

외팔보 형식의 하중진폭 변화에 대한 Al 합금의 관통균열 거동에 관한 연구

유 헌 일* · 김 엽 래**

(1997년 8월 22일 접수)

A Study on the Through Crack Behavior of Aluminum Alloy with Cantilever Beam Type under Variable Load

Heonil Yoo and Yeob Rae Kim

Key Words : Electro-Dynamic Type Fatigue Testing Machine(전동형 피로시험기), High Strength Aluminum Alloy(고강도 알루미늄합금), Plane Bending Cantilever Beam Type(평면굽힘 외팔보 형태), In-plane Bending Specimen(면내굽힘 시험편), Stress Ratio(응력비), Through Crack(관통균열), Chevron Notch(체브론노치), Unloading Elastic Compliance Method(제하탄성 컴플라이언스법)

Abstract

This paper examines the crack growth behavior of 7075-T651 and 5052-H32 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 stress ratios are $R=0.15, 0.0, -0.15$ and $R=-0.15, 0.0, 0.15$. The crack growth rate was found to increase as the load amplitude increases. However, ΔK_{eff} was almost independent on the stress ratio. The experimental constants of 7075-T651 and 5052-H32 in Paris law were $c'=1 \sim 1.3 \times 10^{-7}$, $m'=3 \sim 3.2$ and $c'=4 \sim 6 \times 10^{-9}$, $m'=4.3 \sim 4.8$, respectively. K_{op} of 7075-T651 and 5052-H32 becomes smaller as the stress ratio decreases. It seems that the crack closure affects K_{op} .

1. 서 론

여러 가지의 하중진폭하에 피로균열 성장거동은 정하중에서의 거동과는 많은 차이가 있다. 다양한 크기의 하중에 대한 피로균열 성장은 재료나 구조물에 하중이 가해진 시간동안 큰 영향을 받는다. 이에 대한 수명예측은 균열단형현상을 이용하여 많은 검토가 되고 있으며, 균열단형은 균열성장을 감소시키는 원인으로 여러 문헌에 의하여 소개되어

지고 있다.⁽¹⁾

균열성장은 하중의 변화, 과부하, 일시적인 반복 하중 등에 많은 영향을 받고 있으며, 이러한 영향들에 의해 균열성장거동은 응력확대계수폭(ΔK)과 같은 거시적인 파괴역학적 파라미터에 의해서는 평가가 어려우며,^(2,3) 따라서 피로수명예측을 어렵게 하고 있다.

높은 신뢰성을 요구하는 기기나 구조물에는 손상 허용설계(damage tolerance design) 방법이 적용되고 있으며, 균열의 존재로 인해 재료의 항복강도 이하에서도 피로에 의하여 파괴되는 경우가 대단히 많으므로 피로균열 진전거동의 파악이 매우 중요한

*회원, 국민대학교 기계·자동차공학부 교수

**회원, 국민대학교 대학원

Table 1 Chemical composition of 7075-T 651, 5052-H 32 Al alloy (% , wt.).

Materials	Zn	Cu	Mg	Cr	Mn	Fe	Si	Ti	Other		Al
									Each	Total	
7075-T 651	5.6	1.6	2.5	0.3	0.3	0.5	0.4	0.2	0.05	0.15	Remainder
5052-H 32	0.1	0.1	2.5	0.3	0.1	0.4	0.25	—	0.05	0.15	Remainder

과제로 인식되고 있다.

Paris와 Erdogan⁽⁴⁾은 60년대초 피로균열 성장을 선형탄성파괴역학(LEFM)인 응력확대계수폭(ΔK)과 균열진전속도(da/dN)로서 $da/dN=c\Delta K^m$ 으로 나타내었다. 이것은 응력확대계수폭으로 균열진전 거동을 해석함에 있어서 활용범위를 넓혀주고 있다.

Elber⁽¹⁾는 균열면 소성의 잔류변형에 의하여 인장하중 상태에서도 균열이 닫히는 현상(crack closure)을 관찰하였고, 이때 균열이 열려있는 상태의 유효응력확대계수폭(ΔK_{eff})으로 균열진전을 해석하였다. 이와 같이 피로균열진전에 대한 연구가 어느 정도 확립되어 있지만, 균열진전에 대한 정확한 측정의 어려움때문에 피로수명예측에 더 많은 연구가 필요하다.

Jono와 Song 등⁽⁶⁾은 미소균열의 균열단합에 대한 기본특성을 여러 응력비에 관하여 제시하였으며, 또한 McEviley 등⁽⁷⁾에 의해 미소균열 단합거동에 대한 모델을 제안하였으며, 균열진전과 노치 효과에 대한 균열진전 예측을 검증하였다.

Katoh 등⁽⁸⁾은 변동하중에서 피로균열 성장거동 연구에 두 가지 방법을 제안하였는데, 하나는 일정한 하중진폭에서 과부하(overload)를 가하는 것으로 이것은 균열성장거동이 시편의 표면에서 관찰되어 지며 균열끝단에서 소성영역의 크기나 과부하 이후의 지연기간동안 균열단합의 변화 등의 파라메타를 기준으로 한 균열성장 모델이다.

두번째는 하중진폭을 변화시키는 방법으로 낮은 응력진폭에서 균열진전이 매우 늦으므로 균열진전을 측정하기 위해 각각 응력블럭의 균열성장은 일정하다는 모델이다.

또한 Katoh는 최소하중이 일정한 상태에서 단계적으로 하중을 변화시켜 변화되는 하중지점에서 일시적인 균열성장의 가속과 지연에 대하여 하중레벨에 따라 균열성장거동에 대한 연구가 이루어졌다.

이와 같이 하중의 변화에 대한 여러 파라메타의

Table 2 Mechanical properties of 7075-T 651, 5052-H 32 Al alloy.

Materials	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
7075-T 651	471	539	9
5052-H 32	157	265	11

많은 연구가 이루어지고 있다. 하중변화에 대한 외팔보 형식 시험체의 피로균열 연구는 외팔보 순수 굽힘 미소균열에 대하여 Pang⁽⁹⁾이 균열의 진전과 단합현상을 실험적으로 인정, 압축 과대하중하에서 수행하여 단합거동을 예측하는 방법을 제안하였다. 그러나 고정부분의 자유단에서 인장, 압축하중이 작용할 때 구조물의 결합부분의 피로해석에 관한 연구는 제한된 범위내에서 수행되어지고 있어서 피로균열의 영향에 대한 검증은 충분하지가 않다.

본 연구에서는 일단고정 타단자유단인 외팔보에 응력비 변화에 따라 다단계 인장, 압축하중을 가하여 균열진전에 대한 실험적 결과로부터 균열진전 거동을 산출하였다. 고강도 알루미늄 합금인 7075-T651과 5052-H32의 재료를 응력진폭에 대한 고저블럭을 이용 균열진전시험을 수행하였다. 초기노치는 관통균열의 형태로 셰브론노치를 사용하였으며, 외팔보 끝단에서 다단계 응력비 변화에 대한 균열단합이 균열성장에 미치는 영향을 파괴역학적 평가에 의하여 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용한 재료는 고강도인 Al-Mg-Zn계 7075-T651, 5052-H32 알루미늄 합금을 사용하였으며, 화학적 성분은 X선 스펙트라 분석법에 의하여 검출한 것으로서 Table 1에 표시하였으며, Table 2는 기계적 성질을 나타내었다.

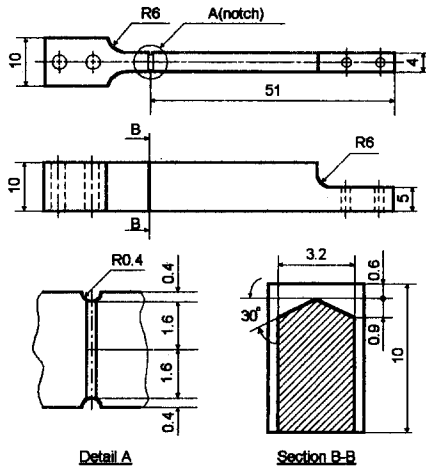


Fig. 1 Configuration of test specimen.

Table 3 Load and voltage of stress ratio.

Stress ratio	L_{max} (N)	L_{min} (N)	ΔL (N)	V_{max} (V)	V_{min} (V)
R=-0.15	41.21	-6.36	47.57	2.0	-0.3
R=0.0	41.21	0	41.21	2.0	0
R=0.15	41.21	6.05	35.16	2.0	0.3

시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 관통균열 부위에 폭 4 mm, 두께 10 mm의 평면굽힘 외팔보 형식의 면내굽힘 시험편으로서 웨브론노치의 각은 60°, 90°, 120°로 제작할 수 있으나 관통균열의 표면 0.6 mm에서 최대한의 균열진전 거동을 관찰하기 위하여 웨브론노치각 120°로 제작하였다. 시험편은 균열진전 방향으로 r=0.4 mm의 반원형 측면홈을 가공하여 균열진전이 되면 평면변형률상태에서 균열성장이 발생되도록 하였다. 시험편 외부가공은 와이어커팅으로 제작하였으며, 웨브론노치와 측면홈은 방전가공으로 제작하여 전체적인 시험편 오차를 극소화 하였다. 시험편 채취방향은 L-T방향이다.

초기노치인 웨브론노치부는 균열성장의 최초시점이 표면에서 0.6 mm, 웨브론노치가 끝나는 지점은 표면에서 1.5 mm로 하였으며, 이 지점을 시작으로 데이터를 산출하였다.

본 실험에서 응력비를 고블력(R=-0.15, 0.0, 0.15)과 저블력(R=0.15, 0.0, -0.15)으로 변화시켜 각각의 응력비에 대한 하중이 균열성장에 미치는 영향을 고찰하였다. 하중모델은 각 응력비의

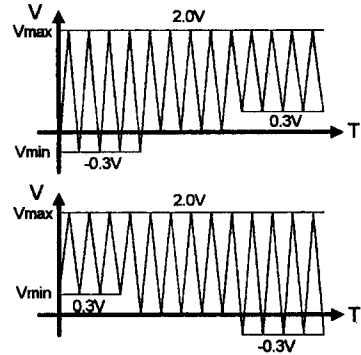


Fig. 2 Load patterns.

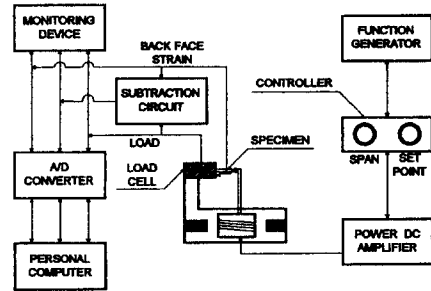


Fig. 3 measurement system for fatigue test.

최대, 최소전압(V_{max} , V_{min})을 선형회기식에 적용하여 최대, 최소하중(L_{max} , L_{min})으로 산출하여 Table 3에 나타내었다. Fig. 2는 하중패턴으로서 응력비의 변화에 따라 응력진폭이 변화되는 단단계 하중패턴으로 하였다.

2.2 시험장치 및 방법

피로시험은 상온 대기중에서 최대용량이 약 200 N인 소형전동형 굽힘 피로시험기⁽⁵⁾를 사용하였다.

Fig. 3에 나타낸 시험장치의 구성도는 함수발생기에서 발생한 파형을 파워앰프로 하중진폭과 크기를 증폭하여 전동용 구동코일에 전달시킨다. 시험편에 가해진 하중은 로드셀(load cell)로 측정하고 배면스트레인게이지(back face strain gage)는 변위신호를 감지하여 감산회로를 거쳐 모니터와 컴퓨터로 보내어 저장한다.

전동용 구동코일의 직경, 앰프 등을 고려하여 최대 가진력을 100 N으로 설정하고 피로시험시의 하중 반복속도는 비교적 넓은 범위에서 선택이 가능하나 임피던스 및 파워앰프의 특성을 고려하여 20 Hz로서 정현파형으로 부하하고 데이터의 수집속도

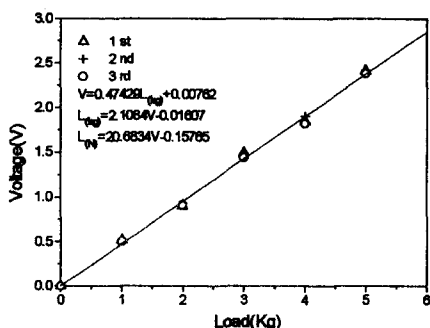


Fig. 4 Load cell calibration curve of voltage(V) vs. load(kg).

는 200점/cycle로 하였다. 피로하중은 하중제어 방식에 의하여 고-저불력의 응력비를 변화시켜 균열 진전거동을 관찰하였다.

2.3 교정곡선 산정

로드셀에 부착된 4개의 스트레인게이지로 풀 브리지(full bridge)를 구성하고 Pre-DC 앰프로부터 OP-앰프를 사용하여 하중측정 신호를 얻었다. 실험시 하중은 실험전에 시험기의 하중과 정밀저항의 눈금사이에서 교정곡선을 산출하여 하중과 균열길이 측정에 이용하였다.

하중과 전압사이의 교정곡선은 선형회기식을 이용하여 Fig.4와 같이 구하였으며, 교정식은 $L_{(N)} = 20.6834V - 0.15765$ 를 사용하였다.

균열진전에 대한 교정곡선은 정확한 데이터를 얻기 위해 $Y = AX^B$ 의 누승회기식을 사용하였으며, Pre-crack은 웨브론노치가 끝나는 지점으로 설정하고 데이터의 산정은 Pre-crack 이후의 균열진전에 대하여 검토하였다.

관통균열의 균열진전에 따른 교정곡선(calibration curve)은 Pre-crack이 끝나는 지점에서 점진적으로 인공결함을 주어 정밀저항(potentiometer) 값의 변화를 검토하였으며, 초기노치에 대응하는 정밀저항의 초기설정치를 P_o 로 하고 피로균열이 성장되었을 때의 정밀저항값(P_i)을 기록하여 균열길이를 산출할 때 이용하였다.

노치부의 초기단면적을 A_o , 균열길이 a 의 진전에 따라서 응력을 받는 단면적은 적어지게 되므로 이때 균열된 단면적을 ΔA_i 라 할 때 Fig.5와 같이 횡축에는 $(P_o - P_i) / P_i$ 를 취하고 종축에는 $\Delta A_i / (A_o - \Delta A_i)$ 를 취하여 균열면적에 대한 식을 다음과 같이 구하여 균열진전의 교정곡선으로 이용하였다. 여기

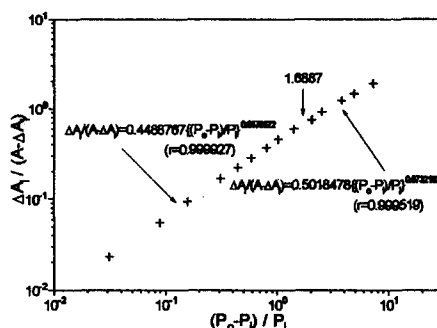


Fig. 5 Calibration curve of $\Delta A_i / (A_o - \Delta A_i)$ vs. $(P_o - P_i) / P_i$.

서, r 는 상관계수이다.

$$\frac{\Delta A_i}{A_o - \Delta A_i} = 0.4488767 \left(\frac{P_o - P_i}{P_i} \right)^{0.8478672} \quad (r=0.999927)$$

$$\frac{\Delta A_i}{A_o - \Delta A_i} = 0.5018478 \left(\frac{P_o - P_i}{P_i} \right)^{0.6732162} \quad (r=0.999519)$$

교정곡선을 작성하기 위해서는 비치마크(beach mark)를 만드는 방법⁽⁶⁾과 여러 개의 시험편에 균열길이를 다르게 하여 파단후 조사하는 방법 및 인공결함을 만든후 조사하는 방법 등이 있으나, 본 실험에서는 인공결함을 주어 정밀저항값을 구하는 방식으로 택하였다.

2.4 외팔보에서 다단계 변동하중

응력확대계수(K)는 순수굽힘(pure bending)에서 하중, 균열크기, 균열형상 및 기하학적 조건에 따라 다르나 CB 시험편⁽¹⁰⁾에 대한 표준식을 이용하여 산출하였다.

$$K = \frac{6M\sqrt{a}}{BW^2} \left\{ 1.99 - 2.47 \left(\frac{a}{W} \right) + 12.97 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 23.17 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 24.80 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right\}$$

여기서, M 은 굽힘시험편의 자유단에서 부하되는 하중의 크기와 그 지점에서 초기균열까지의 굽힘모멘트를 나타내고, B 는 시험편 두께로서 아래와 같이 유효두께 B' 로서 계산하여 구하였다.

$$B' = B - \frac{(B - B'')^2}{B}$$

여기서, B'' 는 사이드 그루브(side groove)를 제외한 시험편의 두께이다.

균열성장거동에 중요한 사항은 균열단합의 크기
에 대한 연구⁽¹¹⁾인데 균열단합현상은 피로균열성장
예측에 중요한 이론으로서 Elber⁽¹¹⁾에 의해 제안되
었으며, 특히 짧은균열(1 mm이하)에서 ΔK_{eff} 를
사용하면 피로진전속도를 잘 표현할 수 있다. 여기
서 ΔK_{eff} 는 최대응력확대계수(K_{max})와 균열열림점
에서의 응력확대계수(K_{op})의 차를 의미한다.

유효응력확대계수폭은 하중-변위 이력곡선(hyst-
eresis loop)으로부터 측정된 유효응력확대계수폭비
(U)와 응력확대계수폭으로 평가하였다.

$$U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}}$$

Paris의 식은 ΔK_{eff} 와 U와의 관계에서 다음과
같이 나타내어 진다.

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

균열단합현상을 관찰하는 방법으로 제하탄성 컴
플라이언스(compliance)법⁽¹²⁾을 이용하였으며, 이
방법은 균열면적의 변화를 검출하고 이것을 이용하
여 균열길이를 평가할 수 있기 때문에 평균적인 균
열길이를 측정할 수 있으며, 균열단합 거동도 평가
할 수 있다. 또한 균열길이와 균열단합점을 실험도
중 중단함이 없이 연속적으로 측정할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 균열진전 및 단합거동

면내굽힘 시험편에 대한 하중진폭을 고-저블럭으
로서 설정한 전체 응력비($R = -0.15, 0.0, 0.15 \cdot R = 0.15, 0.0, -0.15$)에 대한 피로균열 진전속도
(da/dN)와 응력확대계수폭(ΔK)의 관계를 검토하
면 Fig. 6, 7과 같다.

최대하중이 일정한 7075-T651과 5052-H32에서
응력진폭이 큰 응력비($R = -0.15$)에서 균열진전은
빠르게 나타나고 있으며, $R = 0.0$ 에서는 일정한 응
력확대계수폭이 형성되다가 다시 응력진폭이 큰 응
력비에서 균열진전은 빠르게 형성되었다. 이는 최
대하중이 일정한 범위에서는 응력진폭이 큰 부분
에서 균열진전속도가 빠르다는 것을 보여주고 있다.

동일한 ΔK 레벨의 고응력비($R = 0.15$)에서 균열
진전은 빠르게 나타난다. 이것은 고응력비에서 균
열이 진전된 후 ΔK 레벨은 저응력비($R = -0.15$)
와 같아지기 때문이며, 따라서 동일한 균열진전속

도는 고응력비에서 작은 ΔK 레벨을 갖는다.

균열진전속도는 3단계의 균열진전 영역을 가지고
있으며, Fig. 6의 P_1 ($da/dN = 6.47 \times 10^{-6}$), P_2 ($da/dN = 3.0 \times 10^{-5}$)점과 Fig. 7의 P_3 ($da/dN = 4.77 \times 10^{-6}$), P_4 ($da/dN = 2.0 \times 10^{-5}$)점은 응력비의 변화
가 시작되는 지점으로 $da/dN - \Delta K$ 의 기울기가 변
하는 3개의 곡선으로 나타나고 있다. 따라서 균열
진전속도를 응력비별로 예측하면 다음과 같이 나타

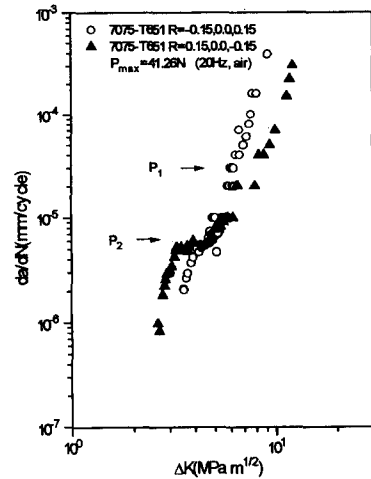


Fig. 6 The fatigue crack growth rate (da/dN) vs. the stress intensity factor range(ΔK) of 7075-T651.

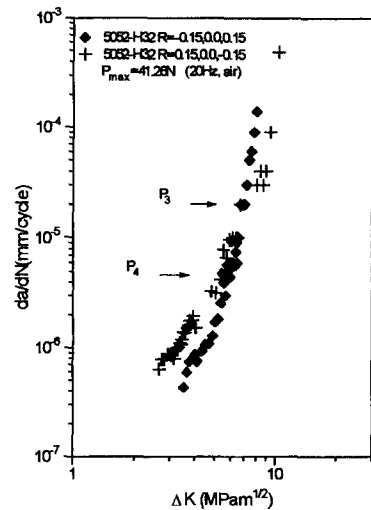


Fig. 7 The fatigue crack growth rate (da/dN) vs. the stress intensity factor range(ΔK) of 5052-H32.

낸다.

(1) 7075-T651 (R = -0.15, 0.0, 0.15)

$$\frac{da}{dN} = 1.8203 \times 10^{-7} \Delta K^{2.2413} \quad (R = -0.15)$$

$$\frac{da}{dN} = 2.0609 \times 10^{-8} \Delta K^{3.6932} \quad (R = 0.0)$$

$$\frac{da}{dN} = 4.5126 \times 10^{-10} \Delta K^{6.0989} \quad (R = 0.15)$$

(2) 7075-T651 (R = 0.15, 0.0, -0.15)

$$\frac{da}{dN} = 3.04881 \times 10^{-8} \Delta K^{4.0509} \quad (R = 0.15)$$

$$\frac{da}{dN} = 4.1358 \times 10^{-8} \Delta K^{3.1872} \quad (R = 0.0)$$

$$\frac{da}{dN} = 2.0122 \times 10^{-10} \Delta K^{5.6139} \quad (R = -0.15)$$

(3) 5052-H32 (R = -0.15, 0.0, 0.15)

$$\frac{da}{dN} = 3.9828 \times 10^{-9} \Delta K^{3.7755} \quad (R = -0.15)$$

$$\frac{da}{dN} = 9.5833 \times 10^{-8} \Delta K^{2.2183} \quad (R = 0.0)$$

$$\frac{da}{dN} = 3.0065 \times 10^{-13} \Delta K^{9.3920} \quad (R = 0.15)$$

(4) 5052-H32 (R = 0.15, 0.0, -0.15)

$$\frac{da}{dN} = 5.4690 \times 10^{-8} \Delta K^{2.5112} \quad (R = 0.15)$$

$$\frac{da}{dN} = 1.1679 \times 10^{-9} \Delta K^{4.9821} \quad (R = 0.0)$$

$$\frac{da}{dN} = 1.2007 \times 10^{-15} \Delta K^{11.2757} \quad (R = -0.15)$$

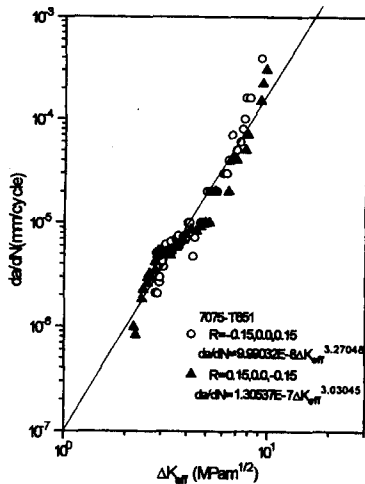


Fig. 8 The fatigue crack growth rate (da/dN) vs. the effective stress intensity factor range (ΔK_{eff}) of 7075-T651.

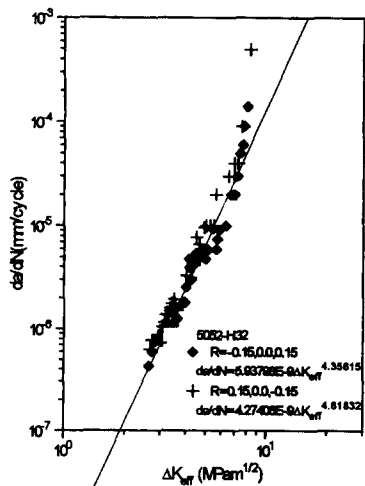


Fig. 9 The fatigue crack growth rate (da/dN) vs. the effective stress intensity factor range (ΔK_{eff}) of 5052-H32.

피로수명을 예측하는데 있어서 균열진전속도가 응력비, 미시조직의 영향을 많이 받는 경우에 대하여 균열단합을 고려한 유효응력확대계수(ΔK_{eff})로 표현하면 보다 정확한 피로수명을 예측할 수 있다. Figs. 8, 9는 관통균열의 진전속도를 유효응력확대계수쪽으로 정리한 것으로서 대체적으로 전구간에 걸쳐 응력진폭인 고-저블럭에 관계없이 일치함을 보이고 있다.

응력확대계수폭과 균열진전속도와와의 관계에서 전반적으로 응력비에 대한 의존성이 크게 나타나지만, 유효응력확대계수폭에서는 응력비에 대한 의존성이 둔화되는 것을 알 수 있다.

3.2 응력확대계수의 역학적 평가

피로균열 진전거동은 균열단합에 의하여 지배되므로 유효응력확대계수폭비와 유효응력확대계수폭에 따르는 변화는 진전속도 영역과 관련하여 나타낼 수 있다.

유효응력확대계수폭비와 최대응력확대계수와의 관계는 응력진폭이 큰 응력비(R = -0.15)에서 균열단합현상이 큰 것으로 나타나며, R = 0.0을 지나면서 서로 반대현상을 보였다.

Fig. 10과 같이 7075-T651에서 최대응력확대계수에 대한 유효응력확대계수폭비(U)의 변화를 보면 응력진폭이 크면 유효응력확대계수폭비는 감소현상

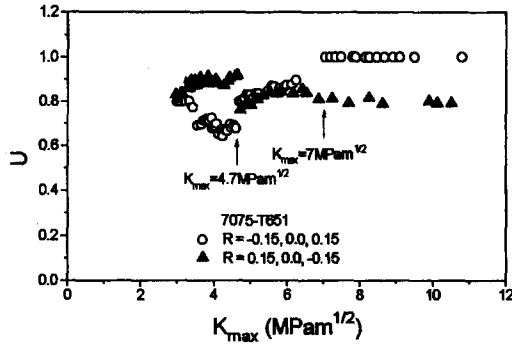


Fig. 10 Relation between effective stress intensity factor range ratio(U) and maximum stress intensity factor(K_{max}) of 7075-T651.

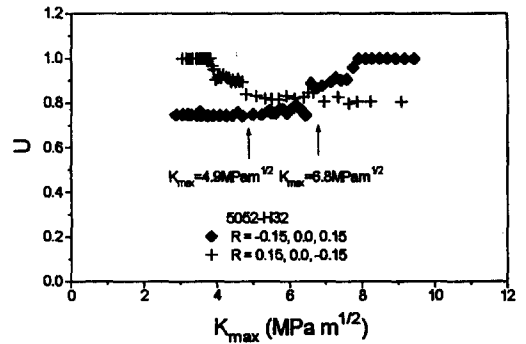


Fig. 11 Relation between effective stress intensity factor range ratio(U) and maximum stress intensity factor(K_{max}) of 5052-H32.

을 보였다. 응력비의 경계점인 $K_{max}=4.7\sim 7\text{ MPa}\sqrt{m}$ 를 기점으로 유효응력확대계수폭비의 값이 서로 다른 양상을 보이고 있다.

$R=-0.15, 0.0, 0.15$ 에서 유효응력확대계수폭비는 $R=0.0$ 이상에서 급격히 증가현상을 가져와 $R=0.15$ 에서는 단힘현상을 보이지 않고 있다. 이는 최대하중이 일정한 고응력비에서는 균열단힘현상이 발생되지 않는다는 것을 보여주고 있다.

$R=0.15, 0.0, -0.15$ 에서는 최대응력확대계수가 증가하더라도 유효응력확대계수폭비는 일정한 형태를 보이고 있는데 이것은 인장에서 압축응력으로 응력진폭이 커지므로 인한 균열단힘 현상이 항상 존재하고 있기 때문이다.

Fig. 11의 5052-H32에서도 이와 흡사한 경향을 보이며, 응력진폭이 큰 $R=-0.15$ 에서 균열단힘현상을 보이지만 응력진폭이 작아지고 응력비가 커질수록 단힘현상은 사라진다.

초기의 균열진전인 $R=0.15$ 에서 단힘현상이 보이지 않았으나 균열이 증가할수록 단힘현상이 나타나고 있으며, $K_{max}=4.9\text{ MPa}\sqrt{m}$ 이상에서는 최대응력확대계수가 증가하여도 유효응력확대계수폭비는 변하지 않음을 보여 준다. $K_{max}=6.8\text{ MPa}\sqrt{m}$ 을 경계로 높은 응력비($R=0.0\rightarrow R=0.15$)로 변화하는 부분은 균열단힘은 서서히 사라지고 있는 현상이 나타나지만, 낮은 응력비($R=0.0\rightarrow R=-0.15$)로 변화하는 부분에서는 균열단힘이 존재하는데 이는 압축으로 인하여 단힘현상이 계속 진행되고 있음을 보여준다.

일정한 응력비에서는 최대응력확대계수가 커질수록 유효응력확대계수폭비는 커지게 되는 현상⁽¹⁰⁾을

보이며, 이는 최대응력확대계수가 클수록 균열선단에서 소성변형이 커지고, 균열면 주위에 남은 잔류소성변위도 클 것으로 본다. 하지만 고-저블럭에서 유효응력확대계수폭비의 값은 응력진폭에 따라 변화되는 양상을 보이고 있다. 큰 잔류소성변위는 유효응력확대계수폭비를 낮아지게 할 수도 있다. 그러나 균열선단의 둔화 등으로 균열개구변위(crack opening displacement)가 커져서 하중이 작을 때 균열이 닫히지 않는 상태가 예상되기도 한다.

균열길이(a)와 균열열림점에서 응력확대계수(K_{op})는 Fig. 12와 같이 최대하중이 일정한 상태에서 $a=3.36\sim 4.83\text{ mm}$ ($R=0.0$)를 경계로 응력진폭이 커질수록(응력비는 낮음) K_{op} 는 균열단힘으로 인하여 급격한 감소현상을 보이면서 점차 회복되는 과정을 계속하고 있다. 이것은 낮은 응력비에서 K_{op} 는 균열단힘에 의존하지만, 응력비가 커질수록 의존성이 없어져 K_{op} 는 사라짐을 알 수 있다. Fig. 13은 균열이 진전될수록 K_{op} 가 분산되는 현상을 보이고 있으며, 응력비가 변하는 지점인 $a=3.44\sim 5.22\text{ mm}$ 를 경계로 K_{op} 의 값은 $0.5\text{ MPa}\sqrt{m}$ 정도의 편차를 가져왔다.

4. 결 론

쉐브론노치의 관통균열형태를 갖는 외팔보 형식 7075-T651과 5052-H32 알루미늄 합금의 시험체를 준비하여 최대하중이 일정한 고-저블럭 응력진폭에 대해 균열진전거동 실험을 수행하였다. 이를 요약하면 다음과 같다.

- (1) ΔK_{eff} 는 응력비의 영향을 받지 않으며, 균열

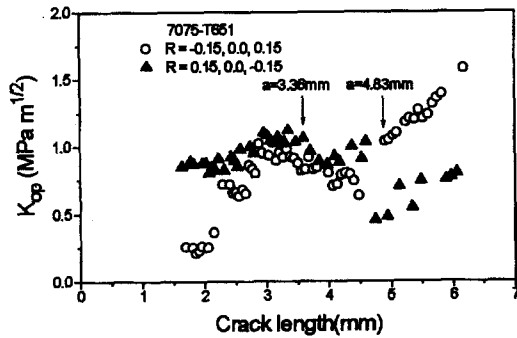


Fig. 12 Relation between stress intensity factor at crack opening point(K_{op}) and crack length (a) of 7075-T651.

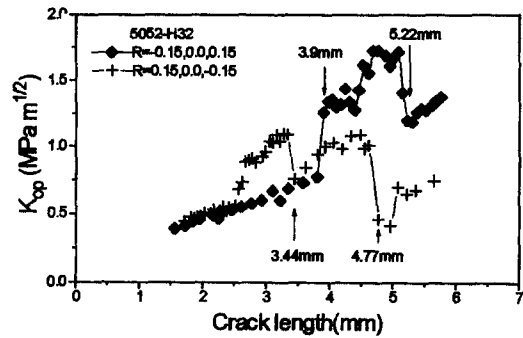


Fig. 13 Relation between stress intensity factor at crack opening point(K_{op}) and crack length (a) of 5052-H32.

단험이 균열성장을 지배한다고 볼수 있다. 피로균열 진전거동을 ΔK_{eff} 로 평가한 결과 7075-T651과 5052-H32의 경우 실험중 응력비와 무관하게 $c' = 1 \sim 1.3 \times 10^{-7}$, $m' = 3 \sim 3.2$ 와 $c' = 4 \sim 6 \times 10^{-9}$, $m' = 4.3 \sim 4.8$ 과 같은 Paris 상수를 얻을 수 있었다.

(2) $R=0.0$ 을 경계로 유효응력확대계수폭비는 균열단험의 영향으로 인하여 높은 응력비에서는 균열단험현상은 사라지고 낮은 응력비에서는 압축하중의 영향으로 단험현상이 지속됨을 알 수 있다.

(3) 7075-T651에서 $a=3.36 \sim 4.83$ mm($R=0.0$)를 경계로 K_{op} 의 값은 고응력비에서는 크고, 저응력비에서는 작아지는 현상이 나타나는데 이것은 고응력비 일수록 단험현상이 발생되지 않음을 알 수 있다. 5052-H32에서는 $a=3.44 \sim 5.22$ mm를 경계로 K_{op} 가 분산되는 현상을 보이고 있으며, 응력비가 변하는 지점에서 K_{op} 의 값은 $0.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 정도의 편차를 가져왔다.

참고문헌

- (1) Elber, W., 1971, "The Singnificance of Fatigue Crack Closure," *ASTM STP 486*, pp. 230~242.
- (2) Jono, M., 1990, "Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loadings," *Fatigue '90*, pp. 1485~1498.
- (3) Wei, R. P. and Stephens, R. I., 1976, "Spectrum Loading and Crack Growth," *ASME, Transaction Journal of Basic Engineering '94*, pp. 182~186.
- (4) Paris, P. C. and Erdogan, F., 1963, "A Critical

Analysis of Crack Propagation Laws," *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, Vol. D85, pp. 528~534.

- (5) 宋智浩, 辛龍承, 林允洙, 1989, "小型動電形 굽힘 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.
- (6) Jono, M. and Song, J. H., 1985, "Growth and Closure of Short Fatigue Crack," *Current Research on Fatigue Cracks, Materials Research Series 1, The Society of Material Science, Japan*, pp. 35~55.
- (7) McEviley, A. J. and Minakawa, K., 1987, "On Crack Closure and the Notch Size Effect in Fatigue," *Eng. Fracture Mechanics*, Vol. 28, No. 5/6, pp. 519~527.
- (8) Katoh, Y., Ko, H. N., Tanaka, T. and Nakayama, H. 1996, "Transient Crack Growth Behavior under Two-step Varying Loads," *Fatigue '96*, Vol. No. 1, pp. 523~528.
- (9) 방중명, 1993, "미소피로균열의 진전 및 단험 거동," 박사학위논문, 한국과학기술원, 대전.
- (10) 國尾 武, 中澤 一, 林 郁彦, 岡村弘之, 1984, "破壊力學試驗法," pp. 128~190.
- (11) Blom, A. F. and Holm, D. K., 1985, "An Experimental and Numerical Study of Crack Closure," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 22, No. 6, pp. 997~1011.
- (12) 菊川眞, 城野政弘, 田中建一, 高谷勝, 1976, "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.

- (13) 서성원, 1993, “고강도 알루미늄 합금의 피로 균열성장 특성에 관한 연구,” 박사학위논문, 국민대학교, 서울.