

알루미늄 판재의 이방성거동 예측을 위한 현상학적 모델과 결정소성학적 모델의 비교연구

정원진[#] · 윤정환¹ · A. Cuitino²

Study on Phenomenological and Crystal Plasticity Models to Predict Anisotropic Behaviors for Aluminum Alloy Sheets

W. J. Chung, J. W. Yoon, A. Cuitino

(Received October 12, 2006)

Abstract

Anisotropy has an important effect on the strain distribution in aluminum alloy sheet forming, and it is closely related to the thinning and formability of sheet metals. Thus, the anisotropy of the material should be properly considered for the realistic analyses of aluminum sheet forming processes. For this, anisotropy can be approached in two different scales: phenomenological and microstructural (polycrystal) models. Recent anisotropic models (Yld2000-2d; Barlat et al.[1] 2003, Cuitino et al.[2] 1992) were employed in this work. For the simulation using shell element, the method which can impose plane stress condition in the polycrystal model is developed. Lankford values and yield stress ratios are calculated along various directions. As planar anisotropic behavior, a circular cup deep drawing simulation was carried out to compare the phenomenological and microstructure models in terms of earing profile.

Key Words : Texture, Anisotropy, Crystal Plasticity, Phenomenological Model, Aluminum

1. 서 론

지금까지 금속 판재의 이방성을 적절히 고려하기 위하여 다른 차원에서 두 가지 방법이 연구되어 왔다. 거시적인 차원에서 여러 가지 현상학적 모델들이 개발되어 왔으며 그 수치적 효율성 때문에 산업계에서 활용되고 있다. Hill[3]의 모델은 광범위하게 금속판재성형의 모델링에 활용되어 왔다. 최근에 개발된 Yld2000-2d 모델(Barlat 등)[1]은 알루미늄 합금 판재의 이방성 거동에 있어서 매우 우수한 예측을 보여 주고 있다. 금속 판재를 미세한 차원에서 관찰하면 다결정 집합조직으로 구성되어 있다. 이러한 집합조직의 결정학적인 측

면에서 결정립 내부의 슬립을 토대로 소성변형을 표현하는 결정소성학적 모델[4~7]이 이방성을 고려하기 위한 새로운 방법으로 대두되고 있다. 결정소성학적 모델에서는 대부분의 변형이 전위(dislocation)의 슬립과 부결정의 생성에 의하여 이루어진다고 가정한다. 알루미늄 합금 판재는 대부분의 변형이 전위의 슬립에 의해서 발생하는 것이 실험적으로 알려져 있다.

현상학적 모델에 의한 판재성형해석은 정량적으로 매우 정확한 수준에 도달하여 실제 설계에 효과적으로 적용되고 있는 상황이다. 그러나, 결정소성학적 모델은 많은 발전을 이루어 왔음에도 박판재의 실제 성형 해석에 활용되기 위해서는

1. Alcoa technical center

2. Dept. of Aerospace and mechanical Eng. Rutgers Univ.

교신저자: 서울산업대학교 금형설계학과

E-mail: wchung@snut.ac.kr

수치적 방법의 정확성이나 효율성 측면에서 더 많은 개선이 요구되고 있다. Dawson 등[8] 과 Grujicic 등 [9] 은 입방체 요소를 사용하고 Taylor 평균법[4]을 사용하여 원형컵 딥드로잉 공정을 해석하였다. 그러나, 판재성형공정해석에서는 계산 효율성 때문에 쉘 요소의 사용을 선호한다.

본 연구에서는 쉘 요소를 사용한 탄소성유한요소해석이 현상학적 모델과 결정소성학적 모델을 동시에 사용하여 수행되었다. 현상학적 모델로는 Yld-2000-2d 모델을 사용하였으며 결정소성학적 모델로는 Cuitino 등에 의하여 제안된 모델[2]을 사용하였다. 결정소성학적 모델에서 쉘요소를 적용하기 위하여 재료모델에서 두께 방향으로 평면응력 조건을 만족하기 위한 방법이 개발되었다. 이방성을 가진 재료특성에 대한 쉘 모델의 수치적 정확성이 실험치와 비교하여 검증되었다. 두 모델에 대하여 이방성 재료특성의 예측이 각각 수행되어 비교검토되었다. 또한 두 모델에 대하여 원형 컵 딥 드로잉 공정 해석을 수행하여 귀발생 형상을 비교하여 이방성 거동의 예측의 정확성을 비교검토하였다.

2. 재료 모델링 이론

현상학적 모델로써 Yld2000-2d 모델이 최근에 알루미늄의 이방성 예측에 성공적인 결과를 보여왔으므로 이를 채택하였다. 등방가공경화의 가정 하에서 소성이방성은 항복함수의 형상으로 표현된다. 평면응력상태에서 stress deviator의 주 방향 성분의 함수로 다음과 같이 항복함수가 표현된다.

$$\phi = \phi' + \phi'' = 2\bar{\sigma}^a \quad (1)$$

여기서

$$\phi' = \left| X_1' - X_2' \right|^a \quad (2a)$$

$$\phi'' = \left| 2X_2'' + X_1'' \right|^a + \left| 2X_1'' + X_2'' \right|^a \quad (2b)$$

(1)식에서 $a \geq 1$ 일 때 항복면은 볼록한 성질을 가지고 있다. 지수 “a” 는 재료의 마이크로한 차원의 재료의 구조적 특성에 관련되어 있으며 “a” 값이 높으면 항복면의 둥글려진 점에서 곡률을 증가시키는 효과를 가지며 면심입방격자(FCC)재

료에 대해서는 $a=8$, 체심입방격자(BCC)재료에 대해서는 $a=6$ 이 추천된다. 식 (2)에서, X_j' 와 X_k'' 는 X' 와 X'' (2개의 stress deviator의 선형변환)의 주 방향 값이며 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} X_{xx}' \\ X_{yy}' \\ X_{xy}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}' & C_{12}' & 0 \\ C_{21}' & C_{22}' & 0 \\ 0 & 0 & C_{33}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{xx} \\ s_{yy} \\ s_{xy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} X_{xx}'' \\ X_{yy}'' \\ X_{xy}'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}'' & C_{12}'' & 0 \\ C_{21}'' & C_{22}'' & 0 \\ 0 & 0 & C_{33}'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{xx} \\ s_{yy} \\ s_{xy} \end{bmatrix}$$

여기서 x 와 y 는 압연방향과 이에 직각인 방향을 각각 나타낸다. 응력텐서와는 다음과 같은 변환식이 성립한다.

$$\mathbf{X}' = \mathbf{C}'\mathbf{s} = \mathbf{C}'\mathbf{T}\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{L}'\boldsymbol{\sigma}$$

$$\mathbf{X}'' = \mathbf{C}''\mathbf{s} = \mathbf{C}''\mathbf{T}\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{L}''\boldsymbol{\sigma} \quad (4a)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & 0 \\ -1/3 & 2/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4b)$$

식 (4)의 텐서 \mathbf{C}' 과 \mathbf{C}'' 는 8 개의 이방성을 나타내는 계수 α_k (k 는 1 에서 8 까지) 로 식 (5)와 같이 표현될 수 있다. 이 때 계수 α_k 가 모두 1 이 되면 등방성재료가 된다.

$$\begin{aligned} \dot{L}_{11}' &= 2\alpha_1/3 & \dot{L}_{11}'' &= (8\alpha_5 - 2\alpha_3 - 2\alpha_6 + 2\alpha_4)/9 \\ \dot{L}_{12}' &= -\alpha_1/3 & \dot{L}_{12}'' &= (4\alpha_6 - 4\alpha_4 - 4\alpha_5 + \alpha_3)/9 \\ \dot{L}_{21}' &= -\alpha_2/3 & \dot{L}_{21}'' &= (4\alpha_3 - 4\alpha_5 - 4\alpha_4 + \alpha_6)/9 \\ \dot{L}_{22}' &= 2\alpha_2/3 & \dot{L}_{22}'' &= (8\alpha_4 - 2\alpha_6 - 2\alpha_3 + 2\alpha_5)/9 \\ \dot{L}_{33}' &= \alpha_7 & \dot{L}_{33}'' &= \alpha_8 \end{aligned} \quad (5)$$

입력 데이터 $\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}, r_0, r_{45}, r_{90}, \sigma_b$ 만 적절히 표현하고자 한다면 7 개의 상수로 충분하다. $C_{12}'' = C_{21}''$ 가 성립하지 않거나 다른 추가적인 실험 데이터를 고려하게 되면 8 번째 상수를 사용할 수도 있다. 등 2 축 인장상태($\sigma_{yy} = \sigma_{xx}$)에서의 이방성 비($r_b = \dot{\epsilon}_{YY} / \dot{\epsilon}_{XX}$)를 추가적인 실험 데이터로 사용할 수도 있다. 계수 α_k 는 실험적으로 결정될

수 있으며 실험 데이터와 계수 α_k 의 관계가 비선형적이므로 Newton-Raphson 반복법에 의하여 계산된다.

결정소성학적 모델에서는 금속 내부의 슬립은 슬립면 상에서 슬립방향으로 전단변형을 일으키며, 여러 개의 작용 슬립시스템에서 일어나고 있는 전단변형의 총합으로 외부의 거시적 소성변형이 나타난다고 가정한다. 본 연구에서는 Cuitino 등이 제안한 면심입방격자 재료에 대한 전위경화(dislocation-hardening) 모델을 사용한 결정소성학적 모델을 사용하였다.

결정의 전체변형은 작용 슬립면에서의 슬립과 격자(Lattice)의 변형으로 구성된다. Lee[10]는 다음과 같이 전체변형을 소성부분(F^p)과 탄성부분(F^e)의 곱으로 나타낼 수 있음을 보였다.

$$F = F^e F^p \quad (6)$$

결정의 소성변형은 소성부분(F^p)에 결정의 회전 및 탄성변형은 탄성부분(F^e)에 내포된다. 탄소성 해석을 위한 속도구배텐서(L^p)는 다음 식과 같이 표현된다.

$$L^p = \dot{F}^p (F^p)^{-1} \quad (7)$$

응력과 속도구배텐서의 관계식은 식 (8)과 같다.

$$L^p = L^p(\bar{\Sigma}, \bar{Q}) \quad (8)$$

여기서 $\bar{\Sigma}$ 는 응력항을 의미하고 \bar{Q} 는 이에 대응되는 적절한 내부변수를 의미한다. 슬립면의 방향을 고려하여 Rice[6]는 속도구배텐서와 슬립시스템에서의 전단변형률속도와의 관계식을 구하였다.

$$L^p = \sum_{\alpha} \dot{\gamma}^{\alpha} s^{\alpha} \otimes m^{\alpha} \quad (9)$$

Asaro[6]는 슬립 시스템에서 전단변형률속도($\dot{\gamma}^{\alpha}$)와 분해전단응력(τ^{α})의 관계를 다음과 같은 역급수형태로 표현하였다.

$$\dot{\gamma}^{\alpha} = \begin{cases} \dot{\gamma}_0 \left(\frac{\tau^{\alpha}}{g^{\alpha}} \right)^{\frac{1}{m}}, & \text{if } \tau^{\alpha} \geq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

이 식에서 m 은 변형률속도에 관련된 지수이며 $\dot{\gamma}_0$ 는 기준전단변형률이다. 그리고 g^{α} 는 슬립 시스템 α 에서의 현재 전단유동응력이다. 식 (10)는 $(\tau^{\alpha}/g^{\alpha})$ 이 1과 차이가 클 경우 비현실적인 변형률속도가 계산되므로 Cuitino와 Ortiz[2]는 다음과 같은 형태의 수정된 관계식을 사용한다.

$$\dot{\gamma}^{\alpha} = \dot{\gamma}_0 \left[\left(\frac{\tau^{\alpha}}{g^{\alpha}} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right], \tau^{\alpha} \geq g^{\alpha} \quad (11)$$

여기서 만약 $\tau^{\alpha} < g^{\alpha}$ 이면 $\dot{\gamma}^{\alpha} = 0$ 이 된다. 이방법에 의하면 슬립 시스템의 숫자는 2배가 되며 변형률속도는 항상 양의 부호를 가진다. Cuitino 등이 제안한 면심입방격자 재료에 대한 슬립 시스템의 변형경화 모델에서는 가공경화는 대각항만을 이용하며 대각항 간의 연관성은 전위의 진화 모델에 의해서 식 (12)와 같이 주어진다.

$$\dot{g}^{\alpha} = \sum_{\alpha} h^{\alpha\alpha} \dot{\gamma}^{\alpha} \quad (12)$$

여기서 $h^{\alpha\alpha}$ 는 대각 경화상수이며 다음 식으로 주어진다.

$$h^{\alpha\alpha} = \left(\frac{\tau_c^{\alpha}}{\gamma_c^{\alpha}} \right) \left(\frac{g^{\alpha}}{\tau_c^{\alpha}} \right)^3 \left\{ \cosh \left[\left(\frac{\tau_c^{\alpha}}{g^{\alpha}} \right)^2 \right] - 1 \right\} \quad (13)$$

no sum in α

슬립 시스템 α 에 대한 특성 전단응력과 변형률은 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_c^{\alpha} = r \mu b \sqrt{\pi n^{\alpha}}$$

$$\gamma_c^{\alpha} = \frac{b \rho^{\alpha}}{2 \sqrt{n^{\alpha}}} \quad \text{no sum in } \alpha \quad (14)$$

여기서 μ 는 전단탄성계수, n^{α} 는 슬립시스템 α 의 저항전위(obstacle dislocation)의 밀도, ρ 는 전위 밀도, 그리고 b 는 버거스(burgers)벡터이다. r 은 통계역학적 상수로써 다른 슬립시스템 간의 간섭정도를 나타낸다. Franciosi 등[11]은 실험연구를 통하여 다음과 같은 n^{α} 의 진화모델을 제안하였다.

$$n^\alpha = \sum_{\beta} a^{\alpha\beta} \rho^\beta \quad (15)$$

$a^{\alpha\beta}$ 는 실험적으로 구해지는 상수이며 다른 슬립 시스템 간의 상호작용에 의한 가공경화를 고려할 수 있다. 한편 ρ 의 진화모델은 전위의 생성과 소멸을 고려하여 다음과 같이 주어진다.

$$\rho^\alpha = \rho_{sat} \left[1 - \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_{sat}} \right) e^{-\gamma^\alpha / \gamma_{sat}} \right] \quad (16)$$

ρ_0 는 초기전위밀도, ρ_{sat} 는 포화전위밀도이며 γ_{sat} 는 포화전단율이다.

3. 셸 요소를 사용한 결정소성학 모델

본 연구에서는 외연적 시간적분법을 사용하여 해석을 수행하였다. 결정소성학적 모델에서는 변형속도가 직접적으로 고려되기 때문에 실제 성형속도와 동일한 조건에서 응력계산이 수행되어야 한다. 그러나 해석시간 상의 문제로 외연적 시간적분법을 사용하여 판재성형을 해석할 때에는 실제보다 급형의 작동속도를 증가하여 해석을 수행하는 것이 보편적이다.

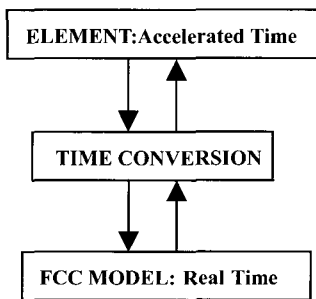


Fig. 1 Schematic diagram of time scaling

따라서 본 해석에서는 Fig. 1 와 같이 전체 시간적분은 증가한 속도에서 수행하고 재료모델 계산시는 실제의 속도로 변환하여 해석을 수행하는 두 개의 시간척도를 사용한 시간 변환방법(Time Scaling)을 사용하였다.

결정소성학적 모델은 3 차원 모델로 주어지기 때문에 셸요소에 적용하기 위하여 평면응력 조건을 만족하는 새로운 방법을 개발하여 적용하였다. Cuitino 등[2]은 2 절의 수식들을 이용하여 시간

t_{n+1} 에서의 1st Piolar-Kirchoff 응력을 (17)식과 같이 표현할 수 있음을 보였다.

$$\mathbf{P}_{n+1} = \hat{\mathbf{P}}(\mathbf{F}_{n+1}; state \text{ at } t_n, \Delta t) \quad (17)$$

여기서 \mathbf{F}_{n+1} 은 시간 t_{n+1} 에서의 변형텐서이다. 식 (17)을 선형화하여 식 (18)와 같은 1st Piolar-Kirchoff 응력과 변형텐서증분($\Delta \mathbf{F}$)간의 거시적 관계식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{P}}}{\partial \mathbf{F}_{n+1}} \cdot \Delta \mathbf{F} = \hat{\mathbf{P}} \quad (18)$$

응력과 셸 요소의 기구적 특성에 의하여 3차원에서 두께 방향을 제외한 나머지 변형텐서증분이 정의될 수 있다. 두께방향의 변형텐서증분은 두께방향의 응력이 0이 되는 조건을 만족하도록 구해져야 한다. 식 (18)에서 변형텐서 성분이 정의된 경우는 해당 변형텐서증분이 0이 되도록 구속조건이 부여된다. 또한, 두께방향 응력이 0이 되도록 구속조건이 부여되어 식 (18)이 계산된다. 두께방향의 변형텐서증분은 평면응력의 조건을 만족하도록 계산되며 식 (18)이 비선형이므로 식 (19)의 식을 만족하도록 선형탐색법에 의한 반복계산을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 해석에서 ε 는 10^{-6} MPa로 하였다.

$$\|P_{zz}\| \leq \varepsilon \quad (19)$$

여기서 P_{zz} 는 두께방향의 1st Piolar-Kirchoff 응력 성분이다.

본 연구에서는 거시응력을 구하기 위하여 재료모델 계산시 Taylor 평균법[4]을 사용하였다. 이 방법에서는 모든 결정립의 변형을 속도텐서는 다결정집합체의 변형을 속도텐서와 같다고 가정한다. 또한 다결정집합체의 거시응력은 각 단결정의 응력을 평균하여 구할 수 있다고 가정한다.

4. 해석 과정 및 결과

알루미늄의 이방성을 방향 별로 잘 예측할 수 있는 지 평가하기 위하여 Fig. 2와 같은 방법으로 이방성 계수 값을 예측하였다.

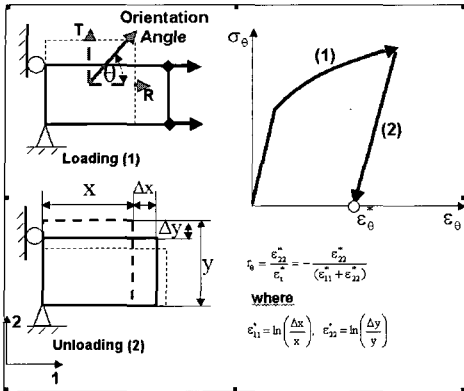


Fig. 2 Schematic diagram for one element test to evaluate r-values along direction ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)

Fig. 2 과 같은 규격($1 \times 1 \times 0.1$, 단위:mm)의 알루미늄 판을 특정 방향으로 10% 신장한 다음 이방성계수에 대한 탄성의 영향을 없애기 위하여 탄성회복시킨 후 이방성계수(Lankford Value)는 Fig. 2 에 표기된 식에 의해서 계산된다. 시험에 사용된 소재는 AL6022-T43 이며 물성치는 NUMISHEET 2005 벤치마크[12]에서 공개된 데이터를 이용하였다. 이 데이터에는 Yld2000-2d 계산에 필요한 물성치나 결정소성학적 모델의 결정립(grain)의 방위(orientation) 데이터가 주어져 있다. Yld2000-2d 모델의 해석에 사용된 물성치는 다음과 같으며 응력-변형을 곡선은 식 (20)으로 주어진다.

$$\alpha_1 = 0.938049, \alpha_2 = 1.045181, \alpha_3 = 0.929135, \\ \alpha_4 = 1.029875, \alpha_5 = 0.987446, \alpha_6 = 1.035941, \\ \alpha_7 = 0.952861, \alpha_8 = 1.101099$$

$$\bar{\sigma} = 363.44 - 234.67 \exp(-7.278 \bar{\epsilon}_p) \text{ (MPa)} \quad (20)$$

그리고, 결정소성학적 모델에 사용한 재료상수는 Table 1 에 나타내었다. 재료상수의 자세한 내용은 참고문헌[2]에 수록되어 있다.

두 모델 모두 동일하게 1,000개의 균일한 시간 증분을 사용하여 전체 해석을 수행하였다. 해석 시간은 2.0Ghz PC에서 Yld2000-2d 모델은 5초가 소요된 반면 결정소성학 모델은 약 5시간이 소요되었다. Table 2에 방향별 이방성계수의 예측과 실험치를 비교하였다. Yld2000-2d 모델의 경우 알려진 바와 같이 실험과 매우 유사한 결과를 보였다. 그러나 결정소성학적 모델은 방향에 따른 경향은

Table 1 Constitutive model parameters in AL6022-T43

Parameter	Value	Parameter	Value
C_{11}	108GPa	C_{22}	61GPa
C_{44}	28.5GPa	g_0	10MPa
S	$135 \times 10^{-3} \text{ Joule/m}^2$	m	0.1
$\dot{\gamma}_0$	10 sec^{-1}	γ_{sat}	0.1 %
ρ_0	10^{12} m^{-2}	ρ_{sat}	10^{15} m^{-2}
b	$2.56 \times 10^{-10} \text{ m}$	μ	26GPa

Table 2 Lankford value Anisotropy

	RD	45°	TD
Experiment	1.029	0.532	0.728
1,000grains	0.975	0.431	0.688
100grains	0.998	0.547	0.682
Yld2000-2d	1.029	0.532	0.728

Table 3 Stress anisotropy

	RD	45°	TD
Experiment	1.066	1.028	1.0
1,000 grains	1.043	1.094	1.0
100 grains	1.049	1.132	1.0
Yld2000-2d	1.066	1.029	1.0

실험과 일치하며 정량적으로도 근접한 결과를 보였으나 아직도 현상학적 모델에 비해서 오차가 큰 것을 알 수 있었다.

Table 3는 재료의 다른 중요한 이방성 물성 중의 하나인 응력의 이방성을 비교한 것이다. Yld2000-2d 모델은 응력의 이방성도 매우 근접하게 잘 예측하고 있으나 결정소성학적 모델은 45° 방향이 압연방향(Rolling Direction)보다 응력이 크게 계산되어 시험과는 다른 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

결정소성학적 모델을 사용한 해석의 경우 평면 응력조건을 만족하기 위한 반복계산을 매 시간증분마다 수행하는데 보통 3~4회의 반복계산 내에 응력기준의 오차가 10^{-6} MPa 이내로 수렴하였다.

Yld2000-2d 모델과 제안된 셀 요소를 이용한 결정소성학적 모델에 의한 해석방법을 사용하여 Fig. 3과 같은 원형컵 딥드로잉 공정을 해석하여 보았다. 이 공정에서 사용된 형상 및 공정변수는 다음과 같다.

Punch diameter (D_p)= 35.56mm
 Punch profile radius (r_p)= 2.28mm
 Die opening radius (D_d)= 36.57mm
 Die profile radius (r_d)= 2.28mm
 Blank inner diameter = 59.38mm
 Blank outer diameter (D_b)= 0.23mm
 Coulomb coefficient of friction = 0.05
 Blank holding force = 10kN
 Punch stroke = 40mm

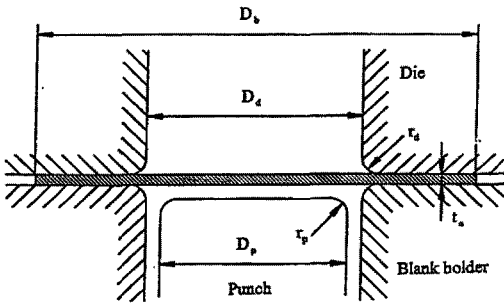


Fig. 3 Schematic view of drawing process

결정소성학적 모델이 해석시간이 매우 많이 소요되기 때문에 문제를 약간 수정하여 해석하였다. 외연적 유한요소법의 경우 요소의 크기에 비례하여 시간증분의 크기가 결정되므로 소재의 가운데 부분을 잘라내고 안 쪽 반경부위의 편치진행방향 변위를 제외한 나머지 방향 변위를 구속하였다. 편치의 편평부에서는 소재의 변형이 대체로 작기 때문에 이방성을 검증하기에는 문제가 없는 가정이라고 판단된다. 또한 해석시간의 절약을 위해서 두께방향 적분점을 1개로 하여 해석을 수행하였다. NUMISHEET 2005 벤치마크에서 주어진 1,000개의 결정립을 40개씩 무작위로 25개의 그룹으로 나눈 뒤 각 요소에 임의순서로 반복적으로 부여하여 계산하였다.

Fig. 4(a)에 해석에 사용된 판재의 메시가 나타나 있으며 Fig. 4(b)는 편치행정 36.5mm 에서 변형된 판재의 모습이다.

편치행정이 약 36.5mm에서 현상학적 모델과 결정소성학적 모델에 의한 귀발생 형상을 비교하였다. Fig. 5에서 결정소성학적 모델에 의한 결과가 현상학적 모델에 의한 결과와 대체로 유사성을 보이고 있다. 그러나 형상이 진동을 보이고 있는데 이는 요소에 할당된 결정립 그룹 간의 평균적인 방위각의 차이 때문인 것으로 판단된다.

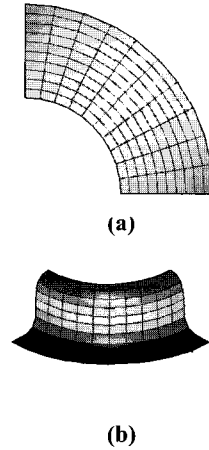


Fig. 4 (a) Initial mesh and (b) deformed mesh

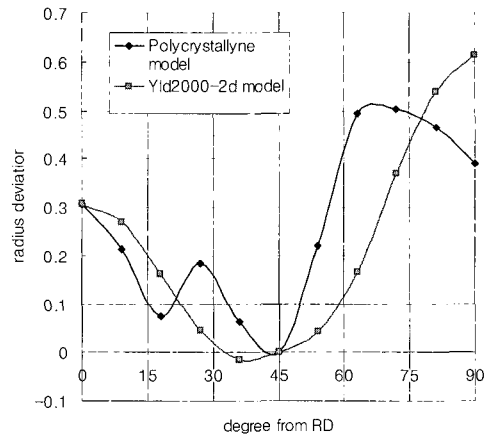


Fig. 5 Earing Profile at punch stroke=36.5mm

5. 결론

알루미늄의 이방성 물성을 셀요소를 사용한 유한요소해석으로 예측하는 경우에 대하여 현상학적 모델 및 결정소성학적 모델의 특성을 비교검토하고자 하였다.

현상학적 모델로는 Yld2000-2d 모델을 선택하였으며 결정소성학적 모델로는 Cutino 등의 모델을 사용하였다. 결정소성학적 모델을 셀요소에 적용하기 위하여 평면응력조건을 만족하기 위한 방법을 개발하였다.

NUMISHEET 2005 벤치마크로 공개된 AL6022-T43 재료에 대하여 이방성 계수 및 응력 이방성을 예측한 결과 Yld2000-2d 모델은 우수한 결과를 보

였고 평면응력을 적용한 결정소성학적 모델은 이 방성계수는 비교적 잘 예측하였으나 응력이방성은 잘 예측하지 못하였다.

또한 원형컵 딥드로잉을 해석하여 귀발생을 Yld2000-2d 모델과 비교한 결과 평면응력을 적용한 결정소성학적 모델도 무작위로 결정립을 요소별로 분배하여 해석한 경우에 귀발생을 정성적으로 예측할 수 있음을 확인하였다. 그러나 귀발생형상의 진동현상을 관측할 수 있었고 정량적으로는 많은 오차를 보였다.

전체적으로 이방성 예측에 있어서 현상학적 모델의 정확성은 매우 높은 수준에 도달한 반면 평면응력을 적용한 결정소성학적 모델은 정확성에 있어서 아직 개선여지가 많고 해석시간이 많이 소요되어 실제 판재성형에 적용하기 위해서는 더 많은 개선이 요구됨을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 국방과학연구소의 고에너지물질 특화연구센터 연구비(UD040023AD) 지원으로 이루어졌음.

참 고 문 헌

- [1] F. Barlat, J. C. Brem, J. W. Yoon, K. Chung, R. E. Dick, S. H. Choi, F. Pourboghrat, E. Chu, D. J. Lege, 2003, Plane stress yield function for aluminum alloy sheets, *Int. J. Plasticity*, Vol. 19, pp. 1297~1319.
- [2] A. M. Cuitiño, M. Ortiz, 1993, Computational modeling of single crystals, *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 1, pp. 255~263.
- [3] R. Hill, 1948, A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, *Proc. Roy. Soc. London A193*, pp. 281~297.
- [4] G. Taylor, 1938, Plastic strain in metals, *Journals of the Institute of Metals*, Vol. 62, p. 307.
- [5] R. Rice, 1971, Inelastic constitutive relations for solids: An internal-variable theory and its application to metal plasticity, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 19, p. 433.
- [6] R. Asaro, 1983, Micromechanics of crystals and polycrystals, *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 23, pp. 1~115.
- [7] U. Kocks, C. Tomé, H. Wenk, 1998, *Texture and Anisotropy: Preferred Orientations in Polycrystals and Their Effect on Material Properties*, Cambridge University Press.
- [8] M. Grujicic, S. Batchu, 2002, Crystal plasticity analysis of earing in deep-drawn OFHC cups, *J. of Material Science*, Vol. 37, pp. 753~764.
- [9] P. R. Dawson, S. R. MacEwen, P. D. Wu, 2003, Advances in sheet metal forming analyses: dealing with mechanical anisotropy from crystallographic texture, *International Materials Reviews*, pp. 86~122.
- [10] E. H. Lee, 1969, Elastic-plastic deformation at finite strains, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 36, p. 1.
- [11] P. Franciosi, A. Zaoui, 1982, Multislip in f.c.c. crystals: A theoretical approach compared with experimental data, *Acta Metallurgica*, Vol. 30, p. 1627.
- [12] L. M. Smith, F. Pourboghrat, J. W. Yoon, T. B. Stoughton, 2005, Proceedings of NUMISHEET 2005: the sixth international conference and workshop on numerical simulation of 3D sheet metal forming processes, August 15-19, Detroit, MI, U.S.A.