

〈논 문〉

A12024-T4의 프레팅 피로균열거동에 관한 실험적 연구

이봉훈* · 이순복**

(1996년 10월 7일 접수)

An Experimental Study on the Fretting Fatigue Crack Behaviour of A12024-T4

B. H. Lee and S. B. Lee

Key Words : Fretting(프레팅), Surface Traction(표면응력), Contact(접촉), Mode I transition(모드 I 균열로의 전환), Traction Calibration(응력 보정), Oblique Crack(경사 균열), Well Point(웰 포인트), Partial Slip(부분 미끄러짐), Gross Slip(전체 미끄러짐), Equivalent Stress Intensity Factor(등가 응력강도계수)

Abstract

The technique of fretting fatigue test was developed and fretting fatigue tests of A12024-T4 were conducted under several conditions. The newly developed calibration methods for measuring surface contact tractions showed good linearity and repeatability. The plate type specimen to which tow bridge type pads were attached and vision system was used to observe the crack behaviour. The oblique cracks appeared in the early stage of crack growth and they became mode I cracks as they grow about 1 mm. The mode I transition points were found to be longer when surface tractions are higher or bulk stress is lower. Before the crack becomes mode I crack, 'well point' where crack grow about rate is minimum, was detected under every experimental condition. The crack behaviour was found to be affected by surface tractions, contact area, bulk stress. It was also found that partial slip and stick condition is most detrimental and the crack starts from the boundary of stick and slip. For gross slip crack started at the outside edge of pad. After crack mode transition, fretting fatigue cracks showed almost same behaviour of plain mode I fatigue cracks. Equivalent stress intensity factor was used to analyse the behaviour of fretting fatigue cracks and it was found that stress intensity factors can be applied to fretting fatigue cracks.

1. 서 론

프레팅(fretting) 현상은 두 개의 접촉면에서 발생하는 반복적인 상대변위에 의한 한쪽 혹은 양쪽의 마모를 가리키는 용어로서 이러한 프레팅조건하에서 발생한 프레팅 피로균열의 경우는 일반 피로

균열과는 상이한 균열발생 및 진전거동을 나타낸다.^(1~3) 접촉면 상의 압축력, 마찰력 및 반복하중의 영향으로 표면에 대해 기울어진 경사균열이 균열발생 초기에 나타나게 되며, 접촉면 응력의 영향이 줄어들면 반복응력에 수직인 방향으로 성장하는 모드 I 균열로 전환되어 일반 피로균열과 유사한 거동을 보이게 된다.⁽⁴⁾ 이러한 거동은 반복하중, 접촉면 응력, 마모, 접촉형태, 재료성질, 미소파편의 생성 및 재부착, 에스페리티(asperity)들의 탄

*한국과학기술원 기계기술연구소

**회원, 한국과학기술원 기계공학과

소성 변형 및 파괴 등 매우 복잡한 메커니즘에 영향을 받으며, 이로 인한 수명의 감소가 매우 큰 것으로 보고되고 있다. 특히 일반 피로와 상이한 거동을 보이는 균열발생 및 균열진전 초기의 수명감소가 전체 수명감소에 매우 큰 영향을 미치고 있다. 또한, 해수, 담수, 온도, 가진 주파수, 마모량 등 여러 가지 환경적인 요인들도 프레팅 피로 거동에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으나 실험상의 어려움으로 인해 많은 연구가 수행되지 못하고 있다. 이러한 프레팅 피로균열에 대한 파괴 역학적 개념 도입의 일환으로 Nix 등은 접촉면 집중 압축력 및 집중 마찰력 하의 수직균열을 가정하여 여러 하중형태에 대한 응력강도계수를 계산하였고, (5) Troshchenko 등은 최대 수직 응력강도계수와 최대 전단응력강도로 프레팅 피로균열거동을 설명하고자 하였다. (6) Faanes 등은 ΔK_{th} 를 도입하여 균열진전을 설명하고자 하였다. (7) 그러나 이러한 시도들은 모두 프레팅 피로균열의 특징인 경사균열을 수직균열로 가정하여 모든 K 만을 고려함으로써 실제 프레팅 피로 균열과는 상당한 차이가 존재하는 난점을 안고 있다. 본 논문에서는 반무한 평판에 대한 펀치 접촉의 경우에서 프레팅 피로시험법과 접촉부의 압축력 및 마찰력 측정법을 개발하여 프레팅 피로실험을 수행함으로써 접촉면 응력, 접촉형태, 반복하중 등이 프레팅 피로에 미치는 영향을 알아보고 경사균열을 고려한 파괴역학적 해석변수를 도입함으로써 새로운 프레팅 피로균열진전 모델을 제안하고 이를 검증하고자 한다.

2. 접촉면 압축력 및 마찰력 측정법 개발

2.1 접촉면 압축력 측정법

프레팅 피로실험은 Fig. 1과 같이 중심부가 관형이고 지그에 고정되는 양단이 환봉형태로 제작되었다.

Fig. 2와 같이 시편의 양쪽 평판 부에 다양한 접촉부 길이를 갖는 브릿지(bridge)형 패드를 부착한 후 로딩바(loading bar)를 이용해 시편과 접촉면 사이에 압축력을 발생시키고, 시편에 반복하중을 가함으로써 패드와 시편의 접촉부에 반복적인 마찰력과 상대변위를 발생시켜 프레팅조건을 만든다. 이 때 패드와 시편 접촉부의 압축력은 로딩바의 축방향 변형률을 이용하여 측정한다.

이를 위해 Fig. 3에서 보듯이 전체적인 형상은

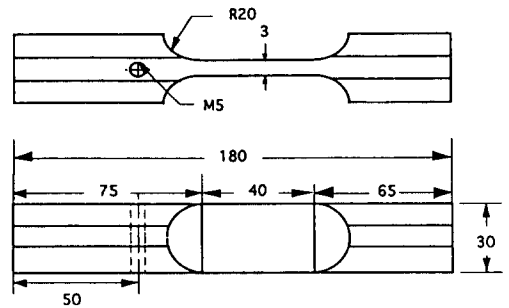


Fig. 1 Fretting specimen, dimensions in mm.

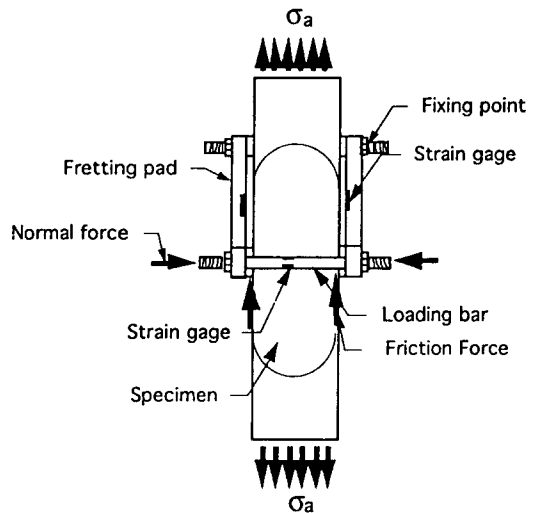


Fig. 2 Specimen and pad assembly

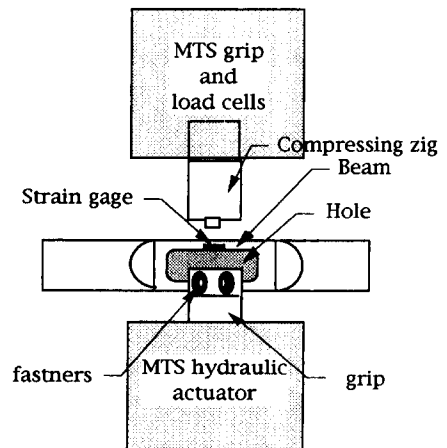


Fig. 3 Compression force calibration method

프래팅 피로 시편과 동일하나 중심에 큰 구멍이 있는 홀 시편(hole specimen)과 서보 유압식 피로시험기를 이용하여 시편 상부 양단 고정부의 변형률과 시험기에 부착된 가압 지그에 의해 가해진 압축력과 관계를 Fig. 4와 같이 얻은 후 동일한 실험을 홀 시편에 패드를 부착하고 로딩바로 하중을 가하면 로딩바의 변형률과 접촉부 압축력의 관계를 얻을 수 있다. 가압 지그의 접촉부는 패드의 접촉부와 동일한 형태로 가공되어 있으며 Fig. 5는 접촉부 길이 10 mm 패드 사용시 로딩바 변형률과 접촉부 압축력의 관계를 나타내고 있으며, 실험결과 좋은 선형성과 재현성을 얻을 수 있었다.

2.2 접촉면 마찰력측정법

프래팅 피로실험에서 가장 중요한 변수인 패드와 시편의 접촉면 사이의 마찰력은 접촉부 압축력, 접촉부 넓이, 반복하중 등에 의해서 영향을 받고 실험시 계속하여 변하게 됨으로 실험에서 사용하는 모든 종류의 패드와, 압축력의 조합에 대한 마찰력의 보정이 필요하게 된다. 이를 위해 Fig. 6과 같은 십자형 시편을 사용하는데, 십자형 시편은 프래팅 피로 시편과 동일한 형태이나 관형의 중심부 이외는 $\phi 5$ mm의 환봉형태로 가공되어 있다. 이러한 십자형 시편의 양쪽에 패드를 고정시키고 시험기로 하중을 가하면 접촉면 상에 마찰력이 발생하게 되고 이 마찰력에 의해 윗부분의 환봉과 아랫부분의 환봉의 변형률 차이가 발생하게 되며 이 변형률의 차이로써 마찰력의 크기를 알 수 있다 이 때 양쪽 관형부에 작용하는 마찰력의 방향은 동일하다고 가정한다. 또, 패드도 접촉부 마찰력에 의해 탄성범

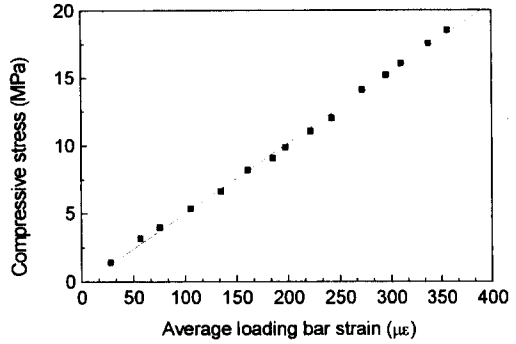


Fig. 5 Loading bar calibration result for 10 mm pad

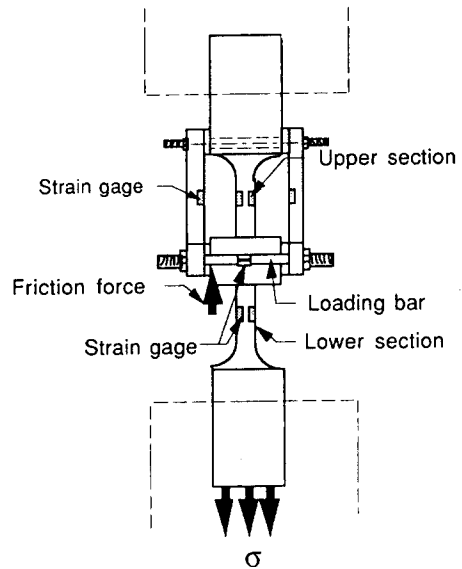


Fig. 6 Friction force calibration method

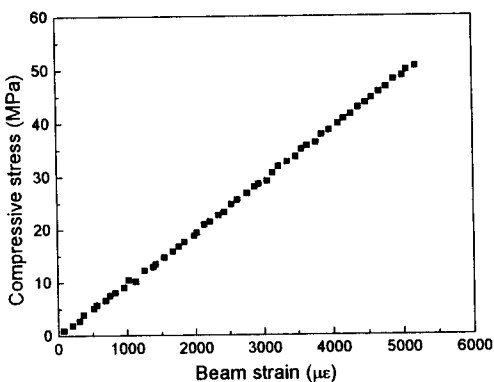


Fig. 4 The calibration result of hole type specimen beam in compressive stress vs. beam strain

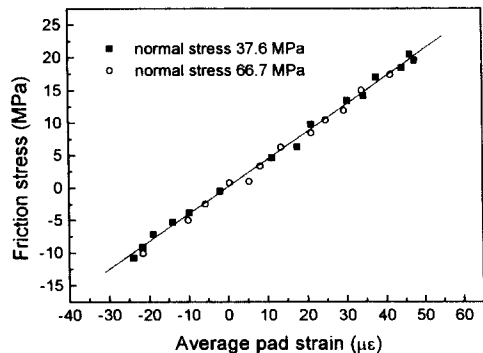


Fig. 7 Calibration curve for 2 mm pad in friction stress vs. average pad strain under two different normal stress

위 내에서 변형하게 됨으로 각각의 압축력과 패드 종류에 따라 마찰력과 패드 변형률의 관계를 얻어 실험시 이용할 수 있다. Fig. 7은 패드길이가 2 mm일 때의 마찰력과 패드 변형률의 보정결과이다.

3. 프레팅 피로실험

3.1 실험방법 및 실험장치

본 실험에서는 Al2024-T4 환봉을 Fig. 1과 같이 양단은 환형이고, 중심부는 판형인 시편으로 가공하여 Fig. 2와 같이 시편의 양쪽 측면에 Al-2024-T4로 만든 패드가 부착되고 패드와 시편간의 접촉부에서 상대변위 및 접촉면 응력이 발생하도록 하였으며, 시편의 전면부는 균열의 관찰을 위해서 경면 가공되었다. Al2024-T4의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었으며, 항복응력은 382 MPa, 탄성계수는 63.73 MPa, 푸아송비는 0.32이다. 본 실험에서는 접촉길이에 따른 프레팅 피로균열의 거동을 관찰하고 시편의 폭(30 mm)에 비해 크지 않아 반무한 평판위의 펀치접촉으로의 가정이 큰 오차를 갖지 않도록 2, 5, 10 mm 접촉부 길이를 갖는 패드와 66.7 MPa, 37.6 MPa의 접촉부 압축응력, 120 MPa, R=0의 반복응력에 대한 실험을 수행하였다.

3.2 균열진전거동 관찰

균열진전거동 관찰은 광학현미경이나 균열진전 계이지를 이용하는 대신 Fig. 8의 개략도와 같이 C.C.D 카메라와 P.C용 비전보드를 이용하여 약 30배의 배율로 균열을 관찰하고 일정 시간 간격마다 균열의 영상을 저장하여 처리하고, 균열길이, 성장방

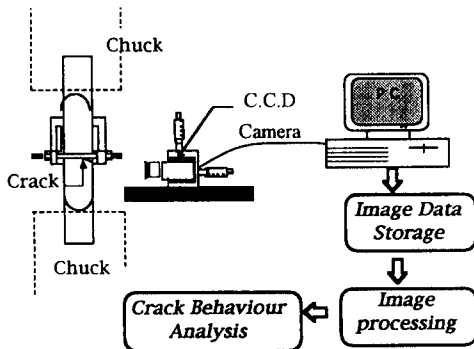


Fig. 8 Crack observation system

Table 1 Chemical composition of Al2024-T4(% wt)

| Cu | Si | Mg | Zn | Cr | Fe | Ti |
|-----|-----|------|------|-----|-----|------|
| 3.5 | 1.6 | 0.25 | 0.55 | 0.1 | 0.5 | 0.15 |

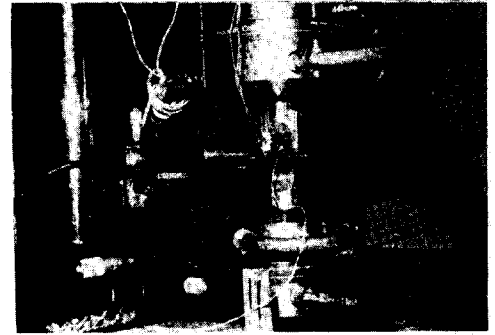


Fig. 9 Real feature of crack observation system

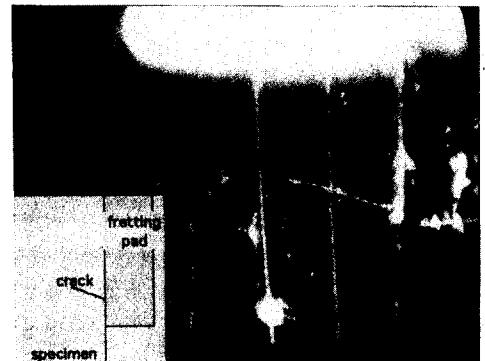


Fig. 10 Image data of observed crack

향, 균열발생점, 균열성장률, 모드 I 전환점 등의 정보를 얻었다. Fig. 8은 균열 관찰 시스템의 개략도이고, Fig. 9는 실제 프레팅 시험장비의 사진이다. Fig. 10에서는 균열이 발생한 상태의 영상을 보여주고 있는데 패드와 시편, 1 mm 간격의 수직 눈금, 균열 등을 확인할 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 프레팅 피로거동의 일반적 특성

프레팅 피로실험 결과를 개략적으로 살펴보면, 프레팅 조건하에서는 모든 경우에 피로한도 이하의 낮은 반복 하중 조건(120 MPa, 172 MPa)에서도 피로균열이 발생하고 파손에 이르게 되어서 프레

팅이 수명감소에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 또한 접촉면 상의 접촉면 응력의 영향에 의해 Fig. 11처럼 발생초기에 경사균열로 성장하다가 접촉면응력의 영향이 줄어들면 Fig. 12처럼 모드 I 균열로 전환되어 일반 피로와 동일한 거동을 나타내었다. 이 때의 균열 경사각은 7.7°~27°의 범위를 나타내었는데 마찰력이 클수록, 접촉부가 짧을수록 경사각의 크기가 커졌으며, 반복하중이 커지

면 모드 I의 영향이 커짐으로 경사각이 작아졌다.

모드 I 균열로의 전환은 1.18 mm~1.85 mm의 범위를 나타내었는데 접촉면 응력이 클수록 길어지고 반복하중이 클수록 줄어들었다. 이러한 프레팅 피로의 파면은 경사균열진전, 모드 I 균열로의 전환, 모드 I 균열진전, 전단파괴 등으로 구분할 수 있으며, 모드 I 균열로 전환되기 전의 거동이 프레팅 피로거동에 있어서 가장 특징적인 단계라고 할 수 있다. Table 2에 각각의 실험조건에 따른 실험결과들을 나타내었다.

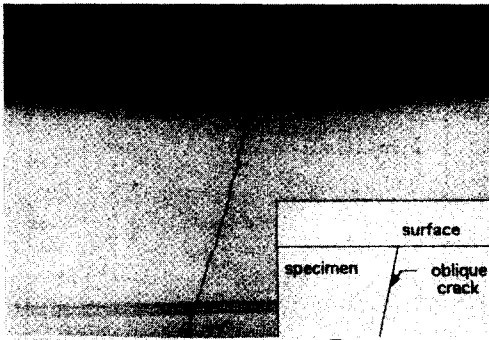


Fig. 11 Oblique crack growth

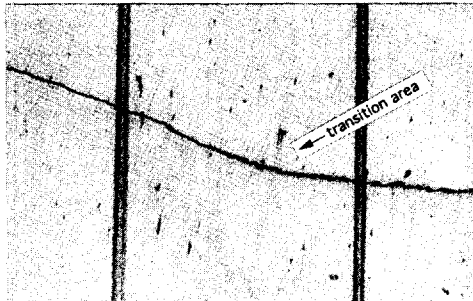


Fig. 12 Transition to mode I crack

4.2 접촉면 마찰력 및 접촉면 거동

접촉면의 마찰응력은 패드길이가 짧을수록, 압축력이 클수록 커졌으며, 반복하중이 증가하면 증가하였다. 마찰력은 또한 Fig. 13에서 보는바와 같이 균열길이 1 mm 부근, 즉 모드 I 전환점 부근부터 균열이 진전함에 따라 급격히 감소하는 것을 알 수

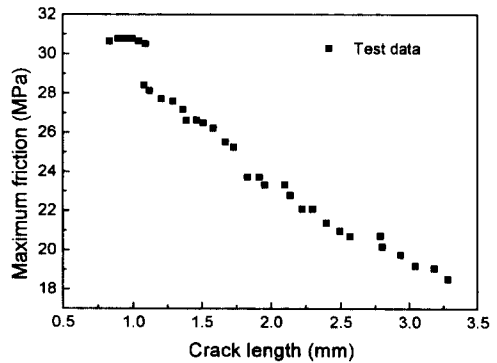


Fig. 13 Friction drop due to crack growth with 5mm pad by 120 MPa bulk stress and 66.7 MPa normal stress

Table 2 Experiment conditions and results

| Bulk stress (MPa) | Pad length (mm) | Normal stress (MPa) | Max. friction (MPa) | Min. friction (MPa) | Crack angle (degree) | Well point (mm) | Mode I transition (mm) |
|-------------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------|------------------------|
| 120 | 10 | 66.7 | 16.3 | -17.0 | 7.7 | 1.29 | 1.74 |
| 120 | 10 | 37.6 | 9.3 | -14.6 | 16.0 | 0.83 | 1.46 |
| 120 | 5 | 66.7 | 30.4 | -27.7 | 17.4 | 1.19 | 1.85 |
| 120 | 5 | 37.6 | 19.9 | -35.0 | 14.4 | 0.73 | 1.26 |
| 172 | 5 | 66.7 | 37.4 | -58.5 | 16.0 | 0.45 | 1.28 |
| 120 | 2 | 66.7 | 39.0 | -70.0 | 27.0 | 0.75 | 1.21 |

있다.

이는 균열진전에 의해 접촉부 부위에 작용하는 축방향 하중이 작아지기 때문으로 이는 균열진전에 의한 접촉면 응력 영향감소를 가속화시킨다. 접촉면은 마찰응력의 크기와 접촉부 길이에 따라 Fig. 14, Fig. 15와 같이 부분 미끄러짐(partial slip)이나 전체 미끄러짐(gross slip)이 발생하는데 부분 미끄러짐의 경우는 검은 색으로 보이는 미끄러짐 영역과 패드와 시편간의 상대변위가 발생하지 않았던 스틱(stick)영역의 경계를 따라 균열이 발생하였고, 전체 미끄러짐의 경우는 미끄러짐 영역의 경계에서 균열이 발생하였다.

접촉면 상의 검은 부분은 미끄러짐이 발생하여 산화가 일어난 부분으로 이러한 미끄러짐, 산화, 에스페리티(asperity)의 탄소성 변형 및 파괴, 미소파편의 발생 및 재부착 등 복잡한 메커니즘이 균열의 발생과 진전 초기에 많은 영향을 미쳤을 것으로 생각되나 이러한 요인들에 대한 정량적 평가는 이루어지지 못하였다. 이러한 비가역적인 에너지의 손실은 때로는 접촉부의 온도를 매우 높게 하여 미소

균열의 입구를 파편들이 녹아 붙으면서 막아버려 균열발생을 지연시키는 경우도 있으며, 균열발생 및 진전 초기의 상태를 상온의 탄소성 거동으로 해석할 때 큰 오차의 요인이 되고 해석을 난해하게 하는 요인이 되고 있다.

4.3 균열진전거동

Fig. 16, Fig. 17, Fig. 18에 각각 10 mm, 5 mm, 2 mm의 접촉부 길이를 갖는 패드에 대해 압축응력 66.7 MPa, 37.6 MPa의 경우에 대한 균열진전률을

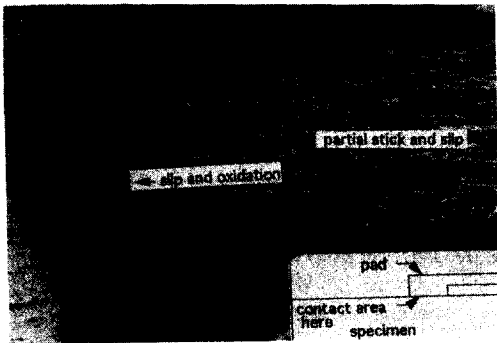


Fig. 14 Contact damage under 5 mm pad

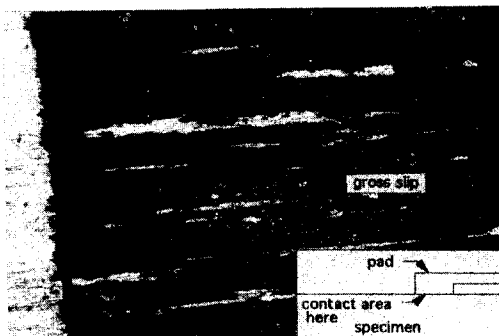


Fig. 15 Contact damage under 2 mm pad

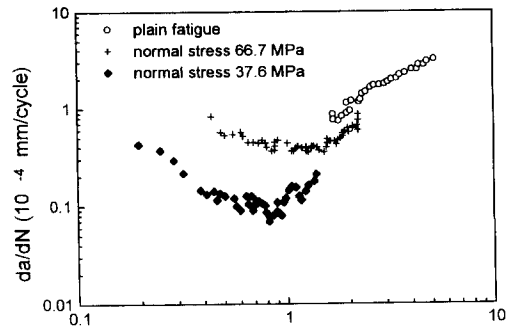


Fig. 16 Crack growth rate for 10mm pad, $\sigma_n = 120$ MPa

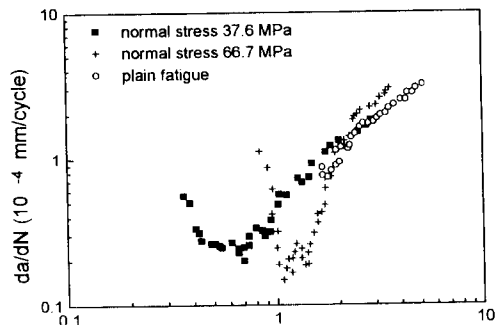


Fig. 17 Crack growth rate for 5 mm pad, $\sigma_n = 120$ MPa

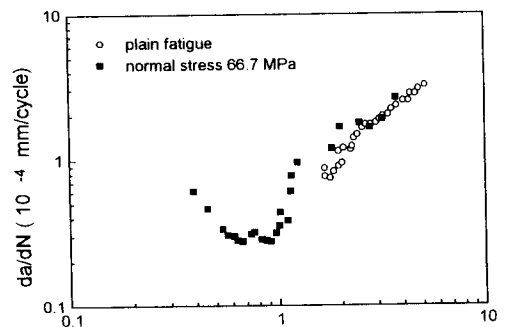


Fig. 18 Crack growth rate for 2 mm pad, $\sigma_n = 120$ MPa

CT시편에서 얻은 A12024-T4의 모드 I 균열진전률과 함께 나타내었다. 모든 경우에 균열발생 초기에는 상당히 높은 균열진전률을 나타내다가 균열길이 1 mm부근에서 균열진전률이 최소가 되는 'V'형태의 결과를 나타내었다. 균열 진전률이 최소가 되는 지점은 'well point'라고 정의하였는데 이러한 'well point'는 1 mm 전후의 값으로서 균열이 모드 I으로 전환되기 바로 전에 나타났다. 모드 I으로 전환된 균열은 CT 시편 실험결과와 같은 균열진전거동을 보임으로 균열이 진전하면서 접촉면 응력의 영향이 줄어들면 반복하중에 의한 영향이 균열진전거동을 지배하게 됨을 알 수 있었다. 이러한 거동은 슛크랙의 거동과도 유사하게 보이나 경사균열로 성장하는 길이가 1 mm를 넘고, 모드 I으로 전환되기 전까지 일정한 경사각을 유지하는 등 슛크랙과는 분명한 차이점을 나타내는 프레팅 피로의 특성이라고 볼 수 있다. 10 mm 패드의 경우 접촉면 압축응력이 37.6 MPa에서 66.7 MPa로 증가하면 전 영역에서 균열진전률이 증가하였고, 5 mm 패드의 경우는 접촉면 압축응력이 증가한 경우에 오히려 균열진전률이 더 낮은 영역이 발생하는데 이는 37.6 MPa 접촉면 압축응력의 경우 66.7 MPa의 경우보다 접촉면 응력의 영향이 작아서 well point가 빨리 발생했기 때문이다. 모드 I 균열로 전환되기 전에는 5 mm 패드의 경우가 가장 높은 균열 진전률을 보이고 2 mm 패드는 가장 큰 마찰력에도 불구하고 가장 낮은 균열진전률을 보이고 있다. 이는 2 mm 패드의 경우에만 전체적 미끄럼(gross slip)이 발생하였다는 점으로 미루어 Nakazawa⁽⁹⁾ 등에 의한 연구결과와 같이 프레팅 피로에서의 재료의 수명은 부분적인 슬립의 경우 전체 접촉면에 대한 슬립면적의 비율의 증가에 따라 수명이 급격히 감소하다가 이 비율이 어느 값 이상이 되면 다시 수명이 증가하여 전체적인 미끄럼이 발생하는 시점에서는 대부분의 부분적인 슬립의 경우보다 긴 수명을 나타내는 현상과 같은 맥락으로 이해해 볼 수 있다. 즉 10 mm에서 5 mm 패드로 바뀌어 미끄럼 영역의 비율이 증가하면 급격히 수명이 감소하다가 2 mm 패드에서 전체적 미끄럼이 발생하면 다시 수명이 증가하는 현상으로 이해될 수 있다.

4.4 응력강도계수의 적용

프레팅 조건하의 경사균열에서의 응력강도계수 계산은 김형규에 의해 제안된 가상인선 전위

(pseudo-dislocation) 방법을 사용하였다.⁽⁸⁾ Fig. 19와 같은 경사균열과 표면응력 분포에 대해서 모드 I 응력강도계수 및 모드 II 응력강도계수는 다음과 같이 계산된다.

$$K_I = \frac{2\sqrt{2}G}{(1+x)}\sqrt{\pi a}\Psi_x(1) \tag{1}$$

$$K_{II} = \frac{2\sqrt{2}G}{(1+x)}\sqrt{\pi a}\Psi_z(1) \tag{2}$$

이 때 $\Psi_x(1)$, $\Psi_z(1)$ 은 식 (3), (4)와 같이 구해진다.

$$\Psi_x(1) = \frac{2}{2n+1} \sum_{i=1}^n \cot\left(\frac{2i-1}{2n+1} \frac{\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{2i-1}{2n+1} n\pi\right) \Psi_x(u_i) \tag{3}$$

$$\Psi_z(1) = \frac{2}{2n+1} \sum_{i=1}^n \cot\left(\frac{2i-1}{2n+1} \frac{\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{2i-1}{2n+1} n\pi\right) \Psi_z(u_i) \tag{4}$$

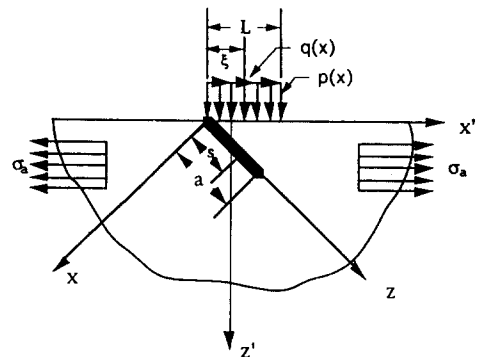


Fig. 19 Pseudo-dislocation fretting fatigue crack model

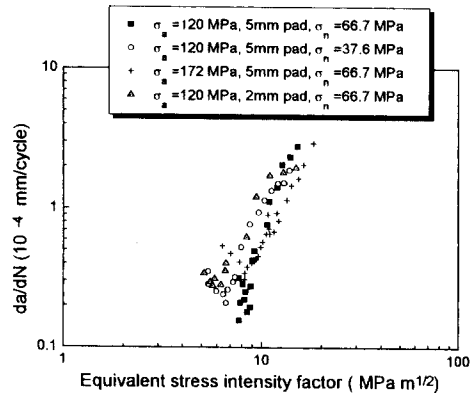


Fig. 20 Crack growth rate vs. equivalent stress intensity factor

$$u_i = \cos\left(\frac{2i-1}{2n+1}\pi\right), \quad v_j = \cos\left(\frac{2j\pi}{2n+1}\right) \quad (i=1, 2, \dots) \quad (5)$$

위와 같이 구한 응력강도계수 K_I 및 K_{II} 에 대해 등가 응력강도계수를 식 (6)으로 정의하고, $a \approx 1$ 일 경우 결과를 Fig. 20에 나타내었다.

$$\Delta K_{eq} = \sqrt{\Delta K_I^2 + a\Delta K_{II}^2} \quad (6)$$

등가 응력강도계수의 사용으로 모든 실험조건에 대해 'V'형태의 균열진전률 거동이 사라지고 ΔK_{eq} 의 증가에 따라 균열진전률이 증가함을 알 수 있다. ΔK_{eq} 의 값이 커지면 데이터들이 잘 모여지나 ΔK_{eq} 의 값이 작을 경우에는 데이터가 흩어지는 경향이 커졌다. 이는 균열성장 초기에는 균열진전거동이 접촉부의 산화, 마찰에 의한 발열, 표면의 소성변형 등에 의해 응력강도계수로서 설명될 수 없고 균열이 진전해 나가면 표면에서 발생하는 현상들의 영향이 줄어들기 때문으로 생각된다.

5. 결 론

(1) 본 연구에서 개발한 접촉면 응력 측정법을 이용해 접촉면 상의 압축력 및 마찰력을 안정적으로 측정할 수 있었다.

(2) 프레팅 피로균열은 균열진전 초기에는 경사 균열로 성장하다가 모드 I 균열로 전환되는데 모드 I으로의 전환점은 마찰력이 클수록 길어지며 경사각은 마찰력이 클수록 커졌으며, 균열진전률은 초기에 접촉면 응력의 영향으로 일반 피로의 경우보다 매우 큰 값을 나타내나 모드 I 균열로 전환되기 전에 균열진전률이 최소가 되는 well point가 발생한다.

(3) 모드 I 균열로의 전환이 일어나면 반복하중의 영향이 지배적이며, 일반 피로균열의 거동과 동일한 거동을 보인다.

(4) 균열진전률은 접촉면 응력이 클수록 커지며 부분 미끄럼, 전체적 미끄럼의 접촉조건 중 부분

미끄럼의 비중이 높은 경우 수명감소가 가장 크다. (6) 등가 응력강도계수의 적용으로 프레팅 피로 균열진전거동을 설명할 수 있으나 진전초기의 거동에는 적합하지 않다.

참고문헌

- (1) Hills, D. A., 1994, "Mechanics of Fretting Fatigue," *Wear*, Vol. 175, pp. 107~113.
- (2) Waterhouse, R. B., 1975, *Fretting Fatigue*, Pergamon Press, pp. 99~125.
- (3) Waterhouse, R. B., 1975, *Fretting Corrosion*, Pergamon Press, pp. 1~18.
- (4) Endo, K. and Goto, H., 1976, "Initiation and Propagation of Fretting Fatigue," *Wear*, Vol. 38, pp. 311~324.
- (5) Nix, K. J. and Lindley, T. C., 1985, "The Application of Fracture Mechanics to Fretting Fatigue," *Fat. Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 8, No. 2, pp. 129~142.
- (6) Troshchenko, V. T. and Tsybanov, G. V., 1994, "Two Parameter Model of Fretting Fatigue Crack Growth," *Fat. Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 17, No. 1, pp. 15~23.
- (7) Faanes, S. and Fernando, U. S., 1994, "Influence of Contact Loading on Fretting Fatigue Behaviour," *Fat. Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 17, No. 8, pp. 939~947.
- (8) Kim, H. K. and Lee, S. B., "A Stress Intensity Factor of an Edge Crack Subjected to Normal and Shear Traction," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, in press.
- (9) Nakazawa, K. and Sumita, M., et al, 1994, "Effect of Relative Slip Amplitude on Fretting Fatigue of High Strength Steel," *Fat. Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 17, No. 7, pp. 751~759.