

# 집합조직과 이랑형표면결함의 제어 및 결정립 미세화 수단으로서의 비대칭압연

이동녕

신소재공동연구소 및 재료공학부, 서울대학교

## Asymmetric Rolling as Means of Texture and Ridging Control and Grain Refinement

D.N. Lee

Research Institute of Advanced Materials and School of Materials Science and  
Engineering, Seoul National University

### Abstract

Asymmetric rolling, in which the circumferential velocities of the upper and lower rolls are different, can give rise to intense plastic shear strains and in turn shear deformation textures through the sheet thickness. The ideal shear deformation texture of fcc metals can be approximated by the  $\langle 111 \rangle // ND$  and  $\{001\} \langle 110 \rangle$  orientations, among which the former improves the deep drawability. The ideal shear deformation texture for bcc metals can be approximated by the Goss  $\{110\} \langle 001 \rangle$  and  $\{112\} \langle 111 \rangle$  orientations, among which the former improves the magnetic permeability along the  $\langle 100 \rangle$  directions and is the prime orientation in grain oriented silicon steels. The intense shear strains can result in the grain refinement and hence improve mechanical properties. Steel sheets, especially ferritic stainless steel sheets, and aluminum alloy sheets may exhibit an undesirable surface roughening known as ridging or roping, when elongated along RD and TD, respectively. The ridging or roping is caused by differently oriented colonies, which are resulted from the  $\langle 100 \rangle$  oriented columnar structure in ingots or billets, especially for ferritic stainless steels, that is not easily destroyed by the conventional rolling. The breakdown of columnar structure and the grain refinement can be achieved by asymmetric rolling, resulting in a decrease in the ridging problem.

**Key words:** Asymmetric rolling, texture, ridging, grain refinement, sheet metals

## 1. 서론

비대칭압연에서는 작동롤의 원주속도가 달라 판재 두께 전체에 심한 소성전단변형이 되며 따라서 전단집합조직이 생긴다 [1-5,11]. 전단집합조직은 열풀림 후에도 거의 변하지 않는다 [4,5]. 그러므로 비대칭압연을 이용하여 면심입방정 금속판재의 디프드로잉성을 향상시킬 수 있고 [1-4] 체심입방정 금속의 전 두께에 걸쳐 고스 (Goss) 방위를 얻을 수 있다 [6]. 판금이 심한 소성전단변형을 받으면 결정립미세화가 이루어지므로 [5,7] 페라이트계 스테인리스강판 [8]과 6000계 알루미늄합금판 [10,11]의 표면에 생기는 이랑형 표면결함을 줄일 수 있다. 여기서는 이러한 현상을 간략하게 종합 정리 하여 소개하고자 한다.

## 2. 집합조직 제어

### 2.1 강의 집합조직

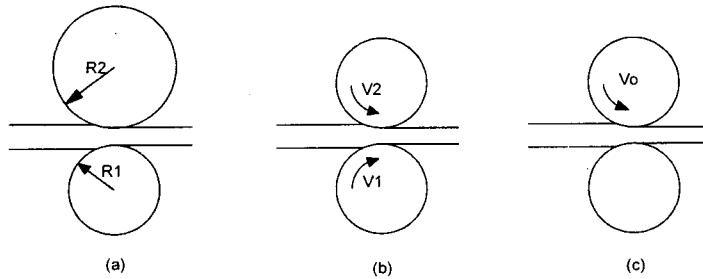


Fig. 1 Asymmetric rolling methods. (a) Different roll radii at same rotation rate, (b) different rotation rates at same roll radii, (c) single roll drive.

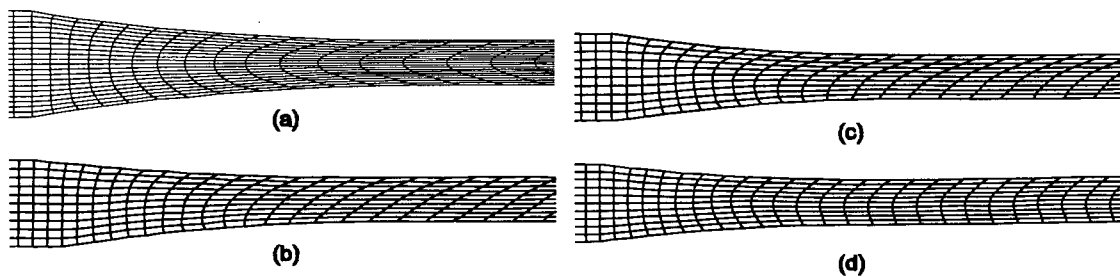


Fig. 2 Calculated deformed meshes of steel sheets rolled (a) symmetrically, (b) asymmetrically at roll radius ratio of 1.5, (c) asymmetrically at roll rotation-rate ratio of 1.5 and (d) by single roll drive. Rolling reduction of 50% and friction coefficient of 0.3 were used in calculation. Roll size in symmetric and single roll drive rolling is same as lower roll size in asymmetric rolling [6].

비대칭압연에는 제어할 수 있는 변수가 여럿 있다. 이를 열거하면 압연방법, 원주속도비, 롤과 재료사이의 마찰계수, 총 압하율, 패스당 압하율, 압연방향, 온도 등 이다. 그림 1에 3가지 비대칭 압연 방법을 나타내었다. 그림 2에서 보는 바와 같이 압연방법에 따라 변형에 차이가 나고 따라서 집합조직에도 차이가 생긴다 [3-6]. 예로서, 비대칭압연으로 판재 두께전체에 걸쳐 Goss 방위 ( $\{110\}<001>$ )가 발달하는 것을 그림 3에 나타내었다. 이 경우, ND (수직방향)-회전 판의 윗표면층의 집합조직과 RD-회전 판재의 아래표면층의 집합조직이 비슷하다. ND-회전판의 경우, 윗표면과 아랫표면이 압연중 변하지 않는 반면, RD (압연방향)-회전판의 경우에는 첫 패스에서의 윗 표면이 둘째 패스에서 아랫표면이 된다. 그러나 이 두 판재의 전단 방향은 매 패스 변한다 (그림 4). 그러므로 ND-회전판재의 윗 표면과 RD-회전판재의 아랫 표면이 최종 패스 중 상부 롤과 접촉하였다. 이러한 사실로부터 표면층의 집합조직이 최종패스의 위치에 의하여 지배된다는 것을 알 수 있다.

체심입방정 철의 전단집합조직 중 Goss 성분은 방향성규소전기강판의 제조에서 얻고자하는 주 방위이다. 비대칭압연과 재래식 방법을 적절히 조합하면 새로운 전기강판의 새로운 생산방법이 개발될 수도 있다.

### 2.2 알루미늄합금의 집합조직

자동차의 경량화를 위하여 강판의 중요한 대체재의 하나로 알루미늄합금이 고려되고 있다. 그러나 알루미늄합금 판의 약점 중 하나로 열등한 디프드로잉성이 꼽히고 있다. 이 열등한 디프드로잉성의 원인은 종래 방법으로 생산된 알루미늄합금판의 집합조직에는 디프드로잉성을 향상시키는  $\langle 111 \rangle // ND$  성분이 없기 때문이다.  $\{001\}<110>$ 과  $\{111\}<112>$ 로 구성된 이상적전단집합조직은 판과 롤 사이의 마찰이 큰 조건에서 압연한 알루미늄의 표면층에서만 생긴다. 그러나 그림 5에서

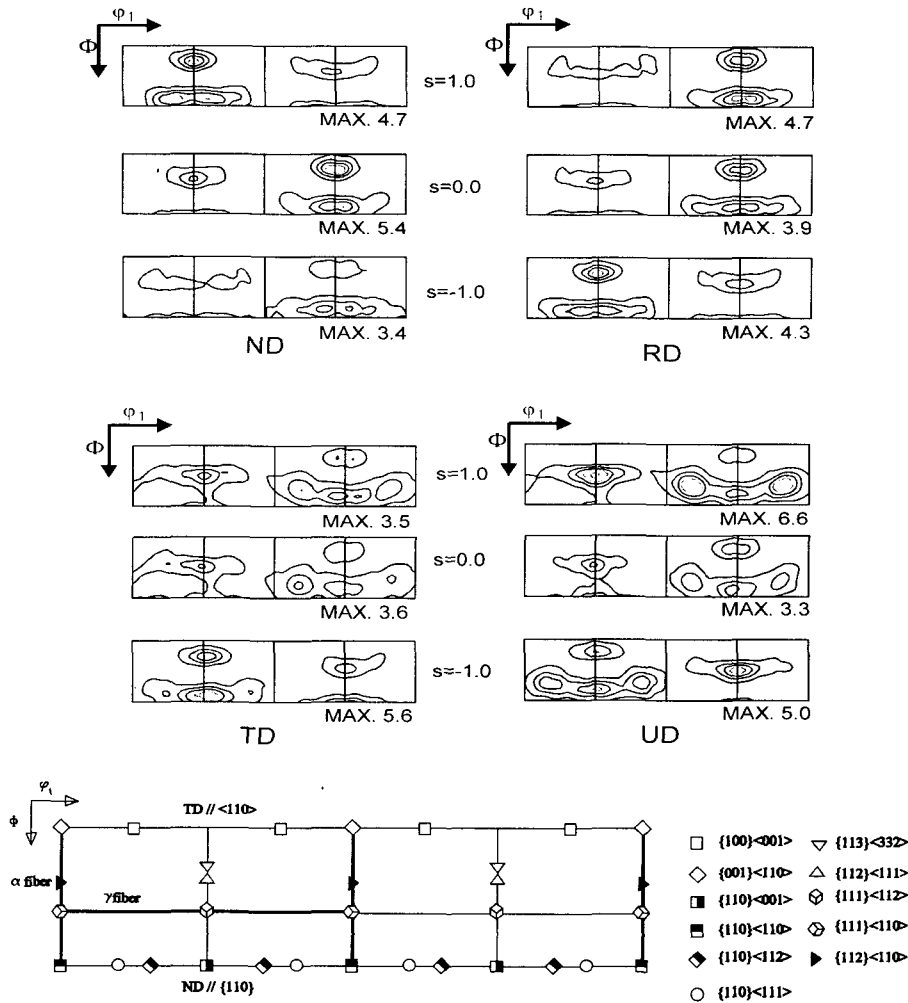


Fig.3 ODFs ( $\phi_2=45^\circ$ ) of IF steel sheets rolled to 0.8mm by 70% with about 20% per pass at roll radius ratio of 1.5 (upper roll dia. 20cm, lower roll dia. 13cm) at 700°C. ND and RD indicate that successive rolling directions were rotated through 180° about ND and RD axes, respectively. s=1, 0, -1 indicate upper surface, center, lower surface layers referred to initial specimen [6].

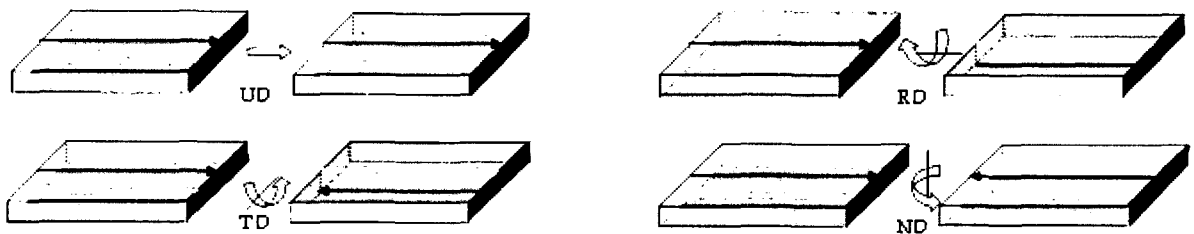


Fig. 4 Shear directions (arrows) in asymmetric rolling. In UD rolling, successive RD is not changed, whereas in TD, RD, and ND rolling, sheet is rotated through 180° about TD (transverse direction), RD, and ND axes, respectively, each pass. Dark surface is initially lower surface. Left and right figures show shear directions before (left) and after (right) each rolling pass.

보는바와 같이 비대칭압연한 판재의 경우 중심 층에도 디프드로잉성을 향상시키는 {111}<112> 성분이 발달한다. 그림 5의 경우 롤반지름비의 값이 1.5일 때 이상적전단집합조직에 가까운 집합조직이 얻어졌다.

그림 6는 알루미늄 비대칭압연판재의 계산 {111} 극점도인데 집합조직이 이상적전단집합조직에

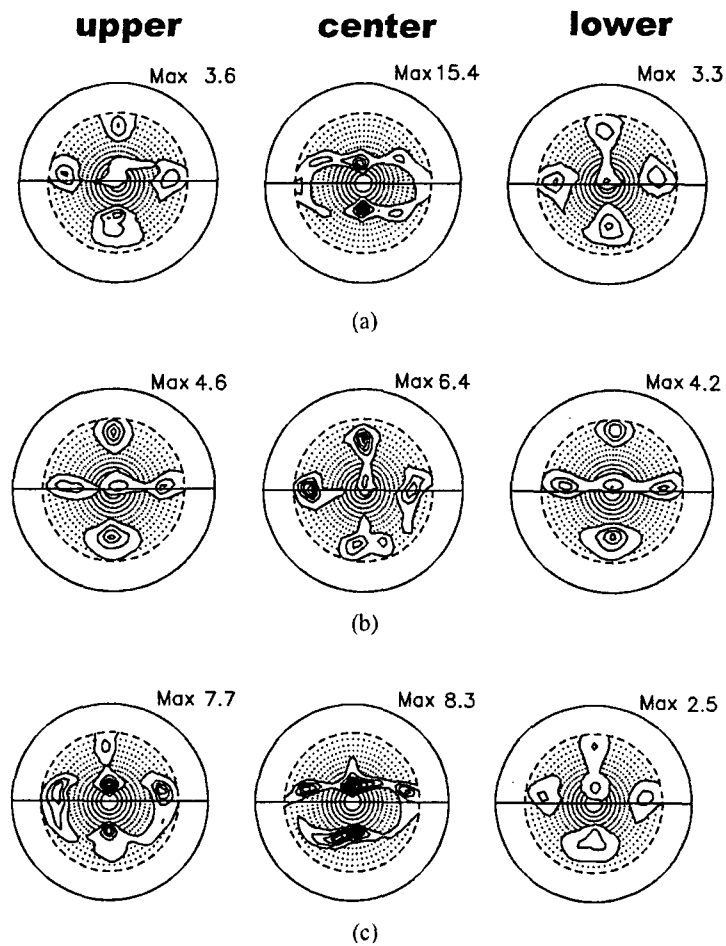


Fig. 5 Measured (111) pole figures of aluminum sheets asymmetrically rolled by 50% at roll radius ratios of (a) 1.25, (b) 1.5, and (c) 2[3].

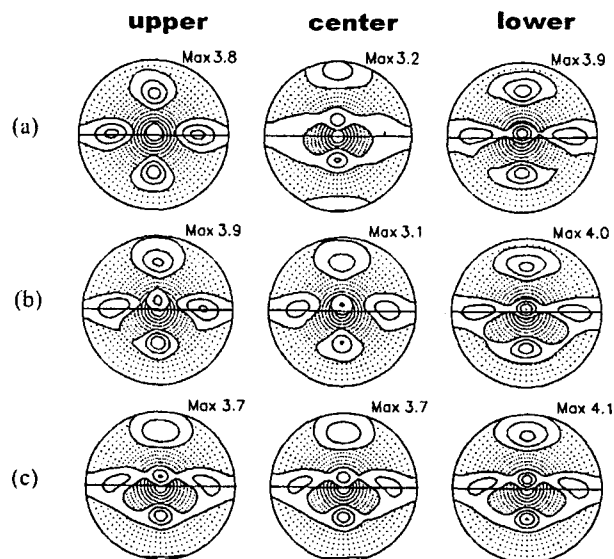


Fig. 6 Calculated (111) pole figures of aluminum sheets asymmetrically rolled by 50% at roll radius ratio of (a) 1.25, (b) 1.5, and (c) 2[3].

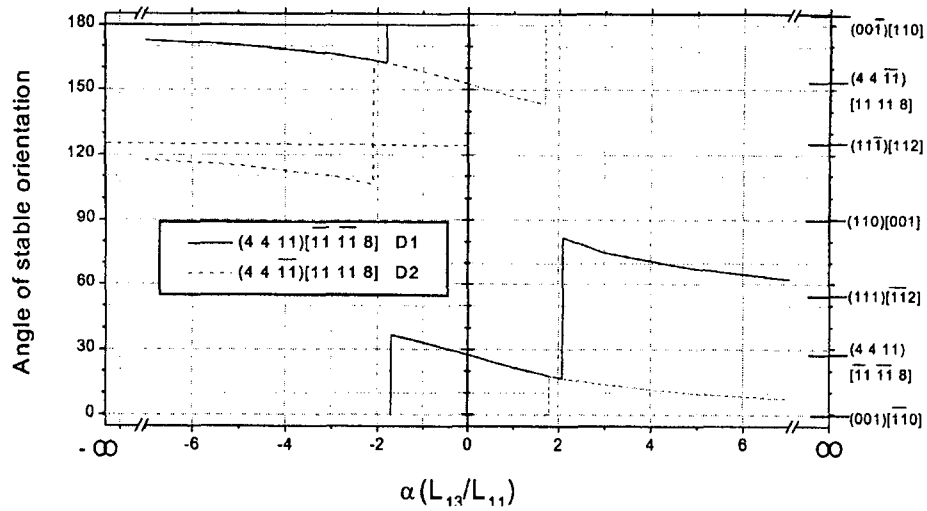


Fig. 7 Stable orientations rotated from Dillamore orientations D1 and D2 about TD as a function of  $\alpha (=e_{13}/e_{11})$  for fcc crystal [3].

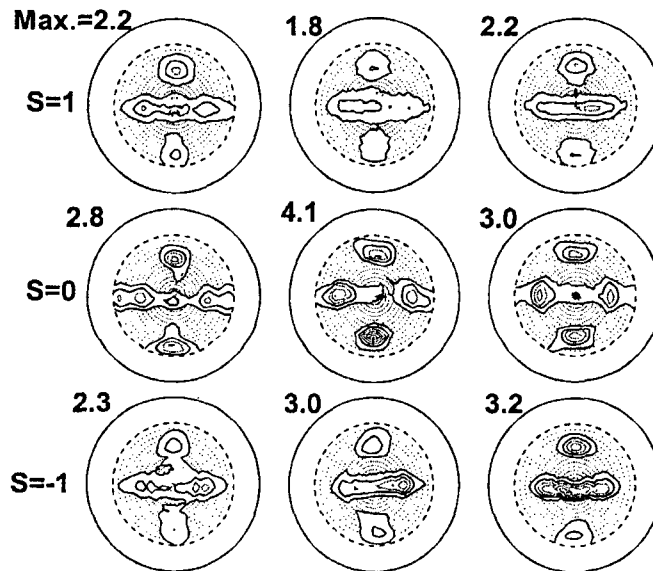


Fig. 8 (111) pole figures of AA1050Al sheets asymmetrically rolled (roll dia. 30 cm, upper roll 45 rpm, lower roll 23 rpm) by 66% in 8 passes, followed by 180° rotation about ND axis and then rolled by (left figure) 24, (center) 19, and (right) 13% in one pass [11].

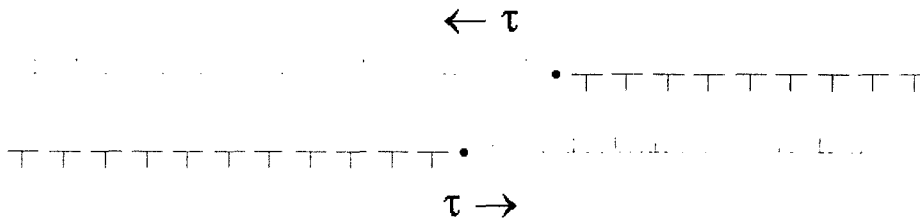


Fig. 9 Schematic illustration of dislocations with single Burgers vector generated by slip systems with single slip direction [4].

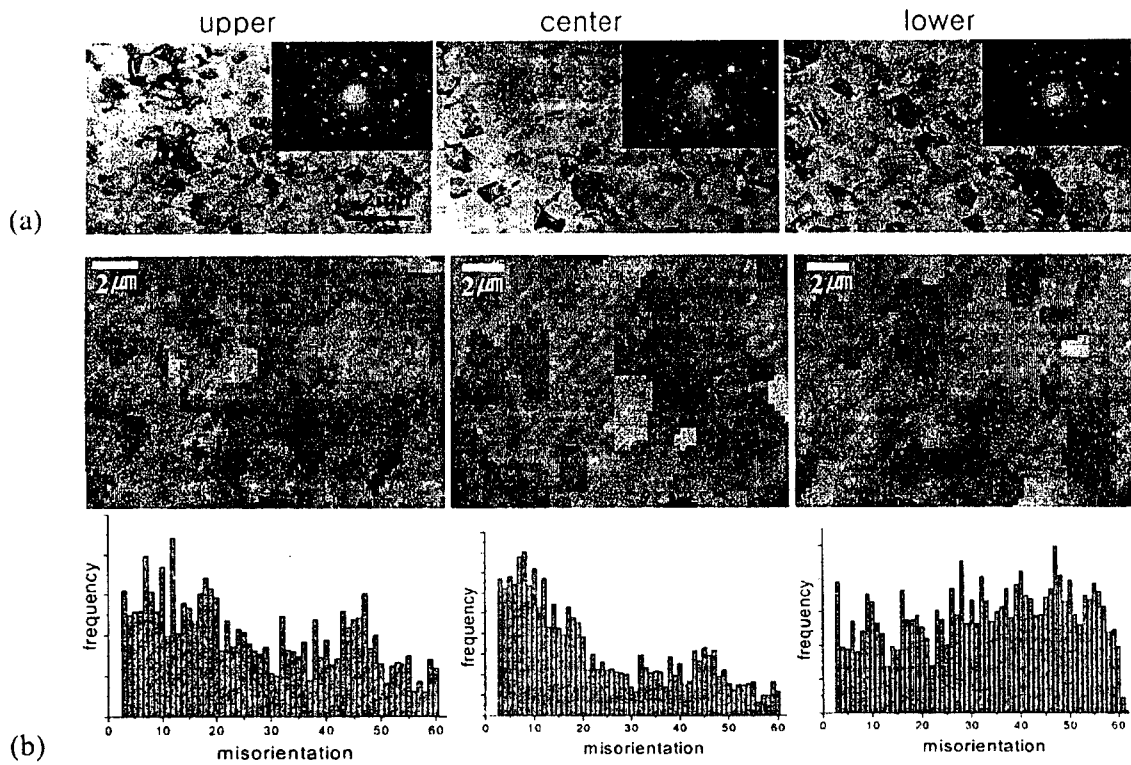


Fig. 10 (a) TEM micrographs of AA1050 Al sheet asymmetrically rolled by 91% in 12 passes at roll radius ratio of 2 in unidirection (UD in Fig. 4) at room temperature, (b) EBSD analyses of sheet of Fig. (a) after annealing at 195°C for 1h [7].

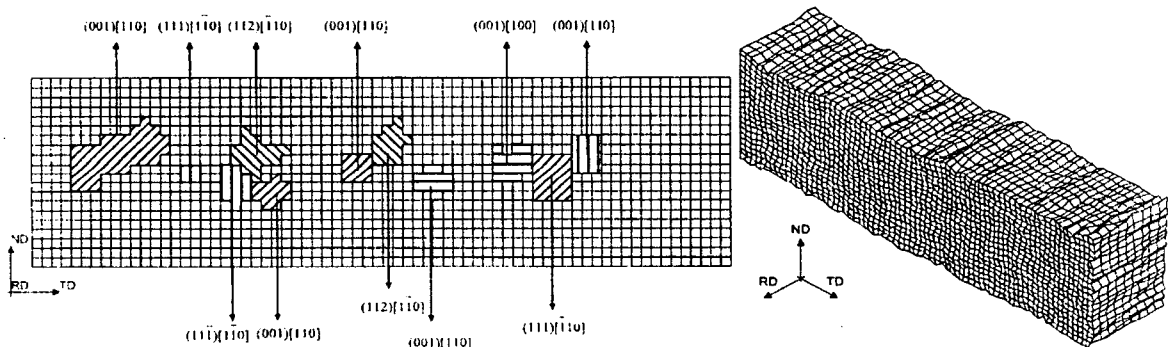


Fig. 11 CPFEM calculated shape of specimen consisting of usual  $\gamma$ -fiber oriented matrix and various colonies after tensile straining by 20% [8].

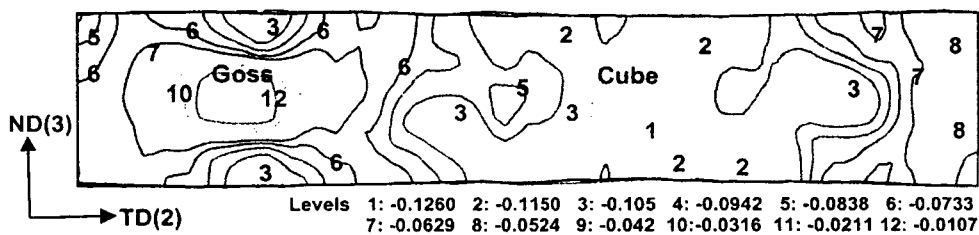


Fig. 12 CPFEM simulation of  $e_{33}$  strain (contours) in specimen composed of cube ( $\{001\}\langle 100\rangle$ ) and Goss ( $\{110\}\langle 001\rangle$ ) oriented bands after straining by 25% in TD [10].

서 약간 벗어나 있다. 이는 비대칭 압연에서는 항상  $e_{11}$ 과  $e_{13}$  ( $e_{ij}$ 는 변위구배이고 아래첨자 1과 3은 RD와 ND를 의미한다.)이 존재하기 때문이다. 그림 7은 fcc 금속의  $\alpha(=e_{13}/e_{11})$ 에 따른 안정 방위를 Dilamore 방위 D1과 D2로부터 회전한 각으로 나타내었다. 이상적전단집합조직은  $\alpha=\infty$ 에서만 얻어진다. 비대칭압연에서는  $|\alpha| < \infty$ 이므로 이상적전단집합조직은 얻을 수 없다. 그러나 그림 8에서 보는 바와 같이 다음 회 압연에서 전단방향을 바꾸면 이상적전단집합조직을 얻을 수 있다. 대칭압연판재의 표면층에서 이상적전단집합조직이 잘 얻어지는데 이는 입구에서 중립점까지의 전단방향과 중립점에서 출구까지의 전단방향이 반대이기 때문이다.

전단집합조직은 열풀림 후에도 잘 변하지 않는다. 이는 전단변형된 금속의 전위 배열이 그림 9에서 보는 바와 같이 근사화 할 수 있다. 이 경우 부호가 다른 전위가 반응하여 빠르게 소멸되기 때문에 불연속재결정의 구동력이 감소하기 때문이다 [4,5].

### 3. 결정립 미세화

재료가 심한 전단변형을 받으면 결정립이 효과적으로 미세화 된다는 것은 잘 알려져 있다. 비틀림 변형, 등통로각형압축 (ECAP) 등이 좋은 예이다. 그러나 이 방법은 판재에 적용하기는 적합하지 않다. 비대칭압연으로 판재의 결정립이 쉽게 미세화 된다는 것을 알게 되었다 [5,7,11]. 그림 10에 한 예를 나타내었다. 그림 10은 비대칭 압연한 1050Al 판재의 결정립을 보여 준다. 압연한 후의 결정립의 크기가 약  $1\mu\text{m}$  이고  $195^\circ\text{C}$ 에서 1시간 열풀림한 후의 결정립도는 약  $2\mu\text{m}$  이다.

### 4. 표면이랑형성

11-17% Cr을 함유한 페라이트계 스테인리스강 (FSS) 과 알루미늄 슬래브의 기둥모양 결정립은  $\langle 100 \rangle$ //기둥축 인 집합조직을 갖고 있다. 재료가 심한 전단변형을 받으면 결정립이 효과적으로 미세화 된다는 것은 잘 알려져 있다. FSS의 기둥모양 결정립은 평면변형압축을 받으면  $\{001\}\langle 110 \rangle$ 방위로 회전되고 쉽게 재결정되지 않는다 [12]. 그 뿐만 아니라 모든 공정 중 강괴에서  $\alpha \rightarrow \nu$  또는  $\nu \rightarrow \alpha$ 의 상변태가 일어나지 않는다. 그러므로 냉간압연 중 기둥모양 결정립으로부터 비슷한 방위를 갖는 긴 결정립 군이 생기며 열풀림 후에도 남아있게 된다. 이 결정립 군과 기지가 다른 소성이방성을 가지게 된다. 이 판재를 압연방향으로 인장하거나 디프트로잉하면 판재의 한쪽 표면에는 튀어나오고 반대쪽 면에는 골이 생겨 두께변화는 별로 없는 바람직 못한 표면결함 결합이 생긴다. 이 결함을 표면이랑형성이라고 한다 (그림 11). 이랑의 깊이는 20-50  $\mu\text{m}$  정도이다.

6000계 Al합금을 판재의 압연 폭 방향으로 인장하면 이랑이 생기는데 이랑과 골이 불규칙하다 [9,10]. 이 이랑현상은  $\{001\}\langle 100 \rangle$ (Cube) 방위와  $\{110\}\langle 001 \rangle$ (Goss) 방위를 가진 결정립의 면내 띠모양 집합체와 관련이 있다.  $\{001\}\langle 100 \rangle$  방위와  $\{110\}\langle 001 \rangle$ 방위를 가진 띠모양 결정군이 박혀 있는 무질서방위의 기지를 가진 판재를 폭 방향으로 인장할 때 두께방향변형을 결정소성유한요소법 (CPFEM)으로 계산한 결과를 그림 12에 나타내었다. Goss 방위의 결정군이 Cube 방위의 결정군보다 훨씬 변형이 잘 되지 않음을 알 수 있다. 따라서 Goss 결정군이 있는 표면이 Cube 결정군이 위치한 표면보다 튀어나오게 된다. 이와 같이 하여 판재의 표면에 이랑이 형성된다.

FSS의  $\langle 100 \rangle$ 방위의 기둥모양 결정립이 비대칭압연으로 효과적으로 파괴될 수 있다. 또한 Al 합금에서의 띠모양 집합체도 비대칭압연으로 감소할 것으로 기대된다. 그러므로 FSS와 Al합금판재의 표면에서 발생하는 이랑형성 문제는 종래의 대칭압연과 비대칭압연을 배합함으로써 제어할 수 있을 것이다.

### 5. 결론

금속판재의 비대칭압연으로 판재의 두께에 걸쳐 전단집합조직을 얻을 수 있다. 면심입방정 금속의 이상적전단집합조직은  $\langle 111 \rangle$ //ND 방위와  $\{001\}\langle 110 \rangle$  방위로 구성되어있으며  $\langle 111 \rangle$ //ND 성

분은 디프드로잉성을 향상시킨다. 체심입방정금속의 이상적전단집합조직은 {110}<001> 방위와 {112}<111> 방위로 구성되어있으며 {110}<001> 방위는 방향성전기강판에서 얻고자하는 방위이다.

비대칭압연으로 판재의 결정립미세화를 효율적으로 이룰 수 있다. 따라서 같은 방위를 가진 결정립균의 존재로 인한 표면결함인 이랑형성을 비대칭압연으로 감소시킬 수 있을 것이다.

## 후기

이 연구는 서울대학교 집합조직제어연구실 (NRL)의 지원으로 이루어졌으며 비대칭압연연구에 참여 하였던 최창희 박사, 김근환 박사, 정세영 박사, 이상현 박사, 김수현 박사, 류종호 박사, 신형준 박사, 홍승현 박사, 이종국 박사에게 감사한다.

## 참고문헌

1. C.-H. Choi, K.-H. Kim, S.-Y. Jeong and D.N. Lee, J. Kor. Inst. Met. Mater., vol. 35, p. 429 (1997).
2. C.-H. Choi, K.-H. Kim and D.N. Lee, Proc. Synthesis/Processing of Lightweight Metallic Materials II, ed. C.M. Ward-Close, F.H. Froes, D.J. Chellman and S.S. Cho, TMS, USA, p. 37 (1997).
3. K.-H. Kim and D.N. Lee, Acta Mater. vol. 49, p. 2583 (2001).
4. D.N. Lee and K.-H. Kim, Proc. 2nd Global Sym. on Innovations in Materials Processing and Manufacturing, ed. M.Y. Demery, TMS, USA, p. 219 (2001).
5. J.K. Lee and D.N. Lee, Mater. Sci. Forum. vol. 408-412, p. 1419 (2002).
6. S.H. Lee and D.N. Lee, Int. J. Mech. Sci. vol. 43, p. 1997 (2001).
7. S.-H. Kim, J.-H. Ryu, K.-H. Kim and D.N. Lee, Mater. Sci. Res. Int. vol. 8, p. 20 (2002).
8. H.-J. Shin, J.-K. An, S.H. Park and D.N. Lee, Acta mater. vol. 51, p. 4693 (2003).
9. G.J. Baczynski, R. Guzzo, M.D. Ball and D.J. Lloyd, Acta mater. vol. 48, p. 3361 (2000).
10. S.-H. Hong, H. Kang, J.M. Kim, J.D. Lim and D.N. Lee, Dislocations, Plasticity and Metal Forming (Proc. Plasticity 2003, July 7-11, Vancouver, Canada), ed. A.S. Khan, Neat Press, Maryland, USA, p. 358.
11. J.K. Lee and D.N. Lee, Proc. Ultrafine Grained Materials III., ed. Y.T. Zhu, TMS, USA, p. 303 (2004).
12. N. Tsuji, K. Tsuzaki and T. Maki, ISIJ Int. vol. 34, p. 1008 (1994).