

UV 경화 수지의 화학적 기계적 경화특성 분석

장용수*, 김정근*, 고선호**, 박이구***,#

*전주대학교 탄소융합공학과, **전주대학교 기계공학과, ***전주대학교 기계자동차공학과

Analysis of Chemical and Mechanical Properties of UV Curing Resin

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

*Graduate School of Carbon Fusion Engineering, JEONJU UNIV.,

**Graduate School of Mechanical Engineering, JEONJU UNIV.,

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

(Received 20 April 2020; received in revised form 26 April 2020; accepted 16 May 2020)

ABSTRACT

Currently, Fiber-Reinforced Plastic (FRP) composite materials are used in many industrial fields, owing to their superior stiffness and specific strength compared to metals. However, there are issues with FRP inefficiency, due to low productivity of such materials, environmental problems they pose and long curing times needed. Trying to address these issues, research was conducted towards the development of a FRP composite material with excellent properties and short production time, introducing a curing method using a UV lamp. Four types of composite materials were prepared, cured with catalyst or UV (CZ: Catalyst + ZNT 6345, CR: Catalyst + RF 1001 MV, UVZ: Photoinitiator + ZNT 6345, and UVR: Photoinitiator + RF 1001 MV). Examination of the chemical and mechanical properties of these composites showed that UV-cured materials performed better than the catalyst-cured ones. These results indicate that the production process of FRP composite materials can be simplified by using a UV lamp for curing, resulting in composite materials with the same quality, but reduced production time by about 70% compared to currently used practices. This advancement will contribute greatly to the composite material industry.

Key Words : UV Curing(UV 경화), Catalyst Curing(촉매 경화), Mechanical Properties(기계적 물성), Barcol Hardness(바콜경도), FT-IR(푸리에 변환 적외선 분광학)

1. 서 론

FRP 복합재료에 사용되는 수지는 불포화 폴리에스테르(Unsaturated Polyester) 수지와 강도, 내열도

가 높은 비닐에스터(Vinylester) 수지이며 이들 수지는 기계적 물성과 가공성이 뛰어난 에폭시 수지이다. 또한 열경화성 수지를 사용하던 기존의 방법과는 달리 원료가 다양화됨에 따라 내열성이 높은 폴리아미드 수지, 양산성이 높은 열가소성수지(PEEK, PES 등)와 같은 다양한 적용 가능 수지들의 개발로 인해 선택의 폭이 넓어졌다. 그러나 기존의 FRP 복합재료는 고온 경화가 많기 때문에

Corresponding Author : kwac29@jj.ac.kr

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

고온에서 변형되는 소재는 사용할 수 없다. 그리고 용제를 사용하기 때문에 오염 등의 환경문제가 발생하며 경화시키는데 에너지 소모가 크다. 또한 경화 장치가 크기 때문에 설치면적이 크다. 마지막으로 경화 시간이 수십 분에서 수 시간 단위이기 때문에 생산성이 떨어진다. 이에 비해 UV 경화를 이용한 복합재료 제조방법은 열경화성 방법에 비해 친환경적이며, 낮은 온도에서도 경화가 가능하고 생산속도가 빠른 자외선(Ultraviolet)에 의해 수지를 경화시키는 방법이 사용된다. UV 경화형 수지는 이중결합의 반응기를 가진 올리고머와 단량체가 자외선 조사에 의해 발생된 라디칼이 부가반응으로 고밀도 삼차원 망상조직의 중합체를 형성함으로 인해 내열성 및 화학적 안정성을 가져 다양한 분야에 응용되고 있다^[1].

본 연구에서는 UV 경화형 타입의 수지를 이용함으로써 제조과정을 단순화함으로써 비용을 낮추고 보다 양질의 성형 방법을 찾아보고자 하였으며, UV 경화를 이용한 Unsaturated Polyester, Vinylester 수지를 적용하여 저비용의 다량의 복합 재료를 생산하는 방법을 모색하고자 한다. 이를 위하여 화학적, 기계적 분석을 통해 경화 특성을 분석하여 UV 경화 수지의 유효성을 확인하고자 한다.

2. 경화 시편 제작

연구재료로 사용된 수지는 Unsaturated Polyester 수지(ZNT 6345, 폴린트 컴포지트 코리아(주))와 Vinylester 수지(RF 1001 MV, 폴린트 컴포지트 코리아(주))가 사용되었으며, 각각 경화제와 촉진제, 광개시제, 기타첨가제가 배합하여 Table 1과 Fig. 2, Fig. 3와 같은 방법으로 4가지 종류의 시편을 제작하였다. ZNT 6345(Unsaturated Polyester 수지), RF 1001 MV(Vinylester 수지)에 촉매 경화제가 첨가된 촉매 경화형 CZ와 CR, UV 경화를 위해 광개시제가 첨가된 UVZ와 UVR를 제조하였다. CZ와 CR의 촉매 경화 시편의 경우 제조사에서 권장하는 비율의 용매를 배합한 뒤 금형에 주입하여 상온경화를 수행하였으며, UVR, UVZ는 시편 금형에 주입한 뒤 UV 램프를 이용하여 경화를 진행

Table 1 Specimen of catalyst curing and UV curing^[2]

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% Co-oct. 0.5pbv -Hardener: Luperox DDM 1.0 pbv	
UVR	Vinylester (RF 1001 MV)	Irgacure 2100	UV Curing
UVZ	Unsaturated Polyester (ZNT 6345)		

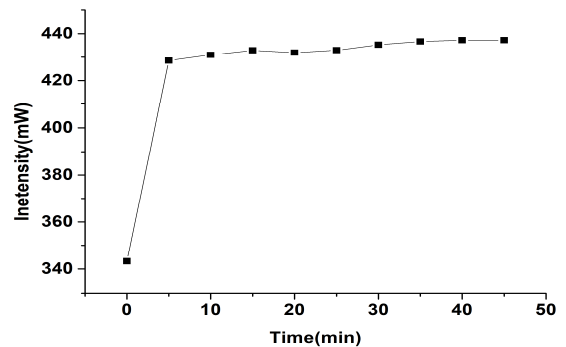


Fig. 1 Measurement data of light quantity over time

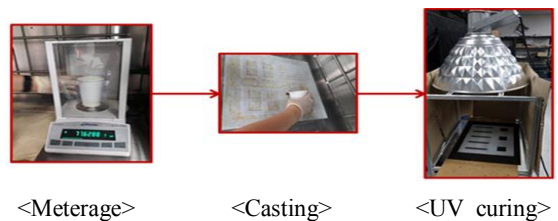


Fig. 2 Specimen making process for UV curing

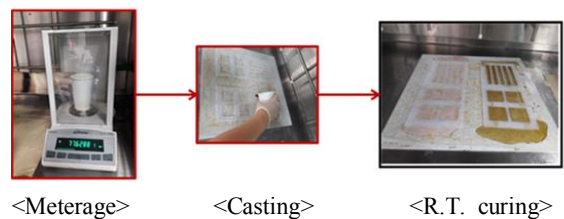


Fig. 3 Specimen making process for catalyst curing

하였다^[2].

또한 UV 램프가 전원 인가 후 어느 정도 시간에서 안정화가 되는지 확인하고 UV 경화 초기 조건을 선정하고자 하였다. 실험에 사용된 UV 메탈할라이드 램프의 UV 에너지는 Fig. 1과 같이 램프에 전원 인가 후 5분 이후부터 안정화되는 것을 확인할 수 있었으며 시편의 UV 경화는 램프에 전원 인가 후 5분 이후부터 진행하였다.

3. 화학적 특성분석

4가지 종류의 경화 시편의 FT-IR과 온도측정을 통해 화학적 분석을 진행하였으며 촉매 경화와 UV 경화의 경화 특성에 대해 분석하였다.

3.1 FT-IR 경화반응 분석

FT-IR은 UV 경화 반응과 시간에 따른 가교 중합도를 측정하기 위해 사용하였다. 관능기의 변화 양상을 보고 반응정도, 즉 중합도를 보기 위함이다. 측정은 Wavenumber 4000 ~ 650 cm^{-1} 범위에서 진행되었다.

Fig. 5는 CR에 대한 FT-IR 측정 결과를 보여주고 있으며, 수지의 초기 상태의 결과를 보면 1726 cm^{-1} 부근에서 C=O Peak와 1285 cm^{-1} 부근에서 C-O Peak, 1500 cm^{-1} 부근에서 Benzene Peak가 뚜렷이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이것은 Vinylester 수지의 경화가 진행되지 않은 것으로 판단할 수 있다. 24시간 경과 후의 결과를 보면 C=O Peak와 C-O Peak, Benzene Peak가 아직 남아 있는 것을 확인할 수 있으며, 72시간 경과 후 모든 Peak가 사라지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 경화가 진행되면서 C=O와 C-O, Benzene 관능

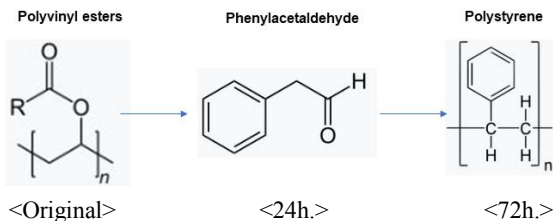


Fig. 4 Changes of CR chemical formula over time^[4]

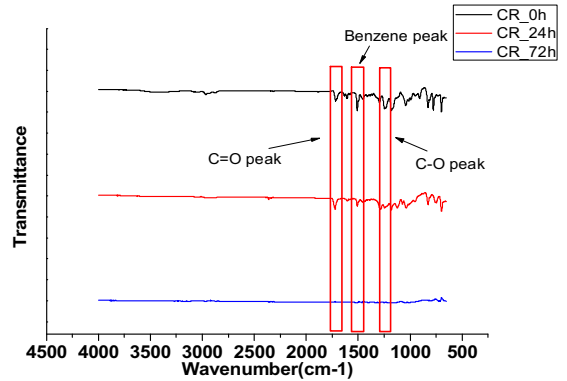


Fig. 5 FT-IR results of CR sample

기가 화학반응에 의해 없어지면서 나타난 현상으로 보이며 72시간 경과 후에는 Vinylester 수지의 경화가 완료된 것으로 판단된다. CR 같은 경우는 24~72시간 사이에 완전 경화가 완료되는 것으로 사료된다.

Fig. 4를 보면 시간이 경과함에 따라 72시간 후에는 C=O 결합과 C-O 결합이 사라졌음을 확인할 수 있다. 초기에 존재하던 C-O 결합이 24시간이 경과된 후 C=O 결합만 있는 것을 볼 수 있다. 이는 촉매가 중합에 관여하여 이중결합과 단일결합을 깨뜨리는 역할을 하는 것으로 판단된다. 즉 촉매가 없을 때 상대적으로 많은 에너지를 필요로 하는데 이때 촉매를 넣게 되면 활성화 에너지를 낮춰줌으로써 보다 적은 에너지로 반응이 일어나기 쉽게 된다. 결과적으로 C=O 결합도 72시간이 지나면 사라졌음을 확인할 수 있다.

Fig. 6에서 보듯 CR과 마찬가지로 72시간이 지난 후의 화학식을 살펴보면 C=O 결합과 C-O 결합이 사라져있다. 이중결합과 단일결합이 촉매에 의해 일어난 화학반응에 의해 깨지는 현상이 발생한 것이다. 촉매를 넣기 전에 상대적으로 반응하기 어려운데 비해 촉매를 넣어 주게 되면 활성화 에너지가 낮아진다. 이에 따라 반응이 일어나기 쉬워지고 화학반응이 시작되는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 CZ에 대한 FT-IR 측정 결과를 보여주고 있으며, 수지의 초기 상태의 결과를 보면 1726 cm^{-1} 부근에서 C=O Peak와 1285 cm^{-1} 부근에서 C-O Peak가 뚜렷이 나타나는 것을 확인할 수 있

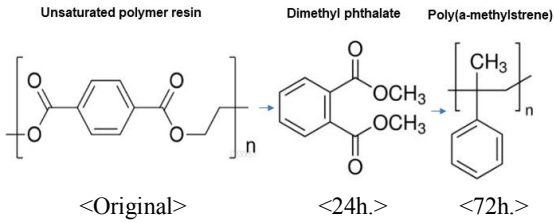


Fig. 6 Changes of CZ chemical formula over time^[4]

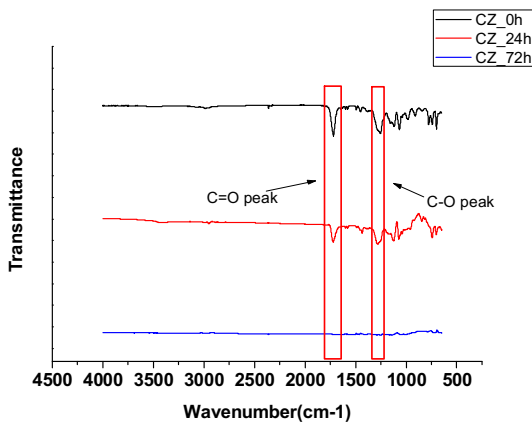


Fig. 7 FT-IR results of CZ sample

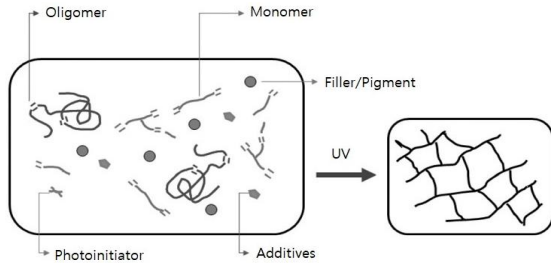


Fig. 8 UV curing system composition^[6]

으며, 이것은 Unsaturated Polyester 수지의 경화가 진행되지 않은 것으로 판단할 수 있다. CR과는 다르게 Benzene Peak는 확인되지 않았으며 이것은 Unsaturated Polyester와 Vinylester의 화학 조성의 차이로 인한 것으로 판단된다. 24시간 경과 후의 결과를 보면 C=O Peak와 C-O Peak가 아직 남아 있는 것을 확인할 수 있으며, 72시간 경과 후 모든 Peak가 사라지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 경화가 진행되면서 C=O와 C-O 관능기가 화학

반응에 의해 없어지면서 나타난 현상으로 보이며 72시간 경과 후에는 Unsaturated Polyester 수지의 경화가 완료된 것으로 판단된다. CZ 경우도 24~72시간 사이에 완전 경화가 완료되는 것으로 사료된다.

위와 같은 CR, CZ의 경화반응 패턴은 촉매 경화의 일반적인 특성이며 경화가 완료되기까지 24~72시간의 많은 시간이 필요하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 UV 경화를 도식적으로 나타낸 그림이다. UV 경화 수지는 단량체(monomer), 중간체(Intermediate), 광개시제(Photoinitiator), 필러(Filler)가 혼합되어 있는 액상 형태이며 UV를 받으면 고분자 중합체인 폴리머(Polymer)의 특성을 가진 고체로 된다^[4]. 한편 Fig. 10은 UVR에 대한 FT-IR 측정 결과를 보여주고 있으며, 수지의 초기 상태의 결과를 보면 1726 cm⁻¹ 부근에서 C=O Peak와 1285 cm⁻¹ 부근에서 C-O Peak, 1500 cm⁻¹ 부근에서 Benzene Peak가 뚜렷이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이것은 Vinylester 수지의 경화가 진행되지 않은 것으로 판단할 수 있다. 2분 경과 후의 결과를 보면 C=O Peak와 C-O Peak, Benzene Peak가 아직 남아있는 것을 확인할 수 있으며, 5분 경과 후 모든 Peak가 사라지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 경화가 진행되면서 C=O와 C-O, Benzene 관능기가 화학반응에 의해 없어지면서 나타난 현상으로 보이며 5분 경과 후에는 Vinylester 수지의 경화가 완료된 것으로 판단된다. UVR 같은 경우는 2~5분 사이에 완전 경화가 완료되는 것으로 사료된다.

Fig. 9를 보면 2분 경과 후에는 C=O 결합만 존재하고 C-O 결합은 존재하지 않는다. 그 이후 5분

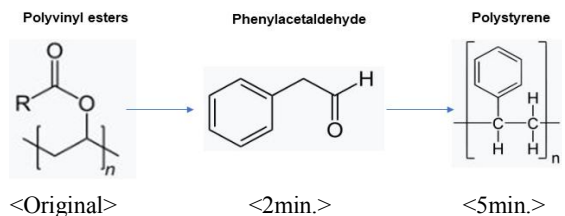


Fig. 9 Changes of UVR chemical formula over time^[4]

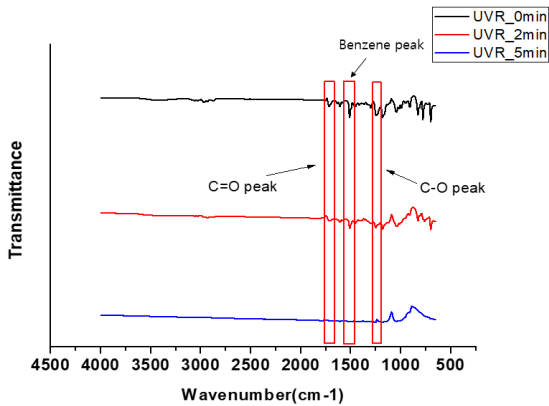


Fig. 10 FT-IR results of UVR sample

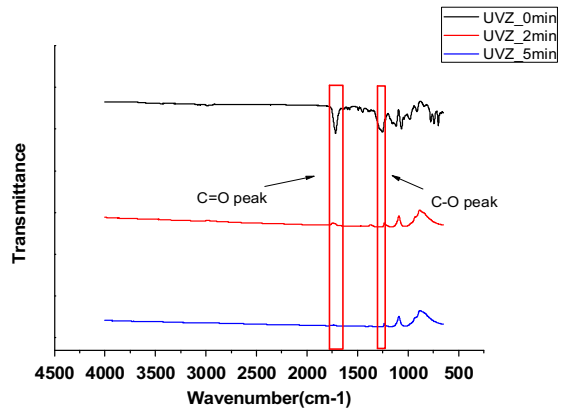


Fig. 12 FT-IR results of UVZ sample

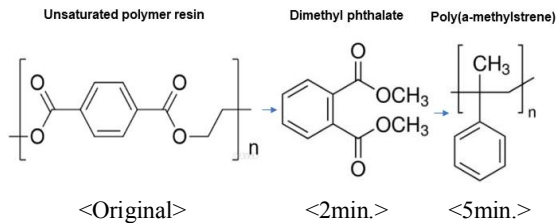


Fig. 11 Changes of UVZ chemical formula over time^[4]

이 경과하게 되면 C=O 결합과 C-O 결합 모두 보이지 않는다. UV 광선이 광개시제에 작용하여 수지가 반응을 시작하고 이에 따라 단계적으로 이중결합과 단일결합을 깨뜨린다고 판단된다. 즉 UV 조사에 의해 광개시제로부터 생성된 라디칼이나 양이온에 의해 개시반응이 시작되어 반응성을 가진 모노머나 올리고머가 연속반응을 통해 경화되는 것이다^[5].

Fig. 11에서 보면 UVR과 마찬가지로 5분이 경과하면 C=O 결합과 C-O 결합이 없어진 것을 볼 수 있다. UV 광선을 조사하게 되면 용액에 들어 있던 광개시제가 반응하여 기존의 용액에 들어 있던 수지가 화학반응을 시작한다. 이에 따라 이중결합과 단일결합이 깨지는 것이다. 2분이 경과했을 때까지 존재하던 C=O 결합과 C-O 결합이 5분 후에는 존재하지 않는다. UV를 조사하게 되면 자외선에 광개시제가 분해되어 수소 이동으로 인한 활성 라디칼을 생성하는데 그 활성 라디칼이 수지

에 작용하여 중합 또는 가교 반응을 일으키고 단 시간에 경화된다^[5].

Fig. 12는 UVZ에 대한 FT-IR 측정 결과를 보여 주고 있으며, 수지의 초기 상태의 결과를 보면 1726 cm⁻¹ 부근에서 C=O Peak와 1285 cm⁻¹ 부근에서 C-O Peak가 뚜렷이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이것은 Unsaturated Polyester 수지의 경화가 진행되지 않은 것으로 판단할 수 있다. UVR과는 다르게 Benzene Peak는 확인되지 않았으며 이것은 Unsaturated Polyester와 Vinylester의 화학 조성의 차이로 인한 것으로 판단된다. 2분 경과 후의 결과를 보면 C=O Peak와 C-O Peak가 아직 남아있는 것을 확인할 수 있으며, 5분 경과 후 모든 Peak가 사라지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 경화가 진행되면서 C=O와 C-O 관능기가 화학반응에 의해 없어지면서 나타난 현상으로 보이며 5분 경과 후에는 Unsaturated Polyester 수지의 경화가 완료된 것으로 판단된다. UVZ 경우도 2~5분 사이에 완전 경화가 완료되는 것으로 사료된다.

위와 같은 UVZ, UVR의 경화반응 패턴은 UV 경화의 특성이며 경화가 완료되기까지 2~5분의 짧은 시간에도 경화가 완료된다는 것을 알 수 있었다.

3.2 경화반응 온도분석

온도 계측은 시편이 경화제에 반응하거나 UV 조사 시에 반응하면서 발생하는 열을 수치적으로

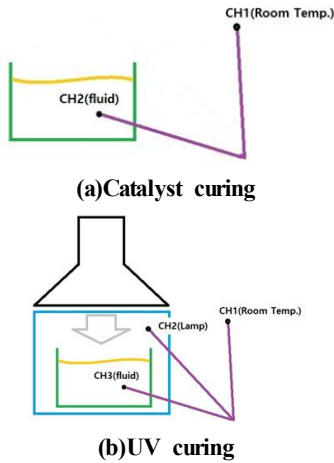


Fig. 13 Curing temperature measurement schematic

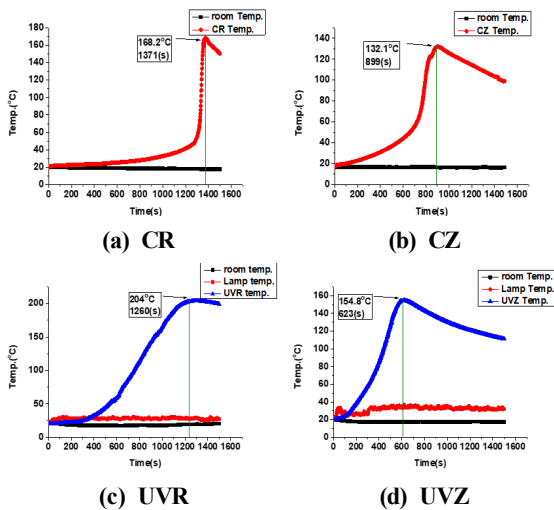


Fig. 14 Temperature over time of CR, CZ, UVR, UVZ solution

확인하고자 하였다.

Fig. 13은 각 경화방법에 대한 온도측정 모식도이다. Fig. 14(a), (b)는 수지에 경화제를 넣었을 때 시간에 따른 온도 변화를 나타내었고, Fig. 14(c), (d)는 수지가 UV 조사 시간에 따라 온도가 변화하는 것을 나타낸 것이다. 측정 결과 동일 수지의 경우 UV 경화가 촉매 경화보다 반응이 빠르게 일어난다는 것을 확인할 수 있었다.

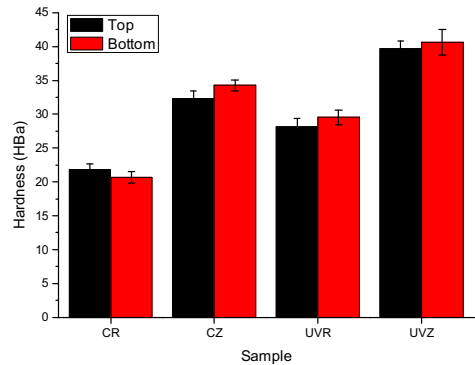


Fig. 15 Barcol hardness results of specimen

4. 기계적 특성분석

4가지 종류의 경화 시편의 3점 굴곡시험(ASTM D 790), 경도시험(Barcol, ASTM D 2583)을 통해 기계적 분석을 진행하였으며, 촉매 경화와 UV 경화의 경화 특성에 대해 분석하였다.

4.1 바콜 경도 분석

바콜 경도(Barcol, ASTM D 2583)는 시편의 상부(Top)와 하부(Bottom)를 각각 측정하여 측정 위치와 경화제, 경화 방법에 따른 경도의 변화를 확인하고자 하였다.

Fig. 15에서 보는 바와 같이 바콜 경도 시편의 윗면(Top)과 아랫면(Bottom)의 경도 차이를 감안하여 따로 각각 측정하여 데이터를 정리하였다. 결과를 살펴보면, Vinylester보다 Unsaturated Polyester 수지가 촉매 경화 및 UV 경화 모두에서 높은 바콜 경도 값을 보였다. 또한 동일 수지를 적용하였을 경우 촉매 경화보다 UV 경화 시편의 바콜 경도가 높게 측정되었다. 따라서 경도 시험에서도 촉매 경화보다 UV 경화 시편의 결과가 우수한 것으로 나타났다.

4.2 굴곡시험분석

굴곡시험은 ASTM D 790을 규격으로 측정이 되었으며 시편에 따른 굴곡의 특성을 확인하고자 하였다.

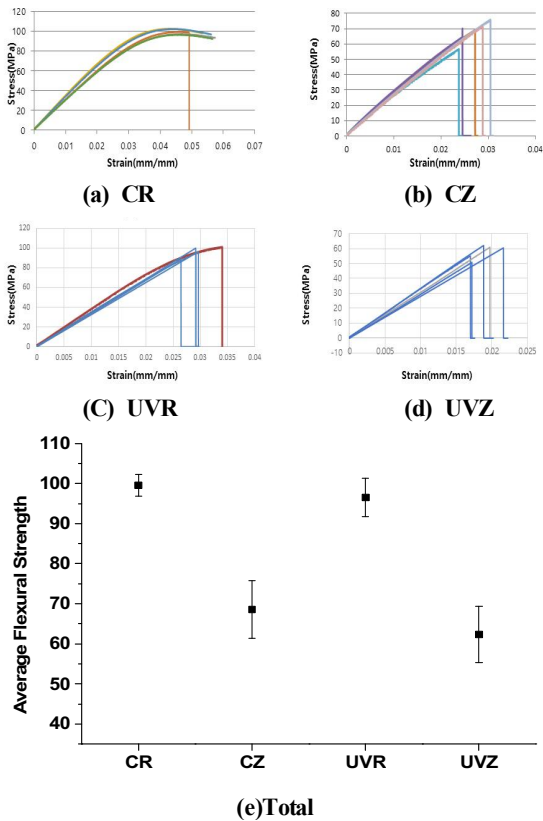


Fig. 16 Flexural test results of specimen

Fig. 16에서 보는 바와 같이 3점 굴곡시험 측정 결과 촉매 경화형(CR, CZ)과 UV 경화형(UVR, UVZ)이 평균 굴곡강도가 오차범위 내에서 비슷한 수준으로 판단되며 동일 경화 방법을 사용했을 경우 Vinylester보다 Unsaturated Polyester 수지를 사용했을 때 평균 굴곡강도가 높을 것으로 나타났다. 따라서 경화 방법에 의한 굴곡강도 변화는 미비한 것으로 사료되며 재료의 변화에 더 영향이 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 UV 경화 타입의 수지를 이용하여 제조과정을 단순화함으로써 비용을 낮추고 보다 양질의 성형 방법을 찾아보고자 하였으며, UV 경화를 이용한 Unsaturated Polyester, Vinylester 수

지를 적용하여 저비용의 다량의 복합재료를 생산하는 방법을 모색하고자 하였다. 이를 위하여 경화 특성에 대한 화학적 분석방법과 기계적 분석방법을 통해 고찰하였으며 다음과 같은 결과를 확인하였다.

측정 결과 동일 수지에 대해 UV 경화가 촉매 경화보다 반응이 빠르게 일어난다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 UV 경화가 신속한 생산에 유리한 것으로 판단된다. Vinylester 수지보다 Unsaturated Polyester 수지가 촉매 경화 및 UV 경화 모두에서 높은 바큇 경도 값을 보였다. 또한 동일 수지를 적용하였을 경우 촉매 경화보다 UV 경화 시편의 바큇 경도가 높게 측정되었다. 따라서 경도 측면에서는 UV 경화가 촉매 경화보다 유리한 것으로 판단된다. 3점 굴곡시험 측정 결과 촉매 경화형(CR, CZ)과 UV 경화형(UVR, UVZ)이 평균 굴곡강도가 비슷한 수준으로 나타났다. 그리고 RF 1001 MV(CR, UVR)의 경우 각각의 ZNT 6345(UVR, UVZ)보다 평균 굴곡강도가 높음을 확인하였다. 오차범위 내에서 동등한 평균 굴곡강도를 보여주었으며 동일한 경화방법에서 Vinylester 수지보다 Unsaturated Polyester 수지로 사용하였을 때 평균 굴곡강도가 높은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 경화방법에 의한 굴곡강도 변화는 미비하며 수지의 변화에 영향이 더 많은 것으로 판단된다. 기계적 특성(바큇 경도, 굴곡강도) 측면에서는 UV 경화가 촉매 경화보다 우수하거나 동등한 수준의 특성을 보이고 있으나 화학적 특성 측면에서 볼 때 UV 경화가 촉매 경화보다 월등히 빠른 경화 시간을 보여주고 있었다. 위와 같은 결과를 통해 복합재료 제조에 있어 UV 경화 방법을 적용하여 기존 공법보다 동등한 기계적 강도 수준에서 공정시간을 단축할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

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

REFERENCES

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.