

홀 펀칭공정에서 이방성 발전에 관한 연구

윤종현¹ · 이용신² · 허훈[#] · 김승수³ · 김응주³

Development of anisotropy in the hole punching process

J. H. Yoon, Y. S. Lee, H. Huh, S. S. Kim, E. Z. Kim

Abstract

The shearing and punching processes are analyzed with the finite element method using an isotropic material model. The experimental result in the punching process shows that final radiuses of sheet metal according to the rolling direction and transverse direction are different because of the material anisotropy. The material anisotropy is induced by complicated large deformation in the polycrystalline aggregate. The contact region between the punch and sheet metal experiences severe deformation such as shear, compression and tension in the punching process. In this paper, the analysis of punching process for Al 1100 is performed with the ABAQUS Standard. The analysis of texture development and evolution is carried out based on the deformation history in the punching process. The deformation histories are extracted by UMAT in the ABAQUS Standard. The texture development is investigated with the pole figure and yield surface during the punching process.

Key Words : Crystal plasticity (결정소성학), Texture (집합조직), Anisotropy (이방성), Punching analysis (펀칭해석), Pole figure (극점도), Yield surface (항복면)

1. 서 론

대표적인 가공공정인 펀칭공정은 전자부품이나 통신기기 등의 미세부품 가공에 널리 활용되고 있다. 파인블랭킹(fine blanking)과 하이드로 펀칭(hydro-mechanical punching)과 같은 기술이 시도되면서 공정변수의 선정과 공정 조건의 최적화를 위하여 유한요소 해석을 수행하게 된다. 펀칭공정 시 펀치와 소재의 접촉이 이루어지는 영역에서 극심한 소성변형과 응력 집중이 일어나므로 판재의 이방성(anisotropy)이 발생하여 변형 양상이나 최종 파단형상이 복잡하게 된다. 실제 펀칭공정의 실험결과를 살펴보면 판재의 압연방향과 수직방향의 직경이 서로 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 결정소성학 이론을 이용

하여 펀칭공정 중에 발생하는 다결정 금속의 배열과 집합조직의 발전을 관찰하고 이방성을 예측한다.

다결정체의 소성변형을 묘사하기 위한 결정소성학은 각 결정립들이 전체 결정립 집합체(aggregate)와 같은 변형률을 갖는 것으로 가정하는 Taylor 모델과 전체 결정립과 같은 응력상태를 갖는 것으로 가정하는 Sachs 모델로 나눌 수 있다. Taylor 모델은 결정립들간의 평형을 만족시키지 못하지만 각 결정립의 경계에서의 응력장에 의하여 응력의 연속성이 보장될 수 있으며 실험결과도 Sachs 모델보다 정확하게 일치하는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 Taylor 모델을 이용하여 다결정 집합체 내의 결정립들의 발전을 관찰하며 극점도의 분석과 소성 유동포텐셜을 구성하여 판

1. 한국과학기술원 기계공학과

2. 국민대학교 기계 자동차 공학부

3. 한국생산기술연구원

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과, hhuh@kaist.ac.kr

칭공정 시 발생하는 이방성을 관찰한다.

2. 홀 펀칭공정의 유한요소 해석

홀 펀칭공정의 유한요소 해석을 수행하기 위하여 초기 블랭크(blank)는 Fig. 1 과 같이 8500 개의 축대칭 요소를 사용하여 모델링 하였으며 다이와 펀치, 스트리퍼는 각각 analytic die 를 사용하였다. 펀치와 공구의 필렛(fillet) 반경, 클리어런스는 각각 6.0, 0.04, 0.03mm 이다. 사용된 강종은 두께 1.0mm 의 Al 1100 이며 적용된 유동응력 식은 Fig. 2 와 같다. 해석은 탄소성 유한요소 프로그램인 ABAQUS/Standard 를 사용하였으며 펀칭공정 중에 소재의 집합조직 발전을 관찰하기 위하여 변형이 집중되는 영역의 요소에 대하여 UMAT(User Material)을 적용하여 속도구배(velocity gradient) 벡터를 추출하고 이를 바탕으로 결정해석을 수행하게 된다.

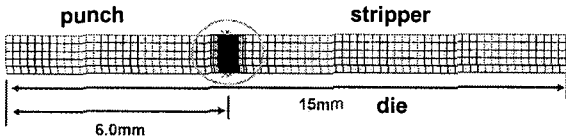


Fig. 1 Finite element modeling

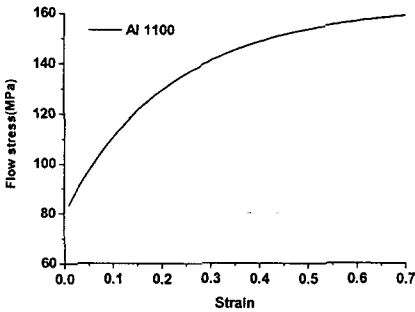


Fig. 2 Flow curve for Al 1100

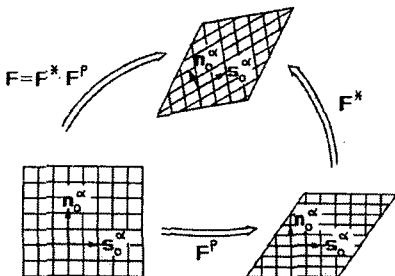


Fig. 3 kinematics of the single crystal deformation

3. 결정 소성학

결정립 내의 슬립(slip)은 소성변형의 대표적인 원인으로 슬립면 위에서 발생하는 전위(dislocation)의 이동을 의미한다. 금속 내부의 슬립은 여러 개의 슬립 시스템 중에서 활성화(active)된 시스템에 의한 전단 변형의 조합으로 거시적인 변형을 유도하게 된다. 초기 결정립들은 변형경로의 특성에 따라 발생하는 슬립에 의하여 방위 변화를 갖게 되어 집합조직을 재형성하게 된다. 따라서 결정 소성학에서는 슬립에 의한 결정학적 운동학(Kinematics)과 구성방정식 그리고 변형경화에 대한 모델이 필요하게 된다.

3.1 단결정 운동학

Fig. 3 에서와 같이 단결정의 변형(F)은 소성에 의한 변형(F^P)과 이를 제외한 변형(F^{*})으로 나눌 수 있다. F^P 는 슬립에 의해서만 생긴 변형이며 F^{*} 는 탄성변형과 격자(lattice)의 회전으로 구성된다. 금속 변형의 경우 탄성을 무시할 수 있으므로 F^{*} 는 식 (1)과 같이 R^{*} 로 대체될 수 있다. 따라서 속도구배 텐서 L 은 식 (2)와 같이 유도할 수 있다.

$$F = F^* \cdot F^P = R^* \cdot F^P \quad (1)$$

$$L = \dot{F} \cdot F^{-1} = \dot{R}^* \cdot R^{*\top} + R^* \cdot \dot{F}^P \cdot (F^P)^{-1} \cdot R^{*\top} \\ = \omega^L + L^P = \omega^L + \omega^P + d^P \quad (2)$$

$$\omega = \omega^L + \omega^P = \dot{R}^* R^{*\top} + \omega^P$$

또한 속도구배 텐서는 식 (3)과 같이 변형률속도 텐서와 스핀텐서의 합으로 표현할 수 있으며 이는 각 슬립시스템의 전단변형률 속도($\dot{\gamma}^{(\alpha)}$)의 조합으로 나타낼 수 있다. P^(α) 와 Q^(α) 는 (α)슬립 시스템에서 정의된 Schmid 텐서의 대칭부와 비대칭부를 의미한다. 따라서 결정립들의 새로운 방위의 결정은 격자의 회전, 식 (4)를 적분하여 계산할 수 있다.

$$d = \frac{1}{2}(L + L^T) = \sum_{\alpha=1}^N P^{(\alpha)} \dot{\gamma}^{(\alpha)} \quad (3)$$

$$\omega = \frac{1}{2}(L - L^T) = \dot{R}^* \cdot R^{*\top} + \sum_{\alpha=1}^N Q^{(\alpha)} \dot{\gamma}^{(\alpha)}$$

$$\dot{R}^* = (\omega - \omega^P) \cdot R^* = \left(\omega - \sum_{\alpha=1}^N Q^{(\alpha)} \cdot \dot{\gamma}^{(\alpha)} \right) \cdot R^* \quad (4)$$

3.2 구성방정식

슬립 시스템에서 전단 변형률속도와 분해전단 응력(resolved shear stress, $\tau^{(\alpha)}$)의 관계를 정의하기 위하여 power-law 형태의 식 (5)를 도입하였다.(Hutchinson[1976], Pan and Rice[1983], Asaro and Needleman[1985]) 아래 식에서 $\dot{\alpha}$ 은 α 슬립 시스템에서 분해전단응력이 그 시스템의 하드니스 $\hat{\tau}^{(\alpha)}$ 에 도달하였을 때의 전단 변형률속도이다. 분해전단응력은 결정립의 코시스트레스(σ)를 현재의 슬립시스템에 투영하여 식(6)과 같이 계산한다. 또한 슬립시스템의 하드니스 발전식은 Voce 에 의하여 제안되고 Kocks 에 의하여 수정된 식(7)을 사용하였다.

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\alpha}^{(\alpha)} \left[\frac{\tau^{(\alpha)}}{\hat{\tau}^{(\alpha)}} \right] \left[\frac{\tau^{(\alpha)}}{\hat{\tau}^{(\alpha)}} \right]^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \quad (5)$$

$$\tau^{(\alpha)} = \text{tr}(\mathbf{P}^{(\alpha)} \boldsymbol{\sigma}^{(s)}) \quad (6)$$

$$\dot{\hat{\tau}}^{(\alpha)} = \Theta_0 \left(\frac{\tau_s(\dot{\gamma}^*) - \hat{\tau}^{(\alpha)}}{\tau_s(\dot{\gamma}^*) - \tau_0} \right) \cdot \dot{\gamma}^*$$

$$\tau_s(\dot{\gamma}^*) = \tau_{s0} \left| \frac{\dot{\gamma}^*}{\dot{\gamma}_s} \right|^{\frac{k_s \theta}{\mu b^3 / \Lambda}}, \quad \dot{\gamma}^* = \sum_{\alpha} |\dot{\gamma}^{(\alpha)}| \quad (7)$$

Table 2 Material parameters of the Voce-Kocks model for Al1100

Parameter	Value
$\dot{\alpha}$	1.0/s
m	0.05
$\hat{\tau}_i$	27.17 MPa
τ_{s0}	61.8 MPa
Θ_0	58.41 MPa
A	0.129 MPa

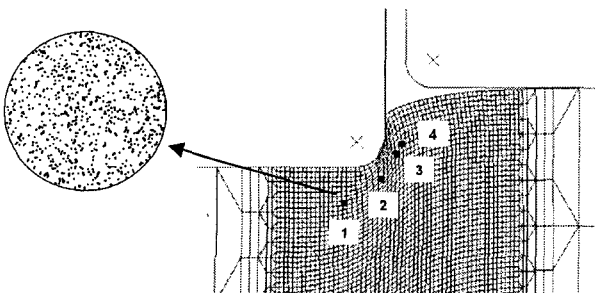
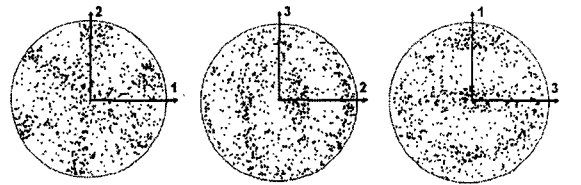


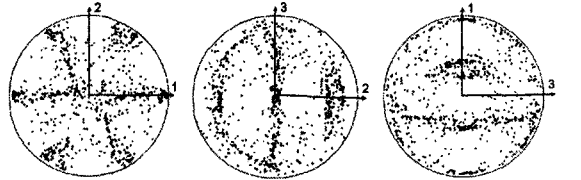
Fig. 4 Inspected material point

4. 해석결과

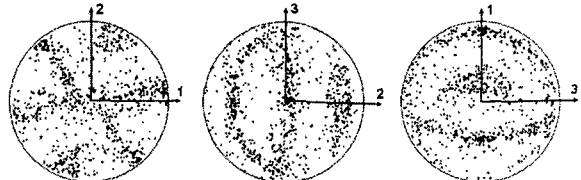
ABAQUS/Standard 를 이용하여 편칭해석을 수행하게 되며 UMAT 을 구성하여 Fig. 4 와 같이 변형이 집중되는 영역 1, 2, 3, 4 의 일정한 변형률에 따른 속도구배 벡터를 계산한다. 속도구배 벡터는 요소의 적분점에서 계산되며 적분점은 결정립 200 개를 포함한다고 가정한다. 편칭공정에 따른 집합조직의 발전을 관찰하기 위하여 위치에 따른 극점도(pole figure)와 항복곡면(yield surface)의 변화를 비교하였다. 초기 결정립들은 방향성을 갖지 않는 등방성 방위각을 갖는다고 가정하여 Fig. 4 의 원과 같은 분포를 보이게 된다. Fig. 5 는 편칭 스트로크 0.3mm 일 때의 각 지점에서 집합조직 분포를 나타낸 극점도이다. 극점도의 무늬가 선명할수록 이방성이 심하게 나타나는 것을 의미한다. Position 1 의 극점도를 살펴보면 각 방향에 따라 전형적인 단순 전단(simple shear)의 극점도 분포를



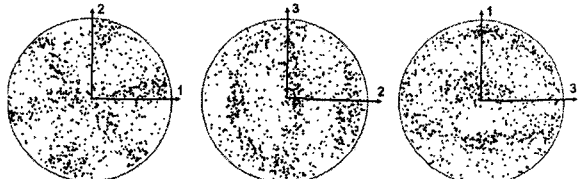
(a) Position 1.



(b) Position 2



(c) Position 3



(d) Position 4

Fig. 5 Simulated {1 1 1} pole figure

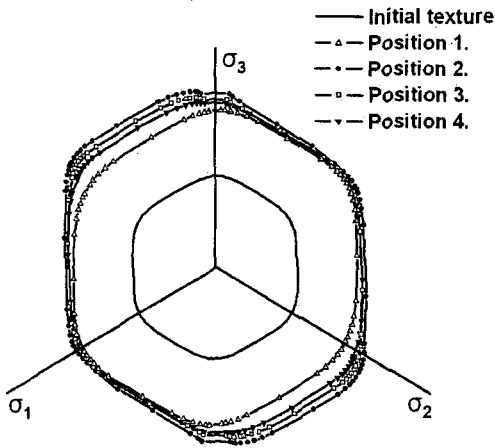


Fig. 6 Evolution of the flow potential surface

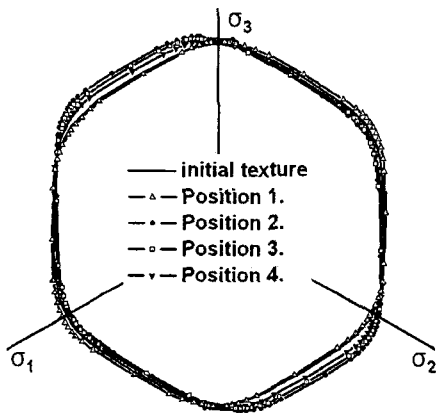


Fig. 7 Flow potential surface

보이며 Position 2, 3, 4 는 전단변형과 평면변형을 압축(plane strain compression)의 변형이 복합적으로 나타나는 극점도를 보이게 된다. 편칭공정 시 초기 파단이 발생하는 Position 2,3 의 극점도가 가장 선명하게 나타나는 것으로 보아 이 지점에서 변형경화와 이방성의 발생이 큰 것으로 판단된다. 다음으로 편칭공정 시 발생하는 하드니스의 발전과 이방성의 발생을 관찰하기 위하여 π -평면에서의 항복곡면을 비교하였다. 점소성유동 해석에서는 항복의 개념이 존재하지 않지만 이와 유사한 등소성 일률을 갖는 유동포텐셜(flow potential)을 구성하여 이를 대체할 수 있다. 실제로 충분히 작은 rate parameter($m < 0.01$)에 대하여 항복곡면과 유동포텐셜은 거의 일치하게 된다. 유동포텐셜을 비교하면 전단변형과 평면변형을 압축이 복합적

으로 집중되는 Position 2,3 에서 가장 크게 발전하여 반경이 가장 큰 유동포텐셜 곡면을 구성하는 것을 알 수 있다.(Fig. 6) 또한 변형경화의 영향은 없이 결정립의 방위에 따른 이방성의 발전을 관찰하기 위하여 Fig. 7 을 비교하면 초기에 Tresca 항복곡면 형태와 비슷한 유동포텐셜 곡면의 형상이 관찰 지점의 변형경로에 따라 변해가는 것을 확인할 수 있으며 Position 2 에서의 형상 변화량이 가장 큰 것을 관찰 할 수 있다.

5. 결 론

편칭공정 시 국부적인 변형으로 인하여 초기 소재에 변형경화와 이방성이 발생하게 된다. 본 논문에서는 결정소성학적 관점에서 초기 소재의 집합조직의 발전을 관찰하고 위치에 따른 변형경화와 이방성의 발생을 예측하기 위하여 각기 다른 변형경로를 갖는 관찰 지점으로부터 속도구배 벡터를 계산하고 이를 바탕으로 집합조직의 발전과 결정립 방위를 계산하였다. 각 방향 극점도와 유동포텐셜을 구성하여 변형이 진행됨에 따라 변형경화와 이방성이 발생이 극심해 지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 정확한 파단을 묘사하고 편칭해석을 수행하기 위해서는 이방성을 고려한 해석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] J. Pan, J. R. Rice, 1983, Rate sensitivity of plastic flow and implication for yield-surface vertices, *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 19, No. 11, pp. 973 ~ 987.
- [2] R. J. Asaro, A. Needleman, 1985, Texture development and strain hardening in rate dependent polycrystals, *Acta metall.*, Vol. 33, No. 6, pp. 923 ~ 953.
- [3] K. K. Mathur, P. R. Dawson, 1989, On modeling the development of crystallographic texture in bulk forming processes, *Int. J. Plasticity*, Vol. 5, pp. 67~94.
- [4] 김응주, 이용신, 1996, FCC 다결정체의 집합조직 발전에 따른 이방성의 변화, *한국기계학회 논문집(A)*, 제 20 권, 제 5 호, pp. 1516~1523.
- [5] U. F. Kocks, C. N. Tomé, H. -R. Wenk, 1998, *Texture and Anisotropy*, Cambridge University Press, Cambridge.