

Three-roll Screw Rolling 공정 시 동봉재의 변형상태와 미세조직의 발달

김상현¹ · 박은수¹ · 허무영[#] · 김휘준² · 배정찬²

Evolution of Strain States and Microstructures During Three-roll Screw Rolling of Copper Rods

S. H. Kim, E. S. Park, M. Y. Huh, H. J. Kim, J. C. Bae

(Received December 3, 2007)

Abstract

In order to investigate the evolution of strain states during screw rolling, the samples of copper rod were rolled in a three-roll screw rolling mill. Microstructure observations and hardness measurements were carried out for examining the deformation history during screw rolling. The finite element method(FEM) was employed to calculate the evolution of strain states during screw rolling. The strain state in the roll gap is quite inhomogeneous through the rod thickness layers. It turned out that shear strain gradients through the thickness layers are reduced by applying a higher reduction.

Key Words: Three-roll Screw Rolling, Strain State, Microstructure, Finite Element Method

1. 서 론

Screw rolling은 planetary rolling 이라고도 한다. 이 공정은 압출이나 인발 공정과 유사하게 봉재 금속의 직경을 감소시키는 소성변형 공정으로 공정 속도가 빠르다는 장점을 지니고 있다. 또한 screw rolling시 롤의 위치를 적절히 조정함으로써 봉재의 직경을 쉽게 조절할 수 있고, 온도 강하, 측면부 퍼짐성과 압연 하중이 낮기 때문에 제품의 정밀성을 향상시키는 장점도 가지고 있다. 그러나 screw rolling시 알루미늄 같이 변형저항이 적은 금속은 재결정 온도 이하의 저온에서도 냉간 가공이 가능하지만, 변형저항이 큰 금속들은 재결정온도 이상의 온도에서 가공해야 하는 단점을 지니고 있다.

최근 Three-roll screw rolling 공정을 유한 요소법을 이용하여 변형상태 해석에 대한 연구 결과가

보고되었다. Shin 등은[1~3] plasticine을 이용하여 three-roll screw rolling 시 생성된 압하율에 따른 spiral marks의 각도, pitch 길이, end cavity등을 유한 요소해석 결과와 실제 실험과 비교함으로써 유한 요소해석의 적용성을 보고하였으며, 소재 중심부에 맨드렐이라는 플러그(plug)를 삽입하여 튜브재를 압연하였고, 유한요소 해석 시 롤 형상과 교차각, 롤 회전속도 등 공정변수를 변화하여 해석을 최적화 하였다고 보고한 바 있다.

Hwang 등은[4~6] screw rolling시 압연공정변수인 시편과 롤의 교차각과 경사각, 그리고 롤의 형상과 압하율을 변화시켜 압연 시 압연 하중과 압연된 시편의 형상에 대해 보고하였다. Min등은[7] 봉재를 연속 압연하여 유한요소해석결과와 비교함으로써 유한요소해석의 정확성을 확인한 바 있다. 그러나 결정질 금속을 이용한 screw rolling의 실험

1. 고려대학교 신소재 공학부

2. 한국생산기술 연구원 신기능 소재팀

교신저자 : 고려대학교 신소재 공학부,

E-mail : myhuh@korea.ac.kr

을 통해 변형상태 해석과 미세조직 및 경도결과에 대해 보충할 수 있는 유한요소해석의 결과에 대한 연구는 보고되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 결정질 금속인 동을 재결정 온도 이상에서 screw rolling 시 압하율의 변화에 따른 미세조직과 경도의 변화를 관찰하였다.

또한 three-roll screw rolling 시 정확한 변형상태를 알아보기 위하여 유한요소법을 사용하여 해석하였고, 그 결과를 실험을 통해 얻은 미세조직 도 결과를 이용하여 비교분석 하였다.

2. 실험 방법

실험을 수행하기에 앞서 압하율을 측정하기 위해 white plasticine 을 이용하여 3 개의 롤의 위치를 적절히 이동시켜 정확한 압하율을 측정하였다. 지름 30mm, 길이 200mm 크기를 갖는 동의 봉재를 초기시료로 three-roll screw rolling mill 의 회전속도를 90 rpm 으로 하고 압연재의 온도를 750℃ 로 가열 후 압하율을 30%, 50%, 70% 변화하여 압연하였다. 압연 후 압연재에서 변형상태의 이력을 추적하기 위하여 미세조직은 EBSD (electron back-scattered diffraction)을 이용하여 관찰하였고, 변형된 시료에서 경도의 변화를 Vickers Hardness tester 를 이용하여 측정하였다. Three-roll screw rolling 시 변형상태의 해석은 상용 DEFORM-3D 를 이용하여 유한요소법 해석하였다.

3. Three-roll screw rolling 공정

Fig. 1은 롤의 형상을 도시한 것이다. 소재와 처음 접촉하는 A 부분에서 큰 변형이 소재에 가해

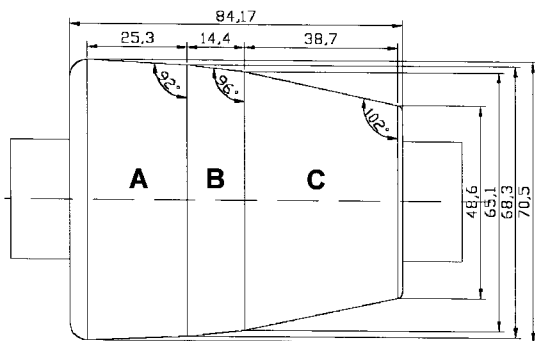


Fig. 1 The roll profile of the three-roll screw rolling mill

지며, A 부분을 지나간 소재는 B 부분과 C 부분을 통과하며 최종 두께를 가지게 된다. 특히 C 부분에서 변형은 소재의 최종 형상과 표면상태를 결정하는 역할을 하게 된다[1]. 이 연구에서 사용한 screw rolling mill에서는 Fig. 1과 같은 3개의 롤이 장착 되어 있다.

연구에서 사용한 screw rolling mill에서는 롤의 교차각(cross angle, α)과 경사각(inclined angle, β)을 각각 17.3°와 20.0°로 일정하게 하였다. Three-roll screw rolling mill에서 교차각과 경사각의 역할은 시료를 전진 방향으로 보내주고 시료의 표면에 전단변형을 가하는 크기를 제어하는 것이다.

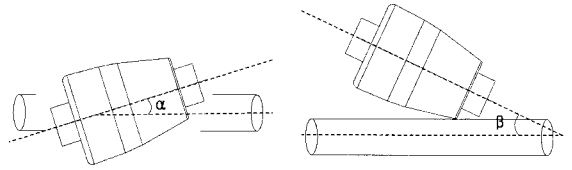


Fig. 2 Cross and inclined angles in three-roll screw rolling mill

4. 실험 결과 및 고찰

As-received 소재는 압출된 상태의 순동 봉재였다. 압연실험 전 미세조직을 균질하게 제어하고, 연화시키기 위하여 750℃에서 5 시간 소둔 처리한 후 screw rolling mill 에서 압연을 시행하였다. 예비 실험 결과 70% 이상의 압하율이 얻어지기 위해서는 압연재의 온도가 750℃ 이상 이었다.

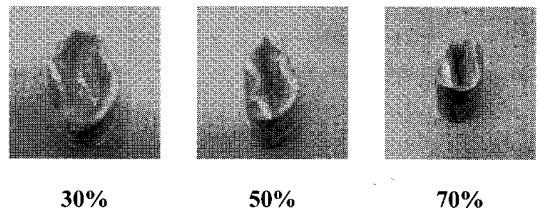


Fig. 3 End cavity of the rolled samples

Fig. 3은 screw rolling 후에 시편의 끝 부분에 형성되는 end cavity의 형상을 보여준다. Screw rolling 시 압하율이 증가할수록 중앙 층에 비하여 표면 층에서 재료의 이동이 더 빠른 속도로 일어나기 때문에 end cavity의 모양이 명확히 얻어짐을 알 수 있다[1]. 또한 압하율이 증가할수록 롤에 접촉

Table 1 Changes in diameter, end cavity and pitch length after screw rolling

Reduction (%)	30	50	70
Diameter (mm)	25.1	21.2	16.4
End cavity (mm)	9.25	12.5	17.5
Pitch length (mm)	11.2	8.3	5.1

하는 재료의 면적이 증가하기 때문에 압연 후 봉재의 표면에서 관찰되는 pitch의 간격이 좁아짐을 확인할 수 있었다. Table 1에는 압하율에 따른 시료의 최종직경(D), end cavity의 깊이, pitch 길이가 보여진다.

Fig. 4는 중앙 층에서부터 표면 층까지 경도의 변화를 Vickers Hardness로 측정한 결과를 보여준다. 모든 시편에서 중앙 층의 경도가 가장 낮으며, 표면 층에 가까울수록 경도가 증가하였다. 주목할 것은 압하율이 낮은 30% 가공한 시료의 표면에서도 Hv=80 이상의 높은 경도가 얻어졌다. 이것은 30%의 낮은 압하율에서도 많은 변형이 표면 층에 가해졌다는 것을 뜻하는 것이다. 또한 30% 가공한 시편의 중앙 층에서는 5mm까지 경도 값이 거의 증가하지 않았지만, 압하율 50%, 70% 시편에서는 중앙 층에서도 경도 값이 증가한 것을 보여준다.

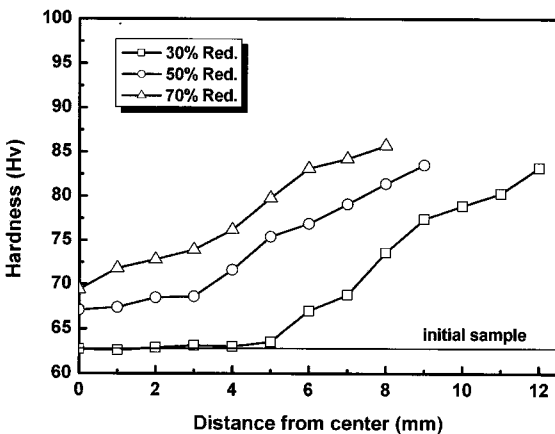


Fig. 4 Changes in hardness at various positions in rolled samples

Fig. 5은 압하율 30%와 70%로 가공된 시편의 EBSD grain boundary mapping images 미세조직 관찰 결과이다. 중앙에서부터 표면까지의 세 부분으로 구분하여 관찰하였다. 즉, 중앙 층(center), 표면

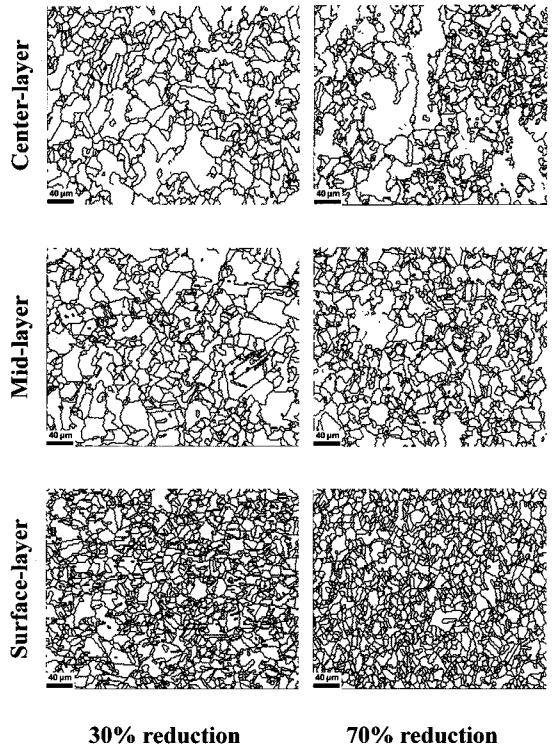


Fig. 5 EBSD grain boundary mapping showing distributions of grains in rolled samples

층(surface), 중앙 층과 표면 층의 중간을 중간 층(mid)로 정하여, 각 층의 미세조직을 관찰하였다.

본 연구에서는 750℃ 온도를 가지는 순동 시료로 screw rolling을 수행하였다. 이 온도는 순동의 재결정 온도 보다 높기 때문에 소성변형이 가해지면 순동에서는 재결정이 일어난다. 일반적으로 재결정 시 변형량이 클수록 재결정핵생성이 빈번하여 결정립의 크기가 작아진다. 따라서 screw rolling 후 결정립의 크기를 비교함으로써 screw rolling 시 가해진 변형량을 간접적으로 파악할 수 있다.

모든 두께 층에서 30% 압연 후 시료에서 보다 70% 압연한 시료에서 작은 크기의 결정립이 관찰되었다. 30% 압연한 시료의 중앙 층의 결정립의 크기는 750℃에서 소둔한 상태와 거의 같았다. 이에 반하여 70% 압연한 시료의 중앙 층에서는 초기 시료에 비하여 불균질한 미세조직이 관찰되며 부분적으로 20μm 이하의 결정립도 많이 관찰되었다. 표면 층에서는 압연가공도 30%, 70% 시료에서 모두 15μm 이하의 비교적 균질한 결정립들이 관

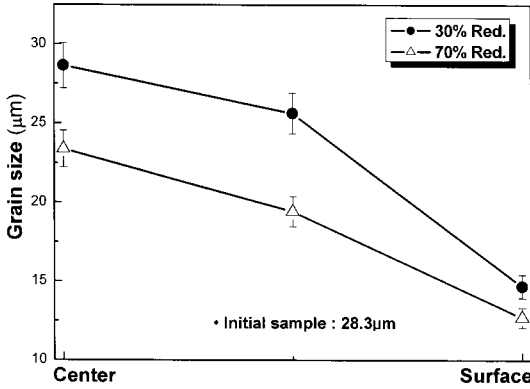


Fig. 6 Changes in grain size at different position in rolled samples after screw rolling

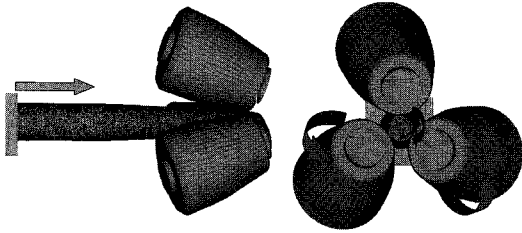


Fig. 7 Finite element modeling of three-roll screw rolling

찰되어 재결정이 폭 넓게 일어났음을 알 수 있다. Fig. 6은 두께 층과 압연가공도에 따른 결정립의 크기를 정리한 것이다.

5. 유한요소해석

본 연구의 three-roll screw rolling 공정 시 변형상태의 변화를 알아보기 위하여 상용 DEFORM-3D 를 이용하여 유한요소 해석을 하였다. Fig. 7은 유한요소해석을 위한 modeling을 도시한 것이다. 해석에서 롤과 압연되는 재료 사이의 계면에 $m=0.7$ 의 마찰이 작용한다고 가정하였으며, 롤의 분당 회전 수는 90rpm이었으며, 해석시간을 줄이기 위하여 롤과 재료사이의 열 전달은 무시하였다. 유한요소해석 시 롤의 정확한 구동 축 좌표를 얻기 위하여 Hyperworks7.0을 이용하여 정확한 구동 축 좌표를 얻었다. 압하율은 30%와 60%인 조건에서 각각 유한요소 해석을 하였다.

유한요소법 계산을 통하여 roll 입구로부터 roll의 출구까지의 변형율속도요소(strain rate components, $\dot{\epsilon}_{ij}$)의 변화를 중앙 층으로부터 표면 층까지 여러 유

동선(stream line)들에 대하여 계산하였다. 각 유동선들에서의 작용한 변형율요소는 식 (1)을 통하여 구할 수 있다.

$$I_{ij} = \int |\dot{\epsilon}_{ij}| dt \quad (1)$$

외부에서 주어진 변형(ϵ_{nor})은 단순히 압연 시 적용된 압하율에 의존한다. 즉 압하율 60%는 $\epsilon_{nor} = 0.91$, 압하율 30%는 $\epsilon_{nor} = 0.35$ 에 상응한다. 이제 I_{ij} / ϵ_{nor} 은 주어진 외부변형에 의하여 시료의 각 유동선에서 작용하였던 변형량 크기의 척도로 사용될 수 있다. Fig. 8은 유한요소법으로 계산한 각 두께 층에서 I_{11} / ϵ_{nor} 과 I_{12} / ϵ_{nor} 의 변화를 보여준다. 압연가공도 30%인 시료에 비하여 압연가공도 60%일 때에 두께 층에 따른 변형률구배(strain gradient)가 적은 것을 이 그림으로부터 알 수 있다. 즉 screw rolling 공정 시 가공도가 높으면 중앙 층에 까지 미치는 변형량이 많고 그 결과 보다 균질한 변형이 가능하다는 것을 이 계산결과 확인할 수 있는 것이다. 이 계산결과를 앞에서 압연된 시료에서 실험적으로 측정한 정도의 변화와 미세조직의 변화와도 일치하는 것이다.

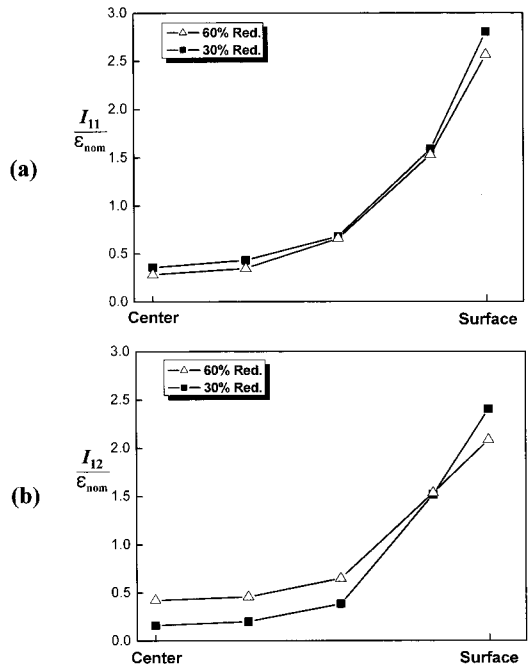


Fig. 8 Variations of (a) I_{11} / ϵ_{nor} and (b) I_{12} / ϵ_{nor} at the different thickness layers

6. 결론

본 연구에서는 결정질 금속인 동을 이용하여 screw rolling 한 후 압하율에 따른 변형상태를 경도변화와 미세조직 관찰을 통하여 실험하였다. Screw rolling 시 중앙 층에 비하여 표면 층에 변형이 집중되어 일어났다. 압하율이 증가할수록 중앙 층까지 변형이 일어나 경도증가와 함께 재결정립의 미세화가 일어났다. 유한요소법을 통하여 screw rolling 을 해석한 결과 압하율이 클수록 두께층에 따른 변형률구배가 감소하여 압연재에 보다 균질한 변형을 가 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 “공통핵심기술개발” 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Chih-Kang Shih, Chinghua Hung, 2003, Experimental and numerical analyses on three-roll planetary rolling process, J. Mater. Proc. Tech, Vol. 142, pp. 702~709.
- [2] Chih-Kang Shih, Ray-Quen Hsu, Chinghua Hung, 2002, A study on seamless tube in the planetary rolling process, J. Mater. Proc. Tech, Vol. 121, pp. 273~284.
- [3] Chih-Kang Shih, Chinghua Hung, Ray-Quen Hsu, 2001, The finite element analysis on planetary rolling process, J. Mater. Proc. Tech, Vol. 113, pp. 115~123.
- [4] Yeong-Maw Hwang, W.M. Tsai, F. H. Tsai, I. Her, 2006, Analytical and experimental study on the spiral marks of the rolled product during three-roll planetary rolling processes, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, pp. 1555~1562.
- [5] Shyue-jian Wu, Yeong-Maw Hwang, Ming-Hu Chang, 2002, A Three-dimensional finite element analysis of the three-roll planetary mill, J. Mater. Proc. Tech, Vol. 123, pp. 336~345.
- [6] Yeong-Maw Hwang, Hung-Hsiou Hsu, G. Y. Tzou, 1998, A study of PSW rolling process using stream functions, J. Mater. Proc. Tech, Vol. 80-81, pp. 341~344.
- [7] J. H. Min, H. C. Kwon, Y. Lee, J. S. Woo, Y. T. Im, 2003, Analytical model for prediction of deformed shape in three-roll rolling process, J. Mater. Proc. Tech, Vol. 140, pp. 471~477.
- [8] H. G. Kang, M. Y. Huh, 2006, Evolution of strain states and textures during rolling with various conditions, Transactions of Materials Processing, Vol. 15, No. 7, pp. 479~484.