



[요약문]

다결정압연판재는 열가공공정을 거쳐서 생산되므로 공정의 특성을 반영하는 미세조직/집합조직 특성을 가지게 된다. 결정립들은 특정방향으로 배향하고 결정립의 형상과 크기도 변화한다. 이러한 변화는 거시적으로 다결정판재의 이방성으로 귀결이 되는데, 근본적으로 판재를 구성하는 단결정들의 기계적 물성이 각각의 방향별로 이방성을 띄기 때문이다. 본 자료에서는 압연공정시 다결정판재의 수직/평면이방성의 발생원인을 집합조직과 결정소성학을 이용하여 간략히 제시하고자 하였다.

1. 서 론 (기술의 개요)

현대 산업 사회에서 항공기, 자동차, 전자 제품 등에 사용되는 여러 가지 구조용 금속재료는 주로 다결정으로 구성되어 있으며, 이들은 생산공정상의 변형과 열처리에 의해서 다양한 미세조직적 특징을 나타낸다. 판재와 같은 다결정 소재의 이방성은 근본적으로 단결정 소재가 가지는 탄소성, 전자기 및 열적 이방성에 기인하며 (그림 1), 압연이나 열처리에 따라서 결정립들의 형상분포 (Morphological texture)와 결정배향성 (Crystallographic texture) 등이 일정한 경향성을 가지게 됨에 따라서 다결정 재료의 거시적인 이방성이 형성된다 (그림 2). 판재의 경우 주조 인공을 이용하여 여러 차례의 열간/냉간 압연 등을 거쳐 최종 두께의 제품으로 만들어지기도 하고, 혹은 박판연속주조를 거쳐서 제조되기도 한다. 여러 가지 제조공정에 따라서 판재의 변형 혹은 재결정 집합조직의 고유한 특징이 형성되고, 기계적 성질과 이방성 등이 결정되므로 고부가가치 고성형성 판재의 생산공정설계에 이방성과 집합조직의 고려는 매우 중요하다 할 수 있다.

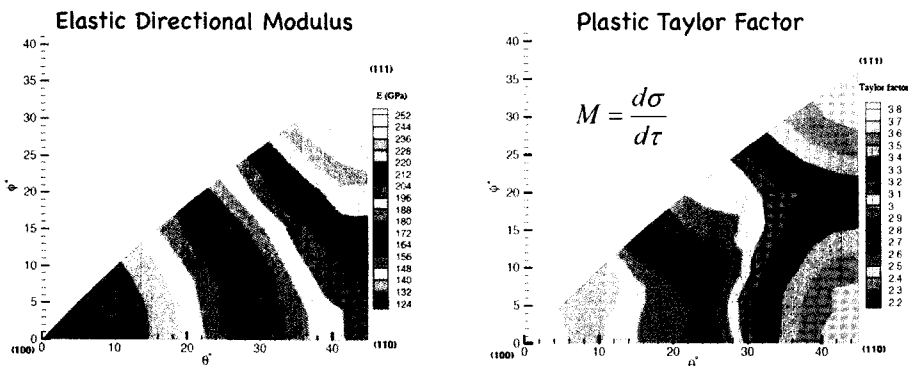
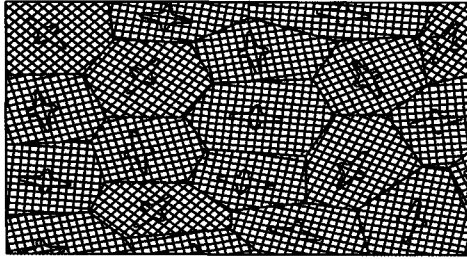
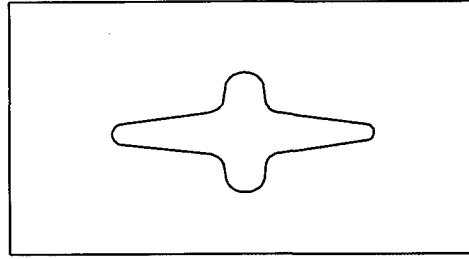


그림 1. 단결정의 탄소성 이방성의 예

최근 들어서 최적화된 기계적 물성의 판재를 제조하기 위해서 압연과 열처리 및 기계적 성질의 평가를 일관적으



Polycrystal



Single crystal

그림 2. 단결정의 총합으로서 다결정의 거시적 이방성을 표현한 개념도

로 관리할 필요성이 제기되고 있고, 공정에 따른 미세조직/집합조직 모델링을 병행하는 연구들이 진행되고 있다. 열간압연에서의 변형과 동적 재결정, 냉간 압연을 통한 변형집합조직의 변화, 그리고 Annealing 처리에 의한 판재의 정적재결정 및 결정성장 등, 공정상에서의 미세조직/집합조직 변화에 대한 연구와, 이렇게 생산된 판재에 대한 일축 인장 혹은 컵드로잉 실험과 같은 기계적 성질 평가를 일관적으로 다룰 필요가 있다. 다음은 이러한 판재생산 시 열가공공정의 개념도이며, 전산모사를 통한 실험과 예측을 병행할 수 있는 작업 흐름도이다 (그림 3)^[1].

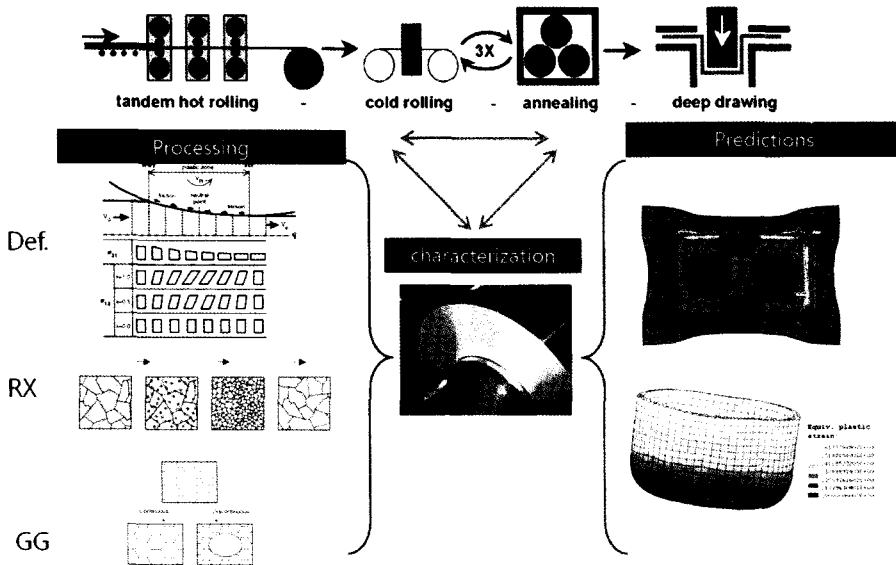


그림 3. 통합적 열기계 공정의 순환 개념도 (공정, 분석, 예측)

판재성형을 통해서 제품을 만들 때, 대부분 소성가공공정을 이용하므로, 다결정재료의 소성 거동에 대한 이해는 재료의 소성가공 범위와 가공 후 변화까지도 예측 가능하게 해준다. 판재의 제조 과정상 형성된 미세조직적 특징, 즉, 결정방위 (Crystallographic texture), 결정립의 크기 및 형상 (Morphological texture), 석출 (Precipitates) 및 분산상 (Dispersoid), 편석 (Segregation) 등이 모두 소성 거동에 영향을 미치게 되지만, 본 연구에서는 이와 같은 여러 가지 미세조직적 특징 중에서 판재의 이방성에 가장 큰 영향을 미친다고 알려진 결정방위 분포 (Crystallographic texture, 혹은 집합조직)에 관해서 논의를 진행하도록 하겠다. 특히 집합조직의 특성을 결정짓는 것은 변형과 열처리 모두를 포함하지만, 본 논문에서는 결정소성학을 바탕으로 소성변형에 의한 집합조직의 변화와

집합조직성분에 의한 소성이방성만을 다루도록 하겠다. 열처리에 따른 미세조직/집합조직의 변화는 문헌^[2]의 상세한 내용을 참조할 수 있다.

본 논문에서는 집합조직 해석을 위한 기본적인 개념에 관해서 간단히 제시하고, 입방정금속과 육방정금속에서 많이 발견되는 집합조직성분들을 제시하였다. 결정소성일반에 대해서 다룬 후, 이들을 이용한 간단한 응용의 예를 보여주었고, 압연시 나타나는 판재의 변형과 집합조직을 다루었으며, 마지막으로 집합조직 성분에 따른 기계적이방성을 다루었다. 판재의 이방성 예측을 위한 방법으로 현상학적 접근 (Phenomenological approaches)과 결정학적 접근방법 (Crystallographic approach)이 시도되어 왔는데, 여기에서는 주로 결정학적 접근방법에 대해서 다루었다.

2. 집합조직개요

다결정재료가 외부의 변형을 수용하는 과정에서 특정한 방향으로 Slip이나 Twin이 발생하며, 거시적으로 결정학적 우선방위 (Crystallographic texture, 혹은 Preferred orientation)를 형성하게 된다. 결정방위의 표현 방법으로 가장 많이 사용하는 것이 Euler angle에 의한 것이며, 전통적으로는 판재의 형상과 결정의 방향을 고려한 Miller index가 개념적으로 이해하기 용이하다. 그 외에 Rodrigues vector과 Quaternions 등은 계산상의 편의성 때문에 Misorientation 계산이나 평균방위 계산 등에 효과적으로 사용되어 계산시간 등을 단축시키는 장점이 있다. 방위공간 (Orientation space)은 특정 방위의 밀도분포 (Orientation distribution function, ODF)를 표현하는 공간이며, 현재 많이 사용하는 공간은 크게 Euler space와 Rodrigues space 등이다. 금속의 결정계 (Crystal symmetry)와 시편의 대칭성 (Sample symmetry)의 두 가지 요인에 의해서 집합조직의 성분이 결정되며, 또한 방위공간의 크기 등도 결정된다. 방위공간에 관한 보다 자세한 사항은 참고문헌^[3,4,5,6]을 통해서 확인할 수 있다. 결정의 방위를 표현하는 여러 가지 방법이 존재하며, 이들은 간단한 수학적 공식에 의해서 상호 교환이 가능하다.

- Miller index: $\{hkl\} \langle uvw \rangle$
- Euler angles: $\{\alpha, \beta, \gamma\}$ 혹은 $\{\varphi_1, \Phi, \varphi_2\}$
- Angle/axis of rotation: $\{\omega; n\}$, $n = (n_1, n_2, n_3)$
- Rodrigues vector: $R = n \tan \frac{\omega}{2} = \{r_1, r_2, r_3\}$,
- Quaternions: $q = (q_0; q) = (q_0; q_1, q_2, q_3)$, $\sum_{i=0}^3 q_i^2 = 1$
- Rotation matrix: $\begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{pmatrix}$

2.1 입방정계(Cubic crystal system)

입방정 결정계 (Cubic crystal system)의 소성변형과 재결정 시 많이 관찰되는 집합조직 성분을 다음 표 1에 정리하였고, 그들의 주요한 위치를 111극점도 상에 표현하였다 (그림 4).

Goss-Brass (α -fiber)와 Brass-S-Copper (β -fiber) 집합조직은 면심입방정 (Face-centered cubic) 재료의 평면변형압축 (Plane strain compression) 조건에서 많이 발견되는 대표적인 변형집합조직 성분이며, Cube 집합조직 성분은 알루미늄 등에서 평면변형 후 재결정 열처리를 통해서 얻어지는 재결정 집합조직으로 알려져 있다. 이외에도 전단변형을 받아서 발생하는 $\{111\}/ND$, 혹은 rotated cube, $\{100\} \langle 011 \rangle$ 등이 있다^[7]. 특히 전단집합조직의 재결정시 Cube형 집합조직성분이 나타나지 않기 때문에 알루미늄판재에서 소성이방성을 향상시키기 위한 방편으로

표 1. 입방정계에서 발견되는 주요한 집합조직 성분^[6]

Component	(hkl) [uvw]	$\{\varphi_1, \varphi_2\}$	$\{r_x, r_y, r_z\}$
Cube	(0 0 1) [1 0 0]	$\{0^\circ, 0^\circ, 0^\circ\}$	$\{0, 0, 0\}$
Goss	(0 1 1) [1 0 0]	$\{0^\circ, 45^\circ, 0^\circ\}$	$\{f, 0, 0\}$
Brass1	(0 1 1) [2 $\bar{1}$ 1]	$\{35.26^\circ, 45^\circ, 0^\circ\}$	$\{f, c, d\}$
Brass2	(0 1 1) [2 1 $\bar{1}$]	$\{324.74^\circ, 45^\circ, 0^\circ\}$	$\{f, -c, -d\}$
Copper1	($\bar{1}$ 1 2) [1 $\bar{1}$ 1]	$\{90^\circ, 35.26^\circ, 315^\circ\}$	$\{c, d, f\}$
Copper2	(1 $\bar{1}$ 2) [1 $\bar{1}$ $\bar{1}$]	$\{270^\circ, 35.26^\circ, 135^\circ\}$	$\{-c, -d, f\}$
S1	($\bar{1}$ $\bar{2}$ 3) [6 3 4]	$\{121^\circ, 36.7^\circ, 206.56^\circ\}$	$\{-l, j, -m\}$
S2	(1 2 3) [6 3 $\bar{4}$]	$\{301^\circ, 36.7^\circ, 26.56^\circ\}$	$\{l, -j, -m\}$
S3	($\bar{1}$ 2 3) [6 $\bar{3}$ 4]	$\{58.98^\circ, 36.7^\circ, 333.43^\circ\}$	$\{l, j, m\}$
S4	(1 $\bar{2}$ 3) [6 $\bar{3}$ $\bar{4}$]	$\{238.98^\circ, 36.7^\circ, 153.43^\circ\}$	$\{-l, -j, m\}$
	$c: (\sqrt{2}-1)(\sqrt{3}-\sqrt{2})$	$d: (\sqrt{3}-\sqrt{2})$	$f: (\sqrt{2}-1)$
	$j: 0.23456$	$l: 0.25355$	$m: 0.29067$

전단집합조직 발생 기구에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다^[8,9].

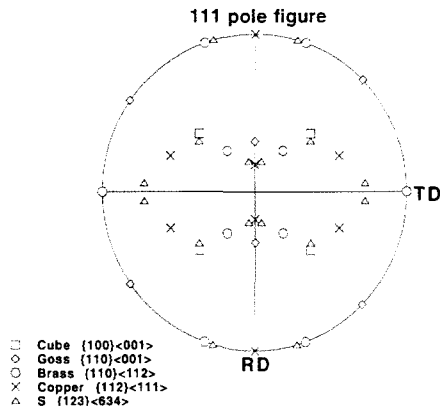


그림 4. (111) 극점도 상에 나타나는 주요 집합조직 성분

체심입방정금속 (Body-centered Cubic)의 슬립계는 일반적으로 면심입방정금속에 비해서 많이 작동한다고 알려져 있으며, 냉간압연집합조직으로 많이 발견되는 성분은 RD//<110> (α -fiber)와 ND//<111>, (γ -fiber) 등이다. 면심입방정금속과 체심입방정금속의 주요한 집합조직성분을 [그림 5]에 나타내었다. 그림의 Euler space는 cubic crystal symmetry와 orthorhombic sample symmetry가 고려된 $90^\circ-90^\circ-90^\circ$ 기본 공간이며, 세 개의 등가의 방향이 존재할 수 있음을 zone I, zone II, zone III로 표현하였다 (FCC Euler space 참조).

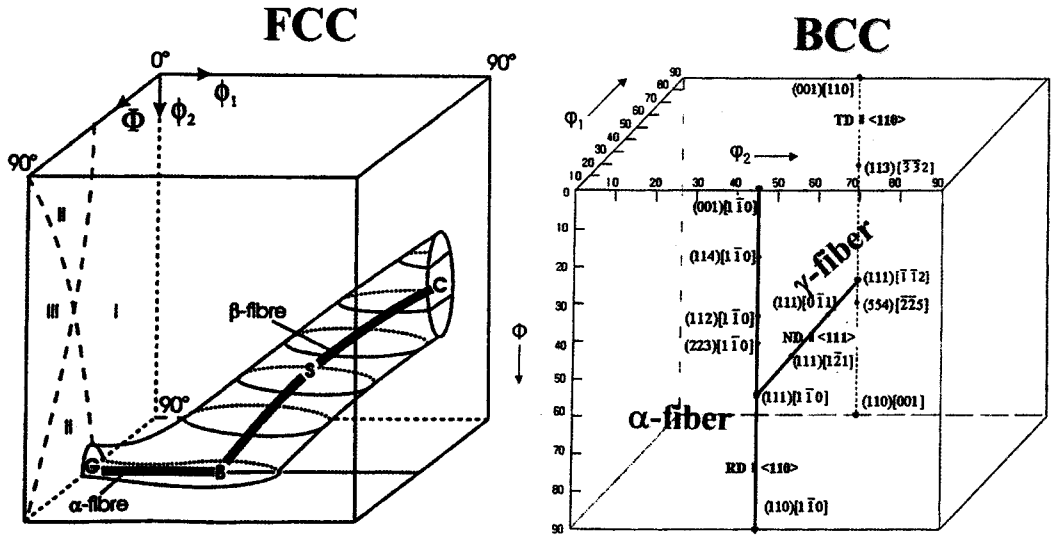


그림 5. Schematic diagrams for the fcc and bcc rolling textures in Euler space^[10, 11]

2.2 육방정계(Hexagonal Crystal System)

최근 들어 육방정계 소재로서 타이타늄합금과 마그네슘합금 등이 경량 소재로 주목을 받으며 산업적인 응용을 위한 연구가 활발하다. 특히 마그네슘 판재의 경우 수송용 및 전자산업 등에서 경량화 부품의 수요가 증가함에 따라 고강도 고성형성을 만족시키기 위한 미세조직과 기계적성질 제어에 관심과 연구가 꾸준히 증가하고 있다. 육방정합금의 경우 입방정금속과 달리 상온에서 작동하는 슬립계가 제한적이어서 성형 공정 등에 어려움이 많은데, 마그네슘합금의 경우 압연등과 같은 변형 시, Basal slip계가 가장 쉽게 작동하여 결과적으로 Basal pole이 판면에 강하게 발달하고 후속 성형 공정 등에 제약으로 작용한다. 이 때문에 Basal pole을 판면의 수직방향에 존재하지 않도록 압출이나 비대칭압연 등을 이용한 판재생산 등이 관심을 받기도 한다.

육방정금속의 기계적 성질은 c/a비율에 영향을 많이 받는다. 다음 그림은 여러 가지 육방정금속의 압연집합조직을 c/a 비율에 따라서 정리한 것이다^[12]. Cd, Zn와 같은 금속은 c/a 가 1.633보다 크며 압연방향 (Rolling Direction, RD)으로 두 개의 basal peak가 나타난다. 이와 반대로 Ti, Zr같은 금속은 c/a가 1.633보다 작으며 TD (Transverse Direction)방향으로 피크의 분리가 관찰된다. Mg는 c/a 비율이 거의 1.633에 근접하며 압연집합조직은 Basal pole이 판면에 수직하게 분포한다. 앞서 지적했듯이, 이러한 집합조직 형태는 판재의 성형성에 제약을 가하게 되므로 판재의 제조공정에서 압연집합조직을 제어하고 무질서 방위를 증가시켜 연신률등을 증가 시킬 필요가 있다. 마그네슘 판재의 압연 시 단변형 성분을 이용하여 Basal peak의 강도를 약화시키고 그 Basal peak의 위치를 변화시키려는 시도는 이주속압연 등을 통해서 이뤄지고 있다^[13, 14, 15]. 또한 압출과 같은 방법으로 Basal peak의 강도를 약화시키고 동적 재결정에 의한 결정립 미세화 효과 등을 이용하기도 한다^[16, 17, 18].

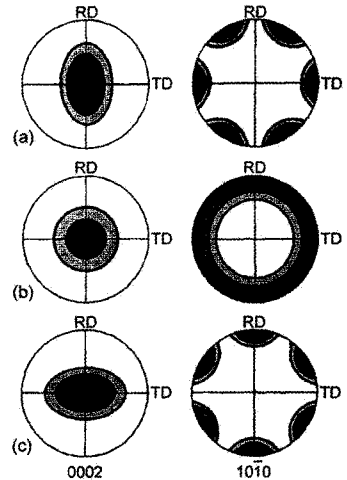


그림 6. 육방정 금속의 c/a 비율에 따른 압연집합조직 개략도. (a) c/a > 1.633, (b) c/a ~ 1.633, (c) c/a < 1.633

3. 변형집합조직과 결정소성

앞 장에서 입방정금속과 육방정금속에서 많이 발견되는 집합조직의 일반적인 형태에 대해서 간략히 살펴보았는데, 이들 집합조직은 판재가 가지는 평면이방성의 중요한 요인이 된다. 판재의 집합조직에 관한 연구는 과거 수십 년간 지속되어 왔으며, 정밀하고 효율적인 판재성형을 위해서 변형기구 (Slip과 Twin)에 대한 이해와 집합조직과 이방성의 관련성에 관련된 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

3.1 결정소성

다결정 재료가 외부의 변형을 받아 변형을 수용하기 위해서 slip과 twin등이 작동하게 되며, 이 때 결정립들의 재배향 (Reorientation)이 발생하게 된다. 결정립들의 소성변형에 관한 연구는 외부 변형을 수용하는 결정립들의 응력과 변형률 상태를 표현하는 방식에 따라 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫째로 Sachs모델은 다결정 내부의 모든 단결정립들의 응력상태를 동일하게 보고 결정립계에서 응력평형상태만 만족되며 변형률 적합성은 위배되는 것을 허용하는 경우이다. 이러한 경우 결정립계에서의 변형률적합성 위배 때문에 결정립들 간의 분리(Gap) 혹은 겹침(Overlay) 현상이 발생하여 단결정의 변형 모델로서는 이용이 가능하나 다결정 모델로서는 적용에 어려움이 있다. 둘째로 Taylor 모델의 경우 다결정내부의 모든 단결정들은 동일한 변형률 상태에 있다고 가정하고 결정립계에서의 응력평형조건은 무시된다. 이러한 조건은 각각의 결정립 내부의 변형조건을 만족하기 위해서 필요한 Multiple slip의 작동이 가능하도록 해주며 응력상태는 결정마다 달라질 수 있다. 결정립계에서의 변형률 적합조건은 만족되기 때문에 결정립들의 분리 혹은 겹침현상은 나타나지 않으며 일반적으로 다결정 모델에서 많이 적용되고 있다^[19, 20, 21]. 다결정 금속재료의 경우 Taylor모델을 이용하여 변형집합조직을 잘 예측할 수 있다. 세 번째의 경우는 Viscoplastic self-consistent모델 (VPSC)이며, 점소성 비압축체 내부 (Viscoplastic incompressible effective medium 혹은 homogeneous equivalent medium, HEM)에 존재하는 점소성 비압축개재물을 관심있는 결정립으로 가정하고 응력과 변형률관계를 계산함으로써 응력평형과 변형률적합성을 모두 만족하도록 하였다^[22, 23, 24]. VPSC모델의 경우, 입방정금속뿐만 아니라 Zr, Mg 등과 같은 육방정 금속의 변형집합조직 예측에도 많이 활용되고 있다.

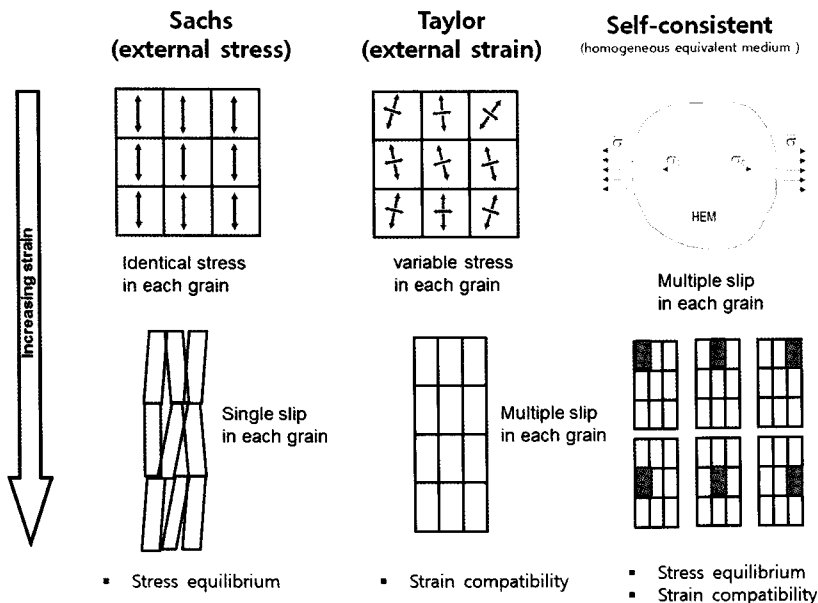


그림 7. 여러 가지 결정소성학 모델의 기본 개념도

결정 소성학을 이용해서 집합조직을 예측하기 위해서는 단결정소성에 관련된 재료변수값이 필요한데, 가장 기본적으로 결정립계에 대한 정보와 변형기구로서 Slip 및 Twin계에 대한 정보가 필요하다. 또한 각 Slip 혹은 Twin 계에서의 임계분해전단응력(Critical resolved shear stress, CRSS)과 가공경화법칙(Hardening law) 등을 결정해야 한다. Fcc, bcc, 혹은 hcp에 따라 고려되어야 할 Slip과 Twin 등이 달라지며, CRSS, 가공경화법칙 등도 모두 달라진다. 각 소재에 대한 구체적인 재료변수값의 활용에는 앞서 제시한 여러 가지 참조문헌을 통해서 확인할 수 있다. 결정소성학은 유한요소법 (Crystal plasticity finite element method)과 결합하여 응용될 수 있으며, 재료의 미세조직적 특징을 좀 더 정확하게 구현할 수 있는 장점이 있어서 최근 들어 그 관심이 증가하고 있다^[25, 26].

다음은 결정소성학의 구성방정식이며, 결정의 응력-변형률의 관계를 표현한 식이다. 외부에서 시편좌표계상으로 주어진 응력-변형률관계($\sigma^s - \epsilon^s$, s : sample)는 결정내부의 결정학적 응력-변형률($\sigma^c - \epsilon^c$, c : crystal) 관계로 전환될 수 있으며, 결정학적 응력-변형률은 slip 혹은 twin계에서의 전단응력-전단변형($\tau^c - \gamma^c$, c : crystal) 관계로 전환이 가능하다.

$$\epsilon_{ij} = \sum_s m_{ij}^s \gamma^s = \gamma_0 \sum_s m_{ij}^s \left(\frac{m_{kt}^s \sigma_{kt}}{\tau_0^s} \right)^n \quad (1)$$

위의 관계에서 τ_s 와 $m_{ij}^s = \frac{1}{2}(n_i^s b_j^s + n_j^s b_i^s)$ 는 각각 고려된 Slip계 (s)에서의 전단응력과 Schmid tensor이며, ϵ_{ij} 와 σ_{kt} 는 각각 변형률과 응력이다. 전단응력, τ_s 의 변화를 예측하는 가공경화법칙으로는 여러 가지 방법이 사용될 수 있는데, 가장 많이 사용하는 방법 중 하나가 Voce hardening law이다. 이것은 소성 변형이 진행됨에 따라서 Slip 혹은 Twin계의 저항 등이 전위의 상호작용 등에 의해서 커지다가 일정값에 도달하면 포화가 됨을 의미하며, Self hardening 혹은 Latent hardening 등으로 구분할 수 있다.

$$\tau^s = \tau_0^s + (\tau_1^s + \theta_1^s \Gamma) (1 - \exp(-\Gamma \frac{\theta_0^s}{\tau_1^s})) \quad (2)$$

속도구배 L은 각각 Symmetric part, D와 Skew part, Ω 로 구분될 수 있으며, 결정립의 회전 (Lattice reorientation)은 거시적인 결정립의 회전(Ω)과 skew(m^s)의차이에 의해서 결정된다.

$$L = D + \Omega \quad (3)$$

$$\omega = \text{vect}(\Omega - \sum_s \gamma^s \text{skew}(m^s)) \quad (4)$$

3.2 변형집합조직 예측

Al합금의 초기 무질서 집합조직을 이용하여 평면변형압축 (Plane strain compression, PSC), 일축인장, 드로잉 등의 변형경계조건을 가하여 얻어지는 집합조직 변화를 그림 8에 나타내었다. 주요한 변수들은 Al합금의 유동곡선에서 얻어진 값을 사용하였으며, 초기 집합조직은 800개의 단결정으로 구성되었다. 속도민감도 결정소성방정식 (Rate sensitivity model)을 이용하여 변형률적합성 (Strain compatibility, Taylor assumption)조건과 주어진 속도구배장을 적용하여 계산하였다. 고려된 변형 모드는 fcc에서 주로 고려되는 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 의 슬립계만을 이용하였다. 주어진 변형경계조건에 따른 집합조직의 다양한 변화를 관찰할 수 있는데, 특히 인장과 인발변형은 Fiber형태의 집합조직이 얻어짐을 알 수 있다. 인장과 인발의 경우 극점도상의 TD를 중심으로 90° 회전관계를 가진다. 집합조직 변화에 따른 Misorientation distribution (방위차분포)의 특성도 알 수 있는데, 무질서 방위는 Mackenzie 분포로 알려진 정방정계 방위차분포를 따르는 반면, 그 외의 변형집합조직은 전체적인 방위차분포의 피크가 고경각쪽 (54.7°)으로 이동했음을 알 수 있다. 평면변형압축, 인장, 드로잉의 변형경계조건에 따라서 약간의 차이는 존재하나, 전체적으로 거의 비슷한 방위차분포를 따르고 있다.

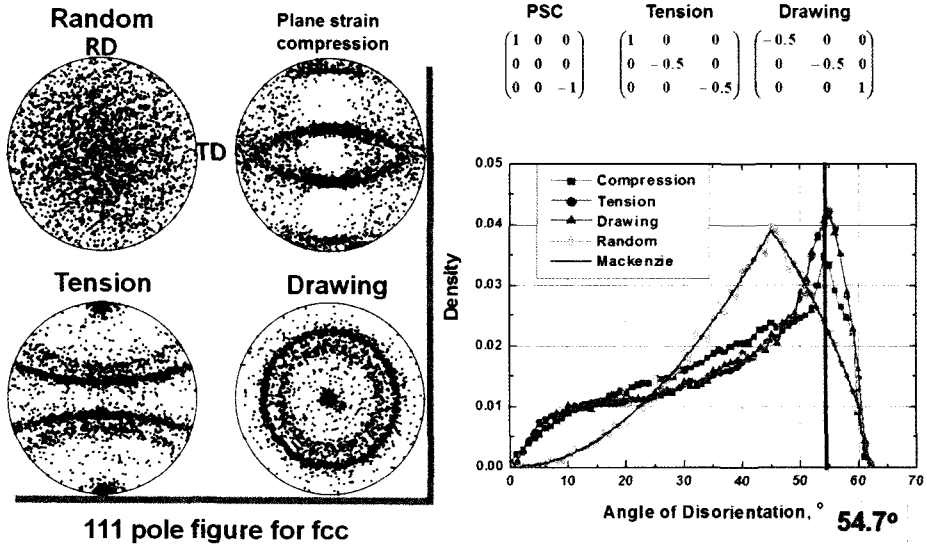


그림 8. Taylor모형을 이용한 fcc 변형집합조직 예측

PSC: plane strain compression. Tension (x): loading along the X direction. Drawing (z): loading along the Z direction

그림 9는 다결정 소성 모델의 하나인 VPSC (Viscoplastic self-consistent model)을 이용하여 초기값으로 1000개의 무질서 분포를 가지는 단결정조합을 이용하고, 면방향 압축 (Through thickness), 길이방향압축 (In plane), 그리고 압축전단복합변형 등 세 종류의 속도구배장을 경계조건으로 인가했을 때 나타나는 집합조직 변화를 관찰한 결과이다. 결정학적 변수들은 Mg합금의 값을 사용했으며, 주요한 변형 모드는 Slip과 Twin을 사용하였다.

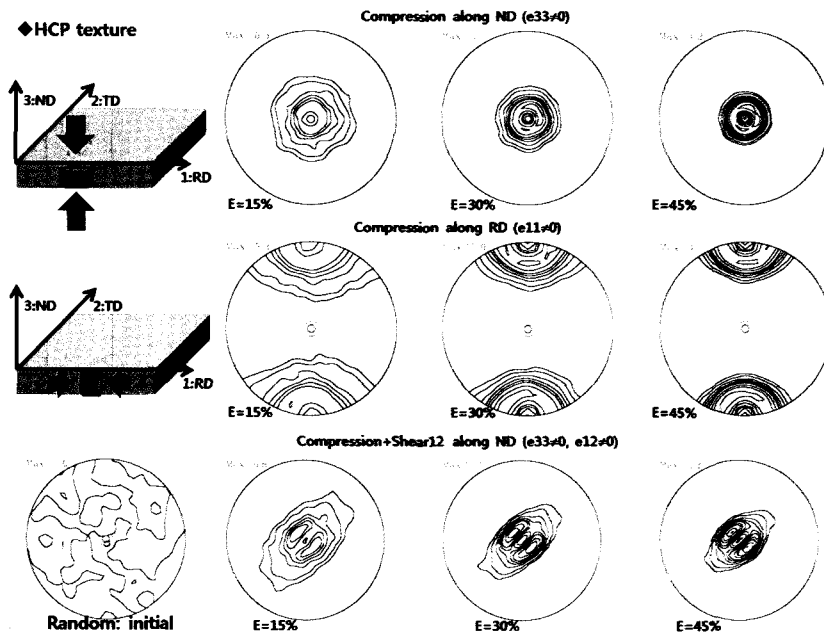


그림 9. VPSC을 이용한 Mg 변형집합조직 예측

표 2. Mg 합금의 집합조직 예측에 사용된 변형 기구

Deformation mode	Systems
Basal <a>	{00.1}<12.0>
Prismatic <a>	{10.0}<21.0>
Pyramidal <c+a>	{21.2}<21.3>
Tensile twin	{10.2}<10.1>

초기의 무질서 방위는 두께 방향 압축 시, Basal fiber로 이동함을 알 수 있으며, 변형량이 15%에서 45%까지 증가함에 따라 Basal intensity는 더욱 크게 증가한다. 길이방향 압축의 경우 쌍정이 강하게 발달하면서 앞의 Basal fiber와는 90° 만큼 떨어진 곳에 강한 피크가 형성된다. 이것은 {1012} Tensile twinning, (86° <1210>)의 작동 때문이다. 마지막으로 두께 방향 압축과 전단변형이 함께 인가된 경우 Basal peak의 분리와 함께 대각선 방향으로 피크가 형성됨을 알 수 있다. 전단변형에 의해서 Basal peak의 분포가 변하는 것은 마그네슘 판재의 성형성 측면에서 비교적 바람직한 형태라고 할 수 있다.

4. 판재의 이방성과 집합조직

4.1 압연과 전단변형

압연은 판재를 생산하는 가장 기본적인 공정이며, 압연판재가 가지는 최종 미세조직은 냉간/열간 압연 및 Annealing 처리 등을 거친 것이다. 압연 판재에서 변형거동을 판재의 두께방향으로 나누어서 관찰해보면, 판재의 중심부에서는 일반적으로 Plane strain compression 변형조건에 가까우며, 판재의 표면은 롤과 판재의 마찰에 의한 전단변형이 많이 발생한다. 전단변형은 롤과 판재의 마찰접촉에 의해서 유발되기도 하지만, 다른 한편으로는 단면 감소율(Reduction area)과 같은 압연공정 자체의 기하학적 요인에 의해서도 발생한다. 전자는 윤활등을 통해서 제어 가능하나 후자는 자연적으로 발생하는 현상이며, 필요에 따라서 단면감소율을 제어해야 한다.

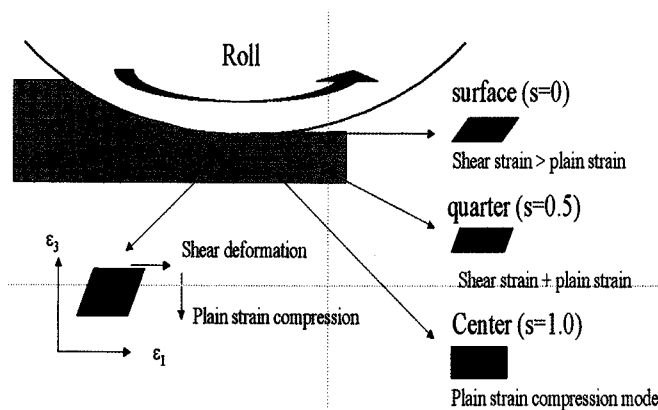


그림 10. 압연 시 판재의 두께방향에 따른 변형거동의 차이

전단변형집합조직은 평면변형집합조직에서 얻어지는 집합조직성분과는 다르기 때문에, 후속 성형공정 혹은 후속 열처리 공정에서 평면변형집합조직 거동과는 다른 양상을 보여준다. 일반적으로 FCC의 평면변형집합조직인 α-, β-fiber 등은 재결정시 주로 강한 Cube형 집합조직성분을 발생시켜서 성형성에 좋지 않은 결과를 보이는데, 전단집

합조직성분인 $\{111\}/ND$ 혹은 Rotated cube, $\{100\} \langle 011 \rangle$ 등은 열처리에 비교적 안정적으로 존재하며, 완전 재결정이 끝난 후에도 무질서 방위를 많이 포함하게 되므로 평면변형집합조직 보다 성형 시 유리한 측면이 있다. 따라서 전단변형집합조직을 생성시키려는 열가공공정에 대한 연구도 많은 관심을 끌어 왔다. 압연 시 전단변형조직을 발생시키는 방법으로 비대칭압연 (Asymmetric rolling)이 고려되어 왔는데, 상부와 하부롤의 직경을 달리하는 방법, 상부와 하부롤의 온도를 달리하는 방법, 상부와 하부롤의 미찰을 달리하는 방법, 상부와 하부롤의 속도비를 달리하는 방법 등이 대표적인 방법이다.^[27]

마찰계수가 달라지면서 나타나는 집합조직의 변화 양상을 살펴보기 위해서 Fcc 소재인 알루미늄의 재료모델을 이용하여 압연공정을 유한요소해석법으로 전산모사하고, 그 결과인 속도구배장 (Velocity gradient)을 Taylor결정소성 모델에 적용하였다. 초기 집합조직은 1000개의 무질서 분포의 단결정을 사용하였다. 그림에서 $s=1$ 은 롤과 접촉한 판재의 표면이며, $s=0$ 은 판재의 중심부이다. 작은 마찰계수에서는 평면변형에 가까운 집합조직 분포가 판재의 표면에서부터 중심부까지 두께방향으로 균일하게 분포되며, 마찰계수가 증가함에 따라서 두께방향 집합조직 분포 거동이 평면변형압축에서 벗어나다. 가장 큰 마찰계수의 경우 표면층에서는 전단조직이 강하게 발달함을 알 수 있고, 중심부는 마찰계수의 영향을 적게 받아 전형적인 평면변형집합조직을 그대로 보여준다.

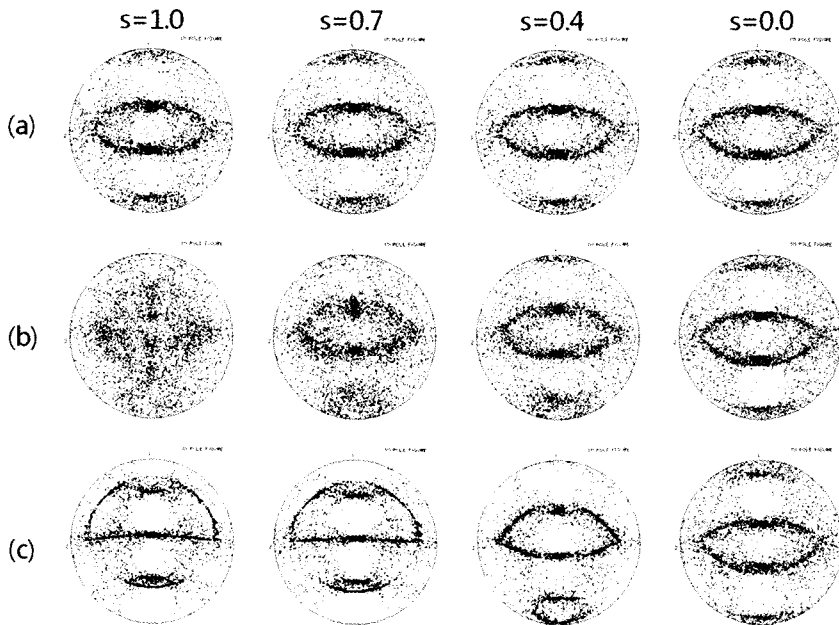


그림 11. 마찰계수변화에 따른 판재의 두께방향 별 집합조직. 마찰계수 $[Ns/m^2]$ 는 각각 (a) 10^7 , (b) 10^8 , (c) 10^9 .

상부롤과 하부롤의 속도차를 이용하여 전단변형을 발생시키는 이주속 압연 (Differential speed rolling)의 공정해석 결과를 다음 그림에 나타내었다. 상부롤의 속도는 0.5 m/sec로 고정시키고 하부롤의 속도를 0.5 m/sec, 1.0 m/sec, 1.5 m/sec로 점차로 증가시켰다. 상하부의 롤속도가 일정한 등속압연의 경우, 유효변형률속도가 판재의 상부와 하부에 대칭적으로 발생하며, 재료의 유속분포도 균일하게 나타난다. 하부롤만의 속도를 증가시키는 경우 뚜렷하게 유효변형률속도의 비대칭이 관찰된다. 롤하부와 롤상부의 속도차가 2:1인 경우와 3:1인 경우 유효변형률속도 분포가 비슷해 보이는데, 이것은 압연시 생성되는 중립점 (Neutral point)의 위치가 일정속도비를 이상의 이주속압연에서는 롤과 판재의 접촉면 밖으로 벗어나는 것과 연관이 있다. 이주속압연 시 중립점의 변화에 대한 논의는 다른 문헌에서 다루고 있다.^[25]

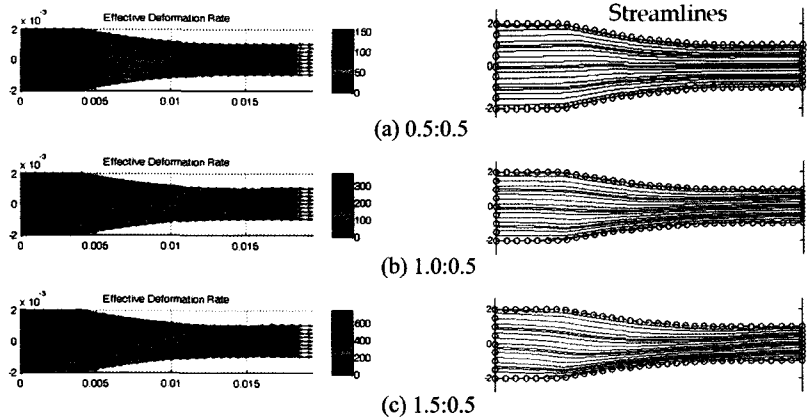


그림 12. 이주속 압연시 유효변형률과 유속분포도

마그네슘 판재의 비대칭 압연을 통해서 일반적인 평면변형압축에 가까운 압연상태에서 얻어지는 강한 Basal fiber의 분포를 변화시킬 수 있다. 비대칭압연을 하는 경우 결정립의 미세화 효과 등도 관찰이 되며, 연신률 등의 증가도 관찰이 된다^[28, 29]. 다음 그림은 Mg 합금 (ZK60)의 이주속 압연 시 집합조직 변화를 (0002) 극점도를 통해서 나타낸 것이다. 초기 판재는 쌍롤박판연속주조를 통해서 생산한 판재이며, 주조와 압연이 짧은 시간 사이에 이뤄지기 때문에 압연조직은 약하게 발달하였다. Basal fiber는 극점도의 중심에서 TD방향으로 분산되어 있는 형태이며, 이것은 박판연속주조 공정이 이상적인 평면변형압축공정에서 벗어나 있음을 의미하기도 한다. 초기 2 mm 두께의 판재를 이용해서 175 °C와 225 °C의 온도에서 온간 압연을 진행하였고, 최종 두께는 1 mm로 약 50%의 단면 감소를 만족시킨 후 XRD를 이용해서 극점도를 측정된 결과이다. 등속압연의 경우 (1.0:1.0), 초기 판재에 비해서 Basal fiber의 극강도 값이 크게 증가하였고, 판재의 수직방향으로 Basal plane이 발달하는 비교적 전형적인 마그네슘합금의 압연집합조직이 관찰되었다. 이후 상부를 속도를 고정하고, 하부를 속도를 점차로 증가시킴에 따라, 압연 방향으로 Basal fiber의 분포가 이동하는 형태를 보이며, 극강도의 값도 감소하는 경향을 보였다. 이러한 집합조직의 변화는 마그네슘판재의 성형성 등에 긍정적인 역할을 할 수 있다.

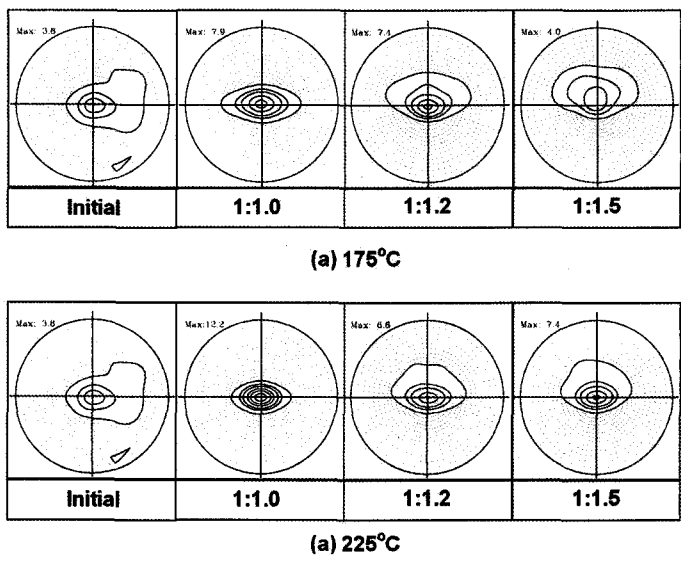


그림 13. ZK60합금의 이주속압연 시 집합조직 변화^[13]

4.2 집합조직에 따른 판재의 기계적 이방성

단결정은 방향에 따른 이방성이 존재하기 때문에 다결정판재에 특정한 우선방위가 발달하게 되면 그 판재는 거시적으로 이방성을 띄게 된다. 집합조직성분이 가지는 기계적 이방성 등을 확인하기 위해서 임의로 주요한 집합조직 성분을 생성시키고 이들을 이용해서 소성 이방성 값 등을 계산할 수 있다. 다음 그림은 여섯 종류의 각각 다른 집합조직 성분을 111 극점도상에 표현한 것이며, 이들에 대한 R-value의 분포를 계산한 결과이다. Gaussian standard distribution에 따라서 집합조직성분을 생성하고, 이것을 이용하여 판재의 각 방향에 따른 R-value를 예측하였다³⁾. 그림에는 Taylor모델과 현상학적 이방성 모델인 Barlat91, Barlat96의 결과도 함께 나타내었다.

Cube집합조직성분, {100}<001>은 압연방향과 압연방향의 90°인방향에서 R값이 1에 근접하나 45° 방향에서는 매우 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 알루미늄합금 재결정 판재에서 많이 발생하는 Cube 형 집합조직이 딥드로잉 공정에서 4개의 귀를 형성하는 것과 깊은 연관이 있다. 변형집합조직 성분인 Brass {110}<112>, Copper {112}<111>, S {123}<634>, Goss {110}<001> 등은 비교적 높은 R 값을 나타낸다.

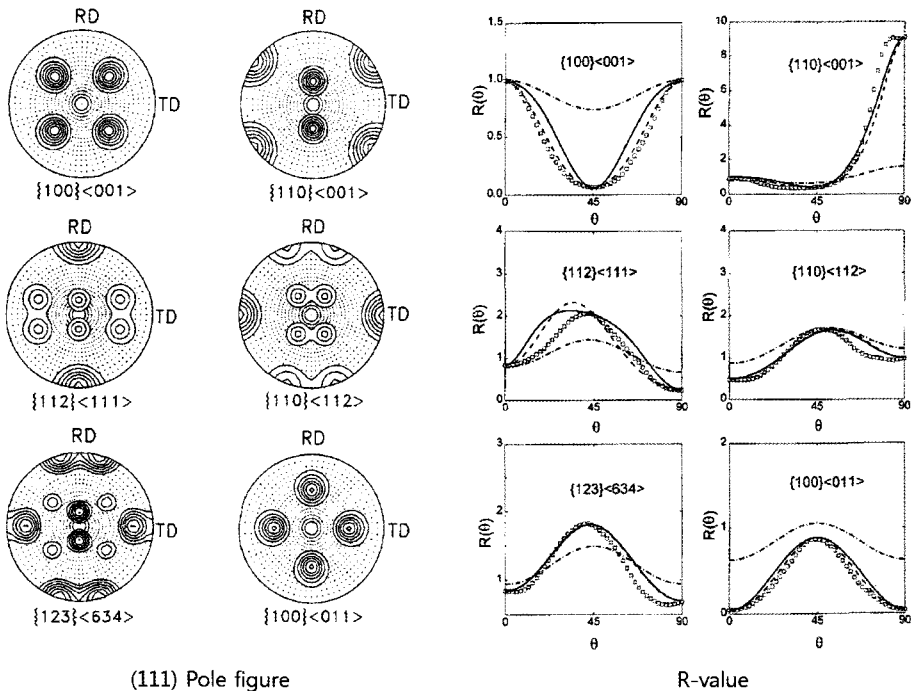


그림 14. 집합조직성분에 따른 R-value 변화¹³⁰⁾

5. 결 론

다결정판재의 기계적 성질은 내부의 단결정들이 자연적으로 가지고 있는 이방성의 총체적 조합으로 표현될 수 있다. 이방성의 정량화를 위한 방편으로 집합조직 등을 이용할 수 있으며, 실험적인 집합조직의 측정과 결정소성학 등을 이용한 변형집합조직의 예측을 통해서 판재가 가지는 거시적 이방성을 이해하고 보다 우수한 기계적 성질을 가지는 다결정 판재의 생산 공정을 구현할 수 있다.

❁ 참고 문헌

- [1] Crumbach, M., Neumann, L., Goerdeler, M., Aretz, H., Gottstein, G. and Kopp, K., *Modell. Simul. Mater. Sci. Eng.* 14 (2006), pp.835–856
- [2] Humphreys, F.J., and Hatherly, M., *Recrystallization and related annealing phenomena*, 2nd ed., Elsevier Ltd., 2004, Oxford, UK.
- [3] Matthies, S., Vinel, G.W, and Helming, K., *Standard distribution in texture analysis*, Akademie-Verlag Berlin (1987)
- [4] Randle, V. and Engler, O., *Introduction to texture analysis macrostructure, microtexture and orientation mapping*, Gordon and Breach Science Publishers (2000)
- [5] Cho, J.H., Rollett, A.D. and Oh, K.H., *Metall. Mater. Trans. A*, Vol.36A(2005), pp. 3427–3438
- [6] Cho, J.H., *Mater. Sci. Eng., A*, Vol. 465 (2007), pp.228–237
- [7] Toth, L.,S., Gilormini, P., Jonas, J.J., *Acta Metall.*, Vol.36 (1988), pp.3077–3091
- [8] Jin, H., Lloyd, D.J., *Mater. Sci. Eng., A*, Vol. 465 (2007), pp.267–273
- [9] Engler, O., Huh, M.Y., Tome, C.N., *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 31A(2000), pp.2299–2315
- [10] Hirsh, J. and Lucke, K., *Acta Metall.* Vol. 33 (1988), pp.2863–2882
- [11] Hirsh, J. and Lucke, K., *Acta Metall.* Vol. 33 (1988), pp.2883–2902
- [12] Kocks, U.F., Tome, C.N., Wenk, H.R., *Texture and anisotropy*, Cambridge University press (1998)
- [13] Cho, J.H., Chen, H.M., Choi, S.H., Kim, H.W., Kang S.K., *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 41A (2010), pp.2573–2583
- [14] Chang, L.L, Cho, J.H., Kang, S.B., *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 211 (2011), pp.1527–1533
- [15] Cho, J.H., Kim, H.W., Kang, S.B., Han, T.S., *Acta materialia*, Vol. 59 (2011), pp.5638–5651
- [16] 재료마당, 마그네슘판재 응용기술, Vol. 20, No.5 (2007)
- [17] 재료마당, 마그네슘 미세구조 제어 및 성형 기술, Vol. 20, No.6 (2007)
- [18] 재료마당, 마그네슘분야 소재원천기술, Vol. 22, No.3 (2009)
- [19] Sachs, G., *Z. Verein Deut. Ing.* Vol. 72 (1928), p.134
- [20] Taylor, G.I., *J. Inst. Metals (U.K.)*, Vol. 62 (1938), pp. 307–324
- [21] Hosford, W., *The mechanics of crystals and textured polycrystals*, Oxford science publications, 1993
- [22] Molinari, A. Canova, G.R. and Ahzi, S., *Acta metall.* Vol. 35 (1987), pp. 2983–2994
- [23] Lebensohn, R.A. and Tome, C.N., *Acta Metall Mater*, Vol. 41 (1993) pp. 2611–2624
- [24] Tome CN., *Modell. Simul. Mater. Sci. Eng.* Vol. 7 (1999), pp.723–738
- [25] Kalidindi, S.R., Bronkhorst, C.A., Anand, L., *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 40 (1992), pp. 537–569
- [26] Marin, E.B., Dawson, P.R., *Comput. Meth. Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 165 (1998), pp.23–41
- [27] Kim, KH, Lee, DN., *Acta Mater.*, Vol. 49 (2001), pp.2583–95
- [28] Kim, S-H, You B.S., Yim C.D., Seo Y.M., *Mater. Lett.* Vol. 59 (2005), pp.3876–3880
- [29] Gong, X., Kang, S.B., Li, S., and Cho, J.H., *Materials and Design*, Vol. 30 (2009), pp.3345–3350
- [30] Choi, S.H. Cho, J.H, Barlat, F., Chung, K., Kwon, J.W., and Oh, K.H., *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 30 (1999), pp. 377–386



조 재 형

- 재료연구소 구조재료연구본부 선임연구원
- 관심분야 : 열가공 공정시 미세조직/집합조직 특성 분석 및 제어, 병렬연산기반 통합적 multiscale 모델링 (공정-미세조직), EBSD/결정소성을 연계한 특성분석 방법론 개발, 고강도 고성형 알루미늄, 마그네슘 합금개발, 이주속압연 공정을 이용한 기계적성질 개선
- E-mail : jhcho@kims.re.kr