

〈論 文〉

원형수직 충돌 수분류에 의한 고온강판의 냉각특성 연구

오승묵* · 이상준**

(1991년 7월 29일 접수)

Cooling Characteristics of a Hot Steel Plate by a Circular Impinging Liquid Jet

Seung-Mook Oh and Sang-Joon Lee

Key Words : Impinging Liquid Jet(충돌수분류), Single Nozzle(단일노즐), Water Cooling Radius(수냉반경), Hot Steel Plate(고온 강판), Cooling Characteristics(냉각특성)

Abstract

The cooling characteristics of a hot steel plate by a laminar impinging water bar were investigated experimentally. The dynamic parameters investigated were nozzle height L between nozzle and the hot plate, flow rate Q , and initial cooling temperature. Because the boiling phenomena on a hot steel plate are unsteady and change discontinuously, it is difficult to analyze the cooling characteristics directly. In this study the cooling efficiency was estimated by using the temperature decay rates and expansion speed of the water cooling zone. Temperature in the water cooling zone decreased rapidly and the radius of the water cooling zone expanded nearly in proportion to square root of the cooling time. With increasing initial temperature of a hot steel plate, the cooling efficiency became descendent. The cooling curve in the case of $L/D=30$ showed the largest temperature decay rate and excellent cooling performance.

1. 서 론

충돌 수분류(Impinging Liquid Jet) 냉각방식은 분류된 액체가 액막을 형성하고 증발 비등하면서 고온면상을 유동하므로 냉각능력이 매우 높다. 현재 충돌 수분류 냉각은 급냉을 필요로 하는 산업 설비에 많은 공업적 응용분야를 가지고 있다. 특히 제철소의 열연 냉각공정에서는 냉각방법이 냉각효율 및 균일냉각 기술과 직접적으로 관련되어 제품의 품질을 좌우하기 때문에 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다.⁽¹⁻⁶⁾

수분류에 의한 고온강재 급냉시 냉각과정의 전열 현상은 비정상(unsteady)이고 높은 열유속을 가지며 고온면에서 유동하는 물이 고온이다. 또한 수분류 충돌시 나타나는 비등현상은 복잡한 형태를 가지고 있다. 특히 비등에 의해 형성된 증기막은 고온면으로부터 냉각수로의 열전달을 방해하므로 강재표면에 형성된 냉각수층 및 증기층을 관통하여 새로운 물이 강재와 직접 접촉하도록 하는 것이 유리하다. 이와같은 유동층을 관통하는 데에는 충돌 유속과 수량밀도를 증가시켜 물의 충격력을 크게 하는 것과 분사된 냉각수를 자연스럽게 배제하여 새로운 냉각수의 충격력이 감소되지 않도록 하는 것이 필요한데 이를 위하여 개발된 냉각방법이 바로 층류(laminar flow) 냉각방법이다.

*정희원, 포항공과대학 대학원

** 정희원, 포항공과대학 기계공학과

수분류 냉각시 증돌지점에서부터의 전열현상을 영역별로 살펴보면 다음과 같다. 증돌 후 분류가 비등점에 도달하기 전에는 단상 유동의 강제 대류가 일어나며 이곳에서의 냉각성능은 매우 높고 표면 온도는 비등점에 비해 매우 낮다. 분류가 증돌 지점으로부터 멀어짐에 따라 점차 가열되어 냉각성능은 떨어지게 되며 표면온도는 높아지게 된다. 유동이 비등지점에 도달하게 되면, 핵비등(nuclear boiling)이 좁은 영역에 걸쳐 일어나게 된다. 그리고 고온면과 냉각수 사이에 증기막이 형성되면 냉각수는 표면장력에 의해 물방울 형태로 고온면을 따라 흐르게 된다.

증돌분류에 대한 연구로 Ruch와 Holman⁽⁷⁾은 프레온 113을 사용하여 증돌분류에 의한 핵비등과 막비등 영역에서의 열유속을 표면온도, 분류속도 및 증돌표면의 방향을 변수로 하여 실험적 연구를 수행하였다. 여기서 그들은 핵비등 열유속을 분류속도에는 무관하게 포화온도와 표면장력을 변수로 하는 관계식으로 표시하였다. 또한 분류속도와 증돌표면의 방향은 열전달과 접촉면의 변수임에도 막비등 열유속과는 무관하다는 결과를 얻었다. Monde와 Katto⁽⁸⁾는 전열면상에서 액체를 강제 공급하는 비등계(boiling system)에 관한 연구를 수행함으로써 한계 열유속에 관한 관계식을 얻었으며 표면장력이 중요한 역할을 함을 밝혔다. 증류 냉각방식에 의한 고온강판의 냉각과정에 관한 기존의 연구로 Hatta et al.^(3,4)은 900℃ 이상의 고온강판에서 증류에 의해 주로 냉각되는 증돌점 부근의 수냉반경(black zone)을 정의하였으며 실험결과로부터 수치해석적 방법을 이용하여 열전달 계수를 구하였다. Zumbrunnen et al.⁽⁵⁾은 2차원 수분류 냉각에서 고온평판의 이송이 전열현상에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하여 비등온도 이상에서는 최대열전달 위치가 이송방향 반대쪽에 나타남을 밝혔다.

본 연구는 제철소 열연공정의 냉각효율 개선을 위한 기초연구로 수행되었다. 전열면의 초기온도가 900℃ 이상일 때 증류 냉각방식에 의한 고온강판의 냉각특성에 영향을 주는 모든 인자를 엄밀히 고려하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 노즐과 고온면 사이 거리(L), 유량(Q), 냉각 초기온도 등을 실제 작업조건에 가깝게 변화시켜 가면서 수냉반경의 변화를 중심으로 전열면의 냉각특성을 해석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이다. 분류는 헤드 탱크로부터 유량계를 거쳐 노즐에 공급되며, 유량은 분당 최고 40리터까지 조절이 가능하다. 고온평판에 증돌 후 분류는 일단 하부 저장 탱크로 모인 후 펌프에 의해 다시 헤드 탱크로 순환되는 구조를 가지고 있다. 과잉 공급된 냉각수는 일정 수두를 유지하도록 하부 탱크로 우회된다.

본 실험에 사용된 노즐은 내경(D) 10 mm의 파이프를 곡률반경 25 mm로 ∩자 형태로 구부러 사용하였다. ∩자형 노즐을 사용함으로써 공기의 유입을 막으며 안정된 유동을 얻을 수 있었다. 본 연구의 실험조건 범위내에서 노즐로부터 나오는 수분류는 항상 층류(laminar flow)가 유지되는 범위내에서 조정하였으며 Laminar jet의 경우 분출단에서 부터 분류하는 점까지의 길이를 액체의 연속 길이(jet length), *l*이라고 부르며 다음 식과 같이 주어진다⁽²⁾.

$$\frac{l}{D} = 22.4 \left\{ (v - v_k) \sqrt{\frac{\gamma D}{\sigma g}} \right\}^{0.8} \left(1 + \frac{1}{250} \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{\sigma \gamma D}{g}} \right) \quad (1)$$

- D* : 제트출구 직경
- v* : 분출속도
- v_k* : 천이속도
- γ : 물의 비중량

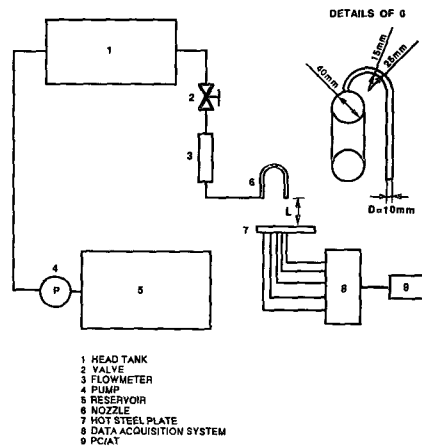


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

- σ : 표면장력
- g : 중력가속도
- μ : 점성계수
- l : 유체의 연속길이(jet length)

노즐 지지대에 부착된 리드스크류를 이용하여 노즐을 0~50mm까지 이동시킴으로써 시편과 노즐사이의 높이(L)를 조절하였다.

시편을 가열하는데 사용된 전기가열로(muffle furnace)의 가열 최고 온도는 1100℃이고 상온의 강판을 950℃까지 올리는 데 걸리는 시간은 약 40분 정도 소요된다.

본 실험에 사용된 시편의 재질은 제철소 열연공정에서 사용되는 스테인레스 강판의 95% 이상인 SUS304이며, 크기는 폭 200 mm, 길이 300 mm이고 두께는 10 mm이다. 스테인레스 강판은 고온에서 변태가 일어나지 않으며 표면산화가 적기때문에 표면성상(表面性狀)이 냉각에 주는 영향을 최소화시킬 수 있다. 온도측정에는 HP3852S 데이터 처리 시스템을 이용하였으며 IBM PC/AT 컴퓨터를 사용하여 콘트롤하였다.

2.2 실험 방법

실험하기전 먼저 시편이 냉각수와 충돌하는 면을 사포를 이용하여 연마하였고 이물질 제거를 위하여 아세톤으로 깨끗이 닦았다.

온도 측정에는 직경 0.4 mm인 K형(Alumel-Chromel) 열전대를 사용하였다. 고온강판의 온도변화를 측정하기 위하여 수분류 충돌지점으로부터 폭 방향으로 0, 10, 20, 20, 20 mm 간격으로 5개의 열전대를 시편의 아랫면(충돌면의 반대편)에 부착하였다. 그 이유는 시편의 윗면에 열전대를 부착하게 되면 이것이 냉각수의 유동장에 영향을 주게 되며 냉각수 방울이 열전대 접합 부분에 붙게 되어 측정 온도의 신뢰성이 떨어지기 때문이다. 열전대와 시편의 접합부분에는 실버 페이스트(silver paste)를 발라서 열전대가 산화에 의해 시편에서 떨어지는 것을 방지하였다.

열전대가 부착된 시편을 전기로내에서 시편 내부까지 균일한 온도가 유지되도록 충분히 가열한 후 전기로에서 꺼내어 시편 받침대로 옮겼다. 스테인레스판을 시편으로 사용하여도 가열온도가 고온이므로 계속 산화가 일어나며 냉각시 열응력에 의해 윗 방향으로 휘게 되므로 한번 사용한 시편은 다시 사용할 수 없다. 시편을 전기로에서 꺼내는 순간부

터 냉각시작 직전까지 소요되는 시간은 15초~20초 정도이다.

냉각수의 온도는 약 17℃정도를 유지하였으며 실험조건은 L/D 가 10, 30, 50 일때 유량(Q)을 1.14, 1.33, 1.51, 2.27(1/min)으로 변화시켰다.

3. 결과 및 토의

3.1 수분류 냉각에 의한 온도변화

본 연구에서 온도변화는 시편을 전기로에서 꺼내는 순간부터 측정하였으며 연구결과에서 온도감소율은 수냉시작 시간부터 도시하였다. Fig. 2은 $L/D=30$ 이고 $Q=1.51(1/min)$ 일때 시편 상부의 냉각과정을 냉각시작 10초 후부터 15초 간격으로 촬영한 사진이다. 시편 중앙부분의 검게 나타난 부분이 수냉반경에 해당하는 부분으로 냉각수에 의한 강제 냉각이 일어나는 부분이다.⁽³⁾ 수냉반경은 시간이

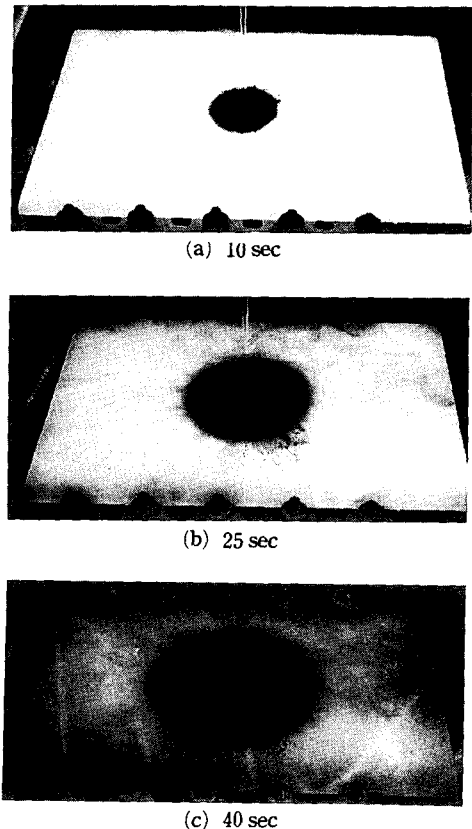


Fig. 2 Visual observation of the cooling process of a steel plate with $L/D=30$, $Q=1.51$ (Vmin)

지남에 따라 그 크기가 점점 확대되며 이 부분에서의 온도감소는 매우 크다. 그림에서 수냉반경으로부터 방사방향으로 하얗게 퍼져나가는 것은 냉각수와 시편사이에 증기막이 형성되어 냉각수가 방울 형태로 시편을 따라 흘러 내리는 것이다. 사진을 자세히 살펴보면 수냉영역의 가장자리 약간 안쪽에서부터 냉각수가 흘러 내리는 것을 볼 수 있다. 이 부분은 냉각수의 온도가 비등점에 도달하여 핵비등(nucleate boiling)이 일어나며 그 영역이 끝남과 동시에 막비등(film boiling)으로 천이하는 영역에 해당한다.⁽⁵⁾ 수냉반경 바깥영역에서는 냉각수가 고온강판 표면과 바로 접촉하지 못하므로 냉각은 대부분 수냉반경내에서 이루어지며 따라서 수냉반경의 확장 및 그 내부에서의 냉각정도는 냉각성능 평가에 있어서 중요한 기준이 된다.

Fig. 3은 $L/D=30$, $Q=1.14$ (1/min)인 실험조건에서 냉각시간 경과에 따른 각 측정위치의 온도변화를 나타낸다. 시편의 두께가 얇고 초기온도가 고온이므로 유량에 따라서 다소 차이는 있으나 냉각 시작 후 20~30초 이내에 시편온도는 500~600°C까지 내려간다. 따라서 냉각 초기 시간대에서의 수냉영역의 전열현상 해석이 가장 중요하다. Fig. 4에서 보면 정체점($X/D=0$)과 $X/D=1$ 위치의 냉각성능이 거의 비슷한데 이것은 이 두 위치가 냉각초기부터 수냉영역에 함께 위치해 있음을 나타낸다. 즉 정체점 부근에서는 수냉역이 빠른 속도로 증가하므로 $X/D=1$ 의 위치는 냉각초기부터 수냉역에 포함되어 정체점과 비슷한 냉각과정을 겪게 된다. 그러나 시간이 지남에 따라 수냉반경이 확대되면서 정체점에서 바깥 방향으로 멀리 떨어질수록 온도가 급격히 감소하는 지점이 늦게 나타나고 있다.

3.2 수냉반경 확대에 관한 고찰

수냉영역의 시간경과에 따른 변화를 온도감소율로부터 추론해 보았다. Fig. 4(a)는 $L/D=30$, $Q=1.51$ (1/min)일때 각 측정 위치에서 구한 온도변화이며 Fig. 4(b)는 이것의 시간도함수(dT/dt)를 나타낸 것이다. 온도변화 곡선에서는 Fig. 3에서와 비슷한 경향을 보이거나 유량 증가에 의하여 정체점과 $X/D=1$ 두 지점이 더욱 잘 일치한다. 냉각시간에 따른 냉각온도의 감소율, 즉 냉각율은 시간경과에 따라 증가하다가 최고값을 가진후 다시 감소하는 경향을 보여 주고 있다. 단위시간당 온도변화가 최고값을 가진다는 것은 그 시간부터 측정위치

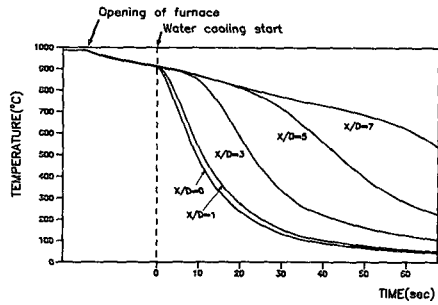


Fig. 3 Temperature variation of a hot plate as a function of cooling time with $L/D=30$ and $Q=1.14$ (1/min)

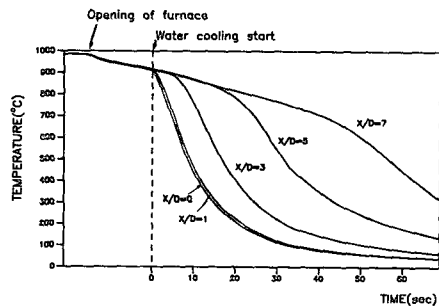


Fig. 4 (a) Temperature variation of a plate as a function of cooling time with $L/D=30$ and $Q=1.51$ (1/min)

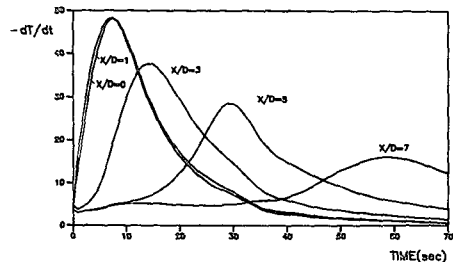


Fig. 4 (b) Temperature decay rates with $L/D=30$ and $Q=1.51$ (1/min)

의 냉각모드가 바뀌어 냉각율이 가장 좋은 수냉반경내에 들어왔음을 의미한다. 정체점에 가까울수록 수냉역에 빨리 도달하게 되며 $X/D=7$ 위치에서는 냉각 개시후 약60초에서 최대값에 이르고 있다. 정체점에서 멀어질수록 냉각수의 온도가 상승하여 냉각율의 절대값은 점점 감소함을 알 수 있다. 정체점과 $X/D=1$ 위치의 냉각율 분포는 전반적으로 거의 비슷하나 유량증가에 따라 더욱 잘 일치한다.

Fig. 5는 노즐 높이를 $L/D=10$ 으로 고정시키고

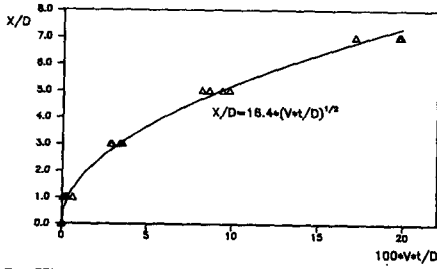


Fig. 5 Water cooling radius vs. cooling time in the case of $L/D=10$

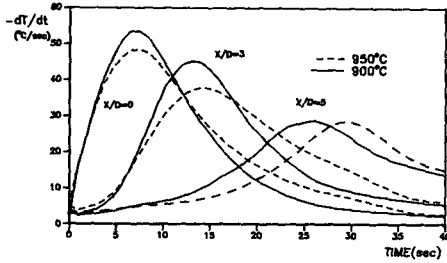
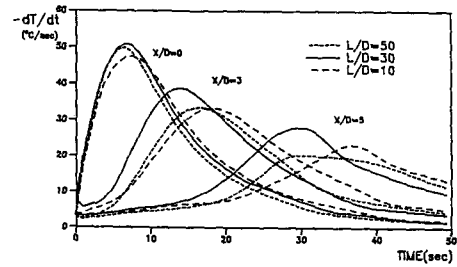
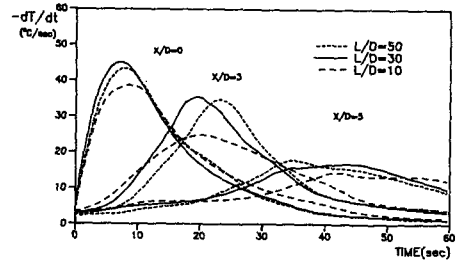


Fig. 6 Cooling characteristics for different initial temperatures with $L/D=30$ and $Q=1.51(1/min)$



(a) $Q=1.51(1/min)$



(b) $Q=2.27(1/min)$

Fig. 7 Cooling characteristics for different nozzle height

유량을 변화시킴에 따라 각 측정 지점이 수냉 반경 내에 들어오는데 걸린 시간을 나타낸 것으로 수냉 반경은 출구속도(V)와 노즐직경(D)으로 무차원한 냉각시간의 제곱근에 비례하는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$X^* = 16.4\sqrt{t^*} \quad (2)$$

여기서 $X^*=X/D$ 이며 $t^*=V*t/D$ 의 무차원 합수이다. 정체점 근처가 수냉반경에 포함되는 시간은 유량변화에 상관없이 거의 같으나 유량이 증가함에 따라 수냉역의 확장 속도가 빠르며, 정체점에서 멀어질수록 수냉역에 들어오는데 걸리는 시간 차이가 크게 나타남을 알 수 있다.

제철소 열연공정의 ROT(run out table)냉각에서 강재의 초기온도는 강재의 두께, 종류 등 작업조건에 따라 약 900~950°C 사이의 값을 가진다. 따라서 본 연구에서는 900°C와 950°C의 두가지 냉각 초기 온도 변화를 비교하여 보았다. Fig. 6은 $L/D=30$ 이고 유량이 1.51(1/min)인 조건에서 시편의 초기 온도변화에 따른 냉각율변화곡선이다. 측정점이 수냉역 바깥에 있을 때는 복사 및 자연 대류에 의한 열전달로 초기온도가 높은 쪽의 온도 감소율이 크다. 측정점이 수냉역 안으로 들어 오기 시작하여

온도 감소율이 최대인 극대점(peak) 부근에서는 시편의 초기온도가 낮은 경우에 냉각율이 크다가 시간이 지나면서 반전되고 있다. 따라서 총류 수분류냉각에서 냉각성능은 시편의 초기 온도가 낮을 수록 높게 나타남을 알 수 있다. 이것은 고온편의 온도가 높을수록 활발한 핵비등으로 증기막의 형성 정도가 심해져서 열전달을 방해하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7(a), (b)는 유량을 $Q=1.51(1/min)$ 와 $Q=2.27(1/min)$ 로 각각 일정하게 유지하고 L/D 를 변화시켜 가면서 측정한 온도감소율 곡선을 나타낸 것이다. 정체점에서는 수냉시작 시간이 거의 비슷하나 X/D 가 커질수록 $L/D=30$ 인 경우가 수냉반경안으로 들어오는 시간이 빠르다. 극대점 부근에서는 $L/D=30$ 에서의 온도감소율이 가장 크게 나타나고 있다. 모든 측정위치에서 $L/D=30$ 일 때가 가장 큰 온도감소율을 보이고 있으며 수냉역의 확장시간도 가장 빠르므로 $L/D=30$ 인 조건에서 냉각성능이 가장 우수하다고 볼 수 있다.

Fig. 8은 정체점과 $X/D=3$ 위치에서 노즐높이를 $L/D=30$ 으로 고정하고 유량을 변화시키면서 구한 온도감소율 곡선이다. 정체점에서는 유량에 따라 큰 차이를 보이지는 않으나 $X/D=3$ 위치에서

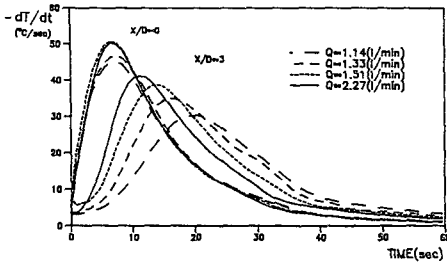


Fig. 8 Cooling characteristics for different flow rates with $L/D=30$

서는 유량이 많을수록 온도감소율이 크다. 냉각수 유량이 증가함에 따라 냉각을 분포곡선은 $t=0$ 축 방향으로 압착되면서 최대값의 크기도 커지게 된다. 전반적으로 유량이 증가함에 따라 온도감소율이 증가하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 층류냉각방식에 의한 고온강판의 수분류 냉각시 분류의 높이, 유량, 냉각 초기온도 등과 같은 동적 매개변수를 변화시켜 가면서 고온강판의 냉각특성에 관하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 고온강판의 온도는 수냉반경내에서 급격히 감소하며 수냉반경은 냉각시간의 제곱근에 비례하여 확장된다.
- (2) 고온강판의 초기온도가 높을수록 온도감소율이 작아 냉각 효율은 떨어진다.
- (3) 본 연구에서 다른 실험범위내에서 $L/D=30$ 조건에서 온도감소율이 가장 크며 우수한 냉각 성능을 보였다.
- (4) 유량 증가에 따라 수냉반경의 크기 및 온도감소율은 증가하였다.

후기

본 연구는 POSCO 계약과제의 일부분으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kohring, F. C., 1985, "WATER WALL Water-Cooling Systems," Iron and Steel Engineer, pp. 30~36
- (2) 일본철강협회, 1988, "철강제조 Process에서의 냉각기술," 냉각기술연구 소위원회 보고서, pp. 137~143.
- (3) Hatta, N., Kokado, J. and Hanasaki, K., 1985, "Numerical Analysis of Cooling Characteristics for Water Bar," Trans. Iron Steel Inst. of Japan, Vol 23, pp. 555~564.
- (4) Hatta, N., Tanaka, Y. and Takuda, H. et al., 1989, "A Numerical Study on Cooling Process of Hot Steel Plates by a Water Curtain," ISIJ International, Vol.29, No.8, pp. 673~679.
- (5) Zumbrennen, D.A., Incropera, F.P. and Vistanka, R., 1990, "Method and Apparatus for Measuring Heat Transfer Distribution on Moving and Stationary Plate Cooled by a Planar Liquid Jet," Exp. Thermal Fluid Sci., Vol 3, pp. 203~213.
- (6) Vader, D.T., Incropera, F.P. and Vistanka, R., 1991, "A Method for Measuring Steady Local Heat Transfer to an Impinging Liquid Jet," Exp. Thermal Fluid Sci., Vol.4, pp. 1~11
- (7) 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.
- (8) Monde, M. and Katto, Y., 1978, "Burnout in a High Heat-Flux Boiling System with an Impinging Jet," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.21, pp. 295~305.