

POSS-SH를 함유한 하이브리드 에폭시 수지를 이용한 고분자 시멘트 모르타르 제조 및 분석

유호진 · 박상현 · 황인설 · 임정혁 · 김경민[†]

한국교통대학교 나노화학소재공학과/BK21 친환경 스마트 미래교통 연구단
(2024년 3월 25일 접수, 2024년 6월 5일 수정, 2024년 6월 7일 채택)

Synthesis and Characterization of Polymer Cement Mortar Using Hybrid Epoxy Resin Containing Mercaptopropyl Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane (POSS-SH)

Ho-Jin Yoo, Sang-Hyeon Park, In Seol Hwang, Jung-Hyurk Lim, and Kyung-Min Kim[†]

Department of Polymer Science and Engineering/Department of IT-Energy Convergence (BK21 PLUS),
Korea National University of Transportation, Chungju, Chungbuk 27496, Korea
(Received March 25, 2024; Revised June 5, 2024; Accepted June 7, 2024)

초록: 3차원 망상구조의 하이브리드 에폭시 수지를 함유한 고분자 시멘트 모르타르는 실리카 입자와 POSS-SH를 함유한 하이브리드 에폭시 수지와 시멘트 모르타르를 물 용매 하에 혼합하여 제조하였다. 하이브리드 에폭시 수지는 diglycidyl ether of bisphenol A(DGEBA)와 경화제인 ethylene diamine(EDA), 필러인 실리카 입자, 경화 촉진제로 POSS-SH를 이용하여 합성되었다. 에폭시 수지의 강도와 시멘트 간의 결합력을 높여주기 위하여 -OH 작용기로 표면이 개질된 실리카 입자와 경화 속도 극대화 및 강도 향상을 위하여 실리카 코어와 8개의 SH 작용기를 가진 mercaptopropyl polyhedral oligomeric silsesquioxane(POSS-SH)를 사용하였다. 실리카 입자와 POSS-SH를 함유한 하이브리드 에폭시 수지의 경우에 연필경도 및 열적 안정성이 가장 우수하였고, 하이브리드 에폭시 수지의 구조 및 표면분석은 푸리에 변환 적외선 분광법(FTIR) 및 주사전자현미경(SEM) 분석을 통하여 확인하였다. 시멘트 모르타르와의 혼합 안정성이 가장 좋은 하이브리드 에폭시는 에폭시와 경화제 비율이 1:1 조합인 것을 에폭시와 경화제의 물 비율에 따라 경화시간을 측정된 데이터로부터 확인하였고, 이를 모르타르와 물에 혼합하여 고분자 시멘트 모르타르를 상온에서 제조하였다. 실리카 입자와 경화 촉진제인 POSS-SH의 영향으로 고분자 시멘트 모르타르의 압축강도는 순수한 시멘트 모르타르에 비하여 2배 이상이 높아졌으며 실리카 입자 및 에폭시 수지의 영향으로 휨 강도도 우수한 결과를 나타내었다.

Abstract: Polymer cement mortar containing a hybrid epoxy resin with a three-dimensional network structure was prepared by mixing a hybrid epoxy resin containing silica particles and POSS-SH and cement mortar in a water solvent. The hybrid epoxy resin was synthesized using diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA), ethylene diamine (EDA) as a curing agent, silica particles as a filler, and POSS-SH as a curing accelerator. To increase the strength of the epoxy resin and the bonding force between cement, silica particles with the surface modified with -OH functional groups were used, and mercaptopropyl polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS-SH) with a silica core and eight SH functional groups was used to maximize the curing speed and improve strength of epoxy resin. The hybrid epoxy resin containing silica particles and POSS-SH had the best pencil hardness and thermal stability, and the structure and surface analysis of the hybrid epoxy resin were confirmed through fourier transform infrared (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM) analysis. It was confirmed from data measuring the curing time according to the molar ratio of epoxy and a curing agent that the hybrid epoxy with the best mixing stability with cement mortar is a 1:1 combination of epoxy and a curing agent. This hybrid epoxy resin was mixed with mortar and water to make polymer cement mortar at room temperature. Due to the effect of silica particles and POSS-SH, a curing accelerator, the compressive strength of polymer cement mortar increased by more than two times compared to pure cement mortar, and the flexural strength also showed excellent results due to the influence of silica particles and epoxy resin.

Keywords: mercaptopropyl polyhedral oligomeric silsesquioxane, silica particles, cement mortar, hybrid epoxy resin, polymer cement mortar.

[†]To whom correspondence should be addressed.
kmmkim@ut.ac.kr, ORCID[®] 0000-0001-5637-9396
©2024 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

서 론

건설 분야에서 사용되는 재료는 시간이 흐르면서 지속적인 발전을 거듭해왔다. 예로 들면 나무, 점토, 풀, 돌과 같은 다양한 자원이 사용되어 왔다. 특히, 현대 건설 분야에서 콘크리트는 경제적이면서 내구성이 뛰어나며, 다양한 형태로 쉽게 사용할 수 있는 장점으로 인해 널리 사용되고 있다. 그러나 콘크리트는 압축강도에 비하여 인장강도와 휨 강도가 상대적으로 낮아 건조수축성에 있어 균열 발생이 쉽고, 고강도 콘크리트의 경우 취성과파괴 거동의 문제점이 있어 이러한 문제점을 해결하고 콘크리트의 인성을 높이기 위하여 보강재료로서 주로 철근이 사용되어 왔으나 최근에는 다양한 보강재료로 강섬유, 탄소섬유, 유리섬유 등을 적용한 콘크리트 복합체에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 고분자와 모르타르를 복합화하여 고분자 시멘트 모르타르를 제조하는 연구가 활발히 진행되고 있으며 고분자 시멘트 모르타르에 사용되는 고분자에는 수성 고분자 분산액(aqueous polymer dispersion), 재유화형 분말수지(redispersible polymer powder), 수용성 고분자(water soluble polymer) 및 액상 고분자(liquid polymer)의 4 종류로 분류될 수 있고, 널리 사용되고 있는 시멘트 혼화용 고분자의 예로는 에폭시 수지가 있으며 철근을 대체할 수 있는 고분자 재료로서 연구되고 있다.¹⁻⁴ 이러한 고분자 시멘트 모르타르는 콘크리트 구조물의 마감 및 보수, 보강 시 손상이나 열화된 단면의 복구재료로 널리 사용되고 있다.

에폭시 수지는 에폭시 화합물과 경화제의 반응으로 3차원 망상구조를 형성한다. 경화된 에폭시 수지는 우수한 전기절연성, 낮은 수축률, 내약품성 및 내열성, 내화학성 등이 우수하며, 경화제의 종류에 따라 그 특성 및 성능을 변화시킬 수 있어 다양한 산업분야에서 사용되는 대표적인 열경화성 고분자 수지이다.^{5,6} 최근에는 에폭시 수지의 특성을 향상시키기 위해 실리카 등의 무기물질을 혼합하여 제조하는 에폭시 복합재료에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.^{7,8} 경화제의 혼합에 따른 점도, 경화온도, 경화시간, 발열 등과 같은 인자들에 따라 에폭시 수지의 물성이 결정되어 다양한 경화제 및 경화촉진제에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다.^{9,10} 에폭시 수지 경화에 mercaptan 계열의 화합물이 경화 촉진제로 사용되었고, 사용된 mercaptan 화합물의 -SH 작용기 수가 증가할수록 활성화 에너지가 감소하고, 경화 반응 개시 온도가 낮아지며 반응 속도가 상승하여 경화 반응 시간이 단축되어 경화를 촉진시키는 연구 결과도 발표되었다.

실세스퀴옥세인 중에서 케이지 구조의 polyhedral oligomeric silsesquioxane(POSS)는 일반적으로 수소 또는 유기화합물(R)이 있는 실란 모노머인 $RSiX_3$ (X=alkoxy 또는 Cl)의 가수반응과 축합반응을 통하여 얻을 수 있다. POSS는 코어가 Si와 O를 포함하고 있는 실리카 육면체 구조로 이루어져 있고 외

곽은 다양한 유기 관능기 그룹을 도입할 수 있어 가장 작은 유기-무기 실리카 입자라고 할 수 있다. POSS의 코어는 Si-O-Si 구조가 치밀하게 연결되어 있어서 화학적으로 안정하고, 열적 특성이 매우 우수하며, 여덟 개의 외곽 유기 관능기로 인한 유기용매에 대한 용해성 및 고분자와의 상용성이 높아 다양한 고분자와의 복합화, 가교 고분자 및 자기 조립화된 금속나노입자 제조를 위한 가교제로 사용될 수 있어 유기-무기 하이브리드 재료로서 주목받고 있다. 위와 같이 POSS는 우수한 기계적 특성 및 열적 안정성, 다양한 기능성 부여 및 고분자와의 복합화 등의 장점으로 인하여 광범위한 분야에서 연구되고 있다.^{11,12} 에폭시 수지와 POSS의 복합화를 통한 나노복합재료의 예로서 에폭시 수지에 불완전 축합된 실세스퀴옥세인(incompletely condensed POSS)을 도입하여 POSS의 균일한 분산 또는 상 분리에 따라 열역학적 특성 및 기계적 강도를 분석, 평가한 연구결과가 발표되었다.¹³

본 연구에서는 에폭시 수지 속경화와 열적 안정성 및 연필경도의 향상을 위하여 경화 촉진제로 -SH 작용기 수가 8개인 POSS-SH와 필러로 실리카 입자를 사용하였고 POSS-SH는 (3-mercaptopropyl)trimethoxysilane(MPTS)을 메탄올과 염산 촉매 하에서 반응시켜 졸-겔 공법으로 합성하였다. Diglycidyl ether of bisphenol A(DGEBA)에 경화제인 ethylene diamine(EDA)와 경화 촉진제인 POSS-SH와 표면이 -OH 작용기로 개질된 실리카 입자를 첨가하여 하이브리드 에폭시 수지를 제조하여 경화거동, 연필경도, 열적 특성 및 모폴로지를 확인하였다. 합성된 하이브리드 에폭시 수지에 모르타르와 물을 첨가하여 고분자 시멘트 모르타르를 제조하고, 고분자 시멘트 모르타르의 구조 및 기계적 물성을 평가하였다. 시멘트와 에폭시 수지와 결합력 향상을 위한 실리카 입자 적용 및 경화촉진제로 사용된 POSS-SH의 독특한 구조인 실리카 코어와 -SH 작용기 수 극대화로 인한 속경화로 고분자 시멘트 모르타르의 압축강도가 순수한 시멘트 모르타르에 비하여 매우 증가하는 것을 확인할 수 있었고 에폭시 수지 및 실리카 입자의 적용으로 휨 강도도 증가하는 것이 관찰되었다. 실리카 입자 및 경화촉진제인 POSS-SH의 도입으로 우수한 내열성 및 기계적 강도를 가진 고분자 시멘트 모르타르 합성으로 같은 강도를 얻기 위해 기존에 사용된 모르타르의 양을 줄여 재료비를 절감할 수 있고, 위와 같은 우수한 물성으로 인한 유지 보수 빈도 저하로 유지 보수 비용 절감효과도 기대할 수 있다. 또한 빠른 경화를 통한 경화시간 단축으로 인한 공정단축 및 에너지 소비 감소효과로 생산단가 절감을 기대할 수 있어 고분자 시멘트 모르타르 연구분야에 본 연구 결과는 좋은 영향을 미칠 것으로 판단된다.

실 험

재료. POSS-SH를 제조하기 위하여 필요한 메탄올(methanol,

HPLC grade)은 Burdick & Jackson에서, 염산(hydrochloric acid, 35~37%)은 Samchun에서 구매하였다. (3-mercaptopropyl)trimethoxysilane(MPTS, 95%)는 Sigma Aldrich에서 구매하였다. 하이브리드 에폭시 수지 제조에 필요한 diglycidyl ether of bisphenol A(DGEBA)와 표면이 -OH 작용기로 개질된 실리카 입자(silica particle (SP))는 각각 국도화학의 YD-128과 디토테크놀로지의 DT-SI-10을 사용하였고, 경화제인 EDA(ethylene diamine, $\geq 99.5\%$)는 Sigma Aldrich에서 구매하였다. 고분자 시멘트 모르타르 제작에 사용된 모르타르(mortar)는 한일시멘트의 건조 시멘트 모르타르를 구매하여 사용하였다.

분석. 하이브리드 에폭시 수지의 열적 특성 및 표면분석은 각각 열중량 분석기(TGA, TGA S-1000, SCINCO, Korea) 및 주사전자현미경(SEM, JSM-6700F, JEOL, Japan)을 통해 확인하였고, 표면강도는 ASTM D3363에 의거한 연필경도 시험기(YOSHIMITSU, Japan)를 통해 측정하였다. 하이브리드 에폭시 수지를 적용한 고분자 시멘트 모르타르 구조는 푸리에 변환 적외선 분광법(FTIR, Nicolet IR 200, Thermo Electron Co., USA)을 이용하여 분석하였고, 압축강도 및 휨 강도는 KS F 2476 고분자 시멘트 모르타르의 시험방법에 의거하여 한국건설생활환경시험연구원에 의뢰하여 측정하였다.

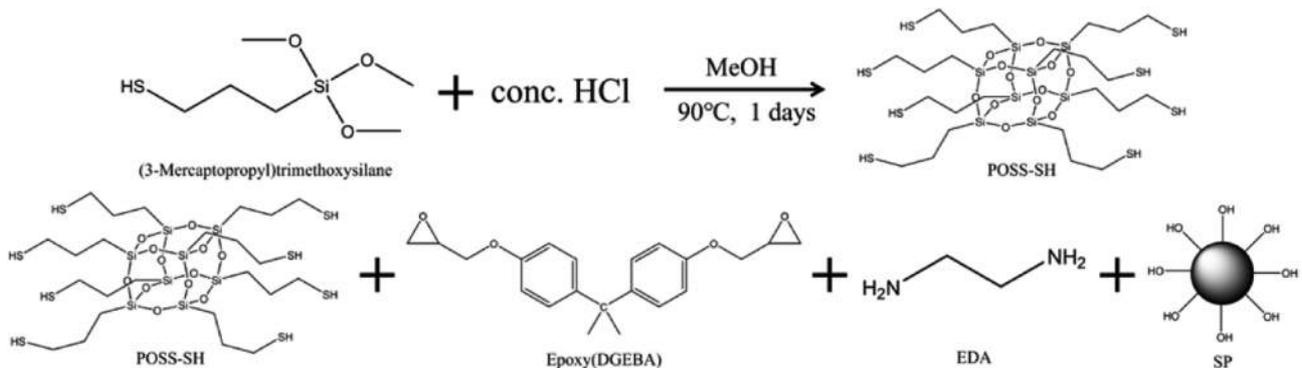
티올 그룹(-SH)을 작용기로 갖는 케이지형 실세스퀴옥세인 제조(POSS-SH). POSS-SH는 이전에 보고된 문헌방법을 참고하여 합성하였다.¹⁴ -SH를 작용기로 갖는 POSS-SH를 얻기 위하여 정제된 메탄올 용액(350 mL)과 염산 촉매(37%, 30 mL) 하에서 MPTS(15 mL)를 90 °C에서 24시간 동안 반응시켰다. 반응 후 흰색의 침전물이 생기면, 차가운 메탄올로 세번 세척해 준 뒤에 남아있는 침전물을 CH_2Cl_2 에 녹여 초순수 증류수로 수 차례 세척해 준다. 세척 후 남아있는 수분을 제거해 주기 위하여 MgSO_4 로 건조 후 남아있는 CH_2Cl_2 는 evaporator를 이용하여 제거시켜주면 흰색의 POSS-SH를 얻을 수 있었다. $^1\text{H NMR}$ (400 MHz, CDCl_3 , δ): 0.78(double, Si- CH_2), 1.4(br, -SH), 1.72(s, - CH_2 -), 2.58(s, - CH_2 -SH). $^{29}\text{Si NMR}$ (400 MHz, CDCl_3 , δ): -66.80(s).

하이브리드 에폭시 수지 및 이를 활용한 고분자 시멘트 모르

타르 제조(Hybrid Epoxy Resin and Polymer Cement Mortar Containing Hybrid Epoxy Resin). DGEBA 38 g에 silica particle(SP) 2.36 g, POSS-SH 3.16 g을 섞어준 뒤 EDA 6.68 mL를 넣고 10분간 교반시켜주면 하이브리드 에폭시 수지를 얻을 수 있었고, 이렇게 얻어진 하이브리드 에폭시 수지에 모르타르 시멘트 440 g과 물 44 g을 섞어주어 하이브리드 에폭시 수지를 함유한 고분자 시멘트 모르타르를 제조하였다.

결과 및 토론

에폭시 수지의 경화 촉진제로 사용하기 위하여 -SH가 함유된 POSS-SH를 Scheme 1과 같이 합성하였다. 합성된 POSS-SH는 ^1H , Si-NMR, IR 분석을 통하여 8개의 티올 그룹이 케이지 구조의 실리카 코어에 붙어 있는 것을 확인하였고, 8개 -SH의 함유로 인한 경화 가속 극대화 효과를 얻기 위하여 POSS-SH를 사용하였다. 실험부분에서 제시한 $^1\text{H NMR}$ 에서와 같이 1.4 ppm과 0.78 ppm에서의 -SH 피크와 Si- CH_2 피크가 1.72 ppm과 2.58 ppm에서 - CH_2 피크와 - CH_2 -SH 피크가 관찰되었고, $^{29}\text{Si NMR}$ 에서는 Si에 붙어있는 8개의 mercaptopropyl 그룹이 동일환경에 존재하여 하나의 단일피크로 -66.80 ppm에서 확인된 것으로 보아 POSS-SH가 성공적으로 합성된 것을 확인할 수 있었다. 에폭시 수지와 시멘트 간의 결합력 향상 및 경화물의 열적 안정성을 높이기 위하여 필터로서 실리카 표면이 -OH 작용기로 치환된 실리카 입자(SP)를 사용하였다. Figure 1은 에폭시와 SP를 함유한 하이브리드 에폭시 수지와 SP와 POSS-SH를 동시에 함유한 하이브리드 에폭시 수지의 경화시간을 에폭시와 경화제 EDA의 몰 비율에 따라 측정할 데이터이다. 경화시간은 경화제를 마지막으로 넣어준 후 경화로 인한 발열이 생기고 흐름성을 통한 표면경화를 확인한 후 크랙이 생기면 시료의 파손 테스트를 진행하면서 내부 경화 확인 후 측정하였다. 전체적으로 EDA가 증가할수록 에폭시 수지와 하이브리드 에폭시 수지의 경화시간이 감소하는 것을 확인하였고, 일반적인 에폭시 수지보다 경화가속제



Scheme 1. Preparation of hybrid epoxy resin with SP and POSS-SH.

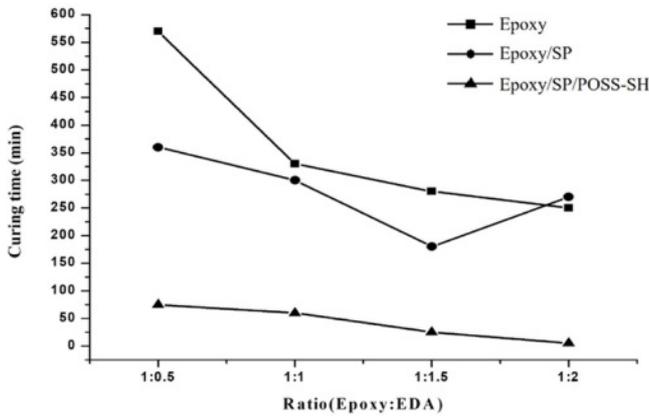


Figure 1. Curing time of hybrid epoxy resin with SP and POSS-SH.

인 POSS-SH가 함유된 하이브리드 에폭시 수지의 경우에 경화 시간이 크게 감소되는 실험결과를 확인할 수 있었다. EDA의 비율이 증가할수록 경화 시간이 감소하지만 에폭시와 EDA의 비율이 1:1.5 이상부터는 너무 빠른 경화로 고분자 시멘트를 제조하기 위하여 넣어준 모르타르와 하이브리드 에폭시 수지와의 균일한 혼합이 불가능하여 고분자 시멘트 모르타르 제조를 위해서는 1:1 비율로 실험을 진행하였다.

에폭시와 경화제 EDA의 몰 비율에 따라 경화 속도를 측정하여 모르타르와의 혼합 안정성이 가장 좋은 에폭시와 EDA의 비율이 1:1 조합에 대한 하이브리드 에폭시 수지 합성 레시피를 Table 1에 나타내었고, Table 1의 비율로 얻어진 에폭시 수지, SP를 함유한 하이브리드 에폭시 수지와 SP와 POSS-SH를 동시에 함유한 하이브리드 에폭시 수지의 연필경도를 측정한 데이터를 Table 2에 나타내었다. 순수한 에폭시 수지의 경우에는 H의 약한 경도를 보인 반면에 에폭시 수지에 SP를 첨가한 경우에는 필러인 SP의 영향으로 경도가 3H로 높아졌

Table 1. Feed Ratio of Hybrid Epoxy Resin

	Epoxy	Epoxy/SP	Epoxy/SP/POSS-SH
POSS-SH	-	-	3.16 g
Hybrid epoxy resin	Epoxy	38 g	38 g
	EDA	6.68 mL	6.68 mL
	Silica	-	2.36 g

Table 2. Pencil Hardness of Hybrid Epoxy Resin with SP and POSS-SH

Sample	Pencil hardness	Comment
Epoxy	H	Easily marked
Epoxy/SP	3H	Good scratch resistance
Epoxy/SP/POSS-SH	4H	Can be marked but difficult to scratch

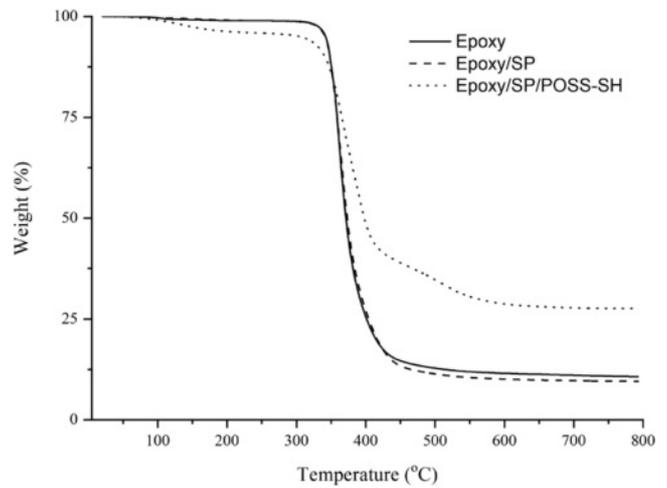


Figure 2. TGA graphs of hybrid epoxy resin with SP and POSS-SH.

고, SP와 경화 촉진제인 POSS-SH를 동시에 함유한 에폭시 수지의 경우에는 경화속도가 증가할 뿐만 아니라 POSS-SH의 실리카 코어로 인하여 경도가 4H까지 증가한 것을 확인하였다.

Figure 2는 질소기류 하에서 에폭시 수지, SP를 함유한 하이브리드 에폭시 수지와 SP와 POSS-SH를 동시에 함유한 하이브리드 에폭시 수지의 열적 안정성을 분석한 TGA 데이터이다. 에폭시 수지와 SP를 함유한 하이브리드 에폭시 수지에 비하여 SP와 POSS-SH를 동시에 함유한 하이브리드 에폭시 수지의 그래프가 오른쪽으로 이동한 것과 800 °C에서의 잔존량이 각각 10.69, 9.54, 27.61%인 것을 확인하였다. 이러한 이유는 열적 안정성이 우수한 POSS-SH의 함유로 인하여 SP와 POSS-SH를 동시에 함유한 하이브리드 에폭시 수지의 분해

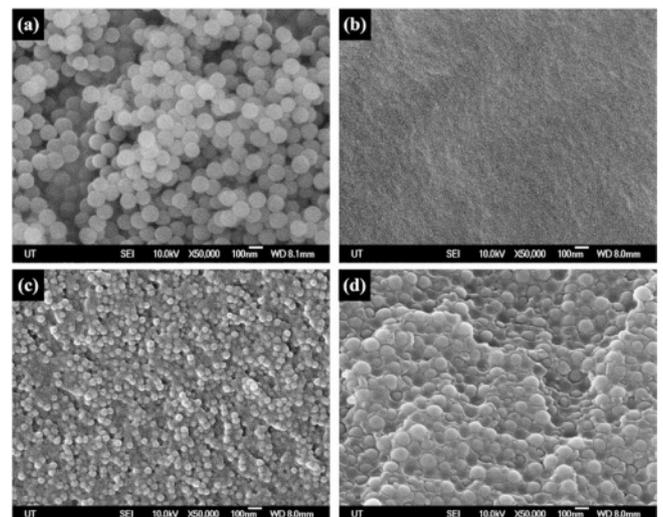


Figure 3. FE-SEM images of (A) silica particle (SP); (B) epoxy resin; (C) hybrid epoxy resin with SP; (D) hybrid epoxy resin with SP and POSS-SH.

가 느리게 일어나고 Si-O-Si 함량 증가로 인한 잔존량 또한 증가한 것으로 판단된다.

Figure 3은 실리카 입자, 에폭시 수지, SP를 함유한 하이브리드 에폭시 수지와 SP와 POSS-SH를 동시에 함유한 하이브리드 에폭시 수지의 모폴로지를 측정된 SEM 데이터이다. 순수한 에폭시 수지의 경우에는 어떤 입자도 없는 편평한 표면 형태로 나타났고, 실리카 입자의 경우에 직경은 대략 50-100 nm 정도되는 구형의 입자인 것을 확인하였다. 하이브리드 에폭시 수지의 경우에는 실리카 입자 또는 실리카 입자와 POSS-

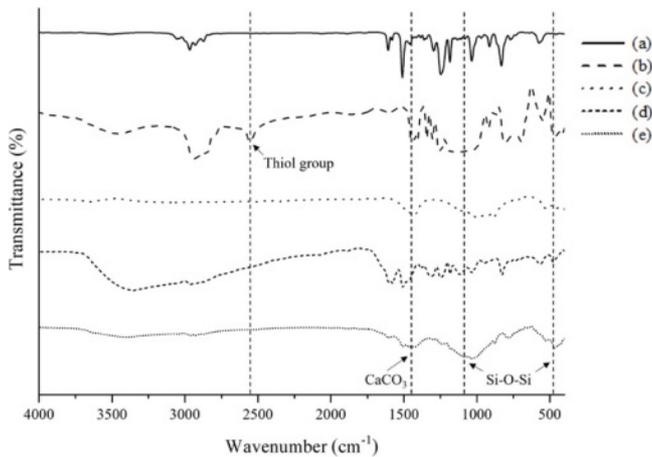


Figure 4. FTIR spectra of (a) epoxy resin; (b) POSS-SH; (c) mortar; (d) hybrid epoxy resin with SP and POSS-SH; (e) polymer cement mortar containing hybrid epoxy resin.

SH가 삼차원 네트워크 형태의 에폭시 수지안에 서로 연결되어 함유된 형태로 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

합성된 하이브리드 에폭시 수지에 모르타르와 물을 섞어 하이브리드 에폭시 수지를 함유한 고분자 시멘트 모르타르를 상온에서 제작하였다. 제작된 고분자 시멘트 모르타르의 구조를 확인하기 위하여 Figure 4에서 에폭시 수지, POSS-SH, 시멘트 모르타르, SP와 POSS-SH를 동시에 함유한 하이브리드 에폭시 수지, 하이브리드 에폭시 수지를 함유한 고분자 시멘트 모르타르의 FTIR 데이터를 분석하였다. POSS-SH에서 2500 cm^{-1} 부근에서 -SH의 피크를 확인할 수 있었고, 하이브리드 에폭시 수지를 함유한 고분자 시멘트 모르타르의 경우에는 에폭시 수지와 시멘트 모르타르에서는 볼 수 없는 $1080\text{-}1090\text{ cm}^{-1}$ 부분의 Si-O-Si 그룹에서 유래되는 피크가 나타났고, POSS-SH의 -SH는 에폭시 그룹과의 화학 반응(click reaction)에 참여하여 피크가 없어져, POSS-SH가 또 다른 경화제의 역할을 수행하여 에폭시의 경화시간을 단축시키는 것으로 판단되어, 상온에서 경화가 촉진된 하이브리드 에폭시 수지가 시멘트 모르타르 내에 함유되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

하이브리드 에폭시 수지를 함유한 고분자 시멘트 모르타르의 휨 강도와 압축강도를 측정하기 위하여 모르타르와 물만 혼합하여 제조한 시멘트 모르타르 샘플(mortar)과 SP를 함유한 하이브리드 에폭시 수지 포함한 고분자 시멘트 모르타르 샘플(MES), SP와 POSS-SH를 동시에 함유한 에폭시 수지를 포함한 고분자 시멘트 모르타르 샘플(MESP)로 명명하고 Table 3과 같은 비율로 제조하고 한국건설생활환경시험연구원(KCL)에

Table 3. Flexural and Compressive Strength of Polymer Cement Mortar Containing Hybrid Epoxy Resin

		Mortar	Mortar/Epoxy/SP (MES)	Mortar/Epoxy/SP/POSS-SH (MESP)	
Epoxy resin	POSS-SH	-	-	3.16 g	
	Epoxy	38 g	38 g	38 g	
	EDA	6.68 mL	6.68 mL	6.68 mL	
	Silica	-	2.36 g	2.36 g	
Mortar		440 g	440 g	440 g	
Water		88 g	88 g	88 g	
Mortar		Mortar/Epoxy/SP (MES)		Mortar/Epoxy/SP/POSS-SH (MESP)	
Flexural strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Compressive strength (MPa)
1.2	2.2	1.8	3.4	0.9	5.0
	2.2				
1.3	2.5	1.8	4.0	1.2	4.0
	2.5				
1.5	2.3	1.7	3.7	1.0	4.0
	2.3				

의뢰하여 휨 강도와 압축강도를 3회에 걸쳐서 측정하고 비교 평가하였다. 휨 강도에서는 MES 샘플의 수치가 가장 높은 것을 확인하였고, MESP 샘플에서는 mortar 샘플보다 약간 낮아지는 경향을 보였다. 고분자인 하이브리드 에폭시 수지가 함유된 MES 샘플의 경우에는 고분자인 에폭시 수지의 영향과 표면이 -OH 작용기로 개질된 SP로 인한 결합력 향상으로 휨 강도가 증가한 것으로 판단되며, MESP 샘플의 휨 강도가 mortar 샘플보다 약간 낮아지는 경향은 POSS-SH의 첨가로 에폭시 수지의 경화속도를 가속화시켜 압축강도의 급격한 증가로 인하여 휨 강도가 다소 낮아진 것으로 판단된다. 압축강도의 경우에는 mortar 샘플, MES 샘플, MESP 샘플의 순서로 증가하는 경향을 보여주었다. MES 샘플에서는 mortar 샘플에 에폭시 수지와 실리카 입자인 SP가 함유되면서 에폭시 수지에 대한 실리카 입자의 영향으로 압축강도가 증가한 것으로 판단되며, MESP 샘플에서는 실리카 입자뿐만 아니라 POSS-SH까지 함유되고 경화속도 가속화로 압축강도가 크게 증가한 것으로 판단된다.

결 론

에폭시와 아민계 경화제의 비율을 조절하고 실리카 입자와 경화 촉진제로 POSS-SH를 이용하여 물성이 우수한 하이브리드 에폭시 수지를 합성하였다. 실리카 입자와 POSS-SH를 함께 함유한 하이브리드 에폭시의 연필경도가 4H로 가장 우수하였고, 열적 안정성도 높은 것을 확인할 수 있었다. 또한 실리카 입자 및 POSS-SH가 에폭시 수지 매트릭스에 연결되어 분산된 것을 SEM 분석을 통하여 확인하였다. 시멘트 모르타르와의 균일한 혼합을 통한 고분자 시멘트 모르타르 제조를 위하여 에폭시와 경화제 비율이 1:1 조합으로 합성된 하이브리드 에폭시 수지를 사용하였다. 하이브리드 에폭시 수지를 함유한 고분자 시멘트 모르타르의 경우에 시멘트와의 상용성 향상을 위하여 실리카 입자 도입과 경화 촉진제인 POSS-SH를 첨가하여 에폭시 수지의 경화속도를 가속화시켜 순수한 시멘트 모르타르(mortar 샘플) 보다 고분자 시멘트 모르타르의 압축강도를 매우 증가시켰고(MESP 샘플), 휨 강도의 경우에는 실리카 입자와 에폭시 수지의 영향으로 향상되는 결과를 확인할 수 있었다(MES 샘플).

감사의 글: 본 연구는 산업통상자원부의 전략핵심소재자립 화기술개발 사업(No. 20010050)과 2024년 한국교통대학교 산학협력단 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사드립니다.

이해상충: 저자(들)는 이해상충이 없음을 선언합니다.

참 고 문 헌

- Golestaneh, M.; Amini, G.; Najafpour, G. D.; Beygi, M. A. Evaluation of Mechanical Strength of Epoxy Polymer Concrete with Silica Powder as Filler. *World Appl. Sci. J.* **2010**, *9*, 216-220.
- Frigione, M.; Lionetto, F.; Mascia, L.; Antonacci, A. Novel Epoxy-Silica Hybrid Adhesives for Concrete and Structural Materials: Properties and Durability Issues. *Adv. Mater. Res.* **2013**, *687*, 94-99.
- Xu, Y.; Chung, D. D. L. Improving the Workability and Strength of Silica Fume Concrete by Using Silane-Treated Silica Fume. *Cem. Concr. Res.* **1999**, *29*, 451-453.
- Singh, L. P.; Goel, A.; Bhattacharyya, S. K.; Ahalawat, S.; Sharma, U.; Mishra, G. Effect of Morphology and Dispersibility of Silica Nanoparticles on the Mechanical Behaviour of Cement Mortar. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* **2015**, *9*, 207-217.
- Ozgul, E. O.; Ozkul, M. H. Effects of Epoxy, Hardener, and Diluent Types on the Hardened State Properties of Epoxy Mortars. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *187*, 360-370.
- Aggarwal, L. K.; Thapliyal, P. C.; Karade, S. R. Properties of Polymer-Modified Mortars Using Epoxy and Acrylic Emulsions. *Constr. Build. Mater.* **2007**, *21*, 379-383.
- Fujiwara, M.; Kojima, K.; Tanaka, Y.; Nomura, R. A Simple Preparation Method of Epoxy Resin/Silica Nanocomposite for T_g Loss Material. *J. Mater. Chem.* **2004**, *14*, 1195-1202.
- Liu, Y. L.; Lin, Y. L.; Chen, C. P.; Jeng, R. J. Preparation of Epoxy Resin/Silica Hybrid Composites for Epoxy Molding Compounds. *J. Appl. Polym. Sci.* **2003**, *90*, 4047-4053.
- Burton, B. L. *Acceleration of Amine-Cured Epoxy Resin Systems*; Thermoset Resin Formulators Association: Texas, 2013.
- Eom, S. Y.; Seo, S. B.; Lee, K. Y. Study on Cure Behavior of Low Temperature and Fast Cure Epoxy with Mercaptan Hardener. *Polym. Korea* **2013**, *37*, 240-248.
- Abad, M. J.; Barral, L.; Fasce, D. P.; Williams, R. J. J. Epoxy Networks Containing Large Mass Fractions of a Monofunctional Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane (POSS). *Macromolecules* **2003**, *36*, 3128-3135.
- Fu, J.; Shi, L.; Chen, Y.; Yuan, S.; Wu, J.; Liang, X.; Zhong, Q. Epoxy Nanocomposites Containing Mercaptopropyl Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane: Morphology, Thermal Properties, and Toughening Mechanism. *J. Appl. Polym. Sci.* **2008**, *109*, 340-349.
- Liu, H.; Zheng, S.; Nie, K. Morphology and Thermomechanical Properties of Organic-Inorganic Hybrid Composites Involving Epoxy Resin and an Incompletely Condensed Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane. *Macromolecules* **2005**, *38*, 5088-5097.
- Lin, H.; Wan, X.; Jiang, X.; Wang, Q.; Yin, J. A Nanoimprint Lithography Hybrid Photoresist Based on the Thiol-Ene System. *Adv. Funct. Mater.* **2011**, *21*, 2960-2967.

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