \mathbf{t} \right]$$

식 3.2.10 목적함수의 해는 다음과 같다.

$\kappa \approx 0$

η

β

$\kappa \approx 0$

$\eta = 0, \beta = 0$

은 공연영역 내부 고온 음장과 내외부
유압차 형성 성능을 조절.

η

는 스피커시스템 입력파워를 조절한다.

- 제어 해 구하는 방법
(1) 다른 음장

β

$\eta \quad \beta$

에는 공연영역의 출력이 반영돼있다.

(2)

으로 설정한다.

(3)

으로 설정하고 제어 해를 구한다.
(4) 공연영역 내부 고온 음장이 만들어지지 않을 경우

(5) 스피커시스템 입력파워가 0인 경우

을 증가

(6) 원하는 성능을 이루는

(7) 제어²도파수 범위 내에서 위 과정을 모두 61 -
<2단계도 Double-layer 스피커 이하의 관 구조를 추진 일정>

연구내용	2차연도 월별 추진일정											
	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월
Double-layer 스피커 어레이구성 대비 공연영역의 사이즈에 따른 제어성 분석 및 소음 억제기술 개발	■	■	■	■	■	■	■					
공연영역의 음상을 고르게 하는 Double-layer 스피커 어레이의 지향성 제어기술 개발						■	■	■	■	■	■	■

다. 3차연도 연구 내용 및 결과

① 공연음 재생과 소음 억제 과정을 분리

기존의 소리를 집중시키는 음장 제어기술은 공연영역(Bright zone)과 저감영역(Dark zone)의 음장을 동시에 제어하였다. 공연영역에서의 좋은 성능은 재생음의 음질을 저하시키지 않는 것이고, 저감영역에서의 좋은 성능은 소음(공연음)을 저감시켜 낮은 음압을 유지하는 것이다. 하지만 이 둘은 trade-off 관계로 공연영역에서의 성능과 저감영역에서의 성능을 동시에 제어하는 경우 서로 미치는 영향으로 그 성능을 제어하기 어려운 단점이 있다. 두 영역을 동시에 제어하는 대신, 우선 재생영역에서 형성하고자 하는 음장을 만들고 그 이후에 재생으로 인한 소음을 저감영역에서 다시 제어하여 음압을 줄이면 서로간에 발생하는 간섭을 파악하는데 용이하다. 기존 공연영역과 저감영역을 동시에 제어하는 대신 다음과 같은 과정을 갖는 제어 방법을 제안한다.

- 공연영역에 재생을 위한 음장을 우선 형성. 이 경우 주 음원(primary source)에 의한 음장이 공연영역과 저감영역에 모두 형성됨. 이를 각각 \mathbf{p}_{bp} \mathbf{p}_{dp}

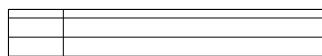
$$\mathbf{p}_{bs}$$

$$\mathbf{p}_{ds}$$

(주 음원에 의한 공연영역에서의 음장).

(제어 음원에 의한 공연영역에서의 음장).
자감영역에서의 음장이라 할. 주 음원은 오노.. 스태레오.. 어레이 등 어떠한 형태로 가능하되 공연영역에서의 음장에서도 가능.
- 제어 음원을 통해 저감영역의 음압을 낮추기 위한 제어를 수행. 이 때 제어 음원(secondary source)에 의한 음장이 공연영역과 저감영역에 모두 형성됨. 이를 각각

$$J = \kappa (\mathbf{p}_{dp} + \mathbf{p}_{ds})^H (\mathbf{p}_{dp} + \mathbf{p}_{ds}) + (1 - \kappa) \mathbf{p}_{bs}^H \mathbf{p}_{bs} + \beta \mathbf{q}_s^H \mathbf{q}_s$$



(제어 음원에 의한 공연영역에서의 음장).

$$\min J = \kappa (\mathbf{G}_{dp} \mathbf{q}_p + \mathbf{G}_{ds} \mathbf{q}_s)^H (\mathbf{G}_{dp} \mathbf{q}_p + \mathbf{G}_{ds} \mathbf{q}_s) + (1-\kappa) (\mathbf{G}_{bs} \mathbf{q}_s)^H (\mathbf{G}_{bs} \mathbf{q}_s) + \beta \mathbf{q}_s^H \mathbf{q}_s$$

- 식(3.2.13)에서

$$\mathbf{G}_{dp}$$

$$\mathbf{G}_{ds}$$

$$\mathbf{G}_{bs}$$

$$\mathbf{q}_p \quad \mathbf{q}_s$$

는 각각 주음원과 저감영역 사이의 전달값.

는 주 음원과 저감영역 사이의 전달값을 나타낸다.

와

는 저음원과 저감영역 사이의 전달

복소증원
- 저음원의 복소해는 다음 식으로 구함

$$\mathbf{q}_s = -\frac{\kappa \mathbf{G}_{ds}^H \mathbf{G}_{dp} \mathbf{q}_p}{(1-\kappa) \mathbf{G}_{bs}^H \mathbf{G}_{bs} + \kappa \mathbf{G}_{ds}^H \mathbf{G}_{ds} + \beta \cdot \mathbf{I}}$$

- β 는 정규화(regularization)를 위해 사용되며, 저음원이 과도한 크기를 갖게 하는 것도 방지할

그림 3.2.9와 같이 소파거와 마이크로폰을 배치하고, 제어 영역을 설정한다. 1개의 주 음원을 사용하고, 제어 음원은 제어 후 음원이 감소하는 결과를 보인다.

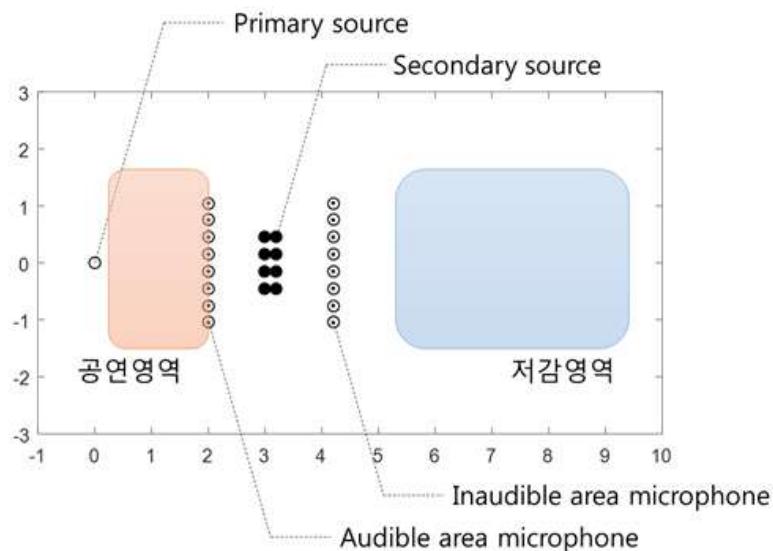
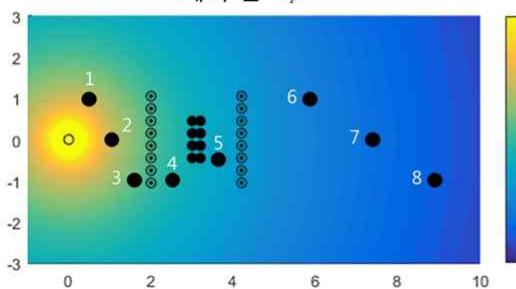


그림 3.2.9 제어 영역의 정의

제어 전 \mathbf{q}_p



제어 후 $\mathbf{q}_p + \mathbf{q}_s$

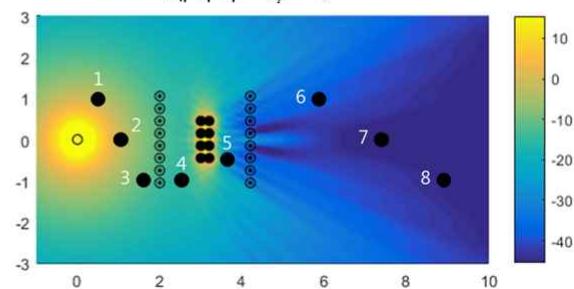


그림 3.2.10 제어 전·후 결과 비교, 전 주파수 파워의 합을 도시

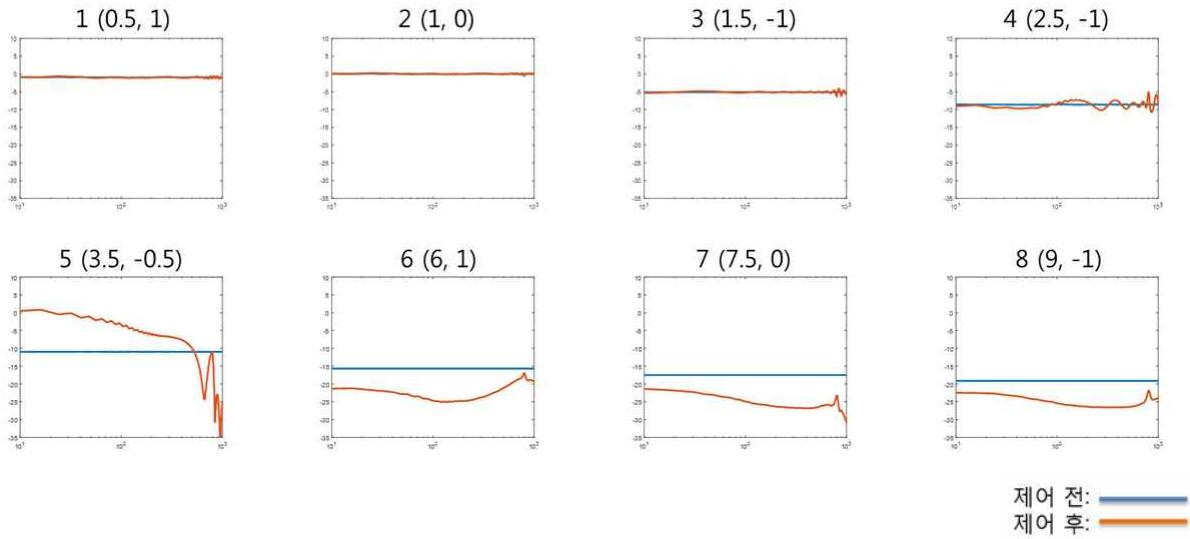


그림 3.2.11 제어 전·후 결과 비교, 각 지점에서의 제어 전·후의 주파수 응답

② 이산화된 double-layer 스피커 어레이의 적용

넓은 영역을 효율적으로 제어하기 위하여 double-layer 스피커 어레이를 적용하였다. Double-layer 스피커 어레이에서 발생하는 제어음이 공연영역에 미치는 영향을 조절하는 계수를 적용할 수 있다. 저감영역을 다수 지정하고 계수를 통해 저감 비율을 조절하도록 하는 제어 식을 도출하였다. κ 를 통해 공연영역에서의 성능, 저감영역에서의 성능 사이의 가중치를 결정하고 c_n 을 통해 영역별 저감 가중치를 설정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \min J = & \kappa \left[c_1 \left(\mathbf{G}_{d1p} \mathbf{q}_p + \mathbf{G}_{d1s} \mathbf{q}_s \right)^H \left(\mathbf{G}_{d1p} \mathbf{q}_p + \mathbf{G}_{d1s} \mathbf{q}_s \right) + \dots + c_N \left(\mathbf{G}_{dNp} \mathbf{q}_p + \mathbf{G}_{dNs} \mathbf{q}_s \right)^H \left(\mathbf{G}_{dNp} \mathbf{q}_p + \mathbf{G}_{dNs} \mathbf{q}_s \right) \right] \\ & + (1-\kappa) \left(\mathbf{G}_{bs} \mathbf{q}_s \right)^H \left(\mathbf{G}_{bs} \mathbf{q}_s \right) + \beta \mathbf{q}_s^H \mathbf{q}_s \end{aligned}$$

$$\mathbf{q}_s = -\frac{\kappa \left(c_1 \mathbf{G}_{d1s}^H \mathbf{G}_{d1p} \mathbf{q}_p + \dots + c_N \mathbf{G}_{dNs}^H \mathbf{G}_{dNp} \mathbf{q}_p \right)}{(1-\kappa) \mathbf{G}_{bs}^H \mathbf{G}_{bs} + \kappa \left(c_1 \mathbf{G}_{d1s}^H \mathbf{G}_{d1s} + \dots + c_N \mathbf{G}_{dNs}^H \mathbf{G}_{dNs} \right) + \beta \cdot \mathbf{I}}$$

식(3.2.15)의 해는 다음과 같다.

이산화된 double-layer 스피커 어레이를 그림 3.2.21와 같이 적용하였고, 적용한 결과는 그림 3.2.22, 3.2.23과 같다. 제어 전후를 비교해보면, 공연영역에서는 전과 후의 주파수 응답이 거의 차이가 없지만 시 감영역에서는 적용은 8dB, 암개는 16dB 저감영드의 경우 12dB의 저감 성능을 보인다.

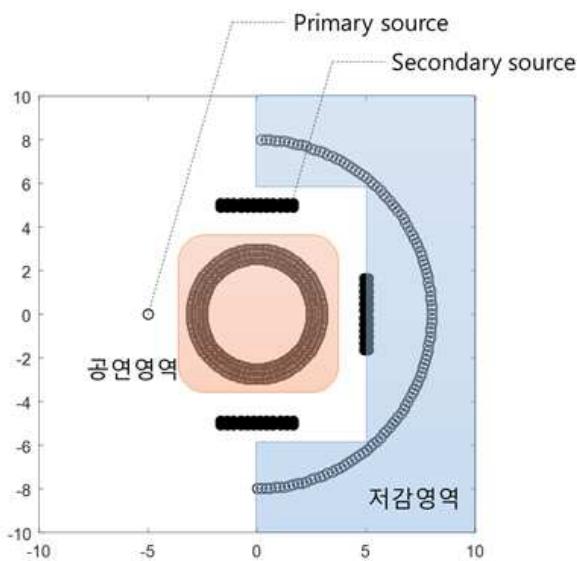


그림 3.2.21 제어 영역의 정의

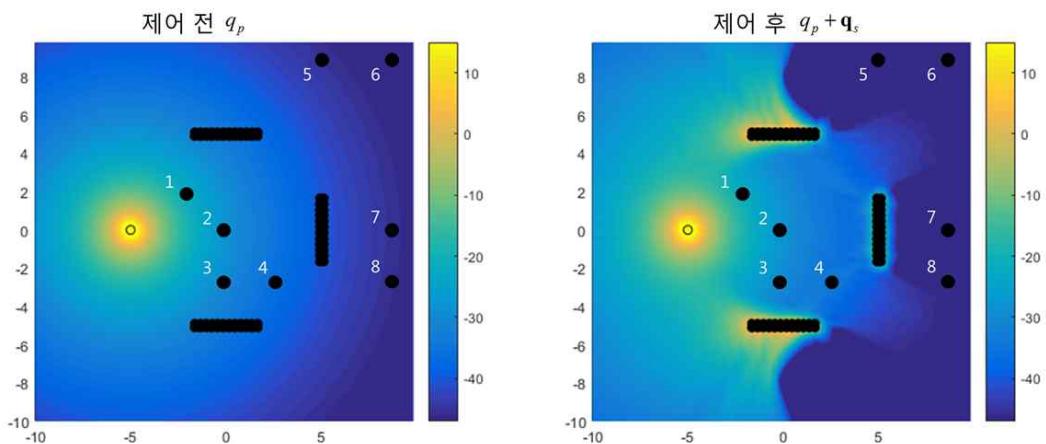


그림 3.2.22 제어 전·후 결과 비교, 전 주파수 파워의 합을 도시

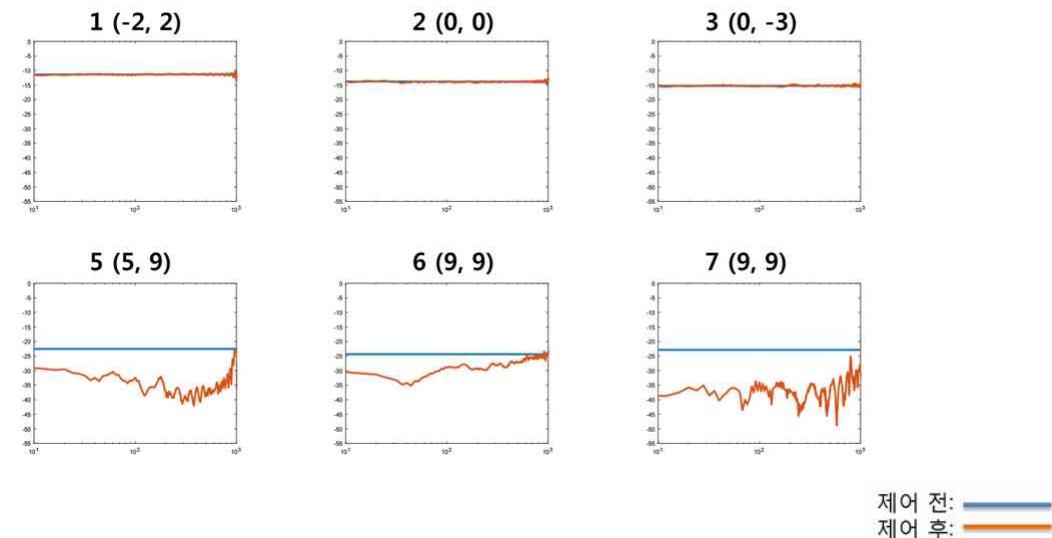


그림 3.2.23 제어 전·후 결과 비교, 각 지점에서의 제어 전·후의 주파수 응답

③ 이산화된 double-layer 스피커 어레이의 배치

이산화된 double-layer 스피커 어레이의 배치 방식에 따라 저감영역의 형태, 크기, 음압이 달라지게 된다. 지역별로 저감 가중치가 높은 곳을 선별적으로 스피커 어레이를 배치하면 소음을 저감시키는데 효과적이다.

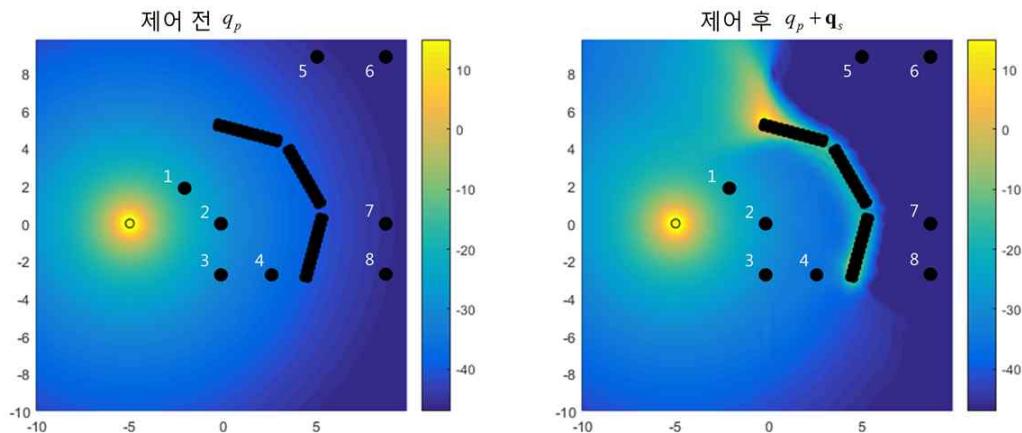


그림 3.2.23 제어 전·후 결과 비교, 전 주파수 파워의 합을 도시

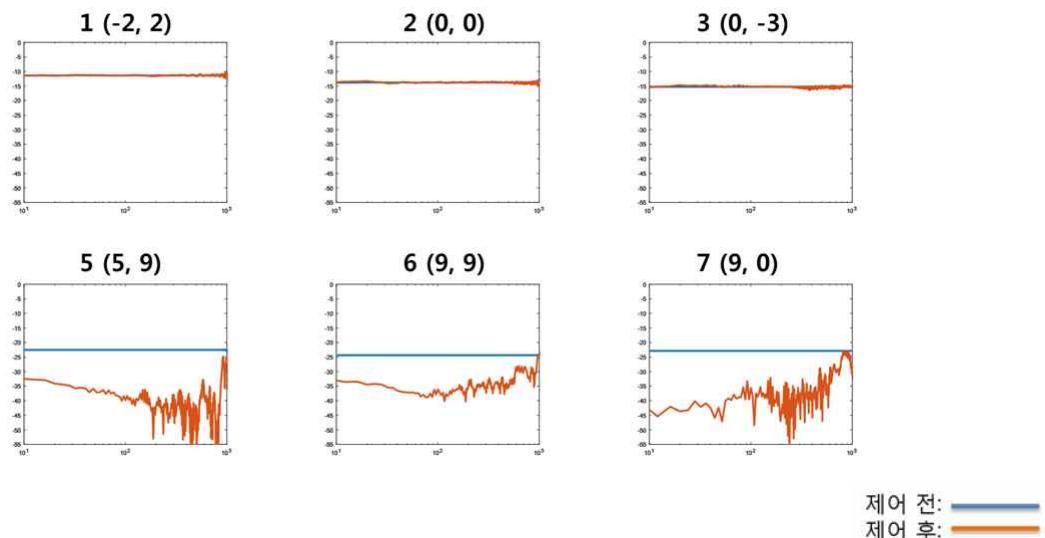


그림 3.2.24 제어 전·후 결과 비교, 각 지점에서의 제어 전·후의 주파수 응답

<3차연도 Double-layer 스피커 어레이 연구개발 추진 일정>

연구내용	3차연도 월별 추진일정											
	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월
Double-layer 스피커 어레이의 이산화 및 최적배치 연구(야외공연장 주변에 따른 제어가중치 제어)												
음질 저하 최소화 연구												

라. 연구개발 성과

○ 국내외 논문 게재(학술대회)

번호	수행기관명	논문명	학술대회명	개최국	주발표자명	발표일
1	광주과학기술원	Sound focusing and its practical applications	International Congress on Sound and Vibration 22	이탈리아	왕세명	15.07.12
2	광주과학기술원	Sound Projection and Capture	APVC 2015	베트남	왕세명	15.11.24
3	광주과학기술원	라우드스피커 어레이를 이용한 개인 음향 시스템의 재생 정확성 평가에 대한 연구	2015년도 추계 소음진동 학술대회	한국	유호민	15.04.22
4	광주과학기술원	Reproduction accuracy evaluation at the audible region of loudspeaker array beamforming	International Congress on Sound and Vibration 22	이탈리아	유호민	15.07.12
5	광주과학기술원	The influences of the bright zone objective function on the sound field control	Inter-Noise 2015	미국	유호민	15.08.09
6	광주과학기술원	라우드스피커 어레이를 이용한 영역 집중 기술의 음향학적 밝은영역 설정 방식에 따른 성능 비교	2015년도 추계 소음진동 학술대회	한국	유호민	15.10.28
7	광주과학기술원	Regional focusing in a large space	International Congress on Sound and Vibration 23	그리스	유호민	16.07.11
8	광주과학기술원	Performance Comparison of filters designed in time and frequency domains for personal audio	2016 AES International Conference on Sound Field Control	영국	유호민	16.07.19
9	광주과학기술원	야외공연장의 공연소음 억제를 위한 가상방음벽 기술 소개	2016년도 추계 소음진동 학술대회	한국	유호민	16.10.20
10	광주과학기술원	큰 공간에서의 라우드스피커 어레이를 이용한 영역집중 기술	2016년 한국음향학회 추계학술발표대회	한국	유호민	16.11.03

○ 기술 요약정보

- 기술 명: Double-layer 스피커 어레이 기반 무대 음향 시스템

- 요약 내용:

야외 공연장에서 객석 밖으로 퍼져나가는 모든 방향의 소음을 제어할 수 있는 무대 음향 시스템이다. Double-layer 스피커 어레이를 적용시킴으로써 소음 억제음이 공연장 내부로 전파하는 것을 최소화시킬 수 있다. 공연장 외부로 전파하는 소음은 저감시키며 공연장 내부에 미치는 영향은 최소화 시키는 음향 시스템이다.

- 기술 완성도: 기술 개발 진행 중

마. 연구 결과

- 기술적 성과: Double-layer 스피커 어레이의 공연영역 외부로 전파하는 소음을 저감시키는데 효과적이면서 동시에 제어음이 공연영역에 미치는 영향을 최소화 시킬 수 있다. 또한 이산화된 형태로 시스템을 구성하면 저감하는 영역을 선택적으로 구성할 수 있으며 저감 성능도 조절 가능하다. 하지만 많은 수의 스피커 어레이가 필요하기 때문에 설치와 유지에 단점이 있고, 이로 인해 상용화에도 어려운 점이 있다.

3-3. 사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술 2: Acoustic parasol

가. 1차년도 연구 내용 및 결과

연구 목표	사운드포커싱 기술의 적용 가능성 검토
연구 내용	- Acoustic parasol의 이론 확립 및 소규모 실험
연구 결과	- Acoustic parasol 개발을 위한 사운드 포커싱 기술 검토 - Zone control 실험

음향 파라솔(acoustic parasol)은 햇빛을 차단하기 위한 목적으로 제작된 기존 파라솔에 원하는 형상의 어레이 스피커를 배치시켜, 착석자들에게는 음향학적으로 높은 음압을 제공하며 반대로 파라솔 밖으로는 음학학적으로 낮은 음압을 만들어 파라솔에서 발생하는 소음을 주변으로 전파하는 현상을 최소화 할 수 있는 개인 청취 시스템이다. 음향 파라솔 개념을 야외 공연장에 적용하기 위한 가능성 여부를 검증함과 동시에 성능에 영향을 미치는 기하학적 또는 음향학적 변수들에 대한 영향을 이론 과 실험을 병행하여 고찰하는 것에 목적을 둔다.

해당 파트의 1차 년도의 연구목적은 작은 규모의 음향 파라솔을 제작하여 “영역 청취 공간”의 실현 가능성이 확인에 있으며, 그림 3.3.1는 설치된 실험 장치(음향파라솔)를 보여주고 있다. 진행된 축소 실험은 정립된 이론과 비교를 위하여 무향실에서 진행되었으며, 12개의 스피커로 이루어진 원형어레이로 구성된다. 그림 9는 실험 결과를 보여주고 있으며, 붉은색으로 표기한 영역은 음압이 높은 영역을 의미하며, 반대로 파란색은 음압이 낮은 영역을 나타낸다. 결론적으로 800Hz, 1000Hz, 1200Hz 주파수 대역에서 청취공간과 청취외공간 사이의 음향 에너지 비가 10 dB 이상 발생하며 이 실험 결과는 야외 공연장에 음향 파라솔 이론이 적용 가능함을 입증한다. <자세한 이론과 실험결과에 대한 고찰은 1차년도 [마일스톤2.3]연구노트.pdf]를 참조>

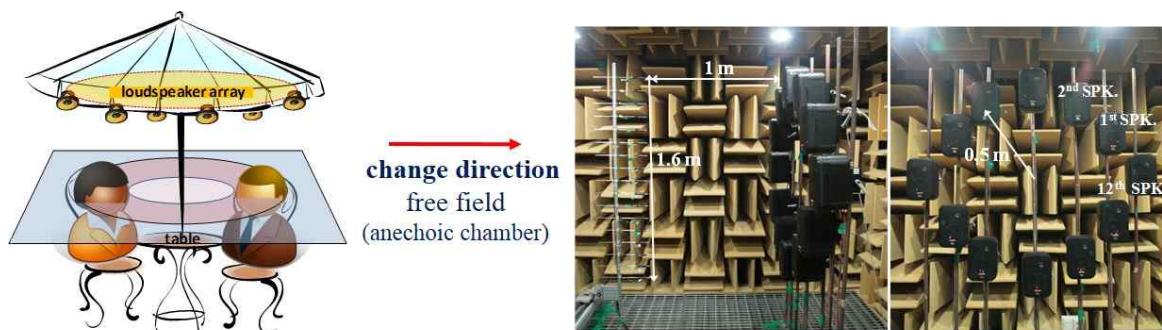


그림 3.3.1. Acoustic parasol을 이용한 Zone control

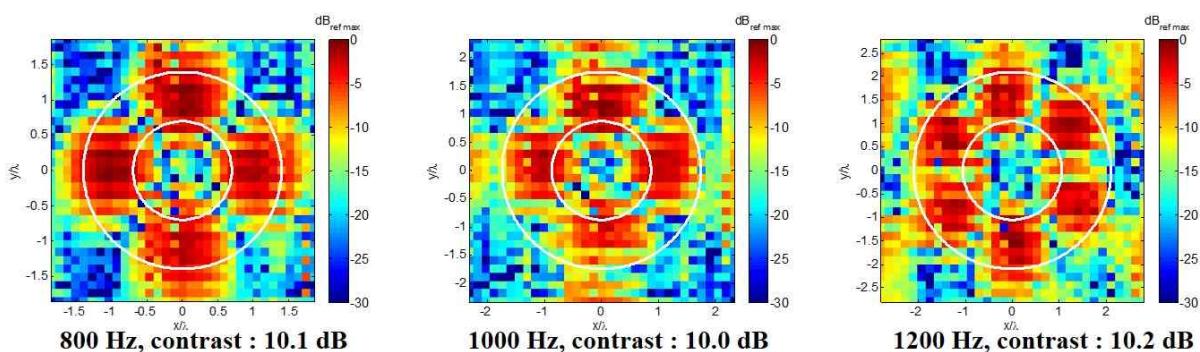


그림 3.3.2. Zone control 실험결과 (800Hz, 1000Hz, 1200Hz)

<1차연도 Acoustic Parasol 연구개발 추진 일정>

연구내용	1차연도 월별 추진일정											
	0월	0월	0월	0월	0월	0월	0월	0월	12월	1월	2월	3월
Acoustic parasol의 이론 확립										▨	▨	▨
Zone control 실험									▨	▨	▨	▨

나. 2차연도 연구 내용 및 결과

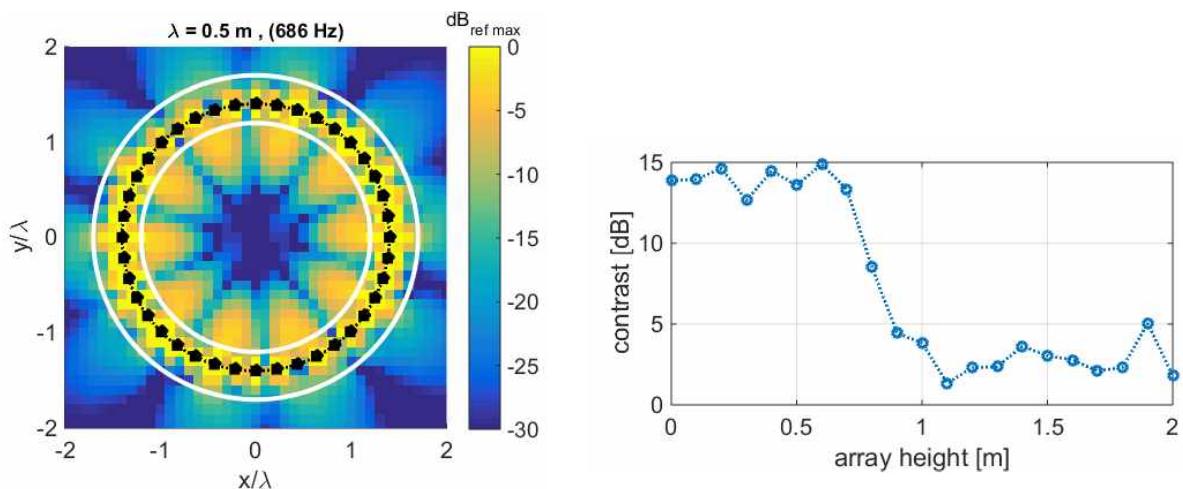
연구 목표	사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술 알고리즘 개발
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - Double-layer 스피커 어레이 구성을 통해 음향대조법(contrast control) 성능 극 대화 - 실험실 내 축소 규모 경우에 대한 24채널 double-layer 어레이 시스템 구현
연구 결과	<ul style="list-style-type: none"> - Double-layer 어레이 적용 가능성에 대한 이론 정립 및 시뮬레이션 결과, 24채널 double-layer 어레이 시스템 구성에 대한 연구노트- Double-layer 어레이 적용 시 음향대조법 제어 결과를 출력하는 MATLAB 기반 컴퓨터 시뮬레이터

① Contrast control algorithm 구현

제어 파라미터(주파수, 제어영역의 크기 및 형상, 스피커 어레이의 형상 및 스피커 개수) 입력 시 contrast control 제어 결과를 (1)공간 상 음 에너지 분포, (2)성능 평가 지표(contrast)를 제시하는 MATLAB 기반의 컴퓨터 시뮬레이터 구현했다

② Single-layer 스피커 어레이를 통한 contrast control

Single-layer 스피커 어레이 사용 시 그림 3.3.3(a)에서 음 에너지 분포와, 스피커 어레이 높이에 따른 제어 성능(contrast)을 그림 3.3.3(b)에서 확인할 수 있다. 스피커 어레이 높이가 낮을수록(제어영역[평면, 청취자들의 귀 높이로 가정])에 어레이가 가까이 위치할수록) 제어 성능이 향상되는 결과는 그림 3.3.3(b)에 표시되어있다.



(a) 음 에너지 분포 (스피커 높이: 0m[평면])

(b) 스피커 높이에 따른 contrast

그림 3.3.3. Single-layer 스피커 어레이를 통한 contrast control 제어 결과, 제어음원: 총 40개 monopole로 구성된 single-layer 스피커 어레이(검정색 점), 밝은 공간(공연장 내부): 안쪽 하얀 원 내부, 어두운 공간(공연장 외부): 바깥쪽 하얀 원 외부.

③ Double-layer 스피커 어레이를 통한 contrast control

- Double-layer 스피커 어레이를 사용을 통한 제어 성능 향상(음 에너지 분포: 그림 3.3.4)

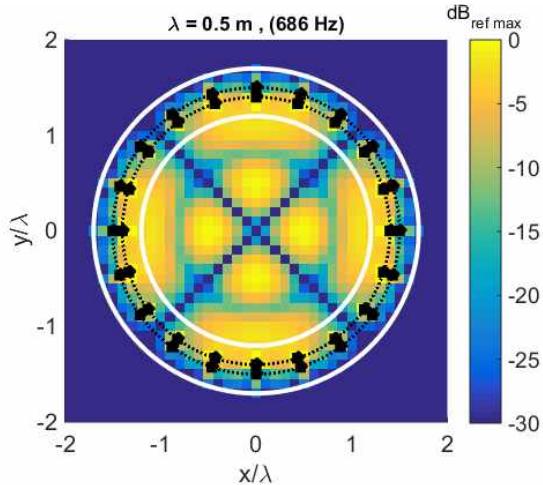


그림 3.3.4. Double-layer 스피커 어레이를 통한 contrast control 제어 결과, 음 에너지 분포
(contrast: 38.6dB), 제어음원: 총 40개 monopole로 구성된 double-layer 어레이(검정색 점), 밝은
공간(공연장 내부): 안쪽 하얀 원 내부, 어두운 공간(공연장 외부): 바깥쪽 하얀 원 외부.

④ Kirchhoff-Helmholtz (K-H) 적분 방정식을 통한 double-layer 어레이 적용 가능성 확인

구형 제어 영역(그림 3.3.5)에서의 K-H 적분 방정식에서 보면 제어 영역 내부에는 목표 음장 형성, 외부에는 음압이 0인 음장 형성한다.

$$P(\vec{r}) = \int_{S_s} \left[P(\vec{r}_s) \frac{\partial G(\vec{r}|\vec{r}_s)}{\partial n_s} - G(\vec{r}|\vec{r}_s) \frac{\partial P(\vec{r}_s)}{\partial n_s} \right] dS_s.$$

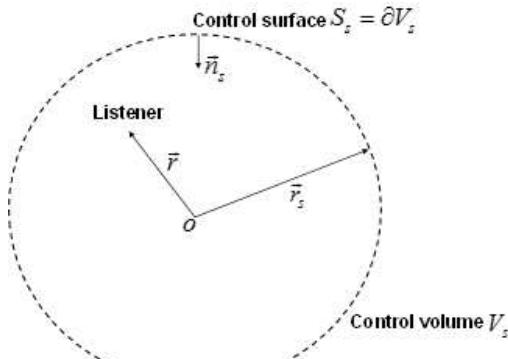


그림 3.3.5 구형 제어 영역의 정의.

제어 영역 내부에 형성하고자 하는 목표 음장을 0차 spherical Bessel 함수라고 정의하면, 3.3.2 식으로 해결할 수 있다.

$$P(\vec{r}) = \int_{S_s} \left[j_0(kr_s) \frac{\partial}{\partial n_s} \left(\frac{e^{ikR_c}}{4\pi R_c} \right) - \frac{e^{ikR_c}}{4\pi R_c} \frac{\partial j_0(kr_s)}{\partial n_s} \right] dS_s,$$

$$P(\vec{r}) \approx \int_{l-\Delta/2}^{l+\Delta/2} \left[j_0(kr_s)ik \cos \varphi_s - \frac{\partial j_0(kr_s)}{\partial n_s} \right] \frac{e^{ikR_c}}{4\pi R_c} dy_s dl,$$

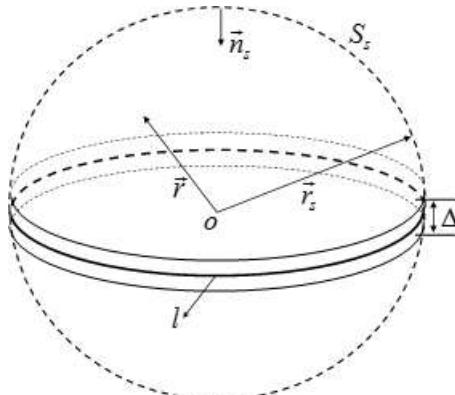


그림 3.3.6. 구형 제어 영역 (원주 상에 위치한 double-layer 어레이만을 하고자 하는 경우).

그 다음으로 Stationary phase approximation 적용하면,

$$P(\vec{r}) \approx \int_l \left[j_0(kr_s) i \sqrt{2\pi i k r_s} \left(\cos \varphi_s \frac{e^{ikr_c}}{4\pi r_c} \right) + j'_0(kr_s) \sqrt{2\pi i k r_s} \left(\frac{e^{ikr_c}}{4\pi r_c} \right) \right] dl,$$

결론적으로 원형 double-layer 어레이를 통해서도 외부 음압이 0이고 어레이 function 형태의 음장을 형성할 수 있음을 알 수 있다. 동일한 접근 방법으로 어레이 음장을 형성하면서 바깥쪽에는 음압을 0으로 만들 수 있는 입력해를 구할 수 있을 것이다. 구 과제에서 더블 어레이를 사용함으로써 외부 소음을 감소시키는 접근이 물리적으로도 가능하다.

⑤ MATLAB 기반 컴퓨터 시뮬레이터

제어 파라미터(주파수, 제어영역[공연장]의 크기 및 형상, 스피커 어레이의 형상 및 시 contrast control 제어 결과를 (1)공간 상 음 에너지 분포, (2)성능 평가 지표(contrast) 통해 제시하는 기능을 가지고 있다.

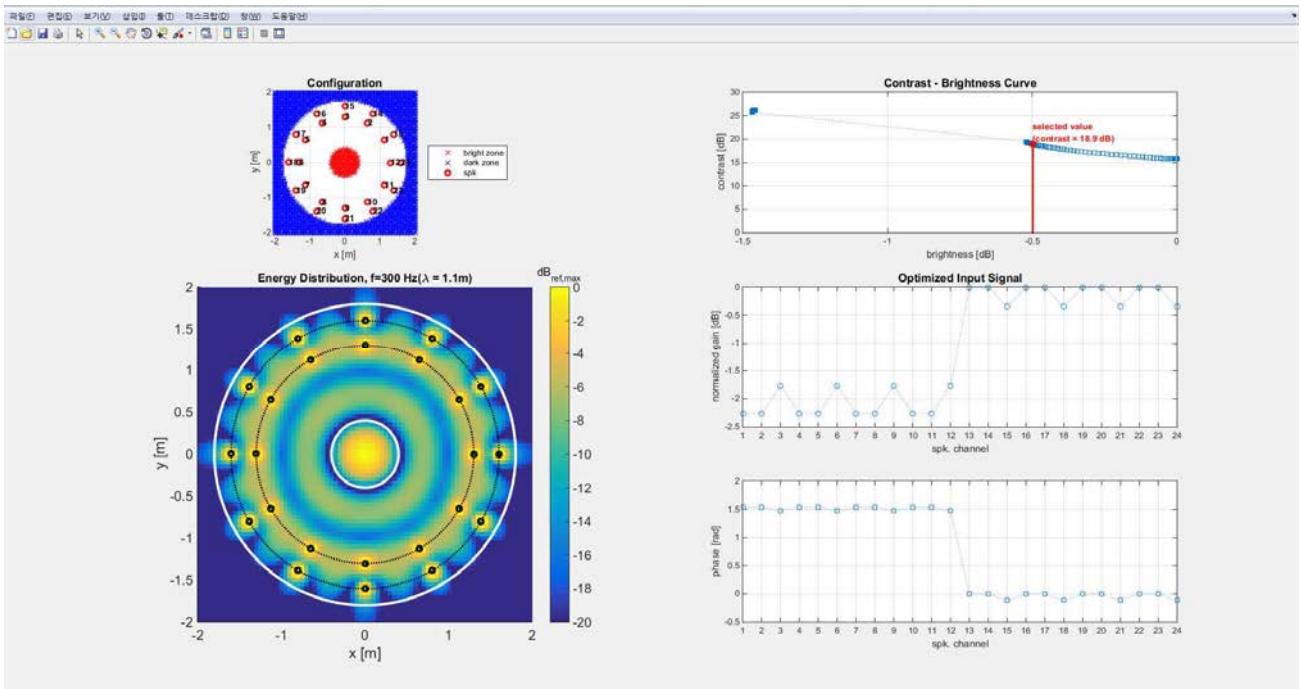


그림 3.3.7 MATLAB 기반 컴퓨터 시뮬레이터를 통한 제어 결과 제시 화면 [제어음원: 총 24개 monopole로 구성된 double-layer 어레이].

2차년도의 연구 내용은 다음 해외 학회를 통해 발표되었다.

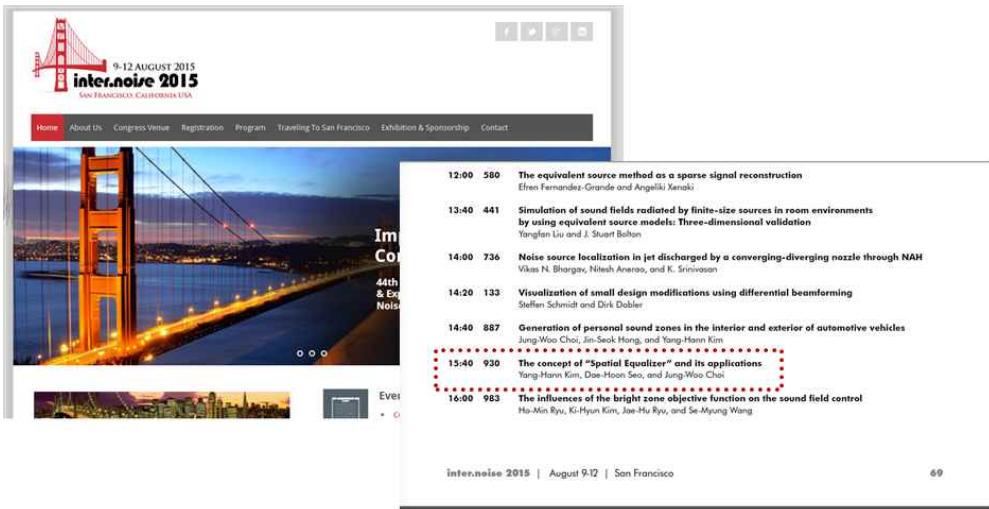


그림 3.3.8. 해외학회 발표논문.

<2차연도 Acoustic Parasol 연구개발 추진 일정>

연구내용	2차연도 월별 추진일정											
	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월
주파수별 contrast algorithm 정립	▨	▨	▨	▨	▨	▨						
Contrast algorithm을 MATLAB 컴퓨터 시뮬레이터로 개발						▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨

다. 3차연도 연구 내용 및 결과

연구 목표	Acoustic parasol 시스템을 통한 음향 대조비 극대화
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - Acoustic parasol 시스템 시뮬레이션 - 2개 층의 Double-Layer 스피커 어레이를 통한 contrast control 구현 - 3차원 상의 Dark zone 제어를 위한 contrast control 알고리즘 개발
연구 결과	<ul style="list-style-type: none"> - Acoustic parasol 시스템 설계 시뮬레이션 프로그램 작성, 실측 결과 동영상 - 시뮬레이션과 실측 결과 모두 contrast 20dB이상 확보

① Contrast control algorithm 구현

제어 파라미터(주파수, 제어영역의 크기 및 형상, 스피커 어레이의 형상 및 스피커 개수) 입력 시 contrast control 제어 결과를 (1)공간 상 음 에너지 분포, (2)성능 평가 지표(contrast)를 제시하는 MATLAB 기반의 컴퓨터 시뮬레이터 구현했다

② 2개 층의 Double-layer 스피커 어레이를 통한 contrast control

2개 층의 Double-layer 스피커 어레이를 사용을 통한 높이 방향에서의 에너지 분포 파악은 그림 3.3.10을 보면 알 수 있다.

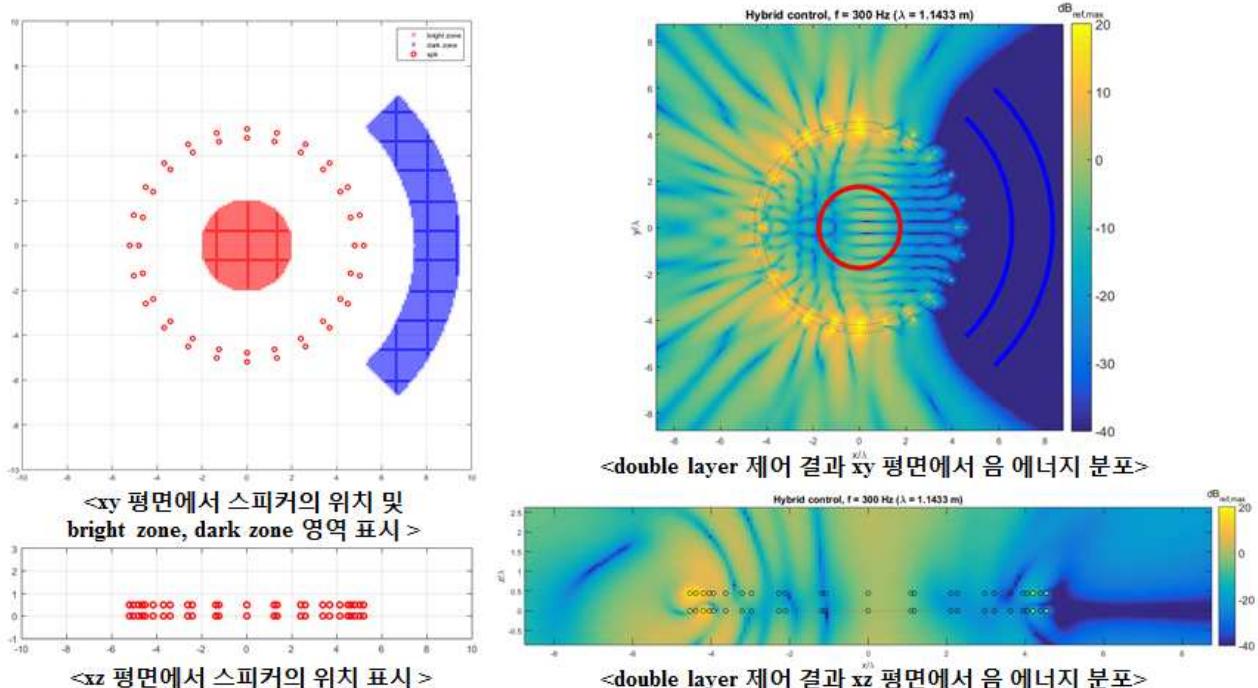


그림 3.3.9 MATLAB 기반의 시뮬레이터 구현

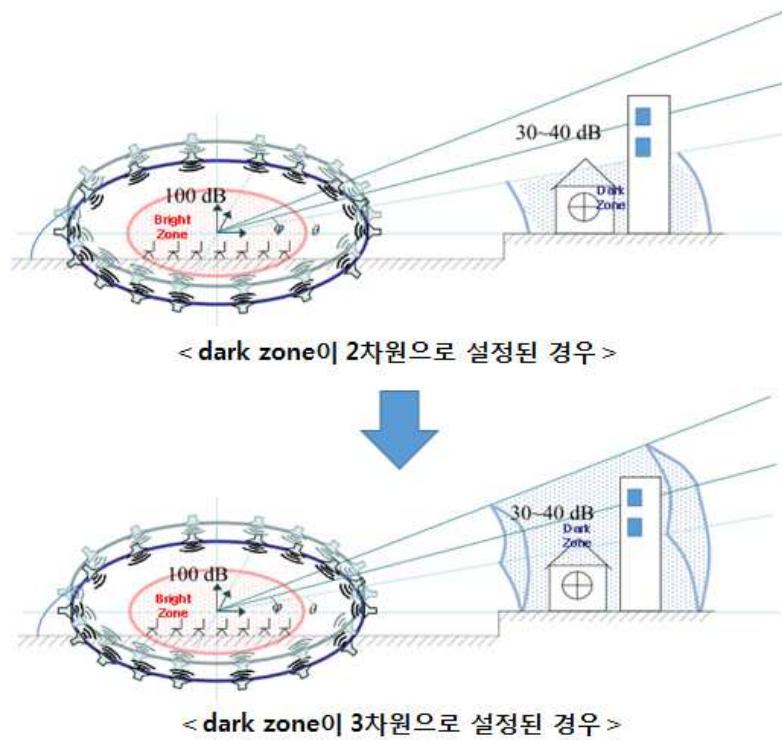


그림 3.3.10 2차원상의 Dark zone과 3차원 상의 Dark zone 설정

Dark zone을 2차원과 3차원 두가지 경우에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 3.3.11과 그림 3.3.12에 표시되어 있다.

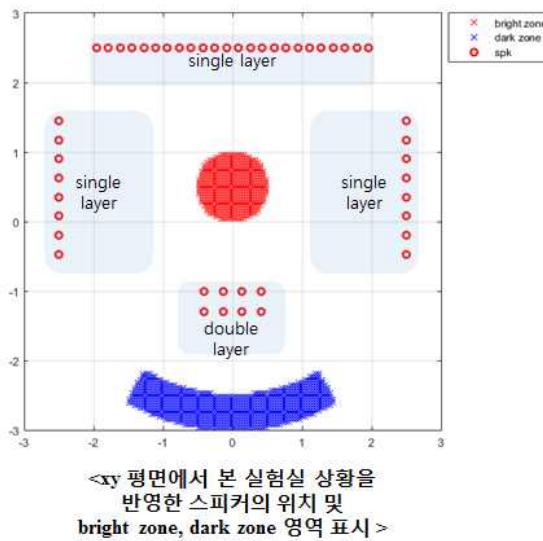


그림 3.3.11 MATLAB 시뮬레이션 설정

③ 3차원 상의 Dark zone 제어를 위한 Contrast control

Dark zone을 한 개의 층(2차원)에서만 제어가 되는 것이 아닌 높이(3차원)에 대해 제어하도록 설정 하여

시뮬레이션을 해보았다. 이 과정에 벽 반사 시뮬레이션 코드를 추가해 좀더 실제 상황과 가까운 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다.

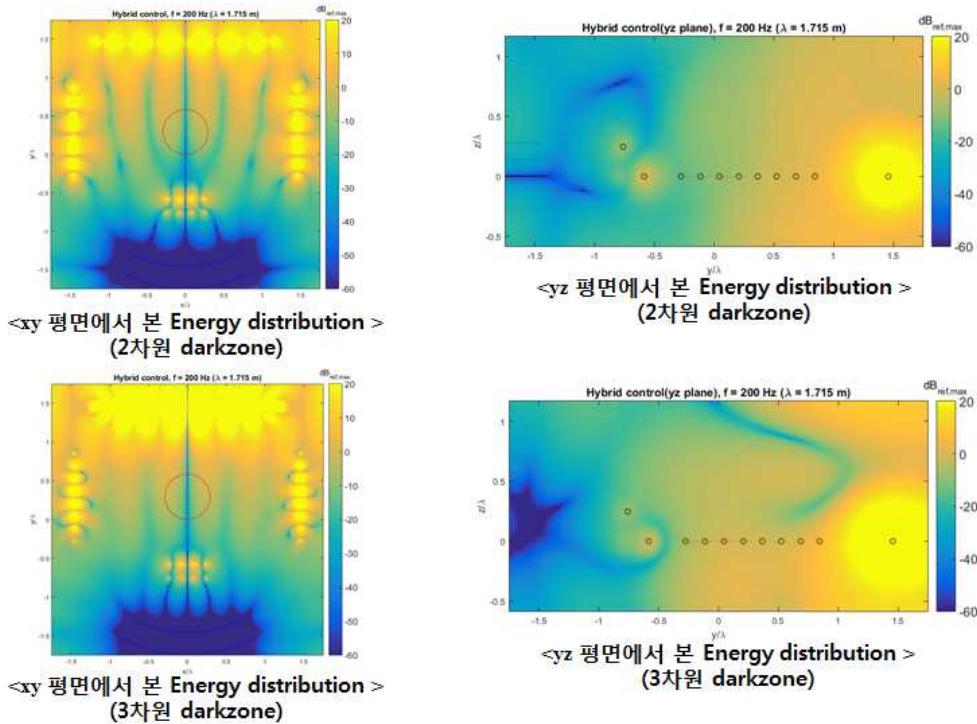


그림 3.3.12 Monopole model + 1차 벽반사 반영으로 모델링 후 코드 시뮬레이션 결과

실험은 KAIST 문지캠퍼스 진리관 105호 실험동에서 이루어졌고, Tannoy Di5 DC 스피커 48대, Crown CT875 6대, d.o.tec 32ch MADI AD/DA Converter 2대를 이용하여 결과를 내었다.



그림 3.3.13 실측 스피커 배치 사진



(200Hz sine wave, 2차원 darkzone의 경우)
39dB -> 45dB -> 61dB

(200Hz sine wave, 3차원 darkzone의 경우)
41dB -> 38dB -> 62dB

그림 3.3.14 실험실 실측 결과

결론적으로 시뮬레이션 및 실제 측정 모두에서 contrast 20dB 이상 확보되었으며, 3차원 darkzone의 경우 2차원보다 dark zone 구역의 높이 방향에서 제어가 고르게 됨을 확인할 수 있었다.

<3차연도 Acoustic Parasol 연구개발 추진 일정>

연구내용	3차연도 월별 추진일정											
	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월
주파수별 contrast algorithm 정립												
Contrast algorithm을 MATLAB 컴퓨터 시뮬레이터로 개발												

라. 연구개발 성과

○ 국내외 논문 게재(학술대회)

번호	수행기관명	논문명	학술대회명	개최국	주발표자명	발표일
7	한국과학기술원	The concept of "Spatial Equalizer" and its applications	Inter-Noise 2015	미국	김양한	15.08.09

○ 기술 요약정보

- 기술 명: Acoustic Parasol
- 요약 내용: 음향 파라솔(acoustic parasol)은 햇빛을 차단하기 위한 목적으로 제작된 기존 파라솔에 원하는 형상의 어레이 스피커를 배치시켜, 착석 자들에게는 음향학적으로 높은 음압을 제공하며 반대로 파라솔 밖으로는 음향학적으로 낮은 음압을 만들어 파라솔에서 발생하는 소음을 주변으로 전파하는 현상을 최소화 할 수 있는 청취 시스템이다. 이것을 발전시켜 야외무대에서도 야외 공연장 밖에서는 공연장의 소리가 주변으로 전파는 현상을 최소화 시키는 시스템이다.
- 기술 완성도: 기술 개발 진행 중

마. 연구결과

- 기술적 성과: 본 기술은 사운드 포커싱 기술을 기반으로 single-layer 스피커와 double-layer 스피커 어레이를 이용하여 Acoustic parasol 기술을 구현했다. 초기 목표였던 10dB를 넘어서 20dB이상의 음압 차이를 발생시켜, acoustic parasol 기술을 현재 구현 가능한 기술 수준으로 끌어올렸다. 본 기술은 국내에서 제일 앞서 가고 있으며, 공연 영역과 조용한 영역이 20dB contrast control이 가능하다는 것은 국내외 어디에서도 연구 결과가 아직 발표되지 않았다. 개발한 내용은 향후 야외공연장의 설계에 활용될 수 있으며, 야외공연의 보편화와 활성화에 큰 기여를 할 것으로 예측된다.

3-4. 무대 스피커 기반 공연소음 억제기술

가. 1차연도 연구 내용 및 결과

연구 목표	무대 스피커 기반의 음장제어 가능성 검토
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 공연용 무대스피커의 지향성 제어 알고리즘의 실측을 통해 분석
연구 결과	<ul style="list-style-type: none"> - 라인어레이(액티브) 스피커 지향성 특성분석 - 우퍼스피커 동특성 분석 및 지향성 특성분석

■ 무대 스피커 기반의 음장제어 가능성 검토

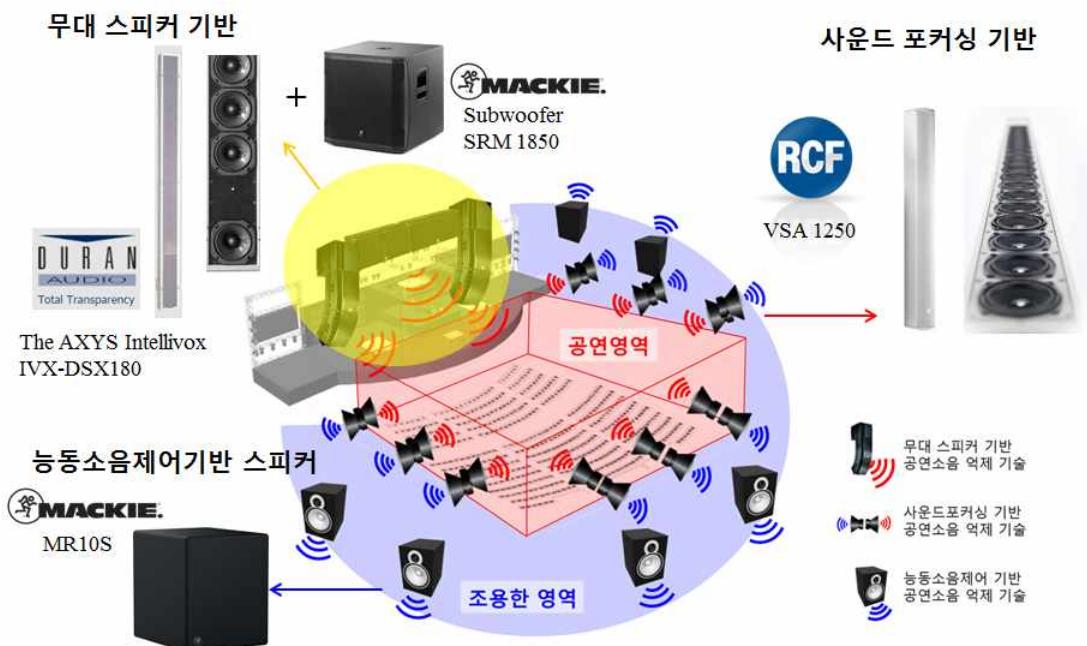


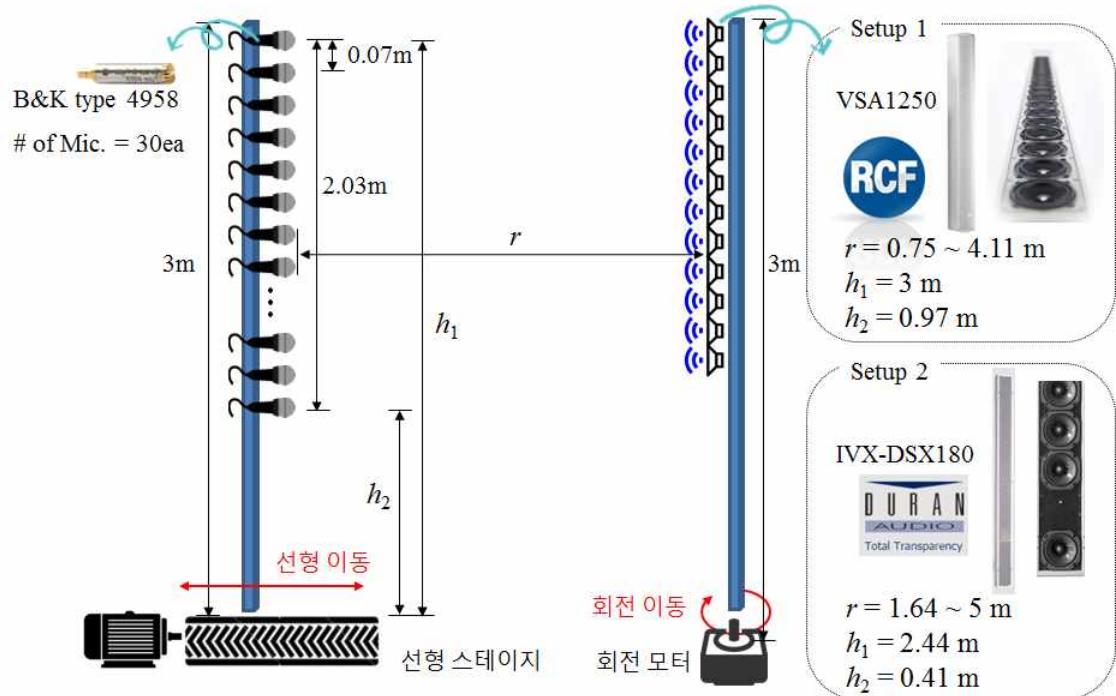
그림 3.4.1. 본 과제 수행 시 사용예정인 공연용 스피커

그림 3.4.1은 가상방음벽 기술의 개념도 및 본 과제수행 시 사용예정인 공연용 스피커들을 표현한 것이다. 공연용 스피커들의 제어에 앞서 각 스피커들의 동특성 및 지향성 실험을 통해 시스템분석이 필요하며, 측정된 실측데이터를 기반으로 야외공연 소음억제기술의 제어성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

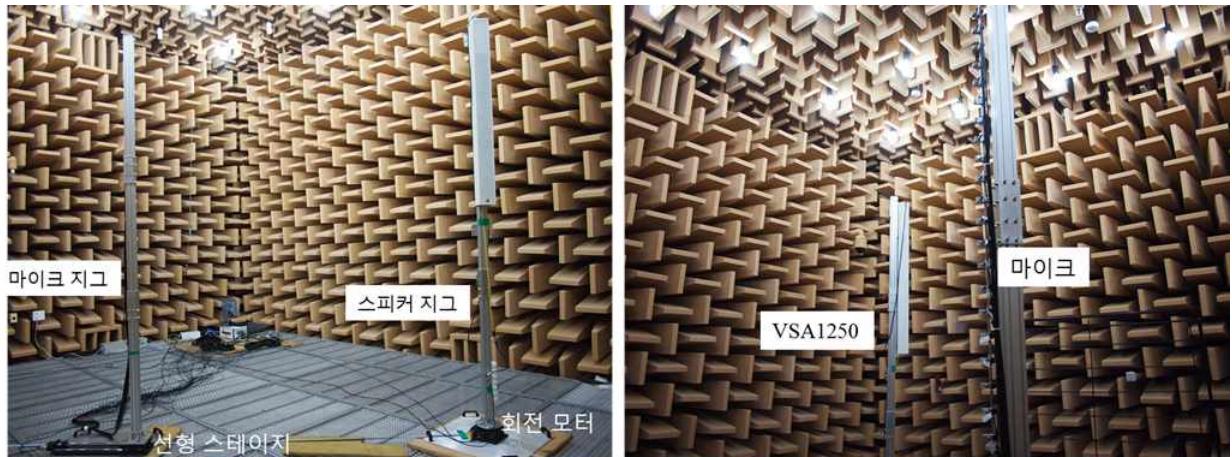
① 라인어레이 스피커(액티브: 지향성 신호처리 기능이 내장된 제품) 실측 및 분석

공연용 스피커의 제조사에서 제공되는 지향성제어 알고리즘 소프트웨어를 이용하여 방사되는 빔이 조향되도록 설정하였을 때, 지향성 실측을 통해서 주파수별로 방사되는 음장을 확인하고 빔형성(Beamforming)기법의 지향각 제어이론을 통해 공연용 스피커의 지향성 특성이 분석가능한지 검토하는 것

이 목적이다.



(a) 지향성 측정 개념도



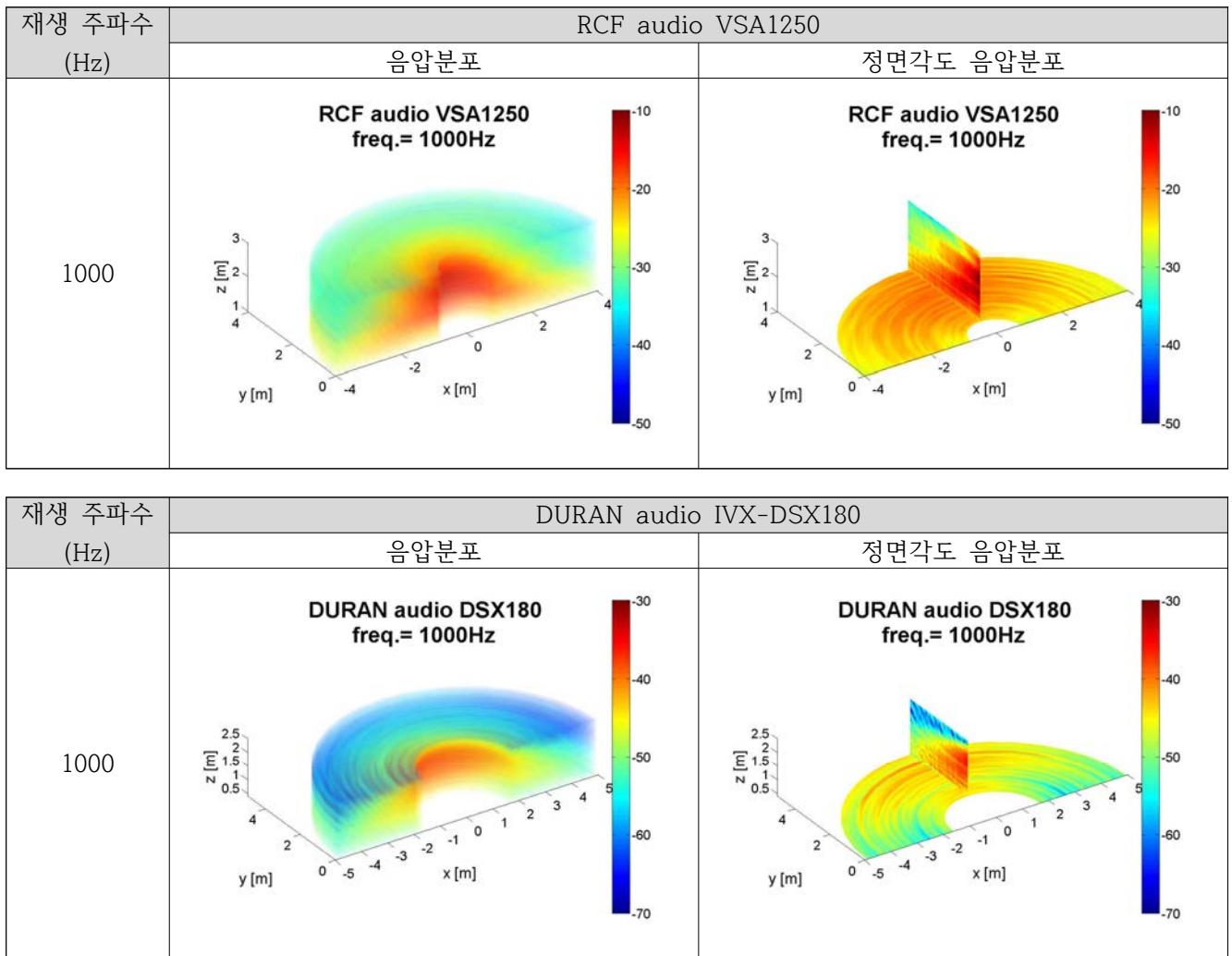
(b) 지향성 측정 구성

그림 3.4.2 라인어레이 스피커 지향성 측정 개념도 및 구성도

그림 3.4.2는 라인어레이 제품군으로 판매되고 있는 RCF오디오사의 VSA1250모델과 DURAN오디오사의 IVX-DSX180모델의 주파수별 지향성을 실측으로 검증하는 개념도 및 측정 구성도를 나타내고 있다. 본 측정 결과(1kHz)는 표3과 같다.

표 3.4.1은 실측을 통해 측정된 각 라인어레이 스피커의 응답 중 1kHz의 응답만을 표현한 결과들이다. 각 스피커들의 알고리즘 방식 및 측정 위치가 다르기 때문에 직적접인 비교는 어렵지만 각 스피커들의 특징들은 살펴볼 수 있었으며, 빔형성(Beamforming)기법의 지향각 제어이론을 통해 공연용 스피커의 지향성 특성이 분석 가능함을 알아냈다.(자세한 사항은 1차년도 “첨부3. [마일스톤 3.1]분석보고서” 참조)

표 3.4.1 측정 결과(VSA1250, DSX180 @1kHz)

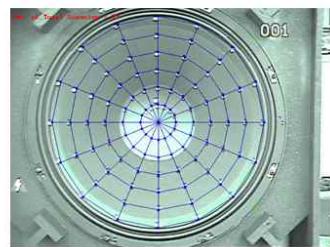


② 우퍼스피커 동특성 분석



Mackie Woofer 스피커 진동 모드 형상

❖ Mackie woofer (# of node: 97)



- LSV velocity sensitivity: 3[mm/sec/V]
- Excitation: Sine-swept
- Excitation voltage: 60[mV_{pp}]
- # of average: 7
- Frequency band: 20 ~ 1000[Hz]
- Frequency resolution: 0.5[Hz]

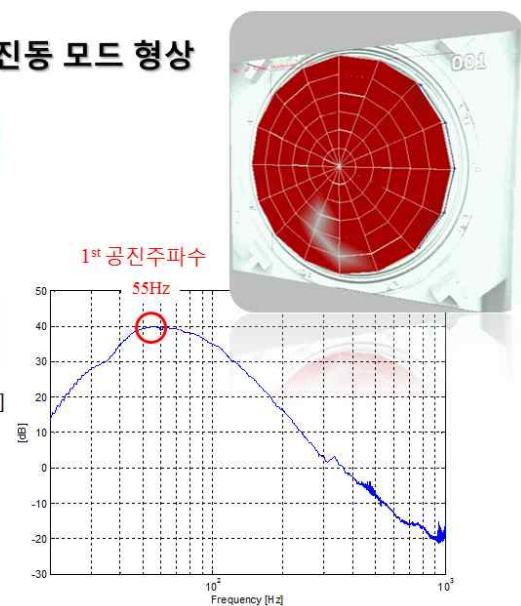


그림 3.4.3 MACKIE SRM1850 우퍼스피커의 동특성 분석실험 구성 및 결과

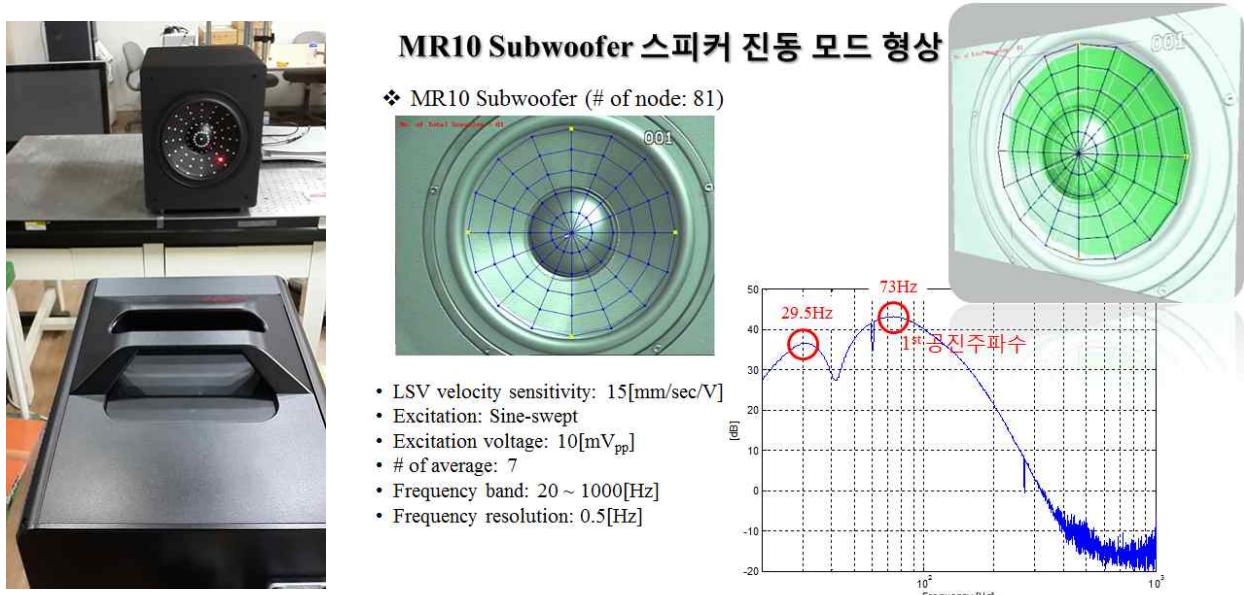


그림 3.4.5 MACKIE MR10 우퍼스피커의 동특성 분석실험 구성 및 결과

그림 3.4.3 및 3.4.5에서 작성된 결과처럼 각 스피커는 100Hz이하에서 첫 번째 고유주파수가 존재하였으며, low pass 필터가 각 스피커시스템에 적용되어 300Hz 이상부터는 음압의 크기가 크게 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다. 단, MACKIE MR10은 10인치 우퍼스피커로서 뒷면에 vent hole이 형성되어 있기 때문에 29.5Hz에서 불규칙한 모드도 형성된 것을 확인 할 수 있었다.

■ 무대 스피커 기반의 음장제어 가능성 검토 결과

① “라인어레이(액티브)” 제품군 중 RCF/ VAS1250모델과 DURAN/ IVX-DSX180모델의 조향각을 높인 범형성 제어결과(제조사에서 제공하는 소프트웨어 사용)를 실측을 통해 검토한 결과 기존의 범형성(Beamforming) 기법의 한계와 동일한 문제점을 안고 있었다.

- 라인어레이를 구성하는 스피커 유닛의 사이즈에 따라서 조향 제어가능한 주파수가 설정.
- 저주파 음원의 범형성을 제어하기 위해서는 사이즈가 긴 라인어레이가 필요할 것으로 판단.
- 고주파 음원의 범형성이 어려워서 청중영역뿐만 아니라 스피커 전방으로 방사되는 음원이 강함.
- 라인어레이의 수직각에서는 조향 제어를 통해 음원의 무한방사를 억제하지만 평면각에서는 제어불가.

② 기존에 사용되는 “라인어레이(액티브)”를 이용하여 공연장의 소음억제 알고리즘을 개발하기 위해서는 위에서 언급된 단점을 최소화해야 무대기반 스피커만을 이용하여 공연영역을 제외한 영역에서 방사되는 소음을 억제할 수 있을 것으로 판단. 따라서 다음과 같은 기술개발이 필요하다.

- 저주파 음원의 범형성을 제어하기 위하여 2개의 수직 라인어레이(스테레오 음원 재생)와 1개의 수평 라인어레이를 이용하여 동시 제어하는 기술을 개발.
- 고주파 음원의 범형성을 제어하기 위하여 범형성기법의 공간적 에러(Spatial aliasing)를 극복할 수 이론검토 및 적용가능성을 높이기 위한 기술 개발.

<1차연도 무대 스피커 기반 공연소음 억제기술 연구개발 추진 일정>

연구내용	1차연도 월별 추진일정											
	0월	0월	0월	0월	0월	0월	0월	12월	1월	2월	3월	
실측을 통한 무대 스피커 기반의 음장형성 분석												
무대 스피커 기반의 음장제어 기술 분석/개발												

나. 2차연도 연구 내용 및 결과

연구 목표	무대 스피커 기반 공연소음 억제기술 알고리즘 개발
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 주파수별 지향성 성능 분석, 제어가능 주파수 대역 선정 및 주파수 대역확장 - 무대기반 스피커 지향각 제어용 스피커배치 설계 - 무대기반 스피커의 음원 방사 지향각 제어 알고리즘 개발
연구 결과	- 음장제어 알고리즘

■ 야외공연장 무대 스피커 기반의 지향성 제어 알고리즘 개발

① 무대 스피커 기반 공연소음 억제기술 개념도

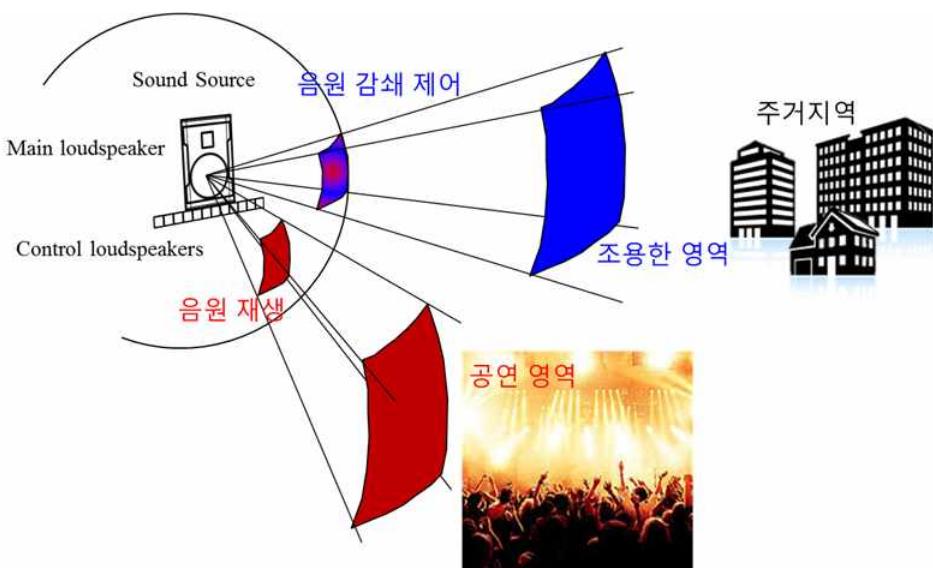


그림 3.4.6 무대 스피커 기반 공연소음억제기술 개념도

그림 3.4.6은 무대스피커 기반 공연소음억제기술의 시스템 개념도를 나타내고 있다. 본 시스템은 음원을 재생하는 메인 스피커와 지향각을 제어하는 제어스피커들이 결합된 모듈형식으로 되어 있다. 시스템의 큰 특징으로 다음 두 가지로 요약할 수 있다.

- 공연소음을 억제하기 위하여 기존 스피커 시스템을 바꾸는 것이 아닌, 스피커의 지향성 특성을 제어하기 위하여 제어스피커 모듈만 새롭게 추가한다. 따라서 제어스피커 모듈의 추가로 사용자가 원하는 방향으로 재생되는 음원을 감쇄시킬 수 있다.
- 본 시스템은 사용자가 원하는 방향에서 재생되는 음원은 유지하고, 동시에 원하지 않는 방향에서는 음원이 감쇄되는 시스템으로 주거지역에 해당되는 방향의 음원을 억제하여 공연소음을 줄일 수 있다.

- ② 주파수별 지향성 성능 분석, 제어가능 주파수 대역 선정 및 주파수 대역확장
 - 현재 개발 중인 시스템 모듈

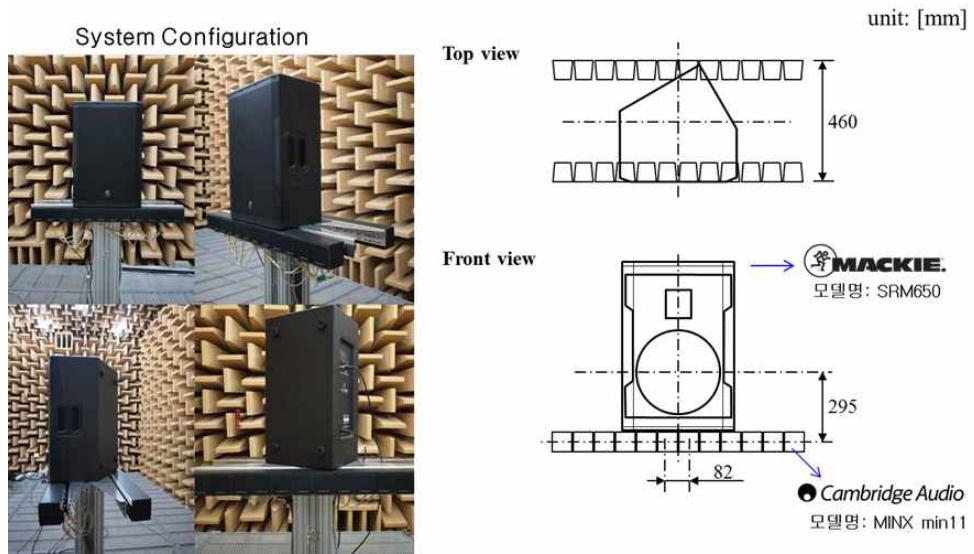


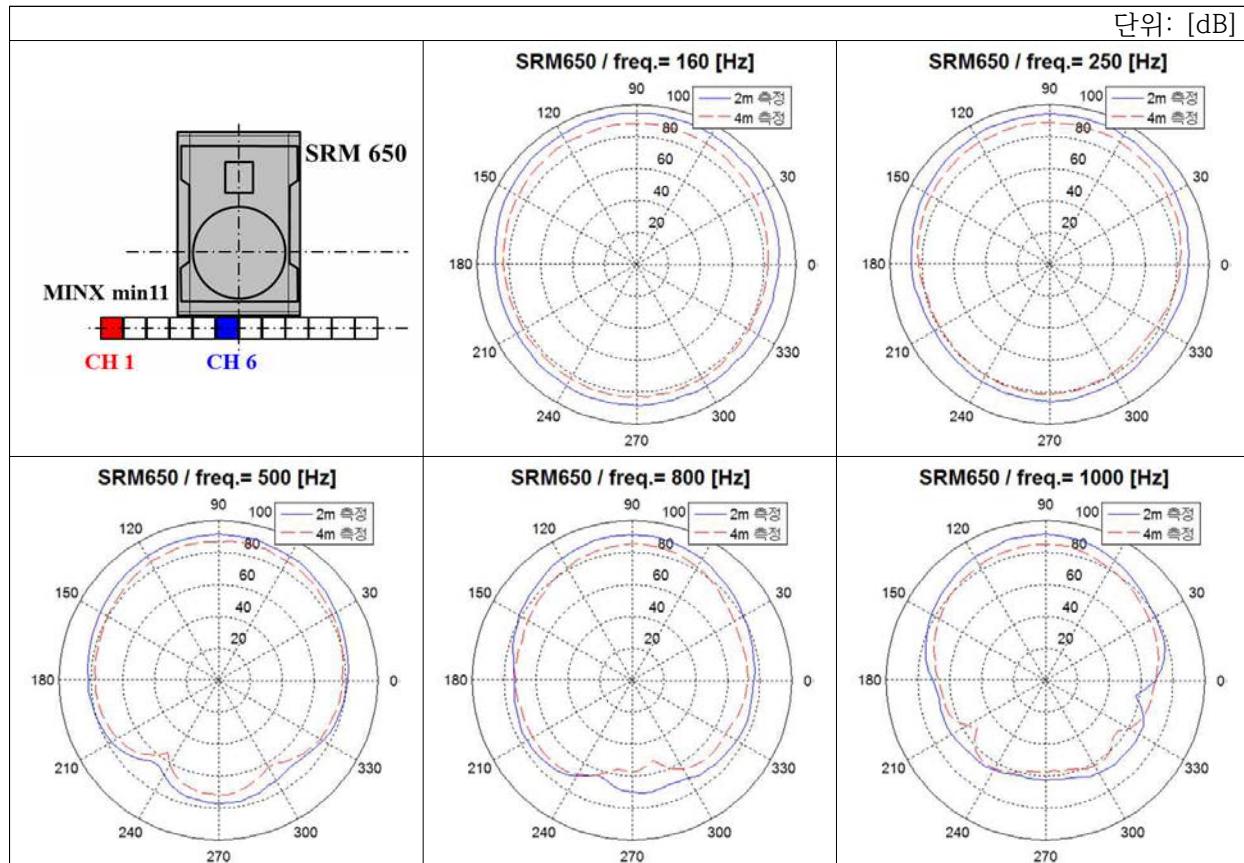
그림 3.4.7 무대스피커 기반 공연억제기술이 적용된 시스템

본 시스템은 그림 3.4.7과 같이 음원 재생에 사용되는 메인스피커로 MACKIE사의 SRM650 스피커 1개가 사용되었으며, 제어스피커로는 CAMBRIDGE AUDIO사의 MINX min11 모델 24개가 사용되었다.

- 주파수별 지향성 성능

i. 메인스피커 - 모델 SRM650

표 3.4.2 SRM650 스피커의 지향성 특성



- 주파수별 지향성 성능

ii.제어스피커 - 모델 MINX min11

표 3.4.3 제어스피커 min11-CH1의 지향성 특성

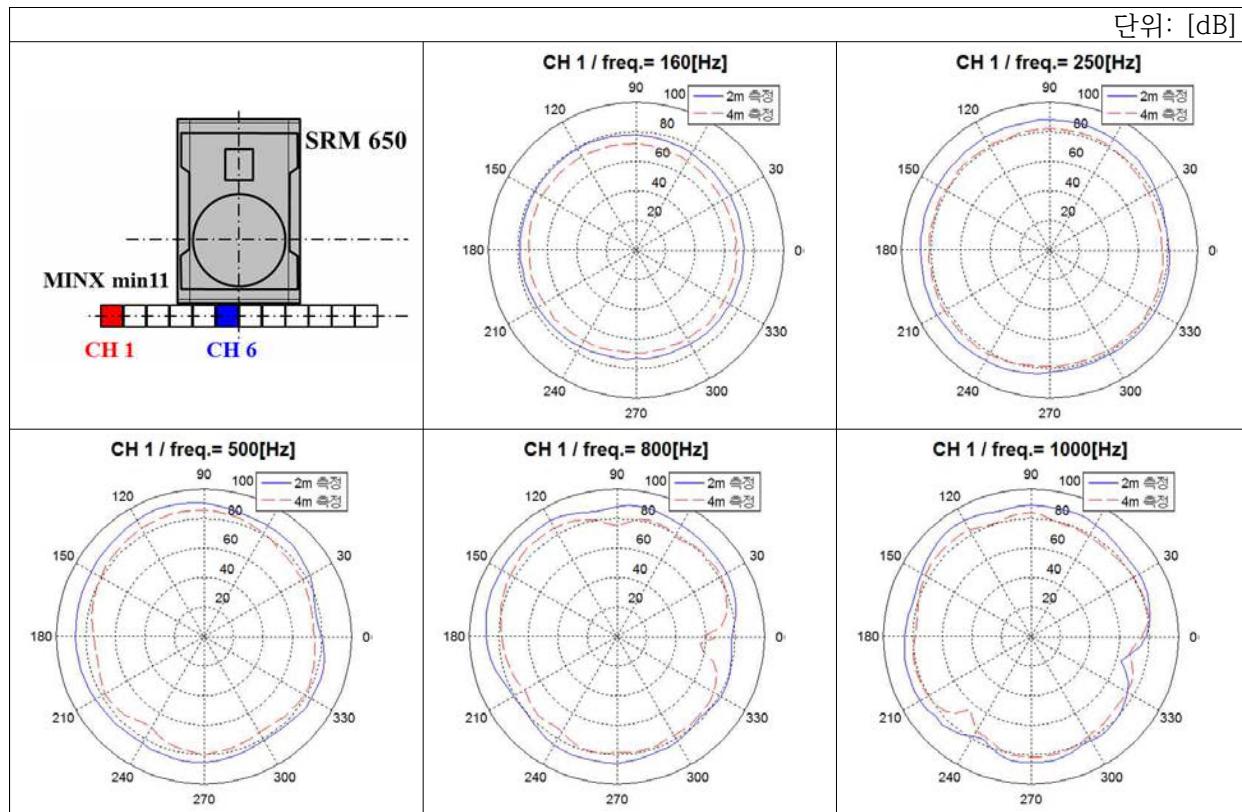
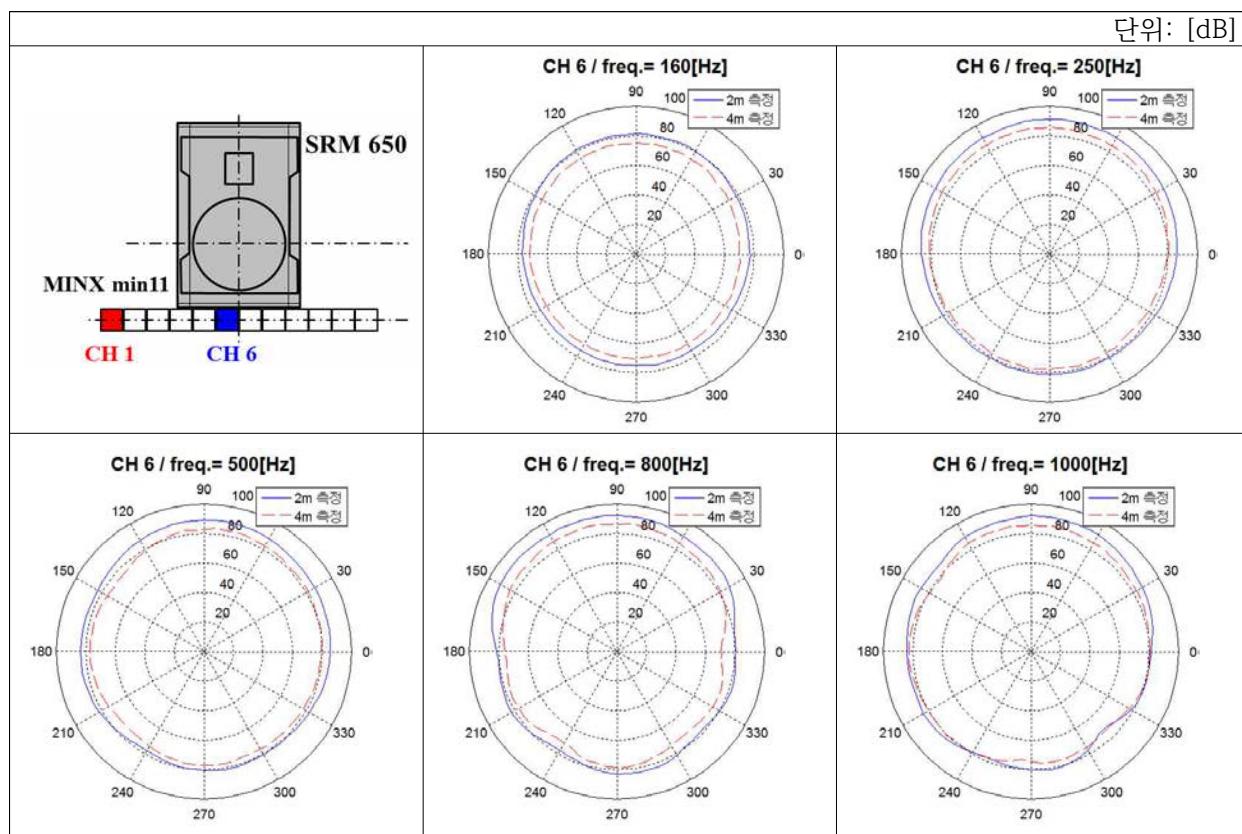


표 3.4.4 제어스피커 min11-CH6의 지향성 특성



- 제어주파수 선정

i. MACKIE SRM650 (2way 스피커)

재생주파수 (-3dB) 50Hz ~17kHz

woofer driver : 50Hz ~ 3kHz

Titanium driver : 3kHz ~ 17kHz

ii. MINX min11 (1way 스피커)

재생주파수 (-10dB) 120Hz ~20kHz

iii. targeted frequency band: 160Hz ~ 3kHz

목적: 메인 스피커인 SRM650의 woofer driver의 지향성 제어

현재 가능주파수 대역: 160Hz ~ 1kHz

③ 무대기반 스피커 지향각 제어용 스피커배치 설계

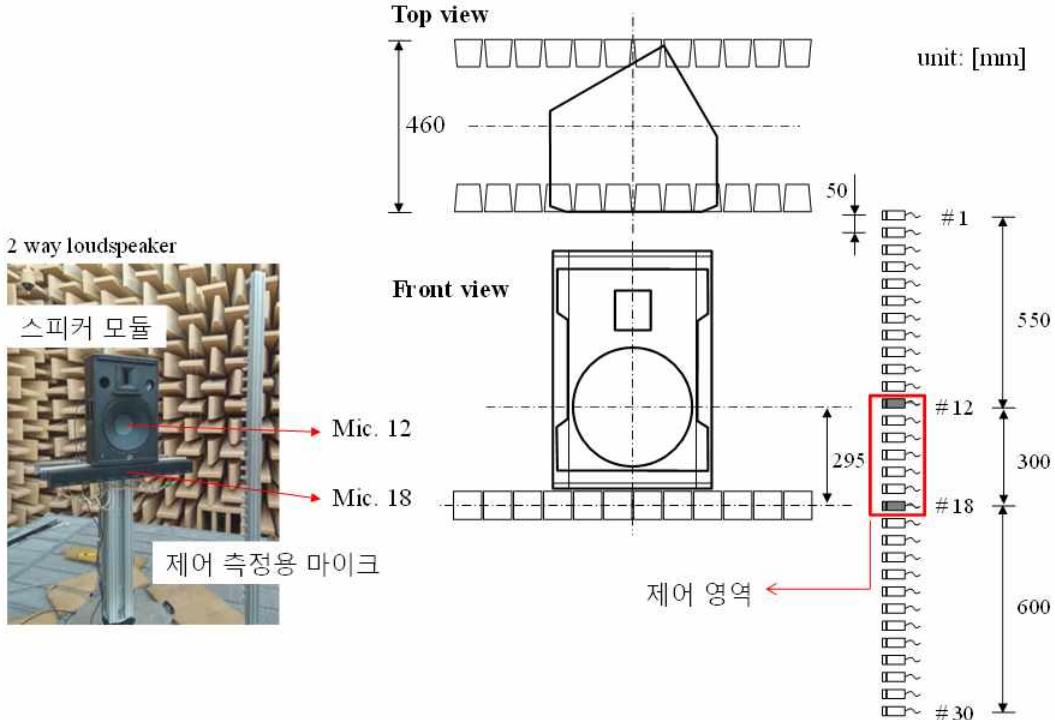
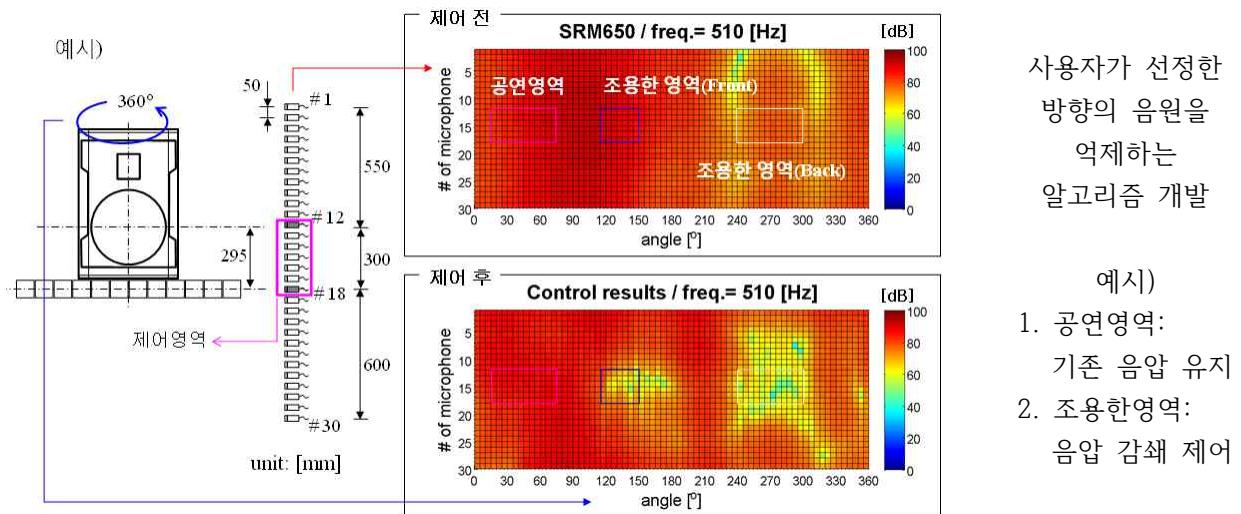


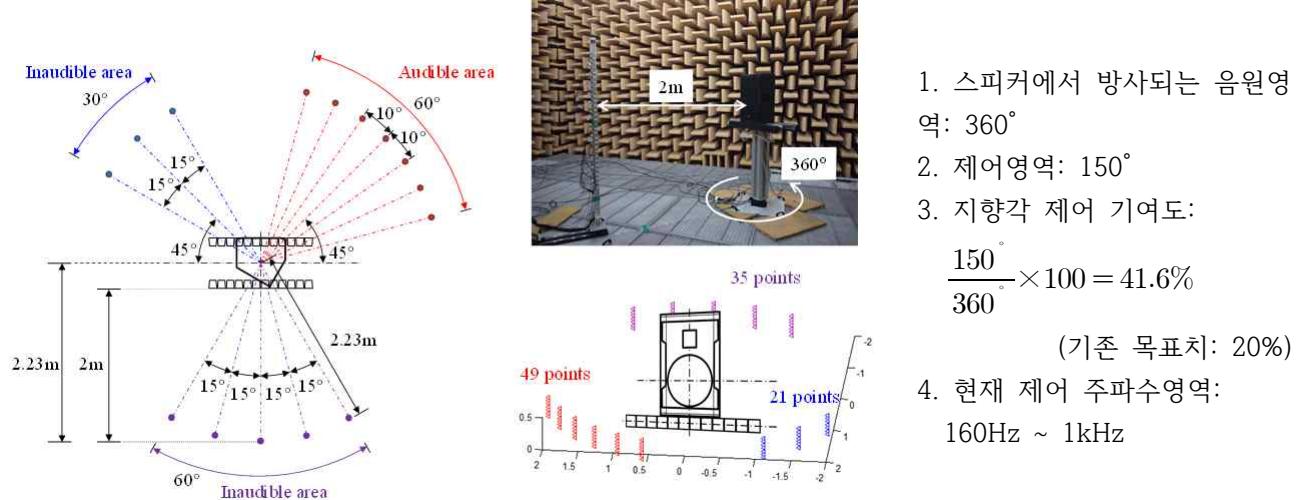
그림 3.4.8 무대스피커 기반 공연소음 억제기술 적용 시스템 및 측정지점

표 3.4.2 ~ 표3.4.4의 결과를 통해 전방으로 전파되는 음원뿐만 아니라 뒤로 전파되는 음원이 각 스피커들마다 강한 것을 확인하였다. 또한 제어 스피커의 형태를 double-layer형식을 통해 전방 및 후방으로 전파되는 음장을 제어 가능하다. 음원재생용인 메인 스피커(SRM650)과 제어스피커(min11)의 높이차를 최소화하여 고주파의 제어가능성을 높일 수 있다.

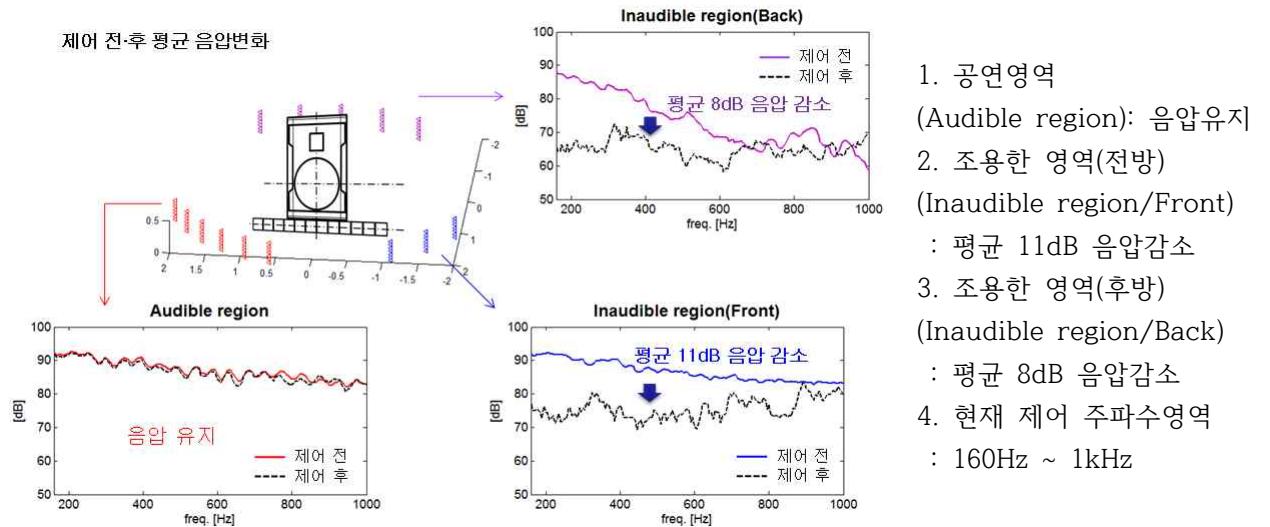
④ 무대기반 스피커의 음원 방사 지향각 제어 알고리즘 개발



⑤ 무대스피커 방사음원 지향각 제어 기여도



⑥ 공연영역 대비 조용한 영역 음압차



<2차연도 무대 스피커 기반 공연소음 억제기술 연구개발 추진 일정>

연구내용	2차연도 월별 추진일정											
	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월
주파수별 지향성 성능 분석, 제어가능 주파수 대역 선정 및 주파수 대역확장												
무대기반 스피커 지향각 제어용 스피커배치 설계												
무대기반 스피커의 음원 방사 지향각 제어 알고리즘 개발												

다. 3차연도 연구 내용 및 결과

연구 목표	기존 무대음향 시스템 기반의 소음억제 시스템 통합
연구 내용	- 야외공연장의 무대스피커 기반 지향성제어 알고리즘 적용 및 분석 - 무대스피커 및 지향각 제어스피커의 배치에 따른 소음저감 기여도 확인 및 분석
연구 결과	- 야외실험을 통한 무대스피커 기반 소음억제 시스템 성능 확인 - 방사음원 지향각 제어 기여도 40%, 공연영역 대비 조용한 영역 음압차 8dB

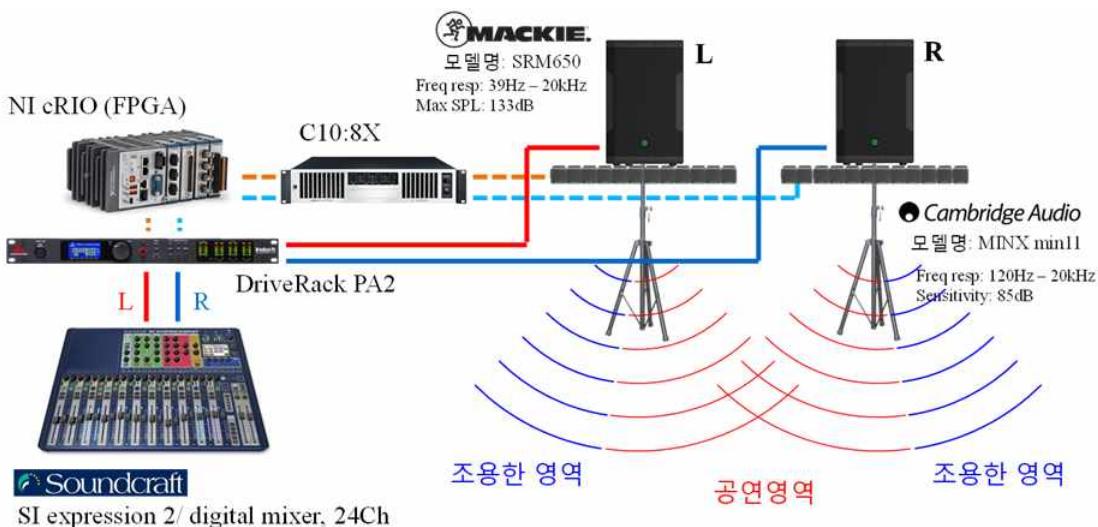


그림 3.4.9 이동 가능한 소형무대기반의 공연소음억제 시스템 구성도

그림 3.4.9는 본 마일스톤이 지향하는 무대스피커 기반의 공연소음 억제 시스템으로서 개발된 시스템 구성을 나타내고 있다. 소형 야외무대에 해당하는 단일스피커 하단에 제어용 어레이스피커 모듈이 장착되어 공연영역의 방향에는 단일스피커의 원음원이 재생되고, 조용한 영역으로 선정된 방향에는 음압이 억제되는 특징을 갖고 있다. 메인스피커는 2차년도부터 사용된 MACKIE사의 SRM650이 사용되었으며, 제어스피커로는 Cambridge audio사의 MINX min11 12개가 각각 사용되었다.

Audio Mixer는 사용자가 소형공연에 적용할 수 있도록 Soundcraft사의 24ch 디지털 믹서가 적용되었으며, 메인스피커와 동일신호를 제어스피커 모듈에 전달하는 동시에 좌측, 우측 및 제어스피커간의 시간차를 보정하가 위하여 dbx사의 driverack PA2가 사용되었다. 제어스피커의 제어필터는 National Instrument (NI)사의 cRIO 시스템이 사용되었으며 본 NI시스템은 FPGA 코드작성과 적은 시간차의 필터 구현이 가능한 특징을 갖고 있다.

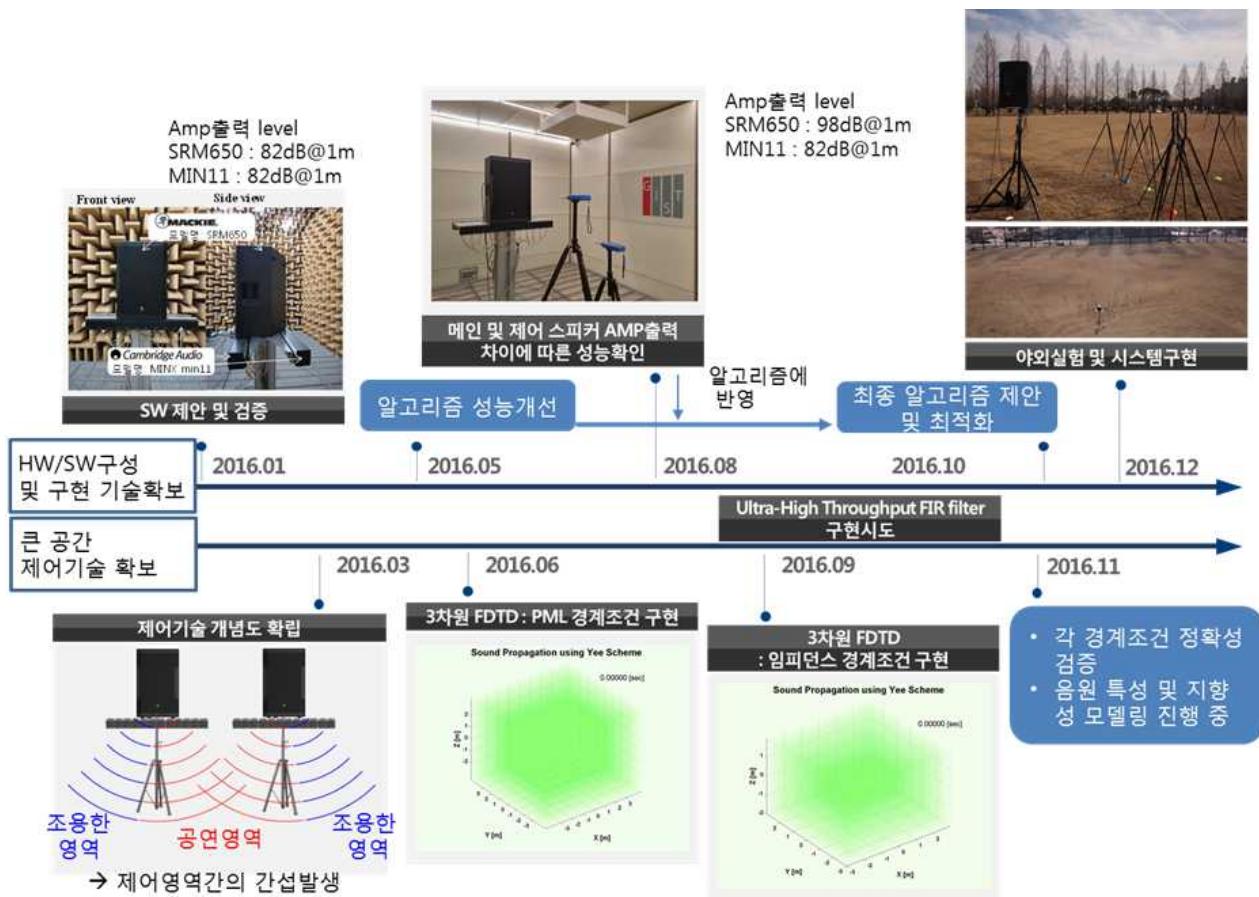


그림 3.4.10 마일스톤 3.1의 3차년도 수행내역

본 과제에서 제안된 무대기반의 공연소음 억제시스템은 크게 2가지로 연구가 진행되었다. 첫 번째는 실제 소규모 야외공연장에서 사용이 가능한 하드웨어(HW)와 소프트웨어(SW/알고리즘)를 개발하는 것이며, 두 번째는 개발된 시스템이 넓은 영역에서 구현될 때 나타나는 상호간의 간섭 또는 다른 시스템들과의 간섭을 확인하기 위한 시뮬레이터 기술개발이다. 첫 번째 기술은 원래목적에 맞게 연구가 진행되었고, 두 번째 기술은 첫 번째 기술개발 시 추가적으로 확인이 요구되어 추가로 진행된 부분이다.

HW/SW개발은 2차년도 말에 본 연구팀이 제안한 알고리즘방법을 창원 경남테크노파크에서 성능을 검증하였으며, 3차년도에 들어와서 메인스피커의 출력에 따른 안정성과 알고리즘의 적응성을 검증하여 최종적인 알고리즘을 확정하였다. 또한, 확정된 알고리즘 방법으로 제안된 시스템의 응답이 본 과제의 목적에 부합되도록 시스템 응답을 유전자알고리즘을 이용하여 최적화하였다. 마지막으로 개발된 시스템이 야외에서 구현되어 그 성능을 확인하였다.

큰 공간제어기술은 유한차분해석법을 이용하여 야외공간에서 시스템이 설계되어 방사되는 것을 묘사하는 시뮬레이터이며, 현재 야외공간 모델링기법과 스피커 시스템 지향성모델링 기법의 초안이 완성된 상태이다. 따라서 개발된 시뮬레이터의 디버깅과 실험적 검증을 통하여 큰 공간제어기술도 확보할 예정이다.

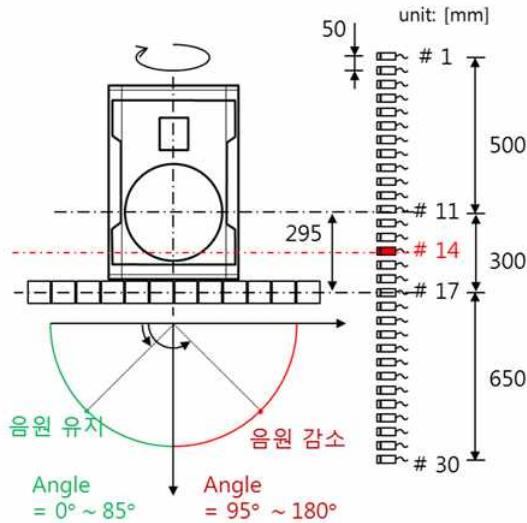


그림 3.4.11 개발된 시스템의 응답을 최적화하기 위한 실험구성

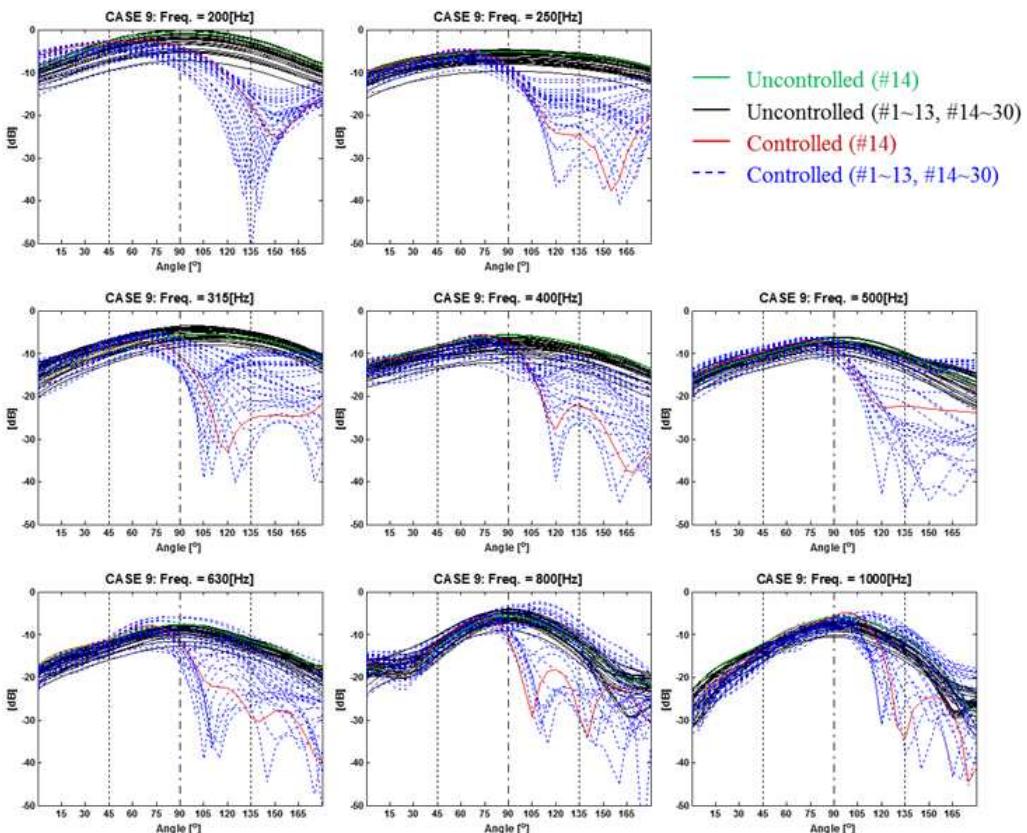


그림 3.4.12 유전자알고리즘을 이용하여 구해진 최적의 시스템 응답특성

그림 3.4.11과 그림 3.4.12는 제안된 시스템 응답을 본 과제의 목적에 맞게 최적화하는 방법을 나타내는 실험구성과 그 결과를 나타내고 있다. 그림 3.4.11은 제안된 시스템 중 우측 스피커시스템에 대한 것으로 좌측방향($0^\circ \sim 85^\circ$)으로는 메인스피커의 응답이 유지되고 우측방향($95^\circ \sim 180^\circ$)으로는 메인스피커의 응답이 최대한 감소되도록 설정한 것을 나타내고 있다. 또한, 최적의 응답 특성을 확보하기 위하여 시스템 전방 2m 앞에 30개의 마이크로폰들을 배치하여 전면 방향($0^\circ \sim 180^\circ$)의 전달함수를 모두 측정하였으며, 측정된 전달 함수 지점을 유전자알고리즘으로 제어지점의 선정 작업을 통하여, 주파수별로 최적의 응답을 도출해주는 제어지점들을 선정하였다. 그 결과 그림 3.3.1.4와 같은 시스템응답 특성을 구할 수 있었다. 약 $105^\circ \sim 180^\circ$

의 음압이 제어가 됐으면 제어되는 지향각 40%를 달성하였다.

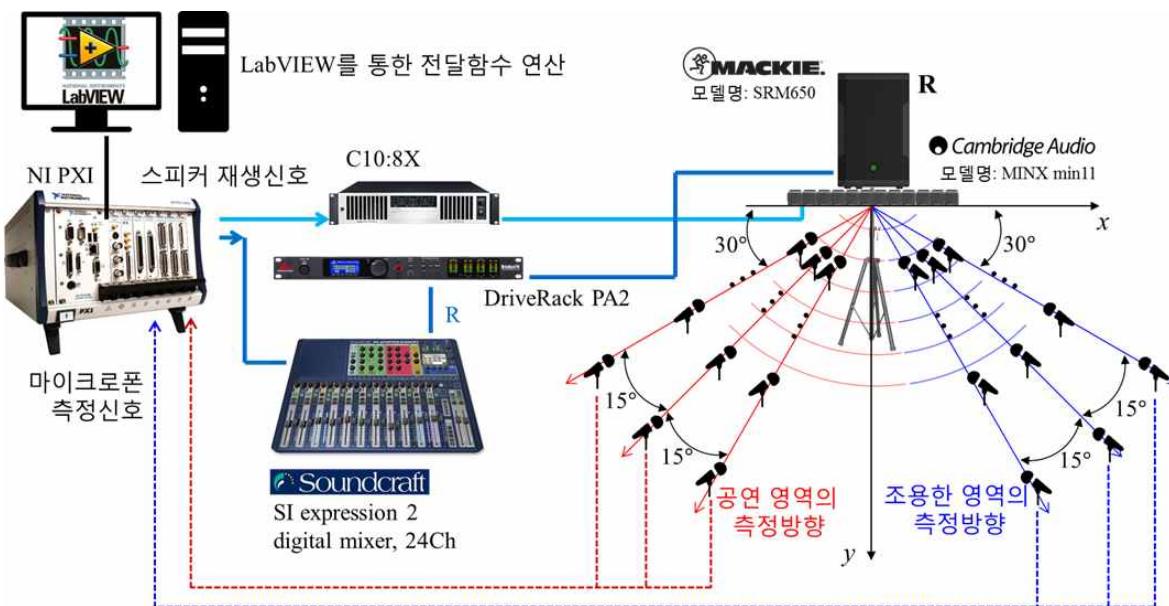


그림 3.4.13 야외실험을 위한 전달함수 측정실험 구성

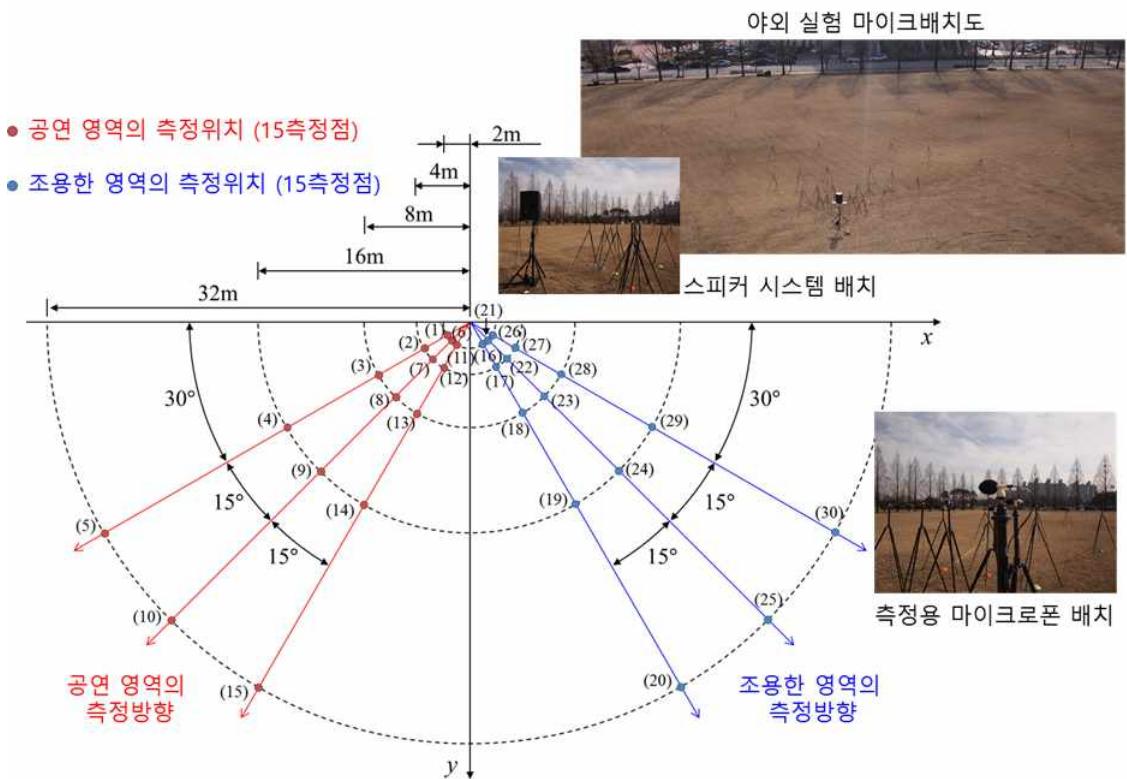


그림 3.4.14 야외실험에서 시스템의 응답을 측정하기 위한 마이크로폰 배치도

그림 3.4.13과 그림 3.4.14는 야외에서 제안된 시스템의 응답이 전파 되었을 경우, 공연영역의 방향은 메인스피커의 응답이 유지되고, 조용한 영역의 방향은 음압이 감소되는지 검증하기 위한 시스템 구성도와 마이크로폰들의 배치를 나타내고 있다. 그림 3.4.14의 마이크로폰 배치는 제어지점인 2m지점을 기준으로

2배씩 멀어지는 거리인 2, 4, 8, 16, 32m에 마이크로폰들이 방향별로 배치되었다. 야외실험에서 전달함수 응답 크기의 변화도를 통하여 주파수 별로 응답이 어떤 경향을 나타내는지 확인할 수 있으며, 그 결과는 그림 3.4.15 및 표 3.4.5에서 확인 할 수 있다.

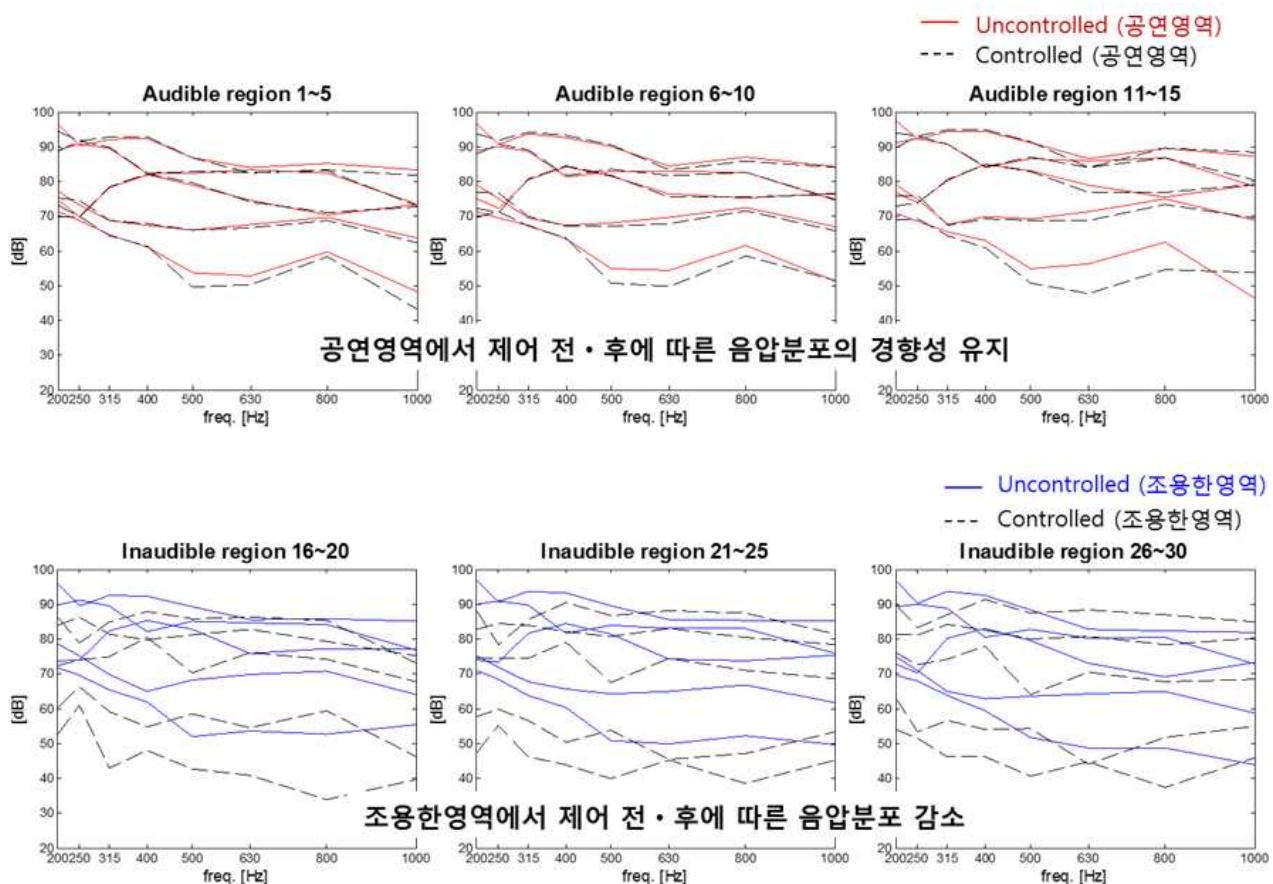


그림 3.4.15 야외 실험결과: 공연영역(Audible region)과 조용한영역(Inaudible region)의 제어 전·후에 따른 응답변화도

그림 3.4.15의 결과를 살펴보면 공연영역은 제어 전·후에 따라 메인시스템의 응답 특성의 경향성이 매우 유사하게 형성되는 것을 확인 할 수 있는 반면, 조용한 영역은 제어 전·후에 따라 응답특성이 변화되고 많은 주파수 영역에서 감소되는 것을 확인 할 수 있다.

표 3.4.5 “4m 라인”음원 억제율(제어 후 측정크기의 평균값이용)

측정 주파수(Hz)	공연영역 4m의 평균값	조용한영역 4m의 평균값	상대적 크기[dB]
200	88.79	82.65	-6.14
250	91.75	83.89	-7.86
315	89.76	83.11	-6.65
400	82.70	81.46	-1.24
500	84.34	80.61	-3.73
630	82.72	82.18	-0.54
800	84.09	79.39	-4.70
1000	75.92	77.87	1.95
평균값	85.00	81.39	-3.61

표 3.4.6 “8m 라인”음원 억제율(제어 후 측정크기의 평균값이용)

측정 주파수(Hz)	공연영역 8m의 평균값	조용한영역 8m의 평균값	상대적 크기[dB]
200	72.67	74.24	1.57
250	71.55	73.67	2.21
315	79.78	74.51	-5.27
400	83.78	79.17	-4.61
500	81.33	67.37	-13.96
630	75.35	73.72	-1.63
800	74.42	71.00	-3.42
1000	75.98	68.25	-7.73
평균값	76.85	72.74	-4.11

표 3.4.7 “16m 라인”음원 억제율(제어 후 측정크기의 평균값이용)

측정 주파수(Hz)	공연영역 16m의 평균값	조용한영역 16m의 평균값	상대적 크기[dB]
200	75.89	60.39	-15.50
250	75.62	59.88	-15.74
315	68.50	57.50	-11.00
400	68.01	53.07	-14.94
500	67.24	55.50	-11.74
630	67.70	48.06	-19.64
800	71.17	52.79	-18.38
1000	65.74	51.49	-14.25
평균값	69.98	54.83	-15.15

표 3.4.8 “32m 라인”음원 억제율(제어 후 측정크기의 평균값이용)

측정 주파수(Hz)	공연영역 32m의 평균값	조용한영역 32m의 평균값	상대적 크기[dB]
200	69.4	51.42	-17.98
250	70.08	55.95	-14.13
315	65.14	45.18	-19.96
400	61.86	46.07	-15.79
500	50.25	41.15	-9.10
630	49.20	43.61	-5.59
800	57.05	36.65	-20.40
1000	49.33	43.70	-5.63
평균값	59.03	45.46	-13.57

표 3.4.5 ~ 표 3.4.8의 야외실험결과를 살펴보면, 반경 8m까지 바닥반사 영향으로 인해 주파수별 음압이 상대적으로 맥동하지만 16m이상의 결과를 살펴보면 제어주파수 영역에서 고르게 음압이 감소되는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 16m 지점들의 공연영역과 조용한 영역의 평균 음압차는 15dB 이상 및 32m 지점들의 공연영역과 조용한 영역의 평균 음압차는 제어주파수 범위 내에서 13dB 이상 확보되는 것을 확인 할 수 있다.

<3차연도 무대 스피커 기반 공연소음 억제기술 연구개발 추진 일정>

연구내용	3차연도 월별 추진일정											
	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월
무대스피커 및 지향각 제어스피커의 배치에 따른 소음저감 기여도 확인 및 분석												
야외공연장(Test bed)의 공연소음 감쇄 알고리즘 적용 및 분석												

라. 연구개발 성과

○ 국내외 논문 게재(학술대회)

번호	수행기관명	논문명	학술대회명	개최국	주발표자명	발표일
1	광주과학기술원	Sound focusing and its practical applications	International Congress on Sound and Vibration 22	이탈리아	왕세명	15.07.12
2	광주과학기술원	Sound Projection and Capture 스피커의 지향성제어를 위한 null steering알고리즘에 대한 연구	APVC 2015	베트남	왕세명	15.11.24
3	광주과학기술원	Directivity control of a large loudspeaker by Multi-zone control using a small loudspeaker array	2016년도 춘계 소음진동 학술대회	한국	김기현	16.04.21
4	광주과학기술원	야외공연장 단일스피커의 방사소음 최소화를 위한 제어스피커 어레이 적용에 대한 연구	Inter-Noise 2016	독일	김기현	16.08.23
5	광주과학기술원	특정방향의 스피커 음원제거 알고리즘개발 및 야외공연장의 방사소음억제 적용	2016년도 추계 소음진동 학술대회	한국	김기현	16.10.20
6	광주과학기술원		2016년 한국음향학회 추계 학술발표대회	한국	김기현	16.11.03

○ 기술 요약정보

- 기술 명: 무대 스피커 기반 공연소음 억제기술

- 요약 내용:

기존 공연에서 사용하던 무대스피커를 최대한 활용하여 공연소음의 외부 전파를 억제하는 기술이다. 기존 무대스피커에 지향각을 제어해 줄 수 있는 스피커 어레이를 추가로 설치하여 각색 방향으로 주로 음향이 전파되고, 공연장 외부로 누설되는 소음을 제어할 수 있는 기술이다.

- 기술 완성도: 기술 개발 진행 중

마. 연구 결과

- 기술적 성과: 무대 스피커 기반 공연소음 억제기술은 기존 무대음향 시스템을 최대한 활용하는 시스템으로 음향 관계자들의 사용에 거부감이 들지 않도록 개발한 것이 특징이다. 기술 개발 결과 공연장의 외부 영역에 형성되는 음압차는 약 8dB 이상으로 이는 국내외 연구 성과와 유사하다. 공연 소음 저감을 위한 시스템 도입에서 무대 스피커 기반 공연소음 억제기술이 현 음향 관계자들의 거부감을 줄여줄 수 있을 것이라 기대한다.

3-5. 개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 1: 개방공간용 능동소음제어

가. 1차연도 연구 내용 및 결과

연구 목표	공연소음 감쇄를 위한 기술 검토
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 ANC 알고리즘 연구 소개 - 야외 공연 소음 감쇄를 위한 ANC 알고리즘 연구 개발을 위한 고려 인자 - 수치 해석을 통한 ANC 시스템의 감쇄 기여도 예측 방법 및 결과
연구 결과	<ul style="list-style-type: none"> - 개방공간 소음제어용 ANC 알고리즘 검토 및 주요인자 분석완료 및 저주파 소음의 감쇄 가능성 확인

■ 기존 ANC 알고리즘 연구 소개

능동 소음 감쇄 (ANC) 기술은 secondary loudspeaker를 이용하여 감쇄하고자 하는 소음의 역위상 음원을 추가적으로 발생시킴으로써, 어느 특정 위치의 소음 레벨을 줄이는 데에 사용되며, 소음원과 소음 제어 환경의 음향학적 특성을 고려하여 설계되어야 한다는 점이 매우 중요하다.[13] 또한, 이 음향학적 특성은 시간에 따라 변하며, 이와 더불어 원하지 않는 외란에 의해 영향을 받는다. 따라서, 1차 연도 연구에서는 이러한 음향학적 변화에 적응하면서 동시에 만족할 만한 소음 감쇄 성능을 얻기 위하여 일종의 적응 필터(adaptive filter)를 기반으로 하는 LMS 알고리즘 (그림3.5.1)을 기본 알고리즘으로 설정하였다.

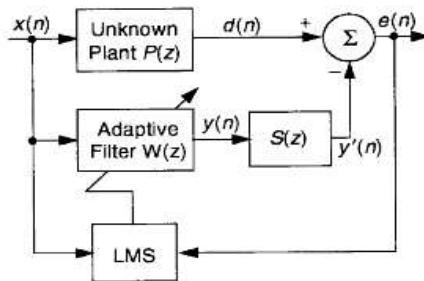


그림 3.5.1 LMS 알고리즘을 적용한 ANC 감쇄 시스템의 블록 선도

한편, 야외 공연장의 소음 저감을 위해 구현되는 능동 소음 제어 시스템에서 제어용 스피커와 여러 마이크로폰 사이의 ‘2차 경로 (secondary path)’는 제어 성능에 가장 큰 영향을 미친다. 이러한 사실은 능동 소음 제어 시스템 내부의 ‘2차 경로 추정 경로’ 구현시, 고차의 FIR 필터를 요구하게 만든다. 따라서, 1차 연도 연구에서는 이러한 LMS 알고리즘의 한계성 극복 및 수렴성을 보장하기 위하여 secondary path를 추정한 필터 $\hat{S}(z)$ 에 reference 신호를 통과시킴으로써, 안정한 소음 감쇄 성능을 갖도록 하는 FxLMS 기반 알고리즘 (그림3.5.2)을 기반으로 연구를 진행하였다. 더 나아가, 이러한 FxLMS 기반 알고리즘들 중 야외 공연 소음 저감에 적합한 알고리즘을 탐색 및 분석하여 적용할 계획이다.

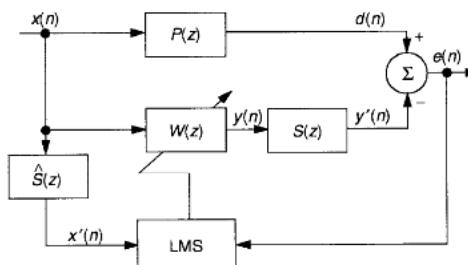


그림 3.5.2 FXLMS 알고리즘을 적용한 ANC 감쇄 알고리즘의 블록 선도

■ 야외 공연 소음 감쇄를 위한 ANC 알고리즘 연구 개발을 위한 고려 인자

문헌 조사를 수행한 결과, 야외 개방 공간을 위한 ANC 감쇄 알고리즘 개발에 대한 연구는 거의 없는 미비한 실정이다. 본 연구에서 야외 개방 공간의 공연 소음 감쇄를 위한 ANC 알고리즘 개발을 위해 고려해야 될 사항들을 그림3.5.3과 같이 정리하였다. 또한, 이 고려 사항들에 대한 해결 방안에 대해서도 그림 3.5.4와 같이 탐색하였다. 이러한 고려 사항 및 해결 방안들을 토대로 야외 공연용 소음 저감에 적합한 FxLMS 기반의 알고리즘을 선정 및 분석하고 적용하는 연구가 진행된다.

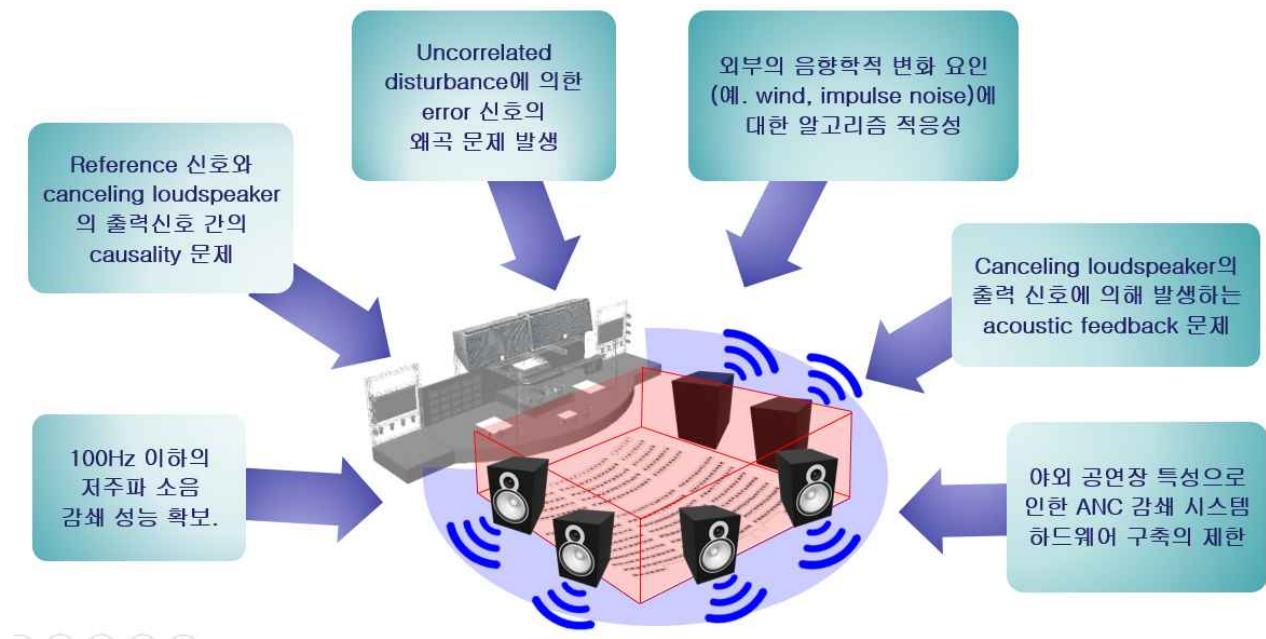


그림 3.5.3 공연 소음 감쇄 ANC 알고리즘 개발을 위한 고려 사항들

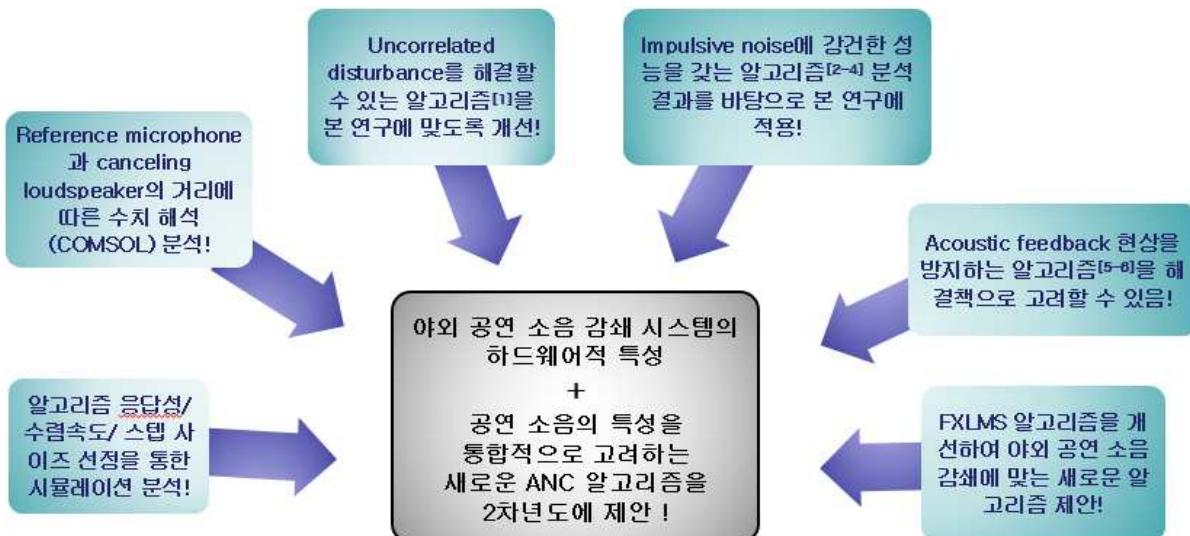


그림 3.5.4 공연 소음 감쇄 ANC 알고리즘 개발을 위한 고려 사항들에 대한 해결 방안 탐색

■ 수치 해석을 통한 ANC 시스템의 감쇄 기여도 예측 방법 및 결과

1) 저주파 공연소음의 감쇄 기여도 예측 방법

그림3.5.5는 유효 방사 면적과 해석 모델에 대한 개략도를 나타낸다. 음향 파워 측정 시 사용된 유한 요소 모델은 소음원과 감쇄 스피커의 음원을 단극 음원으로 가정하였다. 계산량 감소를 위하여 키르히호프-헬름홀츠 적분 방정식을 사용하여 음압을 계산하였다. 음향 파워 예측시 사용되는 방사 면적은 계산의 편의성을 위하여 직사각형 형태의 근사된 영역(그림3.5.6)을 사용하였다.

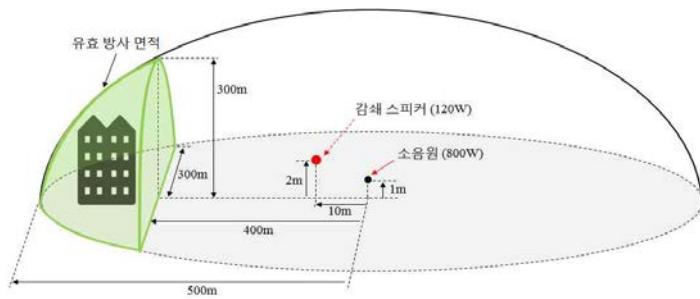


그림 3.5.5 감쇄 기여도 (10%)에 대한 유효 방사 면적

2) 저주파 공연소음의 감쇄 기여도 예측 결과

소음원의 가진 주파수 (40~120Hz)에서 1/3 옥타브 밴드의 중심 주파수에 대한 음향 파워 측정결과를 표3.5.1에 나타냈다. 각 주파수에서 감쇄 스피커 사용 전/후의 음향 파워 차이에 대하여 최소값 (min), 최대값 (max), 최대값과 최소값의 차이 (Δ)를 각각 계산하였다. 여기서 음향 파워의 최대값과 최소값의 차이 (Δ)는 단일 감쇄 스피커에 의하여 변화된 음향 파워를 의미한다. 이는 추후 알고리즘 적용 시, 단일 감쇄 스피커를 이용하여 제어할 수 있는 최대 음향 파워의 dB 값을 의미한다. 또한 공연 스피커와 감쇄 스피커의 실제 방사패턴을 유한요소 모델에 적용한다면 더 정확한 예측을 수행할 수 있다.

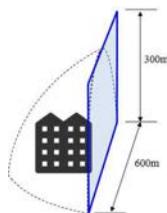
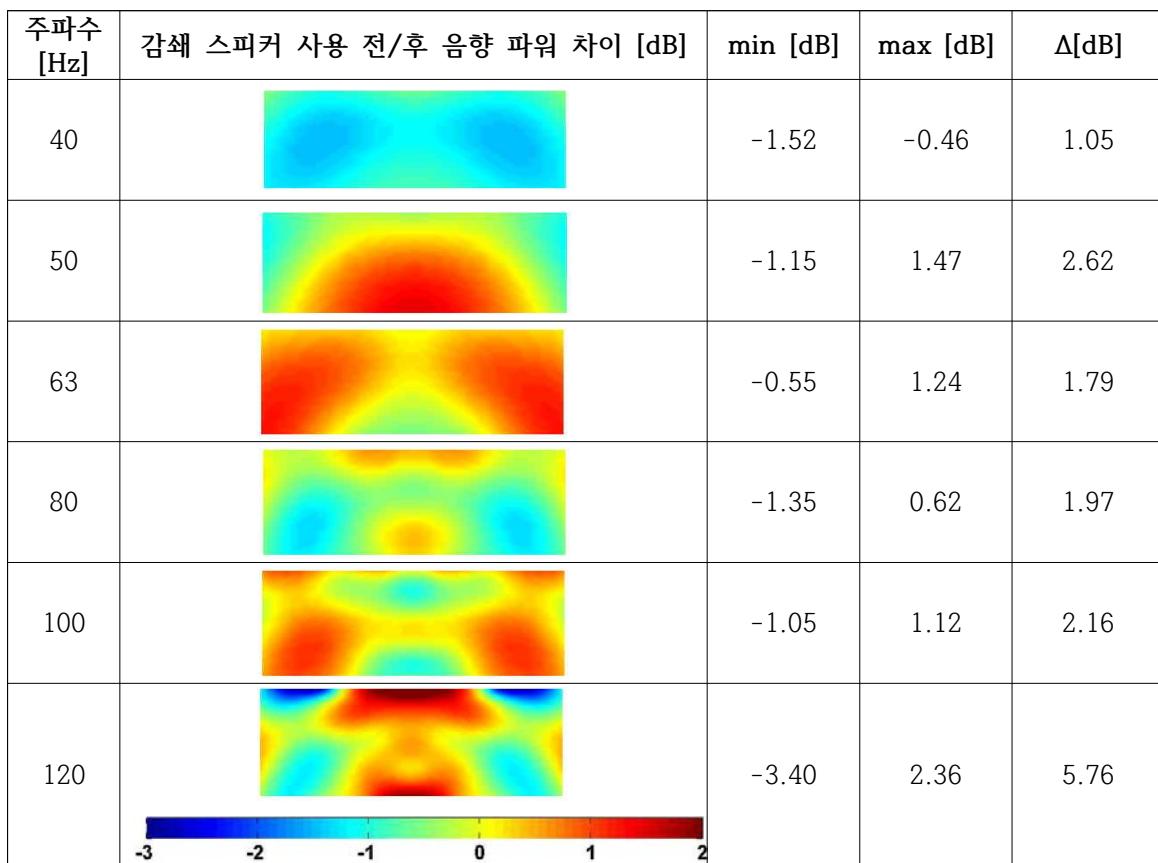


그림 3.5.6 음향 파워 수치 해석 영역

표 3.5.1 음향 파워 수치 해석 결과



<1차연도 개방공간용 능동소음제어 연구개발 추진 일정>

연구내용	1차연도 월별 추진일정											
	0월	0월	0월	0월	0월	0월	0월	0월	12월	1월	2월	3월
기존 ANC 알고리즘 연구 소개												
야외 공연 소음 감쇄를 위한 ANC 알고리즘 연구 개발을 위한 고려 인자												
수치 해석을 통한 ANC 시스템의 감쇄 기여도 예측												

나. 2차연도 연구 내용 및 결과

연구 목표	개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 알고리즘 개발
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 3차원의 능동공연 소음 제어용 오프라인 시간 기반의 ANC 알고리즘 제안 및 분석 - FxLMS 알고리즘을 이용한 야외 공연 소음 저감용 다채널 실시간 능동 소음 제어 시스템 구현에 대한 시뮬레이션 분석 - 오프라인 FxLMS 알고리즘 개념을 적용한 야외 공연 소음 저감용 다채널 실시간 능동 소음 제어 시스템 제안 및 구현에 대한 시뮬레이션 분석
연구 결과	<ul style="list-style-type: none"> - 시간 기반 전달 함수 기반의 오프라인 능동 소음 제어 알고리즘 제안 - 오프라인 + 온라인 능동 소음 제어 알고리즘 제안

■ 3차원의 능동공연 소음 제어용 오프라인 시간 기반의 ANC 알고리즘 제안 및 분석

야외 공간에서 다채널의 스피커를 이용하여 소음을 저감하는 방법은 크게 2가지 방법으로 나누어 생각 할 수 있다. 첫 번째 방법은 일명 ‘오프라인 능동 소음 제어(off-line active noise control)’라고 명명할 수 있다. 이 방법은 그림 #과 같이 배치된 능동 소음 제어 시스템을 통해 소음원 스피커로부터 발생된 소음을 저감시킬 수 있는 다채널 제어용 스피커의 입력 신호를 계산하여 제어하는 개념이라고 할 수 있다. 즉, 제어용 스피커의 입력 신호를 계산하기 위하여 주파수 기반의 음향학적 전달함수 $T.F(w)$ 를 사용하며, 계산이 수월하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 능동 소음 제어 시스템의 배치에 따른 ‘그룹 지연(group delay)’를 고려하고 있지 못하다는 단점을 갖게 됨을 파악하였다. 이 그룹 지연을 고려하지 못하면 일시적으로 변하는 소음, 예를 들면, 음악과 같은 소음에 취약하다는 의미이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 주파수 기반의 전달함수를 이용하는 것이 아니라, 시간 기반의 전달함수 $T.F(n)$ 를 이용하여 제어용 스피커의 입력 신호를 계산하는 방법을 제안하였다.

시간 기반의 전달함수 $T.F(n)$ 를 이용하여 제어용 스피커의 입력 신호를 계산하는 방법은 수식적으로도 거대한 행렬 연산을 필요로 한다. 이러한 이유로 인해, 전체 능동 소음 제어 시스템이 아닌 첫 번째 제어용 스피커와 첫 번째 에러 마이크로폰에 대한 수식으로 전개하려 한다. 먼저, 시간 영역에서의 음압 계산은 ‘discrete convolution’ 방법을 이용하며, 식 (3.5.1)은 이를 이용한 첫 번째 에러 마이크로폰에서의 음압 시간 데이터를 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 P_s(n) &= H_s(n)i(n) \\
 &= \begin{bmatrix} P_1(1) \\ P_1(2) \\ \vdots \\ P_1(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}(1) & 0 & 0 & 0 \\ h_{11}(2) & h_{11}(1) & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ h_{11}(N) & h_{11}(N-1) & \cdots & h_{11}(1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(1) \\ i(2) \\ \vdots \\ i(N) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.5.1}$$

단, N 은 입력 신호 차수를 의미한다. 식 (3.5.1)을 전체 능동 소음 제어 시스템으로 확장하면 식 (3.5.2)와 같이 나타낼 수 있으며, 제어용 스피커의 입력신호는 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}\mathbf{P}(\mathbf{n}) &= P_s(n) + P_p(n) \\ &= \mathbf{H}_s(\mathbf{n})\mathbf{i}(\mathbf{n}) + \mathbf{H}_p(\mathbf{n})\boldsymbol{\delta}(\mathbf{n})\end{aligned}\quad (3.5.2)$$

$$\mathbf{i}(\mathbf{n}) = -\mathbf{H}_s^{-1}(\mathbf{n})\mathbf{H}_p(\mathbf{n})\boldsymbol{\delta}(\mathbf{n}) \quad (3.5.3)$$

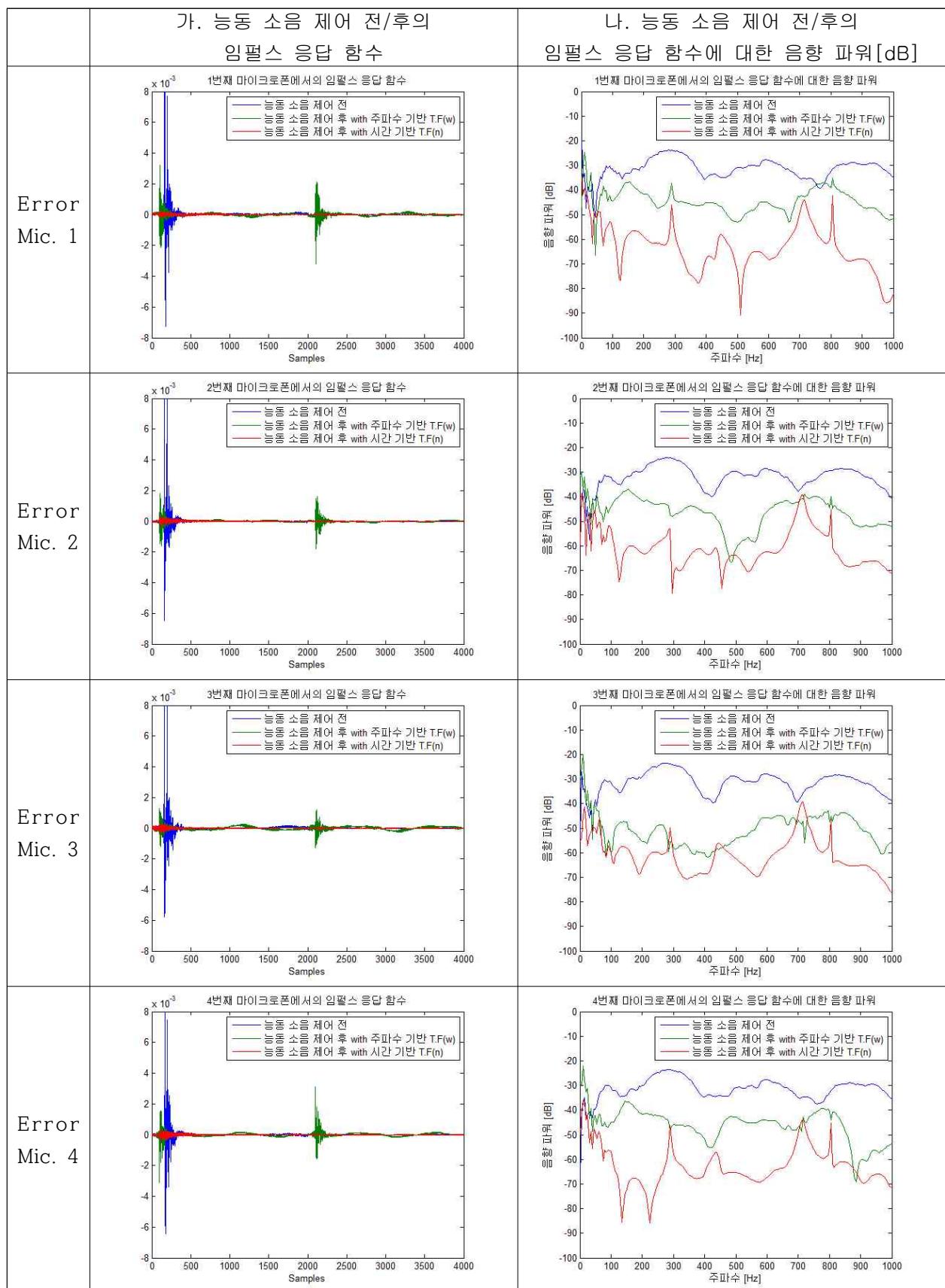
결과적으로 제어용 스피커의 입력 신호는 시간 기반의 전달함수 $T.F(n)$ 을 사용하였기 때문에 ‘그룹 지연’을 고려하고 있다. 반면, 입력 신호 차수 N 에 대한 전달 함수의 행렬 사이즈가 굉장히 크기 때문에 제어용 스피커의 입력 신호를 계산하는 데에는 많은 신호를 필요로 한다는 단점 또한 갖고 있다.

앞서 언급한 이 두 가지 방법에 대한 소음 저감 효과를 파악하기 위하여 수행한 내용은 1) 주파수 기반의 전달함수를 사용한 경우와 2) 시간 기반의 전달함수를 사용한 경우에 능동 소음 제어 성능에 미치는 영향을 MATLAB 시뮬레이션을 통하여 표 # 과 같이 정리하였다. 표 3.5.2의 결과를 다음의 3가지 정도로 요약할 수 있다.

- 1) 제어 전의 경우에 비하여 제어 후의 경우가 전체적으로 더 작은 크기의 임펄스 응답을 보이고 있다. 이는 능동 소음 제어 효과로 인하여 임펄스 응답의 크기 감소하였음을 보여준다.
- 2) 주파수 기반 $T.F(w)$ 를 사용하여 능동 소음 제어를 한 경우의 임펄스 응답은 시간 기반 $T.F(n)$ 를 사용한 경우의 것보다 임펄스 응답의 크기가 크고, 비이상적인 형태를 보임을 확인하였다. 이는 주파수 기반 $T.F(w)$ 를 사용하였을 경우에 발생하는 오차에 의한 것으로 판단된다. 이는 시간 기반 $T.F(n)$ 를 사용하여 능동 소음 제어를 할 경우, 더 나은 효과를 얻을 수 있음을 의미함을 보여준다.
- 3) 시간 기반 $T.F(w)$ 를 사용한 경우에 주파수 기반 $T.F(w)$ 를 사용할 때보다 더 나은 소음 저감 성능을 얻을 수 있음을 보여준다.

결론적으로, 제안한 시간 기반 $T.F(w)$ 를 사용하는 3차원 야외 공연 소음 제어 알고리즘 개발 및 검증을 위하여 추후에 위의 시뮬레이션 결과를 뒷받침할 수 있는 실험 절차 및 결과를 도출할 필요성이 있다. 여기까지가 ‘오프라인 능동 소음 제어(off-line active noise control)’에 대한 내용이며, 이후는 ‘온라인 능동 소음 제어(on-line active noise control)’와 관련된 내용이다.

표 3.5.2 능동 소음 제어 전과 주파수 기반 $T.F(w)$ 및 시간 기반 $T.F(n)$ 를 사용하여 제어한 후의
임펄스 응답 함수 및 이에 대한 음향 파워 시뮬레이션 결과 비교



■ FxLMS 알고리즘을 이용한 야외 공연 소음 저감용 다채널 실시간 능동 소음 제어 시스템 구현에 대한 시뮬레이션 분석

야외 공연 소음 저감용 다채널 실시간 능동 소음 제어 시스템 구현에 적용되는 FxLMS 알고리즘의 효과를 시뮬레이션으로 검증하기 위하여 그림 3.5.7과 같이, 1개의 reference speaker, 4개의 제어용 스피커(Cancellation speaker) 그리고 4개의 마이크로폰으로 구성된 다중 채널 ANC 시스템을 구성하였다. 이를 통해 전체 제어 시스템에서 요구되는 ‘2차 경로’를 추정하였고, 이 추정된 경로들을 MATLAB 시뮬레이션 코드에 적용함으로써, 다채널 실시간 능동 소음 제어 시스템의 소음 저감 효과를 확인하였다.

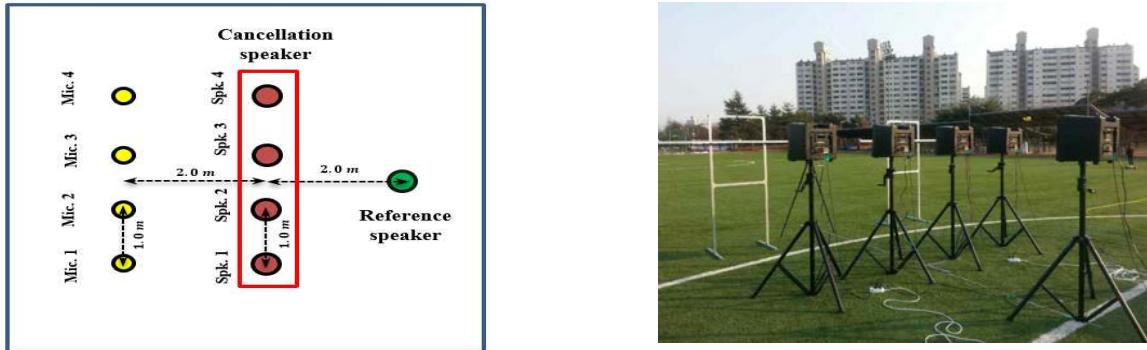
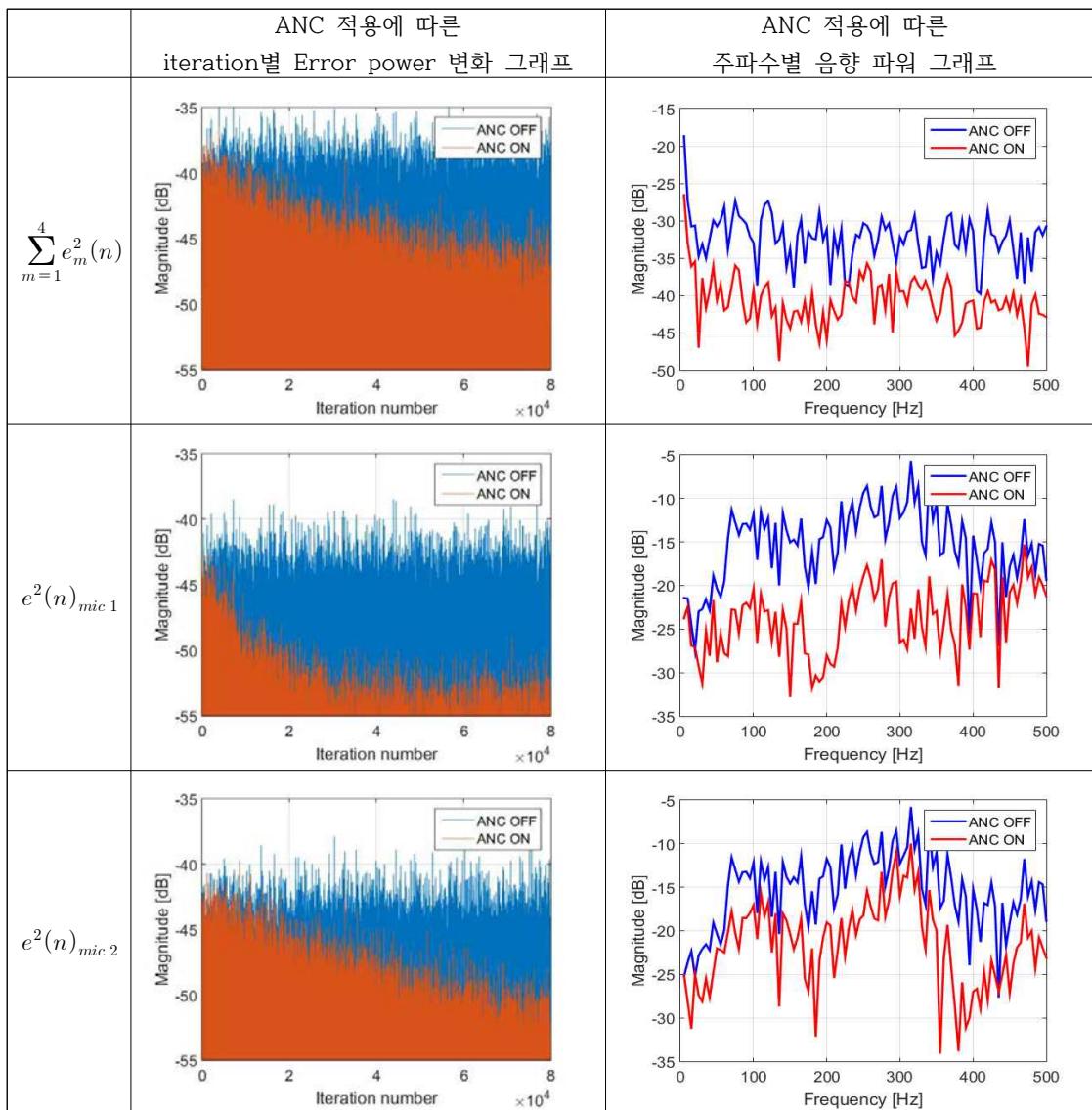


그림 3.5.7 다중 채널 ANC 시스템 (1x4x4) 구조 및 야외 실험 구성도

이들에 대한 결과를 표 #에 정리하였고, 표 3.5.3의 왼쪽은 샘플시간에 따른 각각의 마이크로폰으로 측정되는 오차 신호의 파워를 나타낸 것이다. 시간에 따라 마이크로폰에 들어오는 소음 신호가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉 적응필터 계수가 갱신되면서, 목적함수인 error signal들의 합이 줄어드는 것을 의미한다. 이 뿐만 아니라 적응필터가 수렴한 때의 error signal의 크기를 주파수 0~500[Hz]까지의 영역에서의 residual error signal power를 통해 살펴보았다.

표3.5.3 예상 마이크로폰별 ANC 적용 유무에 따른 iteration별 Error power 변화 및 주파수별 음향 파워 그래프 비교

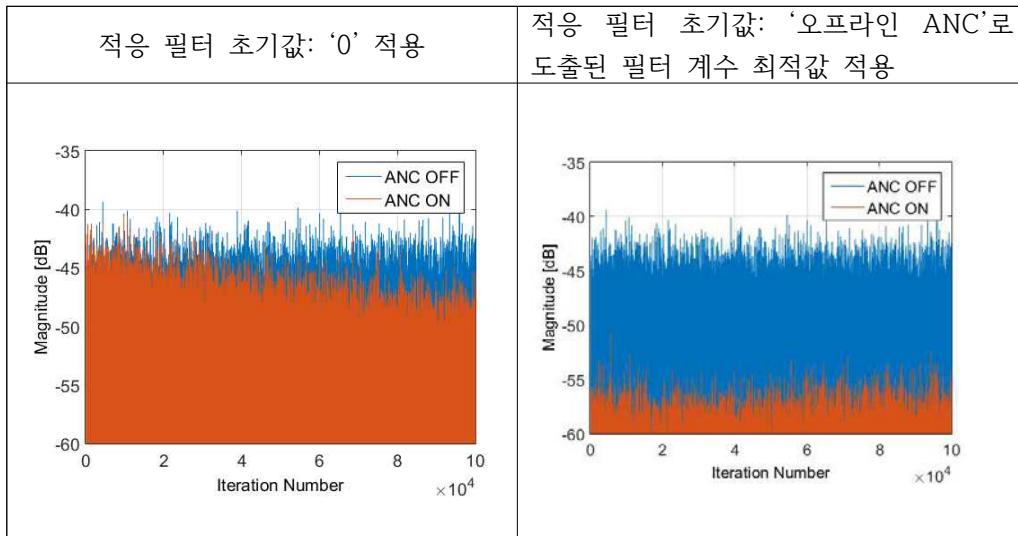


■ 오프라인 FxLMS 알고리즘 개념을 적용한 야외 공연 소음 저감용 다채널 실시간 능동 소음 제어 시스템 제안 및 구현에 대한 시뮬레이션 분석

야외 공연 소음 저감용 다채널 실시간 ANC을 적용하기 전에 미리 최적화된 적응필터 계수를 오프라인 ANC 알고리즘을 통해 도출하고 이 값을 필터 계수의 초기값으로 선정하는 방법을 제안하였다. 이러한 방법은 적응필터 계수가 수렴하기 위한 시간을 단축하는 효과를 가져다 줄 수 있으므로, 보다 적은 iteration안에 소음감쇄를 기대할 수 있다. 제안된 방법을 확인하기 위해, 기존 방법의 ANC 시뮬레이션과 최적화된 적응필터 (필터크기 2000)로 초기화한 ANC 시뮬레이션 결과를 표3.5.4에 정리하였다. 왼쪽 그래프와 같이 적응필터를 '0'으로 초기화한 경우, 초기 Iteration 구간에서 signal power가 감쇠하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 적응필터 계수가 최적화된 값을 향해 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 반면, 오프라인 능동 소음 제어 알고리즘으로 도출한 적응필터 계수를 초기값으로 적용한 경우에는 이미 적응 필터가 최적의 값을 가지므로 iteration에 늘어나도 소음감쇄의 변화 폭이 상당히 작음을 볼 수 있다. 즉, 적응필터의 계수가 이미 수렴 값에 도달하였으므로 갱신되는 폭이 적은 것이다. 적응필터를 적용하여 ANC를 구현할 때 필연적으로 생겨날 수밖에 없는 초기 변화구간을 없앰으로써, 수렴하기까지 걸리는 iteration을 줄임을

꾀할 수 있다고 판단된다. 이러한 아이디어를 추후에 확장하여 구현할 계획이다.

표3.5.4 FX-LMS의 적응 필터 초기값에 따른 초기 수렴 속도 비교



<2차연도 개방공간용 능동소음제어 연구개발 추진 일정>

연구내용	2차연도 월별 추진일정											
	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월
3차원의 능동공연 소음 제어용 오프라인 시간 기반의 ANC 알고리 즘 제안 및 분석	■	■	■	■								
FxLMS 알고리즘을 이용한 야외 공연 소음 저감용 다채널 실시간 능동 소음 제어 시스템 구현에 대 한 시뮬레이션 분석			■	■	■	■	■	■	■	■		
오프라인 FxLMS 알고리즘 개념을 적용한 야외 공연 소음 저감용 다 채널 실시간 능동 소음 제어 시스 템 제안 및 구현에 대한 시뮬레이 션 분석								■	■	■	■	■

다. 3차연도 연구 내용 및 결과

연구 목표	개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 개발
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 공연소음 감쇄 및 저감영역 형성을 위한 소음 감쇄 시스템 구현 - CTFX-NLMS 알고리즘 적용을 통한 소음 제어 응답속도 개선 효과
연구 결과	<ul style="list-style-type: none"> - 시운영 가능한 능동감쇄 시스템의 개수 3개 달성, 공연 소음 감쇄 5~6dB 저감

■ 공연소음 감쇄 및 저감영역 형성을 위한 소음 감쇄 시스템 구현

본 파트에서는 공연소음 감쇄 및 저감영역 형성을 목표로 야외에서의 능동 소음 제어 시스템 구현을 설명한다. 야외 공연장에서 방사되는 소음을 저감하고자 구성한 능동소음제어 시스템은 그림3.5.8과 같다.

소음원에 해당하는 공연장에서 공연음원이 방사될 때, 제어 스피커를 통해서 공연음원과 크기는 같으면서도 180도 반전된 위상을 갖는 음원을 생성하여 두 음원간의 상쇄를 통한 소음감쇄를 유도한다. 능동소음제어 시스템을 구현하기 위해서는 소음원의 정보를 알 수 있는 참조신호, 소음원과 반대위상을 갖는 제어음을 형성하는 소음 제어필터, 이러한 제어음을 발생할 수 있는 제어 스피커, 소음저감 결과를 측정하여 소음 제어필터를 업데이트할 수 있는 오차 마이크로폰으로 구성된다.

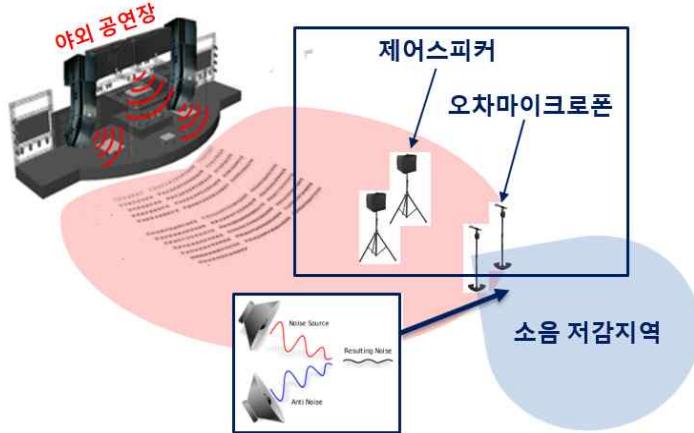


그림3.5.8 공연소음 감쇄 시스템 구성

제어음을 형성하기 위해서는 저감하고자 하는 공연 소음의 정보를 가지는 참조신호에 소음 제어필터를 선형 결합하여 생성한다. 소음 제어필터는 소음원, 제어스피커, 오차마이크로폰 등 시스템 구성 및 위치에 따라 달라진다. 뿐만 아니라 바람, 외부 소음 또는 온도 변화와 같은 요인으로 인해 제어음 형성을 위한 최적의 제어필터의 또한 변화할 수밖에 없다. 따라서, 구현환경에 적응할 수 있는 소음 제어필터를 설계하기 위해서 적응 알고리즘(adaptive algorithm)을 적용하였다.[14] 적응 알고리즘 중에서도 구현의 용이성 및 높은 안정성을 가지는 Filtered-X Least Mean Square (FX-LMS) algorithm 을 적용하였다. 알고리즘에 대한 상세한 내용은 2차년도 보고서를 기술하였으므로 본 보고서에서는 생략한다.

제어음 생성을 위한 소음 제어 필터의 업데이트 과정은 오차마이크로폰의 측정을 기반으로 수행된다. 따라, 오차마이크로폰 주변에서 가장 뛰어난 소음 저감 효과를 얻을 수 있다. 이 때문에 제어스피커 및 오차마이크로폰이 하나인 단일채널 시스템의 경우 소음 저감 범위가 제한적이다. 저감 범위를 넓히기 위해서는 두 개 이상의 제어 스피커 및 오차마이크로폰으로 구성되는 다채널 능동소음제어 시스템이 필요하다. 본 연구에서는 야외에서 저감영역을 형성하기 위한 방법으로 다채널 능동소음제어 시스템을 적용하였고 그 구성은 그림3.5.9와 같다.

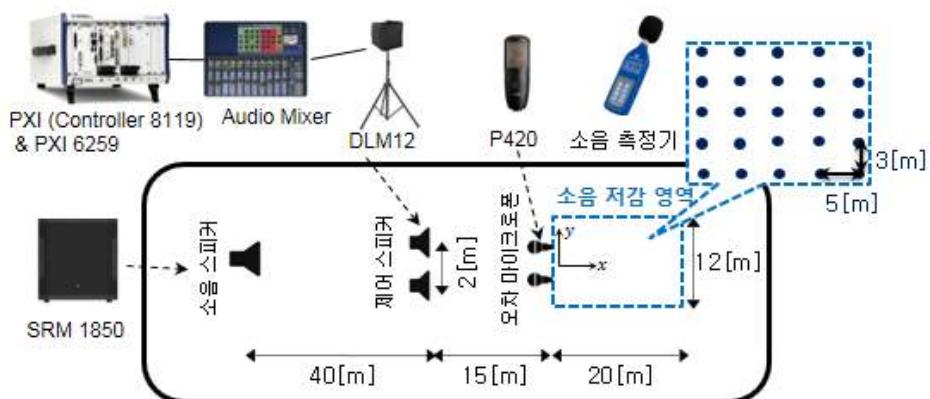


그림3.5.9 공연소음 감쇄 시스템 하드웨어 구성

야외공연 상황을 모사하기 위한 소음원 스피커로 Mackie 사의 'SRM 1850 우퍼 스피커'를 사용하였다. 본 스피커는 실제 야외공연용 스피커로서 특히 관심주파수 대역인 500Hz 이하에서 저주파 소음 방사를 위해 적합하다고 판단하였다. 제어음 출력을 위한 제어 스피커로 Mackie 사의 'DLM 12 스피커', 오차 마이크로폰으로는 AKG사의 'P420'을 각각 선정하였다. 적응 알고리즘 기반의 제어기를 구현하기 위해서는 National Instrument사의 PXI controller 및 DAQ(Data acquisition) 보드를 활용하였으며, LABVIEW를 활용하여 제어 프로그램을 설계하였다. 오디오 믹서를 활용하여 제어 스피커 입력 신호 및 오차 마이크로폰 출력 신호의 증폭 및 대역폭을 조절하였다.

소음감쇄 성능을 평가하기 위해 야외 공연장 test bed에서 야외 실험을 수행하였으며, 이에 해당하는 실험 사진 및 결과는 그림3.5.10과 같다. 성능 평가를 위해서 백색 잡음을 야외 공연장에서 실제로 사용되는 테스트 음원을 선정하여 소음 스피커를 통해 재생하였다. 소음제어에 따른 오차 마이크로폰에서의 소음 크기 변화 및 저감 영역에서의 소음크기 변화를 분석하였다. 분석을 위한 주파수 대역으로는 20~400Hz의 저주파수 대역을 선정하였다. 그림3.5.10을 통해 소음 제어필터가 수렴하면서 소음감쇄가 일어나기 시작하는 것을 알 수 있다. 성능을 평가하기 위해 소음이 충분히 줄어들어 정상 상태를 유지하는 구간에서의 5초간의 데이터를 이용하여 제어 전/ 후의 주파수에 따른 소음 크기를 비교하였다. 그 결과, 백색 잡음에서 평균 10.7[dB], 야외 공연음원의 경우에는 평균 7.6[dB] 소음 감쇄를 확인할 수 있었다.

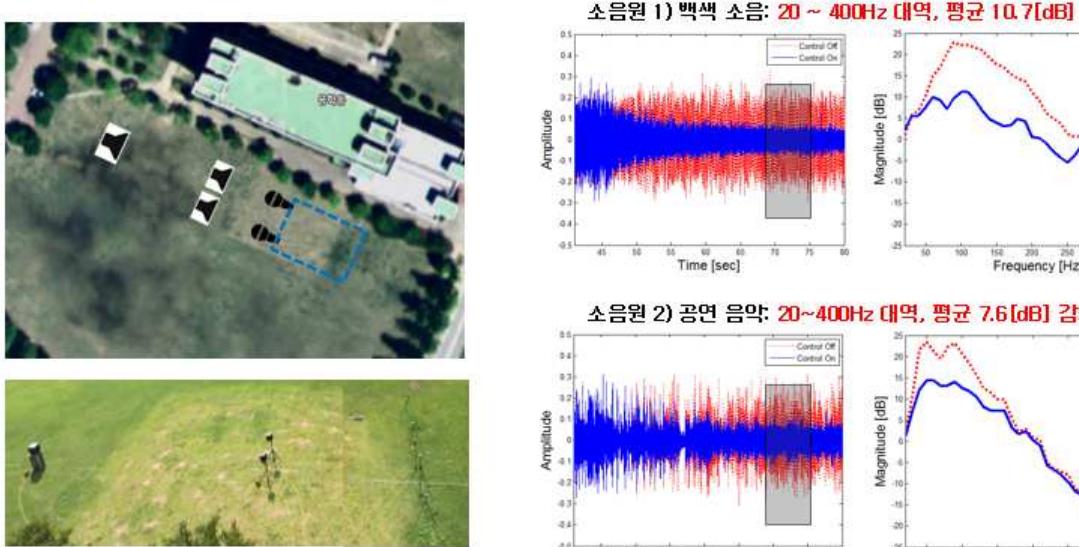


그림3.5.10 시스템 성능평가를 위한 야외 실험 결과

또한, 소음 제어에 따른 저감 영역에서의 소음 감쇄 효과를 분석하기 위해 소음 측정기를 활용하였다. 가로 12[m]와 세로 20[m]내의 저감 영역을 선정하고 이 영역 내부의 소음분포를 확인하기 위해 가로 3[m]와 세로 5[m]의 간격으로 소음 측정기를 설치하여 소음 감쇄 정도를 측정하였다. 소음 저감 영역에서의 소음 감쇄 효과를 분석하는 실험에서는 백색소음을 소음원으로 재생하였으며, 이에 대한 소음 저감 결과는 그림3.5.11와 같다. 측정값이 작을수록, 즉 파란 색이 많이 보일수록 능동 소음 제어에 따른 소음 저감 효과가 크게 일어난다는 것을 나타내고 있다. 정리하자면, 소음 저감 영역의 중앙 지점에서의 5dB이상의 뚜렷한 소음 저감 효과가 나타나며, 그 뒤쪽으로도 어느 정도 소음 저감 효과가 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 이처럼, 본 실험 결과를 통해 본 연구에서 제안한 다채널 실시간 능동 소음 감쇄 시스템의 소음 저감 성능 및 저감 영역 형성을 검증하였다.

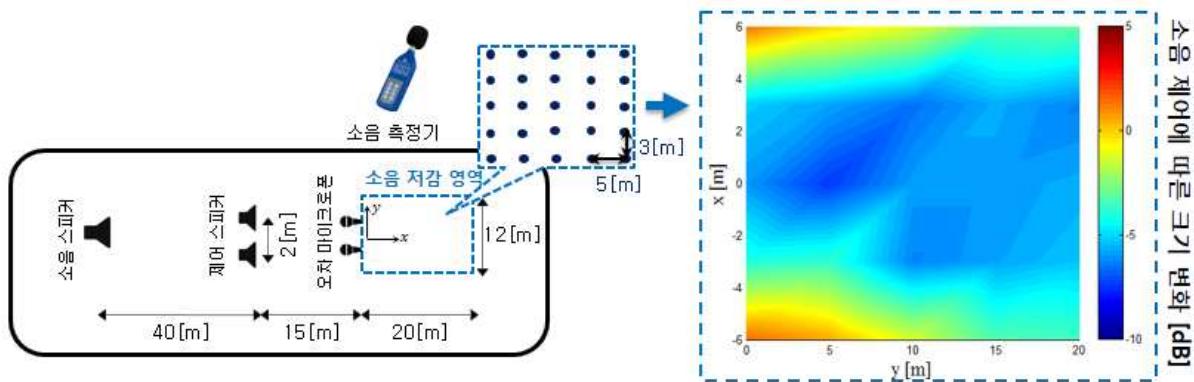


그림3.5.11 소음 저감영역에서의 소음감쇄 실험 결과 (소음원: 백색소음)

■ CTFX-NLMS 알고리즘 적용을 통한 소음 제어 응답속도 개선 효과

본 파트에서는 공연소음을 감쇄하기 위한 적응 알고리즘 기반의 능동소음제어 시스템에서 발생하는 소음 제어 응답속도 저하 문제를 해결하기 위한 방안을 제안한다. 이러한 응답속도 저하 문제는 주파수 별 신호의 파워가 불균등한 공연소음 특성이 주요 원인으로 분석된다. 이를 해결하기 위해서 공연소음의 주파수 별 파워를 균등하도록 정규화(Normalization)하여 적응 알고리즘의 수렴속도를 개선하는 CTFX-NLMS(Cosine Transform Filtered-X Normalized Least Mean Square) 알고리즘을 적용하였다. 적용한 알고리즘을 통해 소음 제어 응답속도를 개선할 수 있었으며, 이를 시뮬레이션 및 무향실과 야외에서의 실험을 통해 검증하였다.

먼저, 본 연구에서 적용하려는 CTFX-NLMS 알고리즘을 적용하려는 배경은 다음과 같다. 적응 알고리즘 중 LMS (Least Mean Square)기반의 알고리즘은 구현이 용이하고, 높은 제어 안정성의 이유로 능동 소음제어 시스템 구현에 널리 사용되어 왔다. 그러나, LMS 기반의 알고리즘을 통해 소음 제어필터를 수렴시키는 경우, 제어하고자 하는 소음의 주파수 특성에 따라 수렴속도가 저하되는 문제가 발생된다. [15, 16]

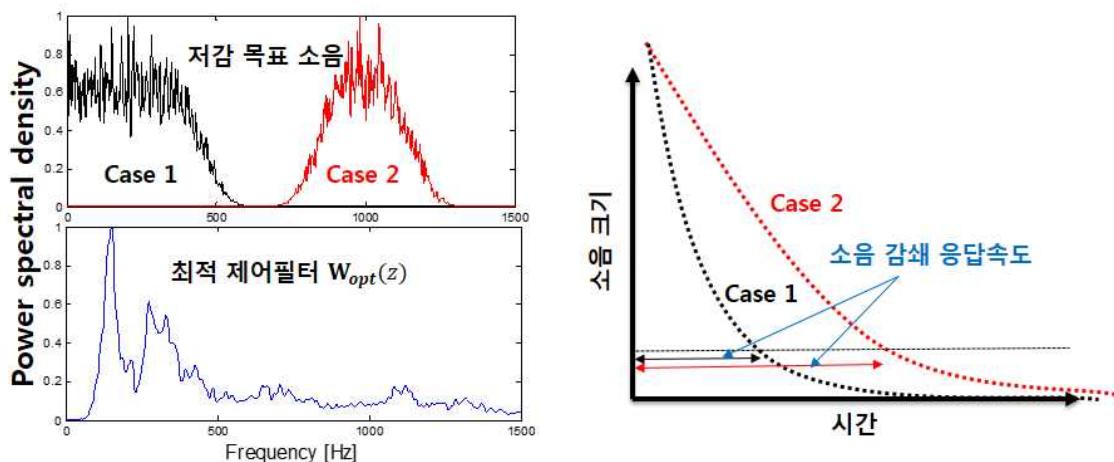


그림3.5.12 입력 소음의 주파수 별 파워 분포와 소음 제어필터의 수렴속도와의 관계

그림3.5.12와 같이, 입력되는 소음의 신호 파워가 주파수별로 불균등한 두 가지의 소음(Case 1과 Case 2)을 입력신호로 사용하여 소음 제어필터 $W_{opt}(z)$ 를 수렴시킬 경우, Case 1에 해당하는 소음을 제어하는 경우가 Case 2에 해당하는 소음의 경우보다 더 빠른 필터 수렴을 보인다. 그 이유는 Case 1의 입력 소음이 Case 2의 입력 소음보다 0~500Hz 대역에서의 높은 파워를 가지기 때문이며, 이러한 경향성이 높아질

수록 제어필터의 수렴속도가 높아진다. Case 2의 경우와 같이 800~1200 Hz 대역에 신호 파워가 몰려있는 경우에는 응답속도가 저하되는 것이다. 이러한 현상을 바탕으로 주파수에 따른 파워가 불균등하게 분포하는 소음일수록 수렴속도 저하문제가 불가피하게 발생하며, 결과적으로 소음 감쇄 응답속도가 저하될 가능성성이 크다고 판단할 수 있다.

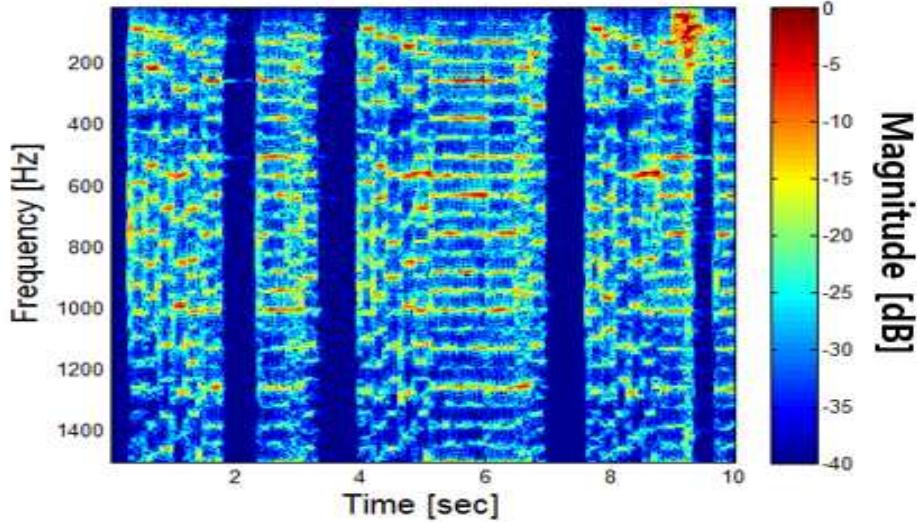


그림3.5.13 공연 음원의 시간-주파수에 따른 신호 파워 분포 그래프

그림3.5.13에서와 같이 대부분의 공연소음은 주파수별 파워의 분포가 불균등한 소음임을 알 수 있다. 따라서, 이러한 공연 소음을 입력 소음으로 하여 소음 제어필터를 업데이트할 경우, 상기 기술한 것과 같이, 소음 제어 응답이 저하 문제가 발생된다. 본 연구에서는 공연소음을 감쇄할 때 나타나는 응답속도 저하문제를 해결할 수 있는 대안으로서, CTFX-NLMS (Cosine Transformed Filtered-X Normalized LMS) 알고리즘을 다채널 능동 소음 감쇄 시스템에 적용하는 것을 제안하였다.

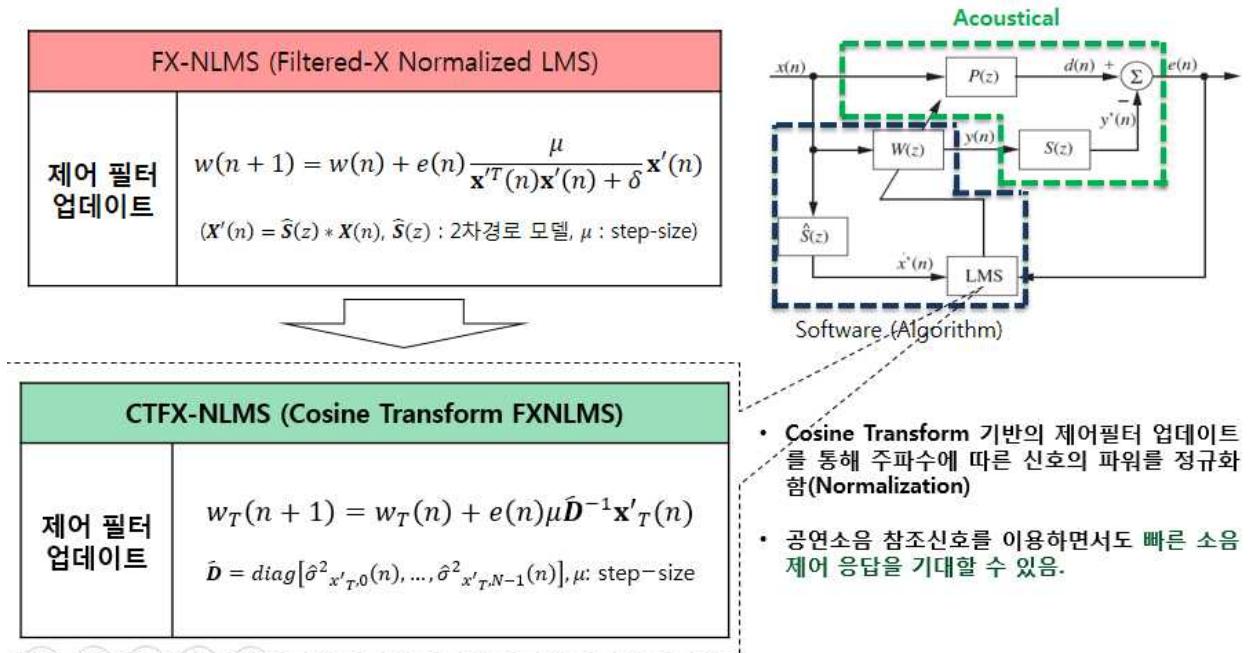


그림3.5.14 FX-LMS알고리즘과 CTFX-NLMS알고리즘의 제어 필터 업데이트 비교

그림3.5.14과 같이, Cosine Transform을 이용하는 CTFX-NLMS 알고리즘의 경우에 소음원의 주파수별

파워를 추정함으로써 공연 소음의 주파수별 파워 분포를 균등하게 정규화하는 것을 핵심으로 한다.[17] 그림3.5.15에서 확인할 수 있듯이, 주파수별 파워 크기의 분포가 특정 주파수 대역에서 몰려있는 신호를 Cosine Transform을 이용하여 정규화함으로써, 주파수마다 균등한 파워를 가지도록 할 수 있다. 이를 통해 주파수 별 파워의 불균형으로 인해 응답속도 저하 문제의 개선을 기대할 수 있다.

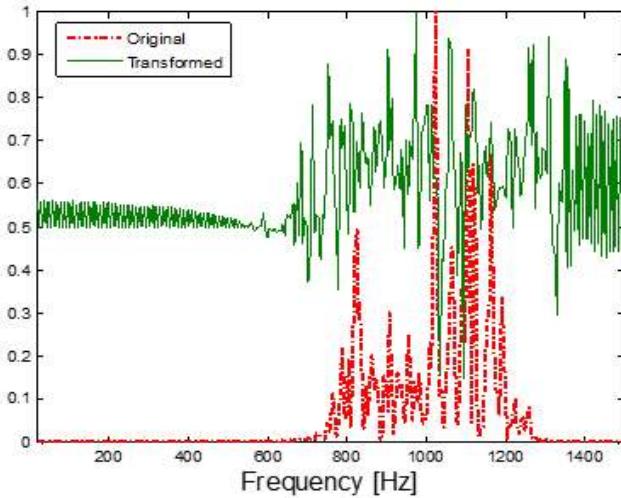


그림3.5.15 Cosine Transform을 이용한 주파수 별
파워 정규화 결과

알고리즘 적용에 따른 제어 응답속도 향상을 확인하기 위해 단일채널 시스템을 기반으로 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다. 실험적 검증을 위한 시스템 구성은 그림3.5.16와 같다. Cosine Transform이 적용된 CTFX-NLMS 알고리즘과 FX-NLMS 알고리즘을 이용하여 얻은 결과를 비교하였다. 비교를 위해 두 가지의 실제 공연 음원을 테스트 음원으로 사용하였다. (음원 1; Rage against the machine - 'Take the power back', 음원 2; Steely Dan - 'Everything must go')

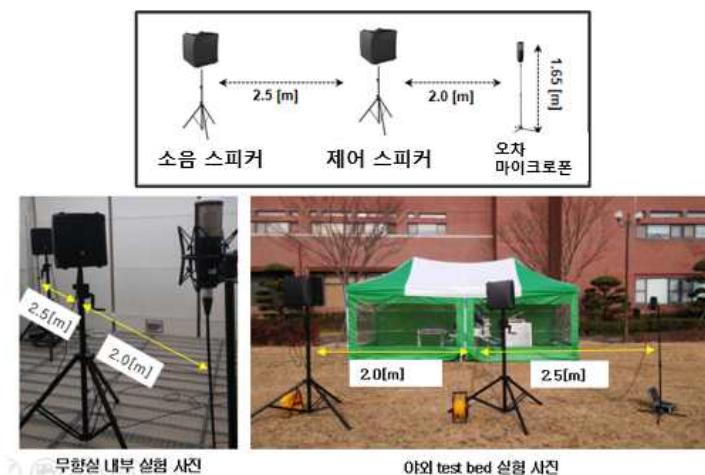


그림3.5.16 알고리즘 적용에 따른 응답속도 개선 검증을
위한 야외 test bed 실험 구성

상기의 두 가지 공연음원에 대한 시뮬레이션 결과와 무향실 및 야외 test bed 실험 수행 결과를 표 3.5.16에서 정리하였다. 오차 마이크로폰에서 측정한 소음 측정 데이터에서 확인할 수 있듯이, FX-NLMS 알고리즘에 비해 CTFX-NLMS 알고리즘을 적용한 경우의 응답 속도가 더 빠른 것을 알 수 있다. 표

3.4.1.1의 실험 결과를 정량적으로 정리하면 표3.4.1.2와 같다. 특히, 공연 음원 1과 공연 음원 2의 두 경우 모두, CTFX-NLMS 알고리즘을 적용한 경우 기존의 알고리즘보다 제어 응답 속도가 빨라짐을 알 수 있다.

표3.5.5 공연음원 별 알고리즘에 따른 수렴성능 비교 (상위 그래프 음원: 음원 1 & 하위 그래프 음원: 음원 2) - 제어 전: 파란색 & FX-LMS: 주황색 & CTFX-NLMS: 초록색

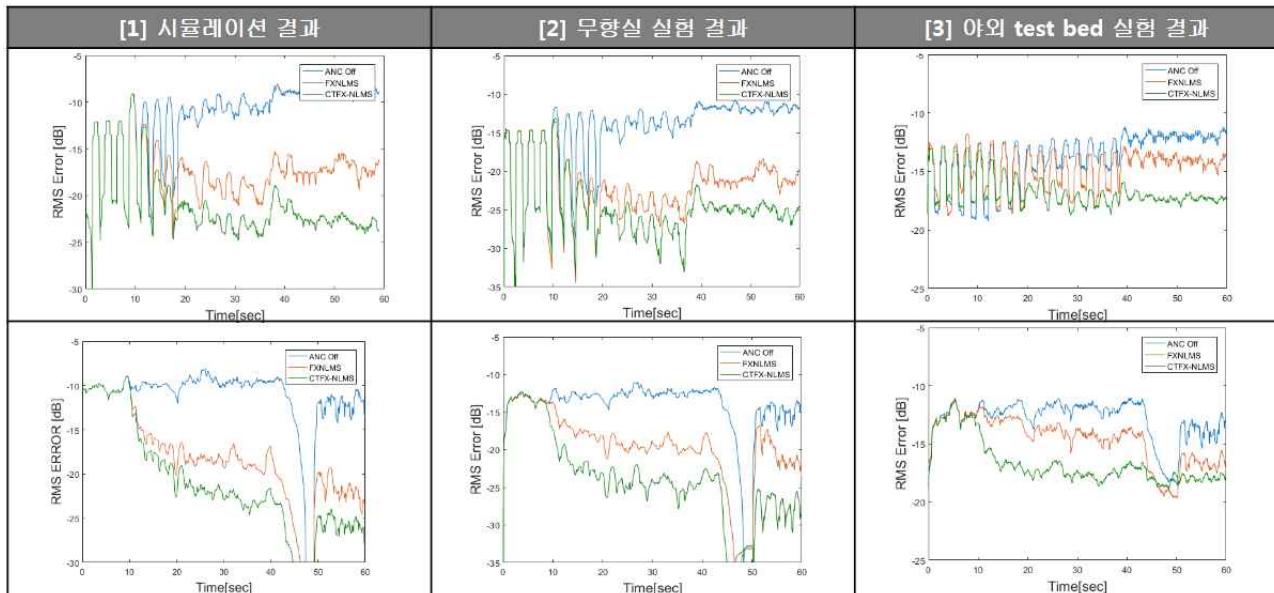


표3.5.6 알고리즘 별 수렴 속도 및 저감 성능 비교

공연음원 1 : Rage against the machine – ‘Take the power back’

	[1] 시뮬레이션 결과		[2] 무향설 실험 결과		[3] 야외 test bed 실험 결과	
감쇄 알고리즘	FXNLMS	CTFX-NLMS	FXNLMS	CTFX-NLMS	FXNLMS	CTFX-NLMS
수렴 속도	30.7 초	17.05 초	21.92 초	17.83 초	60초 이상	28.15 초
저감 성능	7.76 [dB]	14.49 [dB]	8.32 [dB]	12.68 [dB]	1.97 [dB]	5.94 [dB]

공연음원 2 : Steely Dan – ‘Everything must go’

	[1] 시뮬레이션 결과		[2] 무향설 실험 결과		[3] 야외 test bed 실험 결과	
감쇄 알고리즘	FXNLMS	CTFX-NLMS	FXNLMS	CTFX-NLMS	FXNLMS	CTFX-NLMS
수렴 속도	32.88초	17.07초	43.64초	16.12초	60초 이상	21.09초
저감 성능	10.94 dB	13.85 dB	7.08 dB	13.98 dB	3.66 dB	4.61 dB

알 수 있다. 뿐만 아니라, 빠른 수렴속도로 인해 넓은 감쇄 주파수 대역을 확보함에 따라 제어 후 60초 지점에서의 소음 저감 성능 또한 FXNLMS 알고리즘보다 향상됨을 확인할 수 있다. 결론적으로, CTFX-NLMS 알고리즘을 공연소음 감쇄 시스템에 적용함으로써, 상기 기술한 제어 응답속도 저하 문제를 효과적으로 개선할 수 있다는 것을 시뮬레이션과 실험 결과를 통해 확인하였다.

<3차연도 개방공간용 능동소음제어 연구개발 추진 일정>

연구내용	3차연도 월별 추진일정											
	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월
공연소음 감쇄 및 저감영역 형성을 위한 소음 감쇄 시스템 구현												
CTFX-NLMS 알고리즘 적용을 통한 소음 제어 응답속도 개선 효과												

라. 연구개발 성과

○ 국내외 논문 게재(학술지)

번호	수행기관명	논문명	학술지명	호	주저자명	SCI 여부(SCI/비SCI)	게재일
1	광주과학기술원	Electroacoustic Absorber Using Disturbance-Observer-Type Velocity Estimator	IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS		조영은	SCI	16.02

○ 국내외 논문 게재(학술대회)

번호	수행기관명	논문명	학술대회명	개최국	주발표자명	발표일
1	광주과학기술원	포트 엔클로저가 적용된 능동흡음기에 대한 흡음 성능 분석 연구	2016년도 춘계 소음진동 학술대회	한국	조영은	16.04.21
2	광주과학기술원	Study on the effect of vent on the electroacoustic absorber	Inter-Noise 2016	독일	조영은	16.08.23
3	광주과학기술원	야외공연장 저감을 위한 다채널 능동소음제어 시스템 설계	2016년도 추계 소음진동 학술대회	한국	이자승	16.10.20

○ 기술 요약정보

- 기술 명: 공연소음저감을 위한 개방공간용 다채널 능동소음제어 시스템
- 요약 내용: 개방공간인 야외에서 방사되는 야외공연소음을 저감할 수 있는 능동소음제어 시스템이다. 소음원과 크기는 같고 위상은 반대인 소음을 제어스피커를 통해 발생하고 이를 오차마이크로폰 주변에서 상쇄시킴으로서 소음감쇄를 유도한다.
- 기술 완성도: 필드 테스트 조건에서는 기술 개발 달성, 실제 소규모 야외공연에서의 적용 준비 중.

마. 연구 결과

상기의 국내외 기술 개발 현황을 통해 살펴보았듯이, 이들은 주로 야외 공간에서 도로, 항공기 그리고 엔진 배기등의 신호는 일종의 백색 잡음과 같이 시간별 다이나믹 특성 변화가 작고, 주파수별 음향 파워가 전체적으로 균등하다는 특성을 가지는 소음신호를 저감하는 연구를 수행하였다. 그에 비해 본 연구에서는 공연 음악은 시간별 다이나믹 특성 변화가 크고, 주파수별 음향 파워가 균등하지 않은 신호를 다루고 있기 때문에 이에 대한 연구는 기술적으로 어려운 부분이 존재한다. 또한, 이에 대한 연구조차도 전무한 상황이다. 이러한 연구적 배경을 바탕으로 본 연구를 통해 개발된 ‘개방공간용 실시간 다채널 능동 감쇄 시스템’은 세계 최초로 시도된 공연 소음에 대한 소음 감쇄 시스템이라고 말할 수 있다. 본 연구 결과물로서 제시한 ‘능동 감쇄 SW’는 백색 소음과 실제 공연 소음에 대하여 연구 목표로 설정했던 저주파 소음 저감 효과를 만족시키는 성능을 보여준다. 실제 환경에서 제어 방해 요소로 고려되는 바람의 영향에도 어느 정도 강건한 성능을 갖는다는 것도 자체적으로 확인되었다. 이러한 점들을 통해 본 개발 시스템의 우수성은 입증

되었다고 판단된다. 학술적으로 국내와 국외 학회에서 각각 2편과 1편의 학술대회 논문 발표, 1편의 국제 학술지 논문 게재의 연구 실적을 얻게 되었다. ‘개방 공간용 실시간 다채널 능동 감쇄 시스템’을 좀 더 보완하여 상용화 제품으로 완성하여 적용한다면, 먼저 공연 소음으로 인해 피해 받는 지역의 소음 문제를 어느 정도 해소해 주는 사회 문제 해결형 시스템의 역할을 할 것이라고 기대할 수 있다. 또한, 세계 최초로 시도한 야외 공연 소음 감쇄 기술이라는 점에서 세계 시장을 선점하는 데에 유리한 위치에 있다고 판단된다. 더 나아가, 본 연구와 관련된 업체를 물색하여 기술 협력 및 이전 사업을 맺음으로써, 공연 음향 산업 전체에 새로운 산업이 창출될 수 있다. 물론, 이를 위해서는 본 연구 개발 시스템이 다소 생소한 기술인만큼 공연 음향 산업과 관련된 관계자와 충분한 상의와 협력을 통하여 제품의 필요성 등을 제대로 논의하는 과정들이 필요한 건 명확한 사실이다. 정리하자면, 본 연구를 통해 개발된 ‘개방 공간용 실시간 다채널 능동 감쇄 시스템’은 공연 음향 산업뿐만 아니라, 이와 유사한 산업 발전에도 조금이라도 이바지 할 수 있는 연구 결과라고 결론지을 수 있다.

3-6. 개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 2: 임피던스 차이기반 차음시스템

가. 1차년도 연구 내용 및 결과

연구 목표	공연소음 감쇄를 위한 기술 검토
연구 내용	임피던스 부정합 가능한 주파수별 분석
연구 결과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1차원에 대한 임피던스 부정합 이론 개발 및 실험 결과 ○ 임의의 평면에 대한 이론 정립 연구노트

대부분의 야외 공연장에서 발생하는 소리는 전기 앰프로 증폭되기 때문에 여러대의 스피커로 인해 높은 음압을 발생시킨다. 공연장에서 발생하는 소음을 차폐하기 위한 가장 좋은 방법은 공연장 외부를 콘크리트 벽으로 둘러싸는 것이다. 여기서 콘크리트 경계면을 형성하는 것은 음향학적으로 볼 때 그 위치에서 공기의 입자의 속도를 0으로 만드는 경계 조건이기 때문에, 경계면에서의 임피던스가 무한대가 된다. 따라서 경계면에서의 급격한 임피던스 부정합이 발생되게 되므로 공연장에서 외부로 전파하는 소음을 반사시키게 되며, 결국 공연장에서 외부 주거 공간으로 전파하는 소음은 줄게 되므로 조용한 영역이 생성된다(그림 3.6.1 참고).

이와 같은 이론을 바탕으로 축소 실험을 통하여 경계면에 임피던스 부정합을 발생시켜 공연장 외부로 퍼져나가는 소음을 줄일 수 있는지 알아보는데 있다. 야외 공연장의 경우 실내 공간에 비하여 반사나 회절의 영향이 지배적이지 않기 때문에 공연자 주변에 위치한 청취자들은 공연장에서 발생하는 소음의 직접음이 지배적이다. 따라서 1차년도에서는 평면파 형태의 직접음을 발생시킬 수 있는 1차원 덕트를 설계하고 이를 기본으로 공연 음원과 부정합용 제어음원을 이용하여 해당 경계면에서 임피던스 부정합을 발생시켜 공연 영역에서 발생한 음파가 조용한 영역으로 전파되지 못함을 확인하는데 있다. 그림 15는 임피던스 부정합 적용 후의 공연 영역과 조용한 영역의 음압 레벨을 나타내고 있다. 제어 적용 결과 공연 영역 대비 조용한 영역에서 약 15dB 이상을 저감시킬 수 있다. 그러나 이 결과는 주파수별로 성능의 차이가 발생하며, 소음원의 파장에 해당하는 고조파 성분에서는 높은 성능을 기대할 수가 없다.

또한 해당 실험은 1차원에 국한된 이론 및 실험 결과이기 때문에 향후 2차 년도에는 1차원의 이론을 기본으로 실린더형 공연장을 기본 모델로한 경계 임피던스 부정합 이론 및 실험이 진행되어야 한다.

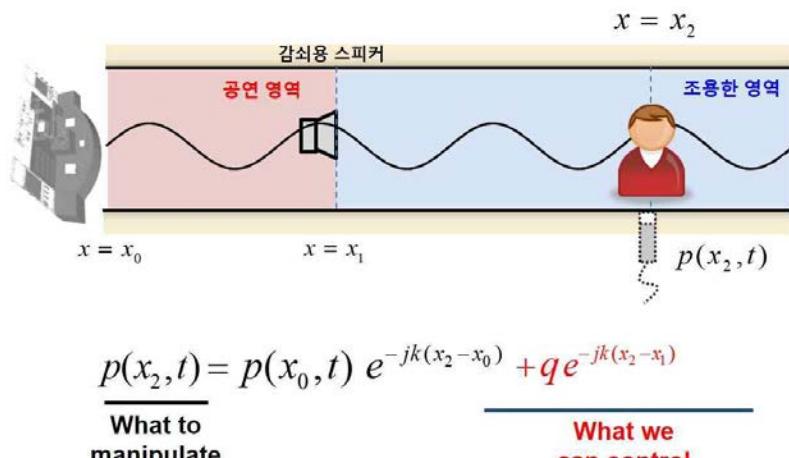
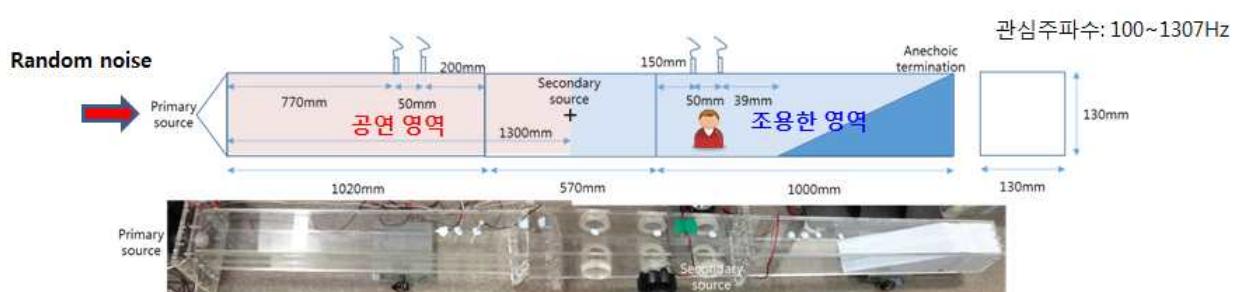


그림 3.6.1 1차원에 대한 임피던스 부정합 이론 개념도



반 무한의 1차원 덕트에 대한 임피던스 부정합 실험구성



그림 3.6.2. 실험결과: 공연영역 대비 최대 15dB 저감

<1차연도 개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 알고리즘 연구개발 추진 일정>

연구내용	1차연도 월별 추진일정											
	0월	0월	0월	0월	0월	0월	0월	0월	12월	1월	2월	3월
임피던스 부정합 기능의 주파수별 분석												

나. 2차연도 연구 내용 및 결과

연구 목표	개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 알고리즘 개발
연구 내용	o 사운드 포커싱 기반 기술 적용 시(double-layer 어레이 음향대조법 적용) 임피던스 부정합 형성 확인

	<ul style="list-style-type: none"> ○ 스피커 개수, 제어 영역이 주어졌을 때 주파수 별 성능 지표(contrast) 검토 (약 1kHz 이하에서 10dB 이상의 contrast 구현 가능)
연구 결과	<ul style="list-style-type: none"> ○ Double-layer 어레이를 통한 음향대조법 구현 시 임피던스 부정합 확인, 주파수 별 제어 성능, 실내에서 제어 결과 등에 대한 연구노트 ○ 주파수별 성능지표(contrast)를 출력하는 MATLAB 기반 컴퓨터 시뮬레이터

① Contrast control algorithm 구현 시 임피던스 부정합 형성

임피던스의 실수부(resistance)가 매우 작거나 큰 경우 임피던스 부정합으로 소리의 전파 차단이 가능하다. 공연 영역을 둘러싼 double-layer 어레이를 통해 contrast control 구현 시 어레이 영역에 임피던스 부정합 발생 여부를 그림 3.6.3 (b)와 그림 3.6.4(b)에서 확인할 수 있다. 반경 방향 임피던스(resistance)를 특성 임피던스로 normalization 수행해 보았다. Resistance가 1인 경우 반경 방향으로 소리의 전파하고, resistance가 0에 가깝거나 1보다 매우 큰 경우 반경 방향으로의 임피던스 부정합으로 소리의 차단을 할 수 있다.

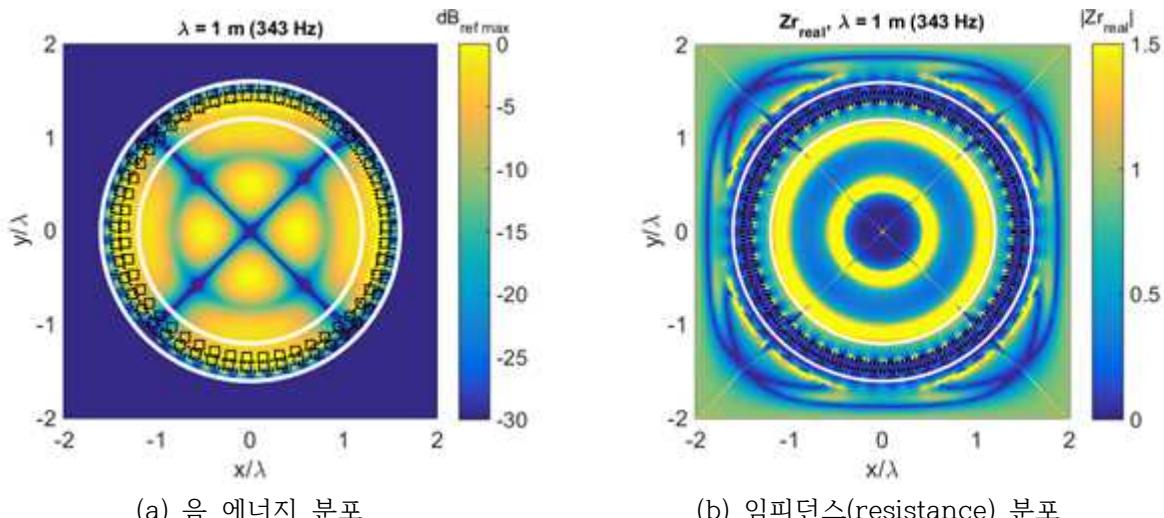


그림 3.6.3 Contrast control 구현 시 제어 결과 음장 및 임피던스(resistance) 분포 [제어음원: 총 100개 monopole로 구성된 double-layer 어레이(검정색 점), 밝은 공간(공연장 내부): 안쪽 하얀 원 내부, 어두운 공간(공연장 외부): 바깥쪽 하얀 원 외부].

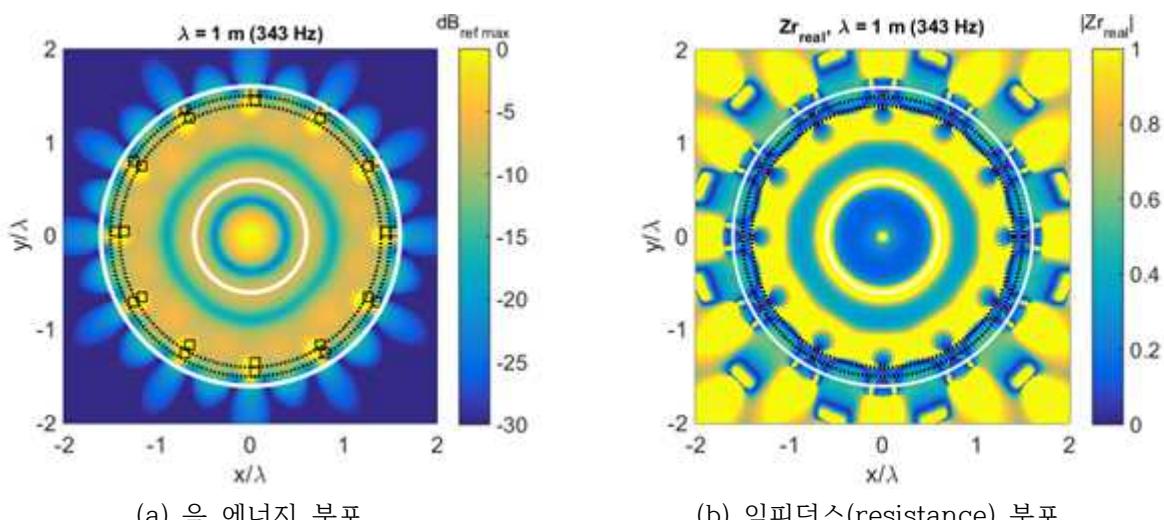


그림 3.6.4 Contrast control 구현 시 제어 결과 음장 및 임피던스(resistance) 분포 [제어음원: 총 24개 monopole로 구성된 double-layer 어레이(검정색 점), 밝은 공간(공연장 내부): 안쪽 하얀 원 내부, 어두운 공간(공연장 외부): 바깥쪽 하얀 원 외부].

② 사운드 포커싱 기반 기술 적용 시 적용 가능한 주파수 범위

제어영역(공연장)의 크기 및 형상, 스피커 어레이의 형상 및 스피커 개수가 주어진 경우 주파수에 따른 성능 변화 검토가 가능한 컴퓨터 시뮬레이터 구현되었다. (MATLAB 기반, 그림 3.6.5). 제어 파라미터(주파수, 제어영역[공연장]의 크기 및 형상, 스피커 어레이의 형상 및 스피커 개수, 관심 주파수 범위) 입력 시 각 주파수에 따른 contrast control 제어 결과를 성능 평가 지표(contrast, dB) 통해 제시하는 기능
- 저주파수에서 10dB 이상의 높은 contrast 확보 가능 (예를 들어 Fig. 3의 경우, 24개 제어음원 사용 시 약 1kHz 이하에서 대략적으로 10dB 이상의 contrast 구현 가능)

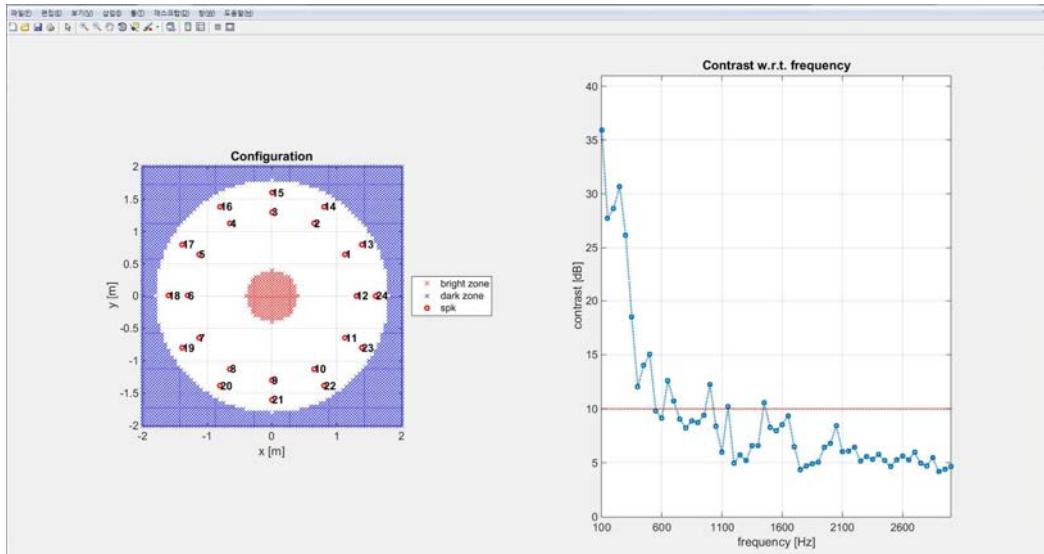


그림 3.6.5 MATLAB 기반 컴퓨터 시뮬레이터를 통한 주파수 별 제어 결과 제시 화면 [제어음원: 총 24개 monopole로 구성된 double-layer 어레이].

③ 해외학회 논문

- Yang-Hann Kim, Jung-Min Lee, Wanjung Kim, Hwan Kim, Jung-Woo Choi and Semyung Wang, "Outdoor concert hall sound design: idea and possible solutions," Proceedings of American Physical Society March Meeting 2016, March 14–18, 2016, Baltimore, USA.

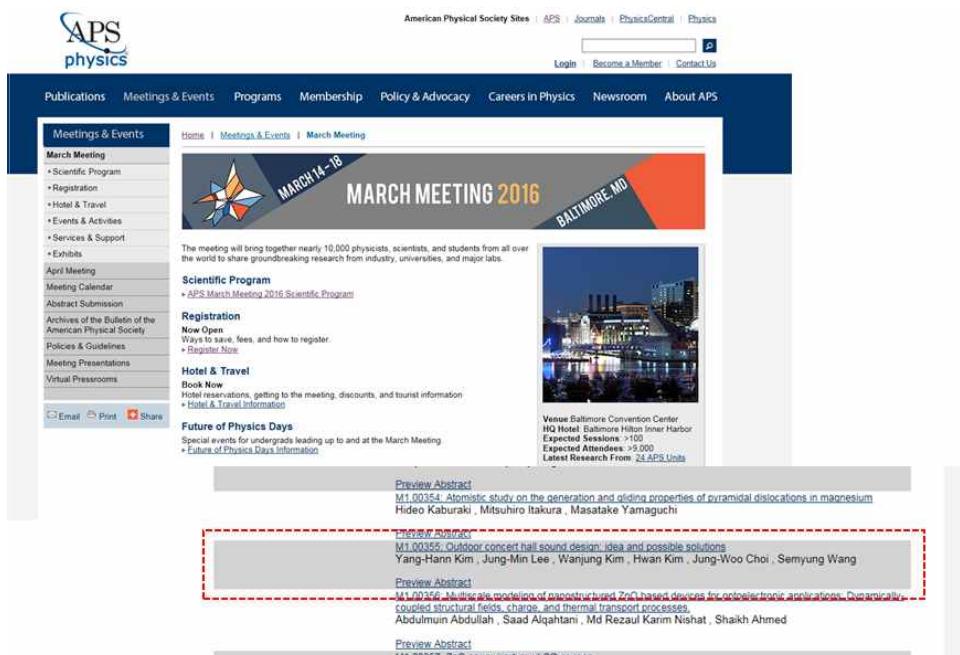


그림 3.6.6. 해외학회 발표논문

<2차연도 개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 알고리즘 연구개발 추진 일정>

연구내용	2차연도 월별 추진일정											
	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월
사운드 포커싱 기반 기술 적용 시(double-layer 어레이 음향대조법 적용) 임피던스 부정합 형성 확인	■		■	■	■	■	■					
스피커 개수, 제어 영역이 주어졌을 때 주파수 별 성능 지표(contrast) 검토						■	■	■	■	■	■	■

다. 3차연도 연구 내용 및 결과

연구 목표	개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 알고리즘 극대화
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 공연장 상황에 맞춘 제어가 가능한 주파수 범위 확인 - 시뮬레이션을 통한 임피던스 부정합 확인
연구 결과	<ul style="list-style-type: none"> - 사운드 포커싱 기반 기술 적용 시 임피던스 부정합 형성을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해 확인 - 주파수 영역 50Hz에서 1000Hz까지 제어가 잘 됨을 확인

① Contrast control algorithm 구현 시 임피던스 부정합 형성

Contrast control 결과 음장에서 반경 방향 임피던스의 resistance를 통해 임피던스 부정합 형성 여부를 그림 3.6.7과 그림 3.6.8에서 보이듯이, Dark zone 영역에서 resistance가 매우 작은 것으로 보인다. 이것은 소리의 반경 방향 전파 차단효과를 볼 수 있다.

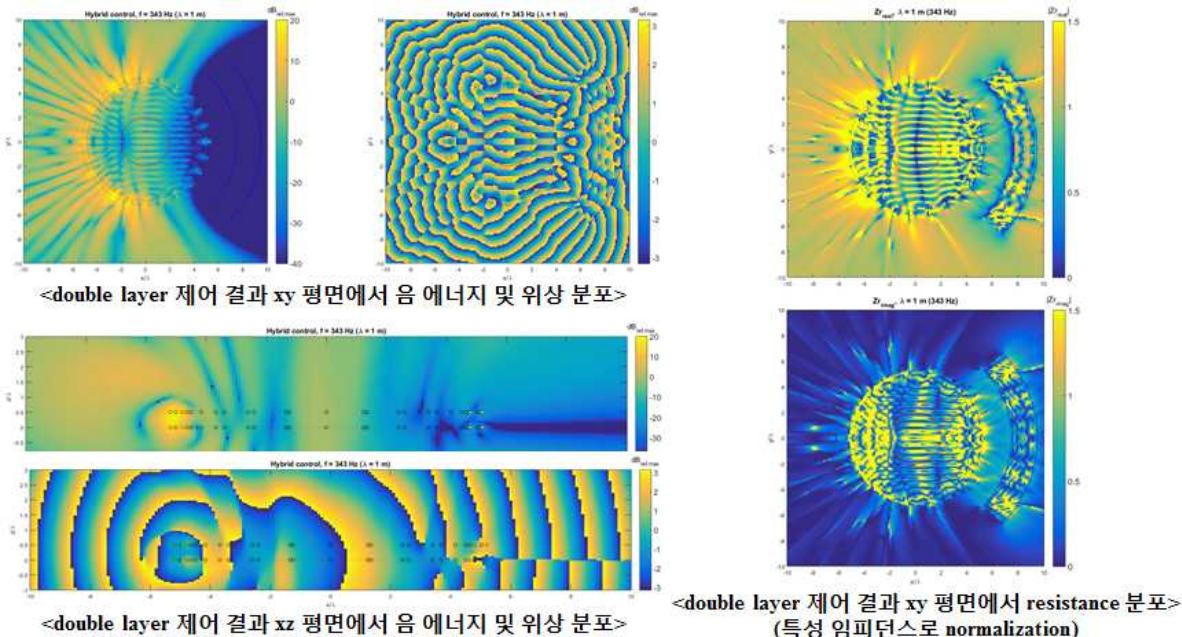


그림 3.6.7 Double layer 제어 상의 임피던스 부정합 형성 시뮬레이션

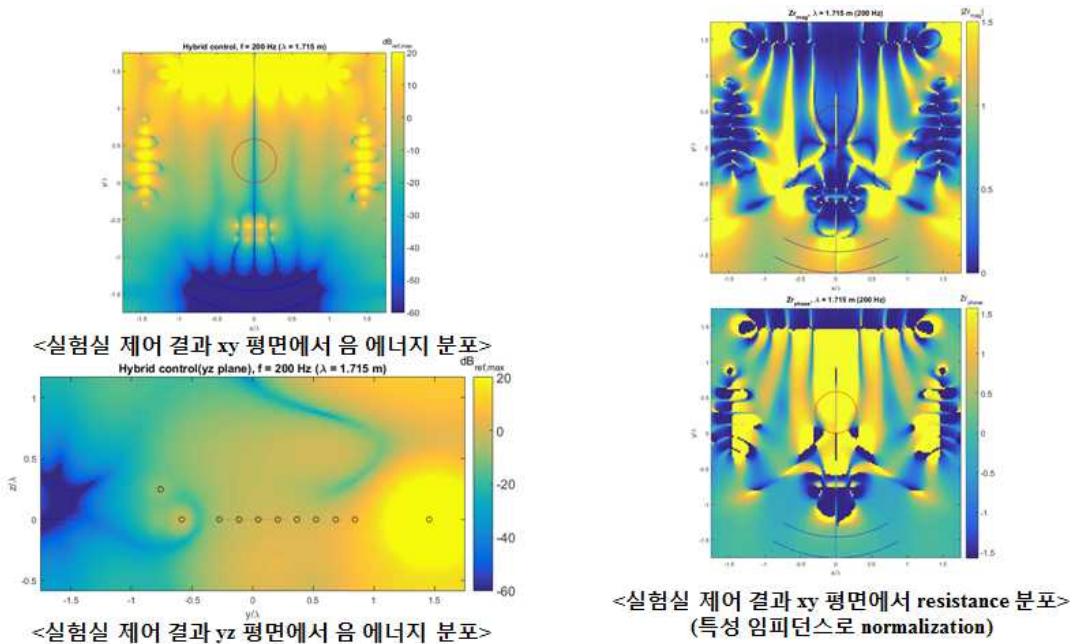


그림 3.6.8 KAIST 문지관 실험실 상의 임피던스 부정합 형성 시뮬레이션

② 사운드 포커싱 기반 기술 적용 시 적용 가능한 주파수 범위

제어영역(공연장)의 크기 및 형상, 스피커 어레이의 형상 및 스피커 개수가 주어진 경우 주파수에 따른 성능 변화 검토가 가능한 컴퓨터 시뮬레이터 구현해 보았을 때, (MATLAB 기반, 그림 3.6.9) 저주파수에서 20dB 이상의 높은 contrast 확보가 가능하다.

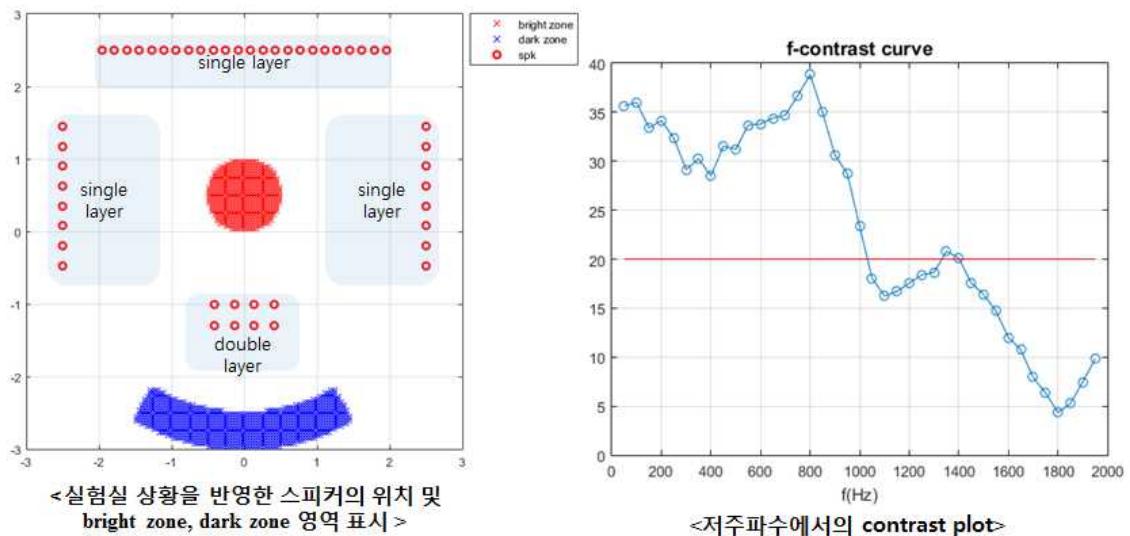


그림 3.6.9 MATLAB 기반 컴퓨터 시뮬레이터를 통한 주파수 별 제어 결과 제시 화면

<3차연도 Acoustic Parasol 연구개발 추진 일정>

연구내용	3차연도 월별 추진일정											
	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월
공연장 상황에 맞춘 제어 가능한 주파수 범위 확인												
시뮬레이션을 통한 임피던스 부정합 확인												

라. 연구개발 성과

○ 국내외 논문 게재(학술대회)

번호	수행기관명	논문명	학술대회명	개최국	주발표자명	발표일
1	KAIST	Application of acoustic contrast control for outdoor music performance : feasibility study and experiments	Acoustical Society of America	USA	김양한	16.12.01
2	KAIST	야외 공연장의 방사 소음 저감을 위한 어레이 스피커 설계 방법론	2016 소음진동공학회	한국	김양한	16.10.19
3	KAIST	어레이 스피커를 이용한 야외 음악당 음장 설계 방법 : 이론과 실험 결과	2017 공동 학술대회(한국소음진동공학회, 한국음향학회, 대한기계학회 동역학및제어부문),	한국	김양한	17.04.26

○ 기술 요약정보

- 기술 명: 공연장 경계 임피던스 부정합 기술
- 요약 내용: 경계면에 임피던스 부정합을 발생시켜 공연장 외부로 퍼져나가는 소음을 줄일 수 있는지 알아보는데 있다. 야외 공연장의 경우 실내 공간에 비하여 반사나 회절의 영향이 지배적이지 않기 때문에 공연자 주변에 위치한 청취자들은 공연장에서 발생하는 소음의 직접음이 지배적이다. 따라서 평면파 형태의 직접음을 발생시킬 수 있는 3차원 실험을 설계하고 이를 기본으로 공연 음원과 부정합용 제어음원을 이용하여 해당 경계면에서 임피던스 부정합을 발생시켜 공연 영역에서 발생한 음파가 조용한 영역으로 전파되지 못함을 확인하는데 있다. 제어 적용 결과 공연 영역 대비 조용한 영역에서 약 20dB 이상을 저감시킬 수 있다.
- 기술 완성도: 기술개발중

마. 연구 결과

- 기술적 성과: 본 기술은 야외 공연장에서 스피커를 2개의 층으로 설치하여, 부정합용 제어 음원을 만들어, 해당 경계면에서 임피던스 부정합을 발생시켜 공연 영역에서 발생한 음파가 조용한 영역으로 전파되지 못하게 하는데 있다. 야외 공연장에서 이와 같은 사례로 실험한 경우는 매우 미비하며 시도 되지 않은 방법이다. 이러한 배경에서 본 기술은 가상 방음벽의 기술 가능성을 매우 높였고, 향후 야외공연장의 소음을 방음벽을 두 개 설치 한 것만큼의 효과를 볼 수 있다.

3-7. 야외공연장 실시간 음향 모니터링 시스템

가. 1차연도 연구 내용 및 결과

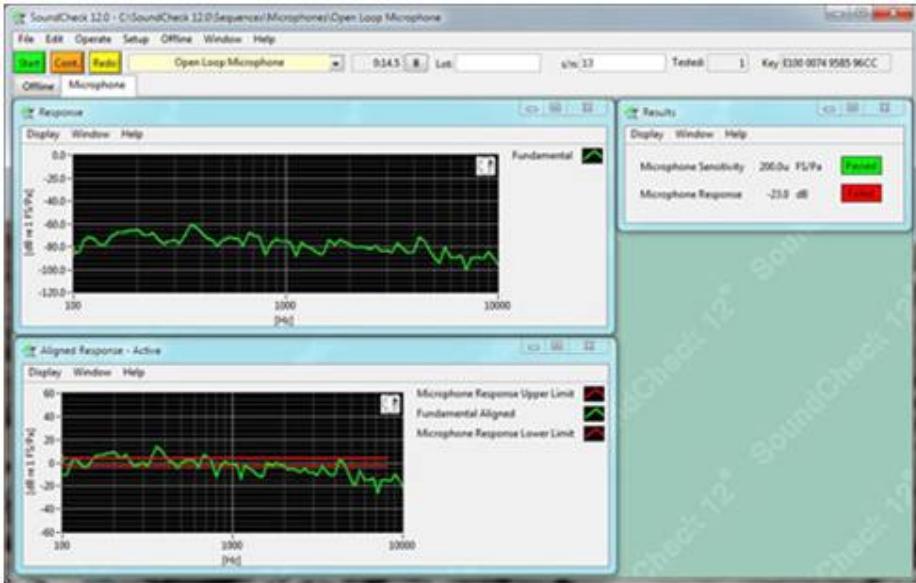
연구 목표	- 야외공연장 모니터링 시스템 설계
연구 내용	- 야외공연장의 음향에 대해 측정 및 모델링 방법을 분석하고, 이를 실제 공연장에 적용방안 도출 - 야외공연장 모니터링 시스템의 기초를 설계
연구 결과	- 10종의 관련 시스템을 비교/분석하였음 - 실제 공연장 적용을 위해서 5가지의 음향 특성 측정에 대한 결론 도출하고 이에 기반하여 시스템 설계

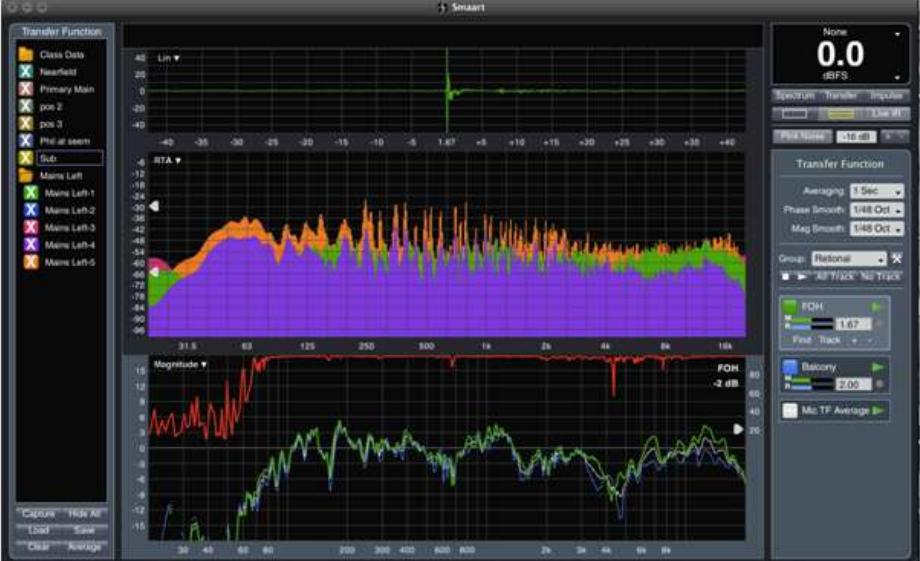
■ 야외공연장의 조건 연구

야외공연장의 무대가 어떤 조건을 가져야 하는지에 대해서 관련 전문가들과의 면담/조사를 통해서 연구하였고, 주변 환경, 무대 및 무대 하부의 지반, Loading area, 전기 및 배선, 공연장의 음향 전기 설비 및 접지 등이 중요한 조건이 됨을 알 수 있었다.

■ 공연장 음향 측정 및 분석 툴 연구

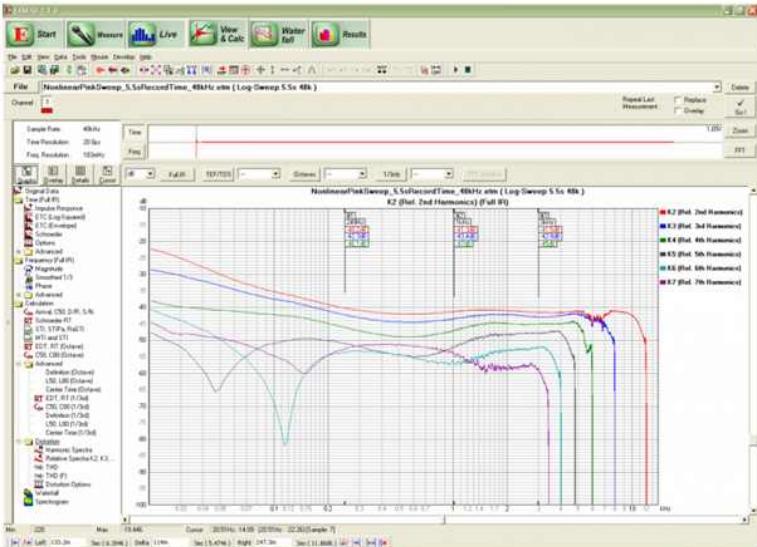
① 소프트웨어 기반 시스템

사운드 체크	
구동화면	
개요	<ul style="list-style-type: none"> - 음향 및 소음 진동 분야의 선두주자인 B&K의 연구원 출신 스티븐 티메가 독립하면서 설립한 Listen. Inc.에서 개발한 측정용 소프트웨어. - QC에서부터 R&D 분야까지 다양한 대응이 가능하며, 시퀀스 에디터가 내장되어 있어 프로그래밍에 대한 지식이 없는 사용자도 숙련도만으로 측정 시퀀스를 다양하게 짤 수 있음
측정범위	<ul style="list-style-type: none"> - 임펄스, 주파수응답특성, 위상, CSD(Cumulative Spectral Decay), THD, 러브 앤 버즈, 지향 패턴, 임피던스, 감도, 특성전압 등 음향 측정에 관한 대부분의 파라매터들을 산출할 수 있다
단점	<ul style="list-style-type: none"> - R&D에 대응하기 때문에 대부분의 무대음향관련 기능들을 내포하고 있으나 다중채널에 대한 동시 모니터링은 불가능함. - 소프트웨어 기반으로는 상당히 정밀한 성능을 보여주고 있지만, 랩톱 기반이라 관련 오류가 종종 발생. - 내부 연산량이 상당히 많아 다양한 시퀀스를 사용할 경우 연결되는 PC의 고성능을 요구함

스마트 라이브	
구동화면	
개요	<ul style="list-style-type: none"> - 스마트라이브는 현재 전세계적으로 가장 많이 사용되는 무대음향 및 현장 측정용 툴. - 다채널 모니터링을 기본적으로 지원하며, 2채널 FFT 기반의 분석을 제공. - 업데이트 버전마다 상세한 기능은 조금씩 차이가 나지만, 가장 자료가 많으며 사용자 층이 넓은 툴로 과거에는 메이어사운드의 SIM에 비해 기능이나 정밀도가 부족했지만, 현재는 소프트웨어라는 장점과 빠른 업데이트를 통한 기능 강화로 인해 오히려 인지도가 더 높음.
측정범위	<ul style="list-style-type: none"> - 펄스, 주파수응답특성, 위상, THD, 다채널 RTA, 피크 가이드, 딜레이 등의 대부분의 음향 관련 파라매터들을 산출함. - 또한 다중채널 입력이 거의 무한하게 이루어지기 때문에 다채널을 구성하여 현장 전체를 실시간으로 모니터링 할 때 적절함.
단점	<ul style="list-style-type: none"> - R&D용 툴이 아니기 때문에 소프트웨어 기반에 연결되는 상용 하드웨어에 대한 정밀한 캘리브레이션 기능이 미비함. - 또한 전기적인 측정이 포함된 파라매터 산출이 불가능함

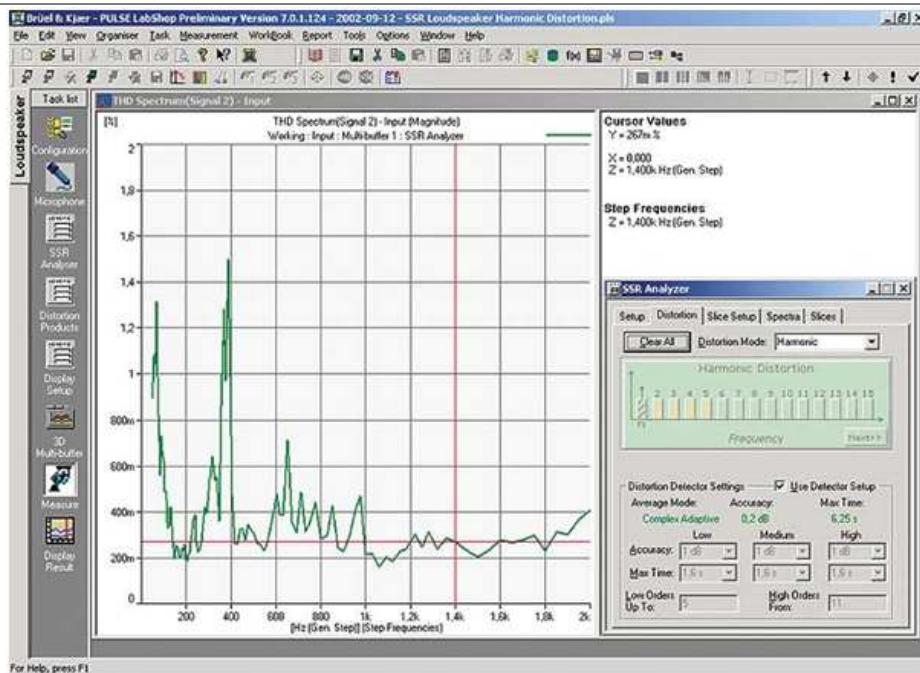
REW	
구동화면	
개요	<ul style="list-style-type: none"> - 실내음향을 측정하기 위해 개발된 측정 툴. 측정 소프트웨어로서는 드물게 모든 기능을 무료로 사용할 수 있음. 자바를 기반으로 구동되며, 여러 개의 프로젝트를 동시에 띠워서 교차, 또는 겹쳐서 볼 수 있음.
측정범위	<ul style="list-style-type: none"> - 임펄스, 주파수 응답특성, RTA, 스코프, 위상, CSD(Cumulative Spectral Decay), 임피던스, 룸 시뮬레이터, 스펙토그램, 에너지 타임 커브 등 대부분의 음향 측정기능을 모두 제공 - 강력한 EQ 기능을 가지고 있어서 여러 종류의 EQ 커브를 단일 또는 다중으로 적용해 사용할 수 있으며, 적용되는 형태를 시각적으로 출력 가능
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 다채널을 각각 측정한 것으로 종합해서 볼 수는 있으나, 다채널을 실시간 모니터링하는 것은 불가능함.

ARTA	
구동화면	
개요	<ul style="list-style-type: none"> - 소프트웨어 기반의 측정 툴 중 비교적 정밀한 툴. - 다용도로 사용기 가능하며, 활용하는 것에 따라 대부분의 음향측정에 사용할 수 있음. 뿐만 아니라 연결되는 장비의 성능만 충분히 좋다면, 캘리브레이션 과정을 거쳐 전기적인 측정도 가능함.
측정범위	<ul style="list-style-type: none"> - 임펄스, 주파수응답특성, RTA, 위상, CSD(Cumulative Spectral Decay), THD, 에너지 디케이(에너지 타임 커브), 임피던스, 지향 패턴 등 대부분의 파라매터들을 산출할 수 있음.
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 다채널 모니터링은 불가능함. - 멀티채널 동시 입력은 가능하지 않으며 2채널 측정을 기본으로 짜여져 있음. - 싱글 채널 방식으로 여러개의 채널을 각각 측정하여 오버레이 할 수는 있으나 후처리 기능이 없으며, 측정 또한 모든 개별 기능을 따로 입력해줘야 하는 불편함이 있음

EASERA- Electronic and Acoustic System Evaluation and Response Analysis	
구동화면	
	<ul style="list-style-type: none"> - 음향 관련 기업 AFMG에서 개발한 종합측정 툴. - 대부분의 측정 시퀀스를 사용할 수 있으며, 정밀하고 빠르게 사용할 수 있다. 다채널 측정을 지원하며 포스트 프로세싱 기능이 있어 여러 가지 가중치나 필터 등을 사용할 수 있음. - 또한, 연계 소프트웨어인 EASE를 사용하여 측정된 데이터를 시뮬레이션 가능.
개요	<p>* EASE - Enhanced Acoustic Simulator for Engineers</p>  <ul style="list-style-type: none"> - AFMG의 시뮬레이션 툴. - EASERA로 측정된 데이터를 불러들여 3차원적인 정보로 시뮬레이션해서 출력함. - 제품 1개에 대해서라면 360도 전방위의 구형 방사패턴을 나타낼 수 있으며, 공연장 전체로 보면 여러 포인트에 측정된 데이터를 통해, 소리의 전달 경로나 음압의 수준을 모델링 된 공연장 도면 위에 디스플레이함.
측정범위	<ul style="list-style-type: none"> - 임펄스, 주파수응답특성, RTA, 위상, CSD, THD, THD+N, 에너지 타임 커브, 임피던스, 지향 패턴 등 대부분의 파라미터들을 산출할 수 있으며, 측정 소프트웨어 치고는 드물게 최대 32채널까지의 RTA 모니터링이 가능함.
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 다채널에 대응하기는 하지만 라이브 사운드의 실시간 모니터링 기능은 부족함

Systune	
구동화면	
개요	<ul style="list-style-type: none"> - EASERA의 라이브 사운드 버전이라고 볼 수 있음 - 측정 중심적인 기능이 라이브한 환경에 대응하게 되었음. - EASERA의 측정 기능이 대부분 옮겨왔지만, 그대로 복사한 것이 아니라 실시간 모니터링을 중심으로 시스템이 구성됨.
측정범위	<ul style="list-style-type: none"> - EASERA의 측정범위의 것들을 모두 할 수 있음 - 다채널 모니터링이 가능하며, RT와 STI (IEC 60268-16, R2003)의 실시간 자동계산이 가능하여 명료도를 측정할 수 있음.

② 하드웨어 기반 시스템

구동화면	 <p>The screenshot shows the B&K Pulse software interface. On the left, there's a vertical toolbar with icons for Task List, Configuration, Microphone, SSR Analyzer, Distortion Products, Display Setup, 3D Multibutton, Measure, and Display Result. The main window displays a THD Spectrum plot titled "THD Spectrum(Signal Z) - Input". The plot shows a complex waveform with several peaks. A red vertical line marks a specific frequency. To the right of the plot is a "Cursor Values" panel showing X=0.000, Y=267.3%, and Z=1,400Hz (Gen Step). Below the plot is a "Step Frequencies" panel showing Z=1,400Hz (Gen Step). A separate window titled "SSR Analyzer" is open, showing a bar chart of harmonic distortion levels across various frequency bands from 1 to 15. The "Setup" tab is selected, showing distortion detector settings like Average Mode, Accuracy (Complex Adaptive), and Max Time (6.25 s).</p>
개요	<ul style="list-style-type: none"> - 음향 및 소음 진동 분야의 선두주자인 B&K를 대표하는 측정 플랫폼. - PC에서 구동하는 플랫폼이지만 반드시 B&K의 인터페이스가 필요하며, 모듈에 따라 요구하는 하드웨어가 존재. - 측정 시스템으로는 가장 기본이 되는 부분이며, 소프트웨어와 하드웨어를 서로 매칭시키기 때문에 높은 신뢰도를 가짐.
측정범위	<ul style="list-style-type: none"> - 측정할 수 있는 범위는 구성하는 모듈에 의해 다르며, 기본적인 음향 팩터들은 대부분 측정 가능. - 각 모듈은 따로 구매해야 하는 경우가 많음
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 음향 측정 분야에 있어서는 기본적인 부분 이외에 새롭게 도입된 측정 방법이나 디스플레이 방법은 적용이 되지 않음. - 다채널 측정을 위해서는 채널의 숫자만큼의 인터페이스 옵션 추가가 필요함. - 실시간 다중 모니터링 기능은 지원하지 않음.

Apx series	
구동화면	 <p>The screenshot shows the Apx series software interface. On the left, the 'Digital Path Setup' window displays 'Input/Output' and 'Output Configuration' sections. In the center, the 'Scope' window shows a sine wave signal. To its right is the 'FFT' window showing a single sharp peak. Below these are several measurement displays: 'RMS Level' (Ch1: -3.018 dBFS, Ch2: -2.993 dBFS), 'THD+N Ratio' (Ch1: -112.072 dB, Ch2: -112.882 dB), 'Frequency' (Ch1: 0.99703 kHz, Ch2: 0.99703 kHz), 'Level' (1.198 Vpp), and 'Digital Waveform Level' (Ch1: FFFFFFF0 hex, Ch2: FFFFFFF0 hex).</p>
개요	<ul style="list-style-type: none"> - 광범위하게 음향 및 전기 음향 측정을 지원하고 있는 툴. 원래 음향기기 및 소자의 전기적인 측정을 하던 고정밀 장비를 기반으로 하고 있기 때문에, 정확도 및 정밀도가 높음. - 최근 어쿠스틱 측정 기능을 확대하면서 본격적인 음향 측정 툴로써 주목 받고 있음.
측정범위	<ul style="list-style-type: none"> - 대부분의 측정 파라매터들을 측정할 수 있으며, 다채널 모델의 경우 8채널의 정보를 실시간 RTA 및 스크프트로 볼 수 있음. - 여러 채널을 순차적, 또는 동시에 측정이 가능하며 측정 시퀀스는 자동화 시킬 수 있다
단점	<ul style="list-style-type: none"> - R&D를 기반으로 개발되었기 때문에 라이브 사운드 환경의 다중 모니터링과는 다름. - 실시간 파라매터를 보내는 것이 아니라 측정한 이후 결과를 보내는 형태임

Sim3	
구동화면	
개요	<ul style="list-style-type: none"> - 메이어 사운드에서 메이어 스피커 시스템을 위해 개발 한 시스템. - 라이브 사운드에 적합하게 설계되었으며 입력되는 신호에 대한 반응이 즉각적임. 무대 음향 시스템의 모범적인 모습을 나타내었으나 폐쇄적인 환경과 느린 업데이트, 그리고 비싼 가격으로 인해 현재는 쓰는 곳이 많지 않음. - 각 포트 별로 철저하게 문제가 생기는 파트를 찾아낼 수 있도록 한 피드백 시스템이 있으며, 원 시그널과 피드백 된 시그널과의 비교도 즉각적으로 이루어낸다
측정범위	<ul style="list-style-type: none"> - 임펄스, 주파수응답특성, 딜레이, THD, 위상, RTA 등 기본적인 음향 팩터들을 실시간으로 확인할 수 있는데, 동시에 멀티레이어로 보는 것은 아니고 채널 별로 이동을 시켜가면서 볼 수 있음
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 다중 채널 입력이 가능하지만, 다중 디스플레이가 자유롭지 못함. - 또한 폐쇄적인 인터페이스의 특성으로 인해 데이터의 아웃풋이 이루어지지 않음

NTI-FX100	
구동화면	
개요	<ul style="list-style-type: none"> - NTI의 대표적인 거치형 측정 플랫폼. 빠르고 정확한 측정과 쉽고 편리한 사용성이 돋보임. 대부분의 음향 측정 파라매터들을 산출 할 수 있으며, 데이터의 입출력도 자유롭다. 다채널 측정을 지원하며, RTA 기능도 지원하지만 다채널 동시 모니터링은 불가능함.
측정범위	<ul style="list-style-type: none"> - 음압, RTA, 주파수 응답특성, STI, 딜레이 등이 있으며, 설치한 옵션에 따라 기능의 활성화 정도가 다름.
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 라이브 사운드를 고려하여 만들어진 플랫폼이 아니기 때문에 다채널 모니터링에 대한 대응이 되지 않음.

NTI-핸드헬드 시스템	
구동화면	
개요	<ul style="list-style-type: none"> - 현장에서 가장 많이 사용되는 NTI 제품임. 무대음향이나 실내음향에서는 주로 XL2 Audio and Acoustic Analyzer와 Minirator MR-PRO의 구성을 사용함. - 최대 1/12 옥타브의 해상도로 RTA를 볼 수 있으며 기본적인 음향 파라매터들을 산출 할 수 있다.
측정범위	<ul style="list-style-type: none"> - 음압, RTA, 주파수 응답특성, STI, 딜레이 등이 있으며, 설치한 옵션에 따라 기능의 활성화 정도가 다름.
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 산출할 수 있는 파라매터들이 적고 해상도가 낮음. PC와의 싱크를 통해 리모트 컨트롤 할 수 있지만, 측정과 저장이 동시에 이루어지지 않음

③ 필요 특성 분석

- 주파수 응답, THD, Phase, 임펄스 응답, STI, CSD 등을 많이 사용하고 있는 것으로 분석하였다.
- 우리 시스템에서 필요한 요소는 주파수 응답, THD, Phase, 임펄스 응답, 딜레이로 판단하였다.

■ 모니터링 시스템 설계

① 모니터링 시스템 구성

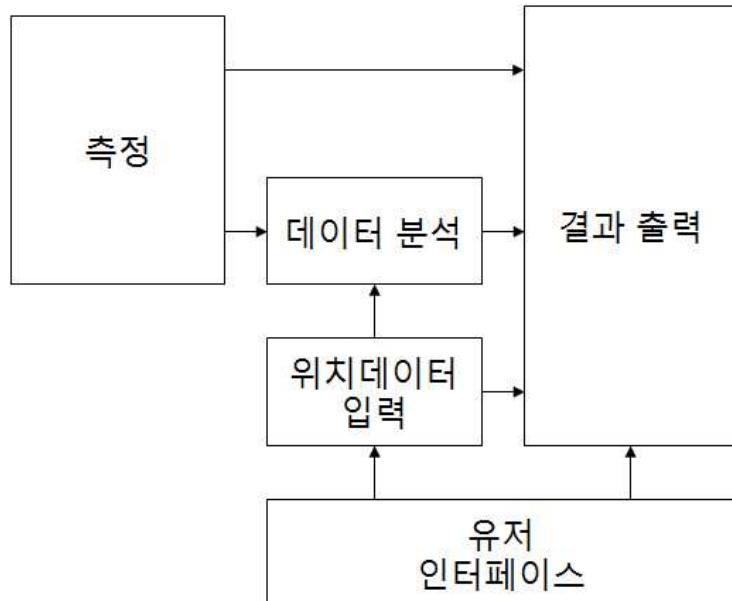


그림 3.7.1. 모니터링 시스템 구조도

② 데이터 구조 설계 및 모듈 설계

- 측정 데이터, 마이크별 측정 데이터, 측정 원시값, 공간 정보 데이터, 마이크 위치 데이터에 대한 데이터 구조를 설계하였다.
- 측정 모듈, 데이터 분석 모듈, 위치데이터 입력 모듈, 결과 출력 모듈에 대해 설계하였다.

③ 출력형태 및 유저인터페이스

- 출력의 구조에 대해서 결과 데이터 출력과 위치별 결과 출력으로 크게 두가지 형태로 설계를 진행하였다.
 - 결과 데이터 출력은 데이터별 결과를 보여주는 것과 전체 측정을 보여주는 형태로 설계하였다.
 - 공간 정보 데이터 및 마이크 위치 데이터 입력에 기반하여 그래피컬하고 공연장과 마이크에 대한 결과를 출력할 수 있도록 설계하였다.
 - 공연장 정보 입력에 대한 인터페이스 및 스피커와 마이크 위치 정보 입력에 대한 인터페이스를 설계하였다.
 - 측정 단계에서의 인터페이스 설계: 측정 단계에서는 마이크 및 관련 입출력의 설정 후 측정시작 버튼 클릭을 통해서 측정에 관계된 순차적인 단계가 모두 수행되고, 데이터 값은 다음 단계로 넘겨지도록 설계하였다.
 - 데이터 분석 관련 인터페이스와 출력시 두 가지 상태를 변경하는 인터페이스를 설계하였다.

나. 2차연도 연구 내용 및 결과

연구 목표	- 야외공연장 음향 모니터링 시스템 개발
-------	------------------------

연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 음향 측정 및 분석 시스템을 구성하고 8채널에 대해서 테스트를 수행함 - 그래픽 처리 엔진을 개발함 (2개 이상의 출력형태를 가짐)
연구 결과	<ul style="list-style-type: none"> - 개발한 두 시스템이 결합되어 실제로 8채널의 입력을 받으면서 그 결과가 그래피컬하게 웹을 통해서 게시되는 시스템을 완성 - 개발결과물에 대한 두 가지 보고서를 제출함

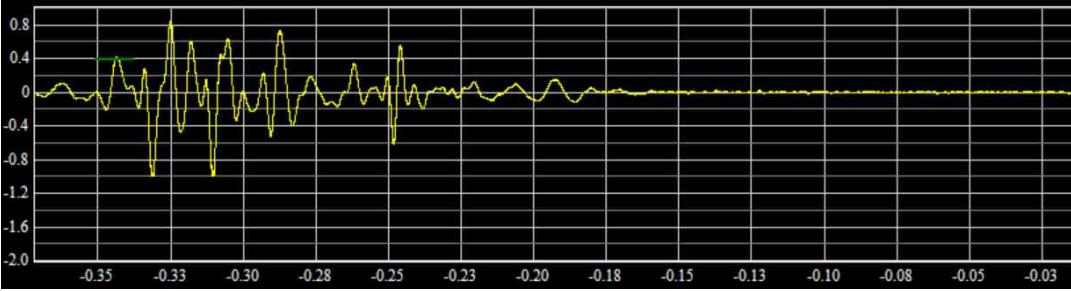
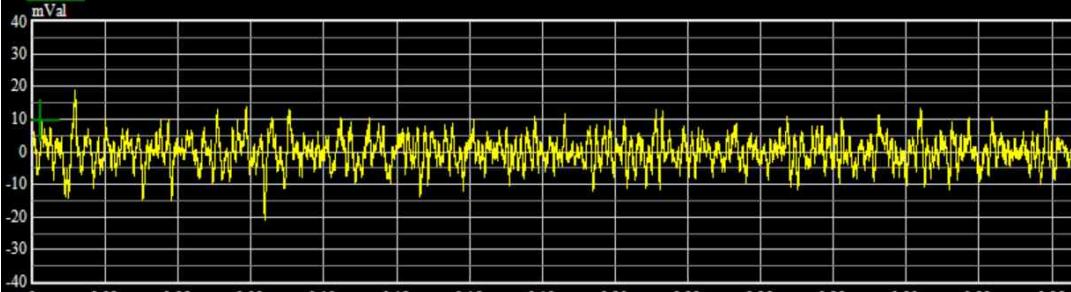
■ 음향 측정 및 분석 시스템 개발

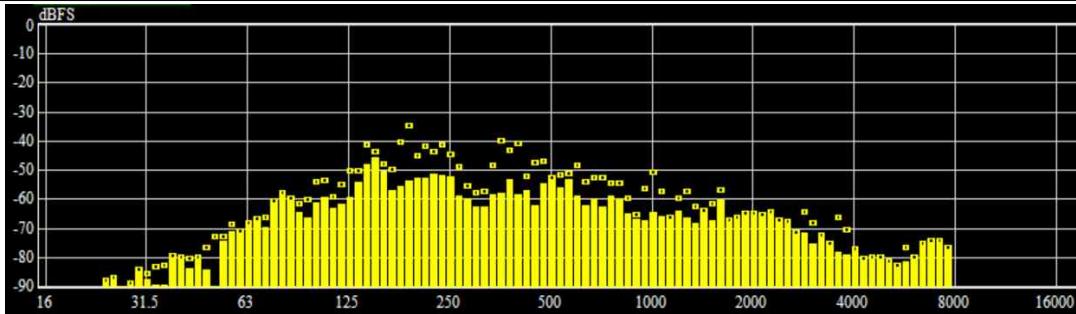
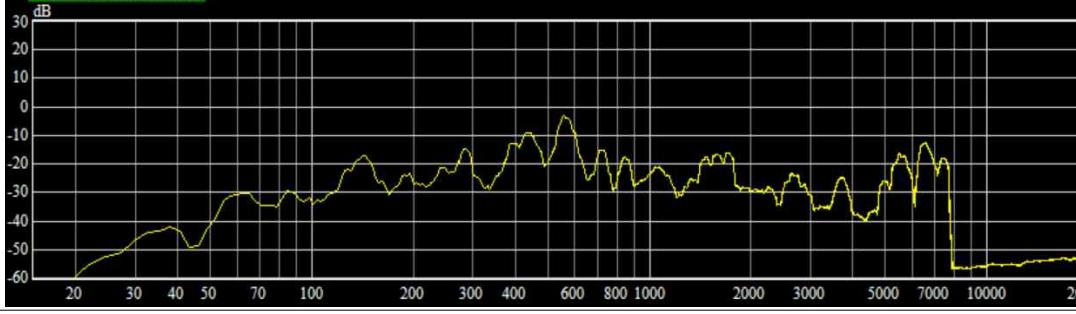
야외공연장을 위한 모니터링 시스템은 8개 채널의 입력을 받아서 분석 신호를 출력하여 저장하는 역할을 수행한다. 저장된 신호는 그래픽 처리 엔진에서 불러들여 화면으로 뿐만 아니라 웹을 통해서 게시되는 시스템을 완성된다.

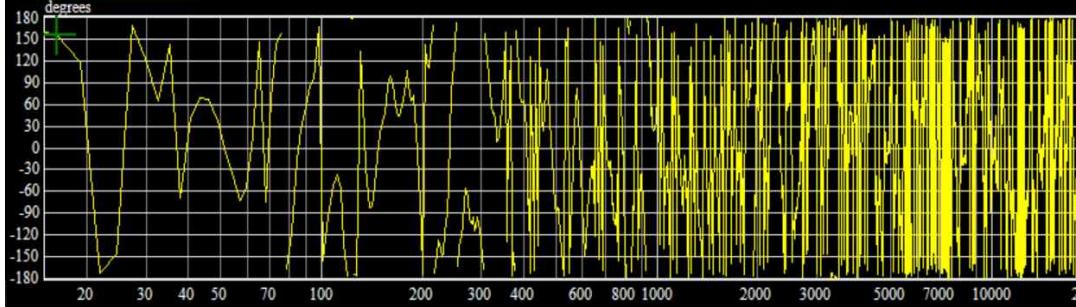
① 측정 파라메터

- 2차년도에 새롭게 정의한 측정 파라미터는 아래 표와 같이 정리할 수 있다.

표 3.7.1. 2차년도에 새롭게 정의한 측정 파라미터

Time signal	 <ul style="list-style-type: none"> - 가장 익숙한 표현 방식이며 시간에 따른 크기 변화 표현을 나타낸다. 일반적으로 x축은 시간의 흐름을 나타내고, y축 신호의 크기이다. - 가장 기본적인 정보이며, 시간 축에서의 정보를 얻을 수 있다. - 음향환경을 분석하는데 있어서 확실한 정보를 주기보다는 음향엔지니어가 판단할 때 음이 잘 입력되고 있는지 여부를 확인하는데 활용될 수 있다. - x축은 시간 값을 나타내며 y축은 파형의 크기 값을 나타낸다. 측정되는 파라미터 길이는 0.37초, 각 점의 간격인 stepsize는 22μ초이며 모두 16384개다. 그리고 측정되는 값은 0초를 기준으로 과거 0.37초의 정보이다.
Impulse response	 <ul style="list-style-type: none"> - 공간정보를 가지고 있으며 딜레이를 측정하거나 공간정보를 얻는 등 다양한 용도로 사용된다. Time signal과 동일하게 일반적으로 x축은 시간의 흐름을 나타내고, y축 신호의 크기이다. - Impulse response를 이용해 소리의 잔향을 살피어 전체적인 소리에 문제가 없는지를 판별하고, 딜레이 여부를 파악할 수 있다. - 각 마이크의 위치에 따라서 입력신호에 대한 공간음향적 변화가 어느 정도 있는지 서로 비교해 볼 수 있는 기능을 수행한다. - Impulse response를 얻기 위해서는 입력 음원에 대한 정보가 있어야 하고, 이런 이

	<p>유로 실제 상황에서 사용되지 않을 수도 있다.</p> <ul style="list-style-type: none"> - x축은 시간 값을 나타내며 y축은 파형의 크기 값을 나타낸다. 측정되는 파라메터 길이는 Time Signal과 동일하게 0.37초, 각 점의 간격인 stepsize는 $22\mu\text{초}$이며 모두 16384개다.
Spectrum	 <p>- 일반적으로 아래 그림처럼 시간영역의 신호가 Fourier 변환을 하여 주파수 영역축의 값으로 변환된다.</p> <p style="text-align: center;"> $x(t)$ → Fourier 변환 → $X(f)$ </p> <ul style="list-style-type: none"> - 그리고 Fourier 변환을 수식으로 나타내면 다음과 같다. $X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt$ <ul style="list-style-type: none"> - 주파수의 사인 및 코사인 형태의 정현파 신호의 성분으로 구성된 것으로 해석하여 주파수 성분별로 크기나 위상을 표현하는 방식이다. x축은 신호의 각 주파수를 나타내고, y축은 dB값 크기이다. - 스펙트럼을 보는 것은 각 주파수 밴드별로 소리의 크기가 어느 정도인지를 알 수 있는 중요한 작업이다. 현재의 과제 진행에서 가상방음벽 역할을 수행하는 기능들을 사용했을 때, 공연장 내의 소리 정보가 어떻게 변화하는지를 파악하기 위해서 반드시 필요한 파라메터이다. - 부가적인 기능으로 모니터링 시스템에서 스펙트럼을 확인하면서 기존의 스펙트럼과 비교하여 적절한 threshold 이상 차이가 나는 스펙트럼이 관측된다면, 이는 문제가 있는 상황으로 제시할 수 있다.
Magnitude	 <ul style="list-style-type: none"> - 주파수 성분에서 크기를 의미 한다. Magnitude를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

	$ X(f) = [Real X(f)^2 + Img X(f)^2]$ <ul style="list-style-type: none"> - $Real X(f)$은 Fourier변환의 결과인 $X(f)$의 실수 성분은이고, $Img X(f)$은 허수성분을 나타낸다. 이를 이용해서 파라메터를 구할 수 있으며 Magnitude가 나타내는 크기는 측정을 위한 마이크 배치에서 일정한 간격을 가지는 형태를 가질 것이고, 특정 위치의 특정 주파수 범위가 급격히 소리가 줄어든다면 형태가 변할 것이기 때문에 이를 판단해 음질이 유지되는지 아닌지를 확인한다. <p>전체적인 영향을 볼 수 있는 역할을 한다.</p> <ul style="list-style-type: none"> - x축은 주파수 성분을 나타내고, y축은 dB로 크기를 나타낸다. 그려진 파형을 보면 각 주파수에서 크기를 확인할 수 있고, x축은 2.69Hz의 stepsize로 나누어지며 15.625Hz~22.05kHz 범위에서 8193개의 값을 가진다.
Phase	 <p>Phase를 수식으로 나타내면 아래와 같다.</p> $\phi(f) = \tan^{-1} \frac{Img X(f)}{Real X(f)}$ <ul style="list-style-type: none"> - Fourier변환의 결과인 $X(f)$의 실수 성분과 허수성분을 이용해 구한다. 이를 이용해 특정 위치에 마이크에서 입력되는 음향신호의 위상 변화가 타 위치보다 큰지 아닌지를 보고 음질을 판단할 수 있다. Phase의 일정한 변화는 좋은 소리를 위한 조건이라 할 수 있기 때문에 필요하다. - 각 주파수 별로 특정 위치에서 음향신호의 크기가 적다던지, 또는 반대의 경우가 있을 수 있고, 이런 경우를 판별할 수 있다. - Phase를 보고 음향적인 판단을 내릴 수 있는 음향 엔지니어는 많지 않으나, phase의 급격한 변화 등이 발생할 수 있는 상황이므로 phase를 살펴보는 것은 의미가 있다. - x축은 주파수 성분을 나타내고, y축은 각도를 나타낸다. x축은 Magnitude와 동일하게 2.69Hz의 stepsize로 나누어지며 15.625Hz~22.05kHz 범위에서 8193개의 값을 가지며 y축의 범위는 -180°~180°이다.

② 데이터 베이스에 저장

- 음향신호 측정 및 분석시스템에서 산출된 데이터는 서버의 데이터베이스에 저장하게 된다. 저장된 데이터베이스에서 웹기반으로 화면을 뿐려주고 입력 인터페이스를 설정하는 것은 그래픽 처리엔진에서 수행한다.
- 전체적으로 아래 그림과 같은 구조를 가진다.

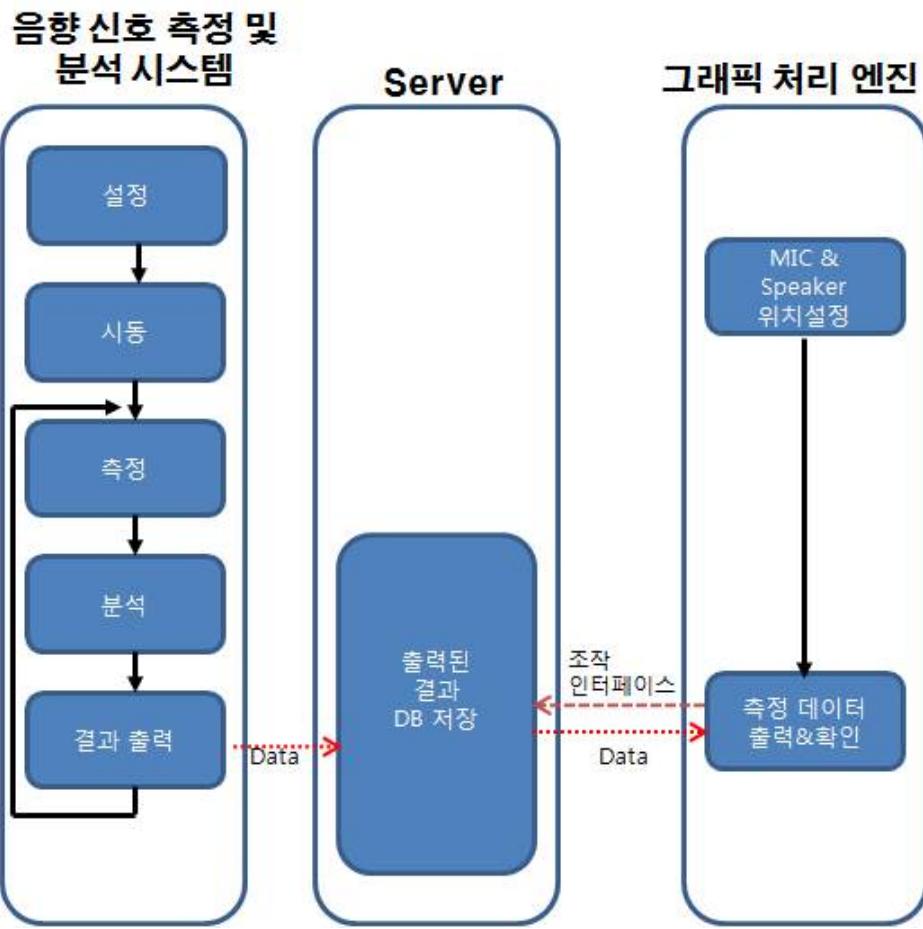


그림 3.7.2. 음향 신호 측정 및 분석 시스템과 그래픽 처리 엔진의 연결

③ 데이터베이스 테이블

- 서버에 저장하기 위해서 데이터에 맞는 형태의 데이터베이스 테이블을 구성하였다.
- 기본 테이블 구조는 데이터 측정이 준비되기 전의 형태를 가지고 있고, 공연장 데이터가 생성되면서 데이터테이블 구조는 측정 데이터를 저장하기 위한 구조를 활용하게 된다.
- 공연장 별로 측정일에 따른 CHART_LIST를 가지고 있고, 이는 다시 각 데이터를 저장하도록 개발하였다.
- 데이터는 특성에 맞는 형태의 구조로 저장된다.



그림 3.7.3. 기본 테이블 구조

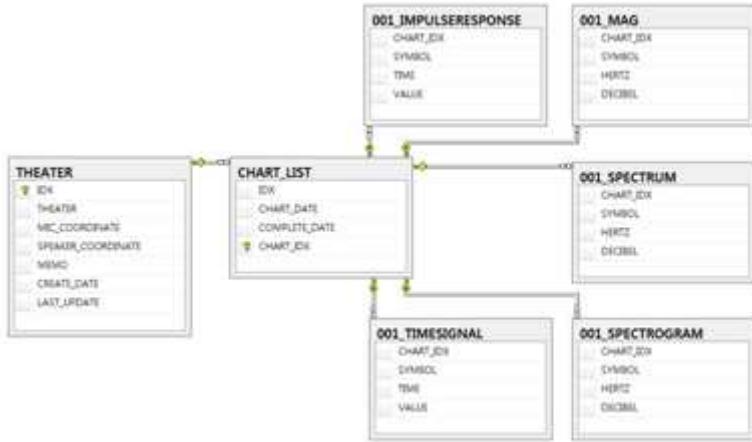


그림 3.7.4. 공연장 데이터 테이블 생성 이후 구조

④ 8채널 테스트

- 8개의 멀티채널의 음향정보를 무선으로 얻기 위해서 8개의 마이크와 Digital UHF Wireless Transmitter를 사용해 멀티채널룸 환경에서의 음향정보를 받는다. 무선으로 8개의 마이크로 신호를 받기 위해 2개의 Wideband 리시버에 각각 4개의 리시버 Module을 4개씩 장착하였고, 받은 무선신호는 XRL 케이블을 통해 오디오 인터페이스로 전송된다. 그리고 서버 PC는 Audio Interface를 거쳐 음향 정보를 받는다.

- 측정 결과는 아래와 같고, 8채널의 입출력에 대해서 잘 동작하고 있음을 확인할 수 있다.



그림 3.7.4. 측정 결과

- Lectrosonics에서 제공하는 wireless systems의 상태를 보여주는 Wireless Designer의 출력화면이다. Ch.1부터 Ch.8은 640~660MHz 주파수 상에서 신호가 전송되며, 화면 상태를 보면 모든 채널에서 신호가 들어오는 것을 확인 할 수 있다

■ 그래픽 처리 엔진 개발

① 화면 구성

- 화면은 크게 메인 화면, 공연장 정보를 설정하는 화면, 결과 출력 화면으로 나누어진다. 또한 결과 출력 화면은 크게 그래프 기반 화면과 지도 기반 화면으로 나누어진다.



그림 3.7.5 화면 구성

② 메인 화면



그림 3.7.6 메인 화면

- 메인 화면의 구성은 각 행마다 등록된 공연장을 나타내며, 목록형식으로 표시한다. 행에 있는 공연장 이름, 설정, 그리고 클릭하며 동작시킨다.
- “공연장 이름”을 클릭 할 경우, 차트를 출력하는 화면으로 이동하게 된다. 만일 공연장을 추가 하고 싶다면 하단의 “신규 공연장 추가”를 눌러 새로운 공연장 정보를 입력한다.
- “설정”아이콘을 클릭 할 경우, 기존에 저장된 공연장의 정보를 수정/삭제 할 수 있는 공연장 상세 정보 보기로 이동하게 된다.
- “비교”아이콘을 클릭할 시, 미리 저장된 차트의 값들을 비교 할 수 있는 화면으로 이동한다.

③ 신규 공연장 추가 설정 화면

- 메인화면에서 “신규 공연장 추가”를 클릭하면 아래와 같은 공연장 상세 정보 보기로 이동을 하게 되며, 화면은 Google Map API기반의 지도창, GPS 기반 위치 조회버튼, 공연장 정보 입력을 위한 설정창으로 구성되어 있다.



그림 3.7.6. 신규 공연장 추가 화면

- 메인 화면에서 “신규 공연장 추가” 선택을 하면 공연장 추가를 위한 공연장 상세 정보 등록화면으로 이동하여 공연장 등록을 할 수 있다. Google Map API기반의 지도 위치 조회 및 디바이스 등록과 상세 정보 입력을 통해 공연장 등록을 완료한다.
- 또한, 위치 조회 버튼을 이용하여 GPS 정보를 가져 올 수 있으며, 드래그를 통해 위치 보정을 할 수 있다.

④ 그래프 기반 출력 화면

- 메인화면에서 공연장의 이름을 클릭하면 공연장 차트 상세 정보 보기 화면으로 이동하게 된다. 이 화면은 측정 장비에서 데이터베이스로 저장된 데이터를 가공해서 보기 쉬운 차트로 내용을 한눈에 볼 수 있게 표시한다.



그림 3.7.7. 그래프 기반 결과 출력 화면

- 차트 데이터 선택은 Time signal, Spectrum, Impulse Response, Magnitude, Phase 중 원하는 데이터를 출력할 수 있게 선택한다.
- 5가지 차트 종류에 각각의 마이크 디바이스를 선택할 수 있으며, 하나의 차트에서 최대 8개의 마이크를 하나씩 선택 가능하다. 또한 하나의 차트에 8개 마이크를 “모두” 표시하고 선택적으로 1개씩 툴을 통해 표시 여부를 선택할 수도 있다. 또한, 현재 표시 차트 데이터를 저장 할 수 있으며, 저장된 데이터는 비교 보기 기능을 통해 확인 가능하다.
- 화면표시 주기 슬라이드의 default값은 10초로 되어 있고, 최소 5초부터 최대 60까지 값을 변경 할 수 있다.
- 맵 보기 버튼을 이용해서 지도기반 출력화면으로 전환 할 수 있다.

⑤ 지도 기반 출력 화면

- 그래프 기반 출력 화면에서 전환버튼을 이용해서 지도 기반 출력 화면으로 이동 할 수 있다. 그래프 기반 출력 화면과 동일하게 화면표시 주기 슬라이드 컨트롤이 존재하며, 그래프 기반 출력 화면으로 전환하는 버튼이 존재한다.

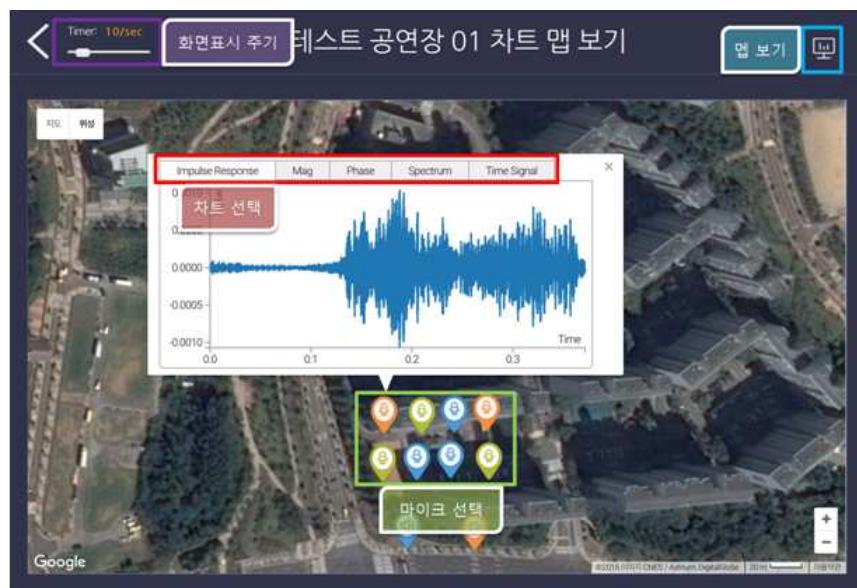


그림 3.7.8 지도 기반 결과 출력 화면

- Google Map API기반의 지도 기반의 디바이스 위치 설정 화면을 기본적으로 표시하며, 마이크 디바이스 마커 클릭을 통해 해당 마이크에 대한 차트 내용을 확인 할 수 있다.
- 차트 내용은 팝업 형식으로 출력 된다. 출력된 차트에서는 차트 상세 보기 화면과 동일하게 5개의 데이터를 선택해서 확인해 볼 수 있다.

⑥ 저장된 결과 비교 화면

- 메인화면에서 “저장 차트 비교 보기” 버튼을 클릭하면 비교를 위한 화면으로 이동하게 된다. 화면은 보여줄 저장된 시점을 선택하는 부분, 5개의 차트데이터에서 원하는 데이터를 선택하는 부분, 마이크를 선택하는 부분, 그리고 저장 데이터를 삭제하는 부분으로 구성되어 있다.



그림 3.7.9. 저장된 결과 비교 화면

- 차트 상세 보기 화면에서 “저장” 버튼 클릭으로 저장된 차트 데이터를 비교 확인 할 수 있는 화면으로 동일 디바이스에 각기 다른 시점의 데이터를 비교하기 위한 기능이다. 비교 표시는 최대 3개까지 선택이 가능하며, 변경 선택도 가능하다.

다. 3차연도 연구 내용 및 결과

연구 목표	<ul style="list-style-type: none"> - 야외 공연장 음향 모니터링 시스템 최적화
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 결과 디스플레이 모듈에서 8가지 이상 출력 결과 보임 - 음향 측정을 통해서 음향적 문제에 대한 정보를 제공하는 모듈 작성 - 시스템 최적화
연구 결과	<ul style="list-style-type: none"> - 다양한 형태의 결과 출력이 가능하도록 개발함 - 음향 정보를 분석하여 문제점이 발생할 시 쉽게 알수 있도록 정보를 제공하는 기능을 수행함 - 시스템 최적화를 진행하고, 다양한 활용을 위해 라즈베리 파이 기반의 독립 시스템을 구성함

■ 결과 디스플레이 모듈

- 1차년도에는 전체적인 설계를 하였고, 음향 입력을 반기 위한 설정을 하고, 음향 측정을 하고 분석 후 결과를 출력하는 모듈은 2차년도에 개발하였다. 출력결과를 DB에 저장하고 그래픽으로 출력하는 모듈은 2차년도에 기초 시스템을 개발하였고, 3차년도에는 8개 이상의 결과 출력 형태를 보일 수 있도록 2차년도 개발내용에 결과 출력 형태를 덧붙이면서 완성도를 높였다.

- 최종적으로 아래의 표에 정리한 것과 같은 다양한 결과 출력 형태를 가진다.

표 3.7.2. 출력 결과 형태 정리

마이크별 데이터 출력	Time
	Impulse
	magnitude
	Phase
	Spectrum
여러 마이크의 데이터 같이 출력	Time
	Impulse
	magnitude
	Phase
	Spectrum
지도 상의 출력	각 마이크 포인트마다 그래프 팝업으로 출력
음압 수치 데이터 출력	8채널 마이크로폰 각각에 대한 음압 값을 출력
지도 상의 음압차이 알림	지도 상에서 마이크로폰으로 들어오는 신호의 음압이 상 대적으로 작거나 클 경우 알림 팝업 띄움
저장된 이전값들끼리 비교	저장된 값에 대해서 마이크별로, 각 음향 팩터별로 비교 분석할 수 있음
저장된 값중 스펙트럼의 경우, 기준값 표현	$\pm 3\text{dB}$ 의 기준 값을 설정하여 이를 그래프상에서 표현
저장된 값중 스펙트럼의 경우, 기준 범위에 벗어난 값 표현	$\pm 3\text{dB}$ 의 기준 범위에서 벗어나는 구간을 표시해 줌

① 그래프 데이터 출력

- 아래 그림과 같이 Time Signal, Impulse Response, Magnitude, Phase, Spectrum의 5가지 결과 그래프에 대해서 결과 출력이 가능하다.

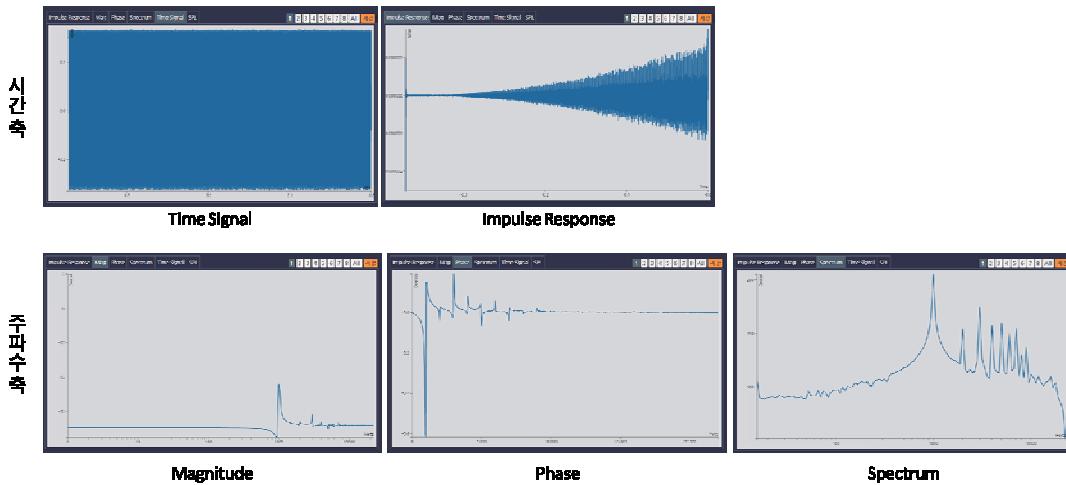


그림 3.7.10. 5가지 그래프 데이터 출력화면

- 출력되는 그래프는 사용자가 원하는 수의 마이크의 결과를 서로 조합하여 보여줄 수 있음. 아래는 8개의 마이크의 스펙트럼 결과를 조합해 출력한 화면이다.

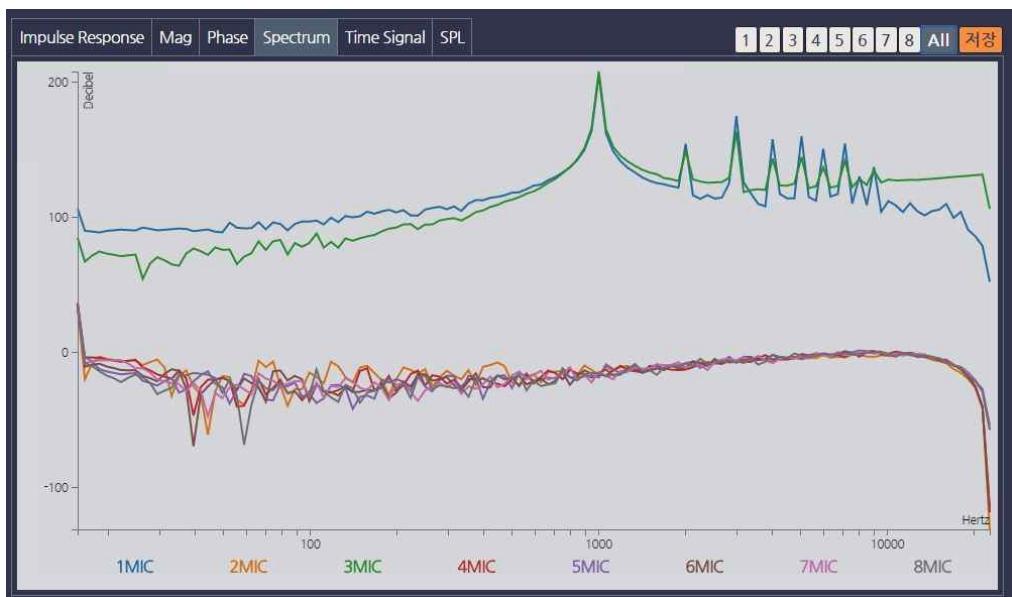


그림 3.7.11. 모든 마이크의 스펙트럼 결과 출력화면

② 수치 데이터 출력

- SPL 출력값들은 아래와 같이 하나의 화면에 8개의 마이크 출력 값이 같이 출력됨

SPL None-weighting			
1MIC: 205.9dB	2MIC: 38.8dB	3MIC: 208.0dB	4MIC: 39.1dB
5MIC: 40.6dB	6MIC: 40.3dB	7MIC: 40.5dB	8MIC: 38.6dB
SPL A-weighting			
1MIC: 205.9dB (A)	2MIC: 84.2dB (A)	3MIC: 208.0dB (A)	4MIC: 85.5dB (A)
5MIC: 87.7dB (A)	6MIC: 87.1dB (A)	7MIC: 87.4dB (A)	8MIC: 84.5dB (A)
SPL B-weighting			
1MIC: 205.9dB (B)	2MIC: 58.7dB (B)	3MIC: 208.0dB (B)	4MIC: 59.8dB (B)
5MIC: 62.0dB (B)	6MIC: 61.4dB (B)	7MIC: 61.7dB (B)	8MIC: 58.9dB (B)
SPL C-weighting			
1MIC: 205.9dB (C)	2MIC: 43.7dB (C)	3MIC: 208.0dB (C)	4MIC: 44.4dB (C)
5MIC: 46.1dB (C)	6MIC: 45.7dB (C)	7MIC: 45.9dB (C)	8MIC: 43.8dB (C)

그림 3.7.12. SPL 수치데이터 출력 화면

③ 지도 상의 결과 출력



그림 3.7.13. 지도상 그래프 결과 출력 화면

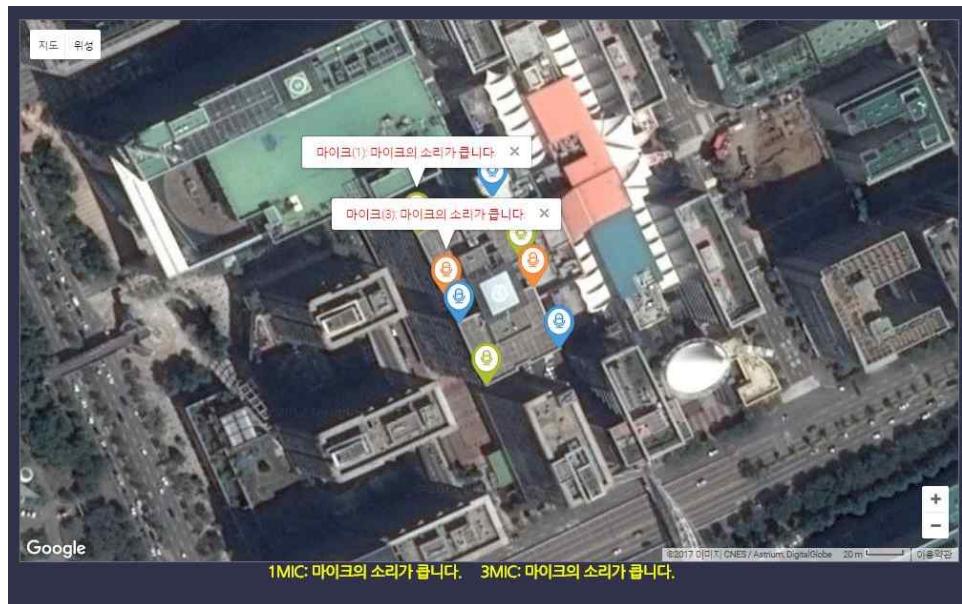


그림 3.7.14. 지도상 각 마이크 음압차이 알림 화면

- 위 그림과 같이 하나의 마이크로폰에 들어오는 음압의 크기가 다른 마이크로폰에 비해서 차이가 날 경우, 아래 그림과 같이 말풍선 형태와 하단에 자막으로 상태에 대한 정보를 제공

④ 저장값과의 비교 결과 출력

- 총 세 개의 값을 저장하여 비교할 수 있다. 저장한 값들끼리의 데이터 비교가 가능하다.



그림 3.7.15. Magnitude 값 비교 결과 화면

- 3차년도에 추가적으로 제공하는 정보는 스펙트럼의 경우, 저장값을 기준으로 $\pm 3\text{dB}$ 를 범위를 잡고, 이 범위에서 벗어나는 경우의 주파수대역을 검출한다.

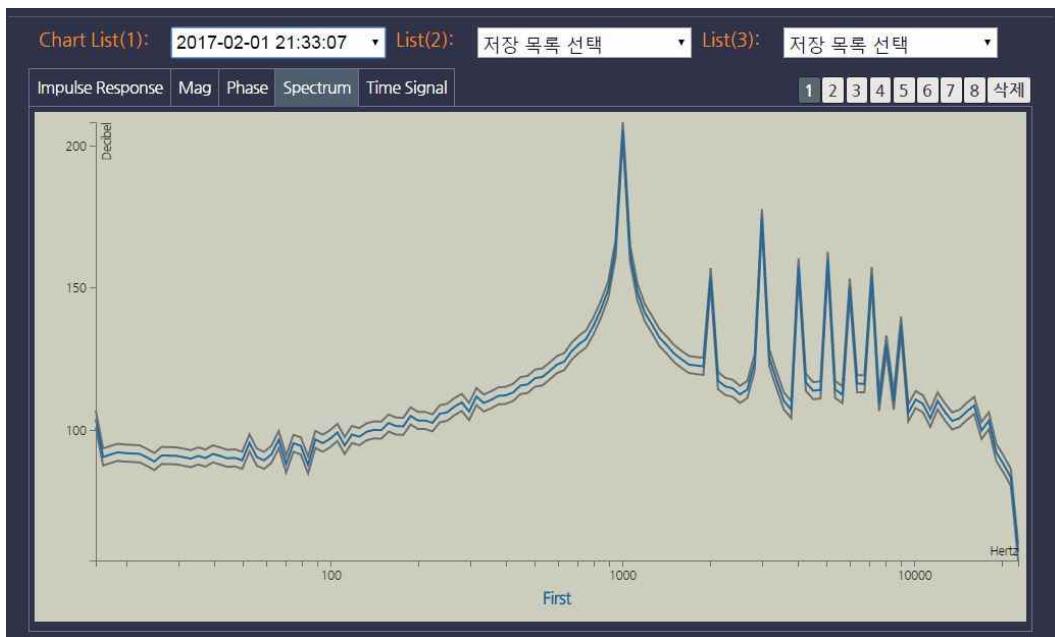


그림 3.7.16. 기준 지정 및 범위에 대한 출력 화면



그림 3.7.17. 기준값 비교 알림창



그림 3.7.18. 비교 차이값 출력화면

■ 정보 제공 모듈

① 필요 정보

- 야외 무대의 공연 설계 및 실 설치를 주로 담당하였던 음향엔지니어 3인 이상의 의견을 모았다.
- 무대음향장치를 설치할 때의 목표 중 하나는 청취공간에 동일한 사운드를 제공하는 것으로 가장 중요하게 생각하는 것은 음향이 전체적으로 고루 들을 수 있도록 하는 것이었다.
- 스피커가 설치된 곳과 가까운 부분만 큰 소리나 나고 다른 부분은 작은 소리가 나는 상황을 피해야 하고, 특히나 가상방음벽 시스템이 들어갈 경우, 가상방음벽 시스템의 위치에 따라서 청취공간 (객석)에 전혀 다른 소리가 날 수 있기에 이에 대한 모니터링이 필요하다는 의견이 있었다.
- 가상방음벽 시스템의 성능 및 배치에 따라서 위치에 따른 영향을 받을 수 밖에 없고, 그러한 이유로 인해서 마이크로폰간 음압을 비교하는 것은 반드시 필요하다는 의견이 있었다.
- 소음을 감쇄시키는 가상방음벽 시스템을 구동할 시와 구동하지 않을 일반적인 음향환경에서의 음향을

서로 비교할 필요가 있다는 의견이 있었다.

- 가상방음벽을 구동할 때 청취공간에서의 음향감쇄가 일어날 수 있으니, 이에 대해서 전 상황과의 비교를 적절히 하고, 정보를 출력할 필요가 있고 이 경우, 가장 중요한 정보는 스펙트럼 데이터가 된다.
- 스펙트럼 상에서 정보가 변경되었을 경우, 전체적인 차이가 있다고 판별할 수 있으니 이에 대한 정보를 제공할 필요가 있다는 의견을 받았다.

② 마이크로폰 간 음압 차이

- 각각 마이크로폰의 입력에 대해서 SPL 값을 비교함
- 값을 비교하는 방법은 아래의 순서에 따름
 - 총 N개의 마이크로폰이 존재한다고 가정
 - 비교하는 SPL값은 A-weighting을 가한 SPL(A) 값을 이용
 - N개의 마이크로폰이 존재할 때,
 - n번째 마이크로폰 MIC_n에 대한 SPL 값을 SPL_n이라고 함
 - K번째() 마이크로폰을 제외한 N-1개의 마이크로폰에서 측정되는 SPL_n 값의 평균을 구하고 이를 M_SPL_K라고 함
 - M_SPL_K - SPL_K >6 일 경우, K번째 마이크로폰의 입력이 너무 적다는 결론을 내림
 - M_SPL_K - SPL_K <6 일 경우, K번째 마이크로폰의 입력이 너무 크다는 결론을 내림
 - 이 과정은 지속적으로 반복

③ 과거값과의 비교

- 과거의 값과 비교할 경우, 스펙트럼을 비교하여 정해진 일정 범위 안에 들어오는지 아닌지를 판단을
- 과거의 값에 비해서 음향적으로 유의미하게 변경을 있었는지 아닌지를 판단할 수 있음

④ 마이크로폰 간 음압 차이

- 마이크로폰 간 음압 차이에 대한 결과는 두 가지 형태로 출력함
- 일반적인 음압(SPL) 결과값을 보여줄 시에 결과값의 색상을 달리 함으로써 정보를 전달함
- 음압이 다른 마이크로폰의 음압보다 상대적으로 높게 나온 값은 붉은색, 낮게 나온 값은 파란색으로 표시
- 그림 3.7.12와 같이 출력됨
- 지도 화면에서 마이크로폰간 음압 차이를 표시함
- 이 때는 SPL 값들 중에 A-weighting 값만을 이용해서 표시함
- 하나의 마이크로폰에 들어오는 음압의 크기가 다른 마이크로폰에 비해서 차이가 날 경우, 그림 3.7.14. 과 같이 말풍선 형태와 하단에 자막으로 상태에 대한 정보를 제공

■ 최적화 및 독립 시스템 구성

- 결과 출력 형태 등에 있어서 시안성 증대를 위해서 개선을 진행
- 라즈베리파이 기반의 독립 시스템을 구성

① 최적화

- 그래프 데이터 출력시, 정렬되지 않은 Y축이 보여지던 것을 수정하였다.
- 그래프 간의 탭 변경시 최소한의 동작으로 변경이 가능하도록 수정하였다.
- 수치 데이터 출력시에 시안성 개선을 위하여 디자인을 변경하였다.
- 지도 데이터 출력을 위해서 구글 API 키를 새로 변경하였다.
- 데이터 싱크 관련 수정을 진행하였다.

② 라즈베리파이 기반 시스템 개발

- 기존 시스템은 상용화된 마이크로폰과 오디오 인터페이스를 사용하였고, 이것은 다양한 활용에 저해요소가 될 것으로 판단하여 독립 시스템을 개발하였다.

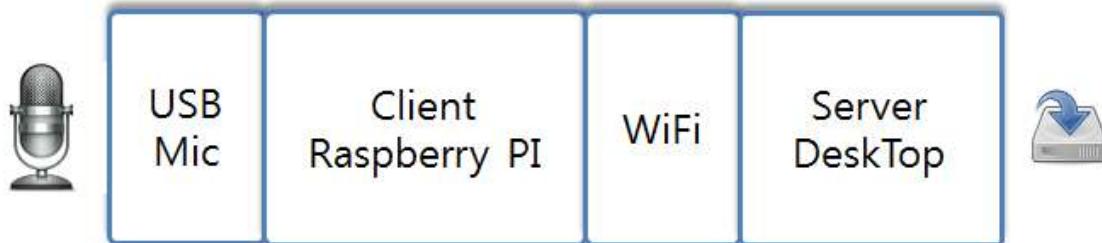


그림 3.7.19 시스템 구조 다이어그램

- 그림 3.7.19와 같이 구조를 계획하고 개발을 진행하였다.
- 그림 3.7.20과 같이 라즈베리 파이 기반 하드웨어를 구성하였고, 그 결과 그림 3.7.21과 같은 시스템이 만들어졌다.
- 그림 3.7.22와 3.7.23은 개발된 시스템의 소프트웨어를 구동하는 화면이고, 개발된 시스템은 기존의 모니터링 시스템과 연계되어 구동됨을 확인하였다.

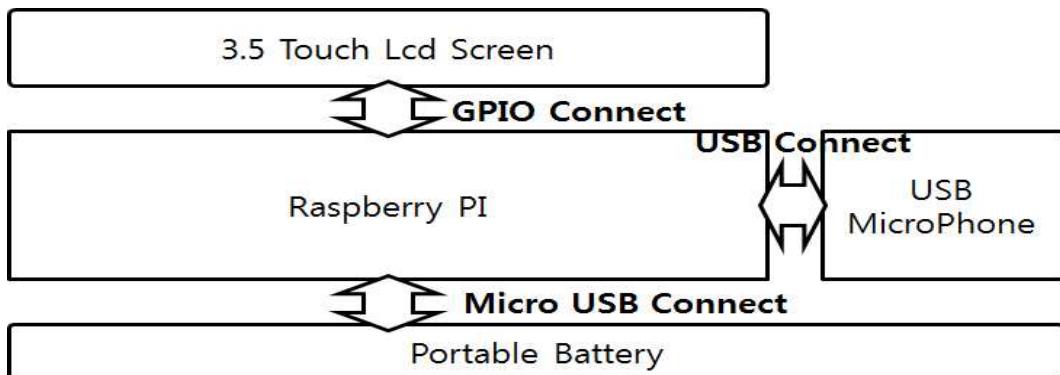


그림 3.7.20. HW 제품 연결 구조도



그림 3.7.21. 구축 된 HW 사진



그림 3.7.22. 서버 프로그램

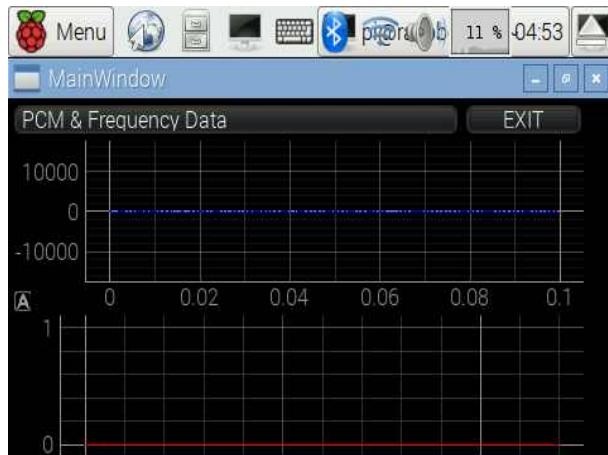


그림 3.7.23. 클라이언트 프로그램

라. 연구개발 성과

○ 국내외 논문 게재(학술대회)

번호	수행기관명	논문명	학술대회명	개최국	주발표자명	발표일
1	전자부품연구원	음향적 전문성과 이어폰의 주 관적 기준 음 특성 관계에 관한 연구	대한전자공학회 추계학술대회	한국	김현갑	15.11.27
2	전자부품연구원	5.1채널 업믹싱 사운드 평가를 위한 사용자 테스트	대한전자공학회 추계학술대회	한국	이명춘	15.11.27
3	전자부품연구원	Comparison of the frequency-domain FxLMS and the time-domain FxLMS for ASQC system	IWAIT 2016	한국	박윤정	16.01.08
4	전자부품연구원	메모리 품을 사용한 귀마개의 밀도 · 경도에 따른 주파수 응답 특성 분석	전자공학회 하계학술대회	한국	장달원	16.06.22
5	전자부품연구원	야외 공연장 세팅을 위한 음향 모니터링 시스템	2016년도 추계 소음진동 학술대회	한국	장달원	16.10.20

○ 특히 출원

번호	수행기관명	특허명	출원국	출원번호	출원일
1	전자부품연구원	음향 모니터링 시스템 및 방법	대한민국	10-2016-0037575	16.03.29
2	전자부품연구원	복수의 단말을 이용한 음향 모니터링 시스템 및 방법	대한민국	10-2016-0165619	16.12.07

○ 기술 요약정보

- 기술 명: 음향 모니터링 시스템

- 요약 내용:

야외 공연장에서 객석에서의 음향 정보를 다수개의 마이크로 입력받아서 그것을 분석하여 사용자가 쉽게 알 수 있도록 화면에 뿐만 아니라 역할을 수행하는 시스템이다. 분석단/서버단/디스플레이단으로 구분되며 8개 채널에 대해서 그래프 결과/지도 상의 결과를 보여줄 수 있고, 음향의 문제점이 있을 때 쉽게 파악할 수 있도록 해줌

- 기술 완성도: 기술 개발 완료

마. 연구 결과

○ 기술적 성과

- 기존에 존재하지 않았던 웹 기반으로 다양한 기기에서 다채널의 음향측정 결과를 볼 수 있는 시스템을 완성하였다. 기존의 시스템은 하드웨어 적으로 만들어져서 한 채널에 대한 결과를 볼 수 있는 단일형 기기거나, 오디오 인터페이스와 결합하여 정해진 PC에서만 볼 수 있는 형태를 가지고 있었다. 본 과제에서 개발한 시스템은 그런 한계를 넘어서 측정하고 분석한 결과를 태블릿, 스마트폰, 노트북 등에서 자유롭게 확인할 수 있는 기능을 갖추었다. 특히 및 논문 발표 실적은 위에 적은 것과 같이 5개의 논문과 2건의 특허 출원이 있었다.

○ 경제적 성과

- 본 시스템을 활용할 경우, 야외공연장 무대 설치 등의 작업에 편의성이 생길 수 있다.

3-8 공연 및 소음 전문가로부터 자문

2017년 3월 23, 24일 3인의 자문단으로부터 연구 결과물의 자문을 받았다. 자문단의 인적사항은 표 3.8.1에 기입하였다.

표 3.8.1 자문단 인적 사항

	전문가 1: 박권일	전문가2: 권혁준	전문가3: 이성규
소속/직위	블루앤드림/대표	라이브미소/이사	에어시스템즈/팀장
경력	25년	27년	10년
연 공연 횟수	약 100회	약 100회	약 150회
연 야외공연 횟수	약 15회	약 30회	약 50회

① 사전질문

평소 야외공연 중 접하는 소음문제의 인식을 알아보기 위해 사전질문을 수행하였다.

▪ 야외공연 중 발생하는 소음 빈도수는?

거의 100% 발생함. 주로 주민들의 항의와 신고를 받은 경찰들로부터 주의를 받음.

▪ 야외공연으로 발생하는 소음 문제를 줄이기 위해 취한 조치는?

공연 전 부녀회에 입장권 주기. 서울은 10시 이전에 공연 종료하기. 소음문제가 크게 대두될 장소는 제외하기.

▪ 야외공연 활성화를 위해 해결이 필요한 문제 중 소음문제가 차지하는 비중은?

30~50%

사전질문을 통해 자문단들 역시 야외공연에서 소음문제로 어려움을 겪고 있음을 알수 있었다. 사전 질문 후 각 기술별로 기술의 유용성과 도입 의견을 물었으며, 각 기술의 장단점과 보완할 점을 질의 응답하였다.

② 야외공연장 방사음향 특성분석 SW 개발

- 기술이 유용하며 도입에 긍정적
- 공연 소음을 예측함으로써 공연장 선정 단계에서 도움이 될 것임
- 소음 전파를 줄일 수 있는 야외공연장 시공에 도움이 될 것임
- 환경부 같은 공공기관에서 웹 페이지나 스마트폰 어플리케이션으로 제공해주면 활용도가 높아질 것임

③ 사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술

- 기술이 유용하지 않으며 도입에 매우 부정적
- 너무 많은 수의 스피커를 추가적으로 설치해야함
- 설치는 누가 하는지, 설치비용은 누가 대는지 고민이 필요함
- 법적으로 강제성이 없으면 사용하지 않을 것임

④ 무대스피커 기반 공연소음 억제기술

- 기술이 유용하나 도입에 부정적
- 방사되는 소리의 x축 방향의 각도 조절이 가능한 점이 이점
- x축과 y축 방향의 각도가 모두 제어되면 좋겠음
- 지향성을 형성하기 위해 설치된 스피커들의 내재화, 일체화가 필요
- 추가되는 장비가 최소화 되면 좋겠음
- 법적으로 강제성이 없으면 사용하지 않을 것임

⑤ 개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술

- 기술이 유용하지 않으며 도입에 부정적
- 스피커를 다수 설치하는 것이 예산이 많이 들 것임
- 미관상 좋지 않음
- 스피커들을 따로 설치하는 것을 최대한 간소화 시켜야함
- 얇은 사운드바로 기술을 구현하여 공연장 주변에 바리케이드 대신 설치하면 좋겠음
- 법적으로 강제성이 없으면 사용하지 않을 것임

⑥ 야외공연장 실시간 음향 모니터링 시스템

- 기술이 매우 유용하며 도입에 긍정적
- 큰 공연장에서 한 번에 여러 지점을 실시간으로 체크 가능한 점이 장점
- 마이크를 설치하는 것과 공연이 끝날 때까지 마이크를 안전하게 유지하는 것이 어려움
- 데이터의 신뢰성만 확인된다면 활용도가 높을 것

공연소음의 예측과 음향 모니터링 시스템은 도입에 긍정적이었으나 소음억제를 위한 기술은 현재 도입이 어렵다는 평가를 받았다. 법적 강제성과 같은 제도적 강제성이 있지 않으면 소음억제 기술의 도입은 어려울 전망이다. 야외공연을 하기 위해서 꼭 필요하다는 인식이 생기도록 제도가 생겨야하며, 정착이 될 때 까지 국가의 지원이 필요함을 알 수 있다.

만약 제도와 규제의 영향으로 야외공연에서 소음제한이 엄격히 지켜진다면, 초기에 음향팀과 소음제어팀이 분리돼 있어 공연 시 무대, 음향장치 설치 및 소음제어 세팅을 따로 하며 한 공연에 두 팀이 공존을 할 것이다. 그 후 시간이 지나며 하나의 팀이 두 팀의 일을 수행하게 될 것이다. 그 후 하드웨어 업체에서 소음제어 기능까지 내장된 장비를 생산하고, 음향팀에서 하드웨어를 구입하여 사용하게 될 것이라 예상하였다.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

① 야외 공연장 방사음향 특성분석 SW개발

- 연차별 연구목표를 달성함
- 야외 공연장 방사음향 특성분석 SW개발 진척도: 최종적으로 SW 개발을 완료함으로써 목표 진척도 100%를 만족함
- 야외 공연장 음원 모델링의 정확도: 3차연도 최종 목표는 80%이지만 연구 결과 90% 이상의 높은 정확도를 보이는 음원을 모델링함으로써 목표를 달성함

② 사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술 1: Double-layer 스피커 어레이

- 공연에서 요구하는 조건을 만족시키며 외부로 전파하는 소음은 저감시키는 새로운 개념의 음향 시스템을 개발
- 실험실 레벨의 구현 조건에서 공연영역 대비 조용한 영역의 음압차 목표를 달성함

③ 사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술 2: Acoustic parasol

- 연차별 연구목표를 달성함
- 공연영역 대비 조용한 영역 음행 대조비 목표를 달성함

④ 무대 스피커 기반 공연소음 억제기술

- 연차별 연구목표를 달성하였고 실제 야외공연에서 테스트가 가능함
- 무대스피커의 방사음원 지향각 제어기여도 목표와 음압차 목표를 달성함

⑤ 개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 1: 개방공간용 능동소음제어

- 연차별 연구목표를 달성하였고 실제 야외공연에서 테스트가 가능함
- 동시 제어 가능한 능동감쇄 시스템 목표 개수와 공연소음의 감쇄 기여도 목표를 달성함

⑥ 개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 2: 임피던스 차이기반 차음시스템

- 연차별 연구목표를 달성함
- 저주파 저감 성능 및 차음성능 목표를 달성함

⑦ 야외공연장 실시간 음향 모니터링 시스템

- 모니터링 시스템은 연도별 연구목표에 따라서 개발을 수행하였음
- 평가항목 중 채널수에 대한 달성도: 2차년도부터 8개 채널에 대한 결과 출력이 가능하였음. 최종적으로 목표 대비 100% 만족함
- 평가항목 중 결과 출력 형태에 대한 달성도: 2차년도부터 2가지 이상, 3차년도에는 8가지 이상의 결과 출력 형태를 개발하였음. 최종적으로 목표 대비 100% 만족함
- 1차년도에는 설계 및 개발, 2차년도에는 시스템 개발, 3차년도에는 시스템 최적화 및 활용도 증대를 위한 기술 개발을 진행하였음

2. 관련 분야 기여도

① 야외 공연장 방사음향 특성분석 SW개발

본 기술은 야외공연 시 발생하는 소음을 예측하기 위한 야외공연장의 소음지도를 작성하는 방법을 목적으로 한다. 기존의 소음지도 작성에 관한 선행기술은 소음데이터 측정을 통한 소음지도 작성 방법과 소음원 모델링을 통한 소음지도 작성방법 두 가지로 분류 된다. 그 중 첫 번째 방법은 국내의 서울시립대학교에서 클라우드 컴퓨팅을 이용한 방법을 개발했고[9], 부산대학교에서는 GPS 데이터를 이용한 방법[10]을 개발했다. 이러한 방법들은 실질적은 소음지도를 작성할 수 있으나 야외공연이 있기전에는 소음예측이 불가하다. 또한 소음원 모델링을 통한 소음지도 작성방법은, 독일의 DataKustik사에서 공장에서 발생하는 소음원 모델을 개발했고[11], 국내의 서울대학교에서 풍력발전단지의 소음원 모델을 개발한 사례[12]가 있다. 이러한 방법들은 소음을 미리 예측할 수는 있으나 야외공연에 맞는 음원모델이 없기 때문에 야외공연 시 발생하는 소음에 대해서는 제한점을 갖는다.

이러한 배경에서 본 기술은 야외공연 시 발생하는 소음을 미리 예측할 수 있다는 점에서 기존의 기술들을 한 단계 발전시킨 결과라고 할 수 있다. 본 기술의 결과는 야외공연장의 소음지도 작성에 대한 국내외 적으로 첫 번째 사례이기 때문에 가치가 있으며, 향후 야외공연장의 소음예측 및 제어기술에 기여할 수 있다.

② 사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술 1: Double-layer 스피커 어레이

기존 음장제어 기술은 음압을 높게 유지시키는 영역과 음압을 낮게 유지시키는 영역을 공존시키는 것이 최대 목적이었다. 그러나 보니 기술은 두 영역의 음압차를 최대화 시키는 방향으로 발전되었고 음압이 높은 영역에서의 음질은 잘 고려되지 않았다. 사운드포커싱 기술을 야외공연에 적용시킬 때 현장에서 많이 요구한 사항이 공연영역에 미치는 영향의 최소화였다. 이 과제를 계기로 외부로 누설되는 소음은 줄이면서 공연영역에 미치는 영향은 최소화 시키는 음장제어 기술을 개발할 수 있었다.

③ 사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술 2: Acoustic parasol

현재 국내에서는 사운드 포커싱 기반 공연 소음 억제기술과 개방 공간용 능동 공연소음 감쇄기술에 대한 연구는 현재 과제 외에 진행되는 연구는 없는 것으로 보인다. 외국에서는 이제 Denmark Technical University에서 야외 공연장 가상 방음벽 연구가 시작 되는 것으로 보인다. 3년이나 먼저 시작한 만큼 기술적인 면에서 앞서고 있는 것으로 보인다.

④ 무대 스피커 기반 공연소음 억제기술

스피커의 지향성 제어 기술은 여러 방식으로 연구되었다. 하지만 메인과 서브 스피커를 분리하여 메인 스피커의 성능을 서브 스피커를 통해 제어하는 기술은 이 과제를 통해 제안된 방식이다. 야외공연에 적용 시킴으로써 공연소음 저감의 목표를 달성하며 성능을 검증하였다. 동일한 제어 방식이 다른 분야의 음장제어에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

⑤ 개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 1: 개방공간용 능동소음제어

본 연구는 전 세계적으로 시도되지 않았던 공연 소음에 대한 능동 감쇄 시스템을 개발하는 것이기 때문에, 이와 비교될만한 유사 연구는 현재 전무한 상황이다. 따라서 본 연구를 통하여 개발된 ‘개방 공간용 실시간 다채널 능동 감쇄 시스템’은 다음과 같은 기여하는 측면은 다양하다고 생각된다. 그 중 첫 번째로서, 상기의 개발된 시스템에 대한 후속 연구가 계속 진행되어 상용화 단계까지 완성된다면, 국내뿐만 아니라 세계적으로도 야외 소음 감쇄 시스템 분야에서 경쟁력 있는 위치에 도달할 것으로 기대된다. 두 번째로서, 야외 공간에서 음악 신호와 같은 특징을 갖는 소음원에 대한 제어 연구는 아직 제대로 수행된 바가 없다. 그러므로 본 연구에서 시도한 공연 소음 제어 연구의 그 자체만으로도 학문 분야에 의미있는 결과를

보여준다고 생각된다. 세 번째로서, 본 연구에서 개발된 시스템으로 인하여 공연 소음 문제가 어느 정도 해소됨으로써, 야외 공연 문화가 활성화 되는 등 공연 음향 산업에 긍정적인 효과를 기대할 수 있다. 마지막으로, 본 연구를 토대로 향후에 도로 및 비행기 소음 등 다양한 산업에 걸친 소음 문제를 해결하는 실마리가 될 수 있으며, 추가적으로 확장 연구로서 진행할 수 있는 연구적 토대가 마련되는 계기가 될 수 있다.

⑥ 개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술 2: 임피던스 차이기반 차음시스템

음장제어 기술을 통해 나타나는 음압차를 임피던스 기반으로 해석을 시도하였다. 이 연구를 통해 음장제어 기술이 갖는 의미를 확장할 수 있었으며 앞으로도 더 연구될 의미 있는 결과를 도출하였다.

⑦ 야외공연장 실시간 음향 모니터링 시스템

모니터링 시스템은 국내에 관련 연구/개발이 진행된 적이 없고, 국외적으로도 전문시스템이 아닌 웹페이지상에서 다채널의 결과를 모니터링할 수 있는 시스템은 유일하다고 볼 수 있다. 측정결과를 웹페이지상에서 확인하도록 제작된 시스템이기 때문에 다기종의 다양한 기기에서 동시에 내용을 확인하고 야외공연장의 스피커 위치 등을 조정할 수 있다.

제5장. 연구 결과의 활용 계획

야외 공연장 방사음향 특성분석 SW는 야외공연이 주변 지역에 미치는 소음도를 미리 파악하여 상설 야외공연장의 위치 선정에 도움을 줄 수 있다. 또한 야외공연의 법적 소음규제 기준 및 실행 방법 마련에 도움을 줄 수 있다. 하지만 추가적으로 다양한 야외공연의 사례 및 실측 데이터를 수집하여 야외공연의 소음 원 모델개발이 필요하다. 그리고 본 기술의 결과는 향후 환경소음 적 관점에서 야외공연장의 소음을 예측하고 방지하기 위한기술 개발에 기여할 수 있다. 또한 야외공연의 법적 규제기준을 만드는 데에도 활용될 수 있다.

사운드포커싱 기반 공연소음 억제기술은 소음 저감 성능은 좋으나 필요한 스피커와 기타 장비들이 너무 많아 아직 현장에 적용은 어려운 실정이다. 실제 공연장에 적용 가능하도록 추가적인 연구가 필요하다.

무대스피커 기반 공연소음 억제기술은 작은 규모의 공연에 바로 사용될 수 있다. 광주광역시 내 야외공연에 시험적으로 적용할 예정이며, 현장에서 요구하거나 필요한 부분을 추가적으로 연구할 계획이다.

개방공간용 능동 공연소음 감쇄기술은 가상방음벽 구성에서 핵심이 되는 기술이다. 광주에서 열리는 야외공연에 본 과제에서 개발된 능동소음제어 기술을 적용할 예정이다. 야외공연에는 바로 적용이 가능하며 항공기 이류 소음 특성을 고려한 추가 개발을 통해 공항에 적용하는 것을 공군과 합의하였다. 1차적으로 군공항 내 전투기 이류소음 측정을 하기로 하였고, 측정을 기반으로 능동 소음제어를 시행하기로 하였다. 목적은 공항 주변에 소음피해를 받는 아파트에 적용하는 것이다.



광주 제1 전투비행단 단장(강규식 준장) 접견 및 항공기 능동 소음제어 적용 합의 (2017.04.17)

또한 광주과학기술원과 대한민국 공군은 ‘민·군 군사과학기술분야 협력을 위한 합의서’를 체결했다.



GIST-공군, 민·군 군사과학기술분야 협력관계 구축 (2017.04.19)

본 기술을 바탕으로 야외 소음과 관련된 도로, 공항, 건축 현장 등의 문제를 해결하기 위한 확장 연구에 활용 가능하다.

음향 모니터링 시스템을 이용하면 음향 설치 및 무대 운영을 전문으로 하는 기업에서 적은 인력으로 최대의 효과를 낼 수 있기에 관련 기업에서 활용하면 좋을 것으로 사료된다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학 기술 정보

■ 소음지도

- 독일 등의 선진국에서는 다양한 환경소음들 (공항, 철도, 공장, 도로 등)에 대한 무수한 실측 및 사례 조사를 통해 음원 예측식을 보유하고 있음. 이러한 예측식들을 이용하면 간단한 매개변수들을 활용하여 실제 환경요소들이 내는 소음도를 예측 할 수 있음
- 그러나 아직까지 야외공연에 대한 음원 예측식에 대한 연구는 수행된 사례가 없음 그 이유로는 야외공연 소음 실측의 어려움과 사례의 부족이 있으며, 야외공연을 특징지을 수 있는 매개변수가 불분명하기 때문인 것으로 보임
- 선진국 또한 도심속 야외공연에 의한 소음에 노출되어 있기 때문에 향후에는 음원모델을 개발하는 연구를 수행해 기술을 선점할 필요가 있음
- 관련 연구: Internoise, 2010, Noise Prediction for Industrial Facilities, DataKustik, 독일

■ 능동소음제어 기술

- 능동소음제어 기술이란 공기를 통해 파동의 형태로 전달되는 소음을 상쇄하기 위해 크기는 같고 반대 위상을 가지는 소음을 발생시켜 음파간의 중첩에 따른 소음 감쇄를 유도함.
- 1936년 Lueg라는 사람에 의해 처음으로 능동소음제어 기술이 특허로 등록되었음. 제어음을 형성할 수 있는 방법이 없던 당시에는 아이디어로 머물렀지만, 1980년대를 들어서면서 디지털 신호 처리 기술의 발전에 힘입어 능동소음제어 시스템의 구현이 가능하게 되었음.[13]

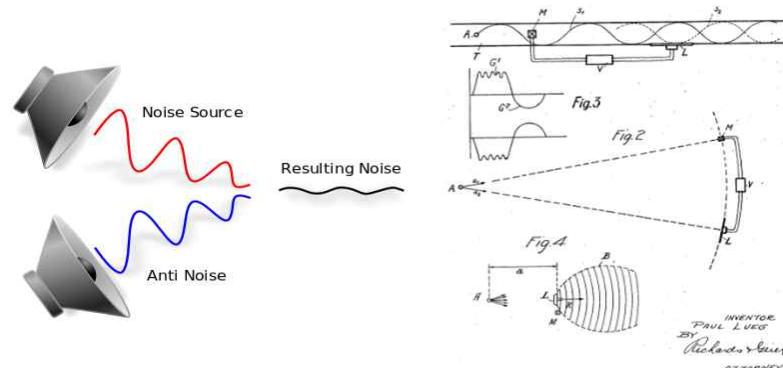


그림 6.1 능동소음제어 원리 및 특허(US 2043416 A, Process of silencing sound oscillations)

- 적용분야로는 환기구 내의 소음, 헤드셋, 자동차 배기소음 등 실내 공간뿐만 아니라, 도로소음, 발전기 소음 등 야외 공간에서도 꾸준히 적용되고 있음.[18~24]

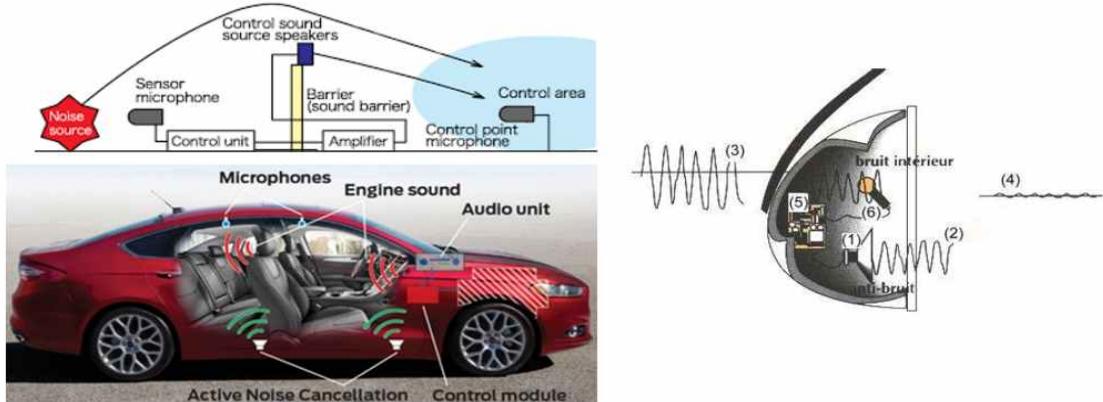


그림 6.2 능동소음제어 적용사례

■ 적응필터링 기술

- 시스템 동작 환경(System operating environment)이 시간에 따라 변화하는 경우에도 적응하여 목표하는 성능을 낼 수 있는 기술.[14]

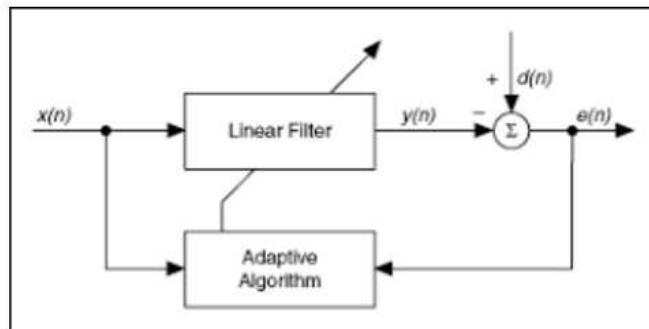


그림 6.3 적응필터링 블록다이어그램 (출처 :
<http://www.ni.com/example/31220/en/>)

- 1960년도에 B.Widrow와 M.E.Hoff에 의해 가장 기본적인 형태의 적응필터링 알고리즘이 Least Mean Square 알고리즘이 제안됨.

LMS ALGORITHM STEPS:

Each iteration of LMS involves three steps:

$$\text{Filter output : } y[n] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]w[n]$$

Estimation error:

$$e[n] = d[n] - y[n]$$

Tap-weight adaptation:

$$w[n+1] = w[n] + \mu x[n]e[n]$$

그림 6.4 LMS 알고리즘

(출처 : <https://www.slideshare.net/bratisundarnanda/project-34302050>)

- 1981년에는 B.Widrow와 D.Shur 등에 의해 음향 경로가 시간에 따라 바뀌는 조건을 반영할 수 있는 환경에서 적응필터링 기술을 통해 능동소음제어를 구현함. 이때 구현을 위해 Filtered-X Least Mean Square 알고리즘이 제안됨.[18]

- 샘플간의 correlation이 높은 입력신호에 대하여 수렴속도가 저하되는 문제를 해결하고자, B.Farhang 과 S.Gazor에 의해서 transform domain 기반의 LMS 알고리즘이 제안됨.[16]

■ 다채널 능동소음제어 시스템의 저감영역 확장을 위한 제어 스피커 및 오차 마이크로폰 배치 기술

- 호주에 위치한 Western Australia 대학교의 J.Guo와 J.Pan 연구팀에서는 다채널 능동소음제어 시스템을 연구함.[25~31]

- 제어 스피커 및 오차 마이크로폰간의 사이의 거리가 능동소음제어에 의한 저감영역 형성에 미치는 영향을 수식적으로 분석함. 수식적 분석에 의하면, 저감영역을 확장할 수 있는 최적의 제어 스피커 및 오차 마이크로폰 간의 거리가 존재함. [29~31]

- 이론적인 분석에 기반하여, 수치적 시뮬레이션 및 무향실 내에서의 실험을 통해 제안한 아이디어의 유용성을 증명함.

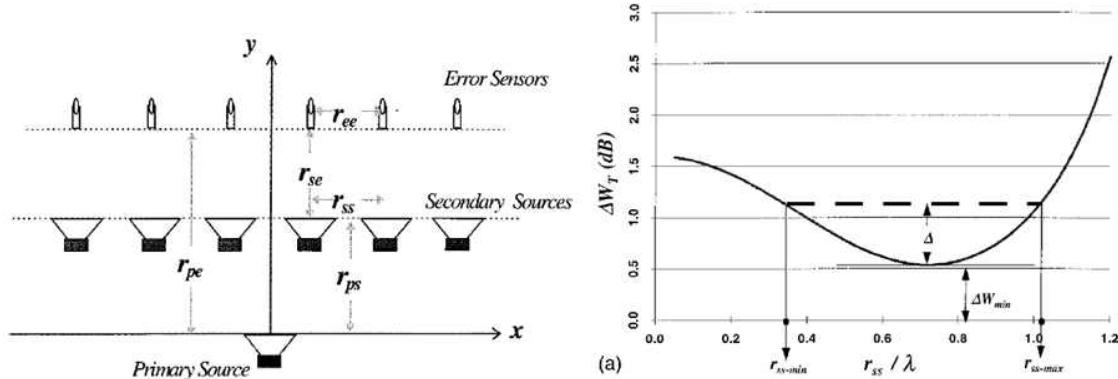


그림 6.5 제어 스피커 및 오차 마이크로폰의 배치에 따른 저감영역 분석 (출처 : Actively created quiet zones by multiple control sources in free space, J. Acoust. Soc. Am. 101 (3), March 1997)

■ 음향 모니터링 기술

- 음향 모니터링 분야에서 가장 두각을 나타나는 것은 AFMG 사로, EASE, EASERA, SYSTUNE 등의 다양한 음향 분석 및 비쥬얼라이제이션 툴을 상품화하고 있음

제7장. 연구 개발 결과의 보안 등급

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구 시설·장비 현황

구입 기관	연구 시설/ 연구 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천 원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
광주과학기술원	부차음총	배경소음 25dB(A) 이하	1	2016. 01. 29	52,455	(주)에스아이판 (02-521-6794)	광주광역시 북구 첨단 과기로 123 (오룡동) 기 전 공학부 F1층 110	NFEC-2016-0 5-209424
	고성능 평판 형 흡음재	350T 흡음재	1	2016. 01. 29	93,500			
광주과학기술원	고성능평판형 흡음재 부속 자재	350T 흡음재. 방음문, 차음 문	1	2017. 01. 25	67,650	(주)에스아이판 (02-521-6794)	광주광역시 북구 첨단 과기로 123 (오룡동) 기 전 공학부 F1층 110	NFEC-2017-0 3-236860
	기타 유지설 비	공조기, 계측 설비	1	2017. 01. 25	59,265			

제9장. 연구 개발 과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

제10장. 연구 개발 과제의 대표적 연구 실적

번호	내 용
1	2016년 'IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS'에 논문 게제 (Electroacoustic Absorber Using Disturbance-Observer-Type Velocity Estimator)
2	2016년 '대한건축학회지'에 논문 게제 (야외공연장 공연 시 주변소음지도 작성 및 음원의 영향에 관한 연구)
3	2015년 ICSV22 학회에서 Keynote Lecture로 초청되었음 (Sound focusing and its practical applications)
4	2016년 특허 출원 (음향 모니터링 시스템 및 방법, 10-2016-0037575)
5	2016년 특허 출원 (복수의 단말을 이용한 음향 모니터링 시스템 및 방법, 10-2016-0165619)

제11장. 기타 사항

1. 기술 개발 사항

본 연구를 수행하며 기존 개발된 기술들의 활용과 구현도 이루어졌지만 기술 개발 또한 달성하였다. 기술 개발에 대한 자세한 내용은 ‘제4장. 목표 달성을 및 관련 분야 기여도’의 ‘2. 관련 분야 기여도’에 자세히 나와있다.

2. 공연 소음 억제기술 상용화에 필요한 사항

현재 환경소음 기준이 마련되어 있지만 강제성이 없는 실정이다. 공연 기획사들은 야외공연장 주민들에게 양해를 구하거나 소음문제가 대두될 장소는 제외하고 있다. 이와 같은 실태 속에서 공연 기획사들이 더 많은 비용을 지불해 가며 공연 소음 억제기술을 도입하기란 기대하기 어렵다. 하지만 야외공연 소음을 현재와 같이 방지할 수 없기 때문에 제도적 강제성이 필요하다. 제도적 강제성으로 소음을 줄이지 않을 시 공연을 하지 못하게 된다면 공연 소음 제어기술의 수요는 증가할 것이다. 이로 인해 발생하는 지출을 국가에서 일부 보조해 준다면, 공연 소음 제어업체가 육성될 것이며 공연 소음 억제 기술도 시장에 고착화 될 것이다. 공연 기획사들의 추가적인 지출로 소음이 제어된 공연이 가능해 진다면 야외 공연도 더욱 활성화 될 것이다.

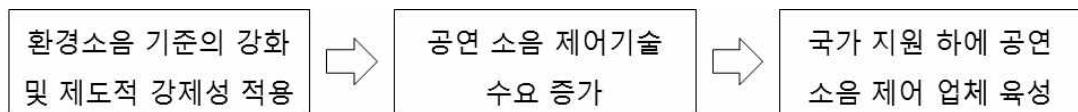


그림 11.1 공연 소음 억제 기술의 시장 진입 과정

제12장. 참고 문헌

- [1] SoundPLAN, L. L. C. "SoundPLAN® User's Manual." (2005).
- [2] Organización Internacional de Normalización. "ISO 9613-1: 1993, Acoustics: attenuation of sound during propagation outdoors. Calculation of the absorption of sound by the atmosphere." (1993).
- [3] 대한민국 환경부, "소음, 진동 공정시험기준(ES 03301.1)", (2016).
- [4] Datakustik GMBH, "CADNA Manual V3.4, Datakustik GMBH." Greifenberg, Germany (2005)
- [5] Kim, Yang-Hann. "Sound Propagation: an impedance based approach." John Wiley & Sons, 2010.
- [6] The Mathworks Inc, "Matlab User's Guide", (2015)
- [7] Licitra, Gaetano. "Noise mapping in the EU: models and procedures". CRC Press, (2012).
- [8] Murphy, Enda, and Eoin King. "Environmental noise pollution: Noise mapping, public health, and policy". Newnes, (2014).
- [9] 소음지도 가시화를 위한 클라우드 컴퓨팅 장치 및 방법, (2010), 출원번호: 10-2010-0117114
- [10] DS Cho et.al., "Noise mapping using measured noise and GPS data", Applied Acoustics, (2007)
- [11] W Probst et.al, "Noise Prediction for Industrial Facilities", INTERNOISE 2010, (2010)
- [12] 소음지도를 이용한 풍력 단지 소음 모니터링 및 제어 시스템, (2011), 출원번호: 10-2011-0073410,
- [13] Sen. M. Kuo and Dennis. R. Morgan, "Active Noise Control: A Tutorial Review", Proceedings of the IEEE, VOL. 87, NO. 6, 1999.
- [14] Simon Haykin, "Adaptive filter theory", Pearson, 2014.
- [15] B. Farhang-Boroujeny, "Adaptive Filters Theory and Applications", John Wiley & Sons, 1995
- [16] B. Farhang-Boroujeny and S.Gazor, "Performance analysis of transform domain normalized LMS algorithm", ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1991.
- [17] B. Paillard, Chon Tam Le Donh, A.Berry, and J.Nicoas, "Accelerating the convergence of the filtered-X LMS algorithm thorough transform domain optimization", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 9, Issue4, pp.445-464, 1995.
- [18] A. Omoto and K. Fujiwara, "A study of an actively controlled noise barrier", J. Acoust. Soc. Am. 94, 2173-2180, 1993.
- [19] A. Omoto, K. Takashima and K. Fujiwara. "Active suppression of sound diffracted by barrier--Experiment in the outdoors", Proceedings of Inter-Noise 94, pp. 1357-1360, 1994.
- [20] K. Ohnishi1, S. Teranishi, M. Nishimura, K. Uesaka, K. Hachimine, and H. Ohnishi, "Development of the noise barrier using active controlled acoustical soft edge", Proceedings of Active 99, USA, Nov.1999.
- [21] J. Zhang, W. Jiang and N. Li, "Theoretical and experimental investigations on coherence of traffic noise transmission through an open window into a rectangular room in high-rise buildings", J. Acoust. Soc. Am. 112 (4), 1482-1495, 2002.
- [22] J. Smith, R. Burdisso, C. Fuller and R. Gibson, "Active control of low-frequency broadband jet engine exhaust noise", Noise Control Eng. J. 44 (1), 45-52, 1996.
- [23] Francesco Borchi, "Design and experimental tests of active control barriers for

low-frequency stationary noise reduction in urban outdoor environment”, Applied Acoustics, Vol. 114, pp.125-135, 2016.

[25] B. Widrow, D. Shur and S. Shaffer, “On adaptive inverse control”, in Proc. 15th Asilomar Conf. pp.185-189, 1981.

[26] M. Hodgson, J. Guo, and P. Germain “Active local control of propeller-airport run-up noise”, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 114, No. 6, Pt. 1, 2003.

[27] J. Guo and J. Pan, “Application of Active Noise Control to Noise Barriers”, Acoustics Australia 25 (1), 11-16, 1997.

[28] J. Guo and J. Pan, “Increasing the insertion loss of noise barriers using active control system”, J. Acoust. Soc. Am. 104 (6), 3408-3416, 1998.

[29] J. Guo, M. Hodgson and P. Germain, “Using an active noise control system to increase the insertion loss of a blast fence for run-up noise at Vancouver Airport”, Proceedings of Inter-noise 2000, Nice, 2000.

[30] Jingnan Guo, Jie Pan, and Chaoying Bao “Actively created quiet zones by multiple control sources in free space”, J. Acoust. Soc. Am. 101 (3), 1997.

[31] Jingnan Guo and Jie Pan, “Actively created quiet zones for broadband noise using multiple control sources and error microphones”, J. Acoust. Soc. Am. 105 (4), 1999.

[32] Jingnan Guo and Jie Pan, “Further investigation on actively created quiet zones by multiple control sources in free space”, J. Acoust. Soc. Am. 102 (5), Pt. 1, 1997.

주 의

1. 이 보고서는 문화체육관광부.한국콘텐츠진흥원에서 시행한 ‘2014년도 문화기술 연구개발지원사업’의 연구 보고서입니다.
2. 본 연구보고서 내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 문화체육관광부.한국콘텐츠진흥원의 ‘2014년도 문화기술 연구개발지원사업’의 연구개발 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.