

열연 공정 정상상태 판 프로파일 예측 - Part I : 유한요소 해석

이재상¹ · 황상무[#]

Prediction of Steady-state Strip Profile during Hot Rolling - Part I : FEM Analysis

J. S. Lee, S. M. Hwang

(Received December 8, 2015 / Revised January 4, 2016 / Accepted January 18, 2016)

Abstract

Precise prediction and control of the strip profile is crucial for automatic process set-up and operation of a hot strip mill. In the current study, we present the effect of post-deformation on the steady-state strip profile. The process was simulated by a 3-D elastic-plastic finite element (FE) analysis. Comparisons are made between the strip profile measured at the roll exit and the steady-state strip profile. The results raised an issue with regard to the importance of taking into account the effect of post-deformation.

Key Words : Strip Profile, Residual Stresses, Finite Element Method, Hot Strip Rolling, Steady-state, Post-deformation

1. 서 론

근래에 압연 강판의 품질 향상에 대한 수요자의 요구가 높아지고 있다. 판 프로파일은 제품의 품질을 결정하는 중요한 요소이기 때문에 판 프로파일의 정밀한 예측 및 제어를 통하여 제품의 품질 향상을 기대할 수 있다.

기존의 판 프로파일 예측 모델은 판의 입·출측 프로파일 및 압연 공정 변수로부터 각각의 소성변형률과 잔류응력을 예측한다. 그러나 이 모델은 형상 섭동 계수(shape disturbing coefficient), 유전 계수(heredity coefficient) 등 임의의 가정된 계수를 사용함으로써 이용에 한계를 가지며 전방 텐션과 잔류응력을 동일하게 가정하는 문제를 가진다[1, 2].

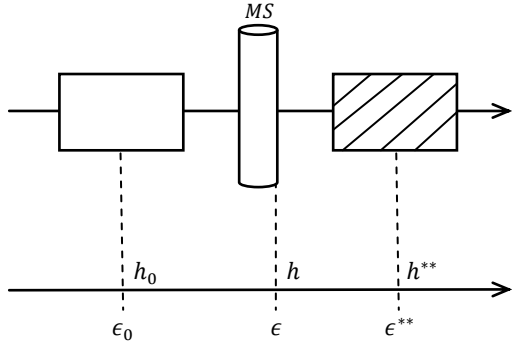
또한, 롤 출측에서의 판 프로파일이 정상상태까지 계속 유지된다고 가정하였기 때문에 롤 출측 판 프

로파일 예측에 중점을 두고 연구가 이루어 졌다. 압연하중에 의한 워크롤의 변형된 형상이 롤 출측 판 프로파일을 결정하기 때문에 워크롤 변형 예측이 주로 연구되었다[3~5]. 위에서 언급된 문제로 인하여 이제까지 개발된 판 프로파일 예측 모델은 제품의 형상을 충분히 반영하지 못하는 한계를 가졌다. 이를 해결해 보기 위해 압연 후 소성변형후 변형(post-deformation)을 반영하고자 한다. 1개의 압연기를 통해서는 큰 차이가 없겠지만 사상 압연은 5~7단의 다단 압연 공정이므로 최종 제품의 판 프로파일 예측 시 상당한 차이를 보일 것이다.

본 논문에서는 정상상태에서의 판 프로파일을 예측해 보고자 하였고, 3-D 탄·소성 유한 요소 해석을 이용하여 압연 후 판이 정상상태에 도달할 때까지 발생하는 소성변형후 변형(post-deformation)이 판에 미치는 영향을 확인하고자 하였다.

1. 포항공과대학교 기계공학과

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



ϵ^{**}, h^{**} : values at steady-state zone of MS
 ϵ, h : values at roll exit of MS
 MS: mill stand

Fig. 1 Representation of thickness and strain at the roll exit and at the steady-state zone

2. 정상상태 판 프로파일 예측

2.1 롤 출측의 변형률 예측

Fig. 1은 압연 시 판의 두께 변화와 변형률 변화를 나타내는 개략도이다. h, ϵ 은 롤 출측에서의 두께와 변형률, h^{**}, ϵ^{**} 는 정상상태 영역에서의 두께와 변형률을 나타낸다.

x 를 폭, y 를 두께, z 를 길이 방향이라고 가정하고 판의 두께방향 변형률 변화를 무시한다면 롤 출측에서의 변형률은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\epsilon_x(x) = \ln \frac{w(x)}{w_0} \quad (1)$$

$$\epsilon_y(x) = \ln \frac{h(x)}{h_0} \quad (2)$$

$$\epsilon_z(x) = \ln \frac{\bar{l}(x)}{\bar{l}_0} \quad (3)$$

2.2 정상상태의 변형률 예측

Fig. 2는 판의 롤 입·출측과 정상상태에서의 길이, 폭, 두께 변화를 나타낸다.

롤 출측에서 정상상태에 도달할 때까지 소성변형 후 변형(post-deformation)이 발생한다고 가정한다면 정상상태에서의 두께방향 변형률은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\epsilon_y^{**}(x) = \ln \frac{h^{**}(x)}{h_0(x)} \quad (4)$$

$h_0(x)$ 는 압연 전 판 프로파일, $h^{**}(x)$ 는 압연 후 정상상태에서의 판 프로파일을 나타낸다.

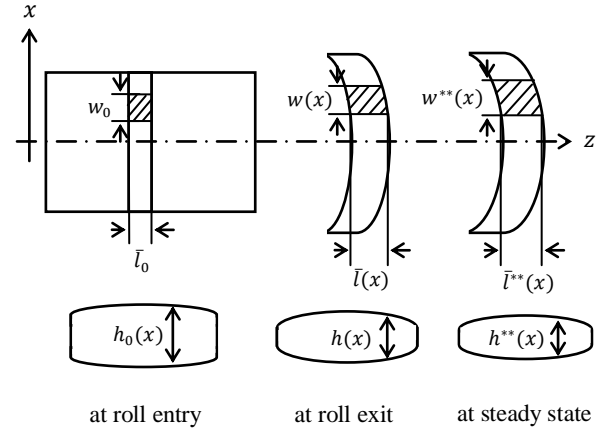


Fig. 2 Representation of thickness, width and length of a small element at the roll exit and at the steady-state zone

전변형률은 탄성변형률과 소성변형률로 구성되어 있으므로 $\epsilon_y^{**}(x)$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\epsilon_y^{**}(x) = \epsilon_y^{e**}(x) + \epsilon_y^{p**}(x) \quad (5)$$

$\epsilon_y^{e**}(x)$ 는 탄성응력-변형률 관계식으로부터 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon_y^{e**}(x) = \frac{1}{E} \{ \sigma_y^{**} - \nu(\sigma_z^{**} + \sigma_x^{**}) \} \quad (6)$$

또한 정상상태에서 $\sigma_x^{**}(x) = \sigma_y^{**}(x) = 0$ 이기 때문에 (6)식은 다음과 같다.

$$\epsilon_y^{e**}(x) = -\frac{\nu}{E} \sigma_z^{**}(x) \quad (7)$$

2.3 정상상태 판 프로파일 예측

정상상태에서의 잔류응력과 두께방향 소성변형률을 알 수 있다면 2.2로부터 $h^{**}(x)$ 를 구할 수 있다. 판의 중심(center) 대비 판 끝 25mm 위치에서의 두께 편차로 정의되는 판 크라운을 이용하여 정상상태 판 프로파일을 식(9)와 같이 정의할 수 있다.

$$h^{**}(x) = h_0(x) \cdot \exp \left\{ -\frac{\nu}{E} \sigma_z^{**}(x) + \epsilon_y^{p**}(x) \right\} \quad (8)$$

$$C_h^{**}(x) = h^{**}(0) - h^{**}(x) \quad (9)$$

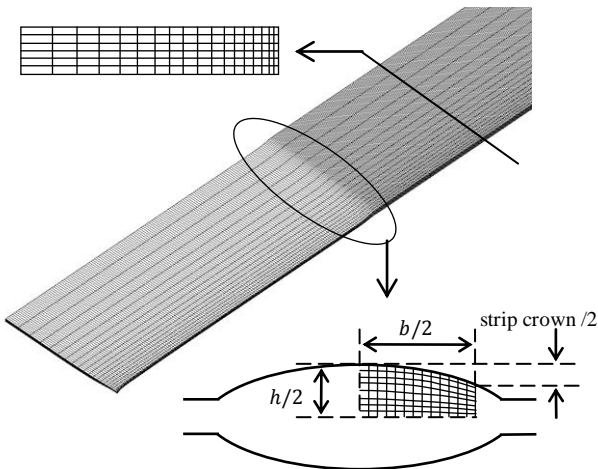


Fig. 3 FE simulation of strip in flat rolling

3. 유한요소 해석

예측 모델의 타당성을 검증하기 위해서는 정상상태에서의 판 프로파일과 잔류응력 및 두께방향 소성변형률을 알아야 하기 때문에 3-D 비정상상태 탄·소성 유한 요소 해석을 이용하여 모델을 검증하고자 하였다.

압연 후 판이 정상상태에 도달할 때까지 판의 변화에 중점을 둔 해석이기 때문에 압연 롤은 강체라고 가정하였고 1개의 롤로 압연하는 유한요소 해석을 수행하였다. Fig. 3은 유한요소 해석 시 사용된 공정 조건 및 해석 결과를 나타낸다. b 는 판 폭, h 는 출측 판 두께, 판 크라운(strip crown)은 롤 출측에서의 크라운(crown)을 나타낸다.

3.1 해석 조건

예측 모델을 검증하기 위해 사용된 해석 조건은 Table 1과 같다. 해석 시 판의 탄성계수(Young's modulus) 100GPa, 포와송 비(Poisson's ratio) 0.37, 항복강도 200MPa을 사용하였다.

마찰 모델은 쿨롬 마찰(coulomb friction)을 사용하였고, 롤과 판 사이의 마찰 계수는 $\mu=0.3$ 을 사용하였다.

3.2 예측 모델 검증

위와 같은 공정 조건에서 유한요소 해석결과 얻어진 정상상태에서의 잔류응력과 판의 두께방향 소성변형률 분포가 Fig. 4,5에 나타나 있다. 해석 결과는 판의 두께방향 평균 값을 나타낸 것이며 두께방향 소성변형률 분포의 경우 중심(center) 대비 위치

Table 1 Simulation conditions

	width [mm]	1000.0
strip	entry thickness [mm]	3.63
	exit thickness [mm]	3.02
strip crown	entry [μm]	0
	roll exit [μm]	30
work roll	diameter [mm]	665.92
	velocity [mpm]	750.0

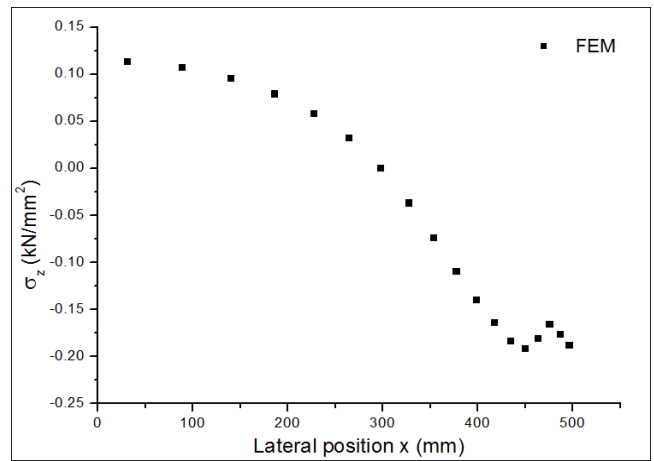


Fig. 4 The residual stress profile appearing in the steady-state zone

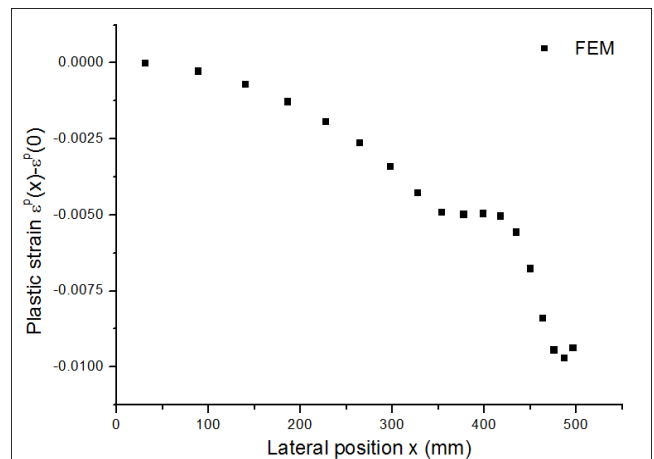


Fig. 5 Thickness plastic strain distribution at the steady-state zone

에서의 차이를 나타낸다.

Fig. 6은 판 프로파일 예측 모델과 유한요소 해석

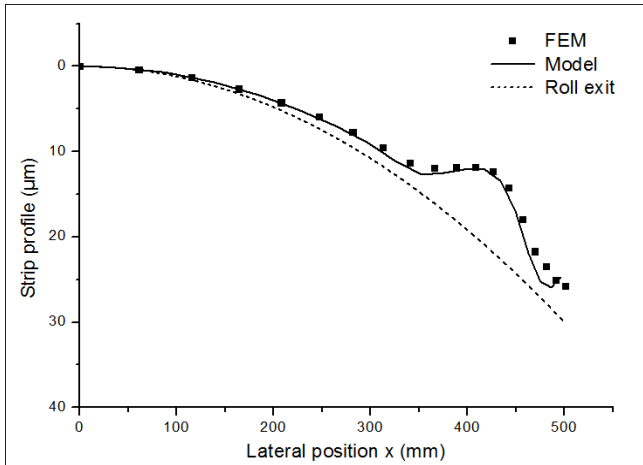


Fig. 6 Predicted strip profile at the roll exit and at the steady-state zone

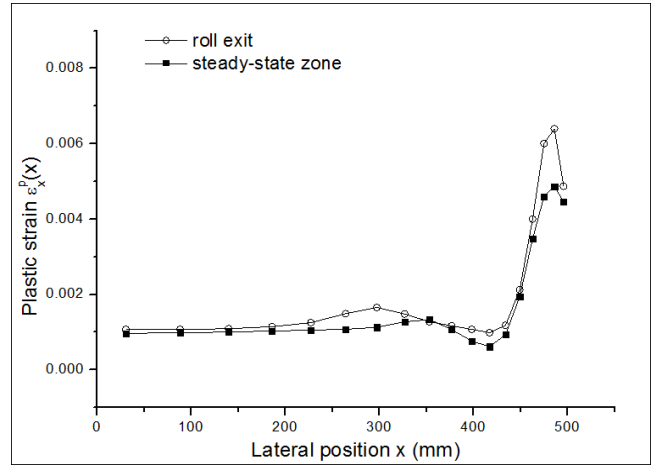
결과를 비교한 것이다. 유한 요소 해석 결과는 정상 상태에서의 판의 두께 프로파일을 표시하였고 판 프로파일 예측 모델을 통해서 Fig. 4.5에서 얻은 잔류응력과 두께방향 소성변형률을 식(8)에 적용하여 얻은 두께 프로파일을 표시하였다. 모델이 수 μm 이하의 오차로 잘 예측하였음을 확인 할 수 있다. 이를 통해 판 프로파일 예측 모델의 타당성을 확인 할 수 있다.

또한 판의 끝 부에서 정상상태 판 프로파일이 롤 출측 프로파일과 상당한 차이를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 이를 통해 롤 출측에서의 판 프로파일이 압연 후 계속 유지된다고 가정하는 것은 타당하지 않으며 판 프로파일을 정밀하게 예측하기 위해서는 소성변형후 변형(post-deformation)을 고려 해야 할 필요가 있음을 보여준다.

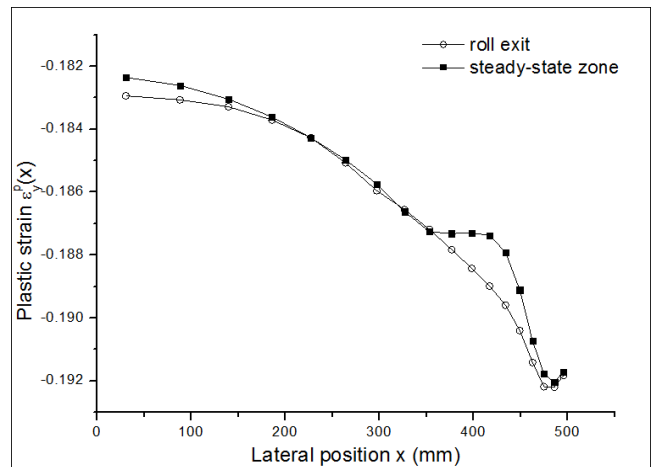
3.3 결과 및 토론

판 프로파일 예측 모델은 롤 출측과 정상상태가 다르다는 것을 전제로 제안된 모델이다. 이것은 판이 롤 출측을 지나 정상상태에 도달할 때까지 소성 변형후 변형(post-deformation)이 발생하여 판 프로파일에 큰 영향을 미쳤다고 보는 것이다.

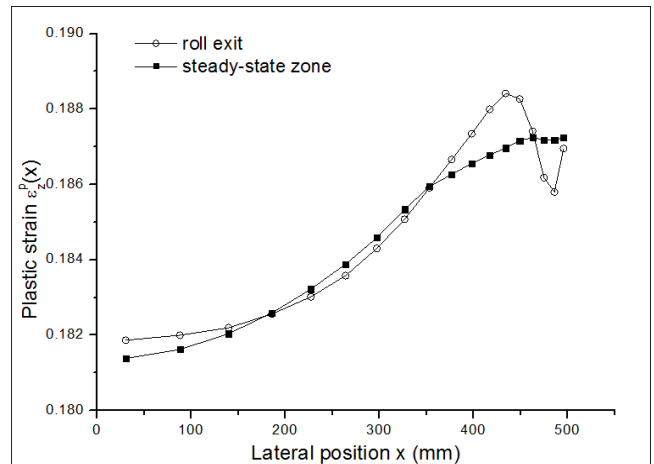
Fig. 7은 유한요소 해석 결과 얻어진 롤 출측에서의 소성변형률과 정상상태에서의 소성변형률을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 7(a)의 결과로부터 판의 끝 부를 제외하고 롤 출측과 정상상태의 폭 방향 소성변형률이 거의 같다는 것을 확인 할 수 있다.



(a) Lateral plastic strain



(b) Thickness plastic strain



(c) Longitudinal plastic strain

Fig. 7 Plastic strain distribution at the roll exit and at the steady-state zone

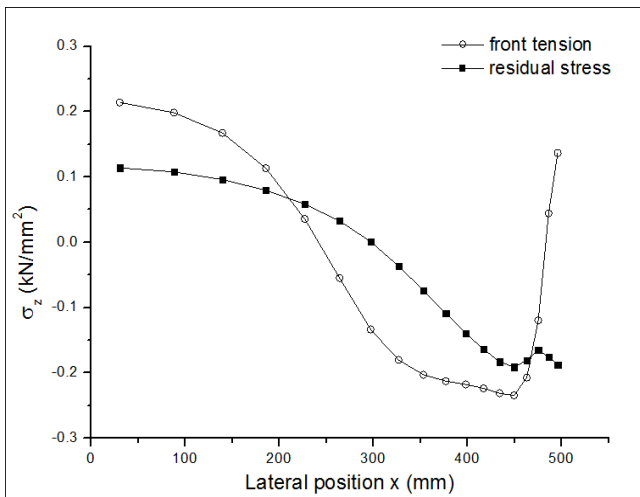


Fig. 8 The stress profile appearing at the roll exit and at the steady-state zone

Fig. 7 (b), (c)의 결과는 400mm이상의 위치에서 소성변형률이 상당히 변화하였음을 보여준다. 판의 끝부분에서 항복강도 이상의 압축응력(compressive stress)에 의해 발생한 소성변형후 항복(post-yielding)이 소성변형률을 감소시킨 것이라고 볼 수 있다.

Fig. 8은 롤 출측에서의 전방 텐션과 정상상태에서의 잔류응력을 비교하여 나타낸 것이다. 소성변형후 변형(post-deformation)의 영향으로 응력 프로파일이 변화 하였음을 확인할 수 있다. 이를 통해 전방 텐션과 잔류응력을 동일하게 가정하는 것은 타당하지 않음을 알 수 있다. 또한 판의 끝 부분에서 응력 프로파일이 인장(tension)에서 압축(compression)으로 크게 변화 하였기 때문에 판 크라운에도 큰 영향을 미칠 것으로 보인다.

4. 결론

본 논문에서는 유한요소 해석을 이용하여 소성변형후 변형(post-deformation)이 판 프로파일에 미치는

영향을 확인하고자 하였다. 잔류응력과 두께방향 소성변형률로부터 정상상태 판 프로파일을 예측할 수 있음을 확인 하였다.

압연 후 소성변형후 변형(post-deformation)의 영향으로 판의 응력 프로파일이 변하며 변화하는 응력 프로파일이 항복강도에 도달할 수 있기 때문에 소성변형후 항복(post-yielding)이 발생할 수 있음을 확인할 수 있었다.

유한요소 해석을 대체하여 소성변형후 변형(post-deformation)의 영향을 예측 할 수 있는 수학적 모델을 개발한다면 압연 공정 설정 및 제어 시 제품의 품질 향상을 위해 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

후 기

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

REFERENCES

- [1] K. Ohe, Y. Morimoto, S. Kajiura, T. ujino, S. Simada, K. Anraku, A. Mizuta, N. Kim, 1994, Proc. 6th Int. Rolling Conf., VDEh, Dusseldorf, pp. 78~85.
- [2] Y. Hori, Y. Mizutani, T. Ogawa, 1994, Proc. 6th Int. Rolling Conf., VDEh, Dusseldorf, pp. 93~100.
- [3] K. N. Shohet, N. A. Townsend, 1968, Roll Bending Methods of Crown Control in Four-high Plate Mill, J. Iron Steel Inst., Vol. 206, No. 11, pp. 1088~1098.
- [4] Y. Tozawa, 1970, Analysis to Obtain the Pressure Distribution from the Contour of Deformed Roll, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 11, pp. 29~37.
- [5] A. Foppl, 1920, Technische Mechanik, 4th ed., B. G. Teubner, Leipzig, Deutschland, Vol. 5, p. 350.