

결정 소성 시뮬레이션을 이용한 프레팅 접촉에서의 마이크로 구조 영향에 관한 연구

고준빈[#], 고충현^{*}, 이기석^{**}

The Study of Microstructure Influence at Fretting Contacts using Crystal Plasticity Simulation

Jun Bin Ko [#], Chung Hyun Goh ^{*} and Kee Seok Lee^{**}

ABSTRACT

The role of microstructure is quite significant in fretting of Ti-6Al-4V since its material properties depend strongly on crystallographic texture. In this study, we adopt crystal plasticity theory with a 2-D planar triple slip idealization to account for microstructure effects such as grain orientation distribution, grain geometry, as well as α colony size. Crystal plasticity simulations suggest strong implications of microstructure effects at fretting contacts.

Key Words : Crystal plasticity(결정소성), fretting fatigue(프레팅피로), Grain size and Shape(입자의 크기 및 형상), Microstructure(마이크로구조), Phase distribution(입상분포), Dual phase(2 중입상)

1. 서 론

일반적으로 고전적인 동질소성이론은 입자크기 이상의 단위에서 이종재료(heterogeneous materials)에 대한 기계적 성질을 모델링하는 것은 가능하지만, 마이크로 구조가 소성에 미치는 영향을 평가하는 것은 매우 어렵다. 예를 들어, 결정입자의 크기 및 형상의 영향, 입자의 상대적 방향 이탈성(misorientation), Ti-6Al-4V 에서 α 군의 크기에 따른 효과 및 입상 분포 등의 영향을 들 수 있다. 특히 Ti-6Al-4V 재료의 특성은 결정 구조에 상당히 밀접함으로 프레팅이 존재하는 경우에 마이크로 구조가 미치는 영향은 매우 크다. 따라서 프레팅 피로

상태에서 입자와 결정 방향성의 영향을 고려해야 한다. 또한 프레팅 접촉과 관련된 소성 변형은 마이크로 구조 범위내의 표면 하부에서 발생하기 때문에 이종 결정 소성 모델 적용을 위해 프레팅 과정과 메커니즘을 보다 더 잘 이해하는 것이 필요하다.

프레팅 피로 해석에 대한 기존 연구 결과들로부터 마이크로 구조가 미치는 영향이 매우 중요하다는 사실을 알 수 있었다.^{2,4} Chan⁵은 Ti-4Al-4V 의 경우 2 중 입상면에서의 슬립은 α 상이나 ($\alpha+\beta$) 상의 계면에서 보다 쉽게 발생 한다고 발표하였다. 또한 2 중 입상 구조에서의 소성 흐름(plastic flow)은 입자 및 입상 경계면에 의해 크게 영향을 받는

¹ 접수일: 2004 년 12 월 31 일; 게재승인일: 2005 년 5 월 13 일

[#] 교신저자: 한밭대학교 기계설계공학과

E-mail kjb1002@hanbat.ac.kr, Tel. (042) 821-1833

^{*} 한밭대학교 기계설계공학과

^{**} 충남대학교 기계공학과

다는 사실도 알게 되었다.^{6,7} 게다가, α 입자군의 크기 및 분포가 2 중 입상(dual phase) 구조에서 마이크로 소성(microplasticity)을 결정하는데 핵심적인 역할을 한다는 사실도 밝혀졌다.^{8,9}

본 논문에서는 프레팅 접촉에서 마이크로 구조가 미치는 영향을 분석하기 위해 ABAQUS UAMT(USER MATerial) 서브루틴을 이용한 유한요소 해석 시뮬레이션을 사용하였다. 또한 시뮬레이션에서 마이크로 구조를 보다 현실적으로 표현하기 위해 다양한 크기와 형태의 결정입자들이 몇 가지 매개변수와 결합된다. 특히 경질의 ($\alpha+\beta$) 층상구조 입자와 연질의 α 입자, 그리고 다양한 크기의 α 군으로 구성된 Ti-6Al-4V 의 이중 마이크로 구조를 보다 현실적으로 표현하기 위해 결정 소성론이 적용되었다. 표면 하부의 소성 변위와 피로 인자에 의한 마이크로 구조의 영향을 조사하기 위하여 2 가지 형태의 입자와 크기가 다른 입자에 대한 마이크로 구조를 유한 요소 모델링으로 수행하였다. 이외에도 경질의 경우와 연질의 경우의 슬립 시스템에 각각 다른 항력강도(drag strength) 값을 적용시킴으로써 α 와 ($\alpha+\beta$) 구조 사이의 입상분포 및 α 입자군의 크기에 따른 영향을 조사하였다.

본 논문에서는 Ti-6Al-4V 의 프레팅 피로 해석에서 마이크로 구조가 미치는 영향을 중점적으로 연구하였으며, 이를 위해 결정 소성 이론에 근거한 유한요소 해석 결과를 이용하였다.

2. 결정 소성 이론

2.1 결정 소성 이론의 기본 개념

결정소성 운동학의 기본 개념은 결정격자가 전위운동에 의한 소성흐름을 통해 탄성변형이 발생한다는 것이다. 결정소성 이론은 Fig. 1 에 나타난 총 변형변화율(\tilde{F})의 배수분해(multiplicative decomposition)에서 유도된다. Fig. 1에서 \tilde{F}^e 는 격자의 탄성 인장과 회전을 나타내는 탄성 변형변화율을 의미하고, \tilde{F}^p 는 변형 전의 형상(undeformed configuration)에서 고정된 격자에 대해 활성슬립면을 따라 발생하는 전위운동의 총체적효과를 나타내는 소성 변형 변화율을 의미한다.

α 번째 슬립시스템이 $\tau^\alpha = \sigma : (\frac{1}{2} \otimes n^\alpha)$ 의 분해 전단응력(resolved shear stress)을 가진 α 번째 슬립시스템의 소성 변형율(plastic strain rate)은 점소성 가중 유동법칙(viscoplastic power-law flow)을 적용함으로

써 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\gamma}^\alpha = \dot{\gamma}_0 \left| \frac{\tau^\alpha - x^\alpha}{g} \right|^m \text{sgn}(\tau^\alpha - x^\alpha) \quad (1)$$

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 변형율을 가리킨다.^{10,11} 역응력은 암스트롱-프레드릭 형태의 순수 비선형 운동경화 법칙(nonlinear kinematic hardening rule)에 따라 다음과 같이 전개된다.

$$\dot{x}^\alpha = h\dot{\gamma}^\alpha - h_d x^\alpha |\dot{\gamma}^\alpha| \quad (2)$$

여기서 h 와 h_d 는 직접경화(direct hardening) 와 동적 회복계수(dynamic recovery coefficients)를 각각 나타낸다.

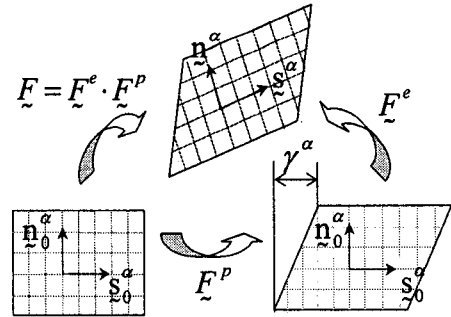


Fig. 1 Kinematics of elastic-plastic deformation of crystalline solid deforming by crystallographic slip

2.2 결정 점소성을 지닌 평면 3 상 슬립모델

Ti-6Al-4V 은 60% HCP α 상과 40% BCC β 상으로 구성된 2 중 마이크로 조직을 가진 2 상 합금이다. HCP α 상의 슬립은 $\{10\bar{1}0\}$ 사방정계면(prismatic plane), $\{10\bar{1}1\}$ 피라미드형상면(pyramidal plane), 그리고 (0001) 기저면(basal plane)에서 각각 발생한다. 2 상 합금에서는 HCP α 상의 슬립이 일반적이고, 사방정계 슬립은 상온에서 가장 활발하게 발생하는 변형모드이다.¹²

본 논문에서는 다결정 프레팅(polycrystalline fretting) 접촉을 표현하기 위해 평면 3 중 슬립 근

사화(planar triple slip approximation)와 함께 Ti 합금의 롤링 조직의 대표적 형태인 평면에 수직인 HCP α 상의 강결합 조직(strong texture)으로 가정하였다. 2-D 평면 3 중 슬립 가정을 토대로 한 결정소성 모델은 Ti-6Al-4V 의 거시적 주기 응력-변형(cyclic stress-strain) 거동을 정확하게 보여 준다.^{2,4} 평면 3 중 슬립모델에서 처음 두 개의 슬립시스템으로부터 각각 120° 떨어진 3 중 슬립시스템은 다결정 Ti-6Al-4V 의 준 탄성-완전 소성 주기적 거동을 표현하는데 필수적이다. 단순화된 2-D 특성에도 불구하고 본 연구에 사용된 평면 3 중 슬립모델은 입상의 불균질성과 다결정 방위의 분포(polycrystalline orientation distribution)의 특징을 적절하게 나타내 주었다.

2.3 2 중상 Ti-6Al-4V 의 모델링

본 논문에서는 2 중상 Ti-6Al-4V 을 표현하기 위해 구성법칙(constitutive laws)의 수정이 필요하다. 즉 평면 3 중 슬립모델에서 상대적으로 작은 항력강도 값은 연질 슬립시스템으로 가정하고, Ti-6Al-4V 에서 60%의 1 차 α 상과 40%의 2 차 ($\alpha + \beta$) 라멜라 상으로 구속된 슬립을 표현하기 위해 두 개의 투영된 경질 슬립시스템은 현저하게 큰 항력강도를 부여하고 임의의 방위에 구속되도록 하였다.⁹ 연질 슬립시스템을 나타내는 3 번째 슬립시스템에 사용된 항력강도 g 는 1 차 α 입자들의 항력강도와 같다고 가정하였다. 반면에 경질 슬립시스템을 나타내는 다른 두 슬립 시스템의 항력강도는 그 크기의 차수에 따라 증가된다.

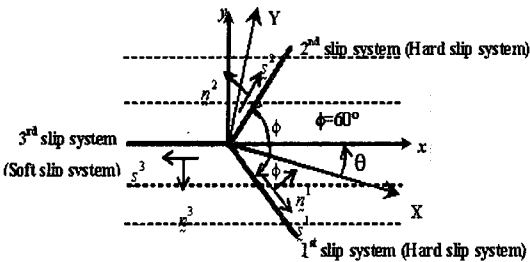


Fig. 2 Schematic of the 2-D planar triple slip model for representing the primary (α) and the secondary ($\alpha + \beta$) phases

따라서 Fig. 2 에서 보듯이 슬립은 연질 시스템을 따라 3 차 슬립시스템에 평행한 접선 방향으로 쉽게 발생하는 반면 다른 두 경질 슬립시스템에서는 쉽지 않으므로 구속된 것으로 가정하였다.

Ti-6Al-4V 의 이중 입상 모델의 경우, 아래 값들이 식(1)에서 항력강도로 사용된다. 1 차 α 입자의 경우 $g^1 = g^2 = g^3 = 404 \text{ MPa}$, 그리고 2 차 ($\alpha + \beta$) 라멜라 입자의 경우 $g^1 = g^2 = 10 \text{ GPa}$, $g^3 = 404 \text{ MPa}$ 이다. 그 외 다른 변수들의 상수 값들은 다음과 같다. 기준 전단 변형율($\dot{\gamma}_0$)=0.001, 유동역지수(m)=63, 직접 경화계수(h)=500 MPa, 동적회복계수(h_0)=100, 영계수(E)=118 GPa, 포아송비(ν)=0.349 등이다.³

3. 유한요소 모델

본 논문에서는 두 유형의 유한요소 모델로서 이상적 프레팅 모델(ideal fretting model)과 요소 프레팅모델(component fretting model)이 사용된다. Fig. 3(a)에서 보듯이 이상적 모델을 위한 유한요소 모델은 탄-소성 반구 위에 반경 10mm 의 강체 원형 실린더로 구성되어 있다. 피로 시편과 프레팅 패드의 대칭면을 나타낸 요소 프레팅 모델은 Fig. 3(b)와 같다. 12.7mm 폭에 5.0mm 두께의 피로 시편은 주 표면(master surface)으로 고려하고, 50mm 의 곡률 반경을 이루는 프레팅 패드는 시편과 동일한 탄성 계수를 가지며 종속표면(slave surface)으로 고려하였다.³ 접선력 Q 는 이상적 프레팅 모델에서는 독립 변수인 반면, 요소 프레팅 모델에서는 시편에 가해지는 피로하중(fatigue load)과 관련된 종속변수이다. Fig. 3 에서 $P(=W/L)$ 와 Q 는 각각 단위길이당 수직 및 접선력이다. 결정 소성모델에서 정의하는 각각의 입자들은 요소들을 그룹화함으로써 표현된다. 기준 좌표계의 X 방향에 대해 각 입자 방위각의 2 등분축이 이루는 각도(θ)는 ABAQUS (1998) UMAT 서브루틴에서 각각 지정된다. 이 각도(θ)는 완전 무작위로 이루어지거나 특정 표면 조직을 나타내기 위해 미리 선택된 방위각을 선정할 수 있다. 본 연구에서는 각 입자들을 표현하는데 두 가지 유형의 유한요소모델이 사용되었다.

첫 번째 모델에서는 2 중 마이크로 조직에서 ($\alpha + \beta$) 라멜라 입자와 α 입자 사이에 차이가 없도록 구성되었다. 따라서, 각 입자들의

기계적 성질은 평균 개념에서 $(\alpha + \beta)$ 라멜라 입자와 α 입자의 표면들을 대표하는 것으로 간주된다. 다른 모델에서는 α 와 β 상이 서로 다른 "2 중상" 이라 불리는 입자들로 구성되었다. 이러한 입자들의 입상 대비(phase contrast)는 α 와 $(\alpha + \beta)$ 상에 대해 서로 다른 등방위 항력강도(isotropic drag strength) 값을 할당함으로써 얻어진다. 또한 프레팅 과정 중 발생하는 마이크로 조직의 영향을 조사하기 위해 다른 형상의 입자들을 모델화 하였다.

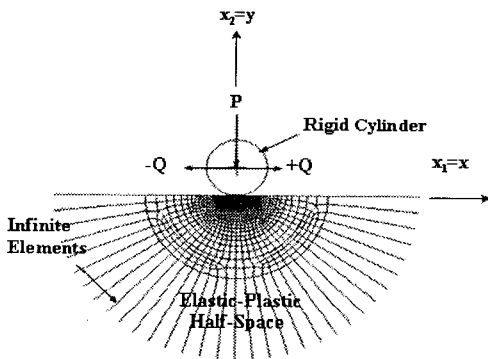


Fig. 3(a) Finite element meshes for the ideal fretting

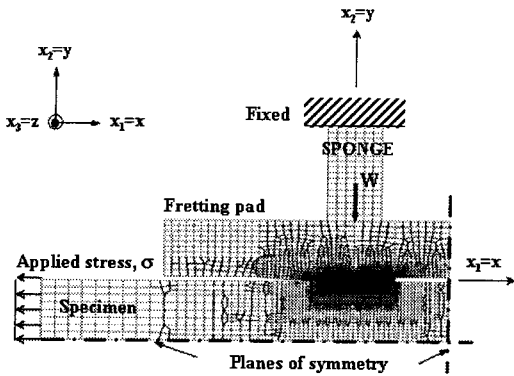


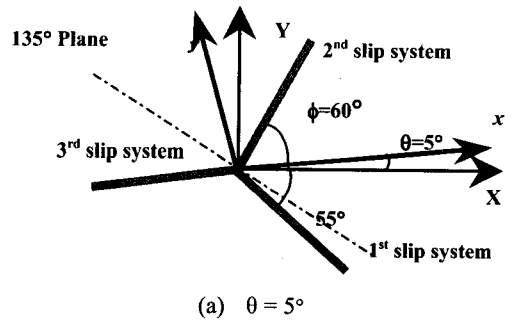
Fig. 3(b) Finite element meshes for the component fretting model

4. 유한요소 해석 및 결과 고찰

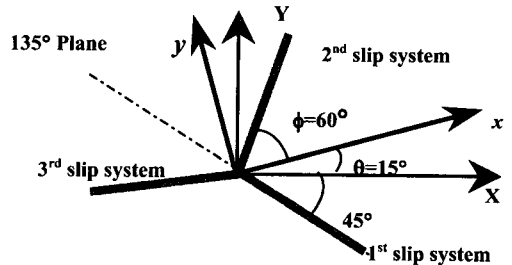
4.1 주기적 변형에서 결정방위와 조직 구조의 영향

입자 방위분포나 결정조직 구조는 피로 강도에

영향을 주는 가장 중요한 요소들이다. 금속에서 입자의 방향성은 상당히 큰 변형까지도 소성 이방성에 심각한 영향을 미칠 수 있다.¹³⁻¹⁴ 다결정형 재료에서는 소성 이방성의 원인을 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫째 각 결정 방위가 우선 방위(preferred orientation)로 재분포되는 과정에서 생성된 결정조직 구조, 둘째 크게 변형된 비등축 형태(non-equiaxed shape)로 인해 발생하는 형태학적 조직(morphological texture)이다. 대부분 재료에서 소성 이방성은 주로 결정학적 조직으로 인해 생성된다.¹³ 따라서 지금까지 수행해 온 많은 연구들은 결정학적 조직이 기계적 거동에 미치는 영향을 이해하기 위해 수행되어 왔다. 입자 방위각의 영향을 조사하기 위해 먼저 여섯 종류의 방위각($\theta = 5^\circ$ 부터 $\theta = 55^\circ$ 까지 10° 씩 증가)들이 단일결정으로 이루어진 이상적 프레팅 모델의 모든 요소들에 지정된다($\mu = 1.5$, $P/P_c = 1.0$, $Q/P_c = 0.3$, $a = 214\mu\text{m}$). 여기서 P_c 는 2 차원 접촉에서 표면 하부의 최초 항복을 일으킬 수 있는 단위 길이당 최대 임계하중(critical peak load)이다. Fig. 4는 다양한 입자 방위각에 대한 2-D 평면 3 중 슬립모델 구조를 나타낸다. 여기서 x, y 는 국부 좌표계이고, X, Y 는 전체 좌표계를 각각 나타낸다.



(a) $\theta = 5^\circ$



(b) $\theta = 15^\circ$

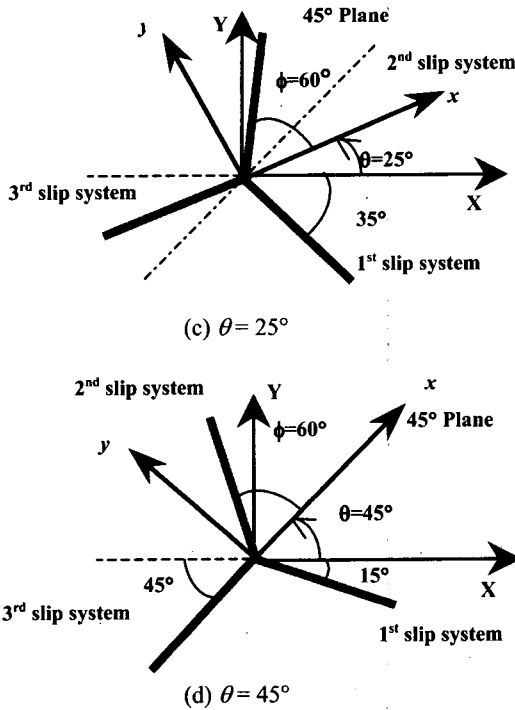


Fig. 4 Schematics of the 2-D planar triple slip model for various grain orientation angles

본 논문에서는 Ti-6Al-4V 재료 특성을 위해 이상적 프레팅 모델의 경우 $P_y=470N/m$, 요소 프레팅 모델의 경우 $P_y=4680N/m$ 이 사용되었다. Fig. 5는 3 사이클 종료후 이상적 프레팅 모델의 표면 하부에 나타난 소성 변형 거동이다. 주기적 소성 변형 거동은 일반적으로 탄성 요동, 주기적 소성, 소성 래칭팅(plastic ratchetting)등 세가지 요소를 나누어진다. 요동은 주기적 소성의 중지(cessation) 또는 역 주기적 소성의 포화 상태(saturation)가 되는 기준이하의 응력 또는 변형수준이라고 정의할 수 있다. 주기적 소성은 재료가 최대 소성변형 크기의 변화 없이 사이클 주기 동안 역 주기적 소성변형이 야기되는 조건을 의미한다. 주기적 소성은 소성 요동(plastic shakedown)으로 불리기도 한다. 소성 래칭팅은 어느 재료가 사이클 주기 동안 최대 소성 변형이 각 사이클마다 증가되는 상태를 말한다.

$\theta = 15^\circ$ 와 $\theta = 45^\circ$ 의 경우, 두 개의 슬립시스템이 우선 사방계면(preferred prismatic plane)인 45° 또는 135° 에 대칭적으로 위치하기 때문에 표면 하부에 나타난 소성 래칭 변형은 거의 대칭적 분포를 나

타낸다(Fig. 4 참조). 반면에 그 외 다른 경우에는 프레팅이 시작하는 쪽보다 끝나는 가장자리에 보다 많은 소성 래칭 변형이 누적되는 비대칭분포를 이룬다(Fig. 5 참조). $\theta = 45^\circ$ 의 경우는 $\theta = 15^\circ$ 에 의해 생성된 결과와 매우 유사한 분포를 보였다. Fig. 5에 보듯이, 단일결정에서도 소성 래칭팅이 현저하게 일어나는 것을 알 수 있다. 또한 소성 변형 거동의 입자 방위각의 매 30° 마다 정성적으로 유사하게 반복되는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 평면 3중 슬립모델에서 이분각이 60° 이기 때문일 것으로 사료된다. 초기의 조직구조가 소성 변형에 미치는 효과는 $R_\sigma = 0.1$, $Q/P_y = 0.3$ 과 마찰계수 $\mu = 1.5$ 값을 가진 요소 프레팅 모델의 경우에 대해 입자의 결정 방위각이 표면을 따라 제한된 각도 범위로 구속시킴으로써 얻었다. 여기에서 R_σ 는 가해진 응력비($\sigma_{min}/\sigma_{max}$)를 나타낸다(Fig. 3(b) 참조). 그리고 마찰계수는 슬라이딩 속도에 따라 증가되며, 주기하중이나 실험조건에 따라 마찰계수가 결정된다.¹⁵ Fig. 6은 결정 소성 모델인 요소 프레팅 모델 ($R_\sigma = 0.1$, $P/P_y = 0.28$, $a = 514 \mu m$)에 의해 접촉 가장자리 끝부근의 표면 하부에 생성된 유효 래칭소성 변형 증가 분포를 보여준다. 여기서 a는 접촉 폭의 1/2 을 의미한다.

유효 래칭 소성변형 증가는 다음과 같이 정의된다.

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

여기에서 $\left(\Delta \epsilon_{ij}^p \right)_{ratch}$ 은 사이클별 래칭 소성변형 증가를 의미하며 다음 식에 의해 계산된다.

$$\left(\Delta \epsilon_{ij}^p \right)_{ratch} = \left(\epsilon_{ij}^p \right)_{\text{circle-end point}} - \left(\epsilon_{ij}^p \right)_{\text{circle-start point}} \quad (4)$$

무작위 결정 방위각의 경우에 생성된 유효 래칭 소성변형 분포(Fig.6(e))는 실험 결과(Fig.7 참조)와 유사하게 표면 아래로 깊이 침투하여 형성된 반면, 특정 방위각 범위로 구성된 경우에 생성된 래칭 소성변형 분포(Fig. 6 (a)-(d))는 주로 표면을 따라 누적된 것을 볼 수 있다.

결정소성 모델에서 소성 전단변형의 진행적인 주기적 래칭팅은 매우 안정된 사이클(3 사이클 후)에 역 주기 소성 전단변형이 프레팅 접촉면의

표면 하부에서 현저하게 발생되는 것을 알았다. 3 사이클 동안 누적된 피크 주기 소성변형 값의 범위는 매우 중요하다. 왜냐하면 이 값으로부터 입자군의 크기 및 결정방위 같은 미소조직이 프래팅에 미치는 효과가 매우 크다는 것을 알 수 있기 때문이다.

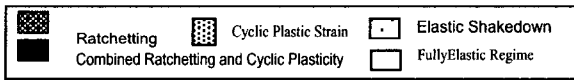
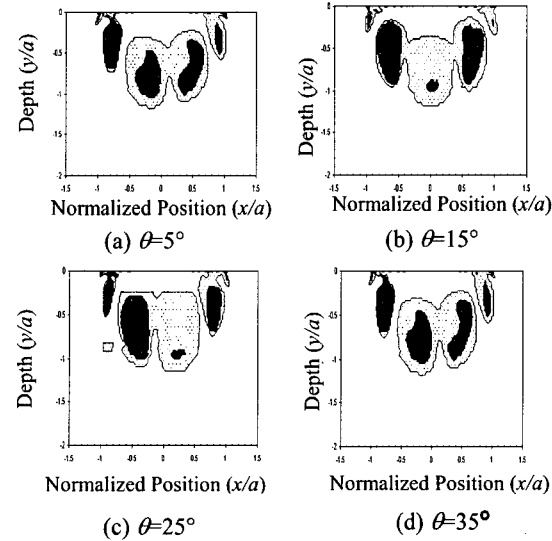


Fig. 5 Plastic strain maps developed from single crystal over the third cycle for various orientation angles(θ)

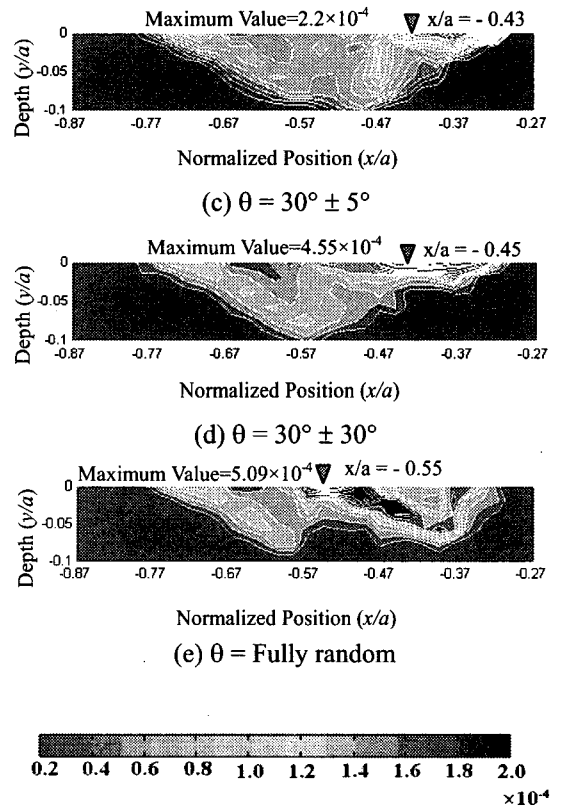
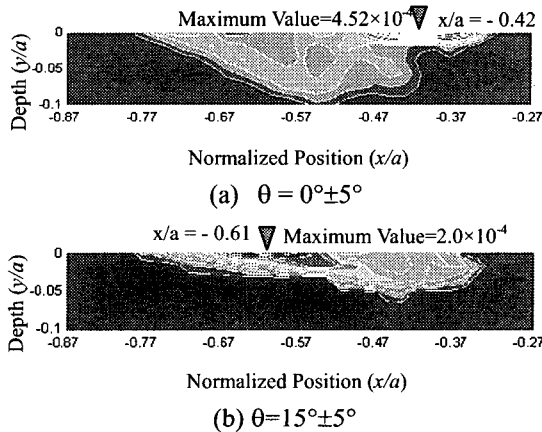


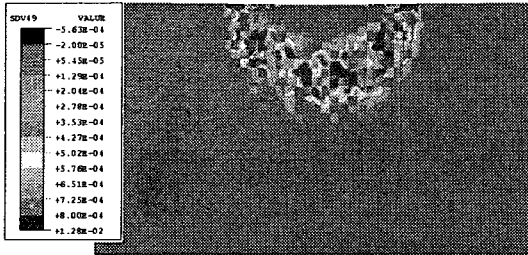
Fig. 6 Effects of texture on the subsurface distributions of the effective ratchetting plastic strain increment near the trailing-edge of the contact

4.2 결정 소성에서 조직 크기의 영향

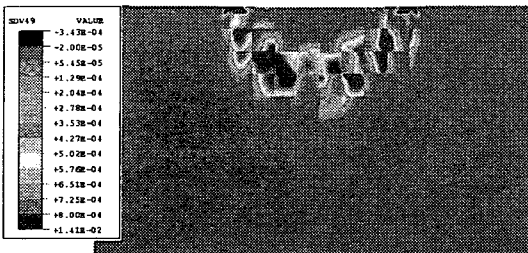
본 논문에서는 단지 국부적 결정 소성이론의 적용에만 관심을 가졌기 때문에 입자 크기에 따라 영향을 받는 전위 축적 효과(dislocation pile-up effect)는 고려되지 않았다. 그러나 주어진 접촉면의 크기, 특징 및 재료의 특성에 따라 접촉표면 아래에서 소성변형의 분포가 어떻게 입자 크기에 의해 영향을 받는지를 밝히는 것은 매우 중요하다고 사료된다. Fig. 7은 이상적 프래팅 모델의 경우, 3 사이클 종료후 다양한 입자크기에 대해 표면 하부에 생성된 유효 소성 변형($\bar{\epsilon}^p = \int d\epsilon^p$)의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보여 주듯이, 단일 결정의 경우 입자 크기(d_p)의 증가에 따라 $\bar{\epsilon}^p$ 분포도 유사하게 커지는 것으로 나타났다. 즉 결정방위각 분포상 소성 변형의 종속성은 입자 크기의

증가와 함께 증가한다. 그러므로 $\bar{\epsilon}^P$ 분포를 살펴 볼 때 각 입자 상에 상응하는 결정 방위각에 따라 입자 경계에서 불연속성(discontinuity)이 발생한다. 즉 이것은 마이크로 조직이 소성 변형의 누적에 지대한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 실험적으로 측정된 평균 입자크기가 $25\mu\text{m}$ 이었지만 $50\mu\text{m}$ 크기의 입자를 사용한 유한요소 결과와 실험 결과를 비교하여 충분히 만족스러운 소성 변형 거동을 얻을 수 있었다.¹⁶⁻¹⁷

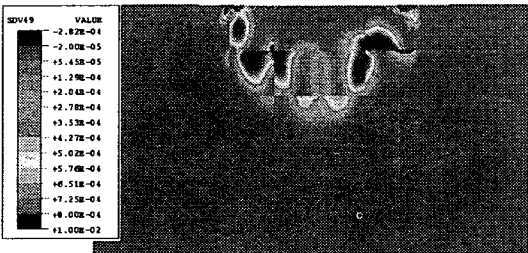
결정 소성론은 입상 분포와 α 입자군 크기, 결정 방위각, 입자 크기등과 같은 마이크로 조직이 미치는 영향 등을 잘 표현할 수 있다.



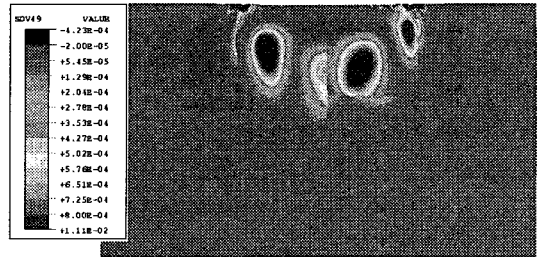
(a) $d_g=20 \mu\text{m}$



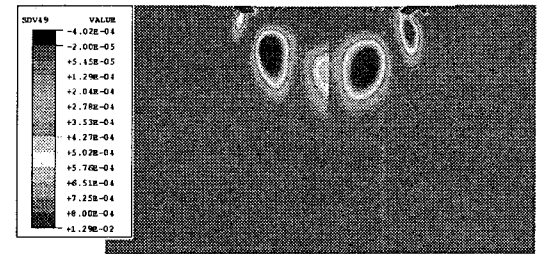
(b) $d_g=50 \mu\text{m}$



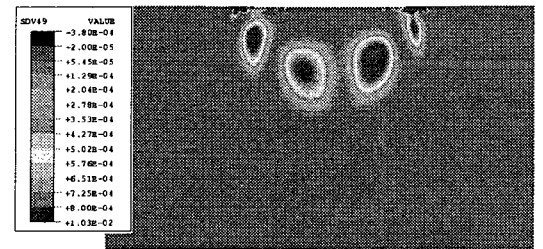
(c) $d_g=100 \mu\text{m}$



(d) $d_g=200 \mu\text{m}$



(e) $d_g=400 \mu\text{m}$



(f) Single crystal ($\theta=5^\circ$)

Fig. 7 Distributions of $\bar{\epsilon}^P$ near the contact after the completion of three cycles based on crystal plasticity simulations for various sizes of square grains for the case (ideal fretting model : $\mu=1.5$, $P/P_y=1.0$, and $Q/P_y=0.3$).

5. 결론

본 연구는 결정 소성 이론을 활용하여 2 중 상으로 이루어진 Ti-6Al-4V 에서 마이크로 조직이 미치는 영향을 분석하였다. 입자 방위 분포, 입자 크기와 같은 마이크로 조직이 소성에 미치는 효과는 결정 소성론을 토대로 한 유한요소 해석에

의해 잘 묘사되었다.

결정 소성 시뮬레이션의 결과는 프레팅시 마이크로 소성에서 결정 방위각 분포 및 α 입자군 크기가 다른 요소들에 비해 상대적으로 매우 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여 주었다. 아울러 소성 변형 거동은 입자 크기 뿐만 아니라 입상분포에 따라서도 크게 영향을 받음을 확인하였다.

마이크로 구조는 주로 표면층(<2a)에서만 영향을 미친다. 3 사이클 이후에 생성된 최대 주기적 소성 변형 누적 값의 범위는 고려된 다양한 표면 조직이 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 마이크로 조직(α 입자군의 크기와 방위)이 프레팅 피로를 억제하는데 매우 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

참고문헌

- Oh, Jung Kuk, Back, Sub Sung, "Plastic Flow Direction and Strength Evaluation of Dissimilar Friction Bonding Interface Joints," *KSPE*, Vol. 19, No.5, pp. 43-50, 2002.
- Goh, C.H., Wallace, J.M. and Neu, R.W., "Polycrystal Plasticity Simulations of Fretting Fatigue," *International Journal of Fatigue*, Vol.23, pp. 423-435, 2001.
- Goh, C.H., Neu, R.W. and McDowell, D.L., "Influence of Nonhomogeneous Material in Fretting Fatigue," *Fretting Fatigue: Experimental and Analytical Results*, ASTM STP 1425, S.E. Kinyon., D.H. Hoepfner. and Y. Mutoh, Eds., American Society. for Testing and Materials, West Conshohocken, PA., 2002.
- Goh, C.H., Neu, R.W., and McDowell, D.L., "Plasticity in Polycrystalline Fretting Contacts," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2002.
- Chan, K.S., Wojcik, C.C. and Koss, D.A., "Deformation of An Alloy with a Lamellar Microstructure: Experimental Behavior of Individual Widmanstatten Colonies of an - Titanium Alloy," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 12A, pp. 1899-1907, 1981.
- Uggowitzer, P. and Stüwe, H.P., "Plasticity of Ferritic-Martensitic Two-Phase Steels," *Zeitschrift für Metallkunde*, Vol. 73, No.5, pp. 277-285, 1982.
- Werner, E. and Stüwe, H.P., "Phase Boundaries as Obstacles to Dislocation Motion," *Materials Science and Engineering*, Vol. 68, pp. 175-182, 1984.
- Lütjering, G, "Influence of Processing on Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Alloys," *Materials Science and Engineering*, A243, pp. 32-45, 1981.
- Morrissey, R., "Strain Accumulation and Shakedown in Fatigue of Ti-6Al-4V," Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA. 2001.
- Bennett, V., "A Study of Microscale Phenomena in Small Crack Propagation under Multiaxial Fatigue," Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA., 1999.
- McGinty, R.D. and McDowell, D.L., "Multiscale Polycrystal Plasticity," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 121, pp. 203-20, 1999.
- Russo, R.A. and Seagle, S.R., "Deformation and Recrystallization of Titanium and Its Alloys," *ASM International*, Course 27, Lesson, Test 5., 1994.
- Kocks, U.F., "Constitutive Relations for Slip," *Constitutive Equations in Plasticity*, ARGON, A.S. Ed., MIT Press, Cambridge, MA, pp. 81-115, 1975.
- Ok, Young Gu, An, Deuk Man, and Cho, Yong Ju, Lee, Hyun Woo, "Study on the Fatigue Limit at Random Contact Loading," *KSPE* Vol. 19 No. 8, pp. 84-91, 2002.
- Hills, D.A., Nowell, D., "Mechanics of Fretting Fatigue," *Kluwer Academic Publishers*, 1994.
- Bronkhorst, C.A., Kalidindi, S.R. and Anand, L., "Polycrystalline Plasticity and the Evolution of Crystallographic Texture in FCC Metals," *Phil. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, Vol. 341, pp. 443-47, 1992.
- Wallace, J.M. and Neu, R.W., "Fretting Fatigue Crack Nucleation in Ti-6Al-4V," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, in press, 2002.