

이종재료에서 프레팅 피로 균열의 생성에 관한 연구

고준빈*, 고충현⁺, 이기석⁺⁺
(논문접수일 2004. 12. 31, 심사완료일 2005. 3. 22)

A Study on the Nucleation of Fretting Fatigue Cracks at the Heterogeneity Material

Jun Bin Goh*, Chung Hyun Goh⁺, Kee Seok Lee⁺⁺

Abstract

Since fretting fatigue damage accumulation occurs over relatively small volumes, the role of the microstructure is quite significant in fretting fatigue analysis. The heterogeneity of discrete grains and their crystallographic orientation can be accounted for using continuum crystallographic cyclic plasticity models. Such a constitutive law used in parametric studies of contact conditions may ultimately result in more thorough understanding of realistic fretting fatigue processes. The primary focus of this study is to explore the influence of microstructure as well as the magnitude of the normal force and tangential force amplitude during the fretting fatigue process. Fretting maps representing cyclic plastic strain behaviors are also developed to shed light on the cyclic deformation mechanisms.

Key Words : Fretting(프레팅), Crystal plasticity(결정소성), Crack nucleation(균열생성), Shakedown map(요동도해), Elastic shakedown(탄성요동), Cyclic plasticity(주기소성), Ratchetting(래치팅)

1. 서 론

프레팅 피로 손상 누적은 결정질(crystallographic) 입자 깊이 내에서도 일부 발생한다. 따라서 이러한 영향을 해석하기 위해서는 주기적인 변형으로 의한 결정질 방위의 역

할, 표면하부 소성의 이종특성(heterogeneous nature), 그리고 주기적인 표면 접촉의 관련성 등을 고려해야 한다. 이것은 탄성-소성변형(elastic-plastic deformation)이 성장하는 접촉 부근의 형상모델의 위치에서 유한요소법과 결정소성 재료 모델(crystal plasticity material model)을 적용

* 한밭대학교 기계설계공학과 (kjb1002@hanbat.ac.kr)
주소: 대전시 유성구 덕명동 산16-1

+ 한밭대 기계설계공학과

++ 충남대학교 기계공학과

한 프래팅 피로 시뮬레이션으로 수행될 수 있다. 결정 소성 모델에서 각각의 입자들은 요소들을 그룹화함으로써 정의될 수 있다.

2-D평면 3중 슬립 가정을 토대로 한 결정소성 모델은 Ti-6Al-4V의 거시적 주기 응력-변형(cyclic stress-strain) 거동을 정확하게 보여 준다.

따라서 본 논문에서는 다결정재료의 전체 거동을 표현하기 위해 Ti-6Al-4V를 사용하였다. 수직 접촉력과 접선력의 크기에 대한 영향은 고전적인 동질 소성이론 결과와 ABAQUS⁽¹⁾으로 코드화된 결정소성 이론 결과를 비교하여 수행하였고, 요동 도해(shakedown map)는 주기 소성 변형 메커니즘을 나타내는 파라미터의 상호 작용을 보이기 위해 이용되었다. 그리고 결정 소성 시뮬레이션과 초기에 비선형 운동 경화⁽²⁾가 있는 등방성 J₂ 소성 이론의 시뮬레이션을 비교하기 위하여 탄성-소성 반구 형태의 모델링과 강체 원형 실린더 접촉으로 가정하였다. 또한 탄성 요동, 래칭팅, 역주기 소성 등 표면 하부의 영역 분포는 3사이클 하중을 가한후 비교 고찰하였다.

2. 재료 구성 모델과 유한요소 모델링

2.1 결정소성 이론

결정소성 운동학의 기본 개념은 결정격자(crystal lattice)가 전위운동에 의한 소성 흐름을 통해 탄성변형이 발생한다는 것이다. 결정소성 알고리즘은 Bennett⁽³⁾와 McDowell⁽⁴⁾에 의해 잘 표현되어져 있다.

결정소성 이론은 Fig. 1에 보듯이 총 변형변화율(F)의 배수분해(multiplicative decomposition)에서 비롯되며 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\underline{F} = \underline{F}^e \cdot \underline{F}^p \quad (1)$$

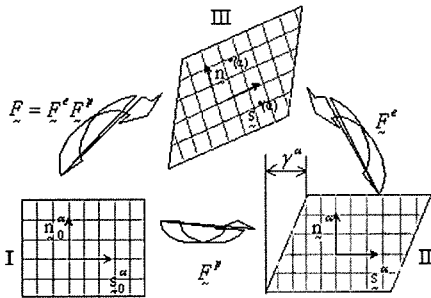


Fig. 1 Kinematics of elastic-plastic deformation of crystalline solid deforming by crystallographic slip

여기에서 F^e 는 격자의 탄성 인장과 회전을 나타내는 탄성 변형변화율을 의미하고, F^p 는 변형 전의 형상에서 고정된 격자에 대해 활성슬립면을 따라 발생하는 전위운동의 총체적 효과를 나타내는 소성 변형 변화율을 나타낸다.

α 번째 슬립시스템이 $\tau^\alpha = \sigma : (s^\alpha \otimes n^\alpha)$ 의 분해 전단응력을 가진 α 번째 슬립시스템의 소성 전단율은 점소성 가중 유동 법칙을 적용함으로써 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\gamma}^\alpha = \dot{\gamma}_0 \left| \frac{\tau^\alpha - x^\alpha}{G} \right|^m \text{sgn}(\tau^\alpha - x^\alpha) \quad (2)$$

여기서 g 는 등방성 항력 강도를 나타내며, m 은 유동 멱지수(flow exponent), x^α 는 α 번째 슬립시스템에 대한 역응력(backstress), $\dot{\gamma}_0$ 은 기준 전단변형율을 나타낸다. 역응력은 암스트롱-프레드릭 형태의 순수 비선형 운동경화 법칙(nonlinear kinematic hardening rule)에 따라 다음과 같이 전개된다.

$$\dot{x}^\alpha = h\dot{\gamma}^\alpha - h_b x^\alpha |\dot{\gamma}^\alpha| \quad (3)$$

여기서 h 와 h_b 는 직접경화와 동적 회복계수를 각각 나타낸다.

2.2 평면 3중 슬립 모델

2중상인 Ti-6Al-4V의 합금은 60%의 1차 α 상과 40%의 2차 ($\alpha+\beta$)라멜라 상으로 이루어져 있고, 영계수(E)=118 GPa, 포아송비(ν)=0.349이다^(5,6). 2중 마이크로 구조인 Ti-6Al-4V 합금에서, HCP α 상에서의 슬립이 대표적이며, 그리고 사방정계면 슬립은(prismatic slip)상온에서 가장 활동적인 변형 모드이다⁽⁷⁾. 평면 3중 슬립 근사화(planar triple slip approximation)한 결정소성 모델은 Ti-6Al-4V의 마이크로 크기의 주기 응력-변위를 정확하게 표현할 수 있음을 보여주었다^(8,9). 이것은 거의 탄성-완전 소성 결과를 보인다. 평면 3중 슬립모델에 적용된 상수값들은 기준 전단변형율($\dot{\gamma}_0$)=0.001, 유동멱지수(m)=63, 직접 경화계수(h)=500MPa, 동적회복계수(h_b)=100이다.

2.3 유한요소 모델링

Fig. 2에서 보듯이 유한요소 모델은 평면 변위 조건을 가정한 탄성-소성 반구 위에 반경이 10mm인 강체 원형 실린더 모델로 구성되어 있다. 강체 원형 실린더는 접촉 알고리

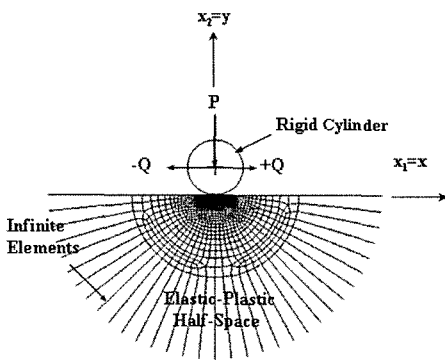


Fig. 2 Finite element meshes for the ideal fretting

증에 따라 주표면(master surface)으로 정의하고⁽¹⁾, 탄성-소성 반구는 종속표면(slave surface)로 정의한다.

단이 길이당 수직력 P를 우선 작용시킨 다음 단위 길이당 접선력 Q는 +Q에서 -Q 사이를 3번의 사이클을 가한다. 이러한 하중 조건에서, 가장자리는 접촉 부위의 왼쪽 끝을 말한다.

본 논문에서는 4개의 노드가 있는 2중 선형 사변형 2-D 솔리드 평면 변위 요소인 ABAQUS CPE4⁽¹⁾를 사용하였고, 미소 슬라이딩이 있는 접촉 쌍 요소는 두 표면사이의 접촉을 기술하는데 사용하였다. 또한 시뮬레이션 입자를 50 μm × 50 μm 로 고려하였다(즉 10 요소 × 10 요소).

2.4 소성 변위 거동

주기적 소성 변형 거동은 단일축인 경우, Fig. 3에서 보듯이 일반적으로 탄성 요동(elastic shakedown), 주기적 소성(cyclic plasticity), 소성 래칭팅(plastic ratchetting)등 세가지 요소를 나누어진다. Fig. 3에서 $d\epsilon^p$ 와 dW^p 는 소성 변위 증분과 소성 변위 에너지 밀도를 나타낸다. 모든 영역은 유한요소 모델에 의해 결정될 수 있다. 상기에 기술한 유한요소 모델은 Ambrico와 Begley⁽⁹⁻¹¹⁾의 방법으로 정의될 수 있다. 파라미터들은 3사이클 후에 결정된다. 주기당 래칭팅 소성 변위 증분은 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\left(\Delta\epsilon_{ratch}^p\right) = \left(\epsilon_{ij}^p\right)_{\text{End of the cycle}} - \left(\epsilon_{ij}^p\right)_{\text{Beginning of the cycle}} \quad (4)$$

그리고 역 주기 소성 변위 범위는 식 (5)과 같다.

$$\left(\Delta\epsilon_{cyc}^p\right) = \left(\Delta\epsilon_{ij}^p\right)_{\text{max Over the cycle}} - \left(\Delta\epsilon_{ij}^p\right)_{ratch} \quad (5)$$

효과적인 역 주기 소성 변위 범위와 래칭팅 소성 변위 증분은 J_2 흐름 이론에서 사용된 동일한 방법으로 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\Delta\epsilon_{cyc,eff}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\Delta\epsilon_{ij}^p\right)_{cyc} \left(\Delta\epsilon_{ij}^p\right)_{cyc}} \quad (6)$$

$$\Delta\epsilon_{ratch,eff}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\Delta\epsilon_{ij}^p\right)_{ratch} \left(\Delta\epsilon_{ij}^p\right)_{ratch}} \quad (7)$$

탄성 요동은 다음 조건을 만족하는 경우에만 발생한다고 가정한다.

$$\epsilon_{ij}^p \neq 0, \left(\Delta\epsilon_{cyc,eff}^p \text{ and } \Delta\epsilon_{ratch,eff}^p\right) \leq C_{cut-off} \quad (8)$$

여기서 $C_{cut-off}$ 는 주기 소성과 래칭팅의 무한급수를 정의하기 위하여 사용된 차단 값을 의미한다.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 수직 접촉력에 의한 영향

수직 접촉 압력이 프레팅 피로 수명에 큰 영향을 미치는 인자라는 것은 분명한 사실이다. 그러나 수직력이 프레팅 피로 수명에 얼마나 큰 효과를 미치는지 정확히 알 수 없다. 단순히 수직력만을 증가시킨 실험^(11,12) 결과를 보면, 프레팅 피로 수명이 수직력에 상응하는 만큼 감소하지 않았다. 따라서 본 논문에서는 수직력에 대한 효과를 조사하기 위하여 탄성 접촉에서의 Hertzian 이론으로 부터 임계 항복하중 P_c ,

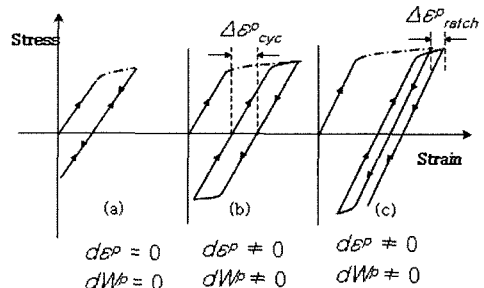


Fig 3. Steady state responses of plastic strain behavior during the cycle

- (a) elastic shakedown,
- (b) reversed cyclic plasticity(or plastic shakedown)
- (c) plastic ratchetting

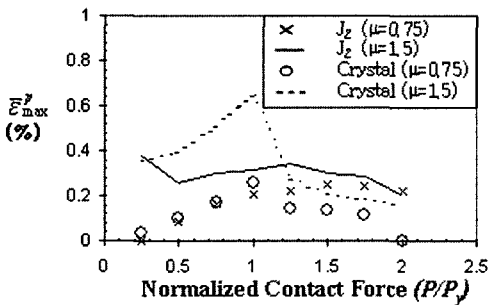
=470 N/mm와 마찰 계수 $\mu=0.75$ 와 $\mu=1.5$ 인 두 소성 모델의 유한요소 모델을 적용하였다⁽¹³⁾. Fig. 4는 다른 두 접선력 $Q/P_y = 0.2$ 와 $Q/P_y=0.3$ 에 대하여 하중을 3사이클 가한 후에 수직력의 증가에 따른 누적 효과 소성 변위의 최고치를 나타낸 것이다. 표면에서 누적 소성 변위의 최고치는 $P/P_y = 0.75$ 부터 1사이에서 최고치를 보이다가 수직력이 증가함으로써 떨어지는 경향을 보였다(Fig. 4 (a)와 4 (c)). 표면 아래 10 μ m의 표면 하부에서는 두 소성 모델에서 수직력이 증가함에 따라 상당히 증가함을 보였다(Fig. 4 (b)와 4 (d)). 결정 소성 시뮬레이션에서 특히 수직력이 증가함에 따라 표면 하부영역에서의 $\bar{\epsilon}_{max}^p$ 최고치는 표면에서 보다 훨씬 높다. 따라서 수직력은 표면보다는 표면 하부에 큰 손상을 준다는 것을 보여주었다. 이것은 표면 하부 영역에서 소성 변형의 증가로 기인된 것으로 사료된다. J_2 의 소성 결과도 결정 소성에서 예측된 결과와 동일한 경향을 보였다. 또한 다른 마찰계수를 적용한 결과도 유사하였다.

접촉력이 증가함에 따라 전체 접촉 면적에서 접촉 영역의 증가를 야기한다(Fig. 5). 접촉 면적은 접착력의 증가로 접촉 가장자리까지 확대된다. 최고 전단력은 프레팅이 발생하는 접촉 가장자리 쪽에서 발생한다(Fig. 5 (b)).

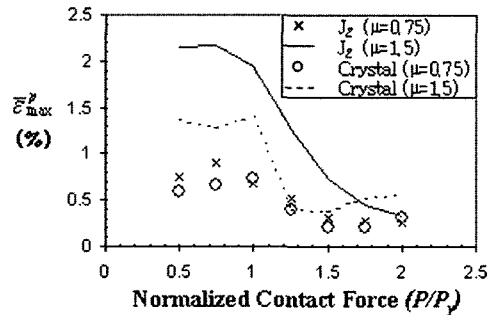
3.2 접선력에 의한 영향

프레팅으로 인한 프레팅 강도의 감소는 접촉 표면위의 높은 접선력이 존재하면 더 크게 발생한다⁽¹⁴⁾. Fig. 6에서 보듯이, 접선력이 증가함에 따라 최대 누적 소성변위는 표면뿐만 아니라 표면 하부에서도 증가한다. 결정소성이 적용되었을 때보다 J_2 소성을 적용하였을 때 표면 소성이 훨씬 더 증가함을 보였다. Fig. 6과 7은 접선력이 증가할수록 소성 래칭팅 영역이 두 소성 모델에서 모두 표면 하부 깊숙이 확대되었음을 보여준다.

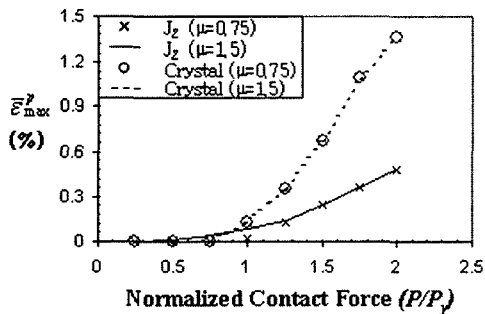
역주기 소성과 소성 래칭팅의 두 모델은 표면 하부영역에서는 서로 다른 소성 변위 거동을 예측하였는데, 역 주기 소



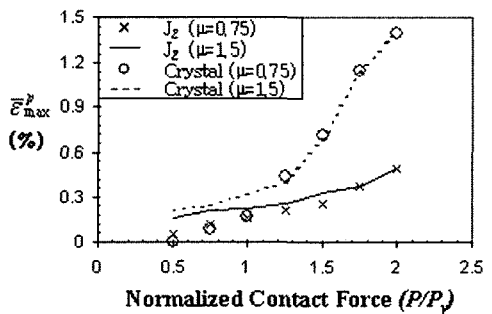
(a) $Q/P_y=0.2$ (Surface plasticity)



(c) $Q/P_y=0.3$ (Surface plasticity)



(b) $Q/P_y=0.2$ (Subsurface plasticity)



(d) $Q/P_y=0.3$ (Subsurface plasticity)

Fig. 4 Comparison of peak values of the cumulative effective plastic strain on the surface and in the subsurface field at 10 μ m below the surface due to the increase of normal contact force for tangential force amplitudes

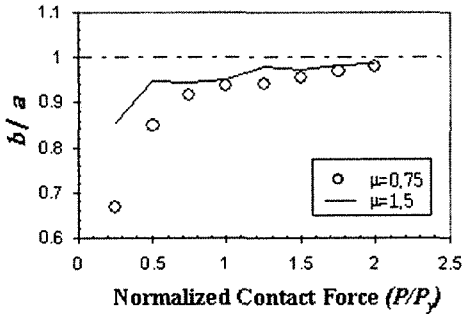


Fig. 5 (a) The variation of the ratio of sticking area b vs. contact area a due to the increase of normal contact force for tangential force amplitude of $Q/P_y=0.2$

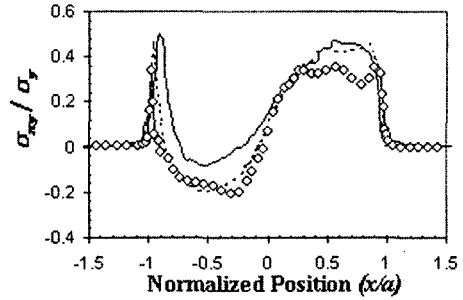
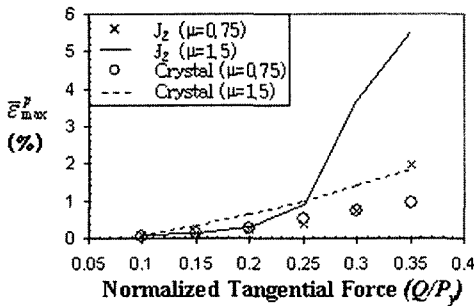
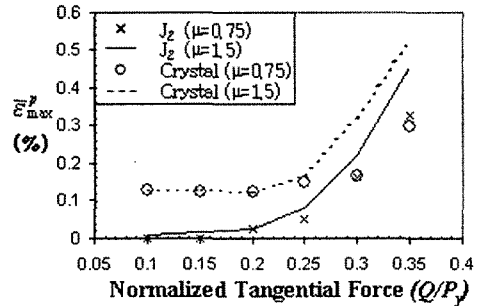


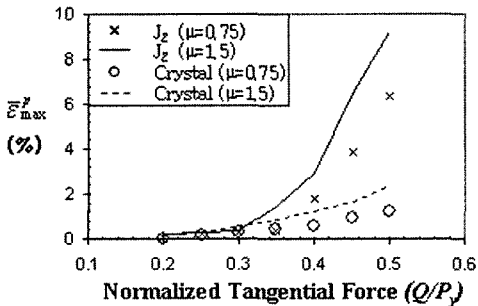
Fig. 5 (b) Shear stress distributions along the interface for $\mu=1.5$ at the end of third loading cycle with indenter in place based on crystal plasticity simulations ($\sigma_y=765.3$ MPa)



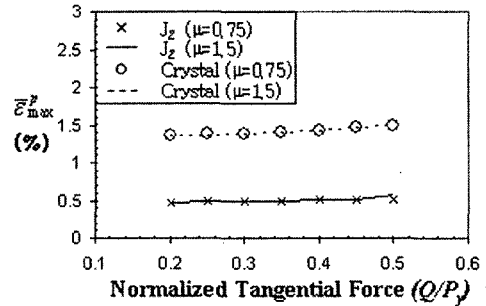
(a) $P/P_y=1.0$ (Surface plasticity)



(b) $P/P_y=1.0$ (Subsurface plasticity)



(c) $P/P_y=2.0$ (Surface plasticity)

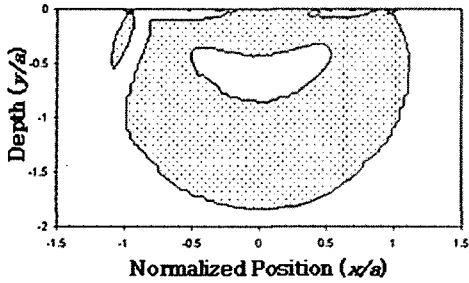


(d) $P/P_y=1.0$, (Subsurface plasticity)

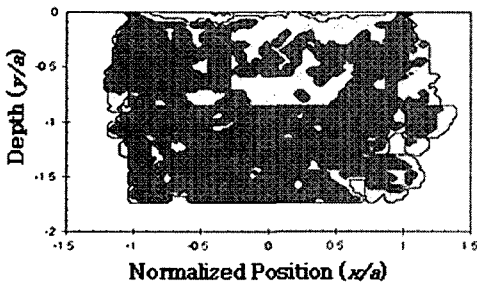
Fig. 6 Comparison of peak values of the cumulative effective plastic strain on the surface and in the subsurface field at $10\mu\text{m}$ below the surface due to the increase of tangential force

성은 J_2 소성 시뮬레이션 메카니즘이 지배적인 반면, 소성 래칭팅은 결정소성이 지배적인 결과를 얻었다(Fig. 7). 따라서 여기서 사용된 결정소성 모델은 점소성 흐름 규칙에 바탕

을 둔 모델이므로 점성 래칭팅 변위 누적을 예측할 수 있다는 것을 확인하였다. 이것은 평균 응력이 작용하는 동안 래칭팅을 예측하는데 중요한 역할을 한다.



(a) J_2 plasticity



(b) Crystal plasticity

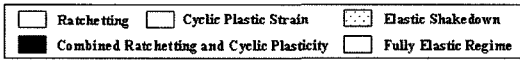
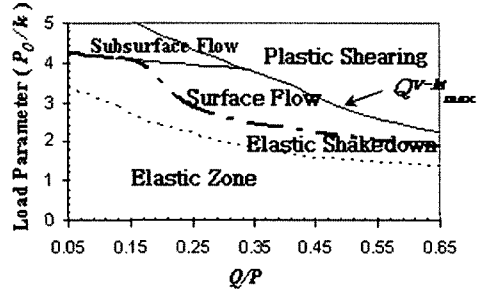


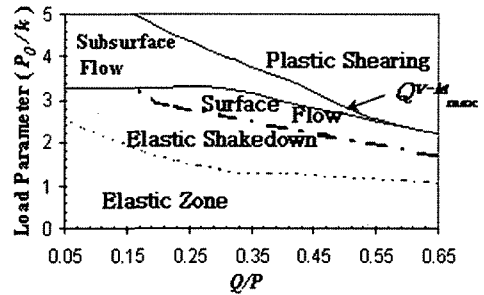
Fig. 7 Plastic strain maps after the completion of three cycles with indenter in place based on ($a = 340 \mu\text{m}$, $\mu = 1.5$, $P/P_y = 2.0$, $Q/P_y = 0.45$)

3.3 탄성요동의 도해 고찰

Fig. 8과 같은 탄성요동 도해는 P_0/k 와 Q/P 의 비로 특징지어지는 접촉하중 사이의 관계를 나타낸다. Fig. 8에서 보듯이 결정소성의 경우, 표면 흐름부터 표면 하부 흐름까지의 전이 한계는 표면하부 흐름 영역이 J_2 소성이론에 의해 예측된 것보다 훨씬 작으므로 전이 한계가 상당히 낮다. 결정소성의 점소성 동질 모델인 소성 전단 변위 래칭팅은 요동 한계를 감소시키는데 중요한 역할을 하며, 또한 형상화 메카니즘과 초기에 국부적인 전단 밴드를 따라 균열을 성장시키는 데도 지배적인 역할을 한다. 소성 래칭팅이 표면의 갈라짐 (delamination), 리플링(rippling) 및 흠(plowing)등을 야기시키는 것을 실험적으로 관측되었다⁽⁸⁾. 따라서 초기 단계에 표면에서 성장하는 프레팅 피로 균열로 표면에서 시작하는 국부적인 소성 전단 변위의 방위각과 깊이를 예측할 수 있



(a) J_2 plasticity



(b) Crystal plasticity

----- : Elastic limit - · - · - : Elastic shakedown limit

Fig. 8 Shakedown maps(P_0 : maximum normal force $\mu = 1.5$, $k = 441.8 \text{ MPa}$, $C_{cut-off} = 0.005\epsilon_y$)

다. 마찰계수는 특히 낮은 수직력에서 표면 소성에 큰 영향을 주지만, 표면 하부에서는 영향이 없다. 또한 결정소성은 J_2 소성이론을 적용한 결과보다 마찰계수에 대하여 덜 민감함을 보였다.

4. 결론

프레팅 피로 균열 생성에 있어서 수직 접촉력과 접선력의 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) $Q/P_y = 0.2$, $\mu = 0.75$, $P_y = 470 \text{ N/mm}$ 인 표면의 결정소성 해석에서 $P/P_y = 1$ 일때 $\bar{\epsilon}_{max}^p = 0.00260$, $P/P_y = 1.5$ 일때 $\bar{\epsilon}_{max}^p = 0.00135$, 표면하부의 결정 소성해석에서는 $P/P_y = 1$ 일때 $\bar{\epsilon}_{max}^p = 0.00123$, $P/P_y = 1.5$ 일때 $\bar{\epsilon}_{max}^p = 0.00667$

의 두 결과값에서 나타나듯이 수직력이 낮은 하중 영역에서는 표면 소성에 큰 영향을 주지만, 수직력이 증가함에 따라 그 영향이 적어짐을 고찰하였다. 그러나 수직력의 증가는 표면 하부 소성에 상당한 영향을 주었으며, 특히 결정소성 이론에서는 더욱 큰 영향을 주었다.

(2) 접선력은 주로 표면 소성에 영향을 주었다. 탄성 요동 도해는 하중 조건이 변하는 경우 소성 변위 누적에 어떠한 영향을 미치는지 예측하기 위해 고안되었다. 이러한 도해는 프레팅 메커니즘을 예측하고 보다 물리적으로 실제적인 균열 생성 모델을 개발하는데 가이드 역할을 할 수 있으리라 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) ABAQUS, version 5.8, 1998, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.
- (2) Marin, E. B., and McDowell, D. L., 1997, "A Semi-Implicit Integration Scheme for Rate- Dependent and Rate-Independent Plasticity," *Computers and Structures*, Vol. 63 (3), pp. 579~600.
- (3) Bennett, V., 1999, *A Study of Microscale Phenomena in Small Crack Propagation under Multiaxial Fatigue*, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
- (4) McGinty, R. D., and McDowell, D. L., 1999, "Multi-scale Polycrystal Plasticity," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 121, pp. 203~209.
- (5) Eylon, D., 1998, *Summary of the Available Information on the Processing of the Ti-6Al-4V HCF/LCF Program Plates*, University of Dayton, Dayton, OH.
- (6) Lin, B. S., and Kim, H. C., 1997, "The Effect of Microstructure and Temperature on Fatigue Crack Propagation in Ti-3Al-2.5V Alloy," *KSMTE*, Vol. 6, No. 2, pp. 58~66.
- (7) Russo, R. A., and Seagle, S. R., 1994, "Deformation and Recrystallization of Titanium and Its Alloys," *ASM International*, Course 27, Lesson, Test 5.
- (8) Goh, C. H., Wallace, J. M., Neu, R. W., and McDowell, D. L., 2001, "Polycrystal Plasticity Simulations of Fretting Fatigue," *International Journal of Fatigue*, Vol. S23, pp. 423~435.
- (9) Goh, C. H., Neu, R. W., and McDowell, D. L., 2002, "Crystallographic plasticity in Fretting," *International Journal of Plasticity*, submitted for review.
- (10) Ambrico, J. M., and Begley, M. R., 2000, "Plasticity in Fretting Contact," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 48(11), pp. 2391~2417.
- (11) Nakazawa, K., Sumita, M., and Maruyama, N., 1992, "Effect of Contact Pressure on Fretting Fatigue of High Strength Steel and Titanium Alloy," *Standardization of Fretting Fatigue Test Methods and Equipment. ASTM STP 1159*, M. H. Attia and R. B. Waterhouse, Eds., ASTM, West Conshohocken, PA, pp. 115~125.
- (12) Adibnazari, S., and Hoepfner, D. W., 1994, "The Role of Normal Pressure in Modelling Fretting Fatigue," *Fretting Fatigue, ESIS 18*, R. B. Waterhouse and T. C. Lindley, Eds., Mechanical Engineering Publications, London, pp. 125~133.
- (13) Hills, D. A., and Nowell, D., 1994, *Mechanics of Fretting Fatigue*, Kluwer Academic Publishers, pp. 113~168.
- (14) Endo, K., and Goto, H., 1976, "Initiation and Propagation of Fretting Fatigue Cracks," *Wear*, Vol. 38, pp. 311~324.