

열간압연 롤의 온도 해석 결과

이명재*, 류재화**, 이희봉**
계측제어연구그룹, 포항제철기술연구소*
박판연구그룹, 포항제철기술연구소**

Temperature profile analysis for HSS Roll in Hot Strip Mill

M. J. Lee* and J. H. Ryu**, H. B. Lee**
Instrument & Control Research Group, Tech. Research Labs., POSCO*
Sheet Products & Process Research Group, Tech. Research Labs., POSCO**

Abstract

The temperature distribution over the work roll length was estimated by solving a 2-dimensional heat transfer equation based on the rolling conditions and the thermal boundary conditions. In order to solve the governing equation, a finite volume method was employed. In the rolling conditions, the strip temperature, the contact time between roll and strip, the roll speed, the strip thickness, the rolling force and the rolling and idling time were used as input data. In order to verify the accuracy of temperature estimation, roll surface temperatures were measured in the roll shop. The measured temperatures showed a good correlation with the calculated ones.

Keywords : roll temperature, HSS roll, work roll

1. 서론

최근들어서 열간압연 공장에서는 고속도공구강롤(이하 HSS 롤이라 함)의 사용량이 증가하고 있는데 이는 HSS 롤의 내구성, 내마모성이 지금까지 주로 사용되던 Hi-Cr roll 이나 Ni-Grain roll 에 비하여 우수하기 때문이다. 그러나 기존의 롤들과 다른 성질들로 인한 적용의 어려움이 발생하였는데, 사상압연 전단의 경우에는 마찰계수 증가에 따른 표면결함 발생증가와 내균열성 저하 등의 문제가 있고, 사상압연 후단의 경우 통관성 저하와 이로 인한 사고율증가의 문제가 아직 존재하고 있다.

이러한 문제들을 해결하기 위한 하나의 방안으로 적정 롤 냉각기술의 확보가 필요한데, 이를 위해서는 우선 롤의 온도해석이 필요하다. 따라서 본 연구는 롤 냉각설비를 바탕으로 하여 열전달 계수를 설정하고, 이를 이용하여 실제 압연 중에 폭방향 온도를 해석하고자 하였다.

롤 내부의 온도 해석은 유한 차분해석을 이용하여 계산되었으며, 과거에 이와 유사한 연구결과로서는 1 차원 반경방향 전도 방정식 해석[1], 마찰발열, 소성발열을 고려한 1 차원 비정상해석[2], 롤의 수명과 주기적 열응력과의 관계성 분석[3], 냉각시 압력과 유량의 영향해석[4], 온도 및 응력

의 연계해석[5], 롤 냉각수의 전열계수 측정분석[6]등이 있다. 본 연구의 특징은 비정상 2차원 온도해석으로서 롤이 장착되어 압연을 수행하고 교체 후 공냉시까지의 폭방향 온도 이력을 전부 해석한 것이다.

2. 전열해석 모델링

2.1 지배방정식

롤 내부의 반경방향과 폭방향으로의 전도 열전달을 고려한 에너지 방정식은 (1)식과 같이 내부 발열량이 없는 원통 좌표계를 써서 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

위식에서 α 는 롤의 열확산계수로서 롤의 열전도도를 κ , 비열을 c , 밀도를 ρ 라 할 때 $\kappa/\rho c$ 이다. x 는 폭방향, r 은 반경방향의 좌표를 나타낸다. HSS 롤은 표층부와 내층부가 각기 다른 재질로 결합되었다. Table1은 본 연구에서 이용한 롤의 구성 재질별 물성치들이다.

Table1. Thermal properties of roll materials.

	Shell	Core
Material	High speed steel	Ductile cast iron
Heat capacity(J/kg°C)	500	590
Density(kg/m ³)	7700	7200
Conductivity(W/m°C)	25.5	27

2.2 경계조건

열연롤에서의 경계구간은 roll bite 구간, 냉각수 분사구간, 공냉구간으로 나눌 수 있는데, 이들 각각에 대해서 살펴보면 다음과 같다.

2.2.1 Roll bite 구간

압연영역 내에서는 코일의 온도에 의한 접촉 열전달과 롤과 코일의 미끄러짐에 의한 마찰발열, 코일의 소성변형에 의한 가공발열을 고려하여 다음과 같이 고려한다.

$$q = Q_f + h(T_s - T_R) \quad (2)$$

여기서 Q_f 는 마찰 및 가공 발열량, T_s , T_R 는 각각 코일과 롤의 표면 온도이고 h 는 롤과 코일간의 접촉 열전달 계수로서 $60\text{kW/m}^2\text{°C}$ 를 적용하였다. 가공발열과 마찰 발열량 및 코일 표면의 온도는 Fig.1에 나타내었다. Fig. 1(a)는 코일과 롤의 접촉부에서 마찰에 의해서 발생한 열에너지이다. Fig. 1(b)는 마찰과 가공발열에 의해 코일 표면의 상승온도이고, Fig. 1(c)는 상승온도를 고려한 접촉부내 코일의 표면온도이다.

위의 값들은 유한요소법을 이용한 롤의 해석[5] 연구결과를 참고하였다.

2.2.2 냉각수 분사영역 및 공기와의 접촉영역

냉각수에 의한 표면의 열전달 경계조건은 식(3)과 같다. Table2는 계산에 이용된 롤 주변의 냉각수 온도와 열전달 계수로서 냉각수 유량과 전열계수와의 연구결과[6]로부터 구하였다.

$$q = h(T_w - T_R) \quad (3)$$

(3)식에서 h 는 분사노즐에 의한 대류열전달 계수이고 T_w 와 T_R 은 각각 냉각수와 롤 표면의 온도이다.

Table2. Heat transfer coefficients along the roll peripheral (except the contact arc).

Angle(deg)	Water temperature(°C)	Heat transfer coef. (W/m ² °C)
46.5	30	300
72.0	30	2000
111.0	30	38000
187.5	30	2000
262.5	30	300
273.5	30	17000
288.0	30	20000
307.5	30	2000
360.0	30	300

2.3 계산조건 선정

조업조건을 토대로 선정된 계산조건은 Table3과 같다.

Table3. Parameters for calculation.

Stand no.	F4
Coil thickness(entry, exit)	6mm, 4mm
Coil width	1260 ±20mm
Carbon contents	0.2%
Entry temperature	970 °C
Initial temperature of roll	25 °C
Roll speed	120 rpm
Roll diameter, length	800mm, 2000mm
Friction coefficient between roll and coil	0.3

2.4 해석방법

2.4.1 격자의 구성

온도방정식 (1)의 해석에는 유한차분법을 적용하여 계산하였다. 계산 범위는 롤 전체를 원통좌표계 내의 2차원 축 대칭 문제로 설정하였다. 계산 격자는 롤의 중심과 축을 대칭으로 구성하고, 축 방향으로는 2분할하여 열연 판과의 접촉부, 열연 판과의 비접촉부로 나누고, 반경방향으로는 롤의 재질에 따라 롤 표층부와 내층부로 구분하였다. 온도변화가 급격하게 일어나는 롤의 표층부는 격자간격을 촘촘히 구성하였다.

2.4.2 경계조건 적용

경계조건 적용에 있어서 롤 주변에 산재된 환경, 즉 롤 표면위치에 따라 나열된 코일, 냉각

수, back up 롤, 공기 등에 의한 열전달 경계조건들은 하나의 등가 경계조건으로 대체하였다. 롤이 1 회전하는 동안 표면이 열유속이 균일한 i 개의 주변과 동시에 대류 열전달을 일으킨다고 하면 열유속은 식(4)와 같다.

$$q'' = \frac{1}{2\pi} \sum_i h_i (T_i - T_R) \theta_i \quad (4)$$

θ_i : i 번째 경계와의 열전달 각도(radian)

h_i : i 번째 경계와의 대류열전달 계수

식(4)로부터 식(5)와 같은 등가 온도 T_{eqv} 와 등가 열전달계수 h_{eqv} 를 구할 수 있다.

$$q'' = h_{eqv} (T_{eqv} - T_R) \quad (5)$$

$$h_{eqv} = \frac{1}{2\pi} \sum_i h_i \theta_i$$

$$T_{eqv} = \frac{\sum_i h_i \theta_i T_i}{\sum_i h_i \theta_i}$$

마찰발열을 포함한 물표면에서의 열전달은 식(6)으로 주어진다.

$$q'' = h_{eqv} (T_{eqv} - T_R) + \frac{1}{2\pi} \sum_i Q_i \theta_i \quad (6)$$

Q_i : i 번째 경계에서의 마찰발열량

3. 해석결과

3.1 단면 등온선

Fig. 2 는 롤 단면의 등온선을 나타낸다. 등온선이 그려진 시점은 idling 에 의한 냉각이 끝난 직후이다. 따라서 표면부보다 약 50mm 부근에 최대 온도영역이 형성되고 있다. 판의 접촉부로부터 롤 내부와 edge 부분으로 열이 확산되며 압연판이 접촉하지 않은 부분과 롤의 edge 부에서는 열이 계속 방출되므로 온도상승이 느린 편이다.

Fig. 2(a)는 10 매의 코일을 압연하고 난 후의 등온선으로 롤 축으로는 아직 열이 충분히 전달되지 않은 상황이다. Fig. 2(b)와 Fig. 2(c)는 압연매수가 30, 50 인 경우의 온도분포로서 롤과의 접촉부위에서 유입된 열이 롤 축, 판 폭 바깥쪽으로 전파되는 현상을 보여준다. Fig. 2(c)의 경우 압연판과의 접촉되지 않은 부분에서는 오히려 내부의 온도가 표면부의 온도보다 높음을 알 수 있다. 이는 롤 표면에서는 냉각수에 의해 냉각이 되고, 롤 축 부분에서는 롤 중앙부로부터 열이 계속 공급되기 때문이다.

3.2 압연매수 증가에 따른 폭방향 온도 분포

Fig. 3 은 압연중 롤 온도상승을 나타낸 것으로 코일이 롤 표면으로부터 100mm, 200mm 깊이와 롤 중심축 부분의 폭방향 온도 곡선이다. 코일의 폭 경계부분에서는 20mm 에 깊이의 0.5m 에서 0.7m 의 구간이 급한 온도기울기를 보이고 있는데 코일의 평균폭이 0.63m 이었기 때문이다. 이 부분의 경사는 압연매수의 증가에 따라 점차적으로 완만해지는 경향을 보이고 있다. 또한 롤 내부로 들어갈수록 폭방향에 걸친 온도변화는 감소하고 있다.

Fig. 3(a), Fig. 3(b), Fig. 3(c)는 각각 압연매수가 10 매, 30 매 그리고 50 매 증가할수록 깊이별 온도 차이는 감소함을 보이고 있다. 압연매수가 적은 초기에는 표면부의 온도가 급속히 증가하나 압연과 idling 에 의한 열의 유입과 유출이 평형에 접근하면서 표면부의 온도증가는 줄어들기 때문이다.

3.3 반경방향 온도분포

Fig. 4 는 반경방향의 온도분포를 나타낸다. idling 직후 최고온도의 위치는 롤 표면으로부터 40~60mm 지점에 존재하며 이 부근 위치를 경계로 내부는 완만한 온도의 증가를 보이고 표면부는 큰 폭의 온도변화가 일어난다. 롤 중심부의 온도는 압연매수와 함께 선형적으로 증가하는데 반해 외부로 나갈수록 초기의 급한 온도상승으로부터 점차 줄어드는 온도 상승폭을 볼 수 있다.

Fig. 4(a)는 롤 중앙위치의 반경방향 온도분포이고 Fig. 4(b)는 코일과의 비접촉부인 0.65m 지점에 반경방향 온도분포이다. 롤 중앙위치에서의 온도값이 비 접촉부분 보다 높음을 알 수 있다.

3.4 압연후 온도 변화

Fig. 5 는 50 매의 압연이 끝나고 약 4 분의 idling 후 공기중에서 자연 냉각하는 롤의 온도 분포이다. 공기중에서 롤의 자연대류 열전달계수는 $20W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$, 대기의 온도는 25°C 로 설정하였다. 수냉 중의 대류 열전달 계수값은 $6000W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$ 이상이므로 공기중 자연 대류와 압연조업중 수냉에 의한 강제냉각의 냉각능의 차이는 300 배 정도이다. 그림에서 알 수 있듯이 롤 내부에서의 확산이 롤 표면에서보다 빠르게 진행되므로 등온선의 모양은 동심원에 가까운 형태를 띠고 있다.

3.5 표면온도 실측치와 비교

Fig. 6 은 공냉시 롤 표면의 폭방향 온도분포를 나타낸다. 시간이 지날수록 중앙부의 온도는 감소하나 Edge 부의 온도는 반대로 증가한다. 등온선에 보여진 바대로 중앙의 높은 온도에 의해 동심원의 형태로 열이 전도되기 때문이다. 계산치와 실측치를 비교한 결과 대부분의 경우 3°C 이내로 예측하였다.

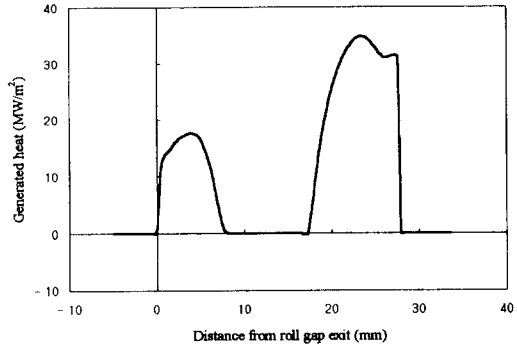
4. 결론

1. 선정된 조업조건에 대해 압연 매수의 증가에 따른 롤 내부의 온도 분포를 계산하였으며 50 매 압연 후 롤 중심축의 온도는 65°C , 표면으로부터 100mm 지점의 온도는 85°C 를 얻었다.
2. 압연 마친 후 공기중에서 롤을 냉각할 때는 표면보다 내부의 확산속도가 빨라 롤 중심으로부터 동심원 형태의 등온선이 형성되며, 이에 따라 양 edge 부는 시간이 지남에 따라 온도가 상승한다. 이러한 현상은 roll shop 에서 실측한 온도 측정치를 통하여 확인되었다.

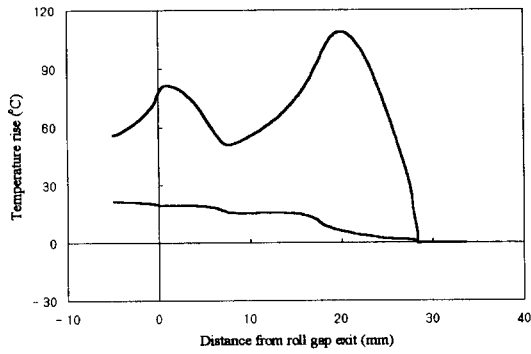
3. 본 해석결과를 토대로 HSS roll 의 통관성 향상을 위한 효과적인 냉각수 분포를 제시하는데 이
용할 수 있다.

참고문헌

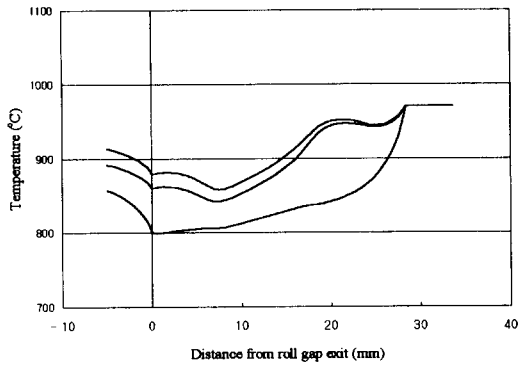
1. C. Devadas, I.V. Samarasekera, "Heat Transfer during Hot rolling of Steel Strip", Ironmaking and Steel making, Vol.13, No. 6, pp.311-321, 1986.
2. Y. Sekimoto, M. Tanaka, "Effects of Rolling Condition on the Surface Temperature of Work Roll in Hot Strip Mill", Transactions ISIJ, Vol. 1, p.551, 1976.
3. P. G. Stevens, "Increasing work-roll life by improved roll-cooling practice", J. of Iron and Steel Institute, pp.1-11, 1971.
4. R.R. Carpenter, "Improving the Efficiency of Work Roll Cooling System", pp.69-73.
5. 손성강, "유한 요소법을 이용한 열연중 온도, 유동과 물 탄성변형의 연계해석", 포항공과대학교 석사논문, 1996.
6. 이필종의, "열연 Roll 표면거침에 미치는 압연조건외 영향연구", 포스코 기술연구소, pp.135-222, 1994.



(a) heat produced by friction

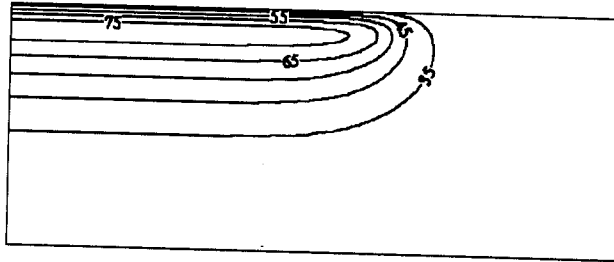


(b) temperature rise of coil surface by deformation and friction

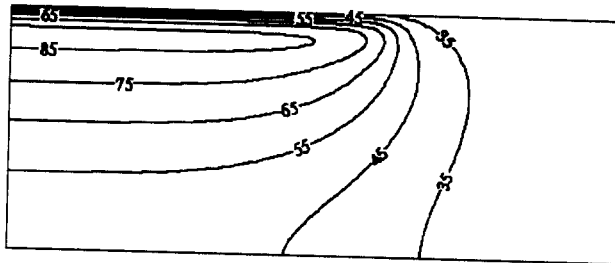


(c) coil temperature inside the roll bite

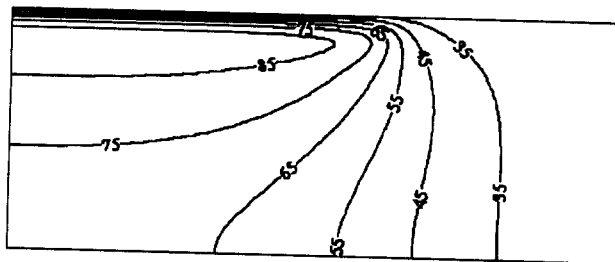
Fig.1 Temperature & heats in the contact arc between roll and coil surfaces.



(a) after 10 coils

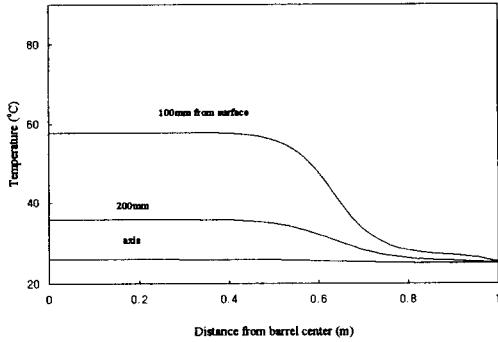


(b) after 30 coils

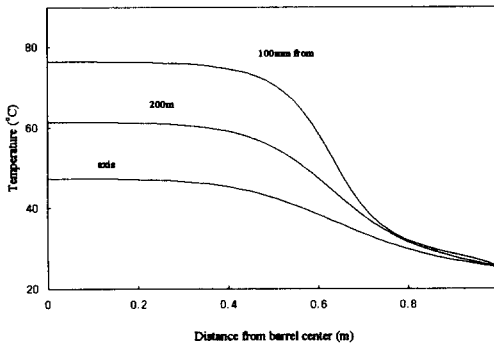


(c) after 50 coils

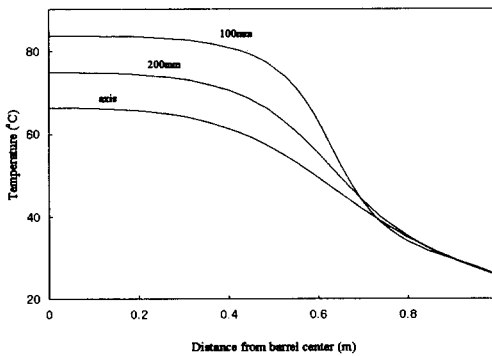
Fig. 2 Temperature contours inside the roll during rolling.



(a) after 10 coils

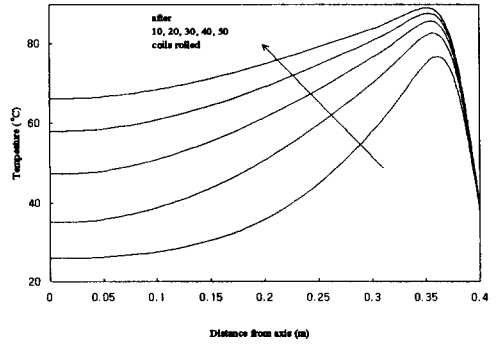


(b) after 30 coils

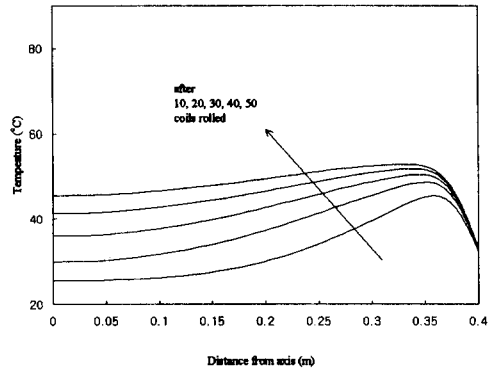


(c) after 50 coils

Fig. 3 Temperature distribution along width direction.

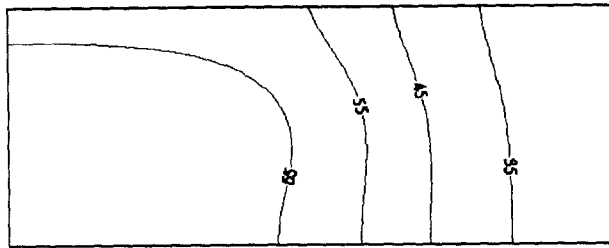


(a) roll center

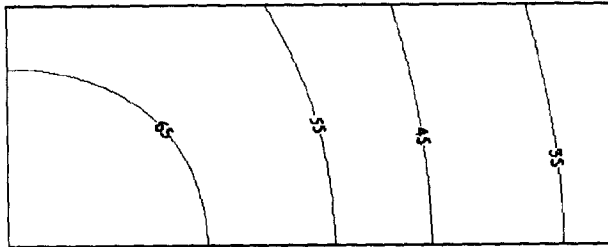


(b) 0.65m from roll center

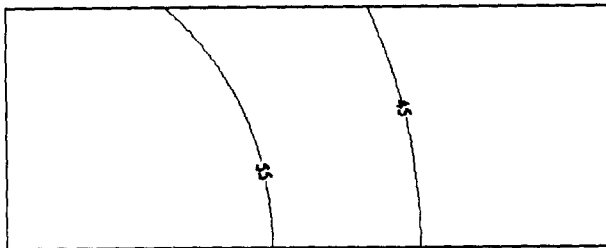
Fig. 4 Temperature distribution along radial direction.



(a) after 15 minutes



(b) after 1 hour



(c) after 2 hours

Fig. 5 Temperature contours during air cooling in roll shop.

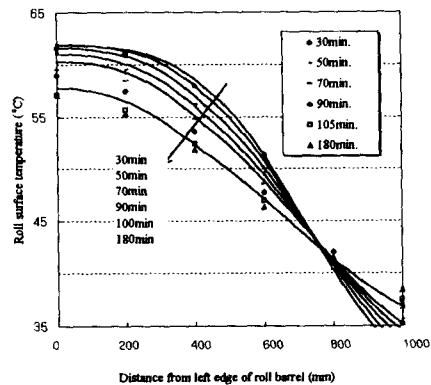


Fig. 6 Temperature variation during air cooling in roll shop.