

디프드로잉 시 DP강의 집합조직 및 이방성 거동 모사

송영식¹, 김병진¹, 한성호², 진광근², 최시훈^{1#}

Simulation of Texture Evolution and Anisotropic Properties in DP steels during Deep Drawing Process

Y. S. Song, B. J. Kim, S. H. Han, K. G. Chin, S. H. Choi

Abstract

A visco-plastic self-consistent (VPSC) polycrystal model has been applied to simulate texture simulation and anisotropic properties of DP steels during deep drawing process. In order to evaluate the strain path during deep drawing, a steady state was assumed in the flange part of deep drawn cup. The final stable orientations were strongly dependent on the initial location in the blank. The evolution of anisotropy of DP steel sheets has been demonstrated through comparison of plastic strain rate vector at the different plastic strain levels.

Key Words : Polycrystal, Texture, Anisotropy, Yield surface

1. 서론

최근 자동차의 차체 경량화와 안전성 확보에 대한 필요성이 대두되면서 dual phase (DP)강과 transformation-induced plasticity (TRIP)강과 같은 고강도 강판의 적용이 확대되고 있다. 특히, DP강은 연한 페라이트 기지 내부에 단단한 소량의 마르텐사이트를 분포시켜 연속 항복거동, 고강도 및 고가공경화와 같은 우수한 기계적 물성을 확보할 수 있다 [1]. 그 결과 자동차의 판넬류와 같은 가공 후 판재의 표면상태와 가공성이 동시에 요구되는 부품에 적용 범위가 점점 확대되고 있다.

성형성이 요구되는 판넬류에 DP강을 적용하기 위해서는 높은 소성변형비와 낮은 평면이방성을 갖는 강판이 상대적으로 유리하다. 최근 포스코는 합금 및 공정조건의 최적화를 통해 기존 DP강에 비해 소성변형비가 높은 드로잉용 DP강을 개발하였다.

본 연구에서는 포스코에서 개발한 드로잉용 DP강의 디프드로잉 시 소성변형에 대한 거동을 이해하기 위해 집합조직 및 이방성의 변화를 이론

적으로 해석하였다. 디프드로잉 공정에 의한 집합조직 및 이방성의 변화를 해석하기 위해 visco-plastic self consistent (VPSC) 다결정모델 [2]을 이용하였다. 컵모양의 디프드로잉 공정에서 플랜지 부위의 소성변형 거동을 정상상태로 가정하고, 컵벽에서의 변형은 무시하여 rolling direction (RD)와 transverse direction(TD)에 대한 디프드로잉 시 변형이력을 계산하였다. DP강의 디프드로잉 시 판재의 RD와 TD로 집합조직의 변화와 항복곡면을 이용한 이방성의 변화도 함께 비교 고찰하였다.

2. 계산방법

다결정모델을 이용한 해석에 필요한 변형이력은 디프드로잉 시 플랜지 부위에서의 변형, 드로잉비, 블랭크 두께변화 등을 이용하여 결정하였다. 플랜지 부위에서의 소성변형은 정상상태로 가정하였으며, 디프드로잉 공정에 의한 집합조직 및 이방성의 변화를 해석하기 위해 반지름방향의 변형률이 0.2, 0.3, 0.4인 상태에서 비교 분석하였다. 해석에 사용한 RD와 TD에 대한 변형속도 텐서, D

1. 순천대학교

2. 포스코 기술연구소

교신저자: 순천대학교, E-mail: shihoon@sunchon.ac.kr

는 아래와 같이 표현할 수 있다 [3].

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & D_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & D_{tt} \end{bmatrix} = D_{rr} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \rho & 0 \\ 0 & 0 & \kappa \end{bmatrix}$$

$$\rho = \frac{D_{\theta\theta}}{D_{rr}}, \quad \kappa = -(1+\rho)$$

여기서 r, θ, κ 는 각각 드로잉 (반지름), 원주 및 두께방향을 나타낸다.

다결정 DP강의 집합조직 및 이방성의 변화를 이론적으로 예측하기 위해 VPSC 다결정 모델을 이용하였다 [2]. 주어진 슬립계, s 에서의 전단속도, $\dot{\gamma}^s$ 는 분해전단응력, τ^s 과 아래 visco-plastic power law식으로 서로 관련되어 있다고 가정한다.

$$\frac{\tau^s}{\tau_0^s} = \left(\frac{\dot{\gamma}^s}{\dot{\gamma}_0^s} \right)^m$$

여기서 m 은 속도민감도 계수를 의미한다. $\dot{\gamma}^s$ 와 τ_0^s 는 각각 기준 전단속도 및 전단응력을 나타낸다. 미시 변형속도는 아래 식을 이용하여 계산이 가능하다.

$$D_{ij} = \dot{\gamma}_0 \sum_s R_{ij}^s \left(\frac{R_{kl}^s S_{kl}}{\tau_0^s} \right)^{1/m}$$

여기서 \mathbf{D} 와 \mathbf{S} 는 각각 변형속도 및 편차응력을 의미한다. 텐서 \mathbf{R} 은 슬립계와 관련되어 있으며 아래 식으로 표현할 수 있다.

$$R_{ij}^s = \frac{1}{2} (b_i^s n_j^s + b_j^s n_i^s)$$

Homogeneous Equivalent Matrix (HEM)과 1-site approximation를 이용하면 각각의 결정립과 주위 기지와의 상호작용 식을 아래와 같이 유도 가능하다.

$$\mathbf{S}^g - \bar{\mathbf{S}} = (\boldsymbol{\Gamma}^{gg^{-1}} + \mathbf{A}) : (\mathbf{D}^g - \bar{\mathbf{D}})$$

여기서 $\bar{\mathbf{S}}$ 와 $\bar{\mathbf{D}}$ 는 기지의 편차응력과 변형속도를 의미한다. 각 슬립계의 self 및 latent hardening은 기준 전단응력, τ_0^s 의 적절한 변화를 통해 고려할 수 있으며, 본 연구에서는 슬립계 수준에서 가공 경화를 고려하기 위해 아래 식을 이용하였다.

$$\dot{\tau}_0^\alpha = \sum_\beta^n Q^{\alpha\beta} |\dot{\gamma}^\beta| \quad \alpha, \beta = 1 \dots n \quad Q^{\alpha\beta} = q^{ij} h_0 \left(1 - \frac{\tau_0^\alpha}{\tau_{sat}} \right)^a$$

여기서 n 은 전체 슬립계의 수이며 $Q^{\alpha\beta}$ 는 hardening 행렬 (nn)를 의미한다. 계산에 사용된 슬립계는 $\{110\}\langle 111 \rangle$, $\{112\}\langle 111 \rangle$, $\{123\}\langle 111 \rangle$ 으로 모두 48개의 슬립계를 고려하였다.

3. 결과 및 고찰

그림1은 디프드로잉 시 RD에 위치한 시편에 대한 집합조직의 변화를 VPSC모델을 이용하여 예측한 결과를 보여준다. (110), (200) 극점도를 이용하여 집합조직의 변화를 비교 분석하였다. 초기 DP강에는 γ -fibre ($\langle 111 \rangle // ND$)와 α -fibre ($\langle 110 \rangle // RD$) 성분을 모두 갖는 집합조직이 발달하고 있었으나, 디프드로잉에 의해 γ -fibre와 α -fibre 성분은 급격하게 감소하고, 반지름 방향으로 소성변형이 증가함에 따라 $\sim \{223\}\langle 110 \rangle$ 집합조직 성분의 밀도가 증가하였다.

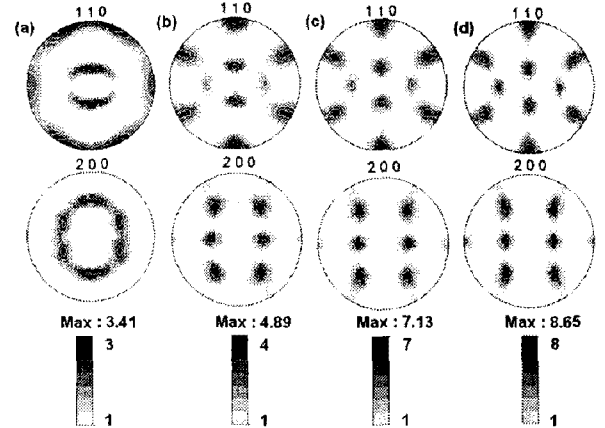


Fig. 1 Evolution of Texture in the RD part of deep drawing cup. (a) initial (b) $\epsilon_{rr}=0.2$ (c) $\epsilon_{rr}=0.3$ (d) $\epsilon_{rr}=0.4$.

그림2은 디프드로잉 시 TD에 위치한 시편에 대한 집합조직의 변화를 VPSC모델을 이용하여 예측한 결과를 극점도상에 나타낸 것이다. γ -fibre와 α -fibre 성분이 발달하고 있는 초기 집합조직과는 다른 변형 집합조직이 디프드로잉 변형에 의해 발달함이 예측되었다. 반지름 방향으로 소성변형이 증가함에 따라 RD에 위치한 시편과도 전혀 다른 $\sim \{111\}\langle 112 \rangle$ 집합조직 성분의 밀도가 증가하였다.

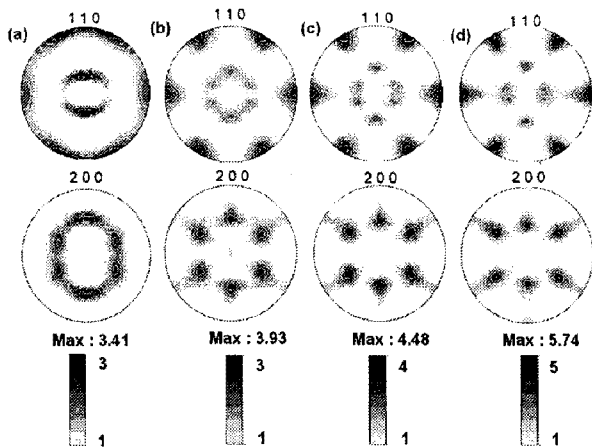


Fig. 2 Evolution of texture in the TD part of deep drawing cup. (a) initial (b) $\epsilon_{rr}=0.2$ (c) $\epsilon_{rr}=0.3$ (d) $\epsilon_{rr}=0.4$.

디프드로잉 공정에서 발생하는 집합조직의 변화는 결과적으로 판재의 이방성의 변화를 유도하게 된다. VPSC 모델을 이용하여 변형집합조직과 각 슬립계의 가공경화를 고려하여 항복곡면을 계산하였다. 그림 3은 디프드로잉 시 RD에 존재하는 시편에서 발달하는 집합조직에 의한 항복곡면의 변화를 이론적으로 계산한 결과이다. DP강의 고가공경화 특성으로 항복곡면이 소성변형 초기 단계에서는 급격하게 팽창하였으며, 소성변형이 증가함에 따라 RD로 찌그러진 형태를 가지면서 등방성의 가공경화에서 벗어남을 알 수 있다.

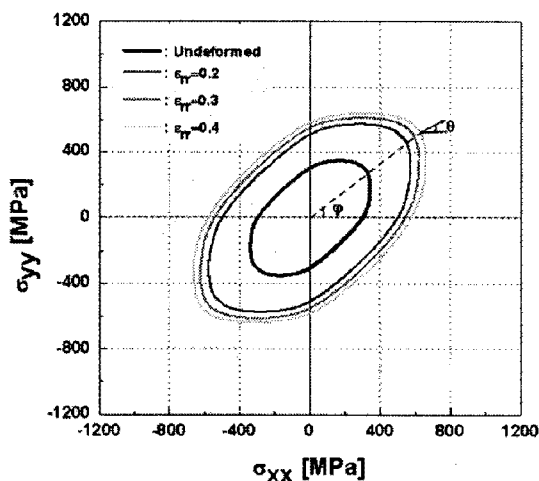


Fig. 3 Evolution of yield surface in the RD part of deep drawing cup.

항복곡면의 변화를 시각적으로 명확하게 비교하기 위해 그림 3에 나타난 항복곡면에 수직인 소성 변형속도 벡터, D^p 를 항복곡면의 제1, 2사분면에 대해서 반 시계 방향으로 계산하였다. 그림 4로부터 소성 변형속도 벡터는 소성변형이 증가함에 따라 서로 일치하지 않은 영역이 많이 존재함을 알 수 있다.

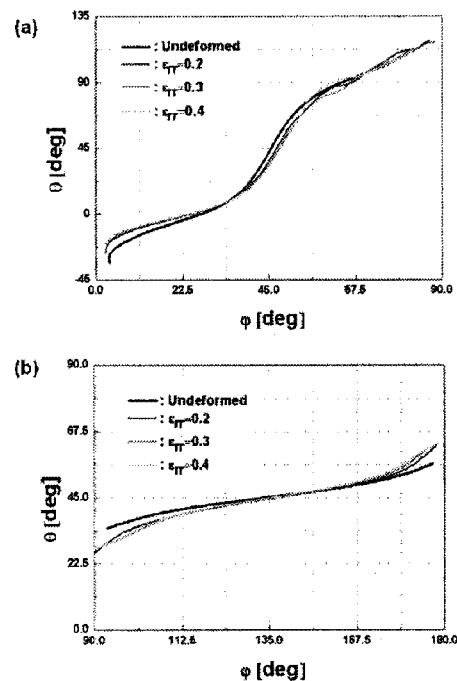


Fig. 4 Evolution of plastic strain rate vector in the RD part of deep drawing cup. (a) first quadrant (b) second quadrant.

컵모양의 디프드로잉 공정에서 RD에 해당하는 영역에서의 응력상태는 제4사분면의 압축TD에 가깝게 존재한다. 이 영역은 대칭관계를 이용하면 제2사분면의 TD부근의 응력상태에 해당하므로 이 영역의 소성 변형속도 벡터의 변화가 의미가 있다. 그림 4로부터 이 영역에서의 이방성의 변화가 다른 영역에 비해 상대적으로 크고, 변형초기에 쉽게 포화됨을 알 수 있었다. 그림 5는 디프드로잉 시 TD에 존재하는 시편에 발달하는 집합조직을 이용하여 계산한 항복곡면의 변화를 보여준다. RD에 해당하는 시편과 마찬가지로 소성변형 초기 단계에서는 급격하게 팽창하였으며, 변형이 증가함에 따라 RD로 존재하는 시편과는 달리 TD로 찌그러진 형태를 가지면서 등방성의 가공경화에서 벗어남을 알 수 있다.

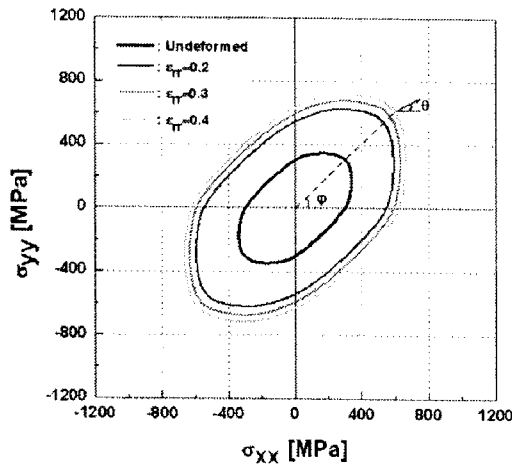


Fig. 5 Evolution of yield surface in the TD part of deep drawing cup.

그림6은 항복곡면의 변화를 시각적으로 명확하게 비교하기 위해 그림5에 나타난 항복곡면에 수직인 소성 변형속도 벡터, D^p 를 항복곡면의 제1, 2사분면에서 대해서 계산한 결과이다. RD에 해당하는 시편의 경우와 마찬가지로 소성 변형속도 벡터는 소성변형이 증가함에 따라 서로 일치하지 않은 영역이 뚜렷하였다.

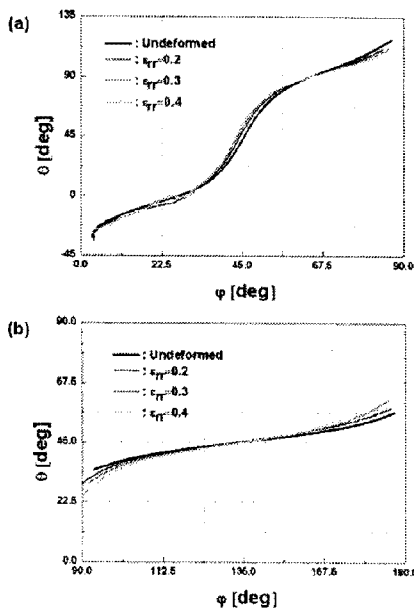


Fig. 6 Evolution of plastic strain rate vector in the TD part of deep drawing cup.

컵모양의 디프드로잉 공정에서 TD영역에서의 응력상태는 제2사분면의 압축 RD에 가깝게 존재하는데, 이 영역에서 소성 변형속도 벡터를 비교하는 것이 의미가 있다. 그림6으로부터 이 영역에서의 이방성의 변화가 다른 영역에 비해 상대적으로 큰 차이가 있고, 변형이 증가함에 따라 지속적으로 변화함을 알 수 있다. 결과적으로 디프드로잉 공정에 의해 DP강판 내부에 집합조직뿐만 아니라 이방성의 변화도 클 것으로 예상할 수 있었다.

4. 결론

DP강의 디프드로잉에 의한 소성변형 시 RD 및 TD에 존재하는 시편의 집합조직 및 이방성의 변화를 VPSC 다결정모델을 이용하여 이론적으로 예측하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) RD에 해당하는 시편의 경우 디프드로잉 변형에 의해 $\sim\{223\}\langle 110\rangle$ 집합조직 성분의 밀도가 증가하였으며, 변형이 증가함에 따라 이방성의 변화는 반지름방향의 소성변형이 0.2에서 포화되어 소성변형이 증가함에 따라 변화는 적었다.

(2) TD방향으로 해당하는 시편의 경우 디프드로잉 변형에 의해 $\sim\{111\}\langle 112\rangle$ 집합조직 성분의 밀도가 증가하였으며, 변형이 증가함에 따라 이방성도 지속적으로 변화하였다.

후기

본 연구결과는 포스코 사외위탁 연구과제(2007Z045) 지원사업으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] D. T. Llewellyn and D. J. Hillis, 1996, Dual phase steels, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 23, pp. 471~478.
- [2] S. -H. Choi, J. C. Brem, F. Barlat and K. H. Oh, 2000, Macroscopic anisotropy in AA5019A sheets, Acta mater., Vol. 48, pp. 1853~1863.
- [3] S. -H. Choi, J. H. Cho, K. H. Oh, K. S. Chung and F. Barlat, 2000, Texture evolution of FCC sheet metals during deep drawing process, Int. J. Mech. Sci., Vol. 42, pp. 1571~1592.