

## 역열전도 기법을 이용한 복합재료의 열물성치의 산정

정법성\* · 김선경\*\* · 김희준\*\*\* · 이우일†  
 (2000년 10월 12일 접수, 2001년 2월 28일 심사완료)

### Inverse Estimation of Thermal Properties for APC-2 Composite

Bup Sung Jung, Sun Kyoung Kim, Hee June Kim and Woo Il Lee

**Key Words :** Inverse Heat Conduction Problem(역열전도 문제), Thermophysical Property(열적 물성치), Parameter Estimation(매개변수 산정법), Sensitivity Analysis(감도 해석), APC-2

#### Abstract

The objective of this work is to estimate the temperature dependent thermal properties of the APC-2 composite using an inverse parameter estimation technique. The present inverse method features the estimation of the thermal conductivity and the volumetric heat capacity, which are dependent on the temperature inside the composite. Furthermore, the thermal conductivity is directionally dependent because of the anisotropy of the composite. An on-line temperature measurement system with a suitable method of heating is built. A composite slab is fabricated using thermoplastic prepreg for the investigation. The corresponding computer code for evaluating the thermal properties inversely using the temperature readings transmitted from the measurement system is developed. The parameterized form is used for the rapid and stable estimation. The modified Newton's method is adopted for the solution technique of the inverse analysis. The estimated results are compared with the measured data from a previous study for the verification.

#### 기호설명

$C$ : 체적 열용량	$q''$ : 단위 길이 당 열유속
$d_j$ : 탐색 방향	$T$ : 온도
$f_i$ : 매개변수	$Y_k$ : 계산된 온도
$\Delta f_i$ : 매개변수 변분	$\alpha$ : 열 확산도
$\mathbf{f}$ : 매개변수 벡터	$\beta$ : 스텝 크기
$J$ : 온도 잉여(residual) 함수	$\varepsilon$ : 충분히 작은 수
$k$ : 열전도도	$\eta$ : 구속 조건 인자
$N$ : 센서의 총 개수	$\sigma$ : 표준 편차
$N_C$ : 체적 열용량에 관한 매개변수의 총 개수	
$N_k$ : 열전도도에 관한 매개변수의 총 개수	

#### 첨자

$i$ : 매개변수 지수
$j$ : 매개변수 지수
$k$ : 센서 지수
$m$ : 매개변수 지수
$n$ : 매개변수 지수
$x$ : 강화 섬유 방향

\* 서울대학교 대학원 기계공학부  
 \*\* 회원, 서울대학교 대학원  
 \*\*\* Univ. of Delaware Center for Composite Materials  
 † 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부  
 E-mail : wilee@snu.ac.kr  
 TEL : (02)880-7116 FAX : (02)886-0631

$y$  : 강화 섬유 방향

## 1. 서론

최근 몇 년간 역열전도 기법은 여러 분야에서 널리 이용되고 있다. 역열전도 문제는 표면의 경계 조건을 찾아내는 문제,<sup>(1,2)</sup> 경계의 일부가 알려지지 않은 물체의 형상을 찾아내는 문제,<sup>(8)</sup> 그리고 물체 내의 몇몇 점에서 측정된 온도 분포를 통해 물체의 열적 물성치를 찾아내는 문제로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 역열전도 기법을 이용하여 열가소성 복합재료의 열적 물성치를 구하는 문제에 대한 해석을 행하였다. 재료의 열적 물성치에 대한 정보는 열전달 문제의 해석에서 매우 중요하며 역열전도 기법을 적용하면 재료의 열적 물성치를 용이하게 알아낼 수 있다. 역열전도 기법은 다음 두 가지 면에서 다른 방법에 비해 우월하다. 첫째로, 온도 범위에 큰 제약을 받지 않는다. 오직 온도 센서의 측정 범위에만 제한을 받게된다. 둘째로 측정을 위해 따로 시편을 준비할 필요 없이 작동하는 물체에 직접 적용할 수 있다.

고체의 열적 물성치를 구하는 역열전도 기법에 대해 많은 연구가 이루어져 있다. 여러 기법 중에서 감도해석법(sensitivity method)<sup>(1)</sup>과 연계문제법(adjoint method)<sup>(2)</sup>은 매개변수(parameter)를 이용한 역열전도 해석에 실용적이다. Beck 과 Blackwell 은 순차방법을 효율적으로 이용한 매개변수 산정법(parameter estimation)<sup>(3)</sup>을 제시하였다. Alifanof<sup>(2)</sup>는 연계 문제법을 이용하여 1 차원 매개변수 산정 문제를 엄밀하게 정식화하였다. Flach 와 Özişik 은 공간적으로 변화하는 체적 열용량과 열전도계수를 동시에 구하는 방법을 제시하였다.<sup>(4)</sup> Sawaf 등은 온도에 따라 선형적으로 변화하는 직교 이방성 매질의 열적 물성치를 구하였다.<sup>(5)</sup> Huang 과 Yan<sup>(6)</sup>은 시간과 공간에 따라 변화하는 열용량에 대한 해석을 하였다. Dowding 등<sup>(7)</sup>은 순차 매개변수 산정법(sequential parameter estimation)을 사용하여 탄소-탄소 복합재료의 섬유 방향에 따라 다른 열적 물성치를 구하였다.

본 연구에서는 PEEK (polyetheretherketone)<sup>(11)</sup>와 탄소 섬유로 이루어진 APC-2 (ICI Fiberite®, Inc) 복합재료의 열전도도와 체적 열용량을 역열전도 기법을 사용하여 산정하고자 한다. 물성치를 산정하는 역문제에서 함수 산정법(function estimation)뿐 아니라 매개변수 산정법도 적용될 수 있다. 또한 산정하고자 하는 변수에 대한 사전 정보가 있다면 이는 변수 산정시 유리하게 이용할 수 있다. 본 연구에서는 온도에 따라 변화하는 체적 열용량을 다

음과 같은 식으로 나타내고자 한다.

$$C(T) = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 \quad (1)$$

이러한 가정을 사용하면 역열전도 문제는 체적 열용량에 대해서 3 개의 미지수를 찾는 문제가 된다. 본 연구에서는 복합재료 내의 온도에 따라 변화하는 체적 열용량과 열전도도를 동시에 산정하였다. 더욱이 열전도도는 복합재료의 이방성에 의하여 방향성이 있으므로, 섬유방향과 섬유에 수직인 방향의 열전도도가 서로 다른 값을 갖는다. 열전도도는 다음과 같은 선형함수로 표현할 수 있다.

$$k_x(T) = k_{x_0} + k_{x_1} T \quad (2a)$$

$$k_y(T) = k_{y_0} + k_{y_1} T \quad (2b)$$

따라서 체적 열용량(식 (1))과 열전도도(식 (2))를 산정하기 위하여는 총 7 개의 매개변수를 알아야 한다. 역열전도 문제를 풀기위해서 먼저 감도계수를 계산해야 하는데, 감도계수는 구하고자 하는 미지의 변수에 대한 온도의 일차 도함수로 정의된다. 감도계수가 구해지면 측정된 온도를 이용하여 매개변수들을 구할 수 있게 된다. 따라서 적절한 가열 방법을 갖춘 실시간 온도 측정 장치가 요구된다. 본 연구에서는 온도 측정 장치로 읽은 온도 데이터를 이용하여 역열전도 기법으로 열적 물성치를 구하는 컴퓨터 코드를 개발하였다. 개발된 프로그램으로 계산된 결과를 Grove<sup>(12)</sup>의 측정 결과와 비교함으로써 검증해 보았다.

## 2. 실험 장치

온도 측정을 위한 실험 장치의 개략도를 Fig.1 에 보였다. 실험 장치는 전기 가열 장치, 복합재료 시편, 온도 측정 센서로 구성되어 있다. 가열은 50 $\mu$ m 두께의 스테인리스 박막의 전기 저항에 의한 발열을 통해 이루어졌다. 박막이 매우 얇기 때문에 가열 박막의 열용량은 무시할 수 있다. 박막의 양 끝은 전극을 통해 연결되어 있으며 높은 전류를 공급할 수 있는 전력 조절 장치를 통해 전극에 전력을 공급한다. 복합재료 표면의 온도를 가열 과정 중 계속해서 측정하기 위해 총 일곱 개의 K-type 열전대(지름 76.2 mm; 최고 오차 2.2°C 또는 0.4%; OMEGA®)를 복합재료 표면에 부착 하였다. 온도 측정 센서의 위치는 Table 1 에 주어져 있다. 열전대에 의해 검출된 온도는 신호 증폭기를 통과하여 컴퓨터 내장형의 A/D 변환기(IBM 호환 PC 에 내장된 PCL-812PG, Advantech®)에 의해 기록된다. 신호 증폭기(5B47, Analog Device®)는 열전대에 의해 검출되는 0° C ~ 1000° C 까지의 온도를 0 ~

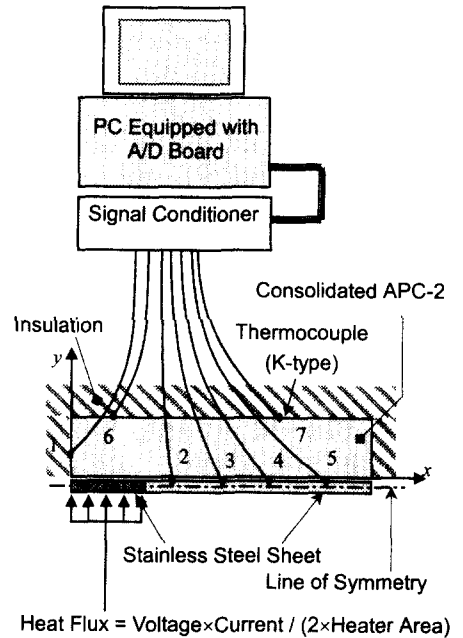
**Table 1** Location of sensors

Sensor Number	Location	
	x (m) Fiber direction	y (m) Transverse direction
1	0.000	0.040
2	0.040	0.000
3	0.055	0.000
4	0.065	0.000
5	0.085	0.000
6	0.015	1.000
7	0.075	1.000

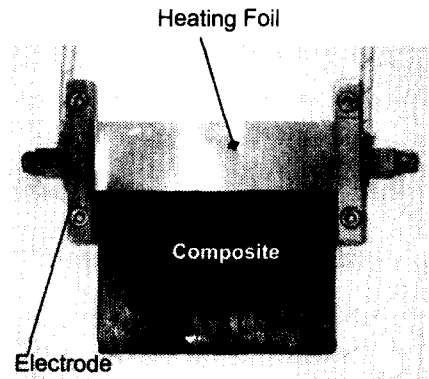
4095 에 해당하는 디지털 값으로 선형화 하는 역할을 한다. 실험을 위하여 APC-2 로 직교 이방성의 복합재료 판재를 만들었다. 복합재료 시편은 세라믹 섬유판(두께 0.025m, 열전도도 0.059W/m°C, KAOWOOL<sup>®</sup>)을 사용하여 단열 되었는데, 단열은 다음의 두 가지 점에서 중요하다. 첫째로, 단열 되지 못했을 경우 벽면에서의 경계 조건을 결정하기가 매우 어렵다. 둘째로, 단열을 함으로써 열전대에 의해 검출된 온도를 재료의 표면 온도로 받아들일 수 있다.

실험에 사용된 직교 이방성의 복합재료 판재는 APC-2 프리프레그(prepreg)를 압축 성형 공정을 통해 제작 하였다. 압축 성형 공정은 가열 프레스를 통해 금형에 가열과 가압을 동시에 하는 공정이다.<sup>(13)</sup> 공정 중에 생기는 섬유 파괴분율의 변화는 무시할 수 있다고 가정 하였다. 제작된 복합재료 판재의 크기는 0.1m×0.1m×0.01m 이고 형상은 Fig. 2 와 같다. 실험시에는 대칭 조건을 위해 두 개의 판을 포개어 놓은 상태에서 실험하였는데, 두 판 사이에는 크기 0.03m × 0.1m 의 스테인리스 박막과 크기 0.07m × 0.1m 의 박막이 0.5mm 떨어져 놓여 있다. 이중 0.03m × 0.1m 의 박막에만 전류를 흘려 주어 복합재료의 일부분만을 가열하였다. 이렇게 일부분만을 가열하면 2 차원적인 온도 분포를 갖게 되므로 섬유의 횡방향 뿐만 아니라 섬유방향의 열전도도도 구할 수 있다.

온도 측정은 15800 W/m<sup>2</sup> 의 일정 열유속을 가한 상태에서 각 센서에서 1 초마다 온도 데이터를 검출하면서 100 초 동안 이루어졌다. 열유속의 크기는 단열재와 가열박막, 전극 등에서의 에너지 손실은 없다는 가정 하에 가열 박막에 가해진 전력의 절반으로 계산하였다. Fig. 3 은 가열 과정 중에 측정된 온도이다. 초기 온도는 28.1°C 이다. 측정된 온도의 표준 편차  $\sigma$  는 가열하지 않은 상태에서



**Fig. 1** Experimental setup



**Fig. 2** Picture of the composite and the heating foil

주변 온도를 측정하여 구하였다. Fig. 4 는 표준 편차가  $\sigma = 0.3^\circ\text{C}$  임을 보여주고 있다. 측정된 온도와 표준 편차를 사용하여 매개변수 산정법을 이용한 역해석을 수행하였다.

### 3. 역해석

본 역열전도 문제의 해석 대상은 Fig. 1 의 하단에 보인 것과 같은 사각 복합재 영역이다. APC-2 적층 공정에서 정상 상태 열전도 문제는 Kim 등이 유한 요소법을 이용하여 계산한 바 있다.<sup>(14)</sup> 먼저 가열하는 동안 시간에 따라 변화하는 복합재료 내

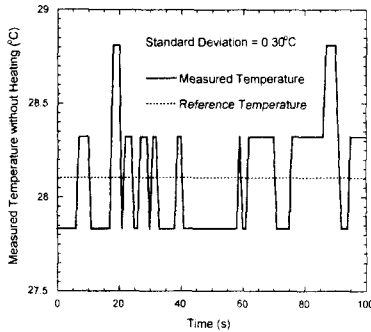


Fig. 3 The measured temperature at sensor 1 without heating

의 온도 분포를 구하는 방법을 정식화 하고자 한다. 지배 방정식과 초기 조건, 경계 조건은 다음과 같다.

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3a)$$

$$T(x, y, 0) = T_i \quad (3b)$$

초기온도  $T_i$  는 28.1°C 이다.

$$\frac{\partial T}{\partial n} = q'' \text{, 가열 지역} \quad (3c)$$

일정 열유속  $q''$  는 15800W/m<sup>2</sup> 이다.

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{, 비가열 지역} \quad (3d)$$

역열전도 문제는 최적화 문제로 볼 수 있는데, 목적함수는 계산된 온도와 측정된 온도 차의 제곱의 합으로 주어진다.

$$J = \sum_{k=1}^{N_s \times N_t} [T_k(t) - Y_k]^2 \quad (4)$$

여기서  $N_s$  는 센서의 개수이고  $N_t$  는 하나의 센서에서 시간에 따라 측정된 온도의 수이다. 또한  $T_k$  와  $Y_k$  는 각각  $k$  번째 계산된 온도와 측정된 온도이다. 역열전도 문제에 관련된 미지수는 식 (1) 과 식 (2) 의 7 개의 매개변수들이다. 이를 벡터로 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{f} \equiv \{f_1, f_2, \dots, f_7\} \\ = \{k_{x0}, k_{y1}, k_{x0}, k_{y1}, C_0, C_1, C_2\} \quad (5)$$

만약 측정된 온도의 오차가 일정하다고 가정하면 계산된 온도와 측정된 온도 차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_k - Y_k \cong \sigma \quad (6)$$

$\sigma$  는 측정된 온도의 표준 편차이다. 그러므로  $J$  의 최적화 목표는 다음과 같이 설정할 수 있다.<sup>(1)</sup>

$$J \leq \sigma^2 N_s N_t \quad (7)$$

위와 같이 최적화된 값을 안전하고 효과적으로 얻

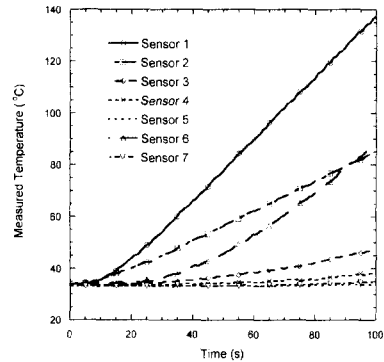


Fig. 4 The measured temperatures

기 위해 황금 분할 탐색법을 이용한 뉴턴방법을 사용하였다.<sup>(10)</sup> 뉴턴방법을 수행하기 위해서는 미지의 매개변수에 대한  $J$  의 도함수들이 필요하다. 즉, 구배 벡터와 Hessian 행렬을 구해야 한다.

구배 벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial J}{\partial f_i} \equiv \sum_{k=1}^{N_s \times N_t} 2[T_k - Y_k] \frac{\partial T_k}{\partial f_i} \quad (8)$$

감도계수<sup>(1)</sup>로 알려져 있는 도함수  $\frac{\partial T_k}{\partial f_i}$  는 다음과

같이 중앙 차분 근사법을 통해 구할 수 있다.

$$\frac{\partial T_k}{\partial f_i} = \frac{T_k^{i+} - T_k^{i-}}{2\Delta f_i} \quad (9)$$

여기서  $T_k^{i+}$  와  $T_k^{i-}$  는 다음과 같다.

$$T_k^{i+} = T_k(f_1, \dots, f_i + \Delta f_i, \dots, f_s) \quad (10)$$

$$T_k^{i-} = T_k(f_1, \dots, f_i - \Delta f_i, \dots, f_s) \quad (11)$$

$\Delta f_i$  는 원래 값에 충분히 작은 수  $\epsilon$  를 곱하여 결정한다. 즉,  $\Delta f_i = \epsilon f_i$  이다. 그러나 반복 계산 과정 중에 매개변수의 값이 매우 작은 경우에는 대신 다음과 같은 값을 사용한다.

$$\Delta f_2 = 10^{-3} \Delta f_1, \quad \Delta f_4 = 10^{-3} \Delta f_3, \quad \Delta f_6 = 10^{-3} \Delta f_5, \\ \Delta f_7 = 10^{-6} \Delta f_5 \quad (12)$$

Hessian 행렬은  $\frac{\partial^2 T_k}{\partial f_i \partial f_j}$  를 무시하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 J}{\partial f_i \partial f_j} = \sum_k \frac{\partial T_k}{\partial f_i} \frac{\partial T_k}{\partial f_j} \quad (13)$$

그리고 통계적 해석을 이용하면 산정된 변수의 표준 편차를 계산할 수 있는데, 다음 식을 이용하여 계산한다.<sup>(5)</sup>

$$\sigma_{f_i} = \sigma \sqrt{\left[ \left( \frac{\partial^2 J}{\partial f_m \partial f_n} \right)^{-1} \right]_{ii}} \quad (14)$$

여기서  $\sigma_i$  는 산정된 변수  $f_i$  의 표준 편차이다. 이를 이용하여 산정된 값의 신뢰도를 결정할 수 있다.

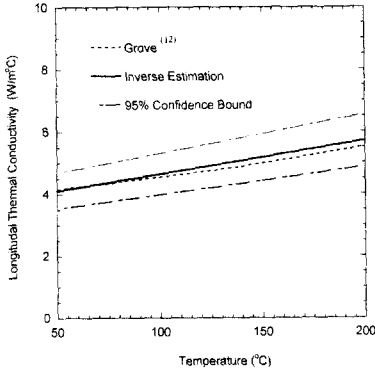


Fig. 5 The longitudinal thermal conductivity estimation

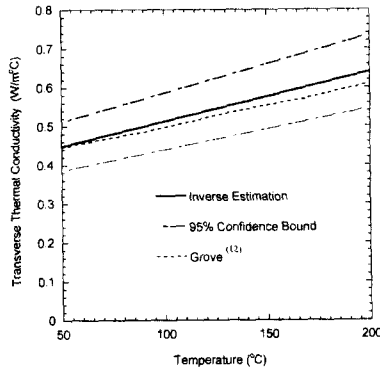


Fig. 6 The transverse thermal conductivity estimation

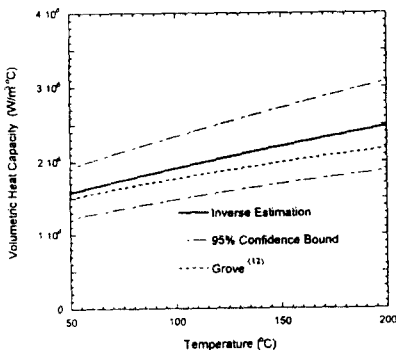


Fig. 7 The volumetric heat capacity estimation

#### 4. 해석 기법

역해석시 수치 해법의 수렴 안정성을 높이기 위해서는 적절한 초기값을 선정하는 것이 유리하다. 초기값을 적절하게 선정하면 반복 계산 횟수를 줄일 수 있다. 특히 체적 열용량에 대한 초기값이 잘못 선정되었을 경우 수렴성이 매우 나빠지게 된다. 다행히도,  $C_0$  에 대해 알맞은 초기값은 에너지 보존 법칙에 의해 구할 수 있다. 먼저 열용량이 일정하다고 가정한다 다음, 측정된 온도를 이용하여 체적 열용량의 값을 구한 후 그 값을 초기값으로 선정한다.<sup>(6)</sup> 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$C_0 \approx 0.3Lq^*t_f \left[ \int_0^{t_f} \sum_{l=1}^N \dot{Y}_l(t) A_l dt \right]^{-1} \quad (15)$$

여기서  $\dot{Y}_l(t)$  는 단위 시간동안  $l$  번째 센서에서 측정된 온도 변화이고,  $A_l$  는  $l$  번째 센서에 의해 측정된 온도가 대표 온도가 되는 구간의 면적이다.

원하는 변수 산정을 위해 안정적일 뿐 아니라 계산 측면에서 효과적인 최적화 방법이 필요하다. 본 연구에서는 스텝 크기를 조정하여 수렴을 보장할 수 있는 수정된 뉴턴방법을 이용하였는데, 이때 스텝 크기는 황금 분할 탐색에 의해 구해진다.<sup>(10)</sup> 뉴턴방법에 의한 탐색 방향은 다음과 같이 주어진다.

$$d_j = - \left[ \frac{\partial^2 J}{\partial f_i \partial f_j} \right]^{-1} \left[ \frac{\partial J}{\partial f_i} \right] \quad (16)$$

황금 분할 탐색은  $J(f_i + \beta d_i)$  를 최소화 하는 알맞은 스텝 크기  $\beta$  를 찾는 방법이다. 스텝 크기를 찾을 수 없거나 매우 작을 경우 탐색 방향은 다음과 같이 다시 설정된다.

$$d_j = - \left[ \frac{\partial J}{\partial f_i} \right] \quad (17)$$

그런 다음 매개변수들은 다음 식에 의해 갱신된다.

$$f_i^{new} = f_i + \beta d_i \quad (18)$$

$f_i^{new}$  는 갱신된 매개변수를 나타낸다.

열전도도와 체적 열용량은 항상 양수값을 가진다. 따라서 계산 과정 중에 열적 물성치가 음의 값을 갖게 되면 예기치 못한 불안정성을 초래할 수 있으므로 다음과 같은 구속 조건들을 적용하기로 한다.

$$C_0 + C_1 Y_{max} + C_2 Y_{max}^2 > \eta C_0 \quad (19a)$$

$$k_{x0} + k_{x1} Y_{max} > \eta k_{x0} \quad (19b)$$

$$k_{y,0} + k_{y,1} Y_{\max} > \eta k_{y,0} \quad (19c)$$

여기서  $\eta$ 는 0.1로 하였다.

요약하면, 역열전도 기법을 사용하여 매개변수를 산정하기 위해 다음과 같은 과정을 수행해야 한다 :

- (1) 식 (15)에 의해 초기값을 선정하거나 식 (18)를 사용하여 변수를 갱신한다.
- (2) 직접 열전도 문제를 풀어서 온도장을 갱신한다. (식 (3))
- (3) 식 (7)이 만족되면 반복 계산을 중단하고 해를 얻는다.
- (4) 식 (8)-(13)을 사용하여 도함수를 계산한다.
- (5) 식 (16)-(17)에 의해 탐색 방향과 스텝 크기를 결정한다.
- (6) (2)의 단계로 돌아간다.

열전도도의 초기값의 크기가 실제값의 크기와 심하게 다르게 선정된 경우 수렴이 어려워질 수 있는데, 이때는 다음과 같은 단계를 거친다. 첫째 단계는  $k_{x,0}, k_{y,0}, C_0$  (상수)만을 미지수로 가정하여 계산하는 것이다. 다음 단계는 앞의 단계에서 구한 결과를 초기치로 설정하고, 모든 매개변수에 대해 계산하는 것이다. 이러한 방법은 특히 수렴이 잘 되지 않는 경우에 안전하고 효율적이다.

## 5. 결 과

앞서 설명한 과정을 따라 매개변수 산정법을 이용한 역해석을 APC-2 에 대해 행하였다. 섬유 방향의 열전도도와 섬유에 수직인 방향의 열전도도 및 체적 열용량은 다음과 같다.

$$k_x = 2.569 + 0.011T, \quad k_y = 0.3841 + 0.00128T$$

$$\rho C_p = 1.1995 \times 10^6 + 7811.75T - 7.2T^2$$

산정된 결과를 보면 섬유 방향의 열전도도가 수직 방향의 열전도도보다 약 10 배가량 큰 것을 알 수 있다. 열전도도와 체적 열용량을 살펴보면 열전도도가 체적 열용량보다 실제값에 더 근사한 것을 볼 수 있는데 이는 체적 열용량이 측정 오차에 더 민감하다는 것을 알 수 있다. 제안된 방법의 적절함을 입증하기 위해 제시한 방법으로 산정한 APC-2 의 물성치를 Grove<sup>(12)</sup>의 측정 결과와 비교하여 보았다. 이때 계산 시간은 Intel® Pentium®II CPU 를 탑재한 퍼스널 컴퓨터에서 몇 백초 정도이다. Fig. 5 와 Fig. 6 은 각각 강화 섬유방향과 섬유의 횡방향의 열전도도를 보여주는 그래프이고 Fig. 7 은 체적 열용량을 보여주는 그래프이다. 계산된 결과는 Grove<sup>(12)</sup>의 측정값과 잘 일치하는 것을 볼

수 있다. 또한 계산된 결과가 통계적 허용 범위 안에 있음을 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 APC-2 복합재료의 열적 물성치를 역열전도 기법을 사용하여 산정하는 방법을 소개하였다. 적절한 실험 장치를 통해 가열중인 복합재의 온도를 측정 하였고 측정된 온도를 이용하여 역해석을 수행하였다. 또한 최적화 방법으로 황금 분할 탐색법을 이용한 뉴튼방법을 채택하여 역해석을 수행하였다. 계산된 결과를 이전의 실험 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업과 교육부 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Beck, J. V., Blackwell, B., and St. Clair, C. R., Jr., 1985, *Inverse Heat Conduction*, Wiley.
- (2) Alifanov, O. M., 1994, *Inverse Heat Transfer Problem*, Springer-Verlag.
- (3) Minkowycz, W. J., Sparrow, E. M., Schneider, G. E., and Pletcher, R. H., Ch.19, 1988, *Handbook of Numerical Heat Transfer*, John Wiley & Sons, New York.
- (4) Flach, G. P. and Özişik, M. N., 1989, "Inverse Heat Conduction Problem of Simultaneously Estimating Spatially Varying Thermal Conductivity and Heat Capacity Per Unit Volume," *Num. Heat Transfer, Part A*, vol. 16, pp. 249~266.
- (5) Sawaf, B., Özişik, M. N., and Jarny, Y., 1995, "An Inverse Analysis to Estimate Linearly Temperature Dependent Thermal Conductivity Components and Heat Capacity of an Orthotropic Medium," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 16, pp. 3005~3010.
- (6) Huang C. H. and Yan, J. Y., 1996, "An Inverse Problem in Predicting Temperature Dependent Heat Capacity Per Unit Volume without Internal Measurement," *Int. J. Numerical Method in Engineering*, Vol. 39, pp. 605~618.
- (7) Dowling, K. J., Beck, J. V., and Blackwell, B., 1996, "Estimation of Directional-Dependent Thermal Properties in a Carbon-Carbon Composite," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 3157~3164.
- (8) Hsieh, C. K., and Kassab, A. J., 1986, "A General Method for the Solution of Inverse Heat Conduction Problems with Partially Unknown Geometries," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, No.1, pp. 47~58.
- (9) Kays, W. M. and Crawford, M. E., 1993, *Convective heat and mass transfer*, 3<sup>rd</sup> Ed., McGraw-Hill.

- (10) Reklaitis, G. V., Ravindran, A., and Ragsdell, K. M., 1983, *Engineering Optimization*, Wiley.
- (11) ICI Thermoplastic Composites, 1991, *Thermoplastic Composites Materials Handbook*.
- (12) Grove, S. M., 1988, "Thermal Modelling of Tape Laying with Continuous Carbon Fibre-Reinforced Thermoplastic," *J. Comp. Mat.* Vol.19, pp. 367~375.
- (13) Mallick, P. K., Newman, S.(Eds), 1990, *Composite Materials Technology*, Oxford Univ. Press.
- (14) Kim, H. J., Kim, S. K., Lee, W. I., 1996, "A Study on Heat Transfer During Thermoplastic Composite Tape Lay-up Process," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 13, pp. 408~418.