수치해석을 통한 유도가열 코일의 설계 및 설계인자의 민감도 해석

오동욱 · 김태훈 · 도규형 · 박장민 · 이정호[†]

한국기계연구원

Design and Sensitivity Analysis of Design Factors for Induction Heating System

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

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

Abstract Rapid and homogeneous heating in heat treatment has been a challenging engineering issue throughout a heating temperature over 1,000°C. Induction heating has been widely used in field of heat treatment compared with conventional heating system. Advantages in homogeneous heating, simple fabrication, and repeatable use can be efficiently made with the induction heater. In this paper, numerical analysis of an induction coil system for heat flux gauge heating is performed. The effect of configuration on the heating performance was considered in various cases of the coil radius, distance between the winding, relative height difference between the heat flux gauge and the coil, and the applied current frequency. Temperature distribution within the heat flux gauge at frequency-steady state was calculated with a finite element method. Sensitivity analysis was also performed and the relative importance of 2 key parameters; coil radius, distance between the winding, were taken as main contributors for induction heating.

(Received July 17, 2012; Revised July 29, 2013; Accepted August 6, 2013)

Key words : Multi-physics simulation, induction heating, heat flux gauge

1. 서 론

최근 조선용, 건축 구조물용 그리고 플랜트용 강재는 보다 높은 강도와 인성이 요구되는 추세에 있다. 단순한 강도의 증가뿐만 아니라 항복강도, 가공성, 용접성 등 향상된 강재 특성이 요구되고 있다. 지난 지난 2000년 이후 에너지 자원의 개발, 환경의 가혹화, 에너지 절약 및 대체 에너지 개발 등을 위하여 향상된 인성과 낮은 탄소당량의 새로운 형태의 고장력강 수요가 지속적으로 늘어나고 있는 실정이다. 이러한 고장력강을 제조하기 위하여 제어압연과 각종 열처리를 포함하는 제어냉각 공정이 요구된다. 이와 같은 강재의 제어냉각 공정은 일반적으로 TMCP (thermo-mechanical controlled process)라고 한다. TMCP는 가공과 열처리를 동시에 행하는 공정으로, 제어압연(controlled rolling), 재결정 제어압연(recrystallization controlled rolling), 가속냉각

(accelerated cooling), 담금질(direct quenching/reheated quenching) 등의 공정을 포함하게 된다. 또한 넓은 의미에서 보면 A_{r3} 온도 이하에서 행하여지는 ausforming, marforming, zerolling 등의 가공열처리도 TMCP에 포함될 수 있다. TMCP 강재의 강도 및 인성 등 기계적 물성은 냉각속도와 밀접한 연관이 있다. 최근 세계 대부분의 철강사의 냉각공정에서는 냉각속도를 증가시키는 방향으로 발전하고 있다[1].

대부분의 급속 냉각공정에 있어 냉각수 유동제어 및 냉각수와 강재 표면 사이 열저항 역할을 하는 증기막 층과 체류수를 제거하는 것이 핵심 기술로 알려져 있다[2]. 최근 심해저 해양플랜트 시장이 확대됨에 따라 두께 60 mm의 후판 수요가 지속적으로 증가했다. 이에 따라 TMCP 공정용 냉각노즐과 같은 새로운 냉각기구 및 냉각시스템의 개발이 요구되고 있다. 새로운 냉각기구 개발에 있어서 반드시

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

이에 대한 판재의 냉각능 측정 및 평가가 이루어져야 한다. 저자들은 이미 실험실 규모에서 간단하고 빠르게 냉각기구의 성능을 평가할 수 있는 열유속게이지를 개발한 바 있다. 본 연구에 앞서 기 개발된 열유속게이지는 실험실 및 강재 냉각공정에서 직접 적용하여 열유속을 측정할 수 있고, 정사각형 혹은 원형 실린더 형상을 가지고 있으며, 실제 TMCP 공정에서 강재의 냉각이 시작되는 온도인 약 1000°C 까지 가열이 가능하고, 냉각능 시험이 약 20회 정도 반복적으로 사용할 수 있으며, 여러 개의 카트리지히터를 열유속게이지에 삽입 및 고정하여 가열하는 형태이다[3].

카트리지히터를 이용한 열유속게이지의 경우, 목표 가열온도까지 열유속게이지를 가열하는데 10분 내로 신속하게 가열할 수 있는 장점을 갖고 있지만, 900°C 이상 고온에서 반복 사용시 카트리지히터의 절연 파괴로 인한 열유속게이지의 수명이 줄어드는 단점이 있다. 또한 카트리지히터가 시편 내부의 약 20~30%에 해당하는 부피를 차지하기 때문에 열유속게이지 내부 여러 점에서 온도를 측정하기 위한 열전대(thermocouple)를 설치할 때 카트리지히터와 열전대의 간섭이 발생할 수 있다. 이와 더불어, 열유속게이지 전체를 단일 물질로 가정하여 계산하는 역 열전도(inverse heat conduction) 해석을 통하여 열유속게이지 표면의 열유속 계산시, 큰 오차를 유발할 수 있다. 이와 같은 문제점들을 해결하기 위하여 본 연구에서는 유도가열방법을 이용하여, 열유속게이지를 가열하는 방법을 고안하였고, 수치해석적 방법을 통해 유도가열에 의한 열유속게이지의 적용 가능성을 확인하였다. 다양한 가열 시편 형상에 대한 유도가열 코일 설계와 관련하여 기존에 많은 연구가 상용 유한요소해석 툴을 이용하여 진행되었다[4-5]. 최근 들어 전자기 및 열전달 현상을 커플링하여 모델링 및 해석할 수 있는 다중물리(multi-physics) 유한요소해석 소프트웨어의 발전 및 보급으로 인하여 복잡한 형상의 유도가열 계산을 쉽게 수행할 수 있게 되었다.

본 연구에 사용된 열유속게이지와 유도가열 코일의 형상은 Fig. 1에 표시하였다. 그림과 같이 열유속게이지와 유도코일 사이에 단열재가 설치되며, 열유속게이지 상부에는 노즐 등의 냉각기구로부터 분사되는 냉각수의 흘러내림을 방지하기 위한 단열 덮개가 놓

Fig. 1. High temperature heat flux gauge with induction heating coil for rapid quenching experiment.

여진다. 이와 같이 열유속게이지를 유도가열하는 경우, 다양한 형상을 가진 유도코일의 가열 성능을 예측하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 COMSOL®을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 주로 수치해석을 통해 유도코일의 직경, 코일간격 및 인가 주파수에 따른 가열 성능 해석을 수행하였으며, 시편이 코일 높이 방향으로 편심된 경우의 가열 성능 저하에 대하여 분석하였다.

2. 유도가열 열전달 해석 및 계산

본 연구에 대상이 되는 열유속게이지는 후판 강재의 급속 냉각 기구 및 시스템을 성능 평가하기 위해 고안된 기구이다. 두께 60 mm, 직경 100 mm의 원형 실린더 형상의 스테인리스강 310S 재질로 가공되어있다. 스테인리스강 310S는 크롬과 니켈의 함량을 304 혹은 316 계열보다 높기 때문에 고온 환경에서 내산화성이 우수하다. 냉각 기구의 냉각능 평가를 위하여 상면에서 각각 0.5, 1 mm 떨어진 지점에 총 20개의 열전대가 삽입 및 설치되어 있고, 설치된 열전대에서 얻어진 반경 및 깊이 방향의 온도를 측정하여 열유속을 계산할 수 있게 설계되어 있다. 열유속게이지는 내화 세라믹 소재의 단열재 속에 위치하게 되며, 상부 표면은 냉각 기구에서 분사되는 냉각수에 노출된다. 냉각 실험 중 열유속게이지 내부의 열전대 연결단자 및 단열재가 냉각수에 젖는 것을 방지하기 위하여 Fig. 1과 같이 도넛 형태의 상부 내화세라믹 덮개가 놓여진다. 이와 같은 덮개의 영향으로 열유속게이지의 중심 높이는 유도가열 코일의 중심 높이 보다 다소 위쪽에 위치하게 된다. 열

열유속게이지 옆면을 감싸는 단열재 외곽에 위치하는 구리 배관에 교류 전류가 인가된다. 유도가열에 따른 구리 배관의 열화를 방지하기 위해 구리 배관 내부에 냉각수를 흐르게 하며, 이 때의 구리 배관은 열유속게이지를 4회 감싸는 동심원 코일 형태로 배치되었다.

위와 같은 유도가열 실험 장치의 가열 성능을 수치해석적 방법을 통하여 계산하였다. 유도가열 코일과 열유속게이지의 전자기 유도 및 열전도 해석을 위하여 유한요소법을 기반으로 둔 COMSOL® 4.3을 사용하였다. 아래와 같은 지배방정식을 통하여 전자기 유도 및 열전도 편미분방정식을 커플링하여 열유속게이지 내부 인가된 Joule 열을 계산하였으며, 이를 통하여 열유속게이지 내부 온도를 계산하였다.

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A + j\omega \sigma A = 0 \quad (1)$$

$$-\nabla \cdot (k \nabla T) = Q(A) \quad (2)$$

여기서 A 는 자기벡터 포텐셜(Wb/m), μ 는 투자율(H/m), ω 는 인가각속도, σ 는 전기전도도(1/Ωm), k 는 열전도율(W/mK), 그리고 Q 는 체적당 발열량(W)이다.

수치해석 과정에 있어 다음과 같은 가정을 하였다. 먼저 열유속게이지의 상대 투자율 및 상대 유전율은 모두 1로 고정된 값으로 가정하였다. 유도가열 코일은 4개의 도넛 형태의 원형링으로 모델링 하였다. 또한 열유속게이지 주변을 감싸고 있는 단열재는 공기로 단순화하였으며, 열유속게이지의 복사 및 대류 열전달에 의한 열 손실은 무시하였다. 계산 영역에서 발생한 Joule 열은 모두 구리 코일 내부를 흐르는 10°C의 냉각수 쪽과 20°C로 설정된 계산 영역 외부 경계벽로 전도 열전달에 의해 빠져나간다. 유도가열 및 열전달 수치해석의 계산 영역은 Fig. 2와 같다. 해석은 2차원 축 대칭으로 단순화하여 계산 영역을 설정하였다. 전체 계산 영역은 직경 400 mm, 높이 500 mm 사각형을 기준으로, 정가운데에 열유속게이지가 위치한다. 열유속게이지, 유도가열 코일은 Fig. 2와 같이 배치되었다. 유도가열에 사용된 코일은 구리 배관으로 외경이 9 mm, 관 두께는 1.5 mm로 내부 냉각수가 순환하는 구조를 모사하였다. 유도가

Fig. 2. Calculation domain of induction heating coil and heat flux gauge : (a) variations of heat flux gauge in z-location, (b) 3-D revolution picture ($r = 95$ mm, $w = 6$ mm and $h = 0$).

열 코일의 중심축에서 배관 중심기준 반경(r), 코일 간격(w)에 따른 열유속게이지의 정상상태 온도를 계산하였다. 유도가열 코일의 중심축에서 배관 중심기준 반경(r)은 열유속게이지의 반경 및 단열재의 두께를 고려하여 설정하였다. 단열재의 최소 두께를 14.5 mm로 놓고, 축대칭 중심축에서 유도가열 코일 배관 중심까지 70 mm에서 120 mm까지 5 mm 간격으로 계산을 수행하였다. 코일 간격(w)은 2 mm에서 10 mm까지 1 mm 간격으로 계산하였다.

열유속게이지와 유도가열 코일의 중심 높이가 다른 경우도 함께 고려하였다. 열유속게이지의 높이, $h = 0$ 인 경우에는 유도가열 코일과 z 방향 중심선이 동일하나, $h = 1, 2$ 인 경우에는 각각 코일 직경과 코일 간격을 더한 것의 1, 2배 만큼 열유속게이지의

Fig. 3. Thermal conductivity and electrical conductivity of stainless steel 310S depending on temperature.

높이 중심을 이동한 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 열유속게이지의 높이 h 값이 0에서 2까지 변화하는 동안 코일 간격 변화에 따른 코일과 열유속게이지의 상대적인 위치를 동일하게 놓고 비교할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 열유속게이지의 고온 실험 초기 조건인 1000°C 까지의 가열을 위한 유도가열 코일의 설계 인자간 관련성 및 최적값을 도출하기 위한 해석을 수행하였다. 실제 열유속게이지 초기 가열시 시편 전면에 Cerak wool[®] 소재의 단열재 및 내화물 단열재로 단열을 하였다. 목표온도를 도달하였을 때 상부 단열재를 제거하고 유도가열 장치 전원 차단을 한 후에 냉각 실험을 실시하게 된다. 이 때문에 유도가열 성능은 열유속게이지의 정상상태 온도로 평가할 수 있다. 이를 비교하기 위하여 주파수-정상상태 해석을 통하여 유도가열 코일에 인가된 주파수, 전류에 따른 유도가열 코일 직경 및 간격에 따른 열유속게이지의 평균 온도를 계산하였으며, 이를 토대로 코일 설계 인자 및 최적값 산출을 하였다.

계산 조건으로 우선 최고 가열온도는 500°C 로 제한하였고, 유도코일 인가 전류는 300 A로 고정하였으며 인가 주파수는 15, 20과 25 kHz 인 경우에 대하여 계산하였다. 보다 정확한 열유속게이지의 온도 예측을 위하여 온도에 따른 시편의 물성 변화를 반영하였다. 계산에 사용된 스테인리스강 310S의 온도에 따른 열전도율 및 전기 전도도 값은 Fig. 3에 도시하였다.

Fig. 4. Temperature distribution inside the calculation domain for current frequency of 20 kHz, $r = 95$ mm, $w = 6$ mm and $h = 0$.

Fig. 5. Magnetic flux density (shown in arrow) and current density (shown in contour) plot of heat flux gauge and induction coil at AC phase of (a) -4 deg and (b) 87 deg.

3. 유도가열 수치해석 결과

Fig. 4에 인가주파수 20 kHz, $r = 95$ mm, $w = 6$ mm and $h = 0$ 에 대한 계산 결과를 표시하였다. 이

경우 열유속게이지 내부 평균온도는 320°C 이며 온도 편차는 0.3°C 미만으로 나타났다. 유도가열 코일 내부 흐르는 냉각수의 냉각 효과 때문에 등온선은 위아래로 긴 형상을 보여주고 있다. 위 조건에 대한 열유속게이지 및 코일 주변의 자속밀도 및 전류밀도는 Fig. 5에 도시하였다. 코일 주변의 자속밀도와 열유속게이지 내부의 와전류가 최대로 나타나는 인가 교류전류의 phase는 각각 -4° 와 87° 로 나타났으며 이때의 자속밀도 벡터와 전류밀도는 각각 Fig. 5(a)와 (b)에 도시하였다.

열유속게이지의 평균 온도를 각 계산 변수 별로 정리한 결과는 Fig. 6에 나타나 있다. 먼저 예상대로 열유속게이지가 유도가열 코일 중심 높이에 위치한 $h = 0$ 인 경우 다른 조건이 같을 때 가장 높은 온도 값을 나타냈다. 열유속게이지의 높이 $h = 0$ 인 경우, 코일과 열유속게이지가 근접해 있는 경우($r < 85\text{ mm}$), 열유속게이지의 평균온도 차이는 작은 것으

로 나타났다. 즉, $h = 0$ 인 경우 인가주파수 및 코일 간격과는 상관없이 코일 반경 70에서 80 mm 사이에서 최고 온도값을 나타낸다. 하지만 코일 반경이 90 mm 이상으로 늘어나면, 유도가열 성능은 급격하게 떨어지는 것으로 확인할 수 있다. 이는 Fig. 7(a)를 통해 관찰할 수 있다.

Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이, 유도가열 코일이 열유속게이지와 20 mm 정도 떨어진 위치에서($r = 75\text{ mm}$) 최고 온도가 나타나는 것은 유도코일 내부 냉각수에 의한 냉각 효과 때문인 것으로 판단된다. 열유속게이지가 10°C 냉각수가 흐르는 유도가열 코일로 손실되는 열량을 최소화하기 위하여 최소 20 mm의 공기층이 필요한 것으로 판단된다. 하지만 h 가 1, 2로 증가할 경우, 유도가열 코일의 냉각효과는 점점 감소되며 r 증가에 따른 유도가열 효율의 감소는 보다 뚜렷하게 나타난다.

Fig. 7(b)에는 r 이 85 mm 로 고정된 경우, w

Fig. 6. Average temperature mapping of the heat flux gauge with dependence on modulation frequency and induction coil configuration.

Fig. 7. Average temperature of the heat flux gauge with varying frequency and induction coil configuration.

변화에 따른 열유속게이지의 온도 변화를 관찰하였다. 이 때 h 값이 증가하면서 w 가 열유속게이지의 미치는 영향은 증가하는 것으로 판단된다. 이는 Fig. 7 (b)의 w 에 따른 온도 기울기가 h 값의 증가에 따라서 증가하는 것을 보고 확인할 수 있다. 또한 Fig. 6에서 등온선의 간격 변화를 통하여서도 이를 확인할 수 있으며, 열유속게이지가 코일에서 멀리 떨

어져 있는 경우에는($r > 100$ mm), w 의 영향이 점차 감소하는 것을 관찰할 수 있다.

인가주파수에 의한 영향은 열유속게이지의 평균 온도의 단순 감소로 나타났다. 이는 Fig. 7 (c)를 통하여 확인할 수 있다. 인가주파수가 r 혹은 w 에 미치는 영향은 무시할 수 있는 수준으로 나타났다. 인가주파수를 15에서 20 kHz로 증가하였을 경우, 열유속게이지 내부 침투깊이 변화는 약 $3 \mu\text{m}$ 정도이다. 이는 코일반경 혹은 간격에 직접적인 영향을 미치지 못하지만, 가열 성능에는 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 25 kHz로 유도가열을 한 경우 열유속게이지의 온도가 20 kHz와 15 kHz의 결과와 비교하여 각각 평균적으로 열유속게이지의 온도를 40, 75°C 정도 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다.

각 변수들의 상대적인 영향을 보다 자세히 분석하기 위하여 열유속게이지의 온도에 대한 r 및 w 에 대한 민감도 해석을 수행하였다[6]. 여기서 민감도라는 것은 변수의 변화율에 따른 목적함수인 열유속게이지 온도의 변화율을 표현하는 것이다. 예를 들면, w 를 포함한 다른 변수들이 고정되어 있을 때, r 이 1% 증가할 경우 이것이 열유속게이지 평균 온도에 미치는 백분율을 r 에 대한 온도의 민감도라고 정의할 수 있다. 열유속게이지의 온도는 r , w 등의 독립변수로 이루어진 함수이다. 민감도 계산을 단순화하기 위하여 열유속게이지의 온도는 r 과 w 만으로 이루어진 함수라고 가정한다. 이것을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$S_r = \frac{\partial \ln(T_w)}{\partial \ln(r)} = \frac{\Delta T_w / T_w}{\Delta r / r} \quad (3)$$

$$S_w = \frac{\partial \ln(T_r)}{\partial \ln(w)} = \frac{\Delta T_r / T_r}{\Delta w / w} \quad (4)$$

여기서 S_r , S_w 는 각각 온도에 대한 r 과 w 의 민감도이며, T_r , T_w 는 각각 r 과 w 를 독립변수로 가진 온도 함수이다. 민감도가 크다는 것은 그만큼 변수의 변화에 따른 결과 온도의 변화가 크다는 것으로 이러한 시스템은 설계자가 원치 않는 것이다. 하지만 민감도는 열유속게이지 온도의 변화율로 산출된 값으로 실제 온도와는 직접적으로 관련이 없을 수 있다. 설계 인자들 간의 상대적인 중요성을 판단할 수 있는 자료이므로 시스템 설계 시 참고자료로 활용될 수 있다.

Fig. 8. Sensitivity coefficient with various induction coil configuration.

Fig. 8 (a)와 (b)에 각각 w 변화에 따른 S_r ($r = 85$ mm)와 r 에 따른 S_w ($w = 6$ mm)를 표시하였다. 그리고 $h = 0$, $r = 85$ mm, $w = 6$ mm인 경우 S_r , S_w 의 값은 따라서 각각 -0.61 , -0.22 로 계산되었으며 h 가 증가할수록 S_r , S_w 의 차이는 줄어드는 것으로 나타났다. 계산이 수행된 모든 구간에서 r 이 w 보다 열유속게이지 온도에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 S_r , S_w 는 동일하게 r , w 이 증가하면 감소하는 것으로 나타났으며, h 가 증가할수록 이 두 값의 상대적인 차이는 줄어드는 것으로 나타났다.

실제 열유속게이지 설계시 중요한 고려사항으로 가열시 열유속게이지 내부 온도 편차를 선정한다. 하지만 본 연구의 모델링은 열유속게이지의 복사 및 대류열전달로 인한 손실을 무시하는 가정하에 진행하였기 때문에, 열유속게이지 내부의 최대 온도편차가 모든 경우 0.3°C 미만으로 계산되었다. 특히 300°C 에

서 스테인리스강 310S의 열전도율은 16.5 W/mK 로 단열재 역할을 하는 공기로 손실되는 비율을 표시하는 유효 Bi(effective Biot number)가 1.6×10^{-3} 수준이다. 만약 실제 열유속게이지 상부가 공기에 노출되어 있는 경우 자연대류 열전달에 의한 냉각을 고려할 수 있고, 이 때의 표면 온도에 따른 대류 열전달계수는 약 $17 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 가정할 수 있다[7]. 또한 이때의 Bi는 6×10^{-2} 의 값을 가진다. 이러한 경우를 모사하기 위하여 열유속게이지 주변을 둘러싸고 있는 공기의 열전도율을 인위적으로 1 W/mK 값으로, 동일한 유효 Bi를 갖기 위한 계산을 수행하였을 때, 온도 편차는 1.2°C 로 나타났다. 즉, 표면에서 발생하는 자연대류열전달은 열유속게이지 내부의 전도열전달에 비하여 미미한 수준이기 때문에 열유속게이지 내부 온도편차를 무시할 수 있다. 이는 카트리지히터로 열유속게이지를 가열했을 경우 발생했던 최대 온도 편차가 약 8°C 정도임을 감안할 때, 매우 온도 균일도가 높다고 판단할 수 있다[3].

결론

본 연구에서는 강재의 급속 냉각 기구 및 시스템의 냉각능 평가를 위한 열유속게이지를 가열하는 데 적용될 수 있는 보다 효율적인 유도가열 방법 및 유도가열 시 코일 배치에 관한 수치해석을 수행하였다. 유도가열 코일의 반경, 간격, 열유속게이지와의 상대적인 높이 차 및 인가주파수 등 설계인자들을 변수로 열유속게이지의 주파수-정상상태에서의 평균 온도를 계산하였다. 예상했던 대로 열유속게이지가 코일에 가깝고, 중심에 위치하고, 코일간격이 좁을수록 최종 온도가 높게 나타났다. 열유속게이지와 유도코일의 상대적인 높이가 차이 나는 경우에 대한 해석 결과, 유도가열 코일이 감겨진 주기만큼 열유속게이지가 이동된 경우와 코일의 높이 중심에 열유속게이지가 위치했을 때 온도 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 열유속게이지의 정상상태 온도에 영향을 가장 크게 미치는 것으로 판단되는 코일반경과 코일 간격에 대한 민감도 해석을 수행하였으며, 코일반경이 코일간격에 비하여 모든 해석 경우에서 높은 민감도를 가진 것으로 계산되었다. 또한 열유속게이지 내부 온도 균일도를 기준으로, 기존 카트리지히터를

적용한 방식에 비해 유도가열 방식이 우수한 것으로 판단된다. 본 연구를 통하여 설계된 유도가열 시스템은 앞으로 강재의 급속 냉각기구 및 시스템을 설계하는 과정에서의 열유속을 보다 정밀하고 안정적으로 측정할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 지식경제부 에너지기술개발사업의 “고효율 무교정 후판 가속냉각 제어기술” 연구과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

References

1. C. Ouchi : ISIJ International, **41** (2001) 542.
2. J. B. Wiskel, H. Deng, C. Jefferies and H. Henein : Ironmaking and Steelmaking, **38** (2011) 35.
3. J. Lee, D. -W. Oh, K. H. Do and T. H. Kim : J. of the Korean Society for Heat treatment, **25** (2012) 181.
4. M. Kranjc, A. Zupanic, D. Miklavcic and T. Jarm : Int. J. of Heat and Mass Transfer, **53** (2010) 3585.
5. C. Chaboudez, S. Clain, R. Glardon, D. Mari, J. Rappaz and M. Swierkosz : IEEE Trans. on Magnetics, **33** (1997) 739.
6. R. M. Costescu, M. A. Wall and D. G. Cahill : Physical Review B **67** (2003) 054302.
7. W. H. McAdams : *Heat Transmission*, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, Chap. 7, (1954).