

## 체심입방격자 단결정의 소성스핀에 관한 연구

남 용 윤\* · 김 사 수\*\*

(96년 4월 23일 접수)

### A Study on the Plastic Spin of Body Centered Crystal

Yong-Yun Nam\* · Sa-Soo Kim\*\*

**Key Words** : Plastic Spin(소성스핀), Single Crystal(단결정), Dislocation(전위)

#### Abstract

Many studies on the plastic spin have been done, but it is still an opened subject. It is essential for the modelling of plastic spin to understand its origin and governing parameters. For the task, it is helpful to know the behavior of single crystal.

This study gives the interpretations for the plastic spin of a B.C.C(body centered cubic crystal) by numerical simulation. It is discussed that the different levels of shear stresses induced on each slip pair in crystallographic slip systems and the nonlinear relationship between shear stress and slip velocity are the fundamental mechanisms of plastic spins. Finally some comments are provided on the plastic spin of polycrystal.

#### 1. 서 언

최근 구조물의 소성해석이 자주 행해지고 있지만, 소성이론은 아직 발전 도상에 있다고 보여진다. 소성해석을 위한 이론은 크게 수치해석기법과 재료 구성방정식 두가지 분야로 발전되어 왔다고 할 수 있다. 이 중 재료의 구성방정식은 재료과학 분야에서 현재 활발히 연구하고 있는 주제로 아직도 많은 연구가 필요한 분야이다.

한편 재료의 합리적인 구성방정식을 개발하기 위해서는 재료의 물리적-역학적 거동에 대한 이해가 필요하다. 본 연구의 대상인 소성스핀(plastic

spin)은 재료의 소성거동을 규명하는 관심 이외에도 재료의 Bauschinger 효과에 의한 역응력의 발전식에 적용되고 있다. 회전변형을 포함하고 있는 일반적인 대변형에서 재료의 겉보기 회전은 강체회전과 소성변형에 의한 회전을 포함하고 있다. 소성변형이 재료의 슬립에 의해서만 일어난다고 국한하면, 소성변형은 등경사(isoclinic)변형을 하므로 재료의 실제 회전이 아니다. 그리고 등경사 변형에 의하여 주어지는 소성속도구배텐서는 일반적으로 대칭이 아니다. 소성스핀은 이 텐서의 반대칭 성분으로 나타난다. 이와같이 소성스핀은 실제의 회전이 아니므로 재료의 회전은 겉보기 회전과 소

\* 한국기계연구원 구조시스템연구부

\*\* 부산대학교 조선해양공학과

성스핀의 차로 주어지야 한다. 따라서, 한 예로 역응력의 객관성률(objective rate)을 Jaumann율로 나타내면 다음과 같다.

$$\alpha^o = \dot{\alpha} + \alpha(W - W_p) - (W - W_p)^T \alpha \quad (1.1)$$

위에서 간단히 설명한 소성스핀에 대한 연구는 Kratochvil<sup>1)</sup>이 재료의 구성방정식에 소성스핀을 고려해야 할 필요를 인식한 이래 일단의 연구가 최근까지 계속되어오고 있다<sup>2) 12)</sup>. 이들 연구에 의하면 소성스핀을 위한 구성방정식으로 대표적인 두 가지 방법이 제시되어 있다. 역응력을 파라미터로 하는 등방함수표시법(isotropic function)<sup>2) 9)</sup>과 비대칭 내부응력을 사용하는 일반화 유동법칙(generalized flow rule)<sup>10), 11)</sup>이 그것이다. 그러나 이 두 방법이 소성스핀을 완전히 해결한 것이 아니며, 어떤 파라미터를 사용하여 어떻게 소성스핀을 나타낼 것인가는 여전히 해결되어야 할 문제로 남아 있다. 또한 소성스핀의 발생기구에 대해서도 아직 완전히 규명되어 있지 않다.

본 연구에서는 소성스핀의 구성방정식을 제시하기에 앞서 소성스핀 발생기구에 대해서 논한다. 대부분의 금속재료는 다결정(polycrystal) 구조로 이루어져 있고, 그 거동은 단결정 거동의 상호작용을 통한 함으로 나타난다. 따라서 단결정의 거동을 이해하는 것이 기본적이며 중요하다. Boukadia와 Sidoroff<sup>13)</sup>는 완전소성모델로써 면심입방격자 결정의 소성스핀을 해석한 바 있는데, 본 연구는 체심입방격자의 소성스핀을 변형률의존 소성모델로 시물레이션하고 나아가 이를 통하여 소성스핀 발생기구를 규명하는데 중점을 둔다.

## 2. 체심입방격자 결정의 변형학 및 슬립속도 모델

### 2.1 슬립시스템

결정슬립은 외하중을 받을 때 슬립이 일어나기 쉬운 면과 방향을 말한다. 보통 슬립을 슬립면과 슬립방향으로 나타낸다. 체심입방격자는 48개의 결정슬립(crystallographic slip)을 갖고 있는데, 대별하면 3가지 형태의 슬립면이 있다. 그 예를 밀러지

수로 나타내면 (110), (112), (123)이다. 슬립방향은 슬립면에서 최대의 대각선 방향과 일치한다. 따라서 (110)형태의 슬립면에는 2개의 슬립방향이 있고 나머지는 한개가 있다. 그리고 (110), (112)형태의 슬립면에는 각각 12개의 슬립시스템이 있고, (123)은 24개가 있다.

실제의 계산에서는 두개의 벡터로 슬립을 나타내는데, 슬립면에 수선벡터 n과 슬립방향을 나타내는 벡터 s이다. 이 벡터들은 밀러지수로부터 구할 수 있다.

### 2.2 슬립에 의한 소성변형

먼저 소성이 결정슬립에 의해서만 일어난다고 가정한다(물론 소성 소성기구에 의한 소성변형도 있지만 보통은 주로 결정슬립에 의해서 소성변형이 일어남).

연속체 변형학에서 변형속도구배텐서  $L$ 은 변형구배텐서  $F$ 에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$L = \dot{F}F^{-1} \quad (2.1)$$

여기서 (.)는 시간 미분을 나타낸다. 여기서 탄성변형을 무시하고, 변형구배텐서를 강체회전을 나타내는 직교텐서  $R$  과 소성변형구배텐서  $F_p$  로써 곱분해로 나타내면 다음과 같이 표시된다.

$$F = RF_p \quad (2.2)$$

(2.2)식을 (2.1)식에 적용하면

$$L = (\dot{R}F_p + RF_p)(RF_p)^{-1} = R\dot{F}_pF_p^{-1}R^T + \dot{R}R^T \quad (2.3)$$

이 되고, 여기서 강체회전은 임의이고 또 관심의 대상이 소성변형에 의한 스핀이므로 이를 소거하면 소성에 의한 변형속도 구배는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$L = \dot{F}_pF_p^{-1} \quad (2.4)$$

소성변형이 결정슬립에 의해서만 일어난다는 가정에 의하여 (2.4)식은 각 슬립시스템의 슬립에 의한

변형속도 구배의 합으로 나타내어지는 등경사 변형을 의미한다.

한 슬립시스템의 슬립에 의한 변형속도구배텐서는 슬립변형의 기하학적인 관계에서 슬립속도  $\dot{\gamma}$ 와 슬립시스템의 두 벡터  $s$ 와  $n$ 의 텐서연산(dyad 곱)에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$L = \dot{\gamma} s \otimes n \quad (2.5)$$

(2.5)식으로부터 소성신장률텐서와 소성스핀텐서는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$D_p = \frac{1}{2} (L + L^T) = \frac{1}{2} \dot{\gamma} (s \otimes n + n \otimes s) \quad (2.6)$$

$$W_p = \frac{1}{2} (L - L^T) = \frac{1}{2} \dot{\gamma} (s \otimes n - n \otimes s) \quad (2.7)$$

여기서 (2.6)식을 이용하여 (2.7)식에서 슬립면에 수직인 벡터  $n$ 과 슬립속도를 소거하면 소성스핀은 다음과 같이 달리 표현할 수 있다.

$$W_p = (s \otimes s) D_p - D_p (s \otimes s) \quad (2.8)$$

(2.8)식은 소성스핀 모델에 대하여 시사하는 바가 크다(12)참조). 이 식에 포함된 각항은 대칭텐서이고, 만약 신장률텐서가 하나의 신장성분만을 갖는다면 소성스핀은 없음을 알 수 있다.

위에서 (2.6), (2.7)식은 하나의 슬립시스템에 대한 것이고, 단결정의 변형에 대한 것은 모든 슬립시스템에 대한 합으로 주어진다.

$$D_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{48} \dot{\gamma}^i (s^i \otimes n^i + n^i \otimes s^i) \quad (2.9)$$

$$W_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{48} \dot{\gamma}^i (s^i \otimes n^i - n^i \otimes s^i) \quad (2.10)$$

### 2.3 슬립속도 모델

Gilman<sup>14)</sup>은 변형률 의존 슬립속도 모델을 다음과 같이 제시하였다.

$$\dot{\gamma} = 2bv_o(\rho_o + \rho\gamma)e^{-\frac{H_o + H_1\gamma}{\tau}} \quad (2.11)$$

여기서  $b$ 는 Burger 벡터,  $v_o$ 는 전위의 한계속도,  $H_o$ 는 재료상수,  $\rho_o$ 는 전위의 초기밀도,  $\rho$ 는 슬립에 따른 전위밀도 증가율,  $\tau$ 는 슬립면에 작용하는 전단응력,  $H_1$ 은 슬립에 따른 구속전위의 증가율을 나타내는 재료상수이다.

여기서는 (2.11)식의 슬립속도 모델을 다음과 같이 수정하여 사용한다. 구속전위의 증가율을 나타내는  $H_1\gamma$ 는 경화를 의미하는데, 아래의 두 항으로 대체한다.

$$h_1 |\dot{\gamma}_m^i| + H_s^i \quad (2.12)$$

여기서  $h_1$ 은 상수,  $\dot{\gamma}_m^i$ 은 슬립시스템  $i$ 의 최대 슬립,  $H_s^i$ 는 다음의 발전식으로 주어진다.

$$\dot{H}_s^i = c_s (h_s^n - H_s^i) \|\dot{\gamma}\| \quad (2.13)$$

여기서  $c_s$ 는 재료상수,  $h_s^n$ 는  $H_s^i$ 의 포화값을 나타내는 상수이고  $\|\dot{\gamma}\|$ 는 다음과 같다.

$$\|\dot{\gamma}\| = \sum_{i=1}^{48} |\dot{\gamma}^i| \quad (2.14)$$

또한 전위 부구조의 형성에 의한 비등방성 내부응력(anisotropic internal stress)을 아래와 같이 도입한다.

$$\dot{\alpha}^i = c_b (h_b^n - |\alpha^i|) \dot{\gamma}^i \quad (2.15)$$

여기서  $c_b$ 는 상수,  $h_b^n$ 는 내부응력의 포화값을 나타낸다.

끝으로 초기항복을 제어하는  $H_o$ 와 응력의 비에 지수승수  $n$ 을 사용하면 본 연구에 적용될 슬립속도 모델은 다음과 같다.

$$\dot{\gamma}^i = \text{sign}(\tau^i - \alpha^i) 2bv_o(\rho_o + \rho |\dot{\gamma}_m^i|)$$

$$\text{EXP} \left[ -\frac{(H_o)^n + (H_s + h_1 |\dot{\gamma}_m^i|) |\tau^i - \alpha^i|^{n-1}}{|\tau^i - \alpha^i|^n} \right] \quad (2.16)$$

여기서 각 슬립시스템에 작용하는 전단응력  $\tau^i$ 는 응력텐서와 단위 슬립속도당의 변형률텐서로부터 다

음의 연산에 의하여 구해진다.

$$\tau^i = tr((s^i \otimes n^i) \sigma) \quad (2.17)$$

### 3. 계산 결과

본 연구는 체심입방격자구조에 대한 소성스핀의 정성적인 경향을 파악하는 것이 목적이므로 재료 상수들을 실험치와의 비교근사에 의해서 결정하지 않고 계산 목적상 Table 3.1과 같이 주어진 값으로 하였다. 하중은 응력제어로 변형동안 일정하게 유지되도록 하였다. 하중으로 주어진 응력성분을 각 계산결과의 도표에 나타냈으며, 모든 계산결과는 대수 전단스트레인이 0.3일 때이다. 그리고 도표에서 횡축은 초기에 기준직각좌표 ( $x_1, x_2, x_3$ )와 결정의 축을 일치시키고((100) 방향을  $x_1$ , (010)을  $x_2$ , (001)을  $x_3$  방향)  $x_3$  축을 회전축으로 결정을 회전시킨 각을 의미한다.

Table 3.1 Used material constants

$b = 2.5E-7(mm)$	$v_o = 3.2E+6(m/s)$
$\rho_o = 375(mm^{-2})$	$\rho = 1.0E+9(mm^{-2})$
$H_o = 80(kg/mm^2)$	$H_1 = 500(kg/m^2)$
$H_s = 12(kg/mm^2)$	$h_s'' = 30(kg/mm^2)$
$n = 1.35$	$C_p = 20.0$
$C_b = 20.0$	Young's Modulus $= 2.1E+11(N/m^2)$

Fig.3.1은 하나의 전단응력 성분에 대한 결과로 이 하중조건에서는 소성스핀이 발생하지 않는다. 전단신장률은 45도일 때 최대이고 또 이각에 대하여 대칭이다.

Fig.3.2와 Fig.3.3은 단축인장과 하나의 전단응력의 경우로, 소성스핀은 소성스핀이 0인 어떤 회전각에 대하여 반대칭이고 전단신장률은 대칭으로 나타나 있다. 소성스핀은 인장응력의 증가와 더불어 증가하는 경향을 보이고 있다. 최대 전단신장률을 주는 각도는 인장응력의 변화에 따라 이동하고 있다.

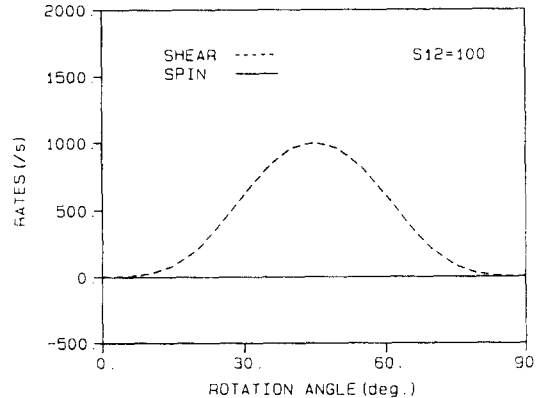


Fig. 3.1 Shear stretch and spin for a shear

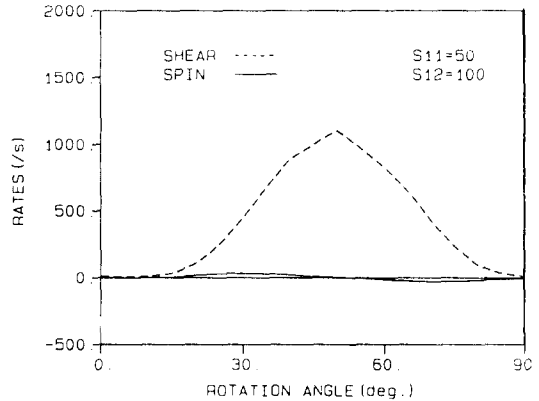


Fig. 3.2 Shear stretch and spin for combined loading(a tension and a shear, S11/S12= 0.5)

Fig.3.4는 같은 크기의 이축응력과 전단응력을 조합한 하중에 대한 결과이다. 전변형률은 Fig.3.1과 마찬가지로 경향이고, 소성스핀은 0도, 45도, 90도에서 0으로 나타나고 있으며, 45도 회전각에 대하여 소성스핀이 반대칭이다. 소성스핀의 크기는 Fig.3.2(단축인장)와 비교하여 약 30% 증가하고 있다.

Fig.3.5는 Fig.3.4와 마찬가지로 응력상태이나  $x_2$  축응력이 압축인 경우이다. 이 하중조건은 하나의 전단응력 성분만 작용시킨 경우와 등가이다. 따라서 Fig.3.1과 동일한 경향이여야 한다. 그림에서 보는 바와 같이 최대 전단신장률을 주는 각도만 변하고 동일한 경향이다.

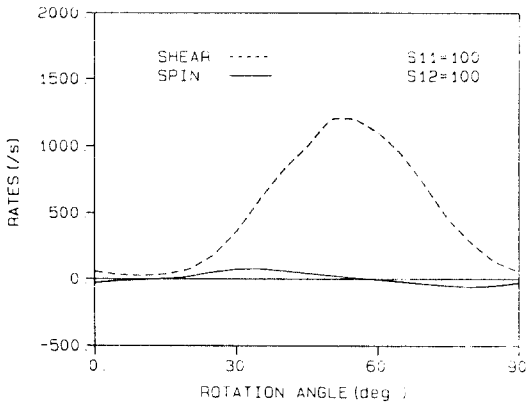


Fig. 3.3 Shear stretch and spin for combined loading (a tension and a shear,  $S_{11}/S_{12}=1.0$ )

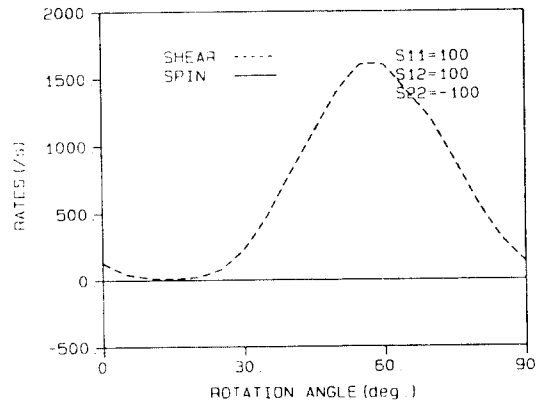


Fig. 3.5 Shear stretch and spin for combined loading (a tension, a compression and a shear)

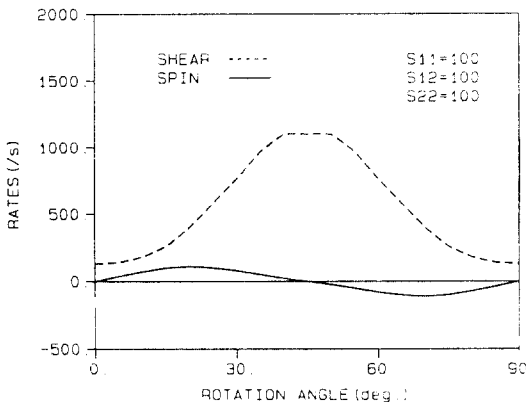


Fig. 3.4 Shear stretch and spin for combined loading (two tensions and a shear)

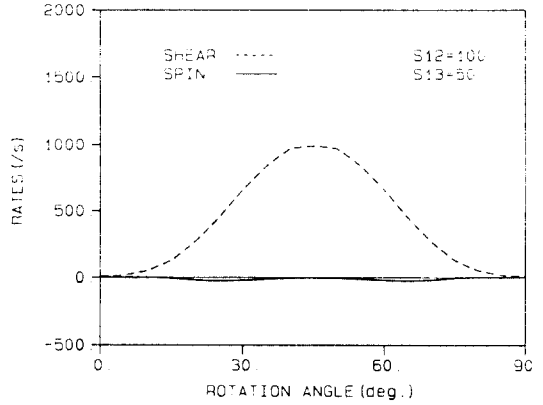


Fig. 3.6 Shear stretch and spin for combined loading (two shears,  $S_{13}/S_{12}=0.5$ )

Fig.3.6과 Fig.3.7은 두개의 전단응력 성분을 조합한 경우이다. 전단신장률은 Fig.3.1과 같이 45도에 대하여 대칭이다. 또한 Fig.3.1과 비교하여 소성스핀이 상당히 나타나고 있는데, Fig.3.2 - Fig.3.5와 달리 45도 축에 대하여 대칭인 점이 특징으로 나타나고 있다.

Fig.3.8은 앞서의 결과를 전단신장률과 스핀의 비로써 다시 나타낸 것이다.

이상에서 보면 소성스핀이 극값 또는 0일 때 전단변형률이 최대 또는 최소가 되고, 소성스핀은 응력 성분에 강한 의존성을 보이고 있다. 특히 인장응력과 전단응력을 작용시킨 경우는 소성스핀이 반대칭, 전단응력만을 조합한 경우는 대칭임을 주목해야 할 필요가 있다.

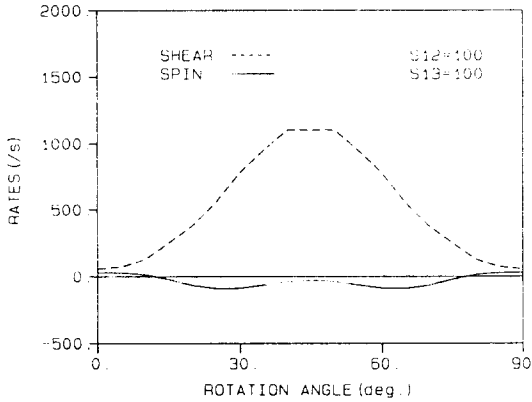


Fig. 3.7 Shear stretch and spin for combined loading (two shears, S13/S12=1.0)

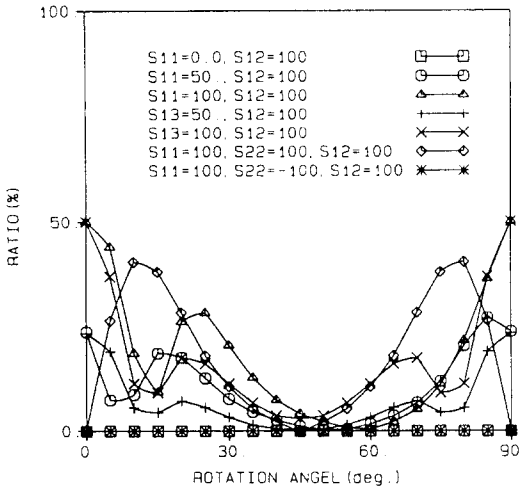


Fig. 3.8 The ratios of spin to shear stretch

#### 4. 소성스핀 발생기구에 대한 고찰

앞장의 소성스핀 시뮬레이션 결과 소성스핀 발생기구와 관련하여 알 수 있는 중요한 특징은 소성스핀이 응력성분에 의존적이라는 점이다. 물론 다른 인자들 예를 들면 역응력, 가공경화등이 소성스핀에 영향을 미친다고 생각되지만, 이들은 발생한 소성스핀의 크기에 관련한다고 믿어지며 소성스핀의 발생여부는 역시 작용하는 응력 성분의 조합이 지배한다고 판단된다. 결정의 방향은 이 응력 성분

의 조합과 증가이다.

이를 근거로 단결정의 소성스핀 발생을 다음에서 구체적으로 알아본다. 소성스핀은 식(2.7)과 같이 소성속도 구배의 반대칭성분으로 주어진다. 그런데 대칭응력하에서 이와 같은 비대칭 소성속도 구배가 얻어지는 것은 소성현상이 결정슬립시스템의 슬립으로 발생한다는데 그 원인이 있다. 대칭응력이 작용할지라도 각슬립 시스템에 유기되는 전단응력은 다르다. 슬립시스템은 보통 특정 축에 대하여 대칭적인 배치를 하고 있는데, 이 대칭 슬립쌍에 유기되는 전단응력이 하중으로 주어지는 응력 성분들의 조합에 따라 서로 달라질 수 있기 때문에 소성속도 구배가 비대칭이 되고 따라서 소성스핀이 발생한다. 여기서 그 구체적인 예로서, 전단 신장률  $D_{23}$ 에 대하여 대칭적인 슬립쌍  $(110) <111>$ 과  $(101) <111>$ 을 택하면

$$s^1 \otimes n^1 = \frac{1}{\sqrt{(6)}} \begin{vmatrix} -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$s^2 \otimes n^2 = \frac{1}{\sqrt{(6)}} \begin{vmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 \end{vmatrix}$$

이 된다. 여기서  $< >$ 은 슬립방향을 나타내는 지수이다. 하중으로 작용하는 응력텐서를 다음과 같은 두가지 경우로 한다.

$$\sigma^1 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \\ 0 & 100 & 100 \end{vmatrix}$$

$$\sigma^2 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \\ 0 & 100 & 0 \end{vmatrix}$$

먼저 응력텐서  $\sigma^1$ 에 대해서 각 슬립에 유기되는 전단력은 (3.7)식으로부터

$$\tau^1 = \frac{-100}{\sqrt{(6)}} \quad , \quad \tau^2 = 0.0$$

이 된다. 여기서 슬립속도를 전단력  $|\tau|$ 의 함수로 표시하면 이 두 슬립에 의한 소성속도구배텐서는 (2.5)식으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$L = \frac{-100}{\sqrt{(6)}} \begin{vmatrix} -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

여기서 관심대상인  $W_{12}$ 는  $-\frac{f(\tau^1)}{2}$  이 된다.

다음 응력텐서  $\sigma^2$ 에 대해서 소성스핀을 계산한

다.  $\tau^1 = -\frac{100}{\sqrt{(6)}}$ ,  $\tau^2 = \frac{100}{\sqrt{(6)}}$  이므로 위와 마찬가지로 계산하면 소성속도 구배는 다음과 같이 주어진다.

$$L = f(|\tau^1|) \begin{vmatrix} 2 & 2 & 2 \\ -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \end{vmatrix}$$

따라서 관심대상인 소성스핀성분 ( $W_{23}$ )은 발생하지 않는다. 이것은 전단응력만 작용할 때는 소성스핀이 발생하지 않는다는 앞장에서의 결과와 합치한다.

위에서 언급한 것과 더불어 또 하나의 중요한 소성발생 원인으로 전단응력에 대한 슬립속도의 비선형 관계를 들 수 있다. 예를 들어 설명하면, 앞에서 예로든 슬립시스템외에 전단신장률  $D_{23}$ 에 대해서 대칭적인 신장을 주는 또 다른 슬립시스템으로 동일 슬립면에서 슬립방향만 다른  $(110)\langle 111 \rangle$ 과  $(101)\langle 111 \rangle$ 이 있다. 만약 이 네개의 슬립시스템에 하중으로 전단응력만 적용되면 모두 같은 크기의 전단력이 같은 부호의 전단신장률( $D_{23}$ )을 하도록 유기된다. 여기에 축응력하중( $\sigma_{33}$ )이 부가되면  $(110)$ 슬립면의 슬립들은 이 하중에 대하여 영향을 받지 않고,  $(101)$ 면의 슬립은 같은 크기의 전단력이 한 슬립에 부가되면 다른 슬립에서는 감해진다. 여기서 만약 슬립속도가 전단응력에 대하여 선형이라면 소성스핀은 발생하지 않을 것이다. 보다 일반적으로 말하면 슬립속도와 유기된 전단력의 관계에 따라 소성스핀의 발생양상이 달라질 수 있다. 한 예로 Fig.4.1은 식(3.6) 대신에 선형적인 관계

$$\dot{\gamma} = \tau - \alpha \tag{4.1}$$

를 사용했을 경우의 소성스핀을 비교한 것으로 이 그림에서 그 차이를 확인할 수 있다. 그런데 실제로 대부분의 재료에서 슬립속도는 응력에 대해서

매우 민감하고 비선형적이다(예, 15)참조). 이와 같은 고찰은 변형률의존 소성과 비의존 소성에서 스핀의 경향이 서로 다르다는 것을 암시한다.

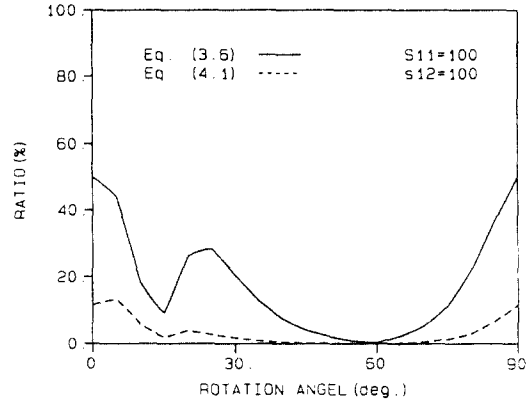


Fig. 4.1 The effects of relationship between shear stress and slip velocity on the spin

다음은 위의 결과를 바탕으로 다결정 재료의 소성스핀 발생에 대해서 간단하게 언급한다. 다결정 모델로 재료의 거동을 시뮬레이션하는 방법으로 몇가지 결정수용(grain accommodation)모델이 있다. 이들 모델에서 결정 상호작용은 결정을 수용하기 위한 모재의 강성에 영향을 주는 것으로 되어 있다. 따라서 그 상호작용은 재료의 유효강성에 영향을 주는데, 이 유효강성은 앞에서 설명한 결정의 소성스핀 발생기구와는 관련이 적다. 그런데 이러한 다결정 모델은 재료의 직조(texture) 발전을 잘 근사한다고 알려져 있다. 이러한 사실에 힘입어 여기서는 결정상호작용을 배제하고 다결정의 소성스핀 발생 원인을 유추한다.

먼저 결정방향의 분포가 랜덤하다면 하나의 전단 또는 축하중과 전단하중의 조합에 의한 하중의 경우는 소성스핀이 그다지 발생하지 않는다고 예상된다. 왜냐하면 Fig.3.2 - Fig.3.4에서 보는 바와 같이 스핀이 어떤 각도에 대하여 반대칭이므로 결정의 랜덤분포에서는 서로 상쇄되기 때문이다. 복수의 전단일 때는 Fig.3.7에서 유추하면 소성스핀이 상쇄되지 않기 때문이다. 그리고 초기직조를 갖는 재료 또는 소성변형에 의하여 직조가 발전했을

때는 소성스핀이 상쇄되지 않기 때문에 일반적으로 스핀이 발생한다.

## 5. 결 언

체심입방격자 단결정의 소성거동 시물레이션을 통하여 단결정의 소성스핀 특징을 고찰하였고, 나아가 소성스핀 발생원인에 대해서 알아보았다.

응력제어하에서 단결정 소성스핀의 특징으로 하나의 전단응력과 축력을 조합한 하중에서는 결정의 회전에 따른 소성스핀의 분포가 특정 각도에 대해서 반대칭이고, 전단응력끼리 조합한 경우는 대칭이다. 그리고 응력성분에 강한 의존성을 보이고 있다.

단결정의 소성스핀 발생원인은 대칭으로 배열된 각 슬립시스템쌍에 유기되는 전단응력이 하중으로 주어지는 응력텐서의 성분에 따라 달라지는 것과 슬립에 유기된 전단력과 슬립속도관계의 비선형성이다.

일반적으로 금속재료는 변형률에 민감하고 응력과 변형속도 관계에서 강한 비선형성을 보이고 있기 때문에 변형률의존 소성과 비의존 소성의 소성스핀은 다른 양상을 보인다고 판단된다.

끝으로 다결정의 소성스핀에 대하여 유추하였는데 이에 대해서는 좀더 자세한 연구가 요망된다.

## 참고문헌

- 1) J. Kratochvil, "Finite-Strain Theory of Crystalline Elastic-Inelastic Materials", *J. Appl. Phys.*, Vol.42, NO.3, PP.1104-1108, 1971
- 2) Y. F. Dafalias, "Corotational Rates for Kinematic Hardening at Large Plastic Deformation", *J. Appl. Mech ASME*, Vol.50, PP. 561-565, 1983
- 3) B. Lorent, "On the Effects of Plastic Rotation in the Finite Deformation of Anisotropic Elastoplastic Materials", *Mech Mat.*, Vol.2, PP.287-304, 1983
- 4) Y. F. Dafalias, "The Plastic Spin", *J. Appl. Mech ASME*, Vol.52, PP.865-871, 1987
- 5) Y. F. Dafalias and E. C. Aifantis, "On the Microscopic Origin of the Plastic Spin", *Acta Mechanica*, Vol.82, PP.31-48, 1990
- 6) J. Ning and E. C. Aifantis, "On anisotropic Finite Deformation Plasticity Part I", *Acta Mechanica*, Vol.106, PP.55-72, 1994
- 7) J.E. Paulun and R. B. Pecherski, "On the Relation for Plastic Spin", *Arch Appl. Mech.*, Vol.62, PP.376-385, 1992
- 8) R.B. Pecherski, "The Plastic Spin Concept and the Theory of Finite Plastic Deformations with Induced Anisotropy", *Arch Mech*, Vol.40, NO.5-6, PP.807-818, 1988
- 9) H. M. Zbib and E. C. Aifantis, "On the Concept of Relative and Plastic Spins and Its Implications to Large Deformation Theories", *Acta Mechanica*, Vol.75, PP.15-33, 1988
- 10) E. Van Der Giessen, "Continuum Models of Large Deformation Plasticity Part I", *Eur. J. Mech, A/Solids*, Vol.8, NO.1, PP.15-34, 1989
- 11) E. Van Der Giessen, "Continuum Models of Large Deformation Plasticity Part II", *Eur. J. Mech, A/Solids*, Vol.8, NO.2, PP.89-108, 1989
- 12) E. Van Der Giessen, "Micromechanical and Thermodynamic Aspects of the Plastic Spin", *Int. J. Plasticity*, Vol.7, PP.365-386, 1991
- 13) J. Boukadia and F. Sidoroff, "Simple Shear and Torsion of a perfectly Plastic Single Crystal in Finite Transformations", *Arch Mech*, Vol.406, NO.5-6, PP.497-513, 1988
- 14) J.J. Gilman, "Dislocation Mobility in Crystals", *J. Appl. Phys.*, Vol.36, NO.10, PP.3195-3206, 1965
- 15) W.G. Johnston, "Yield Point and Delay Times in Single Crystals", *J. Appl. Phys.*, Vol.33, NO.9, PP.2716-2730, 1966