

## 열간압연 이후 주행하는 고온 강재의 냉각해석에서 소재의 물성변화 효과 연구

박 일 석\*\* · 박 정 은\*

\* 경북대학교 기계공학부

### Study for Effect of Changes in Thermal Properties on Cooling Process in Running Hot Steel Strip After Hot Rolling

Il Seouk Park\*\* and Jung Eun Park\*

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

(Received September 21, 2012 ; Revised January 16, 2013 ; Accepted January 16, 2013)

**Key Words:** Hot Rolling(열간압연), Film Boiling(막비등), Steam Layer(증기층), Leidenfrost Phenomenon(라이덴프로스트 현상), Thermal Properties(열물성)

**초록:** 열연 판재 제조과정에서는 제품의 강도와 인성을 제어하기 위해 압연 직후 800℃ 이상의 고온 소재를 수냉각 방식으로 급속 냉각시킨다. 이 과정에는 소재 표면과 냉각수 사이의 비등 열전달 현상과 소재 표면에 쌓이는 체류수의 자유표면 유동, 소재의 고속 주행 등 매우 복잡한 물리현상들을 포함하고 있다. 본 연구에서는 이 모든 물리 현상들을 수치적으로 모델링한 해석 모델을 적용하여 기본 열전달 해석을 수행한다. 실제로 소재는 냉각에 의해 내부에서 오스테나이트로부터 페라이트로 상변태가 일어나고 이로 인해 소재의 국부적인 열물성치의 변화가 발생하지만 본 연구에서는 상변태를 직접 푸는 방법 대신 이미 알려진 소재의 온도에 따른 물성변화 곡선을 이용하여 냉각해석을 수행하고 이를 기존의 일정 물성치 조건에서 해석한 결과와 비교하여 소재의 물성변화가 소재 냉각에 미치는 영향과 상변태 해석의 필요성에 대해 검토하였다.

**Abstract:** In the manufacturing process of steel plates, materials at high temperatures above 800°C are rapidly cooled by using a circular impinging water jet to determine their strength and toughness. In this study, the basic heat and fluid flow is solved by using the existing numerical model for boiling heat transfer. Actually, steel undergoes a phase change from austenite to ferrite or bainite during the cooling process. The phase change induces changes in its thermal properties. Instead of directly solving the phase change and the material cooling together, we solve the heat transfer only by applying the thermal properties that vary with temperature, which is already known from other studies. The effects of the changes in the thermal properties on the cooling of steel and the necessity of calculating the phase change are discussed.

- 기호설명 -

$T$  : 온도(°C)  
 $q''$  : 열유속(W/m<sup>2</sup>)  
 $k$  : 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

### 1. 서론

열간 압연을 거친 800℃ 이상의 고온 철강 판재는 일반적으로 봉상 수분류 (circular water jet)

† Corresponding Author, [einstein@knu.ac.kr](mailto:einstein@knu.ac.kr)  
© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

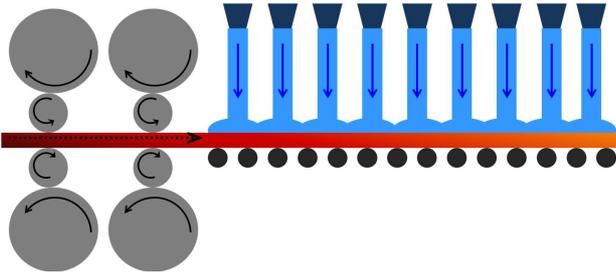


Fig. 1 Schematic of cooling process after hot rolling

에 의해 냉각되어 진다. 이 과정을 현장에서는 가속 냉각 공정이라고 하며 제품의 강도와 인성 등 기계적 물성을 결정하는 중요한 공정이다.

Fig. 1은 압연 직후 소재가 노즐로부터 공급되는 수분류 구간을 통과하면서 냉각되는 과정을 나타내는 도식도이다. 소재 표면과 냉각수 간에는 큰 온도차로 인해 비등 열전달 기구를 통해 열교환이 일어나고 소재에 대량으로 공급된 냉각수는 Fig. 1과 같이 어느 정도의 수위를 형성하며 체류수 층을 형성한다. 이 체류수 층은 외부 공기와의 계면을 형성하므로 본 문제는 자유표면 유동을 포함하게 된다. 또한 소재는 초당 1~10 m/s의 고속으로 주행하므로 철판과 냉각수 사이에 강제 대류 열전달이 존재한다. 이와 같이 본 연구에서 다루고자 하는 문제는 비등열전달, 자유표면 유동, 이동하는 물체 등 단독으로도 해결하기 복잡한 물리현상들을 포함하고 있을 뿐 아니라 이들 간의 상호작용으로 파생되는 복합적인 물리현상까지 나타나므로 이들 현상들에 대한 포괄적 시각의 연구가 요구되고 있다.

Jambunathan 등<sup>(1)</sup>은 정지한 고온 물체 위의 원형 층돌 수분류에 의한 냉각 실험을 수행하였고, Zumbrunnen 등<sup>(2)</sup>은 소재가 주행하는 경우에 수분류에 의한 소재 냉각결과를 정지한 소재의 냉각결과와 비교하는 실험 연구를 실시하였으며 봉상 수분류 대신 평상 수분류 (planar water jet)를 사용하여 실험하였다. Choi 등<sup>(3)</sup>은 수분류 노즐 배열을 사각 배열, 육각배열, 엇갈림 배열 등 다양하게 바뀌어가며 냉각능 테스트를 실시하였으며 엇갈림 배열이 가장 좋은 냉각능을 나타낸 것으로 보고하고 있다.

이상의 실험 연구들과 달리 해석에 의한 연구는 앞서 언급한 복잡하고 어려운 물리 현상들로 인하여 주로 기존의 실험결과에 의존한 경험치를 바탕으로 과정 동안 소재의 온도 강하량을 예측

하는 방향으로 발전하였다. Zumbrunnen 등<sup>(4)</sup>은 비등현상에 의한 소재의 냉각이력 해석을 위해 실험을 통해 알려진 열유속-과열도 관계식을 이용한 바 있다. 한편 많은 연구자들이 소재 내부의 온도 분포에 관심을 가졌는데 이는 냉각에 따른 소재의 상변태와 이로 인한 금속학적 재질 변화 및 기계적 물성변화를 연결지어 생각하고 있기 때문이다. Robidou 등<sup>(5)</sup>과 Xu 등<sup>(6)</sup>은 실험결과에 대한 역열전도문제 (Inverse Heat Conduction Problem, IHPC) 해석을 통해 소재 표면의 열유속 및 소재 내부의 온도 분포 등에 대한 정보를 얻어내었다.

최근 Park<sup>(7)</sup>은 소재와 냉각수 간의 비등열전달과 체류수의 자유표면 거동 그리고 냉각대상물의 고속 이동 등의 효과를 모두 반영한 수치해석 방법을 개발하였다. Park<sup>(7)</sup>은 소재와 냉각수 사이의 열교환이 압연 직후의 고온영역에서는 주로 막비등(film boiling) 모드로 이뤄질 것으로 가정하여 해석모델을 완성하였다. 이 해석모델을 이용하여 이후 다양한 해석결과들이 발표되었는데 소재의 주행속도, 냉각수 공급 유량, 냉각수 공급 노즐의 형상, 노즐 배열 등 다양한 운전 변수들에 의한 냉각능 변화 특성에 관한 연구가 이어졌으며 [8, 9] 무엇보다도 소재 내부의 온도 분포를 알 수 있고 실험에 포함된 여러 가지 불확실성들이 배제된 채로 수치해석이 가능하므로 각각의 설계 및 운전 인자들의 영향에 대한 정성적인 비교 평가가 가능해졌다.

열간압연을 마친 철강 소재는 주로 오스테나이트 상에서부터 냉각이 진행됨에 따라 페라이트, 베이나이트 등으로 상변태가 일어나게 되는데 이 과정에서 소재는 금속학적 구조가 바뀌고 열전도도, 비열, 밀도 등의 열물성값들이 변화하며 결과적으로 강도, 인성 등의 기계적 성질이 이 과정을 통해 결정된다. 따라서 상변태와 열전달은 서로 강하게 연계되어 있으므로 공정의 본 목적을 생각하면 열전달과 더불어 상변태 과정 또한 엄밀히 다루어져야 한다.

본 연구에서는 상변태와 열전달 두 현상을 엄밀하게 연계하여 연구하기 전에 이미 알려진 소재 열물성치들의 온도에 따른 변화를 대입하여 열전달 해석을 수행함으로써 상변태에 의한 열물성치의 변화가 열전달에 미치는 영향에 대해 살펴해보았다. 온도에 따른 물성치 변화를 고려한 경

우와 그렇지 않은 경우의 소재 내부 온도 분포, 소재 냉각이력 등을 비교하여 소개한다.

## 2. 수치해석

소재와 냉각수 사이의 비등열전달 모드에 의한 열교환과 체류수 자유표면 유동, 소재 주행 등을 동시에 해석하기 위하여 Park<sup>(7)</sup>의 해석모델이 적용되었다. 본 논문에서는 Park의 모델 중 비등열전달 해석 부분에 대한 기본 사상을 자세히 소개하고자 한다.

열간 압연 직후와 같이 소재 표면의 온도가 Leidenfrost 온도보다 높은 고온영역에서는 소재 표면에서 주로 막비등 모드로 열교환이 일어날 것으로 예상되며 따라서 냉각수의 상변화에 의해 생겨난 증기가 소재 표면에 얇은 증기막을 형성하게 되고 이를 Leidenfrost 증기층이라고 부른다. 이 증기층의 두께는 일반적으로 50~100  $\mu\text{m}$  정도인 것으로 알려져 있으며 열전달 측면에서는 냉각수와 소재의 열교환을 가로막는 심각한 열저항으로 작용한다. Park의 해석모델에서는 정확한 두께도 알지 못하고, 시간 혹은 공간적으로 그 두께가 계속하여 변할 수 있는 이 얇은 증기층에 대해 직접 격자계를 배정하는 대신 Fig. 2와 같이 소재 표면으로부터 냉각수 방향으로 생성된 고정된 격자계 안에서 증기층이 차지하는 영역의 체적비를 이용하여 첫 번째 격자셀에서 냉각수의 열전도도를 수정하는 방법을 사용하고 있다. 또한 이렇게 얻은 유효열전도도와 증기층의 두께는 다음의 반복 계산 과정을 통해 결정되어진다.

우선, 가정한 초기 유효열전도도  $k_{eff}$ 를 이용하여 소재와 냉각수를 포함한 계산영역 내에서 열전달 해석을 수행한다. (일반적으로 초기 값은 순수 냉각수의 열전도도를 이용한다.)

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

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

$$q_{wall}'' = k_{eff} \frac{T_{wall} - T_{cell}}{\delta_{cell}} \quad (3)$$

열전달 해석을 통해 얻어진 소재 표면의 열유속,  $q_{wall}''$ 은 식 (1)과 같이 얇은 증기층 내부에서의 전도열유속으로도 표현될 수 있으므로 식 (1)

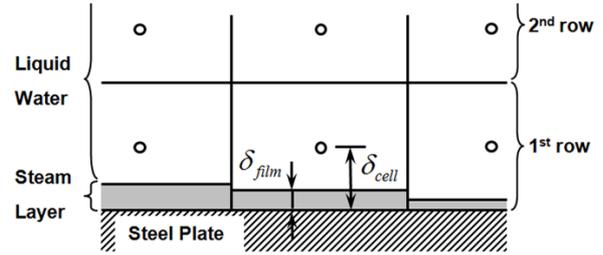


Fig. 2 Numerical modeling for heat transfer between cooling water and steam layer

을 통해 증기막 두께,  $\delta_{film}$ 에 대한 임시값을 얻을 수 있다. 이 때  $T_{wall}$ 은 열전달 해석을 통해 얻어진 소재 표면의 유체 온도를 사용한다. 식 (1) 우변에 나타난 숫자 100은 증기층과 냉각수의 실제 경계에서 온도를 나타내며 대기압에서의 포화증기온도 100 $^{\circ}\text{C}$ 를 의미하고 있다.

다음으로 소재 표면 열유속  $q_{wall}''$ 은 증기층과 냉각수 사이의 경계면과 첫 번째 격자셀 사이 구간에서의 전도열유속으로 식 (2)와 같이도 표현될 수 있다. 이 때  $\delta_{cell}$ 은 첫 번째 격자셀 중심과 소재 표면 사이의 거리를 나타내며, 식 (2)를 통해 첫 번째 격자셀의 온도,  $T_{cell}$ 이 새로 얻어지게 된다.

이제 이렇게 새로 얻어진 첫 번째 격자셀 온도  $T_{cell}$ 과 열전달 해석에서 얻어진 소재 표면에서의 유체 온도  $T_{wall}$ 을 이용하여 첫 번째 격자셀에서 계산한 전도열유속도 열전달 해석에서 얻어진 소재 표면 열유속  $q_{wall}''$ 와 동일해야 하므로 식 (3)이 성립하게 된다. 우리는 식 (3)을 통해 유효열전도도  $k_{eff}$ 를 새롭게 업데이트하고 새 유효열전도도를 이용하여 열전달 해석을 다시 수행한다. 열전달 해석을 통해 얻어진 결과를 이용하여 다시 식 (1)-(3)의 과정을 통해 유효열전도도를 업데이트한다. 이와 같은 반복계산은 유효열전도도  $k_{eff}$ 가 일정 범위 내로 수렴할 때까지 반복된다.

소재와 냉각수 간의 기본 열전달과 냉각수 분류 및 체류수 유동을 해석하기 위해 3 차원 비정상, 비압축성, 난류 유동에 관한 질량, 운동량 및 에너지 보존 방정식들이 지배방정식으로 채택되었으며, 지속적으로 공급되는 냉각수 분류에 의해 소재 상면에 형성되는 체류수의 자유표면 거동을 추적하기 위해서 VOF(Volume of Fluid)<sup>(10)</sup> 방법이 채택하였다. 비정상 해석을 위해 암시적

(implicit) 시간차분법을 적용하고, 시간 간격은 0.001 초로 4 초 동안 해석하였다. 난류유동 해석을 위해서는 표준 k-ε 모델이 적용되었다.

### 3. 모델링

수치해석을 위해 사용된 소재의 두께는 25 mm 이고 수분류 냉각장치의 길이는 1 m 이다. 냉각 장치는 폭방향으로 반복되는 노즐 배열을 가지고 있으므로 본 연구에서는 폭방향 노즐 배열의 한 주기만을 계산 영역으로 채택하였다. 계산 영역의 폭방향 크기는 90 mm이다. 수분류 분사 노즐과 소재 사이의 거리는 150 mm이고, 분사 노즐의 모양은 원형이며 직경은 5mm이다. 소재가 진행되는 방향으로 노즐 간격은 78 mm로 일정하게 하였다. 소재의 초기 진입온도는 850°C이고 소재 주행 속도는 1 m/s, 수분류 분사 온도는 30°C이며 분사 속도는 5.56 m/s이다.

본 연구에서는 소재의 물성이 온도에 따라 변하는 경우와 변하지 않는 경우의 소재 냉각 특성에 대해 비교 연구를 수행하므로 Table 1은 각 경우의 소재 비열과 열전도도를 나타내고 있다. Case1은 소재의 열물성값으로 해석영역 내에서 소재표면의 평균온도에 해당하는 일정한 값을 이용한 경우이고 Case2는 열물성이 온도에 따라 바뀌는 경우이다. 밀도는 온도가 바뀌어도 그다지 크게 영향을 받지 않기 때문에 본 연구에서는 밀도에 대하여는 Case1, Case2 모두 일정한 값을 사용하였다.

### 4. 결과 및 고찰

Fig. 4은 비등열전달, 자유표면유동, 소재 주행

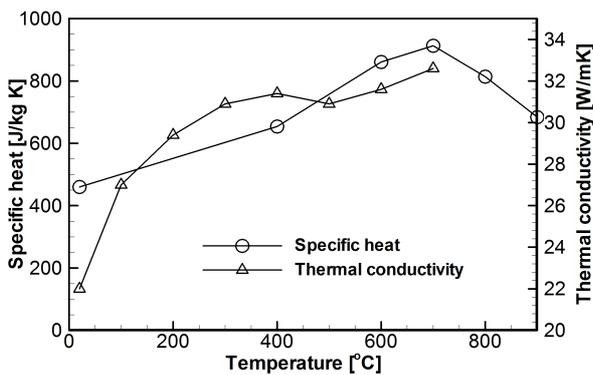


Fig. 3 Change of properties for case 2

Table 1 Specific heat and thermal conductivity of steel plates

Specific heat [J/kg·K]			Thermal conductivity [W/m·K]			
Temp. [°C]	Case1	Case2	Temp. [°C]	Case1	Case2	
20	757.5	460	20	31.25	22.0	
400		654	100		27.0	
600		861	200		29.4	
700		913	300		30.9	
800		814	400		31.4	
900		684	500		30.9	
1500		684	684		600	31.6
					700	32.6
					800	32.6

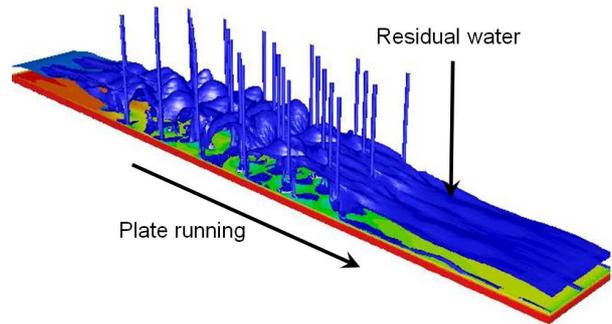


Fig. 4 Shape of residual water and plate cooling

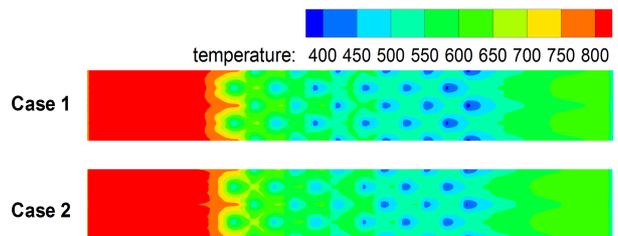


Fig. 5 Temperature distribution on plate surface

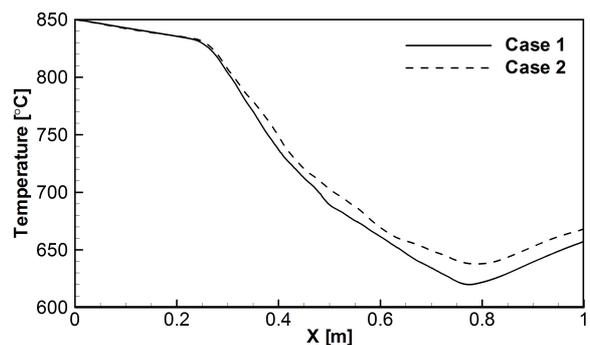


Fig. 6 Temperature profile under 1mm from plate surface

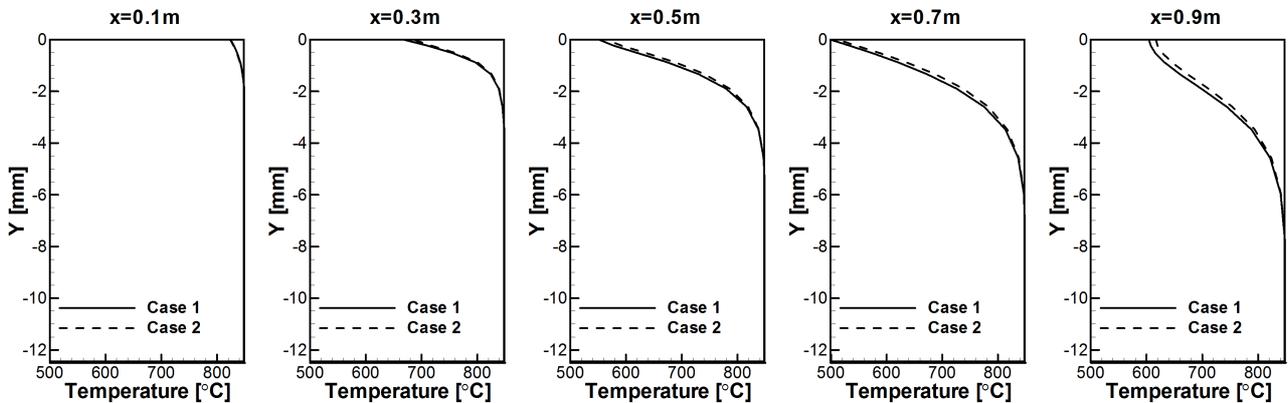


Fig. 7 Temperature profile along thickness direction

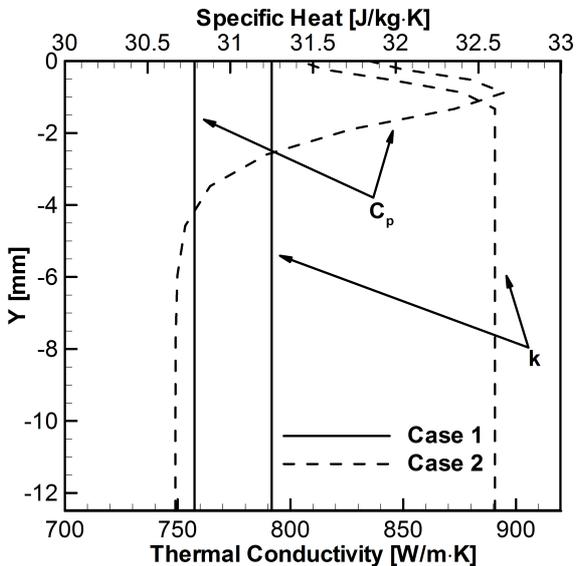


Fig. 8 Specific heat and thermal conductivity profile in thickness direction

등의 효과를 모두 고려한 해석을 통해 얻은 체류수 형상과 소재 냉각과정을 표현한 그림이다. 연속해서 공급되고 있는 냉각수 분류와 소재의 주행에 의해 소재 윗면에 형성된 체류수 모양과 고온의 소재가 냉각되어 나가는 모습을 한눈에 확인할 수 있다.

Fig. 5는 소재 표면에서의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 입구부근에서 온도가 800℃ 이상이며, 노즐에서 분사되는 냉각수 분류를 직접적으로 맞는 영역에서는 국소적으로 온도가 낮아져 다이아몬드 무늬의 패턴이 생기는 것을 확인할 수 있다. 소재 표면에서 온도 측면에서는 Case1과 Case2의 차이는 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 다만 물성이 온도에 따라 변하는 Case2가 약간

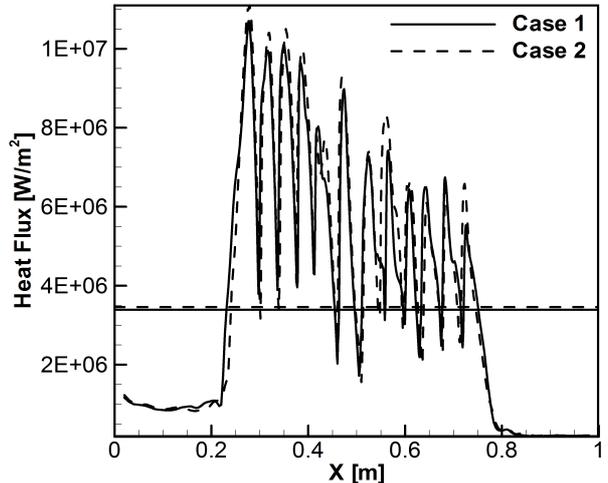


Fig. 9 Heat flux in plate running direction

덜 냉각되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6는 소재 표면으로부터 1 mm 아래 위치에서 소재 주행 방향을 따른 소재의 냉각이력을 나타낸 그림이다. 첫 번째 분사노즐이 위치한 입구로부터 0.3 m까지는 온도가 서서히 감소하다가 이후 냉각수 분류의 영향으로 급격하게 냉각되는 것을 확인할 수 있으며, 0.8 m 지점 이후로는 소재가 복열되는 현상을 확인할 수 있다. 소재의 입구 부근에서는 Case1과 Case2의 온도차이가 거의 없다가 출구 쪽으로 갈수록 온도차이가 커지는 것을 확인할 수 있다. 온도에 따라 물성의 변화를 고려한 Case2가 냉각이 덜 되고 있음을 다시 확인할 수 있다.

Fig. 7은 소재의 두께방향으로의 온도 변화를 나타낸 그림이다. 소재의 중앙부분에서는 거의 온도 강하가 없는 것을 확인할 수 있으며 주행방향 0.1 m 부근에서는 분사되는 냉각수 분류의 직접

적인 영향을 받지 않으므로 소재 표면에서도 온도 강하가 거의 나타나지 않고 있다. Case1과 Case2의 온도 차이는 소재 진행방향 하류로 갈수록 또 소재 두께방향으로는 소재 표면 근처에서 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있으며 그 크기는 10~20℃ 정도이다.

Fig. 8은 Case1과 Case2에 대해 소재 주행방향 0.5 m 위치에서 두께방향으로 열전도도와 비열의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 현재 지점에서 표면 온도는 550℃까지 내려감을 알 수 있고, 그 결과 Fig. 8과 같이 Case2의 표면 근처에서 비열이 증가하다가 감소하는 구간이 나타나고 있다. 비열과 열전도도 모두 Case1에 비해 크게 다른 값이 적용되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 소재 표면에서의 열유속을 나타낸 그림이다. 여러 개의 피크점을 확인할 수 있으며, 이는 소재 주행방향으로 배열된 노즐의 수와 일치하게 나타남을 알 수 있다. 소재와 냉각수간 온도차가 가장 큰 입구 영역 근처에서 큰 열유속 분포가 예측되고 있다. Case1과 Case2의 차이는 거의 나타나지 않고 있다. Fig. 9에 수평하게 그린 두 선분은 Case1과 Case2의 평균 열유속을 나타낸 것인데 그 차이는 약 2% 정도에 그치고 있다.

## 5. 결 론

비등현상과 자유표면유동, 소재주행을 동반한 강제 수냉각 과정에 대하여 수치해석 연구를 수행하였다. 냉각시 상변태에 의한 열물성의 변화가 냉각에 미치는 영향을 알아보기 위해 열물성이 일정한 Case1과 온도에 따라 비열, 열전도도가 바뀌는 Case2에 대하여 열전달 해석을 수행하고 온도변화 및 냉각능력의 차이를 비교, 분석하였다.

열전도도의 경우 소재 내부에서 Case1과 Case2에 적용되는 값이 차이가 크에도 불구하고 전체적인 평균열유속에서는 약 2%의 차이만 보이고 있다. 따라서 강도, 인성 등 제품의 기계적 재질을 예측하기 위하여 열전달 해석 결과를 이용해 상변태 결과를 도출하려는 일방향연계 해석이 충분히 타당성이 있음을 입증할 수 있었다. 그러나 금속이 상변태 과정에 발열 또는 흡열 반응에 의

해 열을 생성하거나 소실하는 경우에는 쌍방향연계 해석이 여전히 필요할 것으로 여겨진다.

## 후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2010-0024619)

## 참고문헌

- (1) Jambunathan, K., Lei, E., Moss, M. A. and Button, B. L., 1992, "A Review of Heat Transfer Data for Single Circular Jet Impingement," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 13, pp. 106~115.
- (2) Zumbrennen, D. A., Incropera, F. P. and Viskanta, R., 1990, "Method and Apparatus for Measuring Heat Transfer Distributions on Moving and Stationary Plates Cooled by a Planar Liquid Jet," *Experimental Thermal and Fluid Science*, pp. 202~213.
- (3) Choi, J. H., Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2002, "The Effects of Impingement Hole Arrangements on Heat Transfer of an Impingement/Effusion Cooling System," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 26, No. 1, pp. 101~109.
- (4) Zumbrennen, D. A., Viskanta, R. and Incropera, F. P., 1989, "The Effect of Surface Motion on Forced Convection Film Boiling Heat Transfer," *Journal of Heat Transfer, Transaction of ASME*, Vol. 111, pp. 760~766.
- (5) Robidou, H., Auracher, A., Gardin, P. and Lebouche, M., 2002, "Controlled Cooling of a Hot Plate with a Water Jet," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 26, pp. 123~129.
- (6) 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, pp. 3785~3799.
- (7) Park, I. S., 2011, "Numerical Analysis for Boiling Heat Transfer of a Moving Hot Steel Plate," *ISIJ International*, Vol. 51, No. 5, pp. 743~747.
- (8) Park, I. S., 2011, "Fully Numerical Analysis for Effects of Cooling Water Flow Rate and Plate

- Running Speed on Steel Plate Cooling in Very High Temperature Region," *ISIJ International*, Vol. 51, No. 11, pp. 1864~1869.
- (9) Park, I. S., 2012, "Numerical Study on Effects of Nozzle Diameter on Plate Cooling in Run Out Table of Hot Plate Rolling Process," *ISIJ International*, Vol. 52, No. 6, pp. 1080~1085.
- (10) Hirt, C. W. and Nichols, B. D., 1981, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201~225