

경계요소법을 이용한 유도초음파 토모그래피 영상화 기법

Guided Wave Tomographic Imaging Using Boundary Element Method

Yunri Piao*, 조운호**†, Lianji Jin*, 안봉영*, 김노유***, 조승현*

Yunri Piao*, Younho Cho**†, Lianji Jin*, Bong-Young Ahn*, Nohyu Kim*** and Seung Hyun Cho*

초 록 토모그래피는 다중 빔을 이용하여 단면을 영상화하는 기법으로서 주로 의료진단 분야에서 인체의 단면 영상획득을 위해 응용되어지는 기법이다. 비파괴검사 분야에서도 단순한 시간영역 신호의 제시에서 탈피하여 검사자에게 영상을 제공함으로써 진단의 효율성을 높이고자 하는 추세이므로 이 기법은 많은 의미를 갖는다. 최근, 유도초음파를 이용한 평판 구조물의 진단 기법이 많은 주목을 받고 있어, 본 논문에서는 컴퓨터 기반 유도초음파 해석 기법과 토모그래피 영상화 기법을 기반으로 2차원 평판에 존재하는 결함 위치를 영상화하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 경계요소법을 이용하여 판 구조물에 존재하는 결함이 유도초음파의 전파 양상에 미치는 영향을 해석하고 그 결과를 토모그래피 영상화 기법에 적용하여 평판의 결함 위치를 판별하고자 하였다. 그 결과, 토모그래피를 위해 사용되는 센서의 개수가 결함 검출 성능에 많은 영향을 미침을 확인할 수 있다.

주요용어: 토모그래피, 유도초음파, 경계요소법

Abstract Tomography is the imaging method of cross sectional area using multi beam signals and is mainly applied to the medical diagnosis to acquire the image of the inside human body. This method is pretty meaningful in nondestructive evaluation field since the imaging of the inspection region can enhance the comprehension of the inspector. Recently, much attention has been paid to the guided wave for the diagnosis of platelike structures. So, in this work, a study on the imaging of the damage location in a plate was carried out on the basis of computer aided analysis of guided waves and tomographic imaging. To this end, boundary element method was employed to analyze the effect of the damage in plate on the propagation of the guided waves and the analytic results were applied to the tomographic imaging method to identify the damage location. Consequently, it was shown that the number of sensors heavily affect the inspection performance of the damage location.

Keywords: Tomography, Guided Waves, BEM

1. 서론

유도초음파는 원거리 전파가 가능하므로 비파괴 평가 분야에서 많은 관심을 받고 있다. 특히, 탐상 영역이 넓거나 접근이 힘든 경우, 유도초음파를 이용하면 센서(sensor)의 이동이 없이 원거리에서 넓

은 영역을 신속하게 탐상할 수 있기 때문에 많은 장점을 갖는다[1]. 최근, 유도초음파 기반 비파괴평가 분야에서는 단순히 구조물에 존재하는 결함의 유무 및 결함의 위치를 판별하는 데이터를 제공하는 것에서 벗어나, 결함을 영상화하여 검사자의 시각적인 판단을 돕기 위한 연구가 다양하게 시도되

고 있다[2]. 2차원 영역의 영상화 기법 중 대표적인 방법이 토모그래피이다. 토모그래피는 탐상 대상 영역을 관통하는 다수의 빔 신호를 측정하여 이 정보를 기반으로 탐상 영역을 영상화하는 기법이다. 토모그래피는 주로 질병의 진단을 위해 방사선을 측정하여 인체의 단면 영상을 제공하는 의료 진단 분야에서는 활발히 응용되어 왔다.

이러한 토모그래피 기법을 유도초음파 기술에 접목하여 구조물에 존재하는 결함을 영상화하고자 몇몇 연구 사례가 최근 보고되고 있다. Jansen and Hutchins[3]는 수중에서 수침형 변환기를 이용하여 평판 시편을 탐상하였다. Pei et. al.[4]은 램파가 배관 부식 부분을 지날 때 도달시간이 지연되는 현상을 이용하여 배관의 영상을 획득한 바 있다. Malyarenko and Hinders[5]는 결함에서 발생하는 램파의 산란 신호를 이용하여 결함을 영상화 하였고, Leonard et. al.[6]은 대상영역에서 빔의 분포가 등간격을 이루도록 실험을 수행하여 좋은 탐상 결과를 보여주었다. 하지만, 현재까지의 연구결과들이 실험을 통해 얻은 신호들을 이용하여 영상화를 수행하였기 때문에 센서의 개수, 빔 통로(path)의 분포 등 다양한 파라미터의 영향을 체계적으로 이해하기 위해서는 많은 실험이 수행되어야 하는 한계가 있었다.

본 연구에서는 실험적으로 획득한 신호 대신 컴퓨터 기반 유도초음파 해석 기법으로 얻은 신호를 이용하여 평판 구조물에 존재하는 결함의 토모그래피 영상화를 시도하였다. 평판 구조물에서 유도초음파를 해석하기 위해 경계요소법(boundary element method)을 도입하였다. 해석적으로 얻은 결함이 없는 건전한 평판과 결함이 존재하는 평판에서의 램파 신호를 토모그래피 기법에 적용하여 결함위치의 영상화를 시도 하였다. 특히, 사용된 센서의 개수를 바꿔가며 토모그래피를 수행하여 센서 개수에 따른 영향을 고찰하였다.

제안한 경계요소법을 이용한 유도초음파 토모그래피 영상화 기법이 성숙되면, 평판의 재질 및 치수, 기하학적 형상 및 센서의 위치 개수 등 다양한 실험 조건에 따른 토모그래피 영상화의 결과를 시뮬레이션 할 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 방법이 실제 신호를 측정하기 전에 탐상 조건의 타당성을 파악하거나 탐상 환경을 최적화 하는데 매우 유용할 것은 자명하다. 따라서, 본 기술은 향후 유도초음파를 이용한 2차원 결함 평가에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

2. 유도초음파의 모드변환 특징

강(steel)의 분산선도를 참고로 하여 중앙에 crack 성 결함이 있는 판재의 단면을 기하학적 형상과 입사 주파수를 고려하여 Fig. 1과 같이 약 740~900개의 절점으로 분할하여 모델링 하였다. 평판의 길이 2L은 해당모드의 두 파장이상에 해당하는 거리로 설정해야 한다. 그리고 결함의 깊이(h)만을 변경하여 반사계수의 크기 ($|r|$)를 구하였다[9]. BEM을 이용하여 계산된 반사계수($|r|$)와 반사계수의 위상각을 구하였다. Fig. 2에서와 같이 결과 결함의 깊이(h/d)가 커질수록 반사계수($|r|$)의 값이 증가함을 알 수 있었고, 위상각도는 $-30^{\circ} \sim 32^{\circ}$ 범위에서 반사계수의 그래프와 대칭이 됨을 알 수 있었다. 이 결과를 통해서 결함의 깊이에 따른 반사파의 진폭의 값을 미리 알 수 있으므로 결함에 따른 진폭의 크기를 직접적으로 예측하여 비교하는 것이 가능하다.

투과파(transmission wave) 영역의 결함이 있는 모델에 주파수 구간에서 BEM을 이용하여 계산된 산란장 값을 IFFT 처리하여 시간영역의 파형으로 변환하였다. Fig. 3에서와 같이 결함부의 우측 4중

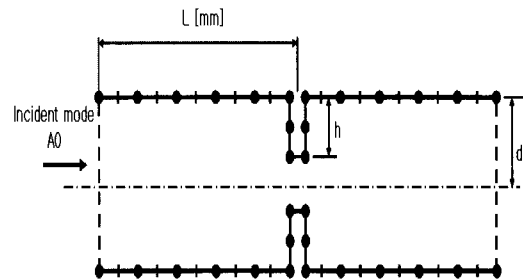


Fig. 1 BEM modeling approach, showing modeling zones

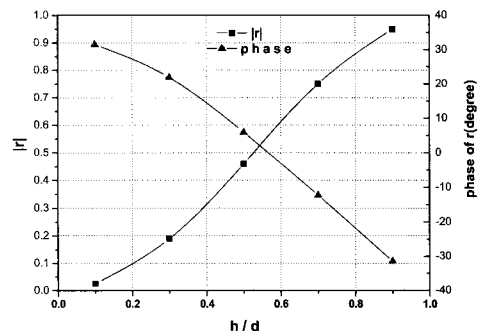


Fig. 2 Reflection coefficient of thin surface crack

위치의 변위(Uy)만을 이용하였다. Fig. 4는 모델의 좌측으로 입사된 A0 모드가 결함에서 산란되어 파형의 모드 변환을 거쳐 결함의 우측으로 전달되는 파형들을 IFFT변환한 것이다. 투과파의 경우 입사파(incidence wave)의 영향이 나타나지 않는다. 이것은 입사파가 없는 것이 아니라 투과파와 진행 방향이 같기 때문에 나타나지 않는 것이다. 35 mm 위치에서 S0 모드와 A0 모드가 중첩되어 모드 변환이 생기지 않았지만, 45 mm 지점에서 S0 모드와 A0 모드가 분리되기 시작하여, 65 mm 지점에서는 모드의 군속도 차이로 인해 완전히 S0 모드와 A0 모드가 분리되는 것을 볼 수 있다.

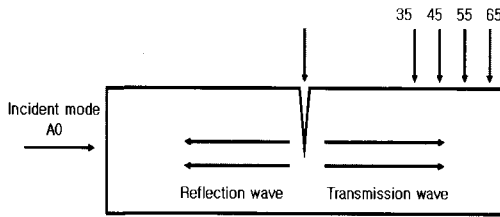
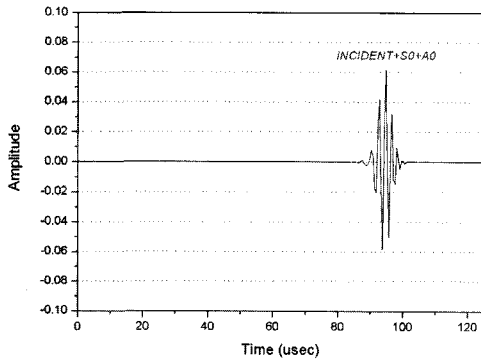


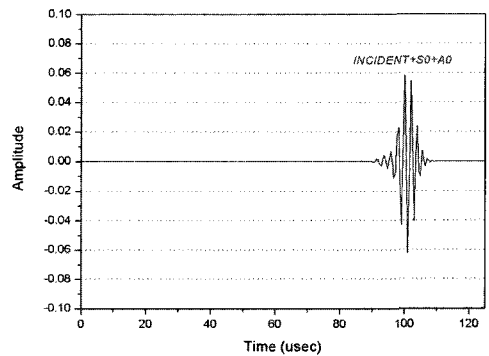
Fig. 3 BEM modeling for the plate with a central defect

3. 토모그래피

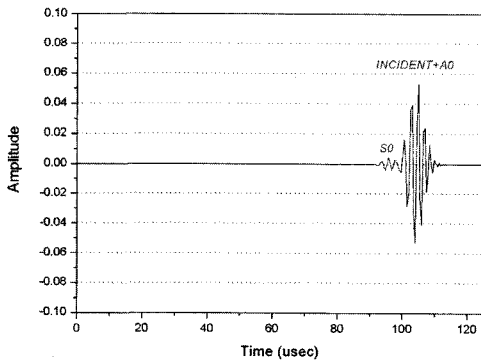
Fig. 5(a)에서와 같이 배열 센서를 결함부에 정4 각형으로 등 간격으로 배치하였을 때 결함이 없는 부위를 통과하는 입력신호는 모드 컨벌전이 일어나지 않는 신호이고, 결함부위를 통과하는 신호는 모드 변환된 신호이다. Fig. 5(b)는 12개 송수신 센서 사이를 전파하는 12×11개의 신호망을 표시한다. 영상화 데이터를 얻기 위해 각 센서가 위치한 지점 사이에서 주고받는 신호 또는 반사 신호를 2회 이상에 걸쳐 반복적으로 수집한 뒤 컨볼루션 적분 식 [1]을 통해 그 신호 지수를 각 유도초음파의 전파 경로 상에서 계산하여 그 값을 명암이나 색상데이터로 나타냄으로써 검사 결과의 영상데이터를 획득한다. $x(t)$, $y(t)$ 는 Fig. 6과 같이 시편에 결함이 없을 때 신호와 배열 센서를 설치하고 결함신호를 받았을 때 모드 변환된 신호이며 τ 는 시간지연을 표시한다. μ_x, μ_y 는 $x(t)$, $y(t)$ 신호의 평균값이며, T는 신호의 주기, R_{xy} 는 상호상관함수이다.



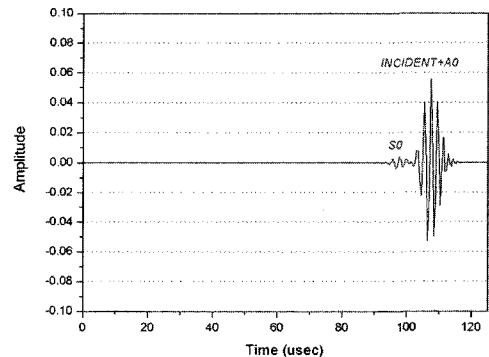
(a) at 35 mm



(b) at 45 mm



(c) at 55 mm



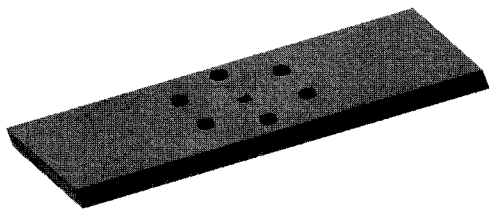
(d) at 65 mm

Fig. 4 A0 mode IFFT result from the defect (transmission, include incident mode)

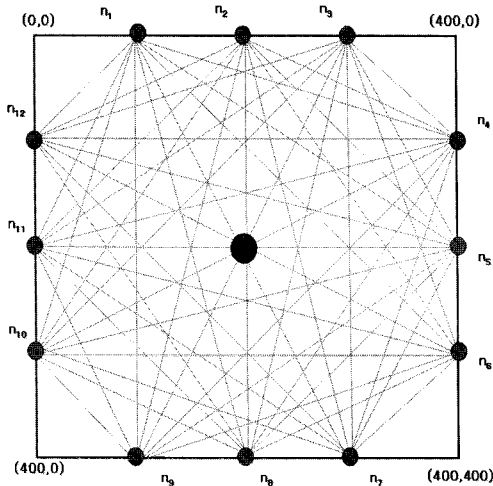
$$C_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{x(t) - \mu_x\} \{y(t-\tau) - \mu_y\} dt \quad (1)$$

$$= R_{xy}(\tau) - \mu_x \mu_y$$

토모그래피 영상을 얻기 위하여 두께가 1 mm이고, 길이가 160 mm, 중심 원추형 결함의 깊이와 윗면의 직경이 각각 0.5 mm인 steel 평판을 사용하였다. 평판 위의 결함을 중심으로 4각형으로 12개 센서를 배치하였는데, 각 테두리 마다 등 간격으로 3개씩 배치하였다. 강(steel)의 분산곡선을 바탕으로 입사파의 주파수 영역은 중심 주파수가 1.0 MHz이고 0.746~1.25 MHz의 주파수대역으로 Gaussian 분포로 하여 0.008 MHz 간격으로 총 64개의 입사파를 계산하였고 판재에 결함을 중심으로 70 mm 일때 A0 모드의 주파수영역을 BEM을 이용하여 얻은 결과를 IFFT변환하였으며, 얻은 12X11개의 신호를 Fig. 6과 같이 토모그래피 알고리즘에 적용시켜 영상을 얻었다.



(a) central defect plate



(b) sparse array signals

Fig. 5 Computer modeling sparse array for guided wave tomography

모드, 주파수, 결함의 형상, 위치 등 입력 변수의 변화에 따른 토모그래피 영상의 변화와 민감도를 체크하는 것이 결함의 크기, 형상, 깊이 등 정량적인 연구에 큰 의미가 있다. 많은 실험적 연구에서 결함의 형상을 영상으로 표현하였지만 구체적인 결함의 위치와 크기를 구하는 방법은 혼하지 않다. 컴퓨터로 모델링 하는 방법으로 결함의 특징에 더 정량적인 접근을 시도하였다. Fig. 7은 반사파 신호를 수집하였을 때 A0입력 신호와 반사 신호의 시간차와 속도 차로 결함의 위치를 추정할 수 있음을 보여준다. Fig. 7(a)와 같이 평판의 결함을 중심으로 25 mm, 45 mm 떨어진 위치의 신호를 모델링 하였다. (b), (c)에서 A0의 입사파와 결함에서 반사되어 돌아온 반사파를 보여준다. 파동의 속도와 시간을 사용하여 45 mm 위치의 센서에서 결함까지의 거리 46.15 mm를 계산하였는데, 오차 2.5%에서

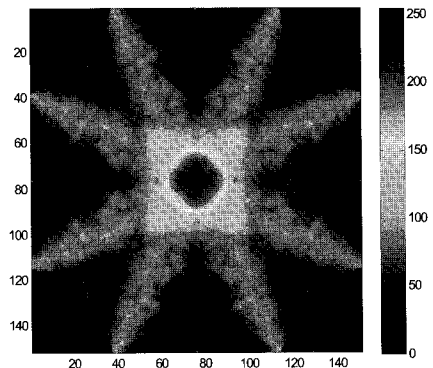
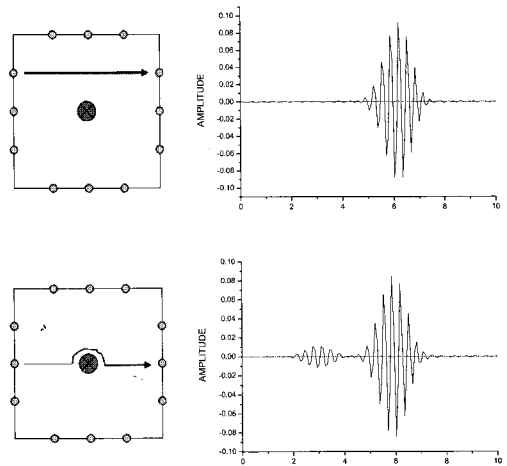
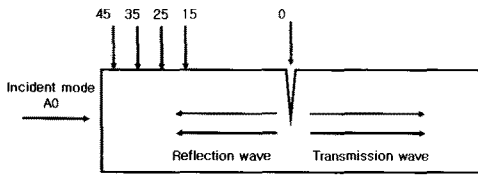


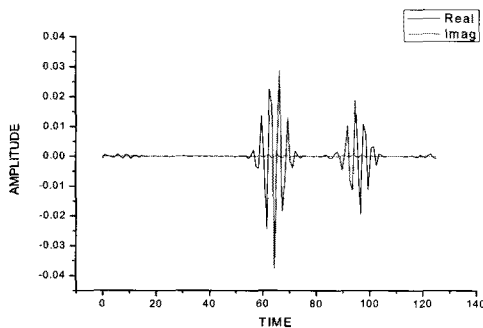
Fig. 6 Tomographical image for a plate with a central defect

결합의 위치를 정확하게 구하였다. Fig. 7(b), (c)는 25 mm, 45 mm 위치에서의 시간 축 상의 반사파를 나타낸다.

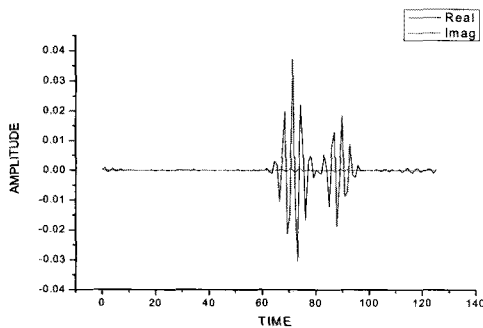
센서 개수가 토모그래피 영상에서 결합의 추출에 주는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 8과 같이 배열형 센서를 6개, 8개, 12개를 4각형 모양으로 배치해 두었다. 영상화에 가장 적합한 센서 개수를 구하는 것은 과량의 센서를 부착함으로써 불필요한 낭비를 줄이는 점에 중요한 의미를 둔다. 또 실제 실험에서 신호 입출력 배열 센서를 부착하였을 때 환경적인 원인으로 인하여 탐촉자가 동작하지 못할 때의 비상의 경우를 대비하여 최적의 센서를 부착하는 것은 재질의 노화, 부식 및 결합의 추출에 큰 의미를 가진다.



(a) BEM modeling for the plate with a central defect



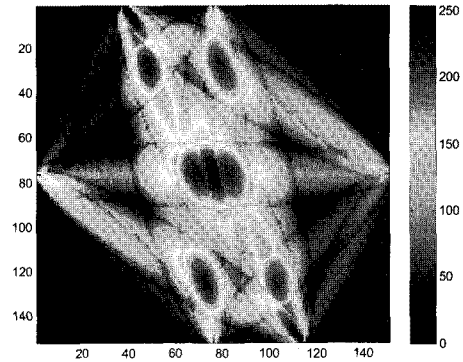
(b) at 25 mm



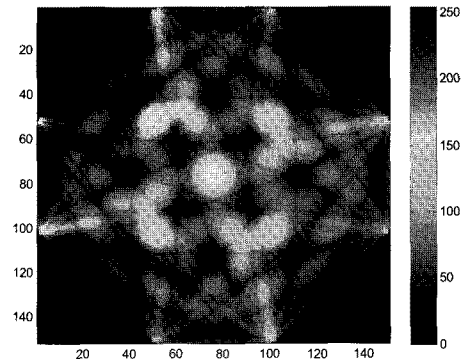
(c) at 45 mm

Fig. 7 Reflection signals with 25 mm, 45 mm from defect

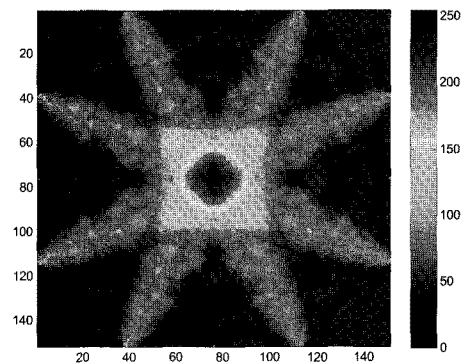
센서 6개를 비대칭으로 4각형으로 부착하였을 때 결합부를 정확하게 나타내지 못하고 있다. 센서 8개일 때는 결합부를 나타낼 수는 있지만, 형상이 흐릿하다. 실제 실험에서 정확한 결합의 정보를 얻으려면 최소 12개의 센서가 필요함을 알 수 있다. BEM 모델링을 사용한 유도초음파의 특징과 토모그래피 영상화를 결합한 연구는 추후의 mock up 테스트와 실제 실험데이터를 이용한 토모그래피 해석에 이론적 토대를 마련해 준다.



(a) 6 transducers



(b) 8 transducers



(c) 12 transducers

Fig. 8 Convergence of GW tomography with respect to the number of transducers

4. 결론

본 연구에서는 평판 구조물의 결함 시각화를 위해 유도초음파 신호를 이용하여 토모그래피 영상화를 수행하였다. 평판에서 램파의 전파 신호를 경계 요소법을 도입하여 해석적으로 획득하였다. 사용되는 센서 설치개수가 결함 영상에 많은 영향을 미침을 확인하였다. 향후, 제안한 기술을 이용하면 평판 구조물의 램파 기반 토모그래피 영상화를 효율적으로 수행하는데 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2007~2009 부산대학교 교내학술연구 지원사업, BK21사업, WCU사업 및 표준과학연구원 연혁연구사업의 지원에 의하여 수행되었기에 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

- [1] T. R. Hay, R. L. Royer, H. D. Gao, X. Zhao and J. L. Rose, "A comparison of embedded sensor Lamb wave ultrasonic tomography approaches for material loss detection," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 15, pp. 946-951, (2006)
- [2] J. K. Van Velsor, H. Gao and J. L. Rose, "Guided-wave tomographic imaging of defects in pipe using a probabilistic reconstruction algorithm," *BINDT*, Vol. 49, pp. 532-537, (2007)
- [3] D. P. Jansen and D. A. Hutchins, "Lamb wave tomography," *IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 1017-1020, (1990)
- [4] J. Pei, M. I. Yousuf, F. L. Degertekin, B. V. Honein and B. T. Khuri-Yakub "Lamb wave tomography and its application in pipe erosion/corrosion monitoring," *IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 795-798, (1995)
- [5] E. V. Malyarenko and M. K. Hinders, "Ultrasonic Lamb wave diffraction tomography," *Ultrasonics*, Vol. 39, pp. 269-281, (2001)
- [6] K. R. Leonard, E. V. Malyarenko and M. K. Hinders, "Ultrasonic Lamb wave tomography," *Inverse Problems*, Vol. 18, pp. 1795-1808, (2002)
- [7] K. R. Leonard and M. K. Hinders, "Lamb wave tomography of pipe-like structures," *Ultrasonics*, Vol. 43, pp. 574-583, (2005)
- [8] Younho Cho, "Understand and application about guided wave," *NDE Learned Journal*, Vol. 21 pp. 446-463, (2001)
- [9] 최영권, "유도초음파 모드전이에 대한 시간영역 전산모사 연구", 부산대학교 공학석사 학위논문, (2007)