



<연구논문>

ISSN 1225-8024(Print)
ISSN 2288-8403(Online)

한국표면공학회지
J. Kor. Inst. Surf. Eng.
Vol. 49, No. 1, 2016.

<http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2016.49.1.104>

다공성 흑연의 기공내부로 침투하는 Si 증발입자의 확산

박장식^{a,*}, 황정태^b

^a한국과학기술정보연구원 리시트 프로그램, ^b제너코트

Diffusion of Si Vapor Infiltrating into Porous Graphite

Jang-Sick Park^{a,*}, Jungtae Hwang^b

^aReSEAT Program, KISTI, 66, Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02456, Korea

^bGenecoat, 14, Dongtansandan 7-gil, Dongtan-myeon, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, 18487, Korea

(Received February 1, 2016 ; revised February 22, 2016 ; accepted February 24, 2016)

Abstract

Graphite's thermal stability facilitates its widespread use as crucibles and molds in high temperatures processes. However, carbon atoms can be rather easily detached from pores and outer surfaces of the graphite due to the weak molecular force of the c axis of graphites. Detached carbon atoms are known to become a source of dust during fabrication processes, eventually lowering the effective yield of products. As an effort to reduce these problems of dust scattering, we have fabricated SiC composites by employing Si vapor infiltration method into the pores of graphites. In order to understand the diffusion process of the Si vapor infiltration, Si and C atomic percentages of fabricated SiC composites are carefully measured and the diffusion law is used to estimate the diffusion coefficient of Si vapor. A quadratic equation is obtained from the experimental results using the least square method. Diffusion coefficient of Si vapor is estimated using this quadratic equation. The result shows that the diffusion length obtained through the Si vapor infiltration method is about 10.7 times longer than that obtained using liquid Si and clearly demonstrates the usefulness of the present method.

Keywords : Silicon vapor, Diffusion coefficient, Infiltration, Silicon carbide

1. 서 론

흑연은 탄소 단일 원소의 sp^2 결합으로 구성된 소재로 화학적으로 매우 안정하다. 흑연은 a, b 면의 탄소 여섯 개의 공유결합과 c축의 층간 반데르발스 결합으로 이루어진 결정구조를 갖는다. 그 결과로 a, b면 방향으로는 전기전도도와 열전도도가 매우 우수하나 c축으로는 결합강도가 약해서 a, b면 방향으로 쉽게 미끄러지는 특성을 갖는다[1]. 흑연은 내 부식성, 높은 열전도도, 낮은 탄성계수, 낮은 열팽창계수 및 용이한 가공성 등의 우수한 특성을 갖

고 있으며 흑연제조 과정에서 일반적으로 생성되는 약 5%~20% 정도의 기공을 갖는 다공성 재료이다[2]. 이러한 흑연 재료는 기계, 자동차, 정밀전자, 반도체, 우주항공 등의 넓은 분야에서 응용이 되며 특히 다른 재료가 대처하지 못하는 고온, 높은 부식성의 환경에서 사용될 수 있으므로 고온 구조용 및 고온 가공용으로 널리 사용되고 있다[3-4]. 그러나 흑연재료는 c축의 약한 반데르발스 결합으로 미끄러짐 현상이 발생하여 표면에서 흑연입자가 떨어져 나가 비산먼지를 발생시키는 문제가 대두될 수 있으며 그 결과로 태양전지 및 금형으로 제조되는 가공품의 제조 수율을 떨어뜨리는 원인이 되기도 하는 것으로 알려져 있다[5-6].

특히 스마트 폰, 웨어러블(wearable) 디스플레이 등에 사용되는 보호용 유리는 사용 용이성, 디자인

*Corresponding Author :Jang-Sick Park
ReSEAT Program, KISTI
Tel: +82- 2-3299-6231; Fax: +82-2 3299-6234
E-mail: jangsick7@naver.com

기능을 향상하기 위해서 곡면 형태로 제작되고 있는 경향이다. 이러한 곡면유리를 가공하기 위해서 흑연금형이 사용되고 있으며 흑연의 기공으로부터 비산먼지가 발생해서 유리 표면에 스크래치, 먼지 부착 등으로 커브 글라스의 양품수율이 낮아지는 문제가 존재한다. 또한 스마트 폰의 디자인의 품질이 향상됨에 따라 커브유리 표면의 손상에 대한 사양이 높아져서 흑연재료 표면 및 기공내부를 안정한 박막으로 코팅하거나 흑연의 기공을 막는 코팅방법이 요구되고 있는 실정이다.

CVD 방식 혹은 열분해 방식[7]을 사용해서 흑연재료의 표면 및 기공내부로 SiC를 침투시켜 코팅하는 방법이 있으나 값비싼 설비투자 및 독성 가스의 사용으로 경제적이지 못한 실정으로 보다 저렴하게 양산에 적용할 수 있는 방법에 대한 연구가 요구되고 있다[8-9]. 한 예로 Cu/In/Ga/Se를 유리기판 위에 증착하기 위해서 사용하는 용탕 용기로서 1000°C 의 고온에서 흑연도가니를 사용하는 경우 흑연 기공으로부터 발생하는 비산먼지를 방지하기 위해서 액상으로 존재하는 Resol 형태의 페놀수지를 고온열처리 공정으로 흑연재료의 표면에 코팅하는 방법이 사용되고 있다. 이 경우 Dipping에 의해 흑연모재를 액상수지로 코팅한 후 200°C까지 가열 후 경화공정을 거쳐 1200°C에서 열처리하면 흑연의 표면이 유리질로 형성된 것이 실험적으로 확인된 상태이다[6]. 따라서 아직 흑연의 기공으로부터 발생하는 비산먼지를 방지하기 위해서 흑연의 기공내부 혹은 표면에 안정한 박막을 형성하는 기술이 완성되지 않은 상태이다.

본 연구에서는 스마트 폰, 웨어러블 디바이스의 보호 글라스를 커브 형태로 가공하기 위해서 금형으로 사용되는 흑연의 기공으로부터 비산먼지가 발생하지 않도록 기체 Si를 흑연의 표면 및 기공내부로 침투시켜 SiC 박막을 형성하는 연구를 수행하였다. 기공내부로 증기 Si가 침투해서 카본 고체와 반응할 경우 액체 Si보다 더 높은 열적 물리적 특성을 가지며 Si 분말의 사용량도 적어서 비용도 절감될 것으로 기대된다. Si 증기가 흑연의 기공내부로 침투할 때의 확산계수에 대한 정보는 금형생산 공정에서 증발 Si의 시간을 결정하는 중요한 변수로서 사용된다. 기체 Si가 흑연의 기공내부로 침투해서 기공의 표면에 SiC 합성물을 형성하는 원리와 확산 계수에 대한 연구는 현재까지 보고된 예가 거의 없다. 현재 액체 실리콘을 카본에 침투시켜 REFEL SiC[10], SILCOMP SiC/Si[11] 그리고 탄소 섬유 강화된 SiC세라믹 복합재료(CMC)[12-14]의 제작에 응용하는 공정은 많이 사용되고 있으며 이때

의 확산계수는 많이 보고되고 있다. Greil 등[15-17]은 탄소섬유 속으로 액체 실리콘을 침투시켜 액체 실리콘과 탄소의 반응으로 형성되는 SiC의 탄소복합체를 조사하였다. SiC를 형성하는 액체Si의 침투 확산계수(D)는 $D(1600^{\circ}\text{C})=4.16 \times 10^{-10} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ 이 사용되었다. Yang[18]은 다이아몬드, 페놀수지, 실리콘, 흑연을 섞어서 직경 20mm, 길이 5mm의 펠릿(pellet)으로 만들어 Si로 채워져 있는 흑연 도가니 위에 놓고 약 1Pa 진공에서 1600°C, 1h 동안 실리콘을 증발시켜 액체상태의 실리콘이 흑연으로 침투해서 SiC가 형성되도록 하였다. 이때 형성된 SiC 형성 두께가 확산계수를 이용한 이론값과 일치함이 확인되었다.

본 논문에서는 다공질 흑연의 기공내부로 기체 실리콘이 침투해서 확산, 반응해서 형성되는 Si_xC_y 합성물의 Si_x 와 C_y 성분의 각각 원자%를 측정해서 최소제곱근사법으로 이차방정식을 구한다. 이것을 확산 법칙에서 정상상태를 가정해서 구한 이차방정식과 비교하여 기체 Si의 확산계수를 추정하며 그 값을 액체 Si의 확산계수와 비교한다.

2. 실험방법

본 실험에서는 7 μm 의 그레인 크기와 1.78 g/cm^3 의 벌크밀도 및 8% 열린 공극률(open porosity)의 특성을 갖는 메르센(Mersen)사에서 제조한 흑연을 60 mm \times 25 mm \times 5 mm(두께)의 크기로 제작하여 사용하였으며 실리콘 입자의 크기는 50 μm 보다 작은 것을 사용하였다. 가열 장치로는 도가니에 담긴 Si분말과 흑연샘플 둘레로 설치된 원통형 흑연가열히터가 장착되었으며 흑연가열히터의 내부온도 분포는 $\pm 10\%$ 이내로 유지되었고 도가니와 흑연샘플 사이의 거리는 약 150 mm이었다. 흑연과 Si분말에 부착된 수분을 제거하기 위해서 25 mtorr, 900°C에서 1시간동안 가열하였다. Si 증기의 흑연 기공으로 침투를 위하여 1550°C의 도가니 온도를 30분, 50분 각각 가열하여 SiC 샘플을 제작하였다. Si 증기가 흑연의 기공으로 침투하여 확산되어 형성된 SiC 합성물의 Si와 C의 원자%를 분석하기 위해서 FE-SEM (JSM-6701, JEOL, Japan)을 사용하였다. 흑연과 흑연의 표면에 형성된 SiC 결정상은 X-선 회절분석기(D-MAX-2200, Rigaku, Japan)를 사용하여 측정하였다.

3. 확산 적용이론

다공성 흑연의 기공내부로 침투하는 증발 Si입자

의 확산계수를 얻기 위해서 확산법칙[16]을 이용하였다. 증발된 Si 입자가 다공성 흑연 표면의 기공으로 침투해서 탄소와 반응하므로 다음과 같이 기술이 된다.

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} - R \quad (1)$$

여기서 N, t, x, D 는 각각 기체 Si 농도(cm^{-3}), 시간(sec), 확산거리(cm), 확산계수($\text{cm}^2\text{se}^{-1}$)를 표시한다. 증발된 Si 이 흑연의 기공으로 침투할 때에 기공을 통과 하는 기체 Si와 기공의 내부 표면과 반응해서 SiC로 합성되는 기체 Si이 존재한다. 기공의 내부표면과 반응하는 기체 Si은 시간의 함수로 설정할 수 있으며 전체 Si 농도에 대해서 감소하는 농도로 표시된다. 여기서 R은 시간에 대해서 기공의 내부 표면과 반응해서 SiC로 합성되는 기체 Si의 농도이다. 본 실험에서 R은 확산시간에 대해서 SiC를 형성하는 평균 Si 농도로 상수로 설정하였다. (1)의 식에서 정상상태로 가정하면 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} = \frac{R}{D} \quad (2)$$

x에 대해서 적분을 하면 다음과 같이 표시되며 c_1 과 c_2 는 적분상수이다.

$$N = \frac{R}{2D}x^2 + c_1x + c_2 \quad (3)$$

확산 깊이 $x=0$ 에서 $N=N_0$ 의 경우에 $c_2=N_0$ 이다. 확산 깊이 $x=d$ 에서 Si 입자의 확산이 끝날 때에는 $(\frac{dN}{dx})_{x=d} \approx 0$ 으로 설정할 수 있다. 따라서 (3)식은 다음과 같이 표시된다.

$$N = \frac{R}{2D}x^2 - \frac{Rd}{D}x + N_0 \quad (4)$$

확산 깊이에 대한 Si 입자의 농도는 (4)식과 같이 2차 방정식으로 표시된다. 본 실험에서 증기 Si 입자가 다공성 흑연 표면의 기공을 통해서 침투해서 기공 내부의 표면과 반응해서 형성되는 합성물의 Si_xC_y 은 증기 Si 입자의 농도에 따라서 x, y의 값이 달라진다. Si_x 성분의 원자%(A)는 증기 Si 입자의 농도(N)에 비례하므로 k를 비례상수로 하면 다음과 같이 표시된다.

$$N = kA, R = kr, N_0 = kA_0 \quad (5)$$

(5)식에서 r, A_0 는 각각 확산시간에 대해서 SiC를

형성하는 평균 Si 원자 %와 $x=0$ 에서 Si 원자 %이다.

(5)식을 (4)식에 대입하면 (4)식은 다음과 같이 이차방정식으로 표시된다.

$$A = \frac{r}{2D}x^2 - \frac{rd}{D}x + A_0 \quad (6)$$

흑연 표면의 기공으로 침투해서 확산한 기체 Si의 농도변화를 (6)식과 같이 2차방정식으로 표시되면 Si 입자의 확산계수를 추정할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

그림 1은 흑연샘플과 1550°C에서 기체 Si에 의해서 흑연샘플의 표면에 형성된 SiC의 XRD 측정결과이다. (a)는 전형적인 흑연의 XRD 패턴을 보여 주며 (b)의 (111), (220) 및 (311)면은 3C-SiC의 1700°C이하에서 형성되는 β -SiC 회절패턴이다. 그림 2는 흑연표면의 기공으로 침투한 증기 Si 입자가 확산되어 카본과 반응해서 형성된 SiC의 FE-SEM 사진이다. (a)는 흑연표면에서 깊이 방향으로 증기 Si가 확산으로 반응하여 형성된 SiC 영역을 보여준다. 단면의 사진에서 백색부분이 SiC의 합성물을 나타내며 검정색 부분이 카본을 나타낸다. 기

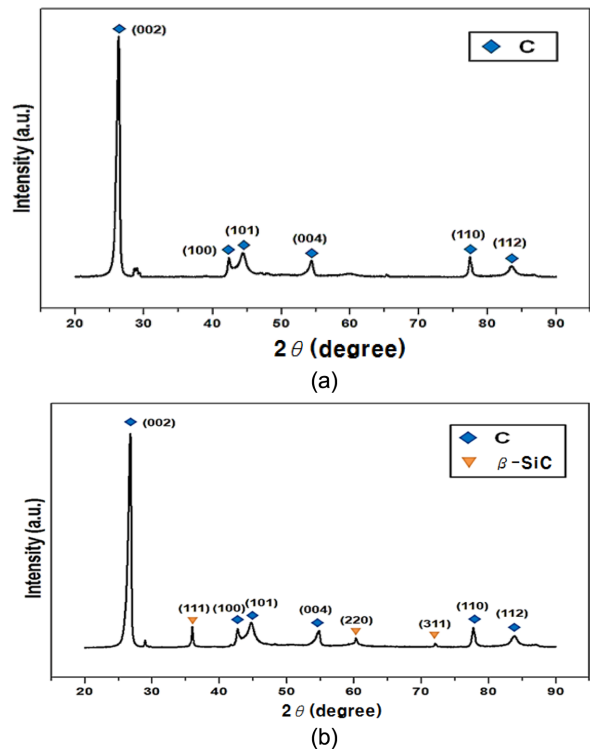


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of (a)bare graphite, (b)SiC-coated graphite prepared at 1550°C (30 min)

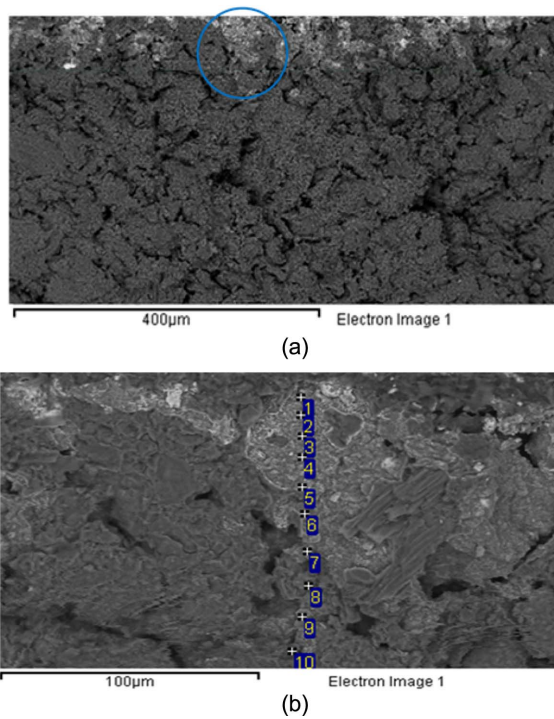


Fig. 2. SiC formed by Si Vapor infiltration into porous graphite in 1550°C (30min) (a) FE-SEM cross-section image (b) Enlargement image of circled region in (a).

공의 틈의 길이가 약 50 µm 이하로 분포한다. (b)는 (a)의 원 표시 부분을 확대한 것으로 숫자(1~10)는 SiC의 성분을 원자%로 분석한 위치를 표시한다. 흑연은 열 제조과정에서 내부에 기공이 불규칙적으로 발생을 하여 일반적으로 5%~20%의 공극률을 가진다. 본 실험에서는 열린 공극률(open porosity)이 8%인 흑연을 사용했으며 그림 1(a)에서 기공이 불규칙적으로 분포되어 있는 것을 보여준다. 따라서 기체 Si이 흑연의 기공으로 침투할 때 흑연의 기공을 따라 침투하게 되므로 형성되는 SiC 영역은 불규칙하게 형성된다. 본 실험에서는 기체 Si이 최대 확산된 길이를 기준으로 확산계수를 구하였다. 표 1은 Si 증발시간을 30분과 50분에서 확산 길이에 대한 SiC의 합성물의 Si와 C 성분

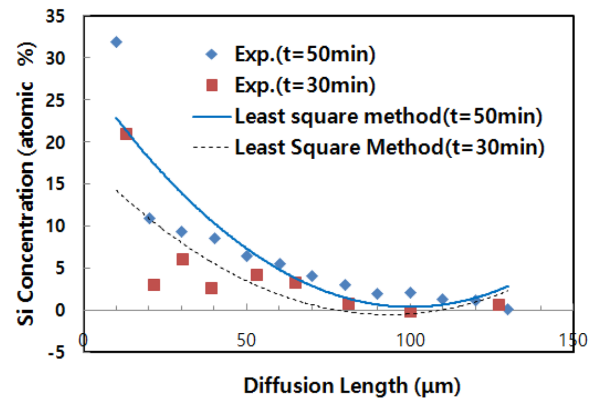


Fig. 3. Experiment results in evaporation time of 30min and 50 min and two quadratic equations for Si concentration obtained by least square method.

의 원자 %를 표시한다.

그림 3은 Si 증발시간 30분과 50분에서 확산 길이에 대한 SiC 합성물의 Si의 원자 %를 표시한다. Si 증발시간 30분에서 Si 입자는 표면으로부터 확산되어 13 µm 깊이에서 21.1 원자 %를 나타내며 확산 깊이 21.3 µm에서는 급격히 감소하여 3.13 원자 %로 낮아진다. 그리고 100 µm 길이까지 천천히 농도가 낮아진다. Si 증발시간 50분에서도 Si 농도의 확산길이에 대한 분포는 Si 증발시간 30분과 같은 경향을 보여준다. 점선과 실선은 각각 Si 증발시간 30분과 50분에서 확산길이에 대한 Si 농도를 최소제곱근사법으로 구한 이차방정식을 표시한다. 이차방정식의 단위를 확산계수 단위(cm²·sec⁻¹)에 맞추면 Si 증발시간 30분과 50분에서 이차방정식은 각각 식 (7), (8)로 표시된다.

$$A = 2140x^2 - 40.2x + 0.183 \tag{7}$$

$$A = 2757x^2 - 55.2x + 0.281 \tag{8}$$

(6)식과 (7)식에서 다음의 식이 성립한다.

Table 1. Si and C atomic% for diffusion length from porous graphite surface in diffusion time of 30 min and 50 min

(a) Diffusion time : 30min

Diffusion Length (µm)	13.0	21.3	30.4	39.2	53.0	64.9	81.0	97.3	127.0
C atomic %	78.9	96.9	93.7	97.2	95.6	96.5	99.0	100	99.2
Si atomic %	21.1	3.1	6.3	2.8	4.4	3.5	1.0	0	0.8

(b) Diffusion time : 50min

Diffusion Length (µm)	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0
C atomic %	61.0	88.0	90.5	91.3	93.4	94.4	95.8	96.9	97.9	97.8	98.6	98.7	99.5
Si atomic %	32.0	11.0	9.5	8.7	6.6	5.6	4.2	3.1	2.1	2.2	1.4	1.3	0.2

$$\frac{r}{2D} = 2140 \quad (9)$$

(9)식에서 r 은 SiC 형성을 위한 Si 증기의 단위시간에 대한 평균 반응비율로 표시하면 $r=1.94 \times 10^{-4}/\text{sec}$ 이다. (9)식에서 30분의 증발시간에서 확산계수 D 는 $D = 4.53 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}$ 으로 계산된다. 같은 방법으로 (8)식으로부터 50분의 증발시간에서 확산계수 D 는 $D = 3.03 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ 으로 계산된다. 30분과 50분에서 구한 Si 증발시간에 대한 평균 확산계수는 $D = 3.78 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ 이다. 평균 확산계수에 대해서 30분, 50분의 Si 확산계수의 상대적인 오차는 약 20%이다. 이것은 Si_xC_y 에서 분석한 Si_x 원자 % 측정오차, 측정영역 등에 기인한 것으로 판단된다. 기체 Si의 확산에 대해서 액체 Si이 탄소와 반응해서 확산되는 경우의 확산계수(D_{eff})는 다음과 같이 표시된다.

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (10)$$

R , Q , T 는 각각 가스 상수, 활성화 에너지, 절대 온도이다. 문헌 데이터($R = 8.31441 \text{ J}^{-1}\text{k}^{-1}\text{mol}^{-1}$, $Q = 132 \text{ kJmol}^{-1}$, $D_0 = 2 \times 10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$)를 이용하면 1550°C 온도에서 액체 Si의 확산계수는 $D_{\text{eff}}(1550^\circ\text{C}) = 3.30 \times 10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ 이다[18].

Greil가 탄소섬유 속으로 액체 실리콘을 침투시켜 모세관현상으로 액체 Si의 침투길이는 SiC 반응에 의해서 형성되는 두께의 비의 값인 1.5×10^5 로부터 추정되는 액체 Si의 삼투압으로 탄소섬유 속으로 확산하는 확산계수는 $D = 7.42 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ 이다[15]. 이것은 대단히 높은 확산계수로 액체 Si의 탄소섬유 내부의 모세관 현상에 기인한다. 본 실험은 열린 공극률이 약 8%의 흑연을 사용하므로 흑연 기공의 분포는 불규칙적이고 크기도 다르며 목재의 고온공정에 의해서 형성된 탄소섬유 내부표면과 흑연기공의 내부 표면상태의 차이가 있으며 흑연과 탄소섬유에 대한 확산현상은 비교하기가 어렵다.

확산 거리(L)는 $L = (D \cdot t)^{0.5}$ 으로 표시가 된다[15,18]. 그림 4는 증기Si와 액체Si의 확산시간에 대한 확산길이를 나타낸다. 흑연에 대해서 동일시간에 증기 Si의 확산길이는 액체 Si에 비해서 약 10.7배 긴 것으로 추정된다. 따라서 기체 Si를 사용해서 짧은 시간에 흑연의 기공을 침투해서 안정된 SiC 합성물을 형성하면 생산성을 높일 수 있을 것이며 적은 Si 분말 양으로 기공표면만 코팅하는 것이 가능하여 경제적이다. 기공 내부로 기체 Si이 깊이 침투해서 확산되면 비산면지의 발산이 감소될 것으로

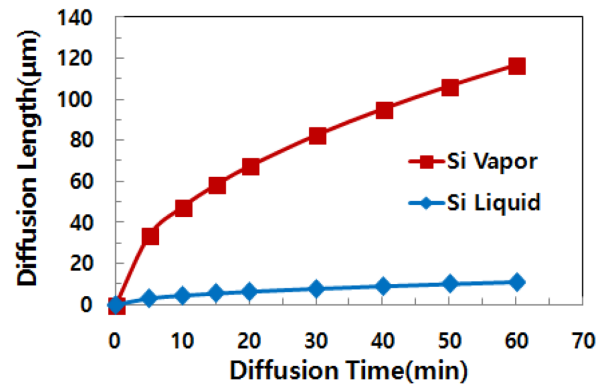


Fig. 4. Diffusion length vs diffusion time for Si vapor and Si liquid.

예상된다. 흑연의 표면과 기공에서 발생하는 비산면지가 문제가 되는 것은 특히 스마트 폰 및 웨어러블 디바이스의 디자인 성능이 높아졌기 때문이다. 본 논문에서 추정된 기체 Si의 확산계수는 흑연기공으로 침투하는 기체 Si에 의해 형성되는 SiC 코팅방식의 기초데이터로 넓게 활용될 것이다. 앞으로 흑연의 기공의 상태와 공극률 및 Si 증발시간 등의 공정 변수에 대해서 형성되는 기공 및 표면의 SiC 합성물의 특성, 확산 길이, 확산 시간에 대해서 체계적인 연구가 필요하다.

5. 결 론

흑연은 c축의 약한 반데르발스 결합으로 미끄러짐 현상이 발생하여 표면에서 흑연입자가 떨어져 나가 비산면지를 발생시켜 제품의 제조 수율을 떨어뜨리고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 흑연의 표면 및 기공 내부로 증기 Si를 침투시켜 안정한 SiC 합성물을 형성하는 방법은 효율이 높고 비용이 저렴하다는 장점이 있다. 본 실험에서는 증기 Si를 흑연의 기공으로 침투시켜 확산 및 반응을 통해서 형성되는 SiC의 성분에서 Si 성분의 원자%를 확산길이에 대해서 측정하였다. 이 측정값에서 최소제곱근사 법칙으로 이차방정식을 구하였으며 정상상태를 가정한 확산법칙을 응용하여 증기 Si이 흑연 기공으로 확산하는 확산계수를 추정하였다. 1550°C 에서 증기 실리콘의 흑연에 대한 확산계수(D)는 약 $D = 3.78 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ 이었다. 증기 Si는 액체Si의 흑연에 대한 확산 길이보다도 약 10.7배 더 큰 결과를 보여주며 따라서 기체 Si를 사용하면 생산성이 향상되며 재료비가 절감될 것이다. 본 연구에서 얻어진 기체Si의 확산 계수는 흑연 기공내부의 SiC 코팅방식에 기초 데이터로 활용될 것으로 기대된다.

6. 후 기

본 연구는 한국과학기술정보연구원(KISTI)가 수행하고 있는 미래창조부 과학기술진흥기금 및 복권기금 출연사업인 “고경력 과학기술인을 활용한 지원사업(Reseat Program)의 일부이다.

References

- [1] D. G. Kim, H. S. Ha, I. S. Park, Y. S. Im, and B. I. Yun, Study on the Effects of High Temperature Heat Treatment on the Physical and Mechanical Properties of Carbon Fiber and Carbon Composites, *Kor. J. Mater. Res.*, 4 (1994) 287-94.
- [2] G. Y. Jo, G. J. Kim, and Y. J. Jeong, The Resin Impregnation with Silane Coupling on Graphite, *J. Kor. Ceram. Soc.*, 40 (2003) 1021-26.
- [3] T. H. Lee, Review of the Research and Development of Ceramic Matrix Composite Materials and Future Works, *Composites Research*, 27 (2014) 123-129.
- [4] S. Y. Kim, I. S. Han, S. K. Woo, K. S. Lee, D. K. Kim, Wear-Mechanical Properties of Filler-Added Liquid Silicon Infiltration C/C-SiC Composites, *Mater. Des.*, 44 (2013)107-113.
- [5] H. S. Kang, K.S. Kim, B.I. Yoon, and Y. S. Bae, Autoclave Processing of Thick Carbon- Phenolic Composites, *J. Kor. Soc. Composite Materials*, 8 (1995) 1-8.
- [6] S. G. Hong, K. Y. Cho, O. H. Kwon, Y. S. Cho and S. J. Jang, High Pressure Curing of Phenol Resin for High Quality Coating of Glassy Carbon, *J. Kor. Ceram. Soc.*, 48 (2011) 141-146.
- [7] E. Lopez-Honorato, P. J. Meadows, P. Xiao, G. Marsh, T. J. Abram, Structure and Mechanical Properties of Pyrolytic Carbon Produced by Fluidized Bed Chemical Vapor Deposition, *Nucl. Eng. Design*, 238 (2008) 3121-3128.
- [8] K. Nakajima and N. Usami, Crystal Growth of Si for Solar Cells, Springer, Sendai (2009) 97-119.
- [9] Y. N. Lee, B. Y. Jang, J. S. Lee, J. S. Kim, Y. S. Ahn and W. Y. Yoon, SiC Contaminations in Polycrystalline-Silicon Wafer Directly Grown from Si Melt for Photovoltaic Applications, *Kor. Found. Soc.*, 23 (2013) 69-74.
- [10] Popper P. Special ceramics, The Preparation of Dense Self-Bonded Silicon Carbide Bodies. London: Heywood; 1960.
- [11] W. B. Hillig, R. Mehan, C. Morelock, V. DeCarlo, Silicon/Silicon Carbide Composites, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 54 (1975)1054-56.
- [12] E. Fitzer, R. Gadow, Silicon Carbide Fiber-Reinforced, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 65 (1986) 326-335.
- [13] D. Sun, X. Yu, W. Liu, D. Sun, Laminated Biomorphous SiC/Si Porous Ceramics Made from Wood Veneer, *Materials and Design*, 34 (2012) 528-532.
- [14] S. H. Yun, P. N. Tan, G. S. Cho, H. Cheong, Y. D. Kim and S. W. Park, Fabrication of Carbon Fiber Reinforced Reaction Bonded SiC Composite Fabricated by a Molten Si Infiltration Method ; I. The Effect of Carbon Fiber Coating Process, *J. Kor. Ceram. Soc.*, 45 (2008) 531-536.
- [15] P. Greil, T. Lifka and A. Kaindl, Biomorphic Cellular Silicon Carbide Ceramics from Wood: I. Processing and Microstructure, *J. Euro. Ceram. Soc.*, 18 (1998) 1961-1973.
- [16] C. D. Shackelford, Laboratory Diffusion Testing for Waste Disposal-A review, *J. Contam. Hydro.*, 7 (1991) 177-217.
- [17] E. Fitzer and R. Gadow, Fiber-Reinforced Silicon Carbide, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 65 (1986) 326-35.
- [18] Z. Yang, X. He, M. Wu, L. Zhang, A. Ma, R. Liu, H. Hu, Y. Zhang, X. Qu, Infiltration Mechanism of Diamond/SiC Composites Fabricated by Si-Vapor Vacuum Reactive Infiltration Process, *J. Europ. Ceram. Soc.*, 33 (2013) 869-878.