

# 316L 스테인리스강의 피로균열 진전 거동과 음향방출신호의 주파수 특성

## Fatigue Crack Propagation Behavior of 316L Stainless Steel and Frequency Characteristics of its Acoustic Emission

이상기 · 도재윤 · 남기우 · 강창룡 · 안석환

S. K. Lee, J. Y. Do, K. W. Nam, C. Y. Kang and S. H. Ahn

**Key Words** : 316L Stainless Steel(316L 스테인리스강), Fatigue Crack Propagation(피로균열진전), Acoustic Emission(음향방출), Time-Frequency Analysis(시간-주파수 분석), Nondestructive Evaluation(비파괴평가)

**Abstract** : We investigated the fatigue crack propagation of base metal, weld metal and heat affected zone in 316L stainless steel. And we analysed acoustic emission signals during the fatigue test by time-frequency analysis method. The specimens of weld metal and HAZ had longer fatigue life and slower rate of crack propagation better than base metal. And as a result of time-frequency was 200-300 kHz was obtained by fatigue crack propagation and 500 kHz was obtained by dimple and separate of inclusion.

### 1. 서론

오스테나이트계 스테인리스강은 기계적 성질과 내식성이 우수하기 때문에 극저온에서 고온에 이르기까지 광범위한 온도 범위와 다양한 사용조건에서 폭넓게 사용되고 있다. 그러나 이들 용접 구조물에서는 조성 및 조직의 불균일과 균열같은 결함으로 인해 반복응력을 받으면 이것을 기점으로 피로균열의 발생 및 성장이 일어나 파괴되므로 문제시되고 있다. 그러므로 반복하중을 받는 구조물의 피로 수명에 대한 용접의 영향은 경제적인 관점에서 또는 안전한 설계를 위해 고려되어야 한다. 그러나 지금까지는 주로 용접 잔류응력, 용착금속부의 조성, 용접균열 및 용접부의 피로거동에 관해서만 다루어져 왔고<sup>1)10)</sup>, 용접부의 피로거동에 관련된 비파괴적 평가에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 최근에는 하중이 가해지는 고체 내부에서 발생하는 변형에너지인 미세한 응력파를 검출하여

구조물의 안전성을 평가하는 음향방출법이 가동중 구조물의 결함검출법으로서 유력시되고 있다.<sup>11)16)</sup> 따라서 본 연구에서는 316L 스테인리스강의 모재, 열영향부 및 용착금속부의 피로균열진전 특성을 조사하고, 균열진전시 발생하는 음향방출 신호를 검출하여 시간-주파수 분석을 통해 비파괴적 특성을 조사하였다.

### 2. 실험방법

316L 스테인리스강과 용접부의 화학조성은 Table 1에 나타낸다. 그리고 316L 스테인리스강의 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다. 용접조건은 Table 3에 나타내었고, Fig. 1에 용접 그루우브의 모양을 나타내었다. 피로균열진전 거동과 균열 진전에 따르는 음향방출을 검출하기 위하여 Fig. 2와 같이, 노치를 열영향부에 가공한 것(HAZ)과, 용착부, 열영향부, 모재순으로 진전하도록 가공한 것(WT), 그리고 압연방향에 대하여 수직(LT) 및 수평(TL)하게 가공한 시험편을 채취하였다. 조직 관찰은 에칭후 광학현미경으로 관찰하였고, 경도측정은 비커스 경도기를 사용하여 모재, 열영향부, 용착부의 경도값을 측정하였다.

접수일 : 2000년 3월 29일  
이상기 : 부경대학교 재료공학과 대학원  
도재윤 : 부산기능대학  
남기우, 강창룡 : 부경대학교 재료공학부  
안석환 : 부경대학교 기계공학부

Table 1 Chemical compositions of 316L stainless steel and weld wire (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	N
316L	0.026	0.66	0.89	0.023	0.008	17.41	12.20	2.38	0.18	0.03	0.038
Weld wire	0.03	0.72	1.08	-	-	18.4	12.5	2.3	-	-	-

Table 2 Mechanical properties

Ultimate Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Young's Modulus (GPa)
576	228	56	73	195

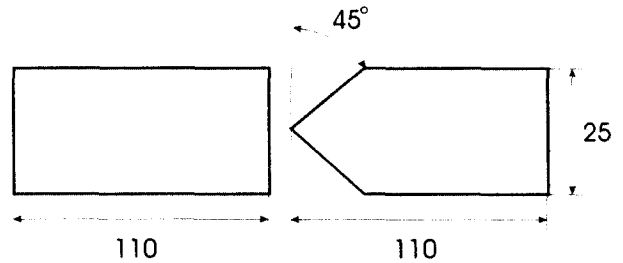


Fig. 1 Groove shape for GMAW

Table 3 GMAW Welding condition

Welding method	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Heat Input (KJ/cm)
GMAW	150	27-28	220	11

316L 스테인리스강의 피로균열진전 특성을 평가하기 위한 피로시험은 용량 10톤의 만능피로시험기(Model : EHF-ED10, Shimadzu)를 사용하여 실온·대기중에서 정현파를 이용하여, 하중반복수 10Hz, 응력비 R=0.1에서 실시하였다. 모든 시험편에 하중 Pmax=1100kgf에서 예비균열을 25mm까지 삽입한 후, 본 실험에서 Pmax=1200kgf의 일정 하중으로 실시하였다. 본 실험에 사용한 CT 시험편의 형상을 Fig. 3에 나타낸다.

피로시험 중에 발생하는 음향방출신호는 Fig. 4에 나타낸 것과 같은 방법으로 검출하였다. 음향방출신호를 검출하기 위해서 PAC사의 1200A model을 사용하였고, 주파수 특성을 파악하기 위해서 1MHz광대역센서를 이용하였다. 그리고 시험편에서 발생하는 신호를 민감하게 측정하기 위해서 시험편과 센서사이에 접촉매질을 얇게 바른 후 테이프 압착하였고, 전기적 노이즈를 제거하기 위해 아날로그 필터링 처리를 하였다. 검출된 음향방출신호는 음향방출 system을 통해 PC와 인터페이스된 GAGE사의 CS2125 고속 A/D 변환기를 이용하여 디지털화 시킨 후, 시간-주파수해석을 수행할 수 있는 프로그램으로 실시간적으로 분석하고 데이터를 저장하였다.

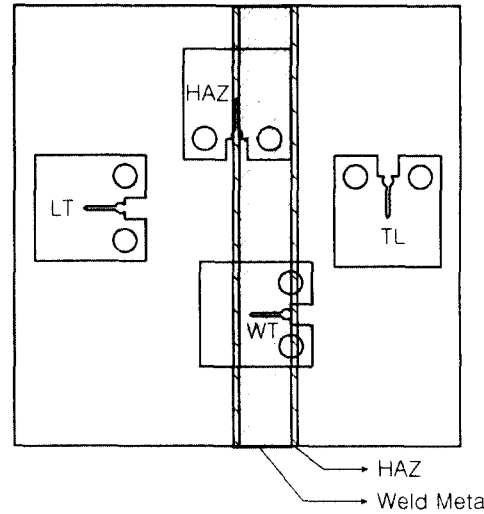


Fig. 2 Specimen location and orientation in weld plate

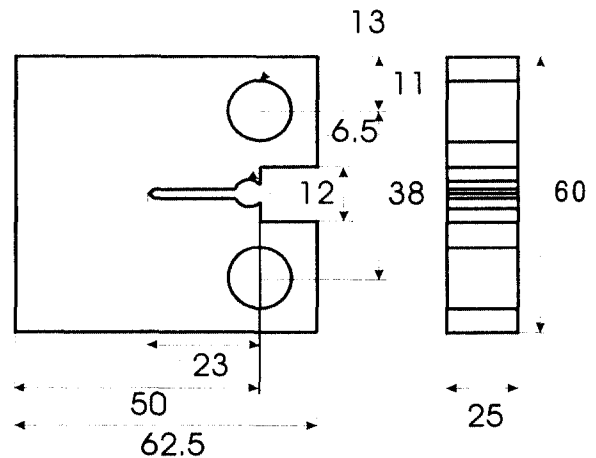


Fig. 3 Dimension of specimens ; all dimensions in mm

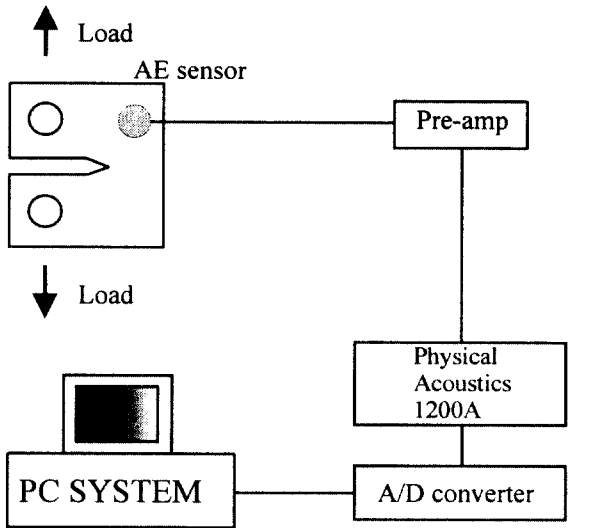


Fig. 4 Measurement system of acoustic emission

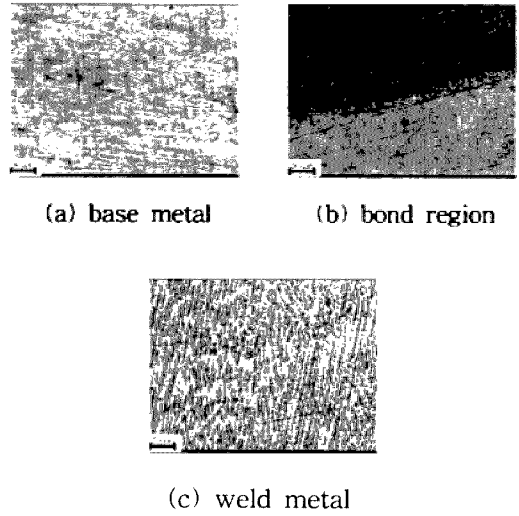


Fig. 5 Micrographs of specimens

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 미세조직 관찰

각 부분의 조직을 관찰하기 위하여 marble용액을 사용하여 에칭한후 광학현미경에서 관찰하였다. Fig. 5는 모재, 접합부, 용착금속부의 조직사진을 나타낸 것이다. (a)는 316L 스테인리스강의 모재부로서 압연방향에 따라 조직이 길게 신연되어 있다. (b)는 접합부로서 용착금속부, 열영향부 조직을 나타내고 있다. 용착금속은 오스테나이트-페라이트의 2상 조직을 이루고 있으며, 열영향부는 조직이 조대화 되었음을 알 수 있다. (c)는 용착금속부의 조직사진으로, 침상(acicular) 페라이트와 래시(lathy) 페라이트, 그리고 버미큘러(vermicular) 페라이트등이 관찰되었다.<sup>4)</sup>

#### 3.2 경도 측정

모재, 열영향부 및 용착금속부의 경도값을 측정하기 위해서 비커스 경도시험기를 사용하였고, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 용착금속부 및 열영향부의 경도값은 모재에 비해 낮게 나타났다. 일반적으로 용착금속부 및 열영향부의 경도값은 모재에 비해 높게 나타나지만, 오스테나이트계 스테인리스강의 경우 마르텐사이트 변태가 없기 때문에 연화되어 경도값이 낮아진 것으로 판단된다.<sup>17)</sup>

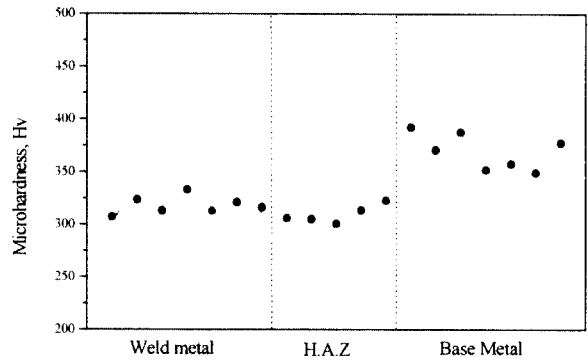


Fig. 6 Vickers hardness distribution of welded 316L stainless steel

#### 3.3 피로균열 진전특성

모재와 용접재의 피로균열 성장거동(a-N선도)를 Fig. 7에 나타내었다. 모재(TL, LT)에 비해 HAZ 시편, WT시편의 피로수명이 더 길게 나타났다. 특히 균열이 열영향부를 따라서 진전하는 시편이 가장 긴 피로수명을 나타냈다. 이는 Fig. 6의 경도값에서도 나타나듯이 용착부나 열영향부의 경도값이 모재에 비하여 낮게 나타났기 때문으로 판단된다. 그리고 모재에서는 압연방향과 균열진전 방향이 수직인 LT시편보다 평행인 TL시편이 가장 빠른 피로 파괴가 나타났다. 이것은 Fig. 5(a)에서 나타났듯이 모재의 조직이 압연방향에 대해 길게 신연되어 있어서, TL 시편의 경우 균열진전이 조직의 경계를 통해서 더 용이하게 진전한 것으로 보여진다.

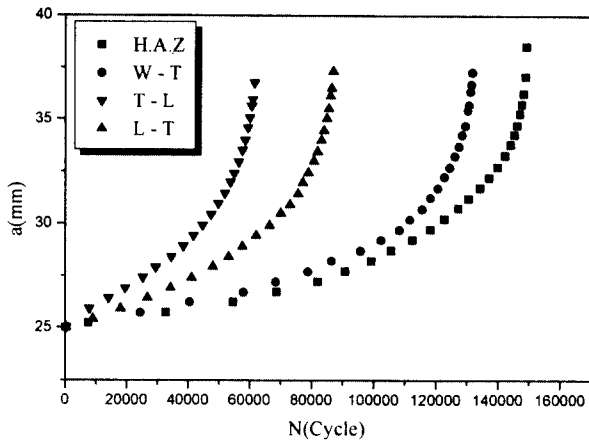


Fig. 7 a-N curves for welded 316L stainless steel

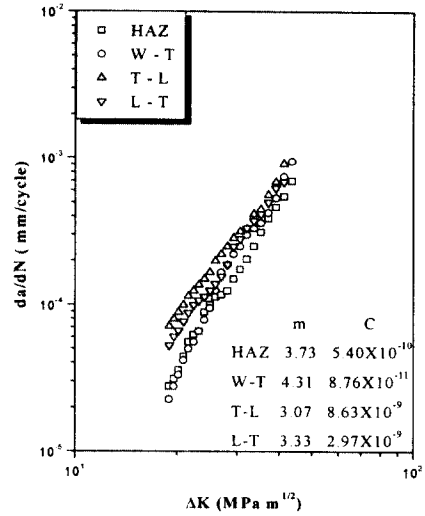


Fig. 8 Fatigue crack growth rate versus stress intensity factor range

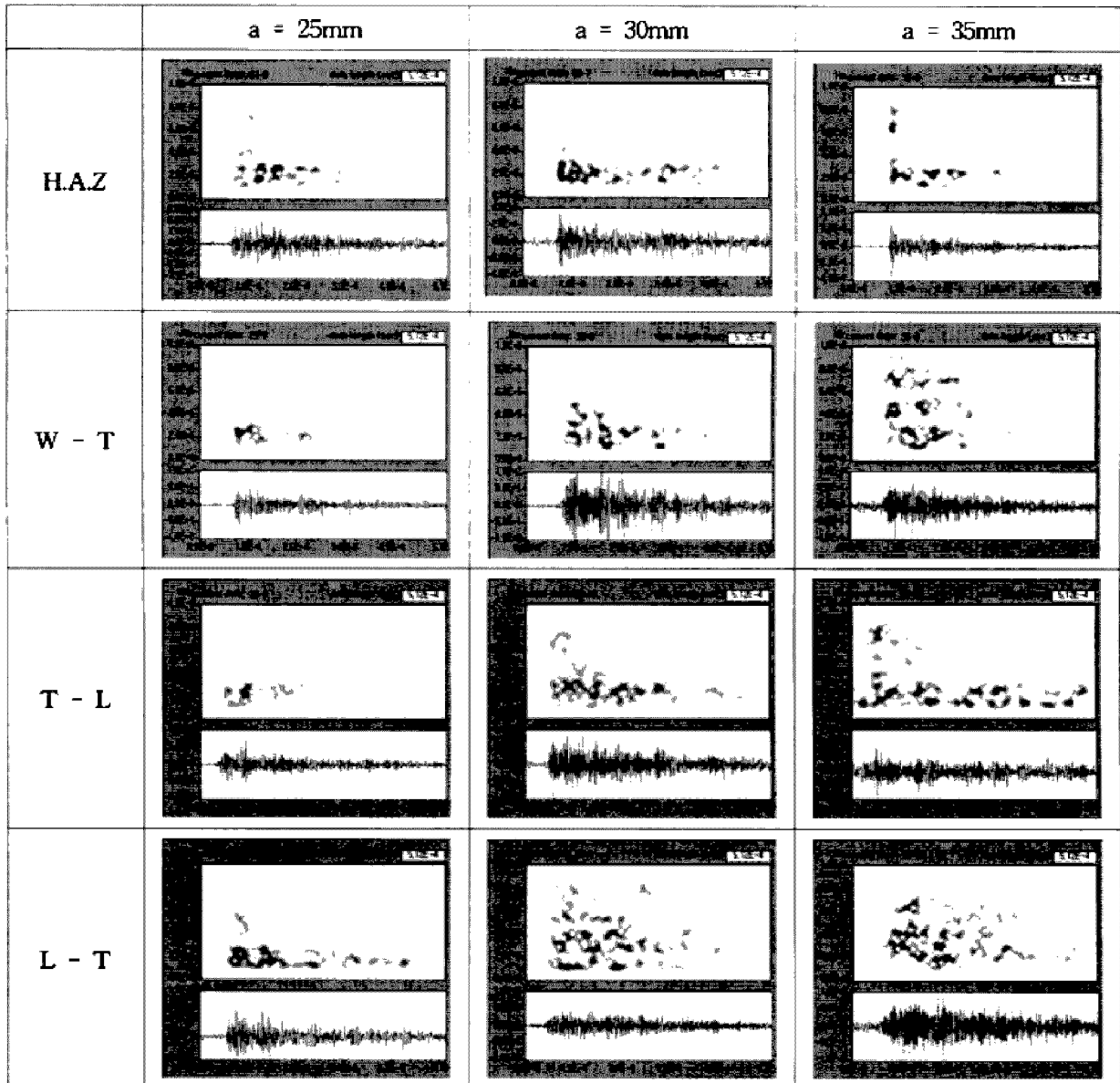


Fig. 9 Time-frequency analysis of AE signals obtained at each crack length

Fig. 8은 HAZ, WT, 모재에서의 균열진전속도  $da/dN$ 과 응력확대계수 변동폭  $\Delta K$ 의 관계를 나타낸 것이다. 모재부의 균열진전속도가 HAZ시험편이나 WT시험편보다 더 빠르며, 모재의 경우에는 TL시험편의 균열진전속도가 더 빠르게 나타났다. 이는 Fig. 5와 Fig. 6에서 설명한 것과 같은 이유라고 판단된다. 또, 열영향부를 따라 균열이 진전하는 HAZ시험편과 용착부-열영향부-모재순으로 균열이 진전하는 WT시험편을 비교해 보면, 저  $\Delta K$  영역에서는 균열진전속도가 비슷한 경향을 보였다. 그러나, 고  $\Delta K$ 영역에서는 WT시험편이 HAZ시험편보다 균열진전속도가 더 빠르게 나타났다. 그 원인으로, 저  $\Delta K$ 영역에서는 WT시험편의 경우 균열진전이 용착부-열영향부를 따라 진전하기 때문에 열영향부를 따라 균열이 진전하는 HAZ 시험편과 균열진전속도가 비슷하게 나타나게 되지만 고  $\Delta K$  영역에서는 WT시험편의 경우 용착부-열영향부를 통과한 균열이 모재부를 따라 진전하기 때문에 HAZ시험편과 균열진전속도에서 차이가 났으며, 모재의 LT 시험편과 균열진전속도는 유사하게 나타났다.

3.4 시간-주파수 해석

Fig. 9는 각 시험편의 피로시험시 발생하는 음향방출 신호의 시간-주파수 분석결과를 균열길이에 따라 나타낸 것이다. 균열진전이 없는 상태에서 검출된 신호의 주파수 분석결과는 200KHz 이하의 영역으로 나타났다. 따라서 이 영역이하의 주파수는 기계적 잡음등의 noise로 분류하였다. 그리고 균열진전시에 검출된 신호의 주파수는 시험편의 종류, 균열길이에 관계없이 항상 200~300KHz 영역의 신호를 얻을 수 있었다. 이것은 피로균열 진전에 의하여 발생하는 음향방출 신호로 판단된다. 그러나, 피로균열이 진전하여 파단에 가까워지므로서 200~300KHz 주파수 영역 이외에도 500KHz 이상의 고주파영역이 나타났다. 이는 IIc단계의 파단직전 피로균열 양상에 있어서 스트라이에이션 이외의 덩플, 벽개파괴, 개재물의 분리 및 파면의 분리 등의 파괴기구가 상당수 포함되기 때문이라고 판단된다. 이러한 현상은 고주파수영역이 나타나는 파단직전 뿐만 아니라, IIb 단계의 균열진전이 진행할 때에도 가끔 발생하였다. 대표적인 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 이와같은 고주파수를 발생시키는 대표적인 파단면의 사진을 Fig. 11에 나타낸다. 그림(a)는 압연방향에 수직하게 노치를 가공한 시험편(TL)에서 얻어진 것으로, 피로파면의 대표적인 양상을 나타내는 스트라이에이션이 관찰

되고 있다. 이와 같은 파면이 형성 될 때는 균열 길이에 관계없이 200-300kHz의 주파수 영역에서 음향방출 신호가 발생한다고 생각된다. 그림(b) 역시 TL시험편에서 얻어진 것으로, 벽개형 파면의 관찰되고 있다. 그리고 그림(c)는 WT시험편에서 얻어진 것으로 개재물의 분리와 파면의 분리(separation) 현상을 관찰 할 수 있다. 그림(b), (c)와 같은 현상이 발생할 때, 500kHz이상의 고주파수가 나타난다고 생각된다. 이와 같이 피로파괴에 있어서 음향방출을 발생시키는 여러 가지 복합적인 파괴기구에 대한 주파수 분석에 있어서는 좀 더 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

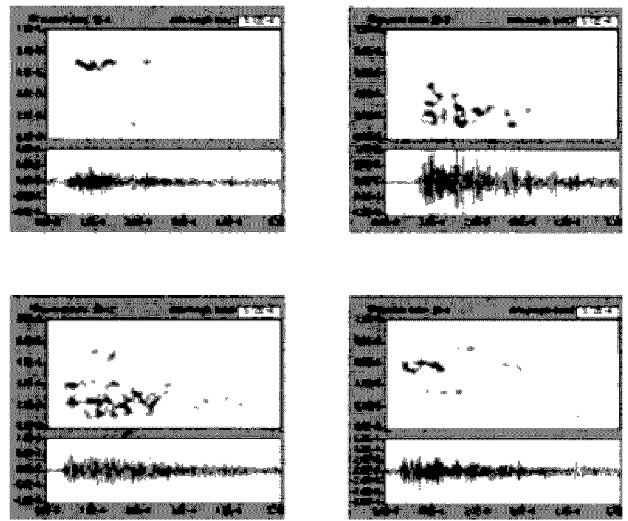


Fig. 10 Time-frequency analysis of unique signals obtained in fatigue crack propagation

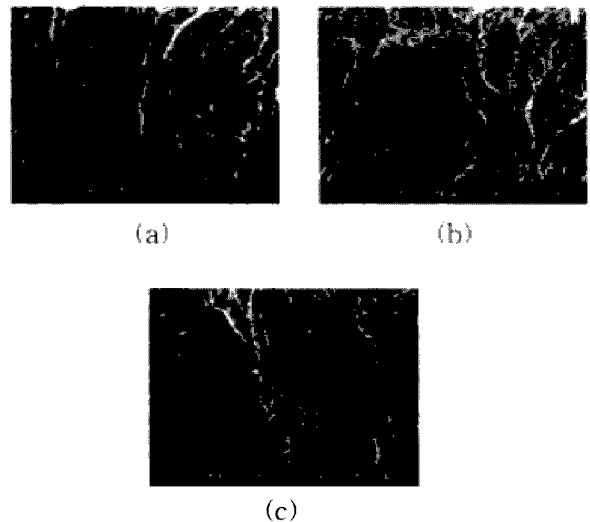


Fig. 11 Fracture surface ; (a) a=30mm of TL specimen, (b) a=26mm of TL specimen, (c) a=30mm of WT specimen

#### 4. 결 론

316L 스테인리스강의 모재, WT시험편, HAZ시험편을 사용하여 피로균열 진전특성을 평가하고, 균열진전시 발생하는 음향방출 신호를 시간-주파수 방법으로 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 316L 스테인리스강의 모재, 열영향부 및 용착 금속부의 경도값은 모재가 용착금속부 및 열영향부의 경도값보다 낮게 나타났다.
- 2) 균열이 열영향부를 따라서 진전하는 HAZ시험편이 가장 긴 피로수명을 보였으며, HAZ시험편과 WT시험편이 모재보다 더 긴 피로수명을 나타냈다. 그리고 모재중에서 압연방향과 균열진전 방향이 수직인 LT시험편이 평행인 TL시험편보다 긴 수명을 나타내었다.
- 3) 피로균열진전속도  $da/dN$ 과 응력확대계수 변동폭  $\Delta K$ 의 관계를 조사한 결과, HAZ시험편과 WT시험편이 모재 보다 더 느리게 나타났다. 모재의 경우는 TL시험편의 균열진전속도가 더 빠르게 나타났다.
- 4) 피로시험시 검출된 음향방출 신호를 시간-주파수 분석결과, 시험편의 상태, 균열길이 관계없이 항상 200~300 kHz의 영역의 신호를 얻을 수 있었다. 그리고, 피로균열이 진전함에 따라서 발생하는 벽개파괴, 개재물 및 파면의 분리현상 등으로 500kHz 이상의 고주파영역이 나타났다. 그러나, 피로파괴에 있어서 여러 가지 복합적인 파괴기구의 주파수 분석에 있어서는 좀 더 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

1. N. R. Nagarafa Rao and Lambert Tall, Welding Research Supplement, 40, pp. 468-S, 1961
2. 伊藤義康 外3, "SUS304 오스테나이트스텐레스鋼 용접 금속의 저사이클疲労特性", 日本機械學會論文集, Vol. 54, No. 502, pp. 1199~1204, 1987
3. J. C. Lippold and W. F. Savage, Welding Research Supplement, 48-S, 1980
4. 정기승, 강인찬, "용접한 AISI 304 스테인리스강의 피로균열 성장거동", 대한금속학회지, Vol. 27, No. 6, pp. 503~512, 1989
5. A. A. Tavassoli, A. Bisson and P. Soulat, Metal Science, 18, p. 345, 1984.

6. 渡辺健彦 外 2, "オーステナイトステンレス鋼 용접熱影響部の結晶粒成長挙動と 용접 금속との關係", 溶接學會論文集, Vol. 13, No. 2, pp. 262~269, 1995
7. 이택순, 양현태, "SUS304강 용접부의 잔류응력이 피로균열진전속도에 미치는 영향", 대한용접학회지, Vol. 15, No. 4, pp. 413~419, 1997
8. J. A. Brooks, A. W. Thompson and J. C. Williams, Welding Research Supplement, 63, 71-S, 1984
9. 西本和俊, "ステンレス鋼의 용접", 溶接學會誌, Vol. 66, No. 3, pp. 156~173, 1997
10. 김대환 외 3, "질소를 첨가한 316L 스테인리스강의 고온저주기 피로균열 생성", 대한금속학회지, Vol. 37, No. 5, pp. 539~542, 1999
11. 정희돈 외 2, "용접부검사법으로서의 Acoustic Emission", 대한용접학회지, Vol. 11, No. 2, pp. 1~12, 1993
12. 新妻弘明 外 2, "周波數解析にもとづく AE發生 패턴の分類と微示破壊過程", 日本非破壊検査學會, Vol. 30, No. 11, pp. 903~910, 1980
13. 岸輝雄 外 2, "AE原波形解析手法の確立と破壊の動的挙動解明への適用", 日本非破壊検査學會, Vol. 30, No. 11, pp. 911~917, 1980
14. KiWoo Nam(1999) Acoustic Emission from Surface Fatigue Cracks in SS41 Steel, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol. 22, No. 12, pp. 1103~1109
15. 이건찬, 오정환, 남기우, 이주석, "열화된 SUS316강의 시간-주파수 해석에 의한 비파괴평가", 비파괴검사학회지, 19-4, 270-276, 1999
16. Ki-Woo Nam, Kun-Chan Lee, Jeong-Hwan Oh "Application of Joint Time Frequency Analysis Methods of Nondestructive Evaluation", AMD- Vol. 234/NDE-Vol. 17, The 1999 ASME International Mechanical Engineering Congress, 67~74
17. 오세규, 정순역, "최신용접공학", 진성각, p. 206, 1998