진공 침탄로 내의 전열 해석

이인섭* · 유홍선† · 김원배** · 양제복**

(2002 년 11 월 16 일 접수, 2003 년 4 월 7 일 심사완료)

Heat Transfer Analysis in the Vacuum Carburizing Furnace

InSub Lee, Hong Sun Ryou, Won Bae Kim and Je Bok Yang

Key Words : Vacuum(진공), Carburizing Furnace(침탄로), Heat Transfer(열전달), Radiation(복사)

Abstract

The main objective of the present study is to analyze the heat transfer characteristics in the vacuum carburizing furnace. Local temperatures are measured at different locations in the self-fabricated furnace for various operating conditions using K-type thermocouples. In addition, the present study simulates the fluid flows and heat transfer in the vacuum carburizing furnace using a commercial package (Fluent V. 6.0), and compares the predictions of local temperatures with experimental data. The temperature and flow fields are predicted. It is found that the time taken for reaching the steady-state temperature under the vacuum pressure is shorter than that under the normal pressure condition. It means that the carburizing furnace under vacuum pressure condition is capable of saving the required energy more efficiently than the furnace under the normal pressure condition. Furthermore, the temperature variations predicted by the numerical simulations are in good agreement with experimental data.

기호설명

c_p	:정압 비열 (J/kg-K)
E	:에너지
f	:자유도
$\vec{F}$	:체적력
h_j	:엔탈피
i	:복사 강도
j_j	:확산 플럭스
k	:열전도도 (W/m-K)
M_w	:분자량 (kg)
p	:압력
R	:일반 기체 상수
S_m	:질량 생성항
S_h	:에너지 생성항
T	:온도 (K)
$\vec{v}$	:속도 (m/s)
Φ	:위상 함수
Ω'	:입체각
μ	:점성 (kg/m-s)
ρ	:밀도 (kg/m^3)
σ	:분자 직경 ($\mathring{A}$)
σ_s	:산란 계수

* 중앙대학교 기계공학부
† 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부
Email :cfdmec@cau.ac.kr
TEL : (02)820-5280 FAX : (02)813-3669
** 한국에너지기술연구원

1. 서 론

열처리로는 장입물(금속, 비철금속 및 요업 재료)을 적당한 온도 및 분위기 하에서 가열, 냉각 작업을 통하여 재료의 특성을 향상하는 로를 총칭한다. 국내에 약 1,000 여기의 열처리 로가 존재하고 있지만 대부분이 금속류, 특히 철강을 열처리하는 로가 주종을 이루고 있다. 철강을 열처리하는 로는 매우 다양하여 그 수는 매우 많지만 크게 침탄이나 질화, 강을 연화하여 소성가공성을 높이거나 잔류응력을 제거하는 풀림 그리고 뜨임등에 적용되는 것이 대부분이다. 로형태에 따라 연속식과 뱃치식으로 대별되며 또한 재료에 따라 여러

형태가 있으며 그에 알맞은 여러 가지 로 설계기술이 존재한다. 하지만 각각의 다양한 형태의 로에 알맞은 고성능 열처리 기술은 제품의 품질과 관련한 생산성에 많은 변수가 있고 이에 대한 충분한 기술 축적이 안되어서 아직까지 국내 기술수준은 선진국의 기술을 답보 하는 상태이다.

본 논문에서는 표면경화를 위한 열처리 공정중 하나인 진공 침탄로에 대해서 연구할 것이다. 진공 침탄은 일명 분압침탄이라고 부르며, 부품을 산소 분압이 낮은 진공중에서 오스테나이트 상태로 가열하고 탄화수소 가스를 주입하여 대기압보다 낮은 진공 상태의 분위기에서 분해된 탄소가 강재표면에 침입하여 침탄이 이루어지는 표면 경화법 이다. 이러한 진공 침탄은 미국에서 1968 년경부터 연구를 시작하여 1970 년대에 사용되기 시작하였다. 그러나, 기대와 달리 수팅(sooting)으로 인한 유지보수의 어려움과 품질의 불안정으로 어려움이 있어 80 년대 중반 거의 폐기되다 90 년대에 수팅의 문제가 해결됨으로써 다시 프랑스를 비롯한 세계각국에서 최근 많이 도입되고 있다. 진공 침탄법은 가스 침탄법과 비교하여 많은 우수한 특징을 가지고 있다. 진공 침탄법은 생산적 측면에서, 진공 단열로 인하여 고온의 처리가 가능하고 처리시간이 단축되며 입계 취하가 적고, 환경적으로도 이산화 탄소의 발생이 적으면 불연속 적인 운적이 가능하여 에너지 절약이 가능하다. 위와 같이 진공 침탄은 많은 장점을 가지고 있지만 발달역사가 짧아 경험이 부족하여 기술 축척이 이루어지지 못한 상태이다. 특히, 우리나라에서 이러한 분야에 대한 연구가 부족하고 진공 침탄의 산업화를 위한 기술 개발이 대단히 미미하여 설비적인 면이나 기술적 양면에서 개발 노력이 절실히 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 침탄로 설계시 요구되는 최적화를 구현하기 위해 진공 침탄로 내의 전열해석을 수행 하였다. 전열 해석을 수행하기 위해 소형 진공 침탄로를 제작하여 온도를 측정 하였고 이를 바탕으로 수치 해석하여 실험과 비교해석 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 저압 침탄 시뮬레이터의 제작

진공 침탄로에서 전열해석을 위해서 실험용 소형 진공 침탄로를 제작하였다. 시뮬레이터의 구성은 크게 시뮬레이터 본체 , 진공 펌프, 로체 냉각장치 , 가열장치 , 진공제어 및 맥동 제어시스템으로 구성되어 있다. 시뮬레이터 본체는 SCM 15 로 외부가 1170 × 1000 × 870 mm 이고 내부가 840 × 750 × 540 mm 이다. 실험로의 본체는 진공상태를 유지하여야 되고 또한 사용온도가 최고 1,000℃ 이르는 점을 감안하여 2 중 철재구조로 제작하였다. 가열 장치는 4 개의 복사 튜뷰 버너 (Single End Type Radiant Tube Burner)이고 냉각 장치는 물재킷을 이용한 강제 수냉식이며 내부 단열재는 그래파이트 펠트 (Graphite Felt)를 사용하였다. Figure 1 은 진공 침탄 시뮬레이터의 외부 전경을 보여주고 있다. Figure 2 은 침탄로 형상에 대한 개략도이다. 침탄로내의 온도 분포는 열전대를 이용하여 그림에 표시된 위치의 10 곳에서 측정하였다. 측정은 버너, 단열벽 바깥쪽 3 곳, 장입물 표면 2 곳과 침탄로 내부 4 곳에서 수행하였다. 열전대의 위치는 Fig. 3 에 나타나 있다. 침탄로는 4 개의 RT 버너와 로 중심에 팬이 장착되어 있고 장입물은 실린더 형상으로 위와 아래에 40 개씩 놓여져 있다.

2.2 실험 장치

Figure 3 는 진공 침탄로에서 온도 측정을 위한 실험 장치의 개략도 이다. 진공펌프와 연결되는

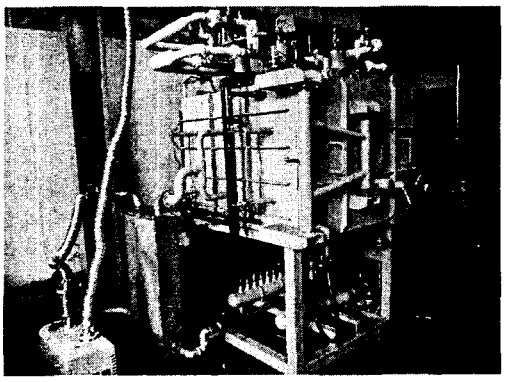

Fig. 1 The vacuum furnace simulator

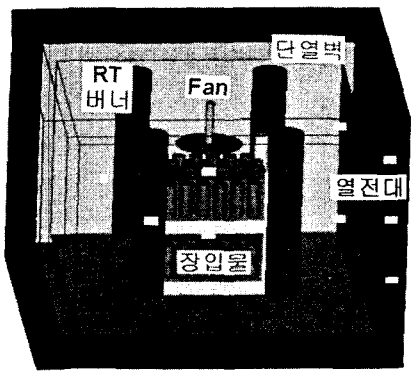

Fig. 2 Scheme diagram of carburizing furnace

진공 흡입구를 시뮬레이터의 한쪽면 중앙에 상 하 두군데 설치하고 외부에서 하나로 합친 후 진공펌프에 연결시켰다. 로체 설계에서 가장 중요한 로내 온도분포도를 알아보기 위한 온도 측정은 단열재 내부의 각면과 상하에 모두 4 곳에 설치하였고 단열재의 단열성능과 로체에 전달되는 전열의 정도를 알아보기 위해 단열재 밖과 본체 벽면 사이의 3 곳에도 설치하였다. 진공펌프 운전의 기준이 되는 피라니 진공게이지를 본체 한군데에 설치하였고 별도로 또 한군데에는 아날로그 진공게이지를 설치하여 항상 육안으로 확인할 수 있도록 하였다. 침탄을 위한 프로판 가스 투입구는 유량조절장치에서 측정되어 나온 프로판 가스가 한군데에 집중적으로 들어가지 않고 로체 상 중 하 세군데로 나뉘어 들어갈 수 있도록 세 곳에 설치하였다. 또한 진공 후 질소 치환할 때 사용되는 질소 투입구를 로체 한면에 1 군데 설치하였다. 모든 센서 투입구 및 가스 투입구에는 물에 의한 냉각을 할 수 있도록 이중으로 만들어 냉각수로 냉각하고 튜브를 충분히 길게 제작하여 밖으로 100 mm 정도가 돌출 되어 고온의 로내온도에 의해 기밀 유지한 부위에 문제가 일어나지 않도록 설계 하였다. 또한 장입물과 버너의 시간에 따른 온도 변화를 알아보기 위하여 장입물과 버너에 k 형식 열전대를 부착하였다.

3. 수치해석

3.1 진공의 수치해석

진공을 수치해석 하기 위해서는 진공에 적용 가능한 수치해석 모델을 결정하는 것이 매우 중요하다. 그러므로 본 연구에서 진공 침탄로의 진공도가 어느 정도인지 판단하는 것이 필요하다. 전광화(1998)는 압력의 크기에 따라 Table 1 과 같이 진공도를 5 가지로 분류하였다. 기존의 수치 해석들은 고 진공의 경우 대류의 영향을 무시하여 수치해석 하였으며 이 경우 복사열전달은 작동유체의 참여를 무시하고 표면 복사만을 고려하여 수치해석 하였다. 그러나, 현재 시스템은 10~100Pa 정도의 작동압력범위를 가짐으로 이 분류 기준에 의하면 중진공에 해당된다. 이는 대류의 효과를 무시하거나 표면 복사만을 고려하는 것은 문제가 있음을 알 수 있다. 또한, 중진공 영역은 분자천이 영역 혹은 미끄럼 영역(slip flow region)으로 정확한 유동 해석을 위하여 분자적 개념의 확률 수치해석법인 DSMC 법을 이용해야 한다. 그러나 이 영역에서는 근사적으로 연속체 (continuum)의 개념을 이용한 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 해석 가능하다(허중식 등, 1999). 그럼으로, 본 진공 침탄로의 수치해석에서는 작동유체를 연속체로 가정하고 대류의 효과뿐만 아니라 참여매체의 효과를 고려할 수 있는 체적복사 방법을 사용하여야 한다

Table 1 The degree of vacuum

진공도	압력 (Pa)	특징
저진공	대기압~100	밀도가 충분히 큼
중진공	10^{2}~10^{-2}	천이영역
고진공	10^{-2}~10^{-5}	분자 충돌이 거의 없음
초고진공	10^{-5}~10^{-8}	재료 표면에서 가스방출
극고진공	10^{-8}~	나노 소자 제조에 쓰임

3.2 수치해석 방법

진공 침탄로의 .유동장과 온도장을 수치해석하기 위해 적용한 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식, 복사전달방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\vec{v})=S_m \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v})+\nabla\cdot(\rho\vec{v}\vec{v})=-\nabla p+\rho\vec{g}+\vec{F} \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\nabla\cdot(\vec{v}(\rho E+p))=-\nabla\cdot\left(\sum_j h_j J_j\right)+S_h \tag{3}$$

$$\frac{di(s)}{ds}=-\alpha\, i(s)+\alpha\, i_b(s)-\sigma_s i(s)+\frac{\sigma_s}{4\pi}\int_{4\pi} i(s,\Omega')\,\Phi(\Omega':\Omega)\,d\Omega' \tag{4}$$

타원형방정식에 의해 지배되는 유동의 가장 큰 특성은 어느 한 방향으로 발생된 어떤 요소의 영향이 모든 방향으로 전파된다는 데에 있다. 따

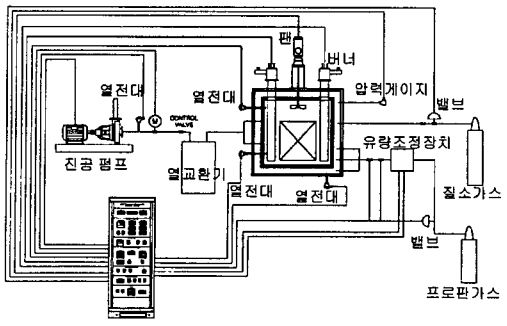

Fig. 3 The scheme diagram of experiment

라서 경계조건을 물리적으로 타당하게 부여하는 것은 수치해석에 있어 매우 중요하다. 본 수치해석에서는 벽면에서의 영향을 고려하는 방법으로 벽함수를 이용하였고 2 층 모델(two layer model)을 사용하여 벽처리를 하였다. 평균 온도장에 대한 벽면 경계조건은 운동량 전달방정식과 에너지 전달방정식의 Reynolds 해석에 의해 평균 속도장에서 벽법칙과 유사하게 표현되어질 수 있다. 또한, 압력장을 구하기 위한 해석 알고리즘으로 PISO 알고리즘(Issa, 1985)을 사용하였다. 수치 해석에 사용된 프로그램은 범용 코드인 Fluent V. 6.0 을 사용하였다.

또한, 진공의 수치해석을 위해 작동 유체의 물성값들을 결정하여야 한다. 본 논문에서는 다음과 같은 이상 기체 상태 방정식과 운동학 이론을 적용하여 수치해석 하였다.

$$\mu = 2.67\times10^{-6}\frac{\sqrt{M_w T}}{\sigma^2\Omega_\mu} \tag{5}$$

$$k = \frac{15}{4}\frac{R}{M_w}\mu\left[\frac{4}{15}\frac{c_p M_w}{R}+\frac{1}{3}\right] \tag{6}$$

$$c_p = \frac{1}{2}\frac{R}{M_w}(f+2), \tag{7}$$

여기서, μ, k, c_p 는 각각 점성, 열전도도, 비열을 나타내며 프로판 가스의 경우 L-J 실험상수는 0.47nm 과 358.9K 이다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 침탄로 설계에서 최적화를 구현하기 위해 소형 진공 침탄로를 제작하여 전열 해석하고 이를 바탕으로 수치 해석하여 실험과 비교 해석 하였다. 실험과 수치 해석은 저압상태와 상압 상태의 두 가지 경우에 대해 수행되었다.

Figure 4 는 저압 상태에서 로내의 온도 상승 곡선을 나타낸다. 여기서, 이점 쇄선은 장입물이 960°C 의 정상 상태에 도달하는 시간을 나타낸다.

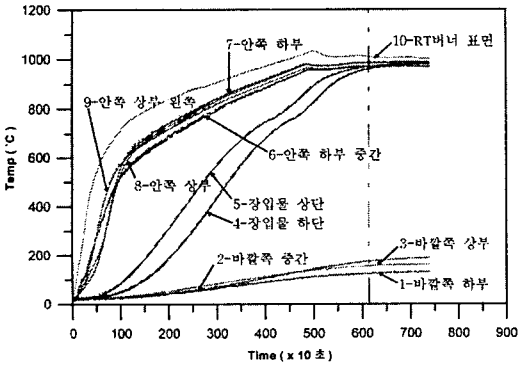

Fig. 4 Temperature at low pressure

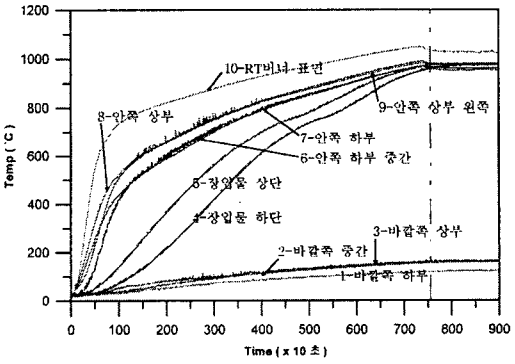

Fig. 5 Temperature at normal pressure

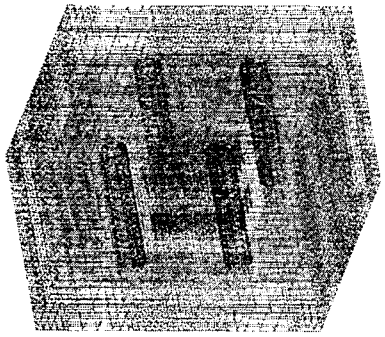

Fig. 6 The grid system for numerical simulation

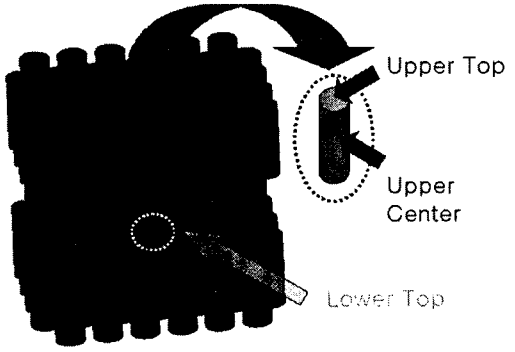

Fig. 7 The extracted location of temperature

버너의 온도는 온도가 낮은 초기에는 온도가 급격히 상승하지만 800°C 정도에 도달하면 열 손실이 커져 온도 상승이 급격히 감소한다. 분위기 온도는 버너의 온도와 유사한 경향을 보여준다. 반면, 장입물의 온도는 초기에 서서히 증가하다가 분위기 온도가 충분히 높아지면 급격히 증가하기 시작한다. 이는 장입물의 온도를 높이기 위해 일정한 열량 이상이 공급되어야 함을 보여준다. 또한, 단열벽 안쪽의 온도가 단열벽에 의해 단열벽 바깥쪽의 온도보다 매우 높은 경향을 보이고 있고 장입물의 온도는 두 온도의 중간정도 이다. 초기에는 장입물과 분위기 온도가 많은 차이를 보이지만 충분한 시간이 경과하여 정상 상태에 도달하면 장입물과 분위기 온도는 거의 같은 온도에 도달하게 된다. 그러나, 단열벽이 열 손실을 완벽하게 차단하지 못함으로 열 손실이 발생하여 버너표면의 온도보다는 낮은 분포를 가진다. 저압 상태의 경우, 시편이 960°C 의 정상 상태에 도달하는 시간은 100 분 정도가 소요되었고 연료 투입량은 정상 상태에 도달하기 전에는 5.2 m^3/h, 도달 후에는 3.2 m^3/h 이다. 이에 비해, Fig. 5 는 상압에서 로내의 온도 변화를 보여 주고 있다. 이 그림은 상압의 경우 저압의 경우 보다 정상 상태에 도달하는 시간이 125 분 정도로 25 분 늦는 것을 보여준다. 또한, 연료 투입량도 정상상태에 도달하기 전에는 5.2 m^3/h, 도달 후에는 3.8 m^3/h 이었다. 이는 저압의 경우가 상압의 경우 보다 에너지 절약 효과가 높음을 보여준다. 대략적으로 정상 상태에 도달하기 전에는 20%정도 연료 소모량이 감소하였으며, 정상 상태 도달 후에는 15%정도 연료 소모량이 감소하였다. 이는 저압의 경우 작동 유체를 가열하는데 필요한 에너지가 적음으로 장입물의 온도를 보다 효과 적으로 높일 수 있음을 알 수 있다. 또한, 분위기 온도와 버너의 온도 차도 저압의 경우 보다 큰 차이를 보이고 있는데 이는 열 손실이 저압의 경우 보다 큼을 알 수 있다. 이것은 진공의 경우 대류에 의한 열전달 효과가 작기 때문에 단열벽의 효과가 증가함을 보여 주고 있다.

Figure 6 은 수치해석을 위한 격자계이다. 격자의존성을 검사하기 위하여 격자는 13 만개와 30, 만개, 50 만개 격자에 대하여 수치해석 하였다. 수치해석의 경계성을 고려해 격자 수는 약 13 만개를 사용하였고 계산 시간은 펜티엄 4 1.5 기가 cpu 를 사용하여 9000 초 까지 수치해석 하는데 시간 변화를 5 초로 하고 약 35 시간 정도 소요되었다.

Figure 7 은 수치해석에서 온도측정 위치를 보여준다. 상단 중간에 위치한 장입물의 표면과 중심, 하단 중간에 위치한 장입물의 표면에서의 온도를 실험 결과와 비교하였다.

Figure 8 은 저압 침탄로의 수치 해석한 결과를 보여준다. 수치해석은 실험에서 측정된 RT 버너의 온도를 버너의 경계조건으로 적용하여 수행하였고 물에 의해 냉각되는 외부 저온벽은 300K 에서 400K 로 선형적으로 변화한다고 가정하고 경계조건으로 적용하였다. 실험에서 측정된 버너의 온도를 시간에 따라 곡선 맞춤(curve fitting)한 함수는 Fig. 8 에 나타나 있다. 수치해석 결과는 분위기 온도, 장입물 상단과 하단의 표면온도를 실험 결과와 비교 해석하였다. 초기에는 실험 결과와 매우 잘 일치하지만 온도가 높아 질수록 약간 하향 예측하고 있다. 이는 복사 물성치를 온도의 함수로 주어야 하지만 복사 물성치에 대한 실험자료의 부족으로 상수로 처리하였기 때문으로 사료된다. 특히, 분위기 온도를 하향 예측함으로써 장입물의

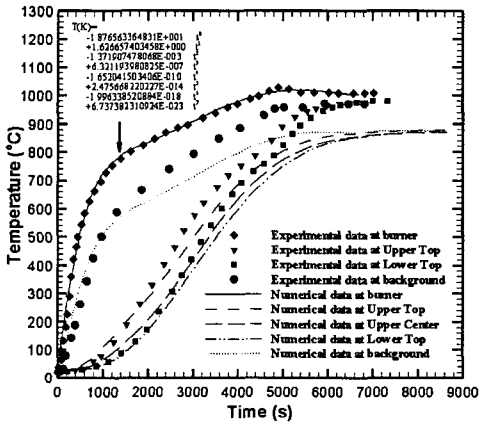

Fig. 8 Temperature variations at vacuum

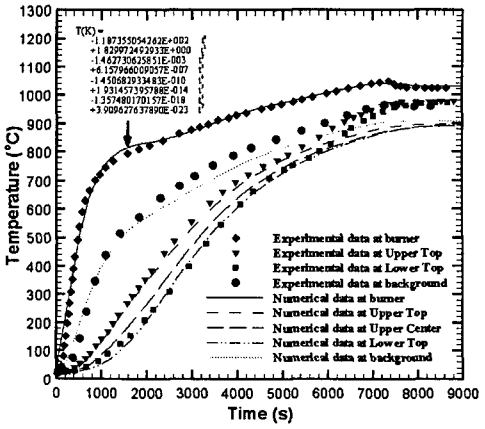

Fig. 9 Temperature variations at normal

온도도 하향 예측하고 있다.

Figure 9 는 상압 침탄의 경우 시간에 따른 온도 변화를 나타낸다. 저압 침탄의 경우와 같이, 초기에는 실험 결과와 매우 잘 일치 하지만 온도가 높아질수록 하향 예측하고 있다. 상압의 경우 분위기 온도를 저압의 경우 보다 잘 예측함으로써 장입물의 온도도 실험 결과와 보다 더 유사하다. 저압과 상압의 결과를 비교해 보면, 실험 결과와 같이, 저압의 경우가 정상 상태에 도달하는 시간이 빠름을 알 수 있다. 이것은 저압 침탄의 경우가 상압 침탄의 경우보다 에너지 절약 효과에서 훨씬 우수하다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 침탄로 설계에서 최적화를 구현하기 위해 소형 진공 침탄로를 제작하여 전열 해석하고 이를 바탕으로 수치 해석하여 실험과 비교 검토 하였다. 본 연구의 실험과 수치 해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 저압 침탄의 경우 상압 침탄의 경우보다 정상상태에 도달하는 시간이 25 분 정도 짧으므로 에너지 절약효과가 크다.

(2) 상압 침탄의 경우 저압 침탄의 경우 보다 정상상태에 도달하기 전에는 연료소비량이 20%많고 정상상태에 도달 후에는 15% 많음으로 상압 침탕의 경우가 열 손실이 더 크다.

(3) 장입물과 분위기 온도에 대한 수치해석 결과는 실험 결과와 비교적 잘 일치하고 있다.

후 기

본 연구는 2001 년 에너지관리공단 에너지절약 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

(1) Kim, J. Y., Lee, D. H., Choi, J. M. and Choi, S. W., 2000, "A Study on Acceleration of Thermal Vacuum Test and Its Numerical Simulation," *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 28, No.2, pp. 145~153.

(2) Bae, S. H., In S. R., Jung, K. H., Lee, Y. B., Shin, Y. H., 2000, "Vacuum Engineering," The Korea Economic Dally, Seoul.

(3) Lee, S. G., Kang, S. B., Jung, B. H. and Kim, H. G., 1992, "A Study on Setting up Condition of Treatment for Vacuum Carburizing," *Journal of the Korean Society for Heat Treatment*, Vol.5, No. 4, December, pp. 195~200.

(4) Jung, K. H., 1998, "Measurement of Degree of Vacuum," *Journal of the KSME*, Vol. 28, No. 5, pp. 54~58.

(5) Heo, J. S., Hwang, Y. K., and Park, C. Y., 1999, "A Study of the Numerical Method on the Molecular Transition Flow for the Rotating Blades," *Journal of the Korean Vacuum Society*, Vol. 8, No.2, pp. 83~92.

(6) Issa R. I., 1985, "Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting," *Journal fo Computaional Physics*, Vol. 62, pp. 40~65.

(7) Mochida, A., Kudo, K., Mizutani, Y., Hattori, M., and Nakamura, Y., 1997, "Transient Heat Transfer Analysis in Vacuum Furnaces Heated by Radiant Tube Burners," *Energy convers. Mgmt*, Vol. 38, No. 10-13, pp. 1169~1176.

(8) Van Atta, C.M., 1965, "Vacuum Science and Engineering," McGraw-Hill, New York.