

〈학술논문〉

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.2.203

표면거칠기 효과에 따른 스프레이 냉각의 열전달 향상 연구<sup>§</sup>이 정 호<sup>\*†</sup>

\* 한국기계연구원 그린환경에너지기계연구본부 에너지플랜트연구실

## Heat Transfer Enhancement of Water Spray Cooling by the Surface Roughness Effect

Jungho Lee<sup>\*†</sup>

\* Dept. of Energy Plant, Environment and Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM)

(Received September 22, 2009 ; Revised January 8, 2010 ; Accepted January 8, 2010)

**Key Words :** Surface Roughness(표면거칠기), Spray Cooling(스프레이 냉각), Heat Transfer Enhancement (열전달 향상)

**초록:** 수분류 스프레이 냉각은 많은 산업적인 응용분야에 넓게 사용되고 있다. 본 연구는 수분류 스프레이가 표면거칠기가 주어진 900°C 고온강판의 표면에 충돌하는 경우, 열유속 및 열전달계수의 정량적인 측정을 통해 표면거칠기가 수분류 스프레이 냉각에 미치는 영향을 고찰하였다. 이 때의 국소 열유속은 시편, 카트리지 히터, 열전대의 조합으로 고안된 고유의 열유속계지를 제작하여 엄밀하게 측정되었다. 평균 표면거칠기 높이를 기준으로 40, 60, 80  $\mu\text{m}$ 의 3 가지 표면과 매끈한 표면에 대한 수분류 스프레이 냉각의 열전달 현상이 비교 및 평가되었다. 표면거칠기가 주어진 표면에서의 돌출물은 얇은 열 경계층두께를 통과할 수 있기 때문에 표면거칠기가 주어진 경우에 열전달은 뚜렷하게 증가하였고, 표면거칠기의 의한 열전달 향상 기구는 서로 다른 비등영역에 대해 구분하여 조사되었다.

**Abstract:** Water spray cooling has been widely used in a variety of industrial applications. The present study concentrated on quantitative measurements of the heat flux and heat transfer coefficient by water spray as it impinges on the rough surface of a hot steel plate at 900°C. A novel experimental technique was developed for a high-temperature heat flux gauge with a test block, cartridge heaters, and thermocouples that was used to measure the surface heat flux information on the hot steel plate for local heat flux measurements. The roles of the surface roughness on heat transfer are presented in this paper for well-characterized four rough surfaces with average rms roughness heights of 40-80  $\mu\text{m}$ . The results show that the local heat transfer for rough surfaces is higher than that for a smooth surface. Heat transfer can be significantly increased by the presence of surface roughness elements, which can disrupt the thin thermal boundary layer. In addition, the heat transfer enhancement mechanism on a rough surface can be investigated by a different boiling regime.

- 기호설명 -

$AR$  : 시편의 종횡비,  $D/L$   
 $d$  : Full cone 스프레이 노즐 출구 직경  
 $D$  : 시편의 지름(mm)  
 $G$  : 스프레이 질량유속 ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ )  
 $h$  : 열전달계수( $\text{W/m}^2\text{K}$ )  
 $k$  : 시편 열전도계수( $\text{W/mK}$ )  
 $L$  : 시편 두께(mm)

$Pr$  : 프란틀 수  
 $q$  : 열유속( $\text{W/m}^2$ )  
 $q_{\text{top}}$  : 상면 열유속( $\text{W/m}^2$ )  
 $q_{\text{bottom}}$  : 하면 열유속( $\text{W/m}^2$ )  
 $Q$  : 유량( $\text{liter/min}$ , LPM)  
 $Re$  : 레이놀즈 수  
 $R_q$  : 평균 RMS 표면거칠기 높이( $\mu\text{m}$ )  
 $S$  : 표면거칠기가 주어진 시편 번호  
 $T_0$  : 시편 초기온도( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_s$  : 시편 표면온도( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{\text{No.7}}$  : 7 번 열전대 측정온도( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $\delta_t$  : 열 경계층 두께 ( $\mu\text{m}$ )  
 $\theta$  : 스프레이 분사각 (deg)

§ 이 논문은 2009년도 열공학부문 춘계학술대회(2009. 5. 20-22, BEXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, jungho@kimm.re.kr

## 1. 서 론

상변화(phase-change)를 동반하는 수분류 스프레이(water spray)는 철강의 냉각, 유리건조와 같이 고온의 열원으로부터 열을 빼앗는 대표적인 냉각 방법으로 매우 효과적으로 사용되어 왔다.<sup>(1-6)</sup> 스프레이는 사용하는 목적에 따라 서로 다른 노즐에 의해 생성될 수 있고, 지난 수 십 년 동안 수분류 스프레이를 이용한 유동해석 및 냉각과 건조에 적용되는 열전달은 수 많은 연구자에 의해 수행되었다. 수분류 스프레이가 고온 표면에 직접 닿는 경우에서의 열유속 및 열전달계수가 정량적으로 측정되었고, 이 때 발생하는 비등을 동반하는 복잡한 열전달 현상을 스프레이 질량유속, 액적 직경, 출구 평균속도와 같은 주요 스프레이 인자의 함수로 비등 열전달 기구를 해석하였다.<sup>(1,2)</sup> 1980 년대에 이르러 Bolle 와 Moureau<sup>(3)</sup>는 fan, fullcone 형태의 서로 다른 압력형 스프레이 노즐을 이용하여 얻은 수분류 스프레이 유동 및 열전달 데이터에 관한 문헌을 정리하였다. 특히 수분류 스프레이에 의한 열전달 측정은 정상상태(steady-state)와 비정상상태(transient) 측정법으로 구분하였고 스프레이와 표면의 기하학적인 관계도 고려하였다. 냉각 표면의 거칠기가 스프레이 냉각에 미치는 영향이 파악되었으나, 표면거칠기가 5  $\mu\text{m}$  이하의 정도에서 철강 제품의 냉각에 적용하기에는 제한적이다.<sup>(4,5)</sup> 철강 제조의 냉각공정에 사용되는 수분류 스프레이는 열연 Run-out Table(ROT) 냉각, 후판 가속냉각(accelerated cooling), 선재 바 냉각(bar cooling)에 대표적으로 사용된다.<sup>(6)</sup>

일반적으로 강재의 표면거칠기 상태는 냉각과정 동안에 냉각에 큰 영향을 미치기 때문에 표면거칠기에 의한 열전달을 무시할 수 없다. 제철소에서 열간 압연제품으로 출하된 강재는 대개 12.5~50  $\mu\text{m}$  정도의 평균 표면거칠기 높이를 갖는 것으로 알려져 있다.<sup>(7)</sup> 열간압연제품의 표면거칠기의 정도에 따라서 냉각과정에서 발생하는 냉각률에 차이를 유발할 수 있으며, 이와 같은 불균일 냉각은 열응력(thermal stress)을 발생시켜 강재의 형상 변형(deformation)과 같은 심각한 문제를 일으킬 수 있다. Gabour 와 Lienhard V<sup>(8)</sup>는 표면거칠기가 충돌 제트에 의한 정체점에서의 열전달에 미치는 영향을 연구하였고, 이 때의 4.7~28.2  $\mu\text{m}$  의 9 개의 서로 다른 표면거칠기에 대해 실험하였으며 매끈한 표면과 거칠기가 주어진 표면에서의 열전달 상관 관계를 조사하였다. Webb<sup>(9,10)</sup>은 표면의 기하학적

형상이 핵비등이 미치는 영향을 연구하였다.

후판의 경우, 수분류 냉각은 표면온도 기준으로 800°C 에서 시작하여 400°C 에 종료되는데, 제품의 강도, 인성과 같은 재료특성에 따라 냉각은 변경될 수 있다. 기존의 스프레이 냉각의 경우 대개 400°C 미만에서의 열전달 현상을 연구하였고, 철강 냉각공정에 적용할 수 있는 고온영역의 스프레이 냉각 데이터는 찾아보기 어려운 현실이다.<sup>(11)</sup> 또한 기존의 고온강판의 냉각에 관한 연구는 대개 가로 200 mm, 세로 200 mm, 두께 10 mm 정도의 가열시편 강판에 열전대를 부착하여 전기가열로(electric muffle furnace)에서 복사 가열한 후 수분류 냉각시험을 실시하였다.<sup>(12)</sup> 이와 같이 종래의 방법은 가열시편을 1~2 회 사용하기 때문에 매번 실험마다 열전대를 설치해야 하기 때문에 실험이 번거롭고 많은 시간을 필요로 하였다.<sup>(11)</sup>

따라서 본 연구에서는 900°C 정도의 고온 발열이 가능한 카트리지히터와 열전대를 시편블록(test block)에 설치하여 열유속을 측정할 수 있는 새로운 개념의 열유속게이지(heat flux gauge)를 개발하였다. 이 때의 열유속게이지는 최소 20 회 이상 반복적으로 사용이 가능하고, 설치가 용이하여 실험이 간편한 장점을 갖고 있다.

본 연구에서는 스프레이 냉각의 경우에 표면거칠기가 열전달에 미치는 영향을 3 가지 다른 표면거칠기를 기준으로 매끈한 표면과 비교하였으며, 900°C 정도의 고온에서의 열유속 및 열전달계수에 대한 benchmark 데이터를 제공하고자 한다. 또한 비등가시화(boiling visualization)를 통해 스프레이 냉각기구에 대한 올바른 이해를 돕고, 표면거칠기가 열전달 향상에 미치는 영향에 대해 설명하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 절차

### 2.1 스프레이 냉각 실험장치

스프레이 냉각실험은 표면거칠기가 주어진 가열 표면의 정가운데에 수분류 스프레이에 의한 냉각을 정량적으로 측정하였다. Fig. 1 에서는 스프레이 냉각실험장치의 개략도를 보여주고 있으며, 가열시편의 상부에 설치된 스프레이 노즐로부터 분출된 스프레이 유동이 수직 하방으로 가열표면에 분사되고 이러한 냉각과정에서 시간 변화에 따른 가열시편 표면에서의 열유속 및 열전달계수를 측정하는 장치이다.

Fig. 1 에 나타난 것과 같이 스프레이 냉각실험

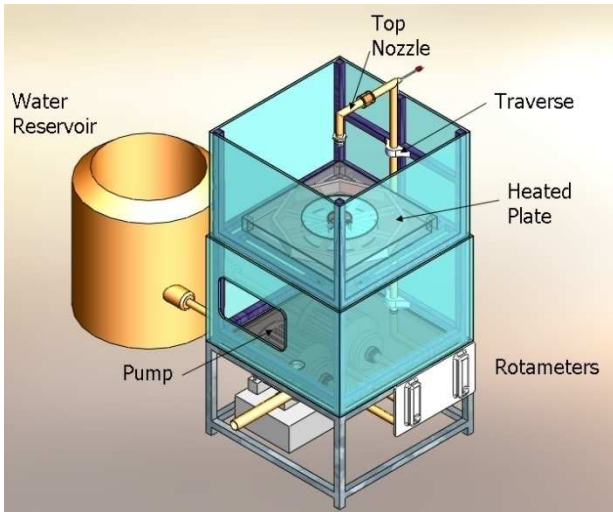


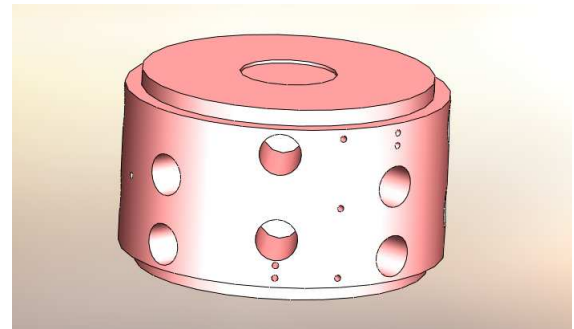
Fig. 1 Schematics of experimental apparatus

장치는 가로 700 mm, 세로 700 mm, 높이 1,440 mm 의 크기이고, 장치의 중간 530 mm 부분과 상부 470 mm 부분은 투명한 강화 폴리카보네이트 재질로 제작되었다. 냉각수를 정지상태에서 저장하는 100 리터 규모의 저장조(reservoir)에서 장치 하부에 위치한 최대 15 bar 3 상 유도 전동 펌프를 이용하여 냉각수를 펌핑하고, 장치의 측면에 부착된 유량계(rotameter, Dwyer)를 통해 유량을 측정한다. 스프레이 냉각실험에 있어 체적 유량은 6.0 LPM 으로 고정하였고, 이 때의 유량에 기초한 레이놀즈 수(Reynolds number)는 49,000 정도이다. 체적유량의 불확도는 최대 3% 정도이고, 레이놀즈 수의 불확도는 최대 4% 정도이다.

본 연구에서 사용된 스프레이 노즐은 내경이 2.9 mm 인 EVERLOY 사 1/4 KS FHS 0865 의 fullcone 형태의 스프레이 노즐을 사용하였다. 스프레이 노즐은 가열시편이 설치된 가열 표면의 상부에 설치되어 있고, 상부노즐의 출구로부터 충돌 가열면 사이의 거리는 360 mm 로 고정하였다. 이 때의 질량유속(G)은 0.74 kg/m<sup>2</sup>s 정도이고, 스프레이 분사각( $\theta$ )은 60 도 정도이다. 또한 실제 스프레이 냉각실험에서의 냉각수의 온도는 20°C 로 거의 일정하게 유지하였다.

## 2.2 고온 열유속계이지

본 측정에서 사용된 가열시편은 약 900°C 정도로 가열하고 냉각실험을 최소 20 회 이상 반복적으로 사용할 수 있는 고온 열유속계이지 (heat flux



(a)



(b)

Fig. 2 Schematics of heat flux gauge; Assemblies of cartridge heaters, thermocouples and test block: (a) test block fabrication, (b) test block assembly

gauge) 기능을 갖는다. Fig. 2 는 스프레이 냉각 측정장치에 놓인 시편블록에 16 개의 카트리지히터와 9 개의 열전대를 삽입한 어셈블리의 개략도이다.

본 측정에 사용된 가열 시편블록은 SUS 304 규격 (18% Cr, 8% Ni)의 스테인리스 강을 사용하였고, 직경은 100 mm 높이는 60 mm 로 종횡비(AR)가 1.67 정도로 거의 1 에 가깝기 때문에 고온으로의 가열 및 냉각 후 열응력에 의해 발생하는 기하학적 변형을 최소화 할 수 있다. 일반적으로 스테인리스 강은 상 변태(phase transformation) 과정에서 생성되는 변태 발열을 추가적으로 고려할 필요가 없기 때문에 가열시편으로 선택되었다.

본 연구에서 사용된 시편블록의 가열은 전기적으로 발열하는 카트리지히터를 시편블록 내부에 설치하여 주울 열(Joule's heating) 방식에 의해 직접적으로 가열하는 방법을 채택하였고, 최대 약 950°C 정도로 가열할 수 있다. 실제 스프레이 냉각실험과정에서 시편블록은 냉각이

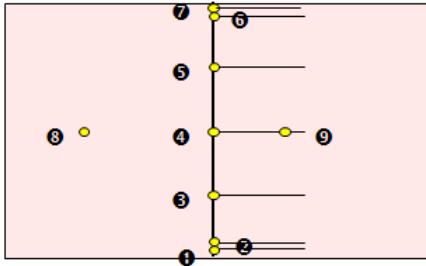


Fig. 3 Location of installed thermocouples in test block

스프레이 냉각수가 닿는 표면에서만 열전달이 발생해야 하므로, 시편블록의 측면은 거의 단열조건을 만족할 수 있을 정도의 Cerakwool 단열재를 부착하였다. 원형 실린더 형상의 시편블록에는 40mm 깊이로 모두 16 개의 카트리지히터가 4 개의 층으로 90 도의 위상 차를 갖도록 배치하였으며, 각각의 층은 45 도의 위상 각(phase angle)을 갖도록 설계하여 균일하게 가열할 수 있다.

본 측정에 사용된 고온용 카트리지히터(cartridge heater)는 미국 Watlow 사 HT Firerod<sup>®</sup>로 최대 온도 980°C 까지 가열 작동되며 최대 15.5 W/cm<sup>2</sup> 정도로 발열시킬 수 있는 용량을 갖고 있다. 카트리지히터의 직경은 12.7 mm 이고 길이가 196 mm 를 갖고 있으나 실제 히터의 발열부는 끝단 으로부터 44 mm 는 가열되고 나머지 152 mm 는 가열되지 않는다. 이와 같이 비 가열부(unheated zone)의 길이를 충분히 길게 설정한 이유는 카트리지히터로부터 주변으로의 열전달을 최소화 하기 위해서 선택되었다. 가열 시편은 4 개의 히터로 구성된 1 개 층의 히터들을 직렬로 연결하여 전체 4 개의 가열 구역을 구성하였고, 각 구역의 카트리지 히터들은 온도제어장치를 통해 시편 가열에 필요한 온도 제어를 행하였다.

가열 시편블록 내부의 온도는 직경 0.5 mm 의 미국 OMEGA 사의 K 형 열전대를 사용하였고, 열전대의 길이는 6"이다. 본 측정에서 사용된 열전대는 Fig. 3 에 나타나 있는 것과 같이 가열 시편블록의 중심 위치에서의 두께 방향으로의 온도 분포를 측정하기 위해 설치되었으며, 열전대의 번호는 하면으로 부터 상면으로 번호가 붙여지고 각각의 번호가 의미하는 열전대의 기하학적 위치는 Table 1 에 잘 나타나 있다.

여기서 ①번 열전대로부터 ⑦번 열전대까지는 가열 시편의 정 가운데의 두께 방향의 온도를 측정하는 데에 사용되고, ⑧번과 ⑨번 열전대는 가열

Table 1 Location of thermocouple in test block

| No. | Location of thermocouple                  |
|-----|---|
| ①   | 하면에서 1mm 에 위치한 지점                         |
| ②   | 하면에서 2mm 에 위치한 지점                         |
| ③   | 하면에서 15mm 에 위치한 지점                        |
| ④   | 하면에서 30mm 에 위치한 지점                        |
| ⑤   | 하면에서 45mm 에 위치한 지점                        |
| ⑥   | 하면에서 58mm 에 위치한 지점<br>(상면에서 2mm 에 위치한 지점) |
| ⑦   | 하면에서 59mm 에 위치한 지점<br>(상면에서 1mm 에 위치한 지점) |
| ⑧   | 중간면에서 반경방향으로 30mm 위치                      |
| ⑨   | 중간면에서 반경방향으로 15mm 위치                      |

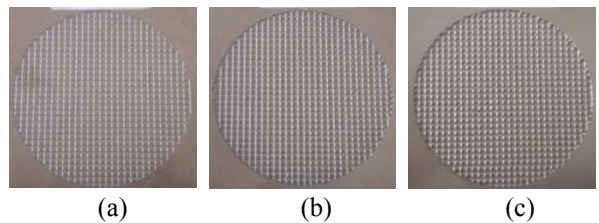


Fig. 4 Photo of rough surfaces on test block: (a) S1, R<sub>q</sub>=40 μm; (b) S2, R<sub>q</sub>=60 μm; (c) S3, R<sub>q</sub>=80 μm

시편의 가운데 평면에서의 반경방향으로의 온도 변화를 측정하기 위하여 설치하였다.

본 측정장치에 대한 자세한 설명과 불확도 해석은 Lee<sup>(13)</sup>의 결과에 잘 나타나 있다.

2.3 표면거칠기 특성

본 연구에서는 표면거칠기가 스프레이 냉각에 미치는 영향을 연구하기 위해 Fig. 4 에 나타난 바와 같이 가열 시편블록의 정가운데에 직경 30 mm 의 크기로 방전가공(corrosive patterning)을 통해 스테인리스 가열 시편블록의 표면을 인위적으로 가공하였다.

본 측정에서 적용된 표면거칠기는 Table 2 에 나타나 있는 것과 같이 S0, S1, S2, S3 의 네 가지로 S0 는 평균 root-mean square 표면거칠기 높이, R<sub>q</sub> 는 0.41 μm 정도로 매끈한 표면을 갖는 경우이고, S1, S2, 그리고 S3 는 Fig. 4 에서 볼 수 있듯이 R<sub>q</sub> 는 각각 40 μm, 60 μm, 그리고 80 μm 정도의 값을 갖는다. 평균 rms 표면거칠기 높이는 ANSI B46.1-1962 의 기준에 따라 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \tag{1}$$

**Table 2** Average root-mean-square roughness height,  $R_q$ , for the four tested surfaces

| Surface Number | Patterning | $R_a$               | Average $R_q$      |
|----------------|------------|---------------------|--------------------|
| S0             | -          | 0.31 $\mu\text{m}$  | 0.41 $\mu\text{m}$ |
| S1             | Corrosive  | 33.51 $\mu\text{m}$ | 40 $\mu\text{m}$   |
| S2             | Corrosive  | 55.96 $\mu\text{m}$ | 60 $\mu\text{m}$   |
| S3             | Corrosive  | 75.95 $\mu\text{m}$ | 80 $\mu\text{m}$   |

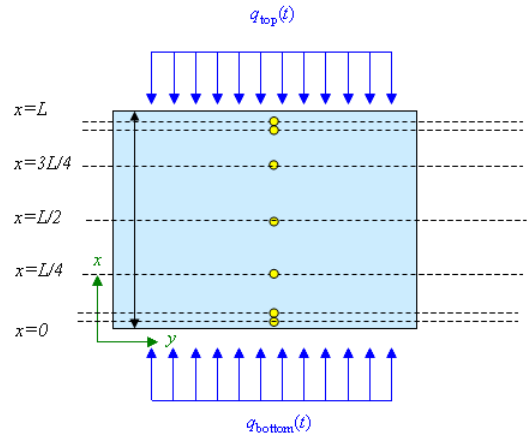
또한 본 측정에서의 표면거칠기는 MAHR PGK 120 Perthometer 를 사용하였고, 표면거칠기 측정의 전/후에 0.15  $\mu\text{m}$  간격으로 구성된 표준시편을 기준으로 표면거칠기 측정기를 보정하였다. 실제 표면거칠기는 17.5 mm 의 스캐닝 길이로 부식가공을 통해 형성된 가열 시편블록의 정 가운데의 표면거칠기 높이를 측정하였다. 여기서의 평균 rms 표면거칠기 높이 측정의 불확도는 약  $\pm 5.5\%$  정도를 갖는다.

### 2.4 실험 절차

본 스프레이 냉각측정에서는 가열 시작 후 시편블록의 내부 온도가 900°C 정도로 거의 균일하게 가열되면, 수분류 스프레이가 분출되어 가열 표면에서의 냉각이 시작된다. 이 때 시간 변화에 따른 온도데이터는 Agilent 34970A 데이터로거(data logger)로 저장되고, Agilent VEE 인터페이스 프로그램으로 초당 2 개의 온도 데이터를 저장하게 된다. 이 때 온도측정에서의 불확도는 약  $\pm 0.5\%$  정도이다.

### 3. 역열전도해석

본 연구에서는 스프레이 냉각실험에서의 표면온도를 직접적으로 측정하는 데에는 다음과 같은 제약이 있다. 첫째, 열전대와 같은 접촉식 온도센서를 부착하여 표면온도를 측정하게 되면 표면에서 일종의 유동 장애를 초래하게 되고, 둘째 적외선 온도센서를 이용하여 비접촉식으로 표면온도를 측정하는 경우에는 고온에서 발생하는 비등으로 인한 증기와 방사율의 변화로 인해 표면온도를 정확하게 측정할 수 없게 된다. 이와 같이 900°C 정도의 고온의 수분류 스프레이 냉각실험에서는 기존의 방법을 이용한 열유속 및 열전달계수의 측정은 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 가열 시편블록의 7 개의 내부온도를 측정하여 표면온도, 표면열유속 및 열전달계수를 유추하는 역열전도 문제(inverse heat conduction problem, IHCP)로 접근하였다. 본 연구에 사용된 역열전도 문제는 Beck<sup>(14,15)</sup>이 제안한 sequential



**Fig. 5** Inverse heat conduction problem and its coordinate

function specification method 를 적용하여 수분류 스프레이 냉각실험의 열유속 및 열전달계수를 결정하였다.

본 연구에서 수행된 900°C 의 고온 시작온도와  $10^5 \sim 10^7 \text{ W/m}^2$  정도의 매우 높은 열유속이 요구되는 실험에서는 정상상태의 일정 온도 또는 일정 열유속 경계조건의 정상상태(steady-state)에서의 측정은 거의 불가능하기 때문에 비정상상태(transient)에서의 열전달 측정을 수행하였다.<sup>(16)</sup>

본 연구에서는 가열 시편블록의 폭 방향 열전달은 두께 방향에 비하여 무시할 정도로 작기 때문에, 두께 방향으로의 열전달 만을 고려하여 Fig. 3 에 나타난 바와 같이 두께 방향으로의 1 차원 비정상상태(unsteady-state)의 에너지방정식을 지배방정식으로 이용하였다.

$$\rho c_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$T = T(t, x) \quad (t > 0, 0 < x < L) \quad (3)$$

이 때의 경계조건은 다음과 같다.

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial x} = q_{bottom}(t) \quad \text{at } x = 0 \quad (4)$$

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial x} = q_{top}(t) \quad \text{at } x = L \quad (5)$$

초기조건은 다음과 같다.

$$T(t, x) = T_0(x) \quad \text{at } t = 0 \quad (6)$$

여기서  $T(t, x)$ 는 두께 방향  $x$  를 따른 온도분포를 보여준다.

또한 역열전도 문제로 접근한 열유속 값을 검증하기 위해 표면온도와 표면으로부터 1 mm 떨어진 지점에서의 온도 차이로부터 다음과 같이 뉴턴의 냉각법칙(Newton's cooling law)을 적용한 열유속과 비교하였다.

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} = -k \frac{(T_s - T_{No.7})}{\Delta x} \quad (7)$$

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 온도 분포

Fig. 6 은 매끈한 표면(S0)을 갖는 가열 시편블록에 스프레이 냉각이 진행될 때 시간에 따른 온도분포를 보여준다. 스프레이 냉각은 약 900°C에서 시작되고, 냉각시간에 따른 온도변화가 잘 나타나 있다. 표면온도 T1, 표면에 가까이 위치한 T2 그리고 T3 에서의 온도는 매우 유사하게 감소하고, T4 와 T5 에서의 온도변화는 스프레이 냉각이 진행되는 동안 단순한 형태로 감소하는 경향을 보인다. 표면온도가 400°C 정도에 다다랐을 때, 전체 측정위치에서 온도는 급격하게 빠르게 감소한다. 매끈한 표면을 갖는 S0 의 경우, 약 200 초에서 표면온도(T1)와 표면에 가까운 온도(T2, T3)는 갑자기 감소하기 시작한다. 이것은 천이비등이 끝나게 되면서 가열된 시편 표면에 스프레이에 의한 분무수가 직접적으로 접촉하면서 인해 핵 비등이 진행되는 것으로 판단된다.

Fig. 7 은 표면거칠기가 주어진 경우(S3, 80µm)에 있어 시간에 따른 온도분포를 보여준다. Fig. 6 에서 나타난 바와 같이 스프레이 냉각은 역시 같은 온도인 900°C에서 시작되고, 온도 T1, T2, T3, T4, 그리고 T5 는 Fig. 6 의 온도분포와 거의 유사한 profile 을 갖는다. 표면온도가 400°C 정도에 도달했을 때, 전체 측정위치에서 온도는 급격하게 빠르게 감소하는 것을 볼 수 있다.

표면거칠기가 주어진 S3 에서는 대략 190 초 정도에서 표면온도가 갑자기 급격하게 감소한다. 이것은 Fig. 6 에서와 마찬가지로 천이 비등 종료의 의미하게 되고, 시편 표면에 수분류 스프레이가 직접적으로 접촉하면서 가열표면으로 냉각수가 덮는 현상을 보여 비등 천이(boiling transition)가 일어나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 급격하게 표면온도가 변화하는 비등 천이현상은 4.2 절의 비등 가시화에서 보다 뚜렷하게 볼 수 있다.

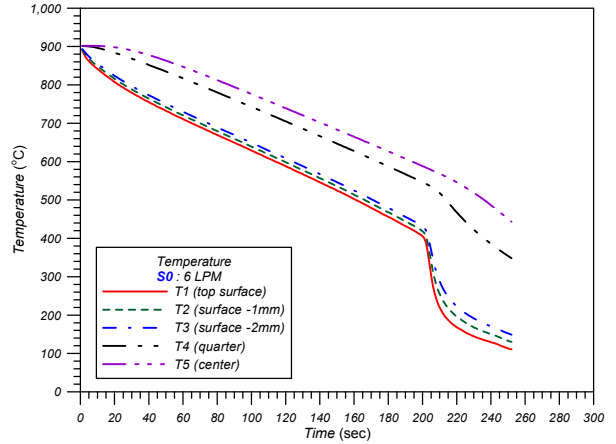


Fig. 6 Time-resolved temperature distributions of S0

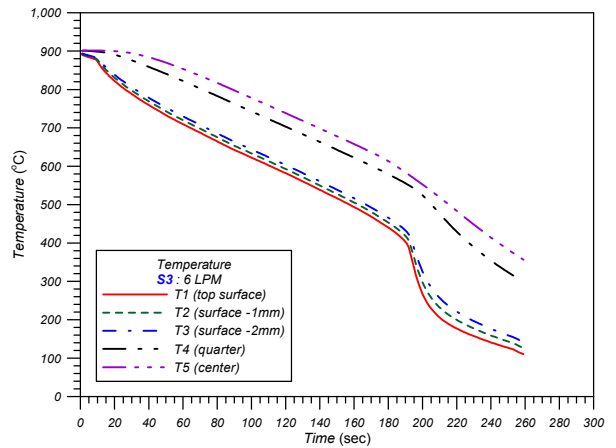


Fig. 7 Time-resolved temperature distributions of S3

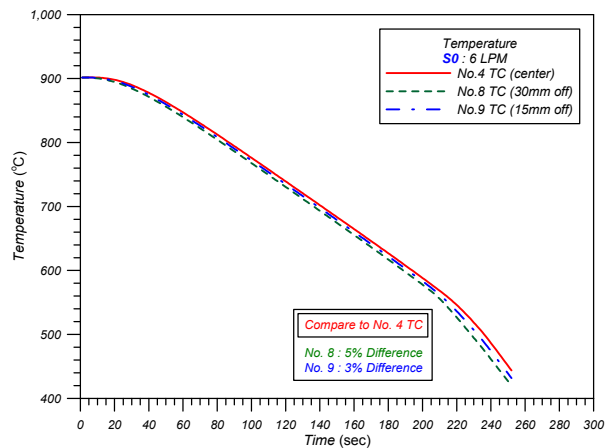


Fig. 8 Radial temperature distribution of S0

그리고 표면거칠기가 주어진 S3 의 경우, 매끈한 표면의 S0 에 비해 더욱 효과적인 열전달이 이루어지기 때문에, 천이 비등에서 핵 비등으로

바뀌는 비등 천이현상은 표면 거칠기가 주어진 S3 경우에 시간적으로 좀 더 일찍 발생함을 알 수 있다.

Fig. 8 은 매끈한 표면(S0)을 갖는 가열 시편블록에 스프레이 냉각이 진행될 때 반경방향에 따른 온도분포를 보여준다. 가열 시편블록의 중심면에서 30 mm 떨어진 지점에서의 No. 8 과 15 mm 떨어진 지점에서의 No. 9 는 시편의 중앙에 위치한 No. 4 의 온도와 거의 유사함을 알 수 있다. No. 8 열전대의 온도와 No. 9 열전대의 온도는 No. 4 열전대 온도에 비교하여 각각 5% 그리고 3% 정도의 매우 근소한 오차를 갖는 것으로 확인되었다. 따라서 본 측정에서는 반경 방향의 열전달은 두께 방향으로의 열전달에 비교하여 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에, 두께 방향으로의 1 차원 열전달만으로도 문제에 접근할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 비등 가시화

스프레이 냉각 실험을 진행하는 동안, 가열 시편블록의 상면에 HD 급 캠코더를 이용하여 스프레이 냉각 동안의 비등현상을 촬영하였다. 본 측정에 사용된 HD 급 캠코더는 SONY HDR-SR7 핸디캠을 사용하여 실시간의 비등현상을 가시화 하였다.

스프레이 냉각에 의해 표면이 거의 증기막으로 덮여 있는 천이 비등에서 증기막이 갑자기 사라지면서 표면이 액적에 의해 직접 닿는 젖음 현상(wetted phenomena)을 가시화하여 시간 간격에 따른 변화를 Fig. 9 에서 볼 수 있다. 앞의 Fig. 7 에서 나타나 있는 바와 같이 표면거칠기가 주어진 경우(S3, 80 $\mu\text{m}$ )의 온도분포에서도 알 수 있듯이, 대략 190 초에서 표면온도가 갑자기 급격하게 감소하는 것으로 나타났다.

이와 같이 표면온도가 냉각 시작 후 190 초 후에 나타나는 현상은 비등 가시화를 통해 완벽하게 증명할 수 있다. Fig. 9 의 (a)는 냉각 후 190초에서의 가열 표면을 유동 가시화한 사진으로 아직까지는 스프레이 액적이 직접적으로 표면에 닿지 않은 것으로 보인다. Fig. 9 의 (b)부터 (f)까지는 1 초 간격으로 가열표면의 비등현상을 가시화한 사진으로 앞의 Fig. 7 의 온도분포에서 급격한 온도감소를 보여준 (b) 191 초에서 표면이 젖기 시작하는 것으로 정확하게 관찰되었다. 이와 같은 젖음 현상은 표면거칠기가 가공되어 있는 가열 시편블록의 가장자리 부분에서 시작해서 전체로 확장되는 것을 알 수 있다.

따라서 이와 같은 비등현상의 가시화를 통하여 실제 표면온도 분포에서 급격한 온도 감소가 발생하는 표면 젖음 현상에 대해 명확하게 고찰하였고, 비등 가시화

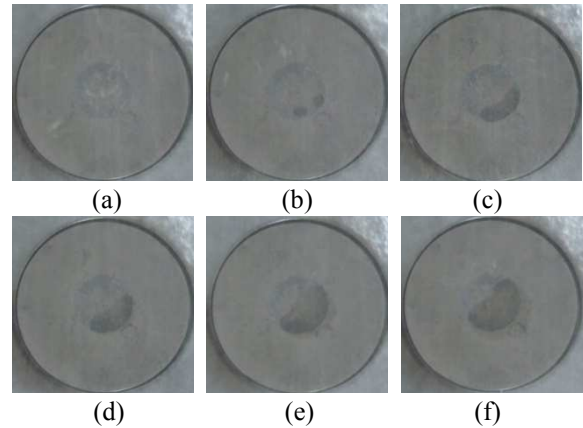


Fig. 9 Boiling evolution of water spray on the heated surface for S3: (a)  $t=190\text{s}$ ; (b)  $t=191\text{s}$ ; (c)  $t=192\text{s}$ ; (d)  $t=193\text{s}$ ; (e)  $t=194\text{s}$ ; (f)  $t=195\text{s}$  after impinging water spray

(boiling visualization)와 온도측정이 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

#### 4.3 열유속 및 열전달계수

표면거칠기 변화(S0, S1, S2, S3)에 따른 스프레이 냉각에 의한 열유속곡선 및 이 때의 온도 변화에 따른 열전달계수를 Fig. 10 과 Fig. 11 에 잘 나타나 있다. 표면 열유속은 스프레이 냉각에 의한 가열 시편 내부의 온도변화로부터 역 열전도해석을 통해 얻어졌으며, 이 때 열유속은 표면온도가 900 $^{\circ}\text{C}$ 부터 100 $^{\circ}\text{C}$  정도에 이르는 냉각과정 동안의 데이터로부터 결정되었고, Nukiyama 열유속곡선은 역열전도해석을 통해 얻어진 열유속 값으로부터 별도의 curve fit 을 이용하지 않았다.

Fig. 10 은 표면거칠기가 주어진 네 가지 경우 (S0, S1, S2 그리고 S3)의 표면거칠기 변화에 따른 스프레이 냉각의 열유속곡선을 보여주고 있다. 매끈한 표면을 갖는 S0 는 0.41  $\mu\text{m}$  정도의 평균 rms 거칠기 높이를 갖는다. 그리고 S1, S2 그리고 S3 는 각각 40, 60, 80  $\mu\text{m}$  의 평균 rms 표면 거칠기 높이를 갖는다. 또한 스프레이 냉각에서의 임계열유속(critical heat flux, CHP)은 240 $^{\circ}\text{C}$ ~300 $^{\circ}\text{C}$  사이에서 관찰되었다. 이와 같은 임계열유속은 기존의 강제 대류 비등 문헌에서 제시된 경우와 거의 유사한 값을 갖는다.<sup>(17)</sup> 또한 본 연구에서 측정된 임계열유속의 크기를 비교하기 위해 기존의 문헌에 나타나 있는 결과 가운데, Hoogendoorn 과 den Hond<sup>(2)</sup>의 측정 결과는 본 실험과 같이 fullcone 형태의 스프레이 노즐을 사용하였고, 질량유속(G)이 0.6  $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$  의 경우와 비교하였는데, 비교적 비등곡선의 형태와

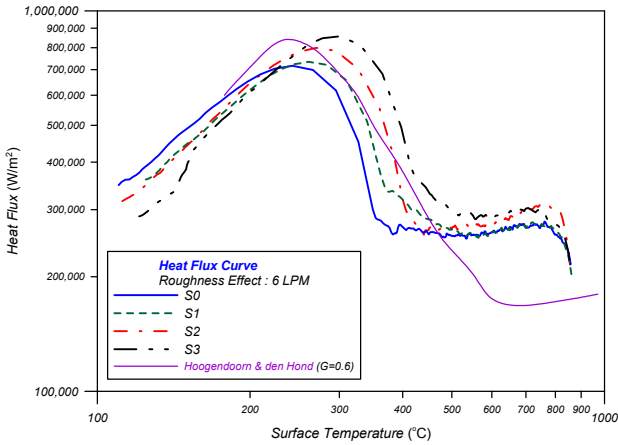


Fig. 10 Heat flux curve for rough surfaces

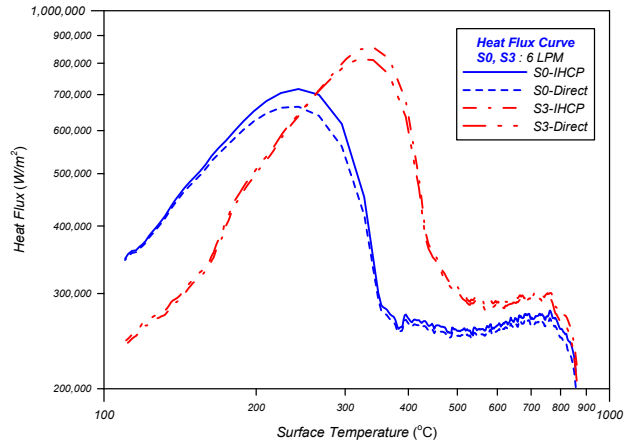


Fig. 12 Comparison of data reduction methods for heat flux determination

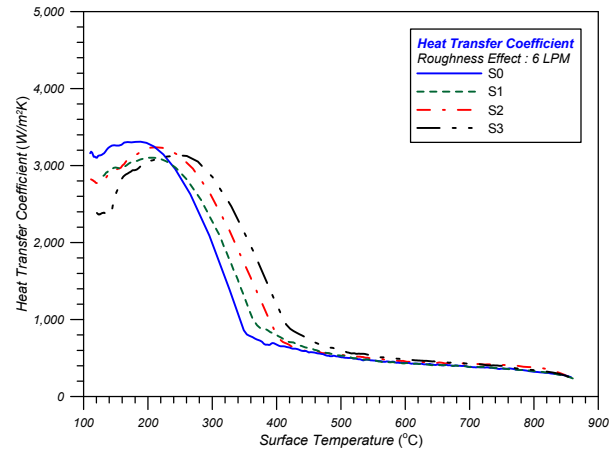


Fig. 11 Heat transfer coefficient for rough surfaces

임계열유속의 크기가 근사함을 알 수 있다.

매끈한 표면을 갖는 S0의 경우에는 임계열유속은 300°C에서 발생하였고, 표면 거칠기 값이 가장 큰 S3에서 임계열유속은 240°C에서 나타났다. 하지만 스프레이 냉각의 경우에는 천이 비등에서 핵 비등으로 바뀌는 비등 천이현상이 표면 거칠기가 주어진 표면에서 더 일찍 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 충돌제트 냉각의 경우에는 충돌제트가 가열 시편의 표면에 연속적으로 닿고 수 초 이내에 막 비등에서 발생하는 증기막을 연속적으로 깨트리기에 충분한 모멘텀을 갖는 제트가 계속해서 표면에 분사되기 때문에 표면거칠기 조건에 따른 변화가 적다고 볼 수 있다. 스프레이 냉각의 경우에는 표면 거칠기가 주어진 표면에서 상대적으로 큰 공동(cavity)이 액적에 의한 증기포를 좀 더 많이 포함하기 때문에 표면거칠기에 따른 비등 천이현상이 서로 다르게 발생할 수 있다.

또한, 표면거칠기가 증가할수록 임계열유속 값이 증가하는 것을 보여준다. 그리고 가장 거친 표면(S3)에서의 임계열유속은 매끈한 표면(S0)과 비교하여 약 20% 증가된 것을 확인할 수 있다. 표면거칠기가 주어진 경우에 있어서의 임계열유속은 일반적으로 많은 문헌에서 알려진 바와 같이 표면의 유효 면적(effective area)이 증가하기에 열전달이 향상되는 것으로 설명될 수 있다.<sup>(9,10)</sup>

표면거칠기가 주어진 경우 표면온도에 따른 열전달계수 분포는 Fig. 11에 잘 나타나 있다. 표면온도가 400°C일 때 모든 표면거칠기에서 열전달계수는 갑자기 증가하기 시작한다. 240°C~420°C의 표면온도 범위를 가지는 천이 비등영역 안에서 거친 표면은 매끈한 표면에 비하여 더 큰 열전달계수를 가진다. 여기서, S3와 S0 사이에서 최대 열전달계수의 차이는 200% 정도로 크게 관찰되었다. 이것은 막 비등, 천이 비등 그리고 핵 비등이 표면거칠기의 정도에 크게 의존하는 것을 증명하여 준다.

이와 같이 표면거칠기가 주어진 경우, 표면에 형성된 작은 크기의 표면 돌출부(surface protrusion)는 상대적으로 매우 얇은 열 경계층(thermal boundary layer)을 충분히 파괴할 수 있고 이 때의 열전달은 표면거칠기의 존재에 따라 현저하게 증가할 수 있다.

Gabour와 Lienhard V<sup>(8)</sup>가 제안한 수분류 충돌제트에서의 열 경계층 두께(thermal boundary layer thickness)는 표면거칠기가 주어지지 않은 매끈한 표면에서 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\delta_t = \frac{3.6 d}{Re^{0.633} Pr^{1/3}} \quad (8)$$

식 (8)을 이용하여 본 연구에서 적용한 수분류 스프레이 냉각 시 계산된 열 경계층 두께는 약 6 μm 정도를



맞는다. 유사한 유동조건에서 수분류 충돌제트 냉각의 열 경계층 두께는 대략  $10 \mu\text{m}$  정도를 갖는다.<sup>8)</sup> 본 측정과 같이 수분류 스프레이 냉각의 경우에 열 경계층 두께는 수분류 충돌제트 냉각에 비해 다소 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 적용된 S1 ~ S3의 세 가지 경우에 대해서는 평균 rms 표면거칠기 높이가 열 경계층 두께 보다 훨씬 큰 값을 갖기 때문에, 표면거칠기로 인해 돌출된 표면은 상대적으로 얇은 열 경계층을 충분히 뚫을 수 있을 것으로 판단되기 때문에, 매끈한 표면에 비해 높은 열전달 특성을 갖는다.

Fig. 12는 역열전도 해석(IHCP)으로 계산된 열유속의 값과 뉴턴의 냉각법칙으로 직접 측정된 열유속 값의 비교를 보여준다. 여기서 직접 측정된 값이 IHCP로 계산된 값보다 약간 작은 것을 볼 수 있지만 임계열유속을 제외하고는 실선과 점선은 매우 잘 일치하고, 본 연구에서 사용된 IHCP 계산이 열유속의 변화를 매우 잘 예상하는 것을 나타낸다. 매끈한 표면(S0)에서 IHCP에 의해 구해진 임계열유속 값은 직접 측정한 값에 비해 약 10% 정도 높은 것으로 나타났고, 거친 표면(S3)에서는 IHCP의 임계열유속 값이 직접 측정한 값에 비해 약 7% 정도 높은 값을 갖는다.

## 5. 결 론

본 연구에서는  $900^\circ\text{C}$  정도의 고온 발열이 가능한 카트리지히터와 열전대를 시편블록에 설치하여 열유속을 측정할 수 있는 새로운 개념의 열유속게이지(heat flux gauge)를 개발하였으며, 이 때의 열유속게이지는 최소 20회 이상 반복적으로 사용이 가능하고, 설치가 용이하여 실험이 간편한 장점을 갖고 있다.

스프레이 냉각의 경우에 표면거칠기가 열전달에 미치는 영향을 3가지 다른 표면거칠기를 기준으로 매끈한 표면과 비교하였으며, 최대 200% 정도의 열전달계수의 증가를 보여주었다. 이 때의 얇은 열 경계층을 파괴할 수 있을 정도의 표면거칠기 요소의 존재에 의해 열전달은 크게 향상될 수 있다. 또한 비등가시화(boiling visualization)를 통해 스프레이 냉각기구에 대한 비등 전이현상을 명백하게 밝혔다.

본 측정에서 역열전도해석을 통해 얻은 열유속은 뉴턴의 냉각법칙과 비교하며 매우 잘 일치함을 알 수 있었고, 본 연구에서 고안된 고온 열유속게이지를 이용한 열유속 측정방법이 충분한 신뢰성을 갖는 것으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 부품소재전문기업기술지원사업인 “고온 발열용 카트리지히터 및 고온 열유속게이지 개발”과 (주)포스코 기술연구원의 수탁 연구과제로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Mizikar, I., 1970, “Spray Cooling Investigation for Continuous Casting of Billets and Blooms,” *Iron and Steel Engineer*, pp. 53~70.
- (2) 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.
- (3) Bolle, L. and Moureau, J. C., 1982, “Spray Cooling of Hot Surfaces,” *Multiphase Science and Technology*, Vol. 1, pp. 1~97.
- (4) Pais, M. R., Chow, L. C. and Mahefkey, E. T., 1992, “Surface Roughness and Its Effects on the Heat Transfer Mechanism in Spray Cooling,” *Journal of Heat Transfer*, Vol. 114, pp. 211~219.
- (5) Kang, B-S. and Choi, K-J., 1998, “Cooling of a Heated Surface with an Impinging Water Spray,” *KSME International Journal*, Vol. 12, pp. 734~740.
- (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) Kalpakjian, S., 1985, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, MA, pp. 180~194.
- (8) Gabour, L. A. and Lienhard V, J. H., 1994, “Wall Roughness Effects on Stagnation-point Heat Transfer Beneath an Impinging Liquid Jet,” *Journal of Heat Transfer*, Vol. 116, pp. 81~87.
- (9) Webb, R. L., 1981, “The Evolution of Enhanced Surface Geometries for Nucleate Boiling,” *Heat Transfer Engineering*, Vol. 2, pp. 46~69.
- (10) Webb, R. L., 1983, “Nucleate Boiling on Porous Coated Surfaces,” *Heat Transfer Engineering*, Vol. 4, pp. 71~82.
- (11) Wolf, D. H., Incropera, F. P. and Viskanta, R., 1993, “Jet Impingement Boiling,” *Advances in Heat Transfer*, Vol. 23, pp. 1~132.
- (12) Hatta, N., Kokado, J. and Hanasaki, K., 1983, “Numerical Analysis of Cooling Characteristics for Water Bar,” *Transaction of Iron and Steel Institute of Japan*, Vol. 23, pp. 555~564.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) Beck, J. V. and Arnold, K. J., 1977, *Parameter Estimation in Engineering and Science*, Wiley, New York.
- (16) Taler, J., 1996, "Theory of Transient Experimental Techniques for Surface Heat Transfer," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 3733~3748.
- (17) van Stralen, S. and Cole, R., 1979, *Boiling Phenomena*, McGraw-Hill, New York.