

〈論 文〉

탄소섬유 에폭시 복합재료 제조의 전문가시스템 연구

최진호* · 이대길**

(1994년 3월 10일 접수)

Expert Cure System for the Carbon Fiber Epoxy Composite Materials

Jin Ho Choi and Dai Gil Lee

Key Words : Composites(복합재료), Expert System(전문가시스템), Cure(경화)

Abstract

In this paper, the expert cure system for carbon fiber epoxy composite materials, which controls the temperature and pressure of the autoclave according to the several rules, was developed to manufacture better composite products in shorter curing time. The rules were based on the on-line measured quantities such as the dielectric properties and temperature of the composites and the pressure of the autoclave. The curing time and the mechanical properties of the composite materials manufactured with the expert cure system were compared to those of the specimens manufactured with the conventional cure cycle.

1. 서 론

고품질의 탄소섬유 에폭시 복합재료의 제조는 일반적으로 오토클레이브(autoclave)내에서 제품의 분위기온도와 압력을 조절하여 이루어진다. 복합재료 제조를 위한 경화사이클은 프리프레그의 공급시에 제조회사로부터 제시되는 것이 일반적이다. 그러나 제조회사로부터 공급되는 경화 사이클은 소량의 표본(sample)으로부터 구해지는 것으로 제조하고자 하는 제품의 형태와 프리프레그의 종류를 고려하지 않은 경우가 대부분이다. 따라서 실제 가공에 있어서는 제조회사에서 공급되는 경화사이클이 항상 최적의 사이클이라고 할 수는 없다. 특히 제품의 두께가 두꺼워질 경우 수지의 발열(exothermic) 반응으로 인하여 내부의 온도가 과승할 수가 있고 복합재료 내부의 과다 수지의 유출이 충

분히 이루어지지 않아 기계적 특성을 저하시킬 수 있으며 균일한 품질을 기대하기가 어렵다.^(1~3)

오토클레이브를 사용하여 복합재료를 제조할 경우에 기계적 성질이 우수하고 균일한 특성을 얻기 위하여 제어할 수 있는 변수는 복합재료의 분위기온도와 압력뿐이다. 일반적으로 압력은 일정 임계치 이상이면 충분한 압밀(consolidation)이 이루어 지므로 경화의 초기 또는 수지의 점도가 충분히 떨어졌을 때 임계치 이상으로 가해주면 된다. 이에 반해 분위기온도는 수지의 경화반응과 점도에 밀접한 관계가 있으므로 경화과정중에 복합재료의 온도 구배나 수지유동에 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 기계적 성질이 우수하고 균일한 특성을 갖는 복합재료를 짧은 시간에 제조하기 위해서는 경화공정의 최적화가 필요하다.

탄소섬유 에폭시 복합재료를 제조할 때 품질을 향상시키고 경화공정을 최적화할 수 있는 방법에는 일반적으로 두가지 방법이 있다. 첫번째 방법은 복합재료의 제조과정을 해석적으로 모델링하는 방법으로 유한요소법이나 유한차분법으로 모사(simula-

*한국과학기술원 정밀공학과

**정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

tion)하여 적절한 경화 사이클을 제시하는 방법이다.^(4~8) 위의 해석적인 방법은 복합재료의 형상과 물성치 변화에 대응하기 어려운 단점을 가지고 있다. 그러나, 제조하려는 복합재료의 형상과 물성치가 알려져 있으며, 제조과정을 빠른시간내에 경제적으로 설명할 수 있는 장점을 가지고 있다. 두번째 방법은 경화중인 복합재료로 부터 경화정보를 측정하여 적절한 가공조건과 제어를 실시간에 제공하는 방법이다.^(9~10) 경화정보에 따른 가공조건과 제어는 몇 가지 법칙들로 이루어진 전문가시스템으로 구성되어 있다. 이 방법은 복합재료의 형상과 물성치 변화에 대응할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 오토클레이브성형법으로 복합재료를 제조할 때, 복합재료 경화시의 온도와 경화상태를 측정하여 경화상태에 따라 적절한 제어를 할 수 있는 전문가시스템을 완성하였다. 또한 전문가시스템으로 제조된 복합재료의 물성치를 측정하여 상용 경화사이클로 제조된 복합재료의 물성치와 비교평가하였다.

2. 오토클레이브의 시스템 구성

오토클레이브의 온도와 압력을 제어하고 경화상태를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같은 시스템을 구성하였다. 온도와 압력을 측정하기 위하여 열전대(thermo-couple)와 압력변환기를 오토클레이브 내부에 설치하였고, 복합재료의 경화 정도를 측정하기 위한 전용센서를 부착하여 복합재료의 경화정보를 알 수 있도록 하였다. 오토클레이브내에 장치된 몇 가지 센서들로부터 나온 출력은 잡음제거와 신호변환을 거쳐 A/D변환기를 통해 컴퓨터로 받아들여진다. 컴퓨터로 받아들여진 신호는 데이터처리과

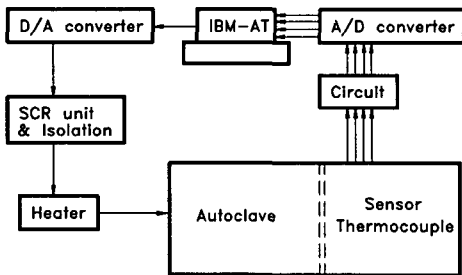


Fig. 1 Schematic diagram of the autoclave control system

정을 거쳐 D/A변환기를 통해 SCR(silicon controlled rectifier)를 제어함으로써 오토클레이브 내부의 히터출력을 조절하도록 되어 있다. 복합재료의 경화정도를 측정하는 방법에는 여러가지가 있으나 본 논문에서는 Dielectrometry법을 채택하였다. Dielectrometry법은 복합재료의 경화반응에 따른 유전율의 변화를 검출하여 경화정도를 예측하는 방법이다. 본 논문에서는 Dielectrometry을 이용하여 수지의 손실계수(dissipation factor)를 경화시간의 함수로 측정하였는데, Fig. 2에서 보는 바와 같이 전극을 복합재료에 삽입한 후 여기에 교류 전장장을 가하면 손실계수 D 를 다음과 같이 구할 수 있다.^(11,12)

$$D = \tan \delta_m = \frac{I_{Rm}}{I_{Cm}} = \frac{|V_m| \cos \psi}{|V| \sin \psi} \quad (1)$$

오토클레이브의 온도제어를 위하여 오토클레이브의 열적특성을 분석하였다. Fig. 3은 히터에 0.7 kW의 전력을 공급하여 일정시간이 경과한 후에

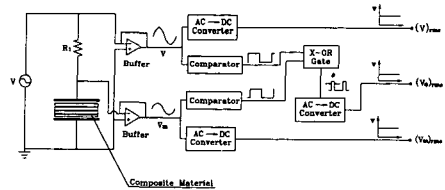


Fig. 2 Electric circuit for measuring the dissipation factor

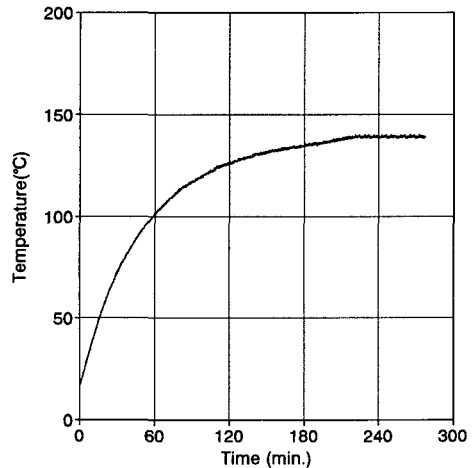


Fig. 3 Temperature characteristics of the autoclave with the step input

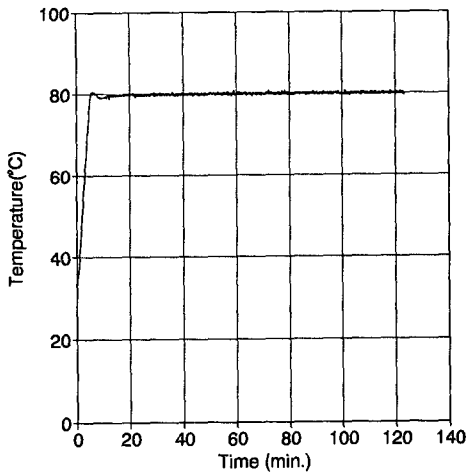


Fig. 4 Response characteristics using the proportional integral controller ($K_p=0.5$, $T_i=42$)

오토클레이브의 온도가 평행상태에 도달하였을 때의 그래프이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 본 실험에 사용한 오토클레이브는 1차 시스템으로 근사화할 수 있었고, 시상수는 52분이었다. 따라서 오토클레이브의 전달함수는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$G_s(s) = \frac{1}{1 + T_s \cdot s} \quad T_s = 52 \text{ min} \quad (2)$$

시스템이 1차 요소로 근사화될 경우에 비례적분제어기를 사용하면 정상편차(steady-state error)를 없앨 수 있으므로 오토클레이브 내부의 온도를 제어하기 위하여 비례적분제어기를 사용하였다.⁽¹³⁾ 비례적분제어기의 전달함수는 아래와 같다.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \quad (3)$$

위 비례적분제어기에서 K_p 와 T_i 값은 모사(simulation)과정을 통해 값을 결정한 다음, 실제로 오토클레이브의 온도를 제어하면서 재조정하여 결정하였다. K_p 를 0.5로 하고 T_i 를 42분으로 하여 원하는 온도를 80°C로 고정하여 제어하면, Fig. 4에서 보는 바와 같이 약 5분이 경과한 후 원하는 온도에 접근함을 볼 수 있다.

3. 전문가시스템

복합재료 경화시의 온도와 경화상태를 측정하여 경화상태에 따라 적절한 제어를 할 수 있는 전문가

시스템을 완성하였다. 본 전문가시스템에서 오토클레이브 내부의 압력은 경화의 초기부터 경화가 끝날 때까지 0.6 MPa로 일정하게 공급하였다. 열경화성 수지의 복합재료 경화는 경화의 초기단계에서는 발열반응이 일어나지 않으나 경화가 진행됨에 따라 복합재료 수지의 화학반응으로 인하여 발열반응이 일어나 복합재료의 제조는 경화과정에서 발열반응이 발생하기 때문에 경화과정중에 시스템의 열적특성이 변화된다. 본 전문가시스템은 경화과정을 발열반응이 발생하기 전후로 나누어 2단계로 구성하였다. 경화정보와 온도의 측정 및 제어는 5초 간격으로 이루어졌다. 본 연구에서 완성된 전문가시스템의 구성에 대해 설명하면 아래와 같다.

3.1 발열반응의 예측

본 시스템에서는 손실계수를 측정하여 손실계수의 변화율이 일정이상이면 복합재료의 경화가 진행되고 있는 것으로 간주하였다. 제작된 회로와 오토클레이브 자체전원의 잡음(noise)으로 인하여 손실계수의 변동률이 분당 $\pm 1.5\%$ 범위내에 있었다. 따라서 손실계수의 변화율이 1.5%의 3배인 분당 4.5% 이상이 되면 복합재료의 경화가 진행되고 있다고 간주하였다.

3.2 1단계 경화

복합재료 경화시스템의 초기단계로서 복합재료의 경화가 진행되지 않는 상태의 제어시스템이다. 1단계 경화에서 사용된 제어기는 비례적분제어기이며, 제어하고자 하는 온도의 대상을 복합재료 표면의 온도로 하였다. 비례적분제어기로 최대 경화온도까지 가열하되 앞에서 설명한 손실계수의 변화율이 일정값 이상이거나 복합재료표면의 온도가 최대 경화온도 이상이 되면 2단계 경화로 진행되게 하였다.

3.3 2단계 경화

복합재료의 경화가 진행되고 있는 상태의 제어시스템으로서 비례미분제어기를 채택하였다. 복합재료의 경화가 진행되면 발열반응이 발생하여 복합재료의 온도가 과승할 수 있으므로 비례미분제어기를 채택하여, 복합재료 중심의 온도가 최대 경화온도가 되도록 제어하였다. 비례상수는 0.8로 일정하게 고정시켰으며 미분상수는 오토클레이브 자체의 미분상수값과 복합재료 자체의 에너지증가량인 $\rho c T$

를 고려한 미분상수값을 더해줌으로써 결정하였다. 본 시스템에서 사용한 오토클레이브의 미분상수는 43초이었다. 비례미분제어기의 미분상수 T_d 를 계산하는 식은 아래와 같다.

$$T_d = T_{dc} + T_{da} \quad (4)$$

여기서, T_{dc} 는 복합재료자체의 에너지를 고려한 미분상수이고, T_{da} 는 오토클레이브의 미분상수이다.

복합재료 자체의 에너지증가량을 고려한 미분상수의 계산식은 아래와 같다.

$$\rho c \dot{T} = K_p \dot{T} K_{SCR} T_{dc} \quad (5)$$

여기서,

K_p : 비례상수

K_{SCR} : 전력조정기의 증폭비

ρ, c : 복합재료의 비중, 비열

위의 식(5)를 식(4)에 대입하면

$$T_d = T_{dc} + T_{da} = \frac{\rho c}{K_p K_{SCR}} + T_{da} \quad (6)$$

2단계 경화가 진행되는 동안 복합재료 손실계수의 변화율이 분당 $\pm 1.5\%$ 범위 이내로 떨어지면 반응이 끝난것으로 간주하여 전체 시스템을 종료하도록 설계하였다.

3.4 압밀

복합재료의 경화에서 여유분의 수지를 밖으로 배출하기 위하여 일반적으로 압밀(consolidation) 과정이 필요하다. 본 전문가시스템에서는 복합재료의 경화가 진행되기 시작하는 2단계 경화과정에서 압밀과정을 첨가시켰다. 2단계 과정의 시작단계에서 복합재료의 온도가 경화온도 이하이면 압밀과정을 거치도록 설계되어있다. 압밀은 복합재료의 온도를 현재의 온도로 일정하게 필요한 시간만큼 유지시켜주는 형태로 되어있다. 압밀에 관한 이론적인 식은 여러가지가 있으나 본 시스템에서는 Gutowski가 제시한 모델을 사용하였는데 일차원 압밀식은 아래와 같다.⁽¹⁴⁾

$$P = A_s \left(\frac{V_f}{V_o} - 1 \right) \left(\frac{1}{V_f} - \frac{1}{V_a} \right)^4 + \frac{4}{3} \mu K_{xx} \frac{a^2}{r_f^2} \frac{V_f}{1 - V_f} \dot{V}_f \quad (7)$$

$$K_{xx} = \frac{r_f^2 (1 - V_f)^2}{4 V_f^2 S_{ii}} \quad (8)$$

Table 1 Properties of the USN150 prepreg

Radius of fiber(μm)	3.5
Initial fiber volume fraction	0.58
Permeability(m^2)	5.8×10^{-16}
Ply thickness(mm)	0.15
Density of fiber(kg/m^3)	2.15
Density of matrix(kg/m^3)	1.30
Specific heat of fiber($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$)	0.75×10^3
Specific heat of matrix($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$)	1.97×10^3

여기서,

V_f : 섬유체적률 (fiber volume fraction)

V_o : 최초 섬유체적률 (initial fiber volume fraction)

V_a : 가능한 섬유체적률

μ : 점성계수

K_{xx} : Kozeny constant

r_f : 섬유의 반경

a : 복합재료의 두께

S_{ii} : 투과율 (permeability)

식(6)에서 원하는 V_f 에 도달하는 시간을 유한차분법으로 계산하여, 압밀에 필요한 시간을 구하였다. 본 연구에서 사용한 탄소섬유 복합재료의 프리프레그는 (주)선경에서 제공한 USN150으로 재료의 물성치는 Table 1에 나타나 있다. 본 시스템에서는 Gutowski모델에서 계산된 압밀 완료시간까지 측정된 현재의 온도를 유지하도록 설계되어 있다.

그런데 복합재료의 두께가 두꺼워지면 압밀과정이 매우 길어진다. 압밀은 복합재료 수지의 점성계수가 일정값 이하에서 효과적으로 일어날 수 있으므로, 압밀과정중에 복합재료 수지의 점성계수가 상승하면 압밀을 위한 지속적인 온도유지는 의미가 없다. 본 시스템에서는 복합재료 손실계수의 변화율이 음의 값을 가지면 수지의 점성계수가 상승하는 것으로 간주하여, 압밀과정을 완료시켰다. 압밀과정이 완료되면 복합재료의 온도를 최대 경화온도가 되도록 가열하는 2단계 경화로 되돌아가도록 설계되어 있다.

3.5 복합재료 내외부의 온도차

복합재료의 경화시 복합재료의 온도분포가 균일

해야 수지의 분포와 품질의 균일성을 이룩할 수 있다. 본 전문가시스템은 복합재료 내 외부의 온도차가 3°C 이상이면 히터에 들어가는 전원을 차단하여 가열을 중지하도록 되어있다.

3.6 복합재료와 오토클레이브 내부공기의 대류

본 전문가시스템은 앞에서 소개된 오토클레이브의 온도특성을 시스템의 특성방정식으로 채택하여 제어시스템을 완성하였다. 따라서 제어하고자 하는 온도의 대상은 오토클레이브 내부의 온도가 되어야 한다. 그러나 복합재료의 경화를 제어하기 위해서는 복합재료 자체의 온도가 더 중요한 의미를 가진다. 따라서 본 시스템에서는 복합재료의 온도를 제어대상으로 지정하였다. 제어하고자 하는 온도를 복합재료의 온도로 지정할 경우, 오토클레이브 내부의 공기와 복합재료의 대류현상으로 인한 부가적인 열부하와 함께 복합재료 자체의 열전달현상이 고려되어야 한다. 복합재료 자체의 열전달 현상은 앞에서 설명하였듯이 복합재료 내외부의 온도차가 일정한 값을 넘지 않도록 제어함으로써 어느정도 해결할 수 있다. 그러나 오토클레이브 내부공기와 복합재료의 대류현상은 고려되어 있지 않다. 따라서 본 시스템에서는 다음과 같은 방법을 제시하여 대류현상에 따른 제어의 어려움을 해결하였다.

복합재료는 최대 경화온도이상으로 가열되면 복합재료 내부의 열응력이 증가하고 수지의 손상을 가져온다. 따라서 복합재료의 온도를 경화온도이상으로 올라가지 않도록 제어할 수 있으면 비록 오토클레이브의 내부공기 온도와 복합재료의 온도 사이에 차이가 발생하여도 그리 큰 문제가 되지 않는다. 본 시스템에서는 복합재료의 온도가 오토클레이브 내부공기의 온도로 인한 대류현상때문에 최대 경화온도이상으로 가열되는 것을 방지하기 위한 알고리즘을 제시하였다. 오토클레이브의 히터를 끌 경우 오토클레이브의 냉각속도(cooling rate)는 실험적으로 구할 수 있다. 본 오토클레이브의 경우는 약 $-2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 측정되었다. 본 시스템에서는 경화중에 복합재료의 온도를 측정하여 그 상태에서 오토클레이브의 히터가 꺼진다고 생각할 때 오토클레이브 내부의 공기와 복합재료의 대류현상으로 인한 복합재료의 최대 상승온도를 계산하는 식을 아래와 같이 제시하였다. 열전달 방정식으로부터⁽¹⁵⁾

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Ah(T_a - T_s)$$

$$= \frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} \quad (9)$$

여기서,

T_a : 오토클레이브의 공기온도

T_s : 복합재료의 표면부온도

A : 면적

h : 열전달계수

위치에 따른 열전달을 무시하면

$$Ah(T_a - T_s) = \rho c \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (10)$$

오토클레이브의 히터를 끈다고 가정하면 오토클레이브의 냉각속도는 아래와 같이 선형화 할 수 있다.

$$T_a = T_{ap} - S_{off}t \quad (11)$$

식(11)을 식(10)에 대입하면,

$$\frac{\rho c}{Ah} \frac{\partial T_s}{\partial t} + T_s = T_{ap} - S_{off} \cdot t \quad (12)$$

경계조건은

$$t=0, \quad T_s = T_{sp} \quad (13)$$

여기서,

T_{sp} : 현재의 복합재료 표면부 온도

식(13)의 경계조건을 이용하여 식(12)를 풀면

$$T_s(t) = C_1 e^{\frac{Ah}{\rho c}t} - S_{off}t + T_{ap} + S_{off} \frac{\rho c}{Ah} \quad (14)$$

$$C_1 = T_{sp} - T_{ap} + S_{off} \frac{\rho c}{Ah}$$

T_s 가 최대인 시간 t_{max} 를 구하기 위해 T_s 를 미분하면

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = -C_1 \frac{Ah}{\rho c} e^{-\frac{Ah}{\rho c}t} + S_{off}t = 0 \quad (15)$$

$$t_{max} = -\frac{\rho c}{Ah} \ln \left(\frac{S_{off} \rho c}{C_1 Ah} \right) \quad (16)$$

식(16)에서 계산된 시간 t_{max} 를 식(14)에 대입하면 복합재료 표면의 최대 상승온도를 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$T_{smax} = C_1 e^{\frac{Ah}{\rho c}t_{max}} - S_{off}t_{max} + T_{ap} + S_{off} \frac{\rho c}{Ah} \quad (17)$$

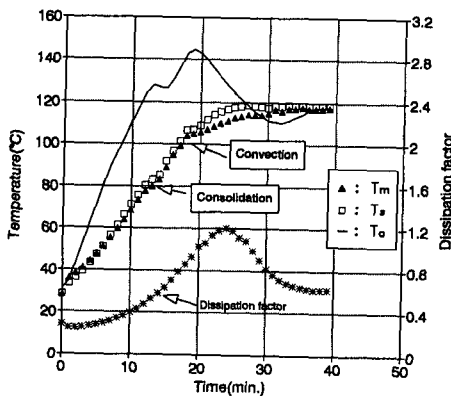
식(17)에서 계산된 복합재료의 최대 상승온도가 최대 경화온도를 넘으면 복합재료는 t_{max} 시간이

지난후 히터로 부터의 열공급이 없어도 경화온도 이상으로 올라갈 수 있다. 따라서 복합재료 경화의 초기부터 계속적으로 온도를 측정하고 위의 식(17)의 최대 상승온도를 계산하여 최대 상승온도가 최대 경화온도를 넘으면 히터를 끄도록 설계하였다. 식(17)에서 복합재료의 $\rho c/Ah$ 는 복합재료의 경화중에 T_a 와 T_s 및 $\partial T_s/\partial t$ 를 측정하여 식(10)에 대입하면 구할 수 있다.

4. 복합재료의 물성치 평가

위에서 설명한 전문가시스템을 이용하여 탄소섬유 에폭시 복합재료를 제조하여 복합재료의 물성치를 평가하였다. 복합재료의 적층각은 $[0^\circ]$, $[90^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$ 에 대하여 각각 실험하였는데 8-ply의 프리프레그를 적층하여 제조하였을 경우의 경화사이클은 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 T_s 와 T_m 은 복합재료 표면과 중심의 온도이고, T_a 는 오토클레이브 내부공기의 온도이다. 그림에서 Convection이라고 표시된 부분은 복합재료와 오토클레이브 내부공기의 대류현상으로 발생하는 복합재료 온도의 과승현상을 방지하는 제어지점의 표시이다. 8-ply의 탄소섬유 복합재료 제조는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 약 40분이 소요되었다.

본 실험에 사용한 탄소섬유 프리프레그의 제조사에서 경화사이클로 탄소섬유 복합재료를 제조하여



T_s : surface temperature of the composites
 T_m : mid temperature of the composites
 T_a : air temperature of the inside of the autoclave

Fig. 5 Cure cycle for the expert autoclave cure system (8-ply prepregs)

전문가시스템으로 제작된 복합재료의 성능과 비교하였다. Fig. 6은 탄소섬유 프리프레그의 제조사에서 제공한 복합재료의 경화사이클로서, 120°C 경화용 탄소섬유 에폭시 복합재료의 대표적인 경화사이클이다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 복합재료의 제조에 필요한 시간은 약 2시간 30분이다. 복합재료의 성능비교를 위하여 Fig. 7과 같은 시편을 제작

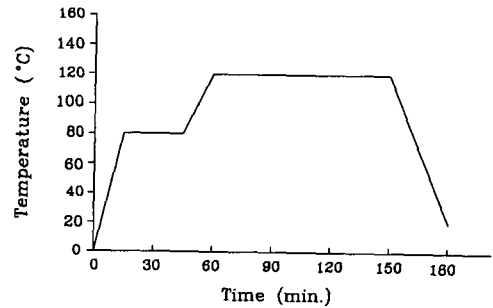


Fig. 6 Conventional autoclave cure cycle

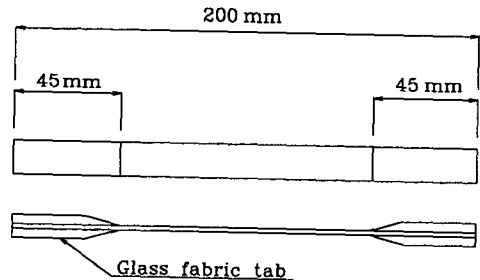


Fig. 7 Shape of the tensile test specimen

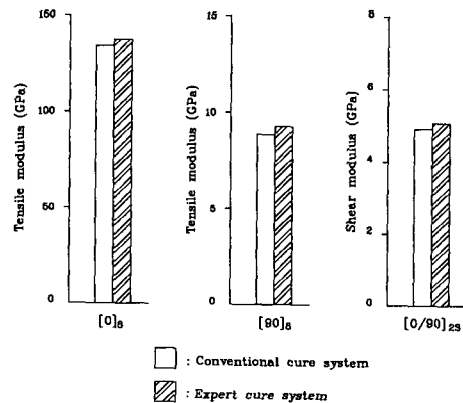


Fig. 8 Tensile and shear moduli of the specimens manufactured by the conventional and the expert cure systems

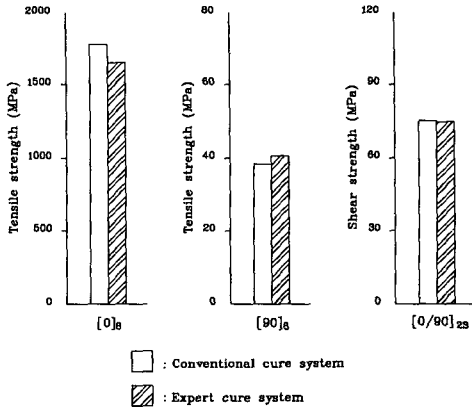


Fig. 9 Tensile and shear strengths of the specimens manufactured by the conventional and the expert cure systems

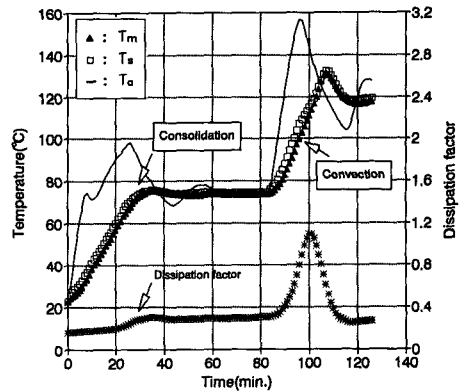
Table 2 Moduli of the 8-ply composite materials

	Tensile moduli (GPa)		Shear moduli (GPa)
	[0] ₈	[90] ₈	[0/90] _{2s}
Conventional cure system	132.3	8.7	4.9
	134.5	8.8	4.9
	135.3	9.1	4.9
Expert cure system	136.3	9.1	4.9
	137.5	9.3	5.1
	138.2	9.4	5.2

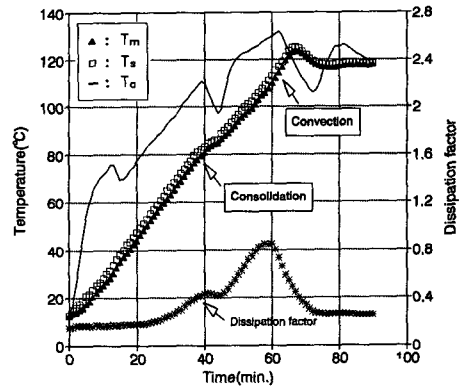
하여 [0]₈와 [90]₈에 대하여 각각 3번씩 인장실험을 수행하였다.⁽¹⁶⁾ 또한 [±45]_{2s}의 적층각을 지닌 복합재료 시편의 인장실험을 하여 탄소섬유 복합재료의 전단물성을 구하였다. Fig. 8은 인장실험결과로 구한 복합재료의 탄성계수값을 평균하여 나타낸 것으로, 전문가시스템으로 제조한 복합재료의 탄성계수가 조금씩 큰 값을 가지나 (주)선경에서 제공한 경화사이클로 제작한 시편과 비슷한 물성치를 가짐을 볼 수 있다. Fig. 9는 제조된 복합재료의 강도값을 비교한 그림으로 두 방식이 거의 비슷한 물성치를 가짐을 볼 수 있다. 인장실험에서 구한 복합재료의 탄성계수값과 인장강도값은 Table 2와 3에 나타나 있다. 위의 결과에서 보는 바와 같이 8-ply

Table 3 Strengths of the 8-ply composite materials

	Tensile strengths (MPa)		Shear strengths (MPa)
	[0] ₈	[90] ₈	[0/90] _{2s}
Conventional cure system	1723.0	36.0	72.3
	1730.0	37.5	74.2
	1875.0	41.3	73.7
Expert cure system	1620.0	37.7	73.7
	1660.0	40.0	74.8
	1698.0	44.2	75.4



(a) The 2nd step of the cure started when the variation rate of dissipation factor was larger than 4.5%



(b) The 2nd step of the cure started when both the variation rate and the dissipation factor itself were larger than 6% and 0.4, respectively

Fig. 10 Cure cycle for the expert autoclave

와 같이 비교적 얇은 복합재료의 제조에 있어서 본 연구에서 개발된 전문가시스템을 사용하면 상용 경화사이클로 제작된 복합재료의 물성치와 비슷한 기계적 특성을 유지하면서 제조시간을 훨씬 단축시킬 수 있었다.

두꺼운 복합재료의 제조에 본 전문가시스템을 적용하기 위해 52-ply의 프리프레그를 $[0/90]_{13s}$ 와 $[\pm 45]_{13s}$ 로 적층하여 SBS(short beam shear)와 인장실험을 하였다. 오토클레이브내에서 복합재료를 제조할 때, 압밀과정에서 배출되는 여유분의 수지를 흡수하고 섬유체적율을 조절하기 위하여 Bleeder를 복합재료의 앞·뒷면에 삽입하여 섬유체적율이 최대가 되도록 하였다. 따라서 제조된 시편의 섬유체적율이 높을수록 압밀은 효과적으로 일어났다고 할 수 있다. Fig. 10(a)는 전문가시스템으로 구성된 경화사이클로서 손실계수의 변화율이 분당 4.5%이상 변화하면 2단계 경화를 시작하도록 되어 있다. Fig. 10(a)에서 보는바와 같이 수지의 발열반응으로 인하여 최대 경화온도가 상으로 10°C의 오버슈트(overshoot)가 발생하였으며, 복합재료의 제조에 걸리는 시간은 약 2시간 10

분이었다. 복합재료의 2단계 경화시점을 손실계수가 0.4이상이고 변화율이 분당 6%이상으로 재조정하여 복합재료를 제조하면 Fig. 10(b)와 같은 경화사이클이 얻어진다. Fig. 10(b)에서 보는 바와 같이 수지의 발열반응으로 인하여 최대 경화온도 이상으로 3°C의 오버슈트가 발생하였으며, 복합재료의 제조에 걸리는 시간은 약 1시간 30분이었다. 위의 두 경우와 상용사이클로 제조한 복합재료의 섬유체적율을 비교하기 위하여 복합재료의 무게를 측정한다음, 가열로에서 복합재료의 수지부분을 태워서 제거하고 다시 무게를 측정하여 섬유체적율을 구하였다. Fig. 11은 복합재료의 섬유체적율은 나타낸

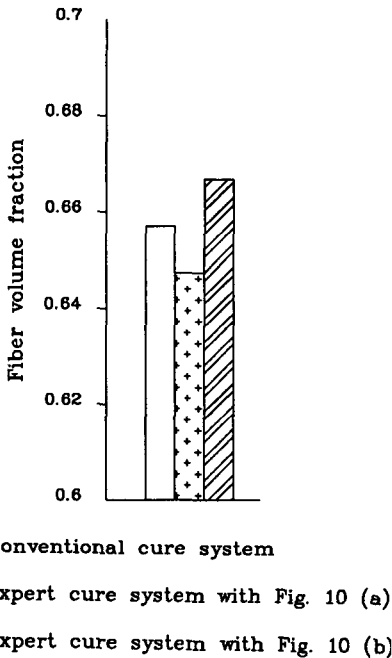


Fig. 11 Fiber volume fractions of the composite material manufactured by the conventional and expert cure systems

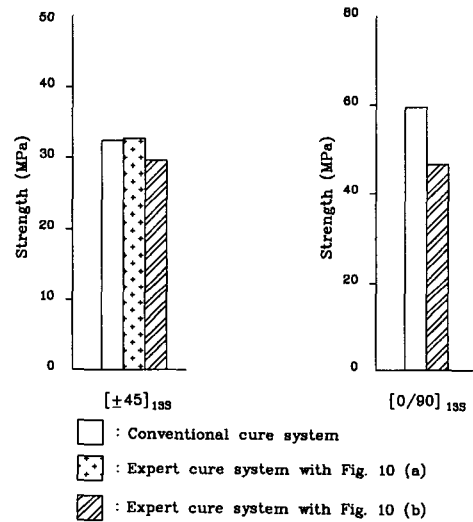


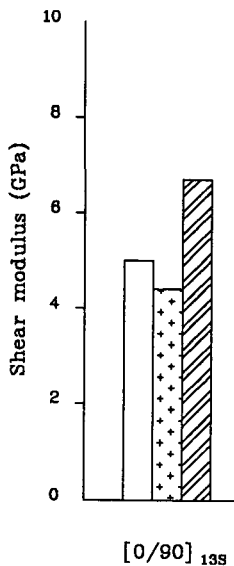
Fig. 12 Short beam shear strength of the specimens

Table 4 Short beam shear strengths

	Conventional cure system (MPa)	Expert cure system (MPa)
$[0/90]_{13s}$	54.7	44.1
	65.1	45.9
	63.4	47.5
	56.4	47.8
	57.0	45.7
	59.1	47.7
	60.2	48.1
	59.4	45.2

그래프로서, 복합재료의 2단계 경화시점을 손실계수가 0.4이상이고 변화율을 분당 6%이상으로 재조정된 시편의 섬유체적율이 가장 높아 압밀이 효과적으로 이루어졌음을 알 수 있다. Fig. 12는 SBS 실험을 8번씩 수행하여 평균값을 취한 결과로서, 전문가시스템으로 완성된 복합재료의 전단강도값이 떨어지는 현상을 볼 수 있는데 그 이유는 섬유체적율이 높기 때문이다. 복합재료 제조시에 Bleeder의 양을 줄여 섬유체적율을 낮추면 SBS 전단강도값을 높일 수 있다. SBS 실험의 결과값은 Table 4에 나타나 있다.

Fig. 13은 $[\pm 45]_{13s}$ 복합재료 시편의 인장실험을 3번 수행하여 탄소섬유 복합재료의 전단물성을 구한 결과이다. 복합재료의 2단계 경화시점을 손실계수가 0.4이상이고 변화율을 분당 6%이상으로 재조정된 시편의 횡탄성계수가 가장 큰 값을 가지는데, 그 이유는 복합재료의 섬유체적율이 높기 때문이다.



- : Conventional cure system
- ⊕ : Expert cure system with Fig. 10 (a)
- ▨ : Expert cure system with Fig. 10 (b)

Fig. 13 Shear moduli of the specimens manufactured by the conventional and the expert cure systems

5. 결 론

본 연구에서는 탄소섬유 에폭시 복합재료의 제조에 대한 전문가시스템을 연구하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- (1) 복합재료의 제조경화공정을 최적화하고 품질을 향상시키기 위한 전문가시스템을 완성하였다.
- (2) 개발된 전문가시스템을 사용하여 8-ply로 적층된 복합재료의 제조시간을 40분으로 단축시킬 수 있었으며, 기계적 물성은 상용사이클로 제조된 시편과 동일하게 유지되었다.
- (3) 두꺼운 52-ply의 복합재료는 제조시간을 1시간 30분으로 단축시킬 수 있었으며, 압밀이 효과적으로 이루어졌다.

참고문헌

- (1) Reinhart, T. J. (Eds.), 1987, "Composites," *ASM International*, pp. 743~778.
- (2) Chiao, L. and Lyon, R. E., 1990, "A Fundamental Approach to Resin Cure Kinetics," *J. of Composite Materials*, Vol. 24, pp.
- (3) Pagano, N. J. and Hahn, H. T., 1975, "Curing Stresses in Composite Laminates," Vol. 24, pp. 739~752.
- (4) Loos, A. C. and Springer, G. S., 1983, "Curing of Epoxy Matrix Composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 17, pp. 135~169.
- (5) Springer, G. S., 1982, "Resin Flow during the Cure of Fiber Reinforced Composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 16, pp. 400~410.
- (6) Lee, W. I. and Springer, G. S., 1987, "A Model of the Manufacturing Process of Thermoplastic Matrix Composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 21, pp. 1017~1053.
- (7) Twardowski, T. E., Lin, S. E. and Geil, P. H., 1993, "Curing in Thick Composite Laminates: Experiment and Simulation," *J. Composite Materials*, Vol. 27, pp. 216~250.
- (8) Dusi, M. R., Lee, W. I., Ciriscioli, P. R. and Springer, G. S., 1987, "Cure Kinetics and Viscosity of Fiberite 976 Resin," *J. of Composite Materials*, Vol. 21, pp. 243~261.

- (9) Kalra, L., Perry, M. J. and Lee, L. J., 1992, "Automation of Autoclave Cure of Graphite-Epoxy Composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 16, pp. 2567~2584.
- (10) Ciriscioli, P. R. and Springer, G. S., 1990, *Smart Autoclave Cure of Composites*, Technomic Publishing Co., Chap. 1~3.
- (11) Hudson, D., 1974, "The Use of Automatic Dielectrometry for Autoclave Moulding of Low Void Composites," *Composites*, pp. 247~252.
- (12) Kim, J. S. and Lee, D. G., 1993, "On-line Cure Monitoring and Viscosity Measurement of Carbon Fiber Epoxy Composite Materials," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 37, pp. 405~416.
- (13) Ogata, K., 1970, *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Chap. 5.
- (14) Gutowski, T. G., Morigaki, T. and Cai, Z., 1987, "The Consolidation of Laminate Composite," *J. of Composite Materials*, Vol. 21, pp. 172~199.
- (15) White, F. M., 1984, *Heat Transfer*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., chap. 1.
- (16) Mallick, P. K., 1988, *Fiber-Reinforced Composites*, Marcel Dekker, Inc., Chap. 4.