

# 압력용기용 부식 배관의 시간-주파수 해석에 의한 비파괴적 특성 평가

남기우<sup>†</sup> · 김진욱\* · 안석환\*\* · 박인덕\*\* · 이수식\*\* · 박소순\*\*

## Nondestructive Characterization Evaluation by Time-Frequency Analysis on Pressure Vessel Piping with Corrosion

K. W. Nam, J. W. Kim, S. H. Ahn, I. D. Park, S. S. Lee and S. S. Park

**Key Words:** Pressure Vessel Piping(압력용기용 배관), Time-Frequency Analysis Method(시간-주파수해석법), Ultrasonic Parameters(초음파 파라미터), Frequency(주파수), Waveform(파형)

### Abstract

In this study, the pressure vessel piping with corrosion used during long term were investigated from the time-frequency analysis method. The damage of piping could be evaluated the attenuation factor by ultrasonic parameters such as center frequency and echo waveform. Based on NDE analysis by time-frequency analysis method, it should also be possible to evaluate from various damages and defects in piping members.

### 1. 서 론

구조물의 안전성 확보와 이것에 관련하여 재료의 열화 평가는 최근 중요한 연구과제중의 하나이다. 구조물의 강도, 수명 및 신뢰도를 저하시키는 어떤 변화가 언제 발생할 것인가? 또는 저하에 어떻게 대처 하면 좋을 것인가? 등에 대하여 파괴역학, 재료성질에 대한 지식을 가지고, 사용중인 구조물을 무사고로 조금이라도 오래 사용하자는 욕구가 강하게 요구되고 있다. 이와 같은 관점에서 항공기, 선박, 구조물 및 발전플랜트 등을 안전하게 사용하기 위해서는 비파괴평가 기술의 진보가 필요하다고 판단된다. 비파괴평가는 가동중인 구조물을 정지하지 않고, 구조물의 건

전성을 평가할수 있는 방법으로 급속하게 발전하고 있다. 특히 초음파법에 의한 신호 해석을 통하여 재료의 특성 평가와 신호가 가지는 여러 가지 정보를 분석하는 비파괴 평가 방법이 여러 연구자들에 의하여 소개되고 있다.

비파괴 평가에서 초음파법을 사용한 재료 열화 손상 평가는 탐촉자에 수신된 초음파 펄스의 주파수에 대한 에너지 분포가 시간적으로 어떻게 변화하는지를 정확히 파악함으로써 재료 내부의 상태변화 등의 정보를 얻는 데 매우 중요하다. 하지만, 초음파 펄스 신호의 주파수 특성을 분석하는 방법으로는 대부분 고속 푸리에 변환이 주로 이용되고 있다. 이 방법으로는 고체 내를 전파하는 파동에 대하여, 시간 변화에 따른 주파수 변화 및 특성을 정확하게 파악하기 어렵다. 따라서, 최근 몇 년 사이에 비파괴 평가에서 시간-주파수 해석법을 이용한 연구가 많은 연구자들에 의하여 활발하게 진행되고 있으나, 아직 이론적인 접근에만 국한되어 있을 뿐, 초음파를 이용한 재료 열화 평가에 대한 연구는 많은 여지를 남겨 놓고 있다.

† 부경대학교

E-mail : namkw@pknu.ac.kr

TEL : (051)620-1640 FAX : (051)624-0746

\* 한국기계연구원

\*\* 부경대학교

본 연구에서는 비파괴 평가에 시간-주파수 해석법의 적용 가능성을 검토하기 위하여, 실구조물에서 장시간 사용한 배관을 채취하여 초음파법에 의하여 시간-주파수 해석법으로 열화특성을 평가하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

본 실험에서는 에너지 관련 플랜트에서 30년간 사용한 배관(ASME SA-155,  $\Phi = 762$  mm,  $t = 9.5$  mm)이 손상됨에 따라서 교체된 것을 채취하여 사용하였다. 배관의 내부에는 부식 등의 손상을 방지하기 위하여 고무를 절연 피복하고 그 위에 세라믹스를 피복한 것으로, 장시간 사용함에 따라서 내부는 Fig. 1과 같이 손상되었다. Fig. 1(a)는 배관의 외부이고, Fig. 1(b)는 배관의 내부이다. 초음파법에 의한 열화평가는 초기의 모재 및 용접부가 없으므로, Fig. 1과 같이 비교적 건전한 부분인 BM11 및 WM11을 기준으로 하였다. BM11과 WM11은 강재부, 피복 고무 및 피복 세라믹스가 건전한 상태이다. BM12와 WM12는 강재부는 건전, 피복 고무는 손상되고, 피복 세라믹스는 소실된 상태이다. BM22와 WM22는 강재는 부식, 피복 고무 및 피복 세라믹스는 소실된 상태이다. 탐촉자의 접촉 압력이나 접촉상태에 따른 영향을 제거하기 위하여 클램프를 사용하여 탐촉자를 일정한 힘으로 고정시켰다. 접촉 매질은 점성이나 음향 임피던스, 접촉 매질층의 두께 및 온도 등의 영향에 따른 초음파의 변환 특성을 고려하여 독일 Krautkrämer社의 ZG-F 접촉매질을 사용하였다.

초음파는 매질에 따라 다른 속도 값을 가지며, 일정분포의 주파수를 매질 내로 진행시키더라도 다중 반사되어 수신되는 저면에코의 주파수 성분은 각각 다르게 된다. 이는 매질의 특성 즉, 결정조직이나 미소결함, 잔류 응력 등의 분포상태나 부식, 석출 등의 재질의 열화정도 등에 의존한다. 따라서 초음파 탐상시스템과 실시간 시간-주파수 분석 프로그램을 이용하여 피검체의 다중 저면 반사파의 주파수의 분포상태 및 각 주파수성분의 진폭스펙트럼(음압 또는 초음파 빔량)을 분석함으로써 피검체의 결정립조직, 잔류응력, 미소결함 등의 분포 상태 및 부식, 석출 등에 의한 열화도를 평가할 수 있다. 본 연구에서는

최근에 신호해석의 방법으로 많이 사용되고 있는 time-frequency analysis의 한 방법 중, raw 시그날의 시간영역을 짧게 나누어 하나의 블록을 만들고 각 블록을 푸리에 변환함으로써 수신신호를



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Outer surface, and (b) Inner surface of pipe

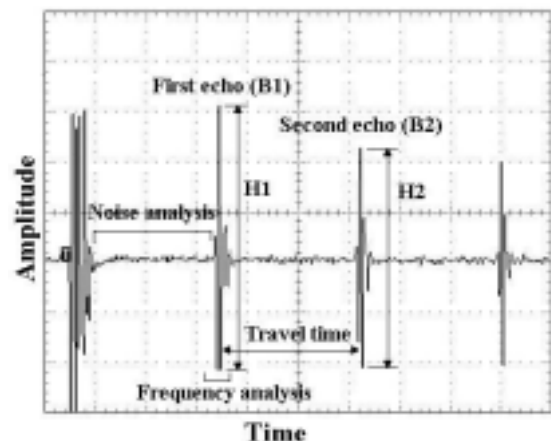


Fig. 2 Ultrasonic echo (A-Scan mode)

시간함수에 대한 주파수, 진폭에너지, 스펙트럼 등의 정보로 분석하는 Short-Time Fourier Transform( STFT법) 을 사용하였다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 제1 저면 에코(B1)의 주파수 변화를 측정하고, 상태에 따른 주파수 변화를 조사하여 재료의 열화 상태를 평가하였다.

### 3. 실험 장치

초음파 시험에 사용된 장비로서는 독일 Krautkrämer社의 USD 15 디지털 초음파 탐상기를 사용하였으며, GAGE社의 CSLITE 고속 A/D변환기를 이용하여 실시간적으로 초음파 신호를 계측하였다. 그리고, 주파수 특성을 파악하기 위하여 Panametrics社의 5MHz(0.5inch) 광대역 센서를 사용하였다. Fig. 3은 본 실험에서 사용된 장비의 Block diagram으로서 초음파 시험의 개략도를 나타낸다. Fig. 4는 본 실험에 사용된 FFT와 시간-주파수 해석 프로그램으로서 좌측 상단의 창은 시간-주파수 해석을 표현하며, 우측 상단의 창은 FFT 분석 결과를 나타낸다. 그리고, 하단의 큰 .

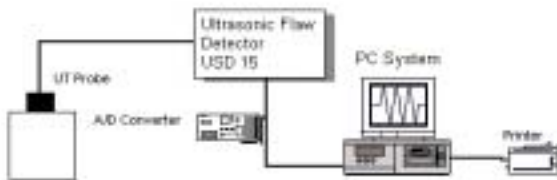


Fig. 3 Block diagram of experiment setup for Ultrasonic test

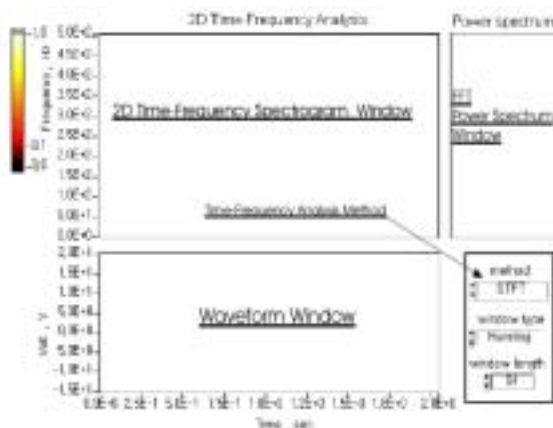


Fig. 4 FFT and Time-Frequency Analysis program

### 4. 저면 에코의 주파수 분석

초음파의 저면 에코 주파수는 결정립의 크기, 결정립계의 석출물 및 표면의 거칠기에 영향을 받기 쉬우며, 고주파수일수록 그 영향은 더 커진다. 본 실험에서는 각 시험편의 제1 저면 에코의 높이를 탐상기의 CRT 화면의 80%로 일정하게 조정된 후, 제1 저면 에코의 주파수 변화를 시간-주파수 해석법을 이용하여 분석하였다.

Fig. 5는 시험편의 외부에서 측정한 제1 저면 에코를 STFT법으로 분석한 결과이다. (a) BM11과 WM11의 부분은 사용한 5 MHz 광대역 초음파 센서의 중심주파수와 비슷한 4 MHz와 4.5 MHz가 나타나고 있으나, (b) BM12와 WM12는 3.5 MHz와 2.5 MHz, (c) BM22와 WM22는 2.5 MHz가 중심 주파수로 나타났다. 이와같이 손상부가 발생할수록 고주파수 영역의 주파수들이 감소하고 중심 주파수가 낮아짐을 알 수 있었다.

Fig. 6은 시험편 각 부분의 중심 주파수의 변화를 나타내고 있다. BM과 WM에 있어서 손상이 심할수록 중심 주파수가 감소하고 있음을 알 수 있다. 주파수가 높을수록 열화 손상에 따른 결정립의 조대화와 석출물 등에 의한 산란 및 감쇠의 영향을 받기 쉽기 때문에, 고주파수 성분은 손상의 증가에 따라 급속히 감소되고, 중심 주파수도 저하되는 것을 알 수 있다. 또한, 고체 내부를 전파하는 초음파는 일반적으로 분산성을 가지며, 재료의 점탄성 특성과 미세적인 구조에 의하여 분산성은 현저하게 달라질 수 있다. 보통 초음파 펄스는 어느 유한의 대역폭을 가지며, 그 대역에 포함된 여러 종류의 주파수 성분으로부터 구성되기 때문에, 재료의 조직 변화에 따른 에코 파형에 포함된 각 주파수 성분은 영향을 받기 쉽다.

Fig. 7은 시험편 각 부분의 제1 저면 에코를 시간-주파수 해석법으로 분석한 결과를 3차원으로 나타낸 것이다.

이상에서 사용중인 구조물은 초음파법으로 검출한 제1저면 에코를 시간-주파수법으로 분석하면 건전성을 평가 할 수 있다고 판단된다.

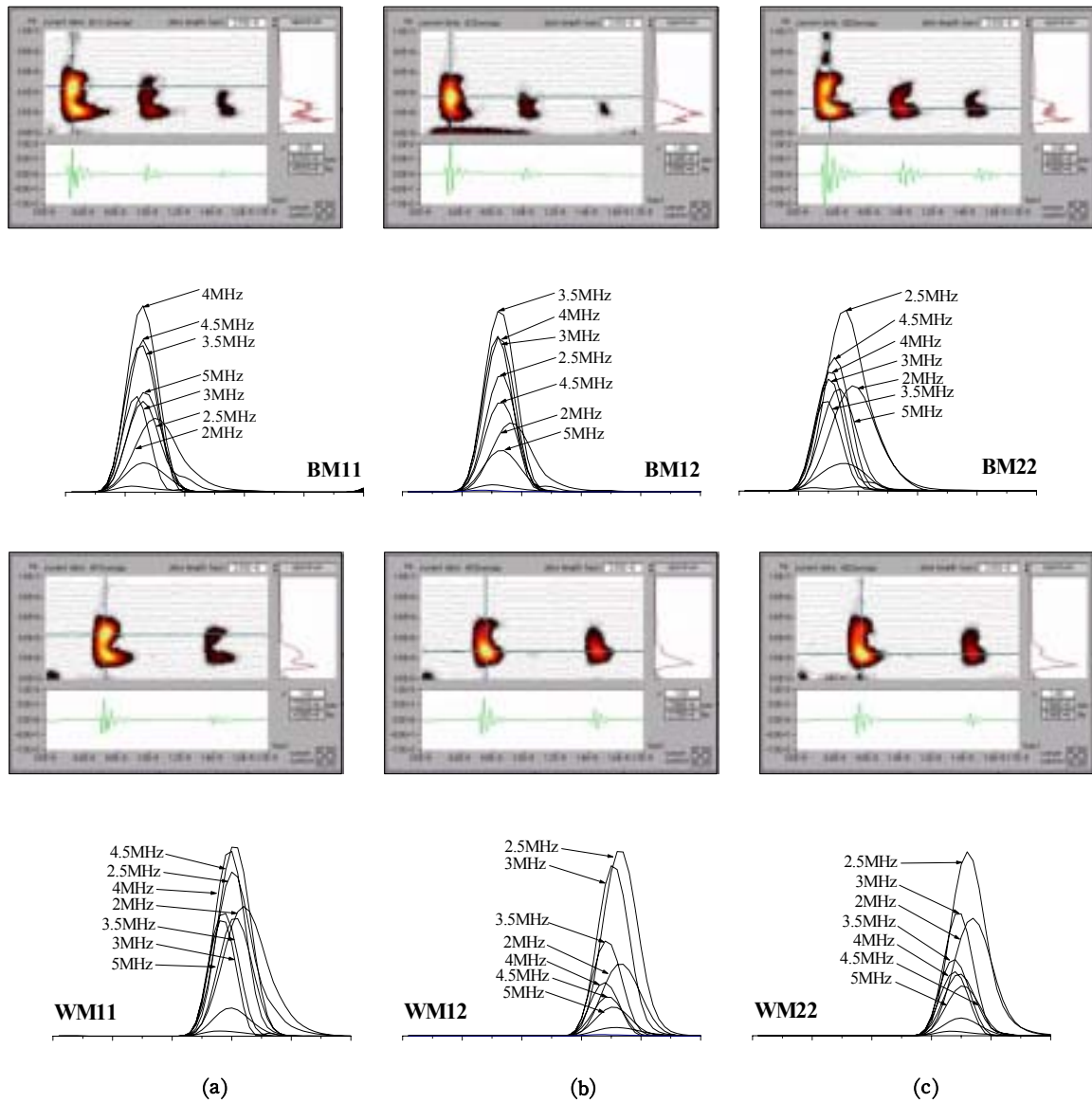


Fig. 5 STFT analysis of B1 echo measured from outer surface

### 5. 결 론

본 연구에서는 비파괴 평가에 시간-주파수 해석법의 적용 가능성을 검토하기 위하여, 실구조물에서 장시간 사용한 배관을 채취하여 초음파법에 의하여 검출된 제1저면 에코를 시간-주파수 해석법을 이용하여 분석하였다. 주파수 분석법을 이용한 배관부의 손상 평가에서 중심 주파수 및 에코 파형 중의 각 주파수 성분마다의 감쇠 정도를 정확하고 용이하게 분석할 수 있었다. 시간-주파수 해석법을 초음파 신호의 비파괴적 특성 평가에 적용한다면 보다 신뢰성 높은 분석이 가능

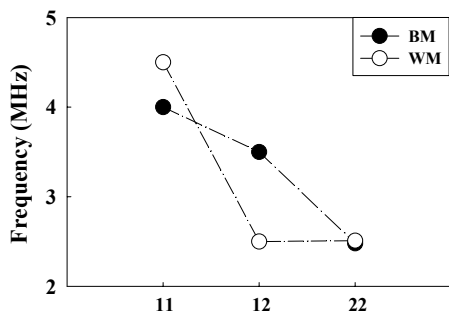


Fig. 6 Frequency of each parts

할 것으로 생각되며, 이들 신호에 대한 새로운 비파괴 평가법으로 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 차후 더욱 정밀한 계측 시스템의 구축

과 함께 여러 가지 시간-주파수 해석법을 초음파 신호의 비파괴적 해석에 적용한다면, 고정도의 비파괴 평가를 할 수 있을 것으로 판단된다.

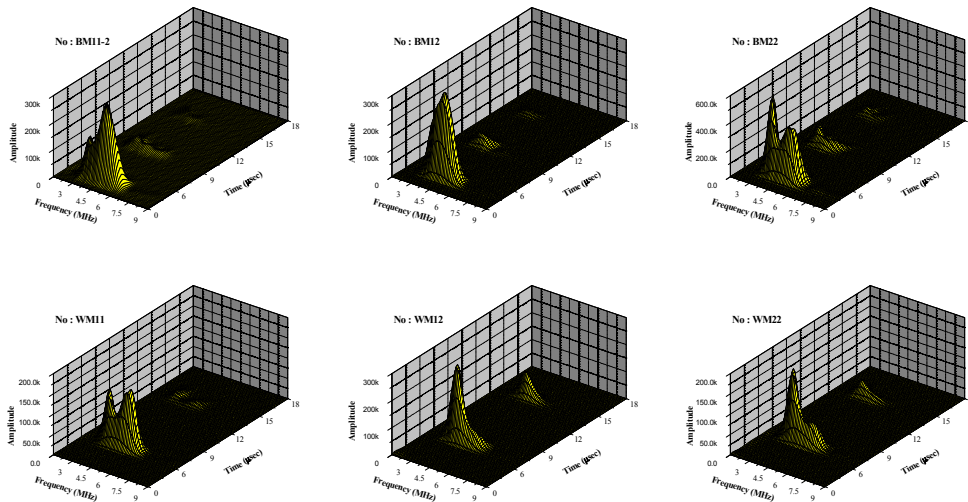


Fig. 7 3D representation of STFT analysis of B1 echo measured from outer surface

### 참고문헌

- (1) Kiwoo Nam, Ajit Mal (2001), "Characteristics of Elastic Waves Generated by Crack Initiation in Aluminum Alloys under Fatigue Loading", Journal of Materials Research, Vol. 16, No. 6, pp. 1745 ~ 1751.
- (2) Ki-Woo Nam, Seok-Hwan Ahn and Chang-Kwon Moon (2003), "Fracture Behavior of CFRP by the Time-Frequency Analysis Method", J. of Applied Polymer Science, Vol. 88, Issue 7, pp. 1659 ~ 1664.
- (3) Seok-Hwan Ahn and Ki-Woo Nam (2003), "The determination of JIC using the time-frequency analysis method", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 31, No. 4, pp. 347 ~ 351.
- (4) Seok-Hwan Ahn and Ki-Woo Nam (2003), "Characteristics of Elastic Waves Generated by Fatigue Crack Penetration and Growth in an Aluminum Plate, KSME International journal, Vol. 17, No. 11, pp. 1599 ~ 1607.
- (5) Redouane Draï, Mohamed Khelil and Amar Benchaala, 2002, Time frequency and wavelet transform applied to selected problems in ultrasonics NDE, NDT & E International, Vol. 35, No. 8, pp. 567-572
- (6) S. Ahmed, R. B. Thompson and P. D. Panetta, 2003, Ultrasonic Attenuation as Influenced by Elongated Grains, REVIEW OF PROGRESS IN QUANTITATIVE NONDESTRUCTIVE EVALUATION, Vol. 22, pp. 109-116
- (7) Bao Mi and I. Charles Ume, 2002, Frequency spectrum analysis of laser generated ultrasonic waves in ablative regime, REVIEW OF PROGRESS IN QUANTITATIVE NONDESTRUCTIVE EVALUATION, Vol. 21 pp. 363-370
- (8) 川嶋 紘一郎, 藤井 隋 他 "固体中の超音波パルス傳ば時間を求める各種デジタル測定法の比較", 日本機械學會論文集(A集)59卷567号 pp286-291, 1993

- (9) Jeff Koay, Julius Frankel, Stephan C.Schroeder and Pankaj, "Signal Detection and Noise Suppression Using a Wavelet Transform Signal Processor: Application to Ultrasonic Flaw Detection", IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Vol. 44, 1.1997
- (10) M.A.Malik, X.M.Jin and J.San iie, "Joint Time-Frequency Processing of Ultrasonic Signals", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.15, 1996
- (11) B.Boashash, "Note on the Use of the Wigner Distribution for Time-Frequency Signal Aalysis", IEEE Trans. Acoustics, Speech, Signal Processing, Vol. 36, No. 9, pp1518-1521, 1988
- (12) Allan McCray and Stuart Kramer, "The Time-Frequency Analysis of Ultrasonic Signals", Review of Progression Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.10A, 1991
- (13) C.H.Chen and J.C.Guey, "On the Use of Wigner Distribution in Ultrasonic NDE", Review of Progress in Quantitative Evaluation, Vol. 11A, 1992
- (14) X.M.Jin, M.A.Malik and J.Saniie, "Singular Value Decomposition of Wigner Distribution for Time-Frequency Representation of Ultrasonic Echoes", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 15, 1996
- (15) 武捨 貴昭,川 浦淳一,“ウィグナー分布とその超音波非破壊評価への應用“日本非破壊學會 第4卷第9号 pp587-591, 1991
- (16) 石光俊介,北川 孟,“周波数領域適應フィルタを用いたWigner分布の干渉項除去”,日本機械學會論文集(c編)61港584号 pp226-231,1995
- (17) 石光俊介,北川 孟,“Wigner分布の補正と非正常信号解析への適用”,日本機械學會論文集(C編) 57港535号 pp141-148,1991
- (18) 福田義徳,北川 孟,“時間-周波数分析にとる超音波信号の弁別”,日本機械學會文集(C編)63港609号 pp145-152,1997
- (19) 杵築 兼史,宇野 裕喜,北川 孟,石光 俊介,“Auto-Wigner分布による時系列解析”,日本機械學會論文集(C編)58港552号, pp107-113,1992
- (20) 太田 博光,瀬戸 邦聰,“短時間FFTとWigner分布によるジェットスクリーチの時間-周波数解析”,日本機械學會論文集(C編)63港612号, pp171-175,1997