

〈論 文〉

다층압연된 알루미늄의 불균질압연집합조직

최창희* · 홍승현* · 권재욱** · 오규환* · 이동녕*

(1995년 6월 13일 접수)

Inhomogeneous Rolling Texture of Multilayered Aluminum Sheet

Chang-Hee Choi, Seung-Hyun Hong, Jae Wook Kwon,
Kyu Hwan Oh and Dong Nyung Lee

Abstract

An inhomogeneous rolling texture of high purity aluminum has been observed by a multilayered rolling. The shear texture of (100)[110] component developed in the surface layer, and the copper type rolling texture developed in the middle and center layers. The through-thickness texture variation has been calculated by the full-constraint Taylor model combined with FEM. The calculated results are in good agreement with the measured data.

1. 서 론

압연이나 압출과 같은 변형을 받는 금속은 롤이나 다이등과의 마찰에 기인하여 시편의 중심부와 표면부에서 결정립의 변형거동이 서로 다르게 되며, 이로 인하여 집합조직 발달에도 차이를 나타낸다.^(1,2) 불균질변형집합조직이란 이와 같이 시편의 표면부와 중심부의 변형거동 차이에 의해서 서로 다른 집합조직을 갖게 되는 경우를 일컬으며, 압연시에는 롤과 시편의 마찰이나 롤과 시편의 기하학적인 관계에 따라 그 발달정도가 지배된다. 지금까지 연구된 바에 따르면, 불균질집합조직은 압연면, 압연방향과 평행한 방향으로의 전단변형과 두께방향으

로의 변형량의 비가 임계값 이상을 가질 경우 발달한다고 알려져 있다.^(3,4) 이같은 영향이 최대화되는 부분은 시편의 표면이며, 이 경우 집합조직을 시편의 중심에서 발달하는 집합조직과 구분하여 표면집합조직이라고, 변형조건을 기준으로 평면변형집합조직과 구분하여 전단변형집합조직이라 부르고 있다. 이같은 집합조직 성분은 열간압연과 같이 압연롤과 시편사이의 마찰계수와 압하량이 큰 경우에 쉽게 관찰되나, 일반적인 압연조건에서는 시편표면의 일부분에만 국한되어 발달하기 때문에 이에 대한 연구가 많지 않다. 공업적인 면에서 이와 같은 불균질 변형은 박판압연에 나쁜 영향을 미치게 되는데, 그 정도가 심할 경우에는 표면에 있는 석출물 주위로 층분리 현상⁽⁵⁾이 일어나거나, 전해축전기용 알루미늄박의 전해에칭과 같이 균일한 표면에칭을 통한 정

*서울대학교 금속공학과

**고동기술연구원

전용량증가나 적정한 에칭박강도가 필요한 공정에서는 그 성능을 저하시키므로⁽⁶⁾ 이에 대한 자세한 연구가 필요하다. 한편, 학문적으로는 불균질변형의 효과를 극대화시켜서, 시편표면으로부터 중심부까지 서로 다른 압연집합조직을 나타내는 시편을 얻고, 이같은 시편을 통하여 재결정 집합조직을 규명하는데 응용하고자하는 노력이 최근 필자들에 의해 이루어지고 있다.⁽⁷⁾

불균질집합조직에 대한 연구는 지금까지 많은 연구자들에 의해 이루어져 왔다^(1-4,6-12). 그중에서도 변형역내에서의 위치에 따른 집합조직의 변화가 심한 금속으로 알루미늄을 그 대표적인 예로 들수있다. Truszkowski등은 불균질집합조직의 발달 경향이 항복강도와 가공경화지수가 작을수록 증가한다고 하였다.⁽⁸⁾ 알루미늄은 면심입방정구조를 갖는 대표적인 금속으로서 평면변형조건에서는 Taylor가 이론적으로 예측한 집합조직인 $\{4\ 4\ 11\}\langle 11\ 11\ 8\rangle$ 에 가까운, β 형 섬유집합조직이 나타난다. β 형 섬유집합조직이란 Euler공간에서 $\{112\}\langle 111\rangle$, 구리형 성분으로부터 $\{123\}\langle 634\rangle$, S방위를 거쳐 $\{110\}\langle 112\rangle$, 황동형 방위를 잇는 하나의 선을 따라 나타나는 섬유집합조직을 일컫는데, 알루미늄이나 구리와 같이 적층결함에너지가 큰 금속에서는 압하량이 증가함에 따라서 이들 성분의 밀도가 증가한다고 알려져 있다.⁽¹³⁾ 그러나 압연면과 평행하게 전단변형이 존재하면 이 방위들은 더 이상 안정방위로 존재하지 않고 $\{001\}\langle 110\rangle$ 방위로 회전하게 된다.⁽³⁾ 이 방위는 입방정집합조직으로 불리는 $\{001\}\langle 100\rangle$ 성분과 압연면에 수직한 방향을 중심으로 45° 회전한 관계에 있으며, 평면변형조건에서는 준안정방위로서 압하량이 증가함에 따라서 구리형성분으로 이동한다고 알려져 있다.⁽¹⁴⁾ 그러나 재료의 변형이 균질변형이 되는 경우는 극히 드물고, 소성변형역에서 내부 전단변형 되기 때문에 가공에 이상일 보다 큰 일, 즉

내부전단변형으로 인한 초과분의 일인 과잉일이 필요하게 된다. 그러므로 단위부피의 금속을 실제 가공하는 데 필요한 총일에서 과잉일이 비율이 클 경우에는 금속의 집합조직도 영향을 받게 된다. Asbeck과 Mecking⁽⁹⁾, Lee등^(3,10)은 압연방향으로의 전단변형률 ϵ_{13} 이 두께 방향으로의 변형률, ϵ_{11} 에 비하여 상대적으로 증가하여, $\epsilon_{13}/\epsilon_{11} > 0.5$ 인 조건을 만족할 경우에는 $\{001\}\langle 110\rangle$ 이 안정방위로 존재한다고 제안하였으며, Truszkowski등⁽⁸⁾은 롤과 시편의 기하학적인 관계로부터 전단변형집합조직의 발달에 관하여 연구하였다. 한편, Mathur, Dawson⁽¹¹⁾과 권재욱등⁽²⁾은 유한요소법을 이용하여 구한 변형률에서 결정방위의 회전을 계산하였다.

이 연구에서는 알루미늄판재를 다층압연하여 전단변형효과를 표면층에 최대화시켜 순수한 전단집합조직만으로 구성된 판재를 제조하였으며, 압하량에 따라 각 층의 집합조직 변화를 관찰하였다. 또한, 이 결과를 유한요소법과 Taylor의 완전구속조건에서의 결정회전방법을 연계해석한 결과와 비교하였다.

2. 실험방법

이 실험에서 사용한 알루미늄은 순도가 99.99%로서 600°C 에서 24시간 균질화처리 후, 두께 25 mm의 시편으로 절단하여 500°C 에서 두께 2 mm까지 12 pass로 압연하였다. 두께 2 mm 시편은 다시 $500\ \mu\text{m}$ 까지 냉간압연하였는데, 무질서에 가까운 시편을 제조하기 위하여, 30%씩 압연하면서 400°C 에서 5분간 어닐링하였다. 이와같이 제조된 5개의 시편을 적층한 후, 아세톤으로 압연유를 제거한 롤을 사용하여 압연하면서 압하량에 따른 집합조직의 변화를 관찰하였다. Fig. 1은 이같은 5층압연을 개략적으로 나타낸 그림이다, 롤과 맞닿아 있는

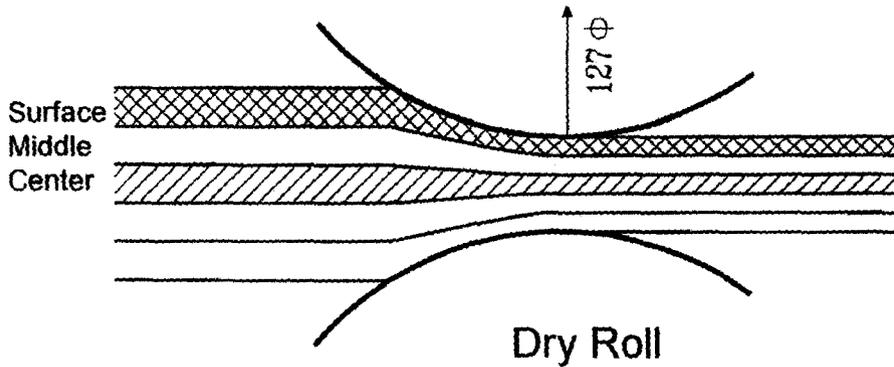


Fig. 1 Schematic diagram of multilayered rolling.

층을 표면층(Surface layer)이라 할 때, 가장 중심에 있는 층을 중심층(Center layer)이라고 하였으며, 중심층과 표면층에 있는 층을 중간층(Middle layer)으로 표현하였다. 압하량은 각각 32, 52, 74, 88%로 4단계를 거쳐 압연하였으며, 각 패스의 l/d 변수를 Table 1에 나타내었다. 여기서 l 은 롤과 시편의 접촉호가 압연방향으로 투영된 길이이며, d 는 각각 다음의 식을 통하여 구할 수 있다.⁽¹⁵⁾

$$l = \left[R(h_o - h_f) - \frac{(h_o - h_f)^2}{4} \right]^{1/2}$$

$$\approx [R(h_o - h_f)]^{1/2}$$

$$d = (h_o + h_f) / 2$$

이때, R 은 롤의 반지름이며, h_o 와 h_f 는 각각 시편의 압연전 두께와 압연후의 두께이다. 한편, 집합조직의 변화를 조사하기 위하여 X-선 회절기를 이용하여 극점도를 측정하였다. 측정조건은 30kV, 15mA로 하였고 구리 타겟을 사용하였다. 방위분포함

수를 (111), (100)완전극점도를 이용하여 구하였으며, 변형량에 따른 특성 성분의 발달을 관찰하였다.

3. 유한요소법을 이용한 변형을 구배계산 및 결정립회전계산

유한요소해석을 위한 초기 요소모양은 Fig. 2와 같으며 해석에 사용된 알루미늄의 물성치를 Table 2에 나타내었다. 초기두께 2.5mm의 단층으로 구성된 알루미늄을 두께 방향으로 10개로 요소분할을 하였으며, 마찰계수를 0.3인 조건에서 각각 32%, 52%, 74%, 로 3패스에 걸쳐 압하량에 따른 변형률구배 성분을 구하였다. 이 성분을 결정학적인 Taylor-Bishop-Hill 이론에 대입하여 외부변형에 의한 여러개의 단결정들의 회전을 계산하였다. 이때 슬립계 조합은 Renouard와 Wintenberger의 2차일 최소화 이론을 이용하여 선택하였으며, 이 계산으로부터 얻은 각 단결정의 회전방위를 (111)

Table 1 Rolling schedule of aluminum sheet

Thickness, μm	Total reduction, %	l/d
500	0	-
340	32	1.2
240	52	1.37
130	74	2.26
60	88	3.51

Table 2 Mechanical properties of 99.99% aluminum

Strength Coefficient, k(MPa)	Young's Modulus, E(GPa)	Strain Hardening Exponent, n	Poisson's Ratio ν
179	210	0.22	0.343

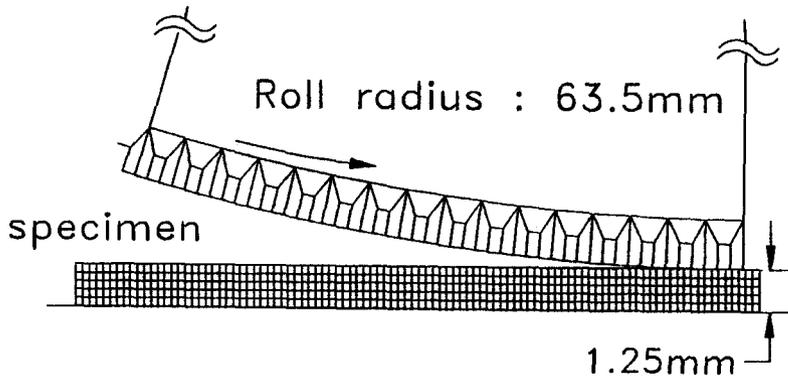


Fig. 2 Finite element mesh for rolling analysis.

극점도 상에 표현하였다. 이때 초기 단결정의 갯수는 200개로 하였으며, 초기 상태의 결정방위는 무질서하다고 가정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 다층압연실험

압하량에 따른 집합조직의 변화를 Fig. 3과 같이 (111) 극점도상에 표현하였으며, 알루미늄에서 발달하는 압연집합조직 중 대표적인 성분들을 Fig. 4에 나타내었다. 압하율 32%의 경우, 시편 표면층(Surface layer)에서는 무질서한 방위를 갖는 시편과 비슷한 집합조직을 나타내었으나, 중심층(Center layer)와 중간층(Middle layer)에서는 우선방위를 나타내기 시작한 것을 알 수 있다. 이때 우선방위 성분으로서는 {123}<634>성분이 주성분으로서, {112}<111>, 구리형 성분이 함께 나타나고 있다. 압하율이 52%에 이르면, 표면층에서는 {111}면과 {001}면을 압연면으로하는 결정립의 밀도가 다른 면에 비하여 높은 경향을

나타내기 시작하면서 우선방위를 보이기 시작하지만 그 강도는 아직 미약함을 알 수 있다. 그러나 {001}면이 압연면인 결정립들에서도 {001}<011> 집합조직을 갖는 방위밀도가 증가하는 경향을 나타내기 시작한다. 한편, 중심층과 중간층에서는 β 형 섬유집합조직의 강도가 더욱 증가하고 있음을 보인다. 74% 압연한 시편의 표면층을 살펴보면 {001}<110> 방위가 주성분으로서, 압연방향과 각 결정의 <110>방향이 평행한 다른 성분들이 {001}<110>방위를 중심으로 분포되어 있음을 알 수 있으며 이중에서도 {111}<110>성분이 가장 큰 강도를 나타낸다. 중심부에서는 52% 압연한 시편과 비슷한 경향을 보인다. 압하율이 88%인 시편의 표면층에서는 {001}<110>성분의 강도가 더욱 증가하였음을 나타내며, RD//<110>관계를 유지하는 성분들, 즉 {112}<110>, {111}<110> 집합조직이 부성분으로 존재한다. 이와 같은 형태의 집합조직을 α 형 섬유집합조직이라 부르는데, 중간층이나 중심층에서 발달하는 β 형 섬유집합조직에 비해서는 섬

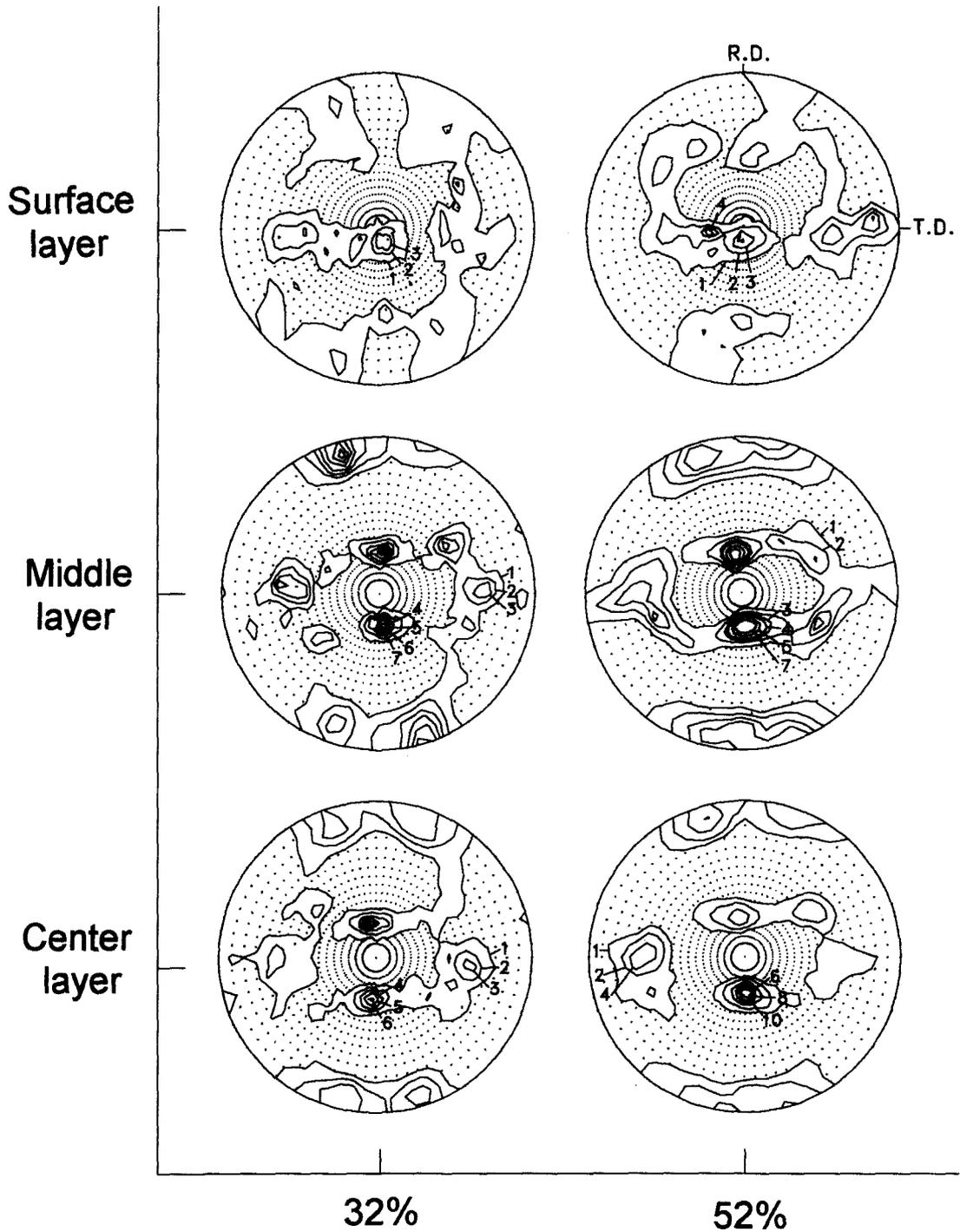


Fig. 3 The measured (111) pole figures of the surface, middle and center layers of aluminum as a function of rolling reduction.

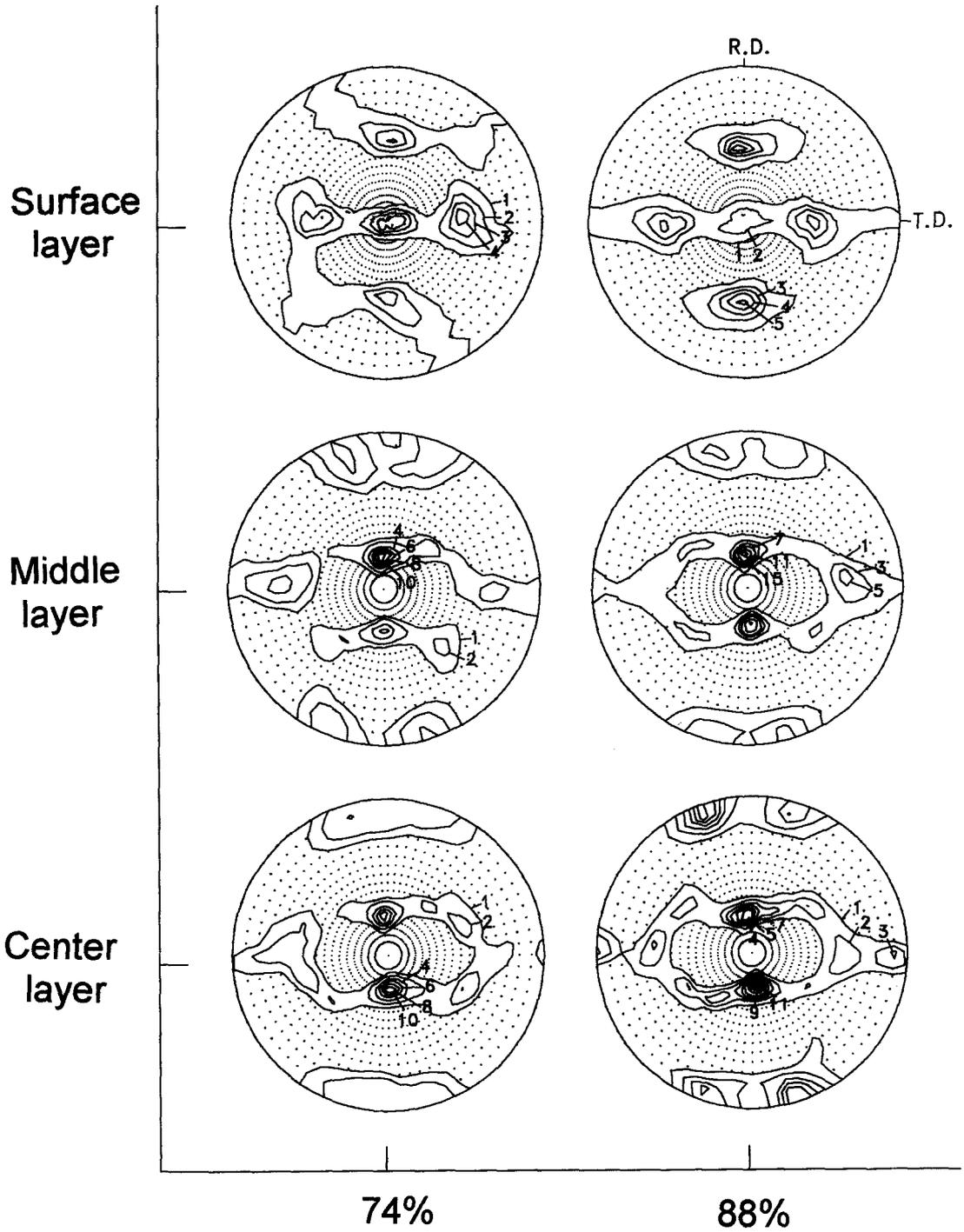


Fig 3. Continuade

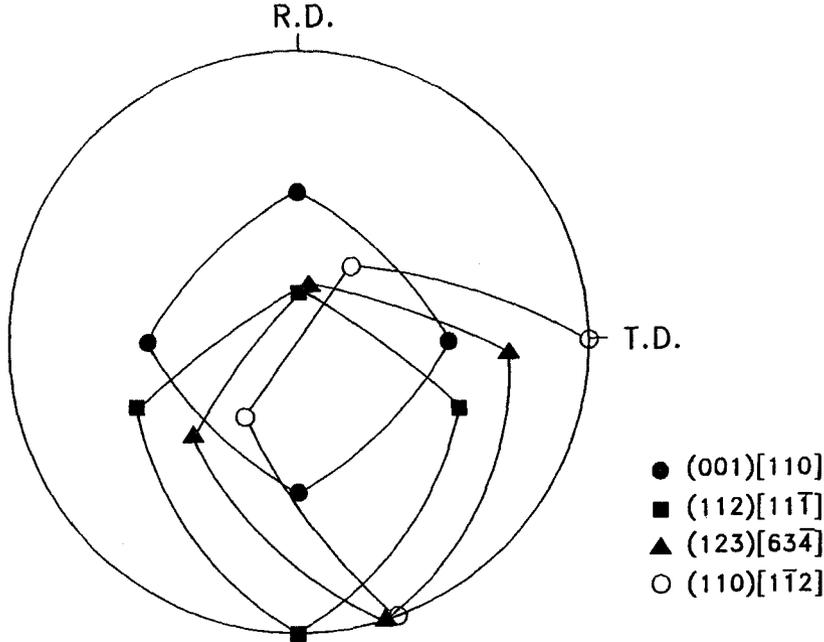


Fig. 4 The (111) pole figure showing some important deformation textures.

유집합조직의 경향이 뚜렷하지 않다. 한편, 중심층과 중간층에서는 S형방위나 구리형 방위의외에도 황동형 성분인 $\{110\}\langle 112 \rangle$ 성분이 발달하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 5는 시편중심에서의 β 형 섬유집합조직을 구성하고 있는 성분들을 따라 방위밀도함수의 변화를 압하율에 대하여 나타내었다. 압하율이 증가함에 따라서 $\{112\}\langle 111 \rangle$ 성분과 더불어 $\{123\}\langle 634 \rangle$ 성분이 주 방위로서 발달하지만, 88% 압연한 시편에서는 $\{011\}\langle 211 \rangle$ 성분의 방위밀도함수값이 $\{112\}\langle 111 \rangle$ 성분의 값과 비슷한 값을 나타낼 수 있다. 이결과는 극점으로 부터 해석한 결과와 잘 일치한다. 또한 88% 압연한 시편의 구리형 성분의 방위밀도함수값이 74% 압연한 시편에 비하여 작게 나타나는데 이는 압연중 각각의 층들이 완전하게 부착되어 있지 않기 때문에 층들간에 미끄러짐에 의해 압연방향이 기존압하율에서의 압연방향과 약간 벗어나서 변형을 받기 때문에 나타난 현상으로 생각된다. 한편 표면층

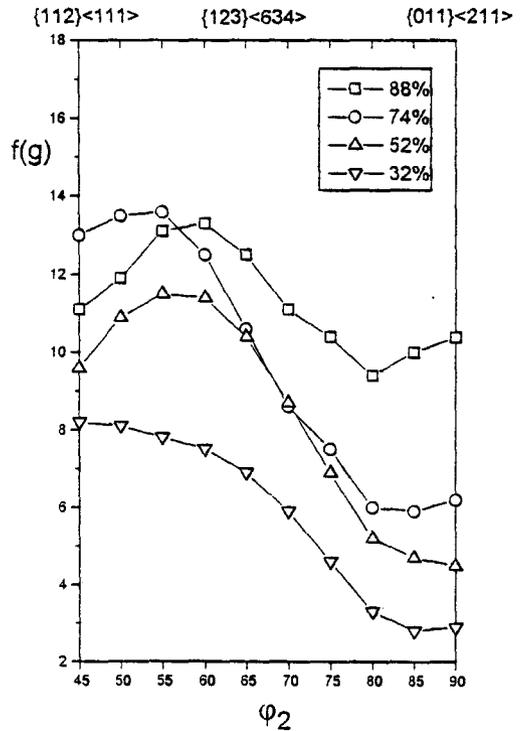


Fig. 5 The orientation densities, $f(g)$, along the β -fibre (max-intensity) at various rolling reductions of center layer.

과 중심층에서의 주방위성분의 방위밀도함수, $f(g)$ 의 변화를 압하량에 따라 살펴본 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 표면에서의 주방위 성분은 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 이고 중심부에서의 주방위 성분은 β 형 섬유집합조직중에서 가장 큰 방위밀도함수값을 갖는 방위이므로, 표면층은 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 성분의 방위밀도함수값을, 중심층은 β 형 섬유집합조직중 최대방위밀도함수값을 압하율에 대하여 나타내었다. 중심층에서는 압하율이 증가함에 따라서 β 형 섬유집합조직의 강도가 증가하였으며, 압하율이 74%인 시편과 88%인 시편의 최대밀도값은 큰 차이를 나타내지 않았다. 한편, 표면층에서는 압하율 54%까지는 방위밀도함수가 2~3정도였으나 74%에서 88%로 압하율이 증가함에 따라서 표면층에서는 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 의 방위밀도함수가 계속 증가하였으며, 압하율이 88%에 이르면 방위밀도함수가 중심층의 것과 거의 비슷한 값을 나타낸다. 또한 표면층의 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 성분의 방위밀도함수가 중심층에서 발달한

β 형 섬유집합조직의 방위밀도함수에 비하여 느리게 증가하는 것이 관찰되는데, 이는 전단변형집합조직이 변형기구가 압연의 기하학적인 효과나 압연 패스에 민감하기 때문이라고 생각된다.

전단변형집합조직에 대한 연구결과에 따르면⁽⁹⁾, 롤과 시편사이의 마찰이 전단변형집합 조직의 발달에 미치는 영향은 시편표면의 얇은 층에 국한되고, 시편의 두께에 따라 상대적으로 넓은 범위에 걸쳐서 전단집합조직이 발달하기 위해서는 롤과 시편의 기하학적인 변수, l/d 가 0.5보다 작거나 5보다 커야 한다고 알려져 있다. 이 실험조건은 l/d 가 0.5와 5사이의 값을 유지함에도 불구하고 총두께의 2/5에 해당하는 범위에서 순수하게 전단집합조직만으로 구성된 층을 얻을 수 있었다. 이는 다층압연으로 인하여 표면에만 전단변형이 집중되었기 때문이며, 기하학적 변수인 l/d 변수뿐만 아니라, 롤과 시편의 마찰계수도 중요한 인자임을 나타낸다. 단층압연판재에서의 시편

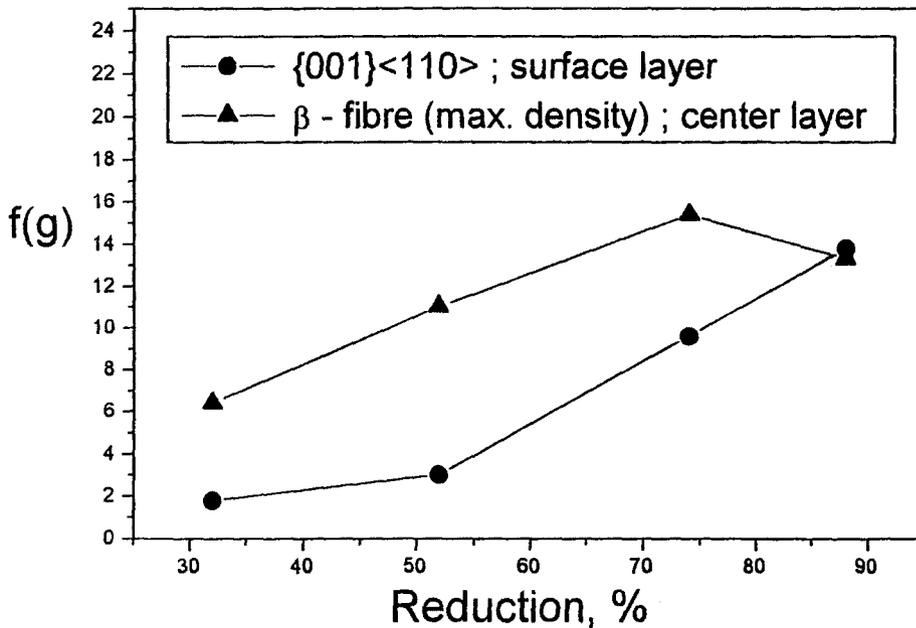


Fig. 6 The orientation density, $f(g)$, of $\{001\}\langle 110 \rangle$ in the surface layer and β -fibre(max-intensity) in the center layer as a function of reduction

의 표면에서부터의 집합조직변화를 측정할 때, 일정한 두께를 제거한 후 측정을 하게 된다. 이때 ϵ_{13} 의 변화가 연속적이기 때문에 정확하게 두께에 따른 집합조직의 변화를 측정할 수 없는데 이는 Dillamore와 Roberts⁽¹²⁾의 결과에서 잘 나타난다. 다층압연은 ϵ_{13} 의 변화가 불연속적이므로 표면에 전단변형을 집중시킬 수 있고 그 효과를 극대화시켜 두께에 따라 시편을 연마할 필요가 없이 단순히 압연만으로도 전단집합조직과 평면변형집합조직을 구분할 수 있다. 한편, 표면에 전단변형집합조직을 쉽게 분리할 수 있는 특성을 갖는 다층압연은 재결정집합조직을 연구하는데 있어서 또한 응용될 것으로 생각된다.

4.2 유한요소법을 이용한 집합조직의 예측

위에서 다층압연에서 얻은 두께에 따른 집합조직의 변화를 유한요소법과 결정회전계산으로부터 구한 결과와 비교하기 위하여 압하율이 각각 32%, 52%, 74%인 시편에 대하여 단층으로 구성된 판재로부터 집합조직을 계산하였다.

Fig. 7은 32%, 52%, 74% 압연한 시편의 요소망이다. 압하량이 증가함에 따라서 요소망의 전단변형이 점점 심해지는 경향을

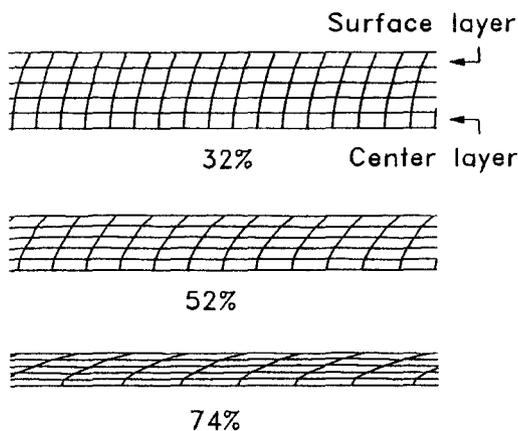


Fig. 7 The deformed finite element meshes after 32, 52, and 74% reduction.

나타내며, 변형 정도는 중심으로부터 표면으로 갈수록 뚜렷하다. 시편이 롤에서부터 빠져 나오는 순간 표면으로부터 중심부까지의 5개의 요소에서 나온 변형을 구배 텐서를 이용하여 집합조직을 구하면 Fig. 8과 같다. 시편중심부에서는 Taylor의 완전구속조건으로 구한 결과와 똑같은 결과를 얻을 수 있었는데⁽¹³⁾, 이때 나타나는 주 방위는 $\{4\ 4\ 11\}\langle 11\ 11\ 8\rangle$ 이다. 이 방위는 실험 결과에선 나타나는 주방위, $\{112\}\langle 111\rangle$ 과 비교해 볼때 $\langle 110\rangle//TD$ 방향을 중심으로 약 8° 회전관계에 있는데, 이와 같은 차이가 나타나는 이유는 실제 압연에서는 평면변형으로부터 벗어나 압연방향이나 폭방향으로의 전단변형이 이완되기 때문이다. 만약, 압연방향으로의 전단변형만을 이완시키면, $\{112\}\langle 111\rangle$ 이 주방위인 집합조직을 나타내며, 압연 방향으로의 전단변형과 더불어 폭방향으로의 전단변형이 이완될 경우에는 주성분이 S형 집합조직이고 부성분으로 $\{112\}\langle 111\rangle$ 집합조직이 발달하는 형태를 보인다.⁽¹³⁾ 이와 같이 완전구속조건에서 압연방향으로의 전단변형을 이완시킨 이완모델을 사용하면 실험결과에 보다 근접한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 그러나 유한요소해석으로부터 구한 변형률구배텐서는 완전구속조건만을 제공하기 때문에 실제 실험결과에서 나타나는 결과와는 차이를 보인다. 한편, 시편의 표면에서는 압하량이 증가함에 따라서 $\{001\}\langle 110\rangle$ 집합조직이 발달이 뚜렷해지는데, 이 결과는 Fig. 4의 실험에서 관찰되는 전단집합조직과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

이와같이 유한요소법과 Taylor의 완전구속조건에서의 결정방위회전을 연계해석하면, 시편내의 위치에 따른 집합조직의 변화를 예측할 수 있으며, 유한요소해석으로부터 구한 변형률구배텐서로부터 전단변형집합조직의 발달 조건을 구할 수 있다. 이에 대한 연구는 추후 진행될 예정이다.

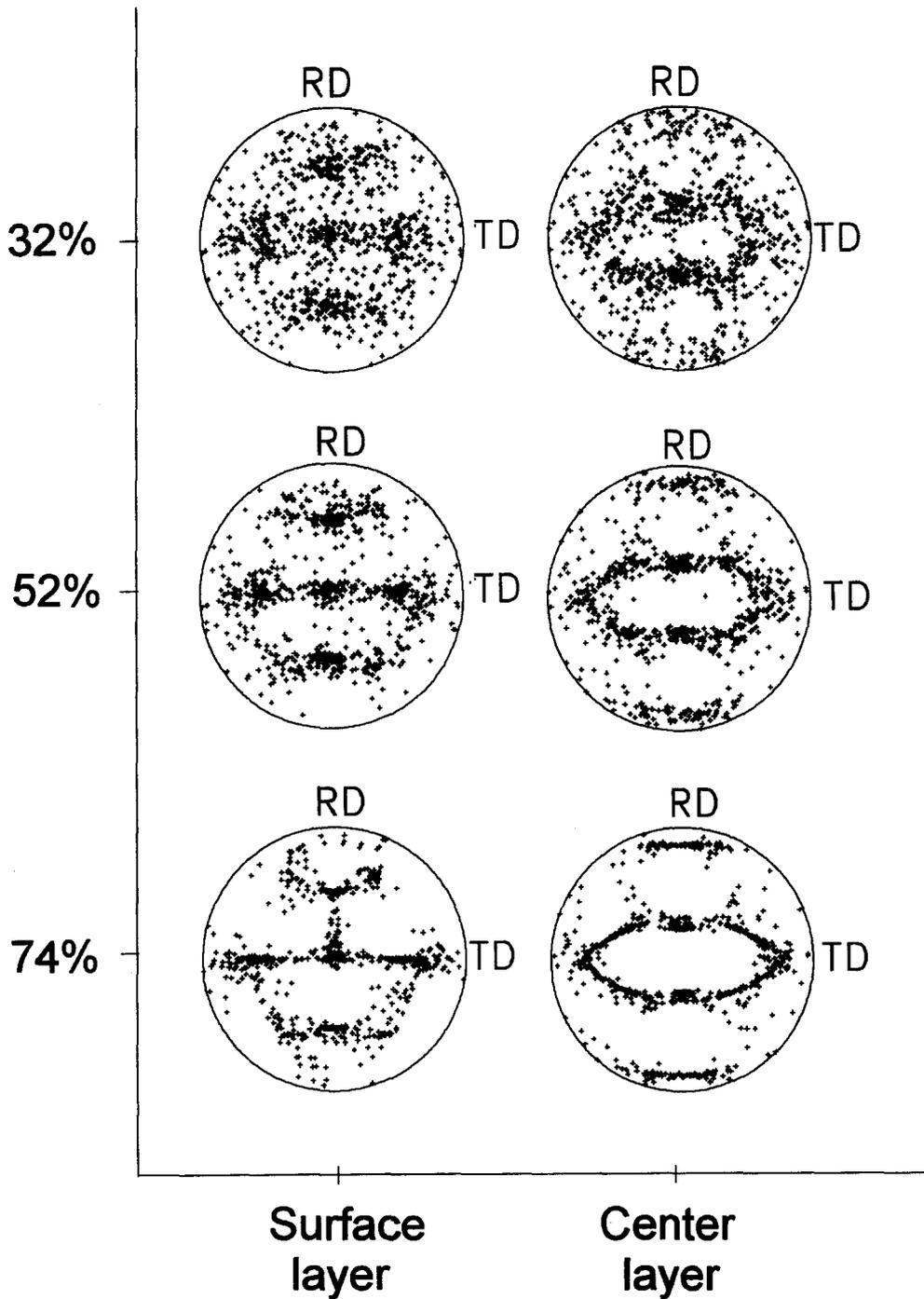


Fig. 8 The calculated (111) pole figures of the surface, middle and center layers of aluminum as a function of rolling reduction

5. 결 론

다층압연을 통하여 불균질압연집합조직의 변화를 두께에 따라 관찰하였고 이 결과를 Taylor의 완전구속조건에서의 결정방위회전과 유한요소해석을 연계하여 해석한 결과와 비교한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 5층압연한 시편의 표면층에서는 압하량이 증가함에 따라서 {001}<110> 집합조직이 발달하였다.
- (2) 시편의 중간층과 중심층에서는 압하량이 74%로 증가함에 따라서 β 형 섬유집합조직의 방위밀도함수가 증가하였는데 이 중에서 {112}<111> 집합조직과 {123}<634> 집합조직의 강도가 가장 컸으나, 88% 압연한 시편에서는 이들 성분과 더불어 {110}<112> 집합조직이 함께 발달하였다.
- (3) 다층압연은 단층압연에 비하여, 전단변형을 표면층에만 집중시킬 수 있으므로 이 방법을 이용하여 {001}<110> 전단집합조직만을 갖는 시편을 얻었다.
- (4) Taylor의 완전구속조건에서의 결정방위회전과 유한요소법을 연계해석하여 압하량에 따른 집합조직의 변화를 관찰하였으며, 계산결과와 실험결과는 잘 일치하였다.

후 기

이 연구는 신소재 박막가공 및 결정성장 연구센터를 통한 한국과학재단의 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드린다.

참고문헌

- (1) D.N.Lee, Y.H.Chung and M.C.Shin, 1983 "Preferred Orientation in Extruded Aluminum Alloy Rod", Scripta Metall. & Mater., Vol. 17, pp.339-342
- (2) 권재욱, 정효태, 오규환, 이동녕, 1994

"유한요소법을 이용한 면심입방정금속의 변형집합 조직 예측", 한국소성가공학회지, Vol.3 pp.229-242

- (3) C.S.Lee and B.J.Duggan, 1991 "A Simple Theory for the Development of Inhomogeneous Rolling Textures", Metall. Trans., Vol. 22A, pp.2637-2643
- (4) J.Hansen and H.Mecking, 1975 "Influence of the Geometry of Deformation on the Rolling Texture of F.C.C. Metals" Texture and the Properties of Materials(Edited by G.J.Davis et al.), The Metal Society, Cambridge, England, pp. 34-46
- (5) 최시훈, 오규환, 이동녕, "개량처리한 Al-17Si합금의 마멸저항", 대한금속학회지, Vol. 33 pp. 184-191(1995)
- (6) C.-H. Choi, S.-H. Hong, J.H.Jeong, J.W. Kwon, K.H.Oh and D.N.Lee, "Effect of Microstructure on the Failure of Cold Rolled Aluminum.", To be published
- (7) C.-H. Choi, and D.N.Lee, "Shear Texture Formation in Cold Rolled Aluminum and Its Recrystallization Texture", Acta Metall. & Mater., Submitted
- (8) W.Truszkowski, J.Krol and B.Major, 1980 "Inhomogeneity of Rolling Texture in fcc Metals", Metall. Trans., Vol. 11A, pp.749-758
- (9) H.O.Asbeck and H.Mecking, 1980 "Influence of Friction and Geometry of Deformation on Texture Inhomogeneity during Rolling of Cu Single Crystals as an Example", Mat. Sci. Eng., Vol.34, pp. 111-119
- (10) C.S.Lee, R.E.Smallman and B.J.Duggan, 1994 "Effect of Rolling Geometry and Surface Friction on Cube Texture Formation", Mat. Sci. Tech., Vol.10, pp. 149-154

- (11) K.K.Mathur and P.R.Dawson, 1989 "On Modeling the Development of Crystallographic Textures in Bulk Forming Processes", *Int. J. Plast.*, Vol.4, pp67-94
- (12) I.L.Dillamore and W.T.Roberts, 1963-1964 "Crystallographic Texture Variations through Rolled Aluminum and Copper Sheet", *J. Inst. Met.*, Vol.92, pp 193-199
- (13) J.Hirsch and K.Lücke, 1988 "Mechanism of Deformation and Development of Rolling Textures in Polycrystalline F.C. C. Metals-Simulation and Interpretation of Experiments on the Basis of Taylor-Type Theories", *Acta Metall.*, Vol.36, pp. 2883-2904
- (14) R.Becker, J.F.Butler, Jr., H.Hu and L.A.Lalli, 1991 "Analysis of an Aluminum Single Crystal with Unstable Initial Orientation (001)[110] in Channel Die Compression", *Metall. Trans*, Vol.22A, pp. 45-58
- (15) 이동녕, 금속소성학, 문운당, p323 (1991)