

두꺼운 복합재료 실린더의 생산 및 열응력 해석

김 철*

Continuous Curing and Residual Stresses of Thick Composite Cylinders

Kim, Cheol

Key Words: Continuous Curing, Thermal Stress, Thick Composite Cylinder

ABSTRACT

A new composite manufacturing technique which combines winding and curing together is studied and analyzed. This method is especially suited to the manufacture of thick composite materials in which thermal spiking is a common problem. An experimental apparatus was designed and built for use with a filament winder to continuously cure a thick composite cylinder. A hoop-wound composite cylinder with 152 mm wall thickness was manufactured and embedded thermocouples and strain gages were monitored throughout the cure process. The experimental data were compared with analytical results.

1. 서 론

복합재료의 우수한 성질을 이용한 구조물의 설계가 증가함에 따라 다양한 응용분야가 나타나고 있다. 특히 고압상태의 복합재료 잠수함과 같은 구조물의 설계를 위해서는 그 두께가 크게 증가할 수밖에 없다. 그러나 두꺼운 열경화성 복합재료 구조물의 생산을 위해서는 몇 가지 극복해야 할 문제점이 있다. 두께 방향으로의 낮은 열전도율은 가열 및 냉각 과정에서 표면과 내부의 큰 온도차와 잔류응력을 유도한다. 이 때문에 표면의 경화(cure)가 내부보다 빨리 일어나서 잉여수지와 기포 등이 외부로 나오지 못하고 내부에 남거나 높은 잔류응력이 존재하여 기계적 특성을 저하시킨다. 다른 문제는 내부에서 수지의 발열성 경화 반응(exothermic curing reaction)에 의한 과도한 온도상승(thermal spiking)이며, 이 때문에 기지의 손상이 쉽게 일어날 수 있다 [1,2]. 가열 속도를 매우 느리게 하고, 특별한

성형사이클을 사용하는 방법이 때때로 높은 온도 상승을 피하기 위해 사용되나 이런 방법은 생산 시간을 매우 길게 하여 생산비용을 상승시킨다.

두꺼운 복합재 구조의 생산을 위해서 본 연구에서는 적층(winding)과 열성형을 결합한 새로운 연속성형(continuous curing)법을 소개한다. 이 방법은 Fig. 1에 간단히 설명되어 있으며, 적층 시 일정 두께에 도달하면 기지 자체 발열반응 열원에 의해서 성형을 진행시키는 방법이다. 또 적층과 성형이 거의 동시에 진행되기 때문에 전체 생산시간을 크게 줄일 수 있다[3]. 감기와 성형을 결합한 연구는 Korotkov[4] 등에 의해서도 논의되었다. 본 논문은 연속성형법의 장점을 입증하기 위하여 이 방법을 적용하여 152 mm 두께의 Graphite/Epoxy 실린더를 제작하였으며, 생산 과정에서 생긴 잔류응력을 분석하였다.

2. 공정모델 및 열응력 해석

2.1 성형공정의 수식화

성형공정중 열전달 및 경화과정을 다음의 식으로 나타내었다.

* 경북대학교 기계공학부

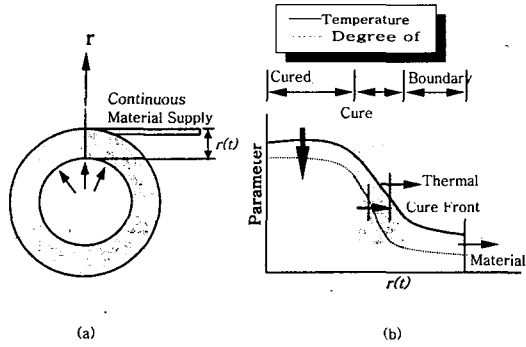


Fig. 1. Continuous curing process schematic

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[k_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \rho \gamma H_r \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dc}{dt} = f(c, T) \quad (2)$$

여기서 변수 ρ , c_p , k 는 각각 복합재료의 밀도, 비열, 열전도 계수를 나타낸다. 식(1)의 마지막 항은 경화에 의한 열 발생을 나타낸다. H_r 은 단위 체적당 총 발열량이고, γ 는 수지의 질량비이다. 재료의 경화도도는 경화도 c 로 표시된다. 식(1)의 경화도는 사용되는 수지의 종류에 따라 결정되며 최근 많이 사용되는 모델은 Arrhenius식의 형태를 가진다. 즉,

$$\frac{dc}{dt} = Z \exp \left[-\frac{AE}{RT} \right] f(c) \quad (3)$$

다음의 경계조건은 내외부의 일정 온도, 열 유동, 단열상태, 또는 표면 대류상태 등을 모두 포함하는 식이다.

$$a_i \frac{\partial T_s(t)}{\partial r} + b_i T_s(t) + c_i T_\infty(t) = d_i \quad (4)$$

$i = \text{inner, outer}$

a_i , b_i , c_i , d_i 는 경계조건에 따라 일정한 값을 가지는 상수이다. 변수 $T_\infty(t)$ 와 $T_s(t)$ 는 주변 온도와 경계표면 온도를 나타낸다. 식(3)과 (4)는 참고문헌[3]에 자세히 기술되어 있다.

필라멘트 와인딩 과정에서는 주기적으로 프리프레그 토우가 표면에 더해지므로, 경계가 움직이는 문제가 발생한다. 시간과 위치에 따라 움직

이는 실린더 표면은 수학적으로 다음과 같이 표시된다.

$$r(t) = R_i + \Delta r \sum_{k=1}^N H(t - k\Delta t) \quad (5)$$

여기서 $H(t)$ 는 Heaviside 함수, R_i 는 초기두께, N 은 총 증분횟수, Δr 은 두께 증분, Δt 는 시간 증분이다. 여기서 $\Delta r/\Delta t$ 는 두께의 평균증가속도이다. 이 식의 해를 구하기 위하여 유한차분법에 근거한 수치해석모델이 개발되었다.

2.2 열응력 해석

잔류응력은 주로 수지의 화학적 수축(chemical shrinkage)과 냉각 중 섬유와 기지간의 열팽창계수의 부조화에 의해 유도된다. 두꺼운 실린더의 잔류응력은 실린더의 내외 표면의 얇은 링이 반경방향으로 잘려져 잔류응력이 이완될 때, 원주방향 변형을 측정함으로써 계산될 수 있다. 잘려진 복합재 링은 잘려진 면의 잔류 굽힘모멘트에 의해 닫히거나 열리는 방향으로 변형된다.

등방성재료 링의 잔류 굽힘모멘트에 관한 식은 Timoshenko 와 Goodier의 연구에서 얻을 수 있다[5]. 복합재 링의 굽힘모멘트는 Lekhnitskii[6]에서 다음과 같이 유도된다.

$$M = \Delta l \frac{r_o^2 g L}{\pi (r_i + r_o)} \frac{E_{rr} E_{\theta\theta}}{(E_{rr} - E_{\theta\theta})} \quad (6)$$

실린더의 원주방향 응력(σ_θ)과 반경방향 응력(σ_r) 분포는 Lekhnitskii[6,7]의 식을 기초로 하여 다음과 같이 유도된다.

$$\sigma_\theta = -\frac{M}{r_o^2 h g} \left[1 - \frac{1 - c^{k+1}}{1 - c^{2k}} k \beta^{k-1} + \frac{1 - c^{k-1}}{1 - c^{2k}} c^{k+1} k \beta^{-k-1} \right] \quad (7)$$

$$\sigma_r = -\frac{M}{r_o^2 h g} \left[1 - \frac{1 - c^{k+1}}{1 - c^{2k}} \beta^{k-1} - \frac{1 - c^{k-1}}{1 - c^{2k}} c^{k+1} \beta^{-k-1} \right] \quad (8)$$

$$g = \frac{1 - c^2}{2} - \frac{k}{k+1} \frac{(1 - c^{k+1})^2}{1 - c^{2k}} + \frac{k c^2}{k-1} \frac{(1 - c^{k-1})^2}{1 - c^{2k}} \quad (9)$$

$$c = \frac{r_i}{r_o}, \quad \beta = \frac{r}{r_o}, \quad k = \sqrt{\frac{E_{\theta\theta}}{E_{rr}}} \quad (10)$$

여기서 Δl , L , h , r_i , r_o , $E_{\theta\theta}$, E_{rr} 은 각각 잘려진 부분의 변위, 실린더 길이, 실린더 두께, 내경, 외경, 원주 및 반경방향의 탄성계수이다.

3. 실험장치설계 및 결과

연속성형법을 사용하여 두꺼운 복합재 실린더를 제조할 수 있도록 실험장치가 설계 및 제작되었다. Fig. 2와 같이 히터의 기능을 겸하는 맨드릴이 4축 필라멘트 와인더에 결합된다. 외경 102 mm 스테인레스강 맨드릴 내에 직경 15.9mm의 봉히터가 설치되며 전원은 튜브의 한쪽 끝에 있는 구리 슬립링과 탄소 브러시를 통해 공급된다. 온도 제어기가 맨드릴 표면온도를 제어한다. 260°C 까지 사용 가능한 MM 250BG 콘스탄탄 스트레인 게이지가 잔류응력의 측정에 사용되었다. 20개의 채널을 가진 데이터 기록장치는 필라멘트와인더의 척에 부착되어 같이 회전한다. 전체 실험장치의 사진이 Fig. 3에 나타나 있다.

재료는 IM6/3501-6 Graphite/Epoxy 프리프레그 토우이며, 초기두께, 회전속도, 맨드릴 표면의 온도사이클, 장력 등의 공정변수는 사전에 해석에 의해서 결정되었다. 평균 두께증가속도는 1ply/46sec.(33.0rpm), 초기두께는 6mm이며, 토우에는 31N의 장력이 걸린다. 회전시 실린더의 내외부에 24 플라이로 된 링을 만들기 위하여 Release Film 이 삽입된다. 프리프레그 토우를 감는 것은 15시간 20분만에 종료되었다. 실린더 표면의 완전 경화를 위하여 오토클레이브에 넣어 177°C에서 5시간 동안 성형시켰다. 최종적으로 두께 152mm, 길이 100mm, 내경 51mm의 실린더가 제작되었다. 실린더와 맨드릴 어셈블리는 Fig. 3에 나타나 있다.

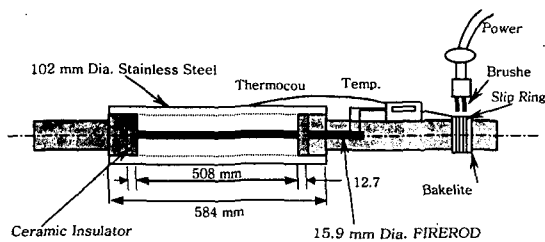


Fig. 2. Mandrel heating system



Fig. 3. Experimental set-up

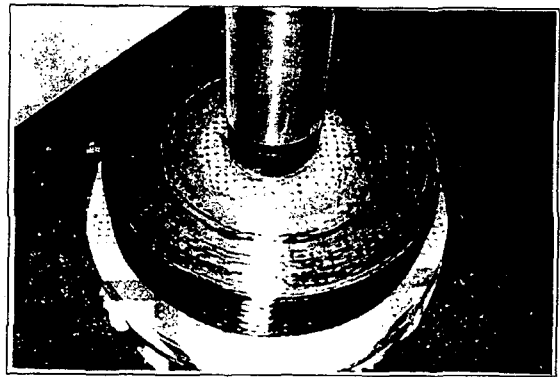


Fig. 4. Composite cylinder after fabrication

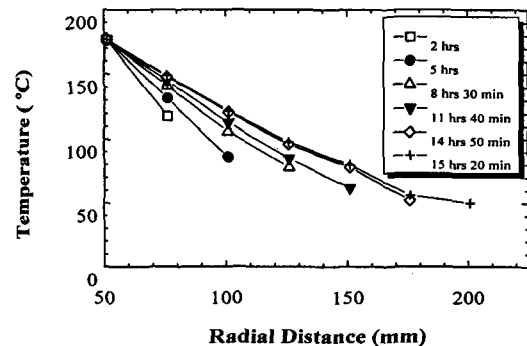


Fig. 5. Experimental thermal distribution

며, 최종 실린더 사진이 Fig. 4에 있다.

열전대로 측정된 실린더 내부의 온도분포가 Fig. 5에 나타나 있다. 이것은 Fig. 1b의 이상적인 경우와 약간의 차이가 있다. 실험 후 해석결과, 경화전파속도(cure front velocity)는 실린더 표면의

대류 계수와 열전도 계수의 비(h/k)에 매우 민감함을 보여준다. 실험 데이터를 사용하여 이 비를 2% 정도까지 낮추어서 Fortran 코드로 계산한 결과 실험치와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 경화 전선은 두께 방향으로 절반 정도 전파되었으며, 두께의 2/3까지는 실린더의 전체적인 특성이 좋았다. 표면부근의 최종 성형을 위해서 오토클레이브가 사용되었다.

연속성형법이 잔류응력에 미치는 영향이 평가되었다. 복합재 링은 잘렸을 때 닫히는 방향으로 변형되며, 원주방향 잔류응력은 외부에서는 인장, 내부에서는 압축이 된다[8,9]. 변위는 내부 링에서 -10.69mm, 외부 링에서는 -15.24mm이다. 이들은 식(6)의 잔류 굽힘모멘트 계산에 쓰인다. 계산된 응력분포는 Fig. 6에 나타나 있다. 유사한 결과가 Kardomateas[10]의 연구에서도 발견된다. IM6/3501-6의 기계적 물성치는 $E_{\theta\theta}=141.96$ GPa, $E_{rr}=9.79$ GPa 이다. 최대 σ_{θ} 는 314.5 MPa 와 -522.8 MPa 이며, 최대 σ_r 은 $r=91$ mm 일 때 -93.8 MPa 이다. 이 수치들은 두께(152mm)에 비해 상대적으로 낮다. 비슷한 크기의 잔류응력이 내경이 38mm이고 외경이 45.7mm인 복합재 실린더를 오토클레이브로 성형했을 때 유도 되었다[11].

4. 결론

필라멘트 와인딩을 이용한 연속성형 실험이 수행되었다. 두께 152mm의 거의 2/3가 감기 종료와 동시에 완전 경화되었으며, 나머지도 오토클레이브에서 5시간만에 완전히 경화되었다. 전 성형공정에서 과도한 온도상승은 발견되지 않았으며, 실린더 내의 잔류응력도 크지 않았다. 이것은 연속성형이 매우 두꺼운 복합재 실린더 등의 구조물의 생산에 효과적이며 경제적임을 나타낸다.

참고문헌

1. P. R. Ciriscioli, Q. Wang, and G. S. Springer, 1992, "Autoclave Curing - Comparisons of Model and Test Results," *Journal of Composite Materials*, 26:90-102.
2. T. A. Bogetti and J. W. Gillespie, Jr., 1991, "Two-Dimensional Cure Simulation of Thick

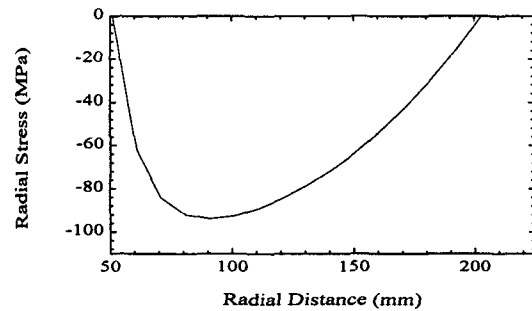


Fig. 6. Hoop thermal stress distribution

Thermosetting Composites," *Journal of Composite Materials*, 25:239-273.

3. C. Kim, H. Teng, C. L. Tucker, III, and S. R. White, 1995, "The Continuous Curing Process for Thermoset Polymer Composites. Part 1: Modeling and Demonstration," *Journal of Composite Materials*, 29:1222-1253.

4. V. N. Korotkov, Y. A. Chekanov, and B. A. Rozenberg, 1993, "The Simultaneous Process of Filament Winding and Curing for Polymer Composites," *Composite Science and Technology*, 47:383-388.

5. S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, 1988, *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, pp.71-80.

6. S. G. Lekhnitskii, 1968, *Anisotropic Plates*, translated by S. W. Tsai & T. Cheron. Gordon and Breach Science Publishers.

7. S. G. Lekhnitskii, 1981, *Theory of Elasticity of an Anisotropic Body*, Mir Publishers, Moscow.

8. A. K. Roy, 1991, "Response of Thick Laminated Composite Rings to Thermal Stresses," *Composite Structures*, 18:125-138.

9. C.W. Gabrys and C. E. Bakis, 1994, Fabrication of Thick Filament Wound carbon Epoxy Rings using in-situ Curing: Manufacturing and Quality, Proceedings of the ASC 9th Technical Conference, University of Delaware, September 20-22, pp. 1090-1097.

10. G. A. Kardomateas, 1989, "Transient Thermal Stresses in Cylindrically Orthotropic Composite Tubes," *Journal of Applied Mechanics*, 56:411-417.

11. D. Kokan and K. Gramoll, 1994, "Analysis of Orthotropic Composite Cylinders," *Composite Engineering*, 4:979-993.