

스핀 탄소/페놀 복합재의 열전도도 예측

서부호*·조영준*·강태진*·윤재륜*

Prediction of Thermal Conductivity of Spun Carbon/Phenolic Composites

Boo Ho Seo, Young Jun Cho, Tae Jin Kang and Jae Ryoun Youn

Key Words: thermal resistance method, thermal conductivity, spun carbon fiber, 8 harness satin

Abstract

This paper predicted the thermal conductivity of spun carbon/phenolic composites by the thermal resistance method. This method uses the analogy between the diffusion of heat and electrical charge. To verify the theoretical predictions, the thermal conductivity of spun carbon/phenolic composites was examined experimentally. The reported thermal conductivities of graphite/epoxy composite of a eight harness satin laminate was used of the comparison with the prediction values of the model and it was noticed that a good agreement has been found.

1. 서 론

섬유 강화 복합재료, 특히 직물 복합재료의 사용이 점차 증가하고 있는 추세다. 이들은 비중(specific gravities)이 낮으며, 비강도(high strength-to-weight ratio)가 높다는 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로 인해 무게를 중요시하는 항공우주, 자동차와 다른 산업분야에서 금속을 대체하기 시작하고 있다.

열전도도(effective thermal conductivity)는 복합재료의 중요한 물리적 성질이다. 고분자, 금속, 세라믹이 보강된 복합재료를 심한 비 열등방성(non-isothermal) 환경에 적용시키기 위해서는 이들의 열전도 거동에 대해 아는 것이 필요하다. 섬유강화 복합재료의 열전도도에 관한 해석적인

방법과 모델링에 대한 연구가 많이 이뤄졌다.

Springer[1]는 일방향 복합재료의 필라멘트방향과 필라멘트의 수직방향으로의 열전도도를 예측할 수 있는 식을 제시하였다. 필라멘트 방향으로 필라멘트와 모재가 병렬연결(parallel) 되어있다고 가정하였다. Mottram[2]은 비열과 밀도를 이용해서 1차원, 2차원, 3차원 복합재료의 열전도도를 예측하고 측정하였다. Dasgupta[3] 등은 균질화기법과 유한요소법과 3차원 직렬-병렬 열 저항 네트워크를 이용하여 평직 복합재료의 열전도도를 예측하였다. Ning[4-6] 등은 기하학적 모델을 이용해 closed-form 형태의 직물 복합재료 열전도도를 구하였다.

여러 접근법 중에서 유사율 이용한 방법은 비교적 간단성과 효율성 측면에서 우수성을 인정받고 있다. 그 중 열-전기 유사성이 가장 널리 이용되고 있는데 이는 열전달 지배방정식인 Fourier 법칙과 전기전달 지배방정식인 Ohm 법칙이 수학적으로나 현상학적으로 유사함을 이용하는 방법이다.

* 서울대학교 재료공학부

본 논문에서는 열-전기 유사성을 이용해서 섬유 강화 복합재료의 열전도도를 예측하였다. 적층 복합재료의 단위구조를 여러 개의 엘리먼트(element)로 나누고, 각각의 엘리먼트에 물성을 부여하였다. 이를 이용해 직렬-병렬 열저항 네트워크를 구성하여 복합재료의 평면방향과 두께 방향의 열전도도를 예측하였다.

2. 실험

2.1 일방향 스펀 탄소/페놀 복합재료의 제조

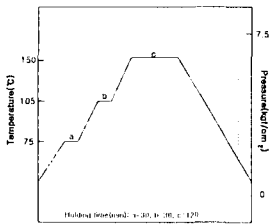


그림 1. 페놀의 경화 사이클

실험에 사용된 재료는 스펀 탄소/페놀 복합재료이며, 직물구조는 8매 주자직이다. 한편 실의 단면은 horse-track 형태로 가정하였다.

스펀 탄소 섬유 프리프레그를 만든 후 적층하여 핫프레스로 압축성형하여 일방향 스펀 탄소/페놀 복합재료를 제조하였으며 성형 조건은 그림 1과 같다.

일방향 스펀 탄소/페놀 복합재료를 제조하여 스펀 탄소섬유의 길이방향과 지름방향의 열전도도를 구하고자 한다.

2.2 8매주자 탄소/페놀 복합재료의 제조

탄소 8매주자 프리프레그를 핫프레스로 압축성형하여 8매 주자 스펀 탄소/페놀 복합재료를 제조하였으며 성형조건은 그림 1과 같다.

2.3 열전도도 측정

본 연구에서는 상온비교 열전도도 측정장비를 이용해 복합재료의 열전도도를 측정하였다

3. 열저항 네트워크를 이용한 열전도도 예측

복합재료의 열전도계수 예측을 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 섬유와 모재(matrix)사이의 열접촉 저항은 무시한다.
- 열유동은 직선으로 흐르며 서로 평행하다.
- 단위구조의 열전도도는 전체 복합재료의 열전도도와 같다.

3.1 단위구조(Unit cell)

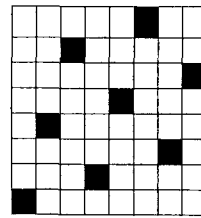


그림 2. 8매 주자직의 단위구조

8매주자의 단위구조는 그림 2와 같이 경사, 위사 각각 8개의 실로 이루어져있다. 그러나 8매 주자직은 그림 3과 같은 단위구조 8개로 구성되므로 전체 단위구조를 그림 3으로 가정하였다.

각각은 경·위사가 올라오는 부분만 다를 뿐 엘리먼트의 개수와 연결방식이 모두 똑같으므로 아래와 같이 정의 내릴 수가 있다.

여기서 경·위사는 같다고 가정하고 실과 실사이의 간격은 g , 실의 높이는 h_s , 실의 가로 최대 길이를 $a+h_s$ 라 정의하였다.

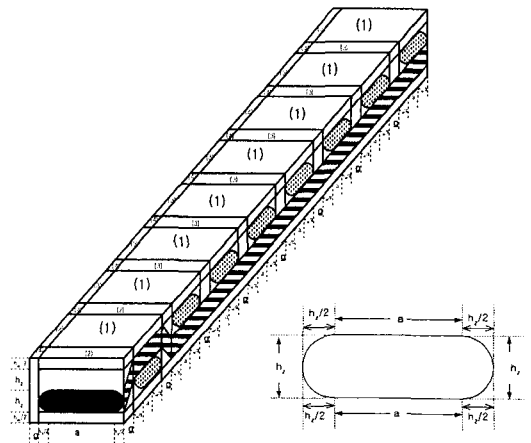


그림 3. 8매 주자직의 단위구조 및 실의 단면

3.2 두께방향

3.2.1 두께방향의 엘리먼트 및 열저항 네트워크

두께방향으로는 모두 4개의 엘리먼트로 나눌 수 있으며 이들은 병렬로 연결되어 있으므로 그림 4와 같은 열저항 네트워크를 구성할 수 있다.

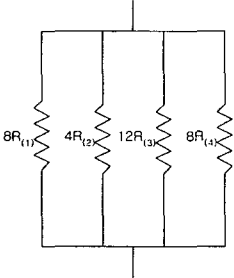


그림 4. 두께 방향으로의 열저항 네트워크

3.2.2 두께방향의 열전도도 예측

위에서 정의한 열저항 네트워크로 열-전기 유사성을 이용해 8매 주자직 복합재료의 두께방향 열전도도를 예측해 보고자 한다. i 번째 엘리먼트의 열저항 R_i 는 다음과 같은 식으로 기술할 수 있다

$$R_i = \frac{L_i}{k_i A_i} \quad (1)$$

여기서 L_i 는 열이 흐르는 방향에서 i 번째 엘리먼트의 길이, k_i 는 열전도계수, A_i 는 열이 흐르는 방향의 수직으로의 단면적을 각각 나타낸다. 이를 이용하면 그림 3의 단위구조의 전체 열저항을 아래와 같다.

$$\frac{1}{R_{trans}} = \frac{h}{8 k_s (a+g+h_z)^2} \quad (2)$$

여기서 R_{trans} 는 두께 방향으로의 열저항이다. 또한 그림 4와 같은 열저항 네트워크의 전체 열저항은 다음과 같다.

$$\frac{1}{R_{trans}} = \frac{8}{R_{(1)}} + \frac{4}{R_{(2)}} + \frac{12}{R_{(3)}} + \frac{8}{R_{(4)}} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)으로부터 다음과 같이 두께방향의 열전도도 k_{eff}^{trans} 를 구할 수 있다.

$$k_{eff}^{trans} = \frac{h}{8(a+g+h_z)^2} \left[\frac{8k_m k_1 a^2}{k_1 h_m + 2k_m h_z} + \frac{64k_1 k_m a h_z}{k_1 h_z (4-\pi) + 4k_1 h_m + (\pi+4)h_z k_m} + \frac{64k_m k_1 h_z}{(16-4\pi)k_1 h_z + 16h_m k_1 + 4\pi h_z k_m} + \frac{16k_m k_2 g h_z}{4k_2 (h_m + h_z - \frac{\pi}{4} h_z) + \pi h_z k_m} + \frac{8k_m k_2 a g}{k_2 (2h_m + h_z) + 2k_m h_z} + \frac{8k_m g^2}{h_m + 2h_z} + \frac{96k_m k_1 h_z g}{(16-2\pi)k_1 h_z + 8h_m k_1 + 2\pi h_z k_m} + \frac{12k_m k_1 a g}{h_m k_1 + 2h_z k_m} \right] \quad (4)$$

여기서 k_{eff}^{trans} 는 두께 방향으로의 열전도도이며, k_1 과 k_2 는 아래 식에서 구할 수 있다.

$$k_i = k_a \cos^2 \bar{\theta}_{wi} + k_t \sin^2 \bar{\theta}_{wi} \quad (i=1,2) \quad (5)$$

$\bar{\theta}_{wi}$ 는 경·위사의 평균 기울기 값으로 문헌에 제시된 값을 이용하였다.[6] k_a 는 섬유 축 방향으로의 열전도도로 식(6)과 같이 혼합법칙을 이용해 구하며, k_t 는 섬유축 수직방향으로의 열전도도를 나타내며 Clayton의 실험식에 의해 각각 아래 식에서 구할 수가 있다.

$$k_a = c_{\beta} k_{f_a} + (1 - c_{\beta}) k_m \quad (6)$$

$$k_t = \frac{k_m}{4} \left[\sqrt{(1 - c_{\beta})^2 + \frac{4 k_{f_t}}{k_m}} - (1 - c_{\beta}) \left(\frac{k_{f_t}}{k_m} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

여기서, k_{f_a} 는 섬유 축 방향의 열전도도, c_{β} 는 실에서 섬유의 체적비, k_m 은 모재의 열전도도, k_{f_t} 은 섬유 지름방향으로의 열전도도를 각각 나타낸다.

3.3 평면방향

평면방향일 경우 엘리먼트 (2)는 열이 흐를 때 열 흐름과 수직으로의 각 엘리먼트의 단면적과 길이가 다르므로 성질에 따라 2개로 나누었으며 엘리먼트 (3)도 2개로 구분하여 그림 5와 같이 열-저항 네트워크를 구성하였다.

3.3.1 평면방향의 엘리먼트와 열저항 네트워크

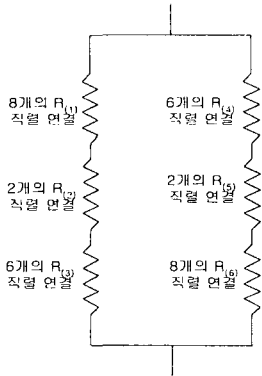


그림 5. 평면 방향으로의 열 저항 네트워크

3.3.2 평면방향으로의 열전도도 예측

두께방향과 동일한 방식으로 열전도도를 예측할 수 있다. R_{plane} 을 평면방향으로의 열저항이라고 하면, 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{R_{plane}} = \left(\frac{8(a+h_z+g)}{8k_2 h(a+h_z+g)} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{k_2 h} \right)^{-1} \quad (8)$$

$$\frac{1}{R_{plane}} = \frac{1}{8R_{(2)} + 2R_{(2)} + 6R_{(3)}} + \frac{1}{6R_{(4)} + 2R_{(4)} + 8R_{(6)}} \quad (9)$$

여기서 식(9)에 각각 엘리먼트의 열저항 값을 대입시키면 평면 방향의 열전도도를 구할 수 있다. 그리고, 식(11)에서 k_1 과 k_2 로 나타내며 위의 과정을 적용하면 평면방향의 열전도도 k_{eff}^n 를 구할 수 있다.

$$k_x = k_a \sin^2 \bar{\theta}_{wi} + k_l \cos^2 \bar{\theta}_{wi} \quad (10)$$

4. 결과

본 논문에서 제시한 모델을 검증하기 위해 문헌 [6]에 제시된 단위구조의 여러 파라메타와 열전도도를 이용하여 graphite/epoxy의 두께방향 열전도도를 계산하여 비교하였다. 그림 6은 그 결과를 보여주고 있는데, 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

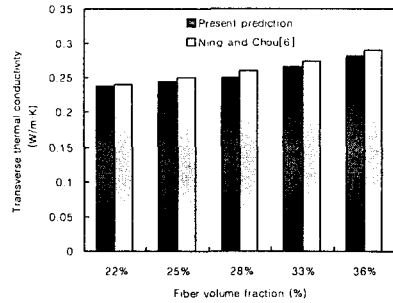


그림 6. Graphite/epoxy의 두께방향의 열전도도

후 기

본 연구는 2000년 과학기술부 지정 국가지정연구실 사업의 과제 지원을 받아 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Springer G.S. and Tsai S. W., Thermal Conductivities of Unidirectional Materials, Journal of Composite Materials, Vol 1, 1967, 166-173
- (2) Mottram J. T. and Tayler R., Thermal Conductivity of Fiber-Phenolic Resin Composites, Part II: Numerical Evaluation, Composites Science and Technology, Vol 29, 1987, 211-232
- (3) A. Dasgupta and R.K. Agarwal, Orthotropic Thermal Conductivity of Plain-Weave Fabric Composites Using a Homogenization Technique, Journal of Composites Materials, Vol. 26, No.18, 1992, 2736-2758
- (4) Qiong-Gong Ning and Tsu-wei Chou, A Closed-Form Solution of the Transverse Effective Thermal conductivity of Woven Fabric Composites, Journal of Composites Materials, Vol 29, No. 17, 1995, 2280-2294
- (5) Qiong-Gong Ning and Tsu-Wei Chou, Closed-Form Solution of the In-Plane Effective Thermal Conductivities of Woven-Fabric Composites, Composites Science and Technology, Vol. 29, No. 17, 1995, 41-48
- (6) Qiong-Gong Ning and Tsu-Wei Chou, A general analytical model for predicting the transverse effective thermal conductivities of woven fabric composites, Composites Part A, 1998