강재 열처리용 다점 열유속 측정 기술 개발

이정호[†] · 오동욱 · 도규형 · 김태훈
한국기계연구원

Development of Multi-point Heat Flux Measurement for Steel Quenching

Jungho Lee[†], Dong-Wook Oh, Kyu Hyung Do, Tae Hoon Kim

Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM), 171, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

Abstract The demand on quantitative measurement of the heat flux is motivated in making higher-quality steel product through a water quenching process of plate mill. To improve a spatial degree of heat flux measurement, the multi-point heat flux measurement was carried out by a unique experimental technique that has a combination of the existing single-point heat flux gauge. The corresponding heat flux can be easily determined by Fourier's law in a conventional way. The multi-point heat flux gauge developed in this study can be applicable to measure the surface heat flux, the surface heat transfer coefficient during a water quenching applications of steel-making process. The results exhibit different heat transfer regimes; such as single-phase forced convection, nucleate boiling, and film boiling, that are occurred in close proximity on the multi-point heat flux gauge quenched by water impinging jet.

(Received May 9, 2012; Revised June 24, 2012; Accepted July 7, 2012)

Key words:

1. 서 론

강재의 대표적인 열처리 공정은 강재의 강도, 인성 및 피로와 같은 기계적 성질을 향상시킬 수 있는 급속 냉각공정이다. 강재의 급속 냉각공정은 담금질을 비롯하여 연속적으로 잠열을 이용한 상변화를 동반하며 고온의 열원으로부터 열을 효과적으로 제거하는 수분류 충돌 제트 또는 스프레이 냉각 방법이 대표적으로 사용되고 있다[1-3]. 강재 제조공정에서 냉각능 향상 및 제어에 필요한 정량적인 데이터를 제공하기 위해 수분류 충돌 제트 또는 스프레이를 이용한 고온 강관의 냉각에 관한 연구는 최근 까지 도 계속 연구되고 있다. 특히 강재 냉각과정에서의 열전달을 정량적으로 측정할 수 있으면, 강재 급속 냉각과 같은 열처리 과정에서 발생하는 냉각기구의 특성을 엄밀하게 파악할 수 있게 된다. 강재의 급속 냉각과정에서의 열유속 정보를 얻기 위해 표면온도를 측정해야 하는데, 이와 같은 냉각과정에서의 온도를 직접 측정하는 것은 거의 불가능하다. 고온 강재의

급속 냉각과정에서의 일반적인 온도 측정법으로는 열전대와 같은 접촉식 센서를 사용하는 방법과 적외선 온도계와 같이 비접촉식 온도 센서를 사용하는 방법이 있지만, 거의 적용이 불가능한 것으로 알려져 있다. 하지만 지금까지 개발된 강재 냉각의 정량적인 측정 방법은 주로 단일 측정점(single-point)에서의 열전달 정도를 측정하는 열유속게이지 또는 열유속센서가 이용되고 있다.

단일 측정점에서의 고온 강재의 냉각 특성을 측정하는 고온 열유속게이지는 저자의 선행 연구에서 나타난 것과 같이, 약 900°C 이상의 고온 영역까지 가열이 가능하고 급속 냉각을 최소 20회 이상 반복적으로 수행할 수 있는 고온 열유속게이지가 개발되었다[4]. 강재의 표면의 중심이 되는 단일점에서 깊이 방향으로 0.5 mm와 1.5 mm 지점의 온도를 직접 측정한 후, 푸리에 법칙(Fourier's law)을 이용하여 열유속을 측정하는 방법을 통하여, 실제 철강 제조공정의 후관 가속냉각공정에 적용하여 열유속 측정 방법을 검증하였다. 여기서 표면 열유속은 푸리에 법칙

[†]Corresponding author. E-mail : jungho@kimm.re.kr

을 사용하여 직접 얻어진 열유속 값과 기존의 역열전도 해석을 사용하여 계산된 결과와 비교하였으며, 더불어 열유속 측정에 관한 불확도를 제시함으로써 단일점에서의 열유속게이지의 측정이 급속 냉각 특성을 파악하는 데에 적합함을 밝혔다[4].

하지만 단일점에서의 열전달 특성을 파악하는 것만으로 강재의 냉각 특성을 규명하기에는 많은 제약이 있다. 따라서 본 연구에서는 강재의 다점에서 냉각 특성을 동시에 측정할 수 있는 다점 열유속게이지를 설계하고 시제품을 제작함으로써, 강재의 다점에서의 냉각 특성을 파악할 수 있는 다점 열유속 측정 기술을 개발하였다.

2. 다점 열유속 측정

2.1 다점 열유속게이지 설계

Fig. 1은 다점 열유속게이지의 시편 블록이 나타나 있다. 저자의 지난 연구에서 개발된 단일점 열유속게이지와 다르게, 다점 열유속게이지의 시편 블록은 원통형이 아닌 정사각형 형태의 정육면체 형상을 선택하였다. 다점 열유속게이지의 경우에는 시편 블록의 표면에 가까운 위치에 다수의 열전대를 설치해야 하기 때문에, 열전대 홀을 가공하는데 원통형 보다는 사각형이 유리하기 때문이다. 또한 최대 1,000°C 고온 영역까지 전기적으로 가열한 후 급속 냉각하는 반복 과정 동안 열응력에 의해 발생하는 기하학적 변형을 최소화 하기 위하여 정육면체 형상으로 고안하였다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 시편 블록은 가로, 세로, 그리고 높이가 100 mm인 정육면체 형상이다. 대부분의 탄소강의 냉각 과정에서는 상 변태(phase transformation)에 의한 변태 발열(transformational heat)을 최소화 하기 위해 강재의 급속 냉각과정에서 상 변태가 거의 발생하지 않는 300계 스테인리스 강(SUS316)을 시편 블록의 재질로 선택하였다.

시편 블록을 최대 1,000°C까지 가열하는 데에는 주울 열(Joule's heating) 방식을 이용한 카트리지 히터를 사용하였다. 직경 25.4 mm, 출력 20 W/cm²의 4개의 카트리지 히터가 설치될 수 있도록 시편 블록에 4개의 홀을 관통하여 가공하였다. 열유속게이지의 설계에 있어 고온에 이르는 시편 블록은 충분

Fig. 1. Geometric design for heating simulation of multi-point heat flux gauge.

히 균일하게 가열되어 시편 블록 내에 온도 편차를 최소화 하는 것이 중요하다. 따라서 시편 블록의 가열 온도 편차를 최소화 하기 위해 카트리지 히터를 이용한 가열 시뮬레이션을 수행하였고, 고온 열유속게이지의 가열과정에서의 열전달 해석을 위해 다중물리해석을 수행할 수 있는 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics®를 사용하여 개발하고자 하는 고온 열유속게이지의 가열 특성을 수치해석적으로 시뮬레이션 하였다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 시편 블록의 상면으로부터 카트리지 히터가 설치되는 거리를 a , 측면으로부터 거리를 b 라고 정의하고, 각각 10, 15,

그리고 20 mm 위치에서의 가열 시뮬레이션을 통해 가열에 따른 온도 편차가 최소화 할 수 있는 조건을 선정하였다.

2.2 고온 가열 시뮬레이션

본 연구에서는 카트리지 히터를 이용하여 시편 블록을 가열하는 전산모사를 하기 위해 유한요소법 (finite element method, FEM)에 기반을 둔 COMSOL Multiphysics®를 이용하여 전산모사를 수행하였다. COMSOL Multiphysics®는 편미분 방정식으로 구현된 물리현상을 시뮬레이션 할 수 있는 모델링 패키지 소프트웨어로서, 솔버 기능을 제공하

고 선 정의(pre-defined) 되어 있는 다중 물리식을 이용하여 복합적으로 구현하고자 하는 모델을 구현할 수 있다.

본 연구에서는 3차원 열전달 해석에 대하여 다음과 같은 에너지 방정식을 사용하여 가열문제에 접근하였다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (1)$$

여기서 ρ 는 밀도, c_p 는 비열, k 는 열전도도, 그리고 Q 는 열 생성을 의미한다. 또한, 고온 열유속계이지와 외부의 경계조건은 시편 블록의 상면, 하면, 그리고

Fig. 2. Electric heating simulation of multi-point heat flux gauge for 2 x 2 cartridge heaters.

측면으로 구분하여 시뮬레이션을 수행하였다. 가열 과정에서 시편 블록의 상면과 하면은 주위 공기에 노출되어 있기 때문에 공기 중의 자연 대류에 의한 열전달계수를 채택하였다. 이 때 상면의 경우 대류 열전달계수는 $17 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 값을 적용하였고, 하면의 경우 대류 열전달계수는 $3 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 값을 적용하였다[5]. 가열 시편 블록의 측면은 가열 과정 동안에 다음과 같이 완전 단열조건을 적용하였다.

$$n \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (2)$$

Fig. 2는 가열 과정에서 시편 블록의 온도분포를 시뮬레이션한 결과를 보여주고 있다. Fig. 2의 (a)부터 (e)는 가열 시작 후 100초 부터 500초까지 100초 단위로 보여주고 있다. COMSOL을 이용한 전산 모사에서 시편 블록의 4개의 카트리지 히터가 놓이는 위치에 20 W/cm^2 의 출력을 갖는 카트리지 히터를 작동한 결과를 의미한다. 가열 과정에서의 시편 블록 내부의 온도 분포가 비교적 일정한 것으로 나타났다, 정육면체 형상의 시편 블록에 20 W/cm^2 의 출력을 갖는 4개의 카트리지 히터를 이용하여 약 10분 이내에 가열 목표 온도인 $1,000^\circ\text{C}$ 정도까지 비교적 균일한 가열이 가능함을 파악할 수 있다.

Fig. 3은 카트리지 히터의 배열 변화에 따른 시편 블록의 상면에서 1 mm 직하 지점에서의 폭 방향의 온도분포를 전산 시뮬레이션한 결과를 나타낸다. 실제 다점 열유속게이지에 설치되는 두께 방향의 열전대는 상면에서 1 mm 지점과 2 mm 지점에 설치되고, 카트리지 히터의 배열 변화에 따른 표면온도의 변화를 상면에서 1 mm 지점에 위치한 열전대를 통해 측정되는 온도를 표면온도와 거의 가깝다는 가정 하에서 1 mm 지점에서의 온도분포를 시뮬레이션 하였다. 시편 블록을 $1,000^\circ\text{C}$ 까지 가열한 전산 시뮬레이션 결과, 카트리지 히터가 배열되는 위치가 $a = 20 \text{ mm}$, $b = 10 \text{ mm}$ 경우와 $a = 20 \text{ mm}$, $b = 15 \text{ mm}$ 경우에 폭 방향으로의 온도 편차가 적은 것으로 나타났으며, 나아가 $a = 20 \text{ mm}$, $b = 12.5 \text{ mm}$ 인 경우에 가열에 따른 온도 편차가 가장 적게 발생함을 알 수 있다.

2.3 다점 열유속게이지 제작

Fig. 4는 제작된 다점 열유속게이지의 개략도를 보

Fig. 3. Surface temperature distribution of multi-point heat flux gauge with different position of cartridge heater installation.

Fig. 4. Fabrication of multi-point heat flux gauge.

여 주고 있다. 본 연구에서 적용된 다점 열유속게이지는 최소 20회 이상 반복적으로 사용이 가능하도록 제작되었고, 저자의 선 연구에서 개발된 고온 열유속게이지와 같이 기존의 고온 강재의 급속 냉각 및 열처리 실험에 사용 가능하고 열유속 측정이 간편한 장점을 가지고 있다. 시편 블록을 최대 $1,000^\circ\text{C}$ 까지 주열 방식을 이용하여 전기적으로 가열하기 위해 직경 25.4 mm, 길이 220 mm 인 4개의 카트리지 히터(Joul®사 20 W/cm^2 급 모델)를 시편 블록

내부에 간극이 발생하지 않도록 삽입하여 완전 고정하였다. 또한 카트리지 히터를 이용하여 전기적 가열이 용이하도록 각 2개의 카트리지 히터를 상부 및 하부 2개의 층으로 배열하였다. 앞의 Fig. 3에서 나타난 카트리지 히터의 배열 변화에 따른 가열 전산 시뮬레이션 결과를 바탕으로, 실제 다점 열유속게이지의 카트리지 히터의 배열은 시편 블록의 구조적인 안정성을 고려하여 $a = 20 \text{ mm}$, $b = 10 \text{ mm}$ 경우를 채택하여 제작하였다. 다점 열유속게이지 고온 가열 시뮬레이션 결과와 같이, 실제 시편 블록의 두께 방향으로의 가열이 비교적 균일함을 확인하였다.

가열 및 급속 냉각과정에서의 시편블록 내부에서의 온도 분포를 측정하기 위해 직경이 0.5 mm 인 18개의 K형 열전대(OMEGA®사 KMTXL-020G-6)를 50 mm 의 깊이 까지 삽입하여 완전 고정하였다. 시편 블록의 중심점에서의 9점의 다점에서의 온도를 측정하기 위해 직경 0.5 mm 의 다수의 열전대가 설치될 수 있도록 시편 블록의 좌측 및 우측으로부터 18개의 홀을 가공하였다. 또한 시편 블록을 지지 및 고정을 목적으로 상면 및 하면에 각각 5 mm 의 단차 가공을 추가하였다.

Fig. 5는 제작된 다점 열유속게이지의 제작된 사진을 보여 주고 있다. Fig. 4에서 언급한 바와 같이 다점 열유속게이지는 정육면체 형상의 시편 블록, 4개의 카트리지히터, 그리고 9개 지점에서의 열유속을 측정할 수 있는 센서로 구성되어 있다. 실제 강재의 급속냉각이나 열처리가 진행될 때, 다점 열유속게이지의 시편 블록 측면은 Cerak wool® 단열재를 부착하여 고온 가열 과정에서의 단열 조건을 충분히 만족하도록 하였다. 시편 블록이 최대 $1,000^\circ\text{C}$ 까지 가열될 때, 열유속게이지가 설치된 면으로의 전도열전달에 의해 설치된 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 고온 영역으로의 가열 전/후에도 바닥면의 처짐은 전혀 없음을 확인하였다. 나아가 다점 열유속게이지는 강재의 급속 냉각 또는 열처리가 적용되는 대상에 따라 설치될 수 있다. 특히 철강 제조과정 가운데 후판 가속냉각, 열연 ROT 냉각, 선재 바 냉각 및 연속주조 2차 냉각과 같은 급속 냉각공정에 물론 적

(a) Top view

(b) Side view

Fig. 5. Photo of the multi-point heat flux gauge.

Fig. 6. Location of installed thermocouples in the heat flux gauge.

용될 수 있다.

Fig. 6는 고온 열유속게이지에 설치된 9개 지점에서의 열전대의 위치를 보여주고 있다. 18개의 열전

대는 시편 블록의 정 가운데 지점에서의 폭 방향으로 각각 쌍으로 배치되어 있다. 특히 폭 방향으로의 열유속을 측정하는 데 사용되는 열전달 쌍은 T1 지점에서 T6 지점까지는 3 mm 간격으로 배치되었고, T6 지점부터 T9 지점까지는 5 mm 간격으로 배치되었다. 9개의 지점에서 열전달 쌍은 시편 블록의 상부 표면으로부터 두께 방향으로 1 mm와 2 mm 위치에 설치되었다. 이와 같이 두께방향으로의 2개의 열전달 쌍으로 부터 열전달 측정은 푸리에 법칙을 이용하였다. 여기서 푸리에 법칙은 정상상태에서의 열전달 문제에서만 적용이 가능하지만, 철강 냉각과정과 같은 비정상상태의 고온 냉각 문제의 열유속 측정에 관례적으로 사용되어 왔다.

본 연구에서 강제 열처리용 다점 열유속게이지를 이용한 열유속 측정은 푸리에 법칙을 적용하여 다음과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$q \equiv -k \frac{\Delta T}{\Delta x} = -k \frac{(T_{upper} - T_{lower})}{\Delta x} \quad (3)$$

여기서 k 는 열전도도, ΔT 는 다점 열유속게이지의 각각의 지점에서 측정된 온도 차이, Δx 는 고온 열유속게이지의 측정 열전대 사이의 거리로 1.0 mm를 나타낸다. 이때의 온도 차이는 ΔT 는 열유속게이지의 T1 지점에서부터 T9 지점까지 열전대 쌍의 두 개의 위 아래 열전대에서 얻어진 온도 차이로 결정된다. 이와 같이 다점 열유속게이지에 표면에서 1 mm 떨

어진 지점에서의 측정되는 온도는 고온 가열로부터 급속 냉각이 진행되는 동안 표면온도와 유사하다는 가정 아래에서 적용이 가능하다.

3. 다점 열유속게이지 적용 결과

3.1 충돌제트 급속 냉각

본 연구에서 개발된 다점 열유속게이지를 충돌제트 급속 냉각에 적용하여 열유속 측정에 대한 적합성을 검토하였다. 충돌제트 급속 냉각은 고온으로 가열된 다점 열유속게이지의 표면의 정 가운데에 단일 제트가 충돌할 때 발생하는 급속 냉각에 따른 정체점에서 부터 폭 방향으로의 열유속을 정량적으로 측정하였다.

본 연구에서 사용된 충돌제트 급속 냉각 실험장치의 개략도는 Fig. 7에 잘 나타나 있다. 실험장치는 항온조, 펌프, 전기전자유량계, 제트 노즐, 다점 열유속게이지, 그리고 데이터 수집장치로 구성되어있다. 항온조는 0.5°C 간격으로 수온을 일정하게 제어할 수 있으며, 100 l 규모의 스테인리스 강 저장조로 되어 있으며 냉각수의 가열 및 냉각을 목적으로 10 kW의 전기히터와 냉동기로 구성되어 있다. 작동유체인 냉각수는 전체수두가 약 100 m 인 입형 다단 펌프(Grundfos®사 CRN 1-15)에 의해 노즐로 이송된다. 이 때의 냉각수 유량은 측정 불확도가 0.5% 인 전기전자유량계(Toshiba®사 GF630A/LF600)를 통해 측정된다. 본 충돌제트 급속 냉각 측정에서 사

Fig. 7. Schematic of experimental apparatus for jet impingement quenching.

용된 냉각수의 체적유량은 2.97 LPM 으로 냉각수 온도는 17°C 조건으로 고정하였고, 이 때의 충돌제트의 레이놀즈 수(Reynolds number)는 20,000 이다. 체적유량 측정에서의 불확도는 약 0.8%이며, 레이놀즈 수의 불확도는 약 3%이다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 충돌제트는 거의 균일하게 가열된 다점 열유속게이지의 상면에 수직으로 분사된다. 상부 노즐의 출구로부터 충돌면 사이의 거리는 300 mm로 고정하였고, 충돌제트 노즐은 내경이 3 mm 인 원형 파이프 노즐을 사용하였다.

급속 냉각 측정은 다점 열유속게이지를 급속 냉각 실험장치에 설치한 후, 가열이 시작되고 다점 열유속게이지 시편 블록의 내부 온도가 900°C 정도로 거의 균일하게 가열되면 급속 냉각을 시작하였다. 충돌제트가 분출되어 다점 열유속게이지의 표면에 닿기 시작하면서 급속 냉각이 시작된다. 이 때 다점 열유속게이지 내부의 각각 다른 위치 9개 지점에서의 열전대 쌍은 시간 변화에 따라 각각의 지점에서의 온도 분포를 데이터 로거에 저장하게 되는데, 온도 데이터는 초 당 10개로 획득되고 실시간으로 저장되었다.

3.2 충돌제트 급속 냉각 결과

충돌제트에 의한 급속 냉각이 시작된 이후 제트가 직접 충돌되는 정체점으로부터 폭 방향으로 설치된 다점 열유속게이지의 시간에 따른 온도분포는 Fig. 8에 나타나 있다. 충돌제트 급속 냉각은 다점 열유속게이지의 표면온도가 900°C에 도달하여 충분히 균일한 온도에 이르렀을 때 시작되고, 실제 표면온도에서 1 mm 떨어진 지점에 위치한 T_{upper} 온도를 표면온도로 근사하였다. 폭 방향으로의 9개의 지점은 정체점으로부터 떨어진 거리를 노즐 직경으로 무차원화하여 표시하였다. 따라서 정체점인 T1 지점은 $r/d = 0$ 에 해당되고, 정체점으로부터 30 mm 떨어진 T9 지점은 $r/d = 10$ 에 해당된다.

충돌제트 급속 냉각이 시작되면서 정체점으로부터 급속 냉각이 시작되어 폭 방향으로 냉각수가 흐르기 때문에 충돌제트에 의한 냉각 속도는 폭 방향으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 특히 정체점으로부터 $r/d = 5$ 까지는 냉각이 급속하게 발생함을 알 수 있고, 폭 방향으로 멀어질수록 냉각이 서서히 진행됨을 알

Fig. 8. Time-resolved temperature distributions.

Fig. 9. Time-resolved surface heat flux distributions.

수 있다. 정체점에서는 냉각이 시작 된 후 2 초 이내에 표면온도가 900°C에서 200°C 이하로 급속 냉각이 진행되어, 냉각이 시작된 직후에 핵 비등 현상이 나타남을 알 수 있다. 이와 같이 다점 열유속게이지를 이용하여 정체점을 비롯하여 급속 냉각이 진행되는 동안의 폭 방향으로의 냉각 현상 또한 측정할 수 있다. 따라서 기존의 단일점에서의 고온 열유속게이지가 갖는 측정 한계를 극복할 수 있다.

Fig. 9는 다점 열유속게이지를 이용하여 9개 지점에서 푸리에 법칙을 이용해 직접 측정한 열유속을 시간 변화에 따라 나타내고 있다. 최대 열유속이 발생하는 것을 의미하는 임계 열유속(critical heat flux)은 정체점에서 가장 먼저 나타나고, 폭 방향으로 나아갈 수록 늦게 나타나는 것을 알 수 있다. 최대 열유속의 크기 또한 정체점에서 약 5.4 MW/m²로

Fig. 10. Heat flux curve for jet impingement quenching.

가장 크게 나타났고, 정체점에서 가장 떨어진 $r/d = 10$ 인 지점에서는 약 2.5 MW/m^2 로 정체점에 비해 절반 이하의 크기를 가짐을 알 수 있다. 따라서 시간 변화에 따른 폭 방향으로의 비등 현상 또한 서로 다르게 나타난다. 정체점에서는 충돌제트에 의한 급속 냉각이 시작되고 매우 짧은 시간에 핵 비등이 지속적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 정체점에서 비교적 가까운 $r/d = 5$ 까지는 냉각이 시작되자마자 약 3초 정도 이내에 핵 비등 현상이 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 정체점에서 비교적 벗어난 $r/d = 10$ 에서는 충돌제트에 의한 급속 냉각이 시작되고 최대 열유속이 발생하는 임계 열유속은 비교적 늦게 발생함을 알 수 있는데, 냉각 시작 직후에는 지속적으로 막 비등에 의해 지배되고 일정한 시간이 지난 이후에 천이 비등 그리고 핵 비등 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 다점 열유속계이치를 통한 9개 지점에서의 열유속 곡선을 보여주고 있다. 열유속 곡선은 대부분 비등 곡선을 의미하고 표면 온도 변화에 따른 비등 현상을 설명한다. 본 그림에서는 정체점으로부터 폭 방향으로 위치에 따른 열유속 곡선을 잘 나타내고 있다. 정체점에서 비교적 가까운 $r/d = 5$ 까지는 최대 열유속을 의미하는 임계 열유속이 $600 \sim 700^\circ\text{C}$ 사이에서 발생하는 것을 알 수 있다. 정체점에서의 냉각 현상을 설명하는 대부분의 기존 연구에서 나타나 있는 핵 비등이 발생하는 온도와 거의 일치함을 잘 알 수 있다 [6-8]. 하지만 기존 연구에서 나타나 있지 않은 정체점에서 비교적 벗어난 r/d

$d = 10$ 에서는 임계 열유속이 $400 \sim 500^\circ\text{C}$ 이하의 낮은 온도에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 다점 열유속계이치를 이용한 열유속을 측정하는 방법은 단일점에서의 급속 냉각에 따른 비등 현상에 관한 정보 뿐만 아니라 폭 방향으로 발생하는 복잡한 비등 현상을 측정할 수 있는 뚜렷한 장점을 갖는다.

4. 결 론

본 연구에서는 900°C 이상 고온 영역에서 단일점에서 주로 측정할 수 있는 고온 열유속계이치의 공간적인 측정 한계를 극복하기 위해 다점에서 동시에 강재의 급속 냉각 또는 열처리 과정에서 열전달을 정량적으로 측정할 수 있는 다점 열유속계이치를 개발하였다. 실제 다점 열유속계이치의 설계 과정에서 다중 물리현상의 전산 시뮬레이션을 통해 균일 가열에 필요한 조건을 결정하였고, 다점 열유속계이치의 제작 과정에서 충분히 균일 가열에 적합함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 다점 열유속계이치는 철강 제조공정의 후판, 열연, 선재, 그리고 연속 주조 냉각공정과 같은 급속 냉각 과정에서의 열유속을 측정하는데 직접적으로 적용할 수 있을 뿐만 아니라 강재 열처리가 요구되는 공정에 확대 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 에너지기술개발사업의 “고효율 무교정 후판 가속냉각 제어기술” 연구과제의 지원으로 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. J. Lee : J. the Korean Society for Heat Treatment, **23** (2010) 323.
5. W. H. McAdams : *Heat Transmission*, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, Chap. 7 (1954).

6. N. Hatta, J. Kokado, K. Hanasaki, H. Takuda, and M. Nakazawa : Tetsu-to-Hagane, **68** (1982).
7. N. Hatta, J. Kokado, H. Takuda, J. Harada, and K. Hiraku : Arch. Eisenhttenwes, **55** (1984).
8. D. A. Zumbrennen, F. P. Incropera and R. Viskanta : Experimental Thermal and Fluid Science, **3** (1990) 202.