

# 나노기술을 활용한 경량 고강도 시멘트 복합체 개발

## Development of lightweight and high strength cement composite using nanotechnology



**김주형 JooHyung Kim**  
(재)한국건설생활환경시험연구원  
건설기술연구센터 수석연구원  
E-mail : kjhmole@kcl.re.kr



**정연웅 Yeonung Jeong**  
(재)한국건설생활환경시험연구원  
건설기술연구센터 책임연구원  
E-mail : yeonungjeong@kcl.re.kr



**문주혁 Juhyuk Moon**  
서울대학교 건설환경공학부  
교수  
E-mail : juhyukmoon@snu.ac.kr



**정상화 Sanghwa Jung**  
(재)한국건설생활환경시험연구원  
건설본부장  
E-mail : jsh2593@kcl.re.kr

### 1. 머리말

나노기술의 개념은 1959년 미국의 리처드 파인만에 의해 미국물리학회 연차총회 강연을 통해 이론적으로 제시되었으며, 1974년 일본의 노리오 다니구치에 의해 나노기술(Nanotechnology)라는 단어를 사용함으로써 시작되었다. 이후 나노기술의 발전은 나노 사이즈를 측정할 수 있는 현미경 발명과 함께 지속적으로 연구되고 실용화 단계에 이르고 있다. 나노기술은 각 분야에서 가장 영향력이 있는 기술 중 하나가 되었으며, 토목·건축기술 분야에서도 다양한 방법으로 연구가 진행되고 있으며, 일부 실용화되고 있다. 콘크리트 분야에서는 초기 재령에서의 강도를 개선하는 것으로 알려져 있으며, 강재분야에서는 탄소나노섬유 등을 통해 중량이 가벼우면서 높은 강도 특성을 활용하여 철근 대체재로서 기능을 발휘할 수 있다. 또한, 유리 분야에서는 나노소재의 소수성 기능을 활용하여 오염물질로부터 방어하는 기능을 나타내기도 한다. 이와 더불어 나노재료의 전도성 기능을 활용한 자가센싱(Self-Sensing) 등의 개발하여 구조물의 유지관리에 활용되기도 한다. 이에 나노기술의 범위는 토목·건축 분야의 모든 부분에 확장되고 있으며, 이에 대한 연구와 개발이 지속적으로 수행되어야 한다. 본 기사에서는 2020년부터 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원 지원으로 진행되고 있는 “나노기술을 활용한 다기능·경량 하이퍼 콘크리트 기술개발” 과제의 일부분인 나노기술을 활용한 시멘트 복합체 기술 개발에 대한 내용을 이야기하고자 한다.

건설분야에서 일반적으로 사용되고 있는 콘크리트의 밀도와 역학적 성능의 비례관계를 가지게 된다. 금속과 같은 무거운 재료들은 상대적으로 가벼운 세라믹, 고분자 재료 등에 비해 역학적으로 우수한 성능을 가지게 되며, 시멘트 복합체 및 콘크리트에서 마찬가지로 이와 같은 성능을 가지게 된다. 즉, 역학적 성능이 높을수록 밀도도 같이 높아지게 된다. 미국콘크리트학회(ACI, American Concrete Institute)에서는 경량 콘크리트를 밀도 1,800 kg/m<sup>3</sup> 이하의 콘크리트로 정의하고 있고(ACI 213)<sup>1)</sup>, 유럽에서는 2,200 kg/m<sup>3</sup> 이하의 콘크리트로 정의하고 있다(EN 1992 1-1)<sup>2)</sup>. 또한, 두 규격 모두 고강도 콘크리트의 정의는 재령 28일 압축강도 기준으로 40 MPa 이상의 콘크리트로 정의하고 있다. 기존까지 수행된 경량 고강도 시멘트복합체 및 콘크리트 연구는 <그림 1>에 나타난 바와 같이 경

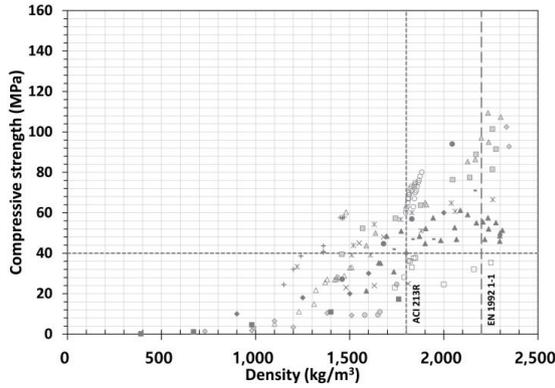


그림 1. 시멘트 및 콘크리트 밀도-압축강도와의 상관관계

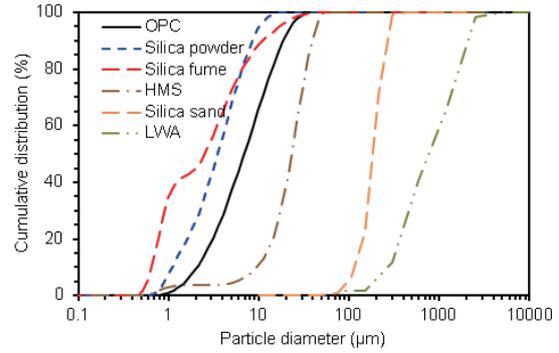


그림 2. 사용재료 입도분포

량 콘크리트와 고강도 콘크리트의 기준선이 접하는 수준에서 연구개발이 이루어지고 있다. 그러나, 본 연구에서는 경량성을 유지하면서 압축강도를 40 MPa 이상의 고강도 성능을 가지는 시멘트 복합체를 개발하는 것을 목표로 수행되었다.

경량이면서 고강도를 확보하기 위해 나소소재로 탄소나노튜브(CNT, Carbon Nanotube)를 활용하였으며, 사용 안정성과 건설용 재료로서 사용하기 위해 액상형 CNT를 개발하여 이에 적용하였다. 본 연구에 최종목표는 시멘트 경화체 밀도  $1.6 \text{ g/cm}^3$  이하 및 압축강도 80 MPa 이상이다.

## 2. 사용재료 특성 및 배합 도출

### 2.1 사용재료 특성

본 연구에서는 1종 보통포틀랜드시멘트와 실리카흙을 결합재로 사용하고, 고순도 실리카분말과 실리카 샌드를 충전재로 활용하였다. 중공마이크로스피어와 경량 잔골재로 충전재를 치환하여 경량성을 확보하는 배합을 도출하였다. 사용한 재료들의 입도는 각각 <그림 2>와 같다. 사용한 1종 보통포틀랜드시멘트의 광물조성은 일반적인 시멘트의 광물조성과 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, 실리카 분말은 다량의 quartz 결정과 소량의 cristobalite로 구성되어 있다. 실리카흙은 대부분 비정질 상으로 구성되어 있으나 소량의 quartz,

crystalite 및 moissanite 결정을 포함하는 것으로 나타났으며, 중공마이크로스피어는 결정상을 포함하지 않는 것으로 나타났다. 각 재료들의 단위중량은 시멘트  $3,150 \text{ kg/m}^3$ , 실리카 흙  $2,200 \text{ kg/m}^3$ , 실리카분말  $2,650 \text{ kg/m}^3$ , 실리카 샌드  $2,648 \text{ kg/m}^3$ , 중공마이크로스피어  $600 \text{ kg/m}^3$ , 및 경량 잔골재  $1,770 \text{ kg/m}^3$ 이다.

### 2.2 밀도 $1.6 \text{ g/cm}^3$ 이하 및 압축강도 80 MPa 경량·고강도 시멘트 복합체 개발

[표 1]은 밀도  $1.6 \text{ g/cm}^3$  이하 및 압축강도 80 MPa 이상의 경량 고강도 시멘트 복합체의 배합을 나타낸다. 지난 연구를 진행하면서 밀도  $2.0 \text{ g/cm}^3$  이하 및 압축강도 120 MPa 이상급, 밀도  $1.8 \text{ g/cm}^3$  이하 및 압축강도 100 MPa급 이상을 개발하였으며, 본 연구에 최종목표인 밀도  $1.6 \text{ g/cm}^3$  이하 및 압축강도 80 MPa 이상을 확보하기 위한 최종 배합을 나타내었다. 화학혼화제의 함량은 고품분 기준으로 화학혼화제에 포함된 물은 배합시 배합수에서 보정하여 사용하였으며, 해당 함량은 적정 위커빌리티를 확보하며 타설 후 24시간에 종결이 발생할 수 있는 함량을 기준으로 선정하였다. 경량재료(중공마이크로스피어 및 경량골재)의 부피비는 전체 시멘트 복합체의 약 43 % 수준이다. 배합한 굳지 않은 시멘트 복합체는  $\Phi 100 \times 200 \text{ mm}$  원주형 몰드에 타설 후  $21 \pm 2^\circ\text{C}$ , RH 95 %에서 24 시간 양생을 실시한 후 탈형하여  $90^\circ\text{C}$ , RH 99 %의 항온습

[표 1] 밀도 1.6 g/cm<sup>3</sup> 및 압축강도 80 MPa 급 경량·고강도 시멘트 복합체 배합설계(단위: kg/m<sup>3</sup>)

Label	물	시멘트	실리카폼	실리카분말	중공마이크로스피어	경량골재	화학혼화제
배합표	195.50	739.13	110.87	208.00	216.50	121.60	8.41

[표 2] 액상 CNT 활용 밀도 1.6 g/cm<sup>3</sup> 및 압축강도 80 MPa 급 경량·고강도 시멘트 복합체 배합설계(단위: kg/m<sup>3</sup>)

Label	물	시멘트	실리카폼	실리카분말	중공마이크로스피어	경량골재	액상CNT	화학혼화제
배합표	195.50	739.13	110.87	208.00	216.50	121.60	0.425	8.41

챔버에서 48시간 고온양생을 실시하였다. 이후 압축강도 측정시까지 21±2℃, RH 65%의 항온항습실에서 기건양생을 실시하였다.

## 2.2 액상 CNT 도입을 통한 경량 고강도 시멘트 복합체의 역학적 성능 향상

경량 고강도 시멘트 복합체의 역학적 성능을 향상하기 위해 액상 CNT를 도입하였다. 사용한 액상 CNT는 각기 다른 4 종류의 분산제를 사용하여 액상의 현탁액(suspension) 상태로 분산하였으며, 사용한 분산제는 폴리비닐피롤리돈(PVP) 분산제 1종, 폴리카르보산계(PC) 분산제 2종, 및 나프탈렌계(NAF) 분산제 1종이다. 사용한 액상 CNT의 함량은 CNT 고형분 기준으로 결합제(시멘트+실리카폼) 기준 0.05%이며, 액상 CNT에 포함된 물은 배합시 배합수에서 보정하여 사용하였다. CNT 혼입 경량 고강도 시멘트 복합체의 배합설계 [표 1]를 사용하였다.

<그림 3>은 액상 CNT 도입을 통한 경량 고강도 시멘트 복합체의 압축강도 특성을 보여준다. 사용한 4종의 CNT 분산제 중 PVP 분산제를 사용한 액상 CNT만 경량 고강도 시멘트 복합체의 역학적 성능을 향상시키는 것으로 조사되었으며, PC계 및 NAF계 분산제를 사용한 액상 CNT의 경우 경량 고강도 시멘트 복합체의 역학적 성능을 저하시키는 것으로 나타났다. 특히 PC계 분산제를 사용한 액상 CNT의 경우 배합과정에서 다량의 기포가 생성되는 것이 확인되었으며, 이는 PC

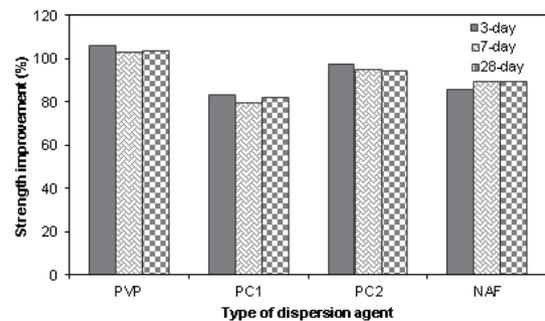


그림 3. 액상 CNT 활용 시멘트 복합체 압축강도

계로 분산한 액상 CNT의 분산 안정성이 낮은 것으로 판단된다. NAF계 분산제로 분산한 액상 CNT의 경우 CNT 자체의 분산은 우수한 것으로 나타났으나, 경량 고강도 시멘트 복합체에 혼입시 강도 하락이 큰 것으로 나타났다. 이는 경량 고강도 시멘트 복합체 제조과정에서 사용되는 PC계 화학혼화제와 액상 CNT 분산에 사용된 나프탈렌계 분산제와의 화학적 합성이 결합되어 생기는 문제로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 작업성과 역학적 성능 안정성을 위해 폴리비닐피롤리돈(PVP)로 분산한 현탁액을 사용하였다.

제작된 시멘트 복합체의 압축강도 실험 결과, 타설 24시간 이후 90℃의 고온양생으로 인해 재령일 증가에 따른 압축강도 발현 효과는 미미한 것으로 나타났으며, 압축강도의 수준은 목표한 80 MPa를 상회하는 것으로 나타났으며, 경화체의 밀도 역시 재령에 상관없이 1.6 g/cm<sup>3</sup> 이하의 밀도로 나타났다.

[표 3] 수축제어를 고려한 액상 CNT 활용 경량·고강도 시멘트 복합체 배합설계

(단위: kg/m<sup>3</sup>)

Label	물	시멘트	실리카폼	실리카분말	중공마이클로스피어	경량골재	액상CNT	수축저감제	팽창제(EA)	화학혼화제
배합표	195.50	739.13	110.87	208.00	216.50	121.60	0.425	B*×1.0%	B×1~3%	8.41

\* B : Binder(시멘트+실리카폼),

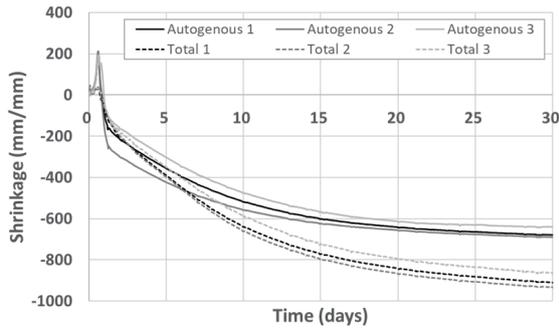


그림 4. 일반양생 조건에서의 수축시험 결과

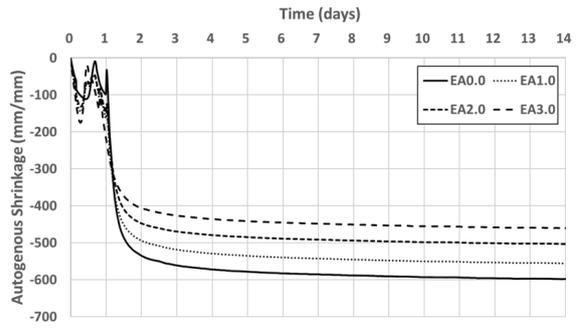


그림 5. 수축저감제 및 팽창제 적용 시멘트복합체 자기수축 실험 결과

### 3. 나노소재 활용 경량·고강도 시멘트 복합체 특성

#### 3.1 나노소재 활용 경량·고강도 시멘트 복합체 수축 특성

도출된 액상 CNT 활용 경량·고강도 시멘트 복합체의 수축 특성을 확인하기 위해 앞서 제시한 양생조건인 고온양생이 아닌 상온양생 조건(20 ± 2°C, 60 ± 3% RH)에서 100mm × 100mm × 400mm 크기의 각주형 시험체를 제작하였으며, 중앙부위에 T사에 PMF series 콘크리트용 매립형 변형율 게이지를 설치하였으며, 자기수축 특성 측정은 몰드와 콘크리트 사이의 부착 및 마찰을 최소화하기 위해 테프론 시트를 이용하였다. 시험체 타설 직후부터 변형을 측정하였으며, 타설 후 24시간 후에 몰드를 제거하였으며, 콘크리트 외부로의 수분 이동을 방지하기 위해 알루미늄 테이프를 이용하여 시험체를 밀봉하였다. 총 수축(Total shrinkage)시험은 시험체 및 측정장치는 자기수축(Autogenous shrinkage)시험과 동일하며, 24시간 이후 탈형하고 양생조건에 따라 측정을 수행하였다.

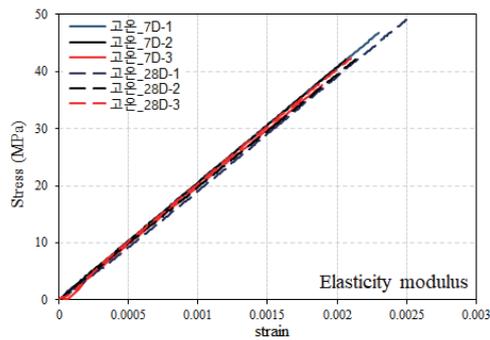
<그림 4> 및 <그림 5>에서 보는 바와 같이 자기수축 시험결과는 약 30일 정도 측정을 실시하였으며, 상대적으로 고강도

를 확보하기 위해 많은 바인더량을 사용함에 따라 수화 초기에 많은 수축량을 보이고 있으며, 일반적으로 재령 초기에 자기수축이 거의 완료되는 경향에 비해 30일 이상 소요되는 것을 확인되었으며, 전체 수축량도 사용 바인더량에 따라 크게 나타났다. 전체수축 시험결과는 자기수축 시험결과와 마찬가지로 많은 바인더량을 사용함에 따라 많은 수축량을 보이고 있으며, 부재 및 구조물 적용을 위해서는 수축 저감을 위한 방안이 필요하다. 이에 기존 문헌 및 연구결과를 참고하여 수축저감제 및 팽창제를 활용한 시멘트 복합체 배합을 실시하였다. 수축저감제는 S사 액상형을 사용하였으며, 팽창제는 CAS 계열의 분말형을 사용하였다. 또한, 경량·고강도 시멘트 복합체를 제조하기 위한 타설 후 24시간 후에 몰드를 제거하였으며, 콘크리트 외부로의 수분이동을 방지하기 위해 알루미늄 테이프를 이용하여 시험체를 밀봉하고, 고온양생 조건(90 ± 2°C, 95 ± 2% RH)에서 해당 재령까지 측정을 실시하였다.

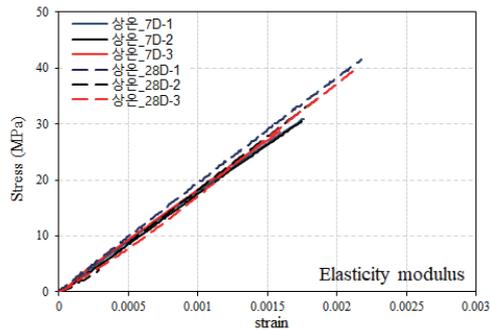
<그림 6>에서 보는 바와 같이 수축저감제 및 팽창제를 적용한 경량·고강도 시멘트 복합체의 자기수축 시험결과는 적용하지 않은 시험체 대비 사용량에 따라 7~23% 수준의 수축저감 효과를 확인하였다. 또한 이와 더불어 수축제어로 인한

[표 4] 팽창제 사용에 따른 시멘트 복합체 압축강도 실험결과

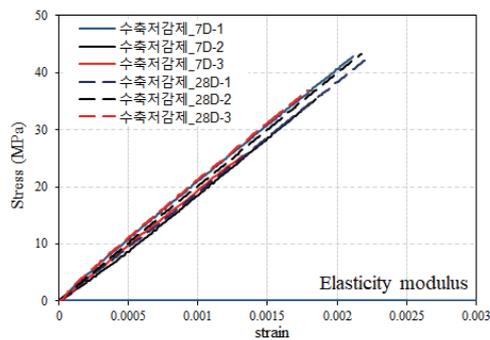
구분		압축강도(MPa)[7일]
팽창제	EA0.0	97.9
	EA1.0	96.3
	EA2.0	98.8
	EA3.0	97.8



(a) 고온양생



(b) 상온양생



(c) 고온양생(팽창제 적용)

그림 6. 경량·고강도 시멘트 복합체 탄성계수 실험 결과

역학적 특성을 확인한 결과, 7일 재령 압축강도 측정 결과, [표 4]와 같으며 수축저감제 및 팽창제를 사용에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

### 3.2 나노소재 활용 경량·고강도 시멘트 복합체 탄성 특성

구조물 적용을 위한 설계에 반영하기 위한 경량·고강도 시멘트 복합체의 탄성계수를 측정하였다. 시험방법은 KS F 2438 “콘크리트 원주 공시체의 정탄성 계수 및 포아송비 시험 방법”에 의거하여 실시하였으며, 시험체 크기는  $\Phi 100 \times 200$  mm 원주형 시험체를 활용하여 고온양생(팽창제 적용, 미적용) 및 상온양생 조건에서의 시험체를 제작하여 실시하였으며, 7, 28일 재령에서 실시하였다.

[표 5]는 탄성계수 실험결과 및 국가건설기준 KDS 14 20 10 “콘크리트 구조 해석 및 설계 원칙”에서 제시하고 있는 단위중량 및 강도 수준에 따른 계산식에 따라 결과를 보여주고 있다. 해당 기준에서는 단위중량  $1,450 \sim 2,500 \text{ kg/m}^3$ 인 경우 식 1을 활용하여 적용하고 있으며, 개발된 시멘트 복합체의 단위중량을 적용한 결과를 나타냈다.

$$E_c = 0.077m_c^{1.5} \sqrt[3]{f_{cm}} \text{ (MPa)} \quad (\text{식 1})$$

[표 5] 경량·고강도 시멘트 복합체 탄성계수 설계 계산식 및 실험결과 비교

구분	압축강도 (MPa)	탄성계수		
		설계식 계산값 (MPa)	실험결과값 (MPa)	
고온양생	7일	106.0	22,882	21,108
	28일	110.8	23,226	21,298
상온양생	7일	78.4	19,694	18,395
	28일	102.2	22,607	21,064
고온양생 (팽창제)	7일	107.2	22,972	21,148
	28일	110.6	23,224	21,245

결과에서 보는 바와 같이 단위중량 및 강도 수준 대비 국가 건설기준 에서 제시하고 있는 식에 도출된 계산값과 실험결과 값은 유사하게 도출되어 기존 설계식을 사용하는 것은 무리가 없을 것으로 판단되며, 추후 구조물 설계에 반영하여 제작을 수행할 예정이다.

#### 4. 맺음말

본 연구는 시멘트 복합체의 낮은 밀도의 고강도 시멘트 복

합체를 개발하는 것을 목표로 수행되었다. 본 연구개발의 결과의 상당수가 기존 밀도-압축강도 상관관계보다 다른 결과를 보여주며, 이는 본 연구개발 성과의 우수성을 보여준다. 현재 구조부재에의 적용을 위해 개발된 경량 고강도 시멘트 복합체의 시간의존적 특성 실험, 휨부재 실험, 및 전단부재 실험 등이 완료된 상태이며, 실제 박스구조물을 대상으로 설계 및 제작을 예정하고 있다. 본 연구개발을 통해 멀지 않은 미래에 경량 고강도 시멘트 복합체의 현장적용이 가능해질 것을 기대해본다.

#### 참고문헌

1. ACI 213R-14 Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete, (2014) American Concrete Institute.
2. EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings (2004) European Committee for Standardization.
3. 정연웅, 임귀환, 강용학, 정상화, 김주형, "단위중량 2,000kg/m<sup>3</sup>급 고강도 시멘트 복합체 개발을 위한 기초 연구" 한국건설순환자원학회 논문집 (2020) 8(4) 562-570.
4. Kang, S.-H. et al., "The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete" Cement and Concrete Research (2019) 115 389-400.
5. Mahato, J. et al., "Incorporation of high volume of cenosphere particles in low water-to-cement matrix for developing high strength and lightweight cementitious composites" Journal of Sustainable Cement-Based Materials (2022) 2095678.
6. KS F 2438 "콘크리트 원주 공시체의 정탄성 계수 및 포아송비 시험 방법"
7. 국가건설기준 KDS 14 20 10 "콘크리트 구조 해석 및 설계 원칙"

담당 편집위원 : 박병선(고려대학교)

#### ●● 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 사진 포함 가능)

##### 3. 보내실 곳

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