[해설] 한국소성가공학회지, 제 15 권 제 7 호, 2006
Transactions of Materials Processing, Vol.15, No.7, 2006

압연조건에 따른 변형률 상태의 변화와 집합조직의 형성

강형구[1] · 허무영[#]

Evolution of Strain States and Textures During Rolling with Various Conditions

H. G. Kang, M. Y. Huh

Abstract

The evolution of strain states and textures during rolling with various conditions was investigated by finite element method (FEM) simulations and measurements of rolling textures. Symmetrical rolling with a high friction gives rise to a strong variation of shear strains in rolled sample leading to the formation of texture gradients throughout the thickness layers. A small variation of shear strains during rolling with a well lubrication condition leads to the formation of a fairly homogeneous rolling texture throughout the sheet thickness. During asymmetrical rolling, a proper control of rolling parameters provides the evolution of a fairly homogeneous shear texture throughout the whole sheet thickness.

Key Words : Symmetrical Rolling, Asymmetrical Cold Rolling , Shear Texture, Strain State, FEM Simulation

1. 서 론

압연변형 시 대부분 결정립이 평면변형을 한다고 가정하며 집합조직을 모델링을 한다. 그러나 이 가정은 압연되는 판재의 중앙 층이 아닌 다른 두께 층에서 일어나는 전단변위를 무시한 것으로 압연재의 집합조직을 시뮬레이션 할 때 많은 문제점을 포함한다. 즉 압연 롤 사이에서 변형구역의 기하학적 형상 및 변형상태의 변화, 압연재와 압연롤과의 접촉면에서 마찰, 열간압연 시 압연재의 두께 층에 따른 온도 구배 등이 평면변형 상태로부터 벗어나는 원인이다[1~4].

Fig. 1은 압연변형 시 전단변위들의 변화를 도식적으로 보여준다[5]. 여기에서 보여지듯이 두 개의 롤 사이에서는 기하학적인 형상 변화에 의하여 $\dot{e}_{31}$ 값이 0이 아닌 것이다. 압연롤 사이에서 $\dot{e}_{31}$ 값은 크기가 변화한다[5~6].

또 하나의 전단요소는 마찰언덕(friction hill)이라

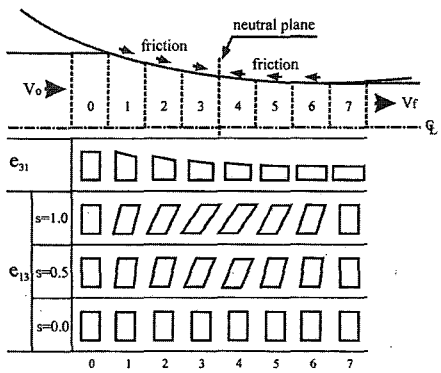

Fig. 1 Schematic representation showing the formation of the shear components e13 and e31 in a roll gap

불리는 롤의 표면과 압연재의 표면에서 작용하는 마찰에 의하여 얻어진다[7]. 중립점(neutral point) 왼쪽에서 판재가 소성구역으로 들어갈 때 재료의

1. 고려대학교 신소재공학과
교신저자: 고려대학교 신소재공학부, myhuh@korea.ac.kr

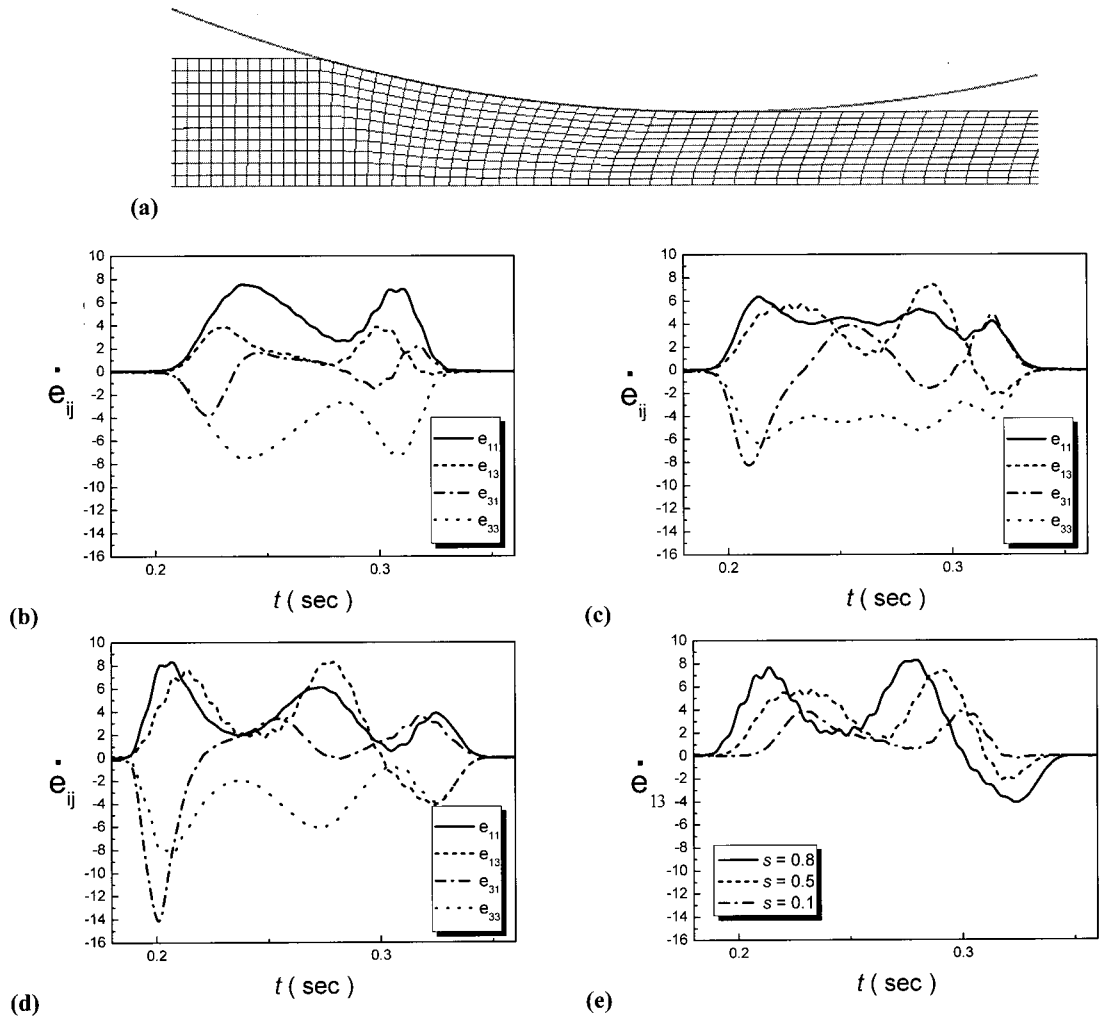

Fig. 2 Evolution of the displacement rate tensor components during one rolling pass of 40% reduction predicted with FEM calculations, (b) s=0.1, (c) s=0.5, (d) s=0.8

속도 V_0는 롤의 속도 V_R 보다 느리지만 판재는 판재표면과 롤 표면에서 작용하는 마찰력에 의하여 롤 사이로 들어가게 된다. 중립점 오른쪽에서는 롤의 속도 V_R에 비하여 재료의 속도 V_e가 빠른 것이다. 이와 같이 마찰언덕의 변화에 의하여 얻어지는 전단요소 $\dot{e}_{13}$는 롤의 입구쪽에서는 양의 값을 가지며, 중립점에서는 0 이며, 롤의 출구쪽에서는 음의 값을 갖는다. 결국 압연변형 시 고려해야 할 변형률 상태는 식(1)과 같다.

$$\dot{e}_{ij} = \begin{pmatrix} \dot{e}_{11} & 0 & \dot{e}_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ \dot{e}_{31} & 0 & -\dot{e}_{11} \end{pmatrix} \quad (1)$$

2. 전단 집합조직과 두께 층에 따른 불균일 집합조직의 시뮬레이션

소성변형되는 재료의 국부적인 변형률을 구하는 가장 기본적인 도구가 유한요소법 (FEM)이다. 압연변형에서 고려할 점은 주어진 경계조건에 따라 판재의 각 위치에서 변형률의 변화를 구하는 것이다[8~10]. 이렇게 압연롤 사이에서 소성변형에 의해 각 위치에서 시간에 따라 변화하는 변형이력을 얻어 압연재 두께 층에 따라 결정학적 집합조직의 형성을 시뮬레이션 하는 것이 가능하다.

Fig. 2는 압연 변형 FEM 시뮬레이션의 한 예를

보여준다. 이 FEM 시뮬레이션은 10.0mm에서 6.0 mm로 40%의 두께 감소를 행한 결과이다. 롤의 직경은 118mm였으며, 롤의 회전속도가 2rad/sec 이었다. 두께 층에 따른 집합조직 발달의 불균일을 증가시키기 위하여 시뮬레이션 시 마찰계수 μ=0.3으로 하였다. 여기서 μ는 수직응력에 대한 마찰 응력의 비이다. FEM 요소의 형태변화가 Fig. 2(a)에서 보여지는데, Fig. 1에서 보여졌던 것과 같이 압연 시 판재가 입구로부터 출구로 진행함에 따라 변형률 상태가 연속적으로 변하고 있음을 명확하게 알 수 있다. 초기에 사각형 이였던 요소가 먼저 진행방향으로 기울어진 후 다시 반대방향으로 기울어지는 것이 보여진다. 그런데 이러한 전방/후방 회전은 판재 두께 층 s에 의존한다. 최대값이 표면 층에서 얻어지며 중앙층으로 갈수록 그 값이 줄어들고 있다. Fig. 2(b)-(d)는 두께 층 s=0.1, s=0.5, s=0.8에서 전단변위요소 $\dot{e}_{11}$, $\dot{e}_{13}$, $\dot{e}_{31}$, $\dot{e}_{33}$의 변화를 보여준다. 전단변위 $\dot{e}_{13}$은 롤의 입구 근처에서 양의 최대값을 가지며, 중간쯤에서 0가 되며 롤의 출구쪽에는 음의 값이 얻어진다. 전단변위 $\dot{e}_{31}$도 비슷한 양상으로 변화한다. 압연판재의 표면 층에 가까울수록 즉 s값이 클수록 전단변위 $\dot{e}_{13}$과 $\dot{e}_{31}$이 커짐을 명확히 확인할 수 있다.

일반적으로 압연 시 l/d 비(압연재와 롤과의 접촉 길이/압연재의 평균두께 비)와 I_{13}/I_{11} 비(전단변형률의 적분값/수직변형률의 적분값 비)가 압연변형집합조직의 형성에 가장 중요한 역할을 한다. I_{ij}는 Fig. 2와 같이 계산한 변형률속도를 시간에 대하여 적분한 값으로서 식 (2)과 같다.

$$I_{ij} = \int \left| \dot{\varepsilon}_{ij} \right| dt \qquad (2)$$

Fig. 3은 FEM 시뮬레이션 결과로부터 시료의 아래쪽 표면부터 중앙 층을 거쳐 위쪽 표면 층까지 각 두께 층에 따라 변화하는 변형률 속도를 추적하여 계산한 I_{13}/I_{11} 비를 보여준다. 이 값은 두께 층에 따라 아주 불균일하게 분포하며, 표면 층에 가까울수록 I_{13}값이 커짐을 알 수 있다. 일반적으로 I_{13}/I_{11}<0.3인 조건에서의 압연은 전형적인 압연 집합조직을 발달시키고, I_{13}/I_{11}>0.6인 조건에서의 압연은 전단 집합조직을 발달시킨다.

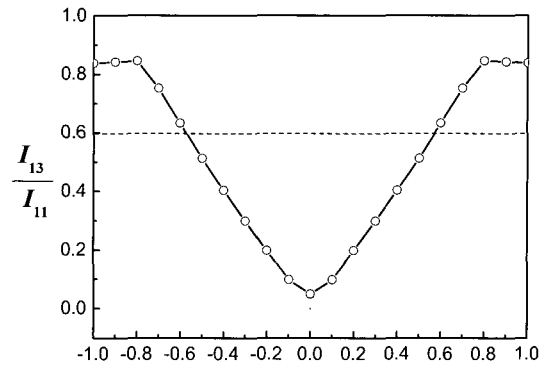

Fig. 3 Variation of I_{13}/I_{11} through thickness layer

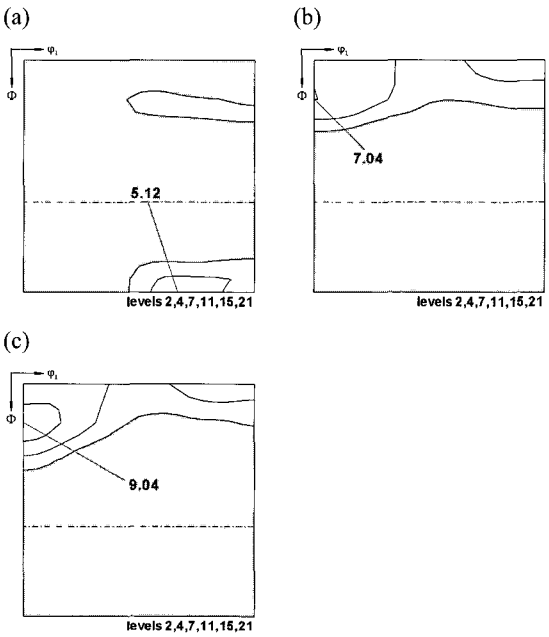

Fig. 4 Evolution of hot rolling textures in WOL sample, (a) s=0.0, (b) s=0.7, (c) s=1.0

3. 금속 판재에서 두께 층에 따른 불균일한 집합조직의 예

본 절에서는 두께 층에 따라 집합조직의 불균일성이 어떻게 얻어지는지, 본 저자가 발표한 연구논문들에서 몇 가지 실험적인 결과들을 정리하여 소개한다.

Fig. 4는 알루미늄 합금 AA1050 판재를 두께 변형률 40%까지 무윤활 압연한 시편의 두께 층에 따른 집합조직의 변화를 보여 준다. 시편의 중앙

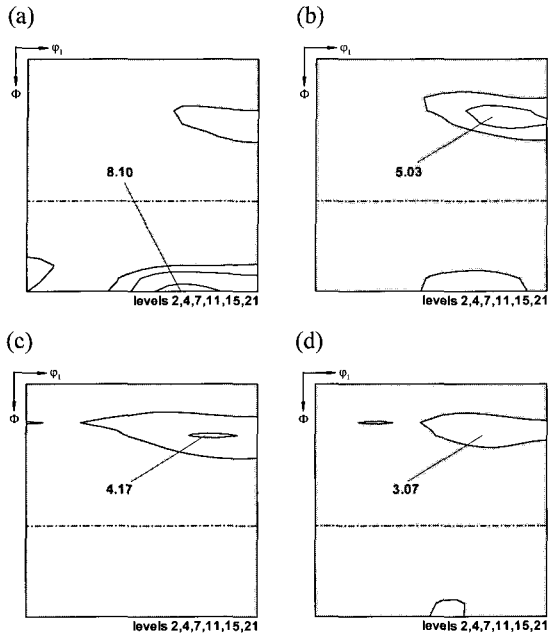

Fig. 5 Evolution of hot rolling textures in WL sample, (a) s=0.0, (b) s=0.5, (c) s=0.7, (d) s=1.0

층에서는 {011}<211> 방위와 {112}<111> 방위를 포함하는 β섬유가 얻어져, 평면변형에 가까운 형태의 결정립 회전이 얻어졌음을 알 수 있다. 반면에 시편의 표면 층에서는 {001}<110> 방위가 강하게 얻어져 전단 집합조직이 형성 되었다. 이와 같은 집합조직 발달의 불균일은 FEM 시뮬레이션에 의한 I_{13}/I_{11} 비를 구함으로써 예측되는 것이다.

4. 금속 판재에서 두께 층에 따른 균일한 집합조직의 예

압연 판재에서 두께 층에 따른 집합조직은, 윤활 압연이나 비대칭 압연을 실시함으로써 압연 집합조직이나 전단 집합조직을 두께 층에 따라 균일하게 형성시키는 것이 가능하다. Fig. 5는 알루미늄 합금 AA1050 판재를 두께 변형률 40%까지 윤활 냉간압연 시 압연재의 두께 층에 따른 집합조직을 측정한 결과이다. {112}<111> Cu 방위에 가까운 방위에서 최대 강도가 나타나는 β섬유가 얻어졌다. {011}<211> Bs 방위밀도의 차이는 있지만 거의 같은 형태로 모든 두께 층에서 β섬유에 속하는 방위가 얻어져 두께 층에 따라 거의 균일한 집합조직이 얻어졌다.

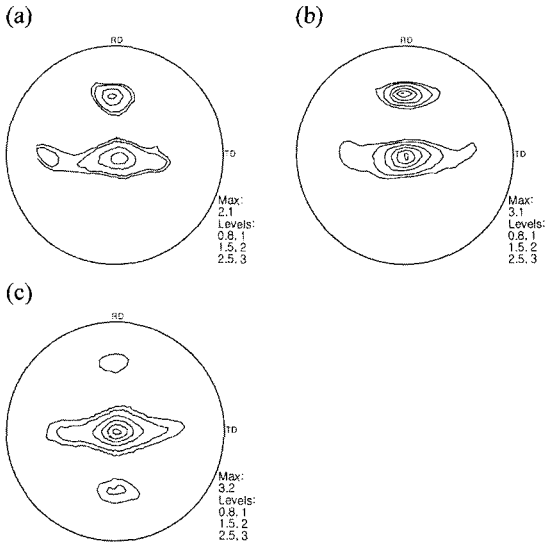

Fig. 6 Evolution of textures in asymmetrically cold rolled sample, (a) s=0.0, (b) s=0.5, (c) s=0.9

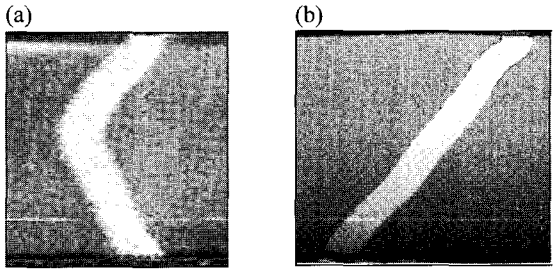

Fig. 7 Change in the strain marking (a) after symmetrical rolling, (b) after asymmetrical rolling

Fig. 6은 직경이 같은 두 롤 중 상부 롤의 회전속도를 하부 롤보다 1.5배 빠르게 하여 비대칭 냉간압연한 시편의 두께 층에 따른 집합조직의 변화를 보여 준다. 초기 두께 10mm의 알루미늄 합금 AA1050판재를 총 두께 변형률 60%까지, 즉 두께 4mm까지 비대칭 냉간 압연하였다. {111}// ND 집합조직이 형성되어 두께 층에 따라 균일한 전단 집합조직을 발달시킬 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 알루미늄 합금 AA1050을 6mm에서 3mm로 대칭/비대칭 냉간 압연 시 변형 상태의 변화를 알아보기 위해, Strain marking 실험을 한 것이다. 대칭 냉간압연에서는 표면 층의 전단 변형량이 중앙 층보다 커서 C 모양의 Strain marking이 관찰된다. 반면에 비대칭 냉간 압연에서는 주입된

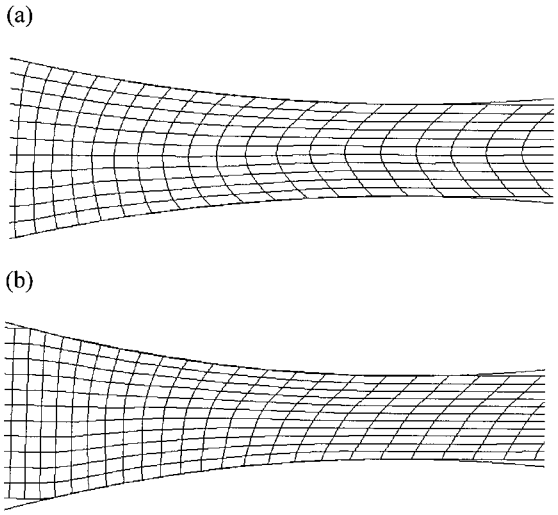

Fig. 8 Shape change of elements in the roll gap (a) during symmetrical rolling, (b) during asymmetrical rolling

구리선의 기울어짐이 약 32°로 명확히 관찰됨으로써, 균일한 전단 변형이 이루어졌음을 보여주고 있다. 하지만, 이러한 균일한 잔류 전단 변형이, 집합조직의 형성에 영향을 미치는 압연롤 사이에서 전단 변형률의 균일함을 나타내지는 않는다.

Fig. 8은 Fig. 7 실험에서의 잔류 전단 변형을 알아 보기 위해 FEM 시뮬레이션 한 결과이다. 초기 생성된 정사각형 모양의 요소가 압연되는 동안 Roll gap에서 형상이 변하는 것으로 판단하여, 실제 실험과 유사한 기울기를 갖는 잔류 전단 변형을 얻을 수 있었다. Fig. 9는 이 FEM 시뮬레이션 결과로부터 시편의 여러 두께 층에 대해 각각 $\dot{\varepsilon}_{13}$을 계산한 것이다. Roll gap에서 비대칭 압연 되는 동안, 두께 층에 따라 전단 변형률이 불균일하게 작용하고 있음을 알 수 있다. 즉 Strain marking 실험의 균일한 잔류 전단 변형이 압연롤 사이에서 전단 변형률의 균일함을 나타내지는 않는다는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

여러 금속 판재에서 확인할 수 있듯이, 대부분의 금속판재에는 두께 층에 따른 집합조직의 불균일성이 다소간 존재한다. 이와 같은 집합조직의

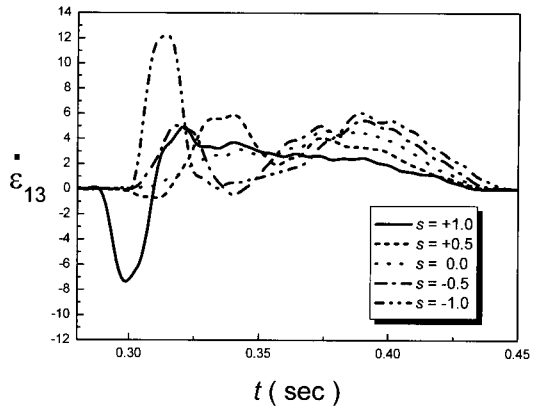

Fig. 9 Variation of $\dot{\varepsilon}_{13}$ along the streamline for various through-thickness layers s in 50% asymmetrically rolled sheet

불균일성은 압연변수에 의하여 변한다. 그런데 집합조직의 불균일성은 결정방위 이방성을 갖는 모든 판재재료의 특성, 즉 R-값과 같은 소성이방성, 탄성계수, 자기적 성질 등에 지대한 영향을 미치게 된다. 따라서 집합조직에 따른 재료의 물성을 명확하게 판단하기 위하여는 판재의 불균일 집합조직을 입체적으로 측정하는 것이 요구된다. 또한 이러한 불균일성을 나타내지 않고 두께 층에 상관없이 균일한 집합조직을 얻을 수 있는 여러 가지 변수들의 역할을 밝혀낼 필요성이 요구된다.

참 고 문 헌

[1] O. Engler, M. Y. Huh, C. N. Tom, 2000, Metall. Mater. Trans. A, Vol. 31A, pp. 2299~2315.

[2] J. Hirsch, K. Lucke, 1988, Acta Metall., Vol. 36, pp. 2863~2883.

[3] M. Y. Huh, S. Y. Cho, O. Engler, 2001, Mater. Sci. Eng., Vol. A315, pp. 35~46.

[4] A. Van Bael, E. Hoferlin, L. Kestens, P. Van Houtte, 1998, Mater. Sci. Forum, Vol. 273-275, pp. 417~422.

[5] M. Y. Huh, J. C. Park, S. Lee, 1996, Metals and Mater. Int., Vol. 2, pp. 141~149.

[6] C. S. Lee, B. J. Duggan, 1991, Metall. Trans. A, Vol. 22A, pp. 2637~2643.

[7] W. F. Hosford, R. M. Caddell, 1993, Metal forming:

mechanics and metallurgy, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

[8] K. K. Mathur, P. R. Dawson, 1989, Int. J. Plast., Vol. 5, pp. 67~94.

[9] S. R. Kalidindi, L. Anand, 1994,J. Mech. Phys. Solids, Vol. 42, pp. 459~490.

[10] S. E. Schoenfeld, R. J. Asaro, 1996, Int. J. Mech. Sci., Vol. 38, pp. 661~683.