

반도체용 저온 열처리로의 Flat Zone 확장 및 온도편차 감소에 관한 연구

주강우[†] · 심승술* · 장 혁** · 이유영*** · 김광선

[†]한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부, *(주)에스티,

** (주)제이엘티, ***한국폴리텍대학 아산캠퍼스

Study on the Flat Zone Expansion and Temperature Deviation Reduction of Low Temperature Furnace for Semiconductor Process

Kang Wo Joo[†], Seung Sool Shim*, You Young Lee** and Kwang sun Kim

[†]KOREATECH School of Mechatronics Engineering, *YesT CO., Ltd.,

JLT CO., Ltd., *Korea Polytechnics Asan

Abstract

This paper is about the yield rate of lower temperature furnace for wafer heat-treatment. The flat-zone that the temperature in furnace has uniform distribution specific area is the significant variable to the yield rate. In this study, we researched about the ways how to widen the flat zone in the furnace using CFD. As a result, we confirmed that the characteristic of the flat-zone was changed when SCU(Super Cooling Unit) was used. We considered temperature control with above.

Key Words : Furnace, Temperature control, Flat zone, CFD

1. 서 론

열처리 기술은 반도체 공정의 기반을 이루는 기술로, 각 공정에 있어 온도 균일성을 확보해야만 품질과 수율을 보장 받을 수 있다. 특히, 최근 반도체 공정의 선 폭 미세화 및 신소재 개발 추세에 따라 공정 온도가 점차 낮아지고 있어 저온 영역에서의 온도 제어의 중요성이 대두되고 있다. 그러나 저온 영역에서의 온도 제어는 상당한 기술을 요하며 국내에서는 기술적 완성도가 매우 낮아 해외 장비에 의존하는 경향을 보인다. 본 연구에서는 Y사에서 기술 국산화를 위해 개발중인 '수직형 저온 열처리로'를 연구 대상으로 하였다.

기준에 보고된 수직형 열처리로와 관련한 연구는 웨이퍼를 고려하지 않고, 반응로 내의 화학 반응에 중점을 두어 이와 연관된 온도 분포 및 가스의 유동 형태

확인이 주를 이루고 있다. J. Aminian, Sh. Shahhosseini, M. Bayar는 장비 내부의 화학 반응 및 복사에 대해 고려하였고[1], Chiara Galletti, Giovanni Coraggio, Leonardo Tognotti는 산화 천연 가스의 반응로에서 퍼니스의 연소 효과 확인을 위한 CFD해석을 수행하였다[2]. 계산 시간 축소 및 해석의 간략화를 위하여 해석 모델을 단순화 시켰으며, 해석 모델의 신뢰성 검증을 이론을 기반으로 간단한 실험을 동반하여 수행하였다.

한동식[3] 등의 연구에 의하면 고온 열처리로 내부에서는 복사에 의한 열전달의 영향이 강하고, 대류의 영향은 매우 작은 것으로 확인되었고, 열전달 특성에 따라 온도 이력에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이와 유사하게, Sorrell, F. Y.[4]는 복사 열전달 해석에서 대류에 의한 열손실은 존재하지 않는다고 가정하였으며, 이를 입증하였다. 그러나 앞선 연구들은 고온 영역에서 수행된 것으로, 본 연구에서 다루는 열처리로는 약 200 - 300°C 내외에서 공정이 이루어지기 때문에 대류에 의한 열전달을 제외할 수 없다.

[†]E-mail : ganggu8@koreatech.ac.kr

기존의 연구사례들로 미루어 볼 때, 열처리로와 관련된 연구는 프로토타입 제작과 함께 실험으로 예측하거나 발견하기 어려운 현상을 수치해석을 통해 검토하는 연구에 집중되어 있고 장비 자체의 성능을 개선하기 위한 연구는 부족함을 알 수 있다. 본 연구에서는 Y사에서 개발중인 저온 열처리로의 CFD 해석을 통하여, 수율에 직접적인 인자가 되는 Flat Zone에 영향을 주는 인자들을 찾고, Flat Zone의 길이를 안정적으로 늘릴 수 있는 방법을 모색한다.

2. 수치해석 모델

2.1. 물리적 모델

본 연구의 대상으로 선정된 열처리로는 300 mm웨이퍼의 열처리를 위한 장비이다. Fig. 1에 장비의 3차원 모델을 나타내었으며, 해석의 용이성을 위하여 1/2 모델로 단순화 하였다.

①에 대한 영역은 Air로써, 히터부가 장착된 외형과 quartz 사이의 공기의 유동장(fluid)이고, ②에 대한 영역은 quartz로써 고체(solid)이다. ③은 N₂의 영역으로써, quartz와 wafer 및 pedestal 사이의 질소의 유동장이고(fluid), ④는 웨이퍼로써 고체(solid), ⑤는 pedestal의 영역으로써 또한 고체(solid)이다.

열처리로는 내부 온도 상승 및 제어를 위하여 히터와 냉각부를 갖는다. 본 연구 대상이 된 열처리로는 온도제어의 용이성을 위하여 히터를 5개의 구간으로 나누어 사용하며, 냉각을 위한 장치로 Super Cooling Unit(SCU)을 사용하여 내부 온도를 제어하게 된다. SCU는 외부로부터 차가운 기체를 유입시키는 장치이

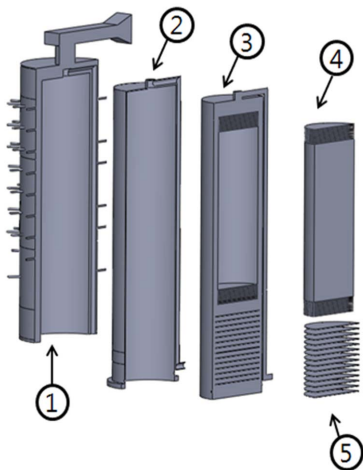


Fig. 1. 3D CAD model of low temperature furnace.

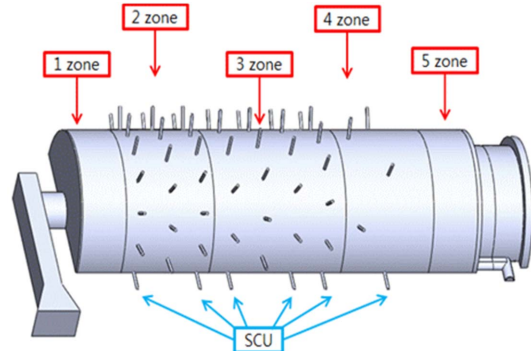


Fig. 2. Heating zone and SCU of the furnace.

다. Fig. 2에 히터 영역과 SCU를 표시하였다.

2.2. 지배 방정식

본 연구에 적용된 수치해석 기법은 유한체적법(FVM)이며, 저온 영역에서는 (200 ~ 300°C) 대류의 영향을 무시할 수 없기 때문에 내부 유체의 유동 및 복사 열전달을 함께 고려하였다. 열처리로 내의 유동은 레이놀즈 수를 계산한 결과 가장 유동이 빠른 곳에서 5308정도로, 난류 영역에 속하므로 난류 모델을 사용한다[5].

- Continuity equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (1)$$

- Momentum equation

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i \quad (2)$$

- Energy equation

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho h u_j + F_{h,j}) = -\frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h \quad (3)$$

* $F_{h,j}$: diffusional energy flux in direction x_j

- Turbulence model

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1s} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3s} G_b) - C_{2s} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} = 0 \quad (5)$$

복사 열전달 계산에는 일반적으로 S2S(Surface to surface) 방법과 DOM(Discrete ordinates method) 방법이 사용된다. S2S 방법은 중간 매질을 무시하고 면과 면 사이의 복사 에너지를 바로 계산하는 방법이다. 이

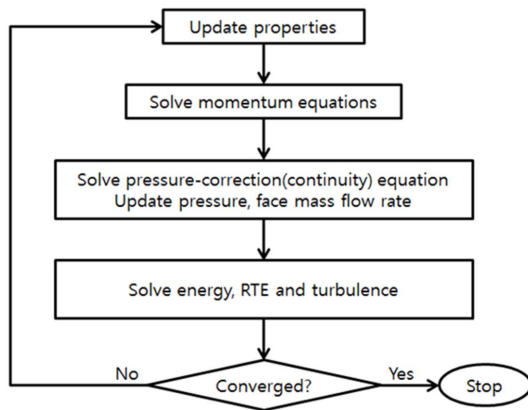


Fig. 3. Flow chart of segregated solving.

방법은 대류효과를 무시하게 되므로 계산 속도를 단축하는 장점이 있다. DOM 방법은 이산화된 좌표계에서

의 복사강도에 대한 방정식을 적용함으로써 매질에 의한 흡수, 산란, 대류 등을 복합적으로 고려한다. 본 연구에서는 대류를 무시하지 않으므로 DOM 방법을 사용하였다.[6-8]

- Radiant heat transfer equation(RTE)

$$\frac{dI_{\lambda}}{ds} = -\beta_{\lambda}I_{\lambda} + k_{a\lambda}I_{b\lambda} + \frac{k_{s\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\lambda}(\Omega) d\Omega \quad (6)$$

$$I_{b\lambda} = \frac{2C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (7)$$

$C_1 = 0.595522 \times 10^{-6} \text{ Wm}^2/\text{s}$, $C_2 = 0.01439 \text{ mK}$

Fig. 3에 수치해석의 흐름도를 나타내었다.

2.3. 경계 조건 및 물성치

해석 모델은 공기, quartz, 질소, 웨이퍼 및 pedestal의 총 4개의 영역으로 나뉘어져 있다. Fig. 4~5에 각 영역간의 경계에 대하여 도시하였다.

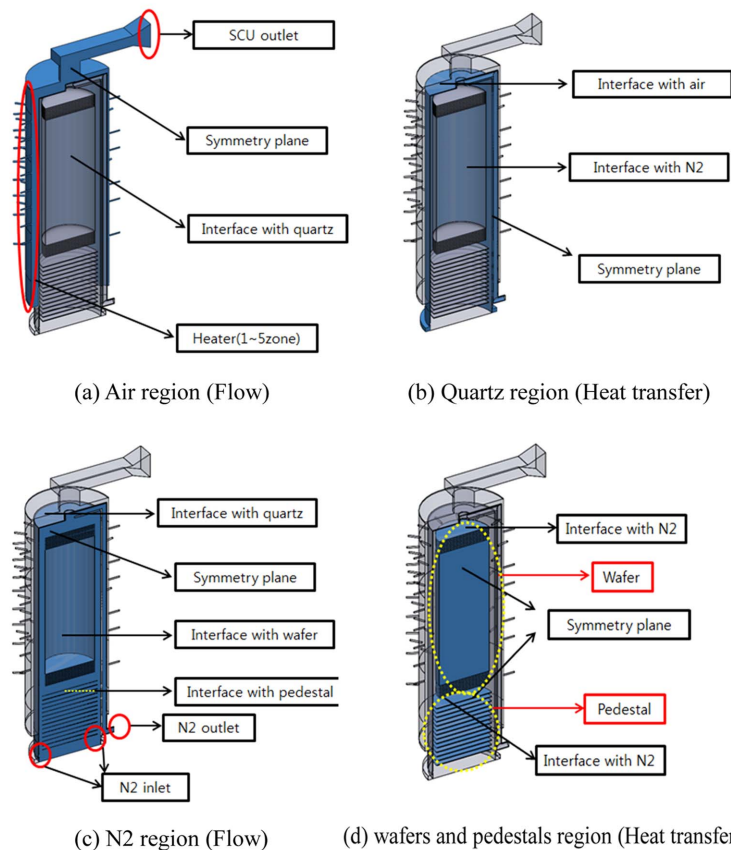


Fig. 4. Names of boundary regions (a~d).

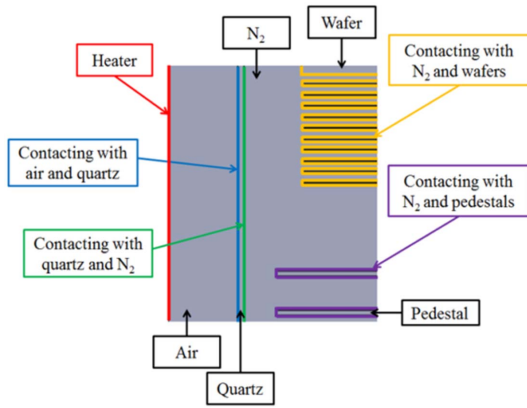


Fig. 5. Names of boundary regions.

해석 모델의 영역은 크게 고체 영역과 유체 영역으로 구분 할 수 있다. Table 1과 Table 2에 각각의 물성

을 표기하였다.

온도 분포에 영향을 주는 변수를 확인하기 위해, pedestal반사율과 방사율, 웨이퍼 층과 pedestal간의 거리, pedestal의 개수, zone의 온도, 그리고 SCU의 동작 여부 등을 조합하여 해석 조건을 작성하였다. 각 case 별 경계 조건을 Table 3~4에 나타내었다.

2.4. 신뢰성 검증

해석의 신뢰성을 확보하기 위하여, 본 연구의 대상이 되는 열처리로를 설계, 제작한 Y社로부터 제공받은 실험 데이터와 수치해석의 데이터를 비교하였다. 비교를 위해 Table 4에 제시한case no. 1의 조건을 실험과 수치해석에 각각 동일하게 적용하였다. 비교 결과, 실험과 수치해석에서의 시간에 따른 온도 상승 데이터가 매우 유사하게 나타났음을 알 수 있으며, Fig. 6에 그 결과를 나타내었다. 이로써 수치해석 결과가 충분히 신

Table 1. Properties of solid regions

Properties	Unit	Quartz	Wafer & pedestal	Note
Density	k/m ³	2200	2329	
SpecificHeat	J/kg-K	670	713	
Thermal conductivity	W/m-K	1.4	124	
Emissivity(E)	-	0.07	Different values by cases	E+R+T = 1
Transmissivity(T)	-	0.93	0.0	
Reflectivity(R)	-	0.0	Different values by cases	

Table 2. Properties of fluid regions

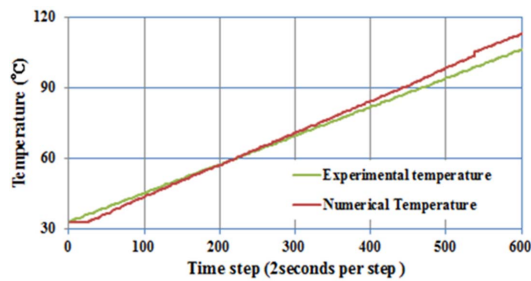
Properties	Unit	Air	N2	Note
Dynamic Viscosity	Pa-s	1.85E-5	1.79	
Specific Heat	J/kg-K	1003.62	1040.76	
Thermal conductivity	W/m-K	0.026	0.025	
Molecular Weight	Kg/kmol	28.96	28	

Table 3. Boundary condition of numerical analysis

Case No.	1	2	3	4	5	6	7
N2	Inlet : 40LPM / Outlet : 392 Pa						
SCU	Not operated						
Emissivity Reflectivity	0.9 0.1	0.5 0.5	0.1 0.9	0.9 0.1			
Distance of pedestals from lower wafer	56mm					31mm	81mm
The number of pedestals	14			10	5	14	
Temperature of heater	200°C						

Table 4. Boundary condition of numerical analysis

Case No.	8	9-1	9-2
N2	Inlet : 40LPM / Outlet : 392 Pa		
SCU	Not operated	23CMM	Not operated
Emissivity Reflectivity	0.9 0.1		
Distance of pedestals from lower wafer	56mm		
The number of pedestals	14		
Temperature of heater	1, 5 : 180°C 2,3,4 : 200°C	Not operated	

**Fig. 6.** Comparison of experiment and numerical result.

퇴성을 갖는다는 사실을 알 수 있다.

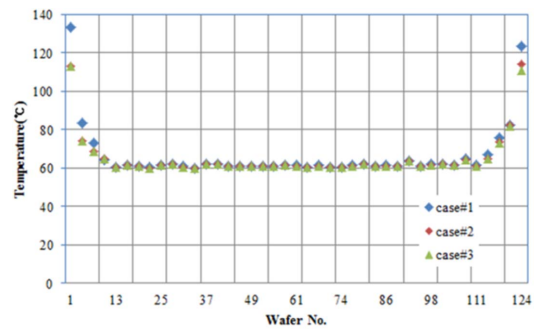
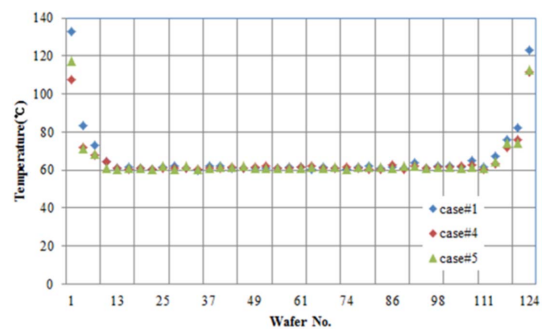
3. 결과 분석

앞에서 제시한 Table 4~5에 나타난 case별 조건표로부터 얻어진 해석 결과들로부터, 열처리로 내부의 flat zone이 어떻게 형성되었는지 Fig. 7~11에 웨이퍼 위치에 대한 온도 그래프로 나타내었다. 각 그래프에서 x축에 해당하는 wafer No.는 열처리로 내에서 최 하단에 위치하는 웨이퍼를 1번으로 한다. Fig. 7~9는 pedestal과 관련된 변수들의 변화에 따른 웨이퍼 온도 분포도이다. 각각의 그래프에 나타났듯, pedestal과 가까운 곳에 있는 하단의 10장 정도의 웨이퍼에서만 온도 차이가 발생하고, 상부로 갈수록 전혀 차이가 나타나지 않는다. 이는 pedestal이 열처리로 전체에 걸친 온도 변화를 유발하지 않음을 의미한다.

Fig. 10은 5개로 나뉘어진 Heating Zone 온도를 다르게 하여 얻은 데이터이다. case1은 5개 zone의 히터 온도를 모두 200°C, case 8은 상단과 하단의 2개 zone을 180°C로 설정하였다. 하부에 위치한 1번 웨이퍼는 pedestal의 영향으로 온도가 크게 떨어지지 않았으나, 상부에서는 온도차가 크게 나며 flat zone이 길어졌음

Table 5. Boundary condition of numerical analysis

case	case_basic	case_AXL	case_blow
Inner (°C)	73.9	79.0	34.9
Spike (°C)	57.0	53.5	21.9

**Fig. 7.** Result of changing emissivity and reflectivity of pedestals.**Fig. 8.** Result of changing the number of pedestals.

을 확인 할 수 있다. 이로부터 5개의 zone에서 히터 온도를 모두 다르게 제어한다면 flat zone의 길이를 조절할 수 있다고 예상 가능하다.

Fig. 11은 히터의 동작을 멈추고, SCU를 이용할 때

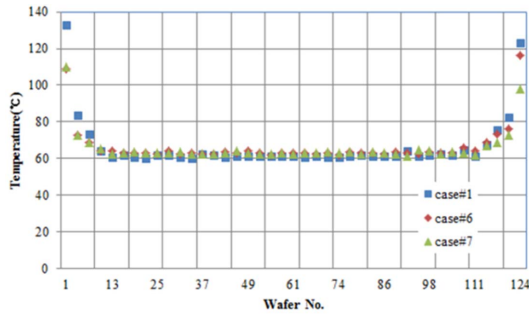


Fig. 9. Result of changing distance of pedestals from the lower wafer.

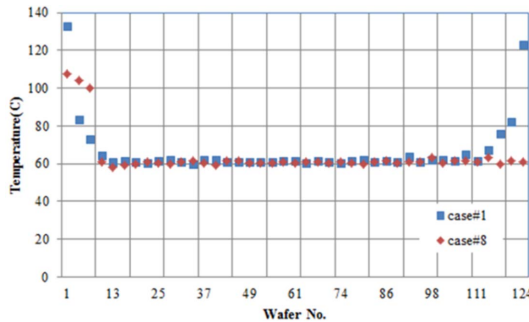


Fig. 10. Result of the different temperature of heaters.

와 이용하지 않을 때 냉각 효과를 관찰한 것이다. 외부에서 냉각을 위해 기체를 불어넣어 주는 편이 온도 하강에 도움이 되는 것은 자명한 일이지만, 이 비교 case는 SCU의 냉각 성능이 어느 정도인지를 확인하기 위하여 수행되었다. SCU를 사용 할 때 초기 냉각 곡선의 기울기를 보면 자연 냉각일 때 보다 매우 급격하게 변화함을 알 수 있다. 또, 열처리 공정의 핵심은 웨이퍼의 온도를 제어함에 있는데, SCU를 사용하여 냉각할 때 웨이퍼의 온도 하강 곡선이 거의 선형성을 띠는 것을 알 수 있다.

4. 냉각 조건 해석

Fig. 10 ~ 11의 결과로부터, 5개 zone에 설치된 히터

Table 6. Analysis Conditions

Case	Case_basic	Case_AXL	Case_blow
SCU	Not operated	Not operated	-30 mmH2O
Conductivity of filler	0.1	0.5	0.1
Initial temperature	23°C		

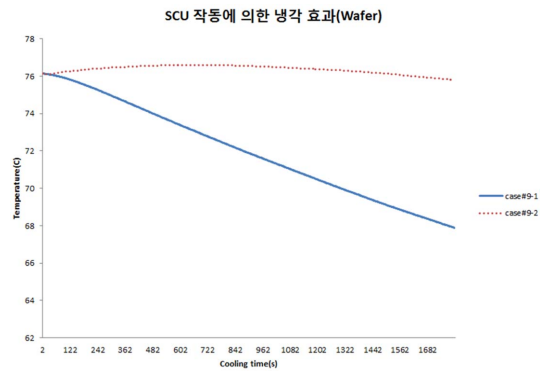


Fig. 11. Comparison of temperature curve when using SCU and natural cooling.

의 개별제어와 SCU의 사용이 본 연구에 사용된 저온 열처리로의 내부 온도 균일화에 도움이 될 수 있음을 확인하였다. 또, 기존의 경험 및 연구들로부터 저온 영역에서 온도 제어는 어렵지만 고온 영역에서의 온도제어는 용이함을 알고 있다.

이와 같은 사실로부터, 저온 열처리로의 내부 온도를 제어함에 있어 처음부터 공정온도를 목표로 온도를 상승시키지 않고, 초기에 정확한 고온을 맞춘 후 냉각을 통해 목표 온도에 도달하게 하는 방법이 채택되었다. 이 절에서는, 추가적인 조건에 대한 수치해석을 통하여 효과적인 냉각조건을 모색한다.

4.1. 경계 조건

앞서 얻은 결과로부터, SCU를 이용하여 냉각할 시 웨이퍼 온도를 선형적으로 제어할 수 있음을 확인하였다. 그러나 SCU는 상당히 고가이므로, 열전달 성능이 뛰어난 충전재를 사용하는 방법을 고려한다. Table 6에 해석을 위한 조건표를 나타내었다.

4.2. 결과 분석

Fig. 12는 기본 상태, 충전재 사용, blow 사용시 furnace 내부의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 전체적인 온도 값의 변화는 blow를 사용 했을 때의 경우가 가장 큰 것으로 확인되었다. Fla zone에 영향을 주는지의 여

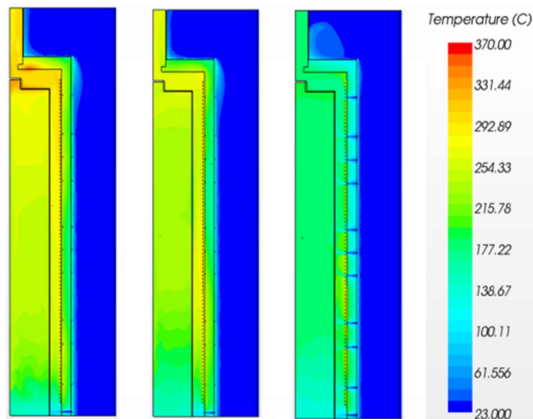


Fig. 12. Comparison of temperature scalar (Case_basic, Case_AXL, Case_blow).

부를 확인하기 위해 쿼츠 안팎으로 세로 방향의 온도를 측정하였고, 그 결과를 Fig. 13~14에 나타내었다. Fig. 13, 14에서 볼 수 있듯이 blow를 사용했을 때, 즉 SCU를 가동했을 때의 온도 분포가 가장 Flat zone에 근접하는 것을 알 수 있었다. 각 경우에 대해서 최대 및 최소 온도 편차를 계산하여 Table 5에 나타내었다. 그 결과 case_blow의 경우가 가장 편차가 적은 것으로 확인되었다. 이로써 blow를 적용한 SCU를 장착한 furnace의 flat zone이 가장 길 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 저온 furnace에서 flat zone을 확장시키기 위한 변수에 대한 연구를 우선으로 진행하였고, 그 중에서도 가장 큰 영향을 미치는 변수는 SCU의 설치 유무였다. 이에 대한 효과를 확인하기 위하여 실제 장비에 적용, 비교 및 대조용으로 열전달이 뛰어난 충전재를 적용하여 해석을 진행하였다. 그 결과, SCU를 적용한 모델이 본 연구에서 고려한 방법 중에 가장 flat zone이 가장 넓을 것으로 결론을 내릴 수 있었고, 현장에서도 이를 수용하여, SCU를 장착한 furnace를 양산 중에 있다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부에서 지원하는 과제(10048914)로 수행되었습니다.

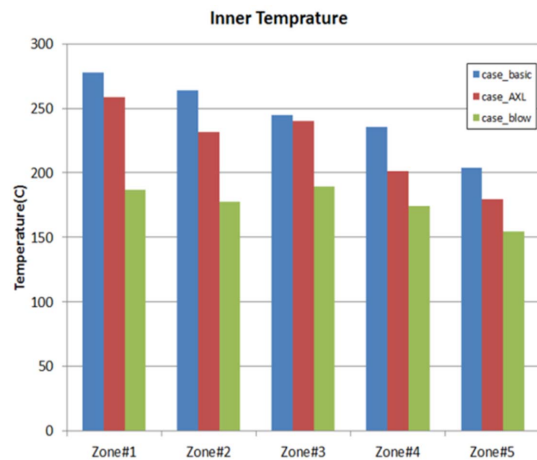


Fig. 13. Comparison of inner temperature.

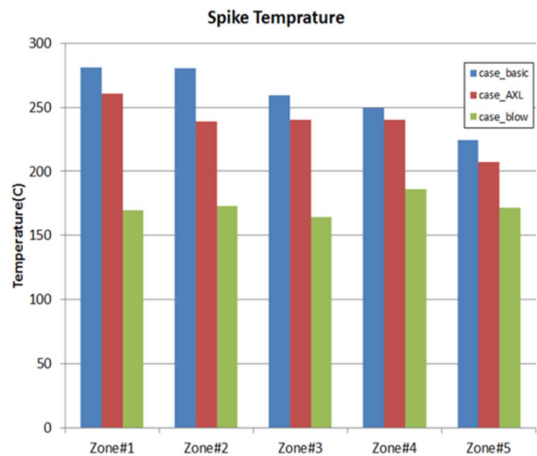


Fig. 14. Comparison of spike temperature.

참고문헌

1. J. Aminian, Sh. Shahhosseini, M. Bayar, "Investigation of Temperature and Flow Fields in an Alternative Design of Industrial Cracking Furnaces Using CFD", Iranian Journal of Chemical Engineering, Vol. 7, No. 3, pp.61-73, 2010.
2. Chiara Galletti, Giovanni Coraggio, Leonardo Tognotti, "Numerical investigation of oxy-natural-gas combustion in a semi-industrial furnace: Validation of CFD sub-models", FUEL, Vol. 109, pp445-460, 2013.
3. D. S. Han, C. H. Jeon, Y. J. Chang, and J. H. Song, "A Numerical Study on Prediction of Internal Temperature in Electric Melting Furnace with Thermal

- Characteristics Effect”, KSME 2008R2048, pp.371-375, 2008.
4. F. Y. Sorrell, “Surface radiation characteristic rapid thermal processing,” SPIESymp(On rapid thermal processing based on incoherent sources of light), 1989.
 5. Munson et al, “Fundamentals of fluid mechanics”, Wiley, 2010.
 6. CD-adapco, User Guide 9.02, 2014
 7. M. F. Modest, “Radiative Heat Transfer”, McGraw-Hill, New York, 1993.
 8. R. Siegel, and J. R. Howell, “Thermal Radiation Heat Transfer”, Third Edition, Hemisphere Publishing Co., Washington, 1992.
-
- 접수일: 2014년 12월 4일, 심사일: 2014년 12월 15일,
게재확정일: 2014년 12월 22일