

TG-CVI용 히터 형상설계 및 최적화

Design and Optimization of TG-CVI Heater

이 성 호* 홍 성 석** 구 형 회***
Sung Ho Lee, Sung Suk Hong, Hyung Hoi Koo

ABSTRACT

Thermal gradient chemical vapor infiltration (TG-CVI) process, which is one of the CVI techniques to densify a porous fiber preform, requires for a heater to have uniform surface temperature distribution. Thus, it is essential to design the shape of the heater and to predict the temperature distribution when the heater has a profile which is not a simple cylinder. In this study, an analytical method has been used to design the inner profile of a conical heater showing uniform temperature distribution, if its outer shape is specified. Temperature distribution on the heater surface has been calculated with the finite difference method and compared with the experimental results. When a heater had a combined profile with a large cone and a small cylinder, temperature was higher in the cylindrical part. To reduce the temperature difference between these areas, a hole-machining method has been proposed including other possible ones. A shape design and optimization program has been made to improve the temperature uniformity of the TG-CVI heater better than that designed with the analytical method.

Keywords : TG-CVI, Heater, Shape design, Optimization

1. 서 론

다공성인 복합재료 프리폼(preform)을 치밀화하기 위한 방법의 하나로써 화학기상함침 공정이 쓰이고 있으며, 여기에는 등온법, 온도구배법, 압력구배법 등이 있다⁽¹⁾. 이 중 온도구배 화학기상함침(TG-CVI, Thermal Gradient Chemical Vapor Infiltration) 공정은 증착온도로 가열된 히터를 프리폼 내부에 위치시켜 프리폼에 온도구배를 발생시킴으로써 증착 반응이

히터 외벽, 즉 프리폼 내부로부터 시작하여 점차로 바깥쪽에서 일어나도록 유도하는 공정이다. 이 공정에서는 히터 외벽 온도를 일정하게 유지하여야 하므로 히터 형상이 단순한 원통형이 아닌 경우에는 일정 표면온도 유지를 위한 히터 형상설계와 온도분포 예측이 필수적으로 수행되어야 한다.

본 연구에서는 해석적 방법을 이용하여 원추형 히터의 형상을 설계하고, 유한차분법으로 히터의 표면 온도분포를 예측하였다. 또한 원추부와 원통부가 결합된 형태의 히터에서 나타나는 두 부분의 표면온도 편차를 줄이기 위한 형상 최적화 방법을 제시하였다.

* 국방과학연구소

** 국방과학연구소

*** 국방과학연구소

2. 모델링

2.1 히터 형상설계

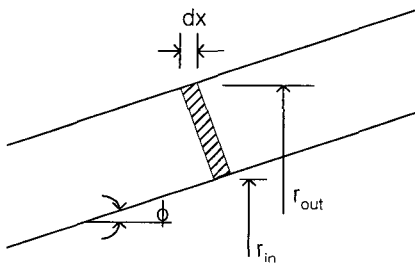
히터는 통전에 의한 Joule열에 의해서 가열되며 이때 발생하는 열은 히터 표면에서 복사(radiation)로 방출되어 전체 열흐름은 정상상태를 이룬다고 가정하였다. 일반적으로 히터의 외면 형상은 미리 주어져 있으므로 이 형상을 기준으로 하여 히터 외면에 일정한 온도가 유지되도록 히터의 내부 형상을 결정해야 한다.

본 연구에서는 원추형 히터를 대상으로 형상설계를 하였으며 여기에 사용된 기하학적 모델은 그림1과 같다. 그림1은 히터의 원추부를 나타낸 것으로서 빗금친 부분과 같은 미소부피를 가정하면 이 요소에서의 Joule열 발생율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{in} = I^2 R = I^2 \rho \frac{l}{A_c} \quad (1)$$

$$= I^2 \rho \frac{dx}{\pi (r_{out}^2 - r_{in}^2)} \cdot \frac{1}{\cos^2 \psi}$$

여기에서 I 는 히터에 흐르는 전류, ρ 는 히터 재료의 비저항, r_{out} 및 r_{in} 은 히터의 외부 및 내부 반지름을 각각 나타내며, ψ 는 히터 표면의 기울기를 나타낸다.



(그림 1) 원추형 히터의 내부 형상설계를 위한 기하학적 모델

한편 히터 외부 표면에서 복사열로 방출되는 에너지는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$q_{out} = \sigma \epsilon (T_{surf}^4 - T_{ambi}^4) A_s \quad (2)$$

$$= \sigma \epsilon (T_{surf}^4 - T_{ambi}^4) 2\pi r_{out} \frac{dx}{\cos \psi}$$

여기에서 σ 는 Stefan-Boltzman상수이며, ϵ 는 복사율(emissivity), T_{surf} 및 T_{ambi} 는 각각 히터 표면온도 및 주변온도를 나타낸다.

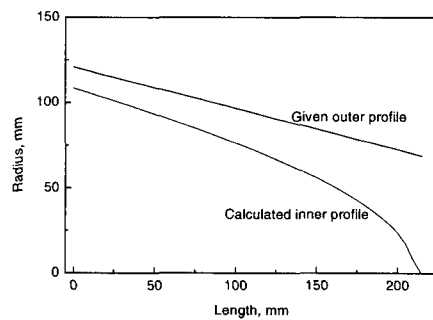
$T_{surf}^4 \gg T_{ambi}^4$ 이므로 식(2)에서 T_{ambi}^4 를 무시할 수 있으며, 정상상태에서 $q_{in} = q_{out}$ 이므로 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$r_{in} = \sqrt{r_{out}^2 - \frac{I^2 \rho}{\sigma \epsilon 2\pi^2 T_{surf}^4 r_{out} \cos \psi}} \quad (3)$$

이 식으로부터 구한 히터의 형상을 그림2에 나타내었으며, 계산에 사용된 각 변수들의 값은 표1과 같다.

(표 1) 히터 형상설계에 쓰인 변수

변 수	값
전류, I (Ampere)	9000
비저항, ρ (Ohm · m)	12×10^{-6}
복사율, ϵ	1.0
표면온도, T_{surf} (K)	1273



(그림 2) 해석적 방법으로 설계된 원추형 히터 형상

2.2 유한차분법을 이용한 히터 열전달 해석

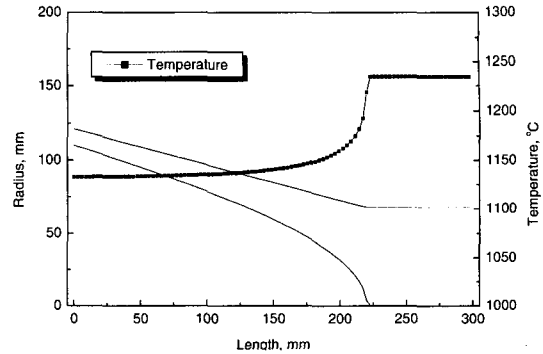
TG-CVI 공정에서 증착층은 온도가 높은 히터 외벽으로부터 시작하여 시간이 지날수록 바깥쪽으로 성장한다. 이러한 공정에서의 히터 및 증착층의 온도분포 예측을 위하여 에너지 평형법에 기초한 유한차분법⁽²⁾을 이용하여 열전달 해석을 하였으며 이 때 다음과 같이 가정하였다.

- 1) 열전달 해석 영역은 히터와 증착층으로 구성되며, 증착층은 일정한 속도로 히터 외벽으로부터 성장한다.
- 2) 히터와 증착층은 축대칭 형상으로서 열전달은 정상상태이며 길이방향으로의 열전달은 무시한다.
- 3) 히터와 증착층의 발열은 Joule열에 의하며 이 때 각 재료층에 흐르는 전류밀도는 균일하다. 한편, 히터와 증착층의 비저항이 다르므로 각 층에 흐르는 전류는 저항의 병렬연결로 취급하여 계산한다.
- 4) 히터의 내벽에서는 복사 열전달만이 존재하며, 히터와 증착층 외벽에서는 복사 열전달과 함께 대류 열전달이 일어난다.
- 5) 히터와 증착층 사이의 열전달은 전도에 의한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 히터만 가열하는 경우

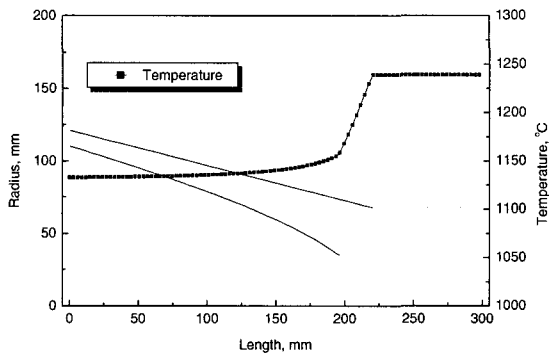
열전달 해석에서 얻어진 결과와 실제의 상황을 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다. 설계된 히터 형상을 그림3에 나타내었으며, 이 때의 온도분포는 전류 9000A, 히터 내부 주변온도 1000°C, 외부 주변온도 500°C 인 경우로 하여 계산하였다.



(그림 3) 히터 형상 및 온도 분포

설계 기준이 되는 히터 표면온도는 1000°C였으나 계산 결과는 1130°C 정도로써 설계값보다 높게 나타났다. 이는 히터 형상설계에 쓰인 해석적 방법과 온도계산에 쓰인 유한차분법에서의 가정의 차이에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 한편 원추부에서의 온도는 비교적 균일하게 유지되지만, 원통부에서의 온도는 이보다 높게 나타남을 알 수 있다. 이것은 히터 설계 방법 상 외부 표면온도가 균일하게 유지될 수 있는 영역은 내부 반경이 0보다 큰 영역, 즉 내부 형상이 구현되는 부분에만 해당되며 그 이외의 부분에서는 외부 형상의 제약으로 인하여 균일한 온도 유지를 위한 히터 두께를 확보하지 못 하기 때문이다. 이러한 현상은 히터 형상이 큰 반경의 원추와 작은 반경의 원통으로 이루어진 복합형상인 경우에 잘 나타나며 이 때 원통부 표면온도는 설계기준치보다 훨씬 높아지게 된다. 이러한 온도차는 TG-CVI 공정에서 매우 중요한 변수로 작용하게 되며, 따라서 실제 공정에서의 히터 표면 온도분포를 정확히 예측하여 이러한 차이를 줄이는 것이 필요하다.

외부 형상의 제약으로 인하여 온도차가 발생하는 경우 이를 최소화할 수 있는 방법으로는 첫째로 온도가 높은 원통부 중앙에 구멍을 가공하여 내부로 복사열 방출을 유도하는 방법, 둘째로 온도가 상대적

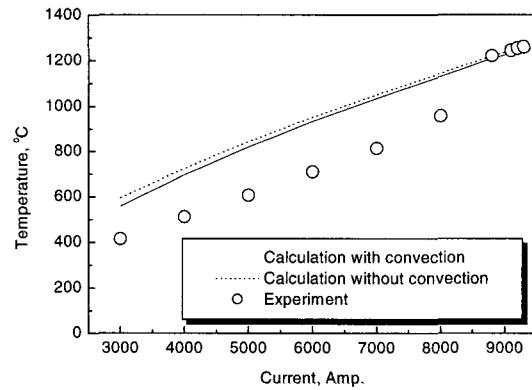


(그림 4) 구멍 가공 후의 히터 형상 및 온도 분포

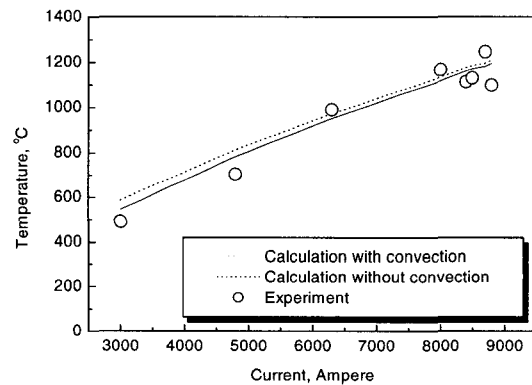
으로 낮은 원추부 내부에 단열재를 부착하여 원추부 온도를 증가시키는 방법, 셋째로 원통부를 수냉 등의 방법으로 강제 냉각하여 온도를 감소시키는 방법 등을 생각해 볼 수 있다. 이 중 세번째 방식은 추가 설비 등의 문제점이 있기 때문에 본 연구에서는 보다 접근이 용이한 원통부 구멍가공 및 내부 단열 효과에 대하여 검토하였다.

그림4는 원통부에 구멍을 가공한 후의 히터 형상과 온도분포의 계산결과이다. 이 때 구멍의 크기는 몇 번의 온도계산을 반복하여 원추부와 원통부의 온도 차이가 최소로 되는 값을 선택하였다. 히터 자체만 가열시키는 경우에는 구멍 가공 전과 비교하여 원통부에서의 온도 감소는 없으며 이에 대해서는 다음의 TG-CVI 공정 열전달 해석 시 다시 검토하기로 한다.

구멍 가공 전, 후의 히터 원통부 온도에 대한 계산값과 측정값을 각각 그림5, 6에 나타내었다. 그림5는 구멍 가공 전의 원통부 온도를 나타낸 것으로 초기에는 계산값과 측정값의 차이가 크지만, 전류의 증가에 따라 히터 온도가 높아질수록 잘 일치함을 알 수 있다. 이것은 히터 온도가 증가할수록 히터 주변온도가 안정화되어 해석 시 가정한 조건과 유사하게 되기 때문이다. 그림6은 원통부 중앙에 반경 35 mm



(그림 5) 히터 원통부의 온도 변화 (구멍 가공 전)



(그림 6) 히터 원통부의 온도 변화 (구멍 가공 후)

의 구멍을 가공한 후 원통부 온도를 측정된 결과이며 측정값과 계산값이 잘 일치하고 있다.

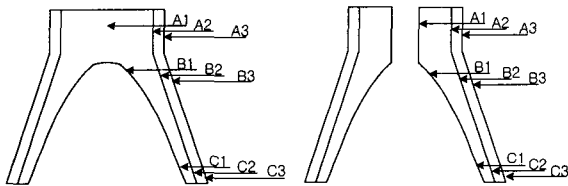
3.2 TG-CVI 공정의 경우

앞서의 수치해석 프로그램을 이용하여 TG-CVI 공정에서의 온도분포를 계산하였다. 해석에 이용된 변수값은 표2와 같으며 히터 원추부 내부의 단열에 따른 온도분포도 계산하여 표3에 나타내었다. 온도 차이는 원통부(A3)와 원추부 하단(C3)을 기준으로 하여 구하였다.

[표 2] TG-CVI 공정 열전달 해석에 이용된 변수값

항 목	변수값
히터 열전도도 (W/m/K)	39.05
증착층 열전도도 (W/m/K)	10.0
대류 열전달계수 (W/m ² /K)	10.0
히터 비저항 (ohm · m)	16.5 × 10 ⁻⁶
증착층 비저항 (ohm · m)	86.4 × 10 ⁻⁶
복사율(emissivity)	0.8
Stefan-Boltzmann 상수 (W/m ² /K ⁴)	5.67 × 10 ⁻⁸
히터 내부 주변온도 (K)	1273
히터 외부 주변온도 (K)	773
증착속도 (mm/hr)	0.33
증착두께 (mm)	30.0
전류 (A)	7000 ~ 11000

[표 3] TG-CVI 공정에서의 히터 원통부 구멍 가공 및 원추부 단열에 따른 온도차 계산



위치	히터 형상 및 원추부 내부 단열 여부에 따른 온도 (°C)			
	구멍 가공 전		구멍 가공 후	
	단열 없음	단열	단열 없음	단열
A1	1970	1970	1443	1443
A2	1776	1776	1483	1483
A3	1170	1170	1081	1081
B1	1371	1888	1371	1371
B2	1393	1767	1395	1395
B3	1033	1171	1036	1036
C1	1207	1627	1207	1627
C2	1214	1603	1214	1603
C3	981	1137	981	1137
온도 차이 (A3-C3)	189	33	100	-56

내부 단열을 하지 않은 구멍 가공 전의 히터에서 온도차가 가장 크며, 내부 단열을 하는 경우 원추부 온도를 증가시킬 수 있어 온도차를 감소시킬 수 있다. 또한 구멍을 가공하는 경우가 구멍 가공 전에 비하여 온도차를 줄일 수 있으며, 이는 구멍에서의 복사열 방출 때문이다. 구멍을 가공한 히터에 내부 단열을 한 경우에는 오히려 원추부 온도가 원통부 온도보다 더 상승한다.

실제 TG-CVI 공정에서의 측정 결과, 원통부 구멍 가공 전에는 원통부와 원추부 하단 사이의 온도 차이가 495°C였으나, 구멍 가공 후에는 178°C로 크게 감소하여 원통부에 구멍을 가공하는 것이 온도차를 줄이는데 크게 기여하고 있음을 알 수 있었다. 하지만 이에 대한 계산값은 표3에 나타난 바와 같이 각각 189°C 및 100°C로서 실측값과 차이가 있으며 이러한 차이는 계산에 이용된 여러 변수들의 값을 보다 정확하게 사용한다면 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 온도 편차를 최소화하기 위한 최적 히터 설계

이상에서 살펴본 바와 같이 히터의 외부 형상이 제한되어 있는 경우에는 히터의 원통부와 원추부 사이의 온도차가 발생할 수 있다. 또한 초기 히터 형상 설계 시 해석적 방법에 따른 단순화한 가정들을 사용하였기 때문에 유한차분법에 의한 온도계산 결과 원추부에서의 온도분포가 완전히 균일하지 않으며 그 값도 설계기준에 일치하지 않음을 알 수 있었다. 더우기 온도차 감소를 위해 원통부 구멍의 크기를 결정할 때 몇 번의 반복적인 열전달 해석을 수행해야 하므로 설계 소요시간이 증가하고 이렇게 결정된 구멍의 크기가 최적값이라는 보장이 없는 등의 문제점이 발생한다.

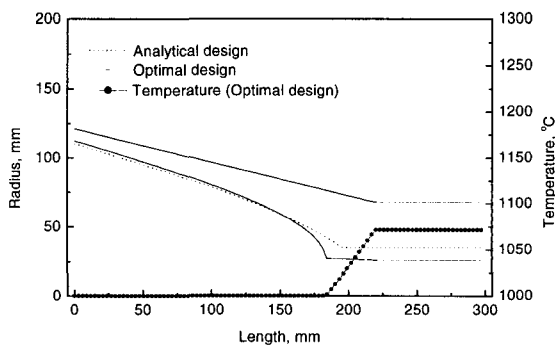
따라서 히터 형상 설계방법을 좀 더 발전시킬 필요가 있으며 여기에서는 앞서 작성된 유한차분 열전달 해석 프로그램을 부프로그램으로 사용하는 히터 형상 최적화 프로그램을 개발하였다. 최적화 알고리즘으로는 Powell법⁽³⁾을 적용하였다. Powell법은 함수의 1차 도함수를 계산할 필요없이 목적함수를 최소화하는 방법으로써 탐색방향으로의 탐색거리 계산은 1차원 Brent법을 이용하였다.

본 연구는 히터 외면이 결정되어 있는 경우에 히터 표면의 온도와 목표 온도와의 차를 최소로 하는 히터 내면 형상을 설계하는데 목적이 있으므로 히터 내면 반경을 설계 변수로 하고 목적함수를 다음과 같이 설정하였다.

$$F(X) = | T_{opt} - T_i |$$

여기서 T_{opt} 는 목표온도, T_i 는 현재 온도이다.

그림7은 최적화 프로그램에 의해 설계된 히터 형상과 이 히터를 이용한 TG-CVI 공정 시의 히터 표면 온도 분포를 나타낸 것이다. 해석적 방법에 의해 설계된 히터 형상과 비교하여 볼 때, 히터 원통부의 구멍 반경이 25 mm 정도로 줄어들었으며 원추부 내면



(그림 7) 최적화 프로그램에 의해 설계된 히터 형상과 온도 분포

형상도 차이가 있음을 알 수 있다. 히터 표면온도는 설계 기준인 1000℃를 원추부에서 균일하게 유지하고 있으며 원통부와 원추부의 온도차는 약 70℃로서 해석적 방법에 의해 설계된 히터보다 온도분포가 균일하다. 이로부터 본 연구에서 개발한 최적화 프로그램에 의해 TG-CVI 공정에 필요한 균일한 온도분포를 갖는 히터를 설계할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 균일한 표면온도를 갖는 TG-CVI용 히터 설계를 위한 해석적 방법을 제시하였다. 한편 유한차분법을 이용한 열전달 해석으로부터 히터의 온도분포를 예측하고, 히터의 외부 형상이 제한되어 있는 경우에 발생하는 히터 상하부의 온도 편차를 줄일 수 있는 방법을 살펴보았다. 또한 유한차분법에 의한 온도계산을 이용한 히터 형상 최적화 프로그램을 작성하여 위의 해석적 히터 설계법에 의한 것보다 더 균일한 온도분포를 나타내는 히터 설계를 수행할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. G. Savage, *Carbon-Carbon Composites*, Chap.3, Chapman & Hall, 1993
2. D.R. Croft and D.G. Lilley, *Heat Transfer Calculations Using Finite Difference Equations*, Chap.3, Applied Science Publ., 1977
3. W.H. Press, *Numerical Recipes in FORTRAN - The Art of Scientific Computing*, 2nd ed., Cambridge University Press, p.406, 1992