

다공성 장석 및 산화그래핀을 적용한 탄소저감형 시멘트 모르타르 강도특성

The Strength Characteristics of CO₂-reducing Cement Mortar using Porous Feldspar and Graphene Oxide

이종영¹, 한중근^{2*}

Jong-Young Lee¹, Jung-Geun Han^{2*}

¹Member, Research Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang Univ., 84 Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul 06974, Republic of Korea

²Member, Professor, Department of Civil&Environmental Engineering and Intelligent Energy&Industry, Chung-Ang Univ., 84 Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul 06974, Republic of Korea

ABSTRACT

In response to the carbon emission reduction trends and the depletion of natural sand caused by the use of cement in construction works, graphene oxide and porous feldspar were applied as countermeasures in this study. By using (3-aminopropyl)trimethoxysilane-functionalized graphene oxide with enhanced bond characteristics, a concrete specimen was prepared with 5% less cement content than that in a standard mortar mix, and the compressive strengths of the specimens were examined. The compressive strengths of the specimen with (3-aminopropyl)trimethoxysilane-functionalized graphene oxide and porous feldspar and the specimen with standard mixing were 26MPa and 28MPa, respectively, showing only a small difference. In addition, both specimens met the compressive strength of cement mortar required for geotechnical structures. It is believed that a reasonable level of compressive strength was maintained in spite of the lower cement content because the high content of pozzolans, namely SiO₂ and Al₂O₃, in the porous feldspar enhanced the reactions with Ca(OH)₂ during hydration, the nano-sized graphene surface acted as a reactive surface for the hydration products to react actively, and the strong covalent bonding of the carboxyl functional group increased the bonding strength of the hydration products.

요 지

본 연구에서는 건설공사시 시멘트 사용에 따른 탄소배출 저감과 천연모래 고갈에 따른 대응방안으로 산화그래핀 및 다공성 장석을 적용하였다. 산화그래핀은 부착특성을 증가시키기 위해 (3-aminopropyl)trimethoxysilane으로 기능화 시켰으며, 이를 적용하여 표준배합 모르타르 대비 시멘트 함량을 5% 감소시킨 배합조건으로 공시체를 제작하여 압축강도를 평가하였다. 다공성 장석과 기능화된 산화그래핀이 적용된 시편과 표준배합시편의 압축강도는 각각 26MPa, 28MPa로 큰 편차를 보이지 않았으며, 지반구조물에서 요구하는 시멘트 모르타르의 압축강도를 만족하는 것으로 평가되었다. 시멘트 함량감소에도 적정강도를 유지할 수 있는 원인으로는 다공성 장석에 대표적 포졸란 성분인 SiO₂와 Al₂O₃가 다량으로 함유되어 수화과정에서 Ca(OH)₂와의 반응을 증가시켰고, 나노크기의 그래핀 표면이 수화생성물이 활발히 반응할 수 있는 반응면으로 작용하였으며, Carboxyl 작용그룹의 강력한 공유결합 특성이 수화물의 결합강도를 증가시켰기 때문에 시멘트 함량을 감소시켰음에도 적절한 압축강도가 유지되었던 것으로 판단된다.

Keywords : Carbon reduction, Graphene oxide, Compressive strength, Porous feldspar

1. 서 론

우리나라는 2019년 대기중 이산화탄소가 417.9ppm으로 온실효과의 가속화로 지난 100년간 평균기온 1.8°C 상

Received 4 Nov. 2021, Revised 9 Nov. 2021, Accepted 11 Nov. 2021

*Corresponding author

Tel: +82-2-813-5345; Fax: +82-2-816-4160

E-mail address: jghan@cau.ac.kr (J.G. Han)

승한 것으로 보고되고 있다(NIMR, 2019). 특히 건설산업은 온실가스의 지속적인 배출을 초래하는 화석연료의 사용과 자원소비형 산업으로 천연자원의 소비가 불가피하여 환경오염과 기후변화를 초래하는 대표적인 산업으로 지적되고 있다(Ahmad et al., 2019). 2015년 우리나라는 제21차 유엔기후변화협약에 의해 에너지 목표관리제 및 배출권거래제를 도입해 온실가스 감축을 본격적으로 추진하고 있는 상황에서 건설산업에서도 탄소발생을 적극적으로 저감시키고자 하는 노력이 필요한 시기이다. 특히 시멘트는 건설산업에서 필수적인 건설재료로서 내구성 및 경제적 측면에서 유용한 재료이지만 환경문제가 꾸준히 지적되어 온 건설재료이다(Kim, 2021; Marinković et al., 2017). 시멘트 생산에 따른 이산화탄소(이하 CO₂)는 2018년 기준 연간 약 24억 톤 CO₂eq.이며, 시멘트 1톤 생산에 따른 CO₂는 약 700~900kg으로 산업공정 분야 중 광물산업분야에서 전체 배출량의 70.6%의 높은 비중을 차지하고 있다(GIR, 2021; Olivier et al., 2012). 또한 시멘트를 사용하는 그라우팅 등 기반보강공사 등에 의해서 발생하는 CO₂는 전 세계 배출량의 약 0.2% 발생한다고 보고되고 있어 CO₂감축에 있어 기반공학분야에서도 적극적인 노력이 필요한 시기이다(Chang et al., 2019).

한편, 우리나라의 골재부존량은 약 263억m³(하천 및 육상골재)으로 개발가능 물량은 약 172억m³으로 수 십년 뒤 고갈될 것으로 예상되고 있어 이에 대한 대응방안이 요구되는 시점이다(MOLIT, 2014). Han et al.(2020)은 시멘트 모르타르에 배합되는 모래의 대체자원으로 다공성 장석의 활용을 제안한 바 있는데 다공성 장석은 알루미늄규산염 광물로 전체 지각의 약 60%를 구성하는 만큼 쉽게 구할 수 있는 천연자원이다. 또한 전체성분 대부분이 포졸란 성분인 SiO₂와 Al₂O₃로 구성되어 있어 시멘트와의 반응성에 긍정적인 요소로 적용이 기대되는 골재대체 광물이다.

최근 시멘트 모르타르의 압축강도 향상에 관한 연구는 융복합적인 다양한 관점에서 진행되고 있다. Kim et al.(2021)은 시멘트배합에 있어 100~150nm 크기의 수소버블을 고농도로 주입한 배합수를 사용하여 압축강도를 최대 15.79% 향상시킨 바 있으며, Li et al.(2002), Maalej et al.(2012), Ahmad et al.(2019)은 직경 39μm, 길이 6~12mm의 PVA(Poly Vinyl Alcohol)섬유를 시멘트 모르타르에 첨가(전체 체적의 2%이하)하여 PVA함량에 따라 최대 80MPa의 압축강도를 얻었다. 1991년 최초로 발견된 탄소나노튜브(Carbon Nanotubes, CNTs)는 전기전도도 및

자기발열 특성을 갖고 있으며, 이와 같은 특성을 이용한 기능성 콘크리트에 활용되고 있다. Chan et al.(2010)은 시멘트 중량대비 0.25wt%의 MWCNTs(Multi Walled Carbon Nanotube)가 함유되었을 때 콘크리트의 휨강도 및 인장강도는 약 25% 증가하였으며, Chaipanich et al.(2010)은 Fly ash 기반 시멘트에 CNTs를 혼합한 공시체를 주사전자현미경을(Scanning Electron Microscope, SEM) 이용해 분석한 결과 CNTs가 시멘트복합체 내부의 미세구조를 채워 밀도를 증가시켰으며, 이로 인해 압축강도가 증가한다고 하였다. 그러나 PVA 및 CNTs는 압축 및 휨강도 향상에 기여를 하지만 높은 생산단가와 낮은 비표면적으로 인해 보조적 수단을 동원하지 않으면 시멘트와 물의 분리로 인해 공극이 발생하는 문제가 지적되고 있다.

산화그래핀(Graphene Oxide, GO)을 적용한 시멘트복합체에 관한 연구는 Lv et al.(2013, 2014)에 의해 처음 소개되었으며, 이후 GO를 활용하여 역학적특성 개선 및 내구성 향상에 관한 연구로 대분되어 현재까지 발전이 거듭되고 있다. GO는 Hydroxyl(-OH), Epoxide(-O-), Carboxyl(-COOH) 및 Carbonyl(-COO) 그룹을 포함한 많은 기능 그룹을 포함하고 있으며, 이는 공유결합 기능화를 위한 반응부위를 제공하기도 한다. GO 표면은 시멘트 수화생성물인 C-S-H 및 Ca(OH)₂와 반응을 위한 면(Planes)을 제공하며, Carboxyl 작용그룹은 C-S-H 및 Ca(OH)₂와 강력한 공유결합을 가지고 있어 GO와 시멘트 매트릭스의 계면에서 강한 공유결합을 형성할 수 있다. 그 결과 시멘트 매트릭스와 GO와의 하중전이효과(Load-transfer efficiency)를 증가시켜 시멘트 복합체의 강도를 개선시킨다(Lin et al., 2016; Pan et al., 2015). GO는 현존하는 물질 중에서 가장 얇고 단단하며, 신축성이 큰 물질로서 기존의 복합첨가물질(PVA, CNTs 등)에 비해 비표면적이 큰 특징을 갖고 있다. 즉, 높은 비표면적과 나노 사이즈 크기와 높은 분산력으로 광범위한 공유결합을 위한 표면을 제공하므로 기존 복합첨가물질의 대안으로 적용이 가능하다.

본 연구에서는 GO의 결합강도 증진을 위해 자가조립단층막(Self-Assembled Monolayers, SAMs)에 의해 GO표면의 산소그룹을 (3-aminopropyl)trimethoxysilane와 반응시켜 아민기로 개질하여 GO에 기능화를 부여하고자 한다. GO에 의해 시멘트 복합체는 조밀한 수화물 형성이 가능하며, SAMs에 의해 부착성능 부여로 인해 외력에 의한 균열의 발달을 저감시켜 압축강도 향상에 긍정적 영향을 기대하였다. 한편, 천연골재를 대체할 목적으로 다공성 장

석을 사용하였으며, 시멘트와 다공성 장석의 반응특성과 기능화된 산화그래핀(Functionalization graphene oxide, sGO)을 시멘트 모르타르와 배합하여 압축강도를 개선하고 시멘트 함량을 감소시키는 것으로 본 연구의 최종목표로 설정하였다.

2. 실험

2.1 그래핀 분리 및 기능화

산화그래핀은 흑연분말(Alfa-Aesar, graphite powder, universal grade, 200mesh, 99.9995%)로부터 수정된 Hummer의 방법에 의해 분리하였다(Lee et al., 2015). 2g의 흑연분말을 농축황산(H_2SO_4 , Sigma-Aldrich, ACS reagent, 95.0-98.0%) 100ml에 넣고 2g의 질산나트륨($NaNO_3$, Sigma-Aldrich, ReagentPlus[®], Sodium nitrate, $\geq 99.0\%$)을 혼합하여 $0^\circ C$ 이하의 얼음수조에서 24시간 동안 교반하였다. 이후 12g의 과망간산 칼륨($KMnO_4$, Sigma-Aldrich, ACS reagent, $\geq 99.0\%$)을 넣고 완전히 혼합한 후 얼음수조에서 꺼낸 후 $35^\circ C$ 에서 고점도 액체가 될 때까지 약 3시간 교반한다. 다음으로 증류수 200ml와 과산화수소(H_2O_2 , Sigma-Aldrich, contains inhibitor, 30 wt.% in H_2O , ACS reagent)를 추가한 뒤 혼합물을 원심분리한 후 HCl과 증류수로 세척한다. 세척과정을 수 차례 반복한 후 $50^\circ C$ 의 진공오븐에서 24시간 건조시키는 과정을 통해 흑연으로부터 GO를 분리하였으며, 그 과정을 요약하면 Fig. 1과 같다.

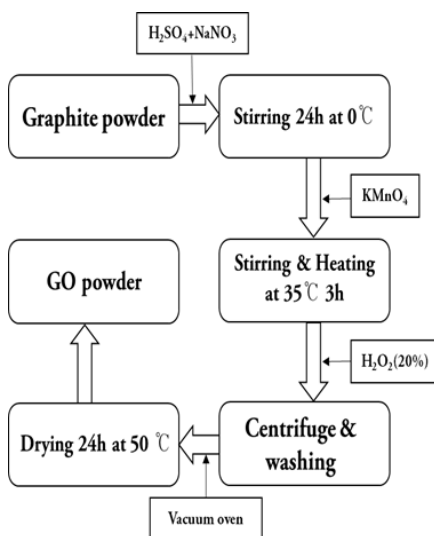


Fig. 1. Schematic of GO synthesis by a modified Hummers method

SAMs는 금속, 유기물 또는 무기물 등으로 구성된 기질 표면 위에 분자들이 자발적으로 화학 흡착하여 단막층을 형성하는 것을 의미한다. SAMs는 Fig. 2와 같이 에너지적 관점에서 3가지로 분류할 수 있는데 먼저 기질 표면에서 화학적 흡착에 의해 결합되는 Head 또는 Anchoring 그룹, 다음으로 각각의 분자막의 형성이 정렬되게 하는 알킬 사슬(Alkyl chain), 생체활성 기능을 부착하여 SAMs이 특성이 발현할 수 있는 작용기 그룹(Terminal group)으로 이루어져 있다. 화학적 관점에서 보면 SAMs는 일단 기질 표면에서 화학흡착이 이루어진 후에 SAMs의 두 번째 그룹인 알킬 그룹에서 반데르발스와 정전기적 상호작용에 의하여 분자들이 기질 표면에 고르게 형성된다. 이것을 응용하면 선택된 기능성 분자를 보다 정밀하게 배치조절이 가능한데 본 연구에서는 대표적인 실란커플링제인 (3-Aminopropyl)trimethoxysilane을 적용하였다. 이렇게 부여된 반응기는 시멘트 모르타르 관점에서의 결합(부착) 또는 강도(인장 및 압축) 증진 측면에서의 유용한 선택이 될 수 있을 것이며, SAMs구조에 있어 반응기의 적극적인 활용이 본 연구의 착안점이다.

Fig. 3은 GO의 기능화 과정을 요약한 것으로 먼저 플라스크에 40ml의 탈이온수와 20mg의 GO를 넣은 후 60분간 수조에서 초음파로 분산시킨다. 이후 (3-Aminopropyl) trimethoxysilane(Sigma-Aldrich, $\geq 98.0\%$)을 함유한 0.2M Toluene(Sigma-Aldrich, 99.8%) 용액을 5mL 혼합한 후 $70^\circ C$ 로 가열하며 24시간 동안 교반하며 분산시켰다. 가열 후 혼합물이 짙은 갈색으로 변화하면 sGO가 형성되었음을 확인할 수 있다(Lee et al., 2015). 이어서 에탄올 및 탈이온수로 세척하고 $50^\circ C$ 의 진공오븐에서 24시간 동안 건조시키면 Fig. 4와 같은 형태의 sGO를 얻을 수 있다. GO

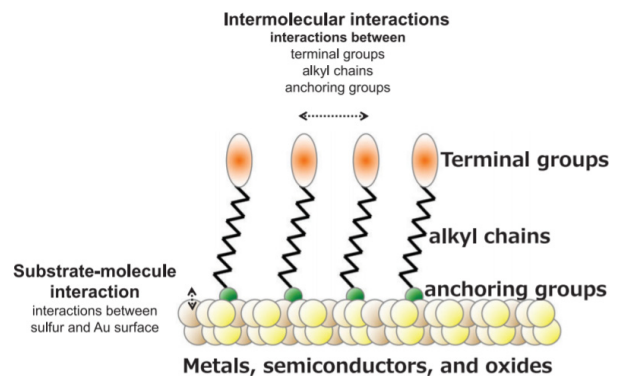


Fig. 2. Schematic illustration of self-assembled monolayers (Chang et al., 2018)

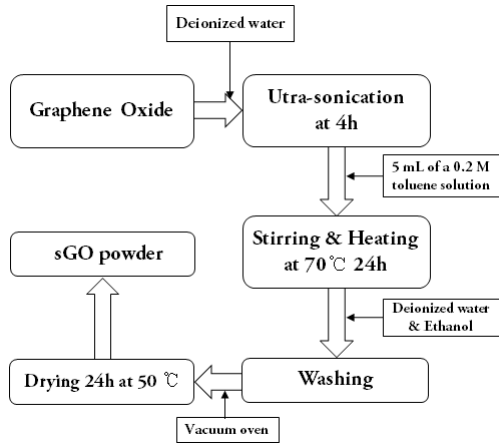


Fig. 3. The fabrication method of silane-functionalized Graphene Oxide(sGO)

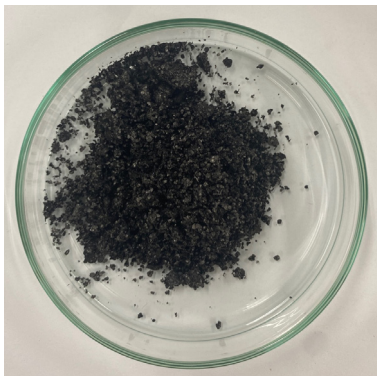


Fig. 4. Silane-functionalized Graphene Oxide(sGO)

또는 sGO의 분산은 초음파를 사용하였으며, 분말 10mg을 20ml 플라스크에서 10ml의 Ethylene glycol(Sigma-Aldrich, 99.8%)과 혼합한 후 4시간 동안 300W로 분산시켰다.

2.2 시멘트 모르타르 배합 및 공시체 제작

실험에 사용된 장식은 충주지역의 화강암과 섬록암 중

장석 반정이 발달한 암석을 채취하여 분말로 제작하여 사용하였다. Table 1은 본 연구에서 골재(모래)의 대체재료로 사용한 다공성 장식의 조성분석을 위한 XRF(X-ray fluorescence) 결과를 나타낸 것으로 SiO₂와 Al₂O₃ 두 성분의 함량이 전체 약 80%이상을 차지하고 있다. Table 2는 실험에 사용된 공시체의 배합비를 나타낸 것으로 EXP-1은 모래와 일반포틀랜드시멘트를 배합하였으며, EXP-2는 EXP-1과 동일한 배합조건으로 모래를 다공성 장식으로 대체하고 기능화된 산화그래핀(sGO)을 시멘트 중량대비 0.01%wt첨가하였다. 공시체는 ASTM C 109에 의해 50×50×50cm의 정육면체 몰드에서 각 조건별로 3개씩 제작한 후 24시간 이후 해체하여 24°C 수중에서 3, 7, 14, 28일간 양생했다(ASTM C 109, 2020). 압축강도 측정은 만능재료시험기(UTM, HJ-1295, Heungjin Testing Machine, Gimpo, Korea)를 사용하여 1mm/min의 속도로 압축파괴하고 각 조건별 3개의 압축강도를 평균하여 분석하였다.

3. 결과분석

3.1 압축강도

Fig. 5는 양생일별 압축강도 결과를 나타낸 것으로 강도의 편차는 일반모래를 사용한 표준배합 조건인 EXP-1이 높은 압축강도를 보였다. 다공성 장식과 sGO가 첨가된 EXP-2와 대비할 때 각 양생일별로 6~19%가량 큰 것으로 평가되었으며, EXP-1의 공시체의 14일, 28일 양생 후 압축강도는 각각 27.45MPa, 28.18MPa로 최대강도는 14일 양생후 발현하는 것으로 나타났다. 반면에 다공성 장식과 sGO가 첨가된 EXP-2 공시체는 양생일이 증가할수록

Table 1. Chemical composition of porous feldspar

Location	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	Fe ₂ O	MgO	TiO ₂	LOI	Other
	(%)									
Chung-ju	69.59	13.07	2.7	4.53	2.56	2.49	1.61	0.49	2.46	0.50

Table 2. Experimental conditions

Test method	Mixed ratio(%)		Curing time(Day)
	EXP-1 (OPC ^{*1} : Sand : PW ^{*2})	EXP-2 (OPC : Feldspar : PW : sGO)	
Compressive strength test	25.4 : 62.2 : 12.4	20 : 80 : 12.4 : 0.01 ^{*3}	3, 7, 14, 28

*1: Ordinary portland cement

*2: Plane water

*3: Functionalization graphene oxide(sGO) of 0.01% by weight of cement(%)

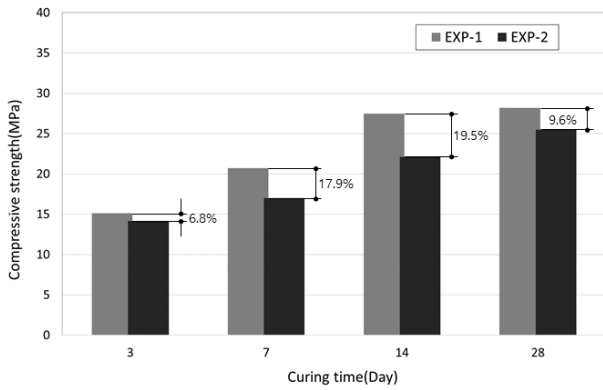


Fig. 5. Comparison of average compressive strength

선형적인 증가를 보였으며, 최대압축강도는 28일 양생 후 26MPa로 측정되었다. EXP-2와 EXP-1의 3일 양생 공시체의 압축강도는 각각 14.17MPa, 15.1MPa로 조기강도에는 큰 차이를 보이지 않았다. EXP-2 공시체는 표준배합에서 모래를 다공성 장석으로 대체하고, 시멘트 함량을 5% 감소시킨 조건의 배합임에도 불구하고 큰 강도편차를 보이지 않았다. 이러한 원인은 크게 두 가지 관점으로 분류하여 판단할 수 있는데 먼저, 다공성 장석이 포졸란 성분인 SiO_2 와 Al_2O_3 로 대부분 조성되어 있어 시멘트와의 수화과정에서 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여 강도를 증가시킨 것으로 판단된다. 다른 강도증가 원인으로는 산화그래핀 표면과 수화생성물과의 반응과 공유결합 특성에 기인된 것으로 이에 대한 분석은 3.2절에서 논하기로 한다.

한편, 압축강도 결과로 비취볼 때 시멘트가 사용되는 대표적인 지반구조물인 어스앵커(Earth anchor) 및 소일네일링(Soil nailing)공법에서 요구되는 시멘트그라우팅의 기준강도가 각각 17MPa(7일), 24MPa(28일)인 국내 시방기준과 비취볼 때 본 연구에서 제안한 배합은 기준배합을 대체하고 탄소배출 저감이 가능한 효과적인 대안이라 판단된다(MOLIT, 2015, Korea Expressway Corporation, 2012; Korea Expressway Corporation, 2009; MOLIT, 2016a&b).

3.2 미세구조분석

Fig. 6(a)는 EXP-2 공시체의 양생일별 주사전자현미경(SEM, S-3400N, Hitachi, Tokyo, Japan) 촬영결과를 나타낸 것이다. 3일 양생후 미세구조를 살펴보면 에트링가이트(Ettringite) 및 수화물(C-S-H)결정이 초기에 형성된 것을 확인할 수 있었다. 압축강도 결과와 비취볼 때 시멘트

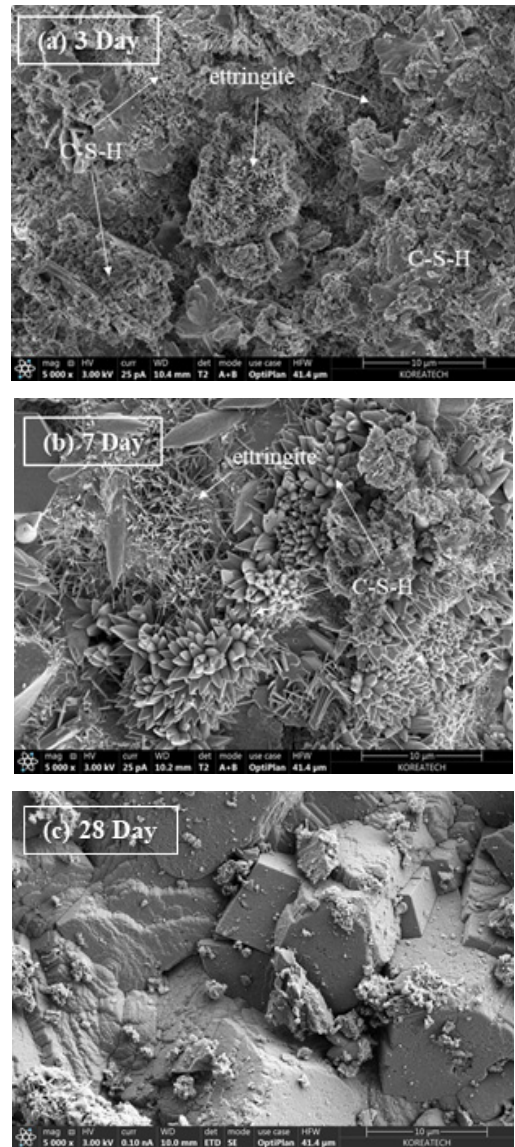


Fig. 6. SEM Image of EXP-2(5000×)

함량이 5%감소된 EXP-2의 강도는 EXP-1과 비취볼 때 유사한 값을 보였는데 이것은 sGO의 표면이 수화생성물과의 반응면을 제공하여 미수화반응물을 감소시켰기 때문으로 판단된다. Fig. 6(b)는 7일양생 후 SEM촬영 결과로 에트링가이트의 증가와 전형적인 초기수화결정체(Hydration crystals initial forming)가 관찰되었다. 이와 같은 형태의 결정체의 발달은 기공과 균열의 충전역할을 하여 균열의 전이를 억제시키는 역할을 하게되며, 28일 양생후에는 Fig. 6(c)와 같이 다면체의 결정이 형성되었음을 확인할 수 있었다. 즉, 나노크기 그래핀 표면의 많은 반응그룹이 시멘트 입자와의 활발한 수화반응을 유도하여 수화물생성에 유리한 조건을 형성하였고 Carboxyl 작용그룹의 강력한 공유결합 특성이 수화물의 결합강도를 증가시켰기 때

문에 시멘트 함량을 감소시켰음에도 적절한 압축강도가 유지되었던 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 건설공사시 시멘트 사용에 따른 탄소배출 저감과 천연모래 고갈에 따른 대응방안으로 기능화된 산화그래핀 및 다공성 장석을 적용한 시멘트 모르타르에 대한 적용성 평가를 위한 일련의 실험을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 시멘트 모르타르 표준배합과 대비해 시멘트 함량을 5% 감소시키고 모래를 다공성 장석으로 대체하여 압축강도를 평가한 결과 28일 양생 후 최대 압축강도는 26MPa로 표준배합 시편의 28MPa과 대비해 큰 편차를 보이지 않았으며, 기반구조물인 소일네일링 및 어스앵커에서 요구하는 시멘트 모르타르를 강도를 대부분 만족하는 것으로 나타났다.
- (2) 시멘트 함량을 감소시키고 적정강도를 유지할 수 있는 원인으로는 모래를 대체한 다공성 장석에 다량으로 함유되어 있는 포졸란 성분인 SiO_2 와 Al_2O_3 가 수화과정에서 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하여 강도를 증가시킨 것으로 판단된다.
- (3) 전자주사현미경 분석결과 양생 초기단계인 3일, 7일 조건에서 다량의 에트리נג가이트 및 수화물이 조기에 형성되었다. 이것은 그래핀 표면이 수화생성물과의 반응면을 제공하여 미수화반응물을 감소시켰고 이로 인해 에트리נג가이트의 증가와 조기수화결정체가 발달하여 기공과 균열의 충진시켜 균열의 전이를 억제시켰기 때문에 궁극적으로 강도증가에 기여했던 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by the MSIT(Ministry of Science and ICT), Korea, under the ITRC(Information Technology Research Center) support program(IITP-2020-2020-0-01655) supervised by the IITP(Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation) and the National Research Foundation (NRF)

of Korea, funded by the Korea government (MSIP) (NRF-2019R1A2C2088962) and the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement under the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government (Project Number: 21CTAP-C164339-01).

References

1. Ahmad, S., Anwar, A., Mohammed, B. S., Wahab, M. bin A. and Ahmad, S. A. (2019), "Strength behavior of concrete by partial replacement of fine aggregate with ceramic powder", *Int. J. Recent. Technol. Eng.*, Vol.8, No.2, pp.5712-5718.
2. ASTM C109/C109M-20b Standard Test(2020), *Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars(Using 2-in. or [50mm] Cube Specimens)*. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
3. Chan, L. Y. and Andrawes, B. (2010), "Finite element analysis of carbon nanotube/cement composite with degraded bond strength", *Computational Material Science*, Vol.47, Issue 4, pp.994-1004.
4. Chang, I., Lee, M. and Cho, G. C. (2019), "Global CO₂ Emission-Related Geotechnical Engineering Hazards and the Mission for Sustainable Geotechnical Engineering", *Energies*, 12(13), 2567.
5. Chang, R., Asatyas1, S., Lkhamsuren1, G., Hirohara1, M. and Mondarte1, E. A. Q., "Suthiwanich, K., Sekine1, T., Hayashi, T.(2018), Water near bioinert self-assembled monolayers", *Polymer J.*, 50, pp. 563-571.
6. Chaipanich, A., Nochaiya, T., Wongkeo, W. and Torkittikul, P. (2010), "Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes-fly ash cement composites", *Mat. Sci. and Engr. : A*, Vol.527, Issue 4-5, pp.1063-1067.
7. Greenhouse Gas Inventory and Research Center/GIR (2021), *National Greenhouse Gas. Inventory Report of Korea*, GIR, Seoul, Republic of Korea.
8. Han, J. G., Cho, J. W., Kim, S. W., Park, Y. S. and Lee, J. Y. (2020), "Characteristics of CO₂ and Energy-Saving Concrete with Porous Feldspar", *Materials*, 13, 4204.
9. Kim, W. K., Kim, Y. H., Hong, G., Kim, J. M., Han, J. G. and Lee, J. Y. (2021), "Effect of Hydrogen Nanobubbles on the Mechanical Strength and Watertightness of Cement Mixtures", *Materials*, 14(8), 1823.
10. Kim, W. K. (2021), *Enhancement of Durability and Watertightness of Cement Mixture Using Highly Concentrated Hydrogen Nano-Bubble Water*, Master Thesis, Chung-Ang University, Seoul, Republic of Korea, pp.1-5.
11. Korea Expressway Corporation (2009), *Expressway construction Guide Specification*, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea.

12. Korea Land & Housing Corporation (2012), *LH Guide Specification*, Gyeongsangnam-do, Republic of Korea.
13. Lee, C. Y. Bae, J. H. Kim, T. Y. Chang, S. H. and Kim, S. Y. (2015), "Using silane-functionalized graphene oxides for enhancing the interfacial bonding strength of carbon/epoxy composites", *Composites: Part A*, Vol.75, pp.11-17.
14. Li, V. C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A. and Saito, T. (2002), "Interface tailoring for strainhardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC)", *ACI Mater. J.*, Vol.99, pp.463-472.
15. Lv, S., Qiu, C., Ma, Y. and Zhou, Q. (2013), "Regulation of GO on cement hydration crystals and its toughening effect", *Mag. Concr. Res.*, Vol.65, Issue 20, pp.1246-1254.
16. Lv, S., Ting, S., Liu, J. and Zhou, Q. (2014), "Use of graphene oxide nanosheets to regulate the microstructure of hardened cement paste to increase its strength and toughness", *Cryst. Eng. Comm.* Vol.16, pp.8508-8516.
17. Lin, C., Wei, W. and Hu, Y. H. (2016), "Catalytic behavior of graphene oxide for cement hydration process", *J. Phys. Chem. Solids.*, Vol.89, pp.128-133
18. Maalej, M., Quek, S.T., Ahmed, S. F. U., Zhang, J., Lin, V. W. J. and Leong, K. S. (2012), "Review of potential structural applications of hybrid fiber engineered cementitious composites", *Constr. Build. Mater.*, Vol.36, pp.216-227.
19. Marinković, S., Dragaš, J., Ignjatović, I. and Tošić, N. (2017), "Environmental assessment of green concretes for structural use", *J. Clean. Prod.*, Vol.154, pp.633-649.
20. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport/MOLIT (2014), *A Study on the 5th general planning for aggregate supply*, MOLIT; Sejong, Republic of Korea.
21. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport/MOLIT (2015), *National highway construction Guide Specification*, MOLIT; Sejong, Republic of Korea.
22. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport/MOLIT (2016a), *Standard Specifications for cut slope construction*, MOLIT; Sejong, Republic of Korea.
23. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport/MOLIT (2016b), *Standard Specifications for road construction*, MOLIT; Sejong, Republic of Korea.
24. National institute of meteorological sciences/NIMR(2019), *Report of global atmosphere watch 2018*, pp.9-24, Jeju, Republic of Korea.
25. Olivier, J.G., Peters, J.A. and Janssens-Maenhout, G. (2012), *Trends in global CO₂ emissions 2012 report*, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, pp. 17.
26. Pan, Z., He, L., Qiu, L., Korayem, A., Li, G., Zhu, J., Collins, F., Li, D., Duan, W. and Wang, M. (2015), "Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite", *Cem. Concr. Compos.*, Vol.58, pp.140-147.