

# 새로운 반도체 Packaging용 Ethoxysilyl Bisphenol A Type Epoxy Resin System의 경화특성 연구

김환건<sup>\*†</sup>

<sup>\*\*</sup> 서경대학교 나노융합공학과

## Cure Characteristics of Ethoxysilyl Bisphenol A Type Epoxy Resin Systems for Next Generation Semiconductor Packaging Materials

Whan Gun Kim<sup>\*†</sup>

<sup>\*†</sup> Department of Nano-Convergence Engineering, Seokyeong University

### ABSTRACT

The cure properties of ethoxysilyl bisphenol A type epoxy resin (Ethoxysilyl-DGEBA) systems with different hardeners were investigated, comparing with DGEBA and Diallyl-DGEBA epoxy resin systems. The cure kinetics of these systems were analyzed by differential scanning calorimetry with an isothermal approach, and the kinetic parameters of all systems were reported in generalized kinetic equations with diffusion effects. The Ethoxysilyl-DGEBA epoxy resin system showed lower cure conversion rates than DGEBA and Diallyl-DGEBA epoxy resin systems. The conversion rates of these epoxy resin systems with DDM hardener are lower than those with HF-1M hardener. It can be considered that the optimum hardener for Ethoxysilyl-DGEBA epoxy resin system is Phenol Novolac type. These lower cure conversion rates in the Ethoxysilyl-DGEBA epoxy resin systems could be explained by the retardation of reaction molecule movements according to the formation of organic-inorganic hybrid network structure by epoxy and ethoxysilyl group in Ethoxysilyl-DGEBA epoxy resin system.

**Key Words** : Semiconductor, Packaging Materials, Epoxy, Cure Kinetics

### 1. 서 론

지금까지 무어의 법칙에 따라 반도체의 미세화가 발전해 온 것은 주지의 사실이다. 그러나 투자비의 급증 및 기술적 한계에 부딪혀 미세화는 한계에 도달하였지만, 반도체의 고집적화 및 고기능화의 개발 방향은 Fig. 1에서 보듯이 반도체 소자의 적층화 기술과 3차원 실장기술의 발전으로 구현되고 있다.[1,2] 이러한 TSV (Through Silicon Via) 공정기술 등의 발전으로 이에 대응하는 반도체 Packaging용 기판 및 Epoxy Resin 성형재료에 대한 성형성, 내열성 및 열팽창계수의 저감 등의 요구가 심화되고 있

다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 새로운 형태의 Epoxy Resin 개발 연구가 선행되어야 한다. 이를 위하여 최근 내열성 및 열팽창계수의 저감을 위하여 기존의 성형성 및 접착성이 우수한 Bisphenol A Type Epoxy Resin (Diglycidyl Ether of Bisphenol A, DGEBA)에 졸겔 반응이 가능한 Alkoxysilyl Group을 도입하여 무기 그물구조를 만들어 유기-무기 혼성화 Network을 구축하여, 차세대 반도체 Packaging재료에 대한 요구 특성을 만족하는 새로운 다양한 형태의 Epoxy Resin이 개발되었다.[3,4]

본 연구에서는 이러한 새로운 반도체 Packaging용 Epoxy Resin의 경화특성을 조사하기 위하여 Alkoxysilyl 기로서 Bisphenol Moiety의 Benzene Ring에 Ethoxysilyl 기를 도입한 Ethoxysilyl-DGEBA Resin의 경화특성을 조사하였다. 경화특

<sup>†</sup>E-mail: whgunkim@gmail.com

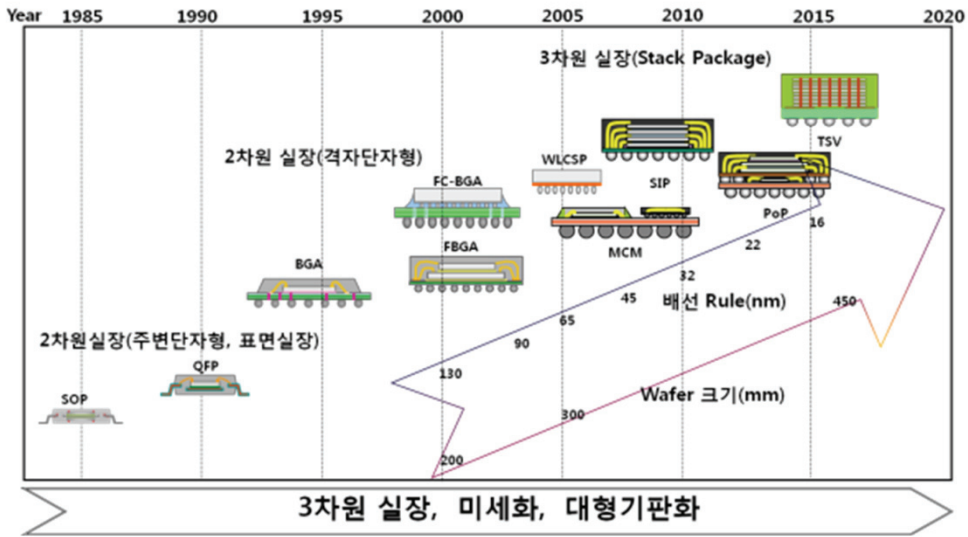


Fig. 1. Semiconductor Device Package Trend.

성을 분석하기 위하여, 경화제로서 Phenol Novolac 및 DDM (Diamino Diphenyl Methane) 경화제를 사용한 Epoxy Resin System을 제조하여 연구를 수행하였다. 또한 기존의 Epoxy Resin System과의 비교분석을 위하여 DGEBA Epoxy Resin 및 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 Ethoxysilyl-DGEBA Epoxy Resin의 합성 전구체인 Diallyl-DGEBA Epoxy Resin의 경화특성과도 비교하였다.

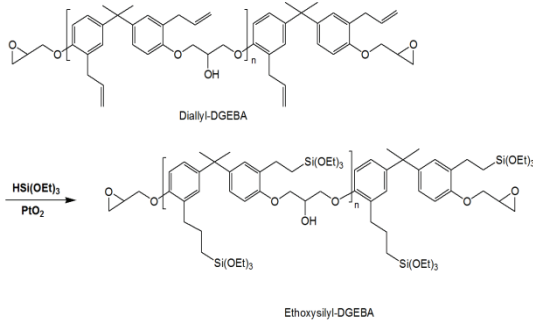


Fig. 2. Synthetic reaction process of Ethoxysilyl DGEBA.

## 2. 실험

### 2.1 시료

본 과제에서 사용한 Epoxy Resin은 한국생산기술연구원 에서 제공한 Epoxy Resin을 사용하였으며, 경화제로는 Phenol Novolac Type 경화제인 HF-1M(Meiwa Kasei Co.)과

Amine Type 경화제인 DDM (Aldrich Chemical Co.)을 사용하였다.[5,6] 경화 촉매로는 TPP (Triphenylphosphine, Aldrich Chemical Co.) 을 사용하였다. 실험에 사용된 Epoxy Resin, 경화제 및 촉매의 구조와 특성을 Table 1에 나타내었다.

### 2.2 시료제조

본 경화특성 연구에 사용한 Epoxy Resin System의 조성은 Epoxy Resin과 경화제의 당량이 1:1 이 되도록 하였고, HF-1M 경화제의 사용시에만 경화촉매 TPP를 1phr (per hundred resin) 첨가하였다. 각 조성물을 잘 혼련하기 위하여 MEK (Methyl Ethyl Ketone) 용매에 넣고 Thinky Mixer (Thinky Co.)를 사용하여 상온에서 혼련하여 균일한 용액을 얻었다. 이렇게 얻은 균일한 용액을 상온에서 진공 건조하여 완전히 MEK용매를 제거한 후, 경화반응이 이루어지지 않도록 냉동 보관하였다.

### 2.3 경화특성평가

제조된 시료의 경화 특성을 평가하기 위하여 시료를 가루로 분쇄 후, 적당량을 DSC 알루미늄 팬에 담고, 각 경화물을 질소 조건 하에서 TA Instruments 사의 시차주사열량계(DSC, TA-2000)를 이용하여 측정하였다. 질소 조건 하에서 0℃에서 250℃까지 5℃/min의 속도로 승온한 동적 가열실험을 통해 총엔탈피 변화를 측정하였고, 각각 120℃, 130℃, 140℃, 150℃의 일정 온도 조건에서 반응 등은 실험을 통해 반응진척도에 따른 반응속도를 측정하였다.[7,8]

**Table 1.** Chemicals Used in This Study

Grade Name	Structure	Remarks
DGEBA		<sup>1</sup> EEW = 288
Diallyl-DGEBA		<sup>1</sup> EEW = 310
Ethoxysilyl-l-DGEBA		<sup>1</sup> EEW = 415
HF-1M		<sup>2</sup> HEW = 107
DDM		<sup>3</sup> AEW = 99
TPP		

<sup>1</sup>EEW : Epoxy Equivalent Weight(g/equiv.)

<sup>2</sup>HEW : Hydroxy Equivalent Weight(g/equiv.)

<sup>3</sup>AEW :Amine Equivalent Weight(g/equiv.)

### 3. 결과 및 고찰

Ethoxysilyl Epoxy Resin System의 경화특성을 조사하기 위하여 Ethoxysilyl Epoxy Resin의 기본 골격구조를 갖는 기존의 DGEBA Epoxy Resin 및 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 Ethoxysilyl Epoxy Resin의 합성 전구체인 Diallyl Epoxy Resin System의 경화특성과 비교하였다. Fig. 3에 HF-1M을 경화제로 사용한 상기 3종의 Epoxy Resin System 조성물의 반응진척도( $\alpha$ )에 따른 등온반응속도를, Fig. 4에는 DDM을 경화제로 사용한 이 3종의 Epoxy Resin System 조성물의 반응진척도( $\alpha$ )에 따른 등온반응속도를 온도 별로 나타내었다.

일반적으로 열경화 수지의 경화특성은 Autocatalytic 경화반응 Mechanism과 n차 경화반응 Mechanism으로 구분할 수 있다. Autocatalytic 경화반응 Mechanism을 따르는 열경화 수지 시스템의 경우, 등온반응속도가 다음 식 (1)을 따르며, n차 반응 Mechanism을 따르는 열경화 수지 시스템은 식 (2)를 따른다.[9]

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2\alpha^m)(1-\alpha)^n \quad (1)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_1(1-\alpha)^n \quad (2)$$

여기서 t는 시간, m, n은 시스템의 반응차수,  $k_1, k_2$ 는 시스템의 속도상수이다. 본 연구에서는 반응진척도 전구간에 서 더 정확한 경화반응속도를 구현하기 위하여 식 (3), 식 (4)와 같은 확산보정인자를 도입하여 일반화한 Autocatalytic 경화반응식과 n차 경화반응식을 사용하였다.[10,11]

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2\alpha^m)(1-\alpha)^n \frac{1}{1 + \exp[C(\alpha - \alpha_c)]} \quad (3)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_1(1-\alpha)^n \frac{1}{1 + \exp[C(\alpha - \alpha_c)]} \quad (4)$$

여기서 C는 시스템 상수 이고,  $\alpha_c$ 는 임계반응진척도이다.

Fig. 3에서 보듯이 HF-1M을 경화제로 사용한 Epoxy Resin System 조성물의 경우, 모든 Epoxy Resin System에서의 경화반응은 사용된 Epoxy Resin의 종류에 관계없이 Autocatalytic 경화반응속도 Mechanism 통해 이루어 짐을 알 수 있다. 반응진척도에 따른 반응속도는 DGEBA Epoxy Resin System, Diallyl-DGEBA Epoxy Resin System, Ethoxysilyl-DGEBA Epoxy Resin System 순으로 감소함을 알 수 있다. 이는 경화 반응을 할 수 있는 Functional Group이 증가함에 따라 경화 Network 구조의 형성이 증가되고, 이에 따른 분자의 반응속도저감으로 설명할 수 있다. 특히 Epoxy Resin과 경화제 간의 유기 경화 Network 구조의 형성뿐만 아니라 Ethoxysilyl Group 간의 무기 경화 Network 구조의 형성이 이루어지는 Ethoxysilyl-DGEBA Epoxy의 경화반응 속도가 제일 느린 것으로 사료된다.

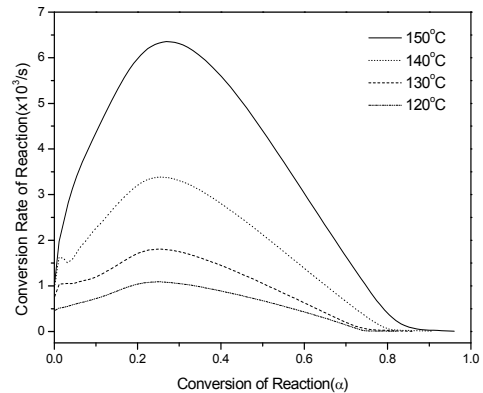
Fig. 4에는 DDM을 경화제로 사용한 Epoxy Resin System의 경화반응속도를 나타내었다. 일반적으로, Epoxy Resin System에서의 n차 반응과 Autocatalytic 경화반응은 Epoxy Resin의 종류보다 경화제의 종류에 의존하는 것으로 보고되고 있다.[12] 본 연구에서도 보여준 바와 같이, HF-1M과 같은 Phenol Novolac 경화제를 사용하면 대부분의 Epoxy Resin System에서는 Autocatalytic 경화특성을 보여주고 있으며, DDM과 같은 경화제의 경우 주로 n차 경화 Mechanism을 따른다. Fig. 4에서 보듯이 Epoxy Group만을 가진 DGEBA는 전형적인 n 차 경화반응 Mechanism을 보여주고 있으나 다른 Epoxy Resin System들은 Autocatalytic 경화반응 Mechanism을 보여주고 있다. 이는 경화반응을 진행할 수 있는 Functional Group의 수가 증가함에 따라 반응이 n차에서

Autocatalytic 반응 Mechanism으로 변환되는 것으로 판단된다. 이러한 경향은 Diallyl-DGEBA Epoxy System과 같이 반응이 비교적 빠른 System에서 명확히 나타나고 있으나, Bulky한 Ethoxysilyl Group이 포함되어 반응속도가 매우 느린 Ethoxysilyl-DGEBA Epoxy System에서는 이러한 Autocatalytic 특성이 미약하게 나타남을 알 수 있다.

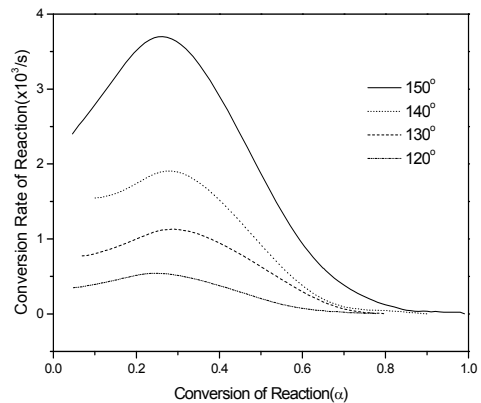
식 (3)과 식 (4)를 사용하여 각 Epoxy Resin System의 반응속도 상수를 구하였다.[15,16] Fig 5에는 경화제를 HF-1M로 사용한 Epoxy Resin System들에 대하여 식 (3)의 반응속도 식을 이용하여 계산된 이론 값과 반응진척도의 실험값을 온도 별로 비교하여 나타내었고, Fig. 6에는 경화제를 DDM으로 사용한 Epoxy Resin System들에 대하여, n 차 경화 반응 Mechanism을 나타내는 DGEBA Epoxy Resin System은 식 (4)의 반응속도 식을, 다른 2종의 Autocatalytic 경화반응 특성을 나타내는 Epoxy Resin System은 식 (3)의 반응속도 식을 이용하여 계산된 이론 값과 반응진척도의 실험값을 온도 별로 비교하여 나타내었다. 그림에서 보듯이 모든 반응 온도 구간에서 실험 치와 이론 치가 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 경화제로 HF-1M을 사용한 Epoxy Resin System들에 대해 이렇게 계산된 반응속도 Parameter들을 Table 2에, 경화제로 DDM을 사용한 Epoxy Resin System들의 반응속도 Parameter는 Table 3에 정리하였다.

Fig. 3에서 보여준 Ethoxysilyl-DGEBA Epoxy System의 반응속도가 제일 느린 이유를 Table 2에 제시된 속도상수의 온도의존성 Data로 분석하여 보면 측정된 반응속도상수  $k_1$ 의 경우 다른 Epoxy Resin System에 비해 분자충돌 진동수 인자의 값이 적고,  $k_2$ 의 경우에는 활성화 에너지가 높아 전체적으로 다른 Epoxy Resin System에 비해 낮은 경화반응속도를 보여주고 있다. 이는 bulky한 Ethoxysilyl Group 간의 경화 Network 구조 형성에 따라 분자간의 충돌횟수가 감소하고 활성화 에너지가 증가하는 것으로 생각할 수 있다. Diallyl-DGEBA Epoxy의 경우는 DGEBA Epoxy에 비해  $k_1$ 의 경우 반응충돌빈도수는 증가하나 활성화 에너지가 높고,  $k_2$ 의 경우에는 충돌빈도수는 적으나 활성화 에너지는 감소하는 것을 보여주고 있다. 그러나 반응차수  $m, n$ 이 DGEBA Epoxy System에 비해 매우 커서 Diallyl-DGEBA Epoxy System이 DGEBA Epoxy System에 비해 반응속도가 낮은 것은 반응차수의 요인에 지배된다고 볼 수 있다. 이는 이중 결합이 포함된 Allyl Group이 다른 Functional Group과 복잡한 경로의 반응들이 진행됨으로써 반응차수가 증가하여 전체적으로 반응속도가 감소하는 것으로 판단된다.

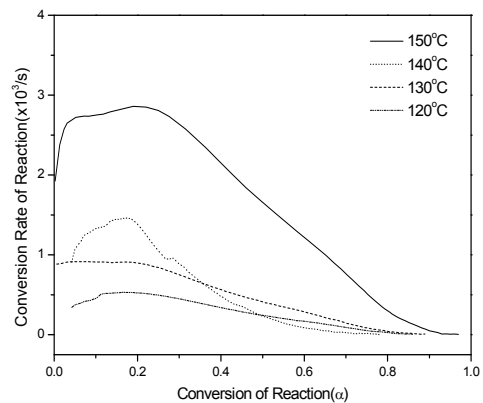
DDM을 경화제로 사용한 Epoxy Resin System의 경우에서도, DGEBA Epoxy Resin System의 반응속도가 다른 Epoxy Resin System보다 빠르며, Bulky한 Ethoxysilyl Group을 갖는 Ethoxysilyl-DGEBA Epoxy System이 Fig. 4에서 보듯이, 반응속



(a) DGEBA/HF-1M

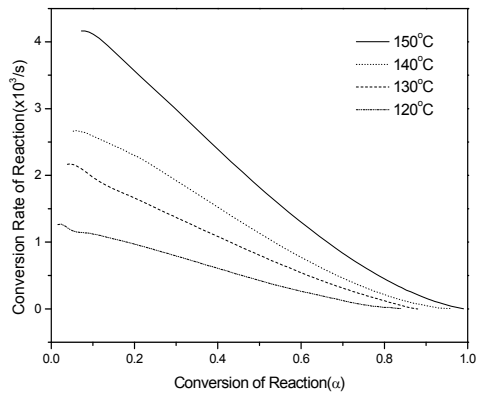


(b) Diallyl-DGEBA/HF-1M

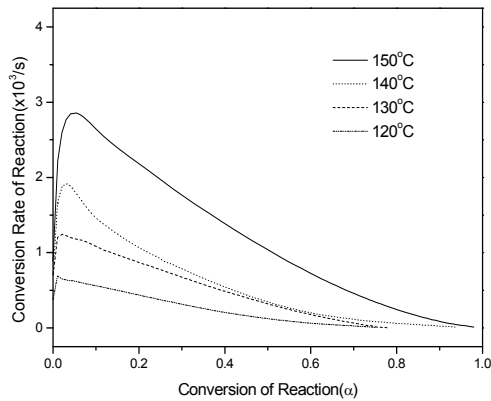


(c) Ethoxysilyl-DGEBA/HF-1M

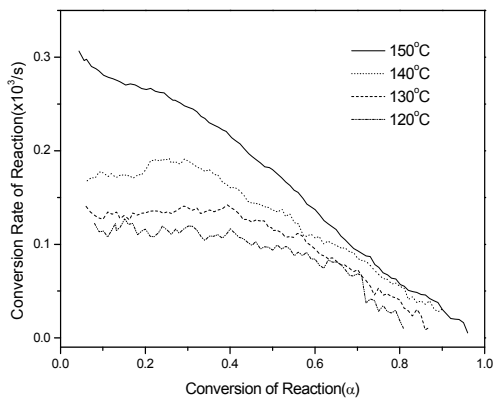
Fig. 3. Isothermal conversion rate as a function of the conversion of the epoxy resin systems with HF-1M as a hardener: (a) DGEBA (b) Diallyl-DGEBA (c) Ethoxysilyl-DGEBA.



(a) DGEBA/DDM

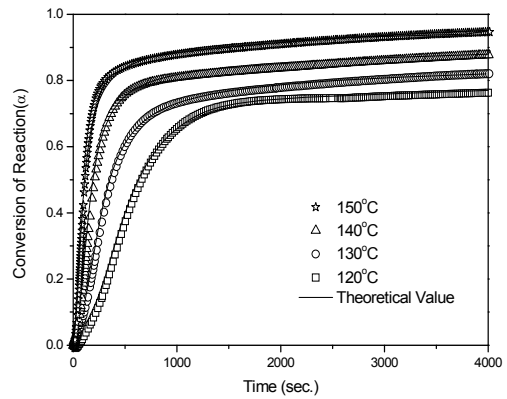


(b) Diallyl-DGEBA/DDM

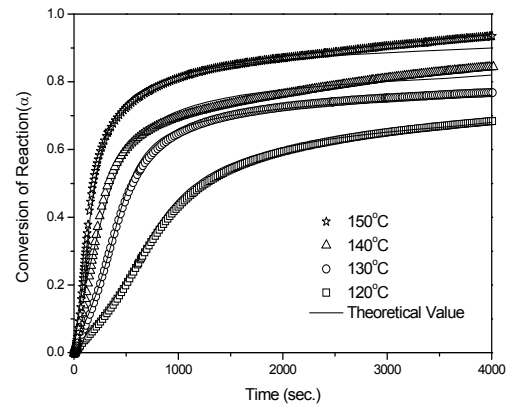


(c) Ethoxysilyl-DGEBA/DDM

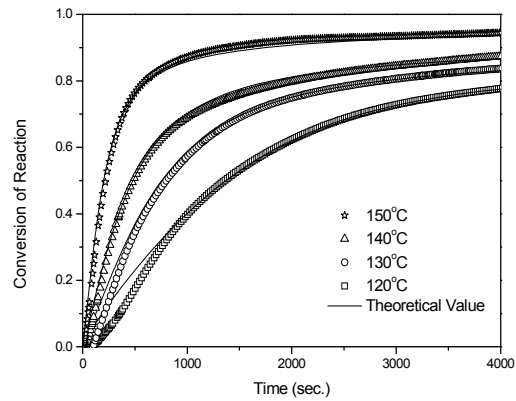
**Fig. 4.** Isothermal conversion rate as a function of the conversion of the epoxy resin systems with DDM as a hardener: (a) DGEBA (b) Diallyl-DGEBA (c) Ethoxysilyl-DGEBA.



(a) DGEBA/HF-1M

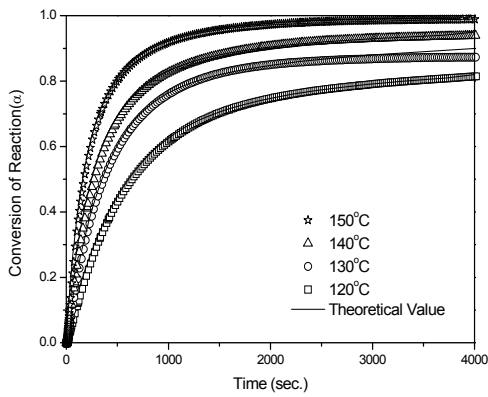


(b) Diallyl-DGEBA/HF-1

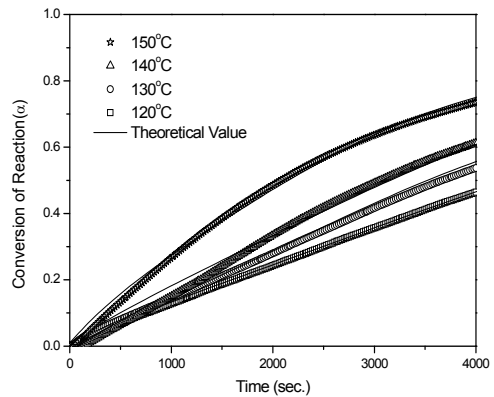


(c) Ethoxysilyl-DGEBA/HF-1M

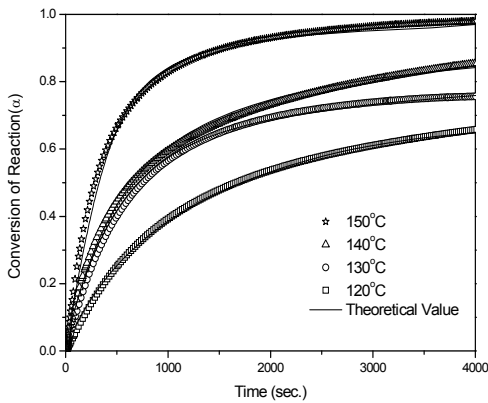
**Fig. 5.** Comparisons between the experimental values of α and theoretical values obtained from the generalized kinetic model for the epoxy resin systems with HF-1M as a hardener: (a)DGEBA (b)Diallyl-DGEBA (c)Ethoxysilyl-DGEBA.



(a) DGEBA-DDM



(c) Ethoxysilyl-DGEBA/DDM



(b) Dially DGEBA/DDM

**Fig. 6.** Comparisons between the experimental values of  $\alpha$  and theoretical values obtained from the generalized kinetic model for the epoxy resin systems with DDM as a hardener: (a) DGEBA (b) Diallyl-DGEBA (c) Ethoxysilyl-DGEBA.

도가 제일 느린 것으로 나타난다. Table 3에 정리한 반응속도 상수 Data로 Ethoxysilyl-DGEBA Epoxy System의 경화특성을 동일한 Autocatalytic 경화 Mechanism을 보여주는 Diallyl-DGEBA Epoxy System과 비교하여 보면, Ethoxysilyl-DGEBA Epoxy System의 충돌빈도수가 매우 낮아 반응속도가 저하되는 것으로 사료된다.

**Table 2.** Kinetic parameters of the epoxy resin systems with HF-1M as a hardener

Epoxy Resin	T(°C)	$k_1(s^{-1})$	$k_2(s^{-1})$	m	n	C	$\alpha_c$	Temperature dependency of the rate constant	m (Avg.)	n (Avg.)
DGEBA	120	$0.40 \times 10^{-3}$	$24.0 \times 10^{-3}$	1.62	3.65	64.07	0.73	$k_1 = 5.78 \times 10^4 \exp(-6.08 \times 10^4/RT)$	1.50	3.49
	130	$0.97 \times 10^{-3}$	$54.6 \times 10^{-3}$	1.77	4.02	21.14	0.77			
	140	$1.31 \times 10^{-3}$	$55.5 \times 10^{-3}$	1.45	3.33	20.58	0.81	$k_2 = 2.45 \times 10^3 \exp(-3.69 \times 10^4/RT)$		
	150	$1.55 \times 10^{-3}$	$57.5 \times 10^{-3}$	1.13	2.95	17.92	0.94			
Diallyl-DGEBA	120	$0.43 \times 10^{-3}$	$5.72 \times 10^{-3}$	2.37	5.35	11.80	0.63	$k_1 = 2.90 \times 10^8 \exp(-8.87 \times 10^4/RT)$	2.45	4.34
	130	$0.88 \times 10^{-3}$	$8.59 \times 10^{-3}$	2.51	4.20	17.83	0.63			
	140	$2.48 \times 10^{-3}$	$9.55 \times 10^{-3}$	2.81	4.20	13.85	0.74	$k_2 = 1.15 \times 10^2 \exp(-2.45 \times 10^4/RT)$		
	150	$2.56 \times 10^{-3}$	$9.92 \times 10^{-3}$	2.13	3.61	6.76	0.88			
Ethoxy Silyl-DGEBA	120	$0.54 \times 10^{-3}$	$2.37 \times 10^{-3}$	1.76	2.39	23.15	0.79	$k_1 = 1.76 \times 10^4 \exp(-5.70 \times 10^4/RT)$	1.01	2.29
	130	$0.63 \times 10^{-3}$	$2.78 \times 10^{-3}$	0.91	2.51	18.26	0.81			
	140	$0.79 \times 10^{-3}$	$3.60 \times 10^{-3}$	0.65	2.26	8.12	0.83	$k_2 = 1.72 \times 10^4 \exp(-5.20 \times 10^4/RT)$		
	150	$2.01 \times 10^{-3}$	$7.71 \times 10^{-3}$	0.71	2.00	15.18	0.87			



**Table 3.** Kinetic parameters of the epoxy resin systems with DDM as a hardener

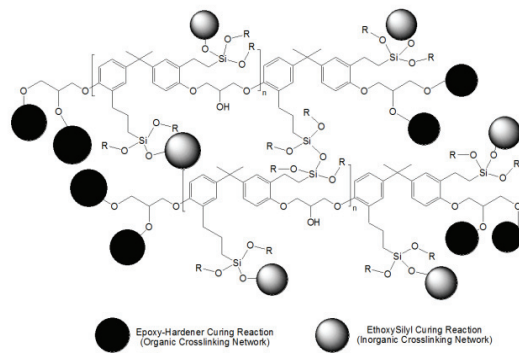
Epoxy Resin	T(°C)	k <sub>1</sub> (s <sup>-1</sup> )	k <sub>2</sub> (s <sup>-1</sup> )	m	n	C	α <sub>c</sub>	Temperature dependency of the rate constant	m (Avg.)	n (Avg.)
DGEBA	120	1.44x10 <sup>-3</sup>	-	-	1.67	14.49	0.73	k <sub>1</sub> = 4.87x10 <sup>4</sup> exp(-5.64x10 <sup>4</sup> )/RT	-	1.63
	130	2.70x10 <sup>-3</sup>	-	-	1.75	34.77	0.83			
	140	3.46x10 <sup>-3</sup>	-	-	1.61	15.91	0.90			
	150	5.15x10 <sup>-3</sup>	-	-	1.50	153.68	0.98			
Diallyl-DGEBA	120	0.74x10 <sup>-3</sup>	0.85x10 <sup>-3</sup>	2.86	2.78	7.62	0.65	k <sub>1</sub> = 7.73x10 <sup>4</sup> exp(-3.72x10 <sup>4</sup> )/RT  k <sub>2</sub> = 5.13x10 <sup>6</sup> exp(-7.33x10 <sup>4</sup> )/RT	2.12	2.25
	130	1.47x10 <sup>-3</sup>	2.03x10 <sup>-3</sup>	2.64	2.25	11.99	0.65			
	140	1.50x10 <sup>-3</sup>	2.17x10 <sup>-3</sup>	1.66	2.24	4.21	0.89			
	150	1.79x10 <sup>-3</sup>	4.87x10 <sup>-3</sup>	1.30	1.73	10.35	0.96			
Ethoxy Silyl-DGEBA	120	0.14x10 <sup>-3</sup>	1.60x10 <sup>-3</sup>	2.21	2.28	472.84	0.81	k <sub>1</sub> = 6.25x10 <sup>1</sup> exp(-4.29x10 <sup>4</sup> )/RT  k <sub>2</sub> = 1.47x10 <sup>3</sup> exp(-4.51x10 <sup>4</sup> )/RT	2.36	2.22
	130	0.15x10 <sup>-3</sup>	1.93x10 <sup>-3</sup>	1.90	2.41	132.26	0.88			
	140	0.20x10 <sup>-3</sup>	2.56x10 <sup>-3</sup>	2.34	1.87	35.46	0.94			
	150	0.36x10 <sup>-3</sup>	4.35x10 <sup>-3</sup>	2.98	2.31	80.29	0.98			

### 4. 결 론

새로운 차세대 Packaging소재로서 저열팽창화 및 내열성이 우수한 Ethoxysilyl기를 갖는 신규 Epoxy Resin System의 경화특성을 조사하였다. 본 수지의 경화특성을 기존의 DGEBA Epoxy Resin 및 Diallyl DGEBA Epoxy Resin과 비교분석하기 위하여 대표적으로 많이 사용되는 Phenol Novolac 및 DDM경화제를 사용한 Epoxy Resin System을 제조하여 열분석 실험을 통하여 경화반응속도를 비교 분석하였다. 경화 반응속도 면에서 Ethoxysilyl DEGEBA Epoxy Resin System이 두 Epoxy Resin System에 비해 느린 반응속도를 보여 주었다. 특히 경화제로 DDM을 사용한 Ethoxysilyl Epoxy Resin System의 경화속도가 매우 느려 Ethoxysilyl Epoxy Resin System의 경화제로는 Amine Type 보다는 Phenol Novolac Type의 경화제가 적합 것으로 평가된다. 이러한 반응속도가 느린 이유로 반응속도 실험을 통하여 얻은 반응속도 상수 Data로 비교한 결과 Fig. 7에 나타난 바와 같이 Epoxy Group 간의 유기 Network 형성뿐만아니라 Bulky 한 Ethoxysilyl 기의 졸-겔 반응에 의한 무기 Network 형성에 따른 반응분자간의 충돌빈도수가 낮아짐에 기인하는 것으로 판단된다.

이렇게 Ethoxysilyl 기를 도입함으로써 유기-무기 혼성화 경화 Network구조의 형성이 가능하여 저열팽창화 및 Tg-less

Epoxy Molding Compound 와 같은 차세대 반도체용 Epoxy 수지 성형재료의 개발에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.



**Fig. 7.** The Formation of Organic-Inorganic Hybrid Network Structure.

### 감사의 글

본 연구는 2017학년도 서경대학교 교내연구비 지원에 의하여 이루어졌습니다. 또한 본 연구를 위하여 시료제공 및 여러 도움을 주신 한국생산기술연구원 전현에 박사님께도 감사의 말씀을 드립니다.

## 참고문헌

1. Tomikawa, M., "Semiconductor Packaging Technical Annual Report 2014", pp. 111-120, Nikkei BP Co., Tokyo, Japan.
2. Nakajima, H., "Semiconductor Packaging Technical Annual Report 2014", pp. 9-22, Nikkei BP Co., Tokyo, Japan.
3. Chun, H. and et al., Korea Patent 10-1252063 (Registered Patent).
4. Kim, W.G., and Chun, H., Molecular Crystals and Liquid Crystals, Vol. 636, pp. 107-116, 2016.
5. Chun, H. and et al., Korea Patent 10-2014-0105162 (Open Patent).
6. Kim, W.G., and et al., Korea Patent 10-2012-0103042 (Open Patent).
7. Kim, W.G., and Chun, H., Molecular Crystals and Liquid Crystals, Vol. 579, pp. 39-49, 2013.
8. Kim, W.G., and Lee, J.Y., Polymer, Vol.43, pp. 5713-5722, 2002.
9. Prime, R.B., "Thermal Characteristic of Polymer Materials", Academic Press Inc., New York, USA. 1981.
10. Han, S., Yoon, H.G., Suh, G.S., Kim, W.G., and Moon, T.J., J. Polymer. Science: Part A:Polymer. Chemistry, Vol. 37, pp. 713-720, 1999.
11. Ryu, J.H., Choi, K.S., and W.G. Kim, J. Applied Polymer Science, Vol. 96, pp. 2287-2299, 2005.
12. Kim, W.G., and Lee, J.Y., J. Applied Polymer Science, Vol. 86, pp. 1942-1952, 2002.

---

접수일: 2017년 5월 1일, 심사일: 2017년 6월 19일,  
 게재확정일: 2017년 6월 19일