

## 5052계 Al합금의 블록하중에 대한 균열진전 Crack Propagation within Block Load of 5052 Aluminum Alloy

김엽래 · 이동명(경민대), 이종선(대진대), 여은구(국민대원)

### Abstract

Fatigue crack propagation behavior for block load in high strength aluminum alloys was investigated in this study. The materials used in this study are aluminum alloy 5052- H32. Initial crack was made by applying cyclic load to a through crack with chevron notch.

Crack length was measured from calibration curve, which was plotted by known crack length and resistance of standard specimens. Load was obtained from linear regression formula. Unloading elastic compliance method was applied to check the crack closure and cracked area.

The present study results can be usefully applied to predicting the change of crack propagation rate, the crack closure, and the delay of crack propagation.

### 제1장 서론

실제 기기나 구조물에 작용하는 하중은 일정진폭 하중보다 하중진폭이 불규칙하게 변화되는 변동하중과 랜덤하중에 의하여 구조물에 미치는 영향이 크므로 그에 대한 피로균열 진전거동의 검토는 매우 중요하다.

여러 가지 하중진폭에서의 피로균열 진전거동은 정하중에서의 거동과는 많은 차이가 있다. 다양한 크기의 하중에 대한 피로균열 성장은 재료나 구조물에 하중이 가해진 시간동안 큰 영향을 받는다. 이에 대한 수명예측은 균열단합현상을 이용하여 많은 검토가 되고 있으며, 균열단합은 균열성장을 감소시키는 원인으로 문헌에 의하

여 소개되고 있다.<sup>1)</sup>

변동하중의 대표적인 하중으로 과대인장·압축하중, 랜덤하중에 의한 균열진전 검토가 많이 이루어져 왔다. 변동하중의 범위는 광범위하므로 본 연구에서는 과대하중과 랜덤하중을 합성한 블럭하중을 선택하였다.

고정 부분의 자유단에서 인장, 압축하중이 작용할 때 구조물의 결합부분의 피로해석에 관한 연구는 제한된 범위내에서 수행되고 있지만 피로균열의 영향에 대한 검증은 충분하지가 않다. 외팔보 순수굽힘의 미소균열 문제에 대하여 Pang<sup>2)</sup>은 균열의 진전과 닫힘현상을 실험적으로 인장·압축 과대하중에서 수행하여 닫힘거동을 예측하는 방법을 제안하였다.

그러나 블럭하중의 피로균열 진전에 대해서는 여러 가지 파라미터에 의해 많은 문제점을 가지고 있다. 피로균열진전에 관한 실험적 연구에서는 초기 균열을 제작하는데 매우 중요하다. 진전 시험 수행시 초기균열을 노치 등의 응력집중 부분에 자연적으로 발생시키거나 인공적으로 관통 균열을 만들어 실험한다. Itoh<sup>3)</sup> 등은 삼각형을 갖는 시험편에 초기 미소균열을 사용하여 예비균열 작성시 나타날 수 있는 하중이력의 영향 없이 실험하는 방법을 제안하였다. 그러나 시험편 두께 전체에 균열선단이 직선적으로 균열진전이 이루어지기가 쉽지 않다. 이러한 결점을 보완한 것이 웨브론노치 형상으로 초기균열은 삼각형 형상을 갖고 균열이 진전된 후 웨브론노치가 끝난 부분을 예비균열로 하여 균열진전이 이루어지면서 균열선단이 직선으로 형성되어 균열진전거동에 중요한 영향을 미치는 균열단합 등의 연구

를 수행하는데 정확성을 기할 수 있다.

균열성장거동에 중요한 사항은 균열단합의 크기에 대한 연구<sup>4)</sup>인데 균열단합현상은 피로균열성장 예측에 중요한 이론으로서 Elber<sup>5)</sup>에 의해 제안되었으며, 그가 더 보완한 것으로 균열이 충분히 열리는 점에서 균열열림응력이 있다는 것이다.

균열단합현상을 관찰하는 방법으로 여러 가지가 제안되고 있으나, 감산변위(differential displacement)를 사용한 제하탄성컴플라이언스(unloading elastic compliance)법<sup>6)</sup>을 이용한 방법으로 균열면적의 변화를 검출하여 균열길이를 평가할 수 있기 때문에 평균적인 균열길이를 측정할 수 있으며, 균열단합거동도 평가할 수 있다. 또한 균열길이와 균열단합점을 실험도중 중단함이 없이 연속적으로 측정할 수 있다.

Fig. 1의 (a)는 하중-변위선도를 (b)는 하중-감산변위선도를 나타내고 있으며, (b)의 감산변위를 사용하여 제하탄성컴플라이언스법을 실험에 적용한 하중과 균열길이, 균열열림점을 측정한다.

(a)는 균열이 열리기 시작하는 지점인 X점에서 균열열림점을 측정하는 방법으로 XY는 2차곡선이 되며, Y점 이하는 균열이 닫혀 있는 상태로써 균열단합현상을 나타내고 있다.

(b)와 같은 하중-감산변위선도에 대해서도 같은 방법을 사용하여 결정할 수 있으며, Y' 점의 결정은 (a)와 달리 정확성을 기할 수 있는 이점이 있다. Y' 점이 균열열림점의 하중이 되며, 균열열림점의 하중( $P_{op}$ )으로 결정하여 균열열림점의 응력확대계수( $K_{op}$ )와 유효응력확대계수폭비( $\Delta K_{eff}$ )를 측정할 수 있다.

선형파괴역학에서 균열진전은  $\Delta K_{eff}$ 에 의해 이루어지며, 이는 최대응력확대계수( $K_{max}$ )와  $K_{op}$ 의 차에 의해  $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}$ 로 표현된다. 하중-변위이력곡선(load-displacement hysteresis loop)으로부터 측정된  $\Delta K_{eff}$ 와 유효응력확대계수폭비(U)는  $\Delta K_{eff} = U \cdot \Delta K$ 로서

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

로 나타낸다.

균열단합현상에 대한 균열진전속도는 Paris의 식<sup>7)</sup>에서  $\Delta K_{eff}$ , U와  $\Delta K$ 의 관계에서 다음과 같이 나타내어진다.

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

피로수명을 예측하는데 있어서 균열진전속도가 응력비, 미시조직의 영향을 많이 받는 경우에 대하여 균열단합을 고려한  $\Delta K_{eff}$ 으로 표현하면 보다 정확한 피로수명을 예측할 수 있다.

이와 같이 피로균열 진전거동에 대해 연구된 문헌들을 검토하고, 외팔보의 끝단에서 블록형태의 변동하중이 발생되었을 때 검토되어 질 수 있는 균열진전을 파괴역학적 평가에 의하여 규명한다.

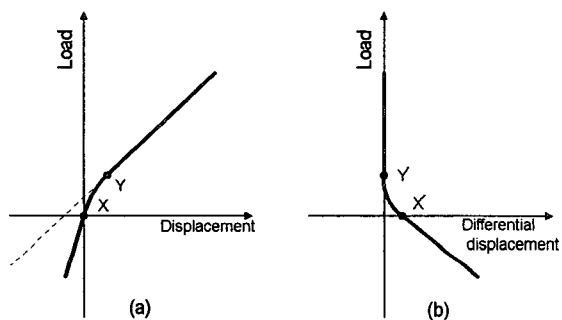


Fig. 3 Load-displacement behavior  
(a) Load vs. displacement curve  
(b) Load vs. differential displacement curve

## 제2장 실험방법

### 2.1 시험편 및 블록하중

본 실험에 사용한 재료는 항공기 및 압력용기에 많이 쓰이는 고강도 5052-H32 알루미늄 합금이다. 재료의 화학적 성분은 Table 1에 표시하였으며, Table 2는 기계적 성질로서  $\sigma_u$ ,  $\sigma_y$ ,  $\delta$ 는 각각 인장강도(MPa), 항복강도(MPa), 연신율(%)을 나타낸 것이다.

Table 1 Chemical compositions of 5052-H32 aluminum alloy(% , wt.)

Materials	Zn	Cu	Mg	Cr	Mn	Fe	Si	Al
5052-H32	0.1	0.1	2.5	0.3	0.1	0.4	0.25	remainder

Table 2 Mechanical properties of 5052-H32 aluminum alloy

Material	Yield strength $\sigma_y$ (MPa)	Tensile strength $\sigma_u$ (MPa)	Elongation $\delta$ (%)
5052-H32	157	265	11

시험편의 형상은 Fig. 2와 같이 관통균열 부위의 폭 10mm, 두께 4mm의 평면굽힘 외팔보 형식의 굽힘 시험편이며, 웨브론노치(chevron notch)의 각도는 관통균열의 표면 0.6mm에서 균열길이에 대해 최대한의 균열진전 거동을 관찰하기 위하여 120°로 제작하였다. 이때 웨브론노치의 높이는 0.9mm로 하여 웨브론노치가 끝나는 지점을 예비균열(pre-crack)으로 설정하고 데이터의 산정은 예비균열 이후의 균열진전에 대하여 검토하였다.

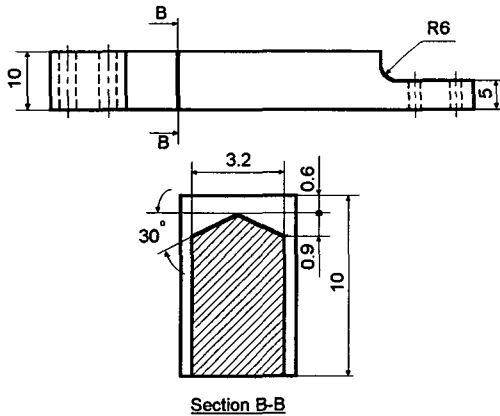


Fig. 2 Configuration of test specimen

본 연구에서 사용된 하중모델은 초기응력비가 일정하다는 가정하에 균열이 진전된 후, 단계적으로 하중과 응력비를 변화시킨 블록하중으로서 각 하중패턴에 대해 균열진전속도, 균열단합, 응

력확대계수, 하중반복수 등에 따라 관통균열에 대한 균열진전을 검토한다.

하중모델은 시험기의 데이터 수집부에서 얻어진 응력비의 최대·최소전압( $V_{max}$ ,  $V_{min}$ )을 선형회귀식에 적용하여 최대·최소하중( $P_{max}$ ,  $P_{min}$ )으로 설정하고, 그에 따른 하중진폭( $\Delta P = P_{max} - P_{min}$ )을 산출하여 Table 3에 나타내었다.

본 연구에 사용한 블록하중은 다음과 같다.

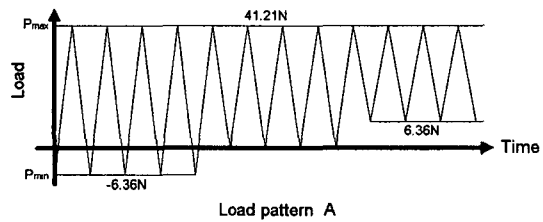
1) 최대하중을 일정하게 설정( $P_{max}=41.21N$ )하고, 하중진폭을 인장 및 압축하중에 의하여 고·저블럭으로 변화시켜 하중진폭의 감소에 따라 각 응력비가 변화하면서 다단계 하중모델이 균열성장에 미치는 영향을 검토한다.

3) 초기 하중진폭( $\Delta P=57.92N$ )과 초기 응력비( $R=0.3$ )가 일정한 인장하중 범위내에서 작은 인장 고·저블럭의 하중진폭( $\Delta P=28.96N$ )으로 변화되었을 때 하중모델이 균열성장에 미치는 영향을 검토한다.

Fig. 3은 본 연구에 사용한 하중모델로서 응력비의 변화에 따라 응력진폭이 변화되는 다단계 하중패턴을 하중모델로 설정하였다.

Table 3 Block load of load pattern for stress ratio

Patterns	R	$P_{max}$ (N)	$P_{min}$ (N)	$\Delta P$ (N)	$V_{max}$	$V_{min}$
A	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	6.36	34.85	2.0	0.3
B	R=0.0	55.05	0	55.05	3.0	0.0
	R=0.75	73.4	55.05	18.35	4.0	3.0
	R=0.0	55.05	0	55.05	3.0	0.0



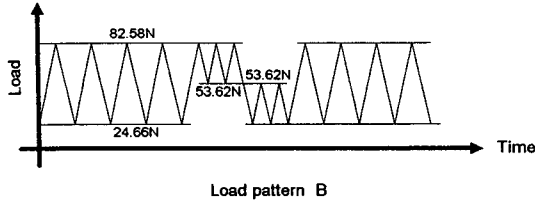


Fig. 3 High-low block load and load pattern within tensile load range.

## 2.2 시험장치

실험이 연구의 주요 부분을 차지하는 피로 연구에 있어서 연구 목적에 알맞은 피로시험기를 사용하는 것이 중요하다.

미소피로균열 연구에 적합한 소용량의 피로시험기를 Song<sup>8)</sup> 등이 개발한 것으로 상온, 대기 중에서 최대용량이 약 200N인 소형동전형 굽힘피로시험기를 사용하였다. 시험기의 구동방식은 피로시험기로서 특성이 좋으며, 소용량화가 용이한 동전형(electro-dynamic type) 방식을 택하였다. 동전형 피로시험기는 일정자장내에 놓여진 구동코일(moving coil)에 전류를 보내어 가진력을 얻는 시험기로서 시험기의 용량은 자장과 허용전류가 높은 구동코일을 얻는 것이 중요하다.

시험기의 자장발생부와 구동코일은 음향스피커에 사용되고 있는 부품을 이용하였으며, 자장은 영구자석에 의하여 발생된다. 구동코일에 감겨져 있는 피로시험기의 가동 원통은 하중봉과 연결하여 하중을 전달하고 하중봉은 횡방향으로 편심되지 않도록 슬라이드 볼 베어링에 의하여 안내된다. 시험편은 판 스프링에 연결하여 처짐에 의한 변위를 판 스프링의 굽힘운동으로 흡수하도록 되었다.

시험편의 고정 부위는 하중검출용 로드셀(load cell)에 연결되고 시험기 프레임은 비자성재료인 알루미늄 합금으로 제작되었으며, 로드셀의 고정 블록은 상·하 두개의 블록으로 구성하여 시험편 길이, 높이의 변경이 가급적 용이하도록 하였다.

## 2.3 실험방법

측정시스템은 시험부와 데이터 수집부로 나누어진다. 시험부는 함수 발생기에서 발생한 파형을 제어기(controller)의 스펠(span)과 세트포인트(set point)로 시험 조건에 맞는 하중과 응력비가 되도록 설정한다. 설정된 하중진폭과 기준 하중은 파워앰프로 하중진폭과 크기를 증폭하여 전동용 구동코일에 전달시킨다. 데이터 수집부는 시험편에 가해진 하중이 로드셀로부터 하중신호를 검출하고, 시험편에 부착된 배면스트레인게이지(back face strain gage)로 부터 변위신호를 검출한다. 이렇게 얻어진 하중과 변위신호를 모니터로 보내 스크린으로 관찰할 수 있도록 하고, 일부 신호는 A/D 변환기에 보내 디지털 화하여 컴퓨터에서 저장한다.

전동용 구동코일의 직경, 앰프 등을 고려하여 최대 가진력을 100N으로 설정하고 피로시험시의 하중 반복속도는 비교적 넓은 범위에서 선택이 가능하나 임피던스 및 파워앰프의 특성을 고려하여 20Hz의 정현파형으로 부하하고, 데이터의 수집속도는 200점/cycle로 하였다. 하중제어방식에 의하여 고·저응력비, 하중진폭을 변화시켜 최대·최소하중, 응력확대계수, 균열진전, 균열단합, 균열길이 등을 관찰하였다.

균열이 진전됨에 따라 응력확대계수는 하중, 균열크기, 균열형상, 하중반복수 및 기하학적 조건에 따라 다르나, 앞절에서 설명한 바와 같이 외팔보 형식의 시험편 끝에서 하중을 가했을 때 CB시험편<sup>9)</sup>을 표준식으로 다음과 같이 응력확대계수를 산출하였다.

$$K = \frac{6M}{B_0 W^2} F\left(\frac{a_i}{W}\right) \sqrt{\pi a_i}$$

$$F\left(\frac{a_i}{W}\right) = \left\{ 1.99 - 2.47\left(\frac{a}{W}\right) + 12.97\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 23.17\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 24.80\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right\}$$

여기서  $M$ 은 시험편의 자유단에서 부하되는 하중과 초기균열까지 거리에 대한 굽힘모우멘트를 나타내고,  $B_0$ 는 시험편 두께,  $W$ 는 시험편 폭,  $a_i$ 는 균열길이이다.

### 제3장 실험결과 및 고찰

#### 3.1 균열진전거동

외팔보 형식의 굽힘 시험편에 대하여 예비균열을 관통균열내 웨브론노치가 끝나는 부분을 기준으로 하고, 응력비를 변화시켜 블록하중에 대하여 균열진전속도( $da/dN$ )와 응력확대계수폭( $\Delta K$ )의 관계를 검토한 결과 Fig. 4에 정리하였다.

하중패턴 A의 Fig. 4(a)에서  $O_1(da/dN=4.77 \times 10^{-6})$ ,  $O_2(da/dN=2.0 \times 10^{-5})$ 선은 응력비의 변화가 시작되는 지점으로 기울기가 변하는 3개의 곡선으로 나타나고 있다. 균열진전속도를 Paris 식을 적용하여 각 응력비별로 Table 4에 나타내었다.

응력비  $R=-0.15$ 에서 균열진전은  $R=0.15$ 보다 빠르게 나타나고 있으며,  $R=0.0$ 에서는 일정한 응력확대계수폭이 형성되다가 다시 응력진폭이 큰 응력비에서 균열진전이 빠르게 형성되었다. 이는 최대하중이 일정한 범위에서는 응력진폭이 큰 부분이 작은 부분보다 균열진전속도가 빠르다.

Fig. 14(b)의 변동하중 부분인 고블럭( $R=0.65$ )에서  $da/dN=3.0 \times 10^{-7}$ mm/cycle, 저블럭( $R=0.46$ )에서는  $da/dN=1.8 \times 10^{-7}$ mm/cycle의 균열진전을 나타내고 있다. 변동하중내 고·저블럭 응력비에 따라 균열진전비  $(da/dN)_{R=0.65}/(da/dN)_{R=0.46}$ 가 1.67배로 7075-T651보다는  $da/dN$ 의 차이가 크게 나타나지 않았다.

Table 4 Paris equation for crack propagation

Patterns	R	$da/dN$	Remark
A	-0.15	$3.9828 \times 10^{-9} \Delta K^{3.7755}$	comp.
	0.0	$9.5833 \times 10^{-8} \Delta K^{2.2183}$	
	0.15	$3.0065 \times 10^{-13} \Delta K^{9.3920}$	
B	0.3	$3.8086 \times 10^{-10} \Delta K^{5.7449}$	
	0.65	$9.9695 \times 10^{-9} \Delta K^{4.1156}$	
	0.46	$2.3149 \times 10^{-9} \Delta K^{4.8284}$	
	0.3	$6.6612 \times 10^{-11} \Delta K^{6.97}$	

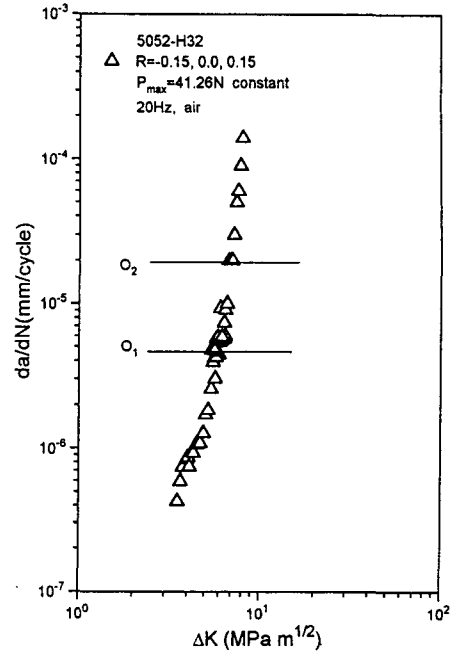


Fig. 14(a) Comparison between  $da/dN$  vs.  $\Delta K$  load pattern A

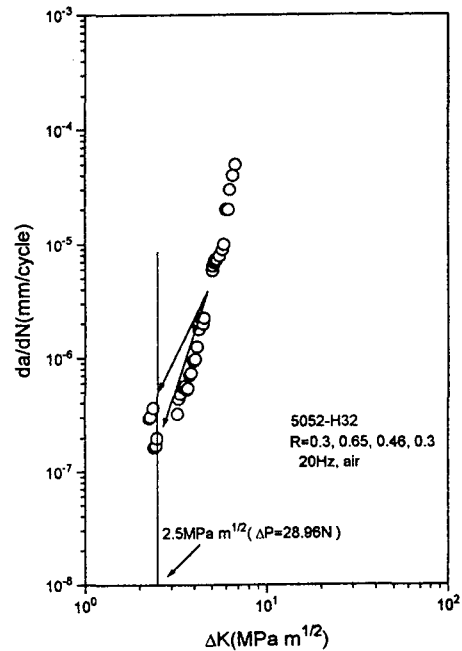


Fig. 4(b) Comparison between  $da/dN$  vs.  $\Delta K$  load pattern B

### 3.2 균열진전수명

하중반복수(N)에 의한 균열진전 수명을 예측하면, 균열진전은 노치선단에서 시작되지만 웨브론노치를 지낸 지점(예비균열)에서부터 발생한 균열길이를 데이터로 이용하였다. 피로수명은 균열 발생수명과 전파수명으로 구분되며, 본 실험에서와 같이 균열전파수명은 환경, 재료내의 초기결함 등의 영향과 재료의 기계적인 성질과, 강도, 작용하중의 형태 등에 의하여 많은 영향을 받는다.

Fig. 5(a)의 하중패턴 A에서 예비균열길이  $a_0$ 를 1.6mm로 설정하여 고블럭에서 저블럭으로 응력비를 변화하여 하중반복수와 균열성장에 대해 검토하였다. 고블럭( $R=-0.15$ )일 때 하중반복수  $N_{R=-0.15}=1.56 \times 10^6$ , 저블럭( $R=0.15$ )일 때  $N_{R=0.15}=1.98 \times 10^6$ 으로 고·저블럭 피로수명  $N_{R=0.15}/N_{R=-0.15}$ 의 비는 1.269배로 고블럭은 저블럭보다 빠른 균열진전을 나타내고 있다. 압축하중이 작용하더라도 최대하중( $P_{max}=41.21N$ )이 일정한 상태에서는 하중진폭이 큰 응력비가 균열진전은 빠르게 나타나는 것을 알 수 있다.

하중패턴 B인 Fig. 5(b)는 일정한 하중진폭에서 단계적으로 하중진폭을 변화할 때 피로수명 지연이 어느 정도 효과가 있는가에 대하여 검토하였다.  $a_i=2.3mm$ 까지  $N=1.43 \times 10^6$ ,  $R=0.65$ 인  $a_i=2.3 \sim 2.5mm$ 는  $N=5.4 \times 10^5$ ,  $R=0.46$ 인  $a_i=2.5 \sim 2.7mm$ 까지는  $N=9.99 \times 10^5$ 의 피로수명을 나타냈다.  $a_i=2.3 \sim 2.7mm$ ( $R=0.65 \rightarrow 0.46$ )까지 응력비 변화로 인한 균열지연 효과는  $N=1.539 \times 10^6$ 의 피로수명을 지연시킬 수 있었다.

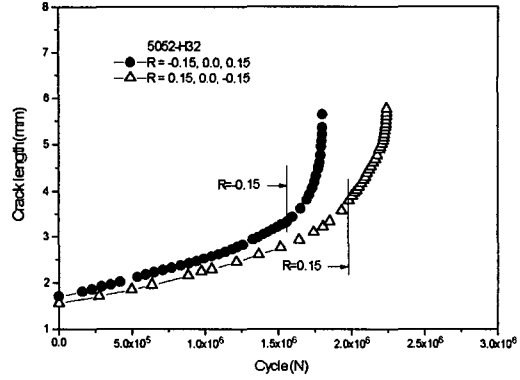


Fig. 5(a) Relation between crack length( $a_i$ ) and number of cycle( $N$ ) for load patterns A

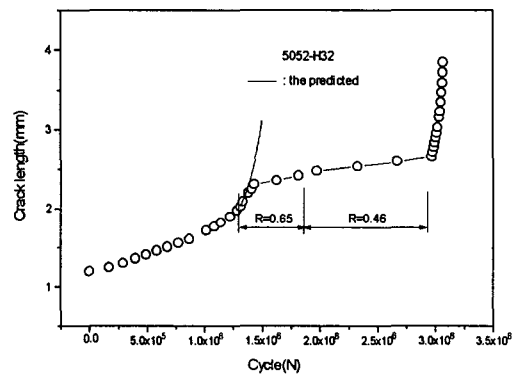


Fig. 5(b) Relation between crack length( $a_i$ ) and number of cycle( $N$ ) for load patterns B

### 제4장 결론

웨브론노치의 관통균열을 갖는 5052-H32 고강도 알루미늄합금 시험체를 준비하여 ① 최대하중이 일정한 고·저블럭 진폭변화 변동하중 ② 인장하중 범위내 진폭변화 변동하중에 대해 균열진전거동 실험을 수행하였다.

블럭하중에 대한 균열진전거동, 균열길이와 하중반복수에 의한 피로수명을 검토한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 균열진전을  $\Delta K$ 로 평가한 결과 하중진폭

변화 블록하중에 대하여 수정 Paris의 식을 얻을 수 있어 설계문제에 응용된다.

2) 인장하중진폭 범위내 블럭하중에서는 예측 피로수명보다  $N=2.538 \times 10^6$  정도의 피로수명 지연효과가 있었다.

#### 참고문헌

- 1) A. J. McEvily, 1988, "On Crack Closure in Fatigue Crack Growth", ASTM STP 982, pp.35~43.
- 2) 방종명, 1993, "미소피로균열의 진전 및 닫힘 거동", 박사학위논문, 한국과학기술원.
- 3) Jono, M., Song, J. H., and Itoh, H., 1985, "Fatigue Crack Growth and Closure of a High Tensile Strength Short Precracks", Trans. JSME, Vol. 51, pp.2554~2559.
- 4) A. F. Blom and D. K. Holm, 1985, "An Experimental and Numerical Study of Crack Closure", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 22, No. 6, pp.997~1011.
- 5) Elber, W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure", Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP 486, pp.230~242.
- 6) 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労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.
- 7) Paris, P. C., and Erdogan. F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Trans. ASME, J. Basic Engineering Vol. D85, pp.528~534.
- 8) 宋智浩, 辛龍承, 林允洙, 1989, "小型動電形 급힘·疲労試驗機의 製作", 大韓機械學會論文集, 第13卷, 第1號, pp.199~203.
- 9) 國尾 武, 中澤 一, 林 郁彦, 岡村弘之, 1984, "破壞力學試驗法", pp.128~190.
- 10) Stephens, R. I., Chen, D. K., and Holm, B. W., 1976, "Fatigue Crack Growth with

Negative Stress Ratio following Single Overload in 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum Alloys", ASTM STP 595, pp.27~40.

11) 김엽래, 유현일, 김세환, 1998, "하중진폭이 작은 인장과대 하중의 균열성장 거동", 한국공작기계학회논문집, 제7권, 제2호, pp.54~61.