

단일과대하중에 의한 피로균열전파의 지연거동 Retardation of Fatigue Crack Propagation by Single Overloading

김 상 철* 함 경 춘** 강 동 명*
Sang-Chul Kim* Kyoung-Chun Ham** Dong-Myeong Kang*

ABSTRACT

Effects of strain hardening exponents on the retardation behavior of fatigue crack propagation are experimentally investigated. The retardation of fatigue crack propagation seems to be induced by the crack closure at crack tip. The phenomenon of crack closure becomes remarkable with the increment of strain hardening exponent and magnitude of percent peak load. The ratio of crack growth increment (a_d/W_d) is influenced by a single overloading (a_d) and estimated plastic zone size ($W_d=2r_p$) is increased according with the increasing of strain hardening exponents. The number of retarded crack growth cycles were (N_d) decreased as the baseline stress intensity factor range (ΔK_b) was increased.

Within the limitation of these experimental results obtained under the single overload, an empirical relation between crack retardation ratio (N_d/N^*), strain hardening exponent (n) and percent peak load (%PL) has been proposed as ;

$$N_d/N^* = \exp [PL \cdot \{PL \cdot A(n) + B(n)\}]$$

where, $A(n) = \alpha n + \beta$, $B(n) = \gamma n + \delta$, $PL = \%PL/100$ and $\alpha = 0.78$, $\beta = 0.54$, $\gamma = 0.58$ and $\delta = -0.01$. It is interesting to note that all these constants are identical for materials such as aluminum(A3203), steel(S45C), steel(SS41) and stainless steel(SUS316) used in this experimental study.

I. 서 론

공업의 발전과 더불어 산업구조물의 대형화는 물론 새로운 최적 설계 개념의 도입 및 신소재의 개발과 기

* 正會員 : 인하대학교 기계공학과

** 正會員 : 인하공전대 기계설계과

계 제품의 경량화 추세에도 불구하고 원자력 구조물의 안전사고, 대형 교량 및 항공기의 파괴사고 등이 끊이지 않고 있으며, 이들 사고의 대부분은 그 원인이 피로파괴에 의한 사고이고, 따라서, 피로파괴에 대한 안전설계의 중요성이 더욱 요구된다. 실제의 기계구조물들은 장기간에 걸쳐 복잡하게 변동하는 하중의 영향을 받으며 일반적으로 행하여지는 기본 피로시험인 일정응력진폭시험의 결과를 그대로 적용할 수 없다. 그러므로 변동하중하에서의 피로균열전파거동은 부하응력 조건에 따른 검토가 선행 되어져야 한다.

변동하중의 기본 형태로서 단일과대하중 또는 반복과대하중^{1~5)}등의 다양한 시험에 의한 피로균열전파거동의 연구가 시도되고 있으나 시험에 사용된 재료에 따라 피로균열전파거동이 다르게 나타나며 또한 실험방법도 일정하지 않아 이 분야에 대한 체계적인 연구가 요망된다.

본 연구에서는 피로균열 비선형거동의 미시기구가운데 균열선단의 소성역의 가공경화 현상을 과대하중에 의해 영향을 받는 지연영역과 계산된 소성영역 및 재료의 가공경화지수와 관련지어 연구하였다.

II. 실험절차

재료는 기계적 성질이 서로 다른 두께가 6mm인 중탄소강(S45C), 열간압연강(SS41)과 두께가 5mm인 알루미늄(A3203), 스테인레스강(SUS316)을 택하였으며, Table 1에는 재료의 기계적 성질을 각각 나타내었다. 피로시험편은 균열단합 측정을 위해 배면게이지 부착이 용이한 폭(W)이 72mm인 CT (compact tension) 시험편이며 CT 시험편에 적용되는 응력확대

계수(K)의 식은 다음과 같다.

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

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

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

균열단합량은 피로 시험편 배면에 스트레인 게이지를 부착하고 감산회로(substract circuit)를 통하여 측정하였고 피로시험을 효과적으로 수행하기 위하여 A/D-D/A변환기를 설치하였다¹⁾. 단일 과대하중 시험을 행하기 전 상호 비교 검토를 위하여 응력진폭을 일정하게 기본피로 시험을 행하였으며 이때 응력비는 0.2, 주파수 및 파형은 20Hz의 정현파로 하였다. 단일 과대하중시험에서의 과대하중비는 다음과 같이 표시된다. 즉, %PL = $[(K_{ov,max} - K_{max}) / \Delta K_b] \times 100$ 이다. 과대하중비(%PL)는 50%와 100% (frequency ≈ 0.05 Hz)로 하였으며, 단일과대하중은 기본피로 시험에서 구한 피로균열 안정성장영역을 피로균열성장속도를 기준으로 초기(first stage), 중간(second stage) 및 후기(third stage)의 세구간으로 나누어 작용시켰다. 세구간으로 나누어 행한 단일 과대하중시험에서 구간별 피로균열성장속도는 재료마다 다소 차이가 있지만 기본피로시험의 결과를 토대로 피로균열성장 초기영역의 피로균열성장속도는 $1 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-5}$ mm/cycle, 피로균열성장 중간영역의 피로균열성장속도는 $4 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-5}$ mm/cycle, 피로균열성장 후기영역은 $8 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4}$ mm/cycle의 범위로 하였다. 단일과대하중시험의 하중조건은 Table 2와 같다.

Table 1 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
Materials	E(Mpa)	$\sigma_{ys} / \sigma'_{ys}$ (MPa)	σ_u / σ'_u (MPa)	n/n'
Aluminum(A3203)	6.00×10^4	120/110	140/130	0.075/0.057
Steel(S45C)	2.12×10^5	340/360	625/650	0.20/0.17
Steel(SS41)	2.10×10^5	300/325	430/445	0.25/0.28
Stainless steel (SUS316)	2.05×10^5	325/370	625/700	0.42/0.35

Table 2 Load conditions in single overload test.

Load conditions Materials	Constant load amp.		Single overload		Unit : KN %Peak load (%PL)
	P _{max}	P _{min}	P _{ov. max}	P _{ov. min}	
Aluminum (A3203)	2.45	0.49	3.43	0.49	50
			4.41	0.49	100
Steel (S45C)	6.13	1.23	8.58	1.23	50
			11.03	1.23	100
Steel (SS41)	6.13	1.23	8.58	1.23	50
			11.03	1.23	100
Stainless steel (SUS316)	5.64	1.13	7.89	1.13	50
			10.15	1.13	100

III. 실험결과 및 고찰

III-1. 균열안정성장 초기영역에서의 실험

이 시험의 결과를 피로균열 성장속도(da/dN)와 균열길이(a)로 정리하여 Fig. 1에 알루미늄, Fig. 2에 스테인레스강을 대표적으로 각각 나타내었다. 각 재료

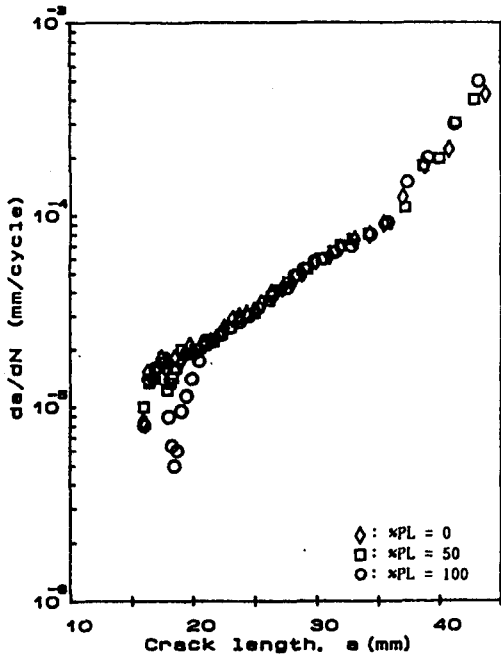


Fig. 1 Fatigue crack growth rate vs. crack length for aluminum(A3203) in single overload test at the first stage.

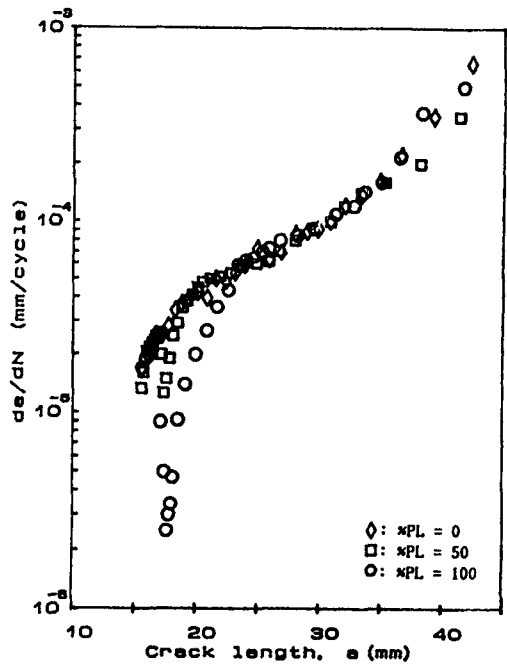


Fig. 2 Fatigue crack growth rate vs. crack length for stainless steel(SUS316) in single overload test at the first stage.

에 대한 이들 그림을 보면 과대하중비가 100%인 경우가 50%인 경우보다 지연효과가 크며 재료마다 지연효과가 서로 다를 수 있다. 단일과대하중이 작용한 후의 피로균열전파속도의 지연효과는 재료의 가공경화지수가 큰 스테인레스강(n=0.42)이 가장 크게 나타났고 가공경화지수가 작은 알루미늄(n=0.075)이 가장 작게 나타났다. 단일과대하중후 정상적인 속도로

돌아왔을 때까지 균열지연 영역을 보면 가공경화지수가 큰 스테인레스강($n=0.42$)이 역시 가장 크며 과대하중비와 가공경화지수가 커질수록 피로균열전파의 지연 효과가 커짐을 알 수 있다.

피로균열지연거동을 균열단합현상과 관련시켜 구명하기 위하여 제하탄성 컴플라이언스법¹⁾으로 균열열림율(U)을 구하였고 이 균열열림율을 최대응력확대계수(K_{max})와의 관계로 나타내었는데 그중 대표적으로 스테인레스강의 경우를 Fig. 3에 보였다. 각 재료에 대한 이들 그림을 보면 균열열림율(U)은 과대하중비가 100%인 경우가 50%보다 작게 나타났다. 즉, 과대하중비가 클수록 균열단합현상이 커진다. 균열단합현상을 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.

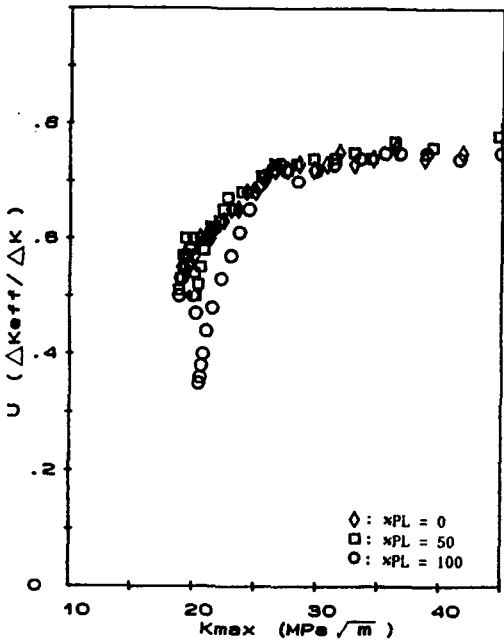


Fig. 3 Crack opening ratio vs. maximum stress intensity factor for stainless steel(SUS 316) in single overload test at the first stage.

피로 균열 성장속도(da/dN)를 유효응력확대계수 [$\Delta K_{eff}(=U \cdot \Delta K)$]와의 관계로 Fig. 4에 나타내었

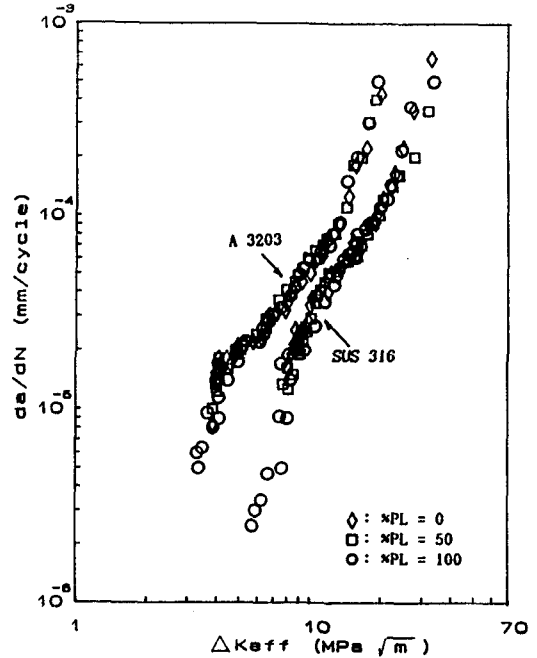


Fig. 4 Fatigue crack growth rate vs. effective stress intensity factor range for aluminum(A 3203) & stainless steel(SUS 316) in single overload test at the first stage.

다. 피로균열성장속도를 이들 그림에서의 같이 유효응력확대계수로 정리하면 과대하중비에 관계없이 각 재료에 마다 실험치가 하나의 선상에 놓이게 된다. 이것은 균열지연거동이 주로 균열단합에 기인함을 뜻한다. 이상의 결과에서 피로균열지연거동은 균열단합현상에 기인하고 균열단합현상은 재료의 가공경화지수와 매우 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있다.

단일과대하중에 의해 영향을 받은 균열성장길이(a_d)를 단일 과대하중에 의한 소성영역과 관련시켜 보면, 평가방법에 따라서 다소 차이가 있겠으나 본 연구에서는 소성영역(W_d)의 크기를 Irwin의 모델을 이용하여 $W_d=2r_y=1/\beta \pi (K_{max}/\sigma_{ys})^2$ 로 계산하였다. 여기서, 평면응력의 경우에는 $\beta=1$ 이며 평면변형의 경우에는 $\beta=3$ 이다.

알루미늄(A 3203), 중탄소강(S 45 C), 열간압연강(SS 41) 및 스테인레스강(SUS 316)에 대하여 계산된 소성영역의 크기(W_d)와 단일과대하중의 영향을 받는 영역의 길이(a_d)와의 비(a_d/W_d)는 Table 3과 같

Table 3 Results of single overload test(first stage).

Materials	Factors %PL	ΔK_b ($MPa\sqrt{m}$)	$K_{ov,max}$ ($MPa\sqrt{m}$)	N_d (cycle)	N^* (cycle)	a_d (mm)	$W_d=2r_y$ (mm)	a_d/W_d	N_d/N^*	n
Aluminum (A3203)	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 (S45C)	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 (SS41)	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	

다.

단일과대하중에 의해 영향을 받은 균열성장길이 (a_d)와 계산된 소성영역의 크기와의 비(a_d/W_d)는 과대하중비와 재료에 따라 다르게 나타났는데 과대하중비가 50%인 경우보다 100%인 경우가 크게 나타났다. 또한, a_d/W_d 를 재료의 가공경화지수와 비교하였을 때 가공경화지수가 작은 알루미늄($n=0.075$)보다 가공경화지수가 큰 스테인레스강($n=0.42$)의 경우가 훨씬 크게 나타났다. Fig. 5에는 기본파로시험(constant stress amplitude test)과 단일 과대하중 시험을 균열길이(a)와 하중반복회수(N)의 관계를 도식적으로 나타내었다. 여기서, N_d 는 균열전파 지연동안에 작용된 하

중반복회수이며, N^* 는 단일과대하중에 의해 영향을 받은 균열성장길이(a_d)에 상응하는 기본실험 때의 하중반복 회수이다.

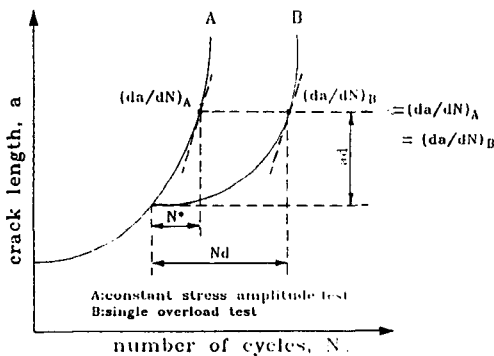
각 재료에 대한 균열지연비(N_d/N^*)를 조사하여 Table 3에 나타내었으며 균열지연비(N_d/N^*)는 재료의 가공경화지수(n)와 과대하중비(%PL)에 따라 다르다. 즉, 균열지연비(N_d/N^*)는 과대하중비가 50%인 경우보다 100%인 경우가 크며, 가공경화지수가 작은 알루미늄($n=0.075$)보다 가공경화지수가 큰 스테인레스강($n=0.42$)의 경우가 큼을 알 수 있다.

III-2. 균열안정성장 중간영역에서의 실험

중간영역에서의 실험 결과를 피로 균열 성장속도 (da/dN)와 균열 길이(a)로 정리하였을 때 균열지연현상은 초기영역에서의 실험과 같이 과대하중비가 클수록 크며, 가공경화지수가 큰 스테인레스강($n=0.42$)이 피로균열전파속도의 지연효과가 가장 크게 나타났고 가공경화지수가 작은 알루미늄($n=0.075$)이 지연효과가 가장 작게 나타났다.

단일과대하중 후 정상적인 속도로 돌아왔을 때까지 지연된 영역을 보면 가공경화지수가 클수록 균열지연 영역이 커지는 경향은 초기영역에서의 단일과대하중 시험의 결과와 같으나 균열지연영역이 초기영역의 결과보다 크게 나타난 것은 과대응력확대계수($K_{ov,max}$)가 초기영역에서 보다 크기 때문이다.

중간영역에서의 단일과대하중시험을 균열 열림을 (U)과 최대 응력확대계수(K_{max})와의 관계로 나타내면 과대하중비가 클수록 균열단합이 크며, 재료의 가공경화지수와 비교하였을 때 가공경화지수가 가장 큰



- 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
- a_d : Crack growth increment influenced by a single overloading

Fig. 5 Schematic illustration of crack retardation after single overload test.

Table 4 Results of single overload test(second stage).

Factors Materials	%PL	ΔK_b (MPa \sqrt{m})	$K_{ov,max}$ (MPa \sqrt{m})	N_d (cycle)	N^* (cycle)	a_d (mm)	$W_d=2r_y$ (mm)	a_d/W_d	N_d/N^*	n
Aluminum (A3203)	50	9.87	17.28	54300	45200	1.90	7.58	0.25	1.20	0.075
	100	9.86	22.18	205000	102500	5.05	12.48	0.40	2.00	
Steel (S45C)	50	19.69	34.46	50000	41700	1.72	3.28	0.52	1.20	0.20
	100	19.77	44.49	190000	82300	3.80	5.46	0.70	2.31	
Steel (SS41)	50	19.28	33.75	64000	48600	2.55	4.02	0.63	1.32	0.25
	100	19.41	43.68	279000	105000	7.50	6.76	1.11	2.66	
Stainless steel (SUS316)	50	21.49	37.61	64900	43300	3.04	4.68	0.65	1.50	0.42
	100	21.76	48.98	320500	103500	9.95	7.95	1.25	3.10	

스테인레스강($n=0.42$)의 경우가 균열단합이 가장 크게 나타났으며 열간압연강($n=0.25$), 중탄소강($n=0.20$) 및 알루미늄($n=0.075$)의 순으로 나타났다.

피로균열 성장속도(da/dN)를 $\Delta K_{eff}(=U \cdot \Delta K)$ 로 정리하면 과대하중비에 관계없이 각 재료에 따라 실험치가 하나의 선상에 정리되는데 이 영역에서 피로균열 지연저동 또한 균열단합과 관계가 있음을 알 수 있다.

중간영역에서 계산된 소성영역의 크기($W_d=2r_y$)와 단일 과대하중에 의해서 영향을 받은 균열성장길이(a_d) 및 그 비(a_d/W_d)는 Table 4와 같고, 과대하중비가 50%인 경우보다 100%인 경우가 크게 나타났다.

a_d/W_d 를 재료의 가공경화지수와 비교하였을 때 가공경화지수가 작은 알루미늄($n=0.075$)보다 가공경화지수가 큰 스테인레스강($n=0.42$)의 경우가 훨씬 크며, 그 수치는 초기영역에서의 단일과대하중의 실험결과와 비슷하게 나타났다. 중간영역에서의 단일과대하중시험 결과와 기본실험의 결과를 균열길이(a)와 하중반복회수(N)의 관계로 비교하여 균열전파 지연동안에 작용된 하중반복회수(N_d), 단일과대하중에 의해 영향을 받은 균열성장길이(a_d)에 상응하는 기본실험 때의 하중반복회수(N^*) 및 균열지연비(N_d/N^*)를 Table 4에 나타내었는데 가공경화지수가 작은 알루미늄($n=0.075$)보다 가공경화지수가 큰 스테인레스강($n=0.42$)의 경우가 크며 그 수치는 초기 영역에서의 단일과대하중의 실험결과와 비슷하게 나타났다.

III-3. 균열안정성장 후기영역에서의 실험

이 시험의 결과를 피로균열 성장속도(da/dN)와 균

열길이(a)로 나타내었을 때도 균열지연영역의 크기는 과대하중비와 가공경화지수가 클수록 앞의 두 영역에서 보다 현저히 크게 나타났으며 이것은 후기영역의 과대응력확대계수($K_{ov,max}$)가 초기영역과 중간영역에서의 과대응력확대계수보다 크기 때문이다. 또한, 균열열림을(U)을 K_{max} 과의 관계에서도 역시 과대하중비가 클수록 균열단합이 크고 재료의 가공경화지수와 비교하였을 때 가공경화지수가 가장 큰 스테인레스강($n=0.42$)의 경우가 균열단합이 가장 크게 나타났으며 열간압연강($n=0.25$), 중탄소강($n=0.20$) 및 알루미늄($n=0.075$)의 순으로 나타났다.

피로균열성장속도(da/dN)를 유효응력확대 계수 [$\Delta K_{eff}(=U \cdot \Delta K)$]로 정리하였을 때 피로균열성장속도는 과대하중비에 관계없이 앞의 두 영역에서의 단일과대하중시험과 같이 하나의 선상으로 놓인다. 후기영역에서의 단일과대하중시험에 의한 피로 균열지연저동 또한 균열단합과 관계가 있음을 알 수 있다. 후기영역에서 단일과대 하중시험의 계산된 소성영역의 크기(W_d)와 단일과대하중에 의해서 영향을 받은 균열 성장길이(a_d) 및 그 비(a_d/W_d)는 Table 5에 나타내었는데 가공경화지수와 과대하중비에 관계없이 나타났다. 이것은 균열전전에 불안정 성장구역으로 접어들면서 균열열림이 커져 지연영역의 크기가 계산된 소성역의 크기에 비하여 줄어들기 때문이다.

균열전파지연동안에 작용된 하중반복회수(N_d)와 단일과대하중에 의해 영향을 받은 균열성장길이(a_d)에 상응하는 기본실험 때의 하중반복회수(N^*) 및 균열지연비(N_d/N^*)와의 관계는 Table 5에 나타내었는데 균열지연비(N_d/N^*)는 가공경화지수가 클수록 크게

Table 5 Results of single overload test(third stage).

Factors Materials	%PL	ΔK_b (MPa \sqrt{m})	$K_{cov,max}$ (MPa \sqrt{m})	N_d (cycle)	N^* (cycle)	a_d (mm)	$W_d=2r_y$ (mm)	a_d/W_d	N_d/N^*	n
Aluminum (A3203)	50	13.66	23.91	39700	31100	3.50	14.50	0.24	1.28	0.075
	100	13.68	30.79	103000	49500	7.30	24.06	0.30	2.08	
Steel (S45C)	50	25.84	45.23	40500	31200	3.70	5.64	0.66	1.30	0.20
	100	25.97	58.44	127000	41000	6.50	9.40	0.69	3.10	
Steel (SS41)	50	25.88	45.30	40000	24900	4.50	7.26	0.62	1.61	0.25
	100	27.93	62.86	147000	33000	9.30	13.98	0.67	4.45	
Stainless steel (SUS316)	50	30.44	53.27	42500	27300	5.30	9.40	0.56	1.56	0.42
	100	30.32	68.22	168700	31000	8.93	15.42	0.58	5.44	

나타나며 과대하중비(%PL)가 100인 경우에는 가공경화지수가 클수록 균열지연비(N_d/N^*)가 크게 증가함을 보이는데 균열이 불안정 성장구간으로 진전함에 따라 균열지연구간에 상응하는 기본실험 때의 하중반복회수가 상대적으로 적기 때문이다.

IV. 단일과대하중에 의해 지연된 피로균열전파식의 제안

피로균열 안정성장구간을 초기영역과 중간영역 및 후기영역으로 나누어서 행한 단일과대하중시험에서 제한탄성 컴플라이언스법을 이용하여 균열열림량(U)을 측정하였을 때 가공경화지수가 큰 스테인레스강(n=0.42)의 경우는 균열단합이 크고 가공경화지수가 작은 알루미늄(n=0.075)의 경우는 균열단합이 작게 나타났으며, 균열 단합효과는 과대하중비가 클수록 크게 나타났다. 이상의 결과로서 균열전파지연은 주로 균열단합에 기인하며 가공경화지수는 균열단합과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

각 재료에 대하여 단일과대하중에 의해서 영향을 받은 균열성장길이(a_d)와 계산된 소성영역($W_d=2r_y$)을 비교하기 위해 Fig. 6에서와 같이 단일과대하중에 의해서 영향을 받은 균열성장길이와 계산된 소성 영역비(a_d/W_d)를 재료의 가공경화지수와 과대하중비와의 관계로 나타내었다. a_d/W_d 는 과대하중비가 50% 보다 100%인 경우가 크고, 가공경화지수가 작은 알루미늄(n=0.075)보다 가공경화지수가 큰 스테인레스강(n=0.42)이 크게 나타났다. 또한, 피로균열 안정성장 초기영역의 단일 과대하중실험에서 a_d/W_d 는 중간 영

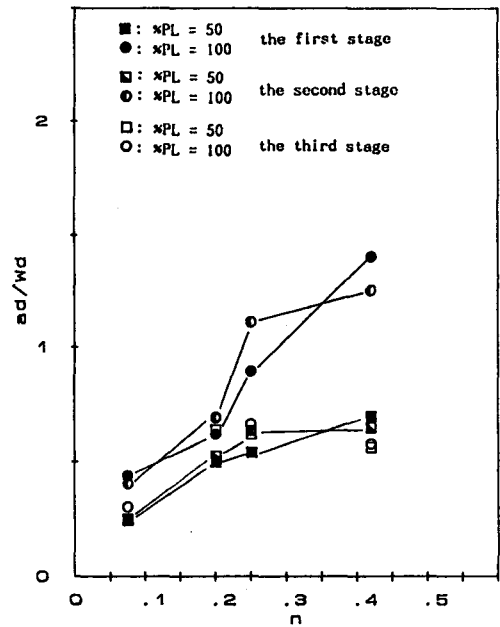


Fig. 6 Ratio of total retarded crack distance to plastic zone size vs. strain hardening exponents in single overload test.

역에서의 a_d/W_d 와 거의 같은 값을 보였다.

기준응력확대계수 폭(ΔK_b)과 균열전파 지연동안에 작용된 하중반복회수(N_d)의 관계를 살펴보면 기준응력확대계수폭(ΔK_b)이 증가할수록 단일과대하중후의 균열전파 지연동안에 작용된 하중반복회수(N_d)는 감소함을 보이는데 가공경화지수와 과대하중비가 클수록 감소율이 커짐을 볼 수 있으며 이는 Chanani⁽²⁾, Lee⁽³⁾ 및 Thomas⁽⁴⁾의 시험결과와 같은

양상이다.

각 재료에 대한 기준응력확대계수폭(ΔK_b)과 균열 전파지연동안에 작용된 하중반복회수(N_d)의 관계는 알루미늄(A 3203)은 Fig. 7, 스테인레스강(SUS 316)은 Fig. 8에 대표적으로 각각 나타내었다.

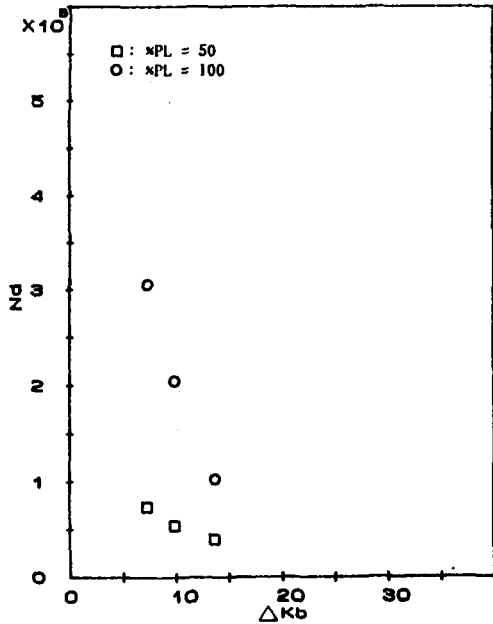


Fig. 7 Number of retarded cycles vs. baseline stress intensity factor range for aluminum(A 3203) in single overload test.

균열전파지연동안에 작용된 하중반복회수(N_d)와 단일과대하중에 의해 영향을 받은 균열성장길이(a_d)에 상응하는 기본실험 때의 하중반복회수(N^*)와의 비를 균열지연비(N_d/N^*)라고 하면 균열안정성장 초기영역과 중간영역의 단일과대하중 시험결과 균열지연비(N_d/N^*)와 과대하중비(%PL) 및 가공경화지수(n) 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

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

여기서, $A(n) = \alpha n + \beta$, $B(n) = \gamma n + \delta$ 및 $PL = \%PL/100$ 이며 본 연구에 사용된 네가지 재료에 대하여 공통으로 $\alpha = 0.78$, $\beta = 0.54$, $\gamma = 0.58$ 및 $\delta = -0.01$ 이다. Fig. 9에는 초기영역, 중간영역 및 후기영역에서의 균열지연비(N_d/N^*)를 가공경화지수(n)와 과대하중비(%PL)의 관계로 나타내었는데 이중 실선은 위의 실험식에 의한 것으로 초기영역과 중

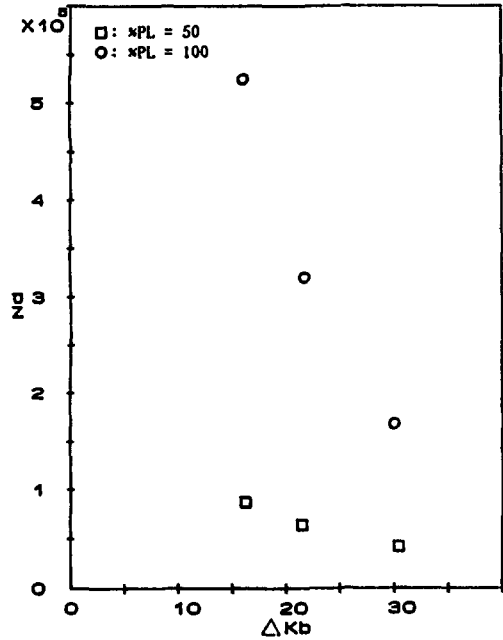


Fig. 8 Number of retarded cycles vs. baseline stress intensity factor range for stainless steel(SUS316) in single overload test.

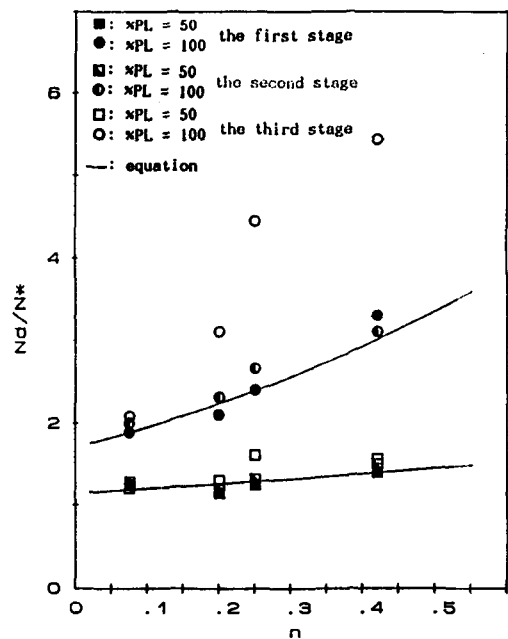


Fig. 9 Retardation ratio (N_d/N^*) vs. strain hardening exponents in single overload test.

간영역 및 후기영역의 과대하중비(%PL)가 50%인 조건까지는 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 그러나 후기영역의 과대하중비가 100%일 때 차이가 난 것은 균열 지연구간에 상응하는 기본실험 때의 균열진전이 불안정 성장구역으로 접어들어 피로균열성장속도가 급격히 증가함에 따라 하중반복회수(N^*)가 상대적으로 더욱 적어지기 때문인 것으로 사료된다.

본 연구에 사용한 재료외에 기계적 성질이 다른 재료 즉, 알루미늄(A 6061), 기계구조용강(SM20C) 및 스테인레스강(SUS 304)에 대한 단일과대하중 실험에서도 위의 실험식을 적용하였을 때 잘 일치함을 보였다⁵⁾.

V. 결 론

본 연구에서는 기계적 성질이 상이한 재료를 택하여 단일과대하중 작용시킨 후 피로균열 지연거동에 끼치는 가공경화지수 및 과대하중비 등의 영향을 구명하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다.

제하탄성 컴플라이언스법에 의한 단일과대하중 실험에서 피로균열 지연효과는 균열단합에 기인함을 확인하였고 가공경화지수와 과대하중비가 클수록 균열 단합현상이 크게 나타나왔다. 단일과대하중에 의해 영향을 받는 지연영역(a_d)과 계산된 소성영역($W_d=2r_s$)을 비교하여 보면 피로균열 안정성장구역의 초기영역 및 중간영역의 a_d/W_d 는 가공경화지수가 클수록 크게 나타났다. 또한, 기준응력확대계수 폭(ΔK_b)과 균열전파 지연구간의 하중반복회수(N_d)의 관계를 살펴보면 기준응력확대계수 폭(ΔK_b)이 증가할수록 과대하중 후의 지연하중반복회수(N_d)는 감소함을 보였다.

균열전파 지연동안에 작용된 하중반복 회수(N_d)와 단일과대하중에 의해 영향을 받은 균열성장길이(a_d)에 상응하는 기본실험 때의 하중반복회수(N^*)와의 비를 균열지연비(N_d/N^*)라고 하면 균열안정성장 초

기영역과 중간영역의 단일과 대하중 시험결과 균열지연비(N_d/N^*)와 과대하중비(%PL) 및 가공경화지수(n) 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립함을 규명하였다. 즉,

$$N_d/N^* = \exp[PL \cdot \{PL \cdot A(n) + B(n)\}]$$

여기서 $A(n) = \alpha n + \beta$, $B(n) = \gamma n + \delta$ 및 $PL = \%PL/100$ 이며 본 연구에서 사용한 네가지 재료에 대하여 동일하게 $\alpha = 0.78$, $\beta = 0.54$, $\gamma = 0.58$ 및 $\delta = -0.01$ 이었다.

REFERENCES

- 1) 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.
- 2) Chanani, G.R., "Effect of Thickness on Retardation Behavior of 7075 and 2024 Aluminium Alloys", Eng. Fract. Mech., Vol. 7, pp.705~711, 1975.
- 3) Lee, E.W., Chakraborty, S.B. and Starke, E.A. Jr., "The Effect of Wverload on The Fatigue Crack Propagation in Metastable Beta Ti-V Alloys", Metal. Trans., Vol.15A, pp.511~517, 1984.
- 4) Thomas, W.J., "The Effect of Single Overload upon Fatigue Crack in 5083-H321 Aluminium", Eng. Frac. Mech., Vol.23, pp.1015~1029, 1986.
- 5) Kim, S.C. and Kang, D.M., "Strain Hardening Exponent on Fatigue Crack Propagation", Proceedings of the Fourth International Conference on Fatigue and Fatigue Thresholds, Fatigue 90, pp.111~116, 1990.