

나노다이아몬드가 첨가된 탄소블록의 열전도도 특성

이준송 · 문지훈* · 주성욱 · 이승욱* · 김민일*,†

경북하이브리드부품연구원 탄소복합설계해석기술지원센터,
*경북하이브리드부품연구원 탄소성형부품상용화인증센터
(2023년 11월 10일 접수, 2023년 11월 20일 수정, 2023년 11월 20일 채택)

The Thermal Conductivity Characteristics of Carbon Block with Nano-Diamond

Jun Soong Lee, Ji Hun Mun*, Sungwook Joo, Seung Uk Lee* and Min Il Kim*,†

Carbon Composite Design Analysis Technology support Center, Gyengbuk Hybrid Technology Institute,
Gyeongsan 38478, Republic of Korea

*Carbon-Formed Component Commercialization Certification Center, Gyengbuk Hybrid Technology Institute,
Gumi 39158, Republic of Korea

(Received November 10, 2023; Revised November 20, 2023; Accepted November 20, 2023)

초 록

탄소블록의 열전도도를 증가시키기 위하여 탄소블록 제조 공정 중 nano-diamond (ND)를 첨가하였다. 첨가된 ND는 탄화 과정에서 바인더 피치의 휘발로 인하여 생성된 탄소블록의 기공을 제어하였다. ND의 첨가는 코크스 및 바인더 피치의 혼련 공정에 추가하였으며, 성형, 탄화를 거쳐 탄소블록을 제조하였다. 첨가된 ND의 양이 증가할수록 탄소블록의 ND 비율이 증가하였다. 첨가된 ND는 탄화 과정에서 바인더 피치의 휘발로 인하여 발생하는 가스의 이동 통로 역할을 하여 탄소블록의 밀도를 높이고, 기공률을 감소시켰다. ND의 첨가를 통하여 높아진 밀도, 낮아진 기공률, ND의 높은 열전도도를 통하여 탄소블록의 열전도도를 향상시킬 수 있었다.

Abstract

Nano-diamond (ND) was added during the carbon block preparation process to increase the thermal conductivity of the carbon block. Added ND controlled the generated pore of carbon block due to the volatilization of the binder pitch during the carbonization process. The ND was added to the kneading process of coke and binder pitch, and carbon blocks were prepared by pressing and carbonization. As the amount of added ND increased, the ND ratio of the carbon block increased. The added ND made a pass-way for generated gas by volatilizing the binder pitch during the carbonization process, increasing the density of the carbon block and reducing the porosity. The thermal conductivity of the carbon block was improved by increased density, lowered porosity, and the high thermal conductivity of added ND.

Keywords: Carbon block, Nano-diamond, Density, Porosity, Thermal conductivity

1. 서 론

탄소복합재는 우수한 기계적 성질 및 화학적 안정성, 낮은 열팽창성, 높은 열전도도 등의 특성으로 인하여 방열소재로 사용되어 왔다. 방열재료로 주로 이용되는 탄소복합재는 형태에 따라 블록 또는 필름 형태가 주로 이용되고 있다. 특히 블록 형태의 탄소블록은 기계적 강도가 우수하고 경량화를 유도할 수 있기 때문에 히터, 로켓 노즐, gas-cket 등의 다양한 분야에 활용되고 있다[1-5].

일반적으로 탄소블록은 코크스를 필러로 이용하고, 바인더 피치를 결합제로 이용하여 제조된다. 필러로 이용되는 코크스는 높은 탄화수율을 보이지만, 열처리 과정에서 자가소결(self-sintering)이 일어나지 않아 블록 형태의 탄소블록으로 제조하기 위해서는 결합제가 필요하다. 탄소블록의 결합제로 주로 이용되는 바인더 피치는 저분자량 화합물부터 고분자량 화합물까지 다양한 분자량을 가지는 화합물이 혼합되어 있다[6-7]. 탄화 과정에서 바인더 피치에 포함된 화합물은 서로 중합되어 분자량이 증가하게 된다. 그러나 일부 저분자량 화합물은 탄소블록 제조 공정 중 고온 열처리 공정인 탄화 공정에서 중합되지 않고 휘발되어 가스를 발생시킨다. 발생한 가스는 방출 과정에서 탄소블록에 다수의 기공을 형성하여 제조된 탄소블록의 밀도 감소를 유발하고, 열적 특성을 저하시킨다[8-10]. 따라서 탄소블록의 열적 특성을 향상시키기 위해서는 바인더 피치에 함유되어 있는 저분자량 화합물의 휘발로 인한 가스 방출을 조절하여 탄소블록의 기공을 조절

† Corresponding Author: Gyengbuk Hybrid Technology Institute
Carbon-Formed Component Commercialization Certification Center, Gumi
39158, Republic of Korea
Tel: +82-54-450-0511 e-mail: mikim@ghi.re.kr

Table 1. The Sample Name and Preparation Conditions

Sample name	Mixture ratio (g/g) (cookes : pitch : nano-diamond)	Preparation conditions	
		Kneading and pressing	Carbonization
CB	80 : 20 : 0		
CB-ND-0.5	80 : 20 : 0.5	Kneading : 145 °C, 3 h, 30 rpm Pressing : 145 °C, 20 MPa, 1 h	1000 °C, 1 h, N ₂
CB-ND-1	80 : 20 : 1		
CB-ND-2	80 : 20 : 2		
CB-ND-3	80 : 20 : 3		

하는 것이 필요하다.

Nano-diamond (ND)는 nano-scale의 다이아몬드 입자로 높은 경도 및 열전도성, 낮은 열팽창계수를 가지고 있어 다양한 복합재의 첨가 재료로 활용되고 있다[11-15]. ND와 같은 나노 입자의 소재는 탄화 과정에서 피치에 포함된 저분자량 화합물의 휘발로 인하여 발생한 가스가 이동하는 통로를 조절할 수 있어 바인더 피치로 인하여 발생한 기공을 조절할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 ND의 높은 열전도도는 탄소블록의 열전도도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 코크스 및 바인더 피치를 이용하여 탄소블록을 제조하였다. 탄화 공정 중 바인더 피치의 휘발로 인하여 발생하는 가스를 제어하기 위하여 코크스 및 피치의 혼련 단계에서 ND를 추가하였다. ND의 첨가에 따른 탄소블록의 물리적 특성, 결정 특성을 평가하였으며, 특성 변화에 따른 ND의 영향에 대하여 고찰하였다. 또한 탄소블록의 열적 특성을 평가하여 ND의 첨가가 탄소블록의 열적 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험

2.1. 실험재료 및 제조 방법

탄소블록을 제조하기 위하여 코크스(particle size (D50) : 8.7 μm, pitchcookes, Poscomcm)를 충전재로 이용하였으며, 블록형성을 위한 결합재로 바인더 피치(softening point: 120 °C, coal tar-based pitch, Handan)를 사용하였다. 탄소블록의 열전도도 향상을 위하여 nano-diamond (ND, particle size : 2-8 nm, agglomerate size (D50) : 8.4 μm, density : 3.2 g/cm³, NEOmond)를 이용하였다. 코크스와 바인더 피치의 질량 비율을 8:2로 유지한 후 ND를 0-3의 질량 비율로 추가하여 혼련하였다. 80 g의 코크스에 20 g의 바인더 피치를 추가한 후 상온에서 30분간 혼련하였다. 혼련된 시료에 각 비율의 ND를 추가하여 145 °C까지 분당 10 °C로 승온한 후 3시간 동안 30 rpm으로 혼련하였다. 혼련이 완료된 시료는 상온까지 자연 냉각하여 코크스, 바인더피치, ND가 혼련된 시료를 얻었다. 혼련된 시료는 145 °C에서 1시간 동안 20 MPa의 압력을 가하여 원기둥 형태의 블록으로 성형하였다. 성형된 블록은 1000 °C의 질소분위기에서 1시간 동안 열처리하여 ND가 첨가된 탄소블록을 제조하였다. 첨가된 ND의 비율 및 비율에 따른 시료명을 Table 1에 나타내었다.

2.2. 탄소블록의 특성 평가

ND의 첨가에 따른 탄소블록의 결정구조 변화는 XRD를 이용하여 측정하였으며, 결합 특성은 RAMNA 분광기를 이용하여 분석하였다. 모든 시료의 시료의 XRD 패턴 분석은 10-80° 범위의 CuKα 방사선 (0.1541 nm)을 이용하여 분석하였다. ND 첨가에 따른 탄소블록의 밀

도 및 기공률을 측정하기 위하여 아르키메데스법(ISO 18754:2012)을 이용하였다. 탄소 블록의 건조 무게를 측정 후 3시간 동안 끓는 물에 끓인 이후 상온까지 냉각하였다. 수중 무게, 포수 무게를 측정하여 다음과 같은 식을 이용하여 밀도 및 기공률을 측정하였다[16].

$$\text{시료의 밀도}(g/cm^3) = \frac{\text{건조 무게}(g)}{\frac{\text{포수 무게}(g) - \text{수중 무게}(g)}{\text{물의 밀도}(g/cm^3)}} \quad (1)$$

$$\text{기공률}(\%) = \frac{\text{포수 무게} - \text{건조 무게}}{\text{포수 무게} - \text{수중 무게}} \times 100 \quad (2)$$

여기서 건조 무게는 110 °C에서 4시간 동안 건조한 후 시료의 무게를 나타내며; 포수 무게는 표면의 수분을 제거한 후 시료의 무게를 나타내며; 수중 무게는 시료를 물에 담근 후의 무게를 나타낸다.

열적 특성은 laser flash analysis (LFA)를 이용하여 열확산도를 측정하였으며, differential scanning calorimetry (DSC)를 이용하여 비열을 측정하여 다음과 같은 식을 이용하여 열전도도를 계산하였다 [17].

$$\begin{aligned} \text{열전도도}(W/m \cdot K) \\ = \text{열확산도}(m^2/s) \times \text{비열}(J/kg \cdot K) \times \text{밀도}(kg/m^3) \end{aligned} \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. ND 첨가에 따른 탄소블록의 결정성 및 결합 특성

ND 첨가에 따른 탄소블록의 결합 특성을 확인하기 위하여 Raman 분석을 실시하였으며, 그 결과를 Figure 1에 나타내었다. Raman 분석 결과 모든 시료는 D band (1350 cm⁻¹)와 G band (1590 cm⁻¹)의 피크가 나타났다[18-20]. D band는 carbon의 sp³ bond를 나타내며, G band는

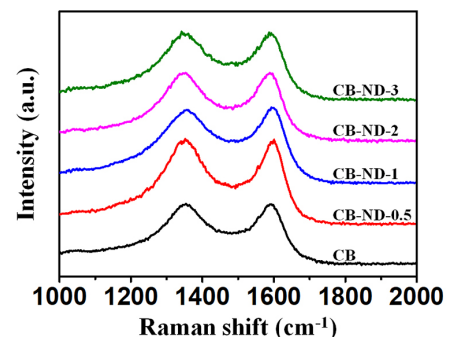


Figure 1. The Raman spectrum of ND added carbon blocks.

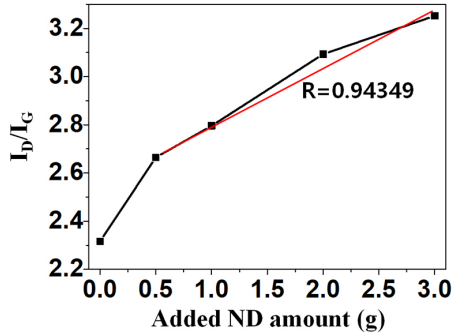


Figure 2. I_D/I_G of ND added carbon blocks from Raman spectrum.

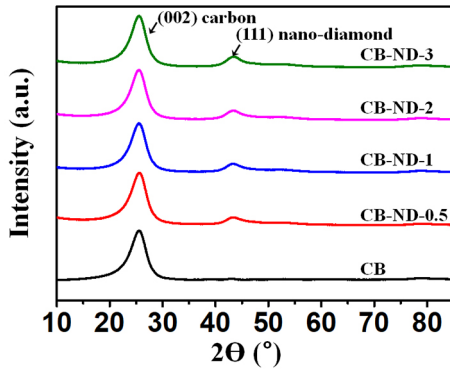


Figure 3. XRD results of ND added carbon blocks.

carbon의 sp^2 bond를 나타낸다. ND가 첨가되지 않은 CB의 Raman 분석 결과로부터 탄소블록은 sp^3 bond와 sp^2 bond가 모두 포함되어 있음을 확인할 수 있었다. 각 시료의 D band 및 G band를 보다 명확하게 분석하기 위하여 Raman 분석 결과로부터 D band와 G band의 비율인 I_D/I_G 를 계산하였으며, 이를 Figure 2에 나타내었다. I_D/I_G 는 가장 많은 ND를 첨가한 CB-ND-3에서 가장 높게 나타났으며, ND의 첨가량이 증가할수록 선형에 가깝게 증가하는 경향을 보였다. ND는 sp^3 결합으로 이루어져 있으며, ND의 첨가로 인하여 I_D 가 증가하여 I_D/I_G 가 증가한 것으로 판단된다[21-22]. 선형에 가까운 I_D/I_G 의 증가로부터 첨가된 ND가 탄소블록에 추가적인 결합을 유도하지 않는 것으로 판단된다.

ND의 첨가에 따른 탄소블록의 결정구조를 평가하기 위하여 XRD 분석을 실시하였으며, 이를 Figure 3에 나타내었다. 모든 탄소블록은 동일하게 (002)면의 피크가 나타났으며, 피크가 완만한 형태를 이루고 있어 대부분 비결정질 탄소로 되어 있는 것으로 사료된다[23-25]. ND가 추가된 시료의 경우 43.8° 부근에서 새로운 피크가 나타났으며, 이는 ND의 주요 피크인 (111)면으로 판단된다[26-27]. 새롭게 나타난 ND의 피크로부터 혼련 단계에서 첨가한 ND가 탄화 공정 등에 의하여 제거되지 않고, 탄소블록에 함유되어 있음을 확인할 수 있었다. 제조된 시료의 (111)면 피크를 보다 명확하게 비교를 위하여 (111)면 피크 강도(intensity)를 (002)면의 피크 강도로 나누었으며 이를 Figure 4에 나타내었다. $Intensity(111)/(002)$ 는 첨가된 ND의 양이 증가할수록 증가하는 경향을 보였으며, 이를 통하여 첨가된 ND의 양이 증가할수록 함유된 ND의 양이 증가함을 확인할 수 있었다. Raman 분석 및 XRD 분석을 통하여 탄소블록 제조 과정에서 첨가된 ND는 탄소블록의 결합 및 결정 특성에 영향을 미치지 않으며, ND 고유의 결정 특성을 유지한 상태로 탄소블록에 함유되어 있는 것으로 판단된다.

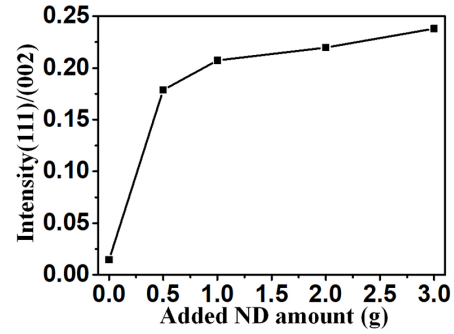


Figure 4. Intensity(111)/(002) of ND added carbon blocks from XRD results.

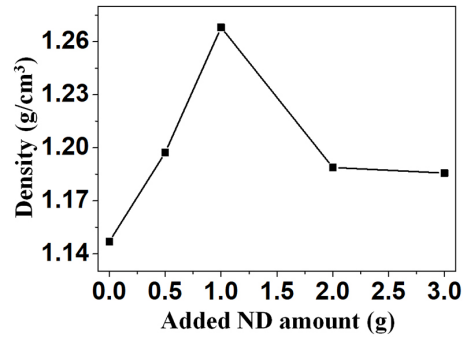


Figure 5. The density of ND added carbon blocks.

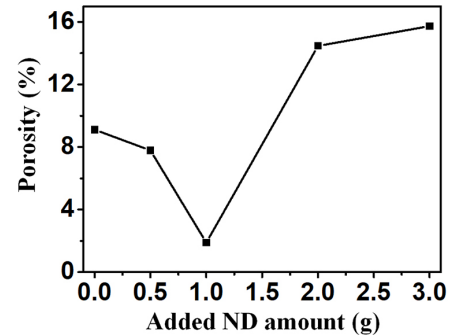


Figure 6. The porosity of ND added carbon blocks.

3.2. ND 첨가에 따른 탄소블록의 물리적 특성

ND 첨가량에 따른 탄소블록의 물리적 특성을 평가하기 위하여 부피밀도를 측정하였으며, 이를 Figure 5에 나타내었다. ND가 첨가되지 않은 CB는 약 1.146 g/cm^3 의 밀도를 나타내었다. ND가 첨가된 탄소블록은 CB보다 높은 밀도를 보였으나 CB-ND-1이 가장 높은 밀도를 보였고, ND의 양이 증가할수록 밀도가 감소하였다. ND의 밀도는 3.2 g/cm^3 로 탄소블록보다 높은 밀도를 갖는 ND의 첨가량이 높은 탄소블록이 높은 밀도를 가질 것으로 기대된다. 그러나 밀도 측정 결과 CB-ND-1의 밀도가 가장 높게 나타났으며, 이는 ND의 첨가 이외의 영향이 탄소블록에 영향을 미쳐 일어난 결과로 판단된다.

ND의 첨가가 탄소블록의 밀도에 미치는 영향을 확인하기 위하여 기공률을 계산하였으며, 이를 Figure 6에 나타내었다. 제조된 탄소블록의 기공률은 첨가된 ND의 양이 증가할수록 감소하여 CB-ND-1가 가장 낮은 기공률을 보였다. 그러나 1 g을 초과하여 ND를 첨가할 경

우 기공률이 더욱 높아진 것을 확인할 수 있었다.

탄소블록의 성형에 결합제로 사용되는 바인더 피치는 저분자량 화합물부터 고분자량 화합물까지 다양한 분자량을 가지는 화합물이 혼합되어 있다. 탄화 과정에서 바인더 피치에 포함된 화합물은 중합되어 분자량이 증가하게 된다. 그러나 일부 저분자량 화합물은 탄화 과정에서 중합되지 않고 휘발되어 가스를 발생시킨다. 발생한 가스가 외부로 나가는 과정에서 탄소블록 표면에 기공을 형성하게 되며, 형성된 기공의 특성은 바인더 피치와 함께 혼련된 필러에 따라 변화하게 된다[8-10]. 필러로 사용한 코크스는 8.7 μm 의 입자 크기 분포를 보인다. 탄화 과정에서 바인더 피치의 휘발로 인하여 발생한 가스는 코크스 입자 사이를 이동하여 외부로 방출된다[28]. 이 과정에서 가스가 이동하는 통로가 형성되며, 이 통로로 인하여 탄소블록 표면에 기공이 형성하게 된다. CB는 코크스 입자 사이에 발생한 가스의 통로로 형성된 기공으로 인하여 9.1%의 기공률이 나타났다. ND는 2~8 nm의 입자가 응집하여 8.4 μm 의 응집체를 형성하고 있다. 응집체는 입자 사이 사이에 가스가 이동할 수 있는 공간이 있는 형태이며, 피치의 휘발로 인하여 발생한 가스가 응집체와 접촉할 경우 가스는 응집체 내부의 비어 있는 부분으로 분산되어 이동하기 때문에 상대적으로 크기가 작고 가스의 이동이 용이한 이동 통로가 형성된다[29]. 이와 같이 ND의 첨가로 인하여 형성되는 이동 통로는 탄소블록의 기공 크기를 감소시키고, 가스의 이동을 용이하게 하여 기공률을 감소시킨 것으로 판단된다. 그러나 일정량 이상의 ND를 첨가하였을 경우 다수의 기공이 형성되어 기공률이 증가한 것으로 사료된다. 이러한 기공 특성으로 인하여 탄소블록의 밀도는 ND의 함량이 증가할수록 증가하여 1 g의 ND를 첨가한 CB-ND-1가 가장 높게 나타났으며, 과량의 ND를 첨가하였을 경우 다수의 기공형성으로 인하여 밀도가 감소한 것으로 판단된다.

3.3 ND 첨가에 따른 탄소블록의 열적 특성

ND의 첨가에 따른 탄소블록의 열적 특성을 평가하기 위하여 열전도도를 측정하였으며, 이를 Figure 7에 나타내었다. ND가 첨가된 탄소블록은 ND를 첨가하지 않은 탄소블록에 비하여 열전도도가 향상하였으며, CB-ND-1이 0.985 W/mK으로 가장 높은 열전도도를 보였다. 일반적으로 열전도도는 동일한 소재의 경우 밀도가 높고 기공이 작을수록 높게 나타난다[29]. CB-ND-1는 가장 높은 밀도를 가지고 있고 기공률이 가장 낮아 가장 높은 열전도도를 보인 것으로 판단된다. 특히 기공률은 탄소블록의 열전도도에 큰 영향을 미친다. 탄소블록에 함유되어 있는 기공엔 공기가 들어가 있으며 낮은 공기의 열전도율(0.026 W/mK)로 인하여 기공이 증가할수록 열전도도가 감소하게 된다[30]. 때문에 기공률이 가장 낮은 CB-ND-1의 열전도도가 가장 높게 나타난 것으로 판단된다.

CB-ND-0.5의 밀도는 1.197 g/cm^3 으로 CB-ND-2 (1.1888 g/cm^3)보다 높은 밀도를 가지고 있다. 그러나 열전도도는 CB-ND-2 (0.648 W/mK)가 CB-ND-0.5 (0.534 W/mK)보다 높게 나타났다. 이러한 현상은 첨가된 ND의 영향으로 판단된다. ND는 높은 열전도도를 가지고 있으며 높은 열전도도를 갖는 ND의 첨가로 인하여 CB-ND-0.5의 밀도가 CB-ND-2보다 높지만 열전도도는 낮게 나타난 것으로 판단된다[13]. 이러한 결과로부터 ND의 첨가로 인하여 바인더 피치의 휘발로 인하여 발생한 가스의 배출이 용이하여 밀도 향상 및 기공 감소를 유도하고, 첨가된 ND의 고유 물질인 높은 열전도도도 때문에 CB-ND-1의 열전도도가 가장 높게 나타난 것으로 판단된다.

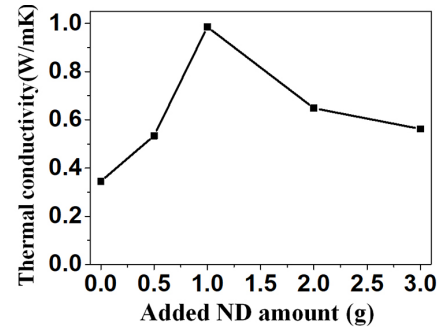


Figure 7. The thermal conductivity of ND added carbon blocks.

4. 결 론

탄소블록 제조 공정에서 바인더 피치에서 발생하는 가스로 인하여 탄소블록에 다수의 기공을 형성하여 제조된 탄소블록의 밀도 감소를 방지하고 열전도도를 향상시키기 위하여 ND를 첨가하였다. Raman 및 XRD 분석으로부터 첨가된 ND는 탄소블록 제조 공정 중 변형이 일어나지 않고, 첨가된 ND의 양이 증가할수록 탄소블록의 ND 비율이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 첨가된 ND는 탄화 과정에서 바인더 피치의 휘발로 인하여 발생하는 가스를 효과적으로 배출할 수 있는 통로 역할을 수행하여 탄소블록의 밀도를 1.268 g/cm^3 까지 증가시켰고, 기공률을 1.8%까지 감소시켰다. 밀도 증가 및 기공률 감소 및 ND의 높은 열전도도를 바탕으로 탄소블록의 열전도도는 최대 0.985 W/mK까지 증가하였다.

감 사

본 연구는 한국탄소산업진흥원의 2023년 탄소융복합소재부품 실증사업(과제번호: G2820220600044, 과제명: 전자기기 부품 가공용 중대형급 고밀도 등방흑연블록 제조기술 실증)의 지원을 받아 연구되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

References

- Z. Yang, G. Cong, B. Liu, Y. Zhang, D. Zhang, X. Wang, J. Li, X. Chen, Z. Liu, and X. Guo, Preparation and characterization of carbon block with coal tar pitch and phenolic resin as mixed binder, *Fuel Process. Technol.*, **243**, 107661 (2023).
- B. Zhong, G. L. Zhao, X. X. Huang, J. Liu, Z. F. Chai, X. H. Tang, G. W. Wen, and Y. Wu, Binding natural graphite with mesophase pitch: A promising route to future carbon blocks, *Mater. Sci. Eng. A*, **610**, 250-257 (2014).
- U. Im, J. Kim, B. Lee, D. Peck, and D. Jung, Manufacture of high density carbon blocks by self-sintering coke produced via a two-stage heat treatment of coal tar, *Heliyon*, **5**, e01341 (2019).
- W. Feng, M. Qin, and Y. Feng, Toward highly thermally conductive all-carbon composites: Structure control, *Carbon*, **109**, 575-597 (2016).
- V. Vasanthi, T. Logu, V. Ramakrishnan, K. Anitha, and K. Sethuraman, Study of electrical conductivity and photoelectric response of liquid phase exfoliated graphene thin film prepared via spray pyrolysis route, *Carbon Lett.*, **30**, 417-423 (2020).

6. J. H. Cho, J. S. Im, M. I. Kim, Y. Lee, and B. C. Bai, Preparation of petroleum-based binder pitch for manufacturing thermally conductive carbon molded body and comparison with commercial coal-based binder pitch, *Carbon Lett.*, **30**, 373-379 (2020).
7. T. Wang, Y. Li, S. Sang, Y. Xu, and H. Wang, Effect of pitch powder addition on the microstructure and properties of carbon blocks for blast furnace, *Ceram. Int.*, **45**, 634-643 (2019).
8. S. Nomura, The effect of binder (coal tar and pitch) on coking pressure, *Fuel*, **220**, 810-816 (2018).
9. G. Yuan, X. Li, Z. Dong, A. Westwood, Z. Cui, Y. Cong, H. Du, and F. Kang, Graphite blocks with preferred orientation and high thermal conductivity, *Carbon*, **50**, 175-182 (2012).
10. S. Nomura and T. Arima, Influence of binder (coal tar and pitch) addition on coal caking property and coke strength, *Fuel Process. Technol.*, **159**, 369-375 (2017).
11. C. Guan, Y. Qin, B. Wang, L. Li, M. Wang, C. Lin, X. He, K. Nishimura, J. Yu, J. Yi, and N. Jiang, Highly thermally conductive polymer composites with barnacle-like nano-crystalline Diamond@Silicon carbide hybrid architecture, *Compos. B Eng.*, **198**, 108167 (2020).
12. T. Hagio, J. Park, Y. Naruse, Y. Goto, Y. Kamimoto, R. Ichino, and T. Bessho, Electrodeposition of nano-diamond/copper composite platings: Improved interfacial adhesion between diamond and copper via formation of silicon carbide on diamond surface, *Surf. Coat. Technol.*, **403**, 126322 (2020).
13. X. Liu, Q. Fu, H. Wang, and Q. Song, Improvement of mechanical property and ablation resistance of carbon/carbon composites by adding nano-diamond particles, *Diam. Relat. Mater.*, **104**, 107751 (2020).
14. L. Saturday, L. Wilson, S. Retterer, N. J. Evans, D. Briggs, P. D. Rack, and N. Lavrik, Thermal conductivity of nano- and micro-crystalline diamond films studied by photothermal excitation of cantilever structures, *Diam. Relat. Mater.*, **113**, 108279 (2021).
15. S. Bagheri and N. M. Julkapli, Nano-diamond based photocatalysis for solar hydrogen production, *Int. J. Hydrogen Energy*, **45**, 31538-31554 (2020).
16. S. Lee, S. Lee, and J. Roh, Effect of change in open porosity as a function of uniaxial molding pressure on density improvement after impregnation, *J. Korean Powder Metall. Inst.*, **28**, 7-12 (2021).
17. A. Rudajevova, F. von Buch, and B. L. Mordike, Thermal diffusivity and thermal conductivity of MgSc alloys, *J. Alloys Compd.*, **292**, 27-30 (1999).
18. A. R. Kamali, J. Yang, and Q. Sun, Molten salt conversion of polyethylene terephthalate waste into graphene nanostructures with high surface area and ultra-high electrical conductivity, *Appl. Surf. Sci.*, **476**, 539-551 (2019).
19. M. I. Kim, J. H. Cho, J. U. Hwang, B. C. Bai, and J. S. Im, Preparation of high-crystallinity synthetic graphite from hard carbon-based carbon black, *Appl. Phys. A*, **127**, 156 (2021).
20. A. Dychalska, P. Popielarski, W. Frankow, K. Fabisiak, K. Paprocki, and M. Szybowicz, Study of CVD diamond layers with amorphous carbon admixture by Raman scattering spectroscopy, *Mater. Sci. Poland*, **33**, 799-805 (2015).
21. S. Gottlieb, N. Wöhr, S. Schulz, and V. Buck, Simultaneous synthesis of nanodiamonds and graphene via plasma enhanced chemical vapor deposition (MW PE-CVD) on copper, *Springerplus*, **5**, 568 (2016).
22. M. Popov, V. Churkin, A. Kirichenko, V. Denisov, D. Ovsyannikov, B. Kulnitskiy, I. Perezhogin, V. Aksenenkov, and V. Blank, Raman spectra and bulk modulus of nanodiamond in a size interval of 2–5 nm, *Nanoscale Res. Lett.*, **12**, 561 (2017).
23. K. Nakajima, M. Okamura, J. N. Kondo, K. Domen, T. Tatsumi, S. Hayashi, and M. Hara, Amorphous carbon bearing sulfonic acid groups in mesoporous silica as a selective catalyst, *Chem. Mater.*, **21**, 186-193 (2009).
24. H. Cheng, X. Li, T. Li, D. Qin, T. Tang, Y. Li, and G. Wang, Electrospun nanofibers with high specific surface area to prepare modified electrodes for electrochemiluminescence detection of azithromycin, *J. Nanomater.*, **2021**, 9961663 (2021).
25. F. Astuti, N. Sari, V. L. Maghfirotuzzoimah, R. Asih, M. A. Baqiya, and D. Darminto, Study of the formation of amorphous carbon and rGO-like phases from palmyra sugar by variation of calcination temperature, *J. Fis. dan Apl.*, **16**, 91-94 (2020).
26. V. Kuzmin, K. Safullin, G. Dolgorukov, A. Stanislavovas, E. Alakshin, T. Safin, B. Yavkin, S. Orlinskii, A. Kiiamov, M. Presnyakov, A. Klochkov, and M. Tagirov, Angstrom-scale probing of paramagnetic centers location in nanodiamonds by ³He NMR at low temperatures, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **20**, 1476 (2018).
27. K. G. Mikheev, T. N. Mogileva, A. E. Fateev, N. A. Nunn, O. A. Shenderova, and G. M. Mikheev, Low-power laser graphitization of high pressure—High temperature nanodiamond films, *Appl. Sci.*, **10**, 3329 (2020).
28. C. Calebrese, G. A. Eisman, D. J. Lewis, and L. S. Schadler, Swelling and related mechanical and physical properties of carbon nanofiber filled mesophase pitch for use as a bipolar plate material, *Carbon*, **48**, 3939-3946 (2010).
29. M. I. Kim, J. H. Cho, B. C. Bai, and J. S. Im, The control of volume expansion and porosity in carbon block by carbon black (CB) addition for increasing thermal conductivity, *Appl. Sci.*, **10**, 6068 (2020).
30. H. Liu and X. Zhao, Thermal conductivity analysis of high porosity structures with open and closed pores, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **183**, 122089 (2022).

Authors

Jun Soong Lee; Mr., Senior researcher, Carbon Composite Design Analysis Technology support Center, Gyengbuk Hybrid Technology Institute, Gyeongsan, 38478, Republic of Korea; jslee@ghi.re.kr
 Ji Hun Mun; Ph.D., Principal researcher, Carbon-Formed Component Commercialization Certification Center, Gyengbuk Hybrid Technology Institute, Gumi, 39158, Republic of Korea; jhmun@ghi.re.kr
 Sungwook Joo; Ph.D., Head researcher, Carbon Composite Design Analysis Technology support Center, Gyengbuk Hybrid Technology Institute, Gyeongsan, 38478, Republic of Korea; jsw@ghi.re.kr
 Seung Uk Lee; M.Sc., Senior researcher, Carbon-Formed Component Commercialization Certification Center, Gyengbuk Hybrid Technology Institute, Gumi, 39158, Republic of Korea; sulee@ghi.re.kr
 Min Il Kim; Ph.D., Senior researcher, Carbon-Formed Component Commercialization Certification Center, Gyengbuk Hybrid Technology Institute, Gumi, 39158, Republic of Korea; mikim@ghi.re.kr