

후판 압연시 선단부 두께편차 보상을 위한 롤갭 설정에 관한 연구

임홍섭¹ · 주병돈¹ · 이건엽¹ · 서재형² · 문영훈[#]

A Study on the Roll Gap Set-up to Compensate Thickness Variation at Top-end in Plate Rolling

H. S. Yim, B. D. Joo, G. Y. Lee, J. H. Seo, Y. H. Moon
(Received February 23, 2009)

Abstract

The roll gap set-up in the finishing mill is one of the most important technologies in the hot plate rolling process. As the target thickness can be obtained by the correct set-up of the roll gap, improving the roll gap set-up technology is very critical for plate thickness accuracy. The main cause of thickness variation in hot plate mills is the non-uniform temperature distribution along the length of the slab. The objective of this study is to adjust the roll gap set-up for the thickness accuracy of plate in hot rolling process considering top-end temperature drop. Therefore this study has concentrated on determining the correct amounts of thickness variation according to top-end temperature drop and roll gap to compensate thickness variation. The control method of roll gap set-up which can improve the thickness accuracy was proposed. The off-line simulation of compensated roll gap significantly decreases top-end thickness variation.

Key Words : Plate Rolling, FEM, Roll Gap Set-up, Mill Modulus, Top-end Roll Gap

1. 서론

일반적으로 후판 압연 공정에 있어 두께품질에 영향을 미치는 소재 요인으로 강종과 소재의 온도분포, 슬라브의 두께, 가열 이력 등을 들 수 있다. 이러한 요인 중 소재의 온도는 압연 시 소재의 변형거동에 직접적인 영향을 미치므로 열간 압연 시 제품의 두께 품질을 결정하는 매우 중요한 요소로 작용한다. 조압연 공정을 포함한 각 스탠드의 압연 공정을 거치는 동안 슬라브의 이송과정 중에 발생하는 열진달 및 방출, 소재의 소성 변형에 의한 변형열, 롤에 의한 손실열등에 의해 슬라브의 선단부(top end)에서는 슬라브의 길이 방향으로 온도 불균형이 발생하게 되는데 선단부는

정상부에 비하여 상대적으로 낮은 온도 분포를 나타내게 된다[1~4]. 이와 같은 선단부의 온도 저하는 압연 공정 시 소재의 온도에 따른 변형저항의 차이로 인하여 온도가 높은 정상부에 비하여 상대적으로 압연시 슬라브의 두께가 두꺼워지는 결과를 초래하므로 두께품질의 저하로 인한 소재의 회수율 및 제품의 생산성을 떨어뜨린다. 압연시 원하는 목표두께로 제품을 생산하기 위하여 롤갭(roll gap)의 설정은 제품의 두께품질을 결정하는 가장 중요한 요소 중 하나이다[5~8]. 사상 압연 공정에서의 정확한 롤갭 설정을 통하여 목표두께로의 제품생산이 가능하므로 매년 생산되는 압연 제품의 막대한 양과 다양성을 고려해 볼 때 선단부에서의 두께 품질의 개선문제는 매우 중요한

1. 부산대학교 기계공학부 / 정밀정형 및 금형가공연구센터
2. POSCO 기술연구소
교신저자: 부산대학교 기계공학부, yhmoon@pusan.ac.kr

사항이다. 따라서 본 연구에서는 압연 공정 중 발생하는 슬라브 선단부에서의 온도편차에 따른 두께변화를 유한요소해석을 통하여 분석하고 이를 바탕으로 선단부에서의 롤갭 보상 설정 방안을 제시하였다.

2. 연구내용 및 해석방법

2.1 압연 해석모델의 개발

소재 내의 온도분포와 공정변수에 따른 두께변화 분석을 위하여 후판 압연 공정의 FE 해석 모델을 개발하였다. FE 해석은 강, 소성 상용 유한요소 코드인 MARC를 이용하여 실제 압연 공정을 Fig. 1과 같이 모델링 하였다. 슬라브는 선단부에서의 국부적인 변형해석을 위하여 정상부에 비해 조밀한 구조를 가지도록 4절점 요소를 사용하여 설계하였으며 초기 슬라브의 롤 바이트(roll bite) 진입 시 롤과의 충격과 롤의 탄성변형, 압연기의 밀 정수(mill modulus)의 적용을 고려하여 상하부 워크 롤에 밀 정수에 상당하는 탄성계수를 가지는 스프링을 적용하여 모델링 하였다.

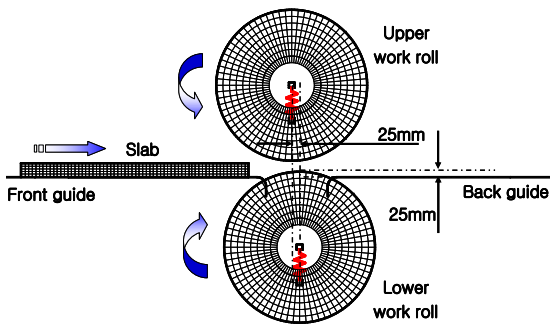


Fig. 1 FE analysis model

해석모델의 구속조건으로는 상하 워크롤(work-roll)을 구성하는 내부 강체 롤과 외부 탄성 롤은 마찰 없이 결합되어 각 워크롤의 원점을 중심으로 슬라브의 유입속도와 동일한 속도로 회전한다. 또한 상하 워크롤은 25mm의 오프센터(off-center)를 유지하며, 압연 반력에 의한 워크롤 및 압연기의 탄성변형을 고려하여 압연 방향으로 고정되어 있다. 가이드 롤의 경우 Fig. 1과 같이 프론트(front) 및 백 가이드(back guide)로 단순화하였으며 패스라인의 25mm처짐을 유도하여 설계하였고 초기 롤갭 설정을 위한 압하율은 각각의 초기 슬라

Table 1 Rolling condition

Thickness (mm)	20, 40, 60, 80
Width (mm)	3000
Mill modulus (ton/mm)	720

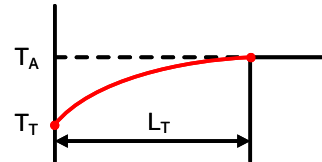


Fig. 2 Temperature distribution of top-end

Table 2 Average temperature and top-end distance according to slab thickness

Plate-thickness (mm)	80	60	40	20
Average temperature (TA, °C)	1090	1080	1070	1030
Top-end distance (TT, mm)	1400	1300	1200	1100

브의 두께에 대하여 일괄적으로 20%를 적용하여 해석을 실시하였다.

Table 1에 나타낸 것과 같이 해석에 적용된 공정 변수는 조압연 단계를 거쳐 롤 바이트 진입 전 슬라브의 두께와 판 폭, 압연 롤의 밀 정수 등이 고려되었다.

Fig. 2에 선단부에서의 온도분포를 나타내었으며 정상부에 비해 온도가 낮은 선단부 구간의 길이(LT)와 정상부의 평균온도(TA)는 초기 슬라브의 두께 별로 Table 2에 나타내었다. 또한 정상부의 평균 온도로부터 선단부의 온도(TT)가 10~100℃가 낮은 것으로 가정하여 이에 따른 슬라브의 두께 변화 분석을 수행하여 온도 편차 별 선단부의 롤갭 보상량을 분석하였다.

2.2 온도편차에 따른 선단부 두께편차 및 롤갭 보상량 분석

압연 공정 중 압연 반력은 롤과 압연기에 전해져서 지지된다. 이때 각 부분은 탄성변형으로 조금씩 늘어나게 되어 결과적으로 롤 간의 간격이 벌어지며 아래 게이지 메터식(gaugemeter-equation)인 (1)로 표현되고 Fig. 3 과 같은 다이어그램으로 나타난다[8].

$$P = M(h-S) \quad (1)$$

P : 압연 반력
 M : 압연기의 밀 정수
 h : 출측 판두께
 S : 초기 설정 롤갭

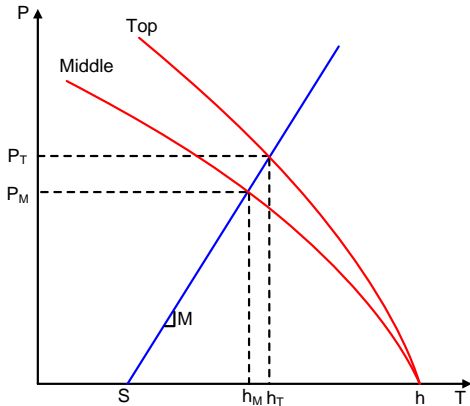


Fig. 3 Gaugemeter diagram for rolling

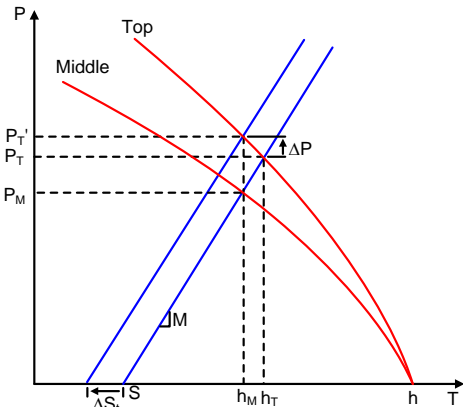


Fig. 4 Top-end roll gap set-up according to temperature drop

Fig. 3 으로부터 온도가 낮은 선단부의 경우 소재의 변형저항이 커지므로 정상부에 비하여 소재의 소성곡선의 기울기가 더욱 크게 나타난다. 따라서 압연기의 탄성곡선과 소재의 소성곡선의 교점이 변화하게 되므로 정상부에 비하여 온도가 낮은 선단부에서 두께(h_T)가 정상부에서의 두께(h_M) 보다 두꺼워지는 결과를 나타내게 된다. 이러한 문제로 인하여 제품의 선단부 두께품질의 저하가 발생하는데 온도편차에 의한 두께 변화를 Fig. 4 과 같이 롤갭을 ΔS_1 만큼 줄여줌으로써 보상할 수 있다.

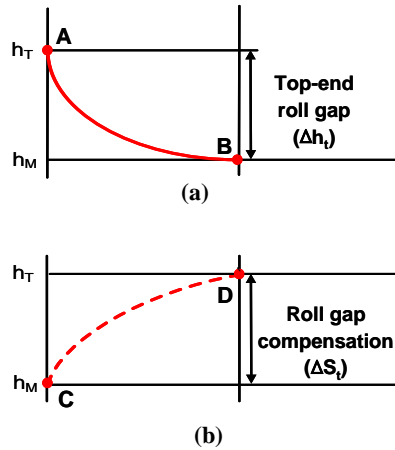


Fig. 5 (a) Thickness distribution of top-end (b) Method of roll-gap compensation

FE해석을 수행하여 h_T 와 h_M 에서의 두께를 각각 구하고 $h_T - h_M$ 를 Δh_1 라 할 때 Δh_1 값으로 롤갭 보상을 수행하여 분석된 두께와 실제 보상해야 할 두께의 비례식으로부터 ΔS_1 의 근사값을 구할 수 있으며 이를 선단부 롤갭 보상량(ΔS_1)으로 표현하였다. 이 같은 방법으로 초기 슬라브의 두께 별로 측정된 조업 데이터의 평균온도를 정상부의 온도로 가정하고 선단부의 온도 편차에 따라 FE 해석을 수행하여 온도편차 별 각각의 h_T 와 h_M 의 값을 구하여 선단부 롤갭 보상량을 분석하였다.

2.3 선단부 롤갭 보상 설정을 통한 두께 편차 보상 방안(1)

Fig. 2와 같이 선단부의 온도는 선형적으로 증가하여 정상부에 도달하기 때문에 선단부에서의 두께분포는 Fig. 5와 같이 점차적으로 감소하여 정상부 두께로 나타난다. 이러한 선단부 두께분포를 보상하기 위하여 ‘2.2’ 절의 방법에 의하여 분석된 온도 편차별 선단부 롤갭 보상량을 선단부 길이 구간에 대하여 보상을 실시하였다.

이때 선단부로부터 정상부에 가까워질수록 슬라브의 온도편차는 점차적으로 줄어들게 되므로 롤갭 보상량이 점차 작아지게 된다. 따라서 초기 온도 편차가 가장 크게 나타나는 최선단부에서 설정되는 롤갭의 양이 정상부로 갈수록 점차 줄어들어 정상부에 도달할 경우 롤갭 보상의 양이 ‘0’으로 복귀하도록 설정되어야 한다. 즉 초기 설정 롤갭으로부터 Fig. 5와 같이 롤갭을 복귀하도록 설정하여 선단부 길이 구간에 대한 두께 편차

를 정상부의 두께로 보상할 수 있다. 따라서 초기 설정되는 선단부 롤갭 보상량에 대한 각 온도 편차 별 롤갭 보상 복귀량을 산출하여 해석 모델에 적용함으로써 선단부 길이에 대한 두께 보상을 실시하였다.

2.4 선단부 롤갭 보상 설정을 통한 두께 편차 보상 방안(2)

선단부 롤갭 보상을 선단부 길이 구간에 대하여 일괄적으로 적용하여 두께편차를 줄이기 위한 방안으로 Fig. 6과 같이 분석된 선단부 롤갭보상량을 요구되는 제품의 두께 치수 공차 또는 임의의 범위내로 적절히 조절하여 적용함으로써 선단부의 두께편차를 줄일 수 있다. 이때 선단부 길이 구간에 대하여 동일한 롤갭 보상량을 적용하더라도 소재의 온도가 정상부로 갈수록 점차 높아지기 때문에 롤갭 보상에 따른 두께감소량이 점차 증가하게 된다. 따라서 Fig. 6과 같이 정상부에 가까워질수록 두께 치수 공차 범위를 벗어나게 되고 정상부에 도달할 경우 α 만큼의 두께오차가 발생하게 된다. 따라서 E와 같이 롤갭 보상범위를 줄여주고 롤갭 보상을 복귀시킴으로써 두께편차를 줄일 수 있다.

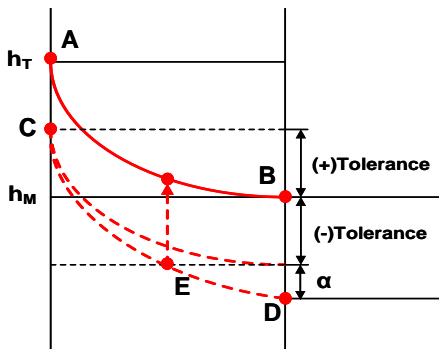


Fig. 6 Roll gap compensation considering tolerance

3. FE 해석 결과

3.1 온도편차에 따른 선단부 두께편차 및 롤갭 보상량 분석

동일한 공정 조건에서 초기 슬라브의 두께에 따라 선단부와 정상부의 온도편차 구간을 10℃구간으로 나누어 온도편차 구간에 따른 선단부 두께 편차와 롤갭 보상량의 변화를 분석하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그 결과 정상부의

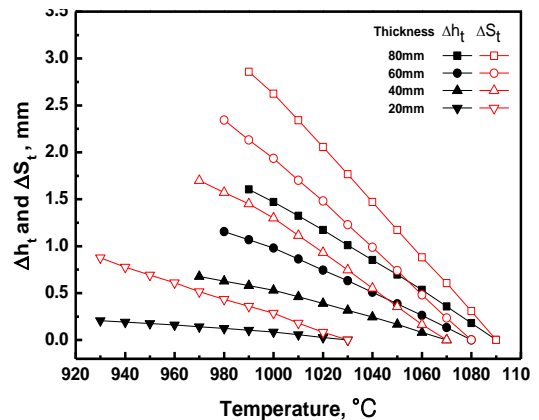


Fig. 7 Thickness and roll gap variation according to temperature

온도로부터 선단부의 온도차가 커질수록 선단부 두께편차량이 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 온도 편차가 커질수록 소재의 변형저항이 증가하므로 Fig. 4의 다이아그램으로부터 소재의 소성곡선 기울기가 더욱 커져 출측 두께(h_T)가 점차 두꺼워지기 때문이다.

또한 초기 슬라브의 두께가 커질수록 두께편차량과 두께 편차의 증가율이 점차 커지는 것으로 나타났다. 롤갭 보상량의 경우 초기 슬라브의 두께가 두꺼워짐에 따라 롤갭 보상량이 커지고 그 증가율이 커지는 것으로 나타났으나 두께편차량에 대한 상대적인 롤갭 보상량의 증가율은 감소하는 것으로 나타났다.

이 같은 결과로부터 선단부 롤갭 보상 설정에 있어 초기 슬라브의 두께와 선단부와 정상부의 온도 편차가 선단부 롤갭 보상량을 결정하는 가장 중요한 변수임을 알 수 있다.

3.2 선단부 롤갭 보상 설정을 통한 선단부 두께 편차 보상(1)

‘2.3’절에 소개된 방법에 의하여 선단부 길이 구간에 대하여 슬라브의 온도편차 별 롤갭 보상량과 롤갭 보상 복귀량을 산출하여 유한요소해석을 수행한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

그 결과 선단부 롤갭 보상 전 선단부 길이구간에서 온도 저하에 의하여 발생한 두께편차를 선단부 롤갭 보상 설정과 정상부 구간까지의 롤갭 복귀 설정을 수행함으로써 정상부의 두께와 근사하게 보상할 수 있음을 확인하였다.

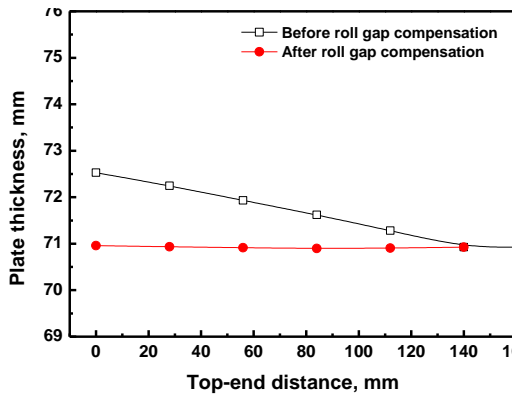


Fig. 8 Thickness distribution according to roll gap compensation

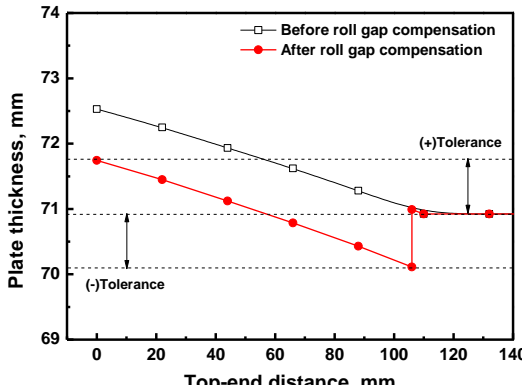


Fig. 9 Thickness distribution after roll gap compensation

3.2 선단부 롤갭 보상 설정을 통한 선단부 두께 편차 보상(2)

선단부 두께 편차를 보상하기 위한 또 다른 방안으로 제시된 ‘2.4’절의 일괄적 롤갭 보상 방안을 두께공차의 범위를 선단부의 최대 두께편차의 1/2로 설정하여 선단부 길이에 대하여 실시하였으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

그 결과 Fig. 9에 나타난 것과 같이 압연 후 선단부의 두께 분포가 설정한 두께 치수 공차 범위 내로 나타남을 알 수 있다. 또한 정상부에 가까워질 경우 온도 상승으로 인한 두께감소량이 더욱 크게 나타나므로 정상부 온도에 도달하기 전 두께분포가 (-) 공차범위를 벗어나는 것으로 나타났다. 따라서 롤갭 보상을 두께 치수 공차범위를 벗어나기 전 복귀시킴으로써 선단부의 두께를 설정된 치수 공차 범위로 만족 시켜 두께편차를 줄일 수 있음을 확인 하였다.

4. 결론

본 연구에서는 후관 압연 시 슬라브 선단부에서의 국부적인 온도편차가 후관의 두께 품질에 미치는 영향을 분석하고 그에 따른 롤갭 보상의 설정 방안을 연구하였다. 이를 위하여 슬라브의 온도 편차에 따른 후관 압연 공정의 FE 해석 모델을 개발하고 유한요소해석을 수행한 결과 다음과 같으며 이를 바탕으로 후관 압연시의 두께품질 향상을 위한 롤갭 보상 설정 방안을 제시하였다.

(1) 슬라브 선단부의 온도편차에 따른 선단부 롤갭 보상 설정을 분석한 결과 슬라브의 두께가 두껍고 온도편차가 클수록 선단부의 두께 편차량은 증가하였으며 선단부 롤갭 보상량 또한 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 각 두께별 두께편차를 보상하기 위한 롤갭 보상량의 상대적인 증가율은 두께가 두꺼울수록 감소하는 것으로 나타났다.

(2) 초기 슬라브의 두께와 온도편차에 따른 선단부 롤갭 보상 설정 후 선단부 길이에 대하여 롤갭 복귀 설정을 수행함으로써 선단부의 두께편차를 상당량 안정화 할 수 있음을 확인하였다.

(3) 선단부 길이에 대하여 일괄적으로 동일한 롤갭 보상량을 설정하여 보상을 실시하고 정상부 온도에 도달하기 전 두께 치수 공차를 벗어나기 전 롤갭 보상을 복귀 시킴으로써 설정한 두께 치수 공차범위내로 두께편차를 줄일 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구 센터사업의 연구비 일부 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] V. Panjkovic, 2007, Model for prediction of strip temperature in hot strip still mill, Applied Thermal Engineering, Vol. 27, pp. 2404~2414.
 [2] S. Serajzadeh, A. K. Taheri, F. Mucciardi, 2002, Prediction of temperature distribution in the hot rolling of slabs, Modeling and Simulation In Materials Science and Engineering, Vol. 10, pp. 185~203.
 [3] S. M. Hwang, C. G. Sun, S. R. Ryoo, W. J. Kwak,

- 2002, An integrated FE process model for precision analysis of thermo-mechanical behaviors of rolls and strip in hot strip rolling, *Computer Methods in Allied Mechanics and Engineering*, Vol. 191, pp. 4015~4033.
- [4] V. B. Ginzburg, *High-Quality Steel Rolling Theory and Practice*, Marcel Dekker, 1993.
- [5] Y. H. Moon, J. J. Yi, 1997, Improvement of roll-gap set-up accuracy using a modified mill stiffness from gaugemeter diagrams, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 70, pp. 194~197.
- [6] Y. M. Hwang, H. H. Hsu, 1999, An investigation into the plastic deformation behavior at the roll gap during plate rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 88, pp. 97~104.
- [7] J. H. Song, D. Y. Kim, J. J. Park, 1997, Prediction of rolling force for hot rolling by finite element method, *Proceeding of The Korean Society Mechanical Engineers 1997 Spring Annual Meeting*, pp. 583~587.
- [8] W. L. Roberts, *Flat processing of steel*, Marcel Dekker, 1988.