

석사학위논문

입력소스의 위치와 센서개수에 따른 평판에서의
시간반전램파의 공간집속성능 규명

동아대학교 대학원

토 목 공 학 과

서 대 재

2 0 1 3 학 년 도

입력소스의 위치와 센서개수에 따른
평판에서의 시간반전램파의
공간집속성능 규명

지도교수 박 현 우

이 논문을 공학석사학위
청구논문으로 제출함

2013년 6월

동아대학교 대학원

토 목 공 학 과

서 대 재

서대재의 공학 석사학위
청구논문을 인준함

2013년 6월

위 원 장 최 광 규 (인)

부위원장 박 현 우 (인)

위 원 강 원 호 (인)

국문초록

입력소스의 위치와 센서개수에 따른 평판에서의 시간반전램파의 공간집속성능 규명

Investigating the spatial focusing performance of time reversal
Lamb waves on a plate with respect to input source
location and the number of sensors

토목공학과 서대재
지도교수 박현우

이 논문에서는 입력소스의 위치와 센서개수에 따른 평판에서 시간반전램파의 공간집속성능을 규명한다. 구조물에 발생한 균열과 같은 국부손상에 민감하게 반응하고 짧은 시간에 멀리 퍼지는 장점을 가진 램파이지만 분산성이라는 단점을 가진다. 램파의 단점을 보완하기 위하여 시간반전 음향학을 이용한 시간반전과정을 이용한다. 시간반전과정에 의하면 가진점에서 발생한 입력신호가 응답점인 응답센서에서 기록되게 되고 기록되어진 응답신호는 시간의 역순으로 다시 가진점으로 되돌려 지게된다. 되돌려진 응답신호는 처음 입력신호가 발생한 가진점에서 복원이 되어진다. 판의 경계면에서 파 반사에 의해 유발된 여러 응답센서를 부착한 것과 같은 결과를 도출하는 가상탐지자효과를 이 연구에 적용하여 입력소스의 공간집속성에 대하여 정식화 하였다. 수치 예제를 통하여 입력소스의 위치와 응답센서의 개수 증가에 따른 공간집속성능이 향상됨을 증명한다. 수치예제에서는 다중모드분산효과를 배제하기 위하여 티모셴코 보이론에 근거로한 A_0 모드만을 사용하였다. 그리고 램파의 파 반사 그리고 가상탐지자효과에 대한 정식화를 토대로 MATLAB을 이용하여 시간반전과정을 구현하였다. 구현된 시간반전과정은 범용유한 해석프로그램인 ABAQUS 6.10-1 Standard와의 비교를 통하여 타당성을 검

증하였다. 또한 공간집속성능에 대해 시각적, 수치적으로 나타내기 위하여 시간반전램파의 지향성패턴을 Desibel(dB)단위로 나타내었으며, 중앙 최대값을 제외한 양쪽 측대역의 지향성패턴의 값을 토대로 RMS값으로 나타내었다.

이 과정을 통하여 입력소스의 위치가 변하여도 Truncation time이 증가할수록 공간집속성능이 향상되는 것과 응답센서의 개수를 1개에서 4개까지 증가시킬 때, 응답센서의 개수가 증가할수록 공간집속성능이 향상됨을 규명한다.

주요어 : 램파, 램파의 분산성, 시간반전과정, 램파의 파반사,
가상탐지자효과, 공간집속성능, 입력소스 위치, 센서개수, RMS

목 차

I. 서 론	1
II. 램파의 시간반전과정	3
2.1. 램파의 정의 및 특성	3
2.2. 램파의 분산성	5
2.3. 램파 전달문제에서의 시간반전과정	8
2.4. 램파의 분산에 따른 시간반전과정	13
III. 시간반전램파의 파반사와 공간모임	18
3.1. 시간반전램파의 파반사에 의한 공간모임	18
3.2. 지향성패턴(Directivity pattern)	25
IV. 수치 예제	27
4.1. 수치예제 모형	27
4.2. 입력신호의 위치 변화에 따른 공간집속성능 규명	31
4.3. 응답센서 개수 변화에 따른 공간집속성능 규명	36
4.4. 매개변수 연구결과 분석 및 토의	41
V. 결 론	46
참 고 문 헌	48
부 록	51
Abstract	72

그림목차

그림 2.1 램파의 모드 분류	3
그림 2.2 구조물에 부착할 수 있는 부착형 압전소자	4
그림 2.3 램파의 분산성을 나타내는 분산곡선	6
그림 2.4 티모셴코 보 이론을 이용한 분산곡선의 예	7
그림 2.5 램파의 시간반전과정에서 복원된 입력신호를 이용한 합성 판에서 박리 탐지	10
그림 2.6 능동탐지기법을 이용한 판에서의 램파 시간반전과정	11
그림 2.7 1차 역 대칭모드의 기준화된 시간반전연산자	13
그림 2.8 협대역과 광대역입력신호를 사용한 시간반전과정을 수치모사한 예	14
그림 2.9 다중모드분산이 시간반전과정에 미치는 영향 개념도	17
그림 3.1 시간반전미러(TRM)	18
그림 3.2 Chaotic cavity에서 시간반전램파의 공간모임	19
그림 3.3 직사각형판에서 파반사를 고려한 가상탐지자의 개념도	20
그림 3.4 가상탐지자 모델에서 직사각형 판과 실제 센서의 거울 복사효과 ·	21
그림 3.5 순방향 전달경로 개수 n_F 를 결정하는 활성 탐지자의 예시	23
그림 3.6 시간반전 램파의 지향성패턴에서 공간해상도와 신호대 잡음비 ...	25
그림 3.7 시간반전 램파의 지향성패턴 예시	26
그림 4.1 수치예제 해석을 위한 알루미늄 평판의 형상 및 입력좌표	27
그림 4.2 수치예제에 사용된 톤버스트 입력신호(200kHz)	28
그림 4.3 I_1 에서 S_3 의 전방향 응답신호의 ABAQUS 와 MATLAB 값 비교 ·	29
그림 4.4 절단시간과 활성가상탐지자의 관계 그래프	30
그림 4.5 I_1 에 입력신호가 가해져서 발생한 램파의 신호가 S_1 에서 유입될 때 의 활성가상탐지자의 개념도	31
그림 4.6 시간반전 된 응답신호 ($I_1 \rightarrow S_1$)	32
그림 4.7 0.25msec의 결과값에 대한 지향성 패턴 ($I_1 \rightarrow S_1$)	32

그림 4.8 I_1 을 입력소스로하고 S_1 을 응답센서로 했을 때 truncation time에 따른 지향성패턴	33
그림 4.9 그림 4.7에서 truncation time 0.25ms와 1ms에 대응하는 지향성 패턴 비교 ($I_1 \rightarrow S_1$)	33
그림 4.10 입력소스가 I_1 에서 가진되고 S_1 에서 받아들일 때의 RMS값 변화	34
그림 4.11 입력소스의 위치가 변화 할 때 ($I_1 \sim I_9$) 지향성패턴의 RMS값	35
그림 4.12 활성화상탐지자 개념도와 응답신호 ($I_2 \rightarrow S_{1234}$)	36
그림 4.13 Trucation time 0.15msec일때의 지향성 패턴($I_2 \rightarrow S_{1234}$)	38
그림 4.14 입력신호가 I_2 에서 발생하고 S_{1234} 에서 받아들일 때의 RMS값	38
그림 4.15 S_{1234} 일 때 입력소스 I_1 에서 I_9 유입에 대한 RMS값	39
그림 4.16 입력소스 I_2 유입시 응답센서 증가에 따른 RMS값($S_1 \sim S_{1234}$)	40
그림 4.17 공간집속성능저하 예시	42
그림 4.18 입력신호가 I_1 에서 발생할 때 응답센서 $S_1 - S_4$ 의 배치	43
그림 4.19 입력소스가 I_1 에서 발생할 때 S_{12} 와 S_{1234} 의 지향성패턴	44
그림 4.20 입력소스 I_1 에서의 RMS 증감 그래프	45

표목차

표 4.1 입력신호와 응답센서에 대한 각 좌표점	28
표 4.2 시간반전과정에서 사용된 절단시간	29
표 4.3 수치예제에 대한 표기 및 증감표시	41
표 4.4 응답센서 변화에 따른 RMS값 증감	42
표 4.5 응답센서 개수 변화에 따른 공간집속성능 비교분석	43

I. 서론

최근 구조물에 대한 유지와 보수에 대한 관심이 높아지면서 구조물의 손상, 탐지를 위한 부착이 용이하고 가진과 탐지를 동시에 수행할 수 있는 박막형 압전센서(Piezoelectric Wafers 또는 PZT Wafer)를 통한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 판형구조물에서 발생하는 유도파의 일종인 램파를 이용한 건전성 감시기법에 대한 연구가 주목받고 있다(Wang 등, 2007). 구조물의 고유모드 또는 고유 진동수와 같은 저주파수 대역 동적 특성보다 램파와 같은 고주파수 대역 유도파가 구조물에 발생한 균열과 같은 국부적 손상에 대해 민감하게 반응하는 것으로 나타나있다(Rose 1999; Viktorov 1967).

램파를 이용한 판형구조물의 손상진단에서 고려해야 할 부분은 분산성(dispersion)이다. 램파의 분산성은 총 세 가지로 나뉜다. 첫 번째는 진폭분산으로 입력신호의 종류가 다양한 주파수로 이루어진 광대역 주파수인 경우 서로 다른 크기로 증폭이 된다. 이때 복원신호는 원입력신호와 같이 재구성할 수 없다. 두 번째로는 속도분산이다. 속도분산은 램파에 포함된 여러 주파수 성분들이 서로 다른 속도로 진행됨으로써 원래 입력파형과 비교했을 때 진행파형이 달라지는 현상이다. 세 번째로는 다중모드분산이다. 다중모드분산은 입사파의 입력주파수가 증가함에 따라 여러개의 대칭, 비대칭 모드가 동시에 발생하게 된다. 이러한 램파의 분산성으로 인하여 판형구조물의 손상진단을 수행할 때, 파의 변화가 손상에 의한것인지 분산성에 의한 것인지 구별하기 어렵다(박현우 등, 2009).

이러한 램파의 분산성을 보완하기 위하여 시간반전을 이용한 구조물 손상진단기법에 대한 연구들이 수행되어왔다(Ing 등, 1996; 1998a; 1998b; Nunez 등, 2005; Park 등, 2007; Sohn 등, 2007a; 2007b; 박현우 등, 2009). 현대반전시간음향학(time reversal acoustics : TRA)을 이용한 시간반전과정(time reversal process : TRP)을 사용하면 가진점에 입력된 신호인 램파가 전달되어 응답점인 응답센서에 기록될 때, 그 응답신호를 기록된 시간순서의 역순으로 뒤집어 다시 가진점으로 돌려보내면 원래 입력신호를 그대로 복원할 수 있다. 이를 체적파(body wave)의 시간반전성(time reversibility)이라고 한다(Fink 1999).

시간반전과정과 함께 연구에 사용되는 또 하나의 이론은 가상탐지자 효과이다.

입력신호가 전달되는 과정에서 응답점에 부착되는 응답센서는 보통 박막형 압전 센서를 사용하게 된다. 응답센서의 수가 증가할수록 가진점에서 발생하는 입력신호의 정보를 많이 기록할 수 있지만 비용적 측면에서 불리하다. 하지만 가상탐지자 효과를 사용하면 한 개의 응답센서를 부착하여도 여러 개의 응답센서를 부착한 효과를 기대할 수 있기 때문에 비용적인 절감을 기대할 수 있다.

박현우 (2011)는 단일 응답센서에서 가상탐지자 모델을 이용하여 공간집속 모임에 대하여 규명하였다. 이 연구를 통해 단일 응답센서만으로도 원 입력소스의 위치추정과 시간반전램파의 공간모임을 효과적으로 유도할 수 있었다.

이 연구에서는 기존의 연구에서 제시된 단일 응답센서의 공간집속에 대하여 위치 변화에 따른 공간집속성능에 대하여 알아본다. 하나의 고정된 응답센서에 대하여 총 9가지의 입력소스 위치를 변화시켜 truncation time이 증가할수록 공간집속성능이 향상되는가에 대해 초점을 맞춘다. 그리고 다수의 응답센서를 판형 구조물에 부착하여 응답센서 개수의 변화에 따른 공간집속성능에 대하여 규명한다. 1개의 응답센서에서 4개의 응답센서를 판형 구조물에 부착하여 응답센서의 개수 증가시 truncation time이 증가할수록 공간집속성능 향상을 규명하고자 한다.

수치예제에서는 램파의 시간반전과정과 파 반사효과, 그리고 가상탐지자 효과를 이용하여 MATLAB으로 정식화하였다. 램파의 분산효과를 배제하기 위하여 티모센코 보이론에 근거로한 A_0 모드만을 사용하였으며 구현된 시간반전과정은 범용유한 해석프로그램인 ABAQUS 6.10-1 Standard와의 비교를 통하여 타당성을 검증하였다. 또한 공간집속성능에 대해 시각적, 수치적으로 나타내기 위하여 시간반전램파의 지향성패턴을 Desibel(dB)단위로 나타내었으며, 중앙 최대값을 제외한 양쪽 측대역의 지향성패턴의 값을 토대로 RMS값으로 나타내었다.

II. 램파의 시간반전과정

2.1 램파의 정의 및 특성

체적파와 유도파와 같은 탄성파는 다음의 Navier식을 지배방정식으로 갖는다 (Fung, 1965).

$$(\lambda + \mu)\nabla\nabla \cdot u + \mu\nabla^2 u = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

여기서, λ 와 μ , u , ρ 는 각각 Lamé constant, 변위 벡터, 재료밀도를 나타내고 ∇ 와 $\nabla \cdot$ 는 그레디언트와 다이버전스 연산자를 나타낸다. 체적파는 경계가 없는 무한체 내부에서 전달되는 탄성파인 반면 유도파는 판과 같은 유한체의 경계면을 따라서 전달되는 탄성파이다. 램파는 윗면과 아랫면을 자유경계면으로 갖는 평면 변형상태의 판에 발생하는 유도파(guided wave)의 일종이다(Viktorov, 1967: Rose, 1999). 판의 탄성체 속을 전파하는 파로써 그림1과 같이 판 내에서 발생하는 파의 진동모양에 따라 두 가지로 분류하게 된다. 그림 2.1 (a)와 같이 중립면을 기준으로 판의 윗부분과 아랫부분이 대칭을 이루는 S모드와 그림 2.1 (b)와 같이 판의 윗부분과 아랫부분이 비대칭을 이루는 A모드로 분류한다.

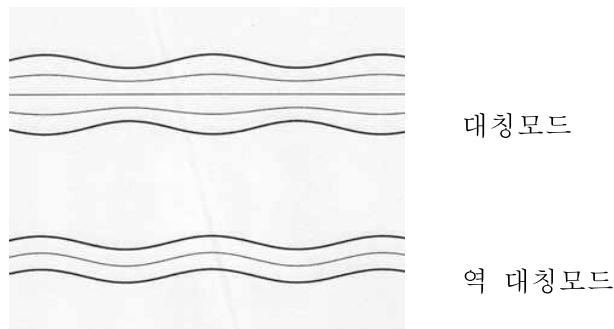


그림 2.1 램파의 모드 분류 (박현우, 2011)

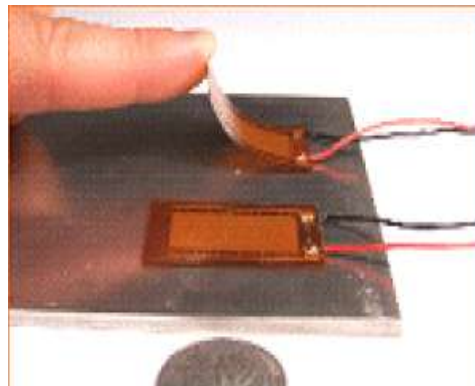
램파는 판의 자유경계면에 의해 구속된 상태로 유도되어 전파되기때문에 체적

파(body wave)와 비교했을 때 파가 감쇠되지 않고 먼 거리까지 도달할 수 있다는 장점을 가진다. 그리고 판에 발생된 균열과 같은 미세손상을 탐지하는데에 있어서 유리하기 때문에 비파괴 검사(nondestructive testing)분야에서 널리 활용되어오고 있다.

최근 그림 2.2와 같은 판 구조물의 손상진단을 수행하는 연구에서 능동센서(active sensor)를 이용한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그림 2.2의 능동센서는 구조물에 부착이 용이할 뿐만 아니라 경량이기 때문에 구조물에 대한 손상탐지 및 감시에 있어서 구조물의 활동에 대한 영향을 최소화시킬 수 있다. 또한 하나의 능동센서를 통해 고주파 대역에서 구조물의 가진과 탐지를 수행하기 때문에 램파를 이용한 판 구조물의 손상탐지 및 감시에 유리하게 활용될 수 있다.



(a) Lead Zirconate
Titanium(PZT) 소자



(b) Macro composite
fiber(MFC) 소자

그림 2.2 구조물에 부착할 수 있는 부착형 압전소자
(박현우, 2011)

2.2 램파의 분산성

램파를 이용하여 판구조물의 손상진단을 수행하기에 앞서 램파의 고유특성인 분산성(dispersion)에 대해 살펴보기로 한다. 이론상으로 램파의 분산성은 두께 $2h$ 인 무한 판에서 발생 수 있는 대칭 및 역 대칭모드로 정의되는 다음의 Rayleigh-Lamb 방정식을 통해 나타낼 수 있다(Viktorov, 1967).

$$(k^2 + s^2)^2 \cosh(qh) \sinh(sh) - 4k^2 qs \sinh(qh) \cosh(sh) = 0 \quad (2.2)$$

$$(k^2 + s^2)^2 \sinh(qh) \cosh(sh) - 4k^2 qs \cosh(qh) \sinh(sh) = 0 \quad (2.3)$$

여기서, $q^2 = k^2 - k_l^2$ 이고 $s^2 = k^2 - k_t^2$ 이다. 또한, k 는 파장의 역수인 파수(wave number)를 나타내고 k_l 과 k_t 는 세로방향과 가로방향에 대응하는 파수이다.

램파의 고유특성을 반영하는 분산곡선은 입력주파수-판두께 곱과 군속도(group velocity) C_g 로 나타낼 수 있다.

$$C_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (2.4)$$

여기서, ω 는 각진동수이다.

그림 2.3는 알루미늄판에서의 램파의 분산곡선에 대한 대표적인 예이다. 판에서 가진 되는 주파수에 대해 식 (2.2)와 식 (2.3)에서 구한 파수를 식 (2.4)를 이용하여 계산한 군속도(group velocity)를 나타낸다. 분산곡선에서 나타나는 분산성은 세 가지로 나눌 수 있다.

첫 번째 분산성은 단일 램파 모드에서 나타나는 속도분산이다. 이후부터 이를 “내부모드분산”(group velocity dispersion) 이라고 부른다. 내부모드분산은 단일모드에서의 램파가 가진되는 주파수에 따라 다른 속도로 전파되어 발생하고 결국 파가 진행함에 따라 여러 주파수로 이루어진 파 성분들이 서서히 분리되어 진행된다. 두 번째 분산성은 다중 파 모드 간에 발생하는 속도분산으로서 “다중모드분산”(multi mode dispersion)이라고 부른다. 다중모드분산은 한 주파수내에서도 서

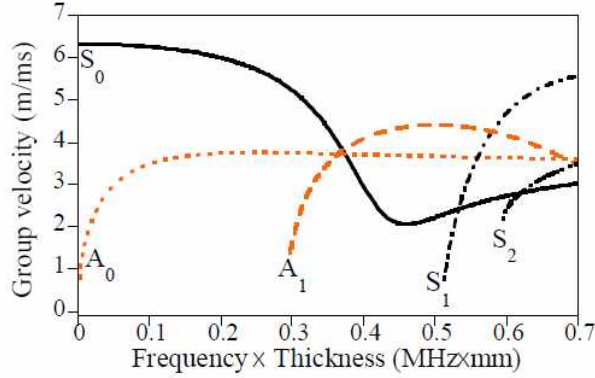


그림 2.3 램파의 분산성을 나타내는 분산곡선
(알루미늄 판 $E=70\text{GPa}$, $\nu=0.33$) (박현우, 2011)

로 다른 속도로 진행하는 여러 모드들이 존재하기 때문에 발생한다. 특정 주파수에 주입시킨 입력소스는 서로 다른 속도로 전파되고 각기 다른 속도의 여러 모드들의 영향으로 파 진행시 파 성분들로 분리되게 된다. 마지막으로 램파의 크기가 감쇠되는 주파수 의존적 현상으로 이를 “진폭분산”(amplitude dispersion)이라고 부른다. 램파의 사용시 발생하는 세 가지의 주파수 의존적인 독특한 분산특성은 시간반전에 대해 사용함에 있어서 복잡한 양상을 띤다.

램파 모드는 판의 중립면을 기준으로 모드의 변형형상을 기준으로 대칭모드 (S 모드)와 역 대칭모드 (A 모드)로 나뉜다. 각 모드 중 기본 대칭 모드인 S_0 모드와 기본 역 대칭모드인 A_0 모드는 판구조물의 손상진단에 널리 사용되고 있다.

A_0 모드의 분산성을 나타내기 위하여 Rayleigh-Lamb 식의 해를 구하는 것은 어렵다. 이때, 티모셴코 보 이론으로부터 각진동수 ω 에 대응하는 파수 k 를 구하기 위한 특성 방정식은 다음과 같다(Doyle, 1997).

$$\det \begin{vmatrix} GK_1 k^2 - \rho \omega^2 & -ikGK_1 \\ ikGK_1 & \frac{h^2}{12}(Ek^2 - \rho K_2 \omega^2) + GK_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (2.5)$$

여기서 E , G , ρ , 그리고 h 는 각각 판의 탄성계수, 전단탄성계수, 밀도, 그리고

두께를 나타내고 K_1 과 K_2 는 전단변형에 따른 조정계수이다. 식(2.5)에서는 평면응력상태의 경우 3차원 탄성체에서 정의되는 탄성계수 E 를 나타내지만 2차원 평면변형상태로 가정하는 경우 3차원 탄성체에서 정의되는 탄성계수에 푸아송 비 ν 를 고려하여 $(1-\nu^2)$ 으로 나눈 값을 사용한다.

그림 2.4는 Rayleigh-Lamb 식에서 계산된 분산곡선과 식 (2.5)에서 제시한 티모센코 보 이론을 사용하여 계산된 분산곡선의 일반적인 예를 비교하여 나타내었다. 1차 cut-off 주파수 이하의 주파수 대역에서 두 분산곡선이 거의 일치함을 보여주고 있다.

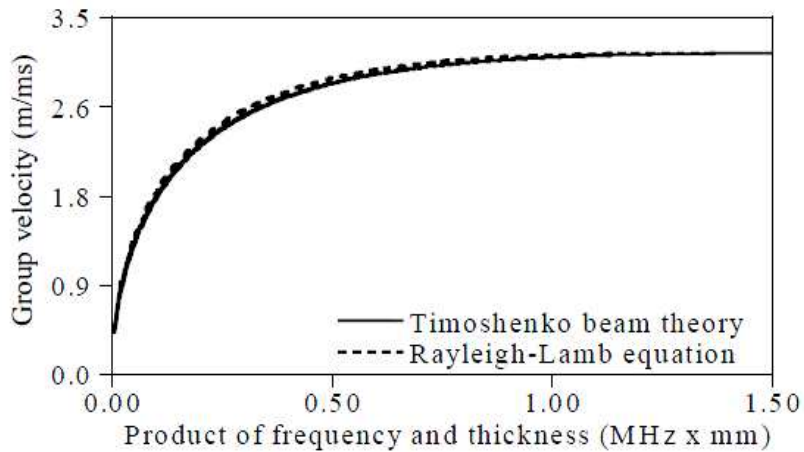


그림 2.4 티모센코 보 이론을 이용한 분산곡선의 예
(박현우, 2010)

2.3 램파 전달문제에서의 시간반전과정

손상진단문제에서 램파를 이용할 때 발생하는 분산성을 보완하기 위해서 램파의 전달과정에서 시간반전음향학을 적용하는 연구가 시도되고 있다. 시간반전음향학이란 음향에너지 혹은 전파에너지에서 파생된 신호를 시간에 대하여 반전 시킨 후 재입사 시켜 공간적으로 집속시키는 연구의 방법이다. 시간반전음향학을 이용 시 충격과 같은 입력소스(input source)가 가진되어 응답센서에서 받아드린 후 응답신호를 시간영역에서 반전 후 재입사 시켜 원래의 입력소스의 발생지점으로 돌려보내면, 입사된 원래 입력소스가 복원된다. 이러한 특성을 파의 시간반전성이라 일컫는다. 시간반전성은 동탄성학적 관점에서 선형상반성이 수반될 때 성립이 가능하다.

동탄성학적 관점에서 선형상반성의 출발점은 아래첨자 I 와 II 로 표시되는 유한체 내의 두 개의 동탄성상태로부터 정식화되는 국지적 상반원리(Local reciprocity theorem)이다(Achenbach, 2004).

$$u_{II} \cdot (b_I - \rho \ddot{u}_I) - u_I \cdot (b_{II} - \rho \ddot{u}_{II}) = \nabla \cdot (\sigma_{II} \cdot u_I - \sigma_I \cdot u_{II}) \quad (2.6)$$

여기서, b , σ , \ddot{u} 는 각각 체적력벡터, 응력텐서, 그리고 시간에 대한 변위벡터 u 의 2차 미분을 나타낸다. 유한체의 경계면 S 를 따라 식 (2.6)을 전체 영역을 적분하면 전체 상반식을 구할 수 있다.

$$\int_V [u_{II} \cdot (b_I - \rho \ddot{u}_I) - u_I \cdot (b_{II} - \rho \ddot{u}_{II})] dV = \int_S (t_{II} \cdot u_I - t_I \cdot u_{II}) dS \quad (2.7)$$

여기서, t 는 경계면 S 를 따라 작용하는 트랙션(traction) 경계조건이다. 식 (2.6)의 오른쪽 항에 대해 다이버전스 원리와 코시의 공식을 이용하여 식 (2.7)을 구할 수 있다. 시간불변의 정상상태라면 u , b 와 t 는 각각 초기조건이 0인 조화함수형태로 나타나게 된다.

$$u(x,t) = \hat{u}(x)e^{-i\omega t} \quad b(x,t) = \hat{b}(x)e^{-i\omega t} \quad t(x,t) = \hat{t}(x)e^{-i\omega t} \quad (2.8)$$

여기서, x 는 기준점으로부터 떨어진 임의의 위치벡터를 나타내고, 변수위의 ‘ $\hat{\cdot}$ ’는 조화운동함수에서 해당변수의 진폭을 나타낸다. 식 (2.8)을 식 (2.7)에 대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\int_V (\hat{u}_{II} \cdot \hat{b}_I - \hat{u}_I \cdot \hat{b}_{II}) dV = \int_S (\hat{t}_{II} \cdot \hat{u}_I - \hat{t}_I \cdot \hat{u}_{II}) dS \quad (2.9)$$

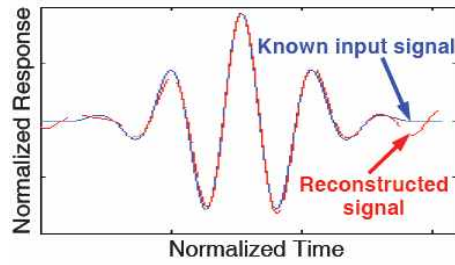
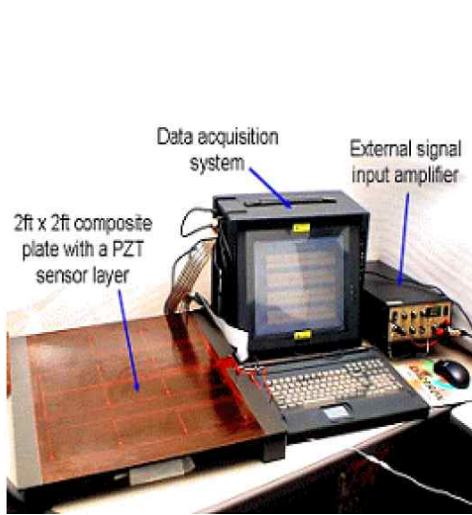
만일 상태 I 과 II 에서 체적력이 없다면 식 (2.9)의 왼쪽이 소거되어 다음과 같은 간단한 형태의 식으로 바꿀 수 있다.

$$\int_S (\hat{t}_{II} \cdot \hat{u}_I - \hat{t}_I \cdot \hat{u}_{II}) dS = 0 \quad (2.10)$$

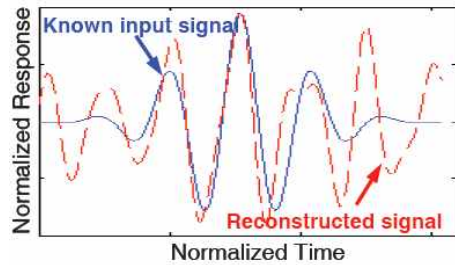
식 (2.10)은 정역학의 상반원리인 베티의 상반관계(Betti's reciprocal relation)와 완전히 같은 형태가 된다.

만약 판 구조물에 발생한 손상이 비선형성을 유발할 경우 선형상반성이 성립하지 않게 되므로 시간반전성은 성립되지 않는다. Sohn 등(2007a)은 합성판의 내부 박리에 의한 동적 비선형성에 의해 그림 2.5 (c)와 같이 램파의 시간반전성이 성립하지 않는 현상을 실험을 통해 보였다. 앞서 언급한 동탄성학적 관점에서 이것은 동적 비선형성에 의해 파 전달의 상반성이 성립하지 않기 때문에 발생한 현상이다. 동적 비선형성을 유발하는 손상이 파 전달경로에 존재하는 경우 램파의 시간반전과정을 이용하여 합성 판 내부에 발생한 박리를 효과적으로 구분할 수 있다(Shon 등, 2007b).

동탄성학적 측면에서 시간반전과정을 효과적으로 수행하기 위하여 하나의 응답 센서로 구조물에 입력소스를 가진시키는 동시에 입력소스에 의한 응답신호를 측정할 수 있는 능동탐지기법을 활용할 수 있다.



(b) 박리가 없을 시 입력-복원신호



(c) 박리가 있을 시 입력-복원신호

(a) 표면부착형 압전소자를 이용한
시간반전과정 실험 구성

(b) 합성 판의 박리에 의해
시간반전성이 성립하지 않는 경우

그림 2.5 램파의 시간반전과정에서 복원된 입력소스를 이용한
합성 판에서 박리 탐지(Sohn 등, 2007b)

역학적 힘을 가할 때 기전력이 일어나거나 혹은 그 반대의 경우에 발생하는 PZT 소자의 압전성(piezoelectricity)에 의해, 전기적 전압 $V(\omega)$ 가 PZT에 가해지게 되면 PZT는 이를 역학적인 변형 $\epsilon(x)$ 을 발생시키게 되며 전기적 전압-역학적 변형간의 관계는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\epsilon(\omega) = k_a(\omega) V(\omega) \quad (2.11)$$

여기서, ω 와 $k_a(\omega)$ 는 각각 각진동수와 전기-역학적 효율계수(electro-mechanical efficiency coefficient)를 나타낸다(Wang 등, 2003).

한편, PZT에 충격으로 인한 역학적 변형이 발생하면 압전효과에 의해서 변형에

대응하는 전기적 전압이 발생한다. PZT에서 발생한 변형에 의해 전압은 역학-전기적 효율계수(mechanical-electro efficiency coefficient) $k_s(\omega)$ 로 유도된다. 식 (2.11)의 각 변수들은 각진동수에 의해서 표현되며 설명 상의 편의를 위해 이후 각진동수 ω 는 생략하기로 한다.

그림 2.6의 (a)와 같이 PZT A에 압전효과로 인한 입력전압이 발생되면 PZT B에서는 응답전압이 발생하며 다음과 같이 표현이 된다.

$$V_B = k_s G K_a V_A \quad (2.12)$$

여기서, G 는 PZT A에서 유발된 입력 변형도와 PZT B에서 발생한 응답 변형도 간의 관계를 나타내는 주파수 영역에서의 전달함수로서 PZT와 판의 기하형상과 물성치에 의해 결정된다(Park 등, 2007). PZT A에서의 전압형태의 입력신호 V_A 는 먼저 k_a 를 통해서 역학적 변형으로 바뀌게 된다. 그리고 입력신호 V_A 로 인한 PZT B에서의 응답변형이 k_s 를 통해서 PZT B에서 전압의 형태인 응답신호 V_B 로 변환된다(그림 2.6(b)). 이후 V_A 와 V_B 는 각각 입력전압과 응답전압으로 나타낸다.

그림 2.6 능동탐지기법을 이용한 판에서의 램프 시간반전과정
(Sohn 등, 2004)

두 번째 단계로 시간반전과정에서의 측정된 응답전압 V_B 가 시간영역에서 역순

으로 뒤집힌다(그림 2.6(c)). 시간영역에서의 역순으로 뒤집는 과정은 주파수영역에서 켈레복소수(complex conjugate)로 나타낼 수 있다. 마지막단계로 시간반전과정을 거친 응답전압 V_B 는 PZT B에 가해지고 응답전압 V_B 로 인해 발생한 응답은 PZT A에서 측정된다(그림 2.6(d)). PZT A에서 응답전압 V_B 로 인해 발생한 응답을 “복원신호”로 명명한다. PZT A에서의 복원신호 V_R 은 다음과 같이 표현된다.

$$V_R = k_s G k_a V_B^* \quad (2.13)$$

여기서 위첨자 *는 변수에 대한 켈레복소수를 의미한다. 식 (2.13)에서 전달함수 G 는 탄성파의 상반원리에 따라서 식 (2.12)에서의 전달함수와 같다고 가정할 수 있다. 식 (2.12)를 식 (2.13)에 대입하면 복원신호 V_R 은 원 입력신호 V_A 에 대해 다음과 같이 표현이 된다.

$$V_R = k_s G k_a V_B^* = k_s G k_a k_s^* G^* k_a^* V_A^* = \Gamma K K^* V_A^* \quad (2.14)$$

여기서, $K = k_s k_a$ 이고 Γ 는 시간반전연산자로서 $\Gamma = G G^*$ 로 정의된다.

만일 시간반전연산자 Γ , 전기-역학적 계수 k_a 와 역학-전기학적계수 k_s 가 관심 주파수대역내에서 일정하다고 가정하면, 식 (2.14)에서 제시된 복원신호 V_R 은 원 입력소스 V_A 의 파형과 크기 배율만 다른 시간상으로 반전된 값을 알 수 있다. 즉, 시간반전과정을 통해 생성된 복원신호의 파형은 원 입력소스의 파형과 닮은꼴이 된다.

하지만 주파수에 따라 변화하는 램파의 특성으로 시간반전연산자에서의 복원신호는 원 입력소스와 같아지기 어렵다. 따라서 램파가 가지는 각각의 특성이 시간반전에 미치는 영향에 대해 알아야 한다. 램파가 시간반전에 미치는 영향은 진폭 분산, 내부모드분산, 다중모드분산 세가지로 나타나며 자세한 설명은 다음 절에서 설명하기로 한다.

2.4 램파의 분산에 따른 시간반전과정

램파의 세 가지 분산성에 의해 시간반전연산자의 복원된 응답신호는 입력소스와 같아지기 어렵다. 이를 이론적으로 규명하기 위해 램파의 세 가지 분산성에 대하여 기술하고자 한다.

첫 번째 램파가 가지는 분산은 “진폭분산”이다. 시간반전연산자는 그림 2.7과 같이 주파수에 따라 변화하는 값을 가지게 되며 시간반전과정에서 서로 다른 크기로 증폭이 된다. 입력소스가 다양한 주파수성분들로 이루어진 광대역(broadband)신호의 경우에는 진폭분산의 영향으로 시간반전과정에서 복원된 응답신호는 원 입력소스와 같이 재구성 할 수 없다.

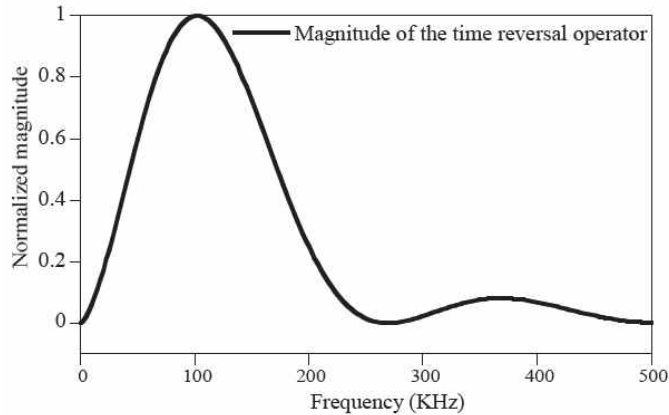
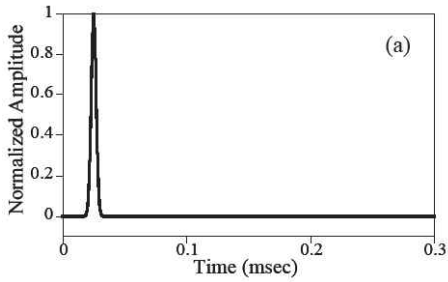


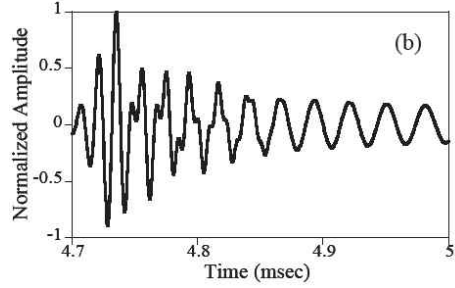
그림 2.7 1차 역 대칭모드의 기준화된 시간반전연산자
(Park 등, 2007)

그림 2.8은 시간반전과정에서 협대역 입력소스를 사용하는 이론적 근거를 제시하고 있다. 그림 2.8의 예제에서는 민들린(Mindlin) 판이론을 적용하여 1차 역대칭 모드 램파만을 사용하였다. 광대역 입력소스와 협대역 입력소스가 시간반전과정에 미치는 영향을 보이기 위하여 광대역입력신호는 가우시안 펄스(gaussian pulse)(그림 2.8(a))를 사용하였고 협대역입력신호로는 100kHz 톤버스트(tonburst)(그림 2.8(d))를 사용하였다. 입력 및 출력 PZT의 간격은 역대칭 모드내 분산을 확인하기 위하여 5m간격으로 설정하였다(그림 2.8(b), (e)). 역대칭 모드내 분산이 충분

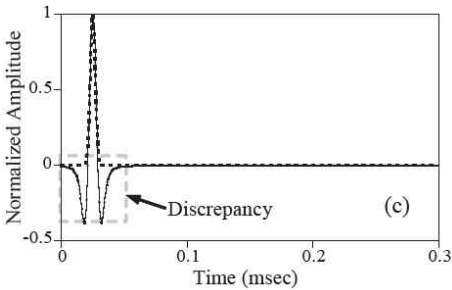
히 발생한 응답신호를 시간영역에서 역순으로 뒤집은 후 원 입력신호의 발생지점으로 되돌려 보냈을 때 모드내 분산성이 원 입력신호와 응답신호가 일치하는 것을 확인 할 수 있다(그림 2.8(c), (f)).



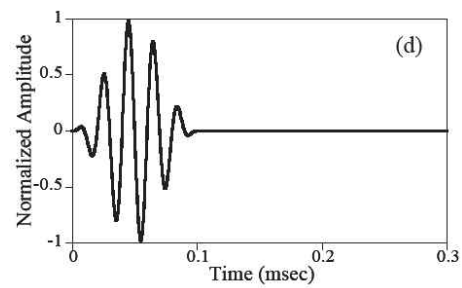
(a) 광대역입력신호 - 가우시안펄스



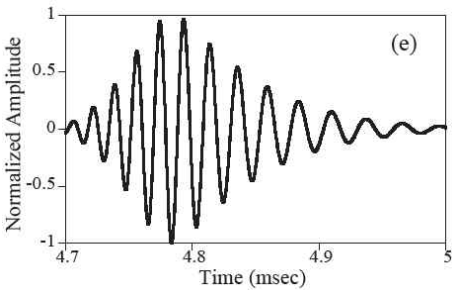
(b) 응답신호 - 가우시안 펄스



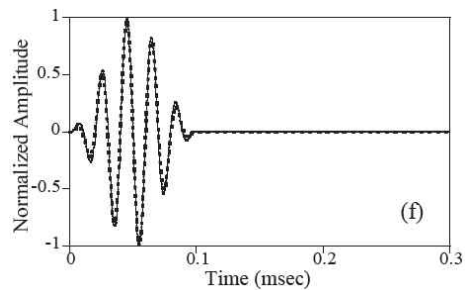
(c) 원 입력신호(점선)과
복원신호(실선) - 가우시안펄스



(d) 협대역입력신호 -
100kHz 톤버스트



(e) 응답신호 - 100kHz 톤버스트



(f) 원 입력신호(점선)과
복원신호(실선) - 100kHz 톤버스트

그림 2.8 협대역과 광대역입력신호를 사용한
시간반전과정을 수치 모사한 예(Park 등, 2007)

또한 단일 램파 모드에 있는 파 성분들은 내부모드분산으로 인하여 각각의 파

의 도착시간이 일정하지 않다. 각기 다르게 도착된 파들이 시간반전과정을 거치게 되면 먼저 도착한 파 성분들은 원 입력지점으로 나중에 보내지게 되고, 반대로 나중에 도착한 파 성분들은 먼저 보내지게 된다. 이 과정을 통해서 서로 다른 속도로 전달되는 모든 파 성분들이 시간반전과정을 거치면서 원 입력지점에 동시에 수렴하게 되고 내부모드분산에 대한 분산이 보상되게 된다.

하지만 그림 2.8(c)에서 나타나듯이 입력신호가 가우시안 펄스가 사용되었을 경우 완벽하게 복원이 되고 있지 않다. 이 현상은 가우시안 펄스의 다양한 주파수 성분들이 시간반전과정에서 서로 다르게 증폭되어 중첩됨으로 인해서 발생한 것이다. 반면, 톤버스트 입력소스를 사용하는 경우 제한된 좁은 주파수 대역에서의 시간반전연산자는 거의 일정하기 때문에 원 입력신호와 복원신호가 일치함을 그림 2.8(f)에서 확인할 수 있다.

두 번째 램파의 분산특성은 “내부모드분산”이다. 이 절에서는 협대역 입력소스에 의해 생성된 1차 대칭 및 역 대칭모드 램파의 내부분산모드에 대하여 설명하기로 한다.

단일 대칭 및 역 대칭 모드의 진폭과 내부모드 분산을 고려하여 식(2.15)에서 제시된 전달함수 G 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = c \exp(-ikr) \quad (2.15)$$

여기서 c 는 각각 특정모드에서의 진폭함수를 나타내고, r 은 입력 및 출력 PZT 중심간 거리를 나타낸다. 식(2.14)의 시간반전연산자에 식 (2.15)를 대입하면 시간반전연산자를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Gamma = GG^* = [c \exp(-ikr)][c^* \exp(ikr)] = cc^* \quad (2.16)$$

식(2.16)에서 $\exp(-ikr)$ 항은 램파의 내부모드분산을 나타내며 시간반전과정에서 상쇄되어 사라지므로 진폭감쇠에 관련된 항만 남게 된다. 식(2.14)에 식(2.16)을 대

입하게 되면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_R = cc^* KK^* V_A^* \quad (2.17)$$

중심주파수 $\bar{\omega}$ 를 가지는 협대역 톤버스트 입력신호를 사용할 때 진폭분산 함수와 전기-역학적 전도함수를 관심대역 상에서 일정하다고 가정할 수 있다. 따라서 시간영역에서의 복원신호는 역 푸리에 변환을 취한 식 (2.17)로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_R(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V_R \exp(i\omega t) d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} cc^* KK^* V_A^* \exp(i\omega t) d\omega \cong \bar{C} \bar{k} V_A(T-t) \end{aligned} \quad (2.18)$$

여기서 $\bar{C} = c(\bar{\omega})c^*(\bar{\omega})$, $\bar{k} = K(\bar{\omega})K^*(\bar{\omega})$ 이고 T 는 측정된 복원신호의 지속시간을 나타낸다.

단일 램파 모드에 관한 식 (2.18)은 시간반전과정을 통해 얻어진 복원신호가 식 (2.14)와 마찬가지로 원 입력소스와 비교했을 때 시간상으로 반전되어 있고 크기의 배율만 바뀐 상태라는 것을 알 수 있다. 따라서 시간반전과정을 통해 단일모드의 내부모드분산은 완벽하게 보완할 수 있기 때문에 시간반전성에 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다.

마지막으로 램파의 분산특성은 “다중모드에 의한 분산”이다. 그림 2.9는 램파의 다중모드 분산이 시간반전과정에 미치는 영향을 보여준다. 여기서 S_0 는 램파의 첫 번째 대칭모드를 A_0 는 램파의 첫 번째 역 대칭모드를 나타낸다. 그림 2.9(a)에서 협대역 입력소스는 다른 모드를 제외한 S_0 와 A_0 만 생성시키고 A_0 보다 S_0 의 파의 속도가 빠르다고 가정한다. 그림 2.9(d)의 ‘ S_0/S_0 ’와 ‘ A_0/S_0 ’는 그림 2.9(c)에서 입력신호를 받아드리는 PZT B에 입사된 S_0 에 의해 발생한 S_0 와 A_0 를 의미한다. 이와 같은 맥락에서 ‘ A_0/A_0 ’와 ‘ S_0/A_0 ’도 정의한다. 그림 2.9(d)에서 ‘ S_0/S_0 ’와 ‘ A_0/A_0 ’는 원 입력소스의 파형과 일치하는 복원신호인 반면에, ‘ A_0/S_0 ’와 ‘ S_0/A_0 ’는 각각

좌우에 대칭이 되는 위치에 복원되는 신호임을 알 수 있다.

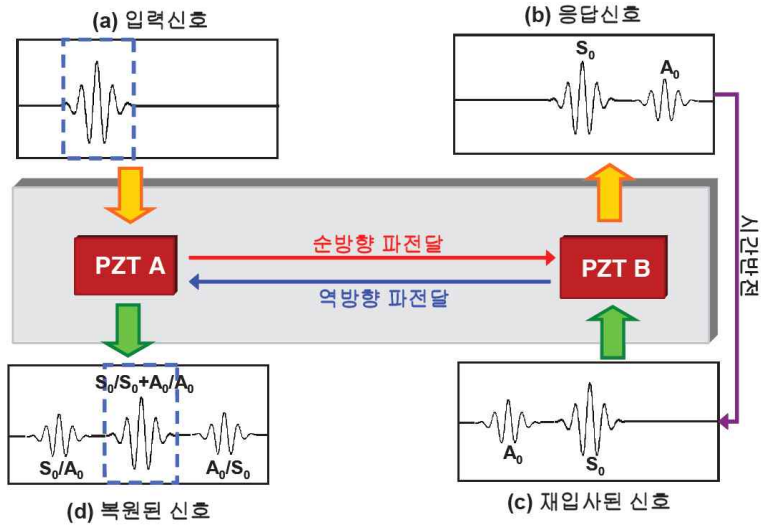


그림2.9 다중모드분산이 시간반전과정에 미치는 영향 개념도

(박현우 등, 2009)

따라서 램파를 이용한 시간반전과정에서 S_0 와 A_0 모드를 동시에 사용할 때에는 원 입력신호가 발생한 위치의 대칭이 되는 위치에 또다른 다중모드가 발생이 되기 때문에 원 입력신호를 그대로 복원할 수 없다. 하지만 이 연구과제에서는 S_0 와 A_0 모드 중 A_0 에 해당하는 역대칭 모드를 사용하므로 다중모드에 의한 대칭적문제가 일어나지 않기 때문에 이후 수치예제에서는 논의하지 않기로 한다.

III. 시간반전램파의 파반사와 공간모임

3.1 시간반전램파의 파반사에 의한 공간모임

램파의 시간반전과정에서 2절에서 제시한 시간영역에서 복원된 입력소스의 집속능력과 더불어 중요한 현상이 바로 공간영역에서 복원된 입력소스의 집속능력인 시간반전램파의 공간모임이다. 시간반전램파의 공간모임을 규명하기 위한 연구는 크게 두 가지로 나눌 수 있다.

첫째, 판형 구조물에 시간반전과정을 위해 특수하게 제작된 시간반전미러(time reversal mirror; TRM)를 이용한 연구이다. 여기서, TRM은 그림10과 같이 적게는 32개 많게는 128개의 압전소자를 원형 또는 웨지에 일렬로 집적시켜 특수 제작된 탐촉기(probe)이다. TRM을 이용한 기존 연구에서 신호분석을 복잡하게 하는 램파의 분산성이 오히려 시간반전과정에서 TRM의 유효면적을 증대시킴으로써 분산이 없는 체적파(대표적으로 음파)보다 훨씬 높은 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio)의 공간모임을 유도할 수 있음을 규명하였다(Ing 등, 1996; 1998a; 1998b; Nunez 등, 2005). 그러나 TRM을 이용한 시간반전과정은 고주파 대역에서 많은 수의 센서를 통해 동시에 탐지와 가진을 수행해야 하므로 고가의 데이터수집장치(Data acquisition equipment)를 필요로 한다.

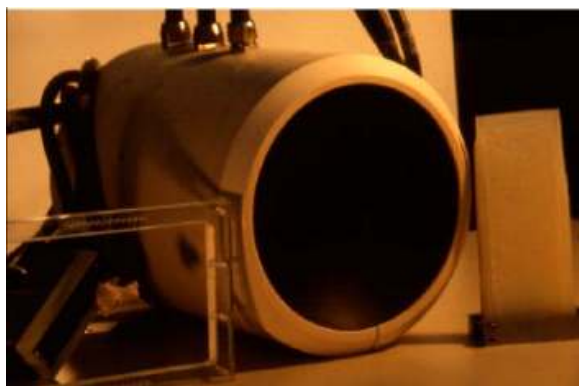
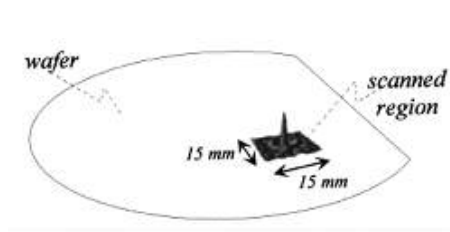
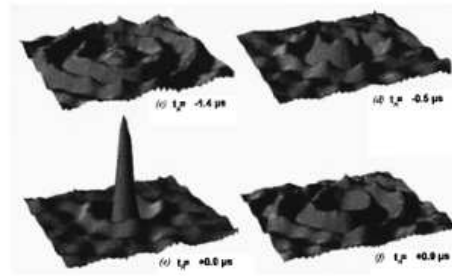


그림 3.1 시간반전미러(TRM) (Fink, 1999)

두 번째 연구는 시간반전미러를 이용한 연구의 단점인 고가의 데이터 수집장치



(a) 시간반전실험에 사용된
chaotic cavity



(b) 그림(a)의 수직변위를
시간에 따라 스캐닝 한 결과

그림 3.2 Chaotic cavity에서 시간반전램파의 공간모임
(Draeger 등, 1999b)

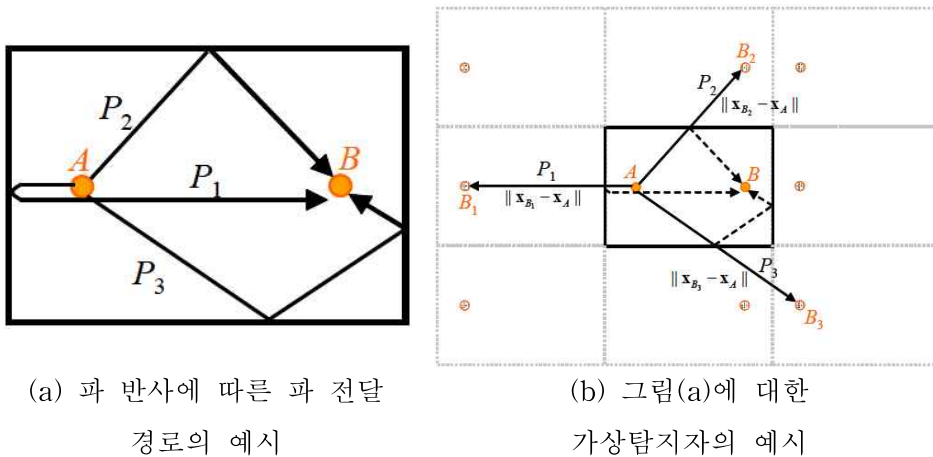
에 대해 보완된 방법으로서 적은 개수의 응답센서를 이용하여 시간반전램파의 공간모임을 유도하기 위해 그림 3.2(a)와 같이 chaotic cavity의 형태로 특수제작된 waveguide를 사용하였다(Draeger 등, 1997; 1999a; 1999b). Chaotic cavity는 판의 임의의 지점에서 입력소스가 가진되더라도 시간이 흐름에 따라 입사파가 파 반사로 인해 판의 모든 지점을 반드시 한번은 지나갈 수 있는 성질을 가지고 있다. 그림 3.2와 같이 chaotic cavity에서 한 개의 응답센서를 이용하여 입력파가 입사된 지점에서 시간반전램파의 공간모임을 재구성할 수 있었다. 이 현상은 chaotic cavity에서 파 반사로 인한 결과가 가상의 수신자(virtual receptor)를 추가하는 것과 같은 효과를 발생시킴으로서 일종의 시간반전미러와 같이 구성되기 때문에 가능하다.

이번 연구에서는 chaotic cavity을 이용하여 시간반전을 사용한 램파의 공간집속을 이끌어 낸다.

시간반전과정에서 파 반사를 이용하면 파의 탐지범위를 확장시켜 실제 사용된 응답센서의 개수보다 많은 수의 응답센서를 사용한 것과 같은 가상탐지자(virtual sensor)효과를 유발한다. 가상 탐지자 효과를 이용한다면 소수의 응답센서의 수로도 손상탐지 범위를 판 내부 전체로 확장할 수 있어 구조물 손상탐지 판별에 유리하며, 또한 실제 사용되는 응답센서의 수는 소수이기 때문에 비용적인 측면에서 절약할 수 있다.

그림 3.3은 직사각형판에서 파 반사를 고려한 가상탐지자의 개념을 보여주고 있으며, 여기서 A 는 입력소스가 유입되어 가진되는 위치, B 는 가진된 입력소스를 받아들이는 응답센서가 부착된 위치를 보여준다. 판의 경계면에서 파 반사를 고려할 때 A 에 입사되는 입력소스로부터 생성된 램파가 파 반사 후 B 에 위치한 응답센서로 전달되는 경로는 무한히 많이 존재한다. 파 반사를 설명하기 위하여 그림 3.3(a)에 파 반사로 발생되는 전달 경로들 중 A 에서 B 에 대한 가장 짧은 경로인 직선경로를 제외한 일반적인 파 반사를 가지는 경로 세 가지를 P_1 , P_2 그리고 P_3 로 도시하였다. 단일 램파모드를 적용하여 판 경계에서 파 반사가 발생할 때 램파의 모드변환(mode conversion)이 발생하지 않도록 하였고, 손실없이 입사파의 에너지가 모두 판에 경계에서 반사되는 전반사가 발생한다고 가정한다.

파 반사로 인해 발생하는 무수한 반사경로들 중 입력소스의 유입 및 가진이 되



(a) 파 반사에 따른 파 전달
경로의 예시

(b) 그림(a)에 대한
가상탐지자의 예시

그림 3.3 직사각형판에서 파 반사를 고려한 가상탐지자의 개념도
(박현우, 2010)

는 위치 A 에서 가진된 입력소스를 받아들이는 응답센서의 위치 B 까지 경계면에서 한번 반사 후 도착하는 경로 P_2 를 그림 3.3(b)와 같이 평면상에 직선으로 펼치면 그림 3.3(a)와 같이 A 에서 B 까지 기하학적 대칭지점인 B_2 지점까지 직접 전달되는 경로와 같게 된다. 따라서 그림 3.3(b)에서 P_2 의 경로를 통해 A 에서 B 로 가진되는 램파는 A 에서 가상탐지자 B_2 로 직접 가진되는 램파의 거리와 같게된다. 그

림 3.3(a)에서 B 에 파 반사를 거쳐 가진되는 램파의 경로는 그림 3.3(b)에 존재하는 다수의 가상탐지자에 직접 가진되는 램파를 모두 그림과 같이 나타낼 수 있다.

램파의 진행시간이 길어지면 경계면에 의해 발생하는 파 반사의 경로수는 증가하게 되고 그림 3.4와 같이 각 파 반사 경로에 해당하는 가상탐지자의 개수도 증가하게 된다. 따라서 가상탐지자는 원래의 사각형 판을 중심으로 좌, 우, 상, 하 방향으로 등가의 길이만큼 거울상(mirror image)형태로 반복된다. 거울상 효과를 이용하면 사각형 판의 크기와 입력소스의 유입위치 A 와 응답센서의 위치 B 가 주어지면 A 와 파 반사에 의한 램파의 경로에 대응하는 모든 가상탐지자까지의 거리를 계산 할 수 있다.

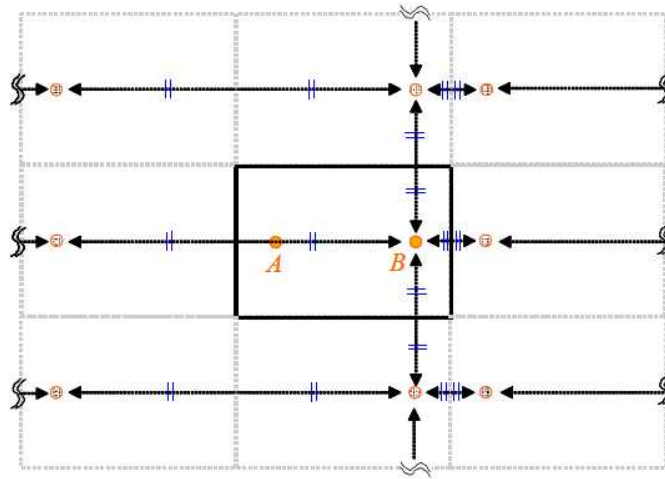


그림 3.4 가상탐지자 모델에서 직사각형 판과
실제 응답센서의 거울 복사효과(박현우, 2010)

파 반사에 의한 가상탐지자 효과로 인해 한 개의 측정 가능한 응답센서만을 이용하는 경우에도 무수히 많은 응답센서를 설치한 것과 같은 효과를 얻을 수 있다. 가상탐지자 효과를 적절히 활용하면 적은 개수의 응답센서를 이용하여 판의 전체 영역에 대해 손상진단이 가능하며, 구조물의 손상과 진단에 대하여 판단 시 소수의 응답센서를 사용하기 때문에 비용적인 측면을 절감할 수 있다.

그림 3.3과 3.4에서 제시된 직사각형 판에서 파 반사에 의한 가상탐지자 개념을 이용하여 그림 3.3(a)의 A 에서 주어진 입력소스에 의해 B 에 출력되는 응답신호를

주파수영역에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(x_B, \omega) = \sum_{i=0}^{n_F} g(p_i, \omega) I_A(\omega) \quad (3.1)$$

여기서, y , x_B , ω , g , p_i , I_A , 그리고 n_F 는 각각 응답신호, B 의 좌표벡터, 각진동수, 입력소스가 유입되는 가진점과 응답센서 간의 전달함수, i 번째 파 반사 전달경로의 거리, A 의 입력소스 그리고 순방향 파 전달 경로의 총 개수다.

단일 램파 모드를 고려하였을 때 식 (3.1)의 전달함수 g 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(r, \omega) = c\eta(r)\exp[-ik(\omega)r] \quad (3.2)$$

여기서, r , c , η 그리고 k 는 각각 파전달 거리, 진폭분산(amplitude dispersion), 공간감쇠 함수 그리고 해당 단일 램파 모드의 파수이다. 진폭분산의 경우 협대역 입력소스에 대한 경우 일정하다고 가정할 수 있다. 공간감쇠 함수는 가진점과 탐지자의 거리 r 의 제곱근에 반비례하는 것으로 알려져 있다(Graff, 1975). 파수 k 는 램파 모드의 분산방정식인 식(2.2) 또는 (2.3)에서 계산 할 수 있다. 부착형 압전소자에 의해 가진되고 탐지되는 주파수 대역에서 통상적으로 발생하는 기본 대칭모드(S_0)와 역대칭 모드(A_0)의 경우 각각 맨들린-허먼 이론과 티모셴코 보 이론에 근간을 둔 분산 방정식을 이용하면 식 (2.1) 과 (2.2)에서 보다 간편하면서도 정확하게 파수를 계산할 수 있다(Graff, 1975).

식 (3.1)에서 i 번째 램파의 파 반사에 의한 가진 경로의 거리 p_i 는 그림 3.3(b)의 P_1 , P_2 , P_3 에 대해 나타낸 것과 같이 입력소스의 가진점 A 와 가상탐지자 B_i 간의 좌표 벡터의 차로 나타낼 수 있다.

$$p_i = \begin{cases} \|x_B - x_A\| & (i = 0) \\ \|x_B - x_A\| & (i \geq 1) \end{cases} \quad (3.3)$$

여기서, x_A 와 x_{B_i} 는 각각 A 점과 가상탐지자 B_i 의 좌표벡터이고 $\|\bullet\|$ 는 벡터

의 2-norm을 나타낸다. 또한 식 (2.17)에서 $i=0$ 은 판의 경계면에서 파 반사 없이 A 에서 B 로 전달되는 경로를 나타낸다.

식 (3.1)의 순방향 전달경로 개수 n_F 는 가진된 입력소스에 의한 응답신호의 측정 시간에 의해 결정되는 정수 값이고 그림 3.5와 같이 램파의 군속도와 측정시간에 의해 결정되는 유효 반경 R 에 포함되는 활성 가상탐지자들의 총 개수로서 결정된다.

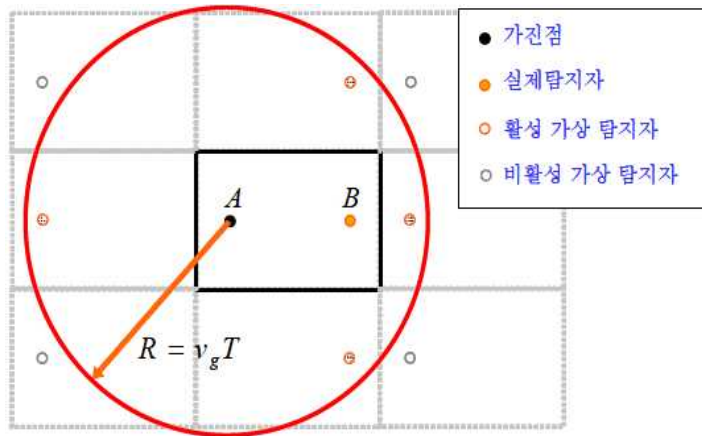


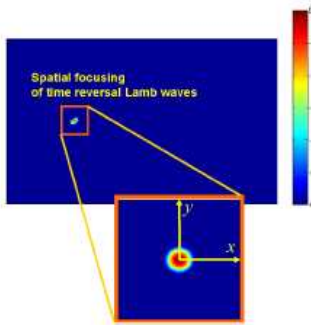
그림 3.5 순방향 전달경로 개수 n_F 를 결정하는 활성 탐지자의 예시
(박현우, 2011)

시간반전램파의 공간모임을 이용한 충격위치 추정은 기존에 널리 사용되던 time-of-flight 정보를 이용한 손상위치 추정 기법보다 더 많은 장점을 갖는다. 여기서, time-of-flight 정보를 사용한 손상위치 추정 기법이란 충격하중 및 입력소스가 응답센서에 도달하여 되돌아오는 시간차를 이용하여 충격하중이 발생한 위치를 추정하는 방법으로 램파의 분산성과 파 반사에 의해 많은 제약을 가지고 있다. time-of-flight 정보를 사용한 위치 추정 기법을 이용한 충격하중 및 입력소스의 위치추정은 위치추정시 많은 제약이 되는 램파의 분산성이나 파 반사를 최대한 배제 시켜야하지만 시간반전과정을 이용하는 경우 램파의 분산성과 파 반사가 가상탐지자효과를 강화시키기 때문에 입력소스의 위치 추정시 공간집속성능을 향상 시킨다. 따라서 시간반전과정을 위치추정시 공간모임에 활용하면 램파의 분산

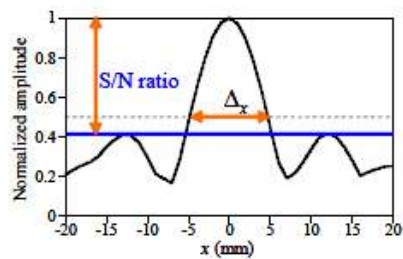
성으로 인해 거쳐야 하는 복잡한 처리기법이나 파 반사효과를 배제하기 위한 복잡한 과정을 거치지 않고도 충격 위치 추정 시 높은 공간적 해상도(spatial resolution)과 신호대 잡음비를 획득할 수 있다.

3.2 지향성 패턴(Directivity pattern)

앞서 3.1절에서 제시된 공간집속성에 대한 결과를 명확히 설명하기 위한 방법으로 시간반전램파의 공간모임을 수행한 후 지향성 패턴(directivity pattern)을 이용한 방법이 제시된다. 여기서, 지향성 패턴이란 시간반전과정의 역방향전달과정에서 계산되는 판의 개별지점의 최대 변위 응답 스펙트럼을 의미한다(Derode 등, 2002). 그림 3.6(a)는 시간반전램파에 의한 공간모임을 판의 전체 영역에 대하여 시각화한 것이다. 그림 3.6(a)와 같이 직사각형 판에서 시간반전램파의 지향성 패턴을 Decibel(dB)단위로 시각화하면 공간모임이 일어난 최대점에서 빨간색으로 나타나며, 최대값을 기준으로 0.5(-6dB)이하의 값은 파란색으로 표시가 된다. 공간모임이 일어난 최대 값을 기준으로 확대하여 그림 3.6(b)와 같이 수치화 시키면 0.5(-6dB)의 크기에 대응하는 Δx 가 시간반전램파의 공간모임에 대한 공간해상도(spatial resolution)를 나타낸다. 그리고 중앙의 최대 피크 값($x=0$)과 인근의 나머지 구간의 피크 값의 차이가 공간모임의 신호대 잡음비(signal to noise ratio; S/N ratio)로 정의가 되며 중앙 최대값을 제외한 양쪽의 측대역(side lobe)의 지향성 패턴에 대한 root mean square(RMS)로 나타내며 이후 RMS로 나타낸다. 입력 가진 주파수 대역이 주어질 때 이론적인 최대 해상도는 주어진 입력 가진 주파수 대역에 대응되는 파장길이의 1/2 지점인 $\lambda/2$ 에 수렴한다고 알려져 있다.



(a) 직사각형 판에서 지향성 패턴의 시각화



(b) 그림 (a) 의 신호대 잡음비 예시

그림 3.6 시간반전 램파의 지향성 패턴에서 공간해상도와 신호대 잡음비(박현우, 2011)

그림 3.7은 지향성패턴을 설명하기 위한 예시로서 시간반전램파의 역방향전달과정에서 계산되는 관의 개별지점의 최대 변위 응답 스펙트럼의 가장 일반적인 형태를 나타내고 있다. 이 연구에서는 입력소스의 가진점을 기준으로 $\pm 40\text{mm}$ 에 해당되는 지향성 패턴을 제시하고 있으며, 지향성 패턴에 대한 RMS값은 최대값을 기준으로 하여 -6dB 이하 지점을 제외한 1mm 마다의 RMS값을 기준으로하고 있다. 시간반전램파의 공간모임 성능을 결정하는 두가지 인자인 공간해상도(spatial resolution)과 신호대 잡음비 관점에서 보면 제안된 방법은 매우 효과적이란 것을 알 수 있다.

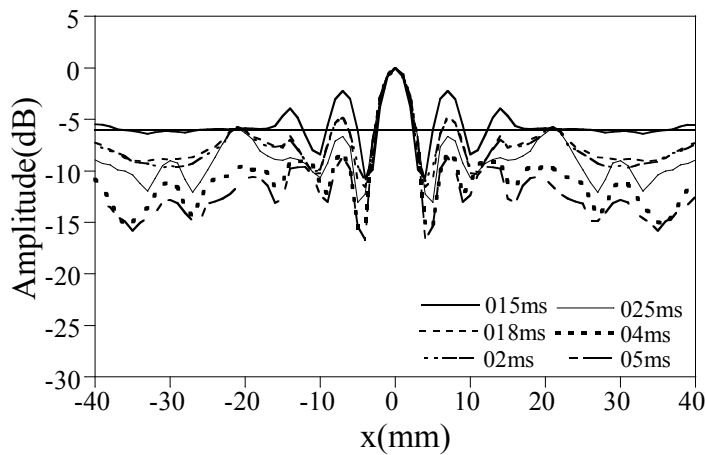


그림 3.7 시간반전 램파의 지향성패턴 예시

IV. 수치 예제

4.1 수치예제 모형

2장과 3장에서 기술한 램파의 시간반전과정을 이용하여 입력소스의 위치와 응답센서의 개수에 따른 시간반전램파의 공간집속성능을 알아보고자 한다. 수치예제를 수행하기 위하여 2장과 3장에서 기술된 이론과 정식화를 토대로 MATLAB을 이용하여 시간반전과정을 구현하였다. 그리고 구현된 MATLAB 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 범용유한요소해석 프로그램인 KISTI 슈퍼컴퓨터센터의 ABAQUS 6.10-1 Standard(이하 ABAQUS로 칭함)와 비교해 보았다. 수치예제에서는 그림 4.1과 같은 가로, 세로, 두께가 각각 600mm, 400mm, 6mm 인 알루미늄 재료의 직사각형 평판($E = 70\text{GPa}$, $\nu = 0.33$, $\rho = 2700\text{kg}/\text{m}^3$)을 사용하였다. 다중모드의 간섭 없이 A_0 (비대칭)모드의 램파만 발생하도록 하였으며, 주파수는 그림 4.2와 같은 200kHz 톤버스트 입력소스를 사용하였다.

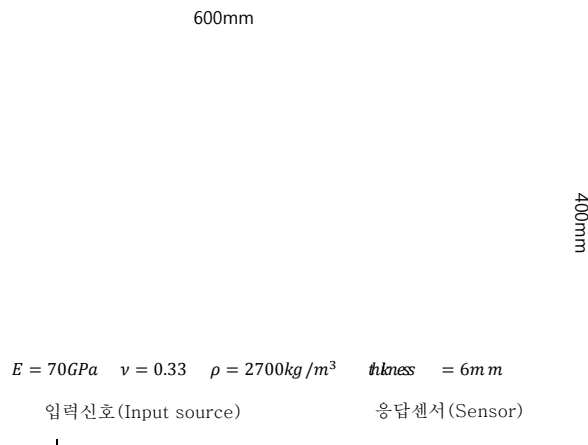


그림 4.1 수치예제 해석을 위한 알루미늄 평판의 형상 및 입력좌표

여기서, 그림 4.1에서 제시한 I_1 에서 I_9 는 입력소스가 발생하는 가진점의 위치로서 입력소스라 칭하고 S_1 에서 S_4 는 입력소스 I 에서 가진되어 나오는 램파를 받아

들이는 응답점의 위치로서 응답센서라 칭한다. 각각의 좌표는 표 4.1과 같다.

그림 4.2 수치예제에 사용된 톤버스트 입력소스(200kHz)

가진점 I 에서 발생하는 입력소스로 인하여 발생하는 A_0 모드의 램파가 일정시간 뒤 응답센서 S 에 도달하게 된다. 응답센서 S 에서 truncation time $1ms$ 이내에 받아들인 응답신호를 시간반전으로 반전시킨 후 응답센서 S 에 재입사시켜 입력소스의 발생점 I 로 다시 돌려보내어 복원시킨 신호를 통하여 공간집속성능을 규명한다.

표 4.1 그림 4.1의 입력소스와 응답센서에 대한 각 좌표점 (x, y)

(단위:mm)

입력소스		응답센서	
I_1	(0, 0)	S_1	(-100, 70)
I_2	(-150, 100)		
I_3	(0, 100)	S_2	(100, 70)
I_4	(150, 100)		
I_5	(150, 0)	S_3	(100, -70)
I_6	(150, -100)		
I_7	(0, -100)	S_4	(-100, -70)
I_8	(-150, -100)		
I_9	(-150, 0)		

그림 4.2의 입력소스를 사용하여 ABAQUS와 MATLAB을 이용하여 해석한 전방향 응답신호의 결과를 비교하여 그림 4.3에 도시하였다. 유한요소해석에서 알루미늄 판은 $1mm \times 1mm \times 1mm$ 8절점 선형 입방고체요소(총 요소 수 : 720,000개)를 사용하였다.

(a) ABAQUS

(b) MATLAB

그림 4.3 그림4.1의 I_1 에서 S_3 의 전 방향 응답신호의
ABAQUS 와 MATLAB 값 비교

그림 4.3과 같이 I_1 에서 S_3 의 전방향 응답신호의 값을 비교해본 결과 입력소스에 의해 발생한 램파 신호의 도달시간과 크기가 ABAQUS와 MATLAB에서 거의 동일하게 나오고 있음을 확인 할 수 있다.

4.2절과 4.3절에서의 수치예제를 수행하기 위하여 시간반전과정에서 사용되는 절단시간의 길이를 센서 개수에 따라 나누어 해석을 수행하였으며 절단시간의 종류는 다음 표 4.2와 같다.

표 4.2 시간반전과정에서 사용된 절단시간(msec)

()안의 숫자는 활성화상탐지자의 개수를 나타냄

$I_1 \rightarrow S_1$	0.25(7)	0.3(11)	0.4(19)	0.5(30)	0.7(61)	1(126)
$I_1 \rightarrow S_{12}$	0.18(7)	0.235(12)	0.3(21)	0.35(29)	0.5(61)	0.7(122)
$I_1 \rightarrow S_{123}$	0.18(10)	0.235(19)	0.25(22)	0.32(36)	0.43(67)	0.6(132)
$I_1 \rightarrow S_{1234}$	0.15(9)	0.18(14)	0.2(17)	0.25(29)	0.4(76)	0.5(121)

여기서 S_1 , S_{12} , S_{123} , S_{1234} 에서 아래첨자에 표시 된 숫자는 그림 4.1에서 나타낸 수치예제에서 사용된 응답센서를 의미한다. S_{12} 의 경우 그림 4.1에서 제시된 응답 센서 S_1 과 S_2 를 사용한 것을 나타낸다. 응답센서 마다 총 6가지의 truncation time으로 나누었으며 각각의 truncation time은 응답센서 1개를 기준으로 비슷한 개수의 활성화상탐지자수를 얻을 수 있도록 설정하였다. 표 4.2의 각 truncation time 옆 괄호안의 숫자는 실제 truncation time내에 얻어지는 활성화상탐지자의

수로써 9개의 입력소스에 따라 구해지는 활성화상탐지자 개수에 대한 평균값으로 나타내었다. 그림 4.4는 표 4.2를 그래프화 시킨 것이다.

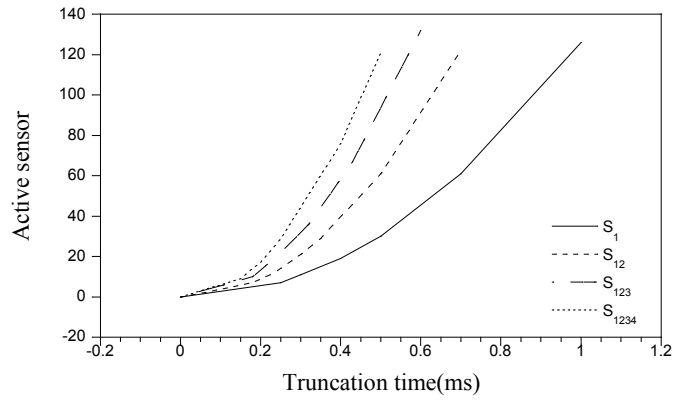


그림 4.4 절단시간과 활성화상탐지자의 관계 그래프

그림 4.4에서 나타난 것과 같이 truncation time이 증가할수록 활성화상탐지자의 개수 또한 증가하는 것을 볼 수 있다. 활성화상탐지자의 증가율은 시간이 지남에 따라 더욱 커지는 것을 확인할 수 있다.

4.2 입력소스의 위치 변화에 따른 공간집속성능 규명

이 절에서는 입력소스의 위치가 바뀌어도 truncation time이 증가함에 따라 시간반전램파를 사용한 공간집속성능은 향상됨을 규명하고자 한다. 그림 4.4와 같이 입력소스가 I_1 에 입사되어 발생한 램파의 신호가 응답센서 S_1 에서 측정되는 예제를 다룬다. 그림 4.1과 같이 응답센서 1개를 부착한 알루미늄 판에 I_1 의 입력소스를 입사시켜 truncation time 0.25ms 동안에 S_1 에서의 공간집속성능을 알아본다. I_1 에 입사되는 입력소스는 그림 4.2에서 제시된 입력소스를 사용하였다.

I_1 에서 파생되는 램파는 응답센서 S_1 에 입사되게 되는데 이때, 판의 경계에서 파반사에 의해 발생한 가상탐지자효과가 나타나게 된다[그림 4.5].

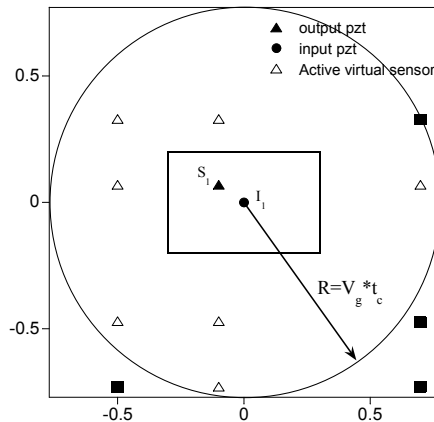


그림 4.5 I_1 에 입력신호가 가해져서 발생한 램파의 신호가

S_1 에서 유입될 때의 활성가상탐지자의 개념도

여기서, 200kHz의 주파수를 가지는 램파는 군속도는 3.154m/ms이다. truncation time은 0.25ms이므로, truncation time내에 탐지가능한 가상탐지자는 7개이며, 실제 부착된 센서1개를 포함하여 총 8개의 탐지자를 사용하는 효과를 볼 수 있다. 각 응답센서가 1개에서 4개 까지의 응답시간의 길이에 대한 활성가상탐지자 개수를 나타낸 표는 부록B에 나타내었다.

가상탐지자효과를 이용하여 S_1 에서 측정된 입력소스의 응답신호는 시간반전을

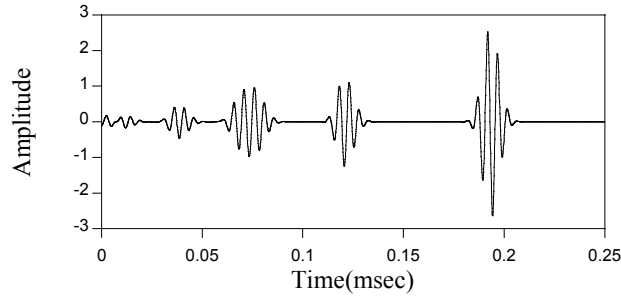
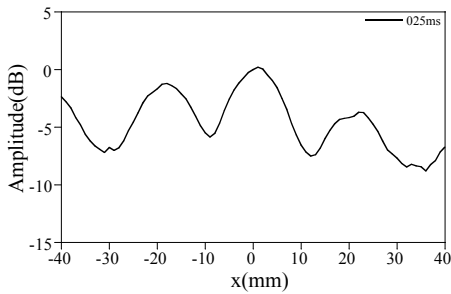


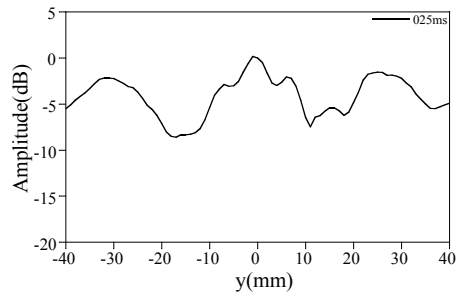
그림 4.6 시간반전 된 응답신호 ($I_1 \rightarrow S_1$)

거쳐 그림 4.6과 같은 입력소스로 재구성되게 된다.

재구성된 입력소스를 S_1 에 재입사 시킨 뒤 I_1 으로 돌려보내어 I_1 을 기점으로 $\pm 40\text{mm}$ 에 대한 경로를 지향성 패턴으로 나타낸 x 와 y 에 대한 결과 값을 dB의 값으로 나타낸 그림 4.7과 같다.



(a) x -direction

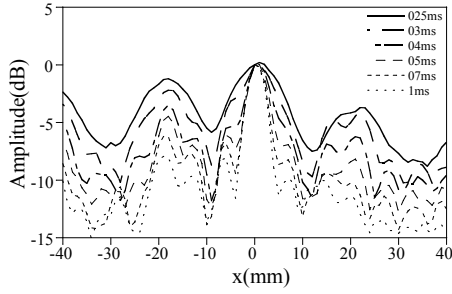


(b) y -direction

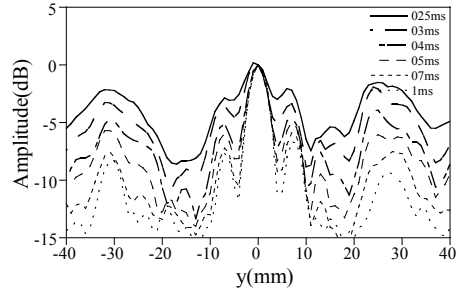
그림 4.7 0.25msec의 결과값에 대한 지향성 패턴 ($I_1 \rightarrow S_1$)

표 4.2에서 제시된 $I_1 \rightarrow S_1$ 의 Truncation time 6가지 경우에 대하여 모두 수행하면 그림 4.8과 같은 지향성 패턴을 얻을 수 있다.

그림 4.8에서 중점에 해당하는 좌표값 0인 지점은 입력소스가 발생되어진 위치를 나타내고, 공간집속성능에 대해 최대값을 가지며, truncation time이 증가할수록 공간집속성능이 향상되고 있음을 알 수 있다. truncation time에 따른 지향성 패턴의 변화를 관찰하기 위해 가장 짧은 truncation time인 0.25ms와 가장 긴 truncation time인 1ms를 그림 4.8에 나타내었다.

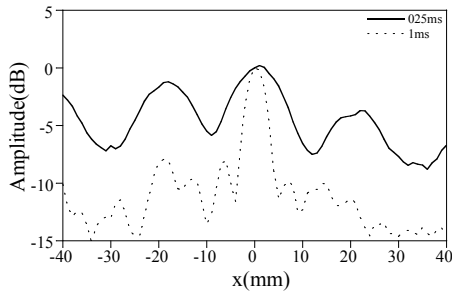


(a) x -direction

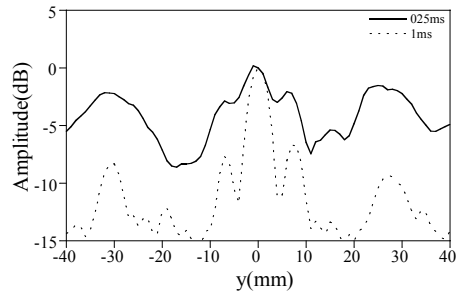


(b) y -direction

그림 4.8 I_1 을 입력소스로하고 S_1 을 응답센서로 했을 때
truncation time에 따른 지향성패턴



(a) x -direction

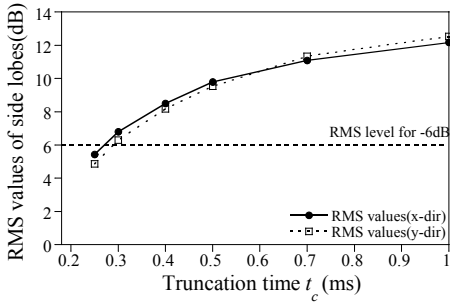


(b) y -direction

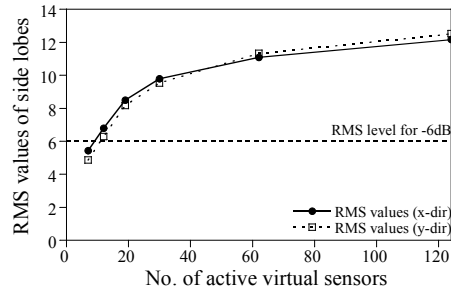
그림 4.9 그림 4.7에서 truncation time 0.25ms와 1ms에
대응하는 지향성패턴 비교 ($I_1 \rightarrow S_1$)

그림 4.9를 보면 truncation time에 따른 그 차이가 확연하게 드러남을 알 수 있다. truncation time이 늘어날수록 활성화상탐지자에 대한 수가 늘어나게 되므로 입력소스에 대한 정보를 활성화상탐지자가 더 많이 얻을 수 있고, 그 결과 그림과 같이 입력소스 발생위치에 대한 공간집속능력에 대한 신호대 잡음비가 크게 향상된다.

그림 4.8에서 나타난 결과를 토대로 x 에 대한 지향성패턴과 y 에 대한 지향성패턴의 결과 값을 RMS값으로 변환한다.



(a) truncation time에 따른 RMS값



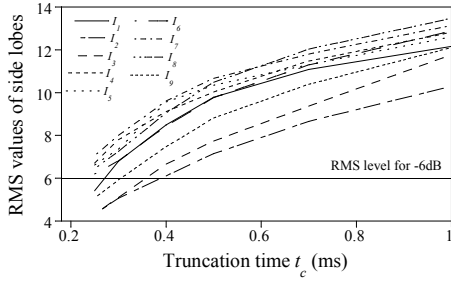
(b) 활성가상탐지자 개수에 따른 RMS값

그림 4.10 입력소스가 I_1 에서 가진되고 S_1 에서 받아들일 때의 RMS값 변화

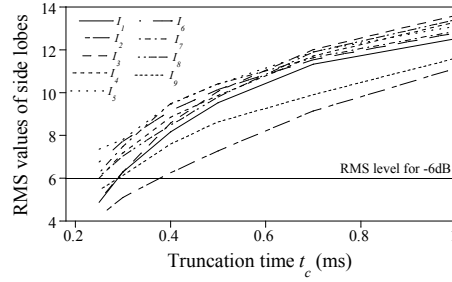
그림 4.10(a)와 같이 응답센서가 1개일 때, I_1 에서 입력소스 유입시의 RMS값은 truncation time에 따라 증가됨을 알 수 있다. 이것은 truncation time이 늘어남에 따라 활성가상탐지자가 더 많은 입력소스의 정보를 얻을 수 있기 때문이다. 그림 4.10(b)는 활성가상탐지자 수가 증가함에 따라 RMS값이 증가하는 것을 보여준다.

입력소스의 위치가 바뀌는 경우에 대해 truncation time이 늘어날수록 위치와 무관하게 공간집속성능이 향상됨을 보이기 위하여 I_1 에서 I_9 까지 입력소스가 유입되는 위치를 변경해가면서 수치예제를 수행한 결과 그림 4.10과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

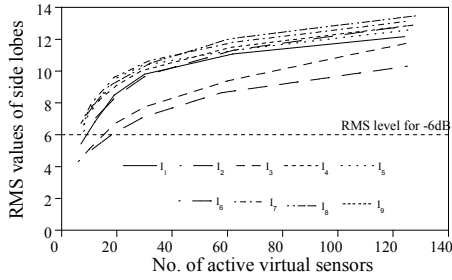
그림 4.11에서 나타나듯이 입력소스의 위치에 상관없이 시간반전램파를 사용하여 수치예제를 수행한 결과 truncation time에 따라 그 공간집속성능이 향상되는 것을 확인 할 수 있었다.



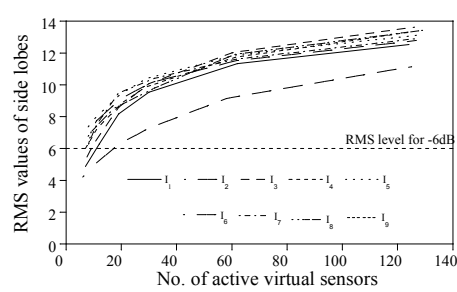
(a) truncation 변화에
따른 RMS 값 변화(x-dir)



(b) truncation 변화에
따른 RMS 값 변화(y-dir)



(c) 활성가상탐지자 개수
변화에 따른 RMS 값 변화(x-dir)



(d) 활성가상탐지자 개수
변화에 따른 RMS 값 변화(y-dir)

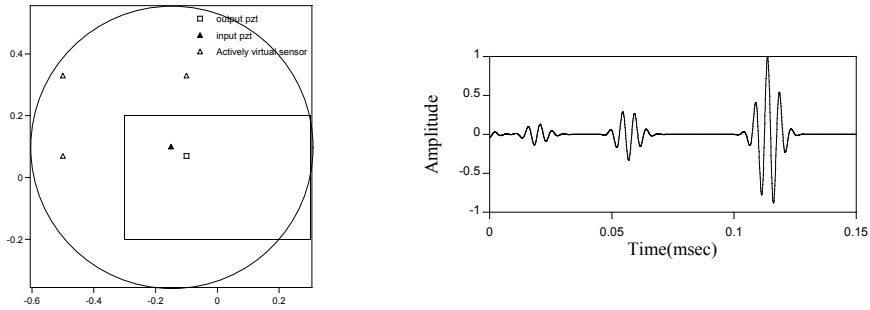
그림 4.11 입력소스의 위치가 변화 할 때 ($I_1 \sim I_9$) 지향성패턴의 RMS값

그림 4.11 (a), (b)을 보면 입력소스 9가지 경우에 대하여 1개의 응답센서를 부착하여 수치예제를 수행한 결과, truncation time이 증가할수록 지향성패턴에 대한 RMS의 값은 x와 y방향 모두에 대하여 증가하는 것으로 나타났다. 그림 4.11 (c), (d)를 보면 활성가상탐지자의 수가 늘어남에 따라 지향성패턴의 RMS값 또한 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 임의의 입력소스가 유입이 되어도 truncation time이 늘어남에 따라 또는 활성가상탐지자의 개수가 늘어남에 따라 공간집속성능은 향상된다고 결론지을 수 있다.

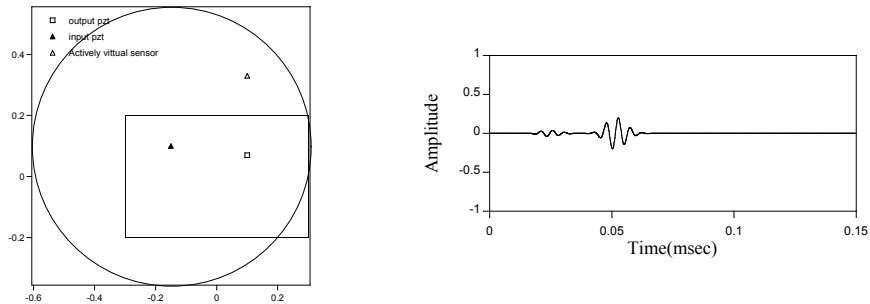
4.3 응답센서 개수 변화에 따른 공간집속성능 규명

이번 절에서는 2장과 3장에서 제안한 시간반전과정과 가상탐지자 효과를 이용하여 응답센서 S 의 개수가 늘어남에 따른 공간집속성능의 향상을 규명하고자 한다. 기본적인 수행방법은 4.2절과 동일하며, 응답센서를 $S_1 \rightarrow S_1, S_2 \rightarrow S_1, S_2, S_3 \rightarrow S_1, S_2, S_3, S_4$ 로 늘려가면서 공간집속에 대하여 살펴보기로 한다. 수치예제에 대한 이해를 돕고자 이번 절에서는 truncation time이 0.18msec이고, 입력소스가 I_2 에서 4개의 응답센서로 유입되는 예를 살펴보고자한다.

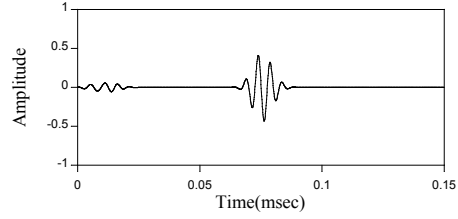
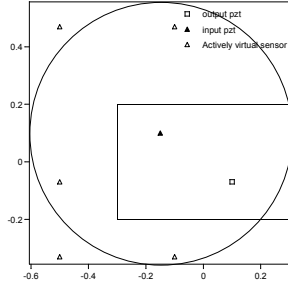
그림 4.1과 같이 입력소스가 I_2 에 유입이 되면 총 4개의 응답센서에서 I_2 에서 발생한 램파의 응답신호를 받아들이게 된다. 이때 I_2 에 유입되는 입력소스는 그림 4.2과 같은 200kHz 주파수의 톤버스트 입력소스이며, 각각의 응답센서에서 활성화 가상탐지자를 구할 수 있다. truncation time이 0.15msec이고, 램파의 군속도가 3.154 m/msec이므로 그림 4.12과 같이 가상탐지자효과를 이용할 수 있다.



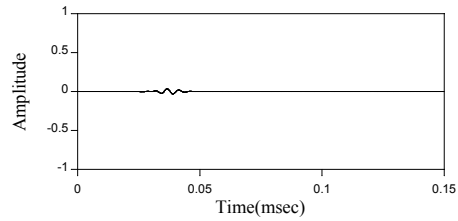
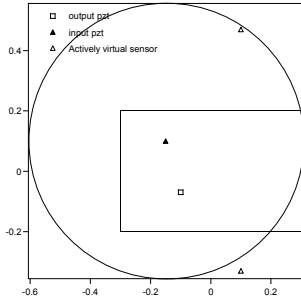
(a) S_1 에서의 가상탐지자와 시간반전 응답신호



(b) S_2 에서의 가상탐지자와 시간반전 응답신호



(c) S_3 에서의 가상탐지자와 시간반전 응답신호

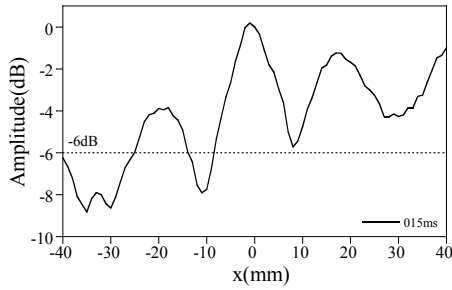


(d) S_4 에서의 가상탐지자와 시간반전 응답신호

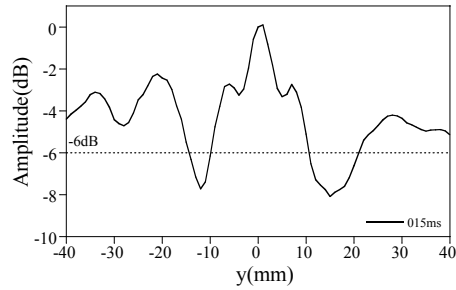
그림 4.12 활성가상탐지자 개념도와 응답신호 ($I_2 \rightarrow S_{1234}$)

활성가상탐지자를 구할 때의 램파가 도달하는 거리에 해당하는 최대반경 R 은 truncation time에 주파수가 200kHz인 램파의 군속도 V_g 를 곱한 값인 0.4731mm 이고 이 반경 내에 존재하는 활성가상탐지자의 수를 구할 수 있게 된다. 각각의 응답센서에 대하여 구해진 가상탐지자의 개수를 조합하면 총8개의 가상탐지자를 구할 수 있다. 가상탐지자 효과를 사용하여 응답센서 S 에 유입된 입력소스를 시간 반전을 통하여 재구성한 응답신호는 그림 4.12의 우측에 도시하였다. 활성가상탐 지자와 응답신호를 비교해보면 알 수 있듯이 활성가상탐지자의 수가 늘어날수록 응답신호에서 파군(Wave packet)의 수가 증가함을 알 수 있다.

각각의 응답센서 S 에서 구해진 입력소스는 중첩시켜 나타낼 수 있으며, 이때 구해진 입력소스를 각각의 응답센서에 재입사시켜 원래의 가진점인 I_2 에서 받아



(a) x-direction



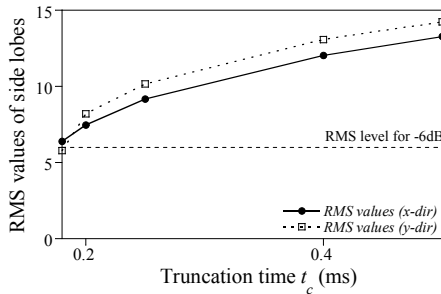
(b) y-direction

그림 4.13 Trucation time 0.15msec일때의 지향성 패턴($I_2 \rightarrow S_{1234}$)

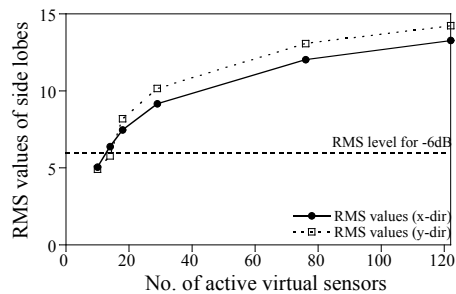
드린 뒤 x 와 y 에 대하여 지향성패턴으로 나타내면 다음과 같다.

그림 4.13에서 보면 지향성패턴은 좌표점이 0인 원점을 기준으로 최대값을 가지며 이 때 원점은 입력소스가 유입되는 좌표를 나타낸다.

그림 4.13에서 얻어진 응답센서 4개 일 때의 지향성패턴을 토대로 x 에 대한 지향성패턴과 y 에 대한 지향성패턴의 결과 값을 RMS값으로 변환하면 그림 4.14와 같다. 이때 truncation time은 표 4.2에서 제시된 절단시간을 사용하여 증가시키며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.



(a) truncation time에 따른 RMS값



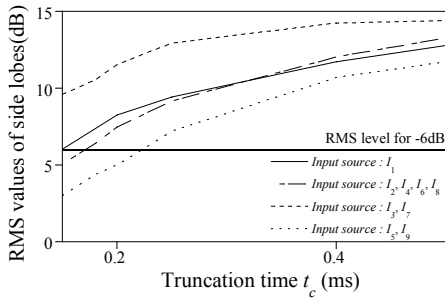
(b) 활성가상탐지자 개수에 따른 RMS값

그림 4.14 입력신호가 I_2 에서 발생하고 S_{1234} 에서
받아들일 때의 RMS값

그림 4.14에서 보듯 응답센서가 4개일 때에도 truncation time이 늘어남에 따라

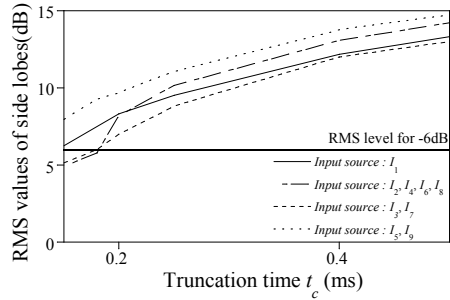
공간집속성능의 지표가 되는 RMS의 값이 더욱 향상되는 것을 알 수 있다.

응답센서 S_{1234} 일 때 I_1 에서 I_9 까지 입력소스가 유입되는 위치를 변경해가면서 수치예제를 수행하였다. 이때, 그림 4.1과 같이 응답센서의 위치상 대칭을 이루는 센서가 존재한다. 그림 4.1과 같이 응답센서가 존재할 때 입력소스 I_2 와 I_4 , I_6 그리고 I_8 은 위치상 응답센서 S_{1234} 에 대해서 대칭적인 위치에 존재한다. 이와같은 방법으로 x와 y방향에 대하여 대칭적인 결과를 제외하고 수치예제를 수행한 결과 그림



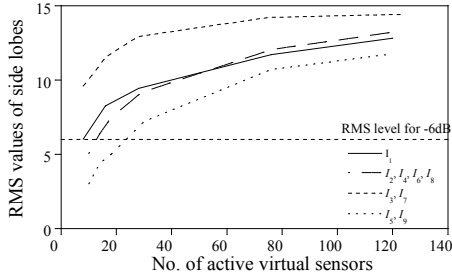
(a) truncation 변화에

따른 RMS 값 변화(x-dir)



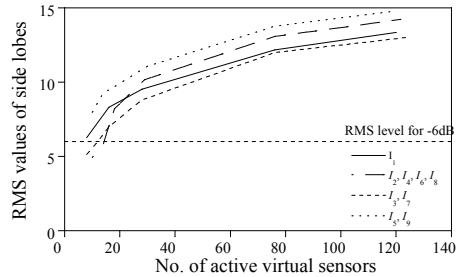
(b) truncation 변화에

따른 RMS 값 변화(y-dir)



(c) 활성가상탐지자 개수

변화에 따른 RMS 값 변화(x-dir)



(d) 활성가상탐지자 개수

변화에 따른 RMS 값 변화(y-dir)

그림 4.15 S_{1234} 일 때 입력소스 I_1 에서 I_9 유입에 대한 RMS값

4.15과 같은 결과를 얻을 수 있다.

그림 4.15 (a), (b)를 보면 응답센서의 수가 4개일 때에도 truncation time이 늘어남에 따라 공간집속성능을 나타내는 RMS의 값이 증가함을 알 수 있다. 그림 4.15 (c), (d)에서도 활성가상탐지자 개수가 늘어남에 따라 지향성 패턴의 RMS값

은 증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 4.16은 응답센서가 늘어남에 따른 공간집속성능 향상을 알아보기 위하여 입력소스가 유입되는 위치가 I_2 일 때 응답센서 S_1 에서 S_{1234} 까지 증가시켜 얻어진 결과를 RMS값으로 나타내었다.

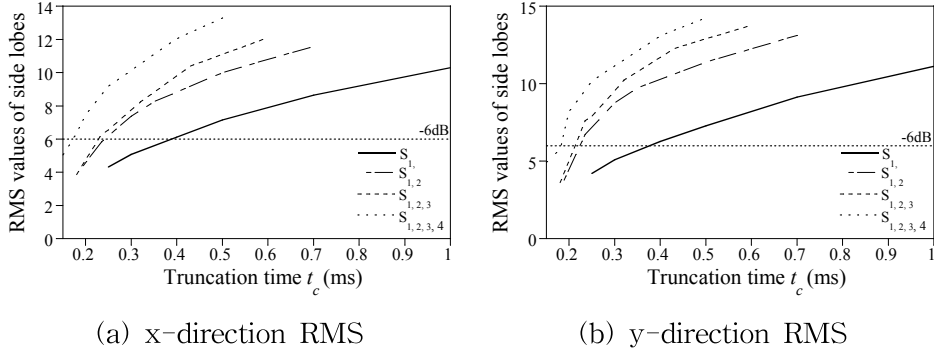


그림 4.16 입력소스 I_2 유입 시 응답센서 증가에 따른 RMS값($S_1 \sim S_{1234}$)


그림 4.16을 보면 응답센서의 수가 늘어남에 따라 공간집속성능을 나타내는 지표인 RMS값이 향상되고 있음을 볼 수 있다. 입력소스가 I_2 에서 가진되는 경우 응답센서 수가 증가함에 따라 truncation time이 증가할수록 공간집속성능은 더욱 향상되는 것으로 밝혀졌다. 다음 4.4절에서는 4.2절과 4.3절에서 수행한 여러 가지 수치예제의 연구결과를 분석하고 이 연구의 타당성 분석 및 토의를 하고자 한다.

4.4 매개변수 연구결과 분석 및 토의

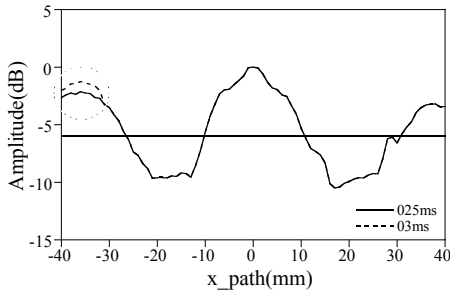
4.2절과 4.3절에서 수행한 수치예제에서 우리는 truncation time이 늘어남에 따른 공간집속성능의 향상을 알아보기 위하여 RMS값을 수치화 하였다. 그 결과 응답센서가 1개일 때, RMS값은 truncation time이 증가할수록 증가하는 형태를 보였다. 응답센서의 수와 위치에 따른 수치예제 표기법과 RMS값의 증가여부를 표 4.3으로 정리하였다. 또한 입력소스의 위치를 임의로 지정한 세 가지 경우에 대하여 추가적인 결과를 얻었다. 임의의 입력소스를 지정한 경우 세 가지를 R_1 , R_2 , R_3 로 명명하며, R_1 의 좌표는 (-89, 14, 3), R_2 의 좌표는 (65, 75, 3), R_3 의 좌표는 (37, -96, 3)이다.

표 4.3 수치예제에 대한 표기 및 증감표시

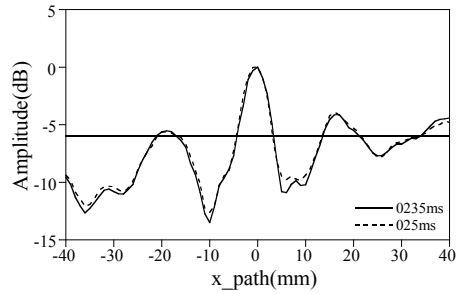
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	R_1	R_2	R_3
S_1	S_1I_1x	S_1I_2x	S_1I_3x	S_1I_4x	S_1I_5x	S_1I_6x	S_1I_7x	S_1I_8x	S_1I_9x	S_1R_1x	S_1R_2x	S_1R_3x
	S_1I_1y	S_1I_2y	S_1I_3y	S_1I_4y	S_1I_5y	S_1I_6y	S_1I_7y	S_1I_8y	S_1I_9y	S_1R_1y	S_1R_2y	S_1R_3y
S_2	S_2I_1x	S_2I_2x	S_2I_3x	S_2I_4x	S_2I_5x	S_2I_6x	S_2I_7x	S_2I_8x	S_2I_9x	S_2R_1x	S_2R_2x	S_2R_3x
	S_2I_1y	S_2I_2y	S_2I_3y	S_2I_4y	S_2I_5y	S_2I_6y	S_2I_7y	S_2I_8y	S_2I_9y	S_2R_1y	S_2R_2y	S_2R_3y
S_3	S_3I_1x	S_3I_2x	S_3I_3x	S_3I_4x	S_3I_5x	S_3I_6x	S_3I_7x	S_3I_8x	S_3I_9x	S_3R_1x	S_3R_2x	S_3R_3x
	S_3I_1y	S_3I_2y	S_3I_3y	S_3I_4y	S_3I_5y	S_3I_6y	S_3I_7y	S_3I_8y	S_3I_9y	S_3R_1y	S_3R_2y	S_3R_3y
S_4	S_4I_1x	S_4I_2x	S_4I_3x	S_4I_4x	S_4I_5x	S_4I_6x	S_4I_7x	S_4I_8x	S_4I_9x	S_4R_1x	S_4R_2x	S_4R_3x
	S_4I_1y	S_4I_2y	S_4I_3y	S_4I_4y	S_4I_5y	S_4I_6y	S_4I_7y	S_4I_8y	S_4I_9y	S_4R_1y	S_4R_2y	S_4R_3y

 : truncation time이 증가하지만 RMS값이 감소하는 예외 경우

이 중 입력소스가 임의인 경우인 R_3 에서 truncation time이 증가하지만 RMS의 값이 증가하지 않는 형태를 보이고 있으며 이 경우를 어두운색으로 표시하였다. 이 경우를 제외하고 모두 truncation time이 증가할수록 공간집속성능이 향상하는 것을 알 수 있었다. 하지만 R_3 의 경우 응답센서가 하나일 때(0.25msec→0.3msec)와 세 개일 때(0.235msec→0.25msec)의 구간에서 그 공간집속성능이 저하되는 것을 볼 수 있다.



(a) R_3S_1 에서 공간집속저하



(a) R_3S_{123} 에서 공간집속저하

그림 4.17 공간집속성능저하 예시

그림 4.17와 같이 두 경우에 대해서 truncation time이 늘어나지만 공간집속성능은 저하되고 있는 것을 알 수 있다. 그림 4.17 (a)는 $-40 < x < 30$ 까지의 지향성 패턴에서의 차이가 공간집속성능 저하를 발생시켰고, (b)의 경우 전체적인 공간집속성능 및 신호대 잡음비가 0.235ms보다 0.25msec일 때 좋지 않았음을 알 수 있다. 이러한 결과가 나오는 것에 대해서는 아직 이유가 밝혀지지 않았으며 추후 연구가 더 필요한 상황이다.

다음으로 4.3절에서 응답센서가 증가함에 따라 truncation time에 대한 공간집속성능의 증감을 표 4.4로 나타내었다. 표에 표시된 o 표시는 응답센서의 수가 증가할수록 공간집속성능을 나타내는 지표인 RMS값이 증가하는 경우이고 x표시는 응답센서의 수는 증가하지만 RMS값이 증가하지 않거나 오히려 감소하는 경우를 나타낸다.

표 4.4 응답센서 변화에 따른 RMS값 증감

	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	R_1	R_2	R_3
x-path	x	o	o	x	x	x	x	x	x	o	x	x
y-path	x	o	x	o	o	x	x	x	o	o	x	x

표 4.4에서 볼 수 있듯이 상당히 많은 부분에서 응답센서 수가 증가하여도 공간집속성능이 향상되고 있지 않음을 볼 수 있다. 좀 더 확실한 결과 도출을 위하여

공간집속성능이 좋은 응답센서의 순서대로 정리하여 표 4.5와 같이 나타내었다.

표 4.5 응답센서 개수 변화에 따른 공간집속성능 비교분석

	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
x-path	132=4	1234	1234	1=234	1=32=4	132=4
y-path	1=234	1234	1=234	1234	1234	1324
	I_7	I_8	I_9	R_1	R_2	R_3
x-path	1324	12=43	12=43	1234	21=34	4132
y-path	1=243	1243	1234	1234	1=234	1423

□ : 응답센서는 증가하지만 RMS값이 감소하는 경우

편의상 응답센서가 1개인 경우 아라비아 숫자 1로 응답센서가 2개인 경우 아라비아 숫자 2로 표시 했으며 나머지의 경우에도 동일하게 표시하였다. ‘=’표시는 응답센서의 공간집속성능을 나타내는 두 그래프가 일치 하는 경우를 나타낸 것이다. 표 4.5에서 제시된 ‘=’표시가 된 부분은 입력소스를 받아들이는 응답센서의 위치가 대칭을 이루는 경우에서 RMS값이 같게 나타나고 있다. 대표적인 예로 그림 4.18과 같이 입력소스가 I_1 에서 작용할 때, x와 y방향에 대하여 응답센서 2개(S_{12}) 일 때와 4개(S_{1234}) 일 때는 서로 대칭적인 구조로 배치 되어있다.

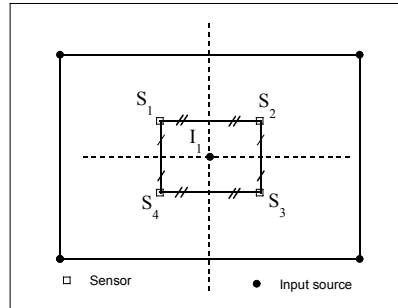
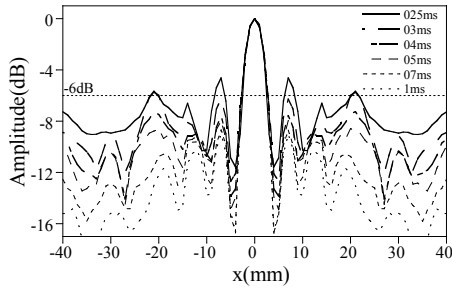


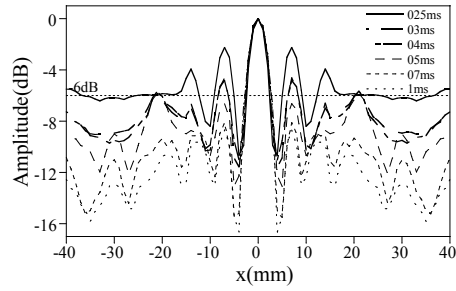
그림 4.18 입력신호가 I_1 에서 발생할 때 응답센서 $S_1 - S_4$ 의 배치

이 때, 결과적으로 얻어지는 지향성 패턴은 그림 4.19와 같다.

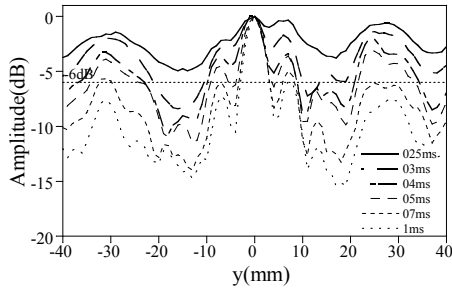
그림 4.19와 같이 입력소스가 I_1 에서 유입이 될 때 I_1 을 기준으로 응답센서가 2개인 경우와 4개인 경우는 x방향에 대한 지향성 패턴이 대칭적인 구조를 이루고



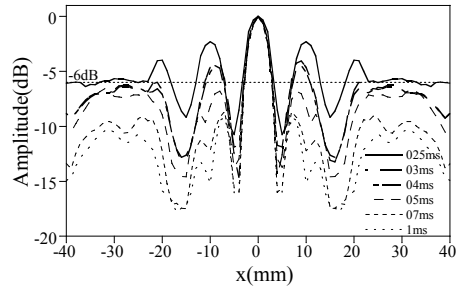
(a) S_{12} 의 x 방향



(b) S_{1234} 의 x 방향



(c) S_{12} 의 y 방향



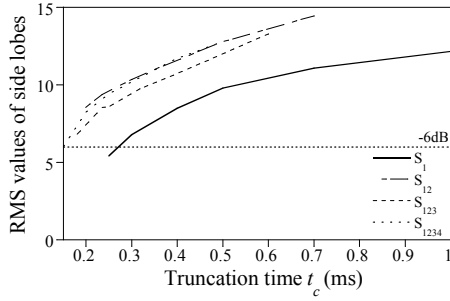
(b) S_{1234} 의 y 방향

그림 4.19 입력소스가 I_1 에서 발생할 때 S_{12} 와 S_{1234} 의 지향성 패턴

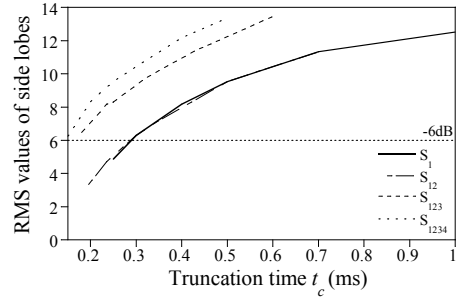
있으며 그에 따른 x 방향 지향성패턴 또한 유사한 경향을 보이고 있다.

그림 4.20에서는 응답센서 개수 변화에 따라 수행한 수치예제의 지향성패턴을 토대로 truncation time에 따른 RMS값을 나타내었다. 그림 4.19과 같이 대칭적 위치에 존재하는 응답센서의 경우 응답센서의 개수가 증가하지만 RMS값이 증가하는 것이 아닌 형태로 나타나게 된다. 이것은 응답센서의 개수를 증가시키면 공간 집속성능이 좋아지지만은 않는다는 것을 보여준다. 수행한 수치예제에서 결과를 분석해보면 대칭적인 위치에 응답센서가 부착되는 경우 각각의 응답센서가 정보를 받아 드리는 과정에서 공간집속성능이 상쇄되는 것으로 생각되어진다.

그리고 표 4.5에서 나타난 색이 표시된 경우는 응답센서가 대칭적 구조가 아님에도 응답센서의 개수는 늘어나지만 공간집속이 향상되지 않는 것으로 밝혀졌다. 또한 임의의 입력소스를 가진시킨 R_2 와 R_3 의 경우에도 대칭적 구조를 보이지 않음에도 센서 수가 증가함에도 공간집속 능력이 향상되지 않았다. 결과를 토대로



(a) x -direction



(a) y -direction

그림 4.20 입력소스 I_1 에서의 RMS 증감 그래프

분석해본 결과 응답센서의 개수를 늘려 공간집속성능의 향상을 기대하기 위해서는 응답센서간의 배치적 문제와 그 외의 복합적인 이유가 있다는 결론을 내렸다. 따라서 두 가지 부분에 대해서는 추후 연구를 통해 그 이유를 알아내야 할 과제로 생각되어진다.

V. 결론

이 연구에서는 입력소스의 위치와 센서 개수에 따른 공간집속성능에 대하여 이론적으로 규명하였다. 그 이유는 입력소스가 발생하는 위치와 무관하게 truncation time이 증가할수록 공간집속성능 또한 향상이 되어야 구조물의 손상진단에 유용하게 적용될 수 있기 때문이다. 그리고 응답센서의 개수가 증가 할수록 공간집속성능이 향상될 때 비용적인 측면과 시간적인 측면을 고려하여 더 유용한 방법으로 연구가 가능해지기 때문이다. 연구를 수행함에 있어서 램파의 분산성을 보완하기 위한 방법인시간반전과정과 램파의 파 반사 그리고 비용절감의 측면에서 유리한 가상탐지자효과를 중점적으로 다루었으며 이론적으로 규명하여 이 연구에 사용하였다.

이 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째로 입력소스의 위치와 무관하게 truncation time이 증가할수록 공간집속성능 또한 향상되는 것을 알 수 있었다. 이 연구에서 수행한 수치예제 48가지(-, -의 입력소스 발생시 응답센서 -에서 받아드리는 경우)의 경우에 대하여 결과를 종합해 본 결과 의 입력소스가 발생할 때 응답센서 에서 받아드리는 경우 에서, 의 입력소스가 발생할 때 응답센서 에서 받아드리는 경우 에서 공간집속성능의 저하를 보였지만 나머지 수치예제에서는 모두 공간집속성능이 향상되는 것을 볼 수 있다. 이것은 서로 간 truncation time 짧아서 혹은 다른 이유로 인하여 발생하는 결과로서 확실한 발생 원인에 대한 도출을 위하여 좀 더 연구 해보아야 할 문제이다.

둘째로, 응답센서의 개수를 늘려가면서 공간집속성능에 대하여 수치예제를 수행해본 결과 응답센서의 부착위치가 입력소스의 발생위치를 기점으로 대칭적인 위치에 존재하는 경우에 공간집속능력의 향상이 이루어지지 않음을 확인해 볼 수 있었다. 또한 응답센서의 위치가 대칭적 위치에 존재하지 않음에도 불구하고 응답센서의 개수는 증가하지만 공간집속성능은 향상되지 않는 경우도 일부 존재한다는 것을 확인할 수 있었다. 수치예제의 결과를 통해 응답센서 부착에 있어서 대칭적인 문제가 존재하는 것은 분명하지만 또 다른 이유에 의하여 공간집속성능 향상이 되고 있지 않음을 알 수 있었다.

이 연구를 통하여 응답센서를 하나 부착할 때 truncation time에 따른 공간집속

성능의 향상을 볼 수 있었기 때문에 구조물의 손상진단에 있어서 우선적으로 적용가능하다는 결론을 얻을 수 있었다. 그러나 앞으로 시간반전과정을 이용한 구조물 손상진단에 있어서 비용적인 측면과 시간적인 측면 모두 이상적인 방법을 찾아내기 위해서는 응답센서의 개수를 증가하면서 발생된 응답센서 부착에 있어서 대칭적 문제와 같은 공간집속성능을 저하시키는 이유를 밝혀내는 것이 앞으로 있어서 연구에 방향이 될 전망이다. 이 문제점들이 보완된다면 구조물 손상진단에 있어서 커다란 발전을 가져올 수 있을 것으로 기대되어진다.

참고문헌

- 1) 박현우, 김승범, 손훈(2009). 램파의 분산성과 파 반사가 시간반전과정에 미치는 영향의 이해, 한국전산구조공학회, Vol.22, No.1, 89-103
- 2) 박현우(2010), 가상탐지자 배열 모델을 이용한 직사각형 판에서 램파 모드 시간반전과정 모사, 한국소음진동공학회, Vol.20, No.5, 460-469
- 3) 박현우(2011), 직사각형 판에서 가상탐지자 모델을 이용한 시간반전램파의 공간모임 규명, 한국전산구조공학회, Vol.24, No.5, 553-567
- 4) Achenbach, J.D(2004), Reciprocity in Elastodynamics(Cambridge Monographs on Mechanics), Cambridge University Press, Cambridge, UK
- 5) Draeger, C, Fink, M(1997), One-channel Time Reversal of Elastic Waves in a Chaotic 2D-silicon Cavity, Physical Review Letters, Vol.79, No.3, 407-410
- 6) Draeger, C., Fink, M(1999a), One-channel Time Reversal in Chaotic Cavities: Theoretical limits, Journal of the Acoustical Society of America, Vol.105, No.2, 611-617
- 7) Draeger, C, Aime, J.C, Fink, M(1999b), One-channel time reversal in chaotic cavities: Experimental results, Journal of the Acoustical Society of America, Vol.105, No.2, 618-625
- 8) Fink, M(1999), Time-reversed Acoustics, Scientific American, Vol.281, No.5, 91-97
- 9) Fung, Y.C(1965), Foundation of Solid Mechanics, Prentice-Hall, INC.,

Englewood Cliffs, NJ, 525

10) Graff, K.F(1975), Wave Motion in Elastic Solids, Oxford University Press, London

11) Ing, R.K., Fink, M(1996), Time Recompression of Dispersive Lamb Waves using a Time Reversal Mirror Application to Flaw Detection in Thin Plates, IEEE Ultrasonics Symposium, Vol.1, 659-663

12) Ing, R.K., Fink, M(1998a), Self-focusing and Time Recompression of Lamb Waves using a Time Reversal Mirror, Journal of the Acoustical Society of America, Vol.104, No.2, 801-807

13) Nunez, I., Negreira, C(2005), Efficiency Parameters in Time Reversal Acoustics: Applications to Dispersive Media and Multimode Wave Propagation, Journal of the Acoustical Society of America, Vol.117, No.3, 1202-1209

14) Park, H.W., Sohn, H., Law, K.H., Farrar, C.R(2007), Time Reversal Active Sensing for Health Monitoring of a Composite Plate, Journal of Sound and Vibration, Vol.302, No.1-2, 50-66

15) Rose, J.L(1999), Ultrasonic Waves in Solid Media, Cambridge University Press, Cambridge, UK

16) Sohn, H., Park, G., Wait, J., Limback, N., Farrar, C(2004), Wavelet-Based Active Sensing for Delamination Detection in Composite Structures, Smart Materials and Structures, Vol.13, 153-160

17) Sohn, H., Park, H.W., Law, K.H., Farrar, C.R(2007a), Damage detection in

composite plates by using an enhanced time reversal method, Journal of Aerospace Engineering, ASCE, Vol.20, No.7, 141-151

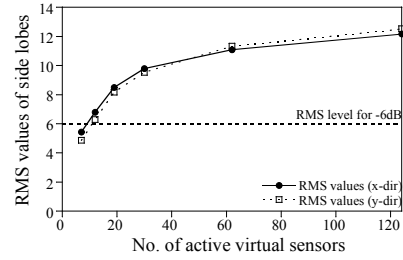
18) Sohn, H., Park, H.W., Law, K.H., Farrar, C.R(2007b), Combination of a time reversal process and a consecutive outlier analysis for baseline-free damage diagnosis, Journal of Intelligent Materials and Smart Structures, Vol.18, No.4, 335-346

19) Viktorov, I.A(1967), Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications, Plenum Press: New York.

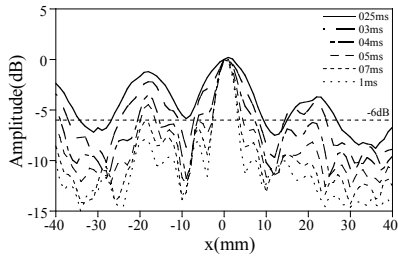
20) Wang, C.H., Rose, J.T., Chang, F.K(2003), A computerized time-reversal method for structural health monitoring, Proceedings of SPIE Conference on Smart Structures and NDE, San Diego, CA, USA.

VI. 부록

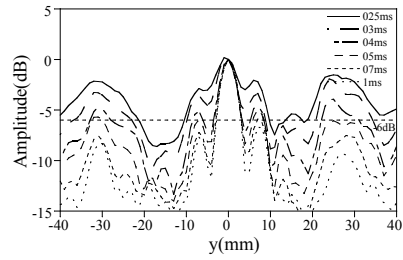
$\langle I_1 S_1 \rangle$



(a) 센서의 위치



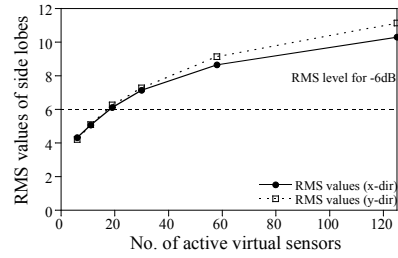
(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

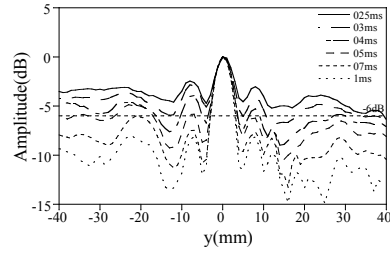
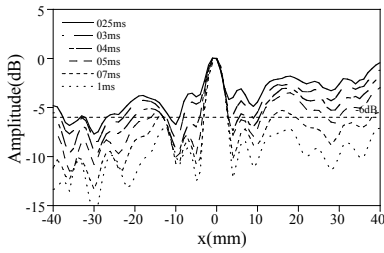
그림 A1 $I_1 S_1$ 결과정리

$\langle I_2 S_1 \rangle$



(a) 센서의 위치

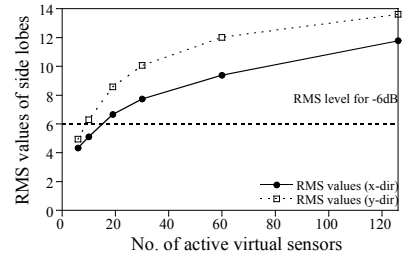
(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

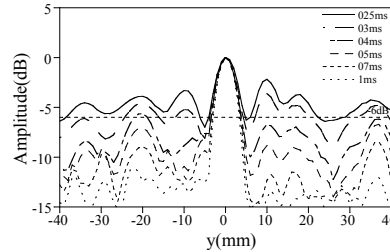
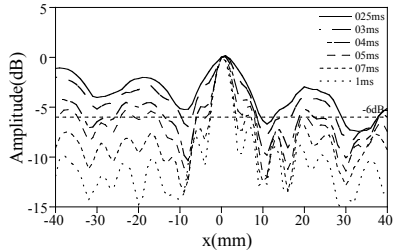
그림 A1 $I_2 S_1$ 결과정리

$\langle I_3 S_1 \rangle$



(a) 센서의 위치

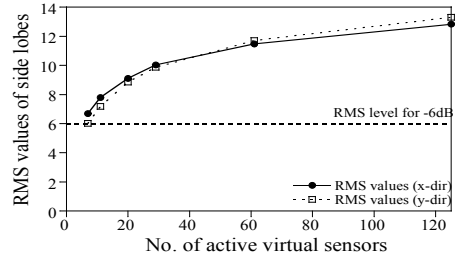
(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

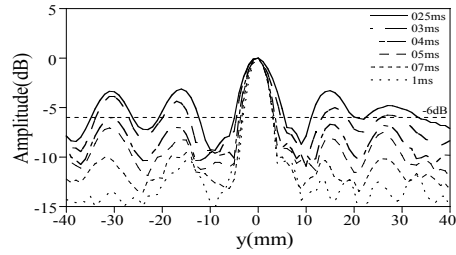
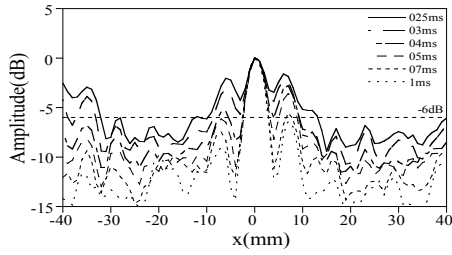
그림 A1 $I_3 S_1$ 결과정리

$\langle I_4 S_1 \rangle$



(a) 센서의 위치

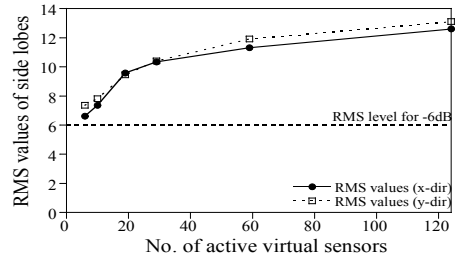
(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

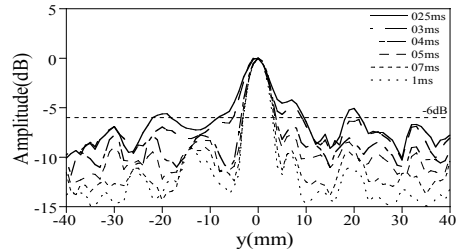
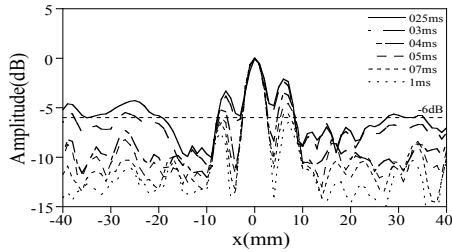
그림 A1 $I_4 S_1$ 결과정리

$\langle I_5 S_1 \rangle$



(a) 센서의 위치

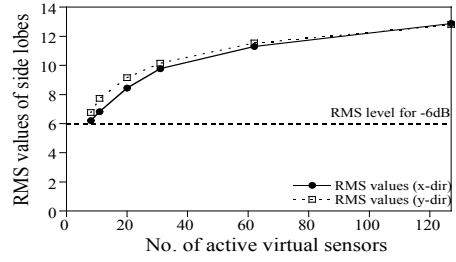
(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

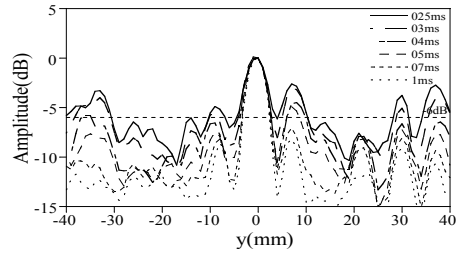
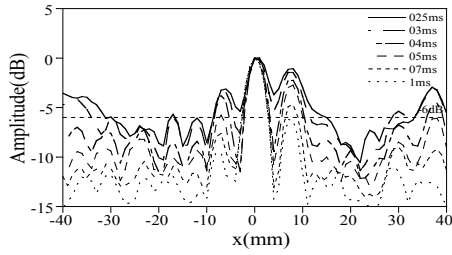
그림 A1 $I_5 S_1$ 결과정리

$\langle I_{6S_1} \rangle$



(a) 센서의 위치

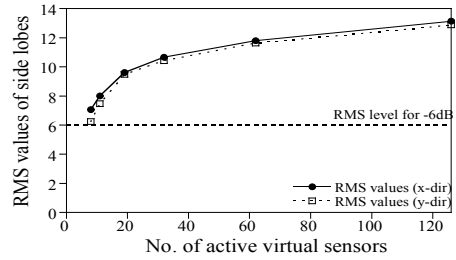
(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

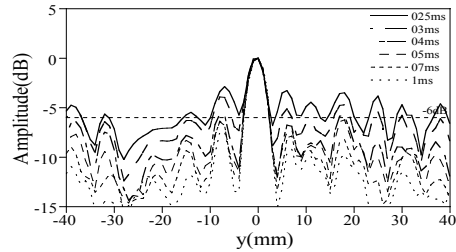
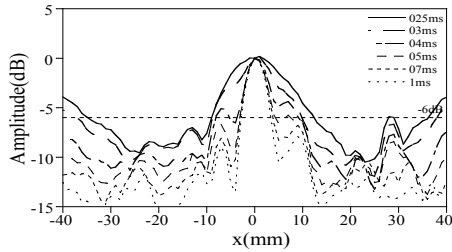
그림 A1 I_6S_1 결과정리

$\langle I_{7S_1} \rangle$



(a) 센서의 위치

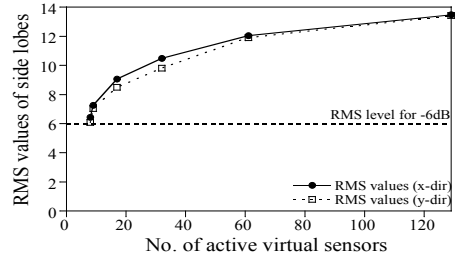
(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

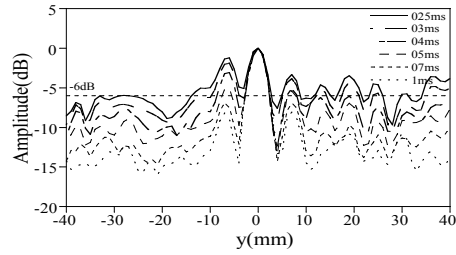
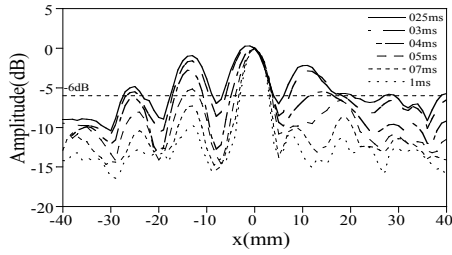
그림 A1 I_7S_1 결과정리

$\langle I_{8S_1} \rangle$



(a) 센서의 위치

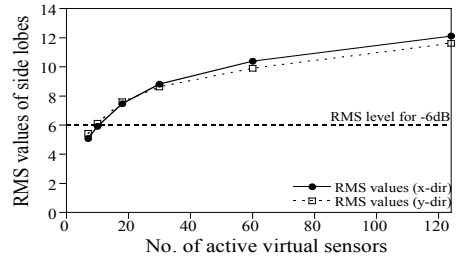
(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

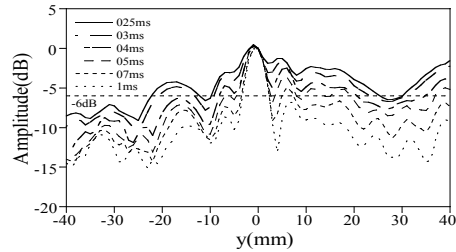
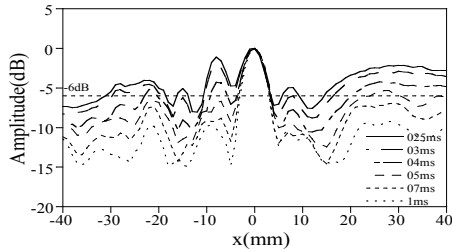
그림 A1 I_{8S_1} 결과정리

$\langle I_{9S_1} \rangle$



(a) 센서의 위치

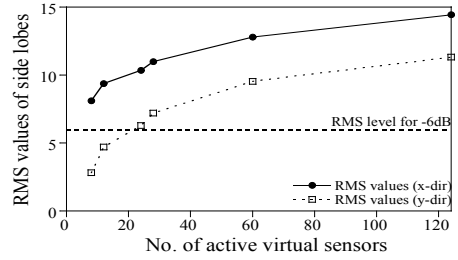
(b) RMS values vs Active sensor



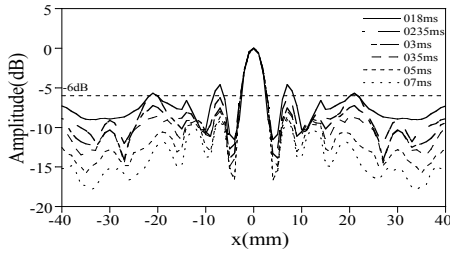
(c) Directivity pattern

그림 A1 I_{9S_1} 결과정리

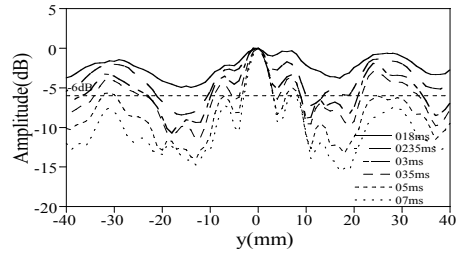
$$\langle I_1 S_{12} \rangle$$



(a) 센서의 위치



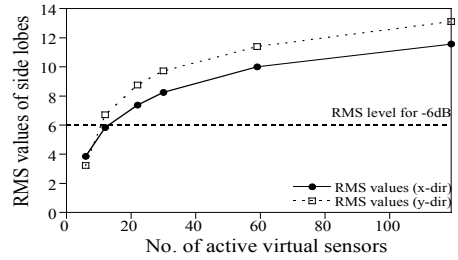
(b) RMS values vs Active sensor



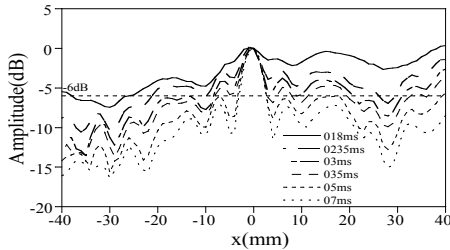
(c) Directivity pattern

그림 A1 $I_1 S_{12}$ 결과정리

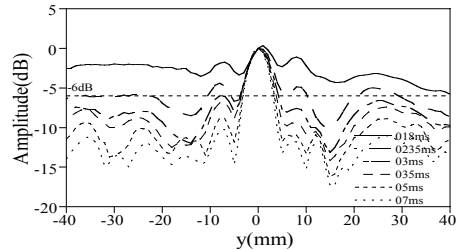
$$\langle I_2 S_{12} \rangle, \langle I_4 S_{12} \rangle$$



(a) 센서의 위치



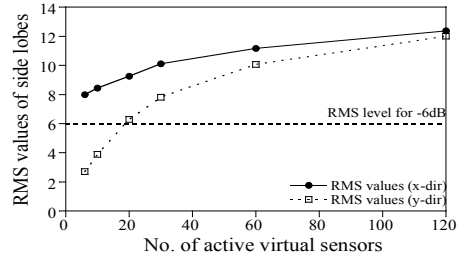
(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

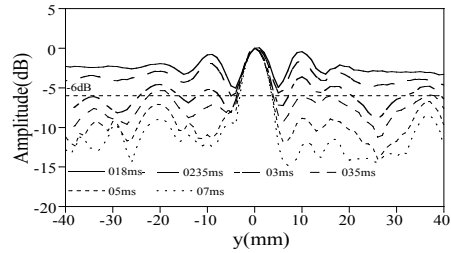
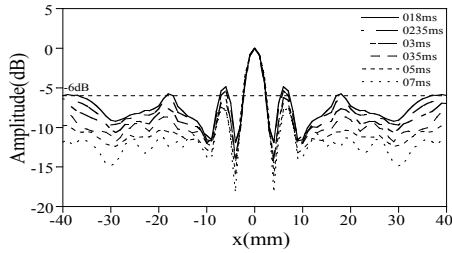
그림 A1 $I_2 S_{12}, I_4 S_{12}$ 결과정리

$$\langle I_3 S_{12} \rangle$$



(a) 센서의 위치

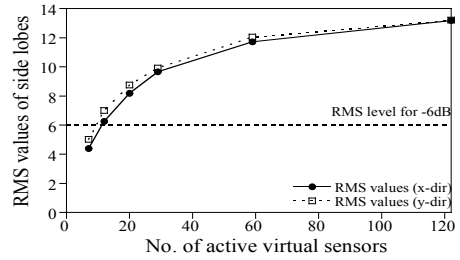
(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

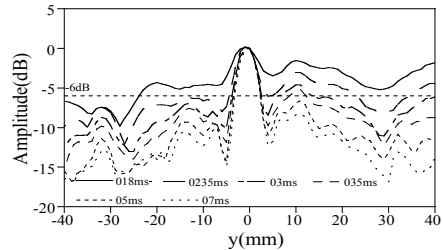
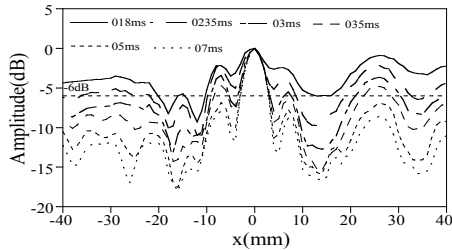
그림 A1 $I_3 S_{12}$ 결과정리

$$\langle I_5 S_{12} \rangle, \langle I_9 S_{12} \rangle$$



(a) 센서의 위치

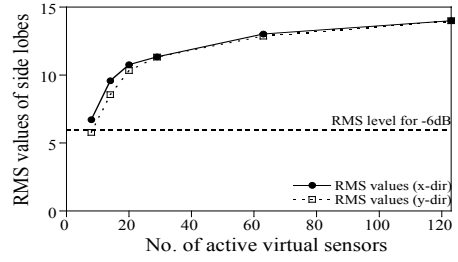
(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

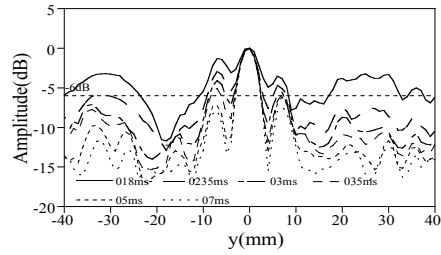
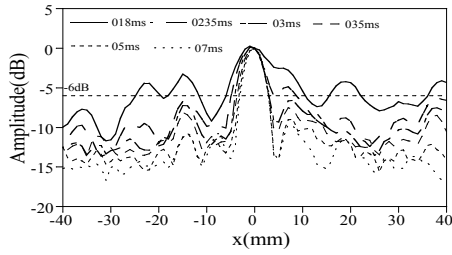
그림 A1 $I_5 S_{12}, I_9 S_{12}$ 결과정리

$$\langle I_6 S_{12} \rangle, \langle I_8 S_{12} \rangle$$



(a) 센서의 위치

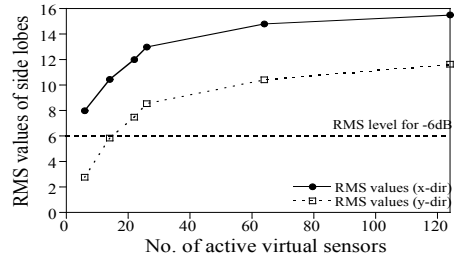
(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

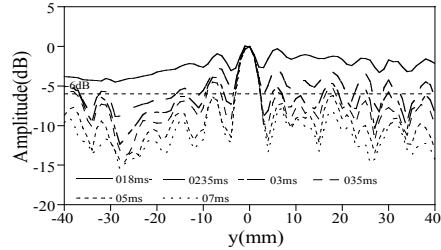
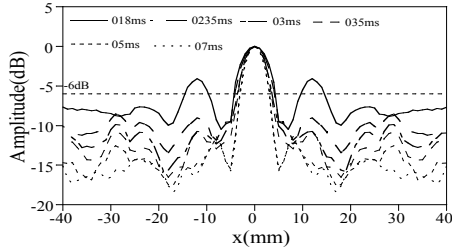
그림 A1 $I_6 S_{12}$, $I_8 S_{12}$ 결과정리

$$\langle I_7 S_{12} \rangle$$



(a) 센서의 위치

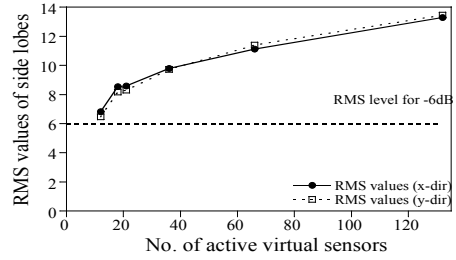
(b) RMS values vs Active sensor



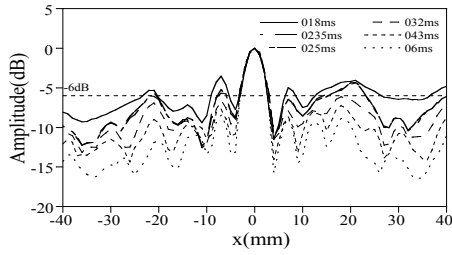
(c) Directivity pattern

그림 A1 $I_7 S_{12}$ 결과정리

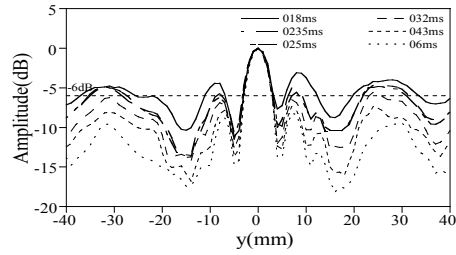
$\langle I_1 S_{123} \rangle$



(a) 센서의 위치



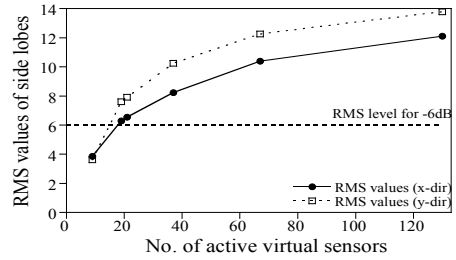
(b) RMS values vs Active sensor



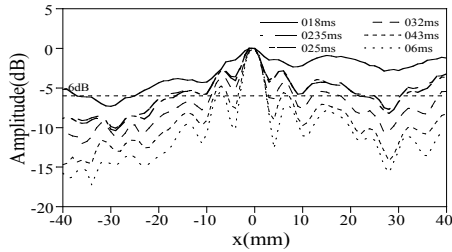
(c) Directivity pattern

그림 A1 $I_1 S_{123}$ 결과정리

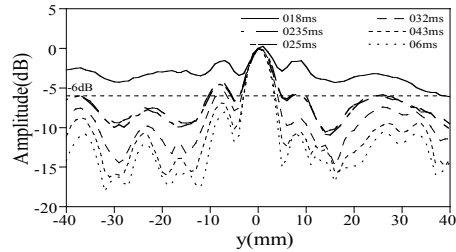
$\langle I_2 S_{123} \rangle$



(a) 센서의 위치



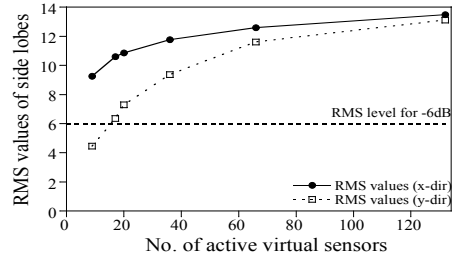
(b) RMS values vs Active sensor



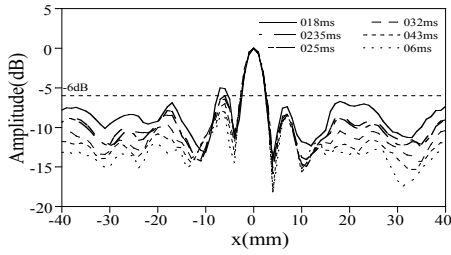
(c) Directivity pattern

그림 A1 $I_2 S_{123}$ 결과정리

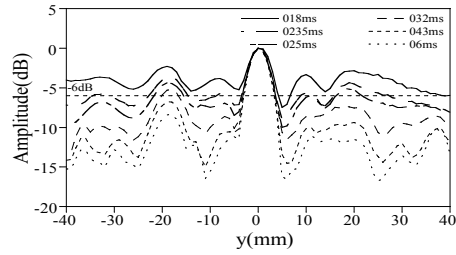
$$\langle I_3 S_{123} \rangle$$



(a) 센서의 위치



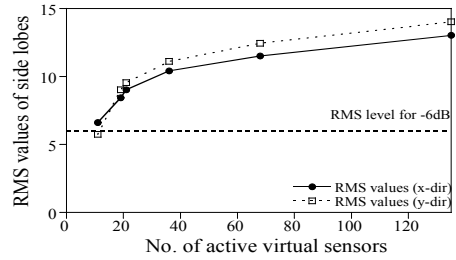
(b) RMS values vs Active sensor



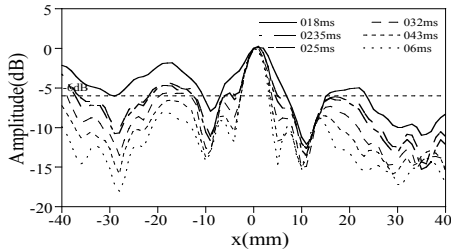
(c) Directivity pattern

그림 A1 $I_3 S_{123}$ 결과정리

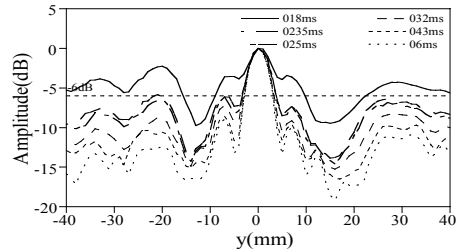
$$\langle I_4 S_{123} \rangle$$



(a) 센서의 위치



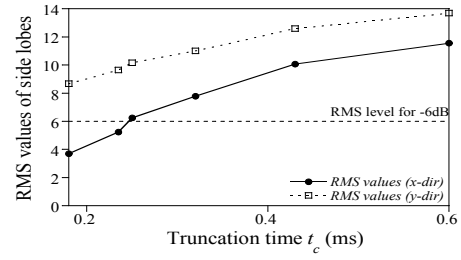
(b) RMS values vs Active sensor



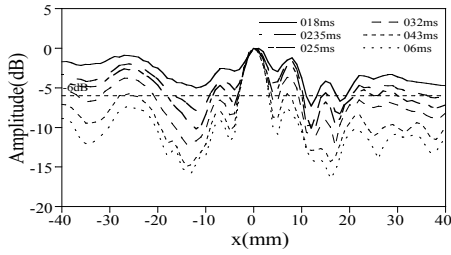
(c) Directivity pattern

그림 A1 $I_4 S_{123}$ 결과정리

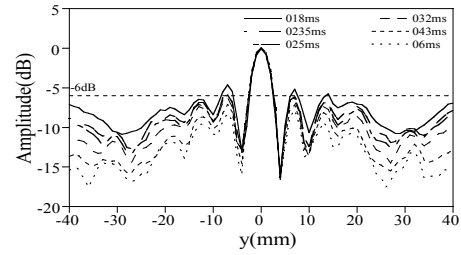
$$\langle I_{5123} S \rangle$$



(a) 센서의 위치



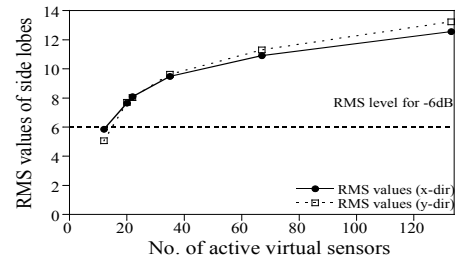
(b) RMS values vs Active sensor



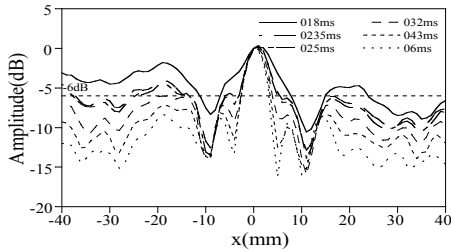
(c) Directivity pattern

그림 A1 $I_{5123} S$ 결과정리

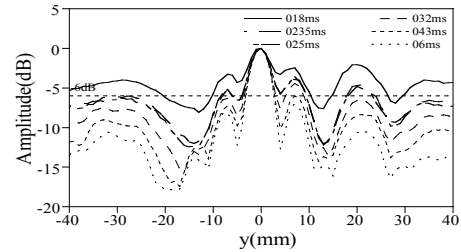
$$\langle I_{6123} S \rangle$$



(a) 센서의 위치



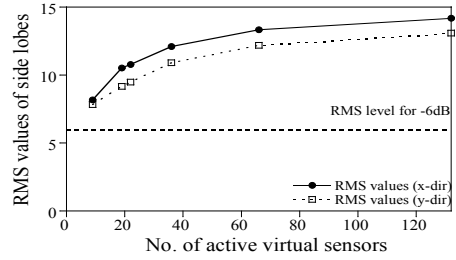
(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

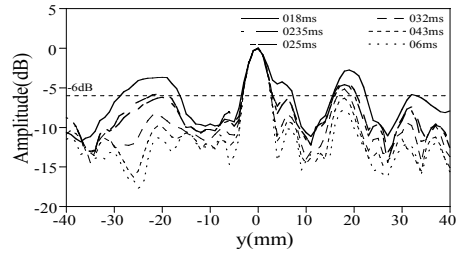
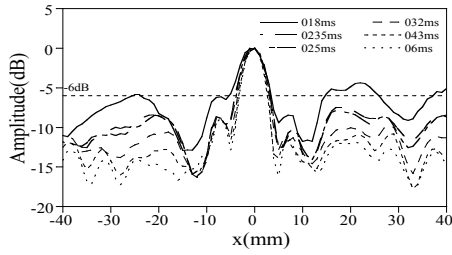
그림 A1 $I_{6123} S$ 결과정리

$\langle I_7 S_{123} \rangle$



(a) 센서의 위치

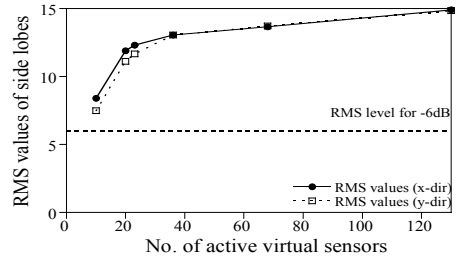
(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

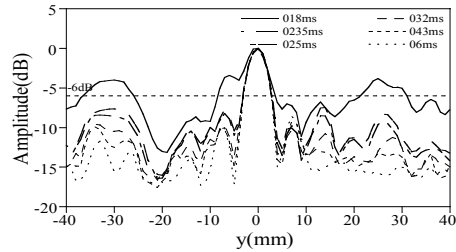
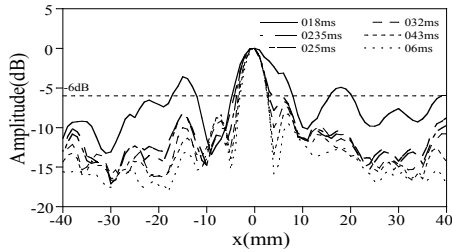
그림 A1 $I_7 S_{123}$ 결과정리

$\langle I_8 S_{123} \rangle$



(a) 센서의 위치

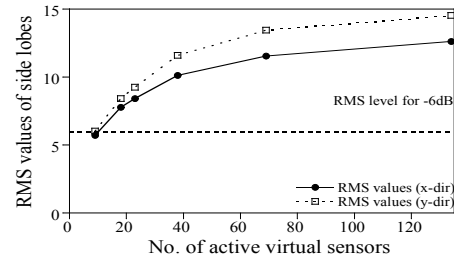
(b) RMS values vs Active sensor



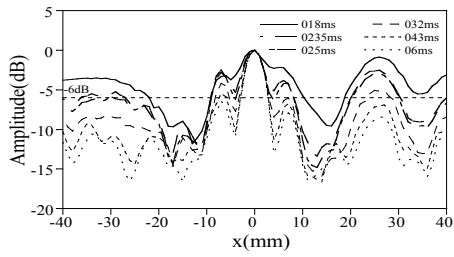
(c) Directivity pattern

그림 A1 $I_8 S_{123}$ 결과정리

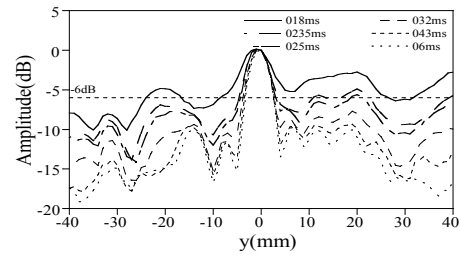
$$\langle I_9 S_{123} \rangle$$



(a) 센서의 위치



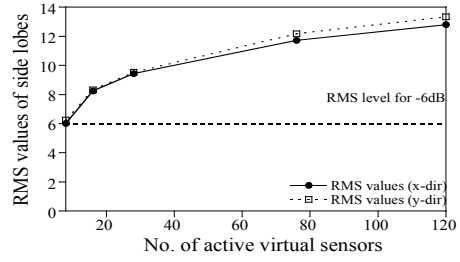
(b) RMS values vs Active sensor



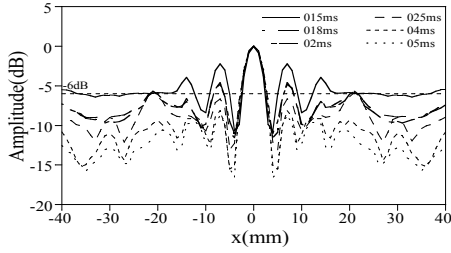
(c) Directivity pattern

그림 A1 $I_9 S_{123}$ 결과 정리

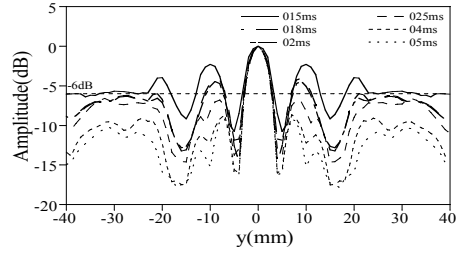
$$\langle I_1 S_{1234} \rangle$$



(a) 센서의 위치



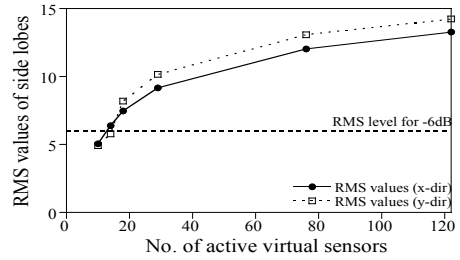
(b) RMS values vs Active sensor



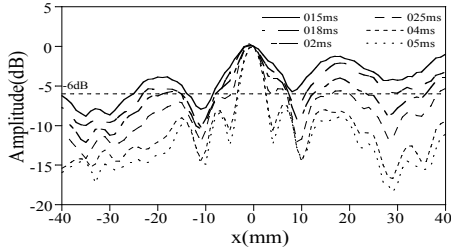
(c) Directivity pattern

그림 A1 $I_1 S_{1234}$ 결과정리

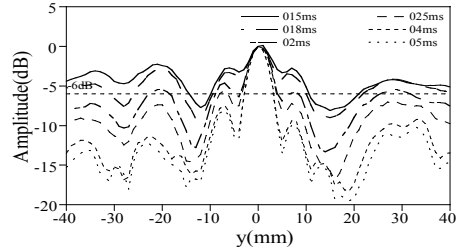
$$\langle I_2 S_{1234} \rangle, \langle I_4 S_{1234} \rangle, \langle I_6 S_{1234} \rangle, \langle I_8 S_{1234} \rangle$$



(a) 센서의 위치



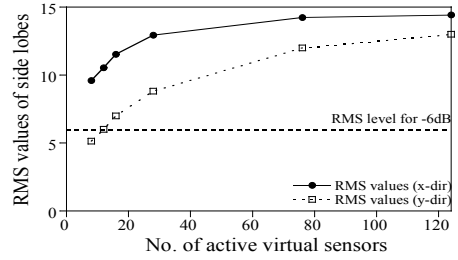
(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

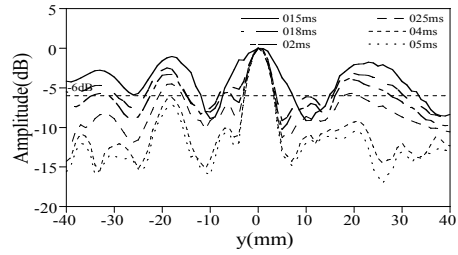
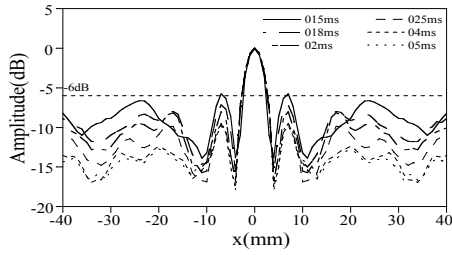
그림 A1 $I_2 S_{1234}, I_4 S_{1234}, I_6 S_{1234}, I_8 S_{1234}$ 결과정리

$$\langle I_3 S_{1234} \rangle, \langle I_7 S_{1234} \rangle$$



(a) 센서의 위치

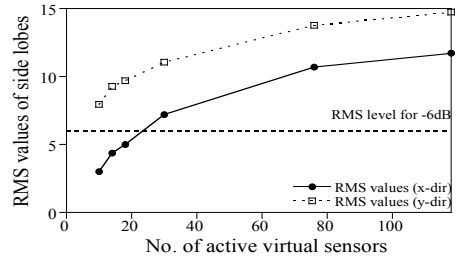
(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

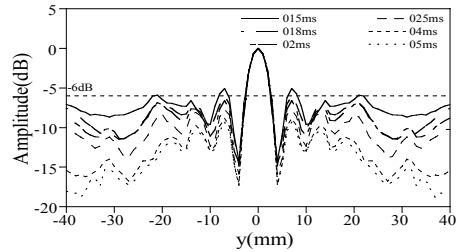
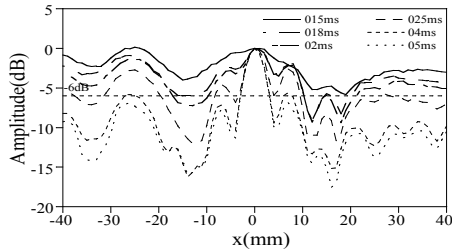
그림 A1 $I_3 S_{1234}$, $I_7 S_{1234}$ 결과정리

$$\langle I_5 S_{1234} \rangle, \langle I_9 S_{1234} \rangle$$



(a) 센서의 위치

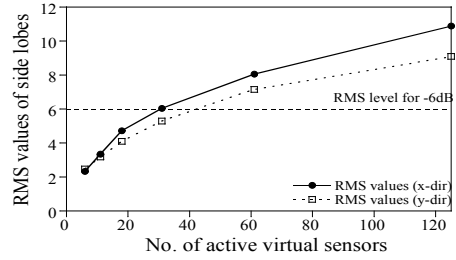
(b) RMS values vs Active sensor



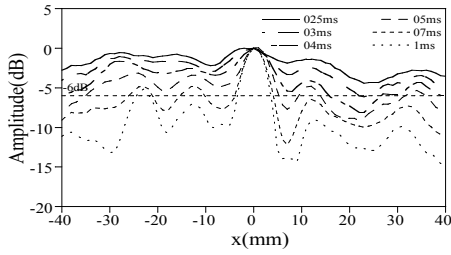
(c) Directivity pattern

그림 A1 $I_5 S_{1234}$, $I_9 S_{1234}$ 결과정리

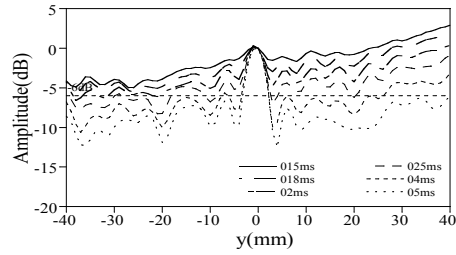
$$\langle R_1 S_1 \rangle$$



(a) 센서의 위치



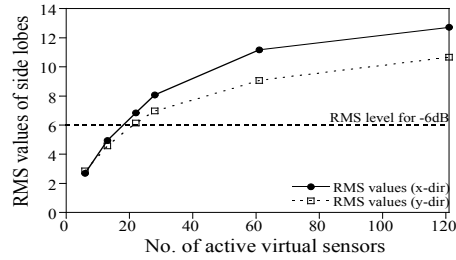
(b) RMS values vs Active sensor



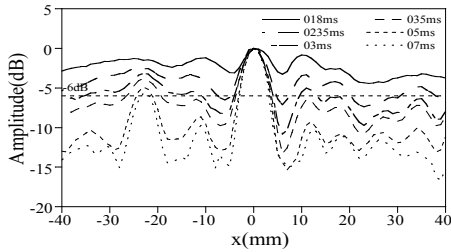
(c) Directivity pattern

그림 A1 $R_1 S_1$ 결과정리

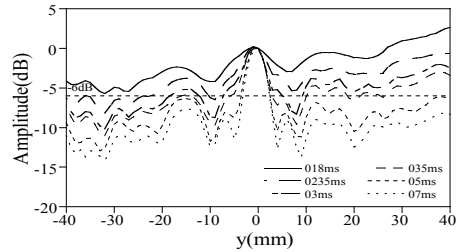
$$\langle R_1 S_{12} \rangle$$



(a) 센서의 위치



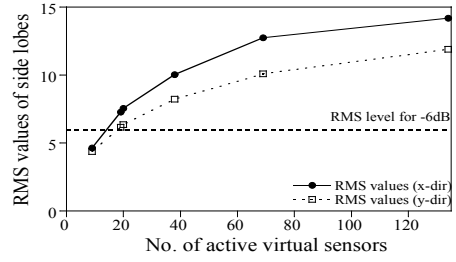
(b) RMS values vs Active sensor



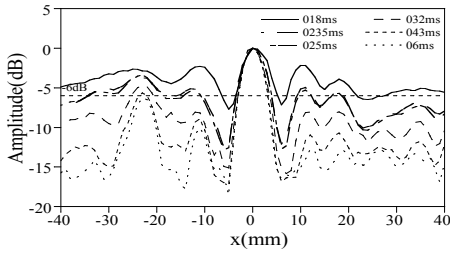
(c) Directivity pattern

그림 A1 $R_1 S_{12}$ 결과정리

$$\langle R_1 S_{123} \rangle$$



(a) 센서의 위치



(c) Directivity pattern

(b) RMS values vs Active sensor

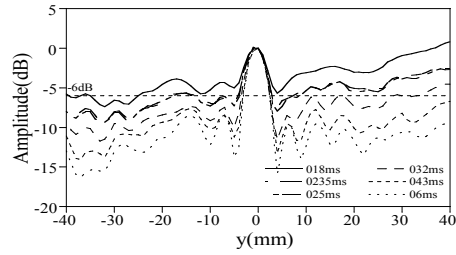
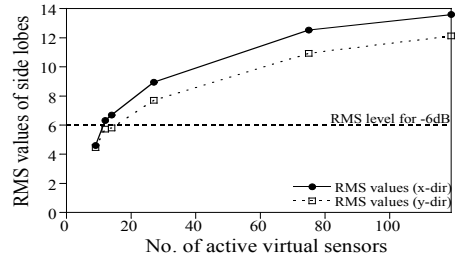
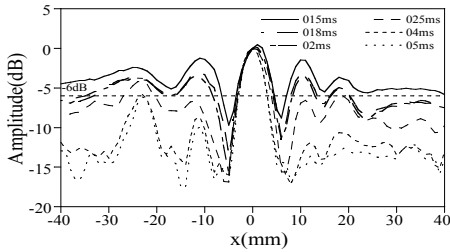


그림 A1 $R_1 S_{123}$ 결과정리

$$\langle R_1 S_{1234} \rangle$$



(a) 센서의 위치



(c) Directivity pattern

(b) RMS values vs Active sensor

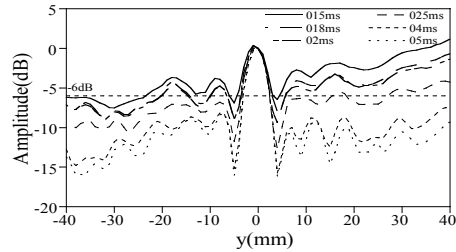


그림 A1 $R_1 S_{1234}$ 결과정리

$\langle R_2 S_1 \rangle$

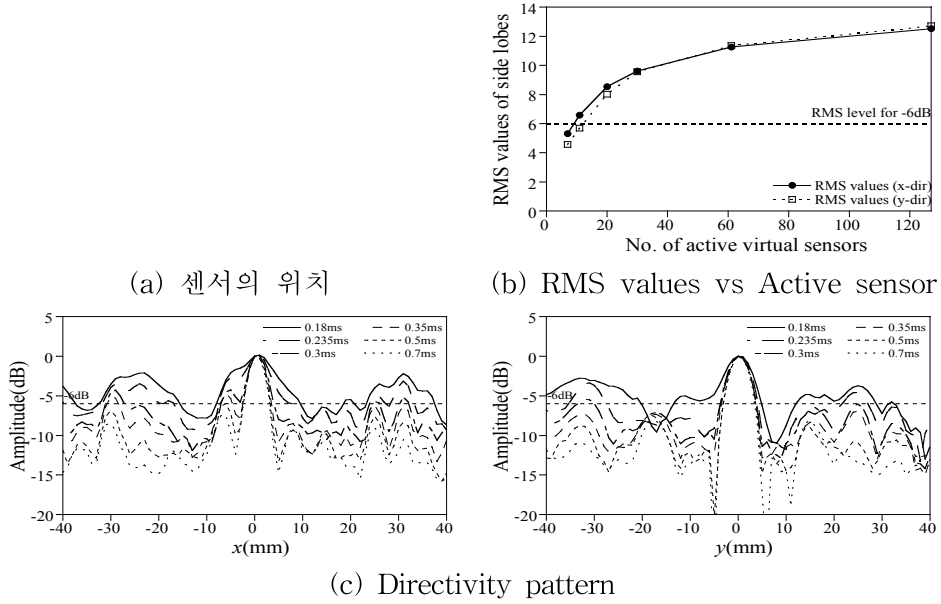


그림 A1 $R_2 S_1$ 결과정리

$\langle R_2 S_{12} \rangle$

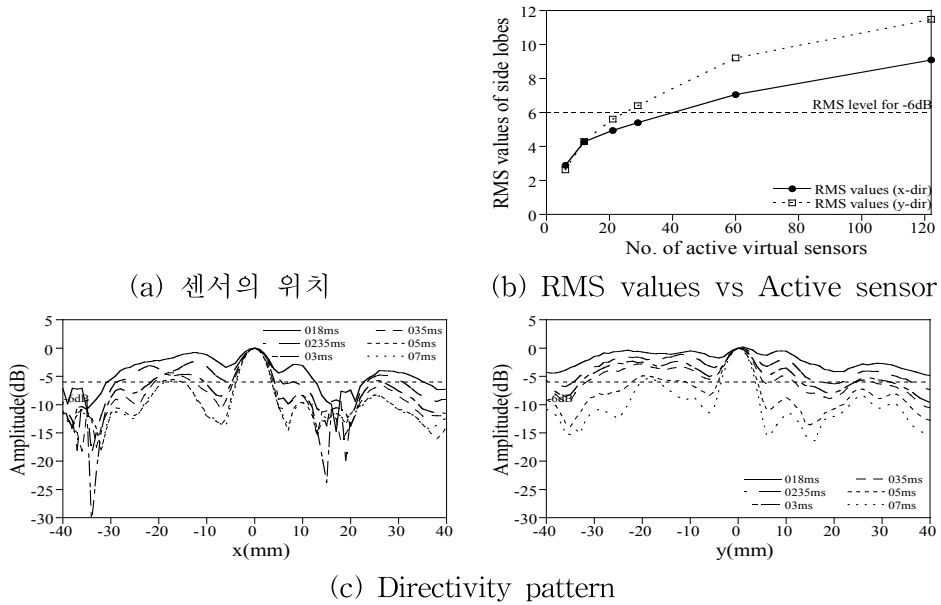


그림 A1 $R_2 S_{12}$ 결과정리

$$\langle R_2 S_{123} \rangle$$

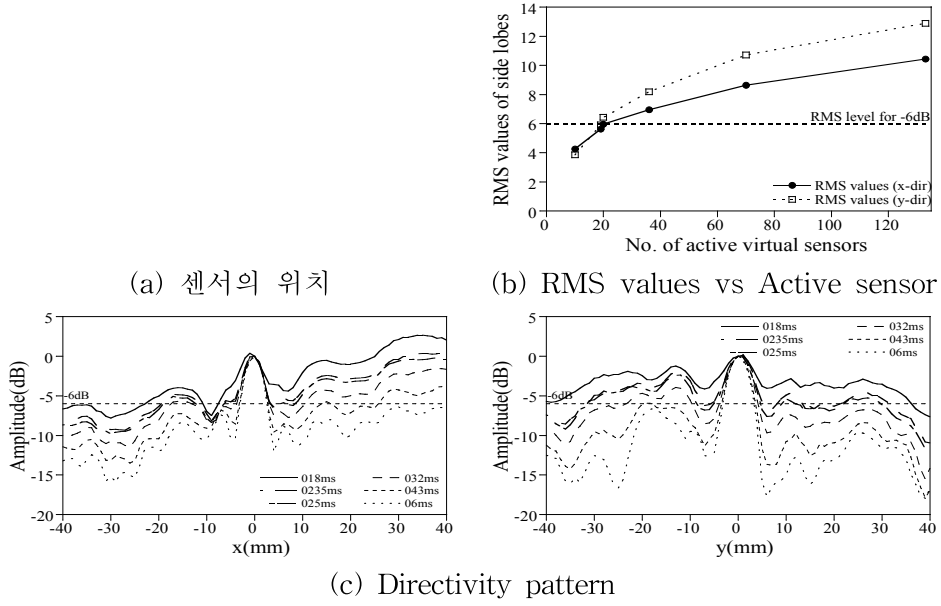


그림 A1 $R_2 S_{123}$ 결과정리

$$\langle R_2 S_{1234} \rangle$$

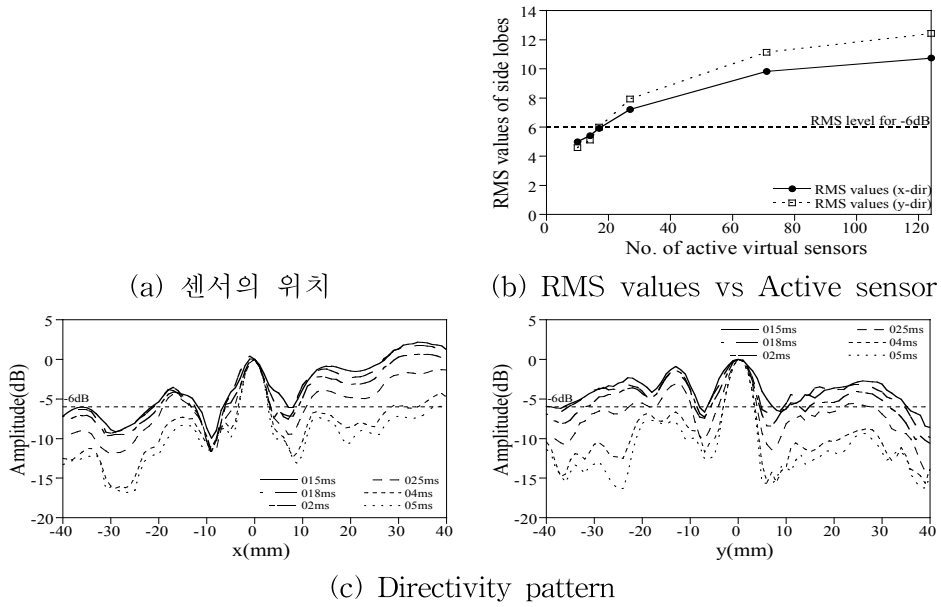
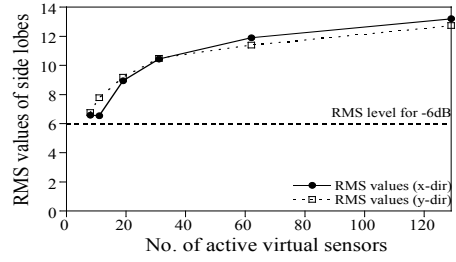


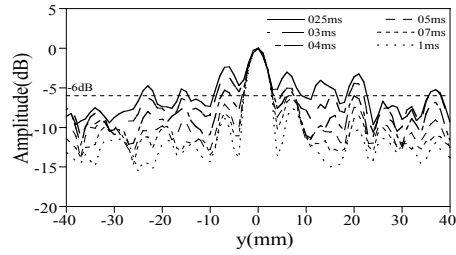
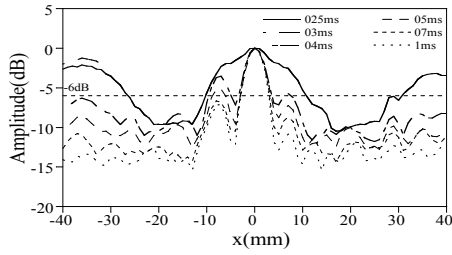
그림 A1 $R_2 S_{1234}$ 결과정리

$$\langle R_3 S_1 \rangle$$



(a) 센서의 위치

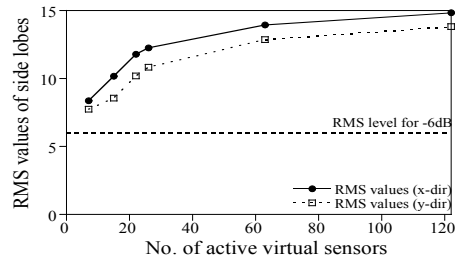
(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

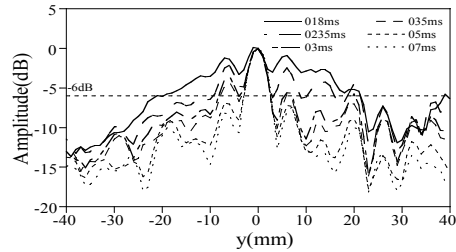
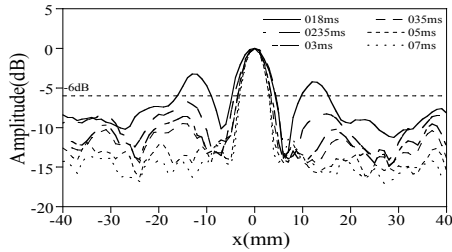
그림 A1 $R_3 S_1$ 결과정리

$$\langle R_3 S_{12} \rangle$$



(a) 센서의 위치

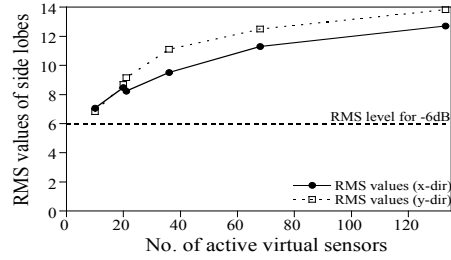
(b) RMS values vs Active sensor



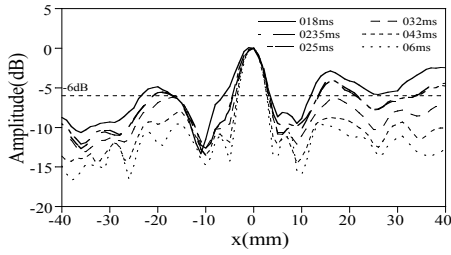
(c) Directivity pattern

그림 A1 $R_3 S_{12}$ 결과정리

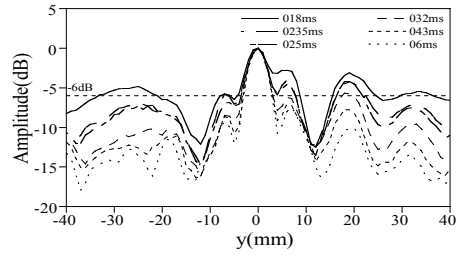
$$\langle R_3 S_{123} \rangle$$



(a) 센서의 위치



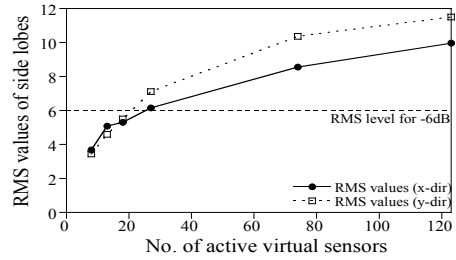
(b) RMS values vs Active sensor



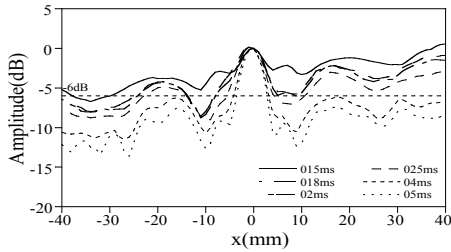
(c) Directivity pattern

그림 A1 $R_3 S_{123}$ 결과정리

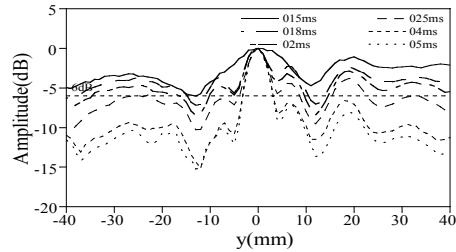
$$\langle R_3 S_{1234} \rangle$$



(a) 센서의 위치



(b) RMS values vs Active sensor



(c) Directivity pattern

그림 A1 $R_3 S_{1234}$ 결과정리

Abstract

Investigating the spatial focusing performance of time reversal Lamb waves on a plate with respect to input source location and the number of sensors.

by

SEO DAE JAE

Department of Civil Engineering

Graduate School, Donga-A University

Busan, Korea

The spatial focusing of time reversal Lamb waves on a plate has attracted considerable attention for identifying the location of an input source. the Lamb waves are sensitive to local damage such as a crack on structure and diffuse away in a short time. however, lamb waves have a weak point such as a dispersion. this study is using time reversal process, reflection of waves and virtual sensors to supplement a weak point of the Lamb waves. This study investigates the spatial focusing performance on a plate with respect to the number of piezoelectric (PZT) sensors for varying locations of input sources. In particular, a small number of PZT sensors produce spatial focusing through the virtual sensor effect due to reflection of Lamb waves at plate edges. The spatial focusing performance with respect to the number of PZT sensors is quantified in terms of signal to noise ratio through numerical simulation and its implication is discussed.