

집합조직 기초 가공경화와 이방성에 의한 반구 성형공정의 전산 시뮬레이션

심정길¹, 김영탁²

Computer Simulation of Hemispherical Forming Process Texture-based Work hardening and Anisotropy

J. K. Sim and Y. T. Keum

Abstract

The hardening and anisotropy based on the crystal plasticity is considered in the numerical simulation of hemispherical sheet forming process to find more realistic simulation results

For calculating the yield shear stresses of each crystal, Taylor's model of the crystalline aggregate is employed. The yield stress of crystalline aggregate is computed by averaging the yield stresses of the crystal. The hardening is evaluated by using the Taylor factor and the critical resolved shear stress of the crystal. In addition, by observing the crystallographic texture and slip system, the anisotropy of the sheet is traced during the forming process.

The anisotropy and hardening behaviors of the sheet found by the crystal plasticity are described better than those of obtained from the Hill's quadratic criterion based on the continuum plasticity.

Key Words : Crystal Plasticity, Texture Evolution, Sheet Metal Forming, Work Hardening, Anisotropy, Taylor Factor

1. 서 론

박판성형공정은 극히 복잡한 변형거동을 갖기 때문에 성형과정 중에 발생하는 파단이나 주름 같은 결함을 예측하는 효과적인 방법이 없다. 최근에는 컴퓨터의 진보 및 유한요소법의 개발에 의해, 박판성형공정이 CAE 화 되고 있다. 그러나 연속체 소성이론을 사용하기 때문에 항복점의 실험적인 정의가 불확실하고, 많은 파라미터를 가진 항복 조건식이 필요하며, 이방성을 고려한 해석에는 한계가 있다. 따라서 결정학적인 실험에 근거한 결정소성학이 새로운 소성이론으로 대두 되고 있다.[1] 다결정 금속의 경우 결정립들의 방위에 의해 이방성을 갖는다. 다결정 금속의 소성변형을 정의한 모델중에는 모든 결정립이 결정립 집합체

와 같은 변형률을 갖는 것으로 가정한 Taylor 의 모델이 있다.

Gottstein 등[2]은 Taylor model 을 이용하여 합금을 위한 새로운 가공경화 모델을 제안하였다. . Gambin. 등[3]은 변형률속도에 의존하지 않는 결정소성학에 기초한 변형 집합조직 발전을 모델링 하였다. 황동타입의 은과 구리타입의 구리와 알루미늄을 대상으로 하여 압연 집합조직을 표현하는 시뮬레이션을 수행하였다. Hosford.[4]등은 Taylor 의 모델을 이용해서 집합조직과 슬립계의 정보로부터 항복곡선의 형상을 계산하였다. 그 결과 Hill 이 가정한 2 차이론 보다 더 정확한 결과를 얻을 수 있음을 보여주었다.

본 논문에서는 다결정 금속의 Taylor 의 모델을 소개하고, Taylor Factor 를 이용한 가공경화로부터

1. 한양대학교 일반대학원

2. 한양대학교 기계공학부, E-mail:ytkeum@hanyang.ac.kr

결정립의 가공경화를 평가하고 집합조직의 발전을 추적하여 이방성 거동을 관찰한다. 또 이것을 알루미늄 박판의 반구성형 시뮬레이션에 도입하여 실제에 더 가까운 반구성형공정을 모사하였고, 연속체 소성론의 결과와 비교하였다.

2. 결정소성학

2.1 구성 방정식

본 연구에서는 Asaro[5]가 고찰한 다결정 금속의 결정학적 운동학 중 집합조직의 변화를 야기시키는 소성변형만을 이용한다.

s 슬립계의 전단변형률속도는 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{\gamma}^s = \dot{a}^s \left(\frac{\tau^s}{g^s} \right) \left(\left| \frac{\tau^s}{g^s} \right| \right)^{\left(\frac{1}{\beta}-1\right)} \quad (1)$$

\dot{a}^s 은 s 슬립계의 분해전단응력 τ^s 가 슬립계의 하드니스 g^s 에 도달했을 때의 전단변형률속도이다. g^s 는 모든 슬립계의 전단변형률 합의 함수이다.[6] β 는 결정립의 변형률속도 민감성지수이다.

2.2 테일러 모델

결정립 집합체에서 s 번째 결정립의 미시적 소성변형률증분은 다음과 같다. m_{ij}^s 는 Schmid tensor 이고, $\dot{\gamma}^s$ 은 결정립의 전단변형률속도이다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \sum_s m_{ij}^s \dot{\gamma}^s \quad (2)$$

Taylor 는 결정립 집합체를 구성하는 각 결정립의 소성변형률이 거시적 소성변형률과 같다고 가정하였다. \dot{E}_{ij} 은 거시적 소성변형률증분이다. 이 가정은 결정립계의 변위 연속을 보장해준다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{E}_{ij} \quad (3)$$

\dot{E}_{ij} 가 주어질 때, 각 슬립계의 $\dot{\gamma}^s$ 는 체적 일정의 조건을 만족시킨다. 이것을 이용하면 식(2)의 독립적인 조건식은 5 개라는 것을 알 수 있다. FCC 금속의 경우 12 개의 슬립계가 있기 때문에 식(2)를 만족시키는 슬립계가 항상 존재한다.

12 개 중에서 실제로 발생하는 5 개의 슬립계를 Taylor 는 소성일증분, 즉 전단변형률증분의 합 $\dot{\Gamma}$ 을 최소로 하는 것이라는 원리를 주장하였다. 이 원리에 의해 FCC 금속의 슬립계를 검토하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다. [1]

$$\dot{\Gamma} = M \dot{E}_{ij} \quad (4)$$

M 은 Taylor Factor 이다.

2.3 집합조직 발전

결정립 집합체에서 소성변형은 각 결정립의 방위변화를 가져온다. 소성변형시 속도구배텐서는 다음과 같다. [7]

$$L_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij} + \dot{\omega}_{ij} \quad (5)$$

$\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률속도텐서이고 $\dot{\omega}_{ij}$ 는 스핀텐서이다. s 슬립계의 스핀텐서는 다음과 같다.[5]

$$\dot{\omega}_{ij} = \sum_s \frac{1}{2} (m_{ij}^s - m_{ji}^s) \dot{\gamma}^s \quad (6)$$

소성변형이 진행된 후의 새로운 결정립 방위는 다음식을 통해 알 수 있다

$$\dot{\omega}_{ij} = \dot{\beta}_{ij} + \dot{\Omega}_{ij} \quad (7)$$

$$\dot{\beta}_{ij} = \sum_s \frac{1}{2} (m_{ij}^s - m_{ji}^s) \dot{\gamma}^s \quad (8)$$

식 (6)에서 스핀텐서를 구하고 식 (8)에서 소성 스핀텐서 $\dot{\beta}_{ij}$ 를 계산하여 식 (7)에 대입하면 격자 회전텐서 $\dot{\Omega}_{ij}$ 를 구할 수 있다. 계산된 격자회전텐서를 다음 식에 대입하여 변형 집합조직을 구할 수 있다.

$$\dot{\phi} = (\dot{\Omega}_{23} \sin \phi_2 + \dot{\Omega}_{31} \cos \phi_2) / \sin \Phi$$

$$\dot{\Phi} = \dot{\Omega}_{23} \cos \phi_2 - \dot{\Omega}_{31} \sin \phi_2 \quad (9)$$

$$\dot{\phi}_2 = \dot{\Omega}_{12} - \dot{\phi} \cos \Phi$$

2.4 가공경화

일반적으로 여러 개의 슬립계가 활동한 경우 결정립의 거시적인 응력과 변형률이 관찰되기 때문에 각 슬립계 마다의 가공경화를 구하는 것은 어렵다. 따라서 Taylor 의 등방경화법칙을 가정하게 된다. 이것은 각 슬립계의 항복전단응력 τ^s 는 슬립계와 관계 없이 모두 같다는 것이다. 이때

τ^s 는 전단변형률의 합 Γ 의 함수이다.

$$\tau^s = K \Gamma^n \quad (10)$$

Horsford 는 등방경화 법칙에 Taylor Factor 를 도입하고 식(12)와 같이 가공경화 법칙을 정의한다. [8]

$$\sigma = M \tau^s \quad (11)$$

$$\sigma = M^{n+1} K \Gamma^n \quad (12)$$

여기서 K 는 강도계수이고, n 은 가공경화지수이다. 이것은 다시 다음과 같은 식을 통해 Fig.1 에서 가공경화를 Hollomon 의 식에 의한가공경화와 Taylor 모델의 식을 비교하였다.

2.5 이방성

박판의 유한요소해석을 위한 각 요소의 적분점에 임의의 집합조직 정보를 삽입한다. 박판성형이

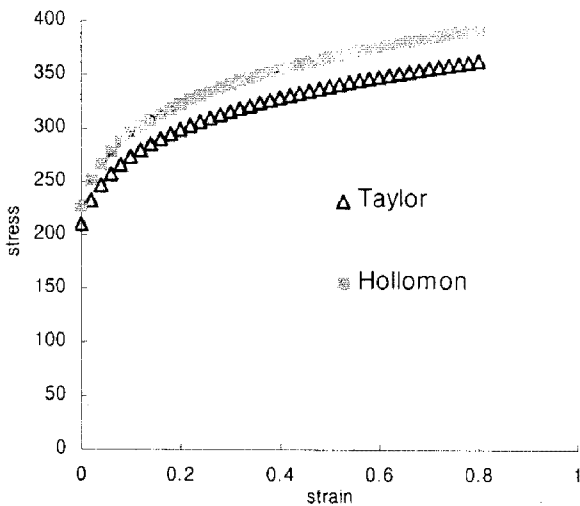


Fig.1 Comparison of hardening behavior between Taylor model and Hollomon model

진행되는 동안 계산 되어지는 분해전단응력과 Taylor factor 그리고 집합조직정보를 극점도로 표현하여 박판의 이방성을 관찰할 수 있다.

3. 반구 성형 시뮬레이션

3.1 모델링

Taylor 모델에 의한 가공경화와 연속체 소성이론에 근거한 가공경화를 비교하기 위해 반구성형 공정을 시뮬레이션 하였다. Keum 등[9]이 개발한 8절점 3 차원 솔리드 요소를 사용했다. Fig.2 은 메쉬를 나눈 박판이고, Fig.3 는 반구성형의 단면도이다.

3.2 해석결과

Fig. 4 는 펀치 이동거리 20mm 일 때의 박판의 변형된 모습이다. 이때 x 축의 좌표에 따른 변형률의 분포는 Fig. 5 에 나타내었다. 성형해석결과 박판에서의 변형률 분포가 매우 잘 일치함을 볼 수 있었다.

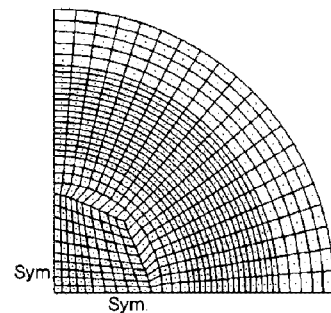


Fig.2 FEM mesh of the sheet used in the simulation of hemispherical forming process (nodes : 1291, elements : 600)

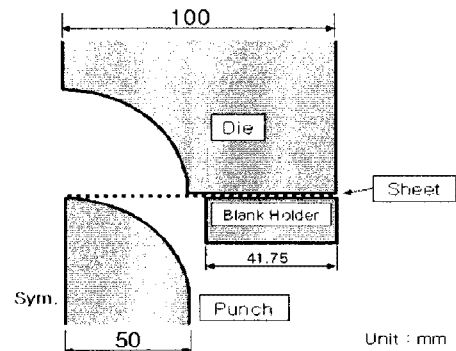


Fig.3 Section view of the tooling in the hemispherical forming process

Fig. 6 은 성형이 진행되는 동안 집합조직의 발전을 극점도를 이용하여 나타낸 것이다. 각 요소의 적분점에 삽입된 집합조직정보가 변형에 따라 발전하는 모습을 보여준다. 성형이 진행됨에 따라 극점도의 중심부에 방위밀도가 높아짐을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 연속체 소성이론을 이용한 박판의 유한요소해석이 갖는 문제점을 극복하기 위해 결정소성이론 중 Taylor 모델을 기본으로 하여 박판의 반구성형 시뮬레이션을 수행하였다.

(1) 집합조직정보와 결정소성이론을 이용하여 박판의 소성변형을 해석하여 연속체 소성이론의 결과와 잘 일치함을 보였다.

(2) 소성변형이 진행되는 동안 박판의 결정학적인 정보를 극점도로 나타내어 이방성이 진전되는 과정을 관찰할 수 있었다.

(3) 집합조직에 기초한 Taylor 의 모델을 도입하여 가공경화를 계산 하였다.

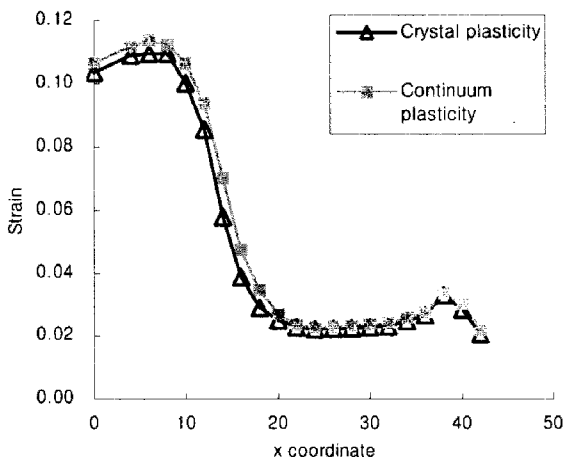
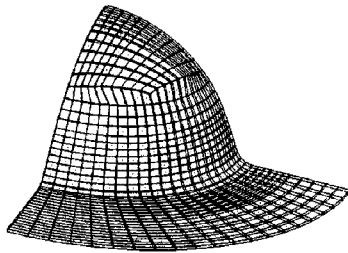


Fig. 4 Deformed shape of the sheet

Fig. 5 Strain distribution of the sheet

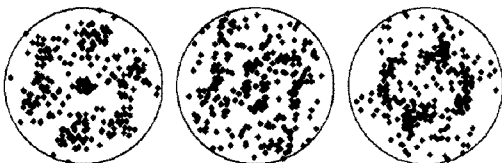


Fig. 6 {111} Pole figure of the sheet during the hemispherical forming process

참고 문헌

- [1] Hiroshi Takahashi, 1999, 多結晶塑性論(Polycrystal Plasticity), corona publishing co.
- [2] F. Roters, D.Raabe and G.Gottstein, 2000, Work hardening in heterogeneous alloys - a microstructural approach based on three internal state variables, Acta materialia, Vol. 48, pp. 4181~4189.
- [3] W.Gambin, F.Barlat, 1997, Modeling of deformation texture development based on rate independent crystal plasticity, International Journal of Plasticity, Vol. 13, No. 1/2, pp. 75~85.
- [4] William F. Hosford, 1998, Reflection on dependence of plastic anisotropy on texture, Materials Science and Engineering, Vol. A257, pp. 1~8.
- [5] R.J.Asaro and A.Needleman, 1984, Texture development and strain hardening in rate dependent polycrystals, Acta metal, Vol. 33, No. 6, pp 923~953.
- [6] Y.Zhou, K.W.Neale and L.S.Toth, 1993, A modified model for simulating latent hardening during the plastic deformation of rate-dependent FCC polycrystals, International Journal of Plasticity, Vol. 9, pp. 961~978.
- [7] E.Nakamachi, C.L.Xie, H.Morimoto, K.Morita, N.Yokoyama, 2002, formability assessment of FCC aluminum alloy sheet by using elastic/crystalline viscoplastic finite element analysis, International Journal of Plasticity, Vol.18, pp. 617~632
- [8] William F. Hosford, 1993, The mechanics of Crystals and Textured Polycrystals, Oxford University Press.
- [9] S.Y.Lee, Y.T.Keum, J.M.Park, K.Chung, and F.Barlat, 1997, Three-dimensional Finite Element Method Simulations of Stamping Processes of Planar Anisotropic Sheet Metals, Int. J. Mech. Sci., Vol. 39 No.10, pp. 1181~1198.