

## 하중진폭제어에 따르는 피로균열전파거동

김 상 철\*, 함 경 춘\*\*, 강 동 명\*\*\*

### Fatigue Crack Propagation Behaviors under the Controlled Stress Amplitude

Sang-Chul Kim\*, Kyoung-Chun Ham\*\*, Dong-Myeong Kang\*\*\*

#### ABSTRACT

The effect of mechanical properties in the plastic zone near the crack-tip was investigated, under various controlled loading conditions, i.e.,  $\Delta K$  increasing,  $\Delta K$  decreasing, and single overload test. For both  $\Delta K$  decreasing test and  $\Delta K$  increasing test with constant stress ratio, it is found that the ratio of material constant  $m'$  ( $\Delta K$  decreasing test) to material constant  $m$  ( $\Delta K$  increasing test) is larger than 1 for  $n < 0.1$ , and it is equal to 1 for  $0.1 < n < 0.2$ . But it is smaller than 1 for  $n > 0.2$ .

A modified crack growth rate equation based on Forman's equation which applied stable region of fatigue crack propagation in  $\Delta K$  decreasing test is proposed.

Within the limit of this single overload test, an empirical relation between among the retardation ratio ( $N_d/N^*$ ), the strain hardening exponent ( $n$ ) and the percent peak load (%PL) has been established.

#### 1. 서 론

장기간에 걸쳐 규칙 또는 불규칙적으로 변동하는 하중의 영향을 받을 때 피로균열전파거동은 여러가지요인의 영향을 받으나 재료의 기계적성질과 밀접한 관계가 있으며 근본적으로는 균열전단의 소성역의 역학적 거동의 영향을 많이 받을 것으로 추측된다<sup>(1)-(2)</sup>.

본 연구에서는 균열전단의 소성역의 역학적 조건을 변화시키기 위한 실험으로 하중진폭제어시험( $\Delta K$  증가 피로시험,  $\Delta K$  감소피로시험 및 단일과대하중시험) 등을 행하여 재료의 기계적성질 가운데 소성역의 특성을 잘 나타내는 가공경화지수와 피로균열전파거동과의 관계를 비교 검토하였다.

#### 2. 시험편 및 실험절차

##### 2.1 $\Delta K$ 감소시험( $\Delta K$ decreasing test)

본 실험에 사용된 재료는 두께가 2mm인 알루미늄(A 1060), 냉간 압연강재(SS 34), 황동(BsS1B) 및 스테인레스강(SUS 304) 등 기계적성질이 상이한 4가지 재료를 택하였다. 단순인장시험(monotonic tension test)과 반복 인장시험(cyclic tension test)에서 구한 기계적성질은 Table 1과 같다.

피로 시험편의 형상은 폭(W)이 70mm인 CCT(center cracked tension)이며 ASTM E 647규정에 의하여 시험편을 가공하였다. 피로시험기는 유압식피로

\* 인하대학교 기계공학과 (정회원)

\*\* 인하공업전문대학 기계설계과 (정회원)

\*\*\* 인하대학교 기계공학과 (정회원)

Table 1 Mechanical properties(monotonic & cyclic stress-strain tests)

Material properties Materials	Young's modulus	Yield strength mono./cyclic	Tensile strength mono./cyclic	Strain hardening exponent mono./cyclic
	E (Mpa)	$\sigma_s / \sigma'_s$ (MPa)	$\sigma_t / \sigma'_t$ (MPa)	n/n'
Aluminum (A 1060)	$5.58 \times 10^4$	112/98	125/108	0.06/0.05
Steel (SS 34)	$2.03 \times 10^5$	284/314	363/397	0.10/0.14
Brass (BsSiB)	$1.09 \times 10^5$	320/315	390/400	0.15/0.16
Stainless steel (SUS 304)	$2.05 \times 10^5$	300/365	720/780	0.49/0.38

Table 2 Load condition ( $\Delta K$  increasing test &  $\Delta K$  decreasing tests)

Load conditions Materials	K increasing test		K decreasing test				Stress ratio (R)
	P <sub>max</sub> (KN)	P <sub>min</sub> (KN)	Initial load		Final load		
			P (KN)	P (KN)	P (KN)	P (KN)	
Aluminum (A 1060)	7.4	1.5	11.0	2.2	5.4	1.1	0.2
Steel (SS 34)	19.6	3.9	27.2	5.4	9.7	1.9	0.2
Brass (BsSiB)	19.6	3.9	27.8	5.6	6.9	1.4	0.2
Stainless steel (SUS 304)	22.0	4.4	27.5	5.5	11.0	2.2	0.2

시험기(Saginomiya Co. : 50ton)를 사용하였으며 피로 시험의 파형으로는 10Hz의 정현파(sine waves)를 택하였다. CCT 시험편에 대한 응력확대계수(K)의 식은 다음과 같다<sup>3)</sup>.

즉,

$$K = \sigma \sqrt{a} F(a/W)$$

여기서,  $F(a/W) = 1.77[1 - 0.1(2a/W) + (2a/W)^2]$ 이며, W는 시험편의 폭이다.

재료의 인장시험을 바탕으로 각 재료의 최대하중(P<sub>max</sub>)과 최소하중(P<sub>min</sub>) 및 응력비(R=0.2)는 Table 2와 같이 설정하고, 각 재료의 기본 피로균열전과거동을 파악하기 위하여 기본피로시험(일정응력진폭시험 또는  $\Delta K$  증가시험)을 행하였다.

$\Delta K$  감소피로시험은 균열길이 증가에 따라 응력확대계수 폭을 감소시켰는데, 균열길이 증가에 따라 반복하중의 크기는 점차적으로 감소한다. 일반적으로  $\Delta K$  감소 피로시험은 피로균열성장속도가  $10^{-5}$ mm/cycle 이하인 하한계영역의 측정에 이용되며 ASTM E 647에 규정된 시험방법은 응력확대계수구배 ( $|C| = |1/K \cdot dK/dal|$ )를  $|C| < 0.08$ mm<sup>-1</sup>로 하며, P<sub>max</sub>의 감소는 10%이하로 제한한다.

본 연구에서의  $\Delta K$  감소 피로시험은  $\Delta K$  증가 피로 시험의 결과를 토대로  $10^{-4}$ mm/cycle 되는 피로 균열전파의 안정성장구간의 상부로부터 응력확대계수 폭을 점차로 감소시켜 가면서 행하였는데 이때 P<sub>max</sub>의 감소와 응력확대계수구배는 규정대로 평균 5% 및 0.05mm<sup>-1</sup>로 하였다.

하중의 설정은 각 재료에 대하여 응력비(R)를 기본 피로시험때와 같이 0.2로 하였으며 초기의 적용하중은 재료의 항복을 넘지 않도록 설정하였다. 각 재료에 대해 설정된 초기하중과 최종하중은 Table 2에 기본피로 시험과 함께 나타내었다.

### 2.2 단일과대하중시험(single overload test)

재료는 기계적 성질이 서로 다른 두께가 6mm인 중탄소강(SM45C), 열강압연강(SS41)과 두께가 5mm인 알루미늄(A 3203), 스테인레스강(SUS316)을 택하였다. Table 3 재료의 기계적 성질을 각각 나타내었다.

피로 시험편은 균열단함 측정을 위해 배면게이지 부착이 용이한 폭(W)이 72mm인 CT(compact tension) 시험편이며, CT 시험편에 적용되는 응력확대계수(K)의 식은 다음과 같다<sup>3)</sup>.

$$K = P / (t \sqrt{W}) F(\xi)$$

여기서 P, t 및 W는 하중, 시험편 두께 및 시험편 폭이고,  $\xi$ 는  $\xi=a/W$ 이며 형상계수는 다음과 같다.

$$F(\xi) = (2 + \xi)(0.886 + 4.64\xi - 13.32\xi^2 + 14.72\xi^3 - 5.6\xi^4) / (1 - \xi)^{3/2}$$

균열달힘량은 피로시험편 배면에 스트레인 게이지를 부착하고 감산회로(substract circuit)를 통하여 측정하였고 피로시험을 효과적으로 수행하기 위하여 A/D-D/A 변환기를 설치하였다<sup>14)</sup>.

단일 과대하중시험을 행하기 전 상호비교검토를 위하여 응력진폭을 일정하게 기본 피로시험을 행하였으며 이때 응력비는 0.2, 주파수 및 파형은 20Hz의 정현파로 하였다. 단일과대하중시험에서의 과대하중비는 다음과 같이 표시된다<sup>15)</sup>.

$\%PL = [(K_{max} - K_{min}) / \Delta K_0] \times 100$ 이며, 여기서  $\Delta K_0$ 는 기준응력확대계수범위이다<sup>16)</sup>.

본 연구에서의 과대하중비(%PL)는 50%와 100% (frequency  $\approx$  0.05Hz)로 하였으며, 단일과대하중은 기본피로 시험에서 구한 피로균열 안정성장영역에서의 피

로균열성장속도를 기준으로 초기영역( $1 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-5}$  mm/cycle)에서 가하였다. 단일과대하중시험의 하중조건은 Table 4와 같다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 $\Delta K$ 감소시험 ( $\Delta K$ decreasing test)

각 재료에 대한 피로균열전파속도를 조사하기 위하여 기본피로시험과  $\Delta K$  감소피로 시험의 결과를 da/dN- $\Delta K$ 로 정리하였는데 그중 대표적으로 알루미늄(A 1060)은 Fig. 1, 스테인레스강(SUS 304)은 Fig. 2에 각각 나타내었다.

이들 그림을 보면 기본피로시험 때와  $\Delta K$  감소시험 때의 실험결과는 서로다른 양상을 보이는데, 응력비를 동일하게 유지하였음에도 불구하고 동일 재료에 있어서도 같은  $\Delta K$ 값에 대하여 피로균열전파속도가 다르게 나타난다.

$\Delta K$  감소시험의 경향을 보면 초기에는 하중감소의 영향으로 인하여 균열성장속도가 급격히 감소하다가 점

Table 3 Mechanical properties(monotonic & cyclic stress-strain tests)

Material properties	Young's modulus	Yield strength mono./cyclic	Tensile strength mono./cyclic	Strain hardening exponent mono./cyclic
	E (Mpa)	$\sigma_s / \sigma_{sc}$ (MPa)	$\sigma_u / \sigma_{uc}$ (MPa)	n/n'
Aluminum (A 1060)	$6.00 \times 10^4$	120/110	140/130	0.075/0.057
Steel (S 45 C)	$2.12 \times 10^5$	340/360	625/650	0.20/0.17
Brass (SS 41)	$2.10 \times 10^5$	300/325	430/445	0.25/0.28
Stainless steel (SUS 316)	$2.05 \times 10^5$	325/370	625/700	0.42/0.35

Table 4 Load conditions in single overload test

Load conditions	constant load amp.		Single overlad		% Peak load (%PL)
	P <sub>max</sub>	P <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>	P <sub>min</sub>	
Aluminum (A 3203)	2.45	0.49	3.43	0.49	50
			4.41	0.49	100
Steel (S 45 C)	6.13	1.23	8.58	1.23	50
			11.03	1.23	100
Brass (SS 41)	6.13	1.23	8.58	1.23	50
			11.03	1.23	100
Stainless steel	5.64	1.13	7.89	1.13	50
			7.89	1.13	100

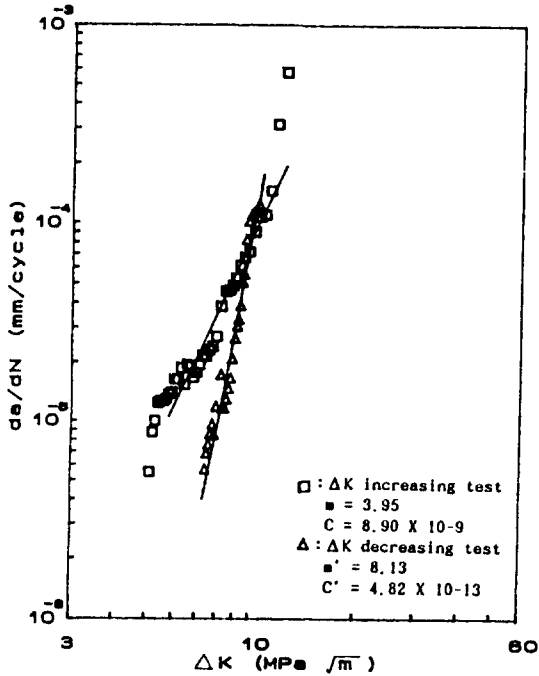


Fig.1 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity factor range for aluminum (A 1060) in  $\Delta K$  increasing &  $\Delta K$  decreasing tests.

차 안정적인 감소 현상을 보이나, 재료별로 그 양상의 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은  $\Delta K$  감소시험 때의 균열선단 소성역의 역학적거동이 재료마다 서로 다르기 때문으로 추측된다.

$\Delta K$  감소시험의 시작점인 상단부를 보면 알루미늄의 경우 초기의 하중감소로 인한 지연효과가 거의 없으나 스테인레스 강의 경우는 지연효과가 크게 나타났는데  $\Delta K$  감소시험의 상단구역에서 균열지연이 최대가 되는 같은 응력확대계수 폭을 기준으로 기본 피로시험에 대한 피로균열 전파속도와의 비를 구하면 알루미늄은 1.0, 압연강은 0.55, 황동은 0.5 및 스테인레스강은 0.4이다. 이 값을 Table 1의 기계적성질 가운데 소성역의 특성을 나타내는 가공경화지수(n)와 비교하여 보면 가공경화지수가 큰 스테인레스강(n=0.49)의 경우 지연효과가 가장 크며 황동(n=0.15), 압연강(n=0.10) 및 알루미늄(n=0.06)의 순으로 지연효과가 감소한다.

이 시험의 균열성장 안정구역을 살펴 보면 기본피로 시험 때와  $\Delta K$  감소시험 때의 기울기의 값은 서로 다르다. 즉, 이 구간에 적용되는 관계식,  $da/dN=C(\Delta K)^m$ 에서 기본피로시험 때의 기울기를 m로 하고  $\Delta K$

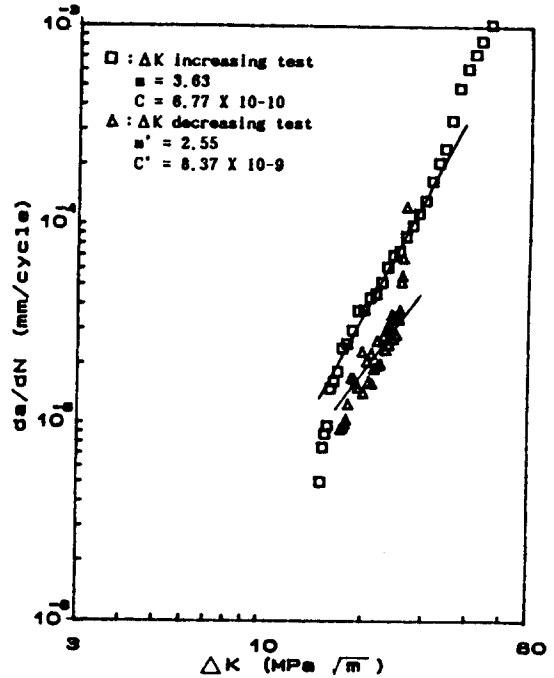


Fig.2 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity factor range for stainless steel (SUS 304) in  $\Delta K$  increasing &  $\Delta K$  decreasing tests.

감소시험 때의 기울기를  $m'$ 이라 하면, 각 재료에 있어서 기울기의 변화율( $m'/m$ )은 알루미늄(A 1060), 압연강(SS 34), 황동(BsS1B) 및 스테인레스강(SUS 304)에 대하여 각각 2.06, 0.92, 1.04, 0.70이 된다.

Table 5에는 각 재료에 대하여 기본피로시험의 결과에서 구한 Paris의 재료상수 m, C와 Forman의 재료상수 B, q 및 피로파괴인성치  $K_{IC}$ 를 나타내었고, 또한  $\Delta K$  증가시험과  $\Delta K$  감소시험 때의 재료상수 m과 C의 변화율도 함께 나타내었다. 기울기의 변화율( $m'/m$ )을 가공경화지수(n)와 비교하여 보면  $n < 0.1$ 인 알루미늄( $n = 0.06$ )에 있어서는  $m'/m$ 의 값이 1보다 크게,  $0.1 < n < 0.2$ 인 압연강( $n = 0.10$ ), 황동( $n = 0.15$ )에서는 1에 가까운 값으로 거의 큰 변화를 보이지 않았으며,  $n > 0.2$ 인 스테인레스강( $n = 0.49$ )에 있어서는  $m'/m$ 의 값이 1보다 작게 나타났음을 알 수 있다.

$\Delta K$  감소시험의 하단부를 보면 알루미늄을 제외한 나머지 재료들을 균열성장속도가  $10^{-5}$ mm/cycle 부근에서 대개 기본시험과 접근하는데 이는 ASTM E-647 규정에 의한  $\Delta K$  감소피로시험법이  $10^{-5}$ mm/cycle 이하에 적용됨을 잘 반영하고 있으나 본 연구의 알루미늄과

Table 5 Material constants (Paris' & Forman's equations)

Material constants Materials	Paris' equation						Forman's equation			n
	K increasing test		K decreasing test		m'/m	C'/C	q	B	K <sub>c</sub> MPa√m	
	m	C	m'	C'						
Aluminum (A 1060)	3.95	8.90×10 <sup>-9</sup>	8.13	4.82×10 <sup>-13</sup>	2.06	0.00054	3.03	3.47×10 <sup>-7</sup>	17	0.06
Steel (SS 34)	4.50	6.03×10 <sup>-11</sup>	4.14	7.34×10 <sup>-11</sup>	0.92	1.22	2.30	7.06×10 <sup>-7</sup>	47	0.10
Brass (BsSIB)	2.72	2.35×10 <sup>-8</sup>	2.87	6.14×10 <sup>-9</sup>	1.04	0.21	1.23	3.59×10 <sup>-5</sup>	49	0.15
Stainless steel (SUS 304)	3.63	6.77×10 <sup>-10</sup>	2.55	8.37×10 <sup>-9</sup>	0.70	12.36	2.26	1.19×10 <sup>-6</sup>	60	0.49

같은 기계적성질을 가진 재료에 대해서는 실험적 연구가 필요하다고 생각된다. 일정응력진폭시험의 피로균열 안정성장영역 및 불안정 성장영역에는 Forman의 식 즉,  $da/dN = B \Delta K_c / [(1-R)K_{Ic} - \Delta K]$ 이 제안되어 있다. 이 실험식을 본 연구의 실험결과와 함께 나타내었는데 그중 대표적으로 알루미늄은 Fig. 3. 스테인레스강은 Fig. 4에 각각 나타내었다. 이 그림에서 일정응력진폭시험은 피로 균열 안정성장영역과 불안정 성장영역에서 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

$\Delta K$  감소 피로시험은 하중감소로 인해 균열 지연현상이 일어나며 이 균열 지연현상은 가공경화지수와 밀접한 관계가 있다. 따라서, 본 연구에서는  $\Delta K$  감소 시험의 균열안정성장 구간에 대하여 적용되는 실험식( $(da/dN)'$  ...)을 일정응력 진폭시험에서의 Forman의 식을 수정하여 다음과 같이 제안하였다.

$$(da/dN)'_{dec} = (\mu n + \lambda) B \Delta K^q / [(1-R)K_{Ic} - \Delta K]$$

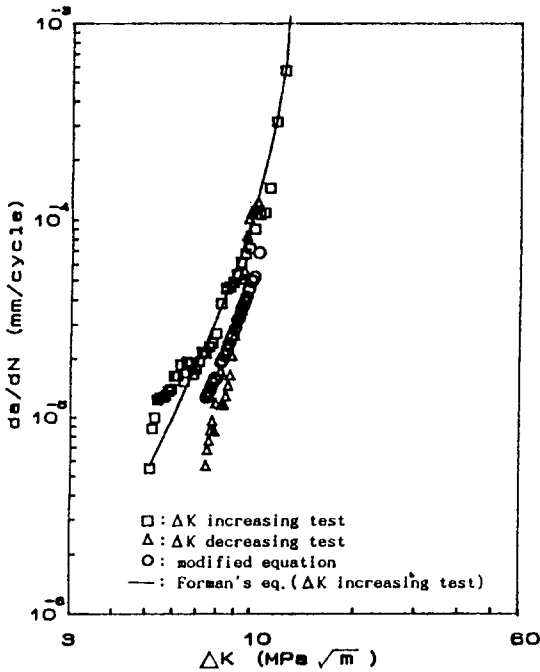


Fig.3 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity factor range for aluminum (A 1060) in  $\Delta K$  increasing &  $\Delta K$  decreasing tests.

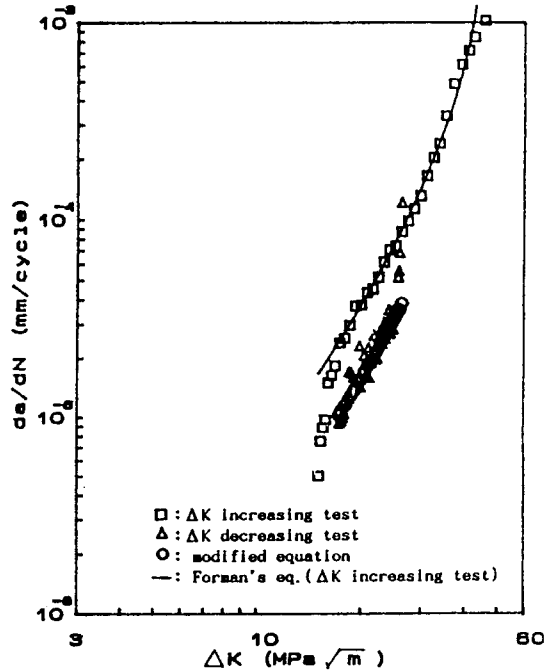


Fig.4 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity factor range for stainless steel (SUS 304) in  $\Delta K$  increasing &  $\Delta K$  decreasing tests.

여기서,  $n$ 은 가공경화지수이고, 상수  $\mu$ 와  $\lambda$ 는 본 실험에서 사용한 네 가지 재료에 대하여 동일하게  $\mu = 0.25$ ,  $\lambda = 0.55$ 이며 피로균열 안정성장구간에서의 실험치와 잘 일치하였다.

이 식에 의한 결과 역시 일정 응력진폭시험의 결과와 함께 나타내었는데 그중 대표적으로 알루미늄은 Fig. 3, 스테인레스강은 Fig. 4에 각각 나타내었다.

### 3.2 단일과대하중시험(single overload test)

이 시험의 결과는 피로균열성장속도( $da/dN$ )와 균열 길이( $a$ )로 정리하여 알루미늄은 Fig. 5, 스테인레스강은 Fig. 6에 대표적으로 나타내었다. 각 재료에 대한 이들 그림을 보면 과대하중비가 100%인 경우가 50%인 경우보다 지연효과가 크며 재료마다 지연 효과가 서로 다를 수 있다.

단일과대하중이 작용한 후의 피로균열전파속도의 지연 효과는 재료의 가공경화지수가 큰 스테인레스강 ( $n = 0.42$ )이 가장 크게 나타났고 가공경화지수가 작은 알루미늄 ( $n = 0.075$ )이 가장 작게 나타났다.

피로균열지연거동을 균열담힘현상과 관련시켜 구명하기 위하여 제하탄성 컴플라이언스법<sup>(4)</sup>으로 균열열림율( $U$ )을 구하였고 이 균열열림율을 최대응력확대계수( $K_{max}$ )와의 관계로 보였는데, Fig. 7에 스테인레스강의 경우를 대표적으로 나타내었다. 각 재료에 대한 이들 그림을 보면 균열열림율( $U$ )은 과대하중비가 100%인 경우가 50%보다 작게 나타났다. 즉, 과대하중비가 클수록 균열담힘현상이 커진다. 균열담힘현상을 재료의 가공경화지수와 비교하여 보면 가공경화지수가 가장 큰 스테인레스강( $n = 0.42$ )의 경우가 가장 크게 나타났으며 열간압연강( $n = 0.25$ ), 중탄소강( $n = 0.20$ ) 및 알루미늄( $n = 0.075$ )의 순으로 나타났다.

피로 균열 성장속도 ( $da/dN$ )를 유효응력확대계수 [ $\Delta K_{eff} (= U \cdot \Delta K)$ ]와의 관계로 Fig. 8에 나타내었다. 피로균열성장속도를 이들 그림에서와 같이 유효응력확대계수로 정리하면 과대하중비에 관계없이 각 재료에 따라 실험치가 하나의 선상에 놓이게 된다. 이것은 균열지연 거동이 주로 균열담힘에 기인함을 뜻한다<sup>(7)(8)</sup>.

이상의 결과에서 피로균열지연거동은 균열담힘현상에 기인하고 균열담힘현상은 재료의 가공경화지수와 매우 밀접한 관계가 있음을 확인 할 수 있다. 단일과대하중의 의해 영향을 받은 균열성장길이 ( $a_n$ )를 단일 과대하중에 의한 소성역과 관련시켜 보면, 평가 방법에 따라

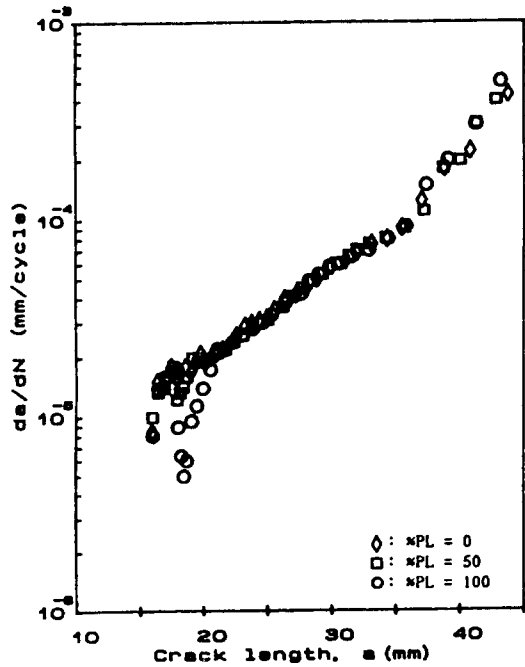


Fig.5 Fatigue crack growth rate vs. length for aluminum (A 3203) in single overload test.

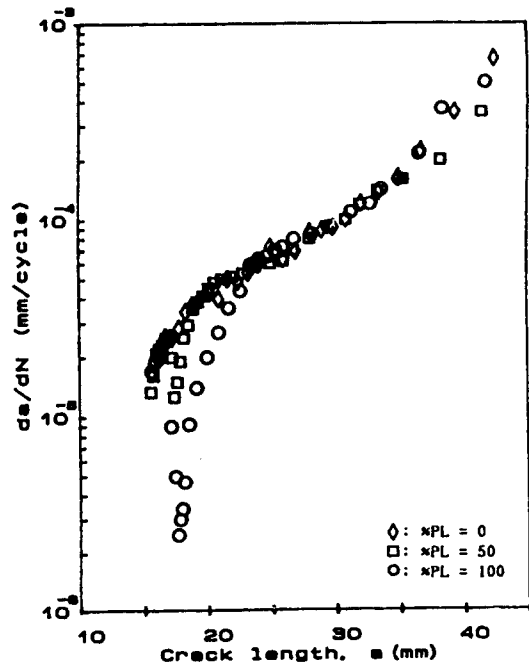


Fig.6 Fatigue crack growth rate vs. length for stainless steel (SUS 316) in single overload test.

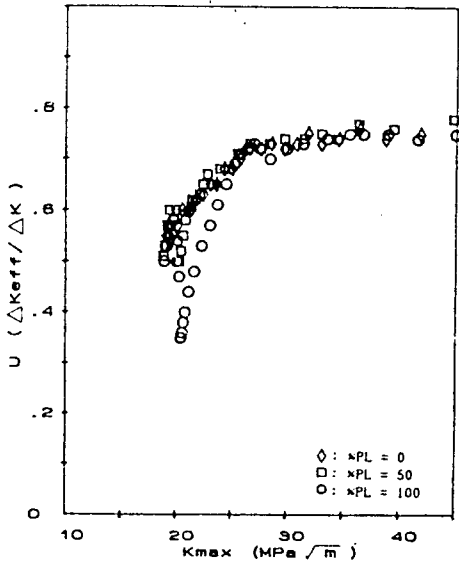


Fig. 7 Crack opening ratio vs. maximum stress intensity factor for stainless steel (SUS 316) in single overload test.

서 다소 차이가 있겠으나 본 연구에서는 소성영역( $W_o$ )의 크기를 Irwin의 모델을 이용하여  $W_o = 2r_o = 1/\beta\pi(K_{max}/\sigma_o)^2$ 로 계산하였다. 여기서, 평면변형의 경우에는  $\beta = 1$ 이며 평면변형의 경우에는  $\beta = 3$ 이다. 알루미늄(A 3203), 중탄소강(S 45 C), 열강압연강(SS 41) 및 스테인레스강(SUS 316)에 대하여 계산된 소성영역의 크기( $W_o$ )와 단일과대하중의 영향을 받는 영역의 길이( $a_o$ )와의 비( $a_o/W_o$ )는 Table 6과 같다. 단일과대하중에 의해 영향을 받은 균열성장길이( $a_o$ )와 계산된 소성영역의 크기와의 ( $a_o/W_o$ )는 과대하중비와 재료에 따라 다르게 나타났는데 과대하중비가 50%인 경우보다 100%

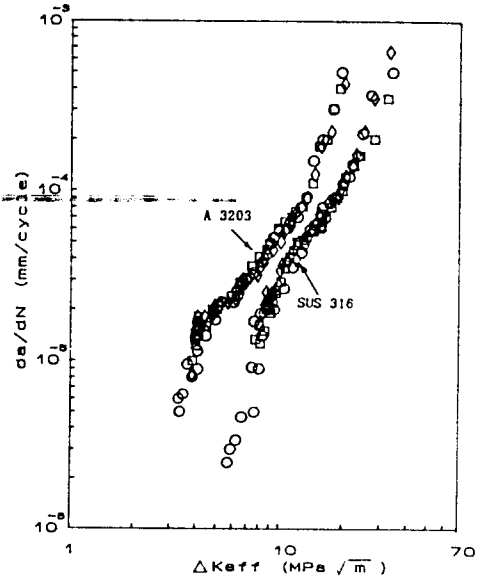


Fig. 8 Fatigue crack growth rate vs. effective stress intensity factor range for aluminum (A 3203) & stainless steel (SUS 316).

인 경우가 크게 나타났다. 또한,  $a_o/W_o$ 를 재료의 가공경화지수와 비교 하였을때도 가공경화지수가 작은 알루미늄( $n = 0.075$ ) 보다 가공경화지수가 큰 스테인레스강( $n = 0.42$ )의 경우가 훨씬 크게 나타났다.

Fig. 9에는  $a_o/W_o$ 를 가공경화지수 ( $n$ )와의 관계로 정리하였는데 가공경화지수와 고대하중비가 클수록  $a_o/W_o$ 는 증가함을 보인다. 기본피로시험(constant stress amplitude test)과 단일 과대하중 시험을 균열길이 ( $a$ )와 하중반복회수 ( $N$ )의 관계로 Fig. 10에 도식적으로 나타내었다. 여기서,  $N_o$ 는 균열전과 지연동안에 작용된 하중반복회수이며,  $N^*$ 는 단일과대하중에 의해 영향

Table 6 Results of single overload test

Materials	Factors	%PL	K <sub>max</sub> (MPa√m)	K <sub>min</sub> (MPa√m)	N <sub>o</sub> (cycle)	N* (cycle)	a <sub>o</sub> (cycle)	W <sub>o</sub> 2r <sub>o</sub> (mm)	W <sub>o</sub> /W <sub>i</sub> (mm)	N <sub>o</sub> /N*	n
Aluminum (A 3203)		50	7.29	12.75	73900	59200	1.05	4.12	0.25	1.25	0.075
		100	7.30	16.42	305500	161300	3.00	6.84	0.44	1.89	
Steel (S 45 C)		50	14.59	25.53	86700	75400	0.91	1.80	0.51	1.16	0.20
		100	14.64	32.94	248500	118400	1.85	2.98	0.62	2.10	
Steel (SS 41)		50	14.34	25.10	87200	69700	1.20	2.22	0.55	1.25	0.25
		100	14.32	32.23	418000	174300	3.29	3.68	0.89	2.40	
Stainless steel(SUS316)		50	16.21	28.37	87500	62500	1.86	2.67	0.70	1.40	0.42
		100	16.09	36.22	525000	159000	6.10	4.35	1.40	3.30	

을 받은 균열성장길이( $a_0$ )에 상응하는 기본실험 때의 하중반복회수이다. 각 재료에 대한 균열지연비 ( $N_d/N^*$ )를 조사하여 Table 6에 나타내었으며, 균열지연비 ( $N/N^*$ )는 재료의 가공경화지수( $n$ )와 과대하중비(%PL)에 따라 다르다. 즉, 균열지연비 ( $N_d/N^*$ )는 과대하중비가 50%인 경우보다 100%인 경우가 크며, 가공경화지수가 작은 알루미늄( $n=0.075$ ) 보다 가공경화지수가 큰 스테인레스강( $n=0.42$ )의 경우가 큼을 알 수 있다.

단일과대하중시험 결과 균열지연비 ( $N_d/N^*$ )와 과대하중비(%PL) 및 가공경화 지수( $n$ ) 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$\text{즉, } N_d/N^* = \exp\{PL \cdot \{PL \cdot A(n) + B(n)\}\}$$

여기서,  $A(n) = \alpha n + \beta$ ,  $B(n) = \alpha + \delta$  및  $PL = \%PL/100$ 이며 본 연구에 사용된 네가지 재료에 대하여 공통으로  $\alpha = 0.78$ ,  $\beta = 0.54$ ,  $\delta = 0.58$  및  $\delta = -0.01$ 이다.

Fig. 11에는 균열지연비( $N_d/N^*$ )를 가공경화지수( $n$ )와 과대하중비(%PL)의 관계로 나타내었는데 이중 실선은 위의 실험식에 의한 것으로 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.

본 연구에 사용한 재료외에 기계적 성질이 다른 재료 즉, 알루미늄(A 6061), 기계구조용강(SM20C) 및 스테인레스강(SUS304)에 대한 단일과대하중 실험에서도 위의 실험식을 적용하였을 때의 잘 일치함을 보였다<sup>9</sup>.

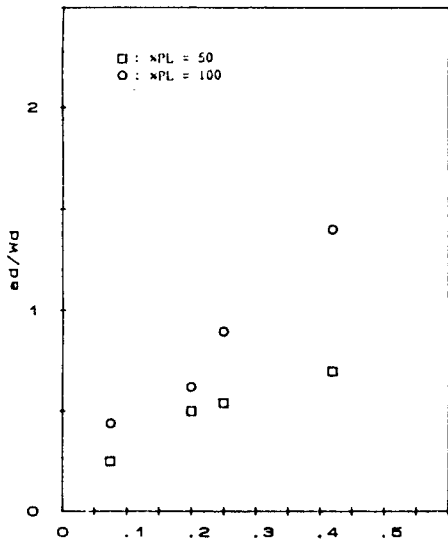


Fig. 9 Ratio of total retarded crack distance to plastic zone size vs. strain hardening exponents in single overload test.

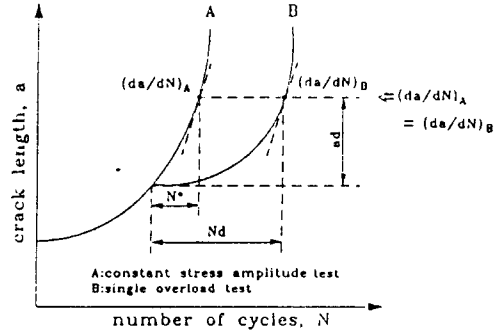


Fig. 10 Schematic illustration of crack retardation after single overload test.

$N_d$ : Number of cycles for retarded crack growth

$N^*$ : Corresponding applied cycles to generate an identical crack increment with the crack increment during crack retardation

$ad$ : Crack growth increment influenced by a single overloading

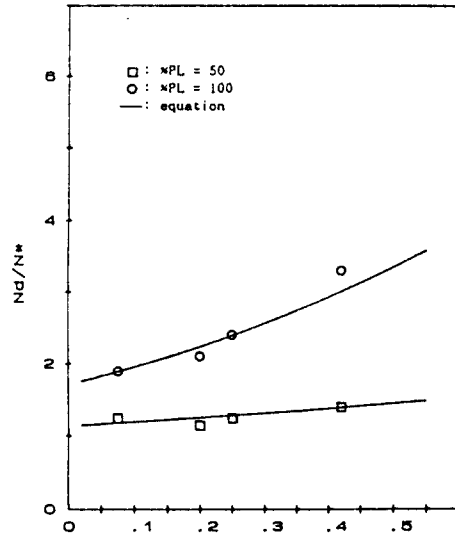


Fig. 11 Retardation ratio ( $N_d/N^*$ ) vs. strain hardening exponents in single overload test.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기계적 성질이 상이한 재료(알루미늄, 연강, 중탄소강, 황동 및 스테인레스강)를 택하여, 균열선단의 소성역의 역학적 조건을 변화 시키는 하중진폭 제어시험 [기본파로시험  $\Delta K$  증가파로시험),  $\Delta K$  감소



피로시험, 단일과대하중시험)하였고, 이 결과를 토대로 재료의 기계적 성질 가운데 소성영역의 특성을 잘 나타내는 가공경화지수와 피로균열전파거동과의 관련성을 규명하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 일정응력진폭시험( $\Delta K$  증가피로시험)과  $\Delta K$  감소 시험의 결과를  $da/dN-\Delta K$ 로 정리하여 재료별로 나타내었을 때 동일 재료의 같은  $\Delta K$ 값에 대하여서도 피로균열 전파속도가 다르게 나타나며, 피로균열전파특성을 잘 나타내는 균열성장 안정구역에서 Paris의 식( $da/dN=C(\Delta K)^m$ )의 재료상수에 대하여 검토한 결과  $\Delta K$  증가 시험 시의  $m$ 의 값과  $\Delta K$  감소시험때의  $m'$ 의 비율 ( $m'/m$ )은 가공화지수 ( $n$ )와 밀접한 관계가 있음을 확인하였다. 즉,  $n < 0.1$ 인 알루미늄( $n=0.06$ )에 있어서는  $m'/m$ 의 값이 1보다 크게,  $0.1 < n < 0.2$ 인 압연강( $n=0.10$ ), 황동( $n=0.15$ )에서는 1에 가까운 값으로 거의 변화를 보이지 않았으며  $n > 0.2$ 인 스테인레스강( $n=0.49$ )에 있어서는  $m'/m$ 의 값이 1보다 작게 나타났다.

2. 기본 실험에서의 Forman의 식을 수정하여  $\Delta K$  감소피로시험의 균열 안정성장 구간에 대하여 적용되는 실험식[( $da/dN$ ) $_{n,n}$ ]을 다음과 같이 제안하였다. 즉, ( $da/dN$ ) $_{n,n} = (\mu n + \lambda) B \Delta K_{II} / [(1-R) K_{II} - \Delta K]$  여기서,  $n$ 은 가공경화지수이고, 상수  $\mu$ 와  $\lambda$ 는 본 연구에서 사용한 네 가지 재료(알루미늄(A1060), 연강(SS34), 황동(BsSiB) and 스테인레스강(SUS304)에 대하여 동일하게  $\mu = -0.25$ ,  $\lambda = 0.55$ 이며 피로균열 안정성장구간에서의 실험결과와 잘 일치하였다.

3. 제하탄성 컴플라이언스법에 의한 단일과대하중 실험에서 피로균열 지연효과는 균열달힘에 기인함을 확인하였고 가공경화지수와 과대하중비가 클수록 균열달힘현상이 크게 나타났다. 단일과대하중에 의해 영향을 받는 지연영역( $a_{II}$ )과 계산된 소성영역( $W_{II} = 2r_{II}$ )을 비교하여 보면 피로균열 안정성장구역의 초기영역 및 중간영역의  $a_{II}/W_{II}$ 는 가공경화지수가 클수록 크게 나타났다. 균열전파 지연동안에 작용된 하중반복회수( $N_{II}$ )와 단일과대하중에 의해 영향을 받은 균열성장길이( $a_{II}$ )에 상응하는 기본실험 때의 하중반복회수( $N^*$ )와의 비를 균열지연비( $N_{II}/N^*$ )라고 하면 균열안정성장 초기영역의 단일과 대하중시험 결과 균열지연비( $N_{II}/N^*$ )와 과대하중비(%PL) 및 가공경화지수( $n$ ) 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립함을 규명하였다. 즉,  $N_{II}/N^* = \exp\{PL \cdot \{PL \cdot A(n) + B(n)\}$  여기서  $A(n) = \alpha n + \beta$ ,  $B(n) = \lambda n + \delta$  및  $PL$

$= \%PL/100$ 이며 본 연구에서 사용한 네 가지 재료에 대하여 동일하게  $\alpha = 0.78$ ,  $\beta = 0.54$ ,  $\lambda = 0.58$  및  $\delta = -0.01$  이었다.

### 참고문헌

- 1) Brown, R. D., Eng. Frac. Mech., Vol. 10, pp. 409, 1978.
- 2) Gemma, A. E., Allison, D. E. and Hopkins, S. W., Eng. Frac. Mech., Vol. 9, pp. 647, 1977.
- 3) William, F. B. and Srawley, J. E., "Plain Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials", ASTM STP 410, pp. 11.
- 4) Kikukawa, M., Jono, M., Tanaca, K., Kondo, Y. and Murata, Y., "Use of Mini-Computer for Accurate Automatic Measurement in Fatigue Test", J. Soc. Mater. Sci. Japan 29, pp. 1240~1246, 1980.
- 5) Von Euw, E. F. J., Hertzberg, R. W., and Robberts, R., "Delay Effects in Fatigue Crack Propagation", ASTM STP 513 pp. 230~242, 1972.
- 6) Mills, W. J., Hertzberg, R. W. and Roberts, R., "Fatigue Crack Growth and Life Predictions in Man-Ten Steel Subject to Single and Intermittent Tensile Overloads." ASTM STP 637, pp. 192~208, 1977.
- 7) Garrette, G. G. and Knott, J. F., "On The Effect of Crack Closure on The Rate of Fatigue Crack Propagation", Int. Jour. of Fract., Vol. 13, pp. 101~104, 1977.
- 8) Ritchie, R. O. and Suresh, S., "Some Consideration on Fatigue Crack Closure at Near Threshold Stress Intensities due to Fracture Surface Morphology", Met. Trans., Vol. 13A, pp. 937~940, 1982.
- 9) Kim, S. C. and Kang, D. M., "Strain Hardening Exponent on fatigue Fatigue Crack Propagation", Proceedings of the Fourth International Conference on Fatigue and Fatigue Thresholds, pp. 111~116, 1990.