

## 반도체 공정용 저온 열처리로의 고효율 냉각시스템 설계에 관한 연구

정두원<sup>†</sup> · 서민석\* · 김광선\*\*

<sup>†</sup>한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학부, \*㈜YEST, \*\*한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학부

### Study on Design of high Efficient Cooling System for Low Temperature Furnace in Semiconductor Processing

Du Won Jeoung<sup>†</sup>, Mason Suh\* and Kwang Sun Kim\*\*

<sup>†</sup>School of Mechatronics Engineering Korea University of Technology and Education

\*Co., LTD Youngin Equipment solution Technology

\*\*School of Mechatronics Engineering Korea University of Technology and Education

#### ABSTRACT

According to recent changes in industry for semiconductor devices, a low-temperature treatment has become a necessity. These changes relate to size refinement and the development of new materials. While variation in cooling efficiency does not affect the yield when using a high-temperature treatment, uniform cooling efficiency is necessary avoid “inconsistencies/bends” in low temperature treatments. However it is difficult to increase temperature stabilization in low temperature treatments. In this paper, using CFD (Computer Fluid Dynamics), we analyze and manipulate the design and input of the low-temperature system to attempt to control for temperature variations within the quartz tube, of which airflow appears to be a predominant factor. This simulation includes variable inputs such as airflow rate, head pressure, and design manipulations in the S.C.U. (Super Cooling Unit).

**Key Words** : Semiconductor, Furnace, Low Temperature, CFD

## 1. 서 론

반도체 제조용 열처리로는 반도체 제조뿐만 아니라, 태양광 전지 및 LED분야 등 반도체 유사 사업군에서도 직접 적용 가능한 장비로, 열처리 장치의 구조는 공정 목적에 따라 적절한 온도 분포를 유지하기 위하여 가스를 분포 시키는 노형태의 장비가 많이 사용되고 있다. 현재 반도체 공정용 열처리로는 온도 안정화 문제로 반도체 공정에서 수평형을 사용하지 않고 있으며, 주로 RTP(Rapid Thermal Processor)와 수직형을 사용하고 있으나, 양산 효율을 증요시하는 메모리의 경우에는 RTP형보다는 수직형이 주류를 이루고 있다. Fig. 1은 현재 널리 사용되고 있는 수직형 열처리로를 나타낸 것으로 고온 열처리로의 장치 구성을 보여준다.

고온 열처리로는 30 nm급 등 소자의 고집적화와 얇고 균일한 박막( $\leq 10$  nm) 증착, 동시에 우수한 Step Coverage를 구현하는데 어려움이 있다. 따라서 관련 산업계에서는 이를 극복하기 위하여 저온 열처리로의 설계 필요성이 대두되어 왔다. 저온 열처리로는 온도를 상승 및 하강시킴에 있어 고온 열처리에 비해 상대적으로 느린 승/하강 속도를 보이게 되는데 이때 발생하는 불필요한 열이력 문제와 급격한 온도 변화시 웨이퍼가 받는 열충격의 최소화, 균일한 산화막 형성을 위해 퀴즈 튜브의 일정한 온도 변화를 유지하는 연구가 필요하다.

문헌 조사에 의하면 저온 열처리로 개발을 위한 설계에 대한 국내외 연구는 부족한 실정이다. 한동식(1) 등은 열전달 특성에 따른 전기 용해로 내부 온도예측에 관한 수치적 연구에서 시험용 전기 용해로를 제작하여 용해로 내부의 온도분포 측정을 하였다. 그리고

<sup>†</sup>E-mail : luzz@kut.ac.kr

용해로 표면에서 열전달 특성이 용해로내 온도이력에 미치는 영향을 연구하여, 전기 용해로의 열전달은 주로 열복사에 의하여 이루어지며 대류에 의한 영향은 무시할 정도로 작다는 결론을 얻었다. 설동일(2)등은 고효율/친환경 전기 용해로 내의 열전달 해석에 대한 연구에서 시험용 전기 용해로를 제작하여 용해로 내의 온도분포를 측정함으로써 표면의 방사율이 용해로 내의 온도이력에 미치는 영향을 검토 하였다. 용해로의 열전달 특성은 주로 열복사에 의하여 이루어지며 대류에 의한 영향은 무시할 정도로 작다는 결론을 얻었다.

그 동안 문헌에 보고된 대부분의 논문은 고온 열처리 장치에 대한 연구들로, 최근까지 그 연구가 활발하게 이루어져 왔다. 그에 비해 저온 열처리 장치에 대한 연구는 아직 미비한 상황으로 다양한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 반도체 공정용 150°C 기준 저온 열처리로의 효율적인 냉각시스템을 설계하기 위하여 저온 열처리로 전문회사인 Y社로부터 설계도면을 받아 수치해석을 진행하였고 그 결과를 이용해 저온 열처리로 제작을 하여 현장에서 요구된 설계조건 만족을 확인하였다.

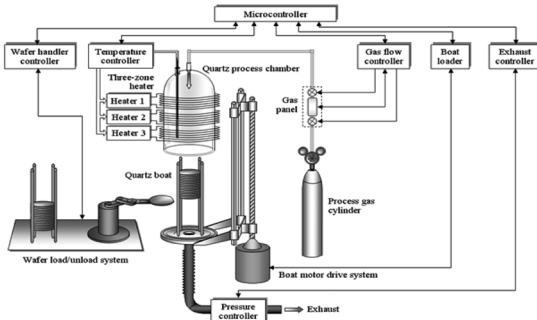


Fig. 1. Schematic diagram of furnace.

## 2. 수치해석

### 2.1. 수치해석의 검증

수치해석 결과를 Y社에서 제작한 열처리로의 온도 승강 실험 데이터와 비교 분석하여 검증하였다. 수치해석 영역을 실험조건과 동일하게 비교 분석하기 위하여 수치해석에 사용한 열처리로의 평균온도 값을 비교 분석한 그림이 Fig. 2에 나와있다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 쿼츠튜브의 온도를 250°C에서 350°C로 Set.T에 따라 상승시킬 때 실험데이터 T.C와 시뮬레이션 데이터 S.T.C의 값을 비교해본 결과, 약간의 차이는 있지만 전체적인 데이터 값의 차이가 크지

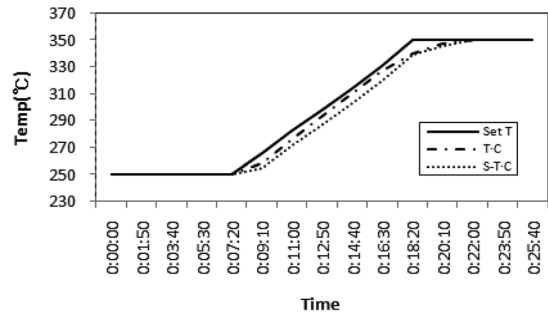


Fig. 2. Temperature comparing Simulation with experiment.

않기 때문에 수치해석의 신뢰성을 확보 할 수 있었다.

### 2.2. 수치해석 모델

본 연구에서 다루고자 하는 저온 열처리 장치 내부의 유동 및 냉각 성능을 고찰하기 위한 해석 모델을 Fig. 3에 나타내었다.

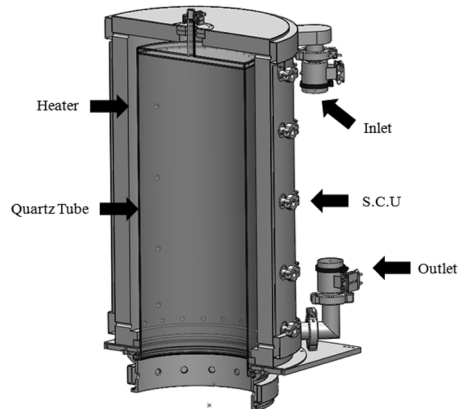


Fig. 3. A numerical simulation model.

저온 열처리 장치의 일반적인 구조는 Fig. 3과같이 이루어져 있으며 세부적으로는 쿼츠 튜브, 히터, S.C.U. 등으로 구성된다.

열처리 장치의 가열 과정은 복사열을 이용하기 때문에 튜브와 함께 내부 형상까지 고려해야 하지만 본 연구에서는 냉각만을 고려했고, 실제 튜브 내부 냉각은 튜브 표면에서의 온도분포와 유사하기 때문에 튜브 내부해석은 생략하기로 한다.

공기가 상부에서 하부로 흐르는 형상을 바탕으로 가열시에는 열 손실을 최소화하고 냉각시에는 효과를 극대화하기 위한 히터와 쿼츠 튜브에 대한 포괄적인 유동 해석이 필요하다.

Fig. 4은 생성된 격자의 모습으로서 약 120만개로써 계산의 정확도를 향상하기 위해서 2개의 layer를 사용하여 계산을 수행하였다.

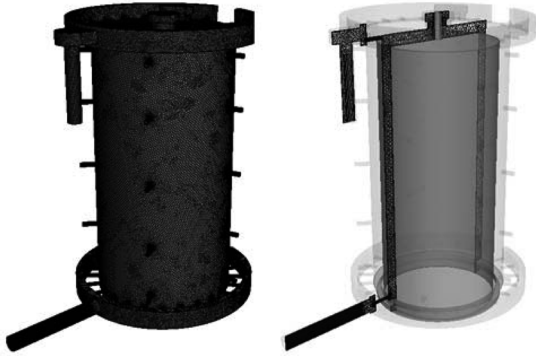


Fig. 4. Grid system.

Fig. 5와 Fig. 6은 연구에 사용된 열처리로이며 기본형과 개량형, 두 가지 타입의 장비를 나타낸다.

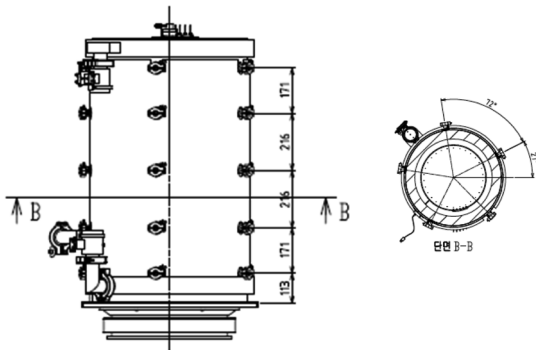


Fig. 5. Type 1. Furnace Model.

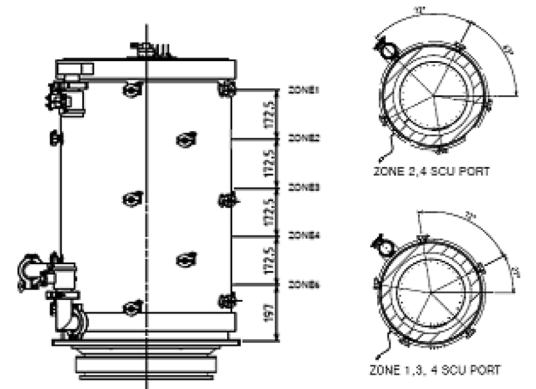


Fig. 6. Type 2. Furnace Model.

### 2.3. 지배방정식

본 연구에서는 저온 열처리 장치 내부 유동에 대하여 기술하는 지배방정식에 대하여 3차원 정상상태의 난류유동으로 가정하였으며, 공기유동에 관한 연속 방정식, 운동량 방정식 난류 운동에너지 방정식 그리고 난류운동 소산 방정식이 함께 계산되었다. 난류모델은 표준 k-ε 모델을 사용하였다.

· 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$$

· 운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

· 에너지방정식

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho C_p u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k + \frac{\mu}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + Q$$

· 난류 운동에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \epsilon$$

· 난류 운동에너지 소산을 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + (C_{1\epsilon} G - C_{2\epsilon} \rho \epsilon) \frac{\epsilon}{k}$$

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_{\mu} = 0.09$$

### 2.4. 경계조건 및 해석방법

본 연구에서 해석격자는 상용코드인 STAR-CCM+ 4.02 version을 사용하여 미소체적인 격자를 Surface mesh에서 Volume mesh로 생성하였다.

위 상용코드에서 지원하는 세 종류의 격자 가운데 복잡한 형상의 모델에 적합한 Polyhedral mesh를 주로 이용하였고, prism layer mesh와 역류를 방지하기 위해 입출구의 형상을 연장시켜주는extruder를 혼용하여 구성하였으며, 해석영역 경계면에서의 기본 조건은 Table 1과 같다.

Fig. 7은 해석 데이터 비교를 위해 설정한 쿼츠 튜브 벽면에 30개의 포인트를 나타내고 있다.

입구 영역은 상온임을 고려하였으며 S.C.U.와 입구를 함께 공정변수로 설정해 여러 가지 경우 대해 시뮬레이션을 진행하였다. 출구의 경우는 모든 경우에 동일

한 음압을 적용하였고 히터와 퀴츠 튜브의 경우 가열 후 냉각성능 확인을 하기 위해 각각 100°C, 25°C로 설정 하였으며, 유입되는 공기의 총량은 60 l/min으로 일정하게 유지하며 각 type마다 Table 2의 4가지 Case에 대해 해석을 진행하였다. 상기 data는 실제 장치에서 사용하고 있는 조건과 동일하게 설정하였다.

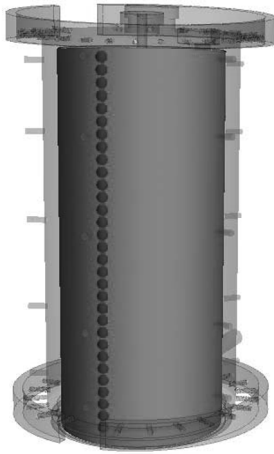


Fig. 7. Positions of temperature measurement.

Table 1. Boundary conditions

Sections	Boundary	Remarks
Cooling air inlet	Mass flow inlet	Temperature : 25°C
	Pressure outlet	
S.C.U. 1~5	Mass flow inlet	Temperature : 25°C
	pressure outlet	
heater	Wall	Temperature : 100°C
Quartz Tube	Wall	Temperature : 25°C
Outlet	Pressure outlet	Pressure : -90Pa

Table 2. Simulation parameters for design

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Inlet	10(l/min)	6	5	17
S.C.U 1	10	6	5	14
S.C.U 2	10	12	8	11
S.C.U 3	10	12	11	8
S.C.U 4	10	12	14	5
S.C.U 5	10	12	17	5
Outlet	-90Pa			

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 퀴츠 튜브에서 온도분포

S.C.U. 배열과 유입공기량에 따른 열처리로 내부 온도의 변화를 알아보기 Fig. 5, Fig. 6의 두가지 형태의 S.C.U.와 Table 2의 4가지 조건에 대해 계산을 수행하였다.

Fig. 8, Fig. 11은 퀴츠 튜브 벽면에서의 온도 분포를 보여 주고 있으며, 특히 S.C.U. 입구 부근의 온도를 잘 나타내고 있다. 이러한 그림은 S.C.U. 를 통한 직접적인 냉각효과를 관찰하기가 좋며, 모든 Case에서 전체적인 온도 분포를 보게되면 S.C.U.를 통해 공기가 열처리로 내부로 유입되는 부분에서 가장 낮은 온도를 보이고 또한 유입되는 공기의 양에 비례해 온도가 낮아지는 경향을 보이고 있다.

Fig. 8에서 (a,b,c,d,) 모두 S.C.U.와 인접한 부분의 온도분포가 각각의 유닛에서 균일하게 냉각이 되고 있는 것을 볼 수 있지만, 유입되는 공기가 충분히 전달되지 않아 각 S.C.U. 사이에서는 효율적으로 냉각이 이루어지지 않음을 보여준다.

Fig. 8 (c,d)에서는, 공급되는 S.C.U.를 통해 공급되는 공기의 양을 상하반대로 하였는데, (c)에 비해 (d)의 경우는 아래쪽을 향해 갈수록 냉각 효과가 현저히 저하됨을 볼 수 있었다. 이는 입구에서 유입되는 차가운 공기가 출구를 향하면서 히터에 의해 서서히 가열되어 퀴츠 튜브를 충분히 냉각하지 못하는 것임을 알 수 있다.

Fig. 11에서도 역시 Fig. 8에서 나타난 각 S.C.U. 사이가 냉각이 되지 않는 현상을 볼 수 있으나, 상대적으로 그 영역이 축소된 것을 볼 수 있다. 이것은 S.C.U.의 배열을 교차시킨 효과로 생각되며, Type 2의 냉각 효율이 Type 1에 비해 뛰어남을 알 수 있다.

Table 3에 나와있는 Type 1, Tpye 2에서 각 Case의 퀴츠 튜브 전체의 평균온도를 보면, Tpye 2에서 퀴츠 튜브 벽면온도가 약 2°C 가량 낮은 온도 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 위에서 밝혔듯이 S.C.U.의 배열로 인해 균일한 냉각이 이루어졌기 때문이다.

Fig. 9는 Fig. 7에 나타난 퀴츠 튜브 위 직선구간에서의 30개의 포인트의 온도를 측정해 그래프로 나타낸 것이다. Tpye 1, Type 2모두 최고점에서의 고온은 거의 같지만 Type 1의 경우 고온영역과 저온 영역의 차이가 크게 나타남을 볼 수 있다. 또한 그래프를 통해서도 볼 수 있듯이 전체적인 온도분포에서 Type 2의 경우가 더 균일한 온도분포를 나타냄을 볼 수 있다.

Fig 8, 11의 온도 분포를 보면 S.C.U.의 입구를 중심으로 말굽 모양의 형상을 보이며, 위쪽과 아래쪽의 온

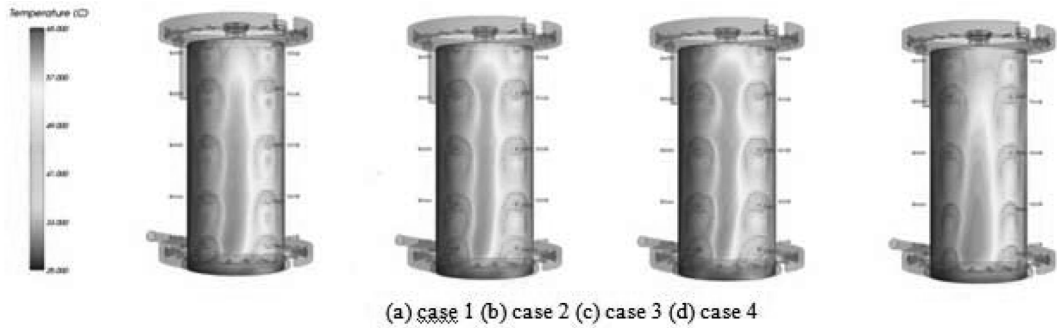


Fig. 8. Temperature contour of Quartz tube (Type 1).

도 차이가 큰 것을 볼 수 있었는데, Fig. 10을 통해 그 이유를 알 수 있었다. 쿼츠 튜브를 따라 출구를 향하던 공기가 S.C.U. 를 통해 들어온 공기와 충돌하면서 와

류가 형성됨을 확인하였다. 공기 유입량이 늘어날수록 강한 와류가 형성될 것임을 알 수 있는데, 이러한 와류 생성을 억제하기 위해서는 S.C.U. 의 유입구의 형상이 지금과 같은 수직형이 아니라 열처리로 내부 유동을 고려한 설계가 필요하다.

Table 3. Average temperature

	Case	1#	2#	3#	4#
Quartz tube Temperature (Area Averaged)	Type 1	51.58	50.86	50.28	49.39
	Type 2	49.62	48.10	48.41	47.54

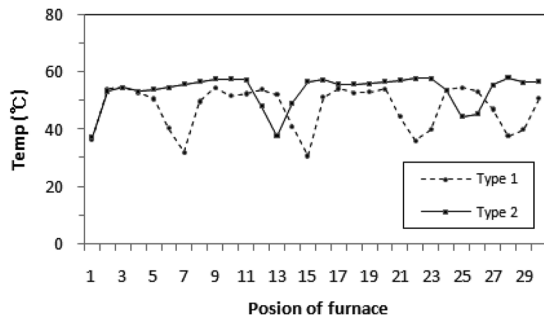


Fig. 9. Type 1 and Type 2 temperature profiles.

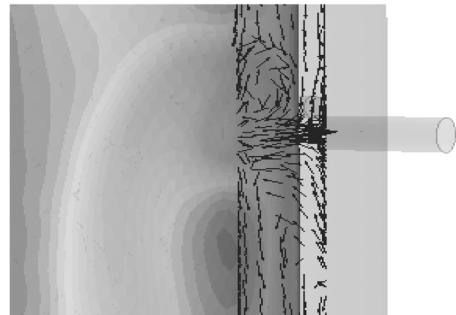


Fig. 10. Vector of air flow.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 저온 열처리로의 냉각 시스템 개발을

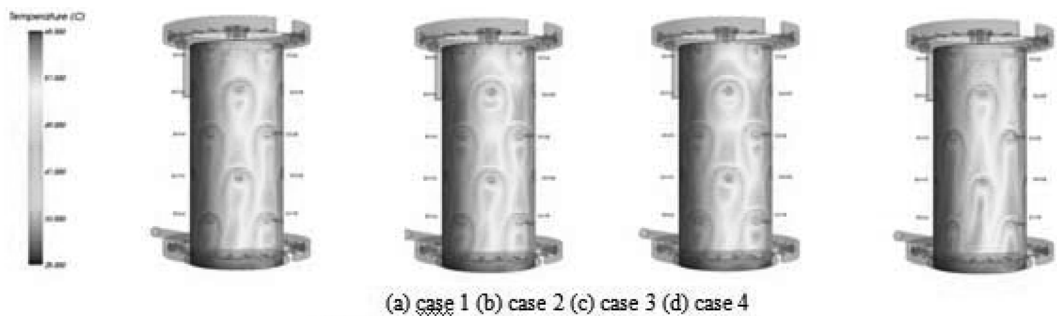


Fig. 11. Temperature contour of Quartz tube (Type 2).

달성할 수 있도록 최적의 냉각 시스템의 사양을 결정하고 전체 냉각시스템의 해석방안에 대한 연구를 수행하였다.

해석된 데이터를 종합해보면 서로 다른 배열의 S.C.U. 형상을 가지는 Type 1, Type 2에 같은 공정조건의 시뮬레이션 데이터를 비교해본 결과 총 량이 정해진 상태에서 유량을 값의 변화를 통해 냉각 효율을 증대시키는 것 보다 S.C.U.의 형상 변경에 의한 냉각 효율의 증대 효과가 더 뛰어난을 알 수 있었다, 또한 S.C.U. 유입구 형상에 의한 와류현상을 확인하였으며, 여러 가지 Case의 시뮬레이션을 진행해 가장 냉각효율이 좋은 Case를 찾아내었다.

저온 공정 영역은 Polyimide Bake, SOG Bake, Metal Anneal과 같은 공정에 직접적인 적용이 가능하기 때문에, 추후 와류 제거를 위한 S.C.U 유입구의 형상, dummy wafer의 열 용량에 따른 시뮬레이션과, 이에 따른 최적 형상을 도출하고 좀더 정확한 Simulation model 제시가 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 우수제조기술연구센터(ATC) 1단계 사업의 지원 하에 수행하였으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. D. S. Han, C. H. Jeon, Y. J. June and J. H. Song, "A Numerical Study on Prediction of Internal Temperature in Electronic Melting Furnace with Thermal Characteristics Effect", Proceedings of the KSME 2008 Fall Annual Meeting, KSME 2008R2048, pp. 514~522, 2008.
2. D. I. Seol, B. H. Lee, C. H. Jeon and Y. J. Chang, "Heat Transfer Analysis in High Efficiency Electric Melting Furnace", Proceedings of the KSME 2008 Fall Annual Meeting, KSME, 2007, pp. 1626~1631, 2007.
3. H. J. Jin, S.M. Choi, and J. K. Jung, "Numerical Simulation of the Liquid Flow in the Lower Part of the Blast Furnace - A Cold Flow Case", journal of KOSCO, Vol.13, No. 2, pp. 33~41. 2008.
4. E. S. Jeong, S. M. Shim, Y. D. Kim, D. H. Kang and W. S. Kim, "A study of Optimal Distribution of Gas Temperature in Directly-Fired Reheating Furnace" Proceedings of the KSME 2008 Fall Annual Meeting, KSME 2008, pp. 2122~2125, 2008.
5. J. Wang and S. J. Spanos, "Real-Time Furnace Modeling and Diagnostics", IEEE Transactions on semiconductor manufacturing, Vol. 15, No. 4, pp. 393~402, 2002.

접수일: 2010년 11월 30일, 1차심사일: 2010년 12월 7일  
2차심사일: 2010년 12월 13일, 게재확정일: 2010년 12월 17일