

# 탄소발열체의 외부유속 및 직경변화에 대한 비정상상태에서의 수치해석적 연구

## Numerical Analysis in Unsteady State on variation of Diameter and Environmental Velocity of Carbon Heating Source

배강열·이윤환·이상용·이철순·김봉곤·이상철

K. Y. Bae, Y. H. Lee, S. Y. Lee, C. S. Lee, B. G. Kim and S. H. Lee

**Key Words** : Carbon Heating Source(탄소발열체), Heat Generation(열발생률), Nusselt Number(누셀수), Reynolds Number(레이놀즈수), Environmental Velocity(외부유속)

**Abstract** : This paper represents the numerical analysis in unsteady state on the variation of diameter and environmental velocity of carbon heating source. In general heating system, the oil and sheath heater is widely used, but these systems have many problems. So, the heating source with carbon ingredient has been researched in many country about manufacture, thermal and electrical properties. In this research, the carbon heating source was studied through numerical analysis on several conditions of unsteady state, heat generation, diameter and environmental velocity. The temperature distributions at steady state are appeared as a non-proportional linear pattern with variations of environmental velocity due to the Nusselt number with convective heat flux is proportioned to 0.805 of Reynolds number. As the radius is increasing, the temperature distributions is appeared the minus tilt because of the environmental condition is cooling by constant temperature. So, the correlation equation between temperature at steady state and environmental velocity was obtained.

### 1. 서 론

에너지 절약 차원에서 최근 탄소 재료를 이용한 제품이 기존의 금속 제품 보다 전기적 특성이 우수하게 나오고 있으며 계속적으로 연구되고 있는 실정이다. 탄소 재료는 높은 전기 전도성, 열 전도성, 내열성, 내식성, 내마모성 및 윤활성 등과 같은 전기적·물리적으로 우수한 특성을 가지고 있기 때문에 광범위하게 널리 사용되고 있다.<sup>1),2)</sup>

그러나, 일상생활에서 사용하고 있는 발열시스템의 경우 대부분을 유류 및 시트히터(sheath heater)에 의존하고 있는 상태이다. 유류를 이용한 발열시스템의 경우 에너지 자원의 고갈 및 다수의 환경오

염을 발생시키고 있으며, 시즈히터의 경우 800℃ 이상의 고온발열의 한계성으로 시스템의 거대화를 초래하고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 많은 국가에서는 탄소, 이규화몰리브덴등을 이용하여 유류 및 시즈히터를 대체할 수 있는 고온발열체의 제조가 이루어지고 있다. 특히 우리나라와 근접한 일본에서는 탄소입자에 여러 가지의 분말을 소결 후 촉진체를 사용한 발열체의 제조와 함께 발열체의 응용분야에 대해서 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>3),4)</sup> 그러나, 우리나라의 경우 발열체에 관한 연구가 진행되고는 있는 실정이지만 아직까지 탄소를 이용한 발열체의 열적, 전기적 특성등에 관한 자료가 매우 부족한 상태이다.<sup>5~7)</sup>

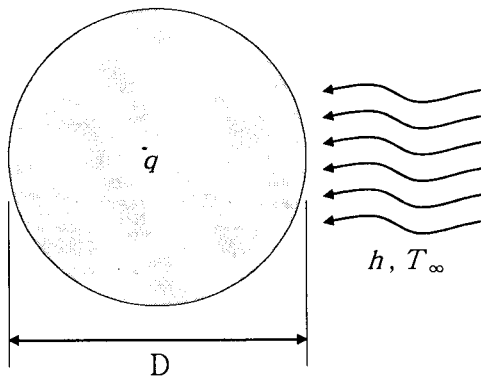
본 연구에서는 카본을 이용하여 제작된 발열체 및 산업현장에서 사용되고 있는 SiC 발열체에 대하여 실험과 수치해석을 검증하고, 내부에 열생성을 가지고 있는 원형발열체에 대한 비정상상태에서의 수치해석을 통하여 외부유속 및 열생성에 대한 열

접수일 : 2006년 8월 7일, 채택확정 : 2006년 9월 30일  
배강열(책임저자) : 경상대학교 항공기부품기술연구소  
E-mail : kybae@gnu.ac.kr Tel. 055-751-6691  
이윤환 : 경상대학교 대학원  
이상용, 이철순 : 한국폴리텍 VII대학  
김봉곤 : 동의공업대학  
이상철 : 거제대학 메카트로닉스 계열

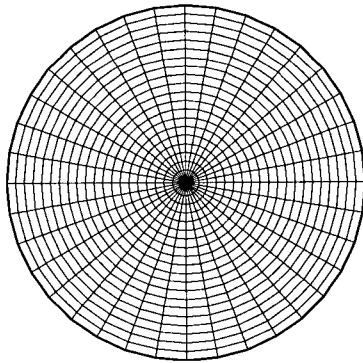
적 성능을 예측하고, 정상상태에서 온도와의 상관식을 도출하여 발열체의 제조 및 산업현장의 적용에 있어서 기본설계자료를 제시하고자 한다.

## 2. 해석모델 및 경계조건

Fig. 1은 수치해석모델에 대한 계략도 및 격자계를 도시한 그림이다. 수치해석에 사용된 격자계는  $r \times \theta = 22 \times 36$ 의 격자계를 선택하였으며 원주방향은  $1^\circ$ 씩 분할을 하였다.



(a) schematic diagram



(b) grid system

Fig. 1 Schematic diagram and grid system for numerical model

Table 1 Main parameters for numerical analysis

parameters	conditions
$\dot{q}$	10, 20, 30, 40, 50
$D$	0.01, 0.015, 0.02, 0.025, 0.03
$V$	0, 1, 2, 3, 4, 5

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + S \quad (1)$$

식 (1)은 수치해석을 위해 사용된 지배방정식이며, 비정상상태를 가정하였다. 수치해석에 사용된 변수는 발열체의 직경( $D$ ), 외부유속( $V$ )과 발열체 내부의 열 발생률( $\dot{q}$ )을 변수로 사용하였다. 그리고, 외부공기의 온도는 검증을 위해서 사용된 발열체의 실험시의 룬 내부 온도인  $16.5^\circ\text{C}$ 로 가정하였다. Table 1은 수치해석에 사용된 변수를 나타낸 것이다. 원형발열체의 표면에 외부유속의 조건을 부과하기 위하여 아래의 식 (2)와 같은 대류경계조건을<sup>8),9)</sup> 사용하였다.

$$q_{conv} = h(T_{SF} - T_\infty) \quad (2)$$

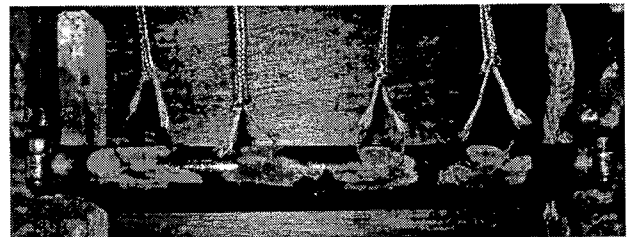
여기에서,  $h = Nu \cdot k_a / D$ ,  $Nu = C_1 Re^{C_2}$

$$C_1 = 0.0239$$

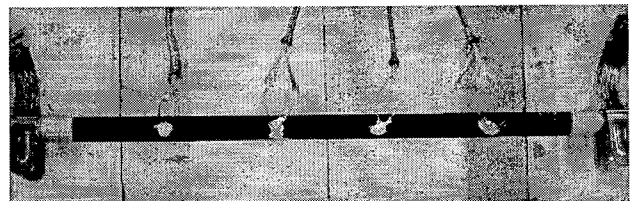
$$C_2 = 0.805 \text{ (at } 4 \times 10^4 \leq Re < 2.5 \times 10^5 \text{)}$$

## 3. 실험과 수치해석의 검증

본 연구에서 수치해석을 이용하여 발열체의 열적 특성을 계산하기 전에 수치해석이 기존의 실험치를 잘 재현할 수 있는 지에 대한 검증이 필요하다. 따라서, 본 수치해석의 프로그램을 검증하기 위해서 자체 제작된 발열체와<sup>10)</sup> 산업체에서 이미 사용되어지고 있는 SiC(Silicon Carbide) 발열체와의 비교검증을 통하여 해석 프로그램의 타당성을 알아보하고자 한다.



(a) carbon heating source

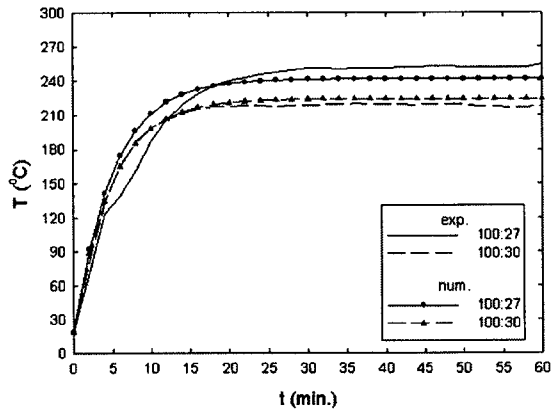


(b) SiC heater

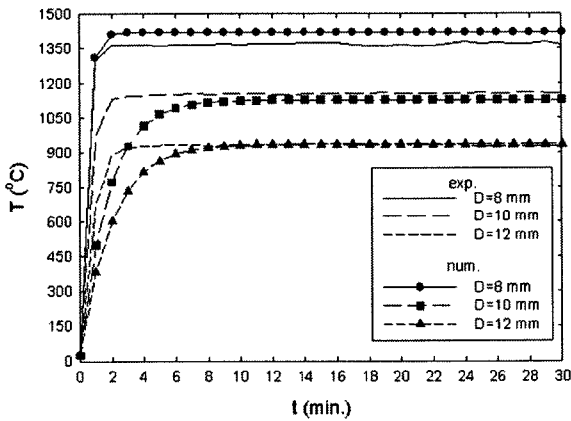
Fig. 2 Photographs of experimental models

Fig. 2는 수치해석의 검증을 위해서 실험에 사용

된 발열체의 사진을 나타낸 것으로, (a)는 제작한 발열체이고 (b)는 현재 산업체에서 특수한 목적으로 사용되고 있는 발열체이다. 인가된 전력은 carbon 발열체의 경우 50W, SiC 발열체의 경우 600W를 인가하였으며, 온도는 4개의 K-type 열전대를 사용하여 측정된 후 평균값을 사용하였다.



(a) carbon heater



(b) SiC heater

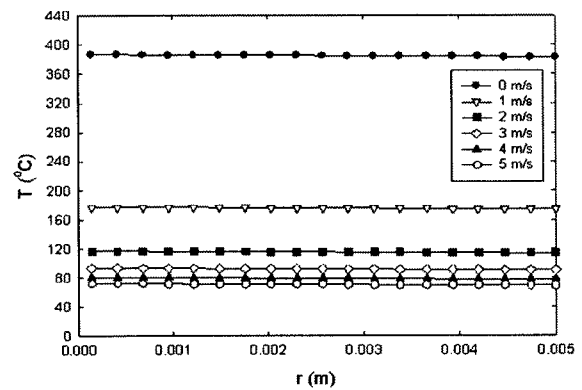
Fig. 3 Temperature distributions between experimental and numerical results

Fig. 3은 발열체의 표면 온도분포에 대하여 실험과 수치해석 결과를 비교한 것이다. Fig. (a)에서 100:27과 100:30은 발열체의 제작시에 사용된 bentonite와 carbon의 함량을 의미하는 것이다. 두 결과를 비교하여 보면 실험에서 정상상태에 도달하는 시간은 약 20분이며, 수치해석의 결과도 약 20분이 경과한 후에 정상상태에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 또한 시간에 따른 온도분포의 결과에서도 실험과 수치해석의 결과가 매우 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다.

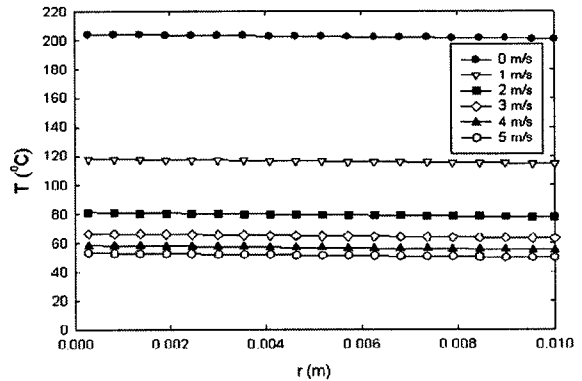
Fig. (b)는 SiC 발열체에 대한 실험 및 수치해석의 결과이며, 직경이 0.008, 0.01, 0.012 m인 3가지

경우에 대하여 비교하였다. 3 경우 모두 정상상태에 도달하였을 때 동일한 온도분포결과를 보이고 있으나, 정상상태에 도달하는 시간에 대해서는 실험과 수치해석의 결과가 상이하게 나타나는 데 이러한 문제를 해결하기 위하여 해석시간을 60분으로 설정하여 발열체의 온도분포가 충분히 정상상태에 도달할 수 있도록 하였다.

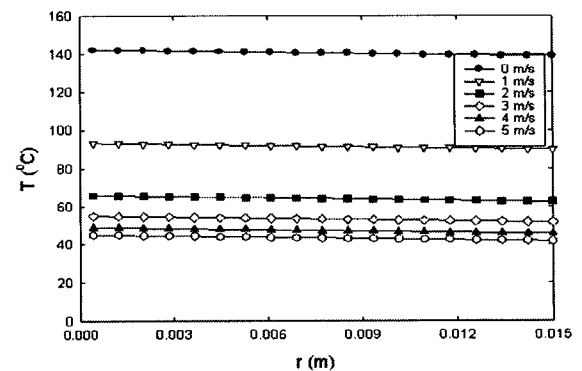
이상의 결과로 수치해석이 실험결과를 비교적 잘 만족하고 있으므로, 수치해석기법의 타당성을 검증할 수 있었다.



(a) D=0.01m



(b) D=0.02m



(c) D=0.03m

Fig. 4 Temperature distributions at cross section according to variations of V and D (50W)

#### 4. 해석결과 및 고찰

Fig. 4는 50W인 경우 정상상태에서 발열체의 단면온도분포를 외부유속 및 직경의 변화에 대해서 도시한 그림이며, 반경은 원형발열체의 중앙부분에서 영으로 나타내었다. 전체적으로 외부유속이 증가함에 따라 발열체 단면의 온도는 점점 낮아지고 있는데 이것은 외부유속이 증가함에 따라 일정한 단면적에 작용하는 유량이 동시에 증가하였기 때문에 발열체에서 생성된 열량이 외부의 유량증가분만큼 외부로 열전달이 일어났기 때문이다.

그리고, 단면의 온도분포를 살펴보게 되면 발열체의 중앙부분에서 반경이 증가할수록 음(-)의 기울기를 가지는 것을 알 수 있는데, 이러한 이유는 발열체의 표면부분에는 일정한 온도의 대기와 접하고 있는데 이 때 대기가 냉각역할을 하기 때문에 이러한 온도기울기가 나타나게 되는 것이다.

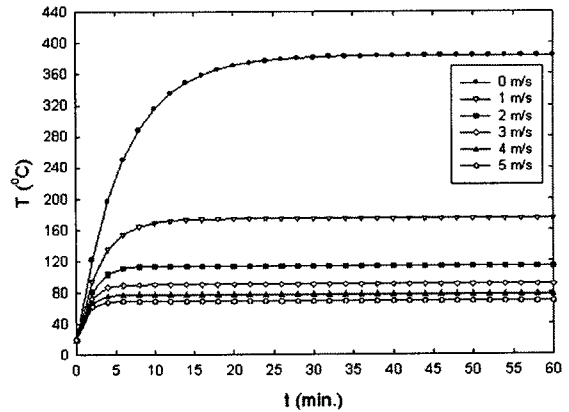
Fig. 5는 50W인 경우 외부유속 및 시간변화에 따른 발열체의 표면에서 온도분포를 나타낸 그림이다. 외부유속이 0일 경우 직경변화에 대한 정상상태 온도값은  $D=0.01m$  일 때  $380^{\circ}C$ ,  $D=0.02m$  일 때  $210^{\circ}C$  그리고  $D=0.03m$  일 때  $140^{\circ}C$ 로서 직경이 커질수록 온도가 낮아지는 것을 알 수 있는데, 이것은 열발생률이 일정할 경우 면적이 커지게 되면 단위면적당 또는 단위체적당 발생하는 열량이 상대적으로 작아지기 때문에 이러한 현상이 나타나게 되는 것이다.

또한 각각의 직경에 대하여 외부유속이 증가함에 따라 정상상태에서 온도분포는 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나, 외부유속의 증가비율에 대하여 단면온도분포는 비례적으로 감소하지는 않고 감소비율이 점점 줄어드는 것을 확인 할 수 있으며, 결국 외부의 유속이 무한히 증가하더라도 발열체 단면온도분포는 일정한 온도 이하로는 감소하지 않을 것이라는 것을 예측할 수 있다.

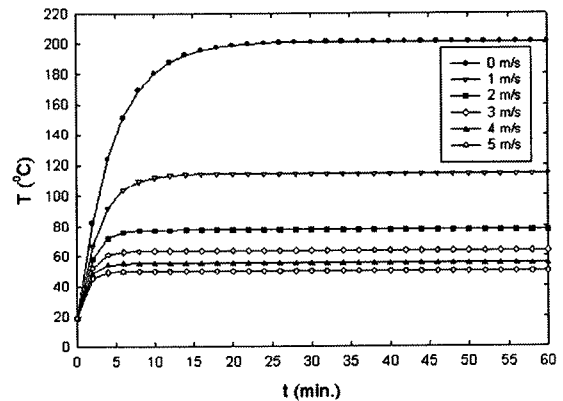
이러한 이유는 위에서 제시한 식(2)에서 Nu수와 Re수와의 상관관계를 살펴보게 되면 외부유속의 함수인 Re수에서 일정한 크기로 유속이 증가하더라도 Nu수는 Re수의 0.805승에 비례하기 때문에 외부유속의 증가에 대한 발열체표면온도는 동일한 비율로 감소하지는 않는 것이다.

Fig. 6은 외부유속의 변화에 대해서 발열체표면의 정상상태 온도분포를 나타낸 그림이다. 이전의 그림

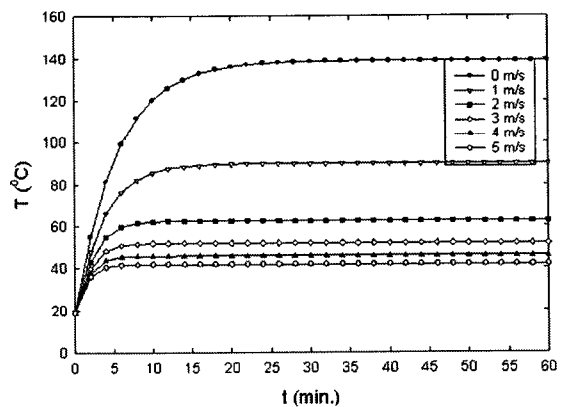
에서도 설명하였듯이 발열체표면온도는 유속이 증가할수록 감소하는 현상을 보이고 있다. 위의 그림에서 유속이 0m/s인 지점과 1m/s인 지점을 보게 되면 직경이 증가할수록 온도감소의 기울기가 완만해진다.



(a)  $D=0.01m$



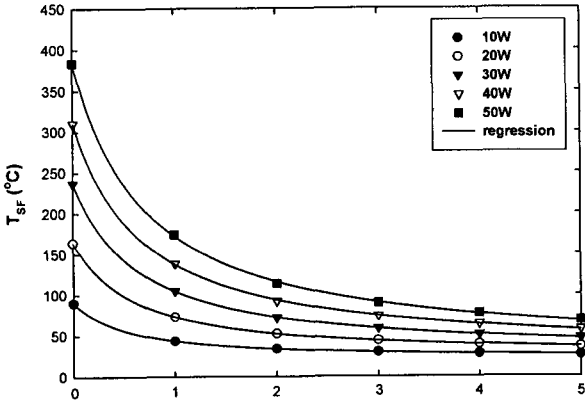
(b)  $D=0.02m$



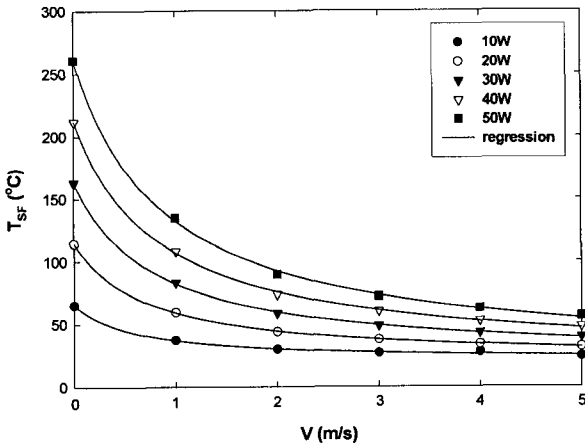
(c)  $D=0.03m$

Fig. 5 Temperature distributions with time variations according to environmental velocity at surface. (50W)

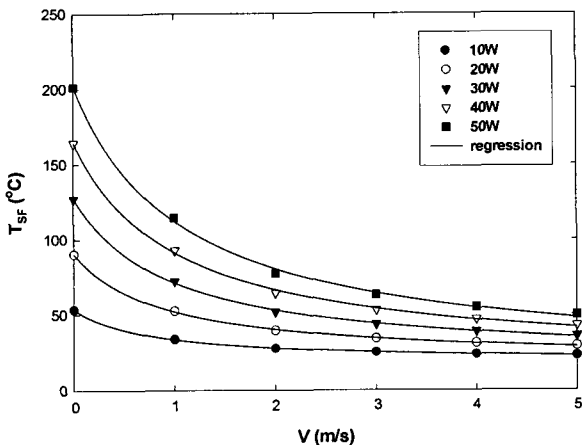
예를 들어, D=0.01m 인 경우 54%, D=0.02m 인 경우 45%, D=0.03m 인 경우 35%의 온도감소를 보이고 있는 것이다. 이렇게 직경이 다른 경우에 온도 감소비율이 차이가 나는 것은 위에서도 설명하였듯이 Nu수와 Re수가 1:1의 상관관계를 가지지 않기 때문에 이러한 현상이 발생하는 것이다.



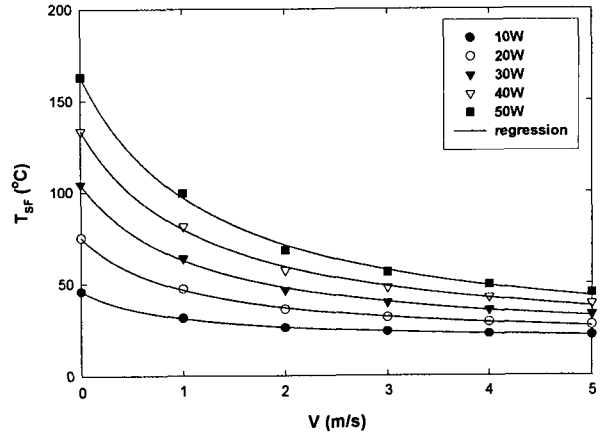
(a) D=0.01m



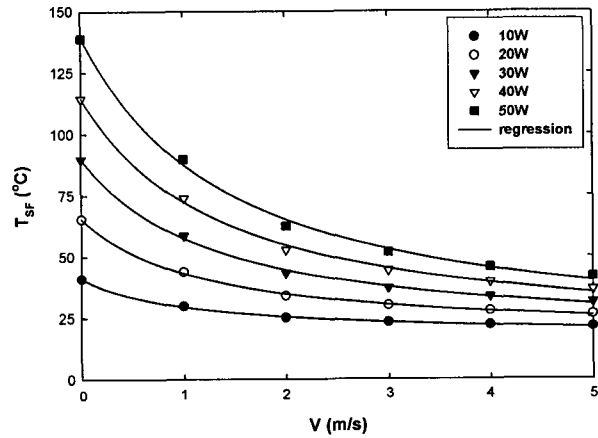
(b) D=0.015m



(c) D=0.02m



(d) D=0.025m



(e) D=0.03m

Fig. 6 Temperature and regression distributions at steady state according to environmental velocity

또한, 이러한 변화는 일정한 규칙성을 가지고 있기 때문에 최소자승법을 이용하여 각각의 열생성에 대하여 외부유속의 변화에 대한 정상상태에서의 온도에 관한 상관식을 식 (3)과 같이 도출하였다. 여기에서 a, b, c는 상관계수이며 Table 2에 각각의 경우에 대한 계수를 나타내었다.

$$T_{SF} = a + \left(\frac{b}{V}\right) + \left(\frac{c}{V^2}\right) \quad (3)$$

위의 식 (3)에서 하첨자로 표시된 SF는 발열체의 표면(surface)을 의미한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 원형발열체에 대한 비정상상태에서의 열적특성을 예측하기 위한 수치해석을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Table 2 Coefficients for correlation equation (10)

D	$\dot{q}$	coefficients		
		a	b	c
0.01	10	21.7405	19.6924	48.4645
	20	25.0038	54.1597	84.1919
	30	26.5833	101.434	108.824
	40	26.8433	159.259	124.247
	50	26.1486	225.353	132.37
0.015	10	20.8912	20.0286	24.4388
	20	20.2813	61.7039	32.2632
	30	20.4552	105.413	37.2971
	40	19.6845	156.407	36.0069
	50	18.1423	213.612	29.2896
0.02	10	17.749	28.3446	7.35523
	20	18.1171	63.3249	8.99679
	30	17.6586	104.451	5.33354
	40	16.4675	151.142	-3.14928
	50	14.6467	202.76	-15.9201
0.025	10	17.0891	27.8397	0.906129
	20	17.023	60.6545	-2.47043
	30	16.3249	98.1452	-9.87972
	40	15.0524	139.957	-21.0253
	50	13.2692	185.694	-35.578
0.03	10	16.6767	27.3584	-3.06268
	20	16.3302	58.7222	-9.57259
	30	15.4688	93.884	-19.3567
	40	14.1324	132.599	-32.2101
	50	12.3653	174.592	-47.9044

- 1) 원형의 탄소발열체에 대한 실험과 수치해석의 비교결과 실험결과와 동일한 온도분포를 얻을 수 있었으며 수치해석의 타당성을 검증하였다.
- 2) 발열체 단면의 온도분포는 벽면에서의 대기 조건이 냉각역할을 하기 때문에 중앙부분에서 표면으로 반경이 증가할수록 음(-)의 기울기를 가진다.
- 3) 대류열유속과 관계되는 Nu수는 Re수의 0.805승에 비례하기 때문에 외부유속의 증가에 대해 발열체표면온도는 동일한 비율로 감소하지 않는다.
- 4) 외부유속에 따른 정상상태의 온도감소기울기는 D=0.01m인 경우 54%, D=0.02m인 경우 45%, D=0.03m인 경우 35%로서 직경의 증가에 대해 기울기는 완만하게 나타난다.
- 5) 외부유속의 변화에 대한 정상상태에서의 발열체 표면온도분포는 반비례 관계를 나타내고 있으며, 최소자승법을 이용하여 식(3)과 같이 상관식 및 상관계수를 도출하였다.

## 후 기

본 연구는 한국학술진흥재단(과제번호 : KRF-2005-005-J09901)의 지원으로 이루어 졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. M. H. Ji, D. Y. Lim and J. O. Kim, 1995, "A Study on Fabrication of Harden Carbon for Electrical Application", Proc. of KIEEME, pp. 198-201.
2. S. S. Noh and G. S. Chung, 1997, "The fabrication of Pt micro heater using aluminum oxide as medium layer and its thermal characteristics", Proc. of KIEEME, pp. 331-334.
3. 일본특허청, 1995, "전기저항 발열로 및 전기 저항 발열체의 제조방법", 특원평5-193770.
4. 일본특허청, 1999, "전기로용 전기저항발열체 및 그와 같은 저항요소의 제조법", 특원평11-19014 0.
5. 박양덕, 1997, "전기로용 인조흑연 전극봉 제조 기술", 고분자과학과 기술, 제8권, 제2호, pp. 155-162.
6. 이후인, 심건주, 한상옥, 2001, "이규화 폴리브덴 고온발열체의 전기적 특성 및 제조에 관한 연구", 한국전기전자재료학회, 하계학술대회 논문집, pp. 605-608.
7. 박현철, 김재원, 백운규, 최성철, 1999, "성형미세구조가 반응소결 탄화규소체의 소결미세구조 및 기계적 특성에 미치는 영향", 한국세라믹학회지, 제1권, 제36호, pp. 97-105.
8. Suhas V. Patankar, 1988, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", 대한교과서주식회사, pp. 79-85.
9. 이택식, 이제현, 이준식, 1996, "열전달", 회중당, pp. 67-73.
10. Bae, K. Y., Lee, K. S, Jeong, H. M., Chung, H. S. and Chung, H. T., 2004, "A Study on the Thermal and Electrical Characteristics with Manufacture of the Heating Element by Using Carbon with Bar Type", Journal of SAREK, Vol. 16, No. 5, pp. 430-437.