

3차원 유한요소법에 기초한 조질 압연 공정 해석 - Part I : 유한요소해석

윤성진¹ · 황상무[#]

3D Finite Element-based Study on Skin-pass Rolling - Part I : Finite Element Analysis

S. J. Yoon, S. M. Hwang

(Received November 30, 2015 / Revised January 18, 2016 / Accepted January 21, 2016)

Abstract

Rolled products often have residual stresses or strip waves that are beyond the customer's tolerance. To resolve this problem, skin-pass rolling is widely used during post-processing of such products. Because a short contact length compared to the strip width is a characteristic of skin-pass rolling, several numerical analyses have been previously conducted based on a two-dimensional approach. In the current study, a series of simulations was conducted using numerical analysis of three-dimensional elastic-plastic finite element method.

Key Words : Skin-pass Rolling, Residual Stress, Roll Force Profile, Plastic Deformation, 3-D Finite Element Method

1. 서론

압연 공정을 거쳐 생산된 제품은 소성 변형의 불균일, 온도 분포의 불균일, 상변태 및 재결정의 불균일 등의 이유로 잔류응력을 갖게 되는 경우가 많다. 지나친 잔류응력은 제품의 평탄도를 떨어뜨리고, 절단 시 휨을 발생시키거나, 조립 공정에서 비틀림을 유발한다.

조질 압연(skin-pass rolling or temper rolling)은 이와 같은 잔류응력을 최소화하고, 제품의 표면 품질을 향상시키기 위해 압연 공정의 마지막에 수행되며, 일반적으로 0.2~2% 정도의 매우 작은 압하율과 판과 롤 사이의 높은 마찰 조건에서 실시된다.

조질 압연은 널리 이용되는 기술인 만큼 그에 대한 연구도 활발히 진행되어왔다. 그 중에서도 수치 해석적 방법을 활용한 연구에 초점을 맞춰보면,

Giarola 등[1]은 조질 압연 공정이 판 표면 품질에 미치는 영향을 알아보기 위해 다양한 조건에서 공정을 해석했고, 반경이 큰 롤과 높은 마찰계수가 좋은 표면 품질을 얻는데 더 효율적이라는 결론을 내렸다. Kijima[2, 3]는 롤 반경이 접촉 조건과 판 표면 품질에 미치는 영향에 대해 연구하여 롤 반경이 작은 경우(50mm)에는 롤 반경이 큰 경우(250mm)와 다른 현상들이 발생하는 것을 확인했고, 실험용으로 축소 제작된 압연기는 실제 공정을 해석하기에 적합하지 않다고 주장했다. Weiss 등[4]은 조질 압연 공정을 2차원적으로 해석하여 압연 후 응력분포가 두께 방향으로 매우 불균일하다는 것을 보여주었지만, 실제로 판 굴곡(strip wave) 현상에 영향을 미치는 폭 방향의 분포에 대해서는 논하지 않았다.

이와 같이 수치 해석적 접근을 통해 조질 압연을 연구하는 데 있어 최근까지도 2차원 해석 기법에

1. 포항공과대학교 기계공학과

Corresponding Author : Department of Mechanical Engineering, POSTECH, E-mail: smhwang@postech.ac.kr

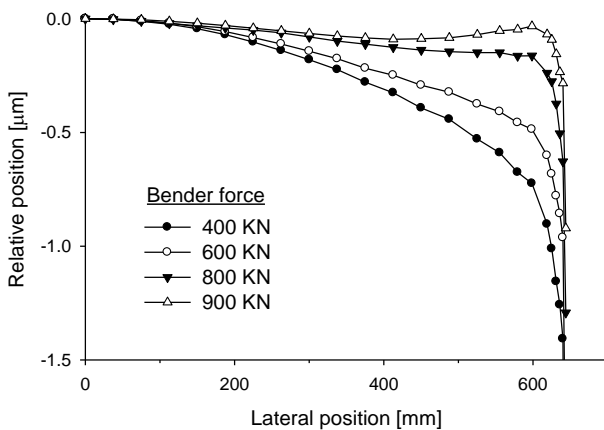
Table 1 Process conditions, part 1 – strip

Parameters	Values
Initial thickness, H [mm]	0.5
Exit thickness at the center, h_c [mm]	0.4973
Initial width, w [mm]	1288
Reduction ratio [%]	0.54
Coulomb friction coefficient between strip and WR	0.3
Young's modulus, E [GPa]	185
Poisson's ratio, ν	0.3
Flow stress, $\bar{\sigma}$ [MPa]	$400 + 4000 \bar{\epsilon}$

* $\bar{\epsilon}$: effective strain**Table 2 Process conditions, part 2 – rolls**

Parameters	Values	
	WR	BUR
Diameter [mm]	590	1200
Barrel length [mm]	2400	2400
Shaft length [mm]	720	720
Shaft diameter [mm]	385	795
Angular velocity [rad/s]	22.63	-
Bender force [KN]	400 ~ 900	-
Young's modulus, E [GPa]	225	225
Poisson's ratio, ν	0.3	0.3

* The interface between WR and BUR is frictionless.

**Fig. 1 Deformed roll profile which is extracted along the line of minimum thickness of strip**

국한되어 있는 이유는 일반 압연에 비해 압하율이 매우 작고, 판 폭에 비해 롤과의 접촉 길이가 너무 짧아서 정밀한 계산에 어려움이 있기 때문이다. 게다가 판의 변형에 비해 롤의 변형이 상당히 커서 롤과 판의 연계 해석이 필수적이므로 계산하는데 훨씬 더 많은 시간적, 자원적 비용이 요구된다.

그럼에도 불구하고 유한요소해석은 조질 압연 공정을 해석하는 좋은 방법 중 하나이며, 2차원 해석만으로는 확인할 수 없는 현상들이 있다. 본 논문에서는 3차원 유한요소해석을 통해 기존 2차원 해석의 정확도를 재고하여 조질 압연공정에 대한 보다 정밀한 분석을 가능케 하고자 한다.

2. 유한요소해석의 준비

3차원 비정상상태 유한요소법[5]을 적용하여 판, 작업 롤(work roll, WR), 백업 롤(back-up roll, BUR)로 이루어진 4-high mill 시스템을 해석한다. 판은 탄소성체로 해석하되, 롤은 탄성체로 가정하였으며, 대칭 조건을 이용하여 전체 시스템의 1/4만 해석했다. 판의 중앙을 기준으로 두께 방향이 y 방향, 폭 방향이 z 방향이 되며, 압연 방향 즉, 판의 진행 방향이 -x 방향이 되도록 좌표계를 설정했다.

해석에 사용된 재료 및 공정조건은 Kainz 등의 연구[6]를 참고하여 선택했으며, 이를 Table 1과 Table 2에 나타냈다. 판과 롤의 변형 전 크라운은 0 이며, 판의 초기 길이는 Kijima의 연구[2]를 참고하여 판과 작업 롤 간 접촉 길이의 10배로 설정했다. 작업 롤에 걸리는 벤더력(bender force)을 400, 600, 800, 900 KN으로 바꾸어가며 다양한 경우를 해석하였다.

초기 크라운이 없기 때문에 판의 입측 두께 H 는 폭 방향으로 일정하지만, 압연 후 출측 두께 $h(z)$ 는 일정하지 않다. 압하율 0.54%는 판 중앙에서의 출측 두께 h_c 를 기준으로 계산된 것으로서, 작업 롤과 백업 롤의 수직 위치를 조정함으로써 압하율을 목표치에 맞출 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

작업 롤에 적용된 벤더력을 조정하여 롤의 변형을 조절할 수 있으며, 이때 얻어지는 작업 롤의 변형 후 크라운 분포는 Fig. 1을 통해 확인할 수 있다. Fig. 1은 작업 롤과 판이 접촉하는 영역에서 롤의 최

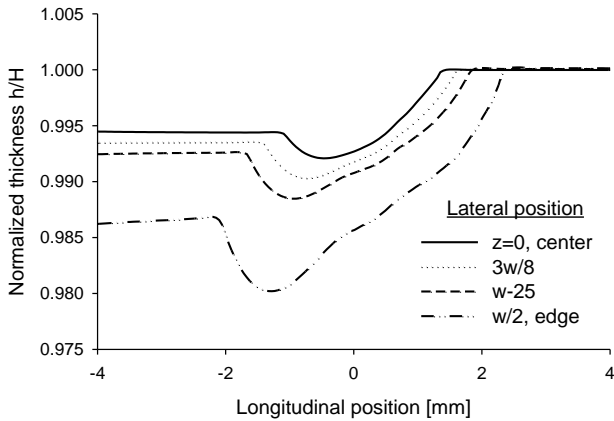
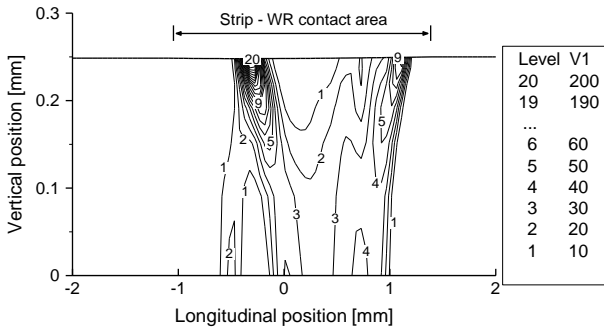
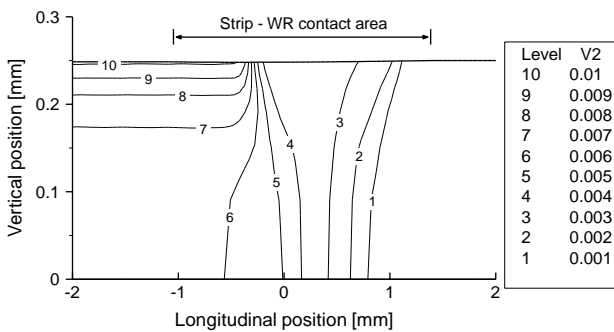


Fig. 2 Thickness distributions along the rolling direction at various positions across the strip width, for bender force = 400KN



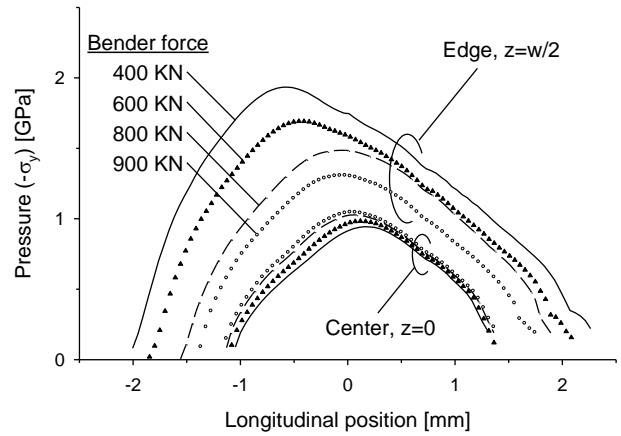
(a) Effective plastic strain rate, in sec⁻¹



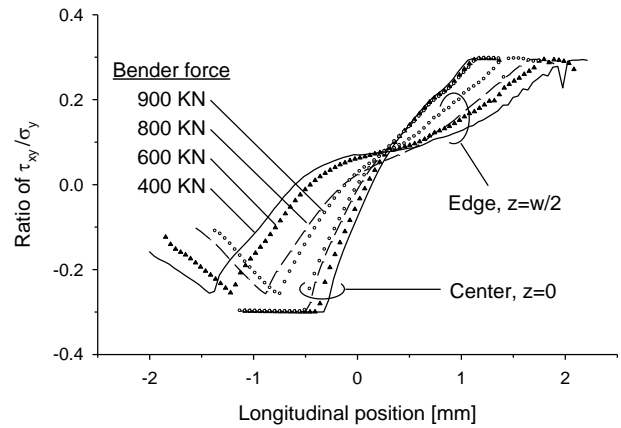
(b) Effective plastic strain

Fig. 3 Distribution of effective plastic strain and its rate at the center cross-section of strip, for bender force = 400KN

저점을 이어 상대적인 위치를 나타낸 것으로서, 롤의 탄성 변형으로 인해 판 가장자리에서 압하량이 매우 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 벤더력이 900 KN까지 증가함에 따라 롤 크라운 분포가 점점 균일해지므로 압연된 제품의 두께 편차



(a) Roll pressure distributions



(b) Frictional stress distributions

Fig. 4 Stress distributions at the center of strip and at the edge of strip

도 작아질 것으로 예상됨은 물론, 연신율 차이로부터 발생하는 잔류응력의 크기도 작아질 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 2는 압연 방향으로 판 두께의 변화를 표현한 것으로, 판 폭의 서로 다른 네 위치에서 얻은 분포를 비교하였다. 판이 최저점까지 압연된 후, 그 중 상당량이 탄성변형에 의해 회복되는 것을 알 수 있는데, 탄성 회복량이 최대 압하량(판의 초기 두께와 최저점 두께의 차)의 30%에 달한다. 또, 롤 평탄화(roll flattening) 현상이 심하게 발생하는 것도 관찰할 수 있는데, 이로 인해 변형 전 롤 반경으로 계산한 접촉 길이에 비해 실제 접촉 길이가 3배 이상 길어진 것을 알 수 있다.

지금까지 여러 연구자들에 의해 논의된 바에 의하면 조질 압연 중 판과 롤의 접촉구간 내부에서는 탄성변형만 발생하는 영역이 중립점(neutral point) 부

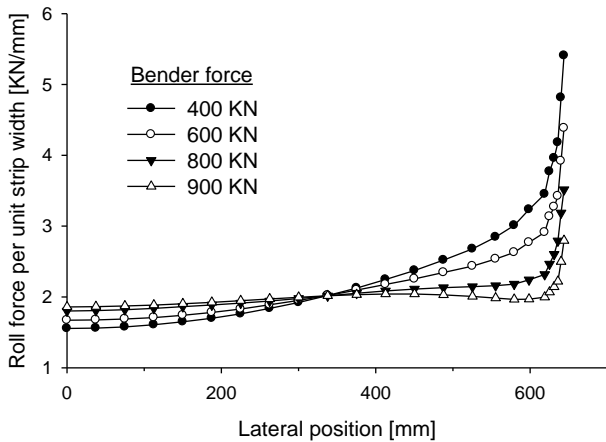


Fig. 5 Roll force profiles across the strip width

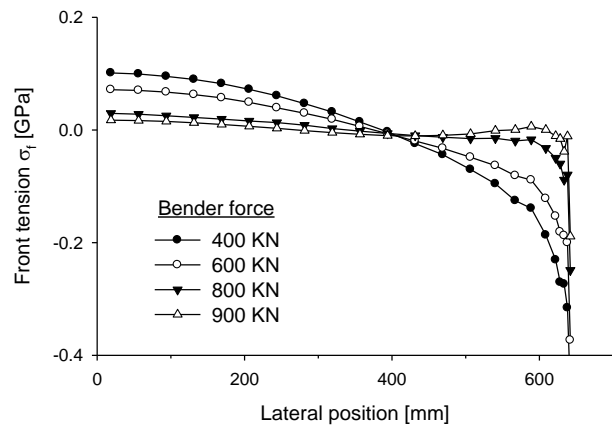
근에 존재한다고 한다. 이러한 탄성변형영역은 소성 변형영역에 둘러싸여 고립된 형태로 나타나며 Fig. 3(a)에서도 그 존재를 확인할 수 있다.

Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 조질 압연 후의 소성 변형을 분포는 두께 방향으로 상당히 불균일하다. 이것은 판과 작업 롤의 접촉면에서 높은 마찰계수를 갖게 되는 조질 압연의 특성에 의한 것[7]으로서 판 중심에서 표면으로 갈수록 소성 변형율이 증가하는 경향을 보인다.

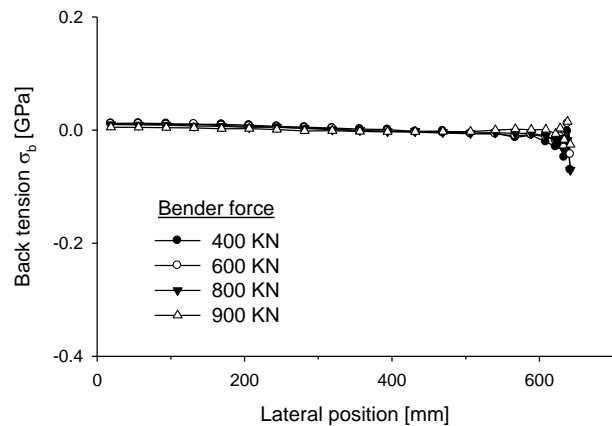
Fig. 4(a)는 판과 작업 롤의 접촉면에서 작용하는 압력의 분포를 보여준다. 적용한 벤더력에 따라 그 분포가 상이하고, 판 중심에서보다 가장자리에서 두 배 정도 큰 값을 갖지만, 모두 전형적인 마찰언덕(friction hill)의 형태를 보인다.

Fig. 4(b)는 판과 작업 롤의 접촉면에서 작용하는 전단응력과 수직응력의 비율을 보여주는 것으로서 이를 통해 마찰 조건의 분포를 유추할 수 있다. 이 비율이 마찰계수인 0.3과 같은 구간은 판과 작업 롤의 표면이 서로 다른 속도로 움직이며 미끄러지고 있는 구간(sliding region)이고, 0.3보다 작은 구간은 두 표면이 같은 속도로 움직이며 서로 붙어있는 구간(sticking region)이다[2].

Fig. 5는 판과 작업 롤 간 압하력의 폭 방향 분포를 보여준다. 일반적으로 열연 공정을 해석하면 판 가장자리에서 압하력이 떨어지는 형태를 보이는 것[8]과 달리 본 해석 결과에서는 판 가장자리에서 급격히 증가하는 형태를 보여준다. 이는 평면 변형 조건이 강하게 지켜지기 때문에 얻어지는 결과로 생각되며, 판 폭에 비해 작업 롤과의 접촉 길이가 매우 짧고 압하율이 일반적인 압연 공정에 비해 매



(a) Front tension profiles at roll exit



(b) Back tension profiles at roll entrance

Fig. 6 Front and back tension profiles during rolling

우 작은 조질 압연의 특징이 그 원인일 것으로 추측된다. 더불어, 압하력 분포가 Fig. 1에 나타난 볼 크라운 분포와 유사한 형태를 보인다는 것에도 주목할 필요가 있다.

압하력 분포에 큰 영향을 주는 요인 중 하나가 전후방 장력 분포이다. 평면 변형 조건이 강하게 지켜지기 때문에, 벤더력이 서로 다른 경우라도 압하율이 같은 판 중앙($z=0$)에서는 압하력이 같을 것으로 생각했으나, Fig. 5에서 그렇지 않은 결과를 얻은 것은 장력 분포가 벤더력에 따라 상이하기 때문으로 보인다. 본 연구에서 해석한 모든 경우에서 판 전, 후단에 작용하는 외력은 없다. 이 때문에 압연 초기에는 장력분포가 0으로 일정하지만, 압연이 진행되면서 Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 벤더력에 따라 서로 다른 전방 장력 분포가 나타난다. 반면 후방 장력 분포는 전방 장력 분포의 1/10 정도의 크기에 불과하며 Fig. 6(b)를 통해 확인할 수 있다.

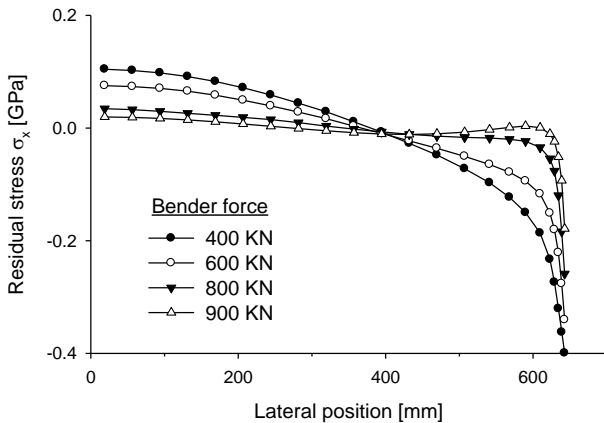


Fig. 7 Residual stress profiles after rolling

Fig. 7은 조질 압연 후 판의 잔류응력 분포를 나타낸 것으로서 판이 롤을 완전히 통과한 후의 분포이다. Fig. 3(b)에서 확인했던 소성 변형율의 불균일성 때문에 응력 분포도 두께 방향으로 불균일하지만, 여기서는 두께 방향으로 평균을 취한 값의 분포를 살펴보기로 한다. 그 형태가 Fig. 1과 유사한 것으로 보아 작업 롤의 크라운 분포가 잔류응력 분포에도 직접적으로 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 흥미로운 사실은 이 잔류응력 분포가 Fig. 6(a)의 전방 장력 분포와 거의 일치한다는 것인데, 이는 판이 롤을 빠져 나온 후에 발생하는 후변형(post-deformation)이 거의 없었음을 말해준다.

4. 결론

본 논문에서는 압연 공정의 마지막 단계인 조질 압연 공정을 3차원 유한요소법으로 해석하고, 그 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압하율과 비교해서 탄성 회복량의 비율이 상당히 큰 편이고, 롤 평탄화 현상이 국부적으로 심하게 발생하기 때문에 판과 작업 롤 간 접촉 길이가 매우 길어진다.

(2) 판과 작업 롤의 접촉 구간 내에서 발생하는 고립된 탄성변형영역의 존재와 소성 변형율의 두께 방향 불균일성을 확인했다.

(3) 압하력의 압연 방향 분포는 전형적인 마찰언덕의 형태를 나타내며, 폭 방향 분포는 판 가장자리에서 급격히 증가하는 형태를 보인다.

(4) 전방 장력 분포와 압연 후 잔류응력 분포가 일치한다는 사실로부터 롤을 빠져 나온 후에 발생

하는 후변형이 거의 없을 것이라는 결론을 얻었다.

유한요소해석은 계산 시간이 오래 걸리기 때문에 현장의 다양한 상황에 즉시 대처하기는 힘들다. 간단한 수식 모델을 도입하여 해석 결과를 근사하면 이런 문제를 해결할 수 있는데, 이 부분은 Part II에서 다루기로 한다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A5A1048294).

REFERENCES

- [1] A. M. Giarola, P. H. R. Pereira, P. A. Stemler, A. E. M. Pertence, H. B. Campos, M. T. P. Aguilar, P. R. Cetlin, 2015, Strain Heterogeneities in the Rolling Direction of Steel Sheets Submitted to the Skin Pass: A Finite Element Analysis, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 216, pp. 234~247.
- [2] H. Kijima, 2013, Influence of Roll Radius on Contact Condition and Material Deformation in Skin-pass Rolling of Steel Strip, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 213, No. 10, pp. 1764~1771.
- [3] H. Kijima, 2014, Influence of Roll Radius on Roughness Transfer in Skin-pass Rolling of Steel Strip, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 214, No. 5, pp. 1111~1119.
- [4] M. Weiss, W. Ryan, B. Rolfe, C. Yang, 2010, Proc. 10th Int. Conf. on Numer. Methods Ind. Form. Processes(eds. F. Barlat, Y. H. Moon, M. G. Lee), Am. Inst. Phys., Danvers, Ma., pp. 896~902.
- [5] J. M. Koo, S. R. Ryoo, C. S. Lee, C. G. Sun, H. N. Han, S. M. Hwang, 2007, Prediction of Residual Stresses in a Plate Subject to Accelerated Cooling, *ISIJ Int.*, Vol. 47, No. 8, pp. 1149~1158.
- [6] A. Kainz, K. Krimpelstätter, K. Zeman, 2003, Abaqus Austria Users' Conf., Vienna, Austria.
- [7] B. B. Hundy, 1955, Inhomogeneous Deformation During the Temper Rolling of Annealed Mild Steel, *J. Iron Steel Inst.*, Vol. 181, pp. 313~315.
- [8] Y. K. Kim, W. J. Kwak, T. J. Shin, S. M. Hwang, 2010,

A New Model for the Prediction of Roll Force and Tension Profiles in Flat Rolling, ISIJ Int., Vol. 50, No. 11, pp. 1644~1652.