



유도초음파를 이용한 판 구조물 CT 영상화 기법

윤현우 · 강 토 · 김학준 · [†]송성진 · 신호상*

성균관대학교 기계공학부

*원자력안전기술원 공학연구소실

(2010년 11월 19일 접수, 2011년 4월 28일 수정, 2011년 4월 28일 채택)

Investigation of CT Imaging Technique Using Guided Wave

Yoon Hyun-Woo · To Kang · Hak-Joon Kim · [†]Sung-Jin Song · Ho-Sang Shin*

School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

*Engineering Research Department, Korea Institute of Nuclear Safety,

Daejeon 305-338, Korea

(Received November 19, 2010; Revised April 28, 2011; Accepted April 28, 2011)

요 약

유도초음파는 구조물의 장거리 탐상에 널리 사용되고 있으며 탐측자의 중심주파수와 판의 두께에 따라 유도 초음파의 군속도가 바뀌는 어려움으로 인하여 최근에 많은 연구자들에 의해 유도초음파를 이용한 판과 같은 구조물 진단에 토모그래피 영상화기법에 관심을 기울이고 있다. 기존에 개발된 영상화 기법으로는 Delay and Sum 영상화 기법이 있으며, 수 년간 판 구조물 영상화 기법의 알고리즘으로 이용되었다. MVDR(Minimum Variance Distortionless Response) 영상화 기법은 초음파의 산란특성을 고려한 영상화 기법으로써, 빔의 특성이 영상화 알고리즘에 적용되어 Delay and Sum 영상화 기법보다 향상된 영상을 판구조물에 존재하는 홀 결합 영상을 통해 비교·분석하였다.

Abstract - Ultrasonic guided waves have been widely utilized for long range inspection of structures. Recently, many researchers have paid attention to the tomographic imaging using guided wave for the diagnosis of plate-like structures because group velocity of guided waves is changed by central frequency of transducer and thickness of plate. Currently, Delay and Sum imaging technique and MVDR(Minimum Variance Distortionless Response) imaging technique are performed. So the performance of these two imaging techniques are investigated in this paper.

Key words : ultrasonic guided wave, computed tomography(CT) image, delay and sum, MVDR(Minimum Variance Distortionless Response)

1. 서 론

SHM(Structural Health Monitoring)은 최근 경제 발전에 발맞춰 활발히 연구되는 분야이다. 대표적으로 항공기나 자동차, 교량 및 고층 빌딩과 같은 다양한 구조물의 신뢰성 및 안전성이 무엇보다 중요하다는 인식이 증대되면서 SHM 기술의 개발에 관련 연구

가 많은 관심을 받고 있다. 하지만, 이러한 대형 구조물의 붕괴 사고는 막대한 경제적 손실뿐만 아니라 수많은 인명 피해를 가져올 수 있기 때문에 피해 방지를 위한 구조물의 안전 진단 기술은 매우 중요하다. 또한 대표적인 구조물외에도 1970년대 후반부터 송유관, 가스, 난방 등의 배관 시설이 설치되기 시작하여 30여년이 지난 오늘날 대부분 노후화 되어 부식 및 결합 등이 나타나고 있다. 따라서 배관에 관련된 연구도 활발히 진행되고 있으며, 장거리 배관 결

[†]교신저자:sjsong@skku.edu

함 탐지를 위해 배열유도초음파의 집속기술의 연구도 진행되고 있다. 일반적으로 구조물의 파괴 및 붕괴는 외부의 커다란 충격이 있는 경우를 제외하고는 대부분 점진적으로 누적된 손상으로 인하여 더 이상의 하중을 견딜 수 없을 때 발생한다. 그러므로 구조물의 파괴를 초래하는 구조물의 노화나 부분적인 결함을 미리 진단하고 평가하는 기술에 대한 요구가 증가하고 있다[1-5]. 이에 따라, 산업설비 구조물의 상당 부분을 차지하고 있는 판 구조물을 검사할 수 있는 유도초음파에 대한 연구가 계속적으로 수행되고 있다. 유도초음파는 복잡하고 다양한 피검체의 형상을 따라 원거리를 진행할 수 있는 파로써 산업설비 부품의 온라인 모니터링 기술에도 적용할 수 있는 가능성이 높기 때문에 국내에서는 유도초음파를 이용한 온라인 모니터링 기술 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구의 주제인 유도초음파를 이용한 CT(Computed Tomography) 영상화 기법은 주로 의료분야에 사용되었다. 특히, CT 영상화 기법이 갖는 강력한 결함검출능력 때문에 국내 산업전반에 걸쳐 사용되게 되었다. Sicard 등[6]은 판 구조물의 검사시 SAFT(Synthetic Aperture Focusing Technique)을 이용한 L-SAFT를 개발하여 Lamb Wave를 집속하고, 영상화하는 기술을 개발하였으며, Hay와 Royer는 항공기 표면에 삽입된 탐촉자와 삽입되지 않고 표면에 드러난 탐촉자를 RAPID(Reconstruction algorithm for probabilistic inspection of damage)를 이용하여 비교하였다[7]. 또한 Rajagopalan 등은 하나의 송신탐촉자와 여러개의 수신탐촉자를 이용하여 판구조물에 대한 SHM을 수행하였다[8]. 국내에서의 구조물 영상화 기법에 관한 연구는 김련희 등[9]에 의해 확률론적 토모그래피 영상화기법이 연구되었다.

본 연구에서는 4개의 탐촉자를 이용하여 CT 영상을 획득하였으며 이 기법을 통해 판 구조물의 결함을 검출하였다. 또한 Delay and sum 영상화 기법과 MVDR(Minimum Variance Distortionless Response) 영상화 기법을 비교하였다. 결론적으로 이와 같은 판 구조물 진단 기술 연구를 통해 구조물 건전성 감시 기술의 밑바탕이 되고자 한다.

II. 이 론

2.1. 군속도와 위상속도의 분산선도

Lamb Wave는 그 특성상 S_0 모드와 A_0 모드로 나뉘어 판에서 전파하기 때문에, 신호해석이 복잡한 분산적 특성을 가지고 있다. Lamb Wave의 신호해석을 쉽게

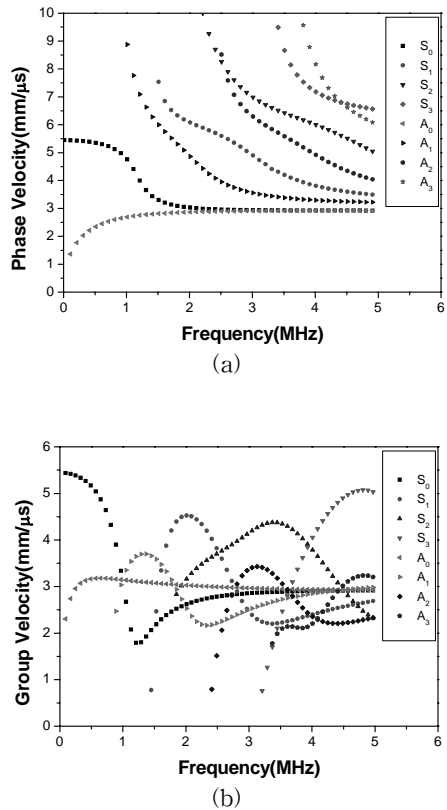


Fig. 1. Dispersion curve for aluminium plate with thickness of 2mm. (a) phase velocity, (b) group velocity.

하기 위해서는 분산적 특성이 줄어들도록 해야 하는데, 위상속도는 주파수와 두께에 관한 함수이므로 저주파의 주파수를 사용하는 것이 분산적 특성을 줄어든다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 2mm 알루미늄 플레이트의 위상속도와 군속도 분산선도를 나타낸 것이다. 주파수가 증가함에 따라 모드들이 추가되어 분산적인 특성을 나타낼 수 있다.

2.2. 판에서의 CT 영상화 알고리즘

2.2.1. Delay and Sum 영상화 기법

CT 영상을 구성하는 방법은 크게 파선 단층촬영법(ray tomography)과 회절 단층촬영법(diffraction tomography)의 두가지로 구분할 수 있다. 파선 단층촬영법은 탐지하고자 하는 결함의 크기가 파장보다 클 경우에 유리한 방법으로, 주변여건에 의한 제약을 적게 받고 계산이 빠르며 좋은 결과를 얻을 수 있다

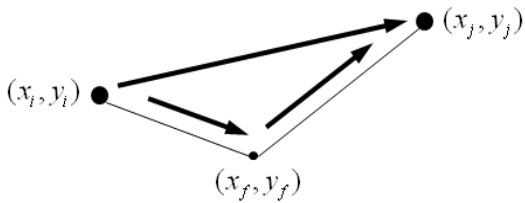


Fig. 2. Geometry of direct and scattered echo arrivals for two transducers and one flaw, (x_i, y_i) : i th transmitting transducer, (x_j, y_j) : j th receiving transducer, (x_f, y_f) : Flaw.

는 장점이 있다. 회절 단층촬영법은 파의 진행을 에너지의 산란으로 보고 회절이론을 이용하는 방법으로 탐지하고자 하는 결함의 크기가 파장과 비슷할 경우에 주로 사용된다. 적은 수의 탐촉자를 이용하여 수신된 신호를 중첩하여 판 구조물을 CT 영상화하는 기법은 Michaels 등[10]에 의해 수치적, 실험적으로 연구되었는데, 개발된 CT 영상화 기법을 이용하여 CT 영상 및 이미지 필터를 적용하여 향상된 영상을 구현해 보고자 한다.

본 연구에서 사용된 CT 영상화 기법은 4개의 배열탐촉자를 사용하여 6쌍의 신호로 판의 영상을 맵핑하는 것이다. Fig. 2는 송신자와 수신자 사이에 직접적으로 도달한 신호와 산란되어 도달한 신호의 형상을 나타내고 있다.

t_{ij} 는 (x_i, y_i) 에서 (x_j, y_j) 까지 도달한 시간이라면, 산란되어 수신된 신호의 TOF(Time-of-flight)와 (x_i, y_i) 와 (x_j, y_j) 사이의 거리를 이용하여 균속도를 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$c_g = \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{t_{ij}} \quad (1)$$

계산된 균속도를 이용하여 결함에 의해 산란된 신호의 도달시간을 t_{ij}^f 라 정의하면 t_{ij}^f 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{ij}^f = \frac{\sqrt{(x_i - x_f)^2 + (y_i - y_f)^2} + \sqrt{(x_f - x_j)^2 + (y_f - y_j)^2}}{c_g} \quad (2)$$

$\bar{d}_{ij}(t)$ 는 $i-j$ 탐촉자쌍으로부터 수집된 신호이며, 총 4개의 탐촉자를 이용하여 12개의 신호를 생성할 수 있지만, 중복되는 신호를 제외하면 총 6개의 신호를 취득할 수 있다. 6개의 신호는 탐촉자의 서로

간의 거리가 다르기 때문에, 그에 따른 보정이 필요하다. 그 보정계수를 $D_{ij}(t)$ 로 계산하고 거리에 따른 진폭을 보정 후 신호는 식 (3)이다.

$$d_{ij}(t) = \frac{\bar{d}_{ij}(t)}{D_{ij}(t)} \quad (3)$$

취득된 신호 $d_{ij}(t)$ 를 이용하여 적절한 시간의 윈도우를 씌워서 모든 신호를 더한 것은 식 (4)와 같다

$$s_{xy}(t; x, y) = \frac{N(N-1)}{2} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N d_{ij}(t - t_{ij}^f) w(t - t_{ij}^f) \quad (4)$$

식 (4)로부터 판의 좌표 (x, y) 의 결과 영상은 식 (5)로 정의된다[7]

$$E(m) = \int_{T_1}^{T_2} [s_{xy}(t; x, y)]^2 dt \quad (5)$$

식(1) - (5)을 이용하여 Delay and Sum 영상화 기법을 설명할 수 있지만, 이보다 더욱 간단하게 계산하기 위해 픽셀값이라는 용어를 도입하고자 한다. 픽셀값이란 개념을 도입한 이유는 판구조물의 모든 픽셀의 값을 계산하여 값의 크기에 따라 색의 변화를 주어 각 픽셀마다 영상화를 하기 때문에 보다 정확하고 간단하게 판구조물 내 존재하는 결함을 영상화하기 위해서이다. 픽셀값은 $P_{x,y}$ 로 표기하며 픽셀값을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$P_{x,y} = \int \left| \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N e_{ijxy} r_{ij} \left(t + \frac{d_{ixy} + d_{jxy}}{c_g} \right) \right|^2 w(t) dt \quad (6)$$

d_{ixy} 는 i 번째 송신탐촉자와 임의의 픽셀 (x, y) 사이의 거리이며, d_{jxy} 는 j 번째 수신탐촉자와 임의의 픽셀 (x, y) 사이의 거리이다. 또한 c_g 는 균속도를 의미하며 e 는 가중치를 위한다. 마지막으로 $w(t)$ 는 윈도우 함수이며 r_{ij} 는 i 번째 송신탐촉자와 j 번째 수신탐촉자 사이의 신호이다. 여기서 I, j 를 M 이라는 변수로 묶는다면 식(6)은 식(7)과 같이 간단해진다.

$$P_{x,y} = \int \left| \sum_{m=1}^M e_{mxy} r_m \left(t + \frac{d_{mxy}}{c_g} \right) \right|^2 w(t) dt \quad (7)$$

Table 1. Description of signals in the discrete-time domain

명칭	기호
Signal from i th Transmitter and j th Receiver	$r_{ij}(n)$
Signal Propagation Distance through (x, y)	d_{ij}^{xy}
Nominal Time Shift	$\Delta n_{ij}^{xy} = d_{ij}^{xy}/c_g$
Time Shifted Signal	$s_{ij}^{xy}(n) = r_{ij}(n - \Delta n_{ij}^{xy})$
Time Shifted Signal Matrix	$S_{N \times K} = \begin{bmatrix} s_{12}^{xy}(0) & \dots & s_{ij}^{xy}(0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{12}^{xy}(N-1) & \dots & s_{ij}^{xy}(N-1) \end{bmatrix}$
Weight Vector	$w_{K \times 1}^{xy} = \begin{bmatrix} w_{12}^{xy} \\ \vdots \\ w_{ij}^{xy} \end{bmatrix}$
Beamformed Signal	$Z_{N \times 1}^{xy} = S w^{xy}$
Pixel Intensity at (x, y)	$P^{xy} = (Z^{xy})^T (Z^{xy})$

식(7)을 더욱 간단히 하기 위해 벡터 개념을 도입한다.

$$\vec{r}_{x,y}(t) = \left[r_1(t + \frac{d_{1xy}}{c_g}) \dots r_M(t + \frac{d_{Mxy}}{c_g}) \right] \quad (8)$$

식(8)을 이용하여 식(7)을 간단하게 표현하면 식(9)와 같다.

$$P_{x,y}(\vec{e}) = \int \left| \vec{r}_{x,y}^T(t) \vec{e} \right|^2 w(t) dt \quad (9)$$

\vec{e} 는 가중치 벡터로 Delay and Sum 영상화 기법에 서는 식(10)으로 계산된다. 가중치 벡터는 영상화 기법에 따라 달라지며 각 영상화 기법의 성능을 좌우 하는 중요한 변수로 작용한다.

$$\vec{e} \sim [1/\sqrt{d_{1xy}} \dots 1/\sqrt{d_{Mxy}}]^T \quad (10)$$

마지막으로 Hermitian transpose의 개념을 도입하여 복소수 차원까지 확장을 시키면 픽셀값은 식(11)에 의해 계산되어진다.

$$P_{xy}^{DS}(\vec{e}) = \vec{e}^H R_{x,y} \vec{e} \quad (11)$$

여기서 H는 Hermitian transpose를 의미하며, $R_{x,y}$ 는 식(12)에 의해 계산된다.

$$R_{x,y} = \int \vec{r}_{x,y}^*(t) \vec{r}_{x,y}^T(t) w(t) dt \quad (12)$$

식(6)부터 식(12)번까지의 과정을 좀 더 간단하게 표로 정리한다면 Table 1.[11]과 같이 정리할 수 있다.

2.2.2. Minimum Variance Distortionless Response(MVDR) 영상화 기법

MVDR 영상화 기법은 공분산을 이용한 기법으로 영상화 성능을 향상시키기 위해 사용된 방법으로 Hall[13]등에 의해 제안되었다. MVDR 영상화 기법의 수학적 이론은 $R_{x,y}$ 를 Eigen decomposition으로부터 시작된다. 이것을 식으로 표현하면 식(13)과 같이 된다.

$$R_{x,y} = \sum_{i=1}^M \lambda_i \vec{v}_i \vec{v}_i^H \quad (13)$$

λ_i 는 $R_{x,y}$ 로부터 계산된 고유값이며 λ_i 로 이루어진 대각행렬을 만든다. \vec{v}_i 는 $R_{x,y}$ 로부터 계산된 단위 노름 고유벡터이다. \vec{v}_i^H 는 \vec{v}_i 를 Hermitian Transpose를 취한 값이다.

결함을 영상화 하는데 최적의 조건은 결함 외에 다른 신호가 없으며, 결함 외에 경계면에서 반사된 신호가 일정해야 한다. 이런 조건을 만족해야 결함이 없는 구조물에서 취득한 기준신호에서 결함이 존재할 때 취득한 신호의 차가 결함신호만 남게 할 수 있다. 이런 조건을 만들기 위해 취득한 신호에 결함신호만 남을 수 있도록 단위 노름 \vec{s} 를 취득한 신호에 곱해준다.

$$\vec{r}_{c,d}(t) = x(t) \vec{s} \quad (14)$$

\vec{v}_i 와 λ_i 의 가장 큰 값을 \vec{v}_1 와 λ_1 로 설정을 하고 \vec{v}_m 와 λ_m 를 가장 작은 고유벡터와 고유값으로 설정을 한다면, Fig. 3(b)와 같은 경우 \vec{v}_i 와 λ_i 는 \vec{v}_1 와 λ_1 이 된다. Fig. 3과 같이 간단한 경우 $R_{x,y}$ 의 Eigen decom-

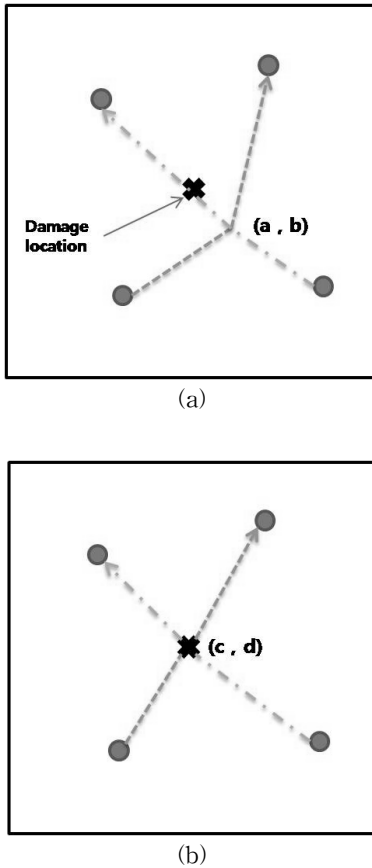


Fig. 3. Schematic of experimental set up for CT imaging. (a) Location (a, b) is an imaging location away from the damage. (b) (c, d) is the location of the damage.

position으로부터 \vec{s} 는 \vec{v}_1 이 되며 $x(t)$ 의 에너지는 λ_1 과 같아진다. 이것을 이용하여 식(15)은 식(16)와 같이 표현할 수 있다.

$$R_{x,y} = \int \vec{r}_{x,y}^*(t) \vec{r}_{x,y}^T(t) w(t) dt \quad (15)$$

$$R_{c,d} = \int |x(t)|^2 w(t) s \vec{s}^H dt = \lambda_1 \vec{v}_1 \vec{v}_1^H \quad (16)$$

식(12)의 $R_{x,y}$ 를 식(16)로 대체하여 픽셀값을 계산하면, $P_{c,d}^{DS}(\vec{e})$ 는 λ_1 일때 최대값을 가지게 된다. 이때 $\vec{e} = \vec{v}_1 = \vec{s}$ 가 성립되며 이와 반대로 $P_{c,d}^{DS}(\vec{e})$ 는 $\vec{e} \perp \vec{v}_1$ 일때 "0"이 된다. 이것이 의미하는 바는 \vec{e} 는 결함을 기준

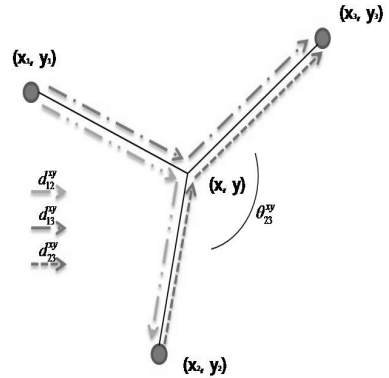


Fig. 4. A graphical description of imaging parameters.

으로 송신탐촉자와 수신탐촉자를 연결한 선의 끼인각이 중요한 변수로 적용된다는 뜻이다. 끼인각은 Fig. 4의 θ 이며, \vec{e} 는 식(17)에 의해 계산된다.

$$e^{xy} \propto \begin{bmatrix} 1/\sqrt{d_{12}^{xy}} \\ \vdots \\ 1/\sqrt{d_{ij}^{xy}} \end{bmatrix} + \alpha \begin{bmatrix} \cos(2\theta_{12}^{xy})/\sqrt{d_{12}^{xy}} \\ \vdots \\ \cos(2\theta_{ij}^{xy})/\sqrt{d_{ij}^{xy}} \end{bmatrix} \quad (17)$$

결함 영상화의 성능을 향상시키기 위해서 결함에 대한 픽셀값 $P_{c,d}^{DS}(\vec{e})$ 은 최대값을 가져야 하며 결함이 아닌 부분에 대한 픽셀값 $P_{x,y}^{DS}(\vec{e})$ 는 최소값을 가져야 한다. 따라서 영상화 성능을 향상시키기 위해서는 식(18)을 만족해야 한다.

$$\min w^H R_{x,y} w \quad (18)$$

여기서 w^H 는 식(19)을 만족해야 한다.

$$w^H e = 1 \quad (19)$$

w 는 식(18)을 만족하는 최적의 가중치 벡터이며 식(16)을 식(18)에 대입하면 식(20)을 얻을 수 있다.

$$w^H R_{c,d} w = \lambda_1 |w^H e|^2 \quad (20)$$

식(20)의 최적해를 찾기 위해 Lagrange multiplier α 를 도입하면 식(20)은 식(21)와 같이 정리된다.

$$L = w^H R_{c,d} w + \alpha (w^H e - 1) \quad (21)$$

Lagrangian L은 식(21)를 \vec{w} 에 관해서 미분함으로써 최소값을 갖게 된다. 식(21)를 \vec{w} 에 관해서 미분한 값을 "0"으로 설정한다면 식(22)을 유도할 수 있다.

$$\vec{w} = \frac{\alpha}{2} R_{x,y}^{-1} \vec{e} \quad (22)$$

식(22)을 α 에 관해서 정리하면 식(23)과 같이 되며 식(23)에 분자분모에 \vec{e}^H 를 곱해주면 식(19) $\vec{w}^H \vec{e} = 1$ 를 이용하여 식(24)를 유도할 수 있다.

$$\alpha = -\frac{2\vec{w}}{R_{x,y}^{-1} \vec{e}} \quad (23)$$

$$\alpha = \frac{2}{\vec{e}^H R_{x,y}^{-1} \vec{e}} \quad (24)$$

식(24)를 이용하여 구한 α 를 다시 식(22)에 대입하여 \vec{w} 에 관하여 정리하면 최종적으로 MVDR 영상화 기법에 사용될 가중치 벡터를 구할 수 있다. 가중치 벡터는 식(25)와 같다.

$$\vec{w}(\vec{e}) = \frac{R_{x,y}^{-1} \vec{e}}{\vec{e}^H R_{x,y}^{-1} \vec{e}} \quad (25)$$

마지막으로 MVDR 영상화 기법의 픽셀값은 Delay and Sum 영상화 기법과 동일하게 $P^{xy} = (Z^{xy})^T (Z^{xy})$ 를 이용하여 구할 수 있다.

III. CT 영상화 실험장치

유도초음파를 발생시키고 수신하기 위해서 Panametrics에서 개발한 Pulser/Receiver와 Oscilloscope 사용하였다. Pulser/Receiver model 5800 장비와 Oscilloscope의 외관은 Fig. 5와 같다. CT 영상화를 위해서는 모든 방향으로 판파가 동일하게 전파해야 하므로, 사각형 탐촉자를 사용하지 않고 GE사의 0.5MHz 원형탐촉자 4개를 이용하여 실험을 수행하였다.

실험에 사용된 시험편은 1000mm×1000mm×2mm의 알루미늄 판을 사용하였으며, 시험편과 탐촉자의 구성도는 Fig. 6과 같다. CT 영상화 알고리즘을 이용하여 총 6개의 신호를 취득할 수 있으며, 그것들의 신호를 중첩하여 CT 영상을 획득할 수 있다.

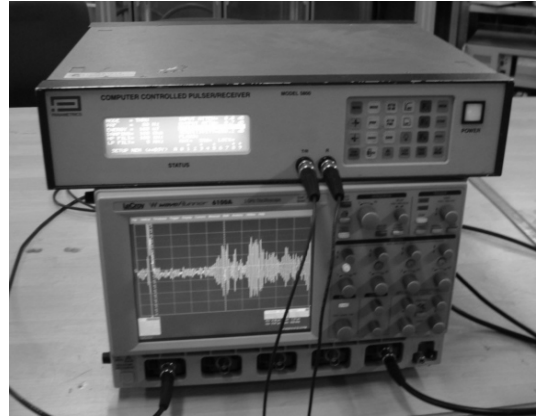


Fig. 5. Pulser/Receiver model 5800 and Oscilloscope.

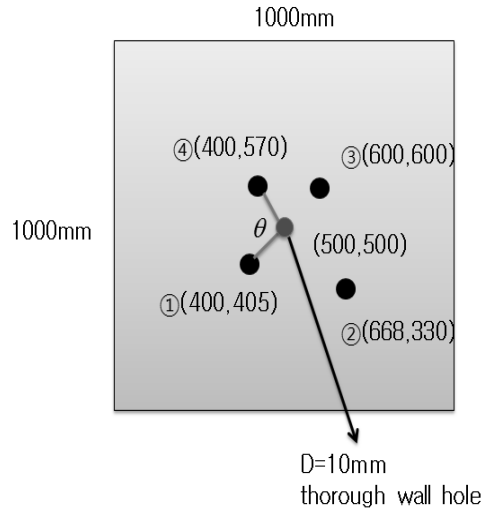


Fig. 6. Experiment setting for CT image.

IV. 판에서의 CT 영상화 실험

4개의 탐촉자를 이용하여 신호를 취득하면 1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 3-4 쌍의 총 6개의 신호를 취득할 수 있으며, 선정된 주파수와 두께에 의해 S모드와 A모드가 발생하게 되며, 결함뿐 아니라 경계면에서 다중 반사가 일어나 신호가 매우 복잡하게 나타나는 것을 알 수 있다.

취득된 신호를 이용하여 식 (1)로부터 각 신호의 군속도를 계산하고, 식 (11)을 이용하여 판의 영상을

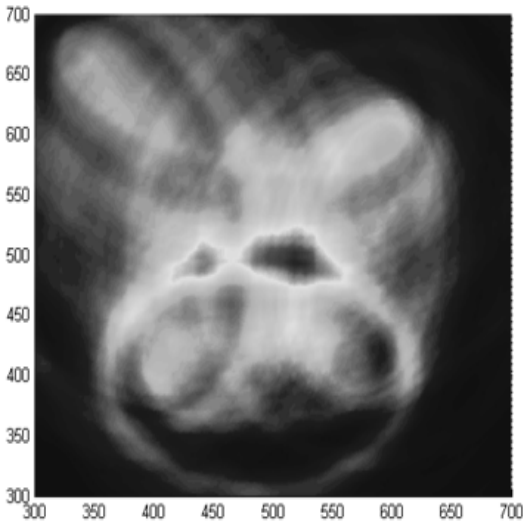


Fig. 7. Delay and Sum image from the specimen.

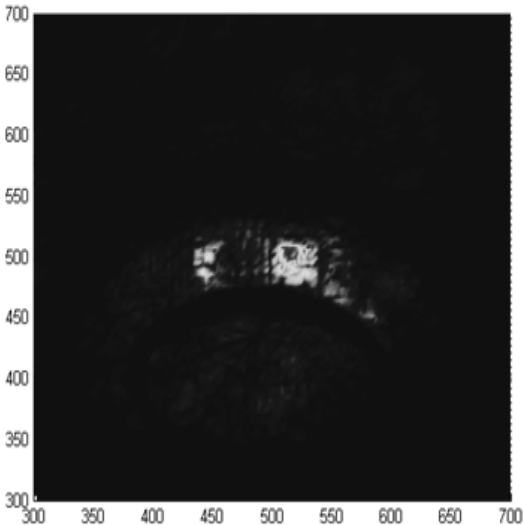


Fig. 8. MVDR image from the specimen.

획득할 수 있는데, 그 때의 영상은 Fig. 7과 같다. 6 개의 신호들이 중첩되어 관통홀에 의해 산란된 신호는 위상이 일치하기 때문에, 보강간섭이 일어나 신호가 커지며, 위상이 일치하지 않는 영역의 신호는 상쇄간섭이 일어나 신호가 작아지게 된다. Fig. 8은 MVDR 영상화 기법을 이용하여 얻은 영상이다. 가중치 벡터에 의해 MVDR 영상화 기법은 Delay and Sum 영상화 기법보다 신호 대 잡음비가 크게 향상

하므로 좀 더 뚜렷한 결함 영상을 확인할 수 있다. 하지만 지금까지 개발된 기법을 적용하여 관통홀과 같은 결함의 위치추적은 용이하지만, 결함의 크기를 산정하는 것은 현재까지 한계가 있는 실정이다. 현장에서 취득된 데이터는 탐촉자의 특성에 따라서 다르기 때문에 정확한 영상 획득을 통한 결함의 크기 산정 기법은 향상된 신호처리기법을 통한 A-scan 신호 획득, 향상된 이미지 중첩기법을 통하여 개발되어야 한다.

V. 결론

본 연구의 목표는 CT 영상화 기법인 Delay and sum 영상화 기법과 MVDR 영상화 기법의 성능을 비교하여 판 구조물의 결함을 검출하는 것이다. CT 영상화를 위하여 A_0 모드를 사용하였고, 관통홀에 의해 산란된 신호를 수집하였다. 유도초음파의 분산적 특성을 제거하기 위하여 관통홀이 있는 시험편의 신호에서 관통홀이 없는 시험편의 신호를 뺀 남은 신호를 사용하였다. 그리하여, CT 영상화 기법은 결함의 위치를 2D 영상으로 나타내어 판 구조물 검사시 검사자의 신호해석의 편의를 도모하게 된다. Delay and Sum 영상화 기법과 사용된 가중치 벡터와 새로운 가중치 벡터를 적용시킨 MVDR 영상화 기법은 Delay and sum 영상화 기법보다 향상된 신호 대 잡음비를 보여준다. 따라서 향상된 영상을 획득하는 것을 가능하게 한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 연구비 지원으로 수행되었으며 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] 신현재, “유도초음파를 이용한 비파괴탐상 기법”, 한국비파괴검사학회, **20**(3), 238-245, (2000)
- [2] 조운호, “유도초음파에 대한 이해와 응용”, 한국비파괴검사학회, **21**(4), 446-459, (2001)
- [3] 강토, 김학준, 송성진, 조영도, 이동훈, 조현준, “배관 원거리 진단을 위한 원주방향 배열 유도초음파 집속기술 개발”, 한국비파괴검사학회, **29**(2), 114-121, (2009)
- [4] To Kang, Sung-Jin Song, Hak-Joon Kim, Young-Do Cho, Dong-Hoon Lee and Hyun-Joon Cho, “Analysis of the Propagation Characteristics of Ultrasonic Guided Waves Excited by Single Fre-

- quency and Broadband Sources”, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, **29**(6), 570-578, (2009)
- [5] To Kang, Dong-Hoon Lee, Sung-Jin Song, Hak-Joon Kim, Young-Do Jo, Hyun-Joon Cho, “Enhancement of detecting defects in pipes with focusing techniques”, *NDT E & international*, **44**(2), 178-187, (2011)
- [6] Rene Sicard, Ahmad Chahbaz, Jacques Goytte, “Guided lamb waves and L-SAFT processing technique for enhanced detection and imaging of corrosion defects in plates with small depth-to-wavelength ratio”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **51**(10), 1287-1297 (2004)
- [7] T R Hay, R L Royer, Huidong Gao, Xiang Zhao and J L Rose, “A comparison of embedded sensor Lamb wave ultrasonic tomography approaches for material loss detection”, *Smart Materials and Structures*, **15**, 946-951 (2006)
- [8] Jagannathan Rajagopalan, Krishnan Balasubramaniam and C V Krishnamurthy, “A single transmitter multi-receiver(STMR) PZT array for guided ultrasonic wave based structural health monitoring of large isotropic plate structures”, *Smart Materials and Structures*, **15**, 1190-1196, (2006)
- [9] 김련희, 조윤호, 안봉영, 조승현, “유도초음파 토모그래피 영상화기법을 적용한 판구조물의 2차원 결함진단”, *춘계비파괴검사학회 춘계학술대회 발표 논문집*, 134-135 (2009)
- [10] Jennifer E. Michaels, Thomas E. Michaels, “Guided wave signal processing and image fusion for in situ damage localization in plates”, *Wave Motion*, **44**(6), 482-492 (2007)
- [11] Jennifer E. Michaels, J. S. Hall, G. Hickman and J. Krolik, “Sparse Array Imaging of Change-Detected Ultrasonic Signals by Minimum Variance Processing”, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluations*, **28**, 642-649 (2009)
- [12] James S. Hall, Jennifer E. Michaels, “Minimum Variance Ultrasonic Imaging Applied to an in situ Sparse Guided Wave Array”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **57**(10), 2311-2323, (2010)