흑연표면의 열방사율 측정시 결정립 배향성의 영향

노재승, 안재상, 김범준, 전호연, 서승국, 김석환, 이상우

금오공과대학교 신소재시스템공학부

Thermal Emissivity Changes as a Function of Degree of Flakes Alignment on the Graphite Surface

Jae-Seung Roh*, Jai-Sang Ahn, Beom-Jun Kim, Ho-Yeon Jeon,
Seung-Kuk Seo, Suk Hwan Kim, Sang-Woo Lee

School of Advanced Materials and System Engineering, Kumoh National Institute of Technology,
Gumi, Gyeongbuk 730-701, Korea

(Received March 31, 2009 ; revised April 20, 2009 ; accepted April 30, 2009)

Abstract

This study is the research on the thermal emissivity depending on the bulk graphite's alignment degree. Bulk graphites were manufactured by uni-axial pressing and subsequent heat treatment of natural graphite flakes with organic binder. The samples were prepared to be 0° (relative to the 002 c-face), 45°, and 90° (relative to the 100 a-face) for measuring alignment degree. The alignment degree of the sample was measured by XRD. The thermal emissivity was measured by infrared thermal image camera at 100°C and compared with the value obtained by Infrared spectroscopy. The alignment degree and thermal emissivity of 0° sample were measured to be 0 and 0.70 respectively. And those of 90° sample were 0.73 and 0.80 respectively. The emissivity value was correlated with obtained by IR spectroscopy. Therefore it was considered that the thermal emissivity of the bulk graphite is correlated with the alignment degree.

Keywords: Emissivity, Bulk graphite, Alignment degree

1. 서 론

최근 전자제품의 소형화 및 초박막화는 한정된 공간에 많은 더욱 소형화된 부품을 집적하여 패키징한다. 하지만 부품의 집적화로 인해 제품의 동작 중 발열이 큰 문제로 떠오르게 되었다. 이러한 발열은 제품의 오작동을 일으킬 수 있으므로 그 대책이 항상 대두되어 왔다. 이렇게 전자제품의 발열을 최소화시킬 수 있는 방법으로는 소형 팬을 설치하는 등의 기계적 방법보다 부피를 최소화하기 위해 방열코팅 등을 이용한 방열코팅방법이 주목을 받고 있다¹⁻³⁾.

그 중 흑연 및 탄소재료는 원자력이나 에너지 재료로 각광을 받고 있으며 전자기기 및 LED 등의

전자부품의 열방출을 위한 코팅재료로 그 이용영역이 확대되고 있다. 특히 원자로는 운전 중의 불의의 사고 시 급속한 열방출이 필요하기 때문에 흑연 재료의 열방사율 데이터 확보는 매우 중요하다⁴⁾.

흑연은 결합력이 큰 기저면을 따라 우수한 열전도도, 전기전도도 및 강성률 등을 나타내고 화학적으로 매우 안정하여 화학, 전기전자, 기계, 자동차, 원자로 등에 널리 사용되고 있다. 이러한 특성은 흑연의 결정구조에서 그 원인을 찾을 수 있다. 흑연의 결정구조는 육방정 구조로써 a-축 방향으로의 기저면(basal plan)은 강한 sp² 결합을 하고 있으며 c-축으로는 약한 Van der Waals 결합을 하고 있다. 따라서 a-축으로는 전기전도도, 열전도도 및 강성률 등이 우수하며 c-축 방향으로의 이러한 특성들이 상대적으로 미약하다^{5,6)}. 방사율 또한 이런 이방성 특성을 나타내고 있다고 알려져 있다.

*Corresponding author. E-mail : jsroh@kumoh.ac.kr

열방사는 열에너지를 갖는 물체의 외부에서 나타나는 현상 중 하나이다. 열방사율은 이상적인 완전 방사체인 흑체의 열방사를 1로 할 때, 이에 대한 방사 휘도의 비율로서 물체의 열방사 정도를 표현한다. 열방사율은 금속재료, 세라믹재료, 플라스틱 재료 등의 열적 물성을 표현하는데 다양하게 이용되고 있으며, 이를 이용하여 항공우주분야, 소방 안전, 건강의료, 플라스틱 가공, 섬유산업, 전기 전자 부품 등 산업 전반에 걸쳐 많은 연구가 진행되고 있다⁷⁻¹⁰⁾.

열방사율은 재료표면의 형상, 기공의 유무, 표면 거칠기, 산화 여부 그리고 측정온도 등에 따라 달라진다. 그러나 많은 보고에서 표면의 형상이나 거칠기의 경향에 따라 열방사율이 영향을 받는다는 언급만 있을 뿐 정량적인 데이터는 거의 찾아보기 힘든 실정이다^{11,12)}.

본 연구에서는 흑연의 결정립 배향성에 따른 열방사율 특성을 조사하기 위하여 치밀하면서 강한 배향성을 갖는 흑연체를 제조하였고, 밀도 및 기공율 등 기본적인 물성과 배향특성을 조사하였다. 또한 제조된 배향성 흑연체를 시편으로 하여 여러 열방사 측정방법 중 적외선 열화상 카메라(infrared thermal image camera)를 이용하여 편리하면서도 재현성 있는 측정을 하고자 하였으며, IR 분광분석법을 이용하여 열화상카메라 데이터와 비교하였다.

2. 방사율 및 측정법

열방사란 “열적으로 여기 된 물질의 구성입자들이 열에너지를 전자에너지로 전환하여 출사하는 방사”라고 정의한다. 열방사는 전자파의 일종으로서 적당한 매질을 통하여 빛의 속도로 전파되며, 물질과 상호작용하여 흡수, 산란, 반사 등을 한다.

열방사는 절대적 물리량(방사강도 등)과 비례적 물리량(방사율)으로 정량화시킬 수 있으며, 이 중 방사율은 재료의 열방사 특성의 표현에, 방사휘도는 물체의 열적 상태의 표현에 주로 사용된다.

- 절대적 물리량 : 방사강도(W/m^2)

- 비례적 물리량 : 방사율(무차원)

열방사를 이용한 온도계측에서는 방사율에 의하여 측정온도의 정밀도가 결정되며, 열적 상태의 최적설계에서는 열확산계수, 열전도계수, 비열과 함께 방사율이 재료선택을 위한 필수적인 검색자료가 된다. 이와 같이 열방사 응용분야에서 방사율이 중요한 의미를 가지고 있음에도 불구하고 다음과 같은 몇 가지 문제점으로 인하여 그 응용은 아직까지 미흡한 실정이다¹³⁾.

첫째, 방사율은 물질의 고유한 특성임과 동시에 동일한 물질에 대해서도 기하학적, 화학적 상태에 따라 다른 값을 나타내는 상태 의존적 물성이다.

둘째, 안정된 환경조건에서의 측정방법은 몇 가지 제안되어 있지만 표준측정법이 제정되어 있지 않으며, 현장측정이 곤란하다.

셋째, 데이터베이스 구축이 미흡하며, 순수물질에 대한 표준상태에서의 몇 가지 자료만이 응용가능하다.

방사율은 임의의 온도로부터 출사되는 열방사와, 동일한 온도의 흑체로부터 출사되는 열방사와의 크기의 비를 말한다. 온도가 T인 물체는 그 온도에 상응한 열방사를 출사하며 또 그 물체에 입사되는 방사를 흡수한다. 온도가 T인 흑체(blackbody)가 방사하는 최대 방사강도(emission power)는 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 법칙에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$E_b = \sigma T^4 (W/m^2) \quad (1)$$

여기서 σ 는 스테판-볼츠만 상수($\sigma = 5.6697 \times 10^{-8}$), T는 켈빈으로 주어지는 물체의 절대온도(K), E_b 는 흑체의 방사강도이다. 이상적인 방사체 또는 흑체만이 식 (1)에 따른 방사강도를 출사할 수 있다. 그러므로 절대온도가 T인 물체가 출사하는 방사강도 E는 다음과 같다.

$$E = \epsilon E_b = \epsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

여기서 ϵ 은 방사율(emissivity)로서 0과 1 사이의 값을 가지며 실제 임의의 물체의 방사율은 항상 1보다 작다.

한편 산업체 현장에서 결함 검사시스템은 매우 중요한 부분을 차지하고 있으며 그 검사 방법이 비파괴적이어서 매우 각광을 받고 있다. 적외선 열화상 카메라를 이용한 방법은 사용이 빠르고 비교적 정확한 데이터를 제공함으로써 그 활용도가 넓어지고 있다. 현대의 열화상 카메라는 측정환경에 대한 방사, 피사체 거리, 상대습도, 대기 온도, 반사된 주위의 온도 등 피사체의 매개변수를 입력해야 한다. 기기의 렌즈와 필터의 조합은 그 자신이 교정기능을 갖고 있다. 이 기능에 대한 교정상수는 스캐너에 저장되어 있고, 기기는 자동으로 조합된 적당한 상수를 선택하게 된다.

3. 실험방법

3.1 시편제조 및 준비

배향성에 따른 특성연구를 위해서는 우선 측정하고자 하는 시편의 제조가 중요하다. 천연인상흑연

Fig. 1. Uniaxial pressing for graphite bulk forming.

Fig. 2. Sample preparation for measuring of XRD and emissivity as a function of alignment angle.

은 탄소로 이루어진 물질 중 자연계에서 가장 흑연 구조에 가까운 물질이다. 배향이 잘 된 시편을 얻기 위하여 다음과 같은 과정으로 시편을 제조하였다.

원료분말로는 분급된 212~425 μm 의 천연인상흑연을 이용하였다. 흑연분말을 유기바인더와 혼합하여 볼 밀링한 후 8×8×80 mm의 사각형의 성형몰드를 이용하여 80 MPa의 성형압력으로 일축가압하여 성형체를 제조하였다(그림 1). 제조된 성형체는 1,200 °C의 질소분위기에서 열처리하여 흑연체(graphite bulk)를 얻었다.

흑연체의 배향특성을 측정하기 위하여 제조된 흑연체는 그림 2와 같이 준비하였다. 시편의 배향성은 가압 성형 시 응력인가방향에 수직인 면(c-face)을 기준으로 0°, 45° 및 인가압력 방향에 평행한 면(a-face)인 90° 등의 세 종류로 하였다. 시편준비는 저속 절단기를 이용하여 8×8×8 mm의 크기로 절단한 후 측정하고자하는 면(그림 2에서 검게 표시된 부분)은 사포를 이용한 조연마 후 1 μm 다이아몬드연마제를 이용하여 미세연마 하였다.

3.2 미세조직 관찰, 밀도 및 기공도 측정

제조된 흑연체의 정성적인 배향도 및 기공도 등을 관찰하기 위하여 미세조직관찰을 실시하였다. 미세조직은 시편연마 후 광학현미경을 이용하여 50배로 관찰하였으며 연마후 부식 등의 처리는 하지 않았다.

또한 흑연체의 기본적인 물성으로는 분말성형체의 기본특성인 밀도 및 기공율을 들 수 있다. 밀도 및 기공율은 Archimedes법(ISO18754)을 이용하여

측정하였으며, 증류수를 이용한 Archimedes법의 밀도 및 기공율 계산식으로는 다음 식을 이용하였다.

$$\text{기공율}(\%) = \{(\text{포수무게} - \text{건조무게}) / (\text{포수무게} - \text{수중무게})\} \times 100$$

$$\text{밀도}(\text{g/cm}^3) = \text{건조무게} / (\text{포수무게} - \text{수중무게})$$

3.3 XRD 측정

배향시편의 배향도를 정량적으로 측정하기 위하여 XRD 피크분석을 실시하였다. XRD 분석은 25~26°의 주사범위에서 주사속도 1°/min의 2 θ 연속 주사방식으로 XRD 회절피크를 얻었으며, 실리콘 표준시편으로 2 θ 보정을 실시하였다. 전체 2 θ 범위에서 얻어진 회절피크에 대하여 $K\alpha_2$ 보정을 실시하였으며, 사용된 X-선 타겟의 파장($\text{Cu-K}\alpha_1$)은 1.5406 Å이다¹⁴⁾.

배향시편의 배향도(degree of alignment, Da)는 (100) 피크와 (002) 피크의 높이로부터 다음의 간단한 식으로 계산하였다.

$$Da = \frac{I_{100}}{I_{100} + I_{002}}$$

여기에서 I_{002} 는 (002) 피크의 높이이고 I_{100} 은 (100) 피크의 높이이다.

3.4 열방사율 측정

시편의 열방사율은 열화상카메라(ThermaCAME2, FLIR Systems 사)를 이용하여 측정하였다. 표 1에 방사율 측정에 이용한 카메라의 주요사양을 나타내었다.

방사율 측정은 그림 3의 그림에 나타난 바와 같이 가열오븐에 시편을 장착하고 시편으로부터 20 cm 거리에 열화상카메라를 설치하였고, 측정모드를 스팟(spot) 방식으로 하여 시편의 중앙부분에서의 방사율을 측정하도록 설치하였다. 또한 시편에는 열전대(thermocouple)를 설치하여 열화상카메라의 온도를 보정하였으며 시험 시 측정온도는 100°C로 하였다. 측정 시 실내온도는 20°C로 일정하게 유지하였다. 그림 4는 카메라의 측정 스팟이 시편의 중앙에 초점되어 있음을 보여주고 있다.

Table 1. Specification of the infrared thermal image camera (ThermaCAM E2)

Property	Value
Thermal sensitivity (°C)	0.12°C at 30°C
Accuracy	±2°C, ±2%
Temperature range (°C)	-20°C to +250°C

Fig. 3. Schematic diagram for measuring emissivity by using infrared thermal image camera.

Fig. 4. Infrared thermal image of reference sample ($\epsilon=0.74$ at 100°C).

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 밀도, 기공률 및 미세조직

표 2에 제조된 흑연체의 기본물성을 나타내었다. 흑연체의 밀도는 1.92 g/cm^3 였으며 기공률은 9.6%로써 상용의 고밀도용 흑연보다 매우 치밀한 상태로 제조되었음을 알 수 있으며 이는 미세구조에서 확실하게 확인할 수 있다. 이렇게 고밀도로 제조된 흑연체는 열방사율 측정 시 기공의 영향을 최소화시킬 수 있어 시편의 배향도 특성에 따른 열방사율 측정에 적합할 것으로 판단되었다.

그림 5는 광학현미경으로 50배로 관찰한 시편의

Table 2. The main properties of graphite bulk

Property	Value
Bulk density (g/cm^3)	1.92
Porosity (%)	9.6
Grain size (μm)	212~425

Fig. 5. Optical microscope images of graphite block.

종단면 미세구조 사진이다. 미세조직 사진에서 알 수 있듯이 흑연체는 상용의 흑연제품에 비하여 매우 치밀하고 기공도 거의 찾아보기 어려움을 관찰할 수 있다. 또한 미세조직 사진만으로도 전반적으로 흑연 입자들이 매우 잘 배향되어 있음을 알 수 있다. 또한 흑연 flake는 휘어지고 구부러져 있어 흑연체 전체의 배향도는 완벽하지 않을 것으로 보인다.

4.2 XRD 분석

그림 6은 0° , 45° 및 90° 시편의 X-선 회절 패턴으로써 (002) 및 (101), (100) 피크들이 분명하게 나타나고 있고, 피크의 baseline이 비교적 평평하고 매우 낮은 위치를 나타내고 있어 제조된 흑연체는 흑연화가 잘 발달되어 있음을 알 수 있다.

그림 6에서 0° 시편은 (002) 피크만 나타나고 (100) 및 (101) 피크는 관찰되지 않는다. 45° 시편은 (002) 피크와 (100) 피크는 나타났지만 (101) 피크는 관찰되지 않으며 여전히 (002) 피크의 높이가 크다. 90° 시편은 (002), (101) 및 (100) 피크들이

Fig. 6. XRD patterns as a function of sample angles.

분명하게 나타났으며 (002)면의 피크가 상대적으로 매우 작은 강도를 나타낸다. 이렇게 시편 채취각도에 따라 배향성에 확연한 차이를 나타냄으로써 본 연구의 목적인 열방사의 배향성 특성을 연구하기에 적합할 것으로 판단되었다.

그림 7은 그림 6의 XRD 피크로부터 배향도를 정량적으로 계산하여 얻은 그래프이다. 배향도는 (100) 피크와 (002) 피크의 높이로부터 계산한 결과로써 0°, 45° 및 90° 시편은 각각 0, 0.08 및 0.73이 얻어졌다. 이 결과는 배향이 완전하게 이루어지지 않았음을 알려주는 결과인데 그림 5에서 관찰했던 미세 조직에서도 flake 형태의 천연흑연 입자가 구부러지고 휘어져서 나타난 결과로 판단된다. 따라서 flake 흑연분말을 이용하여 제조한 성형체의 배향도는 흑연분말의 크기를 조절함으로써 좀 더 높일 수는 있겠지만 배향도 1을 갖는 완벽한 흑연체를 제조하기는 거의 불가능할 것으로 판단된다.

45° 시편의 배향도가 0°의 배향도 0과 90° 시편의 배향도 0.73의 중간 값(약 0.37)이 얻어질 것으로 예상하였으나 실제 계산된 값은 0.08로써 매우 낮다. 이렇게 45° 시편의 배향도가 예상보다 낮게 나

Fig. 7. Degree of alignments as a function of sample angles.

온 이유는 다음과 같은 가능성을 생각할 수 있다. 즉, 시편 준비과정에 문제가 있을 수 있다. 배향 시편은 기계적 가공과정을 거쳐 제작되는데 이 때 어쩔 수 없는 응력이 작용하여 흑연분말이 휘어질 수 있기 때문에 flake 형태의 분말에서 면적이 넓은 부분인 (002)면이 더 드러날 수 있다. 이렇기 때문에 90° 시편에서도 이론적으로 1이 아닌 훨씬 작은 값인 0.73이 얻어진 것으로 판단된다. 실제 45° 시편에 마운팅을 하지 않았으므로 연마 시 표면근처의 조직이 무너지는 현상이 나타나며, 따라서 위 사실을 입증할만한 고배율의 표면근처의 조직사진은 얻지 못하였다. 만약 마운팅을 한다면 열방사율이 달라질 수 있기 때문이다. 이 부분을 정량적으로 확인하기 위해서는 더 깊은 연구가 필요하다.

4.3 열방사율

열화상카메라로부터 얻은 방사율 데이터는 IR 분광기를 이용하여 얻은 방사율 데이터와 비교하여 측정 정확도를 확인하였다. IR 분광기를 이용한 방사율 측정을 위해서는 최소 시편의 크기가 25×25 mm로써 본 연구에 이용한 배향시편의 크기가 너무 작기 때문에 IR 분광기를 이용한 방사율 측정은 레퍼런스 시편을 이용하였다. 레퍼런스 시편은 100°C에서 방사율이 0.74인 원자력급 등방성 흑연 시편을 이용하였으며 경면 연마하여 측정하였다. 앞에서 보았던 그림 4는 레퍼런스 시편의 열화상카메라 측정과정을 보여주는 사진으로써 열화상카메라로부터 얻은 방사율 값도 0.74를 나타내어 IR 분광기에서 얻은 데이터와 잘 일치하였다.

그림 8은 배향각도에 따른 100°C에서의 열방사율 변화를 나타낸 그래프이며, 그 값들은 표 3에 정리하였다. 배향 시편의 각도에 따른 방사율을 보면 0°

Fig. 8. Emissivity changes as a function of sample angles.

Table 3. The main properties of graphite bulk

Sample (Angle)	Degree of alignment*	Emissivity, ϵ
0	0	0.70
45	0.08	0.71
90	0.73	0.80

*Degree of alignment: $I_{(100)}/(I_{(100)}+I_{(002)})$ from XRD analysis

시편은 0.70, 45° 시편은 0.71로 측정되어 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 기존의 보고에서는 45° 시편의 방사율은 0° 시편과 90° 시편의 중간 값(약 0.75 정도)을 나타내고 있다^{15,16)}. 본 연구의 XRD 결과에서도 0° 및 45° 시편의 배향도는 각각 0 및 0.08이 얻어져 큰 차이를 나타내지 않았다. 이는 연마 시 표면근처의 조직이 무너지는 현상으로 설명하였는데, 열방사율 결과도 같은 이유로 설명될 수 있다. 따라서 45° 시편에 대한 정확한 측정을 위해서는 시편 준비에 대한 더 깊은 연구가 필요하다.

한편 90° 시편은 0.80으로 측정되어 0° 및 45° 시편에 비하여 매우 큰 값을 나타내었다. G. W. Autio와 E. Scala는 800~1200°C 사이의 온도에서 열분해의 흑연의 c-면의 방사율이 a-면의 방사율보다 낮게 측정됨을 보고하였으며, 이는 단결정 흑연의 배열과 같은 방향으로 예측된 이론적인 값과 비슷한 경향을 나타내었다. G. W. Autio와 E. Scala는 McCartney와 Ergun의 보고를 인용하면서 그들이 이론적으로 계산한 값을 예로 들었는데, 그 a-면의 방사율 값은 약 0.8이었고 c-면의 방사율은 약 0.7으로써 본 연구에서 측정된 값과 일치하였다¹⁶⁾.

이렇게 배향각도가 큰 시편의 방사율이 큰 값으로 측정된 이유는 흑연의 결정구조에서부터 그 요인을 찾을 수 있다. 원료분말로 이용된 천연흑연은 그 구조가 큰 이방성을 갖고 있다. 전기저항은 a-

축 방향 및 c-축 방향으로 각각 1~100 ($\Omega \cdot \text{cm} \times 10^4$) 및 10,000 ($\Omega \cdot \text{cm} \times 10^4$)으로써 a-축 방향으로의 전기전도도가 최대 10,000배의 값을 갖는다. 또한 열방사율과 관계가 있는 열전도도도는 a-축 방향 및 c-축 방향으로 각각 4.0 (watt/cm) 및 0.8 (watt/cm)로써 a-축 방향으로 5배의 높은 열전도도를 갖는다¹⁷⁾. 따라서 동일한 흑연체에서 준비된 0°, 45° 및 90° 시편의 열방사율은 그 배향성에 따른 열전도도 및 전기전도도와 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. G. W. Autio와 E. Scala는 계속된 연구결과 보고에서 흑연결정과 관련된 배향성에 따른 방사율이 달라지는 결과를 전기비저항과 관련 있음을 설명하였다¹⁸⁾.

이미 본 연구에서 45° 시편의 데이터를 정확하게 측정하기 위하여 시편준비에 대한 더욱 깊이 있는 연구가 필요하다고 판단하였다. 실험실적으로 가압성형에 의해 아무리 밀도가 높은 흑연체를 얻을 수 있다하여도 원료로 이용된 흑연 flake의 특성상 기계가공 시 휘어질 수 있고, 성형 시 첨가된 최소한의 바인더가 열처리 후 기공생성의 원인이 되어 배향도에 따른 열방사율 측정에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구진은 가장 이상적인 벌크 흑연구조에 가까운 열분해흑연을 이용하여 배향도에 따른 열방사율 연구를 계속 진행할 예정이다.

5. 결 론

흑연의 결정립 배향성에 따른 열 방사율 특성을 조사하기 위하여 치밀하면서 강한 배향성을 갖는 흑연체를 제조하였고, 밀도 및 기공율 등 기본적인 물성과 배향특성을 조사하였다. 또한 제조된 배향성 흑연체를 시편으로 하여 여러 열방사 측정방법 중 적외선 열화상 카메라를 이용하여 편리하면서도 재현성 있는 측정을 하고자 하였으며, IR 분광분석법을 이용하여 열화상카메라 데이터와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

제조된 흑연체의 밀도는 1.92 g/cm³였으며 기공율은 9.6%로써 상용의 고밀도용 흑연보다 매우 치밀한 상태로 제조되었음을 알 수 있으며 이는 미세구조에서 확실하게 확인할 수 있었다.

XRD 분석을 통한 배향도는 (100) 피크와 (002) 피크의 높이로부터 계산한 결과로써 0°, 45° 및 90° 시편은 각각 0, 0.08 및 0.73이 얻어져 제조된 흑연체는 매우 높은 배향도를 갖는 것을 확인할 수 있었다.

열화상카메라를 이용한 배향 시편의 방사율은 0°, 45° 및 90° 시편은 각각 0.70, 0.71 및 0.80이 얻어

저 c-면에 대한 배향각도가 큰 경우 방사율은 증가하였다.

열화상카메라를 이용하여 얻은 레퍼런스 시편의 방사율은 IR 분광기를 이용한 방사율과 동일한 값을 얻었다. 따라서 열화상카메라로부터 얻은 열방사 값도 매우 유용함을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 금오공과대학교 연구비지원(2006-104-091)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. X. Jack Hu, Matthew A. Panzer, Kenneth E. Goodson, J. Heat Transfer, 129 (2007) 91.
2. S. P. Rawal, D. M. Barnett, D. E. Martin, Advanced Packaging, 22 (1999) 379.
3. Alberto Castellazzia, Martin Honsberg-Riedlb, Gerhard Wachutka, Microelectronics Journal, 37 (2006) 145.
4. A. Kurumada, T. Oku, K. Harada, K. Kawamata, S. Sato, T. Hiraoka, B. McEaney, Carbon, 35 (1997) 1157.
5. Charls T. Lynch, Practical Handbook of Materials Science, CRC press, Florida (1989) 393.
6. Bruce W. Gonser, Modern Materials, Vol. 7, Academic Press, New York (1970) 165.
7. C. Y. Zhao, T. J. Lu, H. P. Hodson, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47 (2004) 2927.
8. J. Zueco, F. Alhama, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 101 (2006) 73.
9. M. Ball, H. Pinkerton, A. J. L. Harris, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 173 (2008) 148.
10. L. Gardner, K. T. Ng, Fire Safety Journal, 41 (2006) 185.
11. Jian Yi, XiaoDong He, Yue Sun, YaoLi, Applied Surface Science, 253 (2007) 4361.
12. S. Bellayer, J. W. Gilman, S. S. Rahatekar, S. Bourbigot, X. Flambard, L. M. Hanssen, H. Guo, S. Kumar, Carbon, 45 (2007) 2417.
13. K. S. Oh, S. C. Bae, KSME Fall Meeting B (2001) 54.
14. J. S. Roh, Carbon Science, 5 (2004) 27.
15. Bruce W. Gonser, Mordern Materials, Vol. 7, Academic Press, New York (1970) 185.
16. G. W. Autio, E. Scala, Carbon, 4 (1966) 13.
17. T. J. W. van Thoor, L. W. Codd, K. Dijkhoff, J. H. Fearon, C. J. van Oss, H. G. Roeberson, E. G. Stanford, Materials and Technology, Vol. 2, Longman and J. H. Debusy, London (1971) 424.
18. G. W. Autio, E. Scala, Carbon, 6 (1968) 41.