

나프탈렌 변형 양이온 개시제가 에폭시 열경화성 수지의 중합 안정성 및 열전도도에 미치는 영향

우예원* · 주연하* · 홍나예* · 고문주*[†]

Effects of Naphthalene-Modified Cationic Initiators on the Polymerization Stability and Thermal Conductivity of Epoxy Thermosets

Yewon Woo*, Yeonha Ju*, Naye Hong*, Munju Goh*[†]

ABSTRACT: This study presents a novel strategy for high-performance thermal management via naphthalene-modified cationic initiators with adjustable counter-anions. By extending curing latency, these initiators enable efficient formation of highly ordered, dense networks in both conventional and liquid crystalline (LC) epoxies. The prolonged active window grants LC mesogens sufficient time for self-organization during crosslinking, minimizing phonon scattering. DSC profiles confirmed well-regulated polymerization kinetics via a broadened exothermic peak width and uniform heat release. XRD verified that characteristic π - π stacking was preserved after full curing, indicating a well-maintained lamellar mesophase order. Consequently, the unfilled LC epoxy network achieved a high intrinsic thermal conductivity of $0.86 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Furthermore, incorporating 85 wt% hexagonal boron nitride (*h*-BN) platelet fillers established efficient percolation pathways, raising the composite thermal conductivity to $25.08 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. These results demonstrate that regulating initiator chemistry and curing kinetics provides a straightforward platform for fabricating high-purity, thermally conductive, and recyclable epoxy thermosets.

초 록: 본 연구에서는 짝 음이온 조절이 가능한 나프탈렌 변형 양이온 개시제를 통해 열 관리 소재를 향상시키는 새로운 전략을 제시한다. 경화 잠재성을 연장함으로써 일반 및 액정(LC) 에폭시 시스템 모두에서 고차원의 조밀한 네트워크 구조를 효율적으로 형성한다. 연장된 반응 시간은 가교 중 액정 메조젠 단위들이 스스로 조직화하고 도메인을 성장시킬 충분한 시간을 제공하여 포논 산란을 최소화한다. DSC 분석 결과 넓어진 발열 피크 폭과 균일한 열 방출 특성이 나타나 중합 반응 속도론이 안정적으로 제어됨을 확인하였다. 나아가 XRD 분석을 통해 메조젠 방향족 코어 고유의 π - π 적층 구조가 경화 후에도 명확히 보존되어 라멜라 메조상 규칙성이 유지됨을 증명하였다. 그 결과 순수 액정 에폭시 네트워크는 $0.86 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 의 탁월한 고유 열전도도를 달성하였으며, 이는 순수 유기물 시스템 중 최고 수준이다. 또한 판상형 육방정계 질화붕소(*h*-BN) 충전제를 85 wt% 도입하여 효율적인 퍼콜레이션 경로를 구축함으로써 복합재의 열전도도를 $25.08 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 까지 끌어올렸다. 본 결과는 개시제 정밀 조절이 차세대 전자 패키징용 고순도, 고열전도성, 재가공 가능 에폭시를 제조하는 강력한 플랫폼이 될 수 있음을 보여준다.

Key Words: 양이온 개시제(Cationic initiators), 나프탈렌 변형 양이온(Naphthalene-modified cations), 열전도도(Thermal conductivity), 액정 에폭시(Liquid crystalline epoxy)

Received 25 June 2026, received in revised form 21 July 2026, accepted 27 July 2026

*Department of Chemical Engineering, Konkuk University, Seoul 05029, Republic of Korea

[†]Corresponding author (E-mail: mgoh@konkuk.ac.kr)

1. 서 론

현대전자 기기의 전력 밀도가 높아지고 집적화가 진행됨에 따라, 효율적인 열 방출을 보장하여 기기의 신뢰성과 성능을 유지하는 열관리 소재(Thermal management materials)의 역할이 매우 중요해졌다[1]. 그 중에서도 에폭시 시스템은 우수한 기계적 강도, 치수 안정성, 가공성 덕분에 에폭시 몰딩 컴파운드(EMC) 등에 널리 사용되고 있다[2]. 그러나 에폭시 수지 자체의 태생적으로 낮은 열전도도는 고열전도성 무기 충전제를 많이 첨가하더라도 복합재 전체의 열 방출 효율을 크게 제한하는 근본적인 원인이 된다[3,4]. 포논 수송은 수지 내부의 분자 구조, 화학 결합, 정렬 상태에 크게 의존하기 때문에, 고성능 전자 패키징을 위해서는 자체적인 열전도도를 갖춘 에폭시 시스템 개발이 시급하다[5].

이러한 문제를 해결하기 위해, 포논 수송을 촉진하고 고도로 정렬된 에폭시 네트워크를 형성하는 방법으로 양이온 중합(Cationic polymerization)이 주목받고 있다[6,7]. 경화과정에서 양이온 개시제는 신속하고 제어된 고리열림 중합을 촉진하여 메조겐 단량체나 세그먼트가 네트워크를 고화하기 전에 스스로 조직화 하고 정렬할 수 있도록 돕는다. 이 과정에서 π - π 적층 및 쌍극자 정렬과 같은 분자 간 상호작용을 통해 규칙적인 도메인이 형성되어 효율적인 열전도 경로를 제공하는 이방성 구조가 생성된다. 반면 기존 개시제로 제조된 에폭시 열경화성 수지의 열전도도는 액정 시스템에서도 통상 $0.48 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 수준에 불과하여, 메조겐 정렬을 통한 열 전달 잠재력이 아직 온전히 실현되지 못했음을 시사한다.

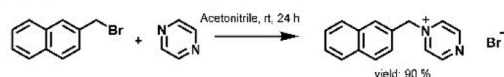
따라서 분자 정렬을 극대화하여 더 높은 열전도도를 달성할 수 있는 새로운 개시제 시스템 설계가 요구된다. 양이온 염 구조 내에 강직된 다환 방향족 골격을 도입하면 결정성과 열적안정성이 향상되어 경화과정에서 개시제의 성능을 높일 수 있다. 또한, 짝 음이온의 선택은 양이온 개시제 시스템의 이온 상호작용 세기와 반응성을 제어하는 데 결정적인 역할을 한다. 본 연구에서는 에폭시 경화 효율과 수명을 동시에 향상시키기 위해 짝 음이온 조절이 가능한 나프탈렌 변형 양이온 개시제의 합리적인 설계를 보고한다. 이 개시제는 연장된 작동 시간을 제공하여 액정 에폭시가 네트워크 형성 중에 고유의 정렬된 구조를 유지할 수 있도록 한다. 그 결과, 충전제가 없는 순수 유기물 수지 상태에서 $0.86 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 의 매우 높은 열전도도를 달성하였다.

2. 결과 및 고찰

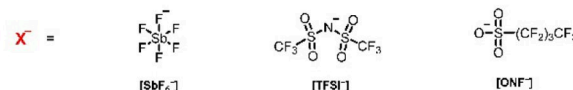
2.1 나프탈렌 변형 양이온 개시제의 합성 및 경화 메커니즘

열 잠재성 양이온 개시제를 개발하기 위해, 2-(브로모메틸)나프탈렌과 피라진 간의 친핵성 치환 반응을 통해 나프탈렌 변형 피라진 염을 합성하였으며, $^1\text{H-NMR}$ 분석을

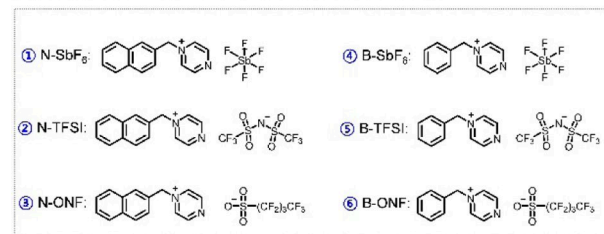
(a) Synthesis of the naphthalene-modified cationic initiator



(b) Anions for anion exchange



(c) Six different cationic initiator combinations



(d) Epoxy resins



Fig. 1. (a) Synthetic route of naphthalene-modified cationic initiator, (b) structures of counteranions, (c) six initiator combinations, and (d) chemical structures of DGEBA and IE epoxy resins

통해 구조를 확인하였다. 대조군으로는 벤질 브롬화물과 피라진을 사용하여 벤질 기반 개시제를 동일하게 합성하였다. 합성된 염의 할로겐화물 음이온은 전자 환경 및 반응성 제어를 위해 비친핵성 짝음이온인 SbF_6^- , TFSI^- , ONF^- 로 각각 교환하였으며, 질산은(AgNO_3) 침전 테스트를 통해 할로겐 이온의 완전한 제거를 확인하여 총 6종의 개시제 조합을 확보하였다. 모델 에폭시 수지로는 범용 비스페놀 A 디글리시딜 에테르(DGEBA)와 합성된 이민 기능화 액정 에폭시(IE)를 사용하였다. 개시제의 구체적인 합성 경로와 화학구조, 그리고 사용된 에폭시 단량체의 화학구조는 Fig. 1에 개략적으로 나타내었다.

합성된 개시제는 열 활성화 시 분해되어 나프탈렌 변형 탄소양 이온을 생성하며, 이것이 에폭시 고리를 공격하여 고리열림 중합을 개시한다. Fig. 2는 나프탈렌 변형 양이온 개시제에 의해 유도되는 에폭시 수지의 열 잠재성 고리열림 중합의 개시(Initiation), 성장(Propagation), 및 종결(Termination)반응 메커니즘을 보여준다. 부피가 크고 공액화된 나프탈렌 모이어티는 활성 양이온 종을 안정화하여 개시제의 작동 수명을 연장시킬 뿐만 아니라, 경화 과정 중 메조겐 단위의 정렬 유도를 도와 포논 산란을 최소화함으로써 최종 네트워크의 열전도도를 향상시키는 핵심 역할을 수행한다.

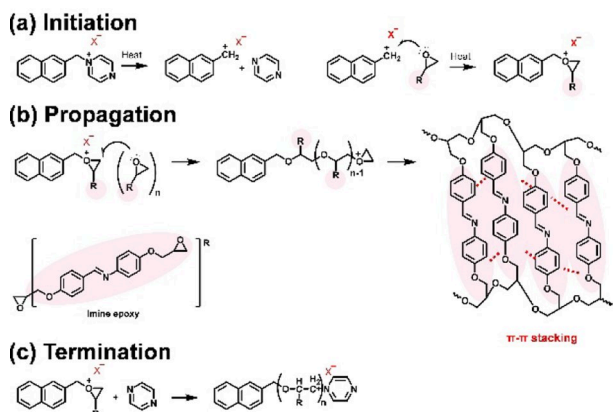


Fig. 2. Curing reaction mechanism (initiation, propagation with π - π stacking, and termination) of epoxy resin initiated by the naphthalene-modified cationic initiator

2.2 개시제 구조 및 짝 음이온이 가교밀도와 열전도도에 미치는 영향

DGEBA 에폭시 시스템 내 개시제별 경화 거동 및 가교 특성을 분석하기 위해 DSC 및 DMA 평가를 진행하였다. Fig. 3a-c의 DSC 열분석 프로파일에서 확인할 수 있듯이, N-SbF₆는 개시 온도 148°C와 피크 온도 190°C와 함께 268 J/g의 엔탈피를 나타내었으며, N-TFSI는 가장 높은 경화 온도 (175°C 개시, 240°C 피크)와 615 J/g의 엔탈피를 기록하였으며, N-ONF는 149°C에서 경화가 개시되어 204°C에서 피크에 도달하였으며, 가장 높은 경화 엔탈피(648 J/g)를 나타내었다. 나프탈렌 변형 개시제는 확장된 π -공액 구조 덕분에 활성 양이온을 효과적으로 안정화하여 벤질 기반 대조군보다 높은 중합 엔탈피를 나타내었으며, 이는 더 조밀한 네트워크 형성을 유도한다. Fig. 3d-f의 DMA 모듈러스 및 $\tan \delta$ 곡선에 나타난 바와 같이, 가교 네트워크의 유리전이 온도(T_g)는 N-SbF₆(149°C), N-TFSI(134°C), N-ONF(108°C) 순으로 높았는데, 이는 이온 반치름이 작을수록 이온 쌍 상호작용이 강해져 사슬 세그먼트의 이동성을 강하게 억제하기 때문이다.

나프탈렌 변형 시스템은 벤질 시스템에 비해 DSC 발열 피크의 반치폭(FWHM)이 넓게 관찰되었으며, 이는 양이온의 전하 분산 효과로 활성 종의 초기 비활성화가 억제되어 개시제 수명이 연장되었음을 뜻한다. 이에 따라 가교 밀도 역시 N-SbF₆(12.28 mmol·cm⁻³)가 B-SbF₆(9.47 mmol·cm⁻³)보다 높게 측정되어 개시제 안정성이 밀접한 가교 구조 형성에 기여함을 실증하였다. DGEBA 매트릭스 상에서 양이온 경화물은 범용 산무수물 경화제(MeTHPA) 시스템 대비 약 20% 향상된 열전도도를 보여 균일한 가교 반응의 이점을 증명하였다.

그러나 무정형(Amorphous) 구조를 가진 DGEBA 매트릭스 내부에서는 나프탈렌 변형 개시제와 벤질계 개시제 간

Epoxy resin: DGEBA

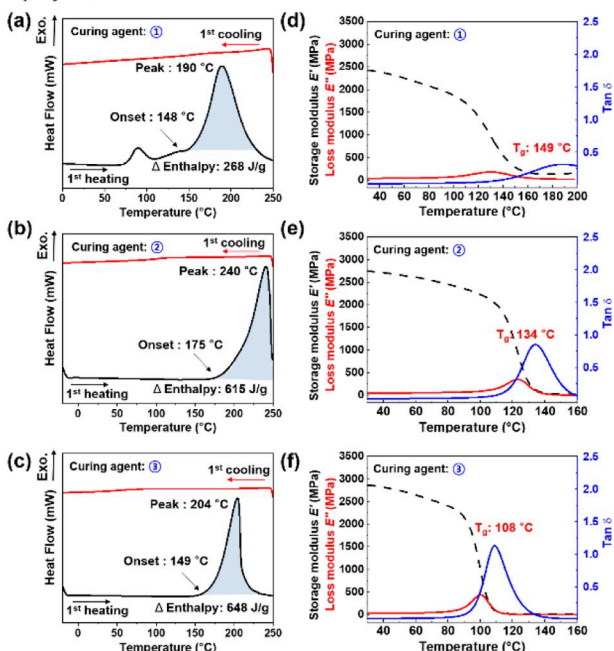


Fig. 3. (a-c) Non-isothermal DSC thermograms and (d-f) DMA curves of DGEBA cured with naphthalene-modified initiators (N-SbF₆, N-TFSI and N-ONF)

의 고유 열전도도 차이가 정량적으로 미미하게 관찰되었다. 이는 무작위 가교 구조 특성상 개시제 치환기에 따른 미시적인 배열 변화가 포논 수송에 미치는 영향이 제한적이기 때문이다. 따라서 방향성 포논 수송 메커니즘을 활성화하고, 개시제의 안정성 및 구조 제어 능력이 열전도도에 미치는 분자 수준의 차이를 보다 민감하게 비교·검증하고자 고도로 정렬된 메조상 형성이 가능한 액정 에폭시(IE)를 새로운 평가 플랫폼으로 도입하였다[8,9].

2.3 메조상 도메인 보존이 열전도도에 미치는 영향

정렬된 메조상 구조가 포논 수송에 미치는 영향을 고찰하기 위해 액정 에폭시(IE)를 도입하고 2단계 경화 프로토콜을 수립하였다. Fig. 4a의 편광 현미경(POM) 이미지 및 DSC에서 확인할 수 있듯이, IE 수지의 액정 메조상 범위는 110°C~125°C로 확인되었다. Fig. 4b-d의 DSC곡선 분석 결과, 개시제 종류와 관계없이 주된 경화 발열 피크가 액정 상전이 온도보다 높은 영역에서 발생하므로, 중합 시의 급격한 발열로 인한 액정 정렬 파괴를 방지하기 위해 1단계 선경화(120°C, 액정 메조상 영역) 후 2단계 후경화(190°C, 완전 경화)를 수행하였다.

선 경화 유지 시간에 따른 이방성 열전도도 변화를 관찰한 결과, Fig. 5a에 나타난 바와 같이 2시간 유지 시에는 0.50~0.58 Wm⁻¹K⁻¹ 수준에 머물렀다. 그러나 Fig. 5b와 같이 이를 24시간으로 연장할 경우 분자 재조직화 및 도메인 성장이 충분히 유도되어 N-TFSI 시스템에서 최대 0.86 Wm⁻¹K⁻¹의

Epoxy resin: IE

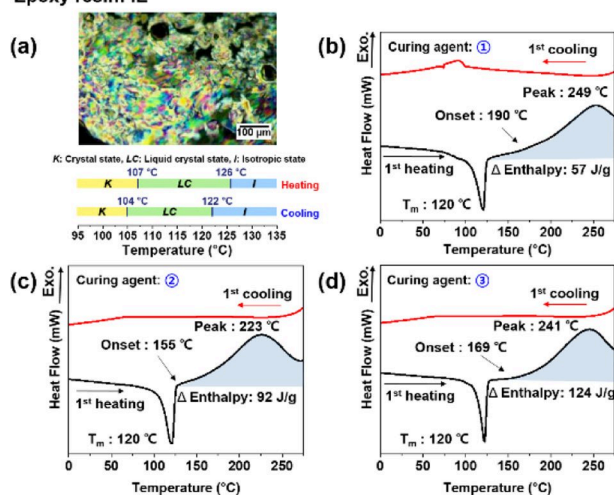


Fig. 4. (a) POM image and phase transition temperatures of IE resin, and (b–d) DSC curing curves of IE with each naphthalene-modified initiator

Epoxy resin: IE

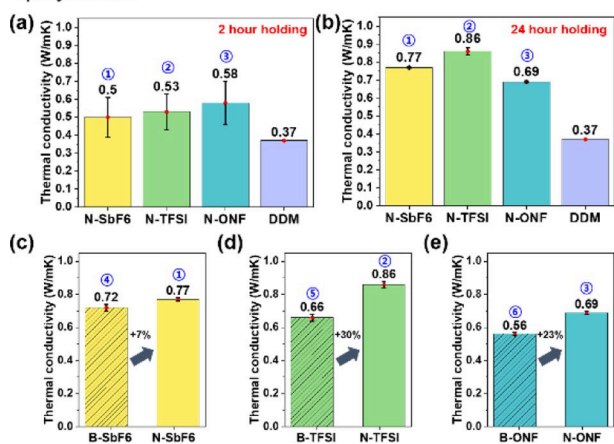


Fig. 5. In-plane thermal conductivity of cured IE networks: (a) after 2 h and (b) 24 h pre-curing at 120 °C, and (c–e) comparison between benzyl- and naphthalene-modified initiators

매우 높은 고유 열전도도가 구현되었다. 이는 일반 아민계 경화제(DDM) 적용 샘플($0.37 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) 대비 132% 향상된 수치이다. 또한 Fig. 5c–e의 대조군 비교 데이터에서 보듯이, 동일 조건 하에서 벤질계 개시제 시스템보다 나프탈렌계 시스템의 열전도도가 일관되게 높게 측정되어 개시제 구조 변형을 통한 메조상 보존 성능의 우수성을 재확인하였다.

2.4 메조상 정렬의 XRD 분석 및 열전도도와 상관관계

경화된 IE 네트워크의 미시 구조적 배열을 확인하고자 X선 회절(XRD) 분석을 실시하였다. 메조겐 아로마틱 코어 간의 규칙적인 정렬 지표인 $2\theta \approx 19^\circ$ 부근의 π - π 적층 피크(거리 $\approx 4.5 \text{ \AA}$)의 세기를 비교한 결과, Fig. 6a의 XRD 패턴에

Epoxy resin: IE

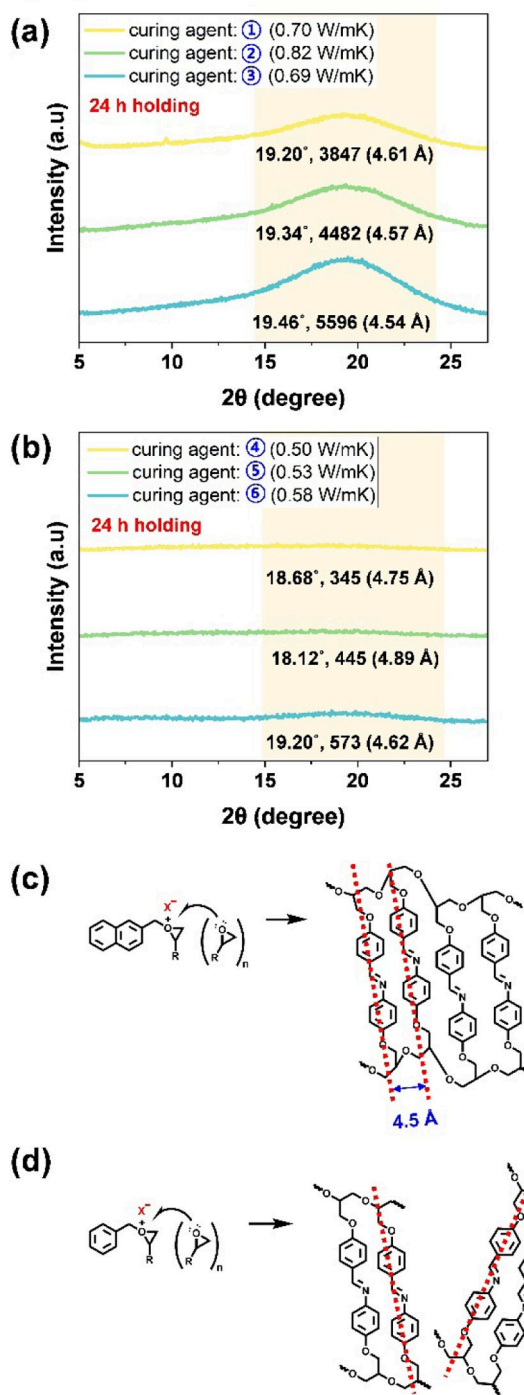


Fig. 6. (a, b) XRD patterns of IE cured with (a) naphthalene-modified and (b) benzyl-based initiators, and (c, d) schematic models of corresponding molecular alignments

서 볼 수 있듯이, 나프탈렌 변형 개시제 시스템은 매우 강하고 날카로운 회절 피크를 나타내어 잘 발달된 라멜라 배향 구조를 증명하였다. 반면, Fig. 6b의 벤질 기반 개시제 시스템은 해당 피크의 세기가 크게 저하되어 가교 중 메조상 배향이 불규칙하게 흩어졌음을 보였다. 이러한 회절 강도

의 거동 차이는 Fig. 6c-d의 모식도에 나타난 바와 같이 나프탈렌계 개시제가 유도한 조밀하고 규칙적인 π - π 적층 구조가 포논 전도 저항을 크게 감소시키는 포논 고속도로 역할을 수행했음을 미시적 구조 거동으로 뒷받침한다.

2.5 메조상 보존의 반응 속도론적 규명

고온의 발열 반응 속에서 나프탈렌 변형 개시제가 액정 구조를 보존할 수 있는 기작을 열역학적·속도론적으로 규명하기 위해, 다음과 같은 Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) 등전환 속도론 수식 (1)을 도입하여 분석을 수행하였다[10].

$$\ln\left(\frac{\beta}{T^2\alpha}\right) = \ln\frac{AE_a}{Rg(\alpha)} - \frac{E_a}{RT_\alpha} \quad (1)$$

여기서 β 는 승온 속도(Heating rate), T 는 특정 전환율(α)에서의 절대 온도, E_a 는 활성화 에너지, R 은 기체 상수, A 는 빈도 인자(Pre-exponential factor), 그리고 $g(\alpha)$ 는 전환율에 따른 적분 함수를 의미한다. Fig. 7a-d에 제시된 다양한 승온 속도별 경화도(α) 추이를 분석한 결과, N-TFSI 시스템은 B-TFSI 시스템에 비해 전환 속도가 전반적으로 완만하게 조절되는 특성을 보였다. 이에 따라 Fig. 7e,f의 KAS 플롯($\ln(\beta/T^2)$ vs $1/T$)의 선형 기울기로부터 계산된 Fig. 7g의 활성화 에너지(E_a) 프로파일을 보면, N-TFSI는 중합 전반에 걸쳐 대조군보다 높은 에너지 장벽을 유지하는 속도론적 지연 특성을 나타내었다.

이러한 특성은 Fig. 7h의 등온 DSC 열유속(Heat flow) 곡

Epoxy resin: IE

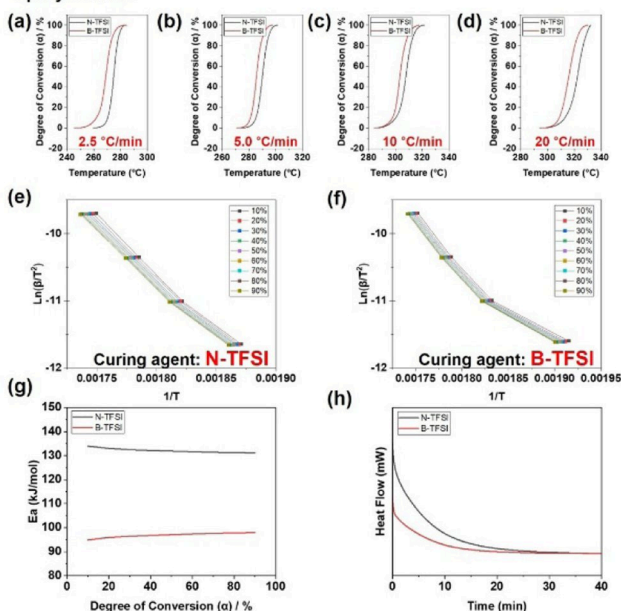


Fig. 7. Kinetic analysis of IE cured with N-TFSI and B-TFSI: (a-d) conversion (α) curves at different heating rates, (e, f) KAS plots, (g) activation energy (E_a) profiles, and (h) isothermal DSC curves at 220 °C

선에서 보듯이 급격하고 집중된 열역학적 요동을 억제하고 메조겐 단위들이 자가 조직화할 수 있는 충분한 반응 시간을 제공한다. 결과적으로 속도론적으로 제어된 반응 메커니즘이 최종 네트워크 내 액정 배향의 안정적 영구 고정을 이끌어냄을 확인하였다.

이러한 속도론적 특성은 Fig. 7h의 등온 DSC 열유속(Heat flow) 곡선에서 보듯이 급격하고 집중된 열역학적 요동을 억제하고 메조겐 단위들이 자가 조직화할 수 있는 충분한 반응 시간을 제공한다. 결과적으로 속도론적으로 제어된 반응 메커니즘이 최종 네트워크 내 액정 배향의 안정적 영구 고정을 이끌어냄을 확인하였다. 이와 같이 유지된 메조상 구조는 분자의 규칙적인 배열과 π - π stacking을 효과적으로 보존하여 포논 산란을 감소시키고 연속적인 열 전달 경로를 형성한다. 따라서 KAS 분석에서 확인된 높은 활성화 에너지와 완만한 중합 거동은 메조상 유지와 향상된 열 전도도를 뒷받침하는 속도론적 근거로 작용한다.

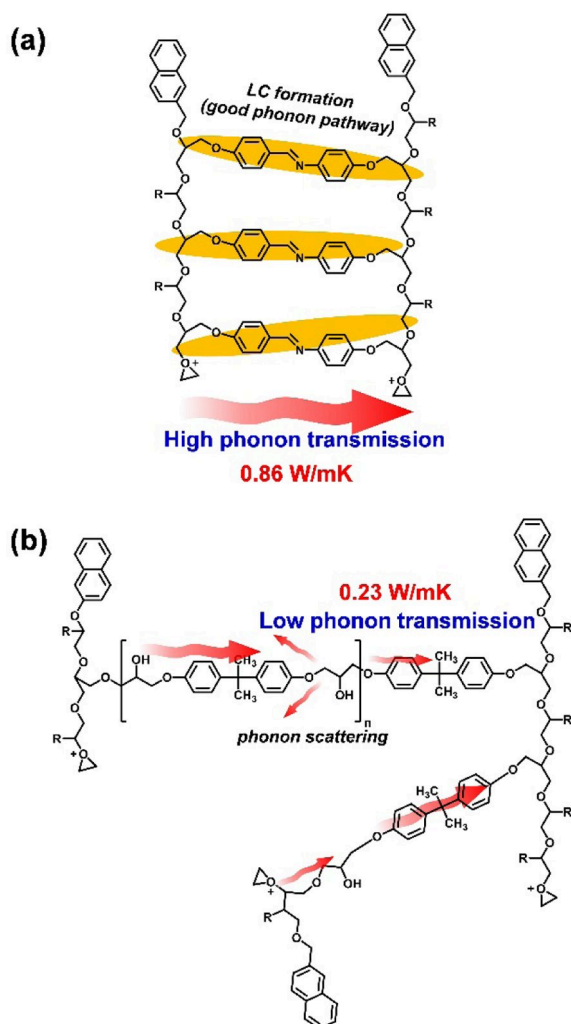


Fig. 8. Schematic illustrations of phonon transport pathways in (a) LC IE and (b) amorphous DGEBA networks

2.6 DGEBA와 액정 에폭시 네트워크의 포논 수송 메커니즘 비교

기존의 DGEBA 매트릭스와 액정 에폭시(LCE) 매트릭스의 기본적인 포논 전도 메커니즘 차이를 비교 분석하였다. 무정형 구조를 갖는 일반 DGEBA 네트워크는 무작위로 뒤엉킨 가교 세그먼트와 수많은 접합부로 인해 격자 진동인 포논 전도 시 격렬한 포논 산란(phonon scattering)이 발생하

여 intrinsic 열전도도가 $0.23 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 수준으로 억제된다. 반면, 나프탈렌 변형 개시제를 도입한 LCE 네트워크는 자가 정렬된 메조젠 도메인이 밀접한 π - π 적층 구조를 구축하여 진동의 감쇄와 산란을 최소화하는 고효율의 연속적 포논 전도 경로를 제공하므로 충전제가 없는 상태에서도 약 4배 높은 $0.86 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 의 높은 방열 거동을 달성하게 된다.

2.7 비트리머(Vitrimer) 형성을 통한 열전도도 및 구조적 진화

재가공이 가능한 방열 네트워크를 구현하기 위해 IE 수지 고유의 가역적 이민 결합(dynamic imine bonds)을 활용한 비트리머 시스템을 구축하였다. 경화된 수지를 미세 분쇄한 후 190°C , 30 MPa 조건에서 3시간 동안 핫프레스를 진행하여 세대별(1~5세대) 비트리머를 재생 제조하였다. 열전도도 평가 결과, 1세대 비트리머는 $0.72 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 의 우수한 수치를 유지했으나 세대 재가공 횟수가 반복될수록 점진적으로 감소하여 5세대에서는 $0.28 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 를 나타내었다.

특히 2세대에서 3세대로 넘어갈 때 약 45%의 급격한 성능 저하가 발생했는데, 이는 가공 누적에 따른 물리적 도메인 분쇄와 라멜라 규칙성 파괴에 기인함을 XRD 분석을 통해 확인하였다. 그러나 Fig. 9c의 FT-IR 분석 결과 이민 가역 결합 특유의 C=N 스트레칭 피크(1680 cm^{-1})는 변함없이 유지되어 공유결합 네트워크의 가역적 교환 메커니즘이 화학적으로 건재함을 입증하였으며, 최종 5세대조차 DGEBA 단량체 수치보다는 높은 열적 성능을 유지하였다[11].

2.8 충전제 강화 에폭시 복합재의 우수한 열전도도

가장 우수한 배향 제어 특성을 보인 N-TFSI 개시제에 중합 완결성을 더하기 위해 2E4MZ 이미다졸 촉진제를 혼합

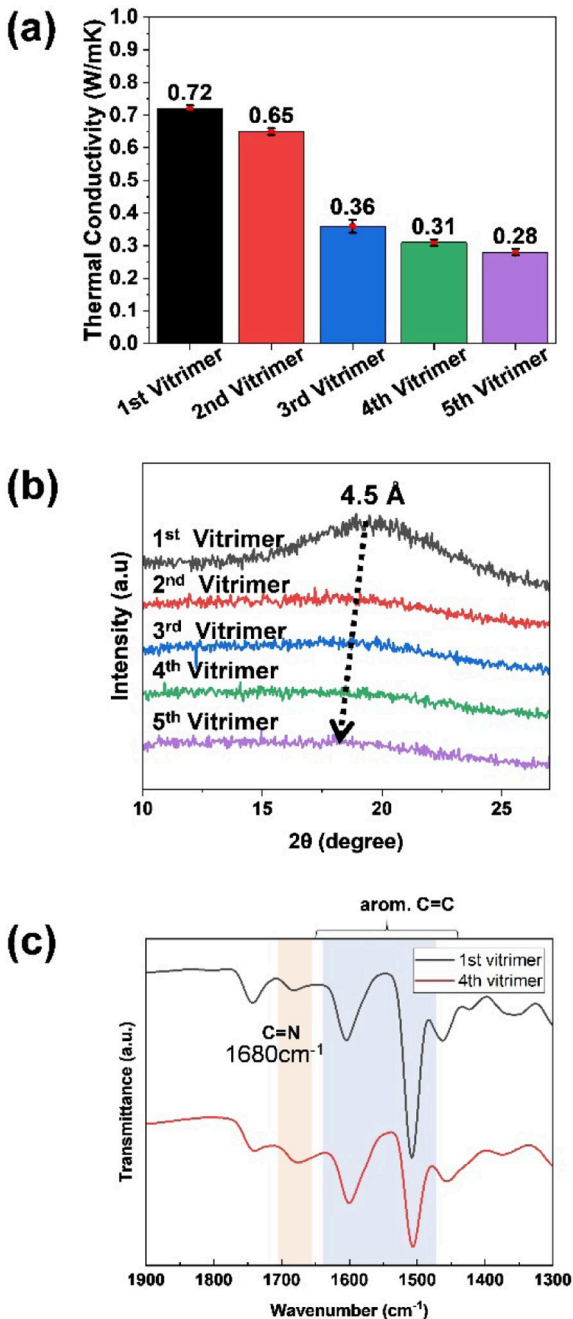


Fig. 9. Structural and thermal properties of IE/N-ONF vitrimers across five generations: (a) in-plane thermal conductivity, (b) XRD patterns, and (c) FT-IR spectra showing the dynamic imine (C=N) bonds

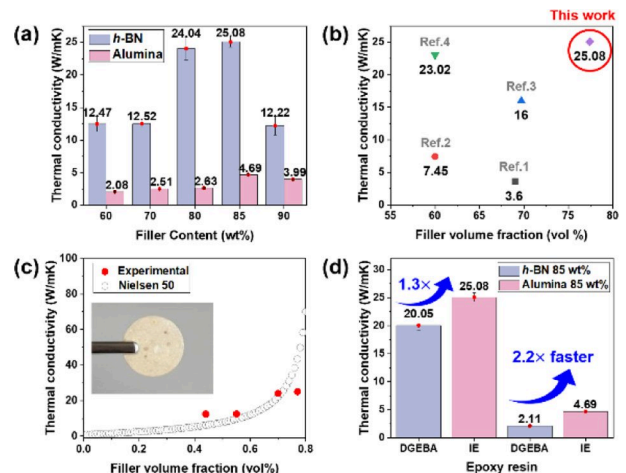


Fig. 10. (a) Thermal conductivity of IE composites with varying contents of h-BN and alumina, (b) comparison with reported literature values, (c) Lewis-Nielsen model fitting ($p=50$) for h-BN composites, and (d) matrix effect comparison at 85 wt% filler loading

한 뒤, 판상형 육방정계 질화붕소(*h*-BN)를 60~90 wt% 함량으로 무용제 건식 블렌딩하여 복합재를 조제하였다. Fig. 10a의 충전 함량별 열전도도 평가 결과에서 보듯이, 복합재의 열전도도는 충전 함량이 증가함에 따라 향상되어 85 wt% *h*-BN 조건에서 최고치인 $25.08 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 에 도달하였다. 이는 Fig. 10b에서 볼 수 있듯이, 기존 문헌들에 보고된 복합재의 최대 열전도도 범위($3.6\sim 23.02 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)를 명확히 경신한 독보적인 성과이다[3,11-13]. 단, 임계 한계 함량인 90 wt% 조사군에서는 과량 충전으로 인한 수지 함침 불량과 내부 기공 발생으로 인해 방열 성능이 대폭 감소하고 복합재의 취성이 극심해지는 거동을 확인하였다.

이러한 실험값들을 Lewis-Nielsen 모델 및 Agari-Uno 모델 예측 곡선과 비교 분석한 결과, 판상형 *h*-BN 데이터는 유효 중형비 $p=50$ 조건의 Lewis-Nielsen 형상 예측 모델과 정량적으로 정확히 부합하였다. 이는 나프탈렌 변형 개시제가 구축한 고정렬 액정 매트릭스가 내부 이방성 판상 충전제들의 물리적인 배향 정렬을 보조하여 밀접한 수송 채널을 형성했기 때문으로 판단된다. 반면 배향성이 결여된 구형 알루미나(Al_2O_3) 복합재는 동일 85 wt% 함량에서 $4.69 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 수준의 퍼콜레이션 한계를 보여, 나프탈렌 변형 개시제 기반 액정 매트릭스 제어 공정이 무기 충전 복합재 방열 극대화에 필수적인 전략임을 최종 규명하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 짝 음이온 조절이 가능한 나프탈렌 변형 양이온 개시제의 합리적 분자 설계를 통해 에폭시 경화 수명을 성공적으로 연장하였으며, 이를 기반으로 일반 및 액정(LC) 에폭시 시스템에서 고차원 규칙성 네트워크 구조를 효율적으로 형성하였다. 나프탈렌 치환기가 유발하는 확장된 π -공액 구조와 양이온 전하 분산 효과는 활성 중합종을 안정화하여 중합 속도를 제어하는 핵심 요인으로 작용하였다. 이러한 속도론적 제어 메커니즘은 경화 중 발생할 수 있는 국부적인 열역학적 요동을 억제하여 메조겐 단위들이 스스로 정렬할 수 있는 충분한 반응 시간을 제공하였고, 최종 네트워크 형성 과정에서도 액정 고유의 메조상 도메인 구조를 완벽하게 보존하는 결과를 이끌어내었다.

그 결과 충전제를 첨가하지 않은 순수 액정 에폭시(IE) 시스템에서 $0.86 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 의 탁월한 고유 열전도도를 달성하였으며, 이는 unfilled 유기물 시스템 중 최고 수준의 수치이다. 또한 고정렬 액정 매트릭스와 판상형 육방정계 질화붕소(*h*-BN) 충전제 간의 구조적 시너지를 최적화함으로써, 85 wt% 충전 조건에서 $25.08 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 의 독보적인 고 열전도 복합재를 구현하여 기존 문헌의 한계치를 명확히 상회하였다.

나아가 본 에폭시 시스템은 가역적 이민 결합 기반의 동적 공유결합 네트워크를 통해, 반복적인 물리적 분쇄 및 열

가압 가공 후에도 화학적 구조와 일정 수준 이상의 방열 성능을 지속적으로 유지하는 가역적 재가공 특성을 실증하였다. 결론적으로 본 연구는 개시제의 분자 구조 변형과 경화 속도론의 정밀 제어를 통해 열경화성 고분자의 고정렬화, 고열전도화, 그리고 친환경 재가공성을 동시에 달성하는 차별화된 플랫폼 전략을 제시하며, 첨단 열 관리 및 전자 패키징 응용 분야에 매우 유용한 통찰을 제공할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행된 연구과제(RS-2023-NR076430)와 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 인력양성사업(RS-2023-00237035)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국산업기술기획평가원(KEIT)의 지원을 받은 연구과제(RS-2025-25447226)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Guo, Q., *Thermosets: Structure, Properties and Applications*, Woodhead Publishing, Oxford, UK, 2012.
- May, C., *Epoxy Resins, Chemistry and Technology*, 2nd ed., CRC Press, New York, USA, 1987.
- Lee, W., Yang, W., and Kim, J., "Thermally Conductive Epoxy Composites Using Porous Boron Nitride Network and Polydopamine-Treated Aluminum Oxide," *ACS Applied Polymer Materials*, Vol. 5, No. 9, 2023, pp. 7043-7050.
- Cha, Y., Hong, Y., Pang, K., Kim, I., and Goh, M., "Maximizing Filler Content and Manufacturing Highly Thermal Conductive Composite Materials through Eutectic Liquefaction of Epoxy Resin," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 140, 2024, pp. 376-384.
- Zhou, M., Yin, G., and González Prolongo, S., "Review of Thermal Conductivity in Epoxy Thermosets and Composites: Mechanisms, Parameters, and Filler Influences," *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Vol. 7, No. 3, 2024, pp. 295-308.
- Wang, W., Liang, X., and Liu, H., "Cationic-Anionic Synchronous Ring-Opening Polymerization," *Nature Communications*, Vol. 16, No. 1, 2025, pp. 1881-1892.
- Kim, J., Kim, S., Choi, S.K., Yang, S., and Kim, M., "Regulating Cationic Polymerization of Difunctional Epoxy Resin through Structural Variations of the Thermal Initiator," *ACS Applied Polymer Materials*, Vol. 6, No. 11, 2024, pp. 6689-6696.
- Jeong, I., Kim, Y., and Goh, M., "Development of Highly Thermal Conductive Liquid Crystalline Epoxy Resins Bearing Phenylcyclohexyl Mesogenic Moieties," *Composites Research*, Vol. 30, No. 6, 2017, pp. 350-355.
- Kim, Y., Jung, J., Yeo, H., You, N.-H., Jang, S.G., Ahn, S., Lee,

- S.H., and Goh, M., "Development of Highly Thermal Conductive Liquid Crystalline Epoxy Resins for High Thermal Dissipation Composites," *Composites Research*, Vol. 30, No. 1, 2017, pp. 1-6.
10. Mashouf Roudsari, G., Mohanty, A.K., and Misra, M., "Study of the Curing Kinetics of Epoxy Resins with Biobased Hardener and Epoxidized Soybean Oil," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, Vol. 2, No. 9, 2014, pp. 2111-2116.
 11. Shin, H., Kim, C.B., Ahn, S., Kim, D., Lim, J.K., and Goh, M., "Recyclable Polymeric Composite with High Thermal Conductivity," *Composites Research*, Vol. 32, No. 6, 2019, pp. 319-326.
 12. Islam, A.M., Lim, H., You, N.-H., and Kim, J., "Enhanced Thermal Conductivity of Liquid Crystalline Epoxy Resin Using Controlled Linear Polymerization," *ACS Macro Letters*, Vol. 7, No. 10, 2018, pp. 1180-1185.
 13. Yuan, C., Duan, B., Li, L., Xie, B., Huang, M., and Luo, X., "Thermal Conductivity of Epoxy Composites Filled with Silane-Modified Boron Nitride Nanosheets," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 11, 2019, pp. 9b16070.