

다목적 야외경기장의 소음 문제 해결을 위한 최적의 천장 구조 탐구:
서울월드컵 경기장을 중심으로

김윤서 · 김준명 · 연승모 · 차준오
하나고등학교

Finding the optimal ceiling structure to address noise issues in multipurpose
outdoor stadiums: Focusing on Seoul World Cup Stadium

Seungmo Yeon · Yoonseo Kim · Junmyung Kim · Juno Cha

Hana Academy Seoul

Abstract Multi-purpose outdoor stadiums, such as the Seoul World Cup Stadium, lack adequate noise reduction measures, causing inconvenience to nearby residents. This study aims to design an optimal stadium roof structure that effectively reduces noise by considering sound wave interference, thereby improving residents' quality of life. The study analyzed constructive interference points of sound waves from the stadium and proposed several roof designs to absorb noise. With models of the stadium and roofs, noise reduction efficiency was tested by measuring decibel levels. The results of the experiment showed that blocking more reinforcement interference points or installing sound-absorbing materials reduced the average decibel level. This research provides a practical and economical solution for noise issues in multipurpose outdoor stadiums.

Key words: Multi-purpose outdoor stadiums, decibel, wave interference, absorption material

1. 서론

서울월드컵경기장은 마포구의 랜드마크로서 다양한 문화·스포츠 행사가 개최되는 중심지이다. FC 서울의 홈 구장으로써 매주 진행되는 축구경기, 그리고 다양한 콘서트와 이벤트 경기 등의 문화 예술 및 각종 행사사들을 통해 사람들이 스포츠와 문화 생활을 영위할 수 있도록 하는 공간이다. 그러나 경기장에서 발생하는 소음은 인근 주민들에게 지속적인 불편과 스트레스를 유발하고 있다.

매주 몇시간씩 이어지는 축구경기에 더해 며칠동안이나 이어지는 콘서트로 인해 불편을 겪는 인근 주민들이 많은 상황이다. 특히 올해 중순에 진행되었던 세븐틴 콘서트와 임영웅 콘서트는 과도한 소음을 유발해 온라인 민원 사이트에 다수의 글이 올라오는 일도 발생했다. 이러한 문제의 해결을 위해 현재 서울월드컵경기장은 천장이 원형으로 뚫려있는 돔형 경기장 구조를 갖는데, 그럼에도 소음 관련 문제는 끊이지 않는 상황이다. 따라서, 경기장 구조의 개선을 통해 더 많은 소음을 저감해야하는데, 기존 소음 저감 연구들은 기존의 구조는 유지하되, 흡음재의 종류나 설치 위치에 초점이 맞춰져 있을 뿐, 건축 구조와 음향 물리학적 설계를 통합적으로 고려한 연구는 부족한 상황이다. 이에 따라, 경기장 천장 구조의 설계가 소음 문제를 효과적으로 해결할 수 있다고 판단했기에 본 연구에서는 소음을 저감하기 위해 천장 구조와 흡음재 사용 위치를 고려해 경기장을 설계하고자 한다. 특히, 음파의 간섭과 반사를 고려한 천장 설계는 소음 저감 효과를 효율적으로 극대화할 가능성을 지니며, 이는 기존 소음 관리 방식의 한계를 효과적으로 극복할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 경기장 음원들로부터 발생하는 음파의 보강 간섭 지점을 분석하고, 이를 기반으로 소음을 효과적으로 흡수·분산할 수 있는 최적의 천장 구조를 설계하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 다양한 천장 형태를 실험적으로 검증하고, 데시벨 측정을 통해 소음 저감 효율이 높은 천장 구조를 도출한다. 궁극적으로, 연구 결과를 활용하여 소음 문제를 해결함으로써 주민들의 삶의 질을 향상시키고, 건축 음향 설계의 새로운 방향을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 보강간섭과 상쇄간섭

같은 위상의 두 파동이 중첩될 때는 진폭이 증가하는 보강간섭이 일어나고, 다른 위상의 두 파동이 중첩되면 진폭이 줄어드는 상쇄간섭이 일어난다. 본 탐구에서는 월드컵 경기장 모형 내에 음원을 배치하고 일정한 음파가 음원에서 나올 때 보강간섭되는 부분과 상쇄간섭되는 부분을 시뮬레이션을 통해 분석하여 이에 따라 경기장의 천장 부분을 고안했다.

2.2 흡음률과 잔향시간

일부 경기장에서는 돔 형태의 지붕을 사용함으로써 밖으로 나가는 소음을 줄이는 방식을 사용한다.

외부로 나가서 소음을 유발하는 음파를 줄이기 위해서는 흡수되는 음파의 양을 늘려야한다. 이때 사용되는 개념이 흡음률인데, 흡음률이란 음향 흡수 계수로, 재료의 종류, 입사음의 주파수, 입사각, 면적 등에 따라 달라지는 음향 흡수 계수(Noise Reduction Coefficient)이다.

흡음률과 함께 잔향시간을 고려해야 한다. 잔향시간은 사빈(Sabine)의 공식에 의해 계산할 수 있고, 이는

다음과 같이 나타난다.

$$T_{60} = \frac{60V}{1.087ac} = \frac{0.161V}{a} \dots\dots\dots(1)$$

a는 공간 내에서의 Sabine 계수와 흡음 면적의 합을 의미하고, c는 음속을 의미한다. (위의 식에서는 온도 20도일 때의 음속으로 계산한 것이다) 위의 식을 보면, 실내 공간이 클수록 잔향시간이 길다는 점을 알 수 있다.

2.3 음향임피던스, 데시벨 측정

음향임피던스(Z)는 매질의 속도와 음압 사이의 비율로, 진동수에 대한 함수로 나타난다.

$$Z = \frac{P}{vS} \dots\dots\dots(2)$$

)

소리의 특성을 파악하기 위해서는 데시벨 단위를 갖는 음압 레벨(La)을 측정할 수 있다. 음압 레벨은 소리의 세기 관점에서 구할 수 있고, 압력 진폭 관점에서도 구할 수 있다.

$$L_a = 10\log\frac{I}{I_0}(\text{소리의 세기}) \dots\dots\dots(3)$$

$$L_a = 20\log\frac{P}{P_0}(\text{압력 진폭}) \dots\dots\dots(4)$$

또다른 데시벨 측정 방법으로는 등가소음도 공식이 있다. 등가소음도는 음압레벨이 시간에 따라서 변화할 때, 측정 시간 내에서 동등한 평균 음압 레벨을 가지고 있는 연속 정상음의 소음도를 의미한다. 음압 레벨(La)과 구분하기 위해서 등가소음도는 Leq로 표기한다.

$$L_{eq} = 10\log(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}}) \dots\dots\dots(5)$$

$$L_{eq} = 10\log(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L_p(t)}{10}} dt) \dots\dots\dots(6)$$

위에서 설명한 음압레벨과 등가소음도를 상황에 맞춰서 구분하여 사용해야한다.

2.4 경기장 구조상 특징

현재 서울월드컵경기장은 원형 구조의 천장을 가지고 있고, 지붕은 길이 40~90m로 된 44개의 Radial 트러스와 16개의 마스트로 이루어진 트러스 돔 구조물이다. 이와 비교해서 음향적인 효율과 외부로 나가는 소음 차단이 뛰어난 형태의 지붕을 고안하는 것이 본 연구의 목적이다. 최대한 경기장과 비슷한

조건에서 실험을 진행하기 위해 경기장의 높이와 면적 등을 고려하여 실험 모형을 제작하였다.

3. 연구 방법 및 절차

3.1. 연구 방법

소음 저감 효율이 높은 경기장 천장의 형태를 찾기 위해 본 연구는 경기장 음원으로부터 발생하는 음파의 보강 간섭, 상쇄 간섭 등을 중심으로 분석하였다. 경기장 음원으로부터 발생하는 음파의 보강 간섭 지점과 상쇄 간섭 지점을 확인하기 위해서 AFMG의 EASE Focus2를 사용하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 음원의 보강 간섭 지점이 격자 무늬 형태로 나타난다는 결과를 도출하였다. 이 결과를 바탕으로 보강 간섭 지점을 막기 위한 두 개의 새로운 천장 형태를 제시하였다. 기존의 천장과 새롭게 제안한 천장을 비교하기 위해서 우드락을 활용해 경기장과 천장 모형을 제작하여, 천장 형태에 따른 데시벨 측정 실험을 진행하였다. 나아가 흡음재의 효과를 확인하기 위해서 흡음재의 유무에 따른 데시벨 측정 실험도 실시하였다. Python의 librosa 라이브러리를 활용하여 각 경우에 따른 데시벨의 변화를 그래프로 나타낸 후 관찰하였다. 이러한 다양한 측정값은 최적의 경기장 천장의 형태를 선별하기 위해 통합적으로 해석되었다.

3.2. 연구 절차

본 연구는 다음과 같은 절차로 수행되었다. 연구에서 먼저 경기장 음원들로부터 발생하는 음파의 보강 간섭 지점을 AFMG 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 서울월드컵경기장의 비율을 고려하여 크기가 300mm*300mm*50mm인 임의의 정사각형 경기장을 구현하고, 음원이 8개일 때의 경기장 단면을 기준으로 데시벨의 변화를 시뮬레이션해 본 결과는 다음과 같다.

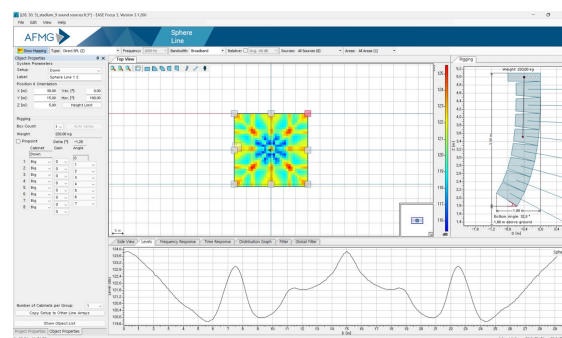


Figure 3-1. Change of dB based on stadium section

이 지점들을 고려하여 소음을 효과적으로 흡수·분산할 수 있는 새로운 천장의 형태 두 가지, 격자1과 격자2를 제시하였다. 격자1과 격자2의 차이는 천장의 정사각형 구멍 크기 차이이다. 격자1의 경우에는 정사각형의 한 변의 길이를 9cm로 설정하여 4개의 구멍이 있는 천장을 설계한 것이고, 격자2의 경우에는 정사각형의 한 변의 길이를 25mm로 설정하여 16개의 구멍이 있는 천장을 설계한 것이다. 원형 구멍의 천장은 실제 서울월드컵경기장의 천장과 유사하기에 실제 천장과 새롭게 설계한 천장을

비교하기 위해서 원형 구멍의 천장 모형도 제작하였다. 모형 제작 설계도는 다음과 같다.

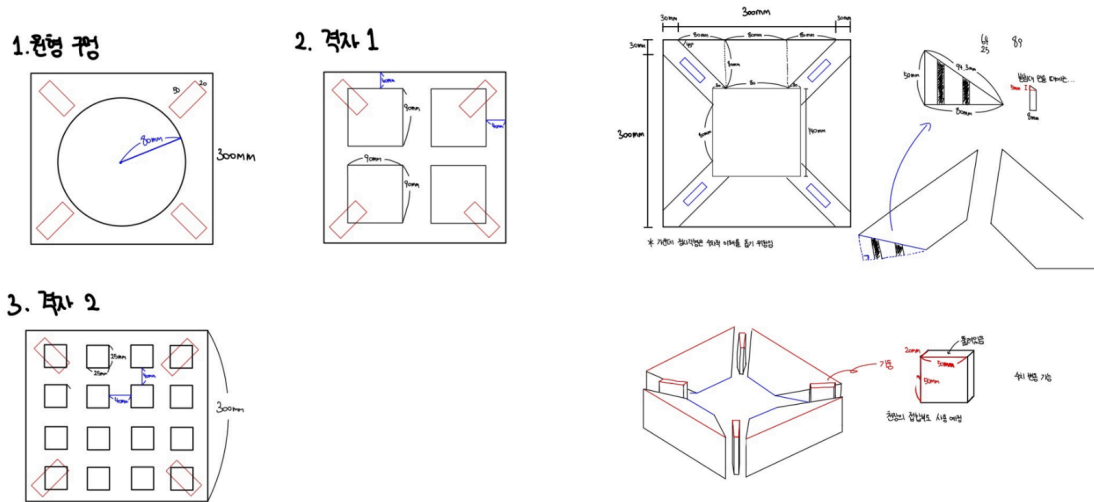


Figure 3-2. Design of stadium model

다음으로 경기장과 새로운 천장의 형태, 실제 서울월드컵경기장과 유사한 천장 구조 등을 우드락을 활용해 모형으로 제작한 후, 네 개의 핸드폰을 경기장과 유사하게 배치하고 관중 음원을 틀어 천장 형태에 따른 경기장 밖에서 들리는 소리를 기록하였다.

실험은 두 차례 진행되었다.

1차 실험

- 1) 네 개의 핸드폰을 핸드폰의 스피커가 관중석의 정중앙에 놓이도록 위치시킨다.
- 2) 경기장 외부로 빠져나가는 소음의 데시벨을 측정하기 위해서 경기장으로부터 10cm 떨어진 곳에 음향 측정 핸드폰을 준비한다.
- 3) 음원 역할을 하는 네 개의 핸드폰이 동일한 음원을 동시에 재생하도록 설정하여 천장이 없는 경우, 원형 구멍의 천장, 격자1의 천장, 격자2의 천장일 때의 음향을 약 20초 동안 기록한다.
- 4) 흡음재의 효과를 확인하기 위해서 흡음재를 붙였을 때의 격자1의 천장, 격자2의 천장의 경우도 측정한다.

1차 실험 결과, 예상 결과와 다른 결과가 도출되어 1차 실험의 한계점을 분석한 후 2차 실험, 즉 재실험을 진행하였다. 재실험에서는 재실험에서는 서울월드컵경기장 인근 거주지역이 서울월드컵경기장 크기의 약 5배 떨어진 곳에 위치한다는 것을 감안하여 음향 측정 핸드폰을 10cm에서 150cm 떨어진 곳에 위치시켰다. 또한 음원의 시작과 끝 지점이 다른 문제점을 보완하기 위해서 음향을 40초 동안 기록한 후 필요한 부분을 편집하여 쓰기로 결정하였다.

2차 실험

- 1) 네 개의 핸드폰을 핸드폰의 스피커가 관중석의 정중앙에 놓이도록 위치시킨다.
- 2) 경기장 외부로 빠져나가는 소음의 데시벨을 측정하기 위해서 경기장으로부터 150cm 떨어진 곳에 음향 측정 핸드폰을 준비한다.
- 3) 음원 역할을 하는 네 개의 핸드폰이 동일한 음원을 동시에 재생하도록 설정하여 천장이 없는 경우, 원형 구멍의 천장, 격자1의 천장, 격자2의 천장일 때의 음향을 약 40초 동안 기록한다.
- 4) 흡음재의 효과를 확인하기 위해서 흡음재를 붙였을 때의 격자1의 천장, 격자2의 천장의 경우도 측정한다.

마지막으로 경우에 따른 데시벨 변화를 Python을 통해 그래프로 구현한다. 이를 구현하는 과정은 다음과 같다. 첫째, 단시간 푸리에 변환(STFT)을 사용하여 음원의 단위 프레임당 주파수 스펙트럼을 도출한다. 둘째, A-weighting 필터를 적용하여 사람이 더 민감하게 반응하는 주파수 대역에 따라 가중치를 부여한다. 셋째, 주파수 스펙트럼에서 진폭(압력)을 계산한다. 넷째, 압력의 진폭을 제곱하여 선형 에너지를 계산하고 이를 데시벨 단위로 변환하여 프레임별 A-weighted 데시벨 값 L_a 를 구한다. 마지막으로, 모든 프레임의 에너지를 평균하여 로그 변환을 통해 등가소음도(Leq)를 계산하며, 결과는 데시벨 단위로 표현한다.

4. 연구 결과

1차 실험

다음은 6가지 경우에 대한 시간에 따라 데시벨(Leq)을 측정한 것이다.

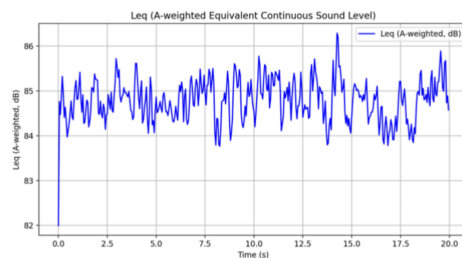


Figure 4-1. Leq of Stadium with no roof

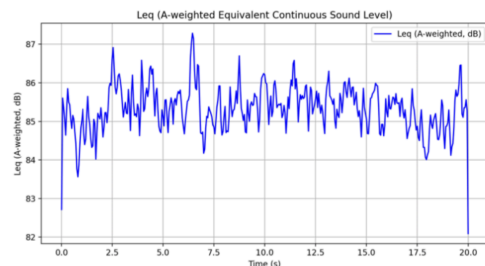


Figure 4-2. Leq of Stadium with circular roof

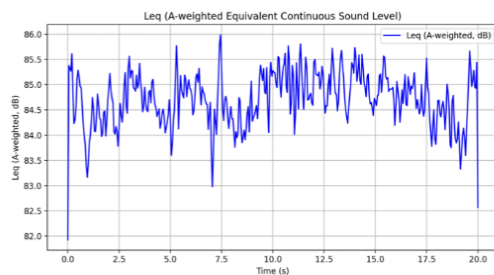


Figure 4-3. Leq of Stadium with grid1

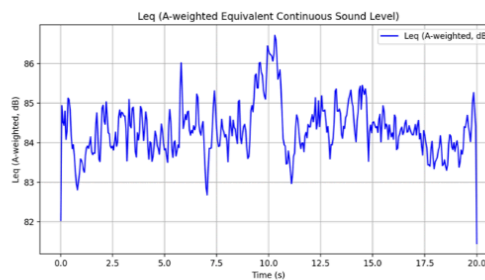


Figure 4-4. Leq of Stadium with grid2

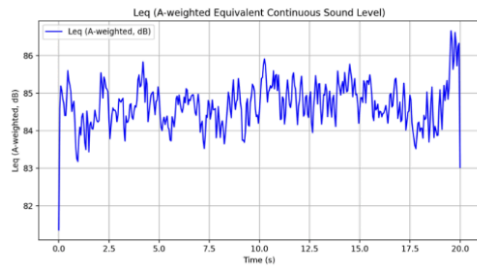


Figure 4-5. Structure 4-3 with sound absorption material (left)

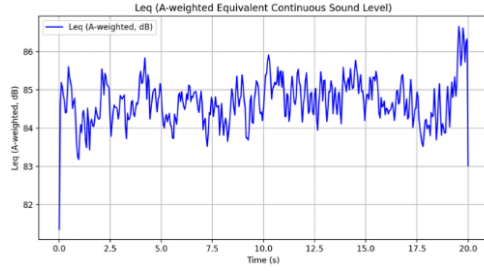


Figure 4-6. Structure 4-4 with sound absorption material (right)

Table 1. Result of first experiment

Structure of Stadium(Figure)	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6
Average Decibel(dB)	84.81	85.37	84.74	84.39	84.72	84.72

1차 실험 결과 해석

1차 실험에서는 뚜렷한 경향성을 파악하지 못 했다. 실험 중 발견 된 문제로는 1) 경기장 크기에 비해 과도하게 큰 소음, 2) 미세하게 다른 녹음 파일의 길이가 있었다. 이러한 문제들을 개선하여 2차 실험을 진행하였다.

2차 실험

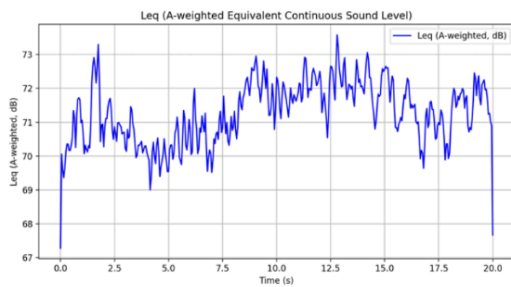


Figure 4-7. Leq of Stadium with no roof

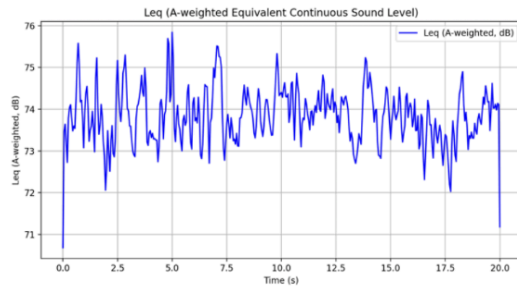


Figure 4-8. Leq of Stadium with circular roof

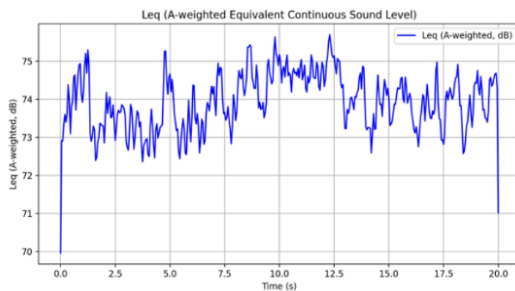


Figure 4-9. Leq of Stadium with grid1

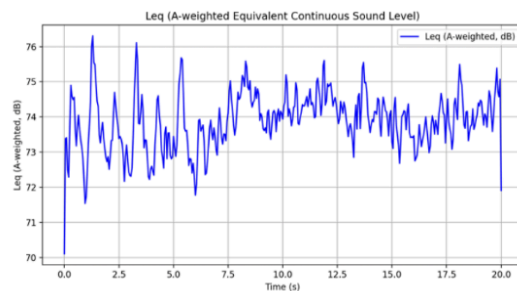


Figure 4-10. Leq of Stadium with grid2

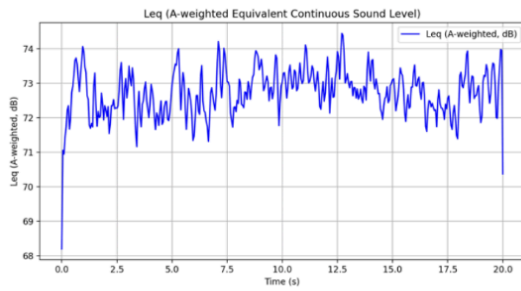


Figure 4-11. Structure 4-10 with sound absorption material (left)

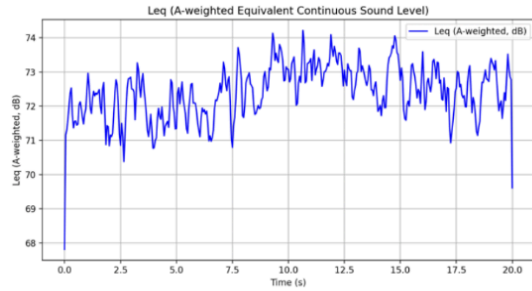


Figure 4-12. Structure 4-11 with sound absorption material (right)

Table 2. Result of second experiment

Structure of Stadium(Figure)	4-7	4-8	4-9	4-10	4-11	4-12
Average Decibel(dB)	71.37	73.89	74.01	73.96	72.78	72.49

2차 실험 결과 해석

소음 소리를 감소시키고, 소음 측정 구간을 정확히 편집하여 실험을 다시 진행하였다. 실험 결과, 천장의 보강간섭 되는 부분을 막는 곳이 많을수록 소음이 줄고, 흡음재를 설치하였을 때, 평균 데시벨의 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 천장이 없는 경기장의 경우 첫 측정 당시 변인통제가 제대로 되지 않아 이상치가 측정되었다.

5. 결론 및 논의

2차 실험의 결과로 미루어보았을 때, Structure 4-8(천장이 없을 때)는 예상과 달리 데시벨이 작게 측정되긴 했으나, Figure 4-9, Figure 4-10, Figure 4-11의 그래프를 통해 소리의 보강 간섭 지점을 막는 원형 천장, 격자1와 격자2 천장의 경우 데시벨이 작게 측정됨을 알 수 있다. 또한, Figure 4-10과 4-12, Figure 4-11과 4-13을 비교함으로써 흡음재인 스펀지를 설치했을 경우에 설치하지 않은 경우보다 더 큰 흡음 효과를 낼 수 있다. 그리고, 이 세가지 형태의 천장을 비교해보면, 격자1 - 격자2 - 원형 천장 순으로 데시벨이 크다. 음원을 8개로 설정해 음파가 보강간섭되어 진폭이 최대가 되는 지점들을 파악했을 때 그 중 1개만을 막은 형태가 격자1의 천장이고, 5개를 모두 막은 형태가 격자2의 천장이다. 따라서 이를 통해 보강간섭 지점들을 더 많이 막은 형태의 천장이 더 큰 흡음효과를 나타냄을 확인할 수 있었다. 또한, 격자2와 원형 천장을 비교해보았을 때, 격자2보다 원형 천장의 경우 데시벨이 더 작게 측정되긴 하나, 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 이를 통해 본 연구에서 설계한 격자2 천장이 현재 사용되는 원형 천장과 비슷한 흡음효과를 낼 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 이 모든 실험 결과를 미루어보았을 때, 보강간섭 지점들을 막는 천장 형태가 높은 흡음효과를 나타냄을 알 수 있고, 본 연구에서 설계한 격자2의 천장이 효과적인 흡음효과를 나타내며, 그와 동시에 비용적 측면에서

경제적인 형태라는 결론을 도출했다.

그러나 본 연구에는 몇가지의 한계점들이 존재한다. 우선 우드락으로 경기장 몸체를 만들었기에 실제 경기장과 소재의 차이가 있었으며 두께 또한 충분히 고려하지 못했다. 그러므로 실제 경기장과 하중에 있어서의 차이가 존재하기에 새로 설계한 구조의 안정성을 충분히 고려하지 못했다. 또한, 실제 경기장의 천장은 입체적인 구조를 띠는 데 반해, 본 연구에서는 설계 및 제작의 효율성을 위해 단면 형태로 제작하였다. 음원을 설정할 때에도 약간의 문제가 있었다. 작은 스피커를 구하지 못해 휴대폰을 음원으로 사용하였는데, 그로 인해 음원의 배치가 설계에서의 배치와 차이가 있었다. 이와 같은 이유들로 인해 변인통제가 완벽하지 않아 정확한 결과를 얻지 못했던 것으로 판단된다. 따라서 추후 재연구를 진행한다면 경기장의 입체적 구조와 음원의 종류 및 배치 등을 더 정확하고 신중하게 고려하고 보완함으로써 더욱 정확하고 효과적인 실험 결과를 도출할 수 있을 것으로 예상된다.

결과적으로, 본 연구는 경기장 등 대규모 실내 공간에서 발생하는 소음 문제를 해결하기 위해 경제적이고 효율적인 흡음 설계를 제시했다는 점에서 의의가 있다. 특히, 설계된 격자2는 기존 원형 천장과 유사한 흡음효과를 내면서도 구조적으로 단순하고 경제적인임을 확인했다. 향후, 이 연구는 실내 음향 설계의 경제성과 효율성을 높이는 데 기여할 수 있으며, 경기장, 강당, 공연장 등 다양한 공간에서 적용 가능성이 높을 것으로 예상된다. 다만, 실제 환경에서의 입체적 구조와 정밀한 음원 설정을 고려하지 못한 한계가 있었기에, 이를 보완한 후속 연구가 필요하다. 이를 통해 더욱 현실적이고 효과적인 음향 제어 설계 방안을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 김정중(2000). 다목적 야외경기장의 음향특성에 관한 연구: 서울월드컵 경기장을 중심으로. 한국소음진동공학회 2000년도 추계학술대회논문집, pp.474-481.
- 정정호, 김정중, 조창근(2008). 다목적 공간의 소음 및 실내음향 제어. 한국소음진동공학회 학술대회논문집, pp.42-45.
- Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders(2000). Foundations of Acoustics. Wiley.
- 환경부(2022). 총칙(소음). 환경부, pp.1-7
- 환경부(2022). 환경 기준 중 소음 측정 방법. 환경부, pp.1-4
- 심철구, 노재훈, 박정균(1995). 소음측정방법에 따른 평가소음도 비교. 한국산업위생학회지. pp.128-136
- 오양기, 주진수, 정광용, 김선우. 실내공간의 잔향시간과 음향변수 측정방법. 한국소음진동공학회 학술대회논문집. pp.392-396
- 박대로.(2024.05.30). "저 무지막지한 우퍼 소리"...서울월드컵경기장 '콘서트 소음' 고통. 공감언론 뉴시스. https://www.newsis.com/view/NISX20240530_0002753813
- 서울월드컵경기장[사진].서울연구데이터서비스, 대한민국. <https://data.si.re.kr/photo/collection/543>