

論文

무용매 Towpreg의 조성 최적화 및 특성에 관한 연구

민경주* · 이호성*

A Study on the Optimization of Composition and Characteristics of Solventless Towpreg

Kyung-Ju Min*, Ho-Sung Lee*

ABSTRACT

As a material for a dry filament winding structures, carbon fiber/epoxy resin towpreg was developed with effort of optimization of compositions and improvement of physical properties of the solventless polymer matrix. DGEBA type epoxy resin was selected as a major matrix, and curable diluent, DELAD type epoxy resin was used to control viscosity and physical properties of the DGEBA resin. Acid anhydride and imidazole were mixed with the epoxy resins as a curing agent and a curing reaction accelerator, respectively. Basic and promising matrix formulations were established with various mixing weight ratios considering initial viscosity and gel time of the resin systems. Physical properties of the cured matrixs having different formulations were measured and compared one another so that the matrix formulations candidated for the towpreg were chosen. Carbon towpregs with 25 wt.% of resin contents were prepared by impregnation of the candidated matrixs and then, the final matrix formulation were determined comparing physical and mechanical properties of the laminates prepared with the towpregs.

Also, the optimum cure condition of the towpreg was studied by controlling cure temperature and time to obtain the highest T_g .

초 록

복합재 구조물을 드라이 와인딩으로 제작하는데 사용할 목적으로 무용매 에폭시 수지를 고분자 매트릭스로 사용하는 탄소 섬유 towpreg를 국산화하기 위하여 매트릭스의 조성 및 이것의 물성 향상 연구를 수행하였다. DGEBA type의 에폭시 수지를 기본 매트릭스로 선정하였고, 이것의 점도 조절 및 물성 조절용으로 경화성 희석제(diluent)인 DELAD type의 에폭시 수지를 사용하였다. 경화제로는 노화 물성이 우수한 산무수물계를 선정하였으며, 이것의 경화반응을 촉진시키기 위한 경화촉진제는 이미다졸(imidazole)을 사용하였다.

이들의 배합 무게비에 따른 초기점도 및 겔 타임을 측정하여 매트릭스의 기본조성을 설정하였으며, 경화된 매트릭스의 각종 기계 및 물리적 성질을 측정하고 비교 검토하여 후보 조성을 결정하였다. 이것을 탄소

*한국항공우주연구소 기술연구부

섬유에 25 wt.%로 함침시켜 towpreg를 제작하고 이것의 라미네이트를 만들어서 각종 물성을 비교 검토하여 최종적인 조성을 개발하였다. 또한 개발된 towpreg의 경화온도 및 경화시간에 따른 T_g 를 측정하여 최적 경화조건을 연구하였다.

1. 서 론

각종 섬유강화 고분자 매트릭스 복합재료가 항공우주용 구조물에서부터 일반 산업분야에 이르기까지 널리 사용되고 있음은 이미 잘 알려진 사실이다. 이들 고분자 복합재료는 사용된 강화섬유 및 매트릭스 종류에 따라 매우 다양한 형태로 상품화되어 있다[1]. 예를 들면, 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유 등에 열경화성 수지 혹은 열가소성 수지를 사용하거나, 혹은 이들 매트릭스에 rigid 혹은 soft한 입자상태의 유기물질의 충전제를 사용하거나, 이들의 혼합형(hybrid) 혹은 flake 상의 알루미늄을 다양한 무게비로 혼합시켜 물성이 향상된 고분자 복합재료가 이미 시판되고 있는 실정이다.

성형전의 고분자 복합재료는 일반적으로 프리프레그(prepreg) 상태로써, 이것의 화학조성 및 물리적 특성은 성형된 구조물의 최종 물성을 좌우한다. 프리프레그는 강화섬유에 매트릭스 역할을 하는 미경화된 수지를 함침(impregnation)시킨 상태를 말하며, 강화섬유 형태에 따라 여러 가지가 있다. 예를 들면, 일방향성 섬유(unidirectional fiber), 일방향성 테이프(unidirectional tape), 다방향성 테이프(multidirectional tape), 직조형 섬유(fabric fiber) 등이 있으며, 구조물의 형상 및 특성에 따라 다양하게 선택되고 이용된다[2,3,4]. 또한 강화섬유의 소재 및 공정특성에 의해 수 백에서 수 천 가닥의 필라멘트로 이루어져 있는 것을 'tow'라고 부르며, 102개 혹은 204개의 필라멘트 가닥(strand)으로 구성되어 있으면서 이들이 서로 꼬여(twist)있는 상태를 'yarn'이라고 부른다. 이들중 일방향성 형태로써 tow를 이루고 있는 강화섬유에 고분자 수지를 함침시켜 B-stage까지 경화시킨 상태를 'tow prepreg' 혹은 'towpreg'라고 부른다. 이것의 가격은 다른 형태의 프리프레그에 비해서 비싼 편이지만, 주로 여러가지 면에서 고성능을 요구하는 항공우주용 구조물을 비롯해서 고성능 튜브, 화공약품 저장 탱크, 경량 내부식성 파이프 등의 드라이(dry) 필라멘트 와인딩 공법을 이용해서 제작되는 구조물에 많이 이용되는 고분자 복합재료이다. 드라이 필라멘트 와인딩 공법이 일반 wet 와인딩 공법의 단점을 보강하고 있으며, 특히 구조물이 대형일

경우 여러 가지 면에서 보다 우수하다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다[5].

드라이 와인딩용 towpreg는 여러 가지 종류의 강화섬유 및 매트릭스로 만들어져 상품화되어 있으며, 사용된 섬유 및 매트릭스에 따라 이것의 물성차이는 매우 크며 주어진 구조물 제작에 대한 이것의 선택은 주로 적절한 가격과 물성에 좌우됨이 일반적이다. 이것의 가격은 주로 강화섬유의 종류에 따라 좌우되며, 또한 강화섬유는 균일한 품질관리에 의해 제직업체에서 생산되기 때문에 구조물의 용도와 기능에 적합하도록 사용자가 선택하면 되기 때문에 towpreg 개발에 이것의 기초연구가 수반될 필요성이 거의 없다. 그러나 선진국의 towpreg 제직업체에서 know-how로 규정하면서 외부 유출을 금지시키는 것은 바로 매트릭스 역할을 하는 고분자 수지 조성이다. 이것의 화학구조 및 특성이 구조물의 최종물성 및 기계적 특성을 결정하는 주요한 요인이 됨은 물론이고, premix의 점도 및 경화조건 등이 towpreg의 제조공법에도 큰 영향을 미치게 된다. 특히 towpreg 제작공정이 고온에서 장시간 진행될 경우, 열적 안정성이 우선적으로 주요시되며, 공정 재현성과 신뢰성 등도 towpreg 개발시 주요한 고려대상이 된다. 이밖에도 towpreg 자체에 충분한 점착(tack)이 존재함으로써 필라멘트상으로 분리하지 않도록 해야 한다[5]. 현재 선진국에서 위성체 추진체계에 사용하는 가압용기는 690기압 정도의 고압가스 및 액체추진제를 저장할 수 있도록 설계되어 있으므로 경량화를 위하여 드라이 towpreg 복합재료를 사용하고 있다.

본 연구에서는 인공위성용 복합재 압력용기의 개발을 위한 재료로 사용할 목적으로 towpreg를 국산화하기 위하여 물성이 우수한 무용매 고분자 매트릭스 조성개발 연구를 수행하였다. 이것의 개발에 경쟁력을 고려하여 T-300 계열의 국산 탄소 섬유를 강화섬유로 선정하였으며, 매트릭스 조성연구에 필요한 모든 수지는 국산 제품을 정제없이 그대로 사용하였다. DGEBA type의 에폭시 수지를 기본 매트릭스로 선정하였고, 이것의 점도 조절 및 물성 조절용으로 경화성 희석제(diluent)를 사용하였다. 경화제로는 노화물성이

우수한 산무수물계를 선정하였으며, 이것의 경화반응을 촉진시키기 위한 경화촉진제는 이미다졸(imidazole)을 사용하였다. 이들의 배합비를 조절하면서 초기점도, 겔 타임, 열분석 등을 측정하여 기본조성을 설정하였으며, 이것을 탄소섬유에 함침시켜 towpreg를 제작하여 경화 후의 최종물성을 비교 검토하면서 최종적인 매트릭스 조성을 연구 개발하였다.

2. 실험

2.1 재료

기본 매트릭스는 DGEBA(Diglycidyl Ether of Bisphenol A)형의 국도화학 제품인 YD-128, 희석제로는 DELAD(Diglycidyl Ester of Linoleic Acid Dimer)로써, 국도화학 제품인 YD-171B, 산무수물 경화제는 NMA(Nadic Methyl Anhydride 로써, Ciba Geigy 제품인 HY-906을 정제없이 그대로 사용하였다. 경화 촉진제는 에폭시 수지와 상용성이 우수하고 분산 특성이 좋은 Fike 제품인 EMI-2,4 (2-ethyl-4-methylimidazole)를 사용하였다. 이들의 특성을 간단히 요약하면 Table 1과 같다. 강화섬유는 태광산업(주)에서 생산된 PAN계 T-300급의 탄소섬유(ACELAN TZ-307)로써 12,000(12k)개의 필라멘트로 구성되어 있는 것을 사이징 제거없이 그대로 사용하였다. 탄소섬유의 모노 필라멘트 평균직경은 약 $6.8\mu\text{m}$ 이며, 섬유밀도는 1.8g/cc 이다.

2.2 매트릭스 조성

매트릭스의 기본 배합비를 결정하기 위해서 우선 혼합성분의 이론적인 최적물성을 얻을 수 있는 당량비를 계산하여 이것을 무게비로 환산하며 기본골격을 마련하였다. 에폭시수지, 희석제, 경화제, 경화촉진제를 무게비로 각각 2 : 1 : 2 : 0.027로 정하였으며, 이를 기초로 희석제 양의 변화(기본에 대해서 0.5 및 2배)와 경화제 양의 변화(기본에 대해서 0.6 및 1.2배)에 따른 물성을 서로 비교 검토하여 최종 조성을 결정하였다. 희석제 양을 변화시켜서 제작하는 시편에 대한 경화제의 배합비는 희석제 양의 변화에 따른 당량값을 고려하였다. 즉 희석제 양이 0.5배 및 2배 변화에 따라 에폭시수지 시스템의 에폭시 당량값이 바뀌게 되는데 이에 따라 경화제의 양을 당량비로 계산하여 혼합하였다.

2.3 라미네이트 제작

시험된 매트릭스 조성중에서 최종 두가지를 선택하여 함침기(Impregnator)를 이용하여 탄소섬유에 함침시켜 B-stage의 towpreg를 제작하였으며, 이때 수지함량은 시편에 따라 25% 및 35%로 조절하였다. 맨드릴 치구에 towpreg를 dry-winding 공법으로 감아서 평판모양으로 제작한 후, 진공 백을 이용한 autoclave 성형을 하여 라미네이트를 얻었으며, 이것을 사용하여 규격에서 정하는 각종 시험에 필요한 시편을 제작한 후 성능시험을 수행하였다.

2.4 점도특성

미경화 상태의 매트릭스 점도는 Brookfield Viscometer Model DV-Ⅱ를 이용하여 측정하였다. 측정조건은 25°C 에서, 회전속도 50 RPM, Spindle No. 27을 사용하였다.

2.5 겔화 시간 측정

미경화 상태의 매트릭스 겔화 시간은 겔화 시험기(일신과학 주식회사, 일본)를 사용하였으며, 149°C 에서 2~3회 측정하여 평균값을 얻었다.

2.6 비중 측정

경화된 에폭시 수지 및 라미네이트의 비중을 Mettler 33360/210260을 이용하여 물속에서 측정하였다.

2.7 T_g 측정

경화된 에폭시 수지 및 라미네이트의 T_g 는 Du pont사의 DMA 983을 사용하여 측정하였으며, 최고치의 $\tan \delta$ 값이 나타나는 온도를 T_g 로 하였다. 시편의 크기는 길이 70mm, 두께 4mm이며 시험조건은 N_2 분위기에서 40°C 에서부터 분당 10°C 상승시켜 250°C 까지 측정하였으며, 이때 clamping 길이는 4mm가 되도록 조절하였다.

2.8 인장 및 굴곡강도

경화된 에폭시 수지의 인장강도는 ASTM D638, 굴곡강도는 ASTM D790 규격에 의해서, 그리고 라미네이트의 인장강도는 ASTM D3039, 굴곡강도는 ASTM D790규격에 의해서 시편을 제작하고 기계적 특성을 측정하였다.

2.9 기공 함량(Void Content)

경화된 라미네이트 내부에 기공의 존재 확인 및 이것의 함량은 ASTM D2734 규격에 따라 측정하였으며 주어진 계산식에 의해서 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

Table 1에서 보여준 각종 성분의 배합비를 결정하기 위해서 먼저 고려해야 하는 것은 이들을 배합한 후, 혼합성분의 점도가 towpreg 공정에 적당해야 하며, 동시에 경화된 혼합성분의 최종물성이 우수해야 한다. Table 2에서 미경화상태의 물성 측정 결과를 나타내었다. 여기서 표시된 시편의 구분은 무게로 환산한 비로써, 시편 NO. 1은 기본 배합비이며, 시편 NO. 2는 기본 배합비의 경화제 양을 1.2배 한 것이며, 시편 NO. 3는 기본 배합비의 경화제 양을 0.6배 한 것이며, 시편 NO. 4는 기본 배합비의 희석제 양을 2배로 한 것이며, 시편 NO. 5는 기본 배합비의 희석제 양을 4배 한 것이다.

에폭시 수지에 저 점도의 희석제 및 경화제를 혼합함으로써 에폭시 수지를 탄소 섬유에 함침시킬 수 있는 수준의 점도로 조절 가능하였다. 예상대로 저 점도의 경화제 및 희석제 양이 증가할수록 시스템의 점도가 감소되었다(NO. 3 > NO. 1 > NO. 2) 및 (NO. 1 > NO. 4 > NO. 5). 겔화 시간은 경화제의 양이 적어지면 빨라지고, 반대로 많으면 느려짐을 알 수 있으며, 희석제의 경우도 이와 유사한 양상을 보여주고 있다. Table 2의 에폭시수지 시스템을 82℃에서 30분간 그리고 149℃에서 150분간 경화시킨 매트릭스의 물성은 조성에 따라 특성별로 큰 차이를 보이고 있음을 Table 3에서 알 수 있다. 먼저 비중은 경화제 양에 따라 약간의 차이를 보이고 있으며, 희석제 양에 따라 서로 이와 유사하다. T_g 는 배합비를 디자인할 때 당량비로 배합한 기본조성인 시편 NO. 1이 가장 높으며, 경화제가 1.2배 과량 배합된 시스템인 NO. 2도 제법 높게 나타남을 알 수 있다. 반면에 경화제가 당량비 이하로 첨가되었거나, 희석제의 양이 증가하면 T_g 가 현저히 낮아짐을 볼 수 있다. 이러한 결과는 열경화성 수지의 T_g 는 주어진 분자구조에 대해서 이것의 3차원 망상구조 특성 즉 경화밀도(crosslinking density)에 비례한다는 사실과 일치하며, 이것은 이미 실험적으로나 이론적으로도 잘 알려진 사실이다.

기계적 성질에 있어서는 경화제가 당량비 보다 약간 더 들어간 NO. 2 시편이 전반적으로 가장 우수하며, 이에 반해 당량비로 반응시킨 NO. 1은 특성에 따라서 약간씩 떨어지는 경향을 볼 수 있다. 기타 다른 조성의 각종 물성은 이들의 물성에 비해 많이 저하됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 경화제 및 희석제 양이 이들 시편의 각종 물성에 미치는 영향이 매우 큼을 나타내며, towpreg의 매트릭스 조성을 디자인 할 때에는 조성의 초기 점도를 포함한 각종 물성을 신중히 고려해야 함은 물론이고 망상구조의 structure-property 연관성을 이해함이 요구된다. 이것의 공정개발 측면에서는 특히 매트릭스의 반응성에 의한 겔화 시간을 고려하여 적절한 시간 및 온도 범위내에서 강화섬유에 일정하게 함침시킬 수 있도록 조성연구 및 공정연구가 이루어져야 한다.

지금까지의 결과를 참고로 해서 드라이 와인딩용 towpreg의 매트릭스 조성을 선정한다면 NO. 1과 NO. 2가 후보로 될 수 있으며, 최종 선택은 towpreg을 개발하여 라미네이트 시편 제작 및 물성 평가 후, 종합적으로 판단함이 바람직하다. 이를위해 배합비가 서로 다른 NO. 1과 NO. 2 매트릭스 시스템을 탄소섬유에 함침시키기 위하여 함침기(impregnator)의 line 속도 및 온도를 조절하였으며, 각각의 B-stage towpreg을 제작하였다. 조성 NO. 1에 대해서는 에폭시 수지 함량(Resin Content : R/C)을 두 가지, 즉 25% 및 35%로 조절하였으며 NO. 2에 대해서는 R/C를 25%로 조절하여 towpreg을 제작하였으며, 이것을 경화시켜 제작한 라미네이트에 대한 각종 물성을 Table 4에 비교 검토하였다. 조성 NO. 1의 라미네이트 물성을 보면 R/C가 증가할 때 비중은 약간 감소(약 3%)함을 보여주는데, 이것은 섬유가 매트릭스 시스템보다 비중이 크기 때문에 당연한 결과이다. 그러나 기계적 성질에 있어 R/C가 감소할 때 인장강도는 증가하고, 굴곡강도는 오히려 감소함을 보이고 있다. 이러한 현상에 대해서 가능한 해석은 R/C가 낮은 고충전 고분자 매트릭스 복합재료의 인장 및 굴곡파괴 메카니즘에 대한 매트릭스의 역할을 이해함으로써 설명된다. 즉 고충전 고분자 복합체 특히 취약 파괴(brittle fracture)특성이 있는 에폭시/탄소섬유의 경우 매트릭스 함량이 낮은 쪽이 섬유 사이의 공간이 좁아서 상대적으로 변형(deformation)이 작게 일어나게 되며, 이러한 경우에 압축 힘을 받는 시편 표면부터 먼저 파괴가 시작되는 굴곡 시험에 있어서 표면의 변형 에너지

흡수가 작기 때문에 굴곡강도가 감소하게 된다. 이에 반해, 인장강도는 주로 interlaminar 파괴 현상에 의한 것으로 매트릭스의 주어진 경화밀도 조건하에서는 충전율에 비례함이 일반적이다. 경화제 양에 따른 물성의 변화를 살펴보면, 동일한 R/C 조건에서 전반적으로 NO. 1 조성보다는 NO. 2 조성의 물성이 더 우수함을 나타내고 있다. Table 3의 매트릭스 자체 물성에서도 이러한 경향이 뚜렷이 나타나고 있는데, 이것은 산무수물 경화제가 습기에 약하며 약간의 휘발성이 있음을 감안한다면, 당량비 보다 약간 과량의 경화제를 사용하게 towpreg 공정상 타당하다고 판단된다. 다음에는 경화된 라미네이트 물성이 경화조건, 즉 경화온도 및 경화시간에 어떠한 영향을 받는지 살펴보기 위해서 경화조건에 따른 T_g 의 변화를 연구하였다. 이것의 목적은 주어진 소재 및 환경조건하에서 최적조건으로 성형시킴으로써 최고의 물성을 갖는 towpreg을 얻기 위함이다. 이러한 성형의 최적조건을 이해하기 위해서 가열하는 방법을 다르게, 즉 단계별 가열(step-by-step heat-up)과 직접 가열(direct heat-up)을 시도하여 비교 검토하였다. NO. 2 매트릭스 조성을 탄소섬유에 함침시

켜(R/C : 25%) towpreg를 제작한 후 라미네이트를 만드는 단계에서 4가지 조건에서의 단계별 가열과 4가지 조건에서의 직접 가열을 시도하여 이들의 T_g 를 측정하여 최적의 성형 싸이클(curing cycle)을 결정하였다. T_g 의 측정결과는 Fig. 1의 DMA 곡선에서 보여주고 있으며 Table 5에서 이들 데이터를 정리하여 보여주고 있다. Trial NO. 1~4까지가 단계별 가열로 얻어진 결과이고, trial NO. 5~8까지가 직접 가열로 얻어진 결과이다. 단계별 가열에서 후경화(post cure)를 시도하면 T_g 의 상승효과 있음을 알 수 있으며, 이것은 후경화 시간의 길고 짧음에는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 직접 가열시는 경화시간이 경과함에 따라 T_g 의 상승효과를 얻을 수 있으나, 170℃에서 5시간 경화시켰을 때 최고치를 보이다가 시간이 더 경과함으로써 오히려 감소하였다. 이는 매트릭스인 에폭시 수지를 고온에서 너무 오랫동안 방치했기 때문으로 판단되며, 결국 열분해에 의한 열적 성질이 저하되었음을 의미한다. 단계별 가열과 직접 가열의 차이점은 전체 성형시간에도 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있는데, 후자인 경우 5시간 정도면 충분히 최대의 T_g 까지 도달함

Table 1. Characteristics of the Matrix System Used

Materials	Trade Name	Manufacture	Equivalent wt(g/eg)	Viscosity (cps)
DGEBA	YD-171B	Kukdo Chemical	186	12,000
DELAD	YD-171B	Kukdo Chemical	400	650
NMA	HY-906	Ciba Geigy	178	225
Imidazole	EMI-24	Fike	55	—

Table 2. Viscosity and Gel Time of the Premixed Epoxy Systems

Property System	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Initial Viscosity at 25℃(cps)	1,800	1,680	3,290	1,550	1,150
Gel Time (min, at 149℃)	3.4	4.0	3.1	4.1	5.0

Table 3. Physical Properties of the Cured Epoxy Systems

Property System	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Specific Gravity	1.177	1.183	1.174	1.160	1.162
T_g (℃)	150	142	101	123	87
Tensile Strength (MPa)	72	73.6	61.6	56.0	30.3
Tensile Modulus(MPa)	2,490	2,917	2,545	1,800	1,538
Elongation(%)	6.44	5.88	5.70	5.75	5.67
Flexural Strength(MPa)	138	151	116	111	64
Flexural Modulus(MPa)	2,834	3,207	2,752	2,669	1,648

Table 4. Physical Properties of the Cured Laminates

Property	System No.1(25%)	No.1(35%)	No.2(25%)
Resin Content (wt %)	25 ± 2	35 ± 2	25 ± 2
Specific Gravity	1.53	1.48	1.54
Tensile Strength (MPa)	1,896	1,600	1,972
Tensile Modulus (GPa)	142	118	155
Flexural Strength (MPa)	745	1,069	869
Flexural Modulus (GPa)	100	113	137
Void Content(%)	2.67	1.86	1.95

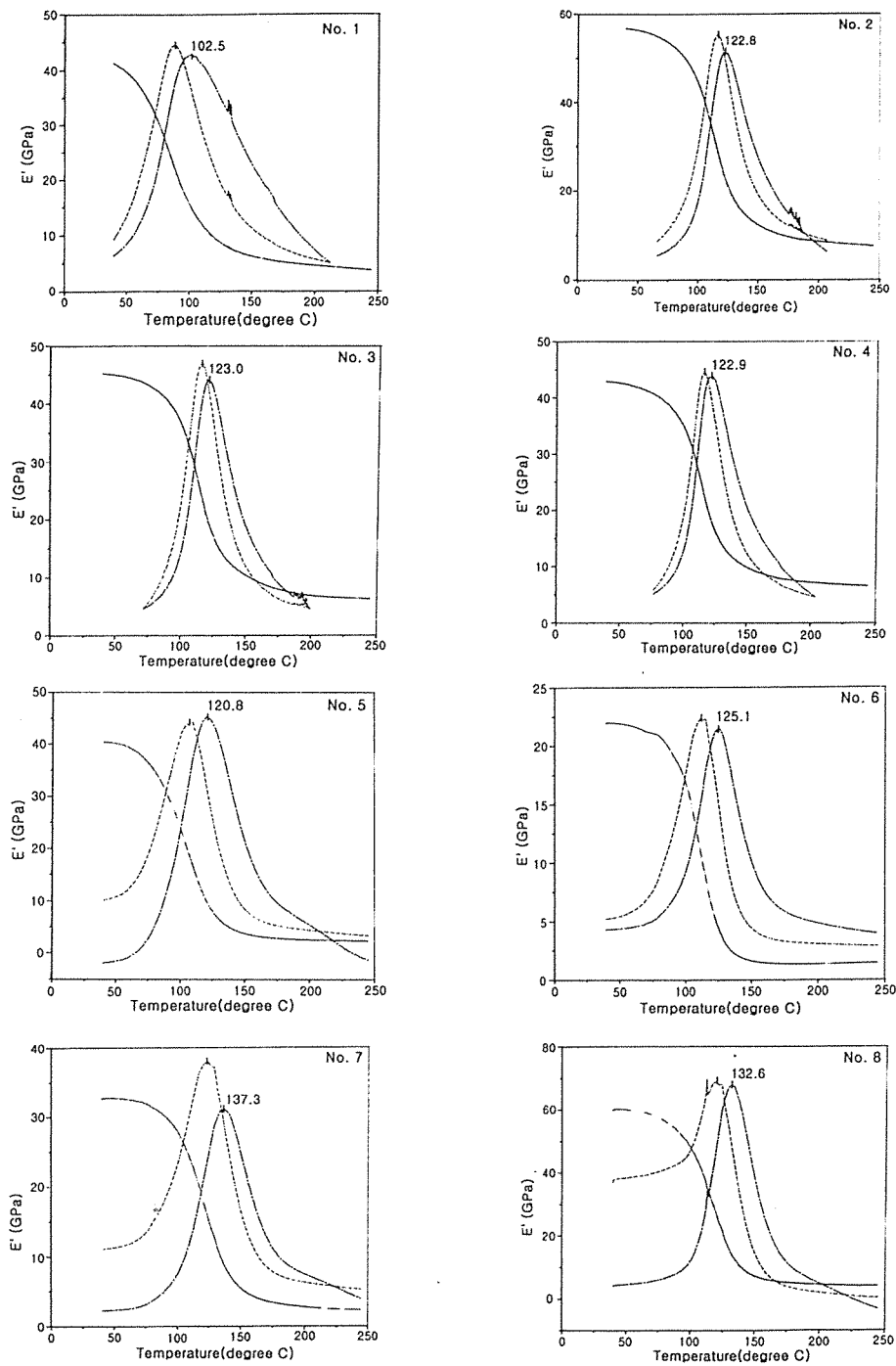


Fig. 1. DMA curves showing T_g of trial No.1 to No.8 specimens prepared at various curing conditions in Table 5

Table 5. Variation of T_g depending on Cure Cycle of No.2(25%)

Trial No.	Curing Cycle	T_g (°C)
1	Initial Condition (IC)*	102.5
2	(IC) + (160°C × 3 hr)	122.8
3	(IC) + (160°C × 4.5 hr)	123.0
4	(IC) + (160°C × 5.5 hr)	122.9
5	170°C × 2 hr	120.8
6	170°C × 3 hr	125.1
7	170°C × 5 hr	137.3
8	170°C × 8 hr	132.6

a : (80°C × 2 hr) + (120°C × 2 hr) + (150°C × 2 hr)

에 비해, 전자의 조건에서는 약 10시간이 소요되었다. 따라서 본 연구의 매트릭스 조성으로 얻어진 towpreg의 경화조건은 170°C에서 약 4~5 시간 직접 가열하면 최대의 열적 특성을 얻을 수 있음을 이해할 수 있다. 이것은 일반적으로 wet-winding 공정에서 즉석에서 섬유에 함침된 젖음(wet) 상태의 에폭시 수지를 최적의 물성을 위해 시도하는 경화 사이클과는 다른 결과로써 함침된 에폭시 수지가 이미 B-stage 상태에서 dry-winding 공법으로 시편이 만들어져 경화가 진행된 towpreg 경화 특성의 결과임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 복합재 구조물에 사용할 드라이 와인딩용 무용매 탄소 섬유 "towpreg" 개발기술을 국산화하기 위함이며 매트릭스 조성, 즉 DGEBA계의 에폭시 수지, DELAD계의 회석제, 그리고 산무수물계의 경화제 함량을 변화시키면서 최적 특성을 얻기 위한 실험을 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. Neat 에폭시 수지 조성의 최적화를 위해서 에폭시 수지, 경화제, 그리고 반응성 회석제의 배합비를 조절하여 towpreg 공정에 적합한 점도를 조절할 수 있었으며 분자구조 및 에폭시 당량값이 서로 다른 에폭시 수지와 회석제를 혼합시킴으로써 원하는 물성을 얻을 수 있었다.
2. 예비조성의 물성을 측정한 결과 동일한 양의 에폭

시 수지와 회석제의 배합조건에서 경화제 양을 당량비보다 약 20% 정도 과량 첨가한 것이 우수한 기계적 특성을 보였으며, 이러한 경향은 경화된 라미네이트에서 더욱 더 두드러지게 나타났다.

3. 라미네이트의 최종 물성은 수지함량(R/C) 및 경화조건, 즉 경화온도 및 경화시간에 크게 좌우됨과 동시에, 단계별 가열 보다는 직접 가열을 시도함으로써 T_g 의 상승효과를 얻을 수 있었으며, 본 연구에서 사용된 매트릭스 조성으로써 최고의 T_g 는 170°C에서 4~5 시간 직접 가열하여 경화시켰을 때 얻을 수 있었다.

4. 본 연구에서 선택한 매트릭스 조성(에폭시 수지, 회석제, 경화제, 경화촉진제)을 이용하여 25%의 수지함량을 갖는 무용매의 탄소 섬유 towpreg를 국산화시킬 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업 지원에 의해 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

5. 참고 문헌

1. De Renzo, D. J., "Advanced Composite Materials Products and Manufactures" Noyes Data Corporation, 1988.
2. Niu, M. Chun-Yung, "Composite Airframe Structures", Chap. 2 & Chap. 4, Conmilit Press LTD., 1992.
3. Middleton, D. H., "Composite Materials in Aircraft Structures", Chap. 3, Longman Scientific & Technical, 1990.
4. Reinhart, T. J., "Engineered Materials Handbook Vol.1 Composite" section 6, ASM International, 1987.
5. Peters, S. T., Humphrey, W. D., and Foral, R. F., "Filament Winding Composite Structure Fabrication", Chap. 2, SAMPE, 1991.