

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.12.1051>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

주행하는 고온 강재의 상하부 동시 냉각 과정 수치해석[§]

권 면 재* · 박 일 석**

* 경북대학교 기계공학부

Numerical Analysis of Simultaneous Cooling Process of Upper and Lower Side of Running Hot Steel Strip

Myeon Jae Kwon* and Il Seouk Park**†

* School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received May 21, 2014 ; Revised August 8, 2014 ; Accepted August 13, 2014)

Key Words: Film Boiling(막비등), Steam Layer(증기층), Leidenfrost Effect(라이덴프로스트 효과), Upper Cooling(상부 냉각), Lower Cooling(하부 냉각)

초록: 열간 압연을 거친 800°C 이상의 고온 철강 판재는 일반적으로 다중 봉상 수분류(multiple circular water jets)에 의해서 급속 냉각된다. 이 과정은 소재의 온도가 냉각수의 끓는점보다 훨씬 높기 때문에 소재 표면과 냉각수 사이에 막비등 열전달 현상이 발생하며 소재 표면에 매우 얇은 증기층이 형성되며, 이 증기층은 소재와 냉각수의 열교환을 방해하는 중요한 열저항으로 작용한다. 본 문제에는 비등 열전달 이외에도 소재 표면에 쌓이는 체류수의 자유표면 유동, 소재의 고속 주행 등 복잡한 물리현상들이 복합적으로 작용하고 있다. 본 논문에서는 이 모든 물리현상들을 동시에 고려할 수 있는 해석 절차를 적용하여 일정한 속도로 주행하는 고온 철강 판재의 상하부 동시 냉각 과정을 3 차원 수치해석 하였으며, 소재 상부 및 하부 면의 냉각 특성을 비교하였다.

Abstract: After hot rolling, a high-temperature steel plate with a temperature higher than 800°C is rapidly cooled by multiple circular water jets. In this cooling process, because the temperature of the steel plate is much higher than the boiling point of the cooling water, film-boiling heat transfer occurs and a very thin steam layer forms between the plate surface and the cooling water. The steam layer acts as a thermal resistance that prevents heat transfer between the cooling water and the steel plate. In addition to the film-boiling heat transfer, complex physical phenomena such as the free-surface flow of residual water that accumulated on the material and the material's high-speed motion also occur in the cooling process. In this study, the simultaneous cooling process of the upper and lower sides of a running hot steel strip is investigated using a three-dimensional numerical model and the cooling performances and characteristics of the upper-side cooling and lower-side cooling are compared.

- 기호설명 -

T : 온도(°C)
q'' : 열유속(W/m²)
k : 열전도 계수(W/m·K)
x : 주행방향(m)

y : 두께방향(m)
z : 폭방향(m)

하첨자

eff : 유효
film : 막
wall : 벽
steam : 증기
water : 물
cell : 격자점
int : 경계면

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 유체공학부문 춘계학술대회(2014. 5. 15.-16., 부산 해운대 한화콘도) 발표논문임.

† Corresponding Author, einstein@knu.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

열간 압연 이후 주행하는 고온 철강 관재의 상부와 하부는 노즐에서 분사되는 냉각수에 의해서 동시에 냉각되며 이 과정은 제품의 기계적, 재료적 물성을 결정하는 중요한 공정이다. 냉각수의 공급 방식으로는 냉각수 운동량을 한 점에 집중하여 전달함으로써 냉각수 냉기를 효과적으로 소재에 전달할 수 있는 봉상 수분류 방식이 널리 적용되고 있다.

소재 표면과 냉각수 사이의 열교환 모드는 소재와 냉각수의 온도에 따라서 강제 대류, 핵비등, 천이비등, 막비등 등이 있을 수 있으나⁽¹⁾ 본 연구에서는 해석영역을 압연 직후의 고온 소재가 유입되는 냉각공정 입구 부근으로 국한하여 막비등 열전달이 지배적인 것으로 가정하였다. 막비등 열전달의 경우에는 냉각수가 자신의 끓는점보다 월등히 높은 고온 소재 표면과 접촉하면 순간적으로 증발해 증기막을 형성하는 라이덴프로스트 효과가 발생하며, 따라서 소재 표면과 냉각수는 집적적으로 닿지 않고 증기막에 의해서 분리된다. 본 문제에는 비등열전달 이외에도 소재에 대량으로 공급되는 냉각수가 소재 표면에 적당한 수위의 체류수층을 형성하므로 체류수의 자유표면 유동을 포함할 뿐 아니라, 피냉각체인 소재는 고속으로 주행하고 있으므로 해석영역 내부에 움직이는 물체를 포함하고 있다. 이와 같이 본 연구에는 여러 가지 복잡한 물리현상들이 복합적으로 작용하고 있으므로 이들 요소 현상들에 대한 포괄적 연구가 요구되고 있다.

Park⁽²⁾은 소재와 냉각수 간의 비등열전달과 체류수의 자유표면 유동, 소재의 주행효과를 모두 반영한 수치해석 절차를 개발하였다. Park 은 열간 압연 직후의 고온 영역에서는 소재와 냉각수의 열교환이 주로 막비등 모드로 이루어질 것이라 가정하고 막비등 열전달에 관한 해석모델을 개발하였으며, 소재와 냉각수 간의 열저항으로 작용하는 증기막의 존재를 수치해석에 반영하기 위하여 유효열전도도의 개념을 제안하였다.

소재의 냉각 성능에 영향을 미치는 인자들은 냉각수의 온도와 공급유량, 소재의 온도와 주행 속도, 노즐의 배열 등이 있다. Chen 등⁽³⁾은 단일 봉상 수분류를 사용해서 고정된 소재와 주행하는 소재의 냉각 특성을 비교하였고 주행하는 경우 냉각 효율이 크게 향상되는 것을 확인하였다. Kwon 등⁽⁴⁾은 냉각수를 분사하는 노즐의 배열 영향을 조사하

기 위해 정렬 배열과 엇갈린 배열을 비교하였으며 엇갈린 배열을 사용할 경우 정렬 배열보다 큰 냉각능을 얻을 수 있으며 소재의 폭 방향으로 균일한 온도 분포를 얻을 수 있음을 확인하였다. Zhang 등⁽⁵⁾은 주행하는 고온소재의 냉각과정을 묘사하는 간략화된 해석 모형을 제안하고, 다양한 소재 유입온도와 냉각수 유량 및 온도, 소재 주행 속도 조건에서 소재의 냉각 효율을 비교하였다.

소재와 냉각수 사이의 비등 열전달에 관한 많은 이전 연구들이 있는데, Nakanishi 등⁽⁶⁾은 수치해석을 통해서 평상 수분류(planar water jet)가 소재와 충돌하는 정체점에서 증기층의 두께와 비등 열전달량을 예측하기 위한 단순화된 분석 모형을 제안하였다. 이들이 이론적으로 예측한 증기막의 두께는 10~100 μm 의 범위에 있었다. Kim 등⁽⁷⁾은 정지한 소재에 분사되는 단일 냉각수분류에 의한 비등 열전달 과정에서 냉각수와 공기의 계면과 냉각수와 증기의 계면을 추적하기 위해서 sharp-interface level-set 방법을 적용하여 비등열전달 해석을 수행하였다. Xu 등⁽⁸⁾과 Robidou 등⁽⁹⁾은 실험결과에 대해서 2 차원 역열전도문제 (Inverse Heat Conduction Problem) 해석을 수행하여 소재 표면의 열유속 및 소재 내부의 온도 분포 등에 대한 정보를 얻어내었다.

대부분의 이전 연구들은 중력 방향에 순방향으로 냉각수가 분사되는 조건을 다루고 있으나 실제로는 철강 열간 압연 공정을 비롯한 대부분의 공정에서 냉각수 분사는 중력에 순방향과 역방향 모두 적용되고 있으며 이들 상호간의 냉각능 불균형이 공정 상 심각한 문제를 일으키는 경우가 많다.

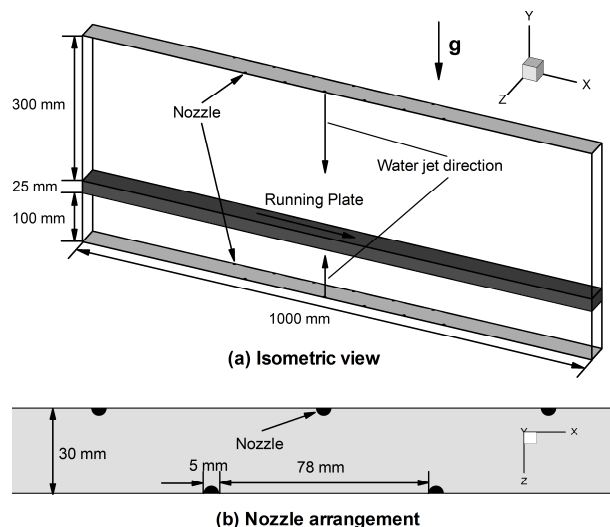


Fig. 1 Computational domain and nozzle arrangement

따라서 본 연구에서는 소재와 냉각수 간의 비등열 전달과 체류수의 자유표면 유동, 소재의 주행 효과를 모두 반영하는 수치해석 모델⁽²⁾을 적용하여, 주행하는 고온 소재의 상하부 동시 냉각 과정을 3차원적으로 해석하였으며 소재 상부와 하부의 냉각 성능을 비교하여 소개한다.

2. 수치해석

Fig. 1 은 수치해석에 사용된 계산 영역과 노즐의 배열을 나타낸 그림이다. 수치해석을 위해 사용된 소재의 두께는 25 mm 이고 수분류 냉각장치의 소재 진행 방향 길이는 1 m 이다. 냉각 장치는 소재의 폭방향으로 반복되는 노즐 배열을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1(b)와 같이 폭방향 노즐 배열의 한 주기인 30 mm 을 계산 영역으로 채택하였으며 계산영역의 측면에 대칭조건을 적용하였다. 소재의 진입온도는 850℃ 이며 1 m/s 의 일정한 속력을 가지고 x 방향으로 주행한다. 소재 상부에서 300 mm 위와 소재 하부에서 100 mm 아래에 지름 5 mm 의 노즐이 엇갈린 배열로 위치한다. 노즐의 출구에서 수분류 분사 속도는 8 m/s 이며 수분류의 온도는 30℃이다.

소재와 냉각수 간의 기본 열전달과 냉각수 분류 및 체류수 유동을 해석하기 위해 3 차원 비정상, 비압축성, 난류 유동에 관한 질량, 운동량 및 에너지 보존방정식들이 지배방정식으로 채택되었다. 난류유동 해석을 위해서 표준 k-ε 모델을 적용하였다. 소재에 지속적으로 공급되는 냉각 수분류에 의해 소재의 상면과 소재 하부의 냉각 장치 위에 체류수가 형성되며 체류수의 자유표면을 추적하기 위해서 VOF(Volume Of Fluid) 방법을 적용하였다. 비정상 해석의 시간 간격은 0.001 초로 설정하고 체류수 형상과 소재의 냉각 이력이 정상상태에 도달할 때까지 해석을 수행하였다. 해석을 위하여 상용 유동해석코드인 Fluent 6.3 이 적용되었다.

소재 표면과 냉각수 사이의 막비등 열전달을 해석하기 위해서 Park⁽²⁾의 해석모델을 수정하여 적용하였으며 이에 대해 간략하게 소개하면 다음과 같다.

열간 압연 이후 고온영역에서는 소재와 냉각수 사이에 주로 막비등 모드로 열교환이 일어날 것으로 예상되며 냉각수의 상변화에 의해서 소재의 표면은 얇은 증기층으로 덮히게 된다. 이러한 증기층은 열전달 측면에서 냉각수와 소재의 열교환을 가로막는 열저항으로 작용한다. Park 의 해석모델

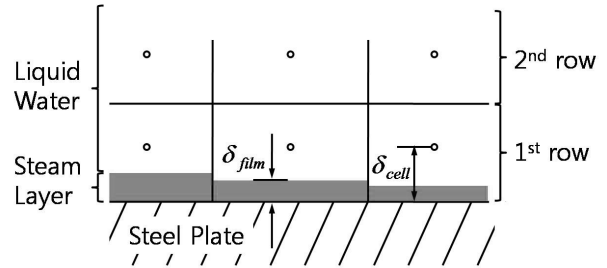


Fig. 2 Surface Heat flux in plate running direction

은 증기층에 대해 직접 격자계를 배정하는 대신 Fig. 2 와 같이 소재 표면으로부터 노즐이 위치한 방향으로 생성된 고정된 격자계의 첫 번째 격자셀에서 증기층이 차지하는 영역의 체적비를 이용하여 냉각수의 열전도도를 수정하는 방법을 사용하고 있다.

먼저, 첫 번째 격자셀 안에서 가정된 초기 유효 열전도도 k_{eff} 를 이용하여 기본적인 열전달 해석을 수행한다. 일반적으로 가정된 초기 유효열전도도 값은 순수한 냉각수의 열전도도 값을 이용한다.

열전달 해석을 통해 소재 표면의 열유속 q''_{wall} 과 소재 표면에서 유체의 온도 T_{wall} 를 구했다면 아래의 식 (1)을 통해서 증기층의 두께 δ_{film} 에 대한 임시값을 얻을 수 있다.

$$q''_{wall} = k_{steam} \frac{T_{wall} - 100}{\delta_{film}} \quad (1)$$

식 (1)은 소재 표면의 열유속을 얇은 증기층 내에서 유한차분적으로 나타낸 식으로 우변의 숫자 100℃은 증기층과 냉각수의 경계에서의 온도를 나타내며 대기압에서 냉각수의 포화증기온도를 나타낸다. k_{steam} 은 증기의 열전도도이다.

다음으로, 소재 표면으로부터 전달된 열유속 q''_{wall} 은 유실 없이 증기층과 냉각수의 경계면을 통해 전달된다고 가정하여 $q''_{int} = q''_{wall}$ 의 관계가 성립하다. 또한 q''_{int} 은 소재 표면에 인접한 첫 번째 격자셀 내부에서 증기층-냉각수 경계와 셀 중심점 사이에 다음 식 (2)와 같이 유한차분적으로 나타낼 수 있다.

$$q''_{int} (= q''_{wall}) = k_{water} \frac{100 - T_{cell}}{\delta_{cell} - \delta_{film}} \quad (2)$$

식 (2)에서 k_{water} 는 물의 열전도도를 나타내며 δ_{cell} 는 첫 번째 격자셀 중심과 소재 표면 사이의 거리를 나타낸다. 식 (2)를 통해서 첫 번째 격자셀

의 온도 T_{cell} 를 새롭게 구할 수 있다.

이제 새롭게 구해진 첫 번째 격자셀 온도 T_{cell} 와 열전달 해석에서 얻어진 소재 표면에서 유체의 온도 T_{wall} 를 이용해서 소재 표면의 열유속을 나타내면 식 (3)과 같다.

$$q''_{wall} = k_{eff,new} \frac{T_{wall} - T_{cell}}{\delta_{cell}} \quad (3)$$

식 (3)을 통해서 첫 번째 격자셀에서 증기층과 냉각수의 열전도도를 모두 반영하는 유효열전도도 k_{eff} 를 새롭게 업데이트 할 수 있다. 이렇게 새롭게 얻어진 유효열전도도를 이용하여 열전달 해석을 다시 수행하고 해석을 통해 얻어진 결과를 이용하여 다시 식 (1)-(3)의 과정을 반복한다. 이러한 반복계산은 유효열전도도 k_{eff} 가 일정 범위 내로 수렴할 때까지 반복된다.

하부 냉각의 경우에는 소재 표면이 냉각수와 닿지 않고 주변 공기에 의해서만 냉각되는 영역이 존재하는데 이러한 영역에서 첫 번째 격자셀의 유효열전도도는 공기의 열전도도와 같아지도록 설정하였다. 공기와 증기막이 닿는 현상은 철판 표면의 극히 일부 영역에서 발생하며 열유속, 철판 온도 등의 해석 결과에 거의 영향을 미치지 않으므로 본 연구에서는 고려하지 않았다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3 은 주행하는 소재의 냉각 과정을 나타내며 초기 진입 온도 850℃의 소재가 상부와 하부

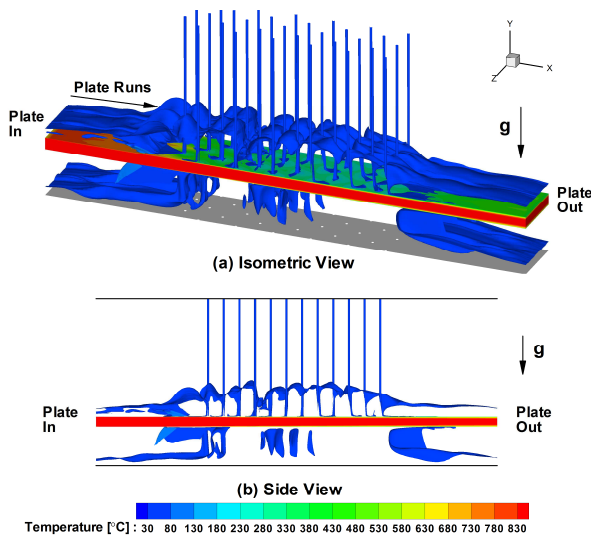


Fig. 3 Shape of residual water in (a) isometric view and (b) side view

에서 분사되는 수분류에 의해서 동시에 냉각되는 것을 확인할 수 있다. 이때 지속적으로 공급되는 수분류에 의해서 주행하는 소재의 상부면에 체류수가 형성되고 소재의 하부면과 하부 냉각 장치 사이에도 체류수가 형성된다. 체류수는 소재를 냉각하는 역할을 하지만 냉각 수분류와 소재와의 충돌을 감소하는 역할도 한다. 상부 냉각의 경우에는 냉각수가 중력가속도 방향으로 분사되며 소재 상부에 쌓여있는 체류수를 관통하며 소재와 충돌한다. 반대로 하부 냉각의 경우에는 냉각수가 중력가속도의 역방향으로 분사되며 하부 냉각 장치 위에 형성된 체류수를 관통하며 소재와 충돌하게 된다. 소재의 하부면과 충돌한 냉각수는 소재의 하부면과 하부 냉각 장치 사이의 수분류 분사 영역을 가득 채우며 철판의 입구 영역과 출구 영역으로 빠져나간다.

Fig. 4 는 소재 표면의 온도 변화를 소재 주행 방향을 따라 나타내고 있다. 소재가 주행하는 방향으로 6 개의 노즐이 존재하며 냉각수 분류가 소재와 충돌하는 각 지점에서 소재 표면의 온도가 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 소재가 진입하는 입구에서부터 수분류와 충돌하기 이전까지 소재의 상부는 체류수에 의해서 냉각되지만 소재의 하부는 공기에 의해서만 냉각이 되므로 온도가 거의 떨어지지 않는다. 상부 냉각의 경우 하부 냉각보다 소재 표면의 온도가 더 많이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 소재 표면의 최저 온도는 상하부면에서 최대 200℃의 차이를 보이고 있다. 수분류의 충돌에 의한 냉각이 종료된 후에는 소재

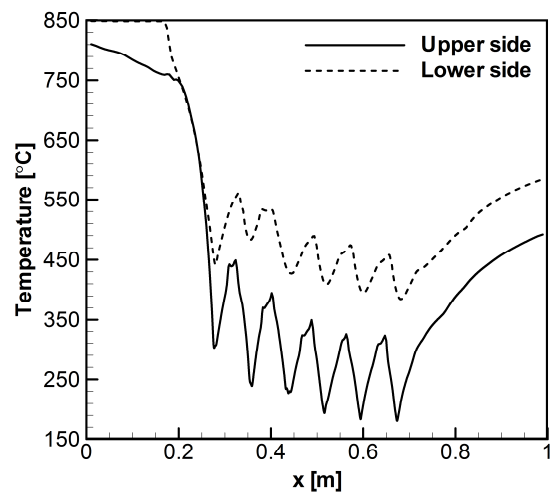


Fig. 4 Temperature profile on plate surface along plate running direction

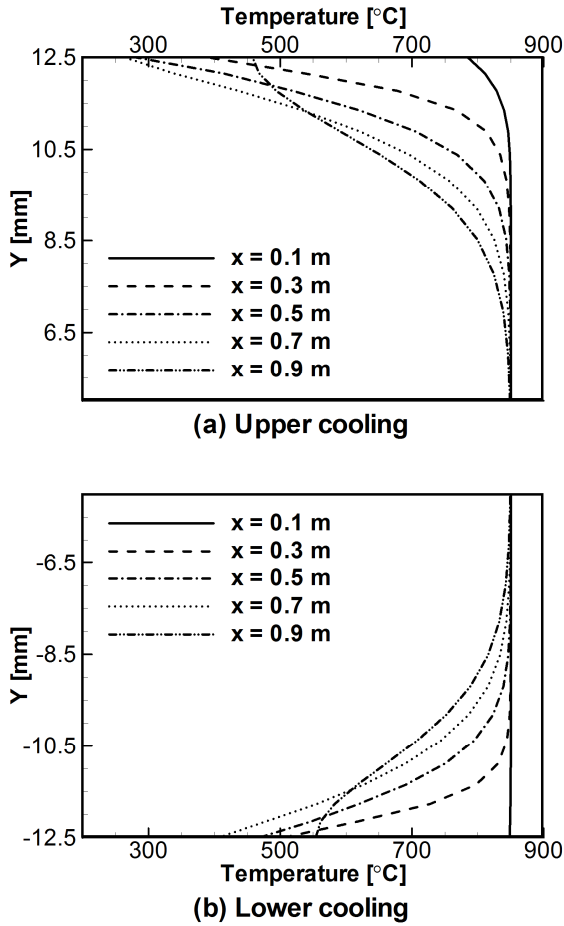


Fig. 5 Temperature profile along thickness direction for (a) upper cooling and (b) lower cooling

표면의 온도가 다시 상승하는 것을 확인할 수 있는데 이는 소재 내부의 열이 전도를 통해서 소재 표면으로 전달되기 때문이다.

Fig. 5 는 소재의 두께방향 온도분포를 상부 냉각과 하부 냉각에 대하여 소재 주행방향 여러 위치에서 비교하여 나타내고 있다. 입구로부터 0.1 m 부근에서 상부 냉각의 경우에는 소재 위에 쌓인 체류수에 의해서 냉각이 시작되어 소재의 온도가 감소하지만 하부의 경우에는 소재가 냉각수와 직접적으로 닿지 않기 때문에 온도가 850°C로 거의 일정한 것을 확인할 수 있다. 소재 진행방향 하류로 갈수록 소재 내부의 온도가 감소하지만 소재의 중앙부분에서는 온도 강하가 거의 나타나지 않는다. 수분류가 분사되는 영역을 지나서 900 mm 부근에서 소재 내부의 온도는 상류보다 낮지만 소재 표면의 복열 현상으로 온도가 상승하였다. 각각의 위치에서 상부가 하부보다 더 많이 냉각되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6 은 소재 표면에서의 유효열전도도 k_{eff} 의

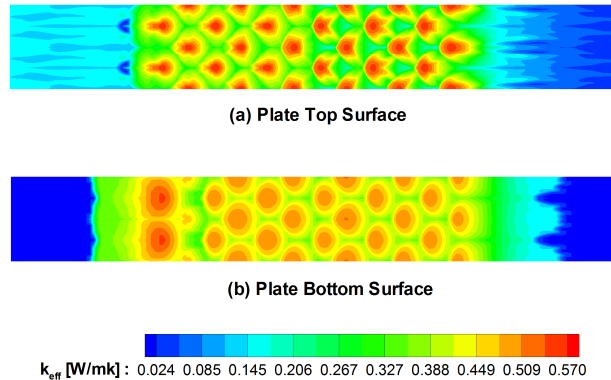


Fig. 6 Distribution of effective thermal conductivity on (a) plate top surface and (b) plate bottom surface

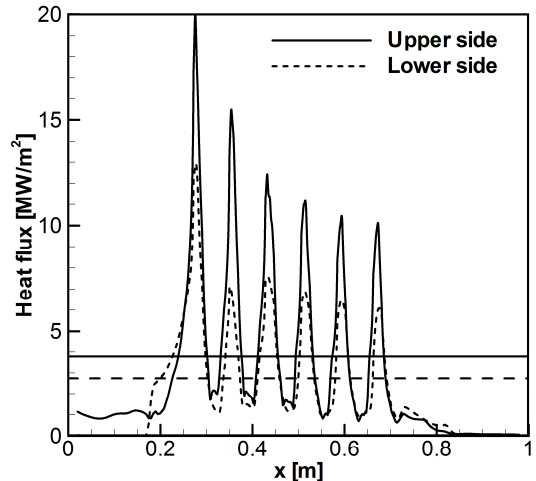


Fig. 7 Distribution of effective thermal conductivity on (a) plate top surface and (b) plate bottom surface

분포를 나타내고 있다. 소재의 표면에서 계산된 유효열전도도는 공기의 열전도도 $k_{air} = 0.0242 \text{ W/m} \cdot \text{k}$ 와 냉각수의 열전도도 $k_{water} = 0.6 \text{ W/m} \cdot \text{k}$ 사이의 값을 가짐을 확인할 수 있다. 수분류가 소재 표면과 충돌하는 지점에서 유효열전도도는 높은 값을 가지는데 이는 수분류의 충돌에 의해서 증기층이 얇아지는 현상을 반영하고 있다. 또한 수분류가 소재와 충돌하는 지점에서 소재의 상부와 하부의 유효열전도도를 비교해보면 소재 상부의 유효열전도도가 더 큰 값을 가지는데 이는 소재의 상부에서 수분류의 충돌 압력이 더 크기 때문으로 해석할 수 있다. 소재의 상부면에서 수분류의 최대 충돌 압력은 35 kPa 으로 소재의 하부면에서 수분류의 최대 충돌 압력 5 kPa 보다 7 배 이상 큰 값을 가진다. 뿐만 아니라 소재의 상부에서는 유효열전도도의 공간 구배가 매우 크게 나타나고 있는 반

면 하부면에서는 매우 원만한 구배를 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 소재 표면에서의 국소 열유속의 편차는 하부면에서 더 작을 것으로 예상되고 소재의 국소 재질 편차가 상부면에 비해 하부면에서 줄어들 것으로 예상된다. 하부 냉각의 경우 소재의 표면이 냉각수와 접하지 않는 부분에서 유효열전도도 값은 공기의 열전도도 값과 같다.

Fig. 7 은 노즐이 위치한 단면에서 소재 표면의 열유속을 소재 주행 방향을 따라 나타낸 그림이다. 열유속은 수분류가 충돌하는 지점에서 국부적으로 높은 피크값을 가지며 소재가 주행방향으로 냉각되기 때문에 열유속의 피크값도 주행방향을 따라 감소하고 있다. 상부 냉각의 경우 소재가 진입하는 곳에서 수분류가 충돌하기 전까지 소재는 체류수에 의해서만 냉각되며 이 영역에서의 열유속은 피크값보다 훨씬 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 즉 주행하는 고온 소재는 주로 수분류의 충돌에 의해서 지배적으로 냉각되며 체류수에 의한 냉각 효과는 상대적으로 크지 않음을 알 수 있다. 그림의 수평선들은 소재 표면에서 평균 열유속을 나타내고 있다. 소재 상부면에서 평균 열유속은 3.78 MW/m^2 이고 하부면에서 평균 열유속은 2.74 MW/m^2 으로 상부 냉각의 경우 하부 냉각보다 냉각 성능이 약 37.9% 이상 높다. 상부 냉각과 하부 냉각에서 수분류의 분사속도가 8 m/s 로 동일하여 공급 유량이 동일하지만 하부 냉각의 냉각능력이 더 낮은 값을 보임을 확인할 수 있다. 이는 소재의 하부 면과 하부 냉각 장치 사이에 가득 차있는 두꺼운 체류수가 수분류의 운동량을 크게 감소시키고 또 중력의 영향으로 수분류의 충돌압력이 줄어들었기 때문으로 해석할 수 있다.

4. 결 론

주행하는 고온 강재의 상하부 동시 냉각 과정을 3 차원 수치해석을 통해서 모사하였다. 소재와 냉각수 사이의 막비등 열전달을 해석하기 위해서 소재 표면에서 형성되는 얇은 증기층의 영향을 반영하는 유효열전도도의 개념을 도입하였으며 소재의 표면에서 유효열전도도 값을 구할 수 있었다. 소재는 소재의 상부와 하부에 위치한 노즐에서 분사되는 수분류의 충돌에 의해서 지배적으로 냉각되며 수분류와 소재의 충돌 지점에서 소재의 온도가 급격하게 감소하고 열유속의 피크값을 가진다. 소재의 표면에 쌓이는 체류수에 의한 냉각 효과는 크지 않음을 확인하였다. 그러나 체류수는 수분류와 소재의 충돌을 감소하는 역할을 함으로써 냉각

능에 지배적인 영향을 미친다. 실제 냉각 공정에서는 소재의 상부와 하부에 큰 온도 차이가 발생할 경우 소재의 상하 휨 등의 변형에 의해 문제가 발생할 수 있다. 따라서 상하부 균일 냉각은 매우 중요한 문제이며, 본 연구에서는 동일 냉각수 유량이 상부와 하부면에 공급될 때 소재의 하부면에 비해 상부면에서 약 37.9% 큰 평균 열유속을 나타냄을 수치해석을 통하여 확인하였다.

후 기

이 논문은 2013 년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2013R1A1A2A10059593)

참고문헌 (References)

- (1) Wolf, D. H., Incropera, F. P. and Viskanta, R., 1993, "Jet Impingement Boiling," *Advance in heat transfer*, Vol. 23, No. 1, pp. 1~132.
- (2) Park, I. S., 2011, "Numerical Analysis for Film Boiling Heat Transfer of a Moving Hot Steel Plate," *ISIJ International*, Vol. 51, No. 5, pp. 743~747.
- (3) Chen, S. J., Kothari, J. and Tseng, A. A., 1991, "Cooling of a Moving Plate with an Impinging Circular Water Jet," *Experimental thermal and fluid science*, Vol. 4, No. 3, pp. 343~353.
- (4) Kwon, M. J. and Park, I. S., 2013, "Numerical Study of the Effect of Nozzle Arrangement on Cooling Process in Running Hot Steel Strip after Hot Rolling," *ISIJ International*, Vol. 53, No. 6, pp. 1042~1046.
- (5) Zhang, D. H., Wang, B. X., Zhou, N., Yu, M. and Wang, J., 2008, "Cooling Efficiency of Laminar Cooling System for Plate Mill," *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 15, No. 5, pp. 24~28.
- (6) Nakanishi, S., Ishigai, S., Ochi, T. and Morita, I., 1980, "Film Boiling Heat Transfer of Impinging Plane Water Jet," *JSME Ser. B*, Vol. 46, pp. 955~961.
- (7) Kim, K. M. and Son, G. H., 2013, "Numerical Analysis of Film Boiling in Liquid Jet Impingement," *Numerical heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 64, No. 9, pp. 695~709.
- (8) Xu, F. and Gadala, M. S., 2006, "Heat Transfer Behavior in the Impingement Zone under Circular Water Jet," *International Journal of heat and mass transfer*, Vol. 49, No. 21, pp. 3785~3799
- (9) Robidou, H., Auracher, H., Gardin, P. and Lebouche, M., 2002, "Controlled Cooling of a Hot Plate with a Water Jet," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 26, No. 2, pp. 123~129.