

# 디프드로잉 시 DP강의 집합조직 및 이방성 거동 모사

송영식<sup>1</sup> · 김병진<sup>1</sup> · 한성호<sup>2</sup> · 진광근<sup>2</sup> · 최시훈<sup>#</sup>

## 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

(Received May 8, 2008)

### 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 Model, Texture, Dual Phase, Anisotropy, Yield Surface

### 1. 서 론

최근 10년전부터 전세계적으로 자동차 산업에서 차체 경량화와 승객의 안전성 확보에 대한 필요성이 대두되면서 dual phase(DP)강 및 transformation-induced plasticity(TRIP)강과 같은 고강도 강판의 적용이 확대되고 있다[1]. 기존에는 IF형 고강도강과 더불어 가공 후 도장 건조 과정에서 강도가 증가하는 BH강이 주로 외판재로 적용되어 왔다. 최근에는 항복강도가 낮고 BH성이 우수한 440MPa급의 DP강이 차세대 자동차강판으로 각광받고 있으며 적용범위를 확대시키기 위해 연구가 활발히 진행되고 있다. DP강은 연한 페라이트 기지 내부에 소량의 경한 마르텐사이트로 구성된 이상조직강으로서 연속 항복거동, 고강도 및 고가공경화와 같은 우수한 기계적 물성을 지니는 것으로 알려져 있다[2]. 그 결과 자동차의 판넬류와 같은 가공 후 판재의 표면상태와 가공성이 동시

에 요구되는 부품에 적용 범위가 점점 확대되고 있다.

이러한 DP강과 같은 고강도강의 사용을 판넬류와 같은 외판재로 확대하기 위해서는 고강도에 따른 높은 소성변형비(plastic strain ratio, r-value)와 낮은 평면이방성이 요구된다. 그 이유는 경량재료 [3]를 비롯하여 모든 자동차 재료의 성형성 및 가공성은 소성변형비가 높고, 평면이방성이 낮을수록 우수하다[4,5]. 소성변형비를 비롯한 기계적 물성은 재료의 합금성분을 조절하거나, 압연 및 열처리를 통해 미세조직을 제어하거나 성형 다이등을 성형에 유리하게 설계하여 확보할 수 있다 [6,7]. 자동차용 강판의 경우 열간압연, 냉간압연 및 소둔공정을 통해서 주로 집합조직을 제어하고 있다. 특히, 소둔공정 후 강판 내부에 {111}//ND 집합조직이 우선적으로 발달하도록 제어하고 있다. 그 이유는 자동차용 강판에서 {111}//ND 집합조직, 즉  $\gamma$ -fiber가 성형성에 가장 유리한 집합조직

1. 순천대학교

2. 포스코 기술연구소

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

으로 알려져 왔기 때문이다[8,9]. 소둔공정 후  $\gamma$ -fiber를 갖는 판재의 집합조직 거동은 소성변형모드와 변형량에 따라 변형집합조직으로 바뀌게 된다. 결과적으로 판재의 성형성은 초기집합조직 뿐만 아니라 변형 중에 변화하는 집합조직에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 지금까지 많은 연구자들에 의해 인장[10,11], 압연[12] 그리고 디프드로잉[11,13]과 같은 금속의 소성변형에 의한 결정학적인 집합조직의 변화를 실험적으로 측정하고, 결정학적 모델을 이용하여 이론적으로 연구하여 왔다.

본 연구에서는 포스코에서 개발한 기존 DP강에 비해 소성변형비가 높은 드로잉용 DP강의 디프드로잉 시 소성변형에 대한 거동을 이해하기 위해 집합조직 및 이방성의 변화를 이론적으로 해석하였다. 디프드로잉 공정에 의한 집합조직 및 이방성의 변화를 해석하기 위해 visco-plastic self consistent (VPSC) 다결정모델[14]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

### 2.1 디프드로잉 계산

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 진 변형률이 0.2, 0.3, 0.4인 상태에서 비교 분석하였다. 해석에 사용한 RD와 TD에 대한 변형속도 텐서,  $\mathbf{D}$ 는 아래와 같이 표현할 수 있다[15].

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & D_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & D_{zz} \end{bmatrix} = D_{rr} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \rho & 0 \\ 0 & 0 & \kappa \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{D_{\theta\theta}}{D_{rr}}, \quad \kappa = -(1 + \rho) \quad (2)$$

여기서  $r, \theta, \kappa$ 는 각각 드로잉 (반지름), 원주 및 두께방향을 나타낸다.

### 2.2 VPSC다결정 모델

DP 강 of 디프드로잉 시 소성변형에 따른 집합조직의 변화와 항복곡면을 계산하여 이방성의 변화를 이론적으로 예측하기 위해 visco-plastic self consistent 다결정모델[12]을 이용하였다. 완전구속의 Taylor 모델과는 달리 VPSC 모델은 이웃결정립간의 상호작용을 고려할 수 있는 장점이 있다. 주어진 슬립계,  $s$ 에서의 전단속도,  $\dot{\gamma}^s$ 는 분해전단응력,  $\tau^s$ 과 아래 visco-plastic power law 식으로 서로 관련되어 있다고 가정한다.

$$\frac{\tau^s}{\tau_0^s} = \left( \frac{\dot{\gamma}^s}{\dot{\gamma}_0^s} \right)^m \quad (3)$$

여기서  $m$ 은 속도민감도 계수를 의미한다.  $\dot{\gamma}^s$ 와  $\tau_0^s$ 는 각각 기준 전단속도 및 전단응력을 나타낸다. 미시 변형속도는 아래 식을 이용하여 계산이 가능하다.

$$D_{ij} = \dot{\gamma}_0 \sum_s R_{ij}^s \left( \frac{R_{kl}^s S_{kl}}{\tau_0^s} \right)^{1/m} \quad (4)$$

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

$$R_{ij}^s = \frac{1}{2} (b_i^s n_j^s + b_j^s n_i^s) \quad (5)$$

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

$$\mathbf{S}^g - \bar{\mathbf{S}} = (\boldsymbol{\Gamma}^{gg^{-1}} + \mathbf{A}) : (\mathbf{D}^g - \bar{\mathbf{D}}) \quad (6)$$

여기서  $\bar{\mathbf{S}}$ 와  $\bar{\mathbf{D}}$ 는 기지의 편차응력과 변형속도를 의미한다. 각 슬립계의 self 및 latent hardening은 기준 전단응력,  $\tau_0^s$ 의 적절한 변화를 통해 고려할 수 있으며, 본 연구에서는 슬립계 수준에서 가공 경화를 고려하기 위해 아래 식을 이용하였다.

$$\dot{\tau}_o^\alpha = \sum_{\beta}^n Q^{\alpha\beta} |\dot{\gamma}^\beta| \quad \alpha, \beta = 1 \dots n \quad (7)$$

$$Q^{\alpha\beta} = q^{ij} h_o \left( 1 - \frac{\tau_o^\alpha}{\tau_{sat}} \right)^a \quad (8)$$

여기서  $n$ 은 전체 슬립계의 수이며  $Q^{ij}$ 는 hardening 행렬 ( $nn$ )를 의미한다. 계산에 사용된 슬립계는  $\{110\}\langle 111 \rangle$ ,  $\{112\}\langle 111 \rangle$ 으로 모두 24개의 슬립계를 고려하였으며, Table 1에는 가공경화식에 사용된 계수를 나타내었다.

**Table 1** Microscopic hardening coefficients for viscoplastic self consistent model

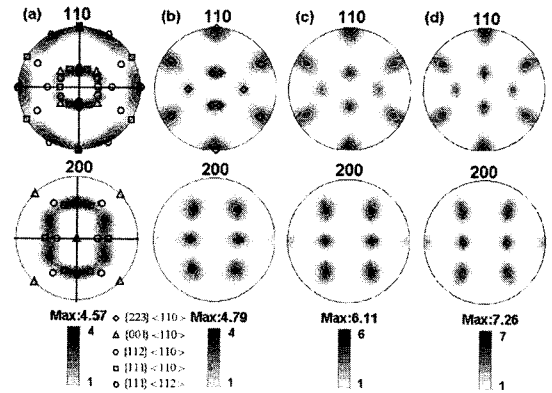
Deformation Mode	$h_o$	$a$	$\tau_o^\alpha$ (MPa)	$\tau_{sat}$ (MPa)
$\{110\}\langle 111 \rangle$	3800	5	159	495
$\{112\}\langle 111 \rangle$				

### 3. 결과 및 고찰

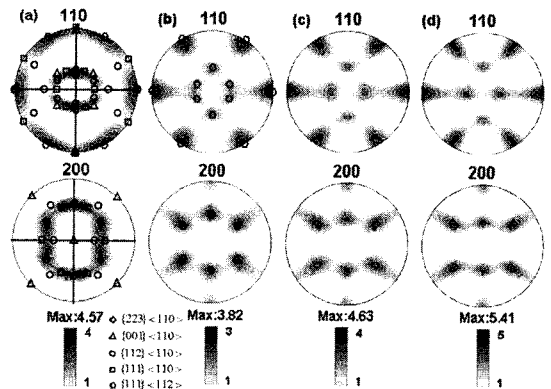
#### 3.1 집합조직 거동

드로잉용 DP강의 디프드로잉 시 집합조직 및 이방성의 거동을 VPSC 다결정모델을 이용하여 분석하고자 하였다. Fig. 1은 디프드로잉 시 RD에 위치한 시편에 대한 집합조직의 변화를 VPSC모델을 이용하여 예측한 결과를 보여준다. (110), (200) 극점도를 이용하여 집합조직의 변화를 비교 분석하였다.

초기판재의 DP강에는  $\gamma$ -fibre( $\langle 111 \rangle // ND$ )와  $\alpha$ -fibre( $\langle 110 \rangle // RD$ ) 성분을 모두 갖는 집합조직이 발달하였다. 하지만 초기 집합조직과는 달리 디프드로잉이 진행됨에 따라  $\gamma$ -fibre와  $\alpha$ -fibre 성분은 급격하게 감소하였다. 디프드로잉에 따른 반지름 방향으로 소성변형이 증가함에 변형초기( $\epsilon_{rr}=0.2$ )에 집합조직은  $\sim \{223\}\langle 110 \rangle$  집합조직 성분으로 급격히 변하였으며, 그 후 변형이 더 증가하여도 안정방위를 기준으로 더욱 모여드는걸 확인할 수 있었다. 결과적으로 변형초기에 집합조직에 따른 이방성의 변화도 클 것으로 판단된다. 또한 반지름 방향으로 변형이 증가함에 따라 밀도가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 그 결과  $\gamma$ -fibre 성분의 부피분율도 감소할 것으로 판단된다.



**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)  $\epsilon_{rr}=0.4$



**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)  $\epsilon_{rr}=0.4$

Fig. 2는 디프드로잉 시 TD에 위치한 시편에 대한 집합조직의 변화를 VPSC모델을 이용하여 예측한 결과를 (110), (200) 극점도상에 나타낸 것이다. 초기에  $\gamma$ -fibre와  $\alpha$ -fibre성분이 발달하고 있는 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 집합조직이 발달하였다.

RD에 위치한 시편과 같이 변형이 증가함에 따라 초기에 집합조직이 안정방위로 급격히 변하였으며, 그 후 변형이 증가하여도 안정방위를 기준으로 더욱 모여드는걸 확인할 수 있었다. RD에 위치한 시편과 같이 변형이 증가함에 따라 밀도가

증가함을 확인할 수 있었으며, 그 결과  $\gamma$ -fibre 성분의 파괴분율이 증가할 것으로 판단된다.

### 3.2 이방성 거동

디프드로잉 공정에 의해 발생하는 집합조직의 변화는 결과적으로 판재의 이방성의 변화를 유도하게 된다. 디프드로잉 시 집합조직의 변화에 따른 이방성의 변화를 예측하기 위해 VPSC 모델을 이용하여 변형집합조직과 각 슬립계의 가공경화를 고려하여 항복곡면을 계산하였다.

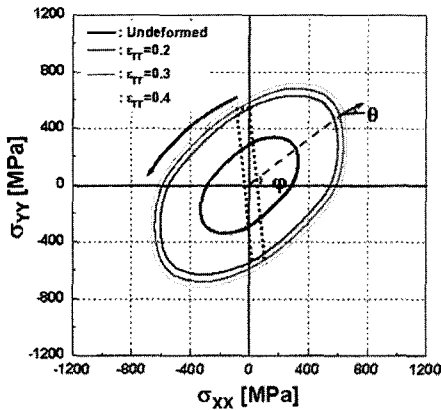


Fig. 3 Evolution of yield surface in the RD part of deep drawing cup

Fig. 3은 디프드로잉 시 RD에 존재하는 시편에서 발달하는 집합조직에 의한 항복곡면의 변화를 이론적으로 계산한 결과이다. DP강의 고가공경화 특성으로 항복곡면이 소성변형 초기 단계에서는 급격하게 팽창하였다. 또한 원주방향으로 소성변형이 증가함에 따라 TD로 찌그러진 형태를 가지면서 등방성의 가공경화에서 벗어남을 알 수 있다. 이 결과로부터 디프드로잉 시 초기단계에서 급격한 집합조직의 변화는 이방성의 변화와 관련이 있음을 확인할 수 있었다.

소성변형에 따른 항복곡면의 변화를 시각적으로 명확하게 비교하기 위해 Fig. 3에 나타난 항복곡면에 수직인 소성 변형속도 벡터,  $D^p$ 를 항복곡면의 제1, 2사분면에 대해서 반 시계 방향으로 계산하였다. Fig. 4로부터 소성 변형속도 벡터는 소성 변형이 증가함에 따라 서로 일치하지 않은 영역이 많이 존재함을 알 수 있다. 특히, 디프드로잉 변형 초기에 소성 변형속도 벡터의 차이가 큰 것으로 보아 이방성의 변화가 초기에 빠르게 진행됨을 시각적으로 확인할 수 있었다.

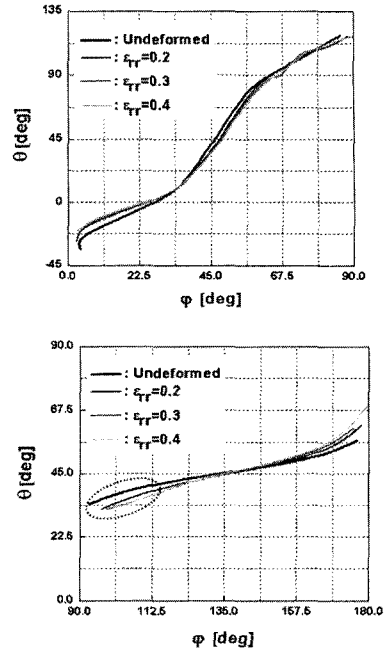


Fig. 4 Evolution of plastic strain rate vector in the RD part of deep drawing cup, (a) first quadrant (b) second quadrant

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. Fig. 4로부터 제2사분면의 TD부근에서 소성 변형속도 벡터의 변화가 상대적으로 큰 것으로 보아 이 영역에서 이방성의 변화가 다른 영역에 비해 상대적으로 크다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 원주방향으로 변형이 증가함에 따라 변형초기에 쉽게 포화됨을 알 수 있었다.

Fig. 5는 디프드로잉 시 TD에 존재하는 시편에 발달하는 집합조직을 이용하여 계산한 항복곡면의 변화를 보여준다. RD에 해당하는 시편과 마찬가지로 소성변형 초기 단계에서는 급격하게 팽창하였다. 이것은 DP강이 기존 BH강이나 IF강과는 달리 높은 가공경화능에 따른 소성변형 거동으로 판단된다. 원주방향으로 변형이 증가함에 따라 RD로 존재하는 시편과는 달리 RD로 찌그러진 형태를 가지면서 등방성의 가공경화에서 벗어남을 알 수 있다. RD에 존재하는 시편에서 알 수 있었던듯이 TD에 존재하는 시편에서도 소성변형에 따른

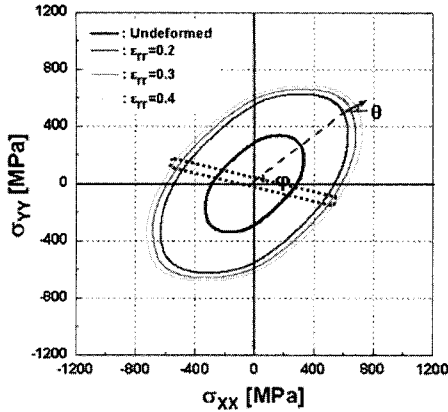


Fig. 5 Evolution of yield surface in the TD part of deep drawing cup

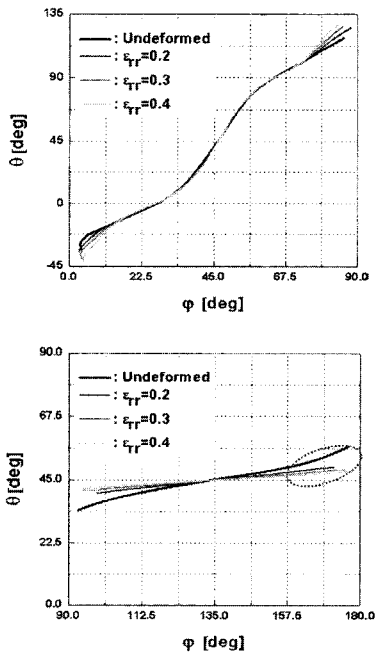


Fig. 6 Evolution of plastic strain rate vector in the TD part of deep drawing cup

집합조직의 변화는 이방성 변화에 밀접한 관련이 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 6은 변형에 따른 항복곡면의 변화를 좀더 시각적으로 명확하게 비교하기 위해 Fig. 5에 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.

컵모양의 디프드로잉 공정에서 TD영역에서의 응력상태는 제2사분면의 압축 RD에 가깝게 존재하는데, 이 영역에서 소성 변형속도 벡터를 비교하는 것이 의미가 있다. 항복곡면의 제1, 2사분면에서 소성 변형속도 벡터를 나타낸 Fig. 6으로부터 이 영역에서의 이방성의 변화가 다른 영역에 비해 상대적으로 큰 차이가 있었다. 특히, 제2사분면의 압축 RD에 해당하는 영역에서 소성 변형속도 벡터의 변화가 가장 차이가 있음을 확인 하였으며, 원주 방향으로 변형이 증가함에 따라 지속적으로 변화함을 알 수 있다. 결과적으로 디프드로잉 공정에 따른 소성변형에 의해 DP강판 내부의 집합조직은 초기 단계에 급격히 변형집합조직으로 발달함을 알 수 있었다. 또한 소성변형이 증가함에 따라 변형집합조직에 따른 이방성의 변화도 상당히 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.

#### 후 기

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

#### 참 고 문 헌

[1] O. Grassel, L. Kruger, G. Frommeyer, L. W. Meyer, 2000, High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development - properties - application, Int. J. Plasticity., Vol. 16, pp. 1391~1409.

- [2] D. T. Llewellyn, D. J. Hillis, 1996, Dual phase steels, *Ironmaking and Steelmaking.*, Vol. 23, pp. 471~478.
- [3] J. Hu, K. Ikeda, T. Murakami, 1998, Effect of texture components on plastic anisotropy and formability of aluminum alloy sheets, *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 73, pp. 49~56.
- [4] C. L. Xie, E. Nakamachi, 2002, Investigations of the formability of BCC steel sheets by using crystalline plasticity finite element analysis, *Mater. Design*, Vol. 23, pp. 59~68.
- [5] E. Nakamachi, C. L. Xie, M. Harimoto, 2001, Drawability assessment of BCC steel sheet by using elastic/crystalline viscoplastic finite element analyses, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 43, pp. 631~652.
- [6] R. K. Ray, J. J. Jonas, M. P. Butron-Guillen, J. Savoie, 1994, Transformation textures in steels, *ISIJ Int.*, Vol. 34, pp. 927~942.
- [7] T. Senuma, 2001, Physical Metallurgy of modern high strength steel sheets, *ISIJ.*, Vol. 41, pp. 520~532.
- [8] C. L. Xie, E. Nakamachi, 2002, The effect of crystallographic textures on the formability of high-strength steel sheet, *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 122, pp. 104~111.
- [9] R. W. Cahn, P. Haasen, E. J. Kramer, 1992, *Materials Science and Technology, A comprehensive treatment*, Vol. 7, Constitution and properties of steel, VCH, pp. 285~333.
- [10] S. -H. Choi, J. H. Cho, F. Barlat, K. Chung, J. W. Kwon, K. H. Oh, 1999, Prediction of yield surface of textured sheet metals, *Metall. Trans.*, Vol. 30A, pp. 377~386.
- [11] D. Daniel, J. Savoie, J. J. Jonas, 1992, Textures induced by tension and deep drawing in low carbon and extra low carbon steel sheets, *Acta Metall. Mater.*, Vol. 41, pp. 1907~1920.
- [12] R. Saha, R. K. Ray, 2008, Effects of severe cold rolling on the texture and grain boundary character of a Ti-Nb IF steel, *Mater. Lett.*, Vol. 62, pp. 222~225.
- [13] J. Savoie, J. J. Jonas, 1994, Simulation of the deformation textures induced by deep drawing in extra low carbon steel sheets, *Acta Metall. Mater.*, Vol. 42, pp. 4101~4116.
- [14] S. H. Choi, J. C. Brem, F. Barlat, K. H. Oh, 2000, Macroscopic anisotropy in AA5019A sheets, *Acta Mater.*, Vol. 48, pp. 1853~1863.
- [15] S. H. Choi, J. H. Cho, K. H. Oh, K. S. Chung, F. Barlat, 2000, Texture evolution of FCC sheet metals during deep drawing process, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 42, pp. 1571~1592.