

## 에폭시 강인성 향상 첨가제의 적용 및 물성 분석

김대연 · 김순천 · 박영일 · 김영철 · 임충선<sup>†</sup>

한국화학연구원 그린정밀화학연구센터  
(2015년 7월 20일 접수, 2015년 8월 28일 수정, 2015년 9월 2일 채택)

### The Physical Properties Analysis of Epoxy Resins Incorporated with Toughening Agents

Daeyeon Kim, Soonchoen Kim, Young-IL Park, Young Chul Kim, and Choong-Sun Lim<sup>†</sup>

Research Center for Green Fine Chemicals, Korea Research Institute of Chemical Technology 45, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44412, Korea

(Received July 20, 2015; Revised August 28, 2015; Accepted September 2, 2015)

**요약:** 코어/셸 나노입자, CTBN 변성에폭시, 폴리에스터 폴리올, 폴리우레탄 등과 같은 다양한 종류의 강인화 소재는 에폭시 수지의 주요 단점으로 알려진 취성을 보완하여 낮은 충격 저항성을 개선시키기 위한 방법으로 연구되고 있다. 본 연구에서는 앞서 언급된 강인화 소재를 선정, 접착제 조성물에 첨가하여 기계적 물성을 조사하였다. 강인화 소재 도입에 따른 기계적 강도의 측정은 UTM을 이용한 굴곡 강도와 탄성률 측정 및 Izod 충격 시험기를 사용한 충격 강도 실험을 통해 이루어졌으며, 그 결과 강인화 소재가 에폭시 경화물의 유연성 및 충격에 대한 저항성 향상에 미치는 긍정적인 효과가 나타남을 관찰하였다. 또한, DMA를 이용한 저장 탄성률 결과는 굴곡 탄성률의 결과와 동일한 경향으로 나타남을 확인하였다. 강인화 소재가 충격 강도 향상에 영향을 주는 이유는 에폭시 수지에 첨가된 강인화 소재의 상 분리 현상에 의한 것이며, 상 분리된 강인화 소재는 에폭시 조성물의 파단면을 관찰한 FE-SEM 이미지에서 관찰하였다.

**Abstract:** Epoxy resin toughening agents such as core/shell nanoparticles, CTBN epoxy, polyester polyols, and polyurethane have been widely used in order to compensate for the brittleness and improve the impact resistance of the epoxy resin. In this work, a few tougheners mentioned above were individually added into adhesive compositions to observe the effects of physical and mechanical properties. Both flexural strength and flexural modulus were measured with UTM while impact strength was analyzed with Izod impact tester. The obtained results showed that the addition of toughening agents afforded positive performance in terms of flexibility and impact resistance of the cured epoxy resin. Furthermore, DMA experiments suggested that the trends of storage modulus data of each epoxy resin composition coincided with the trends of flexural modulus data. FE-SEM images showed that toughening agents formed circled-shape particles when it was cured in epoxy resin composition at high temperature by phase separation. The existence of particles in the cured samples explains why epoxy resin with toughener has higher impact resistance.

**Keywords:** Epoxy resin, toughening agent, impact resistance, phase separation

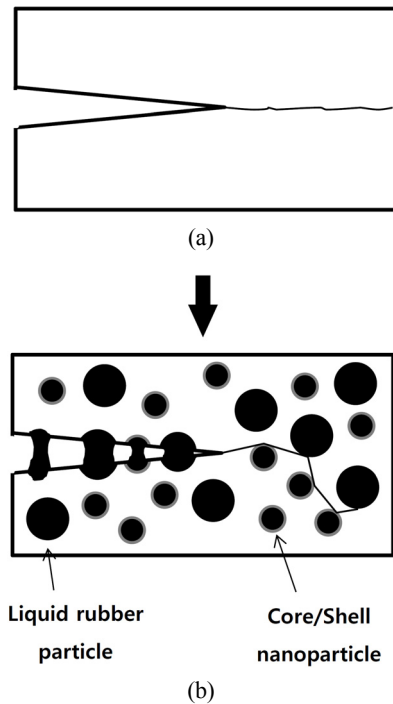
### 1. 서론

대표적인 열경화성 고분자 재료 중의 하나인 에폭시 수지는 접착제, 코팅제, 전기·전자 분야, 복합 재료 등과 같은 응용 분야에서 주 수지로서 사용되고

있다[1,2]. 에폭시 수지는 저렴한 가격 및 경화제에 따른 경화속도 제어의 용이성, 그리고 내열성 및 경도 등이 우수하다는 장점이 있다. 하지만 높은 가교밀도로 인해 분자 구조가 강직해져 취성(brittleness)이 증가하게 되고, 이에 따라 외부의 충격에 의해 쉽게 깨어지는 단점도 가지고 있다[3].

에폭시 수지의 단점을 극복하기 위해서 많은 연구

<sup>†</sup>Corresponding author: Choong-Sun Lim (chsunlim@kricr.re.kr)



**Figure 1.** Crack propagation in epoxy system (a) neat epoxy system (b) rubber particles dispersed epoxy system[10].

자들이 강인성 부여에 관한 실험을 수행하였고, 현재에도 계속적으로 연구되어지고 있다[4-6]. 대표적으로 고무 계열 및 열가소성 재료를 에폭시 수지에 도입하여 강인성 향상을 도모하는 방법들이 주로 소개되어진다[7,8]. 에폭시 수지의 강인성 향상을 위해 주로 사용되는 소재는 carboxyl-terminated butadiene-co-acrylonitrile (CTBN), amine-terminated butadiene-co-acrylonitrile (ATBN), 폴리부타디엔(polybutadiene), 폴리우레탄(polyurethane), 코어/셸 나노입자(core/shell nanoparticle), poly ethylene oxide (PEO), 폴리아마이드(polyamide) 등이 있으며, 이 중에서 CTBN과 ATBN은 에폭시 수지와 반응을 통해 변성 에폭시의 형태로 합성하여 주로 사용되고 있다[9]. 이와 같은 강인화 소재의 도입에 따라 강인화 소재의 고무와 같은 유연한 성분이 에폭시 수지 전체에 고루 분포하게 되고, 에폭시 수지는 강인화 소재 도입 전과 비교하여 향상된 유연성(flexibility)을 가지게 된다. 뿐만 아니라 에폭시 수지 내에서 주로 액상으로 존재하는 강인화 소재들은 경화과정 중에 액상에서 고상으로 전환되는 상 분리(phase separation) 현상에 의해 일정한 크기를 가지는 구 형태의 입자로 바뀌게 된다. 이러한 입자들은 에폭시 경화물 전체에 골고루 분포해 있으며, Figure 1에 나타난 바와 같이 외부로부터 가해지는 충격에 의해 발생하는 힘에 의해 발생한 크랙(crack)이 점점 커지는 것을 막

아주거나 크랙 진행방향을 바꿔주는 역할을 하여 경화물이 쉽게 깨어지거나 파괴되지 않도록 도와준다[8,10].

강인화 소재에 의해서 충격에 대한 저항성 및 유연성이 향상된 에폭시 수지는 접착 소재로 사용될 때 취성에 의해 구현되지 못한 에폭시 수지의 성능을 최대한 이끌어 내어주는 역할을 할 수 있다. 그로 인해 접착 성능의 향상에 긍정적인 작용을 하여 에폭시 수지의 접착 소재로의 적용에 있어서 더 발전된 방향을 제시하는 것이 가능할 것이라 여겨진다.

본 연구에서는 우수한 기계적 특성 및 접착 성능을 가지는 에폭시 접착 소재를 설계하기 위해서 에폭시 수지에 다양한 종류의 강인화 소재를 일정한 함량으로 도입하였고, 그에 따른 에폭시 경화물을 각각 제조하여 동역학적 거동, 기계적 강도 그리고 접착 성능을 조사하였다. 또한 파단면 분석을 통해서 강인화 소재가 실제로 에폭시 경화물 내에 상 분리되어 고르게 분포되어 있는 상태를 관찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 재료

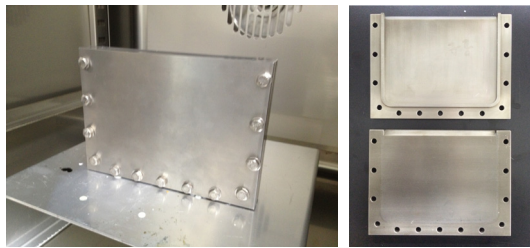
에폭시 수지의 강인화 특성 연구를 위한 기본 수지는 모멘티브사에서 범용 에폭시 수지로 분류되는 diglycidyl ether of dibisphenol A (DGEBA, EPIKOTE828, EEW = 187 g/eq)를 사용하였다. 상온에서 안정하고 고온에서 경화반응을 유도하기 위해서 에어프로덕츠사에서 구입한 dicyandiamide (DICY, DICYANEX 1400F)와 우레아 유도체(AMICURE UR 7/10)를 각각 경화제와 반응 촉진제로 선택하였다. 충전제는 OMYA사의 calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>, OMYACARB 30-CN)를 사용하였으며, 21~33 μm의 입자사이즈를 가진다.

코어/셸 나노입자 형 강인화 소재는 polybutadiene을 기재로 하고 비스페놀 A계 에폭시 수지에 25%의 나노입자가 사전에 분산된 형태이며, 에폭시 당량이 240 g/eq인 KANEKA사의 KANE ACE MX 156을 사용하였다. CTBN 변성 에폭시 수지인 Struktol polydis 3614는 SCHILL+SEILACHER사의 제품으로 비스페놀 A계 에폭시 수지에 40%의 CTBN이 개질되어 있으며, 에폭시 당량은 330 g/eq이다. Polyester polyol 형태의 강인화 소재인 DYNACOLL 7210은 Evonik사로부터 제공받았으며, hydroxyl number (OH)가 30 mg KOH/g이다. 폴리우레탄의 합성을 위한 주재료로는 polytetrahydrofuran (PolyTHF, Mn = 2000 g/mol)과 hexamethylene diisocyanate (HMDI)가 사용되었고, trimethylolpropane (TMP)과 2-allylphenol (2AP, 98%)은 각각 가교제와 blocking agent로 사용하여 특허에서 언급된 방법을 참고하여

**Table 1.** Formulations of Epoxy Resin with Toughening Agents

Sample	Epoxy resin	Curing agent	Accelerator	Filler	Toughening agent
1	100	11	0.3	10	0
2	100	11	0.3	10	27 (MX 156)
3	100	11	0.3	10	27 (Polydis 3614)
4	100	11	1	10	27 (DYNACOLL 7210)
5	100	11	1	10	27 (Polyurethane)

※ Unit = phr (part per hundred resin)



**Figure 2.** Closed type metal mold to fabricate the cured epoxy specimen.

제조하였다[11]. 폴리우레탄 합성용 재료들은 모두 Sigmaaldrich사에서 구입하였으며, dibutyltindilauryl mercaptide (SNN-2800, 95%)는 Gelest사에서 구입하였다. 본 실험에서 사용된 재료들은 별도의 처리 없이 제공받은 그대로 사용하였다.

**2.2. 조성물의 배합비**

에폭시 수지를 기본 골격으로 하는 경화물을 제조하기 위해 11 phr의 경화제를 사용하였고, 첨가되는 강인화 소재의 종류에 따라 0.3~1 phr의 촉진제를 사용하였다. 충전제와 강인화 소재는 모든 조성에서 동일하게 10 phr와 27 phr로 함량을 고정하였다. 이때, 일부 강인화 소재에 포함된 에폭시 수지의 경우, 조성물 배합에서 필요한 에폭시/경화제 간의 당량 계산에서 제외시키고 한 물질로 취급하여 배합에 사용하였다. 에폭시 조성물의 배합비는 Table 1에서 자세히 나타내고 있다.

**2.3. 조성물의 제조 및 경화 반응**

모든 조성물의 제조는 상·하부가 분리되는 반응조 내에서 진공 하에 이루어졌다. 1차 교반을 위해 300 mL 반응조에 액상 형태인 재료(에폭시 수지, 강인화 소재)를 넣고 기계적 교반기(mechanical overhead stirrer, Eurostar digital, IKA)를 이용하여 90°C에서 20 min 간 400 rpm으로 혼합하였다. 이어서 고상 형태인 재료(경화제, 촉진제, 충전제)를 정해진 양에 맞추어 첨가 후, 동일한 조건으로 30 min 동안 2차 교반을 수행

하여 최종 접착 조성물을 제조하였다.

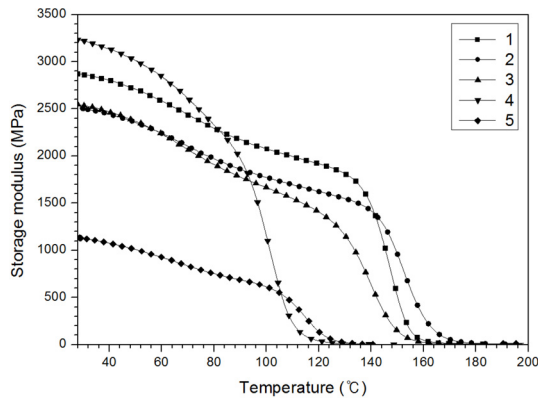
Figure 2에서는 에폭시 경화물 제조를 위해 사용된 금형몰드를 보여주고 있다. 금형몰드는 경화물의 수축 및 변형을 고려하여 폐쇄형으로 제작하였다. 120°C로 사전 가열된 금형몰드에 앞서 제조한 접착 조성물을 가득 채우고, 170°C로 가열한 경화 오븐으로 옮겨 30 min 동안 경화 반응을 수행하였다. 경화 반응이 끝난 금형몰드는 급격한 냉각으로 인해 경화물에 발생하는 변형을 방지하기 위해 상온에 비치하여 자연냉각을 시킨 후 금형몰드를 분해하여 경화물을 수거하였다. 이후에 측정하고자 하는 시험에 맞는 크기로 가공하여 다양한 종류의 시험편을 제작 후 경화물의 특성 분석에 사용하였다.

**2.4. 측정 및 특성 분석**

강인화 소재의 종류에 따른 에폭시 경화물의 동적 열특성 조사를 위해 동역학 분석기(dynamic mechanical analysis (DMA), Q800, TA Instruments)를 사용하였다. 금형 몰드에서 경화된 시험편은 가로 × 세로 × 두께가 각각 60 mm × 12 mm × 2.5~3 mm가 되도록 가공하였다. 측정 조건은 dual cantilever probe를 사용하여, frequency = 1 Hz, amplitude = 10 μm, 분당 5°C의 승온속도로 30~200°C의 온도 범위에서의 저장 탄성률(storage modulus)과 손실 탄성률(loss modulus)의 변화를 관찰하였다.

각 경화물의 유리전이온도(glass transition temperature, T<sub>g</sub>)는 강인화 소재의 도입에 의해 동역학분석기에서 측정이 이루어지지 않아 시차주사열량계(differential scanning calorimetry (DSC), Q2000, TA Instruments)를 이용하여 경화 전 액상 조성물로부터 유리전이온도를 조사하였다. 시차주사열량계의 분석 조건은 질소(N<sub>2</sub>) 분위기 하에서 25~300°C의 온도 범위로 분당 10°C의 승온속도를 적용하였으며, 2<sup>nd</sup> heating까지 분석을 수행하였다. 이때, 2<sup>nd</sup> heating에서 나타나는 그래프 변화로부터 유리전이온도를 관찰하였다.

강인화 소재들이 에폭시 수지의 기계적 강도에 미치는 영향은 굴곡 특성(flexural property) 및 충격특성



**Figure 3.** Graphs of storage modulus of cured epoxy samples with neat or toughened conditions.

(impact property)으로부터 관찰하였다. 굴곡 특성은 측정하고자 하는 시편들의 굴곡 강도(flexural strength) 및 굴곡 탄성률(flexural modulus)의 변화를 통해서 강인화 소재가 도입된 시편의 유연성 수치를 비교하여 에폭시 경화물에서의 강인화 소재와 유연성의 상관관계를 증명할 수 있다.

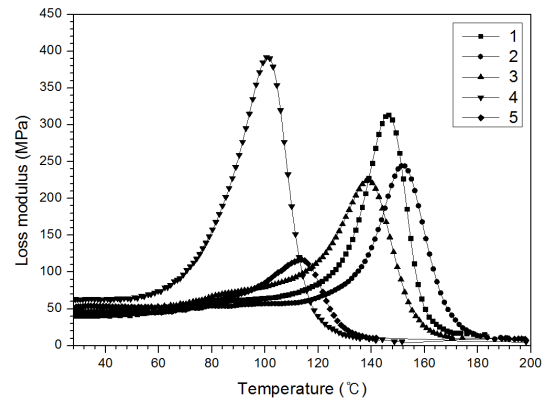
굴곡 강도와 굴곡 탄성률은 ASTM D 790M을 참고하였고, 만능재료시험기(universal testing machine, UTM, model 5982, INSTRON)의 3점 굽힘(3 point bending) 시험법으로 측정하였다. 굴곡 시편은 길이 × 폭 × 두께가 각각 60 mm × 25 mm × 3 mm가 되도록 가공하였고 시편 지지대(span)의 길이는 48 mm로 적용하였으며, 분당 1.2 mm의 속도로 시험을 수행하였다.

충격강도는 에폭시 수지에 강인화 소재를 첨가하여 경화시킨 시편에 펜듈럼(pendulum)이 직접적으로 내려치는 충격을 통해서 얻어지는 수치를 바탕으로 측정되었으며, 시험에 있어서의 세부사항은 ASTM D 256을 참고하였다. 충격 시험용 장비는 아이조드(Izod)형의 충격시험기(CEAST 9050, INSTRON)를 사용하였다. 시편의 크기는 길이 × 폭 × 두께가 각각 63.5 mm × 12.7 mm × 3 mm의 크기로 가공하였고, 2.54 mm의 노치(notch)를 적용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 동역학적 분석 및 유리전이온도 관찰

강인화 소재가 첨가된 에폭시 경화물의 점탄성 거동은 30~200°C 온도 범위에서 동역학 분석을 통해 비교 관찰되었다. Figure 3은 동역학 분석으로부터 얻어진 저장 탄성률의 결과를 보여준다. 가장 큰 특징은 폴리에스터계 강인화 소재를 제외한 강인화 소재의 첨가에 따라 초기 저장 탄성률은 감소하였다. 그중에서도 폴리우레탄을 사용한 경우는 순수한 에폭시 경

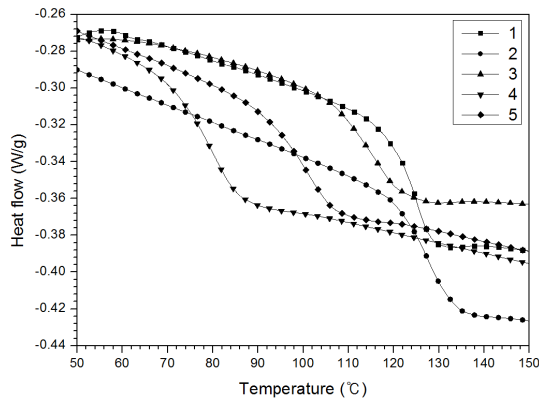


**Figure 4.** Graphs of loss modulus of cured epoxy samples with neat or toughened conditions.

화물에 비해 초기 저장 탄성률이 1/2 수준으로 나타났다. 고무 성질의 강인화 소재는 에폭시 경화물에 존재하여 탄성률을 낮추어주는 역할을 하게 된다. 폴리에스터계 강인화 소재의 경우는 다른 강인화 소재와는 달리 높은 초기 탄성률을 가지는 것으로 보아 고무 성분보다는 에폭시 경화물에 높은 가교밀도를 부여해주는 역할을 해주는 것으로 여겨진다. 하지만 높은 가교밀도에 비해서 열이 가해지는 상태에서 저장 탄성률의 급격한 하락이 관찰됨에 따라 열적 특성 자체는 좋지 못한 것으로 생각되어진다.

Figure 4의 손실 탄성률은 일반적으로 점탄성 거동에서 점성의 특성을 의미하며, 유리전이영역에서 높은 온도에 노출된 물질의 유리성질이 감소하며 열로써 사라지는 비가역적 에너지를 나타내고 있다. 실질적으로 동역학 분석에서 유리전이온도는  $\tan \delta$  그래프가 만들어내는 피크부분으로 정의된다. 그러나 본 실험에서는 에폭시 경화물에 강인화 소재의 도입으로 인해서 시편의 유연성이 높아지고 동역학 분석을 위한 probe 상에서 시편의 유동이 발생하여 정확한  $\tan \delta$  그래프가 만들어지지 않았다. 그래서 유리전이온도는 시차주사열량계를 이용하여 비교 관찰하였고,  $\tan \delta$ 와 유사한 경향을 보이는 손실 탄성률과 비교하여 유리전이온도를 상대적으로 비교하였다.

시차주사열량계를 이용한 조성물의 열용량 분석으로부터 각각의 강인화 소재 조건으로부터 발생하는 유리전이온도를 Figure 5에 그래프로 나타내었다. 경향 측면에서는 강인화 소재의 도입은 유리전이온도의 감소를 보여주고 있다. 하지만 코어/셸 나노입자는 에폭시 조성물에 도입되어도 유리전이온도에는 큰 영향을 미치지 않았고, 오히려 더 높은 유리전이온도 결과를 보여주었다. 하지만 상 분리를 통해 입자 형태로 전환되는 변성에폭시의 CTBN과 폴리우레탄의 경우 기존 에폭시 조성물에 비해 낮은 유리전이온도를 가졌다. 그

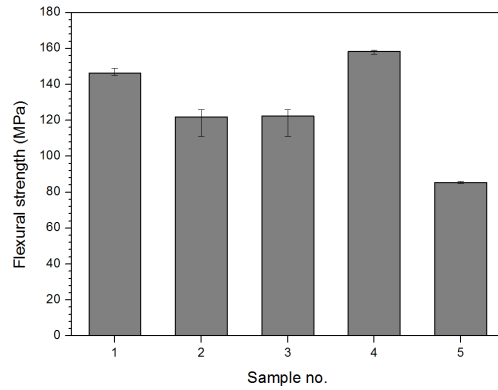


**Figure 5.** DSC graphs showing the glass transition temperature of epoxy resin systems with tougheners.

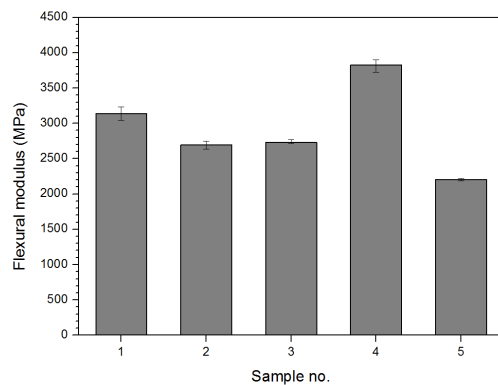
리고 폴리에스터계 강인화 소재는 가장 낮은 유리전이 온도를 가짐으로써 열적으로 안정하지 않다는 것을 확인하였다.

### 3.2. 기계적 물성 조사

만능재료시험기를 사용하여 에폭시 및 강인화 소재가 첨가된 에폭시 경화물의 굴곡 특성을 조사하였고, Figure 6에 각각 굴곡 강도와 굴곡 탄성률의 결과를 나타내었다. Figure 6(a)에서 폴리에스터계 강인화 소재를 제외하고 강인화 소재가 첨가됨에 따라 순수한 에폭시 경화물과 비교하여 더 낮은 굴곡 강도를 가졌다. 특히 폴리우레탄의 경우 다른 조건들에 비해 현저하게 낮은 굴곡 강도를 보여 주고 있다. 코어/셸 나노입자, 변성 에폭시의 CTBN, 그리고 폴리우레탄의 경우 모두 경화 후에 입자형태로 존재하여 고무와 같은 유연함과 탄성을 가지게 되고 이는 에폭시 경화물 전체에 고무 분포되어 에폭시 경화물의 유연성을 향상시켜주는 역할을 하게 된다. 이로 인해 유연성이 향상된 만큼 적은 힘으로도 굽힘의 정도는 크게 나타나게 되고 결과적으로 낮은 굴곡 강도를 가지게 된다. 또한 이 결과는 Figure 6(b)의 굴곡 탄성률의 결과에서도 동일한 경향으로 관찰되었다. 반면에 폴리에스터계 강인화 소재가 첨가된 에폭시 경화물은 순수한 에폭시 경화물보다 더 높은 굴곡 강도와 굴곡 탄성률을 가지는 것으로 나타났다. 폴리에스터계 강인화 소재 첨가 에폭시 경화물은 앞서 동역학 분석기를 이용한 저장 탄성률의 결과에서 관찰된 바와 같이, 굴곡 특성에서도 높은 탄성률이 관찰됨에 따라 높은 가교밀도를 가지는 것으로 예상이 되었다. 폴리에스터계 강인화 소재의 경우 강인화 소재로 적용되었지만 경화 후에 다른 소재들과 같은 입자로는 존재하지 않고, 폴리에스터 수지의 양쪽 말단의 -OH (하이드록실) 관능기가 각기 다른 에폭시 관능기의 탄소와 반응하여 고분자 형태



(a)



(b)

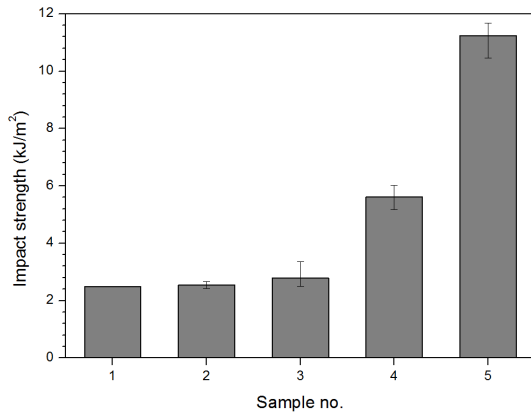
**Figure 6.** The comparison of flexural properties of each cured sample (a) flexural strength (b) flexural modulus.

성함으로써, 경화물 자체의 가교밀도를 높여주는 역할을 한 것으로 여겨진다.

펜듈럼에 의해 가해지는 충격에 대한 저항성을 보여주는 충격 강도의 결과는 Figure 7에 나타내었다. 기본적으로 모든 강인화 소재의 첨가는 충격 강도의 향상에 긍정적인 영향을 미치는 것이 관찰되었다. 그 중에서도 폴리우레탄은 에폭시 경화물의 충격 강도에 가장 큰 효과를 줌에 따라 충격 향상을 위한 소재로 가장 적합한 것으로 확인되었다. 그리고 고무 입자로 존재하는 코어/셸 나노입자 및 변성 에폭시의 CTBN의 경우 입자들이 충격을 완화시켜줄 것이라는 예상과는 달리 순수한 에폭시와 비교하여 큰 차이가 나타나지는 않았다. 오히려 상 분리가 이루어지지 않는 폴리에스터계 강인화 소재의 경우 폴리우레탄 다음으로 높은 충격 강도를 보여주었다.

### 3.3. 파단면 분석

Figure 8에서는 충격 시험을 통해서 얻은 시편의 파단면을 FE-SEM으로 관찰한 이미지를 보여준다. 결과에서 관찰되듯이, 순수한 에폭시 경화물의 경우 표면

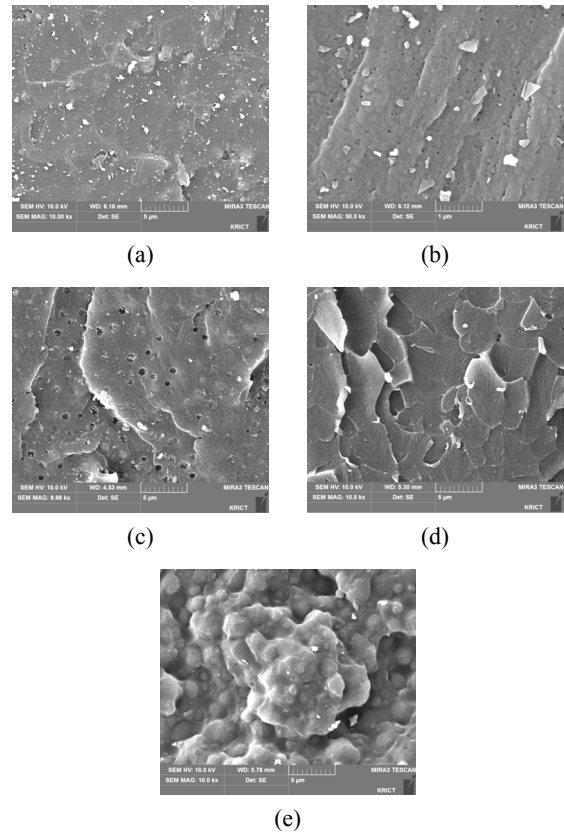


**Figure 7.** Impact strength of cured epoxy resins with toughening agents by Izod impact tester.

에 다소 깨끗하게 나타나고 있다. 반면에 코어/셸 나노입자 및 변성 에폭시의 CTBN이 도입된 경우는 나노입자 자체 및 상 분리에 의한 고무 입자 형성에 따라 이탈된 입자들의 비어있는 공간이 관찰된다. 이러한 공간들은 입자들과 매트릭스 수지인 에폭시 수지와 의 계면 결합력이 높지는 않다는 것을 설명해준다. 폴리우레탄의 경우도 유사한 형태로 상 분리에 의해 입자가 형성되었는데, 다른 두 조건과 비교하여 매트릭스 수지인 에폭시와 잘 결합되어 입자 자체가 이탈되지 않고 감싸여져 있는 것 같은 형상을 보이고 있다. 이 결과는 폴리우레탄이 가지는 우수한 기계적 성능과 뛰어난 접착 강도를 증명해주는 이유 중 하나로 생각되어진다.

#### 4. 결 론

강인화 소재의 도입은 경화된 에폭시 수지에 유연성을 부여하여 에폭시 경화물이 가지는 가장 큰 단점인 취성의 감소에 효과적으로 작용한다. 본 연구에서는 코어/셸 나노입자, CTBN 변성 에폭시, 폴리우레탄, 그리고 폴리에스터계 강인화 소재를 사용하여 에폭시 수지의 물성 향상을 도모하였다. 다양한 종류의 강인화 소재들은 에폭시 수지에 첨가됨에 따라 경화물의 탄성률에 변화를 주었고, 이는 동역학 분석기 및 만능 재료시험기를 이용한 저장 탄성률과 굴곡 탄성률의 결과로부터 확인 가능하였다. 두 종류의 탄성률은 동일한 경향을 보여주고 있는데, 실험에 사용된 대부분의 강인화 소재들은 에폭시 경화물의 탄성률을 낮춰주는 역할을 하고 있다. 그러나 폴리에스터계 강인화 소재는 오히려 탄성률의 증가 효과를 보여주고 있다. 일반적으로 가교밀도의 상승과 탄성률의 증가는 비례 관계를 보여주는데, 이 결과에서는 폴리에스터계 강인



**Figure 8.** FE-SEM images taken at  $\times 10,000$  and  $\times 50,000$  magnifications from the fracture surfaces of each cured sample (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4, (e) 5.

화 소재가 경화물의 가교밀도에 영향을 주는 소재라는 사실에 대한 간접적인 증명으로 여겨진다. 한편 폴리우레탄의 경우 가장 큰 탄성률의 감소를 보여주는 데 폴리우레탄이 에폭시 경화물에 부여해주는 유연성 향상이 주된 이유로 생각이 되며 이는 굴곡 강도의 결과로부터 알 수 있다. 굴곡 강도는 경화물의 유연성 여부를 확인할 수 있는 척도로써 적용되는데, 폴리우레탄은 가장 낮은 탄성률을 보여준 만큼 낮은 굴곡 강도를 보이며 순수한 에폭시 경화물에 비해 상대적으로 높은 유연성을 가짐이 확인되었다. 반대로 가장 높은 탄성률의 폴리에스터계 강인화 소재는 가장 높은 굴곡 강도를 보여주고 있다. 충격 시험에서도 폴리우레탄의 도입은 다른 강인화 소재들에 비해 높은 충격 강도를 가지는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 폴리우레탄에 의한 유연성뿐만 아니라 상 분리에 의해 형성된 우레탄 입자들이 충격 완화 효과를 준 것으로 판단된다. 상 분리에 의해 형성된 폴리우레탄 입자들은 FE-SEM을 통해서 확인 가능하였다. 마치 매트릭스 수지에서 빠져나간 것 같은 계면 양상의 다른 강인화 소재들과는 달리 폴리우레탄 입자의 계면은 매트릭스

수지에 의해 뒤덮여 있고 완전히 하나로 결합되어 있는 형상을 보여주고 있다. 매트릭스와의 높은 결합력은 충격이 가해졌을 때 그 충격을 견딜 수 있는 힘으로 작용하므로 기계적 성능의 향상을 이루어주는 주된 요소로 작용할 수 있다. 본 연구에서의 결과들을 토대로 실험에서 사용된 강인화 소재들은 유연성, 기계적 강도 향상에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 특히 폴리우레탄은 타 강인화 소재보다 더 뛰어난 기계적 강도를 보여줌에 따라 다양한 방면의 물성 향상을 구현할 수 있는 최적의 강인화 소재로 분류할 수 있음을 실험을 통해서 관찰하였다.

### 참 고 문 헌

1. R. Thomas, S. Durix, C. Sinturel, T. Omonov, S. Goossens, G. Groeninckx, P. Moldenaers, and S. Thomas, *Polymer*, **48**, 1695-1710 (2007).
2. B. L. Zhang, G. L. Tang, K. Y. Shi, Y. C. You, Z. J. Du, J. F. Yang, and J. Huang, *European Polymer Journal*, **36**, 205-213 (2000).
3. Y. C. Kim and B. H. Lee, *Journal of Adhesion and Interface*, **10**, 4, 191-198 (2009).
4. S. Lu, J. Ban, C. Yu, and W. Deng, *Iranian Polymer Journal*, **19**, 669-678 (2010).
5. R. Thomas, D. Yumei, H. Yuelong, Y. Le, P. Moldenaers, Y. Weimin, T. Czigany, and S. Thomas, *Polymer*, **49**, 278-294 (2008).
6. S. Jin, X. Feng, J. Pang, X. Hua, Y. Li, and Y. Yu, *Journal of Materials Science and Technology*, **12**, 46-50 (1996).
7. V. D. Ramos, H. M. Costa, V. L. P. Soares, and R. S. V. Nascimento, *Polymer Testing*, **24**, 387-394 (2005).
8. R. Thomas, J. Abraham, S. Thomas, and S. Thomas, *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.*, **42**, 2531-2544 (2004).
9. R. Akbari, M. H. Beheshty, and M. Shervin, *Iranian Polymer Journal*, **22**, 313-324 (2013).
10. S. K. Douglass, P. W. R. Beaumont, and M. F. Ashby, *Journal of Materials Science*, **15**, 1109-1123 (1980).
11. R. Mulhaupt, J. H. Powell, C. S. Adderley, and W. Rufenacht, *U. S. Patent*, 5,278,257 (1994).