

고-저블럭 응력비에서 하중진폭이 작은 인장과대 하중의 균열성장 거동

(Crack Growth Behavior of Tensile Overload for Small Load Amplitude at High-Low Block Stress Ratio)

김 열 래*(경민전문대학), 유 현 일(국민대), 여 은 구(국민대 대학원),
이 종 선(대전대), 이 정 윤(삼척산업대)

Abstract

This paper examines the crack growth behavior of 7075-T651 aluminum alloy under high-low block loading condition.

The cantilever beam type specimen with a chevron notch is used in this study. The crack growth and closure are investigated by compliance method. The applied initial stress ratios are $R=-0.5$, $R=0.0$ and $R=0.25$

Crack length(a), effective stress intensity factor range(ΔK_{eff}), ratio of effective stress intensity factor range(U) and crack growth rate(da/dN) etc. are inspected fracture mechanics estimate.

1. 서론

여러 가지의 하중진폭하에 피로균열 성장거동은 정하중에서의 거동과는 많은 차이가 있으며, 다양한 크기의 하중에 대한 피로균열 성장은 재료나 구조물에 하중이 가해진 시간동안 큰 영향을 받는다. 이에 대한 수명예측은 균열단합의 응용으로 많은 논의가 되고 있으며, 균열단합은 균열성장을 감소시키는 원인으로 최근에 많은 문헌에 의하여 소개되어 지고 있다.¹⁾

하중이 가해지는 동안 균열단합거동, 균열진전 등은 피로균열 증가의 초기조건에 영향을 미치며, 여러 가지 하중의 초기조건에서 선형적분에 의한 $da/dN - \Delta K_{eff}$ 관계에서 응력비에 관계없이 선형적으로 평가된다.²⁾

복잡한 응력들의 균열성장거동은 응력확대계수범위(ΔK)와 같은 순간적이고 거시적인 파괴역학적 파라메타에 의해서는 평가가 어려우며,^{3),4)} 따라서 피로수명예측을 어렵게 하고 있다.

균열성장은 하중의 변화, 과부하 등에 많은 영향을 받으며, 반복되어 지는 일시적인 거동에

의하여 여러 가지 형태로 변화된다.

변동하중에서 피로균열 성장거동 연구에 사용되는 두가지 방법으로 하나는 일정한 하중진폭에서 과부하(overload)를 가하는 것으로 이것은 균열성장 거동이 시편의 표면에서 관찰되어 지며 균열 끝단에서 소성영역의 크기나 과부하 이후의 지연기간 동안 균열단합의 변화 등의 파라메타⁵⁾를 기준으로 균열성장-모델을 제시한다. 두번째는 하중진폭을 변화시키는 방법으로 각각의 응력레벨에서 균열진전이 매우 작으므로 균열진전을 측정하기 위해 각각 응력블럭의 균열성장은 일정하다는 가정하에 선형누적법칙(linear cumulative law)이 도입되고 있다.²⁾

본 연구에서는 고장력강인 알루미늄합금 7075-T651을 사용하여 외팔보 형식의 시편으로 일정한 하중진폭에서 균열성장중 고하중 저진폭으로 변화시켜 균열진전 실험을 수행하였으며, 하중변화에 따라 발생하는 균열성장 거동을 연구하였다.

2. 시험편과 실험과정

시험편

본 실험에 사용한 재료는 항복강도와 인장강도가 각각 503MPa, 572MPa의 고강도 Al-Mg-Zn계 7075-T651 알루미늄 합금을 사용하였다.

초기노치는 관통균열의 쉘브론노치를 주어 초기균열진전이 일어나게 한 평면굽힘 외팔보 형식의 면내굽힘 시험편으로서 관통균열 부위는 표면 0.6mm에서 최대한의 균열진전거동을 관찰하기 위하여 쉘브론노치각 120°로 제작하였다. 시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 시험편은 균열진전 방향으로 $r=0.4mm$ 의 반원형 측면홈을 주어 균열진전이 되면 평면변형을 상태에서 균열전파가 발생되도록 하였다. 시험편 외부 가공은 와이어커팅으로 제작하였으며, 쉘브론노치와 측면홈은 방전가공하여 전체적인 시험편 오차를 극소화 하였다. 시험

편 채취방향은 L-T방향이다.

화학적 성분은 X선 스펙트라 분석법에 의하여 검출한 것으로서 Table 1에 표시하였으며, Table 2는 기계적성질을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of 7075-T651 Al alloy (%wt.)

Material	Zn	Cu	Mg	Cr	Mn	Fe	Si	Ti	Al
7075-T651	5.6	1.6	2.5	0.3	0.3	0.5	0.4	0.2	remainder

Table 2 Mechanical properties of 7075-T651 Al alloy

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Shear strength (MPa)	Elongation (%)
7075-T651	503	572	310	10

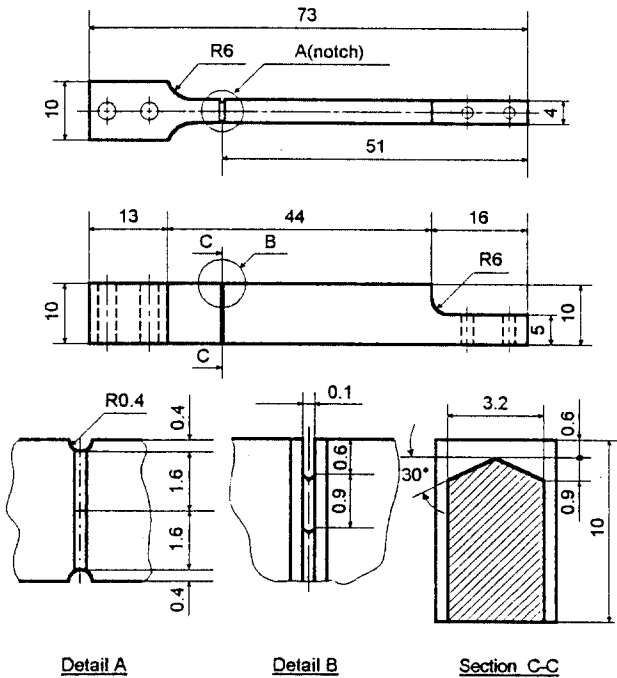


Fig. 1 Configuration of test specimen

실험과정

피로시험은 상온 대기중에서 주파수 범위는 정현파형 20Hz로 하였으며, 최대용량이 약 200N 인 소형전동형 급힘 피로시험기⁶⁾를 사용하였다.

시험장치의 구성은 Fig. 3과 같이 함수발생기에서 발생한 파형을 파워앰프로 하중진폭과 크기를 증폭하여 전동용 구동코일에 전달시킨다. 시험편에 가해진 하중은 로드셀(load cell)로 측정하고 배면스트레인게이지(backface strain gage)는 변위신호를 감지하여 감산회로를 거쳐 모니터와 컴퓨터

터로 보내어 저장한다. 시험장치의 안전성을 고려하여 최대 가진력을 100N으로 설정하고 cycle당 데이터의 수집속도는 200점으로 하였다. 피로하중은 하중제어방식에 의하여 하중을 부하하고 초기의 하중진폭보다 작은 고하중 저진폭의 변동하중을 주어 각각의 응력비에 따라 균열진전거동을 관찰하였다.

실험에서 외팔보의 순수굽힘에 의한 압축과 인장을 발생시켜 초기 응력비 $R=-0.5$, $R=0.0$, $R=0.25$ 를 기준으로 하중을 설정하고 균열진전후 저진폭의 인장하중으로 변화시켜 각각의 응력비에 대한 하중이 균열전파에 미치는 영향을 고찰하였다. 각 시험편에 사용한 응력비(R)의 하중모델과 고하중 저진폭 하중패턴은 Table 3, Fig. 2와 같다.

Table 3 Kinds of through crack specimen along load ratio

Pattern	Stress ratio	$P_{max}(N)$	$P_{min}(N)$	$\Delta P(N)$
A	$R=-0.5$	36.7	-18.35	55.05
	$R=0.67$	55.05	36.7	18.35
	$R=-0.5$	36.7	-18.35	55.05
B	$R=0.0$	55.05	0	55.05
	$R=0.75$	73.4	55.05	18.35
C	$R=0.25$	73.4	18.35	55.05
	$R=0.8$	91.75	73.4	18.35
	$R=0.25$	73.4	18.35	55.05

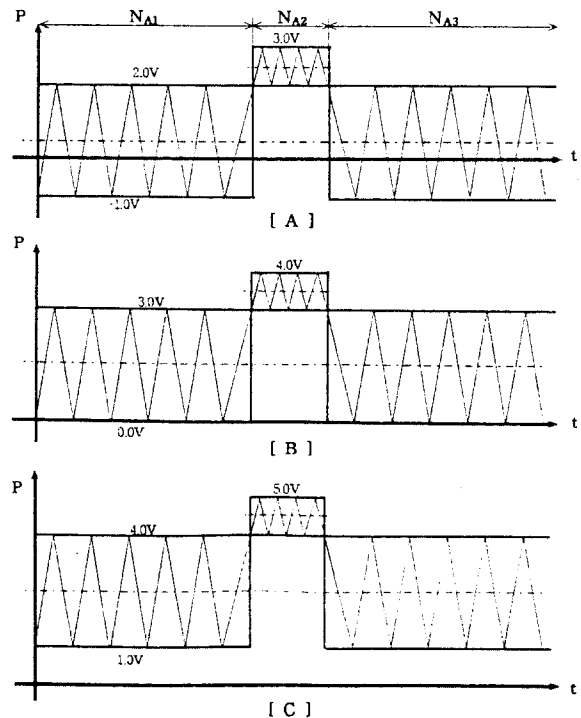


Fig. 2 Load patterns

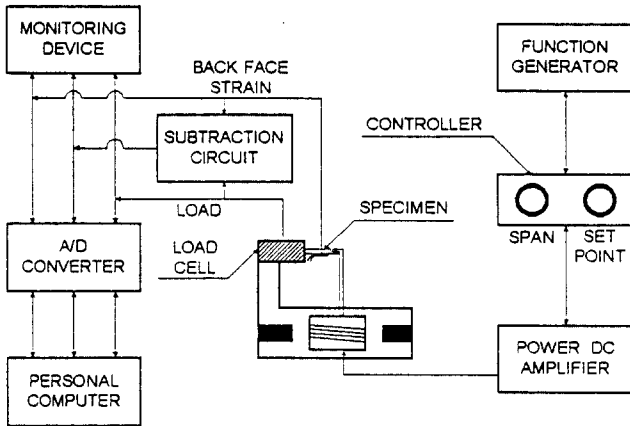


Fig. 3 System of fatigue test

3. 고하중 저진폭 변동하중

예비실험

피로균열진전 실험을 수행하기 전에 시험편에 가해지는 하중은 로드셀에 부착된 4개의 스트레인게이지에서 얻어지는 전압으로서 하중측정값을 구한 다음 선형회기식의 교정곡선을 도입하여 시험편에 가해지는 하중을 측정하였다.

균열진전에 대한 예비실험은 쉘브론형상의 초기노치를 기준으로 시험편에 인공결함을 주여 여기에 대응하는 정밀저항(potentiometer)값을 측정하고 반복적으로 균열길이를 증가시키면서 정밀저항값을 기록하여 실험시 균열길이를 산출할 때 사용하였으며, 정확한 데이터를 얻기 위해 누승회기식을 도입하였다.

예비실험 결과 하중과 균열길이에 대한 교정식은 다음과 같이 구하였으며, 실험을 통해 얻어진 데이터를 교정식에 적용시켜 사용하였다.

$$N=20.6834V-0.15765 \quad (N:\text{Newton}, V:\text{Voltage})$$

$$\frac{\Delta A_i}{A_o - \Delta A_i} = 0.0518 \times \left(\frac{P_o - P_i}{P_i} \right)^{0.6732} \quad \text{-- I 구역}$$

$$\frac{\Delta A_i}{A_o - \Delta A_i} = 0.4489 \times \left(\frac{P_o - P}{P} \right)^{0.8479} \quad \text{-- II 구역}$$

Boundary point : 0.686604

(ΔA_i : Crack area of specimen, A_o : Initial area of notched specimen, P_o : Initial graduation of potentiometer, P : graduation of potentiometer)

초기노치가 쉘브론노치인 관통균열의 균열진전에 대하여 초기노치에 대응하는 정밀저항의 초기설정치를 P_o 로 하고 피로균열이 성장되었을 때의 정밀저항값(P)을 기록하여 균열길이를 산출할 때 이용하였다. 노치부의 초기단면적을 A_o , 균열

진전에 따라서 응력을 받는 단면적은 작어지게 되므로 이 때 균열된 단면적을 ΔA_i 로 하여 위식의 교정식을 사용 균열길이를 측정하였다.

고하중 저진폭 변동하중

하중이 변하는 경우의 균열성장에 관해서는 매우 복잡적이고, 제한된 경우에 만 타당성을 가지고 있으며,⁵⁾ 특히 응력진폭이 작고, 낮은 하중일 수록 균열증분이 매우 작으므로 진전거동을 관찰하는데 유의하여야 한다.

본 실험은 고하중 저진폭에서의 균열성장에 대한 관찰에 초점을 두었으며, 고하중 저진폭으로 하중이 변화되는 부분에서 균열의 성장은 가속에서 감속으로 균열지연현상을 가지게 되며, 하중진폭을 동일하게 하고 응력비를 변화시켜 관찰하여 가속과 감속의 차이에 대하여 검토하고자 한다.

하중패턴 A, B, C에서와 같이 초기하중 진폭은 일정($\Delta P=55.05N$)하게 설정하고 균열길이 2.5 mm에서 고하중 저진폭으로 변화하여 실험한 후 다시 초기하중의 진폭으로 균열진전 실험을 수행하였다.

초기하중 진폭의 하중패턴 A는 인장과 압축 하중이, 하중패턴 B, C는 인장하중을 주었으며, 고하중 저진폭의 하중진폭 $\Delta P=18.35N$ 으로 각 하중패턴에 하중을 가하여 변동하중에 대한 실험을 수행하였다.

또한 하중패턴에 따른 반복수는 초기균열 부분(N_{A1}, N_{B1}, N_{C1}), 고하중 저진폭 부분(N_{A2}, N_{B2}, N_{C2}), 균열진전후(N_{A3}, N_{B3}, N_{C3}) 부분으로 하여 하중반복수에 따른 균열길이의 성장, 응력확대계수(K)의 크기, 균열의 지연과 가속에 의한 성장률 등을 검토하였다.

응력확대계수(K)는 외팔보 형식의 순수굽힘(pure bending)에서 하중, 균열크기, 균열형상, 하중반복수 및 기하학적 조건에 따라 다르나 CB시험편⁷⁾에 대한 표준식을 이용하여 산출하였다.

$$K = \frac{6M\sqrt{a}}{BW^2} \left\{ 1.99 - 2.47 \left(\frac{a}{W} \right) + 12.97 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 23.17 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 21.80 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right\}$$

여기서 M 은 굽힘시험편의 자유단에서 부하되는 하중의 크기와 그 지점에서 초기균열까지의 굽힘모우멘트를 나타내고, B 는 시험편 두께, W 는 시험편 폭, a 는 균열길이이다.

균열성장거동에 중요한 사항은 균열단합의 크기에 대한 연구⁸⁾인데 균열단합현상은 피로균열 성장 예측에 중요한 이론으로서 1970년대 Elber¹⁾에 의해 제안되었으며, 그가 더 보완한 것으로 균열이 충분히 열리는 점에서 균열열림응력이 있다는 것이다. 피로균열이 진전되기 위해서는 응력이 균열열림응력 이상이 될 때이며 이점을 균열열림점이라 한다.

선형과곡역학에서 '균열진전은 유효응력확대 계수폭(ΔK_{eff})에 의해 이루어지며 이는 최대응력 확대계수(K_{max})와 균열열림점에서의 응력확대계수(K_{op})의 차에 의해 $\Delta K_{eff}=K_{max}-K_{op}$ 로 표현되며, 하중-변위 이력곡선(hysteresis loop)으로 부터 측정된 유효응력확대계수폭비(U)와 응력확대계수폭은 $\Delta K_{eff}=U \cdot \Delta K$ 으로 평가하였다.

균열단합현상에 대한 균열진전속도는 Paris의 식⁹⁾에서 ΔK_{eff} , U 와 ΔK 의 관계에서 다음과 같이 나타내어진다.

$$da/dN = C (\Delta K_{eff})^m = C (U \Delta K)^m$$

균열단합의 측정은 제하탄성 컴플라이언스(unloading elastic compliance)법¹⁰⁾을 이용하였으며, 이 방법은 균열면적의 변화를 검출하고 이것을 이용하여 균열길이를 평가할 수 있기 때문에 평균적인 균열길이를 측정할 수 있으며, 균열단합 거동도 평가할 수 있다. 또한 균열길이와 균열단합 측정에서 실험도중 중단합이 없이 연속적으로 측정이 가능하다.

4. 실험결과

4.1 균열진전 평가

7075-T651 알루미늄 합금을 면내굽힘으로 하중을 주어 하중진폭을 고-저블럭으로 설정한 전체응력비($R=-0.5, 0.67, -0.5 \cdot R=0.0, 0.75, 0.0 \cdot R=0.25, 0.8, 0.25$)에 대한 피로균열 진전속도(da/dN)와 응력확대계수폭(ΔK)의 관계를 검토하면, Fig. 4와 같이 큰 응력비에서 균열진전은 빠르게 나타나고 있다. 또한 응력비가 바뀌는 고하중 저진폭(N_{A2}, N_{B2}, N_{C2}) 부분에서 하중반복수에 따른 균열진전은 각 응력비에 대하여 매우 느리게 형성되고 있다. 이는 응력비가 낮은 초기하중인 저하중 고진폭보다 균열진전은 느리다는 것을 보여주고 있다.

초기균열부 하중패턴(N_{A1}, N_{B1}, N_{C1})에서 응력비가 변화되는 부분(N_{A2}, N_{B2}, N_{C2})과 균열진전후의 하중패턴(N_{A3}, N_{B3}, N_{C3}) 3개의 곡선에 대하여 균열진전속도를 ΔK 로 평가하면 다음과 같다.

1) 하중패턴(N_{A1}, N_{B1}, N_{C1})

$$R=-0.5(N_{A1}) : \frac{da}{dN} = 3.6918 \times 10^{-9} \Delta K^{4.3648}$$

$$R=0.67(N_{B1}) : \frac{da}{dN} = 1.4412 \times 10^{-8} \Delta K^{6.9352}$$

$$R=-0.5(N_{C1}) : \frac{da}{dN} = 1.49 \times 10^{-10} \Delta K^{5.776}$$

2) 하중패턴(N_{A2}, N_{B2}, N_{C2})

$$R=0.0(N_{A2}) : \frac{da}{dN} = 4.7195 \times 10^{-9} \Delta K^{4.926}$$

$$R=0.75(N_{B2}) : \frac{da}{dN} = 6.0631 \times 10^{-8} \Delta K^{4.4649}$$

$$R=0.0(N_{C2}) : \frac{da}{dN} = 4.4968 \times 10^{-10} \Delta K^{5.3513}$$

3) 하중패턴(N_{A3}, N_{B3}, N_{C3})

$$R=0.25(N_{A3}) : \frac{da}{dN} = 2.3854 \times 10^{-8} \Delta K^{3.5526}$$

$$R=0.8(N_{B3}) : \frac{da}{dN} = 2.3538 \times 10^{-15} \Delta K^{35.7263}$$

$$R=0.25(N_{C3}) : \frac{da}{dN} = 2.5354 \times 10^{-9} \Delta K^{4.7774}$$

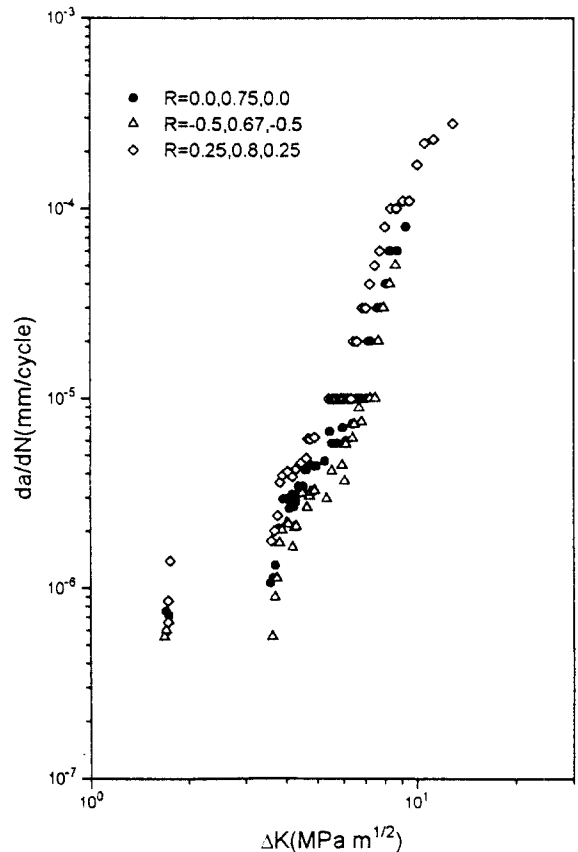


Fig. 4 The fatigue crack growth rate(da/dN) vs. the stress intensity factor range (ΔK)

피로수명을 예측하는데 있어서 균열진전속도는 응력비, 하중진폭, 미시조직 등의 영향을 많이 받으며, 이에 대하여 균열단합을 고려하면 보다 정확한 피로수명을 예측할 수 있다.

초기노치의 균열성장은 균열단합 현상이 작지만 균열이 진행되면서 차츰 균열단합이 커지게 된다. 초기노치의 소성역 크기가 균열전단의 소성역 크기보다 크기 때문이다.

Fig. 5는 관통균열의 진전속도를 유효응력확대계수폭으로 정리한 것으로서 균열진전은 전구간에 걸쳐 응력비에 따라 ΔK_{eff} 의 값이 큰 변화를 가져와 균열진전의 차이를 보이고 있다. 응력확대계수폭과 균열진전속도와의 관계에서 전반적으로 응력비에 대한 의존성이 크게 나타나지만, 유효응력확대계수폭에서는 응력비에 대한 의존성이 둔화되는 것을 알 수 있다.

응력비가 변화되는 부분을 하중패턴에 따라 균열진전속도를 ΔK_{eff} 로 평가하면 다음과 같다.

1) 하중패턴(N_{A1}, N_{B1}, N_{C1})

$$R=-0.5(N_{A1}) : \frac{da}{dN} = 1.2653 \times 10^{-8} \Delta K_{eff}^{5.045}$$

$$R=0.67(N_{B1}) : \frac{da}{dN} = 1.4412 \times 10^{-8} \Delta K_{eff}^{6.9352}$$

$$R=-0.5(N_{C1}) : \frac{da}{dN} = 1.2948 \times 10^{-9} \Delta K_{eff}^{6.5437}$$

2) 하중패턴(N_{A2}, N_{B2}, N_{C2})

$$R=0.0(N_{A2}) : \frac{da}{dN} = 1.80891 \times 10^{-9} \Delta K_{eff}^{5.4104}$$

$$R=0.75(N_{B2}) : \frac{da}{dN} = 6.0631 \times 10^{-8} \Delta K_{eff}^{4.4649}$$

$$R=0.0(N_{C2}) : \frac{da}{dN} = 1.5196 \times 10^{-9} \Delta K_{eff}^{5.0883}$$

3) 하중패턴(N_{A3}, N_{B3}, N_{C3})

$$R=0.25(N_{A3}) : \frac{da}{dN} = 2.3855 \times 10^{-8} \Delta K_{eff}^{3.5526}$$

$$R=0.8(N_{B3}) : \frac{da}{dN} = 2.3538 \times 10^{-15} \Delta K_{eff}^{35.7263}$$

$$R=0.25(N_{C3}) : \frac{da}{dN} = 2.5354 \times 10^{-9} \Delta K_{eff}^{4.7774}$$

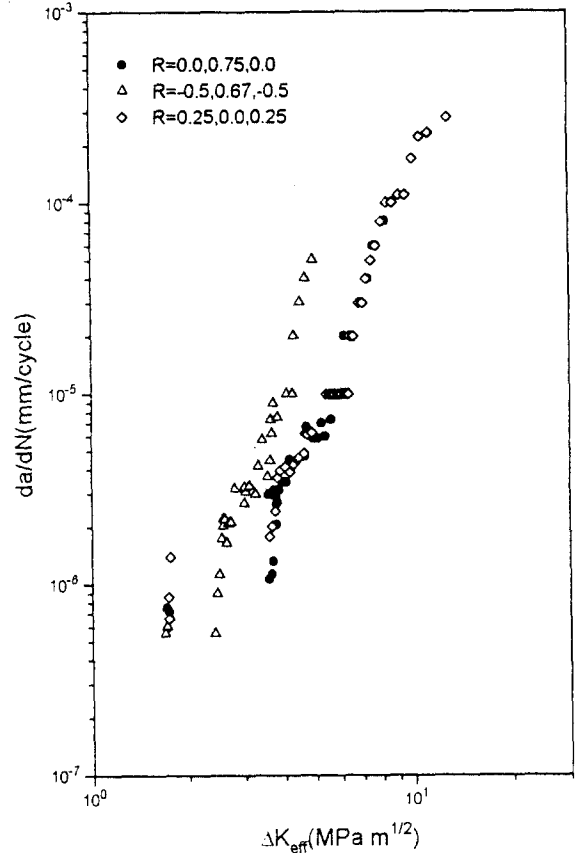


Fig. 5 The fatigue crack growth rate(da/dN) vs. the effective stress intensity factor range(ΔK_{eff})

4.2 균열길이의 역학적 평가

균열진전에 대하여 응력확대계수폭으로 관찰한 결과 균열이 성장함에 따라 ΔK 의 범위는 증가를 가져오면서 고하중 저진폭 부분의 ΔK 는 하중진폭이 작으므로 그 값은 Fig. 6과 같이 낮은 값을 보이고 있다. 이때의 균열길이는 약 2.5mm 부근이다.

Fig. 7과 같이 균열길이와 K_{op} 관계를 검토하여 보면 하중패턴 C는 전체적으로 균열단합현상을 보이지 않고 있다. 하중패턴 A,B인 균열길이 2.5mm부근의 고하중 저진폭 인장과대 하중($R=0.67, R=0.75$)에서는 균열단합을 발견할 수 없었지만, 초기균열진전(N_{A1}, N_{B1})과 인장과대 하중 후의 균열진전(N_{A3}, N_{B3}) 부분에서는 균열단합현상이 다시 재연되었다.

균열단합의 크기는 Fig. 8에 나타난 것과 같이 응력비가 낮을 수록 크게 나타나고 있으며, 유효응력확대계수폭비($\Delta K_{eff}/\Delta K$)로 볼 때 초기 응력비 $R=0.25$ 는 $U=1$, $R=0.0$ 은 $U \approx 0.9$, $R=-0.5$ 는 $U \approx 0.6$ 으로 형성됨을 보이고 있다. 또한 고하중 저진폭 부분에서는 단합현상이 없이 U 값은 최대

로 일정하다.

응력비가 클수록 균열단합현상이 발생되지 않음으로 피로수명은 그만큼 짧아 진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 균열길이에 대한 하중반복수(N_f)를 나타낸 것으로서 동일진폭에서 하중패턴 A,B,C의 초기균열에 대한 하중반복수 관계를 보면 $N_{A1}=5.93 \times 10^5$, $N_{B1}=4.25 \times 10^5$, $N_{C1}=2.74 \times 10^5$ 범위의 분포를 보였다. 고하중 저진폭 인장과대 하중에 대한 균열진전의 하중반복수는 $N_{A2}=2.82 \times 10^5$, $N_{B2}=2.52 \times 10^5$, $N_{C2}=1.89 \times 10^5$ 의 분포를 보여 응력비가 높을 수 록 균열진전은 빠르게 나타나고 있다. 따라서 고응력비일 수록 피로에 대한 수명은 빠르다는 것을 알 수 있다.

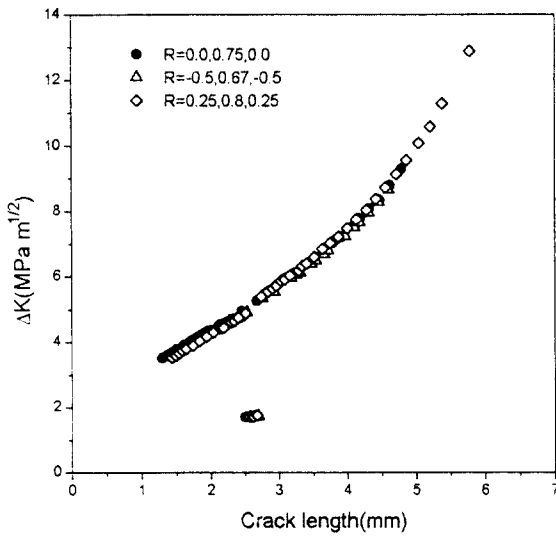


Fig. 6 Relation between stress intensity factor range(ΔK) and crack length(a)

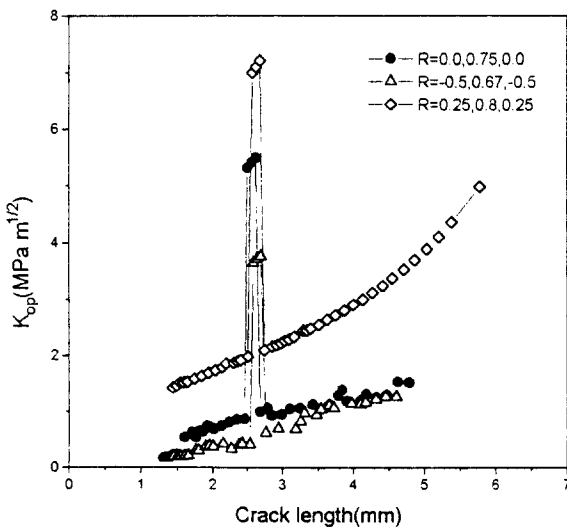


Fig. 7 Relation between stress intensity factor at crack opening point(K_{op}) and crack length(a)

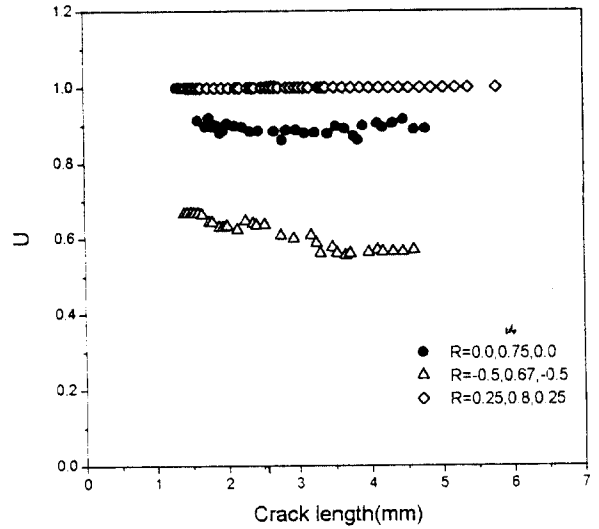


Fig. 8 Relation between effective stress intensity factor range ratio(U) and crack length(a)

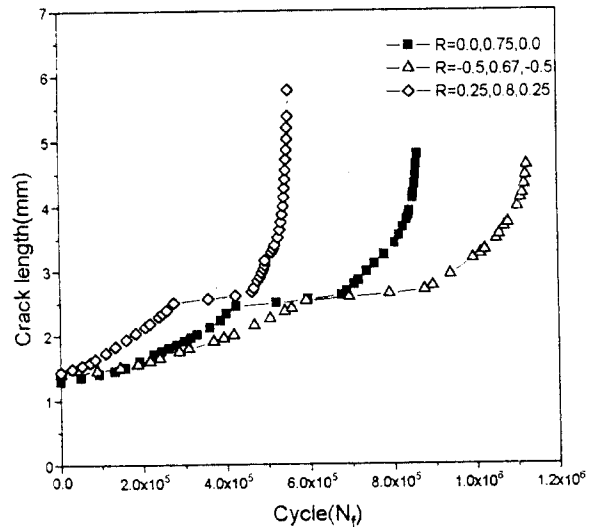


Fig. 9 Relation between crack length(a) and cycle(N_f)

4. 결론

초기균열선단은 웨브론노치의 관통균열로서 웨브론노치를 Pre-crack으로 설정하여 외팔보 형식의 7075-T651 알루미늄 합금을 하중진폭이 일정하고 균열이 진전된 후 고하중 저진폭으로 변동하중을 주어 균열진전 시험을 통해 예측한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 누승회기에 의한 교정곡선을 이용하여 데이터를 분석, 검토한 결과 ΔK 는 응력비 변화에 따라 균열진전은 서로 다른 양상을 보이지만, ΔK_{eff} 에 의한 균열진전은 응력비에 의존하지 않는다.

2) 응력비가 높은 하중패턴 A와 고하중 저진폭에서는 균열닫힘이 발생하지 않고 있으며, 하중패턴 B,C의 초기균열과 고하중 저진폭 후의 균열진전에서는 균열닫힘현상이 발생하고 있다.

3) 일정하중진폭에서 초기균열에 대한 하중반복수 $N_{A1}(R=-0.5)$ 이 $N_{C1}(R=0.25)$ 보다 2.16배 정도의 피로에 대한 수명이 컸으며, 고하중 저진폭에서는 $N_{A2}(R=0.67)$ 는 $N_{C2}(R=0.8)$ 보다 1.5배 정도의 큰 피로수명을 가져와 고응력비일 수록 균열진전은 빠르게 나타남을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) Elber, W., The Significance of Fatigue Crack Closure, ASTM STP 486, pp.230-242, 1971.
- 2) Kikukawa, M., Jono, M. and Kondo, Y., An Estimation Method of Fatigue Crack Propagation Rate under Varying Loading Conditions of Low Stress Intensity Level, Proc. ICF-5, pp.1799-1805, 1981.
- 3) Jono, M., Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loadings, Fatigue 90, pp.1485-1498, 1990.
- 4) Wei, R. P. and Stephens, R. I., Spectrum Loading and Crack Growth, ASME, Transaction Journal of Basic Engineering 94, pp.182-186, 1976.
- 5) Katoh, Y., Ko, H. N., Tanaka, T., and Nakayama, H., Transient Crack Growth Behavior under Two-step Varying Loads, Fatigue 96, Vol., No. 1, pp.523-528, 1996.
- 6) 宋智浩, 辛龍承, 林允洙 “小型動電形 급힘 疲勞試驗機의 製作”, 大韓機械學會論文集, 第13卷, 第1號, pp.119-203, 1989.
- 7) 國尾 武, 中澤 一, 林 郁彦, 岡村弘之, “破壞力學試驗法”, pp.128-190, 1984.
- 8) A. F. Blom and D. K. Holm, “An Experimental and Numerical Study of Crack Closure”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 22, No. 6, pp.997-1011, 1985.
- 9) P. C Paris and F. Erdogan, “A Critical Analysis of Crack Propagation Laws”, Trans. ASME, J. Basic Eng., Vol. D85, pp.528-534, 1963.
- 10) 菊川眞, 城野政弘, 田中建一, 高谷勝, “除荷彈性 コンプライアンス법による低進展速度領域における疲勞き裂進展速度とき裂開閉口舉動の測定, 材料, Vol. 9, No. 276, pp.899-903, 1976.