

<論 文>

# 탄소강의 피로균열 진전거동 평가에 관한 실험적 연구

김 희 송\* · 안 병 옥\*\*

(1989년 7월 5일 접수)

## An Experimental on the Evaluation of Fatigue Crack Propagation of Carbon Steel

Hei Song Kim and Boung Wook Ahn

**Key Words :** Fatigue Crack Propagation Rate(피로균열 진전속도), Acoustic Emission Count Rate(AE 계수율), Effective Stress Intensity Factor(유효 응력확대계수), Near-Threshold Stress Intensity Factor(하한계 응력확대계수)

### Abstract

Using the CT specimen of carbon steel(SM45C), we estimated the fatigue crack propagation behavior in stable crack propagation range. Furthermore the fatigue crack propagation rate, Acoustic Emission(AE) count rate, and fractography characteristics were also compared among others. The following results were confirmed by experimental observation. Near-threshold stress intensity factor range( $\Delta K_{th}$ ) is influenced by stress ratio, but not at the upper limit of stable crack propagation range. As stress intensity factor range( $\Delta K$ ) and(or) stress amplitude increase (s), both crack propagation rate( $da/dN$ ) and AE count rate( $dn/dN$ ) increase. Effective stress intensity factor range( $\Delta K_{eff}$ ) determined from the crack closure point measurement by AE method is useful for the evaluation of fatigue crack propagation rate. Fractography in stable crack propagation range showed striation, and agreed with the crack propagation rate obtained either by experiment or by the results of microscopic measurements.

### 1. 서 론

실제 구조물에서는 많은 노치(notch)와 결함들이 존재하며, 이들 결함으로부터 균열이 생성, 성장했을 때, 잔존수명을 평가하기 위한 피로균열진전 거동의 규명<sup>(1,2)</sup>은 대단히 중요하다. 이에 따른 파괴강도를 정량적으로 해석하여 구조물 설계의 신뢰성 및 안전성을 얻기 위한 평가법으로서, 피로균열진전거동은 선형 파괴역학 파라미터  $K$ 에 의한 해석과 피로균열진전속도가 소규모 항복조건을 만족

하지 않는 경우, 대규모 항복조건을 만족시키기 위하여  $J$ 와 COD를 이용한 연구<sup>(3)</sup>가 진행되고 있다. 최근에는 음향방출(Acoustic Emission: AE)법에 의한 연구를 피로균열 진전거동에 적용하는 것이 관심의 대상이 되고있다. 그런데 음향방출은 재료의 미시적 변형 및 균열진전에 대한 동적 거동을 민감하게 파악할 수 있는 반면 역학적 조건과 재료 인자등의 영향을 받는다<sup>(4~8)</sup>.

본 연구에서는 CT시험편을 이용하여 소규모 항복조건하에서 하한계(near-threshold)영역과 안정 균열성장(제II)영역의 균열진전거동을 파악하고 피로균열 진전속도와 음향방출거동, 파단면 특성을 각각 비교, 고찰하여 각 파라미터간의 상관관계 및

\* 정희원, 단국대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 정희원, 대전공업대학 기계공학과



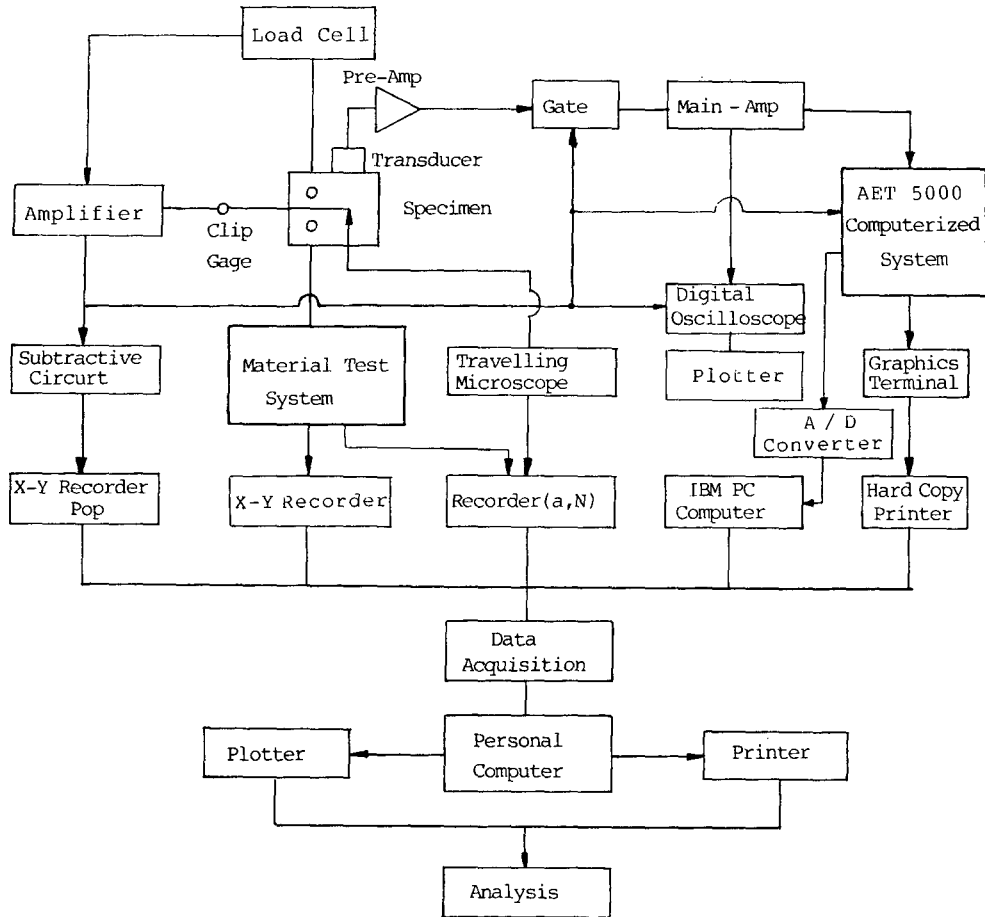


Fig. 2 Block diagram of a fatigue crack propagation test

ASTM E24.04.03<sup>(10)</sup>에서 제안한 시험법에 따라 하중 반복속도를 20Hz로 하여 시행하였다.

$\Delta K$  감소시험은 하중감소에 따른 하중이력의 영향을 없애기 위하여 응력비  $R$ 이 일정한 경우,  $K$  감소의 기울기  $C$ 는

$$|C| = \left| \frac{1}{K(dK/da)} \right|$$

$$= \left| \frac{1}{\Delta K \{d(\Delta K/da)\}} \right| < 0.08 \text{mm}^{-1} \quad (1)$$

이 되도록하고 하중감소후 최대하중( $P_{max}$ )은 감소전 최대하중( $P_{max}$ )의 92%로 하였다<sup>(10)</sup>

그리고 안정균열성장영역의 실험은 하한계 응력 확대계수 폭( $\Delta K_{th}$ )의 값을 구한 후, 최대하중( $P_{max}$ )을 24.5KN으로 일정 하중진폭( $\Delta K$  증가시험)하에서 하였다. 하중 반복속도는 안정 균열성장영역에서 7Hz로 하고, 균열진전속도( $da/dN$ )의 산출은 정확한 데이터 점을 얻기 위해서 ASTM E

647-83에 제안된 Secant method를 이용하였다.

$K$  시험에 의한 응력확대계수 폭( $\Delta K$ )과 유효 응력확대계수 폭( $\Delta K_{eff}$ )은 ASTM에 제안된 CT 시험편의 적용식 (2)와 식 (3)을 이용하였다<sup>(9)</sup>.

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2+a)}{B\sqrt{W}(1-a)^2} (0.866+4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.60\alpha^4)$$

$$\alpha = a/W, \quad \alpha > 0.2 \quad (2)$$

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad (3)$$

여기서,  $K_{max}$  : 최대응력확대계수

$K_{op}$  : 균열 열림점 응력확대계수

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 피로균열 진전특성

Fig. 3은 피로균열 진전의 하한계영역에서  $\Delta K$  감소시험과 최대하중( $P_{max}$ )을 24.5KN으로  $\Delta K$  증가

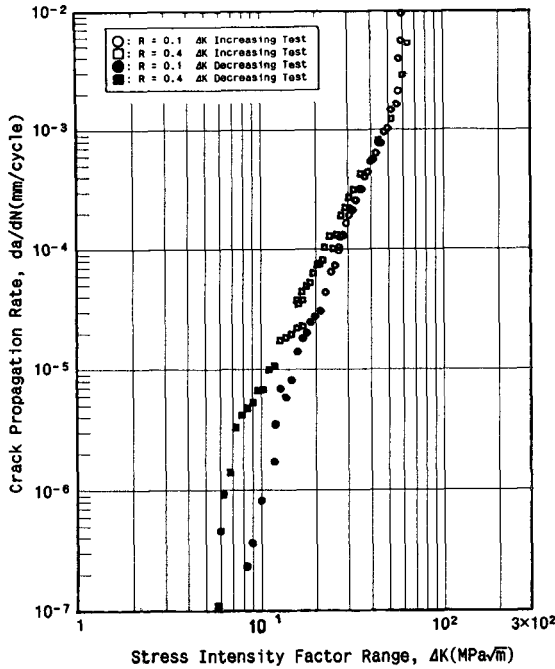


Fig. 3 Fatigue crack propagation rate vs. stress intensity factor range

R=0.1 R=0.4

시험한 결과를 아울러 나타낸  $da/dN - \Delta K$  선도이다.

여기서 피로균열진전속도 하한계 값은  $10^{-6}$ mm/cycle이하인 데이터를 이용하여  $\log(da/dN)$ 과  $\log(\Delta K)$ 의 함수를 선형회귀하여  $10^{-7}$ mm/cycle에 대응하는 응력확대계수 폭( $\Delta K$ )을 하한계 응력확대계수 폭( $\Delta K_{th}$ )으로 정하였다. Fig. 3에 하한계특

성은 응력비에 따라 분명히 나타나고 있으며, 응력비  $R=0.1$ 이  $R=0.4$ 보다 큰 하한계 값을 보여 주고 있다.

Lukas와 Klesnil<sup>(11,12)</sup>등이 하한계 응력확대계수 폭( $\Delta K_{th}$ )과 응력비( $R$ )의 함수관계를

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th,0} (1 - R)^r \quad (4)$$

여기서,  $\Delta K_{th,0}$ :  $R=0$ 일 때의  $\Delta K_{th}$ 로 제한한 식을 이용하여 구한  $\Delta K_{th,0}$ 와  $r$ 을 Table 3에 나타내었다.

Fig. 3에서 피로균열진전속도는  $\Delta K$ 감소시험과  $\Delta K$ 증가시험에 의한 하중이력의 영향이 약간 나타나고 있지만 비교적 일치하고 있다.

안정 균열성장영역에서 균열진전속도는 Paris식  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 에 의해 정리하면 전대수 직선으로 잘 정리되고 있다. 균열진전속도는 동일 응력확대계수 폭( $\Delta K$ )에서  $R=0.1$ 이  $R=0.4$ 보다 더 작은 값을 보이고 있으며 낮은 응력확대계수 폭( $\Delta K$ )에서 피로균열 진전속도( $da/dN$ )의 차는 크게 나타나는 반면, 높은 응력확대계수 폭( $\Delta K$ )으로 갈수록 균열진전속도의 차는 작아지고 있다.

따라서 강재의 균열진전속도는 안정 균열성장영역에서 응력비의 영향을 받고 있지만, 상한계 영역으로 접근함에 따라 응력비에 관계없이 동일한 값을 갖는다. 이것은 최대 응력확대계수( $K_{max}$ )가 피로파괴인성( $K_{fc}$ )에 도달하므로써 발생되며, 결국 피로파괴인성( $K_{fc}$ )에 도달하면 균열진전 속도는 응력비의 감소에 따라 가속되어 불안정 파단에 이르게 되는 것으로 설명할 수 있다.

Table 3 Relation among  $R$ ,  $\Delta K_{th,0}$  and  $r$

Material	$\Delta K_{fc}$ (MPa√m)		Yield strength (MPa)	$\Delta K_{th,0}$ (MPa√m)	$r$
	$R=0.1$	$R=0.4$			
SM45C	8.37	5.89	335.85	9.19	0.89

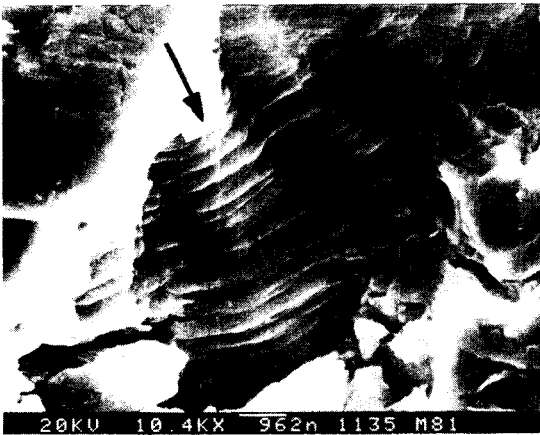
Table 4 Experimental constants by Paris equation at stable crack propagation region

Material	Region	Strees ratio	$\Delta K$ range (MPa√m)	$da/dN$ range (mm/cycle)	$c$	$m$
SM45C	II	0.1	$15.96 \leq \Delta K \leq 56.49$	$1.421 \times 10^{-5} da/dN \leq 1.637 \times 10^{-3}$	$2.337 \times 10^{-12}$	3.941
		0.4	$16.37 \leq \Delta K \leq 35.87$	$3.536 \times 10^{-5} da/dN \leq 2.282 \times 10^{-2}$	$1.831 \times 10^{-10}$	3.071

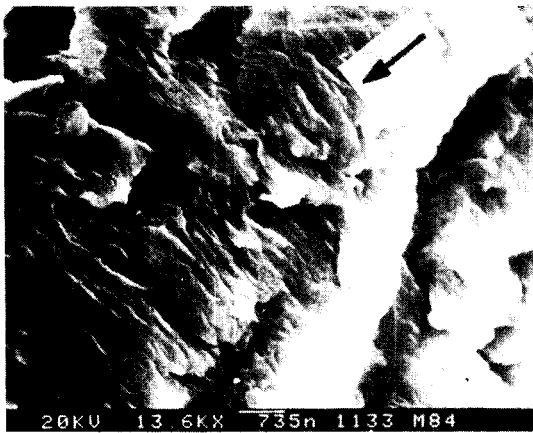
Table 4는 Paris식을 사용하여 구한 재료의 재료상수  $c$ 와  $m$ 의 값이다. 여기서 균열진전속도의 변화율을 나타내는  $m$ 의 값은 응력비 증가에 따라 감소하고  $c$  값은 증가되고 있다.

Fig. 4는 피로 균열진전시험 후, 파단한 시편을 노치선단으로부터 12mm피로균열이 진전한 영역에서 절취하여 주사형 전자현미경(SEM)으로 피로파면을 사진촬영한 것이다.

Fig. 4의 안정 균열성장영역에서 강재의 피로파괴기구는 연성 스트라이에이션(striation)임을 알 수 있고, 파단면의 스트라이에이션 간격으로부터 측정된 균열진전속도는 응력비( $R$ )가 0.1인 경우  $5 \times 10^{-4}$ mm/cycle이었으나, 응력비( $R$ )가 0.4인 경



R=0.1



R=0.4

Fig. 4 Scanning electron microscope at stable crack propagation region (Arrow indicates direction of crack propagation)

우 스트라이에이션 간격을 정확히 측정할 수 없었다. 응력비( $R$ )가 0.1인 경우의 피로균열진전속도는 실험에서 구한값( $4.44 \times 10^{-5}$ mm/cycle)보다 11.2%크게 나타났다.

이 값은 실험에서 구한 피로균열진전속도와 거의 일치되고 있다.

### 3.2 피로균열 진전속도와 AE 계측수와의 관계

Morton<sup>(13)</sup>등은 균열진전속도( $da/dN$ ), 사이클당 AE계수율( $dn/dN$ )과의 상호관계와 응력확대계수 폭( $\Delta K$ )과의 관계를 Paris-Erdogan<sup>(14)</sup>이론을 사용하여 다음과 같이 나타냈다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \tag{5}$$

$$dn/dN = C_1(\Delta K)^{m_1} \tag{6}$$

Lindly<sup>(15,16)</sup>등은 AE의 발생원으로 1사이클당 균열진전에 따른 포텐셜에너지 해방률과 새로이 형성된 항복영역내의 소성변형을 고려하여 각각에 따른 AE계측수를  $n_1, n_2$ 라 하여

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dN} &= \frac{dn_1}{dN} + \frac{dn_2}{dN} \\ &= C_2 \left( \frac{\Delta K}{1-R} \right)^2 \frac{da}{dN} = \frac{C_3}{(1-R)^2} (\Delta K)^{m+2} \end{aligned}$$

하였다. 즉, AE계수율( $dn/dN$ )에 관해서는 응력확대계수 폭( $\Delta K$ )의 지수  $m_1 = m+2$ 로 된다고 하였다.

Fig. 5, 6은 안정 균열성장영역에서의 응력확대계수 폭( $\Delta K$ )의 변화에 따른 균열진전속도와 AE계수율에 대한 실험결과이다.

$c_1, m_1$ 의 값은 응력비( $R$ )가 0.1인 경우는 각각  $1.58 \times 10^{-12}, 6.152$ 이고, 응력비( $R$ )가 0.4인 경우는 각각  $4.36 \times 10^{-10}, 4.762$ 이다. 이때 재료상수  $m_1$ 값과 Table 4의  $m$ 값을 다시쓰면 응력비( $R$ )가 0.1인 경우는 각각 6.152, 3.941이고, 응력비( $R$ )가 0.4인 경우는 각각 4.726, 3.071이다. 따라서 응력비( $R$ )가 0.1인 경우  $m_1 = m+2.221$ 이고, 0.4인 경우  $m_1 + 1.655$ 로 결정되었다.

동일한 응력비에서는 응력확대계수 폭( $\Delta K$ )이 증가함에 따라 피로균열 진전속도( $da/dN$ )와 AE계수율( $dn/dN$ )이 증가하고, 응력비( $R$ )가 증가함에 따라  $m_1$ 값도 동시에 완만하게 감소하는 경향을 갖는다.

한편 실험에 의해 구한  $m_1$ 값은 Moton, Lindly등의 가정에 의한  $m_1 = m+2$ 와 비교하여 보면 응력

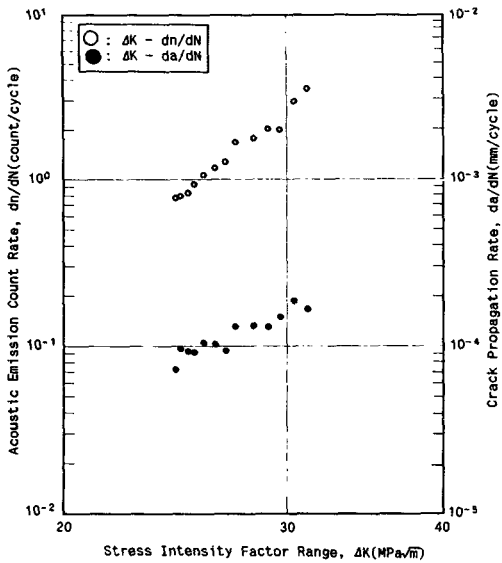


Fig. 5 Relation between  $dn/dN$  and  $da/dN$  as a function of  $\Delta K$  (stress ratio=0.1).

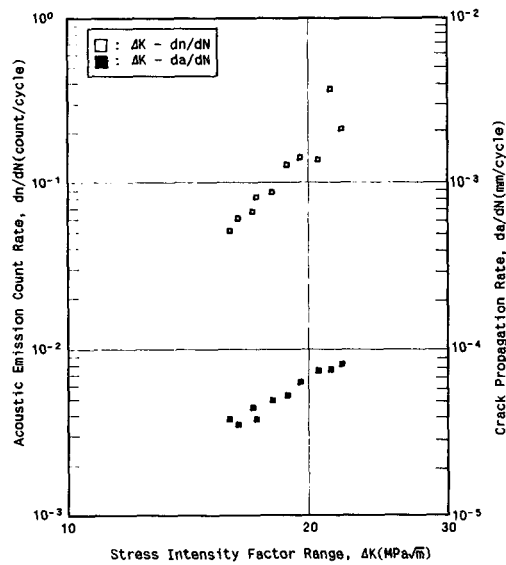


Fig. 6 Relation between  $dn/dN$  and  $da/dN$  as a function of  $\Delta K$  (stress ratio=0.4).

비( $R$ )가 0.1인 경우 실험값이 3.4% 크게 나타난 반면 응력비( $R$ )가 0.4인 경우 6.6%작게 나타났다.

Fig. 7은  $K_{max} - dn/dN$ 의 관계를 나타내었다. 기울기 값은 응력비( $R$ )가 0.1인 경우에 6.151이고, 0.4인 경우는 4.730으로 나타났다. 따라서 동일한 응력비에서 응력확대계수 폭( $\Delta K$ ) 및 최대 응력확대계수( $K_{max}$ )가 증가함에 따라서 AE계측수

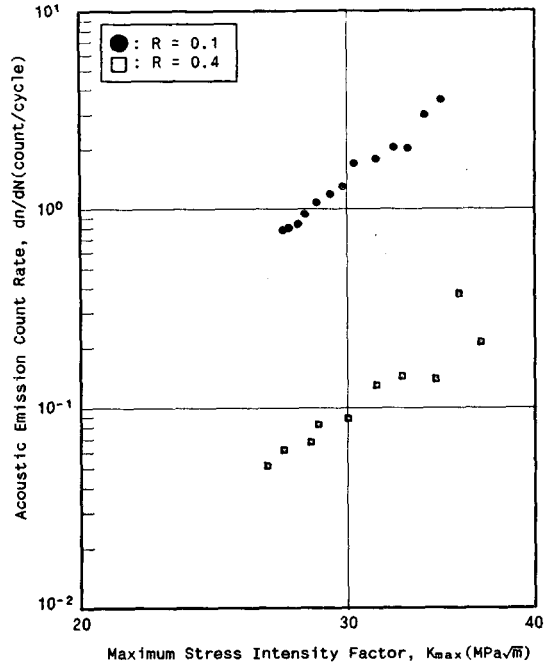


Fig. 7 Relation between  $K_{max}$  and  $da/dN$ .

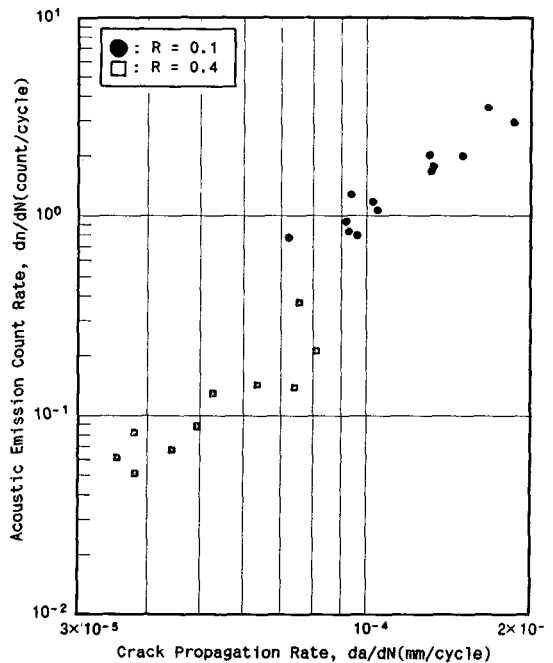


Fig. 8 Relation between  $da/dN$  and  $dn/dN$ .

및 AE계수율은 증가하고, 한편 응력비가 증가함에 따라서 AE계측수 및 AE계수율의 기울기 값은 감소한다고 생각된다.

Fig. 8은 AE계수율( $dn/dN$ )과 피로균열전속도

( $da/dN$ )의 관계이다.

Dunegan<sup>(17,18)</sup>등은 AE계수율( $dn/dN$ )과 균열진전속도( $da/dN$ )의 관계를 직선식으로 표현하였으므로, 식 (5)와 식 (7)의 관계로부터 기울기는  $(m+2)/m$ 으로 표현할 수 있다. Fig. 8에서  $da/dN - da/dN$ 의 응력비( $R$ )가 0.1인 경우에 1.96이고, 0.4인 경우는 1.60이었다. 실험에서 구한 기울기가 응력비( $R$ )가 0.4인 경우는  $(m+2)/m$ 에서 구한 이론값 1.65와 거의 일치 하지만 0.1인 경우는 이론값 1.51보다 큰 값을 나타내었다.

따라서 AE계수율( $dn/dN$ )과 균열진전속도( $da/dN$ )와의 상관관계에서는 직선식으로 표시되며 AE 계수율의 변화율이 균열진전속도변화율보다 크고 응력비의 영향이 있다고 사료된다.

### 3.3 유효 응력확대계수 폭( $\Delta K_{eff}$ )과 균열단 힘 특성

피로균열진전속도( $da/dN$ )는 Elber<sup>(19)</sup>가 제안한 유효 응력확대계수 폭( $\Delta K_{eff}$ )에 의해 정리하면 Pairs식으로 응력비에 관계없이 잘 정리될 수 있다는 것이 본 연구의 관심의 대상이 되었다.

한편, Zheng과 Hirt<sup>(20)</sup>는  $\Delta K$ 와  $\Delta K_{th}$ 의 차를 유효 응력확대계수 폭  $\Delta K_{eff}$ 라 하여 식(8)로 나타내었다.

$$\Delta K_{eff} = \Delta K - \Delta K_{th} \quad (8)$$

따라서, 균열진전속도 식은 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$da/dN = C' (\Delta K_{eff})^{m'} = C' (\Delta K - \Delta K_{th})^{m'} \quad (9)$$

(여기서,  $C'$ ,  $m'$ 는 실험상수)

Fig. 9는 식(9)를 이용하여 얻은 결과를 도시한  $da/dN - (\Delta K - \Delta K_{th})$ 선도이다.

균열진전속도는  $3 \times 10^{-5}$ mm/cycle이상에서 응력비에 관계없이 잘 일치하고 있으며,  $da/dN < 3 \times$

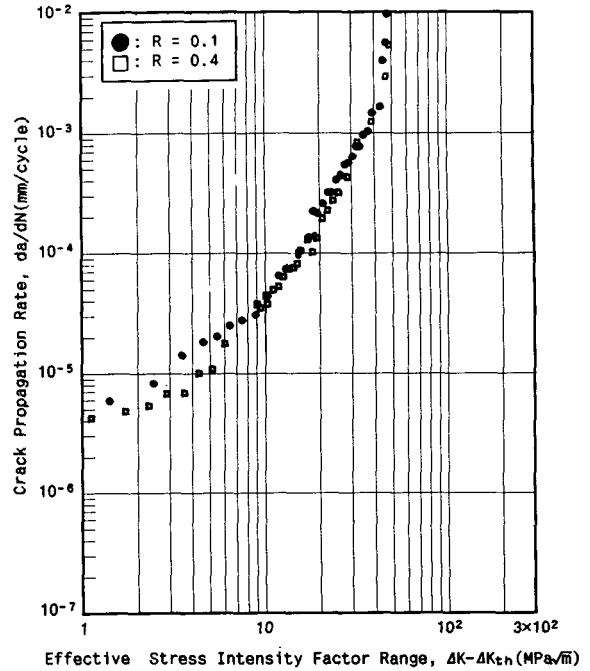


Fig. 9 Fatigue crack propagation rate vs.  $\Delta K - \Delta K_{th}$

$10^{-5}$ mm/cycle영역에서 균열진전속도 변화율은 작아지면서 다소 분산성이 있다. 이는 균열진전 하한계영역과 안정균열 성장영역의 천이 때문에 발생하는 것으로 생각된다.

Table 5는  $C'$ ,  $m'$ 의 결과이다.

Fig. 10, 11은 각 응력비에 따라 유효응력확대계수 폭( $\Delta K_{eff}$ )를  $K_{max} - K_{op}$ 관계로 구하여 나타낸  $da/dN - \Delta K_{eff}$ 선도이다.

Fig. 10, 11은 각 응력비에 따라 유효응력확대계수 폭( $\Delta K_{eff}$ )을  $(K_{max} - K_{op})$ 관계로 구하여 나타낸  $da/dN - \Delta K_{eff}$ 선도이다.

여기서, 균열단힘점 측정은 인산회로(subtrative

Table 5 Experimental coefficients by Paris equation by means of( $\Delta K - \Delta K_{th}$ )

Material	Region	Strees ratio	( $\Delta K - \Delta K_{th}$ ) Range (MPa√m)	$da/dN$ range (mm/cycle)	$c'$	$m'$
SM45C	II	0.1	$9.266 \leq \Delta K - \Delta K_{th} \leq 31.784$	$3.290 \times 10^{-5} \leq da/dN \leq 1.154 \times 10^{-3}$	$2.415 \times 10^{-8}$	2.224
		0.4	$6.154 \leq \Delta K - \Delta K_{th} \leq 28.910$	$1.496 \times 10^{-5} \leq da/dN \leq 1.650 \times 10^{-3}$	$2.286 \times 10^{-8}$	2.133

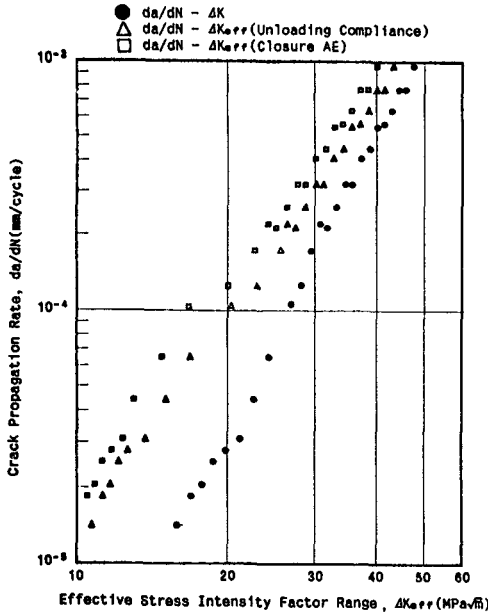


Fig. 10 Relation between  $\Delta K_{eff}$  and  $da/dN$  ( $R=0.1$ ).

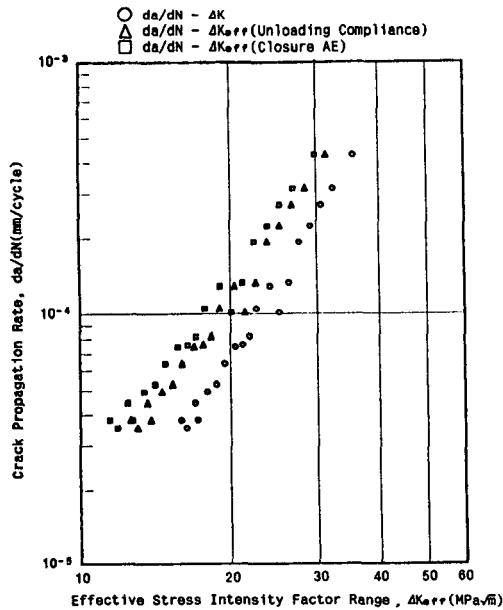


Fig. 11 Relation between  $\Delta K_{eff}$  and  $da/dN$  ( $R=0.4$ ).

circuit)를 이용한 제하탄성 컴플라이언스법과 음향 방출법에 의한 AE형 및 하중변화곡선을 동시에 디지털 오실로스코프와 컴퓨터에 입력하여 AE계측수가 급격히 증가되는 하중값으로부터 구하였다. Fig. 12는 Fig. 10과 11의 결과를 합하여 나타낸 선도이고, Table 6은 Paris식의 실험상수를 최소자승법으로 구한 결과이다. 균열 진전속도는 균열단

Table 6 Experimental Coefficients determined by using  $\Delta K_{eff}$

Unloading compliance method		Closure AE method	
$C''$	$m''$	$C''$	$m''$
$0.244 \times 10^{-10}$	2.797	$0.393 \times 10^{-10}$	2.721

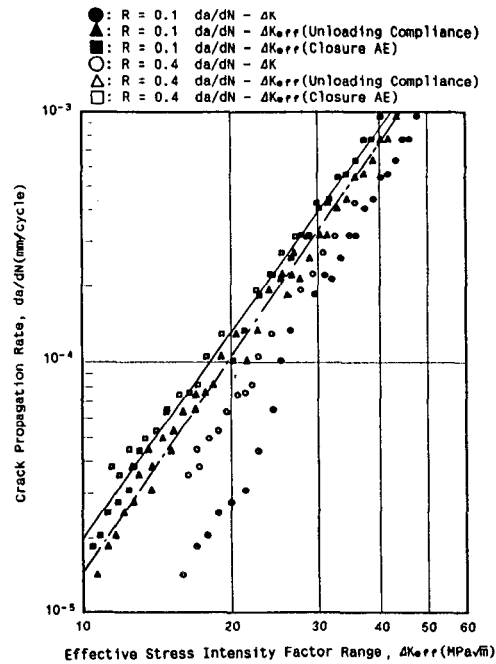


Fig. 12 Relation between  $\Delta K_{eff}$  and  $da/dN$  ( $R=0.1, 0.4$ ).

힘점을 고려하여 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$da/dN = C'' (\Delta K_{eff})^{m''} = C'' (U \times \Delta K)^{m''} \quad (10)$$

여기서,  $C''$ ,  $m''$ 는 실험상수,  $U$ (균열단합 비) =  $\Delta K_{eff} / \Delta K$ 이다.

Fig. 10과 11에서보면 균열진전속도는 각 응력비에서 균열단합 AE법이 제하탄성 컴플라이언스법보다 과소 평가됨을 알 수 있다.

Fig. 12에서 제하탄성컴플라이언스법이나 AE법 모두 응력비에 관계없이 균열진전속도( $da/dN$ )는 유효 응력확대계수 폭( $\Delta K_{eff}$ )에 의하여 하나의 직선식으로 표시되며, 균열진전속도가 균열단합 AE(closure AE)법에 의해 평가하면 제하 탄성 컴플라이언스법보다 큰 차이는 없으나 과소평가되고 있다. 따라서 음향방출(AE)이 재료의 변형 및 파괴 기구에 민감하기 때문에 음향방출법으로 균열 단합



점을 측정하여 산출한 유효 응력확대계수 폭 ( $\Delta K_{eff}$ )은 균열 진전속도 평가에 유용하다고 사료된다.

#### 4. 결 론

탄소강 SM45C의 피로균열 안정성장 거동을 규명하기 위한 피로시험으로 피로균열 진전속도와 음향방출(AE)거동 및 파단면 관찰등의 실험결과를 비교, 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 피로균열 하한계값( $\Delta K_{th}$ )은 응력비가 증가함에 따라 감소하고, 피로 균열안정성영역 상한계의 피로균열진전속도는 응력비에 영향을 받지 않는다.

(2) 응력확대계수 폭( $\Delta K$ )또는 응력진폭이 증가할수록 균열진전속도( $da/dN$ ) 및 AE 계수율( $da/dN$ )은 증가한다.

(3) 음향방출(AE)법으로 균열단립점을 측정하여 산출한 유효응력확대계수 폭( $\Delta K_{eff}$ )은 균열진전속도 평가에 유용하다.

(4) 피로균열안정성장영역의 파단면은 스트라이에이션을 나타내며 실험에서 구한 피로균열진전속도와는 일치된다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Kurihara, M., Katoh, A., and Kawahara, M., 1986, "Analysis on Fatigue Crack Growth Rates under a wide Range of Stress Ratios", Trans. of the ASME, J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 108, No. 2, pp. 209~213.
- (2) Zhang, S., Marissen, R., and Schulte, K., 1987, "Crack Propagation Studies on Al 7475 on the Basis of Constant Amplitude and Selective Variable Amplitude Loading Histories", Fatigue & Struct., of Eng. Mater. & Struct., Vol. 10, No. 4, pp. 314~332.
- (3) Tanaka, K., 1983, "The Cyclic-J-Integral as a Criterion for Fatigue Crack Growth", Int. J. of Fracture, Vol. 22, pp. 91~104.
- (4) Harris, D.O., Dunegan, H.L., and Tetelman, A.S., 1969, "Prediction of fatigue Lifetime by Combined Fracture mechanics and Acoustic Emission Techniques", AFFDL TR 70-140 Dec., pp. 1~12.
- (5) Harris, D.O. and Dunegan, H.L., 1974, "Continuous Monitoring of Fatigue-Crack Growth by Acoustic-Emission Techniques", experimental mechanics. Vol. 14, pp. 71~81.
- (6) Sinclair, A.C.E. and Conners, D.C., 1977, "Acoustic Emission during Fatigue Crack Growth in Steel", Mat. sci. and Eng., Vol. 28, pp. 263~273.
- (7) Ohira, T., Kishi, T. and Horiuchi, R., 1980, "Acoustic Emission during Fatigue Crack Propagation in Structural materials", The 5th AE Symposium, Tokyo, 3-137~3-145.
- (8) 이강용, 1989, "저주기 피로파괴 하중하에서 AE수 변화율과 균열성장율에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제13권, 제2호, pp. 252~256.
- (9) ASTM E647-83, 1985, "Constant Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rates above  $10^{-8}$  m/cycle", pp. 739~759.
- (10) ASTM E24.04. 03, 1981, "Proposed ASTM Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", ASTM STP738, Appendix II pp. 340~356.
- (11) Lukas, P. and Klesnil, N., 1972, "Effect of Stress Cycle Asymmetry of fatigue Crack Growth", Mater. Sci. Eng., Vol. 9, pp. 231~240.
- (12) Mackay, T.L., 1983, "Near-threshold Fatigue Crack Propagation of Several High Strength Steels", Eng. Fract. Mech., Vol. 18, No. 2, pp. 403~416.
- (13) Morton. T.M. Smith S., and Harrington. R.M., "Effect of Loading Variables on the Acoustic Emissions of Fatigue Crack growth", Exp. Mech. May, 1974, pp. 208~218.
- (14) Paris, P. and Erdogan, F., 1963, "A Critical Analysis on Crack Propagation laws", J. of Basic Eng. Trans. of the ASME, Series D, PP. 528~534.
- (15) Lindley, T.C., Palmer, L.G., and Richard, C.E., 1978, "Acoustic Emission Monitoring during Fatigue Crack Growth", Materials Sci. and Eng., Vol. 32, pp. 1~15.
- (16) Morton, T.M., Harrington, R.M. and Bjeletich, J. G., 1973, "Acoustic Emission of Fatigue Crack Growth", Eng. Fract. Mech., Vol. 5, pp. 691~697.
- (17) Dunegan, H.L., Harris, D.O. and Tatro, C.A., 1968, "Fracture Analysis by Use of Acoustic Emission". Eng. Fract. Mech., Vol. 1, pp. 105~122.
- (18) Ohira, T. and Kishi, T., 1980, "Acoustic Emission Characteristics of type 304 Stainless Steel during Fatigue Crack Propagation", The 5th AE Symposium, Tokyo, pp. 465~474.
- (19) Elber, W., 1971, "Significance of Fatigue Crack Closure", Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP 486, pp. 230~242.
- (20) Zheng, X. and Hirst, M.A., 1983, "Fatigue Crack Propagation in Steels", Eng. Fract. Mech., Vol. 18, No. 5, pp. 965~973.