접촉피로 파라미터의 개발

Development of Fretting Fatigue Parameter

이 혁 재*

Hyukjae Lee

Abstract

In this study, new multi-axial, critical plane based, fretting fatigue crack initiation parameter is developed by the addition of a new term into the Modified Shear Stress Range(MSSR) parameter. The newly developed parameter (MSSR') is then used to evaluate fretting fatigue life of titanium alloy, Ti-6Al-4V with various contact conditions. Finite element analysis is also used in order to obtain stress distribution on the contact surface during fretting fatigue test, which is then used for the calculation of fretting fatigue parameter. The MSSR' parameter shows better performance in predicting fretting fatigue lives from the conventional fatigue data, and less scattering within fretting fatigue data with different contact geometries.

Keywords : Fretting Fatigue(접촉피로), Multi-axial Parameter(다축 파라미터), Critical Plane(임계면), Titanium Alloy(티타늄합금), Finite Element Analysis(유한요소분석)

1. 서론

Fretting은 일정한 압력 하에서 접촉하고 있는 두 장치 사이에 작은 진폭의 왕복운동이 가해졌을 때 일어나는 현상이다. 접촉피로(fretting fatigue)는 이러한 fretting 하에서 반복하중이 가해졌을 때 일어나는 현상으로 접촉면에 fretting으로 인한 인장응력과 전단응력의 상승이 비정상적으로 빠른 균열의 발생을 야기하여 결국 피로수명의 감소를 유발하게 된다^[1~3].

접촉피로가 일어나는 가장 중요한 예 중 하나는 가스터빈엔진 내 blade/disk dovetail joint들이다. 항공기의 비행 시 이 부분은 기본적으로 높은 평균응력 위에 다시 고주파의 진동이 겹쳐지는 고주기피로(high cycle fatigue)를 경험하게 된다. 저주기피로(low cycle fatigue)의 경우 균열의 크기는 비교적 빠르게 측정 가능한 크기까지 자라 상당한 양의 수명이 정기적인 검사 시까지 남아있게 되고 이를 통해 'damage tolerance'에 의한 검사방법이 가능하다. 반면에 고주기피로의 경우에는 90% 이상의 전체 피로수명이 균열발생과 측정 가능한 크기(0.1~0.2mm)까지의 균열성장에 소모되어 damage tolerance방법의 적용이 매우 어렵다^[4,5]. 더구나 가스터빈엔진 내 dovetail joint의 복잡한 구성은 실제 검사에 의한 균열의 탐색을 더욱 어렵게 만들고 있다. 이와 같은 이유로 인해 고주기피로의 경우 'damage

† 2010년 10월 8일 접수~2011년 1월 13일 게재승인

* 안동대학교 청정에너지소재기술연구센터(Materials Research Center for Energy and Green Technology, Andong National University)

책임저자 : 이혁재(hlee@andong.ac.kr)

tolerance' 대신 'crack initiation' 방법이 쓰이곤 한다. 이 방법에서는 균열의 발생까지 걸리는 기간을 미리 예측하여 일정기간이 지나면 부품을 교환하게 된다^[5]. 이때 피로수명이 너무 짧게 예측된 경우에는 천문학적 인 추가 교체비용이 들게 되고, 너무 길게 예측된 경우에는 부품의 치명적인 파괴를 유발하게 되어 crack initiation 방식의 사용에는 정확한 피로수명의 예측이 가장 중요한 요소라고 볼 수 있다^[5].

접촉피로의 수명예측(fretting fatigue life prediction)에서 가장 문제가 되는 점은 시험 데이터를 분석할 때 어떠한 파라미터(parameter)를 이용하는가 하는 점이다. 피로거동을 이해하고 정량화 하는데 있어 가장 널리 쓰이는 기법은 S-N(응력-수명) 방법이다. 물론 어떠한 응력 파라미터(i.e., 응력진폭 등)를 사용하는가는 각 상황에 따라 달라지지만 일반적으로 시편에 가해지는 수직응력(normal stress)에 관계된 파라미터를 수직축에 놓고 파괴까지의 반복횟수를 수평축에 놓은 S-N 곡선이 기본적인 해석/정량화 방법이라 할 수 있으며 이는 지금까지 수많은 피로 연구에 사용되어 좋은 결과를 보여주었다^[6,7]. 그러나 접촉피로하중이 가해질 때 접촉부위의 응력상태는 일반적인 피로(접촉 피로가 아닌)와는 달리 다축적(multi-axial) 특성을 지니고 있어 단순한 수직응력을 이용한 파라미터의 사용이 힘들게 된다. 즉 다축적인 특성을 지닌 접촉피로하중 하에서의 균열생성수명(crack initiation life)을 평가/예측하기 위해선 역시 다축적인 특성을 지닌 파라미터를 이용하여야 한다. 이에 미공군의 고주기피로프로그램(high cycle fatigue program)에서 접촉피로에 대한 연구가 본격화 된 이후 접촉피로거동과 파라미터에 대한 많은 연구가 진행되고 그 결과들이 발표되고 있다^[5]. 본 연구에서는 지금까지 개발된 다축 파라미터(multi-axial parameter) 중 접촉피로에의 적용에서 좋은 결과를 보였던 Modified Shear Stress Range(MSSR) 파라미터를 기본으로 새로운 파라미터를 개발하였다. 그리고 개발된 파라미터를 실제 다양한 접촉 조건 하에서의 실험결과에 기존 파라미터와 함께 대입하여 그 피로수명 예측성능을 알아보고 접촉피로에 대한 적용가능성을 검증하였다.

2. 이론적 배경

현재까지 다수의 모델 또는 파라미터들이 다축응력

(multi-axial state of stress) 하에서의 피로거동을 위해 제안되었으며 이들은 크게 등가응력 모델(equivalent stress model)과 임계면 모델(critical plane model)의 두 가지로 분류될 수 있다^[6,8,9]. 등가응력모델은 단축응력 데이터에서 다축 상황에 맞도록 등가파라미터를 도출해 내어 사용하는 것이나 다축 상황에서 단축의 데이터를 이용한다는 것이 의미가 있는가 하는 점이 태생적인 한계로 남는다^[9]. 반면에 임계면 모델은 피로하중 하에서 균열의 발생이 특정한 면에서 일어난다는 실험적 발견을 기초로 개발된 것으로 임계면 위에서 수직응력 또는 전단응력을 사용하여 파라미터를 만든다. 임계면 위에서 수직응력은 균열을 열어 균열 면들 사이의 마찰을 줄이는 역할을 하게 되고 전단응력은 미끄럼면(slip plane)위로 전위를 움직이는 역할을 하여 균열의 발생과 성장을 야기할 것이라 예측된다. 이로 인해 임계면 모델은 균열의 방향과 크기를 예측할 수 있는 가능성을 지니고 있으며 다축상태의 다양한 응력조건을 모두 포함할 수 있다는 장점을 지니고 있어 접촉피로거동을 정량화 하는데 더욱 적합하다고 할 수 있다^[6,9].

다축 파라미터를 최초로 접촉피로에 적용한 사람은 Szolwinski와 Farris이다^[10]. 이들은 Smith^[11] 등이 일반적인 피로를 위해 제안한 다축 파라미터를 접촉피로에 맞도록 변형하여 사용하였다(SWT parameter). 이들이 사용한 파라미터는 균열의 발생이 최대수직응력(maximum normal stress)과 수직변형진폭(normal strain amplitude)의 곱이 최대가 되는 면에서 일어난다고 가정하고 그 양을 파라미터로 잡았다. 그 뒤 Fatemi-Socie(F-S)^[12], Findley^[13], Shear Stress Range(SSR)^[14], Modified Shear Stress Range(MSSR)^[15] 등 다양한 파라미터들이 개발되어 왔다. 이들 중 SWT, F-S 파라미터는 수직응력을 주로 사용하였으며 Findley, SSR 파라미터는 전단응력 그리고 MSSR 파라미터는 수직응력과 전단응력을 조합하여 이루어져 있다. 이들 중 임계면 위에서의 수직응력과 전단응력의 효과를 동시에 고려하는 MSSR 파라미터가 좋은 효과를 보이는데, 이는 접촉피로 시 수직응력과 전단응력이 모두 중요한 역할을 하는 점에 비추어 당연하다 할 수 있다^[15]. 그러나 MSSR 파라미터가 접촉피로거동의 정량화에 최적의 파라미터라 할 수는 없으며 이를 개선하기 위한 노력이 다음 장에 기술되었다.

3. 실험 및 파라미터 개발

가. 접촉피로 시험

개발된 접촉피로 파라미터를 적용하여 그 성능을 알아보기 위해선 많은 접촉피로시험 데이터가 필요하다. 이를 위해 기존에 발표된 접촉피로시험 데이터를 이용하였으나 데이터의 실증을 위하여 비슷한 조건 하에서 추가 시험을 행하여 기존 데이터를 검증하는 동시에 데이터의 양을 늘리고자 하였다.

본 연구에서는 기존에 발표된 데이터와 같은 시험조건으로^[15], dog-bone 타입 Ti-6Al-4V 합금 시편을 사용하였다. Ti-6Al-4V 합금은 실제 항공기용 dovetail joint에 사용되고 있는 소재로 가벼우면서도 높은 강도를 지니고 있으나 접촉피로에 취약한 특성을 가지고 있다. Fig. 1은 실제 시험에 사용된 시편의 크기를 보여준다. 접촉현상을 이루기 위해 같은 소재로 만든 실린더 모양의 접촉패드를 만들어 사용하였으며 이때 실린더 패드의 반지름을 달리하여 다양한 접촉조건을 구현하였다(Fig. 1).

Fig. 1. 접촉피로 시편 및 패드

접촉피로 시험은 Fig. 2에 보이는 접촉피로시험장치를 이용하여 실시하였다. Fig. 2에서 피로하중은 servo-hydraulic test frame에 의해 시편의 아래 방향으로 가해지게 되며 수평으로 부착한 다양한 접촉패드(contact pad)를 스프링을 이용하여 시편의 양쪽으로부터 눌러 접촉(fretting)상황을 만들어 냈다. 이때 로드셀을 이용하여 항상 일정한 접촉압력이 유지 되도록 하였으며 일정한 접촉상태를 각 시험마다 가질 수 있도록 압력 감지 테이프를 이용해 접촉패드와 시편표면 사이의 접촉상태를 매 시험마다 관찰하였다. 일반 피로시험과는

달리 시편의 위/아래에 두 개의 로드셀을 설치하여 피로시험 중 접촉면에서의 접선력(tangential force)을 구할 수 있도록 하였다.

Fig. 2. 접촉피로시험장치

나. 유한요소분석

임계면 방식의 파라미터를 계산하기 위해서는 접촉피로 시 접촉면에서의 응력분포를 알아야 한다. 이를 위해 주어진 접촉피로상황에 맞는 유한요소모델을 상용 유한요소분석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 만들었다. 접촉피로 시편과 패드의 유한요소모델은 Fig. 3에 보이는 대로 4개의 노드를 가지는 plain strain 요소로 구현되었으며 시편과 패드사이의 접촉면에서는 master-slave contact element를 사용하였다.

Fig. 3에서 메쉬의 크기는 접촉면에서 매우 세밀하게 그리고 접촉면에서 멀어질수록 점차적으로 메쉬의 밀도가 낮아지게 만들었으며 수렴연구를 통하여 메쉬의 최종 크기를 결정하였다. 접촉면에서의 마찰계수는 실험에서 구한 값을 사용하였으며 50.8mm 반지름의 실린더 패드에서 1330N의 접촉압력(Fig. 3의 P)이 가해진 경우 0.5였다.

유한요소 분석의 첫 단계는 시편과 패드 사이의 접촉을 이루는 것으로서 접촉 알고리즘을 사용하여 마스터 표면 위의 특정 부분이 슬레이브 노드와 접촉하여 시편과 패드 사이에서 하중이 이동할 수 있도록 한다. 이를 위해 접촉압력(P)이 접촉패드 윗부분에 분산된 형태로 가해지게 되며 접촉을 이룬 후 실험에서 가한 최대 피로하중(S)과 실험결과로부터 얻은 그때의 접선력(Q)을 가해준다. 마지막으로 최소 피로하중과 접선력을 다시 가해주면 하나의 피로 사이클을 모사

해 내게 된다. 접촉패드는 시편의 길이 방향으로 rigid body constraint를 가하여 시편의 팽창에 따라 움직이지 않게 하였으며 접촉패드의 윗부분에도 multi-point constraint를 가하여 사이클 시 발생할 수 있는 회전을 방지하였다. 일반적으로 접촉피로의 경우 시편과 패드 사이에는 stick-slip 접촉이 이루어지게 되는데 위와 같은 모델을 이용한 결과 접촉면에서의 stick-slip 접촉 조건을 완벽히 구현해 낼 수 있었다.

Fig. 3. 시편과 실린더 패드의 유한요소메쉬 디자인

다. 접촉피로 파라미터의 개발

MSSR 파라미터를 계산하기 위해선 우선 shear stress range를 구하여야 한다. 이를 위해 유한요소법에서 구한 접촉면 위의 각 응력 성분(S_{xx} , S_{yy} , S_{xy})을 이용하여 전단응력을 $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 사이에서 1° 씩 증가 시키며 다음과 같이 구한다.

$$\tau = -\frac{S_{xx} - S_{yy}}{2} \sin 2\theta + S_{xy} \cos 2\theta \quad (1)$$

여기서 q 는 가하는 피로하중 방향의 수직방향에서부터의 각도이다. Shear stress range(Dt)는 $t_{\max} - t_{\min}$ 으로 구해지며 여기서 $t_{\max}$ 와 $t_{\min}$ 은 최대와 최소 피로하중에서의 전단응력이다. 각 각도에서 구한 SSR을 비교하여 그 값이 최대가 되는 곳이 바로 임계면이 된다. 위에서 구한 SSR은 범위의 개념이므로 그 중간응력값(mean stress)이나 응력비(stress ratio)에는 영향을 받지 않게 된다. 실제 피로거동에 큰 영향을 끼치는 이들을 고려하기 위해 Walker^[16]가 제안한 방식을 이용하여 보정된 shear stress range를 다음과 같이 계산

할 수 있게 되며 이를 Shear Stress Range(SSR) 파라미터라고 부른다^[14].

$$(SSR=) \Delta \tau_{crit} = \tau_{\text{maj}} (1 - R)^m \quad (2)$$

여기서 $t_{\max}$ 와 R 은 임계면에서의 최대 전단응력과 최대/최소 전단응력의 비를 나타내고 m 은 fitting parameter로 Ti-Al-4V인 경우 0.45이다^[14]. 마지막으로 MSSR 파라미터는 위에서 구한 SSR 파라미터(Dt_{crit})에 임계면에서의 최대 수직응력을 더하여 구한다.

$$MSSR = A\Delta\tau_{crit}^B + CS_{\text{may}}^D \quad (3)$$

여기서 $S_{\max}$ 는 임계면에서의 최대수직응력이며 A, B, C, D는 fitting 상수들로 데이터들의 최적 curve fitting을 위해 다음과 같은 값을 가진다. $A = 0.75$, $B = 0.5$, $C = 0.75$, $D = 0.5$ ^[15]. MSSR 파라미터의 경우 앞의 SSR 부분은 균열생성에 보다 직접적인 관계를 가지게 되고 뒤 수직응력 부분은 균열의 전파에 보다 긴밀한 관계를 가지게 된다.

비록 위에서 구한 MSSR 파라미터는 타 파라미터들
에 비해 우수한 능력을 가진 것으로 보고되었지만
SSR에서 추가된 $S_{\max}$ 의 경우 임계면에서의 최대 수직
응력으로 단축적인 성질을 가지고 있다. 다축적인 접
촉피로를 위해선 파라미터의 각 요소가 다축적인 성질
을 가지고 있는 것이 바람직하므로 이를 개선하고자
식 (3)에서의 최대 수직응력 $S_{\max}$ 에 대해 Szolwinsky^[10]
등이 제안한 바대로 변형을 시도하였다. 즉 $S_{\max}$ 에 최
대 접선력과 최대 수직접촉력을 감안한 요소를 식 (4)
에서 보이는 바와 같이 더하여 $S_{m,F}$ 로 대체하였고, 이
를 식 (5)와 같이 MSSR'로 표시하였다. 결국 MSSR'
파라미터의 모든 요소는 다축적인 성질을 가질 수 있
게 되었으며 이에 따른 파라미터 성능의 향상을 도모
하였다.

$$S_{m,F} = S_{\max} + 2p_o \sqrt{\mu F_t / F_n} \quad (4)$$

$$MSSR' = A\Delta\tau_{crit}^B + CS_{m,F}^D \quad (5)$$

여기서 p_0 는 최대 Hertzian peak pressure이고 m 는 마찰계수, F_t 는 최대접선력(maximum tangential force), F_n 은 최대수직접촉력(maximum normal force)이다.

4. 결과 및 해석

가. 접촉피로 시험결과

접촉피로 파라미터의 성능 평가를 위해선 가급적 많은 접촉피로 데이터가 필요하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 기존에 발표된 다수의 접촉피로 데이터^[15]를 이용하였으나 수집된 데이터의 신뢰성을 알아보기 위하여 비슷한 조건 하에서 추가 실험을 자체적으로 실시하여 이들의 결과를 비교 하였다. 자체 접촉피로 시험을 한 결과와 기존 발표된 시험 데이터를 단순 비교 하는 것은 복잡한 접촉피로의 성질 상 매우 위험하지만 일단 같은 재료와 모양의 fretting fixture, 시편, 패드 등을 사용하였으므로 응력범위($S_{max} - S_{min}$)를 y 축으로 하여 S-N 커브를 그려서 비교하여 보았으며 그 결과는 Fig. 4에 나타나 있다. 이때 사용한 패드의 반지름은 50.8mm이고 접촉압력은 1330N이다. 그림에서 볼 수 있듯이 약간의 차이가 보이기는 하지만 무난하게 맞아 들어가고 있어 데이터의 신뢰도에는 문제가 없어 보인다.

Fig. 4. 기존데이터^[15]와 자체실험데이터의 비교

기존에 발표된 모든 시험결과와 본 연구에서 자체적으로 실시한 시험에서 시편의 파괴는 항상 trailing edge에서 일어났다. Trailing edge는 시편의 패드와의 접촉면에서 피로하중 방향으로의 끝단으로 stick-slip condition 시 slip이 시작되는 곳이다. Fig. 5에는 시편에 균열이 생긴 후 완전한 파괴가 이루어지기 전에 실험을 중단하고 표면의 fretting scar를 찍은 사진이다. 여기서 fretting scar의 아래 쪽(피로하중 방향) 맨 끝단에서 균열이 시작되고 있음을 분명히 볼 수 있다.

Fig. 5. 균열이 생긴 직후의 fretting scar.

이와 같이 trailing edge에서 균열이 시작되어 파괴가 일어나는 것은 접촉면에서의 응력 분포를 보면 쉽게 이해가 될 수 있다. Fig. 6은 50.8mm의 실린더패드가 1330N의 접촉압력으로 접촉해 있는 상황에서 566.1 MPa의 최대피로하중이 가해져 574N의 접선력이 생겼을 때의 시편 표면에서의 응력 분포를 앞에서 기술한 유한요소법을 이용하여 구한 것이다.

Fig. 6. 566.1MPa의 피로하중이 가해졌을 때 시편 위 응력분포

위 그림에서 S_{xx} 는 축방향(피로하중 방향) 응력, S_{yy} 는 수직응력 그리고 S_{xy} 는 전단응력이며 모든 응력은 1330N 접촉압력 하에서의 최대수직응력을 나타내주는 Hertzian peak pressure(p_0)로 정규화 되어있다. 피로하중 방향의 시편길이 x 는 시편과 패드의 접촉 중심점을 0

으로 놓고 전체 접촉면적의 반(contact half width, a)으로 정규화 되었다. Hertzian peak pressure와 contact half width는 Hertz 접촉이론에 의해 계산되었으며 그 값은 292MPa와 0.458mm이다.

Fig. 6에서 보듯이 축방향 응력(S_{xx})의 최대값은 항상 시편 접촉면위의 trailing edge($x = 1$)에 존재하게 되며 이는 모든 접촉피로시험 시 균열의 발생 및 시편의 파괴가 이 지점에서 일어난 실험적 결과를 설명해 준다. 또한 수직응력 역시 접촉의 중심점에서 1을 보이고 있어 Hertz 계산 결과와 정확히 맞아떨어짐을 알 수 있다. 이와 같이 유한요소분석을 통해 접촉피로 시 시편 위 응력상태를 알 수 있었으며 이 결과들은 접촉피로 파라미터를 계산하는데 다시 사용되었다.

나. 접촉피로 파라미터

가장 쉽고 일반적인 피로 파라미터는 가해진 응력 범위(stress range)나 이를 변화시킨 것으로 볼 수 있다. Fig. 7은 접촉피로가 아닌 일반적인 피로의 경우(plain fatigue)와 접촉피로 시 50.8, 101.6, 304.8mm의 반지름을 가지는 패드를 각각 1330, 2220, 3990N의 접촉압력 하에서 사용했을 때의 S-N 커브를 하나의 그래프 안에 도시하고 있다. 이때 y축에는 중간응력값의 영향을 가질 수 있도록 Walker^[16]가 제안한 방식의 유효응력(effective stress)을 사용하였으며 각 데이터는 기존에 발표된 데이터^[15]와 각 조건에서 자체 실험한 데이터를 같이 사용하여 데이터의 양을 최대화 하였다. 유효응력은 $S_{eff} = S_{max}(1-R)^m$ 으로 계산되며 이때 S_{max} 는 최대 피로응력, R은 최소/최대 응력비이고, m은 fitting 파라미터로 0.45로 구하여 졌다.

일반 피로에 대한 접촉피로에서의 피로수명의 감소는 Fig. 7에서 뚜렷하게 보이고 있으며 서로 다른 조건 하에서의 데이터들도 크게 분산되어 있어 반지름이 큰 패드에서 피로 수명이 줄어드는 경향을 분명히 볼 수 있다. 즉 접촉조건에 따라 피로수명이 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 여기서 서로 다른 접촉조건 하에서도 하나의 등가곡선(equivalent curve)으로 모든 데이터를 수렴할 수 있는 피로 파라미터가 있다면 단순한 시험에서 나온 결과로부터 다양한 조건 하에서의 접촉피로결과를 예측할 수 있다. 즉 접촉피로가 아닌 일반 피로시험의 결과로부터 접촉피로 시 피로수명을 예측할 수 있다면 복잡한 접촉피로시험을 매 조건에 맞추어 할 필요가 없어진다.

Fig. 7. 다양한 접촉조건하에서의 유효응력과 피로수명과의 관계

이러한 요구를 충족시키기 위해, 위에 소개된 MSSR 파라미터를 이용하여 S-N 커브를 도시한 것이 Fig. 8에 보이고 있다. 그림에서 보이는 MSSR 파라미터는 임계면에서의 최대 MSSR값을 구하여 표시한 것으로 최대 MSSR값은 항상 접촉면 위 trailing edge 부근에서 관찰되었다. 각 접촉조건에서의 MSSR 파라미터 값은 일정한 대역으로 수렴되어 Fig. 7에 비해 매우 비슷한 영역에 위치해 있다. 이에 MSSR 파라미터의 수명예측 능력이 뛰어나 다양한 조건 하에서의 피로수명 기대치를 단순한 시험에서 도출할 수 있다고 말할 수 있다.

Fig. 8. 다양한 접촉조건하에서의 MSSR 파라미터와 피로수명과의 관계

Fig. 9에는 본 연구에서 새로 개발된 MSSR' 파라미터를 이용한 결과가 보이고 있다.

Fig. 9. 새로운 MSSR' 파라미터와 파괴수명과의 관계

MSSR' 파라미터를 사용하였을 시 Fig. 8에 비해 일반 피로시험 데이터와의 근접성이 매우 향상되었으며 각 접촉 조건하의 데이터들의 분산 정도도 향상되어 보다 좁은 영역에서 수렴되어 있음을 알 수 있다. 이는 MSSR' 파라미터가 전단응력 요소만이 아닌 수직응력 요소에서도 다축적인 성질을 가짐으로서 실제 물리적 상황에 더욱 비슷하게 다가갔다고 볼 수 있다. 결론적으로 MSSR' 파라미터는 MSSR 파라미터의 각 요소에 다축적인 성질을 부여함으로써 접촉피로 수명에 측에 향상된 성능을 보여주고 있어 crack initiation 방식의 적용 시 사용 가능한 유력한 파라미터가 될 수 있을 것이다.

5. 결론

기존의 MSSR 파라미터의 접촉피로 수명예측 능력을 향상시키기 위하여 MSSR 파라미터의 수직응력 부분에 다축적인 기능을 첨가하여 새로운 MSSR' 파라미터를 개발하였다. 기존에 발표된 접촉피로 데이터와 새로 시험한 결과를 사용하여 그 성능을 조사한 결과 MSSR' 파라미터가 다양한 조건 하에서의 접촉피로 수명을 하나의 경향으로 수렴하는 데 기존의 MSSR 파라미터에 비해 우수한 능력을 보여 주었으며 이로 인해 보다 정확한 접촉피로 수명의 예측이 가능해질 것으로 보인다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0017147).

References

- [1] Waterhouse, R. B., Fretting Fatigue, Applied Science Publishers, London, 1981.
- [2] Hoepfner, D., Goss, G., "A Fretting-Fatigue Damage Threshold Concept", Wear, Vol. 27, pp. 61~70, 1974.
- [3] Waterhouse, R. B., "Fretting Fatigue", Int. Mater. Rev., Vol. 37, 77~92, 1992.
- [4] Cowles, A. B., "High Cycle Fatigue in Aircraft Gas Turbines - An Industry Perspective", Int. J Fatigue, Vol. 20, pp. 147~163, 1999.
- [5] Nicholas, T., "Critical issues in high cycle fatigue", Int. J Fatigue, Vol. 21, pp. S221~231, 1999.
- [6] Bannantine, J. A., Comer, J. J., Handrock, J. L., Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, NJ, 1990.
- [7] Krupp, U., Fatigue Crack Propagation in Metals and Alloys, Wiley-VCH, Weinheim, 2007.
- [8] Krgo, A., Kallmeyer, A. R., Kurath, P., "Evaluation of HCF Multiaxial Fatigue Life Prediction Methodologies for Ti-6Al-4V", In Proceedings of the 5th National Turbine Engines High Cycle Fatigue Conference, Arizona, 2000.
- [9] Shigley, J. E., Mischke, C. R., Mechanical Engineering Design, McGraw-Hill, NY, 1989.
- [10] Szolwinski, M., Farris, T., "Mechanics of Fretting Fatigue Crack Formation", Wear, Vol. 198, pp. 93~107, 1996.
- [11] Smith, K., Watson, P., Topper, T., "A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals", J. Mater. JMLSA, Vol. 5, pp. 767~778, 1970.
- [12] Fatemi, A., Socie, D., "A Critical Plane Approach to Multiaxial Fatigue Damage Including Out of Phase Loading", Fatigue Fract. Engr. Mater. Struct., Vol. 11, pp. 149~165, 1988.

- [13] Findley, W. N., "Fatigue of Metals Under Combination of Stresses", Trans. ASME, Vol. 79, pp. 1337~1352, 1975.
- [14] Lykins, C. D., Mall, S., Jain, V. K., "A Shear Stress Based Parameter for Fretting Fatigue Crack Initiation", Fatigue Fract. Engr. Mater. Struct., Vol. 24, pp. 461~473, 2001.
- [15] Namjoshi, S., Mall, S., Jain, V. K., Jin, O., "Fretting Fatigue Crack Initiation Mechanism in Ti-6Al-4V", Fatigue Fract. Engr. Mater. Struct., Vol. 25, pp. 955~964, 2002.
- [16] Walker, K., "The Effective Stress Ratio during Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum", Effects on Environment and Complex Load History on Fatigue Life, Philadelphia, pp. 1~14, 1970.