

전자기유도초음파를 이용한 복수기 전열관 결함신호 특성분석

Characteristic Analysis of Electromagnetic-ultrasonic Guided Waves for Defect Signals in Condenser Tubes

최상훈(Sang-Hoon Choi)^{1†}, 왕지남(Gi-Nam Wang)²

¹한전KPS주식회사 기술연구원, ²아주대학교 산업공학과

¹Technical Research and Development Institute, KPS, Naju, 520-350, Korea

²Department of Industrial Engineering, Ajou University, Suwon, 443-947, Korea

(Received December 1, 2014; revision received January 17, 2015; Accepted: January 26, 2015)

Abstract This paper describes a signal processing technique for identifying signals from defects by using an electromagnetic-ultrasonic guided waves method based on a magnetostrictive sensor that generates a torsional mode (T(0, 1)). Because this technique is based on the digital filtering, the filtered signals provide information on the relationship between the cutoff frequency of band-pass filter and the characteristic of defect signals in heat exchange tubes. To verify the performance of the technique, artificial defects with various thickness reduction ration and shape were machined in titanium tubes, and digital filtering results are reported. The results show that digital filtering provides information to the identify shape of defects and the contact condition between the tube and support ring. Therefore, the proposed technique has good potential as a tool for evaluating the integrity of heat exchange tubes.

Key words Guided Wave(유도 초음파), Condenser Tube(복수기 전열관), Magnetostrictive Sensor(자왜형 센서), Frequency(주파수)

† Corresponding author, E-mail: shchoi2@kps.co.kr

기호설명

T : Torsional Mode
L : Longitudinal Mode
F : Flexural Mode

1. 서 론

플랜트 산업설비는 터빈, 펌프, 밸브, 모터, 배관, 열교환기 등 다양한 종류의 기기들로 구성되어있다. 발전분야에 널리 사용되는 설비 중 복수기는 증기를 물로 전환하기 위한 열교환기중 하나이다. 복수기를 포함한 열교환기는 수십에서 수만 개의 많은 전열관으로 구성되어 있으며 열 교환 효율을 높이기 위해 두께가 매우 얇게 제작된다. 이는 결함에 매우 취약하며 결함 발생시 쉽게 파괴될 수 있어 손상을 사전에 감지하고 진단하여 그 상태를 최적화하기 위해 비파괴검사 및 평가를 수행하고 있다. 복수기 전열관 결함은 잔류응력과 유체이동이 집중되는 확관부에서 주로 발생한다. 또한 전열관 지지관과 곡관부에서도 결함이 발생되는데 이 부위는 기존의 검사방법인 와전류탐상검사를 적용하여 전열관을 검사하기에는 어려움이 있다. 이유는 곡관의 경우 검사 프로브가 전열관

내면에서 슬라이딩하여 동작하기가 어렵기 때문이다.

유도초음파 검사기술은 초음파 센서의 이동이 없으며 피시험체를 따라 신호가 전파되므로 전열관 전범위의 탐상이 가능하고 와전류탐상 검사방법에 비해 속도가 훨씬 더 빠르다. 이러한 장점들 때문에 유도초음파 검사기술 개발에 대한 실용화 연구가 산업계를 비롯한 연구소 및 학교에서도 다양하게 진행되고 있다.⁽¹⁻⁵⁾ 그러나 구조물에 발생하는 결함 여부와 정성적인 결함의 크기평가에서 벗어나 현 기술을 실제로 적용하는데 정량적인 결함 특성 분석 또는 결함유형 분석이 추가적으로 요구되고 있다. Park⁽⁷⁾ 등은 전열관에서 발생하는 결함신호와 전열관 지지판에서 발생하는 의사신호의 특성에 대한 연구와 Gil⁽⁶⁾ 등은 전열기내 결함신호에 대한 주파수 의존성에 대한 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 복수기 전열관에서 발생하는 다양한 결함을 평가하고 결함유형을 분석하기 위해 결함신호 특성을 비교분석하였다. 이를 위해 유도초음파의 비틀림 모드를 적용하여 결함형상에 따른 신호를 수집하고 분석하였다. 특히 결함신호의 패턴분석을 위해 디지털 필터의 차단 주파수 대역에 따른 다양한 결함신호의 변화와 서포트에 의한 영향을 실험적으로 확인하였다.

2. 유도초음파 분산선도

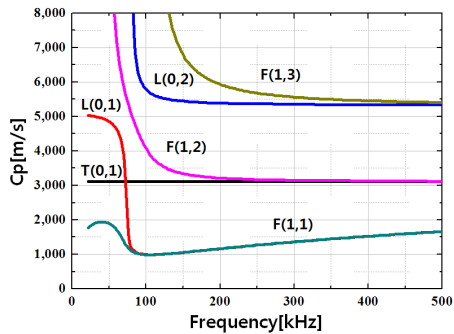
본 연구에서 유도초음파를 발생시키기 위해 자왜형 센서를 사용하였다. 이 센서는 전열관 외면에 장착되어 진동이 원주방향 성분을 가지는 비틀림 모드(T(0, 1)) 송·수신이 가능하다. 적용된 유도초음파의 중심주파수는 T(0, 2)모드의 Cutoff 주파수 이하 250 kHz이므로 다른 T(0, m)모드는 고려하지 않아도 되며, 모드변환 또는 여러 요인으로 발생하는 종형 모드(L(0, m))와 굽힘형 모드(F(n, m))도 함께 신호분석에서 고려해야 한다. Fig. 1은 전열관에서 발생 가능한 유도초음파 모드들의 이론적인 분산곡선을 나타낸다.⁽⁸⁾

3. 실험 장치 및 방법

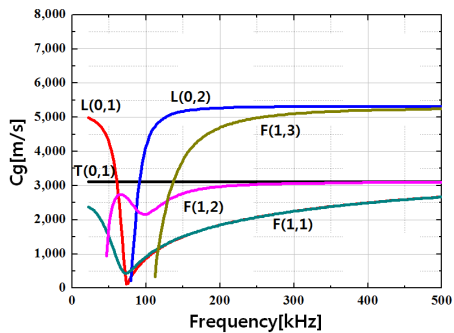
3.1 시험편 제작

Fig. 2는 본 실험에 적용한 시험편으로 외경이 22.22 mm이며, 두께는 0.71 mm, 길이는 6 m의 티타늄 전열관을 준비하였다. 전열관 시험편은 결함형상에 따른 신호특성을 확인하기 위해 전열관 횡단면에 결함면적이 3%, 5%, 7%, 10%가 되도록 기계 가공하였다. 그리고 결함방향에 대한 영향을 확인하기 위해 동일한 면적의

노치형 결함을 원주방향과 축방향으로 각각 제작하였다. 자세한 결함형상 및 치수는 Table 1에 정리하였다. 또한 다양한 결함 형상을 고려하기 위해 드릴 홀 결함과 마모결함을 각각 제작하였다. 드릴 홀의 직경은 1.32 mm, 1.70 mm, 3.00 mm이며, 모든 드릴 홀 결함은 두께를 관통하도록 가공하였다. 그리고 마모결함의 결함 깊이는 두께 대비 50, 60, 70%로, 결함 길이는 10 mm, 20 mm로 가공하였다.

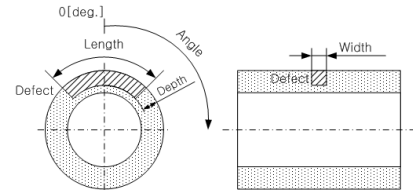


(a) Phase velocity

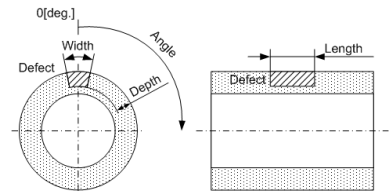


(b) Group velocity

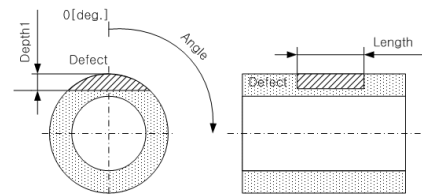
Fig. 1 Dispersion curve of guided wave.



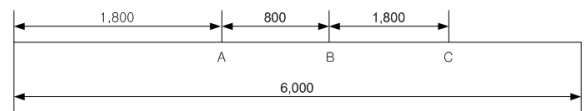
(a) Circumferential notch



(b) Axial notch



(c) Wear



(d) position of defects

Fig. 2 Shape of various defects and specimens.

Table 1 Defect-size specification

No	Defect types	Reduction [%]	Cross-section loss [%]	Orientation
SS01	Notch	50, 30, 10	3	Circumferential
SS02		50, 30, 10	3	Axial
SS03		50, 30, 10	5	Circumferential
SS04		50, 30, 10	5	Axial
SS05		50, 30, 10	7	Circumferential
SS06		50, 30, 10	7	Axial
SS07		50, 30, 10	10	Circumferential
SS08		50, 30, 10	10	Axial

3.2 실험장치

유도초음파의 송·수신을 위한 초음파검사시스템은 MsS2020(SwRI사 제작)을 사용하였으며, Fig. 3(a)는 유도초음파를 발생하기 위한 MsS(Magnetostrictive Sensor) 시스템의 구성도를 나타낸다. 유도초음파를 가진하기 위해 사용된 펄서/리시버는 협대역 주파수특성에 적합한 Tone burst 파를 적용하였다. MsS는 자기변형 현상을 이용하는 센서로 자왜 현상이 우수한 Fe-Co 합금 스트립을 전열관 표면에 에폭시로 접착하여 고정된 후 전열관에 정자기장을 가하면 Wiedemann 효과에 의해서 유도초음파가 발생하게 된다. 그리고 데이터 수집을 위해 디지털 오실로스코프(Lecroy 9374 M)를 사용하였다.

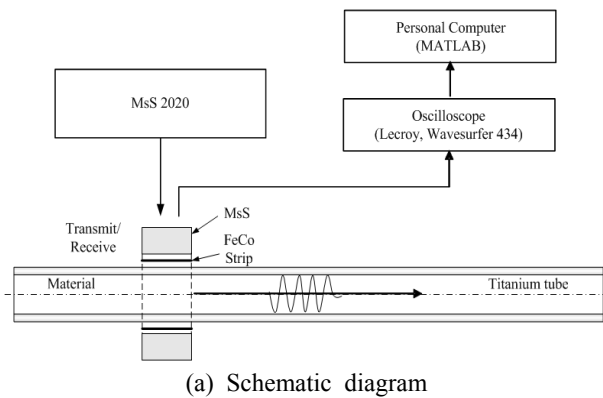


Fig. 3 Experimental setup of heat exchanger tube inspection system with MsS.

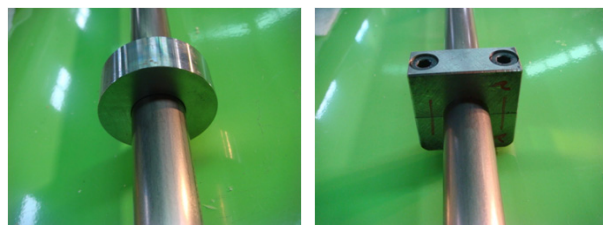


Fig. 4 Support simulated for Tube support plate.

3.3 실험방법

본 실험에서 사용된 자왜형 센서는 중심 주파수가 250 kHz가 되도록 제작하였으며, Fig. 2의 전열관 끝단에 센서를 설치하여 발생된 유도초음파 신호를 펄스에 코덱으로 측정하였다. 결함형상에 따른 신호특성을 비교하기 위해 결함형상이 각기 다른 시험편에 동일한 방법으로 신호를 수집하여 비교분석하였다.

또한 전열관 지지판을 모의하기 위해서 Fig. 4와 같이 링형과 클램프형의 서포트를 제작하여 적용하였다.

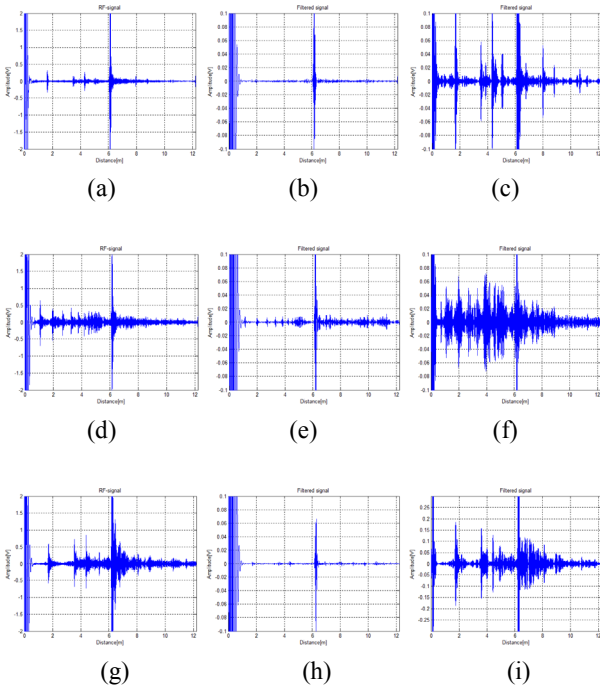
4. 결함신호 특성분석

4.1 결함유형에 따른 신호특성

복수기 전열관에서 전파하는 유도초음파는 결함형상에 따라 영향을 받는데, 이것은 결함을 통과하거나 반사할 때 모드변환 현상이 발생하기 때문이다. Fig. 5는 결함유형에 따른 실험결과로써, Fig. 5(a-c)는 결함면적이 전열관의 10%에 해당하는 노치결함, Fig. 5(d-f)는 지름 3 mm의 관통 결함, 그리고 Fig. 5(g-i)는 결함면적이 약 5%, 7%, 9%이고, 결함길이는 전열관 길이 방향으로 10 mm의 마모형 결함에서 수집된 결과이다. Fig. 5(a), (d), (g)는 결함에서 얻어진 원 파형이며, Fig. 5(b), (e), (h)는 통과 대역이 저주파수 영역(차단주파수가 10/30 kHz), 나머지는 고주파수 영역(차단주파수가 240/260 kHz)의 추출결과이다. 이 결과로부터 결함형상에 관련 없이 고주파수 영역의 신호는 좋은 감도의 결함 검출능을 확인하였다.

결함의 방향이 유사한 노치와 마모결함은 저주파수에 비해 고주파수 영역에서 결함 신호의 감도가 급격히 상승함을 보인 반면에 곡면 형상인 드릴 홀 결함은 저주파수에서 고주파수 영역으로 감도가 완만하게 상승함을 확인하였다. 또한 노치결함이 다른 결함에 비해 결함 신호의 폭이 좁음을 확인하였다. 그 이유로는 노치결함은 길이방향 결함의 폭이 약 0.3 mm로 결함 신호의 폭이 좁은 반면에 드릴홀 결함과 마모결함은 결함의 길이가 상대적으로 길기 때문에 신호가 분산되어 넓게 나타나게 된다.

결함신호에 대한 패턴 분석결과 노치결함은 고주파수 영역에서 감도가 급격히 상승하면서 신호의 폭이 좁은 패턴을 보였고, 드릴 홀 결함은 고주파수 영역으로 감도가 완만히 상승하면서 신호의 폭이 넓은 패턴, 마모결함은 고주파수 영역에서 감도가 급격히 상승하면서 신호의 폭이 넓은 패턴을 보였다. 이러한 신호 패턴 결과를 통해 결함유형 분석이 가능하다고 판단된다.



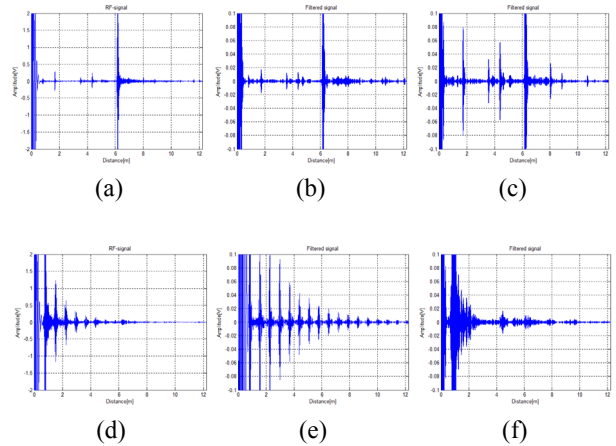
* The X axis of graphs means the distance from sensor to defect and the Y axis means amplitude.

Fig. 5 Amplitude change of torsional mode(T(0, 1)) according to shape of defect.

4.2 전열관 지지판에 따른 신호특성

복수기 전열관의 자중에 의한 처짐을 방지하는 목적으로 설치된 전열관 지지판에서 발생하는 반사신호는 전열관에서 발생하는 대표적인 의사신호이다. 전열관 지지판은 제작공정에 따라 적정 허용오차를 가지고 제작이 되기 때문에 전열관의 접촉에 의한 의사신호가 적을 것으로 예측할 수 있지만, 실제 복수기 제작공정에서 여러가지 허용오차들이 결합하여 복수기 전열관에 밀착되어 설치되는 경우가 빈번히 발생한다. 또한 장기간 운영으로 강재의 전열관 지지판이 부식 또는 이물질에 의해 전열관과 지지판 사이의 간극이 줄어 전열관에 밀착되는 현상이 관측되고 있다. 따라서 여러 가지 요인에 의해 발생하는 전열관 지지판 신호를 결함 신호와 구별할 필요성이 있다.

전열관 지지판의 접촉 조건에 따른 영향을 검토하기 위해 제작시 적용하는 허용오차로 제작된 링형 서포트와 전열관과 지지판의 밀착조건을 모의하기 위해 클램프형 서포트를 제작하여 실험에 적용하였다. Fig. 6은 디지털 필터링에 의한 신호를 추출한 결과이다. Fig. 6(a), (d)는 링형과 클램프형의 서포트를 왼쪽 끝단에서 700 mm 떨어진 위치에 장착한 후 수신된 원파형이다. Fig. 6(c), (d), (e), (f)는 통과 대역에 따른 신



* The X axis of graphs means the distance from sensor to defect and the Y axis means amplitude.

Fig. 6 Amplitude change of torsional mode(T(0, 1)) according to support ring types.

호 추출결과이다. 이 결과로부터 서포트에 의한 의사신호는 저주파수 영역에서 모두 발생하는 반면에 고주파수 영역(Fig. 6(c), (f) 참고)의 링형 서포트 신호는 노이즈레벨이하로 나타나고 클램프형 서포트 신호는 고주파수 영역에서 크게 나타난다. 또한 고주파수 영역인 경우, 클램프형의 서포트 신호는 끝단 신호가 나타나지 않는 반면에 링형 서포트 신호는 끝단 신호뿐만 아니라 결함 신호 모두 식별이 가능함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구는 유도초음파검사 기법을 적용하여 복수기 전열관에서 발생하는 결함을 평가하였다. 이를 위해 다양한 종류의 결함신호 특성을 실험을 통하여 비교분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 유도초음파 신호를 디지털 필터링하여 통과대역에 따라 신호 패턴을 비교분석하면 노치, 드릴 홀, 마모형의 결함유형으로 구별할 수 있음을 확인하였다.
- 또한 서포트링에 따라 전열관 지지판에서 발생하는 반사신호를 통과대역에 따라 비교분석하면 접촉조건에 따른 특성변화를 구별할 수 있음을 확인하였다.

References

1. Rose, J. L., Jiao, D., and Spanner, Jr. J., 1996, Ultrasonic Guided wave NDE for Piping, Materials Evaluation, Vol. 54, No. 11, pp. 1310-1313.
2. Shin, H. J., Rose, J. L., and Song, S. J., 2000, Inspection of Heat Exchanger Tubing Detects with Ultrasonic

- Guided Waves, J. KSNT, Vol. 20, No. 1, pp. 1-9.
3. Park, I. K., Kim, Y. K., Kim, H. M., Song, W. J., Cho, Y. S., and Ahn, Y. S., 2005, Long Range Ultrasonic Guided Wave Techniques for Inspection of Pipes, J. KWS, Vol. 23, No. 5, pp. 43-48.
 4. Choi, B. I., Cho, Y. H., Lee, J. H., and Shin, D. C., 2009, A Study on MsS Guided Wave Scattering from Defects, J. KSNT, Vol. 29, No. 5, pp. 442-449.
 5. Cheong, Y. M., 2009, Experimental Evidence and Analysis of a Mode Conversion of Guided Wave Using Magnetostrictive Strip Transducer, J. KSNT, Vol. 29, No. 2, pp. 93-97.
 6. Gil, D. S., Ahn, Y. S., Jung, G. J., and Kim, Y. G., 2012, Study on the Property of Guided Wave Signal Analysis according to Defect Shape of Small Size”, J. KSNT, Vol. 32, No. 4, pp. 410-417.
 7. Kim, Y. K., Park, I. K., Park, S. J., Ahn, Y. S., and Gil, D. S., 2012, A Technique for Defect Detection of Condenser Tube in Support Plate Region using Guided wave, J. KWS, Vol. 30, No. 6, pp. 522-527.
 8. Gazis, D. C., 1959, Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders. I. Analytical Foundation, J. Acous. Soc. Am, Vol. 31, No. 5, pp. 568-573.