

# 폴리실리콘 슬러지 및 과립형 경화제를 활용한 장거리 압송용 보수 모르타르 개발

The Development of Repair Mortar by Using Granulated Hardener and Poly Silicon Sludge



**김홍기 Hong-Gi Kim**  
한양대학교 건설환경공학과  
박사수료  
E-mail : dmkg1404@naver.com



**박대오 Dae-Oh Park**  
리플래시기술(주) 차장  
E-mail : daeoh80@naver.com



**서창영 Chang-Yung Seo**  
리플래시기술(주) 대리  
E-mail : tjckgdud@naver.com



**류재석 Jae-Suk Ryou**  
한양대학교 건설환경공학과 교수  
E-mail : jsryou@hanyang.ac.kr

## 1. 서론

### 1.1 연구 배경

최근 전 세계적으로 지구온난화로 인한 환경문제가 인식되고 있고 이산화탄소 배출규제를 강화하기 위해 1992년 온실가스 배출을 억제하기 위한 국제적 노력으로 기후변화협약(UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change)이 체결되고 1997년 ‘교토의정서’가 채택되었고 세계 동향에 따라 국내 정부에서도 이산화탄소

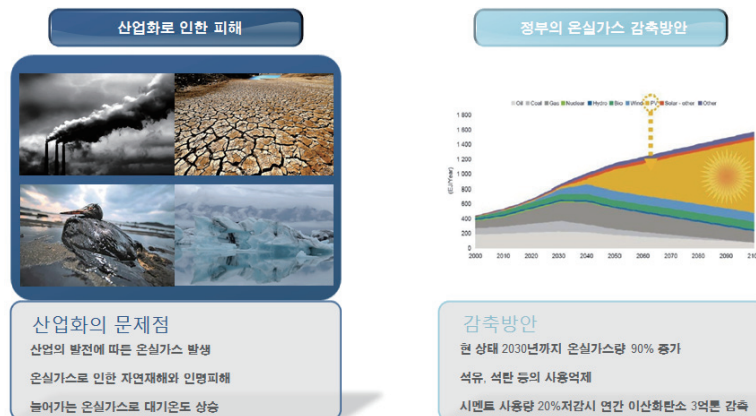


그림 1.1. 산업화의 문제점 및 정부의 온실가스 감축방안

등의 온실가스(GHC : Green House Gas) 감축의 일환으로 '저탄소 녹색성장'이라는 정부시책 아래 온실가스·에너지목표관리제를 도입하였다. <그림 1.1>은 우리나라 산업화의 문제점 및 정부의 온실가스 감축방안을 나타낸 것이다.

이와 같이 2013년 목표를 부여받은 관리업체의 목표이행실적에 대한 기업평가가 이루어지게 되면서 화석연료를 대체하기 위하여 신재생 에너지가 도입되고 그 중 태양광발전 수요가 연 평균 30% 이상의 고속 성장을 기록하며 현재 가장 빠르게 성장하고 있는 산업 중에 하나이다. 이로 인해 태양광발전 집광판의 주원료인 폴리실리콘 제조생산이 급속히 증가하고 국내에 많은 기업이 폴리실리콘 생산 사업을 확장하고 있는 단계이다. 하지만 폴리실리콘 슬러지는 고형화되어 전량이 매립 처리되는 실정이며, 이는 또 다른 환경문제를 야기할 수 있는 상황으로 폴리실리콘 슬러지의 재활용이 시급한 실정이고 그로 인해 재활용에 관한 연구 및 수급처가 필요한 실정이다. 시멘트산업은 에너지 소비가 큰 소재산업으로 온실가스 감축정책 의무화 대상이다. 시멘트 사용량을 20% 저감하면 연간 3억 톤의 이산화탄소의 배출을 감소시킬 수 있다. 이에 따라 건설업계에서는 이산화탄소 저감하는 방안으로 산업부산물물의 사용하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이에 본 연구에서는 폴리실리콘 슬러지의 주 화학성분은  $SiO_2$ ,  $CaO$ 가 대부분으로 이루어져 있는 것을 고려하여 광물질 혼화제로서의 사용성능을 평가하고 보수재료로서의 적합성을 분석하였다. 여기에 산업부산물을 활용한 보수모르타르의 조기강도를 확보하면서 응결시간을 조절하여 작업성을 확보할 수 있는 기술적 문제를 보완하기 위하여 과립형 경화제를 혼입하여 장거리 압송이 가능한 보수모르타르의 개발에 관하여 연구하였다.

## 1.2 연구 내용 및 방법

### 1.2.1 급결제의 과립 및 재료선정

본 연구에서는  $C_{12}A_7$ 계 급결제를 사용하였다.  $C_{12}A_7$ 계 광물계 급결제는 일본의 DENKA사와 Taiheiy material사에서 개발되어 실용화되어 사용되었으며, 친환경적 특성으로 인해 급속히 사용이 확대되었다.  $C_{12}A_7$ 계 광물계 급결제는 시멘트광물의 일종인 칼슘 알루미늄네이트 광물의 급결성을 이용한 재료

로서 별도로 합성한 광물을 분쇄하여 분말형으로 제조되며 시멘트의 광물을 이용하기 때문에 급결성이 뛰어나고 강도의 발현이 안정적이다.

### 1.2.2 급결제의 과립 및 코팅

분말의 과립화는 입자와 입자 사이의 결합력을 향상시켜 입자를 함께 모으는 공정으로 과립의 표면적은 같은 부피의 분말보다 작기 때문에 공기 중의 습도에 보다 안정적이고 덩어리지거나 굳는 경우가 훨씬 적다. 기계적인 조립기를 통과시켜 균일한 입자크기로 과립화시키는 방법으로 슬러그 방식으로 불리는 건식법으로 분말이나 분말혼합물을 강한 압력으로 압축하여 정제나 슬러그를 만드는 방식이다. 현재 사용

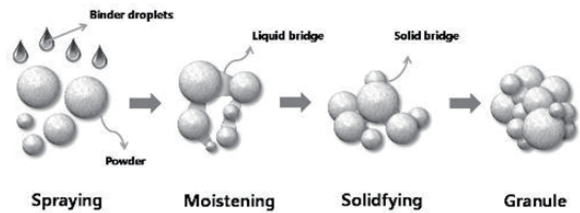


그림 1.2. 과립화 공정

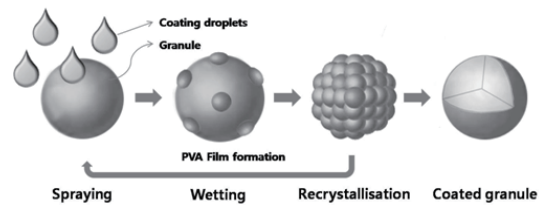


그림 1.3. Pan-coating 방법

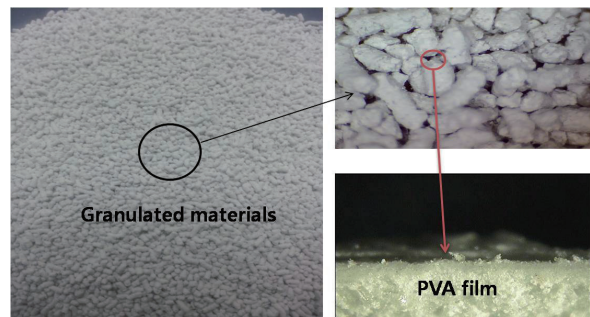


그림 1.4. 과립화된 분말재료와 Close-up 된 과립제와 코팅재료

되고 있는 코팅방법에는 크게 팬 코팅법, 유동층 코팅법 등이 있고 가장 일반적인 코팅방법은 팬 코팅법이다. 본 연구에서는 팬 코팅법을 선정하고 코팅재료로는 폴리비닐알콜계열의 친환경수지성 필름을 활용하였다. 팬 코팅기안에 수용성 필름을 분사시킴과 동시에 건조기를 활용하여 정제수를 증발시켜 표면에 폴리비닐알콜수지만을 코팅시키는 방법이다. <그림 1.2>는 과립화 공정을 나타낸 것이고, <그림 1.3~4>는 팬 코팅 과정을 도식화 및 과립제와 표면에 코팅된 필름을 나타낸 것이다.

1.2.3 코팅된 과립 급결제의 사용비율과 폴리실리콘 슬러지의 사용비율 산정

과립 급결제의 사용비율은 Control, 0.5%, 1.0%, 15%, 2.0% 를 각각 혼입한 공시체를 제작하여 경과시간에 대한 관입저항시험, 응결시험, 압축강도 시험을 실시한 후 결과를 종합적으로 고려하여 과립 급결제의 사용비율을 1.0% 로 결정하였다. 폴리실리콘 슬러지의 사용비율을 산정하기 위하여 폴리실리콘 슬러지를 시멘트 대비 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40%로 점차 치환비율을 높여 공시체를 제작하였다. 여기에 보수 모르타르로서의 부착성능을 향상시키기 위하여 폴리머를 기초실험을 통해 10, 15, 20, 25%로 각각 치환하여 공시체를 제작한 후 강도측정결과를 토대로 15%로 결정한 후 위에 공시체에 첨가하여 제작하였다.

28일 압축강도 및 휨강도 결과를 바탕으로 치환비율이 높을수록 강도가 저하되는 것으로 나타났다. 치환비율이 25%

까지의 결과가 우수한 것을 확인하였다. 이에 따라 치환비율을 5, 10, 15, 20, 25%로 정하고 여기에 과립 급결제의 사용비율을 1%로 하고 폴리머를 15% 비율로 하여 공시체를 제작하였다.

2. 실험체 제작 및 시험방법

2.1 실험체 제작

본 연구에서는 KS L ISO 679에 규정되어 있는 모르타르 배합을 적용하여 실험체를 제작하였다. 위에서 산정된 치환비율별로 하여 배합표를 작성하였다. 아래의 표는 모르타르의 배합비율을 나타낸 것이다.

[표 2.1] 모르타르 배합비율

구분	W/B(%)	단위량(g/cm <sup>3</sup> )					
		물	Polymer	시멘트	골재	폴리실리콘 슬러지	GA(%)
Plain	50.0	191.25	33.75	450	1,350	0	1
MD 1				427.5		22.5	
MD 2				405		45	
MD 3				382.5		67.5	
MD 4				360		90	
MD 5				337.5		112.5	

\* GA : 과립화된 급결제

[표 1.1] 페 폴리실리콘 슬러지 모르타르의 재령 28일 압축강도

구분	Control	PS1	PS2	PS3	PS4	PS5	PS6	PS7	PS8
압축강도 (MPa)	39.11	43.14	44.25	42.21	41.83	39.47	27.12	23.88	21.11

[표 1.2] 페 폴리실리콘 슬러지 모르타르의 재령 28일 휨강도

구분	Control	PS1	PS2	PS3	PS4	PS5	PS6	PS7	PS8
휨강도 (MPa)	5.45	6.12	6.05	6.11	5.86	5.74	4.56	4.21	3.98

제작된 공시체는 24시간 후 탈영하여 향온 항습기에 넣어 양생을 실시하였다. 양생온도는 온도 15℃, 습도 60%로 양생하였다.

### 2.2 시험방법

본 연구에서는 KS F 2436에서 제시된 방법에 따라 관입저항침에 의한 응결시간시험을 실시하였다. 초결 및 종결의 응결 시간을 얻기 위하여 결과 도시 방법 중 핸드피팅에 의한 방법을 실시하였다. 여기에 모르타르의 Flow 시험, 압축강도 시험, 부착강도시험, 휨강도 시험, 염소이온침투시험, 유해성검출시험(RoHS) 등을 통해 물리적 특성과 내구성 등을 평가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 관입저항침에 의한 응결시간 측정시험 결과

본 연구에서는 응결시간에 따른 강도 특성을 측정하기 위하여 관입저항시험을 실시하였다. <그림 3.1>은 경과시간에

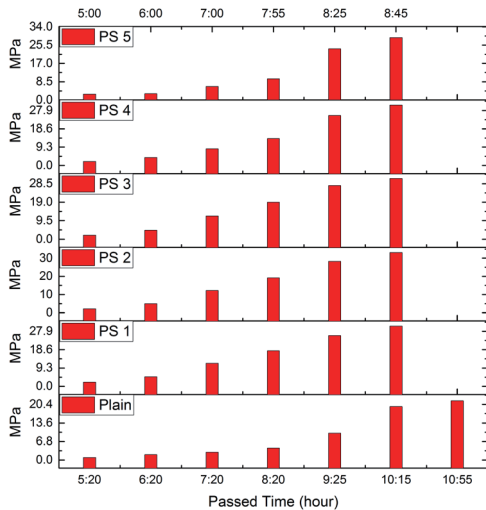


그림 3.1. 관입저항시험측정결과

따른 관입저항 값을 나타낸 것이다.

결과 값을 살펴보면 급결제가 첨가된 공시체는 일반 공시체 보다 시간이 경과함에 따라 강도가 증진되는 것을 확인하였다. 이는 급결제가 시멘트 수화반응과 응결에 직접적으로 관여하여 수화반응을 촉진시켜 응결시간을 단축시켜 강도가 증진된 것으로 판단된다. 하지만 폴리실리콘 슬러지의 비율이 높아지게 되면 응결시간은 늦어지고 강도는 적게 발현되는 것을 확인하였다.

### 3.2 Flow 측정시험 결과

본 연구에서는 보수 모르타르의 작업특성을 판단하기 위하여 배합비율별로 Flow 시험을 실시하였다. 아래의 <그림 3.2>는 Flow 시험결과 및 손실량을 나타낸 것이다.

Flow 시험결과를 살펴보면 초기에는 일반 공시체와 크게 차이를 보이지 않다가 30분이 경과한 후부터 Flow 값이 6 ~ 10 mm 감소되는 것을 확인하였다. 이는 초기에 과립된 급결제가 반응하지 않아 일반 공시체와 비슷한 경향을 나타내는 것으로 판단된다. 또한 60분이 지난 후 Flow 손실은 48 ~ 56 mm로 나타났다. 이는 과립급결제가 반응하기 보다는 시멘트 자체의 수화반응에 의한 손실로 판단된다. 따라서 현장에서 작업성을 확보하기에도 충분하다고 판단된다.

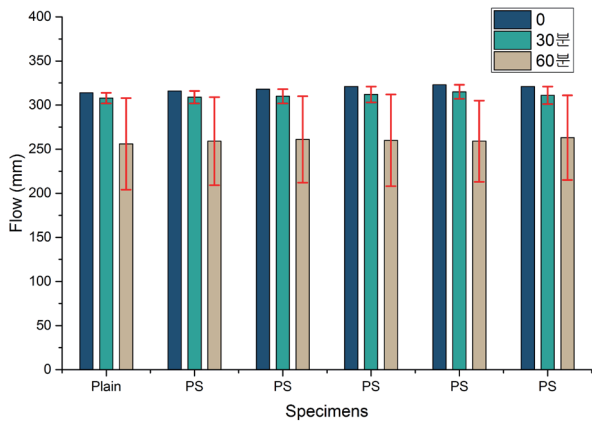


그림 3.2. Flow 시험측정결과

### 3.3 압축강도 측정시험 결과

본 연구에서는 폴리실리콘 슬러지와 과립급결제가 혼입된 공시체의 압축강도 시험을 실시하였다. 아래의 <그림 3.3>은 재령별로 3, 7, 28일 후의 압축강도를 측정한 결과이다.

결과를 살펴보면 3일 후에 강도의 경우는 폴리실리콘 슬러지를 함유한 공시체보다 일반 공시체의 압축강도가 높게 나타났다. 이는 폴리실리콘 슬러지의 특성이 초기에 수화반응을 일으키지 않기 때문이라고 판단된다. 하지만 28일 후에 강도 경향은 폴리실리콘 슬러지를 함유한 공시체의 경우가 일반 공시체의 비해 강도가 높게 나타났다. 이는 폴리실리콘 슬러지의 분말도가 일반 포틀랜드 시멘트와 비교하여 약 2배 이상의 높은 분말도를 가지고 있기 때문에 시멘트와 골재사이에 볼베어링 역할을 한 것 이라고 판단된다. 또한 폴리실리콘 슬러지의 주성분이 SiO<sub>2</sub> 로서 수화과정에서 수산화칼슘과 결합하는 포졸란 반응을 일으켜 미세공극을 감소시켜 강도가 증진된 것으로 판단된다.

### 3.4 부착강도 측정시험 결과

구조물에 보수재료로 사용하기 위해서는 압축이나 휨과 같은 여러 가지 물성들이 제 성능을 발휘하여 콘크리트 구조물에 보수 후 성능을 유지시키기 위해서는 우선적으로 콘크리

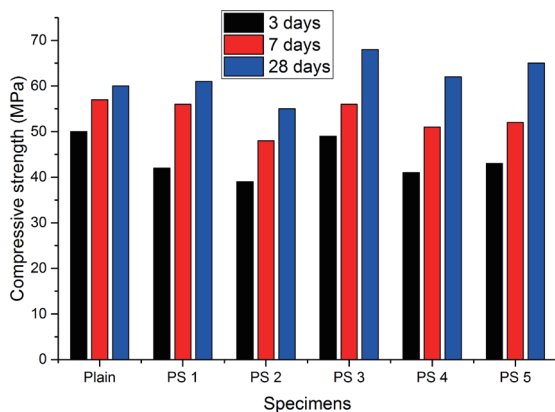


그림 3.3. 압축강도시험측정결과

트와 부착이 양호하여야 성능을 충분히 발휘할 수 있다. 이에 따라, 폴리실리콘 슬러지를 함유한 보수 모르타르가 보수재료로서의 역할을 발휘하기 위해서는 부착강도 시험이 필요하다. 콘크리트 구조물의 보수 및 보강 시에 보다 견고하게 부착되어 높은 강도를 유지함과 동시에 보수 후 내구성의 효율성을 높이는 목적으로 부착강도 시험을 실시하였다. <그림 3.4>는 부착강도 시험결과를 나타낸 것이다.

폴리실리콘 슬러지를 함유한 모르타르의 부착강도 시험결과 일반 모르타르 보다 폴리실리콘 슬러지를 함유한 모르타르의 경우가 전체적으로 혼입비율이 증가할수록 부착강도의 값이 증가되는 것으로 나타났다. 이는 폴리실리콘 슬러지의 높은 분말도와 시간이 경과하면서 포졸란 반응을 일으키게 되면서 강도가 증진되어 미세공극이 줄어들고 조직이 치밀해 지면서 증진된 것으로 판단된다.

### 3.5 RoHS 분석시험 결과

폴리실리콘 슬러지가 폐기물 재료이기 때문에 환경유해성 검토시험을 실시하였다. 중금속 검출에 사용된 용출 시료는 기건 양생 28일 후에 공시체를 파쇄한 후 시멘트 파우더와 골재를 분류하여 시료를 재취하여 시멘트 파우더를 수집하여 시료를 제작하였다. 제작된 시료는 중금속 검출시험에 의해 시험되었다. 먼저 납(Pb), 카드뮴(Cd), 수은(Hg)의 경우는 유

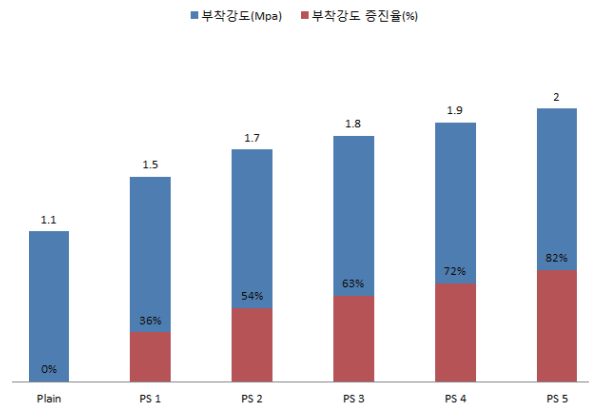


그림 3.4. 부착강도시험측정결과

도플라스마-발광분석법(ICP-OES)에 의해 시험되었고, 6가 크롬(Cr<sup>6+</sup>)의 경우는 분광광도계기법(UV/VIS)의 기법에 의해 시험되었다. 이와 같이 납(Pb), 카드뮴(Cd), 수은(Hg), 6가 크롬(Cr<sup>6+</sup>) 총 4가지의 중금속 검출 시험을 실시하였고 아래의 [표 3.1]은 중금속 용출결과를 나타낸 것이다.

결과를 보면 모든 시료들에서 중금속 성분이 검출되지 않는 것으로 나타났다. 일반적으로 보통포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 미분말의 수화반응을 통해서도 중금속 용출함량은 상

대적으로 적거나 나타나지 않는 경우가 대부분이다. 이는 수화반응 시에 화학적인 결합으로 고정화 되어 다양한 용출방법으로도 검출이 미미하거나 안되는 경우가 대부분이다. 이는 폴리실리콘 슬러지가 고로슬래그와 비슷한 화학특성을 가지고 있기 때문이라고 판단된다. 따라서 폴리실리콘 슬러지를 함유한 모르타르의 경우 양생 후에 중금속 등의 유해성분에 검출이 없다는 결론을 얻었다. 이는 환경적으로 문제가 없다는 것을 나타낸다.

[표 3.1] 중금속 용출 시험결과(RoHS)

구분	용출시험	단위	시험결과	MDL	시험방법
Plain	Pb	mg/kg	N.D	5.0	IEC 62321 : 2008_ICP-OES
	Cd		N.D	0.5	
	Hg		N.D	1.0	
	Cr <sup>6+</sup>		N.D	0.2	IEC 62321 : 2008_UV/VIS
PS 5 %	Pb	mg/kg	N.D	5.0	IEC 62321 : 2008_ICP-OES
	Cd		N.D	0.5	
	Hg		N.D	1.0	
	Cr <sup>6+</sup>		N.D	0.2	IEC 62321 : 2008_UV/VIS
PS 10 %	Pb	mg/kg	N.D	5.0	IEC 62321 : 2008_ICP-OES
	Cd		N.D	0.5	
	Hg		N.D	1.0	
	Cr <sup>6+</sup>		N.D	0.2	IEC 62321 : 2008_UV/VIS
PS 15 %	Pb	mg/kg	N.D	5.0	IEC 62321 : 2008_ICP-OES
	Cd		N.D	0.5	
	Hg		N.D	1.0	
	Cr <sup>6+</sup>		N.D	0.2	IEC 62321 : 2008_UV/VIS
PS 20 %	Pb	mg/kg	N.D	5.0	IEC 62321 : 2008_ICP-OES
	Cd		N.D	0.5	
	Hg		N.D	1.0	
	Cr <sup>6+</sup>		N.D	0.2	IEC 62321 : 2008_UV/VIS
PS 25 %	Pb	mg/kg	N.D	5.0	IEC 62321 : 2008_ICP-OES
	Cd		N.D	0.5	
	Hg		N.D	1.0	
	Cr <sup>6+</sup>		N.D	0.2	IEC 62321 : 2008_UV/VIS

※ MDL : Method Detection Limit, N.D : Not Detected



#### 4. 결론

폴리실리콘 슬러지의 사용가능성을 여러 가지 실험을 통해 입증하였다. 보수 용 모르타르에 폴리실리콘 슬러지를 광물질 혼화제의 대체제로서 사용하기에는 큰 무리가 없다는 결론은 얻었다. 또한 폴리실리콘 슬러지의 특성이 슬래그의 특성과 비슷한 성질을 가지고 있기 때문에 화학 및 물리적 특성에 따라서 구조물의 환경조건을 고려하여 사용하면 매우 효율적인 결과를 얻을 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 과립급결제의 사용으로 인해 동절기에 장거리 압송용으로 보수 모르타르의 작업성과 사용성능 또한 입증하였다. 추후 지연제 및 자기치유 재료 등에 과립기술을 적용하여 다양하게 보수재료로서 적용 및 연구가 이루어질 필요가 있다고 판단된다.

- V. S. Ramachandran, "Concrete Admixtures Handbook – Properties, Science, and Technology", Noyes Publications, USA, 1995.
- Tousey MD, The Granulation Process 101 Basic Technologies for Tablet Making, Pharmaceutical Technology 2002; 8-13.
- Ukrainczyk N, Matusinovic T, Thermal properties of hydrating calcium aluminate cement pastes, Cement and Concrete Research 2010; 40(1): 128-36.
- Ryou JS, Yang NW, Lee YS, A Study on Properties of Retarder via Tableting Method, Journal of the Korea Concrete Institute, 2013; 25(2): 201-207.
- 이용수, Study on crack-sealing of cement composite via encapsulating the granulated healing material, 박사학위논문, 한양대학교 대학원, 2015.
- Lee YS, Ryou JS, Self healing behavior for crack closing of expansive agent via granulation/film coating method. Construction and Building Materials, 2014; 71: 188-193.
- 김용하, 류재홍, 박성순, 이은승. "폴리실리콘 제조과정 발생 슬러지의 건설소재원료화", 유기성자원학회 2011년도 폐기물 관련학회 추계 공동학술대회 논문집, pp. 397~399, 2011
- 문지환, 박종필, 이윤성, 이강필, 이상수, 송하영. "폴리실리콘 슬러지를 사용한 저탄소 무기복합재의 Si/Al별 유동 및 강도특성", 한국건설공학회 학술. 기술논문발표회 논문집, Vol.11 No.2, pp. 47~48, 2011
- 신성환, "산업부산물인 폴리실리콘 슬러지와 레드머드의 혼입에 따른 모르타르의 공학적 특성", 한밭대학교, 석사학위논문, 2015

#### 참고문헌

- 약제학분과회 역, "제제학 – 의약품제형과 약물전달시스템", 신일북스, 서울, 2009, pp. 199~230.
- Shangraw RF, DA, Demarest, "A survey of current industrial practices in the formulation of tablets and capsules", Pharm Tech, 1993, pp. 32~44.

담당 편집위원 : 전중규(삼표시멘트)

#### ●● 학회 특별회원사 동정 안내

Magazine of RCR(한국건설순환자원학회지)은 계간으로 발행되어 회원을 비롯한 관련 업계, 학계, 유관기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다. 특별회원사의 최신 정보 및 기술현황 등의 홍보사항을 학회지에 무료로 게재하여 널리 홍보하고자 하오니 관심 있는 특별회원사는 아래 사항을 참조하여 원고를 송부하여 주시기 바랍니다.

##### 1. 특별회원사 홍보내용

특허, 신기술, 신제품, 수상실적, 세미나 및 시연회, 사회공헌 등

##### 2. 원고 분량

A4 2~4매 내외이나 특별한 제한이 없음(그림 또는 사진포함 가능)

##### 3. 보내실 곳

한국건설순환자원학회 오경숙 과장(E-mail : rcr@rcr.or.kr, Tel.02-552-4728)