

공형압연에서 소재 주름힘 발생 해석 - 유한요소해석

나두현¹, 조오영², 이종호², 이용희², 이영석[#]

Analysis of Wrinkle Initiation on Workpiece in Groove Rolling – Finite Element Analysis

D. H. Na¹, O.Y. Cho², J.H. Lee², Y.H. Lee² and Y. Lee[#]

Abstract

We propose a criterion which predicts wrinkle initiation on workpiece in groove rolling process based on finite element analysis. Fundamental idea introduced in the criterion is to examine the difference between flat rolling which don't cause wrinkling at all and groove rolling which usually accompanies it. The proposed criterion assumes that irregular distribution of shear strain on workpiece during groove rolling is attributable to the initiation of wrinkling. The proposed criterion has been applied to roughing train in the rod and bar mill of SEAH BESTEEL Inc. A new design for 2nd pass (square roll groove) was suggested, machined and applied. Results reveal that the proposed criterion in this study could point out the location of wrinkle initiation during groove rolling and could reduce onset of wrinkle on final products.

Key Words : Groove design, Wrinkle initiation, Groove rolling, FEM Simulation

1. 서 론

선재압연공정은 열간공형압연 공정과 마찬가지로 고온에서 소재를 수십 스탠드를 걸쳐서 연속적으로 압연하면서 소재의 단면적을 순차적으로 줄여 원형 단면의 소재를 생산하는 것을 말한다. 자동차 제작에 소요되는 철강제품의 14.9%가 선재압연공정을 거쳐서 만들어진다.

이러한 제품/부품을 생산할 때 가장 중요한 요소는 소재표면에 흠(crack)이 생기지 않게 하는 것이다. 철사 줄, 자동차 타이어에 사용되는 타이어 코드 및 바퀴 조향장치 용도의 봉(bar)은 사람의 생명과 밀접한 관련성이 있기에 선재압연공정에서 소재 주름힘 발생원인 분석, 발생위치 파악 및 발생억제 방안 관한 연구는 매우 중요하다.

선재압연공정에서 표면흠 발생에 대한 연구는 예전부터 계속해서 수행되어 왔다. Eriksson 은 소재 표면에 매크로(macro)크기의 흠을 인위적으로

만들고 타원형 및 원형 공형설계 변수 중에서 DS와 OE의 비(ratio)를 비교하여 그에 따라 소재 표면흠(surface crack)의 폭과 깊이가 어떻게 변화하는지 실험 및 유한요소해석을 통해 연구하였다. 또한 이 소재 표면흠이 공형 형상과 감면률 등에 관련하여 어떻게 거동하는지 보고하였다[1]. Eriksson 은 공동연구자인 Filipovic, Overstam 와 함께 소재의 표면흠이 초기부터 어느 정도 있을 때와 없을 때 깊이 성장에 관한 비교연구를 수행하였다. 유한요소법을 사용하여 표면흠의 성장에 대한 예측을 하였고 실험값과 계산값을 비교하였다[2]. Ervasti and Stahlberg 는 압연을 하기 전에 소재의 길이, 횡 방향으로 표면흠이 존재한다고 가정하고 요소생성을 하였다. 그리고 유한요소법을 사용하여 표면흠 성장거동에 대해 연구하였다. 마찰계수, 롤의 반지름, 표면흠의 초기 깊이에 따라 표면흠의 폭(width)과 깊이(depth)가 어떻게 변하는지 비교하였다[3,4].

1. 중앙대학교 기계공학부

2. ㈜세아베스틸

교신저자: 중앙대학교 기계공학부, E-mail: ysl@cau.ac.kr

하지만 상기 연구들은 초기 표면흠이 존재한다고 가정하고 유한요소해석을 하였다. 또한 실험할 때 소재 표면에 일정 깊이의 흠을 인공적으로 만들어 실험하였다. 이러한 가정은 현실과는 거리가 있기 때문에 문제해결에 큰 도움이 되지 못했다.

본 연구에서는 공형압연의 표면흠의 한 종류인 주름흠(wrinkle)에 대해 연구하였다. 열간공형압연 공정에서 주름흠 발생 원인을 고찰하고 주름흠 발생 기준을 제시한다. 나아가 이 기준을 (주)세아베스틸 압연공장(열간공형압연 공장)의 조압연 라인에 적용하여 주름흠 발생 가능성을 낮출 수 있는 공형 설계를 방안을 본 연구에서 제안한다.

2. 주름흠 발생 기준

2.1 주름흠 발생 예측 모델

공형압연과 판압연의 가장 큰 차이점은 첫 번째로 롤 직경이 변하고 두 번째로 큰 차이점은 공형 형상에 의해 소재가 변형 중에 구속을 받는다는 것이다. 따라서 본 연구에서는 이 두 가지 차이점을 분석하고 이를 근거로 하여 주름흠 발생 예측 모델을 만든다.

Hashimoto et al은 강편압연공정에서 표면흠 발생을 억제하기 위해서 사상압연 패스(finishing rolling pass)에서 수직 공형, 수평공형 연속 판압연 공정을 제안하였다. 결과적으로 판압연이 소재 표면흠 발생을 감소시킨다는 것을 확인하였다[5]. 이 결과는 본 연구에서 제안하려는 주름흠 발생 예측 모델이 타당성 있다는 것을 간접적으로 말해준다.

2.1.1 롤의 직경이 변함에 따라 소재 표면에서 전단 변형률의 변화

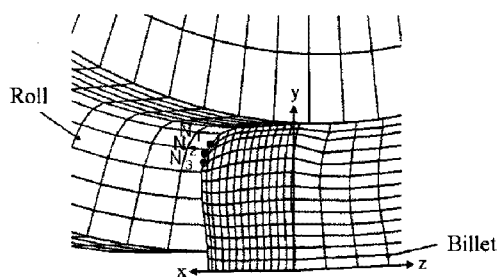


Fig. 1 Schematic of difference of nodal velocities at three nodes(N_1 , N_2 and N_3) due to groove shape

Fig. 1에서 롤 직경이 가장 큰 부분에서 접촉하는 N_3 에서 소재의 절점 속도가 가장 빠르고 직경이 가장 작은 부분에서 접촉하는 N_1 에서 소재의

절점 속도가 가장 느리게 된다. 따라서 각 절점에서 절점속도의 차이로 인해 소재의 변형이 ($-z$ 축) 방향으로 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 점으로 볼 때 변형률(strain)의 성분 중 ϵ_{yz} 의 크기 변화가 소재 주름흠 발생 가능성이 높은 요인이 된다는 것을 알 수 있다.

2.1.2 롤 공형에 따라 소재 표면에서 전단 변형률의 변화

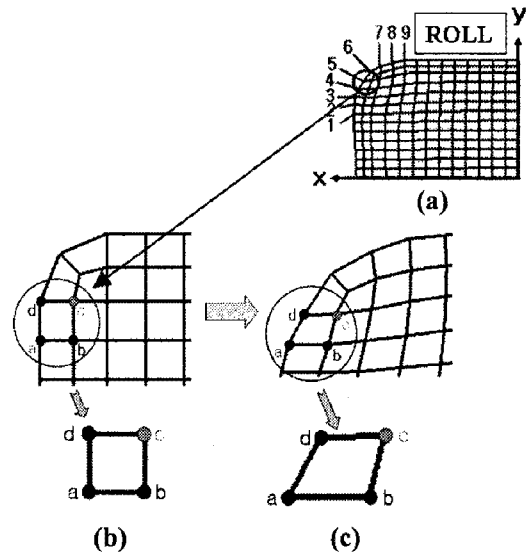


Fig. 2 Variation of shear strain (ϵ_{xy}) of an element at the region contacting roll groove (a) Quarter of FE meshes deformed inside box groove (b) The selected element before rolling (c) The selected element after rolling

Fig. 2에서 전단으로 인한 변형이 가장 큰 요소 abcd의 형상을 추적하였다. 선분 ad의 변형 전 형상과 변형 후 형상이 급격한 변화가 나타난 것을 확인할 수 있다. 이런 변화는 감면률, 공형폭, 모서리 반경의 변화에 따라 다르게 나타난다. 선분 ad부분에서 발생한 전단력으로 인하여 소재는 이 부분에서 주름흠 발생 가능성이 크다.

전단 변형률 성분 중에서 ϵ_{zx} 는 그 크기가 다른 두 전단 변형률(ϵ_{yz} , ϵ_{xy})에 비해 작기 때문에 주름흠 발생에 기여하는 바가 작다. 수직 변형률 성분 z 방향의 강력한 변형률이 걸리면 소재의 횡방향의 주름흠을 되지만 실제 공형압연으로 만든 제품은 횡방향으로 표면흠이 거의 발생하지 않는다. y 방향의 수직 변형률 성분은 압축에 의해서 발생한 것이기에 파단과는 아무 관계가 없다. x 방향의 수직 변형률은 소재내부의 파단에 관계되는 변형률 성분이다. 이러한 이유로 본 논

문에서는 주름힘 발생 가능성이 높은 ϵ_{xy} , ϵ_{yz} 의 성분 두 가지를 가지고 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 편의상 ϵ_{xy} 를 'xy 전단 변형률', ϵ_{yz} 를 'yz 전단 변형률' 이라 부른다.

2.1.3 전단 변형률 주름힘 발생 기준

본 연구에서는 전단 변형률을 줄이는 것을 기준으로 하여 공형 설계를 하는 방안을 제시한다. 전단 변형률 값이 작아지면 주름힘이 발생할 확률도 작아지기 때문에 주름힘 발생 가능성을 감소시킬 수 있다.

따라서 제안된 공형에서 xy 및 yz 전단 변형률이 현재사용 중인 공형에서의 xy 및 yz 전단 변형률보다 한 성분이라도 작게 나타나면 소재의 주름힘 발생 가능성이 감소한다고 본 연구에서 제시한다.

3. 공형압연해석

3.1 유한요소해석방법

유한요소 프로그램 ABAQUS 6.6-1 을 사용하여 공형압연공정을 해석하였다. 빌렛과 롤의 마찰은 0.3 이고 열전도계수는 해석을 통하여 실제 실험과 가장 비슷한 값인 $3.5\text{kW/m}\cdot^\circ\text{C}$, 대류 열전달 계수는 $4\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ 로 하였다. 초기 빌렛의 온도는 1150°C 이고 열전달을 고려하였다. 롤의 온도는 20°C 로 일정하게 해석하였다.

1/4 대칭(symmetric)기법을 사용하여 해석하였고 빌렛의 크기는 가로, 세로가 180mm 이고 길이가 300mm 인 소재로 해석을 하였다. 빌렛의 길이는 실제 압연현장과 동일하게 해석을 하기에는 시간이 많이 소요되고 소재 흠은 초기에 진행되기 시작하면 계속해서 진행되기에 길이를 줄여서 해석을 하였다.

3.2 실험 VS 계산 (형상)

Fig. 3 에서는 세아베스틸 압연공정(소형압연 공장) 조압연라인의 1, 2 번 패스의 출측에서 채취한 소재 단면 형상과 유한요소해석 결과를 비교하였다. 결과적으로 소재 단면 형상과 해석한 단면 형상이 거의 일치하게 나온 것을 확인할 수 있다. 오차를 계산해보면 1 번 패스에서 0.28%, 2 번 패스에서 2.58%의 오차를 보였다. 이 결과(실험 VS 유한요소모사)는 본 연구에서 사용된 유한요소해석 방법 및 사용된 소재의 물성치 그리고 적용된

경계조건이 적절하다는 것을 의미한다.

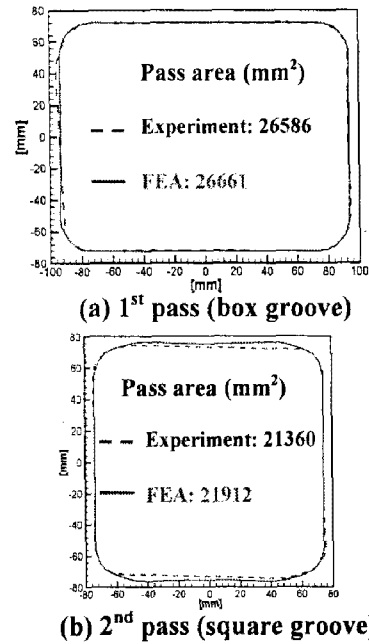
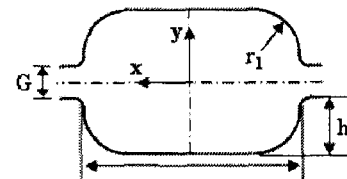


Fig. 3 Comparison of experiment and FEA at each pass of roughing mill of Seah Besteel Inc.

4. 결과 및 토의

4.1 유한요소해석 결과

현재 세아베스틸 압연공정(소형압연공장)의 조압연라인에서 사용되고 있는 공형의 형상 및 각 공형에서의 설계변수를 Fig. 4 에 나타내었다.



(a) 1st pass (box) and 2nd pass (square groove)

Fig. 4 Design parameter of each groove. If the box groove is rotated 90 degree, it will be the square groove

현재 공형에서 1 번 박스 공형은 코너 반지름(r_1)을 18mm, 폭(w)을 180.0mm 로 변경하였고 2 번 사각 공형에서는 코너 반지름(r_1)을 20mm, 폭(w)을 140mm 로 변경하여 결과를 비교하였다.

분석 과정에서 E1-2 는 절점 1 과 2 사이에 있는 요소(element)를 말한다. Fig. 5 에서는 보면 E1-2 의 'xy 전단 변형률' 이 제안 공형에서 -0.3 보다 작아졌다. 또한 E3-4, E5-6 의 'yz 전단 변형률' 도 0.35 보다 작아진 것을 확인할 수 있다.

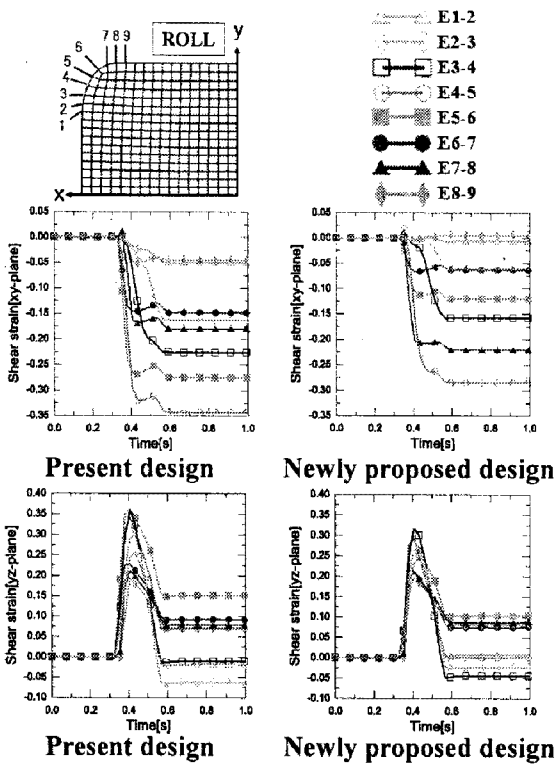


Fig. 5 Shear strain variation. Present design is compared with newly proposed design in case of box groove

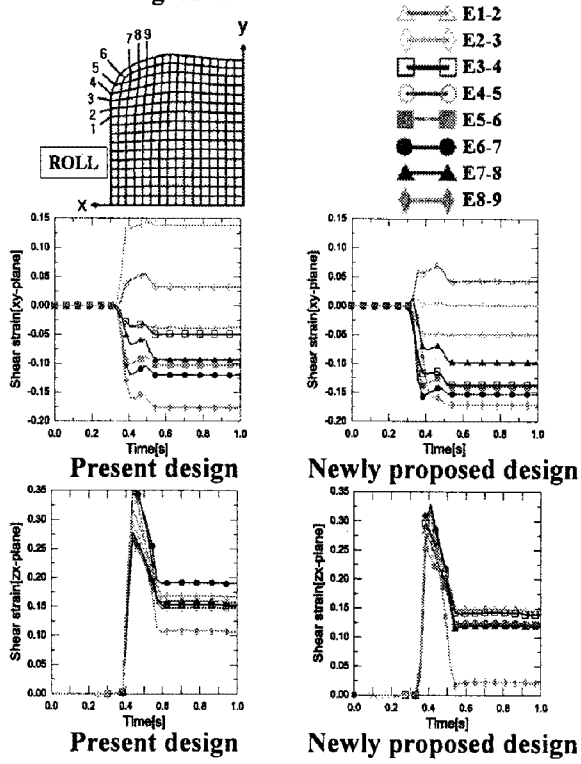


Fig. 6 Shear strain variation. Present design is compared with newly proposed design in case of square groove

Fig. 6 에서는 'xy 전단 변형률' 은 그 값이 작기

때문에 주름힘 발생에 영향을 미치지 않는다. E6-7, E7-8 의 'zx 전단 변형률' 은 개선 후에 0.35 를 넘지 않는 것을 확인할 수 있다.

실제 현장에서 2 번 사각(square) 공형만을 변경하여 테스트를 실시하였다. 1~ 6 번 패스까지 압연을 마친 제품의 불량 제품 비율을 비교한 결과 기존 7.55%에서 본 연구에서 제안된 공형을 사용했을 시 7.08%로 낮아진 것을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 제안된 주름힘 발생 예측모델이 열간공형 압연공정에 적용되었을 때 주름힘 억제 가능성을 현장 테스트를 실시하여 확인하였다. 제안된 공형 설계를 사용하면 전단 변형률의 감소로 주름힘 발생이 감소될 것으로 예측된다.
- (2) 따라서 본 연구에서 제안된 전단 변형률 기준이 공형압연시 주름힘 발생이 억제되는 공형설계도 가능하다는 것을 보여주었다.

후 기

본 연구는 세아그룹 해암학술재단(주세아베스탈) 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] C. Eriksson, 2004, Surface Cracks in Wire Rod Rolling, steel research int., vol. 75, No. 12, pp.818~828
- [2] M. Filipovic, C. Eriksson, H. Overstam, 2006, Behaviour of Surface Defects in Wire Rod Rolling steel research int., vol. 77, No. 6, pp.439~444
- [3] E. Ervasti, U. Stahlberg, 1998, Behaviour of longitudinal surface cracks in the hot rolling of steel slabs, Journal of Materials Processing Technology, vol. 94, pp.141~150
- [4] E. Ervasti, U. Stahlberg, 1999, Transversal cracks and their behaviour in the hot rolling of steel slabs, Journal of Materials Processing Technology, vol. 101, pp.312~321
- [5] Y. Hashimoto et al., 2001, Improvement of bloom casting and high reduction breakdown process, La Revue de Métallurgie, pp. 375~382