

Research Paper

# 그래핀과 유공유리분말을 사용한 초고강도 콘크리트의 역학적 성능에 관한 실험적 연구

## An Experimental Evaluation of Mechanical Behavior in Ultra-High Strength Concrete Utilizing Graphene and Hollow Glass Powder

서태석<sup>1</sup> · 변찬<sup>2</sup> · 김강민<sup>3</sup> · 이현승<sup>3\*</sup>

Seo, Tae-Seok<sup>1</sup> · Byon, Chan<sup>2</sup> · Kim, Kang-Min<sup>3</sup> · Lee, Hyun-Seung<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Senior Researcher(Ph.D, PE), R&D Center, Hyundai E & C, Jongno-Gu, Seoul, 03058, Korea

<sup>2</sup>CEO(Ph.D), CBBS, Co., Ltd, Ulsan, 44992, Korea

<sup>3</sup>Senior Researcher(Master), R&D Center, Sampyo Industry, Gyeonggi-do, 12768, Korea

\*Corresponding author

Lee, Hyun-Seung  
Tel : 82-2-476-5483  
E-mail : hs\_1214@hanmail.net

Received : May 31, 2023

Revised : June 23, 2023

Accepted : June 29, 2023

ABSTRACT

This research scrutinizes the mechanical characteristics of ultra-high strength concrete using oxide graphene nanoplatelet(GO) and hollow glass powder(HGP). The investigation covered various mechanical attributes, including workability, compression strength, tensile strength, water resistance, and the internal microstructure of standard concrete. Our findings reveal that workability experiences a significant improvement with the incorporation of a minimal amount of HGP, and an increase was also observed in tensile strength and water resistance. It was confirmed that cGO(C company GO) and HGP demonstrated commendable dispersion and the pore volume exhibited a reduction of more than 20%. The potential of cGO and HGP to substitute silica fume(SF) was also explored. Consequently, it was found that both workability and mechanical properties were enhanced in the absence of SF when cGO and HGP were used. This finding implies that the utilization of these novel materials could potentially modify conventional methods of concrete manufacturing.

**Keywords :** ultra high strength concrete, oxidized graphene nanoplatelet, hollow glass powder, novel materials

## 1. 서론

그래핀은 흑연을 한층 박리시킨 탄소 나노재료로써 다른 나노재료 보다 비표면적이 넓고 기계적 강도, 열적, 전기적 특성이 매우 우수한 특징이 있기 때문에 다양한 산업 분야에 활용되고 있다[1]. 따라서 그래핀을 콘크리트 재료에 적용한다면 소량 사용으로도 콘크리트 매트릭스 내 공극들이 충전 되어 콘크리트의 공극특성과 역학적 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있을 것으로 기대 된다[2-4].

그래핀을 콘크리트 재료에 적용하기 위해서는 분산성을 향상시키는 것이 매우 중요하다. 그래핀은 강한 반데르발스 힘(Van der waals forces)으로 인해 그래핀 간에 상호 응집하는 경향이 있으며 소수성으로 물에 분산이 잘 되지 않는 특징이 있다[5,6]. 따라서 고분자 내에서 분산성, 고분자 매트릭스와의 계면 접착력을 향상시킬 수 있는 산화 그래핀 나노플레이트릿(Oxidized graphene nanoplatelet, GO)이 제조되었다[1]. 하지만 산화 그래핀의 높은 분산성과 큰 비표면적으로 인하여 접촉면적이 넓어지고 수분흡착이 증가하여 물과 고성능 감수제의 분자활동이 제한되어 작업성능이 저하되는 것으로 보고되고



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있다[7-9]. 나노소재인 그래핀을 콘크리트에 적용하기 위해서는 작업성능을 확보하는 것이 중요하다. 기존 연구[10]에서는 고성능 감수제(superplasticizer) 또는 실리카흄(silica fume, SF)을 활용하여 작업성능을 향상시키는 전통적인 방식에서 탈피하여 유공유리분말(Hollow Glass Powder, HGP)이라는 신소재를 활용하여 고강도 콘크리트의 작업성을 검토하였다. 그 결과 HGP 소량 투입으로도 HGP의 볼베어링(ball bearing) 효과로 고강도 콘크리트의 작업성을 효과적으로 향상시킬 수 있는 것으로 확인되었다. HGP는 소다 라임 보로실리케이트 유리(Soda-lime-borosilicate glass)로 제조되며 고강도, 저비중의 미세한 분말 형태의 물질로 점성의 감소 및 유동성 증가 효과가 있어 작업성 향상에 도움이 되므로 플라스틱 사출 및 도막재료 등 다양한 분야에서 광범위하게 사용되고 있는 재료이다[10].

따라서 콘크리트에 GO와 HGP를 사용하면 쉽게 작업성을 확보하면서 역학특성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 120MPa 급의 초고강도 콘크리트를 대상으로 역학특성을 검토하였고, GO와 HGP가 SF를 대체할 수 있는지에 대해서도 검토하였다. SF는 초고강도 콘크리트의 강도 및 유동성 확보를 위해 필수로 적용되고 있는 재료이지만 대량생산 시 SF가 사일로에 붙거나 이송라인의 폐색을 유발하기 때문에 생산성이 하락하는 문제가 발생할 수 있다. GO와 HGP가 SF를 대체할 수 있다면 고강도 콘크리트 대량생산 시 품질관리 및 생산성 향상에 도움이 될 것으로 기대된다. 특히 본 연구를 통해 신재료의 사용으로 콘크리트 역학특성의 향상 및 제조방법의 변화가 가능함을 제시하고자 한다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 사용재료 및 배합

본 연구에서는 분산성뿐만 아니라 경제적인 측면도 고려하여 팽창흑연(expanded graphite)를 기계적으로 박리한 후 GO를 결합시킨 C 사의 GO(이하 cGO)를 사용하였고, 폴리카르복산계(polycarboxylic, PC) 고성능 감수제에 cGO를 분산시켜 cGO+고성능 감수제 분산액으로 제작하였다. Table 1에 cGO의 특성을 정리하였고, Figure 1에 cGO의 개념도 및 PC에 첨가된 cGO의 광학현미경 촬영 이미지를 나타내었다. 미립자의 분산을 위해서는 강한 전단력(shear rate, 단위: 1/s)을 가하여 입자를 미립화시키는 작업이 필요하기 때문에 분말형 나노입자인 그래핀의 분산을 위해 10,000,000 1/s의 전단력 인가가 가능한 3.0kw, 1.0liter/min 급의 microfluidizer를 이용하여 30분 이상 분산을 수행하였다. 분산 전과 후의 분산성을 광학현미경으로 촬영한 이미지를 비교하면 분산이 잘 된 것을 확인할 수 있었다(Figure 1 참조).

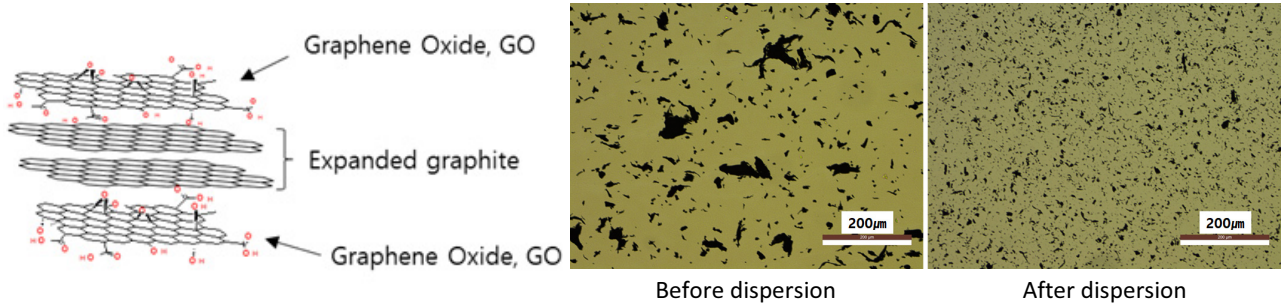
Figure 2는 Scanning Electron Microscopy(SEM)으로 촬영한 cGO의 형상을 나타낸 것이다. 불규칙한 주름이 있는 판상형 구조인 것을 알 수 있으며 이러한 형상은 박리 과정에서 생긴 변형의 결과인 것으로 보고되고 있다[11].

작업성 확보를 위해 활용된 HGP는 밀도가 0.4 정도로 경량이고 분말도가 6,000~10,000cm<sup>2</sup>/g 정도로 미세하여 육안상으로 분말의 형태로 보이지만 구형의 형태를 하고 있으며 Soda lime Borosilicate Glass의 구성성분으로 이루어진 셀로 막을 형성하고 있고 그 안은 중공으로 되어 있다. Table 2에 HGP의 특성을 정리하였고, Figure 3에 광학현미경으로 촬영된 HGP의 이미지를 나타내었다.

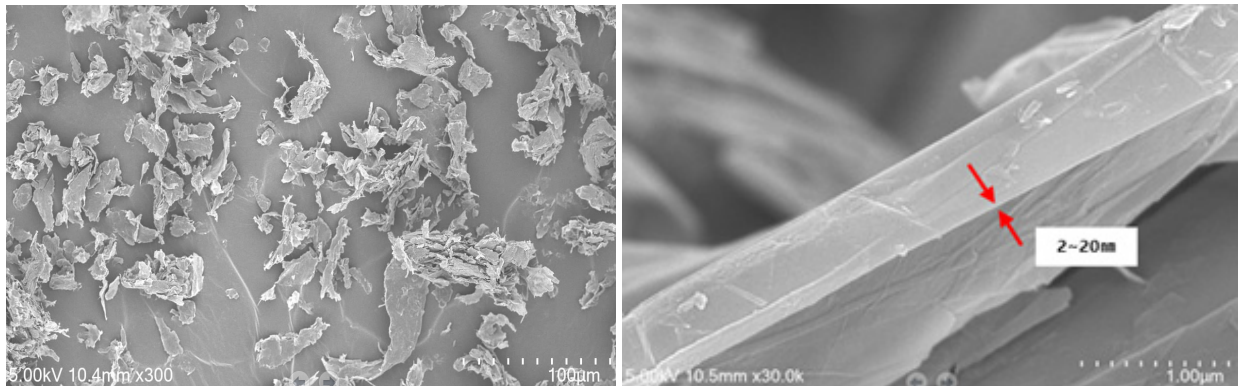
사용한 결합제는 조강시멘트, 실리카흄, 고로슬래그 미분말, 석고이고, 골재는 규사를 사용하였으며 Table 3에 정리하였다. 콘크리트 배합은 cGO와 HGP를 활용하여 SF를 대체한 초고강도 콘크리트의 개발 가능성을 검토하기 위하여 SF가 사용된 압축강도 120MPa 급의 초고강도 콘크리트 배합과 SF를 생략하고 cGO와 HGP를 사용한 배합을 기준으로 하여 Table 4와 같이 정하였다.

**Table 1.** Characteristics of cGO

Layer	Thickness(nm)	Length( $\mu\text{m}$ )	Specific surface area( $\text{m}^2/\text{g}$ )
5~50	2~20	5~30	50~150



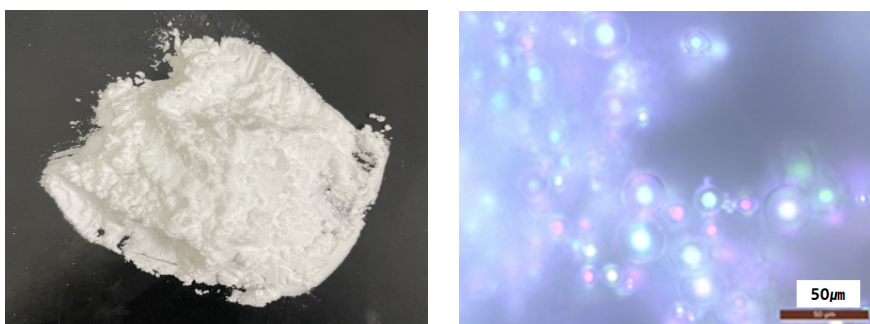
**Figure 1.** Illustration of cGO and its interaction with superplasticizer



**Figure 2.** Scanning electron microscopy(SEM) image of cGO

**Table 2.** Characteristics of HGP

Density (g/cc)	90% Breaking strength (MPa)	Particle size distribution( $\mu\text{m}$ , by volume)			
		10th%	50th%	90th%	Effective top size
0.46	110	10	20	20	20



**Figure 3.** Visual representation of Hollow Glass Powder

**Table 3.** Properties of the utilized materials

Material	Physical properties
Cement(C)	Type III, Specific gravity: 3.15, Specific surface area: 341m <sup>2</sup> /kg
Silica fume(SF)	Specific gravity: 2.20, Specific surface area: 20m <sup>2</sup> /g
Granulated blast-furnace slag(BFS)	Specific gravity: 2.90, Specific surface area: 430m <sup>2</sup> /kg
Gypsum(G)	Specific gravity: 2.81, Specific surface area: 390m <sup>2</sup> /kg
Fine aggregate(S)	Natural silica sand, Specific gravity: 2.62, Particle size : 0.18~0.85mm
Superplasticizer(SP)	Polycarboxylate high range AE water reducer(liquid type)

**Table 4.** Proportions of Concrete mix(Weight ratio)

Mix	W/B (%)	W	C	BFS	SF	G	S	SP (B*%)	cGO (kg/m <sup>3</sup> )	HGP (kg/m <sup>3</sup> )
Ref	24.0	0.4	1.0	0.5	0.08	0.08	1.88	0.75	-	-
Ref+G(1)	24.0	0.4	1.0	0.5	0.08	0.08	1.88	0.75	1.0	-
Ref+G(1)+H(2)	24.0	0.4	1.0	0.5	0.08	0.08	1.88	0.75	1.0	2.0
SF(×)+G(1)+H(3)	25.3	0.4	1.0	0.5	0.0	0.08	1.98	0.75	1.0	3.0

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 슬럼프 플로우 및 T500

슬럼프 플로우는 KS F 2594[12]에 준하여 실시하였다. T500은 굳지않은 콘크리트의 점성을 간접적으로 평가할 수 있는 방법으로 슬럼프 플로우가 500mm 도달할 때의 시간을 측정한다.

### 2.2.2 레올로지 시험

굳지않은 콘크리트의 항복응력과 소성점도를 측정할 수 있는 Biel 사의 Rhetribo를 사용하여 콘크리트의 레올로지를 측정하였다. 측정방법은 용기(직경 286mm)에 콘크리트를 채운 후 십자 날개판을 시편 중앙에 삽입하여 20초 동안 0.5rev/s의 속도로 회전시킨 후, 회전속도를 0.5rev/s에서 0.05rev/s까지 30초 동안 감속시켜가며 날개판에 발생하는 비틀림 모멘트 값을 5초마다 총 7회 측정하고 측정된 값으로부터 회귀분석을 실시하여 얻어진 직선의 기울기로부터 소성점도를 산출하였다.

### 2.2.3 강도(압축, 할렬, 휨) 시험

강도시험을 실시하기 위해서 KS F 2403[13]에 준하여 압축, 할렬 인장강도는  $\Phi 100 \times 200$ mm, 공시체를 제작하여 재령 3일, 7일, 28일에 강도 시험을 실시하였고, 휨 강도는 100×100×400mm 공시체를 제작하여 재령 28일에 4-point bending test를 실시하였다. 공시체는 배합별로 3개씩 제작하여 표준양생을 실시하였다.

### 2.2.4 투수 시험

투수 시험은 KS F 4919[14]에 준하여 실시하였으며, 재령 28일 경과 후에 기준 수압보다 2배 높은 0.2MPa의 수압으로 1시간 가한 후에 콘크리트 공시체가 물을 흡수한 양을 측정하였다. 시험체는 배합별로 2개씩 제작하였다.



### 2.2.5 내부조직(SEM, MIP)

강도 시험을 실시한 공시체에서 10mm 정도의 크기로 시편을 채취하여 24시간 동안 아세톤에 침지시켜 수화 정지시킨 후 24시간 이상 건조시킨 다음 Scanning Electron Microscopy(SEM) 촬영을 수행하여 미세구조를 확인하였고 공극률 측정을 위해 Mercury Intrusion Porosimetry(MIP) 분석을 실시하였다.

## 3. 시험결과 및 분석

### 3.1 유동성 평가

SF와 고성능 감수제로 작업성을 맞춘 초고강도 콘크리트 배합을 기준배합(Ref)으로 해서 단위수량 및 고성능 감수제량을 고정으로 하여 SF 생략 및 cGO와 HGP를 추가 투입하여 슬럼프 플로우 변화를 조사하였다. 모든 배합에서 재료분리 현상은 발생하지 않았다(Figure 4).

Figure 5에 슬럼프 플로우 결과를, Figure 6에 T500 결과를 나타내었다. Ref 배합에 cGO를  $1.0\text{kg/m}^3$  혼입한 배합(Ref+G(1))의 슬럼프 플로우는 Ref 배합 보다 8% 이상 감소하였고, 굳지않은 콘크리트의 점성을 간접적으로 평가할 수 있는 T500도 Ref 배합보다 2배 정도 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 현상은 분산성이 확보된 그래핀은 큰 비표면적으로 인하여 수분과의 접촉면적이 넓어져서 수분흡착이 증가하여 고성능 감수제의 성능 저하로 인해 콘크리트의 작업성능이 감소되는 것으로 보고되고 있다[7-9]. 따라서 본 연구에 적용된 cGO+고성능 감수제의 분산성이 우수한 것으로 판단된다.

HGP가 작업성 개선에 효과가 있는지를 검토하기 위해 Ref+G(1) 배합에 HGP를  $2.0\text{kg/m}^3$  혼입한 배합 Ref+G(1)+H(2)의 슬럼프 플로우를 측정하였다. 그 결과 플로우 값은 Ref+G(1) 보다 4% 이상 증가하였고, T500은 30% 이상 단축되는 등 Ref+G(1)의 작업성능이 회복되는 것을 확인할 수 있었다.

초고강도 콘크리트에서 강도 및 유동성 확보를 위해 필수로 활용되고 있는 SF를 cGO와 HGP로 대체 가능한지를 검토하기 위해 SF를 제거하고 cGO와 HGP를 각각  $1.0\text{kg/m}^3$ ,  $3.0\text{kg/m}^3$  혼입한 SF(x)+G(1)+H(3) 배합의 작업성능을 검토하였다. 본 배합에서는 SF가 빠지기 때문에 점성의 증가를 고려하여 HGP를  $1.0\text{kg/m}^3$  더 추가하여 검토하였다. 그 결과 슬럼프 플로우는 800mm, T500은 3.1초로 Ref 배합과 거의 유사한 결과를 나타내었다.

슬럼프 플로우 시험 외에도 레올로지 시험을 실시하여 소성점도를 측정하였고, 그 결과를 Figure 7에 나타내었다. cGO  $1.0\text{kg/m}^3$ 의 투입으로 점성이 Ref 배합보다 3배 정도 증가하였지만 HGP의 혼입으로 점성이 회복되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 SF를 생략하고 cGO를 혼입해도 HGP 소량 투입( $3.0\text{kg/m}^3$ )으로 작업성능을 획기적으로 회복시킬 수 있는 것으로 확인되었다.

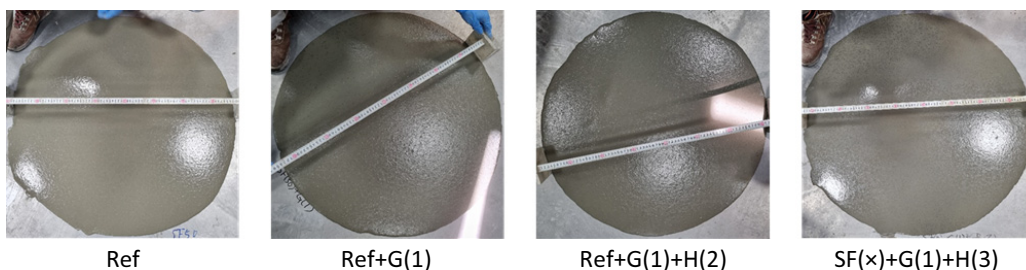


Figure 4. Diagram of Slump flow

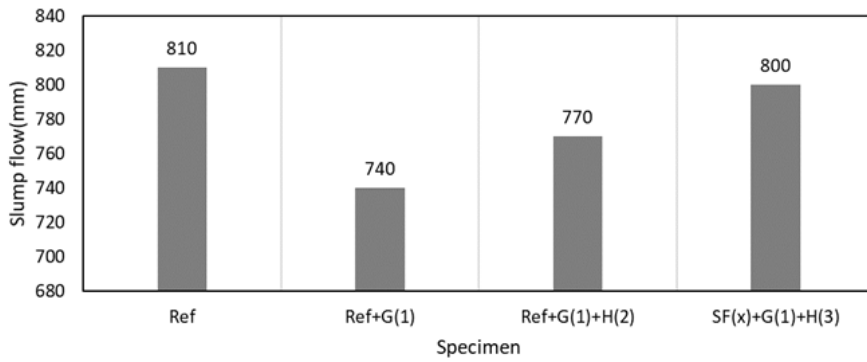


Figure 5. Slump flow evaluation

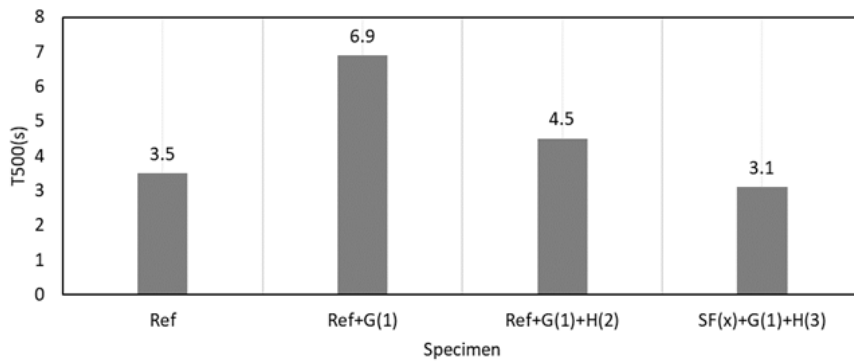


Figure 6. T500 analysis

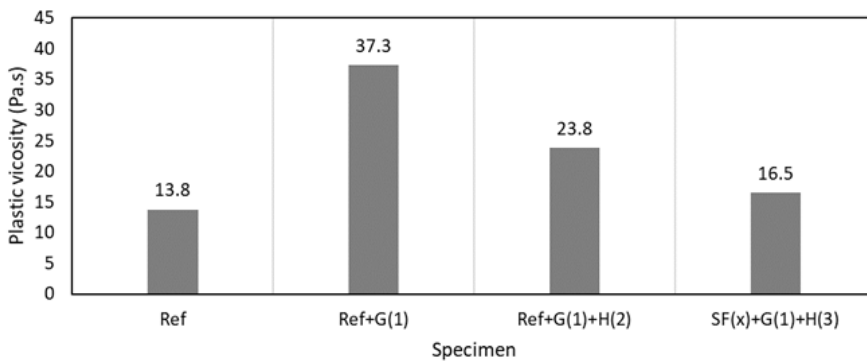


Figure 7. Examination of Plastic viscosity

### 3.2 강도(압축, 할렬, 휨) 평가

압축강도 결과를 Figure 8에 나타내었다. 모든 배합에서 목표강도(120MPa) 이상 발현되었으며, cGO의 혼입으로 압축강도의 증가가 크지는 않았지만 cGO가 혼입된 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 2~3% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 할렬 인장강도(Figure 9)와 휨강도(Figure 10)도 cGO의 혼입으로 강도가 각각 20%, 10% 정도 증가하는 것으로 확인되었다. 그래핀은 섬유와 같이 균열의 전파를 효과적으로 억제하는 것으로 보고되고 있으며[15] 이러한 균열 전파의 억제로 인해 콘크리트의 강도가 증가한 것으로 추정된다. 특히 SF를 생략해도 cGO의 소량 투입으로 강도특성이 향상되는 것으로 확인되었다.

Figure 10에 재령 28일의 휨강도와 할렬 인장강도의 관계를 나타내었다. 기존 연구[16]에 의하면 휨강도와 할렬 인장강도

와의 관계를 식 (1)과 같이 나타내었지만 이번 실험 결과에서는 휨강도가 할렬 인장강도보다 2.5배 정도 높은 것으로 나타났다. 추후에 초 고강도 콘크리트 강도특성의 보다 많은 데이터의 축적과 분석이 필요할 것으로 판단된다.

$$\sigma_f = 1.8 \times \sigma_t \tag{1}$$

$\sigma_f$  : 휨 강도(MPa)

$\sigma_t$  : 할렬 인장강도(MPa)

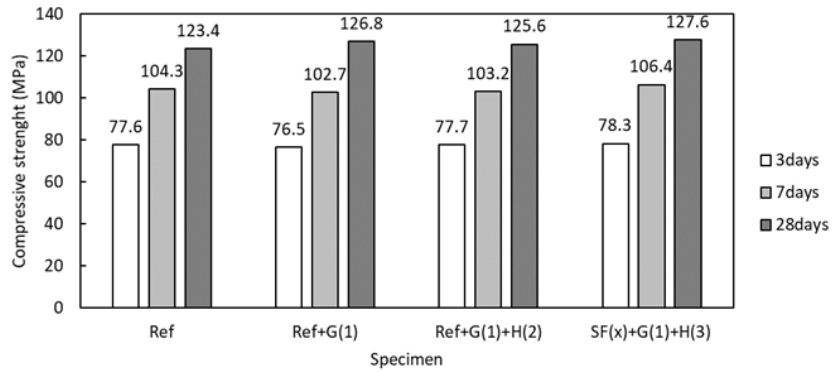


Figure 8. Evaluation of compressive strength

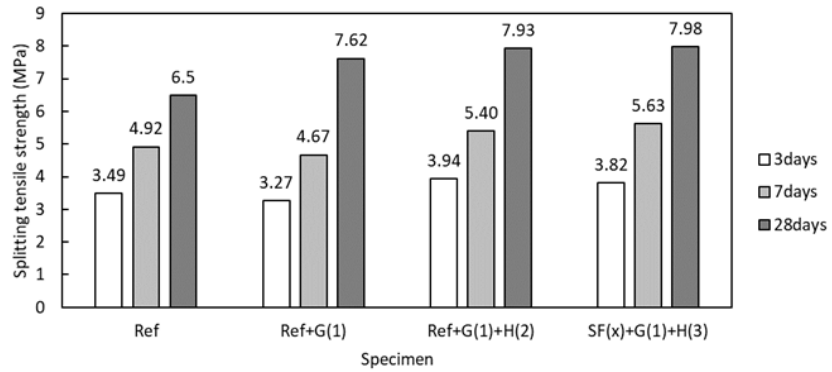


Figure 9. Investigation of Splitting tensile strength

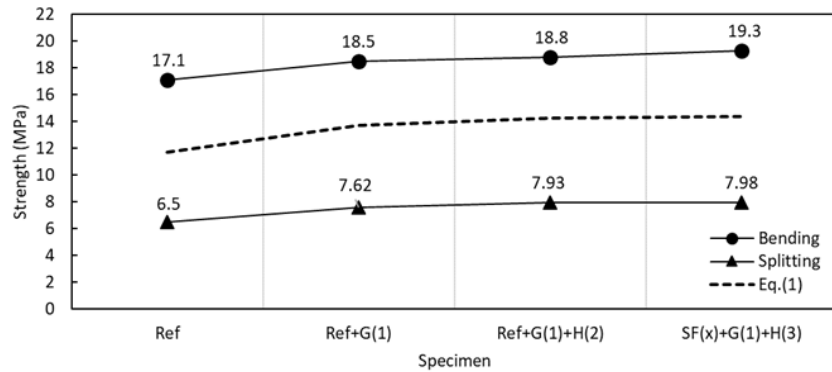


Figure 10. Comparative analysis of bending strength and splitting tensile strength

### 3.3 수밀성 평가

0.2MPa의 수압을 1시간 가한 후에 콘크리트 공시체가 물을 흡수한 양을 식 (2)에 따라 구하였고, 그 결과를 Figure 11에 나타내었다. 120MPa의 초고강도 콘크리트를 대상으로 실시했기 때문에 조직이 매우 치밀하여 최대 수분 흡수량은 1.1g으로 적었지만 cGO가 혼입된 콘크리트의 수분흡수량은 0.2~0.3g 정도로 cGO가 혼입되지 않은 Ref 콘크리트보다 80% 정도 감소하는 것으로 나타났다. cGO의 우수한 분산성능과 큰 비표면적으로 인해 콘크리트 매트릭스 내의 공극들이 충전 되어 강도 특성뿐만 아니라 수분 침투의 장벽으로 작용하여 수밀성도 향상된 것으로 추정된다. 수분은 모세관 작용에 의해 염화물, 황산염 등과 같은 내구성에 악영향을 미치는 물질의 침투를 위한 매개체 역할을 하므로 그래핀은 내구성 향상에도 도움이 될 것으로 판단된다.

$$W = B - A \tag{2}$$

*W*: 콘크리트 시편이 흡수한 물의 양(g)

*A*: 건조로에서의 절건 중량(g)

*B*: 투수시험 종료 후의 중량(g)

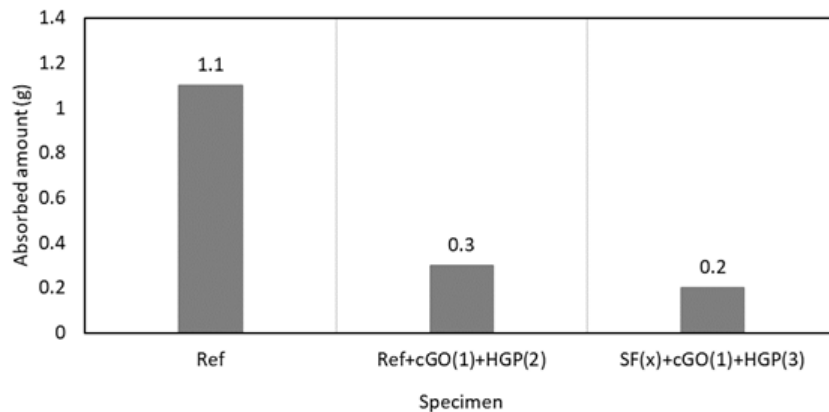


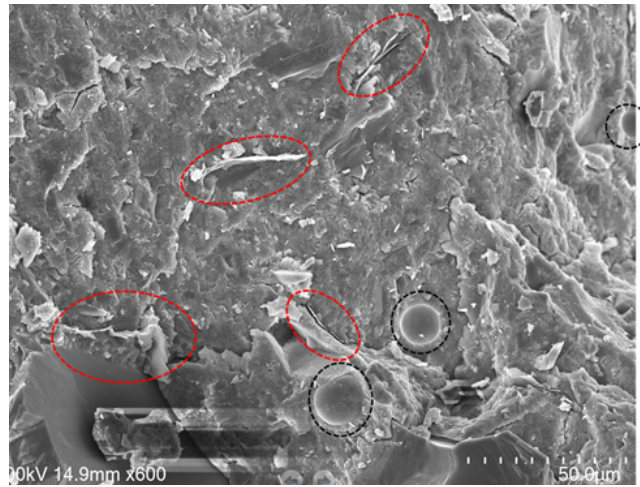
Figure 11. Permeability testing

### 3.4 내부조직(SEM, MIP)

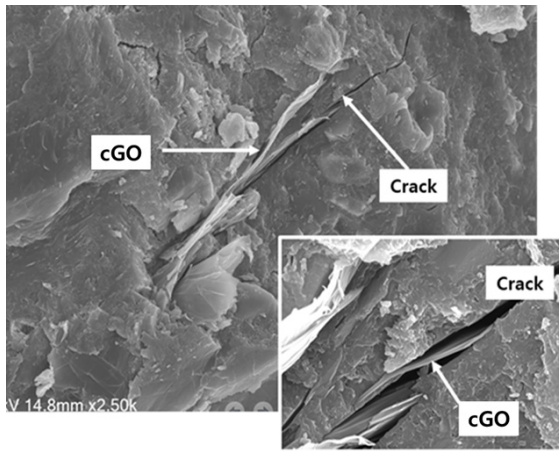
Figure 12에 SF(x)+G(1)+H(3) 시험체의 SEM 촬영 결과를 나타내었다. 수화생성물 사이에 cGO 입자가 고루 분포되는 것으로 관찰되었고, 응집현상은 발견되지 않았으며 HGP 도 콘크리트 조직 내에서 고루 분포되어 있는 것으로 나타났다 (Figure 12(a)). 특히 균열면에서 cGO가 가교 저항 역할을 하는 것으로 추정되는 곳도 관찰 되었으며(Figure 12(b)) 이러한 가교 저항 역할로 균열을 구속하고 인장강도가 증가하는 것으로 추정된다[15].

또한 균열면에서의 HGP가 형상의 변화나 파괴가 전혀 발생하지 않았음을 확인할 수 있었다(Figure 12(c)). HGP의 높은 강도특성과 구형의 형태로 인해 콘크리트의 강도에 영향을 주지 않고 볼베어링(ball bearing) 효과로 작업성 향상에 기여하는 것으로 추정된다.

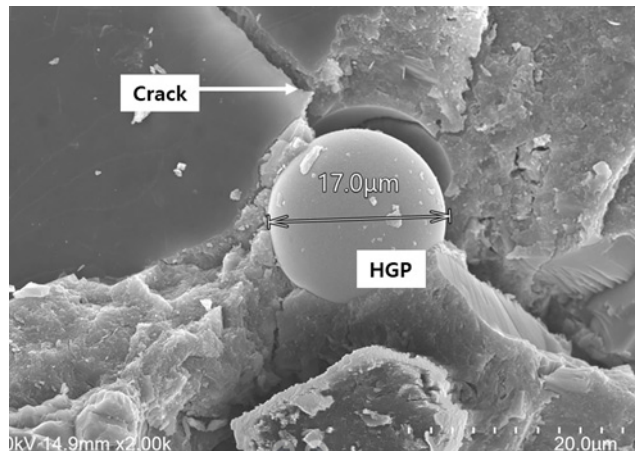




(a) cGO and HGP inside concrete ○ cGO ○ HGP



(b) cGO on cracked surface



(c) HGP on cracked surface

**Figure 12.** SEM image of concrete enriched with cGO and HGP

Figure 13 에 Ref 와 SF(×)+G(1)+H(3) 시험체에서 채취한 시편에서 MIP 분석을 실시한 결과를 나타내었다. 공극 분포는 모든 시편에서 15~25nm 크기의 공극은 증가하고 25~50nm 크기의 공극이 현저히 감소하는 것으로 확인되어 공극 구조가 유사한 것으로 나타났다. 전체 누적 공극량(Cumulative pore volume)은 SF(×)+G(1)+H(3) 가 Ref 보다 21% 정도 감소하는 것으로 확인되었다(Figure 13(a)). 한편 모세관 공극(Capillary pore)은 외부의 이산화탄소, 산소, 물 등의 침투 경로가 되어 콘크리트의 내구성능에 나쁜 영향을 미칠 수 있는 것으로 보고되고 있으며[17] 모세관 공극 영역인 0.003~10μm[18] 의 범위에 대한 누적 공극량도 조사하였다. 모세관 공극 누적량도 SF(×)+G(1)+H(3) 가 Ref 보다 27% 정도 감소하는 것으로 나타났다(Figure 13(b)). 이는 수분산 cGO의 높은 분산성능과 높은 비표면적으로 인해 콘크리트 내부의 공극구조가 향상된 것으로 추정된다. 이러한 향상된 공극구조로 인해 강도 및 수밀성이 향상된 것으로 판단되며 하이퍼루프 튜브와 같이 기밀성능을 요하는 구조물에도 효과적으로 활용 가능할 것으로 판단된다.

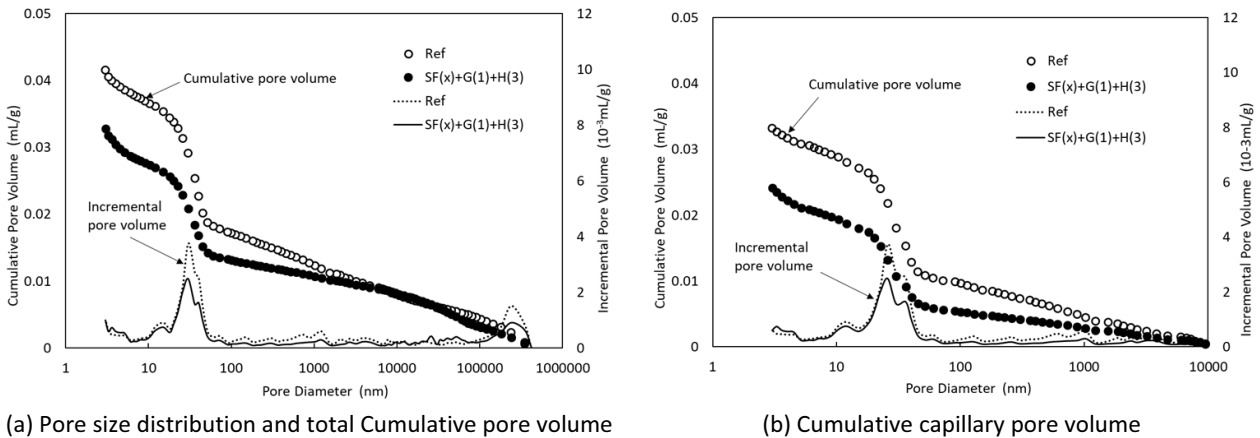


Figure 13. Result of MIP analysis

#### 4. 결론

본 논문에서는 cGO와 HGP를 사용한 초고강도 콘크리트의 물성에 대해 검토하였고 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) SF와 고성능 감수제로 작업성을 맞춘 Ref 배합에 SF 대신에 cGO와 HGP를 투입하여 작업 성능을 검토한 결과 cGO 1.0kg/m<sup>3</sup> 혼입으로 작업이 불가능 할 정도로 작업성이 나빠졌지만 HGP 소량 투입(2.0~3.0kg/m<sup>3</sup>)으로 유동성이 증가하고 점성이 감소하는 등 Ref 배합의 작업 성능과 동등 이상으로 회복시킬 수 있는 것으로 확인 되었다. HGP 투입량의 적절한 조절로 120MPa를 상회하는 초고강도 콘크리트의 작업성도 쉽게 확보할 수 있을 것으로 판단 된다.
- 2) cGO가 혼입된 콘크리트의 재령 28일 압축강도, 할렐 인장강도 및 휨강도는 각각 3%, 20%, 10% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 그래핀은 섬유와 같이 균열의 전파를 효과적으로 억제하는 것으로 보고되고 있으며 이러한 균열 전파의 억제제로 인해 콘크리트의 강도가 증가한 것으로 추정된다.
- 3) 투수시험 결과 cGO의 혼입으로 수분 흡수량이 80% 정도 감소하는 것으로 나타났으며 cGO의 우수한 분산성과 큰 비표면적으로 인해 콘크리트 매트릭스 내의 공극들이 충전 되어 강도 특성뿐만 아니라 수분 침투의 장벽으로 작용하여 수밀성도 향상된 것으로 추정된다.
- 4) SEM 촬영 결과 수화생성물 사이에 cGO 입자가 고루 분포되는 것으로 관찰되었고 cGO의 응집현상은 발견되지 않았다. HGP도 콘크리트 조직 내에서 고루 분포되어 있는 것으로 나타났다. 특히 균열면에서 cGO가 가교 저항 역할을 하는 것으로 추정되는 곳도 관찰 되었다. 또한 HGP가 형상의 변화나 파괴가 전혀 발생하지 않았음을 확인할 수 있었고 높은 강도특성과 구형의 형태로 인해 콘크리트 강도 저하에 영향이 없이 작업성 향상에 기여하는 것으로 추정된다.
- 5) 전체 누적 공극량(Cumulative pore volume)은 SF(x)+G(1)+H(3)가 Ref 보다 21% 정도 감소하는 것으로 확인되었고 모세관 공극 영역인 0.003~10μm의 범위에 대한 누적 공극량도 SF(x)+G(1)+H(3)가 Ref 보다 27% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

초고강도 콘크리트는 자기수축이 크게 발생하는 문제가 있으므로 향후에는 cGO와 HGP를 혼입한 초고강도 콘크리트의 자기수축 특성에 대해 실험적 연구를 수행할 계획이다.

## 요약


본 연구에서는 산화 그래핀 나노플레이트릿(Oxidized graphene nanoplatelet, GO)와 유공유리분말(Hollow glass powder, HGP)를 활용한 초고강도 콘크리트의 역학특성을 검토하였으며 이를 위해 작업성, 강도(압축, 인장), 수밀성, 내부조직을 검토하였다. 그 결과 HGP 소량 투입으로 작업성능을 획기적으로 회복시킬 수 있었고 강도특성 및 수밀성도 증가하는 것으로 나타났다. cGO(C사의 GO)와 HGP는 응집현상 없이 분산이 잘 되어 있는 것으로 확인되었고 공극량은 20% 이상 감소하는 것으로 나타났다. cGO와 HGP가 실리카 흙(Silica fume, SF)을 대체할 수 있는지에 대해서도 검토하였다. cGO와 HGP의 사용으로 SF 없이도 쉽게 작업성을 확보할 수 있었고 역학특성도 향상되는 것으로 나타났으며 신재료의 사용으로 콘크리트 제조방법의 변화가 가능함을 확인할 수 있었다.

키워드 : 산화 그래핀 나노플레이트릿, 유공유리분말, 초고강도, 신재료


## Funding


This study is part of the joint research results of Hyundai E&C and Sampyo Industries.

## ORCID

Tae-Seok Seo,  <http://orcid.org/0000-0003-1825-2348>

Chan Byon,  <http://orcid.org/0000-0003-4661-2291>

Kang-Min Kim,  <http://orcid.org/0000-0003-1514-4739>

Hyun-Seung Lee,  <http://orcid.org/0000-0002-5603-538X>

## References

1. Kim KN. Technology development trend and application of graphene. Korean institute of electrical and electronic material engineers. 2016 Jun;29(6):3-11.
2. Seo KS, Song YM, Choi WS, Chung WS. Effect of some parameters on the compressive strength of graphene oxide cement composites. Proceeding of the Korea Concrete Institute; 2015 May 13; Gwangju, Korea. Seoul (Korea): the Korea Concrete Institute; 2015. p. 553-4.
3. Jeong SH, Kim DU, Lee SJ, Won JP. Mix proportion of graphene cement composites. Proceeding of the Korea Concrete Institute; 2019 May 8; Jeju, Korea. Seoul (Korea): the he Korea Concrete Institute; 2019. p. 501-2.
4. Lee HS, Kim KM. Evaluation of basic properties of concrete using functionalized graphene. Proceeding of the Korea Concrete Institute; 2022 May 11; Jeju, Korea. Seoul (Korea): the he Korea Concrete Institute; 2022. p. 537-8.
5. Kim HK, Nam IW, Lee HK. Enhanced effect of carbon nanotube on mechanical and electrical properties of cement composites by incorporation of silica fume. Composite Structures. 2014 Jan;107(1):60-9. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.07.042>
6. Seo WW, Kim GY, Yoon MH, Lee BK, Nam JS. Mechanical properties of epoxy paint using oxidized graphene nanoplatelet as a reinforcement. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2017 Oct;17(5):465-71. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2017.17.5.465>
7. Bo Z, Shu JC, Asghar HK, Frank C, Wang CM, Wen HD. Effect of ultrasonication energy on engineering properties of carbon

- nanotube reinforced cement pastes. *Carbon*. 2015 April;85(4):212-20. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.12.094>
8. Ko HJ, Choi BK, Park YK, Yoon JY, Yoon GW. The physical properties mortar by graphene oxide mixing method. *Proceeding of the Korea Concrete Institute*; 2018 May 2; Changwon, Korea. Seoul (Korea): the he Korea Concrete Institute; 2018. p. 539-40.
  9. Kim JH, Choi IJ, Kim SH, Han SY, Joung CW. Production of graphene oxide reinforced cement paste. *Building Construction*. 2020 Jun;20(2):39-44.
  10. Yoon S, Lee HY, Seo TS. Experimental study on the material properties of high strength concrete with hollow glass powder. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2020 Aug;20(4):313-9. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2020.20.4.313>
  11. Chufa BM, Murthy HCA. Effect of reinforcement of reduced graphene oxide on mechanical properties of concrete nanocomposite. *Journal of Materials and Environmental Science*. 2020 Dec;11(6):844-55.
  12. KS F 2594. Method of test for slump flow of fresh concrete. Seoul (Korea): Korea Agency for Technology and Standards; 2021. 3 p.
  13. KS F 2403. Method of making and curing concrete specimens. Seoul (Korea): Korea Agency for Technology and Standards; 2005. 9 p.
  14. KS F 4919. Cement-polymer modified waterproof coatings. Seoul (Korea): Korea Agency for Technology and Standards; 2018. p. 4-5.
  15. Sufen D, Yanlei W, Ashraf A, Baoguo H, Jinping O. Nano/micro-structures and mechanical properties of ultra-high performance concrete incorporating graphene with different lateral sizes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020 Oct;137:106011. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106011>
  16. Noguchi T, Tomosawa F. Relationship between compressive strength and various mechanical properties of high strength concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan*. 1995 Jun;60(472):11-6.
  17. Lee CL, Huang R, Lin WT, Weng TL. Establishment of the durability indices for cement-based composite containing supplementary cementitious materials. *Materials & Design*. 2012 May;37:28-39. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.12.030>
  18. Kim NW, Yeo DG, Song JH, Bae JS. A study on the characteristic of capillary pore and chloride diffusivity by electrical difference of high strength concrete using metakaolin. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2007 Aug;19(4):499-506. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2007.19.4.499>