

## 탄소섬유강화 복합재의 열전도율 평가에 관한 연구

송준희\*· 최창호\*· 임재규†  
(2001년 8월 31일 접수, 2002년 1월 2일 심사완료)

### A Study on Evaluation of Thermal Conductivity for Carbon-Fiber-Reinforced-Plastics

Jun-Hee Song, Chang-Ho Choi and Jae-Kyoo Lim

**Key Words:** Thermal Conductivity(열전도율), CFRP Laminates(탄소섬유강화 적층재), Mean-Field Model(평균장 모델), Composite(복합재료)

#### Abstract

Carbon-fiber which has very small radial dimension makes us difficult to measure its properties. So in this paper, we suggest a simple method to measure the thermal conductivity of a carbon-fiber's and carbon-fiber-reinforced-plastics(CFRP) laminates. The thermal conductivity of CFRP laminates was measured experimentally at the same time analytically. The experimental model is based on the one-dimensional analysis of fin sample because CFRP laminates has a thin geometric configuration. The analytical model to measure the thermal conductivity of carbon-fiber is expressed by use of mean-field model which is based on Eshelby's elliptical inclusion problem. Therefore the thermal conductivity of angle-ply laminates can be computed by use of effective longitudinal and transverse thermal conductivities of unidirectional composite of the constituents.

#### 1. 서 론

CFRP 적층재는 철강에 비하여 경량이지만 강도와 인성이 높기 때문에 구조용 재료로 개발되어 왔다. 탄소재료는 고유의 우수한 전기·열전도율, 기계가공성, 내마모성 및 내식성 등의 특징으로 다른 구조용 재료가 보유하지 못한 특징을 지니고 있다.<sup>(1~3)</sup> 탄소섬유가 구조용 재료로 사용될 때 열적 성질에 있어서 몇가지 장점을 보유하고 있다. 그 하나는 플라스틱재에 비해 내열성이 풍부하므로 CFRP 적층판에 열이 부과되었을 때 탄소섬유가 적당한 비율로 열부하를 부담하므로

열변형 온도를 대폭 상승시킬 수 있다. 또 하나는 탄소섬유가 일반적으로 플라스틱재에 비하여 높은 열전도율을 가지기 때문에 CFRP 적층판은 플라스틱 단일재보다 높은 열전도율을 가진다. 이 때문에 재료 내에서 열확산이 비교적 용이하므로 동일한 조건에서 온도상승을 억제할 수 있다. 이것은 실질적으로 내열성의 향상을 의미한다.<sup>(4)</sup> 또한 열전도의 관점에서 살펴보면, CFRP 적층판은 길이 방향에 대하여 고열전도율의 탄소섬유를 이용함으로써 고분자재료의 전열특성을 향상시키는 재료로 간주할 수 있다. 이처럼 고분자계 복합재료를 고온환경에서 이용할 경우의 구조설계에서 구조재료만이 아니라 기능재료의 관점에서 탄소섬유의 체적률 및 배향각을 고려하여야 할 필요가 있다.<sup>(5)</sup>

CFRP 적층판은 주로 항공우주산업과 항공기의 중요 부품으로 사용되는 점유율이 점점 증가하고 있다. 우주 항공기의 구조가 예를 들어 오일, 연료, 수분, 산(acids) 및 증식로켓케이스의 고온기

\* 전북대학교 부설 공학연구원 공업기술연구소

† 책임저자, 회원, 전북대학교 기계공학부, 자동차신기술연구소

E-mail : jklim@moak.chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-2321 FAX : (063)270-2460

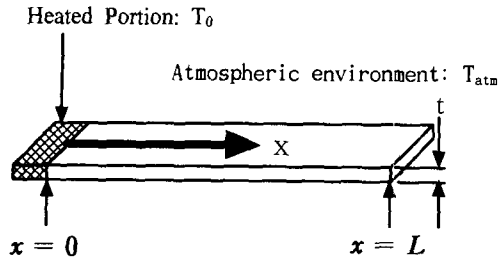


Fig. 1 Principle of thermal conductivity measurement

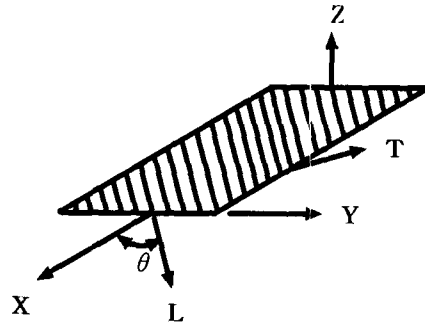


Fig. 2 Schematic diagram of coordinate system

체 및 온도에 관련된 부분에 노출되어 있기 때문에 탄소/에폭시 복합재료의 특수한 내부식성과 고열전도율이 그러한 상태에서 큰 가치를 발휘하게 된다. 또한 우주의 열악한 환경에서 사용될 경우 즉 태양광선의 영향이 미치는 부분과 그렇지 못한 부분의 온도차가 200℃정도에 달하므로 열전도성이 낮은 재료를 사용할 경우 열변형이 용이하여진다. 그러나 열전도율이 높은 탄소섬유를 강화재로 사용할 경우 고온부위의 열을 저온으로 용이하게 전도함으로써 재료의 열변형온도를 크게 높일 수 있어 구조재로 사용이 가능하다. 이에 대한 신뢰성 있는 자료가 희박하므로 탄소섬유의 열전도율 및 탄소섬유의 열전도율 측정방법에 대한 중요성이 증대하고 있다. 그러나 탄소섬유는 섬유라는 1차원적인 형상과 극히 작은 반경의 제약으로 그 물성값을 측정하기 곤란하다. 특히 탄소섬유의 길이방향의 물성치는 직접적으로 결정하기 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 CFRP 적층판의 열전도율을 결정하기 위하여 핀의 일차원 열전도문제를 응용하였으며, 탄소섬유의 열전도율을 결정하기 위하여 Eshelby<sup>(6)</sup>의 등가개재물법에 기초한 평균장 모델을 이용하였다.

## 2. 해석방법

### 2.1 열전도율 측정 원리

Fig. 1과 같이 시험편의 끝이 일정온도  $T_0$ 로 가열되는 직사각형 평판을 고려한다. 가열부의 열은 평판의 길이방향으로 전열됨과 동시에 표면에서 온도  $T_{atm}$ 의 분위기 기체로 전열되고 있다. 평판의 경우 얇고 가는 형상이므로 단면내의 온도분포는 무시하고 평판표면에 대한 길이방향의 정상온도상태에서의 온도분포만을 고려하면 된다. 자유단이 단열된 경우, 이 문제는 핀의 1차원

열전도식으로 기술된다.

$$\frac{T - T_{atm}}{T_0 - T_{atm}} = \frac{\cosh m(L - x)}{\cosh mL} \quad (1)$$

$$m = \sqrt{\frac{2(w + t)h}{wt\lambda}} \quad (2)$$

$\lambda$ 와  $h$ 는 각각 시험편의 열전도율과 열전달계수이며,  $w$ 와  $t$ 는 시험편의 폭과 두께이다. 따라서 정상온도상태에서 측정된 온도분포로부터  $m$ 의 값을 결정하고 별도로 적당한 열전달계수  $h$ 를 결정할 수 있으면 식 (1) 및 식 (2)를 이용하여 대상으로 하는 시험편의 열전도율을 간단히 계산할 수 있다.

### 2.2 CFRP적층판의 열전도율 측정 원리

스칼라량인 온도  $T$ 의 구배로 정의되는 벡터량  $H_i$  (field intensity)와 열유속  $q_i$  (heat flux)는 Fourier 법칙에 의해 다음처럼 선형관계가 있다.

$$H_i = -\frac{\partial \phi}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$q_i = \lambda_{ij} H_j \quad (4)$$

$x_i$ 와  $\lambda_{ij}$ 는 각각 직각좌표계의 길이방향과 이방성재료의 대칭열전도율을 나타낸다. 탄소섬유의 열전도율을 공간좌표에서 표현할 경우 9개의 요소를 필요로 하며, 이들 요소는 적층판의 주축에 고정한 Global 좌표계  $X = (X, Y, Z)$ (판의 두께방향을  $Z$ 축, 길이방향을  $X$ 축)와 Lamina의 주축에 고정한 Local 좌표계  $x = (L, T, Z)$ 로 표현할 수 있으며, 이는 Fig. 2와 같다. 먼저 탄소섬유의 열전도율을 축 대칭성을 고려하고 텐서의 축약법에 의하여 표현하면 다음과 같다.

$$\lambda_{ij}(X, Y, Z) = \begin{bmatrix} \lambda_L^{UD} \\ \lambda_T^{UD} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T_\theta = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\cos\theta\sin\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\cos\theta\sin\theta \\ -\cos\theta\sin\theta & \cos\theta\sin\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix}$$

따라서 시험편의 길이방향 및 직각방향의 열전도율은 다음 식으로 표현된다.

$$\lambda_X = \sum_i f_i (\lambda_L^{UD} \cos^2\theta_i + \lambda_T^{UD} \sin^2\theta_i) \quad (6)$$

$$\lambda_Y = \sum_i f_i (\lambda_L^{UD} \sin^2\theta_i + \lambda_T^{UD} \cos^2\theta_i) \quad (7)$$

$f_i$ 는  $i$ 번째 층의 두께분율이다.

### 2.3 탄소섬유의 열전도율 측정 원리

탄소섬유의 열전도율에 대한 계산식은 Eshelby의 탄성체 개재물 문제를 기반으로 평균장 근사 모델을 적용하여 유도된다. 여기에서 평균장 근사란 복합재료 내의 미시적인 열유량이 입자의 주위로부터 거리의 함수이므로 이를 정량적으로 계산하는 것이 곤란하다. 따라서 각 구성상의 열유량을 체적 평균하여 열유량을 계산하는 것을 말한다.<sup>(6-9)</sup>

일방향재의 섬유 길이방향 및 섬유 반경방향의 열전도율은 각각 구성하는 섬유와 모재의 열전도율 및 체적률을 이용하여 기술할 수 있다. 등방성체인 모재의 열전도율  $\lambda^m$ , 탄소섬유의 길이방향 및 반경방향의 열전도율  $\lambda_L^f$  및  $\lambda_T^f$ 를 이용하면 다음 식으로 표현된다.

$$\lambda_X^{UD} = (1 - V_f)\lambda^m + V_f\lambda_L^f \quad (8)$$

$$\lambda_Y^{UD} = \lambda^m \frac{(1 - V_f)\lambda^m + (1 + V_f)\lambda_T^f}{(1 + V_f)\lambda^m + (1 - V_f)\lambda_T^f} \quad (9)$$

## 3. 시험편 및 시험방법

### 3.1 시험재료 및 시험편

본 연구에서 사용한 시험편은 日本石油(株) 中央技術研究所에서 우주선 판재용으로 제작한 Carbon/Epoxy 적층판이다. 적층판에 대한 열전달 계수의 실험값을 결정하기 위하여 수지재료는 Poly-Carbonate(PC) 및 Poly-Methyl-Methacrylate

(PMMA) 그리고 금속재료는 동, 알루미늄 및 철을 준비하였다. CFRP 적층판의 열전도율 계산시 요구되는 물성값은 Table 1에 나타내었으며, 시험편의 크기는 열전도율을 고려하여 적층판의 길이 방향이 섬유의 길이방향과 평행인 경우 250mm×20mm×2mm, 섬유의 길이방향에 수직인 경우 140mm×20mm×2mm로 하였다. 간편화를 위하여 YS-95A-30S/25P재는 NO1, YS-90A-30S/25P재는 NO2, YS-90A-30S/25P의 직교적층판은 NO3, SF(4HS)-YS90A200/25P의 직물적층판의 경우 NO4 및 YSH-70A-60S/25P재는 NO5로 표기하며, UD-0°는 L, UD-90°는 T로 표기한다.

### 3.2 실험장치 및 실험방법

정상온도분포를 측정하기 위한 실험장치는 적외선 도입 가열장치(眞空理工株式會社), 차광판, 열화상 시스템(AVIO TVS-2000/TV-2002) 및

Table 1 List of the lay-up and volume fraction for the specimens

Specimen	Lay-up	Volume Fraction(%)
NO1-L	16	56.0
NO1-T	16	56.0
NO2-L	16	55.3
NO2-T	16	55.3
NO3	16	53.4
NO4	12	53.1
NO5-L	15	52.8
NO5-T	15	52.8

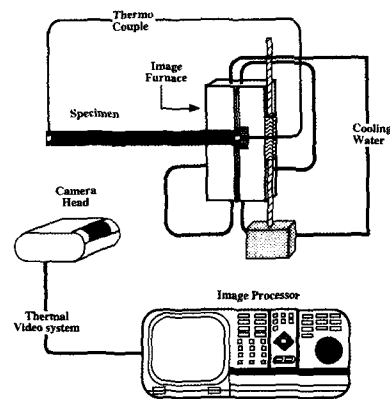


Fig. 3 Schematic of apparatus for measuring temperature distribution on the specimen

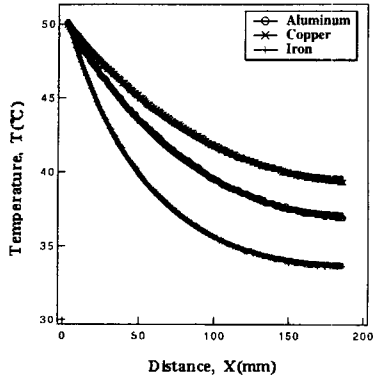


Fig. 4 Temperature distribution and fitting curve of metals at the steady state

열전대로 구성되었다. 차광판은 적외선 도입 가열장치의 적외선 램프로부터 발생한 빛이 시험편의 비가열부에 도달하는 것을 차단하며, 온도의 영향을 최소화하기 위하여 냉각수를 이용하였다. 또한 시험편의 국부 가열을 위하여 램프의 초점이 형성되는 부분에 3mm의 슬릿을 넣었다. 시험편은 차광판의 과열 및 과냉에 의한 영향을 최소화하기 위하여 차광면에 6mm지점에 위치시켰다. 이에 대한 전체의 구성도는 Fig. 3에 나타내었다.

실험은 정적 실온환경에서 수행되었다. 시험편의 끝 10mm 부분은 고정부 및 가열부로 사용되었으며, 가열부는 약 50°C를 유지하게 하였다. 시험편이 가열에 의하여 정상온도분포상태에 도달하였을 때 길이방향에 대한 온도분포가 열화상시스템에 의하여 측정된다. 측정된 표면 온도분포는 curve fitting을 행하여 m의 값을 구한다.

#### 4. 실험결과

##### 4.1 열전달계수의 결정

열전달계수는 분위기 기체의 흐름상태 및 벽면의 표면상태 등에 의존하는 실험값이다. 따라서 본 연구에서는 모든 시험편의 표면에 광택이 없는 흑색도료를 도포하여 표면상태가 시험편의 종류에 의존하지 않게 하였으며, 정적 실험환경에서 온도분포를 측정하여 분위기 온도가 변화하지 않도록 열전달계수를 결정하였다.

CFRP 적층판의 길이방향이 섬유 방향

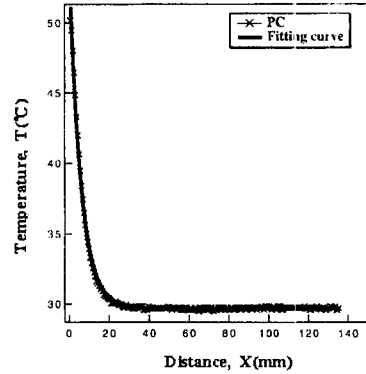


Fig. 5 Temperature distribution and fitting curve of plastic at the steady state

Table 2 Results of m-value and h-value for metals and plastics

Specimen	Cu	Al	Fe	PC	PMMA
m (m <sup>-1</sup> )	8.28	10.82	18.9	173.52	181.06
h (W·m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )	12.96	13.27	13.3	4.48	6.07

과 일치하는 경우 높은 열전도율을 보이므로 금속 시험편의 열전달계수를 이용하였으며, 섬유의 길이 방향에 수직인 경우 극히 낮은 열전도율을 보이므로 수지 시험편의 열전달계수를 이용하였다. 금속의 열전도율은 각각 구리 397 W/m·K, 알루미늄 238 W/m·K 및 철 78.2 W/m·K을 이용하였으며,<sup>(10)</sup> 수지의 열전도율은 각각 PC 0.19 W/m·K 및 PMMA 0.21 W/m·K을 이용하였다.<sup>(11)</sup> 정상온도상태에서 측정한 금속시험편의 표면온도와 curve fitting의 결과는 Fig. 4에 나타내며, 수지 시험편의 표면온도와 curve fitting의 결과는 Fig. 5에 나타낸다. 이 때 curve fitting에 의하여 계산된 m값과 금속과 수지의 열전도율을 식 (1) 및 식 (2)에 적용하여 열전달계수를 설정할 수 있으며, 이 값들은 Table 2에 나타낸다.

시험편의 표면온도는 열전도에 따라 변화하므로, 본 연구에서는 열전도율이 양호한 CFRP적층판의 열전달계수는 금속의 평균 열전달계수인 13 W·m<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>을 이용하고, 열전도율이 낮은 CFRP 적층판의 열전달계수는 수지의 평균 열전달계수인 5 W·m<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>을 이용한다.

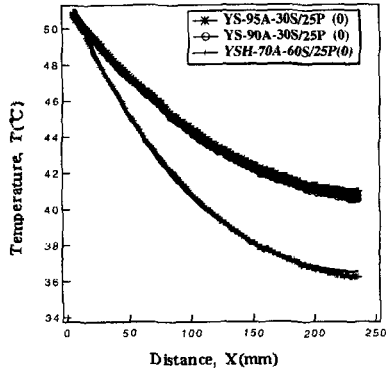


Fig. 6 Temperature distribution and fitting curve in lengthwise direction at the steady state

Table 3 Result of  $\lambda$  -value in lengthwise direction

Specimen	NO1-L	NO2-L	NO5-L
$m (m^{-1})$	6.46	6.75	8.65
$\lambda (W \cdot m^{-1}K^{-1})$	342.67	313.85	191.12

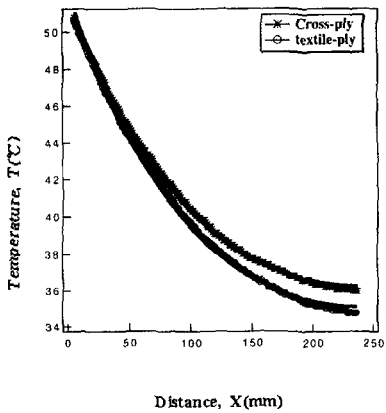


Fig. 7 Temperature distribution and fitting curve of the cross-ply and the textile-ply specimen at the steady state

Table 4 Result of  $\lambda$  -value for the cross-ply and textile-ply sepcimen

Specimen	N03	N04
$m (m^{-1})$	9.36	9.43
$\lambda (W \cdot m^{-1}K^{-1})$	163.22	160.81

Table 5 Comparison between theoretical and experimental thermal conductivity of the cross-ply and textile-ply specimen

Specimen	N03	N04
Theoretical Result	157.32	157.32
Experimental Result	163.22	160.81

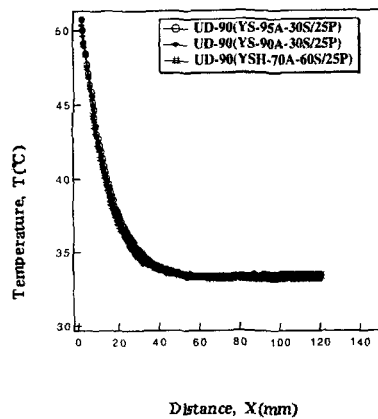


Fig. 8 Temperature distribution and fitting curve of specimens in lengthwise direction at the steady state

Table 6 Result of  $\lambda$  -value for specimens in lengthwise direction

Specimen	NO1-T	NO2-T	NO5-T
$m (m^{-1})$	82.41	83.32	86.64
$\lambda (W \cdot m^{-1}K^{-1})$	0.81	0.79	0.73

4.2 CFRP적층판의 열전도율

Fig. 6은 CFRP 적층판의 길이방향과 탄소섬유의 길이방향이 일치하는 경우의 시험편의 정상 온도분포 측정 결과 및 curve fitting 결과를 보여 주고 있다. NO1 시험편이 NO2 시험편에 비하여 다소 높은 표면온도를 보이므로 온도와 열전도의 상관관계, 즉 시험편의 일정 위치에서 열전도가 양호한 시험편의 경우 더 온도가 높음을 고려하면, NO1 시험편의 열전도율이 다소 높음을 예측할 수 있으며, 이를 Table 3에 나타낸다.

**Table 7** Longitudinal thermal conductivity of the carbon fiber

Specimen	N01-L	N02-L	N05-L
$\lambda (W \cdot m^{-1}K^{-1})$	611.72	567.34	361.75

**Table 8** Transverse thermal conductivity of the carbon fiber

Specimen	N01-T	N02-T	N05-T
$\lambda (W \cdot m^{-1}K^{-1})$	11.42	10.98	9.13

Fig. 7은 직교 적층판인 N03와 직물 적층판 N04의 정상 온도분포 측정 결과 및 curve fitting 결과를 보여주고 있다. 직물 적층판은 직교 적층판의 다소 변형된 형태이므로 두 시험편의 열전도율을 거의 비슷한 결과를 예측할 수 있으며, 그 결과는 Table 4에 나타난다. 또한 직교적층판과 직물적층판은 실험에 의하지 않고 식 (6) 및 식 (7)을 이용함으로써 예측할 수 있으며, 그 결과는 Table 5에 나타난 것처럼 실험값과 거의 동일한 값을 보인다.

Fig. 8은 CFRP 적층판의 길이방향과 탄소섬유의 길이방향이 수직인 경우의 정상 온도분포 측정 결과 및 curve fitting 결과를 보여주고 있으며, 그 결과는 Table 6에 나타난다.

**4.3 탄소섬유의 열전도율**

일방향 적층판 및 모재의 열전도율과 탄소섬유의 체적율을 식 (8) 및 식 (9)에 적용함으로써 탄소섬유의 열전도율을 계산할 수 있으며, 이때 모재인 Epoxy의 열전도율은  $0.244 W/m \cdot K$  값을 이용하였다. 탄소섬유의 길이방향에 대한 열전도율은 Table 7에 나타난다. 또한 탄소섬유의 반경방향에 대한 열전도율은 Table 8에 나타난다.

탄소섬유는 Turbostratic graphite라는 결정자의 집합체로 구성되어 있으며, 이 결정자는 graphite 결정자의 다소 변형된 형태로 원자층면의 적층에 대하여서는 graphite와 같은 주기성이 없고 평균거리가 조금 크다. Graphite의 원자층면에 수직인 방향의 열전도율은  $6 W/m \cdot K$ 이므로,<sup>(12)</sup> 탄소섬유의 반경방향 열전도율은 이 값보다 다소 크다고 예측되는 양호한 결과가 얻어졌다.

**5. 결론**

본 연구에서는 CFRP 적층판의 열전도율 및 복합재료를 구성하고 있는 탄소섬유의 열전도율을 평가하였다. 이 평가 원리는 핀의 1차원 열전도 문제를 응용한 것으로 시험편의 한쪽 끝을 일정 온도로 가열하여 표면이 정상온도분포에 도달하였을 때 이를 열화상 시스템으로 측정된 후 curve fitting함으로써 적층판의 길이방향 및 직각방향에 대한 열전도율, 탄소섬유의 길이방향 및 반경방향의 열전도율을 계산하였다.

- (1) CFRP 적층판의 열전도율을 핀의 1차원 열전도 문제를 응용하여 계산할 수 있었다.

Specimen	N01-L	N02-L	N05-L
$m (m^{-1})$	6.46	6.75	8.65
$\lambda (W \cdot m^{-1}K^{-1})$	342.67	313.85	191.12

Specimen	N01-T	N02-T	N05-T
$m (m^{-1})$	82.41	83.32	86.64
$\lambda (W \cdot m^{-1}K^{-1})$	0.81	0.79	0.73

- (2) 일방향 재료의 길이방향 및 직각방향 열전도율에서 강화재인 탄소섬유의 열전도율을 계산할 수 있었다. 또한 탄소섬유는 열전도에 대하여 이방성임을 알 수 있었다.

Specimen	N01-L	N02-L	N05-L
$\lambda (W \cdot m^{-1}K^{-1})$	611.72	567.34	361.75

Specimen	N01-T	N02-T	N05-T
$\lambda (W \cdot m^{-1}K^{-1})$	11.42	10.98	9.13

- (3) 직교 적층판 및 직물 적층판의 경우, 실험에 의하지 않고 계산에 의하여 열전도율을 정밀도가 높게 측정할 수 있었다.

Specimen	N03	N04
Theoretical Result	157.32	157.32
Experimental Result	163.22	160.81

**참고문헌**

- (1) 강기원, 김정규, 2000, "에너지 해방률을 이용

- 한 CFRP 적층복합재료의 층간분리 평가," 대한 기계학회논문집(A), 제24권, 제8호, pp. 2115~2122.
- (2) 강기원, 김정규, 2000, "충격손상을 가진 CFRP 적층복합재료의 피로수명예측모델," 대한 기계학회논문집(A), 제24권, 제11호, pp. 2828~2835.
- (3) 김영남, 최효석, 차천석, 임광희, 정종안, 양인영, 2000, "CFRP 박육부재의 적층조건이 충격압 특성에 미치는 영향," 대한기계학회논문집(A), 제24권, 제12호, pp. 2945~2951.
- (4) 伊藤 哲也, 1991, "纖維強化プラスチック積層板の熱變形舉動及び伝熱特性の異方性に關する研究," 東京工業大學 博士論文.
- (5) 齋藤彬夫, 岡田昌志, 一宮浩市, 1985, 伝熱工學, 産業圖書, 25.
- (6) Eshelby, J.D., 1957, "The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal inclusion and Related Problems," *Proceedings of the Royal Society of London*, A241, pp. 376~396.
- (7) 若島健司, 1992, 熱物性, 日本熱物性學會.
- (8) Wakashima, K. and Tsukamoto H., 1991, "Mean-field Micro Mechanics Model and Its Application to the Analysis of Thermomechanical Behavior of Composite Material," *Materials Science and Engineering*, A146.
- (9) Wakashima, K. and Tsukamoto, H., 1992, "A Unified Micromechanical Approach toward Thermomechanical Tailoring of Metal Matrix Composite," *ISIJ International*, Vol. 32.
- (10) 日本機械學會編, 1986, 熱計測技術, 朝倉書店.
- (11) 日本國立天文臺編, 1990, 理科年表, 枳上版.
- (12) Brandup, J. and Immergut, E. H., 1989, *Polymer handbook*, Wiley, N. Y..