

## 프레팅 피로 균열의 발생 위치 및 방향 예측

허용학<sup>†</sup> · R.E Edwards\*, M.W. Brown\*, E.R. de los Rios\*  
(2002년 12월 30일 접수, 2003년 5월 19일 심사완료)

### Prediction of Initiation Location and Direction of Fretting Fatigue Crack

Yong-Hak Huh, Rachel E Edwards, Mike W. Brown and Edward de los Rios

**Key Words:** Fretting Fatigue Crack(프레팅 피로 균열), Crack Initiation Direction(균열 발생 방향), Tangential Stress Range(접선응력폭),

#### Abstract

Governing parameters for determination of the location of crack initiation and direction of crack initiation were investigated by performing fretting fatigue tests and analysis on Al 2024-T351. Fatigue tests were carried out using biaxial fatigue machine. It was shown that the dominant fatigue crack tended to initiate at the outer edge of one of the four bridge pads, growing at an angle beneath a pad, before turning perpendicular to the orientation of the axial load. Distribution of stresses generated during fretting fatigue loading along the interface was calculated by elastic FE simulation. It can be known that the location of crack initiation can be predicted by using the maximum tangential stress range. Futhermore, the crack initiation direction can also be predicted by a maximum tangential stress range.

#### 기호설명

$\mu$	: 마찰계수 (frictional coefficient)
$\sigma_a$	: 축 응력 (axial stress)
$\sigma_{\theta\theta, \max}$	: 최대 접선 응력 (max. tangential stress)
$\tau_{r\theta, \max}$	: 최대 전단 응력 (max. shear stress)
$\Delta\sigma_{\theta\theta, \max}$	: 최대 접선 응력 폭 (max. tangential stress range)
$\sigma_N$	: 수직응력 (normal stress)
$\theta$	: 균열 발생 각(crack initiation angle)

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국표준과학연구원 환경안전연구센터  
E-mail : yhhuh@kriss.re.kr

TEL : (042)868-5386 FAX : (042)868-5635

\* Department of Mechanical Engineering, Univ. of Sheffield

#### 1. 서 론

가압 체결부(press-fitted joint), 리벳 연결부, 캐 이블, 터빈 블레이드 조립부, 로터부, 발전설비의 배관지지 체결부 그리고 볼트 연결부 등과 같은 기계 구조물 요소의 체결연결부(clamping joint)에서는 이들 체결부의 계속적인 접촉과 작은 상대 진동 운동에 의하여 그 접촉 계면에서 프레팅 손상이 발생한다. 특히 이러한 체결부의 주기적 하중 작용은 프레팅 피로를 발생시키며, 이는 체결부의 주요 파손 기구 중의 하나가 된다.<sup>(1-4)</sup> 프레팅 피로 손상은 국부적인 접촉영역에서의 높은 응력 집중, 다축 응력, 그리고 비비례 응력 상태 등의 복잡한 조합에 의하여 접촉 계면에서 발생하며, 이는 프레팅 피로 균열 발생과 균열 진전 그리고 파손으로 이어진다.

프레팅 균열 발생과 진전에 대한 균열 거동에 대한 연구가 실험과 해석을 통하여 비교적 많이

진행되어 왔다.<sup>(5-7,12)</sup> 수직하중과 축 하중의 이축 하중에 대한 프레팅 접촉의 실험적 모사로부터 접촉 계면에서의 혼합 하중하에서 프레팅 피로 수명과 프레팅 균열 거동이 실험적으로 규명되었고, 접촉 계면의 복잡한 거동에 따른 프레팅 피로 균열 발생과 진전에 대한 역학적인 해석이 균열 발생의 위치, 균열 발생의 방향, 그리고 단계별 균열의 천이 동안의 균열의 방향의 변화 등을 포함하여 해석적으로 진행되고 있다. Ruiz등<sup>(6)</sup>은 균열의 발생 위치를 프레팅 손상 계수인 인장 응력( $\sigma$ ), 전단 응력( $\tau$ ) 그리고 상대 미끄럼 변위( $\delta$ )와 관련시켰으며, 균열 발생 위치는 접촉의 끝단에서 발생함을 보였다. 또한 Lamacq등<sup>(7)</sup>은 균열의 발생과 접선 응력  $\sigma_{xx}$ 을 연관시켰다.

균열 발생 방향을 예측하기 위한 연구는 많이 진행되지 않았으나, Nowell 등<sup>(8)</sup>은 응력 확대 계수를 고려하여 단계적인 균열에서 그 방향을 예측하려고 하였다. 그러나 이는 균열의 크기에 대한 제한 조건을 가지고 있는 응력 확대 계수(stress intensity factor)를 초기 단계에서 발생하는 매우 작은 균열에 적용해야하는 문제점을 가지고 있었다. 한편 Yamashita와 Mura 등<sup>(9)</sup>은 응력에 영향을 받은 전이 이동(dislocation movement)를 고려하여 반복된 경사 하중에 대한 균열 방향을 예측하려고 하였다.

본 연구에서도 일정 수직하중하에서 되풀이 축 하중이 작용하는 프레팅 피로 하중하에서 접촉면에서 발생하는 균열의 발생 위치와 발생 방향에 대하여 실험과 해석을 통하여 고찰을 하였다. 본 연구에서는 알루미늄 합금 Al2024에 대하여 실험적으로 프레팅 피로 균열의 발생 거동을 관찰하고 이를 수치적으로 해석하여 손상 계수를 결정하였으며, 균열의 발생 위치와 방향을 예측하는 방법을 제시하였다.

## 2. 실험 및 해석 방법

### 2.1 실험 방법

프레팅 피로 시험은 4대의 유압 서보 구동체(servo hydraulic actuator)가 장착된 이축 시험기(BI-AX 200 Mayes)를 사용하여 수행하였다. 시험기는 두 대의 축 방향 유압 구동체(hydraulic actuator)와 두 대의 수직 방향 유압 구동체로 구성하였고, 이들 각 방향의 구동체는 축방향의 되

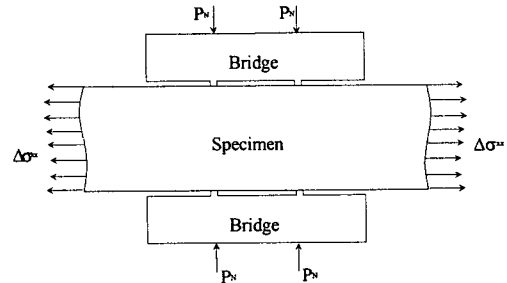


Fig. 2 Schematic drawings for fretting fatigue testing

풀이 하중(cyclic load)과 브리지 패드(bridge pad)를 통한 정적 수직 하중(static normal load)이 각각 시험편에 가해지게 한다. 축 방향의 2대의 유압 구동체는 동기 제어되어 시험편의 양쪽에 동기된 같은 크기의 피로 시험 하중이 작용할 수 있도록 하였다. 수직 방향의 하중도 같은 방법으로 동기되도록 하였다. 이러한 시험편의 중앙(center)에 대하여 시험편의 좌우 및 상하로 대칭인 동기된 하중의 부하는 시험편에 프레팅되는 4개의 브리징 패드에 동일한 피로 응력이 작용하게 한다. Fig. 1은 본 시험기를 이용하여 시험을 수행하는 개략도를 나타낸다.

시험편은 8x20mm의 단면적을 가지는 사각형의 단면과 58mm의 평행부 길이를 가지고 있다. 브리지는 두 개의 브리지 패드(bridge pad or foot)를 가지고 있고 이는 1.27mm의 너비와 1.0mm의 높이로 설계하였다. 또한 브리지 패드간의 스패(span)는 16.5mm이다. 일정 수직하중은 시험편 중심에 대하여 대칭으로 위치하는 2개의 브리지 패드를 통하여 시험편에 전달되도록 하였다. 시험편과 브리지 패드 사이에서 미소 상대 운동은 시험편 축 방향 피로 하중에 의하여 일어나며, 이 상대 운동에 의하여 경계면에서 마찰 작용이 발생하게 된다. 이 때 발생하는 접촉 마찰력은 브리지의 밀면과 윗면에 부착한 변형률 게이지를 통하여 측정할 수 있도록 하였다. 즉, 브리지의 패드에 전달되는 전단력(마찰력)은 브리지 본체의 탄성 변형을 야기시키며, 이 변형과의 상관 관계를 통하여 마찰력이 측정되도록 하였다. 브리지에서의 탄성 변형은 하나의 회로(Wheatstone bridge)로 구성된 두면에 부착된 게이지의 출력으로 측정되어지고, 본시험에서는 변형률 게이지

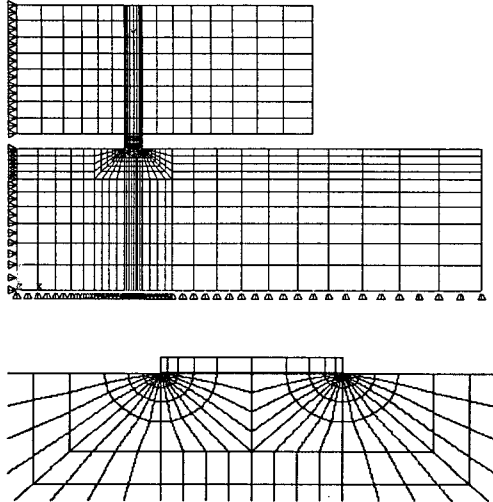


Fig. 2 Finite element mesh of the fretting specimen and bridge

회로의 출력을 패드에 가해지는 전단력으로 고정하여 그 상관관계를 얻었다. 따라서 두개의 브리지 패드에 작용하는 전체의 마찰력은 게이지 회로의 출력을 얻음으로서 얻어지게 하였다. 시험 동안의 축하중과 마찰력의 데이터는 소형컴퓨터에 장착된 데이터 획득 시스템(PC based data acquisition system)을 이용하여 기록된다. 시험편에 가해지는 축 하중은 응력비 R이 -1이며 20Hz의 속도로 정현파로 가해지며 그 크기는 100MPa이었다. 수직 하중은 축하중이 가해지는 동안 일정하게 유지하였으며, 10-120MPa범위의 다양한 수직하중이 시험 조건에 따라 선택되어졌다.

본 연구에 사용한 재료는 항공기 구조 및 부분품에 널리 사용되는 알루미늄 합금 Al2024-T351이다. 접촉 패드는 두 종류의 재료를 사용하여 제작하였으며, 이는 BS S98강과 Al 2024-T351이다.

2.2 해석 절차

되풀이 축 하중이 가해지는 동안 접촉면에서의 응력 분포를 조사하기 위하여 2차원 탄성 유한 요소해석을 평면 변형률 조건하에서 수행하였으며, 상용 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 시험 장치의 대칭성을 이용하여 Fig. 2와 같이 시험편과 브리지의 1/4를 모델링하였다. 시험편과 브리지는 8점 고체 요소(eight noded solid element)로 모델링하였고, 시험편과 브리지의 접

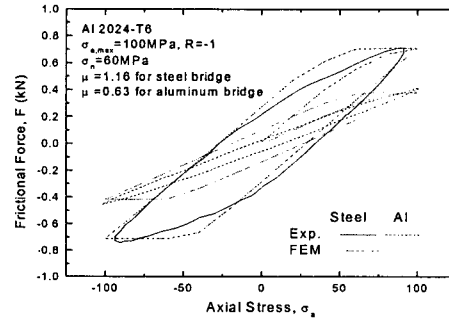


Fig. 3 Frictional force curve obtained from Fretting fatigue test and FE analysis

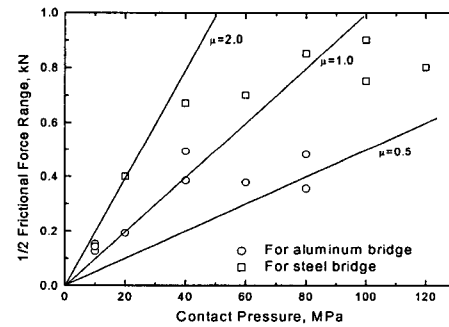


Fig. 4 Frictional force amplitude obtained with normal contact pressures

촉 경계면에서는 2차원 점대점 접촉 요소(point-to-point contact element)를 사용하여 모델링하였다. 접촉 영역에서의 요소를 세밀하게 하였으며, 특히 균열의 발생이 예상되는 접촉면 끝단점에 해당하는 부분에서는 그 점을 중심으로 한 동심의 요소를 사용하였다. 접촉면의 접촉 요소는 접촉면에 직각인 방향으로 압축을 지탱할 수 있으며, 접선 방향으로서는 탄성 Coulomb 전단 응력이 작용하는 것으로 하였다.

본 해석에서는 수직 접촉 하중과 축 하중 그리고 마찰 계수 와 같은 프레팅 피로 조건은 각각 실험에서 정의된 하중을 그리고 실험으로부터 측정된 계수를 사용하였다.

3. 실험 및 해석 결과

3.1 마찰 거동

Fig. 3은 되풀이 축 하중이 작용하는 동안 초기 단계에서 측정된 마찰 하중과 축하중의 곡선을 나타낸다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 마찰 하중 곡선의 히스테리시스 는 접촉면에서의 마이크로 및 매크로 미끄럼(micro and macro slip)을 명확하게 보여주고 있다.

마찰 하중 곡선은 수직 접촉 하중의 크기에 따라 다르게 변화하고 있으며, Fig. 4는 마찰 하중 폭의 수직 접촉 하중에 대한 의존성을 나타낸다.<sup>(10)</sup> 마찰 하중에 대한 수직 접촉 하중의 비를 마찰 계수로 정의하면, 마찰 계수는 수직 접촉 하중이 작아질수록 커지고 있다. 또한 Fig. 4에서 보여준 바와 같이, 마찰계수는 접촉 재료에 따른 의존성을 동시에 보여주고 있다.

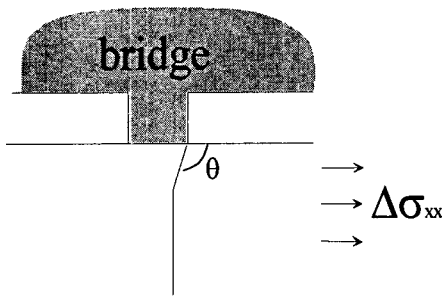


Fig. 5 Schematic presentation of morphology of the fretting fatigue crack initiated at outer bridge pad

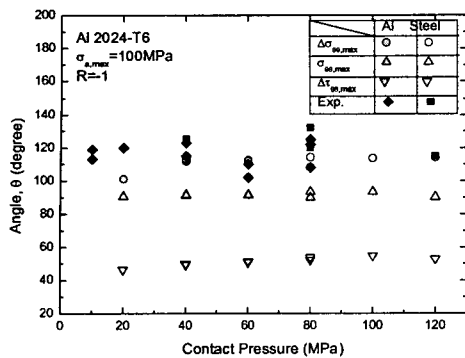
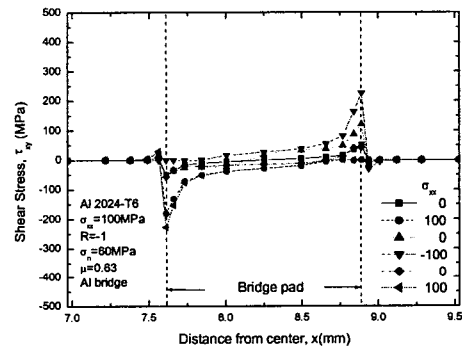


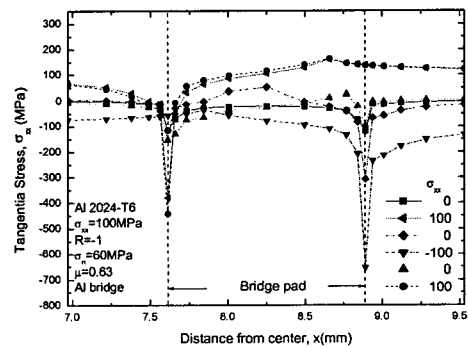
Fig. 6 Comparison of crack initiation direction obtained from experiment and direction of various stress components obtained from FE analysis

3.2 피로 균열 발생 양상

프레팅 피로 하중하에서 발생한 피로 균열은 하중의 크기에 따라 다양한 양상으로 발생한다. de los Rios 와 Orlov<sup>(10)</sup>에 의하면, 고 수직 접촉 하중(high normal contact load)에서는 많은 미소 균열이 접촉면에 발생하며, 중간 수직 접촉 하중에서는 하나 혹은 두 개의 미소 균열이 발생하고, 그리고 저 하중에서는 하나의 균열이 발생하였다. 이와 같이 접촉 면에서의 미소 균열의 발생은 수직 접촉 하중의 크기에 대하여 의존성을 보이고 있으나, 주요 균열은 Fig. 5에 도식적으로 표시한 바와 같은 양상으로 발생 및 성장한다. 접촉면에서의 주요 균열은 브리지 패드의 바깥쪽에 대응하는 부근에서 균열이 발생하여 접촉



(a) Distribution of shear stress



(b) Distribution of tangential stress

Fig. 7 Distribution of (a) shear stress and (b) tangential stress over the contact interface

표면에서 일정한 각을 가지고 발생 및 성장하고 일정 깊이까지 경사된 균열로 성장한 후 시험편의 축하중 방향과 직각된 방향으로 성장하여 파단되고 있다. 이러한 균열의 발생과 성장 과정은 표면에서 경사된 균열로 발생 및 성장하는 단계를 단계 I(stage I) 그리고 직각된 방향으로 성장하는 단계를 단계 II(stage II)로 구분한다.

Fig. 6는 접촉 표면에서 단계 I에서 발생한 균열의 방향을 수직 접촉 하중의 크기에 따라 도시한 것이다. 알루미늄 브리지에서는 균열 표면에서 100도에서 120도의 방향에서 발생하였고, 강 브리지에서는 115도에서 130도의 범위의 방향에서 발생하였다. 이러한 발생 방향은 수직 하중의 크기가 증가할수록 작아지는 경향을 보이고 있으며, 강 브리지에서의 발생 방향이 알루미늄 브리지에서보다 다소 큼을 알 수 있다. 이러한 균열 발생 방향의 재료 의존성은 접촉 재료의 특성 즉, 계면에서 접촉면의 마찰 계수와 연관할 수 있다.

3.3 접촉면에서의 응력 분포

평면대 평면 압입(flat-on-flat punch)에서 수직 접촉 하중이 작용하는 계면에서의 2차원 응력의 분포는 Johnson<sup>(11)</sup>에 의하여 알려져 있으며, 이는 압입자의 양단에서 응력 집중이 되고 있는 분포를 보이고 있다. 축 방향의 피로 하중이 작용하는 시험편에서 되풀이 하중의 작용에 따라 브리지 패드의 접촉 계면에서의 마이크로 매크로 미끄럼(micro-macro sliding)은 피로 하중의 수준에

따른 계면에서의 다양한 응력 분포의 변화를 가져오게 한다.<sup>(7)</sup> 따라서 본 연구에서는 이러한 피로 하중의 수준에 따른 접촉 계면에서의 응력 분포의 변화를 고찰하기 위하여 각 피로 하중의 수준에 대한 응력을 수치해석을 통하여 계산하였다. Fig. 7은 하중이 되풀이 하중의 각 단계에서의 접촉 계면에서의 전단 응력과 접선응력의 분포의 예를 나타낸다. 여기서 각 응력 분포는 축 응력의 폭이 100MPa, 평균 수직 접촉 응력이 60MPa 그리고 마찰 계수가 0.63인 하중 조건에서 해석된 결과이며, 축 방향의 되풀이 하중에 대한 계면에서의 응력 분포와 응력 성분을 평균 응력 지점(응력 수준은 0)과 최대, 최소 응력의 3 수준에서 각각 얻었다. Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이 계면에서 얻어지는 전단응력은 축 하중이 0인 경우에는 거의 존재하지 않으나, 축 하중이 최대로 증가함에 따라 브리지 패드의 한쪽 끝단에서 최대 전단응력이 작용하고 다른 한쪽 끝단은 0의 응력 분포를 나타낸다. 축 하중이 최소가 되었을 경우에는 전단 응력 분포는 최대 하중에서의 전단 응력 분포와 대칭적으로 작용하고 있다. 이러한 전단 응력의 분포에 대하여 접선 응력의 분포는 Fig. 7(b)와 같다. 축하중이 0인 경우에는 브리지 패드의 양단에서 수직 접촉 하중에 의한 접선 응력의 성분이 미소하게 작용하고 최대 축 하중에서는 접선 응력은 패드의 한쪽 끝단 부근에서 최대치를 보이고 다른 한쪽에서는 압축 접선응력의 분포를 보인다. 고 수직 접촉 응력에서 최대 접선 응력은 패드의 한쪽 끝단에서 발생하고 있

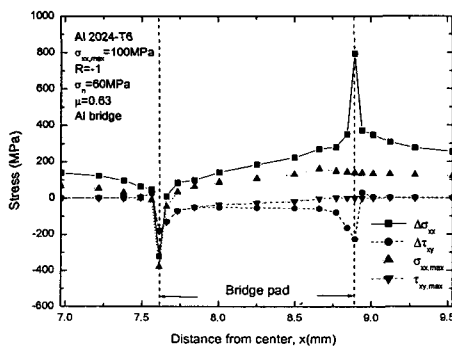


Fig. 8 Distribution of range of tangential stress, range of shear stress, tangential stress and shear stress over the contact area

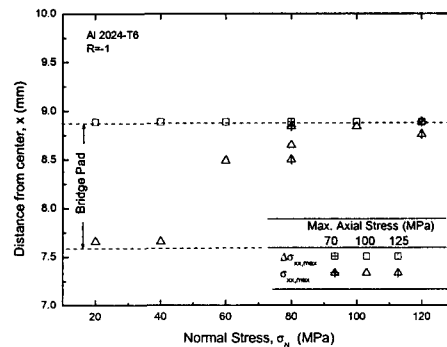


Fig. 9 Location of the maximum value of each damage parameter

으나, 수직 응력이 작아질수록 그 위치는 패드 안쪽으로 이동하고 있는 경향을 보이고 있다. 최소 축 하중에서의 접선 응력의 분포는 최대 축 하중에서의 접선 응력의 분포와는 다소 다른 분포 형태를 보이고 있다. 따라서 이러한 응력의 분포는 축 하중이 최대에서 최소로 움직이는 피로 하중에서 브리지 패드의 축 방향의 미끄럼 운동이 점착(stick)과 미끄럼(sliding)에 의한 운동이 축 하중의 최대 최소 부하에 따라 대칭적으로 나타나고 있지 않음을 알 수 있다.

#### 4. 토 의

앞에서 언급한 바와 같이 프레팅 피로하중에 의하여 접촉 계면에서 주요 균열은 브리지 패드의 바깥쪽 끝단에서 발생하여 단계I(Stage I)과 단계 II(Stage II)로 구분되어 성장한다. 이러한 접촉 계면에서 발생하는 피로 균열의 위치를 예측하고 설명하기 위하여 비교적 많은 연구들이 진행되었다. Dang Van<sup>(5)</sup>은 재료의 탄소성 거동을 고려하여 균열 발생 임계 위치에서 전단 응력과 정수압 인장 응력의 선도로서 균열 발생 유무를 예측하는 다축 피로 가설(multi-axial fatigue criterion)을 제안하였다. Ruiz<sup>(6)</sup>은 프레팅 손상을 전단 응력과 상대 변위의 두 계수로 정량화를 하여 이들 계수와 균열 발생 위치와 관련시켰다. 또한 Lamacq<sup>(7)</sup>은 접선 응력  $\sigma_{xx}$ 이 균열 발생과 관련 있음을 보였다. 이와같은 연구 결과들은 피로 균열의 발생이 계면에 작용하는 응력 성분과 유관함을 보여주고 있다.

계면에서의 접선 응력과 전단 응력의 성분과 피로 하중에 의한 각각 응력의 폭은 이러한 피로 손상을 정량화하는 유력한 파라미터 후보들이다. 이에 따라 이들 응력 성분을 각각 최대치와 응력의 폭으로 정리하여 그 변화를 고찰하는 것은 매우 의미가 있을 것이다. Fig. 7에서는 본 연구에서 사용한 실험 조건에서의 접촉 계면에서 응력 성분과 분포의 한 예를 나타내었다. 이러한 응력 성분들은 Fig. 8에서 보여준 바와 같이 접촉 계면을 포함하는 시험편의 표면에서 접선응력의 최대치  $\sigma_{xx, max}$ 와 폭( $\Delta\sigma_{xx}$ ) 그리고 전단 응력의 최대치( $\tau_{xy, max}$ )와 폭( $\Delta\tau_{xy}$ )의 분포로 각각 정리할 수 있다. 최대 전단응력은 앞(3.3절)에서 언급한 바와 같이 최대와 최소 축 하중의 작용상태에서 브리

징 패드의 각 한 쪽 끝단 위치에서 최소치를 각각 보이고 다른 끝단 위치에서는 거의 0인 상태를 보이고 있다. 반면에 전단응력의 폭은 브리징 패드의 양 단에서 피크치를 보이고 있다. 따라서 전단 응력 폭이 균열 발생 위치에 유력한 파라미터라면 패드의 접촉 양단이 그 발생 지점으로 나타나야 할 것이다. 반면에 접선응력의 최대치와 폭은 Fig. 8에서 보여준 바와 같이 각각 브리지 패드의 바깥쪽 끝단 부근에서 각각 피크를 보여주고 있다. Fig. 9는 이들 두 응력 성분을 다양한 프레팅 피로 시험 조건에 대하여 정리한 결과를 나타낸다. Fig. 9에 나타낸 바와 같이 접선응력은 수직 고하중에서는 브리지 패드의 바깥쪽 끝단에서 최대가 되고 있으나, 수직 하중이 작아질수록 접선응력의 최대는 브리지 패드의 바깥쪽 끝단에서 안쪽으로 이동하여 발생하고 있다. 이에 반하여 접선 응력 폭( $\Delta\sigma_{xx}$ )은 다양한 축 하중의 크기와 수직 접촉 하중의 크기에 무관하게 브리지 패드의 바깥쪽 끝단에서 최대가 되고 있다. 이러한 계면에서의 발생하는 각 응력 성분을 Fig. 5에서 나타낸 균열 발생 위치와 비교할 수 있다. 즉, 접선 응력 폭이 최대가 되는 위치와 균열 발생 위치와는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 다축 응력이 작용하는 계면과 응력 집중이 되는 브리징 패드의 양 단에서 프레팅 피로 손상이 최대가 되고 이를 지배하는 인자는 접선 응력 폭임을 의미한다.

이와같은 피로 균열 발생 위치와 함께 그 방향을 지배하는 인자를 명확히 하는 것은 프레팅 피로 균열 해석에 매우 도움이 된다. Nowell<sup>(8)</sup>은 프레팅 피로 하중하에서 응력 강도 계수의 변화를 고려하여 각 균열의 단계를 연구하였으나, 비교적 긴 균열에서 정의되는 응력 강도 계수를 각 단계의 미소 균열에 적용하는 문제점을 가지고 있다. 또한 Yamashita와 Mura<sup>(9)</sup>는 응력 영향 전이 이동(stress influencing dislocation motion)을 고려하여 반복된 경사하중에 대한 균열 발생을 예측하려고 하였다. 이러한 예측들은 발생된 균열로부터 그 방향을 예측하려고 있다. 그러나 이미 발생된 균열은 이미 하나의 방향성을 가지고 있어 발생 시점에서 이러한 방향성을 예측하기에는 다소 부족하다.

본 연구에서는 다축 응력이 작용하는 표면에서의 응력 상태를 고찰하여 응력 성분의 변화와 균

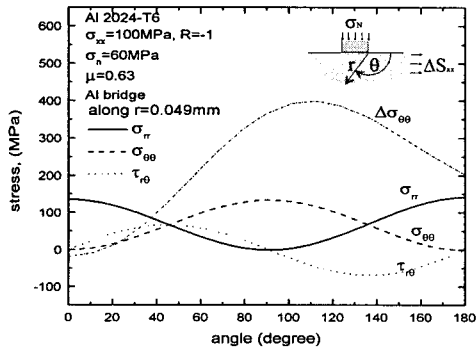


Fig. 10 Variation of stress components with angles below the leading edge of the bridge pad at the depth of 0.049mm

열 방향과의 상관 관계를 고찰하였다. Fig. 10은 균열 발생 지점의 일정 깊이에서 원주 방향으로의 응력 성분의 변화를 나타낸다. 최대 축하중에서의 접선 응력( $\sigma_{\theta\theta}$ ), 반경 방향 응력( $\sigma_{rr}$ ), 전단 응력( $\tau_{r\theta}$ ) 그리고 접선 응력의 폭( $\Delta\sigma_{\theta\theta}$ )의 원주 방향에 대한 변화가 조사되었다. 이들 응력 성분들은 접촉 표면에서 표면에서부터 원주 방향으로 감에 따라 변화되고, Fig. 10은 이러한 변화를 보여주고 있다. 이러한 각 방향의 응력 성분의 최대치를 정리하여 보면 Fig. 6과 같다. Fig. 6에는 이들 응력 성분의 최대치 방향과 실험에서 얻어진 균열 발생 방향을 접촉 응력에 따라 함께 도시하였다. 전단 응력이 최대가 되는 방향은 약 45도의 방향을 나타내고 있어 실험에서 얻어진 방향과는 상당한 차이를 보이고 있다. 이에 반하여 접선응력의 최대와 폭의 방향은 실험 결과와 접촉 수직 하중에 따라 실험에서 얻어진 균열의 방향과 거의 같음을 보이고 있다. 그러나 Fig. 6에서 보여준 바와 같이, 접선 응력의 폭의 최대가 되는 방향이 접선 응력의 최대 방향보다는 실험 결과에 좀더 근접하고 있다. 이는 접선응력 폭은 접촉 계면에서 발생하는 균열의 방향을 결정하는 유력한 인자임을 의미한다.

5. 결론

알루미늄 2024-T351에 대한 프레팅 피로 시험

과 해석을 수행하였으며, 이를 통하여 피로 균열 발생 거동과 발생 위치 그리고 방향에 대한 지배 인자에 대하여 고찰하였다.

(1) 프레팅 피로 균열은 평면대 평면 접촉되는 브리지의 바깥쪽 끝단에 접촉하는 부분에서 발생하였으며, 표면에 대하여 경사진 방향으로 발생하고 일정 깊이후 시험편의 축방향에 대하여 직각된 방향으로 성장하였다. 프레팅 피로 균열 발생 방향은 접촉 재료와 수직 하중의 의존성을 보이고 있었다.

(2) 수치해석을 통하여 접촉 계면에 대한 응력 분포를 계산하였으며, 균열 발생위치는 접선응력의 폭의 최대치와는 상당히 잘 일치하고 있어, 접선 응력 폭은 프레팅 피로 균열 발생 위치와 밀접한 관계가 있음을 보였다.

(3) 균열 발생 지점에서의 얇은 깊이에서의 접선 응력 폭은 균열 발생 방향과 잘 일치하고 있었으며, 접선응력 폭은 균열 발생 방향을 예측할 수 있는 유용한 계수임을 보여주었다.

후 기

이 논문은 한국과학재단의 해외 post-doc 연구 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

(1) Farris, T. N., Grandt, A. F., Harish, G. and Wang, H. L., 1996, "Analysis of Widespread Fatigue Damage in Structural Joints," *41st Int. SAMPE Symp. and Exhibition*.  
 (2) Hattori, T., 1994, "Fretting Fatigue Problems in Structural Design," *Fretting Fatigue, ESIS 18*, pp. 437-451.  
 (3) Szolwinski, M.P., Harish, G., McVeigh, P.A., and Farris, T.N., 1996, "The Role of Fretting Crack Nucleation in the Onset of Widespread Fatigue Damage: Analysis and Experiments," *Symp. on the Continued Airworthiness of Aircraft Structures*, pp. 585-596.  
 (4) Connor, Z.M., Li, W., Fine, M.E. and Achenbach, J.D., 1997, "Fatigue Crack Initiation and Growth in Reveted Specimens: An Optical

- and Microscopic Study," *Int. J. Fatigue*, 19 : *Supplement No. 1*, January, pp. S331~S338.
- (5) Dang Van K., Griveau B., and Message G., 1989, "On a New Multiaxial Fatigue Limit Criterion: Theory and Applications," in *Biaxial and Multiaxial Fatigue*, pp. 479~496.
- (6) Ruiz C., Boddington P.H.B. and Chen K.C., 1984, "An Investigation of Fatigue and Fretting in a Dovetail Joint," *Exp. Mech.*, pp. 208~217.
- (7) Lamacq V., Dubourg M.C. and Vincent L., 1996, "Crack Path Prediction under Fretting Fatigue - a Theoretical and Experimental Approach," *ASME Tribol.*, Vol. 118, pp. 711~720.
- (8) Nowell D., and Hills D.A., 1987, "An Analysis of Fretting Fatigue," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, pp. 965~973.
- (9) Yamashita N. and Mura T., 1983, "Contact Fatigue Crack Initiation under Repeated Oblique Force," *Wear*, Vol. 91, pp. 235~250.
- (10) de los Rios R.A. and Orlov E., 1998, "The Effect of Shot Peening on the Fretting Fatigue Fracture of BS L65 Copper Aluminum Alloy," *Progress Report*, U. of sheffield.
- (11) Johnson K.L., 1985, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press.
- (12) B.H. Lee and S.B. Lee, 1997, "An Experiment Study on the Fretting Fatigue Crack Behaviour of Al2024-T4," *Transactions of the KSME (A)*, Vol. 21, No. 3. pp. 511~519.