

## 강재 급속냉각용 고온 열유속게이지 개발

이 정 호<sup>†</sup>

한국기계연구원 그린환경에너지기계연구본부

## Development of High-Temperature Heat Flux Gauge for Steel Quenching

Jungho Lee<sup>†</sup>

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

**Abstract** The present study was motivated by increasing demands on quantitative measurements of the heat flux through the water cooling and quenching process of hot steel. The local heat flux measurements are employed by a novel experimental technique that has a function of high-temperature heat flux gauge in which test block assemblies are directly used to measure the heat flux variation during water cooling and quenching of hot steel. The heat flux can be directly achieved by Fourier's law and is also compared with numerical estimation which is solved by inverse heat conduction problem (IHCP). The high-temperature heat flux gauge developed in this study can be applicable to measure cooling rate and history during the actual cooling applications of steel-making process. In addition, the measurement uncertainty of heat flux is calculated by a quantitative uncertainty analysis which is based on the ANSI/ASME PTC 19.1-2005 standard.

(Received October 4, 2010; Accepted October 29, 2010)

**Keywords:** Quenching, High-temperature, Heat flux gauge

### 1. 서 론

철강 제조공정에서 대부분의 강재는 강의 강도 및 인성과 같은 기계적 성질을 향상시키기 위해 강재의 급속 냉각공정을 필요로 하는데, 수분류 충돌 제트 또는 스프레이는 상변화(phase-change)를 동반하기 때문에 고온의 열원으로부터 열을 제거하는 대표적인 급속 냉각방법으로 매우 효과적으로 사용되어 왔다 [1-3]. 특히 수분류 충돌 제트 또는 스프레이를 이용한 고온 강판의 냉각에 관한 연구는 철강제조공정에서 냉각 효율 향상 및 냉각 제어에 필요한 기본 데이터를 제공하기 위해 연구되었다[2, 3]. 이와 같이 약 900°C 이상의 고온 영역에서 수냉각이 진행되는 냉각과정의 열유속 및 열전달계수를 측정하는 것은 강재의 급속 냉각 도중에 발생하는 냉각기구의 특성을 파악하고 보다 냉각을 엄밀하게 제어하기 위해 매우 중요하다.

급속 냉각과정에서의 열유속 정보를 얻기 위해 표

면온도를 측정해야 하는데, 이와 같은 냉각과정에서의 온도를 직접 측정하는 것은 거의 불가능하다. 고온 강재의 급속 냉각과정에서의 일반적인 온도 측정 방법으로는 열전대와 같은 접촉식 센서를 사용하는 방법과 적외선 온도계와 같이 비접촉식 온도 센서를 사용하는 방법이 있다. 하지만 실제 약 900°C 이상의 고온 영역에서 급속 냉각이 진행이 되는 동안 강재의 표면에 접촉식 온도센서를 부착하는 것은 냉각수 유동을 변화시키기 때문에 직접 적용하기 곤란하고, 비접촉식 적외선 온도계의 사용은 냉각 도중에 발생하는 수증기, 표면스케일 등의 영향으로 표면온도를 정확하게 측정할 수 없다. 따라서 지금까지 고온 강재의 급속 냉각 실험에서는 강재의 냉각이 진행되는 동안 동시에 여러 개의 내부 지점에서 온도를 기록하여 표면의 온도를 예측하는 역열전도 해석 기법(IHCP)을 일반적으로 사용하여 왔다[1, 4, 5].

강재의 급속 냉각과정에서의 표면 열유속, 열전달 계수와 같은 냉각 특성의 측정은 주로 1980년 이후

<sup>†</sup>E-mail : jungho@kimm.re.kr

일본의 철강사를 중심으로 진행되어 왔다[4, 5]. 대부분의 강재의 급속 냉각실험은 대개 가로 200 mm, 세로 200 mm, 두께 10 mm 정도의 스테인리스 강판을 가열 시편으로 이용하고 전기가열로에서 복사열에 의해 900°C 이상 고온 영역의 높은 온도로 균일하게 가열한 후에, 수분류 증돌제트나 스프레이를 표면에 분사하여 냉각 시작 이후 시간 변화에 따른 강판 내부의 온도를 측정한다. 이와 같이 기존의 급속 냉각측정은 가열 시편을 매 급속 냉각실험 때마다 교체해야 하기 때문에 측정에 많은 시간, 비용 및 노력을 필요로 하고 냉각 측정이 매우 번거로운 단점이 있다. 따라서 기존 가열시편의 단점을 보완하여 시편은 고온으로 가열하고 급속 냉각하는 일련의 과정을 반복적으로 수행할 수 있는 측정법이 필요하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 약 900°C 이상의 고온 영역에서 고온 발열하고 급속 냉각을 최소 20회 이상 반복적으로 수행할 수 있는 고온 열유속계이지를 개발하였다. 강재의 표면으로부터 0.5 mm와 1.5 mm 지점의 온도를 직접 측정할 후 푸리에 법칙을 이용하여 열유속을 직접 측정하였다. 그리고 실제 철강제조공정의 냉각공정으로의 적용 가능성을 확인하기 위해 수분류 스프레이 급속 냉각에 적용하여 열유속 측정법을 검증하였다. 여기서 표면 열유속은 푸리에 법칙을 사용하여 직접 계산된 열유속 결과를 기존의 역열전도 해석을 사용하여 계산된 결과와 비교하였으며, 열유속 측정에 관한 불확도를 제시함으로써 본 연구에서 개발된 열유속계이지의 측정이 급속 냉각측정에 적합함을 밝혔다.

## 2. 열유속계이지 개요

### 2.1 고온 열유속계이지 설계 및 제작

Fig. 1은 고온 열유속계이지의 시편 블록의 가공 형상을 나타낸다. 시편 블록은 최대 1,000°C 고온 영역까지 전기적으로 가열한 후 급속 냉각 실험을 진행하는 동안 열응력에 의해 발생하는 기하학적 변형을 최소화 하기 위하여 고안하였다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 가열 시편 블록은 직경 100 mm, 높이 60 mm를 갖는 원통 형상이다. 고온 가열과 급속 냉각을 반복적으로 사용할 수 있도록 가열 시

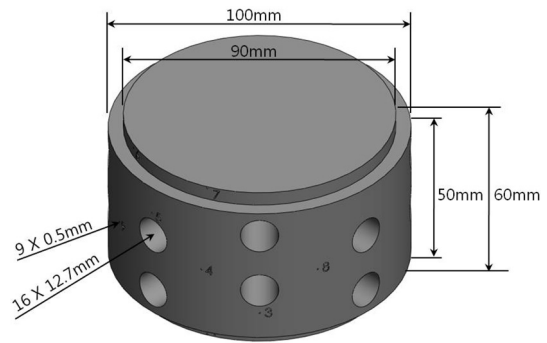


Fig. 1. Fabrication of test block.

편의 직경과 높이의 종횡비가 거의 1에 가까운 1.67의 값을 갖고, 실제 고온 가열 및 급속 냉각 이후에도 시편 블록의 기하학적 형상의 변화는 발생하지 않았다. 또한 급속 냉각 과정에서의 비오 수(Biot number)가 0.4 정도의 값을 갖기 때문에, 시편 블록 내부의 온도분포는 parabolic 한 형상이 아니고 표면에서의 큰 온도 기울기를 갖기 때문에 본 연구에서 채택된 시편 블록의 기하학적 형상은 급속 냉각실험에 적합하다고 할 수 있다.

대부분의 탄소강 급속 냉각 과정에서는 상 변태(phase transformation)에 의한 변태발열(transformational heat)이 발생하고, 이 때 발생하는 변태발열은 급속 냉각실험에 있어 추가적인 열 에너지를 제공하기 때문에 측정이 매우 까다로워진다. 따라서 본 연구에서 채택된 시편 블록은 강재의 급속 냉각 과정에서 발생하는 변태발열을 최소화 하기 위하여 상 변태가 거의 발생하지 않는 300계 스테인리스강(SUS316) 재질로 선택하였다.

시편 블록을 최대 1,000°C까지 주울 열 방식에 의해 직접적으로 가열하기 위해 직경 12.7 mm의 카트리지히터가 설치될 수 있도록 16개의 홀을 40 mm 깊이로 가공하였고, 전기적 가열 및 급속 냉각 과정에서의 시편 블록의 온도를 측정하기 위해 직경 0.5 mm의 열전대가 설치될 수 있도록 9개의 홀을 가공하였다. 또한 시편 블록을 냉각 장치에 설치하기 위해 상면 및 하면에 각각 5 mm의 단차 가공을 행하였다.

Fig. 2는 시편 블록, 카트리지히터, 열전대의 조합으로 고안된 고온 열유속계이지를 나타낸다. 본 연구에서 적용된 고온 열유속계이지는 최소 20회 이상

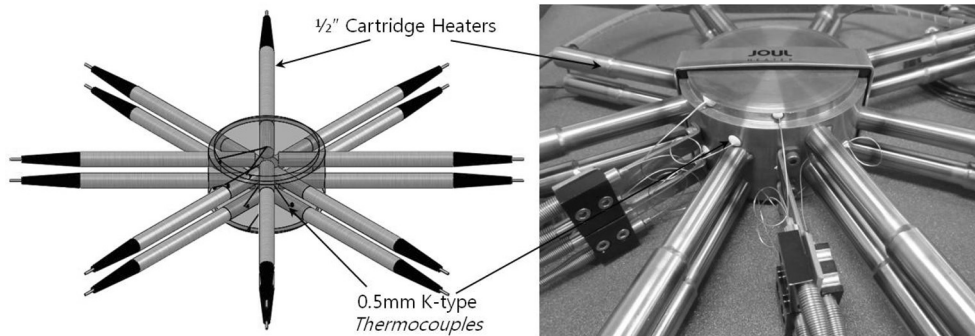


Fig. 2. Assemblies of the heat flux gauge with 16 cartridge heaters and 9 thermocouples.

반복적으로 사용이 가능하고, 기존의 고온 강재의 급속 냉각 및 열처리 실험에 사용된 일회용 시편과 비교하여 설치가 매우 용이하고 실험이 간편한 장점을 가지고 있다[6, 7]. 시편 블록을 최대 1,000°C 까지 주울 열 방식을 이용하여 전기적으로 가열하기 위해 직경이 12.7 mm 인 16개의 카트리지히터 (Joul® 사 90 Volt, 290 W 급 모델)를 시편 블록 내부에 간극이 발생하지 않도록 삽입하여 완전 고정하였다. 또한 카트리지히터를 이용하여 전기적 가열이 용이하도록 각 4개의 카트리지히터를 4개의 층으로 배열하였고, 시편 블록의 두께 방향으로의 가열이 매우 균일함을 확인하였다[7]. 가열 및 급속 냉각과정에서의 시편블록 내부에서의 온도 분포를 측정하기 위해 직경이 0.5 mm 인 9개의 K형 열전대 (OMEGA® 사 KMTXL-020G-6 모델)를 삽입하여 완전 고정하였다.

Fig. 3은 고온 열유속계지에 설치된 9개 열전대의 위치를 보여주고 있다. 여기서 T1부터 T7 열전대까지는 시편 블록의 정 가운데 지점에서의 두께 방향으로 배치하였고, T1과 T2 열전대는 시편 블록의 상부 표면으로부터 0.5 mm와 1.5 mm 지점, T3 열전대는 시편 블록의 1/4 두께 지점, 그리고 T4 열전대는 시편 블록의 1/2 두께 지점에 설치되었다. 시편 블록의 하부는 상부와 마찬가지로 T7, T6, 그리고 T5 열전대는 시편 블록의 하부 표면으로부터 각각 0.5 mm 지점, 1.5 mm 지점, 그리고 시편의 3/4 두께 지점에 설치되었다. 또한 T8과 T9 열전대는 시편 블록의 중간 평면에서 반경 방향으로의 온도를 측정하기 위하여, T4 열전대로부터 반경방향으로 각각 15 mm와 30 mm 떨어진 위치에 설치되었

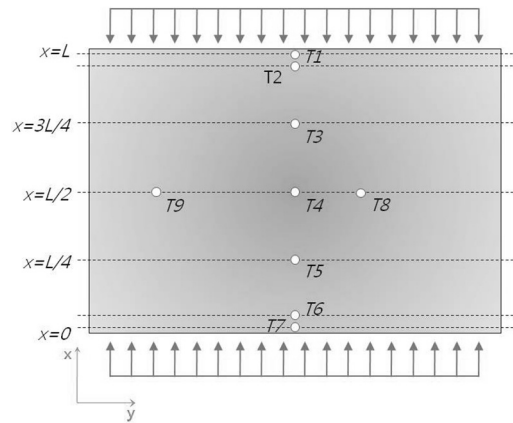


Fig. 3. Location of installed thermocouples in the heat flux gauge.

다. 시편 블록의 측면은 Cerakool® 단열재를 부착하여 고온 가열 및 급속 냉각과정에서의 단열 조건을 충분히 만족하도록 하였다. 실제 급속 냉각실험을 통하여 T8과 T9번 열전대의 온도가 T4 열전대와 거의 동일하다는 것을 저자의 선행연구를 통해 알 수 있다[6]. 따라서 본 연구에서는 급속 냉각실험이 진행되는 동안 반경방향 온도변화는 거의 무시할 수 있고, 열유속 측정은 두께 방향의 온도측정을 통한 1차원 열전달 해석만으로도 만족될 수 있다.

Fig. 4는 고온 열유속계지가 급속 냉각실험 장치에 설치된 사진이다. 시편 블록이 최대 1,000°C 까지 가열될 때, 급속 냉각실험 장치의 바닥면으로의 전도열전달에 의해 바닥면이 팽창하여 처짐이 발생할 수 있다. 이와 같은 처짐 현상을 피하기 위하여 급속 냉각실험 장치의 바닥면은 온도 변화에 따른 열팽창이 거의 없는 인바(Invar)를 적용하였고, 실제

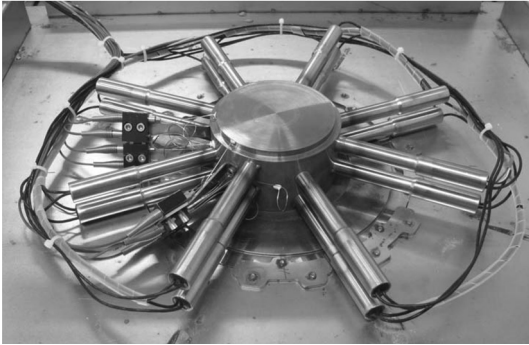


Fig. 4. Heat flux gauge setup on cooling apparatus.

고온 영역으로의 가열 전 후에도 바닥면의 처짐은 전혀 없음을 확인하였다.

또한 고온 열유속계이지는 급속 냉각이 적용되는 대상에 따라 설치될 수 있다. 특히 철강 제조공정 가운데 후판 가속냉각, 열연 ROT 냉각, 선재 바 냉각 및 연속주조 2차 냉각과 같은 급속 냉각공정에 물론 적용될 수 있으며, 상부 및 하부 냉각이 동시에 진행되는 경우에 고온 열유속계이지의 상면 및 하면에서 열유속을 각각 측정할 수 있는 장점을 갖도록 제작되었다.

## 2.2 열유속 측정법

본 연구에서 개발된 고온 열유속계이지를 급속 냉각실험장치에 설치한 후 전기적인 가열이 시작되고, 시편 블록의 내부 온도가 900°C 정도로 거의 균일하게 가열되면 급속 냉각실험을 시작할 수 있다. 수분류 충돌제트 또는 스프레이가 분출되어 고온 열유속계이지의 가열 표면에 닿기 시작하면서 급속 냉각이 시작된다. 이 때 고온 열유속계이지 내부의 각각 다른 위치의 9개 열전대는 시간 변화에 따른 각각의 온도 분포를 데이터로거에 저장하게 되며, 온도 데이터의 획득 속도는 급속 냉각실험의 조건에 따라 변경될 수 있지만, 온도측정에 사용하는 열전대의 시간 분해능에 의존하겠지만 고온 냉각의 경우 대개 초당 10개 정도가 적합하다.

일반적으로 수분류 충돌제트와 스프레이와 같은 강제 대류유동에 의한 급속 냉각은 정상상태와 비정상상태 측정법으로 구분될 수 있다. 정상상태 측정법은 시편 블록에 공급되는 입력 전력과 강제 대류유동에 의한 열전달의 열적 균형이 요구된다. 일반적으로 시

편 블록의 온도를 일정하게 유지하기 위해서 10<sup>7</sup> W 이상의 입력 전력이 요구되므로 실제 열전달 측정에서는 적용하기가 거의 불가능하다. 하지만 비정상상태 측정법에서는 시편블록을 높은 온도로 균일하게 가열한 후, 수분류 강제 대류유동에 의해 급속하게 냉각되고, 동시에 여러 개의 내부 지점에서 온도가 기록된다. 따라서 비정상상태 측정법은 큰 열전달이 수반되는 급속 냉각(quenching)에 적합하다[8].

본 연구에서는 고온 가열 및 급속 냉각과정에서 시편 블록의 폭 방향으로의 열전달이 두께 방향으로의 1차원 열전달을 고려하였다[6, 7]. 고온 열유속계이지를 이용한 열유속 측정은 푸리에 법칙을 적용하여 다음과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$q = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} = -k \frac{(T_{T1} - T_{T2})}{\Delta x} \text{ at upper surface} \quad (1)$$

$$q = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} = -k \frac{(T_{T7} - T_{T6})}{\Delta x} \text{ at lower surface} \quad (2)$$

여기서의 온도 차이는 상면의 경우에는 열유속계이지의 T1과 T2 열전대에서 얻어진 온도 차이를 의미하고, 하면의 경우에는 열유속계이지의 T7과 T6 열전대에서 얻어진 온도 차이로 결정된다. 왜냐하면 열유속계이지의 T1 열전대는 표면에서 0.5 mm 떨어진 지점에서의 온도로 고온 가열로부터 급속 냉각이 진행되는 동안 표면온도와 거의 동일하다고 가정할 수 있다. 따라서 표면 열유속을 결정하는 위의 식 (1)과 (2)에서의 온도 차이는 열유속계이지 내부 2개의 온도 정보로부터 결정될 수 있다.

## 2.3 불확도 평가

푸리에 법칙을 이용한 열유속 측정은 식 (3)과 같이 각각 3개의 독립변수로 구성되어진 함수관계로 표현할 수 있다.

$$q = f(k, \Delta T, \Delta x) \quad (3)$$

여기서 k는 열전도도,  $\Delta T$ 는 고온 열유속계이지에서 측정된 두 온도(T1, T2)의 차이,  $\Delta x$ 는 고온 열유속계이지의 측정 열전대 사이의 거리로 1.0 mm를 나타낸다. 또한 온도 측정 데이터의 획득 속도는 초당 10개를 기준으로 하였다.

	Nominal Value	Absolute Systematic Standard Uncertainty	Absolute Random Standard Uncertainty	Unit
Thermal conductivity of fluid, $k_f$	0	0	AIR WATER	W/(m·K)
Nozzle exit diameter, D	0	0	0	m
Heat transfer coefficient, h	0	0	0	W/(m <sup>2</sup> ·K)
<b>On/Off heat transfer coefficient dialog box</b>				
heat transfer coefficient, h				
Local wall temperature, $T_w$	0	0	0	°C
Jet exit temperature, $T_j$	0	0	0	°C
Heat flux, q	1637784.000	49161.907	0	W/m <sup>2</sup>
<b>On/Off heat flux dialog box</b>				
Heat flux, q				
Thermal conductivity, k	1.587E+1	1.530E-3	SUS304 SUS316	W/(m·K)
Temperature difference, $\Delta T$	5.160E+1	1.155E+0	0	°C
Distance, dx	5.000E-4	1.000E-5	0	m
<b>Heat Flux</b>		<b>1637784.000</b>		
<b>Combined Standard uncertainty</b>		<b>49161.907</b>		
<b>Relative Expanded Uncertainty (%)</b>		<b>5.883</b>		

Copyright (c) KIMM, 2010

Fig. 5. Uncertainty Analysis Program.

열유속 측정과 같이 단일계측요소의 조합으로 나타나는 식의 경우, 불확도 평가를 위해 각각의 측정인자에서 정확하고 체계적인 불확도 평가가 선행되어야 한다. 여기서 표준불확도는 관측값의 통계적인 분석으로 계산되는 A형 표준불확도와 측정기기 등으로부터 발생하는 B형 표준불확도로 나누어 계산하게 된다. 본 연구에서는 불확도 계산을 위해 먼저 각각 독립변수를 A형 표준불확도와 B형 표준불확도로 정의하고 표준불확도 계산을 수행하였다. 그리고 각각의 표준불확도를 합성 표준불확도로 계산한 후, 최종적으로 확장불확도의 형태로 나타내는 해석을 수행하였다. 여기서 열유속 측정의 불확실성 해석은 미국기계학회에서 추천하는 ASME PTC 19.1-2005를 기준으로 채택하였다[9].

본 연구에서는 고온 열유속계이지를 이용한 열유속 측정의 불확도 평가를 위해 불확도 해석 프로그램을 Visual Basic 6.0으로 작성하였다. Fig. 5는 본 연구에서 사용한 열유속 측정 불확도 해석프로그램의

일부분을 나타낸다. 이 프로그램은 크게 주 대화상자, 입력 대화상자, 그리고 결과 대화상자로 구성되며, 주 대화상자로부터 호출된 입력 대화상자에서 각각의 파라미터에 맞추어 A형과 B형 표준불확도로 분류하여 입력할 수 있다. 그리고 최종적으로 결과 대화상자를 통하여 계산된 불확도 성분을 확인할 수 있도록 작성되었다.

Table 1은 푸리에 법칙을 적용하여 직접 측정된 고온 열유속계이지의 열유속측정에 대한 불확도 평가 결과를 보여준다. 본 연구에서 개발된 고온 열유속계이지의 열유속 측정의 상대 합성 불확도는 4.40~8.97% 정도로 나타났다. 그리고 전체 불확도에 미치는 측정인자의 영향은 열전대 사이의 거리( $\Delta x$ )가 최대 4%로 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 두 열전대 사이의 온도 차( $\Delta T$ )가 최대 2.22% 정도로 영향을 미치는 것으로 해석되었다. 따라서 이와 같은 불확도 평가 결과로부터 고온 열유속계이지를 이용한 열유속 측정에 있어서 두 열전대 홀을 보다

**Table 1.** Results of uncertainty analysis of heat flux measurement

Individual Measurand		$\left  \frac{\delta x_i}{x_i} \frac{\partial q}{\partial x_i} \right  \times 100 (\%)$	
$x_i$	Unit	Min	Max
$k$	W/m · K	0.004	0.108
$\Delta T$	°C	1.02	2.22
$\Delta x$	mm	2.0	4.0
$4.40 \leq \frac{\delta q}{q} \leq 8.97 (\%)$			

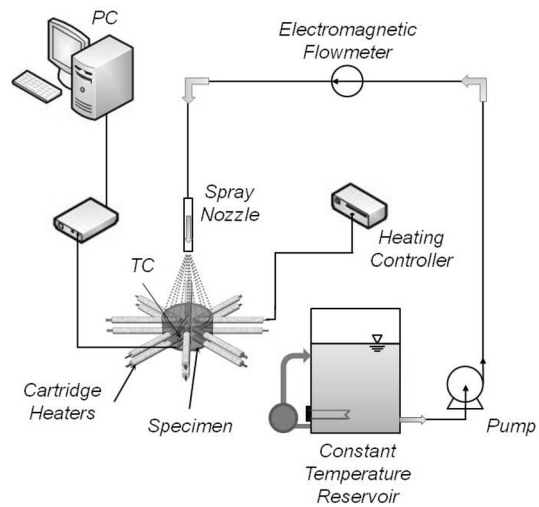
정밀하게 가공하고, 열전대를 설계한 위치에 보다 정확하게 설치하는 것이 열유속 측정의 불확도를 감소시키는 방법이라는 것을 암시한다.

### 3. 열유속계이지 적용 결과

#### 3.1 스프레이 급속 냉각 실험

본 연구에서 개발된 고온 열유속계이지를 스프레이 급속 냉각에 적용하여 열유속 측정에 대한 적합성을 검토하였다. 스프레이 급속 냉각 실험은 고온으로 가열된 표면의 정 가운데에서 수분류 스프레이가 충돌할 때 발생하는 열유속을 정량적으로 측정하였다. 본 연구에서 사용된 스프레이 냉각실험장치의 개략도는 Fig. 6에 잘 나타나 있다. 실험장치는 항온조, 펌프, 전기전자유량계, 스프레이 노즐, 열유속계이지의 기능을 가진 가열시편, 그리고 데이터 수집장치로 구성되어 있다.

항온조는 0.5°C 간격으로 수온을 일정하게 제어할 수 있으며, 100 liter 규모의 스테인리스 강 저장조로 되어 있으며 냉각수온의 가열 및 냉각을 목적으로 10 kW의 전기히터와 냉각기로 구성 되어 있다. 작동 유체인 냉각수는 전체수두가 약 100 m 인 입형다단 펌프(Grundfos® 사 CRN 1-15)에 의해 펌핑된다. 이 때의 냉각수 유량은 측정 불확도가 0.5% 인 전기전자유량계(Toshiba® 사 GF630A/LF600)를 통해 정밀하게 측정된다. 본 연구에서 스프레이 냉각 실험에서의 체적유량은 8 LPM으로 냉각수 온도는 25°C 조건으로 고정하였고, 이 때의 수분류 스프레이의 레이놀즈 수(Reynolds number)는 68,200 정도이다. 체적유량 측정에서의 불확도는 0.78%이며, 레이놀즈

**Fig. 6.** Schematic of experimental apparatus for spray quenching.

수의 불확도는 3.9%이다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이 수분류 스프레이는 거의 균일하게 가열된 열유속계이지 기능을 가진 가열 시편의 상면에 수직으로 분사된다. 상부 노즐의 출구로부터 충돌 가열면 사이의 거리는 300 mm로 고정하였다. 본 연구에서 사용된 스프레이 노즐은 내경이 2.9 mm 인 fullcone 형태의 스프레이 노즐(Everloy® 사 1/4 KS FHS 0865)을 사용하였다. 이 때의 수분류 스프레이의 질량유속은 약 1.15 kg/m<sup>2</sup>s, 스프레이 차압은 0.3 MPa에서 유지되었고, 스프레이 평균 입자직경은 약 300 μm이다.

#### 3.2 스프레이 급속 냉각 결과

수분류 스프레이 급속 냉각이 진행될 때 시간에 따른 온도분포는 Fig. 7에 나타나 있다. 스프레이 급속 냉각은 표면온도가 900°C 일 때 시작되고, 표면온도  $T_{surface}$ 와 표면에서 매우 가까운 T1 그리고 T2 온도는 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 T3와 T4 온도는 스프레이 냉각이 진행되는 동안 단순히 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 실제 냉각이 진행되는 동안 T1 온도는 표면온도와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 고온 열유속계이지의 T1 온도는 표면온도와 1% 이내의 오차를 가지고 있어 앞에서 가정한 T1 온도가 표면온도와 일치한다는 것이 검증됨을 알

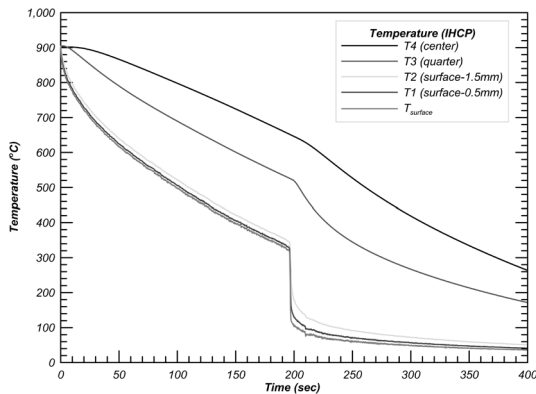


Fig. 7. Time-resolved temperature profiles during spray quenching.

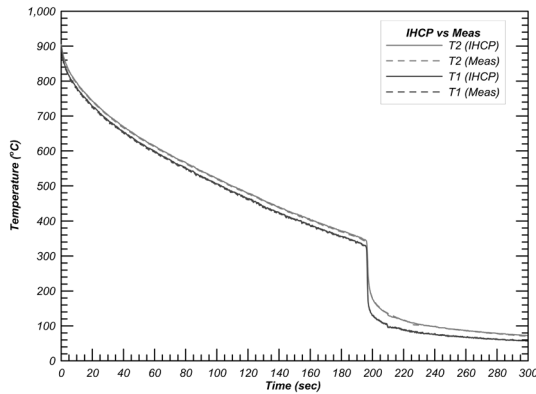


Fig. 8. Comparison of data reduction methods for temperature profile.

수 있다.

Fig. 8은 본 연구에서 고온 열유속계이지에서 직접 측정된 T1, T2 온도와 기존의 역열전도 해석을 통해 얻은 동일 지점에서의 온도를 비교하였다. 본 연구에서는 역열전도 해석을 수행하는 데 있어 Beck[10]이 제안한 sequential function specification method 를 적용하였으며, 이 방법은 이미 많은 문헌에서 검증된 것으로 알려져 있다[6,7].

T1과 T2 온도에서의 두 가지 방법의 온도 분포를 비교해 보면 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 고온 열유속계이지를 이용한 온도 측정이 기존의 역열전도 해석 방법과도 잘 부합된다. 또한 T1과 T2 온도는 거의 340°C 부근에서 급격하게 감소하기 시작한다. 이것은 막 비등에 의한 증기막이 사라지면서 스프레이에 의한 분

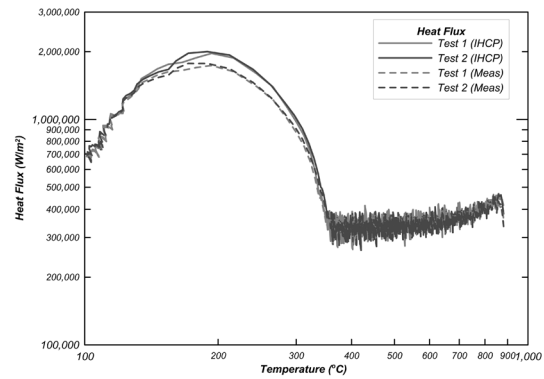


Fig. 9. Heat flux curve for repeated spray quenching.

무수가 직접적으로 고온의 표면에 접촉하는 천이 비등이 시작되는 것을 의미한다. 이와 같은 현상의 기존의 스프레이 급속 냉각의 비등 특성과 매우 잘 일치함을 알 수 있다[11, 12].

Fig. 9는 고온 열유속계이지의 푸리에 법칙을 이용해 직접 측정된 열유속과 역열전도 해석을 통해 얻은 열유속을 두 번의 반복 실험을 거쳐 비교하였다. TEST 1과 TEST 2의 두 번의 반복 실험을 통한 열유속 분포가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있고, 이것은 열유속계이지를 이용한 열유속 측정에 있어 높은 재현성을 보여주고 있다.

열유속곡선에서 임계열유속은 대략 200°C에서 관찰되는데, 이와 같은 임계열유속은 기존의 스프레이 문헌에서 제시된 경우와 거의 유사한 값을 갖는다 [11, 12]. 또한 열유속 곡선에서 알 수 있는 비와 같이 약 340°C 막 비등이 종료되는데, Fig. 8의 온도 분포에서 언급한 막 비등이 종료되는 온도와 정확하게 일치한다.

또한 푸리에 법칙으로 직접 측정된 열유속과 역열전도 해석으로 계산된 열유속을 비교하면, 임계열유속을 제외하고는 두 가지 방법이 매우 잘 일치하고 있다. 하지만 임계열유속에서는 역열전도 해석으로 계산한 방법이 약 15% 정도 큰 값을 보이는 데, 실제 역열전도 해석에서는 임계열유속을 결정하는 데 보다 큰 불확도를 동반하기 때문이다. 따라서 본 연구에서 사용된 고온 열유속계이지를 이용한 열유속을 측정하는 방법은 역열전도 해석에 의한 열유속 결정법에 비해서 보다 정확하게 열유속을 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 900°C 이상 고온 영역에서 역열전도 해석과 같은 기존의 열유속 측정에서 발생하는 오차를 감소하기 위해 초고온 열유속계이지를 개발하였고, 그 결과를 기존의 역열전도 해석을 통해 얻은 결과와 상호 비교하였다. 그 결과 고온 열유속계이지를 통해 직접 측정된 열유속은 역열전도 문제의 해를 통해 얻은 결과와 거의 동일한 분포를 보여준다. 특히 임계열유속 지점에서는 역열전도 해석 방법에 비해 보다 높은 신뢰성을 갖는 것으로 판단된다. 그리고 엄밀한 불확도 해석을 통하여 측정결과에 대한 높은 신뢰성을 확보하기 위해서는 열유속계이지 내부의 열전대 사이의 거리의 불확도를 최소화하는 것이 매우 중요하다 것을 밝혔다.

따라서 본 연구에서 개발된 고온 열유속계이지는 철강 제조공정의 후판, 열연, 선재, 그리고 연속주조 냉각공정과 같은 급속 냉각 과정에서의 열유속을 측정하는 데 직접적으로 적용할 수 있다. 또한 열유속 측정 불확도를 줄이면서 최소 20회 이상 반복적으로 사용할 수 있어 기존의 까다로운 열유속 측정 방법을 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 2009년 지식경제부 부품소재전문기업기

술지원사업의 “고온 발열용 카트리지히터 및 고온 열유속계이지 개발” 연구과제로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. I. Mizikar : Iron and Steel Engineer (1970) 53.
2. D. H. Wolf, F. P. Incropera, and R. Viskanta : Advances in Heat Transfer, **23** (1993) 1.
3. S-J. Chen and A. A. Tseng : Int. J. Heat Fluid Flow, **13** (1992) 358.
4. N. Hatta, J. Kokado, K. Hanasaki, H. Takuda, and M. Nakazawa : Tetsu-to-Hagane, **68** (1982).
5. N. Hatta, J. Kokado, H. Takuda, J. Harada, and K. Hiraku : Arch. Eisenhüttenwes, **55** (1984).
6. J. Lee : ISIJ Int., **49** (2009) 1920.
7. 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.
8. J. Taler : Int. J. Heat Mass Transfer, **39** (1996) 3733.
9. ASME : Test Uncertainty, ASME PTC-19.1 (2005).
10. J. V. Beck, B. Blackwell, and C. R. St. Clair, Jr. : Inverse Heat Conduction : Ill-posed Problems, A Wiley-Interscience, New York (1985) 108.
11. L. Bolle and J. C. Moureau : Spray Cooling of Hot Surfaces, Multiphase Science and Technology, **1** (1982) 1.
12. K. J. Choi and S. C. Yao : International Journal of Heat and Mass Transfer, **30** (1987) 311.