

후판 압연 시 공정변수 및 선단부의 온도저하가 두께편차에 미치는 영향

임홍섭* · 주병돈* · 이해경* · 서재형** · 문영훈†

*부산대학교 기계공학부/정밀정형 및 금형기공연구센터†, **POSCO 기술연구소

The Effect on the Thickness Variation According to Rolling Condition and Temperature Drop At Top-end in Plate Rolling

H. S. Yim*, B. D. Joo*, H. K. Lee*, J. H. Seo**, Y. H. Moon†

*Dept. of Mechanical Engineering/ Engineering Research Center for Net Shape and Die Manufacturing, Pusan national university, Busan 609-735, Korea†

**Technical Research Laboratories, POSCO, Pohang-city, Gyungbuk 790-785, Korea

Abstract The rolling process is an efficient and economical approach for the manufacturing of plate metals. In the rolling process, the temperature variation 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. Also the exit plate thickness is mainly affected by the rolling conditions such as mill modulus, plate thickness and plate width. Hence the thickness variation in top-end is also dependent on these factors. Therefore this study has concentrated on determining the correct amounts of thickness variation due to top-end temperature drop and process parameters.

(Received December 23, 2008; Accepted December 31, 2008)

Key word: Plate rolling, Temperature drop, Roll gap set-up, Thickness variation.

1. 서 론

후판 압연 제품의 치수 요구 조건 중 두께품질은 갈수록 엄격해 지고 있는 실정이므로 두께품질 요구 조건을 충족시키기 위한 두께편차의 제어는 매우 중요하다. 후판 압연 시 소재의 선단부는 열 전달 및 방출, 소재의 소성변형에 의한 변형 열, 롤에 의한 열 손실 등으로 인하여 국부적인 온도 저하가 발생하게 된다. 압연 시 소재의 온도 변화는 소재의 소성변형에 직결되는 요소이므로 선단부의 온도 저하는 두께품질의 저하를 수반하게 된다[1-4]. 뿐만 아니라 압연기의 밀 정수와 초기 소재의 판 두께 및 판 폭 등과 같은 공정변수는 사상압연 후 출측 판 두께에 영향을 미치므로 제품의 두께 품질을 결정하는 요소로 작용한다. 이와 같은 요인들은 후판 압연 시 제품의 실수율 및 생산성에 크게 영향을 미치므로 제품의 두께 품질 및 생산성을 향상시키기 위하여 두께편차를

최소화 하는 것이 중요하다[5-9]. 따라서 본 연구에서는 후판 압연 시 공정변수 및 선단부에서의 국부적인 온도 저하가 선단부 두께편차에 미치는 영향을 분석하고자 후판 압연 공정의 FE해석 모델을 개발하고 유한요소해석을 수행하였다. 개발된 FE해석 모델을 이용하여 선단부 온도 저하에 따른 선단부 두께편차를 정량적으로 분석하였으며 각 공정변수가 선단부 두께편차에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 분석된 두께편차를 보상하기 위한 롤갭의 설정값과 롤갭 설정 시 선단부 두께의 변화거동을 분석하였다.

2. 연구내용 및 해석 방법

2.1 후판 압연 공정 해석모델

후판 압연 시 슬라브의 선단부 온도편차에 따른 압연 후 슬라브의 두께 변화 분석을 위하여 후판 압연 공정을 Fig. 1과 같이 모델링하고 상용 유한요

†E-mail : yhmoon@pusan.ac.kr

Table 1. Chemical composition of slab

Material	SM45C				
Component	C	Si	Mn	P	S
Wt%	0.42~0.48	0.15~0.35	0.6~0.9	≤0.03	≤0.035

Table 2. Mechanical properties

Material	Tensile test			Hardness test
SM45C	Yield Strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (HB)
	≥ 35	≥ 48	≥ 20	167~229

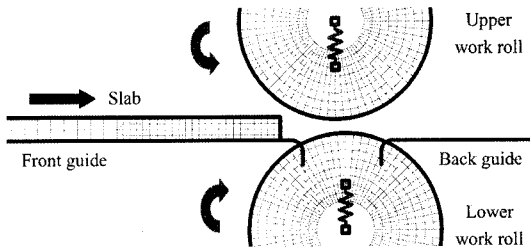


Fig. 1. FE analysis model.

소해석 코드인 MARC를 이용하여 FE 해석을 실시하였다. 후관 압연 해석에 사용된 슬라브는 기계구조용 탄소강인 SM45C가 사용되었으며 그 화학조성과 기계적 특성을 Table 1-2에 나타내었다. 본 연구에서는 선단부 온도편차에 따른 국부적인 변형해석을 실시하고자 각 슬라브의 두께 별 선단부의 길이 구간에 대하여 조밀하게 4절점 요소를 사용하여 모델을 설계하였다. 또한 초기 슬라브의 롤 바이트(roll bite) 진입 시 롤과의 충격과 롤의 탄성변형, 압연기의 밀 정수(mill modulus)의 영향을 FE 해석에 반영하기 위하여 Fig. 1에 나타나듯이 상하부 워크롤(work-roll)에 밀 정수에 해당하는 탄성계수를 가지는 스프링을 적용하였다.

FE 해석의 간소화를 위하여 상하 워크롤을 내부 강체 롤과 외부 탄성 롤으로 마찰 없이 결합하여 설계하였다. 해석 모델의 구속조건으로 상하 워크롤은 25 mm의 오프센터(off-center)를 유지하고 슬라브의 유입속도와 동일한 속도로 회전하며 압연 반력에 의한 워크롤 및 압연기의 탄성변형을 고려하여 압연 방향으로 고정되어 있다. 또한 가이드 롤의 경우 Fig. 1과 같이 프론트(front) 및 백 가이드(back guide)로 단순화하였으며 슬라브와의 마찰은 무시하였고 패스라인의 25 mm 처짐을 유도하여 설계하였

Table 3. Rolling condition

Thickness (mm)	20, 40, 60, 80
Width (mm)	1500, 3000, 4200
Mill modulus (ton/mm)	640, 720, 780

Table 4. Average temperature and top-end distance according to slab thickness

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

다. Table 3에 압연 공정시의 공정변수를 나타내었다. 초기 롤갭 설정을 위한 압하율은 각각의 초기 슬라브의 두께에 대하여 일괄적으로 20%를 적용하였으며 밀 정수와 판폭, 초기 슬라브의 두께에 대하여 온도 편차에 대한 두께변화 해석을 실시하였다.

슬라브의 평균온도와 선단부의 길이는 Table 4에 나타난 것과 같이 두께 별로 측정된 조업 데이터로부터 정상부의 평균온도와 선단부의 길이를 산출하였으며 산출된 정상부의 평균 온도로부터 선단부의 온도가 10~100°C 낮은 것으로 가정하였다. 이를 바탕으로 각 온도 편차에 따른 선단부와 정상부의 두께변화를 분석하였다.

2.2 공정 변수에 따른 선단부 두께편차 분석

개발된 FE 해석모델을 이용하여 슬라브의 판 폭과 판 두께, 밀정수가 압연 시 온도 편차를 가지는 선단부의 두께 변화에 미치는 영향을 분석하고자 Table 3에 나타난 것과 같은 압연조건에서 FE 해석을 수행하였다. 각 공정변수 별 선단부와 정상부에서의 슬라브 두께 변화를 각각 분석하고 이를 바탕으로 각 공정변수가 두께 편차에 미치는 영향을 분석하였다.

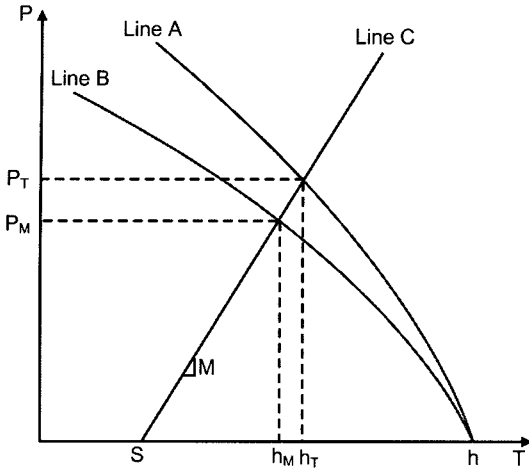


Fig. 2. Gaugemeter diagram for rolling.

이때 슬라브 선단부의 온도는 Table 4에 나타난 슬라브의 두께 별 정상부의 평균온도보다 100°C 낮은 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

2.3 온도편차에 따른 선단부 두께편차 분석

압연 공정 시 소재의 온도는 소재의 변형저항에 영향을 미치므로 압연 후 소재의 두께에 직접적인 영향을 끼치게 된다. 압연 시 압연 반력은 롤과 압연기에 전해져서 지지되는데 이때 각 부분은 압연 반력으로 인한 탄성변형으로 조금씩 늘어나 롤 간의 간격이 설정된 초기 롤갭보다 더욱 벌어지게 된다. 이때 압연 시 압연 반력과 압연기의 밀 정수, 소재의 두께 및 롤갭은 게이지 메터식(gaugemeter-equation)인 (1)로 표현되고 Fig. 2와 같은 다이어그램으로 나타난다.

$$P = M(h - S) \tag{1}$$

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

소재의 온도가 낮을 경우 소재의 변형저항이 커지므로 Fig. 2의 다이어그램에서 Line A와 같이 소재의 소성곡선의 기울기가 크게 나타나고 소재의 온도가 높을 경우 Line B와 같이 소재의 소성곡선의 기울기가 상대적으로 작게 나타난다. 소재의 출측 두

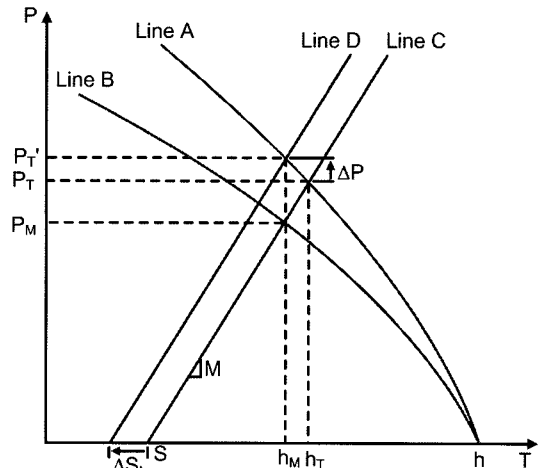


Fig. 3. Top-end roll gap set-up.

께는 Fig. 2의 다이어그램으로부터 압연기의 탄성곡선인 Line C와 소재의 소성곡선의 교점에 의해 결정되므로 소재의 온도가 낮은 선단부에서의 출측 두께(h_T)가 정상부에서의 출측 두께(h_M) 보다 상대적으로 두꺼워지게 된다. 따라서 초기 슬라브의 두께 별 선단부에서 발생하는 온도편차의 정도에 따른 두께편차를 분석하기 위하여 Fig. 2의 h_T 와 h_M 에서의 출측 두께를 각각 FE 해석을 수행하여 $h_T - h_M$ 을 구함으로써 온도 편차의 정도에 따른 두께편차를 분석하였다.

2.4 온도편차에 따른 선단부 롤갭 보상량 및 두께 변화거동 특성분석

초기 슬라브의 두께와 온도 편차 구간별로 분석된 선단부의 두께 편차는 Fig. 3의 Line D와 같이 롤갭을 ΔS_t 만큼 줄여줌으로써 보상할 수 있다. 이때 보상하는 롤갭 ΔS_t 는 식 (2)와 같은 온도변화에 따른 소재의 변형저항 계수(K_t)에 의해 결정되므로 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$K_t = f(\Delta T) \tag{2}$$

$$\Delta S_t = (h_T - h_M) / (1 - K_t) \tag{3}$$

이때 $h_T - h_M$ 를 Δh_t 라 하면 초기 온도 편차에 따른 Δh_t 의 값으로 롤갭 보상을 수행한 후의 두께와 실제 보상되어야 할 두께의 비례식으로부터 ΔS_t 의 근사값을 구할 수 있으며 이로부터 온도에 따른 소재

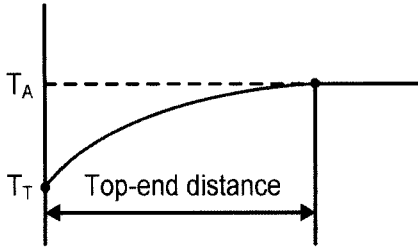


Fig. 4. Temperature distribution at top-end.

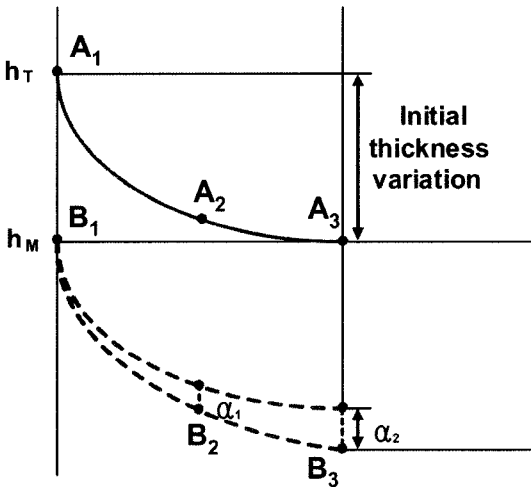


Fig. 5. Thickness distribution after top-end roll gap set-up.

의 변형저항 계수 K_t 를 구할 수 있다. 이러한 선단부의 두께 편차를 줄이기 위하여 설정되는 롤갭의 보상값을 선단부 롤갭 설정값(ΔS_t)으로 표현하였다.

선단부의 온도 분포는 Fig. 4와 같이 온도가 선형적으로 증가하여 정상부 온도(T_A)에 도달하게 된다. 이는 연속 압연 시 소재의 변형저항 계수 K_t 가 정상부로 갈수록 작아지게 됨을 의미하므로 두께편차를 보상하기 위하여 분석한 선단부 롤갭 설정값 ΔS_t 를 온도 편차가 발생하는 선단부 길이구간에 대하여 보상할 경우 정상부에서의 두께 변화량이 더욱 크게 나타나게 된다. 따라서 정상부에서 Fig. 5의 α_2 만큼 두께가 더욱 감소하게 된다. 이때 롤갭의 설정값과 소재의 변형저항 계수, 압연 후 두께변화는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta S &= (h_{A1} - h_{B1}) / (1 - K_{A1}) \\ &= (h_{A2} - h_{B2}) / (1 - K_{A2}) \\ &= (h_{A3} - h_{B3}) / (1 - K_{A3}) \end{aligned} \quad (4)$$

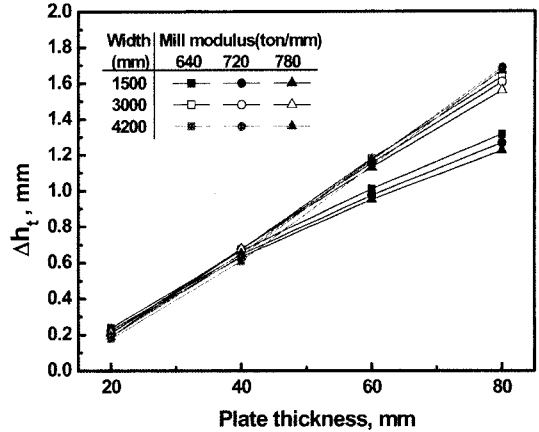


Fig. 6. Thickness variation at top-end according to plate thickness.

식 (4)로부터 식 (5)와 식 (6)을 유도할 수 있으며 Fig. 5에 나타난 것과 같이 선단부 길이구간에 대하여 분석된 롤갭의 설정 시 동일한 변형저항 계수를 가질 때의 슬라브의 두께분포와 온도 변화에 따라 소재의 변형저항 계수가 감소할 때의 슬라브의 두께 변화를 FE 해석을 수행하여 구함으로써 각각 α_1 , α_2 를 구할 수 있다. 따라서 식 (4)~(6)을 통하여 K_{A2} , K_{A3} 를 구하고 온도 편차에 따라 발생하는 정상부의 두께 증가량(α)의 변화를 분석하였다.

$$\begin{aligned} (h_{A1} - h_{B1}) - (h_{A2} - h_{B2}) &= (K_{A2} - K_{A1}) \cdot \Delta S \\ \alpha_1 &= (K_{A2} - K_{A1}) \cdot \Delta S \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} (h_{A1} - h_{B1}) - (h_{A3} - h_{B3}) &= (K_{A3} - K_{A1}) \cdot \Delta S \\ \alpha_2 &= (K_{A3} - K_{A1}) \cdot \Delta S \end{aligned} \quad (6)$$

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 공정 변수에 따른 선단부의 두께 변화

초기 롤갭을 각각의 슬라브 초기 판 두께에 대하여 동일하게 20%의 압하율을 적용하여 선단부의 두께편차를 분석한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그 결과 슬라브의 초기 두께가 20 mm에서 80 mm로 점차 두꺼워 짐에 따라 선단부의 두께 편차가 점차 커지는 것으로 나타났다.

또한 판 폭이 선단부의 두께편차에 미치는 영향의 경우 Fig. 7에 나타난 것과 같이 초기 슬라브의 두께가 20 mm와 40 mm일 때와 같이 슬라브의 두께

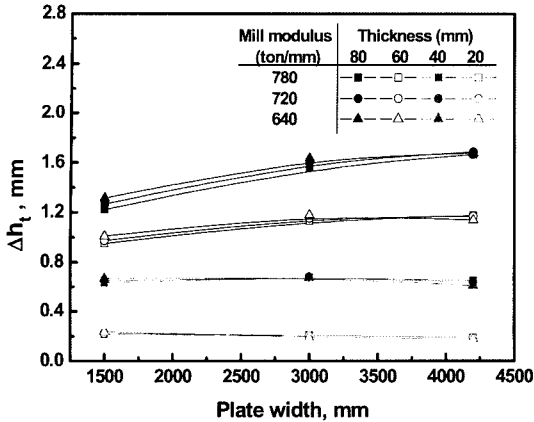


Fig. 7. Thickness variation at top-end according to plate width.

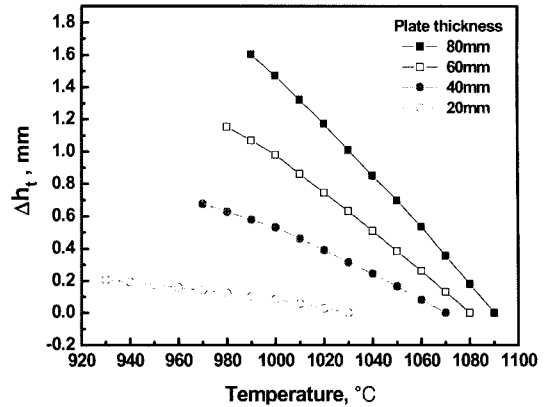


Fig. 9. Thickness variation at top-end according to temperature.

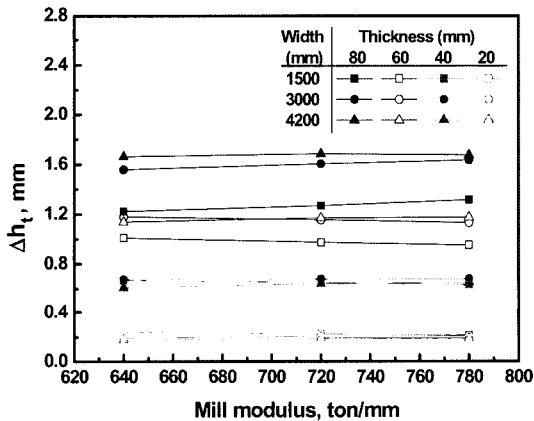


Fig. 8. Thickness variation at top-end according to mill modulus.

가 비교적 얇은 경우 판 폭이 1500 mm, 3000 mm, 4200 mm로 변화하더라도 선단부의 두께편차에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 슬라브의 두께가 60 mm와 80 mm일 때와 같이 두꺼워질 경우 판 폭이 증가하면 선단부의 두께 편차가 커지는 것으로 나타났으며 특히 80 mm의 경우 판 폭의 증가가 두께편차에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

식 (1)에서 알 수 있듯이 밀 정수는 슬라브의 두께변동에 직접적인 영향을 미치는 중요한 변수이다. Fig. 3으로부터 밀 정수가 커질 경우 압연기의 탄성 곡선의 기울기가 더욱 커지게 되므로 소재의 소성곡선과의 교점이 변화하게 된다. 따라서 압연 시 소재에 더 높은 압연하중이 작용하게 되므로 압연 후 소재의 출측 두께가 줄어들게 된다. 이러한 슬라브의

출측 두께 변화로부터 밀 정수의 변화에 따른 선단부 두께편차의 변화를 Fig. 8에 나타내었다.

그 결과 슬라브의 두께가 20 mm와 40 mm일 경우 밀 정수의 변화가 선단부 두께편차의 변화에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며 두께가 60 mm와 80 mm로 두꺼워질 경우 밀 정수가 커짐에 따라 두께편차의 변화에 약 6% 이내의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 전반적으로 밀 정수의 변화가 선단부 두께편차에 미치는 영향은 미소한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 밀 정수의 설정 범위가 크지 않기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 선단부 온도편차에 따른 두께 변화

초기 슬라브의 두께에 따라 온도편차 구간을 10°C 구간으로 나누어 선단부의 온도가 정상부의 온도보다 10~100°C 낮은 것으로 가정하여 FE 해석을 수행하여 두께 편차의 변화를 분석한 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

동일한 온도 편차 구간에서 초기 슬라브의 두께가 20 mm에서 80 mm로 두꺼워 질수록 선단부의 두께 편차가 커지며 두께편차의 증가율이 커지는 것으로 나타났다. 또한 온도 편차가 커질수록 선단부의 두께 편차가 커지는 것으로 나타났다. 이는 타 압연 공정 조건이 동일한 경우 압연에 필요한 압하력이 Fig. 2의 다이어그램으로부터 초기 슬라브의 두께가 커질수록 소재의 소성곡선이 우측으로 이동하게 되므로 압연에 필요한 압하력과 출측 판 두께가 커지기 때문이다. 또한 온도 편차가 커질 경우 소재의 소성 곡

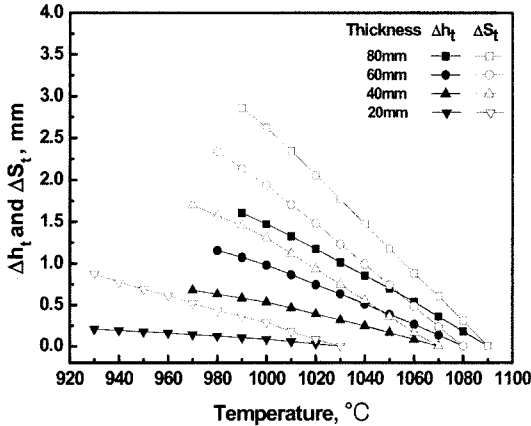


Fig. 10. Compensation value of roll gap according to temperature.

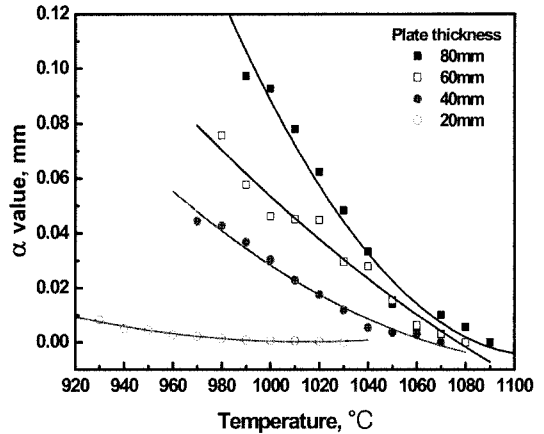


Fig. 12. α value according to temperature.

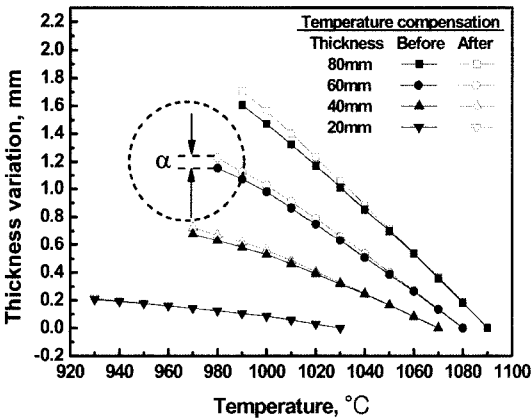


Fig. 11. Thickness variation after roll-gap set up.

선의 기울기가 커지므로 압하력이 커져 출측 판두께가 두꺼워지기 때문이다.

3.3 온도편차에 따른 선단부 롤갭 설정값 및 정상부 두께변화 특성

Fig. 9에서 분석된 초기 슬라브의 두께와 온도편차에 따른 두께편차를 보상하기 위한 롤갭 설정값을 Fig. 10에 나타내었다. 그 결과 초기 슬라브의 두께가 두껍고 온도편차가 커질수록 두께편차를 보상하기 위한 롤갭 설정값은 커지지만 두께 편차에 대한 상대적인 롤갭 설정값의 증가율은 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 온도 편차에 의해 발생한 선단부의 두께편차를 보상하기 위한 롤갭 설정값은 초기 슬라브의 두께와 슬라브내의 온도편차의 정도에 따라 결정됨을 알 수 있다.

또한 ‘2.4’절의 방법으로 소재가 동일한 변형저항계수를 가질 때의 두께 분포와 온도편차에 따라 변형저항계수가 변화할 때의 롤갭 설정 후 두께분포를 Fig. 11에 나타내었다. 이로부터 온도 편차에 따른 정상부까지의 두께 증가량을 분석해 본 결과 Fig. 12과 같이 나타났다. 그 결과 초기 슬라브의 두께가 두꺼워 질수록 정상부에서의 두께 증가량과 증가율이 가장 크게 나타나며 20 mm의 경우와 같이 슬라브의 두께가 얇은 경우에는 정상부의 두께 증가량이 매우 미소하게 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 후판 압연 시 공정변수 및 소재 선단부의 온도 저하로부터 야기되는 두께변화를 분석하고자 후판 압연 공정의 FE 해석 모델을 개발하고 해석을 수행하여 공정변수와 선단부 온도편차에 따른 두께 편차를 정량적으로 분석하였다. 또한 분석된 두께 편차로부터 롤갭 설정값을 분석하였으며 연속 압연 시 선단부의 두께변화 특성을 해석적으로 분석하였다.

1. 선단부의 두께편차의 정도에 초기 슬라브의 판두께가 두꺼워 질수록 두께편차가 커지며 판폭의 경우 판두께가 60 mm와 80 mm의 경우와 같이 두꺼울 경우 두께편차에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 밀 정수의 경우 전반적으로 선단부 두께편차에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타났다.

2. 선단부와 정상부의 온도편차가 클수록 선단부의

두께편차가 크게 나타났으며 초기 슬라브의 두께가 두꺼워질수록 선단부의 두께편차와 두께편차의 증가율이 더욱 크게 나타났다.

3. 분석된 두께편차를 보상하기 위한 초기 슬라브의 두께 별 롤갭 설정값의 경우 두께편차에 비례하여 상대적으로 더욱 크게 나타났으며 온도편차가 커지고 초기 슬라브의 두께가 두꺼울수록 증가하였다. 그러나 두께편차에 대한 롤갭 설정값의 증가율은 초기 슬라브의 두께가 커질수록 감소하는 것으로 나타났다.

4. 분석된 선단부 두께편차로부터 계산된 롤갭 설정 시 정상부로 갈수록 온도 상승으로 인하여 두께 감소량이 더욱 커짐을 알 수 있으며 초기 판두께가 커질수록 두께감소량과 증가율이 점차 커지는 것으로 나타났다. 초기 판두께와 판폭이 선단부 두께편차에 영향을 미치므로 롤갭의 설정값과 이로 인한 정상부에서의 두께감소량의 증가에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터 사업의 연구비 일부 지원으로 수행되었음

참고문헌

1. S. Serajzadeh¹, A. Karimi Taheri¹, and F. Mucciardi : Modeling and Simulation In Materials Science and Engineering, **10** (2002) 185-203.
2. S. Y. Yuan, L. W. Zhang, S. L. Liao, G. D. Jiang, Y. S. Yu, and M. Qi : Journal of Materials Processing Technology, **209** (2009) 2760-2766.
3. Vladimir Panjkovic : Applied Thermal Engineering, **27** (2007) 2404-2414.
4. J. B. Kim, J. H. Lee, and S. M. Hwang : International Journal of Heat and Mass transfer, **52** (2009) 1864-1874.
5. Y. H. Moon, and J. J. Yi : Journal of Materials Processing Technology, **70** (1997) 194-197.
6. Y. M. Hwang, and H. H. Hsu : Journal of Materials Processing Technology, **88** (1999) 97-104.
7. S. M. Hwang, C. G. Sun, S. R. Ryoo, and W. J. Kwak : Comput. Methods Appl. Mech. Engrg, **191** (2002) 4015-4033.
8. M. Trull, D. McDonald, A. Richardson, and D. C. J. Farrugia : Journal of Materials Processing Technology, **177** (2006) 513-516.
9. A. R. Shahani, S. Setayeshi, S. A. Nodamaie, M. A. Asadi, and S. Rezaie : Journal of Materials Processing Technology, **209** (2009) 1920-1935.
10. William L. Roberts : Flat processing of steel, Marcel Dekker (1988).
11. Vladimir B. Ginzburg : High-Quality Steel Rolling Theory and Practice, Marcel Dekker (1993).