

## 그루브 압축이 알루미늄 집합조직에 미치는 영향

김영석\* · 박종진\*\*

(2000년 4월 18일 접수)

### Effect of Groove Pressing on Deformation Texture in Aluminum

Y. S. Kim and J. J. Park

#### Abstract

The present study has focused on the development of shear textures during groove pressing in an aluminum alloy sheet. The shear components  $e_{23}$  and  $e_{13}$  developed during the groove pressing process. The process consisting of two steps of grooving and flattening each effectively gave rise to a high shear deformation in the sheet without reduction in thickness. The main texture component obtained from the process was the rotated Bs-orientation. The evolution of shear components during the groove pressing caused an increase in R-value of aluminum sheet comparing to a normally processed rolled sheet.

**Key Words** : Groove Pressing, Groove Rolling, R Value, Shear Deformation, Aluminum

#### 1. 서론

대표적인 경량화 재료인 알루미늄 합금의 강도와 연성은 다량의 원소첨가에 의한 고용경화나 석출경화 효과를 이용하여 향상되어왔다. 따라서 높은 비강도를 갖춘 재료로서 항공기 구조용 재료로 사용되고 있을 뿐만 아니라 최근에는 에너지 절약과 환경오염 규제 등을 위하여 철도차량, 특수차량을 비롯한 일반 승용차의 구조용 재료에 이르기까지 사용범위가 확대되고 있다.

일반적으로 알루미늄 판재의 성형성은 여러 인자들에 의존한다. 그 중 중요한 인자로는 가공경화지수  $n$ , 변형

속도민감도  $m$ , 소성비  $R$ 이 있다. 소성불안정개시의 주요 인자인  $n$ 과 그 이후의 연신률을 지배하는  $m$ 은 다량의 합금원소를 첨가하여 상당한 수준까지 개선되었다. 그러나 성형성을 지배하는 소성비  $R$ 의 경우는 여전히 1.0에도 못 미치는 낮은 값에 머무르고 있다.  $n$  및  $m$ 과는 달리  $R$ 은 동일한 재료라도 집합조직에 따라 다른 값을 나타낸다. 따라서 알루미늄의 이러한 낮은 소성비는 이 재료의 독특한 집합조직과 깊은 관련이 있다고 할 수 있다. 즉, 알루미늄은 대표적인 면심입방정 구조를 갖는 금속으로서 압연공정에서 나타나는 변형 집합조직이나 재결정 집합조직 등이 소성비를 저하시키는 열등한 성분들

\* 홍익대학교 대학원

\*\* 홍익대학교 기계공학과

로 대부분 구성되기 때문이다<sup>(1~4)</sup>. 이러한 이유로 인하여 소성비의 향상을 위한 집합조직 연구는 주로 강판에 대하여 진행되어 왔으며 알루미늄에 대해서는 극히 제한적이었다.

알루미늄 판재의 소성비를 향상시키고자 하는 연구의 초점은, 첫째 압연시 전단변형을 가능한 크게 발생시켜 (1 1)면이 판재 표면과 평행하게 발달하도록 하는 것이며, 둘째 어닐링 조건을 적절히 조절하여 될 수 있는 대로  $\Delta R$ 을 감소시키고 동시에 평균 R을 증가시키려는 것이다. Kanijo<sup>(5)</sup> 등은 Al-Mg 합금을 고온에서 압연하여 향상된 소성비를 발견하였으며, 또한 Nagai<sup>(6)</sup> 등은 용탕 직접압연(Melt Direct Rolling)을 통하여 강한 전단변형 집합조직을 발달시켜 소성비를 향상시켰다. 그러나 이러한 압연방법들은 높은 에너지를 필요로 하며 중심층에서는 여전히 평면변형 집합조직이 발생하는 문제를 가지고 있다. 이를 극복하기 위하여 Hu<sup>(7)</sup>와 左海哲大<sup>(8)</sup> 등은 이주속 압연을 통하여, 또한 김근환<sup>(9)</sup> 등은 지름이 상이한 상하 압연롤을 통하여 두께방향으로 매우 균일한 전단변형 집합조직을 얻었으며 소성비가 향상되었음을 발견하였다.

## 2. 실험 및 해석

본 연구에서는 그루브(groove) 압연과 유사한 변형모드를 수반하는 그루브 압축을 고안하고 이러한 변형장치에 의해서 발생하는 전단변형과 집합조직에 대하여 연구하였다. 그루브 압축에서는 압축 전과 후에 판재 두께 및 폭의 변화가 없기 때문에 평압연 전에 전처리 압연으로써 응용이 가능하며, 판재 방향을 조절하여 전단변형을 RD와 ND로 정의되는 평면이나 TD와 ND로 정의되는 평면에 발생시킬 수 있다. 평압연에서는 전단변형이 항상 RD와 ND로 정의되는 평면에서만 발생한다. 특히 그루브 압축에서의 전단변형은 평압연에서 발생하는 전단변형과 매우 상이하며 판재 표면보다는 내부에서 크게 발생하는 특징을 나타낸다.

### 2.1 압축실험

Fig. 1에 그루브 압축에 사용된 실험장치가 도시되어 있다. 그루브의 경사각도는 45°이며, 그루브 끝단의 폭은 6.4mm이다. 시편은 열간압연된 Al 1050으로써 두께가 6.4mm이고 가로와 세로가 각각 70.4mm인 정사각형 판재이다. 이러한 시편에 다음과 같은 네 단계의 압축변형을 가하였다: (1) 그루브 금형을 사용하여 시편단면을 그루브 형태로 압축하고, (2) 평금형을 사용하여 시편을

평평하게 펴고, (3) 그루브 금형을 사용하여 아직 변형을 받지 않았던 시편의 단면을 그루브 형태로 압축하고, (4) 평금형을 사용하여 다시 시편을 평평하게 펴낸다. 이와 같은 압축과정을 거친 시편은 초기와 형상이 동일하다. 즉, 두께와 폭의 변화가 없다. 하지만 내부에는 큰 전단변형이 축적되는데, 그루브 형태로 압축될 때와 평평하게 펴낼 때 각각 약 0.8의 전단변형률이 발생된다.

Fig. 2와 같이 압연 방향과 그루브 방향의 관계에 따라 압축 시편을 두 가지로 구분할 수 있다: (1) A-type 시편 -- 압연방향이 그루브와 평행하여 전단변형이 RD와 ND로 정의되는 평면에 발생한다. 주로 전단변형성분  $\epsilon_{32}$ 와  $\epsilon_{23}$ 이 나타난다. (2) B-type 시편 -- 압연방향이 그루브와 수직하여 전단변형이 TD와 ND로 정의되는 평면에 발생한다. 주로 전단변형성분  $\epsilon_{31}$ 과  $\epsilon_{13}$ 이 나타난다.

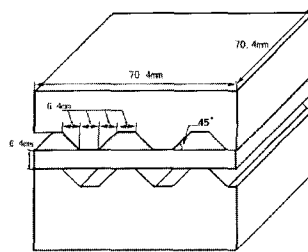


Fig. 1 Schematic drawing of the groove pressing apparatus

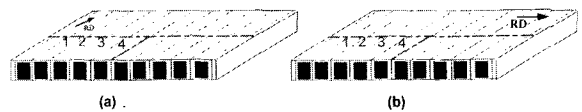


Fig. 2 Two types of specimen: (a) A type and (b) B type

### 2.2 그루브 압축의 유한요소해석

그루브 압축시 시편내에서 발생하는 변형은 비정상상태에서 진행되므로 변형률은 시간에 따라 변화하며, 불균일 변형이 진행되므로 변형률 이력은 질점의 위치마다 다르게 된다. 질점의 위치에 따라 다르게 나타나는 변형률 이력을 구하기 위하여 그루브 압축에 대한 강소성 유한요소해석을 수행하였다<sup>(10)</sup>. Fig. 3에 도시되어 있듯이 시편의 상부 표면층은 S=1, 중심층은 S=0, 하부 표면층

은  $S=-1$ 으로 정의하면, 임의의 두께위치를  $S$ 값으로 나타낼 수 있다. 영역 (a)는 네 단계 압축시 1과 2 단계의 변형을 받는 영역이며, 영역 (b)는 3과 4 단계의 변형을 받는 영역을 의미한다.

유한요소해석은 평면변형을 변형 가정 하에 급형과 판재사이의 마찰계수  $m$ 을 0.1로 설정하고 수행하였다. 판재소재인 Al 1050의 유동응력식은 강도계수  $K$ 를 119.23MPa, 가공경화지수  $n$ 을 0.297로 갖는 멱함수로 표현하였다. Fig. 4는 유한요소해석으로부터 예측된 시편 단면에서의 변형된 요소망이다. 초기의 단면에서의 요소망은 정사각형으로 구성되었으므로 변형된 요소망으로부터 각 위치에서의 변형률 이력을 구할 수 있다.

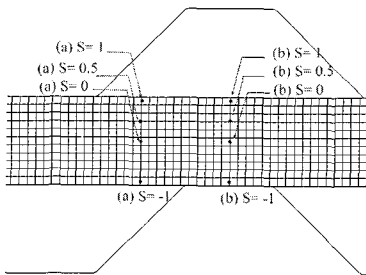


Fig. 3 Designations of regions (a) and (b), and  $S$  values for several locations

### 2.3 집합조직의 측정 및 예측

그루브 압축된 시편에서 두께방향으로의 위치에 따라 다르게 발생하는 집합조직을 연구하기 위하여  $S=1$ ,  $S=0.8$ ,  $S=0.5$ ,  $S=0$ 에서의 극점도를 측정하였다. 이를 위하여 시편에 기계적 연마를 가한 후, 가성소다에서 약 30초 동안 화학연마를 가하였다. Co K  $\alpha$ -선을 이용하여  $0^\circ \sim 70^\circ$  범위에서 Schulz 반사법으로  $\{111\}$ ,  $\{200\}$ ,  $\{220\}$ 에 대한 극점도를 측정하고<sup>(11,12)</sup>, 극점도 positivity를 이용한 반복계산을 통하여 방위분포함수(ODF)를 구하였다<sup>(13)</sup>.

또한 유한요소해석에서 구한 변형률 이력을 Taylor-Bishop-Hill 이론<sup>(14,15)</sup>에 대입하여 결정의 회전을 예측하고 방위분포함수를 예측하였다. 이 과정에서 Strain rate sensitivity model<sup>(16)</sup>을 이용하여 슬립계의 조합을 선택하였다. 초기 결정방위는 측정된 결정방위를 사용하였다.

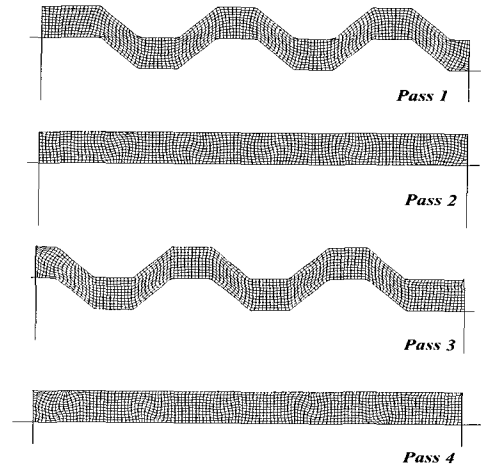


Fig. 4 Deformed cross sections and distorted grids at the four stages of compression

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5에 각각 영역 (a) 와 (b)에서 발생하는 변형률 이력을 나타내었다. 각 그림의 가로축은 네 단계 압축과정에서 경과된 시간(총 0.26초)을, 세로축은 변형률 증분  $\Delta e_{22}$ ,  $\Delta e_{33}$ ,  $\Delta e_{23}$ ,  $\Delta e_{32}$ 를 나타낸다. 각 단계마다 경과된 시간은 0.065초로 동일하다고 간주하였다. 영역 (a)는 1과 2단계에서 변형을 받고 영역 (b)는 3과 4단계에서 변형을 받으므로 그림에서 볼 수 있듯이 이 두 영역에서의 변형률 이력은 서로 대칭적으로 나타난다. 모든 두께위치에서  $\Delta e_{22}$ 는 그루브 변형 단계의 최종 순간에 급히 증가하였다가, 곧 이어 평평하게 펴는 단계의 초기 순간에 급히 감소한다. 반면에  $\Delta e_{33}$ 은 천천히 증가하였다가 감소한다. 즉, 그루브 압축에서는 신장과 압축이 약간 발생하며, 완전히 전단변형만이 유지되지 않는 것을 알 수 있다. 하지만 네 단계의 변형과정을 거친 후에는  $e_{22}=0$ 과  $e_{33}=0$ 이 되므로 두께와 폭의 변화가 없음을 알 수 있다.

$S=1$ 에서는  $\Delta e_{23}$ 과  $\Delta e_{32}$ 가 부호는 다르지만 같은 크기를 나타내므로 네 단계 압축에서 전단변형을 거의 받지 못하고 주로 강제회전을 한 것으로 나타났다. 반면에  $S=0$ 과  $S=0.5$ 에서는  $\Delta e_{23}$ 에 비하여  $\Delta e_{32}$ 가 크게 변화하므로 전단변형을 크게 받은 것을 알 수 있다. 따라서 그루브 압축에서 표면은 주로 강제회전을, 내부는 주로 전단변형을 받는다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 그루브

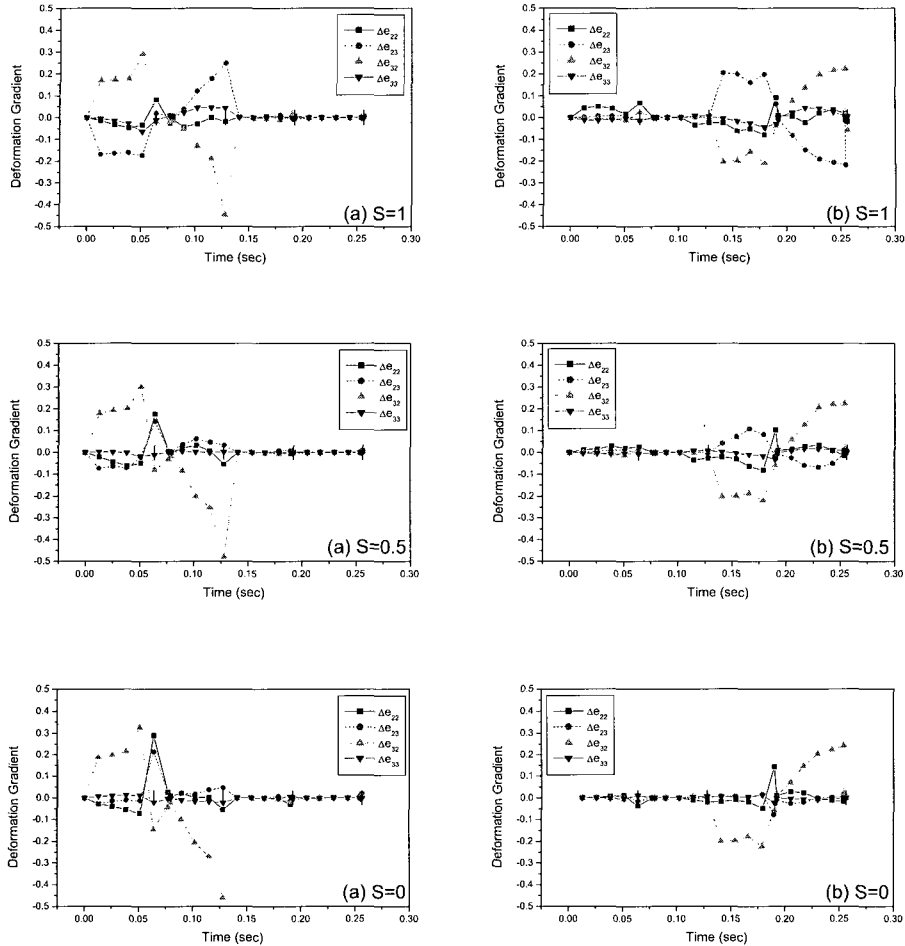


Fig. 5 Comparison of deformation gradient increments at S=1, 0.5 and 0 in regions (a) and (b)

압축된 시편의 변형률 이력을 그루브 위치에 따라 일정한 패턴의 불균일성을 나타내며, 시편의 두께방향으로도 불균일하게 나타낼 것이다.

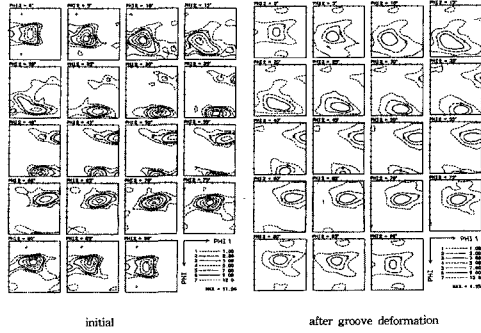
A형 시편의 영역 (a)에서의 초기 집합조직과 그루브 압축 후의 집합조직을 측정하고 이를 Fig. 6에 방위분포 함수로 비교하였다. 표면층에서는 초기의  $\{110\}\langle 112\rangle$ 와  $\{123\}\langle 634\rangle$ 의 강도가 높은  $\beta$ -fiber가 압축 후에는 강도가 낮고 균일한  $\beta$ -fiber로 회전하였다. S=0.5에서는 초기의 균일한  $\beta$ -fiber에서 압축 후에는  $\{110\}\langle 112\rangle$ 에서 약  $5^\circ$  회전된  $\{40^\circ 45^\circ 0^\circ\}$  성분이 강하게 나타났다. 중심층에서는  $\beta$ -fiber,  $\{110\}\langle 112\rangle$ 와  $\{110\}\langle 001\rangle$ 가 포함된 섬유집합조직, Goss 그리고  $25^\circ$  rotated Goss 등이

혼합된 복잡한 초기 집합조직이 압축 후에는 약한 강도의  $\{40^\circ 45^\circ 0^\circ\}$  성분으로 회전하였다.

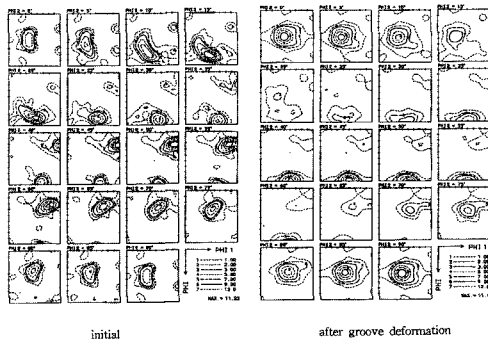
Fig. 7에는 B형 시편에서 측정된 집합조직을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 전단변형에서 안정된 성분으로 알려진 회전 입방정 집합조직인  $\{30^\circ 45^\circ 0^\circ\}$  성분이 잘 나타났다. 이 성분은 소성비를 저하시키는 것으로 이미 잘 알려져 있으며, 많은 연구가 수행되었으므로 본 연구에서는 A형 시편에 초점을 맞추게 되었다.

Fig. 5의 변형률 이력을 이용하여 영역 (a)의 S=0.5에서의 집합조직을 예측하고 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 6의 측정결과와 매우 유사하게  $\{40^\circ 45^\circ 0^\circ\}$  성분이 강하게  $(f(g)_{\max}=15.63)$  나타나는 것을 볼 수 있다.

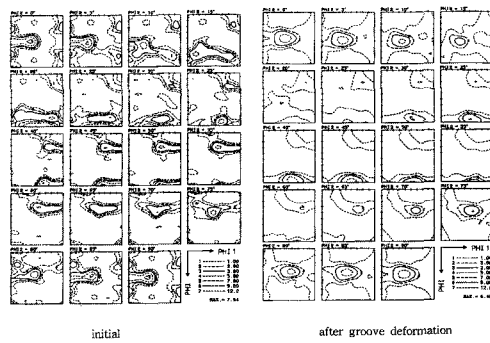
그루브 압축이 알루미늄 집합조직에 미치는 영향



(a) S=1

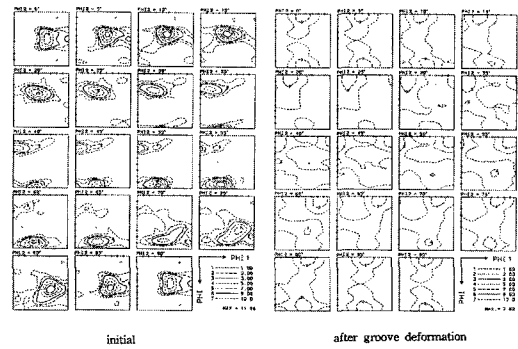


(b) S=0.5

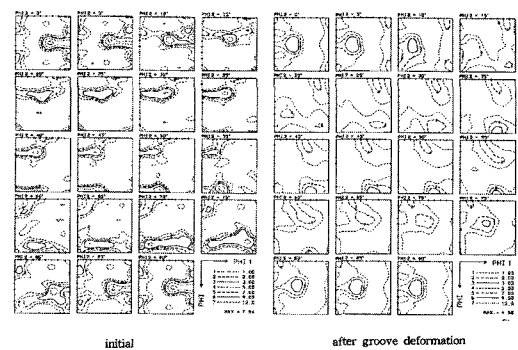


(c) S=0

초기 집합조직과 그루브 압축 후의 집합조직을 이용하여 소성비를 예측하고 이를 Fig. 9에 도시하였다. 표면층에서  $R_m$ 은 초기의 1.58에서 압축 후 1.25로 감소하였고,  $\Delta R$ 도 초기의 -1.87에서 압축 후 -1.55로 감소하였다. S=0.8에서  $R_m$ 은 1.32에서 2.03으로 증가하였으며,  $\Delta R$ 도 -1.87에서 -3.06으로 증가하였다. S=0.5에서  $R_m$ 은 1.10에서 2.14로 증가하였으며  $\Delta R$ 도 -1.26에서 -3.21로 증가하였다. S=0에서  $R_m$ 은 0.84에서 1.09로 증가하였으며,  $\Delta R$ 은 0.37에서 -0.25로 감소하였다. R의 최대값은 3.8로써 S=0.5에서  $45^\circ$  방향에서 나타났다. 그루브 압축에서는  $\{110\}\langle 112 \rangle$ 에서 약  $5^\circ$  회전된  $\{40^\circ 45^\circ 0^\circ\}$  성분이 발생하고 이 성분이 판재의 R과  $\Delta R$ 를 증가시킨다고 판단된다.



(a) S=1



(b) S=0

Fig. 6 Comparison of measured textures in ODF at initial and compressed stages (A type): (a) S=1, (b) S=0.5 and (c) S=0

Fig. 7 Comparison of measured textures in ODF at initial and compressed stages (B type): (a) S=1 and (b) S=0

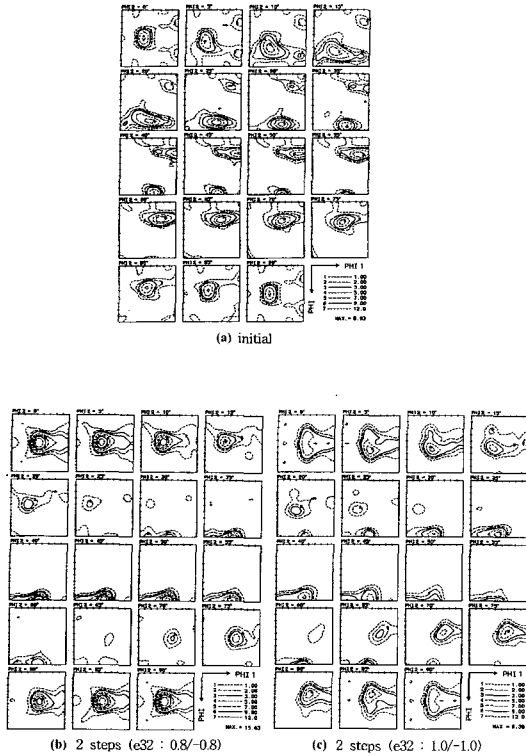


Fig. 8 Predicted textures in ODF at initial and compressed stages at  $S=0.5$  (A type): (a) initial, (b) incremental strain and (c) total strain.

용탕직접압연<sup>(6)</sup>에 의해 제작된 Al 1050 판재는  $R_m$ 이 0.96, R의 최대값은  $45^\circ$  방향에서 1.5,  $\Delta R$ 은 -1를 나타내었으며, 비대칭압연<sup>(9)</sup>에 의해서 제작된 Al 1100 판재에서는  $R_m$ 이 1.04, R의 최대값은  $0^\circ$  방향에서 1.32,  $\Delta R$ 은 0.11로 나타났다. 이에 비하여 그루브 압연은 R과  $\Delta R$ 이 모두 크게 증가한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

대표적 면심 입방정 금속인 알루미늄 판재의 소성비를 향상시키기 위한 방법으로 그루브 압축을 제안하고 이것이 집합조직이 미치는 영향을 연구하였다. 이를 위하여 초기 집합조직과 그루브 압축 후 발생하는 집합조직을 판재두께 위치에 따라 측정하였다. 또한 초기 집합조

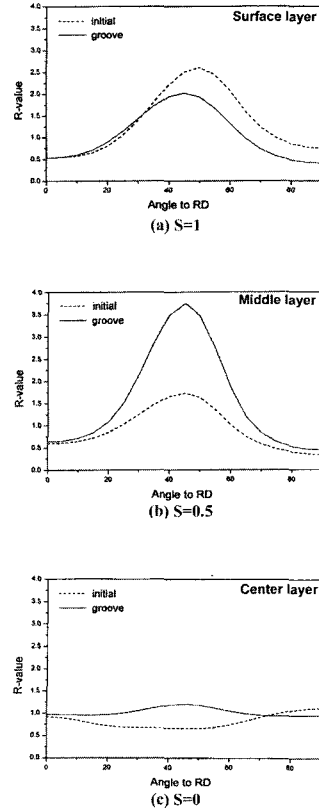


Fig. 9 Predicted R values at initial and compressed stages: (a)  $S=1$ , (b)  $S=0.5$  and (c)  $S=0$

직과 유한요소해석으로 구한 변형률 이력을 이용하여 압축 후의 집합조직을 예측하였다. 그리고 측정된 집합조직으로부터 방향에 따른 R값을 계산하였다. 본 연구에서 얻은 결과를 다음과 같이 요약하였다.

(1) 그루브 압연과 유사한 변형을 발생시키는 그루브 압축의 실험결과, 집합조직은 변화되 단면은 일정하게 유지됨을 확인할 수 있었다. 따라서 그루브 압연은 평압연 전에 수행하는 전처리 압연으로써 조직제어를 위한 목적으로 응용될 수 있을 것이다.

(2) 측정된 집합조직과 예측된 집합조직은 성분별 강도의 차이는 있었으나, 서로 잘 일치하였다. 따라서 초기 집합조직을 알게 되면 이로부터 임의의 변형률 이력에 의하여 발생하는 집합조직의 변화는 예측이 가능하다.

(3) 그루브 압축에서 표면은 강체회전을, 내부는 전단 변형을 크게 받는다. 따라서 그루브 압축된 시편의 변형률 이력은 두께 위치에 따라 불균일하고 또한 그루브 위

치에 따라 일정한 패턴의 불균일성을 나타낸다.

(4) 본 연구에서 사용한 시편의 초기 집합조직은  $\beta$ 점 유 집합조직이었으며, 이는 그루브 압축 후에  $\{40^\circ 45^\circ 0^\circ\}$  성분으로 발달하였다. 이 성분은 평압연에서는 발생되지 않는 것으로 알려져 있다. 그리고 무운할 평압연에서 표면에 발생하는 전단변형 집합조직 성분인  $\{001\}\langle 110 \rangle$ ,  $\{111\}\langle 110 \rangle$ ,  $\{111\}\langle 112 \rangle$  성분들은 거의 관찰되지 않았다. 따라서 그루브 압연과 평압연에서 발생하는 집합조직은 매우 상이하다는 것을 알 수 있었다.

(5) R값은 압연방향과  $45^\circ$  를 이루는 방향에서 최대 3.8로 나타났다. 이러한 R값의 향상은  $\{40^\circ 45^\circ 0^\circ\}$  성분에 기인하는 것으로 판단된다. 하지만 이 성분은 전단 변형률이 더 증가하면 감소하는 것으로 예측되므로 준안정 방위로 판단된다.

(6) 그루브 압연은 기존의 용탕직접압연과 비대칭압연에 비하여 R과  $\Delta R$ 이 모두 크게 증가한 결과를 나타내었다. 향후 R과  $\Delta R$ 을 적절히 조절할 수 있는 어닐링 조건에 대한 연구가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 학술진흥재단 '98 신소재분야(1998-017-E00098) 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한 본 연구에 많은 도움을 주신 서울대 이동녕 교수님과 금오공대 박노진 교수님께도 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) M. Hatherly and W. B. Hutchinson, 1979, An Introduction Textures in Metals, Institution of Metallurgists, London
- (2) J. Hirsch and K. Lucke, 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-Tape Theories", Acta Metall., Vol.36, p.2883.
- (3) W. B. Hutchinson and H.-E. Ekström, 1990, Mat. Sci. Tech. 6, p.1103.
- (4) A. K. Vasudevan and R. D. Doherty, 1989, Aluminum Alloys-contemporary Research and Applications (Treatise on Materials Science and Technology, Vol.31), Academic Press
- (5) T. Kamijo and H. Fukutomi, 1995, "Microstructural and Crystallographic Aspects of Recrystallization", Proc. of 16th Riso International Symposium of Material Science, p.377
- (6) Y. Nagai, N. Tsuji, T. Sakai and Y. Saito, 1996, "Microstructure and Texture of A1050 Aluminum Strips Produced by Melt Direct-Rolling Method", 日本金屬學會誌, 第60卷, 第8号 p.708
- (7) J. Hu, K. Ikeda and T. Murakami, 1996, 日本金屬學會誌, 第60卷, 第11号 p.1130
- (8) 左海哲夫, 第174号 塑性加工 ツソボヅウム, 日本塑性加工學會, 日本機械學會, 東京, 平成 9年, p.33
- (9) 김근환, 1996, 비대칭 압연한 알루미늄 합금판재의 집합조직 및 소성변형비, 박사논문, 서울대학교 금속공학과
- (10) S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, 1989, Metal Forming and the Finite Element Method, Oxford University Press
- (11) B. D. Cullity, 1978, Elements of X-ray Diffraction, Addison-Wesley Publishing Company
- (12) H. J. Bunge, 1982, Texture Analysis in Material Science, translated by P. R. Morris, Butterworths & Co.
- (13) S. Matthies and H.-R. Wenk, 1985, "Preferred Orientation in deformed Metals and Rocks" (ed. H.-R. Wenk), Academic Press, Inc. p.139
- (14) G. L. Taylor, 1938, J. Inst. Metals, Vol.63 p. 307
- (15) J. F. Bishop and R. Hill, 1951, Phil. Mag. Vol.42, p.414
- (16) G. R. Canova and U. F. Kocks, 1984, Proc. ICOTOM 7, Noordwijkerhout, Netherlands Society of Materials Science, p.428