

## STS316L 용접부의 피로거동 및 초음파시험에 의한 열화특성 평가

### Fatigue Behavior of STS316L Weldments and Degradation Characteristic Evaluation by Ultrasonic Test

남기우\*<sup>†</sup>, 박소순\*\*, 안석환\*\*\*, 도재윤\*\*\*\*, 박인덕\*

Ki-Woo Nam\*<sup>†</sup>, So-Soon Park\*\*, Seok-Hwan Ahn\*\*\*, Jae-Yoon Do\*\*\*\* and In-Duck Park\*

초 록 STS316L은 인성, 연성, 부식저항성 등 우수한 기계적 성질 때문에 에너지환경설비 등 구조물에 널리 이용되고 있다. 그러나, 용접구조물은 가혹한 환경하에서 경년열화가 심각하다. 지금까지의 연구들은 주로 용접부의 피로균열진전거동에 관하여 수행되었고, 피로균열진전속도식의 재료상수와 비파괴적 평가의 상관성에 관한 연구는 거의 없었다. 본 연구는 STS316L 용접부의 피로균열진전 거동을 조사하고, 초음파 파라미터로 열화특성을 평가하고 시간-주파수 분석으로 해석을 하였다. 본 연구 결과는 용접구조물의 사용기간 중 피로수명 등을 예측하기 위한 기초 데이터로서 사용될 수 있다.

**Abstract** STS316L had been used as the structural material for energy environmental facilities, because austenite stainless steels like 316L have superior mechanical properties of which toughness, ductility, corrosion resistant and etc. However, those welded structures are receiving severe damage due to increasing of the aged degradation. Most studies until now have been carried out against fatigue behaviors of weldments, and were not well studied on nondestructive evaluation methods. In this study, the fatigue crack propagation behavior of STS316L weldment usually used for vessels of the nuclear power plant was investigated. Also, the degradation characteristics of 316L stainless steel weldments were evaluated by the ultrasonic parameter such as ultrasonic velocity, attenuation factor and time-frequency analysis. The results of this study can be used as a basic data for the prediction of the fatigue crack life of weldments structures without disjoining or stopping service of structures in service.

**주요용어:** STS316L 용접부, 음속, 감쇠계수, 피로거동, 시간-주파수 분석, 단시간 푸리에 변환, 열화

**Keywords:** STS316L weldment, ultrasonic velocity, attenuation factor, fatigue behavior, time-frequency analysis, short time fourier transformation, degradation

#### 1. 서 론

오스테나이트계 스테인리스강은 인성, 연성, 내식성 등 우수한 기계적 성질을 가지므로 극저온에서

고온에 이르기까지 광범위한 온도 범위와 다양한 사용조건에서 폭넓게 사용되고 있다. 특히, 에너지 환경설비용 구조재료로 STS304나 STS316 등의 300계열의 오스테나이트 스테인리스강이 주로 사용되

어 왔다. 그러나 300계열의 오스테나이트 스테인리스강은 열화물 분위기에서 공식, 입계부식 및 응력부식에 취약한 문제점을 나타내고 있다[1,2]. 더욱이 이들의 용접 구조물에서는 조직의 불균일, 반복 응력 및 부식환경 하에서 경년열화의 가속으로 심각한 문제가 되고 있다. 에너지 관련시설의 경우 시설의 취급물질 특성상 가동 중에는 검사원의 출입이 불가능하며 가동중의 갑작스런 파단으로 대형 인명사고를 유발할 가능성이 크므로 사고 발생 방지를 위한 가동중 에너지 관련시설의 원거리 실시간 감시시스템의 개발과 균열 발생 및 경년열화에 따른 잔여 수명예측 시스템의 개발이 절실히 요구되고 있다. 지금까지의 연구는 주로 용접잔류응력, 용착금속부의 조성, 용접균열 및 용접부의 피로거동에 관해서만 다루어져 왔다[3-7]. 또한, 열화된 시험편의 비파괴적 평가에 관한 연구는 일부 시도되고 있으나[8-10], 용접부의 피로거동에 관련된 비파괴적연구는 거의 찾아 볼 수 없는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 비파괴적인 방법에 의해 가동중 원자력 관계시설 용접부의 경년열화에 따른 잔여수명을 예측하고 피로균열의 발생 및 균열진전거동을 감시하기 위한 원거리-실시간 감시시스템 개발의 기초자료를 조사하고자 한다. 시설의 가동중단이나 해체 없이 원거리에서 열화도나 피로균열발생 및 성장거동의 평가가 가능한 초음파 탐상법으로 STS316L 용접부의 피로균열거동 및 열화에 따른 초음파 파라미터를 조사하였다. 그리고, 파괴역학적 파라미터와의 상관관계를 정량화하여, 단성파법에 의한 열화도 평가 및 피로수명 예측을 시도하였다.

2. 이론

초음파는 매질에 따라 다른 속도로 전파하며, 일정 분포의 주파수를 매질 내로 진행시키더라도 다중 반사되어 수신되는 저면에코의 주파수 성분은 매질의 특성, 즉 결정조직, 미소결합, 잔류 응력 등의 분포상태나 부식, 석출 등의 재질의 열화정도 등에 의존한다. 따라서 초음파 탐상 시스템과 실시간 시간-주파수 분석 프로그램을 이용하여 피검체의  $V_L$ (종파속도),  $f_L$ (종파의 중심주파수), 진폭에너지변화 및  $\alpha_L$ (종파감쇠계수)를 파악함으로써 피검체의 결정립 조직, 잔류응력, 미소결합 등의 분포 상태 및 부식, 석출 등에 의한 열화도를 실시간적으로 평가할 수 있다[11].

Table 1 Chemical compositions of STS316L [wt%]

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

2.1. 초음파 속도

초음파의 속도는 재료의 물리적 특성 및 파의 종류(또는 진동방식)에 따라 다르며 재료에 따른 고유값을 가진다. 아래에는 초음파 속도 관계식 및 밀도( $\rho$ ), 포와송비( $\nu$ ), 종탄성계수( $E$ )에 따른 고체 중에서의 종파 속도 관계식을 나타낸다[12].

$$V = f \cdot \lambda \tag{1}$$

$$V_{L(solid)} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \tag{2}$$

2.2. 초음파 감쇠 및 감쇠계수

초음파가 매질 내를 진행하는 중에 감쇠되는 요인으로 산란, 흡수, 모드변환, 전이손실, 반사 및 분산(확산) 등을 들 수 있다. 일반적으로 초음파의 감쇠 정도는 감쇠계수(dB/mm)로 나타낸다. 다음은 감쇠계수 관련인자 및 관계식을 나타낸다[12].

$$\begin{aligned} \alpha_{Total}(dB/mm) = & \alpha( absorption) \\ & + \alpha( diffusion) + \alpha( scattering) \\ & + \alpha( transmode) + \alpha( reflection) \end{aligned} \tag{3}$$

$$\alpha(dB/mm) = \frac{20 \log \left( \frac{B1}{B2} \right) - \Delta da}{2T} - \alpha_{scatter} \tag{4}$$

2.3. 시간-주파수 분석

재료내를 통과하는 초음파의 감쇠량은 일반적으로 식(3,4)에 의해 결정되며, 감쇠량은 재료내를 통과하는 초음파의 파장( $\lambda$ ), 조직(결정립크기 및 분포)에 크게 영향을 받으며, 잔류응력, 가공경화도, 피검체의 형상 등에도 영향을 받는다. 또한 재질의 특성에 따라 초음파 속도가 달라지며 주파수는 이러한 초음파 속도에 의존하여 변화한다. 따라서 이러한  $f_L$ 분포의 분석 결과를 열화 평가에 응용할 수 있을 것으로 판단한다.

### 3. 시험편 및 실험 방법

#### 3.1. 시험편

STS316L의 화학조성 및 기계적 성질을 Table 1 및 2에 각각 나타낸다. Table 3은 본 실험에 이용한 용접조건을 나타내며 용접봉은 스테인리스강용 용접봉을 사용하여 GMAW용접 후 공냉하였다. Table 4는 고온환경하의 용접부 열화도를 평가하기 위한 인공 열화 조건을 나타낸다[13].

파괴균열진전거동을 조사하기 위한 CT시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1에 나타내며, CT시험편을 채취한 방향과 위치는 Fig. 2에 나타낸다.

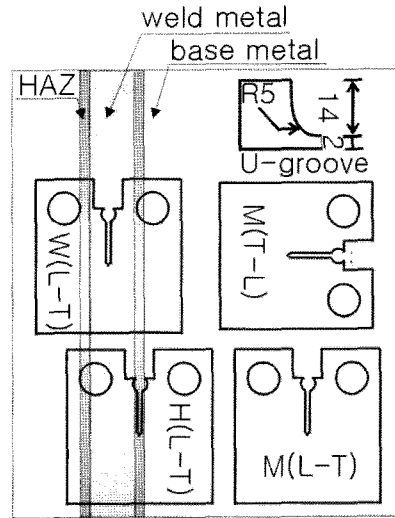


Fig. 2 Specimen location in plate

Table 2 Mechanical properties of STS316L

Yield strength (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	HRB
267.0	585.3	60.1	309.8

Table 3 Welding conditions of STS316L

Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Heat input (kJ/cm)	Welding method
270	17	280	9.107	GMAW

Table 4 Heat treatment conditions

Specimen No.	CT1	CT2	CT3	Air cooling
Degradation time at 475°C	24 h	48 h	72 h	

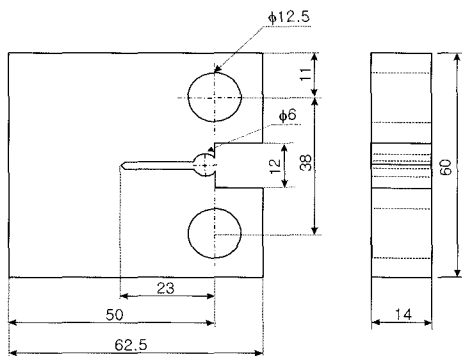


Fig. 1 Dimensions of CT specimen (unit: mm)

#### 3.2. 조직 및 경도

모재(BM), 열영향부(HAZ) 및 용착금속(WM)의 경도값은 시험편 표면을 picric산 용액으로 표면을 부식시켜 육안으로 BM, HAZ, WM경계선의 구분이 가능한 상태로 준비한 후 광학현미경으로 조직을 관찰하고 비커스 경도시험기로 측정하였다.

#### 3.3. 초음파 시험

본 연구에 사용한 초음파탐상 시스템을 Fig. 3에 나타내며, 초음파의 탐상 방향을 Fig. 4에 나타내었다. Parametrics사의 USD-15 초음파탐상기와 중심 주파수 5MHz, 주파수 분포 1~10 MHz, 15 mm인 수직용 광대역 탐촉자를 사용하였다. 본 연구에서는 검출된 신호의 시간영역을 짧게 나누어 하나의 블록을 만들고 각 블록을 푸리에 변환함으로써 수신 신호를 시간함수에 대하여 주파수, 진폭에너지, 스펙트럼 등의 정보로 분석하기 위하여 시간-주파수 해석법중에서 STFT(short-time Fourier transform)법을 사용하였다. 펄스반사법에 의하여  $V_L$  (L방향에 대한 종파속도) 및  $\alpha_L$  (L방향에 대한 종파감쇠계수)를 측정하고, STFT법에 의해 실시간적으로 신호를 처리하여 다중 저면 반사파의  $f_L$  (L방향에 대한 종파중심주파수) 및 각 주파수성분에 따른 진폭 분포 등의 초음파 파라미터를 분석하였다.

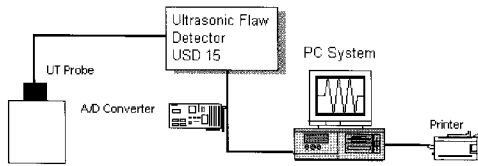


Fig. 3 Measurement system of ultrasonic test

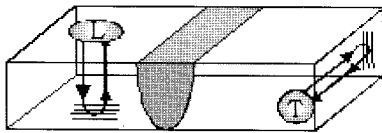


Fig. 4 UT measurement direction

3.4. 피로시험

STS316L의 피로균열진전 특성을 평가하기 위한 피로시험은 최대 용량 98kN의 만능피로시험기 (Model: EHF-ED10, Shimadzu)를 사용하여 실온·대기중에서 정현파를 사용하여 하중반복수 10Hz, 응력비 R=0.1에서 실시하였다. 모든 시험편은 ASTM E 647-81 규정(피로예비균열길이>0.1B; B는 시험편두께)에 따라서 하중 P<sub>max</sub>=10.8 kN에서 예비균열을

2 mm 삽입한 후, 본 실험에서는 P<sub>max</sub>=11.8 kN의 일정하중으로 실시하였다. 균열진전량은 클립게이지를 사용하여 측정하였으며, 응력확대계수는 식 (5)를 이용하여 계산하였다.

그리고 균열전파속도(da/dN)는 중분다항식법으로 구하였다.

$$K = \left[ \frac{P}{(B \cdot W^{1/2})} \right] \cdot f(\eta), \quad \left( \eta = \frac{a}{W} \right) \tag{5}$$

$$f(\eta) = \frac{(2+\eta)}{(1-\eta)^{3/2}} (0.886 + 4.64 \cdot \eta - 13.32 \cdot \eta^2 + 14.72 \cdot \eta^3 - 5.6 \cdot \eta^4)$$

이 식은 0.2 ≤ a/W < 1에서 적용 가능하다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 조직 관찰

Fig. 5는 STS316L 용접부의 BM, HAZ 및 WM의 조직사진을 각각 나타낸다. Fig. 5(a)는 BM으로 조대한 단상의 오스테나이트가 압연면-너비 방향(L-T)에 따라 길게 연신된 이방성 조직임을 알 수

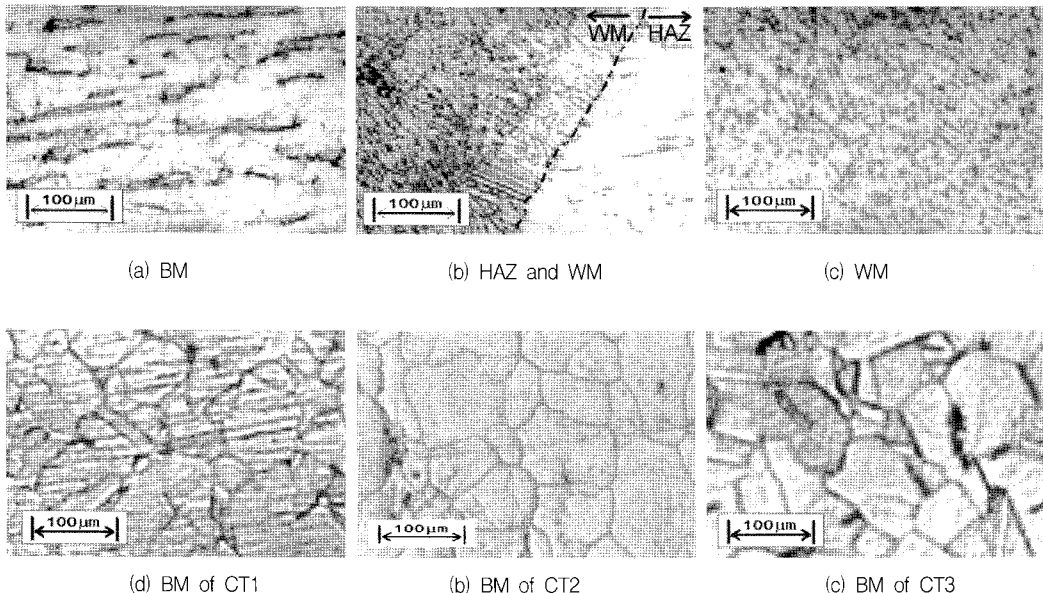


Fig. 5 Optical micrographs of base metal(BM), heat affected zone(HAZ) and weld metal(WM) on STS316L weldments

있다. Fig. 5(b)는 접합부로 WM 및 HAZ의 조직을 함께 나타내고 있다. WM과 HAZ의 경계에 초석 페라이트가 형성되어 있으며 HAZ는 조직이 용접 열에 의해 BM보다 조대해졌고 약간의 이방성을 갖는 것으로 나타났다. Fig. 5(c)는 WM의 조직으로, 침상(acicular) 페라이트와 래시(lathy) 페라이트, 버미큘러(vermicular) 페라이트 등이 관찰되며[14] 용접 후 공냉에 의한 재결정으로 오스테나이트 기지에 페라이트가 석출된 2상 조직을 가지는 것으로 나타났다. 또한 WM의 페라이트는 용접 열이 흐르는 방향을 따라 형성되어 이방성분포를 가지는 것으로 나타났다. Fig. 5(d), (e) 및 (f)는 475°C에서 각각 24 h, 48 h 및 72 h 동안 유지 후 공냉한 BM의 조직사진으로 475°C 열처리 에 의해 BM의 이방성이 상당부분 제거되었으며 유지시간이 길어질수록 조직이 조대해지는 것으로 나타났다. 또한 고온내식성을 보유한 저탄소 오스테나이트계 스테인리스강의 특성에 의해 고온환경에 비교적 장시간 노출되어도  $\sigma$ -상,  $\chi$ -상 등의 고온내식성 및 취성에 영향을 끼치는 탄화물의 석출이 없는 것으로 나타났다[2].

4.2. 경도 분포

각 부분의 비커스경도를 Table 5에 나타내었다. WM 및 HAZ의 경도는 BM에 비해 낮게 나타났다. 이는 WM 및 HAZ의 경도가 BM에 비해 높게 나타나는 일반강재의 GMAW 용접조직과 다르게 오스테나이트계 스테인리스강의 경우 마르텐사이트 변태가 없으며 WM의 페라이트상 석출에 의한 연화로 경도가 저하된 것으로 판단된다.

Table 5 Micro-hardness distribution of each parts

	Micro-hardness(Hv)
BM	410, 375, 386, 352, 355, 350, 380
HAZ	313, 310, 302, 323, 325
WM	325, 310, 325, 315, 342, 319, 325

4.3. 피로균열진전 거동

Fig. 6은 STS316L 각 부분의 피로균열성장거동을 나타낸다. 각 부분의 피로파단수명은 피로 균열이 WM을 따라 진전하는 W(L-T)가 가장 짧고, BM을

따라 진전하는 M(T-L), M(L-T)에 이어서 HAZ를 따라 피로균열이 진전하는 H(L-T)의 순으로 피로파단 수명이 길게 나타났다. 이는 동일한 피로응력이 가해질 경우 Table 5의 경도분포에서 고찰한 바와 같이 WM이나 HAZ의 경도가 BM에 비하여 낮은 것에 기인하며 WM의 경우, 오스테나이트-페라이트의 2상조직이 형성됨으로써 피로수명이 짧아진 것으로 판단된다. 또한 HAZ의 경우 BM과 동일한 오스테나이트 조직이지만 용접열에 의해 이방성이 제거됨으로써 피로파단수명이 길어진 것으로 판단된다. 또한, BM에서는 압연면-길이방향(T-L)과 피로균열의 진전 방향이 평행인 M(T-L)이 압연면-너비방향(L-T)과 피로균열의 진전방향이 평행인 M(L-T)보다 피로파단수명이 짧은 것으로 나타났다. 이는 Fig. 4(a)에서 살펴본 바와 같이 BM의 조직이 T-L에 대해 길게 연신되어 있으므로 M(T-L)의 경우 조직의 경계면을 따라 균열의 진전이 용이해졌기 때문인 것으로 판단된다.

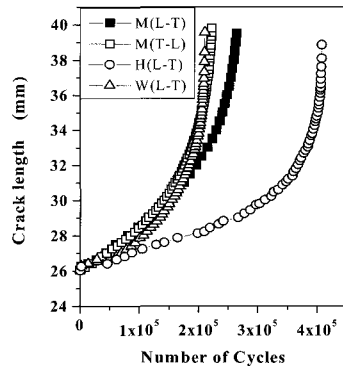


Fig. 6 a-N curves for welded STS316L

Fig. 7은 각 부분의 균열진전속도 da/dN과 응력 확대계수 변동폭  $\Delta K$ 의 관계를 나타낸다. BM의 균열진전속도가 H(L-T)보다 빠르며, BM의 경우에는 M(T-L)의 균열진전속도가 M(L-T) 보다 빠르게 나타났다. 또한, W(L-T)의 경우 저 $\Delta K$ 영역에서는 BM보다 균열진전속도가 더 느리지만 고 $\Delta K$ 영역에서는 BM보다 더 빠르게 나타났다. 이는 결정립 분포에 기인한 것으로 동일 피로 응력이 가해질 경우 피로 파괴  $\Pi_a$ ,  $\Pi_b$ 영역에서는 조직의 미세한 결정이 저항 인자로 작용하여 BM보다 균열의 진전이 지연되지만  $\Pi_c$ 영역에서는 파괴인성치만이 지배인자로 작용하여 미세 결정립에 의한 효과를 기대할 수 없기 때문인 것으로 판단된다[15]. 여기서,  $\Pi_a$ ,  $\Pi_b$  및  $\Pi_c$

는  $da/dN-\Delta K$ 의 관계에서 각각 균열 발생 후 성장 시작단계, 균열 성장이 안정적인 단계 및 균열의 성장인 불안정하여 급속히 파괴되는 단계를 나타낸다.

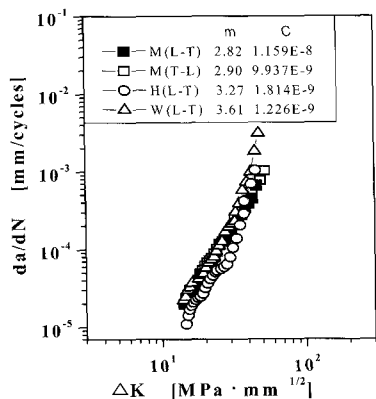


Fig. 7 Fatigue crack growth rate versus stress intensity factor range of welded STS316L

4.4. 초음파 파라미터에 의한 열화 특성

초음파 속도 V는 식 (1) 및 (2)의 관계식으로부터 파의 종류, 주파수(f), 파장(λ) 등의 탄성과 특성 및 E, ρ, v, 가공경화나 소성변형, 부하 등에 의한 잔류응력 등의 재료특성 및 환경특성에 의해 결정된다. 또한 감쇠계수 α는 파의 종류, f, λ 등의 탄성과 특성 및 관계식 (3) 및 (4)로부터 결정립 분포, 석출물이나 개재물 등의 조직 불균일, 잔류응력 등에 의해 좌우되며 부식이나 균열 등의 결합존제, 표면조도 등에도 크게 영향을 받는다[12]. 따라서 본 연구에서는 이러한 관계를 기초로 재료의 열화도에 따른 초음파 파라미터를 평가하고, 이로부터 초음파 파라미터와 재료물성 및 파괴적 파라미터와의 상관관계를 알아보았다. STS316L 및 그 용접부의 초음파 특성을 파악하기 위해 열처리 전과 후의  $V_L$ 과  $\alpha_L$  및  $f_L$ 분포 변화를 계속하였다.

Fig. 8은 각 부분의 열처리 전 압연면에 수직인 방향(L)과 압연면에 평행인 방향(T)에 대한  $V_L$ ,  $V_T$ ,  $\alpha_L$ ,  $\alpha_T$ , 및  $f_L$  분포 변화를 나타낸다.

Fig. 9는 열처리 후 BM의 L방향(BM(L))에서의  $V_L$ ,  $\alpha_L$  및  $f_L$ 분포 변화를 나타낸다.

Fig. 10(a), (b) 및 (c)는 BM, HAZ 및 WM의 STFT에 의한 L방향에 대한  $f_L$ 분포를 나타낸 것이고, Fig. 10(d), (e) 및 (f)는 475°C 열처리 시간에 따른

BM의  $f_L$ 분포를 나타낸 것이다. 이들 그림에서 상단부는 빔의 해당 주행시간에 대한 주파수 contour를 나타내며, 하단부는 contour에 대한 주파수 분석 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 8 및 Fig. 10(a), (b) 및 (c)의 분석결과로부터 열처리 전 각 부분의  $V_L$  및  $f_L$ 분포는 BM이 가장 높고, HAZ, WM의 순으로 나타났다.  $V_L$ 과  $f_L$ 분포는 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났으나,  $\alpha_L$ 는 WM가 가장 높고 HAZ, BM의 순으로  $V_L$ 과는 상반되는 거동을 보이는 것으로 나타났다. T방향에 대한 분석결과는 Fig. 8에서 고찰한 바와 같이 L방향에 대한 분석결과와 유사한 거동을 보이므로 지면관계상 결과는 생략한다. 이러한  $V_L$ ,  $f_L$ 의 저하 및  $\alpha_L$ 의 증가는 조직관찰을 실시한 결과, 용접열에 의한 페라이트-오스테나이트 2상조직 형성 및 용접인장 잔류 응력에 기인한 것으로 판단된다.

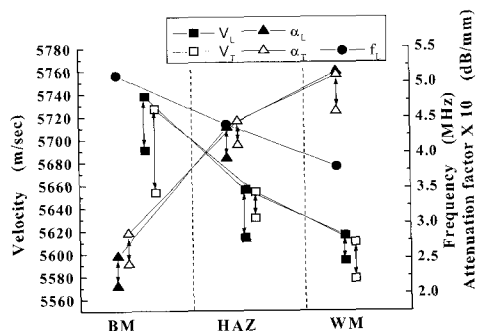


Fig. 8 Velocity and attenuation factor of base metal(BM), heat affected zone(HAZ) and weld metal(WM)

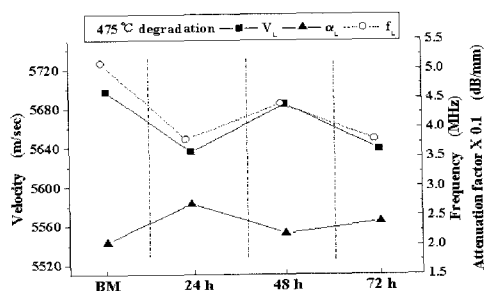


Fig. 9 L-direction Velocity, attenuation factor and frequency of base metal(BM) according to degradation time

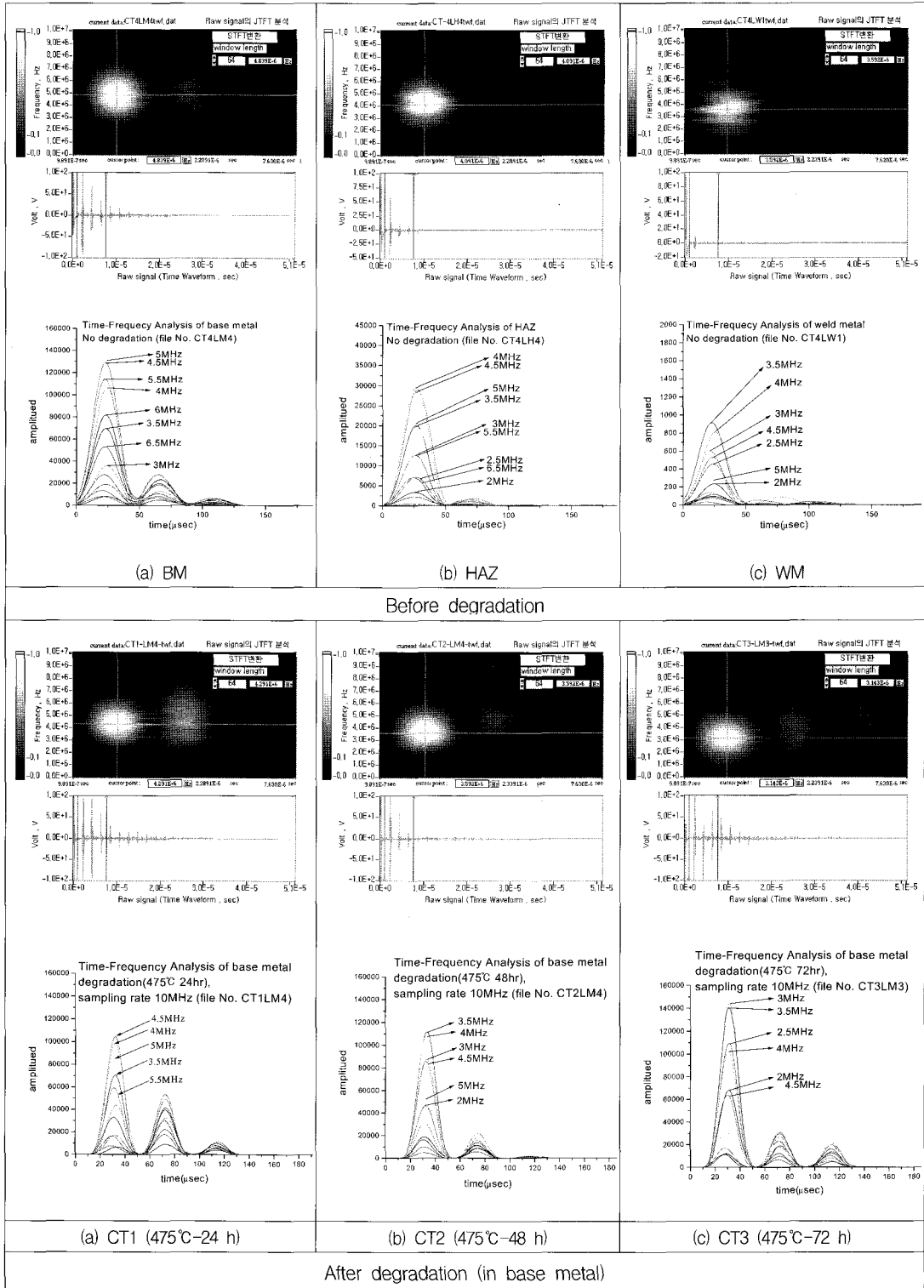


Fig. 10 Time-frequency and amplitude analysis of multi-reflected back echo by STFT

통상적으로 WM에는 인장 잔류응력이 형성되며 오스테나이트계 스테인리스강의 WM에는 페라이트가 4.1~5.5wt% 정도 형성된다[2]. 이로 인해 WM의 경도가 저하되며 종탄성계수는 BM이 17,335 MPa, HAZ가 16,825 MPa, WM가 16,315 MPa로 저하되는 것으로 나타났다. 따라서 관계식 (1) 및 (2)로부터 페라이트-오스테나이트의 2상조직 형성에 따른 조직 불균일, 페라이트의 이방성분포, 결정립계의 면적증가, 종탄성계수 감소 등에 의해 파의 신속한 진행이 방해받고 이로 인해  $V_L$ 는 낮아지며  $dL$ 는 증가하는 것으로 판단된다. 또한 Fig. 10에 나타난 바와 같이 수신된 초음파의  $f_L$ 성분이 낮아지는 원인으로도 판단된다. 즉 속도관계식 (1)에서 파장을 계산함으로써 투과력에 대한 고찰이 가능하다. 따라서 파의 진행을 방해하는 요인이 많은 WM의 경우 초음파 빔이 매질 내를 진행하는 동안 흡수, 산란, 감쇠, 회절 등이 BM에 비해 많이 발생하고 결과적으로 투과력이 강한 장파장, 저주파수대의 수신율이 높아지며, 단파장대 성분의 음압감쇠로 인해  $f_L$ 성분이 낮아지고  $\alpha_L$ 가 높아진 것으로 판단된다.

Fig. 9 및 Fig. 10(d), (e) 및 (f)의 475°C 열처리 시간에 따른  $V_L$ ,  $\alpha_L$  및  $f_L$  변화를 고찰하였다. 475°C 열처리 시간에 따른 BM의 조직사진에서 CT1은 이방성은 사라졌으나 조직이 조대해졌으며, CT2는 이방성이 완전히 사라졌고, CT3는 이방성이 완전히 사라지고 조직은 더욱 조대해진 것으로 나타났다. 따라서 이방성이 없어짐에 따라  $V_L$  및  $f_L$ 분포는 높아지고  $\alpha_L$ 는 감소하며 이방성은 제거되었으나 조직이 더욱 조대해진 CT3의 경우 초음파가 결정립내를 뚫고 진행하는 과정에서 조대한 조직이 초음파의 진행을 방해함으로써 상대적으로 투과력이 저하되어  $V_L$  및  $f_L$ 분포는 낮아지고  $\alpha_L$ 는 증가한 것으로 판단된다.

4.5. 탄성과 파라미터와 재료상수와의 상관 관계

4.3절의 피로균열진전 특성과 4.4절의 초음파 파라미터에 의한 열화특성에서 얻어진 L-T의 방향의 초음파 파라미터와 피로균열진전속도식의 재료상수  $m$  및  $\text{Log}C$ 와의 상관관계를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 이 그림들에서  $V_L$  및  $f_L$ 분포는  $\text{Log}C$ 와,  $\alpha_L$ 는  $m$ 과 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났다. 따라서,  $V_L$  및  $f_L$ 분포 거동은  $\text{Log}C$ 를 반영하는 파

라미터로서,  $\alpha_L$ 는  $m$ 을 반영하는 파라미터로서 고찰하여 피로 수명의 평가가 가능할 것으로 판단된다.

따라서 실시간 탄성과 분석 시스템과 설비에 사용된 재료에 대한 열화 및 피로균열 진전 거동에 따른 탄성과 특성에 대한 기초 데이터가 마련될 경우, 가동중인 시설에 대한 탄성과 분석에 의한 실시간 원거리 감시 시스템의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

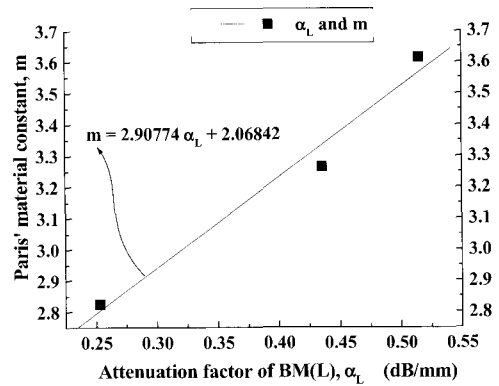


Fig. 11 Relationship between  $\alpha_L$  of L-direction of BM and  $m$

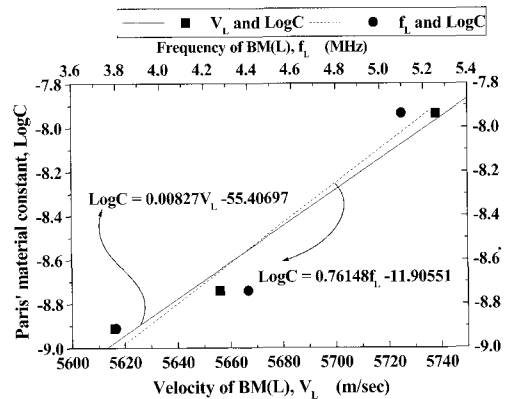


Fig. 12 Relationships between  $\text{Log}C$  and  $V_L$  and  $f_L$  of L-direction of BM

5. 결론

- (1) STS316L 용접부의 경도는 BM, WM, HAZ순으로 높게 나타났다.
- (2) 피로파단수명은 H(L-T), M(L-T), M(T-L), W(L-T)의 순으로 나타났다.



- (3) 피로균열진전속도와 응력확대계수 변동폭과의 관계에서, 동일  $\Delta K$ 에 대하여 H(L-T)의 균열진전속도가 가장 늦으며, M(L-T), M(T-L), W(L-T)의 순으로 균열진전속도가 빠르게 나타났다. 또한 H(L-T) 및 W(L-T)는  $\Delta K$ 영역에 따라 균열진전속도가 달라졌으며, 저  $\Delta K$  영역에서는 H(L-T)의 균열진전속도가 가장 느리며 W(L-T)에 이어 BM 순으로 나타났으나, 고  $\Delta K$ 영역에서는 H(L-T)가 가장 빠른 균열 진전속도를 나타내었다.
- (4) 초음파 특성 분석 결과  $V_L$  및  $f_L$ 분포는 BM이 가장 높고, HAZ에 이어 WM이 가장 낮은 것으로 나타났으며  $\alpha_L$ 은  $V_L$ 과 상반되는 거동을 나타내었다.
- (5) 열화처리 시험편의  $V_L$  및  $f_L$ 분포는 용접부의 2상조직형성, 이방성 등 결정립 분포가 불균일하고 결정립이 조대할수록 저하되고,  $\alpha_L$ 는 증가하는 것으로 나타났다.
- (6) 종파속도 및 중심주파수 분포는 피로균열진전속도식의 재료상수  $\log C$ 와, 감쇠계수는 재료상수  $m$ 과 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 초음파 파라미터의 분석으로부터 피로균열진전 분석이 가능할 것으로 판단된다.

## 후 기

“이 논문은 2002년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었음”

## 참고문헌

- [1] ASM International, "Stainleee Steels," pp. 133-254, (1996)
- [2] 임우조, 양학회, 인현만, 이진열, "부식과 방식", 원창출판사, pp. 167-244, (1998)
- [3] 이택순, 양현태, "SUS304강 용접부의 잔류응력이 피로균열진전속도에 미치는 영향," 대한용접학회지, Vol. 15, No. 4, pp. 413-419, (1997)
- [4] 정기승, 강인찬, "용접한 AISI 304 스테인리스강의 피로균열 성장거동," 대한금속학회지, Vol. 27, No. 6, pp. 503-512, (1989)
- [5] J. C. Lippold and W. F. Savage, Welding Research Supplement, 48-S, (1980)
- [6] 西本和俊, "ステンレス鋼の溶接," 日本溶接學會誌, Vol. 66, No. 3, pp. 156-173, (1997)
- [7] 渡辺健産, "オーステナイトステンレス鋼溶接熱影響部の結晶粒成長挙動と溶接金属との關係," 溶接學會論文集, Vol. 13, No. 2, pp. 262-269, (1995)
- [8] 이진찬, 오정환, 남기우, 이주석, "열화된 SUS316강의 시간-주파수 해석에 의한 비파괴 평가," 비파괴검사학회지, Vol. 19, No. 4, pp. 270-276, (1999)
- [9] 박은수, 박익근, 김덕희, 안형근, "초음파 특성을 이용한 경년열화 평가," 비파괴검사학회지, Vol. 22, No. 2, pp. 149-154, (2002)
- [10] 최윤호, 김현목, 박익근, 장경영, "2.25Cr-1 Mo 강 of 열화도 평가를 위한 비선형 음향효과 응용법," 비파괴검사학회지, Vol. 22, No. 2, pp. 170-176, (2002)
- [11] 장영수, 김진호, 정현조, 남영현, "시간 및 주파수 영역에서의 신호처리 기술에 의한 초음파속도와 감쇠계수의 측정," 비파괴검사학회지, Vol. 19, No. 2, pp. 118-128, (1999)
- [12] 이충현, 김경애, "초음파탐상 검사," 세진사, pp. 183-189, (1999)
- [13] ASM International, "Stainleee Steels," pp. 508-524, (1996)
- [14] 이상기, 도재윤, 남기우, 강창룡, 안석환, "316L 스테인리스강의 피로균열진전거동과 음향방출 신호의 주파수특성," 한국동력기계공학회지, Vol. 4, No. 2, pp. 52-57, (2000)
- [15] 오세욱, 윤환기, 남기우, 차용훈, "재료강도학", 원창출판사, pp. 124-128, (1999)