

실린더형 패드와 평판 시험편간 프레팅 피로의 접촉폭 크기효과에 관한 평가

김진광*, 조상봉#

Estimation on a Contact Size Effect in Fretting Fatigue Between Cylindrical Pad and Flat Specimen

Jin Kwang Kim* and Sang Bong Cho#

ABSTRACT

In general, fretting is a contact damage process due to micro-slip associated with small amplitude oscillatory movement between two surfaces in contact. Previous studies in fretting fatigue have observed a contact size effect related to contact width. The volume-averaging method of theoretically predicted contact stress fields was required to emulate experimental trends and to predict the observed contact size effects. This contact size effect is captured by the mean values of stresses and strains at the element integration points of FE model and two critical plane models (SWT, FS) in the present paper. It is shown that crack nucleation and fretting fatigue life can be predicted by the FE-based critical plane models.

Key Words : Fretting Fatigue (프레팅 피로), Contact Size Effect (접촉폭 크기효과), Critical Plane Model (위험단면 모델), Stress Gradient Effect (응력구배효과)

1. 서론

프레팅은 접촉하고 있는 두 물체 사이에 미세한 진동이 발생할 때, 작은 진폭의 상대운동으로 인한 접촉 손상과정을 말하며, 일반적으로 기계구조물에서 흔히 볼 수 있는 현상으로 리벳 또는 볼트로 체결된 연결부, 항공기 터빈엔진의 블레이드와 디스크 접촉부 등에서 발생한다.

프레팅 손상과정에는 프레팅 접촉조건에 따라 상대슬립만 발생하는 전면슬립(gross slip)현상과 접

착부(stick zone)와 슬립부(slip zone)가 함께 존재하는 부분슬립(partial slip)현상이 나타나는 것을 관찰할 수 있다.¹

본 논문에서는 부분슬립 접촉 조건하의 프레팅 피로현상에 대한 응력장과 변위장을 유한요소 해석을 통해 파악하고자 한다. 이러한 부분슬립상태의 프레팅 피로는 접촉표면 주변의 주응력과 주변형률 성분들의 크기와 그 방향이 반복적인 하중 사이클 내에서 다축(multiaxial), 비비례(non-proportional) 응력상태가 되고, 또한 그 응력이 급

접수일: 2007년 11월 28일; 게재승인일: 2008년 3월 21일

* 경남대학교 기계자동차공학부

교신저자: 경남대학교 기계자동차공학부

E-mail: sbcho@kyungnam.ac.kr Tel. (055) 249-2620

격히 증가하는 응력구배(stress gradient)현상으로 인해 일반 평판의 피로수명보다 현저히 감소하는 것으로 알려져 있다.

이와 같은 프레팅 피로현상을 규명하기 위해 실험과 이론적 해석을 통한 많은 연구들이 진행되어왔다. 프레팅 피로시험은 평판 시험편과 접촉되는 패드(pad)의 형상에 따라 플랫(flat), 플랫-라운드(flat and rounded), 실린더(cylinder) 등의 형태로 구분할 수 있다. 패드와 평판 시험편간 접촉표면의 양쪽 끝 경계지점에서 응력특이성이 존재하는 브리지 형태의 플랫 패드에 대해 Giannakopoulos² 등과 Yang 과 Mall³ 이 파괴역학과 접촉역학의 상사성을 이용한 프레팅 피로수명 평가방법을 제안하였고, Nowell 과 Dini⁴ 는 플랫-라운드 패드와 평판 시험편에 의한 프레팅 피로현상을 노치형태의 문제로 접근하여 피로수명을 평가한 바 있다. 그리고 실린더 패드와 평판 시험편간 프레팅의 경우는 Hertz⁵ 와 Mindlin⁶ 의 접촉문제 해석방법을 이용한 Hills 와 Nowell⁷ 에 의해 일정한 수직력 및 반복적인 접선력과 부피응력(bulk stress)을 받는 형태로 발전하였다. 그리고 근래에 플랫-라운드 패드와 실린더 패드에 의한 프레팅 피로현상에 관하여 균열핵 생성을 설명하고, 그 수명을 예측하기 위해 위험단면 모델(critical plane model)을 활용한 연구결과들이 발표되고 있다. 이 위험단면 모델은 다축피로 이론에 기초된 접근법으로 접촉표면에서의 응력과 변형률의 조합으로부터 최대 손상면을 찾을 수가 있다. Socie⁸는 다축피로 파라미터에 기초한 위험단면 모델을 개발하기 위해 평균응력효과를 고려한 SWT 변형률-수명식⁹ 을 수정한 위험단면 SWT-모델을 제안하였다. Szolwinski 와 Farris¹⁰는 이 위험단면 SWT-모델을 사용하여 두 접촉면의 마찰계수에 따른 균열핵 생성지점과 균열 진전방향 및 프레팅 피로수명을 예측하였고, 위험단면 SWT-모델이 프레팅 피로의 초기균열 위치를 예측하는데 적합함을 보였다. Lykins 와 Mall¹¹은 초기균열의 생성지점과 초기균열의 방향 및 그 피로수명을 예측하기 위해 2 차원 평면변형률상태의 유한요소해석을 수행하였고, 전단응력기준 파라미터(shear stress-based parameter)의 위험단면 모델을 제안하였다. Nowell^{12,13} 등은 Fatemi 와 Socie¹⁴ 가 제안한 위험단면 FS-모델과 Socie⁸ 가 제시한 위험단면 SWT-모델을 활용하여 프레팅 피로현상에 관한 실험과 수치해석적 연구를 하였다. 그들은 실린더 패드와 평판

시험편간 프레팅 접촉문제에서 헤르츠 접촉응력과 전단 접촉응력의 최대값들을 일정하게 유지하도록 설정한 하중조건들에 대한 피로시험으로부터 패드와 시험편간 접촉길이가 증가함에 따라 그 피로수명이 감소하는 접촉폭 크기효과가 나타남을 관찰하였고, 실험에 의한 피로수명값보다 두 위험단면 모델들에 의해 예측된 피로수명값이 보수적으로 나타남을 보였다.

본 논문에서는 참고문헌¹²에서 제시된 접촉폭 크기효과를 고려한 프레팅 피로시험 조건들을 2 차원 평면변형률상태로 유한요소해석하고, 위험단면 SWT-모델과 위험단면 FS-모델을 이용하여 균열핵 생성지점과 그 방향 및 피로수명에 관한 값들을 예측하였다. 그리고 위험단면 모델에 사용될 접촉표면에서의 응력과 변형률 값들을 절점응력과 절점변형률 대신에 임계체적의 크기에 해당하는 각 요소의 적분점들에서의 평균값인 요소응력과 요소변형률 값들을 사용하였다. 재료의 결정입자 크기에 해당하는 임의의 임계체적이 그 피로한계에 도달하면 균열핵이 생성되어 파손에 이르는 것으로 가정하여 재료의 피로특성치에 해당하는 임계체적의 크기를 결정하였고, 그에 대한 피로수명 값을 계산하였다. 또한 그 임계체적의 크기를 접촉폭 길이에 따라 변화시켜 프레팅 피로수명 값을 예측하였다.

이러한 평가방법에 의해 예측된 프레팅 피로수명값들과 참고문헌¹²에서의 실린더 패드와 평판 시험편간 프레팅 피로시험 결과값들을 비교하여 본 연구에서 수행된 수치해석적 평가방법이 프레팅 피로시험에서 관찰된 접촉폭 크기효과를 잘 설명할 수 있음을 보였다.

2. 위험단면 모델

위험단면 모델은 피로균열이 구조부재 내의 특정단면에서 시작되고 성장하는 물리적인 현상에 기초된 접근법으로 초기균열이 생성되는 단면의 위치와 그 방향을 변동하중 내의 특정단면에서 작용하는 응력과 변형률 성분들의 복잡한 조합에 의해 결정한다. 이러한 위험단면에서의 주응력과 주변형률은 하중사이클 내에서 그 크기와 방향이 변화하는 비비례 거동을 함에 따라 다축피로 이론의 도입이 필요하다. 위험단면 모델은 최대 손상이 발생하는 단면을 다축피로 파라미터에 의해 예측

하고, 변형률-수명식의 단축 피로물성치들에 의해 그 손상수명을 계산할 수 있다.

2.1 위험단면 SWT-모델

Smith⁹ 등은 Basquin 식을 변형률-수명식에 단순히 곱함으로써 평균응력효과를 고려하였다.

$$\sigma_{\max} \epsilon_n = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \epsilon'_f (2N_f)^{b+c} \quad (1)$$

여기서 σ'_f , b , ϵ'_f , c , $2N_f$, E 는 각각 피로강도계수, 피로강도지수, 피로연성계수, 피로연성지수, 파단까지의 반복수 및 탄성계수이다.

Socie⁸는 하중사이클 동안 주변형률 진폭이 최대가 되는 단면에서 초기균열이 발생하고, 그 단면에 작용하는 최대 수직응력에 의해 균열이 진전한다는 위험단면 SWT-모델을 제안하였다. 반면에 Szolwinski와 Farris¹⁰는 주변형률 진폭과 그 단면에 작용하는 수직응력의 곱, 즉 $\sigma_{\max} \epsilon_n$ 이 최대가 되는 단면에서 초기균열이 발생한다고 생각하였고, $\sigma_{\max} \epsilon_n$ 를 위험단면 SWT-파라미터라고 하였다. 이후 본 논문에서는 Socie⁸에 의해 제안된 변형률 기준의 위험단면 SWT-파라미터를 Γ 라 표기할 것이다. 이러한 위험단면 SWT-모델의 식 (1)에서 좌변의 Γ 에 의해 초기균열이 발생하는 단면의 위치와 그 방향을 예측할 수 있다.

2.2 위험단면 FS-모델

다축피로 연구에서 Fatemi와 Socie¹⁴는 비틀림 피로시험이 그와 같은 진폭의 단축 피로시험에 비해 장수명을 가짐을 관찰했다. 그들은 전단하중 하에서 불규칙적으로 형성된 균열면이 마찰을 야기시키고, 결국 균열선단에서의 응력을 감소시키는 반면, 균열면에 수직한 하중을 가하면 균열면은 열리고 마찰력에 의한 영향은 감소된다고 생각하였다. 완전교번 비틀림 시험에 의한 전단 변형률-수명식의 피로물성값들과 k 값에 의한 위험단면 FS-모델을 단축 변형률-수명식의 피로물성값들로 표현하면 식 (2)¹⁵와 같다. 식 (2)에서 $\sigma_{n,\max}$ 는 최대 전단변형률이 작용하는 단면에서의 최대 수직응력이고 S_f , k , ν_s , ν_p 는 각각 항복강도, 재료상수, 탄성 포아송비와 소성 포아송비이다. 위험단면 FS-모델을 단축 변형률 수명식의 피로물성값들로 식 (2)와 같이 사용할 경우, k 값을 1로 가정하여 사용

할 수 있다.¹⁵

$$\frac{\Delta \gamma_{\max}}{2} \left(1 + \kappa \frac{\sigma_{n,\max}}{S_f} \right) = \left[(1 + \nu_s) \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + (1 + \nu_p) \epsilon'_f (2N_f)^c \right] \times \left[1 + \kappa \frac{\sigma'_f}{2S_f} (2N_f)^b \right] \quad (2)$$

2.3 위험단면 결정법

실린더 패드와 평판 시험편간 프레팅 피로시험을 2 차원 평면변형률상태의 탄성-접촉문제로 유한요소해석하여 하중사이클에 대한 접촉표면에서의 응력텐서와 변형률텐서의 응답이력들을 구하고, 그 결과값들과 두 위험단면 모델(SWT, FS)들을 활용하여 프레팅 피로수명값과 초기균열이 발생하는 위치 및 그 방향을 예측하고자 한다.

Nowell^{13,14} 등은 프레팅 피로시험에 의한 수명이 위험단면 모델들에 의해 예측된 수명보다 더 길게 나타나는 현상을 보였고, 균열핵 생성지점에서 응력이 급격하게 증가하는 응력구배현상이 나타남을 언급하였다. 그들은 Muskhelishvili의 포텐셜 이론에 기초한 해석적 방법으로 반 무한판으로 가정된 시험편의 응력장을 해석하여 결정입자의 크기에 해당하는 임계체적을 구하였고, 그 체적에 대한 평균응력값을 위험단면 모델들에 적용하여 프레팅 피로수명을 평가하였다.

본 논문에서는 이러한 평균응력개념을 유한요소모델에 확대 적용하기 위해 각 절점에서의 절점 응력과 절점변형률 대신, 접촉표면과 그 주변에 임계체적의 크기로 분할된 각 요소의 적분점들에서의 응력과 변형률의 평균값인 요소응력과 요소변형률 값들을 사용하였다.

평면변형률상태의 2 차원 유한요소해석 결과에 의한 응력텐서와 변형률텐서로부터 다음의 변환식에 의해 초기균열이 발생하는 위험단면에서의 수직응력과 수직변형률 및 전단변형률 값들을 구할 수 있다.¹⁶

$$\sigma_n = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta_i + \tau_{xy} \sin 2\theta_i \quad (3)$$

$$\epsilon_n = \frac{\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}}{2} + \frac{\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}}{2} \cos 2\theta_i + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_i \quad (4)$$

$$\gamma_t = -(\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}) \sin 2\theta_i + \gamma_{xy} \cos 2\theta_i \quad (5)$$

이와 같은 2 차원 평면변형률상태의 탄성-접촉 문제에 대한 유한요소해석과 위험단면 모델들로부터 초기균열이 발생하는 단면의 위치와 그 방향 및 피로수명값을 예측하기 위해서 다음과 같은 위험단면 알고리즘을 활용하였다.

1. 하중사이클에 대한 유한요소해석 결과로부터 프레팅 접촉표면에서의 요소들에 대한 적분점들에서의 응력텐서와 변형률텐서의 응답이력들을 얻는다.
2. 각 요소 내의 적분점들에서의 평균값인 요소 응력과 요소변형률 값들을 계산한다.
3. 위험단면을 조사하고, 각 모델에 대한 파라미터 값들을 계산한다.
 - a) 위험단면 SWT-모델;

$-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 사이의 θ 를 1° 씩 증가시키며 각 요소들에 대해 최대 주변형률 진폭 $\epsilon_{s,max} = (\epsilon_{s,max} - \epsilon_{s,min})/2$ 가 발생하는 위험단면들을 조사한다. 각 단면들에서 하중사이클 내의 최대 수직응력 σ_{max} 을 구하고 Γ 값들을 결정한다.
 - b) 위험단면 FS-모델;

$-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 사이의 θ 를 1° 씩 증가시키며 각 요소들에서 최대 전단변형률 진폭 $\gamma_{s,max} = (\gamma_{s,max} - \gamma_{s,min})/2$ 가 발생하는 위험단면들을 조사한다. 그 위험단면들에서 최대 수직응력 $\sigma_{s,max}$ 을 계산하고 FS-파라미터 값들을 결정한다.
4. 프레팅 접촉표면에서의 각 요소들에 대한 위험단면 파라미터 값과 단축 변형률-수명식의 피로물성값들로부터 피로수명을 예측한다.

3. 유한요소모델

실린더 패드와 평판 시험편간 프레팅 접촉모델과 그에 대한 유한요소모델은 Fig. 1 과 같고, 적용된 하중은 세 종류이다. 수직하중 P 는 실린더 패드에 일정하게 작용하는 압축력이고, Q 는 반복적인 접선력이며, σ_B 는 평판에 가해지는 반복적인 부피응력이다. 이러한 하중들에 대한 프레팅 접촉 표면에서의 응력텐서와 변형률텐서의 응답이력들을 유한요소해석 프로그램인 ANSYS¹⁷를 활용하여 구하였다. 그리고 평판 시험편의 두께는 10mm 이고, 표점거리는 70mm 이다. 프레팅 피로시험은 평판 시험편의 중립면에 대하여 대칭이므로 1/2 만 유한요소모델링 하였다.

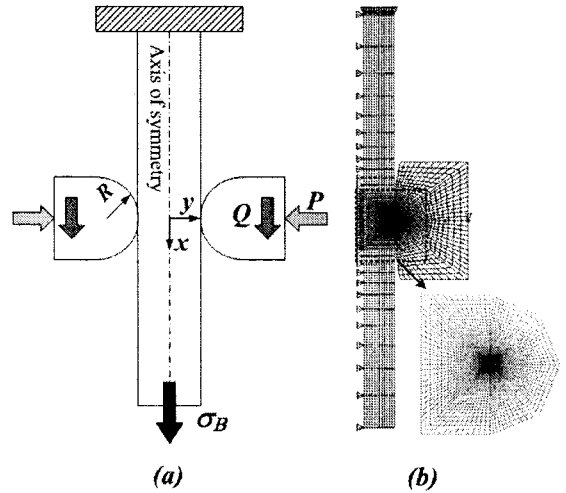


Fig. 1 (a) Cylinder-on-flat configuration and (b) FE model

유한요소해석에 사용된 평면변형률 요소는 4 절점과 4 개의 적분점을 갖는 Plane 182 번 요소이고, 탄성-접촉문제로 해석하였다. 그리고 패드와 평판 시험편간 접촉표면에는 서로 침투할 수 없다는 접촉적합성 조건을 만족시키기 위해서 접촉압력이라는 자유도를 추가한 라그랑지 승수법 (Lagrange multiplier method)을 사용하였다. 이는 거의 침투량이 영(0)에 가까운 최적의 접촉적합성을 제공한다. 그리고 두 접촉표면에서의 마찰은 쿨롱 마찰(Coulomb friction) 모델을 적용하였다.

4. 유한요소해석 결과검토

실린더 패드와 평판 시험편간 프레팅 피로현상을 분석하기 위해 본 연구에서 적용된 유한요소해석의 타당성을 부분슬립 조건하에서 수행된 Araujo 와 Nowell¹²에 의한 프레팅 피로시험 결과값들과 비교하여 검토하였다.

4.1 프레팅 피로시험 데이터

Table 1 과 Table 2 에 항공기 부품소재로 널리 사용되고 있는 Al4%Cu 알루미늄합금과 항공기의 터빈엔진 블레이드와 디스크에 사용되는 Ti-6Al-4V 티타늄합금에 대한 기계적 성질과 변형률-수명식에 대한 피로물성값들을 나타내었다.¹² 그리고 Table 3 에 참고문헌¹²에서 제시된 프레팅 피로시

험에서의 실린더 패드 반경 R , 접촉길이 반폭 a , 마찰계수 f 및 하중조건과 그에 대한 피로수명값을 나타내었다. 각 재질에 대한 피로시험들은 실린더 패드에 가해지는 압축력 P 와 패드의 반경 R 에 $\sqrt{P/R}$ 로 비례하는 헤르츠 접촉압의 최대값 p_c 을 일정하게 유지할 수 있도록 수직력 P 와 패드 반경 R 을 결정하였고, 그에 대한 접촉길이 반폭 a 을 구하였다. Al4%Cu와 Ti-6Al-4V에 대한 프레팅 피로시험에서 설정된 최대 헤르츠 접촉응력의 이론해는 각각 157 MPa와 650 MPa 이고, 최대 전단 접촉응력의 이론해는 각각 106 MPa와 272 MPa 이다. 이러한 프레팅 피로시험들을 유한요소해석으로 평가하기 위해 적용된 하중이력은 5 단계로 구성된다. 1 단계에서는 Fig. 1에 나타난 압축력 P 만 실린더 패드에 작용시킨다. 그리고 2 단계부터 5 단계까지 이 압축력을 일정한 크기로 계속 유지시키고, 접선력 Q 와 부피응력 σ_b 을 양진 피로하중으로 인가한다. 즉 2 단계에서 양의 방향(+x)으로 접선력 Q 와 부피응력 σ_b 을 각각 패드와 평판에 동일한 위상으로 가하고, 3 단계에서 접선력과 부피응력을 제거한다. 4 단계에서 접선력과 부피응력을 음의 방향(-x)으로 동일한 위상으로 가하고, 5 단계에서는 인가된 접선력과 부피응력을 제거한다. 2 단계에서 5 단계까지의 이력이 반복적인 하중사이클이 되며, 마찰에 의해 전단 접촉응력이 발생한다.

4.2 접촉응력 분포도

Table 3에 나타난 각 재료의 모든 프레팅 피로 시험들에 대해 유한요소해석에 의한 접촉표면에서의 헤르츠 접촉응력과 전단 접촉응력의 분포도들을 Nowell과 Hills⁸에 의한 이론해와 비교하면 두 결과가 비교적 잘 일치하고, 동일한 분포형태를 나타낸다. 이러한 결과들 중에서 Al4%Cu의 실험 1과 Ti-6Al-4V의 실험 2에 대하여 평판 시험편의 접촉표면에서 발생하는 1 단계 끝에서의 헤르츠 접촉응력과 접선력과 부피응력이 같은 위상으로 가해지는 2 단계 끝에서의 전단 접촉응력에 대한 유한요소해석 결과와 이론해를 전 접촉길이에 대해서 나타내면 각각 Fig. 2, 3과 같다. 유한요소해석 결과값과 이론해가 유사한 분포도를 나타내고 있다. 특히 전단 접촉응력 분포도에서 접촉구간과 슬립구간의 경계가 이론해와 잘 일치함을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 4, 5에 Al4%Cu의 실험 5에 대한 유한요소해석에 의한 헤르츠 접촉응력 분포

Table 1 Mechanical properties of Al4%Cu and Ti-6Al-4V

Material	E(GPa)	ν	0.2% σ_{ys} (MPa)
Al4%Cu	74	0.33	465
Ti-6Al-4V	115	0.32	974

Table 2 Fatigue properties for Al4%Cu and Ti-6Al-4V

Materials	σ'_f (MPa)	b	ϵ'_f	c
Al4%Cu	1015	-0.11	0.21	-0.52
Ti-6Al-4V	2030	-0.104	0.841	-0.688

Table 3 Experimental fretting total life for each theoretical contact size, a and pad radius, R based on paper by Aratújo and Nowell¹²

Experiment	1	2	3	4	5
Al4%Cu					
P(N/mm)	93.25	139.9	186.5	233.1	279.8
Q/P	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
σ_b (MPa)	92.7	92.7	92.7	92.7	92.7
f	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
R(mm)	50	75	100	125	150
a (mm)	0.38	0.57	0.76	0.95	1.14
Life(10^6 cycles)	1.29	0.67	0.85	0.73	0.67
Ti-6Al-4V					
P(N/mm)	777	1036	1243	1450	-
Q/P	0.16	0.16	0.16	0.16	-
σ_b (MPa)	280	280	280	280	-
f	0.55	0.55	0.55	0.55	-
R(mm)	37.5	50	60	70	-
a (mm)	0.76	1.01	1.22	1.42	-
Life(10^5 cycles)	5.21	3.74	1.96	1.73	-

도와 전단 접촉응력 분포도를 도시하였다. 이들은 Fig. 3과 동일한 형태의 분포도를 나타낸다.

5. 프레팅 피로수명 예측

유한요소해석으로부터 반복적인 하중사이클 동안의 응력텐서와 변형률텐서를 구하고, 위험단면 모델을 활용한 수치해석으로부터 프레팅 피로수명과 위험단면의 위치 및 그 방향을 예측하였다.

Fig. 6과 7은 Table 3에 나타난 Al4%Cu의 실험 1의 조건에 대한 하중사이클 동안의 접촉표면에서 초기균열이 발생할 것으로 예측된 위치에서의 위험단면에 발생하는 응력과 변형률의 변동이

력들을 나타낸 것이다. 즉 Γ 값에 의해 예측된 위험단면에서의 수직응력과 수직변형률 및 FS-파라미터에 의한 위험단면에서의 수직응력과 전단변형률 값들에 대하여 전 하중단계에 걸쳐서 나타낸 것이다. 위험단면 SWT-모델의 경우는 하중사이클 동안에 위험단면에서의 수직응력과 수직변형률의 값들이 동일한 경향을 나타내었고, 위험단면 FS-모델은 위험단면에서의 수직응력값이 하중단계 2의 끝에서 가장 크게 나타났으며, 전단변형률값은 피로하중들이 음의 방향으로 가해지는 하중단계 4의 끝에서 가장 크게 반응하는 것으로 나타났다.

그리고 두 위험단면 모델들로부터 초기균열이 발생할 것으로 예측된 위험단면의 위치는 일치하였지만, 그 방향은 서로 다르게 나타났다. 시험편의 접촉표면에 수직인 단면으로부터 반 시계방향으로 측정되는 위험단면의 방향은 SWT-모델의 경우, 7° 기울어진 단면에서 최대 수직변형률 진폭이 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 평판 시험편에 부피응력만 작용할 때의 위험단면 각도 0° 에서 패드와의 프레팅 접촉에 의해 그 단면이 7° 만큼 회전된 것이다. 또한 FS-모델의 경우는 52° 에서 최대 전단변형률 진폭이 나타나는 것으로 예측되었다. 부피응력만 작용할 경우의 위험단면 각도 45° 에서 패드와의 접촉에 의해 7° 만큼 증가된 것이다. 이러한 결과로부터 위험단면 SWT-모델과 FS-모델은 각각 취성재료와 연성재료에 대한 수명예측에 활용되는 것이 타당할 것으로 판단된다. 본 논문에서는 이러한 두 위험단면 모델들을 모두 활용하여 프레팅 피로수명값을 평가하였다.

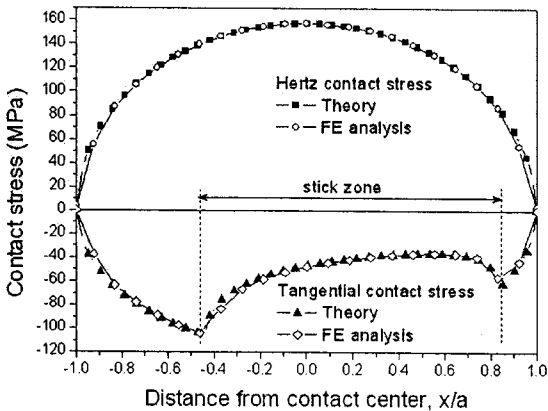


Fig. 2 Comparison of contact stress between FE analysis and analytical solution for Al4%Cu

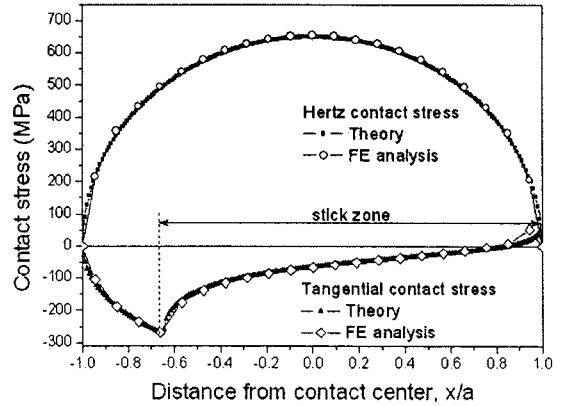


Fig. 3 Comparison of contact stress between FE analysis and analytical solution for Ti-6Al-4V

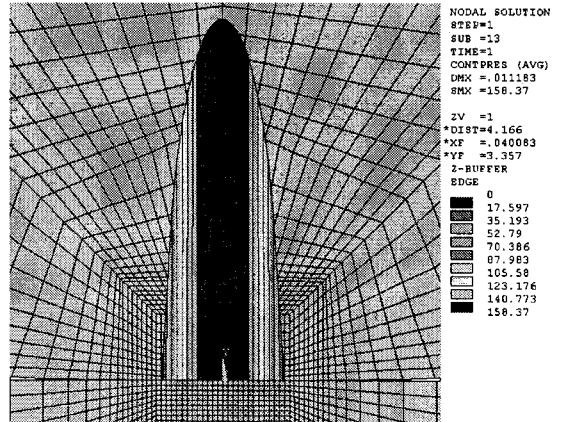


Fig. 4 Contribution curve of the Hertz contact stress by FE analysis for Al4%Cu

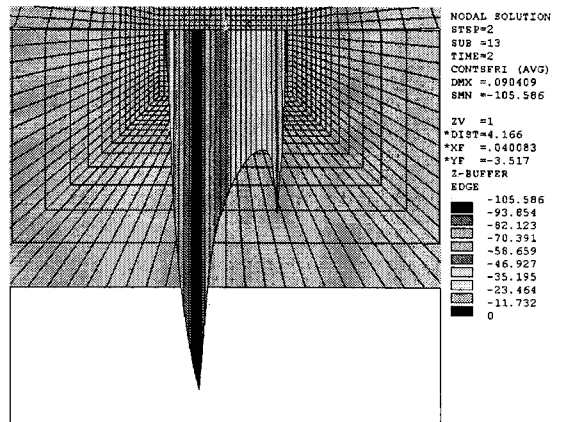


Fig. 5 Contribution curve of the tangential contact stress by FE analysis for Al4%Cu

Fig. 8 과 9 는 앞서 언급된 모델에 대하여 평판 시험편의 전 접촉길이 $2a$ 에 대하여 하중사이클 동안의 Γ 와 FS-파라미터 값들을 계산하여 도시한 것이다. 두 파라미터의 최대값들은 동일하게 접촉 표면 센터로부터 음의 방향에 위치한 접촉길이 반쪽 $x = -0.38 \text{ mm}$ ($x/a = -1$) 지점인 접촉 끝 경계 (trailing edge)에서 발생하는 것으로 예측되었다. 즉 균열핵은 이 위치에서 생성되어 전전에 의해 파손에 이르게 될 것이다. 이러한 결과는 참고문헌¹²에서 제시된 프래팅 피로시험에 의한 파손위치와 잘 일치한다. 그리고 Fig. 8 에서 음의 Γ 값들이 접촉 구간 내에 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 접촉 표면의 접촉구간에서 압축응력만 발생하기 때문에 나타나는 결과라고 판단된다.

Nowell^{12, 13} 등은 Muskhelishvili 의 포텐셜 이론과 위험단면 모델에 기초한 해석적 접근방법으로 반 무한판으로 가정한 시험편에 관해 평균응력개념을 도입하여 실험값에 근접한 피로수명 값을 예측하였다. 본 논문에서는 Fig. 1 에 나타난 유한 평판 시험편에 대하여 임계체적의 평균값에 해당하는 요소응력과 요소변형률의 값들을 사용하여 Table 3 에 나타난 프래팅 시험편에 대한 피로수명 값을 예측하였고, 그 결과를 Fig. 10 과 11 에 나타내었다. Fig. 10 은 Al14%Cu 에 대하여 임계체적의 한 변의 요소길이 $l_c \cong 40 \mu\text{m}$ 와 $50 \mu\text{m}$ 로 하여 예측한 피로수명과 실험에 의한 피로수명 값들을 함께 도시한 것이다. Fig. 9 는 Ti-6Al-4V 에 대하여 임계체적의 한 변의 요소길이 $l_c \cong 100 \mu\text{m}$, $110 \mu\text{m}$, 그리고 $120 \mu\text{m}$ 로 하여 계산한 피로수명값과 실험값을 함께 나타낸 것이다.

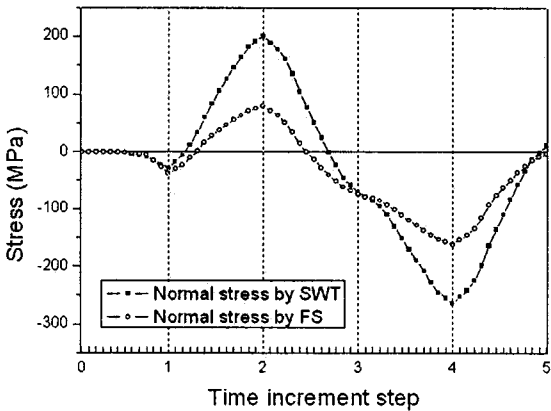


Fig. 6 Evolution of stress with time on the critical plane

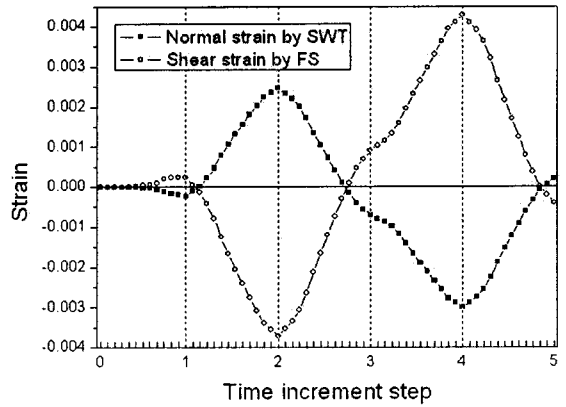


Fig. 7 Evolution of strain with time on the critical plane

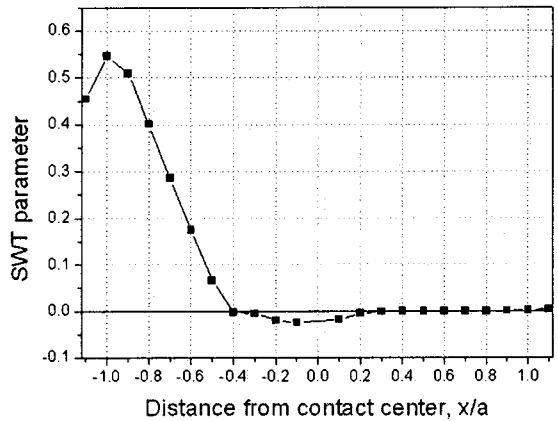


Fig. 8 Distribution of maximum SWT parameters over the contact surface

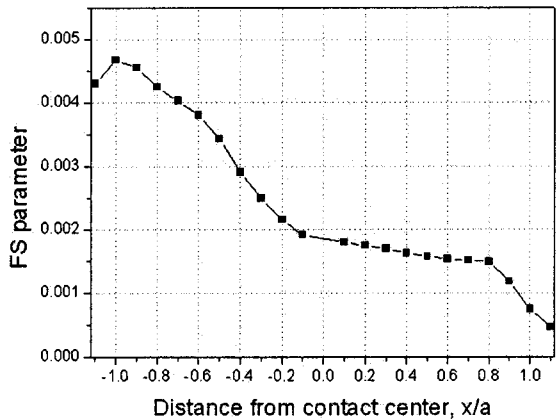


Fig. 9 Distribution of maximum FS parameters over the contact surface

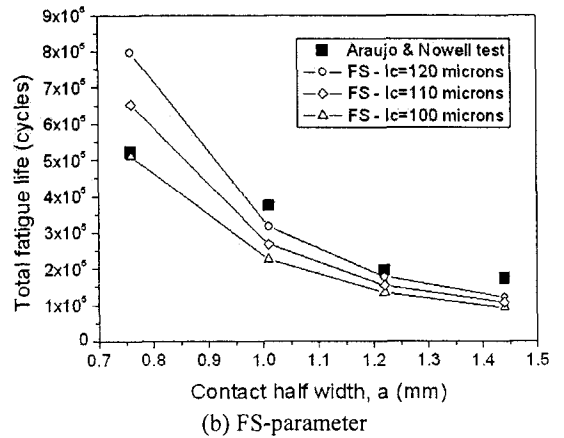
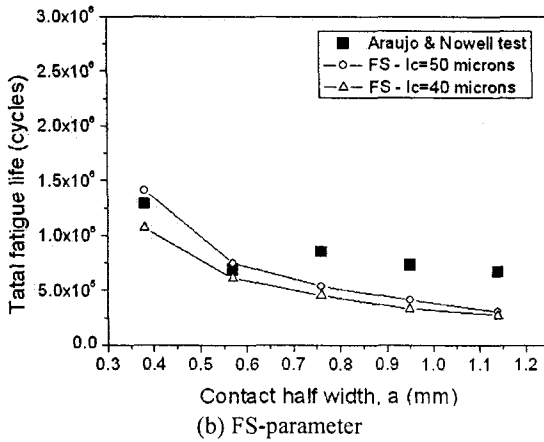
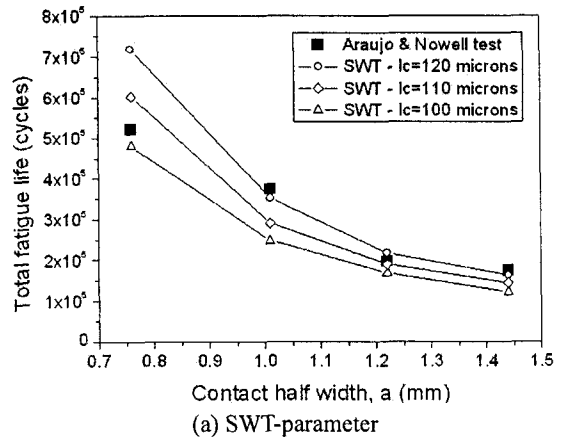
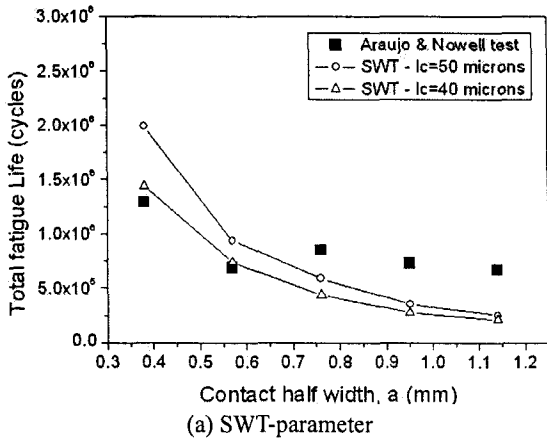


Fig. 10 Application to Al4%Cu data. Total life versus contact size using critical plane models

Fig. 11 Application to Ti-6Al-4V data. Total life versus contact size using critical plane models

헤르츠 접촉응력의 최대값 p_0 을 일정하게 유지한 피로시험과 수치해석 결과들은 접촉표면이 커짐에 따라 피로수명이 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 현상은 접촉길이가 커짐에 따라 Fig. 12에서와 같이 균열핵 생성지점 근방의 응력성분들이 완만하게 증가하는 응력구배현상으로 인해 임계체적에 대한 평균응력값이 증가하여 그 피로수명이 감소하는 것이다. 각 재료에 대한 모든 시험조건들은 Fig. 1에 표시된 x 축에 대해 접촉표면 센터로부터 음의 방향에 위치한 접촉 끝단 경계지점 (-a)에서 균열핵이 생성되는 것으로 예측되었다. 이 접촉 경계지점에서의 응력상태는 시험편의 유한두께로 인해 접촉길이가 증가함에 따라 커지는 경향을 나타내지만, 그 증가량은 무시할 만큼 작다. 따라서 한 점의 응력상태로부터 그 피로수명 값을

평가한다면 각 재료의 모든 시험조건들에 대해 거의 동일한 예측값을 얻게 되고, 실험값보다 보수적인 피로수명값을 얻게 될 것이다. 하지만 임계체적에 대한 평균응력값은 Fig. 12에서와 같은 응력구배효과로 인해 접촉길이가 커짐에 따라 증가하여 그 피로수명이 감소한다. 따라서 프레팅 피로시험에서 관찰된 접촉폭 크기효과를 이러한 임계체적에 대한 평균응력개념에 의해 설명할 수 있다.

또한 Fig. 10 과 11에서 일정한 크기의 임계체적에 대한 평균값으로부터 예측된 피로수명값들은 접촉길이가 커짐에 따라 그 예측 수명값이 실험에 의한 값보다 더 빨리 감소하는 경향이 나타난다. 따라서 실험결과에 보다 근접한 예측결과를 얻기 위해서 임계체적의 크기를 접촉길이에 따라 변화

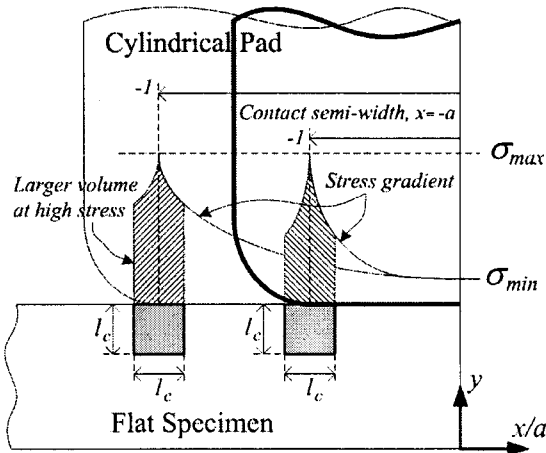


Fig. 12 Stress gradient in large and small contact zones

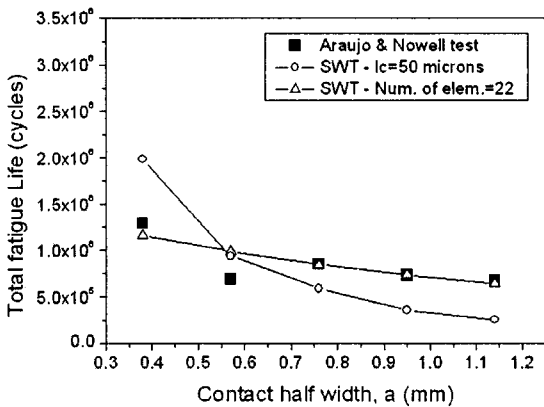


Fig. 13 Application to Al14%Cu data. Total life versus contact size using critical plane SWT-model

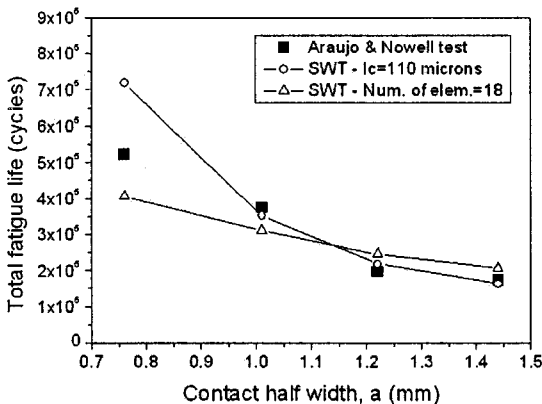


Fig. 14 Application to Ti6-Al-4V data. Total life versus contact size using critical plane SWT-model

하도록 접촉표면 내에 동일한 요소분할 개수를 할당하여 위험단면 SWT-모델로부터 그 피로수명값을 예측하였다. 이러한 평가방법으로 예측한 피로수명을 임계체적의 크기를 일정하게 하여 구한 결과와 실험결과 값들과 함께 Fig. 13 과 Fig. 14 에 나타내었다. Fig. 13 은 Al14%Cu 에 대한 것으로 접촉길이가 내에 요소분할 개수를 22 개로 일정하게 하여 평가한 피로수명 값들을 나타낸 것이다. 실험에 의한 결과와 예측결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 14 는 Ti-6Al-4V 에 대한 것으로 프레팅 접촉구간 내에 18 개의 요소를 생성시켜 피로수명을 예측한 결과이다.

6. 결론

실린더 패드와 평판 시험편간 프레팅 피로의 접촉폭 크기효과에 관해 유한요소해석에 기초한 위험단면 SWT-모델과 위험단면 FS-모델을 활용하여 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실린더 패드와 평판 시험편간 프레팅 피로현상에 대한 접촉표면에서의 접촉구간과 슬립구간의 경계 및 접촉응력값들을 유한요소해석에 의해 잘 표현할 수 있음을 보였다.
2. 위험단면 SWT-모델과 위험단면 FS-모델을 사용하여 프레팅 피로에 의한 균열핵 생성지점과 그 방향을 예측할 수 있음을 확인하였다.
3. 임계체적의 평균값인 요소응력과 요소변형률값들을 위험단면 모델에 입력값으로 활용하여 프레팅 피로시험에서 관찰된 접촉폭 크기효과를 설명하였다.
4. 본 논문에서 확립된 수치해석적 접근방법은 보다 복잡한 형상의 구조 부재간 프레팅 피로의 수명평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구결과물은 2007 학년도 경남대학교 교내 학술연구장려금지원에 의한 것임.

참고문헌

1. Magaziner, R., Jin, O. and Mall, S., "Slip regime explanation of observed size effects in fretting,"

- Wear, Vol. 257, Issues 1-2, pp. 190-197, 2004.
2. Giannakopoulos, A. E., Lindley, T. C. and Suresh, S., "Aspects of equivalence between contact mechanics and fracture mechanics: theoretical connections and a life-prediction methodology for fretting-fatigue," *Acta Mater.*, Vol. 46, No. 9, pp. 2955-2968, 1998.
 3. Yang, B. and Mall, S., "On crack initiation mechanisms in fretting fatigue," *J. Appl. Mech.*, Vol. 68, Issue 1, pp. 76-80, 2001.
 4. Nowell, D. and Dini, D., "Stress gradient effects in fretting fatigue," *Tribology Int.*, Vol. 36, Issue 2, pp. 71-78, 2003.
 5. Hertz, H., "On the contact of elastic solids," *J. reine und angewandte mathematik*, Vol. 92, pp. 156-171, 1882.
 6. Mindlin, R. D., "Compliance of elastic bodies in contact," *J. Appl. Mech.*, Vol. 16, pp. 259-268, 1949.
 7. Nowell, D. and Hills, D. A., "Mechanics of fretting fatigue test," *Int. J. Mech. Sol.*, Vol. 29, No. 5, pp. 355-365, 1987.
 8. Socie, D., "Multiaxial fatigue damage models," *J. Eng. Mater. Technol.*, Vol. 109, No. 4, pp. 293-298, 1987.
 9. Smith, K. N., Watson, P. and Topper, T. H., "A stress strain function for the fatigue of metals," *J. Mater.*, Vol. 15, pp. 767-778, 1970.
 10. Szolwinski, M. P. and Farris, T. N., "Mechanics of fretting fatigue crack formation," *Wear*, Vol. 198, Issues 1-2, pp. 93-107, 1996.
 11. Lykins, C. D., Mall, S. and Jain, V., "An evaluation of parameters for predicting fretting fatigue crack initiation," *Int. J. Fatigue*, Vol. 22, Issue 8, pp. 703-716, 2000.
 12. Araújo, J. A. and Nowell, D., "The effect of rapidly varying contact stress fields on fretting fatigue," *Int. J. Fatigue*, Vol. 24, Issue 7, pp. 763-775, 2002.
 13. Nowell, D., Dini, D. and Hills, D. A., "Recent developments in the understanding of fretting fatigue," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 73, Issue 2, pp. 207-222, 2006.
 14. Fatemi, A. and Socie, D., "A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out of phase loading," *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, Vol. 11, Issue 3, pp. 149-165, 1988.
 15. Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R. and Fuchs, H. O., "Metal Fatigue in Engineering, 2nded," John wiley & Sons, pp. 328-332, 2001.
 16. Kwak, D. H., Roh, H. R., Kim, J. K. and Cho, S. B., "A Study on Fretting Fatigue Life Prediction for Cr-Mo Steel(SCM420)," *Journal of KSPE*, Vol. 24, No. 4, pp. 123-130, 2007.
 17. Swanson Analysis Systems, Inc., "ANSYS User's and Theory manual Version 10," 2006.