

# 냉각수 배관 용접부 평가를 위한 유도초음파 기술의 적용 Application of Guided Ultrasonic Wave Technology for Evaluation of Welding Part in Cooling Water Pipe

길두송 · 안연식 · 박상기  
D. S. Gil, Y. S. Ahn and S. K. Park

(접수일 : 2010년 7월 13일, 수정일 : 2010년 9월 9일, 채택확정 : 2010년 9월 24일)

**Key Words** : Guided Ultrasonic Wave(유도초음파), Welding Part(용접부), Cooling Water Pipe(냉각수 배관), Wall Loss(두께 감육), Symmetric Mode(대칭 모드)

**Abstract** : The ultrasonic guided wave propagates along with the given structure's wall direction. Because of this specific character, the ultrasonic guided waves are used in many other fields. Especially, it can be readily utilized for nondestructive inspection of various structures that are made up of gas pipes, heat exchanger tubes, and thin plates. Further, the guided wave technology can be readily utilized when inspecting pipes or thin plates which pose high risk of the accident but for which the nondestructive inspection itself is impossible because it is difficult to get to them since they are coated or buried underground. In the other hand, conventional ultrasonic testing such as thickness gauging uses bulk waves and only tests the region of structure immediately below the transducer. As a result of the application about inlet and outlet cooling water line using guided wave test, we conformed that the overall corrossions were in the lower side of the 304.8 mm inlet valve and these corrossions were engaged in not locally but through the lower side of the valve line. In the near future, we can expect that the detectable defect size is smaller than before along with the development of the sensing technology.

## 1. 서 론

비파괴시험은 소재, 기기, 구조물의 품질관리나 품질보증의 한 수단으로 이용되는 계측기법으로 재료, 제품, 구조물 등의 종류에 거의 상관없이 시험대상물을 손상, 분리, 파괴시키지 않고 원형 그대로 유지한 상태에서 시험체의 표면, 내부의 결함유무와 그 상태 또는 대상물의 성질, 내부구조 등을 조사하는 시험전체를 말한다<sup>1)</sup>. 유도초음파는 구조물의 벽면을 따라 전파하는 파로서 종파 또는 횡파를 사용하는 기존의 비파괴 검사방법에 비해 정밀도는 떨어지는 것으로 알려져 있으나 광범위한 부위를 빠르고 효율적으로 검사할 수 있다는 장점을 가지고 있으며 특히, 열교환기세관이나 배관과 관재의 비파괴검사에 유용하고, 고정된 지점으로부터 대형 설비

전체를 한번에 탐상할 수 있을 뿐만 아니라 절연체나 코팅재의 제거 없이 구조물이 설치된 그대로 검사를 수행 할 수 있어 시간적, 경제적 효율성이 뛰어나다<sup>2)</sup>. 영국의 임페리얼 대학(Imperial College)에서는 유도초음파의 여러 모드를 이용한 실험적 검증과 수치적인 해석을 통하여 각 모드의 특성을 분석한 결과를 보였으며<sup>3~5)</sup>, 미국의 펜실베이니아 대학(Penn. State)에서는 유도초음파의 이론을 바탕으로 실험적 검증을 통한 성과를 나타내었다<sup>6~8)</sup>. 또한, 미국의 SWRI(southwest research institute)<sup>9)</sup>에서는 배관에서 유도초음파를 발생시키기 위한 자왜형 센서(magneto-strictive sensor)를 자체적으로 개발하여 장거리 배관의 결함을 신속하게 탐상하고자 하였다. 일반적인 초음파 검사기술<sup>10)</sup>에 비하여 유도초음파를 이용한 검사기술은 보온재가 설치되어 있거나 땅속에 매설된 배관 또는 파이프, 제한된 공간으로 인하여 검사자의 접근이 곤란하고 복잡한 부위 등을 원거리 검사에 적극 활용되고 있다.

본 연구에서는 발전설비 중의 하나인 소내 냉각

길두송(교신저자) : 전력연구원 원자력발전연구소  
E-mail : kds6801@kepri.re.kr, Tel : 042-865-5558  
안연식, 박상기 : 전력연구원 원자력발전연구소

수 배관을 검사하기 위해 유도초음파 기술을 적용함으로써 신호해석 및 모드분석 등을 통해 그 활용성을 가시적으로 나타내고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

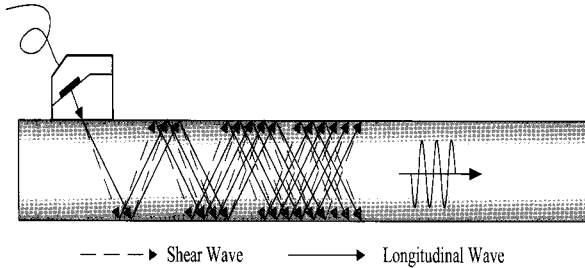
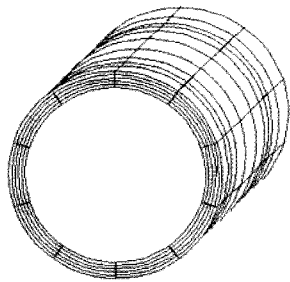
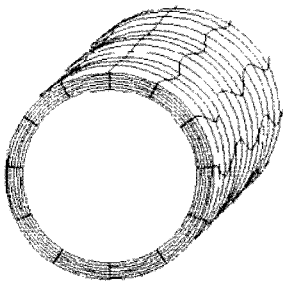


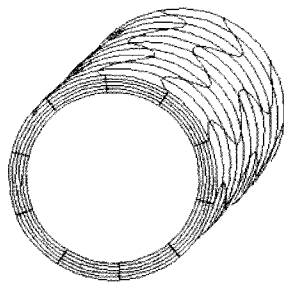
Fig. 1 Principle of the propagation forming a guided wave in a thin plate



(a) Longitudinal mode



(b) Flexural mode



(c) Torsional mode

Fig. 2 Several modes of guided waves

유도초음파를 발생시키는 여러 가지 방법 중 Fig. 1과 같이 종파를 이용하여 경사로 입사할 때 판 내부에서 종파와 횡파가 발생하여 반사, 굴절 그리고 모드변환을 일으키며 판을 따라 전파된 후 새로운 형태의 파가 생성되는데 이를 유도 초음파라 한다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 유도 초음파가 관의 두께방향으로 전파할 때 종형 모드(a), 굽힘형 모드(b), 비틀림형 모드(c)의 세 종류 모드가 존재할 수 있으며, 유도 초음파의 진행방향이 관의 길이방향인 경우 유도 초음파 모드를 나타내기 위해서 두 개의 원주방향 차수와 모드수를 사용하고 있다. Fig. 3은

유도초음파가 관의 벽면을 따라 전파해 나갈 때의 분산도를 나타낸 그림으로서 원주방향 차수가 0인 경우에는 관의 축에 대해 대칭인 축 대칭 모드(axi-symmetric mode)를 나타내는데, 축 대칭인 모드는 다시 종형 모드와 비틀림형 모드로 파가 관의 벽 속에서 진동하는 양상에 따라 구별되어진다. 종형 모드는 파의 진동하는 성분이 관의 길이방향과 반경방향으로만 있는 경우로서 L(0,n)으로 나타내며, 비틀림형 모드는 파의 진동성분이 원주방향으로만 있을 경우로서 T(0,n)으로 나타낸다.

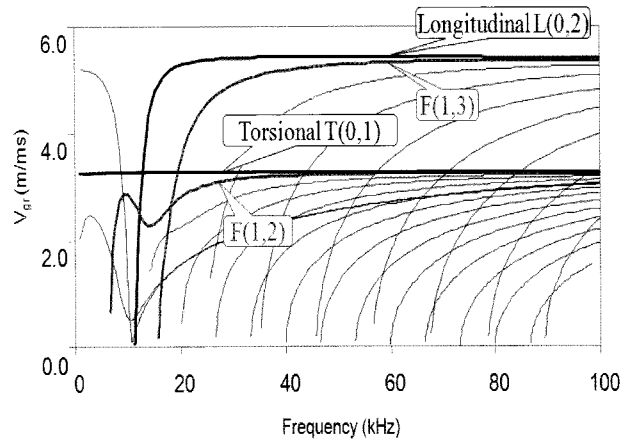


Fig. 3 Dispersion curves of guided wave

## 3. 시스템 구성

Fig. 4는 유도초음파를 이용하여 냉각수 배관을 검사할 때 나타나는 주요한 신호들의 모양을 나타낸 것으로서 그림에서 보는 바와 같이 지지대(hanger), 용접부(weld), 배관의 끝단(flange) 신호 등을 주로 볼 수가 있으며, 이들 부분에 결함 또는 두께 감육이 발생되었을 경우에는 각 파형들 내에 분포되어 있는 붉은색 파형인 비대칭신호(non-symmetric signal)들이 높게 나타나게 되어 이들 배관의 상태를 파악할 수가 있다.

Fig. 5는 냉각수 배관의 검사를 위한 시스템 구성을 나타낸 것으로서 탐촉자를 검사하고자 하는 대상물에 설치한 뒤 유도초음파를 발생시키면 파가 관의 벽을 따라 진행하다가 지지대(support), 부식(corrosion), 용접부(weld)를 거치게 되면 여기에서 반사된 신호들이 탐촉자를 거쳐 본체에서 파형을 분석한 후 컴퓨터의 모니터를 통하여 그 결과파형을 볼 수 있도록 시스템이 구성되어 있으며, Fig. 4의 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 각 대상물의 형태에 따라 다르게 나타나는 고유의 신호파형 모양

을 통하여 그 상태를 판별할 수 있게 된다. 유도초음파 검사기술을 탄소강 재질의 냉각수 배관 용접부에 적용하기 위하여 Fig. 5와 같이 시스템을 현장에 설치하였으며, 시험대상체의 외경은 각각 152.4 mm, 304.8 mm이다.

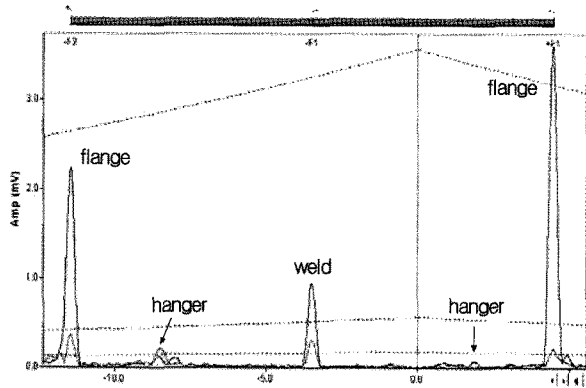


Fig. 4 Major defects in cooling water pipe

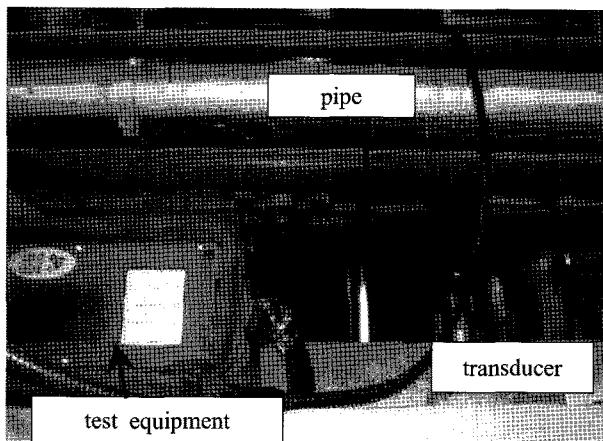


Fig. 5 System make up of guided wave

#### 4. 시험방법 및 결과

##### 4.1 304.8 mm 냉각수 계통 배관

Fig. 6은 304.8 mm 외경을 가진 냉각수 계통배관 입구 측의 검사를 위한 센서 설치모습을 나타낸 것이며, Fig. 7는 그 결과 파형을 나타낸 것으로서, 그림 왼쪽부분의 녹색 선은 센서의 설치위치를 나타낸 것이고 붉은색 파형들은 배관의 부식상태를 나타낸 신호들이다. Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 입구 측 배관의 하부에 국부적으로 부식이 진행된 상태를 육안검사를 통하여 볼 수가 있으며, 이는 304.8 mm 배관에 전반적으로 나타나고 있는 현상

이었다. Fig. 7의 파란색 원으로 표시한 부분에서 알 수 있듯이 주로 지지대(support)의 하부에 국부적인 감육상태가 나타나고 있었으며, 센서 설치위치(녹색선)로부터 약 20 m 지점에서는 배관의 상부에서도 두께감육 또는 부식이 진행되어 있는 것을 신호파형을 통하여 알 수가 있었다.

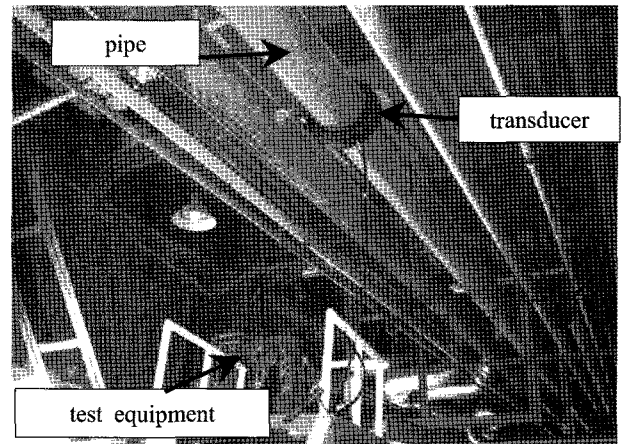


Fig. 6 Guided wave test of inlet 304.8 mm pipe

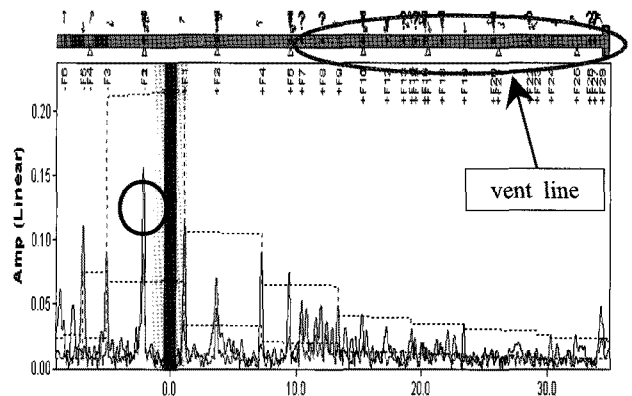


Fig. 7 Result signal for inlet 304.8 mm pipe test

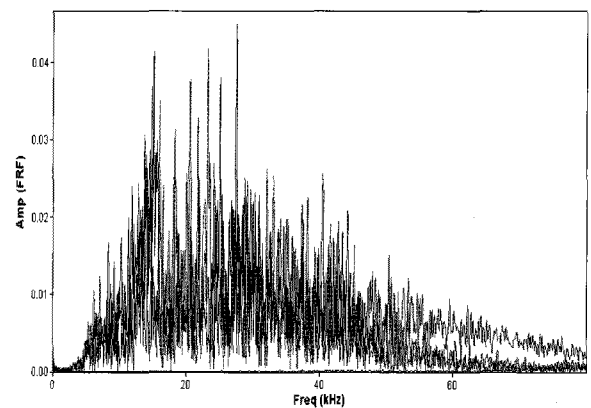
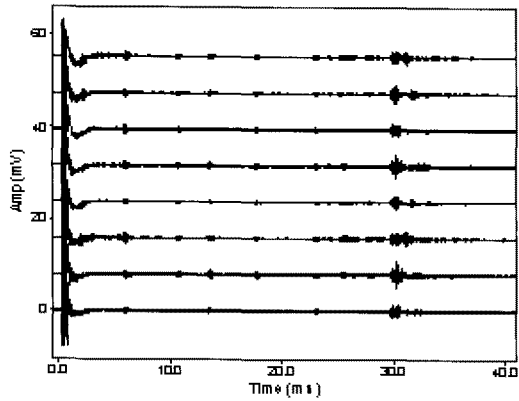
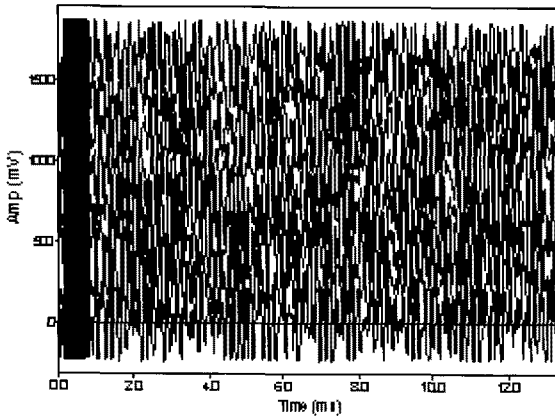


Fig. 8 Noise signal for outlet 304.8 mm pipe test



(a) Good signal of raw data



(b) Noise signal of raw data

Fig. 9 Signal comparison of raw data

또한, Fig. 7의 물음표(?) 표시부분은 추기라인(vent)을 나타낸 것이며, 검사구간은 센서 설치 부분으로부터 좌우로 약 30 m의 범위를 설정하였다. Fig. 8은 304.8 mm 냉각수 계통배관 출구 측의 검사시 수 십 미터 떨어진 지역에서 해당배관에 대한 용접작업으로 인하여 미세한 진동이 감지되어 외부의 노이즈(noise) 신호로 나타난 결과파형의 모양을 나타낸 것이다. 그림상의 검정, 빨강색은 각각 배관의 대칭, 비대칭을 나타내는 파형으로서 이 신호들이 외부의 노이즈로 인하여 녹색파형이 혼합되어 나타난 결과로서 Fig. 7의 304.8 mm 냉각수 계통 입구 측의 정상적인 데이터 신호와 비교해 볼 때 노이즈로 인한 신호는 파형해석이 불가능함을 알 수가 있으며, 용접작업이 이루어지지 않는 시간대에 재검사를 필요로 한다. 또한, Fig. 9는 노이즈 신호와 정상적인 신호를 비교하기 위하여 가공되지 않은 주파수 신호(raw data signal)를 나타낸 그림으로서 Fig. 9(a)는 정상적인 신호파형을 나타낸 그림이고, Fig. 9(b)는 노이즈 신호파형을 나타낸 그림이다. Fig. 9

에서 가로축은 파형의 전파시간을 나타내고 있으며 세로축은 파형의 진폭(amplitude)을 나타내고 있다. Fig. 9(b)는 노이즈 파형으로서 건전한 정상파형에 비해 결과 해석이 불가능함을 알 수 있다.

#### 4.2 152.4 mm 냉각수 계통 배관

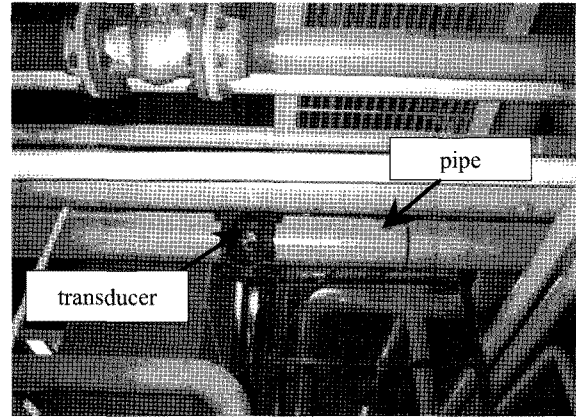


Fig. 10 Guided wave test of outlet 152.4 mm pipe

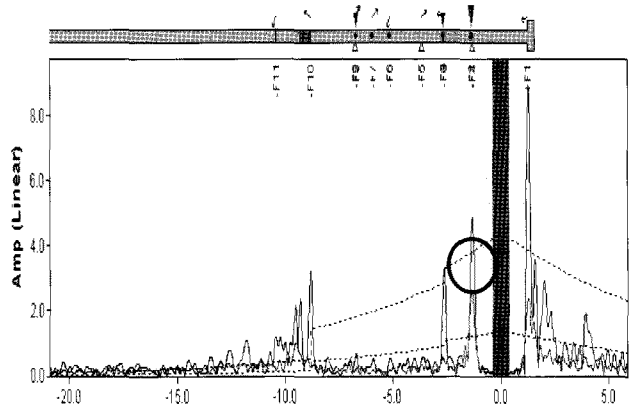


Fig. 11 Result signal for outlet 152.4 mm pipe test

Fig. 10은 152.4 mm 냉각수 계통배관 출구 측의 시험모습을 나타낸 것이며, Fig. 11은 그 시험결과 파형을 나타낸 것이다. Fig. 11에서 볼 수 있는 바와 같이 지지대(support)가 설치된 곳(파란색 원)의 하부에 붉은색 파형이 높게 올라와 있는 것을 볼 때, 이 부분에 국부적인 부식이 진행되어 있는 것을 알 수가 있으며, 센서 설치위치의 오른쪽 부분은 배관이 분기되는 분기관(tee joint)을 나타낸 것으로서 그 이후의 신호들은 분기관으로 인해 왜곡되어 나타나므로 평가에서 제외하였으며, 그림을 통하여 180도에 위치한 배관의 밑 부분에서 주로 부식이 많이 발생되어 있는 것을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

유도초음파 시험결과 304.8 mm 입구 측 하부에 부식이 집중하여 진행되고 있는 것으로 평가되었으며, 이러한 부식은 국부적이 아니라 배관 하부를 따라 전체적으로 진행되고 있으며, 상부나 좌우는 상대적으로 깨끗한 상태를 나타내었다. 304.8 mm 출구 측 배관에 대한 시험결과에서는 배관자체의 진동 및 소음(noise)이 너무 심하여 이 부분에 대한 데이터 취득이 불가능하였으며, 이와 같은 노이즈 신호가 나타난 원인은 주로 배관의 심한 진동이나 주변에서의 용접작업 등으로 인하여 나타난 결과임을 알 수 있었다. 또한, 소내 냉각수 계통 152.4 mm 입구 및 출구 측 배관에 대한 육안점검을 통해서도 하부 측 표면에는 양호한 모습을 보였으나, 신호취득 결과 일부지지대(support) 및 용접부에서 부분적인 부식 및 두께감소를 나타내는 신호가 포착되었고 특히, 중앙통로에서 20 m부근에는 국부적인 부식현상이 발생하고 있는 것으로 평가 되었다. 본 연구를 통하여 유도초음파 검사기술에 대한 이론적 배경을 바탕으로 한 현장적용 시험결과 장거리 소화수 배관에 대한 건전성 평가가 가능함을 알 수 있었다. 하지만, 원거리의 배관을 검사하기 위해서는 저주파를 사용해야 하기 때문에 아주 미세한 결함에 대한 검출능력은 떨어지지만, 센서제작 기술 및 검사결과를 구현하는 신호처리 기술의 발달로 검출할 수 있는 결함의 크기 또한 점점 작아지고 있는 추세에 있기 때문에 산업설비 전반에 있어서 그 활용범위는 점점 더 넓어지고 매우 유용하게 사용되어 질 수 있을 것으로 예상된다.

## 참고문헌

1. S. K. Park and Y. H. Lee, 2008, "Application of Thin-Walled Tubes Using Guided Wave", The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 12, No. 1 pp. 58~65.
2. D. S. Gil 외 5인, 2009, "Defect Evaluation of Carbon Steel Weld Part using guided wave", Abstracts of the 2009 Spring Annual Meeting of Korean Welding and Joining Society, pp. 123.
3. D. Alleyne and P. Cawley, 1991, "A two-dimensional Fourier Transform method for the measurement of propagating multimode signals", Journal of the Acoustical society of America, pp. 1159~1168.
4. D. Alleyne and P. Cawley, 1992, "Optimization of Lamb wave inspection Techniques", NDT & E International, Vol. 25, pp. 11~22.
5. D. Alleyne and P. Cawley, 1997, "Long Range Propagation of Lamb Waves in Chemical Plant Pipework", Materials Evaluation, Vol. 52, No. 7, pp. 504~508.
6. J. J. Ditre and J. L. Rose, 1992, "Excitation of guided elastic wave modes in hollow cylinders by applied surface tractions", Journal of Applied Physics. Vol. 72, No. 7, pp. 2589~2597.
7. J. L. Rose and K. M. Rajana and F. T. Carr, 1994, "Ultrasonic Guided Wave Inspection Concept for Steam Generator Tubing", Materials Evaluation, Vol. 49, pp. 307~311.
8. J. L. Rose, 1995, "Recent Advances in Guided Wave NDE, IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 761~770.
9. H. Kwun, S. Y. Kim and G. M. Light, 2001, "Long-Range Guided Wave Inspection of Structures Using the Magnetostrictive Sensor", Journal of the Korean Society for Non-Destructive testing, Vol. 21, No. 4, pp. 383~390.
10. D. S. Gil, Y. S. Ahn and S. K. Park, 2010, "Research for Signal Analysis of 18Mn-5Cr Steel Generator Retaining Ring Using Ultrasonic Wave", The Korean Society for Power System Engineering, pp. 65~70.