

불연속 탄소섬유-에폭시 복합재의 발열성능 평가

김명수*, 공경일*, 김나리*, 박형욱*, 박운영*, 박영빈⁺⁺, 정무영**, 이상환***, 김수기***

Experimental and Numerical Study of Heating Characteristics of Discontinuous Carbon Fiber-Epoxy Composites

Myungsoo Kim*, Kyungil Kong*, Nari Kim*, Hyung Wook Park*, Ounyoung Park*, Young-Bin Park⁺⁺,
Mooyoung Jung**, Sang Hwan Lee***, Su Gi Kim***

ABSTRACT

This study explores the resistive heating characteristics of discontinuous carbon fiber (CF)-epoxy composites. Test samples including 1, 3, and 5 wt.% CF were fabricated using sonication and cast molding processes. For heating performance characterization, DC currents were applied to the composite samples, and surface temperatures were evaluated visually and quantitatively using an infrared camera. To estimate the thermal performance of composites and verify the experimental results, finite element analyses were performed. The resistive heating mechanism was investigated in connection with CF loading and applied voltages. Resistive heating efficiency increased proportionately with CF concentration and applied voltage. To obtain homogeneous temperature distribution of the samples, high degree of CF dispersion is required.

초 록

불연속 탄소섬유-에폭시 복합재의 저항발열 특성에 관한 연구를 수행하였다. 1, 3, 5 wt.% 불연속 탄소섬유가 함유된 복합재 시험편을 초음파 처리와 캐스트 몰딩(cast molding)을 이용하여 제조하였다. 시험편에 DC 전류 인가시 발생하는 저항열에 의한 시험편의 표면온도 변화를 적외선 카메라를 이용하여 측정하였다. 발열온도를 예측하기 위해서 유한요소해석을 수행하였는데, 실측된 온도와 부합함을 확인하였다. 탄소섬유의 함량과 인가전압이 증가할수록 발열저항에 의해서 발생된 열은 증가함을 확인하였다. 복합재 내에서 균일한 온도분포를 얻기 위해서는 탄소섬유의 분산상태가 중요하며, 대기온과 습도 등 실험환경이 발열온도에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Key Words : 탄소섬유(carbon fiber), 불연속 보강재(discontinuous reinforcement), 고분자모재 복합재(polymer-matrix composites), 열적 성질(thermal properties), 유한요소해석(finite element analysis)

1. 서 론

탄소섬유는 우수한 열적, 전기적 성질로 인해 발열체로서 사용될 수 있다[1,2]. 탄소섬유는 저항[3-8] 혹은 자기유도[9-11]를

접수: 2013년 1월 30일, 수정: 2013년 2월 25일, 게재승인: 2013년 2월 25일

* 울산과학기술대학교 기계 및 신소재공학부

⁺⁺ 울산과학기술대학교 기계 및 신소재공학부, 교신저자(E-mail: ypark@unist.ac.kr)

** 울산과학기술대학교 테크노경영학부

*** (주)경보포리머

이용하여 발열을 할 수 있으므로 고분자 모재에 첨가하여 발열 복합재를 구성할 수도 있다.

Zantout과 Zhupanska[3]는 DC 전류를 인가하여 0° 방향으로 정렬된 연속 단방향 탄소섬유와 0°와 90° 방향으로 교차정렬된 탄소섬유 복합재의 발열에 관한 연구를 수행하였다. 탄소섬유 층수가 증가함에 따라 복합재의 전기저항이 감소함을 보였다. Fosbury et al.[4,5]은 탄소섬유-고분자 복합재의 층간 계면을 통한 저항 발열을 연구하였는데, 층간 접촉계면이 효율적인 저항발열체로서의 가능성이 있음을 보였다. Athanasopoulos와 Kostopoulos[6]는 탄소섬유 복합재에서의 온도장을 예측하기 위한 수치 시뮬레이션을 수행하였는데, Joule 발열을 위한 방정식과 비등방성 재료를 위한 연속체 방정식을 포함하고 있다. Takahashi와 Hahn[7]은 그래파이트섬유-고분자 복합재의 전기전도성을 이용하여 자동열관리시스템을 소개하였다. 이들은 섬유방향과 두께방향의 연속성을 조절함으로써 복합재의 온도가 조절될 수 있음을 보였다. 모사된 광전전류에 노출된 탄소섬유강화 고분자의 열적, 전기적 성능의 분석에 관한 연구도 수행되었는데[8], 낙뢰에 의한 손상이 복합재의 Joule 발열에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Rudolf et al.[9]은 연속탄소섬유로 강화된 열가소성 수지의 자기유도 발열에 관한 연구를 수행하였다. 이들은 발열을 위해서 전류가 흐를 수 있도록 섬유가 폐회로를 형성해야 한다는 것을 발견하였다. 예를 들어, 단방향섬유로 보강된 laminated 복합재에서는 섬유간 접촉부족으로 열이 발생하지 않는다. 탄소섬유-에폭시 복합재의 열적 성질을 평가하기 위하여, Tian과 Cole[12]은 평면상과 두께방향의 열전도도를 동시에 근사화할 수 있는 이차원 비등방성 열전도 모델을 제시하였다. 탄소섬유-고분자 복합재의 전기전도도를 향상시키는 연구도 진행되었는데[13,14], ITO 또는 은나노입자를 탄소섬유에 코팅한 후 복합재를 제조함으로써 복합재의 전도도를 크게 향상시킬 수 있음을 보였다.

현재까지의 탄소섬유-고분자 복합재의 발열응용에 관한 연구는 대부분 연속섬유 발열복합재에 한정된 반면, 본 연구에서는 불연속 탄소섬유 복합재의 발열 특성에 관한 연구를 수행하였다. 시편은 초음파 처리와 캐스트 몰딩을 이용하여 제작되었고, 다양한 조건에서 제작된 시편의 발열특성을 적외선 카메라를 이용하여 평가하였다. 유한요소해석(FEA)을 수행하여 실험결과와 비교분석 하였다.

2. 실험

2.1 불연속 탄소섬유-에폭시 복합재 제조

탄소섬유-에폭시 복합재 시편을 다음과 같이 제작하였다. 길이 6 mm 탄소섬유(ACECA-6P, 한국 ACE C&TECH 제공)를 1, 3, and 5 wt.% 함량으로 Bisphenol-F type epoxy(YDF-170, 국도화학)에 horn sonicator(S-4000, 미국 Qsonica사 제조)를 이용하여 분산하였다. 경화제(SH-101, 세진 E&C)를 탄소섬유-에폭시 혼합물에 교반 후, 진공 오븐에서 30분간 탈포하였다.

복합재 혼합물을 몰드에 투입한 후 열간프레스(Model 4386, 미국 Carver 사 제조)를 이용해서 가압상태에서 경화시켰다. 경화 조건은 120°C, 2 hr이었고, 후경화는 150°C에서 2 hr 동안 실시하였다.

2.2 저항발열 시험

복합재 시편의 발열특성은 Fig. 1(a)의 시험장치와 구성을 이용하여 평가하였다. 전원공급장치를 복합재 시편에 연결한 후 시편의 표면온도를 적외선 카메라(H2640, Joowon Industrial Co., Ltd, 한국)를 이용하여 측정하였다. Figure 1(b)는 시편의 기하학적 형상과 전선연결 상태를 보여준다. 시편은 한 변의 길이가 70 mm인 정사각형 형태이고 두께는 대략 1.3 mm 이다. 가로 10 mm, 세로 70 mm인 구리전극 두 개를 복합재를 캐스트 몰딩하는 과정에 삽입하였고, 여기에 전선을 부착하여 전원공급장치에 연결하였다.

온도분포는 구리전극이 삽입된 면의 반대면을 측정하였는데, 그 이유는 전극과 복합재의 경계부분에서 온도가 급격히 올라가는 현상이 발생되었기 때문이다. 이 부분에 대해서는 4장에서 다시 언급될 것이다. 저항발열의 정량적 평가는 전극이 배제된 중간부분(50 mm × 70 mm)의 평균온도를 측정하였다(Fig. 2). 측정대상면적의 평균온도와 상온 간의 차이, 즉 순수하게 저항발열로 인해 상승한 온도를 발열성능 평가 지표로 사용하였다. 평균온도는 적외선카메라 운용시스템 ThermoMovie (Joowon Industrial Co., Ltd, 한국)를 이용하여 구하였는데, 평균온도 측정원리는 다음과 같다. 그림 6 (b)는 적외선 카메라로 획득한 발열 영상의 예를 보여주는데, 결과 데이터는 이러한 영상들의 각 화소의 온도 정보를 저장하고 있다. 즉 특정시간에서 측정영역내의 각각의 화소들의 온도를 전부 더한 다음 측정영역의 화소수로 나누면 그 영역의 평균온도를 구할 수 있다.

발열실험(6, 12, 18와 24V 인가) 전후에 두 전극간 저항을 디지털 멀티미터 (Model 2002, 미국 Keithley)로 측정하였는데(각 시편당 8회), 발열로 인한 탄소섬유 네트워크의 물리적 혹은 전기적 변화가 관찰되지 않았다. 1, 3, 5 wt.% 탄소섬유 시편의 내부 저항은 각각 355±7.1, 338±9.3, 341±49.9Ω

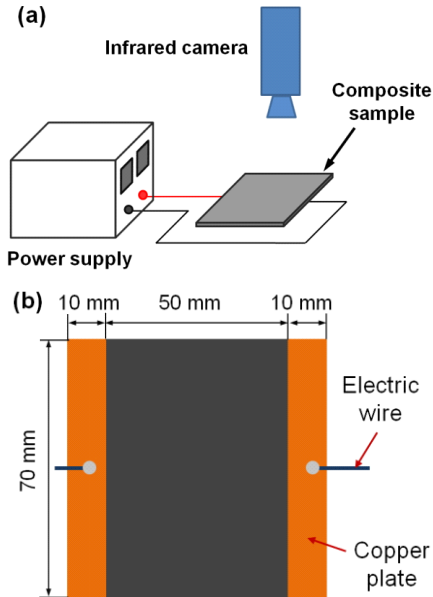


Fig. 1 Test setup for measuring sample temperatures (a) and sample configuration showing geometry and electrode placement (b).

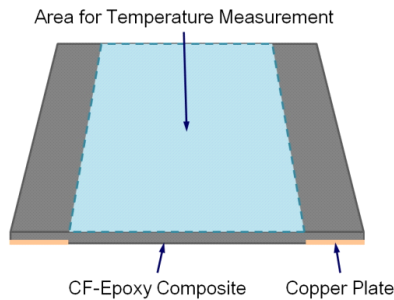


Fig. 2 Schematic of area for temperature measurement.

이었는데, 탄소섬유의 함량이 다름에도 불구하고 유사한 저항을 보였다. 이는 다음 두 가지로 설명될 수 있다. 첫째, 사용된 섬유와 모재의 percolation threshold는 1 wt.% 이하로 추정되며, 따라서 1, 3, 5 wt.% 탄소섬유 복합재 시편이 유사한 저항을 갖게 된다. 둘째, 복합재의 전도도는 두 전극 사이에 형성된 탄소섬유 연결망 중 지배적인 전도경로의 영향을 받으며, 탄소섬유의 분산이 균일하지 않은 경우 측정된 저항이 연결망 전체의 저항을 대표한다고 보기는 어렵다. 따라서, 각 시편의 평균 비저항을 오옴의 법칙(전압 = 전류 X 저항)을 이용하여 간접적으로 구하였다. 즉 전원공급장치에는 인가된 전압과 이로 인해 흐르는 전류가 동시에 표시되는데, 이 값들을 이용하여 저항을 구한 후 구리전극간 거리(50 mm)로 나뉘줌으로써 비저항을 구하였다.

3. 유한요소해석

3.1 복합재 시편의 구조 및 시뮬레이션 조건

다양한 조건으로 제작된 복합재의 발열성능을 예측하고 이를 실험결과와 비교·분석하기 위해 FEA를 수행하였다. 해석을 위해서 ANSYS가 제공하는 Thermal-Electric Analysis를 사용하였다. 유한요소모델을 Fig. 3에서 볼 수 있는데, 이는 Fig. 1(b)의 실제 시편과 유사함을 알 수 있다. 실험시편과 가깝게 모사하기 위해 유한한 두께를 갖는 solid 형태로 700 mm × 700 mm의 복합재를 설계한 후 Fig. 3(b)와 같은 형태(10 mm × 70 mm)의 동판을 복합재에 삽입하였다. 복합재와 구리판의 두께는 각각 2 mm와 1 mm로 설정하였다. 실제 시편에서는 전선을 구리전극에 납땜하여 전원공급장치와 연결하였는데, 이와 유사한 형태를 구현하기 위해 전극에 구리 원기둥(직경 2 mm, 높이 1 mm)을 설치하였다. Fig. 3(a)에서 왼쪽 구리기둥으로 전류가 흘러 들어가고 오른쪽은 구리기둥으로 전류가 흘러나오도록 설정하였다. 즉, 왼쪽 구리전극에 0V 이상의 전압을 인가하고, 오른쪽 구리전극에 0V의 전압이 인가되도록 하였다.

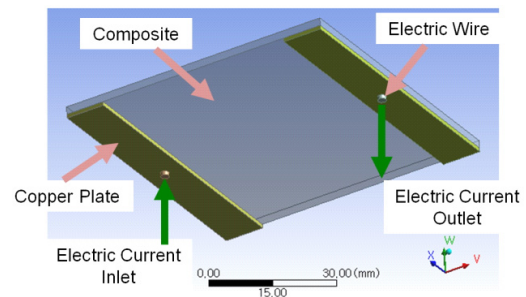


Fig. 3 Composite sample configuration for FEA.

3.2 복합재의 열·전기적 물성

복합재의 발열을 해석하기 위해서는 복합재의 열전도도와 비저항이 필요하다. 복합재의 열전도도는 Rule of Mixtures (ROM)와 Halpin-Tsai(HT) 모델을 이용해서 구하였고[15], 복합재의 비저항은 2.2절에서 언급하였듯이 측정 시 복합재료에 인가되는 전압과 전류를 이용하여 간접적으로 구하였다.

열전도도를 얻기 위해 사용된 ROM과 HT 공식은 다음과 같다. 섬유가 단방향으로 정렬되어있을 경우 섬유방향의 열전도 공식은 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$k_L = k_f V_f + k_m V_m \quad (1)$$

여기서 k_f 와 k_m 은 각각 섬유와 고분자 소재의 열전도도를 나타내는데, 탄소섬유와 에폭시의 열전도도는 각각 $3.06 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$ 과 $0.25 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$ 가 사용되었다 [15]. V_f 와 V_m 은 섬유와 고분자 소재의 부피비를 각각 나타내는데, 이는 식 (2)를 이용하여 구하였다 [15,16].

$$V_f = \frac{W_f}{W_f + (\rho_f/\rho_m) - (\rho_f/\rho_m)W_f} \quad (2)$$

여기서 W_f 는 탄소섬유의 함량(무게비, wt.%/100), ρ_f 와 ρ_m 은 각각 탄소섬유의 밀도(1.8 g/cc)와 에폭시의 밀도(1.2 g/cc)를 나타낸다. 구하여진 탄소섬유 부피비를 Table 1에 정리하였다. 섬유정렬방향에 수직인 방향의 전기전도도(k_T)는 다음 HT 공식을 이용하여 구할 수 있다.

$$k_T = k_m \left[\frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \right] \quad (3)$$

$$\eta = \frac{(k_f/k_m) - 1}{(k_f/k_m) + \xi}$$

$$\xi = \log^{-1} \sqrt{3} \log \frac{a}{b}$$

여기서 a/b 는 섬유의 단면방향의 형상비(aspect ratio)인데, a 의 방향은 열전도도방향이고, b 의 방향은 그에 수직 방향을 나타낸다. 단면이 원형인 섬유의 경우 $a/b = 1$ 이므로, $\xi = 1$ 이 된다.

식 (3)은 단방향으로 정렬된 복합재의 경우에 해당되는데, 본 연구에서 사용된 복합재는 탄소섬유가 임의 방향으로 정렬되어 있다. 따라서 임의의 방향으로 정렬된 복합재의 열전도도를 구하기 위해 식 (4)를 사용하였다.

$$k = \frac{3}{8}k_L + \frac{5}{8}k_T \quad (4)$$

여기서, k_L 과 k_T 는 각각 섬유가 정렬될 방향과 이에 수직인 방향으로의 열전도도를 나타낸다.

ROM과 HT는 기본적으로 기계적 물성을 예측하는 공식인데, 여기서는 복합재의 열적 물성을 구하는데 사용되었다[15]. 같은 방식으로, 식 (4)는 섬유가 임의방향으로 정렬된 복합재의 기계적 물성을 예측하는 공식이나, 여기서는 열적 물성을 구하는 공식으로 사용되었다. 상기 식들과 2.2절의 설명을 이용해서 구한 복합재의 열전도도와 비저항을 Table 1에 정리하였다.

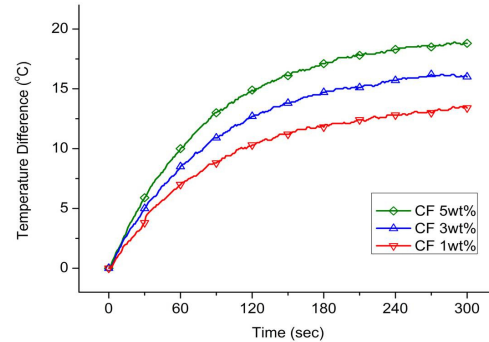


Fig. 4 Effects of CF content on temperature rise and heating rate (24V was applied).

Table 1 Material properties of composite samples

CF concentration [wt.%]	1	3	5
CF volume fraction [vol.%]	0.67	2.02	3.39
Thermal conductivity [W/m·°C]	0.2588	0.2767	0.2950
Volume resistivity [Ω·cm]	65	58	47

FEA에서 또 하나 고려해야 하는 사항은 자연대류에 의한 열손실이다. 이는 복합재의 저항발열에 의해 발생된 열의 손실에 적지 않은 영향을 미친다. Fig 3에서 전류의 입력부와 출력부인 구리기둥을 제외한 전 영역에서 대류의 영향을 받는 것으로 가정하였다.

4. 결과 및 토의

Fig. 4는 24V 전압이 인가된 복합재 시편의 평균온도상승을 보여준다. 탄소섬유의 함량이 증가할수록, 온도가 최초 상온에서부터 높아지고 발열도 비례하여 증가함을 알 수 있다. Fig. 5는 6, 12, 18, 24V 인가 후 300초간 1, 3, 5 wt.% 탄소섬유 복합재의 평균온도변화를 보여준다. FEA 결과들은 정상상태에 이르렀을 때의 평균온도를 나타내는데, 예측된 온도가 측정된 온도와 부합되는 것으로 나타났다. Fig. 6는 FEA와 적외선 카메라로 얻은 온도분포를 보여준다. FEA에서는 복합재 시편이 등방성의 비저항을 갖는 것으로 간주하였으나, 실험 시편은 탄소섬유의 분산도에 따라 등방성 혹은 이방성의 비저항을 갖는다. 이로 인해 유한요소모델에서는 균일한 온도분포를 나타내는 반면 (Fig. 6(a)), 측정결과에서는 영역에 따라 균일하지 않은 온도분포를 보인다 (Fig. 6(b)). 이런 차이에도 불구하고 FEA와 실험결과가 부합하는 것으로부터, 실험에서 사용한 전압과 전류를 이용해서 구한 비저항(Table 1)이 각 복합재에 대해 대표성을 갖는다고 볼 수 있다.

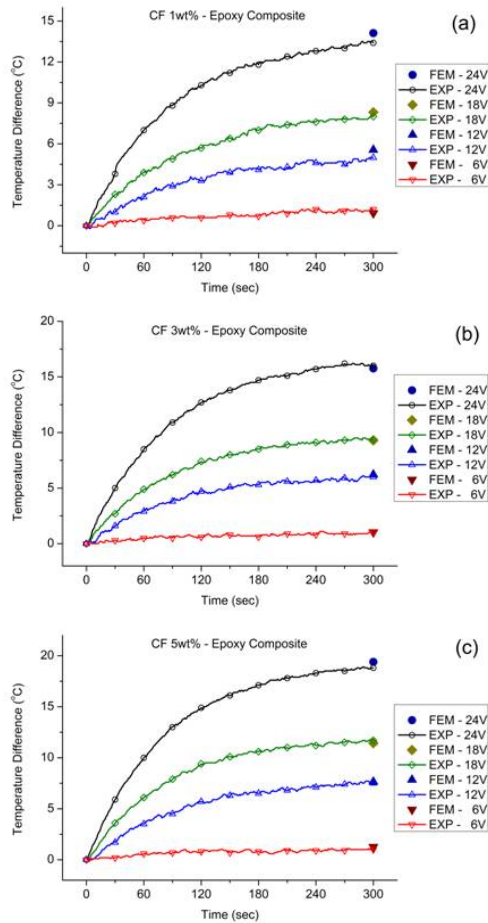


Fig. 5 Effects of applied voltage on heating characteristics: (a) 1 wt.%, (b) 3 wt.% and (c) 5 wt.%

여기서 언급되어야 할 또 다른 경계조건은 대류열전달이다. 유한요소모델에서 대류열전달은 열전달계수를 조절함으로써 적절한 열전달 환경을 구현할 수 있다. 12V 인가전압 시뮬레이션에서는 $1.3 \times 10^{-5} \text{ W/mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, 6V와 18V 인가전압 시뮬레이션에서는 $2.0 \times 10^{-5} \text{ W/mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, 그리고 24V 시뮬레이션에서는 $2.1 \times 10^{-5} \text{ W/mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 가 대류 열전달 계수로 사용되었다[17,18].

Fig. 6(b)에서 흰색 부분은 온도가 가장 높은 지점을 나타내는데, 이는 탄소섬유 연결망이 높은 밀도로 형성된 지역을 의미한다. 온도 구배가 있다는 것은 탄소섬유의 분산이 완벽하지 않다는 것을 의미하고, 이는 탄소섬유가 많이 결합되면 될수록 그 지역의 온도가 높아진다는 것을 말한다. 그런데, 이것은 탄소섬유의 함량이 증가할수록 온도가 항상 증가하는 것을 의미하지는 않는다. 구리전극이 부착된 부분이 저온영역인

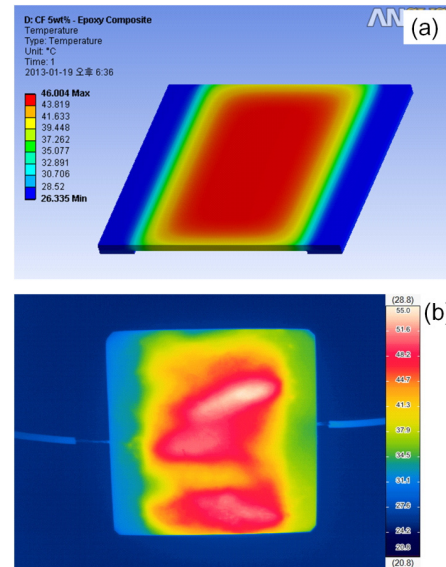


Fig. 6 Surface temperature distribution of 5 wt.% CF-epoxy composite: (a) from FEA and (b) temperature distribution captured by an infrared camera.

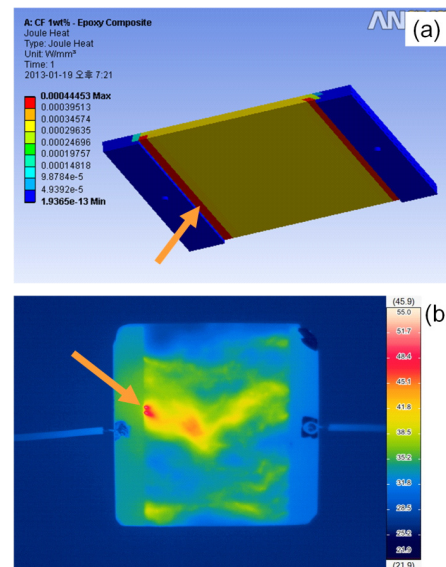


Fig. 7 Resistive heating in the vicinity of copper electrodes(1 wt.% CF-epoxy composite): (a) heating near the edges of copper electrodes as predicted by FEA; (b) temperature distribution at 70 sec after the application of 24V.

하늘색인 것으로부터, 전도성이 높은 도체에서는 저항 열이 발생하지 않음을 알 수 있다. 이는 Joule 발열 공식($Q = I^2 R$)으로도 설명될 수 있는데, 저항 R 이 매우 낮으면 Joule 열 Q 가 매우 작아지고, 결국 온도변화가 거의 일어나지 않게

된다. 그러므로, 전도성 물질로 충전된 복합재에서 Joule 발열을 효과적으로 얻기 위해서는 전도성 충전재의 함량을 적절히 선정하는 것과 충전재의 분산을 균일하게 하는 것이 필요하다. 적외선 카메라를 이용해서 얻은 온도분포는 복합재 내의 전도성 충전재 분산 정도를 평가하는 수단으로 유용하게 사용될 수 있다.

Fig. 7(a)는 구리전극이 삽입된 면의 온도분포를 보여주는 데, 화살표로 표시된 것처럼 구리전극의 가장자리에서 저항에 의한 발열이 다른 부분보다 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 구리전극의 가장자리와 에폭시 복합재의 접합부분에서 접촉저항의 증가에서 기인하는 것으로 여겨진다. 이 현상은 실험에서도 볼 수 있다. Fig. 7(b)는 1 wt.% 탄소섬유 복합재 시편에 24V 전압인가 후 70초가 되는 시점에서의 측정된 온도분포를 보여준다. 화살표가 가리키는 좌측 전극부에서 온도가 최대임을 알 수 있다. 이러한 경향은 FEA 결과와 부합함을 알 수 있고, 전극 부근에서 온도분포가 균일하지 않은 것은 탄소섬유의 분산이 고르지 못한 데서 기인한다.

5. 결론

본 연구에서는 불연속 탄소섬유-에폭시 복합재의 발열특성에 관한 연구를 수행하였다. 시편은 초음파처리와 캐스트 몰딩을 통해서 제작하였으며, 온도분포는 적외선 카메라를 이용하여 측정하였다. 측정결과와 비교·검증을 위해 FEA를 수행하였다. 발열성능은 탄소섬유 함량과 인가된 전압의 증가에 비례적으로 증가하였다. FEA와 실험 결과가 잘 부합하는 것으로 보아 전압과 전류를 이용하여 구한 비저항이 각 복합재에 대해 대표성을 갖는다고 볼 수 있다. 2차원적으로 형성된 탄소섬유의 전도 연결망과 섬유의 균일한 분포는 발열효율에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 전도 연결망이 형성된 부분에서는 온도가 국부적으로 높게 나타났다. 적외선 카메라를 사용한 온도분포 이미징은 일반적으로 절연성 소재 내 전도성 충전재의 분산 정도를 판단하는 기법으로 활용될 수 있다. 불연속 탄소섬유-고분자 복합재는 가정에서 사용될 수 있는 발열체, 건축 내장재, 자동차 내장재, 해빙장치 등 다양한 분야에서 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2012년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역혁신인력양성사업(No. 2012H1

B8A2026133), 기초연구사업(No. 2012R1A1A2044321)과 한국과학기술단체총연합회의 해외고급과학자초빙(Brain Pool)사업(No. 122S-2-3-0439)으로 수행된 연구결과이며, 지원에 대해 진심으로 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) Joseph, C., Viney, C., "Electrical resistance curing of carbon-fibre/epoxy composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 60, No. 2, 2000, pp. 315-319.
- 2) Zhang, J., Guo, Q., Huson, M., Slota, I., Fox, B., "Interphase study of thermoplastic modified epoxy matrix composites: Phase behaviour around a single fibre influenced by heating rate and surface treatment," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41, No. 6, 2010, pp. 787-794.
- 3) Zantout, A. E., Zhupanska, O.I., "On the electrical resistance of carbon fiber polymer matrix composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41, No. 11, 2010, pp. 1719-1727.
- 4) Fosbury A., Wang S., Pin Y.F., Chung D.D.L. "The interlaminar interface of a carbon fiber polymer-matrix composite as a resistance heating element," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 34, No. 10, 2003, pp. 933-940.
- 5) Wang S., Chung, D.D.L., "Temperature/light sensing using carbon fiber polymer-matrix composite," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 30, No. 6, 1999, pp. 591-601.
- 6) Athanasopoulos, N., Kostopoulos, V., "Resistive heating of multidirectional and unidirectional dry carbon fibre performs," *Composites Science and Technology*, Vol. 72, No. 11, 2012, pp. 1273-1282.
- 7) Takahashi, K., Hahn, H.T., "Autonomic thermal management of graphite fiber/epoxy composite structures using an addressable conducting network," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No. 3, 2012, pp. 833-840.
- 8) Ogasawara, T., Hirano, Y., Yoshimura, A., "Coupled thermal-electrical analysis for carbon fiber/epoxy composites exposed to simulated lightning current," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41, No. 8, 2010, pp. 973-981.
- 9) Rudolf, R., Mitschang, P., Neitzel, M., "Induction heating

- of continuous carbon-fibre-reinforced thermoplastics,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 31, No. 11, 2000, pp. 1191-202.
- 10) Fink, B.K., McCullough R.L., Gillespie, J.W., “A local theory of heating in cross-ply carbon fiber thermoplastic composites by magnetic induction,” *Polymer Engineering and Science*, Vol. 32, No. 5, 1992, pp. 357-369.
 - 11) Fink, B.K., McCullough, R.L., Gillespie, J.W., “A model to predict the through-thickness distribution of heat generation in cross-ply carbon-fiber composites subjected to alternating magnetic fields,” *Composites Science and Technology*, Vol. 55, No. 2, 1995, pp. 119-130.
 - 12) Tian, T., Cole, K.D., “Anisotropic thermal conductivity measurement of carbon-fiber/epoxy composite materials,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 23-24, 2012, pp. 6530-6537.
 - 13) Seo, S.W., Ha, M.S., Kwon, O.Y., Choi, H.S., “Improvement of Electrical Conductivity of Carbon-Fiber Reinforced Plastics by Nano-particles Coating,” *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 23, No. 6, 2010, pp. 1-6.
 - 14) Ha, M.S., Kwon, O.Y., Choi, H.S., “Improved Electrical Conductivity of CFRP by Conductive Nano-Particles Coating for lightning Strike Protection,” *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 23, No. 1, 2010, pp. 31-36.
 - 15) Barbero, E. J., *Introduction to Composite Materials Design*, Taylor & Francis Group, New York, NY, USA, 1999.
 - 16) Thostenson, E. T., Chou, T.W., “On the elastic properties of carbon nanotube-based composites: modeling and characterization,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 36, No. 5, 2003, pp. 573-583.
 - 17) Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6th edition)*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2007.
 - 18) Holman JP, *Heat Transfer (9th edition)*, Gyeongmunsa, Seoul, 2007.