한국소성가공학회 2008년도 추계학술대회 논문집 pp. 130~133

DP강의 디프드로잉 시 집합조직 발달 시뮬레이션

송영식[1]· 한성호[2]· 진광근[2]· 최시훈[1#]

Simulation of Texture Evolution in DP steels during Deep Drawing Process

Y. S. Song, S. H. Han, K. G. Chin, S. H. Choi

Abstract

The formability of DP steels can be affected by not only initial texture but also deformation texture evolved during plastic deformation. To investigate the evolution of deformation texture during deep drawing, deep drawing process for DP steels was carried out experimentally. A rate sensitive polycrystal model was used to predict texture evolution 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. A rate sensitive polycrystal model successfully predicted the texture development in DP steels during deep drawing process. It was found that the final stable orientations were strongly dependent on the initial location in the blank.

Key Words : Polycrystal, Texture, Deep drawing, formability

1. 서 론

자동차 산업에서 차체 경량화와 승객의 안전성 확보에 대한 필요성이 대두되면서 dual phase (DP) 강 및 transformation-induced plasticity (TRIP)강과 같은 고강도 강판의 사용 비율이 증가하고 있다. 기존에는 IF 형 고강도강과 더불어 가공 후 도장 건조 과정에서 강도가 증가하는 BH 강이 주로 외판재로 적용되어 왔다. 최근에는 항복강도가 낮고 BH 성이 우수한 440MPa 급의 DP 강이 차세대 자동차강판으로 각광받고 있으며 적용범위를 확대시키기 위해 활발한 연구가 진행되고 있다[1]. 이러한 DP 강과 같은 고강도강의 사용을 판넬류와 같은 외판재로 확대하기 위해서는 고강도에 따른 높은 소성변형비(plastic strain ratio, r-value)와 낮은 평면이방성이 요구된다. 일반적으로 높은 소성변형비를 갖는 자동차용 강판를 생산하기 위해 소둔공정 후 가공 및 성형에 가장 유리한 {111}//ND 집합조직이 우선적으로 발달하도록 제어하고 있다[2]. 성형에 유리한 γ-fiber 를 갖는 판재의 집합조직은 소성변형모드와 변형량에 따라 다양한 변형집합조직으로 바뀌게 된다[3]. 결과적으로 판재의 성형성은 초기집합조직 뿐만 아니라 변형 중에 변화하는 변형 집합조직에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 최근 포스코는 합금 및 공정조건의 최적화를 통해 기존 DP 강에 비해 소성변형비가 높은 드로잉용 DP 강을 개발하였다.

본 연구에서는 포스코에서 개발한 드로잉용 DP 강의 디프드로잉 시 소성변형에 의한 집합조직 거동[3,4]을 이해하기 위해 디프드로잉된 컵의 rolling direction(RD) 와 transverse direction(TD)에 대하여 전자후방산란회절(EBSD)를 이용하여 미시집합조직을 측정하였다. 디프드로잉 공정에 의한 집합조직 변화를 이론적으로 예측하기 위해 속도민감 다결정모델(rate sensitive polycrystal model)[5]을 이용하였다. 컵모양의 디프드로잉 공정에서 플

1. 순천대학교
2. 포스코 기술연구소
교신저자: 순천대학교, E-mail: shihoon@sunchon.ac.kr

랜지 부위의 소성변형 거동을 정상상태로 가정하고, 컵벽에서의 변형은 무시하여 RD 방향과 TD 방향에 대하여 디프드로잉 시 변형이력을 계산하였다.

2. 실험 및 계산방법

드로잉용 DP강을 컵모양으로 디프드로잉 후 컵 바닥면을 기준으로 RD방향과 TD방향에 해당하는 컵벽의 1/2, 2/3과 6/7지점에서 시편을 각각 취하였다. 시편표면의 변형층과 산화층을 제거하기 위해 기계적연마와 전해연마를 실시하였다. 준비된 시편을 FE-SEM(Hitachi S-4300SE)에 장착된 TSL의 OIM을 이용하여 미시집합조직을 측정하였다. 집합조직 측정은 0.1㎛의 step size를 이용하여 0.2mm^{2}의 면적에 걸쳐 수행하였다. EBSD측정 후 TSL 소프트웨어를 이용하여 결정방위를 분석하였으며, 우선방위에 해당하는 집합조직의 부피분율을 계산하였다.

디프드로잉 시 집합조직을 예측하기 위해 다결정모델에 필요한 변형이력은 플랜지 부위에서의 변형, 드로잉비, 블랭크 두께변화 등을 이용하여 결정하였다. 플랜지 부위에서의 소성변형은 정상상태로 가정하였으며, 디프드로잉 공정에 의한 집합조직 변화를 예측하기 위해 RD 방향과 TD 방향의 변형속도텐서[4]를 이용하여 반지름 방향으로 변형률이 0.2, 0.3, 0.4 인 상태에서 비교 분석하였다.

속도 민감도 다결정모델은 다결정체의 거시적 변형상태가 재료 내부 각 결정립에서의 변형상태와 같다는 가정에 기초한다. 속도민감 다결정모델의 변형은 항상 슬립계 s 에서의 전단변형률속도 $\dot{\gamma}_s$와 분해전단응력 τ^s 사이의 지수법칙에 의해 모델링 된다[5].

$$\tau^s = \tau_o \,\mathrm{sgn}(\dot{\gamma}_s)\left|\frac{\dot{\gamma}_s}{\dot{\gamma}_o}\right|^m = \tau_o \frac{\dot{\gamma}_s}{\dot{\gamma}_o}\left|\frac{\dot{\gamma}_s}{\dot{\gamma}_o}\right|^{m-1}$$

m은 양수이고 속도민감도 (rate sensitivity)이며, τ_o는 기준전단응력, $\dot{\gamma}_o$는 기준전단속도이다. 분해전단응력은 아래 관계식을 통해 결정의 Cauchy 응력텐서, σ_{ij}와 관련되어 있다.

$$\tau^s = \tilde{\sigma}\cdot\vec{n}^s \otimes \bar{b}^s = m^s_{ij}\sigma_{ij}$$

Schmid 텐서 $m^s_{ij}(=b^s_i n^s_j)$는 슬립면에 수직인 단위벡터 $\tilde{n}^s$와 슬립계 s의 슬립방향에 평행한 단위벡터 $\bar{b}^s$로 정의될 수 있다. 주어진 Cauchy 응력텐서 σ_{ij}와 관련되어 있는 변형률속도텐서 $\dot{\varepsilon}_{ij}$의 성분은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{\dot{\gamma}_o}{\tau_o^{1/m}} \sum_s \frac{1}{2}(m^s_{ij}+m^s_{ij})\, m^s_{kl}\sigma_{kl}\left|m^s_{pq}\sigma_{pq}\right|^{\frac{1}{m}-1}$$

변형률속도는 응력포텐셜 (stress potential)로부터 유도가 가능하다고 알려져 있다 [4]. 응력포텐셜은 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{m}{(m+1)}\frac{\dot{\gamma}_o}{\tau_o^{1/m}} \sum_s \left|\frac{1}{2}(m^s_{ij}+m^s_{ij})\sigma_{ij}\right|^{\frac{1}{m}+1} = \frac{m}{(1+m)}\dot{W}(\sigma_{ij})$$

여기서 $\dot{W}(\sigma_{ij})$는 완전구속모델에서 규정한 변형률속도 $\dot{\varepsilon}_{ij}$에 의한 소성일률을 의미한다. 주어진 변형률속도에서 위의 식을 만족시키는 응력상태는 Netwton-Rephson방법을 이용하여 구할 수 있다 [6]. 각 슬립계의 self 및 latent hardening은 기준 전단응력, τ^s_o의 적절한 변화를 통해 고려할 수 있으며, 본 연구에서는 슬립계 수준에서 가공 경화를 고려하기 위해 아래 식을 이용하였다.

$$\dot{\tau}^\alpha_o = \sum_\beta^n Q^{\alpha\beta}\left|\dot{\gamma}^\beta\right| \quad \alpha,\beta = 1...n \qquad Q^{\alpha\beta} = q^{ij}h_o\left(1-\frac{\tau^\alpha_o}{\tau_{sat}}\right)^a$$

여기서 n은 전체 슬립계의 수이며 Q^{ij}는 hardening 행렬 (nn)를 의미한다. 계산에 사용된 슬립계는 {110}<111>, {112}<111>으로 모두 24개의 슬립계를 고려하였다.

3. 결과 및 고찰

디프드로잉 시 DP강 판재의 집합조직 발달을 분석하기 위해 EBSD를 이용하여 초기판재와 디프드로잉 후 RD방향과 TD방향에 해당하는 컵높이 1/2, 2/3과 6/7지점에서 집합조직을 측정하였다.

Fig. 1은 초기 DP강 판재의 집합조직 결과를 역극점도(Inverse Pole figure, IPF) Color Map과 극점도(Pole figure)를 이용하여 나타내었다. 초기판재에 발달한 주 집합조직으로는 γ-fibre (<111>//ND)와 부 집합조직으로는 α-fibre (<110>//RD) 성분의 집합조직이 발달하였음을 알 수 있다.

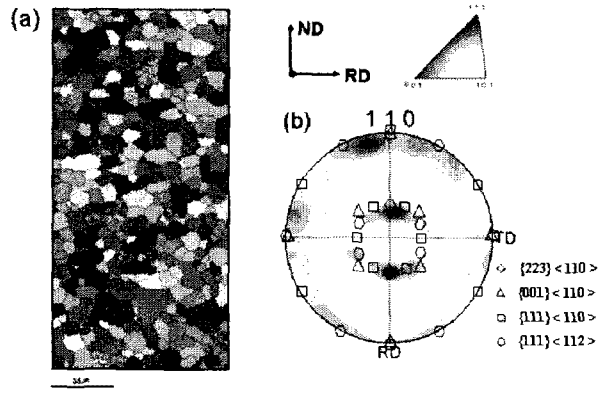

Fig. 1 (a) IPF color map and (b) (110) pole figure for initial DP steels.

Fig. 2의 (a)는 EBSD를 이용하여 측정한 초기 판재의 집합조직과 디프드로잉 후 RD 방향에 해당하는 컵의 높이에 따른 집합조직의 결과를 나타낸 것이다. (b)는 X-ray를 이용하여 측정한 초기 판재의 집합조직과 속도민감 다결정모델을 이용하여 원주방향의 변형량에 따라 계산한 집합조직의 결과를 나타낸 것이다. 초기 DP강 판재에 발달한 γ-fibre 성분의 집합조직이 디프드로잉 후 ~{223}<110> 성분으로 발달하는 것을 알 수 있다. 또한 실험 및 계산결과 모두 원주방향으로 변형이 증가함에 따라 안정방위를 기준으로 결정방위들이 모여드는 것을 알 수 있다. EBSD를 이용한 집합조직 측정결과 컵벽의 높이가 증가함에 따라, 즉 원주방향으로 변형이 증가함에 따라 최대 극밀도 값은 감소하였다. 반면, 다결정 모델을 이용한 계산결과에서는 원주방향으로 변형이 증가함에 따라 최대 극밀도 값이 증가하는 상이한 결과를 얻었다.

결과적으로 다결정 모델을 이용한 집합조직의 안정방위는 정확히 일치하였으나, 원주 방향으로 변형이 증가함에 따라 최대 극밀도 값은 실험결과와 반대경향을 보였다. 이 결과는 EBSD를 이용한 집합조직 측정 시 좁은 측정면적으로 인해 결정립수가 부족하여 발생한 실험적인 오차로 판단된다. 또한 다결정 모델을 이용한 이론적인 계산에서 디프드로잉 시 컵벽에서의 변형을 무시한 결과로 생각된다. 이와 같이 디프드로잉 시 소성변형에 의한 집합조직 거동을 예측하기 위해서는 좀더 엄격한 변형 이력이 필요할 것으로 판단된다.

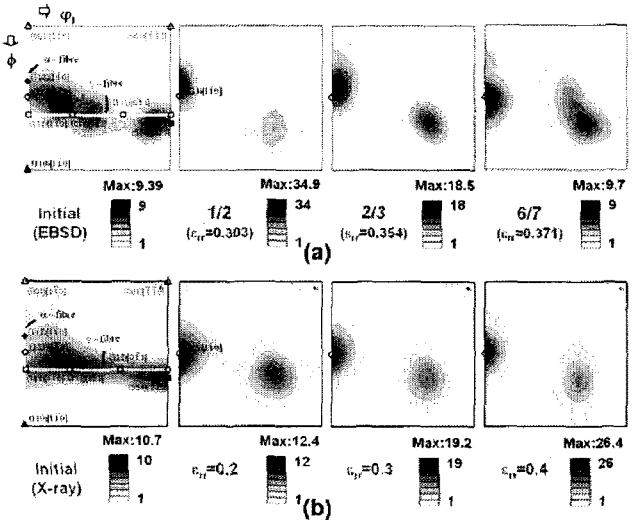

Fig. 2 Evolution of deformation texture in the RD part of deep drawing cup. (a) Experimental (b) Calculation

Fig. 3은 판재의 TD방향에 대하여 디프드로잉 후 컵벽의 높이에 따른 집합조직과 속도민감 다결정 모델을 이용하여 계산한 집합조직의 결과를 나타내었다. RD방향에서와는 달리 초기 γ-fibre 성분이 컵벽의 높이에 따라 ~{111}<112> 성분으로 발달하는 것을 알 수 있다. EBSD를 이용한 실험결과에서 원주방향으로 변형이 증가함에 따라 최대 극밀도 값이 감소하다가 2/3높이에서 증가하였으며, 계산결과에서는 RD 방향에서와 같이 변형이 증가함에 따라 증가하였다.

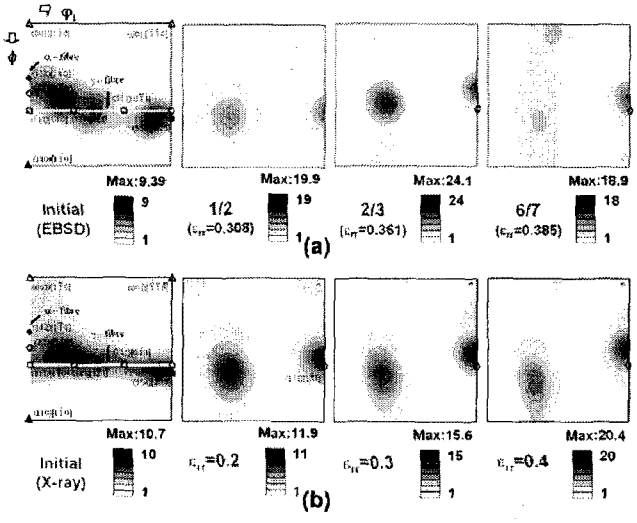

Fig. 3 Evolution of deformation texture in the TD part of deep drawing cup. (a) Experimental (b) Calculation

기존 연구결과에 의하면 판재의 성형성은 초기 집합조직 뿐만 아니라 변형중에 발달하는 변형 집합조직에 영향을 받는다고 알려져 있다[5]. 결과적으로 디프드로잉 공정에 의한 소성변형에서 집합조직의 변화는 성형성에 중요한 변수로 작용할 것으로 판단된다.

DP강의 디프드로잉 소성변형에 따른 γ-fibre와 α-fibre 성분의 부피분율을 알아보기 위해 EBSD를 이용한 집합조직의 결과로부터 3차원 방위분포함수를 이용하여 부피분율을 계산하였다. Fig. 4는 판재의 RD와 TD방향에 대하여 디프드로잉 후 컵벽의 높이에 따른 γ-fibre와 α-fibre 성분의 부피분율을 나타낸 것이다. 컵벽의 높이에 따라 RD방향에서는 {111}<110> 성분의 γ-fibre가 증가하였으며, TD 방향에서는 {111}<112> 성분의 γ-fibre가 증가하였다. 한편, 컵벽의 높이에 따라 RD 방향에서는 α-fibre 성분의 부피분율이 증가하였으며, TD 방향에서는 감소하였다. 이것은 RD 방향에서 결정방위들이 ~{223}<110> 안정방위를 기준으로 그리고 TD 방향에서 결정방위들이 ~{111}<112> 안정방위를 기준으로 모여든 결과로 판단된다.

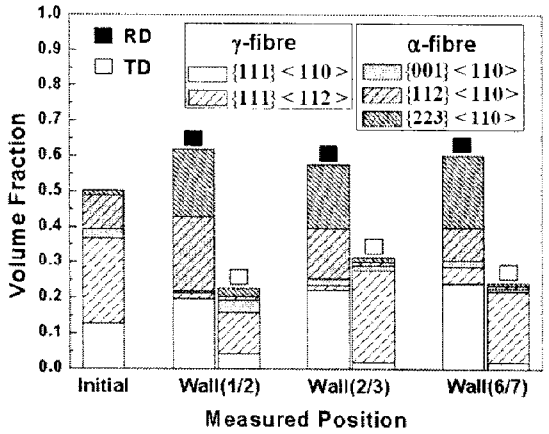

Fig. 4 Volume fraction of texture components measured by EBSD

4. 결 론

DP강의 디프드로잉에 의한 소성변형 시 RD 및 TD방향에 존재하는 시편의 집합조직 변화를 EBSD를 이용하여 실험적으로 측정하였으며, 속도민감 다결정모델을 이용하여 이론적으로 예측하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 디프드로잉 컵의 RD방향에 해당하는 시편의 경우 디프드로잉 변형에 의해 실험 및 이론적인 결과 모두 ~{223}<110> 성분의 변형 집합조직이 발달하였다. EBSD 분석 결과 원주방향으로 변형이 증가함에 따라 안정방위의 최대 극밀도가 감소함을 확인하였다.

(2) 디프드로잉 컵의 TD 방향에 해당하는 시편의 경우 디프드로잉 변형에 의해 ~{111}<112> 성분의 변형 집합조직이 발달하였으며, 안정방위의 최대 극밀도 값을 제외하면 실험 및 이론적인 결과가 서로 잘 일치함을 확인하였다.

(3) 디프드로잉 후 EBSD를 이용하여 측정한 집합조직 성분의 부피분율을 계산한 결과 RD 방향에서는 {111}<110> 성분의 γ-fibre와 α-fibre가 높은 부피분율을 보였으며, TD 방향에서는 {111}<112> 성분의 γ-fibre가 높은 부피분율을 보였다.

후 기

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

참 고 문 헌

[1] D. T. Llewellyn and D. J. Hillis, 1996, Dual phase steels, Ironmaking and Steelmaking., Vol. 23, pp. 471~478.

[2] C. L. Xie and E. Nakamachi, 2002, Investigation of the formability of BCC steel sheets by using crystalline plasticity finite element analysis, Materials and Design., Vol. 23, pp. 59~68.

[3] J. Savoie and J. J. Jonas, 1994, Simulation of the deformation textures induced by deep drawing in extra low carbon steel sheets, Ata metal. Mater., Vol. 42, pp. 4101~4116.

[4] 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.

[5] S. -H. Choi and K. -H. OH, 1997, Rate sensitive analysis of texture evolution in FCC metals, Metals and Materials., Vol. 3, pp. 252~259.

[6] L. S. Toth, P. Gilormini and J. J. Jonas, 1988, Effect of rate sensitivity on the stability of torsion textures, Acta metal., Vol. 36, pp. 3077~3091.