

〈論 文〉

계장화 미소변위 측정기를 이용한 AI 2024-T3 소재의 미소피로 균열의 열림특성연구

이주진* · 남승훈* · 허용학* · 임대순** · 윤성기***

(1990년 6월 13일 접수)

A Study on Crack Opening Behavior of Small Fatigue Crack in AI 2024-T3 Material Using Computerized Interferometric Strain/Displacement Gage

J.J. Lee, S. Nahm, Y. Huh, D.S. Lim and S.K. Yoon

Key Words : Small Fatigue Crack(미소피로균열), Crack Opening Load(균열열림하중), Crack Opening Displacement(COD; 균열열림변위), Computerized Interferometric Strain/Displacement Gage(계장화 미소변위측정).

Abstract

To examine small fatigue crack behavior, the crack opening displacement (COD) was measured for surface cracks in the range of few tens to hundreds μm using the computerized Interferometric Strain/Displacement Gage (ISDG) which could measure the relative displacement with a resolution of $0.02 \mu\text{m}$. The load-COD record is stored and analyzed after the test to determined the opening load. Single-edge notched specimens, 2.3mm thick, of AI 2024-T3 were precracked at load ratios of 0.0, -1.0 and -2.0 to make small fatigue cracks. The opening loads were measured on these small cracks and compared with those of long cracks. The opening load ratios for the short cracks are about 10% smaller than those for long cracks at positive R -ratios, but are about 100% smaller at negative R -ratios.

1. 서 론

미소 피로균열은 긴 피로균열의 성장한계치 이하의 응력확대계수 범위에서도 성장하고 긴 균열의 낮은 성장속도 구간(성장 초기단계)에서 더 빠른 속도로 성장한다는 연구 결과가 일반화됨⁽¹⁻⁶⁾에 따라 세삼 주목을 받고 있다. 더욱기 기계구조물의 소재로 사용되고 있는 많은 금속의 피로수명은 60~80%가 미소균열 생성되기까지의 과정에 소모

된다⁽⁷⁾는 사실은 미소 피로균열에 대한 연구의 중요성을 더하고 있다. 이러한 미소 피로 균열에 대해서 긴 균열과의 성장속도의 차이를 균열 열림특성에 의한 해석으로 규명하려는 시도⁽⁸⁻¹²⁾가 행하여졌다. 이 균열 열림특성에 의한 해석은 물리적인 미소 피로균열(physically small crack)과 노치에서 발생하는 균열에 대해 잘 적용될 수 있는 것으로 보고되었다⁽¹³⁾.

균열 열림하중(또는 응력)은 통상적으로 하중-COD 곡선으로부터 얻게 되는데 그 과정에 대해 표준화된 규격은 아직까지 정해져 있지 못하다. 긴 균열에 있어서 COD는 크립게이지나 뒷면 스트레인 게이지(back face strain gage) 방법 등을 사용

* 정회원, 한국표준연구소 역학물성연구실

** 한국표준연구소 역학물성연구실

*** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

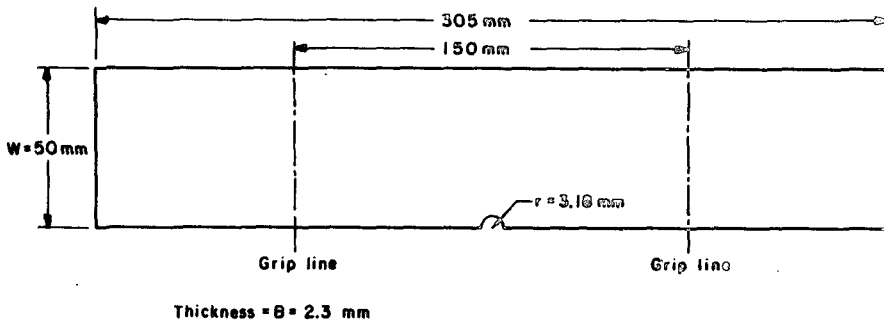


Fig. 1 Dimension of specimen

하나 미소균열에 대한 측정으로는 감도가 너무 떨어져 곤란하게 된다. Morris등⁽¹⁴⁾은 시편을 전자현미경의 챔버(chamber) 내에 넣어서 하중을 가하여 전자현미경으로 미소균열의 COD를 측정하였고 Davidson⁽¹⁵⁾은 입체영상법(stereo imaging technique)을 사용하여 미소균열이 COD를 측정하였으나 두 방법들은 시간과 노력이 너무 많이 드는 단점이 있다.

본 연구에서는 Al 2024-T3 판으로 제작된 한면 노치 시편에 여러 조건의 피로하중을 가하여 노치면내에 형성된 미소 피로균열의 COD를 광학적 간섭현상에 기초를 둔 미소 변위측정기⁽¹⁶⁾(Interferometric Strain/Displacement Gage ; ISDG)를 개량하여 측정하였다. 이 ISDG의 컴퓨터 조정방식을 정밀화시켜 0.02 μ m까지의 상대변위를 측정할 수 있도록 보완하였다. 고정밀화된 측정기로 수십 μ m 길이의 미소균열의 COD도 측정하였고 컴퓨터에 저장시킴으로써 시험후 미소 피로균열에 대한 열림특성을 분석할 수 있다. 측정된 미소 피로균열의 균열열림특성을 고찰하고 긴 균열의 열림특성과도 비교·분석 하였다.

2. 시편 및 피로균열 생성시험

시험시편들은 Al 2024-T3, 두께 2.3mm의 판으로부터 Fig. 1과 같이 한면 반원 노치 형상으로 가공되었고 소재의 항복강도는 359MPa였다. 각 시편들은 가공 잔류응력을 제거시키기 위하여 화학연마시켰으며 하중비 $R=0.1, -1.0,$ 및 -2.0 의 값으로 피로하중을 가하여 피로균열을 만들었다. 하중조건은 일정진폭 하중으로 다음과 같이 각 응력비값에서 3가지 다른 응력범위를 가하도록 하였

고 각 조건에 2개의 시편들이 시험되도록 하여 전부 18개의 시편에 대한 실험이 행하여졌다.

$R=0.0$; $S_{max}=145\text{MPa}, 120\text{MPa}, 110\text{MPa}$

$R=-1.0$; $S_{max}=105\text{MPa}, 80\text{MPa}, 70\text{MPa}$

$R=-2.0$; $S_{max}=75\text{MPa}, 60\text{MPa}, 50\text{MPa}$

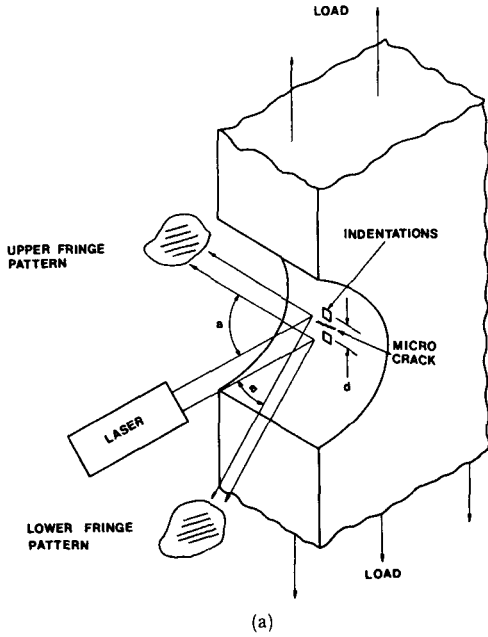
피로균열은 MTS유압시험기에 의하여 만들어졌는데 $R=-1.0$ 및 $R=-2.0$ 의 압축 응력을 가하기 위해 수직도를 조정할 수 있는 반구형 그립(half spherical grip)을 사용하였고 스트레인 게이지를 부착한 예비시편을 이용하여 스트레인을 측정하면서 비틀림 또는 굽힘하중이 걸리지 않도록 중심선 조정이 선행되었다. 또한 시험중에는 좌굴이 일어나지 않도록 두께 5mm의 지지판을 시편 앞뒤에 부착하고 시험을 수행하였다. 피로하중은 20Hz의 정현파형으로 가해졌고, 아세테이트 필름(acetate film)으로 표면복제하여 미소균열의 발생을 검사하였다. 피로균열은 노치면(notch root)내에서 형성되기 시작하였으며, 생성된 초기균열의 표면길이는 35~200 μ m로 측정되었고, 시편의 두께인 2.3mm까지 성장시키면서 시험하였다.

3. COD 측정 및 열림하중 계산

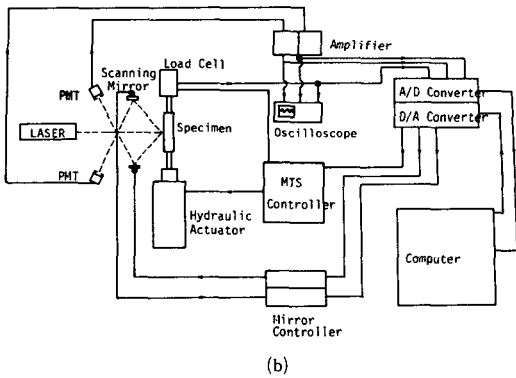
3.1 COD 측정

생성된 미소 피로균열에 대해 미소변위측정기(ISDG)로 각 균열표면 중앙위치에서 COD를 측정하였다. ISDG는 광학적 간섭현상에 기초를 둔 상대변위 측정장치로 그 원리는 다음과 같다.

Vickers 미소경도 시험기를 이용하여 시편의 표면에 두개의 자국(indentation)을 만든다. 이때 두 자국간의 거리는 임의로 조절할 수 있으나, 미소균열을 위해서 20~50 μ m 하였고 자국의 크기도



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Schematic diagram of principle of interferometric strain/displacement gage
(b) Schematic diagram of interferometric strain/displacement gage system

7~10 μm 가 되도록 하였다. Fig. 2(a)와 같이 이 두 자국에 레이저(laser) 빛을 입사시키면 경로차에 의해 반사된 간섭무늬가 형성되어지고 시편이 변형됨에 따라 간섭무늬가 움직이게 되므로 이들로 부터 상대변위를 구할 수 있게 된다. 즉, 상대변위 δd 는

$$\delta d = \frac{\Delta m_u + \Delta m_l}{2} \cdot \frac{\lambda}{\sin \alpha} \quad (1)$$

여기에서 Δm_u 와 Δm_l 은 간섭무늬의 상대변위이고 λ 는 입사빛의 파장, α 는 반사각이다. He-Ne 레이

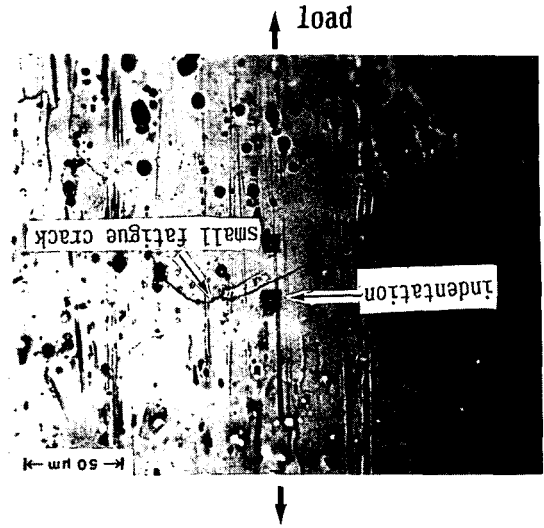


Fig. 3 Indentations with spacing of 30 μm across a 100 μm long crack (100 \times)

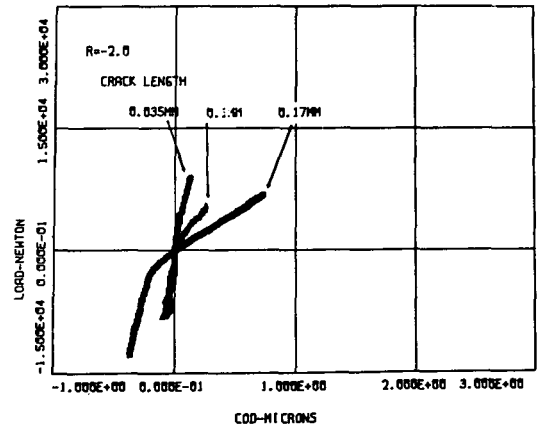


Fig. 4 Typical load-COD plot for $R=-2$

저를 쓰고 비커스 경도기의 138 $^\circ$ 다이아몬드 팁을 쓸 경우 λ 는 632.8nm, α 는 42 $^\circ$ 가 되어 $\frac{\lambda}{\sin \alpha}$ 는 약 1 μm 가 된다.

ISDG 장치를 0.02 μm 까지 정확히 측정하고 자동화 시키기 위하여 주사거울(scanning mirror)과 컴퓨터를 이용한 시스템의 개략도가 Fig. 2(b)에 나타나 있다. 이 시스템은 주사거울 조정, 대변위(large displacement) 측정치 보정, 추적위치 고정, 데이터 처리, MTS 시험기 조정등의 프로그램이 중요한 부분으로 되어 있다. Fig. 3은 노치면내에서 형성된 0.1mm 크기의 미소 피로균열에 비커

스 경도기로 두 자국을 만든 사진으로 두 자국간의 거리는 30 μ m이다.

ISDG에 의해 측정된 미소 균열의 COD의 대표적인 곡선이 Fig. 4에 나타나 있다. $R=-2.0$ 에서 만들어진 피로균열에서 균열길이 0.035mm, 0.1mm 및 0.17mm에 대한 COD의 측정곡선인데 균열이 닫혀있는 압축하중 부분에서는 탄성계수에 의한 기울기를 나타내고 하중이 점차 증가함에 따라 균열이 열리고 완전히 열림에 따라 다시 직선적인 변화를 보여주고 있다. 균열의 길이가 미소해짐에 따라 육안으로는 그 변화를 찾기가 어려우며 컴퓨터에 의한 처리가 필요하게 된다.

3.2 열림하중 계산

균열 열림하중은 Fig. 5에서 보여주는 것과 같이 측정된 하중-COD 곡선에서 차감법(reduced data method)을 이용하여 상당히 정확하게 구할 수 있다. 즉, 균열이 완전히 열림상태에 있을 때는 COD 곡선이 직선적인 변화를 나타낸다는 점을 이용하여 COD 곡선의 직선부분에서 최소-자승 직선(least square fitted line)을 계산하고 이 직선을 최소하중까지 연장시킨다. 이 직선에서 측정된 COD값을 감산하여 차감선(reduced line)을 그리면, 차감선에서 영(zero)이 되는 점에 해당하는 하중이 열림하중으로 정의될 수 있다. 그러나 실제의 측정 데이터는 약간 분산되므로 컴퓨터로써 완전히 영이 되는 점을 찾는 것보다는 차감선의 최대치(max. difference)의 5~10%가 되는 점을 찾는 것이 공학적으로 타당하다고 볼 수 있다.

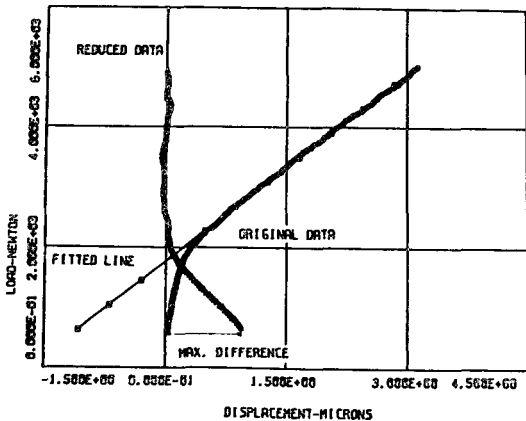


Fig. 5 Reduced data method for crack opening load

4. 시험결과 및 고찰

본 실험에서 관찰된 미소피로균열은 반원 노치면 내에서 관찰되었으며, 표면길이는 수십 μ m~수백 μ m 사이에 분포하였다. 각 크기에 대해 시편을 파단시켜 관찰한 결과 대부분은 반타원형으로 성장됨을 보였고, 일부는 노치면 구석에서 1/4원형으로 성장되기도 하였다.

미소균열의 피로성장율은 응력강도계수범위 ΔK 에 대하여 비교할 때 긴 균열보다 빠른 것으로 보고되고 있는데 이에 대한 주원인으로 균열선단에 생성·잔류하는 소성역의 차이에 의한 것으로 제안되었다⁽¹¹⁾. 이러한 잔류소성역의 차이는 균열열림 특성의 변화로 나타나게 되고 이는 유효추진력을 변화시키게 된다. 즉 ΔK_{eff} 를 유효 응력강도계수, K_{max} 및 K_{min} 를 최대 및 최소 응력강도계수, K_{op} 를 균열열림 응력강도계수라 할 때, 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta K_{eff} = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} \cdot \Delta K \quad (2)$$

미소균열의 잔류소성역이 긴 균열보다 적게 될 것이므로 K_{op} 값이 적게되어 유효 추진력이 크게 되고, 결국 ΔK 에 대한 미소균열의 피로성장률이 빠르게 나타날 것이다.

측정된 하중-COD 곡선으로부터 균열이 완전히 열린후의 컴플라이언스(compliance)를 구하여 균열 길이가 0.5mm이하인 반타원형의 균열에 대한

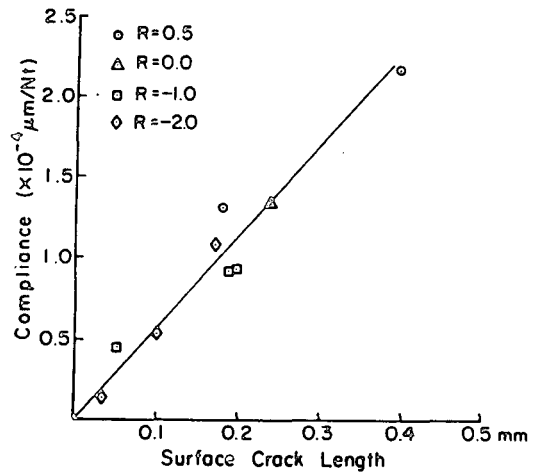


Fig. 6 Plot of short crack compliances-surface crack length

컴플라이언스-균열 길이의 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. 직선으로 표시된 Mattheck 등⁽¹⁷⁾에 의한 예측치와 잘 일치하고 있는데 이러한 직선적인 변화는 선형탄성파괴역학(LEFM)과 관계를 성립시킬 수 있음을 보여주고, 또한 균열 형상비가 거의 일정하게 유지되고 있음을 보여주고 있다.

또한 측정된 하중-CDO 곡선으로부터 차감법에 의해 열림하중을 계산하고 0.5mm크기 이하인 반타원형 미소균열에 대하여 Fig. 7에 균열길이-열림하중비의 관계를 예측치와 비교하였다. 미소균열에 대한 균열열림치의 계산해석은 거의 시도되지 않았는데, 최근에 Newman 등이 균열주위 잔류응력론에 근거하여 예측하였다⁽¹⁸⁾. Fig. 7에서 선으로 표시된 예측치는 미소균열이 생성된 후 0.1mm정도 크기까지는 열림하중비가 급격히 증가하고, 그 후에는 거의 일정한 값을 유지하는 경향을 보이고 있다. 그러나 이 예측치들은 각 R값에서 한가지 응력조건에 대해서만 계산하였고, 0.2mm 이하의 길이에 한정하였으므로 실험치와 정확한 비교·분석은 할 수 없지만 R=0.0과 -1.0에 대해서 경향적으로 실험치와 예측치의 근사함을 볼 수 있다. 더우기 미소균열의 균열열림치는 균열선단과 결정입계의 거리에 영향을 받는다⁽¹⁹⁾는 결과등으로부터 미세조직의 영향에 의한 분산이 나타날 수 있으므로 연속체 역학에 근거한 계산예측치와 잘맞는 비교는 기대하기 어렵고, 대략의 경향을 보는 것의 의미를 둘 수 있다.

Fig. 8은 미소 피로균열의 열림하중비와 긴균열의 예측치를 R 값에 따라 비교한 그래프이다. 일반적으로 열림하중비는 R값에 따라 변화하는 것으로 알려져 있고 Fig. 8에서 보는 것처럼 긴 균열이나 미소균열에서도 같은 추세가 나타남을 알 수 있다. AI 2024-T3 소재의 긴균열 열림하중 예측치에 대해 Schijve⁽²⁰⁾은 $R \geq -1$ 구간에서 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$\frac{S_{op}}{S_{max}} = 0.45 + (0.1 + a)R + (0.45 - 2a)R^2 + aR^3 \quad (3)$$

여기서 S_{op} 는 열림하중치, S_{max} 는 최대 하중치, a 는 1/2균열길이 R는 하중비이다. Newman⁽²¹⁾은 긴균열에 대해 다음과 같이 예측 관계식을 표시하였다.

$$\frac{S_{op}}{S_{max}} = A_0 + A_1R + A_2R^2 + A_3R^3, \quad R \geq 0 \quad (4)$$

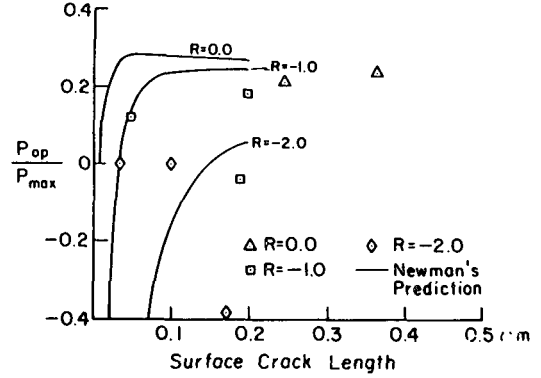


Fig. 7 Plot of crack opening load ratio-surface crack length for small cracks

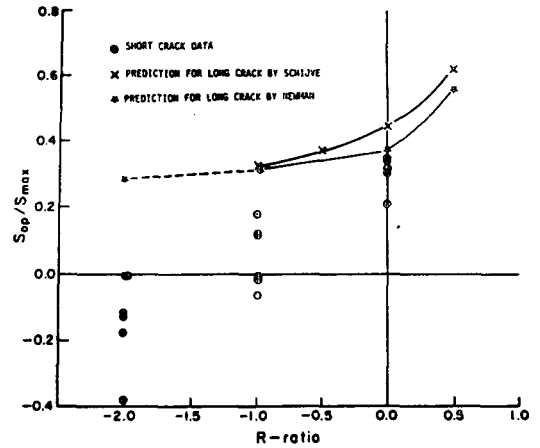


Fig. 8 Crack opening load-R-ratio for small cracks

$$\frac{S_{op}}{S_{max}} = A_0 + A_1R, \quad -1 \leq R < 0 \quad (5)$$

이때 $A_0 - A_3$ 은 재료와 응력상태에 따른 상수들이다.

그래프에서 보여주는 바와 같이 R=0.0에서는 긴 균열과 미소균열의 열림하중의 차이가 적게 나타났고 R=-1 및 R=-2에서는 상당히 크게 나타나고 있다.

각 R값과 가해진 응력에 대해 측정된 열림하중을 무차원화시킨 평균값과 Newman과 Schijve의 예측 관계식에 의해 구한 긴균열의 예측치들을 Table 1에 비교하였다. R=0.0에서는 미소피로균열의 열림하중비가 긴균열의 예측치 보다 약 10% 정도 낮게 나타났고 R=-1 및 R=-2에서는 100%이상 낮음을 보여주고 있다.

Table 1. Comparison of P_{op}/P_{max} of short and long cracks

| R | S_{max} (MPa) | P_{op}/P_{max} | | |
|------|--------------------|-------------------------------|------------------------------|---------|
| | | Average of short cracks | Predicted for long cracks | |
| | | | Newman | Schijve |
| 0.0 | 145 | 0.32 | 0.355 | 0.45 |
| | 120 | 0.21 | 0.365 | |
| | 110 | 0.32 | 0.368 | |
| -1.0 | 105 | -0.05 | 0.298 | 0.35 |
| | 80 | 0.12 | 0.322 | |
| | 70 | 0.08 | 0.331 | |
| -2.0 | 75 | -0.09 | 0.275 | . |
| | 60 | -0.25 | 0.300 | |
| | 50 | -0.06 | 0.314 | |

이에 따른 결과로 $R=0.0$ 에서 균열의 유효추진력(effective crack driving force)은 미소균열과 긴 균열의 차이가 별로 없게 되고, $R=-1$ 및 $R=-2$ 에서는 미소균열의 유효 추진력이 긴 균열보다 2배 이상 될 것이므로 유효응력강도계수 ΔK_{eff} 가 아닌 응력강도계수 범위 ΔK 를 기준으로 볼 때 미소균열의 성장속도는 긴 균열보다 수배 이상 빠를 것으로 예측된다.

5. 결 론

미소변위 측정장치 (interferometric strain/displacement gage)를 이용하여 Al 2024-T3 소재로 만든 반원노치 시편에서 미소피로균열을 생성시켜 균열열림을 측정·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 미소변위 측정기법을 이용하여 미소 피로균열의 열림변위 (COD)를 35 μ m까지의 작은 균열에서도 성공적으로 측정하였으며, 열림 하중을 나타내는 변이점을 차감법에 의하여 찾을 수 있었다.

(2) 표면길이 0.5mm 이하의 미소 피로균열의 열림하중비는 균열길이에 따라 대체적인 증가관계를 보였으나, 미세조직의 영향에 따른 분산이 많이 나타나 일반적인 관계로는 보기 어렵다.

(3) 측정된 미소 피로균열의 열림 하중비는 긴

균열의 예측치보다 $R=0.0$ 에서 10%정도 낮게 나타났고 $R=-1.0$ 및 $R=-2.0$ 에서는 100%이상 낮게 나타났다.

참 고 문 헌

- (1) Fujimura, S., Hayashi, T., Hoshide, T. and Yamada, T., 1985, "Short Crack Growth and Life Prediction in Low-Cycle Fatigue of Smooth Specimens", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, No.2, pp.85~101.
- (2) Hudak, S. J. Jr., 1981, "Small Crack Behavior and the Prediction of Fatigue Life", Transactions of ASME, Vol. 103, pp.26~35.
- (3) 서창민, 권오현, 이정주, 1987, "작은 표면결함에 서 발생·성장하는 표면균열의 성장특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제11권, 제 2 호 pp. 191~197.
- (4) El Haddad, M. H., Smith, K. N. and Topper, T. H., 1979, "Fatigue Crack Propagation of Short Cracks", Transactions of ASME, Vol.101, pp.42~46.
- (5) Pearson, S., 1975, "Initiation of Fatigue Cracks in Commercial Aluminum Alloys and the Subsequent Propagation of Very Short Cracks", Engineering Fracture Mechanics, Vol.7, No.2, pp.235~247.
- (6) Knott, J. E. and Taylor, D., 1981, "Fatigue Crack Propagation Behavior of Short Cracks-The Effects of Microstructure", Fatigue Of Engineering Materials and Structures, Vol.4, No.2, pp.147~155.
- (7) Schijve, J., 1984, "the Practical and Theoretical Significance of Small Cracks", Proceeding of 2nd International Conference of Fatigue and Fatigue Thresholds(Fatigue 84), pp.751~772.
- (8) Newman, J. C. Jr., 1983, "On the Behavior of Short Cracks in Airframe Compoments", AGARD Conference Proceedings No.328, AGARD, France, pp. 6.1~6.26.
- (9) Ritchie, R. O. and Zaiken, E., 1985, "On the Development of Crack Closure and the Threshold Condition for Short and Long Cracks in 7150 Aluminum Alloy", Metallurgical Transactions A, Vol.16, pp. 1467~1477.
- (10) McEvily, A. J. and Minakawa, K., 1984, "Crack Closure and the Growth of Short and Long Fatigue Cracks", Scripta Metallurgica, Vol.18, pp.71~76.
- (11) James, M. N. and Knott, J. F., 1985, "An Assessment of Crack Closure and the Extent of the Short Crack Closure and the Extent of the Short Crack

- Regime in QIN CHY80 Steel", *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, Vol.8, No.2, pp. 177~191.
- (12) Brent, J. L., Mudry, F. and Pineau, A., 1981, "Short Crack Propagation and Closure Effects in A508 Steel", *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, Vol.6, No.4, pp.349~359.
- (13) Ritchie, R. O. and Lankford, J., 1986, "Overview of the Small Crack Problem", *Proceedings of the 2nd Engineering Foundation International Conference on Small Fatigue Cracks*, pp.1~5.
- (14) Morris, W. L. and Buck, O., 1977, "Crack Closure Load Measurement for Microcracks Developed During the Fatigue of A1 2219-T851", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 8A, pp.597~601.
- (15) Mudak, S. J. Jr., 1981, "Small Crack Behavior and the Prediction of Fatigue Life", *Transactions of ASME*, Vol.103, pp.26~35.
- (16) Sharpe, Jr. W. N., 1982, "Application of the Interferometric Strain/Displacement Gage", *Optical Engineering*, V. 21, pp.483~488.
- (17) Mattheck, C., Morawietz, P. and Munz, D., 1983, "Stress Intensity Factor at the Surface and at the Deepest Point of a Semi-elliptical Surface Crack in Plates Under Stress Gradients", *International Journal of Fracture*, Vol.23, pp.201~212.
- (18) Newman, J. C. Jr., Swain, M. H. and Phillips, E. P., "An Assessment of the Small-Crack Effect for 2024-T3 Aluminum Alloy".
- (19) Morris, W. L., James, M. R. and Buck, O., 1981, "Growth Rate Models for Short Surface Cracks in A1 2219-T851", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 21A, pp.57~64.
- (20) Schijve, J. 1981, "Some Formulas for the Crack Opening Stress Level", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.14, pp.481~465.
- (21) Newman, J. C., 1984, "A Crack Opening Stress Equation for Fatigue Crack Growth", *International Journal of Fracture*, Vol.24, pp. R131-R135.