

## 결정 소성학을 이용한 반구 박판 성형공정 전산모사

심정길<sup>1</sup>, 김영탁<sup>2</sup>

# Computer Simulation of Hemispherical Sheet Forming Process Using Crystal Plasticity

J. G. Shim<sup>1</sup> and Y. T. Keum<sup>2</sup>

### Abstract

The hardening and the constitutive equation based on the crystal plasticity are introduced for the numerical simulation of hemispherical sheet metal forming. For calculating the deformation and the stress of the crystal, Taylor's model of the crystalline aggregate is employed. The hardening is evaluated by using the Taylor factor, the critical resolved shear stress of the slip system, and the sum of the crystallographic shears. During the hemispherical forming process, the texture of the sheet metal is evolved by the plastic deformation of the crystal. By observing the texture evolution of the BCC sheet, the texture evolution of the sheet is traced during the forming process. Deformation texture of the BCC sheet is represented by using the pole figure.

The comparison of the strain distribution and punch force in the hemispherical forming process between crystal plasticity and experiment shows the verification of the crystal-based formulation and the accuracy of the hardening and constitutive equation obtained from the crystal plasticity.

**Key Words** : Crystal Plasticity (결정 소성학), Texture Evolution (집합조직발전), Sheet Metal Forming (박판성형), Work Hardening (가공경화), Taylor Factor (테일러 인자)

### 1. 서론

최근에 컴퓨터 응용기술의 진보와 수치해석법의 개발로, 박판성형공정의 많은 작업이 CAE화되고 있다. 그러나 박판 성형공정은 극히 복잡한 변형거동을 갖기 때문에 성형과정 중에 발생하는 파단이나 주름 같은 결함을 정확히 예측하는 것이 어렵다. 따라서 실제 물리적 현상을 반영하여 정도 높은 박판 성형공정의 전산모사를 위해 금속의 결정학적 특성에 기초한 결정 소성학이 새로운 소성이론으로 대두되고 있다.

대부분의 금속은 다결정이며 금속 박판의 경우

압연공정을 거치면서 결정립들의 우선적인 방위 분포 즉 집합조직을 갖게 된다. 집합조직은 재료의 물성에 큰 영향을 미치므로 박판 성형공정의 정도 높은 전산 해석을 위해서는 미세 재료 거동을 고려해야 한다.

Gottstein 등[1]은 Taylor model을 이용하여 합금을 위한 새로운 가공경화 모델을 제안하여 유한요소해석에 도입하였고, Gambin 등[2]은 변형률속도에 의존하지 않는 결정 소성학 기초 집합조직 발전을 모델링 하여 은, 구리 그리고 알루미늄 박판의 압연 집합조직에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

1. 한양대학교 일반대학원 자동차 공학과  
2. 한양대학교 기계공학부, E-mail:ytkeum@hanyang.ac.kr

본 논문에서는 Taylor Factor 를 이용한 가공경화로 부터 결정립의 가공경화를 평가하고 이것을 도입하여 연강 박판의 반구 성형공정을 전산모사하고, 얻어진 변형률과 펀치력의 분포를 실험 결과와 비교한다. 또 성형공정중의 집합조직의 발전을 추적하여 극점도로 표현한다.

## 2. 결정 소성학

### 2.1 결정소성 모델

본 연구에서는 Asaro [3]가 고찰한 다결정 금속의 결정학적 운동학의 식들로부터 각각의 슬립시스템에 발생하는 전단 변형률 속도는 다음과 같이 정의된다.

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

$\dot{\alpha}$  은 분해전단응력  $\tau$  가  $g$  에 도달했을 때의 전단 변형률 속도이다.  $g$  는 결정립의 하드니스이고,  $\beta$  는 결정립의 변형률 속도 민감성지수이다.

Taylor 는 각 결정립의 소성 변형률이 거시적 소성 변형률과 같다고 가정하였다. 거시적 소성 변형률증분이 주어질 때, 다결정 금속의 슬립시스템으로부터 Taylor Factor  $M$  을 구할 수 있다. 이것은 집합조직에 의존하는 평균 방위 분포를 표현하는 인자이다. Kocks 는  $M$  을 도입하여 다음과 같이 가공경화 법칙을 정의한다[4].

$$\sigma = M\tau \quad (2)$$

### 2.2 집합조직 발달

박판의 소성 변형시 계산되는 스핀텐서와 소성 스핀텐서로부터 격자회전텐서  $\dot{\Omega}_j$  를 구할 수 있다. 계산된 격자회전텐서를 다음식에 대입하여 각 결정립의 오일러각으로부터 변형집합조직을 구할 수 있다[5].

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= (\dot{\Omega}_{23} \sin \phi_2 + \dot{\Omega}_{31} \cos \phi_2) / \sin \Phi \\ \dot{\Phi} &= \dot{\Omega}_{23} \cos \phi_2 - \dot{\Omega}_{31} \sin \phi_2 \\ \dot{\phi}_2 &= \dot{\Omega}_{12} - \dot{\phi}_1 \cos \Phi \end{aligned} \quad (3)$$

## 3. 유한요소 전산모사

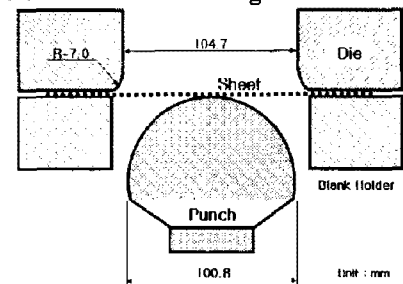
### 3.1 모델링

Fig.1 은 반구성형공정의 장치 단면도이다. 집합조직 분석을 위하여 8 절점 3 차원 솔리드 요소의 적분점마다 집합조직 정보를 오일러각으로 입력한다. 성형해석에 사용한 SCP1 박판은 대칭조건을 고려하여 1292 개의 절점과 600 개의 요소를 갖는 1/4 원만 모델링하고, 전산 시뮬레이션을 위한 공정변수들은 블랭크 홀딩력을 10kN, 마찰계수를 0.144, 박판의 초기 두께를 0.7mm 로 한다.

### 3.2 전산모사 결과

Fig.2 는 펀치의 이동거리가 20mm 일 때 변형된 박판의 x 축방향 요소에서 얻은 소성 변형률 분포이다. 결정 소성학을 기초로 하여 반구 성형을 시뮬레이션하고 실제 박판의 실험결과와 비교한다. 결정 소성학을 이용한 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 잘 일치하고 있음을 보여준다.

Fig.1 Section view of the tooling in the hemispherical forming process.



forming process.

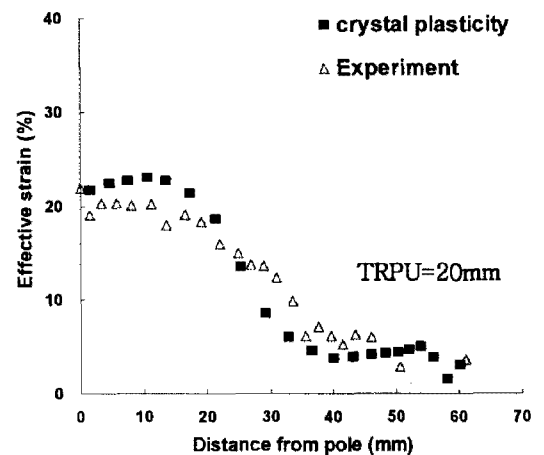


Fig. 2 Comparison of strain distribution of the sheet between crystal plasticity and experiment.

Fig.3 은 펀치 이동거리가 20mm 까지 진행되는 동안에 결정소성학을 기초로 하여 시뮬레이션하여 얻어진 펀치력의 변화를 실험결과와 비교한 그림이다. 시뮬레이션결과가 실험결과보다 평균 10% 이내의 오차로 크게 예측된다.

### 3.3 집합조직 분석

변형집합조직은 입력된 초기 집합조직과 슬립 시스템에 대한 정보에 의해 계산된다. 초기 집합조직으로 랜덤방위의 오일러각 200 개를 생성하였다. Fig. 4 은 펀치 이동거리에 따른 집합조직 발달을 극점도로 나타낸 것이다. {111} 방향의 경우 성형이 진행됨에 따라 극점의 분포가 상하 대칭의 형태로 이동하는 것을 관찰할 수 있다. {100} 방향의 경우 수평 방향으로 분포한 극점들이 수직 방향의 분포로 이동하고 있다.

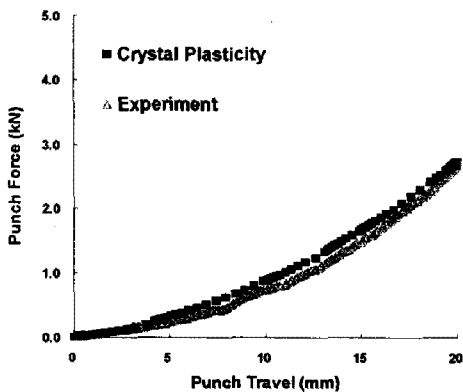


Fig. 3 Comparison of punch force between crystal plasticity and experiment.

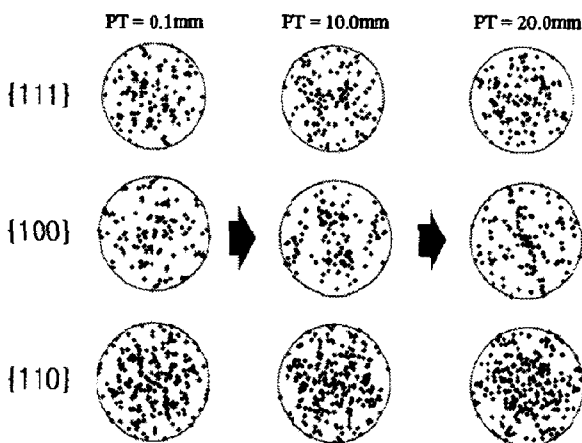


Fig. 4 Pole figures of the sheet during the hemispherical forming process.

{110} 방향의 경우 중심부의 극점의 강도가 점점 높아지고 있음을 보여준다.

## 4. 결론

정도 높은 박판성형공정의 해석을 위해 결정소성학에 기초한 FEM 프로그램을 개발하고 반구성형공정을 전산 시뮬레이션하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 결정소성학에 기초한 반구성형공정 전산모사로부터 얻어진 변형률과 펀치력의 분포를 실험치와 비교하여 결정소성학 기초 유한요소 전산모사의 정확도를 검증할 수 있다.

(2) 소성가공 공정 중 박판의 집합조직 발달을 관찰함으로써 재료의 미세거동을 극점도를 통해 표현한다.

## 참고 문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] U.F. Kocks, C.N. Tome, and H.-R. Wenk, 1998, *Texture and Anisotropy*, Cambridge University Press.
- [5] H.J. Bunge, 1982, *Texture analysis in materials science : mathematical methods*, Butterworths.
- [6] 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.