

주변공기조건이 총돌수분류에 의한 고온강판의 냉각에 미치는 영향 연구

이필종* · 최해원** · 이승홍***
(1999년 5월 6일 접수)

The Effect of Ambient Air Condition on a Hot Steel Plate Cooled by Impinging Water Jet

Pil-Jong Lee, Hae-Won Choi and Seung-Hong Lee

Key Words: Impinging Liquid Jet(총돌수분류), Hot Steel Plate(고온강판), Ambient Air Temperature (주변 공기온도), Inverse Heat Conduction(역열전도), Humidity Ratio(습도비)

Abstract

It is observed that the cooling capacity of impinging water jet is affected by the seasonal conditions in steel manufacturing process with large scale. To confirm this phenomena, the cooling experiments of a hot steel plate by a laminar jet were conducted for two different initial ambient air temperature(10℃ and 40℃) in a closed chamber, and an inverse heat conduction method is applied for the quantitative comparison. It is found that the cooling capacity under 10℃ air temperature is lower than that under 40℃, as is the saturated water vapor is more easily observed, and the amount of total extracted heat in the case of 10℃ is smaller by nearly 15% than that of 40℃ case. From these results, it is thought that the quantity of water vapor, which could be absorbed until saturation, effects on the mechanism of boiling heat transfer.

1. 서 론

총돌수분류 냉각은 단순한 장치를 이용하여 높은 열전달효율을 얻을 수 있어 산업적 응용사례가 늘어나는 추세이다. 고온강판을 냉각하기 위해 수냉각을 실시할 때 비등현상이 과격해지면 이로 인해서 생긴 증기막이 강판을 덮기 때문에, 새로운 냉각수가 강판과 직접 접촉될 수가 없게 되고 냉각효율은 급격히 떨어지게 된다. 하지만 총돌수분류 냉각은 수분류의 운동에너지를 이용하여 이 증기막을 파괴함으로써 냉각효율의 저하를 막을 수 있는 장점이 있다. 철강 제조과정 중

열간 압연을 마친 고온강판이 원하는 기계적 성질을 갖도록 하는 급냉열처리하는 공정에서는 이러한 총돌수분류 냉각방식이 오래 전부터 사용되어 왔다. 최근에는 여러 총돌수분류 냉각방식에서 적은 에너지를 공급하면서 고압 분사제트에 비해 30% 이상 냉각효율을 높일 수 있는 총류냉각방식 기술이 널리 적용되고 있다.^(1,2)

총돌수분류 냉각에 대한 기존의 연구들에서는 분류속도, 노즐형상 및 크기, 노즐과 전열면간의 거리, 냉각매체의 온도 및 표면 장력 등 물질 상수, 전열면의 표면상태 등 다양한 인자가 전열현상에 미치는 영향을 살펴보았다. 하지만 대부분이 균일열유속 조건에서 단상강제대류 영역에 대한 것이며 일부만이 비등현상, 그것도 핵비등영역에 국한되어 연구하였다.^(3~6) 따라서 철강제조 공정에서와 같이 강판 온도가 Leidenfrost 온도 이상인 경우로 핵비등 외에 천이비등과 막비등이 동반되는 경우에 대한 연구사례는 매우 적은 편

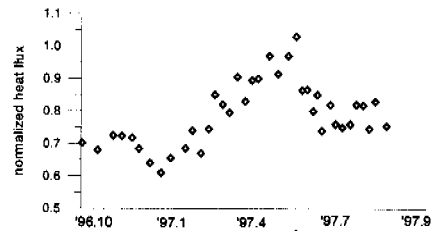
* 회원, 포항산업과학연구원 열유체연구팀
E-mail : leepj@risnet.rist.rc.kr
TEL : (0562)279-6636 FAX : (0562)279-6888
** 포항산업과학연구원 열유체연구팀
*** 회원, 부산대학교 기계공학부

이다.^(7~10) Ishigai 등⁽⁷⁾은 2차원 증돌수분류 냉각에서 과포화온도가 10-1000℃범위인 경우 증돌짐에서의 열유속을 냉각수의 과냉도, 분류속도에 따라 살펴보았다. Kokado 등⁽⁸⁾은 비정상상태의 냉각법을 이용하여 고온강판에 대한 증돌수분류 냉각 시 열전달 특성을 연구하였다. 이들은 약 900℃로 가열된 스테인리스 강판을 원형 증돌수분류로 냉각 시 냉각수의 과냉도에 따라 젖음 현상을 나타내는 조건을 제시하였다. Hatta 등⁽⁹⁾은 단상강제대류 영역이 시간의 제곱근에 비례하여 확장된다는 사실과 수냉 영역이라고 하여 단상강제대류영역과 핵비등 영역을 통합한 영역에 대해 실험결과와 일치되는 평균 열전달 계수식을 구하였다. 오송복 등⁽¹⁰⁾은 Hatta와 유사한 실험조건에서 초기온도가 높은 경우에서 냉각효율이 떨어짐을 밝혔고 강판과 노즐 사이의 거리변경효과를 살펴보았다.

그런데 본 연구자들은, 수온이 일정하게 관리됨에도 불구하고 4계절의 기온변화가 심한 국내 제철소에서 고온강판을 냉각하는 경우 여름의 냉각수량이 겨울에 비해 약 20-30%까지 줄어드는 것을 관찰하게 되었다. Fig. 1은 같은 두께의 제품을 생산할 때 냉각설비가 발휘할 수 있는 열유속을 정규화하여 연간 변화정도를 살펴본 것이다. 이 기간동안 냉각수 온도는 약 29-32℃ 사이에서 일정하게 유지되고 있어 열전달에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 생각된다. 그럼에도 불구하고 3월에서 6월 사이의 열유속이 10월에서 2월 사이의 열유속에 비해 큰 것을 알 수 있다.

기존 연구들 중 유일하게 주위공기조건과 냉각효율의 관계에 대해 Filipovic 등⁽¹¹⁾은 열간 압연 공정에서 복사 효과가 전체 열전달량 중 약 10% 정도를 차지함을 언급하고 있다. 하지만 이는 Fig. 1의 결과와는 반대로 겨울에 냉각수 사용량이 줄어들 것이라는 예상을 하게 된다. 이러한 문제에 대해서 냉각수가 고온강판에 충돌된 후 얇은 액막상태로 흘러가면서 비등하게 되므로 주변공기조건인 온도나 습도가 열전달에 영향을 미칠 것이라는 추정은 되었지만 기존의 연구들은 그 영향에 대해 설명해주질 못하고 있다.

본 연구에서는 일련의 비정상상태 실험을 통해 주변공기조건(온도와 습도)이 다른 두 조건에서 고온 강판의 수분류 냉각효과가 달라지는 것을 확인하고 이러한 변화를 설명해줄 수 있는 인자



1. electric furnace
2. water reservoir
3. float flow meter
4. air chamber
5. water chamber
6. air line
7. test specimen
8. transport system
9. thermocouple
10. transmitter for RH and temp. of air
11. data acquisition system

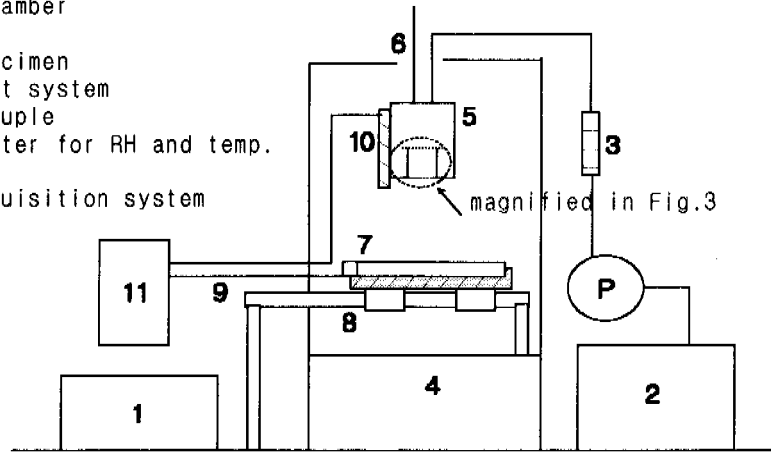


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

냉각실험중 발생된 수증기가 자연스럽게 방출되는 것을 돕기 위해 공기방 상면에 소형팬을 2개 설치하였다.

시편 이송대는 가열로에서 꺼내어진 시편의 수평을 유지하여 공기방 내부로 넣어주며 분류가 시편 중심에 떨어질 수 있도록 하기 위한 것이다. 이송대 하변에는 단열효과를 볼 수 있도록 시편과 5mm 떨어진 위치에 세라믹 판을 깔았고 시편이 시편 이송대로의 접촉되는 부위를 최소화 하였다.

Hatta나 오승목 등^(9,10)은 파이프 형태의 노즐을 사용한 데 반해 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 convergent 형태로 출구 쪽 직경이 6 mm인 노즐을 사용하였다. 노즐실에는 노즐상면에 별도의 공간을 만들고 철망을 설치함으로써 공급되는 냉각수가 난동성분을 갖는 경우에도 분사되는 냉각수가 강판에 층류로 떨어질 수 있도록 하였다. 냉각수 공급관에는 유량조절밸브와 개폐용 밸브를 설치하였고 노즐실 상단에 공기구멍을 만들고 개폐밸브를 설치하였다.

시편은 냉각과정에서의 금속학적인 상변태나 스케일발생이 냉각에 미치는 영향을 없애기 위해 스테인리스 304 압연판을 사용하였다. 시편두께는 10mm이며 가로, 세로가 각각 200mm로 오승목 등⁽¹⁰⁾이 실험한 것보다는 작게 만들어 한 면 냉각에 의한 열변형으로 발생하는 실험오류를 줄

이고자 하였다.

강판의 온도 측정을 위해 시편에서 냉각수 충돌면과 반대되는 면의 충돌 직하면($x/d=0$), 충돌점에서 반경방향으로 30mm 떨어진 위치($x/d=5$), 그리고 60mm 떨어진 위치($x/d=10$)의 3곳에 K형 열전대를 부착하였다. 열전대는 소선 직경이 0.076mm, 스테인리스 304로 피복되어 외경이 1.5mm이며 응답성을 향상시키기 위해 소선 피복을 약 5mm 정도 제거한 후 두 소선을 교차시켜 용접하였다. 또 냉각이 진행되는 동안 시편에서 흘러내리는 냉각수온도를 측정하기 위해 이송장치 측면에 흐름를 붙이고 소선 직경이 0.5mm인 T형 열전대를 설치하였다. 주위온도와 상대습도 측정을 위하여 OMEGA HX13V 2개를 노즐실 옆과 공기방 외부에 설치하였고, 가시화를 위해서 카메라(Nicon FM2)와 Super VHS 비디오 카메라를 이용하였다.

2.2 실험방법

우선 공기방의 공기와 물저장용기의 냉각수 온도를 원하는 온도가 되도록 한 후, 냉각수를 노즐실로 공급하면서 실험은 시작된다. 공기온도는 냉각 개시점까지 제어가 되는 반면 냉각수 온도는 일단 노즐실로 공급되면 제어가 불가능하므로 실험개시 직전에 냉각수가 노즐실로 공급되도록 하여 수온변화 가능성을 최소화 하였다. 다음으로 노즐실의 공기구멍밸브, 그리고 냉각수 개폐

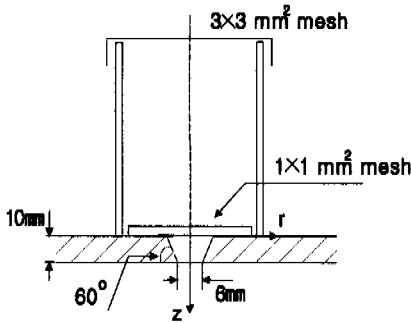


Fig. 3 Geometry of the convergent nozzle

밸브와 제어밸브를 열어 원하는 양의 냉각수가 흘러갈 수 있도록 냉각수 제어밸브를 맞추고 나서, 공기밸브를 닫고 냉각수 개폐밸브를 닫은 상태로 냉각실험을 기다린다. 이렇게 하면 냉각수는 노즐실내의 진공효과로 노즐상단까지 가득차 있게 되어 순간적으로 냉각수를 개폐할 수 있으면서 항상 동일유량이 흐를 수 있다.

실험하기 전에 시편 표면을 알코올로 깨끗이 닦아내고 열전대를 붙인 후 전기가열로에 넣어 가열한다. 시편 온도가 940℃에 도달된 후에 시편이 충분히 균등하게 가열될 수 있도록 30분동안 더 가열한 후 시편을 꺼내고, 공기실내 공기 조건 변화를 최소화하기 위해 외부에서 800℃까지 자연냉냉시킨 후 공기방내부로 시편을 밀어 넣는다. 시편온도가 750℃가 되는 순간 노즐실 입구에 설치된 유량개폐밸브를 열어 냉각수를 강판에 분사하였다. 실험중에서는 냉각수나 수증기의 유동이 공기방내의 공조장치에 의해 영향을 받지 않도록 끄고 공기실 상면에 위치한 소형 팬을 가동시켰다.

실험조건으로는 공기방내부의 초기 공기온도가 10℃(± 0.2℃)와 40℃(± 0.2℃)로 다른 경우로, 이하에서 이 두 실험조건을 각각 W40A10과 W40A40으로 명기한다. 전체 실험은 분사유량과 시편조도가 다른 1차와 2차로 나눌 수 있다. 1차 실험에서는 분사유량이 2090ml/min(± 10ml/min)인 조건에서 평균조도가 14.7μ m인 시편을 사용하여 실험을 실시하였다. 이 실험들은, 같은 날, 그것도 오전 11시에서 오후 3시 사이에 수행되어 외부 공기조건에 유사한 경우에 수행되었다. 하지만 보다 정확한 실험을 위해서는 외부 공기조건이 동일하여야 하고 동시에 공기방 내부의 온도, 습도변화를 측정하여야 한다고 생각되었다.

Table 1 Thermophysical properties

T(℃)	Cp(J/kg℃)	ρ(kg/mm ³)	K(W/mm ²)
20	543.7	8.0E-9	0.017095
407	697.1	8.0E-9	0.026906
605	748.5	8.0E-9	0.031292
700	757.3	8.0E-9	0.033011
799	761.0	8.0E-9	0.034012
885	781.6	8.0E-9	0.035918

2차 실험에서는 외부공기는 온도 25℃, 상대습도 65%로 동일하고 실험중에도 변동이 없었으며 냉각실험중 공기방 내부의 온도 및 습도변화를 함께 측정하였다. 또 두 실험조건에 따른 냉각능력의 차이를 보다 극명하게 볼 수 있도록 분사유량을 3000ml/min(± 10ml/min)으로 늘리고 평균조도가 약 28μ m인 시편을 사용하였다. 노즐과 시편 사이의 거리는 1,2차 실험에서 300mm로 동일하다.

2.3 역열전도 해석

본 연구에서는 고온 강판의 수분류 냉각특성을 살펴보기 위해서 충돌면 반대면에 부분적으로 3개의 열전대만을 부착하여 온도변화를 관찰하였다. 정확한 냉각특성을 살펴보기 위해서는 충돌 표면에 보다 많은 열전대를 부착하여야 하지만 이는 유동패턴은 물론 열전달특성에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 경우에 대해 고체내부의 비정상적인 온도분포를 이용하여 표면의 열유속을 구하기 위한 역열전도 해석기법(inverse heat conduction technique)이 개발되어 왔다. 또 최근에는 비정상상태 실험에서 열전달 특성을 정량화하는 연구에서 많은 연구자들이 활용하고 있으며 다수의 상용패키지도 나와 있다.

본 연구에서는 Trucomp 사의 D. M. Trujillo에 의해 개발된 INTEMP 패키지⁽¹²⁾를 사용하였다. 이 패키지는 규준화 방법(regularization)을 사용하며 평판이나 축대칭인 경우에 대해 열저항법은 물론 1,2차원 유한해석법을 사용할 수 있다. 또 비열, 열전도등의 열물성값이 온도에 따라 변화되는 것을 고려할 수 있는 데 사용된 열물성값은 Table 1과 같다.

계산영역에서 시편의 충돌점인 중심면에 대해 대칭조건을 적용하였고 충돌면을 제외한 나머지

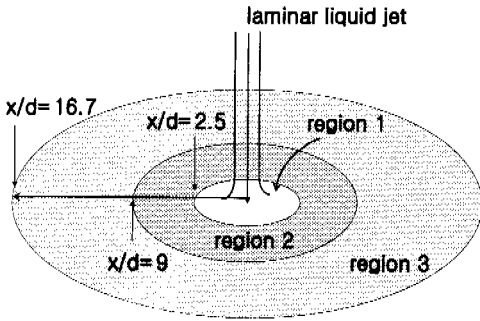


Fig. 4 Regions for calculating heat flux

면에서는 복사효과가 있을 수 있으나 그 전열량이 증돌면에서의 비등에 의한 전열효과에 비해 적을 것이므로 단열경계조건을 사용하였다. 또 측정에 사용된 열전대의 개수가 3개이므로 국소 영역의 열전달특성을 정확하게 구하기 어려워서 Fig. 4와 같이 강판 상면을 3영역으로 나누어 평균 열유속의 시간에 따른 변화를 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 냉각진행에 따른 온도변화

Fig. 5는 1차 실험에서 W40A40과 W40A 10의 두 실험조건에 대해 냉각시간 경과에 따른 시편의 온도변화를 비교한 것이다. 기존연구결과들에서 확인되었듯이 증돌점에서 멀어질수록, 즉 x/d 가 증가할수록 온도가 순차적으로 감소하게 된다. 이는 뒤에서 언급되겠지만, 단상강제대류 영역이 시간에 따라 점차로 커져서 열전대가 부착된 위치까지 확대될 때 그 주변에서 비등열전달로 인해 온도의 급격한 감소가 시작되기 때문이다. 두 실험조건을 비교하여 보면, 증돌점($x/d=0$)에서는 냉각시간에 따른 온도차이가 거의 생기지 않으나 $x/d=5$ 와 10의 지점에서는 두 실험조건에서는 공기온도가 40°C 인 W40A40의 경우가 공기온도가 10°C 인 W40A10인 경우에 비해 더 빨리 냉각되어 온도차이가 발생하며 x/d 가 클 때 그 온도차이가 더 큰 것을 볼 수 있다. 이러한 온도차이는 한 측정지점, 예를 들어 $x/d=10$ 인 위치에서 비등이 활발하게 되어 냉각중반까지 점차로 증가하다가 강판이 식어서 비등이 둔화되는 냉각 후반부에서는 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이 2차 실험에서도 공기온도가 40°C 인 조건에서 더 빠르게 냉각되는

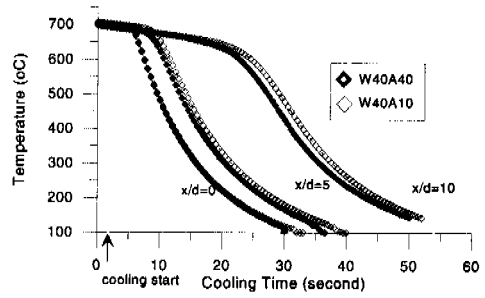


Fig. 5 Temperature variations of a hot plate (1st experiment)

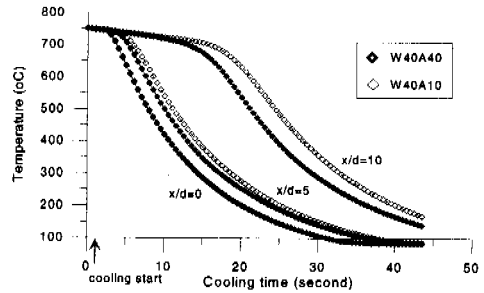


Fig. 6 Temperature variations of a hot plate (2nd experiment)

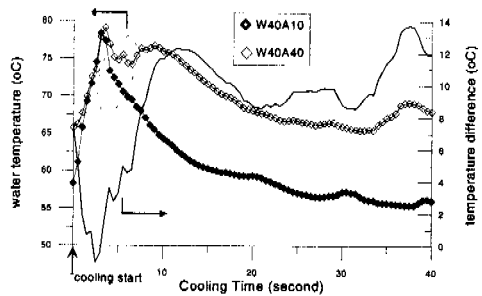
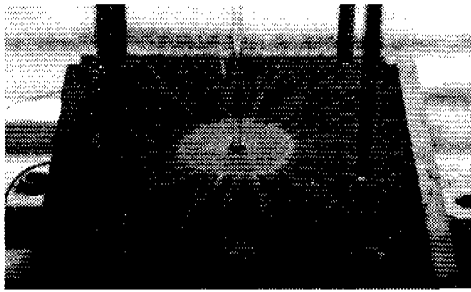


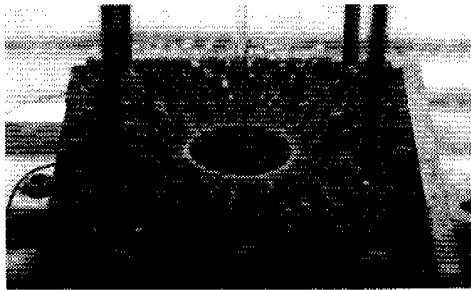
Fig. 7 Water film temperature variation during the cooling process(1st experiment)

것을 확인할 수 있었다, 그런데 2차실험은 1차실험에 비해 유량이 많고 강판표면이 좀더 거친 조건으로 냉각이 더 빠르게 진행되는 조건으로 이 경우는 1차실험에 비해 두 실험 조건간의 온도차이가 더 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 즉 주변공기온도가 높은 조건일 때는 낮은 경우에 비해 열전달이 활발하여 냉각 정도의 차이가 커지는 것을 알 수 있었다.

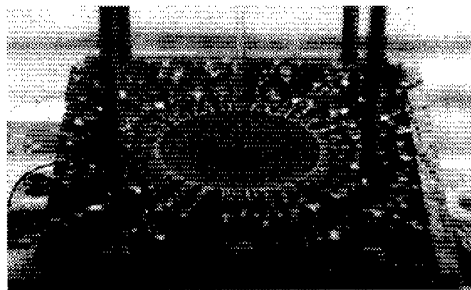
Fig. 7은 두 실험 조건에서 강판과 증돌 후 강판에서 흘러내리는 냉각수의 온도변화를 T형 열



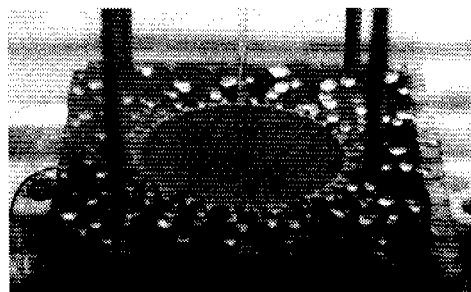
(a) 0 second



(b) 5 second

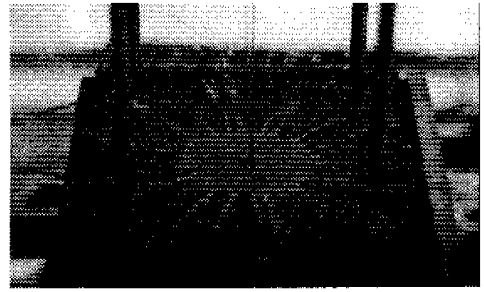


(c) 15 second

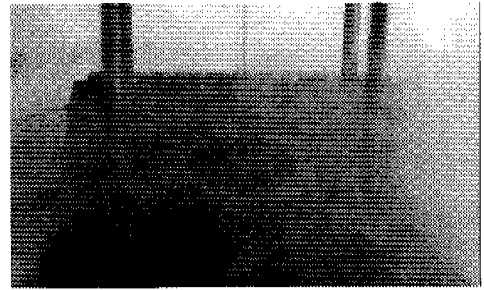


(d) 25 second

Fig. 8 Photographs of successive stages for the cooling process(W40A40 in 2nd experiment)



(a) 0 second



(b) 5 second



(c) 15 second



(d) 25 second

Fig. 9 Photographs of successive stages for the cooling process(W40A10 in 2nd experiment)

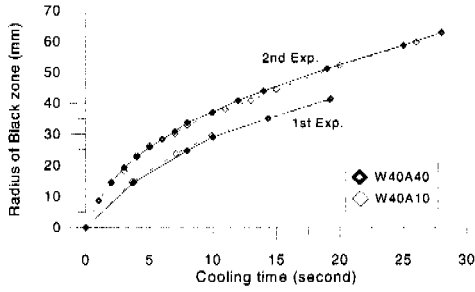


Fig. 10 Radius of black zone during the cooling process

진대로 측정된 것이다. 두 실험조건에서 강판에 충돌한 냉각수는 강판의 냉각 직후 순간적으로 78℃ 정도까지 가열되었다.

하지만, 냉각이 진행됨에 따라, W40A40의 경우는 70℃ 정도의 수온을 유지하면서 W40A10의 경우보다 약 10℃정도 높은 온도를 유지하고 있다. 이와 같이 냉각 후 강판을 흘러내린 냉각수의 온도가 높다는 것은 강판으로부터 가져간 열량이 많다는 것을 의미한다고 볼 수 있다. 따라서 이 결과 역시 앞서 강판온도를 측정된 결과와 마찬가지로 초기 공기온도 40℃인 경우가 10℃의 경우보다 냉각효과가 큰 것을 말해주고 있다.

3.2 냉각진행에 따른 가시화 및 공기조건의 변화

2차 실험에서 W40A40일 때 냉각이 진행되는 단계를 사진 관찰한 결과는 Fig. 8과 같고 Fig. 9는 W40A10일 때에 대한 것이다. 냉각개시 직후(0초)의 사진에서 보면 충돌점을 중심으로 증기막에 해당하는 큰 원형태의 영역이 순간적으로 생겨나지만, 이는 1초 이내에 사라지면서 핵비등과 전이비등으로 바뀐다. 그 부근에서부터 냉각수는 아주 작은 물방울로 쪼개지면서 사방으로 튀어나가는 것(sputtering)을 관찰할 수 있다.

시간이 경과되면서 단상강제 대류영역(sin-gle phase forced convection area)은 그 크기가 점점 확대되지만, 그 확장속도는 점차로 둔화되는 경향을 볼 수 있다. 1,2차 실험에서 얻은 비디오자료를 이용하여 냉각진행에 따른 수냉 반경크기를 측정된 결과를 Fig. 10에 나타내고 있다. Hatta 등⁽⁹⁾이나 오승묵 등⁽¹⁰⁾의 기존 연구자들이 언급하였듯이, 단상강제 대류영역의 확장속도를 추세식으로 표현하면 냉각시간의 제곱근에 비례하는 것을 볼

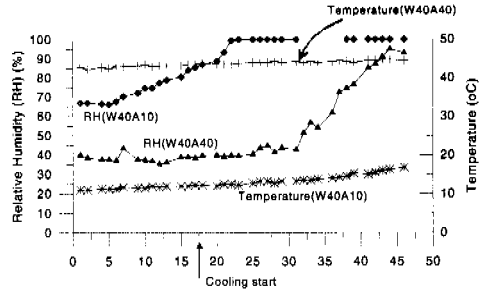


Fig. 11 Variation in the conditions of ambient air during the cooling process(2nd experiment)

수 있다. 또한 유량이 2090(ml/min)이고 강판 평균 표면조도가 14μ m인 경우보다 유량이 3000(ml/min)이고 평균표면조도가 약 28μ m인 2차 실험에서 냉각효과가 더 클 것이므로 단상강제대류 영역의 크기와 확장속도가 더 크게 나타나는 것도 일치하였다. 여기서 수냉반경 R을 시간 t의 함수로 나타내면 다음의 식과 같다.

$$R_{1st} \sim 9.5\sqrt{t} \tag{1}$$

$$R_{2nd} \sim 12.1\sqrt{t} \tag{2}$$

단 두 실험조건인 W40A40과 W40A10에서 단상강제대류영역의 크기차이는 없는 것으로 나타났다.

단상강제대류영역의 가장자리에서 물방울이 쪼개지는 현상(sputtering)은 비등으로 인해 생긴 것이다. 일반적으로 상온의 강판에서는 물이 강판을 타고 흐르다가 일정거리에서 수력도약이 되지만 물방울이 잘게 쪼개지는 현상은 없다. 이러한 분산되는 물방울의 크기는 냉각이 진행됨에 따라 그 크기가 점차로 커지며 튀어나가는 정도는 둔화되는 경향을 볼 수 있다. 이는 냉각이 진행되면서 강판이 갖는 열량이 줄어들고 따라서 비등의 강도가 감소하기 때문이다.

제시된 Fig. 8과 9를 통해 두 실험조건에서 냉각진행의 차이점을 볼 수 있다. 첫째는 공기온도가 40℃인 경우와는 달리 공기온도가 10℃인 경우에는 냉각초기부터 다량의 수증기가 발생하는 것을 볼 수 있으며 둘째는 냉각개시 후 5초 이후(Fig. 8과 9의 5, 15초)부터는 공기온도가 10℃일 때보다 40℃인 경우에서 강제대류영역 가

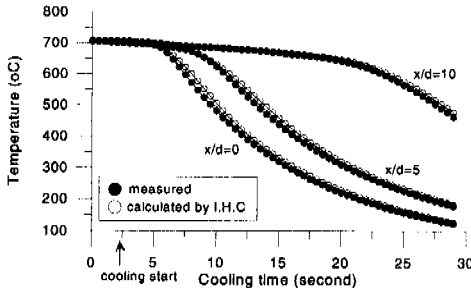


Fig. 12 Comparison between the measured and calculated temperatures(W40A40 in 1st experiment)

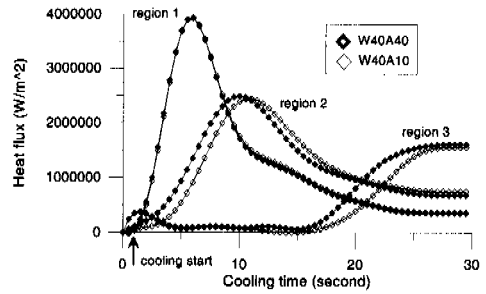


Fig. 13 Calculated heat flux during the cooling process (1st experiment)

장 자리부 에서의 수증기 떠가 보다 선명하게 보임을 알 수 있다. 이 중 둘째 항목은 공기온도 40℃의 경우에 강제대류영역 가장자리에서의 비등 강도가 상대적으로 활발하였음을 암시한다고 생각되며 앞에서 제시된 두 조건에서의 강판온도 차이를 유발한 부분으로 보인다.

반면 첫째 항목은 공기온도가 10℃인 조건이 마치 냉각효과가 높아서 비등된 냉각수량이 많은 것처럼 생각하게 할 수 있다. 따라서 이 현상에 대해 좀더 살펴볼 필요가 있다. 2차 실험에서 두 실험조건에 대해 공기방 내부의 공기온도와 상대 습도 변화를 측정한 결과는 Fig. 11과 같다. 실험에 있어 공기방 외부의 공기온도와 상대 습도는 25℃, 65%로 이 외부공기를 공기방내로 유입하여 실험조건이 되도록 냉각, 가열을 하였고 실험이 진행되는 동안 공기방 외부의 공기온도와 상대 습도는 초기 외부 공기조건인 25℃, 65%가 그대로 유지되었다. 하지만 냉각조건을 위해 공기 온도를 맞추는 과정에서 가열 및 냉각이 진행되어 상대습도의 가습 및 제습이 발생하였고 또한 강판이 공기방 내부로 들어가기 전에 유량을 맞추기 위한 과정에서 공기방 내부에 분사되는 냉각수에 의한 습도 상승효과와 강판이 공기방 내부의 냉각 개시 전에 들어와 있기 때문에 생기는 공기온도 상승효과 등으로 인해 공기온도 10℃를 목표로 한 경우는 12.5℃, 91%가 되었고 40℃를 목표로 한 경우는 약 43.5℃, 39%가 되었다.

W40A10의 경우에는 냉각 직후부터 약 5초 이내에 수증기가 100%로 포화가 되는 반면

면 W40A40에서는 냉각이 충분히 진행된 이후에 수증기의 포화가 이루어짐을 보여준다. 이와

같이 10℃ 공기 온도조건에서 수증기가 많이 관측된 것은 비등량이 절대적으로 많은것 보다는 공기 중의 수증기 포화가 빨리 이루어졌기 때문으로 생각된다.

3.3 역열전도 해석에 의한 열전달량의 비교

1,2차 실험에서 W40A40과 W40A10의 실험조건에 대해 얻어진 강판의 온도변화결과를 이용하여 역열전도 해석을 실시하였다. 계산결과와 실험성을 검토하기 위해 Fig. 12에 보인 것 같이 열전대에서 측정된 온도와 계산된 온도를 비교하였다. 1차 실험에서 W40A40인 조건에서의 결과를 예로 보였으나, 다른 조건에서도 역시 약 20℃이내의 오차를 보였다.

Fig. 13은 두 실험조건에 대해 계산으로 얻어진, 시간에 따른 3개 영역의 열유속 변화를 비교한 것이다. 각 영역은 처음에는 복사나 막비등 영역이다가 단상 강제대류 영역이 확대되는 영향과 함께 핵비등 영역이 되고 마지막에는 단상 강제대류 영역으로 들어가는 과정을 거치게 된다. 따라서 각 영역의 열유속값은 점차로 증가되어 최대값을 갖다가 감소되는 형태를 보이게 되며, 최대 열유속의 값은 예상할 수 있듯이 충돌점이 가까운 경우에 크게 나타나고 있다. 두 실험조건에 대해 비교하여 보면 충돌점 근처의 값은 거의 같지만, 충돌점에서 벗어난 영역의 값들은 초기 복사나 막비등 영역에 해당될 것으로 보이는 조건에서는 차이가 없다가 단상강제대류영역이 확대되어 오면서 최대값에 도달되기 전까지 W40A40의 열유속이 W40A10의 열유속에 비해 크게 나타난다. 그리고 최대값이 나타난 이후, 즉 단상 강제대류 영역이 나타난 이후에는 다시 주변공기

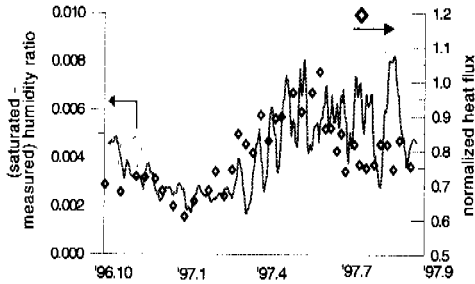


Fig. 14 Normalized heat flux and (saturated-measured) humidity ratio in 1 year

조건에 따른 차이는 줄어들게 된다.

이러한 계산결과에서 시간에 따른 열유속값을 냉각 시작 이후 27초 구간에 대해 적분하고 각각의 계산영역의 면적을 곱한 후, 모든 값들을 합하면 실험조건에 따른 총 열전달량의 차이를 구할 수 있다. 이렇게 구한 총 전열량은 1차 실험에서는 W40A40이 약 6.47MJ, W40A10이 약 5.61MJ로 나타나서, W40A40인 경우가 W40A10에 비해 약 15%인 0.86MJ정도 전열량이 많게 나타났다. 2차 실험에서는 W 40A40이 약 9.11MJ, W40A10이 약 7.84MJ로 나타나서 총 전열량이 많은 만큼 그 차이 역시 약 1.27MJ로 많아졌지만, W40A40인 경우와 W40A10의 조건을 비교하면 1차 실험과 유사한 약 16%정도로 전열량이 많게 나타났다.

3.4 포화될 때까지의 공기가 함유할 수 있는 수증기량과 열전달률

제시된 결과와 수분류의 온도 및 표면 장력등 기준에 정리된 모든 조건이 동일하였다는 사실에서 공기온도의 변화에 따라, 즉 습도비의 차이에 따라 열전달이 달라짐을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 공기가 포화되기까지 함유할 수 있는 수증기량이 열전달과 관련된다고 가정해 보았다.

이러한 가정을 바탕으로 Fig. 1에 제시된 자료와 함께 같은 시기에 지방기상대에서 구한 평균 공기온도와 상대 습도량을 이용하여 공기가 포화되기까지 함유할 수 있는 수증기량을 계산하여 Fig. 14에 나타내어 보면, 공기가 포화되기까지 함유할 수 있는 수증기량의 시계열적인 변화와 정규화된 열유속값의 경향이 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

단상강제 대류영역 가장자리의 비등, 즉 얇은

액막 유동과 비등이 수반되는 열전달 기구에서는 형성된 수증기막의 제거가 효율적이면 액막과 강판과의 접촉이 잘 이루어지고 이를 통해 비등이 활발할 것이다. 형성된 수증기막은 공기중으로 확산되며 이러한 확산의 정도는 주위공기의 포화되기까지 함유할 수 있는 수증기량에 의해 결정되기 때문에 위와 같은 결과들이 얻어진다고 생각한다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온강판을 층류 응축수분류로 냉각할 때, 주변공기조건을 영향을 살펴보기 위해 초기공기온도가 10℃와 40℃로 다른 두 실험 조건에서 냉각실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 냉각수 온도가 같은 경우, 주변공기온도가 높은 경우가 낮은 경우에 비해 냉각능력이 크게 나타난다.
- (2) 단상강제대류 영역의 확장속도는 시간의 제곱근에 비례하며 주변공기조건에 영향을 받지 않는다.
- (3) 주변공기조건은 비등현상에 영향을 미치며 두 실험조건에서 전열량은 초기공기온도가 40℃인 경우가 10℃인 경우에 비해 약 15-16% 정도 많다.
- (4) 주변공기조건은 영향을 공기가 포화될 때까지 함유할 수 있는 수증기량으로 표현하는 경우 실제 냉각능력이 변화되는 경향과 잘 일치한다.

참고문헌

- (1) Roberts, W. L., 1983, "Hot Rolling of Steel," Marcel Dekker, NewYork.
- (2) Tacke, G., Litzke, H., and raquet, E., 1985, "Investigations into the Efficiency of Cooling Systems for Wide-Strip Hot Rolling Mills and Computer-Aided Control of Strip Cooling, in Accelerated Cooling of Steel," P.D.Southwick, Ed., The Metallurgical Society, Warrendale. Pa., pp. 35~54.
- (3) Ruch, M. A., and Holman, J. P., 1975, "Boiling

- Heat Transfer to a Freon-113 Jet Impinging Upward onto a Flat, Heated Surface," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 51~60.
- (4) Katsuta, M., and Kurose, T., 1981, "液膜の沸騰熱傳達に關する研究(第2報 核沸騰限界熱流束について)," *日本機械學會論文集*, 第47卷, 第421號, pp. 1849~1860.
- (5) 이기우, 김유, 1988, "충돌 수분류에 의한 고온면의 비등 열유속에 관한 연구," *대한기계학회논문집* 제12권 제1호, pp. 81~94.
- (6) Vader, D. T., Incropera, F. P., and Viskanta, R., 1992, "Convective Nucleate Boiling on a Heated Surface Cooled by an Impinging, Planar Jet of Water," *J. Heat Transfer*, Vol. 114, pp. 152~160.
- (7) Ishigai, S., Nakanishi, S., and Ochi, T., 1978, "Boiling Heat Transfer for a Plane Water Jet Impinging on a Hot Surface," *Int. Heat Transfer Conf.*, 6th, pp. 445~450.
- (8) Kokado, J., Hatta, N., Takuda, H., Harada, J., and Yasuhira, N., 1984, "An Analysis of Film Boiling Phenomena of Subcooled Water Spreading Radially on a Hot Steel Plate," *Arch. Eisenhüttenwes.*, Vol. 55, No. 3, pp. 113~118.
- (9) Hatta, N., Kokado, J., Takuda, H., Harada, J., and Hiraku, K., 1984, "Predictable Modelling for Cooling Process of a Hot Steel Plate by a Laminar Water Bar," *Arch. Eisenhüttenwes.*, Vol. 55, No. 4, pp. 143~148.
- (10) 오승목, 이상준, 1992, "원형수직 충돌 수분류에 의한 고온강판의 냉각특성 연구," *대한기계학회논문집* 제16권 제6호, pp. 1150~1155.
- (11) Filipovic, J., Viskanta, R., Incropera, F. P., and Veslocki, T. A., 1994, "Cooling of a Moving Steel Strip by an Array of Round Jets," *Steel Research*, Vol. 65, No. 12, pp. 541~547.
- (12) Trujillo, D. M., INTEMP user's manual, TRUCOMP CO., CA.