

<論 文>

고강도 알루미늄합금의 피로균열의 하한계 및 안정 전파거동

옹장우* · 진근찬** · 김종배** · 김재훈*** · 하태수***

(1987년 10월 19일 접수)

A Study on Near Threshold and Stable Crack Growth Behaviors in High Strength Aluminum Alloys

Jang Woo Ong, Keun Chan Jin, Jong Bae Kim,
Jae Hoon Kim and Tai Soo Ha

Key Words : Theshold Fatigue Crack Growth(하한계 피로균열진전), High Strength Aluminum Alloy(고강도 알루미늄합금), Crack Closure(균열닫힘)

Abstract

The threshold fatigue crack growth and the stable crack propagation behaviors were studied in 7017 T 651, 7020 T 651 and 5083 H 115 aluminum alloys. The threshold (ΔK_{th}) fatigue crack growth can be expressed by the equation $\Delta K_{th} = \Delta K_{tho}(1-R)^r$, where R is stress ratio, ΔK_{tho} is ΔK_{th} at $R=0$ and r is material constant. The stable crack growth rate against stress intensity factor range ΔK exhibits the trilinear form with two transitions and results of investigation on crack closure phenomena showed that the crack opening stress intensity factor K_{op} is approximately equal to $R K_{max} + \Delta K_{th}$.

1. 서 론

재료의 피로균열진전특성의 공학적 응용을 위해서는 안정균열 성장영역과 균열진전 하한계특성을 규명하는 것이 바람직하다. 균열진전 하한계값은 균열이 더 이상 진전하지 않거나 매우 작은 진전을 성장하는 값으로서 응력비, 환경, 미시조직의 영향을 크게 받고 있는 것으로 알려져 있다^(1~5). 이는 어떤 균열검사방법으로탐지 불가능한 최대균열 길이에서 구조물의 파손방지를 위한 설계기준이 된다. 또한 불규칙한 하중을 받는 구조물의 손

상축적해석등을 위해서는 응력비의 영향을 포함하여 균열진전 속도식을 수식화 하는것이 요구된다.

본 연구에서는 항공기, 압력용기 및 지상운송차량 등에 고강도와 용접성이 요구되는 고강도 알루미늄합금 7017 T651, 7020 T651 및 5083 H 115에 대해 균열진전 하한계특성 및 안정 균열성장거동을 규명하고, 균열닫힘현상이 균열진전 하한계특성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. 실험 방법

실험에 사용한 재료는 알루미늄합금 7017 T 651, 7020 T 651 및 5083 H 115 판재로서 각각의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다.

*정회원, 충남대학교 공과대학 기계설계공학과

**대전기계창

***충남대학교 대학원

Table 1 Chemical composition (wt, %)

Designation	Cu	Mg	Mn	Cr	Si	Fe	Ti	Zn	Zr	Ni
7017 T 651	0.20	2.00	0.05	0.35	0.35	0.45	0.15	4.00	0.10	0.10
7020 T 651	0.10	2.26	0.12	0.24	0.14	0.23	0.15	4.48	0.12	
5083 H 115	0.10	4.00	0.40	0.25	0.40	0.40	0.15	0.25		

Table 2 Mechanical properties

Designation	Yield strength σ_y (kgf/mm ²)	Tensile strength σ_t (kgf/mm ²)	Elongation ϵ (%)
7017 T 651	44.59	49.68	13.80
7020 T 651	34.93	39.44	15.48
5083 H 115	26.70	33.73	20.11

시험편은 CT시험편으로 ASTM E 647에 따라 설계하였으며 균열진전방향이 판재의 압연방향이 되는 L-T방향으로 하였다. 사용한 시험기는 Shimadzu 20톤용 유압 서어브식 피로시험기로 4톤을 최대 하중작용범위로 하고 하중반복속도를 12 Hz로 하여 하중제어방식으로 시험하였다. 균열길이는 디지털화된 100배의 이동식 현미경을 사용하여 표면과 이면 양쪽에서 1/1000mm까지 측정하여 평균값을 사용하였다. 균열진전속도가 5×10^{-6} mm/cycle 이상인 구간에 대해서는 반복하중을 일정하게 하여 ASTM E 647을 확대 적용하였으며, 하한계 응력확대계수폭 ΔK_{th} 를 구하기 위한 실험에서는 ASTM E 24, 04, 03에서 제안한⁽⁶⁾ 시험법에 따라 ΔK 감소시험을 행하였다. ΔK 감소시험은 하중감소에 따른 영향을 없애기 위하여, 응력비 R 이 일정할 경우

$$C \equiv \frac{1}{K} \frac{dK}{da} = \frac{1}{\Delta K} \frac{d\Delta K}{da} \geq -0.08 \text{mm}^{-1} \quad (1)$$

이 되도록 하고, 하중감소후의 최대하중 P_{max} 는 감소전 P_{max} 의 90% 이상이 되도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 균열진전 하한계특성

Fig. 1~3은 각각 7017 T 651, 7020 T 651 및 5083 H 115 알루미늄합금에 대한 ΔK 감소시험에 의한 저 ΔK 영역의 균열진전속도를 보여준다. 7017 T 651은 균열진전에 대한 하한계특성이 분명하게 나타나는 대신 7020 T 651 및 5083 H 115는 ΔK 가 더 감소되어도 낮은 속도의 균열진전이 계속됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 균열진전속도가

10^{-6} mm/cycle이하인 3점 이상의 데이터를 사용하여 $\log(da/dN)$ 와 $\log(\Delta K)$ 의 함수를 선형회귀하여 10^{-7} mm/cycle에 대응되는 ΔK 를 하한계 응력확대계수폭 ΔK_{th} 로 정하였다.

각 재료 및 응력비 R 에 따른 ΔK_{th} 를 정리해 보면 Table 3과 같으며 R 의 증가에 따라 ΔK_{th} 는 감소함을 알 수 있다.

Lukas와 Klesnil⁽⁷⁾, Asami⁽⁸⁾등은 응력비 R 이

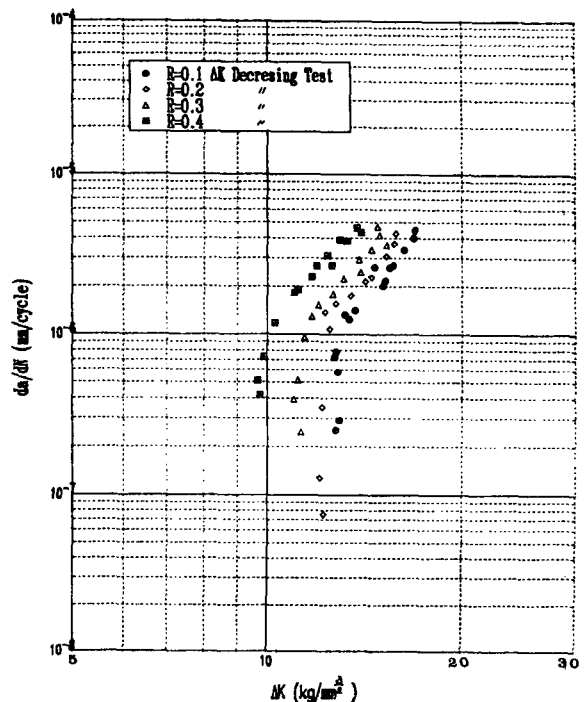


Fig. 1 Near-threshold fatigue crack growth rate vs stress intensity factor range in 7017 T 651 aluminum alloy

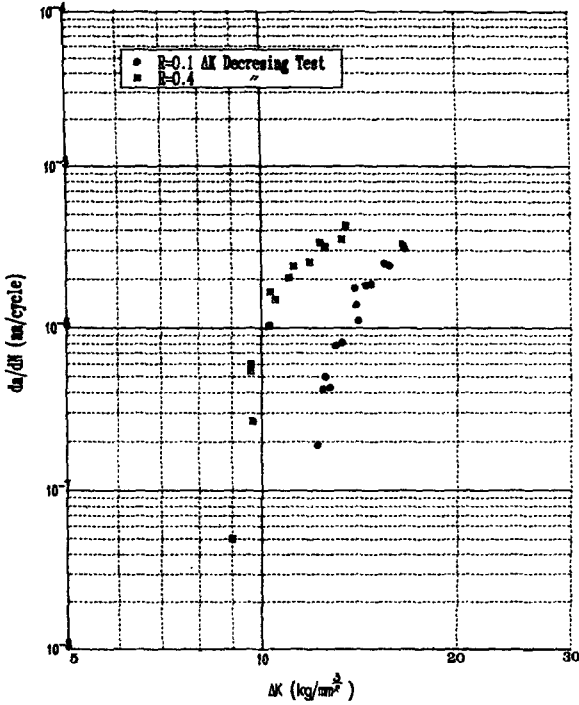


Fig. 2 Near-threshold fatigue crack growth rate vs stress intensity factor range in 7020 T 651 aluminum alloy

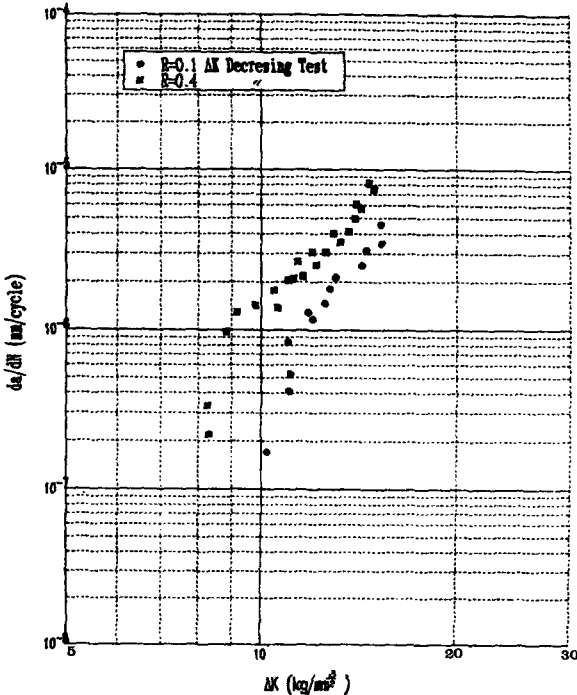


Fig. 3 Near-threshold fatigue crack growth rate vs stress intensity factor range in 5083 H 115 aluminum alloy

Table 3 Threshold stress intensity factor range ΔK_{th}

Designation	Stress ratio, R	ΔK_{th} (kg/mm ^{3/2})
7017 T 651	0.1	12.78
	0.2	12.13
	0.3	11.10
	0.4	9.75
7020 T 651	0.1	12.16
	0.4	9.21
5083 H 115	0.1	10.33
	0.4	8.24

Table 4 $\Delta K_{th} = \Delta K_{tho}(1-R)^r$

Designation	K_{tho} (kg/mm ^{3/2})	r
7017 T 651	14.06	0.706
7020 T 651	13.07	0.685
5083 H 115	10.96	0.558

ΔK_{th} 에 미치는 영향을 연구하여 ΔK_{th} 와 R의 관계를

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{tho}(1-R)^r \quad (2)$$

여기서 $\Delta K_{tho} = \Delta K_{th}$ at $R=0$

= material constant.

으로 제안하였다⁽⁷⁾.

Fig. 4는 $1-R$ 과 ΔK_{th} 와의 관계를 양대수 좌표로 나타낸 것으로 식(2)와 같은 관계를 나타내고 있음을 보여주고 있다. 각 재료에 대해 R과 ΔK_{th} 와의 관계를 식(2)로부터 구해 보면 Table 4와 같다. Table 4는 7017 및 7020 알루미늄합금이 5083 알루미늄합금보다 균열진전하한계값이 높다는 것을 보여준다.

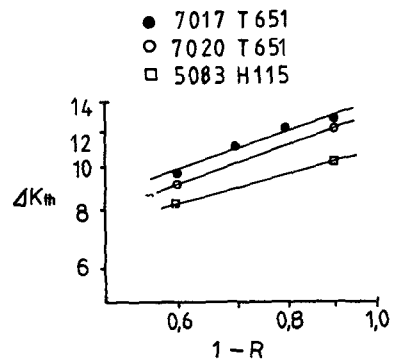


Fig. 4 Relationship between ΔK_{th} and R

3.2 안정균열 성장거동

Fig. 5~7은 각 재료의 2단계 피로균열 진전속도를 구한 실험결과와 낮은 ΔK 영역의 하중감소시험에 의한 균열진전하한계 실험결과를 합하여 나타낸 것이다. Fig. 5는 응력비 R 을 0.1, 0.2, 0.3, 0.4로 변화시키면서 시험한 7017 T 651 알루미늄합금의 제1, 2단계 피로균열진전속도를 보여주고, Fig. 6, 7은 7020 T 651 및 5083 H 115 알루미늄합금에 대한 $R=0.1, 0.4$ 인 경우의 실험결과를 나타내고 있다.

그림에서 ΔK 가 큰 영역에서는 응력비의 영향이 작고 ΔK 가 낮은 영역일수록 응력비의 영향이 크게 나타나고 있다. 또 제2단계의 안정균열 성장영역에서는 Paris의 균열진전법칙 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 을 달리 적용시켜야 할 3개의 구간으로 구분될 수 있다. 즉 Fig. 5~7 및 Table 5에서 균열진전속도가 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ mm/cycle 부근은 비교적 완만한 $m=3 \sim 5$ 의 기울기를 나타내고 있으며 (Table 5의 II_a 영역), $10^{-5} \sim 10^{-4}$ mm/cycle 부근에서는 m 값이 7이상되는 급격한 기울기를 나타내고 있다 (II_b 영역). 이러한 현상은 5083-0 알루미늄합금에 대한 실험결

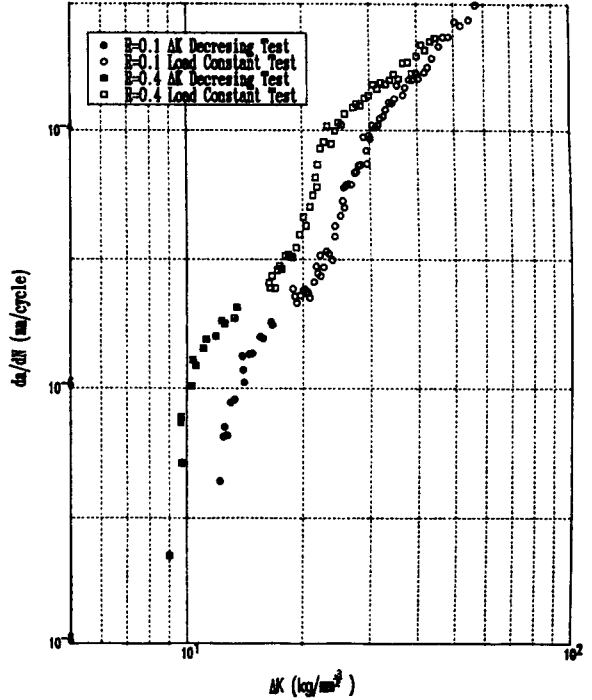


Fig. 6 Fatigue crack growth rate vs stress intensity factor range in 7020 H 651 aluminum alloy

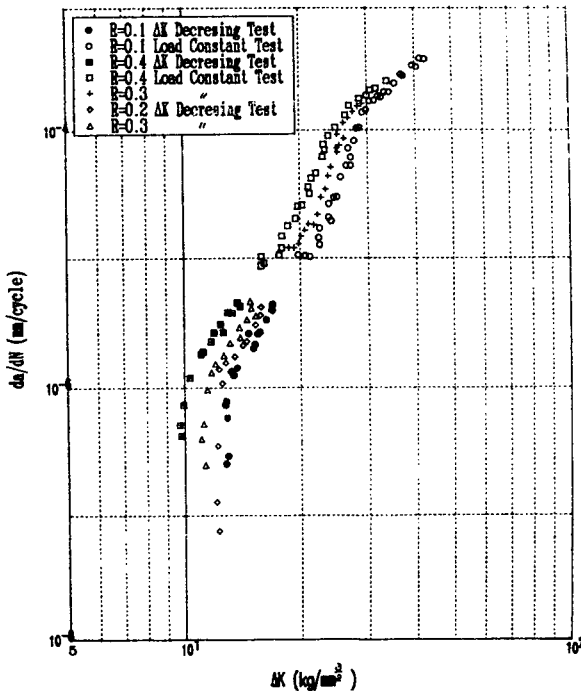


Fig. 5 Fatigue crack growth rate vs stress intensity factor range in 7017 T 651 aluminum alloy

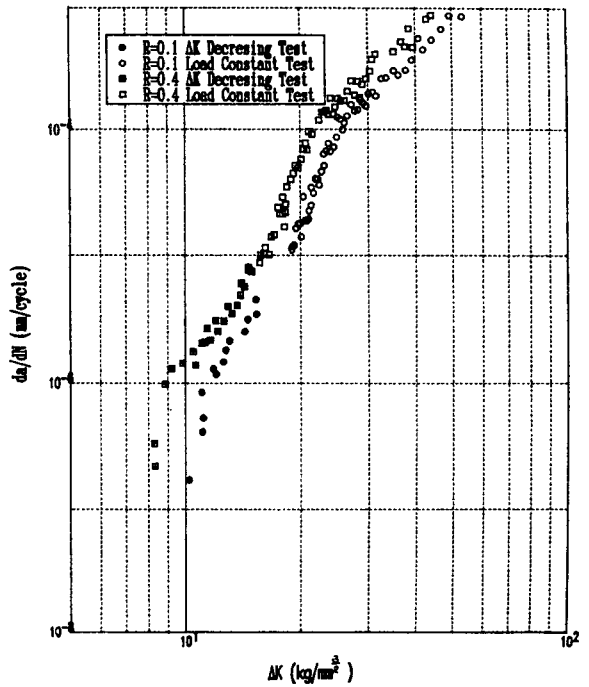


Fig. 7 Fatigue crack growth rate vs stress intensity factor range in 5083 H 115 aluminum alloy

Table 5 $da/dN = C(\Delta K)^m$

Designation	Region	Stress ratio R	ΔK range (kg/mm ^{3/2})	da/dN range (mm/cycle)	C	m
7017 T 651	II _a	0.1	14.12 ≤ ΔK ≤ 23.04	1.75 × 10 ⁻⁶ ≤ da/dN ≤ 1.74 × 10 ⁻⁵	5.53 × 10 ⁻¹²	4.77
		0.3	12.37 ≤ ΔK ≤ 22.69	1.64 × 10 ⁻⁶ ≤ da/dN ≤ 2.71 × 10 ⁻⁵	1.62 × 10 ⁻¹¹	4.59
		0.4	10.69 ≤ ΔK ≤ 20.05	1.64 × 10 ⁻⁶ ≤ da/dN ≤ 2.56 × 10 ⁻⁵	4.77 × 10 ⁻¹¹	4.40
	II _{ab}	0.1	23.04 ≤ ΔK ≤ 29.65	1.74 × 10 ⁻⁵ ≤ da/dN ≤ 1.54 × 10 ⁻⁴	2.86 × 10 ⁻¹⁷	8.65
		0.3	22.69 ≤ ΔK ≤ 27.59	2.71 × 10 ⁻⁵ ≤ da/dN ≤ 1.50 × 10 ⁻⁴	3.71 × 10 ⁻¹⁷	8.75
		0.4	20.05 ≤ ΔK ≤ 25.39	2.56 × 10 ⁻⁵ ≤ da/dN ≤ 1.54 × 10 ⁻⁴	2.97 × 10 ⁻¹⁵	7.63
	II _b	0.1	29.65 ≤ ΔK	1.54 × 10 ⁻⁴ ≤ da/dN	1.88 × 10 ⁻⁸	2.66
		0.3	27.59 ≤ ΔK	1.50 × 10 ⁻⁴ ≤ da/dN	5.77 × 10 ⁻⁸	2.37
		0.4	25.39 ≤ ΔK	1.54 × 10 ⁻⁴ ≤ da/dN	3.32 × 10 ⁻⁷	1.90
7020 T 651	II _a	0.1	14.95 ≤ ΔK ≤ 24.59	2.16 × 10 ⁻⁶ ≤ da/dN ≤ 1.46 × 10 ⁻⁵	9.48 × 10 ⁻¹¹	3.73
		0.4	10.63 ≤ ΔK ≤ 19.56	1.92 × 10 ⁻⁶ ≤ da/dN ≤ 1.27 × 10 ⁻⁵	1.30 × 10 ⁻⁹	3.09
	II _{ab}	0.1	24.59 ≤ ΔK ≤ 31.37	1.46 × 10 ⁻⁵ ≤ da/dN ≤ 1.20 × 10 ⁻⁴	1.32 × 10 ⁻¹⁷	8.66
		0.4	19.56 ≤ ΔK ≤ 23.10	1.27 × 10 ⁻⁵ ≤ da/dN ≤ 1.60 × 10 ⁻⁴	1.20 × 10 ⁻²¹	12.41
	II _b	0.1	31.37 ≤ ΔK	1.20 × 10 ⁻⁴ ≤ da/dN	6.50 × 10 ⁻¹⁰	3.52
		0.4	23.10 ≤ ΔK	1.60 × 10 ⁻⁴ ≤ da/dN	3.79 × 10 ⁻⁸	2.51
5083 H 115	II _a	0.1	12.27 ≤ ΔK ≤ 22.59	1.38 × 10 ⁻⁶ ≤ da/dN ≤ 4.68 × 10 ⁻⁵	4.15 × 10 ⁻¹¹	4.47
		0.4	11.31 ≤ ΔK ≤ 13.36	2.12 × 10 ⁻⁶ ≤ da/dN ≤ 2.08 × 10 ⁻⁵	9.35 × 10 ⁻¹²	4.75
	II _{ab}	0.1	22.59 ≤ ΔK ≤ 25.26	4.68 × 10 ⁻⁵ ≤ da/dN ≤ 1.13 × 10 ⁻⁴	8.06 × 10 ⁻¹⁸	7.95
		0.4	13.36 ≤ ΔK ≤ 22.11	2.08 × 10 ⁻⁵ ≤ da/dN ≤ 1.29 × 10 ⁻⁴	1.22 × 10 ⁻¹⁵	8.20
	II _b	0.1	25.26 ≤ ΔK	1.13 × 10 ⁻⁴ ≤ da/dN	1.04 × 10 ⁻⁸	2.88
		0.4	22.11 ≤ ΔK	1.29 × 10 ⁻⁴ ≤ da/dN	3.88 × 10 ⁻⁸	2.62

Table 6 $da/dN = C'(\Delta K - \Delta K_{th})^{m'}$

Designation	Region	(ΔK - ΔK _{th}) range (kg/mm ^{3/2})	da/dN range (mm/cycle)	C'	m'	ΔK _{th}
7017 T651	II _a	2.37 ≤ ΔK - ΔK _{th} ≤ 8.67	2.40 × 10 ⁻⁶ ≤ da/dN ≤ 1.21 × 10 ⁻⁵	7.99 × 10 ⁻⁷	1.26	ΔK _{th} = 14.06(1-R) ^{0.706}
	II _{ab}	8.67 ≤ ΔK - ΔK _{th} ≤ 19.10	1.21 × 10 ⁻⁵ ≤ da/dN ≤ 2.56 × 10 ⁻⁴	2.91 × 10 ⁻⁹	3.86	
	II _b	19.10 ≤ ΔK - ΔK _{th}	2.56 × 10 ⁻⁴ ≤ da/dN	1.16 × 10 ⁻⁶	1.83	
7020 T651	II _a	1.02 ≤ ΔK - ΔK _{th} ≤ 11.91	9.34 × 10 ⁻⁷ ≤ da/dN ≤ 8.98 × 10 ⁻⁶	9.19 × 10 ⁻⁷	0.92	ΔK _{th} = 13.07(1-R) ^{0.685}
	II _{ab}	11.91 ≤ ΔK - ΔK _{th} ≤ 22.80	8.98 × 10 ⁻⁶ ≤ da/dN ≤ 2.05 × 10 ⁻⁴	5.85 × 10 ⁻¹¹	4.82	
	II _b	22.80 ≤ ΔK - ΔK _{th}	2.05 × 10 ⁻⁴ ≤ da/dN	2.18 × 10 ⁻⁷	2.19	
5083 H115	II _a	4.10 ≤ ΔK - ΔK _{th} ≤ 9.22	2.86 × 10 ⁻⁶ ≤ da/dN ≤ 1.50 × 10 ⁻⁵	1.54 × 10 ⁻⁷	2.06	ΔK _{th} = 10.95(1-R) ^{0.588}
	II _{ab}	9.22 ≤ ΔK - ΔK _{th} ≤ 14.58	1.50 × 10 ⁻⁵ ≤ da/dN ≤ 1.23 × 10 ⁻⁴	5.46 × 10 ⁻¹⁰	4.60	
	II _b	14.58 ≤ ΔK - ΔK _{th}	1.23 × 10 ⁻⁴ ≤ da/dN	5.49 × 10 ⁻⁷	2.02	

과에서도 보고되고 있다⁽⁹⁾.

이 원인으로는 미시조직상의 계재물의 영향⁽¹⁰⁾, 소성역크기와 결정입경과의 관계^(9,11)등으로 설명되고 있다.

Hartman과 Schijve는 ΔK_{th}를 포함한 아래식 (3)의 균열진전속도식을 제안하였다⁽¹²⁾.

$$da/dN = C'(\Delta K - \Delta K_{th})^{m'} \quad (3)$$

Fig. 8~10은 Fig. 5~7의 da/dN을 ΔK - ΔK_{th}

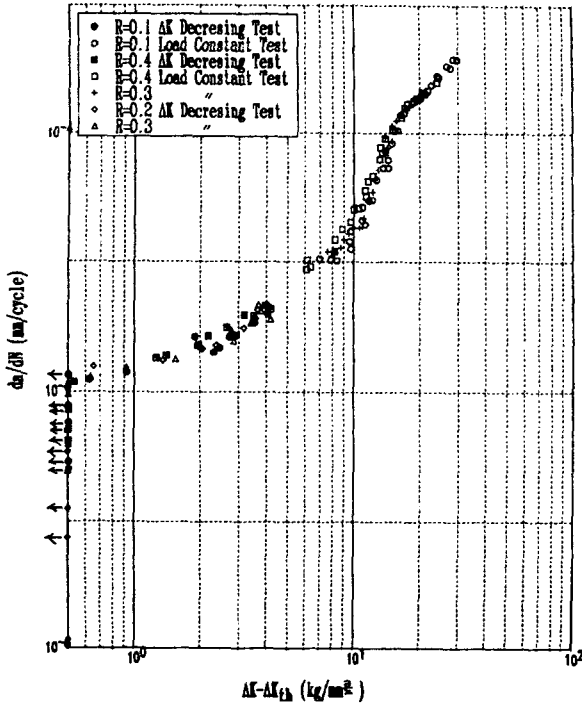


Fig. 8 Fatigue crack growth rate vs $\Delta K - \Delta K_{th}$ 7017 T 651 aluminum alloy

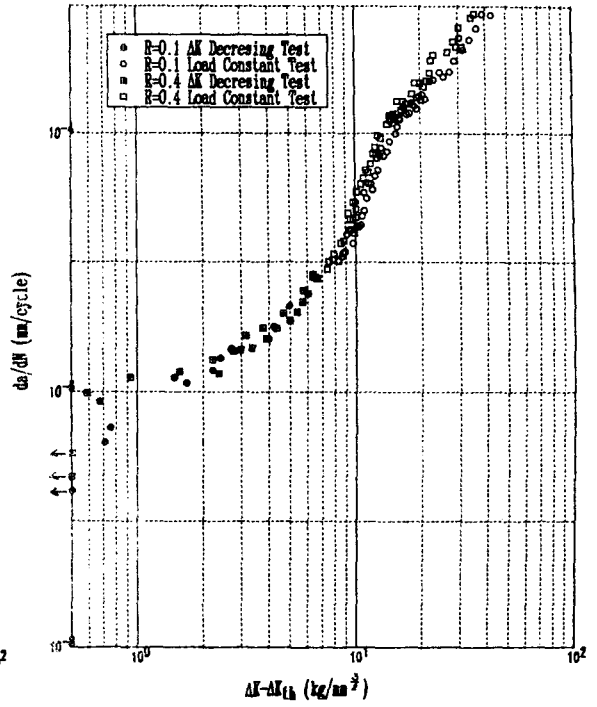


Fig. 10 Fatigue crack growth rate vs $\Delta K - \Delta K_{th}$ 5083 H 115 aluminum alloy

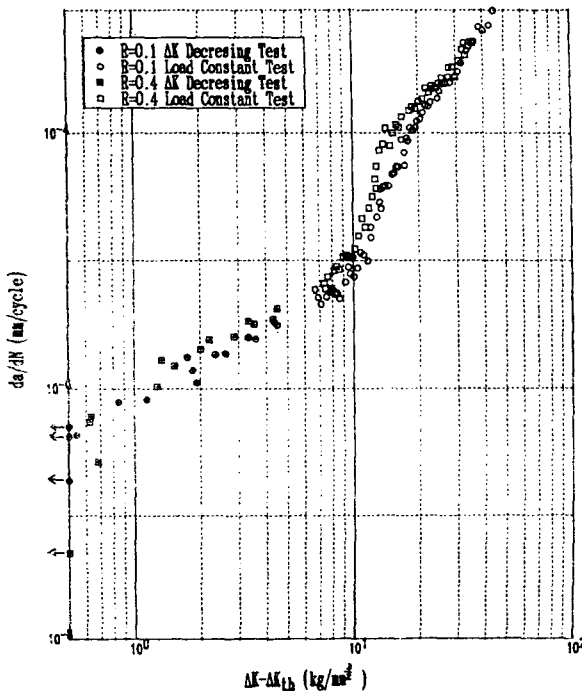


Fig. 9 Fatigue crack growth rate vs $\Delta K - \Delta K_{th}$ in 7020 T 651 aluminum alloy

에 대해 정리한 것으로, 약간의 흠어짐은 있으나 R값에 관계없이 잘 정리되고 있다. 또 제2단계 균열진전영역은 Fig. 5~7에서와 마찬가지로 3개의 영역으로 구분되는데, 각 재료에 대하여 구간별 공식(3)의 C' 와 m' 를 구한 결과는 Table 6과 같다.

균열단합현상에 대한 많은 연구결과는 유효응력 확대계수 ΔK_{eff} 를 사용하면 응력비에 관계없이 균열진전속도가 아래식(4)로 잘 정리된다는 것을 보여주고 있다^(9,13).

$$da/dN = C'' (\Delta K_{eff})^{m'} \quad (4)$$

식(3)과 (4)는 응력비에 관계없이 균열진전 속도가 잘 정리되고, 또한 같은 형태를 가지고 있으므로 균열열림점의 응력확대 계수 K_{op} 의 영향을 고찰해 보기위해

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} = \Delta K - \Delta K_{th} \quad (5)$$

라고 가정하면

$$\begin{aligned} K_{op} &= K_{max} - \Delta K + \Delta K_{th} \\ &= RK_{max} + \Delta K_{th} \end{aligned} \quad (6)$$

가 된다. 식(6)에서 K_{op} 는 K_{max} 가 증가함에 따라 R의 기울기를 따라 증가한다. 이를 도식적으로 표시하면 Fig. 11과 같다. 이러한 특성은 5083-0 알

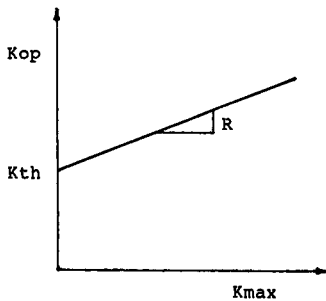


Fig. 11 Dependence of K_{op} on K_{max}

루미늄합금에 대한 K_{op} 와 K_{max} 관계에서도 같은 경향을 나타내고 있다⁽⁹⁾.

따라서 식 (5), (6)을 사용하면 약간의 흠여짐은 있으나 균열단형현상에 대한 측정없이 ΔK_{th} 를 이용하여 균열진전속도식을 잘 정리할 수 있다.

4. 결 론

고강도 알루미늄합금인 7017 T 651, 7020 T 651 및 5083 H 115에 대해 ΔK 감소시험에 의한 균열진전 하한계특성과 제2단계 균열진전특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 7017 T 651, 및 7020 T 651 알루미늄합금이 5083 H 115 알루미늄합금보다 응력비 R 의 영향을 받고 균열진전 하한계값이 크다.

(2) 제2단계 균열진전특성은 대략 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ mm/cycle, $10^{-5} \sim 10^{-4}$ mm/cycle, 10^{-4} mm/cycle 이상의 3영역으로 구분되고, 특히 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ mm/cycle 영역에서는 Paris의 균열진전속도식의 m 값이 7이상이 되는 급격한 기울기를 가진다.

(3) $K_{op} \cong RK_{max} + \Delta K_{th}$ 의 관계를 사용하여 $\Delta K_{eff} = \Delta K_{max} - K_{op}$ 로 da/dN 을 정리하면 약간의 흠여짐은 있으나 응력비 R 에 관계없이 균열진전속도를 잘 정리할 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) P.C. Paris, R.J. Bucci, E.T. Wessel, W.G. Clark, Jr., and T.R. Mager, 1972, "EX Tensive Study of Low Fatigue Crack Growth Rates in A533 and A508

Steels, ASTM STP 513, pp.141~176.

(2) R.J. Bucci, W.G. Clark, Jr. and P.C. Paris, 1972, "Fatigue Crack Propagation Growth Rates under a wide Variation of ΔK for an ASTM A517 Grade F Steel, ASTM STP 513, pp.177~195.

(3) R.O. Ritchie, 1979, "Near-Threshold Fatigue -Crack Propagation in Steels, Int. Metals Reviews, Nos. 5 and 6, pp.205~230.

(4) R.L. Tobler and Y.W. Cheng, 1985, "Automatic Near-Threshold Fatigue Crack Growth Rate Measurements at Liquid Helium Temperature", Int. J. Fatigue 7, No. 4, pp. 191~197.

(5) W.V. Vaidya, 1986, "Near Threshold Fatigue Crack Propagation Behaviour of a Heterogeneous Microstructure, Fatigue Fract, Engng, Mater. Struct., Vol. 9, No. 4, pp.305~317.

(6) ASTM Committe E-24, 1981, "Proposed ASTM Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", Appendix II, ASTM STP 738, pp. 340~356.

(7) P. Lukas and M. klesnil, 1972, "Effect of Stress Cycle Asymmetry of Faitigue Crack Growth", Mater, Sci. Eng., Vol. 9, pp.231~240.

(8) K. Asami, 1985, "Current Research on Fatigue Cracks", The Japan Society of Material Science, pp. 175~199.

(9) 박영조, 김정규, 김일현, 1986, "5083-0 알루미늄합금의 피로균열진전거동과 균열단형에 관한 연구, 대한기계학회논문집, 제10권 제2호, pp.208~214.

(10) S.M. El-Soudani and Pelloux, 1973, "Influence of Inclusion Content on Fatigue Crack Propagation in Aluminum Alloys, Metallurgical Trans., Vol. 4, pp.519~531.

(11) G.R. Yoder, L.A. Cooly and T.W. Crooker, 1978, "Fatigue Crack Propagation Resistance of Betaannealed Ti-6Al-4V Alloys of Differing interstitial Oxygen Contents", Metallurgical Trans., Vol. 9A, pp.1413~1420.

(12) A. Hartman and J.Schijve, 1970, "The Effects of Environment and Load Frequency on the Crack Propagation Law for Macro Fatigue Crack Growth in Aluminum Alloys", Engng, Frac, Mech., Vol.1, pp.615~631.

(13) W. Elber, 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP 486, pp.230~242.