

## MsS Guided Wave를 이용한 결함 신호의 분석에 관한 연구

### A Study on MsS Guided Wave Scattering from Defects

최부일\*, 조운호\*\*<sup>†</sup>, 이준현\*\*, 신동철\*\*

Boo Il Choi\*, Younho Cho\*\*<sup>†</sup>, Joon Hyun Lee\*\* and Dong-Chul Shin\*\*

**초 록** 스테인레스 스틸 배관의 결함에 대한 MsS의 비틀림모드 신호와 BEM 모델링의 SH모드 신호의 특성을 살펴보았다. 비틀림모드 신호와 SH모드신호의 비교를 위해 스테인레스 스틸 배관의 결함은 깊이와 폭을 달리하면서 원주방향으로 360도 가공하였다. MsS의 비틀림모드 신호분석 결과 원주방향 결함을 모두 탐지하였으며 깊이 변화에 따라 신호 진폭의 변화가 확인되었다. 하지만 원주방향 결함의 폭 변화는 일정한 경향이 나타나지 않았다. BEM 모델링의 SH 모드 신호 분석 결과 깊이 변화의 경우 비틀림모드 신호와 유사한 결과가 나타났지만, 폭 변화는 신호 진폭의 변화가 일어났다. 본 연구를 통하여 배관의 원주방향 결함에 대한 비틀림모드와 SH모드의 비교 분석을 통하여 신호 특성을 확인하였고 배관의 축대칭 결함에 대해 SH모드 모델링으로도 신호 예측이 가능함을 알 수 있었다.

**주요용어:** 유도초음파, 자기변형, 비틀림파, 경계요소법, 수평회파

**Abstract** An investigation has been made on the relationship between characteristics of torsional mode signal in MsS and SH mode signal in BEM modeling for the defect of stainless steel pipe. In order to compare torsional mode signal with SH mode signal of defect in stainless steel pipe, specimens were made by changing size of depth and width along to circumferential direction 360 degrees. All the defects was detected by torsional mode signal of MsS, especially according to the change of depth size, amplitude of signal was changed. But width change for the circumferential defects has no certain tendency. SH mode signal of BEM modeling shows similar results with torsional mode, with change makes amplitude variation of signal. In this paper, the characteristics of torsional mode and SH mode signals were found. It is possible to predict the circumferential defects for the pipe by SH mode modeling.

**Keywords:** Guided Wave, Magnetostriction, Torsional Wave, Boundary Element Method(BEM), Shear Horizontal Wave

#### 1. 서 론

최근 가파른 유가 상승 및 심각한 환경오염으로 인해 태양광에너지, 풍력에너지와 같은 신재생에너지원들이 크게 각광받고 있다. 하지만 아직 높은 경제성을 확보하지 못한 상황에서 원자력 에너지가 가장 현실적이고 강력한 대안으로서 차세대 그린에너지로 재조명되고 있다. 원자력 발전설비의 대구경

파이프나 소구경 튜브와 같은 원통형 구조물의 결함을 검출하는 비파괴탐상기법으로 초음파탐상검사(UT), 와전류탐상검사(ECT), 자분탐상검사(MT), 침투탐상검사(PT) 등과 같은 여러 가지 방법들이 있다. 유도초음파(ultrasonic guided wave)는 구조물의 기하학적인 구조를 따라 전파하는 파로서, 광범위한 비파괴탐상을 효율적으로 수행할 수 있다는 점에서 여러 분야에 적용될 수 있고, 기존의 종파나

횡파를 사용한 국부검사법에 비해 탐촉자의 이동 없이 고정된 지점으로부터 대형 설비 전체를 한번에 탐상할 수 있을 뿐만 아니라 절연체나 코팅재의 제거 없이 구조물이 설치된 그대로 검사를 수행할 수 있어 기존의 비파괴기법에 비해 시간적 경제적 효율이 뛰어나다. 이렇듯 비파괴 유도초음파 검사법은 소비하는 에너지양을 획기적으로 줄여 결과적으로 이산화탄소 배출까지 크게 낮출 수 있는 친환경 검사법이다. 또한 보온재나 제한된 공간으로 인하여 검사자의 접근이 곤란하고 복잡하다던가, 다양한 피검사체의 형상을 따라 원거리 초음파탐상이 어려운 발전설비의 보수검사에 적극 활용되고 있다[1-6]. 특히, 미국의 Southwest Research Institute(SwRI)는 장거리 배관의 결함을 신속하게 탐상하기 위해 배관에 유도초음파를 발생시키는 자기변형 탐촉자(MsS) 장비를 개발하여 다양한 분야에 적용하고 있다.

유도초음파에서 비틀림파(torsional wave)의 첫 번째 모드인 T(0,1) 모드는 분산성이 없어서, 봉이나 배관내의 결함 진단을 효과적으로 수행할 수 있다. SH파는 표면과 수평 방향으로 입자가 진동하는 모드로써 모드변환이 없고 분산특성이 단순하여 신속한 신호해석이 가능하다[7].

본 연구에서는 스테인레스 스틸 배관의 원주방향 결함에 대하여 자기변형센서를 사용하여 비틀림모드 신호와 경계요소법(BEM) 모델링을 통하여 얻은 SH 모드 신호의 비교분석을 통하여 각 모드의 특성과 악 및 다양한 결함 신호별 정량적 해석을 시도하였다.

## 2. 이론

### 2.1. 자기변형 현상 및 응용

자기변형(magnetostriction)은 강자성 재료가 자기장 아래 놓일 때 기계적인 변형이 발생하는 현상을 말하며 주울 효과(Joule effect)라고도 한다. 이것의 역현상으로 재료에 응력이 작용할 때 재료 내부의 자기적 상태가 변화하는 현상을 역자기변형 현상 또는 빌라리 효과(Villari effect)라고 한다[8].

강자성 재료가 자기장 아래에 놓일 때의 부분적인 길이 변화로 정의되는 자기변형은 식 (1)로 표시된다.

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \tag{1}$$

식에서  $\lambda$ 는 자기변형,  $l$ 과  $\Delta l$ 은 각각 변형전의 길이와 변형에 의한 길의 변화이다. 강자성 재료는

큐리 온도(Curie Temperature)를 통과하면서 자구가 형성되고 자구가 생성되어 있는 재료에 외부에서 자기장을 가하면 자구의 재배열이 일어나면서 자기변형이 생긴다. 이를 그림으로 설명하면 Fig. 1 과 같다. 즉, 그림에서 큐리 온도 이상에서 무질서하게 배향되어 있던 자기모멘트가 큐리 온도 이하에서 인접한 자기모멘트가 같은 방향으로 정렬하면서 자기변형이 일어나 길이 변화가 생기게 된다. 이때 외부 자기장이 인가되면 자기장의 방향에 따라 자기모멘트들이 한쪽 방향으로 정렬 하면서 더 큰 자기변형이 일어난다. 자기변형센서는 외부 자기장 부가에 의한 자기변형 특성을 이용한다. 즉, 자기장의 세기를 변화시킬 때 일어나는 자기변형을 초음파 발생원으로 이용하는 것이다[9].

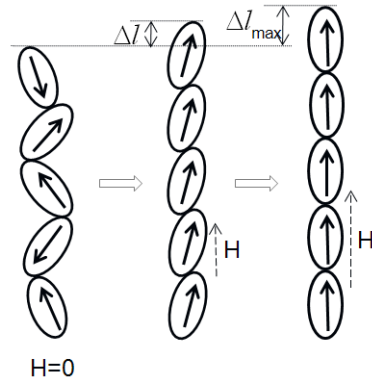


Fig. 1 Mechanism of magnetostriction

### 2.2. SH모드 경계요소법

혼합 경계요소법에서 일반 모드 표현 기법은 산란파의 원거리장 방식으로 나타낸다. 총 변위와 트래션(traction)은 입사되고 산란되어 전파하는 모든 파장의 중첩이다. 결함을 가진 영역을 모델링하는 경계치 문제에서 SH파는 식 (2)와 같은 경계 적분 방정식으로 나타낸다[10,11].

$$C(\vec{\xi})u(\vec{\xi}) + \int_{\Gamma} \frac{\partial u^*(\vec{\xi}, \vec{\chi})}{\partial n} u(\vec{\chi}) d\Gamma(\vec{\chi}) = \int_{\Gamma} u^* \frac{\partial u(\vec{\chi})}{\partial n} d\Gamma(\vec{\chi}) \tag{2}$$

$\Gamma$  : total boundary of the modeling area

$\vec{\xi}$  : position vector of the unit point source load

$\vec{\chi}$  : field point

### 3. 실험

#### 3.1. 시험편

본 연구를 위한 유도초음파 시험 재료는 스테인레스 스틸 배관으로 Table 1과 같다. 시험편의 결함은 자기변형센서로 측정된 비틀림모드 신호와 SH BEM 모델링의 SH모드 신호 결과와 비교 분석을 위해 원주방향으로 360도 가공하여 Table 2와 같다.

#### 3.2. 분산선도

Table 1 으로부터 구한 스테인레스 스틸의 SH 모드 분산선도는 Fig. 2, Fig. 3와 같다.

Table 1 Geometric and velocity of stainless steel pipes

Material	Stainless steel
Length	1 m
Outside Diameter	114 mm
Thickness	6 mm
Longitudinal wave velocity	3,120 m/s
Shear wave velocity	7,390 m/s
Density	8.03 g/cm <sup>3</sup>
Torsional wave	3,203 m/s

Table 2 Defects of specimens

width (mm)	depth (mm)
0 (결함 X)	0 (결함 X)
1	1
	2
	3
2	1
3	

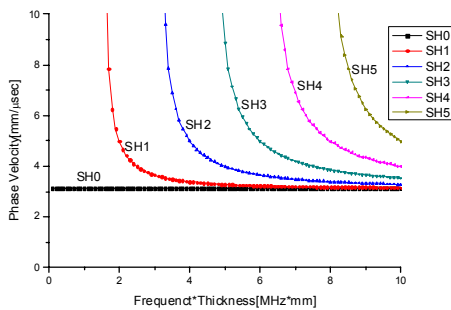


Fig. 2 Phase velocity dispersion curves in stainless steel

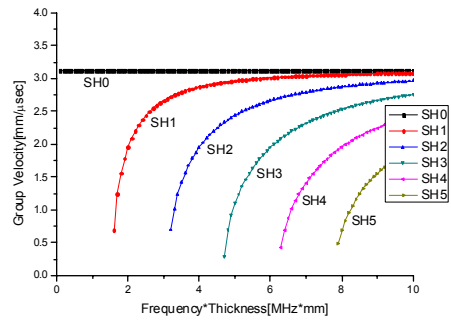


Fig. 3 Group velocity dispersion curves in stainless steel

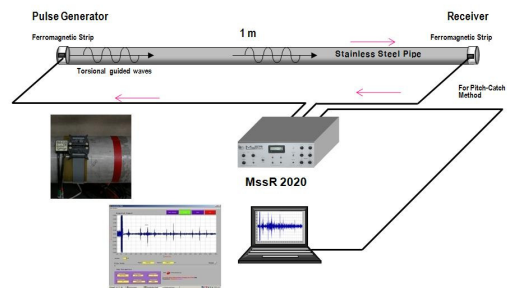


Fig. 4 Experimental setup

#### 3.3. 실험 장치 구성 및 방법

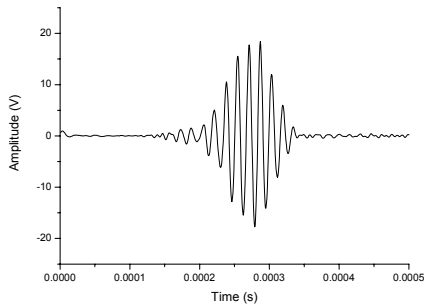
실험에 사용한 자기변형센서는 Fig. 4와 같이 미국 Southwest Research Institute(SwRI)에서 개발한 MsSR 2020 장비로 비틀림모드를 사용하였다. 길이 1 m의 스테인레스 스틸 배관 양쪽 끝에서부터 50 mm에 니켈 strip 센서를 부착하고 영구자석으로 자화시켰다. 자기변형 초음파 발생장치를 사용하여 주파수 64 kHz, 128 kHz, 비틀림모드 신호를 pitch catch 방식으로 가진 및 수신하여 배관 결함 신호를 측정하였다.

### 4. 결과 및 고찰

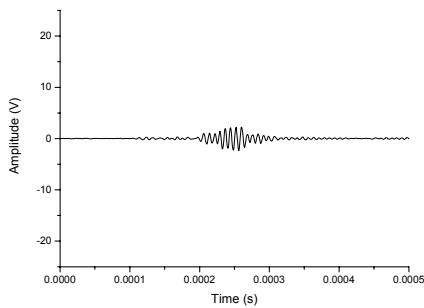
#### 4.1. MsS 실험

Fig. 5에서 결함이 가공되기 전에 수집된 기준신호를 제시하였다. 동일한 재료의 배관이라 하더라도 배관의 상태 및 니켈 strip의 부착조건 등에 따라서 수신되는 진폭에 영향을 받게 되므로 결함이 있는 배관의 수신 신호와 비교해서 경향성이 약간 떨어지는 것을 확인하였다.

4.1.1. 결함이 없는 배관



(a) frequency 64 kHz

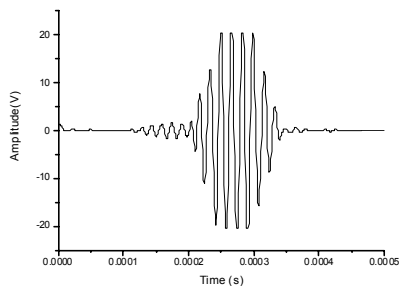


(b) frequency 128 kHz

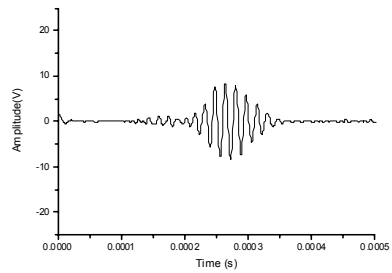
Fig. 5 64, 128 kHz signal results by experiment

4.1.2. 결함 깊이 변화

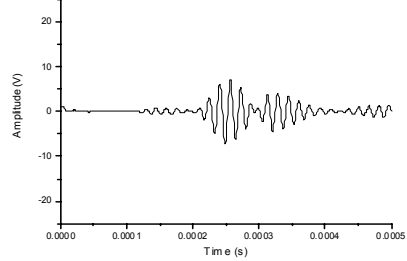
Table 2와 같이 배관의 원주방향 결함의 깊이를 다르게 하면서 실험한 결과, Fig. 6와 Fig. 7과 같이 나타났다. 결함의 깊이가 커질수록 진폭의 크기는 점점 작아지는 것을 확인할 수 있다. 비틀림파의 반사율은 배관의 단면적대비 결함면적에 비례하기 때문이다. 주파수 64 kHz가 128 kHz보다 상대적으로 진폭의 크기가 크게 나타나서 결함의 변화에 대해 눈으로 확인하기가 더 편하다.



(a) depth 1 mm

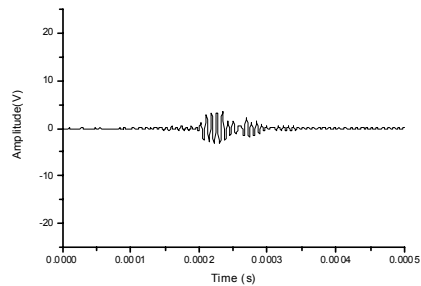


(b) depth 2 mm

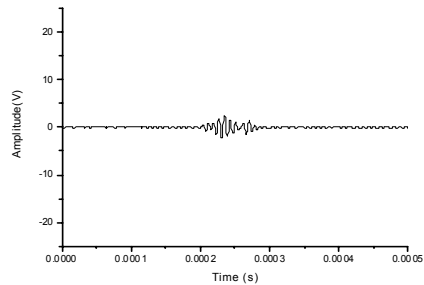


(c) depth 3 mm

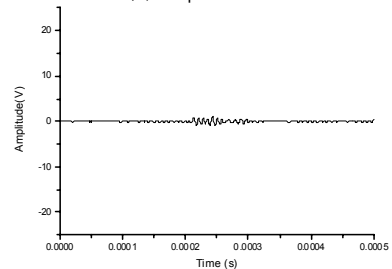
Fig. 6 Results of 64 kHz signal by experiment



(a) depth 1 mm



(b) depth 2 mm

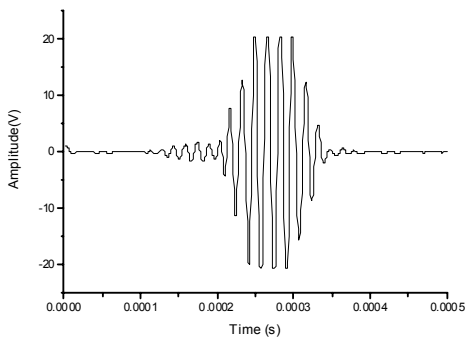


(c) depth 3 mm

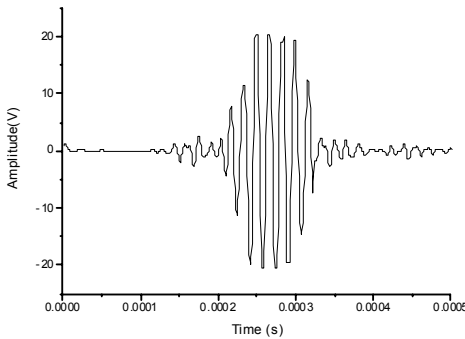
Fig. 7 Results of 128kHz signal by experiment

### 4.1.3. 결함 폭 변화

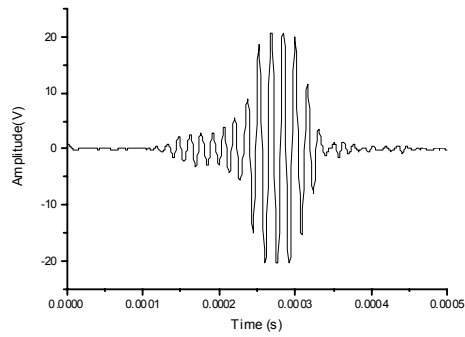
배관의 원주방향 결함의 폭을 Table 2와 같이 변화시켜 주었을 경우 Fig. 8과 Fig. 9에서와 같이 주파수 64 kHz와 128 kHz 모두 진폭의 변화가 거의 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 축방향 결함은 원주방향 결함보다 배관 대비 결함면적이 훨씬 작기 때문에 검출하기가 매우 힘들다. 그래서 배관의 원주방향 결함의 폭 변화시 배관의 결함 단면적의 변화가 적기 때문에 영향이 적게 나타났다.



(a) width 1 mm

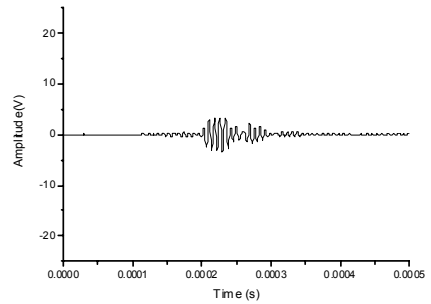


(b) width 2 mm

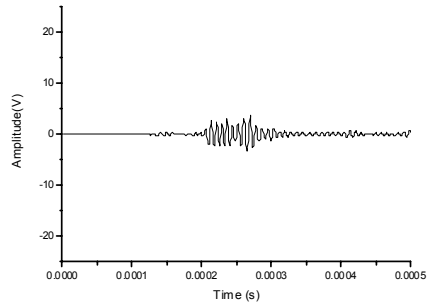


(c) width 3 mm

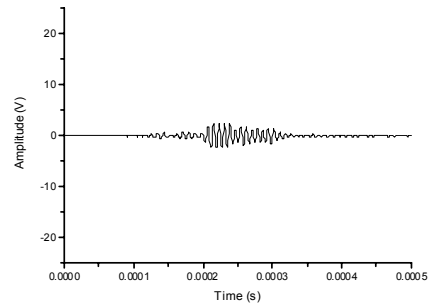
Fig. 8 Results of 64 kHz signal by experiment



(a) width 1 mm



(b) width 2 mm



(c) width 3 mm

Fig. 9 Results of 128 kHz signal by experiment

## 4.2. SH BEM 모델링

### 4.2.1. 결함 깊이 변화

앞에서 실험한 배관 대신 같은 두께와 길이를 가지는 스테인레스 스틸 평판에 대해 SH BEM 모델링을 실시하였다. Pitch catch 방식으로 주파수 64 kHz와 128 kHz의 SH0 모드를 발생시켜 결함의 깊이 변화에 따른 신호변화를 구했다. Fig. 10은 깊이 1 mm, 폭 1 mm의 결함을 가진 평판의 SH BEM 모델링 형상을 나타낸 것이다. 모델링한 결과, Fig. 11와 Fig. 12에서와 같이 결함 깊이에 따라 진폭이 점점 작아지는 것을 확인할 수 있다.

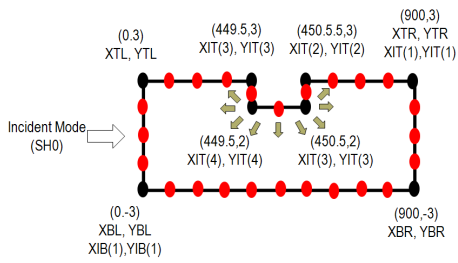
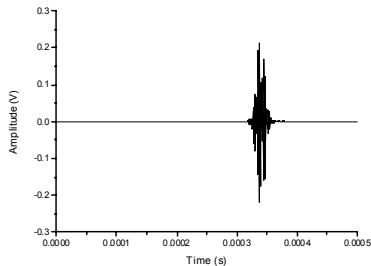
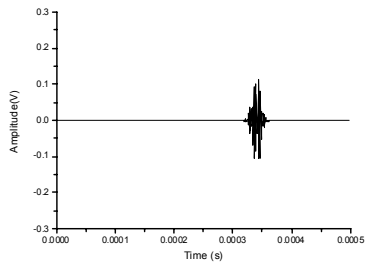


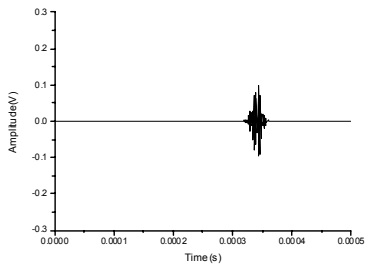
Fig. 10 Example of SH BEM modeling



(a) depth 1 mm



(b) depth 2 mm

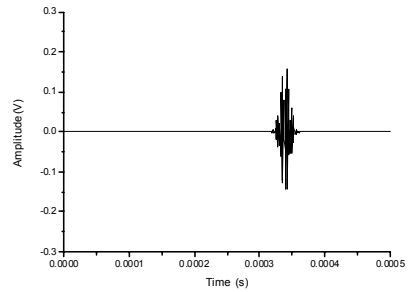


(c) depth 3 mm

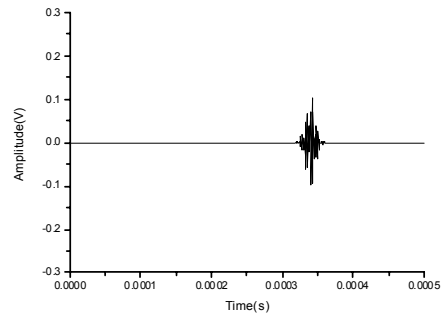
Fig. 11 Results of 64 kHz signal by SH BEM modeling

4.2.2. 결함 폭 변화

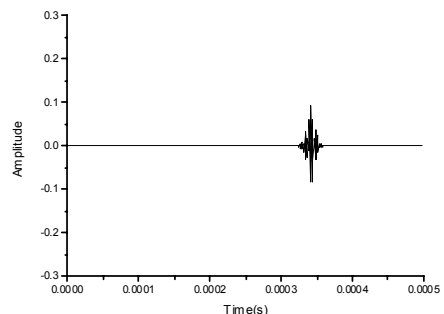
실험 결과와 비교하기 위해 평판의 결함 폭 변화에 따른 SH BEM 모델링을 하였다. 주파수 64 kHz, 128 kHz에서의 SH0 모드를 발생시켰다. Fig. 13과 Fig. 14에서 평판의 결함 폭 변화는 진폭 변화에 거의 영향을 끼치지 않는 것을 확인할 수 있다.



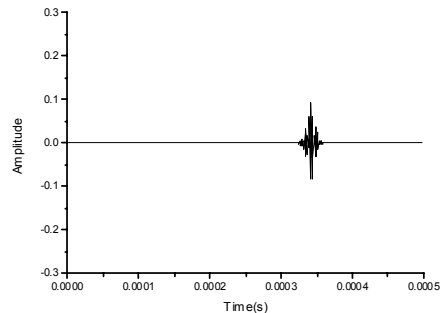
(a) depth 1 mm



(b) depth 2 mm

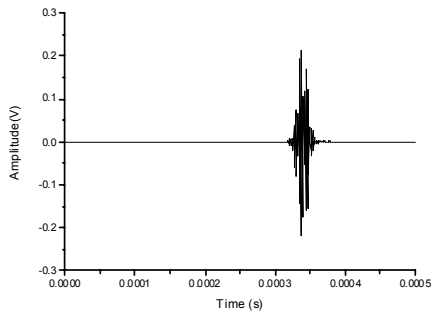


(b) depth 2mm

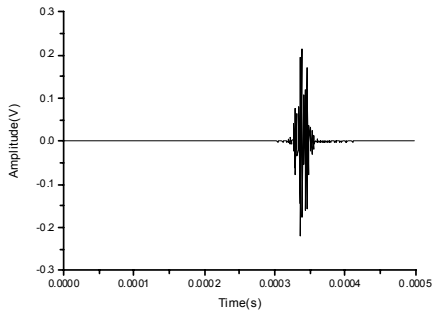


(c) depth 3 mm

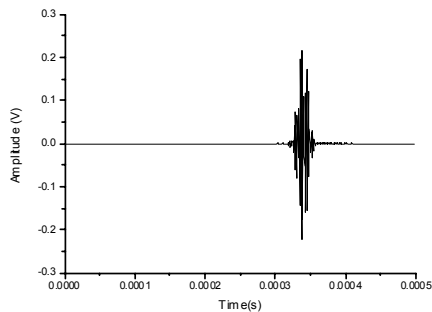
Fig. 12 Results of 128kHz signal by SH BEM modeling



(a) width 1 mm

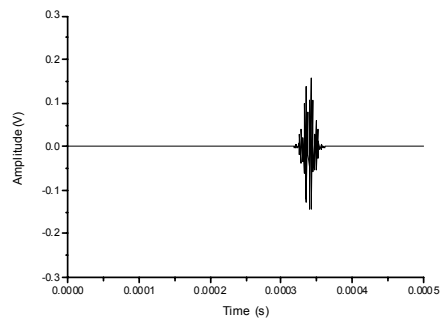


(b) width 2 mm

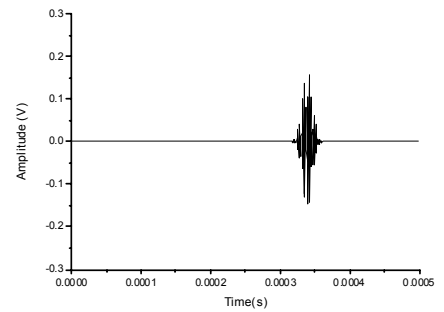


(c) width 3 mm

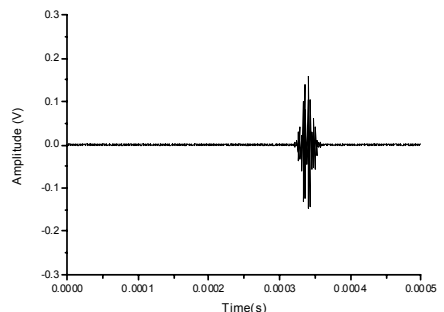
Fig. 13 Results of 64 kHz signal by SH BEM modeling



(a) width 1 mm



(b) width 2 mm



(c) width 3 mm

Fig. 14 Results of 128 kHz signal by SH BEM modeling

5. 결론

배관에서의 비틀림모드는 평판에서의 SH 모드와 물리적으로 동일한 특성을 가진다. 그래서 스테인레스 스틸 배관의 원주방향 결함에 대한 정량적인 분석을 위해 MsS 장비를 사용한 배관의 비틀림과 실험 결과와 평판의 SH파 BEM 모델을 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 결함의 깊이가 커질수록 배관의 비틀림과 실험 결과와 평판의 SH파 BEM 모델링 결과 모두 진폭의 변화가 점점 작아지는 것을 확인

할 수 있었다. 이는 비틀림파와 SH파의 반사율은 전체 단면적 대비 결함 면적에 비례하기 때문이다.

- (2) 결함의 폭을 변화시켜 주어도 배관의 비틀림과 실험 결과와 평판의 SH파 BEM 모델링 결과는 진폭의 변화가 거의 나타나지 않았다. 이는 전체 단면적 대비 결함 면적의 변화가 적기 때문이다.

정성적 실험신호 분석이 제한된 MsS 유도초음파 신호의 정량적 모드 분석을 위해 SH BEM 모델을 적용할 경우 다양한 결함 신호별 정량적 해

석을 위한 기초 자료 확보가 가능할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부 2009년도 원자력연구개발 사업비의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 조운호, "유도초음파에 대한 이해와 응용", 비파괴검사학회지, 제21권, 제4호, pp. 446-460 (2001)
- [2] S. J. Song, J. S. Park and H. J. Shin, "Guided wave mode selection and flaw detection for long range inspection of polyethylene coated steel gas pipes," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 21, No. 4, pp. 406-414 (2001)
- [3] D. N. Alleyne and P. Cawley, "Long range propagation of lamb waves in chemical plant pipework," Materials Evaluation, Vol. 52, No. 7, pp. 504-508 (1997)
- [4] Tatsuyuki Nagai, Masami Hyodo and Kenichi Takamura, "Long range ultrasonic technique for inspection of buried pipelines," Journal of the Japanese Society of Non-Destructive Inspection, Vol. 51, No. 10, pp. 622-627 (2002)
- [5] Peter J. Mudge and Alan M. Lank, "A long range method of detection of corrosion under insulation in process pipework," Journal of the Inspection, Vol. 46, No. 4, pp. 314-319 (1997)
- [6] 박익근, 김용권, 조운호, 안연식, 조용상, "Comb Transducer를 이용한 파이프 내 유도초음파 모드의 거동에 관한 연구", 비파괴검사학회지, 제24권, 제4호, pp. 142-150 (2004)
- [7] 박태성, 김태형, 김현목, 박익근, 김용권, 조용상, 안형근, "두께 감속 평가를 위한 SH파 모드의 분산 특성", 한국비파괴검사학회 춘계논문집, pp. 364-372 (2005)
- [8] 김운영, 박찬일, 한순우, 조승현, "자기변형 트랜스듀서를 이용한 유도 비틀림파의 발생 및 배관의 이상 진단", 한국소음진동공학회 논문집, 제14권, 제2호, pp. 144-149 (2004)
- [9] 안봉영, 김영주, 김영길, 이승석, "배관 결함 검출을 위한 자왜형 초음파 센서의 특성", 비파괴검사학회지, 제20권, 제1호, pp. 46-53 (2000)
- [10] J. L. Rose, S. P. Pelts and X. Zhao, "Detect characterization using SH guided waves," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 20, pp. 142-148 (2001)
- [11] X. G. Zhao and J. L. Rose, "Boundary element modeling for defect characterization potential in a wave guide," Int'l. Journal of Solids & Structures, Vol. 40, pp. 2645-2658 (2003)