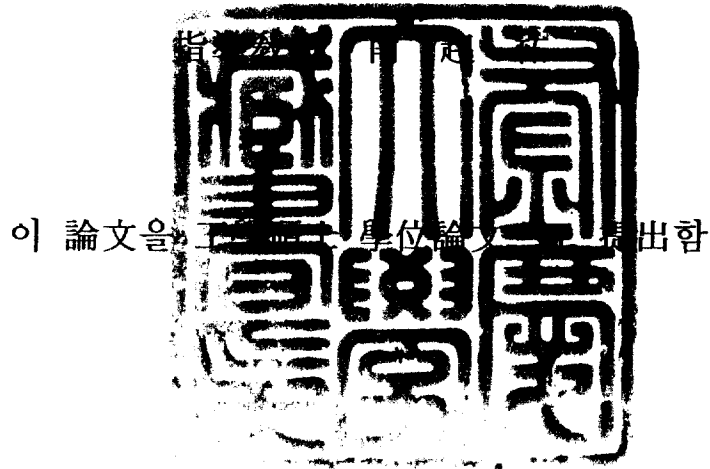


工學碩士 學位論文

열화된 에너지 플랜트 배관 및 감육된 인코넬 배관의 초음파 특성



이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함

2006 年 2月

釜慶大學校 産業大學院

材料工學科

都 和 湜

都和湜의 工學碩士 學位論文을 認准함

2005年 12月

주 심 공학박사 김 진 욱 (인)

위 원 공학박사 안 석 환

위 원 공학박사 남 기 우

목 차

Abstract	iii
1. 연구배경	1
2. 초음파에 의한 비파괴 검사법	6
2.1 초음파 탐상법	6
2.1.1 초음파의 정의 및 계측 방법	6
2.1.2 초음파 파라미터에 의한 물성 분석법	7
2.2 음향방출(AE)법	10
2.2.1 음향방출의 특징 및 응용분야	10
2.2.2 음향방출의 정의 및 발생기구	11
2.2.3 음향방출신호의 처리 및 분석법	13
2.3 탄성파의 신호처리 및 해석 알고리즘	15
2.3.1 Fast Time Fourier analysis(FFT분석)	15
2.3.2 Time-Frequency Analysis(시간-주파수분석)	16
2.3.3 Short Time Fourier analysis (STFT분석)	17
2.3.4 Wavelet Analysis (WT 분석)	19
2.3.5 시간-주파수 영역에서 신호처리를 통한 탄성파 파라미터의 해석 알고리즘	21
3. 에너지 플랜트 배관의 시간-주파수 해석	23
3.1 서 론	23
3.2 시험편 및 실험방법	24
3.3 실험 장치	26

3.4 저면 에코의 주파수 분석	27
3.5 요약	31
4. 인코넬 690 세관의 탄성과 특성	32
4.1 서론	32
4.2 시험편 및 실험방법	34
4.3 실험 결과 및 고찰	37
4.3.1 파형과 주파수 스펙트럼	37
4.3.2 웨이브렛(wavelet) 해석	43
4.3.3 중심 주파수 특성	47
4.4 요약	57
5. 결 론	58
참고문헌	59

Ultrasonic Characteristics of Degraded Energy Plant Pipe and Wall Thinned Inconel Tube

Hwa-Sik Do

*Department of Materials Science and Engineering
Graduate School of Industrial
Pukyong National University*

Abstract

In this study, the pressure vessel piping with corrosion used during long term and the inconel 690 tube with artificially all-circumferential wall thinning 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. Inconel 690 tube with all-circumferential wall thinning could be evaluated with dominant frequency by wavelet analysis. 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. 연구배경

1986년 12월 9일 미국 버지니아전력 Surry원자력발전소 2호로 2차측 급수관에 배관파단사고가 발생하여 작업인원 8명이 사상하였다. 파손상황은 파손 곡관부의 내면은 감육되었다. 이것은 배관에 고속으로 흐르는 냉각수의 난류에 의한 침식(erosion)이었다. 초음파탐상에 의한 곡관부의 두께는 표면의 전역에서 감육이 검출되었다. 곡관부의 용접부 근방에서 국부적인 공동(cavity)이 발견되었다. 초기 두께는 12.7 mm이었으나, 감육되어 2.29 ~ 3.56 mm이었으며, 국부적으로 1.22 mm로 상당히 감육되었다. 금속조직은 급격한 변형은 발견되지 않았다. 파면은 평면응력 상태인 연성형 균열로 시간 의존형 파손이었다. 급수펌프입구 배관은 곡관부(T joint와 곡관부 연결부 아랫부분)의 내면이 감육하여, 곡관부는 원자로 기동 후 통상 발생하는 압력상승에 의하여 감육부분이 손상하고, 연성 파단하였다. 배관내면이 감육한 직접적인 원인은 배관부의 배관형상(T joint와 곡관부)에 의한 국소적인 난류이지만, 수질, 수온 등의 조건이 중복된 침식·부식(erosion·corrosion)작용에 의한 것이라고 한다^(1,2).

Surry원자력발전소 2호로 2차측(Fig. 1.1) 급수관계 배관파단사고는 최초에 용접부 부근의 국부감육부(cavity)에서 축방향으로 균열이 진전, 정지하여 증기누설이 발생하였다. 그 후 다른 위치에서 국부감육부를 기점으로 360°에 걸쳐서 원주방향으로 균열이 진전하였다고 추정하고 있다. 더욱이 전자주사현미경에 의한 단면의 관찰에서 2군데의 파괴 기점은 전면소성 연성파괴특유의 덩플 형상이 관찰되어, 파괴는 대규모 항복 후에 발생하였다고 추정되고 있다. 이와 같은 파괴는 실단면응력 기준(Net-Section Collapse Criterion)으로 평가가 가능하다^(3,4).

Fig. 1.2와 Fig. 1.3과 같이 2004년 8월 발생한 일본관서 전력 미하마 원전 3호기의 증기분출사고는 복수관내의 유량조정용의 오리피스 후방에서 2차측 냉각수의 난류가 발생하여 탄소강관 내부가 감육되어 일시에 파단하였다. 파단 후 배관의 두께는 10 mm이어야 할 곳이 1.4 mm 밖에 되지 않았다. 부식과 마모가 빠르게 소용돌이치는 수류와 어울려

서 금속관을 내측에서 감육하였으며, 이 사고로 5명이 사망하였다.

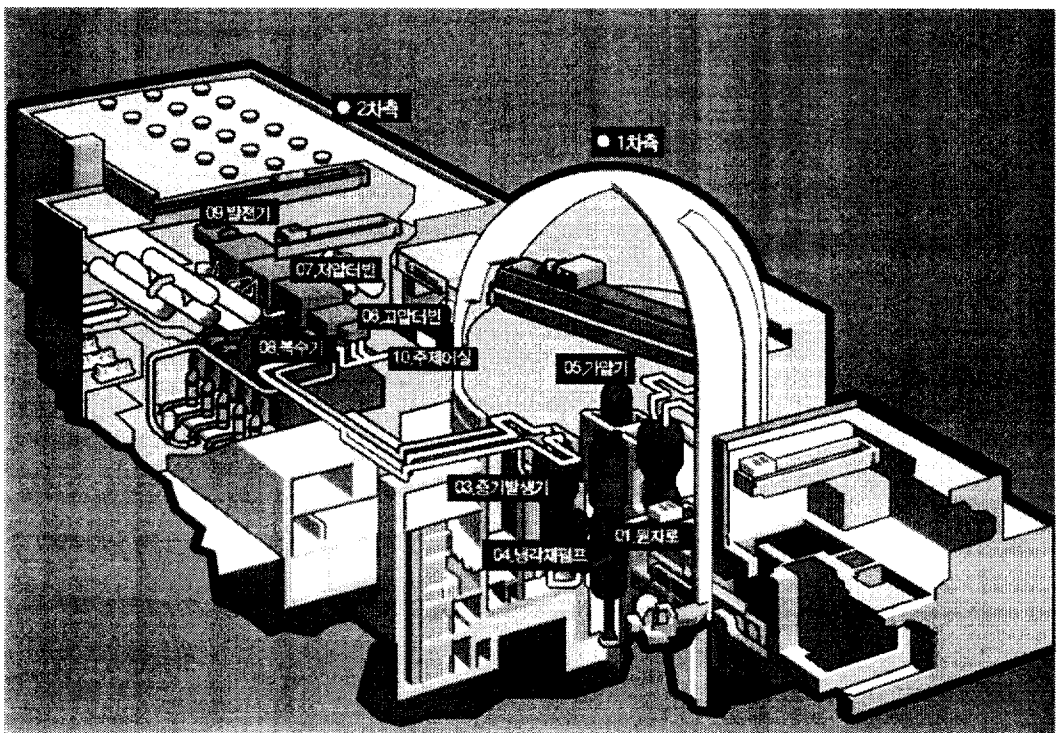


Fig. 1.1 Illustration of nuclear power plant



Fig. 1.2 Steam condenser pipe of brokeed Mihama nuclear power plant

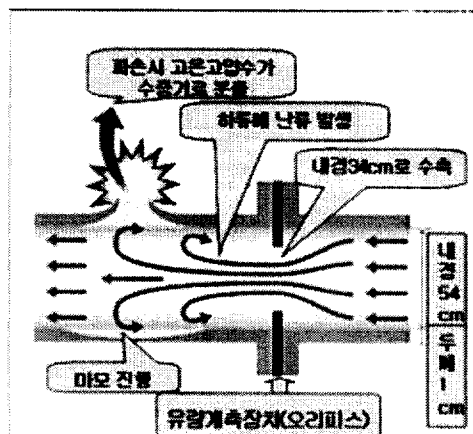


Fig. 1.3 Illustration of brokeed steam condenser pipe

2002년 4월 5일 오후 6시 33분경 발생한 울진4호기 1차측 증기세관 파단사고는 핵발전소의 중심, 원자로를 식히는 냉각수 수위가 급속히 내려가기 시작했다. 1.7센티미터밖에 되지 않는 증기발생기의 가느다란 관이 가로로 잘려나가면서(세관파단) 이 세관을 통해 13분간 45톤의 물이 순식간에 쏟아져 나왔다. 증기로 가득 차 있던 높이 21미터의 증기발생기는 순식간에 물이 차 올랐다. 경보는 요란하게 울렸고 비상냉각장치가 작동하지 않아 운전원은 급히 수동으로 냉각장치를 작동시켜 원자로가 녹아내리는 것(노심용융)을 막았다. 다행히 당일 새벽 정기검사를 위해 가동이 중단된 상태여서 최악의 사고는 피할 수 있었다.

울진 4호기 세관파단 사고는 미국과 일본에 이어 세 번째로 일어난 세계적으로 드문 사고 유형이다. 이와 동일한 사건이었던 미국의 노서아나 1(North Anna 1, 1987년)과 일본의 미하마 2(Mihama 2, 1991년)의 경우 70년대 건설되었고, 각각 9년과 19년간 가동되어 노후된 발전소였던 것에 비교하면 울진4호기의 사고는 가동 후 2년 3개월밖에 지나지 않은 신형 한국표준형 핵발전소에서 일어난 사고로 이 분야에서는 ‘세계 신기록’을 세운 셈이다. 하지만 이 사고는 이미 예견된 사고였다는 것이 국외 전문가들의 반응이다. 위험천만했던 이 사고의 원인이 된 증기발생기의 소재, 인코넬-600MA는 지난 1980년대부터 심각한 문제가 있다는 사실이 세계적으로 인식되어 왔기 때문이다. 미국에서만 1975년부터 현재까지 총 9차례의 세관파열 사고, 작업자들의 심각한 방사능 피폭, 68건의 증기발생기 교체를 불러온 핵심원인으로 인코넬-600MA 재질이 꼽히고 있다.

에너지 관련 플랜트의 주요 배관은 막대한 에너지가 운송된다. 이와 같은 배관류는 플랜트의 성능과 안전성 유지상 중요한 설비이다. 그 때문에 중요한 배관의 건전성 유지에 대해서는 예방 보전 기술 등에 의하여 특단의 배려가 되어있다. 그러나 에너지 관련 플랜트의 배관은 사용 중에 여러 가지 종류의 열화·손상을 받을 가능성이 있다. 그 중의 하나가 침식·부식(erosion·corrosion)작용에 의하여 발생하는 국소적인 감육을 들 수 있다. 국소감육현상은 배관의 안전과 성능유지상 중요한 문제이고, 미국⁽⁵⁾, 벨기에⁽⁶⁾, 노르웨이 등에서 주목받고 있다. 또, 감육의

허용기준안 등이 검토되고 있다⁽⁵⁻⁷⁾. 그러나 국소적인 감육부를 가지는 배관의 강도와 파괴기구에 관한 계통적인 실험연구는 극히 적고, 그 특성이 해명되어 있지 않는 것이 실상이다^(8,9).

초음파법으로는 열화된 2차측 배관의 열화에 따른 손상 평가를 하였고, 음향방출법으로는 증기세관에 사용되는 감육된 인코넬 배관을 사용하여 감육에 따른 탄성파의 신호로부터 실시간 손상 평가의 적용가능성을 검토하고자 한다.

2. 초음파에 의한 비파괴 검사법

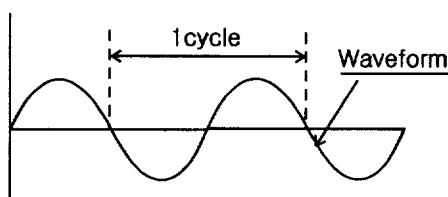
일반적으로 초음파는 적극적인 방법에 의한 초음파법과 음향방출법으로 나누며, 통칭하여 탄성파(elastic wave)라 하며, 산업분야에서 널리 응용되고 있다.

2.1 초음파 탐상법

초음파 탐상법은 표면 및 내부 불연속을 검출하기 위해서 고주파의 음파빔(초음파)을 재료내로 입사시켜 초음파와 물질간의 상호작용을 검출·분석하여 결함의 존재여부, 조직분포, 열화정도 등 재료의 물성을 평가하는 비파괴 시험법으로 펄스반사법, 투과법, 공진법으로 분류 된다.

2.1.1 초음파의 정의 및 계측 방법

초음파란 인간의 귀로 들을 수 있는 가청 주파수인 20 Hz~20 KHz 이상의 주파수를 갖는 음파를 말하며 초음파탐상에는 주로 주파수 0.5 MHz~20 MHz영역의 초음파가 이용된다. Fig. 2.1은 음파의 파형과 주파수 결정방법을 나타내었다. 주파수(frequency : f)는 음파가 진행하는 매질에서 원자의 진동으로 1초당의 cycle수(Hz)로 표기한다. Fig. 2.2에 나타낸 초음파 계측 및 분석 시스템을 이용해 피검체 내부를 통과하여 송·수신된 초음파 신호로부터 신호처리 또는 실측계산에 의해 amplitude(진폭), velocity(속도), attenuation(감쇠), frequency(중심주파수) 등의 파라미터가 분석된다.



※ 1 Hz= 1 cycle per sec

$$T = \frac{1}{f} \quad (T: \text{진동주기}, f: \text{주파수})$$

※ 진동 주기: 1 cycle에 걸리는 시간

Fig. 2.1 Waveform and frequency

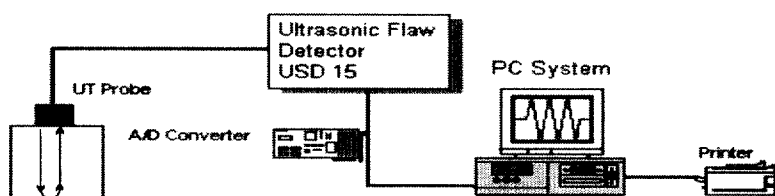


Fig. 2.2 Ultrasonic test and analysis system

2.1.2 초음파 파라미터에 의한 물성 분석법

초음파 탐상법은 공업적·학문적인 목적으로 다양하게 사용되고 있으며 초음파가 연구에 응용되는 전형적인 분야로 재료 물성 결정, 미세구조 특성평가, 열화 평가, 결함의 탐상 등을 들 수 있다. Table 2.1은 초음파 분석법에 의한 재질특성의 분석 대상을 나타낸다. 이러한 재질특성의 분석은 속도, 감쇠, 후방산란, 임계각 반사, 주파수 분석, 노이즈, SNR(신호대잡음비) 등의 파라미터의 분석에 의해 가능하며 특히 속도, 감쇠계수 및 주파수 분포는 E(종탄성계수), G(전단계수), ν (프와송비), ρ (밀도) 등과 같은 재료 물성의 계산 및 결함의 검출, 피로손상 정도의 파악, 결정립 크기 결정 등 재료내부의 미세구조 상태 평가에 많이 사용되고 있다.

Table 2.1 Ultrasonic test methods for materials

1) 재료내부 및 표면에 존재하는 결함 검출 2) 두께 측정, 탄성률 측정, 3) 금속 조직 연구 4) 피검체의 제조 변수의 영향 평가 5) 기타 재료의 부식정도 측정 등 재료의 물리적 제특성 평가 및 연구		
방 법	내 용	대 상
속도 측정	음속 변화 측정	응력측정, 열화, 피로, 부식, 수소취화 등
감쇠 계수 측정	감쇠율 변화 측정	열화, 피로, 결정입도, 부식, 수소취화 등
주파수 분석법	주파수 분포의 변화	열화, 피로, 결정입도, 템프링 취화 등
L_{CR} 과 속도측정	표면파(L_{CR} 파)의 속도	잔류응력, 열화, 가동도 등
산란파 법	후방산란파의 진폭 특성	열화, 피로, 결정입도, 담금질깊이, 편식
L_{CR} 과 임계각법	표면파의 발생 임계각도	잔류응력, 피로, 냉간가공도 등
노이즈 분석법	후방산란파의 주파수 분석	열화, 피로 등

1) 초음파 속도 (V)

초음파의 속도는 재료의 물리적 특성과 파의 종류(또는 진동방식)에 따라 달라지며, 재료의 밀도, 프와송비 및 탄성계수에 따른 함수로 주어진다. 횡파는 탄성계수 및 밀도가 큰 고체 중에서만 전파되므로 액체·기체 중에서의 횡파속도는 구할 수 없다(10). 보통 횡파는 종파의 50%, 표면파는 횡파의 90%의 속도를 가진다. 일반적인 초음파의 속도와 주파수와의 관계는 식(2-1)에 나타내었으며, 고체중의 종파속도는 식(2-2)에 나타내었다.

$$V = \lambda \cdot f \quad (\lambda : \text{파장}, f : \text{주파수}) \quad (2-1)$$

$$V_{L(\text{고체중종파속도})} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2-2)$$

여기서, K : 탄성계수, E : 종탄성계수, ρ : 밀도, ν : 프와송비

2) 초음파의 감쇠(α)

초음파가 매질내를 진행하는 중에 감쇠되는 요인으로 산란, 흡수, 모드변환, 전이손실, 반사 및 분산(확산)등을 들 수 있다. 보통 초음파의 감쇠 정도는 감쇠계수(dB/mm)로 나타내며 이를 관계식으로 나타내면 식

(2-3)과 같다⁽¹⁰⁻¹²⁾.

$$\alpha_{\text{Total}} (\text{dB/mm}) = \alpha_{\text{absorption}} + \alpha_{\text{diffusion}} + \alpha_{\text{scattering}} + \alpha_{\text{transmode}} + \alpha_{\text{reflection}} \quad (2-3)$$

식(2-3)에서 초음파의 감쇠에 비교적 큰 영향을 미치는 인자는 $\alpha_{\text{absorption}}$, $\alpha_{\text{diffusion}}$, $\alpha_{\text{scattering}}$ 으로 그 이외 인자는 일정조건에 의해 제거할 수 있다^(10, 12). 또한 $\alpha_{\text{diffusion}}$ 은 DGS(distance gain size)선도로부터 쉽게 구할 수 있으며, $\alpha_{\text{scattering}}$ 은 초음파의 주파수, 산란, 결정립 직경과 조직분포의 함수로 식(2-4)와 같다. 감쇠 관계식은 Manson의 다결정체 금속내 결정입계에서의 산란에 의한 관계식으로부터 식(2-5)과 같이 간단히 나타낼 수 있다^(10, 12). 그러나 본 실험에 사용된 초음파는 중심주파수 5 MHz(2~8 MHz대의 주파수)이므로 식(2-1) 속도로부터 파장의 길이가 결정립 직경의 0.1배를 초과한다. 따라서 결정입계의 산란에 의한 파의 감쇠는 매우 작아 무시할 수 있다⁽¹⁰⁻¹²⁾.

$$\alpha_{\text{산란}} = \alpha(f, D, \mu, GD, \frac{D}{\lambda}) \quad (2-4)$$

여기서, μ : 입자내 다른 구조, GD : 결정립분포

$$\alpha_{\text{산란}} = \frac{H}{3} D^3 \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^4 = \frac{H}{3} D^3 \left(\frac{\pi f}{V} \right)^4 \quad (2-5)$$

여기서, H : 금속산란인자, D : 결정립직경, f : 주파수, λ : 파장

이러한 상관관계로부터 감쇠계수는 식(2-6)에 의해 간단히 구할 수 있다.

$$\alpha (\text{dB/mm}) = \frac{20 \log \left(\frac{B_1}{B_2} \right) - \Delta da}{2T} - \alpha_{\text{scatter}} \quad (2-6)$$

Δda : 확산손실분, 2T : 빔의 총 진행거리

3) 시간-주파수(f) 분석

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 실시간적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 최근에 신호해석의 방법으로 많이 사용되고 있는 time-frequency analysis의 한 방법 중, raw 시그널의 시간영역을 짧게 나누어 하나의 블록을 만들고 각 블록을 푸리에 변환함으로써 수신신호를 시간함수에 대한 주파수, 진폭에너지, 스펙트럼 등의 정보로 분석하는 Short-Time Fourier Transform(STFT법)을 사용하였다.

2.2 음향방출(AE)법

2.2.1 음향방출의 특징 및 응용분야

(1) 장점

동적 비파괴 검사법이다.

결함탐지 감도가 매우 높다

대상체의 구조나 결함의 크기, 방향 등에 구애받지 않는다.

다른 비파괴 검사법과는 달리 접근이 제한된 부위의 진단이 가능하다.

온-라인 실시간 검사가 가능하다.

재료의 미세 거동 및 재료시험과 병행이 가능하다.

(2) 단점

검사체에 응력이 작용하는 동안에만 적용이 가능하다

(정적 불연속에서는 AE신호가 발생하지 않는다.)

신호대 잡음비 (SNR) 개선이 다소 곤란하다.

주변잡음(noise)의 효과적인 제어가 필요하다.

시험자의 경험과 판단이 분석결과를 좌우하므로 광범위한 전문적 지식이 요구된다.

(3) AE의 응용분야

재료과학적인 연구-재료의 기계적 특성 검사 및 규명

예방안전검사(Proof-Test)-최대하중 또는 파괴압력예측

가동중 검사(In-service inspection, ISI)

사용전 검사(Pre-service inspection, PSI)

실시간 감시(On-line Monitoring)

생산 공정 감시-공구파손, 마모 등

누설탐지 및 위치표정

지질학적 응용-지진 진원지 예측 등

2.2.2 음향방출의 정의 및 발생기구(source mechanism)

음향방출(acoustic emission)은 재료에 가해진 응력이나 충격 등에 외력에 의해 재료내부에서 국부적으로 형성된 변형에너지는 1) slip형성, 격자 이동 등의 소성변형에너지 2) 소량의 열에너지 3) 균열진전에 따른 파면형성에너지 등으로 해소되고 그 잉여 에너지가 탄성파의 형태로 방출되는 현상으로 정의된다. 이때 방출된 탄성파를 음향방출신호(AE signal), 음향방출신호를 검출하는 수단 및 해석법을 음향방출법(AE method)이라 한다. 피검체로부터 방출된 AE신호는 피검체 표면에서 압전 센서를 이용하여 전기적 신호로 변환한 후 처리하게 되며 음향방출신호의 형태는 재료의 특성에 따라서 크게 달라질 수 있다. 최근 초음파와 함께 가동 중 시설의 비파괴 검사법으로 대두되고 있다.

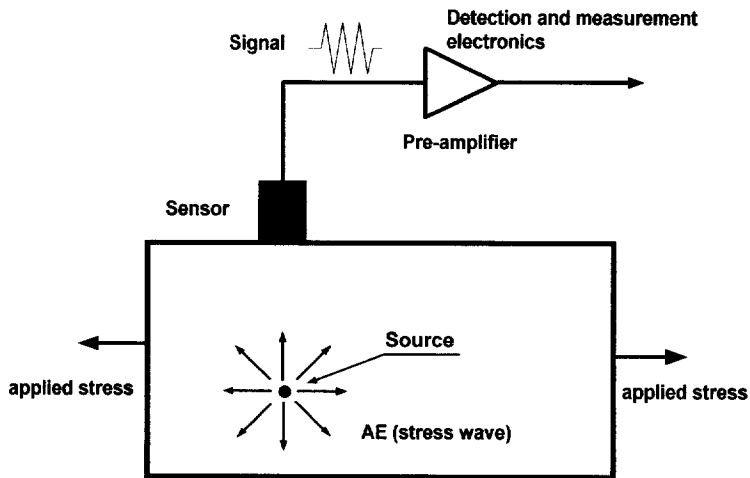


Fig. 2.3 Basic principle of Acoustic Emission

(1) 거시적 관점에서의 AE 발생기구

재료의 소성변형

파괴 및 균열진전 (연성/전성파괴, 취성파괴, 크리프 등),

복합재료(기지재균열, 섬유파단(breakage) 및 분리(debond), 층간분리 (delamination), 피로(fatigue) 화학반응(부식, 응력부식균열 SCC/산화/도금 등)

(2) 미시적 관점에서의 AE 발생기구

전위이동-쌍정(twinning), 슬립(slip)

미세균열-결정입계의 이동/ 개재물과 모재의 파단 및 분리

상변태-마르텐사이트 변태/ 용해/ 응고/소결(sintering)/경화(curing)

(3) 유사발생원

누설(leakage)

공동현상(cavitation)

입자충격(particle impact)

마찰 및 마모(friction & wear)

2.2.3 음향방출신호의 처리 및 분석법

실제 AE신호의 분석에 있어서 파괴형태에 따라서는 파괴시 발생하는 음향방출 횟수가 너무 많아 전체 파형을 기록하여 분석하기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 음향방출의 신호처리 및 분석은 매개변수(parameter)들을 추출하여 시험데이터를 분석하는 것이 일반적이며, 다음과 같은 여러 방법을 이용하여 분석한다^(13,14).

(1) 파형분석법(parameter analysis)

AE신호의 파형이 어떻게 생겼는가 비교하는 방법으로서 rising time (RT, 상승시간), duration time (DT, 유지시간), rising slope (신호의 상승률) 및 frequency spectrum(주파수 분포) 등의 파라미터를 이용하며 이러한 파라미터는 파원의 발생기구와 밀접한 관계가 있다.

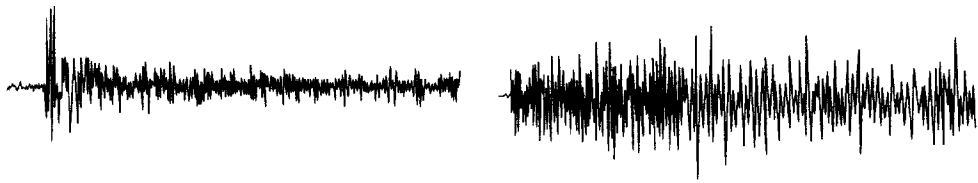
(2) 음향방출 활성화도 분석법(activity analysis)

AE신호의 event 수, count 수, 최대진폭(maximum amplitude) 및 energy 등의 변수를 이용하며 음향방출원의 크기 및 개수와 밀접한 관계가 있다.

(3) Pattern 인식법

특별한 손상기구에서의 AE신호의 특징을 선택하여 신호를 분류함으로써 신호 발생원에서의 손상기구를 규명하는데 이용하고 있다.

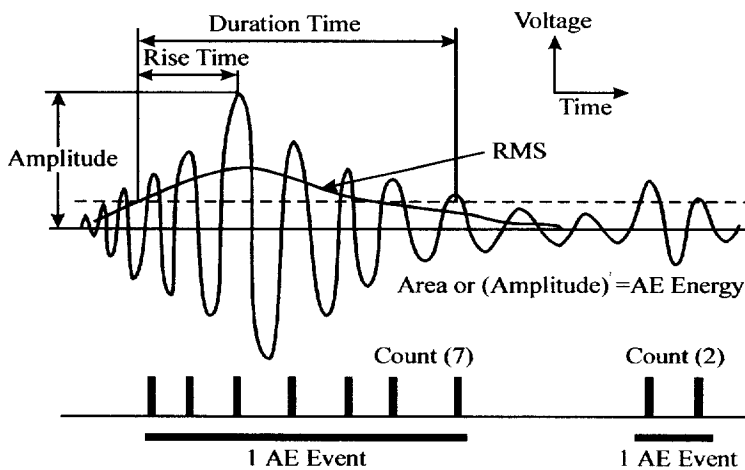
AE신호의 대표적 파형 및 AE신호의 분석 파라미터를 각각 Fig. 2.4, Fig. 2.5에 나타내었다. AE 신호 분석의 파라미터에는 사상(event), 카운터(count), 에너지(energy), 증폭(voltage 또는 amplitude), 지속(duration), 상승시간(rising time), 쇠퇴시간(decay time) 등이 있다. Table 2.2는 음향방출 신호의 진폭에 영향을 미치는 재료의 특성 또는 현상의 종류를 나타내었다.



burst type

continuous type

Fig. 2.4 Type of acoustic emission signal



AE parameter

- 1) AE event count
- 2) AE count
(ring-down count)
- 3) RMS voltage
(in continuous AE)
- 4) Peak amplitude
- 5) AE event energy
- 6) Frequency analysis

Fig. 2.5 Parameters of acoustic emission signal.

Table 2.2 Factors affecting the relative amplitude of acoustic emission response

Factor increasing acoustic emission response amplitude	Factor decreasing acoustic emission response amplitude
High Strength High strain rate Low temperature Anisotropy Inhomogeneity Thick sections Brittle failure (cleavage) Material containing discontinuities Martensitic phase transformation Crack propagation Cast materials Large grain size Mechanically induced twinning	Low Strength Low strain rate High temperature Isotropy Homogeneity Thin sections Ductile failure (shear) Material without discontinuities Diffusion without transformation Plastic deformation Wrought materials Small grain size Thermally induced twinning

2.3 탄성파의 신호처리 및 해석 알고리즘

2.3.1 Fast Time Fourier analysis(FFT분석)

탄성파 신호는 수학적 표현에 의해 시간에 따른 진폭으로 나타내는 시간-진폭의 함수와 주파수 진폭 변화를 나타내는 주파수-진폭의 함수로 표현할 수 있다. 이 때 임의의 탄성파 신호로부터 정보를 얻기 위한 여러 가지 수학적 변환이 이용되며 그 중 FFT 분석법은 프랑스의 수학자 Joseph Fourier에 의해 소개된 푸리에 변환(Fourier Transform)을 이용한 분석법이다.

시간함수 $f(t)$ 에 대한 푸리에 변환은 다음 식과 같이 표현된다.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2-7)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2-8)$$

$F(\omega)$ 를 $f(t)$ 의 푸리에 변환이라고 하며, 전체 시간 영역에 대한 신호의 주파수 성분을 표현할 수 있다. 즉 전 시간영역에서 신호를 푸리에 변환에 의해 주파수-진폭의 관계를 나타내는 분석화면을 얻을 수 있고 이로부터 주파수 성분을 분석한다. 그러나 푸리에 변환법은 전 시간 영역에 대한 신호의 주파수-진폭을 표현하므로 분석된 신호의 주파수 성분의 수신 시간대에 대한 정보를 상실하게 되며 각각의 시간 성분에 따른 주파수 성분의 분석이 불가능하다. 따라서 신호가 시간에 따라 주파수 성분이 변하지 않는 정상신호(stationary signal)일 경우에는 문제가 되지 않지만 시간변화에 따라 주파수 성분이 변화하는 비정상신호(non-stationary signal)의 분석에 있어서는 시간경과에 따른 주파수 성분의 변화를 분석할 수 없다는 단점이 있다.

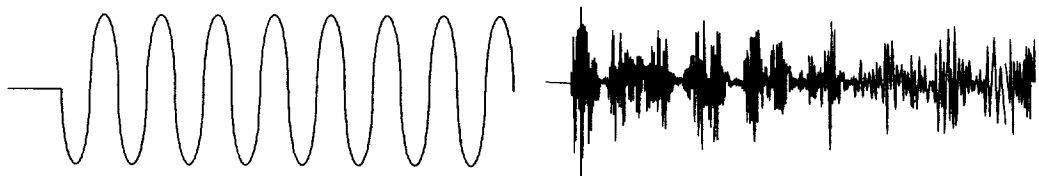


Fig. 2.6(a) stationary signal Fig. 2.7(b) non-stationary signal

2.3.2 Time-Frequency Analysis(시간-주파수분석)

지금까지 신호의 주파수 성질을 연구하는 가장 일반적인 방법이었던 푸리에 변환은 비정상신호(non-stationary signal)를 정확히 표현할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 단점을 보완한 새로운 신호 해석법인 시간-주파수 해석법들이 개발되었다. 시간과 주파수의 2차원 평면상에 신호의 수신시각에 따른 주파수 변화를 표현하는 시간-주파수 해석법의 특징은 첫째, 정상신호(stationary signal)뿐만 아니라 비정상신호(non-stationary signal)를 푸리에 변환에 비하여 상세하게 분석할 수 있다. 즉, 시간 변화에 따른 주파수 변화를 시간-주파수 평면상에 정확히 표현할 수 있다는 것이다. 둘째, 일반적으로 노이즈는 시간과 주파수 영역에서 퍼지는 특징이 있으며, 신호는 짧은 시간 영역 또

는 좁은 주파수 대역에 집중하는 성질을 가진다. 따라서 노이즈가 포함된 신호를 분석할 경우 시간-주파수 평면상에서 노이즈와 신호의 구별이 쉽고, 노이즈 제거가 쉽다는 장점이 있다. 이와 같이 시간-주파수 해석법은 반세기 이전부터 개발되기 시작하였으며, 시간 영역을 짧게 나누어 하나의 블록을 만들고 각각의 블록에 대해 푸리에 변환을 하는 Short Time Fourier Transform (STFT)로부터 시작하여, Dennis Gabor에 의해 expansion과 series의 개념을 이용한 Gabor expansion, Eugene P. Wigner의 상관함수를 이용한 Wigner-Vill distribution(WVD), Kernel 함수를 이용한 Choi-Williams distribution (CWD)과 1980년대 말 이론이 정립된 wavelet transform등 여러 가지 시간-주파수 해석법이 사용되고 있다. 최근에는 하드웨어의 급속한 발달에 따른 빠른 연산처리가 가능하게 됨으로서 실시간적인 분석이 가능하게 되었다. 이러한 시간-주파수 해석법들은 크게 선형계열과 비선형계열로 구별할 수 있고 비선형 알고리즘(nonlinear algorithm)을 가지는 Wigner-Ville distribution과 Choi-Williams distribution 등은 시간과 주파수 영역에서의 분해능이 아주 높다는 장점을 가지는 반면, 간섭 현상에 의한 간섭항(cross-term)이 발생하는 단점을 가지고 있다. 반면, 선형 알고리즘(linear algorithm)을 가지는 Short Time Fourier Transform과 Gabor expansion 등은 간섭 현상을 일으키지는 않지만, 분해능이 다소 떨어지는 단점을 가지고 있다.

2.3.3 Short Time Fourier analysis (STFT분석)

Short Time Fourier Transform(STFT)은 푸리에 변환(FFT)이 시간 변화에 대한 주파수 표현을 하지 못하는 단점을 보완하여, 전체 시간영역을 짧은 시간 단위로 신호를 분리하고 푸리에 변환하는 시간-주파수 분석(time-frequency analysis)의 한 방법이다. 즉, 시간과 주파수 영역에서 동시에 존재하는 창 함수(window function)를 이용하여 각 시간에서의 주파수를 구하는 방법으로 식(3-13)과 같이 표현된다.

$$STFT(t, \omega) = \int s(\tau) \gamma_{t, \omega}^*(\tau) d\tau = \int s(\tau) \gamma^*(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2-9)$$

$$SP(t, \omega) = |STFT(t, \omega)|^2 \quad (2-10)$$

식(2-9)는 일반적인 내적(inner product)을 이용한 표현으로서, signal $s(t)$ 와 elementary function $\gamma(\tau - t)e^{j\omega\tau}$ 사이의 상관성을 나타내며, 이로부터 자기 상관, 상호상관, 등에 의한 위상식으로부터 위상속도 군속도 등을 분석할 수 있다. 식(2-10)은 STFT spectrogram으로서 시간-주파수 평면상에 주파수 성분의 에너지 분포를 나타내는 것으로서 STFT의 자승으로 표현된다. 창 함수 $\gamma(t)$ 는 Fig. 2.8에서와 같이 시간 함수 $s(t)$ 에 대해서 전 시간에 걸쳐 이동하면서 각 시간에 대한 푸리에 변환을 행하여 시간-주파수 평면상에 표현하는 방법이다. 그러나 창 함수의 크기에 따라 시간 또는 주파수 분해능이 달라지므로, 시간 영역의 분해능을 높이기 위해서는 주파수 분해능이 떨어지게 되고, 주파수 분해능을 높이기 위해서는 시간 영역의 분해능이 떨어지는 창 효과(window effect)가 발생하는 단점이 있다. Fig. 2.9(a)는 비정상신호의 Short Time Fourier Transform 분석 결과를 나타내며, Fig. 2.9의 (b) 및 (c)는 Short Time Fourier Transform의 창 효과를 나타내고 있다^(12, 15). Fig. 2.10은 STFT분석의 3차원 분석결과를 나타낸다.

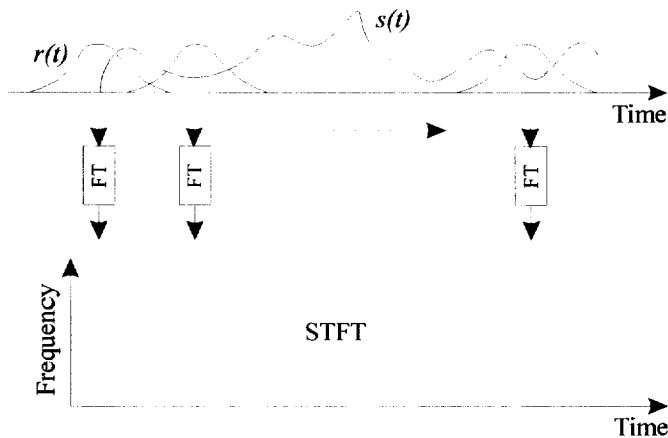
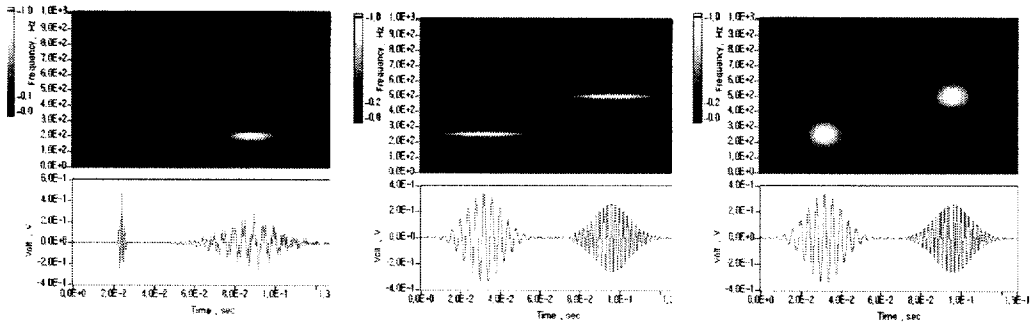


Fig. 2.8 Short Time Fourier Transform



(a) Short Time Fourier Transform in 2D (b) High resolution in time domain (c) High resolution in frequency domain

Fig. 2.9 Short Time Fourier Transform in 2D representation and Window effect

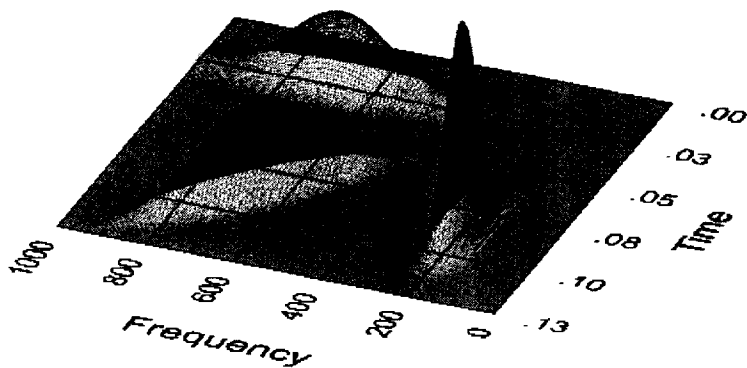


Fig. 2.10 Short Time Fourier Transform in 3D representation

2.3.4 Wavelet Analysis (WT 분석)

먼저 신호를 분석하는 가장 일반적인 기법인 Fourier Transform(FT)은 시간의 함수로 나타난 값을 주파수의 함수로 바꾸어주는 기술이다.

즉 시간에 따라 변화하는 신호를 주파수가 다른 여러 개의 사인파가 중첩된 것으로 보고 각각의 사인파의 크기를 구하는 방법이다. 이 방법은 주파수가 다른 여러 개의 사인파가 섞이는 전기신호를 분석하는데 특히 유용하며 신호 중에서 우리가 원하지 않는 주파수의 신호만 제거해서 노이즈를 줄이는데 사용된다.

그러나 Wavelet은 좀 더 발전된 형태의 FT라고 할 수 있다. 무한히 반복되는 사인파를 기본파형으로 이용하여 주파수만을 변화시키며 상관 관계를 밝히는 FT에 비해 Wavelet은 한 파장의 파형(사인파일 수도 있고 아닐 수도 있다)을 기본파형으로 하여 그 크기와 위치를 변화시켜가며 상관관계를 밝히는 것이다. 여기서 크기를 변화시키는 것은 FT의 주파수 변화와 같은 개념이라고 볼 수 있으며 위치를 변화시키는 것은 Wavelet만의 독특한 방법이다.

FT의 경우 무한히 반복되는 사인파가 기본파형이므로 주파수의 함수로 바꾸었을 때 시간 정보가 사라진다는 단점이 있다. 즉, 어떤 주파수의 성분이 많은지는 알 수 있지만 그 성분이 시간적으로 어떤 위치에서 많이 나타나는지는 알 수 없다. 하지만 Wavelet은 한 파장의 파형을 크기와 함께 위치도 변화시키므로 주파수 정보와 함께 시간의 정보도 알 수 있다는 장점이 있다. 하나의 신호를 FT로 분석하면 주파수 축과 값(amplitude)축의 2차원 그래프로 나타내어지지만 Wavelet으로 분석하면 크기(scale)축과 위치(translation)축 그리고 값(amplitude)축의 3차원 그래프로 나타내어진다.

또한 FT는 사인파만을 기본파형으로 하는 반면에 Wavelet은 수학적으로 증명된 임의의 파형을 기본파형으로 사용할 수 있다. 따라서 분석하려는 신호에 적합한 파형을 기본파형으로 사용할 경우에는 분석의 정확도가 높아지지만 파형을 선택하는 과정에서 분석자의 의지가 개입한다는 측면이 단점으로 작용하기도 한다.

신호로부터 노이즈(일반적으로 가우스(Gaussian) 노이즈)을 제거하여 유용한 정보를 갖는 신호로 복원하는 문제는 Wavelet의 대표적 응용 분야 중의 하나이다. 노이즈 제거 문제의 일반적 형태는 노이즈 $z(t)$ 에 의해 왜곡된 관측값 $y(t)$, 즉, $y(t) = f(t) + z(t)$, (여기서 $z(t) \sim N(0, \sigma^2)$)로

부터 원 함수 $f(t)$ 를 복원하는 것이다. Wavelet 변환을 이용한 노이즈 제거는 노이즈는 그 통계적 특성을 반영하여 각 Wavelet 계수로 고루 분포하고, 추정하고자 하는 신호는 적은 수의 Wavelet 계수에 집중된다는 사실에 기초한다. Donoho 와 Johnstone^(16, 17)은 이를 바탕으로 소위 Wavelet 축소(Wavelet shrinkage) 기법을 노이즈 제거 방법으로 제안하였는데, 간단한 3단계의 과정을 통해 수행된다. 첫째, 관측 신호 $y(t)$ 에 대해 Wavelet 변환을 수행하여, 각 스케일에 대한 Wavelet 계수를 추출한다. 둘째, 정해진 문턱값에 대해 축소 작용소를 이용하여 각각의 Wavelet 계수를 축소시킨다. 셋째, 축소된 Wavelet 및 스케일링 계수를 이용하여 Wavelet 역변환을 수행함으로써 노이즈가 제거된 추정 신호 $\hat{f}(t)$ 를 얻는다. Fig. 2.11은 수정된 Wavelet 축소 기법을 이용하여 가우스 잡음과 이상치(outlier)를 동시에 제거함으로써, 시불변 선형 시스템의 전달 함수(FRF)를 추정한 사례를 보여주고 있다⁽¹⁸⁾.

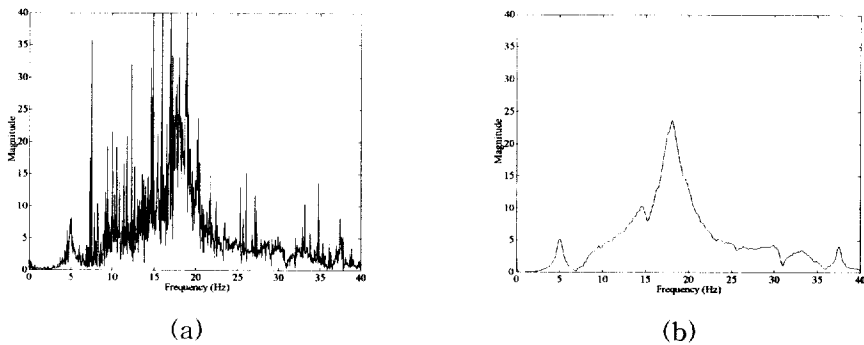


Fig. 2.11 (a) Noized FRF, (b) Denoized FRF

2.3.5 시간-주파수 영역에서 신호처리를 통한 탄성과 파라미터의 해석 알고리즘

시간-주파수 영역에서 신호처리 기술을 이용한 다양한 탄성과 파라미터(속도, 감쇠계수, 군속도, 위상속도 등)를 계측하기 위한 해석 알고리즘 중 자주 사용되는 방법으로 다음의 방법이 있으며 아래의 방법 모두

는 매질과 매질의 계면에서 반사된 펄스를 수신하는 방법에 기초한 펄스 반사법에 의한 해석 알고리즘에 속한다.

- 1) Pulse Overlap Method (펄스 겹침법)
- 2) Cross-Correlation Method (상호상관법)
- 3) Fourier 변환법 (위상기울기법, Fourier 스펙트럼법)
- 4) Hilbert 변환법
- 5) Wavelet 변환법

Pulse Overlap Method(펄스겹침법), Cross-Correlation Method(상호상관법), Fourier 변환법에 의한 위상 기울기법, Hilbert변환법에 의해 연속된 두 에코 사이의 시간지연(τ)값을 계측함으로써 초음파의 속도를 결정할 수 있다. 또한 Fourier 변환을 이용한 스펙트럼법과 Wavelet 변환법에 의해 광대역 탐촉자에 수신된 탄성파로부터 각각의 주파수에 따른 위상속도, 군속도, 감쇠계수를 측정할 수 있다. 이들 계측치로부터 재료내부에 존재하는 산란체로 인한 속도와 감쇠계수의 분산성을 관찰할 수 있다.

3. 에너지 플랜트 배관의 시간-주파수 해석

3.1 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, 사용 중인 구조물을 무사고로 조금이라도 오래 사용하자는 욕구가 강하게 요구되고 있다. 이와 같은 관점에서 항공기, 선박, 구조물 및 발전플랜트 등을 안전하게 사용하기 위해서는 비파괴평가 기술의 진보가 필요하다. 비파괴평가는 가동 중인 구조물을 정지하지 않고, 구조물의 건전성을 평가할 수 있는 방법으로 급속하게 발전하고 있다^(19,20). 특히 초음파법에 의한 신호 해석을 통하여 재료의 특성 평가와 신호가 가지는 여러 가지 정보를 분석하는 비파괴 평가 방법이 소개되고 있다⁽²¹⁾.

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 비파괴 평가에서 시간-주파수 해석법을 이용한 연구가 많은 연구자들에 의하여 활발하게 진행되고 있으나^(22,23), 초음파를 이용한 재료 열화 평가에 대한 연구는 많은 여지를 남겨놓고 있다.

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

3.2 시험편 및 실험방법

본 실험에서는 에너지 플랜트에서 30년간 사용한 배관(ASME SA-155, $\Phi = 762 \text{ mm}$, $t = 9.5 \text{ mm}$)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. 3.1과 같이 손상되었다. Fig. 3.1(a)는 배관의 외부이고, Fig. 3.1(b)는 배관의 내부이다. 초음파법에 의한 열화평가는 초기의 모재 및 용접부가 없으므로, Fig. 3.1과 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 저면예코의 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 시그널의 시간영역을 짧게 나누어 하나의 블록을 만들고 각 블록을 푸리에 변환함으로써 수신신호를 시간함수에 대한 주파수, 진폭에

너지, 스펙트럼 등의 정보로 분석하는 Short-Time Fourier Transform(STFT법)을 사용하였다. 본 연구에서는 Fig. 3.2와 같이 제1 저면 에코(B1)의 주파수 변화를 10회 측정하고, 상태에 따른 주파수 변화를 조사하여 재료의 열화 상태를 평가하였다.

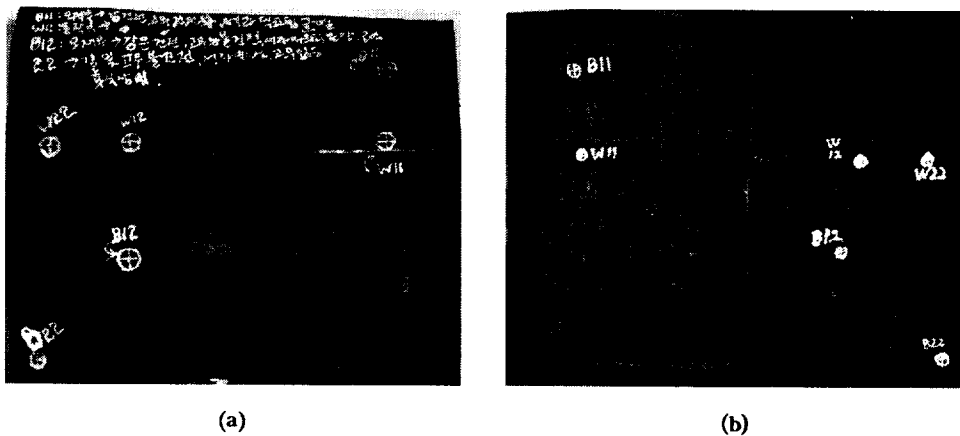


Fig. 3.1 (a) Outer surface, and (b) Inner surface of pipe

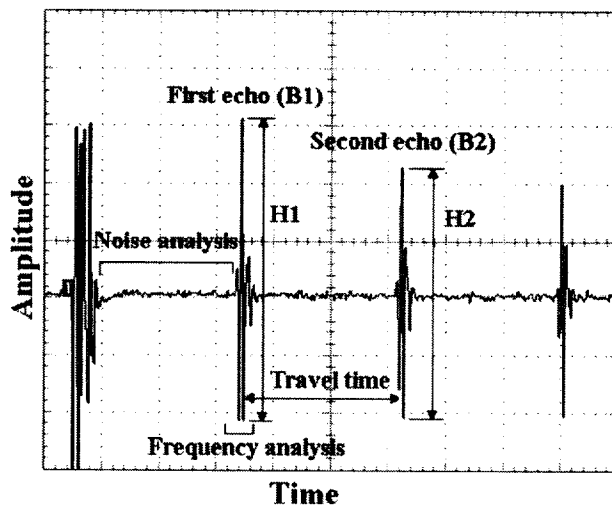


Fig. 3.2 Ultrasonic echo (A-Scan mode)

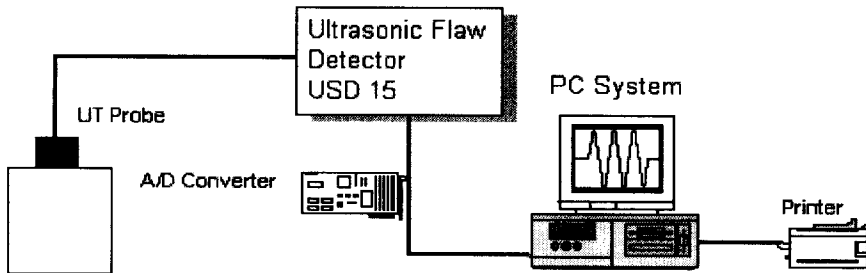


Fig. 3.3 Block diagram of experiment setup for Ultrasonic test

3.3 실험 장치

초음파 시험에 사용된 장비로서는 독일 Krautkrämer社의 USD 15 디지털 초음파 탐상기를 사용하였으며, GAGE社의 CSLITE 고속 A/D 변환기를 이용하여 실시간적으로 초음파 신호를 계측하였다. 그리고 주파수 특성을 파악하기 위하여 Panametrics社의 5 MHz(0.5inch) 광대역 센서를 사용하였다. Fig. 3.3은 본 실험에서 사용된 장비의 Block diagram으로서 초음파 시험의 개략도를 나타낸다. Fig. 3.4는 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 창은 수신된 신호의 파형을 나타내며, 우측 하단은 시간-주파수 분석에 사용된 신호처리를 위한 함수변환방법을 나타낸다.

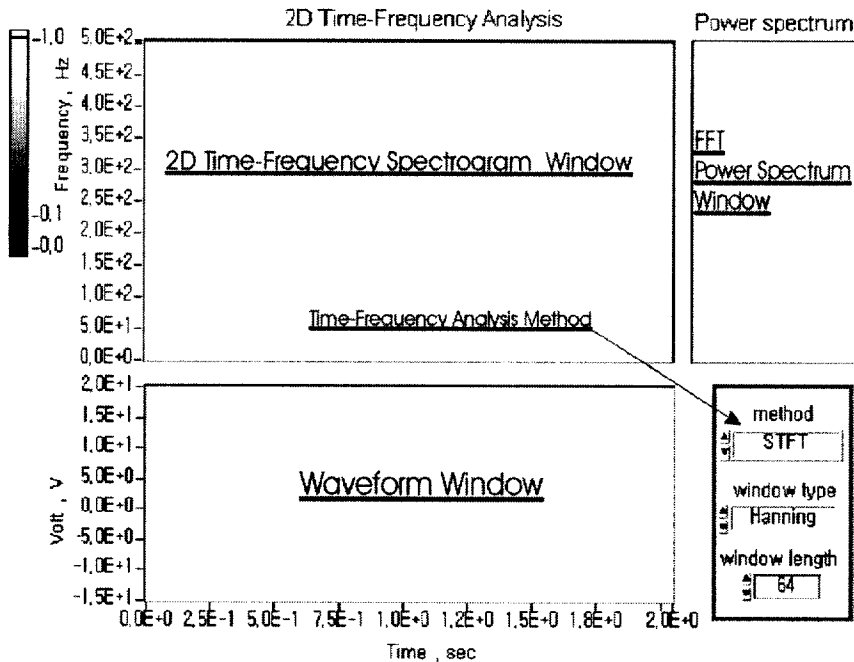


Fig. 3.4 FFT and Time-Frequency Analysis program

3.4 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 조정 한 후, 제1 저면 에코의 주파수 변화를 시간-주파수 해석법을 이용하여 분석하였다.

Fig. 3.5는 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 주

파수들이 감소하고 중심 주파수가 낮아짐을 알 수 있었다.

Fig. 3.6은 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 조대화과 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. 3.7은 시험편 각 부분의 제1 저면에코를 시간-주파수 해석법으로 분석한 결과를 3차원으로 나타낸 것이다.

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

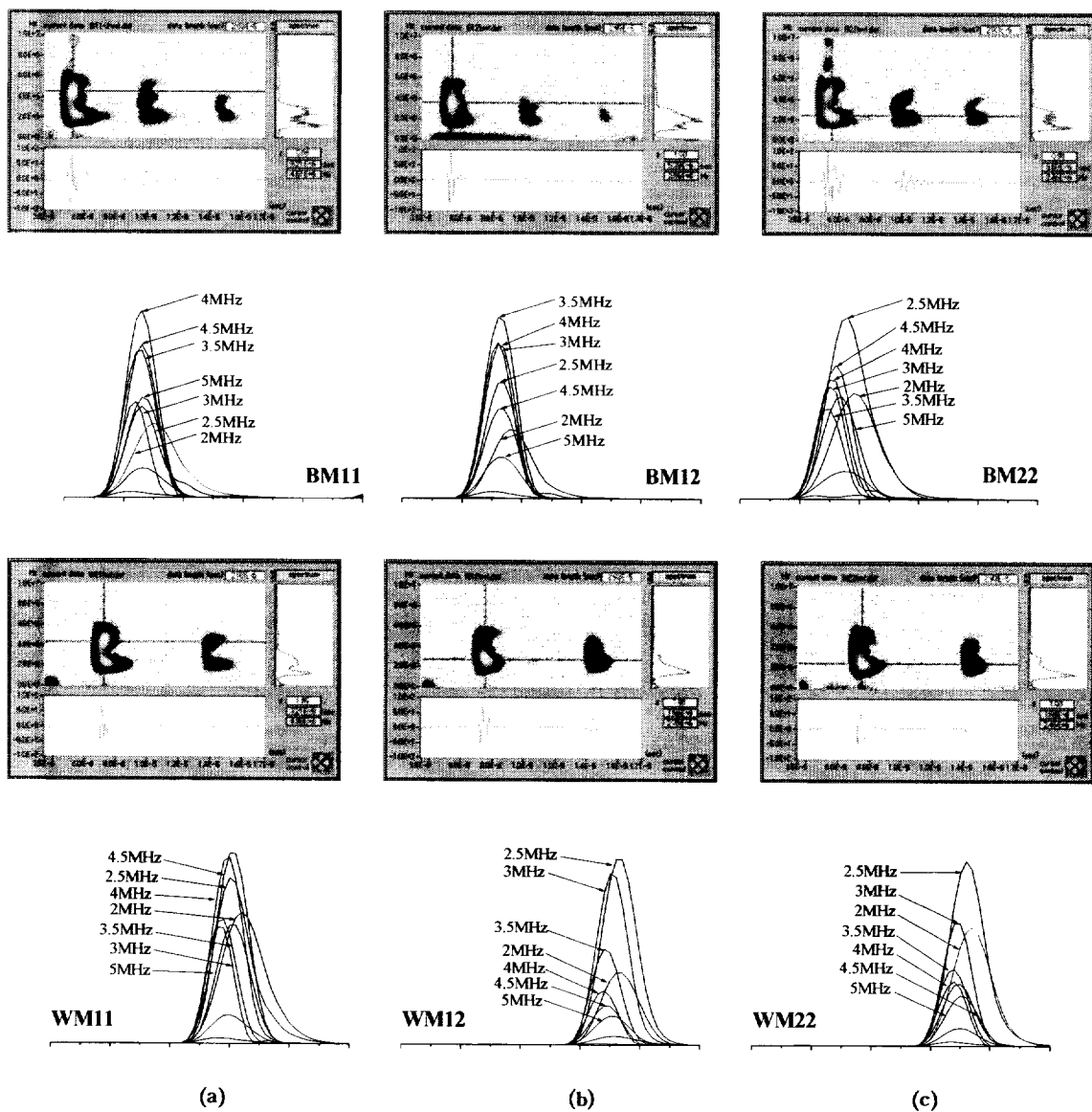


Fig. 3.5 STFT analysis of B1 echo measured from outer surface

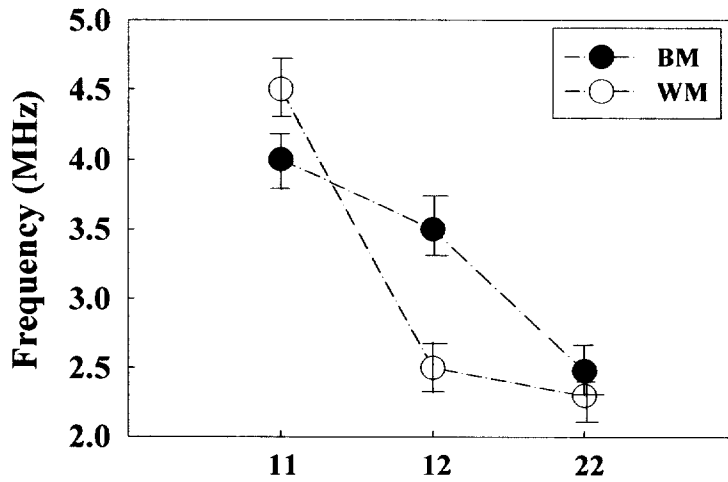


Fig. 3.6 Frequency of each parts

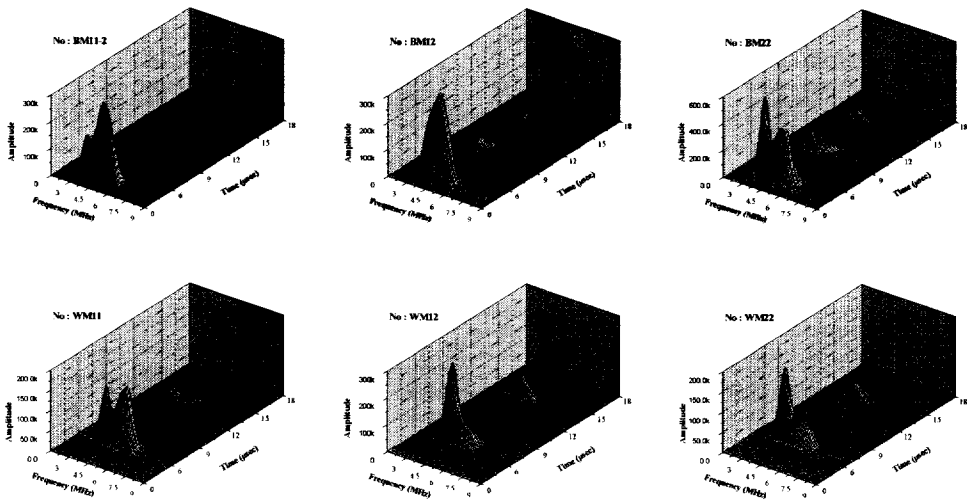


Fig. 3.7 3D representation of STFT analysis of B1 echo measured from outer surface

3.5 요 약

본 실험에서는 에너지 플랜트에서 30년간 사용한 배관(ASME SA-155, $\Phi = 762 \text{ mm}$, $t = 9.5 \text{ mm}$)이 손상됨에 따라서 교체된 것을 사용하여, 제1저면 에코를 시간-주파수 해석법을 이용하여 분석하였다.

- (1) 건전한 부분인 BM11 및 WM11 부분은 사용한 5 MHz 광대역 초음파 센서의 중심주파수와 비슷한 4 MHz와 4.5 MHz가 나타났다.
- (2) 강재부는 건전, 피복 고무는 손상되고, 피복 세라믹스는 소실된 상태인 BM12와 WM12는 3.5 MHz와 2.5 MHz이고, 강재는 부식, 피복 고무 및 피복 세라믹스는 소실된 상태인 BM22와 WM22는 2.5 MHz가 중심 주파수로 나타났다.

4. 인코넬 690 세관의 탄성과 특성

4.1 서론

세계적으로 PWR 발전소의 절반 정도가 매년 증기발생기의 세관을 plugging 하거나 sleeving 하는 것으로 보고되고 있다. 이것은 이들 발전소의 절반 정도가 특정 연도에서 설계 제한치 근처 또는 이상의 조건에서 운전되고 있음을 의미한다. 1975년부터 1994년까지 매년 PWR과 CANDU 발전소에서 plugging 되는 세관수의 연간 평균 plugging 비율은 0.15 ~ 0.47 %로 허용 가능한 범위일 수 있으나 40년 수명으로 가정할 때 산술적으로는 총 6 ~ 18 %의 세관이 plugging됨을 의미하며, 운전기간이 길어질수록 세관손상이 심화되므로 실제로는 이보다 훨씬 높은 비율이 될 것으로 예상되고 있다.

세관손상 메커니즘은 다음과 같이 크게 두 가지 유형으로 구분될 수 있다; ① Corrosion-induced degradation (Denting, Intergranular attack, Stress corrosion cracking or PWSCC, Pitting), ② Mechanically-induced degradation (Wastage, Fretting wear, Circumferential Cracking). 1979년부터 각종 부식 메커니즘이 주요 세관손상 원인으로 부각되고 있으며, 이들 부식 메커니즘은 세관 이차측 응력부식균열(ODSCC: Outside Diameter Stress Corrosion Cracking), Intergranular Attack(IGA), Pitting과 일차측 응력부식균열 (PWSCC: Primary Water Stress Corrosion Cracking)로 구분할 수 있다. 1980년대 이후 일차측 및 이차측 응력부식균열이 세관손상원인의 약 60 %를 차지하고 있어 이에 대한 방지대책이 중요한 관심사로 부각되고 있다.

1977년, 1982년 및 1994년도에 PWR과 CANDU 원전에서 문제가 발생한 것으로 보고된 증기발생기 수와 세관손상 원인은 ODSCC, PWSCC 및 Fretting에 의한 세관손상수가 매우 급격히 증가하였다. 1994년에는 ODSCC가 42%, PWSCC가 22 %, Fretting이 4 %로 이들 손상원인에 의한 plugging이 전체 plugging의 68 %를 차지하고 있다.

1994년 기준으로 2000개 이상의 세관을 plugging하였거나 sleeving한 PWR 원전을 표 4.6에 수록하였다. 고리1호기의 경우 16년 운전시점에서 1,531개의 세관을 plugging 하였으며 1,544개의 세관을 sleeving한 것으로 나타나 있다. 운전 역사가 가장 긴 Main Yankee의 경우 17,000개 이상의 세관이 plugging 되었거나 sleeving 된 것으로 나타나 있다.

이상과 같이 재료는 오랜 기간 사용함으로서 재료 내부에서 변형 및 파괴가 발생한다. 이와 같은 변형 및 파괴가 발생할 때는 재료의 특성 및 작용응력의 형태에 따라 독특한 탄성파가 방출되는데 이러한 탄성파를 검출하여 재료내부에서 일어나고 있는 현상들을 해석하는 음향방출법이 새로운 재료 평가법으로 주목받고 있다. 음향방출법은 비파괴 검사방법의 일종으로 다른 비파괴 검사법과는 달리, 미소균열 또는 재료 내부의 변형에 따르는 탄성파를 직접 검출하고, 그 발생위치, 발생수, 신호강도로부터 각각의 발생된 미소균열 등을 동적으로 검출하고 평가하는 수법이다. 따라서 재료 중에 미소균열이나 변형이 발생하면 탄성파가 방출되고, 탄성파를 표면에 부착시킨 센서로 검출하여, 탄성파의 신호처리를 함으로서 재료내의 미소균열발생이나 성장을 검출할 수 있다^(24, 25).

탄성파 신호 분류를 위한 wavelet transform(WT)의 유용성은 유리섬유 강화된 복합재⁽²⁶⁾와 감육을 가지는 배관의 비파괴 평가^(27, 28)에서 확인되었다. 현재 우리나라 원자력발전소 특히 한국형 표준원전의 증기발생기에서 사용되고 있는 안전등급 1등급의 1차 폐쇄회로의 증기발생기 세관은 Inconel 690이 주로 사용되고 있다. 그러나 증기세관의 감육에 관한 탄성파 특성 연구는 전무한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 인코넬 690 세관의 여러 가지 감육형상에 따른 탄성파의 조사를 위하여 공진형 AE센서에 의해 얻어진 AE신호들에 대해 wavelet transform 시스템을 사용하였다. steel ball의 낙하에 의하여 인코넬 690 세관의 표면에 발생한 AE신호들을 조사하여, 인코넬 690 세관의 감육 길이와 감육 깊이에 따른 보전예방을 위하여 사용될 수 있도록 하였다.

4.2 시험편 및 실험방법

본 연구에 사용한 재료는 인코넬 690 세관이며, 기계적 특성과 화학 성분을 Table 4.1 및 4.2에 각각 나타낸다. Full-scale 실험이 감육 결함을 가지는 외경 17.7 mm, 두께 1.2 mm의 세관에서 수행되었다. 실 구조물의 사용중에는 세관의 감육이 내부에서 이루어지지만, 가공상의 문제로 인하여 외부 감육으로 하였으며, 탄성파의 전파는 내외부 감육에서 유사할 것이라는 가정하에서 실시하였다. 탄성파를 발생시키기 위하여 직경 0.8 mm의 steel ball을 높이 50 mm에서 세관 시험편의 중앙에 낙하시켰다. 탄성파 시험에 사용된 시험편은 감육깊이(d) 0.3, 0.6 및 0.8 mm, 감육길이(ℓ) 5, 20 및 40 mm의 결함을 기계적으로 가공하였고, 세관시험편의 전장은 800 mm를 사용하였다. 감육시험편의 치수를 Table 4.3에 나타낸다.

부하시간에 의한 진폭분포를 얻기 위한 AE시스템은 문턱값(threshold) 10 mV, 각 채널에 대해 1024 point gate length로서 12.5 MHz의 디지털화속도를 가지는 Fracture Wave Detector (FWD)를 사용하였다. 변환자(transducer, DWCB1025)는 1 ~ 1.5 MHz의 광대역센서를 사용하였다. 샘플링속도와 포인트 수는 5 MHz와 2048 point로 각각 설정하였고, 지속시간은 409.4 μ s로 설정하였다. 지속시간의 설정은 플라스틱 볼의 충격에 의한 응력파의 전파가 센서를 지나 시험편의 자유단으로부터 반사되어 되돌아오는 반사파의 영향을 받지 않게 하기 위해서였다. 검출된 신호들은 40 dB로 증폭시켰다. Fig. 4.1에 나타내었듯이 센서는 볼의 낙하지점에서 180부분, 감육부 중앙에서 15 mm (감육길이 $\ell = 5, 20$ mm) 및 25 mm (감육길이 $\ell = 40$ mm)떨어진 부분에 부착시켰다. trig와 사상(event) 지속시간은 각각 50 μ s 및 200 μ s 이었다. 총 데이터 수록시간은 409.4 μ s로 결정하였다.

Table 4.1 Mechanical properties of inconel 690 tube.

Material	Tensile strength σ_u (MPa)	Yield strength σ_Y (MPa)	Elongation (%)
Inconel 690	758	358	40

Table 4.2 Chemical composition of inconel 690 tube [%].

Material	Ni	Cri	Fe	Mn	Si	C	Al
Inconel 690	Bal	29	9	0.35	0.25	0.01	0.25

Table 4.3 Dimension of thinned specimens.

Specimen No.	Thinned length (ℓ , mm)	Thinned depth (d , mm)
A	0	0
B-1	5	0.6
B-2	20	
C	5	0.8
D	40	0.3

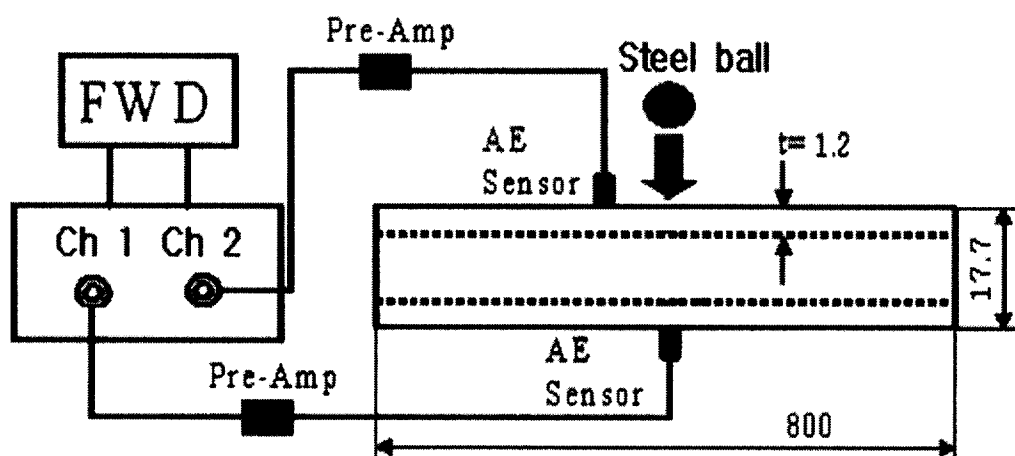


Fig. 4.1 Experimental setup for the measurement of AE test of inconel 690 tube specimen with all-circumferential wall thinning (unit: mm).

4.3 실험결과 및 고찰

4.3.1 파형과 주파수 스펙트럼

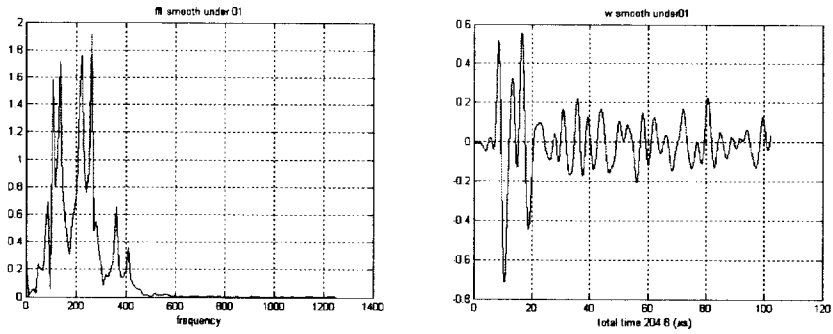
Fig. 4.2는 인코넬 690 세관 모재 시험편(A)의 (a) 180°점과 (b) 15 mm에서 검출한 탄성파의 파형과 파워스펙트럼을 나타낸다.

Fig. 4.3은 감육길이 5 mm, 감육 깊이 0.6 mm인 전주 감육을 가지는 인코넬 690 세관 시험편(B-1)의 (a) 180°점 및 (b) 15 mm에서 검출한 탄성파의 파형과 파워스펙트럼을 나타낸다.

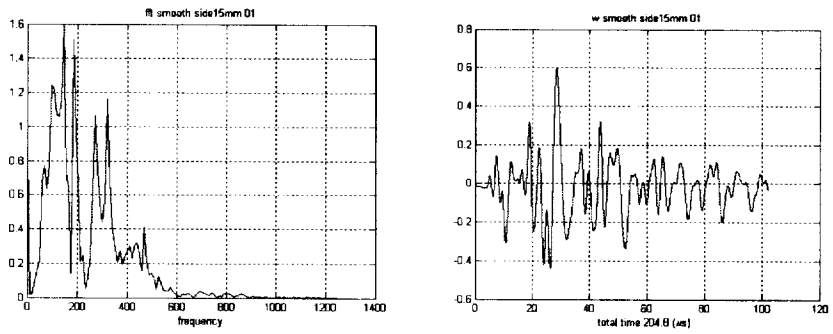
Fig. 4.4는 감육길이 20 mm, 감육 깊이 0.6 mm인 전주 감육을 가지는 인코넬 690 세관 시험편(B-2)의 (a) 180°점 및 (b) 15 mm에서 검출한 탄성파의 파형과 파워스펙트럼을 나타낸다.

Fig. 4.5는 감육 길이 5 mm, 감육 깊이 0.8 mm인 전주 감육을 가지는 인코넬 690 세관 시험편(C)의 (a) 180°점 및 (b) 15 mm에서 검출한 탄성파의 파형과 파워스펙트럼을 나타낸다.

Fig. 4.6은 감육 길이 40 mm, 감육 깊이 0.3 mm인 전주 감육을 가지는 인코넬 690 세관 시험편(D)의 (a) 180°점 및 (b) 25 mm에서 검출한 탄성파의 파형과 파워스펙트럼을 나타낸다.

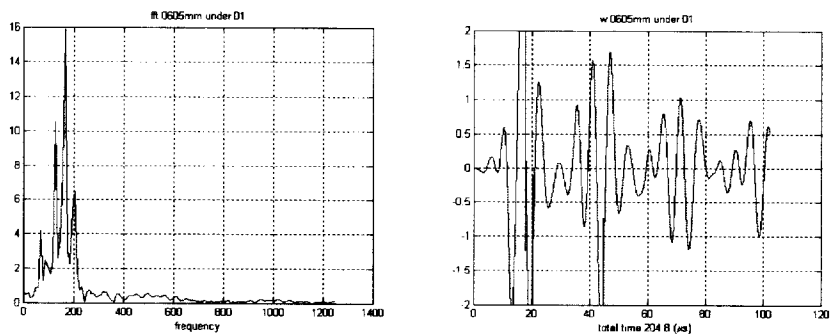


(a) 180°

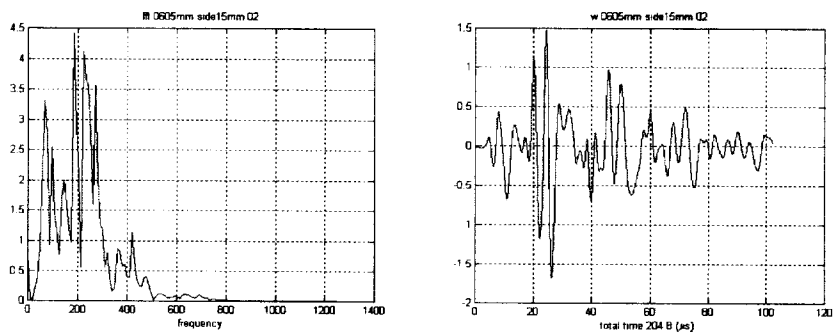


(b) 15 mm

Fig. 4.2 Waveform and power spectrum of inconel 690 tube without wall thinning (Specimen No. A).

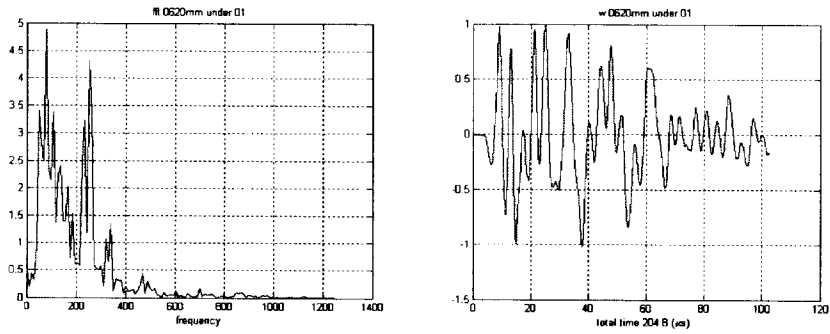


(a) 180°

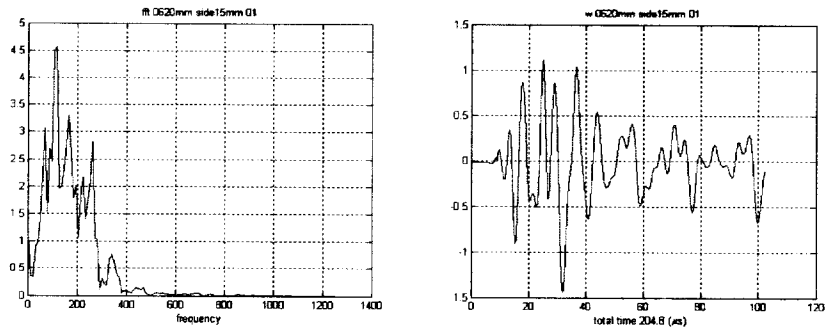


(b) 15 mm

Fig. 4.3 Waveform and power spectrum from center of inconel 690 tube with all-circumferential wall thinning (Specimen No. B-1).

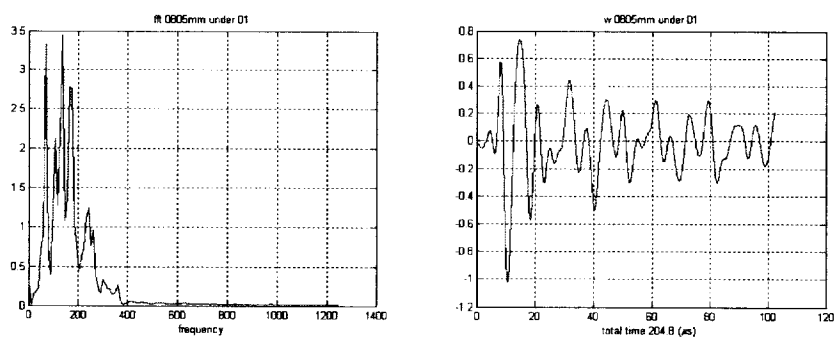


(a) 180 °

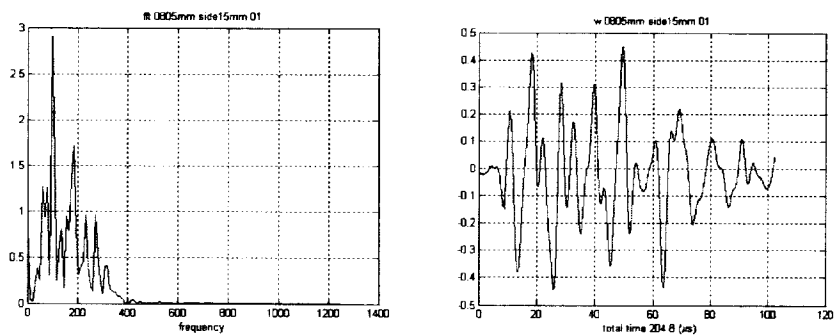


(b) 15 mm

Fig. 4.4 Waveform and power spectrum from center of inconel 690 tube with all-circumferential wall thinning (Specimen No. B-2).

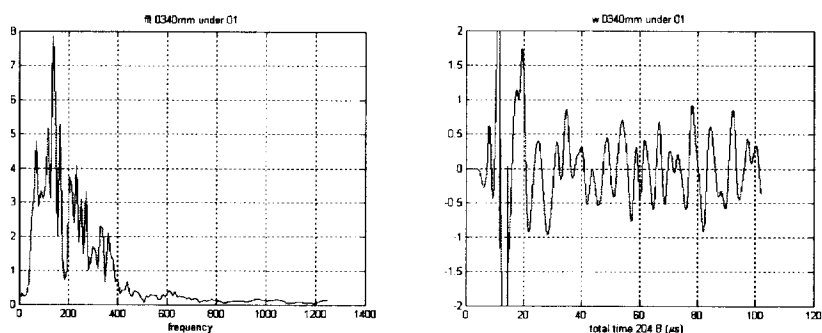


(a) 180°

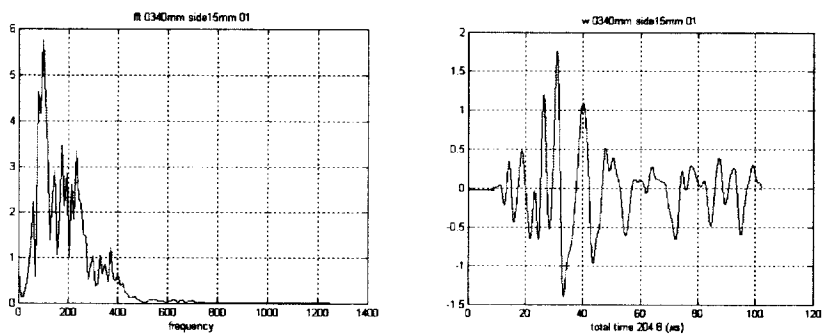


(b) 15 mm

Fig. 4.5 Waveform and power spectrum from side of inconel 690 tube with all-circumferential wall thinning (Specimen No. C).



(a) 180°



(b) 25 mm

Fig. 4.6 Waveform and power spectrum from side of inconel 690 tube with all-circumferential wall thinning (Specimen No. D).

4.3.2 웨이브렛(wavelet) 해석

웨이브렛 변환은 계산속도가 푸리에 변환보다 빠르며, 주어진 신호의 정보를 시간과 주파수(또는 스케일) 두 영역에서 효율적으로 국소화시킬 수 있다는 것이다. 푸리에 변환(Fourier transform)에 근간을 두고 있는 전통적인 주파수 분석 기법은 해석 등의 문제를 포함하여 많은 공학 분야에서 활용되고 있으나, 해석하고자 하는 신호의 시간 정보를 전혀 제공하지 않는다는 단점이 있다. 이에 반해 웨이브렛 변환은 주어진 신호에 대한 시간과 주파수 영역에서의 정보를 균형적으로 국소화시킴으로서, 비정상, 과도 신호 등의 시간-주파수 해석을 가능하게 한다. 또한 신호의 평탄성(smoothness) 분석이 특징이다.

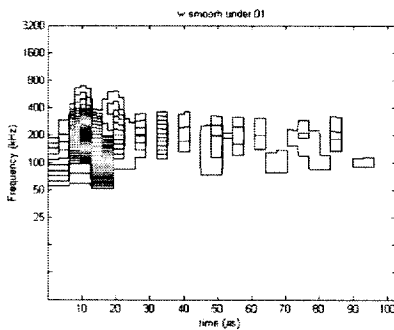
Fig. 4.7은 인코넬 690 세관 모재 시험편(A)의 (a) 180°지점과 (b) 15 mm에서 검출한 탄성파의 웨이브렛 해석 결과를 나타낸다.

Fig. 4.8은 감육 길이 5 mm, 감육 깊이 0.6 mm인 전주 감육을 가지는 인코넬 690 세관 시험편(B-1)의 (a) 180°지점 및 (b) 15 mm에서 검출한 탄성파의 웨이브렛 해석 결과를 나타낸다.

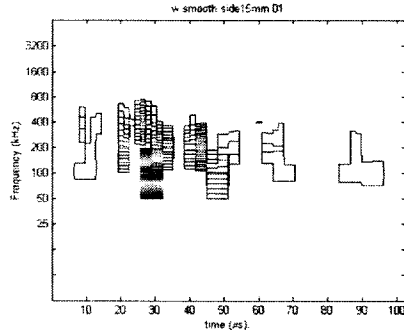
Fig. 4.9는 감육 길이 20 mm, 감육 깊이 0.6 mm인 전주 감육을 가지는 인코넬 690 세관 시험편(B-2)의 (a) 180°지점 및 (b) 15 mm에서 검출한 탄성파의 웨이브렛 해석 결과를 나타낸다.

Fig. 4.10은 감육 길이 5 mm, 감육 깊이 0.8 mm인 전주 감육을 가지는 인코넬 690 세관 시험편(C)의 (a) 180°지점 및 (b) 15 mm에서 검출한 탄성파의 웨이브렛 해석 결과를 나타낸다.

Fig. 4.11은 감육 길이 40 mm, 감육 깊이 0.3 mm인 전주 감육을 가지는 인코넬 690 세관 시험편(D)의 (a) 180°지점 및 (b) 15 mm에서 검출한 탄성파의 웨이브렛 해석 결과를 나타낸다.

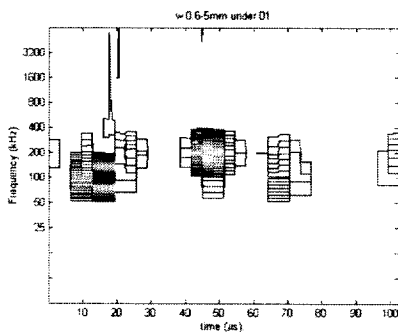


(a) 180°

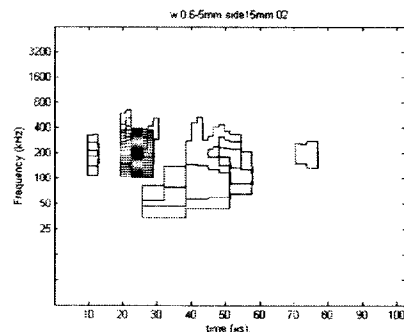


(b) 15 mm

Fig. 4.7 Time-frequency analysis of inconel 690 tube without wall thinning (Specimen No. A).

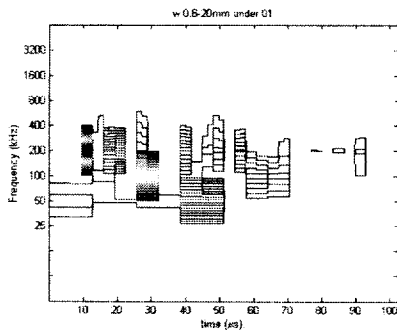


(a) 180°

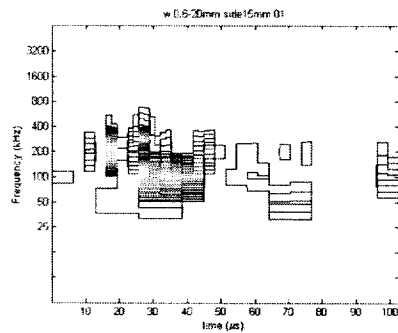


(b) 15 mm

Fig. 4.8 Time-frequency analysis of inconel 690 tube with all-circumferential wall thinning (Specimen No. B-1).

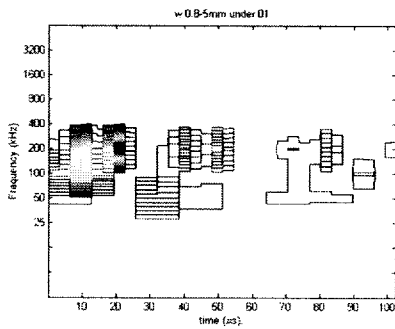


(a) 180°

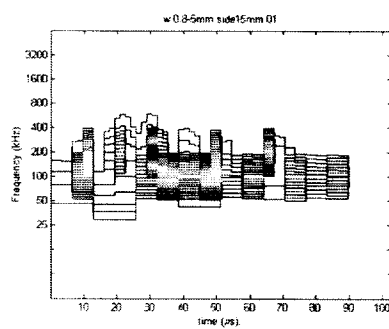


(b) 15 mm

Fig. 4.9 Time-frequency analysis of inconel 690 tube with all-circumferential wall thinning (Specimen No. B-2).

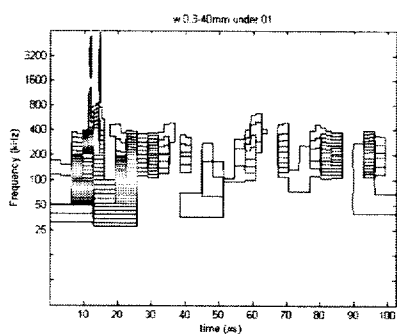


(a) 180°

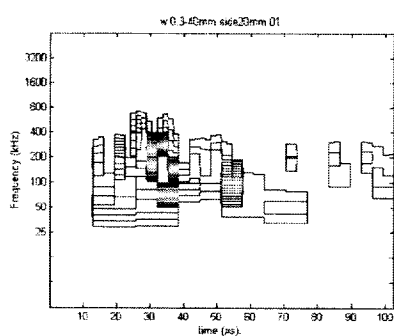


(b) 15 mm

Fig. 4.10 Time-frequency analysis of inconel 690 tube with all-circumferential wall thinning (Specimen No. C).



(a) 180°



(b) 25 mm

Fig. 4.11 Time-frequency analysis of inconel 690 tube with all-circumferential wall thinning (Specimen No. D).

4.3.3 중심 주파수 특성

인코넬 690 세관에서 얻어진 파형과 주파수에서 시간-주파수 해석을 실시하여 얻어진 중심 주파수를 Fig. 4.12, 4.13 및 4.14에 나타내었다. 측정된 신호는 탄성과 펄스의 크기가 설정기준(setting value limited)을 초과하지 않고 유효한 것만 해석하였다. 볼의 낙하점에서 180o지점과 15 mm 및 25 mm지점에서 신호를 동시에 검출하였지만, 180o지점은 계측기의 설정기준을 초과하는 무효 신호가 자주 발생되었다. 한번의 탄성과 신호 중에서 웨이브렛 해석 결과 밀도가 높은 경우가 2개 이상인 경우는 모두 유효한 값으로 나타내었다. 그러므로 1회 볼의 낙하에서 유효 신호는 설정 기준이하의 신호와 한 신호 내에서 웨이브렛 해석 시 밀도가 높은 부분이 2개인 신호는 모두 각각 1개씩의 유효한 값으로 인정하였다.

Fig. 4.12는 인코넬 690 세관 모재 시험편(A)의 중심 주파수를 기준으로 비교하였다. 흰 기호는 180o지점에서 검출된 신호이며, 검은 기호는 15 mm 및 25 mm지점에서 검출된 것이다. 인코넬 690 세관 모재 시험편(A)은 약 100 kHz (W1), 150 kHz (W2), 180 kHz (W3), 220 kHz (W4) 및 270 kHz (W5)의 5가지의 주파수 군집으로 나타났다. 모든 시험편의 탄성과 신호를 웨이브렛 해석한 중심주파수 분포는 건전한 세관(A)의 신호와 같이 대략 5종류의 특성 주파수 집단으로 분포하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4.12는 Table 4.3의 시험편 번호 A, B-1, B-2, C, D 순으로 나타내었다.

세관의 감육 깊이와 길이에 따라서 탄성과 신호의 특성 주파수 집단의 분포가 미묘하게 조금씩 달라짐을 보이고 있다. 그리고 하나의 탄성과 신호에 대한 주파수 분석 결과는 세관 재질과 두께의 형상에서 기인하는 특성 주파수 또는 낙하 볼의 특성에 기인된 주파수일 수도 있다. 이러한 특성 주파수에 대한 명확한 분리 또는 분석은 간단하게 분별되지 않는다. 예로, 연속적으로 펄스를 발생시킬 수 있으면 명확한 실험적 구분은 가능하지만, 단속적으로 발생된 펄스신호로서는 중심 주파수의 크기가 낙하 볼의 특성을 나타낼 수 있으므로 매우 주의가 필요하다고

생각된다.

Fig. 4.12는 세관과 볼의 특성 주파수 성분이 모두 섞여 나타나고 있으나, 대체적으로 세관의 특성 주파수가 우세하게 나타난 것으로 판단된다. 먼저 웨이브렛 해석 결과 주파수 특성만으로 나타낸 인코넬 690 세관 모재 시험편(A)는 180o와 15 mm에서 점선인 W1, W2, W3, W4, W5의 상하로 주파수 변동 폭이 거의 일정하게 나타나 있음을 알 수 있다. 일정한 주파수 폭으로 상하 좌우로 나타나고 있다는 것은 세관 재질과 두께가 일정한 형상에서 기인된 것으로 보인다. 이러한 일정한 특성 주파수가 감육 깊이와 길이의 상관관계에 따라 미묘하게 변화되고 있음을 Fig. 4.12에서 알 수 있다.

특성 주파수 군의 미묘한 변화 차이를 알아보기 위하여 감육 깊이와 길이별로 분류하여 보았다. 미묘하지만 확연하게 차이를 알 수 있는 경우는 감육 길이보다는 감육 깊이 차이에서 더욱 뚜렷하게 알 수 있었다. 이것에 대한 그림을 Fig. 4.13과 Fig. 4.14에 각각 나타내었다.

Fig. 4.13은 건전한 세관에 대하여 감육 깊이를 0.6 mm로 일정하게 하고 감육 길이를 5 mm(B-1)와 20 mm(B-2)로 하여 비교하였다. 건전한 세관(A)의 결과인 W1~W5와 비교하면, 일점쇄선은 오른쪽으로 기울어져, 즉, 감육 세관의 중심 주파수가 낮음을 알 수 있다. 그러나 특성주파수의 변화정도의 경향은 어느 정도 추량이 가능하나, 명확하게 명시하기는 쉽지가 않다.

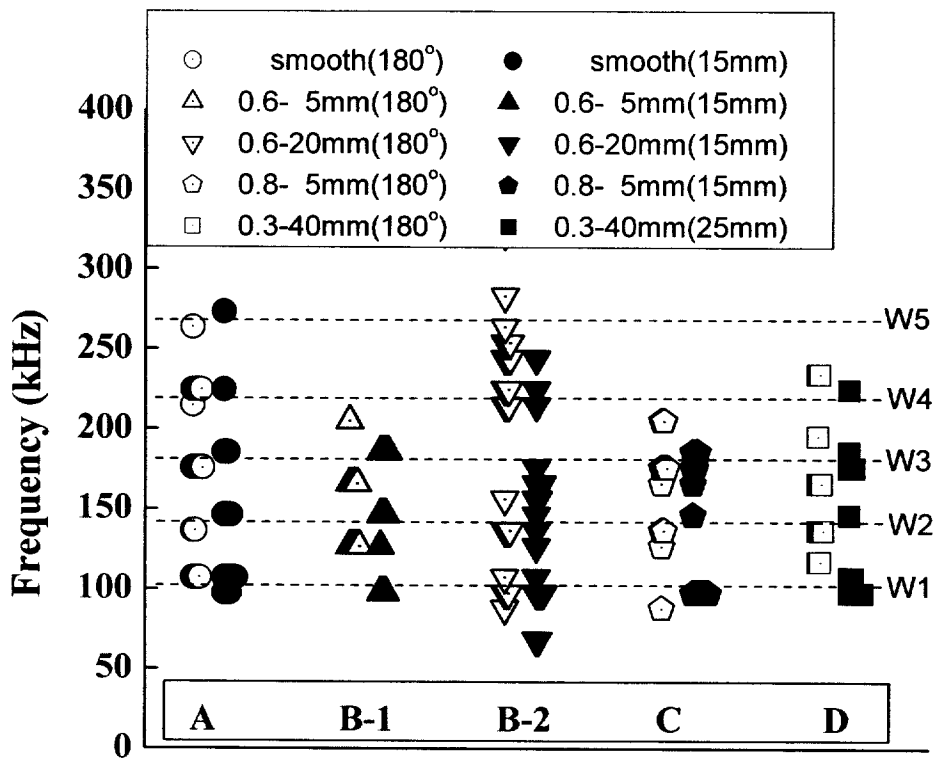


Fig. 4.12 Comparison of dominant frequency according to wall thinning length and depth.

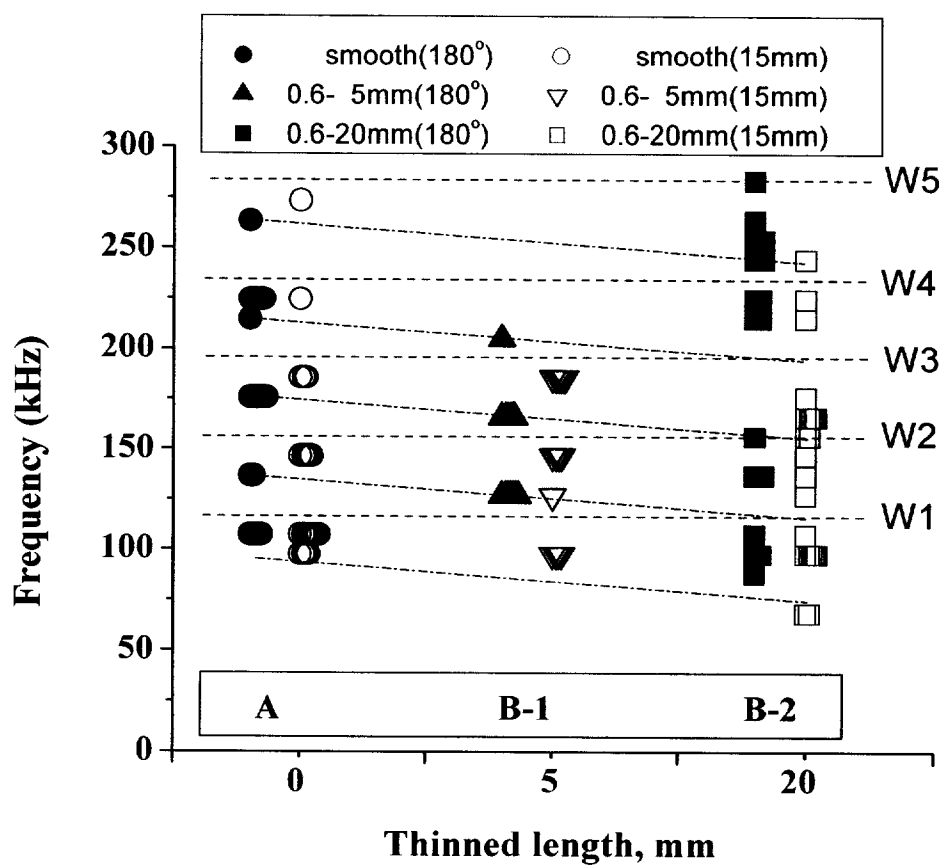


Fig. 4.13 Comparison of dominant frequency according to wall thinning length.

Fig. 4.14는 감육 깊이와 길이가 각각 다르나, 감육 깊이를 변수로 비교하였다. 중심 주파수는 시험편 (A), (D), (B-1), (B-2) 및 (C)의 180o 지점의 결과이다. 건전한 세관(A)인 W1~W5와 비교하면, 일점쇄선으로 표시한 W1', W2', W3', W4', W5'는 감육 깊이가 깊어질수록 겉보기에 선형적으로 비례하여 중심 주파수가 낮아짐을 알 수 있다. (D)의 경우, 차이가 큰 이유는 감육 길이가 40 mm로 다른 것보다 상당히 크다는 원인이 있으나 분명하지는 않다. 대체적으로 감육 길이보다는 감육 깊이에 따라서 중심 주파수의 변화도 민감한 것을 알 수 있다. 180o 지점의 결과는 오른쪽으로 기울어져, 즉, 어느 정도 비례적으로 중심 주파수가 낮아지고 있음을 알 수 있었다. 그러나 이에 대한 주파수의 변화정도는 금후 더욱 상세한 연구를 필요로 한다.

Fig. 4.15, 4.16, 4.17 및 4.18은 Fig. 4.14의 시험편(A), 시험편(D), 시험편(B-1), 시험편(C) 180o 지점의 대표적인 예 W2'를 나타낸다. 즉, 중심 주파수의 변화정도에 대한 탄성과 신호의 (a) 주파수, (b) 파형 및 (c) 웨이브렛 해석 결과를 각각 나타낸다. Fig. 4.15, 4.16, 4.17 및 4.18에서 (a)는 탄성과 신호의 주파수를 분석한 것으로, 피크치가 여러 개 있는 것을 알 수 있다. 그러나 웨이브렛 분석(c)에서 주파수 등고선의 밀도가 가장 높은 붉은색 부분의 성분은 정확하게 Fig. 4.15는 136.7 kHz과 175.7 kHz 성분, Fig. 4.16은 136.7 kHz 성분이 중심 주파수임을 알 수 있었다. 그러나 감육 깊이가 큰 Fig. 4.17은 126.9 kHz과 166.0 kHz 성분, Fig. 4.18은 126.9 kHz 성분이 중심 주파수임을 알 수 있었다.

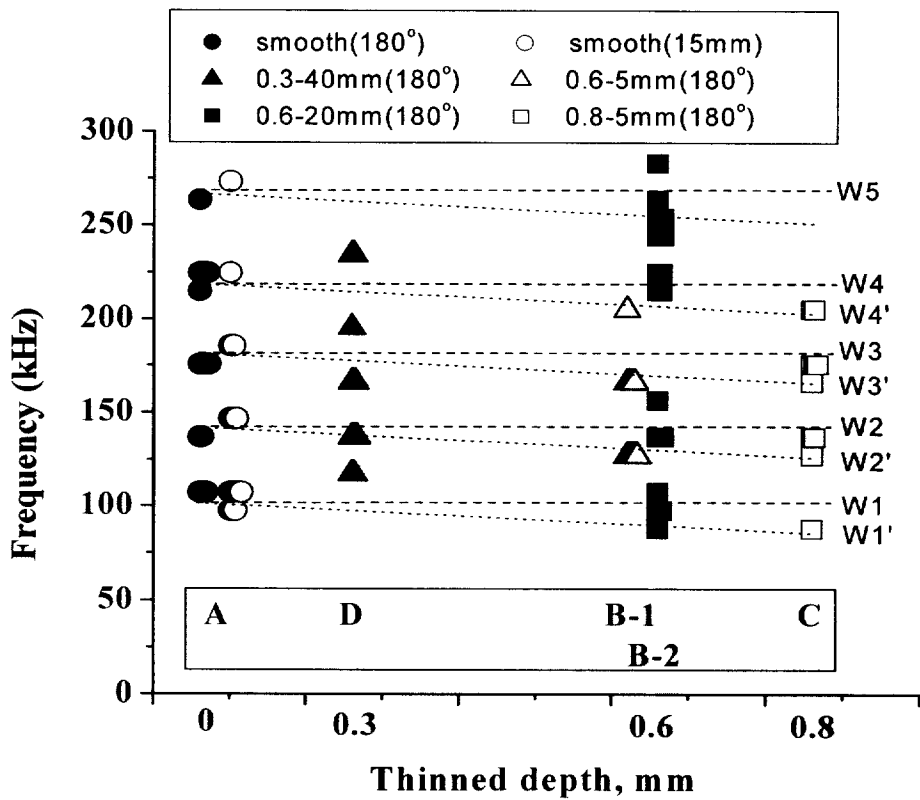
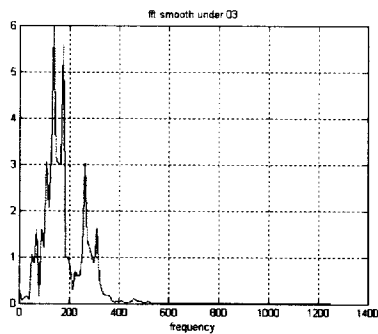
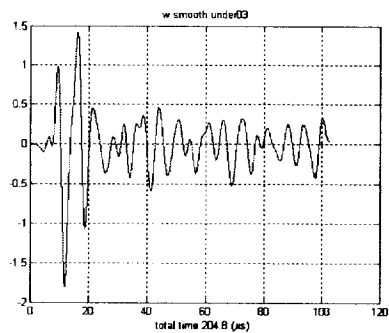


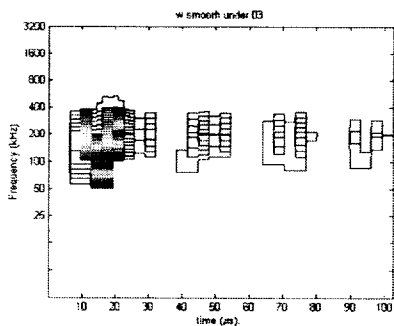
Fig. 4.14 Comparison of dominant frequency according to wall thinning depth.



(a)

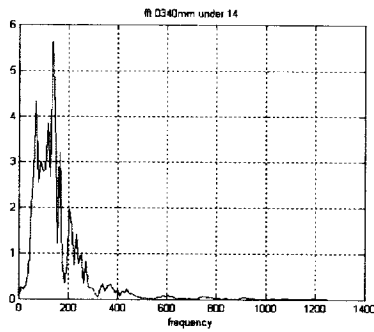


(b)

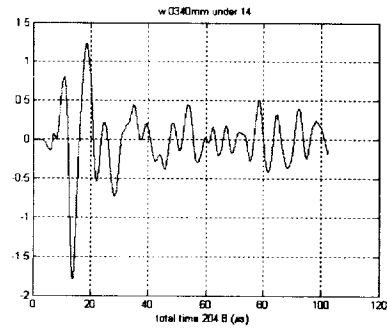


(c)

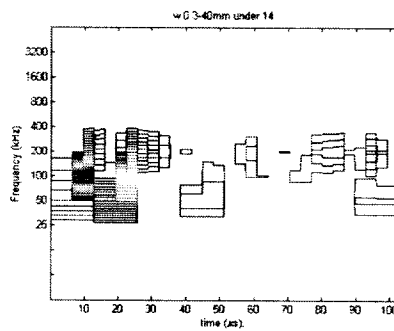
Fig. 4.15 Signal analysis of inconel 690 tube without wall thinning (Specimen No. A); (a) Frequency, (b) Waveform, (c) Wavelet analysis.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.16 Signal analysis of inconel 690 tube with all-circumferential wall thinning (Specimen No. D); (a) Frequency, (b) Waveform, (c) Wavelet analysis.

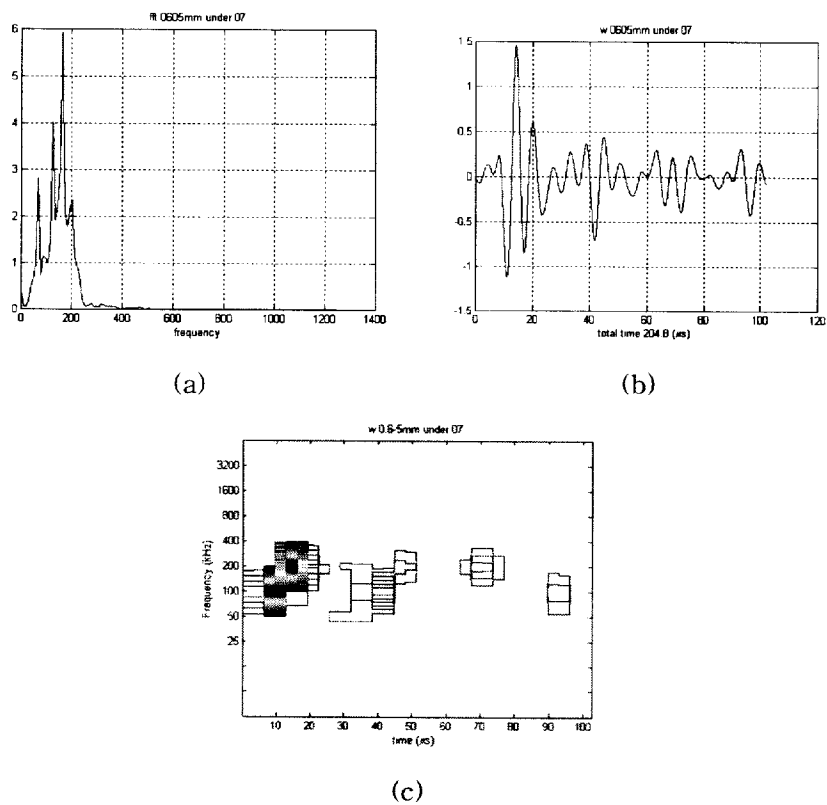


Fig. 4.17 Signal analysis of inconel 690 tube with all-circumferential wall thinning (Specimen No B-1); (a) Frequency, (b) Waveform, (c) Wavelet analysis

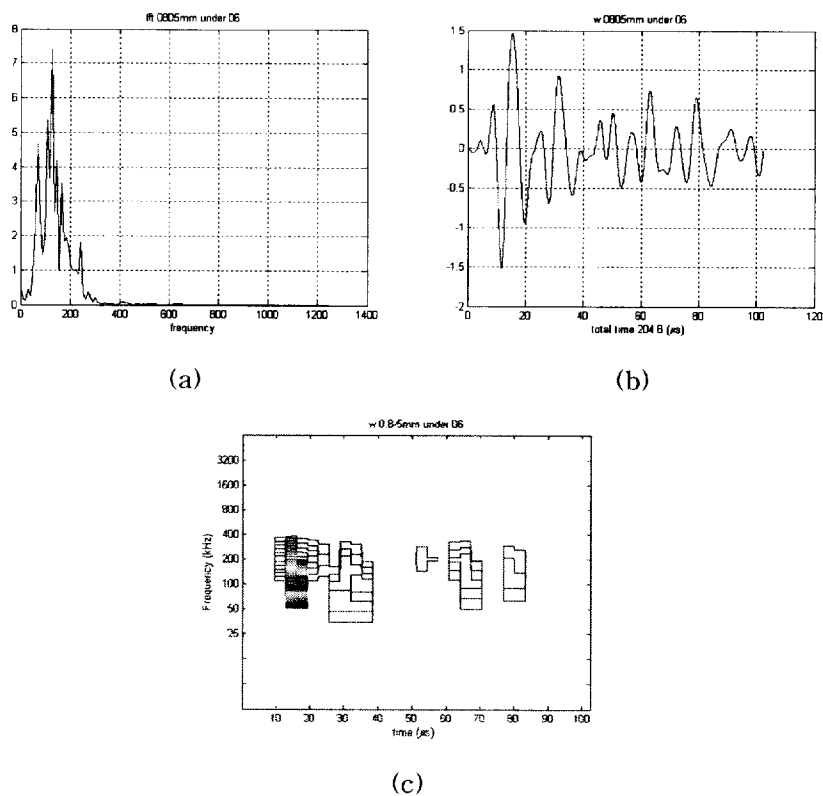


Fig. 4.18 Signal analysis of inconel 690 tube with all-circumferential wall thinning (Specimen No. C); (a) Frequency, (b) Waveform, (c) Wavelet analysis

4.4 요 약

건전한 세관의 경우를 기준으로 하여 손상 감육 깊이와 길이의 변화에 따른 경우를 서로 비교하여 살펴보았다. 본 연구에 사용된 Inconel 690의 건전한 세관의 경우는 약 100 kHz, 150 kHz, 180 kHz, 220 kHz, 270 kHz의 5가지의 주파수 군집으로 정리되었다.

(1) 세관의 감육 깊이와 길이에 따라서 중심 주파수 군의 분포가 미묘하게 조금씩 높아지든가 아니면 낮아지는 변화를 보였다. 본 실험에서는 건전한 세관의 비교 기준 주파수에 비교하여 조금씩 낮아지는 경향을 보였다.

(2) 중심 주파수의 변화는 미묘하지만 확연하게 차이를 알 수 있는 경우는 감육 길이보다는 감육 깊이 차이에서 더욱 뚜렷하게 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 비파괴 평가에 시간-주파수 해석법의 적용 가능성을 검토하였다. 제3장에서는 실구조물에서 장시간 사용한 배관을 채취하여 초음파법에 의하여 검출된 제1저면 에코를 시간-주파수 해석법을 이용하여 분석하였다. 제4장에서는 증기세관으로 사용되는 인코넬 690 세관을 사용하여 사용 중에 감육이 발생하는 것을 고려하여 인위적으로 기계 가공하여 탄성파를 검출하여 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 있었고, 감육 길이 및 깊이에 따른 감육부의 중심 주파수 성분으로 손상 정도를 파악할 수 있었다. 이와 같은 시간-주파수 해석법을 초음파 신호의 비파괴적 특성 평가에 적용한다면 보다 신뢰성 높은 분석이 가능할 것으로 생각되며, 이들 신호에 대한 새로운 비파괴 평가법으로 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 차후 더욱 정밀한 계측 시스템의 구축과 함께 여러 가지 시간-주파수 해석법을 초음파 신호의 비파괴적 해석에 적용한다면, 고정도의 비파괴 평가를 할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) K. Yagawa (1987), "Report of Surry Nuclear Power Plant 2 Reactor Pipe Failure America", Journal of Japan Nuclear Society Vol. 29, No. 7, pp. 621.
- (2) 일본원자력연구소, "Surry 원자력발전소 배관파단사고", Journal of Japan Nuclear Society Vol. 29, No. 11, pp. 952.
- (3) 長谷川邦夫, 坂田信二, 清水 翼, 志田 茂 (1983), "주방향 표면균열을 갖는 압력배관의 누설하중 평가법", 일본압력기술, 제21권, 제1호, pp. 16.
- (4) K. Hasekawa, S. Sakata, T. Shimizu and S. Shida (1983), "Prediction of Fracture Tolerances for Stainless Steel Pipes with Circumferential Cracks", ASME International Journal of Pressure Vessel and piping, Vol. 95, PP. 65.
- (5) A. F. Deardorff and S. H. Bush (1990), "Development of ASME Section Criteria for Erosion-Corrosion Thinning of Carbon Steel Piping", ASME PVP, PVP-Vol. 186, NDE Vol. 7 pp. 71.
- (6) J. F. Mathonet, J. Mcherasse, C. L. Leblois and M. A. Guyette, "Belgian Methodology for Evaluation of Erosion Corrosion Phenomena in Unit 1;2;3&4 of DOEL Nuclear Power Plant (NPP)"
- (7) 長谷川邦夫, 외 4인 (1991), "축력을 받는 탄소강 배관의 침식에 의한 국부감육의 허용기준", 일본기계학회논문집(A편), Vol. 57, No. 539, pp. 1470.
- (8) 일본원자력연구소 기기신뢰성연구실 (1993. 5), "배관 신뢰성 실증시험 기술보고서", JAERI-M93-076, pp. 104.
- (9) S. H. Ahn, K. W. Nam, Y. S. Yoo, K. Ando, S. H. Ji, M. Ishiwata and K. Hasegawa (2002), "Fracture Behavior of Straight Pipe and Elbow with Local Wall Thinning", Nuclear Engineering and Design, Vol. 211, Issues 2-3, pp. 91~103.

- (10) 이충현, 김경애 (1999), “ 초음파 탐상검사”, 세진사, pp. 183~189.
- (11) 남영현 (2000), “ Evaluation of Fracture Appearance Transition Temperature to pressure Vessel by Ultrasonics, 비파괴검사학회지, Vol.20, No.5.
- (12) 장영수, 김진호, 정현조, 남영현 (1999), “ 시간 및 주파수 영역에서의 신호처리 기술에 의한 초음파 속도와 감쇠의 측정” 비파괴검사학회지, Vol.19, No.2.
- (13) 탄성파이용기술연구회, 탄성파이용기술 입문 시리즈 제 1권 “음향 방출”, pp. 1~45
- (14) 한국비파괴검사학회, “음향방출시험 (I)” pp. 6~13,
- (15) 이건찬, 오정환, 남기우, 이주석 (1999), “열화된 SUS316강의 시간-주파수 해석에 의한 비파괴평가”, 비파괴검사학회지, Vol.19, No.4.
- (16) Donoho, D. and Johnstone, I., (1994), “Ideal Spatial Adaptation by Wavelet Shrinkage”, *Biometrika*, 81, pp. 425~455.
- (17) Donoho, D. and Johnstone, I., (1995), “Adapting to Unknown Smoothness via Wavelet Shrinkage”, *J. Amer. Statist. Assoc.*, 90, pp. 1200~1224.
- (18) Kim, Y. Y., Jang, G. W., and Kim, J. E., (2001), Multiscale Wavelet-Galerkin Method for Meshless Analysis of Plane Elasticity Problems, in *Computational Mechanics, New Frontiers for the New Millennium*, Edited by S. Valliappan and N. Khalili, pp. 959 ~964, Elsevier, Amsterdam.
- (19) Ik-Keun Park, Yong-Kwon Kim, Younho Cho, Yeon-Shik Ahn and Yong-Sang Cho (2004), “A Study on the Behavior of Ultrasonic Guided Wave Mode in a Pipe Using Comb Transducer,” *KSNT*, Vol. 24, No. 2, pp. 142-150.
- (20) Sang-Guk Lee (2004), “Leak Detection and Evaluation for Power Plant Boiler Tubes Using Acoustic Emission,” *KSNT*, Vol. 24, No. 1, pp. 45-51.
- (21) Ki-Woo Nam, So-Soon Park, Seok-Hwan Ahn, Jae-Yoon Do

and In-Duck Park (2003), "Fatigue Behavior of STS316L Weldments and Degradation Characteristic Evaluation by Ultrasonic Test," KSNT, Vol. 23, No. 2, pp. 156-164.

(22) 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.

(23) 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.

(24) Ki Woo Nam, Seok Hwan Ahn and Jin Wook Kim (2005), "Nondestructive evaluation in materials using time-frequency analysis methods", Key Engineering Materials, Vol. 297-300, pp. 2090~2095.

(25) 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.

(26) H. Suzuki, et. all, "Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals", J. of Acoustic Emission Vol. 14, No. 2, pp. 69-84.

(27) J. W. Kim, K. W. Nam and S. H. Ahn, 2004, "Nondestructive Evaluation of Pipes with Local Wall Thinning by Wavelet Analysis of Elastic Wave", Key Engineering Materials, Vol. 270-273, pp. 954~958.

(28) Ki Woo Nam, Seok Hwan Ahn and Jin Wook Kim (2005), "Nondestructive Evaluation in Materials using Time-Frequency Analysis Methods", Key Engineering Materials, Vol. 297-300, pp. 2090~2095.