

열-전기 유사성을 이용한 복합재료의 열전도도 예측

조영준* · 강태진* · 윤재륜*

Effective Thermal Conductivities of Fiber-Reinforce Composites Using a Thermal-Electrical Analogy

Young Jun Cho, Tae Jin Kang and Jae Ryouun Youn

Key Words : thermal conductivity, thermal-electrical analogy, thermal resistance network, unit cell, volume element (voxel)

ABSTRACT

An approach for predicting the effective thermal conductivities of fiber-reinforce composite has been developed based on a thermal-electrical analogy. The unit cell of the composite laminate is divided into regular volume elements and the material properties have been given to each element. By constructing the series-parallel thermal resistance network, the thermal conductivities of composite both in-plane and out-of-plane direction have been predicted. Graphite/Epoxy composite is used for a balanced plain-weave composite laminate. By comparing the predicted results and the previous works, good agreement has been found.

1. 서론

섬유강화복합재료는 그 무게에 비해 뛰어난 비강도와 비강성 때문에 여러 분야에 응용되고 있으며 사용이 계속 증가하고 있다. 그 우수성으로 인하여 새로운 구조재료 각광받고 있으며 항공산업, 자동차산업 등 재료의 무게가 중요시되는 산업에서 금속의 대체재로 떠오르고 있다. 현재까지 복합재료의 강도나 강성 등 기계적 성질을 개선하기 위한 연구와 공정개선에 주안점을 두고 발전해왔다. 한편으로 우수한 열적 특성을 가지는 재료에 대한 요구가 점차 증가하고 있다. 열전도도는 물

질전달 현상의 주요 특성 중 하나이며 복합재료의 열전달과 열역학적 거동에 크게 영향을 주는 인자이다. 그동안 이 주제에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며[1] 그 중에 유사성을 이용한 방법은 비교적 간단성과 효율성 면에서 우수성을 인정받고 있다. [2] 그 중 열-전기 유사성이 가장 널리 이용되고 있다. 이는 열전달 지배방정식인 Fourier 법칙과 전기전달 지배방정식인 Ohm 법칙이 수학적으로 현상학적으로 유사함을 이용하는 방법이다.

본 연구에서는 열-전기 유사성을 적용하여 직물 복합재료의 평면방향과 두께방향의 열전도도를 예측하고자 하였다. 직물복합재료의 단위구조를 일

* 서울대학교 재료공학부

정부피요소로 나눈 후 각 요소에 물질특성을 부여한 후 직렬-병렬 열저항 네트워크를 구성하여 열전도도를 예측하였다. 이를 기존 연구 결과와 비교하여 모델의 타당성을 검증받고자 하였다.

2. 단위구조 모델링

2.1 단위구조 (Unit cell)

본 연구에서는 평직 복합재료 구조를 이용하였으며 이의 단위구조는 Fig 1.과 같다. 실의 단면은 실제 직물상에서 실의 단면형태와 가장 유사한 렌즈모양으로 모사하였다. 실의 경로는 다항식, 삼각함수, 파라미터 방정식으로 표현할 수 있다. [4]

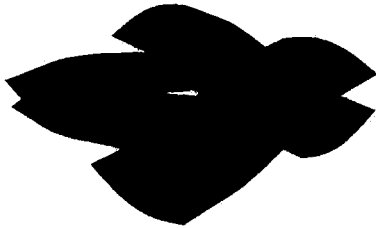


Fig 1. Unit cell of plain woven fabric

이런 단위구조를 Fig 2.와 같이 $N_x N_y N_z$ 개의 일정부피요소(volume element , voxel)로 나누었다.

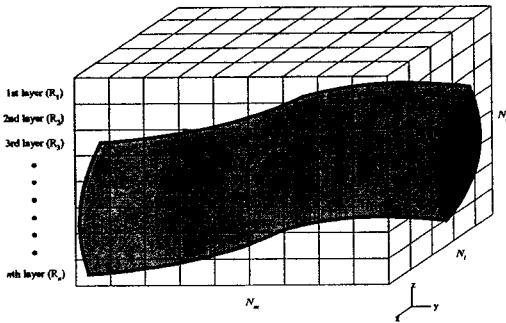


Fig 2. The $N_x N_y N_z$ voxelized unit cell

각 복셀의 중심점이 주어진 섬유 부피 내에 존재하면 그 셀은 섬유형 복셀로 구분하여 섬유특성

을 부여하였고 그렇지 않은 경우는 기지재형 복셀로 구분하여 기지재 물성을 부여하였다. 섬유형 복셀에서는 섬유의 방향성을 고려한 물성을 부여하였다. 하였다.

2.2 Thermal resistance network

단위구조의 열전도도는 전체 적층복합재료의 열전도도와 같다는 가정 아래 다음의 과정을 수행하였다.

2.2.1. 평면방향 열저항 네트워크

평면방향의 열저항을 계산하기 위하여 각 복셀의 열저항을 구하여 이를 저항의 직렬-병렬연결을 통해 전체 단위구조의 열저항을 계산하였다.[3] 단위구조는 Fig 2.와 같이 두께방향으로 총 n 개의 층으로 구성되어 있고, 각 층은 총 l 개의 열(row)이 병렬로 구성되어 있으며 각 열은 m 개의 복셀이 직렬로 연결되어 있다. (Fig 3.)

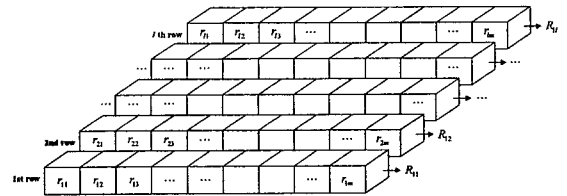


Fig 3. Aggregate of voxels in the first layer

임의 i 번째 복셀에서의 열저항, r_i ,은 다음과 같이 표현된다.

$$r_i = \frac{l_i}{k_i A_i} \quad (1)$$

여기서 l_i 와 k_i 는 각각 열흐름 방향으로 복셀의 길이와 열전도도 값이며 A_i 는 열흐름에 수직인 복셀의 단면적이다. 따라서 모든 복셀에서 복셀의 길이와 단면적은 같으며 열전도도는 섬유형, 기지재형 복셀과 섬유방향에 따라 달라진다. 먼저 Fig 3.의 첫번째 열의 열저항은 다음과 같이 직렬

로 연결되어 있으므로 (Fig 4.) m 개 복셀 열저항의 합과 같으며(식 2) 다른 열에서도 같은 방법으로 열저항을 구할 수 있다.

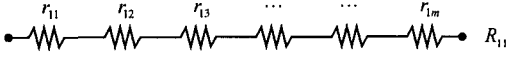


Fig 4. Series thermal resistance network of 1st row

$$R_{11} = r_{11} + r_{12} + r_{13} + \dots + r_{1m} = \sum_{i=1}^m r_{1i} \quad (2)$$

첫번째 층은 Fig 5.와 같이 l 개의 열이 병렬로 연결되어 이 층의 열저항은 다음 식(3)과 같이 계산할 수 있으며 위의 과정을 다른 층에도 적용하여 열저항을 구한다.

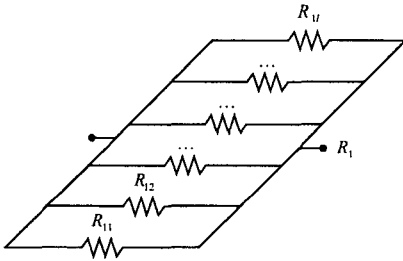


Fig 5. Parallel thermal resistance network of 1st layer

$$R_1 = \left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13}} + \dots + \frac{1}{R_{1l}} \right)^{-1} = \left(\sum_{j=1}^l \frac{1}{R_{1j}} \right)^{-1} \quad (3)$$

전체 단위구조는 각 층이 R_k ($k=1, 2, \dots, n$)의 열저항 값을 가지는 총 n 개의 층이 병렬로 연결되어 있으며 (Fig 6.). 식(4)를 통해 총 열저항 값을 구한다.

$$R = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)^{-1} = \left(\sum_{k=1}^n R_k \right)^{-1} \quad (4)$$

단위구조의 평면방향 열전도도, k_{eff}^n , 는 총 열저항 R 과 관계식 (5)를 통해 구할 수 있다.

$$R = \frac{L_{unit}}{k_{eff}^n A_{unit}} \quad (5)$$

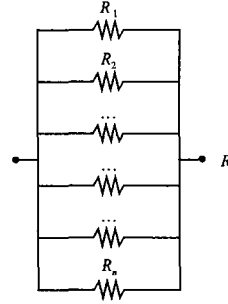


Fig 6. Parallel thermal resistance network of the whole unit cell

여기서 L_{unit} 은 열흐름방향으로 단위구조의 길이이며 A_{unit} 는 열흐름에 수직인 단위구조의 단면적이다.

실의 열전도도 값을 구하기 위해 섬유방향 실의 열전도도, k_{ya} , 는 식(6)과 같이 혼합률 법칙에 의해. 섬유횡방향의 실의 열전도도, k_{yf} , 는 식(7)과 같이 Clayton의 식[5]으로 표현할 수 있다.

$$k_{ya} = v_f k_f + (1 - v_f) k_m \quad (6)$$

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

여기서 v_f 는 실에서의 섬유부피분율, k_f 와 k_t , k_m 는 각각 섬유방향 열전도도, 섬유지름방향의 열전도도, 기지재의 열전도도이다. 섬유가 실의 진행방향과 각 θ_i 의 방향성을 가질 때의 열전도도는 변환식에 의해 다음과 같이 표현된다. [6]

$$k_{\theta_i} = k_{ya} \cos^2 \theta_i + k_{yf} \sin^2 \theta_i \quad (\text{in-plane}) \quad (8)$$

$$k_{\theta_i} = k_{ya} \sin^2 \theta_i + k_{yf} \cos^2 \theta_i \quad (\text{out-of-plane}) \quad (9)$$

2.2.2. 두께방향 열저항 네트워크

두께방향 열전도도는 위와 같은 방법을 적용하며 섬유의 방향성 효과는 식(9)를 적용하여 구할 수 있다.

3. 결과

평직 복합재료의 평면방향 열전도도와 두께방향의 열전도도를 예측하고 이를 검증하였다. Graphite/epoxy 복합재료를 사용하였으며 Dasgupta와 Agarwal 연구[3]에 사용된 디멘션과 물성을 이용해 기존 연구결과[1,2,3]와 비교하였다. 실에서의 섬유부피분율, v_f , 은 0.63이며 복합재료의 섬유부피분율은 0.35이다. Graphite의 열전도도는 섬유방향, 섬유횡방향이 각각 8.40 W/mK, 0.84 W/mK이며 epoxy 기지재의 열전도도는 0.19 W/mK이다. 단위구조는 총 65,000개의 복셀로 나누었다.

($N_l = 50$, $N_m = 50$, $N_n = 26$)

평면방향과 두께방향 열전도도 예측결과를 각각 Fig 7-8.에 나타내었는데 기존 연구결과와 비교적 일치하고 있음을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 열-전기 유사성을 이용하여 섬유강화복합재료의 열전도도를 예측하였는데, 기존 연구결과와 비교해본 결과 비교적 잘 일치하는 결과를 통해 본 모델의 타당성을 검증할 수 있었다.

후기

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

참고문헌

1. 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
2. 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

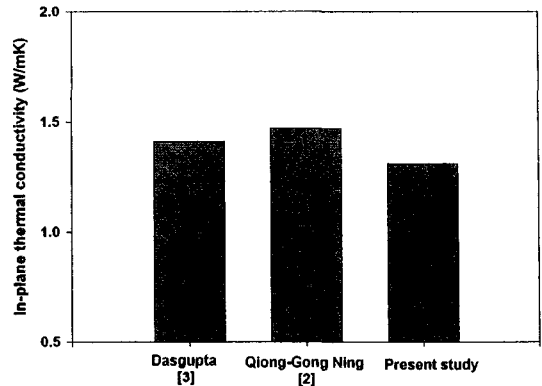


Fig 7. In-plane thermal conductivities of graphite/epoxy composite

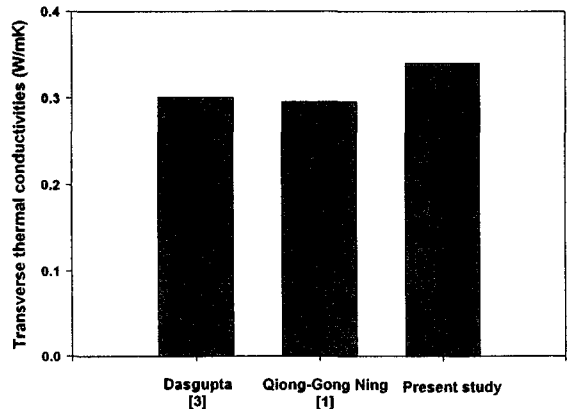


Fig 8. Transverse thermal conductivities of graphite/epoxy composite

3. A. Dasgupta and R.K. Agarwal, Orthotropic Thermal Conductivity of Plain-Weave Fabric Composites Using a Homogenization Technique, Journal of Composite Materials, Vol. 26, No. 18, 1992, 2736-2758
4. D. Bigaud, J.-M. Goyh n che and P. Hamelin, A Global-Local Non-Linear Modelling of Effective Thermal Conductivity Tensor of Textile-Reinforced Composites, Composites Part A, Vol. 32, 2001, 1443-1453
5. W.A. Clayton, Constituent and Composite Thermal Conductivities of Phenolic-Carbon and Phenolic-Graphite Ablators, AIAA, Paper no. 71-380
6. Carslaw, H. S. and J. C. Jaeger, 1959. Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Oxford: Clarendon Press