

열생성을 가진 원형발열체의 외부 유속의 영향에 대한 수치해석 Numerical Analysis on Effect of the Environmental Velocity for Circular Heating Source with Heat Generation

배강열 · 지명국 · 정한식 · 정효민 · 정희택

K. Y. Bae, M. K. Ji, H. S. Chung, H. M. Jeong and H. T. Chung

Key Words : Heat Generation(열생성), Circular Heating Source(원형발열체), Environmental Velocity (외부유속), Steady State(정상상태)

Abstract : This paper represents the numerical analysis on effect of the environmental velocity for circular heating source with heat generation. 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, a circular heating source was studied through numerical analysis on several conditions of unsteady state, heat generation and environmental velocity. The temperature distributions at steady state is appeared as a non-linear pattern with variations of environmental velocity. So, the correlation equation between temperature at steady state and environmental velocity was obtained.

기호 설명

- A : 면적(area : m^2)
- a : 상관계수(correlation coefficient)
- b : 상관계수(correlation coefficient)
- c : 상관계수(correlation coefficient)
- c_p : 정압비열(constant pressure specific heat : $kJ/kg/K$)
- D : 직경(diameter : m)
- h : 대류열전달계수(convection heat transfer coefficient : W/m^2K)
- k : 열전도율(thermal conductivity : W/mK)
- L : 길이(length : mm)
- Nu : 누셀수(Nusselt number)
- q_{conv} : 대류열유속(convective heat flux : W/m^2)

- \dot{q} : 열생성(heat generation : W/m^3)
- q'' : 열유속(heat flux : W/m^2)
- Re : 레이놀즈수(Reynolds number)
- S : 생성항(generation term)
- T : 온도(temperature : $^{\circ}C$)
- t : 시간(time : $sec.$)
- V : 외부속도(environmental velocity : m/s)
- θ : 각도(angle : $rad.$)

Subscripts

- c : 구리(copper)
- SF : 표면(surface)
- p : 정압상태(state of constant pressure)
- ∞ : 외부(environment)

1. 서 론

접수일 : 2003년 12월 15일
 정효민(책임저자) : 경상대학교 기계항공공학부 · 해양산업연구소
 E-mail : hmjeong@gsnu.ac.kr, Tel : 055-640-3184
 배강열, 정한식, 정희택 : 경상대학교 기계항공공학부 · 해양산업연구소
 지명국 : 경상대학교 대학원 정밀기계공학과

일상생활에서 사용하고 있는 발열시스템의 경우 대부분을 유류 및 시즈히터(sheath heater)에 의존하고 있는 상태이다. 유류를 이용한 발열시스템의 경우 에너지 자원의 고갈 및 다수의 환경오염을 발생시키고 있으며, 시즈히터의 경우 800 $^{\circ}C$ 이상의 고

온발열의 한계성으로 시스템의 거대화를 초대하고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 많은 국가에서는 탄소, 이규화물리브텐등을 이용하여 유류 및 시즈 히터를 대체할 수 있는 고온발열체의 제조가 이루어지고 있다¹⁾. 특히 우리나라와 근접한 일본에서는 탄소입자에 여러 가지의 분말을 소결 후 촉진제를 사용한 발열체의 제조와 함께 발열체의 응용분야에 대해서 많은 연구가 진행되고 있다^{2,3)}. 그러나, 우리나라의 경우 발열체에 관한 연구가 진행되고는 있는 실정이지만 아직까지 탄소를 이용한 발열체의 열적, 전기적특성등에 관한 자료가 매우 부족한 상태이다⁴⁻⁶⁾.

본 연구에서는 열생성을 가지고 있는 원형발열체에 대하여 비정상상태에서 수치해석을 통하여 외부속도 및 열생성에 대한 열적 성능을 예측하고, 외부유속 및 열생성에 대한 정상상태에서 온도와의 상관식을 도출하여 발열체의 제조 및 적용에 있어서 기본설계자료를 제시하고자 한다.

2. 해석모델 및 경계조건

Fig. 1은 수치해석모델에 대한 개략도 및 격자계를 도시한 그림이다. 수치해석에 사용된 모델의 치수는 직경이 17.4mm인 원형의 카본발열체이며, 격자계는 $r \times \theta = 22 \times 36$ 의 격자계를 선택하였으며 원주방향은 1°씩 분할을 하였다.

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

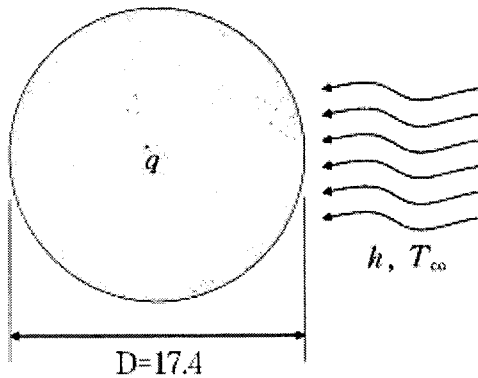


Fig. 1 Schematic diagram for numerical model

Table 1 Main parameters for numerical analysis

heat generation(W/m ³)	environment velocity(m/s)				
10.513×10 ⁵	1	2	3	4	5
21.02×10 ⁵	1	2	3	4	5
31.54×10 ⁵	1	2	3	4	5

식 (1)은 수치해석을 위해 사용된 지배방정식이며, 비정상상태를 가정하였다. 수치해석에 사용된 변수는 발열체 외부에서 공기의 유속과 발열체 내부의 열 발생률(q)을 변수로 사용하였다. 그리고, 외부공기의 온도는 상온으로 가정하여 계산을 실행하였다. Table. 1은 수치해석에 사용된 변수를 나타낸 것이다. 여기에서 사용된 열 발생률은 카본 발열체에 인가되는 전력(50, 100, 150W)을 체적으로 나누어서 구한 값이다.

원형발열체의 표면에 외부유속의 조건을 부과하기 위하여 아래의 식 (2)와 같은 대류경계조건을⁷⁻⁸⁾ 사용하였다.

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

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

$$C_1 = 0.0239$$

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

3. 열 전도율

Fig. 2는 재료의 열전도율을 측정하기 위한 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 먼저 열전도율을 구하고자 하는 재료를 보온통의 중앙부분에 설치한다. 보온통 내부의 상부와 하부에는 순수한 구리($k = 401 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)로 제작된 봉이 상부와 하부에 있고 중앙에 구하고자 하는 재료를 장착하게 된다. 재료가 장착된 후에는 Hot bath 내부의 물 온도는 일정하게 유지시켜주며, 하부의 Cold bath에서는 상온의 물을 계속해서 흘러주어 일정한 냉각조건을 유지시켜 주게 된다.

설치된 열전대의 온도를 Data logger를 통하여 측정하게 되면 일정한 시간이 지난 후에 전체적인 온도분포가 정상상태에 도달하게 되는 때, 정상상태에 도달했을 때의 각 부분의 온도를 측정할 후 식 (3)을 이용하여 재료의 열전도율을 구할 수 있다.

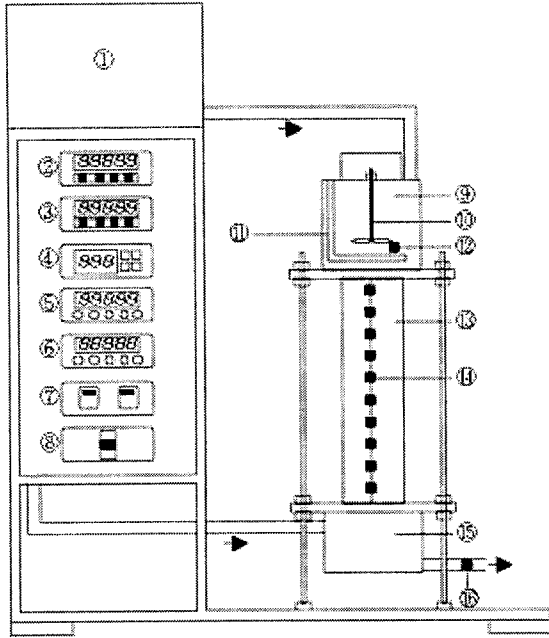


Fig. 2 Schematic diagram for measuring the conductivity of material

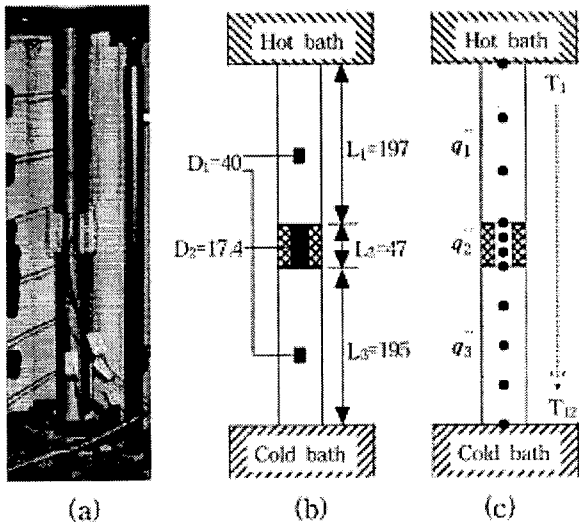


Fig. 3 (a) Photograph, (b) dimensions and (c) positions of thermocouple for measuring temperature

Fig. 3은 측정하고자 하는 대상물을 열전도를 측정장치의 내부에 장착한 모습, 치수 및 열전대의 측정점을 도시한 그림이다. 상부와 하부의 재질인 동과 철의 길이는 각각 197mm와 195mm로 되어 있으며, 직경은 40mm이다. 그리고, 측정하고자 하는 대상물의 길이는 47mm이며, 직경은 17.4mm이다. 대상물은 직경이 기존에 장착되어 있는 동에 비하여 직경이 작으므로 빈 공간은 대류에 의한 열전달을

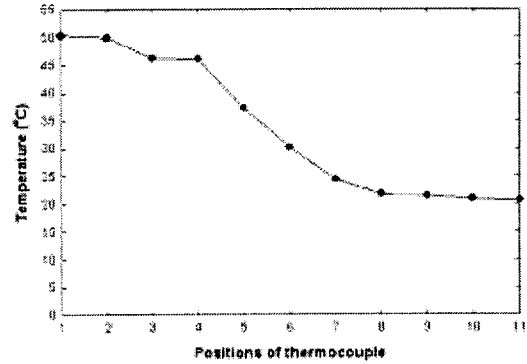


Fig. 4 Temperature distributions with positions of thermocouple when heating temperature is about 50°C.

없애기 위해서 단열재를 이용하여 단열처리를 하였다. 열전대는 상부의 동에 4개, 대상물의 상부와 하부를 비롯하여 4개의 열전대를 장착하였다. 그리고, 하부의 동에는 5개의 열전대를 사용하여 온도를 측정하였다.

실험은 각 부분의 온도분포가 정상상태에 도달할 때까지 실험을 진행하였으며, 정상상태일 경우의 온도를 측정하여 Fourier에 법칙을⁹⁾ 이용하여 열전도율을 구하였다.

$$\ddot{q}_1 = \ddot{q}_2 = \frac{T_1 - T_4}{\frac{L_1}{k_c A_1}} = \frac{T_4 - T_7}{\frac{L_2}{k A_2}} \quad (3)$$

Fig. 4는 상부에 있는 Hot bath의 온도를 약 50°C로 일정하게 가열하였을 경우 각 부분의 온도가 정상상태에 도달하였을 경우에 대한 온도분포를 도시한 그림이다. 실험에서 구해진 각 부분에서의 온도와 미지수의 값들을 식(3)에 대입하게 되면, 열전도율은 100.68 W/m·K이다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 단면 온도 분포

Fig. 5~7은 정상상태에서 원형발열체의 단면 온도분포를 도시한 그림이다. 반경은 원형발열체의 중앙부분에서 영으로 나타내었다.

Fig. 5는 열생성(heat generation)이 50W인 경우 외부유속의 변화에 따른 단면에서 온도분포를 도시

한 그림이다. 전체적으로 원형발열체의 단면에서의 온도분포가 거의 변화가 없이 일정한 분포를 보이고 있는데, 이것은 원형발열체의 경우 단면의 전 영역에 열생성의 조건이 주어졌기 때문이다. 외부 유속이 1m/s인 경우 약 117℃의 온도를 나타내며, 외부유속이 증가할수록 온도분포는 점점 낮아지고 있다. 이러한 현상을 보이는 이유는 외부유속의 증가로 인하여 외부로 열전달이 더욱더 촉진되고 있기 때문이다. 그러나, 외부유속이 증가함에 따라 온도의 감소비율이 일정하지는 않고, 점점 작아지는 현상을 보이고 있다. 따라서, 외부의 유속이 무한히 증가하게 되더라도 일정한 온도 이하로는 감소하지는 않을 것이다.

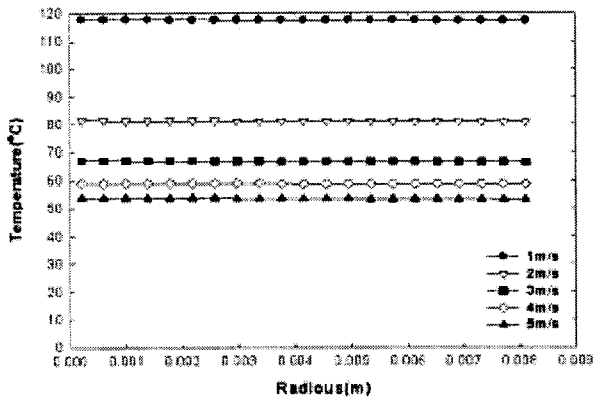


Fig. 5 Temperature distributions at cross section according to variations of environmental velocity(50W)

우 외부유속의 변화에 따른 단면에서 온도분포를 도시한 그림이다. 전체적인 온도분포는 열생성이 50W인 경우와 거의 동일한 분포를 보이고 있다. 외부유속이 1m/s인 경우 약 236℃의 온도분포를 보이고 있으며, 열생성이 50W인 경우보다 2배정도 높은 온도분포를 나타내고 있다.

Fig. 7은 열생성이 150W인 경우 외부유속의 변화에 따른 단면에서 온도분포를 도시한 그림이다. 유속이 1m/s인 경우 350℃정도의 온도분포를 보이고 있으며, 5m/s인 경우에는 약 130℃의 온도분포를 나타내고 있다. 또한, 외부의 유속변화에 따른 정상상태에서의 온도분포가 선형적으로 변화하지 않으며, 외부유속의 증가에 대하여 온도가 무한히 감소하지는 않을 것이다.

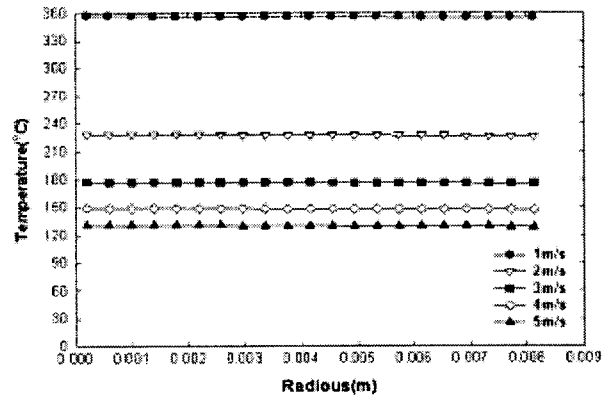


Fig. 7 Temperature distributions at cross section according to variations of environmental velocity(150W)

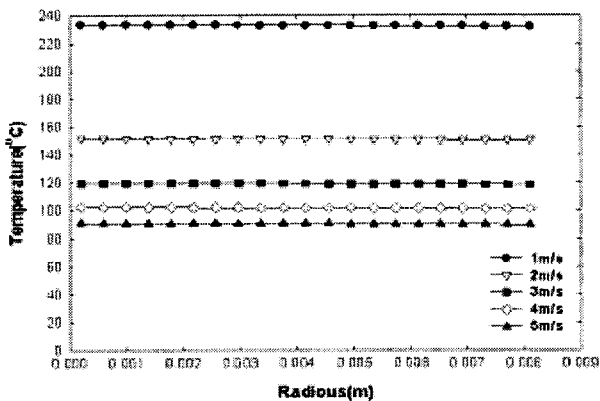


Fig. 6 Temperature distributions at cross section according to variations of environmental velocity(100W)

Fig. 6은 열생성(heat generation)이 100W인 경

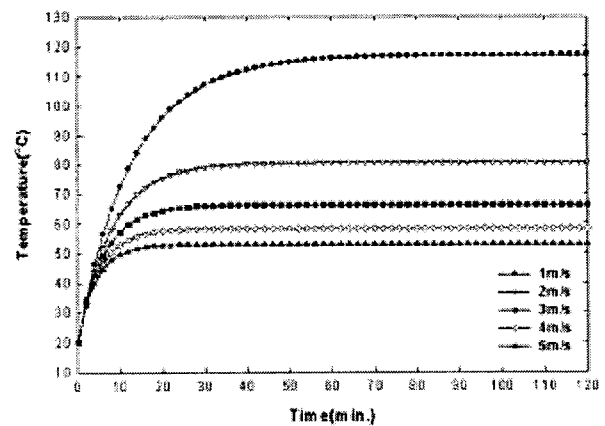


Fig. 8 Temperature distributions with time variations according to variations of environmental velocity at surface(50W)

이러한 결과에서 나타난 바와 같이 외부의 유속 변화 및 열생성의 변화에 따른 정상상태에서의 온도분포를 예측함으로써 열 시스템의 설계에 있어서 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

4.2 표면 온도 분포

Fig. 8은 열생성이 50W인 경우 원형발열체의 표면에서 시간의 변화에 대한 온도분포를 도시한 그림이다. 외부유속이 증가함에 따라 정상상태에서 표면온도가 점점 낮아지는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 외부유속이 일정하게 증가하는 반면에 정상상태에서 온도분포가 낮아지는 비율이 점점 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

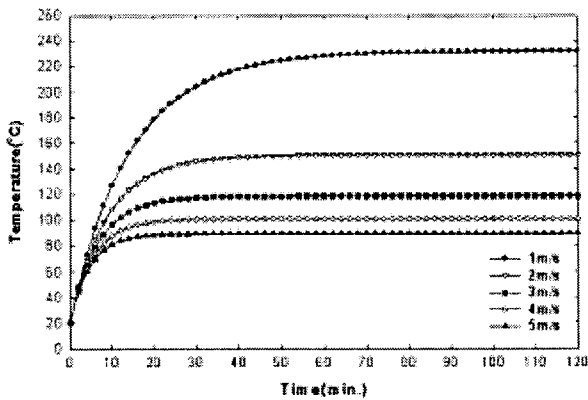


Fig. 9 Temperature distributions with time variations according to variations of environmental velocity at surface(100W)

Fig. 9는 열생성이 100W인 경우 원형발열체의 표면온도분포를 시간의 변화에 대하여 도시한 그림이다. 전체적인 온도분포는 열생성이 50W인 경우와 유사한 분포를 보이고 있으나, 외부유속에 따른 정상상태에서의 온도가 높게 나타나고 있다.

Fig. 10은 열생성이 150W인 경우 외부유속의 변화에 따른 원형발열체의 표면온도분포를 도시한 것이다. 정상상태인 경우 외부속도의 증가에 따라서 온도가 점점 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 이전의 결과와 마찬가지로 온도감소가 비선형적인 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이것은 외부속도가 증가함에 따라 원형발열체로부터 외부로 열전달이 빠르게 진행되기 때문에 정상상태에 도달하는 시간도 짧아지며 이러한 경향을 보이고 있는 것이다.

Fig. 11은 열생성과 외부유속의 변화에 따른 정상상태에서의 온도분포를 도시한 그림이다. 외부유

속이 증가함에 따라 정상상태에서의 온도가 감소하고 있으며, 이전의 시간에 대한 온도분포에서와 마찬가지로 비선형적인 분포를 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 그렇지만, 유속이 증가할수록 각 열생성에 대한 온도감소는 적어지는 것을 확인할 수 있는데 이러한 결과는 외부유속이 무한히 증가하게 되더라도 일정한 온도이하로는 감소하지 않을 것이다.

또한, 이러한 변화는 일정한 규칙성을 가지고 있기 때문에 최소자승법을 이용하여 각각의 열생성에 대하여 외부유속의 변화에 대한 정상상태에서의 온도에 관한 상관식을 식 (4)과 같이 도출하였다.

$$T = a + \left(\frac{b}{V}\right) + \left(\frac{c}{V^2}\right) \quad (4)$$

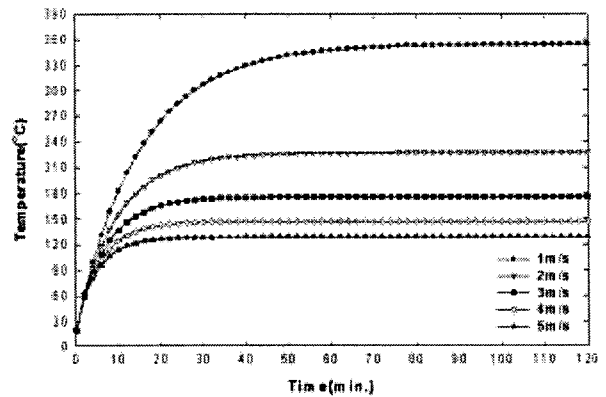


Fig. 10 Temperature distributions with time variations according to variations of environmental velocity at surface(150W)

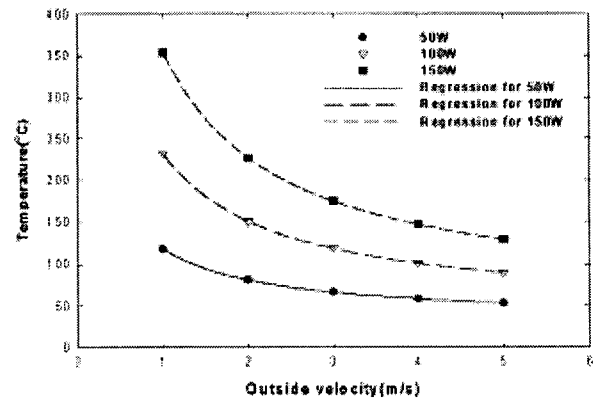


Fig. 11 Temperature and regression distributions at steady state according to the variations of environmental velocity

Table 2는 식 (4)에서 제시한 계수들의 값을 나타낸 것이다.

Table 2 Coefficients with correlation equation between outside velocity and the temperature for steady state.

heat generation or electric power	coefficients		
	a	b	c
50W	32.59	108.31	-23.68
100W	44.31	238.68	-51.03
150W	55.89	386.18	-87.47

5. 결 론

본 연구에서는 열생성을 가지고 있는 원형발열체에 대한 비정상상태에서의 열적특성을 예측하기 위하여 수치해석을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 외부유속이 증가할수록 발열체로부터 외부로 열전달이 빠르게 진행되며, 온도분포는 비선형적으로 감소하는 분포를 보이고 있다.
2. 외부유속이 증가함에 따라 정상상태에서의 온도분포는 비선형적인 분포를 보이고 있다.
3. 외부유속의 변화에 대한 정상상태에서의 온도분포는 반비례관계를 나타내고 있으며, 최소자승법을 이용한 상관식을 도출하였다.

위의 결과를 열생성을 가진 원형발열체의 제조 및 적용에 응용하게 된다면 기본적인 설계에 있어서 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 BK21 지역대학육성사업단 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고 문헌

1. 김영진, 김덕윤, 1994, "비금속 발열체", 재료공학 핸드북, 한국사전연구소, pp. 1767~1804.
2. 일본특허청, 1995, "전기저항 발열로 및 전기 저항 발열체의 제조방법", 특원평5-193770.
3. 일본특허청, 1999, "전기로용 전기저항발열체 및

그와 같은 저항요소의 제조법", 특원평11-19014 0.

4. 박양덕, 1997, "전기로용 인조흑연 전극봉 제조 기술", 고분자과학과 기술, 제8권, 제2호, pp. 155~162.
5. 이후인, 심건주, 한상욱, 2001, "이규화 물리브덴 고온발열체의 전기적 특성 및 제조에 관한 연구", 한국전기전자재료학회, 하계학술대회 논문집, pp. 605~608.
6. 박현철, 김재원, 백운규, 최성철, 1999, "성형미세구조가 반응소결 탄화규소체의 소결미세구조 및 기계적 특성에 미치는 영향", 한국세라믹학회지, 제1권, 제36호, pp. 97~105.
7. Shmas V. Patankar, 1988, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", 대한교과서주식회사, pp. 79~85.
8. 香月, 中山, 1990, "熱流動の 數値シミュレーション", 森北出版株式會社, pp. 19~34.
9. 이택식, 이재헌, 이준식, 1996, "열전달", 최중당, pp. 67~73.