

냉각수 온도에 따른 수분류 충돌제트의 열전달 특성 연구

이정호[†] · 유청환 · 도규형

한국기계연구원 그린환경에너지기계연구본부

Effect of Cooling Water Temperature on Heat Transfer Characteristics of Water Impinging Jet

Jungho Lee[†], Cheong-Hwan Yu and Kyu Hyung Do

Environment and Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM)
171, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Korea

Abstract Water jet impingement cooling has been widely used in a various engineering applications; especially in cooling of hot steel plate of steelmaking processes and heat treatment in hot metals as an effective method of removing high heat flux. The effects of cooling water temperature on water jet impingement cooling are primarily investigated for hot steel plate cooling applications in this study. The local heat flux measurements are introduced by a novel experimental technique that has a function of high-temperature heat flux gauge in which test block assemblies are used to measure the heat flux distribution during water jet impingement cooling. The experiments are performed at fixed flow rate and fixed nozzle-to-target spacing. The results show that effects of cooling water temperature on the characteristics of jet impingement heat transfer are presented for five different water temperatures ranged from 5 to 45°C. The local heat flux curves and heat transfer coefficients are also provided with respect to different boiling regimes.

(Received July 27, 2010; Accepted September 10, 2010)

Key words : Water temperature, Impinging jet, Heat flux gauge

1. 서 론

수분류 충돌제트는 상변화를 동반하기 때문에 높은 열유속을 효과적으로 제거할 수 있는 방법으로 철강 제품의 제조 공정에 있어서의 급속 냉각 및 열처리에 주로 이용된다. 수분류 충돌제트에 관한 연구는 지난 수 십년 간 지속적으로 진행되고 있다[1]. 특히 수분류 충돌제트는 강판, 후판, 선재와 같은 철강제품의 냉각공정에서 냉각 제어에 주로 이용된다[2]. 일반적으로 충돌제트의 열전달 현상은 냉각과정에서 다양한 비등영역을 거치게 된다. 강 냉각이 필요한 경우 높은 열전달을 위해 열유속이 낮은 막 비등이나 천이 비등 보다 열유속이 상대적으로 높은 핵 비등 영역에서 냉각을 진행하는 것은 냉각능 향상에 유리하며, 이러한 비등특성을 이해하고 냉각속도를 제어하는 것은 매우 중요하다.

일반적으로 고온 강판의 냉각에 있어 냉각능과 제어

성능은 냉각 방법과 노즐 형상 변화와 같은 냉각 기구에 의존하게 된다. 냉각 방법 측면에서는 냉각수온이 냉각능에 미치는 영향은 냉각수 유량, 강판 표면에서의 표면 유동형태에 비해 상대적으로 작다. 하지만 철강 제조공정에서의 냉각수온은 계절의 변화와 같은 장기변동 원인과 기계 수리 및 단위 공정의 변화에 따른 기동 중단과 같은 단기변동 원인에 의해 변화될 수 있다. 따라서 철강 제조공정에서의 냉각 제어는 냉각수온의 변화에 따른 특성을 무시할 수 없다.

지금까지 수분류 충돌제트의 냉각수온 효과에 대한 선행 연구는 정량적인 열전달계수의 측정 보다는 냉각수온계수(coefficient of water temperature)를 도입하여 냉각능을 평가하는 경험적인 연구에 제한되어 왔다[3]. Copeland[4]는 완전발달 핵비등 영역에서 과냉도가 수분류 충돌제트의 열전달계수 변화에 미치는 영향을 조사하였는데, 22~96°C의 냉각수온 범위에서 비등 곡선의 뚜렷한 차이가 없음을 밝혔다.

[†]E-mail : jungho@kimm.re.kr

Monde와 Katto[5]는 30°C 이하의 과냉도에서 냉각수온의 영향을 조사하였고, 이 때의 냉각능은 과냉도에 거의 관계 없다는 것을 보고하였다. 하지만 이와 반대의 결과로 냉각수온이 최대 열유속 변화에 큰 영향을 미치는 연구도 보고되었다. Ochi 등[6]은 5~80°C 정도의 과냉도 범위에서 수분류 충돌제트의 과냉도의 증가는 정체점에서의 최대 열유속의 뚜렷한 증가를 유발하고, 특히 충돌제트의 출구속도가 3 m/s의 경우에는 과냉도가 5°C에서 80°C로 증가함에 따라 약 6배 정도로 최대 열유속이 증가한다고 보고하였다. 과냉도의 증가가 최대 열유속 증가에 영향을 미치는 유사한 결과 또한 Matsumura 등[7]에 의해 보고되었다. Ishigai와 Mizuno[8]는 45~80°C 정도의 과냉도 범위에서 임계열유속이 과냉도의 1.15 배 곱에 의존하는 상관관계식을 제시하였다.

후판 가속냉각공정은 대개 수분류 충돌제트는 800°C 정도의 오스테나이트 온도에서 냉각이 시작되고 400°C 정도에 냉각이 종료되는 급속 냉각 열처리 공정이라 할 수 있다. 따라서 철강제조공정의 후판 가속냉각에서 수분류 충돌제트 냉각이 진행되는 동안, 냉각수온이 열전달 특성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 본 연구를 수행하게 되었다.

본 연구에서의 국소 열유속 및 열전달계수는 시편 블록, 카트리지히터, 열전대의 조합으로 고안된 고온 열유속게이지(heat flux gauge)를 이용하여 측정하였다. 이 때 고온 열유속게이지는 20회 이상 반복적으로 사용이 가능하고, 기존의 고온 강판의 냉각 및 열처리 실험에 사용된 일회용 시편과 비교하여 설치가 용이하고 실험이 간편한 장점을 가지고 있다[9]. 그리고 냉각수온이 수분류 충돌제트의 열전달에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실제 900°C 이상 고온으로 가열된 표면에 적용하여 수분류 충돌제트의 열전달 특성을 확인하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 수분류 충돌제트 냉각 실험 장치의 전체적인 개략도는 Fig. 1에 나타나 있다. 냉각 실험장치는 항온조, 펌프, 전자기 유량계, 충돌제트 노즐, 열유속게이지의 기능을 가진 가열 시편블록,

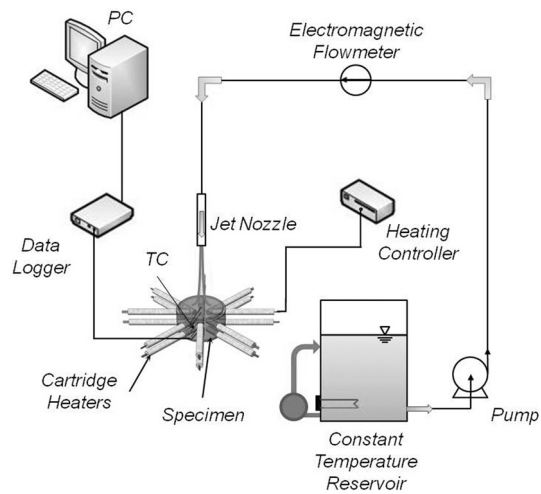


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus for jet impingement cooling.

그리고 데이터 수집장치로 구성되어 있다.

항온조는 100l 규모의 스테인리스 강 저장조에 냉각수온의 가열 및 냉각을 목적으로 10 kW의 전기히터와 냉각기가 설치되어 있으며 0.5°C 단위로 수온을 일정하게 제어할 수 있다. 작동유체인 냉각수는 전체 수두가 약 100 m 인 입형 다단펌프(CRN 1-15, Grundfos®)에 의해 냉각 노즐로 펌핑된다. 이 때의 냉각수 유량은 측정 불확도가 0.5%인 전자기 유량계(GF630A/LF600, Toshiba®)를 통해 정밀하게 측정된다. 본 실험에서는 수분류 충돌제트의 체적유량은 전자기 유량계를 통해 항상 8 LPM의 값으로 일정하게 고정하였다. 여기서 냉각수온 $T_w = 25^\circ\text{C}$ 일 때 레이놀즈 수(Reynolds number)는 약 68,200 정도이고, 체적 유량 측정에서의 불확도는 최대 0.78%이며, 레이놀즈 수의 불확도는 최대 3.9% 정도이다.

본 연구에서 수분류 충돌제트는 수직 하방으로 분출되고 가열된 시편블록의 정 중앙부인 정체점에 충돌되면서 냉각이 시작된다. 이 때 노즐과 가열면 사이의 거리는 300 mm로 고정하였고, 냉각수온은 5~45°C의 범위에서 10°C 간격으로 5개의 조건으로 각각 일정하게 유지하였다. 수분류 충돌제트는 직경 3 mm, 길이 40 mm의 원형 파이프 노즐로 부터 분출되어 난류 충돌제트를 형성한다. 본 연구에서는 후판 가속냉각의 냉각능을 평가를 목적으로 (주)포스코 포항 2후판 공장의 가속냉각설비의 냉각 노즐과 상

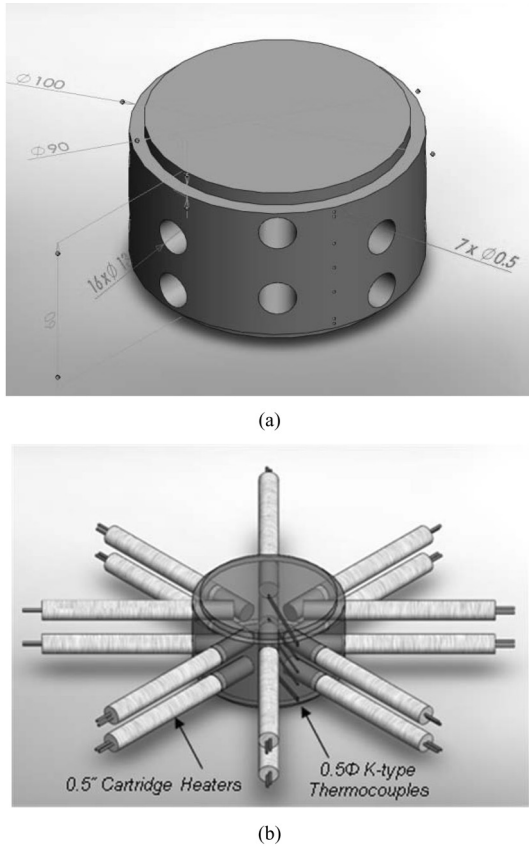


Fig. 2. Assemblies of the heat flux gauge: (a) fabrication of test block, (b) total assembly with 16 cartridge heaters and 9 thermocouples.

사한 유동을 모사하기 위해 동일한 기하학적 형상을 갖는 원형 노즐을 채택하였다.

2.2 고온 열유속계이지

Fig. 2는 시편블록, 카트리지히터, 열전대로 구성된 고온 열유속계이지 어셈블리의 개략도이다. 대부분의 탄소강의 냉각과정에서는 상 변태(phase transformation)에 의한 변태발열(transformational heat)이 발생하고, 이 때 발생하는 변태발열은 냉각실험에 있어 추가적인 열 에너지를 제공하기 때문에 열전달 실험에 있어 측정이 매우 까다로워진다. 따라서 본 연구에서 채택된 시편블록은 강관의 냉각과정에서 발생하는 변태발열을 최소화 하기 위하여 상 변태가 거의 발생하지 않는 304계 스테인리스 강(SUS316) 재질로 선택하였다.

가열시편은 Fig. 2(a)와 같이 높이는 60 mm 직경은 100 mm이고, 중형비가 1.67 정도로 거의 1에 가깝기 때문에 최대 1,000°C 고온으로의 가열 및 급속 냉각 후에도 열응력(thermal stress)에 의해 발생하는 기하학적 변형을 최소화 할 수 있고, 실제 고온 가열 및 급속 냉각 이후에도 시편 블록의 기하학적 형상 변화는 나타나지 않았다. 앞에서 언급한 바와 같이 고온 시편블록은 고온 가열과 급속 냉각을 20회 이상 반복적으로 사용할 수 있도록 설계 및 제작되었다.

시편블록을 최대 1,000°C까지 주울 열(Joule's heating) 방식에 의해 직접적으로 가열하기 위해 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 직경이 12.7 mm 인 16개의 카트리지히터(90 Volt, 290 Watt, Joule[®])를 시편블록 내부에 39 mm 깊이로 삽입하여 고정하였다. 가열 및 급속냉각 과정에서의 시편블록 내부에서의 온도 분포를 측정하기 위해 직경이 0.5 mm 인 9 개의 OMEGA사 KMTXL-020G-6 모델의 K형 열전대를 Fig. 3과 같이 삽입하여 고정하고 시간에 따른 온도변화를 수집하였다. 여기서 1번부터 7번 열전대까지는 시편블록의 정 가운데 지점에서의 두께 방향으로 배치하여 설치되고, 1번과 2번 열전대는 하부 표면으로부터 1 mm와 2 mm 지점, 3번 열전대는 시편블록의 1/4 두께 지점, 그리고 4번 열전대는 시편블록의 1/2 두께 지점에 설치되었다. 시편블록의 하부와 마찬가지로 상부에서도 7번, 6번, 그리고 5번 열전대는 시편블록의 상부 표면으로부터 각각 1 mm 지점, 2 mm 지점, 그리고 시편의 3/4 두께 지점에 설치되었다. 또한 8번과 9번 열전대는 시편블록의 중간 평면에서 반경방향으로의 온도변화를 측정하기 위하여, 4번 열전대로부터 반경방향으로 각각 30 mm와 15 mm 떨어진 위치에 설치되었다. 시편블록의 측면은 단열재(Cerakwool[®])를 부착하여 고온 가열 및 급속 냉각하는 과정에서의 단열조건을 만족하였다. 실제 냉각실험을 통하여 8번과 9번 열전대의 온도가 4번 열전대와 거의 동일하다는 것을 저자의 선행연구를 통해 알 수 있다[9]. 따라서 본 연구에서는 수분류 충돌제트 냉각실험이 진행되는 동안 반경방향 온도변화는 거의 무시할 수 있고, 국소 열유속 측정은 두께 방향의 온도측정을 통한 1차원 열전달 해석만으로도 충분히 만족될 수 있다.

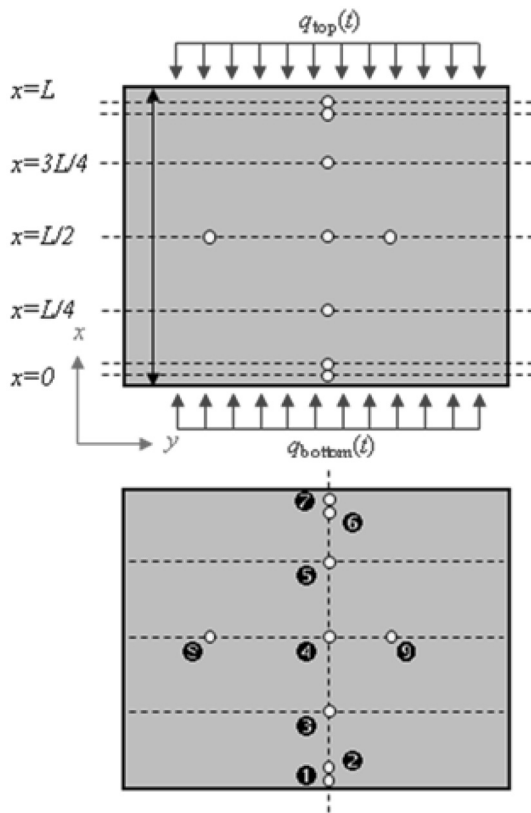


Fig. 3. Location of installed thermocouples in the heat flux gauge.

열전대의 보정은 실험 전후에 백금저항온도계와 비교하여 수행되었고, 온도측정에서의 최종 불확도는 약 0.1°C 이다. 시편블록, 카트리리지히터, 온도 보정과정, 그리고 불확도 해석에 대한 세부적인 정보는 저자의 선행연구 결과에 잘 나타나있다[10].

2.3 실험절차 및 방법

수분류 충돌제트를 이용한 고온 냉각실험에서는 가열 시작 후, 시편블록의 내부 온도가 900°C 정도로 거의 균일하게 가열되면 수분류 충돌제트가 분출되어 가열 표면에서의 급속 냉각이 시작된다. 이 때 시간 변화에 따른 각각의 온도 정보는 데이터로거(midi LOGGER GL800, GRAPTEC®)를 사용하여 초당 10개 온도 데이터(10 data/sec)로 저장하게 된다.

수분류 충돌제트에 의한 열전달 측정은 정상상태와 비정상상태 측정법으로 구분될 수 있다. 정상상태 측정법은 시편블록에 입력되는 전력과 수분류 충돌제트

에 의한 열전달의 열적 균형이 요구되지만, 일반적으로 시편블록의 온도를 일정하기 유지하기 위해서 입력되는 전력이 10^7W 이상의 입력 전원이 요구되므로 실제 열전달측정에서는 거의 실현 불가능하고, 이러한 정상상태 측정법은 단일 액적과 같은 낮은 체적유량에서의 열전달 측정에서만 제한된다. 하지만 비정상상태 측정법에서는 시편블록을 높은 온도로 균일하게 가열한 후, 수분류 충돌제트에 의해 급속하게 냉각되고, 동시에 여러 개의 내부 지점에서 온도가 기록된다. 따라서 비정상상태 측정법은 큰 열전달이 수반될 때 유용하고, 본 연구와 같이 수분류 충돌제트에 의한 급속 냉각에서 적용될 수 있다.

일반적으로 역열전도 문제는 표면에서의 온도를 직접적으로 측정하기 어려울 때 사용될 수 있다. 역열전도 문제는 지금까지 몇몇의 연구자들에 의한 수치해석기법이 제안되었다[11, 12]. 실제 수분류 충돌제트 냉각실험에서의 국소 열유속 및 국소 열전달계수를 결정하는데 있어 본 연구에서는 Beck[11]이 제안한 sequential function specification method를 적용하였다.

본 연구에서는 고온 가열 및 급속 냉각과정에서 시편블록의 폭 방향으로의 열전달이 두께 방향에 비하여 무시할 정도로 작기 때문에 두께 방향으로의 열전달만을 고려하였고, 따라서 1차원 비정상상태의 에너지 방정식을 지배 방정식으로 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 차이로부터 다음과 같이 뉴턴 냉각법칙을 적용한 열유속과 비교하였다.

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

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

여기서의 온도 차이는 역열전도 문제의 해로 얻어진 표면온도와 표면으로부터 1 mm 떨어진 지점에서의 온도로 정의된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도 분포

Fig. 4는 수분류 충돌제트에 의해 냉각이 진행될 때 시간에 따른 온도분포를 나타내고 있다. 수분류 충돌제트 냉각은 표면온도가 약 900°C에서 온도가 일정하게 유지된 상태에서 시작된다. Fig. 4(a)에서 4(c)는 냉각 수온 변화에 따른 온도분포를 보여주고 있는데, 냉각이 시작되면서 표면온도 T1과 표면에서 매우 가까운 T2 그리고 T3의 온도는 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 표면으로부터 1/4 지점과 1/2지점에 위치한 T4와 T5는 충돌제트 냉각이 진행되는 동안 단순히 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다.

충돌제트에 의한 냉각이 진행되는 동안 냉각수온이 5°C 인 경우에 가장 가파른 온도 감소를 보여주고 있는데 이것은 냉각과 동시에 큰 운동량을 가진 충돌제트가 가열 표면에 직접적으로 접촉하면서 온도가 급격하게 감소하는 것으로 볼 수 있다. 이와 같은 급격한 온도 감소는 냉각 수온이 낮은 경우에 조금 먼저 나타난다. Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 냉각수온이 5°C 인 경우에 표면온도는 충돌제트 냉각 시작 후 5초 정도에 100°C 이하로 급격하게 감소된다. 하지만 냉각수온이 45°C 인 경우에 Fig. 4(c)에 나타난 바와 같이 100°C 이하로 표면온도의 급격한 감소는 냉각 시작 후 10초 이후에 발생함을 알 수 있다. 이러한 현상은 낮은 수온의 경우, 충돌제트 냉각의 천이 비등이 좀 더 일찍 종료된다. 즉 낮은

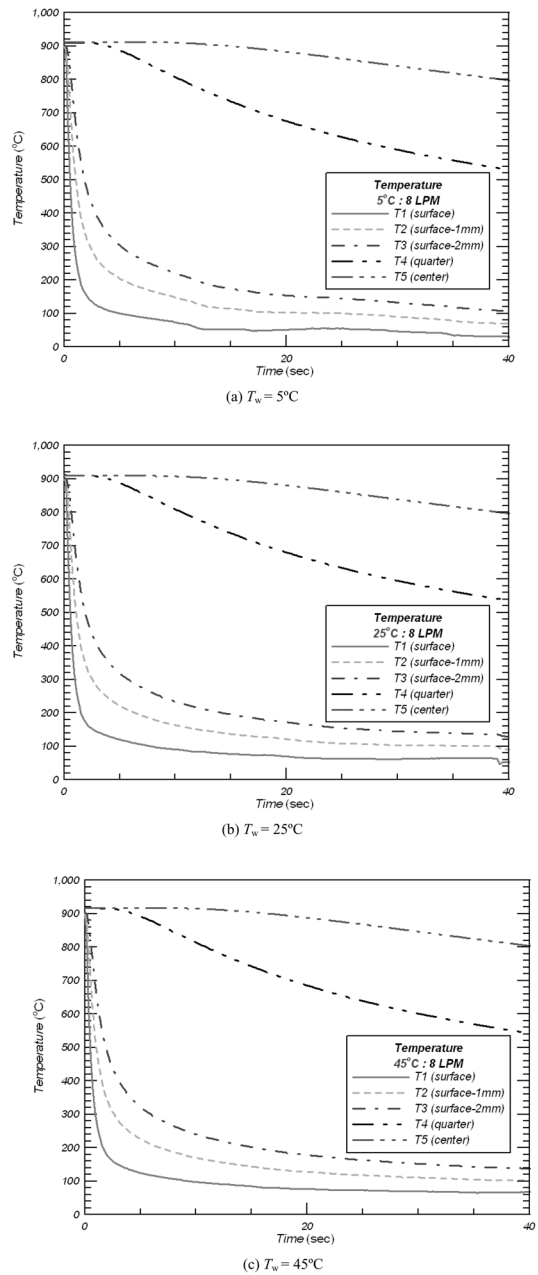


Fig. 4. Time-dependent temperature profile: (a) $T_w = 5^\circ\text{C}$, (b) $T_w = 25^\circ\text{C}$, (c) $T_w = 45^\circ\text{C}$.

수온의 경우 냉각수가 표면에 직접 닿는 핵 비등이 좀 더 일찍 나타남을 알 수 있다. 하지만 본 실험의 경우에 8 LPM의 유량에서는 충돌제트의 높은 운동량 효과로 인해 냉각 수온의 변화에 따른 온도 감소를 뚜렷하게 나타내지는 않았다.

3.2 열유속 곡선

Fig. 5는 냉각수온이 5°C, 15°C, 25°C, 35°C, 그리고 45°C의 5 가지 조건에서의 열유속 곡선을 보여준다. 본 측정에서의 임계열유속은 460~510°C 부근에서 존재하고 있음을 알 수 있고, 충돌제트에 의한 비등 현상에 관한 기존 문헌에서 잘 알려진 바와 같이 거의 유사한 온도 범위에서 임계열유속이 존재함을 확인할 수 있다 [1, 13].

Fig. 5에 나타난 바와 같이 냉각 수온의 영향은 열유속 곡선의 특별한 변화를 나타내지 않고 있는데, 수온이 22~96°C의 범위에서 Copeland[4]의 선행 연구와 같이 냉각 수온이 완전 발달된 핵 비등에 미치는 영향은 열유속 곡선에 영향을 거의 미치지 않음을 확인할 수 있다. 임계열유속의 크기 또한 5 가지 냉각수온 조건에 따라 거의 일정함을 알 수 있다. 따라서 임계열유속은 수분류 충돌제트 냉각에 있어서 수온에는 거의 무관하다는 것을 알 수 있고, 기존 선행연구 결과[4, 5]와 매우 잘 일치한다. 이것은 표면온도가 500°C 이상의 고온에서는 표면온도와 냉각수온의 온도 차가 냉각수온 변화에 따른 온도 차에 비해 상대적으로 작고, 따라서 냉각수온의 영향에 비해 큰 운동량을 가지는 수분류 충돌제트의 영

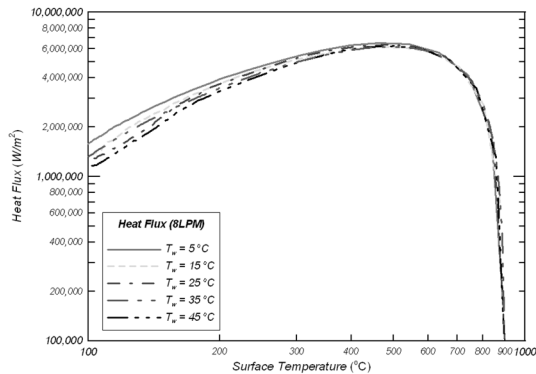


Fig. 5. Heat flux curve for five cooling water temperatures.

향이 지배적으로 작용하여 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 하지만 표면온도가 낮아지면서 낮은 냉각수온에서 큰 열유속을 가지는 경향을 볼 수 있고, 특히 낮은 냉각수온인 $T_w = 5^\circ\text{C}$ 인 경우 높은 냉각수온인 $T_w = 45^\circ\text{C}$ 와 비교하여 최대 약 40% 정도 큰 열유속이 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 표면온도가 낮을 때는 냉각수온이 표면 열유속에 영향을 미치지 않지만, 임계열유속이 발생하는 높은 표면온도에서는 냉각수온의 변화가 표면 열유속의 변화에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

하지만 냉각수온이 임계열유속과 열유속 곡선에 미치는 영향이 충돌제트의 정체점에서 뚜렷하게 나타나는 본 연구결과와 상충하는 결과 또한 선행 연구결과에서 보고되었다[6, 7]. Table 1에서는 냉각수온(즉, 과냉도)이 충돌제트의 냉각에 미치는 기존의 선행 연구 결과들[6-8]과 본 연구에서의 충돌제트의 냉각의 실험 특성을 비교하였는데, 본 연구와 기존 선행 연구와의 큰 차이점은 노즐 출구에서의 충돌제트의 속도에 나타난다. 본 연구의 경우 노즐 출구에서의 충돌제트의 속도는 기존 선행 연구에 비해 상대적으로 높다. 따라서 본 연구결과와 같이 충돌제트의 운동량이 기존의 선행 연구에 비해 큰 경우에는 냉각수온이 열유속 곡선의 변화에 미치는 영향은 거의 무시될 수 있는 것으로 설명될 수 있다.

Ishigai와 Mizuno[8]는 냉각수온이 20~55°C 범위에서 노즐 출구속도가 1.3~9.0 m/s 범위에서 노즐 출구속도가 열유속에 미치는 영향을 다음과 같은 상관관계식으로 제시하였다.

$$q_{\text{CHF}} = 0.0142 \times 10^6 \left(\frac{V_n}{d} \right)^{0.34} \Delta T_{\text{sub}}^{1.15} \quad (8)$$

여기서 임계열유속 q_{CHF} , V_n/d , 그리고 과냉도 ΔT_{sub} 는 각각 W/m^2 , $1/\text{s}$, 그리고 $^\circ\text{C}$ 의 단위로 표현된다. 하지만 식 (8)의 상관관계식은 노즐 출구속도

Table 1. Measurement characteristics of water jet impingement cooling

Author	Jet Type	Fluid	ΔT_{sub} ($^\circ\text{C}$)	V_n (m/s)	d (mm)
Present Study	Circular Jet	Water	55-95	18.8	3
Ochi et al. [6]	Circular Jet	Water	5-80	3	5-20
Matsumura et al. [7]	Circular Jet	Water	0-89	1.3-4.0	2
Ishigai and Mizuno [8]	Circular Jet	Water	45-80	1.3-9.0	5.7-17

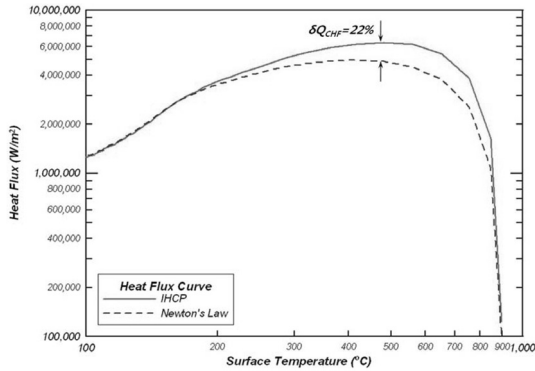


Fig. 6. Comparison of data reduction methods for heat flux determination ($T_w = 25^\circ\text{C}$).

가 비교적 낮은 경우에서만 적용될 수 있다. 본 연구와 같이 노즐 출구속도가 높은 범위에서 제시된 상관관계식은 아직 문헌에서 찾아 볼 수 없다.

Fig. 6은 냉각수온 25°C 인 경우에서 역열전도 해석(IHCP)으로 계산된 열유속과 뉴턴의 냉각법칙으로 직접 측정된 열유속의 결과를 비교하여 보여주고 있다. 여기서 뉴턴의 냉각법칙을 적용하여 직접 측정된 열유속이 역열전도 해석으로 계산된 열유속에 비해 조금 작은 값을 보여주고 있다. 임계열유속에서는 두 가지 열유속 결정법의 차이는 최대 약 22% 정도 나타나지만, 임계열유속 부분을 제외하고는 두 가지 열유속 결정법이 매우 잘 일치함을 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 역열전도 해석에 의한 열유속 결정은 실제 열유속의 변화를 매우 잘 예상하는 것을 알 수 있다.

3.3 열전달 계수

냉각수온의 변화에 따른 수분류 충돌제트의 열전달 계수의 분포는 표면온도에 따라 Fig. 7에 잘 나타나 있다. 여기서 각각의 냉각수온에서 표면온도가 $190\sim 250^\circ\text{C}$ 에 도달하는 동안 열전달 계수는 갑자기 증가하기 시작하는 것을 볼 수 있다. 표면온도 기준으로 500°C 보다 낮은 완전 발달된 핵 비등 영역에서는 높은 냉각수온($T_w = 45^\circ\text{C}$)에 비해 낮은 냉각수온($T_w = 5^\circ\text{C}$)에서 높은 열전달 계수가 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 500°C 보다 높은 온도의 천이 비등 영역에서는 수분류 충돌제트의 열전달 계수는 냉각수온의 영향이 거의 나타나지 않음을 알

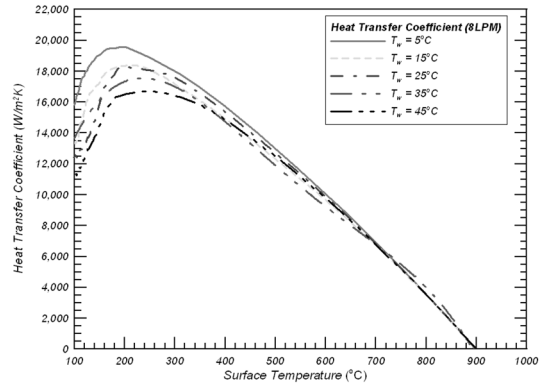


Fig. 7. Heat transfer coefficient distribution for five cooling water temperatures.

수 있다. 따라서 수분류 충돌제트 냉각의 경우에는 냉각수온의 변화가 열전달 계수에 미치는 영향은 완전 발달된 핵 비등 영역에서만 뚜렷하게 나타나는 것으로 설명할 수 있다.

냉각수온 $T_w = 5^\circ\text{C}$ 와 냉각수온 $T_w = 45^\circ\text{C}$ 사이에서 최대 열전달 계수의 차이는 약 15% 정도로 낮은 냉각수온에서 높은 최대 열전달 계수가 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 표면온도가 낮아질 때, 냉각수온이 낮을수록 상대적으로 큰 열유속이 발생하고 냉각수온이 열전달 계수에 미치는 영향이 커지면서 큰 최대 열전달 계수가 나타나는 것으로 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온 열유속게이지를 사용하여 냉각수온의 영향에 따른 수분류 충돌제트 냉각의 열전달 특성을 확인하였다. 여기서 사용된 고온 열유속게이지는 기존의 강제 대류 열전달 실험방식과 비교하여 설치가 용이하여 실험이 간편한 장점을 가지고 있고, 최소 20회 이상 반복적으로 사용이 가능하다. 냉각수온에 따른 열유속 측정결과에서 높은 표면온도에서의 열유속은 냉각수온의 영향을 거의 받지 않지만, 표면온도가 낮아지면서 냉각수온의 영향이 커지고 낮은 냉각수온에서 높은 열유속이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 수분류 충돌제트 냉각의 경우에는 냉각수온의 변화가 열전달 특성에 미치는 영향은 완전 발달된 핵 비등 영역에서만 뚜렷하게 나타나고,

천이 비등 영역에서는 거의 나타나지 않았다. 그리고 본 연구에서 사용한 역열전도 해석(IHCP)과 뉴턴 냉각법칙으로 직접 측정된 열유속 값은 매우 잘 일치하였고, 역열전도 해석에 의한 계산이 실제 열유속의 변화를 매우 잘 예상하는 것을 확인 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2009년 지식경제부 부품소재전문기업기술지원사업의 “고온 발열용 카트리지히터 및 고온 열유속게이지 개발” 연구과제로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. D. H. Wolf, F. P. Incropera, and R. Viskanta : *Advances in Heat Transfer*, **23** (1993).
2. S-J. Chen and A. A. Tseng : *Int. J. Heat Fluid Flow*, **13** (1992) 358.
3. M. Mitsutsuka and K. Fukuda : *Tetsu-to-Hagane*, **75** (1989) 1154 (in Japanese).
4. R. J. Copeland : *Boiling Heat Transfer to a Water Jet Impinging on a Flat Surface (-1g)*, Ph.D. Thesis, Southern Methodist University, Dallas, TX (1970).
5. M. Monde and Y. Katto : *Int. J. Heat Mass Transfer*, **21** (1978) 295.
6. T. Ochi, S. Nakanishi, M. Kaji, and S. Ishigai : *Multi-Phase Flow Heat Transfer III, Part A: Fundamentals* (1984) 671-681.
7. S. Matsumura, T. Kumagaya, and T. Takeyama : *Proc. the 16th National Heat Transfer Symposium of Japan*, (1979) 322-324 (in Japanese).
8. S. Ishigai and M. Mizuno : *Reprint of JSME*, No. 740-16, (1974) 139.
9. J. Lee : *ISIJ Int.*, **49** (2009) 1920.
10. J. Lee : *Development in In-Line Heat Flux Curve of Accelerated Cooling Machine and its Application in Plate Mills*, POSCO Technical Report 2008X017, Pohang, Korea, (2008) 64.
11. J. V. Beck, B. Blackwell, and C. R. St. Clair, Jr. : *Inverse Heat Conduction : Ill-posed Problems*, A Wiley-Interscience, New York, (1985) 108.
12. J. Taler : *Int. J. Heat Mass Transfer*, **39** (1996) 3733.
13. S. van Stralen and R. Cole : *Boiling Phenomena*, McGraw-Hill, New York, (1979).