

〈論 文〉

7075-T73 알루미늄 합금의 피로균열진전거동 및 지연현상에 미치는 두께의 영향

김정규* · 박병훈** · 류석현**

(1989년 3월 29일 접수)

Effect of Specimen Thickness on Fatigue Crack Growth and Retardation Behavior of 7075-T73 Aluminum Alloy

Jung Kyu Kim, Byung Hoon Park and Suk Hyun Ryu

Key Words: Specimen Thickness(시험편두께), Single Overload(단일과대하중), Retardation(지연현상), Crack Depth(균열깊이), Crack Branching(균열가지)

Abstract

The constant amplitude loading and 100% single overloading fatigue studies of domestic high tensile 7075-T73 aluminum alloy were performed to examine the effect of specimen thickness and its mechanisms on fatigue crack growth behavior. The stage II fatigue crack growth rates tend to increase with decreasing specimen thickness under constant amplitude loading condition and this has relation with stress intensity factors and plastic zone size. The amount of retardation by an overload increased with decreasing specimen thickness when the crack depth and baseline stress intensity factors were constant. The crack depth is one of major factors which affect retardation phenomena by an overload and the amount of retardation increase with decreasing the crack depth. Its main mechanisms are crack closure and decreasing of K at the crack tip by branching and deflection of crack. And they are affected by near surface more severely than central portion of specimen.

1. 서 론

일정한 진폭하중하에서의 피로균열전진속도 da/dN 은 Paris법칙⁽¹⁾으로 평가되고 있지만 기계 구조물이 사용중에 받고 있는 하중은 복잡하게 변동하고 있으며 이에 의한 하중상호간의 영향때문에 이 법칙을 그대로 적용할 수는 없다. 따라서 하중이력의 영향에 대한 검토가 필요하며 특히 단일과대하중(single overload)후의 지연현상에 관한 기구의 정확한 이해와 응용은 변동하중에서의 피로수명에

측에 기본이 된다.

단일과대하중에 의한 피로균열의 지연현상에 영향을 미치는 인자는 과대하중비⁽²⁻⁴⁾, 항복강도^(4,5), 과대하중시기⁽⁶⁻⁹⁾, 응력비⁽¹⁰⁾ 및 시험편두께^(6,7) 등이 알려져 있다. 특히 기계 구조물부재의 두께는 사용 장소에 따라 일정하지 않은 경우가 많으며 또한 피로균열선단은 3차원적인 복잡한 응력상태가 되기 때문에 두께변화에 의한 피로균열진전거동의 파악은 실용적으로 중요한 문제이다.

균열진전의 지연현상에 미치는 두께의 영향에 있어서 Mills등⁽⁶⁾은 2024-T3 알루미늄 합금의 경우, 두께가 감소함에 따라 지연에 소요되는 하중반복수는 증가하며 이러한 결과는 Shih등⁽⁷⁾과 Chanani⁽⁸⁾

*정회원, 한양대학교 공과대학 기계설계학과

**한양대학교 대학원

에 의한 7075-T6 및 7075-T73 알루미늄 합금에서도 보고되고 있다. 그러나 2024-T8 및 2024-T851 알루미늄 합금에서는 두께의 영향이 없음을 Sharpe 등⁽¹¹⁾이 보고하고 있고 Tokaji등⁽¹²⁾은 고장력강에서 두께가 15mm정도까지는 이의 증가에 따라 하중반복수가 감소하지만 이 이상의 두께에서는 거의 영향이 없다고 하였다.

이와같이 두께변화에 따른 지연현상은 사용한 재료에 따라 다르며 또한 실험방법도 일정하지 않아 이에 관한 명확한 해답을 얻기 어렵다.

본 연구에서는 항공기 구조용 재료로서 널리 사용되는 국산 고장력 7075-T73 알루미늄 합금을 준비하고 일정진폭하중 및 단일과대하중에 의한 피로균열 진전저동에 미치는 두께의 영향과 이의 기구를 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 재료 및 시험편

사용한 재료는 Table 1과 같은 화학적성분을 가진 두께가 30mm인 7075-T73 알루미늄 합금으로서 이의 기계적특성은 Table 2와 같다.

시험편의 형상은 ASTM E 647-88⁽¹³⁾의 규정에 의하여 가공한 폭 $W=50.8\text{mm}$ 그리고 두께가 2, 4, 10 및 25.4mm(side groove)의 CT(compact tension) 시험편이며 이의 채취는 L-T방향이다. 또한 시험편 두께는 다음의 식 (1)의 조건을 만족하여야 한다. 그러나 두께 2mm 및 25.4mm의 시험편은 이 규정에 벗어나지만 시험편의 응력조건을 가능한 한 평면응력 또는 평면변형률 조건에 가깝게 하기 위하여 임의의 치수로 준비한 것이다.

$$W/20 \leq B \leq W/4 \tag{1}$$

Table 1 Chemical composition(%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
0.08	0.15	1.33	0.001	2.16	0.22	5.77	Re

Table 2 Mechanical properties

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
452	520	12.9

2.2 피로시험

피로시험은 10톤 용 유압 서보식 피로시험기를 사용하여 하중비 $R=0.1$ 에서 하중반복속도가 11 Hz인 정현파형으로 하였다. 과대하중크기는 식 (2)로 나타내는 과대하중(overload, O.L.)의 비(%)를 사용하여 정의하고 본 연구에서는 100% O.L로 하였다.

$$\%O.L = \frac{K_{2max} - K_{1max}}{K_{1max}} \times 100 \tag{2}$$

여기에서 K_{1max} 는 일정진폭하중시의 최고응력확대계수이며 K_{2max} 는 과대하중시의 값이다. Fig. 1은 단일과대하중의 모식도이며 과대하중의 부하는 기준응력 확대계수범위 ΔK_0 가 정해진 값에 도달했을 때 수동으로 하였다. Fig. 2는 과대 하중후의 지연에 소요된 하중반복수 N_d 와 지연균열길이 a_d 를 모식적으로 나타낸 것이다.

균열길이 및 단합은 시험편 내부를 포함한 평균적인 균열길이를 전 수명에 걸쳐서 연속적으로 측정할 수 있는 제하탄성 컴플라이언스법을 사용하였고 동시에 표면부의 균열길이는 이동현미경(traveling microscope)을 사용하여 측정 하였다. 응력 확대계수범위 ΔK 는 ASTM E647-88⁽¹³⁾에 의하여 계산하였으며 피로균열진전속도 da/dN 은 시이킨

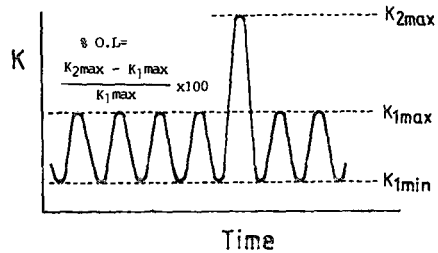


Fig. 1 Schematic diagram of a single overload

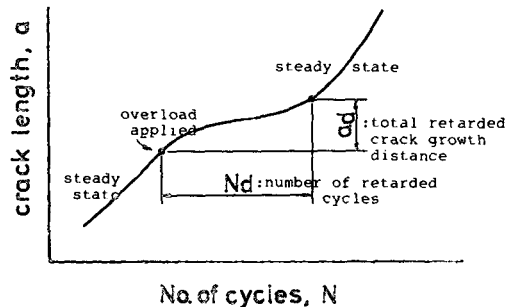


Fig. 2 Schematic illustration of delay in fatigue crack growth and definition of N_d and a_d

트(secant) 법으로 구하였다. 또한 과대하중직후의 균열선단 및 미시파면의 관찰은 주사형전자현미경(SEM)을 사용하였다.

3. 실험결과

3.1 일정진폭 하중하에서의 피로균열 진전 거동

Fig. 3은 일정진폭하중하에서의 피로균열진전속도 da/dN 와 응력확대계수범위 ΔK 와의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 시험편의 두께가 두꺼울수록 da/dN 이 저하하는 경향을 나타내고 있다.

da/dN 와 두께와의 관계에 있어서 일반적으로 두께가 얇을수록 da/dN 이 저하하는 경향이며 이

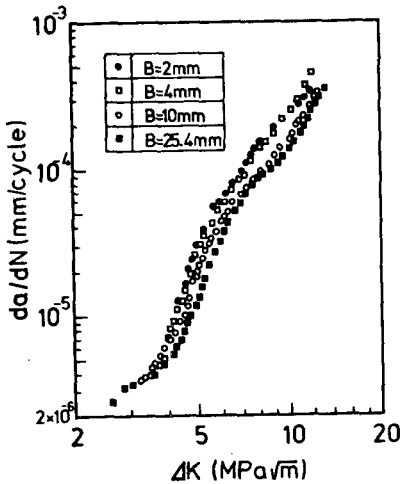


Fig. 3 Stress intensity factor range (ΔK) vs. fatigue crack growth rate(da/dN)

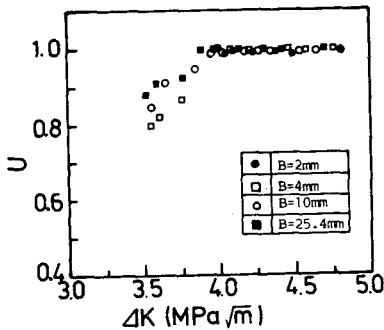


Fig. 4 Relation between effective stress intensity factor range ratio (U) and stress intensity factor range (ΔK)

의 원인으로서 Tokaji등⁽¹²⁾, McGowan등⁽¹⁴⁾은 균열단힘의 차이에 의한 것임을 보고하고 있다. 즉 McGowan등은 평면응력상태의 표면에서 평면변형률상태의 중심부로 이동함에 따라 최대 주응력의 변화로 인하여 소성영역의 크기는 감소하게되고 따라서 표면은 높은 잔류응력으로 인하여 균열개구응력이 상승하기 때문에 두께가 얇은 것이 균열진전속도가 저하한다고 설명하고 있다. 그러나 두께가 증가할수록 da/dN 의 저하를 나타내는 Fig. 3의 결과는 Fig. 4의 유효응력확대계수범위의 비 $U(= \Delta K_{eff}/\Delta K)$ 와 ΔK 와의 관계에서 보는 바와 같이 균열단힘과 무관함을 알 수 있다.

3.2 단일 과대하중에 의한 피로균열진전거동

(1) 시험편두께, 균열깊이와 지연거동

Table 3은 두께 2mm, 4mm 및 10mm의 시험편에 대하여 각각의 단일과대하중 조건에 의한 지연현상을 정리한 것이다. 단일과대하중시의 소성영역의 크기 W_d 는 평가방법에 따라 다소 차이가 있으나 본 연구에서는 두께 B 의 변화를 고려한 식 (3)으로부터 구하였다⁽⁸⁾.

$$\begin{aligned}
 W_d &= 1/2\pi (K_{2max}/\sigma_{ys})^2 \\
 &\text{when } B < 2.5(K_{2max}/\sigma_{ys})^2 \\
 W_d &= 1/4\pi (K_{2max}\sigma_{ys})^2 \\
 &\text{when } B \approx 2.5(K_{2max}/\sigma_{ys})^2 \\
 W_d &= 1/6\pi (K_{2max}\sigma_{ys})^2 \\
 &\text{when } B > 2.5(K_{2max}/\sigma_{ys})^2 \quad (3)
 \end{aligned}$$

σ_{ys} : 항복강도

Fig. 5는 Table 3으로부터 균열 깊이 a/W 및 과대하중 직전의 응력확대계수범위 ΔK_b 가 일정한 경우, 두께 B 와 지연에 소요된 하중반복수 N_d 의 관계를 동일 재료에 대한 Chanani의 연구결과⁽⁵⁾와 함께 나타낸 것이다. 이 그림에서 N_d 는 두께가 커짐에 따라 저하함을 알 수 있으며 이의 결과는 종래의 것^(4~7)과 같은 경향이다. 그리고 Chanani의 결과가 본 결과의 N_d 보다 큰 것은 강도 및 시험편형상의 차이에 의한 것이라 생각된다. 또한 동일한 두께에서는 a/W 및 ΔK_b 가 클수록 N_d 가 감소하는 경향을 나타내지만 이에 미치는 ΔK_b 및 a/W 의 영향이 동시에 존재한다고 생각되므로 이들 관계에 대해서는 불명확하다고 하겠다.

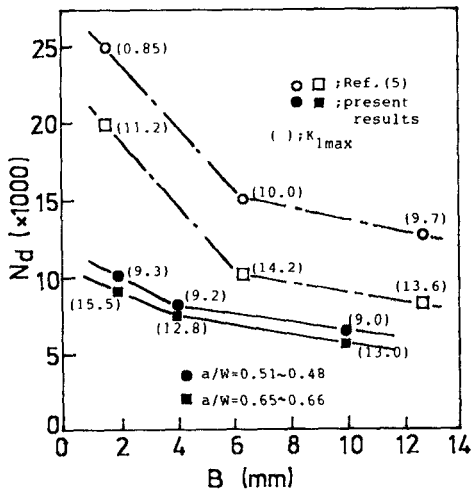
한편 Fig. 6(a) (b)는 두께에 따른 a/W 만의 영향을 명확히 하기 위하여 ΔK_b 가 일정한 경우 $a/$

Table 3 Overload results

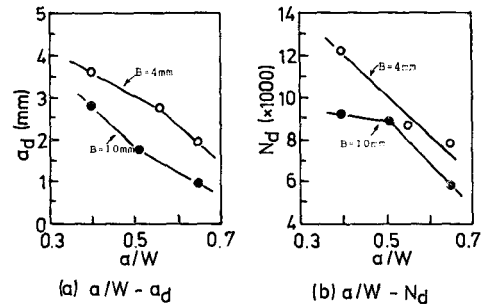
B(mm)	a/W	$\Delta K_d(K_{1max})$ (MPa \sqrt{m})	K_{2max} (MPa \sqrt{m})	N_d (cycles)	a_d (mm)	W_d (mm)
2	0.48	8.2(9.3)	18.6	10160	0.85	0.27
	0.66	14.2(15.5)	31.1	9050	2.50	0.75
4	0.49	8.2(9.2)	19.1	8080	0.75	0.14
	0.40	11.3(12.6)	25.7	12100	3.52	0.52
	0.56	11.4(12.6)	26.2	8420	2.60	0.54
	0.65	11.5(12.8)	25.8	7960	2.01	0.52
10	0.51	8.1(9.0)	17.9	6350	0.33	0.08
	0.40	11.9(13.3)	27.2	9170	2.85	0.19
	0.51	11.6(12.8)	26.3	8870	1.70	0.18
	0.65	11.8(13.0)	26.5	5810	1.00	0.18

B : Specimen thickness

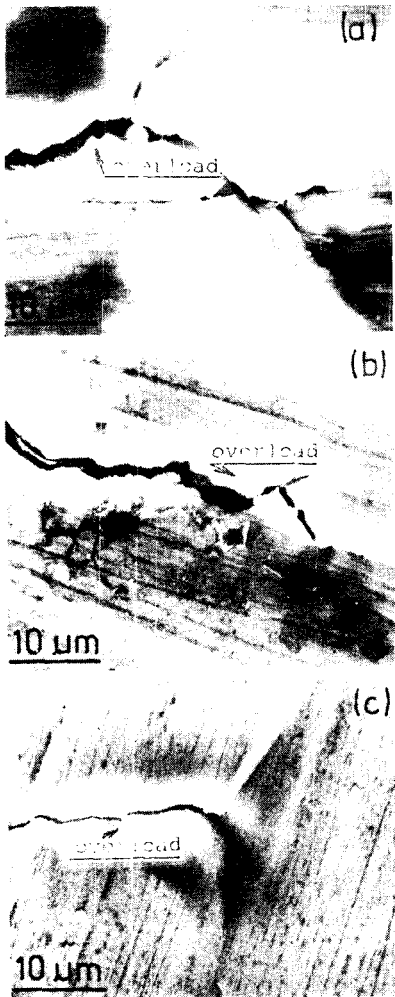
a/W : Crack depth

 ΔK_d : Baseline stress intensity factor range K_{1max} : Baseline maximum stress intensity factor K_{2max} : Overload maximum stress intensity factor N_d : Number of retarded cycles a_d : Total retarded crack growth distance W_d : Overload plastic zone sizeFig. 5 Effect of specimen thickness (B) on retarded cycles (N_d)

W 와 N_d 및 지연현상을 받은 균열길이 a_d 와의 관계를 나타낸 것이다. Vardar⁽²⁾은 7075-T6 알루미늄 합금에서 그리고 Benard등⁽⁴⁾은 강에서 a/W 의 변화에 대한 지연거동에 차이가 없음을 보고하였으나 본 결과에서는 두께의 크기에 관계없이 a/W 의 증가에 따라 N_d 및 a_d 가 저하함을 알 수 있다. 이러한 지연현상은 과대하중직후의 미시파괴 양상과도 관련이 있으므로^(15,16) 균열선단에 대하여 관

Fig. 6(a,b) Effects crack depth(a/W) on total retarded crack growth distance(a_d) and retarded cycles(N_d)

찰하였다. Fig. 7은 a/W 가 다른 두께 10mm 시험편 표면에서 과대하중직후에 관찰한 균열선단의 대표적인 모양이다. 즉 $a/W=0.40$ 및 0.51 ($B=4$ mm에서는 0.56)의 경우는 과대하중직후에 균열가지가 형성되었고 그 크기와 정도는 $a/W=0.40$ 일 때가 더욱 심하며 $a/W=0.65$ 의 경우에는 균열폭이 좁고 균열진전 경로에만 약간의 변화가 있음을 알 수 있다. 이러한 양상은 두께 2mm, 4mm 시험편의 경우에서도 유사하였다. 따라서 a/W 의 크기에 따른 지연현상의 차이는 균열가지 또는 균열진전경로의 변화로 인한 균열단함⁽¹⁷⁾ 및 균열선단의 K 값의 완화^(15,18)가 주요한 원인으로 생각된다⁽²⁾.

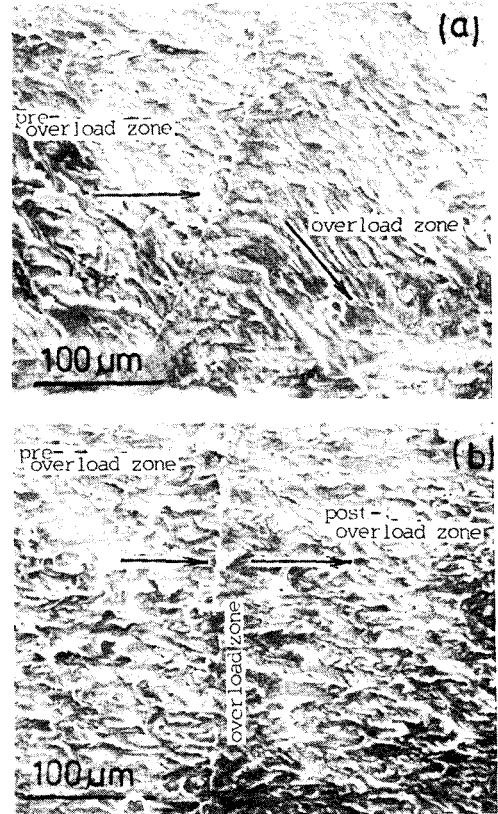


(a) $a/W=0.40$, $\Delta K_b=11.9\text{MPa}\sqrt{m}$
 (b) $a/W=0.51$, $\Delta K_b=11.6\text{MPa}\sqrt{m}$
 (c) $a/W=0.65$, $\Delta K_b=11.8\text{MPa}\sqrt{m}$

Fig. 7 Surfaces of specimen overloaded at different values of a/W

(2) 과대하중직후의 미시파면

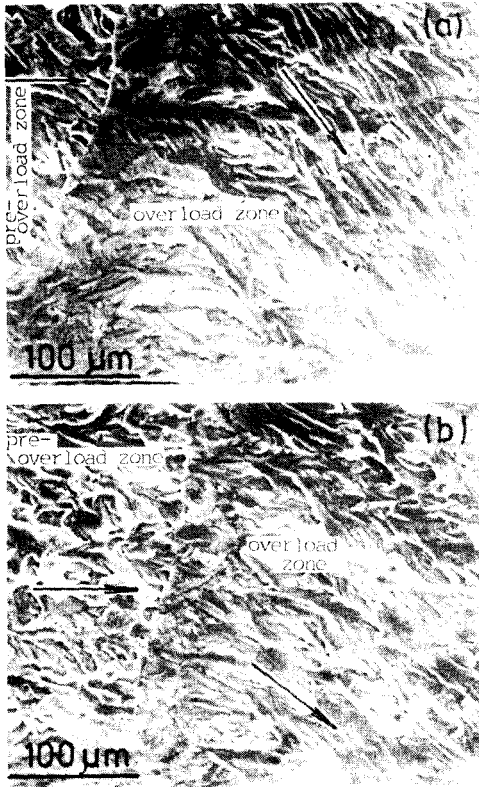
Fig. 8(a) (b)는 a/W 및 ΔK_b 가 일정한 경우, 과대하중직후 지연사이클 수 N_a 가 가장 많은 두께 2mm의 미시파면의 예이다. 중앙부 부근에서는 비이치 마아크(beach mark) 전후의 파면양상이 일정하며 이의 미시파면은 인장형이지만 표면부 부근에서는 심한 전단형을 나타내고 있다. 이러한 경향은 4mm, 10mm의 시험편에서도 비슷한 양상이지만 표면



(a) near specimen surface.
 (b) central portion of specimen. Arrow indicates direction of micro-crack growth

Fig. 8 Fracture surface features in specimen of $B=2\text{mm}$ ($a/W=0.48$, $\Delta K_b=8.2\text{MPa}\sqrt{m}$)

부 부근에서의 전단형 파면은 두께가 작을수록 현저히 증가하였다. 한편 시험편의 두께 및 ΔK_b 가 일정한 경우, a/W 가 다른 조건에서 과대하중직후의 표면부 파면양상의 예는 Fig. 9(a) (b)와 같으며 두께변화에 관계없이 전체적인 경향은 Fig. 8(a) (b)와 유사하지만 표면부 부근의 파면은 a/W 가 작을수록 현저한 전단형을 나타내고 있다. 따라서 이들과 균열선단의 양상을 연관지어 보면 피로 균열은 과대하중직후, 중심부에서는 이의 진전방향에 변화가 없지만 표면부 부근에서의 전단형 파면은 균열가지 또는 이의 진전방향변경에 관계한다고 할 수 있다. 따라서 두께 및 a/W 의 차이에 따르는 지연현상은 중심부보다 표면부 부근의 진전거동에 지배될 가능성이 크다고 하겠다.



(a) $a/W = 0.40$, $\Delta K_b = 11.3 \text{MPa}\sqrt{m}$
 (b) $a/W = 0.65$, $\Delta K_b = 11.5 \text{MPa}\sqrt{m}$. Arrow indicates direction of micro-crack growth

Fig. 9 Fracture surface features developed in near specimen of $B=4\text{mm}$

4. 고찰

4.1 균열선단에서의 K 값 분포

일정진폭하중에서 da/dN 와 두께와의 관계에 대한 최근의 연구결과를 정리하면

- (1) 균열진전의 중간영역 또는 높은 영역에서 두께가 클수록 da/dN 가 증가하는 경우^(6,14,19)
- (2) 8mm이상의 두께에서는 이의 효과가 없는 경우⁽¹²⁾
- (3) 두께가 클수록 da/dN 가 감소하는 경우⁽²⁰⁾
- (4) 두께의 영향이 거의 없는 경우⁽¹⁹⁾

로 나누어 진다.

한편 피로균열진전속도 da/dN 와 응력확대계수 범위 ΔK 와의 관계는 시험편 전체를 평면응력 또

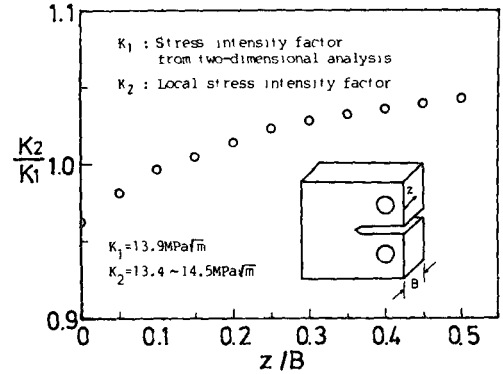


Fig. 10 Variation of stress intensity factor along the crack front of specimen ($B=10\text{mm}$)

는 평면변형률의 2차원적인 상태로 가정하여 평가한다. 그러나 시험편 두께에 따른 응력상태를 비교하면 표면은 평면응력, 내부는 평면 변형률상태이므로 두께의 관점에서 비교하면 두께가 작을수록 소성영역이 큰 평면응력상태가 될 경향이 크다. 또한 Hagiwara등⁽²¹⁾은 피로균열전단의 비이치 마야크 형태에 있어서 내부균열이 평면응력상태의 표면균열보다 빨리 진전하는 것처럼 보이나 정상속도에서 내부의 응력확대계수 K 가 표면보다 높다고 생각하면 내부가 오히려 표면보다 균열진전이 어려움을 의미한다고 보고하고 있다. 따라서 평면응력상태에서 McGowan등⁽¹⁴⁾이 지적한 균열단합의 영향이 존재하지 않으면 소성영역이 큰 표면에서의 균열진전속도가 평면변형률상태의 내부보다 빠르다고 생각된다.

Fig. 10은 두께방향에 따른 최대하중에서의 K 값의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 K_1 값은 제하탄성 컴플라이언스법에 의해 측정된 균열길이(시험편 표면과 내부를 포함한 평균적인 균열길이)로부터 산출한 것이며 K_2 값은 균열선단의 각 위치까지의 균열길로부터 얻은 것이다. 이 그림으로부터 내부로 갈수록 표면부에 비하여 높은 K 값을 나타냄을 알 수 있고 이것은 표면부에서 내부로 이동함에 따라 구속성의 변화로 인하여 중심부에서 높은 K 값을 갖게되어 표면부에 비하여 균열이 빨리 형성되어 성장하였기 때문이다. 따라서 시험편 두께방향에 따라 균열진전량(또는 진전속도)이 일정하다면^(14,21) K 값이 낮고 소성영역이 큰 표면부가 K 값이 높은 평면변형률상태의 내부에 비하여 피로균열진전속도가 빠르다고 할 수 있다. 그래서

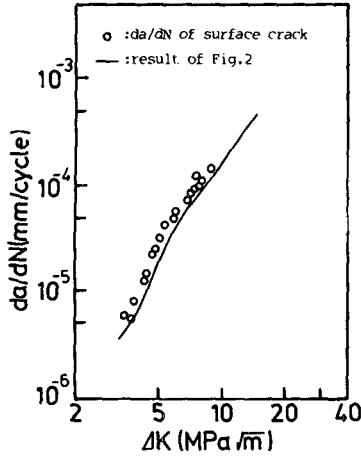


Fig. 11 Comparison between da/dN of surface crack and result of Fig. 3 ($B=10\text{mm}$)

$B=10\text{mm}$ 표면부에서의 피로균열진전속도 ($da/dN = 6 \times 10^{-6} \sim 1.6 \times 10^{-4} \text{mm/cycle}$)를 구하고 이의 결과를 Fig. 3의 것과 비교하였다. Fig. 11은 이의 결과로서 평면응력 조건을 만족하는 표면부의 da/dN 은 동일한 ΔK 에서 표면부와 내부의 평균적인 균열진전속도 da/dN 보다 빠름을 알 수 있다.

따라서 두께가 작을수록 da/dN 이 증가하는 것은 평면변형률상태의 두꺼운 시험편에 비하여 동일한 da/dN 에 있어서 소성영역이 크고 또한 K 값이 낮기 때문이라고 할 수 있다.

4.2 지연현상에 미치는 균열가지의 영향

단일과대하중시의 지연현상에 관한 기구로는 잔류압축응력과 이에 의한 균열 닫힘^(4,6), 균열둔화⁽⁵⁾, 균열가지^(16,22)등으로 설명되고 있으며 이들 기구의 공통점은 주로 균열선단의 소성영역크기 W_a 와 관계가 있다. 그러나 지연현상의 대소와 과대하중시의 W_a 와의 관계에 대해서는 잘 일치한다는 보고^(6,23)와 이의 상반된 결과^(4,24)가 보고되고 있어 이들의 관계는 명확하지 않다.

Fig. 12(a, b)는 Table 3에 정리한 W_a 와 N_d 및 a_d 와의 관계를 나타낸 것으로 일점쇄선은 a/W 및 ΔK_b ($a/W=0.48 \sim 0.51$, $\Delta K_b=8.1 \sim 8.2 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 및 $a/W=0.65 \sim 0.66$, $\Delta K_b=11.5 \sim 14.0 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)가, 그리고 이점쇄선은 시험편의 두께 및 ΔK_b ($B=4\text{mm}$ 에서는 $\Delta K_b=11.3 \sim 11.5 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, $B=10\text{mm}$ 에서는 $\Delta K_b=11.6 \sim 11.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)가 각각 일정한

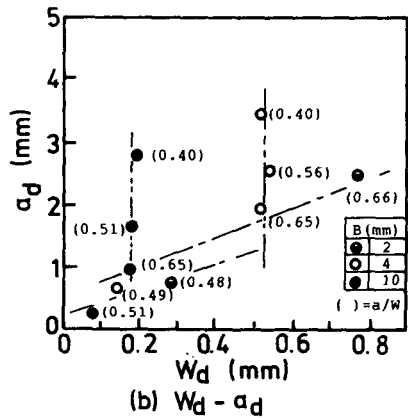
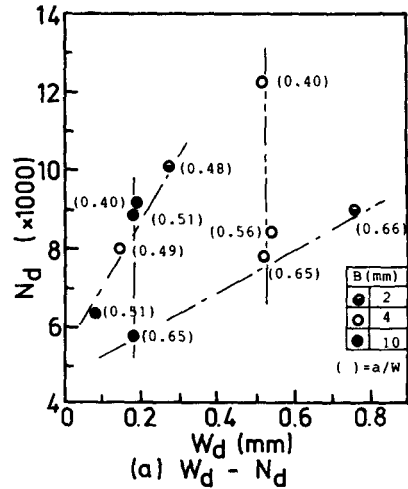


Fig. 12 Effects of overload plastic zone size (W_a) on number of retarded cycles (N_d) and total retarded crack growth distance (a_d)

경우이다. 이 그림에서 두께변화에 의한 지연현상의 차이는 W_a 와 밀접한 관련이 있지만 균열깊이의 증가에 따른 지연현상의 저하는 W_a 의 대소와 무관함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서의 W_a 는 지연현상에 있어서 필요조건은 될 수 있지만 충분조건이 아님을 알 수 있다. 그래서 두께에 따라 W_a 가 같은 동일 ΔK_b 에서도 a/W 에 따라 지연현상에 차이가 생기는 현상을 지연속도비 λ 및 균열가지등으로 인하여 생성될 수 있는 균열닫힘을 과대하중후의 균열성장길이 Δa 와 함께 검토하였다. λ 는 식 (4)로 정의하며

$$\lambda = \frac{(db/dN)_1}{(da/dN)_2} \tag{4}$$

이 식에서 $(da/dN)_1$ 은 일정진폭하중하의 피로균

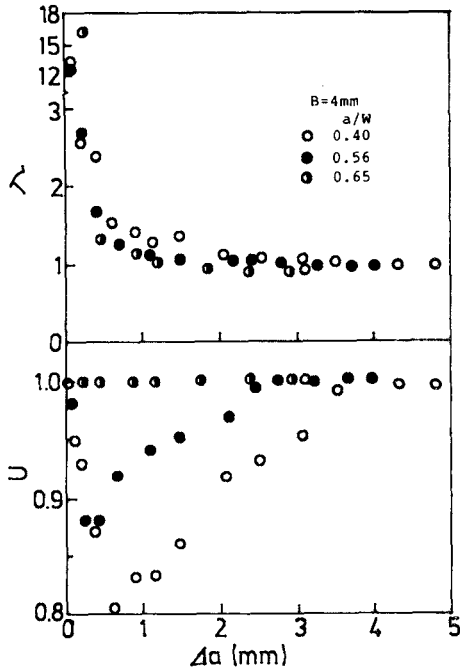


Fig. 13 Comparison of fatigue crack growth rate ratio(λ) and crack closure behavior following a single overload

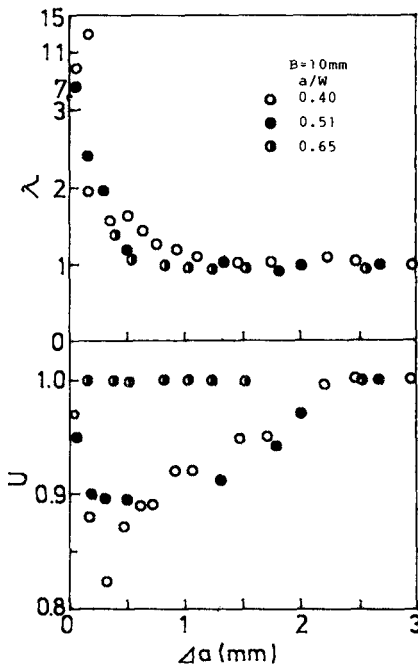


Fig. 14 Comparison of fatigue crack growth rate ratio(λ) and crack closure behavior following a single overload

열진전속도이며 $(da/dN)_2$ 는 단일과대하중후의 진전속도이다.

Fig. 13 및 Fig. 14는 두께 4mm 및 10mm 시험편에 대한 결과이다. 이들 그림에서 Δa 가 증가함에 따라 지연속도비는 급격히 감소하여 일정진폭하중하의 피로균열진전속도로 근접하며 동일한 균열성장길이에서는 $a/W=0.40$ 의 경우가 지연현상이 가장 현저함을 알 수 있다. 또한 이들 두께에서 $a/W=0.40$ 및 0.51 ($B=4mm$ 인 경우는 0.56)의 경우 Δa 의 증가($\Delta a \geq 0.5mm$ 영역)에 따른 지연속도비의 저하는 U 의 상승과 대응하고 있어 지연현상은 균열달힘의 대소에도 관계한다고 생각된다. 또한 미시파면에 있어서 표면부 부근은 전단형을 그리고 중심부는 인장형을 나타내고 있으므로 지연현상에 미치는 균열달힘현상은 종래의 결과^(6,12)와 마찬가지로 표면부 부근의 미시파괴거동과 밀접한 관련이 있음을 시사한다.

그러나 $\Delta a < 0.5mm$ 에서는 균열달힘이 증가함에도 불구하고 지연속도비는 감소하며 또한 $a/W=0.65$ 에서는 균열달힘이 존재하지 않는 $U=1$ 의 상태에서도 지연현상이 나타나고 있어 균열달힘만으로는 설명이 곤란함을 알 수 있다. Bilby 등⁽¹⁸⁾과 Kitagawa 등^(25,26)은 Kinked Crack과 Forked Crack에 대하여 Faber⁽²⁷⁾은 Doubly-Kinked Crack에 대하여 수치적인 방법으로 K 값을 구하였다. Suresh⁽¹⁵⁾는 과대하중후의 균열선단의 모양을 Fig. 15와 같은 세가지 형태로 정리하여 균열가지와 균

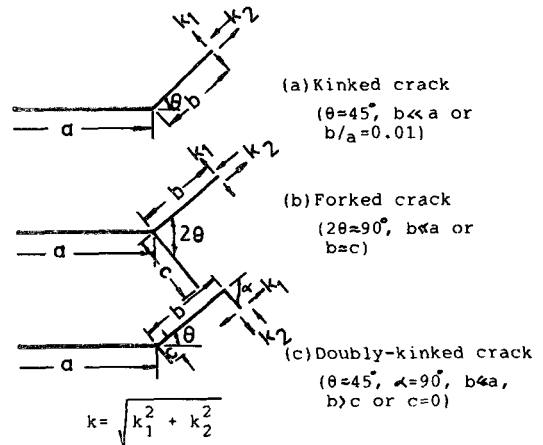


Fig. 15 Schematic showing possible types of crack branching after an overload and corresponding nomenclature to describe stress intensity factors⁽¹⁵⁾

열진전경로의 변화에 의해 K 값이 각각 $0.81\sim 0.85K$, $0.65\sim 0.67K$ 및 $0.74K$ 정도로 완화된 것을 보고하고 있다. Fig. 7에서의 균열선단의 모양은 이러한 균열형태를 나타내고 있으므로 균열가지 등에 의한 균열단합이 존재하지 않아도 위에서 설명한 K 값의 완화로 인하여 지연현상이 일어나게 된다. 따라서 a/W 변화에 따른 지연현상의 차이는 균열가지 또는 균열진전경로 변화에 의한 균열단합과 K 값의 완화가 주요한 원인이라고 할 수 있으며 시험편 두께에 의한 이의 정도는 소성영역의 크기 와도 관련이 있다고 하겠다.

5. 결 론

변동하중에 의한 피로균열의 지연현상 및 이의 기구를 규명하기 위하여 항공기 구조용 재료로서 널리 사용되고 있는 7075-T73 알루미늄 합금을 준비하고 일정진폭하중 및 단일과대하중에 의한 피로 균열진전거동에 미치는 시험편 두께의 영향을 검토하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 일정진폭하중하에서 두께가 작을수록 피로 균열진전속도는 증가하는 경향이며 이는 평면응력상태의 낮은 응력확대계수값과 소성영역의 크기에 관계한다.

(2) 균열길이 및 과대하중시의 응력확대계수값이 일정한 경우, 과대하중에 의한 지연현상은 두께가 클수록 저하한다.

(3) 균열깊이는 과대하중시 지연현상에 영향을 미치는 주요한 인자로서 이 값이 작을수록 지연현상은 증가하는 경향이며 또한 이에 의한 효과는 두께가 작은 시험편이 현저하다. 이것은 균열가지에 의한 균열단합 및 균열선단의 응력확대계수값의 완화가 주요한 원인이다.

(4) 지연현상은 표면부 부근의 전단형 미시파괴의 정도와 밀접한 관련이 있으며 균열가지 또는 이의 진전경로 변화로 인한 균열단합 및 응력확대계수 값의 완화는 중심부보다 표면부의 영향이 강하게 작용한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구의 일환으로 행하여졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. 바이다.

참 고 문 헌

- (1) Paris, P. and Erdogan, F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", J. Basic Engng, Trans. ASME, pp. 528~534.
- (2) Oktem Vardar, 1988, "Effects of single Overload in FCP," Eng. Fract. Mech., Vol. 30, No. 3, pp. 329~355.
- (3) Wei, R.P., and Shih, T.T., 1974, "Delay in Fatigue Crack Growth", Int. Jour. Fract., Vol. 10, No. 1, pp. 77~85.
- (4) Benard, P.J., Lindley, T.C., and Richards C.E., 1976, "Mechanisms of Overload Retardation During Fatigue Crack Propagation", ASTM STP 595, pp. 78~97.
- (5) Chanani, G.R., 1977, "Effect of thickness on Retardation Behavior of 7075 and 2024 Aluminum Alloys", Eng. Fract. Mech., Vol. 7, pp. 705~711.
- (6) Mills, W.J., and Hertzberg, R.W., 1975, "The Effect of Sheet Thickness on Fatigue Crack Retardation in 2024-T3 Aluminum Alloys", Eng. Fract. Mech., Vol. 7, pp. 705~711.
- (7) Shin, 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.
- (8) Vecchio, R.S., Hertzberg, R.W., and Jaccard R., 1984, "On the Overload Induced Fatigue Crack Propagation Behavior in Aluminum and Steel Alloys", Fatigue of Eng. Material and Structure, Vol. 7, No. 3, pp. 181~194.
- (9) Thomas, W.M., 1986, "The Effect of Single Overloads upon Fatigue Cracks in 5083-H321 Aluminum", Eng. Fract. Mech., Vol. 23, pp. 1015~1029.
- (10) Stephens, R.I., Chen, D.K., and Hom B.W., 1976, "Fatigue Crack Growth with Negative Stress Ratio Following Single Overloads in 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum Alloys", ASTM STP592, pp. 27~40.
- (11) Sharpe, W.N. Jr., Corbly, D.M., and Grandt A.F. Jr., 1976, "Effects of Rest Time on Fatigue Crack Retardation and Observations of Crack Closure", ASTM STP595, pp. 61~77.
- (12) Tokaji, K. Ando, A. Nagae, K. and Imai, T., 1985, "Effect of Sheet Thickness on Fatigue Crack Retardation in High Tensile Strength Steel and Validity of Crack Closure Concept", Trans. JSME, Vol. 462, pp. 318~325.
- (13) ASTM E647-88, 1988, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates".

- (14) McGowan, J.J. and Liu, H.W., 1980, "The Role of Three-Dimensional Effects in Constant Amplitude Fatigue Crack Growth Testing", *J. Engng Materials and Technology*, J. ASME, Vol. 102, pp. 341~346.
- (15) Suresh, S., 1983, "Micromechanisms of Fatigue Crack Growth Retardation Following Overloads", *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 18, No. 3, pp. 577~593.
- (16) Katz, Y. Bussiba, A. and Mathias, H., 1981, "Micromechanisms of Fatigue Crack Growth Exposed to Load Transient Effects", *Met. Sci.*, Vol. 15, pp. 317~319.
- (17) Suresh, S., 1985, "Fatigue Crack Deflection and Fracture Surface Contact: Micromechanical Models", *Met. Trans.*, Vol. 16A, pp. 249~260.
- (18) Bilby, B.A. Cardew, G.E. and Howards, I.C., 1977, "Stress Intensity Factors at the Tip of Kinked and Forked Cracks", *Fracture 1977*, Univ. of Waterloo Press, Vol. 3, pp. 197~200.
- (19) Hudson, C.M. and Newman, J.C., Jr., 1973, "Effect of Specimen Thickness on Fatigue Crack Growth Behavior and Fracture Toughness of 7075-T6 and 7178-T6 Aluminum Alloys", NASA TN D-7173.
- (20) Jack, A.R. and Price, A.T., 1972, "Effect of Thickness on Fatigue Crack Initiation and Growth in Notched Mild Steel Specimens", *Acta Metallurgica*, Vol. 20, pp. 857~866.
- (21) Hagiwara, Y., Yoshino, J. and Kunio T., 1981, "Effect of Thickness of Fatigue Crack Growth in Thin Steel Plates", *Trans. JSME*, Vol. 47, No. 419, pp. 698~707.
- (22) Lankford, J. and Davidson, D.L., 1981, "The Effect of Overloads upon Fatigue Crack Tip Opening displacement and Crack Tip Opening/Closing Loads in Aluminum Alloys", *Advances in Fracture Research*, Pergamon Press, Oxford, pp. 899~906.
- (23) 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.
- (24) Lee, E.W. Chakraborty, S.B. and Starke, E.A., Jr., 1984, "The Effect of Overload on the F.C.P. in Metastable Beta Ti-V Alloys", *Metall. Trans.*, Vol. 15A, pp. 511~517.
- (25) Kitagawa, H. and Yuuki, R., 1977, "Analysis of Branched Cracks under Biaxial Stresses", *Fracture 1977*, Univ. of Waterloo Press, Vol. 3, pp. 201~211.
- (26) Kitagawa, H. Yuuki, R. and Ohira, T., 1975, "Crack-Morphological Aspects in Fracture Mechanics," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 7, 515~529.
- (27) Faber, K., 1982. "Toughening of Ceramic Materials by Crack Deflection Processes", Ph. D. thesis, Univ. of California, Berkely.
- (28) Suresh, S., 1985, "Further Remarks on the Micromechanisms of Fatigue Crack Growth Retardation following Overloads", *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 6, pp. 1169~1170.