

## 희석제에 따른 복합소재용 에폭시 수지의 경화 거동 및 물성에 대한 연구

황태용<sup>†</sup> · 황인호 · 박경국 · 김종훈\* · 김경수\* · 정승민\*\* · 김진성\*\* · 김예진\*\* · 정상기\*\*

코오롱인더스트리 연구개발본부, \*코오롱스페이스웍스 사업 1팀

\*\*국방과학연구소 미사일연구원1부

(2024년 6월 24일 접수, 2024년 10월 8일 수정, 2024년 10월 10일 채택)

## Study on the Curing Behavior and Properties of Epoxy Resin for Composites with Different Diluent System

Tae Yong Hwang<sup>†</sup>, In Ho Hwang, Kyungkook Park, Jong Hoon Kim\*, Kyung Su Kim\*,  
Seung Min Jeong\*\*, Jinsung Kim\*\*, Yejin Kim\*\*, and Sang Ki Chung\*\*

Kolon Industries, R&D Division, 110, Magokdong-ro, Gangseo-gu, Seoul

\*Kolon Dacc Composite, Development 1 Team, 26-23, Hamansandan 1-gil, Haman-gun, Gyeongsangnam-do

\*\*Agency for Defense Development, Missile Research Institute 1<sup>st</sup> Directorate, Yuseong P.O. Box 35, Daejeon

(Received June 24, 2024; Revised October 8, 2024; Accepted October 10, 2024)

**초록:** 희석제 종류에 따른 복합소재용 에폭시수지 시스템의 경화거동 및 물성을 비교 연구하였다. 희석제 종류로는 반응형 희석제, 고순도 bisphenol-A(BPA) 에폭시, bisphenol-F(BPF) 에폭시를 사용하였으며, 범용의 BPA 에폭시에 혼합하여 점도가 유사한 수지 시스템을 제조, 물성을 비교하였다. 수지 시스템의 경화 거동을 시차주사열량계(DSC) 및 레오미터(rheometer)로 조사하였으며, 경화된 시편의 점탄성 특성 및 기계적 물성을 동력학분석기(DMA), 만능시험기(UTM)를 이용하여 특성 비교를 하였다. 또한 복합소재로 제조시 물성 비교를 위해 스트랜드 테스트를 통해 섬유강도전이율을 측정하였다. 고순도 BPA 에폭시 수지 사용시 반응형 희석제 및 BPF 에폭시 사용시 대비 내열성은 향상되었으나 경화반응이 지연되고 인장탄성률이 저하되었다. 반응형 희석제 사용에 따른 내열성 저하를 고순도 BPA에폭시 사용시 방지할 수 있을 것으로 사료된다. BPF 에폭시 사용시 인장강도 증가를 보였으나 신율은 감소하여 강직성이 높은 특성을 보였다. 섬유강도전이율 확인결과, 반응형 희석제 사용시 강도전이율이 가장 우수한 것을 확인하였다. 이러한 연구를 통해 복합소재 물성 발현을 증대시킬 수 있는 에폭시 수지 시스템을 제조할 수 있으리라 사료된다.

**Abstract:** The effect of diluent system on curing behavior, thermal and mechanical properties of epoxy resin system for composites were investigated. Three types of diluents were used: reactive diluent, high purity bisphenol-A (BPA) epoxy and bisphenol-F (BPF) epoxy. Resin systems with similar mix viscosity were prepared by mixing with a BPA epoxy and diluent system, and their properties were compared. The curing behavior of the resin systems was investigated using a differential scanning calorimeter (DSC) and rheometer. The viscoelastic properties and mechanical properties of the cured specimens were compared using a dynamic mechanical analyzer (DMA) and a universal testing machine (UTM). Additionally, the fiber strength transition rate was measured through strand test. With high purity BPA epoxy resin thermal stability was improved when compared to reactive diluents and BPF epoxy. With BPF epoxy resin, an increase in tensile strength was observed, but the elongation at break decreased. It was found that the fiber strength transition rate of epoxy system with reactive diluent was higher compared to other diluent system. Therefore, through this study, it is possible to manufacture and optimize an epoxy resin system capable of improving the properties of composites.

**Keywords:** epoxy resin system, fiber reinforced composite, reactive diluent, fiber strength transition rate.

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
taeyong\_hwang@kolon.com, ORCID<sup>®</sup>0009-0003-6722-704X  
©2025 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

## 서 론

에폭시 수지는 코팅, 접착제, 전자재료, 복합소재 등 매우 다양한 분야에서 활용되고 있으며 기계적 물성, 내화학성, 치수안정성이 우수한 소재이다. 에폭시 수지는 비스페놀에이(bisphenol A)와 같은 방향족 하이드록실기를 가지고 있는 원료에 에피클로하이드린(epichlorohydrin, ECH)을 염기성 촉매 하에 반응시켜 제조하며, 원료에 따라서 노블락(novolac), 지환족(cycloaliphatic) 에폭시 등 다양한 종류의 제품이 제조되고 있다.<sup>1</sup>

복합소재용 에폭시 수지 시스템은 일반적으로 이중 이상의 수지를 혼합하여 함침성, 내열성, 기계적 물성을 보강하여 배합된 형태의 제품으로 제조되며 주제와 경화제로 구성된다.<sup>2</sup> 주제는 BPA에폭시(diglycidyl ether of bisphenol A)가 일반적으로 사용되며 점도나 내열성 조절을 위해 저점도 에폭시 및 다관능 에폭시 수지 등이 혼합된다. 경화제는 아민 및 산무수물류가 주로 사용되며 극성이 강한 아민류를 사용시 경화 후 보강재와 강한 계면 결합을 생성 우수한 복합소재 물성 발현을 기대할 수 있으며, 산무수물 경화제는 치수안정성 및 내열 특성이 우수하며, 가사시간이 긴 장점이 있어서 일반 산업용 복합소재 및 충전기용도로 사용 중이다.

섬유강화 복합소재의 주요 공정으로는 필라멘트와인딩(filament winding), 인발(pultrusion), 인퓨전(infusion), 수지이송성형(RTM) 등이 있으며, 일반적으로 금형 혹은 수지 함침조에서 섬유와 수지가 함침되어 경화공정을 거치게 된다. 수지의 함침성은 성형 후 복합소재의 물성을 좌우하는 중요한 요소이다. 섬유와 수지 간의 함침성을 향상시키기 위한 가장 중요한 요소는 점도이며, 이에 따라 복합소재용 에폭시 시스템 제조시 희석제를 사용하여 주제의 점도를 조절하게 된다. 수지의 점도가 감소되면 계면 결합력이 향상되어서 복합소재의 인장강도는 증가하게 된다.<sup>3,4</sup> 하지만 일반적으로 사용되는 지방족 계열의 희석제는 뛰어난 희석능을 가지고 있으나, 사용시 내열성, 기계적 물성의 저하를 가져온다. 이에 따라 에폭시 반응기를 가지고 있는 반응형 희석제를 사용하여 경화간 희석제도 반응에 참여하여 물성 저하를 방지하려하고 있

다. 반응형 희석제 이외에도 저점도 수지인 BPF형 에폭시(diglycidyl ether of bisphenol F), 고순도 BPA 에폭시(high purity BPA epoxy)도 수지의 점도를 조절할 수 있는 소재로 적용되고 있다.

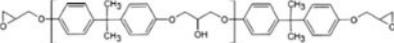
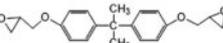
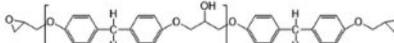
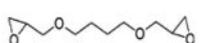
복합소재로 가공 후의 물성비교를 위해 섬유강도전이율(fiber strength transition rate)을 측정할 수 있다. 섬유강도전이율은 섬유 단위에서의 강도와 최종 구조물에서의 섬유강도를 비율로 나타낸 값으로 탄소섬유 복합소재를 이용한 구조물 제작시 섬유의 인장 강도가 어떠한 변화를 나타내는지를 나타내는 척도이다.<sup>5</sup> 보다 적은양의 탄소섬유를 사용하여 복합소재 부품을 제조하기 위해서는 섬유강도전이율이 높은 소재의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 점도차에 의한 수지와 섬유간의 젖음성(wettability) 차이를 배제한 상태에서 수지 종류가 탄소섬유 복합소재의 물성에 미치는 영향을 확인하였다. 범용의 BPA 에폭시에 점도 조절을 위하여 반응형 희석제, 고순도 BPA 에폭시 및 BPF 에폭시를 혼합, 유사 수준의 혼합점도를 갖는 에폭시 시스템을 제조하여 물성 차이를 확인하였다. 이에 대해서 경화거동 및 기계적 물성을 비교하고, 탄소섬유의 섬유강도전이율을 측정함으로써 복합소재로 성형 후 물성의 차이를 비교하였다.

## 실 험

**실험 재료 및 조성물 제조.** 본 연구에서는 유사한 혼합점도를 가지고 있는 3종의 에폭시 조성물을 제조하였다. 주제는 범용의 BPA 에폭시인 KE-8128에 점도를 조절하기 위해서 반응형 희석제인 KEW-L2400, 고순도 BPA 에폭시 KE-8120, BPF 에폭시 KF-8100을 혼합 제조하였다. 고순도 BPA에폭시 수지(KE-8120)는 KE-8128을 분자증류하여 고분자 부분을 분리한 제품이다. BPADGE(bisphenol A diglycidyl ether)의 성분이 KE-8128은 약 82%인 반면, KE-8120은 98% 이상을 가지고 있다. 경화제는 polyetheramine(PEA) 계열의 제품을 사용하였다. 에폭시 수지 및 경화제는 코오롱인더스트리(대한민국)의 양산 제품을 공급받아 사용하였으며 구조 및 물성을

Table 1. Chemical Structure and Properties of the Epoxy Resins Used in This Study

| Epoxy     | Type                  | Structure                                                                            | EEW (g/eq) | Viscosity (cps@25°C) |
|-----------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------|
| E-8128    | BPA epoxy             |  | 184-190    | 11000-14000          |
| KE-8120   | High purity BPA epoxy |   | 170-175    | 4000-6000            |
| KF-8100   | BPF epoxy             |  | 160-180    | 2000-5000            |
| KEW-L2400 | Reactive Diluent      |   | 120-145    | 15-30                |

EEW: Epoxy equivalent weight

**Table 2. Properties of the Hardener Used in This Study**

| Hardener | Type           | AHEW (g/eq) | Viscosity (cps@25 °C) |
|----------|----------------|-------------|-----------------------|
| KEF-6310 | Polyetheramine | 57~58       | 10                    |

\*AHEW: Active hydrogen equivalent weight

**Table 3. Component and Property of Resin Systems**

| Remark | Resins      |             | Hardener | Mixed Viscosity (cps@25 °C) |
|--------|-------------|-------------|----------|-----------------------------|
|        | Component 1 | Component 2 |          |                             |
| C1     |             | KEW-L2400   |          | 444                         |
| C2     | KE-8128     | KE-8120     | KEF-6310 | 409                         |
| C3     |             | KF-8100     |          | 432                         |

Table 1, Table 2에 도시하였다.

수지 조성물은 주제와 경화제를 화학량론비(stoichiometric ratio)에 따라 혼합, 최종 조성물의 혼합점도(mixed viscosity)를 상온에서 400-500 cps에 도달하게 제조하여 경화거동 및 경화 후 점탄성 거동, 기계적 물성을 측정하였다. 제조된 조성물 3종(C1, C2, C3)의 구성 및 물성은 Table 3에 수록하였다.

**물성 측정.** 에폭시 시스템의 경화거동은 시차주사열량계 DSC(Q2000, TA instruments)와 레오미터(Discovery HR-2, TA instruments)를 사용하였다. DSC는 30-250 °C의 온도범위에서 승온속도 10 °C/min로 측정하였으며, 수지 조성물의 주제와 경화제를 혼합 후 hermetic pan에 6±2 mg을 담아 질소 분위기에서 측정하였다. 레오미터는 직경이 25 mm인 parallel plate fixture를 0.5 mm 간격에서 각주파수(angular frequency) 10 rad/s, 변위(strain) 5.0% 조건 하에서 80 °C 등온 조건으로 측정하였다.

경화 후 물성은 동력학분석기 DMA(Q800, TA instruments) 및 만능시험기 UTM(LR-5K, lloyd)을 활용하여 점탄성 거동 및 기계적 물성을 측정하였다. 시편은 ASTM D7028(DMA), D638(인장), D790(굴곡)을 참고하여 제작하였으며, 80 °C에서 3시간 경화 후 125 °C에서 3시간 후경화 하였다. 점탄성 거동은 DMA로 35-150 °C의 온도범위에서 승온속도 5 °C/min, 주파수(frequency) 1 Hz, 변위(strain) 0.1% 조건으로 측정하였다. 인장시험은 5 mm/min 속도로 측정하였으며, 굴곡시험은 2 mm/min 속도로 변위 5% 범위 안에서 각각 5회 측정하여 평균을 구하였다.

**스트랜드 시편 제작 및 평가.** 복합소재 제조시 물성 차이를 확인하기 위해서 탄소섬유 복합소재의 스트랜드 시험 평가를 통해 섬유강도전이율(fiber strength transition rate, STR)을 측정하였다. 섬유는 효성의 탄소섬유 H2550(Table 4)을 사용하여 ASTM D4018에 의거 시편 제작 및 시험을 수행하였다.<sup>5</sup> 필라멘트와인딩 공법을 이용하여 시편을 제작하였고, 40N의 장력이 유지된 상태에서 수지와 섬유를 함침하였다. 경화는 환

**Table 4. Properties of the Carbon Fiber**

| Carbon fiber | Tensile strength (MPa) | Tensile modulus (GPa) | Yield (g/km) |
|--------------|------------------------|-----------------------|--------------|
| H2550-24K    | 6006                   | 244                   | 1650         |

경챔버에서 80 °C에서 3시간 경화 후 125 °C에서 3시간 후경화 하였으며, 제작된 시편은 250 mm로 절단하여 선별하였다.

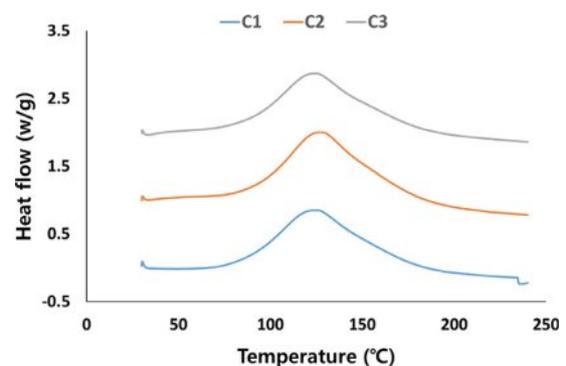
스트랜드 인장시험은 만능재료시험기 Instron 5982와 비디오 신율계를 사용하여 하중과 변형률을 측정하였다. 시험은 5.0 mm/min의 속도로 15개의 시편을 측정하여 평균 및 변동계수(C.V.)를 구하였다.

## 결과 및 토론

**경화 거동.** Figure 1에 C1, C2, C3 수지 조성물의 경화 열량곡선을 도시하였다. 조성물 3종의 기저 수지(KE-8128) 및 경화제(KEF-6310)가 같음에 따라 유사한 경화 거동을 보이지만 고순도 BPA에폭시 수지를 사용한 조성물(C2)의 경화열량이 높으며, Peak point, Onset point 비교시 경화반응도 보다 높은 온도에서 일어나는 것을 확인할 수 있다(Table 5). 이를 통해 고순도 수지 사용시 상대적으로 가교도가 높고 반응속도는 지연되는 것으로 예상할 수 있다.

Figure 2에 80 °C에서 3가지 조성물의 점도 변화를 도시하였다. C1 및 C3의 점도거동은 유사한 반면, C2는 경화 반응이 느린 것을 확인할 수 있다. 이는 DSC 결과와 일치한다. 경화 반응속도의 정량적인 비교 분석을 위해서 3가지 조성물의 겔포인트(gelation point)를 측정하였다.

겔포인트는 반응속도를 나타내는 대표적인 지표로 일반산



**Figure 1.** DSC thermogram of different resin systems.

**Table 5. Cure Properties of Different Resin Systems**

| Item               | C1     | C2     | C3     |
|--------------------|--------|--------|--------|
| Peak point (°C)    | 125.64 | 128.65 | 124.81 |
| Onset point (°C)   | 84.44  | 89.65  | 85.25  |
| Heat of cure (J/g) | 322.3  | 363.5  | 322.0  |

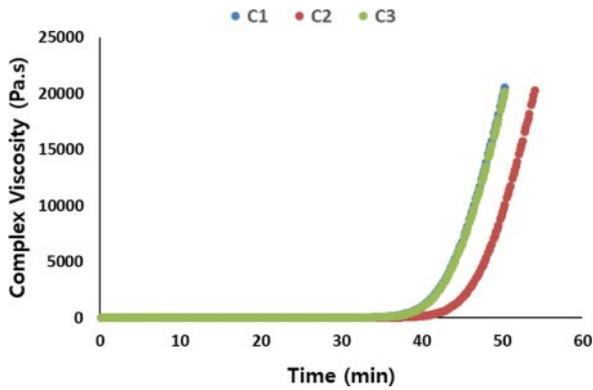


Figure 2. Complex viscosity of different resin systems.

업분야에서 광범위하게 사용된다. 겔포인트를 측정하는 방법에는 여러 가지가 있다. 탄성계수(elastic modulus,  $G'$ )와 점성계수(viscous modulus,  $G''$ )의 교차점,  $\tan \delta$  곡선의 최대점, 점도가 증가하여 발산되는 지점 등이 대표적이다.<sup>6,7</sup> 본 연구에서는  $G'$ 와  $G''$ 의 교차점으로 겔포인트를 측정하였다(Figure 3). 조성물의 점탄성 거동에서  $G'$ 와  $G''$ 의 교차점은 액상에서 고상으로의 상변화를 의미하며, 정확한 지점을 확인할 수 있어 많은 연구에서 사용된다. 3가지 조성물의 겔포인트를 Table 6에 정리하였다. C1과 C3의 겔포인트는 각각 41.46분, 40.91분으로 유사한 반면 C2는 약 10% 정도 늦은 45.56분인 것을 확인할 수 있다. 이는 고순도 수지 사용에 따라 가수분해성 염소분(hydrolysable chlorine)이나 알파 글라이콜(alpha glycol)과 같은 부반응물 함량이 줄어들기 때문으로 판단된다. 에폭시 수지 제조시 부반응에 의해 말단기에 비에폭시류의 화합물이 생성된다.<sup>1</sup> 아민 경화제 사용시 가수분해성 염소분이나 알파 글라이콜 같은 부반응물들은 촉매로 작용하여 경화반응을 촉진시킬 수 있다.<sup>8</sup> 고순도 BPA에폭시의 경우 분자중류로 고분자량대의 수지를 제거하는 과정에서 부반응물도 제거된다. 대표적인 부반응물인 가수분해성 염소분의 함량이 범용 에폭시인 KE-8128이 218 ppm인 반면, 고순도 에폭시인 KE-8120은

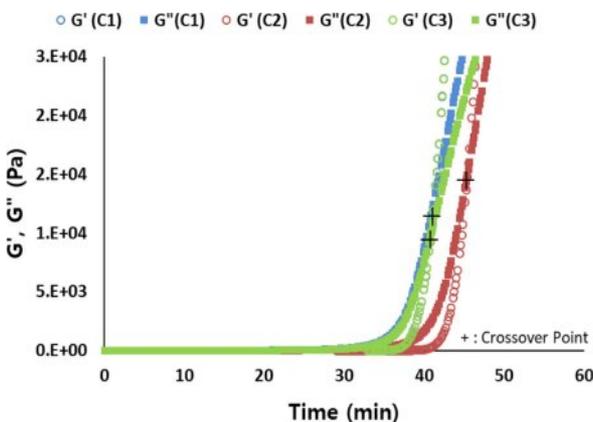


Figure 3. Storage and loss modulus of different resin systems.

Table 6. Gelation Point of Different Resin Systems at 80 °C

| Item                 | C1    | C2    | C3    |
|----------------------|-------|-------|-------|
| Gelation point (min) | 41.46 | 45.56 | 40.91 |

131 ppm으로 약 40% 적다. 이로 인해 C2의 경화반응이 상대적으로 지연되는 것으로 판단된다.

**동력학적 특성.** 완전 경화된 에폭시 수지의 저장탄성율(storage modulus,  $E'$ )과 감쇄율(damping factor,  $\tan \delta$ )를 Figure 4에 도시하였다. 상온 및 유리전이온도 이전의 온도에서 저장탄성율은 완만히 감소하다 유리전이온도에서 급격히 변함을 확인하였다. 이는 경화과정에서 형성된 3차원 망상 구조가 온도가 올라감에 따라 분자분절(molecular segment)들이 움직이고, 이에 따라 재료가 유연하게 되어 저장탄성율이 급격히 감소하는 현상으로 경화성 수지의 전형적인 동력학적 특성이다.<sup>9</sup> 이때 유리전이온도 이전의 저장탄성율은 C2가 C1, C3 대비 낮은 것을 확인할 수 있다(Table 7).

유리전이온도는 경화 시편의 감쇄율을 의미하는  $\tan \delta$ 의 최대점으로 확인하였다. 이는 저장탄성율의 급격한 감소와 같이 저장에너지를 소멸시키는 전체 유리전이에 따른 운동에 기인한다.<sup>9,10</sup> 유리전이온도는 C1과 C3가 유사한 반면 C2가 약 5 °C 높은 것을 확인할 수 있다(Table 7). 일반적으로 반응형 희석제 사용시 내열성은 줄어 들고 연성은 증가한다.<sup>11,12</sup> 이는 경화반응 이후 가교결합된 분자의 움직임과 관련 된다. 반응형 희석제 사용시 주쇄에 상대적으로 분자의 움직임이 유연한 지방족(aliphatic) 그룹의 함량이 증가하게 되어 내열성이 저하되는 것으로 사료된다. 반면, 고순도 BPA 에폭시 수지 사용

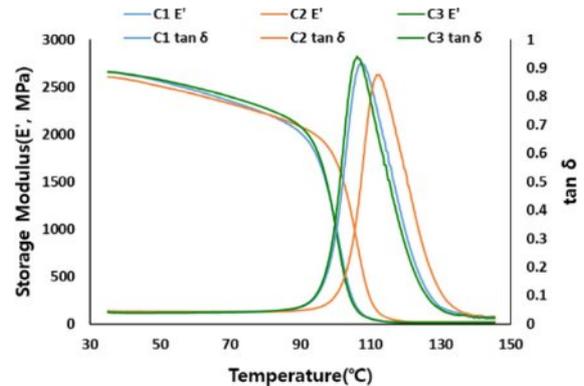


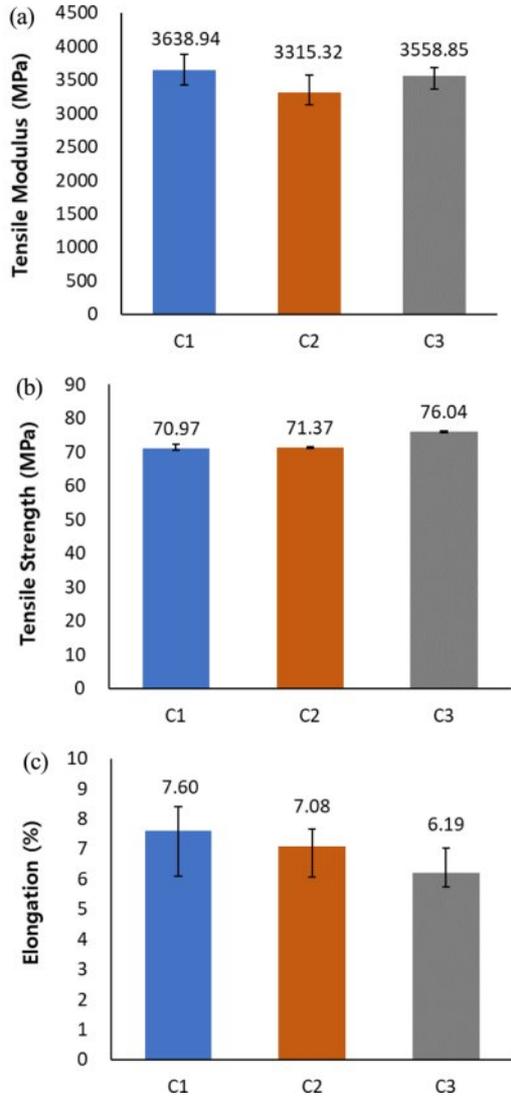
Figure 4. DMA thermogram of different resin systems.

Table 7. DMA Results of Different Resin Systems

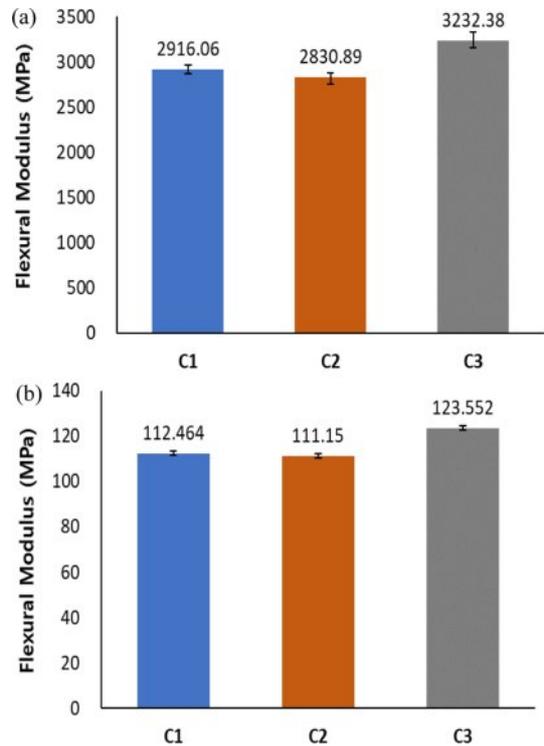
| Item                       | C1     | C2     | C3     |
|----------------------------|--------|--------|--------|
| $T_g$ (°C, $E'$ onset)     | 99.15  | 104.02 | 98.55  |
| $T_g$ (°C, $\tan \delta$ ) | 107.44 | 111.77 | 106.10 |
| $E'$ (MPa, @50 °C)         | 2,563  | 2,509  | 2,575  |

하여 점도 조절시 구조적으로 안정한 방향족(aromatic) 화합물로 이루어진 에폭시 수지의 기본 구조를 유지할 수 있어서 지방족 화합물 혼합에 의한 내열성 저하를 막을 수 있다.<sup>13,14</sup>

**기계적 물성.** Figure 5는 경화 시편의 인장시험 결과이다. 인장탄성률 확인 결과 C1과 C3가 유사한 반면, C2의 값이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 DMA 분석 결과와 일치한다. 인장강도는 C1과 C2가 유사한 반면 C3가 높은 것을 확인할



**Figure 5.** The comparison of tensile properties of different resin systems: (a) tensile modulus; (b) tensile strength; (c) elongation.



**Figure 6.** The comparison of flexural properties of different resin systems: (a) flexural modulus; (b) flexural strength.

수 있었으며, C3의 신율이 가장 낮았다. 반응형 희석제를 사용한 C1이 지방족 분자 구조의 영향으로 연성이 증가하는 특성을 보이며,<sup>15,16</sup> BPF 에폭시를 사용한 조성물의 경우 신율이 줄어들고, 강도가 증가하는 상대적으로 강직성이 높은 특성을 보인다.

굴곡시험 결과 C3의 탄성률과 강도가 높았으며, C1과 C2의 거동은 유사한 경향을 보였다(Figure 6). 이는 인장시험 결과와 유사한 경향이다. 일반적으로 반응형희석제 사용에 따라 굴곡 탄성률 및 강도는 감소한다.<sup>6</sup> BPF 에폭시 사용시 반응형 희석제에 의한 굴곡물성 저하를 방지할 수 있을 것으로 사료된다.

**섬유강도전이를 평가.** 섬유강도전이를 평가결과를 Table 8에 정리하였다. 수지 시스템 종류별 평가 결과 C2와 C3의 결과가 각각 83.91%, 84.16%로 유사한 반면 C1의 전이율이 87.58%로 높은 것을 확인 할 수 있다. 이는 수지 시스템의 인장탄성률 차이로 인한 결과로 판단된다.<sup>17,18</sup> 수지 시스템의 탄성률이 낮을 경우 복합소재에 가해진 응력이 계면에 집중되고 크랙이 쉽게 섬유를 따라 전파되며 섬유와 수지와와의 박리가 일어난다. 반

**Table 8. Result of Fiber Strength Transition Rate of Different Resin Systems**

| Remark | Elastic modulus (GPa) | C.V. | Tensile strength (MPa) | C.V. | STR (%) |
|--------|-----------------------|------|------------------------|------|---------|
| C1     | 240.27                | 1.52 | 5,259.79               | 3.98 | 87.58   |
| C2     | 238.65                | 1.51 | 5,039.57               | 4.88 | 83.91   |
| C3     | 239.09                | 1.33 | 5,054.60               | 2.77 | 84.16   |

면 탄성률이 높은 경우 응력이 섬유와 수지 계면사이에서 충분히 전달되고 파괴 에너지가 흡수되어 소실된다. 복합소재 파괴를 위한 에너지가 올라가게 되어 인장 강도가 증가하게 된다. 하지만 인장탄성률이 유사한 C1, C3 조성물의 섬유강도전이율 평가 결과가 차이가 있는 것으로 확인되며, 이는 수지의 탄성률에 의한 차이뿐만 아니라 신율에 의한 차이도 섬유강도전이율에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 수지 시스템의 신율이 작을 경우 복합소재에 응력이 가해진 상태에서 수지에서부터 크랙이 발생되어 시편의 인장강도 저하로 이어질 수 있다. 수지의 물성과 섬유강도전이율에 대한 상관 관계는 추가 연구가 필요하다.

## 결 론

복합소재용 에폭시 시스템의 중요 물성인 점도를 조절하기 위해서는 다양한 종류의 수지를 사용할 수 있고, 이에 따라 최종 복합소재의 물성에도 영향을 미친다. 본 연구에서는 반응형 희석제, 고순도 BPA 에폭시, BPF 에폭시를 사용하여 유사 혼합점도의 에폭시 수지 시스템을 제조하였다.

고순도 BPA 에폭시 사용시 경화반응은 지연되었으나 유리전이온도가 가장 높았다. 반응형 희석제 및 BPF 에폭시 사용시 내열성 저하를 방지할 수 있을 것으로 사료된다. 기계적 물성 측정 결과 고순도 BPA 에폭시 수지 사용시 인장탄성율이 상대적으로 작으며, BPF 에폭시 수지 사용시에는 신율이 작고 강도는 높아 강직성이 높은 거동을 보임을 확인하였다.

섬유강도전이율 측정 결과 반응형 희석제 사용시 전이율이 가장 높은 것을 확인할 수 있었다. 이는 수지의 탄성률 차이에 의한 결과로 사료되며, 수지와 섬유사이의 응력 전달 차이에 따라 복합소재의 물성도 차이를 보임을 의미한다.

에폭시 수지의 함침성은 복합소재의 물성에 직접적인 영향을 미친다. 유사 점도를 가지고 있어 함침성이 유사하다 하더라도 경화 후 물성 등에 따라 섬유강도전이율에 차이가 있을 수 있다. 본 연구에서는 희석제 시스템의 차이에 따른 수지 시스템의 물성 차이를 연구하였다. 이를 바탕으로 최적의 물성 발현을 위한 수지 시스템의 개발이 가능할 것으로 사료된다.

**감사의 글:** 본 논문은 2023년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소 지원을 받아 수행된 연구임(UI230021SD).

**이해상충:** 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

## 참 고 문 헌

1. Ellis, B., Chemistry and Technology of epoxy resins, 1st ed., Chapman & Hall, Glasgow 1993.
2. Petrie, E. M., Epoxy Adhesive Formulations, McGraw-Hill, 2006.

3. Chen, W.; Yu, Y.; Li, P.; Wang, C.; Zhou, T.; Yang, X., Effect of New Epoxy Matrix for T800 Carbon Fiber/epoxy Filament Wound Composites. *Compos. Sci. Technol.* **2007**, *67*, 2261-2270.
4. Morgan, R. J.; Walkup, C. M. Epoxy Matrices for Filament-wound Carbon Fiber Composites. *J. Appl. Polym. Sci.* **1987**, *32*, 37-46.
5. Lee, S.; Kim, N.; Shin, K. Evaluation of Strength Transition rate for 6.8 L Composite Pressure Vessel using Domestic High strength Carbon fiber, *J. Korean Soc. Precis. Eng.* **2020**, *37*, 843-848.
6. Hanna, E. G.; Younes, K.; Amine, S.; Roufayel, R. Exploring Gel-Point Identification in Epoxy Resin using Rheology and Unsupervised Learning. *Gels*, **2023**, *9*, 828-842.
7. Shah, D. U.; Schubel, P. J. Evaluation of Cure Shrinkage Measurement Techniques for Thermosetting Resins. *Polym. Test.* **2010**, *29*, 629-639.
8. Vargiu, S.; Pitzalis, M.; Crespolini, G.; Giuliani, G. Preparation of Liquid Epoxy Resins From Bisphenols. US Patent 4,132,718, 1979.
9. Hong, Y.; Lee, S. Characteristics of Eco-Friendly Epoxy Resin Modified with Epoxidized Soybean Oil (ESO): Thermal, Mechanical and Morphological Properties. *Polym. Korea* **2024**, *48*, 133-141.
10. Sun, Y.; Yu, A.; Liang, Y.; Wang, G.; Song, S.; Lu, W.; He, Z.; Meng, S. Crosslink Density and Mechanical Property Evolution During the Curing of Polyurethane-urea/sodium Silicate Hybrid Composite. *High Performance Polym.* **2021**, *34*, 66-76.
11. Khalina, M.; Beheshty, M. H.; Salimi, A. The Effect of Reactive Diluent on Mechanical Properties and Microstructure of Epoxy Resins. *Polym. Bulletin.* **2019**, *76*, 3905-3927.
12. Malburet, S.; Bertrand, H.; Richard, C.; Lacabanne, C.; Dantras, E.; Graillot, A. Biobased Epoxy Reactive Diluents Prepared from Monophenol Derivatives: Effect on Viscosity and Glass Transition Temperature of Epoxy Resins. *RSC Adv.* **2023**, *13*, 15099-15106.
13. Yu, M.; Zhou, Z.; Lu, H.; Li, A.; Bai, R.; Sun, J.; Ren, M.; Hu, H. Curing Kinetics and Thermal Properties of Aromatic Multifunctional Epoxy Resins. *Polym. Polym. Compos.* **2014**, *22*, 1-12.
14. Downey, M.; Drzal, L. T. Toughening of Aromatic Epoxy via Aliphatic Epoxy Copolymers. *Polymer* **2014**, *55*, 6658-6663.
15. Montserrat, G.; Andreu, P.; Cortes, Y.; Calventur, P.; Colomer, J. M. Addition of a Reactive Diluent to a Catalyzed Epoxy Anhydride System. I. Influence on the Cure Kinetics. *J. Appl. Polym. Sci.* **1996**, *61*, 1663-1674.
16. Qin, Y.; Yang, T.; Fan, M.; Cheng, U.; Zhang, J. "The Effect of a Renewable Fatty Acid Derivatives Based Epoxy Diluent on the Curing Kinetics and Thermal Properties of Epoxy/anhydride Systems. *Thermochimica Acta*, **2015**, *614*, 37-44.
17. Zhang, Q.; Liang, S.; Sui, G.; Yang, X. Influence of Matrix Modulus on the Mechanical and Interfacial Properties of Carbon Fiber Filament Wound Composites. *RSC Adv.* **2015**, *5*, 25208-25214.
18. Qi, G.; Du, S.; Zhang, B.; Tang, Z.; Yu, Y. Evaluation of Carbon Fiber/epoxy Interfacial Strength in Transverse Fiber Bundle Composite: Experiment and Multiscale Failure Modeling. *Compos. Sci. Technol.* **2014**, *105*, 1-8.

**출판자 공지사항:** 한국고분자학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관찰권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.