

물-공기 혼합분무에 의한 고온 강판 냉각에 대한 연구 (I) -막비등 열전달에 대한 공기질량유속의 영향-

이필종[†] · 진성태^{*} · 이승홍^{**}

(2003년 2월 10일 접수, 2004년 2월 4일 심사완료)

A Study on Cooling of Hot Steel Surface by Water-Air Mixed Spray(I) -The Effect of Air Mass Flux on Film Boiling Heat Transfer-

Pil-Jong Lee, Sung-Tae Jin and Sung-Hong Lee

Key Words : Water-Air Mixed Spray(물-공기 혼합분무), Hot Steel Plate(고온 강판), Film Boiling(막비등), Air Mass Flux(공기질량유속), Water Mass Flux(물질량유속)

Abstract

The cooling characteristic of water-air mixed spray for high water mass flux is not well defined, compared to that of highly pressurized spray. A series of research program was planned to develop the boiling correlation for whole temperature range in case of water-air mixed spray with high water mass flux. The cooling experiments of hot steel surface with initial temperature of 820°C were conducted in unsteady state with relatively high water mass flux. A computer program was developed to calculate the heat flux inversely from measured data by three inserted thermocouples. Finally the effects of water and air mass flux on the averaged film boiling heat flux and wetting temperature were studied. In this 1st report, it is found that the boiling curve was similar to that of highly pressurized spray and the decreased slope of heat flux in film boiling region with respect to surface temperature became steep by increasing air mass flux. Also it is shown that, by increasing air mass flux, the averaged heat flux in film boiling region was increased, and then saturated and the wetting temperature was increased, and then decreased. Finally when the heat flux in film boiling region is compared with that of highly pressurized spray, it is known that the cooling is improved by introducing air up to 60%.

1. 서 론

분무 액적을 이용하는 냉각방법은 단순한 설비 구성을 통해 높은 열전달 효율을 얻을 수 있다는 측면에서 그 활용도가 매우 높다. 철강제조에 있어 연속주조나 열간 압연, 기타 열처리 공정을 들 수 있다. 이러한 분무 냉각은 열전달 특성이 풀비등 곡선의 그것과 유사하여, 강판온도에 따라 막비등, 천이비등, 핵비등, 그리고 단상 강제대류 냉각의 영역구분이 가능하다.⁽¹⁾

분무 액적을 이용한 냉각 방법은 크게 냉각수만을 고압으로 분무하는 단순 스프레이 냉각(Spray Cooling)과 물과 공기를 혼합하여 분무하는 냉각(Water-Air Mixed Spray)으로 나눌 수 있다. 이중 단순 스프레이 냉각은 상대적으로 높은 냉각 성능을 갖는 데 주로 사용된 반면, 물-공기 혼합분무 냉각방법은 공기가 들어가면서 입자 직경을 다양하게 변화시킬 수 있고 고르게 할 수 있어 제어 냉각이 필요한 곳을 중심으로 활용되어 왔다.⁽²⁾

그런데 최근 보다 빠른 냉각속도에서, 균일냉각이 필요한 고부가가치 고강도 강재 생산노력이 진행되고 있다. 이 때 단순 스프레이 냉각을 이용하여 고온 강판을 냉각할 때 막비등이 발생되어 냉각능력을 높이기 어려운 문제를, 물-공기 혼합분무 냉각을 통해 해결하고자 하는 노력이 전개되고 있다.^(3,4) 하지만, 이러한 물-공기 혼합 분무 냉각은

* 부산대학교 기계공학과 대학원

** 회원, 부산대학교 기계공학과

[†] 책임저자, 회원, 포스코 기술연구소 공정제어 연구그룹
E-mail : leepj@posco.co.kr
TEL : (054) 220-9235 FAX : (054) 220-6914

강판표면에 부딪히는 액적의 거동과 함께 공기 유량 등에 의해서도 영향을 받기 때문에, 훨씬 복잡한 열전달 기구를 갖는 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁾

지금까지 스프레이 냉각에 대한 연구는 많이 있었지만, 물-공기 혼합 분무냉각, 그것도 막비등이 일어나는 고온, 더 나아가 고유량인 경우에 대한 연구가 매우 적었기 때문에, 스프레이에 대한 연구결과로부터 미루어 물-공기 혼합분무 냉각을 이해하는 것이 훨씬 용이할 것으로 생각된다.

스프레이 냉각에 대해 열전달 특성을 정의하는데 있어 냉각 표면 온도 외에도, 체적(질량)유속, 분무 액적의 속도, 그리고 액적 직경 등의 인자를 사용한 연구가 많이 있다.⁽⁶⁻¹²⁾ 이중 막비등 열전달과 관련되어, 기존의 연구들에서는 스프레이 냉각을 물의 체적유속이 낮은 영역과 체적유속이 높은 영역으로 구분되어야 한다고 언급하였다.^(7,8) Hoogendoorn 등⁽⁶⁾은, 이 두 영역에서, 체적유속이 $0.6 \times 10^{-3} \sim 25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{sec}$ 인 범위에서 고온의 스테인레스(Stainless)박판을 냉각하면서 체적유속이 증가되면서 Leidenfrost 온도(이하에서는 적심 온도라 언급함.)가 따라서 증가되며 물입자 크기가 작을수록 열전달 계수가 커지는 결과를 얻었다. Choi 등⁽⁷⁾은 $0.11 \times 10^{-3} \sim 1.84 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{sec}$ 의 희박한 체적유속을 갖는 스프레이에 대한 냉각실험을 통해, 막비등 영역에서 체적 유속이 열전달을 지배하는 인자이며 희박 체적유속 조건일 때는 웨버수의 영향이 중요하며, 체적유속이 높은 영역이 되면 그 영향이 크게 줄어든다고 보고하였다. Klinzing 등⁽¹²⁾은 체적유속이 약 $3.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{sec}$ 이하일 때를 희박 영역이라 정의하고 이 때는 체적유속이 제일 중요한 인자이고 입자 직경이 적게나마 영향을 미치지만, $3.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{sec}$ 이상의 높은 체적유속 영역에서는 체적유속과 함께 입자속도가 중요하다고 보고하였다. Mitsutsuka⁽¹¹⁾는 $0.1673 \times 10^{-3} \sim 33 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{sec}$ 로 넓은 체적유속 범위에서 수행된 기존 문헌의 실험 결과들을 바탕으로 막비등의 열전달 계수를 강판 표면온도와 체적유속으로 다음과 같이 표현하였다.

$$h = 2.292 \times 10^8 W^{0.616} T_s^{-2.445} \quad (1)$$

여기서 h 는 열전달계수로 $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 로 표현되고 W 는 체적유속으로 $\text{l}/\text{m}^2\text{min}$, T_s 는 표면온도로 $^\circ\text{C}$ 의 단위를 갖는다.

물-공기 혼합분무의 경우에는 스프레이에 비해 고온영역이나 높은 체적유속조건에 대해 정량적인 연구를 시도한 사례는 매우 드물다. Ohkubo와 Nishio⁽¹³⁾는 막비등 영역의 온도를 다루었지만,

$0.57 \times 10^{-3} \sim 4.72 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{sec}$ 의 낮은 물 체적유속에서 상향 원형 평판의 물-공기 혼합 분무냉각에서 표면 거칠기와 접촉각, 시편두께, 그리고 열물성값이 열전달에 미치는 영향에 대해 실험을 실시하였다. Buckingham과 Haji-Sheikh⁽⁵⁾은 물 체적유속 조건이 명확하지 않지만 공기에 대한 물의 질량 유량비($X < 10$)를 조절하면서, 1000°C 까지 가열시킨 고온 실린더를 냉각하였다. 이들은 Monte Carlo 모사에 의한 역열전도기법⁽¹⁴⁾을 사용하여 실린더의 표면온도를 계산한 후, 표면 적심 온도보다 높은 온도에서 발생하는 열전달 영역을 복사 지배영역(radiation-dominated region)과 대류 지배영역(convection-dominated region)으로 나눌 수 있다고 언급하였다. 강보선 등⁽¹⁵⁾은 최대 $1.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{sec}$ 물 체적유속조건에서 정상상태에서 수행된 냉각실험을 통해, 물의 체적유속이 증가함에 따라, 그리고 공기압력이 증가함에 따라 막비등 열유속이 증가되는 결과를 얻었다. 저자를 포함한 이수관 등⁽⁴⁾은 체적(질량)유속을 제시하지 않은 상태로 고온 실린더 냉각에서 단순 모델을 통해 열전달 기구의 해석을 시도하고 적심 온도가 높아질 수 있는 임계질량비가 존재함을 확인하여 공기가 냉각에 영향을 미치고 있음을 보였다.

본 연구는 물-공기 혼합분무 냉각에 있어, 비정상상태에서 냉각 실험하는 방법을 통해 높은 물의 질량 유속조건에 대해, 핵비등, 천이비등, 그리고 막비등에서의 열전달 특성을 정량적으로 규명하고 모델화하기 위해 시작되었다. 여기서는 그 제 1 보로서, 물 체적유속이 $2.66 \times 10^{-3} \sim 9.77 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{sec}$ 일 때 막비등 조건에서의 열유속을 구하고 이를 기존 spray 냉각에 대한 결과와 비교하였으며 막비등 열유속과 적심 온도에 대한 물 및 공기의 체적(질량)유속의 변화가 미치는 영향을 살펴보았다.

다음으로 이어질 논문들에서는 강판 표면온도와 함께, 공기 및 물의 질량유속을 이용하여 막비등 및 핵비등에 대해 열유속 및 관련된 온도의 예측식을 도입하고 최종적으로는 입자속도, 입자직경 등을 측정하여 이들을 열유속 및 관련 온도 예측에 활용하고자 한다.

2. 실험 및 해석

2.1 실험장치

Fig.1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이다. 실험 장치는 크게 냉각방(Quenching Chamber)과 가열부(Induction Heater)로 나뉘어 진다. 냉각방

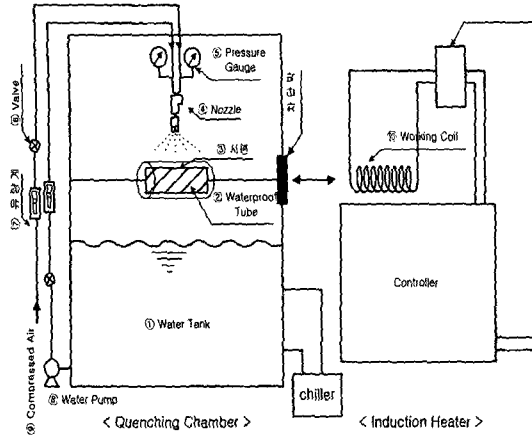


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

은 노즐, 냉각수 펌프, 하부 냉각수 저장탱크, 유량계, 밸브, 배관계통, 방수관(waterproof tube), 그리고 냉각수 냉각기(Chiller)등으로 구성되어 있다. 냉각수는 시편 아래에 위치한 냉각수 저장탱크에서 펌프를 통해 가압되고 노즐로 보내어진다. 공기는 외부의 대형 공기 저장탱크에서 7 kg/cm²로 일정한 압력을 가진 압축 공기가 노즐로 보내져서 노즐내부에서 혼합되어 분무된다. 방수관은 밸브를 처음 열었을 때 냉각수 유동이 불안정한 상태에서 시편이 냉각되는 것을 방지하도록 설치되었다.

물과 공기의 유량은 최대 ±0.1 %의 오차를 보이는 면적식 유량계를 이용하여 측정되며 물과 공기의 압력은 니들밸브를 통해 조절된다. 기 문헌⁽⁴⁾과의 차이점으로는 압력지시계를 노즐쪽에 더욱 가깝게 설치하였으며 수온의 변동을 최소화하기 위해 1.5 RT 냉각기가 추가되어 ±0.5 °C 범위에서 수온을 일정하게 할 수 있도록 하였다. 또 시편이 원형 실린더에서 사각 단면을 갖는 봉으로 변경됨에 따른 시편지지대가 바뀌었고 시편이 목표온도 근처로 가열된 상태에서 가열부에서 대기하고 있을 때 초기 분무 냉각수가 비산되면서 시편을 냉각시키지 못하도록 하기 위해 차단막이 가열부와 냉각방 사이에 설치되었다.

온도계측을 위해서는 NI사의 SCXI Data Acquisition System(12bit, 상온 보상회로 포함)과 Labview Software가 사용되었다.

2.2 노즐

실험에 사용한 노즐은 Spraying System Korea에서 제작된 내부 혼합형 노즐이다. Fig. 2는 노즐의 개략도를 보여준다. 분사면적은 길이에 비해

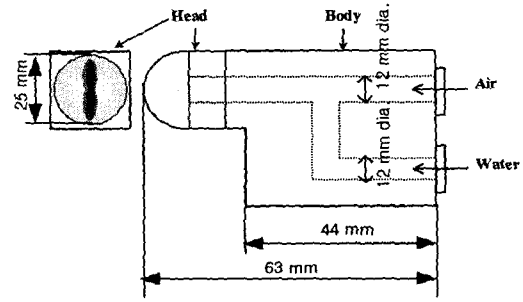


Fig. 2 Schematic diagram of water-air mixed spray nozzle

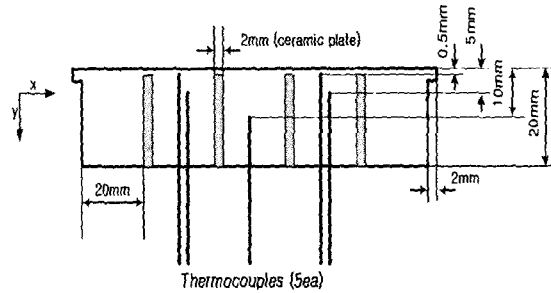


Fig. 3 Schematic diagram of SUS 304 Specimen

두께가 얇은 형태를 갖는 데, 실험범위 내에서 길이방향의 분사각도는 약 85 ~ 105 °를 갖는 반면 두께는 거의 일정하게 나타났다.

부위별 체적유속분포를 측정하기 위해 폭이 약 20 mm를 갖는 아크릴로 제작된 셀(cell)들로 구성된 장치가 사용되었다. 이 장치를 이용하여 약 45 초간 냉각수를 분사한 후, 셀내의 수면 높이를 측정하였다.

2.3 시편

Fig. 3은 냉각 실험에 사용된 시편을 나타낸다. 시편은 반복적인 가열 및 냉각 과정에서 발생하는 산화막의 생성을 최소화하기 위해 SUS304로 제작되었는데, 길이, 폭, 두께가 각각 112 mm, 20 mm, 그리고 2 mm이다. 표면 조도, Ra는 약 4 μm로 유지되었다.

본 연구에서 사용된 노즐의 경우, 시편에 대해 비교적 균일한 유량분포(체적유속)이 확보되었지만, y 방향으로 열전달이 일어나는 것을 방지하기 위해 두께 2 mm의 세라믹 단열재를 삽입하였다.

또한 시편 상부 냉각면은 아래보다 조금 더 크게 하여, 즉 턱을 만들어서, 분무 냉각수가 측면에

직접 닿는 것을 방지하고자 하였다. 이에 따라 냉각표면이 냉각수에 의해 젖기 전, 즉 막비등 구간에서, 시편 옆면은 복사 및 공기에 의한 강제 대류 냉각만이 있을 수 있다고 생각되었다.

냉각 표면의 반대 면에서 정밀드릴을 사용하여 열전대 설치 구멍을 가공하였다. 시편 중심에는 냉각 표면에서 10 mm 지점에 열전대를 설치 하여 시편 내부의 온도 변화를 보고자 하였으며, 시편 중심 셀의 양 옆 셀에는 똑같이 냉각면에서 0.5 mm 와 5 mm 지점에 열전대를 설치 하였다. 이 때 구멍깊이 오차는 최대 0.02 mm 로 하였다. 시편과 열전대의 완전한 열적 접촉을 위해, 은분(silver paste)을 바르고 소선직경이 ϕ 0.25 mm K형 열전대는 외경이 ϕ 1.0 mm 인 SUS304 로 피복하였다.

2.4 실험방법

본 실험에 사용된 시편이 가열부와 냉각방으로 자유롭게 이동될 수 있도록 이송대를 설치하였다. 시편 표면은 알코올로 잘 닦아 표면조건이 항상 일정하게 하였다. 시편을 유도가열장치 쪽으로 이동시켜 중심온도가 약 850 °C로 될 때까지 가열한 후 공냉을 시켜 시편전체가 균일한 온도분포가 되게 하였다. 이어서 시편온도가 830 °C보다 조금 높을 때 냉각수 펌프를 가동하고 동시에 물과 공기의 유량조절밸브를 조정하여 원하는 실험조건에서 분무를 시작하면 실험준비가 완료된 것이다.

다음으로 측정된 시편의 온도정보를 저장하기 시작하고 냉각방과 가열부 사이에 설치된 비산수 차단막을 제거한 후에 이송대를 이용해 시편을 냉각실험 위치로 이동시켰다. 이때 시편은 방수관에 의해 분무 냉각수로부터 보호되어 있다가, 820 °C 가 될 때 방수관을 제거하고 시편을 냉각시킨다.

노즐 끝에서부터 시편까지의 거리는 300 mm (\pm 1 mm)로 고정하였고 냉각수 온도는 25°C(\pm 0.5 °C)

로 유지하였다. 실험은 같은 조건에 대해 2 번 반복하여, 실험간 온도편차가 5 % 이내 이면 그 중 하나를 결과로 사용하였고 5 % 보다 크면 다시 실험을 실시하였다. 온도 편차가 생기는 주된 원인은 많은 반복 실험과정에서 시편이 변형되어 생기는 것으로 보이며 이 때는 시편을 교체하여 다시 반복 실험하였다. Kline 과 MaClintock⁽¹⁶⁾에 의해 제안된 방법을 사용하면, 물 유량이 6 l/min, 공기 유량이 20 Nm³/min 인 조건에서 온도측정 불확실도는 7.97 %이다.

2.5 역열전도 해석

냉각수와 고체 표면 사이의 대류 열전달 전열 표면에 직접 열전대를 부착하여 표면 온도를 측정하는 것은 측정상의 오차를 초래하기 때문에, 전열면 내부에서 온도를 측정하여 역으로 전열 표면의 온도와 열유속을 계산하는 역열전도 해석 기법 (Inverse Heat Conduction Technique)이 개발되어 왔다. 최근에는 비정상상태 실험에서 열전달 특성을 정량화하는 연구에서 많은 연구자들이 이 기법을 활용하고 있다.

본 연구에서는 자체적으로 열유속을 계산하는 프로그램을 작성하였다. 분무냉각 개시 전에 측정된 온도로 시편 온도가 균일하다고 가정하였다. 다음으로 분무 냉각수에 의해 냉각되는 표면에서의 열유속을 가정하여 1 차원 비정상 열전도 해석을 시도한후, 표면에서 0.5 mm 와 5 mm 지점에 대해 계산된 온도와 측정된 온도에 대해 최소자승법으로 구한 오차가 최소(0.6 °C 이하)가 되는 열유속 값을 구하였다. 이어서 현재 계산된 온도분포를 초기 온도로 하여 다음 계산시간으로 이동한다.

이 때 분무 냉각수에 의해 냉각되는 면의 반대 면에서 복사열전달을 고려하였고(복사율 0.8 적용⁽¹⁾) 시편 폭방향으로의 열전달은 없는 것으로 가정하였다. 격자는 0.2 mm 간격을 갖는 등 간격 격자계를 구성하였으며 열물성 값은 온도에 따라 변화되는 것을 고려하였다.⁽¹⁷⁾

Table 1 Experimental cases and conditions

Water (l/min) \ Air (Nm ³ /hr)	6	10	16	22
	Pw Pa	Pw Pa	Pw Pa	Pw Pa
20	0.5 0.5	1.1 1.0	2.3 1.8	3.5 2.3
35	1.0 1.5	1.8 2.0	3.2 2.8	4.5 3.5
50	1.5 2.1	2.5 2.9	4.0 3.8	5.4 4.5
65	2.0 3.0	3.0 3.6	4.5 4.5	6.0 5.3

(Pa, Pw: kg/cm²)

3. 결과 및 고찰

3.1 노즐 특성

Fig. 4 는 물이 6 l/min, 공기 35 Nm³/hr 조건에서 분무되는 시편 주변의 물 질량분포를 측정된 것이다. 중심선을 기준으로 대칭으로 분포되며 평균 물 질량분포는 약 2.66 kg/m²sec 이다. 질량분포의 차는 10 %정도이나, 열전대가 있는 위치에서는 더

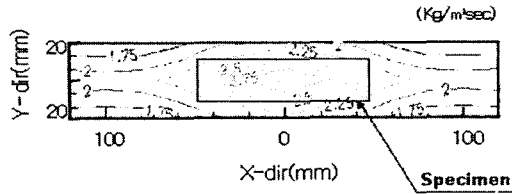


Fig. 4 Distribution of water mass flux near the test specimen (water 6 l/min, air 35 Nm³/hr)

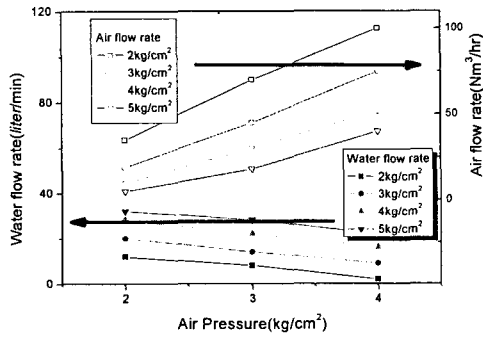


Fig. 5 Effect of spraying pressure on water and air flow rates

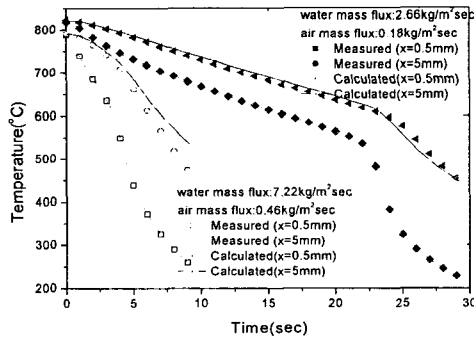
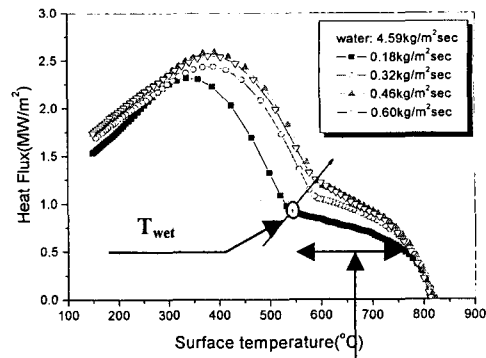


Fig. 6 Comparison of calculated and measured temperatures at the depths of 0.5 mm and 5 mm from sprayed surface

작은 약 5%이내의 오차가 예상된다.

Fig. 5는 물 분사압력이 일정할 때 공기압력이 증가함에 따라 물의 질량유속은 선형적으로 감소하고 공기의 질량유속은 선형적으로 증가함을 나타낸다. 반대로, 공기의 분사압력이 일정한 상태에서 물 분사압력이 증가되면 물의 질량유속도 선형적으로 증가되고 공기의 질량유속이 선형적으로 감소되는 것으로 나타났다. 기 연구결과에 의하면 이러한 노즐은 공기압력의 증가로 입자의 분사속도는 증가되지만 입자직경의 변화는 적다고 알려져 있다.⁽⁴⁾



Temperature range for averaging heat flux in film boiling regime

Fig. 7 Effect of air mass flux on boiling curve (water mass flux: 4.59 kg/m² sec)

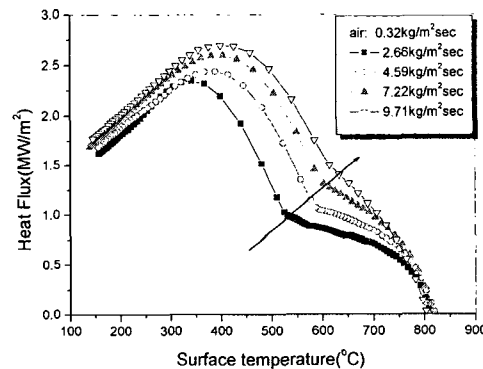


Fig. 8 Effect of water mass flux on boiling curve (air mass flux: 0.32 kg/m² sec)

3.2 역열전도 해석결과

Fig. 6은 물 6 l/min, 공기 20 Nm³/hr 인 조건과 물 16 l/min, 공기 50 Nm³/hr 인 조건에서 측정된 온도와 계산된 온도를 비교한 것이다. 측정 온도와 계산 온도가 잘 일치하며 강 냉각일 때보다는 약 냉각일 때가, 표면에서 5 mm 로 멀리 떨어진 지점에서 보다는 표면에 가까운 0.5 mm 되는 지점이, 그리고 냉각개시 후반보다는 전반에서 계산온도가 측정온도에 더 잘 일치한다.

3.3 비등곡선의 일반적 특징

Fig. 7은 물의 질량유속이 일정할 때 공기 질량유속 변화에 따른 비등곡선을 보여준다. 공기 질량유속이 증가되면 막비등, 천이비등, 그리고 임계열유속에 이르는 구간의 열유속이 커지는 경향이 있다. 하지만 공기 질량유속이 0.46 kg/m²sec 이상이 되면 열유속의 증가는 매우 작은 것으로 나타났다.

Fig. 8은 공기의 질량유속이 일정할 때 물의 질량 유속 변화에 따른 비등곡선을 보여준다. 물의 질량유속이 증가되면, 앞의 공기 질량유속이 증가에서 처럼 막비등, 천이비등, 그리고 임계 열유속 점에 이르는 구간의 열유속이 커지는 경향이다. Fig. 7과 다른 점은 물의 질량유속 증가에 따라 지속적으로 열유속이 증가한다는 것이다.

Fig. 9는 본 연구에서 구한 물-공기 혼합 분무와 Mitsusuka⁽¹⁾가 구한 단순 스프레이의 비등곡선을 비교한 것이다. 두 경우 모두 풀비등 곡선과 유사하게, 막비등, 천이비등, 그리고 핵비등 영역이 나타나는 점에서 같다. 차이점으로 첫째는 물-공기 혼합 분무의 경우는 단순 스프레이에 비해 천이비등/핵비등 영역이 보다 명확하다. 둘째 최대 열유속에 해당되는 온도가 물-공기 혼합 분무의 경우에서 상대적으로 더 높은 편이다. 셋째 공기가 들어가면서 단순 스프레이에 비해 적은 물 질량유속에서도 유사하거나 더 높은 열유속이 얻어진다. 예를 들어 물-공기 혼합 분무에서 물 질량유속이 2.66 kg/m²sec 이고 공기 질량유속이 0.46 kg/m²sec 인 경우는 물 질량유속이 3.33 kg/m²sec 인 경우에 비해 막비등 열유속이 거의 같고 최대 열유속은 거의 50~60% 증가되는 것으로 나타났다.

3.4 막비등 열유속의 강판온도에 따른 변화

막비등 열유속은 강판 표면온도가 높아짐에 따라 감소되는 경향을 보인다. 이는 단순 스프레이에 대한 Mitsusuka 나 타 연구자들의 결과와 유사한 형태를 보인다.^(1,6) Mitsusuka⁽¹⁾는 단순 스프레이에 대한 연구에서 기존 타 연구자들의 실험결과를 검토하면서 정상상태의 실험결과가 강판 표면온도에 따라 거의 일정한 형태를 보이는 데 반해, 비정상 상태의 실험결과들은 강판 표면온도가

높아짐에 따라 열유속이 낮아지는 것을 확인하였다. 그는 강판 표면온도가 높아짐에 따라 열유속이 낮아지는 것은 비정상상태로 실험하면서 생기는 오차일 수도 있을 것이라고 언급한 바 있다.

하지만, 현실적으로 정상상태 실험은 낮은 물 질량유속에서만 가능한 것을 참작하면, 본 연구에서와 같은 경향은 오차보다는 높은 질량유속에서의 당연한 결과라고 생각된다. 그 타당성을 설명해주는 인자로는 첫째는 Fig. 8에서 보다 더 낮은 물 질량유속이 된다면 비정상상태 실험에서도 강판온도에 따른 열유속의 변화가 매우 적을 수 있을 것으로 보인다는 점을 들 수 있다. 다음으로 높은 질량유속이 되면 냉각수의 충돌력이 증가되면서 막비등 영역내에 일부 천이비등이 혼재되면서 온도가 낮을 때가 높을 때보다 열유속이 커질 것이라는 점이다. 본 연구에서 충돌력을 증가시킬 것으로 생각되는 공기나 물의 질량유속 증가는 막비등 영역의 기울기를 더 크게 만들어, 최종에는 천이비등과 같은 기울기를 갖게 되는 경향을 확인할 수 있다는 것이 좋은 증거가 된다.

3.5 막비등 열유속에 대한 공기질량유속의 영향

Fig. 10은 Mitsusuka⁽¹⁾의 단순 스프레이에 대한 막비등 열유속 예측식(1)을 이용하여 구한 값과 본 연구에서 물 질량유속을 2.66 ~ 9.71 kg/m²sec 까지 변화시키면서 구한 막비등 열유속을 값을 비교한 것이다. 공기가 들어가면 대부분의 경우에서 단순 스프레이에 비해 열유속 값이 크고 공기 질량유속이 증가될수록 열유속이 커져서 최대로 약 60% 까지 열유속이 증가되었다. 이는 단순히 공기에 의한 강제대류 효과로 보기에 너무 큰 값으로 공기의 추가가 물-공기 혼합 분무의 입자 크기나 입자 속도에 영향을 미쳤다고 생각된다.

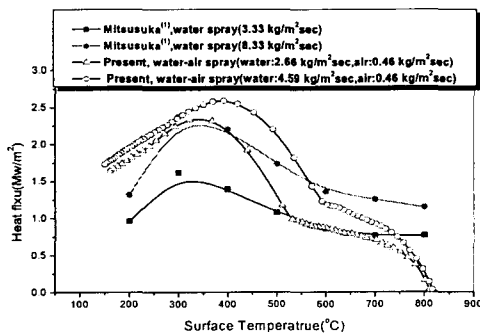


Fig. 9 Comparison of boiling curves for water-air mixed spray in this research and that for water spray by Mitsusuka⁽¹⁾

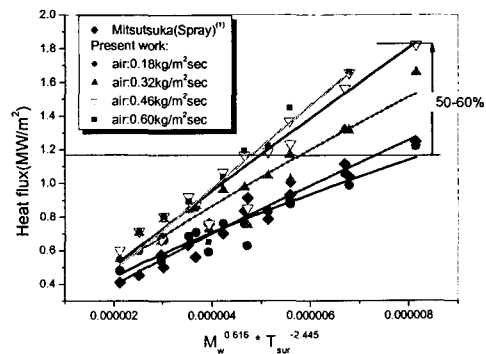


Fig. 10 Comparison of film boiling heat flux of present water-air spray with water spray by Mitsusuka⁽¹⁾

공기가 들어가면서 열유속이 증가하는 경향은 Fig. 7에서 알 수 있었듯이 공기 질량유속이 0.46 kg/m²sec 일 때부터 크게 둔화되는 것을 볼 수 있다. 또 물의 질량유속이 크거나 온도가 낮은 경우에서 그 증가 경향이 잘 나타난다. 예외적으로 공기 질량유속이 0.18 kg/m²sec 로 낮은 경우에서 물의 질량유속이 상대적으로 적거나 온도가 높으면 물-공기 혼합분무 냉각의 경우가 단순 스프레이 냉각에 비해 열유속이 매우 적은 차이는 하지만, 열유속이 낮은 경우도 생겼다.

3.6 적심 온도와 평균 막비등 열유속의 정의

적심 온도와 평균 막비등 열유속을 정의하는 방법을 Fig. 7에 나타내었다. 적심 온도(T_{wet})는 정문기 등⁽¹⁸⁾이 제안한 방법중 천이비등 영역 쪽에서 나타낸 열유속의 접선과 막비등 영역 쪽에서 나타낸 열유속의 접선이 만나는 표면온도로 정의하였다. 또 막비등 영역에서 열유속은 표면온도에 따라 일정하게 나타나지 않기 때문에, 적심 온도에서부터 750 °C 까지의 평균값을 취하여 평균 막비등 열유속이라 정의하였다. 이보다 높은 온도에서는 수 냉각 개시 때 시편이 균일한 온도 분포를 갖는 것으로 가정하여 열유속을 계산하였기 때문에 오류가 포함되어 있다고 생각하여 제외하였다.

3.7 평균 막비등 열유속

Fig. 11은 물 질량유속 변화에 대한 평균 막비등 열유속의 변화를, Fig. 12는 공기 질량유속 변화에 대한 평균 막비등 열유속을 살펴 본 것이다.

Fig. 11에서 물 질량유속의 0.31~0.42 승에 비례하여 평균 막비등 열유속이 증가되는 것으로 볼 수 있다. 공기 질량유속이 낮은 조건에서는 물 질량유속에 대한 평균 막비등 열유속의 의존도가 낮고 공기 질량유속이 커지면 그 의존도가 커지는 경향을 갖는 것으로 나타났다. 그 의존도는 단순 스프레이에 대해 Klinzing 등⁽¹²⁾에 의해 구해진 물 질량유속의 약 0.264 ~ 0.566 승에 비례하는 관계와 유사하고 Mitsutsuka⁽¹⁾에 의한 약 0.616 승에 비례한다는 관계식보다는 다소 작은 값이다.

Fig. 12에서는 앞서 Fig. 7이나 Fig. 10에서 알 수 있었듯이 공기의 질량유속이 증가될 때 평균 막비등 열유속은 점차로 증가되며, 공기의 질량유속이 약 0.46 kg/m²sec 이상에서 포화 되는 경향을 다시 확인시켜 주고 있다. 공기 질량유속의 증가에 대해 평균 막비등 열유속이 점진적으로 증가하는 구간만 보더라도 공기의 질량유속에 대한 의존성은 물에 대한 의존성에 비해 적은 편이다.

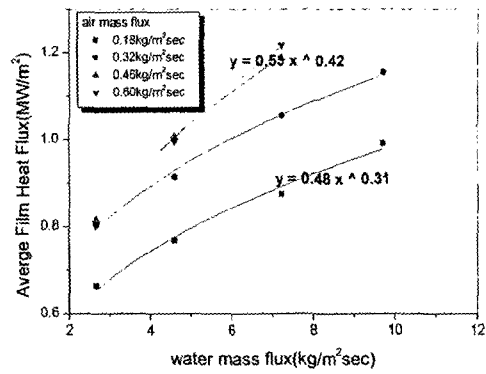


Fig. 11 Effect of water mass flux on average film boiling heat flux

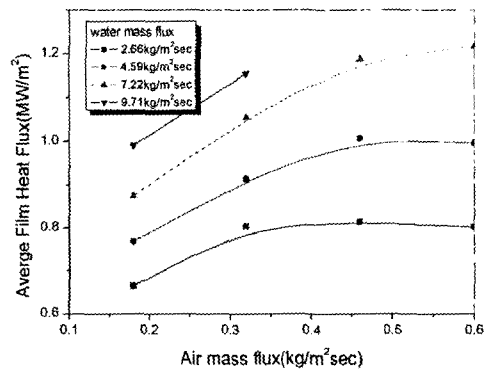


Fig. 12 Effect of air mass flux on average film boiling heat flux

3.8 적심 온도

Fig. 13은 물 질량유속 변화에 대한 적심 온도의 변화를, Fig. 14는 공기 질량유속 변화에 대한 적심 온도의 변화를 살펴 본 것이다. Fig. 13에서 적심 온도는 물 질량유속의 0.14 승 또는 그보다 작은 지수 승에 비례하는 관계를 보인다. 공기 질량유속이 낮은 경우보다는 높은 경우에서 물 질량유속에 대한 적심 온도의 의존도, 즉 증가율이 커지는 경향을 갖게 된다.

Fig. 14는, 앞서 막비등 열유속에 대한 Fig. 10 또는 Fig. 12에서 처럼, 적심 온도의 경우에도 공기 질량유속 0.46 kg/m²sec 가 중요한 변화점이 되는 것을 보여준다. 물 질량유속이 2.66 kg/m²sec 인 경우를 제외하면, 공기 질량유속이 증가되면 적심 온도는 높아지다가 공기 질량유속이 0.46 kg/m²sec 보다 커지면 적심 온도가 높아지는 경향이 크게 둔화되거나 또는 작은 양이지만 감소하는 것을 볼

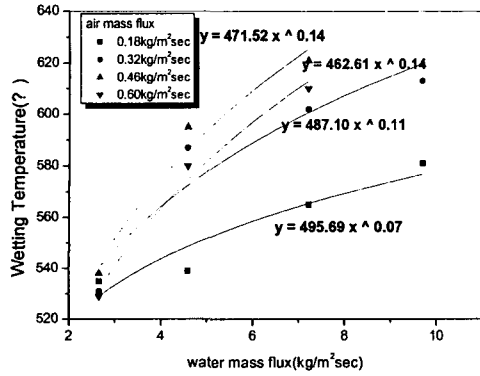


Fig. 13 Effect of water mass flux on wetting temperature

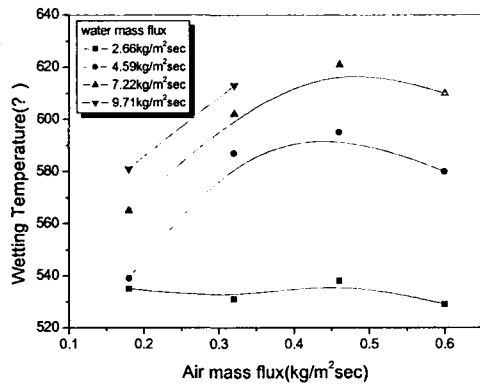


Fig. 14 Effect of air mass flux on wetting temperature

수 있다. 반면 물 질량유속이 2.66 kg/m²sec 일 때는 공기의 질량유속의 변화에 대해 적심 온도의 변화는 거의 없게 나타났다.

4. 결론

물-공기 혼합분무에서 물 질량유속을 2.66 ~ 9.77 kg/m²sec, 공기 질량유속을 0.18 ~ 0.6 kg/m²sec 로 변화시키면서 고온 강판을 비정상 상태에서 냉각하는 실험을 수행하고 비등곡선을 계산하였다. 이중 막비등 영역을 중심으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 물-공기 혼합분무 냉각의 비등곡선은 단순 스프레이 냉각의 비등곡선보다는 천이비등과 핵비등 영역이 명확하다. 또 물-공기 혼합분무에서 공기가 들어가면서 단순 스프레이에 비해 열유속이

커지는 경향을 보이는 데, 막비등 영역의 경우 최대 60%까지 향상된다.

(2) 막비등 열유속은 강판 표면 온도가 높아짐에 따라 감소되는 형태이다. 이 때 물이나 공기의 질량유속이 증가되면 그 감소되는 정도가 증대되는 경향을 보인다.

(3) 평균 막비등 열유속은 물 질량유속의 약 0.3-0.4 승에 따라 증대된다. 공기 질량유속이 증가될 때 평균 막비등 열유속은 증가되며, 공기 질량유속이 약 0.46 kg/m²sec 이상에서 포화되는 경향을 보인다.

(4) 적심 온도는 물의 질량유속의 약 0.14 승 또는 그보다 작은 지수 승에 비례한다. 물 질량유속이 2.66 kg/m²sec 보다 클 때 공기의 질량유속 0.46 kg/m²sec 이 적심 온도를 높일 수 있는 한계점이 된다. 반면 물 질량유속이 2.66 kg/m²sec 일 때는 공기 질량유속의 변화에 대해 적심 온도는 변화가 거의 없었다.

참고문헌

- (1) Mitsutsuka, M., 1983, "Heat Transfer Coefficients in the Surface Temperature Range of 400 to 800°C during Water - Spray Cooling of Hot Steel Product," *Iron and Steel Japan*, Vol. 69, No. 2, pp. 268 ~ 274.
- (2) Ito, T., Takata Y., Mousa M. M. M. and Yoshikai, H., 1992 " Studies on the Water Cooling of Hot Surface" *JSME International Journal*, Series II, Vol. 35, No. 4, pp. 589 ~ 598.
- (3) Buckingham, F. P. and Haji-Sheikh, A., 1995," Cooling of High-Temperature Cylindrical Surfaces Using a Water-Air Spray," *ASME J. Heat transfer*, Vol. 118, pp. 343 ~ 349.
- (4) Lee, S. W., Park, J. M., Lee P. J. and Kim M. H., 2002, "Mist Cooling of High-Temperature Cylinder Surface," *Trans. KSME (B)*, Vol. 26, No.2, pp. 448 ~ 457.
- (5) Ohkubo, H. and Nishio, S., 1993, "Study on Transient Characteristics of Mist-Cooling Heat Transfer from a Horizontal Upward-Facing Surface," *JSME Int. J.*, Vol. 36, pp. 543 ~ 555.
- (6) Hoogendoorn, C.J. and Hond, R.D., 1974, "Leidenfrost Temperature and Heat-Transfer Coefficients for Water Sprays Impinging on a Hot Surface," *Proc. 5th Int. Heat Transfer Conference*, pp. 135 ~ 138.
- (7) Choi, K. J. and Yao, S. C., 1987, "Mechanism of Film Boiling Heat Transfer of Normally Impacting Spray," *Int. J. Heat Transfer*, Vol.30, pp. 311 ~ 318.
- (8) Yao, S.C. and Choi, K.J., 1987, "Heat Transfer Experiments of Mono-Dispersed Vertically Impacting

- Sprays," *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol.13, pp. 639~648.
- (9) Dep, S. and Yao, S.C., 1989, "Analysis on Film Boiling Heat Transfer of Impacting Sprays," *Int. J. of Heat Transfer*, Vol. 32, pp. 2099~2112.
- (10) Bolle, L. and Moureau, J.C., 1976, "Spray Cooling of Hot Surfaces: A Description of the Dispersed Phase and a Parametric Study of Heat Transfer Results," *Proc. Of Two Phase Flows and Heat Transfer*, Vol.3, pp.1327~1346.
- (11) Gottfried, B.S., Lee, C.J. and Bell, K.J., 1966, "The Leidenfrost Phenomenon: Film Boiling of Liquid Droplets on a Flat Plate," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 9, pp. 1167~1187.
- (12) Klinzing, W.P., Rozzi, J.C. and Mudawar, I., 1992, "Film and Transition Boiling Correlations for Quenching of Hot Surfaces with Water Sprays," *J. Heat Treating*, Vol.9, No.2, pp. 91~103.
- (13) Ohkubo, H. and Nishio, S., 1989, "Study on Accurate Prediction of Mist Cooling," *Heat Transfer Japanese Research*, pp. 43~50.
- (14) Haji-Sheikh, A., 1989, "Monte Carlo methods," In 1st Edn., Minkowycz, W.J. et al., *Handbook of Numerical Heat Transfer*, Wiley, NY, Chap. 16.
- (15) Kang, B. S. and Choi, K.J., 1998, "Cooling of a Heated Surface with an Impinging Water Spray," *KSME Int. Journal*, Vol. 12, No.4, pp. 734~740.
- (16) Kline, S.J. and McClintock, F.A., 1953, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiment," *Mechanical Engineering*, Vol.75, pp. 3~8.
- (17) KIM, S. J., 1990, "Characteristics of Thermophysical Properties of Various Kinds of Steels at Elevated Temperatures," *RIIST*, p. 78.
- (18) Chung, M. K., Park, J. S. and Lee, Y. W., 1985, "A Study of Rewetting Temperature in Cooling of Hot Surfaces," *Trans. KSME (B)*, Vol. 9, No.4, pp. 463~470.