

# AE을 이용한 강의 피로균열전파 거동에 관한 연구

## A Study on Fatigue Crack Growth Behavior of Steel Using AE

정규연 · 김선진 · 김영식 · 오명석 · 김영대

K. Y. Chung, S. J. Kim, Y. S. Kim, M. S. Oh and Y. D. Kim

**Key Words** : Fatigue Crack Growth(피로균열전파), Specimen Thickness(시험편 두께), Stress Ratio(응력비), Crack Closure(균열닫힘), Acoustic Emission(음향방출), Time-Frequency Analysis(시간-주파수 해석법)

**Abstract** : In this study, the effect of specimen thickness and stress ratio on fatigue crack growth in S45C steel was investigated. Acoustic emission was monitored during the fatigue crack growth test. Both crack closure and AE technique were used in assessing fatigue crack growth behavior. Constant amplitude loading tests were performed on CT type specimen with three different thicknesses and stress ratios. Crack closure was investigated to explain the influence of specimen thickness and stress ratio on the fatigue crack growth in the second growth region. The crack closure effect was decreased with specimen thickness and stress ratio.

### 1. 서 론

구조물 혹은 기계부품 등의 피로파괴는 재료결합, 가공손상 등에 의한 균열상의 결함을 기점으로 일어나는 경우가 많다. 건전한 평활재의 시험편에 있어서도 미소한 피로균열은 초기에 발생하고 그 균열의 전파율과 정류조건에 의해서 피로수명과 피로한도가 거의 결정된다. 반복하중을 받는 기계·구조물의 피로균열전파거동에 대한 고찰은 안전한 설계뿐만 아니라, 기기의 운용, 보수, 점검 등을 위해서도 파악되어야 할 중요한 사항이다.

일반적으로 피로수명은 피로균열의 발생수명(initiation life)과 전파수명(propagation life)의 합으로 이루어진다. 그러나 균열전파수명이 지배적인 경우에는 균열의 전파거동을 파악하는 것이 중요하다. 피로균열의 전파거동에 미치는 영향인자는 대단히 많다. 예를 들면 역학적 인자로는 균열의 치수나 형상, 부하응력, 변형률 범위, 평균응력, 혼합 모드의 부하, 변동하중 등이 있고, 환경인자로는 온도, 산화분위기, 부식분위기, 진공분위기 등이 있으며, 그 밖의 중요한 인자로는 균열선단의 개폐구 현상 등을 들 수 있다<sup>1-5)</sup>.

특히 피로균열전파 거동은 부하의 반복에 의한 균열의 개구, 폐구에 의해서 균열선단부에 피해를 주는 반복소성 변형량과 그것에 재료의 균열전파저항과의 관계에 많이 지배된다는 보고가 있다<sup>6-7)</sup>. 실제 균열의 개폐구에 의한 피로균열전파 거동에 대한 연구는 많이 있지만, 피로균열전파시 AE 기법을 활용하여 균열전파거동의 지배인자의 하나인 균열닫힘에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 이상과 같은 관점에서 기계 구조용 강인 S45C 재의 CT(compact tension) 시험편을 이용하여 재료의 피로균열 전파저항에 관여하는 조직상태 그리고 역학적 지배인자의 하나인 응력비, 시험편 두께를 달리하여 일정하중 진폭피로 시험을 수행하여 균열닫힘의 특성을 고찰하고, 또한 피로균열전파시 발생하는 음향방출 신호를 검출하여 시간-주파수 분석법을 통하여 균열닫힘과 균열전파거동과의 관계를 검토하고자 하였다.

### 2. 시험편 및 실험방법

#### 2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편 재료는 일반 기계구조용강인 S45C 강으로, 그 화학적 성분과 기계적 성질을 각각 Table 1과 2에 나타내었다.

접수일 : 2001년 3월 10일  
정규연 : 부경대학교 대학원  
김선진, 김영식, 오명석, 김영대 : 부경대 기계공학부

Table 1 Chemical composition of S45C (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.43	0.16	0.66	0.025	0.007	0.03

Table 2 Mechanical properties of S45C

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
610	342	23.0	216

시험편의 형상은 ASTM E647-93의 규정에 의하여 폭(W) 100mm, 시험편 두께(B) 6, 12, 18mm인 3 종류의 CT(compact tension) 시험편을 사용하였으며, 그 형상과 치수를 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 실험 방법

시험편은 기계가공에 의한 열적영향, 잔류응력과 가공경화 등의 변수를 제거하고 이상적인 실험조건을 만들기 위하여 실온, 대기 중에서 정현파를 이용하여 응력반복속도 10Hz,  $\Delta K=20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 으로 2~4mm정도의 예비균열을 삽입한 후 본실험을 수행하였다. S45C 강의 피로균열전파 특성을 평가하기 위한 피로시험 시스템은 용량10톤의 만능피로시험기(Model : EHF-ED, Shinmadzu)를 사용하여 모든 시험편에서  $\Delta P$  일정피로시험을 수행하였다. 시험조건은 실험실의 대기중에서 응력반복속도 10Hz로 시험편 각각의 두께에 대해 응력비를 0.1, 0.2, 0.4로 달리하여 실험하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 실험시스템의 구성도를 나타낸다. 시험편 두께

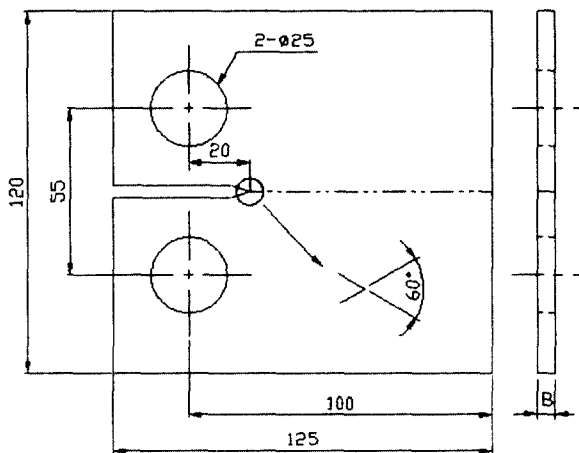


Fig. 1 Shape and dimension of specimen (unit: mm, B = 6, 12, 18mm)

18mm의 경우에는 열처리를 행하여 압연재와도 비교 검토하였다. 열처리 방법은 845°C에서 30분간 유지 후 수냉(water cooling) 하였고, 다시 1시간 동안 Tempering을 행하였다. 한편 음향방출 신호를 검출하기 위하여 PAC사의 Mistras 2001을 사용하였고, 주파수 특성을 파악하기 위해 100~1200kHz 주파수 신호를 유입할 수 있는 광대역 센서를 이용하였다. 시험편에서 발생하는 신호를 민감하게 측정하기 위해 시험편과 센서사이에 접촉매질을 얇게 바른 후 테이프로 압착하였고, 전기적 노이즈를 제거하기 위해 아날로그 필터링 처리를 행하였다. 검출된 음향방출 system을 통해 PC와 인터페이스된 GAGE사의 CS2125 고속 A/D 변환기를 이용하여 디지털화 시킨 후, 시간-주파수 분석을 수행할 수 있는 프로그램을 이용하여 실시간으로 데이터를 분석하고 저장하였다.

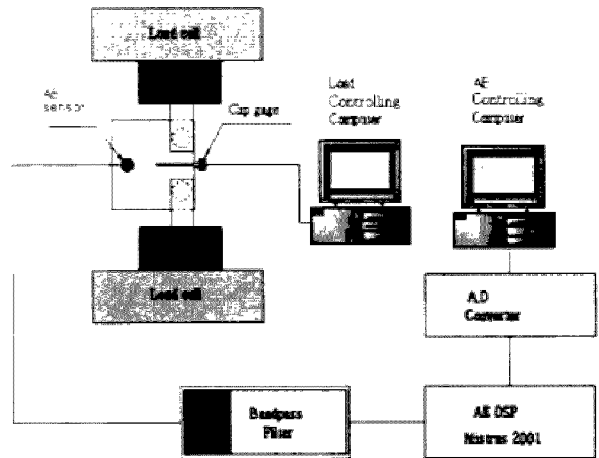


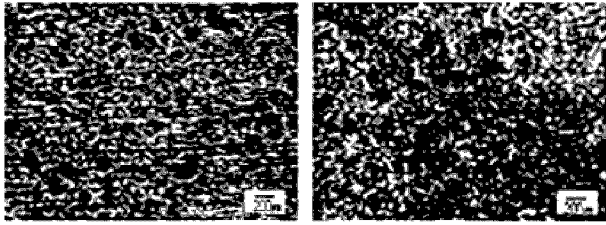
Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 열처리에 따른 미세조직 및 경도변화

Fig. 3은 S45C 강의 압연재와 열처리재의 경우에 대한 미세조직을 광학현미경을 통해 200배율로 관찰한 것을 나타낸다. 사진에서 희게 보이는 부분이 페라이트(ferrite) 조직으로, 펄라이트(pearlite)보다 다소 많은 양의 페라이트가 관찰되었다. Fig. 3(b)의 경우는 열처리재 시험편으로 펄라이트(pearlite)와 베이나이트의 조직으로 구성되어 있음을 보여주고 있다.

Vickers 경도기를 사용하여 압연재와 열처리재의 경도값을 측정하였다. 비커스 경도기 500gf 압자를 사용하여 실험하였다. Fig. 4는 열처리재와 압연재의 경도값의 변화를 나타낸 것이다. 열처리재의 경



(a) Rolling specimen (b) Heat-treated specimen

Fig. 3 Effect of heat-treatment on the structure

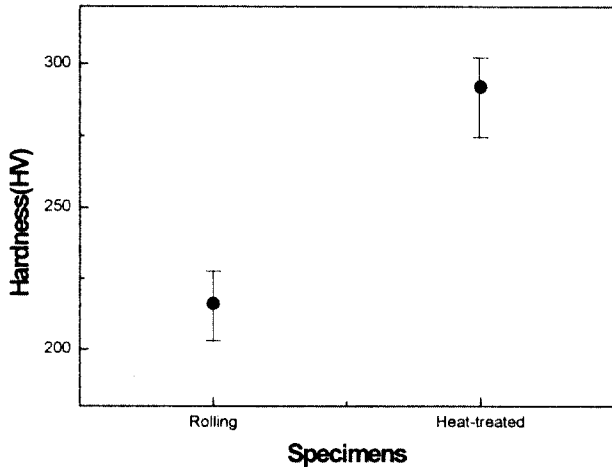


Fig. 4 Effect of heat-treatment on the hardness(Hv)

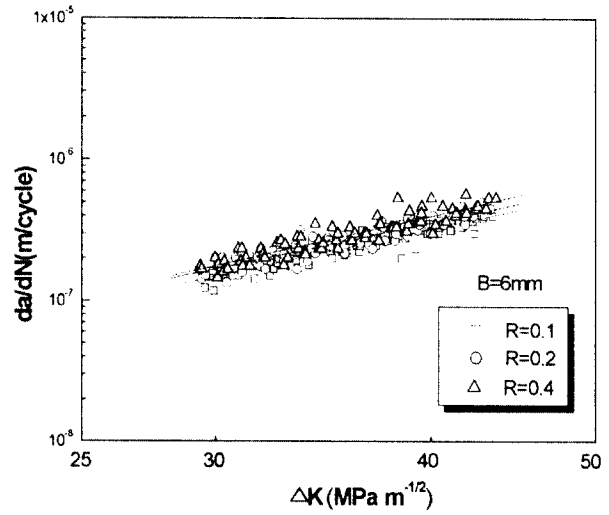
우가 압연재의 경우보다 평균 76Hv 정도 높게 나타났으며, 이는 조직사진에서 보는 바와 같이 연성을 지닌 페라이트가 감소되고 펄라이트가 증가하게 되어 경도가 향상되었다고 사료된다.

### 3.2 피로균열 전파거동

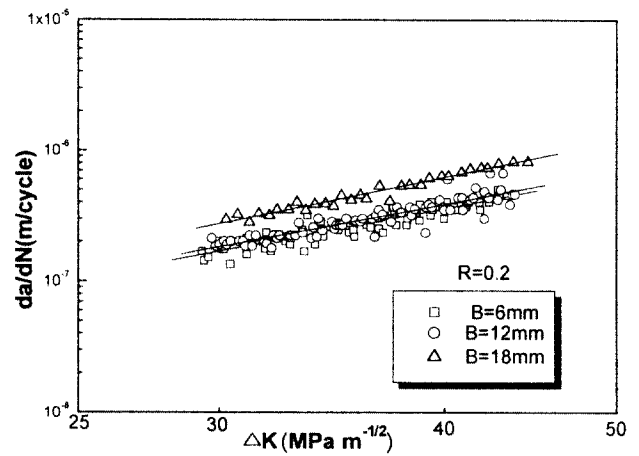
Fig. 5는 본 실험결과의 일례로 피로균열전파율  $da/dN$ 와 응력확대계수범위  $\Delta K$ 와의 관계를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 본 실험의 범위는 피로균열전파의 제2단계 안정전파영역에 속한다고 생각되며, 동일 시험편 두께에서 응력비가 증가하면 피로균열전파율도 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 동일 응력비( $R=0.2$ )에서 시험편 두께가 증가하면 그 피로균열전파율도 증가하는 경향을 나타내고 있다.

일반으로 균열을 가진 부재의 피로균열전파 거동의 안정균열전파 영역인 II영역에 대하여 Paris 등은 피로균열전파율과 응력확대계수범위에 대하여 다음과 같은 식을 제안하였다<sup>1, 2)</sup>.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$



(a) B=6mm



(b) R=0.2

Fig. 5 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta K$

여기서  $C$ 와  $m$ 은 실험상수이다. 본 실험의 경우에 대한  $C$ 와  $m$ 값을 구한 결과를 Table 3에 나타낸다.

Table 3 The constants in Paris's law

$B$	$R$	$C$	$m$
6mm	0.1	$1.55185 \times 10^{-11}$	2.69
	0.2	$2.15100 \times 10^{-11}$	2.63
	0.4	$1.11794 \times 10^{-11}$	2.84
12mm	0.1	$7.61395 \times 10^{-11}$	2.29
	0.2	$2.39927 \times 10^{-11}$	2.63
	0.4	$0.45300 \times 10^{-11}$	3.08
18mm	0.1	$7.69715 \times 10^{-11}$	2.36
	0.2	$1.60576 \times 10^{-11}$	2.86
	0.4	$9.19179 \times 10^{-11}$	2.39

### 3.3 균열단합 현상에 미치는 시험편 두께와 응력비의 영향

균열단합 현상의 영향을 알아보기 위하여 본 연구에서는 다음의 균열열림비  $U$ 는 선형회귀법을 사용하여 응력비( $R$ ),  $\Delta K$  그리고 시험편 두께( $B$ )의 관계로 표현되었다.  $U$ ,  $K_{op}$ ,  $\Delta K_{eff}$ ,  $R_{eff}$ 는 다음과 같은 식으로 정의되었다.<sup>3)</sup>

$$U = 0.716 + 0.012\Delta K + 0.144(B/W) + 0.433$$

if ( $\beta > 0.567$ )

$$U = 1 \quad (\text{if } \beta < 0.567) \quad (2)$$

$$\beta = 0.716 + 0.012\Delta K + 0.144(B/W) \quad (3)$$

$$K_{op} = K_{max} - U\Delta K \quad (4)$$

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad (5)$$

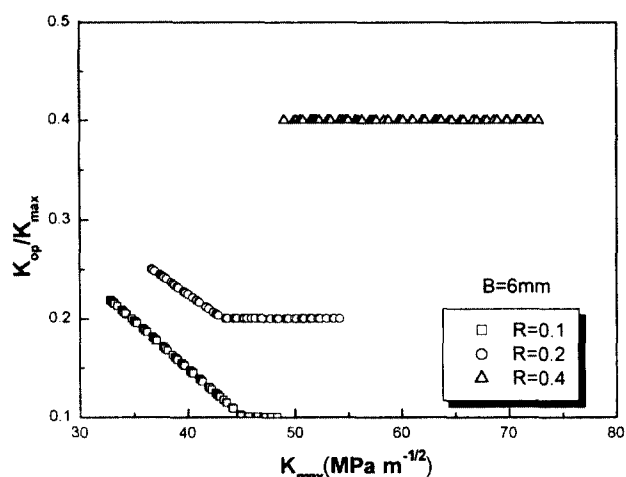
$$R_{eff} = K_{op}/K_{max} \quad (6)$$

여기서  $U$ 는 균열열림비,  $K_{op}$ 는 균열열림점 응력 확대계수,  $\Delta K_{eff}$ 는 유효응력확대계수범위,  $R_{eff}$ 는 유효응력비를 나타낸다.

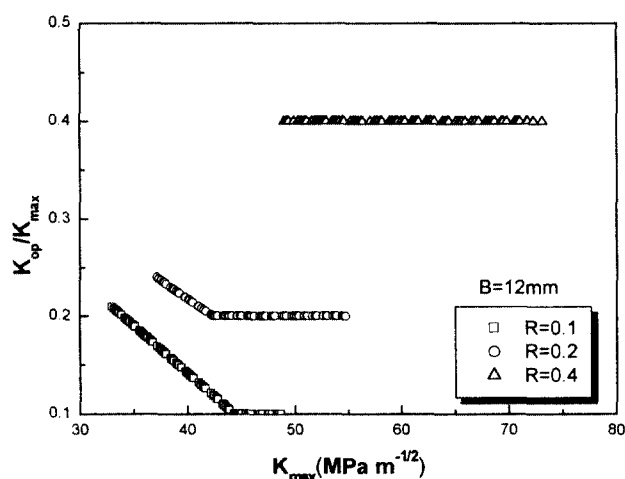
McClung 등은 1개의 식이나 방법으로는 3가지 모든 영역에서 균열단합 현상을 나타낼 수 없다고 하였다<sup>1, 2)</sup>. 따라서 본 연구에서는 II 영역에서의 균열단합 현상을 고려하는 것으로 한다.

Fig. 6(a)~(c)는 시험편 두께에 대한 응력비의 영향을 보여주고 있다. 각각의 시험편 두께에서 응력비가 증가할수록  $K_{op}/K_{max}$ 가 증가함을 알 수 있었다. 응력비 0.4의 경우를 제외하고는, 시험편 두께에 관계없이  $K_{max}$ 가 증가하면  $K_{op}/K_{max}$ 는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 응력비( $R$ ) 0.1, 0.2에서는 균열단합이 발생하였고, 0.4인 경우는 발생하지 않음을 알 수 있었다. 즉, 균열단합이 발생하지 않는다는 것은  $K_{op} \leq K_{min}$ 이 되면  $U=1$ 이 되고, 균열단합이 결과에 영향을 미치지 않게 되어  $R_{eff}$ (유효응력비)= $R$ 이 되기 때문이다.<sup>1)</sup> 각각의 시험편 두께에서 응력비 0.4인 경우에는 균열단합 현상이 관찰되지 않았다. 전체적인 경향은 응력비가 증가할수록  $R_{eff}=R$ 이 되는  $K_{max}$ 값은 응력비가 증가할수록 감소되는 경향을 나타내었다.

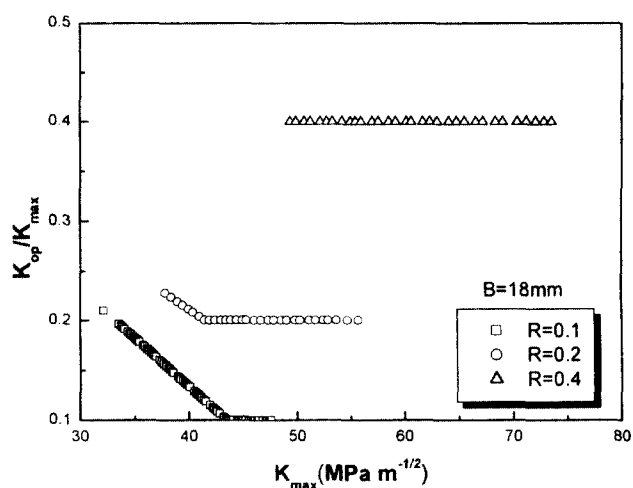
Fig. 7(a)~(c)는 응력비 0.1, 0.2, 0.4에 대한 각각의 시험편 두께에서 균열단합의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 시험편 두께가 증가할수록 더 이상 균열단합이 발생하지 않는  $K_{max}$ 값이 감소함을 알 수 있었다. 균열단합이 발생하지 않는  $\Delta K$ 와  $K_{max}$ 값을 Table 4에 나타내었다.



(a)  $B=6\text{mm}$

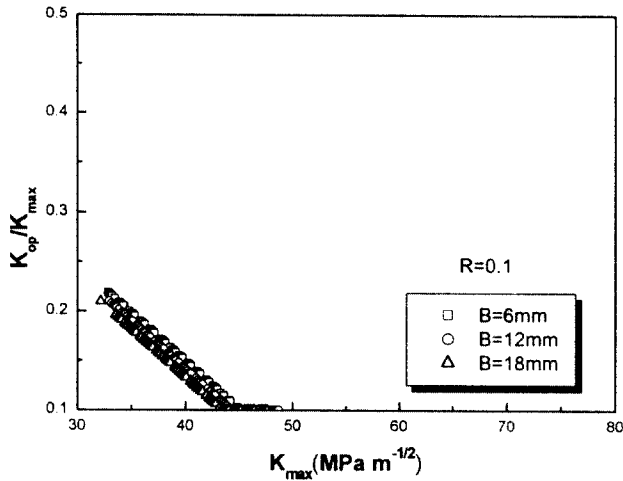


(b)  $B=12\text{mm}$

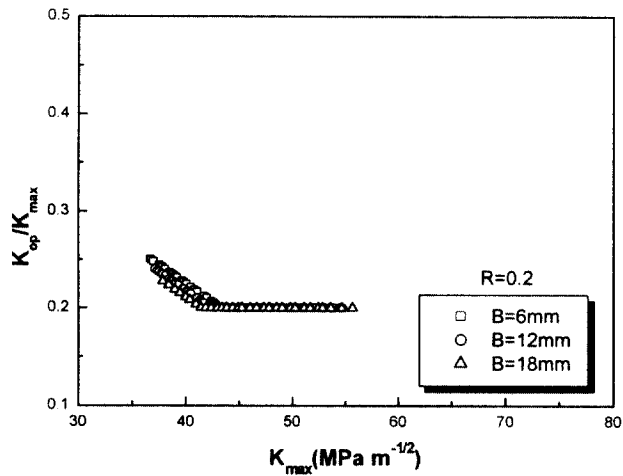


(c)  $B=18\text{mm}$

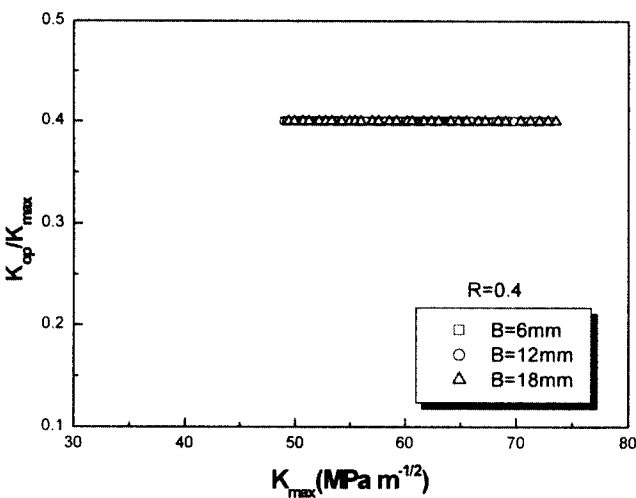
Fig. 6  $K_{op}/K_{max}$  versus  $K_{max}$  for specimen thickness



(a)  $R=0.1$



(b)  $R=0.2$



(c)  $R=0.4$

Fig. 7  $K_{op}/K_{max}$  versus  $K_{max}$  for stress ratio

Table 4  $K_{op}/K_{max}-K_{max}$  curves above which  $R_{eff}=R$

$B$	$R$	$\Delta K (MPa m^{-1/2})$	$K_{max} (MPa m^{-1/2})$
6mm	0.1	41.0	45.5
	0.2	35.0	43.5
12mm	0.1	40.0	44.3
	0.2	34.0	42.5
18mm	0.1	39.0	43.5
	0.2	33.5	42.0

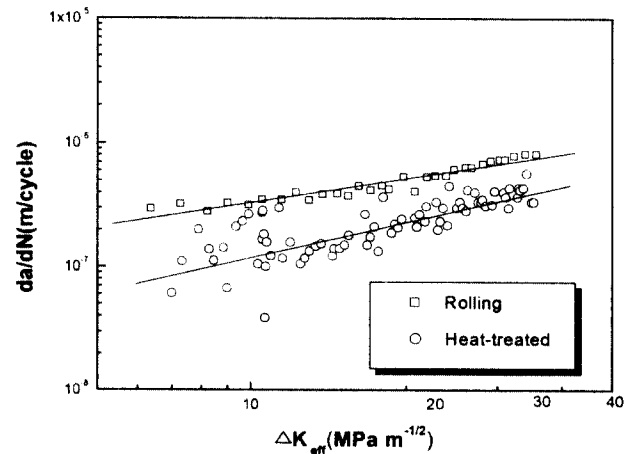
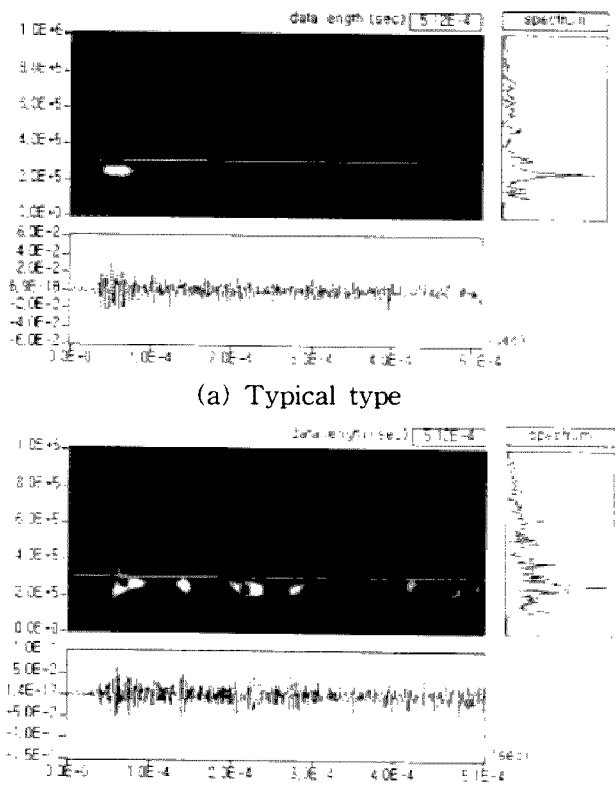


Fig. 8  $da/dN$  versus  $\Delta K_{eff}$  curve for rolling and heat-treated specimens

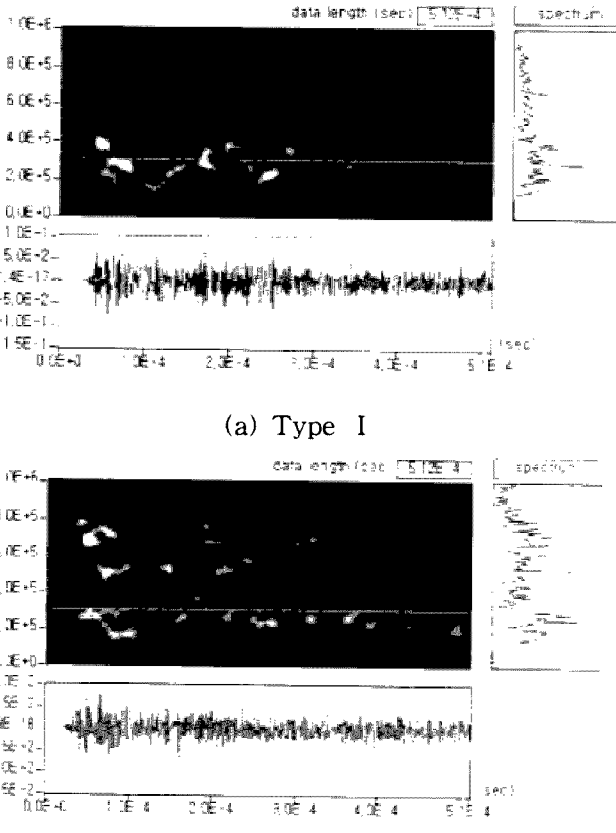
Fig. 8은 압연재와 열처리재에 대한 피로균열전파율과  $\Delta K_{eff}$ 와의 관계로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 동일 응력레벨에서 압연재의 경우가 피로균열전파율이 높고 열처리재가 낮은 경향을 보여 주고 있다. 하지만, 응력레벨이 증가할수록 두 재료의 전파율의 차이는 다소 감소하는 경향을 보였다.

### 3.4 응력비와 시험편 두께에 따른 AE 신호 특성

응력비와 시험편 두께에 따른 AE 신호를 고찰한 결과, Fig. 9(a)에서 보는바와 같이 시험편 두께와 응력비에 무관하게 일정한 주파수 영역대인 200~300kHz 대의 신호가 주로 관찰되었다. 이 범위의 신호는 균열전파시 발생하는 신호라 생각된다. Fig. 9(b)는 특이신호로서 시험편 두께 18mm, 응력비 0.4의 경우에 나타난 신호이다. 이 신호는 시간축으로 균열전파 신호로 추정되는 신호가 3개 연속으로 배열된 형태를 나타내었다. 이는 동일 시간 내에서 균열전파신호가 3개가 유입되어 균열전파율이 아주 빠르다는 것과 밀접한 관계가 있는 것으로 사료된다.



(a) Typical type  
(b) Singularity type  
Fig. 9 Types of AE signal



(a) Type I  
(b) Type II  
Fig. 10 Example of AE signal for heat-treated specimen

3.5 열처리재의 AE 신호 특성

압연재와 열처리재의 피로균열전파시 발생하는 AE 신호의 형태는 다른 양상을 보였다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 압연재의 경우는 균열전파시 발생하는 AE 신호의 주파수 영역대가 200~300kHz대역인 반면, 열처리재는 200~300kHz 대역과 400kHz 대역의 신호가 동시에 나타난 Type I과 600~700kHz 대역의 고영역신호들이 나타난 Type II의 유형으로 구분되었다. 주파수 영역 400kHz 신호의 발생원은 펄라이트 조직 내에서 균열전파로 인해 발생하는 신호로 추정되고, 주파수 영역 600~700kHz 신호의 발생원은 페라이트를 포위하고 있는 펄라이트와의 계면사이에서 원자 상태가 불안정하기 때문에 이 영역에서 균열전파시 고영역대의 신호가 방출되는 것으로 추정된다. 그러나 이의 피로균열전파 거동에 대한 AE신호를 발생시키는 복합적인 파괴모드에 대한 주파수분석은 더 많은 고찰<sup>12)</sup>과 연구가 필요할 것으로 생각된다.

4. 결론

기계구조용강인 S45C재의 CT 시험편을 이용하여 재료의 피로균열 전파저항에 관여하는 조직상태 그리고 역학적 지배인자의 하나인 응력비(R)와 시험편 두께(B)를 달리하여 일정하중진폭 피로시험을 수행하여 균열단힘의 특성을 고찰하였고, 또한 피로 균열전파시 발생하는 음향방출신호를 검출하여 시간-주파수 분석을 통한 균열단힘 현상과 균열전파 거동과의 관계를 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) S45C재의 미시조직의 상태가 피로균열전파율에 영향을 미침을 알 수 있었다.
- 2) 균열단힘은  $K_{op}/K_{max}-K_{max}$ 로 나타낸 선도로 효과적으로 평가되었다. 균열단힘의 결과가 영향을 미치지 않는  $R_{eff}=R$ 이 되는  $K_{max}$ 값은 응력비와 시험편 두께가 증가할수록 감소하였다. 그리고 응력비 0.4인 경우에는 시험편 두께와 관계없이 균열단힘 현상이 관찰되지 않았다.
- 3) AE 신호를 주파수 분석하여, 균열전파 신호는 응력비와 시험편 두께에 관계없이 일정한 주파수 영역대인 200~300kHz 대역으로 관찰되었다. 하지만 시험편 두께 18mm, 응력비 0.4인 경우는 균열전파신호로 추정되는 신호가 시간축으로 3개가 나열되어 균열전파율이 매우 높음을 알 수 있었다
- 4) 열처리재는 200~300kHz 대역의 신호뿐만 아니라

라 400kHz 와 600~700kHz 대역의 신호도 관찰되었다.

### 참고문헌

1. T. L. Anderson, "Fracture Mechanics", CRC press, 1995
2. D. Broek, "Elementary Engineering Fracture Mechanics", Sijthoff and Noordhof, 1988
3. J. D. M. Costa, J. A. M Ferreira, "Effect of Stress Ratio and Secimen Thickness on Fatigue Crack Growth of CK 45 Steel", Theoretical and Applied Fracture Mechanics 30, pp. 65~73, 1988
4. W. Elber, "Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension", Eng. Fract. Mech. 2, pp. 37~45, 1970
5. A. F. Blom, D. K. Holm, "An Experimental and Numerical Study of Crack Closure", Eng. Fract. Mech. 22, pp. 997~1101, 1984
6. W. Elber, "The Significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP415, pp. 230~242, 1971
7. J. Schijve, "Tour Lectures on Fatigue Crack Growth, Eng. Fract. Mech. 11, pp. 167~221, 1979
8. A. Berkovits and D. Fang, "Study of Fatigue Crack Characteristics by Acoustic Emission", Eng. Fract. Mech. Vol. 51, No. 3, pp. 401~416, 1995
9. J. Qian and Y. Dzenis, "Acoustic Emission Study of Damage Evolution in CFRP based on Waveform Analysis", Dept of Eng. Mech., Univ. of Nebraska-Lincoln, NE 68588
10. L. K. Djiauw and D. G. Fesko, "Fatigue Life Prediction for Structural Composites by AE", Plastics Development and Application Office Ford Motor co. Detroit, MI
11. H. K. You, O. Y. Kwon and K. J. Lee, "Acoustic Emission Monitoring of Short Fatigue Crack", Department of Mechanical Eng., Inha Univ., pp. 402~701, 1998
12. 남기우, 이상기, 도재윤, 강창룡, "시효된 수퍼 2상 스테인리스강의 피로균열전진시 발생하는 음향방출신호의 시간-주파수 분석", 한국해양 공학회 2000년도 추계학술대회논문집, pp. 20~25, 2000