

## 두께감육 평가를 위한 비접촉식 초음파 센서 네트워크를 이용한 토모그래프 기술 개발

이주민<sup>a</sup>, 김용권<sup>b</sup>, 박익근<sup>c\*</sup>

## Development of Tomograph Technique for Evaluating Thickness Reduction using Noncontact Ultrasonic Sensor Network

J. M. Lee<sup>a</sup>, Y. K. Kim<sup>b</sup>, I. K. Park<sup>c\*</sup><sup>a</sup> Graduate School of Energy & Environment, Seoul National Univ. of Science & Technology, Seoul 139-743, Republic of Korea<sup>b</sup> Technology R&D Institute, KEPCO Plant Service & Engineering, Gyeonggi-do 463-726, Republic of Korea<sup>c</sup> Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul National Univ. of Science & Technology, Seoul 139-743, Republic of Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	8	August	2013
Revised	9	November	2013
Accepted	28	December	2013

## Keywords:

Electromagnetic acoustic transducer  
 Shear horizontal plate waves  
 Tomograph  
 Thickness reduction  
 Noncontact  
 Time of flight

## ABSTRACT

This paper describes a tomographic imaging technique for evaluating the thickness reduction of a plate-like structure using a noncontact sensor network based on an electromagnetic acoustic transducer that generates shear horizontal plate waves. Because this technique is based on the effect of mode cutoff and time of flight of guided waves caused by a change in thickness, the tomographic image provides information on the presence of defects in the structure. To verify the performance of the method, artificial defects with various thickness reduction ratios were machined in an aluminum plate, and the tomographic imaging results are reported. The results show that the generated tomographic image displays the thickness reductions and can identify their locations. Therefore, the proposed technique has good potential as a tool for health monitoring of the integrity of plate-like structures.

## 1. 서론

원자력/화력 발전소, 석유/화학 플랜트, 선박, 항공기와 같은 대형 구조물은 장기간에 걸쳐 운행할 뿐만 아니라 고온, 고압 및 복합적인 환경에 노출된다. 이러한 환경에서 오랫동안 가동된 구조물은 재료의 물성저하를 일으키는 경년열화(material degradation)가 발생한다. 경년열화는 가동연수가 증가함에 따라 경년적 열화요인인 응력부식균열, 피로, 마모, 부식 등에 큰 영향을 주는 인자로 설비의 손상 및 파괴사고의 원인이 된다. 이에 열화요인에 대한 정량적인 평가는 매우 중요하다. 따라서 구조물의 안전성 및 건전성을

확보하기 위해서 주기적으로 비파괴평가(nondestructive evaluation; NDE)를 수행하고 있으며, 지속적으로 새로운 비파괴평가기술개발에 대한 연구에 대한 필요성과 산업체에 적합한 기술개발의 요구가 증가하고 있는 추세이다.

발전소와 같은 대형 구조물이 배관이나 박판 구조물인 경우, 구조물의 손상을 진단하는데 비파괴평가기법으로 유도초음파가 큰 장점을 가지고 있어 활발히 연구되고 있다<sup>1-3)</sup>. 기존의 유도초음파 기술은 결함특성, 즉 크기나 형상에 대한 정확한 정보를 제공하지 못하여 이를 보완하기 위해 여러 개의 센서를 장착하거나 검사부위를 탐상하여 이미지화하는 연구를 수행하고 있다. 현재 유도초음파

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6332

Fax: +82-2-977-6332

E-mail address: ikpark@seoultech.ac.kr (I. K. Park).

를 이용한 손상진단 기술분야에서 이미지는 최첨단 기반 기술에 해당하며 국제적인 기술연구의 추세로 가장 활발하게 진행되고 있는 연구 분야이다. 유도초음파의 이미지는 적절한 센서 네트워크 구성이 필수적인데 현재 PZT 센서를 이용하는 방법이 널리 사용되고 있다. 실 구조물에 PZT 센서 네트워크를 구성하기 위해서는 많은 양의 센서를 부착해야하는데 이는 시스템 구성에 어려움이 있다. 따라서 대형 구조물에 적합한 유도초음파의 이용이 가능한 센서 네트워크를 구성하여 구조물의 손상 진단을 위한 토모그래피 기술 개발의 필요성이 있다.

유도초음파 기법을 실제로 적용하기 위한 연구는 1990년대 이후로 본격적으로 수행되어 기초 기술 개발이 대부분 성숙 단계에 접어들어 이미 산업계에 적용이 되고 있다. 또한 검사신뢰성 향상을 위한 자동화에 적합한 비접촉식 유도초음파 기법 개발에 관련된 연구가 현재 활발히 진행되고 있다<sup>[4-6]</sup>.

본 연구에서는 두께감옥 평가를 위한 비접촉식 센서 네트워크를 이용한 토모그래피 기술 개발하기 위한 선행 연구로 이론적 분산선도와 SH-EMAT과 모드의 선택적인 송·수신에 따른 전파시간차를 적용하였다. 토모그래피 기술의 기반기술인 두께감옥 평가 기술<sup>[9,10]</sup>은 선행연구결과를 활용하여 두께감옥을 평가하고 두께감옥을 이미지화하고자 한다.

## 2. SH-EMAT과 모드의 선택적 수신

유도초음파의 한 종류인 SH파를 송수신하는 SH-EMAT은 PPM (Periodic permanent magnet)형 영구자석과 spiral 코일로 구성되어 있다. 이를 이용하여 발생하는 초음파 모드는 PPM형 영구자석의 요소 간격에 영향을 받으며 발생주파수에 따라 모드를 선택할 수 있다<sup>[9,10]</sup>.

SH파의 발생을 위해 2 mm 두께의 알루미늄 박판에 대한 횡파 속도로부터 Fig. 1과 같은 분산선도를 얻었다. Fig. 1은 주파수에 따른 위상속도(Phase velocity) 분산선도(Dispersion curve)와 군속도(Group velocity) 분산선도를 나타내고 있다. Fig. 1에서 나타낸 직선의 기울기 값은 식 (1)과 같은 관계를 갖는다.

$$\lambda = \frac{C_p}{f} = 2 \times \Delta d \quad (1)$$

여기서,  $C_p$ 는 SH파의 위상속도,  $f$ 는 주파수,  $\lambda$ 는 SH파의 파장 그리고  $\Delta d$ 는 영구자석의 요소 간격이다. 두께 2 mm의 알루미늄 박판에 SH파를 발생하기 위해 사용된 EMAT의 자석의 간격이 2.15 mm이므로 발생모드의 파장은 4.30 mm이다. 따라서 위상속도 분산선도에서 4.30 mm의 파장을 나타내는 직선과 교차되는 지

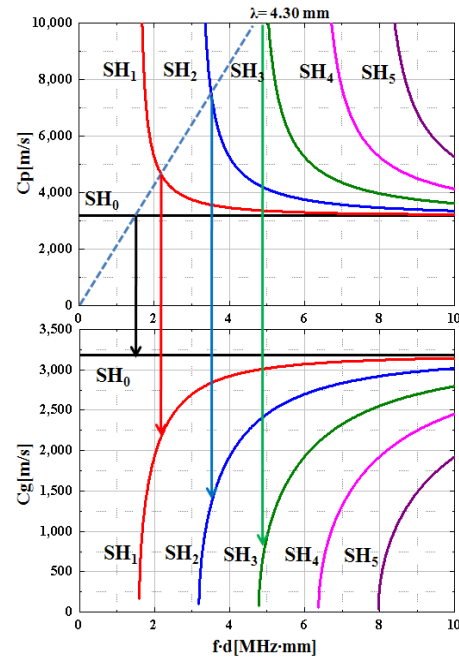


Fig. 1 Phase velocity and group velocity dispersion curves for SH-EMAT waves in an aluminum plate (thickness 2 mm)

점에 해당하는 SH파의 모드가 발생하게 된다.

## 3. 토모그래피 알고리즘

구조물의 두께감옥 평가를 위한 토모그래피 알고리즘을 개발하였으며 Fig. 2와 같은 알고리즘 구조로 설계하였다. 이 알고리즘은 (1)유도초음파 신호를 취득하여 (3)모드 컷오프 현상과 (4)측정 시간 변화를 이용하여 (5)결함의 유무를 판별하고 결함이 존재하는 경우에는 측정 시간 변화를 통해 결함의 감옥량을 분석하게 된다<sup>[9,10]</sup>. 이 모드 컷오프 현상과 측정 시간 변화를 통해 (6)측정 라인의 결함 유무를 토모그래피 이미지에 표시하고, 모든 센서 측정 라인의 결과를 조합하여 결함 이미지를 구현한다.

## 4. 실험 장치 및 시험편

### 4.1 비접촉식 초음파 시스템

Fig. 3은 알루미늄 박판의 두께변화를 평가하기 위해 구성된 시스템의 개요도이다. 유도초음파 송수신을 위해 초음파 펄서/리시버(RITEC, RPR-4000)가 사용되었다. 펄서/리시버에 의해 발생된 초음파 펄스는 임피던스 매칭박스를 통해 송신 EMAT에 보내져 SH파를 발생시킨다. 그리고 발생된 SH파는 동일한 형태의 EMAT으로 수신되어 프리앰프(WIS사)에서 증폭된 후 신호처리를 위해 디지털 오실로스코프(Lecroy사)와 연결되어 신호의 평균

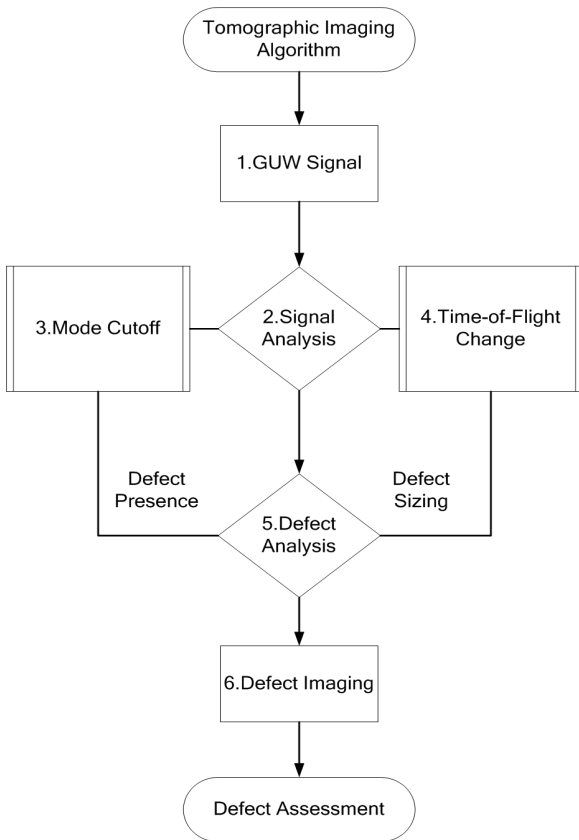


Fig. 2 Tomographic imaging algorithm for analysis of guided wave

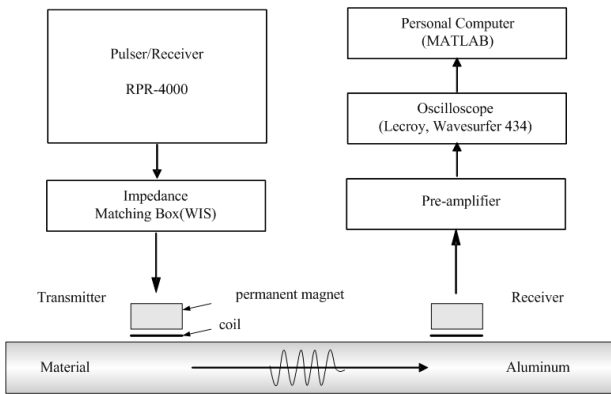


Fig. 3 Configuration of noncontact system for sensor network

화 및 주파수 분석 등을 수행할 수 있도록 구성하였다.

두께감육을 평가하기 위해서 pitch-catch 방식을 활용하여 측정 파라미터인 진폭과 전파시간차를 유도초음파 모드에 따라 측정을 통해 결함의 크기평가가 가능하지만 결함의 위치를 확인할 수 없는 문제점이 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 음향방출시험에서 활용하는 위치표정법인 지역표정법을 활용하여 측정라인별로 결함을 분석하여 위치를 확인하였다. 이를 위해 32개의 센서를 이용하는 센서 네트워크를 형성하여 신호분석에 활용하였다.

Table 1 Size and thickness reduction of defects in the specimen

No.	Dia. [mm]	Thickness reduction [%]
1	40	3.2
2		6.8
3		4.9
4		3
5		6.8
6		4.9

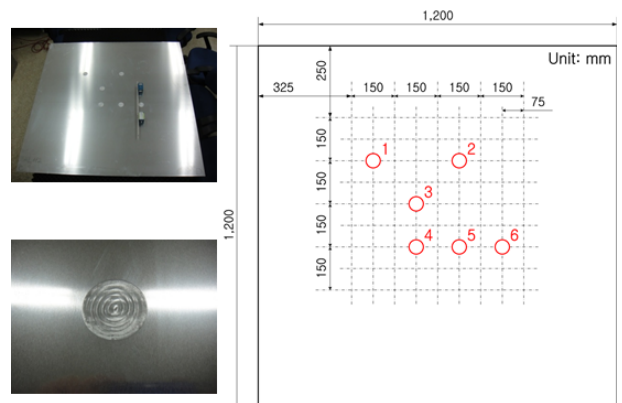


Fig. 4 The aluminum plate specimen geometry

#### 4.2 두께감육 시험편

박판에서의 두께변화에 의한 비접촉 SH파의 모드분산성 분석을 위해 2 mm 두께의 알루미늄 박판에 인공결함을 가공하였으며, 그 형상은 원형으로 직경이 40 mm 이며, 두께의 약 3~7%에 해당하는 결함 깊이를 가지도록 시험편에 기계 가공으로 제작하였다. 인공결함은 총 6개로 구성되어 있으며 자세한 결함정보는 다음 Table 1과 같다. Fig. 4는 시험편의 형상과 결함 형상을 나타낸다.

#### 5. 실험 방법

알루미늄 박판에서 두께변화를 평가하기 위해 SH-EMAT을 이용하여 비접촉으로 SH파를 송수신하였다. 이때 초음파 펄서/리시버의 주파수 범위는 약 0.4~2 MHz이다. SH파의 가진 주파수는 이론적인 분산선도에서 파장과 위상속도의 관계로부터 확인할 수 있으며, SH파의 여러 모드 중에서 SH<sub>1</sub>, SH<sub>2</sub> 모드를 발생하기 위해서 이론적인 분산선도로부터 가진 주파수를 선정하였다. SH파의 파장과 관련된 영구자석의 간격은 1.59 mm, 2.15 mm로 파장이 3.18 mm, 4.3 mm인 SH파가 발생된다. 예를 들어 파장이 3.18 mm 인 SH<sub>1</sub> 모드를 발생하기 위한 가진 주파수는 1.255 MHz이다. 한 쌍의 SH-EMAT 간격은 600~848.5 mm로 하여 피치-캐치 방식으로 SH파를 송수신하였으며 탐촉자의 위치는 결함의 양

쪽에 배치하였다. 이때 시험편과 EMAT의 리프트오프는 0.1 mm로 설정하였다. 그리고 수신된 신호는 가진 주파수에 해당하는 주파수 대역으로 필터링하였으며 사용된 필터는 버터워스(Butterworth) 필터로 MATLAB을 이용하였다.

## 6. 두께감육 토모그래프

Fig. 5는 총 81개의 센서측정라인으로부터 분석된 두께감육평가 결과를 기반으로 한 토모그래피 이미지를 나타내고 있다. 토모그래피 알고리즘을 통해 결함의 위치를 이미지화하였으며, 결과 이미지의 오른쪽 컬러바(colorbar)는 두께감육결함의 결함존재확률을 나타내고 있어 수치가 높을수록 결함이 존재할 확률이 높아진다. Fig. 5(c)와 같이 50% 이상의 결함존재확률로 이미지 레벨을 조절하면 실제 결함 위치에 보다 근접하는 결과를 얻을 수 있다. 이 결과 이미지를 통해 분석하면 측정 센서의 주변은 측정 불능 영역이 존재하게 되는데, 이는 센서측정라인 부족에 인한 부분이다. 이를 개선하기 위해 센서측정라인을 증가시키면 보다 넓은 영역의 결함위치 정보를 이미지화 할 수 있을 것으로 판단된다.

## 7. 결론

본 연구는 부식이나 마모에 의한 두께감육을 모니터링할 수 있는 비접촉식 초음파와 센서 네트워크를 이용한 토모그래피 기술을 개발하기 위한 선행연구이다. 토모그래피 기술은 유도초음파의 분산특성을 이용한 토모그래피 알고리즘을 통해 구현하였다. 그리고 토모그래피 기술을 검증하기 위해 두께감육 결함을 이미지화 하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

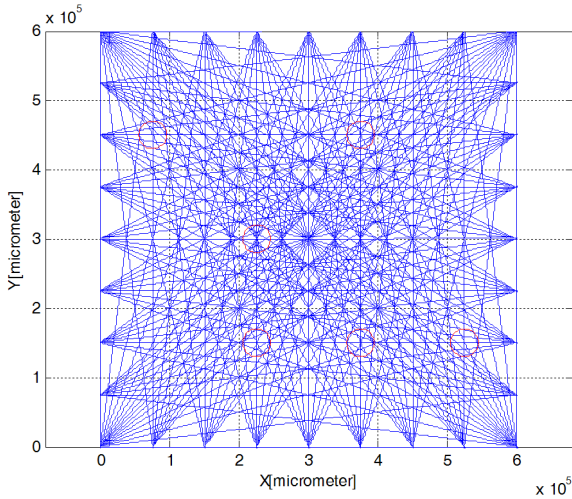
- (1) 비접촉식 센서 네트워크를 구성하였으며, SH-EMAT을 이용하여 총 81개의 측정라인에서 두께감육 결함 신호를 취득하였다.
- (2) 모드 컷오프와 측정 시간 변화를 이용하여 토모그래피 알고리즘을 구현하였다.
- (3) 토모그래피 알고리즘을 통해 약 3~7% 두께감육 결함을 이미지화하여 결함의 위치를 추정할 수 있음을 확인하였다.

## 후기

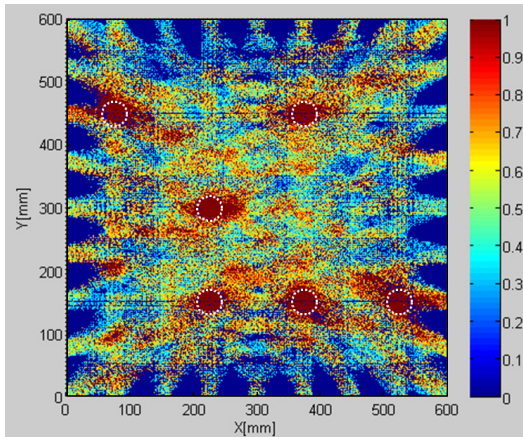
이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

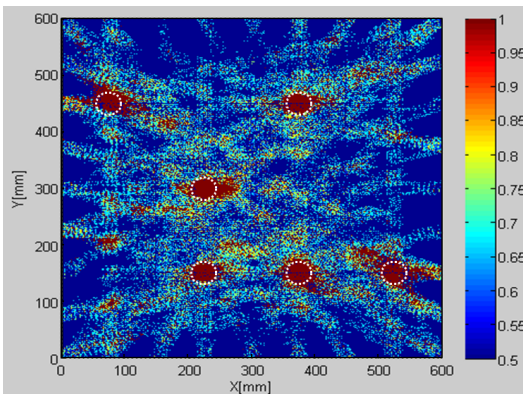
- [1] Rose, J. L., 1995, Recent advances in guided wave NDE, Proc. 1994 IEEE Ultrason. Symp., 761-770.
- [2] Cho, Y. H., 2001, Understanding and Application of Ultrasonic



(a) Measured line and location of defects



(b)



(c)

Fig. 5 Tomographic image of thickness reduction by using algorithm

- Guided Waves, *Journal of the KSNT* 21:4 446-460.
- [3] Park, I. K., Kim, Y. K., Kim, H. M., Song, W. J., Cho, Y. S., 2006, Long Range Ultrasonic Guided Wave Technique for Inspection of Pipes, *Key Engineering Materials* 321-323 799-803.
- [4] Tuzzeo, D., Lanza di Scalea, F., 2001, Noncontact Air-Coupled Guided Wave Ultrasonics for Detection of Thinning Defects in Aluminum Plates, *Res. Nondestructive Evaluation* 13:2 61-77.
- [5] Luo, W., Rose, J. L., 2003, Guided wave thickness measurement with EMATs, *Insight* 45:11 1-5.
- [6] Hirao, M., Ogi, H., 2003, *EMATs for Science and Industry Noncontacting Ultrasonic Measurements*, Kluwer Academic Publisher, USA.
- [7] Gao, H., Rose, J. L., 2006, Ultrasonic Sensor Placement Optimization in Structural Health Monitoring Using Evolutionary Strategy, *Rev. Progress in QNDE* 25 1687-1693.
- [8] Gao, H., Guers, M. J., Rose, J. L., Zhao, G., Kwan, C., 2006, Ultrasonic Guided Wave Annular Array Transducers for Structural Health Monitoring, *Rev. Progress in QNDE* 25 1680-1686.
- [9] Park, I. K., Kim, Y. K., 2010, Mode Characteristics Analysis of the SH-EMAT Waves for Evaluating the Thickness Reduction, *Journal of the KSMTE* 19:2 198-203.
- [10] Kim, Y. K., Park, I. K., 2010, Evaluation of Thickness Reduction in an Aluminum sheet Using SH-EMAT, *Journal of the KWS* 28:2 68-72.