

## 論文

## 필라멘트 와인딩 플라이휠의 스마트 경화에 관한 연구

이도훈\*, 김선경\*\*\*, 김동진\*\*, 이우일\*\*\*, 하성규\*\*\*\*

## A Study on Smart Cure of Filament Wound Composite Flywheel

Doh Hoon Lee\*, Sun Kyung Kim\*\*\*, Dong Jin Kim\*\*, Woo Il Lee\*\*\*, and Sung Kyu Ha\*\*\*\*

## ABSTRACT

A cure process control model was proposed to optimize the curing process of thick filament wound structure. There are two types of smart cure, one is that the boundary conditions of the hollow cylinder are same between inner surface and outer surface, and the other is that inner surface temperature is slightly higher than outer surface to initiate cure reaction from the inner side to the outer side to reduce residual stress.

## 초 록

두꺼운 필라멘트 와인딩 복합재료의 경화 공정의 최적화를 위한 모델이 제안되었다. 스마트 경화는 중심 축 부분과 바깥 쪽의 온도 조건을 같게 하는 방법과 중심 축 쪽의 온도가 약간 높게 조절하여 경화 반응이 안쪽부터 시작될 수 있도록 하는 방법의 두 가지로 제안되었으며, 이는 잔류응력을 줄이기 위함이다.

## 1. 서 론

플라이휠은 로터의 회전 관성 에너지를 축적하는 에너지 저장 시스템이다. 이러한 플라이휠의 제작에는 다음과 같은 방법들이 이용된다(Fig. 1).

- 시가렛 롤링(Cigarette rolling) : 프리프레그 시트를 맨드릴에 적정 두께가 되도록 감는다.
- 습식 필라멘트 와인딩(Wet filament winding) : 섬유 다발에 수지를 함침시켜 맨드릴에 감는다.
- 건식 필라멘트 와인딩(Dry filament winding) : 프리프레그를 맨드릴에 감는다.

복합재 구조물을 설계할 수 있다. 그리고 2차원적으로 이러한 공정 이후에 제품은 경화 과정을 거치며, 이 과정에서 경화 잔류 응력이 발생하게 된다.

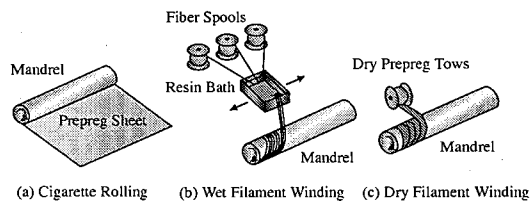


Fig. 1 Methods of manufacturing flywheels.

대부분, 플라이휠은 매우 두꺼워 반경방향의 온도제어가 매우 어려우므로 종종 경화 공정이 한 번에 이루어 지지 않고 몇 번의 단계를 거쳐 이루어지게 된다. 이 방법은 복합재료를 적정 두께까지 맨드릴에 감은 후 경화하고 다시 그 위에 또 감는 방법으로, 이 경우, 온도 제어는 가능하지만 비용과 시간이 많이 소요된다. 또한 각 층이 균일하지 못하여 기계적 성질에 많은 영향을 미치게 된다.

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원(교신저자, E-mail:wilee@snu.ac.kr)

\*\* 한양대학교 기계설계공학과 대학원

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\*\*\* 한양대학교 기계산업공학부

본 연구에서는 플라이휠을 한 단계의 공정으로 경화하는 방법으로 스마트 경화[1]가 제안되었으며, 이는 한 번에 경화를 하기 위한 경화 사이클의 최적화이다.

스마트 경화에서는 발열 반응 중의 온도 오버 슈트를 방지하기 위한 지식 기반 제어를 수행하며, 복합재료 내에서의 온도 변화를 미리 정해둔 범위 내로 조절한다.

스마트 경화의 효용성을 검증하기 위해 실험을 수행하였으며, 필라멘트 와인딩 방법으로 제작된 원통형 제품을 기존의 방법과, 스마트 경화 방법으로 대류 오븐에서 경화하여 이를 비교하였다.

## 2. 스마트 경화

### 2.1 문제의 기술

플라이휠은 고속으로 회전하며 원심력에 의한 응력을 받게 된다. 이 때, 응력을 견디면서 효율적으로 에너지를 저장하기 위해서는 내구성, 안전성을 충족시키는 비강도 비강성이 우수한 복합재료가 적합하다. 복합재료를 이용한 구조물의 설계 시, 재료의 이방성과 불균일성을 고려한 최적 설계가 수행되어야 한다. 특히, 두꺼운 실린더 형태의 복합재료 플라이휠의 경우 경화과정 중에 발생하는 잔류응력이 구조물 내부에 영구적으로 남게 되고, 기계적 성질의 예측이 어렵게 되므로 경화 공정의 최적화도 필수적이다. 이러한 복합재료로 만든 플라이휠의 경화 공정에서 필요한 요구조건을 Table 1에 정리하였으며 이는 전문가 시스템[1]의 요구 사항이다.

복합재료 내에서의 균일한 온도 분포는 재료내의 경화가 전체적으로 균일하게 이루어지도록 하지만, 원통형인 플라이휠의 경우에는 균일한 경화가 이루어질 경우 기하학적인 형상에 의해 잔류응력이 발생할 수 있으므로 위에서 제시한 요구 조건이 약간 수정될 필요가 있다. 원통형 복합재료 구조물의 경우에는 중심 축 쪽에서 경화가 이루어지기 시작하여 바깥쪽으로 전파되어 나가도록 하는 것이 더 적절하다. Table 2는 수정된 스마트 경화의 요구 조건을 정리한 것이다.

스마트 경화의 수행을 위해서는 센서와, 제어 알고리즘 등이 구비되어야 하며, 다음 그림에 이를 간략하게 도식화하였다(Fig. 2).

### 2.2 제어 규칙

본 연구에서 복합재료는 대류 오븐에서 경화되었으며, 이 오븐은 컴퓨터에 의해 스마트 경화 규칙에 따라 제어되었다. 컴퓨터는 온도 정보를 센서로부터 읽어들이어 제어 규칙에 따라 제어 신호를 발생시켜 오븐을 제어하게 된다.

Table 1 Requirements of Smart Cure I (Expert cure)

- 전체 경화 과정 동안에 복합재료 내의 온도가 정해진 한계 온도 이하로 유지되어야 한다.
- 복합재료내의 온도 분포가 적절히 일정하여야 한다.
- 경화 잔류응력이 적어야 한다.
- 전체적으로 균일하고 완전한 경화가 이루어져야 한다.

Table 2 Requirements of Smart Cure II (Modified)

- 전체 경화 과정 동안에 복합재료 내의 온도가 정해진 한계 온도 이하로 유지되어야 한다.
- 경화 반응은 중심 축 쪽에서 시작되어 바깥쪽으로 전파되어나가도록 한다. (즉, 안쪽 온도가 바깥쪽보다 약간 높게 하여 반응을 촉진시킨다)
- 경화 잔류응력이 적어야 한다.
- 전체적으로 균일하고 완전한 경화가 이루어져야 한다.

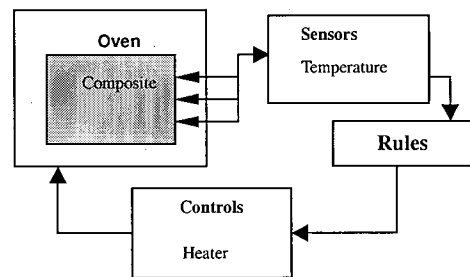


Fig. 2 Schematic view of Smart cure system.

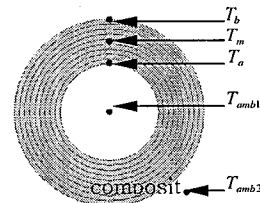


Fig. 3 Data points for Smart Cure system.

온도 정보는 복합재료의 안쪽에 위치한 열전대로부터 얻어지며, 그 위치는 다음 그림에 도시되어 있다(Fig. 3).

#### 2.2.1 스마트 경화 I (Expert cure algorithm)

우선, 복합재료 내에서의 온도는 전체 경화 과정 동안 주어진 최대 온도보다 높아서는 안된다. 즉,  $T_a$ ,  $T_b$ ,  $T_m$ ,  $T_{amb1}$ ,  $T_{amb2}$ 가 정해진 온도, 보다 높아지면 냉각이 이루어진다.

Table 3 Rules for smart cure I optimization [1]

IF	$T_{amb1} < T_{MAX}$ and $T_{amb2} < T_{MAX}$ and $T_a < T_{MAX}$ and $T_b < T_{MAX}$ $\Delta T < \Delta T_{MAX}$ and $\ddot{T}_m < 0$
THEN	Increase the ambient air temperature
IF	$T_{amb1} < T_{MAX}$ and $T_{amb2} < T_{MAX}$ and $T_a < T_{MAX}$ and $T_b < T_{MAX}$ $\Delta T > \Delta T_{MAX}$ and $\ddot{T}_m < 0$ and $T_i < T_m$ and $\ddot{T}_m < 0$
THEN	Increase the ambient air temperature
IF	$T_{amb1} > T_{MAX}$ or $T_{amb2} > T_{MAX}$ or $T_a > T_{MAX}$ or $T_b > T_{MAX}$ $\Delta T > \Delta T_{MAX}$ or $\ddot{T}_m > 0$
THEN	Decrease the ambient air temperature

Here,

$$\Delta T : \text{Temperature difference inside the composite} \\ |T_m - T_a| \text{ or } |T_m - T_b|$$

다음으로, 복합재료 내부의 온도는 균일해야 한다. 가령, 복합재료 내부의 온도,  $T_m$ 이  $T_a$ ,  $T_b$  보다 높을 때, 즉 발열 반응이 지배적일 시기에는 히터를 작동하여  $T_a$ ,  $T_b$ 를 높여서 복합재료 내부의 온도를 비교적 균일하게 유지한다.

또한 위의 제어 규칙을 적용함에 있어, 급격한 온도 변화를 방지하기 위해서  $T_m$ 의 이차 미분항을 항상 0보다 작게 유지하도록 한다.

Table 3은 스마트 경화 I의 제어 규칙을 정리한 것으로 전문가 시스템[1]의 경화 규칙과 같다.

### 2.2.2 스마트 경화 II

위의 스마트 경화 I의 규칙에 따라 제어할 경우, 복합재료 전체에서 균일하게 경화가 진행되게 된다. 이 때, 원통형 구조물은 기하학적 형상에 의해 잔류 응력이 발생할 수 있다. 그러므로 스마트 경화 I은 수정될 필요가 있다. 이를 수정한 스마트 경화 II는 경화반응이 안쪽에서부터 시작되어 바깥쪽으로 전파되어 가도록 하여 잔류응력을 줄이는데 그 목적이 있다. 이는 경화 과정 중의 수축을 고려한 것이다. 경화 반응이 중심 축 쪽에서부터 일어나게 하기 위해서, 반응이 먼저 일어나게 하기 위한 쪽의 온도를 약간 더 높게 유지하도록 한다 (“약간” 더 높게 하는 것은 전체적으로 비교적 균일한 온도 분포를 가지도록 하는 것이다). 안쪽과 바깥쪽의 온도분포를 약간 다르게 만들기 위해서는 두 개의 히터가 필요하며, 하나는 중심 축쪽을 가열하여 중심 축쪽의 외기 온도( $T_{amb1}$ )를 조절하며, 또 하나는 바깥쪽의 외기 온도( $T_{amb2}$ )를 조절하게 된다. 제어의 수행은 스마트 경화 I과 비슷하지만 중심 축방향의 외기 온도를 조절하고 바깥쪽의 외기 온도는 내부와의 온도 차가 커지지 않도록 중심 축 방향의 온도를 따라 조절되는 것이 다르다.

Table 4 Rules for smart cure II optimization

IF	$T_{amb1} < T_{MAX}$ and $T_{amb2} < T_{MAX}$ and $T_a < T_{MAX}$ and $T_b < T_{MAX}$ $\Delta T < \Delta T_{MAX}$ and $\ddot{T}_a < 0$
THEN	Increase the axis ambient air temperature
IF	$T_{amb1} < T_{MAX}$ and $T_{amb2} < T_{MAX}$ and $T_a < T_{MAX}$ and $T_b < T_{MAX}$ $\Delta T > \Delta T_{MAX}$ and $\ddot{T}_a < 0$ and $\ddot{T}_b < 0$
THEN	Increase the axis ambient air temperature
IF	$T_{amb1} > T_{MAX}$ or $T_{amb2} > T_{MAX}$ or $T_a > T_{MAX}$ or $T_b > T_{MAX}$ $\Delta T > \Delta T_{MAX}$ or $\ddot{T}_a > 0$
THEN	Decrease the axis and outer ambient air temperature
IF	$T_{amb1} < T_{MAX}$ and $T_{amb2} < T_{MAX}$ and $T_a < T_{MAX}$ and $T_b < T_{MAX}$ $\Delta T < \Delta T_{MAX}$ and $\ddot{T}_a < 0$ and $\Delta T > \Delta T_{MAX}$ and $T_a > T_b$
THEN	Increase outer ambient temperature

Here,

$$\Delta T : \text{Temperature difference inside the composite} \\ |T_a - T_b| \text{ or } |T_a - T_b|$$

Table 4는 스마트 경화 II의 제어 규칙을 정리한 것으로 스마트 경화 I의 규칙이 수정된 것이다.

## 3. 응용

### 3.1 수치해석

#### 3.1.1 경화 해석

##### 모델링

본 연구에서 사용된 복합재료의 기하학적 형상은 무한 원통이며 (실제 실험에서는 원통의 아래쪽과 위쪽의 면을 단열하였다) 이 문제에서의 지배방정식[2]은 푸리에의 일차원 열전도 방정식이다.

지배방정식 :

$$\dot{q} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\text{for } T(r, t) \text{ in } (r_i < r < r_o)$$

$$\dot{q} : \text{Internal heat generation} \quad (1)$$

$\rho$  : Density

$c$  : Specific heat

$k$  : Coefficient of heat conduction

경계조건 :

$$k \frac{\partial T}{\partial r} + h[T - T_{amb}] = 0 \quad \text{at } r = r_i \quad (2)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial r} + h[T - T_{\text{amb}}] = 0 \quad \text{at} \quad r = r_o$$

그리고, 내부의 경화 반응으로 인한 발열은 다음 식으로 주어진다.

$$\dot{q} = \rho H_R \frac{\partial \alpha}{\partial t} \quad (3)$$

반응열은 DSC (differential scanning calorimeter)를 사용하여 측정하였으며, 경화도  $\alpha$ 는 다음의 식에 의해 계산된다 [3,4,5].

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{H_T}{H_U} \frac{1}{H_T} \left( \frac{dQ}{dt} \right)_T = \frac{H_T}{H_U} \frac{\partial \beta}{\partial t}$$

where,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \beta}{\partial t} &= (K_1 + K_2 \beta^m)(1 - \beta)^n \\ K_1 &= A_1 \exp(-\Delta E_1 / RT) \\ K_2 &= A_2 \exp(-\Delta E_2 / RT) \end{aligned} \quad (4)$$

식에서  $A_1$ ,  $B_2$ ,  $m$ ,  $n$ 은 상수들이며,  $\Delta E$ 는 활성화 에너지이며,  $R$ 은 기체 상수이다.

본 연구에서 사용된 에폭시 수지는 JF-7006 (중도화학 Co.)이며 그 물성치는 다음과 같다.

$$A_1 : 1.7647 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$$

$$A_2 : 1.5782 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$$

$$\Delta E_1 : 66397 \text{ J}$$

$$\Delta E_2 : 76693 \text{ J}$$

$$m : 1.1448$$

$$n : 1.5790$$

## 결과

계산은 50개의 요소로 이루어진 일차원 유한요소법을 이용하였으며 시간 증분은 5초로 하였다. 계산에 사용된 플라이휠의 치수는 내경 66mm, 외경 300mm이다.

### 기존 경화 사이클

기존의 방법으로 경화할 경우의 경계조건은 다음과 같이 계산하였다.

1. 오븐의 온도가 100℃가 될 때까지 가열 후, 2시간 동안 유지한다. 이 때, 온도는 분당 5℃의 속도로 상승하도록 하였다.
2. 100℃로 2시간이 지난 후, 120℃가 될 때까지 가열한 후 경화가 끝날 때까지 유지한다. 경화는 3.5시간에 완료되었다.

계산 결과는 다음 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

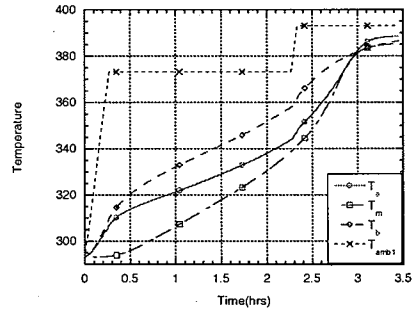


Fig. 4 Temperature profile of conventional cure.  
경화반응에 의하여 복합재료 내부의 온도가 균일하지 않거나 바람직하지 않아도 오븐의 온도만 제어한다.

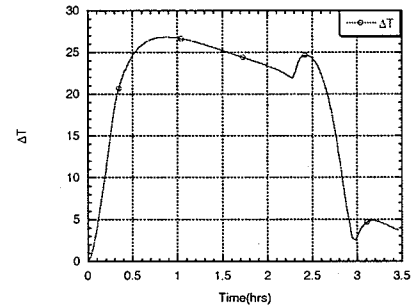


Fig. 5 Temperature difference of conventional cure.  
복합재료 내부의 온도차의 평균이 19.11℃로 매우 크며, 최대값은 27℃가 넘는다.

### 스마트 경화 I

기존의 방법으로 경화할 경우의 경계조건은 다음과 같이 계산하였다. 스마트 경화 I의 경우 경계조건은 앞의 Table 3의 조건에 따라 변하게 되며, 이는 복합재료 내부의 온도를 균일하게 유지하여 전체적으로 균일한 경화의 진행을 목적으로 한다. 그 계산 결과는 다음 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.

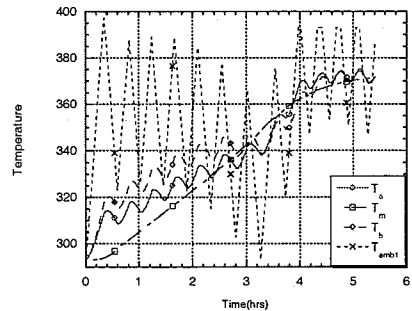


Fig. 6 Temperature profile of smart cure I.  
복합재료 중심축 방향의 온도 조건과 바깥쪽방향의 온도조건이 같아지도록 제어한다.

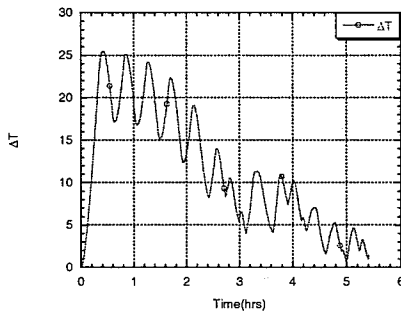


Fig. 7 Temperature difference of smart cure I.  
복합재료 내부의 온도차의 평균이 11.50°C로 감소하고, 제어를 함에 따라 점차 내부의 온도가 균일해져 감을 알 수 있다.

### 스마트 경화 II

스마트 경화 II 역시 앞의 Table 4에 그 경계조건이 소개되었으며, 이는 복합재료의 중심 축으로부터 경화가 진행되어 경화 수축으로 인한 잔류 응력을 감소 시키는 것이 목적이며, 중심축 방향과 바깥쪽의 온도차의 최대값은 7°C로 하였으며 이는 비교적 균일한 온도 분포를 위함이다. 계산 결과는 다음 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다.

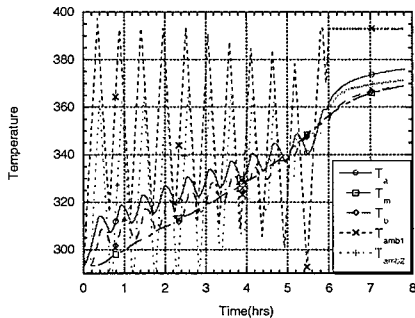


Fig. 8 Temperature profile of smart cure II.  
복합재료 중심축쪽에서 경화 반응이 시작되어 바깥쪽으로 전파되도록 한다.

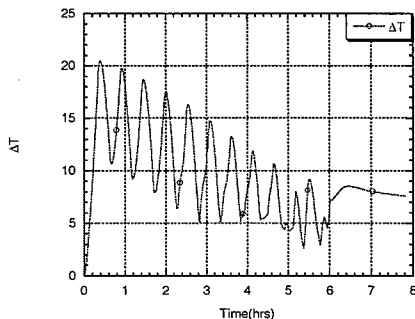


Fig. 9 Temperature difference of smart cure II.

복합재료 내부의 온도 차의 평균이 9.6°C로 감소하였으며 제어가 진행됨에 따라 점차 내부의 온도가 균일해지는 동시에 중심축 근처의 온도가 약간 높아져 경화 반응이 안쪽에서 바깥쪽으로 진행됨을 알 수 있다.

복합재료 내부의 평균 온도차는 각각 19.11°C (기존 방법), 11.50°C (스마트 경화 I), 9.60°C (스마트 경화 II)로 39.8% (스마트 경화 I), 49.8% (스마트 경화 II) 감소하였다. 이는 스마트 경화가 복합재료 내부의 온도를 더 균일하게 유지할 수 있음을 보여준다.

### 3.1.2 응력 해석

#### 모델링

경화 잔류 응력은 경화 과정에서의 화학적 수축과 열팽창에 의해 발생된다[1,6].

힘의 평형 조건 :

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (5)$$

기하학적 합치 :

$$\epsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \epsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (6)$$

응력-변형률-온도-수축 관계 :

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \left( \frac{1}{E_r} \sigma_r - \frac{\nu}{E_\theta} \sigma_\theta \right) + \alpha_r [T - T_0] + \Delta\epsilon_r^{ch} \\ \epsilon_\theta &= \left( \frac{1}{E_\theta} \sigma_\theta - \frac{\nu}{E_r} \sigma_r \right) + \alpha_\theta [T - T_0] + \Delta\epsilon_\theta^{ch} \end{aligned} \quad (7)$$

$\alpha_r, \alpha_\theta$  : Thermal expansion coefficients

$\Delta\epsilon^{ch}$  : Strain from chemical shrinkage

지배방정식 :

$$\begin{aligned} E_1 \frac{d^2 u}{dr^2} + (E_1 - \nu E_2 + \nu E_1) \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - E_2 \frac{1}{r^2} u \\ = -\frac{\Delta T}{r} (E_1 \alpha_1 + E_1 \nu \alpha_2 + E_2 \alpha_2 + E_2 \nu \alpha_1) \\ + \frac{\Delta\epsilon^{ch}}{r} (1 + \nu)(E_1 - E_2) \end{aligned} \quad (8)$$

경계조건 :

$$\begin{aligned} u &= 0 \quad \text{at} \quad r = r_i \\ \sigma_r &= 0 \quad \text{at} \quad r = r_o \end{aligned} \quad (9)$$

본 연구에서 사용한 탄소 섬유는 TZ-307(태광산업 Co.) 그 물성은 다음과 같다.

$$E_1 : 2.068 \times 10^{11}$$

$$E_2 : 2.068 \times 10^{10}$$

$$\nu : 0.2$$

$$\alpha_1 : -9.0 \times 10^{-7}$$

$$\alpha_2 : 7.2 \times 10^{-6}$$

## 결과

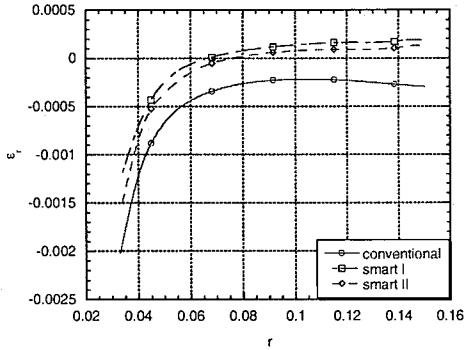


Fig. 10 Strains after cure.

위의 Fig. 10에서 보면 잔류 변형율의 제곱의 평균의 제곱근은 각각 0.000583 (기존 방법), 0.000385 (스마트 경화 I), 0.000327 (스마트 경화II)이며 이는 각각 34%, 44% 만큼 감소됨을 알 수 있다.

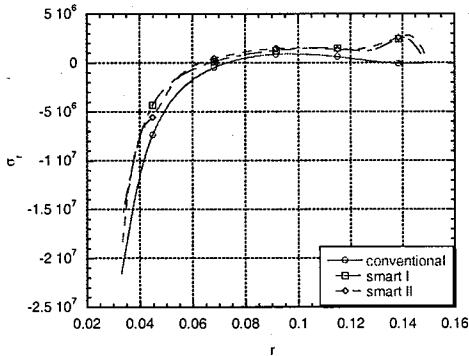


Fig. 11 Radial residual stresses after cure.

위의 Fig. 11에서 잔류 응력의 제곱의 평균의 제곱근은 각각 5.18MPa(기존 방법), 4.2MPa (스마트 경화 I), 3.78MPa (스마트 경화II)이다.

## 3.2 실험

실험은 대류 오븐에서 수행하였으며, 오븐의 열원만으로는 복합재료의 안과 밖의 가열/냉각이 균일하게 이루어 지지 않으므로 중심 축 방향의 가열과 냉각을 위해 공기 제트를 다음 Fig. 12와 같이 장치 하여 이용하였으며 실제 장치는 다음 Fig. 13에 보였다.

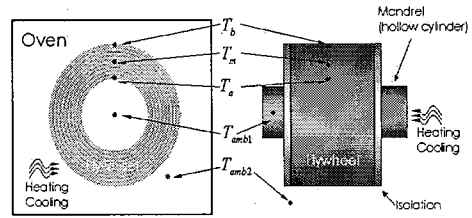


Fig. 12 Schematic view of equipment.

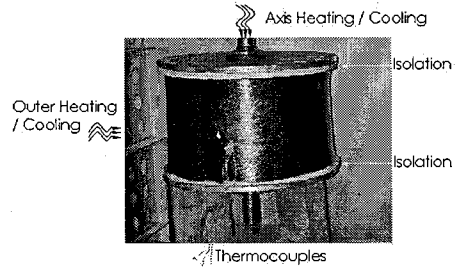


Fig. 13 Equipment for experiment.

위의 Fig. 13에서 축방향의 아래쪽 끝과 위쪽 끝은 축 방향으로 온도가 균일하게 하여 앞의 수치 해석에서 수행한 반경방향으로의 일차원 해석이 타당할 수 있도록 하였다.

### 3.2.1 온도 프로파일

스마트 경화 I 과 스마트 경화 II의 경화 과정중의 복합 재료 내부의 온도와 오븐의 온도 조건을 다음 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내었다. 실험에는 대류 오븐이 사용되었다.

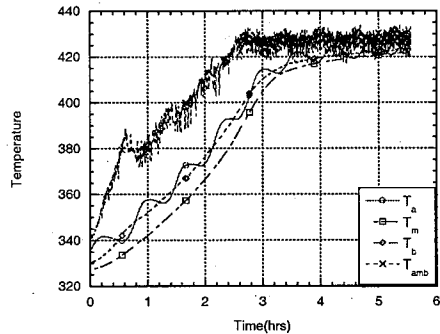


Fig. 14 Actual temperature profile of smart cure I.

대류 오븐의 큰 열용량으로 인하여 오븐 온도가 수치해석에서와 같이 제어되지는 않았으나, 중심쪽 근처의 온도와 바깥쪽 방향의 온도가 같아지도록 제어가 이루어 짐을 볼 수 있으며, 제어가 진행됨에 따라 복합재료 내부의 온도가 점차 균일해짐을 알 수 있다.

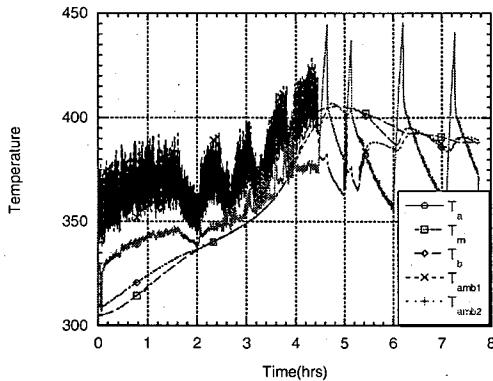


Fig. 15 Actual temperature profile of smart cure II.

처음부터 중심 축 근처의 온도가 약간 더 높음을 볼 수 있으며, 경화 반응이 안쪽에서 시작되어 전파되어 나감을 짐작할 수 있다.

### 3.2.2 잔류 변형율

잔류 변형율은 다음 Fig. 16과 같이 스플릿 링 검사(split ring test)를 통해 측정한다. 이 검사에서는 길이 3 mm, 저항 350Ω, 2.1의 gauge factor를 가지는 스트레인 게이지를 사용하였으며, 각각의 스트레인 게이지에서 신호를 취득한 후, 시편의 일부분을 제거하고 스트레인 게이지에서의 신호를 취득하여 시편의 일부를 제거하기 이전의 신호와의 차를 이용하여 시편의 잔류 응력으로 인해 발생하는 변형율을 계산하였다.

본 연구에서 수행했던 실험에서는 층간 박리(delamination) 현상의 발생으로 앞서의 계산과는 다른 결과가 나왔으나, 기존 방법에 비해 스마트 경화에서의 잔류 변형율이 더 작은 값을 보임을 확인할 수 있었다.



Fig. 16 Split ring test.

split ring test 후, 시편의 일부가 제거된 모습

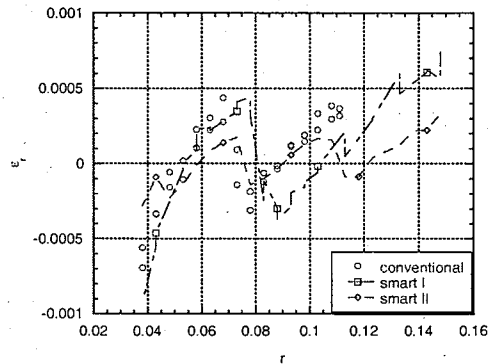


Fig. 17 Actual residual strains.

층간 박리 현상으로 인해 잔류 변형율이 연속적으로 측정되지 않았다.

위의 Fig. 17에서 잔류 변형율의 측정의 평균의 측정값은 각각 0.000275 (기존 방법), 0.000258 (스마트 경화 I), 0.000147 (스마트 경화 II)으로 기존의 경화 사이클보다 더 좋은 값으로 측정되었다.

## 4. 결 론

두꺼운 원통형 필라멘트 와인딩 구조물의 경화를 위한 스마트 경화 제어가 제안되었으며, 스마트 경화를 수행할 경우, 경화과정 중의 복합재료 내의 온도분포가 균일하게 유지되며 경화 후의 잔류 응력도 감소함을 확인할 수 있었다.

스마트 경화를 수행함에 있어서 경화 반응에 의한 과도한 발열을 효율적으로 조절하는 방법에 대한 연구가 후행되어야 한다.

## 후 기

본 연구는 서울대-한양대 BK 사업단의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) P. R. Criscioli, G. S. Springer and W. I. Lee, "An Expert System for Autoclave curing of Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 25, 1991, pp. 1542-1587.
- 2) T. A. Bogetti and J. W. Gillespie, Jr., "Process-Induced stress and Deformation in Thick-Section Thermoset

- Composite Laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 25, 1992, pp. 626-660.
- 3) M. R. Dusi, W. I. Lee, P. R. Ciriscioli and G. S. Springer, 1987, "Cure Kinetics and Viscosity of Fiberite 976 Resin," *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, 1987, pp. 243-261.
  - 4) A. C. Loos and S. Nagendra, "Optimization of the curing Process of Filament Wound Composites," *34th International SMAPE Symposium*, 1989, pp. 1853-1863.
  - 5) M. Li, Q. Zhu, P. H. Geubelle, and C. L. Tucker, "Optimal curing for Thermoset Matrix Composites : Thermochemical Considerations," *Polymer Composites*, Vol. 22, 2001, pp. 118-131.
  - 6) S. W. Tsai, H. T. Hahn, *Introduction to Composite Materials*, Technomic Publishing Co., 1980.