

동시 경화 제작기법을 적용한 이중 수지 복합재의 열적/기계적 특성에 관한 실험적 연구

윤진영^{*1)} · 최지덕¹⁾ · 박철용²⁾ · 김영규³⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제1기술연구본부

²⁾ 한화디펜스(주) 종합연구소

³⁾ 코오롱테크컴퍼지트 개발Unit

Experimental Study on Thermal and Mechanical Characteristics of Two Resin Composites Using the Co-Curing Process

Jin-Young Yoon^{*1)} · Jiduck Choi¹⁾ · Cheolyong Park²⁾ · Younggyu Kim³⁾

¹⁾ *The 1st Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

²⁾ *Research Institute, Hanwha Defense, Korea*

³⁾ *Development Unit, Koron Dacc Composite, Korea*

(Received 24 March 2020 / Revised 19 June 2020 / Accepted 15 July 2020)

Abstract

Individual curing process of each layer in two resin composites can be caused the separation between two layers. In this study, co-curing process for two resin composites is suggested to improve the inter-layer bonding. Glass fiber reinforced composites with phenolic and epoxy resins were manufactured by co-curing process, and several types of glass/phenolic composites were considered to confirm the application on two resin composites. Experiments for smoke resistance, scratch resistance and flexural strength were carried out to verify requirements corresponding to thermal and mechanical environments. It was validated that two resin composites with phenolic resin impregnated prepreg exhibits good thermal and mechanical characteristics, and it can serve as highly effective composite structures in aerospace and many industry areas.

Key Words : Two Resin Composite(이중 수지 복합재), Co-Curing Process(동시경화 공정), Smoke Resistance(연기 발생 저항성), Scratch Resistance(긁힘 저항성), Flexural Strength(굴곡 강도)

1. 서론

섬유 강화 복합재는 일반적인 금속재보다 높은 비강도와 비강성을 가지고 있고 열적, 피로 특성도 우수하여, 항공기, 우주선, 자동차뿐만 아니라 최근에는 철도차량, 풍력발전 시스템 등 다양한 분야에서 광범위하게 사용되고 있다¹⁻⁶⁾.

* Corresponding author, E-mail: yjy0914@add.re.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

섬유 강화 복합재에 적용 가능한 여러 제작공정 중 필라멘트 와인딩(filament winding) 공정은 일반적으로 작업성과 제품 복제성이 우수하다. 주로 사용되는 강화 섬유로는 유리 섬유(glass fiber)와 탄소 섬유(carbon fiber)가 있다. 유리 섬유는 상대적으로 가격이 저렴하고, 탄소 섬유는 두께 및 중량 감소에 보다 효과적이다. 기지는 열경화성 고분자 수지인 에폭시 수지(epoxy resin)와 페놀 수지(phenolic resin)를 주로 사용한다. 에폭시 수지는 열경화성 수지 중 기계적 물성, 작업성, 내화학성과 내열성 등이 우수한 장점을 가지고 있다. 그러나 에폭시 수지는 연소 과정 중에 다량의 연기와 그을음이 발생되므로, 화염에 노출되는 환경에서 사용하기에 적합하지 않다. C. Park et al.^[7]은 유리-에폭시 복합재의 표면에 다양한 난연성 도료를 적용하여 화염에 의한 그을음 발생이 감소됨을 확인하였으나, 굽힘이 발생하는 환경에서는 다량의 도료 가루가 발생되어 사용이 제한적이다. 페놀 수지는 에폭시 수지에 비해 화염에 대한 난연성은 우수하나 기계적 강도가 낮아, 동일한 하중 지지를 위해 복합재의 두께와 중량 증가가 필요하다. 구조 안전성, 난연성과 굽힘 저항성 등이 요구되는 환경에서 운용하기 위한 복합재 구조물을 제작할 때, 최근에는 이러한 수지별 특성들을 고려하여 높은 기계적 강도를 가지는 에폭시 수지 함침 복합재와 난연성이 우수한 페놀 수지 함침 복합재를 혼합하여 사용하는 경우도 있다. 에폭시 수지 함침 복합재를 이용하여 부가하중에 대한 구조강도를 지지하고, 화염 노출면에 페놀 수지 함침 복합재를 적용하여 화염에 의한 그을음 발생을 최소화한다. 그러나 에폭시 수지와 페놀 수지는 화학적 구조 등의 차이로 인해, 하나의 복합재 구조물에서 이중 수지를 개별적으로 경화할 경우에 각 수지 함침 복합재 층 사이의 결합력은 상대적으로 약하게 된다. 또한 굽힘이 발생하는 환경에서 페놀 수지 함침 복합재를 필라멘트 와인딩 공정으로 제작할 경우, 굽힘에 의해 강화 섬유가 끊어져 주변의 섬유까지 다량으로 박리, 손상될 수 있다.

본 연구에서는 구조하중 부가, 화염 노출, 굽힘 등의 환경에서 운용되는 복합재 구조물에 대해, 높은 기계적 강도를 가지는 에폭시 수지와 난연성이 우수한 페놀 수지를 혼합하여 하나의 복합재 구조물 형태로 구성하면서 이중 수지 층간의 결합력을 향상시키기 위해, 이중 수지 복합재의 동시 경화 제작기법을 제안하였다. 또한 유리-페놀 복합재에 대해 굽힘 저항성을 증대시키기 위한 다양한 형태를 고려하였다. 동시 경

화 제작기법으로 제작한 이중 수지 복합재에 대해 연기 발생, 굽힘 저항성 및 굴곡 강도 등의 성능시험을 수행하여, 운용환경에서 요구되는 열적, 기계적 특성을 확인하였고 유리-페놀 복합재에 적합한 형태를 선정하였다. 본 연구에서 시험 시편의 강화 섬유는 유리 섬유를 사용하였다.

2. 이중 수지 복합재의 동시 경화 제작기법

유리 섬유 강화 복합재(GFRP: Glass Fiber Reinforced Plastic)에 대해 구조 안전성이 요구되면서 내부가 화염에 노출될 때, Fig. 1과 같이 기계적 강도가 우수한 유리-에폭시(G/E: Glass/Epoxy) 복합재 내부에 난연성이 우수한 유리-페놀(G/P: Glass/Phenolic) 복합재를 얇게 적용하는 이중 수지 복합재로 구성한다.

기존에는 이중 수지 복합재를 제작할 때, 난연성을 위해 내부에 위치하는 유리-페놀 층을 제작금형(mandrel) 위에 필라멘트 와인딩 후 먼저 경화한다. 이후 경화된 유리-페놀 층 위에 이중 수지 층간 접착력을 향상시키기 위한 에폭시 접착 필름을 적용하고, 그 위에 유리-에폭시 층을 필라멘트 와인딩 후 경화한다. 이때 복합재 내부 굽힘이 발생하는 환경에서는 필요에 따라 유리-페놀 층의 섬유가 끊어져 박리되는 현상을 방지하기 위해 페놀 접착 필름을 제작금형 위에 먼저 적용하기도 한다. 페놀 접착 필름은 유리-페놀 층을 보호하고 표면조도를 향상시키는 역할을 한다.

본 연구에서는 이중 수지 복합재의 유리-페놀 층과 유리-에폭시 층간의 결합력을 향상시키기 위한 제작기법을 제안하였다. Fig. 2와 같이 이중 수지 층별로 개별적으로 경화하지 않고 최종 단계에서 동시에 경화하는 공정을 적용하였다. 먼저 미경화 또는 반경화 상태의 유리-페놀 층을 제작금형 위에 위치시킨다. 이때 유리-페놀 층의 경화공정을 바로 진행하지 않으며, 최소한으로 반경화 상태까지만 진행한다. 이후 유리-페놀 층 위에 유리-에폭시 층을 필라멘트 와인딩 후 Fig. 3의 경화 사이클에 따라 전체를 동시에 경화한다. 초기에 불필요한 수지가 빠져 나오도록 수지의 점도가 저하되는 90 °C에서 경화 후, 열적 안정화를 위해 105 °C를 거쳐 에폭시 수지의 경화 온도인 125 °C에서 최종적으로 경화한다. 이중 수지 층간의 접착력 향상을 위해 기존 개별 경화 공정에서 적용한 에폭시 접착 필름은 동시 경화 공정에서 필요 시 적용한다.

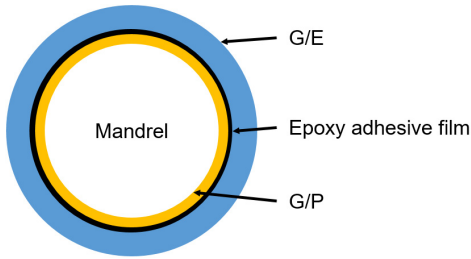


Fig. 1. Schematic of a composite with phenolic and epoxy resins

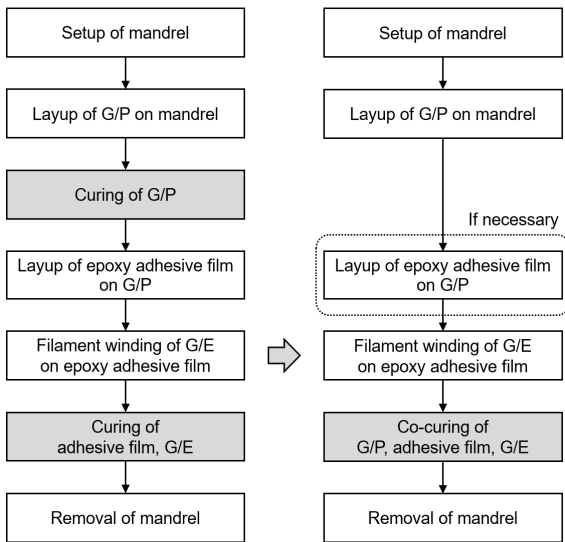


Fig. 2. Co-curing process of two resin composites

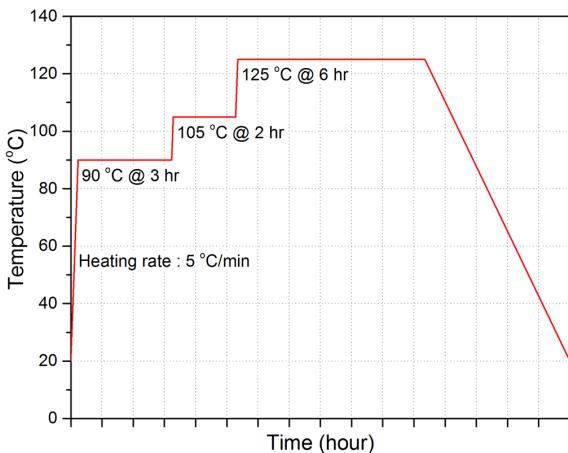


Fig. 3. Curing cycle of two resin composites using the co-curing process

3. 시편 제작 및 성능시험

동시 경화 제작기법으로 제작한 이중 수지 복합재에 대한 난연성을 확인하기 위해 연기 발생 시험을 수행하였다. 이중 수지 복합재를 제작할 때 난연성을 위해 적용되는 유리-페놀 층의 페놀 수지는 에폭시 수지에 비해 경도가 상대적으로 낮다. 따라서 유리-페놀 층에 대해 굽힘 저항성이 우수한 형태를 선정하기 위해, 기존의 필라멘트 와인딩 공정 이외에 부직포(felt), 시트(sheet), 프리프레그(prepreg) 등 다양한 형태에 대한 굽힘 저항성 시험을 수행하였다. 또한 동시 경화 제작기법에 따른 굴곡 강도 저하 여부를 확인하기 위한 굴곡 강도 시험도 수행하였다.

3.1 연기 발생 시험

3.1.1 시험 시편

유리-페놀 층과 유리-에폭시 층을 동시 경화 기법으로 제작하는 이중 수지 복합재의 특성을 연구하기 전에, 유리-페놀 층의 형태에 따른 난연성을 확인하기 위해 연기 발생 시험을 수행하였다. 연기 발생 시험은 유리-페놀 층의 형태별로 그을음 발생 정도를 상대적으로 비교하기 위한 목적으로 수행되어, 시편은 단일 수지만을 사용하여 제작하였다. Table 1과 같이 유리-페놀 복합재 시편은 필라멘트 와인딩, 부직포, 시트, 프리프레그 등 총 4개의 형태로 제작하였다. 시험 시편 제작에 사용된 유리 섬유로 필라멘트 와인딩용은 E-glass spray-up roving 2400TEX를 사용하였다. 부직포는 단위중량 100 g/m²의 PET 폴리에스터 부직포를 사용하였다. 시트는 ECR-glassfiber surface tissue를 사용하였고, 비중은 2.7 g/cm³이다. 필라멘트 와인딩, 부직포, 시트용 페놀 수지는 CELLOBOND® J2027L을 사용하였고, 비중은 1.22~1.24 g/cm³이다. 유리-페놀 프리프레그는 내마모성을 고려하여 [0/90]의 적층 배열을 가지는 PHC522를 사용하였다. PHC522는 단위중량이 260 g/m², 두께가 0.4 mm이고, KRD-HM2 페놀 수지가 약 44 % 함유되어 있다. 에폭시 수지는 SS-2016W를 주제로, SS-2012H를 경화제로 사용하였다. 필라멘트 와인딩의 수지 함유량은 약 41 %이다.

수지별 난연성을 비교하기 위해 유리-에폭시 복합재 시편도 제작하였다. 각 시편의 경화 사이클은 필라멘트 와인딩과 프리프레그 형태의 유리-페놀 복합재, 유리-에폭시 복합재는 Fig. 3에 따라 경화하였다. 부직포와 시트 형태의 유리-페놀 복합재는 80 °C에서 4시

간 동안 경화 후, 페놀 수지의 경도를 높이기 위해 140 °C에서 4시간 동안 후경화를 진행하였다.

각 시편의 길이와 너비는 연기 발생 시험장치와 관련된 KS M ISO 5659-2 규격^[8]에서 제시한 75±1 mm로 제작하였다. 시편의 두께는 5 mm로 제작하였다.

Table 1. Specimen configuration for smoke generation test

Resin type	Specimen ID	Specimen composition (Resin)
Phenolic	GP_FW	G/P Filament Winding (J2027L)
	GP_FE	G/P Felt(J2027L)
	GP_SH	G/P Sheet(J2027L)
	GP_PR	G/P Prepreg(PHC522)
Epoxy	GE	G/E Filament Winding (SS-2016W)

3.1.2 시험 구성

연기 발생 시험은 복합재 시편의 노출면으로부터 발생하는 연기의 광학 밀도 측정방법을 규정하고 있는 KS M ISO 5659-2 규격을 기준으로 제작된 Fig. 4의 연기 발생 시험장치를 사용하였다. 본 연구에서 시험 조건은 가열온도 500 °C, 열유량 24.1 kW/m², 가열시간 5분이다.



Fig. 4. Smoke generation test setup

본 연구에서 연기 발생 시험의 목적은 연기의 광학 밀도 측정이 아니고, 시편별로 가열 중 발생하는 연기에 포함된 그을음의 양을 상대적으로 비교하기 위한 것이다. 연기에 포함된 그을음을 포집하기 위한 방법으로 시험장치 챔버 내부에 접착성이 있는 흰색 포집 용지를 설치하였다.

3.1.3 시험 결과

연기 발생 시험 후 시편별로 가열면 반대면의 표면 상태와 그을음 포집 상태는 Fig. 5와 같다. 유리-페놀 복합재 시편 중 필라멘트 와인딩 시편(GP_FW)은 시험 후 표면이 완전히 검게 그을렸고, 이에 비해 프리프레그 시편(GP_PR)은 약간 변색된 정도로 표면 상태가 가장 양호하였다.

시험 후 그을음 발생량은 유리-페놀 복합재 시편 4종 모두 포집 용지에서 그을음이 거의 확인되지 않았으나, 유리-에폭시 복합재 시편(GE)은 검은 입자 형태의 그을음이 다량으로 포집되었다. 따라서 페놀 수지 함침 복합재는 경화과정, 유리-페놀 형태와 무관하게 화염에 의한 그을음이 거의 발생되지 않았고, 에폭시 수지 함침 복합재보다 난연성이 매우 우수함을 확인하였다.

3.2 굽힘 저항성 시험

3.2.1 시험 시편

유리-페놀 층과 유리-에폭시 층을 동시 경화 기법으로 제작한 이종 수지 복합재에 대해, 유리-페놀 층의 형태에 따른 굽힘 저항성을 확인하기 위한 시험을 수행하였다. Table 2와 같이 이종 수지 복합재 시편의 굽힘 대상인 유리-페놀 층은 필라멘트 와인딩, 부직포, 시트와 프리프레그 등 총 4개의 형태를 선정하였다. 각 시편의 유리 함유와 페놀 수지의 제원은 연기 발생 시험 시편과 동일하다. 유리-페놀 층의 두께는 필라멘트 와인딩과 시트 형태는 약 1.0 mm, 부직포는 0.3 mm를 적용하였다. 프리프레그 형태는 3장을 적용하여 1.2 mm의 두께를 적용하였다. 이종 수지 복합재 시편의 유리-에폭시 층의 두께는 6.2 mm이고, 실제 운용환경에서 복합재 구조물에 작용하는 압력과 굽힘 하중에 대한 구조 안전성을 만족하는 설계값을 동일하게 적용하였다. 유리-에폭시 층의 필라멘트 와인딩 패턴은 [90₂/±30/90₂/±30/90₂/±30/90₆]이다.

필라멘트 와인딩 형태의 유리-페놀 층을 적용한 이종 수지 복합재 시편은 기존 제작방식과 동일하게 각

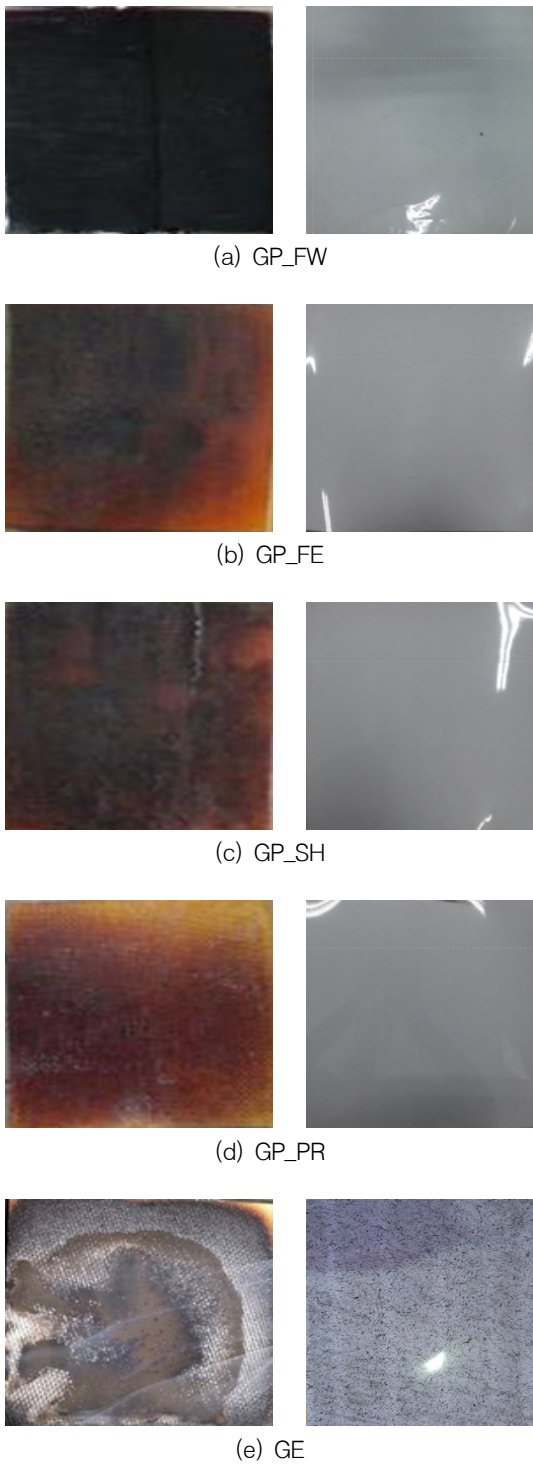


Fig. 5. Surface and smoke generation of specimens after smoke generation test

Table 2. Specimen configuration for scratch resistance test

Resin type	Specimen ID	Specimen composition (Resin)
Phenolic + Epoxy	[GP_FW/GE]	Phenolic Adhesive film (AF 30) + G/P Filament Winding (J2027L) + Epoxy Adhesive film (AF 163-2K) + G/E Filament Winding (SS-2016W)
	[GP_FE/GE]	G/P Felt(J2027L) + G/E Filament Winding (SS-2016W)
	[GP_SH/GE]	G/P Sheet(J2027L) + G/E Filament Winding (SS-2016W)
	[GP_PR/GE]	G/P Prepreg(PHC522) + G/E Filament Winding (SS-2016W)
Epoxy	GE	Epoxy Adhesive film (AF 163-2K) + G/E Filament Winding (SS-2016W)

수지 층을 개별적으로 경화하였다. 또한 유리-페놀 층의 표면 보호를 위해 AF 30 페놀 접착 필름을 적용하였고, 이중 수지 층간의 결합력 증대를 위해 AF 163-2K 에폭시 접착 필름을 적용하였다. AF 30과 AF 163-2K의 두께는 각각 0.13 mm(5 mil)와 0.19 mm(7.5 mil)이다. 부직포, 시트와 프리프레그 형태의 유리-페놀 층을 적용한 이중 수지 복합재 시편은 본 연구에서 제안한 이중 수지 층을 동시 경화공정으로 제작하였고, 접착 필름은 적용하지 않았다. 이중 수지 복합재 시편에 대해 경화 사이클은 모두 Fig. 3을 적용하였다.

이중 수지 복합재의 유리-페놀 층의 굽힘 저항성을 상대적으로 비교하기 위해, 기계적 강도가 우수한 유리-에폭시 복합재 시편도 6.2 mm의 두께로 제작하였다.

3.2.2 시험 구성

긁힘 저항성 시험장치는 고분자 코팅제과 플라스틱의 긁힘 저항성을 평가하기 위한 시험방법을 규정하고 있는 ASTM D7027-13 규격⁹⁾을 참고하여 Fig. 6과 같이 제작하였다. 시험조건은 긁힘에 대한 실제 운용 환경을 고려하여 설정하였다. 시편 표면을 긁기 위한 바늘(stylus)의 끝부분은 반경 11.8 mm의 원통형상으로 제작하였고, 100 kg의 부가하중에 대해 25회 왕복 시험 후 시편의 표면 상태를 육안으로 확인하였다. 바늘의 이송속도는 5 mm/s로 설정하였다.

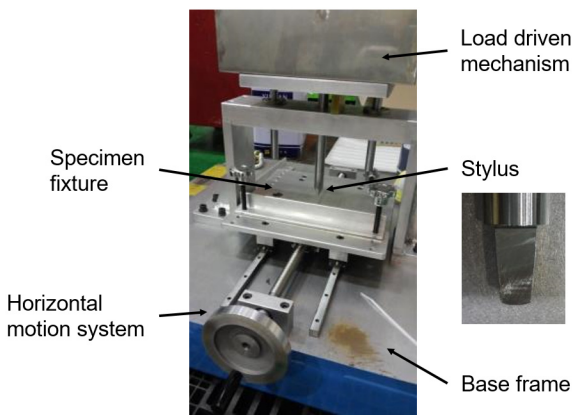


Fig. 6. Scratch resistance test setup

3.2.3 시험 결과

시험 후 시편의 표면 상태는 Fig. 7과 같다. 이중 수지 복합재 시편 중 수지 층을 개별 경화한 필라멘트 와인딩 형태의 유리-페놀 층 시편([GP_FW/GE])은 1회의 왕복 시험 후 시편의 접착 필름 표면이 박리되었고 왕복 시험이 계속 진행되면서 유리-페놀 층의 섬유도 손상, 박리되었다. 부직포 형태의 유리-페놀 층 시편([GP_FE/GE])과 시트 형태의 유리-페놀 층 시편([GP_SH/GE])은 25회의 왕복 시험 후 이중 수지 층간에 박리가 발생되지 않았으나, 유리-페놀 층 표면의 일부분이 손상되어 유리-에폭시 층이 노출되었다. 이에 비해 프리프레그 형태의 유리-페놀 층 시편([GP_PR/GE])은 25회의 왕복 시험 후 이중 수지 층간에 박리가 발생되지 않았고, 표면에 바늘 이송 자국만 남았고 전혀 손상되지 않았다. 표면 상태가 유리-에폭시 복합재 시편(GE)과 유사하게 매우 양호하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 이중 수지 층을 동시 경화 공정으로 제작한 3종의 이중 수지 복합재 모두 층간

박리가 발생되지 않아, 층간 결합력이 우수함을 확인하였다. 특히 프리프레그 형태가 시편 표면에 손상과 박리가 전혀 발생되지 않아 긁힘 저항성 면에서 가장 적합함을 확인하였다.

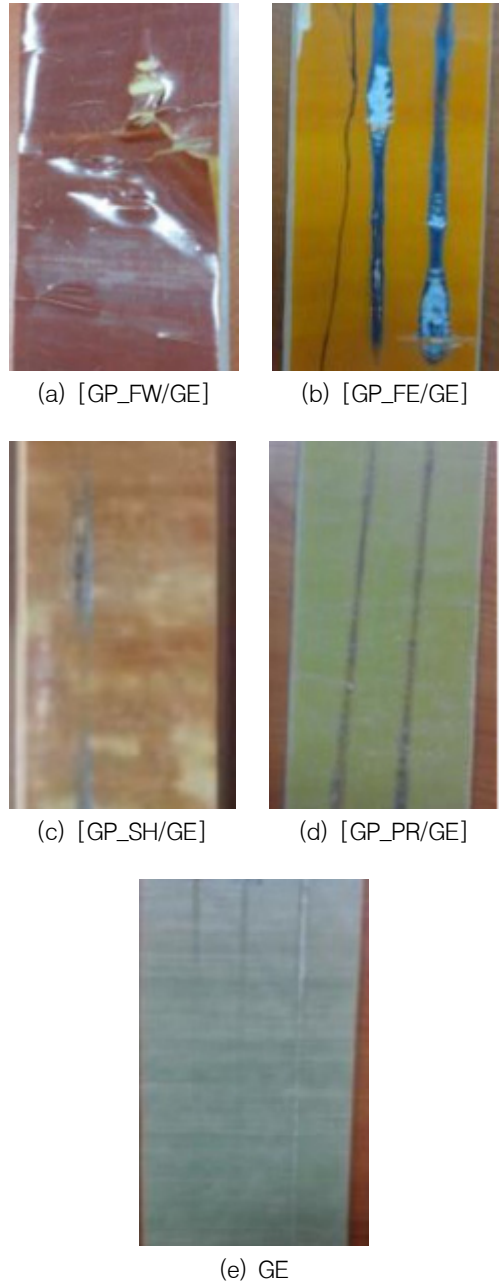


Fig. 7. Surface of specimens after scratch resistance test

3.3 굴곡 강도 시험

3.3.1 시험 시편

페놀 수지 함침 복합재는 에폭시 수지 함침 복합재에 비해 기계적 물성이 낮다. 따라서 유리-페놀 층과 유리-에폭시 층을 동시에 경화하는 공정 중에 페놀 수지가 에폭시 수지 층으로 침투되면 기계적 강도가 요구되는 유리-에폭시 층의 물성이 저하될 수 있다. 이에 페놀 수지가 에폭시 수지 층으로 침투되는지 확인하기 위해 이중 수지 동시 경화공정으로 제작된 시편의 굴곡 강도 시험을 수행하였다. Table 3과 같이 이중 수지 복합재 시편의 유리-페놀 층은 굽힘 저항성이 가장 우수한 프리프레그 형태를 선정하였다. 유리-페놀 층과 유리-에폭시 층의 두께는 굽힘 저항성 시험 시편과 동일하게 각각 1.2 mm와 6.2 mm로 설계하였고, 제작 후 이중 수지 복합재 시편의 총 두께는 약 7.1 mm로 측정되었다. 이중 수지 복합재의 굴곡 강도 저하 여부를 확인하기 위한 유리-에폭시 복합재 시편의 두께는 6.2 mm로 설계하였고, 제작 후 두께는 약 6.3 mm로 측정되었다. 시편의 너비는 15 mm로 동일하다.

Table 3. Specimen configuration for flexural strength test

Resin type	Specimen ID	Specimen composition (Resin)
Phenolic + Epoxy	[GP_PR/GE]	G/P Prepreg(PHC522) + G/E Filament Winding (SS-2016W)
Epoxy	GE	G/E Filament Winding (SS-2016W)

3.3.2 시험 구성

굴곡 강도 시험은 플라스틱의 굴곡 특성에 대한 시험방법을 규정하고 있는 ASTM D790-15 규격^[10]에 따라 Fig. 8과 같이 만능재료시험기를 이용하여 수행하였다. 시편을 양쪽 2개소에서 지지하고 시편의 중심점에 0.05 mm/s의 속도로 하중을 부가하였다. 시편의 양쪽 지지점 간의 거리(support span)는 해당 규격에서 제시한 16:1의 지지점 거리 대 두께 비율을 적용하였다. 시편 두께를 고려하여 이중 수지 복합재 시편의 지지점 간 거리는 114 mm, 유리-에폭시 복합재 시편은 100 mm로 설정하였다. 시편 수량은 해당 규격에서

5개 이상을 추천하였고, 본 연구에서는 시편 종류별로 10개씩 제작하였다.

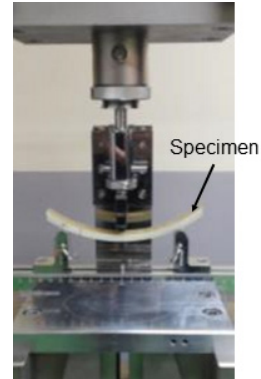


Fig. 8. Flexural strength test setup

3.3.3 시험 결과

Fig. 9의 하중-변위 선도로부터, 이중 수지 복합재 시편([GP_PR/GE])은 총 10개의 시편 모두 유사한 경향을 나타내었다. 유리-에폭시 복합재 시편(GE)은 계측에 오류가 발생한 1번과 10번을 제외한 8개의 시편에서 유사한 경향을 나타내었고, 굴곡 특성 계산 시에 8개 시편의 결과만을 사용하였다. 각 시편의 시험 후 변형 상태는 Fig. 10과 같다.

시험에서 각 시편의 파단 시점에서의 하중과 변위를 측정하였고, 식 (1)부터 식 (3)까지를 이용하여 시편별로 굴곡 강도(flexural strength, σ_M), 굴곡 변형률(flexural strain, ϵ_f)과 굴곡 강성(flexural modulus, E_B)을 계산하였다. P 와 D 는 각각 시편의 파단 시점에서의 하중과 변위, L 은 시편의 양쪽 지지점 간의 거리, b 와 d 는 각각 시편의 너비와 두께를 의미한다. m 은 하중-변위 선도에서 초기 직선 구간의 접선 기울기를 의미한다. Table 4와 Table 5에 시편별로 시험 측정결과와 굴곡 특성 계산결과를 정리하였다.

Flexural Strength (σ_M) :

$$\sigma_M = 3PL/2bd^2 \quad (1)$$

Flexural Strain (ϵ_f) :

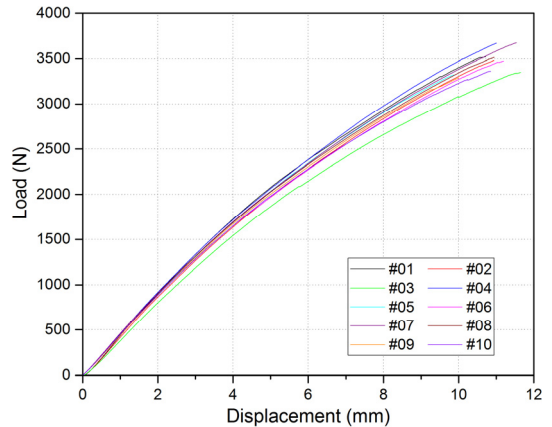
$$\epsilon_f = 6Dd/L^2 \quad (2)$$

Flexural Modulus(Tangent Modulus of Elasticity, E_B) :

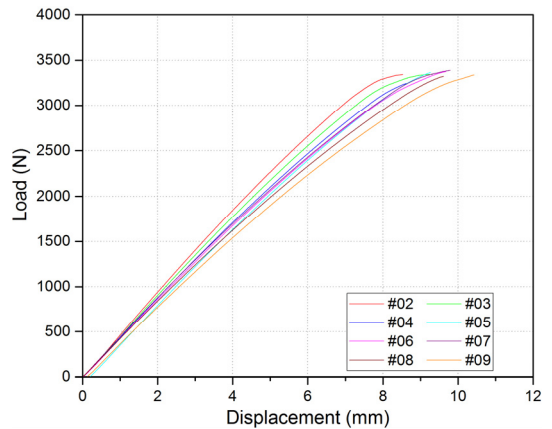
$$E_B = L^3m/4bd^3 \quad (3)$$

이중 수지 복합재 시편의 평균 파단 하중은 3,466 N으로 측정되어, 유리-에폭시 복합재 시편의 평균인 3,340 N에 비해 약 3.8 % 큰 값을 나타내었다. 이중 수지 복합재 시편은 유리-에폭시 복합재 시편과 동일한 두께의 유리-에폭시 층에 유리-페놀 층이 내부에 추가된 형태이다. 유리-페놀 층의 두께는 1.2 mm로 유리-에폭시 층의 두께 6.2 mm에 비해 얇고 페놀 수지 특성상 에폭시 수지보다 강도가 상당히 낮으므로, 유리-페놀 층은 이중 수지 복합재 시편 전체의 파단 하중 증가에 효과가 미미할 것으로 예상된다. 따라서 이중 수지 복합재 시편의 파단 하중이 유리-에폭시 복합재 시편보다 저하되지 않고 동등 이상의 수준을 나타내어, 이중 수지 복합재 시편의 동시 경화공정 중에 페놀 수지가 에폭시 수지 층으로 거의 침투되지 않았을 것으로 판단된다. 이중 수지 복합재 시편의 평균 파단 변위는 10.87 mm로 측정되어, 유리-에폭시 복합재 시편의 평균인 9.41 mm에 비해 약 15.5 % 많이 변형되었다. 하중-변위 선도에서 초기 하중에서는 두 시편의 상대 변위가 유사하나, 하중이 증가할수록 이중 수지 복합재 시편의 변위가 약간 증가되는 경향을 나타내고 있다.

두 시편의 길이와 두께가 상이하여 굴곡 특성을 상대 비교하는 것은 적절하지 않으며, 시험결과로부터 계산된 굴곡 특성의 경향에 대한 분석을 수행하였다. 이중 수지 복합재 시편과 유리-에폭시 복합재 시편의 평균 굴곡 강도는 각각 778.0 MPa와 840.2 MPa로 계산되었다. 식 (1)에서 두 시편의 지지점 길이 대 두께 비율 L/d 와 너비 b 는 각각 16:1과 15 mm로 동일하므로, 굴곡 강도는 파단 하중 P 와 두께 d 의 비율과 관련된다. 이중 수지 복합재 시편의 파단 하중이 약간 큰 값으로 측정되었으나 두께 차이가 더 크므로, 굴곡 강도가 더 작게 계산되었다. 이중 수지 복합재 시편의 평균 굴곡 변형률은 0.0358 mm/mm로 계산되어, 유리-에폭시 복합재 시편의 평균인 0.0356 mm/mm과 유사하였다. 굴곡 변형률은 식 (2)에서 파단 변위 D 와 지지점 길이 L 의 비율과 관련되며, 두 변수의 차이가 유사하였다. 이중 수지 복합재 시편과 유리-에폭시 복합재 시편의 평균 굴곡 강성은 각각 31.29 MPa와 29.70 MPa이다. 식 (3)에서 굴곡 강성은 하중-변위 선도의 초기 기울기 m 을 제외하고 두 시편이 동일하므로, m 이 약간 큰 이중 수지 복합재 시편의 굴곡 강성이 크게 계산되었다.



(a) [GP_PR/GE]



(b) GE

Fig. 9. Load-displacement curve of specimens during flexural strength test



(a) [GP_PR/GE]



(b) GE

Fig. 10. Deformation of specimens after flexural strength test

Table 4. Flexural properties of [G/P_PR+G/E] specimens in flexural strength test

Test no.	P (N)	D (mm)	σ_{IM} (MPa)	ϵ_f (mm/mm)	E_B (GPa)
01	3,522	10.72	778.9	0.0355	32.36
02	3,479	10.93	781.8	0.0359	31.53
03	3,350	11.65	776.2	0.0377	30.32
04	3,671	11.01	806.7	0.0366	31.22
05	3,323	9.90	749.9	0.0325	31.80
06	3,472	11.20	769.4	0.0371	30.25
07	3,676	11.54	836.0	0.0377	32.00
08	3,515	10.95	779.4	0.0362	30.86
09	3,291	10.00	730.2	0.0331	30.53
10	3,362	10.85	771.3	0.0353	31.99
Avg	3,466	10.87	778.0	0.0358	31.29

Table 5. Flexural properties of G/E specimens in flexural strength test

Test no.	P (N)	D (mm)	σ_{IM} (MPa)	ϵ_f (mm/mm)	E_B (GPa)
02	3,344	8.53	833.1	0.0324	32.04
03	3,345	9.32	835.8	0.0353	30.69
04	3,245	8.63	828.2	0.0325	30.27
05	3,364	9.27	843.8	0.0351	29.59
06	3,375	9.68	870.7	0.0362	30.29
07	3,388	9.79	838.2	0.0374	28.89
08	3,323	9.61	839.3	0.0363	28.55
09	3,338	10.43	832.4	0.0396	27.27
Avg	3,340	9.41	840.2	0.0356	29.70

4. 결론

유리-페놀 층과 유리-에폭시 층으로 구성되는 이종 수지 복합재의 층간 결합력을 향상시키기 위해 동시

경화 제작기법을 제안하였다. 또한 난연성을 위한 이종 수지 복합재의 유리-페놀 층에 대해 굽힘 저항성이 우수한 형태를 선정하기 위해 성능시험을 수행하였다. 연기 발생 시험을 통해, 유리-페놀 복합재 시편은 적용 형태와 무관하게 화염에 의한 그을음 발생을 최소화할 수 있고 유리-에폭시 복합재 시편에 비해 난연성이 우수함을 확인하였다. 유리-에폭시 층에 다양한 형태의 유리-페놀 층을 동시 경화기법으로 제작한 이종 수지 복합재에 대해 굽힘 저항성 시험을 수행한 결과, 부직포, 시트, 프리프레그 형태의 유리-페놀 층을 적용한 시편 모두 이종 수지 층간에 박리가 발생되지 않아, 동시 경화기법이 층간 결합력 측면에서 우수함을 확인하였다. 이 중 프리프레그 형태의 유리-페놀 층이 표면의 손상 없이 굽힘 저항성이 가장 우수하였다. 또한 굴곡 강도 시험으로부터, 유리-에폭시 복합재에 비해 프리프레그 형태의 유리-페놀 층을 적용한 이종 수지 복합재의 굴곡 강도가 저하되지 않아, 유리-페놀 층과 유리-에폭시 층을 동시에 경화하는 과정 중에 페놀 수지가 에폭시 수지 층으로 거의 침투되지 않음을 확인하였다. 이와 같이 기계적 강도가 우수한 유리-에폭시 층과 프리프레그 형태의 난연성이 우수한 유리-페놀 층을 동시 경화 기법으로 제작할 경우, 층간 결합력이 증대될 뿐만 아니라 난연성, 굽힘 저항성, 굴곡 강도 등의 열적, 기계적 특성에 대한 운용 요구환경을 모두 만족함을 확인하였다. 이종 수지 복합재에 대한 동시 경화 제작기법은 항공우주, 산업 분야 등에서 이종 수지 층간 결합력이 요구되는 다양한 복합재 구조물에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] J. R. Vinson and R. L. Sierakowski, "The Behavior of Structures Composed of Composite Materials," Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2002.
- [2] P. D. Mangaliri, "Composite Materials for Aerospace Applications," Bulletin of Materials Science, Vol. 22, pp. 657-664, 1999.
- [3] G. Pulci, J. Tirillo, F. Marra, F. Fossati, C. Bartuli and T. Valente, "Carbon-Phenolic Ablative Materials for Re-Entry Space Vehicles," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 41, No.

- 10, pp. 1483-1490, 2010.
- [4] P. Beardmore, "Composite Structures for Automobiles," *Composite Structures*, Vol. 5, No. 3, pp. 163-176, 1986.
- [5] H. Y. Ko, K. B. Shin and J. S. Kim, "A Study on Improving the Fatigue Life for a Woven Glass Fabric /Epoxy Laminate Composite Applied to Railway Vehicles," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A*, Vol. 34, No. 2, pp. 203-209, 2010.
- [6] H. Park, "Study on Structural Design of Glass/Epoxy Composite Blade and Tower of Vertical Axis Wind Turbine System," *Composites Research*, Vol. 31, No. 3, pp. 104-110, 2018.
- [7] C. Park, Y. Kim, J. Yoon and J. Lim, "Anti-Smoke Varnish for Epoxy Based Structural Composite for Flame Exposure," *2015 KIMST Annual Conference Proceedings*, pp. 505-506, 2015.
- [8] KS M ISO 5659-2, "Plastics - Smoke Generation - Part 2: Determination of Optical Density by a Single-Chamber Test," 2012.
- [9] ASTM D7027, "Standard Test Method for Evaluation of Scratch Resistance of Polymeric Coatings and Plastics Using an Instrumented Scratch Machine," 2013.
- [10] ASTM D790, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials," 2015.