

(論文)

疲勞크랙 進展過程에서의 크랙열림점 評價에 관한 研究(I)

— 실험에 의한 크랙열림점 측정 —

崔乘起* · 尹漢鏞** · 朴昌彥** · 丁太權***

(1990年 12月 8日 接受)

A Study on Evaluation of Crack Opening Point in Fatigue Crack Propagation Course (I)

— Measurement of Crack Opening Point by Experiment —

Byung-Ky Choi, Han-Yong Yoon, Chang-Eun Park and Tae-Gweon Jeong

Key Words : Effective Stress Intensity Factor Range(유효응력 확대계수폭), Crack Opening Ratio(크랙열림비), Crack Mouth(크랙마우스), Crack Tip(크랙선단), Back Stage(시험편 배면)

Abstract

This paper aims to synthesize the research on the fatigue fracture mechanisms of high strength aluminum alloys which are widely used in airplanes to prevent accidents. In spite of the same material and method given to measure the data of the crack opening point used for evaluating the fatigue crack propagation rate as an effective stress intensity factor, many researchers have revealed different results. Therefore an exact crack opening ratio was supplied for the propose of receiving a more exact fatigue crack propagation rate. As the result of the test for fatigue crack propagation rate as an effective stress intensity factor by exact data, this test was proved to be the best method. Summarizing the results : (1) As a result of the fatigue test, the value of the crack opening ratio is the same regardless of the stress ratio. (2) The crack opening ratio is different according to the measurement location. As a result of the crack propagation ratio test by effective stress intensity factor, the crack opening ratio value, measured at the crack mouth by a clip gage or measured behind the specimen by a strain gage, is more exact and valuable than any other measuring test.

1. 序 論

크랙 열림의 개념은 피로크랙 진전문제에 대하여 매우 중요하며 하중변동의 영향뿐 아니라 크랙 진

전의 하한계 조건, 미소크랙의 진전속도등 ΔK 만으로는 설명할 수 없는 현상을 설명할 수 있는 것으로 생각된다.

피로크랙 진전에 관한 연구는 Elber⁽¹⁾가 최초로 크랙 열림 단힘 현상을 발표함으로써 급속적인 발전을 보여, 크랙 열림현상을 고려한 有效應力擴大係數幅 ΔK_{eff} 가 實動荷重下에서는 強度評價의 지배인자로 생각되는 實測 가능한 하나의 공학적인

* 正會員, 朝鮮大學校 工科大學 機械工學科
** 正會員, 木浦大學校 工科大學 機械工學科
*** 正會員, 朝鮮大學校 工科大學 機械設計工學科

力學量으로서 크랙 진전속도를 평가하는데 중요한 파라미터가 되고 있다.

크랙 열림變位를 측정하는 방법에 관해서는 많은 논문이 발표되어 있다. 즉, 크랙열림 단합의 第1 要因은 크랙 가장자리에 남겨지는 塑性變形이라는 점에서 크랙 열림점을 彈塑性 解析에 의하여 구하려는 試圖⁽²⁾, 크랙 열림의 개념을 바탕으로한 피로 크랙 진전모델⁽³⁾, 有限要素法에 의한 變動荷重下에서의 크랙 진전 시뮬레이션 계산등이 보고⁽⁴⁾ 되고 있다. 가령, Haenny⁽⁵⁾는 스트레인게이지를 직접 부착하는 방법을 사용하고 있으며, 小林⁽⁶⁾ 등은 언로딩 엘라스틱 컴플라이언스(unloading elastic compliance) 법과 超音波法을 사용해서 측정한 결과, 차이가 있음을 지적하고 있다. 또, 西谷⁽⁷⁾ 등은 언로딩 엘라스틱 컴플라이언스법에 있어서 평가의 문제점을 지적하고 있다. 이밖에 같은 방법으로 사용한 결과에 있어서도 연구자에 따라 다른 보고가 있다.

예를들면, Elber⁽⁸⁾, Schijve⁽⁹⁻¹¹⁾, Vazquez⁽¹²⁾ 등은 크랙先端 근방에 크립게이지를 장착하여 측정한 결과를 발표하고 있으나 연구자에 따라 同一材料에 대해 다음에 나타내는 바와같이 다른 결과를 나타내고 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Elber ; } U' &= \frac{P_{op}}{P_{max}} \\
 &= 0.4R^2 + 0.1R + 0.5 \left(R = \frac{P_{min}}{P_{max}} \right) \\
 (U' &= \text{크랙 열림비})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Schijve ; } U' &= \frac{P_{op}}{P_{max}} \\
 &= 0.1R^3 + 0.25R^2 + 0.2R + 0.45
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Vazquez ; } U' &= \frac{P_{op}}{P_{max}} \\
 &= 0.43(R \text{에 관계없음})
 \end{aligned}$$

그러나, 크랙이라고 하는것은 재료내부와 표면에서 그 진전의 크기가 다르며 또한, 서로 조화를 이루면서 진전해 나간다. 다시말해서, 크랙 진전속도가 크랙 열림에 영향을 받는다고 하면 이들 표면과 내부에서의 속도의 차이는 크랙 열림의 차이로 부터 기인되는것으로 생각할 수 있다.

그러나, 이들 연구자들은 크랙 열림점의 측정시 재료표면의 크랙先端 부근에서만 측정했기 때문에 정확한 정보가 될수없을 가능성을 내포하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 크립게이지와 스트레인게이지를 사용하여 정확한 크랙 열림점의 값을 제시

하고져 한다.

2. 試驗片 및 實驗方法

2.1 試驗片

본 실험에 사용하고자 하는 시험편의 재료는 Al 2024-T3材의 壓延板材로 高靱性, 高强度 재료로서 航空機 構造物의 대부분을 구성하고 있다. 그러나 현재 Al 2024-T3材의 국내 구매가 불가능하여 어니링 상태의 Al 2024-0材를 구입하여 Fig. 1과 같이 溶體化 處理 過程을 통해서 얻고자하는 T3의 物性值를 얻었으며 Al 2024-T3처리후의 재료의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2에 나타났다.

한편, 시험편의 규격은 ASTM E 647-78T에 준하여 壓延方向과 크랙의 진전방향이 직각이 되도록 채취하고 두께 4.2mm와 8.4mm의 판재로 하중 제어방식에 적합한 C-T시험편(compact tension type specimen)을 사용하였으며 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 2와 같다.

가공된 시험편은 크랙이 빨리 발생되도록 하기 위하여 시험편의 기계 노치에 0.14mm 휠커터로 약 2mm 정도 슬릿을 넣은 다음 동일한 응력 세기 조건을 만들기 위하여 0.1B(B: thickness) 이상이 되도록 豫크랙(pre-crack)을 발생시킨 후 실험을 개시토록 하였다.

크랙 길이의 측정을 위해 기계가공된 시험편의 표면을 연마지 #1200까지 研磨하고 산화크롬 분말로 버프연삭하여 鏡面이 되도록 하였으며 접촉 게이지를 사용하여 豫크랙先端으로 부터 직각방향으로 0.5mm 간격으로 슬립마킹하여 사용하였다.

2.2 實驗方法

실험에 사용한 시험기는 용량 ±10톤 電氣油壓式

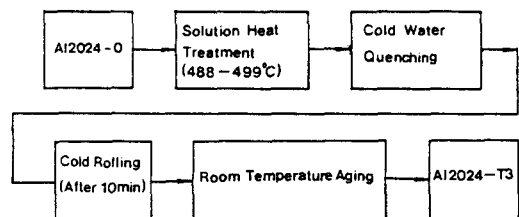


Fig. 1 Process diagram for Al 2024-T3 treatment

Table 1 Chemical compositions of Al 2024-T3 (Wt%)

Test piece	Comp item	Chemical composition							
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
	$t=4.2\text{mm}$	0.28	0.21	4.1	0.55	1.2	0.016	—	0.03
	$t=8.4\text{mm}$	0.06	0.14	3.8	0.45	1.2	0.005	—	0.027
	SPEC	0.50	0.50	3.8	0.30	1.2	1.10	0.25	0.15
		Max	Max	4.9	0.9	1.8	Max	Max	Max

Table 2 Mechanical properties of Al 2024-T3

Test item		Tension test			Hardness test
		Yield strength	Tensile strength	Elongation	
Test piece		kgf/mm ²	kgf/mm ²	%	hr
$t=4.2\text{mm}$	No.1	30.4	45.1	24.6	95-97
	No.2	30.9	45.3	24.2	"
$t=8.4\text{mm}$	No.1	31.4	46.5	21.2	99-101
	No.2	30.9	45.7	21.0	"
SPEC (Al 2024-T3)		30.0	45.0	15.0	94
		Min	Min	Min	103
SPEC (Al 2024-0)		10.0	22.0	12.0	
		Max	Max	Min	

引張壓縮疲勞試驗機(SERVOPULSER type pull-push fatigue testing machine)이며 반복하중은 하중제어에 의한 sine 파형을 사용하였다.

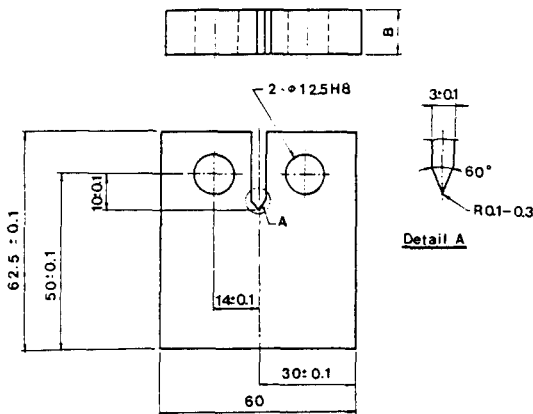


Fig. 2 Shape and dimensions of specimen.

한편, 크랙길이의 측정은 접촉계이지를 사용하여 0.5mm간격으로 슬립 마킹한 시험편을 0.01mm까지 측정이 가능한 스케일이 부착되어 있는 이동식 현미경으로 관찰하였으며 크랙이 진전됨에 따라 정확한 사이클수를 측정하기 위하여 점진적으로 반복속도를 낮추어 실험을 진행하고 이렇게 얻어진 실험결과치를 應力擴大係數幅 ΔK 와 크랙 진전속도 da/dN 으로 정량화시키기 위하여 다음식⁽¹³⁾에 의하여 應力擴大係數幅 ΔK 를 산출하였으며 크랙 진전속도 da/dN 와 應力擴大係數幅 ΔK 는 seven point incremental polynomial 방법으로 구하였다.

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

$$f(\alpha) = \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha$$

$$- 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

여기에서 α =크랙길이, W =시험편의 폭, ΔP =하중폭, B =시험편 두께이다.

Table 3 Load conditions 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	

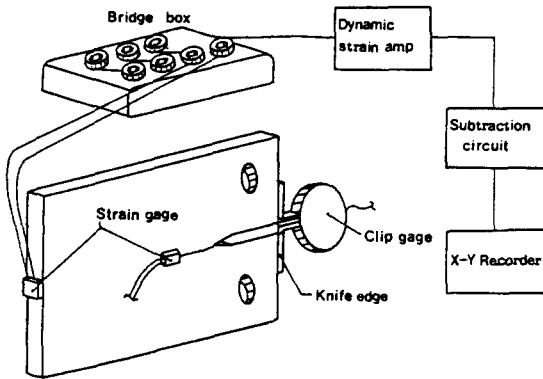


Fig. 3 Schematic diagram of location and system of displacement measurement

실험에 사용된 하중조건은 Table 3과같이 설정하였다. 크랙 열림점의 측정은 Fig. 3에서와 같이 하나는 시험편 背面에 스트레인 게이지를 부착하였으며, 하나는 크랙마우스(crack mouth)에 크립게이지를 장착하였고, 그리고 또 하나는 크랙先端 近方에 스트레인 게이지를 붙여 크랙 열림점을 측정하였다.

한편 스트레인게이지에서 檢出된 電壓은 브리지 박스, 다이내믹 스트레인 증폭기를 통과하여 減算回路에 들어가고 減算回路에서의 出力을 低速(0.5 Hz)으로 X-Y 레코더에 기록하여 크랙 열림점을 측정하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 應力比에 따른 크랙 열림점 값의 차이

Fig. 4는 응력비가 다른 각각의 실험중 크랙진전의 제 II 영역의 중간부분에서 측정된 크랙선단 근방의 하중(P)과 감산변위($a\epsilon - P$)의 관계를 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있는 바와같이 각각

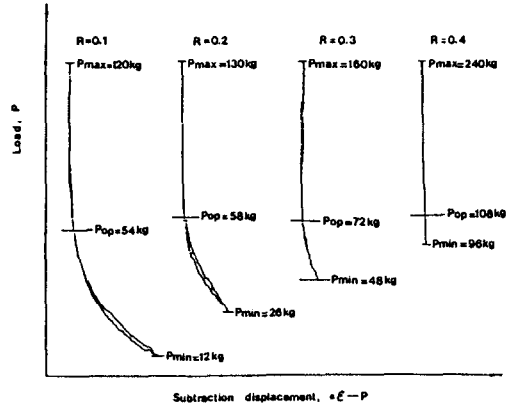


Fig. 4 Relationship between stress ratio and opening load under constant-amplitude load (at near crack tip)

다른 응력비에 대해서 측정된 크랙 열림비($U' = Pop/P_{max}$)의 값은 대략 0.45정도로 비슷한 값을 나타내고 있어서 Elber나 Schijve의 결과식과는 달리 응력비에 관계없이 일정하며, 오히려 Vazquez의 결과가 더욱 타당함을 알 수 있다.

3.2 크랙 열림점의 測定位置에 따른 차이

Fig. 5는 一定 振幅荷重下에 있어서 측정位置에 따른 크랙 열림점의 값을 나타낸 그림으로서 크랙 마우스에 크립게이지를 装着하고 시험편 背面과 크랙先端 近方에 스트레인게이지를 부착하여 크랙 열림점의 값을 荷重(P)과 減算變位($a\epsilon - P$)와의 관계를 나타낸 結果이다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 크랙先端 近方 에서는 높은량($U'=0.45$)을 나타내며 크랙先端에서 먼 즉, 크랙 마우스 및 백스태이지에서는 비교적 작은값인 $U'=0.25$ 를 나타내고 있다.

균열 단합의 原因에는 세가지 즉, (1) 塑性 誘起型, (2) 酸化物에 의한 것, (3) 表面 거칠기에 의한 것으로 大氣環境 條件下의 크랙 進展의 第 II 領域에서는 크랙先端의 塑性域으로부터 起因되는것이 大部分이다. 또한, 塑性域의 크기는 시험편의 表面과 内部에서 다르다. 다시말해서, 内部의 평면 변형 狀態에서 表面의 평면 응력 狀態에 가까이 갈수록 塑性域의 크기는 커진다.

위의 측정 結果는 바로 表面과 内部의 塑性域의 크기의 差異로부터 起因된 것으로, 크랙先端 近方

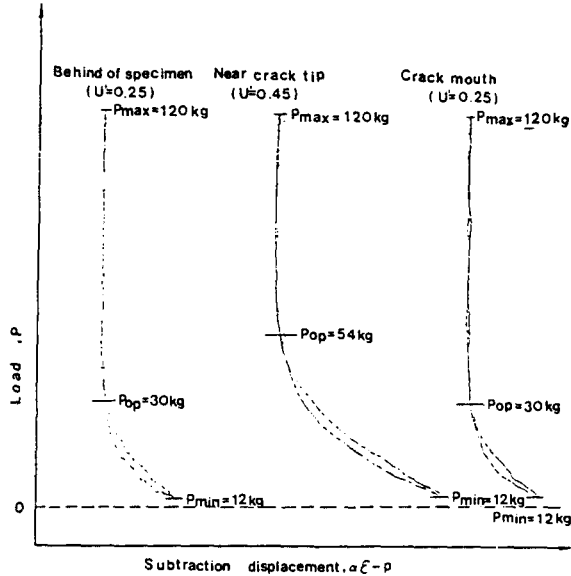


Fig. 5 Magnitude of opening displacement along measurement location by subtraction displacement (R=0.1)

은 시험편 表面의 力學的 量이 그대로 反映된 것이며 크랙先端에서 멀어질수록 表面과 內部的 平均化 된 量이 나타나는 것으로 생각할 수 있다.

3.3 有效應力擴大係數에 의한 크랙進展速度의 評價

Fig. 6에는 測定位置에 따른 크랙 열리는 比 ($U' = P_{op}/P_{max}$)의 값과 應力比와의 關係를 나타낸 그림으로서 既存의 研究者들 즉, Elber, Schijve, Vazquez 등의 結果式으로 부터 크랙 열리는 比 ($U' = P_{op}/P_{max}$)의 값을 나타낸 것과 本 實驗의 結果 (Fig. 4, Fig. 5)인, 크랙先端 近方에서 스트레인 게이지에 의한 크랙 열리는 點의 값을 測定한 것과 크랙 마우스 및 試驗片 背面에 각각 크립 게이지와 스트레인게이지를 附着하여 測定하였을 때의 크랙 열리는 比 ($U' = P_{op}/P_{max}$)의 값을 綜合해서 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 既存의 研究者인 Elber나 Schijve는 應力比가 커짐에 따라 크랙 열리는 比의 값도 增加함을 나타내고 있으나 Vazquez의 結果式으로 부터는 應力比에 關係없이 크랙 열리는 比의 값은 一定한 값인 0.43을 나타내고 있다.

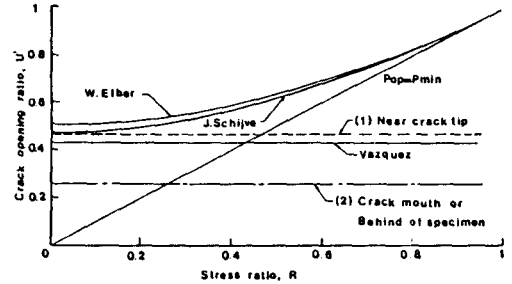


Fig. 6 Relationship between stress ratio and opening point in measurement location

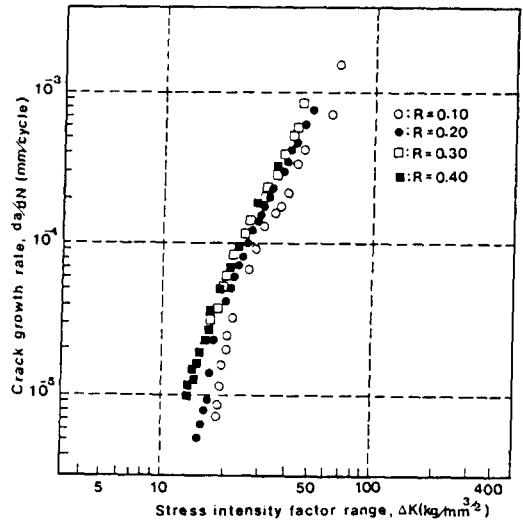


Fig. 7 Relationship between crack growth rate and stress intensity factor range under constant amplitude load

本 實驗의 結果 크랙先端 近方에서 測定했을 때의 값은 Vazquez의 結果式보다 약간 높은 값인 0.45를 나타내고 있으며 크랙 마우스에서와 試驗片 背面에서는 낮은 값인 0.25를 나타내고 있다. 크랙 열리는 比의 값이 크든 작든간에 가장 重要한것은 應力比의 影響을 잘 排除하여야만 한다.

本 節에서는 他 研究者의 結果와 本 實驗의 結果를 利用하여 疲勞크랙 進展速度를 評價하므로 해서 어느것이 가장 잘 應力比의 影響을 排除할 수 있는가를 確認하고자 한다.

Fig. 7은 疲勞크랙 進展實驗에서 얻어진 크랙길 이의 사이클수로 부터 應力擴大係數幅 ΔK와 크랙

進展速度 da/dN 의 關係를 구해 나타낸 그림으로서, 그림에서 알 수 있는바와 같이 應力比가 커짐에 따라 크랙 進展速度는 빠름을 알 수 있다.

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10은 각각 Elber, Schijve, Vazquez 등의 結果式을 應力比에 따른 크랙 進展速度와 有效應力擴大係數幅 ΔK_{eff} 로 나타낸 것이며

Fig. 11, Fig. 12는 각각 $U'=0.45$ 일때와 $U'=0.25$ 일때의 結果를 나타낸 것이다.

이들 結果로 부터 알 수 있는바와 같이 本 實驗에서 얻어진 것중 $U'(P_{op}/P_{max})=0.25$ 를 利用한 것이 應力比의 影響을 가장 잘 排除할 수 있음을 알 수 있다.

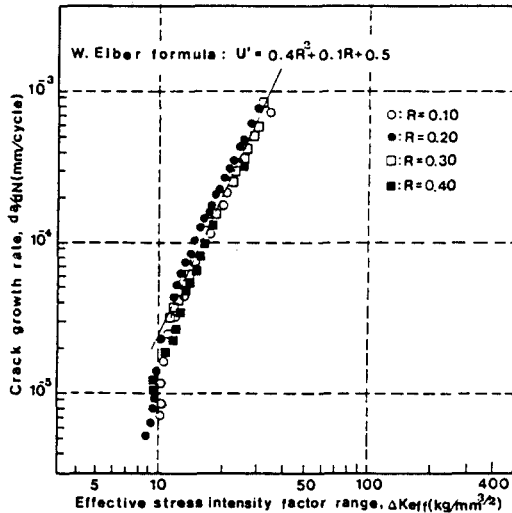


Fig. 8 Relationship between crack growth rate and effective stress intensity factor range under constant amplitude load (by using Elber's formula)

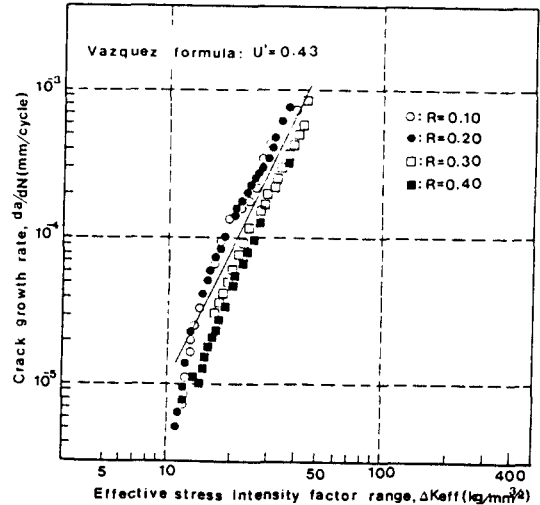


Fig. 10 Relationship between crack growth rate and effective stress intensity factor range under constant amplitude load (by using Vazquez's formula)

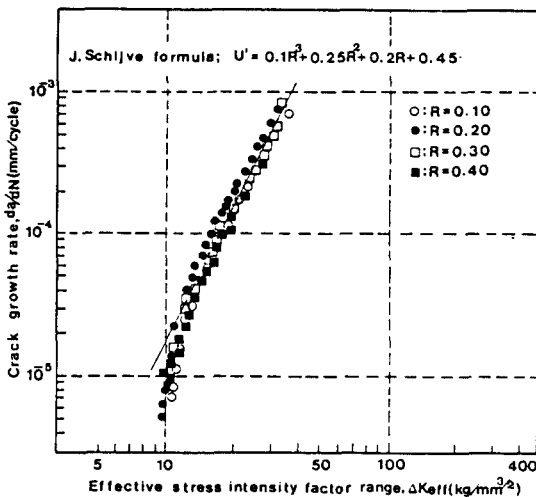


Fig. 9 Relationship between crack growth rate and effective stress intensity factor range under constant amplitude load (by using Schijve's formula)

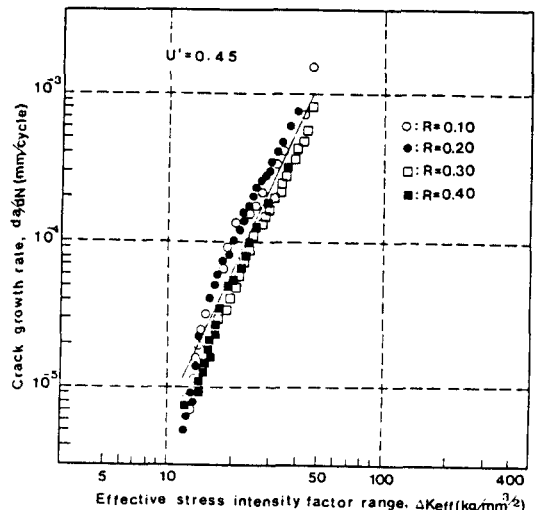


Fig. 11 Relationship between crack growth rate and effective stress intensity factor range under constant amplitude load (from test result 1)

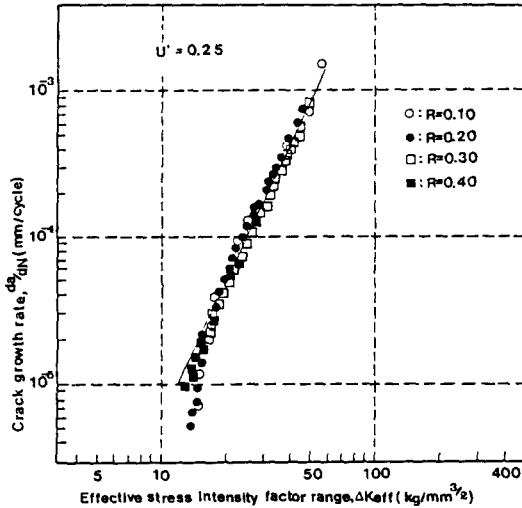


Fig. 12 Relationship between crack growth rate and effective stress intensity factor range under constant amplitude load (from test result 2)

따라서, 有效應力擴大係數를 利用하여 크랙 進展 速度를 評價할 경우 크랙 열림比의 값은 크랙 先端 으로부터 떨어진 곳 즉, 表面과 內部的 綜合된 力學的인 量을 얻을 수 있는 곳에서의 값을 利用하는 것이 바람직 하다고 하겠다.

4. 結 論

本 論文은 有效應力擴大係數를 利用하여 크랙 進展 速度를 評價할 때 利用되는 크랙 열림점의 측정 에 관한 것을 다룬것으로, 本 研究에서 얻어진 結果를 整理하면 다음과 같다.

(1) Al 2024-T3材料를 사용하여 疲勞 試驗을 한 結果 측정된 크랙 열림比의 값은 應力比에 관계없 이 一定함을 알 수 있었다.

(2) 크랙 열림比의 量은 측정位置에 따라 다르며 有效應力擴大係數를 이용하여 크랙 進展速度를 評價한 結果 크립게이지를 利用하여 크랙 마우스에서 측정한 것과 스트레인 게이지를 이용하여 시험편 背面에서 측정한 것이 보다 正確하고 有用함이 밝혀졌다.

참 고 문 헌

- (1) Elber, W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP 486. pp.230~242.
- (2) 小林英男, 涉谷榮一, 1980, "疲勞き裂進展の彈塑性破壞力學にする評價", 材料, 第29卷, 第325號, pp. 1049~1055.
- (3) Elber, W. 1970, "Fatigue Crack Closure Under Cyclic Tension", Engineering Fracture Mechanics, Vol.2, pp.37~45.
- (4) 菊川眞, 城野政弘, 1983, "ランダムを含む定常變動荷重下の疲勞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.
- (5) Haenny, L. and Dickson, J.I. 1980, "Comments on the Experimental Evaluation of Fatigue Crack Closure", International Journal of Fracture, Vol. 16, pp.R121~R125.
- (6) 小林英男, 小川武史, 1984, "SFVV3鋼の疲勞き裂開閉口の實測と下限界特性の評價", 日本機械學會論文集, 第50卷, 第451號, pp.309~319.
- (7) 西谷弘信, 1985, "除荷彈性エンプライアンス 法に關する一考察", 日本機械學會論文集, 第51卷, 第465號, pp.1436~1441.
- (8) Elber, W. 1976, "Equivalent Constant-Amplitude Concept for Crack Growth Under Spectrum Loading", ASTM STP 595, pp.236~250.
- (9) Schijve, J. 1976, "Observations on the Prediction of Fatigue Crack Growth Propagation Under Variable - Amplitude Loading", ASTM STP 595, pp. 3~23.
- (10) Schijve, J. 1967, "Significance of Fatigue Cracks in Micro-Range and Macro-Range", ASTM STP 415, pp.415~457.
- (11) Schijve, J. 1979, "Four Lectures on Fatigue Crack Growth", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp.167~221.
- (12) Vazquez, J.A. 1979, "Experimental Results on Fatigue Crack Closure for Two Aluminum Alloys", Engineering Fracture Mechanics, Vol.12, pp.231~240.
- (13) ASTM E647-83, 1984, "Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates. Above 10^{-6} m/cycle." pp.711~731.