

# 끈 섬유 복합재료의 열전도도 예측모델

변준형\*\*, 이상관\*, 김병선\*, 박종규\*\*, 이재열\*\*

## Thermal Conductivity Model of Twisted Yarn Composites

Joon-Hyung Byun<sup>\*+</sup>, Sang-Kwan Lee<sup>\*</sup>, Byung-Sun Kim<sup>\*</sup>, Jong-Kyoo Park<sup>\*</sup>, Jae-Yeol Lee<sup>\*</sup>

**Key Words:** Twist, Spun yarn, Thermal conductivity, Coordinate transformation, Thermal resistance

### Abstract

In woven or knitted preforms for composites, the yarns are often twisted for avoiding damage due to the contact with the textile machine elements. When the preforms of twisted yarns are used in carbon/carbon composites, the thermal conductivity of the composites varies depending upon the degree of the yarn twist. This paper presents a thermal conductivity model of spun yarn composites. The thermal-electrical analogy and the averaging technique have been adopted in this analysis. The model prediction has been correlated with experimental results in order to confirm the model predictability. Parametric study has also been conducted to examine the effect of the yarn twist on the thermal conductivity of spun yarn composites.

### 1. 서론

복합재료의 woven 또는 니트 프리폼 제조에 사용되는 섬유는 여러 직조 기계요소와의 접촉으로 인하여 손상이 생길 수 있다. 이러한 손상을 줄이고 섬유 사이의 결속을 주기 위하여 섬유에 꼬임(twist)을 가하게 된다. 끈 섬유를 잡아당기면, 꼬임으로 인하여 횡방향 힘이 가해지고, 이 힘에 의해 마찰력이 생겨 섬유를 서로 결속시킨다. 탄소/탄소 복합재료의 프리폼은 주로 woven 직물의 다층구조로 되어있는데 밀도화 공정 중에 발생하는 높은 열에 의한 파단과 층간분리를 막기 위해 주로 니들 펀칭(needle punching)에 의해 층과 층을 결속시키고 있다. 니들 펀칭 공정에서는 미늘

형 바늘이 적층된 직물의 수직 아래 방향으로 관통할 때 평면에 배열된 섬유를 잡아 당겨 다른 층의 섬유와 얽히게 한다. 니들 펀칭용 직물은 더 많은 섬유를 두께 방향으로 배열시키기 위하여 꼬인 spun 섬유를 사용하는데 꼬임을 주는 이유는 단섬유들을 서로 결속시켜 연속 섬유 형태로 만들어 직조가 가능하도록 하기 위함이다. 한편, spun 섬유 내로 바늘이 관통하면 단섬유는 쉽게 이탈하여 바늘 진행 방향으로 내려가게 된다.

끈 섬유를 사용한 복합재료의 열전도도는 섬유 꼬임의 정도에 따라 변한다. 그러나, 사용하고자 하는 섬유 종류 및 꼬임 정도가 매우 다양하기 때문에 이 모든 경우에 대하여 실험적으로 복합재료의 열전도도를 측정하는 것은 많은 노력과 시간을 필요로 한다. 따라서 끈 섬유에 대한 복합재료 열전도도를 해석적으로 구하는 모델에 필요하다. 일방향 섬유 복합재료나 입자 복합재료에 대한 모델이 많이 제시 되었으며[1,2] 최근에는 woven 섬유 복합재료의 열전도도를 예측하는 모델이 보고 되고 있다[3,4]. 그러나 끈 섬유가 폭

\* 한국기계연구원

\*+ 한국기계연구원 교신저자

\*\* 국방과학연구소

넓게 사용되고 있음에도 불구하고 끈 섬유 복합재료의 열전도도 연구는 미진하다.

본 논문에서는 spun 섬유 복합재료의 열전도도 모델을 기존의 열-전기유사법 (thermal-electrical analogy)과 체적 평균법을 적용하여 제시하였으며, 이 모델의 유효성을 확인하기 위하여 모델 예측치와 실험치를 서로 비교하였다.

## 2. 열전도도 모델

Fig. 1은 세 가닥의 섬유가 꼬인 것을 보여주고 있으며, 꼬임 각  $\theta$ , 섬유지름  $D$ , pitch인  $h$ 를 표시하였다. 각각의 섬유는 같은 각도로 꼬여져 있으므로, 섬유가닥의 수에 관계없이 하나의 섬유가닥만을 선택하여 해석할 수 있다. 섬유가닥 하나의 pitch는 단위 셀(unit cell)로 정의된다. Fig. 2는 단위 셀의 미소 섬유를 나타낸 것인데 여기서 점선은 한 가닥의 섬유를 피치 길이만큼 표시한 것이다. 이 그림에서 좌표계  $x$ - $y$ - $z$ 는 구하고자 하는 끈 섬유 복합재료 전체 좌표계이며  $x'$ - $y'$ - $z'$ 는 전체 좌표계를 미소 요소까지 이동한 좌표계이다. 좌표계  $x''$ - $y''$ - $z''$ 는 국부 좌표계로서 미소 요소를 일방향 복합재료로 간주할 때  $x''$ 축은 섬유 길이 방향이며, 전체 좌표계의 종축과  $\theta$  방향만큼 틀어져 있다. 따라서 미소요소를 횡등방성이라고 가정하면, 열전도도  $k''$ 는 다음과 같다.

$$[k''] = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & 0 \\ 0 & 0 & k_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $k_{11}$ 과  $k_{22}$ 는 일방향 복합재료의 길이 방향 및 폭 방향의 열전도도이며, micromechanics식으로부터 얻을 수 있다. 좌표 변환을 거치면 전체 좌표계  $x$ - $y$ - $z$ 에서 미소 섬유의 열전도도는 다음과 같이 구해진다.

$$[k] = [T][k''] [T]^t \quad (2)$$

여기서,

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta\cos\phi & \sin\theta\sin\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\cos\phi & \cos\theta\sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

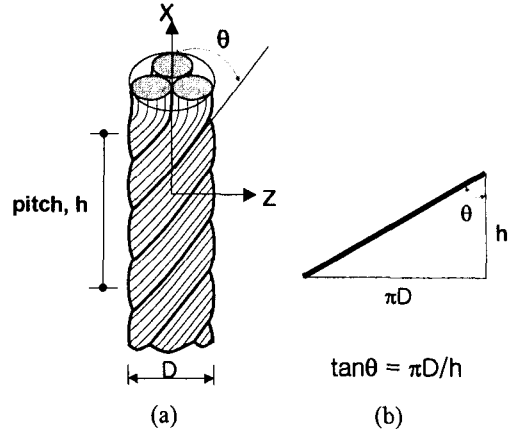


Fig. 1 Geometry of a twisted yarn: (a) 1/3 yarn; (b) parametric relationship.

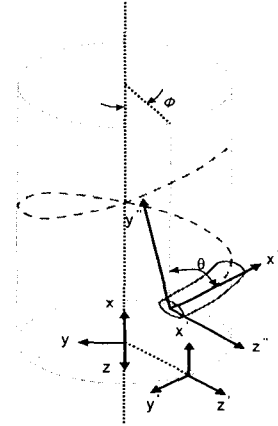


Fig. 2 Coordinate systems of an infinitesimal segment for twisted yarn composite.

열전도 해석을 위하여 열-전기유사법 (thermal-electrical analogy)을 도입하면, 열저항은  $R=L/kA$ 로 표시되며, 여기서  $L$ 과  $A$ 는 각각 열이 전달되는 미소요소의 두께와 단면적이다. Fig. 3(a)는 열 해석을 수행하기 위한 섬유요소의 다층구조를 나타낸 것이다. 만약  $x$ -방향으로 열유동이 일어나고 유동선이 서로 평행하고 직선적이라고 가정하면, 열저항은 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 직렬로 배열되어 있다고 볼 수 있다. 마찬가지로,  $y$  방향 및  $z$  방향의 열전도는 병렬로 배열되어 있다고 볼 수 있다.

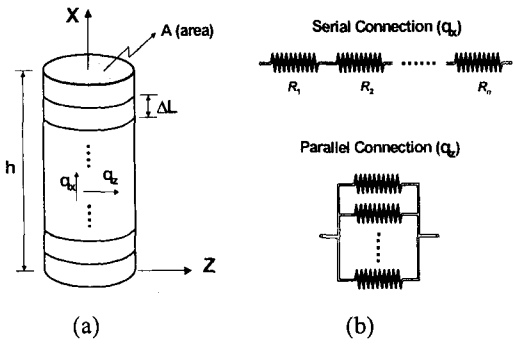


Fig. 3 Schematic of thermal-electrical analogy: (a) multi-layer construction of yarn segments; and (b) serial and parallel connections.

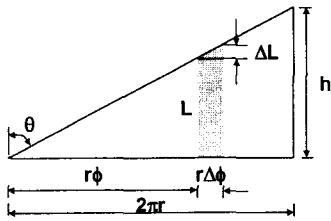


Fig. 4 Averaging method of thermal conductivity.

열 저항이 직렬로 연결되어 있고, 미소요소의 열 저항을 전체 pitch 길이에 대하여 평균하면 (Fig. 4) 끈 섬유 복합재료의 길이 방향 열전도도 ( $k_e$ )는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{k_e} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\phi}{k_i} \quad (4)$$

마찬가지로 끈 섬유 복합재료의 폭 방향 열전도도는 열 저항이 병렬로 연결되어 있다고 볼 수 있으므로 전체 pitch 길이에 대하여 평균하면 다음 식으로 구해진다.

$$\frac{1}{k_e} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} k_i d\phi \quad (5)$$

최종적으로, 식 (2)와 식 (4) 및 식 (5)를 풀면 끈 섬유 복합재료의 열전도도는 다음 식으로 구해진다.

$$k_{xx}^e = k_{11} \cos\theta + k_{22} \sin\theta$$

$$k_{yy}^e = k_{zz}^e = \frac{1}{2} (k_{11} - k_{22}) \sin\theta + k_{22} \quad (6)$$

이 식에서 나타나지 않는 다른 열전도도는 모두 0이다. 식 (6)으로부터 끈 섬유 복합재료의 열전도도는 횡 등방성이라는 것을 알 수 있다.

### 3. 실험

모델의 타당성을 확인하기 위하여 열전도도 시험을 하였다. 시편 제조를 위하여 탄화시킨 *oxi-PAN spun* 섬유를 성형용 치구에 감아 일정한 두께로 만든 뒤 금형에 넣고 수지 주입을 하였다. Fig. 5는 사용한 성형치구와 RTM 금형을 보인 것이다.

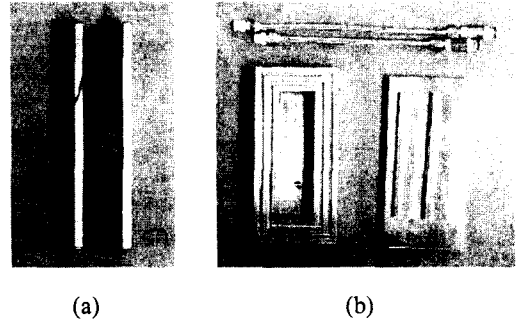


Fig. 5 (a) Insert mold with twisted yarn and (b) RTM mold.

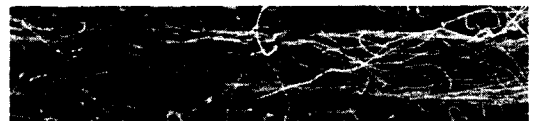


Fig. 6 SEM micrograph of a twisted spun yarn.

Fig. 6는 단섬유를 끈, *spun* 섬유를 보인 것이며 두 가닥이 꼬인 것을 알 수 있다. 꼬임 각은 22°로 측정되었고, 복합재료의 섬유 체적율은 약 50%였다.

복합재료 시편의 열전도도는 ASTM E-1225-87에 의거하여 측정되었다. 정적상태에서, 시험시편과 기준시편의 열 구배를 비교하여 열전도도를 계산하였으며 기준시편으로 스텐레스 스틸 STS 304를 사용하였다.

#### 4. 결과

Table 1은 구성 재료의 열전도도를 요약한 것이고, Table 2는 모델 예측과 시험 결과를 비교한 것이다. 길이 방향의 열전도도 예측은 실험치와 잘 일치함을 볼 수 있으나 폭 방향은 15%의 오차를 보였다. 그 이유는 Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 spun 섬유는 연속 섬유와는 달리 단섬유의 배향이 일정하지 않기 때문에 시험치와 차이를 보이는 것이라고 생각된다.

Table 1 Thermal conductivity of fiber and matrix

Material	Thermal Conductivity
Carbonized oxi-PAN spun yarn	$k_{f1} = 3.4 \text{ W/m-K}$ $k_{f2} = 0.34 \text{ W/m-K}$
Epoxy resin	$k_{m} = 0.1 \text{ W/m-K}$

Table 2 Comparison of the model prediction and test results

Thermal conductivity	Prediction	Experimental
$k_{xx} \text{ (W/m-K)}$	1.53	1.54
$k_{yy} = k_{zz} \text{ (W/m-K)}$	0.28	0.33

또한, Spun 섬유 복합재료의 열전도도에 대한 꼬임 각의 영향을 확인하기 위해 인자 연구(parametric study)를 수행하였다. Fig. 7은 그 결과를 보인 것으로 꼬임 각이 증가할 때 길이 방향의 열전도도는 감소하지만 폭 방향의 열전도도는 증가함을 알 수 있다. 그 이유는 섬유의 꼬임 각이 증가함에 따라 섬유가 폭 방향으로 배열되기 때문이다.

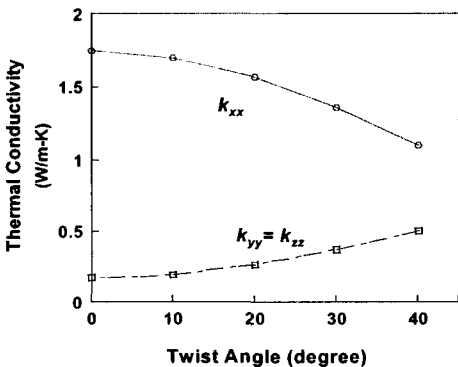


Fig. 7 Variation of thermal conductivity of spun yarn as a function of twist angle.

#### 5. 결론

(1) 끈 섬유의 섬유 가닥 하나에 대하여 단위셀을 정의함으로써 미소요소의 국부좌표계와 끈 섬유 전체 좌표계와의 좌표변환을 이용하여 미소 요소의 열전도도를 구하였다. 열-전기유사법을 적용하여 열유동 방향에 따른 미소요소가 직렬 혹은 병렬로 배열되었다고 가정함으로써 전체 끈 섬유의 열전도도를 체적 평균하여 구하였다.

(2) 열전도도 모델의 타당성을 확인하기 위하여 탄화시킨 oxi-PAN spun 섬유를 사용한 시편으로부터 열전도도를 측정하였다. 길이 방향의 열전도도 예측은 실험치와 잘 일치하였으나 폭 방향은 약 15%의 오차를 보였다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 연구 개발사업인 “차세대 소재성형 기술개발 사업” 과 국가지정연구실사업에서 수행된 연구결과임.

#### 참고문헌

- [1] Springer GS, Tsai SW. Thermal conductivities of unidirectional materials. Journal of Composite Materials 1967; 1:166-173.
- [2] Donea J. Thermal conductivities based on variational principles. Journal of Composite Materials 1972;6:262-266.
- [3] Dasgupta A, Agarwal RK. Orthotropic thermal conductivity of plain-weave fabric composites using a homogenization technique. Journal of Composite Materials 1992;26:2736-2758.
- [4] Ning QG, Chou T-W. Closed-form solutions of the in-plane effective thermal conductivities of woven-fabric composites. Composites Science and Technology 1995;95:41-48.