〈 기술논문 〉

전산 열해석 DB를 이용한 초고온 진공로 최적설계

리진철* · 박미영* · 이재우† · 변영환** · 이창진**

(2005 년 5 월 31 일 접수, 2006 년 4 월 18 일 심사완료)

Optimal Design of High Temperature Vacuum Furnace Using Thermal Analysis Database

Zhen-Zhe Li, Mee-Young Park, Jae-Woo Lee, Yung-Hwan Byun and Changjin Lee

Key Words : High Temperature Vacuum Furnace(초고온 진공로), Optimization(최적화), Thermal Analysis Database(열해석 DB)

Abstract

Optimization study has been carried out to design an energy efficient, high temperature vacuum furnace which satisfies users' design requirements. First of all, the transient temperature distribution and the uniform temperature zone results have been compared with the steady state results to validate the feasibility of using steady state solution when constructing the thermal analysis DB. In order to check the accuracy, the interpolated results using thermal analysis DB have been compared with the computational and the experimental results. In this study, total heat flux is selected as the objective function, and the geometry parameters of vacuum furnace including the thickness of insulator, the heat zone sizes and the interval between heater and insulator are the design variables. The Uniform temperature zone sizes and the wall temperature are imposed as the design constraints. With negligible computational cost a high temperature vacuum furnace which has 40~60% reduction in total heat flux is designed using thermal analysis DB.

1. 서 론

진공로는 공업로의 한 종류로 알맞은 분압(partial pressure)으로 배기시킨 밀폐 공간에서 금속을 열처리 하는 로(furnace)를 말한다. 공업용 진공로는 원재료와 기능요소 부품의 제조공정에 필수적인 장치로 현대산업의 기반 기술이 되고 있다.

그러나 국내에서 행해지는 진공로의 제작은 기존의 경험에 의존하거나 선진기업 제품의 모방 제작을 반복함으로 인하여 제작 전 성능예측이 불가능하다. 또한 사용자의 요구사항을 만족 시키기 위하여 과도하게 설계되는 경향이 있어 불필요한 제작 및 운용비 증가를 유발하므로 독자적 신제품 개발 및 신기술에 대한 체계적이며 과학적인 접근이 필요한 실정이다.[1] 특히, 경쟁력 있는 진공로의 생산을 위해서는 효율적인 진공로 설계기술의 확보가 매우 중요하다.

일반적으로 진공로는 발열체, 단열재, 챔버, 배기시스템, 제어시스템, 냉각시스템으로 이루어져 있으며, 각각의 구성품들은 사용자의 요구사항과 운용조건에 따라 설계, 선정되고 있다. 특히 발열체와 단열재는 진공로의 핵심부품으로 그 구성 및 선택은 에너지 효율, 제작비 및 운용비와 직접적으로 연관되어 있으므로 설계요구사항을 만족시키는 최적의 설계가 이루어져야 한다.[2]

따라서 본 연구에서는 수치최적설계 기법을 적

* 건국대학교 기계항공공학부 e-시스템통합기술연구센터
† 책임저자, 회원, 건국대 기계항공공학부 CAESIT
E-mail : jwlee@konkuk.ac.kr
TEL : (02)450-3461 FAX : (02)3437-3548
** 건국대 기계항공공학부 CAESIT

용하여 진공로 구성품들의 규격 및 배치 등을 최적화하고 진공로의 운용비용, 에너지 효율을 극대화 할 수 있는 진공로 설계 기술을 개발하고자 하였다. 해석결과의 정확성을 유지하면서 최적설계에 필요한 해석 시간을 효율적으로 감소시키기 위하여 진공로의 열해석을 미리 실행한 후, 해석결과를 DB 화 하였으며 사용자의 요구조건에 적합한 진공로 형상을 도출하여 제작과정에서 발생하는 문제점을 최소화하고 비용과 제작시간을 절감하는 설계과정을 정립하고자 한다. 그리고, 시험로를 제작하여 실험결과와 열해석 결과를 상호비교, 보정함으로써 진공로 최적설계방법과 열해석 DB의 적용의 타당성을 검증 하고자 한다.

2. 진공로 설계 프로세스

일반적으로 업체에서는 진공로 설계를 위해 우선 견적서를 통하여 사용자가 요구하는 사용온도, 사용분위기, 열처리 장치의 형상, 전력요구 수준들을 선정한 후, 발열체와 단열재의 종류를 선정하는 과정을 수행한다.[2] 챔버 형태와 크기는 요구된 열처리 유효 면적과 사용 온도의 일정영역을 고려해서 결정하여 사용될 진공로 형태와 진공 시스템을 결정하고 사용온도 영역과 온도 일정 영역에 대한 조절(control) 방식을 결정한 후, 마지막으로 시료 크기와 무게에 따라 sample loading 방식을 결정한다. Fig. 1은 진공로 설계 과정을 보여주고 있다.

그러나 이와 같은 방법은 경험적이고 순차적이기 때문에 설계 및 제작 과정 중에 생기는 Over Design, Infeasible Design이 발생하게 되는 문제에 대해서는 고려되지 않고 있다. 이러한 문제점을 확인해 보기 위해 본 연구에서는 진공로를 이용한 실험과정 수행하여 보았다. 본 연구에서 사용된 시험로는 육면체 형상이고 발열체(Heater) 재료는 융점이 높고 증기압이 낮은 특성을 지닌 그라파이트(Graphite)를, 단열재는 열전도율이 낮고 고온에서 잘 견디는 그라파이트 펠트(Graphite Felt)를 사용하였다.[3] 챔버의 크기와 단열재 외부 크기는 고정하였으나 단열재 두께, Heat Zone 크기와 히터와 단열재 사이의 간격은 변수로 선정하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 시험로를 보여주고 있다.

3. 열해석 DB 구축

3.1 승온과정 고려 여부에 따른 비교분석

진공로 내에서의 열전달은 주로 전도와 복사에

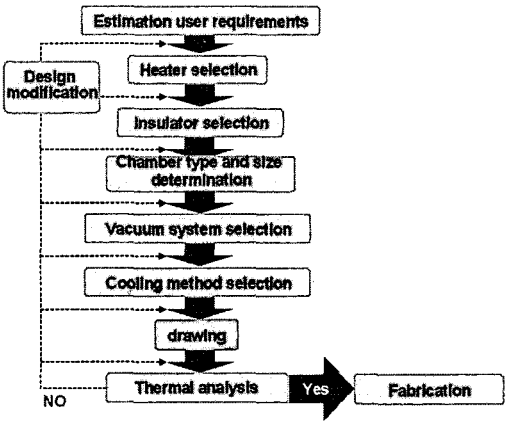


Fig. 1 Design process of vacuum furnace

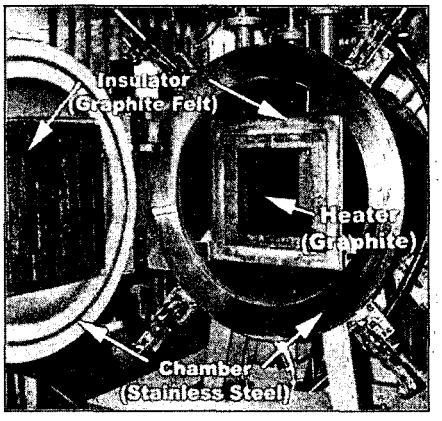


Fig. 2 Vacuum furnace baseline model

의해 발생하며 분위기 기체(Ambient Gas)가 있는 경우 대류 현상을 고려해야 한다. 분위기 기체가 없는 경우, 히터에서 단열재 내벽으로 복사에 의한 열전달이 발생하며, 단열재 내에서는 전도에 의해 외벽으로 에너지가 전달된다. 또한, 단열재 외벽에서 챔버까지 복사에 의한 열전달이 일어난다. 이러한 진공로 내부 열해석 결과를 이용하여 해석 DB 를 구축하고, 이를 바탕으로 진공로 내부 열해석을 수행함에 있어서 진공로의 전반적인 승온 과정에 대한 비정상해석이 필요하다.[4] 비정상해석은 많은 계산시간이 요구되기 때문에 대부분의 경우 경계조건을 초기화하여 정상상태로 수렴할 때까지 해석을 수행하는 방법을 이용한다. 이 방안의 타당성 검증을 위하여 기준형상 진공로 발열영역에 대한 승온(1350-2000℃)과정에 대한 비정상해석을 수행하여 정상상태로 수렴한 해석결과와 비교하였다. Fig. 3은 기준형상 진공로의

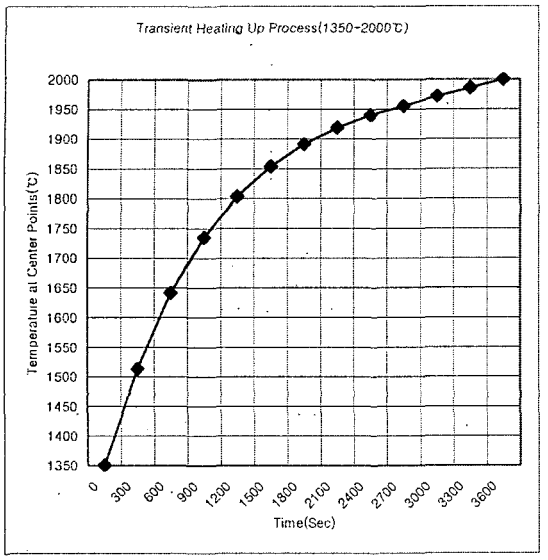
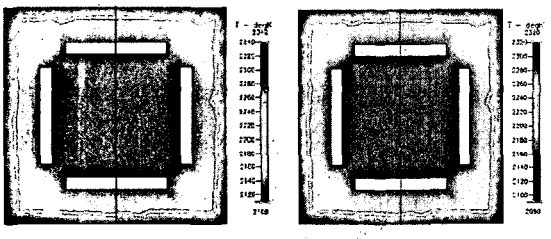


Fig. 3 Transient heating up process (1350-2000℃)



(a) Transient (b) Stedy-State

Fig. 4 Comparison to temperature distribution

승온과정을 보여주고 있다.

Fig. 4와 Table 1 에서 알 수 있듯이 비정상상태 해석에서 얻은 유효 발열영역크기(uniform temperature zone size)는 정상상태 해석결과와 1.7% 이내의 오차를 가지고 있으며 이를 통해 정상상태 해석으로 열해석 DB 를 구축하는 방안의 타당함을 검증 하였다.[5] 여기서 유효발열영역이란 사용자가 지정한 온도편차를 만족하는 유효공간의 크기를 말한다.

3.2 진공로 내부 열해석

진공로의 열해석을 위하여 상용 열유동 해석 프로그램인 CFD-ACE[6]를 사용하였다. 해석을 위한 진공로 형상은 가장 중요한 설계요소인 히터, 단열재, 챔버로 Fig. 5와 같이 단순화하여 구성하였다. 여기서 히터와 단열재 사이의 간격도 설계변수로 선정하였다. 히터는 두께를 가진 평판이며, 냉각수와 접촉하는 챔버의 온도는 27℃로 가정하였으며, 히터에 발열량을 경계조건으로 주고 계산을 수행하여 결과로 온도와 유효 발열영역의 크기 및 단열재 외벽 모서리 온도를 얻게 된다. 여기서 단열재 외벽 모서리 온도는 단열재를 지지하는 부분과 접촉하는 부분으로서 그 자체의 온도는 단열재에 많은 영향을 준다.

Table 1 Comparison of temperature distributions between transient heating up and steady-state

Items	Transient heating up		Steady-stae	
Input (mm)	Temperature(℃): 2000 Ambient Gas: Ar Temperature Variation(℃): 5 Number of Heater : 4 Heat Zone Height & Width: 160 Heat Zone Depth : 205			
Output (mm)	Uniform Temp. Zone		Uniform Temp. Zone	
	Height	146.3	Height	145
	Width	146.3	Width	145
	Depth	175	Depth	172
	Converged Time : 60hour		**Converged Time : 5hour**	

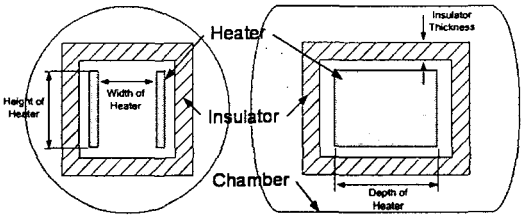


Fig. 5 Simplified furnace configuration for analysis

우선 진공로의 CFD 계산을 위해 진공로 내부와 외벽을 비정렬(unstructured grid) 격자로 구성하였다 비정렬 격자를 이용한 이유는 Heat Zone 을 하나의 영역으로 계산해주기 위함이다. 벽면의 경계 조건은 no-slip condition 이며, gas 의 온도는 벽면의 온도와 동일하고, 벽면에서의 열 손실은 없다고 간주하였다. 또한 본 연구에서는 분위기 기체인 Ar 이 존재함에 따라 대류현상이 발생하기 때문에 아래방향으로의 중력 효과를 고려해주도록 하였다. 열전달에 대한 효과는 Table 2 에 나와있는 실험을 통해 측정한 온도에 따른 Thermal Conductivity 를 Input 으로 넣어주어 그 효과를 계산하였다. 복사

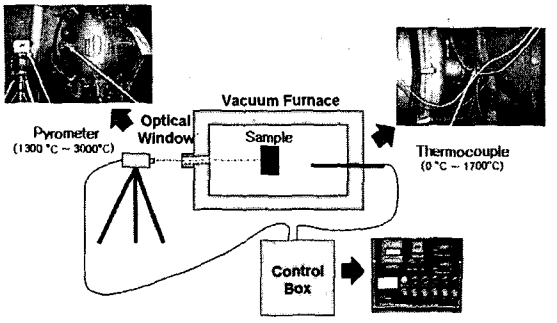


Fig. 6 Apparatus vacuum furnace experiment

모델의 경우 단열재를 blackbody 로 간주하여 gray body model 을 사용하였다. 진공로에서는 크게 두 가지 volume 이 존재하게 되는데, 하나는 heater 가 존재하는 공간과 단열재와 chamber 사이의 공간이며, 다른 하나는 단열재이다. 두 volume 에서 발생하는 열전달 과정은 완전히 다르기 때문에 구분해 주어야 한다. 전자의 공간에는 분위기 기체인 Ar 이 존재하게 된다. 이 volume 에는 Ar 기체의 방사율 중 초기 조건인 300K 일 때의 값인 0.5를 넣어주었으며, 흡수율은 0.2를 넣어주었다. 후자인 단열재가 존재하는 공간은 단열재는 단열재의 재료인 그라파이트 펠트의 방사율 0.9를 그리고, 단열재는 불투명(*opaque*)이므로 흡수율은 -1을 넣어주었다.

3.3 단열재의 열전도도 계산

해석결과의 정확도를 높이기 위해서는 실험결과와 해석결과에 대한 비교가 필요하다. 또한 정확한 해석을 위해서는 열전달에 가장 큰 영향을 미치는 단열재의 열전도도(Conductivity)도 알고 있어야 한다. 그러나 본 연구에서 사용된 단열재는 온도에 따른 초고온 열전도도가 알려지지 않았으므로 실험을 통하여 구하여야 했다. 이를 위해 고온인 1300℃ ~ 1600℃, 초고온인 2000℃ ~ 2500℃ 온도범위에서 실험을 수행하여 열전도도를 구하였다.[2] Fig. 6 은 사용된 진공로의 실험 구성도를 보여주고 있다. 이렇게 구해진 열전도도는 열해석 DB 구축과정에서 입력 값으로 사용하였다. Table 2 는 실험과 해석결과의 온도 비교 및 열전도도 값을 나타내었다. 열해석 결과는 실험치와 0.3% 이내의 정확도로 내부 온도를 예측하고 있음을 알 수 있다.

3.4 열해석 DB 구축

각 형상에 대한 열해석 결과는 미리 구축된 DB 를 사용하게 되면 진공로 설계시간을 대폭 단축할 수 있을 뿐만 아니라 전문지식이 없이도 해석이 가능하며 중소기업에서 실제 진공로 설계를 위하여 사용상의 편의성을 제공한다는 면에서 그 장점이 있다.

열해석 DB 는 사용자 요구 조건인 온도, 설계변수, 목적함수, 제한함수를 포함한다. 실제 진공로 경험적인 설계에서 형상변수에 대한 설계범위가 주어지며 이에 근거하여 각 설계변수들이 가질 수

Table 2 Comparison between experimental and CFD-ACE analysis results

Heat flux (W)	Experimental (℃)	CFD-ACE Analysis (℃)	Conductivity (W/m K)
1500	1000	999	0.40
2800	1300	1303	0.58
3300	1400	1405	0.67
3900	1500	1501	0.80
4600	1600	1603	0.97
6422	2000	1997	1.30
6903	2100	2105	1.39
7728	2200	2206	1.57
9270	2300	2302	2.03
9990	2400	2399	2.195
14350	2500	2499	3.65

Table 3 Schema of thermal analysis database

DB		Range
User Interface	Number of Heaters	2, 4
	Temp. at Center Points (℃)	2000-2500
	Ambient Gas	Ar
	Temperature Variation (℃)	3, 5, 10
Design Variables	Insulator Thickness (mm)	80-100
	Gap between Heater and Insulator (mm)	15-60
	Heater Height (mm)	100-200
	Heater Width (mm)	100-200
	Heater Depth (mm)	200-300
Objective	Required Heat Flux (KW)	
Constraints	Uniform Temp. Zone Height (mm)	
	Uniform Temp. Zone Width (mm)	
	Uniform Temp. Zone Depth (mm)	
	Temp. of Insulator Outer Wall (℃)	

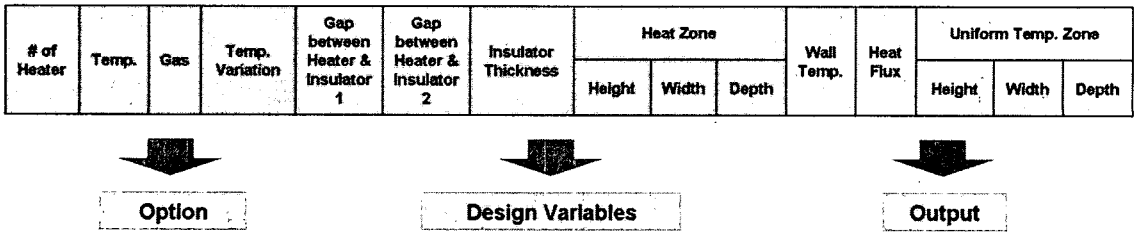


Fig. 7 Thermal database structure

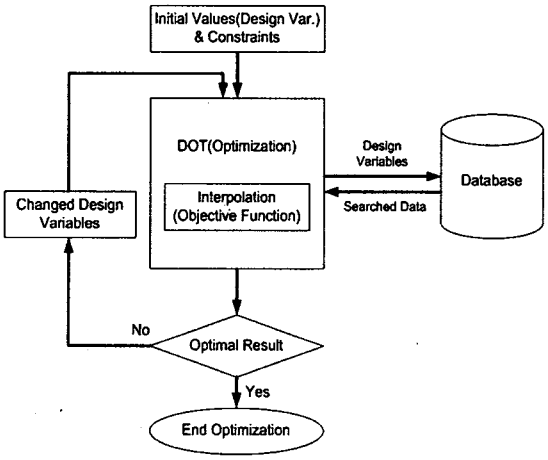


Fig. 8 Optimization strategy using thermal analysis database

있는 범위의 최대, 최소값이 결정된다. 해석 DB에 모든 설계값들을 포함할 수 없기 때문에 최적화 과정에서 설계변수들에 대한 목적함수와 제한함수 값은 선형 보간법(Linear Interpolation)을 이용하였다.

4. 진공로 최적설계 전략

4.1 최적설계를 위한 정식화

진공로의 설계요소는 사용자가 요구하는 사용온도, 사용분위기, 열처리 장치의 형상, 전력요구 사항과 발열체, 단열재, 챔버 크기, 배기시스템, 제어시스템, 냉각시스템 등으로 구성 된다. 본 연구에서는 진공로의 챔버 크기와 단열재의 외부 크기가 고정된 상태에서 주어진 구속조건을 만족시키면서 가장 적은 발열량을 필요로 하는 진공로 형상을 찾고자 한다.

진공로 내부형태는 육면체이며, 초고온에서 온도 범위는 2000℃ ~ 2500℃이다.

최적설계 정식화는 다음과 같다.

목적함수:

$$F(\vec{X}) = q_{required}$$

구속조건:

$$G_1(\vec{X}) = H_{required} - H \le 0$$
$$G_2(\vec{X}) = W_{required} - W \le 0$$
$$G_3(\vec{X}) = D_{required} - D \le 0$$
$$G_4(\vec{X}) = T - T_{required} \le 0$$

설계변수:

q : 발열량
Heat Zone 높이(H): (100-200)mm
Heat Zone 너비(W): (100-200)mm
Heat Zone 깊이(D): (200-300)mm
단열재 두께: (80-100)mm
높이, 너비방향에서의 히터와 단열재 사이의 간격: (15-60)mm
깊이 방향에서의 히터와 단열재 사이의 간격: (15-60)mm

본 연구에서는 구배법(Gradient Based Method)에 기반한 최적화 상용 프로그램인 DOT[7]를 이용하였고, MMFD(Modified Method of Feasible Directions)와 SQP(Sequential Quadratic Programming) 그리고 SLP(Sequential Linear Programming)알고리즘을 사용하여 최적화를 수행하였다.[7,8]

4.2 열해석 DB를 이용한 최적화 설계 프로세스

Fig. 8은 열해석 DB를 이용한 최적설계 과정을 나타낸 것이다. 설계변수와 제한함수를 초기화 한 후 최적화 과정에서 설계변수를 열해석 DB로 넘겨주면, 열해석 DB 내에서 각 설계변수 값들과 이웃한 값들을 보간 해준 다음, 최적화로 넘겨주어 지정된 설계변수들의 목적함수 값을 구한다. 목적함수 값이 최적화되고 구속조건을 만족할 때까지

새로운 값으로 설계변수를 변화시킨다.[8]

5. 설계/최적화 결과

5.1 열해석 DB와 해석 결과의 비교

열해석 DB 의 정확도 검증을 위하여 CFD-ACE 해석 결과와 열해석 DB 를 이용한 해석결과를 비교하였다. 검증용 시험로는 Fig. 2에서 보여진 형상으로서 단열재의 두께가 80mm 로 내부 형상은 160*160*205(단위: mm)이고 히터와 단열재 사이의 거리가 45mm 와 60mm 이다.

해석 DB 를 이용한 결과는 CFD-ACE 해석결과와 4%의 발열량 오차를 나타내고 있다. 해석 DB 를 사용하면 실험에서는 얻을 수 없는 유효발열영역(Uniform Temperature Zone) 크기를 얻을 수 있고 빠른 시간 내에 일정한 정확도를 만족하는 발열량을 얻을 수 있다.(Table 4참조) Fig. 9의 (a)는 2000℃에서의 Baseline 진공로 내부 온도분포를 보여주고 있다.

5.2 열해석 DB를 이용한 최적설계 결과

열해석 DB 를 이용하여 Baseline 에 대해 최적화를 수행하였고 최적화 수행 시 구속조건은 앞에서 수행한 열해석에서 얻은 유효발열영역의 크기(145*145*172)로 주었다. 유효공간크기가 전체 발열영역에서 차지하는 공간의 비중은 68.9%이다. 다음으로 열해석 DB 를 이용한 최적화 결과와 CFD-ACE 해석결과를 비교하였다.[Table 5, Table 6, Fig. 9의 (b) 참조] Table 5에서 알 수 있듯이 단열재 두께는 예상대로 커지는 방향으로 변하였고 히터와 단열재 사이의 거리는 작아지는 방향으로 변하였으며 챔버 크기를 고정한 상태에서 위에서 선정한 설계변수들이 서로 영향을 주어 최적화 형상을 도출하였다. 또한 최적화를 통하여 에너지를 40.7% 절감하였다.

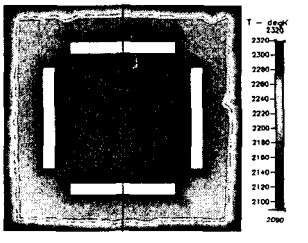
Table 6 은 열해석 DB 를 이용한 결과와 CFD-ACE 사이의 발열량 오차를 보여주는데 1.7%로 나타나고 있다. 여기서 알 수 있듯이 열해석 DB 를 사용하여 최적화 수행하면 사용자의 요구사항을 만족하면서 일정한 오차를 만족하는 전제하에서 빠른 시간 내에 진공로를 설계할 수 있다.

5.3 챔버 구속조건 적용여부에 따른 최적화 결과 비교

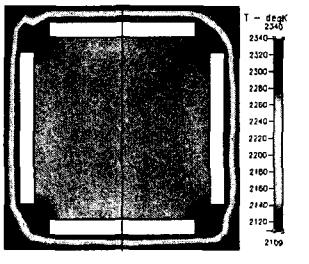
향후 진공로 사용시 광범성 보증을 위해 챔버 구

Table 4 Validation of thermal analysis database

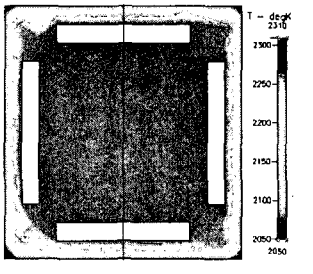
Items	CFD-ACE Analysis			Analysis using Thermal Analysis Database		
Design Data (mm)	Temp.(℃): 2000, Ambient Gas: Ar Temp. Variation (℃): 5 Number of Heater: 4 Insulator Thickness: 80 Gap between Heater and Insulator: 45,60 Heat Zone Height & Width : 160 Heat Zone Depth: 205					
Output (mm)	Heat Flux (KW)		9.8	Heat Flux (KW)		9.4
	Uniform Temp. Zone	Height	145	Uniform Temp. Zone	Height	151.9
		Width	145		Width	151.9
		Depth	172		Depth	199.4
	Wall Temp.(℃)		522	Wall Temp.(℃)		507.6



(a) Base model



(b) Optimized configuration under chamber size constraint



(c) Optimized configuration under without chamber size constraint

Fig. 9 Temperature contour plots of vacuum furnace (2000℃ at Center points)

속조건 사용여부에 따른 2 가지 Case 에 대한 비교를 진행하였다.(Table 7 참조) 구속조건으로 챔버 크기를 고정한다는 것은 경제적인 측면을 고려하여 기준 진공로의 챔버를 변경하지 않고 최적화를 수행함을 의미하며, 챔버 크기를 고정 하지 않는다는 것은 열해석 DB 를 사용할 수 있는 범위 내에서 챔버 구속조건 없이 최적화를 수행함을 의미한다.

2가지 경우에서 단열재의 두께는 모두 커지는 방향으로 변하고 히터와 단열재 사이의 간격은 모두 작아지는 방향으로 변하였다. 하지만 가장 큰 변화는 Table 6에서 나타나 있듯이 발열영역의 크기에서 볼 수 있다. 챔버 구속조건 사용하지 않을 경우에 챔버 구속조건 사용했을 경우에서 발생하는 균일 발열영역이 과도하게 만족하여 에너지 효율 이 떨어지고 제작 및 유지 비용이 커지는 영향을 피하게 함으로써 더 좋은 최적화 결과를 얻었다. 챔버를 변경하지 않을 때에 비해 최상의 에너지 절감 효과는 얻지 못했지만 Baseline 결과와 비교하여 볼 때 많은 에너지 절감 효과를 얻었음을 확인하였다.[Table 7과 Fig. 9의 (c) 참조]

Table 5 Energy efficiency the optimized for vacuum furnace

Items	Basemodel Vacuum Furnace			Optimized for Vacuum Furnace		
Input (mm)	Temperature(℃): 2000 Ambient Gas: Ar Temperature Variation(℃): 5 Number of Heater: 4					
	Insulator Thickness		80	Insulator Thickness		99.9
	Gap between Heater and Insulator		45,60	Gap between Heater and Insulator		15,42
	Heat Zone	Height	160	Heat Zone	Height	179.2
		Width	160		Width	
		Depth	205		Depth	200
Output (mm)	Heat Flux(KW)		9.4	Heat Flux(KW)		5.48
	Uniform Temp. Zone	Height	151.9	Uniform Temp. Zone	Height	176
		Width	151.9		Width	176
		Depth	199.4		Depth	194
	Wall Temp. (℃)		507.6	Wall Temp. (℃)		490
	Reduced of Heat Flux : 40.7%					

Table 6 Optimized designs using thermal analysis database and CFD-ACE

Items	Thermal Analysis DB			CFD-ACE		
Input	Temperature(℃): 2000 Ambient Gas: Ar Temperature Variation(℃): 5 Number of Heater: 4 Insulator Thickness(mm): 99.9 Gap between Heater and Insulator(mm): 15,42 Heat Zone Height & Width(mm): 179.2 Heat Zone Depth(mm): 200					
Output (mm)	Heat Flux(KW)		5.572	Heat Flux(KW)		5.48
	Uniform Temp. Zone	Height	179.2	Uniform Temp. Zone	Height	176
		Width	179.2		Width	176
		Depth	191.7		Depth	194
	Wall Temp. (℃)		483.7	Wall Temp. (℃)		490
	Converged Time : 40sec			**Converged Time : 30hour**		

Table 7 Optimized results with different chamber sizes

Items		Base Model	Fixed Chamber Size	Unfixed Chamber Size
Temperature(℃): 2000 Ambient Gas: Ar Temperature Variation(℃): 5 Number of Heater: 4				
Insulator Thickness (mm)		80	99.9	84.0
Gap between Heater and Insulator (mm)		45,60	15,42	11.3,46.6
Heat Zone	Height(mm)	160	179.2	145.8
	Width(mm)	160	179.2	145.8
	Depth(mm)	205	200	172.1
Heat Flux (KW)		9.400	5.572	3.452
Uniform Temp. Zone	Height(mm)	151.9	179.2	145.8
	Width(mm)	151.9	179.2	145.8
	Depth(mm)	199.4	191.7	172.0
Wall Temp. (℃)		507.6	483.7	451.0
Reduced of Heat Flux			**40.7%**	**63.3%**

6. 결 론

진공로 설계과정에서 사용자가 요구하는 유효발열영역 크기를 만족 시키면서 에너지 효율을 극대화하는 초고온 진공로의 최적설계를 위하여 열해석 DB 를 구축하였다. 정상 상태 열해석의 타당성 검증을 위해 기준형상 진공로 승온(1350-2000℃) 과정에 대한 비정상 상태의 해석을 수행하여 정상상태의 해석결과와 비교하여 정상상태로 수렴할 때까지 해석을 수행하는 방법의 타당성을 검증하였다. 진공로에 대한 본 연구를 통하여 열전달 DB 를 미리 구축하고 이를 이용하여 진공로 내부의 최적설계를 수행하여 에너지 절감효과를 확인하였다. 챔버 구속조건을 적용하지 않으면 63.3%, 경제적인 측면을 고려하여 챔버를 변경하지 않으면 40.7% 에너지 절감효과를 얻었다. 본 연구는 비교적 쉽고 빠르게 그리고 해석 정확도는 유지하면서 설계 최적화 결과를 도출하는 진공로 설계 방법을 정립하였다. 이 방법은 전기로 설계, 제작 현장에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 산학연 공동기술개발 컨소시엄사업과 한국과학재단의 특정기초연구지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Metal Network Korea, 2003, "What's the Present State and Future of Our Industrial Furnace Industry on 2003," *Industry Journal News CO. Ltd.*

(2) Lee, J. W., 2003, "High Efficiency and Very High Temperature Vacuum Furnace Design Technique Development Using MDO(Multidisciplinary Design Optimization) Method," *Technical Report.*

(3) 1991, "Heat Treating in Vacuum Furnaces and Auxiliary Equipment," *Metals Handbook,* Vol. 4. 9th edition.

(4) Modest, M. F., 2003, "Radiative Heat Transfer," *McGraw-Hill*, Second Edition.

(5) Kim, M. J., Jung, H. G, Lee, J. W. and Lee, C. J., 2005, "Optimal Design of Energy Efficient Vacuum Furnace Using Thermal Analysis Database," *Key Engineering Materials*, Vol. 207~279, pp. 732~740.

(6) CFD Research Corporation, 2004, "CFD-ACE Users Manual."

(7) 1995, "DOT Users Manual," *VR&D.*

(8) Jasbir S. Arora, 2001, "Introduction to Optimum Design, Second Edition," *McGraw-Hill.*