

# 고효율/친환경 전기 용해로 내의 열전달 해석

설동일<sup>†</sup>·이병화\*·전충환\*\*·장영준\*\*

## Heat Transfer Analysis in High Efficiency Electric Melting Furnace

Dong-Il Seol, Byung-Hwa Lee, Chung-Hwan Jeon and Young-June Chang

**Key Words:** Electric Melting Furnace(전기 용해로), Heat Transfer(열전달), Thermal Radiation(열복사)

### Abstract

The main objective of this study is to analyze the heat transfer characteristics in the electric melting furnace. Local temperatures are measured at various location in the furnace using the B-type thermocouples. In this paper, the numerical simulation was performed using the ANSYS software, and compared with experimental data. Mathematical heat transfer model for the prediction of temperature distribution has been developed by considering the thermal radiation among heating element, crucible and insulating materials. The results show that the temperature distributions predicted by the numerical simulation agree with experimental results comparatively.

### 기호설명

A	: 면적(m <sup>2</sup> )
c	: 비열(J/kgK)
F	: 형태계수
h	: 대류열전달계수(W/m <sup>2</sup> K)
k	: 열전도계수(W/mK)
q	: 열유속(W/m <sup>2</sup> )
T	: 온도(°C)
t	: 시간(sec)
$\epsilon$	: 방사율
$\theta$	: 극 각도(rad)
$\rho$	: 밀도(kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	: Stefan-Boltzman 상수

### 1. 서론

지속적인 경제성장과 생활수준의 향상으로 국내 에너지 소비는 높은 증가율을 보이고 있으며 구체적으로는 1994. 3월 기후 변화 협약이 발효되어 화석연료의 사용규제에 대한 논의가 구체화되는 등 대·내외적인 에너지 사용 여건이 급변하고 있다. 따라서 이들을 능동적으로 대처하기 위하여 에너지 사용기기의 효율향상 및 환경 보전은 에너지 소비가 많은 산업 분야에서 중요한 문제로 대두되고 있다.

1차 산업의 한 분야인 금속용해 부분은 우리나라의 경우 대부분의 업체들이 영세성을 면치 못하고 있는 실정이다. 열악한 작업 환경과 비경제성으로 에너지를 필요 이상으로 소비하고 또한 환경도 그에 따라 많이 오염시키고 있다. 일부 생산량(100톤/월 이상)이 많은 대형 업체는 전기 유도로를 이용하고 있으나, 그 이하의 중소기업은 거의 대부분 과거로부터 답습해온 화석연료를 이용한 버너 용해를 하고 있어 평균 20% 내외의 아주 낮은 열효율로 에너지의 불필요한 낭비를

---

† 부산대학교 기계공학부  
E-mail : ruxian@hanmail.net  
TEL : (051)510-1379 FAX : (051)582-9818  
\* 부산대학교 기계공학부  
\*\* 부산대학교 기계공학부

---



Fig. 1 Photographs of electric furnace

초래하고 있다. 또한 미연소로 인한 매연, 송풍용 회전기기의 소음, 연소 용해로의 개방으로 인한 높은 열 등으로 인하여 열악한 작업 환경에서 낮은 생산성과 품질로 기업과 노동자 모두에게 많은 손실을 주고 있는 실정이다.

따라서 이를 해결할 수 있는 기술개발이 절실히 필요하며 전산해석에 의한 다양한 연구가 진행되고 있다<sup>(1~4)</sup>. 본 연구를 통해 작업장에서의 환경오염을 방지하고 동시에 높은 열효율로 에너지를 절감할 수 있는 전기 용해로를 개발하여 기존의 오일 버너 용해로를 대체함으로써 에너지 절감, 작업 환경 개선, 품질 향상 등 선진국에 비해 뒤떨어져 있는 1차 기초 산업인 금속 용해 전통 산업의 경쟁력을 높이는데 도움이 되고자 한다.

본 연구에서는 전기 용해로 설계 시 요구되는 최적화를 구현하기 위하여 용해로 내의 열전달 해석을 수행하였다. 또한 시험용 전기 용해로를 제작하여 로 내의 온도를 측정하였고 이를 수치해석 결과와 비교 분석하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 전기 용해로의 제작

전기 용해로 본체의 구성은 크게 도가니, 발열체 및 단열재(내화벽돌)로 구성되어 있다. 본체는 사각형 타입으로 외부가 1220 × 1220 × 1220mm 이고 내부가 1211 × 1211 × 993 mm 이다. 시험용 용해로의 본체는 최고 1300℃까지 운전가능하며 철재구조로 제작하였다. 가열장치는 12개의 탄화규소 발열체 (Silicon Carbide Heater) 이고 내

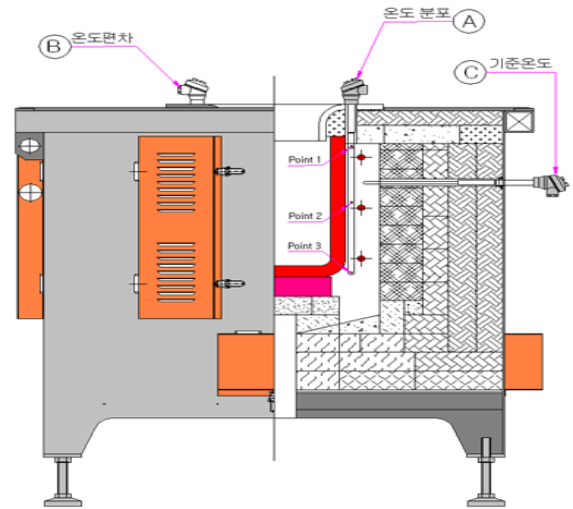


Fig. 2 Schematic diagram of electric furnace

부 단열재는 내화벽돌, 단열벽돌, 캐스타블, 세라믹보드 및 세라크울 등으로 이루어져 있다. Fig. 1은 전기 용해로의 실물 사진이며, Fig. 2는 전기 용해로 형상에 대한 개략도이다. 로 내의 온도 분포는 열전대를 이용하여 그림에 표시된 위치에서 각각 측정하였다.

### 2.2 실험 장치

Fig. 3은 전기 용해로 내의 온도 측정을 위한 실험장치의 개략도이다. 실험 장치는 로체, 열전대, 시험분석 장치, 컨트롤 패널 그리고 PC로 구성되어 있으며 컨트롤 패널은 다시 전력제어 장치인 SCR UNIT과 온도제어를 위한 PR SENSOR로 구성되어 있다. 열전대는 상부에 2개 그리고 측면에 1개를 설치하여 A, B, C 각 지점에서 용해로 내부 및 외부 표면온도를 측정하였다.

## 3. 수치해석

### 3.1 수치해석 모델

Fig. 4는 본 연구에 사용된 수치해석 모델을 도시화한 것으로 해석의 정확도를 높이기 위하여 정형화된 육면체 격자를 대부분 사용하였다. 또한 계산시간을 줄이기 위하여 전체모델의 1/4만 해석영역에 포함시켰다.

용해로 내의 열전달 특성을 파악하기 위해서는 이에 맞는 수치해석 모델을 결정해야한다. 본 연구에서는 열원인 발열체의 열전달 메커니즘을 규

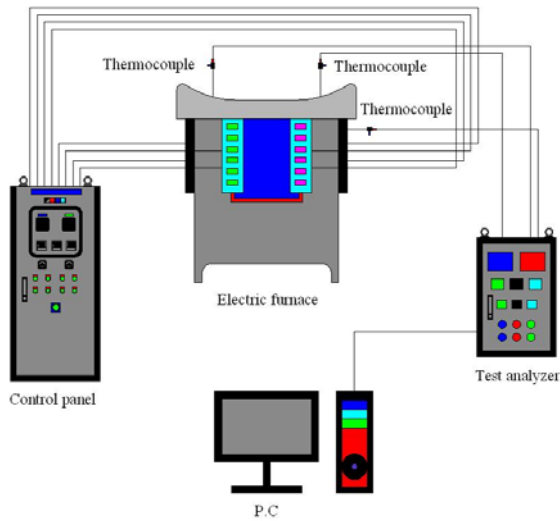


Fig. 3 Photographs of electric furnace

명하고 그에 따른 내부 단열재들의 온도변화를 분석하였다. 발열체로부터 발생한 열에너지는 대류 및 복사를 통해 도가니 및 단열내벽에 전달되고 다시 열전도에 의해 외벽으로 전달된다.

따라서 열전달 메커니즘은 두 가지 경우로 나눌 수 있다. 첫째, 발열체로부터 발생한 열에너지가 자연대류에 의해 내벽에서 외벽으로 전도에 의해 열전달 되는 경우이며, 두 번째는 열에너지가 복사에 의해서 전도로 전달되는 경우이다.

열복사 해석의 경우 형태계수를 반드시 계산해야 되며 본 연구에서는 ANSYS에서 제공하는 Radiation Matrix에 의해서 형태계수를 계산하였다<sup>(5)</sup>. 먼저 Shell 57 Element를 이용하여 복사표면을 정의하고 각 요소별로 형태계수를 계산한다. 이때 Element 좌표계의 (+) z 방향이 복사가 일어나는 방향으로 정의하였다. 그리고 Stefan-Boltzmann 상수와 방사율을 적용하여 Radiation Matrix를 생성하여 복사열전달을 수행하였다.

### 3.2 지배방정식

본 연구에서 수치해석 모델을 간략하게 하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- ① 발열체의 표면온도는 길이방향으로 균일하며 표면온도 변화는 50℃를 넘지 않는다<sup>(6)</sup>.
- ② 용해로는 발열체에 의해 열이 발생하는 영역과 외부공기의 자연대류에 의한 냉각되는 영역으로 나누어지며 각 영역에서의 분위기 온도와 대류열전달계수는 일정하다.
- ③ 용해로의 모든 표면은 방사체이며 정반사

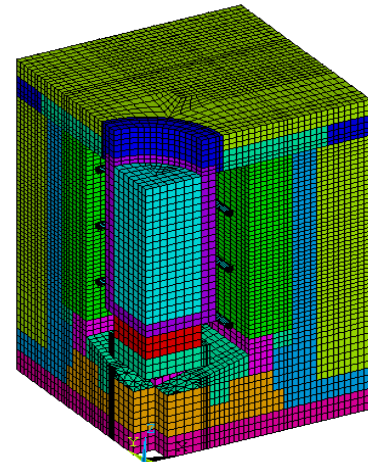


Fig. 4 Photographs of electric furnace

및 확산반사와 상관없이 복사거동과 관련된 모든 물성치는 방향과 과장에 따라 평균값을 취한 전물성값(Total property)을 사용한다.

④ 용해로의 모든 표면의 초기온도 분포는 위치에 상관없이 균일하다.

용해로 내의 도가니 및 단열재의 온도분포를 계산하기 위해서 본 연구에서 고려한 3차원 비정상 열전도 방정식은 다음과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (1)$$

식 (1)에서의 경계조건은 아래와 같다.

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial T}{\partial y} + k_z \frac{\partial T}{\partial z} = q_t \quad (2)$$

여기서 열유속(heat flux)은 복사 및 대류에 의한 열전달의 합으로 식 (3)과 같이 주어진다.

$$q_t = q_{rad} + q_{conv} \quad (3)$$

식 (3)에 나타나는 복사에 대한 열유속은 Siegal, R. 과 Howell, J. R<sup>(7)</sup>이 사용한 수학적 모델을 적용하였으며, 다음과 같이 표현된다.

$$q_{rad} = \sigma \epsilon_i F_{ij} (T_i^4 - T_j^4) \quad (4)$$

형태계수  $F_{ij}$ 는 표면 i를 떠나는 복사 중에서 표면 j에 의해 직접 차단되는 분율로 정의되며 다음과 같이 표현된다.

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} d(A_j) d(A_i) \quad (5)$$

여기서  $\theta$ 는 두 표면을 잇는 직선이 각 표면의 법선 벡터와 이루는 각을 나타내며, r은 두 표면

**Table 1** Thermal property used in this model

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c$ (J/kgK)	$\kappa$ (W/mK)
SiC Heater	2500	1000	16.86
Crucible	2500	1000	16.86
Crucible Support	2500	1000	16.86
Ins. Brick(B-5)	800	900	0.268
Ins. Brick(C-1)	1100	800	0.349
Ins. Brick(B-1)	700	1100	0.198
Fire Brick(SK-34)	2150	740	0.2
Fire Brick(SK-36)	2350	740	0.2
Ceramic Board	600	800	0.209
Cerak wool	500	900	0.256
Castable	2150	700	1.63

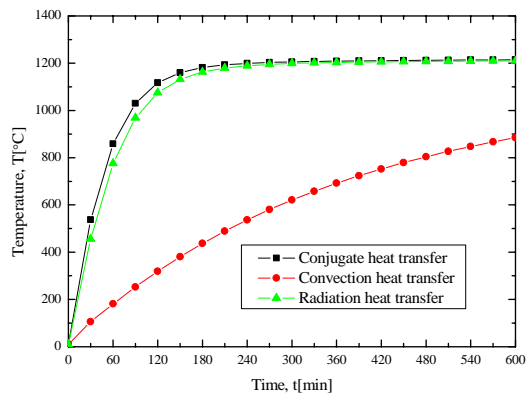
사이의 거리를 나타낸다. 용해로 상·하·측면에서의 대류에 의한 열유속은 다음과 같다.

$$q_{conv} = h(T_w - T_\infty) \quad (6)$$

여기서  $h$ 는 대류열전달계수, 하첨자  $w$ 와  $\infty$ 는 벽면과 분위기 기체를 나타낸다.

### 3.3 물성치 및 경계조건

용해로 내의 열해석을 하기 위해서는 지배방정식 (1)과 경계조건식 (2)를 풀어야하며 이를 해석하기 위해서는 재료의 열적 물성치, 복사 물성치, 온도조건 등이 필요하다. 수치해석을 위해 사용된 재료의 물성치는 Table 1에 나타내었다. 용해로의 내의 분위기 온도는 각 영역에서 발열조건 및 유동조건에 따라 상이한 값을 가진다. 본 연구에서는 계산의 단순화를 위해 발열체의 표면과 용해로 내 분위기와 온도차를 최대 온도편차인



**Fig. 5** Characteristic of heat transfer mechanism

**Table 2** Boundary condition used in this model

Zone	T [°C]	h [W/m <sup>2</sup> K]	$\varepsilon$
Furnace	10	-	0.6 ~ 0.9
Heater	1250	-	0.6 ~ 0.9
Internal air	1200	10	0.6 ~ 0.9
External air	15	5	0.6 ~ 0.9

약 50°C로 가정하여 수치해석을 수행하였다. 그리고 과도열전달 해석에 필요한 데이터인 용해로의 초기온도와 열전달 계수 및 방사율을 Table 2에 나타내었다.

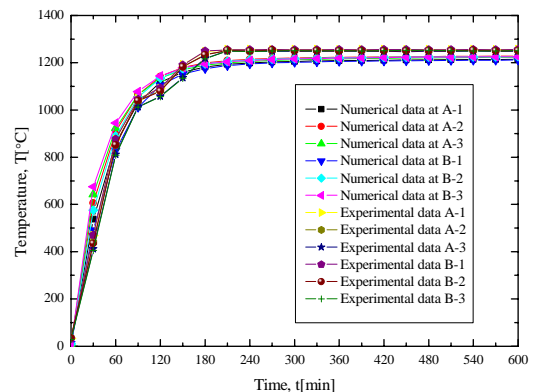
본 연구에서 적용한 수치해석의 타당성을 검증하기 위하여 수치해석 결과를 실험 결과와 비교하였으며 이를 Fig. 6에 나타내었다.

## 4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 발열체의 열전달 특성을 파악하여 용해로 내부의 온도분포를 수치 해석하여 실험 결과와 비교하였다. 그리고 표면의 물질과 거칠기에 강하게 의존하는 변수인 방사율에 따른 영향을 분석하였다.

### 4.1 발열체의 열전달 특성

Fig. 5는 발열체의 열전달 메커니즘인 대류 및 복사에 대하여 도가니(Crucible)의 온도분포를 수치 해석하여 나타낸 것이다. 본 연구에서는 로체의 온도 변화에 영향을 미치는 요인으로서 대류보다는 복사의 영향이 비교적 크며 복합열전달의 경우와 비교했을 때 대류의 영향은 무시할 정도



**Fig. 6** Temperature distribution on crucible surface

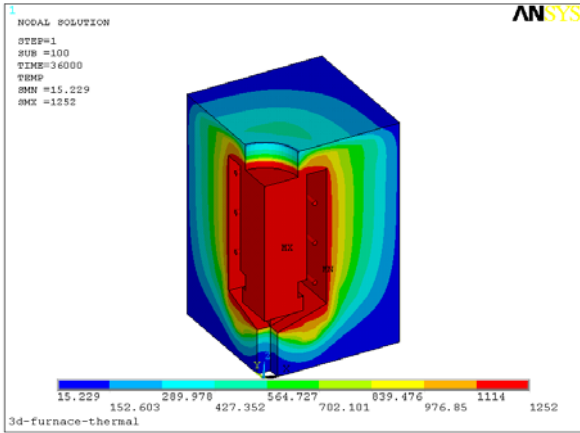


Fig. 7 Temperature distribution in electric furnace

로 작다. 이는 발열영역에서의 대류 열전달이 강제 대류가 아닌 자연 대류이기 때문이라 생각된다. 또한 대류 열전달에 의한 온도변화는 시간에 따라 비례하여 상승하지만 복사 열전달의 경우는 초기에 급격한 온도 상승을 한 후 일정 시간이 지난 후 정상상태에 도달하는 것을 알 수 있다.

#### 4.2 용해로 내부의 온도분포

Fig. 6은 시간에 따른 도가니(Crucible) 표면의 온도변화를 나타내며 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 나타내었다. 그 결과는 온도분포에 있어서 유사한 경향을 보여주고 있다. 온도 측정은 10시간 동안 A, B의 3지점에서 각각 이루어졌으며 초기 1.5시간 동안은 온도가 급격하게 상승하였으며 약 3.5시간이 경과한 후 정상 상태에 도달하였다.

Fig. 7은 같은 조건에서의 용해로의 온도분포를 나타낸다. 용해로의 상부는 하부와 측면에 비하여 단열두께가 얇기 때문에 일부 열손실이 발생하고 있으며 그에 비해 측면과 하부는 적절한 단열설계가 되었다는 것을 보여준다.

#### 4.2 방사율에 따른 영향

Fig. 8는 복사표면의 방사율이 0.6 ~ 1.0인 경우로 방사율에 따른 도가니 표면의 온도분포를 나타낸다. 결과에서 알 수 있듯이 복사표면의 방사율이 높을수록 도가니의 표면온도는 방사율이 낮은 경우에 비해 보다 높은 온도에서 도달하였다. 즉, 방사율이 높을수록 에너지 절감효과와 에너지 효율 문제를 동시에 해결할 수 있다. 결국 방

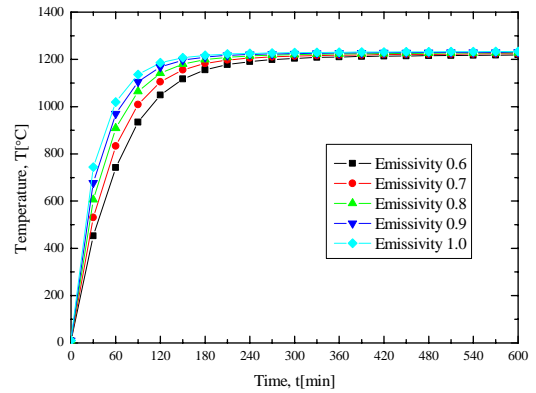


Fig. 8 Effect of emissivity on crucible surface

사율은 재료 표면의 거칠기와 상당히 관계가 깊기 때문에 용해로 설계 시 재료 선정이 상당히 중요하다고 할 수 있겠다.

이상의 결과에서 알 수 있듯이 본 연구에 사용된 용해로는 열전달 특성이 복사열전달에 강하게 의존하며 또한 방사율이 높을수록 효율이 높아짐을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 시험용 전기 용해로를 제작하여 용해로 내의 온도분포를 측정하였으며, 제시된 수치해석 모델을 이용하여 실험결과와 비교 분석하였다. 그리고 표면의 방사율이 용해로 내의 온도이력에 미치는 영향을 검토하였다. 본 연구의 실험과 수치해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전기 용해로의 열전달 특성은 주로 열복사에 의하여 이루어지며 대류에 의한 영향은 무시할 정도로 작다.

(2) 도가니의 온도분포가 정상상태에 도달하는 시간은 약 3.5시간 정도이며 이는 기존의 oil burner 용해로의 비해 약 3시간 정도 짧으므로 에너지 절감 효과가 크다.

(3) 복사표면의 방사율이 높을수록 더 높은 온도에서 보다 빨리 정상상태에 도달한다.

(4) 본 연구에 사용된 수치계산 모델은 실험결과와 비교적 잘 일치하였으며 추후 전기 용해로의 최적화 설계에 이용가능하다.

## 후 기

이 연구는 2006-2007년도 중소기업청의 중소기업기술혁신개발사업 및 BK21 2단계 사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Kim, Y. D., Kang, D. H. and Kim, W. S., 2006, "A Study on the Prediction of Plate Temperature in Indirectly-Fired Continuous Heat Treatment Furnace," Trans. of the KSME(B), Vol. 30, No. 6, pp. 514~522.
- (2) Kim, M. Y., Lee, D. E. and Park, H. D., 2006, "2D Heat Transfer Model for the Prediction of Temperature of Slab in a Direct-Fired Reheating Furnace," Trans. of the KSME(B), Vol. 30, No. 10, pp. 950~956.
- (3) Byun, D. Y., Baek, S. W., and Kim, M. Y., 2003, "Investigation of Radiative Heat Transfer in Complex Geometries using Blocked-Off, Multiblock, and Embedded Boundary Treatments," Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 43, pp. 807~825.
- (4) Li, Z. Z., Lee, J. W., Byun, Y. H. and Lee, C. J., 2006, "Optimal Design of High Temperature Vacuum Furnace Using Thermal Analysis Database," Trans. of the KSME(B), Vol. 30, No. 6, pp. 594~601.
- (5) Kim, J. Y., 2006, "Heat Transfer Analysis," pp. 153~166
- (6) Chapman, K., Harder, R.F., Ramadhyani, S. and Viskanta, R., 1988, "Radiative Heat Transfer," Annual Report January 1987 - March 1988, Purdue Uni., 1988
- (7) Siegal, R. and Howell, J. R., 1981, "Thermal Radiation Heat Transfer," Second Edition, Hemisphere Publishing Corporation.