

A7075-T6 알루미늄 합금의 프레팅 피로 손상 파라미터 비교 평가[§]

황 동 현* · 조 성 산*[†]

* 홍익대학교 기계공학과

Comparison and Estimation of Fretting Fatigue Damage Parameters for Aluminum Alloy A7075-T6

Dong Hyeon Hwang* and Sung-San Cho*[†]

* Dept. of Mechanical Engineering, Hongik Univ.

(Received April 12, 2011 ; Revised July 31, 2011 ; Accepted August 5, 2011)

Key Words : Fretting fatigue (프레팅 피로), Damage parameter(손상 파라미터), Finite Element Analysis (유한요소해석), Crack initiation(균열 생성)

초록: 신뢰성이 가장 우수한 프레팅 피로손상 파라미터를 찾아내기 위해 알루미늄 합금 A7075-T6 을 대상으로 피로시험을 수행하였다. 시편 표면에 홈을 가공하여 패드 접촉압력에 따라 패드-시편 접촉면에서 프레팅 피로균열이 발생하거나 또는 홈에서 일반 피로균열이 발생할 수 있게 하였다. 광학현미경을 이용하여 균열의 발생위치와 방향을 측정하고, 문헌에서 가장 많이 사용되는 프레팅 피로손상 파라미터들의 신뢰성을 평가하였다. 파라미터 값과 최대손상평면 방향을 산출하는데 필요한 응력과 변형률 자료는 유한요소해석으로 산출하였다. 전단모드 피로파손을 가정하는 Fatemi-Socie 파라미터와 McDiarmid 파라미터가 가장 신뢰성이 높은 것으로 판명되었다.

Abstract: Fatigue tests were conducted on the aluminum alloy, A7075-T6 to determine the most reliable fretting fatigue damage parameter. Specimens with grooves were used, so that either fretting fatigue crack at the pad/specimen interface or plain fatigue crack at the groove could be nucleated, depending on the pad pressure. Both the crack nucleation location and initial crack orientation were examined using optical microscopy, and the results were used to assess the reliability of the various fretting fatigue damage parameters that have been most commonly used in the literature. Finite element analysis was employed to obtain the stress and strain data of the specimen, which were needed to estimate the parameter values and the orientation of the critical plane. It was revealed that both the Fatemi-Socie and McDiarmid parameters, which assume shear-mode fatigue cracking, are the most reliable.

- 기호설명 -

- σ_{max} : 최대 수직 응력
- τ_a : 전단 응력 진폭
- ϵ_a : 인장 변형률 진폭
- γ_a : 전단 변형률 진폭
- σ_y : 항복 응력
- σ_u : 인장 강도
- t : 전단 피로 한계
- b : 굽힘 피로 한계
- k : 물질 상수

- $J_{2,a}$: 2 차 불변량 진폭
- $I_{1,max}$: 1 차 불변량 최대값

1. 서론

프레팅 피로는 수직하중에 의해 접촉된 두 물체의 접촉면에서 미세한 미끄럼이 발생할 때 접촉면 내의 가장자리 부근에서 생성되는 균열에 의해 발생한다.^(1,2) 프레팅 피로 파손은 일반적인 피로 파손보다 훨씬 더 낮은 외력 조건에서 발생하므로,^(3,4) 내구설계과정에서 예상치 못한 접촉 이음부의 피로파손을 초래한다. 문헌상에 보고된 프레팅 피로 파손의 사례로는 항공기 엔진용 터빈의 블레이드/디스크 도브테일 연결부, 항공기 엔진의 프로펠러 축과 허브의 플렌지 연결

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회(2011. 4. 14.-15., SETEC) 발표논문임

† Corresponding Author, sscho@hongik.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

부, 고관절 임플란트 내 조립 이음부, 내연기관 크랭크 축 조립부의 축/키/키홈 접촉부 등이 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

프레팅 피로가 발생하는 접촉면 가장자리는 접촉압력과 마찰력의 급격한 변화로 인해 주응력의 방향이 지속적으로 바뀌는 다축 응력상태이다.⁽⁸⁾ 따라서 프레팅 피로 파손을 평가하기 위해 다축 피로이론에 근거한 다양한 손상 파라미터들이 도입되었으며,⁽⁹⁾ 대표적인 것으로 Smith-Watson-Topper (SWT),⁽¹⁰⁾ Fatemi-Socie (FS),⁽¹¹⁾ Findley, McDiarmid,⁽¹²⁾ Crossland⁽¹³⁾ 파라미터 등이 있다. 이후 다양한 파라미터의 신뢰성을 비교 평가하는 연구가 수행되었지만, 현재까지 최적의 프레팅 피로 손상 파라미터를 확립하지 못한 상태이다.^(14,15)

기존의 파라미터 비교 평가 연구는 주로 프레팅 피로 수명에 영향을 미치는 인자의 값을 변화시키면서 얻어진 시험자료를 근거로 수행되었다.^(14,15) 한편 최근까지 제안된 프레팅 피로손상 파라미터들은 다축 피로이론에 근거를 두고 있으므로, 이 파라미터들은 프레팅 피로뿐만 아니라 일반 피로 손상도 평가할 수 있다. 따라서 본 연구는 프레팅 피로와 일반 피로가 모두 발생할 수 있는 조건에서 수행된 피로시험결과를 근거로 기존의 파라미터들을 비교 평가하여 최적의 프레팅 피로손상 파라미터를 찾는 것을 목적으로 한다.

2. 피로 시험

Fig. 1(a)은 일반 피로와 프레팅 피로 균열을 모두 발생시킬 수 있도록 고안된 시험방법을 개념도로 보여준다. 시편 측면에 대칭으로 홈(groove)이 가공되어 있고, 홈과 충분히 떨어진 지점에서 시편에 패드를 일정 압력으로 접촉시키고 시편에 반복하중을 가한다. 패드 압력이 0 이거나 매우 낮은 조건에서는 홈에서 일반 피로파괴가 발생하지만, 압력을 일정 값 이상으로 증가시키면 패드와 접촉한 시편에서 프레팅 피로파괴가 발생한다. Fig. 1(b)는 시험에 사용된 프레팅 피로 시험 시편과 패드의 형상 및 치수를 보여준다. 프레팅 패드는 시편과 패드 사이의 접촉면을 안정적으로 확보하기 위해 bridge 타입을 사용하였다. 시편과 프레팅 패드는 와이어 방전 가공으로 제작하였으며, 방전 가공면에 존재하는 재응고층과 열영향부를 제거하기 위해 가공면을 입도 1000의 사포로 연마하였다.

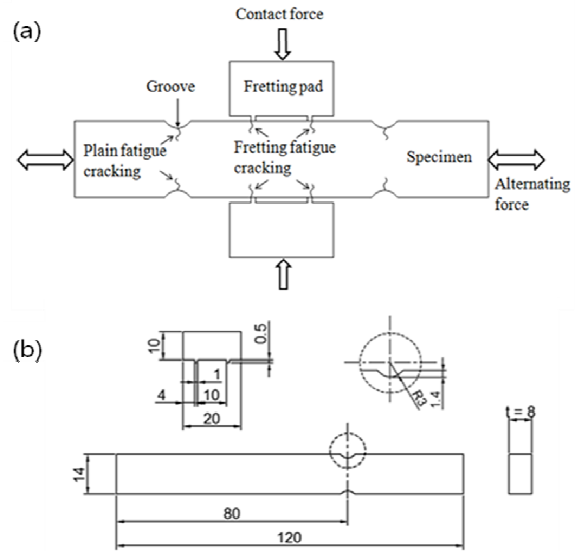


Fig. 1 (a) Schematic of fretting fatigue test with grooved specimen, and (b) geometry of the specimen and pad with dimensions

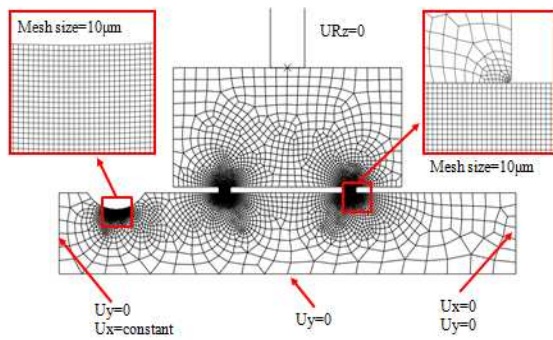


Fig. 2 Fatigue test setup

Fig. 2 는 시험 장치를 보여준다. 금속 링에 끼워진 볼트로 2 개의 패드를 시편 측면에 대칭으로 밀착시킨다. 패드와 시편 간의 접촉력은 금속 링에 부착된 스트레인 게이지를 이용해 조절한다. 패드와 조립된 상태의 시편 양단을 피로시험기의 상하 척에 고정시킨 후, 시편에 길이방향으로 응력진폭 110 MPa의 완전교번하중을 가하는 방법으로 피로시험을 수행하였다. 패드와 시편의 접촉압력을 10 MPa에서 120 MPa까지 단계적으로 증가시키면서 피로시험을 수행하여 시편의 홈에서 일반 피로에 의해 균열이 발생하는 경우와 시편/패드 접촉면에서 프레팅 피로에 의해 균열이 발생하는 경우의 시험자료를 모두 확보하였다. 시험 결과의 유효성을 확보하기 위해 접촉압력 별로 2~4 회의 반복 시험을 수행하였다. Table 1은 시편과 패드와 링 재료의 종류와 기계적 물성값을 보여준다.

Table 1 Material property of specimen and components

Part	Material	Elastic modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
Specimen	A7075-T6	70	503	572
Pad	SKD11	205	-	-
Ring	SPS30	200	230	310

**Fig. 3** Finite element model

3. 유한요소해석

프레팅 피로 손상 파라미터의 값을 산출하는 데 필요한 응력과 변형률 자료를 산출하기 위해 피로시험을 모사하는 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 3 은 2 차원 유한요소모델을 보여준다. 시험장치는 시편의 길이방향 중심선을 기준으로 형상 및 하중 관점에서 대칭이므로 반쪽 모델(half model)을 작성하였다. 모델은 시편과 패드와 볼트를 별도의 부품 모델로 작성한 후, 각 부품 모델을 실제 조건과 동일하게 볼트에 수직하중을 가하여 조립하는 방법으로 전체모델을 작성하였다. 사각형 2 차 등매개변수 유한요소를 사용하였으며, 균열이 발생하는 패드/시편 접촉부와 홈 부분에는 한 변의 크기가 10 μ m 인 유한요소를 사용하였다. 시편-패드 접촉면의 마찰계수는 0.7 을 사용하였다.^(16,17) 유한요소해석코드 ABAQUS 를 사용하였으며, 증분방식의 정적해석을 수행하였다.

4. 프레팅 피로 손상 파라미터

최적의 프레팅 피로손상 파라미터를 선정하기 위해 기존의 문헌에서 사용 빈도수가 높은 파라미터를 조사하여 파라미터 후보군을 다음과 같이 선정하였다.

$$\text{Critical plane SWT} = \sigma_{\max} \varepsilon_a$$

$$\text{FS} = \gamma_a \left(1 + k \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_y} \right)$$

$$\text{McDiarmid} = \tau_a + \frac{t}{2\sigma_u} \sigma_{\max}$$

$$\text{Findley} = \tau_a + k \sigma_{\max}$$

$$\text{Crossland} = \sqrt{J_{2,a}} + \frac{I_{1,\max}}{3} \left(\frac{t}{b} - \sqrt{3} \right)$$

위 식에서 $\sigma_{\max}, \tau_a, \varepsilon_a, \gamma_a$ 는 최대손상평면(critical plane)에 작용하는 값이다.

상기한 5 개 파라미터의 특징은 다음과 같다. 최대손상평면 SWT 파라미터는 인장모드 피로파손을 가정하고 최대손상평면에 작용하는 최대인장변형률진폭을 피로손상의 지표로 사용한다. FS, McDiarmid, Findley 파라미터는 전단모드 피로파손을 가정하고 최대손상평면에 작용하는 최대전단변형률진폭을 피로손상의 지표로 사용한다. 그러나 FS 파라미터는 전단변형률진폭을 피로손상의 지표로 사용하면서 최대수직응력의 영향을 가장 중요으로 적용한다. 한편 McDiarmid 와 Findley 파라미터는 모두 전단응력진폭을 피로손상의 지표로 사용하면서 최대수직응력의 영향을 중첩시키는 방법을 사용하지만, McDiarmid 는 최대수직응력의 영향도를 재료의 물성값에서 산출하고, Findley 는 실험으로 결정되는 상수값을 사용하므로 근본적으로 두 파라미터는 동일한 파라미터이다. 따라서 본 연구에서는 Findley 파라미터의 평가는 생략하였다. 마지막으로 Crossland 파라미터는 최대손상평면의 개념을 적용하지 않고 응력의 불변량을 지표로 사용한다. 따라서 Crossland 파라미터는 균열의 발생위치만을 평가할 수 없다. 한편 상기한 다른 파라미터는 최대손상평면의 개념을 사용하므로 균열발생 위치와 방향을 모두 평가할 수 있다.

5. 피로 손상 파라미터 평가

Fig. 4 는 프레팅 피로균열과 일반 피로균열에 의해 파손된 시편을 보여준다. 프레팅 피로균열은 접촉면 가장자리에서 발생하며, 일반 피로균열은 홈의 가장 깊은 위치에서 발생한다. 본 연구에서 고안한 방법으로 프레팅 피로파손과 일반 피로 파손을 모두 발생시킬 수 있음을 입증한다.

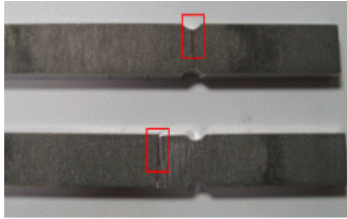


Fig. 4 Location of fretting and plain fatigue cracks

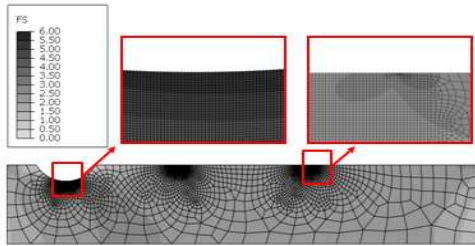


Fig. 5 Distribution of FS parameter values in the specimen at the pad pressure of 30 MPa

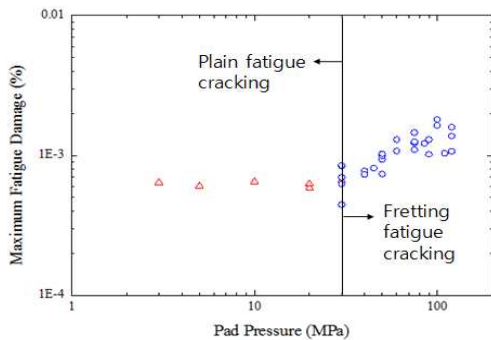


Fig. 6 Variation of maximum fatigue damage with pad pressure

Fig. 5 는 패드 압력 30 MPa 에서 해석결과를 이용해 산출한 FS 파라미터 값의 시편 내 분포를 보여준다. FS 파라미터는 패드/시편 접촉면 가장자리와 홈 바닥에서 국부적으로 최대값을 나타낸다. 즉, 두 지점의 FS 파라미터 값의 크기에 따라 프레팅 또는 일반 피로균열이 시험결과와 동일하게 발생할 수 있음을 의미한다. 본 논문에서 고려한 다른 파라미터들도 FS 파라미터와 정성적으로 동일한 분포를 산출하였다.

Fig. 6 은 시편에 발생하는 최대피로손상과 패드압력의 관계를 보여준다. 피로손상은 피로파손이 발생하는 시점의 반복하중 사이클 수의 역수로 정의하였다. 즉, 피로손상은 1 회의 외력 사이클에 의해 시편에 가해지는 손상을 나타낸다. 원으로 표시한 시험결과는 프레팅 피로 파손이 발생한 경우를 나타내며, 삼각형으로 표시된 시험결과는 일반 피로에 의해 홈의 바닥에서 파손이

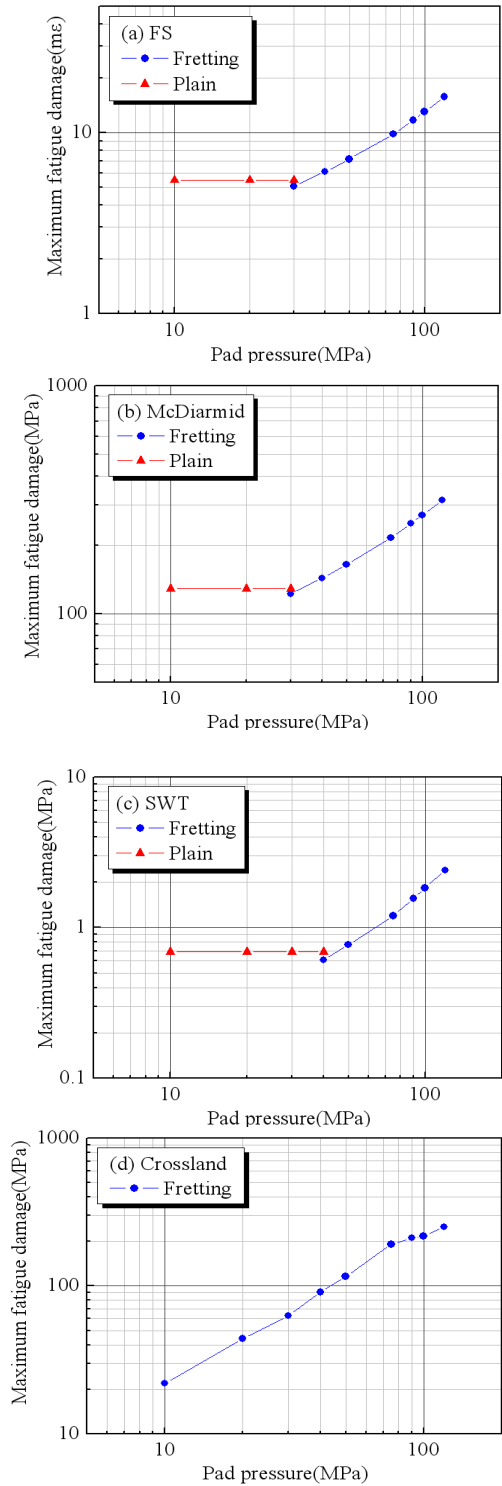


Fig. 7 Maximum fatigue damage evaluated with: (a) FS, (b) McDiarmid, (c) SWT, and (d) Crossland parameters

발생한 경우를 나타낸다. 패드 압력이 30 MPa 이하일 때 시편은 홈에서 발생하는 일반 피로균열에 의해 파손된다. 홈 내의 응력상태는 패드

압력과 무관하므로 시험결과가 수평선으로 나타난다. 한편 패드 압력 30 MPa 이상일 때에는 프레팅 피로에 의해 접촉면에서 시편이 파손된다. 프레팅 피로파손이 발생하는 경우에 패드 압력이 증가하면 프레팅 피로손상이 증가한다. 패드 압력이 30MPa 일 때 시편은 프레팅 피로(원 표시) 또는 일반 피로(삼각형 표시) 중에서 한 가지 균열에 의해 파손된다. 즉, 두 종류의 피로 균열이 동시에 발생하지는 않는다. 그 이유는 일단 한가지 종류의 균열이 발생하면 그 지점의 stress intensity factor 가 증가하여 균열성장이 빨라지므로 다른 종류의 균열이 생성되기 전에 시편이 파손되기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7 은 4 가지 피로손상 파라미터에 대해 패드 압력 변화에 따른 시편 내에 분포하는 파라미터의 최대값, 즉 최대 피로손상의 변화를 보여준다. 파라미터 값을 산출하는데 필요한 응력과 변형률 값을 유한요소해석으로 산출하였다. FS 와 McDiarmid 파라미터는 시험결과와 매우 유사한 결과를 산출한다. 즉, 패드 압력 30 MPa 을 경계로 프레팅 피로파손과 일반 피로파손이 발생하는 것을 예측한다. SWT 파라미터는 시험결과와 정성적으로 유사한 결과를 산출하지만 프레팅 피로파손과 일반 피로파손이 발생하는 경계를 나타내는 패드 압력 값으로 약 40 MPa 을 산출한다. 피로시험 결과가 본질적으로 큰 산포를 나타낸다는 사실을 감안할 때, SWT 파라미터도 신뢰성이 있는 것으로 판단된다. Crossland 파라미터는 시험결과와는 다르게 모든 시험조건에서 프레팅 피로파손을 예측한다. 따라서 이상의 내용을 정리하면 Crossland 파라미터를 제외하 나머지 파라미터 모두는 피로균열 발생위치를 비교적 잘 예측한다.

Fig. 8 은 패드 압력이 100 MPa 일 때 프레팅 피로 파단부 중에서 초기 균열 부분의 단면 사진과 균열의 방향을 보여준다. 초기 균열은 시편 길이방향에 수직인 방향(사진에서 수직선)에 대해 경사진 방향으로 생성되며, 초기 균열이 어느 정도 성장하면 균열은 거의 수직방향으로 성장한다. 프레팅 피로손상 파라미터는 균열 생성을 평가하는 파라미터이므로 초기 균열의 방향을 기준으로 파라미터의 신뢰성을 평가한다.

Fig. 9 는 패드 압력에 따른 프레팅 피로 초기 균열 방향의 변화를 보여준다. 시험결과와 3 가지 피로손상 파라미터로 예측한 결과를 비교하여 보여준다. 균열의 방향은 Fig. 8 에 제시된

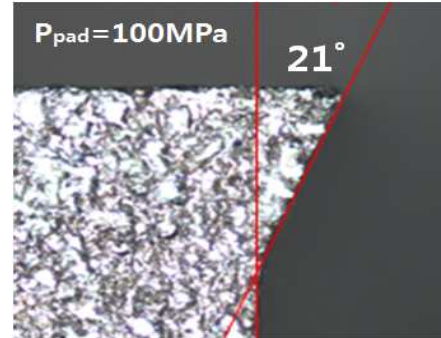


Fig. 8 Cross-sectional view of initial fretting fatigue crack and its orientation

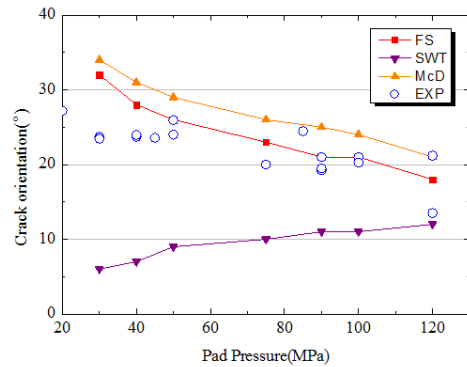


Fig. 9 Variation of initial fretting fatigue crack orientation with pad pressure

바와 같이 시편 길이방향에 수직인 방향과 균열면이 이루는 각도로 나타내었다. 피로손상 파라미터 중에서 Crossland 파라미터는 균열의 방향을 예측할 수 없으므로 제외시켰다. 시험결과에 의하면 패드 압력이 증가할수록 초기 균열 방향의 각도가 서서히 감소한다. 비교 평가된 3 개의 파라미터 중에서 전단모드 피로균열 생성을 가정하는 FS 와 McDiarmid 파라미터가 시험과 유사한 결과를 산출한다. McDiarmid 파라미터가 FS 파라미터보다 약간 큰 각도를 산출하지만 McDiarmid 파라미터에서 수직응력의 영향도를 결정하는데 사용된 재료의 물성값 대신에 FS 또는 Findley 파라미터처럼 실험으로 결정되는 상수값을 사용하여 값을 조정한다면 FS 파라미터와 동일한 결과가 산출될 수 있다. 한편, SWT 파라미터는 시험결과와 정반대의 경향을 나타낸다. 즉, 패드 압력이 증가할 때, SWT 파라미터가 예측하는 초기균열방향의 각도는 서서히 증가하므로, 인장모드 피로균열 생성을 가정하는 SWT 파라미터는 초기 균열의 방향을 올바르게 예측하지 못하는 것으로 판단된다.

따라서 알루미늄 합금 A7075-T6 의 경우 전단모드 피로균열 생성을 가정한 파라미터들이 초기 균열의 방향을 비교적 잘 예측한다. 대부분의 금속재료에서 초기 피로균열은 표면에서 발생하는 국부적 소성변형에 의해 생성되므로, 본 연구에서 얻어진 결론이 다른 금속재료에도 적용될 가능성이 높다. 이 추론은 추가적인 실험으로 확인할 계획이다. 한편 패드 압력이 매우 클 경우 프레팅 피로균열이 생성되는 지점에서 소성변형이 발생할 수 있으므로 응력을 사용하는 McDiarmid 파라미터 보다 변형률을 사용하는 FS 파라미터가 더 넓은 범위의 프레팅 조건에서 프레팅 피로평가에 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 이 또한 추후 실험 및 해석적 방법으로 확인할 계획이다.

6. 결 론

프레팅 피로와 일반 피로가 모두 발생하는 피로시험을 수행하고, 기존 문헌에서 사용 빈도가 높은 프레팅 피로손상 파라미터들로 균열발생위치 및 방향을 예측한 후 시험결과와 비교하였다.

피로시험에서 패드 압력이 30 MPa 보다 낮을 때 시편에 가공된 홈에서 균열이 발생하지만 압력을 더 증가시키면 프레팅 피로균열이 발생하였다. 이 시험결과와 동일한 결과를 산출하는 파라미터는 전단모드 균열생성을 가정한 파라미터, 즉 FS 와 McDiarmid 파라미터이다. SWT 파라미터는 약간의 오차가 있지만 비교적 유사한 결과를 산출하였고, Crossland 파라미터는 전혀 다른 결과를 산출하였다.

초기 균열의 방향은 패드 압력이 증가하면 서서히 감소하는 시험결과를 얻었다. 전단모드 균열생성을 가정한 파라미터들은 균열 방향에 대한 시험결과와 정성 및 정량적으로 잘 일치하는 결과를 산출하였다. 그러나 SWT 파라미터는 정반대의 결과를 산출하였다.

초기균열의 발생위치와 방향을 기준으로 기존의 프레팅 피로손상 파라미터들을 종합적으로 평가하면, 알루미늄 합금 A7075-T6 의 경우 전단모드 균열생성을 가정한 FS 와 McDiarmid 파라미터가 최적의 파라미터인 것으로 판단된다. 이 결론이 다른 금속재료에도 적용되는지 여부는 추가적인 실험으로 확인할 계획이다.

후 기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의

재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0010795).

참고문헌

- (1) Milestone, W. D. and Janeczko, J. T., 1971, "Friction Between Steel Surfaces During Fretting," *Wear*, Vol. 18, pp. 29~40.
- (2) Wharton, M. H., Waterhouse, R. B., Hirakawa, K. and Nishoika, K., 1973, "The Effect of Different Contact Materials on the Fretting Fatigue Strength of an Aluminum Alloy," *Wear*, Vol. 26, p. 253.
- (3) Hattori, T., Nakamura, M. and Watanabe, T., 1984, "Fretting Fatigue Analysis by Using Fracture Mechanics," *ASME paper no. 84-WA/DE-10*
- (4) King, R. N. and Lindley, T. C., 1980, "Fretting Fatigue in a 3.5 Ni-Cr-Mo-V Rotor Steel," *Proceedings of ICF5*, p. 631.
- (5) Hattori, T., Sakata, S. and Ohnishi, H., 1984, "Slipping Behavior and Fretting Fatigue in the Disk/Blade Dovetail Region," *Proceedings of the 1983 Tokyo international gas turbine congress*, p. 945.
- (6) Gassner, E., 1967, "The Value of Surface-Protective Media Against Fretting Corrosion on the Basis of Fatigue Strength Tests," *Laboratorium fur Betriebsfestigkeit TM19/67*
- (7) Hattori, T., Kawai, S., Okamoto, N. and Sonobe, T., 1981, "Torsional Fatigue Strength of a Shrink-Fitted Shaft," *Bull JSME*, Vol. 24, No. 197, p. 1893.
- (8) Dominguez J., 1998, "Cyclic Variation in Friction Forces and Contact Stresses During Fretting Fatigue," *Wear*, Vol. 218, pp. 43~53.
- (9) Szolwinski, M. P. and Farris, T. N., 1996, "Mechanics of Fretting Crack Formation," *Wear*, Vol. 198, pp. 93~107.
- (10) Smith, K. N., Watson, P. and Topper, T. H., 1970, "A Stress-Strain Function for Fatigue of Metals," *J Materials*, Vol. 5, No. 5, pp. 767~778.
- (11) Fatemi, A. and Socie, D., 1988, "A Critical Plane Approach to Multiaxial Fatigue Damage Including Out-of-Phase Loading," *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, Vol. 11, pp. 145~65.
- (12) McDiarmid, D. L., 1994, "A Shear Stress Based Critical-Plane Criterion of Multiaxial Fatigue Failure for Design and Life Prediction," *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, Vol. 17, pp. 1475~1484.
- (13) Crossland, B., 1956, "Effect of Large Hydrostatic Pressures on the Torsional Fatigue Strength of an Alloy Steel," *Proceedings of the international conference on fatigue of metals*, pp. 138~149.
- (14) Navarro, C., Munoz, S. and Dominguez, J., 2008,

- "On the Use of Multiaxial Fatigue Criteria for Fretting Fatigue Life Assessment," *International Journal of Fatigue*, Vol. 30, pp. 32~44.
- (15) Lykins, C. D., Mall, S. and Jain V., 2000, "An Evaluation of Parameters for Predicting Fretting Fatigue Crack Initiation," *International Journal of Fatigue*, Vol. 22, pp. 703~716.
- (16) Swalla, D. R. and Nuw, R. W., 2001, "Influence of Coefficient of Friction on Fretting Fatigue Crack Nucleation Prediction" *Tribology International*, Vol. 34, pp. 493~503.
- (17) Tsai, C.T. and Mall, S., 2000, "Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Fretting Stresses in Prestressed Strip in Contact with Cylindrical Pad," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 36, pp. 171~187.