한국해양공학회지 제17권 제1호, pp 47~54, 2003 (ISSN 1225-0767)

# STS316L용접재의 표면파에 의한 잔류응력 측정과 균열진전시의 음향방출특성

남기우* · 박소순** · 안석환*
*부경대학교 공과대학
**부경대학교 대학원

# Residual Stress Measurement by $L_{CR}$ Wave and Acoustic Emission Charactreistics from Fatigue Crack Propagation in STS316L Weldment

KI-WOO NAM*, SO-SOON PARK** AND SEOK-WHAN AHN*
*College of Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea
**Graduate School, Pukyong National University, Busan, Korea

**KEY WORDS** : Residual Stress 잔류응력, $L_{CR}$ Wave 표면파, Acoustic Emission 음향방출, Fatigue Crack Propagation 피로균열전파, Time-Frequency Analysis Method 시간-주파수 해석

**ABSTRACT** : *In this study, the residual stress and the acoustic emission characteristics from fatigue crack propagation were investigated, based on the welded material of STS316L. The residual stress of welding locations could be evaluated by ultrasonic parameters, such as $L_{CR}$ wave velocity and $L_{CR}$ wave frequency; the residual stress between base metal and weld metal was evaluated. In the fatigue tests, three types of signals were observed, regardless of specimen condition, base metal, and weld metal. Based on NDE analysis of AE signals by the time-frequency analysis method, it should also be possible to evaluate, in real-time, the crack propagation and final fracture process, resulting from various damages and defects in welded structural members.*

## 1. 서 론

철구조물로 이루어지는 해양구조물 등은 용접에 의하여 가공되므로 용접부에는 잔류응력이 남게된다(김화수, 1997). 잔류응력은 외력이 작용하지 않는 상태에서 구조물에 존재하는 응력으로서 열처리 또는 용접 등 기계적인 가공 작업에 의하여 재료의 내부에 축적된 응력이며 불균일한 영구변형을 하는 부재에서 발생한다. 이러한 영구변형은 소성변형, 입자의 질화, 탄화, 상변화 등에 의한 금속격자의 국부 수축이나 팽창에 의하여 발생한다. 일반적으로 인장 잔류응력은 피로나 응력 부식과 파괴에 대한 민감도를 상승시키므로 구조물 자체에 유해한 영향(서창민 등, 1993; 이택순과 양현태, 1997; 류기열과 엄동석, 1998; 석창성 등, 1999)을 끼치는 반면, 압축 잔류응력은 외부로부터 가해지는 응력을 감쇠시켜 주므로 유익하게 작용할 때가 많다(Ishigami et al., 2000; Croccolo et al., 2002). 또한 공학적인 구조물 파괴의 가장 중요한 모드인 피로파괴와 응력부식파괴는 표면에 민감한 현상이므로 표면 잔류응력이 적절하게 평가되어야 한다. 표면 잔류응력을 평가하는 방법 중 파괴하거나 해체하지 않고 현장에서 직접 잔류응력을 측정하고 평가하는 비파괴 평가법은 시간적, 경제적인 절감 효과가 있다.

제1저자 남기우 연락처: 부산광역시 남구 용당동 100
051-620-1640 namkw@pknu.ac.kr

한편, 음향방출법은 최근 가동 중 시설의 균열의 발생 및 진전을 검출하고 분석하는 비파괴 검사의 한 방법으로 초음파법과 마찬가지로 원거리에서 실시간적인 검사가 가능하며 균열발생 시 초기 검출이 가능하므로 구조물의 안전관리 차원에서 유용한 수단이다(김현수 외, 2000).

본 연구에서는 구조부재로 많이 사용되고 있는 STS316L의 용접재를 사용하여 잔류응력에 민감한 $L_{CR}$파를 이용하여 초음파법에 의한 표면 잔류응력 분석을 시도하였다. 그리고, 피로균열발생 및 진전거동에 따른 음향방출을 시간-주파수 방법으로 특성을 분석하여 원거리 실시간 검사시스템 개발을 위한 기초 data를 마련하고자 한다.

## 2. 시험편

본 연구에 사용한 재료는 오스테나이트계 스테인리스강인 STS316L로 인성, 연성, 내식성 등 우수한 기계적 성질을 가지므로 극저온에서 고온에 이르기까지 광범위한 온도 범위와 다양한 사용조건에서 폭넓게 사용되고 있다. 용접부의 특성을 평가하기 위한 시험편은 U-그루부가 가공된 모재에 스테인리스강용 용접봉을 사용하여 GMAW 용접 후 공냉하였다.

재료의 화학조성, 기계적 성질 및 용접조건을 Table 1, Table 2 및 Table 3에 나타내었다. 피로균열 전파거동 및 균열 진전 중에 발생하는 음향방출특성을 평가하기 위한 ASTM E-399-78에

**Table 1** Chemical compositions of test material

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.020 | 0.61 | 0.67 | 0.023 | 0.002 | 17.31 | 12.00 | 2.14 |

**Table 2** Machanical properties of STS316L

| Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation (%) | HRB |
|---|---|---|---|
| 267.0 | 585.3 | 60.1 | 309.8 |

**Table 3** Welding condition of STS316L (GMAW)

| Current (A) | Voltage (V) | Welding speed (㎜/min) | Heat input (KJ/㎝) |
|---|---|---|---|
| 270 | 17 | 280 | 9.107 |

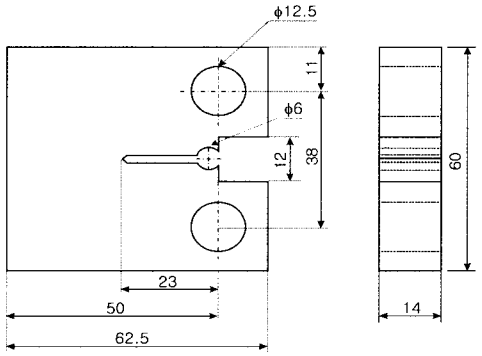



**Fig. 1** Dimensions of CT specimen [mm]

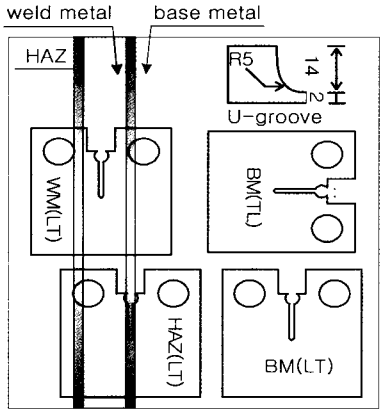



**Fig. 2** Specimen location in plate

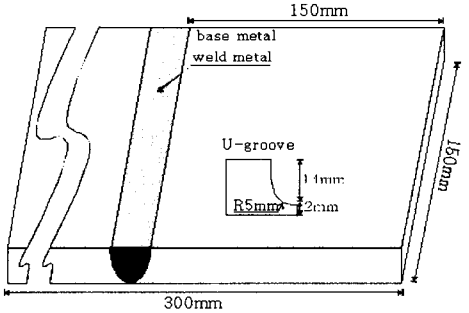



**Fig. 3** Dimension of UT-specimen

따른 CT시험편의 형상 및 치수를 Fig. 1에, 시험편의 채취 방향 및 위치를 Fig. 2에 나타내었다. 초음파의 표면파에 의한 잔류응력 평가에 사용된 시험편의 형상을 Fig. 3에 나타내었다.

## 3. 실험방법

### 3.1 $L_{CR}$파(표면파)에 의한 잔류응력 측정

본 연구에 사용한 초음파탐상 시스템을 Fig. 4에 나타낸다. Parametrics사의 USD-15 초음파탐상기와 중심주파수 5MHz, Ψ 0.25"인 수직용 광대역 및 협대역 탐촉자를 사용하였다. 본 연구에서는 검출된 신호의 시간영역을 짧게 나누어 하나의 블록을 만들고 각 블록을 퓨리에 변환함으로써 수신신호를 시간함수에 대하여 속도, 주파수, 진폭 등의 정보로 분석하기 위하여 시간-주파수 해석법중에서 STFT(short-time Fourier transform) 법을 사용하였다(남기우와 문창권, 2002; Nam and Kim, 2001; Nam and Moon, 2001; Ahn and Nam, 2001). 재료의 $L_{CR}$파의 음향임피던스(acoustoelastic constants)를 결정하고, 이로부터 잔류응력은 비례식으로부터 구할 수 있다(박익근과 이철구, 1999; 김선진과 전창환; 2001). Fig. 5에 $L_{CR}$파를 이용한 잔류응력 측정 개략도를 나타내었고, 식(1)은 $L_{CR}$파의 속도식이고, 식(2)는 동일 재료에 응력이 가해진 상태에서의 잔류응력이다.

$$V_{L_{CR}} = \frac{W}{T} \tag{1}$$

$$\Delta\sigma_r = \frac{\Delta T_{L_{CR}}}{T_{oL_{CR}}} \frac{E}{L} \tag{2}$$

여기서, $V_{L_{CR}}$ : $L_{CR}$파 속도[㎜/㎲], T : 전파시간[sec], W : 표면파 진행거리(82㎜로 일정)[㎜], $\Delta\sigma_r$ : $L_{CR}$파의 속도 변화량에 따른 잔류응력 변화량[MPa], $\Delta T_{L_{CR}}$ : 가해진 응력에 의한 전파시간 변화량[sec], $T_{oL_{CR}}$ : 응력을 받기 전 초기의 전파시간[sec], E : 종탄성계수[MPa], L : 음향탄성계수 $[\Delta V/V_o]$,이다.

$L = \Delta V/V_o$를 대입하고, 식(2)를 정리하면 다음식과 같다.

$$\Delta\sigma_r = \frac{\Delta T_{L_{CR}}}{T_{oL_{CR}}} E, \text{ (동일재료)} \tag{3}$$

식(3)은 동일재료에 대한 잔류응력 $\Delta\sigma_r$식이다. 이종재료에 대한 음탄성변화를 반영하기 위하여 $Z = \rho V$를 식(1)에 대입하여 정리하고, 이종재료간의 종탄성계수의 변화를 반영하면, 용접에 의한 모재와 용착부 간의 잔류응력를 구하는 식은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \rho\frac{W}{Z}$$

$$\Delta\sigma_r = \frac{T_{2L_{CR}}}{T_{1L_{CR}}} \frac{\Delta E^2}{2E_1} = \frac{\rho_2 Z_1}{\rho_1 Z_2} \frac{\Delta E^2}{2E_1} = \frac{\rho_2\rho_1 V_{1L_{CR}}}{\rho_1\rho_2 V_{2L_{CR}}} \frac{\Delta E^2}{2E_1}$$

$$\therefore \Delta\sigma_r = \frac{T_{2L_{CR}}}{T_{1L_{CR}}} \frac{\Delta E^2}{2E_1} = \frac{V_{1L_{CR}}}{V_{2L_{CR}}} \frac{\Delta E^2}{2E_1} \text{ (이종재료)} \tag{4}$$

위 식에서 $\triangle E^2/2E$를 곱한 이유는 물질의(용접부 및 모재부) 탄성계수에 의한 잔류응력를 반영하기 위한 것이다. 기존 식(김선진과 전창환; 2001)은 동일재료에 대하여 적용한 것이므로 탄성계수의 변화 역시 동일하지만, 용접부와 모재부의 탄성계수 변화가 다르므로 이를 반영하기 위한 것이다. 즉 물질에 따른 가공경화 정도차에 대한 잔류응력을 1)탄성계수의 차, 2) 밀도, 3) 초음파 속도 및 음향임피던스, 4)음향탄성계수(김선진과 전창환; 2001) 등 4개의 인자를 반영하여 정리한 것이다. 따라서, 식(4)를 이용하면, 이종재료간의 밀도차에 상관없이 모재와 용착부의 잔류응력를 구할 수 있다.

여기서, 1은 오스테나이트계 모재부, 2는 오스테나이트계 용접부에서 구한 실험값이다. 만약 재료가 오스테나이트계 모재부 및 일반강 모재부 등 이렇게 다른 재료에 대한 잔류응력을 비교하는 것이라면 2대신에 상수 C를 넣으면 성립한다. Z : 음향임피던스[kg/m²sec], ΔE : 가해진 응력에 의한 E 변화량[MPa], ΔZ : 가해진 응력에 의한 Z 변화량[m² · sec]이다.

### 3.2 피로시험 및 음향방출 시험

피로균열진전 특성을 평가하기 위한 피로시험은 최대 용량 10톤의 만능피로시험기(Model : EHF-ED10, Shimadzu)를 사용하여 실온 · 대기중에서 정현파로 하중반복수 10Hz, 응력비 R=0.1에서 실시하였다. 모든 시험편은 하중 Pmax=14kN에서 예비균열을 2㎜ 삽입한 후, 본 실험에서 Pmax=14.5kN의 일정하중으로 실시하였으며 균열길이는 clip gage를 이용하여 측정하였다. 피로 시험 중에 발생하는 음향방출신호의 검출을 위해 PAC사의 1200A와 광대역 센서(주파수 범위 ; 100~1000kHz)를 사용하였다. 또한 노이즈를 줄이기 위하여 1차 적으로 analog filtering을 하고 CRT 화면상의 육안 검출이 가능하도록 40dB Pre-amplifier를 거쳐 신호를 검출하였다.

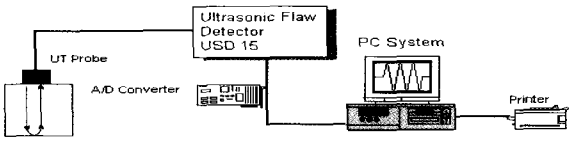



**Fig. 4** Ultrasonic test and analysis system

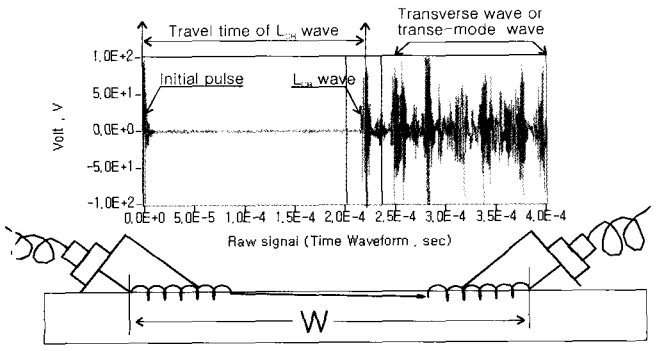



**Fig. 5** Basic principle of $L_{CR}$ wave measurement

피로시험동안 각 균열 진전량 5㎜마다 event 수 3000개까지 계측하고 계측된 각각의 탄성파는 Gage社의 CS215 고속 A/D 변환기를 이용하여 디지털화 시켰다. 디지털화된 탄성파는 다시 주파수-스펙트럼 분석 프로그램(FFT분석)으로 진신호와 노이즈를 일차 분별한 후, 진신호만을 선별하여 STFT법에 의하여 분석하였다. 음향방출 분석 시스템의 개략도를 Fig. 6에 나타내었다.

## 4. 시험결과 및 고찰

### 4.1 $L_{CR}$파(표면파)법에 의한 잔류응력의 분석

초음파의 속도는 파의 종류, 매질특성 등에 의해 결정되며 $L_{CR}$ 파는 잔류응력에 민감함을 이용하여 $L_{CR}$의 속도 및 주파수 분석을 통해 잔류응력을 측정하고자 하였다.

Fig. 7에 모재 및 용착부로 진행시킨 $L_{CR}$파의 전파시간($\mu s$), 속도 및 STFT분석에 의한 중심 주파수 분포를 나타내었다. 모재부의 $L_{CR}$파 속도 및 주파수는 대표값으로 약 3721㎧, 4.5㎒대에 분포하였으며, 용착부의 $L_{CR}$파 속도 및 주파수는 대표값으로 3561㎧, 2.5㎒대의 분포를 보였다. $L_{CR}$파 속도는 식(1)에 의하여, 모재와 용착부의 잔류응력차는 식(4)로부터 도출하였다. 식(4)로부터 얻어진 잔류응력차는 $\Delta\sigma$ = 649.7㎫ ~580.5㎫로 나타났다. 본 실험에서 식(4)가 성립함을 검증하였으며, 이 검증을 통하여 용착부에는 용접잔류응력이 많이 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 7로부터 $L_{CR}$파 속도가 잔류응력에 민감함을 확인 할 수 있다(박익근과 이철구, 1999; 김선진과 전창환; 2001). 또한, $L_{CR}$파의 f(L)분포는 속도와 거동을 같이 하였고 잔류응력에 대한 민감도가 속도에 비하여 큰 것으로 나타났다. 그러나 식(4)는 정성적 및 정량적인 평가가 가능하지만, 정량적인 평가를 위해서는 더 많은 연구에 의해 명확한 해석 및 규명이 필요할 것으로 판단된다.

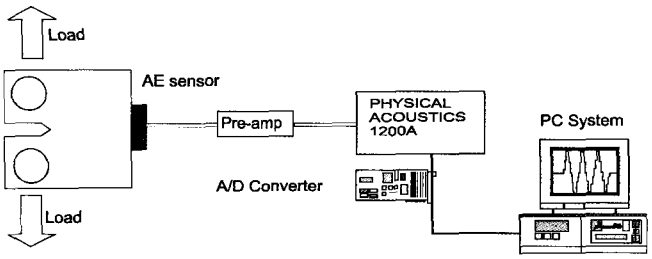



**Fig. 6** Measurement system of acoustic emission

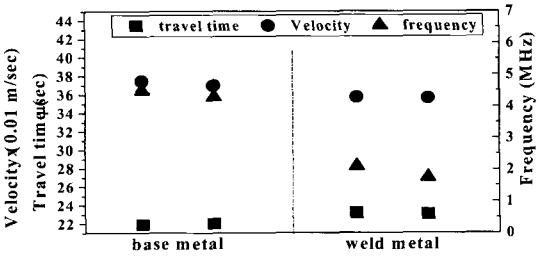


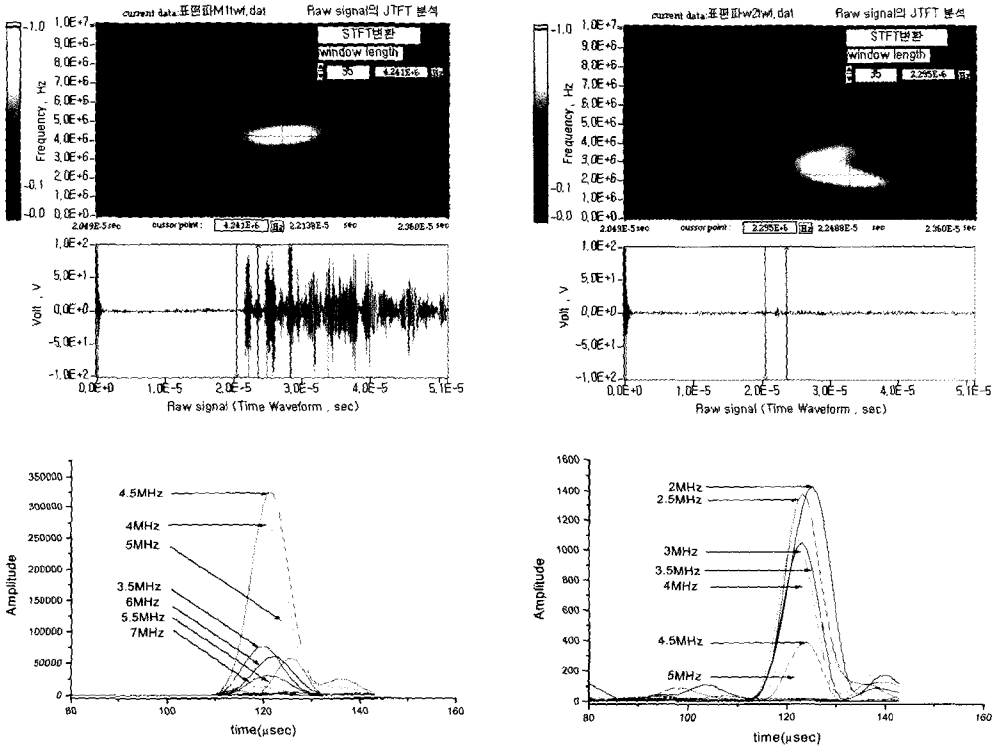

**Fig. 7** Travel time, velocity and frequency analysis of $L_{CR}$ wave (sampling rate 10MHz)

Fig. 8에 모재와 용착부에 대한 $L_{CR}$파의 STFT분석 결과를 도시하였다. 모재는 중심주파수 성분인 4.5㎒성분 이외에도 6㎒~7㎒대의 고주파수 성분이 다량 존재하지만, 용착부는 고주파수 성분이 거의 없음을 알 수 있다. 용착부의 고주파수 성분이 감소하는 원인은 오스테나이트-페라이트의 2상조직에서 페라이트가 초음파 진행을 방해하는 원인으로 작용하며, 페라이트 함량이 많을수록 페라이트의 분포 이방성이 클수록 중심주파수는 저하되었다. 또한 용착부의 석출물도 중심주파수의 변화에 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

### 4.2 피로균열진전 거동에 따른 음향방출

STS316L 용접부의 음향방출은 주로 높은 진폭을 가지며 균열의 진행시에 방출되는 돌발형과 낮은 진폭을 가지며 슬립의 이동, 소성변형, 파면마찰 등의 경우에 방출되는 연속형으로 나눌 수 있다. 본 실험에서는 파형 분석법, 형상인식법 및 음향방출 활성도 분석법에 의해 피로시험 중에 검출된 음향방출을 분석한 결과, 크게 Type I, Type II 및 Type III의 세가지 신호로 분류 할 수 있었다(Nam and Mal; 2001). 이러한 신호는 전 피로시험중에 일정주기로 반복되는 것으로 나타났다. 따라서 이 세가지 Type의 신호를 피로하중의 부하 및 제하의 피로 1 사이클에 검출되는 음향방출로 판단하였다(이건찬 등; 1999). 피로하중의 부하 및 제하의 피로 1 사이클에 검출되는 음향방출을 분석한 결과, 균열진전에 의한 돌발형 신호(Type I), 균열닫힘과 그에 따른 파면마찰시의 프레팅에 의한 부식생성물 및 산화물의 분쇄 시 발생하는 신호(Type II), 균열 열림 및 그에 따른 파면마찰에 의한 신호(Type III), 잡음신호의 대표적인 4가지 형태로 분류 할 수 있었다. 또한 Type I 및 Type II 신호는 다시 Type Ia, Ib, Ic, IIa, IIb로 세분할 수 있었고 전 피로균열 진전과정에서 이러한 Type I, Type II, Type III신호 및 잡음신호가 주기적으로 반복되는 것으로 나타났다. 또한 잡음신호를 검출하기 위해, 균열의 거의 진전이 없는 것으로 고려되는 예비균열 삽입의 초기단계에 음향방출을 검출하고 분석한 결과 전기적 잡음, 시험편과 고정핀의 마찰에 의한 것으로 피로시험의 응력비(R=0.1) 및 하중반복수(10Hz)에 의존하며 1MHz의 저주파수에 진폭(V 또는 에너지스펙트럼) 역시 일정하였다. 따라서 본 논문에서도 잡음신호는 무시하고 진신호만 분석하였다. Table. 3에 STS316L 용접재의 피로균열진전 거동에 따른 음향방출의 분류표를, Fig. 9에 Table. 3에 의한 음향방출의 분류 기준를 나타내었다. 피로균열 진전 거동에 따른 음향방출 특성 평가를 위해 BM(LT)의 피로 균열길이 25㎜, 30㎜, 35㎜, 38㎜에서의 각 AE신호를 분석한 결과이다. 균열 진전 속도가 빨라짐에 따라 Type I 신호가 2~3개 씩 겹쳐서 수신되는 겹친 돌발신호 및 돌발신호와 연속신호가 겹쳐서 수신되는 돌발-연속형의 복합형신호의 event 수가 증가하였다.

전체적으로 피로 균열이 진전됨에 따라 각 Type의 event수가 증가하였으나, IIc영역에 해당되는 고ΔK 영역에서는 Type II의 event수가 거의 없었으며 Type I 및 Type III의 event수만이 증가하였다. 이는 저 · 중 ΔK의 안정 피로파괴 영역에서는




(a) base metal (b) weld metal

**Fig. 8** Time-frequency and amplitude analysis of $L_{CR}$ wave (sampling rate 10MHz)

**Table. 4** Classification of AE signals

| Type | 특 징 |
|---|---|
| Type Ia | 단순돌발형, 200-350KHz, 저amplitude(v), 주파수 감쇠가 심하고 분포가 단순 |
| Type Ib | 돌발형, 200-500KHz, 고 amplitude(v), 주파수 감쇠가 심하고 분포가 단순 |
| Type Ic | 돌발형, 200-900KHz, 고 amplitude(v), 주파수 감쇠가 심하고 분포가 단순 |
| Type IIa | 돌발변형, 200-500KHz, 저 amplitude(v), 주파수 감쇠가 심하고 분포가 복잡 |
| Type IIb | 돌발변형, 200-800KHz, 저 amplitude(v), 주파수 감쇠가 심하고 분포가 복잡 |
| Type III | 연속형, 100-350KHz, amplitude(v) 일정, 주파수 분포 단순 |

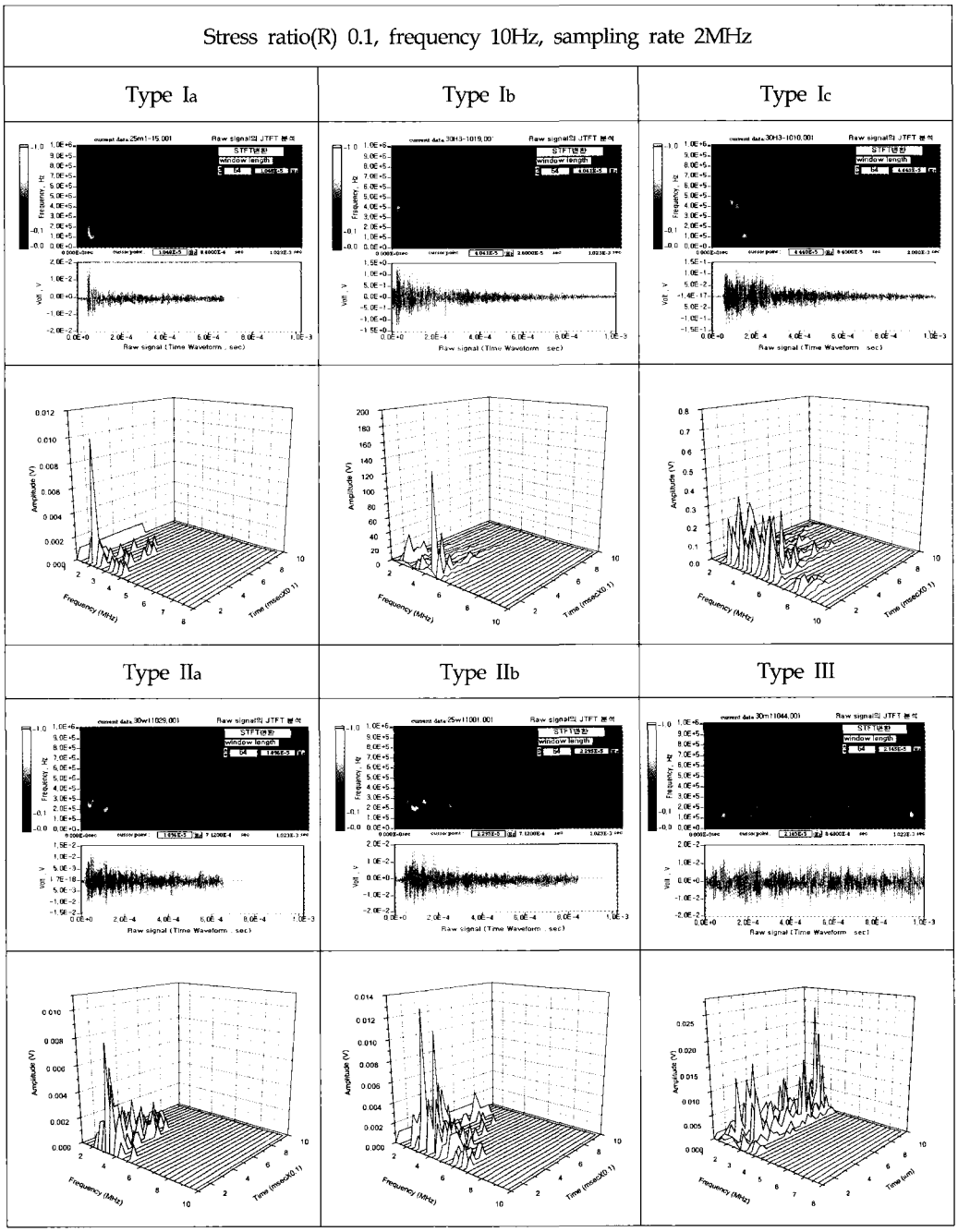



**Fig. 9** Classification of AE signals by waveform and STFT(3D)

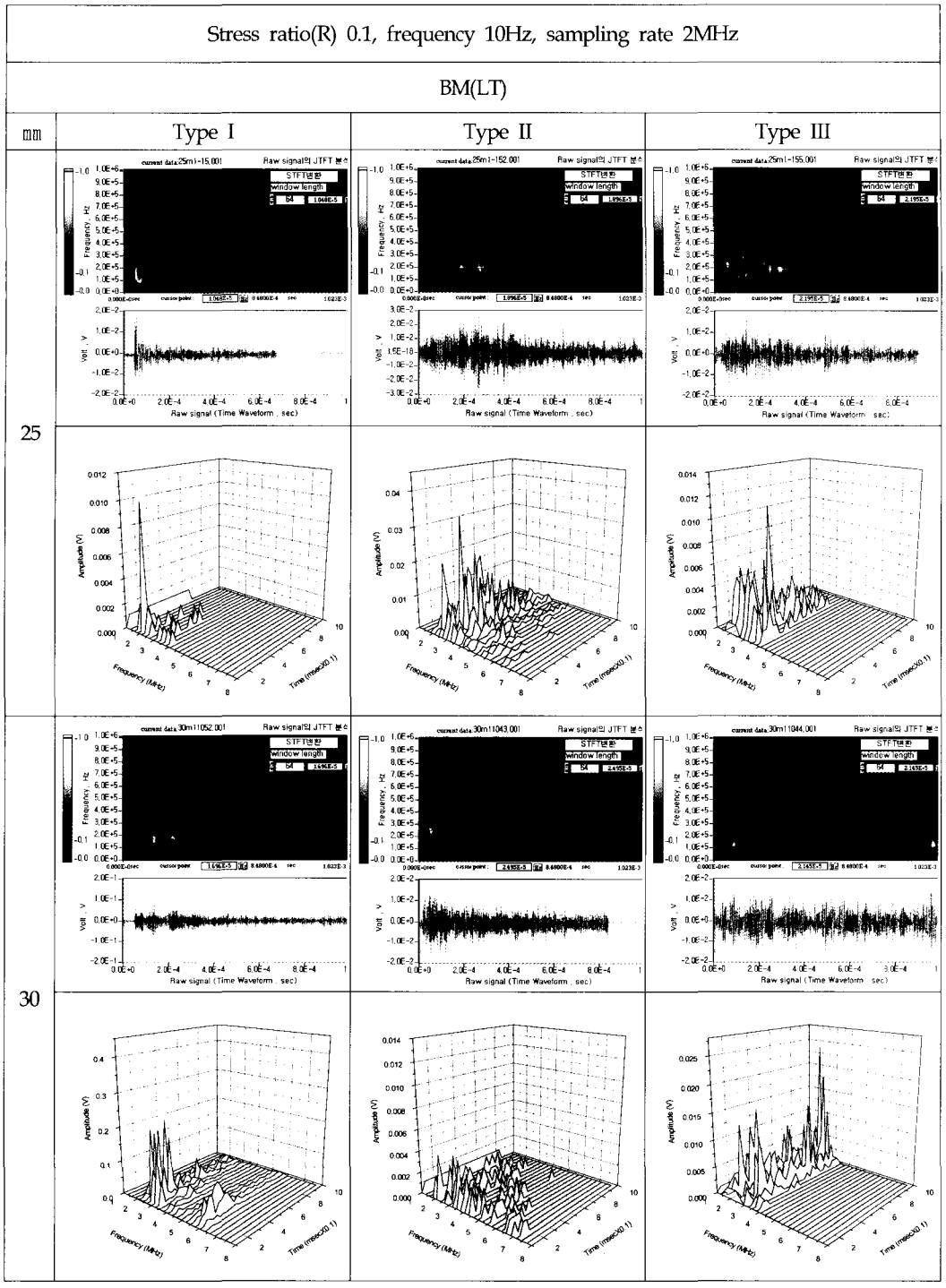



**Fig. 10** AE waveform and time-frequency analysis on each crack length of BM(LT)

피로 파괴 과정에서 제하 - 균열닫힘 - 균열진전 - 부하 - 균열열림 - 균열진전의 반복과정을 거쳐 균열이 성장하고 음향방출 역시 이에 따라 주기적으로 반복되지만 피로파괴 IIc영역의 고 △K 영역에서는 피로 균열의 진전이 매우 빠르며 제하 - 균열진전 - 부하 - 균열열림 - 균열진전의 반복과정으로 균열 닫힘이 거의 일어나지 않기 때문인 것으로 판단된다. 각각의 피로균열길이 25㎜, 30㎜, 35㎜, 39㎜에서 Type I의 중심주파수대는 각 각 1~2MHz, 1~2.5MHz, 1~3MHz, 3~5MHz, amplitude (에너지 스펙트럼, V)는 각각 20mV, 30mV, 60mV로 균열진전 속도가 빨라짐에 따라 수신되는 음향방출의 중심주파수 분포 및 진폭가 증가하였으며 rising time은 100$\mu$s, 10$\mu$s, 1$\mu$s로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 Type II는 균열 닫힘에 의한 파면마찰 및 프레팅에 의한 부식생성물 및 산화물의 분쇄에 의한 신호가 겹쳐있으므로 각각의 피로균열길이에서의 주파수성

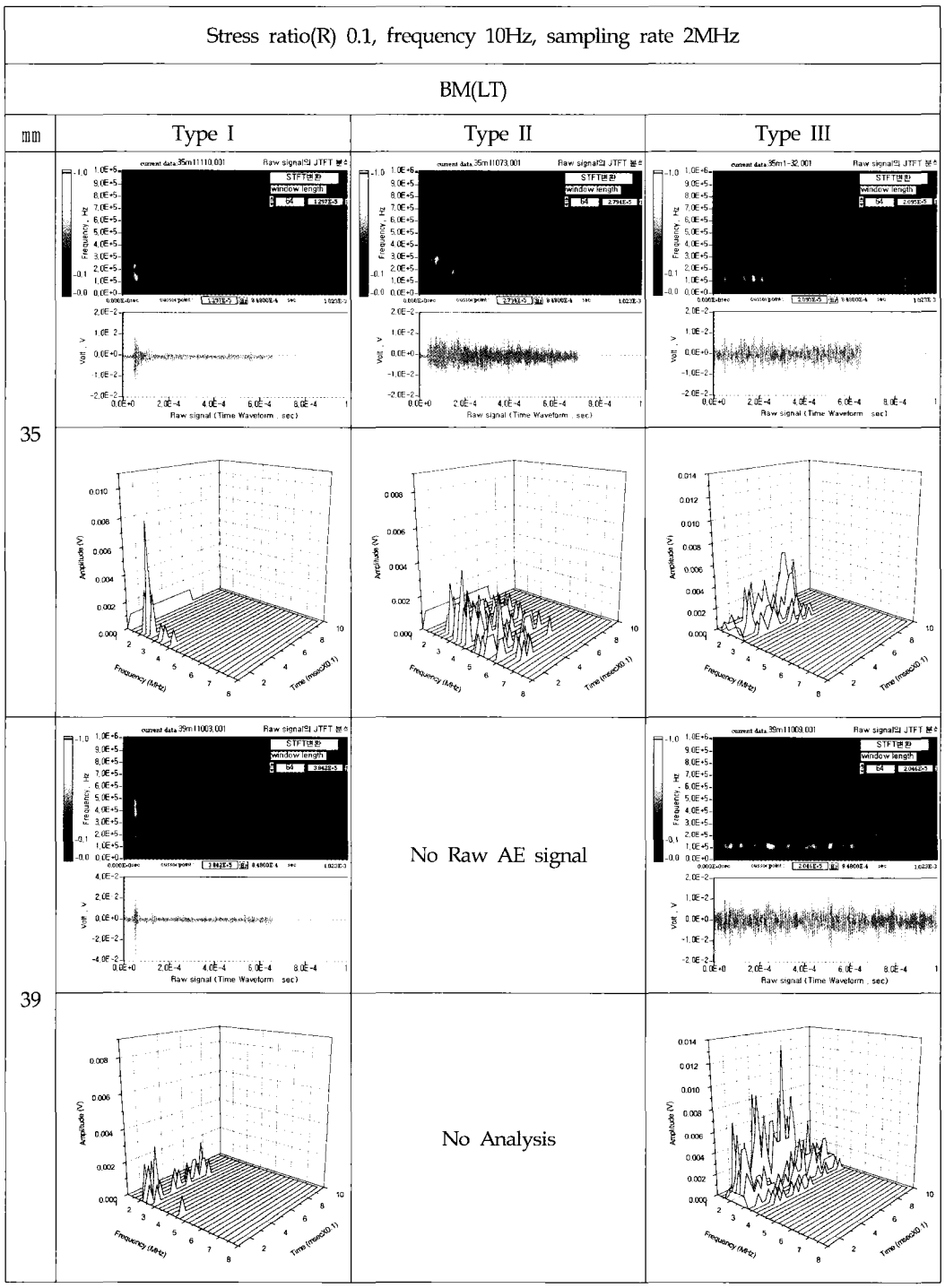



**Fig. 10** Continued

분의 분포대가 1~4MHz, 1~5MHz, 1~6MHz로 넓게 분포하며 Type I과 같이 균열진전속도가 빨라짐에 따라 주파수 성분의 분포대가 높아지는 경향을 나타내었다. 그러나 Type III의 경우 균열진전 속도가 빨라짐에 따라 각 균열길이에서의 event 수는 증가하였고 중심주파수 성분은 1~3MHz, 1~2.5MHz, 1~2MHz의 순으로 낮아지는 경향이 있었으며, 진폭의 변화는 관찰되지 않았다. 이는 위에서 고찰한 바와 같이 Type III의 경우 균열 열림시의 파면 마찰에 의한 음향방출이므로 균열진전의 후반으로 갈수록 제하-균열진전-부하-균열열림-균열진전의 반복과정으로 균열 닫힘이 거의 일어나지 않고 균열이 거의 열린 상태에서 진전하므로 파면마찰은 일어나지만 마찰이 그다지 강하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

BM(TL), WM(LT) 및 HAZ(LT)의 피로균열진전에 따른 음향방출은 BM(LT)에 비하여 파형 및 진폭 분포는 다소 복잡해

지고 변형된 파형이 많았다. 특히 WM(LT)의 경우 개재물 분리, 균열의 지그재그 진전 등에 의해 파형 및 진폭 분포는 더욱 복잡해 졌으나 피로균열의 진전에 따른 전체적인 거동은 BM(LT)와 유사하였으므로 지면관계상 분석결과의 도시는 생략한다.

## 5. 결 론

STS316L 용접재의 모재와 용착부의 초음파특성 및 피로균열 전파특성에 따른 음향방출 특성을 평가한 결과, 다음의 결론을 얻었다. $L_{CR}$파에 의한 동종 재료간의 잔류 응력 관계식으로부터 이종 재료간의 잔류응력 관계식을 도출하였으며, 이식에 의하여 모재와 용착부 간의 잔류응력을 구할 수 있었다.

그러나 식의 정량화 및 명확한 규명을 위해 좀 더 깊은 연구가 필요한 것으로 판단된다. 모재와 용착부의 음향방출은 잔류응력에 관계없이 Type I, Type II 및 Type III의 세가지 신호로 분류 할 수 있었다. 음향방출의 수신 개시점으로부터 피로균열의 발생시기를 검출할 수 있으며, Type I 및 Type II 신호의 중심 주파수와 진폭의 증가, Type I 신호의 rising time의 감소로부터 피로 균열 진전 속도가 증가하고 있음을 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌


김선진, 전창환 (2001). "$L_{CR}$파를 이용한 압연 알루미늄판의 잔류응력 평가에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제15권, 제3호, pp 81-86.

김화수 (1997). "선박 용접구조의 잔류응력과 피로강도, 대한용접학회지, 제15권, 제3호, pp 12-19.

김현수, 심규현, 안석환, 남기우 (2000). "시간-주파수 해석법을 이용한 선박용 디젤엔진 배기밸브의 열화도 평가에 관한 기초적 연구(II)", 한국해양공학회지, 제14권, 제4호, pp 68-72.

남기우, 문창권 (2002). "CFRP적층 형태에 따른 파괴시 음향방출 신호특성" 한국해양공학회지, 제16권, 제2호, pp 67-71.

류기열, 엄동석 (1998). "원통의 용접변형 및 잔류응력에 대한 연구", 대한조선학회논문집, 제35권, 제4호, pp 55-64.

박익근, 이철구 (1999). "음탄성에 의한 비파괴적 잔류응력 측정", 대한용접학회지, 제17권, 제2호, pp 26-27.

서창민, 강용구, 박원종 (1993). "잔류응력에 의한 피로균열면 형상변화 및 수명예측", 한국해양공학회지, 제7권, 제2호, pp 246-256.

석창성, 박지홍, 김수용 (1999). "용접부의 잔류응력 및 피로균열성장 거동 해석", 대한기계학회논문집A, 제23권, 제9호, pp 1516-1524.

이건찬, 오정환, 남기우, 이주석 (1999). "열화된 SUS316강의 시간-주파수 해석에 의한 비파괴평가", 비파괴검사학회지, 제19권, 제4호, pp 270-276.

이택순, 양현태 (1997). "SUS-304강 용접부의 잔류응력이 피로균열진전속도에 미치는 영향", 대한용접학회지, 제15권, 제4호, pp 187-193.

Ahn, S. W. and Nam, K. W. (2001). "Characteristics of AE Signals from Fatigue Crack Propagation and Penetration of a Surface Crack in 6061 Aluminum Plate", International Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol 4, No 1, pp 44-50.

Croccolo, D., Cristofolini, L., Bandini, M. & Freddi, A. (2002). "Fatigue Strength of Shot-Peened Nitrided Steel: Optimization of Process Parameters by means of Design of the Experiment", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol 25, No 7, pp 695-707.

Ishigami, H., Matsui, K., Jin, Y., Ando, K. (2000). "A study on Stress, Reflection and Double Shot Peening to Inrease Compressive Residual Stress", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol 23, No 11, pp 959-963.

Nam, K. W. and Kim, Y. U. (2001). "Nondestructive Evaluation for Artificial Degraded Stainless 316 Steel by Time-Frequency Analysis Method", J. Ocean Engineering and Technology, Vol 15, No 3, pp 87-92.

Nam, K. W. and Moon, C. K. (2001). "Classification of Acoustic Emission Signals from fatigue crack propagation in 2024 and 5052 Aluminum Alloys", International Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol 4, No 1, pp 51-55.

Nam, K., Mal, A. (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.


2002년 11월 8일 원고 접수
2002년 12월 31일 최종 수정본 채택