

論文

복합재료의 열전도 계수에 관한 연구

양 희 천*

A Study of Thermal Conductivity for the Composite Materials

Heechun Yang*

ABSTRACT

The thermal conductivity of the composite materials becomes an important factor because the required processing temperature increases and the processing time needs to be decreased. The thermal conductivity in the fiber direction is given by the rule of mixtures, since the fiber and matrix present continuous paths for heat conduction. The transverse thermal conductivity, however, has non-continuous paths and depends on the individual properties of the constituents, such as the fiber volume fraction, the fiber shape and the fiber distribution. In this paper, the fiber distribution of the composite is described using the Weibull density function and the transverse thermal conductivity is determined for the different types of prepregs. The type of prepreg does not have a significant effect on the thermal conductivity of the composite and the result can be represented by using the modified lower bound equation.

초 록

복합재료의 발달에 따라 제조 온도가 높아지고 요구 제조시간이 단축되면서, 복합재료의 열전도계수는 제조 공정을 해석하는데 중요한 요소가 되었다. 복합재료의 섬유방향 열전도계수는 강화섬유 및 수지의 연속적인 열전달 경로의 특징으로 Rule of mixtures로 예측 가능하나, 횡방향 열전도계수는 강화섬유 및 수지의 비연속적이고 임의적인 경로 구성으로 구성체 각각의 열전도계수 및 부피분율 외에 강화섬유의 배치 분포도에 의존하게 된다. 본 연구에서는 복합재료의 강화섬유 분포도를 Weibull 밀도함수를 이용하여 표현하였고, 이를 바탕으로 횡방향의 열전도계수를 프리프레그의 형태에 따라 예측하였다. 프리프레그의 형태가 횡방향 열전도계수에 주는 영향은 적었으며 modified lower bound equation을 이용하면 효과적으로 표현됨을 보여 주었다.

1. 서 론

두가지 이상의 물리적 특성이 서로 다른 재료를 거시적으로 혼합한 복합재료는 현재 그 용도가 항공, 자동차와 같은 수송수단 뿐만 아니라 스포츠

용품, 토목 구조물에 까지 광범위한 응용 분야를 보이고 있다. 이러한 응용분야의 확장에 따라 복합재료의 구성재료도 고분자, 금속, 탄소, 세라믹 까지 다양화 되고 있으며 새로운 공정 방법도 함께 대두되고 있다. 과거의 복합재료의 대부분은 열경

* 삼성데이타시스템 컨설팅사업팀

화성 수지(thermoset)를 사용한 것으로 열경화성 수지는 상온 근처, 혹은 비교적 낮은 온도에서 다루어지기 때문에 복합재료의 해석은 주로 수지의 발열 반응에 따른 열전달 현상에 많은 관심을 기울였었다. 그러나 고분자 공학의 발전으로 열경화성 수지 보다 우수한 공학적 특성을 가진 열가소성 수지(thermoplastic)가 개발 되었고, 이러한 수지들은 고성능 열가소성 수지(advanced thermoplastic)라 하며 높은 파괴인성 및 충격강도, 반 영구적인 보관성, 스크랩의 재활용 등으로 특징지어지며 열경화성 수지 보다도 월등히 높은 성형온도를 요구하고 있다. Table 1은 이러한 고성능 열가소성 수지의 온도 특성을 보여주고 있다[1].

열가소성 수지 복합재료는 성형온도가 수지의 용해 온도 부근이며 용해시의 수지 점성계수가 상당히 높기 때문에 열경화성 수지 복합재료에 비해 고온(400°C 근처) 및 고압(0.7MPa에서 2.1MPa까지)의 성형 조건을 요구하고 있다[2]. 열가소성 수지가 고온의 공정 온도에 도달하기 위해 사용되는 방법으로는 프레스 몰딩(press molding)과 같은

주변 금형의 열전달에 의존하는 방법과 레이저, 고온 가스 및 적외선 가열과 같은 직접 가열 방법 등이 있다[3~5]. 또한 이러한 성형 방법과 관련되어 요구되는 가열 요구시간도 프레스 몰딩의 경우는 1시간 정도이지만, filament winding의 경우는 수초에 지나지 않는 다양한 분포를 보이고 있다. 이러한 고온의 성형 온도 및 짧아진 가열 시간으로 말미암아 열전달과 관련된 다양한 연구가 진행되었으며, 이러한 해석의 가장 중요한 변수중의 하나가 열전도계수이다.

열전달 해석을 위해 요구되는 복합재료의 열전도계수는 대상이 되는 복합재료가 강화섬유와 수지가 미리 혼합되어 있는 프리프레그(prepreg) 형태인 경우에는 프리프레그의 공급업체가 제공하는 측정자료를 이용할 수 있으나, 측정자료가 없는 경우에는 강화섬유 및 수지의 열전도계수를 이용하여 예측해야 한다[6]. 또한 복합재료의 열전도계수는 강화섬유의 부피분율에 따라 변하기 때문에 해석과정에 부피분율의 변화가 고려되는 경우에는, 강화 섬유의 부피분율에 대한 함수의 형태가 요구된다. 열전도 계수의 계산에 가장 보편적으로 사용되는 모델은 단순한 산술평균을 이용하는 방법 및 강화섬유의 규칙적인 분포를 가정하고 단순한 형태의 셀(cell)로 부터 열전달 해석을 사용하는 방법이 주로 사용되고 있다[7~8]. 본 연구에서는 복합재료 열전도계수의 정확한 예측을 위해서 강화섬유가 불규칙한 분포로 배열되어 있는 경우에 열전도 계수를 계산할 수 있는 모델을 제안하였고, 실제로 측정된 복합재료의 열전도 계수와 비교하였다.

2. 배 경

복합재료의 열전도계수 예측에 사용되는 가장 보편적인 가정은 복합재료내에서 수지와 강화섬유가 적층(laminate) 형태로 배열된 것으로 Fig. 1과 같은 배열을 가정한 것이다. 이러한 가정에서 복합재료의 열전도계수는 수지의 열전도계수 k_m , 강화섬유의 열전도계수 k_f , 부피분율 v_f 로 부터 계산할 수 있으며 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다[9].

Table 1. Examples of advanced thermoplastics[1]

Polymer	Supplier	$T_g, ^\circ\text{C}$ ($T_m, ^\circ\text{C}$)	Processing Temp. $^\circ\text{C}$
Polyetheretherketone (PEEK)	ICI	143(343)	400
Polyarylene Ketone (APC-HTX)	ICI	205(386)	420
Polyarylene Ketone (PXM 8505)	AMOCO	265	-
Polyphenylene Sulfide (PPS, Ryton)	Phillips	90(290)	343
Polyarylene Sulfide (PAS-2)	Phillips	215	329
Polyarylamide (J-Polymer)	DuPont	120(279)	343
Polyamideimide (Torlon)	AMOCO	275	400
Polyamideimide (Uitem 1000)	G.E.	217	343
Polyimide (Aramid K-III)	DuPont	251	350
Polyimide (LaRC-TPI)	Rogers	264(325)	343
Polysulfone (Udel P-1700)	AMOCO	190	300
Polyarylethersulfone (Victrex 4100G)	ICI	230	300

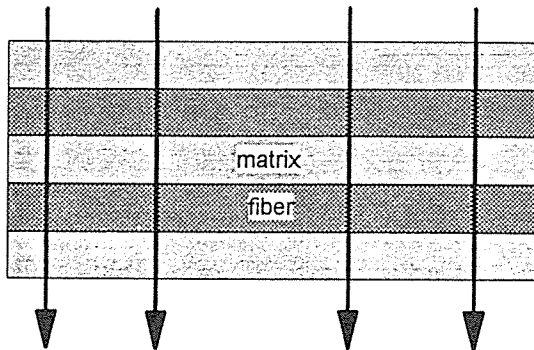


Fig. 1. Thermal paths for the lower bound equation

$$\text{Upper bound} \quad k = (1 - v_f)k_m + v_f k_f \quad \dots\dots (1)$$

복합재료의 강화섬유가 축방향으로 균일하게 배열된 경우에는 축방향 열전달 경로가 수지 및 강화섬유의 축방향으로 서로 병렬로 연결되어 있기 때문에 위와 같은 가정으로 구한 축방향 열전도계수(axial thermal conductivity)는 거의 근사한 열전도계수의 예측치를 주었고 Nysten 및 Issi는 실험을 통하여 증명하였다[10].

한편 이러한 적층 형태의 배열 가정하에서 횡방향 열전도계수(transverse thermal conductivity)를 계산하려면 강화섬유와 수지가 번갈아서 열전달경로를 이루는 형태가 되며 다음과 같은 식으로 표현이 된다[9].

$$\text{Lower bound} \quad \frac{1}{k} = \frac{1 - v_f}{k_m} + \frac{v_f}{k_f} \quad \dots\dots (2)$$

그러나 실제로 횡방향의 열전달경로는 수지와 강화섬유를 번갈아서 통과하는 Fig. 2와 같은 비정형적인 형태이므로 부피분율 외에 강화섬유의 형태 및 분포도의 영향을 받게 됨을 추측할 수 있다. 여기서 Rayleigh는 더 정사각형 형태의 방해물에서 매질의 성질 변화에 따른 해석을 하였으며 이를 이용하여 복합재료의 횡방향 열전도계수를 계산하면 다음과 같다[11].

$$\begin{aligned} \frac{k}{k_m} &= 1 - 2v_f [\beta + v_f - 0.036 \frac{v_f^4}{\beta} \\ &\quad - 0.0134 \frac{v_f^8}{\beta} \dots\dots]^{-1} \quad \dots\dots (3) \\ \beta &= \frac{k_m + k_f}{k_m - k_f} \end{aligned}$$

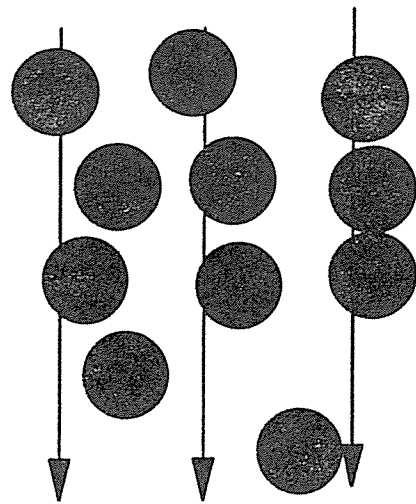


Fig. 2. Thermal paths for the real composite

한편 Springer와 Tsai는 강화섬유가 규칙적으로 분포되어 있다는 가정 하에서 열전달경로를 단위 격자로 근사화하고, 정사각형 섬유가 사각배열 방향으로 분포되어 있는 경우 다음과 같은 횡방향 열전도계수의 계산 방법을 도출하였다[8].

$$\frac{k_T}{k_m} = (1 - \sqrt{v_f}) + [\sqrt{1/v_f} + (\frac{k_m}{k_f} - 1)]^{-1} \quad \dots\dots (4)$$

또한 원통형 섬유가 사각배열 방향으로 분포되어 있는 경우에는 다음과 같이 횡방향 열전도계수를 계산하였다.

$$\begin{aligned} \frac{k_T}{k_m} &= 1 + 2\sqrt{v_f/\pi} \left[\int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sec \theta + B\sqrt{v_f/\pi}} - 1 \right] \\ B &= 2 \left[\frac{k_m}{k_f} - 1 \right] \quad \dots\dots (5) \end{aligned}$$

Fig. 3은 식(2)~(5)의 차이점을 나타내기 위하여 $k_f/k_m = 10$ 이라는 가정에서 횡방향 열전도계수를 계산한 결과이다. 식(3)과 식(4)는 강화 섬유의 형태가 사각형이라는 같은 형태의 가정이기 때문에 그 결과가 거의 일치하고 있다. 고기능 복합재료의 일반적 부피분율인 60% 부근에서는 식(2)의 결과가 식(5)의 결과보다 33% 정도 낮은 결과를 보이고 있다. 이러한 차이는 강화섬유의 열전도계수가 수지의 열전도계수 보다 크면 클수록 더욱 증가하게 된다.

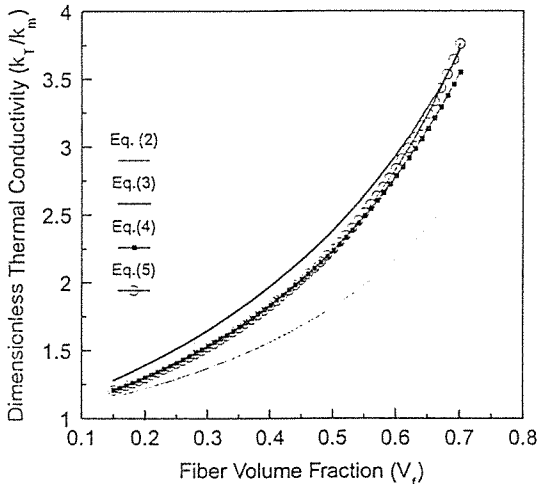


Fig. 3. Dimensionless thermal conductivity(k_r/k_m) with thermal conductivity ratio(k_r/k_m)=10

열경화성수지 복합재료에서는 수지의 열화(thermal degradation) 방지를 위하여 반응 도중의 최고 온도를 예측하고 이를 효과적으로 통제하기 위하여, 그리고 열가소성 복합재료에서는 높은 성형 온도로 인한 정확한 온도 분포의 예측을 위하여 복합재료의 열전달 분석이 활발히 되고 있다. 이에 따른 정확한 열전도 계수 입력이 필요하기 때문에, 연구의 대부분은 물성치에 대한 많은 측정이 이루어진 복합재료에 대해서만 수행되었다[12~13]. 결국 복합재료 자체의 열전도계수에 관한 측정 자료가 없거나, 부피분율의 변화에 따른 열전도계수 값이 필요한 경우에는 강화섬유 및 수지의 열전도계수 값과 위에 열거한 공식중 하나를 선택하여 계산한 값으로 해석을 해야 한다[14]. 단순한 적층 형태의 강화섬유 배치를 가정한 식(2)의 사용이나, 강화섬유 형태의 균등한 분포 형태를 가정한 식(3), (4), (5)의 사용은 실제 복합재료의 횡방향 열전도 계수와는 차이가 있기 마련이다. 특히 강화 섬유가 균등한 분포 상태의 가정하에서 모든 강화섬유에 대하여 사각형이나 육각형의 일정한 셀을 지정한 모델은 부피분율이 증가하면서 사각형 또는 육각형 셀 형태의 가정에 수정을 요구하게 된다. 한편 복합재료의 횡방향 열전도계수는 강화섬유 배열에 영향을 받기 때문에 복합재료의 제조 방법에 따른 강화섬유의 배열조건 변화가 복합재료의 열전도계수에

영향을 미친다고 예상할 수 있다.

그리고 복합재료의 제작을 위해 사용이 급증하는 프리프레그를 이용하여 열가소성 수지 복합재료를 제작하는 경우에는 수지의 높은 점도 계수로 인하여 복합재료 제작 후에 강화 섬유가 매우 불규칙한 분포를 보이고 있다[15]. 이러한 강화 섬유의 불규칙한 분포는 재료의 압축강도, 충격강도, 파괴 인성에 많은 영향을 미치고 있다[16]. 또한 이러한 강화 섬유의 분포는 복합재료의 성형조건에 중요한 영향을 미치는 수지의 투과성 계수(permeability) 및 강화 섬유의 탄성 특성(elastic modulus)에도 많은 영향이 있다[17]. 본 연구에서는 열가소성 수지 프리프레그를 사용하여 복합재료를 제작하였을 때, 적용된 프리프레그의 종류에 따른 강화 섬유의 불규칙한 분포도를 고찰하였고, 이러한 강화 섬유의 불규칙한 분포도가 복합재료의 열전도계수에 미치는 영향을 중점적으로 고찰하여 실제에 가까운 복합재료의 열전도계수 예측을 시도 하였다.

3. 이론 및 결과

본 연구에서는 고성능 열가소성 수지로서 파괴 인성이 우수하고 손상에 대한 저항성이 뛰어난 PEEK(Poly-ether-ether-ketone)을 수지로 사용하고 graphite carbon fiber를 강화섬유로 사용한 복합재료의 열전도 계수를 예측하였다.

강화섬유의 배치상태를 얻기 위하여 3가지 형태의 프리프레그(tape prepreg, powder coated towpreg, commingled towpreg)를 사용하여 제작하였으며, 그 사양이 Table 2에 있다.

제작된 시편의 강화섬유 분포도와 부피분율을

Table 2. Various prepreps for the PEEK and AS-4 graphite fiber

	Tape prepreg	Powder Coated Towpreg	Commingled Tow Towpreg
제 조 회사	I. C. I	CCMI	BASF
밀 도	150 g/m ²	0.44 g/m	0.8 g/m
공정 압력	1.0MPa	1.4MPa	1.4MPa
공정 온도	390℃	390℃	415℃
함 침 형태	Full impregnation	Seimi-impregnation	No Impregnation

구하기 위하여 수치영상분석(Digital Image Analysis) 방법이 사용되었으며 자세한 방법은 참고문헌에 있다[15]. Fig.4.5.6은 사용된 3가지의 프리프레그 형태에 따른 시편의 단면을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 비슷한 부피분율을 가지고 같은 종류의 강화섬유(AS-4) 및 수지(PEEK)로 이루어진 복합재료임에도 불구하고, 서로가 다른 강화 섬유의 분포도를 보여주고 있다. 이러한 강화 섬유의 분

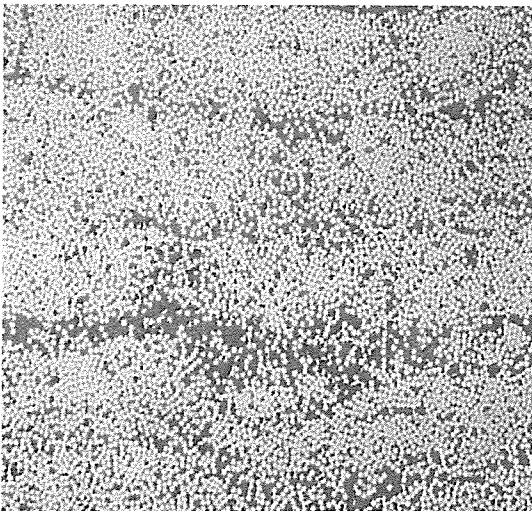


Fig.4. Micrograph of the composite made from tape prepreg



Fig.5. Micrograph of the composite made from commingled towpreg



Fig.6. Micrograph of the composite made from powder coated towpreg

포도를 정량화하기 위하여 Voronoi 셀 개념을 이용하였다[18]. 하나의 강화섬유에 대하여 Voronoi 셀은 다른 강화 섬유의 무게 중심 보다도 해당되는 강화 섬유의 무게중심에 거리가 가까운 지역을 의미한다. 이러한 셀에 대하여 강화 섬유의 무게중심으로 부터 경계지역까지의 거리는 선택된 방향에 따라 다르며 강화섬유의 반지름 보다는 항상 크다. 이러한 거리는 강화 섬유간 거리의 반을 의미하며 셀간의 형태가 심하게 변화되지 않으면 Fig.7과 같이 근사화 할 수 있다. 이러한 단면으로 부터 각각의 강화섬유에 대하여 무게중심을 구하고, Voronoi셀과 같은 면적을 갖는 정사각형 셀로 근사화 한 후에 정사각형의 길이를 Voronoi 거리 L_p 로 표현할 수 있다. 각 셀의 Voronoi 거리에 대한 분포도를 히스토그램 형태로 나타낸 전형적인 결과가 Fig.8이다. 결과의 수치적 표시를 위해 비대칭형 랜덤 분포를 잘 표현하는 Weibull 분포함수를 도입하여 자료의 회귀 분석(Regression Analysis)을 수행하였으며 그 함수의 형태는 다음과 같다[19].

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\beta}{\delta} \left(\frac{x-\gamma}{\delta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\delta}\right)^{\beta}\right] & x \geq \gamma \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 γ 는 location 변수($-\infty < \gamma < +\infty$), δ 는 scale 변수($\delta > 0$), β 는 shape 변수($\beta > 0$)이며 x 는 Vo-

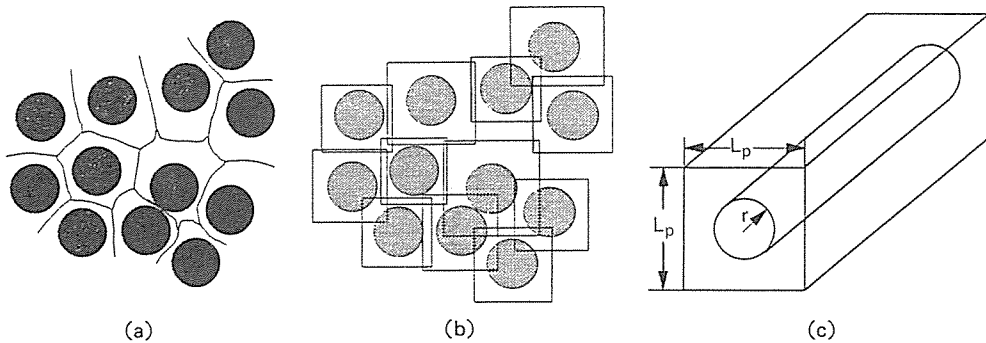


Fig. 7. (a) Voronoi cells for the irregularly distributed fiber (b) Approximated Voronoi cells as the nearest square (c) Geometry of the Voronoi unit cell

ronoi 거리이다. 각 프리프레그에 대하여 다섯 경우의 서로 부피분율이 다른 시편을 제작하였으며 각 시편에서는 5개의 영상 처리를 하여 그 평균값을 계산하였고, 그 결과를 Table 3에 수록하였다. 위와 같은 분포도를 이용한 복합재료의 물성치 예측을 위하여 Davy와 Guild는 통계적 자료를 바탕으로 하는 이론을 제시하고 인장강도 및 탄성 계수 예측에 적용하였는데, 본 연구에서도 이 이론을 적용하여 횡방향 열전도계수의 예측을 시도하였다[18]. Fig. 8과 같은 Voronoi 거리의 분포도로부터 횡방향 열전도계수 k_T 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{1}{k_T} = \frac{1}{k_{Tp}} + d\left(\frac{1}{k_T}\right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

Table 3. Parameters of the Weibull density function for the 3types of preregs
(a) APC-2 tape prepeg

v_f	0.4660	0.4725	0.5254	0.5377	0.5840
β	1.14420	1.09265	1.08849	0.96448	1.13509
δ	5.59821	4.45677	4.29971	4.62440	4.04178
γ	4.89510	4.77678	4.74205	4.76759	4.76349

(b) CCMI powder coated towpreg

v_f	0.6167	0.6365	0.7068	0.7400	0.7523
β	1.14864	0.97572	0.95498	1.04580	0.92655
δ	4.13605	3.82372	3.43662	3.07351	2.67946
γ	4.53247	4.78734	4.63587	4.63336	4.63324

(c) BASF commingled towpreg

v_f	0.4272	0.4383	0.4465	0.5214	0.6177
β	1.07492	1.14993	1.17336	1.14987	0.92232
δ	6.04497	5.84058	5.82883	4.90325	3.98763
γ	4.98752	4.81763	4.77577	4.61044	4.63164

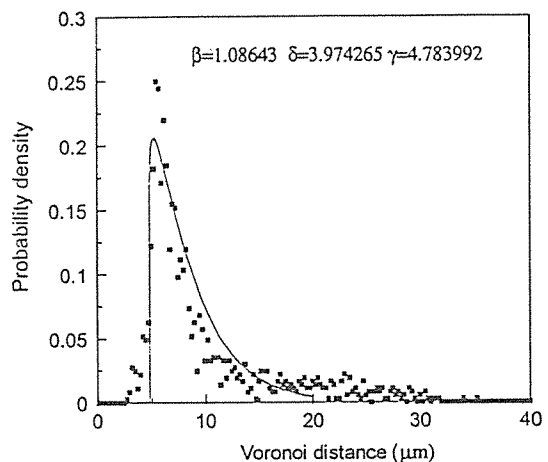


Fig. 8. Histogram of the Voronoi distance and data regression by the Weibull distribution

여기서 k_{Tp} 는 규칙적인 섬유분포를 가질 경우의 종방향 열전도계수이며, $d(1/k_T)$ 는 분산도(dispersion factor)라고 하며 다음과 같다.

$$d\left(\frac{1}{k_T}\right) = \frac{1}{2} \left(\frac{L_p^2}{r_f^2}\right) \left[\frac{L^2(1/k_T)}{r_f^2}\right]^{''} CV^2 \left(\frac{L^2}{r_f^2}\right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

여기서 r_f 는 강화섬유의 반지름, L_p 는 규칙적인 섬유분포를 가질 경우의 Voronoi 거리, k_T 와 L 은 각 격자별로의 열전도계수 및 Voronoi 거리이다. CV^2 는 분산계수(squared coefficient of variation)로서 분산도를 평균치의 제곱으로 나눈 값이다. 규칙적인 섬유분포를 가질 경우의 열전도계수는 식(5)로부터 계산되어지며, 상첨자 ''는 L^2/r_f^2 의 2차 도함수를 표시한다. PEEK/AS-4의 횡방향 열전도계수를 계

산하기 위하여 Table 3의 Weibull 밀도 함수 회귀 분석 자료를 사용하였으며 PEEK의 열전도계수는 $0.251\text{W/m}^\circ\text{C}$ 이고, AS-4 Graphite fiber의 횡방향 열전도계수는 $3.198\text{W/m}^\circ\text{C}$ 를 취하였다[20~21]. Fig.9는 식(2)의 적용 결과 및 Table 3과 식(8)의 불규칙적인 분포의 적용 결과, 그리고 식(8)과 Poisson 분포를 이용한 랜덤 분포의 결과를 보여 주고 있다. 프리프레그의 종류에 따른 강화 섬유 불규칙 분포는 현저한 차이를 보였지만, 횡방향 열전도계수의 영향은 매우 미미하였다. 특히 Commingled 프리프레그의 경우는 식(2)의 적용 결과에 거의 근접하는데, 이는 강화 섬유의 심한 불규칙적인 분포로 인하여 열전달 경로가 강화섬유가 매우 밀접한 지역 및 수지로 이루어진 층을 번갈아 통과하는 적층 구조와 유사하게 되기 때문이다. 그러나 APC-2 프리프레그를 사용하여 제작한 복합재료와 같이 강화 섬유의 분포가 어느정도 규칙적인 경우에는 복합재료의 열전도계수는 증가함을 볼 수 있다. 또한 이러한 증가 정도는 부피분율이 증가함에 따라 현저한데, 이유는 부피분율이 증가하면서 강화섬유의 불규칙적인 분포도가 점차적으로 규칙적으로 되며, 최종적으로 최대 부피분율이 되는 경우에는 완벽한 규칙적인 강화섬유 분포를 갖기 때문이다. 위와 같은 PEEK/AS-4의 열전도계수의 예측 결과를 식(2)를 변형한 이른바 Mo-

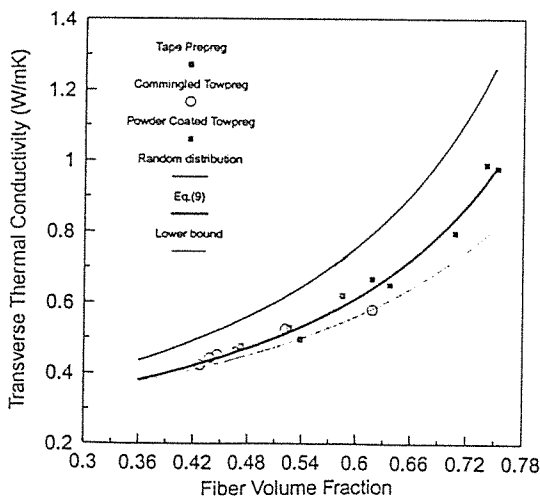


Fig.9. Transverse thermal conductivity vs. fiber volume fraction for PEEK and AS-4 composite

Table 4. Transverse thermal conductivity of PEEK and AS-4 composite and measurement of APC-2(unit: $\text{W/m}^\circ\text{C}$)

v_f	Eq. (9)	Random Distribution	Eq. (2)	Measurement of APC2
0.55	0.5441	0.6619	0.5090	
0.56	0.5566	0.6791	0.5186	
0.57	0.5697	0.6970	0.5287	
0.58	0.5834	0.7157	0.5392	
0.59	0.5977	0.7354	0.5501	
0.60	0.6128	0.7560	0.5614	0.590 at 25°C

dified Lower Bound Equation을 이용하여 회귀분석한 결과로서 다음과 같은 식을 얻을 수 있었다 [19].

$$\frac{1}{k_T} = \left(\frac{1-v_f}{k_m}\right)^{1.0310} + \left(\frac{v_f}{k_f}\right)^{2.5403} \dots\dots\dots (9)$$

한편 Blundell은 laser flash apparatus를 이용하여 APC-2 테이프 프리프레그의 횡방향 열전도계수를 측정하였다[6]. APC-2의 부피분율은 공급자 자료에서는 60%이었으나, 실제 측정치는 56%~58% 사이를 보였다. Table 4는 PEEK/AS-4 복합재료의 횡방향 열전도계수를 여러가지 모델로 부터 계산한 결과와 Blundell의 APC-2의 측정 결과를 비교하여 보여주고 있다. APC-2의 측정결과와 식(9)를 이용한 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 만약 복합재료의 열전도 계수에 대한 측정 결과가 없거나, 부피분율에 따른 횡방향 열전도계수 예측 모델이 필요한 경우에는 강화섬유의 횡방향 열전도계수 및 수지의 열전도계수 그리고 식(9)를 이용하면, 개략적인 열전도계수 예측에 적당한 식이라 생각된다.

4. 결 론

복합재료의 횡방향 열전도 계수는 각종 복합재료 가열 및 냉각 공정 과정의 수치해석에 중요한 변수이고, 강화섬유의 부피분율에 따라서 변화하기 때문에 정확한 예측을 가능하게 하는 모델이 요구되고 있다. 본 연구에서는 실제로 강화 섬유의 분포도를 고려한 열전도 계수의 계산 방법을 제시하기 위하여, PEEK/AS-4 열가소성 수지 복합재료의 단면을 수치영상방법을 사용하여 분석하였다. 그 결과로서 복합재료의 강화섬유 분포도를 Voronoi 거리

및 Weibull 분포 함수를 이용하여 표시하였다. 위의 얻어진 결과로부터 분산도를 이용한 통계적인 접근방법을 이용하여 횡방향 열전도계수를 계산하였다. 이러한 결과는 Modified Lower Bound Equation을 이용하면 효과적으로 표시되었고, APC-2의 횡방향 열전도계수 측정 결과와 비교하였다.

참 고 문 헌

1. Johnston, N.J. and Hergenrother, P.M., "High Performance Thermoplastics: A Review of Neat Resin and Composite Properties," The 32nd International SAMPE Symposium, pp. 1400-1412, 1987.
2. Cattanach, J.B. and Cogswell, F.N., "Processing with Aromatic Polymer Composites," Developments in Reinforced Plastics, Vol. 5, pp. 1-37, 1986.
3. Colton, J., Muzzy, J., Birger, S., Yang, H. and Norpoth, L., "Processing Parameters for Consolidating PEEK/Carbon Fiber (APC-2)," Composites, ANTEC91, pp. 2013-2017, 1991.
4. Carpenter, C.E., "On-line Consolidation Mechanism for Thermoplastic Composites," M. S., thesis, Georgia Institute of Technology, 1992.
5. Beyeler, E., Phillips, W. and Güceri, S.I., "Experimental Investigation of Laser-Assisted Thermoplastic Tape Consolidation," Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 1, pp. 107-121, 1988.
6. Blundell, D.J. and Willmouth, F.M., "Crystalline Morphology of the Matrix of PEEK-Carbon Fiber Aromatic Polymer Composites," SAMPE Quarterly, Vol. 17, pp. 50-57, 1986.
7. Progelhof, R.C., Throne, J.L. and Ruetsch, R.R., "Methods for Predicting the Thermal Conductivity of Composite System: a Review," Polymer Engineering and Science, Vol. 16, pp. 615-625, 1976.
8. Springer, G.S. and Tsai, S.W., "Thermal Conductivities of Unidirectional Materials," Journal of Composite Materials, Vol. 1, pp. 166-173, 1967.
9. Carslaw, H.S. and Jaeger, J.G., *Conduction of Heat transfer in Solids*, Oxford University Press, 1973.
10. Nysten, B. and Issi, J.P., "Composites based on Thermally Hyperconductive Carbon Fibres," Composites, Vol. 21, pp. 339-343, 1990.
11. Rayleigh, L., "On the Influence of Obstacles Arranged in Rectangular Order upon the Properties of a Medium," Philosophical Magazine LVI, pp. 481-487, 1892.
12. Gilmore, S.D. and Güceri, S.I., "Solidification in Anisotropic Thermoplastic Composites," Polymer Composites, Vol. 11, pp. 406-416, 1990.
13. Grove, S.M., "Thermal Modelling of Tape Laying with Continuous Carbon Fiber-reinforced Thermoplastics," Composites, pp. 367-375, 1988.
14. Lee, W.I. and Springer, G.S., "A Model of the Manufacturing Process of Thermoplastic Matrix Composites," Journal of Composite Materials, Vol. 21, pp. 1017-1054, 1987.
15. Yang, H. and Colton, J., "Quantitative Image Analysis of the Composite Materials," Polymer Composites, Vol. 15, pp. 46-54, 1994.
16. Jones, R.M., *Mechanics of Composite Materials*, Hemisphere Publishing Corp., New York, 1975.
17. Yang, H. and Colton, J., "Microstructure-based Processing Parameters of Thermoplastic Composite Materials," ASME 93, Vol. 46, pp. 609-631, 1993.
18. Davy, P.J. and Guild, F.J., "The Distribution of Interparticle Distance and its Application in Finite-element Modelling of Composite Materials," Proceedings of Royal Society London A, Vol. 418, pp. 95-106, 1988.
19. Hines, W.W. and Montgomery, D.C., *Probability and Statistics in Engineering and Management Science*, John Wiley and Sons, New York, 1990.
20. Product Data from ICI Americas, Inc.
21. Product Data from Hercules, Inc.