냉간 압연에서 압하력 분포 예측 - Part II: 적용 및 검증

남승연¹·황상무[#]

Prediction of Roll Force Profile in Cold Rolling - Part II : Application and Validation

S. Y. Nam, S. M. Hwang

(Received March 4, 2019 / Revised May 24, 2019 / Accepted May 30, 2019)

Abstract

This paper proposes a precise mathematical model for the prediction of the variation of the roll force across a strip in cold rolling. It further describes the deformation characteristics of the strip using a 3-D finite element method. The different features of hot rolling and cold rolling through a 3-D finite element method are shown. The predicted roll force profile and tension profile are verified through comparison with the prediction from a 3-D finite element method.

Key Words : Finite Element Method, 3-D Theory of Rolling, Cold Rolling, Roll Force Profile, Tension Profile

1. 서 론

냉간압연에서 압연 후 발생하는 잔류응력뿐만 아 니라 웨이브 형성을 예측하기 위해서는 바이트존 (bite zone)에서의 압하력 분포를 정밀하게 예측하는 것이 아주 중요하다. 압연의 복잡한 3차원적인 탄성, 소성 변형 특성을 이해하기 위해서 유한요소해석이 수행된다. 이런 현상을 묘사하기 위한 열연에서의 유한요소법[1,2]에서 마찰계수, 재료의 특성, 공정 조 건 등 냉연에 알맞은 데이터로 변경하여 원하는 해 석을 진행할 수 있다. 하지만 유한요소해석의 경우 몇시간 혹은 며칠 이상의 시간이 걸리기 때문에 실 시간으로 변하는 공정 조건에서 압하력 분포를 예 측하는 것은 불가능한 일이다. 따라서 유한요소해석 의 결과와 유사하며 실시간으로 제어할 수 있는 수 식 모델의 개발이 필요하다. '냉간압연에서 압하력 분포 예측 – Part I : 수식 모델 개발'에서 그 자세한 내용을 소개하였다. 본 논문에서는 유한요소해석을

1. 포항공과대학교 기계공학과 # Corresponding Author: Department of Mechanical Engineering, POSTECH, E-mail: smhwang@postech.ac.kr, ORCID ID: 0000-0001-9347-4472 통해 냉연의 판 변형 특성을 설명하고, Part I에서 소 개한 수식 모델을 유한요소해석 결과와 비교를 통 해 그 타당성을 검증하고자 한다.

2. 유한요소해석을 통한 판의 변형 특성

아주 작은 폭을 가지는 하나의 긴 조각이 평면 변 형조건을 따른다고 했을 때, 두께방향으로의 변수의 변화가 없다면, 확연히 구분되는 후방영역, 바이트 존(bite zone), 전방영역이 관찰될 것이다. 그러나 넓 은 폭을 가지는 판이 압연된다면 Fig. 1에 보이는 것 처럼 확연한 7개의 영역이 존재하게 된다. 이것은 압 연방향의 속도와 폭방향의 속도의 상호적인 관계가 작용하기 때문이다. 결과적으로, 압연 후 롤 출구 측에서 폭방향 소성변형률의 분포가 나타나게 된다. 또한, 이러한 상호작용은 외부적으로 장력이 전혀 주어지지 않아도 롤 입구 측에서의 후방장력 분포 와 전방장력 분포에 영향을 준다. Fig. 2는 소성변형 이 바이트존(bite zone)뿐만 아니라 소성변형전, 후 영역(pre, post-deformation zone)에서 일어나는 것을 보 여주고 있다.

이것은 만약 소성변형전, 후 영역(pre, postdeformation zone)이 무시된다면 장력 분포를 예측하 는 것은 불가능하다는 것을 의미한다.



Fig. 1 Classification of the deformation zones appearing in the strip being rolled, predicted from FE simulation of hot strip rolling [1]. Process conditions are, strip width = 1000 mm, entry thickness = 44.67 mm, exit thickness = 24.14 mm, roll radius = 403.22 mm

판의 평탄도를 결정하는 롤 출구 측 쪽 정상상태 영역에서 나타나는 잔류응력 분포와 전방장력 분포 는 유한요소해석을 통해 Fig. 3에서 보여주듯이 다른 관계를 보여주고 있다. 잔류응력이 압연방향 소성변 형률 분포에 따라 결정되는 것을 고려한다면, 폭방 향 및 두께방향 소성변형률 분포를 아는 것이 중요 하며, 두께방향 소성변형률은 롤 출구 측에서의 두 께방향 탄성변형률 분포를 안다면 예측이 가능하다. 한편, 폭퍼짐과 폭방향 변형률은 τ_{x} 의 분포에 따라 계산될 수 있으며 이는 Part I에 자세히 설명 되어있다.



Fig. 2 Distribution of $\dot{\varepsilon}_{xz}$ component of the plastic strain rate tensor, predicted from FE simulation of cold rolling. Note that plastic deformation occurs not only in the bite zone but also in the pre and post deformation zones. Process conditions are described as case 3 in Table 2

열연의 조압연이나 두께 대비 폭이 큰 사상압연 구간의 경우 Fig. 4에서 알 수 있듯이, 롤 입구 측에 서 τ_x 가 음의 값을 가지는 것으로부터 판의 가장자 리 조각이 폭방향 속도를 갖는 것을 알 수 있다. 이 조각은 폭방향 속도가 최대치에 도달하는 곳에서 τ_y 의 부호가 바뀐다는 것을 추론할 수 있다.



Fig. 3 The front tension profile (----) and the residual stress profile (---). Process conditions are described as case 2 in Table 1. For the strip material, plain carbon steel is assumed, with the strip temperature being 1200℃. The flow stress characteristics are from Misaka [3] 반면, 냉연에서는 반대현상이 일어나는데, 롤의 입구 측에서 바이트존(bite zone)의 중간까지는 아주 작은 값을 가지다가 최종적으로 음의 값을 가지는 것을 Fig. 5에서 관찰할 수 있다.



Fig. 4 Distribution of τ_{xz} predicted from FE simulation of hot rolling. Note that +x direction is opposite to the rolling direction and +z direction goes from the plane of symmetry to the strip edge. Each colour represents initial z coordinate of the material particle traveling along the rolling direction. For the process conditions, see case 1 in Table 1



Fig. 5 Distribution of τ_x predicted from FE simulation of cold rolling. Note that +x direction is opposite to the rolling direction and +z direction goes from the plane of symmetry to the strip edge. Each colour represents initial *z* coordinate of the material particle traveling along the rolling direction. For the process conditions, see case 4 in Table 2 Fig. 6은 냉연에서 폭퍼짐이 롤 출구 측에서 측정 되는 것이 아니라 롤 출구 측에서 멀리 떨어진 소 성변형후 영역(post-deformation zone)과 롤 출구 측 쪽 정상상태영역 사이에서 측정되어야 한다는 것을 보여주고 있다. Fig. 7에서 보여주듯이 롤 출구 측에 서부터 대략 판 폭의 절반 정도 위치에서 폭퍼짐을 측정해야 한다는 것을 보여주고 있다.



Fig. 6 Variation of lateral spread after rolling, due to the elastic recovery occurring in the post deformation zone. The red line represents case 1 (hot strip rolling) in Table 1 and the green line represents case 1 (cold rolling) in Table 2



Fig. 7 τ_{xz} distributions, predicted from FE simulation of cold rolling. For the process conditions, see case 1 in Table 2

		0
	Case 1	Case 2
Entry thickness [mm]	43.38	210
Exit thickness [mm]	28.59	155
Initial width [mm]	1009	1300
Strip crown at roll exit [µm]	0	0
Roll diameter [mm]	806.44	625
Roll speed [mpm]	82	130
Flow stress [GPa]	0.2	Misaka
Coefficient of friction	0.3	0.3

 Table 1 Process conditions for hot rolling

Table 2	Process	conditions	for	cold	rolling

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Entry thickness [mm]	2.953	2.953	2.324	1.158
Exit thickness [mm]	2.324	2.324	1.829	1.005
Initial width [mm]	1448	1448	1448	1448
Strip crown at roll exit [µm]	10	-10	10	0
Roll diameter [mm]	510.05	510.05	459.44	487.03
Roll speed [mpm]	340	340	442	635
Yield stress [GPa]	0.6	0.6	0.6	0.6
Coefficient of friction	0.1	0.1	0.1	0.1

3. $l_0^2/(l_{pre}l)$ 의 결정

Part I에서 모델의 압하력 분포는 $l_0^2/(l_{pre}l)$ 의 값에 따라 민감하게 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 유 한요소 코드[2]를 이용해 다양한 공정조건에서 압하 력 분포를 계산하였고, 그 분포를 기반으로 구한 $l_0^2/(l_{pre}l)$ 의 적절한 식은 다음과 같다.

$$\frac{{l_0}^2}{l_{pre}l} = 0.01 + c_4 \frac{|\Delta r|}{r(0)} \tag{1}$$

$$c_4 = 0.002 \cdot \left(\frac{b}{H_1(0)} - 490.35\right) + 0.2$$
 (2)

$$\left|\Delta r\right| = \frac{2}{b} \int_{0}^{b/2} \left| r(x) - r(0) \right| dx$$
(3)

4. 압하력 분포 및 전, 후방장력 결과

Fig. 8은 다양한 판 크라운(strip crown)에 대해 수 식 모델과 유한요소해석의 압하력 분포를 보여주고 있다. 롤 출구 측에서의 판 크라운(strip crown)이 양 수일 때, 유한요소해석을 통해 얻은 압하력 분포와 모델이 예측한 결과가 일치하는 것을 확인할 수 있 었다.



Fig. 8 Roll force profiles, — prediction from the model, ---- prediction from FEM. For the process conditions, see each case in Table 2

롤 출구 측에서의 판 크라운(strip crown)이 음수일 때도 마찬가지로 두 결과가 서로 잘 맞는 것을 확 인할 수 있었다. 하지만 두 경우 모두 그래프의 기 울기에서 약간의 오차를 보여주고 있으며, 이는 Fig. 9 와 Fig. 10에서 알 수 있듯이 모델의 전, 후방장력 의 예측 차이에서 발생하는 오차라고 할 수 있다.



Fig. 9 Front tension profiles, — prediction from the model, ---- prediction from FEM. For the process conditions, see each case in Table 2

그러나 근사 모델임을 감안한다면 허용 가능한 오차라고 할 수 있고, 그래프의 경향성을 파악했을 때 모델과 유한요소해석의 결과가 잘 맞는 것을 확 인할 수 있었다.



Fig. 10 Back tension profiles, — prediction from the model, ---- prediction from FEM. For the process conditions, see each case in Table 2

특히, 롤 출구 측에서의 판 크라운(strip crown)이 없는 경우에 압하력 분포 및 전, 후방장력의 결과는 확연히 유한요소해석 결과와 잘 일치하는 것을 확 인할 수 있었다.

5. 폭방향 소성변형률 분포 결과

현재 모델은 압하력 분포 예측에 초점이 맞춰져 있기 때문에 정밀한 폭방향 소성변형률 분포를 예 측하고 폭퍼짐을 계산하기에는 어려움이 있었다.



Fig. 11 $\omega(x) - \omega(0)$ at roll exit, — prediction from the model, ---- prediction from FEM. For the process conditions, see case 1 in Table 2

따라서 판의 중앙에 대한 상대적인 폭방향 소성 변형률 분포 즉, $\omega(x) - \omega(0)$ 에 대해 조사하였다.

롤 출구 측에서의 판 크라운(strip crown)이 양수일 때, Fig. 11에서 보여주듯이 판의 가장자리에서 예측 된 상대적인 폭방향 소성변형률은 유한요소해석의 결과보다 높게 예측되었다.



Fig. 12 $\omega(x) - \omega(0)$ at roll exit, — prediction from the model, ---- prediction from FEM. For the process conditions, see case 2 in Table 2



Fig. 13 $\omega(x) - \omega(0)$ at roll exit, — prediction from the model, ---- prediction from FEM. For the process conditions, see case 4 in Table 2

롤 출구 측에서의 판 크라운(strip crown)이 음수일 때와 없을 때는 각각 Fig. 12와 Fig. 13에서 알 수 있 듯이 예측된 결과가 유한요소해석의 결과와 유사한 경향성을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 무엇보다 도 모든 경우에서 그래프의 경향성은 일치하는 것 을 확인할 수 있고, 이는 현재 수식 모델을 롤 출구 측 쪽 정상상태에서의 잔류응력과 판의 평탄도를 예측하는데 사용할 수 있다는 것을 의미한다.

6. 결 론

본 논문에서는 Part I에서 제시된 수식 모델을 적 용하여 압하력 분포와 전, 후방장력 분포를 계산하 고 유한요소해석 결과와의 비교를 통해 검증해 보 았다. 검증에 필요한 유한요소해석의 경우 최소 한 달에서 최대 두 달 정도의 시간이 소요되었지만 제 안된 수식 모델은 단지 0.01초 만에 계산을 완료할 수 있기 때문에 실용적이라고 할 수 있다. 제안된 수식모델을 검증하기 위한 유한요소해석은 냉간 압 연의 조건을 따르며, 롤 출구 측에서의 판 크라운 (crown)이 양수, 음수, 없는 경우에 대해 시행되었다. 냉간 압연에서의 유한요소해석 결과는 압연방향 τ. 분포가 열간 압연과는 다른 경향성을 보여주고 있 으며, 폭퍼짐 또한 롤 출구 측에서 떨어진 영역에서 측정되어야 한다는 것을 보여주고 있다. 이와 같은 냉간 압연의 특성을 고려하여 제시된 수식 모델의 압하력 분포와 전, 후방장력 분포의 예측 정확도는 완벽하게 유한요소해석과 같은 정밀한 예측을 수행 하지는 못하지만 전반적으로 우수하다고 할 수 있 다. 한편, 예측된 폭방향 소성변형률은 유한요소해 석 결과와 큰 차이를 보였다. 그 이유는 폭방향 소 성변형률 예측에 초점을 맞춘 모델이 아니라 압하 력 및 전, 후방장력 분포를 예측하기 위한 모델이기 때문이며, 3장에서 언급된 $l_0^2/(l_{pre}l)$ 을 조정한다면 유 한요소해석과 유사한 폭방향 소성변형률 예측 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한, 현재 수식 모델 의 예측 정확도를 높이기 위해 탄성, 소성변형에 대 한 더 자세한 정보가 필요하며, 이 목적을 달성하기 위해서는 아주 정밀한 유한요소해석을 수행해야 할 것이다. 이를 통해 냉연에서의 탄성, 소성 변형의 특성을 이해하고, 수식화하여 현재 모델을 개선할 수 있을 것이다.

후 기

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

REFERENCES

- J. S. Lee, T. J. Shin, S. J. Yoon, S. M. Hwang, 2016, Prediction of Steady-State Strip Profile in Flat Rolling, Steel Research Int., Vol. 87, No. 7, pp. 930~940.
- [2] H. J. Park, S. M. Hwang, 2017, 3-D Coupled Analysis of Deformation of the Strip and Rolls in Flat Rolling by FEM, Steel Research Int., Vol. 88, No. 12, 1700277.
- [3] Y. Misaka, T. Yoshimoto, 1967, Formulation of Mean Resistance of Deformation of Plain Carbon Steel at Elevated Temperature, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 8, No. 79, pp. 414~422.