

〈論 文〉

7075-T73 알루미늄 합금의 피로 균열진전의 지연현상과 이의 기구

김 정 규* · 박 병 훈**

(1990년 3월 28일 접수)

The Retardation of Fatigue Crack Growth and Its Mechanisms in 7075-T73 Aluminum Alloy

J. K. Kim and B. H. Park

Key Words : Fatigue(Materials) (피로), Crack Propagation(균열진전), Retardation(지연), Aluminum Alloy(알루미늄 합금), Single Overloading(단일과대하중), Crack Depth(균열깊이), Crack Branching(균열가지)

Abstract

For the analysis of the retardation behavior in 7075-T73 aluminum alloy, which is produced after a single overloading, the effects of the crack depth(a/W), the baseline stress intensity factor range (ΔK_b), and % overload (% O.L.) are examined. Test results showed that the amount of the retardation after a single overloading increased with a decrease in a/W and increase in ΔK_b , and %O.L. These phenomena are related to the change of the micro-crack growth direction and the crack branching in near-surface of the specimen. It was difficult to explain the retrdation after a single overloading by the plastic zone size only. Main mechanisms of these retardation phenomena are the crack closure and the relaxation of K at the crack tip, which are caused by the branching and deflection of the crack.

1. 서 론

기계구조물이 사용중에 받는 하중은 매우 복잡하게 변동하고 있으므로 이에 의한 피로균열진전거동은 일정진폭하중시의 거동과 다르게 나타난다. 따라서 변동하중하에서의 피로균열진전기구를 파악하기 위해서는 변동하중의 기본형태인 단일과대하중에 의한 피로균열진전거동에 대해 충분한 이해가 있어야 한다.

단일과대하중에 의한 피로균열진전의 지연현상에

영향을 미치는 인자는 과대하중비^(1~3), 과대하중시기^(4,5), 항복강도⁽³⁾, 응력비⁽⁶⁾ 및 시험편두께^(7~9)등이 알려져 있으나 이들의 결과 및 기구가 항상 일치하고 있는 것은 아니다. 특히 과대하중비 %O.L.은 그 값이 클수록 지연이 증가하는 것으로 알려져 있으나, 기준응력확대계수범위 ΔK_b 의 변화에 대해서는 서로 다른 결과가 보고되고 있다^(4,5,7).

지연현상에 미치는 ΔK_b 의 영향에 대하여 Chanani⁽¹⁰⁾는 7075 및 2024 알루미늄합금 등에서 ΔK_b 가 증가하면 지연에 소요되는 하중반복 수는 감소한다고 하였으며, Thomas⁽⁵⁾는 5083-H321 알루미늄합금에서, Lee등⁽¹¹⁾은 Ti합금에서 같은 결과를 보고하고 있다. 그러나 Mills등⁽⁷⁾은 2024-T3 알

*정회원, 한양대학교 공과대학 기계설계학과

**국방과학연구소

루미늄합금에서, 그리고 Hertzberg등⁽¹³⁾은 A514F 강에서 이들과 반대의 결과를 보고하였다. 또한 알루미늄합금과 강에 대한 Vecchio등⁽⁴⁾의 결과와 Ti 합금에 대한 Ward-Close등⁽¹²⁾의 결과는 ΔK_b 의 영역에 따라 이들 지연의 효과도 다름을 지적하였다.

한편 균열길이 a/W 의 영향에 대해서 Vardar⁽¹⁾은 7075-T6 알루미늄 합금에서, 그리고 Bernard 등⁽³⁾은 강에서 이의변화에 대한 지연거동에 차이가 없음을 보고하고 있으나, 김등⁽⁹⁾은 두께에 관계없이 a/W 의 감소에 따라 지연현상이 증가함을 보고하였다.

이와같이 a/W , %O.L. 및 ΔK_b 변화에 따른 피로균열진전의 지연현상은 서로 일치하지않고 있으며, 또한 실험방법도 다르기 때문에 이에 관해 명확한 해답을 얻기 어렵다.

본 연구에서는 항공기 구조용 재료로서 널리 사용되는 고장력 7075-T73 알루미늄합금을 준비하고, 균열길이 a/W 변화에 따른 단일과대하중후의 지연현상을 기준응력확대계수범위 ΔK_b 및 과대하중비 %O.L. 과 함께 검토하였다.

2. 실험방법

사용한 재료는 두께가 30mm인 7075-T73 알루미늄합금으로서 이 재료의 화학성분 및 기계적 특성은 전보⁽⁹⁾와 같다.

시험편은 ASTM E647-88⁽¹⁴⁾의 규정에 의하여 가공한 폭 $W=50.8\text{mm}$, 두께 $B=4\text{mm}$ 의 CT(compact tension) 시험편이며, L-T방향으로 채취하였다.

피로시험은 10톤용 유압서보식 피로시험기를 사용하여 하중비 $R=0.1$ 에서 하중반복수가 11Hz인 정현파형으로 하였다. 기준응력확대계수범위 ΔK_b 는 8 및 11.5MPa \sqrt{m} 이며, 이때 과대하중의 크기는 식 (1)로 나타내는 %과대하중(%O.L.)을 사용하여 정의하고 본 연구에서는 50%, 100% 및 130% O.L.로 하였다.

$$\%O.L. = (K_{2max}/K_{1max} - 1) \times 100 \quad (1)$$

여기서 K_{1max} , K_{2max} 는 각각 일정진폭하중시 및 과대하중시의 최고응력 확대계수이다.

과대하중은 ΔK_b 가 정해진 값에 도달하였을때 1초 이내에 수동으로 부하하였으며, 과대하중후의 지연하중반복수 N_d 와 지연균열길이 a_d 의 정의는 전보⁽⁹⁾와 같다.

균열길이 및 단힘은 시험편 내부를 포함한 평균

적인 균열길이를 전 수명에 걸쳐 연속적으로 측정할 수 있는 제하탄성 컴플라이언스법을 사용하였다. 또한 ΔK 는 ASTM E647-88⁽¹⁴⁾의 식에 의하여 산출하였고, 과대하중직후의 균열선단 및 미시파면은 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 관찰하였다.

3. 실험결과

3.1 단일과대하중에 의한 지연결과

Table 1은 지연현상의 결과를 각각의 실험조건에 따라 정리한 것이다. 이 표에서 과대하중에 의한 소성영역의 크기 W_d ⁽⁴⁾는 식 (2)로 부터 구한 값이다.

$$\begin{aligned} W_d &= 1/2\pi(K_{2max}/\sigma_{ys})^2 \\ &\text{when } B < 2.5(K_{2max}/\sigma_{ys})^2 \\ W_d &= 1/4\pi(K_{2max}/\sigma_{ys})^2 \\ &\text{when } B \approx 2.5(K_{2max}/\sigma_{ys})^2 \\ W_d &= 1/6\pi(K_{2max}/\sigma_{ys})^2 \\ &\text{when } B > 2.5(K_{2max}/\sigma_{ys})^2 \end{aligned} \quad (2)$$

B : 시험편 두께, σ_{ys} : 항복강도

이 표로부터 %O.L.과 지연균열길이 a_d 및 지연하중반복수 N_d 의 관계를 a/W 의 영향과 함께 나타낸 것이 Fig. 1(a)와 (b)이다. 이 그림에서 a/W 의 크기에 관계없이 %O.L.이 증가함에 따라 a_d 와 N_d 는 증가하고 있으며 이들 현상은 ΔK_b 가 높은 쪽이 현저함을 보이고 있다. 한편, 낮은 ΔK_b ($\approx 8\text{MPa}\sqrt{m}$)에서는 %O.L.이 작을수록 a_d 에 미치는 a/W 의 영향이 감소하지만, 높은 ΔK_b ($\approx 11.5\text{MPa}\sqrt{m}$)에서는 %O.L.의 크기에 관계없이 이의 영향이 현저함을 보이고 있다.

3.2 균열선단 및 미시파면양상

Fig. 2 (a)와 (b)는 과대하중에 의한 표면부 부근의 미시파면과 표면에서 관찰한 균열선단의 대표적인 모양으로, a/W 및 %O.L.이 일정하고 ($a/W=0.40$, 130%O.L.), ΔK_b 가 각각 8 및 11.5MPa \sqrt{m} 인 경우의 것이다.

ΔK_b 가 높은 것이 낮은 것에 비하여 과대하중에 의한 비치마크와 표면부에서의 균열가지의 형성이 현저함을 알 수 있다. 또한 표면부 부근에서의 미시파면 양상은 ΔK_b 가 높은 것이 미시균열 진전방향의 변경영역이 클 뿐 아니라 진전방향도 거시균열의 것과 큰 차이를 나타내고 있다.

이러한 결과는 전보⁽⁹⁾에서와 같이 %O.L. 및

Table 1 Overload test results

%O.L.	a/W	$\Delta K_b (K_{1max})$	K_{2max}	N_a	a_a	W_a
50	0.40	8.0 (8.9)	13.4	3400	0.44	0.05
		11.5 (12.8)	19.2	5370	2.04	0.29
	0.56	8.0 (8.9)	13.6	1940	0.32	0.05
		11.6 (12.9)	19.4	2620	1.12	0.29
	0.65	8.2 (9.1)	13.6	1560	0.28	0.05
		11.6 (12.9)	19.6	1900	0.82	0.30
100	0.40	8.0 (8.8)	17.7	9380	1.10	0.12
		11.3 (12.6)	25.7	12100	3.52	0.52
	0.56	8.0 (8.9)	17.9	6290	0.82	0.13
		11.4 (12.6)	26.2	8420	2.68	0.54
	0.65	8.1 (9.0)	18.3	4810	0.61	0.13
		11.5 (12.8)	25.8	7960	2.05	0.52
130	0.40	7.9 (8.8)	20.3	16150	1.50	0.32
		11.5 (12.7)	29.2	20630	4.44	0.66
	0.56	8.0 (8.9)	20.6	11550	1.22	0.33
		11.5 (12.8)	29.8	19000	3.82	0.69
	0.65	8.1 (9.0)	20.8	10860	0.81	0.34
		11.6 (12.9)	29.7	18770	3.07	0.69

$\Delta K_b, K_{1max}, K_{2max}$: MPa \sqrt{m}

a_a, W_a : mm N_a : cycles

ΔK_b 가 같은 경우에, a/W 가 작을수록 표면부에서의 미시균열 전진방향변경 및 균열가치의 양상이 현저하다는 결과와 같음을 알 수 있다.

따라서 ΔK_b 및 %O.L.가 높고, 또한 a/W 가 작을수록 단일과대하중후의 지연현상은 표면부에서의 미시균열전진방향변경 및 균열가치의 형성과 함께 증가하지만, 이와 반대의 경우에는 이들 현상이 감소한다고 할 수 있다.

4. 고 찰

단일과대하중에 의한 피로균열진전의 지연현상은

ΔK_b 가 증가함에 따라 상승하는 경우^(7,13,15)와 이와 반대의 경우^(5,10,11,16), 그리고 ΔK_b 가 낮은 경우에는 ΔK_b 의 증가에 따라 지연이 감소하지만 ΔK_b 큰 경우에는 ΔK_b 의 증가에 따라 지연이 증가하는 경우^(4,12)로 대별되며 본 연구 결과는 첫째의 경우에 속한다. 이러한 경우에는 소성유기형 균열단합(plasticity-induced crack closure)이 지연의 주요한 기구로 논의되고 있으며, 이것은 과대하중에 의한 소성영역의 크기 W_a 와 밀접한 관련이 있음이 지적되고 있다^(7,17).

Fig. 3(a)와 (b)는 W_a 와 a_a 및 N_a 의 관계를 a/W 와 함께 나타낸 것이다. 이 그림에서 W_a 가 클

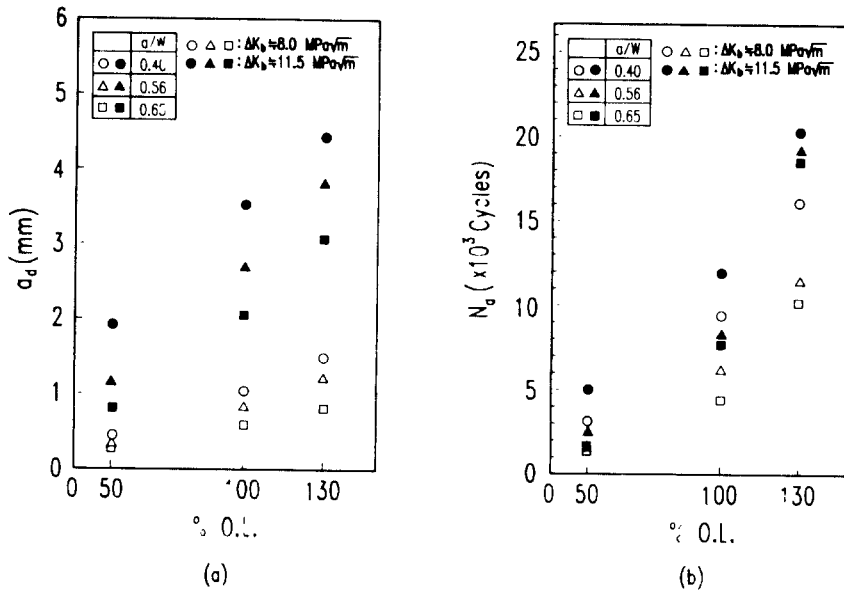


Fig. 1 Effects of overload ratio(%O.L.) on (a) total retarded distance of crack growth (a_d) and (b) no. of retarded cycles (N_d)

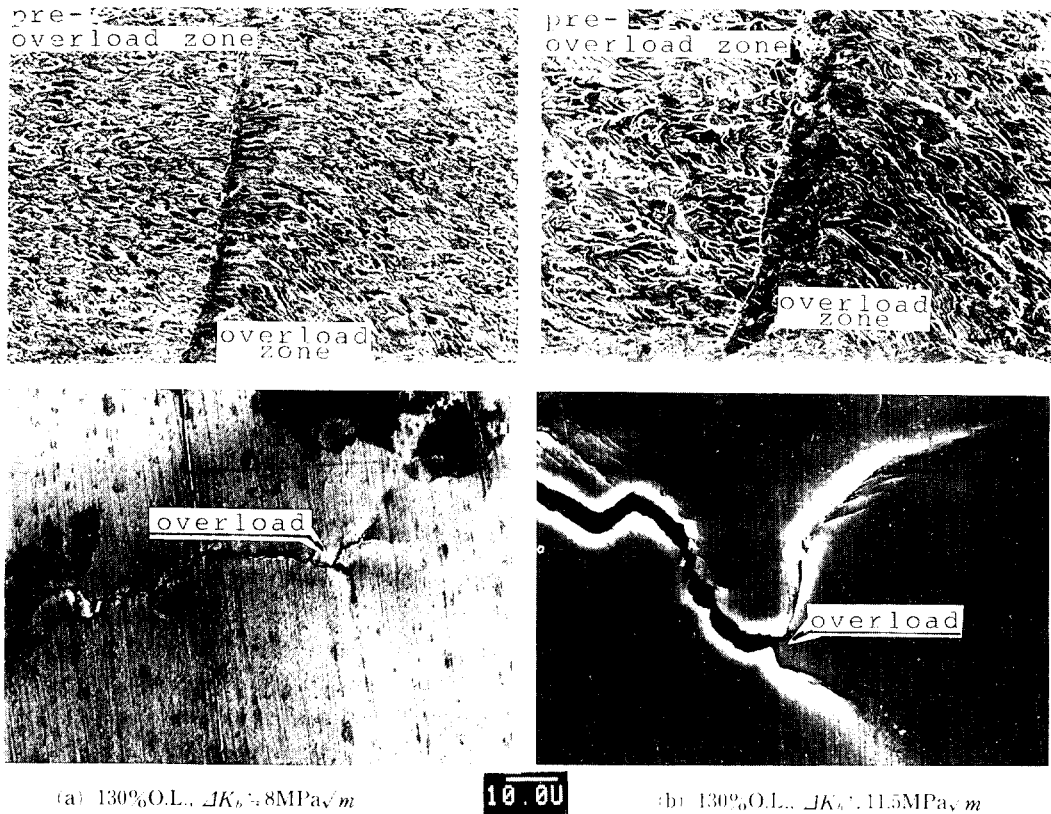


Fig. 2 Fracture surface features in near-surface and the surfaces of the specimens after an overloading ($a/W = 0.40$)

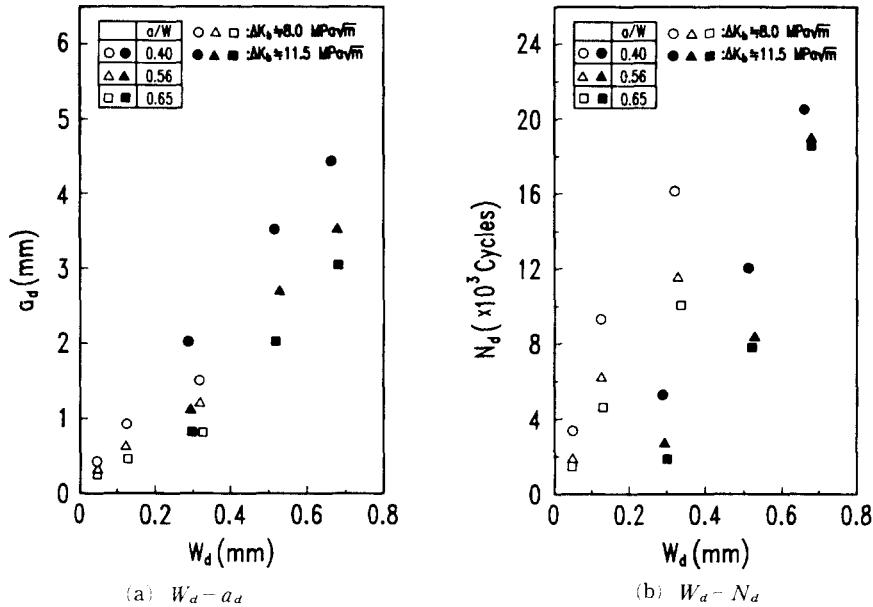


Fig. 3 Effects of overload plastic zone size (W_d) on (a) total retarded distance of crack growth (a_d) and (b) no. of retarded cycles (N_d)

수록 지연이 증가하는 경향을 보이고 있으므로 W_d 와 지연현상과는 관련이 있음을 알 수 있다. 그러나 동일한 W_d 인 경우에도 a/W 및 ΔK_b 의 변화에 따라 지연에 차이가 나타나고 있으므로 소성 영역의 크기는 지연현상의 충분조건이 아님을 알 수 있다. 따라서 이들의 관계를 좀 더 명확히 하기 위해 이들조건에 따른 지연현상의 차이를 지연속도비 λ 및 잔류응력과 균열까지 등으로 생성될 수 있는 균열담합비 U 를 과대하중후의 균열 성장길이 Δa 와 함께 검토하였다. λ 및 U 는 각각 식(3)과 (4)로 정의하였다.

$$\lambda = (da/dN)_1 / (da/dN)_2 \quad (3)$$

$$U = \Delta K_{eff} / \Delta K \quad (4)$$

이 식에서 $(da/dN)_1$ 은 일정진폭하중시의 피로 균열진전속도이고 $(da/dN)_2$ 는 단일과대하중후의 진전속도이며, ΔK_{eff} 는 유효응력 확대계수 범위 ($=K_{max} - K_{op}$)이다.

Fig. 4 및 Fig. 5는 $\Delta K_b \approx 11.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $a/W = 0.40$ 및 0.65의 결과인 Δa 와 U 및 λ 의 관계이다.

$a/W = 0.40$ 의 100% 및 130 %O.L. 그리고 $a/W = 0.65$ 의 130%O.L.에 있어서, λ 는 Δa 가 수 mm에 이를 때까지 급격히 감소하여 1에 접근하고 있으며, 이에 대하여 U 는 감소-증가하고 있어 단

일과대하중직후의 현저한 지연현상 및 %O.L.에 따른 이들현상의 차이는 균열담합과 관련이 있음을 시사한다. 그러나 $a/W = 0.40$ 의 50%O.L. 및 $a/W = 0.65$ 의 50%와 100%O.L.의 결과에서는 균열담

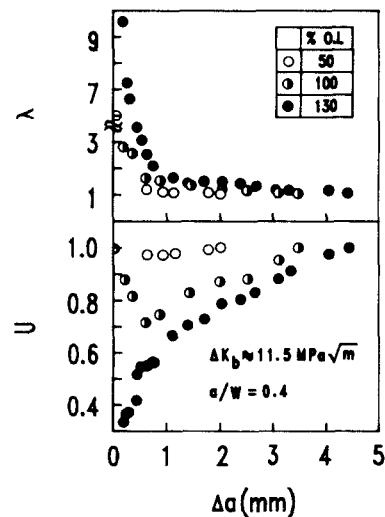


Fig. 4 Comparison of fatigue crack growth ratio (λ) and crack closure behavior following a single overloading ($\Delta K_b \approx 11.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $a/W = 0.40$)

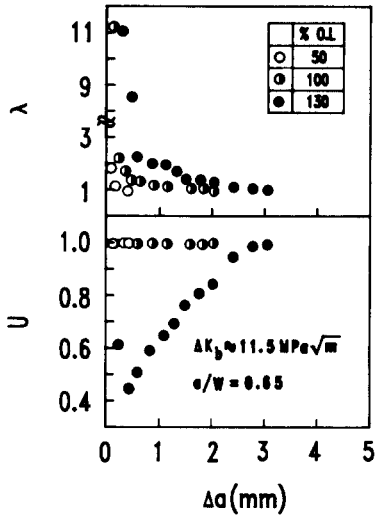


Fig. 5 Comparison of fatigue crack growth ratio(λ) and crack closure behavior following a single overloading ($\Delta K_b \approx 11.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $a/W = 0.65$)

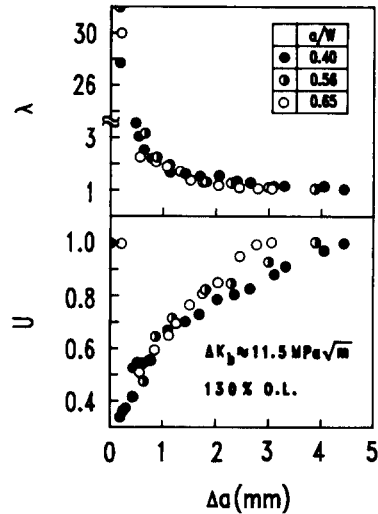


Fig. 7 Comparison of fatigue crack growth ratio(λ) and crack closure behavior following a single overloading ($\Delta K_b \approx 11.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$, 130% O.L.)

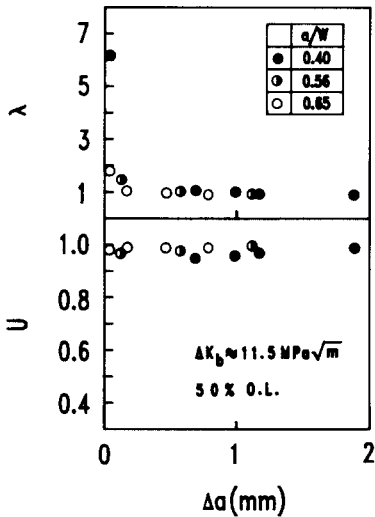


Fig. 6 Comparison of fatigue crack growth ratio(λ) and crack closure behavior following a single overloading ($\Delta K_b \approx 11.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$, 50% O.L.)

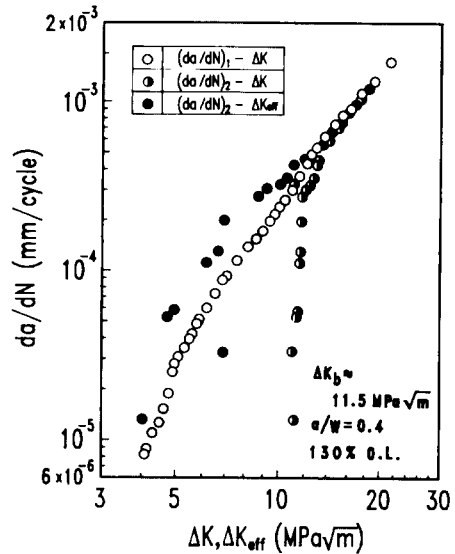


Fig. 8 Comparison of $(da/dN)_1 - \Delta K_1$, $(da/dN)_2 - \Delta K$ and $(da/dN)_2 - \Delta K_{eff}$ ($a/W = 0.40$)

힘이 존재하지 않음에도 불구하고 단일과대하중후의 초기단계에서 지연현상이 나타나고 있으며, 이러한 현상은 $\Delta K_b \approx 8 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 의 결과에서도 유사한 경향을 보였다. 또한 Fig. 6 및 Fig. 7은 $\Delta K_b \approx 11.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 에서의 50% 및 130% O.L.의 지연결과를 a/W 의 영향에 대하여 나타낸 것으로, 지연이 일반적으로 큰 경우에는 이미 설명한 바와 같이 균열

단립과는 관련이 있으나, 이와 반대인 경우에는 균열단립과 무관함을 알 수 있다.

한편 Fig. 8 및 Fig. 9는 $\Delta K_b \approx 11.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$, 130% O.L. 및 $a/W = 0.40, 0.65$ 의 단일과대하중 조건하에서의 피로균열 진전속도를, 그리고 Fig. 10은 지연현상이 낮은 조건($\Delta K_b \approx 11.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$, 50% O.L. 및 $a/W = 0.40$)에서의 결과를 균열단립을 고

려한 ΔK_{eff} 로 정리하여 일정진폭시의 피로균열진전 속도와 함께 나타낸 것이다.

일정진폭하중시 응력비 또는 미시구조의 변화에 의한 피로균열진전 속도의 차이는 균열단합을 고려함으로써 거의 일치함이 많은 연구에 의해 보고되고 있다⁽¹⁸⁻²⁰⁾.

그러나 단일과대하중후의 $(da/dN)_2$ 는 균열단합

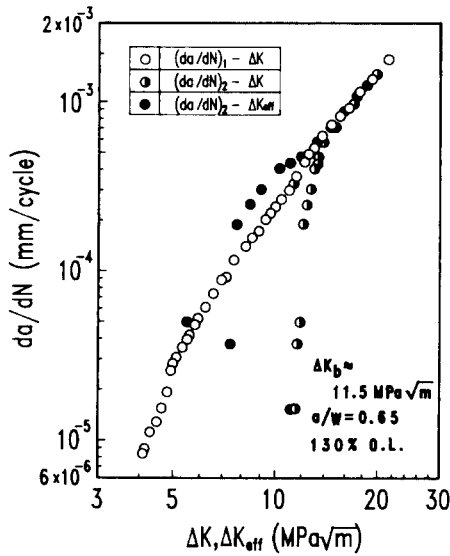


Fig. 9 Comparison of $(da/dN)_1 - \Delta K_1$, $(da/dN)_2 - \Delta K$ and $(da/dN)_2 - \Delta K_{eff}$ ($a/W = 0.65$)

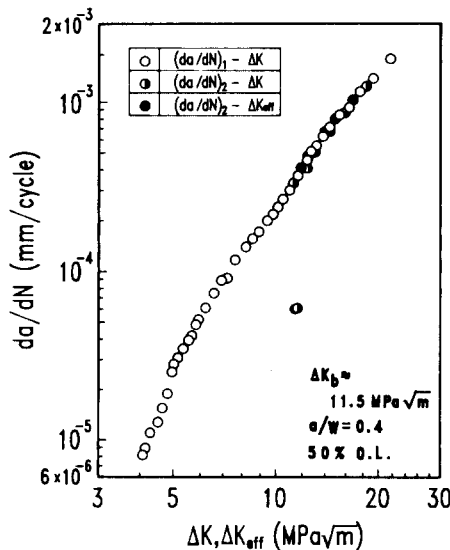


Fig. 10 Comparison of $(da/dN)_1 - \Delta K_1$, $(da/dN)_2 - \Delta K$ and $(da/dN)_2 - \Delta K_{eff}$ ($a/W = 0.40$)

을 고려하여도 종래의 연구결과와는 다른 양상을 보이고 있다.

즉, 이들 그림에서 균열단합을 고려한 $(da/dN)_2$ 는 초기($\Delta a \leq 0.5\text{mm}$)에는 일정진폭속도인 $(da/dN)_1$ 보다 느린 구간이 생긴 후 점차 일정진폭속도에 접근하여 이 속도보다 빠른구간을 지난 후 일정진폭속도에 일치하고 있다. 이 그림에서 초기에 나타나는 현상은 과대하중직후에 형성된 균열가지를 동반한 균열이 미소하여 이에 의한 균열단합의 영향이 적기 때문이며, 이 영역을 지난 후의 거동은 균열단합의 증가와 함께 $(da/dN)_1$ 에 접근하지만, 과대하중시의 소성영역의 증가로 인한 균열단합의 과대평가가 원인이 되어 오히려 균열단합을 고려한 $(da/dN)_2$ 가 $(da/dN)_1$ 보다 빠른 경향을 나타내었다고 생각된다.

한편 균열단합이 없거나 또는 적음에도 불구하고 초기에 나타난 지연현상의 현저함은 大路 등⁽²¹⁾이 보고한 바와 같이 균열선단 가지 또는 균열진전경로의 변화(굴곡균열)로 인한 K 값의 완화가 주요한 원인으로 생각된다.

Fig. 11은 단일과대하중후의 균열양상의 모식도이다. 단일과대하중직전의 주 균열 a 의 선단에 길이 b 의 굴곡균열이 존재할 때, 선단 B 점에서의 K_I^* 값은 굴곡각 α 및 b/a 에 따라 변화함이 예상된다.

大路 등⁽²¹⁾은, 균열전파에는 Mode I이 지배적이라는 생각하에 K_I^* 값과 C 점에서 K_I 값과의 관계를 식 (5)로 나타내고 있다.

$$F_I = K_I^*/K_I \quad [K_I = \sigma\sqrt{\pi(C/2)}] \quad (5)$$

여기서 $F_I = \cos^{3/2}\alpha$, $0 < \alpha < 45^\circ$, $b/a > 0.3$ 의 경우이다.

이 식에서 K_I^* 값은 α 및 b/a 에 의존하여 변한다

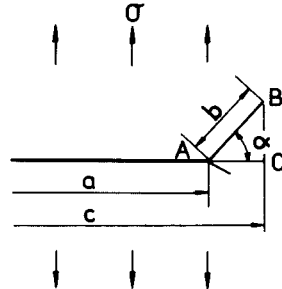


Fig. 11 Schematic diagram of crack branching after an overloading

고 할 수 있다. 본 연구에 있어서 α 및 b/a 의 정량적 평가는 행하지 못하였지만 a/W , ΔK_b 및 %O.L.이 각각 다른 조건에서의 균열선단 및 미시파면 양상을 검토하면 지연현상은 α 및 b/a 의 값이 클수록 현저하였다. 따라서 균열단힘이 거의 없음에도 불구하고 초기단계 ($\Delta a \leq 0.5\text{mm}$)에서 나타난 지연현상이 일정진폭속도와 일치하지 않는 것은 균열선단의 K_I 값의 완화에 기인한다고 할 수 있다.

5. 결 론

고장력 7075-T73 알루미늄합금의 균열깊이 a/W 에 대한 단일과대하중후의 지연현상을 기준응력 확대계수범위 ΔK_b 및 과대하중 %O.L.의 영향과 함께 검토하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) a/W 가 일정한 경우, %O.L.이 증가함에 따라 지연현상은 증가하며 이는 ΔK_b 가 높은 쪽이 현저하다.

(2) 지연현상은 %O.L. 및 ΔK_b 의 대소에 관계없이 균열깊이가 증가함에 따라 감소하며 이의 영향에 의한 지연은 과대하중에 의한 소성영역의 크기와는 무관하다.

(3) %O.L., ΔK_b 및 a/W 의 인자에 의한 지연효과를 미시파면 및 균열양상과 관계하며 일반적으로 과대하중직후의 균열선단의 굴절각 및 굴절균열의 길이가 클수록 지연현상은 현저하다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원의 목적기초연구(과제번호 ; 87-04-00-3)의 일환으로 행하여진 결과의 일부이며 이에 관계자 여러분께 감사드리는 바이다.

참 고 문 헌

(1) Öktem Vardar, 1988, "Effect of Single Overload in FCP", Eng. Fract. Mech., Vol. 30, No. 3, pp. 329~355.
 (2) Wei, R.P. and Shih, T.T., 1974, "Delay in Fatigue Crack Growth", Int. Jour. Fract., Vol. 10, No. 1, pp. 77~85.
 (3) Bernard, P.J., Lindley, T.C. and Richards, C.E., 1976, "Mechanisms of Overload Retardation During Fatigue Crack Propagation", ASTM STP 595, pp. 78~97.
 (4) Vecchio, R.S., Hertzberg, R.W. and Jaccard, R.,

1984, "On the Overload Induced Fatigue Crack Propagation Behavior in Aluminium and Steel Alloys", Fatigue of Eng. Materials and Structures, Vol. 7, No. 3, pp. 181~194.

(5) Thomas, W.M., 1986, "The Effect of Single Overloads upon Fatigue Cracks in 5083-H321 Aluminium", Eng. Fract. Mech., Vol. 23, pp. 1015~1029.
 (6) Stephens, R.I., Chen, D.K. and Hom, B.W., 196, "Fatigue Crack Growth with Negative Stress Ratio Following Single Overloads in 2024-T3 and 7075-T6 Aluminium Alloys", ASTM STP 529, pp. 27~40.
 (7) Mills, W.J. and Hertzberg, R.W., 1975, "The Effect of Sheet Thickness on Fatigue Crack Retardation in 2024-T3 Aluminium Alloys", Eng. Fract. Mech., Vol. 7, pp. 705~711.
 (8) Shih, T.T. and Wei, R. P., 1975, "Effect of Specimen Thickness on Delay in Fatigue Crack Growth", Jour. Testing and Evaluation, Vol. 3, No. 1, pp. 46~47.
 (9) 김정규, 박병훈, 류석현, 1989, "7075-T73 알루미늄합금의 피로균열진전거동 및 지연현상에 미치는 두께의 영향", 대한기계학회논문집, 제13권, 제4호, pp. 670~679.
 (10) Chanani, G.R., 1977, "Effect of Thickness on Retardation Behaviour of 7075 and 2024 Aluminium Alloys", ASTM STP 631, pp. 363~387.
 (11) Lee, E. W., Chakraborty, S. B. and Starke, Jr. E. A., 1984, "The Effect of Overload on the Fatigue Crack Propagation in Metastable Beta Ti-V Alloys", Metall. Trans. A., Vol. 15A, March, pp. 511~517.
 (12) Ward-Close, C.M., Blom, A.F. and Ritchie, R.O., 1989, "Mechanisms Associated with Transient Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading; An Experimental and Numerical Study", Eng. Fract. Mech., Vol. 32, No. 4, pp. 613~638.
 (13) Mills, W.J., Hertzberg, R.W. and Roberts, R., 1977, "Load Interaction Effects on Fatigue Crack Growth in A514F Steel Alloy", ASTM STP 637, pp. 192~208.
 (14) ASTM E647-88, 1988, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates".
 (15) Von Euw, E.F.J., Hertzberg, R.W. and Roberts, R., 1972, "Delay Effects in Fatigue Crack Propagation", ASTM STP 513, pp. 230~259.
 (16) Drew, M.W. and Thompson, K.R.L., 1988, "The Effect of Overload Cycles on Fatigue Crack Propagation in Two Structural Steels", Eng. Fract. Mech., Vol. 30, No. 5, pp. 579~593.

- (17) Bathias, C. and Vancon, M., 1978, "Mechanics of Overload Effect on Fatigue Crack Propagation in Aluminum Alloys", *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 10, pp. 409~424.
- (18) Garrett, G.G. and Knott, J.F., 1977, "On the Effect of Crack Closure on the Rate of Fatigue Crack Propagation", *Int. Jour. of Fract.*, Vol. 13, pp. 101~104.
- (19) Ritchie, R.O. and Suresh, S., 1982, "Some Considerations on Fatigue Crack Closure at Near-Threshold Stress Intensities Due to Fracture Surface Morphology", *Met. Trans.*, Vol. 13A, pp. 937~940.
- (20) 김정규, 황돈영, 1988, "복합조직강의 피로균열진전거동과 균열닫힘 조건에 미치는 응력비 및 미시조직크기의 영향", *대한기계학회논문집*, 제12권, 제6호, pp. 1343~1349.
- (21) 大路清嗣, 小倉敬二, 原田昭治, 田路勉, 1977, "壓延異方性鋼板の波勞き製傳ばに及ばず層狀組織及び介在物の影響", *日本機械學會論文集*, 第43卷, 第347號, pp. 3594~3602.