

UV 경화형 복합재료의 진공압에 따른 기계적 경화 특성 분석

장용수*, 김정근*, 고선호**, 김흥건*,***, 광이구*,***,#

*전주대학교 탄소융합공학과, **전주대학교 탄소연구소, ***전주대학교 기계자동차공학과

Analysis of Mechanical Curing Properties Based on Vacuum Pressure of UV-Cured Composites

Yong-Soo Jang*, Jeong-Keun Kim*, Sun-Ho Go**, Hong-Gun Kim*,***, Lee-Ku Kwac*,***,#

*Department of Carbon Convergence Engineering, JEONJU UNIV.,

**JEONJU UNIV. Institute of Carbon Tech.,

***Department of Mechanical and Automotive Engineering, JEONJU UNIV.

(Received 04 September 2020; received in revised form 14 September 2020; accepted 15 September 2020)

ABSTRACT

In this study, a UV-cured GFRP molding is made using a combination of hand lay-up and resin transfer molding, and its properties are analyzed. The molded plates produced using various vacuum pressures (0 mmHg, -450 mmHg, and -760 mmHg) are examined via a comparison of hand lay-up molding and resin transfer molding. Tests are conducted by processing tensile specimens (ASTM D-5083), flexural test specimens (ASTM D-790), and ILSS test specimens (ASTM D-2344) according to each ASTM standard with a molded plate. Similarly, the UV-cured GFRP molding is compared against GFRP using epoxy. It was confirmed that the mechanical strengths of all the specimens increased when the vacuum pressure was increased and when UV curing was applied. This is believed to be because as the vacuum pressure increases, the pores of the cured specimen are removed, thereby reducing defects, and the bonding force between the glass fiber and the resin is stronger than that of the epoxy resin. It is expected that if resin transfer molding methods and UV-cured resins are used for molding GFRP composites in industry, products with better mechanical properties and faster curing time will be produced.

Key Words : Hand Lay-up(수적층), Resin Transfer Molding(수지 이송 성형), Tensile Strength(인장 강도), Flexural Strength(굴곡 강도), ILSS(층간 전단 강도)

1. 서 론

최초의 FRP(Fiber Reinforced Plastic)는 1930년대

영국의 Norman de Bruyne에 의해 상업적으로 개발되어 항공 산업에서 관심을 모았다. 우리나라에서 FRP의 역사는 1960년대 제1차 경제개발 5개년 계획 기간 중에 FRP 선을 건조하는 업체가 5개사로 명목치는 않으나 FRP 역사의 시초로 판단되며, 최초의 FRP 재료의 등록은 1978년 1월 CCP

Corresponding Author : kwac29@jj.ac.kr

Tel: +82-63-220-3063, Fax: +82-63-220-3161

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

사의 FRP용 액상 불포화 폴리에스테르 수지(KS 허가 획득(제1576호))로서 이 시기를 전후로 FRP 제품이 뿌리를 내려 현재에 이르렀다¹⁻⁴⁾.

초기의 FRP 공법은 대부분 기초적 원시적인 수적층(Hand Lay-up) 공법이 차지했고 이후 스프레이(Spray-up), 필라멘트 와인딩(Filament Winding), 수지이송(Resin Transfer Molding), 진공 성형(Vacuum Bagging, VIF, Va-RTM), 오토클레이브 등의 여러 공법이 도입되었으며 현재는 점점 고부가 가치 상품(방산제품, 우주 항공부품)으로서 진입하고 있다.

또한 보강재(Reinforcement : 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드, 고탄성 폴리에스테르 등)와 기재(Matrix : 열경화성수지 - 불포화 폴리에스터, 페놀, 에폭시, 이미드 - 열가소성수지 : PP, PE, PA, PEEK 등)도 시대의 흐름과 사용자 요구에 따라서 발전해 왔다²⁾.

기재인 합성수지의 경우 보강재의 접착제로 적용하기 위해서는 열에너지가 FRP 제조원가에 상당한 영향을 주고 있으며 성형 공정에 많은 공정이 사람의 손(수적층, 수동작업 등)에 의존하여 공정 개선이 요구되고 있으며 VOC(휘발성 유기물질)등의 환경규제가 강화되고 있고 숙련된 FRP 기능공의 고령화로 인하여 작업자 구인의 어려움 등의 제약이 현재의 FRP 제조에 상당한 걸림돌이 되고 있는 실정이다²⁾.

이를 개선하기 위한 한 가지 방법으로는 자외선(UV)에 노출시켜 FRP를 성형하는 방법으로서 짧은 경화시간을 가진 RTM(Resin Transfer Molding, 수지이송 성형) 공법으로 VOC 등의 위해성 경감, 미숙련공들의 작업에 용이함을 주는 등의 장점에 따른 FRP 산업에 새로운 경향을 제시할 것으로 본다.

본 연구에서는 자외선(UV)을 이용한 FRP 성형의 빠른 경화라는 장점을 살려 UV 경화형 수지를 이용한 GFRP를 제작하고 RTM 공법과 Hand Lay-up(수적층)의 차이를 인장 강도, 굴곡 강도, ILSS(Interlaminar Shear Strength) 결과를 통해 확인하고자 하였다. 또한 기존 에폭시 수지를 동일한 방법으로 제작하여 기계적 물성 차이를 비교, 검토하고자 하였다. 이를 바탕으로 진공압의 유무에 따른 차이와 진공압의 강도에 따른 차이 또한 확인하고자 하였다.

2. UV 경화형 수지의 특징

Table 1은 촉매경화형 수지와 UV 경화형 수지의 종류 및 첨가제와 경화 방법을 나타내고 있다. Fig. 2는 각각의 수지가 반응하여 경화되는 과정에서 온도가 상승할 때의 상온, 램프 근처, 해당 용액의 온도를 측정할 때 Thermal Couple의 위치를 도식화하였다. 온도 측정은 GT-309 모델을 사용하였다.

Fig. 2에서 볼 수 있듯이, UV 경화형 수지(UVR, UVZ)의 경우 촉매 경화형 수지(CR, CZ)보다 동일

Table 1 Specimen of catalyst curing and UV curing³⁾

Specimen	Resin	Additives	Curing
CR	Vinylester (RF 1001 MV)	- Accelerator : VE 1.0 pbv - Hardener : Luperox DDM 1.0 pbv	R.T. Curing
CZ	Unsaturated Polyester (ZNT 6345)	- Accelerator : 6% C o-oct. 0.5pbv - Hardener : Luperox DDM 1.0 pbv	
UVR	Vinylester (RF 1001 MV)	Irgacure 2100	UV Curing
UVZ	Unsaturated Polyester (ZNT 6345)		

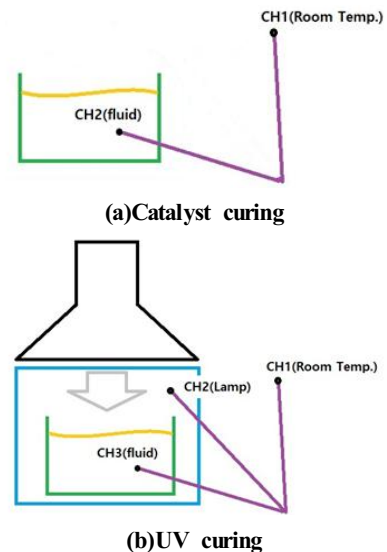


Fig. 1 Curing temperature measurement schematic³⁾

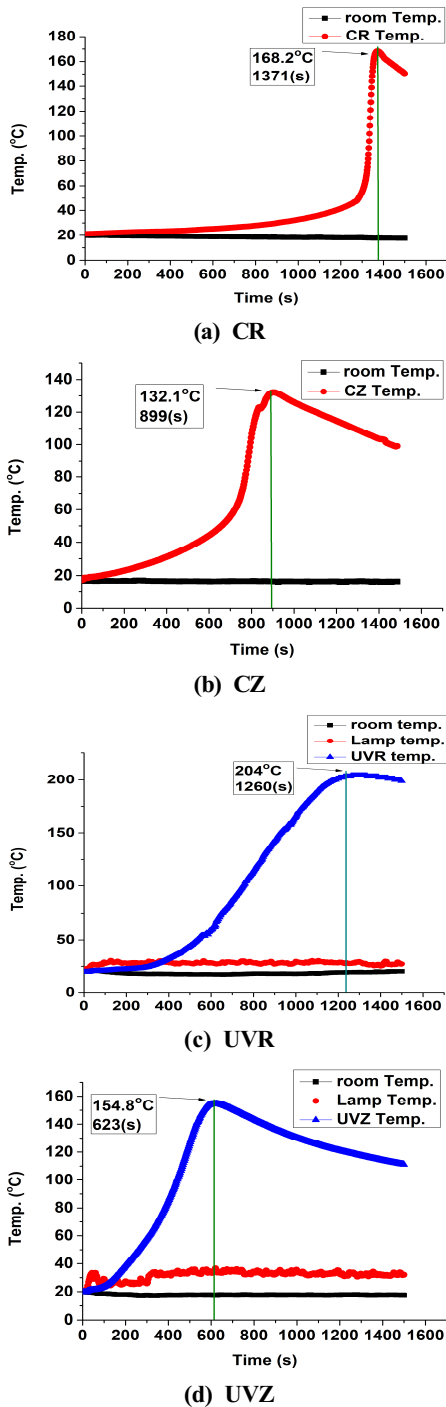


Fig. 2 Temperature over time of CR, CZ, UVR, UVZ solution^[3]

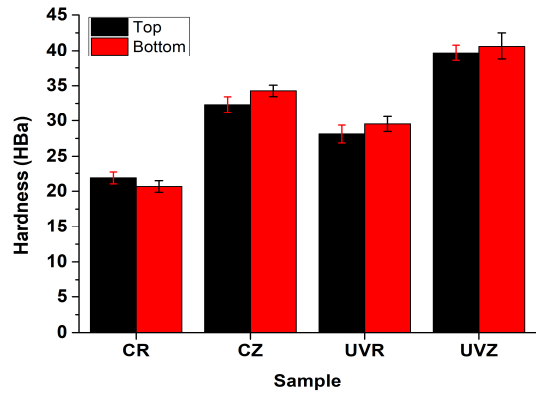


Fig. 3 Barcol hardness results of specimen^[3]

수지였을 때 상대적으로 반응이 빠르게 일어난다는 것을 확인할 수 있다. 특히 UV 경화형 수지 중 UVZ는 623초 안에 반응 최고 온도에 도달하여 생산시간을 단축시킬 수 있는 최적의 소재라고 판단된다(CR: 1371초, CZ: 899초, UVR: 1260초)^[2].

또한 Fig. 3의 바콜 경도(Barcol, ASTM D-2583) 측정 결과를 살펴보면 동일 수지였을 때 UV 경화형 수지가 경도값이 우수하며 UVZ는 다른 시편에 비해 경도값이 높음을 확인할 수 있다^[2].

따라서 UV 경화형 수지인 UVZ 수지를 이용하여 GFRP를 제작하면 제조시간을 단축하고 화학적, 기계적 특성이 우수한 제품을 생산할 수 있을 것으로 판단되어 이에 본 연구에서는 UV 경화형 불포화 폴리에스테르 수지를 이용하여 GFRP를 제작하고 기계적 특성을 확인하고자 하였다^[4].

3. 광경화 복합재료의 기계적 특성분석

3.1 연구방법

UV 경화형 수지를 이용한 방법과 에폭시 수지를 이용하여 각기 다른 진공압으로 제작된 각각의 3가지 종류의 GFRP 평판을 가공한 시편에 대해 인장 시험(ASTM D-5083), 3점 굴곡 시험(ASTM D-790), ILSS(Interlaminar Shear Strength) 층간 전단 시험(ASTM D-2344)을 통해 UV형 GFRP의 기계적 특성 분석을 진행하고자 하였다. 해당 연구에서 적

용된 GFRP 성형 공정은 Hand Lay-up과 RTM 공정이 사용되었으며 Autoclave나 Hot Press 방식에 비해 생산량이 우수하다고 판단되어 선택하게 되었다^[3].

첫 번째는 UV 경화형 수지를 이용하는 방법인데 Fig. 4는 간단하게 UV 경화의 공정 흐름을 나타내고 있다. 우선 UV 경화형 불포화 폴리에스테르수지에 스티렌 노모머, 기타 첨가제, 광 개시제를 순서와 비율에 따라서 전동 믹서를 사용하여 잘 혼합되게 섞어준다. 그리고 전동 믹서로 혼합할 때는 용기 밖으로 튀지 않게 믹서의 회전속도를 낮춰서 서서히 섞어준다. 그 후 약 5 ~ 10분 정도 방치하면 기포가 없어지게 되는데 이 모든 작업의 최적 조건은 25℃(상온)에서, 자외선 침투가 최소화하도록 모든 공간 내의 공기 출입부는 암막 천으로 밀폐시켜 수행하였다.

두 번째는 에폭시 수지를 이용한 방법이다. 본

연구에서는 KFR-120V 에폭시와 KFH-163 경화제를 사용하였고, 3:1의 비율로 혼합하여 진공 흡입 방법을 이용하여 기포를 제거해준 후 Hand Lay-up이나 RTM 공정을 수행하였다.

다음은 위에서 준비한 수지를 가지고 수행한 RTM 공정을 나타낸다. 사용된 유리섬유(Glass Fiber)의 경우 Combination Mat로서 유리섬유 이방향 로빙(45° ± UD Roving)과 Chopped Strand를 바느질한 보강재료를 사용하였고 CR880(Chopped Strand 300g/m² + 이방향 로빙 580g/m²), Polyester 실로 박음질하였으며 앞면은 이방향 로빙 580g/m², 뒷면은 Chopped Strand 300g/m²에 해당하는 유리섬유이다.

진공압 0mmHg GFRP 판재의 경우, 대기압 상태에서 Hand Lay-up 공법을 이용하여 제작하였으며 보강재 유리섬유 적층 수량은 4매로 적층하였다. 그리고 수지 함침 공구는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 함

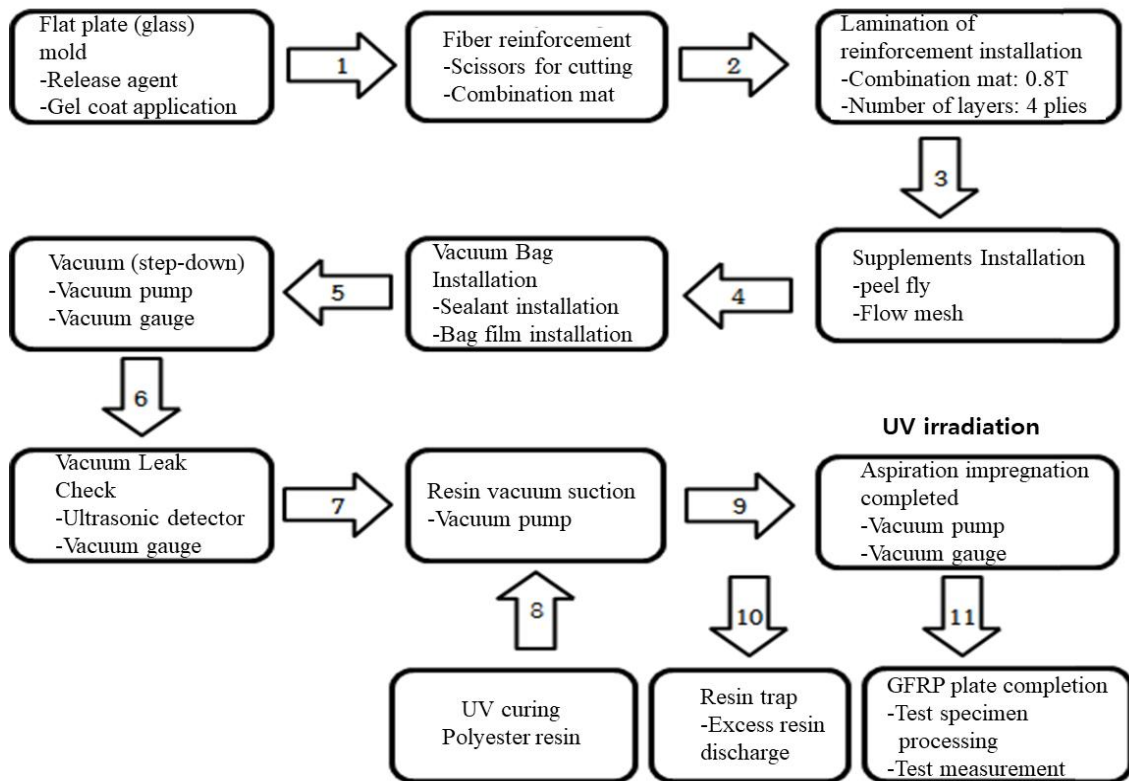


Fig. 4 UV curing GFRP plate forming process



Fig. 5 Vacuum pressure : 0mmHg (hand lay-up), GFRP sheet and tools



Fig. 6 Vacuum pressure: -450mmHg & -760mmHg (RTM), GFRP sheet and tools

침용 롤러를 사용하여 유리섬유 표면을 전후좌우로 살살 문질러 기포가 빠지게끔 섬유 밖으로 밀어내서 평탄화 작업을 한다. 그 이후 UV 경화형 수지를 이용하는 방법의 경우 현장 조건에 맞추어 일광에 노출시켜 경화 제작하고 에폭시 수지를 이용하는 방법의 경우는 100℃ 오븐에 넣어 2시간 정도 성형 시켰다.

Fig. 6은 진공압 -450mmHg (Hand Lay-up)와 -760mmHg (RTM) GFRP 판재의 경우이며, UV 경화형 수지를 RTM 공법으로 -450mmHg (RTM)와 -760mmHg (RTM)로 유지된 상태에서 일광에 노출시키거나 100℃의 오븐에서 경화 제작하였다.

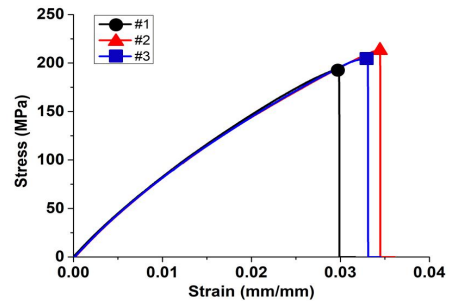
3.2 인장 시험 분석

인장 시험은 만능재료시험기(Universal Testing Machine)를 사용하였다. 그리고 ASTM D-5083 규격에 의거하여 시험절차 및 분석을 진행하였다.

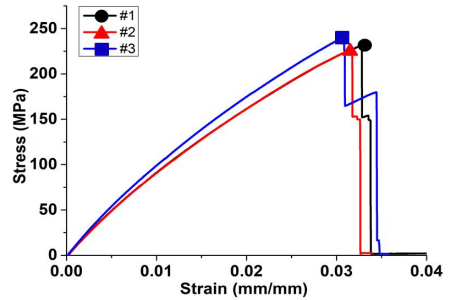
인장 시험 데이터의 경우 데이터의 신뢰성을 확보하고자 최대값과 최소값을 제외한 나머지 세 개의 시편 데이터를 가지고 분석을 하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각 에폭시와 UV 경화형 시편에 대한 인장 강도 결과 그래프이다.

Table 2에서 볼 수 있듯이 UV 경화형일 때 실험 결과 변형률에 따른 응력의 경우 진공압 0mmHg (Hand Lay-up)에서는 평균 227.64MPa의 응력이 나

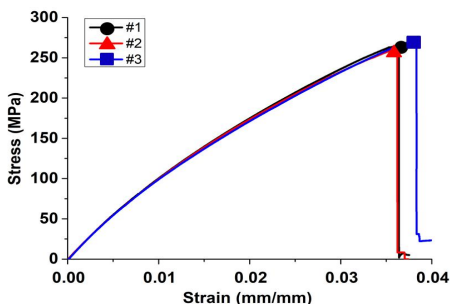
타났으며 진공압 -450mmHg(RTM)에서는 평균 334.43MPa의 응력이 나타났고 진공압 -760mmHg (RTM)의 경우는 평균 381.30MPa의 응력이 나타났다. 따라서 성형 진공압이 증가함에 따라 시편의 인장 강도 또한 증가했음을 확인할 수 있었다. 진공압이 증가하면서 수지가 경화할 때 내부에서 발생하는 기체를 효과적으로 제거할 수 있었기 때문에 시편 내부의 기공을 줄일 수 있었고 결과적으로 시편의 결함이 감소한 것으로 판단된다.



(a) 0mmHg (Hand Lay-up)



(b) -450mmHg (RTM)



(c) -760mmHg (RTM)

Fig. 7 Tensile test results of epoxy specimen

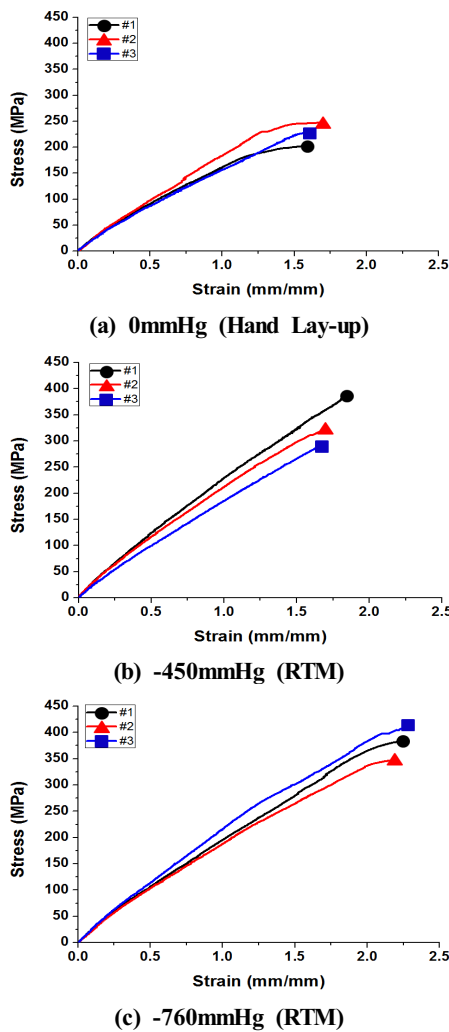


Fig. 8 Tensile test results of UV specimen

한편 기존 에폭시 수지와 비교했을 때 UV 경화형 수지 시편의 인장 강도 값이 0mmHg (Hand Lay-up)는 11.62%, -450mmHg(RTM)는 44.05%, -760mmHg (RTM)는 44.13% 증가하는 결과를 나타냈다. 이를 통해 UV 경화형 수지가 유리섬유와의 결합력이 에폭시 수지에 비해 강하며 보다 단단한 네트워크를 형성하였기 때문에 이와 같은 결과가 도출된 것으로 사료된다.

이외에도 UV 경화형일 때 Tensile Chord Modulus of Elasticity의 경우 성형 시의 진공압의 증가에 따

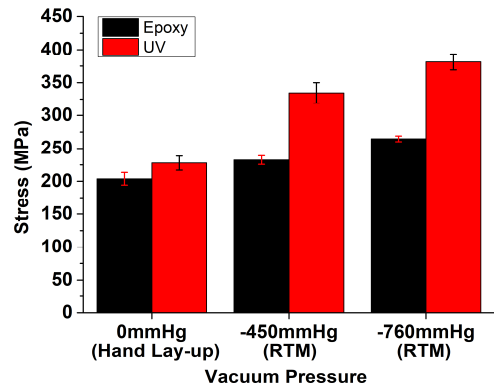


Fig. 9 Comparative graph of tensile strength according to vacuum pressure

Table 2 Mechanical property measurement results of the tensile test specimen

	Resin	0mmHg (Hand Lay-up)	-450 mmHg (RTM)	-760 mmHg (RTM)
Max. Load (kN)	Epoxy	16.93	15.89	20.21
	UV	22.81	28.43	28.88
Tensile Strength (MPa)	Epoxy	203.93	232.16	264.55
	UV	227.64 (+11.62%)	334.43 (+44.05%)	381.30 (+44.13%)
Tensile Chord Modulus of Elasticity(GPa)	Epoxy	8.95	10.14	10.64
	UV	18.44	21.99	22.38
Poisson's Ratio by Chord Method	Epoxy	0.21	0.18	0.21
	UV	0.19	0.20	0.24

라 각 18.44GPa, 21.99GPa, 22.38GPa로 증가하였고 푸아송비의 경우도 0.19, 0.20, 0.24로 증가한 것으로 나타나 기계적 물성이 진공압의 증가로 향상되었고 UV 경화형 GFRP의 우수한 기계적 물성을 확인하였다.

3.2 굴곡 시험 분석

굴곡 시험 측정은 동일한 만능재료시험기를 사용하였으며 ASTM D-790에 의거하여 시험 절차와 결과 분석을 수행하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 각각 에폭시와 UV 경화형 시편에 대한 굴곡 강도 결과 그래프이다.

굴곡 시험 측정 결과 모든 시편에서 중앙부에서 파단이 시작되었고 Table 3에서 볼 수 있듯이 UV

경화형의 경우 진공압 0mmHg (Hand Lay-up)에서는 평균 316.57MPa의 응력과 진공압 -450mmHg (RTM)에서는 평균 386.7MPa의 응력, 진공압 -760mmHg (RTM)의 경우는 평균 361.9MPa의 응력이 나타났다. 성형 시의 진공압의 상승은 응력의 증가로 이어졌고 이는 굴곡 강도에 있어 성형 시의 진공압이 강도를 증가시키는 요소라는 것을 확인하였다.

한편 UV 경화형 수지의 시편이 에폭시 수지 시편에 비해 굴곡강도 값이 0mmHg (Hand Lay-up)는

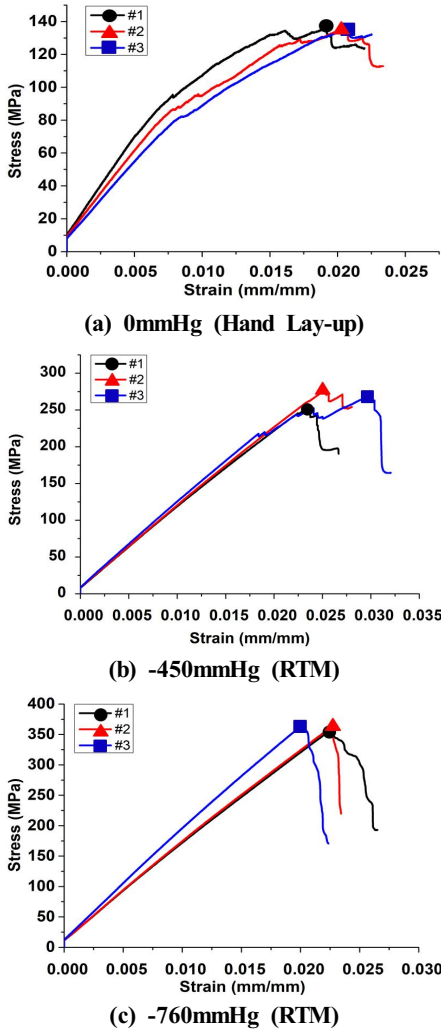


Fig. 10 Flexural test results of epoxy specimen

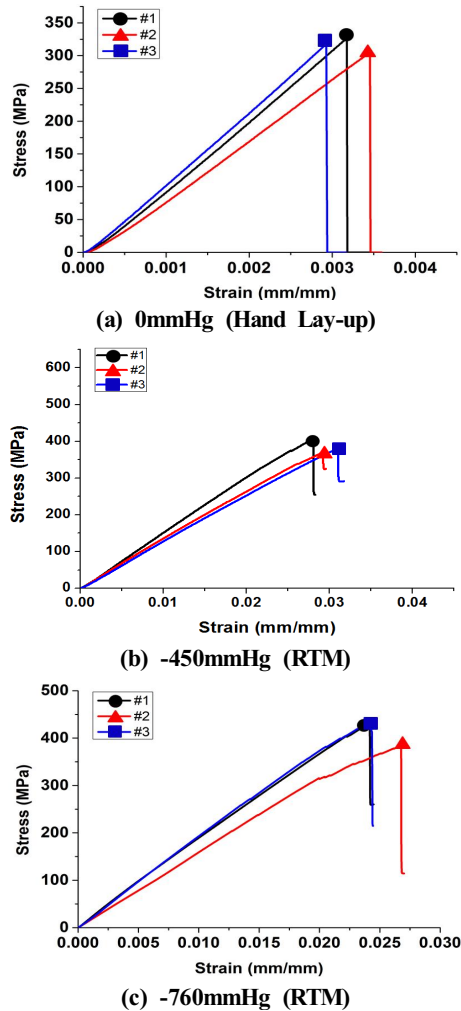


Fig. 11 Flexural test results of UV specimen

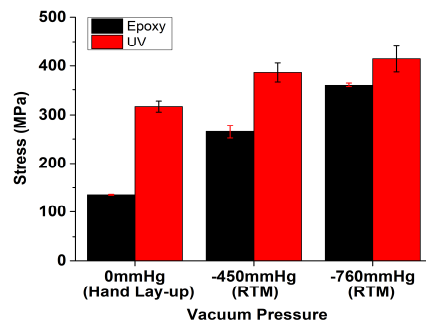


Fig. 12 Comparative graph of flexural strength according to vacuum pressure

Table 3 Mechanical property measurement results of the flexural test specimen

	Resin	0mmHg (Hand Lay-up)	-450 mmHg (RTM)	-760 mmHg (RTM)
Area (mm ²)	Epoxy	59.03	64.05	45.10
	UV	52.79	42.16	40.85
Max. Load (N)	Epoxy	328.67	615.00	734.33
	UV	697.66	665.34	702.50
Flexural Strength (MPa)	Epoxy	135.32	265.78	360.67
	UV	316.57 (+133.95%)	386.69 (+45.49%)	414.32 (+14.87%)

133.95%, -450mmHg (RTM)는 45.49%, -760mmHg (RTM)는 14.87% 증가하였으며 UV 경화형 수지가 유리섬유와 함께 에폭시 수지보다 단단한 네트워크를 형성했음을 의미한다.

3.3 ILSS(층간 전단 강도) 시험분석

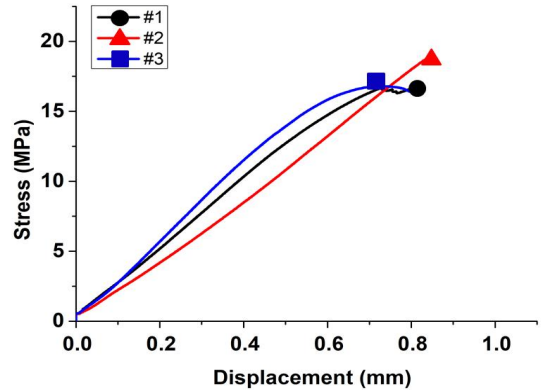
ILSS(Interlaminar Shear Strength) 층간 전단 강도 시험은 동일한 만능재료시험기로 시험을 실시하였으며 ASTM D-2344 규격에 의거하여 시험 절차 및 결과 분석을 진행하였다. Fig. 13과 Fig. 14은 각각 에폭시와 UV 경화형 시편에 대한 ILSS 결과 그래프이다.

실험 결과 Table 4와 같은 결과를 얻었으며 UV 경화형일 때 진공압 0mmHg(Hand Lay-up)에서는 평균 22.34MPa, 진공압 -450mmHg(RTM)에서는 평균 23.56MPa, 진공압 -760mmHg(RTM)의 경우는 평균 24.79MPa이 나타났다.

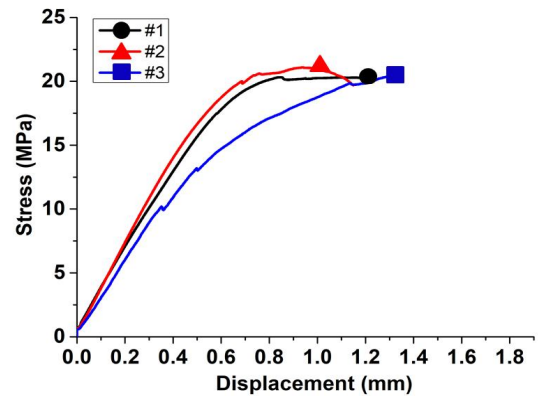
Table 4에서 볼 수 있듯이, 진공압이 증가함에 따라 응력값은 점차 증가하는 경향을 보였으며 층간 전단에 있어 성형 시의 진공압의 증가는 층간 전단 강도를 상승시킬 수 있음을 확인하였다. 따라서 진공압의 유무가 시편의 강도에 영향을 주고 응력값을 상승시킬 수 있는 요인이 될 수 있다고 판단된다.

한편 UV 경화형 수지의 시편이 에폭시 수지의 시편에 비해 층간 전단 강도 값이 0mmHg(Hand Lay-up)일 때 27.85%, 450mmHg(RTM)일 때

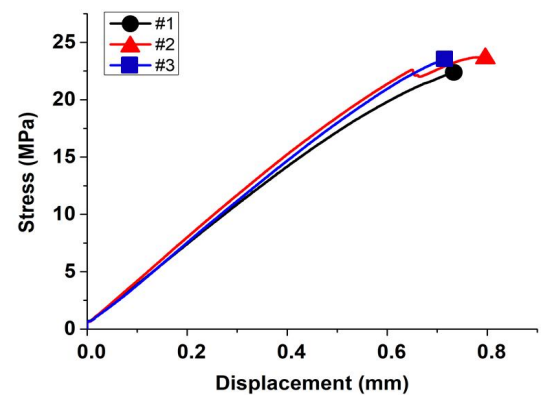
14.29%, 760mmHg(RTM)일 때 7.30% 증가하였고 이로서 UV 경화형 수지가 유리섬유와 함께 에폭시 수지보다 강한 결합력을 가졌음을 확인하였다.



(a) 0mmHg (Hand Lay-up)



(b) -450mmHg (RTM)



(c) -760mmHg (RTM)

Fig. 13 ILSS test results of epoxy specimen

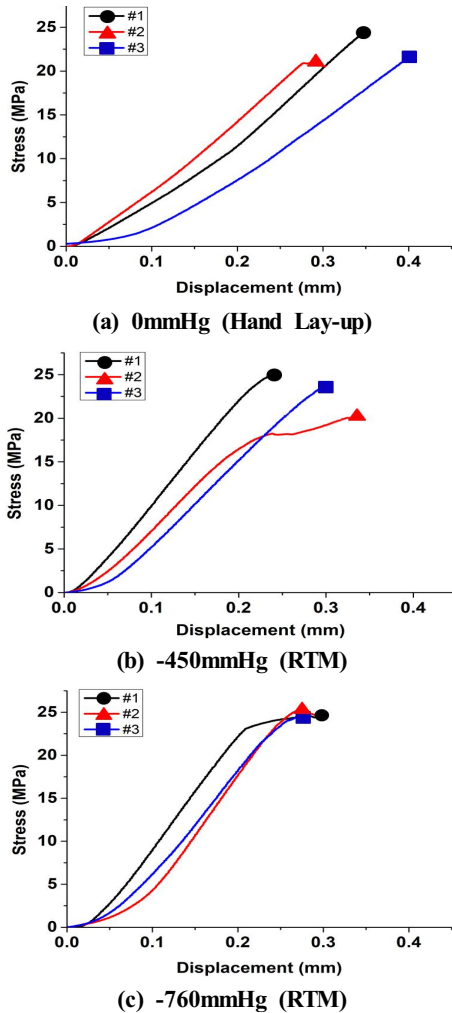


Fig. 14 ILSS test results of UV specimen

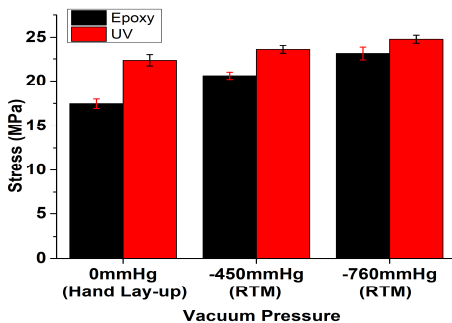


Fig. 15 Comparative graph of ILSS according to vacuum pressure

Table 4 Mechanical property measurement results of the ILSS test specimen

	Resin	0mmHg (Hand Lay-up)	-450mmHg (RTM)	-760mmHg (RTM)
Area (mm ²)	Epoxy	51.11	42.97	24.34
	UV	33.57	21.97	17.55
Max. Load (kN)	Epoxy	1.19	1.18	0.75
	UV	1.00	0.69	0.58
Interlaminar Shear Strength (MPa)	Epoxy	17.47	20.61	23.10
	UV	22.34	23.56	24.79

4. 결론

본 연구는 UV 경화형 수지와 촉매 경화형 수지만의 발열 분석을 실시하여 UV 경화형 수지가 촉매 경화형 수지보다 경화 시간이 빠르고 경도가 우수한 것을 확인하였다. 이후 Hand Lay-up과 RTM 공법을 적용하여 진공압에 따른 에폭시와 UV 경화형 GFRP의 인장, 굴곡, ILSS 시험을 수행하였으며 이를 통해 GFRP의 기계적 물성 차이를 비교, 분석하고자 하였다.

각각의 진공압에 따른 시험편을 가지고 인장, 굴곡, ILSS 시험을 진행한 결과 성형 시의 진공압의 증가는 곧 응력값을 향상시켰고 이는 Hand Lay-up보다 RTM 공법이 재료의 기계적 물성을 향상시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 진공압이 증가함에 따라 시험편 내부의 결합력을 상승시킨 것이 주요 원인이라고 판단된다.

특히 에폭시 수지를 이용한 방법보다 UV 경화형 수지를 이용한 방법이 인장 강도, 굴곡 강도, ILSS(층간 전단 강도) 모두 높게 나오는 특성을 보였다. 이는 UV 경화형 수지가 유리섬유와 함께 에폭시 수지보다 강한 네트워크를 형성하였고 기계적 강도 상승이라는 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 진공압의 상승은 기공에 의한 시험편의 결함을 최대한으로 줄일 수 있는 요소로 판단되며 수지의 성형 시 발생하는 기체를 효과적으로 제거할 수 있는 수단이라고 확인할 수 있었

다. 나아가 산업체에서 GFRP 복합재 성형에 UV 경화형 수지와 RTM 공법을 활용한다면 기존 에폭시 수지에 비해 빠른 경화 시간이라는 장점과 더불어 우수한 기계적 물성을 보유한 제품을 생산할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

“이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2016R1A6A1A03012069)”

REFERENCES

- Kim, S. H., Jang, H. S., Park, S. H., Song, G. G., “Study on the Curing Properties of Photo-curable Acrylate Resins”, Polymer(Korea), Vol. 34, No. 5, pp. 469-473, 2010.
- Lee, Y. S., Song, S. A., Kim, W. J., Kim, S. S., Jung, Y. S., “Fabrication and Characterization of the Carbon Fiber Composite Sheets”, Composite Research, Vol. 28, No. 4, pp. 168-175, 2015.
- Jang, Y. S., Kim, J. K., Go, S. H., Kwac, L. K., “Analysis of Chemical and Mechanical Properties of UV Curing Resin”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 6, pp. 88-95, 2020.
- Bae, J. W., Jung, J. H., Wang, H. S., Kim, S. H., Kim, I. J., Kim, I. J., Song, K. K., “Dual Curing Characteristics of Photo-curable Acrylate Monomers”, Polymer(Korea), Vol.41, No.2, pp. 361-366, 2017.
- Kim, H. R., Kim, D. H., Kim, Y. U., Lee, D. J., Bae, J. Y., “Synthesis and Properties of Epoxy Modified Acrylate Binder Based on Aromatic Anhydride Forming Patternable Silica Resist”, Polymer(Korea), Vol. 42, No. 4, pp. 551-559, 2018.
- Nam, H. C., Nam, Y. S., You, R., Park, W. H., “Fabrication and Characterization of Super-absorbent Coating Solution and Film for Glass Fiber in Optical Cable”, Polymer(Korea), Vol. 43, No. 6, pp. 921-925, 2019.
- Kim, J. Y., Moon, B. J., Kang, D. H., Hwang, S. H., “Synthesis and Cured Film Properties of UV-Curable Caprolactone-Modified Urethane Acrylate Oligomers”, Polymer(Korea), Vol. 34, No. 6, pp. 574-578, 2010.
- Wang, H. S., Lee, S. H., Bu, S. H., Song, K. G., “FT-IR Spectroscopic Studies of Thermal Curing Behaviors of Photo-Curable Acrylate Mixtures”, Polymer(Korea), Vol. 43, No. 1, pp. 99-105, 2019.
- Cho, Y. K., Lee, W. K., “Synthesis and Properties of UV-Curable Polyurethane Acrylates Containing Fluorine”, Polymer(Korea), Vol. 40, No. 3, pp. 439-445, 2016.
- Gwon, Y. J., Cho, U. R., “Study on the Improvement of Film Shrinkage in UV-curing Process”, Polymer(Korea), Vol. 35, No. 4, pp. 320-324, 2011.
- Kim, S. H., Wang, H. S., Lee, S. H., Bu, S. H., Song, K. G., “FT-IR Spectroscopic Studies of Photo-Thermal Dual Curing Behaviors of Acrylate Monomers”, Polymer(Korea), Vol. 42, No. 4, pp. 714-719, 2018.
- Ahn, B. U., Jung, J. A., Lee, J. M., Jeong, H. M., “Preparation and Properties of Self-photocuring Poly(urethane acrylate)”, Polymer(Korea), Vol. 41, No. 5, pp. 790-797, 2017.
- Lee, J. H., Lee, Y. N., Park, S. S., Ha, K. R., “Preparation and Properties of Thiol-ene UV-cured Nanocomposites with Methacrylate-grafted Cellulose Nanocrystals as Fillers”, Polymer(Korea), Vol. 43, No. 4, pp. 612-620, 2019.
- Kim, H. G., “Effect of Composition of Mixed Reactive Diluent on Thermal Stability of UV Cured Urethane Acrylate/MMT Nanocomposite”, Polymer(Korea), Vol. 40, No. 1, pp. 9-16, 2016.

15. Kim, D. B., “Adhesion Properties and Light Shielding Effect by Pigments of UV Curing Acrylic Adhesives”, Polymer(Korea), Vol. 40, No. 1, pp. 92-100, 2016.
16. Um, C. H., Lee, M. H., Kwak, S. B., Han, I. S., Ko, Y. K., Lee, H. W., Lee, P. C., Ha, J. U., “Study on the Interfacial Strength of Carbon Fiber-Polymer Film Composite by Lap Shear Test Method”, The Transactions of the Korean Society Automotive Engineers, Vol. 27, No. 6, pp. 455-461, 2019.
17. Lee, D. U., Seo, H. Y., Lee, S. H., Lee, J. Y., Yoon, H. G., “Effects of the Reinforcement of Block Copolymer-treated Carbon Fibers on Tensile Properties of Polypropylene Composites”, Polymer(Korea), Vol. 41, No. 6, pp. 1066-1072, 2017.
18. Yoon, H. J., Gil, B. M., Lee, J. H., Park, J. E., Lim, J. H., Jo, M. J., Jung, K. H., Wie, J. J., “Thermal and Mechanical Properties of Polypropylene/Cellulose Nanofiber Composites”, Polymer(Korea), Vol. 44, No. 3, pp. 255-263, 2020.
19. Lim, W. J., Kang, Y. J., Kim, J. H., “Preparation and Properties of Chitin and Cellulose Nanofibers and Their Applications in Polymer Films”, Polymer(Korea), Vol. 44, No. 1, pp. 13-20, 2020.
20. Sohn, M. H., Li, X. X., Cho, U. R., “Synthesis of Polyurethane Elastomers by Different Kinds of Acids”, Polymer(Korea), Vol. 43, No. 6, pp. 824-830, 2019.
21. Kim, S. M., Kim, S. H., Lee, E. J., Park, H. J., Lee, K. Y., “Curing Kinetics of Polyurethane Elastomers Depending on the Amount of Curing Agent and Temperatures by Real Time FT-IR Spectroscopy”, Polymer(Korea), Vol. 41, No. 4, pp. 610-618, 2017.
22. Kim, S. H., Lee, D. G., Lee, J. W., Oh, D. G., Son, I. T., Lee, J. H., Kim, H. J., Jung, H. W., “Relationship between Crosslinking and Surface Mechanical Properties of UV Curable Coatings for Automotive Interior Plastic Parts”, Polymer(Korea), Vol. 44, No. 1, pp. 38-48, 2020.