

# 공형압연에서 소재 주름힘 발생 감소를 위한 유한요소해석

나두현<sup>1</sup> · 조오영<sup>2</sup> · 이종호<sup>2</sup> · 이용희<sup>2</sup> · 이영석<sup>#</sup>

## Finite Element Analysis to Reduce the Wrinkle Initiation of Workpiece in Groove Rolling

D. H. Na, O. Y. Cho, J. H. Lee, Y. H. Lee, Y. Lee

(Received March 27, 2008)

### Abstract

A criterion which predicts wrinkle initiation on workpiece in groove rolling process based on finite element analysis is proposed. Fundamental idea considered in the criterion is using 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 mill of SEAH BESTEEL Inc. A new design of 2nd pass (square roll groove) was suggested, machined and applied. Results reveal that the proposed criterion could point out the location of wrinkle initiation and could reduce onset of wrinkle.

**Key Words:** Groove Design, Wrinkle Initiation, Groove Rolling, FEM Simulation

### 1. 서론

열간공형압연(hot groove rolling)은 사각형 단면의 소재를 고온에서 여러 가지 형상이 파여진 상부 및 하부 작업 롤 사이를 연속적으로 통과시켜서 여러 가지 단면형상의 소재를 만드는 공정이다[1]. 상부 및 하부 작업 롤 한 세트(set)가 압연기에 설치된 것은 스탠드(stand) 또는 패스(pass)라고 현장에서 부른다. 선재압연(rod rolling)은 상부/하부 롤이 상자형(box shape), 원형(round shape), 타원형(oval shape), 사각형(square shape), 다이아몬드형(diamond shape) 등으로 파여진다. 그리고 소재가 그 사이를 순차적으로 압연되어 단면이 점점 작아지고 최종적으로 원하는 형상의 단면이 제조되는 공정이다.

선재압연공정은 열간공형압연 공정과 마찬가지로 소재를 고온에서 수십 개의 스탠드를 걸쳐서

연속적으로 압연한다. 소재의 단면적을 순차적으로 줄여 원형 단면의 소재를 생산하는 것을 말한다. 선재압연을 통하여 생산된 1 차 선재제품은 2 차 가공 (신선(drawing), 냉간압조(cold heading)) 공정을 거쳐서 스프링(spring), 볼트(bolt), 철사 줄(wire rope), 자동차와 자전거 바퀴 등 같은 우리 일상 생활에 사용되는 제품/부품으로 생산된다. 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. 선재제품 표면에 흠이 생기면 이 흠은 2 차 가공공정에서 더욱 성장하고 나아가 최종제품으로 사용하다 보면 피로파괴(fatigue failure)가 발생할 우려가 커진다. 등산 기구인 철사 줄, 자동차 타이어에 사용되는 타이어 코드(tire cord) 및 바퀴 조향장

1. 중앙대학교 기계공학부

2. ㈜세아베스틸

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

치 용도의 봉(bar)은 사람의 생명과 밀접한 관련성이 있기에 선재압연공정에서 소재 주름힘 발생원인 분석, 발생위치 파악 및 발생억제 방안 관한 연구는 매우 중요하다. 즉, 선재생산공정에서 주름힘 발생을 억제하지 못한 제품이라면 그 제품은 전량 폐기처분되기 때문에 선재생산공정에서 중요한 문제이다.

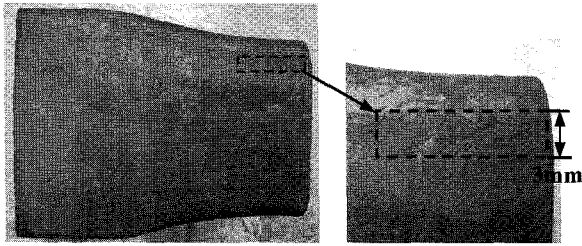


Fig. 1 Surface crack on workpiece after 1<sup>st</sup> pass(box groove)

Fig. 1은 열간공형압연의 1번 박스(box) 공형에서 압연된 빌렛(billet) 형상이다. 실제 빌렛 표면에서 주름힘이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 표면에서의 주름힘이 지속적으로 발생하여 최종 제품에서 흠으로 인한 파괴를 유발하게 된다.

선재압연공정에서 표면흠 발생에 대한 연구는 예전부터 계속해서 수행되어 왔다. Eriksson[2]은 소재 표면에 매크로(macro)크기의 흠을 인위적으로 만들고 타원형 및 원형 공형설계 변수 중에서 DS(diameter at groove bottom)와 OE(edge height of oval)의 비(ratio)를 비교하였다. 이에 따라 소재 표면흠(surface crack)의 폭과 깊이가 어떻게 변화하는지 6-패스(pass)압연 실험 및 유한요소해석을 통해 연구하였다. 또한 이 연구를 통해 소재 표면흠이 공형 형상과 감면률 등에 관련하여 어떻게 거동하는지 보고하였다. Eriksson은 공동연구자인 Filipovic, Overstam[3]와 함께 소재의 표면흠의 깊이가 초기부터 어느 정도 있을 때와 없을 때 표면흠의 깊이 성장(depth evolution)에 관한 비교 연구를 수행하였다. 그들은 소재의 단면에서 3개의 위치, 즉, 물/소재 접촉부, 롤 갭(roll gap) 위치 그리고 상기 두 위치의 중간 부위에서 표면흠의 깊이 성장에 대한 연구를 하였다. 또한 유한요소법(FEM)을 사용하여 표면흠의 성장에 대한 예측을 하였고 실험값과 계산값을 비교하였다.

Ervasti, Stahlberg[4~5]는 압연을 하기 전에 소재의 길이 방향 그리고 횡 방향으로 표면흠이 존재한다고 가정하고 요소생성(element generation)을 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.

하지만 상기의 연구들은 모두 수 밀리미터(millimeter) 크기의 초기 표면흠(initial surface crack)이 존재한다고 가정하고 유한요소해석을 하였고 또한 실험을 할 때 소재 표면에 일정 깊이의 흠을 인공적으로 만들어 실험을 하였다. 하지만 이러한 가정은 현실과는 거리가 있기 때문에 문제해결에 큰 도움이 되지 못했다.

한편으로 Farrugia[6]는 공형압연 중 소재의 미세조직(microstructure)과 소성변형을 결부시켜 표면흠 발생에 관해서 설명을 하였다. 그리고 표면흠 발생 예측을 위한 여러 종류의 모델을 기술하였다. 모델에 사용된 개념은 공형압연 중 표면흠 발생은 3축 응력, 주응력, 등가소성 응력 및 변형량의 상호관계에 기본으로 하고 있다. 그리고 소성변형 에너지를 기초로 한 Latham-Cockroft 모델도 언급하였다. 하지만 여러 모델을 나열만 하였을 뿐이고 모델의 유효성 및 적용여부에 대해서는 전혀 언급하지 않았다.

소재 표면에서 변화거동을 관측하기 위해서 1000℃가 넘는 소재에 가까이 다가가는 것은 거의 불가능하다. 또한 압연이 순식간에 이루어지기 때문에 표면흠 진행을 관찰하는 것 역시 사실상 불가능하다. 따라서 선재공정을 정확히 모사할 수 유한요소법을 사용하여 표면흠 발생여부를 연구하고 억제 방안을 강구하는 것이 타당하다.

본 연구에서 표면흠 연구는 열간판압연(hot flat rolling)과 열간공형압연(hot groove rolling)과의 차이점을 고찰하는 것에서부터 시작한다. 공형압연에서 표면흠은 여러 종류가 있지만 본 연구에서 말하는 표면흠은 흠(defect)의 한 종류인 주름힘(wrinkle)을 말한다. 열간판압연에서는 주름힘 발생에 대한 문제 제기가 없었다. 그 이유는 소재와 접촉하는 롤의 직경이 일정하기 때문에 소재단면의 각 점(point)에서 절점 속도(nodal velocity)는 거의 일정하다. 하지만 열간공형압연의 경우 소재와 접촉하는 롤의 직경은 변한다. 이 때문에 소재단면의 각 점에서 절점속도는 서로 다르게 되어 전단변형이 발생하게 된다. 이런 측면에서 열간공형압연 공정에서 주름힘 발생 원인에 대한 고찰을 하고 주름힘 발생 기준을 제시한다. 나아가 이 기준을 (주)세아베스틸 압연공정(소형압연공장)의 조압연 라인에 적

용하여 주름힘 발생 가능성을 낮출 수 있는 공형 설계 방안을 본 연구에서 제안한다.

## 2. 주름힘 발생 기준

### 2.1 주름힘 발생 예측 모델

주름힘 발생 예측 모델을 만들기 위해서는 우선 공형압연과 판압연의 차이점을 먼저 분석할 필요가 있다. 이유는 판 압연공정에서는 주름힘 발생이라는 문제가 거의 나타나지 않기 때문이다. 가장 큰 차이점은 첫 번째로 판 압연롤은 롤의 직경이 변하지 않는데 비해 공형압연롤은 롤 직경이 변한다는 것이다(Fig. 2). 따라서 롤 직경 변화가 압연 중에서 소재의 변형에 어떤 영향을 주는가를 관찰하여야 한다. 두 번째로 큰 차이점은 공형압연의 경우 롤과의 마찰에 의한 구속과 더불어 공형 형상에 의해 소재가 변형 중에 구속을 받는다는 것이다. 판 압연의 경우 소재의 변형 중 구속은 롤과의 마찰에 의한 구속을 빼고는 없다. 따라서 본 연구에서는 이 두 가지 차이점을 분석하고 이를 근거로 하여 주름힘 발생 예측 모델을 만든다.

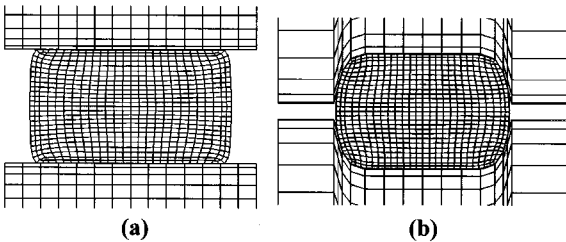


Fig. 2 (a) Flat rolling and (b) groove rolling

Hashimoto[7] 등은 강편압연 공정(bloom rolling process)에서 표면힘 발생을 억제하기 위해서 사상 압연 패스(finishing rolling pass)에서 수직공형, 수평공형 연속 판압연 공정을 제안하였다. 결과적으로 공형압연보다 판압연이 소재 표면힘 발생을 감소시킨다는 것을 확인하였다. 이 결과는 본 연구에서 제안하려고 하는 주름힘 발생 예측 모델이 타당성 있다는 것을 간접적으로 말해준다.

#### 2.1.1 롤의 직경 변화에 따른 소재 표면 전단 변형률의 변화

롤의 형상으로 인해 소재의 각 점(point)은 일정한 속도로 압연되는 것이 아니다. 롤의 직경이 커지는 부분에서 접촉되는 소재는 더 빠른 속도로

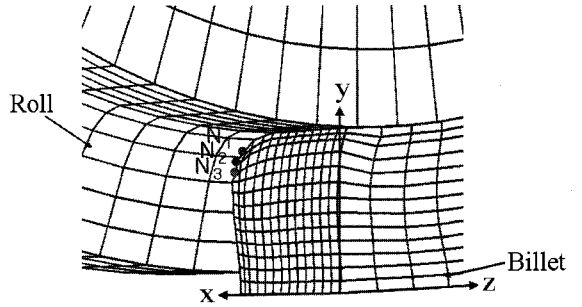


Fig. 3 Schematic of difference of nodal velocities at three nodes( $N_1$ ,  $N_2$  and  $N_3$ ) due to groove shape

압연이 된다. Fig. 3 을 보면 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 (-z축) 방향으로 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 점으로 볼 때 변형률(strain)의 성분 중  $\epsilon_{yz}$ 의 상대적인 크기 변화가 소재 주름힘 발생 가능성이 높은 요인이 된다는 것을 알 수 있다.

#### 2.1.2 롤 공형에 따라 소재 표면에서 전단 변형률의 변화

공형이 없는 판압연과는 달리 공형압연에서는 롤 모서리에 있는 공형 형상으로 인해 소재의 변형이 급격하게 변화하게 되고 이로 인해 주름힘이 발생할 가능성이 있다. 예를 들어 Fig. 4에서 전단(shearing)으로 인한 변형이 가장 큰 요소 abcd의 형상을 추적하였다. 선분 ad의 변형 전 형상과 변형 후 형상이 x축 방향으로 급격한 변화가 나타난 것을 확인할 수 있다. 이런 변화는 감면률, 공형 폭, 모서리 반경의 변화에 따라 다르게 나타난다. 선분 ad부분에서 발생한 전단력으로 인하여 소재는 이 부분에서 주름힘 발생 가능성이 크다. 이 현상을 상세히 고찰하기 위해 Fig. 5를 도시하였다.

Fig. 5에 스프링 3개가 서로 연결되어 있다. 유한요소법과 비교해보면 스프링은 요소(element)라고 할 수 있고 스프링들이 연결된 점(1,2,3,4번)은 절점(node)라고 할 수 있다. 어떤 이유로 인해 중간에 있는 스프링만 변형이 되면 이 스프링이 견딜 수 있는 변형률을 넘어서는 순간 파단이 일어나게 된다. 따라서 본 연구에서 ‘주름힘’은 국부적으로 과도한 인장변형을 거쳐 파단에 의해 발생하는 터짐힘이라고 간주한다.

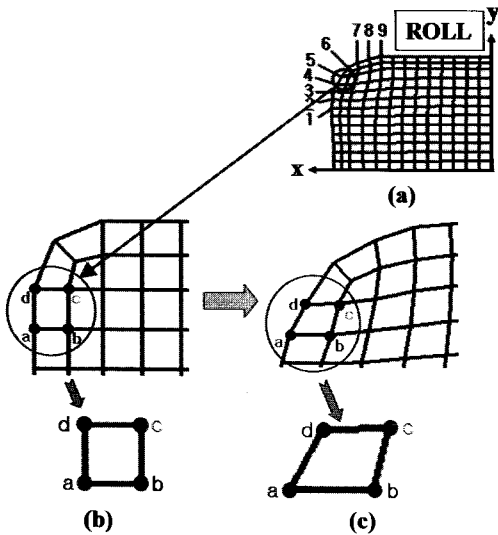


Fig. 4 Variation of shear strain ( $\epsilon_{xy}$ ) of an element at the region contacting roll groove (a) Quarter of FE meshes deformed inside box groove (b) Selected element before rolling (c) Selected element after rolling

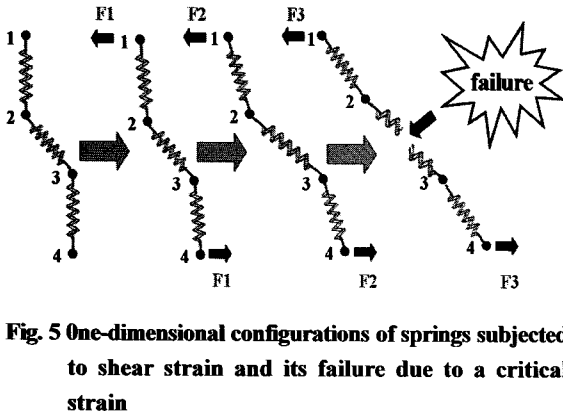


Fig. 5 One-dimensional configurations of springs subjected to shear strain and its failure due to a critical strain

전단 변형률 성분 중에서  $\epsilon_{zx}$  는 소재의 자유 표면 방향으로 공형률에 의해 소재가 구속을 받지 않는다. 따라서 그 크기가 다른 두 전단 변형률 ( $\epsilon_{yz}, \epsilon_{xy}$ )에 비해 작기 때문에 주름힘 발생에 기여하는 바가 작다. 유한요소해석 결과에서도 변형률 값이 작은 것을 확인하였다. 한편 수직 변형률 성분 중 x, y, z 방향의 수직 변형률 성분들이 있는데 이 성분들이 소재 표면에서의 주름힘 발생 원인이 되지 않는다. 우선 z 방향을 보면 소재에 인장 변형률이 걸리고 있는데 이 방향의 변형률은 주름힘 발생을 유발하는 요소라고 볼 수 없다. 만약 z 방

향의 변형률에 의해 소재 표면에 강력한 변형률이 걸리면 소재의 횡방향의 주름힘을 유발하게 된다. 하지만 실제 공형압연으로 만든 제품을 확인하면 주름힘은 횡방향으로 거의 발생하지 않는다. y 방향의 수직 변형률 성분은 압축에 의해서 발생한 것이기에 파단과는 아무 관계가 없다. 마지막으로 x 방향의 수직 변형률은 소재 내부의 파단에 관계되는 변형률 성분이다. 이러한 이유로 변형률의 성분 6개 중 본 연구에서 제시하는 2개의 성분 이외에 4개의 성분으로 인하여 주름힘 발생한다고 가정하는 것은 어렵다. 따라서 본 논문에서는 주름힘 발생 가능성이 높은  $\epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}$ 의 성분 두 가지를 가지고 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 편의상  $\epsilon_{xy}$ 를 'xy 전단 변형률',  $\epsilon_{yz}$ 를 'yz 전단 변형률'이라 부른다.

### 2.1.3 전단 변형률 주름힘 발생 기준

공형압연에서 소재 표면에서 전단력을 받게 되고 파단 전단 변형률(shear strain for failure)을 넘어서는 순간 주름힘이 발생하게 된다고 가정한다. 하지만 실제로 열간 전단 실험을 통하여 파단 전단 변형률의 기준을 정의하기가 어렵다. 이러한 이유로 인하여 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 아래에 있는 식(1), (2)에서와 같이 제안된 공형에서 xy 및 yz 전단 변형률이 현재 사용 중인 공형에서의 xy 및 yz 전단 변형률보다 작게 나타나면 주름힘이 발생할 가능성이 감소한다고 본 연구에서 제시한다.

$$\epsilon_{xy} |_{npd} \leq \epsilon_{xy} |_{pd} \quad (1)$$

$$\epsilon_{yz} |_{npd} \leq \epsilon_{yz} |_{pd} \quad (2)$$

여기서 'npd'는 새로 제안된 설계(newly proposed design) 공형을 의미하고 'pd'는 현재 사용 중인 설계(present design) 공형을 의미한다.

## 3. 공형압연해석

### 3.1 유한요소해석방법

유한요소 프로그램 ABAQUS 6.6-1 을 사용하여 공형압연공정을 해석하였다. 해석을 하는 과정에서 빌렛과 롤의 마찰은 0.3 으로 하였다. 접촉면에서의

열전도계수는 실험적으로도 구하기가 힘들기 때문에 가정하였다. 빌렛과 물의 열전도계수는 해석을 통하여 실제 실험과 가장 비슷한 값인  $3.5\text{kW/m}\cdot\text{C}^{\circ}$ 로 가정하고 소재의 대류 열전달 계수는  $4\text{W/m}^2\cdot\text{C}^{\circ}$ 로 하였다. 초기 빌렛의 온도는  $1150\text{C}^{\circ}$ 이고 열전달을 고려하였다. 물의 온도는  $20\text{C}^{\circ}$ 로 일정하게 해석하였다. 물은 압연이 될 때 상온에 있기 때문에 초기  $20\text{C}^{\circ}$ 에서 압연이 시작된다. 빌렛이 압연되면서 물의 온도가 상승하게 되지만 냉각수에 의해 물의 온도가 내려가기 때문에 물의 온도는  $20\text{C}^{\circ}$ 로 일정하다고 가정하여 해석하였다.

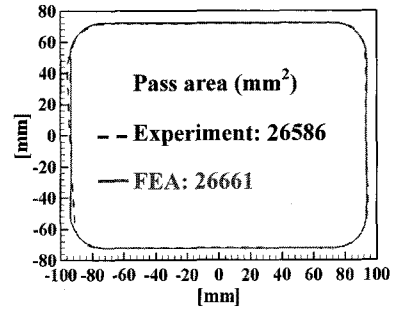
유한요소해석은 외연적 시간 적분법(explicit)으로 모사하였다. 요소(element)는 8 절점 3-D 요소를 사용하고 1/4 대칭(symmetric)기법을 사용하였다. 빌렛의 크기는 가로, 세로가 180mm 이고 길이가 300mm인 소재로 해석하였다. 실제 압연현장에서 빌렛의 길이는 10 미터(meter)이지만 동일하게 해석 하기에는 시간이 많이 소요되고 소재 흡은 초기에 진행되기 시작하면 계속해서 진행되기에 길이를 줄여서 해석하였다.

### 3.2 측정된 형상과 계산된 형상 비교

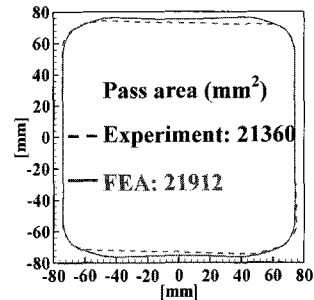
Fig. 6 에서는 ㈜세아베스틸 압연공정(소형압연 공장) 조압연 라인의 No. 1 스탠드(stand)에서부터 No. 4 스탠드(stand)까지 출측에서 채취한 소재 단면 형상과 유한요소해석 결과를 비교하였다. 결과적으로 소재 단면 형상과 해석한 단면 형상이 거의 일치하게 나온 것을 확인할 수 있다. 각 패스별로 오차를 계산해보면 1번 패스에서 0.28%, 2번 패스에서 2.58%, 3번 패스에서 0.70%, 4번 패스에서 0.76%의 오차를 보였다.

1, 3, 4 번 패스보다 2 번 패스에서 다소 오차가 크게 발생한 이유는 Fig. 6(a)에서 보면 현장에서 압연될 때 1번 패스에서 빌렛 왼쪽 부분이 비대칭 압연이 된 것을 확인할 수 있다. 이 상태에서 2번 패스로 압연될 때 빌렛(billet)이 시계 방향으로 뒤틀리는 현상이 발생하였고 이로 인해 폭퍼짐이 다소 작게 퍼진 것으로 추정된다. 또 다른 이유로 압연 공정에서 물에 냉각수를 분사하는데 2번 공형 물의 온도가 다른 공형물보다 낮았던 것으로 예측된다. 공형물의 온도가 낮다는 것은 압연될 때 소재 온도가 급격하게 떨어지게 된다. 이로 인해 소재가 고온이 아닌 다소 저온인 상태로 압연되어 폭퍼짐이 더 작게 퍼져나간 것으로 추정된다.

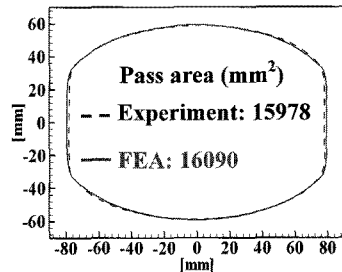
이 결과는 본 연구에서 사용된 유한요소해석 방



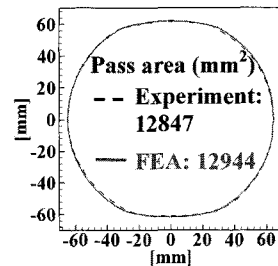
(a) 1<sup>st</sup> pass (box groove)



(b) 2<sup>nd</sup> pass (square groove)



(c) 3<sup>rd</sup> pass (oval groove)



(d) 4<sup>th</sup> pass (round groove)

Fig. 6 Comparison of experiment and FEA at each pass of roughing mill of Seah Besteel Inc

법 및 사용된 소재의 물성치 그리고 적용된 경계 조건이 적절하다는 것을 의미한다.

### 4. 결과 및 토의

#### 4.1 유한요소해석 결과

현재 ㈜세아베스틸 압연공정(소형압연공장)의 조압연라인에서 사용되고 있는 공형의 형상 및 각 공형에서의 설계변수를 Fig. 7에 나타내었다.

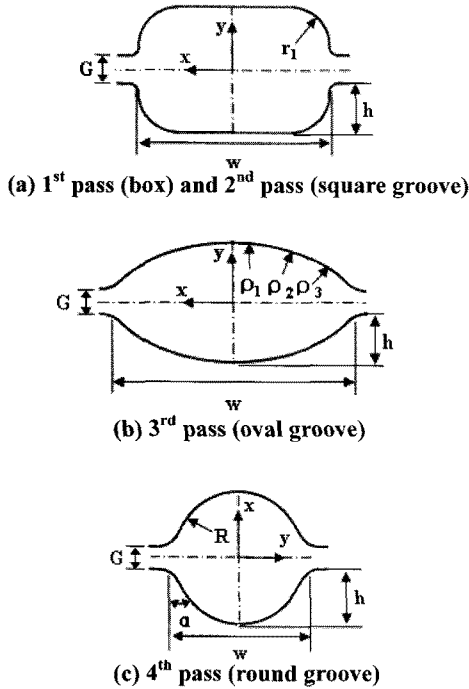


Fig. 7 Design parameter of each groove. If the box groove is rotated 90 degree, it will be the square groove

Table 1 Present design and newly proposed design parameter of box, square, oval and round groove

Std. number, groove shape	Present design	Newly proposed design
No. 1, box	$r_1=20\text{mm}$ $w=177.5\text{mm}$	$r_1=18\text{mm}$ $w=180.0\text{mm}$
No. 2, square	$r_1=18\text{mm}$ $w=137.6\text{mm}$	$r_1=20\text{mm}$ $w=140.0\text{mm}$
No. 3, oval	$G=15\text{mm}$	$G=18\text{mm}$
No. 4, round	$R=65\text{mm}$	$R=68\text{mm}$

‘w’, ‘h’는 공형의 폭과 높이를 의미한다.  $r_1$ 은 상자형(box type), 사각형(square type)의 구석반경

(corner radius)을 나타내고  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ 는 3-R 타원 공형의 곡률반경(curvature radius)을 의미한다. R은 원형 공형의 곡률반경이다.

Table 1에서는 기존 공형설계(present design)과 본 연구에서 제시한 제안 공형설계(newly proposed design)의 차이점을 나타내었다. 기존 공형설계와 제안 공형설계의 결과를 전단 변형률 방법으로 분석한다. 필요에 따라서 롤 갭(roll gap), G가 변경될 수도 있다.

조압연의 1번, 3번 공형은 수평(horizontal)이고 2번, 4번 공형은 수직(vertical) 방향으로 압연된다. 본 연구에서 집중적으로 분석하는 부분은 1~4번 공형이다. 그 이유는 초기 1번~4번 공형에서 주름힘이 발생하지 않으면 압연이 되는 과정에서 주름힘 발생을 억제할 수 있기 때문이다. 실제 압연 현장에서 주름힘이 발생하는 위치를 보면 빌렛(billet)의 코너(corner) 부분에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 소재단면의 코너 부위에서 요소 8개를 선택한다.

Fig. 8에서는 현재 1번 상자(box) 공형의 폭(width)을 180.0mm, 코너 반지름(radius)을 18mm로 해석한 결과이다. 분석 과정에서 E1-2는 절점 1과 2 사이에 있는 요소(element)를 말한다. 마찬가지로 E5-6는 절점 5와 6 사이에 있는 요소를 의미한다. E1-2의 ‘xy 전단 변형률’이 제안 공형에서 -0.3보다 작아졌다. 또한 E3-4, E5-6의 ‘yz 전단 변형률’도 0.35보다 작아진 것을 확인할 수 있다. 유한요소해석 결과 제안된 공형설계에서 폭을 더 넓히고 코너 반지름을 더 작게 하면 전단 변형률이 더 작아졌다. 결과적으로 주름힘 발생 가능성이 더 낮아진다고 볼 수 있다. 하지만 2번 사각(square) 공형 압연 후 3번 타원(oval) 공형에서는 1번 공형의 설계변경으로 인해 결과적으로 전단 변형률이 급격하게 증가하는 결과를 확인하였다. 이러한 이유로 인하여 본 연구에서는 1번 상자(box) 공형에서 가장 적합한 설계는 폭 180.0mm 이고 코너 반지름이 18mm인 공형설계를 제안한다.

Fig. 9에서는 2번 사각(square) 공형의 폭을 140.0mm, 코너 반지름을 20mm로 수정한 결과이다. 제안 공형 결과는 1번 패스에서 제안한 박스(box) 공형에서 압연된 빌렛(billet)을 2번 제안 사각(square) 공형에서 압연한 결과이다. ‘xy 전단 변형률’은 그 값이 작기 때문에 주름힘 발생에 영향을 미치지 않는다. E6-7, E7-8의 ‘zx 전단 변형률’은 개선 후에 0.35를 넘지 않는 것을 확인할 수 있다. 유한요

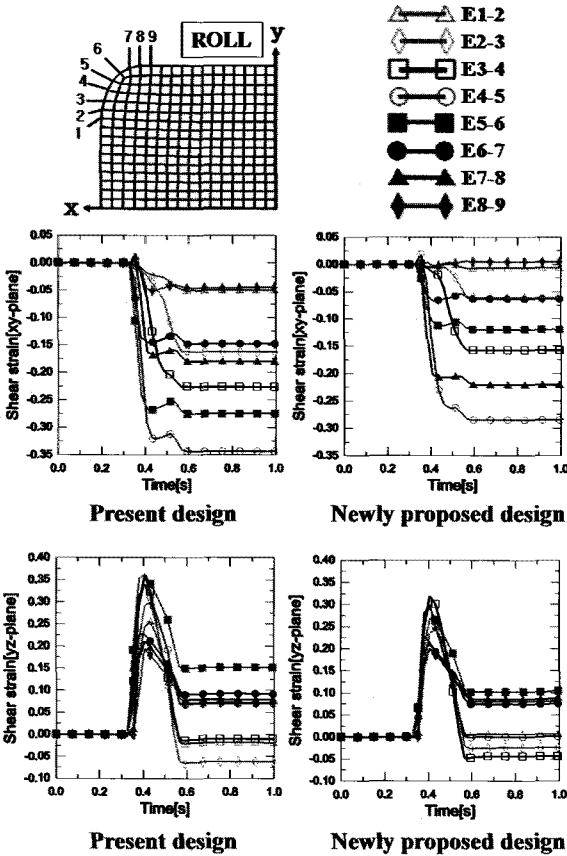


Fig. 8 Shear strain variation along rolling time. Present design is compared with newly proposed design in case of box groove

소해석 결과 2번 공형에서도 1번 공형과 마찬가지로 공형 폭을 더 넓히거나 코너 반지름을 더 작게 하면 결과적으로 더 개선된다. 하지만 3번 타원(oval) 공형에서 결과적으로 악화되기 때문에 2번 공형의 가장 적합한 설계는 폭 140.0mm, 코너 반지름 20mm 인 공형설계를 제시한다.

Fig. 10 에서는 3 번 타원(oval) 공형의 롤 갭(roll gap)을 현재 15mm 에서 18mm 로 변경하여 해석한 결과이다. E5-6 에서 E8-9 까지의 'xy 전단 변형률' 이 제안 공형설계에서 -0.3 보다 작아진 것을 확인할 수 있다. 'yz 전단 변형률' 은 값의 차이가 거의 없었다. 결과적으로 'xy 전단 변형률' 이 현재 공형보다 작아졌기 때문에 주름 발생 기준인 두 성분 중 한 성분이라도 현재 전단 변형량보다 작게 되면 주름 발생이 감소할 것이라는 조건에 만족한다. 3 번 공형에서도 마찬가지로 롤 갭을 18mm

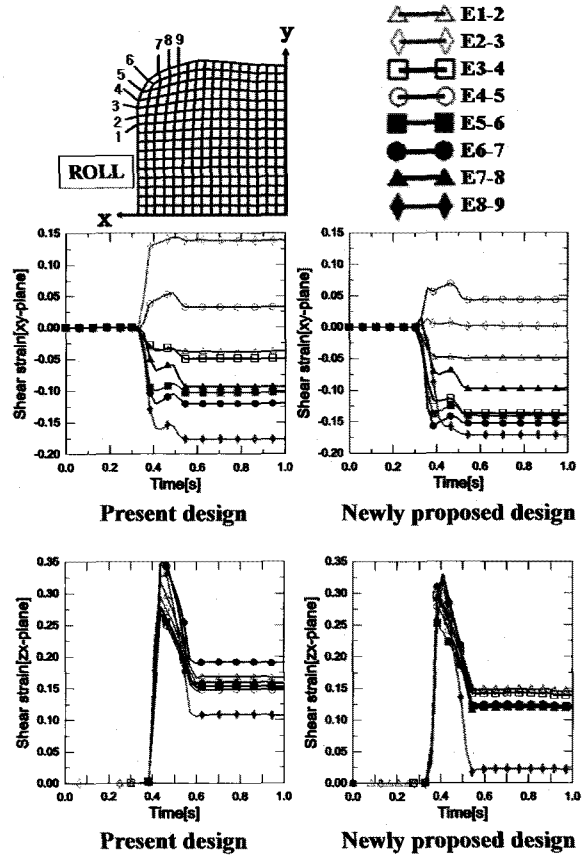


Fig. 9 Shear strain variation along rolling time. Present design is compared with newly proposed design in case of square groove

보다 더 크게 하면 3 번 타원 공형에서는 전단 변형률이 작아지지만 유한요소해석 결과 4 번 원형(round) 공형에서 급격하게 악화되었다. 따라서 3 번 타원(oval) 공형에서는 롤 갭을 18mm 로 하는 것이 가장 적합하다고 제시한다.

Fig. 11 에서는 4 번 원형(round) 공형의 폭을 반경을 68mm 로 변경하여 해석한 결과이다. E1-2 에서 급격하게 떨어졌던 'xy 전단 변형률' 이 -0.3 보다 작게 되었다. 또한 E2-3, E3-4 의 'zx 전단 변형률' 도 작아진 것을 확인할 수 있다. 폭을 반경이 현재 공형보다 3mm 더 커졌기 때문에 빌렛의 급격한 변화가 완화되었고 이로 인해서 전단 변형률이 작아진 것이다. 따라서 기존 공형보다 결과적으로 개선이 되었고 주름 발생 가능성이 줄어들 수 있다는 것을 알 수 있다.

실제 현장에서 2 번 사각(square) 공형만을 변경

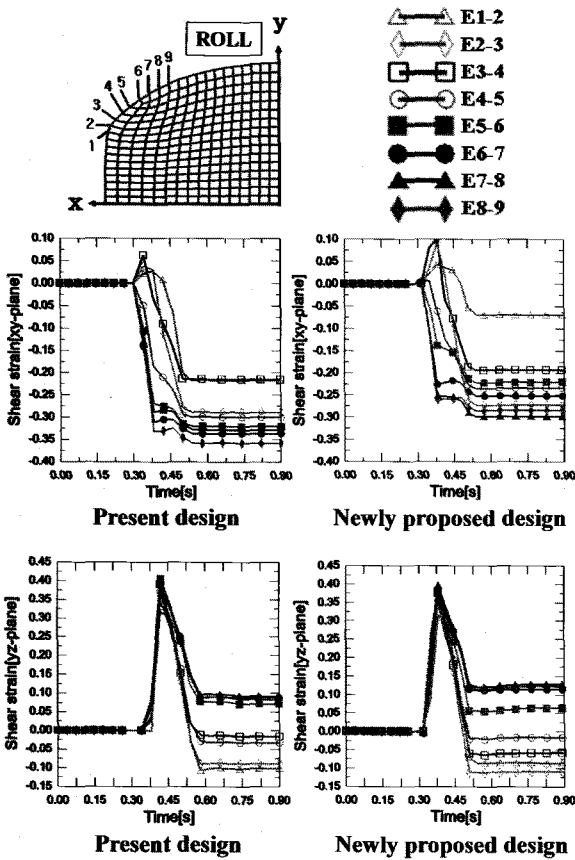


Fig.10 Shear strain variation along rolling time. Present design is compared with newly proposed design in case of oval groove

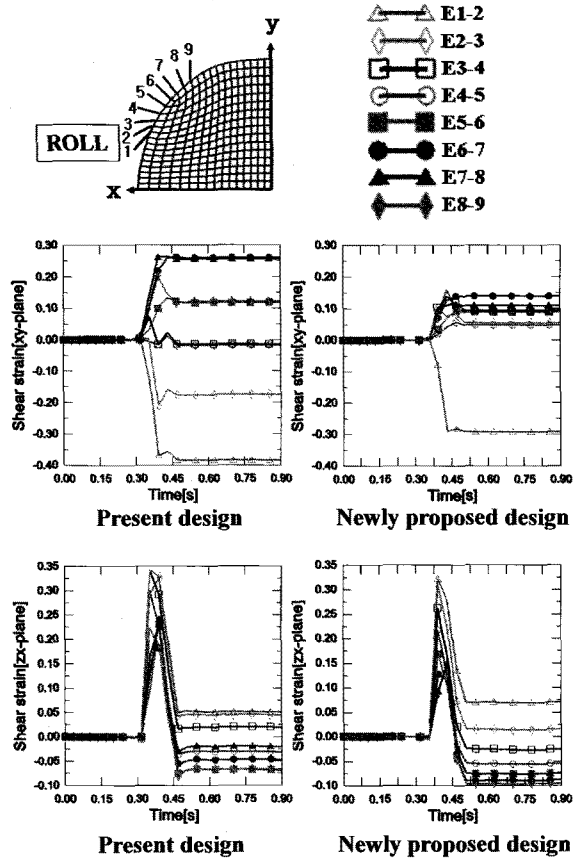


Fig.11 Shear strain variation along rolling time. Present design is compared with newly proposed design in case of round groove

Table 2 Present design and newly proposed design defective goods ratio

	Total No. of products	No. of products with surface defect
Present design	8532	644
Newly proposed design (2 <sup>nd</sup> pass)	16314	1155

하여 테스트를 실시하였다. Table 2 에서는 1~6 번 패스까지 압연을 마친 제품의 전체 개수와 불량 제품 개수를 나타내었다. 전체 제품 개수와 불량 제품 비율을 비교하였을 때 기존 7.55%에서 본 연구에서 제안된 공형을 사용했을 시 7.08%로 불량 제품 비율이 낮아진 것을 알 수 있다. 2번 사각 공형 하나만 변경하여도 개선이 되었기 때문에 본 연구에서 제안하는 1번 박스(box) 공형에서 4번

원형(round) 공형까지 설계변수와 롤 갭을 변경하면 불량 제품 비율이 더 감소할 것으로 예상된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 2세대아베스틸 압연공정(소형압연 공장)을 대상으로 공형압연 중에서 발생하는 주름힘 억제 방법에 대한 연구를 수행하였다. 주름힘 발생 기준 모델을 새롭게 정립하고 현재 사용중인 공형압연공정에 정립된 모델을 적용하였다. 또한 3차원 유한요소법을 사용하여 전산모사를 하고 이 결과를 바탕으로 주름힘 발생이 감소되는 공형설계방법을 제시하였다. 따라서 아래와 같은 결론을 도출 할 수 있다.

(1) 본 연구에서 제안된 주름힘 발생 예측모델이 열간공형 압연공정에 적용되었을 때 주름힘 발생



예측 및 억제 가능성을 현장 테스트를 실시하여 확인하였다. 본 연구에서 제안된 공형(1번 상자 공형, 2번 사각 공형, 4번 원형 공형)의 설계변수와 롤 갭(3번 타원 공형)을 변경하면 전단 변형률의 감소로 인해 소재 주름힘 발생이 감소될 것으로 예측된다.

(2) 따라서 본 연구에서 제안된 전단 변형률 기준(shear strain criterion)이 공형압연 시 소재 주름힘 발생 예측에 매우 유용하고 이를 활용하면 주름힘 발생이 억제되는 공형설계도 가능하다는 것을 보여주었다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

- [1] Youngseog Lee et al., 2001, Mathematical Model to Simulate Thermo-Mechanical Controlled Processing in Rod(or Bar) Rolling, Metals and Materials International, Vol. 7, No.6, pp. 519~330.
- [2] C. Eriksson, 2004, Surface Cracks in Wire Rod Rolling, steel research int., Vol. 75, No. 12, pp. 818~828.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] D. Farrugia, 2006, Prediction and avoidance of high temperature damage in long product hot rolling, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 177, pp. 486~492.
- [7] Y. Hashimoto et al., 2001, Improvement of bloom casting and high reduction breakdown process, La Revue de Métallurgie, pp. 375~382.