

동시경화 하이브리드 금속/복합재료 구조물의 제조 잔류 열응력 제거를 위한 경화사이클에 관한 연구

김학성* · 박상욱* · 이대길**

Investigation of cure cycle for co-cured metal/composite hybrid structures without fabricating thermal residual stress

Hak Sung Kim, Sang Wook Park and Dai Gil Lee

ABSTRACT

In this work, the cure cycle of co-cured metal/composite structure was investigated to decrease fabricating thermal residual stresses between the metal and the composite material. DSC (Differential scanning calorimetry) experiment and static lap shear test of co-cured aluminum/composite double lap joint as well as the curvature experiment of co-cured steel/composite strip were performed to investigate the effect of curing cycle on the thermal residual stress of co-cured hybrid structures. From the experiments, it was found that post curing method after abrupt cooling of co-cured aluminum/composite hybrid structure at certain point of degree of cure during curing process could eliminate fabricating the thermal residual stresses.

Key Words: Fabricating thermal residual stress, Co-cured hybrid metal/composite structures, Post curing

기호 설명

T_{curing} :	금속/복합재료 계면 접합 시점의 온도
T_{room} :	상온의 온도
α_c :	복합재료의 열팽창 계수
α_{steel} :	강철의 열팽창 계수
E_{com} :	복합재료의 강성
E_{steel} :	강철의 강성
t_{com} :	복합재료 스트립의 두께
t_{steel} :	강철 스트립의 두께

1. 서론

복합재료는 비강성, 비강도가 높고 감쇠능이 우수하여 경량 구조물로서의 적용예가 크게 증가하

고 있다. 그러나 아직까지 복합재료의 상대적으로 높은 가격으로 인하여 모든 구조물을 복합재료로 제작하지는 못하는 실정이며 가격이 저렴한 금속 재료와 함께 하이브리드 구조로 제작되고 있다 [1]. 복합재료와 금속재료를 함께 사용하여 구조물을 제작하는 방법에는 접착제 접합, 동시경화 접합, 기계적 접합 등이 있다. 그 중 동시경화 방법은 경화 공정 중 복합재료의 잉여 레진을 이용하여 금속과의 접착을 이루기 때문에, 접합 공정이 상대적으로 간단하고 쉬우므로 하이브리드 구조물 제작에 널리 이용되고 있다.

동시경화 방법에서는 고온에서 금속/복합재료의 접착이 이루어진 후 상온으로 돌아오게 되는데 이때 두 재료의 열팽창 계수 차이로 인하여 제조 잔류 열응력이 발생하게 된다. 제조 잔류 열응력은 구조물의 피로 수명을 떨어뜨릴 뿐 아니라 치수

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과 정교수

정밀도에도 악영향을 미치게 된다. 현재까지 제조 잔류 열응력을 제거하기 위하여 금속재료에 압축 응력을 가한 상태에서 경화를 시키는 방법이 사용되어 왔다 [2]. 그러나 이 방법은 압축 공정이 복잡하고 보수 장비가 추가로 필요하게 되어 대형 구조물의 경우에는 적용성이 떨어지는 단점이 있었다. 또한 과도한 압축 하중으로 인하여 구조물에 변형이 발생할 수도 있다.

본 연구에서는 동시경화법으로 제작되는 금속/복합재료 하이브리드 구조물의 제조 잔류 열응력을 감소시키기 위한 경화사이클에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 복합재료의 경화사이클에 따른 DSC (Differential scanning calorimetry) 실험, 동시경화된 강철/복합재료 스트립 (Strip)의 곡률 시험, 동시경화 알루미늄/복합재료 양면 겹치기 조인트의 정적 강도 실험을 수행하였다.

2. 시편 제작 및 시험 방법

2.1 DSC 실험

본 연구에서는 고강성 복합재료 (URN300, SK Chemical, Suwon)을 사용하였으며 그 물성을 Table 1에 나타내었다. 복합재료의 경화사이클에 따른 경화도를 측정하기 위하여 DSC (Differential scanning calorimetry)를 사용하였다. DSC는 접착제 등의 열경화성 수지의 경화 시 발생하는 열량을 측정하여 경화도를 구하는 경화모니터링 방법이다. 실험을 위하여 TA Instrument (USA)사의 DSC Q100 시험기를 사용하였다. 시험기에 9~11 mg 정도의 탄소섬유/에폭시 복합재료를 넣고 온도와 시간에 대한 열 발생을 (Heat rate)을 측정하였다. 복합재료가 완전 경화될 때까지의 전체 발열량을 측정하기 위하여 1 °C/min의 승온 속도로 180 °C까지 승온 실험을 수행하였으며 온도에 따른 경화도를 측정하기 위하여 100 °C ~140 °C의 범위에서 10 °C의 간격으로 등온 주사 실험을 수행하였다. 또한 실제 경화 사이클에 대한 DSC 실험도 수행하였다.

2.2 동시경화 강철/복합재료 스트립 곡률 시험

금속과 복합재료의 완전히 경화되어 접착면이 접합되면, 두 재료가 고온에서 상온으로 돌아왔을

Table 1 Material properties

	Steel	Aluminum	URN300
E_1 (GPa)	207	72	380
E_2 (GPa)	-	-	5.1
α_1 ($\mu\text{S}/^\circ\text{C}$)	11	27	-0.9
α_2 ($\mu\text{S}/^\circ\text{C}$)	-	-	27
ν_{12}	0.3	0.3	0.23

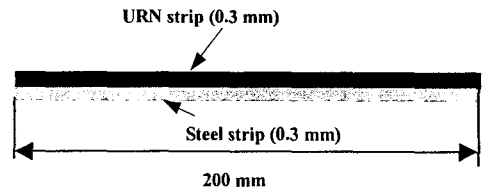


Fig. 1 Configuration of co-cured steel/composite strip

경우 열팽창계수 차이에 의하여 잔류 응력이 발생한다. 반면 계면이 완전히 접합되지 않은 상태에서 상온으로 냉각되면 일정한 온도 이하부터 접합이 되어 상온에서의 잔류 열응력이 감소하게 된다. 따라서 계면의 경화 상태는 상온에서의 잔류 열응력에 중요한 변수가 된다. 본 연구에서는 계면의 경화도가 하이브리드 구조물의 잔류 열응력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 1와 같이 동시경화된 강철/복합재료 스트립을 제작하였다. 복합재료와 강철 스트립 사이의 계면이 접합되는 온도가 T_{curing} 이고, 상온이 T_{room} 일 때 스트립의 곡률 R 은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{1}{R} = \frac{1(1+m)^2(\alpha_m - \alpha_c)(T_{curing} - T_{room})}{t[3(1+m)^2 + (1+mn)(m^2 + 1/mn)]} \quad (2-1)$$

여기서,

$$m: t_{steel}/t_{com}$$

$$n: E_{steel}/E_{com}$$

$$t: t_{com} + t_{steel}$$

T_{curing} 이 높을수록 금속/복합재료 계면 사이의 접합 온도가 상대적으로 높아져 상온에서 잔류 열응력이 커짐을 의미한다.

2.3 동시경화 알루미늄/복합재료 양면 겹치기 조인트 제작 및 정적 실험

경화 사이클에 따른 금속/복합재료 계면의 접착 강도와 접합부의 잔류 열응력을 평가하기 위하여

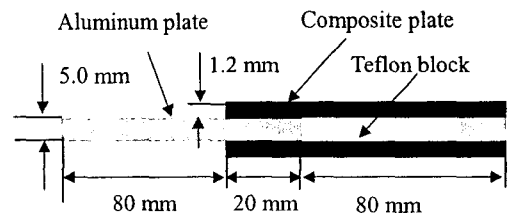


Fig. 2 Configuration of co-cured aluminum/composite

double lap joint

Fig. 2 와 같이 동시경화 알루미늄/복합재료 양면 접착기 조인트를 제작하였고 정적 실험을 수행하였다. 만능 재료 시험기 (Instron 5583)를 사용하여 실험을 수행하였으며 하중 속도는 0.5 mm/min 으로 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 DSC 실험 결과

Fig. 3 에 고강성 탄소섬유 에폭시 복합재료의 승온, 등온 실험으로부터 얻은 경화율 변화를 도시하였다. DSC 승온 실험으로부터 복합재료가 완전 경화 될 때까지의 전체 발열량 (H_U)을 측정하였으며 그 값은 81.4 J/g 이었다. 한편 등온 실험으로부터 등온 경화율 ($\frac{d\beta}{dt}$)은 식 (3-2) 와 같이 계산된다. 승온 실험으로부터 구해진 전체 발열량 (H_U)과 등온 실험에서 구해진 등온 발열량 (H_T), 단위 시간당 등온경화율 ($\frac{d\beta}{dt}$)로부터 경화도 α 는 식 (3-3)와 같이 계산된다.

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{H_U} \left(\frac{dQ}{dt} \right) \quad (3-1)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{H_T} \left(\frac{dQ}{dt} \right) \quad (3-2)$$

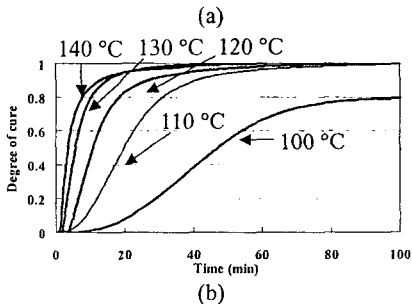
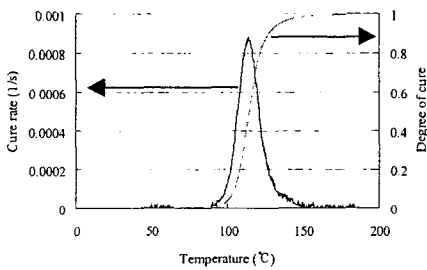


Fig. 3 DSC experiment result: (a) dynamic scanning result; (b) Isothermal scanning results.

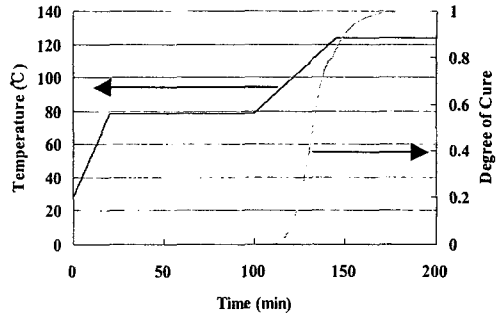


Fig. 4 Absolute degree of cure during recommended cure cycle of composite material.

$$\alpha = \frac{H_T}{H_U} \int \left(\frac{d\beta}{dt} \right) dt \quad (3-3)$$

Fig. 3(b)에 등온실험 결과를 도시하였다. 복합재료는 110 °C 이상의 온도에서 완전히 경화될 수 있었으며 그 이하의 온도에서는 두 시간 이상의 시간이 경과하여도 경화도가 1.0에 도달하지 못하였다. 따라서 복합재료가 완전한 경화를 이루기 위해서는 110°C 이상의 온도에서 경화시켜야 한다. 위와 같은 방법으로 제조사에서 추천하는 경화 사이클에 대한 경화도도 측정하였으며 Fig. 4에 도시하였다.

3.2 동시경화 강철/복합재료 스트립 곡률 시험

복합재료/금속 계면의 경화도에 따른 계면 접합 온도를 알아 보기 위하여 동시 경화 강철/복합재료 스트립을 제작하였다. 경화 사이클 도중 Fig. 5 (a)에 도시된 각 시점에서 시편을 빼내고 펜을 이용하여 상온으로 급격히 냉각 시켰다. 이후 Fig. 5(b)와 같이 상온에서 시편의 곡률을 측정하고 식 (2-1)로부터 금속/복합재료 계면이 접합되는 온도를 계산하였다. 냉각 시점의 복합재료의 경화도에 따른 금속/복합재료 계면의 접합 온도를 Fig. 5 (c)에 도시하였다. 냉각 시점의 복합재료 경화도가 증가할수록 금속/복합재료 계면의 접합이 이루어지는 온도가 증가하였으며 특히 0.5 이상의 경화도에서 시편을 냉각시켰을 경우 계면이 접합되는 온도가 급격히 증가하였다. 이는 경화도가 0.5 이상이면 계면의 접합이 이미 고온에서 이루어졌다는 것을 의미하며, 경화도 0.5 이하에서 시편을 냉각했을 경우에는 계면의 레진이 완전히 경화되지 않은 상태이기 때문에 온도가 낮아지면서 상대적으로 낮은 온도에서 계면이 접

착된다는 것을 의미한다. 따라서 하이브리드 구조물의 계면의 경화도를 조절하여 냉각시키면 금속/복합재료 계면이 접합되는 온도를 조절할 수

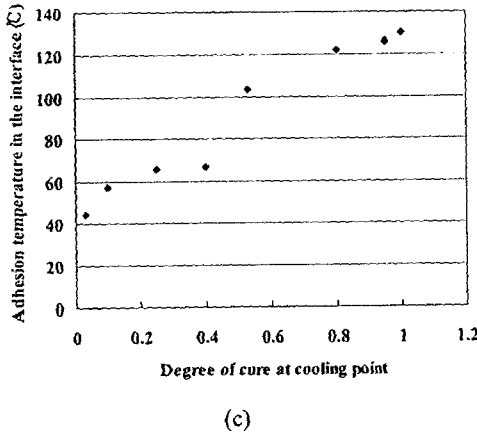
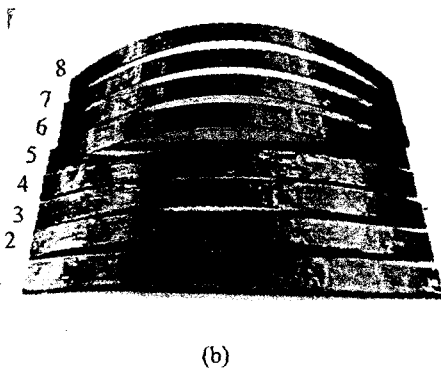
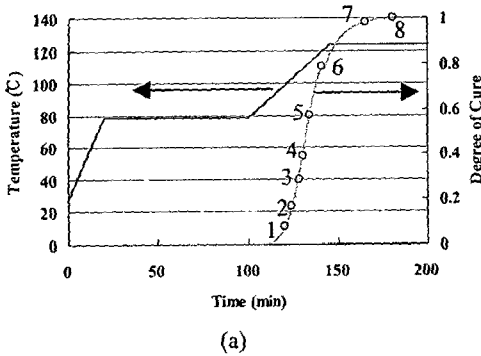


Fig. 5 Curvature experiment of co-cured steel/composite strip: (a) cooling point of co-cured steel/composite strip; (b) co-cured steel/composite strip; (c) Adhesion temperature in the interface of steel/composite with respect to degree of cure at cooling point.

있게 되므로 구조물의 제조 잔류 열응력을 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

3.3 동시경화 알루미늄/복합재료 양면접치기 조인트 정적 강도 실험

위와 같이 경화 도중 시편을 냉각시킬 경우 금속/복합재료 계면이 접합되는 온도를 낮출 수 있어 잔류 열응력을 줄일 수 있지만 완전한 경화가 이루어지지 않기 때문에 계면의 접합 강도는 감소한다. 경화사이클에 따른 계면의 접합 강도 및 잔류 열응력 영향을 파악하기 위하여 경화사이클에 따라 동시경화 알루미늄/복합재료 양면 접치기 조인트를 제작하고 정적 강도를 실험하였다. 앞 절의 강철/복합재료 스트립과 마찬가지로 경화 도중 Fig. 6(a)에 도시된 각 시점에서 시편을 빼내고 팬을 이용하여 상온으로 냉각시킨 후 정적 강도 실험을 수행하였다. Fig. 6(b)에 시편 냉각 시점의 경화도에 따른 동시경화 알루미늄/복합재료 양면 접치기 조인트의 정적 강도를 나타내었다. 냉각 시점의 복합재료의 경화도가 커질수록 동시경화 조인트의 정적 강도는 증가하였다. 그러나 경화도가 0.7 인 시점에서 시편을 냉각시킨 경우에는 정적 강도가 오히려 감소하였다. 이는 계면에 존재하는 레진층의 경화가 어느 정도 진행된 상태에서 레진이 굳어져 취성이 생기고 이 상태에서 급격히 온도가 떨어졌을 때 강도가 약한 레진이 부분적으로 박리되었기 때문으

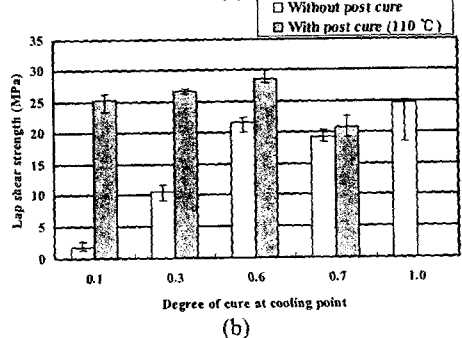
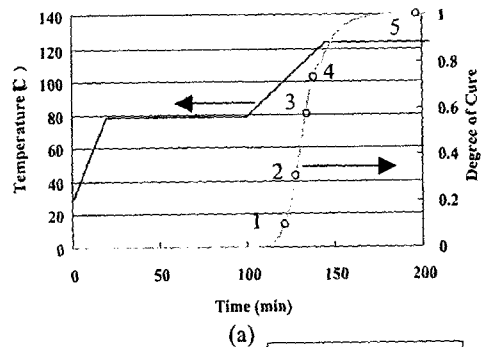


Fig. 6 Lap shear experiment of co-cured aluminum/composite double lap joint: (a) cooling point of co-cure aluminum/composite double lap joint; (b) Lap shear strength with respect to degree of cure at cooling point and post curing.

로 사료된다.

금속/복합재료 계면 레진층의 경화도를 증가시켜 계면 강도를 높이기 위하여 경화 사이클 도중 냉각된 시편을 후경화하였다. 앞 질의 등은 실험 결과, 110 °C 이상에서 완전한 경화가 이루어졌으므로 110 °C 의 온도에서 3 시간 동안 후경화 하였고 정적 실험을 수행하였다. 정적 실험 결과 Fig. 6 와 같이 경화도 0.6 에서 냉각시키고 다시 후경화 시켰을 경우의 정적 강도가 완전 경화된 시편보다 최대 12 % 증가하였다. 이 이하의 경화도에서 냉각하고 후경화 한 시편도 완전 경화된 시편보다 높은 계면 강도를 나타내었다. 이는 후경화를 통하여 계면의 경화도를 100 % 완전하게 이루었고 금속/복합재료 계면의 잔류 열응력도 감소 되었기 때문에 사료된다. 그러나 냉각시점의 경화도가 0.7 이상인 경우에는 냉각 도중 계면의 부분적 박리가 발생하였기 때문에 후경화를 거쳐도 완전 경화된 경우보다 계면의 정적 강도가 오히려 감소한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 동시경화 금속/복합재료 구조물의 제조 잔류 열응력을 감소시킬 수 있는 경화사이클에 대하여 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 금속/복합재료 구조물에서 경화 도중 일정한 경화도에서 경화를 멈추고 냉각시키는 공정을 통하여 금속/복합재료 계면의 접합 온도를 조절할 수 있었고 이를 통하여 상온에서의 잔류 열응력을 조절할 수 있었다.

2. 냉각 시점의 계면의 경화도가 증가함에 따라 금속/복합재료 구조물의 계면 접합 강도는 증가했으나 0.7 이상의 경화도 상태에서 냉각할 경우 오히려 정적 강도가 감소하였으며 이는 냉각에 의하여 금속/복합재료의 계면 박리가 발생했기 때문으로 사료된다.

3. 0.6 이하의 경화도에서 냉각된 금속/복합재료 구조물은 110°C 에서의 후경화를 통하여 완전 경화의 경우보다 계면의 정적 강도가 최대 12 % 향상 되었다. 이는 완전한 경화와 함께 제조 잔류 열응력이 감소했기 때문으로 사료된다.

향후 복합재료의 비가역적 경화반응에 대한 심층적으로 연구가 수행되어야 하며 후경화 공정, 냉각 공정 등에 대한 변수별 연구가 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 NRL 국가 지정 연구실 과제 및 BK21 과제의 도움으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) D. H. Cho, D. G. Lee and J. H. Choi, "Manufacture of One-piece Automotive Drive Shafts with Aluminum and Composite Materials," *Composite Structures*, 1997, Vol. 38, pp. 309-319.
- (2) D. H. Cho, and D. G. Lee, "Manufacturing of Cocured Hybrid Aluminum Composite Shafts with Preload to Reduce Residual Thermal Stresses," *Journal of Composite Materials*, 1998, Vol. 31, pp. 1221-1241.