

## Al 2024-T3재의 Crack Opening Point의 평가에 관한 연구

최 병 기\*, 국 중 민\*\*

\* 조선대학교 공과대학 기계공학부

\*\* 한국생산기술연구원

### A Study on Evaluation of Crack Opening Point in Al 2024-T3 Material

Byung-Ki Choi\*, Jung-Min Kuk\*\*

\* Dept. of Mechanical Eng., Chosun Univ.

\*\* Korea Institute of Industrial Technology

#### Abstract

This paper aims to synthesize the research on fatigue mechanisms of high strength aluminum alloys which are widely used in motorcars or airplanes to prevent accidents.

To measure the data of crack opening ratio, the same materials and methods are used for evaluating the fatigue crack propagation rate as an effective stress intensity factor. But, many researchers have brought different results.

An exact crack opening ratio was, therefore, proposed for getting a more accurate fatigue crack propagation rate.

#### 1. 서 론

크랙 열림의 개념은 피로크랙 진전 문제에 대하여 매우 중요하며 하중변동 영향뿐 아니라 크랙진전의 하한계 조건, 미소크랙의 진전속도 등  $\Delta K$ 만으로는 설명할 수 없는 현상을 설명하는 중요한 파라미터(parameter)라고 생각된다.

피로크랙 진전에 관한 연구는 Elber<sup>(1)</sup>가 최초로 크랙 열림 단합현상을 발표함으로써 급속적인 발전을 보여 오고 있다. 크랙 열림현상을 고려한 유효응력 확대계수폭  $\Delta K_{eff}$ 가 실동 하중하에서는 강도평가의 지배인자로 생각되는 실측 가능한 하나의 공학적인 역학량으로서 크랙진전속도를 평

가하는데 중요한 파라미터가 되고 있다.

크랙 열림변위를 측정하는 방법에 관해서는 많은 논문이 발표되어 있다. 즉, 크랙 열림 단합의 제 1요인은 크랙 가장자리에 남겨지는 소성변형이라는 점에서 크랙 열림점을 탄소성 해석에 의하여 구하려는 시도<sup>(2)</sup>, 크랙 열림의 개념을 바탕으로 한 피로크랙 진전 Model<sup>(3)</sup>, 유한요소법에 의한 변동하중하에서의 크랙진전 모사(simulation) 계산<sup>(4)</sup> 등이 보고되고 있다. 가령 Haenny<sup>(5)</sup>는 스트레인 게이지를 직접 부착하는 방법을 사용하고 있으며, 小林<sup>(6)</sup> 등은 제하 탄성 컴플라이언스(unloading elastic compliance)법과 초음파법을 사용해서 측정한 결과, 차이가 없음을 지적하고 있다. 또, 西谷<sup>(7)</sup> 등은 제하 탄성 컴플라이언스법에 있어서 평가의 문제점을 지적하고 있다. 이 밖에 같은 방법을 사용한 결과에 있어서도 연구자에 따라 다른 보고가 있다.

예를들면, Elber<sup>(8)</sup>, Schijve<sup>(9,10,11)</sup>, Vazquez<sup>(12)</sup> 등은 크랙 선단근방에 클립게이지를 장착하여 측정한 결과를 발표하고 있으나 연구자에 따라 동일 재료에 대해서 다음과 같이 다른 결과를 나타내고 있다.

$$\text{Elber : } U = \frac{P_{op}}{P_{max}} = 0.4R^2 + 0.1R + 0.5$$

$$\left( R = \frac{P_{min}}{P_{max}} \right) \quad (U = \text{크랙 열림비})$$

Schijve :

$$U = \frac{P_{op}}{P_{max}} = 0.1R^3 + 0.25R^2 + 0.2R + 0.45$$

Vazquez :

$$U = \frac{P_{op}}{P_{max}} = 0.43 \text{ (R에 관계없음)}$$

그러나, 크랙이라고 하는 것은 재료내부와 표면에서 그 진전의 크기가 다르며 또한, 서로 조화를 이루면서 진전해 나간다. 다시말해서, 크랙 진전속도가 크랙 열림에 영향을 받는다면 이들 표면과 내부에서의 속도의 차이는 크랙 열림의 차이로부터 기인되는 것으로 생각할 수 있다. 그러나, 대부분의 연구자들은 크랙 열림점의 측정 시 재료표면의 크랙 선단부근에서만 측정했기 때문에 정확한 정보가 될 수 없을 가능성을 내포하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 클립게이지와 스트레인 게이지를 사용하여 정확한 크랙 열림점의 값을 제시하고자 한다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 시험편

본 실험에 사용한 재료는 Al 2024-T3재의 압연판재로 고인성, 고강도 재료로서 항공기 구조물 및 자동차의 경량화, 내식성을 위한 차체 전 부품에 두루 사용되고 있는 추세이며 재료의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2에 나타났다.

Table 1 Chemical compositions of specimen

component	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti
Weight(%)	0.28	0.21	4.1	0.55	1.2	0.016	0.03

Table 2 Mechanical properties of specimen

Yield Stress (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensile Stress (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
40	49	28

한편, 시험편의 규격은 ASTM E647-78T에 준하여 압연방향과 크랙의 진전방향이 직각이 되도록 채취하고, 하중 제어방식에 적합한 CT시험편을 사용하였으며 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다.

가공된 시험편은 크랙이 빨리 발생되도록 하기 위하여 시험편의 기계 노치에 0.14mm 휠 커터로 약 2mm 정도 슬릿을 넣은 다음 동일한 응력조건을 만들기 위하여 0.1B(B: thickness)이상 되도록 하였으며 a/W가 0.35~0.55가 되도록 예크랙(pre-crack)을 발생시킨 후 실험을 개시하였다.

크랙길이의 측정을 위해 기계 가공된 시험편의 표면은 연마지 #1500을 사용하여 최종 연마하고 산화알루미나(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.3μm) 분말로 래핑 가공하여 경면이 되도록 하였으며 하이트 게이지(height gage)를 사용하여 예크랙 선단으로부터 직각방향으로 0.5mm 간격으로 슬립 마킹(slip marking)하여 사용하였다.

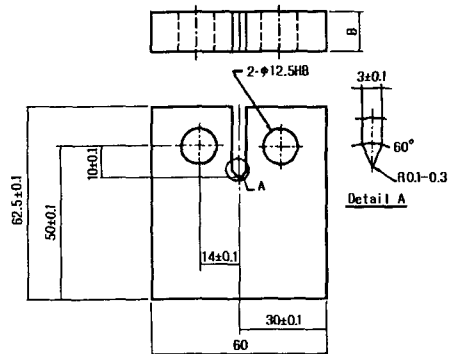


Fig. 1 Shape and dimensions of specimen

### 2.2 실험방법

실험에 사용한 시험기는 용량 ±10ton 전기유압식 인장압축 피로시험기(SERVOPULSER type pull-push fatigue testing machine)이며 반복하중은 하중제어에 의한 정현파형을 사용하였다.

한편, 크랙길이의 측정은 하이트 게이지를 사용하여 0.5mm 간격으로 슬립 마킹한 시험편을 0.01mm까지 측정이 가능한 눈금이 부착되어 있는 이동식 현미경으로 관찰하였으며 크랙이 진전됨에 따라 정확한 사이클수를 측정하기 위하여 점진적으로 반복속도를 낮추어 실험을 진행하고

이렇게 얻어진 실험결과를 응력확대계수폭  $\Delta K$ 와 크랙진전속도  $da/dN$ 으로 정량화시키기 위하여 다음 식<sup>(13)</sup>에 의하여 응력확대계수폭  $\Delta K$ 를 산출하였으며 크랙진전속도  $da/dN$ 와 응력확대계수폭  $\Delta K$ 는 seven point incremental polynomial method로 구하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} f(a), \quad a = \frac{a}{W} (0.25 \leq a \leq 0.60)$$

$$f(a) = \frac{(2+a)}{(1-aa)^{3/2}} (0.886 + 4.64a - 13.32a^2 + 14.72a^3 - 5.6a^4)$$

여기에서  $a$  = 크랙길이

$W$  = 시험편의 폭

$\Delta P$  = 하중폭

$B$  = 시험편 두께

실험에 사용된 하중조건은 Table 3과 같이 설정하였다. 크랙 열림점은 측정은 Fig. 2에서와 같이 하나는 시험편 배면에 스트레인 게이지를 부착하였으며, 하나는 크랙 마우스(crack mouth)에 클립게이지를 장착하였고, 하나는 크랙 선단근방에 스트레인 게이지를 붙여 크랙 열림점을 측정하였다.

한편 스트레인 게이지에서 검출된 전압은 브리지 박스(bridge box), 동적 변형증폭기(dynamic strain amplifier)를 통과하여 감산회로에 들어가 감산회로에서의 출력을 저속(0.5Hz)으로 X-Y 기록계에 기록하여 크랙 열림점을 측정하였다.

Table 3 Load condition of fatigue test

R(Stress ratio)	$P_{max}$ (kg)	$P_{min}$ (kg)	Remark
0.1	120	12	
0.2	130	26	
0.3	160	48	
0.4	240	96	

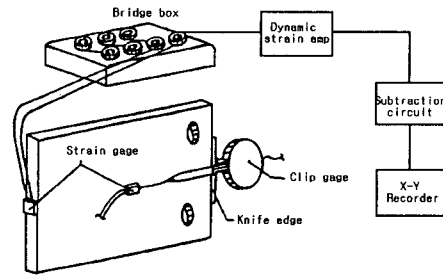


Fig. 2 Schematic diagram of location and system of displacement measurement

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 응력비에 따른 크랙 열림점 값의 차이

Fig. 3은 응력비가 다른 각각의 실험중 크랙진전의 제 II영역의 중간부분에서 측정된 크랙 선단근방의 하중( $P$ )과 감산변위( $a\epsilon - P$ )의 관계를 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 각각 다른 응력비에 대해서 측정된 크랙 열림비( $U' = P_{op}/P_{max}$ )의 값은 대략 0.45정도로 비슷한 값을 나타내고 있어서 Elber나 Schijve의 결과 식과는 달리 응력비에 관계없이 일정하며, 오히려 Vazquez의 결과가 더욱 타당함을 알 수 있다.

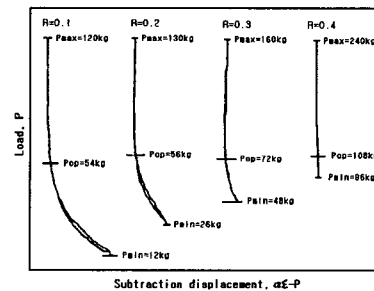


Fig. 3 Relationship between stress ratio and opening load under constant amplitude load(at near crack tip)

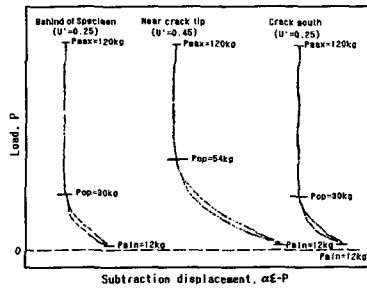


Fig. 4 Magnitude of opening displacement along measurement location by subtraction displacement( $R=0.1$ )

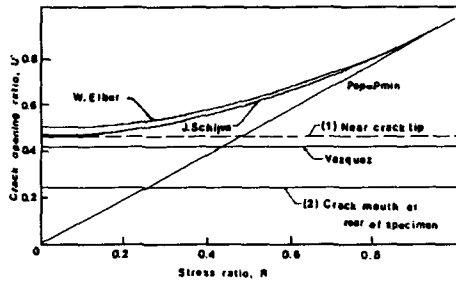


Fig. 5 Relationship between stress ratio and opening point in measurement location

### 3.2 크랙 열림점의 측정위치에 따른 차이

Fig. 4는 일정진폭 하중하에 있어서 측정위치에 따른 크랙 열림점의 값을 나타낸 그림으로서 크랙 마우스에 클립게이지를 장착하고 시험편 배면과 크랙 선단근방에 스트레인 게이지를 부착하여 크랙 열림점의 값을 하중( $P$ )과 감산변위( $\Delta\epsilon - P$ )와의 관계를 나타낸 결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 크랙 선단근방에서는 높은량( $U'=0.45$ )을 나타내며 크랙선단에서 먼 즉, 크랙 마우스 및 시험편 배면에서는 비교적 작은 값인  $U'=0.25$ 를 나타내고 있다.

크랙 닫힘의 원인에는 세가지 즉, (1) 소성 유기형, (2) 산화물에 의한 것, (3) 표면 거칠기에 의한 것으로 대기환경 조건하의 크랙진전의 제 II영역에서는 크랙 선단의 소성역으로부터 기인되는 것이 대부분이다. 또한, 소성역의 크기는 시험편의 표면과 내부에서 다르다. 다시말해서, 내부의 평면변형상태에서 표면의 평면응력상태에

가까이 갈수록 소성역의 크기는 커진다.

위의 측정결과와 바로 표면과 내부의 소성역의 크기의 차이로부터 기인된 것으로, 크랙 선단근방은 시험편 표면의 역학적 양이 그대로 반영된 것이며 크랙 선단에서 멀어질수록 표면과 내부의 양이 평균화되어 나타나는 것으로 생각할 수 있다.

### 3.3 유효응력 확대계수에 의한 크랙진전속도의 평가

Fig. 5는 측정위치에 다른 크랙 열림비( $U'=P_{op}/P_{max}$ )의 값과 응력비와의 관계를 나타낸 그림으로서 기존의 연구자들 즉, Elber, Schijve, Vazquez 등의 결과식으로부터 크랙 열림비의 값을 나타낸 것과 본 시험의 결과(Fig. 3, Fig. 4)인, 크랙 선단근방에서 스트레인 게이지에 의해 크랙 열림점의 값을 측정된 것과 크랙 마우스 및 시험편 배면에 각각 클립게이지와 스트레인 게이지를 부착하여 측정했을 때의 크랙 열림비의 값을 종합해서 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 기존의 연구자인 Elber나 Schijve는 응력비가 커짐에 따라 크랙 열림비의 값도 증가함을 나타내고 있으나 Vazquez의 결과식으로 부터는 응력비에 관계없이 크랙 열림비의 값은 일정한 값인 0.43을 나타내고 있다.

본 실험의 결과 크랙 선단근방에서 측정했을 때의 값은 Vazquez의 결과식보다 약간 높은 값인 0.45를 나타내고 있으며 크랙 마우스에서와 시험편 배면에서는 낮은 값인 0.25를 나타내고 있다. 크랙 열림비의 값이 크든 작든간에 가장 중요한 것은 응력비의 영향을 잘 배제하여야만 한다.

본 절에서는 타 연구자의 결과와 본 실험의 결과를 이용하여 피로크랙 진전속도를 평가하므로 해서 어느 것이 가장 잘 응력비의 영향을 배제할 수 있는가를 확인하고자 한다.

Fig. 6은 피로크랙 진전실험에서 얻어진 크랙 길이와 사이클수로부터 응력확대계수폭  $\Delta K$ 와 크랙진전속도  $da/dN$ 의 관계를 구해 나타낸 그림으로서, 그림에서 알 수 있는바와 같이 응력비가 커짐에 따라 크랙진전속도는 빠름을 알 수 있다.

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9는 각각 Elber, Schijve,

Vazquez 등의 결과식을 응력비에 따른 크랙진전 속도와 유효응력 확대계수폭  $\Delta K_{eff}$ 로 나타낸 것이며, Fig. 10, fig. 11은 각각  $U'=0.45$ 일 때와  $U'=0.25$ 일 때의 결과를 나타낸 것이다.

이들 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 본 실험에서 얻어진 것 중  $U'(P_{op}/P_{max})=0.25$ 를 이용한 것이 응력비의 영향을 가장 잘 배제할 수 있음을 알 수 있다.

따라서, 유효응력 확대계수를 이용하여 크랙진전속도를 평가할 경우 크랙 열림비의 값은 크랙 선단으로부터 떨어진 곳 즉, 표면과 내부의 중합된 역학적인 양을 얻을 수 있는 곳에서의 값을 이용하는 것이 바람직하다고 하겠다.

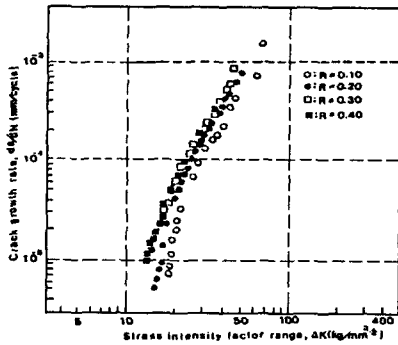


Fig. 6 Relationship between crack growth rate and stress intensity factor range under constant amplitude load

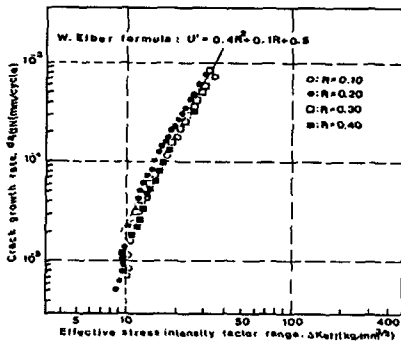


Fig. 7 Relationship between crack growth rate and effective stress intensity factor range under constant amplitude load (by using Elber's formula)

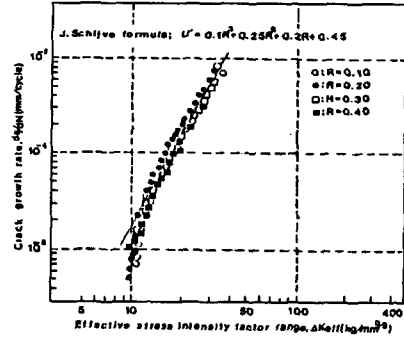


Fig. 8 Relationship between crack growth rate and effective stress intensity factor range under constant amplitude load (by using Schijve's formula)

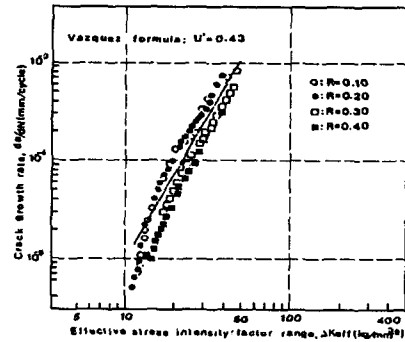


Fig. 9 Relationship between crack growth rate and effective stress intensity factor range under constant amplitude load (by using Vazquez's formula)

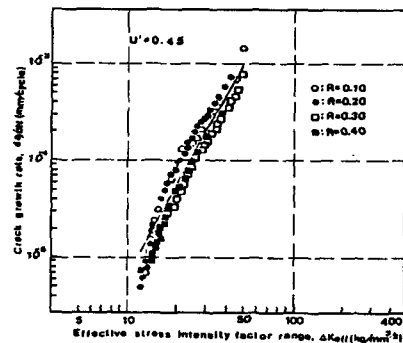


Fig. 10 Relationship between crack growth rate and effective stress intensity factor range under constant amplitude load (from test result 1)

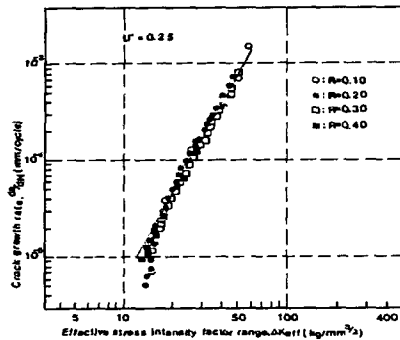


Fig. 11 Relationship between crack growth rate and effective stress intensity factor range under constant amplitude load (from test result 2)

#### 4. 결론

본 논문은 유효응력확대계수를 이용하여 크랙진전속도를 평가할 때 이용되는 크랙 열림비의 측정에 관한 것을 다룬 것으로, 본 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. Al 2024-T3재를 사용하여 피로시험을 한 결과 측정된 크랙 열림비의 값은 응력비에 관계없이 일정함을 알 수 있었다.
2. 크랙 열림비의 양은 측정위치에 따라 다르며 유효응력 확대계수를 이용하여 크랙진전속도를 평가한 결과 클립게이지를 이용하여 크랙 마우스에서 측정한 것과 스트레인 게이지를 이용하여 시험편 배면에서 측정한 것이 보다 정확하고 유용함이 밝혀졌다.

#### 참고 문헌

- (1) Elber W., "The significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP 486, pp. 230-242, 1971.
- (2) 小林英男, 涉谷榮一, "疲労き裂進展の弾塑性破壊力學にする評價", 材料, 第29卷, 第325號, pp. 1049-1055, 1980.
- (3) Elber W., "Fatigue Crack Closure Under

Cyclic Tension", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 2, pp. 37-45, 1970.

- (4) 菊川眞, 城野政弘, "ランダム含む正常變動荷重下の疲労き裂開閉口舉動とき裂進展速度の推定法(第2報, 高進展速度領域への擴張), 日本機械學會論文集, 第49卷, 第439號, pp. 278-285, 1983.
- (5) Haenny L., and Dickson J. I., "comments on the Experimental Evaluation of Fatigue Crack Closure", International Journal of Fracture, Vol. 16, pp. R121-R125, 1980.
- (6) 小林英男, 小川武史, "SFVV3鋼の疲労き裂開閉口の實測と下限界特性の評価", 日本機械學會論文集, 第50卷, 第451號, pp. 309-319, 1984.
- (7) 西谷弘信, "除荷彈性ユンプライアニス法に関する考察", 日本機械學會論文集, 第51卷, 第465號, pp. 1463-1441, 1985.
- (8) Elber W., "Equivalent Constant-Amplitude Concept for Crack Growth Under Spectrum Loading", ASTM STP 595, pp. 236-250, 1976.
- (9) Schijve J., "Observations on the Prediction of Fatigue Crack Growth Propagation Under Variable-Amplitude Loading", ASTM STP 595, pp. 3-23, 1976.
- (10) Schijve J., "Significance of Fatigue Cracks in Micro-Range and Macro-Range", ASTM STP 415, pp. 415-457, 1967.
- (11) Schijve J., "Four Lectures on Fatigue Crack Growth", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 167-221, 1979.
- (12) Vazquez J. A., "Experimental Results on Fatigue Crack Closure for Two Aluminum Alloys", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 12, pp. 231-240, 1979.
- (13) ASTM E647-83, "Constant Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above  $10^{-8}$  m/cycle", pp. 711-731, 1984.