

후판 압연의 온라인 온도예측 모델 개발

서인식, 이창선, 주세돈, 주응용
후판연구그룹, 포항제철

Development of On-line Temperature Prediction Model for Plate Rolling

I. S. Suh, C. S. Lee, S. D. Choo and W. Y. Choo
Plate, Rod & Welding Res. Group, POSCO

Abstract

Temperature prediction model was developed for on-line application to plate rolling mills of POSCO. The adequate boundary conditions of heat transfer coefficients were obtained by comparing the predicted temperature with the measured temperatures taken by measuring system in plate rolling mill of POSCO. In obtaining the boundary condition which minimize the mean and standard deviation of the difference between prediction and measurement, orthogonal array for experimental design was used to reduce the calculation time of large data set. To predict the temperature drop at four edge of plate in one dimensional model, the energy change by heat transfer through directions perpendicular to thickness direction was treated like that by deformation. And the heat transfer through four edge directions was inferred from that through thickness direction with two coefficients of depth and severity of temperature drop at the edge. The boundary condition for the depth and severity of temperature drop were also determined using the measured temperature.

Key words : temperature prediction, plate rolling, heat transfer coefficient, temperature drop

1. 서론

POSCO는 후판종합품질 관리시스템(PIPO : Plate Intelligence Process Optimization)을 개발하여 후판 전공정의 조업 data와 계측 data를 관리하는 한편 slab 온도분포, 날판 온도분포, 재질분포, scale 분포, 평탄도와 잔류응력을 예측하고 있다(1). PIPO 시스템의 날판 온도예측 모델은 후판압연의 특성을 고려한 1차원 FDM 모델(2)로 구성되어 있으며 slab 모델로부터 온도분포와 공정 SCC로부터 조업 data를 입력 받아서 강판 내의 45 point에 대한 온도이력을 실시간으로 예측하고 있다.

온도예측모델의 예측정도는 크게 2 가지 인자에 의해서 결정된다. 첫째는 실제 압연과정에서 발생하는 열전달과 에너지 변화를 정확하게 계산할 수 있는 알고리즘을 구성하는 것이고 둘째는 공장의 조업특성에 맞는 적절한 열전달계수를 적용하는 것이다. 본 모델의 기본 알고리즘은 제2회 압연심포지엄에서 이미 발표된 바 있으며(2) 주요 차이점은 다음과 같다. 온라인 적용에는 예측정도와 함께 계산시간의 단축이 필수적이었기 때문에 tridiagonal 형태의 연립방정식에 적합한 알고리즘을 사용하여 계산시간을 10초에서 2초 이내로 단축하였다. 한편, 압연 중에 scale의 형성과 성장 및 제거 과정이 반복되며 이와 같은 강판 표면상태 변화는 표면 열유속에 영향을 미

치게 된다. 따라서 온도예측 모델과 scale 성장모델을 coupling 함으로서 scale에 의한 영향을 고려하고자 하였다. 일반적으로, 강판의 선단부와 후단부 그리고 양 edge는 중심부에 비해서 온도강하가 심하게 발생한다. 두께방향의 열전달만을 고려한 1차원 FDM 모델을 이용하여 edge 부의 과냉현상을 예측하기 위한 알고리즘을 구성하였으며 이는 후에 자세히 언급하겠다.

예측온도는 열전달 경계조건에 크게 의존하는데, 문헌에 보고된 경계조건(예로 롤접촉 열전달 계수는 4,800~70,000W/m²K)을 보면 그 범위가 매우 넓다(3-6). 이와 같이 넓은 범위를 보이는 것이 실제 물리적인 현상을 잘 반영한 결과라고 이해되기 보다는 모델 알고리즘의 차이, 측정방법 차이 및 다른 냉각 event와의 상호작용 효과등이 복합적으로 작용한 결과라고 이해된다. 한편, 각 냉각 event에 대한 열전달계수는 공장특성(지역, 날씨, 설비, 조업등)과 모델의 알고리즘에 따라 변화될 것이며 모델의 예측정도를 높이기 위해서는 해당 모델과 적용공장의 특성에 적절한 경계조건을 사용하는 것이 요구된다 하겠다.

본 논문에서는 개발된 온도예측모델의 모듈 구성에 대해서 간략히 살펴보고 POSCO 후판 공장의 온도측정 결과를 이용하여 공장특성에 맞는 열전달계수를 설정한 결과와 양 단부와 edge의 과냉효과에 대한 해석방법 및 결과에 대해서 논의하고자 한다.

2. 모델의 구성

개발된 온도예측모델은 POSCO 2후판 공장과 3후판 공장에서 온라인으로 기동 중인 2후판 온라인 모델과 3후판 온라인 모델이 있고, 정도향상과 version-up을 위한 2후판 오프라인 모델과 3후판 오프라인 모델이 있다. 또한 윈도우와 graphic 기능을 포함하고 있으며 재질예측모델과 통합된 2, 3 후판 오프라인 윈도우 모델이 있다.

각각의 개별 모델은 계산을 수행하는 핵심부와 계산필요 data와 결과를 입출력하는 I/O로 구성되어 있는데, 모든 모델이 서로 공유할 수 있는 공통 부분과 공장의 특성 차이 및 온라인과 오프라인 차이 때문에 공유할 수 없는 부분으로 나누어져 있다. 모델의 지속적인 version-up은 물론 용이한 관리를 위해서 공유 가능한 모듈들과 불가능한 모듈을 분류하여 구조화하였으며 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

전체 공통모듈은 계산 핵심부에 관련된 모듈로서 starttc, tempcalc, tempfdm2, thermalp, mymath가 있으며 모델 구조체로 입력된 공정 data를 이용하여 node 분할, 온도초기화, event 분할, 각 event를 미소시간 증분으로 분할, 연립방정식 구성 및 연립방정식의 해를 구하는 함수등

Table 1. Module structure of temperature prediction model.

Category	#2 Plate Mill		#3 Plate Mill	
	on-line	off-line	on-line	off-line
Module specific to model	pmmtmp tmponio	tmpoff tmpofio slbofio2p	mod200 m200onio	m200off m200ofio slbofio3p
Module specific to Mill	tmpio pilac		m200io m200meas	
Common Module	tmpcomio starttc tempcalc tempfdm2 thermalp mymath (tmpofcomio : common module of off-line)			

을 포함하고 있다(2). tmpcomio 모듈은 모든 모델에서 공통으로 사용하는 입출력함수들을 포함하고 있으며 tmpofcomio 모듈은 2, 3 후판 오프라인 모델에서 공통으로 사용하는 입출력 함수들을 포함하고 있다.

공장 고유모듈을 보면, tmpio와 m200io 모듈은 온라인과 오프라인의 차이는 없으나 공장 차이에 관련된 입력함수들을 포함하고 있다. 2후판의 pilac 모듈은 2 후판 공장의 가속냉각설비에 의한 수냉각을 예측하기 위한 event 구성과 방사온도계 측정시점에 대한 측정 event를 구성하는 반면 3 후판의 m200meas 모듈은 3 후판의 측정 event를 구성하는 모듈을 포함하고 있다.

개별모델들의 고유모듈은 각 모델의 main 함수를 포함하는 모듈(pmmtmp, tmpoff, mod200, m200off)들과 공장차이 및 오프라인과 온라인 차이에 의해서 달라지는 data 입출력 함수들을 포함하고 있다.

원도우용 모델의 경우에는 2, 3 후판 오프라인 모델에 X-window/Motif를 이용하여 계산위치 선정, 공정 data 입력 방법 선택, 계산 중간결과들과 최종결과들의 출력 여부등을 선택할 수 있는 원도우 화면을 제공하는 모듈들과 계산결과와 측정결과를 graphic으로 볼 수 있는 graphic 모듈들을 포함하고 있다.

3. 열전달 경계조건 도출

3.1 경계조건 변화와 압연종료 온도 관계

이전의 연구자들에(3-6) 의해서 보고된 후판압연의 냉각 event에 대한 경계조건을 Table 2에 요약하였다. Table 2에서 알 수 있듯이 보고된 경계조건들은 넓은 범위를 보이고 있다. 한편, 하나의 강판에 대한 압연종료 온도를 예측하는 경우를 고려하면 대부분의 경계조건을 임의의 값으로 가정하고 단지 하나의 경계조건을 변화시킴으로써, 즉 오조준 함으로써, 정확하게 예측하는 것이 가능하지만 여러 강판에 대해서는 예측정도가 떨어질 것이다. 또한, 여러 개의 경계조건을 동시에 정확하게 맞추는 것이 불가능하기 때문에 어느 정도의 오조준은 필요하지만 온도예측은 최종 결과의 예측값이 중요하기 보다는 압연과정의 온도변화를 정확하게 예측하는 것이 중요하기 때문에 사용하는 경계조건은 물리적으로도 의미를 가져야 할 것이다.

본 연구에서는 먼저 문헌에 보고된 경계조건 범위에서 온도예측값에 대한 경계조건에 영향을 몇개의 판에 대해 계산하였으며 그 결과의 일부를 Fig. 1에 나타내었다. 이때 온도계산은 POSCO 3후판에서 생산한 실제 공정 data를 이용하였으며 예측온도는 3후판 공장의 압연기 후면 41m 지점(SP2 : No.2 scanning pyrometer)까지 이송 후의 값에 해당된다.

Fig. 1에서 알 수 있듯이 강판두께에 따라 기울기는 약간씩 변화되지만 방사율, 공냉대류 열전달계수 및 물접촉 열전달계수가 증가할수록 예측온도는 거의 직선적으로 낮아지고 있으며 예측

Table 2. Summary of previously reported boundary conditions.

Boundary condition		Min. value	Max. value	Typical value
Emissivity (E)		0.6	0.95	0.8
Heat transfer coefficient (W/m ² K)	Air (A)	4	49	13
	Roll contact (R)	4,800	70,000	10,000
	Descaling (D)	1,000	10,000	2,000
Atmosphere temp. (°C)		-30	40	20
Temp. of roll (°C)		10	30	20
Temp. of descaling water °C		40	100	60

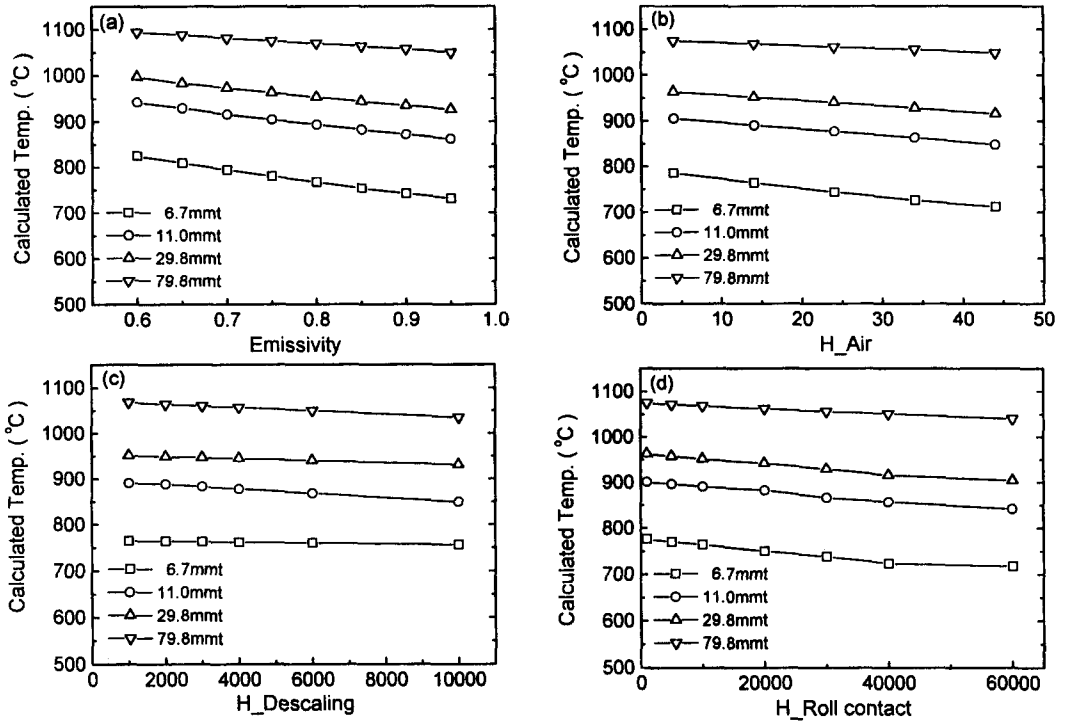


Fig. 1 Variation of predicted temperature with boundary condition. (a) emissivity (b) heat transfer coefficient (HTC) by air (c) HTC by descaling water (d) HTC by roll contact

온도에 대한 영향이 큼을 알 수 있다. 한편, 디스케일링수에 의한 열전달 계수의 영향은 강판두께에 따라 큰 차이를 보이나 이는 강판에 따라서 descaling 패턴과 윗수가 다르기 때문이다. 따라서 예측정도를 높이기 위해서는 이들 4 가지 경계조건들을 예측모델과 공장특성에 맞게 선택해야함을 알 수 있다.

Table 1에 있는 다른 경계조건의 영향을 계산한 결과에 의하면, 분위기 온도와 descaling 수 온도는 변화가 가능한 범위에서 예측값에 거의 영향이 없음을 보였으며 결국 분위기 온도와 descaling 수 온도의 영향은 고려하지 않아도 됨을 알 수 있었다.

압연 roll 온도는 20℃에서 400℃로 증가하면 예측온도는 약 5℃ 정도 증가함을 보였다. 압연 roll의 표면온도는 압연과정을 통하여 변화하기 때문에 그 영향을 정확하게 묘사하기 위해서는 압연 roll 온도를 예측해야하며 강판온도예측 모델과 coupling 해야 된다. 현재는 압연 roll의 온도를 예측할 수 없으며 그 효과가 매우 크지 않기 때문에 roll 표면 온도 영향은 무시하고 문헌에서 보고된 값을 사용하고자 한다.

3.2 ANOVA 분석에 의한 경계조건 설정

공장특성에 맞는 경계조건은 실험적인 방법에 의해서 구할 수도 있지만 본 연구에서는 POSCO 후판공장에 설치된 scanning pyrometer에서 측정된 수천장의 강판에 대한 측정온도를 이용하여 구하고자 하였다. 예측결과에 영향을 미치는 여러 개의 경계조건들 중에서 어떤 인자가 결과 값에 큰 영향을 미치는지를 알아내고 그 인자들의 수준(값)을 얼마로 해야 최적의 결과를 얻을 수 있는지를 알고자하는 경우, 고려해야 할 인자의 수가 1~2개 일 때는 통계적 분석을 행하지 않아도 쉽게 목적을 달성할 수 있다. 그러나 현재와 같이 4 가지 경계조건을 동시에 구해야하는 경우

와 한 data set의 계산시간이 많이 소요되는 경우에는 통계적 분석을 행해야 적정조건을 쉽게 찾을 수 있다.

ANOVA(analysis of variance)(7)는 이러한 문제의 해결에 적합한 통계적 분석법이다. 통계적 분석의 기본개념은 변동(variation)의 분해이며 즉, 각 경계조건에 의해서 예측결과에 대한 통계적 수치(예로 실측값-예측값의 평균과 그 표준편차등)가 어떻게 변화되는지를 분석하는 것이다. ANOVA 범중에서도 현재의 경우와 같이 각각의 경계조건 사이의 상호작용 효과가 크지 않으면서 고려해야할 인자의 수가 4 개인 경우는 Table 3에 나타낸 것과 같은 L9 직교좌표계를 이용하여 단지 9 번의 계산을 수행함으로써 4 가지 경계조건에 의한 변동을 구할 수 있다.

이러한 L9 직교좌표계를 이용한 통계분석에서는 각 인자의 수준을 얼마로 해야하는지가 매우 중요하다. 실제 방사율이 0.8 이라고 가정할 때, 방사율의 수준을 0.3, 0.4, 0.5로 변화시키는 것은 잘못된 결과, 즉 다른 경계조건에 의해서 상당히 오조준된 결과를 얻을 것이다. 따라서 4 가지 경계조건에 대한 개략적인 값을 어느 정도 알고 있는 상태에서 L9 직교좌표계의 각 수준의 값을 변화시키는 것이 실제 경계조건에 근사한 값을 쉽게 얻을 수 있다.

Fig. 2에는 500매의 강판에 대한 POSCO 3후판 공장의 SP2 상부표면 온도 측정치와 예측치의 관계를 도시하였다. 이때 예측온도는 Table 2의 경계조건 최소와 최대 범위의 중간값을 이용하여 계산한 결과이다. 계산결과, 예측온도가 측정온도에 비해서 약 80℃ 정도 낮은 값을 보였다. 이는 L9 직교좌표계 각 인자의 수준을 선정할 때, 수준 2를 문헌에서 보고된 값의 중간 정도에 맞추면 예측온도가 매우 낮은 영역에서 분석하게 됨으로서 좋은 결과를 기대할 수 없게 됨을 의미한다.

L9 직교좌표계의 각 인자에 대한 적절한 수준범위를 결정하기 위해서 압연 원료 후 공냉만 발생하는 구간에서의 온도 강하량을 분석함으로써 방사율과 공냉대류 열전달계수를 개략적으로 결정하고자 하였다. 3후판의 경우 압연기 후단 41m 지점(SP2)과 113m 지점(SP3)에서 sacnning pyrometer를 이용하여 매 판에 대한 온도를 측정하므로 두 지점의 측정온도 강하량을 구할 수 있다. 방사율과 공냉대류 열전달계수를 변화시키면서 두 지점 사이의 온도 강하량을 계산하여 측정 강하량과 비교분석한 결과, 방사율 0.8과 공냉대류 열전달계수 8W/m²K에서 예측 강하량과 측정 강하량이 비교적 잘 일치하였다(Fig. 3).

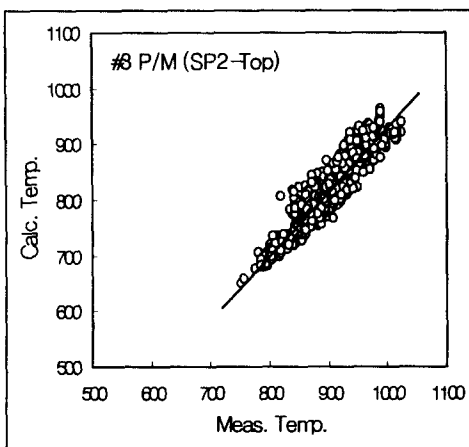


Fig. 2 Measured vs. calculated temperature for condition of E=0.78, A=26, D=5,500 and R=37,000.

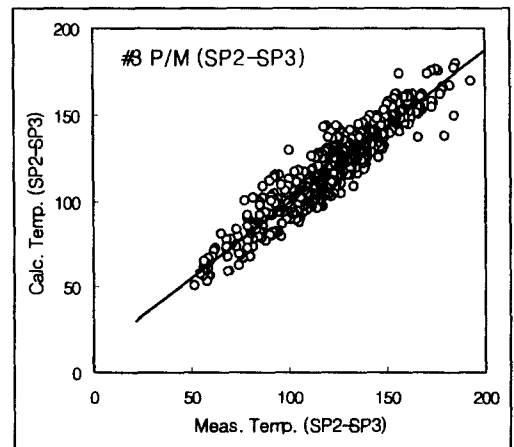


Fig. 3 Measured vs. calculated temperature drop between SP2 and SP3 for condition of E=0.8, A=8, D=2,000 and R=15,000.

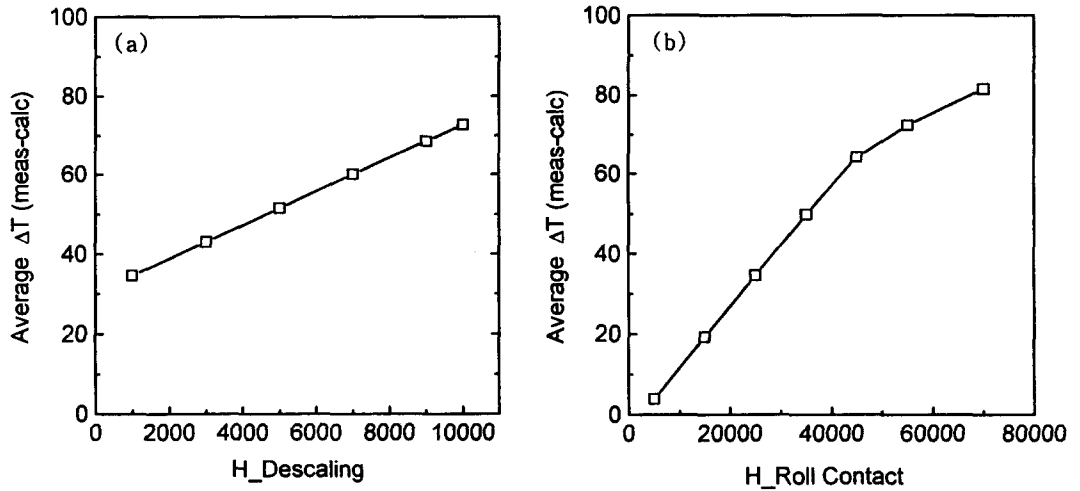


Fig. 4 Variation of average difference between measured and calculated temperature with heat transfer coefficient for condition of $E=0.8$, $A=8$, $R=37,000$ for (a) and $D = 5,500$ for (b).

한편, 방사율을 0.8, 공냉대류 열전달계수를 $8W/m^2K$ 로 고정하고 descaling과 roll contact 열전달계수를 변화시키면서 500매의 판에 대해서 계산한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Descaling 열전달계수(b)와 roll contact 열전달계수(a)는 문헌의 중간값인 5,500과 $37,000W/m^2K$ 으로 고정된 결과이다. 문헌에서 보고된 전 범위에서 예측온도는 측정온도보다 낮음을 알 수 있으며, L9 직교좌표계의 수준 2의 값을 문헌에 보고된 범위의 중간값보다 작게해야 함을 알 수 있다. Descaling과 롤접촉 열전달계수에 대한 수준 2의 값은 각각의 중간값으로부터 문헌상의 최대값 비율인 1:7의 비로 감소시켜 측정치와 계산치의 차이가 대략 0이 되는 조건인 2,000과 $13,000W/m^2K$ 로 하였다.

이상과 같은 예비계산 결과로부터 L9 직교좌표계의 계산조건을 설정하였으며 Table 3에 나타내었다. POSCO 3후판에서 생산한 2000매의 판에 대한 강판온도를 Table 3에 있는 9개의 경계조건 group에 대해서 계산하였다.

Table 3. Orthogonal array L9 for temperature prediction.

Calculation No.	Emissivity	HTC by air	HTC by descaling	HTC by Roll contact	Remark
L1	1	1	1	1	Emissivity level 1 : 0.7 level 2 : 0.8 level 3 : 0.9
L2	1	2	2	2	
L3	1	3	3	3	
L4	2	1	2	3	HTC by air level 1 : 4 level 2 : 8 level 3 : 12
L5	2	2	3	1	
L6	2	3	1	2	
L7	3	1	3	2	HTC by descaling level 1 : 1,000 level 2 : 2,000 level 3 : 3,000
L8	3	2	1	3	
L9	3	3	2	1	

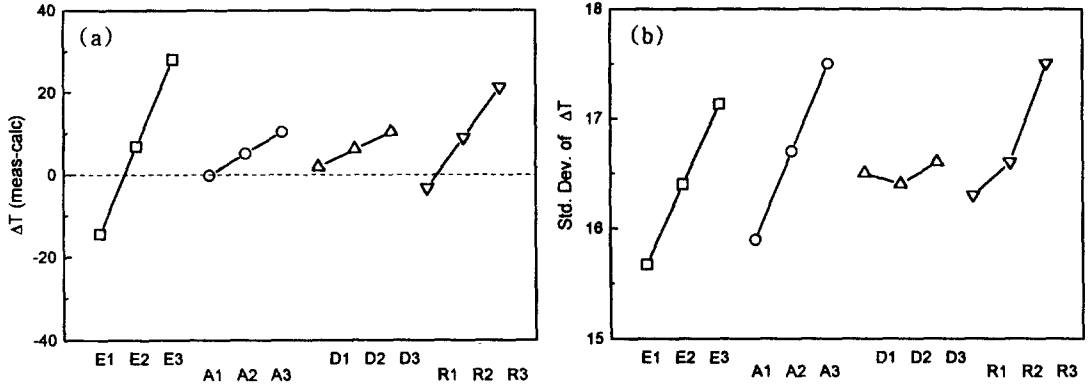


Fig. 5 Variation of $\Delta T_{\text{meas-calc}}$ (a) and standard deviation (b) of $\Delta T_{\text{meas-calc}}$ with level of boundary condition.

Fig. 5에는 L9 직교표계의 계산결과로부터 SP3 측정치와 예측치의 평균차이와 그 표준편차에 대해서 SPSS를 이용하여 통계분석한 결과를 도시하였다. Fig. 5는 측정치와 예측치의 평균 차이와 그 표준편차가 4 가지 경계조건 수준 변화에 의해서 어느 정도 영향을 받는지를 보여주는 그림이다. 방사율과 공냉대류는 평균과 표준편차가 모두 경계조건 변화에 대해서 거의 직선적으로 변화되고 있으나 그 변동폭은 서로 다름을 알 수 있다. Desacling과 물접촉 열전달계수 효과는 평균에는 직선적으로 영향을 미치나 표준편차에는 직선적으로 기여하지 않는다. 즉, 경계조건 변화에 따른 평균과 표준편차의 변화정도가 서로 다르게 나타나고 있는데 이를 좀 더 명확히 보여주기 위해서 Fig 6에 각각의 경계조건에 대해서 평균변화에 대한 표준편차 변화를 도시하였다.

Fig. 6을 보면, 방사율과 공냉대류 열전달계수는 평균변화에 대한 표준편차 변화 정도가 매우 다르다. 즉, 공냉대류 열전달계수는 방사율에 비해서 단위 평균변화에 대한 표준편차 변화가 매우 큰 데, 이와 같은 차이는 두 냉각모드가 강판 표면온도에 대한 의존성이 1승과 4승으로 다른 것에 기인된 결과라고 이해된다. Descaling의 경우 변화가 미약하지만 표준편차가 최소가 되는점이 존재하며 물접촉의 경우에는 평균변화에 대해서 표준편차 변화가 둔감한 영역과 민감한 영역으로 구분되고 있음을 알 수 있다. 따라서 경계조건의 적절한 조합을 행할 경우에 실측온도와 예측온도의 평균차이를 0으로 하면서 표준편차를 최소화할 수 있게 된다.

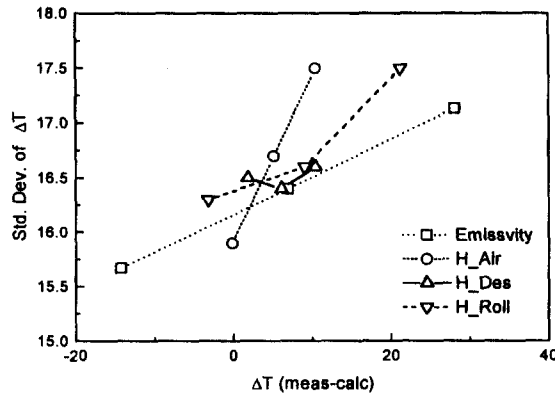


Fig. 6 Relation of ΔT and standard deviation for each boundary condition.

Table 4. Result of SPSS analysis on some calculation condition.

Condition of Level	$\Delta T_{\text{meas-calc}}$	Std of ΔT
2122	1.5	15.5
2321	-0.2	16.8
1233	2.1	16.6
1121	-32.0	14.4
3333	49.8	19.0

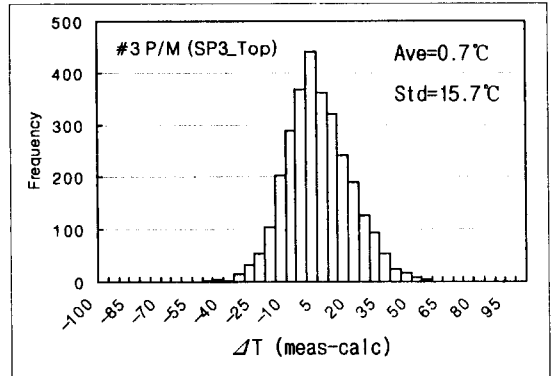


Fig. 7 Histogram on the difference of measured and calculated temperatures (#3 P/M SP3).

Table 4에는 Table 3의 계산조건 이외의 조합에 대한 평균차이와 표준편차를 SPSS 통계분석으로 계산한 결과의 일부를 요약하였다. 모든 81개의 계산조건 중에서 2122 즉 방사율, 공냉대류, descaling, 물접촉 열전달계수의 수준이 각각 2, 1, 2, 2인 조건의 경우가 실측값과 예측값의 평균차이를 최소화하면서 표준편차를 최소화할 수 있는 조건이 된다. 2321 조건은 평균차이는 2122보다 작지만 표준편차가 1.3 정도 크기 때문에 예측정도는 더 낮게 된다. 한편, 1121 조건은 표준편차는 제일 낮으나 예측값과 실측값의 차이가 너무 크다. 따라서 POSCO 3후판 공장의 경우는 2122 조건이 평균차이와 그 표준편차를 최소화하는 조건이라고 할 수 있다.

Fig. 7에는 2122 조건을 평균차이가 0이 되도록 미세조정된 경계조건(방사율=0.79, 공냉대류=5, descaling=1,300, 물접촉=13,000)을 이용하여 3후판 공장의 4000 메에 대하여 계산된 SP3 실측온도와 예측온도 차이를 히스토그램으로 나타내었다. 예측온도는 실측온도에 비해서 0.7°C 높으며 실측과 예측온도 차이의 표준편차는 15.7°C 였다.

4. 단부 과냉 효과 계산

4.1 계산방법

후판 압연 중에 폭방향과 길이방향으로의 열전달에 의해서 단부쪽에서는 중심부에 비해서 온도강하가 심하게 발생한다. 두께방향 열전달 만을 고려한 1차원 FDM 모델에서 선후단부와 양 edge부의 온도강하를 예측하기 위해서 두께방향 온도구배를 이용하여 폭방향과 길이방향으로의 열전달에 의한 에너지 축적율을 계산하고 폭방향과 길이방향의 에너지 축적율을 가공이나 변태에 의한 에너지 축적율과 동일하게 처리하였다.

두께방향 온도구배로부터 폭방향과 길이방향의 에너지 축적율을 근사하는 방법은 다음과 같다. 먼저, 두께방향 온도분포를 [1]식과 같이 두께방향 상대위치의 4차 함수로 근사시킨다. 상하 대칭 조건(4식)에 의해서 [1]식에서 C_1 과 C_3 는 0이 되고, 두께 중심부에서는 온도구배가 0 이라는 가정(5식)을 이용하면 [1]식에서 C_2 도 0이 됨으로 결국 두께방향 온도구배는 [6]식과 같이 근사된다.

$$f(x) = C_0 + C_1*x + C_2*x^2 + C_3*x^3 + C_4*x^4 \quad \text{-----} \quad [1]$$

$$f'(x) = C_1 + 2*C_2*x + 3*C_3*x^2 + 4*C_4*x^3 \quad \text{-----} \quad [2]$$

$$f''(x) = 2*C_2 + 6*C_3*x + 12*C_4*x^2 \quad \text{-----} \quad [3]$$

$$f(x) = f(-x) \quad \text{-----} \quad [4]$$

$$f'(0) = 0 \quad \text{-----} \quad [5]$$

$$f(x) = C_0 + C_4*x^4 \quad \text{-----} \quad [6]$$

[6]식과 3차원 열전달 지배방정식을 이용하면 [7]식과 같은 폭방향과 길이방향 특정 위치에서의 에너지 축적율을 구하는 식이 구성된다.

$$EGR = 12 * k * (C/t^2) * R^2 * EGRR \quad \text{-----} [7]$$

[7]식에서 EGR(energy generation rate)은 에너지 축적율, k는 열전도도, t는 판두께, EGRR은 대응위치에서 폭길이방향 EGR과 두께방향의 EGR의 비이다. R은 두께 중심부에서 표면부까지의 거리와 edge부 온도감소 개시점으로부터 edge부까지의 거리를 0에서 0.5로 대응시킨 상대좌표 값으로서 edge로부터 edge 방향으로의 열전달이 없는 위치 즉 1차원 열전달 만이 일어나는 지점까지의 거리에 의해서 결정되는 값이다.

따라서 edge 부의 특정위치에서의 온도강하량은 edge부 온도 감소 개시점과 EGRR을 조절함으로써 측정치와 일치시킬 수 있다. 본 연구에서는 edge부 온도감소 개시점과 EGRR을 변화시키면서 폭방향 온도분포를 예측하여 3후판에 설치되어 있는 scanning pyrometer의 폭방향 온도 측정결과와 비교함으로써 온도감소 개시점과 EGRR에 대한 경계조건을 결정하였다.

Fig. 8에는 EGRR이 0.05인 경우에 edge 방향 열전달이 개시되는 점을 두께의 4배, 8배, 0배인 경우에 대해서 폭방향 온도분포를 계산한 결과(a)와 edge 방향 열전달이 개시되는 점이 두께의 4배인 경우에 EGRR을 변화시키면서 폭방향 온도를 계산한 결과(b)를 측정결과와 함께 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 두께의 4배 지점에서부터 edge 방향 열전달이 개시되며 EGRR이 0.05인 경계조건이 측정치의 폭방향 온도 profile과 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 강판의 가장자리로부터 두께의 4배 이상 안으로 들어간 지역의 열전달은 1차원으로 해석할 수 있다고 알려진 결과와도 일치하는 결과이다.

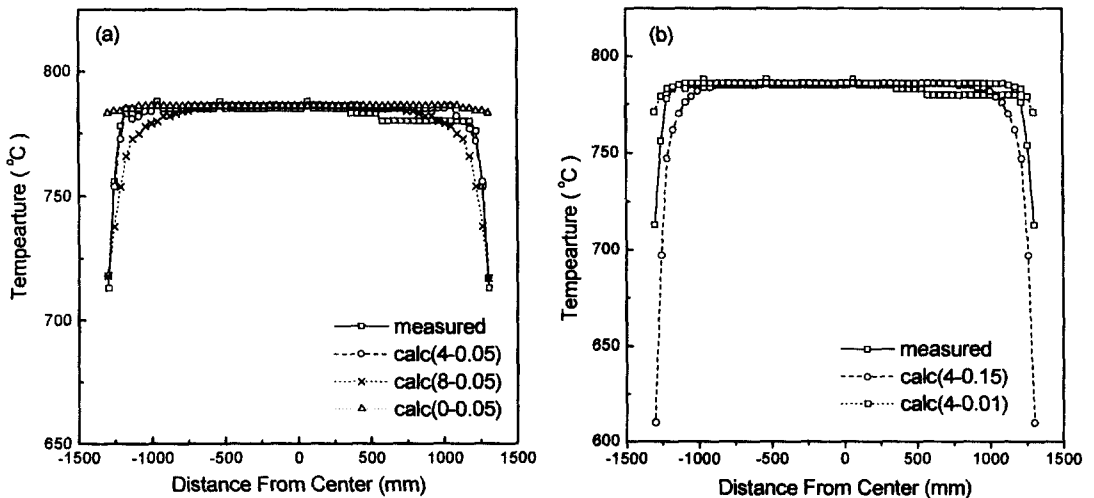


Fig. 8 Temperature profiles measured and calculated with various calculating conditions through width direction at SP3 in POSCO #3 P/M.

4. 결론

1) 기 개발된 off-line 온도예측모델을 모듈구조화와 version-up하여 POSCO 2, 3후판 공장에 적용하였으며 강판의 45 point에 대한 온도이력을 실시간으로 계산하고 있다.

2) 현장의 실 측정치와의 통계적 비교분석에 의해서 적정 경계조건을 도출한 결과, POSCO 3후판 공장의 경우 방사율 0.79, 공냉대류 열전달계수 5W/m²K, descaling 열전달계수 1,300W/m²K, 를

접촉 열전달계수 $13,000\text{W/m}^2\text{K}$ 임을 알 수 있었다. 이때의 측정온도와 예측온도 차이는 0.7°C 이고 그 표준편차는 15.7°C 였다.

3) 두께방향 온도구배를 이용하여 폭, 길이방향의 에너지 축적율을 근사함으로써 1차원 FDM 모델에서 강판의 선후단부와 양 edge부의 온도강하를 예측할 수 있었다.

4) 두께의 4배 지점에서부터 edge 방향 열전달이 발생하고 그 때의 edge 방향 에너지 축적율이 두께방향의 0.05배인 경우에 계산된 폭방향 온도 profile은 실측된 것과 잘 일치하였다.

참고문헌

1. H. Y. Sung et. al, Proceedings of the 3rd rolling symposium, Pohang, Korea, KIMM & KSTP, this volume (1999).
2. C. S. Lee et. al, Proceedings of the 2nd rolling symposium, Pohang, Korea, KIMM & KSTP, pp. 121-134(1996).
3. A. A. Tseng et. al, Proceedings of Mathematical Modelling of Hot Rolling of Steel, Ontario, Canada, pp. 177-189(1990).
4. M. Packo et. al, Steel Research, vol. 64, no.2, pp. 128(1993)
5. M. Pietrzyk et. al, Proceedings of Modelling of Metal Forming Processes, pp. 281-288(1988).
6. A. Silvonen et. al, Scandianvian Journal of Metallurgy, vol. 16, pp. 103(1987).
7. M. S. Phadke, "Quality Engineering Using Robust Design",PTR Prentice Hall, New Jersey, 1989.