

회전 실린더의 스프레이 분사 냉각에 관한 열전달 연구

이필종* · 최 호* · 이승홍**
(2001년 5월 26일 접수, 2002년 4월 3일 심사완료)

Cooling Heat Transfer from a Rotating Roll by Impinging Water Spray Jets

Pil-Jong Lee, Ho Choi and Seung-Hong Lee

Key Words: Rotating Roll(회전 롤), Spray Jet(스프레이 분사), Heat Transfer Coefficient(열전달 계수), Specific Flow Rate(비수량), Finite Difference Method(유한 차분법)

Abstract

The cooling heat transfer by impinging water spray jets on a rotating roll with a relatively large diameter has been investigated under various experimental conditions with 3 different sizes of flat type nozzle. The local heat transfer coefficients were calculated by finite difference method using measured surface temperatures of the circular cylinder as boundary conditions. Results show that a peak value of the heat transfer coefficient is located at the center of sprayed area and there may be a secondary peak at the downstream. The average heat transfer coefficients on the sprayed area were found to be 10 to 22 kW/m²°C, and were not related to spraying pressure, but approximately linearly to flow rate of sprayed water. Also it is found that increasing the distance from roll to nozzle could improve the cooling efficiency by increasing the sprayed area.

기호설명

C_p : 비열 [J/kg°C]

d : 롤과 노즐간의 거리 [m]

h : 열전달계수 [kW/m²°C]

k : 열전도도 [W/m°C]

P : 압력압력 [kg/cm²]

Q : 유량 [liter/min]

R : 반경방향길이 [m]

t : 시간 [sec]

T : 온도 [°C]

θ : 각도 [rad]

ρ : 밀도 [kg/m³]

ω : 롤의 회전속도 [rad/sec]

하첨자

P : center

E : east

W : west

N : north

S : south

w : water

그리스문자

* 회원, 포항산업과연연구원 열유체연구팀

** 회원, 부산대학교 기계공학부

† 책임저자, 회원, 포항산업과화학연구원 열유체연구팀

E-mail : leepj@rist.re.kr

TEL : (054)279-6636 FAX : (054)279-6888

1. 서론

철강제조 공정중 하나인 압연공정은 스프레이를 분사해서 회전하는 고온 실린더를 냉각하는

대표적인 예가 될 수 있다. 이 공정에서는 이 통상 롤(roll)이라고 불리는 수백 mm의 직경을 갖는 실린더를 이용하여 소재를 압축하면서 소성변형이 되게 한다. 이 때 동반되는 압력과 마찰 등에 의한 열로 인해서 소재와 접촉되는 1초 이내의 짧은 순간에도 롤의 극 표면온도가 크게 상승된다. 특히 압연되는 소재의 온도가 매우 높은 열간 압연에서는 롤 표층의 온도가 순간적으로 수백 °C 이상이 되기 때문에 많은 문제가 생길 수 있다.⁽¹⁾ 소재와 접촉되는 롤의 표면온도가 높아지면서 롤의 강도가 떨어져 마모가 심해지고 결국에는 롤의 수명을 단축시키게 된다. 또 롤의 온도가 높아지게 되면 열팽창이 심하게 되어 균일한 두께의 제품을 만들기 어려워진다.

이러한 이유로 롤이 소재와 접촉되는 부위를 제외한 거의 모든 영역에 고압의 스프레이를 분사하여 롤을 냉각시킨다. 따라서 회전하는 대형 실린더의 스프레이 분사냉각에 관한 연구는 이 냉각설비를 최적화하여 롤의 수명을 늘려주고 제품 품질을 향상시키는 데 필요하다.

스프레이 분사 냉각에 대한 연구는 주로 정지 상태의 강판에서 비수량(specific flow rate, 스프레이 유량을 스프레이가 롤에 분사되는 면적으로 나눈 값)과 표면온도의 상관관계를 구하여 왔다. Mitsutsuka 등⁽²⁾은 비수량이 2000 liter/m²min 이하에서 표면온도가 200-300 °C일 때 열전달 계수가 비수량의 약 0.65승에 비례하고, 300-400 °C일 때는 약 0.8승에 비례한다고 보고하였다. Mitsutsuka 등⁽³⁾은 또 비수량이 매우 적은 약 100 liter/m²min 이하이고 강판온도가 125-475 °C인 조건에서 열전달 계수가 비수량의 약 0.8승에 비례한다고 보고하였다. Hoogendoorn 등⁽⁴⁾은 비수량이 1500 liter/m²min 이하일 때, 표면온도가 350-900 °C인 조건에서 열전달 계수가 비수량에 거의 비례하며 입자 직경의 0.25승에, 그리고 입자속도에 비례한다고 보고하였다. Raudensky 등⁽⁵⁾은 비수량이 최대로 2000 liter/m²min인 조건에서 강판 표면 온도 변화에 따른 열전달 계수를 구하고 압력 4-12 kg/cm² 사이에서 냉각능력이 포화된다고 보고하였다.

그런데 실제 압연공정은 앞서 연구들보다는 비수량이 매우 높은 편으로 3000 liter/m²min 이상이 대부분이다. Nakahara 등⁽⁶⁾은 비수량을 제시하지 않고 표면온도 60 °C인 조건에서 평판 냉각실험을 수행한 결과로, 유량 증가됨에 따라 초기에는

열전달 계수가 증가하다가 약 11.5 kW/m²°C로 포화됨을 보이고 이 값이 통상 압연공정에 적용될 수 있다고 하였다. 반면 Roberts⁽⁷⁾는 0.5-30 kg/cm² 사이에서 열유속이 압력의 제곱근에 비례한다고 하였다. 또한 롤의 표면온도가 100 °C 이하인 경우에는 6-11 kW/m²°C를, 100 °C 이상인 경우에는 20-40 kW/m²°C를 제안하였다.

회전 롤에 대하여 실험한 경우로, Hogshead 등⁽⁸⁾은 롤 표면온도가 88-115 °C일 때 롤 회전속도가 0-1800 rpm, 유량이 약 5-50 liter/min인 조건에서 2-5 kW/m²°C의 평균 열전달 계수가 얻어짐을 보였다. Liu 등⁽⁹⁾은 롤 표면온도가 95 °C보다 낮을 때, 회전속도 200 rpm, 최대 분사압력 7 kg/cm², 노즐당 유량이 최대 150 liter/min인 조건에서 평균 열전달 계수가 약 6.5 kW/m²°C, 이웃하는 두 제트사이의 영역에서는 5 kW/m²°C의 열전달 계수가 얻어짐을 보였다. Tseng 등⁽¹⁰⁾은 외경이 약 460 mm, 두께 12.7 mm인 비교적 큰 롤을 300 rpm으로 회전시키면서 롤 표면온도가 100 °C 이하일 때 냉각실험을 수행하였다. 그는 제트가 충돌되는 면에서 약 6 kW/m²°C의 열전달 계수를 얻었고 와이퍼(wiper)에 도달되기 이전까지 또 물이 롤 표면을 계속해서 타고 흐르는 영역에서는 약 2 kW/m²°C의 열전달 계수를 얻었다. 하지만 이 경우는 사용유량이 정확하지 않을 뿐 아니라 한가지 조건에서만 실험을 하였다. 그는 이후 응답성에 매우 빠른 열전달을 이용한 냉각 실험으로부터 국소 열전달 계수를 구하고 최대 열전달 계수가 약 170-250 kW/m²°C 라고 보고하였다.⁽¹¹⁾ Raudensky와 Tseng 등⁽¹²⁾은 직경이 약 650 mm인 대형의 롤을 초기온도 180 °C로 가열한 후, 10 kg/cm²에서 유량이 약 75 liter/min인 노즐을 이용하여 압력이 16 kg/cm²까지 변화되는 조건에서 냉각실험을 실시하였는데, 최대 열전달 계수는 약 12 kW/m²°C로 나타났다. 그들은 또 롤에 대한 노즐의 분사 방향이 변화될 때의 영향 대해 살펴보았다.

이상에서와 같이 기존 스프레이 냉각에 대한 연구는 주로 비수량이 2000 liter/m²min 이하에서 행하여 졌다. 또한 회전 롤에 대한 기존의 연구들은 대부분 롤 온도가 100 °C 이하로, 그렇지 않은 경우가 일부 있으나, 압력, 유량, 거리에 따른 영향을 명확하게 설명해 주지 못하고 있다.

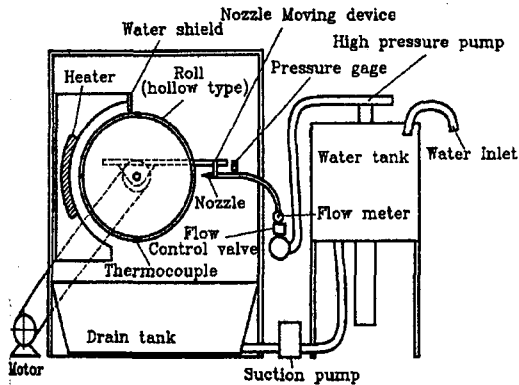


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

따라서 본 연구에서는 표면온도를 약 150 °C 까지 가열하여 직경이 800 mm인 대형 롤을 60 rpm으로 회전시키면서 비수량이 실제 압연에서 처럼 2000 liter/m²min 이상인 조건에서 분사압력, 유량, 거리에 따른 열전달 특성을 살펴보고자 하였다.

2. 냉각실험 및 열전달 계수 도출

2.1 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 냉각수는 외부에서 물탱크로 공급된 후, 물탱크 내에 설치된 20단 원심펌프에 의해 가압되어 헤더, 노즐을 거쳐 롤에 분사된다. 노즐은 총 3개가 70 mm간격으로 설치되며, 롤로부터 거리가 변경될 수 있다. 압력은 0-30 kg/cm², 노즐 당 최대 분사 유량은 150 liter/min 이다.

롤은 AC모터에 의해 400 rpm까지 회전되고, 인버터로 속도 제어를 할 수 있다. 재질은 스테인리스(SUS304)이고 외경 800 mm, 두께 6 mm인 중공형(hollow type)으로 길이는 1000 mm이다. 물을 최대 200 °C까지 가열하기 위해 스프레이가 분사되는 면의 반대되는 면에, 롤 표면에서부터 약 10 mm 떨어진 위치에서 중심각 60° 에 걸쳐 열선 가열장치를 설치하였다. 분사압력은 노즐 전단에 설치된 압력변환계(pressure transducer), 유량은 터빈유량계로 측정한다.

Fig. 2는 온도 계측장치의 개략도를 나타낸 것이다. 소선 직경이 0.3 mm이고, SUS304로 피복된

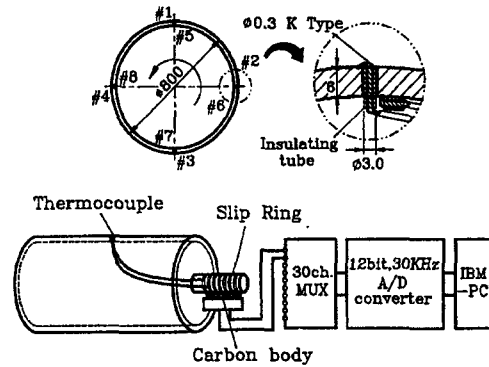


Fig. 2 Schematics of temperature measurement system

외경이 1.6 mm의 K형 열전대 8개가 롤 온도를 측정하는 데 사용되었다. 각각의 열전대는 롤 축 방향으로 중심인 곳에서 원주방향으로 90° 씩 돌아간 위치에, 그리고 각 위치에서 롤 두께방향 외부와 내부표면에 스팟웰딩(spot welding)되었다. 이 열전대를 슬립링(slip ring, 열전대가 연결된 상태로 롤과 함께 회전하는 구리 합금판과 고정된 탄소막대가 계속해서 접촉되어 롤 온도가 측정될 수 있게 함.)에 연결하고, 최대 32채널의 정보를 스캐닝하는 장치, A/D 변환기(12 bit, 30 kHz) 그리고 퍼스널 컴퓨터(IBM-PC) 등을 이용하여 온도를 측정하였다.

본 실험은 가열장치, 펌프, 롤 회전장치, 비산수, 슬립링의 접촉저항등 온도를 측정할 때 노이즈(noise) 또는 오차를 만들 수 있는 인자가 매우 많다. 이로 인해 냉각을 개시하기 전에, 물을 동일한 온도(150 °C)로 유지시킬 때에도 열전대에서 측정되는 온도 데이터는 ± 5 °C내에서 섭동되게 나타났다. 실험결과를 해석할 때에는, 노이즈의 영향을 조금이라도 줄이기 위해, 어떤 시간에서 얻어진 온도정보와 그 전후로 각 3개씩의 온도 데이터를 취하고 Fig. 3에 나타난 가중값을 각각 곱한 후 총 데이터수, 7로 나누어 평균을 구한 후, 이를 현재 온도로 사용하였다.

노즐은 스프레이 시스템 코리아(주)에서 제작된 것으로, 출구가 길쭉한 타원형이면서 오리피스 형태가 다른 3개가 사용되었다. 터빈유량계와 각 도계를 이용해서 측정된 분사압력 변화에 따른 유량 및 분사각도 변화는 Fig. 4와 같다. 이 노즐들의 경우 분사유량은 압력의 약 0.5승에 비례하

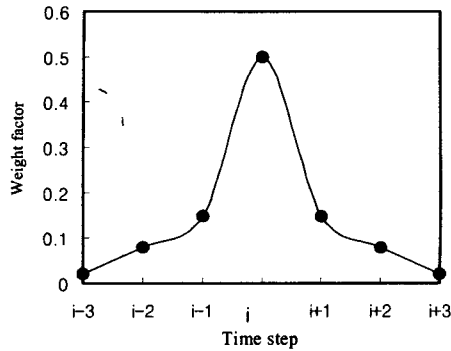


Fig. 3 Weight factor for time averaging

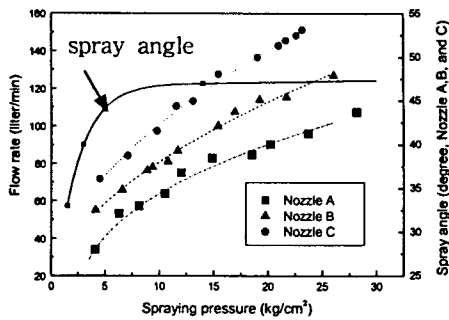


Fig. 4 Flow rate and spray angle with respect to spraying pressure

며 5 kg/cm² 이하에서는 압력이 증가됨에 따라 분사각도가 크게 증가되다가 이후에는 증가되는 경향이 크게 둔화되는 것으로 나타났다. 이에 따라 스프레이가 물에 분사되는 범위(물의 원주각)는 분사압력이 15 kg/cm² 일 때 물에서 노즐까지의 거리가 150 mm이면 약 17°에서 450 mm로 되면 53°로 크게 늘어난다. 반면 물에 노즐까지의 거리가 350 mm로 일정할 때, 압력이 5 kg/cm² 에서 15 kg/cm²로 증가되어도 회전각은 45°에서 49°로 되어 큰 차이가 없게 나타난다.

2.2 열전달 계수 산출

고정된 Eulerian 좌표계에서 물 축방향 중심의 온도변화를 지배하는 방정식은 다음과 같이 표현된다.⁽¹³⁾ 이 때 물 축방향 중심에서는 열적으로 대칭이므로, 축 방향의 열전도는 무시될 수 있다.

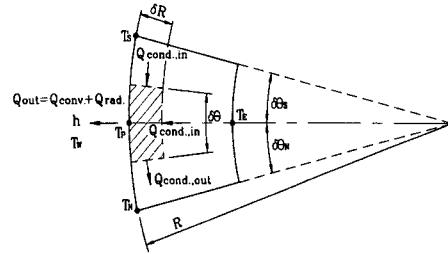


Fig. 5 Energy balance in a control volume of roll surface

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \omega \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) = \frac{1}{R} \left(kR \frac{\partial T}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \quad (1)$$

초기조건으로는 냉각개시 직전의 온도를 사용하였다. 냉각중의 경계조건은 Tseng 등⁽¹⁴⁾이 국소 열전달 계수값을 구할 때 사용한 것처럼 물과 함께 회전하는 열전대의 신호에서 시간과 위치를 역추적하여 대입하는 방법으로 구하였다.

위와 같은 방법으로, 임의 시간에서 물의 온도 분포가 구해지면 물 회전방향으로 임의 theta 위치에서 롤 표면에 작용되는 전열 현상들은 Fig. 5와 같이 표현된다. 따라서 냉각수에 의한 열전달 계수는 표면의 미소 체적소에서 열평형 방정식을 적용, 정리하면 다음과 같은 식으로 표현된다. 이때 냉각수 온도 T_w 는 20 °C로 가정하였다.

$$h = \left[\rho \cdot C_p \cdot \left(\frac{T_P - T_P^0}{\delta t} \right) \cdot R \cdot \delta \theta \cdot \delta R + k \cdot \left\{ \left(\frac{T_P - T_S}{\delta \theta_S} \right) + \left(\frac{T_P - T_N}{\delta \theta_N} \right) \right\} \cdot \frac{\delta R}{R} + k \cdot \left(\frac{T_P - T_E}{\delta R} \right) \cdot R \cdot \delta \theta \right] / \{ R \cdot \delta \theta \cdot (T_P - T_W) \} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 냉각곡선과 열전달 계수 분포

60 rpm으로 회전하는 물에, A 노즐로 압력 10 kg/cm²(유량 69 liter/min)에 맞춰 냉각수를 분사하

는 경우의 냉각곡선은 Fig. 6과 같다. 초기온도는 155 °C로, 원주방향의 표면에서 최초로 수냉되는 열전대가 #2이고 롤 내부에 부착된 것이 #6이다. 그리고 #2로부터 180° 돌아간 위치에서 롤 표면에 설치된 것이 #4, 롤 내부에 설치된 것이 #8이다. 표면에 부착된 열전대들은 각각이 스프레이가 롤에 분사되는 부위로 들어가면서 온도가 급격하게 감소되나, 롤내부 온도는 아직 높기 때문에 충돌 부위를 지나면 짧은 시간 내에 온도가 다시 상승된다. 하지만 시간이 지나면서 롤의 평균 온도는 점점 낮아져서 표면온도가 다시 상승되는 데 걸리는 시간은 길어지고 스프레이에 롤에 분사되는 영역에서 온도가 감소되는 정도도 점차로 줄어든다.

Fig. 7은 위의 조건에서 스프레이가 롤에 처음

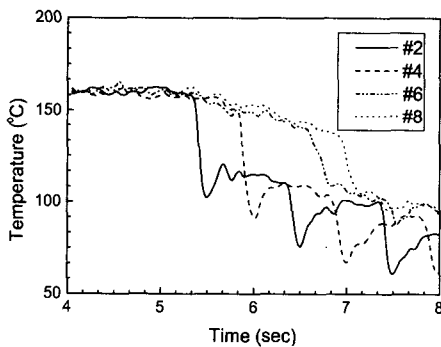


Fig. 6 Measured cooling curve with nozzle A
 $P=10 \text{ kg/cm}^2$, $Q=69 \text{ liter/min}$, and $d=350 \text{ mm}$

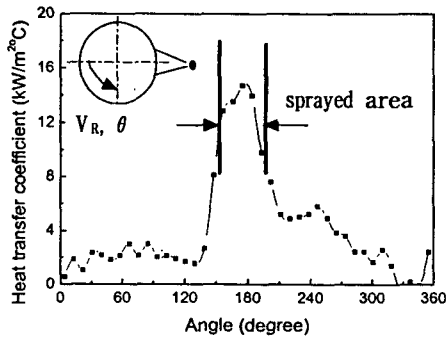


Fig. 7 Local heat transfer coefficients for nozzle A,
 $P=10 \text{ kg/cm}^2$, $Q=69 \text{ liter/min}$, and $d=350 \text{ mm}$

으로 분사될 때 롤 원주방향의 열전달 계수분포를 나타낸 것이다. 물은 반 시계방향으로 회전하며, 가로축은 롤이 회전하는 방향의 원주각을 나타낸다. 열전달 계수는 스프레이가 롤에 분사되는 부위의 중심근처에서 최대이다가 충돌중심에서 멀어지면서 급격하게 감소되고 있다.

롤에 분사된 냉각수는 롤이 회전되는 방향으로 물론, 회전 반대방향으로도 롤 표면을 타고 흐르게 되는데, 회전방향으로 냉각수가 타고 흐르면서 냉각시키는 효과가 반대방향으로 흐르면서 냉각시키는 효과보다는 크다. 또 Tseng 등,^(10,11) Raudensky 등⁽¹²⁾의 실험결과처럼 냉각수가 회전방향으로 롤 표면을 타고 흐르면서 240° 이상되는 지점에서 2차 최대(peak)점이 나타난다. 기존 문헌에서는 이에 대한 설명이 없기 때문에 본 연구에서의 결과만 놓고 보면, 롤의 회전속도가 느린 조건이므로 중력의 영향 때문에 물을 타고 흐르는 냉각수의 유속이 이 부근에 와서 느려지는 것과 관련이 있다고 생각된다. 또 롤에 냉각수가 분사되는 영역 및 2차 최대점을 제외한 나머지 영역에서의 열전달 계수는 Fig. 7의 실험조건에서는 약 $2.5 \text{ kW/m}^2\text{°C}$ 정도이고 분사유량이나 거리가 다른 조건들에서는 최대 $5 \text{ kW/m}^2\text{°C}$ 까지 나타났다. 이 결과는 일부 냉각수가 물을 타고 흐르면서도 냉각에 기여하고 있다는 것을 말해준다.

3.2 분사압력에 따른 냉각능력

Fig. 8은 A 노즐에서 분사압력이 변화될 때, 수냉 개시후 첫 번째 회전에서 열전달 계수를 비교한 것이다. 압력이 증가됨에 따라 스프레이가 롤에 분사되는 부위의 열전달 계수가 커지는 것을

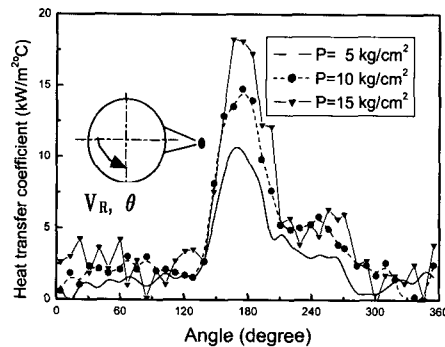


Fig. 8 Local heat transfer coefficients for Nozzle A, $d=350 \text{ mm}$

볼 수 있다. 하지만 그 외 영역에서 분사압력의 증가에 따른 차이는 뚜렷하지 않았다.

사용된 3가지 노즐들에 대해 물과 노즐간의 거리가 동일하면서 분사 압력이 변화될 때, 스프레이가 물에 분사되는 영역의 평균 열전달 계수를 비교한 결과는 Fig. 9와 같다. 여기서 평균 열전달 계수를 계산할 때 Fig. 4에서 보이듯이 분사 압력에 따른 분사각도의 변화를 고려하였다. 분사 압력이 증가하면 Fig. 9와 같이 스프레이가 분사되는 영역의 평균 열전달 계수는 증가되나, Raudensky 등⁽¹²⁾의 결과에서와 같이, 분사압력이 많이 높아지면 평균 열전달 계수가 증가되는 경향은 크게 둔화되는 것으로 나타났다. 특히 A 노즐의 경우, 15 kg/cm² 이상에서 그 값이 거의 포

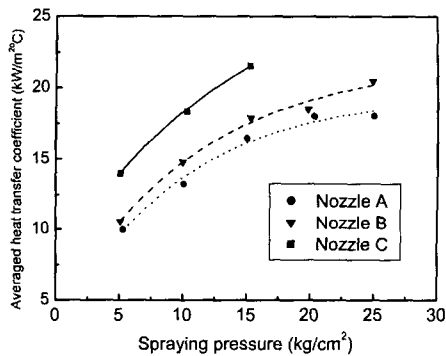


Fig. 9 Averaged heat transfer coefficients on impinging area with respect to spraying pressure for each nozzle

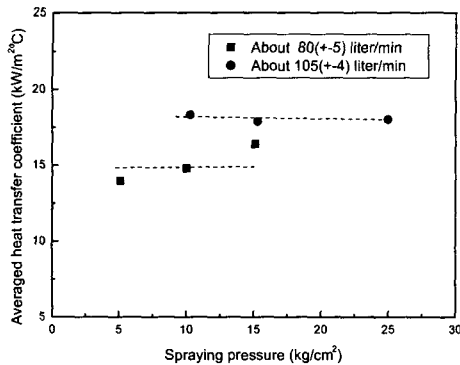


Fig. 10 Averaged heat transfer coefficients on impinging area with respect to spraying pressure for constant flow rate conditions

화됨을 볼 수 있었다. 각각의 노즐에서 평균 열전달 계수는 분사압력의 약 0.4승에 비례하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 이는 앞서 Fig. 4에 보인 것처럼 분사 유량이 압력의 약 0.5승에 비례하는 관계로 볼 때, 평균 열전달 계수의 증가는 압력이 아니라, 분사 유량이 증가되면서 나타나는 것으로 추정되었다.

분사 압력만의 영향을 살펴보기 위해 Fig. 9에 나타난 결과들 중에서 분사압력이 다르지만, 분사유량이 비교적 일정한 조건에서 얻어진 실험결과들을 찾아 Fig. 10에서 비교하였다. 분사압력의 변화에 따른 평균 열전달 계수의 변화는 거의 없는 것으로 보인다. 따라서 실제 압연공정에서 분사 압력을 높이기 위해 고압 펌프를 도입하는 것은 적절하지 못하다고 생각된다.

3.3 유량에 따른 냉각능력

분사 압력이 일정해도 오리피스 직경이 다른 노즐들을 이용하면 유량이 변경된다. Fig. 11은 분사압력이 10 kg/cm²인 조건에서 노즐을 달리하여 분사유량이 변경될 때의 열전달 계수 분포를 살펴 본 것이다. 분사 유량이 증가하면서 스프레이가 물에 분사되는 영역의 열전달 계수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 그 외 물에 분사된 냉각수가 물을 타고 흐르는 영역에서는 분사 유량의 증가에 따른 영향이 뚜렷하지 않았다.

물에서 노즐까지의 거리가 350 mm로 동일하고 분사압력이 각각 5, 10, 15 kg/cm²로 일정한 조건일 때, 비수량에 따른 평균 열전달 계수의 변화는 Fig. 12와 같다. 앞서 예상되었듯이 비수량,

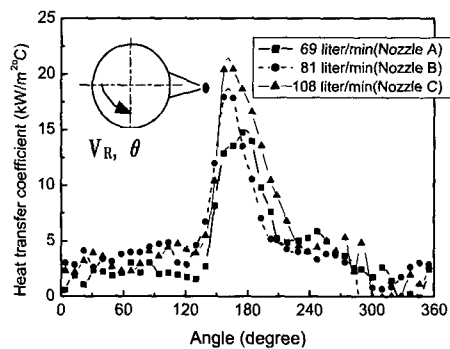


Fig. 11 Local heat transfer coefficients with P=10 kg/cm², d=350 mm

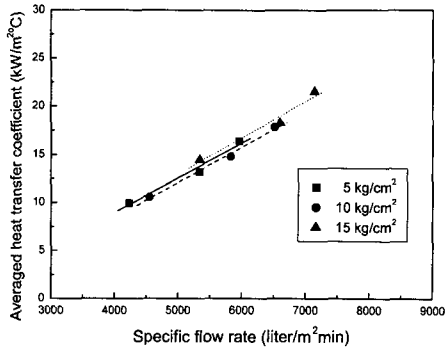


Fig. 12 Averaged heat transfer coefficients with respect to specific flow rate of spray

즉 유량의 증가에 대해 평균 열전달 계수는 거의 선형에 가깝게 증가되는 데, 이러한 결과는 Hoogendoorn 등⁽⁴⁾이 낮은 수량밀도 조건에서 제시한 결과와 유사하다. 따라서 실제 압연조건에서는 분사압력을 높이는 것보다 유량을 높일 수 있도록 펌프를 선택하고 동시에 노즐의 오리피스 직경을 더욱 넓게 하는 방법을 제안하고 싶다.

3.4 롤과 노즐간의 거리에 따른 냉각능력

Fig. 13은 A 노즐에서 분사압력이 15 kg/cm²로 일정할 때, 롤과 노즐간의 거리 변화에 따른 열전달 계수 분포의 변화를 보여준다. 롤과 노즐간의 거리가 멀어짐에 따라 스프레이가 롤에 분사되는 영역에서의 최대 열전달 계수가 점차로 감소되나, 반대로 분사되는 면적(롤회전각)이 늘어나는 효과를 확인할 수 있다. 이들중 롤과 노즐간의 거리가 150 mm일 때는 롤이 회전하는 반대쪽에서 열전달 계수가 음인 경우가 나타났다. 이는 다른 조건에 비해 유속이 빨라서 냉각수가 롤에 부딪힌 후, 표면을 타고 흐르지 못하고 튀어나가면서 롤 내부에서 전도되는 열에 의해 롤 표면의 온도가 상승되기 때문인 것으로 생각된다.

롤과 노즐간의 거리가 변화될 때 스프레이 분사되는 영역의 평균 열전달 계수와 함께 평균 열전달 계수와 분사면적을 곱한 값(즉, 열유속, $q = \mathbf{1} * \mathbf{A} * \Delta T$ 에서 "h * A"를 의미함.)을 Fig. 14에 나타내었다. 이때 롤 축방향으로 분사되는 길이는 단위길이(1 m)로 가정하였다.

롤과 노즐간의 거리가 멀어짐에 따라 평균 열전달 계수는 완만하게 감소되어 Stenden 등⁽¹⁵⁾의

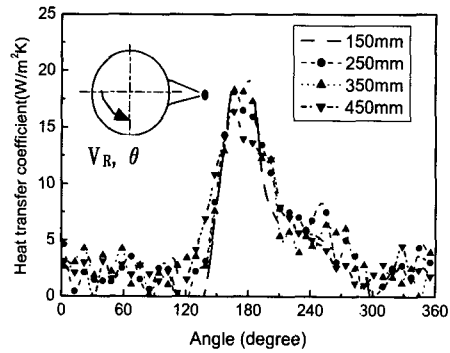


Fig. 13 Local heat transfer coefficient for nozzle A, with P=15 kg/cm²

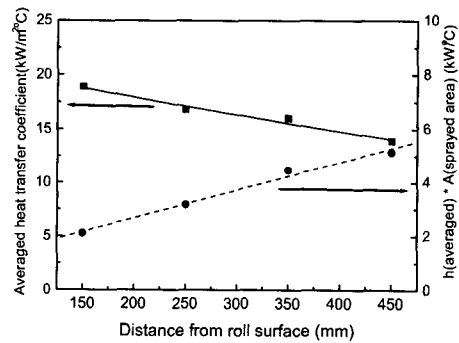


Fig. 14 Averaged heat transfer coefficient and $h * A$ (sprayed area) with respect to roll-nozzle distance

결과와 유사한 경향을 보인다. 하지만 롤에서 노즐까지의 거리가 멀어짐에 따라 스프레이가 롤에 분사되는 영역이 늘어나는 경향이 더 급해서, 평균 열전달 계수와 분사 면적의 곱은 롤과 노즐간의 거리가 멀어짐에 따라 증가되는 경향을 보인다. 여기서 롤과 노즐간의 거리가 150 mm일 때는 롤 회전각으로 약 16°의 분사면적을 갖고 그 거리가 450 mm이면 약 53°의 분사면적을 갖는다. 따라서 본 실험조건내에서 롤과 노즐간의 거리가 멀어질 때 냉각효율이 높아질 수 있다고 생각되었다.

4. 결론

60 rpm으로 회전하는 직경 800 mm의 실린더

를, 비수량이 2000 liter/m²min 이상이 조건에서 고압 스프레이로 냉각하는 경우에 대해, 실험을 통해서 열전달 특성을 살펴본 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 회전 물을 초기온도 155 °C로 가열한 후, 스프레이 물 분사로 냉각할 때, 국소 열전달 계수는 스프레이의 충돌중심에서 최대를 보이며 스프레이가 물에 분사되는 영역의 평균 열전달 계수는 약 10-22 kW/m²C로 나타났다.

(2) 회전되는 물에 부딪힌 냉각수는 물을 타고 흘러가면서 열전달 계수는 물이 회전하는 방향에서 2차 최대점을 보이는 경우가 있다. 또 스프레이가 분사되는 영역과 2차 최대점 부근을 제외한 나머지 영역에서의 열전달 계수는 최대 5.0 kW/m²C 이하로 나타났다.

(3) 동일 노즐에서 스프레이가 물에 분사되는 영역의 평균 열전달 계수는 분사압력의 약 0.4승에 비례한다. 하지만 노즐을 달리하여 유량이 일정한 조건이 되면 평균 열전달 계수는 분사압력에는 거의 무관한 반면 분사유량의 변화에 대해서는 거의 선형적으로 비례한다. 따라서 냉각효과를 증대시키기 위해 유량을 증대시키는 방안을 제안할 수 있다.

(4) 물과 노즐간의 거리가 멀어질수록, 스프레이가 물에 분사되는 부위의 평균 열전달 계수는 완만하게 감소하는 반면 스프레이의 분사면적이 더 급하게 증대되기 때문에, 냉각효율이 높아질 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 포항종합제철(주)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Stevens, P.G., Ivens, K.P., and Happer, P., 1971, "Increasing Work-roll Life by Improved Roll-cooling Practice," *Journal of Iron and steel Engineer*, Vol. 209, pp. 1~11.
- (2) Mitsutsuka, M., 1968, "Study on the Water Cooling of Steel Plate at High Temperature," *Tetsu-to-Hagane*, Vol. 54, No.14, pp. 1457~1471.
- (3) Mitsutsuka, M., and Fukuda, K., 1983, "Cooling Characteristics and Heat Transfer Coefficients during Water-spray Cooling of Hot Steel Plate," *Tetsu-to-Hagane*, Vol. 69, No.2, pp. 262~274.
- (4) Hoogendoorn, C.J., and Hond, R. D., 1974, "Liedenrost Temperature and Heat Transfer Coefficients for Water Sprays Impinging on a Hot Surface," *Proceedings of the 5th Int. Heat Transfer Conference*, Vol.4, pp. 135~138.
- (5) Raudensky, M., Bending, L., and Horsky J., 1994, "Experimental Study of Heat Transfer in Process of Roll cooling in Rolling Mills by Water Jets," *Steel Research*, Vol.65, No.1, pp. 29~35.
- (6) Nakahara, H. et al., 1988, "Development of Water Film Roll Cooling Method for Hot Strip Mill," *CAMP-ISIJ*, Vol.1, p. 571.
- (7) Robert.W.L.,1978, *Cold Rolling of Steel*, Marcel Dekker, New York.
- (8) Hogshead, T.H., 1992, "Heat Transfer and Temperature Distributions in the Rolling of Metal Strip," Ph. D Thesis, Carnegie-Mellon University, U.S.A..
- (9) Lui, J.C., Finn, T.L., and Ramser, R.A., 1986, "Average Transfer Coefficient Measurement Technique for Impinging Spray Jets on a Rotating Cylinder," *Symposium on Measuring and Metering of Unsteady Flows, ASME WAM*, pp. 33~38.
- (10) Tseng, A.A., Chen, S.J., and Westgate, C.R.,1987, "Determination of Local Heat Transfer Coefficients for Modeling Rolling Processes," *ASME*, New York, NY, MD-Vol.3, pp. 51~63.
- (11) Tseng, A.A., Gunderia, A.S., Sun P.F., 1991, "Cooling of Roll and Strip in Steel Rolling," *Steel Research*, Vol. 62, No.5, pp. 207~215.
- (12) Raudensky, M., Horsky, J., Kerjsa, J., and Tseng, A.A., 1996, "Experimental Study of Heat Transfer on Rotating Roll Cooled by Water Nozzles," *Proceedings of the 6th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Vol. 2, pp. 501~508.

- (13) Huang C.H., Ju T.M., and Tseng A.A., 1995, "The Estimation of Surface Thermal Behavior of the Working Roll in Hot Rolling Process," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 6, pp.1019~1031.
- (14) Tseng, A.A., Lin, F.H., Gunderia, A.S., and Ni, D.S., 1989, "Roll Cooling and Its Relationship to Roll Life," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 20A, pp. 2305~2320.
- (15) Steden, G.V., and Tellman, J.G.M, 1987, "A New Method of Designing a Work Roll Cooling System for Improved Productivity and Strip Quality," *Proceedings of 4th International Steel Rolling Conference*, Deauville, France, June, pp. A29.1~A29.12.