

## 유도초음파를 이용한 복수기 튜브지지판 영역에서의 결함검출기법

김용권\* · 박익근\*,† · 박세준\*\* · 안연식\*\*\* · 길두송\*\*\*

\*서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

\*\*두산중공업 비파괴검사팀

\*\*\*한전 전력연구원

### A Technique for Defect Detection of Condenser Tube in Support Plate Region using Guided Wave

Yong-Kwon Kim\*, Ik-Keun Park\*,†, Sae-Jun Park\*\*, Yeon-Shik Ahn\*\*\* and Doo-Song Gil\*\*\*

\*Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National Univ. of Science & Technology, seoul 139-743, Korea

\*\*Non-Destructive Examination Dept., Doosan Heavy Industries & Construction, Changwon 641-792, Korea

\*\*\*KEPCO Research Institute, Daejeon 305-760, Korea

†Corresponding author : ikpark@snut.ac.kr

(Received August 26, 2012 ; Revised October 25, 2012 ; Accepted December 31, 2012)

#### Abstract

General condensers consist of many tubes supported by tube sheets and support plates to prevent the deflection of the condenser tubes. When a fluid at high pressure and temperature runs over the tubes for the purpose of transferring heat from one medium to another, the tubes vibrate and their surface comes into contact with the support plates. This vibration causes damage to the tubes, such as cracks and wear. We propose an ultrasonic guided wave technique to detect the above problems in the support plate region. In the proposed method, the ultrasonic guided wave mode, L(0,1), is excited using an internal transducer probe from a single position at the end of the tube. In this paper, we present a preliminary experimental verification using a super stainless tube and show that the defects can be discriminated from the support signals in the support region.

Key Words : Ultrasonic guided-wave, Condenser tube, Support plate region, Internal transducer probe

#### 1. 서 론

발전 분야에 널리 사용되는 설비 중 복수기 장치는 열에너지를 다른 유체에 열전달을 이용하는 발전설비 중 하나이다. 열교환기 내부 수많은 튜브는 열 교환 효율을 높이기 위해 두께가 매우 얇아 결함에 상당히 취약하여 결함발생 시 쉽게 파괴될 수 있어 손상을 감지하고 그 상태를 최적화하기 위해 비파괴평가가 진행되고 있다. 열교환기 튜브를 평가하는 기존의 방법은 국부 검사법(point by point inspection)으로 와전류를 이용한 와전류탐상검사(ECT)와 원거리와 전류검사(RFECT),

내삽형 초음파검사(IRIS), 육안검사(Endoscope testing)가 활용되고 있다. 열교환기 튜브에서 결함이 집중적으로 발생하는 영역은 잔류응력과 유체이동이 집중되는 환관부에서 주로 발생한다. 또한 튜브지지판과 곡관부에서도 결함이 발생하는데 이 부위는 기존의 검사방법인 국부검사법을 적용하여 튜브를 평가하기에 어려움이 있다. 와전류신호는 임피던스 변화를 이용하여 결함을 검출하는데 결함신호 뿐만 아니라 재질과 형상에도 민감하게 변화한다. 튜브 지지판 영역에서는 지지판 재질의 영향으로 결함신호를 정량적으로 평가하는데 많은 어려움이 있다<sup>1)</sup>.

그리고 IRIS 검사법은 상대적으로 정밀한 평가가 가

능하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 결함의 형상에 따른 산란신호(ghost echo), 부적절한 전처리에 따른 이물질 산란과 튜브 검사시 튜브 내에 초음파 전달을 위한 작동유체가 필요하며 검사 속도가 매우 느려서 열교환기 튜브의 전수검사의 어려움이 있다. 위와 같이 기존의 방법으로 열교환기의 상태를 유지 관리하는데 어려움이 있다. 하지만 유도초음파는 시험체를 따라 전파하므로 튜브의 전범위의 탐상이 가능하며 초음파의 센서의 이동이 없으므로 기존의 검사법에 비해 검사속도를 향상시킬 수 있다. 위와 같은 장점을 가진 유도초음파 기법은 선행 연구자들에 의해 배관 또는 튜브 평가의 가능성을 실험적으로 검증되었으며<sup>2-3)</sup>, 국외 상용화 업체에 의해 제작된 시스템을 활용하여 배관의 건전성 평가에 대한 많은 현장 적용 사례들이 발표되었다<sup>4-8)</sup>. 최근 발생한 국내외 사고사례들에 의해 발전시설의 신뢰성에 대한 의문이 증폭되고 있는 상황에서 열교환기 튜브 건전성 평가에 대한 관심이 집중되고 있으며, 이에 대한 유도초음파 기법의 현장 적용성 검토를 위한 연구가 발표되고 있다<sup>9-10)</sup>.

그러나 튜브는 배관과 달리 많은 수의 튜브지지관에 의해 유도초음파의 전파에 영향을 받기 때문에 유도초음파를 이용한 튜브평가를 위해서는 이에 대한 해석이 선행적으로 진행될 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 튜브지지관에서의 튜브와 튜브지지관의 접촉에 따른 유도초음파 결함신호의 영향을 실험적으로 검증하였다. 이를 위해 유도초음파의 여러 가지 모드들 중에서 종형 모드 L(0,1)을 사용하였다.

## 2. 튜브내의 유도초음파

튜브내에서 운동 방정식은 Navier's 방정식으로부터 식 (1)과 같이 유도되어지며 튜브에서 유도초음파가 전파한다고 가정하고, Fig. 1과 같이 경계면이 자유로운 경우 경계 조건을 식 (2)로 정의할 수 있다.

$$\mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot u) = \rho (\partial^2 u / \partial t^2) \quad (1)$$

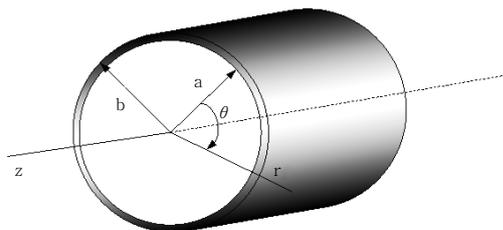


Fig. 1 A traction-free, infinitely long hollow cylinder with inner radius, a and outer radius, b

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rz} = \sigma_{r\theta} = 0 \quad \text{at } r = a \text{ and } r = b \quad (2)$$

각 방향의 응력은 다음 식 (3)로 유도되며,

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \left\{ -\lambda(\alpha^2 + \xi^2)f + 2\mu \left[ f'' + \frac{n}{r}(g_3' - \frac{g_3}{r}) + \xi g_1' \right] \right\} \\ &\quad \times \cos n\theta \cdot \cos(\omega t + \xi z) \\ \sigma_{r\theta} &= \mu \left\{ -\frac{2n}{r}(f' - \frac{f}{r}) - (2g_3'' - \beta^2 g_3) - \xi \frac{n+1}{r} g_1 - g_1' \right\} \\ &\quad \times \sin n\theta \cdot \cos(\omega t + \xi z) \\ \sigma_{rz} &= \mu \left\{ -2\xi f' - \frac{n}{r} \left[ g_1' + \left( \frac{n+1}{r} - \beta^2 + \xi^2 \right) g_1 \right] - \frac{n\xi}{r} g_3 \right\} \\ &\quad \times \cos n\theta \cdot \sin(\omega t + \xi z) \end{aligned} \quad (3)$$

경계조건 식 (2)에 식 (3)를 대입하면 다음의 특성(characteristic) 방정식을 얻을 수 있다<sup>11)</sup>.

$$|C_{ij}| = 0, \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6) \quad (4)$$

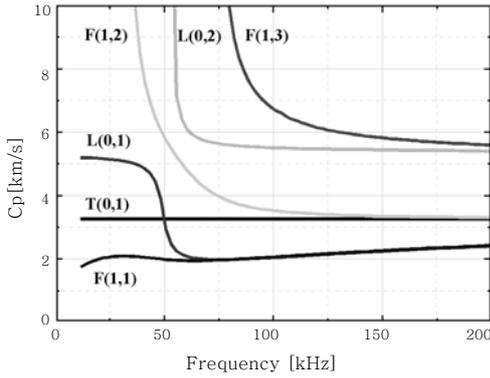
이 행렬식은 주파수식이라고도 부르며, 이 식 (4)을 이용하여 이론적인 분산곡선을 얻을 수 있고 배관내에 존재하는 모드들을 해석하여 배관의 건전성을 평가할 수 있다.

본 논문에서 적용하는 시스템에서 프로브는 튜브 내부로 삽입되어 공기압에 의해 밀착되어 전파하는 종형 모드 L(0,1)이 송·수신된다. Fig. 2(a),(b)는 식 (4)에서 얻어진 이론적인 분산곡선으로 각각 위상속도, 군속도 분산선도로 위상속도 분산선도는 유도초음파 모드발생에 활용되고, 군속도는 유도초음파의 전파속도로 실험적인 분석에 활용된다. 여기서, L,T,F는 튜브내에서 발생 가능한 유도초음파 모드로 각각 종형, 비틀림, 굽힘형 모드를 나타낸다.

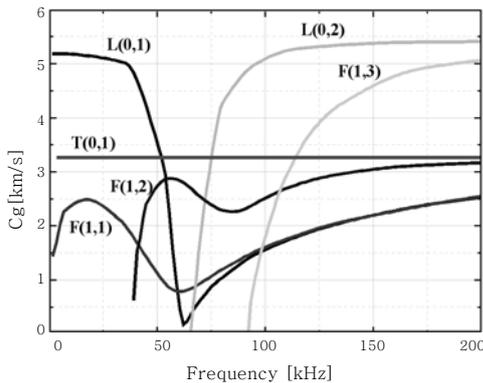
## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 유도초음파 시스템

본 논문에서 사용한 유도초음파 탐상 장치는 GUL사(Wavemaker G3)의 장비로 튜버스트파를 이용하여 종형모드인 L(0,1)를 송수신할 수 있다. Fig. 3(a)는 유도초음파를 발생하는 시스템 구성을 나타내고 있으며 신호를 송·수신하는 G3 장비와 이를 구동하기 위한 제



(a) Phase velocity



(b) Group velocity

Fig. 2 Dispersion curve of guided wave

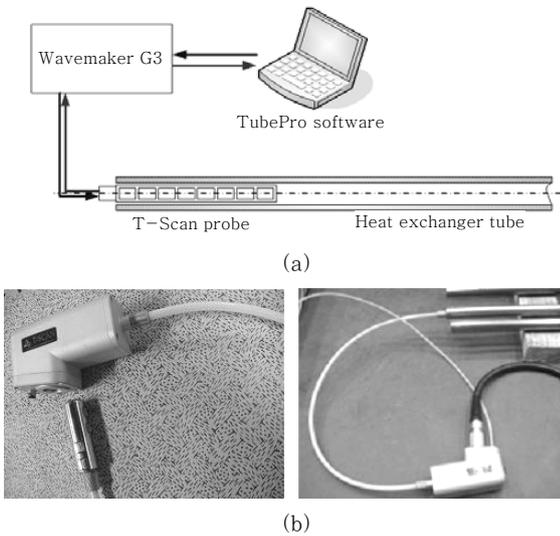


Fig. 3 Experimental setup of (a) Guided wave inspection system with (b) internal probes

어 컴퓨터와 내삽형 프로브로 구성되어있다. Fig. 3(b)는 본 실험에 사용된 내삽형 프로브로 열교환기 튜브에 규격에 따라 제작되었으며, 프로브의 사용주파수범위는 25-44 kHz이다. 이 프로브는 8개의 탐촉자가 배열을 이루고 있으며 공기압으로 튜브 내부에 밀착되어 유도 초음파를 송·수신한다.

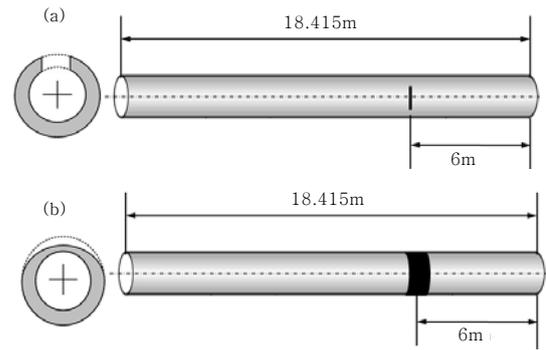


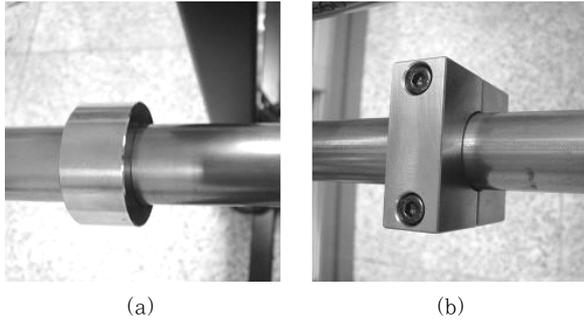
Fig. 4 The shape of specimen with notch and wear defects

### 3.2 시험편

Fig. 4는 본 실험에 적용한 시험편으로 튜브지지판 영역에서 발생할 수 있는 균열을 모의한 노치와 진동으로 발생하는 튜브의 마모를 검출하기 위해서 인공 결함을 기계가공하여 제작하였다. 이 튜브는 신월성 원자력 복수기 튜브 재질(Super stainless steel, ASTM A249/UNS S32050)로, 바깥지름은 25.4 mm이며, 두께는 0.889 mm, 길이는 18.415 m이다. Fig. 4(a)는 튜브 끝단에서 6 m 위치에 폭 0.7 mm, 길이가 10 mm, 결함 깊이가 두께의 100% 인 노치 결함을 가공하였다. Fig. 4(b)는 튜브 끝단에서 6 m 위치에 폭 19.05 mm, 길이가 39 mm 결함깊이가 최대 두께의 40% 인 편심형 마모 결함을 가공하였다.

### 3.3 튜브지지판

열교환기내 수많은 튜브를 일정 간격을 가지고 튜브를 지지하는 튜브지지판은 고온, 고압의 유체에 의한 심한 진동으로 튜브지지판(support plate) 영역에서의 마찰 부식(Fretting corrosion)과 응력 발생으로 응력 부식균열(Stress corrosion crack)이 발생한다. 따라서 튜브지지판 영역은 손상이 예상되는 부위로 튜브의 안정성을 확보하기 위해 비파괴 평가의 수행이 필요하다. 하지만 실제 사용되고 있는 튜브는 튜브지지판의 열화 또는 스케일로 인하여 서로 접촉된다. 이로 인해 유도초음파가 튜브를 따라 전파할 때 튜브지지판의 영향을 받을 것이다. 따라서 유도초음파 기술의 현장 적용성을 높이기 위해 튜브지지판 영향을 고려할 필요가 있다. 이를 위해 복수기의 튜브지지판의 치수를 고려하여 지지대 링(support ring)과 클램프형 지지대 링(clamp type support ring)를 제작하였으며 그 형상은 Fig. 5와 같다.



**Fig. 5** The shape of a (a) support ring & (b) clamp type support ring

### 3.4 실험방법

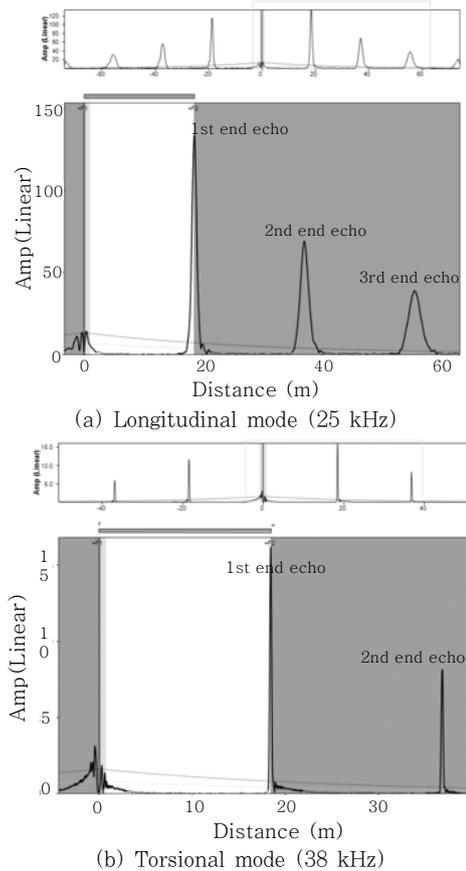
복수기 튜브에서 결함신호의 감도 및 분해능이 좋은 주파수를 선정하였으며, 유도초음파를 발생하기위해 튜브 내면에 공기압으로 밀착되는 프로브를 적용하였다. 또한 Fig. 4의 시험편의 한쪽 끝부분에 프로브를 삽입하여 유도초음파를 송·수신하였다. 이때 유도초음파 시스템의 주파수는 중형모드는 25 kHz, 비틀림 모드는 38 kHz 이다. 해당 주파수의 유도초음파는 시간주파수 해석법에 의해 이론적인 분산선도와 실험신호를 비교분석하여 실험적으로 검증하였다.

## 4. 실험결과

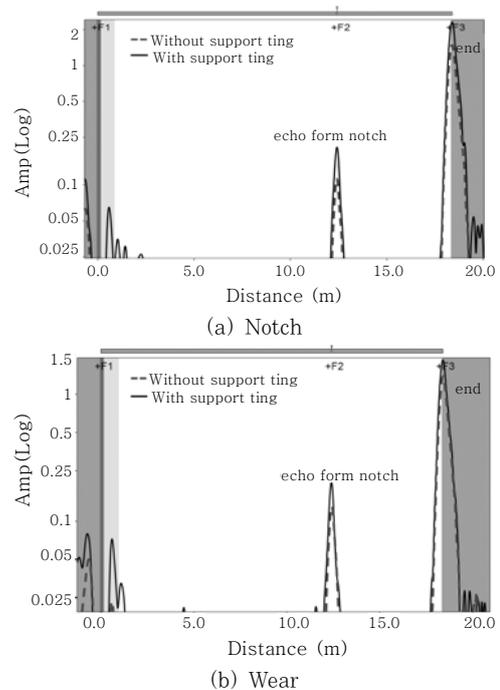
### 4.1 튜브지지판의 영향

본 실험에서 열교환기 튜브에 대한 유도초음파 탐상은 Fig. 3(b)의 프로브를 적용하였다. Fig. 6은 건전한 열교환기 튜브에서 종파모드와 비틀림 모드를 이용하여 얻은 실험결과이다. 그 중 각각 25 kHz, 38 kHz 주파수 대역에서의 신호는 근거리 영역에서 Mirroring echo의 영향이 적고, 결함신호의 S/N비와 결함 분해능이 우수함을 알 수 있다. Fig. 7 (a), (b)는 Fig. 4에 가공된 노치결함, 마모결함으로부터 얻은 실험결과로 결함위치에 실제 튜브지지판의 영향을 고려하기위해 제작된 지지대 링을 설치하고, 그 영향에 따른 결함신호의 진폭변화를 나타내고 있다. 이 결과로부터 결함에 서 반사된 신호가 지지대 링과 튜브의 접촉에 의한 영향으로 증폭되어 발생함을 확인할 수 있다.

끝단으로부터 7 m 위치에 완전 밀착된 상태의 튜브 지지판을 고려하기위해 제작된 클램프형 지지대 링을 적용하여 실험을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 8과 같다. 클램프형 지지대 링에 의해 고정된 튜브를 전파하는 유도초음파는 클램프형 지지대 링을 지나 충분히 전달되지 못하고 대부분이 지지대 링으로부터 반사됨을



**Fig. 6** Experimental result from guided wave modes in a super stainless steel tube (25.4 mm O.D., 0.889 mm thickness)



**Fig. 7** Experimental result in a super stainless steel tube at 25 kHz

알 수 있다. 이로부터 튜브와 튜브지지판의 접촉 상태에 따라 유도초음파의 신호가 영향을 받으며, 특히 클램프형 지지대 링과 같이 고정된 튜브지지판인 경우에는 유도초음파를 이용한 튜브 평가가 어렵다는 것을 확인하였다.

실제 튜브지지판의 영향을 확인하기 위해 제작중인 복수기에 튜브를 삽입하고 L(0,1) 모드의 유도초음파를 적용하여 실험을 수행하였다. 복수기내의 24개의 튜브지지판은 약 700 mm 간격으로 튜브를 지지하고 있다. Fig. 9는 튜브지지판의 접촉상태에 의해 발생한 지지대 신호와 노치, 마모 결합의 유도초음파 신호를 측

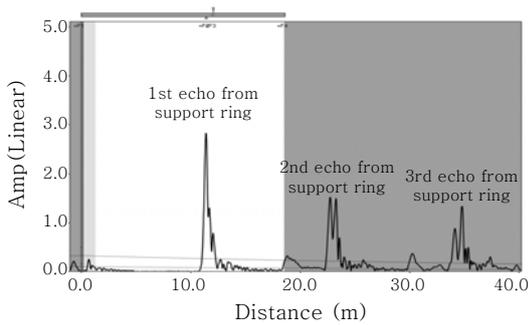
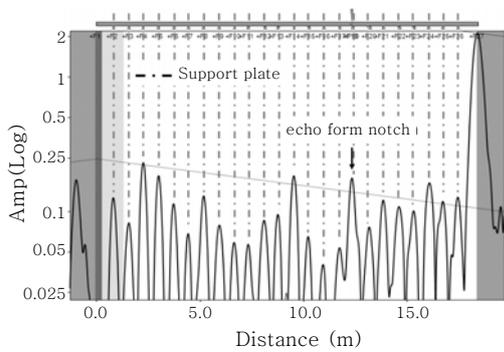
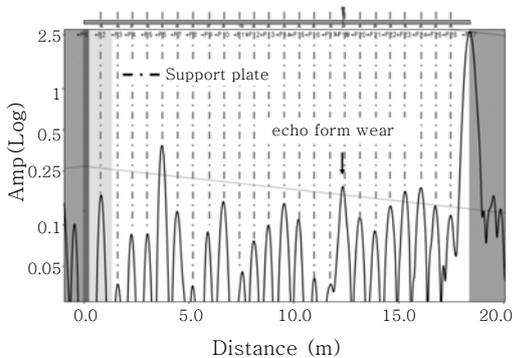


Fig. 8 Experimental result in a tube with fixed type support ring



(a) Notch



(b) Wear

Fig. 9 Experimental result in a super stainless steel tube installed at the condenser

정한 결과이다. 실험 결과 종형모드 L(0,1)과 비틀림 모드 T(0,1) 모두 24개의 튜브지지판 영역을 통과한 튜브 끝단부 신호로 튜브 평가의 가능성을 확인할 수 있었지만, Fig. 7의 결합신호와 유사한 진폭의 튜브지지판 신호가 함께 나타남을 확인할 수 있다. 이와 같이 튜브지지판의 영향으로 인해 진폭을 이용한 방법으로는 결합과 튜브지지판 신호를 구별하기에는 어려움이 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 주파수의존성

튜브지지판의 신호와 결합신호를 식별하기 위해 튜브지지판 영역에서의 결합신호의 특성을 검토할 필요성이 있다. 이를 위해 유도초음파의 주파수에 따른 지지대 링에 위치한 결합신호의 진폭변화를 확인하기 위해 실험을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 10과 같다. 이 중 결합신호와 지지대 신호가 주파수에 따라 진폭이 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 또한 끝단 신호도 유사한 경향성을 보이는데, 특히 결합이 없이 튜브지지판에 의해 지지되는 튜브에서의 끝단 신호는 주파수에 따른 진폭변화가 이전 Fig. 10(a),(b)와 차이가 있음을 알 수 있다. Fig. 10의 진폭 정보를 이용하여 끝단신호와 결합/지지대 신호의 비를 계산한 결과는 Fig. 11과 같다. 이 결과로부터 주파수에 따른 진폭비 변화를 적용하면 튜브지지대 신호로부터 결합 신호(노치, 마모 결합)의 유무를 구별할 수 있어 튜브평가가 가능할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 유도초음파의 주파수가 40 kHz가 넘을 경우에는 튜브지지판 신호에서 결합의 유무를 확인하는 것이 힘들다. 이는 Fig. 2의 위상곡선에서 L(0,1) 모드가 40 kHz 이상부터 분산성이 커지는 분산영역에 들어가게 되는 것과 일치하고 있고, 유도초음파 모드가 분산성이 증가하게 되면 유도초음파 모드가 분산되어 진폭이 감소되는 것과 연관된다고 생각된다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 발전설비에 사용되는 복수기 튜브지지판에 대한 유도초음파 탐상의 영향을 실험적으로 검증하였다. 내삽형 센서를 사용한 유도초음파를 적용하기 위하여 실험실 환경뿐만 아니라 원자력 발전소에 공급되는 실기 부재인 복수기에 대한 실험을 수행하였다. 그 결과 유도초음파는 시험체의 표면 접촉 상태에 따라 많은 영향을 받는 것을 확인하였다. 특히 튜브와 지지판이 밀착된 경우에는 유도초음파의 진폭만으로 결합신호와 튜브지지판 신호를 구별하는 것은 어려움이 있다.

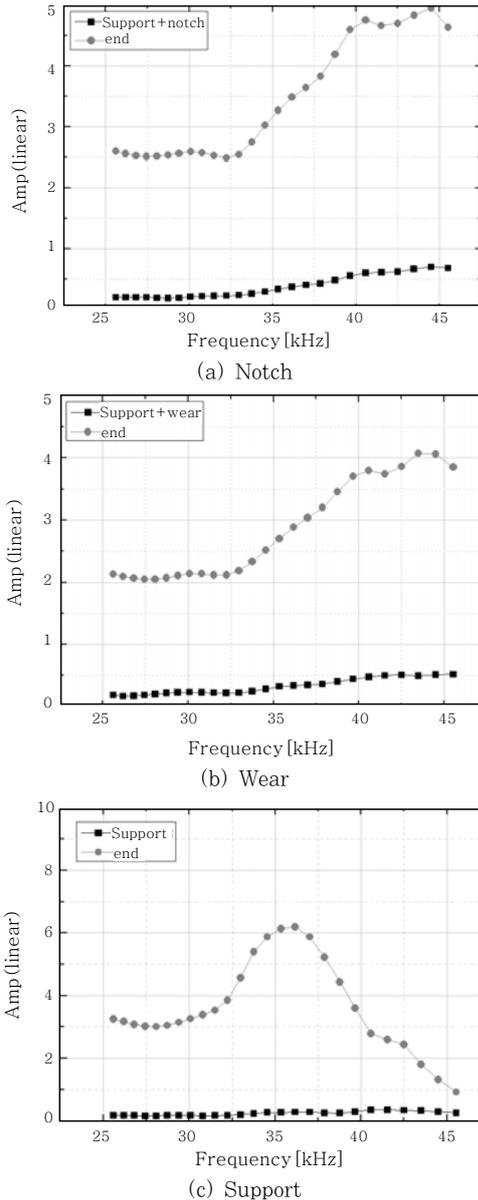


Fig. 10 Amplitude change of (a) notch, (b) wear, (c) support ring and end signal due to the frequency

그러나 주파수에 따른 유도초음파 신호의 진폭비를 계산하여 비교하면 튜브지지판 신호로부터 결함신호의 유무를 식별할 수 있다. 따라서 유도초음파를 이용한 복수기 튜브지지판 영역에서의 결함평가가 가능할 것으로 사료된다.

### 후 기

본 연구는 한전 전력연구원에서 지원하는 학술연구용역으로 “Guided wave 진파거동 해석 및 신호처리 기술 개발”과제의 일환으로 수행되었습니다.

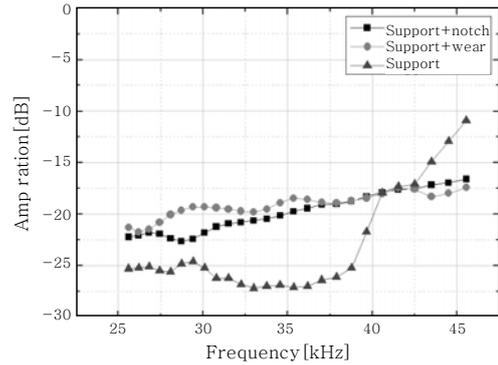


Fig. 11 Amplitude ratio of defects signal and support signal to end signal due to the frequency

### 참 고 문 헌

1. Y.G. Shin and Y.T. Lee : Prediction of bobbin eddy current signals from various anomalous defects in the heat exchanger tube, KSNT/FC0035, (2004), 239-248
2. J.L. Rose, D. Jiao and J. Spanner, Jr. : Ultrasonic Guided wave NDE for Piping, Materials Evaluation, **51-5** (1996), 1310-1313
3. H.J. Shin, J.L. Rose and S.J. Song : Inspection of Heat Exchanger Tubing Detects with Ultrasonic Guided Waves, Journal of the KSNT, **20-1** (2000), 1-9
4. T. Nagai, M. Hyodo and K. Takamura : Guided Ultrasonic Testing as a Practical Technology, Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection, **52-12** (2003), 667-671
5. S. Kameyama, K. Misu, S. Wadaka, Y. Tanaka, M. Koike and S. Suchiro : Ultrasonic Test Instrument Using Guided Wave, Journal of the JSNDI, **52-12** (2003), 672-678
6. D.S. Gil, Y.S. Ahn, S.K. Park, I.K. Park and Y.K. Kim : Defect Evaluation of Carbon Steel Weld Part using Guided Wave, KWJS 2009-Spring, 123
7. Y.K. Kim, I.K. Park, H.M. Kim, W.J. Song, Y.S. Cho, Y.S. Ahn and T. Hayashi : Pipe Inspection of Weldments using Long Range Ultrasonic Guided Wave Techniques, KWJS 2005-Spring, 191-193
8. I.K. Park, Y.K. Kim, H.M. Kim, W.J. Song, Y.S. Cho and Y.S. Ahn : Long Range Ultrasonic Guided Wave Techniques for Inspection of Pipes, Journal of the KWS, **23-5** (2005), 43-48 (in Korean)
9. I.K. Park, Y.K. Kim, S.J. Park, Y.S. Ahn and D.S. Gil : Application of Ultrasonic Guided Wave to Heat Exchanger Tubes Inspection, WCNDT (2008)
10. I.K. Park, Y.K. Kim, S.J. Park, Y.S. Cho and D.S. Gil : Defect detection of Exchanger Tube using internal guided wave probe, KSNT/SC0039, (2008), 120-124
11. D.C. Gazis : Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders. I. Analytical Foundation, J. Acous. Soc. Am, **31-5** (1959), 568-573