

냉각수온 효과에 따른 고온 강판의 스프레이 냉각 열전달 특성 연구[§]

이정호^{*†}, 유정환^{**}, 박상진^{*}

* 한국기계연구원 열유체시스템연구실, ** LG 전자 HA 사업본부

Effect of Water Temperature on Heat Transfer Characteristic of Spray Cooling on Hot Steel Plate

Jungho Lee^{*†}, Cheong-Hwan Yu^{**} and Sang-Jin Park^{*}

* Dept. of Thermal Systems, Korea Institute of Machinery and Materials

** Division of Home Appliance, LG Electronics Co.

(Received May 26, 2010 ; Revised February 15, 2011 ; Accepted February 20, 2011)

Key Words: Water Temperature(수온), Spray Cooling(스프레이 냉각), Hot Steel Plate(고온 강판)

초록: 수분류 스프레이 냉각은 900℃ 이상의 고온에서 강판을 냉각하는데 매우 중요한 기술이다. 본 연구는 냉각수온이 고온 강판의 수분류 스프레이 냉각에 미치는 영향을 고찰하였다. 이 때의 열유속은 시편, 카트리지히터, 열전대의 조합으로 고안된 열유속계이치를 제작하여 엄밀하게 측정되었다. 스프레이는 fullcone 노즐로부터 생성되고 냉각실험은 일정한 스프레이 질량유속과 노즐과 표면 사이의 거리 조건에서 수행되었다. 냉각수온의 효과는 5℃에서 45℃까지 다섯 가지의 서로 다른 수온에 대한 수분류 스프레이 냉각의 열전달 현상을 비교 및 평가하였다. 여기서 열유속곡선과 열전달계수는 고온 강판의 냉각공정에서 실제 스프레이 냉각을 위한 기본 데이터로 활용될 수 있다.

Abstract: Water spray cooling is a significant technology for cooling of materials from high-temperature up to 900℃. The effects of cooling water temperature on spray cooling are mainly provided for hot steel plate cooling applications in this study. The heat flux measurements are introduced by a novel experimental technique that has a function of heat flux gauge in which test block assemblies are used to measure the heat flux distribution on the surface. The spray is produced by a fullcone nozzle and experiments are performed at fixed water impact density of G and fixed nozzle-to-target spacing. The results show that effects of water temperature on forced boiling heat transfer characteristics are presented for five different water temperatures between 5 to 45℃. The local heat flux curves and heat transfer coefficients are also provided to a benchmark data for the actual spray cooling of hot steel plate cooling applications.

- 기호설명 -

AR : 시편의 종횡비, D/L
 $c_{p,l}$: 액체의 비열 (kJ/kgK)
 $c_{p,v}$: 증기의 비열 (kJ/kgK)
 d : Full cone 스프레이 노즐 출구 직경
 D : 시편의 지름(mm)
 G : 스프레이 질량유속 (kg/m²s)
 h : 열전달계수(W/m²K)

h_{fg} : 증발 잠열(kJ/kg)
 k : 시편 열전도계수(W/mK)
 L : 시편 두께(mm)
 q : 열유속(W/m²)
 q_{top} : 상면 열유속(W/m²)
 q_{bottom} : 하면 열유속(W/m²)
 Q : 유량(liter/ min, LPM)
 Re : 레이놀즈 수
 T_{sat} : 포화온도(℃)
 $T_{surface}$: 시편 표면온도(℃)
 T_w : 냉각수 온도(℃)
 η : 스프레이 효율

[§] 이 논문은 2010년도 대한기계학회 열공학부문 춘계학술대회 (2010. 5. 13.-14., 전북대) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, jungho@kimm.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

수분류 스프레이(water spray)는 상변화(phase-change)를 동반하기 때문에 고온의 열원으로부터 열을 제거하는 대표적인 냉각방법으로 다양한 공업적 응용분야에서 매우 효과적으로 사용되어 왔다.^(1~5) 특히, 스프레이 냉각은 열간압연공정의 Runout-table(ROT) 냉각, 후판제조공정의 가속냉각(accelerated cooling), 그리고 선재제조공정의 바 냉각(bar cooling) 등 철강제조공정에서 대표적인 냉각방법 가운데 하나로 잘 알려져 있다.⁽⁶⁾

특히 TMCP 강의 제조에 필요한 후판 가속냉각 공정에서의 냉각능은 수분류의 냉각 조건과 강판의 상태에 크게 의존될 수 있다. 고온 강판의 냉각에 있어 냉각수온이 냉각능에 미치는 영향이 수분류 냉각방법, 냉각수 유량, 그리고 강판 표면에서의 표면 유동형태에 비해 상대적으로 작지만, 철강제조공정에서의 냉각수온은 계절의 변화와 같은 장기변동 원인과 기계 수리 및 단위 공정의 변화에 따른 가동중단과 같은 단기변동 원인에 의해 변화될 수 있다. 따라서 철강제조공정에서의 냉각 제어(cooling control)는 냉각수온의 변화에 따른 특성이 반드시 고려되어야 한다. 하지만, 냉각수온이 수분류 스프레이 냉각능에 미치는 영향에 대한 선행연구로 정량적인 열전달계수 측정 결과는 거의 발표되지 않았고, 냉각수온계수(coefficient of water temperature)를 도입하여 수분류 스프레이 냉각능을 제어하는 경험적인 연구에 제한되어왔다⁽⁷⁾. Kimura 등⁽⁸⁾은 20℃~35℃ 범위의 냉각수온의 변화가 수분류 충돌제트의 열전달계수 변화에 미치는 영향을 조사하였고, 스프레이 질량유속이 1.65 kg/m²s 일 때 냉각수온이 20℃의 조건에서의 열전달계수는 냉각수온이 35℃인 경우보다 약 30% 정도 증가되었음을 보고하였다.

철강제조공정에서 대부분의 냉각공정은 수분류 스프레이냉각이 진행되는 동안 냉각수온이 열전달 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 본 연구는 수행되었다. 후판제조공정의 경우, 수분류 냉각은 표면온도 기준으로 800℃ 정도의 오오스테나이트(austenite) 온도에서 시작하여 400℃ 정도의 온도에서 냉각 종료된다. 그러나 기존의 스프레이 냉각의 경우 400℃ 미만에서의 열전달 현상이 연구되었고, 실제 철강 냉각공정에 적용할 수 있는 고온 영역의 스프레이 냉각 데이터는 찾아보기 매우 어려운 실정이다.

본 연구에서 열유속 및 열전달계수의 측정은 시

편블록(test block), 카트리지히터(cartridge heater), 열전대의 조합으로 고안된 열유속게이지(heat flux gauge)를 사용하였다. 이 때의 열유속게이지는 20회 이상 반복적으로 사용이 가능하고, 기존의 고온 강판의 냉각실험에 사용된 일회용 시편과 비교하여 설치가 용이하고 실험이 간편한 장점을 가지고 있다.^(9,10) 본 연구에서는 냉각수온이 수분류 스프레이 충돌 열전달에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실제 900℃ 이상 고온으로 가열된 표면에 적용되었다.

2. 실험 장치 및 절차

2.1 실험 장치

스프레이 냉각 실험은 고온으로 가열된 표면의 정가운데에서 수분류 스프레이가 충돌할 때 발생하는 열유속을 정량적으로 측정하였다. 본 연구에서 사용된 스프레이 냉각실험장치의 개략도는 Fig. 1에 잘 나타나 있다. 실험장치는 항온조, 펌프, 전기전자유량계, 스프레이 노즐, 열유속게이지의 기능을 가진 가열시편, 그리고 데이터수집장치로 구성되어 있다.

항온조는 0.5℃ 간격으로 수온을 일정하게 제어할 수 있으며, 100 l 규모의 스테인리스 강 저장조로 되어 있으며 냉각수온의 가열 및 냉각을 목적으로 10kW의 전기히터와 냉각기로 구성되어 있다.

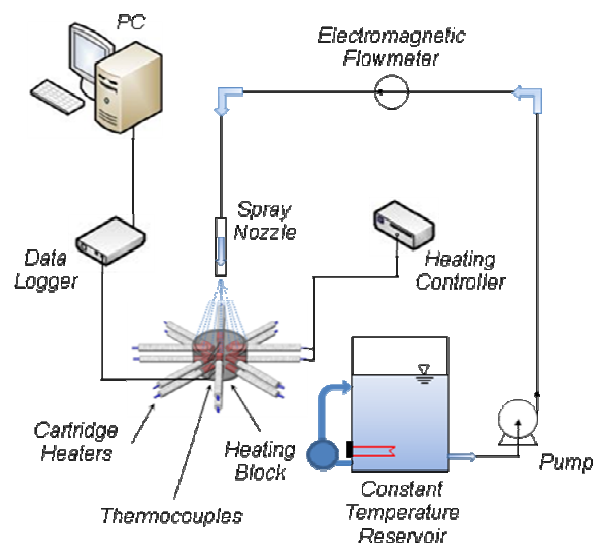


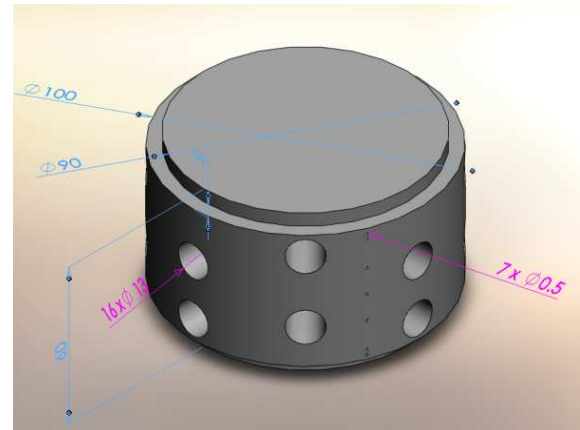
Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

Table 1 Measurement characteristics of water spray cooling

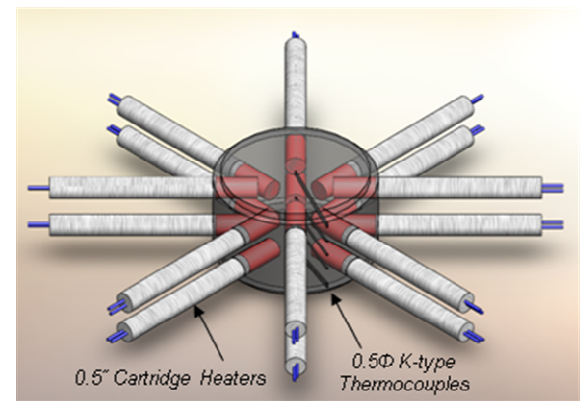
Measurement Characteristics	Present Study	Hoogendoorn and den Hond [3]
Nature of Hot Wall	Horizontal cylinder of SUS304	Horizontal disk of SUS321
Surface Area of Heated Surface (cm ²)	63.6	269
Water Temperature of Spray (°C)	5 - 45	20
Spray Nozzle Type	Fullcone	Fullcone
Differential Pressure (MPa)	0.3	0.1
Mean Drop Diameter (μm)	300	200
Water Impact Density, G (kg/m ² s)	1.15	0.6

작동유체인 냉각수는 전체수두가 약 100 m 인 입형다단펌프(CRN 1-15, Grundfos®)에 의해 펌핑된다. 이 때의 냉각수 유량은 측정 불확도가 0.5%인 전기전자유량계(GF630A/LF600, Toshiba®)를 통해 정밀하게 측정된다. 본 연구에서 스프레이 냉각실험에서의 체적유량은 8 LPM 으로 고정하였고, 냉각수온 $T_w=25^\circ\text{C}$ 일 때 수분류 스프레이의 레이놀즈 수(Reynolds number)는 약 68,200 정도이다. 체적유량측정에서의 불확도는 최대 0.78%이며, 레이놀즈 수의 불확도는 최대 3.9%이다.

Fig. 1 에 나타난 바와 같이 수분류 스프레이는 거의 균일하게 가열된 열유속계이지 기능을 가진 가열시편의 상면에 수직으로 분사된다. 상부 노즐의 출구로부터 충돌면 사이의 거리는 300 mm 로 고정하였고, 이 때의 냉각수온은 5~45°C 의 범위에서 10°C 간격으로 각각 일정하게 유지하였다. 사용된 스프레이 노즐은 내경이 2.9 mm 인 fullcone 형태의 노즐(1/4 KS FHS 0865, Everloy®)을 사용하였다. 또한 수분류 스프레이 냉각실험에서 사용된 실험 조건은 Table 1 에 잘 나타나 있고 고온 냉각의 스프레이 열전달 문헌 가운데 잘 알려진 Hoogendoorn 과 Hond⁽³⁾의 측정방법과 비교하였다.



(a)



(b)

Fig. 2 Assemblies of the heat flux gauge: (a) test block fabrication; (b) total assembly with 16 cartridge heaters and 9 thermocouples

이 때 수분류 스프레이의 질량유속(G)은 약 1.15 kg/m²s, 스프레이 차압은 0.3 MPa 에서 유지되었고, 스프레이 평균 입자직경은 약 300 μm 이다.

2.2 고온 열유속계이지

Fig. 2 는 시편, 카트리지히터, 열전대로 구성된 고온 열유속계이지 어셈블리의 개략도이다. 수분류 스프레이는 수직 하방으로 가열시편의 상면에 분사된다. 대부분의 탄소강의 냉각과정에서는 상변태(phase transformation)에 의한 변태 발열(transformational heat)이 발생하고, 이 때 발생하는 변태 발열은 냉각실험에 있어 추가적인 열 에너지를 제공하기 때문에 열전달 실험에 있어 측정이 까다로워진다. 따라서 본 연구에서는 강판의 냉각과정에서 발생하는 변태발열을 최소화 하기 위하여 상 변태가 거의 발생하지 않는 300 계(SUS304) 스테인리스 강(18% Cr, 8% Ni)을 사용하여 가열시편을 제작하였다.

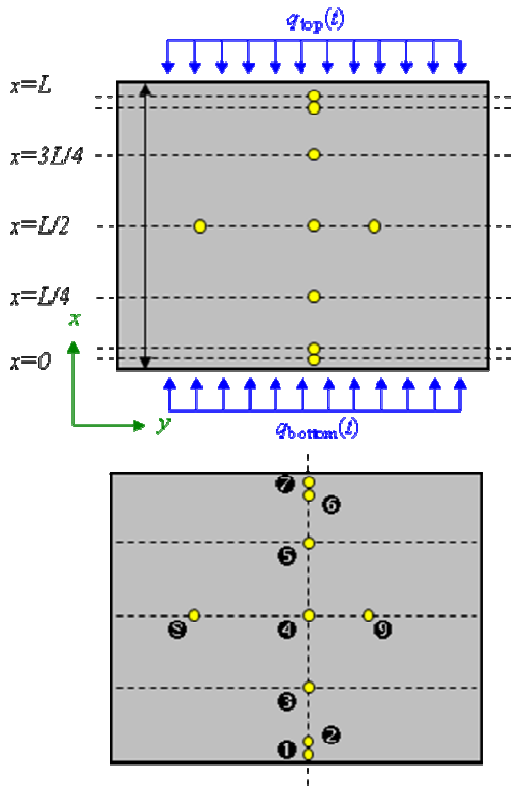


Fig. 3 Location of installed thermocouples in test block

가열시편은 Fig. 2(a)와 같이 높이는 60 mm 직경은 100 mm 이고, 종횡비(AR)가 1.67 정도로 거의 1에 가깝기 때문에 고온으로의 가열 및 급속 냉각 후에도 열응력(thermal stress)에 의해 발생하는 기하학적 변형을 최소화 할 수 있는 장점을 갖고 있다. 따라서 본 측정에서 사용된 가열시편은 약 900°C 정도로 가열하고 냉각하는 실험을 최소 20회 이상 반복적으로 사용할 수 있도록 설계되었다.

Fig. 2(b)에 나타나 있는 것과 같이 가열시편의 가열을 위하여 직경이 12.7 mm 인 16 개의 카트리지히터(Joul®)가 가열시편 블록에 39 mm 깊이로 삽입된다. 이 때 삽입된 카트리지히터는 약 1000°C 이상으로 시편 블록을 전기적으로 주열 열(Joule's heating) 방식에 의해 직접적으로 가열하는데 사용된다. 직경이 0.5 mm 인 9 개의 K 형 열전대(KMTXL-020G-6, K-type, OMEGA®)는 Fig. 3 과 같이 각각 9 개의 위치에서의 온도측정을 위해 설치되었다. 여기서 1 번부터 7 번 열전대까지는 가열시편의 정 가운데 지점에서의 두께 방향으로 배열되고, 1 번과 2 번 열전대는 하부 표면으로부터 1 mm 와 2 mm 지점, 3 번 열전대는 시편의 1/4 두께 지점, 그리고 4 번 열전대는 시편의 1/2 두께 지점에 설치되었다. 가열시편의 하부와 마찬가지로 상

부에서도 7 번, 6 번, 그리고 5 번 열전대는 시편의 상부 표면으로부터 각각 1 mm 지점, 2 mm 지점, 그리고 시편의 3/4 두께 지점에 설치되었다. 또한 8 번과 9 번 열전대는 가열시편의 중간 평면에서 반경방향으로의 온도변화를 측정하기 위하여, 4 번 열전대로부터 반경방향으로 30 mm 와 15 mm 떨어진 지점에 설치되었다. 가열시편의 측면은 단열재(Cerakwool®)를 부착하여 고온으로 가열 및 냉각하는 과정에서의 단열조건을 만족하였다. 실제 냉각실험을 통하여 8 번과 9 번 열전대의 온도가 4 번 열전대와 거의 동일하다는 것을 저자의 선행연구를 통해 알 수 있다.⁽⁹⁾ 따라서 본 연구에서는 수분류 스프레이 냉각실험이 진행되는 동안 반경방향 온도변화는 거의 무시할 수 있고, 열유속 측정은 두께 방향의 온도측정을 통한 1 차원 비정상 열전달 해석만으로도 만족되었다.⁽⁹⁾

열전대의 보정(calibration)은 실험 전후에 백금 저항온도계와 비교하여 수행되었고, 온도측정에서의 최종적인 불확도는 약 0.1 °C 이다. 가열시편, 카트리지히터, 온도 보정과정, 그리고 불확도 해석에 대한 세부적인 정보는 저자의 선행연구⁽¹⁰⁾ 결과에 잘 나타나 있다.

2.3 실험 절차

수분류 스프레이를 이용한 고온 냉각 실험에서는 가열 시작 후, 가열시편 블록의 내부 온도가 900°C 정도로 거의 균일하게 가열되면 수분류 스프레이가 분출되어 가열 표면에서의 냉각이 진행된다. 이 때 시간변화에 따른 각각의 온도 정보는 데이터로거(midi LOGGER GL800, GRAPHTEC®)를 사용하여 초 당 10 개의 속도(10 data/sec)로 데이터가 저장된다. 일반적으로 수분류 충돌제트 냉각과 비교하여 비교적 냉각속도가 느린 스프레이 냉각의 경우에는 초 당 10 개의 데이터 저장속도 정도로도 열유속을 측정하는 데에 큰 오차가 발생하지 않지만, 비등곡선에서 임계열유속과 같이 냉각속도가 상대적으로 빠른 경우에는 초 당 10 개의 데이터를 기준으로 한 측정은 보다 큰 오차를 유발할 수도 있다.

수분류 스프레이에 의한 열전달 측정은 정상상태(steady-state)와 비정상상태(transient) 측정법으로 구분되어 연구되었다.⁽²⁾ 정상상태 측정법은 가열시편 블록에 입력되는 전력과 스프레이에 의한 열전달의 열적 균형이 요구되지만, 일반적으로 시편블록의 온도를 일정하기 유지하기 위해서 입력되는 전력이 10⁷ Watt 이상의 입력 전원이 요구되므로

실제 열전달 측정에서는 거의 불가능하게 되고, 이러한 정상상태 측정법은 단일 액적(single droplet)과 같은 낮은 체적유량에서의 열전달 측정에서 제한적으로 사용될 수 있다. 하지만 비정상상태 측정법에서는 가열시편 블록을 높은 온도로 균일하게 가열한 후, 수분류 스프레이에 의해 급속하게 냉각되고, 동시에 여러 개의 내부 지점에서 온도가 기록된다. 따라서 비정상상태 측정법은 큰 열전달이 수반될 때 유용하고, 본 연구와 같이 수분류 스프레이에 의한 급속 냉각에서 사용될 수 있다.

역열전도 문제(inverse heat conduction problem, IHCP)는 표면에서의 온도를 직접적으로 측정하기 어려울 때 사용될 수 있다. 지금까지 몇몇의 연구자들이 IHCP 를 위한 수치해석기법을 제안되었다.^(11,12) 본 연구에서는 철강 냉각공정에 적용되는 수분류 스프레이 냉각실험에서의 열유속 및 열전달계수를 결정하는데 Beck⁽¹¹⁾이 제안한 sequential function specification method 를 적용하였다.

본 연구에서는 가열시편 블록의 폭 방향 열전달이 두께 방향에 비하여 무시할 정도로 작기 때문에 두께 방향으로의 열전달만을 고려하였고, 따라서 1 차원 비정상상태(unsteady-state)의 에너지방정식을 지배방정식으로 이용하였다.

$$\rho c_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$T = T(t, x) \quad (t > 0, 0 < x < L) \quad (2)$$

이 때의 경계조건은 다음과 같다.

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial x} = q_{bottom}(t) \quad \text{at } x=0 \quad (3)$$

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial x} = q_{top}(t) \quad \text{at } x=L \quad (4)$$

초기조건은 다음과 같다.

$$T(t, x) = T_0(x) \quad \text{at } t=0 \quad (5)$$

여기서 $T(t, x)$ 는 두께 방향 x 에 따른 온도분포를 나타내고, 앞에서 언급한 바와 같이 반경방향으로의 열전달은 무시될 수 있다.

또한 역열전도 문제로 접근한 열유속 값을 검증하기 위해 표면온도와 표면으로부터 1 mm 떨어진

지점에서의 온도 차로부터 다음과 같이 푸리에법칙 (Fourier's law)을 적용한 열유속과 비교하였다.

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} = -k \frac{(T_{surface} - T_{No.7})}{\Delta x} \quad \text{at top surface} \quad (6)$$

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} = -k \frac{(T_{surface} - T_{No.1})}{\Delta x} \quad \text{at bottom surface} \quad (7)$$

여기서 임계열유속을 제외한 영역에서는 역열전도 문제로 근사한 온도 차와 실제 표면온도와 표면으로부터 1 mm 떨어진 지점에서의 온도 차는 거의 차이가 나지 않는 것으로 나타났다.

3. 결과 및 결론

3.1 온도 분포

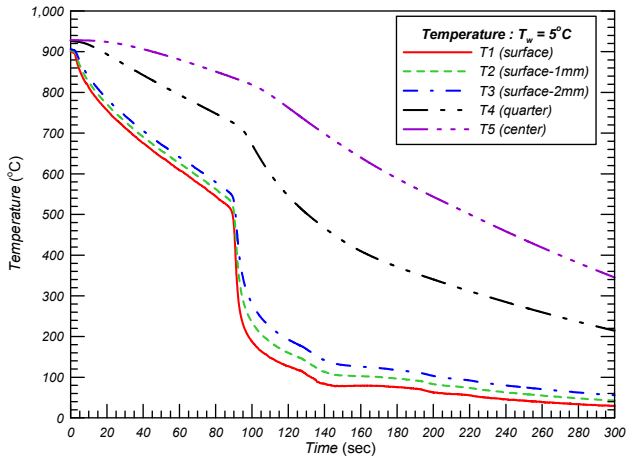
수분류 스프레이 냉각이 진행될 때 시간에 따른 온도분포는 Fig. 4 에 나타나 있고, 측정된 온도분포는 냉각시간에 따라 변화하는 것을 알 수 있다. 스프레이 냉각은 표면온도가 900℃ 일 때 시작되고, 표면온도 T1 과 표면에서 매우 가까운 T2 그리고 T3 의 온도는 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 T4 와 T5 는 스프레이 냉각실험이 진행되는 동안 단순하게 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5 는 냉각수온 변화에 따른 표면온도 분포를 보여준다. 여기서 표면온도는 거의 420℃ 부터 500℃ 부근에서 급격하게 감소하기 시작하고, 이러한 온도감소는 낮은 냉각수온에서 더 빨리 발생하는 것을 알 수 있다. 냉각수온이 $T_w = 5^\circ\text{C}$ 일 때 표면온도가 스프레이 냉각이 시작된 후 약 90 초 이후에 갑자기 감소하고, 냉각수온이 $T_w = 45^\circ\text{C}$ 일 때는 약 165 초 뒤에 표면온도가 갑자기 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 막 비등이 종료되고 쉘 비등이 시작되는 비등 특성이 나타나게 되고, 이와 같이 쉘 비등이 시작되는 시점에서는 스프레이에 의한 분무수가 직접적으로 가열 표면에 접촉하기 시작하는 것을 알 수 있다.

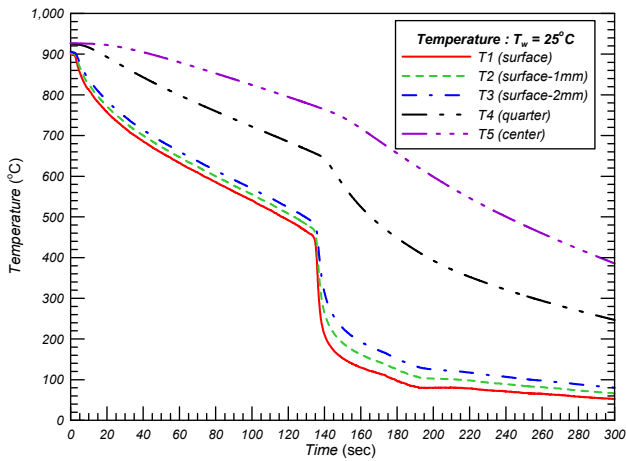
그리고 낮은 냉각수온이 높은 냉각수온에 비해 큰 열전달 효과를 가지기 때문에 5℃의 낮은 냉각수온에서 쉘 비등이 높은 냉각수온에 비해 일찍 나타나는 것 또한 볼 수 있다.

3.2 열유속 곡선

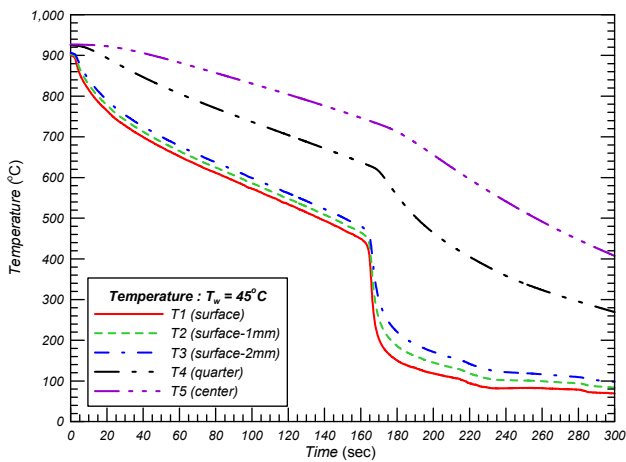
Fig. 6 은 냉각수온이 5℃, 15℃, 25℃, 35℃, 그리고 45℃의 5 가지 조건에서의 열유속을 보여준다.



(a) $T_w=5^\circ\text{C}$



(b) $T_w=25^\circ\text{C}$



(c) $T_w=45^\circ\text{C}$

Fig. 4 Time-resolved distributions in measured temperatures: (a) $T_w=5^\circ\text{C}$; (b) $T_w=25^\circ\text{C}$; (c) $T_w=45^\circ\text{C}$

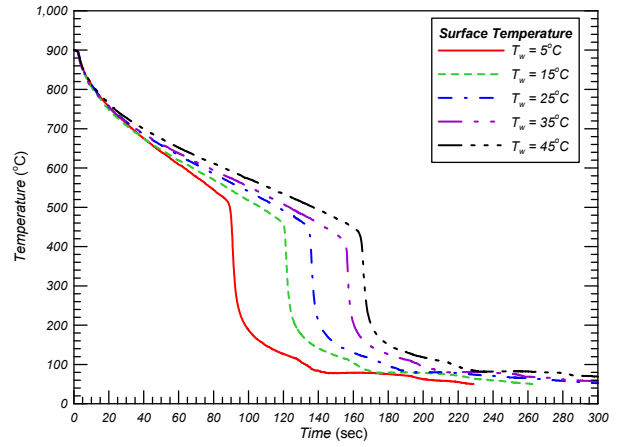


Fig. 5 Comparison of surface temperature profile for five water temperatures

여기서 임계열유속 (Critical heat flux, CHF)은 대개 $290\sim 330^\circ\text{C}$ 에서 관찰되는데, 이와 같은 임계열유속은 기존의 강제 대류비등 문헌에서 제시된 경우와 거의 유사한 값을 갖는다.⁽¹³⁾ 여기서 나타나는 열유속 곡선에 있어서 막 비등이 종료되는 지점과 Fig. 5에 나타난 바와 같이 표면온도가 급격히 감소하는 지점의 온도는 매우 잘 일치하고, 낮은 냉각수온에서 막 비등이 먼저 종료되는 것을 알 수 있다.

이것은 예상한 바와 같이 냉각수온이 감소함에 따라 임계열유속이 증가하는 것으로 볼 수 있다. 냉각수온이 낮은 $T_w = 5^\circ\text{C}$ 인 경우에서의 임계열유속은 냉각수온이 높은 $T_w = 45^\circ\text{C}$ 와 비교하여 약 24% 증가되었음을 알 수 있다. 이와 같이 임계열유속은 현열 열교환으로 설명할 수 있는 수분류 스프레이 냉각특성에 크게 의존하는 것으로 알려져 있다.^(2~5)

수분류 스프레이 냉각의 선행연구 가운데 본 연구에서의 실험 조건과 거의 유사한 Hoogendoorn과 Hond⁽³⁾의 결과가 비교되었다. Fig. 6에 나타난 Hoogendoorn과 Hond⁽³⁾의 결과는 스프레이 질량유속과 거의 흡사하고, 최대 열유속과 최소 열유속을 제외하고는 열유속 곡선의 형태도 거의 유사함을 알 수 있다.

스프레이 냉각에서 냉각수온의 변화에 따른 최대 열유속과 최소 열유속은 Fig. 7에 나타나 있다. 최대 열유속은 냉각수온이 증가할 때, 온도에 따라 거의 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있고, 최소 열유속(Leidenfrost heat flux) 역시 냉각수온에 따라 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 여기

서 냉각수온이 5°C인 경우와 냉각수온이 45°C인 경우에서 최대 열유속 차이와 최소 열유속 차이는 각각 24%와 22% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

일반적으로 스프레이 냉각의 열전달률은 스프레이 효율(spray effectiveness, η)로 나타낼 수 있다. 열전달 효율(heat transfer effectiveness)은 수분류 스프레이가 완전하게 증발되기 위해 필요한 전체 열전달과 수분류 스프레이에 의해 가열표면으로부터 냉각에 의해 전달되는 열전달의 비(ratio)로 정의되고, 다음과 같은 식으로 표현된다.^(4,5)

$$\eta = \frac{q}{G[c_{p,l}(T_{sat} - T_w) + h_{fg}]} \quad (8)$$

그러나 일반적으로 표면온도는 포화온도보다 높게 가열되고, 가열 표면에서는 상변화에 의한 증기가 발생하지만 식 (8)에 나타난 스프레이 효율은 가열표면에서 발생하는 증기에 의한 표면온도의 열전달에는 적용될 수 없음을 알 수 있다. 따라서 스프레이 효율에 대한 더욱 정확한 정의는 Kim⁽¹⁴⁾에 의해 제안된 바와 같이 다시 정의될 수 있다.

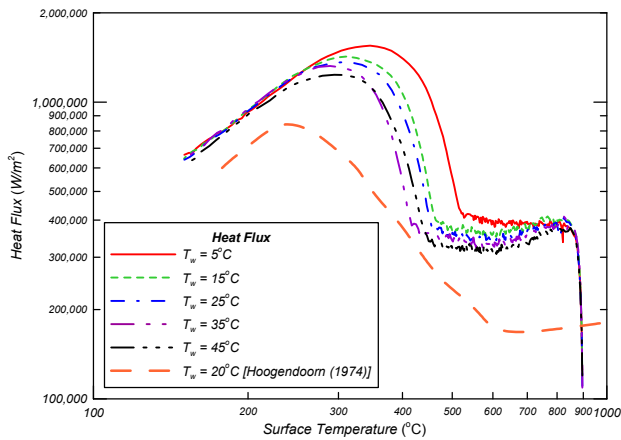


Fig. 6 Heat flux curve for five water temperatures

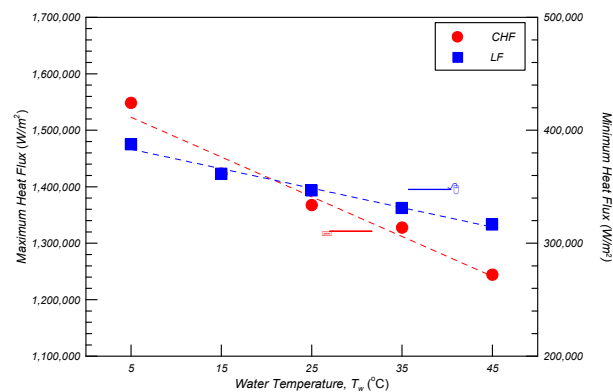


Fig. 7 Maximum and minimum heat flux for five water temperatures

$$\eta = \frac{q}{G[c_{p,l}(T_{sat} - T_w) + h_{fg} + c_{p,v}(T_{surface} - T_{sat})]} \quad (9)$$

Fig. 8 은 식 (9)에 의해 정의된 스프레이 효율 분포를 냉각수온에 따라 보여주고 있다. 냉각수온이 5°C, 25°C, 그리고 45°C 일 때 임계열유속 지점에서의 스프레이 효율은 Deb 과 Yao⁽⁵⁾의 연구결과 ($\eta = 0.2$) 보다 큰 0.35 에서 0.4 까지 관찰되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9 는 냉각수온 5°C에서 역열전도 해석(IHCP)으로 계산된 열유속과 푸리에법칙으로 직접 측정된 열유속과 비교하여 보여주고 있다. 여기서 IHCP 로 계산된 값이 직접 측정된 값보다 최대 약 11% 정도 큰 것을 볼 수 있지만, 임계열유속을 제외하고는 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 하지만 비정상상태 실험에서 특히 임계열유속을 측정하거나 계산하는 경우에 있어서는, 임계열유속이 나타나는 지점에서의 냉각속도가 매우 빠르기 때문에 보다 큰 오차를 유발할 수 있기 때문에 측정에 보다 세심한 주의가 요구된다.

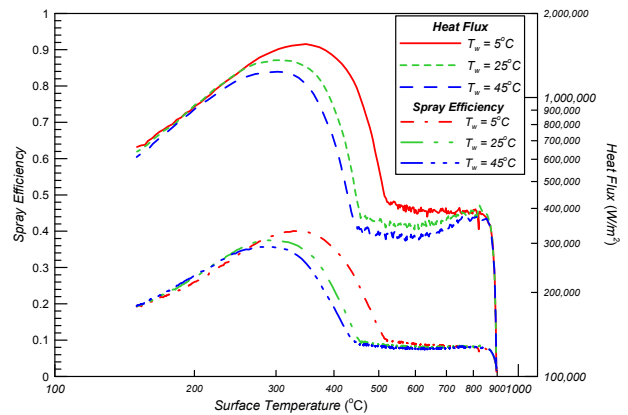


Fig. 8 Comparison of spray efficiency based heat flux curve

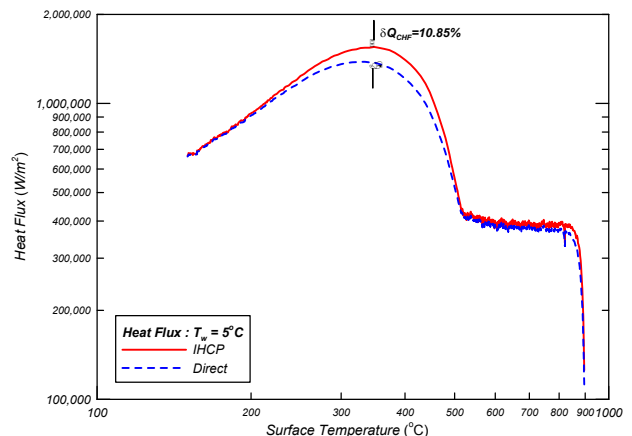


Fig. 9 Comparison of data reduction methods for heat flux determination

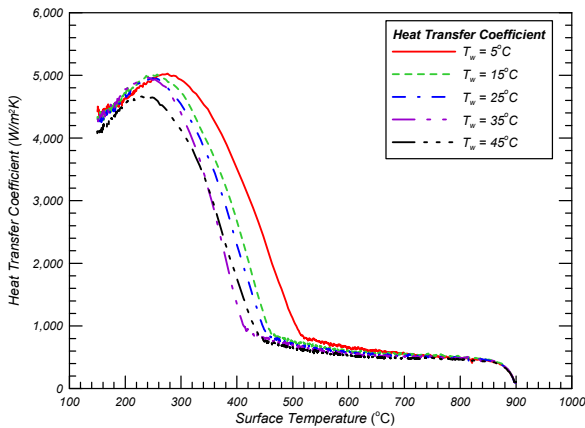


Fig. 10 Heat transfer coefficient for five water temperatures

3.3 열전달 계수

표면온도에 따른 열전달 계수의 분포는 Fig. 10에 잘 나타나있다. 각각의 냉각수온에서 표면온도가 230~270°C에 도달하는 동안 열전달 계수는 증가하기 시작하는 것을 알 수 있다. 이것은 표면의 온도가 230~520°C인 천이 비등영역에서 5°C의 낮은 냉각수온을 사용한 경우, 45°C의 높은 냉각수온을 사용한 것보다 매우 높은 열전달 계수를 가지는 것을 보여준다. 그리고 천이 비등영역 가운데 냉각수온 $T_w = 5^\circ\text{C}$ 와 냉각수온 $T_w = 45^\circ\text{C}$ 사이에서 가장 큰 열전달 계수의 차이는 약 200% 정도로 나타났다. 이것은 막 비등 천이 비등, 그리고 핵 비등 사이의 상관관계가 냉각수온조건에 크게 영향을 받는 것을 보여준다. 하지만 냉각수온이 5°C와 45°C 사이의 최대 열전달 계수의 차이는 거의 10% 보다 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고온 열유속계이지를 사용하여 냉각수온의 영향에 따른 수분류 스프레이 냉각의 열전달 특성을 확인하였다. 이 때의 열유속계이지는 최소 20회 이상 반복적으로 사용이 가능하고, 기존의 강제 대류 열전달 실험방식과 비교하여 설치가 용이하여 실험이 간편한 장점을 가지고 있다. 냉각수온이 5°C로 낮은 경우에 높은 냉각수온에 비해 높은 현열 열전달을 갖게 되고, 그로 인해 천이 비등은 높은 냉각수온에 비해 먼저 발생하는 것을 알 수 있다. 그리고 본 연구에서 사용한 역 열전도 해석(IHCP)과 직접 측정된 열유속 값은 잘 일치하고, IHCP 계산이 열유속의 변화를 비교적 잘 예상하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 냉각수온

이 5°C와 45°C 사이에서 천이 비등영역 동안 열전달 계수가 약 200% 증가하는 것을 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부 부품소재전문기업기술지원사업의 “고온 발열용 카트리지히터 및 고온 열유속계이지 개발” 연구과제로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Mizikar, I., 1970, “Spray Cooling Investigation for Continuous Casting of Billets and Blooms,” *Iron and Steel Engineer*, pp. 53~70.
- (2) Bolle, L. and Moureau, J. C., 1982, “Spray Cooling of Hot Surfaces,” *Multiphase Science and Technology*, Vol. 1, pp. 1~97.
- (3) Hoogendoorn, C. J. and den Hond, R., 1974, “Leidenfrost Temperature and Heat Transfer Coefficients for Water Sprays Impinging on a Hot Surface,” *Proceedings of 5th International Heat Transfer Conference*, Vol. 4, pp. 135~138.
- (4) Choi, K. J. and Yao, S. C., 1987, “Mechanism of Film Boiling Heat Transfer of Normally Impacting Spray,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 2, pp. 311~318.
- (5) Deb, S. and Yao, S. C., 1989, “Analysis of Film Boiling Heat Transfer of Impinging Sprays,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, No. 11, pp. 2099~2112.
- (6) Chen, S-J. and Tseng, A. A., 1992, “Spray and Jet Cooling in Steel Rolling,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 13, No. 4, pp. 358~369.
- (7) Mitsutsuka, M. and Fukuda, K., 1989, “Effect of Water Temperature on Cooling Capacity in Water Cooling of Hot Steels,” *Tetsu-to-Hagane*, Vol. 75, No. 7, pp. 1154~1161 (in Japanese).
- (8) Kimura, M., Tanaka, Y., Yoshida, H., Uemura, N., Ohbu, M. and Sekine, T., 1984, “Development of Uniform Controlled Cooling Method : Multi-Purpose Accelerated Cooling System III,” *Tetsu-to-Hagane*, Vol. 70, No. 5, S375 (in Japanese).
- (9) Lee, J., 2010, “Heat Transfer Enhancement of Water Spray Cooling by the Surface Roughness Effect,” *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 34, No. 2, pp. 203~212.
- (10) Lee, J., 2008, “Development in In-Line Heat Flux Curve of Accelerated Cooling Machine and its Application in Plate Mills,” POSCO Technical Report 2008X017, Pohang, Korea, pp. 64~79.

- (11) Beck, J. V., Blackwell, B. and St. Clair, Jr., C.R., 1985, *Inverse Heat Conduction : Ill-posed Problems*, A Wiley-Interscience, New York, pp. 108~217.
- (12) Taler, J., 1996, "Theory of Transient Experimental Techniques for Surface Heat Transfer," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 3733~3748.
- (13) van Stralen, S. and Cole, R., 1979, *Boiling Phenomena*, McGraw-Hill, New York.
- (14) Kim, J., 2007, "Spray Cooling Heat Transfer: The state of the art," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 753~767.