

Bisphenol계 DGEBA/DGEBS 에폭시 블렌드 시스템의 열적 특성 및 파괴인성

박수진[†] · 김범용 · 이재락 · 신재섭^{*}

한국화학연구원 화학소재연구부, ^{*}충북대학교 화학과
(2002년 8월 30일 접수, 2002년 10월 9일 채택)

Thermal Properties and Fracture Toughness of Bisphenol-Based DGEBA/DGEBS Epoxy Blend System

Soo-Jin Park[†], Fan-Long Jin, Jae-Rock Lee, and Jae-Sup Shin^{*}

Advanced Materials Division, Korea Research Institute of Chemical Technology,
P.O. BOX 107, Yusong, Daejeon 305-600, Korea

^{*}Department of Chemistry, Chungbuk National University, Chongju 361-763, Korea

[†]e-mail: psjin@kRICT.re.kr

(Received August 30, 2002; accepted October 9, 2002)

초록 : 본 논문에서는 비스페놀계 2관능성 에폭시 수지 DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 경화거동, 열안정성, 그리고 파괴인성 특성을 고찰하였다. DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 함량비율을 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 그리고 60 : 40 wt%까지 변화시켰으며, DSC에 의한 열분석을 통하여 Ozawa식으로 경화활성화 에너지 (E_a)를 계산하였으며, TGA 열분석을 사용하여 열분해 개시 온도 (IDT), 최대 무게 감량시 온도 (T_{max}), 그리고 적분 열분해 진행 온도 (IPDT) 등 열안정성 인자를 고찰하였다. 경화된 시편의 파괴인성 특성은 크랙성장 저항을 나타내는 임계응력세기 인자 (K_{IC}) 실험을 통하여 알아보았으며, 주사전자 현미경 (SEM)을 사용하여 시편의 파단 특성을 조사하였다. 실험 결과 DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 E_a , IPDT, 그리고 K_{IC} 는 DGEBS 함량이 20 wt%인 경우 최대값을 나타내었는데, 이는 설봉기의 도입으로 인한 치밀한 네트워크 구조의 형성때문이라 사료된다.

ABSTRACT : In this study, the bisphenol-based DGEBA/DGEBS blend systems were studied in cure kinetics, thermal stabilities, and fracture toughness of the casting specimen. The content of DGEBA/DGEBS was varied in 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, and 60 : 40 wt%. The cure activation energies (E_a) of the blend systems were determined by Ozawa's equation. The thermal stabilities, including initial decomposed temperature (IDT), temperatures of maximum rate of degradation (T_{max}), and integral procedural decomposition temperature (IPDT) of the cured specimen were investigated by thermogravimetric analysis (TGA). For the mechanical interfacial properties of the specimens, the critical stress intensity factor (K_{IC}) test was performed and their fractured surfaces were examined by using a scanning electron microscope (SEM). As a result, E_a , IPDT, and K_{IC} show maximum values in the 20 wt% DGEBS content compared with the neat DGEBA resins. This was probably due to the fact that the elevated networks were formed by the introduction of sulfonyl groups of the DGEBS resin.

Keywords : DGEBA, DGEBS epoxy resin, thermal properties, fracture toughness, activation energy.

1. 서론

2관능성 에폭시 수지 diglycidylether of bisphenol-A (DGEBA)는 널리 사용되고 있는 범용 에폭시 수지로서 고온 특성과 내화학성이 우수하며, 접착성과 반응성이 우수하여 섬유 복합재료의 매트릭스, 코팅, 구조용 접착

제, 전기·전자부품 재료 등에 널리 사용되고 있다.^{1,2} 그러나, 2관능성 에폭시 수지는 구조적으로 잘 깨지는 취성과 고온에서의 열안정성 저하로 인하여 고성능 구조재료의 이용에 제한을 받아왔다.

최근에는 2관능성 에폭시 수지에 열경화성 수지 등을 블렌드하여 에폭시 수지 고유의 물성을 유지하면서 열

안정성과 기계적 물성을 향상시키는 연구가 많이 진행되어 왔다. 전보에서 저자 등은^{3,4} near-IR를 사용하여 diglycidylether bisphenol-A (DGEBA)/cycloaliphatic epoxy (CAE) 블렌드계의 경화거동과 반응동력학을 고찰하였으며, 점도가 낮은 trimethylol propane triglycidylether (TMP) 에폭시 수지와 블렌드하여 DGEBA의 강인성 증진을 시도하였다. Lin 등은^{5,6} DGEBA에 bisphenol-A diacrylate, resole 등을 블렌드하였고, FT-IR과 DSC를 사용하여 블렌드계의 IPN (interpenetrating polymer network) 형성과정을 조사하였으며, Chakrabarty 등은⁷ DGEBA/poly(ethyl methacrylate) 블렌드계의 열적 물성과 기계적 특성을 고찰하였다.

Diglycidylether of bisphenol-S (DGEBS)는 주쇄에 설펀기를 도입한 에폭시 수지로서 우수한 열안정성, 기계적 물성, 내화학성 등으로 인하여 주형, 접착제, 코팅 분야에서 널리 사용되고 있다.^{8,9} 그러나, DGEBS 에폭시 수지와 유리섬유를 사용하여 제작한 복합재료의 기계적 물성, 절연성 등에 관한 연구는 진행되고 있지만,¹⁰ DGEBS 에폭시 수지를 다른 수지와 블렌드하여 시스템의 열안정성, 기계적 특성 향상에 관한 연구는 널리 보고된 바가 없다.

따라서, 본 연구에서는 2관능성 에폭시 수지 DGEBA에 물성이 우수한 DGEBS 수지를 블렌드하여 경화반응, 열안정성 및 강인성의 증진을 도모하였으며, DSC와 TGA에 의한 열분석과 층간 파괴인성 실험을 통하여 DGEBS 함량이 블렌드계의 경화거동, 열안정성 그리고 기계적 계면 특성에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

2. 실험

재료. 2관능성 에폭시 수지는 국도화학의 diglycidylether of bisphenol-A (DGEBA, YD-128, EEW = 185~190 g/eq, $d=1.16 \text{ g/cm}^3$)를 사용하였으며, 경화제 diaminodiphenyl methane (DDM)은 Aldrich사의 시약을 사용하였으며, diglycidylether of bisphenol-S (DGEBS) 에폭시 수지는 다음과 같이 합성하였다.

Bisphenol-S (200.2 g, 0.8 mol), epichlorohydrin (370.1 g, 4 mol) 및 40% NaOH 수용액 (80 g, 0.8 mol)을 온도계와 교반기가 달린 1 L 반응기에 넣고 온도 100 °C에서 교반하여 7시간 반응시켰다. 과량의 epichlorohydrin과 물은 100 °C와 70 kPa하에서 제거하고 methyl isobutyl ketone (MIBK)으로 반응생성물을 용해시켜 30분 동안 교반한 후 여과하였다. 이를 100 °C에서 MIBK를 진공증류하여 수율 80% 이상의 에폭시 수지를 얻었다. IR, ¹³C-NMR spectrum 분석, 그리고 원소분석으로 합성한 DGEBS 에폭시 수지의 화학 구조를 확인하였다. IR spectrum 분석: 581, 913, 1151, 1178, 1295, 1593, 3074 cm^{-1} . ¹³C-NMR Spectrum 분석: 22.3, 43.9, 51.9, 68.7, 69.5, 72.8, 115.4, 129.5, 133.8, 162.3 ppm. 원소 분석: 분자식 $\text{C}_{104}\text{H}_{130}\text{O}_8\text{S}_5$ 의 계산값- C: 59.94%, H: 6.24%, S: 7.68%; 측정값- C: 55.74%, H: 5.30%, S: 7.75%. Figure 1에 사용한 수지와 경화제의 화학 구조식을 나타내었다.

분석 시료 및 시편 제조. DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 열적 및 기계적 특성을 알아보기 위하여 에폭시 수지와 경화제 (DDM)를 1:1 당량 비율로 혼합하여 사

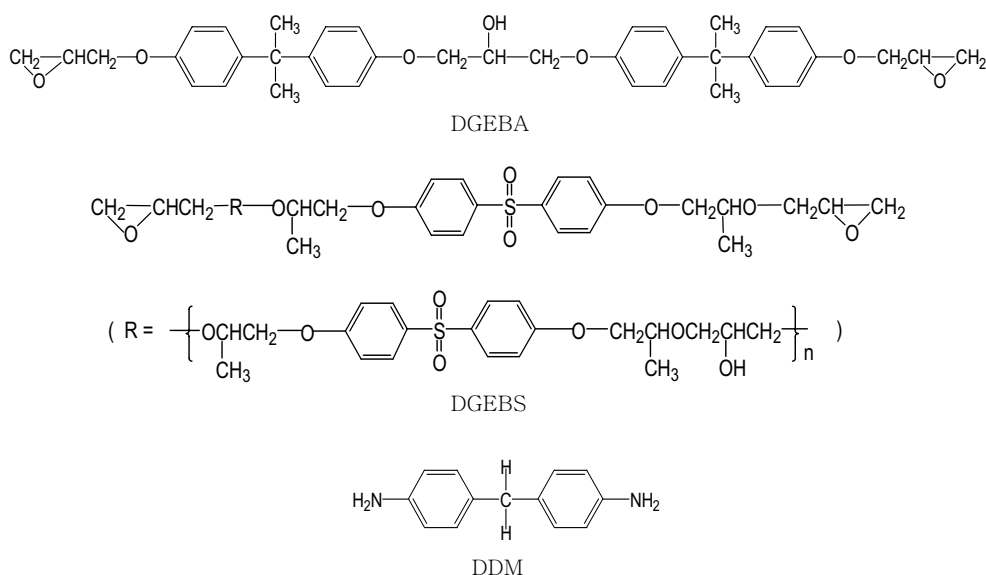


Figure 1. Chemical structures of the materials used.

용하였으며, DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 함량비율을 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 그리고 60:40 wt%까지 변화시켰다. 먼저 DGEBA와 DGEBS 에폭시 수지를 각각 완전히 녹인 후 혼합하였으며, 100 °C의 온도에서 DGEBA/DGEBS에 경화제를 첨가한 다음 투명한 혼합물이 얻어질 때까지 교반한 후 90 °C의 진공 오븐에서 감압하여 기포 등을 제거하였다. 기계적 계면특성을 알아보기 위한 시편을 제작하기 위하여 위와 같은 방법으로 혼합한 시료를 6 mm 두께의 실리콘 고무를 간격판으로 한 스테인레스 몰드에 주입한 후 경화시켰다. 에폭시 수지의 경화시 급격한 경화에 인한 유리화를 방지하기 위하여 110 °C (1시간), 130 °C (2시간), 그리고 150 °C (1시간)의 3단계의 경화 조건하에서 실행하였다.

경화 동력학. DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 경화 반응속도는 시차 주사 열량계 (Perkin Elmer, DSC-6)를 사용하여 질소 30 mL/min의 조건하에서 분석을 행하였다. 그리고 조성별 블렌드 시스템의 DGEBS 함량에 따른 경화 활성화 에너지 (E_a)의 변화를 알아보기 위하여 5, 10, 15, 그리고 20 °C/min의 승온 속도로 실행하였다. 등온 DSC는 70, 85, 그리고 100 °C에서의 전환율 (α)과 전환속도 (da/dt)를 측정하였다.

열안정성. DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템계의 열분해 개시 온도 (IDT), 최대 무게 감량시 온도 (T_{max}), 열안정성 지수 ($A^* \cdot K^*$), 그리고 적분 열분해 진행 온도 (IPDT) 등 열안정성 인자를 고찰하기 위하여¹¹ 열중량 분석기 (Du Pont, TGA-2950)를 사용하여 10 °C/min의 승온 속도와 질소 분위기 하에서 30~850 °C 온도 범위에서 측정하였다.

파괴인성 특성 및 모폴로지. DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 파괴인성 특성을 알아보기 위한 single edge notched bending (SENB)의 시편은 $6 \times 12 \times 60 \text{ mm}^3$ 크기로 각각 5개 제작하였으며, 노치의 길이를 두께의 1/2로 고정하였다. 임계응력세기 인자 (K_{IC})는 만능 재료 시험기 (Universal Testing Machine #1125, Lloyd LR 5 K)를 사용하여 cross-head speed를 1 mm/min, span-to-depth는 4:1로 하여 측정하였다. 파괴 인성 측정 후 주사전자 현미경 (scanning electron microscope, SEM)을 사용하여 1000배로 파단면의 모폴로지를 관찰하였다.

3. 결과 및 토론

동적 DSC를 이용한 열분석. Figure 2에 에폭시 수지/아민계의 경화반응 메카니즘을 나타내었다. 1차 아민 (RNH_2) 분자는 우선 한 개의 에폭사이드와 반응하여 2차 아민으로 전환되고 2차 아민이 또 다른 에폭시기와

반응하여 에폭시 수지 분자속에 다리 형태로 조립되어 두 개의 에폭시 수지 분자를 가교한다.^{12,13} 이 경화반응은 루이스산, 벤졸, 그리고 알코올에 의해 촉매 작용을 받으며, 아민과 에폭사이드의 부가반응에 의해 생성된 수산화기는 활성 촉매로서 경화반응을 촉진한다.^{14,15}

DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 경화거동을 알아보기 위하여 DSC를 사용하여 열분석을 시행하였으며, 그 결과를 Figure 3에 나타내었다. Figure 3의 DSC 열분석도로부터 경화반응의 열분석 데이터를 Table 1에 보였는데, DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 경화반응은 DGEBS 함

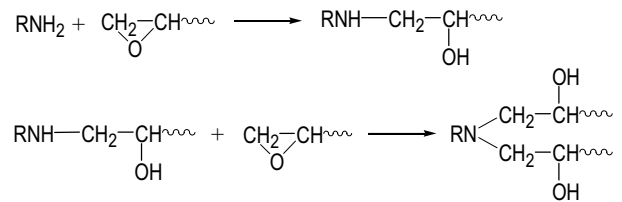


Figure 2. Cure mechanism of epoxy resins by amine curing agent.

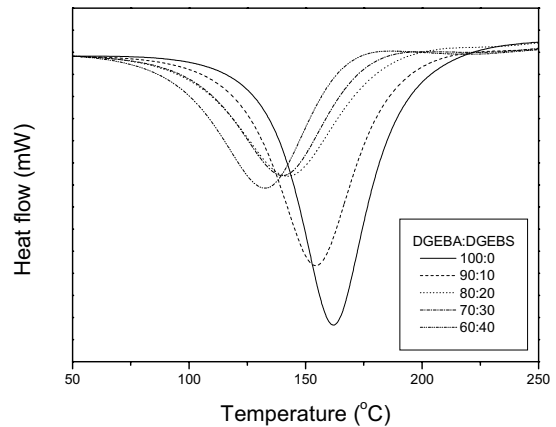


Figure 3. Dynamic DSC thermograms of DGEBA/DGEBS blend systems.

Table 1. DSC Data for the Curing Reaction of DGEBA/DGEBS Blend Systems

DGEBA/DG EBS	(heating rate: 10 °C/min)				ΔH (J/g)
	peak start	peak	peak end	ΔH (J/g)	
	temperature	maximum	temperature		
(°C)	(°C)	(°C)			
100:0	62	162	255	536.1	
90:10	57	154	236	502.0	
80:20	52	142	215	390.5	
70:30	48	140	201	336.5	
60:40	46	133	185	288.1	

량이 증가함에 따라 저온에서 개시되고 최대 발열 피크는 162 °C에서 133 °C로 이동하였다.

경화속도는 온도의 함수로서 속도상수가 Arrhenius식에 따른다고 가정하면 Ozawa식 (1)을 사용하여 경화 활성화 에너지 (E_a)를 구할 수 있다.¹⁶

$$\log \beta = \left(\frac{1}{2.303}\right) \ln \beta = -0.4567 \left(\frac{E_a}{RT_p}\right) + [\log \left(\frac{AE_a}{R}\right) - \log F(\alpha) - 2.315] \quad (1)$$

여기서, β 는 승온속도, A 는 지수 앞 인자, T_p 은 최대 발열 피크시의 온도, $F(\alpha)$ 는 전환율에 의존하는 항, 그리고 R 은 기체상수를 각각 나타낸다.

각 승온속도에 따른 최대 발열 온도를 구한 후 식 (1)로부터 $\ln \beta$ vs. $1/T_p$ 의 관계를 구하고, 그래프의 기울기로부터 구한 E_a 결과를 Table 2에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 E_a 는 DGEBA 단일 조성보다 DGEBS가 20 wt%의 함량을 가질 때 최대값을 가졌으며, DGEBS 20 wt% 이상에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 DGEBS 20 wt%의 경우, DGEBS의 첨가로 인하여 네트워크 구조의 형성에 영향을 주어 경화를 지연하는 효과를 초래하였기에 경화 활성화 에너지가 증가한 것으로 사료된다.¹⁷

등온 DSC에 의한 열분석. 등온 DSC 열분석법을 사용하여 각각의 경화온도에서 발생하는 발열량의 변화에 따른 DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 경화 특성을 고찰하였다. 일반적으로 데이터 분석이나 동력학 인자 등을 유도해 내는데 있어서 등온 모드가 동적 모드보다 단순성과 신뢰성을 기대할 수 있다고 알려져 있다.¹⁸

경화 반응속도는 열생성 속도 dH/dt 와 직접적으로 비례하는데 시간 t 에서의 전환율 (α)과 전환속도 ($d\alpha/dt$)는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_R} \quad (2)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{(dH/dt)}{\Delta H_R} \quad (3)$$

여기서, ΔH_t 는 시간 t 까지의 발열량, ΔH_R 은 모든 반응기들의 전체반응열을 나타낸다. ΔH_t 는 dH/dt 를 적분하여 직접적으로 구하였으며, 등온 발열량과 잔여량의 합이 같은 반응에서는 동적 발열량보다 작아지기 때문에 전체 발열량 ΔH_t 을 동적 DSC 분석에 의해 구한 발열량으로 하여 전환율과 전환속도를 구하였다.¹⁹

Figure 4는 식 (2)로부터 구한 DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 전환율과 시간의 관계를 나타낸 것으로서, 경화온도가 높을수록 높은 전환율을 보이고 짧은 시간에 평형상태에 도달하였는데, 이는 경화온도가 증가함에 따른 반응 활성화점의 증가로 인하여 짧은 시간에 네트워크 구조를 형성하기 때문이라 사료된다. 또한 전환율은 DGEBS 함량이 증가함에 따라 증가함을 확인할 수 있다.

Figure 5는 식 (3)으로부터 구한 DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 전환속도와 시간과의 관계를 나타낸 것으로서, 전환속도는 시간에 따라 증가하다가 최대값을 지난 후 감소하며, 고온의 등온 경화반응일수록 보다 짧은 시간에 최대 전환속도를 나타내며, 온도가 낮아질수록 오른쪽으로 피크가 이동함을 확인할 수 있었다. 이는 에폭시 수지가 경화되어질 때 온도가 낮으면 분절운동이 감소하게 되고 화학적인 반응을 감소시켜 전체 반응속도가 감소하기 때문이라 사료된다. 또한 전환속도는 DGEBS 함량에 따라 점차 증가하는데, 이는 DGEBS 첨가량의 증가로 인하여 반응성이 높아져 네트워크 형성속도가 빠르게 진행되기 때문이라 사료된다.

열안정성. 질소분위기 하에서 TGA를 이용해 측정된 DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 열분석도를 Figure 6에 나타내었으며, 이 열분석도로부터 열분해 개시 온도(IDT), 최대 무게 감량시의 온도(T_{max}), 열안정성 지수 ($A^* \cdot K^*$), 그리고 적분 열분해 진행 온도(IPDT) 등 열안정성 인자를 구하였으며, 그 중 IPDT 면적비로 얻어지는 정량적인 값이기 때문에 열안정성에 대하여 매우 재현성 있는 유용한 정보를 제공해 준다.²⁰

Table 3의 열중량 분석 결과에서 알 수 있듯이 IDT와 T_{max} 는 DGEBS 함량이 20 wt%까지 변화를 보이지 않다가 DGEBS 함량이 보다 증가하면 감소하는 경향을 나타내었다. 블렌드 시스템의 IPDT는 DGEBS 함량이 커질수록 증가하다가 DGEBS 20 wt% 이상에서는 감소하

Table 2. Cure Activation Energies (E_a) of DGEBA/DGEBS Blend Systems

DGEBA: DGEBS	kinetic factor	heating rate (°C/min)				E_a (kJ/mol)
		5	10	15	20	
100:0	$1/T_p \times 10^3$	2.43	2.32	2.26	2.21	51
	$\ln \beta$	1.61	2.30	2.71	3.0	
90:10	$1/T_m \times 10^3$	2.45	2.34	2.30	2.25	55
	$\ln \beta$	1.61	2.30	2.71	3.0	
80:20	$1/T_m \times 10^3$	2.49	2.41	2.35	2.30	57
	$\ln \beta$	1.61	2.30	2.71	3.0	
70:30	$1/T_m \times 10^3$	2.53	2.42	2.37	2.32	54
	$\ln \beta$	1.61	2.30	2.71	3.0	
60:40	$1/T_m \times 10^3$	2.59	2.46	2.42	2.37	50
	$\ln \beta$	1.61	2.30	2.71	3.0	

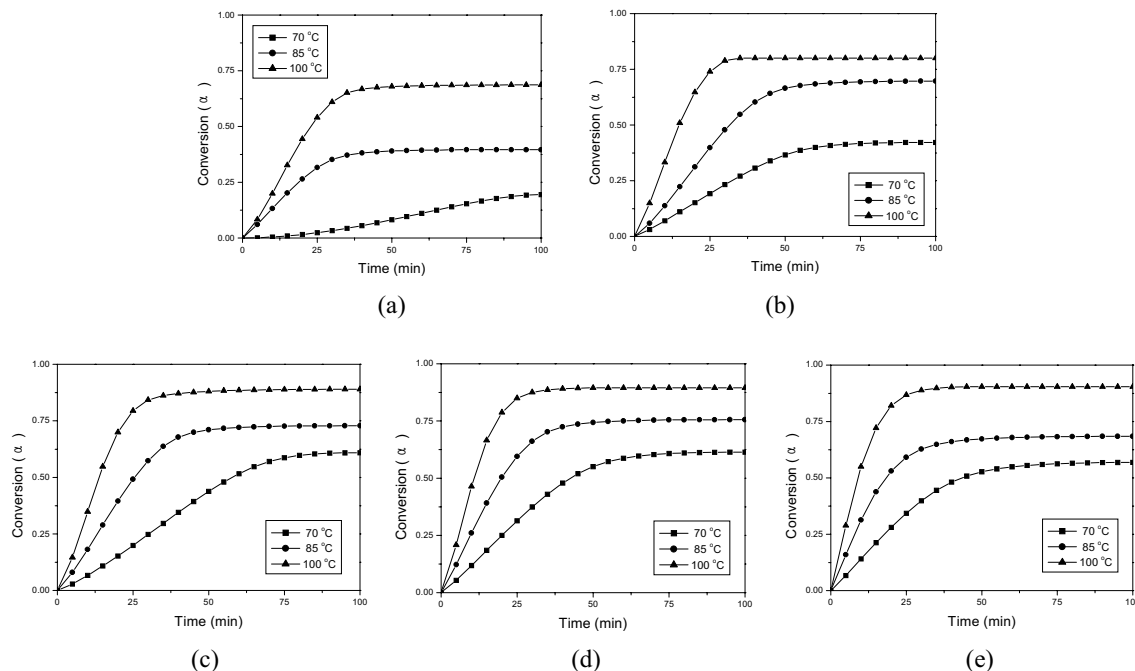


Figure 4. Conversions vs. time of DGEBA/DGEBS blend systems. (a) 0 wt%, (b) 10 wt%, (c) 20 wt%, (d) 30 wt%, and (e) 40 wt%.

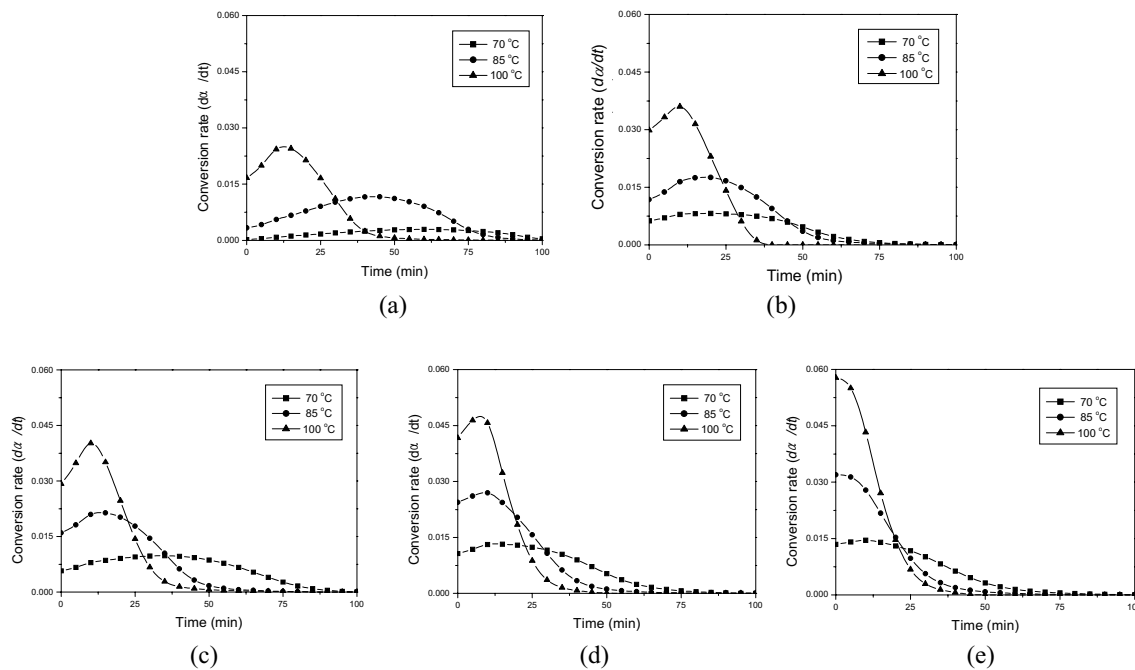


Figure 5. Conversion rate vs. time of DGEBA/DGEBS blend systems. (a) 0 wt%, (b) 10 wt%, (c) 20 wt%, (d) 30 wt%, and (e) 40 wt%.

는 경향을 나타내었다. 이는 DGEBS 함량이 20 wt%일 때 술폰기의 도입으로 치밀한 네트워크 구조를 형성하여 높은 IPDT를 나타내었으나, DGEBS 함량이 보다 증

가하면 네트워크 형성에 있어서 수지의 점도 증가로 인한 혼합도의 저하로 DGEBA와 DGEBS 사이의 불완전한 네트워크 구조를 이루기 때문이라 사료된다.²¹

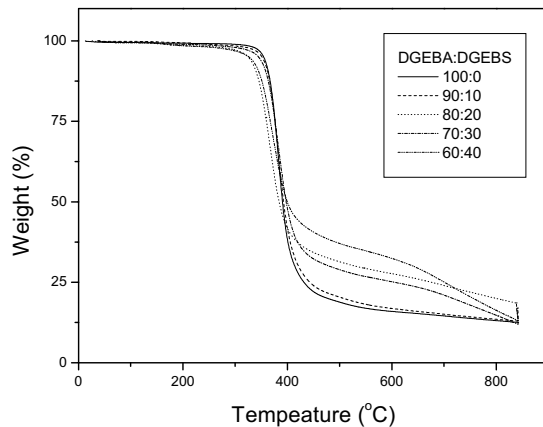


Figure 6. TGA thermograms of DGEBA/DGEBS blend systems.

Table 3. Thermal Stabilities of Cured DGEBA/DGEBS Blend Systems

DGEBA/DGEBS	IDT (°C)	T_{max} (°C)	$A^* \cdot K^*$	IPDT (°C)
100:0	354	383	0.70	588
90:10	352	383	0.70	602
80:20	354	390	0.84	715
70:30	344	385	0.79	670
60:40	326	372	0.75	644

파괴인성 특성. DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 파괴인성 특성은 three-point bending test를 통하여 알아보았으며, 경화된 시편의 크랙성장 저항을 나타내는 임계응력세기 인자(K_{IC})는 다음 식 (6)을 사용하여 구하였다.

$$K_{IC} = \frac{P \cdot L}{b \cdot d^{3/2}} \cdot Y \quad (6)$$

여기서, P 는 하중, L 는 span간의 거리, b 는 시편의 너비, 그리고 d 는 시편의 두께를 각각 나타내며, Y 는 크랙의 길이, 크랙의 위치, 하중 방법에 의존하는 geometric factor로서 다음 식 (7)을 사용하여 계산하였다.

$$Y = \frac{3(a/d)^{1/2}[1.99 - (a/d)(1 - a/d)(2.15 - 3.93a/d + 2.7a^2/d^2)]}{2(1 + 2a/d)(1 - a/d)^{3/2}} \quad (7)$$

여기서, a 는 크랙의 길이를 나타낸다.

식 (6)과 (7)을 사용하여 DGEBS 함량에 따른 DGEBA/DGEBS 블렌드계의 파괴 인성을 구하였으며, 이를 Figure 7에 나타내었다. K_{IC} 값은 앞에서 논의하였던 E_a 와 IPDT의 결과처럼 DGEBS 함량이 증가할수록 증가

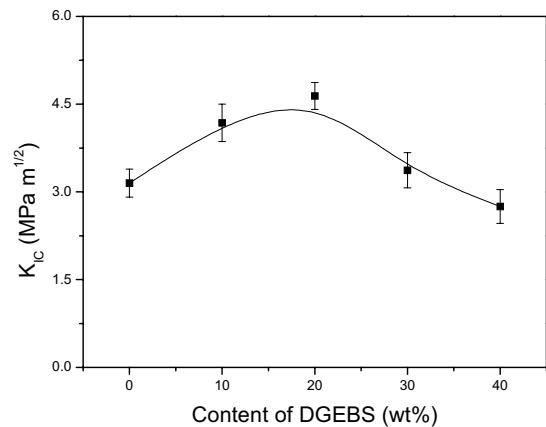


Figure 7. K_{IC} values of DGEBA/DGEBS blend systems.

하다가 DGEBS 20 wt% 이상에서 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 DGEBS 함량이 20 wt%일 경우 설폰기의 도입으로 치밀한 네트워크 구조를 형성하여 블렌드계의 강인성은 증가하였으나, DGEBS 함량이 보다 증가하면 네트워크 형성에 있어서 수지의 점도의 증가로 인한 혼합도의 저하로 인하여 불완전한 네트워크 구조를 이루기 때문에 감소하였다고 사료된다.²²

모폴로지. DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 파괴인성 특성 시험 후 주사전자 현미경(SEM)을 사용하여 시편의 파단면을 관찰한 결과를 Figure 8에 나타내었다. 순수한 DGEBA인 경우에는 불규칙적인 균열 성장 형태를 나타내었으며 (Figure 8 (a)), DGEBS 함량 10 wt%와 20 wt%에서는 균열 성장이 지연되어 완곡한 균열과 많은 능선을 나타내었으며 (Figure 8 (b), (c)), 이때 K_{IC} 값은 높게 나타났다. DGEBS 함량 30 wt%에서는 완곡한 균열과 능선이 없어지고 규칙적인 균열을 나타내었으며 (Figure 8 (d)), DGEBS의 함량 40 wt%에서는 상분리 현상이 일어났다 (Figure 8 (e)). 이상의 결과로부터 DGEBS 첨가량이 20 wt%에서 강인화 효과가 높은 모폴로지를 나타내었는데, 이는 열적 및 기계적 특성 실험에서 얻은 결과와 일치함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 DDM을 경화제로 사용한 DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 DGEBS 함량에 따른 경화 활성화 에너지(E_a), 전환율(α), 전환속도(da/dt), 열안정성 인자, 임계응력세기 인자(K_{IC}), 그리고 시편의 파단 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

DSC 열분석 결과 DGEBA/DGEBS 블렌드 시스템의 E_a 는 DGEBA 단일 조성보다 DGEBS 20 wt%의 함량에

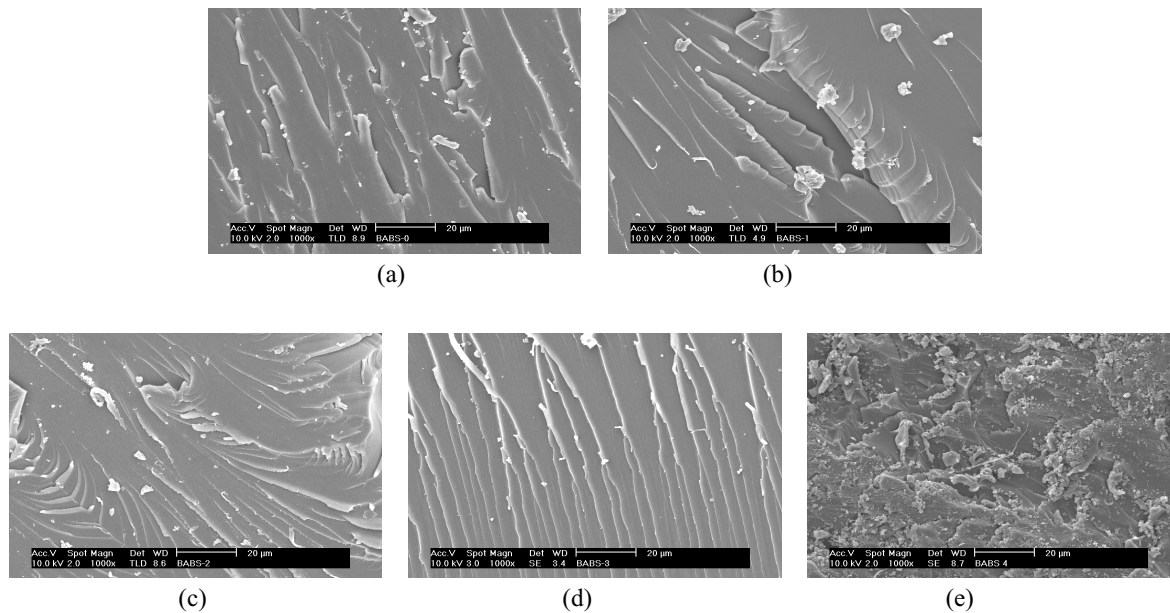


Figure 8. SEM photographs of fractured surfaces after K_{IC} test. (a) 0 wt%, (b) 10 wt%, (c) 20 wt%, (d) 30 wt%, and (e) 40 wt%.

서 최대값을 나타냈으며, TGA 분석 결과 IPDT는 DGEBS 20 wt%의 함량에서 증가하였다. 파괴인성 특성을 고찰하기 위해 SENB 방법에 의하여 구한 K_{IC} 값은 DGEBS의 함량 20 wt%까지는 증가를 하다가 그 이상이 되면 감소하였다. 시편의 파단 특성 결과 열적 및 기계적 특성 결과와 일치하는 모폴로지를 나타내었다.

결론적으로, 2관능성 에폭시 수지 DGEBA에 DGEBS 에폭시 수지를 20 wt% 비율로 블렌드하였을 경우가 시스템의 열안정성과 기계적 계면 특성이 가장 우수하였는데, 이는 실론기의 도입으로 인한 치밀한 네트워크 구조의 형성때문이라 사료된다.

감사의 글 : 본 연구는 2001년도 21C 프론티어연구개발 사업비에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. R. S. Bauer, "Epoxy Resin Chemistry", in *Advanced in Chemistry Series No. 114*, American Chemical Society, Washington DC, 1979.
2. H. Lee and K. Neville, *Handbook of Epoxy Resin*, McGraw-Hill, New York, 1967.
3. S. J. Park, H. C. Kim, H. L. Lee, and D. H. Suh, *Macromolecules*, **34**, 7573 (2001).
4. S. J. Park, T. J. Kim, and H. Y. Kim, *Polym. Int.*, **51**, 386 (2002).
5. M. S. Lin and M. W. Wang, *Polym. Int.*, **48**, 1243 (1999).

6. M. S. Lin and C. C. Chiu, *J. Appl. Polym. Sci.*, **80**, 963 (2001).
7. D. Chakrabarty, B. Das, and S. Roy, *J. Appl. Polym. Sci.*, **67**, 1051 (1998).
8. V. Sykora, V. Spacek, and I. Dobas, *J. Appl. Polym. Sci.*, **54**, 1463 (1994).
9. J. G. Gao and Y. F. Li, *Polym. Int.*, **49**, 1590 (2000).
10. J. K. Parekh and R. G. Patel, *Angew. Makromol. Chem.*, **227**, 1 (1995).
11. S. J. Park and H. C. Kim, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, **39**, 121 (2001).
12. M. P. Stevens, *Polymer Chemistry*, Oxford University Press, New York, 1999.
13. K. Pielichowski, P. Czub, and J. Pielichowski, *J. Appl. Polym. Sci.*, **69**, 451 (1998).
14. H. Kakiuchi, *Recent Development of Epoxy Resin Hardener*, CMC, Tokyo, 1994.
15. S. G. Shen, Y. F. Li, J. G. Gao, and H. W. Sun, *Int. J. Chem. Kinet.*, **33**, 558 (2001).
16. T. Ozawa, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **38**, 1881 (1965).
17. S. J. Park, T. J. Kim, and J. R. Lee, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, **38**, 2114 (2000).
18. H. H. Winter, *Polym. Eng. Sci.*, **27**, 1698 (1987).
19. D. N. Waters and J. L. Paddy, *Anal. Chem.*, **60**, 53 (1988).
20. C. D. Doyle, *Anal. Chem.*, **33**, 77 (1961).
21. G. H. Kwak, S. J. Park, and J. R. Lee, *J. Appl. Polym. Sci.*, **78**, 290 (2000).
22. M. G. Lu, M. J. Shim, and S. W. Kim, *Polym. Int.*, **48**, 787 (1999).