

## 산화그래핀 기능화에 의한 시멘트 복합체의 전기전도 특성 개선

# Enhanced Electric Conductivity of Cement Composites by Functionalizing Graphene Oxide

한중근<sup>1</sup>, 전재현<sup>2</sup>, 김영호<sup>3</sup>, 김진<sup>4</sup>, 이종영<sup>5\*</sup>

Jung-Geun Han<sup>1</sup>, Jae-Hyeon Jeon<sup>2</sup>, Young-Ho Kim<sup>3</sup>, Jin Kim<sup>4</sup>, Jong-Young Lee<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Professor, Department of Civil&Environmental Engineering and Intelligent Energy&Industry, Chung-Ang Univ., 84 Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul 06974, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Masters Degree, Department of Civil Engineering, Chung-Ang Univ., 84 Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul 06974, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Senior Researcher, Korea Expressway Corporation, Dongtansunhwan-daero 17-gil, Hwaseong-si, Gyeonggi-do 18489, Republic of Korea

<sup>4</sup>Member, Ph.D. Student, Department of Intelligent Energy&Industry, Chung-Ang Univ., 84 Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul 06974, Republic of Korea

<sup>5</sup>Member, Research Professor, Office of Research Affairs, Chung-Ang Univ., 84 Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul 06974, Republic of Korea

### ABSTRACT

This study has utilized self-assembled monolayers technology to improve electrical property of graphene-oxide, which has been separated graphene powder through a chemical exfoliation. Aluminum sulfate ( $Al_2(SO_4)_3$ ) was applied on graphene-oxide as a reactant, and the fundamental research was carried out to apply on the self-sensing of cement-based construction structures. Electric resistance measurement result has shown that cement-composites with GO and Al-GO can be used as a conductor, electric resistance of GO and Al-GO contained composites improved by 10.2% and 15.9% respectively when compared to the standard cement-composite. Microstructure analyzation shown the formation of  $Al(OH)_3$  gel when Al-GO was added, which is speculated to result the smooth flow of current by improving the density of cement-composite. This implies that graphene-oxide has a possibility to be utilized as smart building materials and construction structure itself rather than just a structure.

### 요 지

본 연구에서는 화학적 박리를 통해 흑연분말로부터 분리한 산화그래핀의 전기적특성을 개선시키기 위해 자가조립단층막 기술을 활용하였다. 반응물질로는 황산알루미늄( $Al_2(SO_4)_3$ )을 적용하였으며, 시멘트를 기반으로 한 건설구조물의 자가센싱에 적용하기 위한 기초연구를 수행하였다. 전기저항 측정결과 대조군인 표준공시체와 대비할 때 GO 및 Al-GO가 함유된 공시체에서 각각 10.2%, 15.9% 개선되어 도체로서의 활용 가능성을 확인하였다. 미세구조분석 결과 Al-GO의 첨가에 따라  $Al(OH)_3$  gel 형성을 확인하였으며, 이로 인해 공시체의 밀도를 향상시켜 전류의 흐름을 원활하게 개선시킨 것으로 판단된다. 이는, 단순 구조물이 아닌 구조물 자체로서 활용성을 지닐 수 있음을 시사하며, 스마트 건설소재로서의 가능성을 확인하였다.

**Keywords** : Graphene oxide, Aluminum sulfate, Self-assembled monolayers, Cement composite, Electric conductivity

Received 29 Dec. 2022, Revised 26 Jan. 2023, Accepted 30 Jan. 2023

\*Corresponding author

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

E-mail address: geoljy@cau.ac.kr (J.Y. Lee)

## 1. 서론

콘크리트, 모르타르 등 시멘트 기반의 복합재료는 전 세계적으로 건설 인프라에 사용되는 가장 대표적인 자재로서 저렴한 비용, 자유로운 성형 및 압축에 우수한 강도특성을 보유하고 있다. 그러나 유해환경에서 보이는 취성 및 낮은 인장강도는 시멘트 기반 복합체의 단점으로 내구성 및 유지관리 효율성을 저하시키는 요인으로 지적되고 있다(Mindess et al., 2003; Han et al., 2017). 최근 시멘트 복합체의 기계적특성 및 내구성 향상과 더불어 부가적 기능을 부여하기 위해 나노실리카(Nano-silica), 나노이산화티타늄(Nano-titanium dioxid), 나노점토(Nano-clay), 탄소나노섬유(Carbon-nanofiber), 탄소나노튜브(Carbon-nanotube) 등 다양한 나노물질을 시멘트 복합체에 적용하려는 시도가 꾸준히 이어져왔다(Du and Pang, 2019; Sobolkina et al., 2012; Han et al., 2015). 2000년대 초반 발견된 그래핀은 높은 인장강도(130GPa) 및 Young's modulus(1.1TPa) 등의 물리적 특성과 큰 비표면적( $2630\text{m}^2\text{g}^{-1}$ )과 높은 열전도율( $\sim 5000\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) 및 높은 전자이동성으로 인해 다양한 소재에 응용이 가능한 탄소계 나노소재로 발전해 왔다. 시멘트 소재 복합체에서 그래핀을 적용하는 것은 몇 가지 관점으로부터 발전해 왔는데 가장 먼저 소량의 그래핀을 첨가함으로써 시멘트 함량을 감소시키고 동일한 기계적 특성을 발현하고 유해환경에서의 내구성 증진을 위한 연구가 대표적이다. 이외 최근에는 그래핀을 함유한 시멘트 복합체의 높은 전기전도와 압력저항 특성을 활용하여 콘크리트로 포장된 도로에서 전기차량의 정적/동적 무선충전 및 제빙, 사회기반시설의 스마트 자가센싱(Self-sensing) 등으로 적용하기 위한 미래지향적 활용방안이 제시되기도 하였다(Dimov et al., 2018; Talga, 2018). 그래핀이 가지고 있는 특별한 전기전도성을 활용해 그래핀을 함유한 시멘트 복합체는 우수한 전기전도성과 압력저항을 기반으로 변형 및 손상을 감지할 수 있는 것으로 보고된 바 있다(Al-Dahawi et al., 2016; Xu and Zhang, 2017; Fraç and Pichór., 2020; Guo et al., 2020; Tao et al., 2019). 그래핀은 다양한 방법에 의해 제조되는데 그 중 화학적 박리에 의해 흑연으로부터 분리시킨 산화그래핀(Graphene Oxide, GO)은 시멘트계 복합체의 성능개선 또는 시멘트 함량 축소를 목적으로 가장 많이 사용되고 있는 재료이다. 특히, 산화그래핀에 함유된 친수성 산소 작용기는 GO가 물에 보다쉽게 분산될 수 있어 시멘트 복합체에서의 적용성이

우수하며, 이로 인해 시멘트 복합체의 기계적 성능 및 내구성을 효과적으로 향상시킬 수 있다. 그러나 산화박리과정에서 물리적 특성 변화로 인해 즉, 산소를 포함한 기능성 그룹의 존재로 인해 낮은 전기전도 특성을 띄게되며, 이것은 시멘트 복합체에서 발생할 수 있는 변형/손상 등을 감지할 수 있는 기능 저하를 가져온다(Qureshi and Panesar, 2019). 산화그래핀의 전기적 특성은 환원 과정을 통해 되살리는 방법이 있으나 비용 및 효율을 고려해 볼 때 대량으로 사용되는 건설재료에서의 환원은 효과적인 방법으로 분류할 수 없다. 다른 대안으로 자가조립 단층막(Self-Assembled Monolayers, SAMs)에 의해 그래핀 표면을 개질하는 방법을 고려할 수 있는데 이 방법은 금속이온을 작용기 그룹에 선택적으로 결합시켜 전기적 기능 특성을 부여하는 방법이다. 이 방법에 의해 전기적 특성을 갖게되는 산화그래핀은 시멘트와 혼합시 고유의 물리적 특성 및 수화반응의 특성 변화는 없으며, 경화된 시멘트 공시체 자체가 전기적 특성을 갖는 구조체를 형성하게 된다. 따라서 구조체에 과도한 외력작용 또는 내구성 저하로 인해 균열 및 파손이 발생할 경우 밀도의 변화가 발생하고 밀도의 변화는 전기저항의 변화를 발생시키므로 저항의 변화를 감지함으로써 구조체의 결합여부를 비교적 간단하게 판독이 가능할 것이다. 이러한 방법은 지반공학 분야에서 다수의 보강체가 설치되는 Anchor, Rock bolt, Pile 등 시멘트가 재료로 적용된 보강체의 유지관리에서 저비용으로 효과적인 영구적인 관리기법으로의 적용이 가능할 것이다.

이에 본 연구에서는 화학적 박리를 통해 흑연분말로부터 분리한 산화그래핀의 전기적특성을 개선시키기 위해 자가조립단층막 기술을 활용하였으며, 반응물질로는 황산알루미늄( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )을 적용하여 전기적 특성을 개선하고자 하였다. 이를 위해 산화그래핀의 분리 및 기능화 단계를 확인하기 위한 물리·화학적 분석을 진행하였다. 이후 황산알루미늄으로 기능화된 산화그래핀을 시멘트 복합체에 적용한 뒤 전기전도 개선효과를 확인하여 시멘트를 기반으로 한 건설구조물의 자가센싱 기술에 적용하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 그래핀 분리 및 기능화

산화그래핀은 흑연분말(Alfa-Aesar, graphite powder, uni-

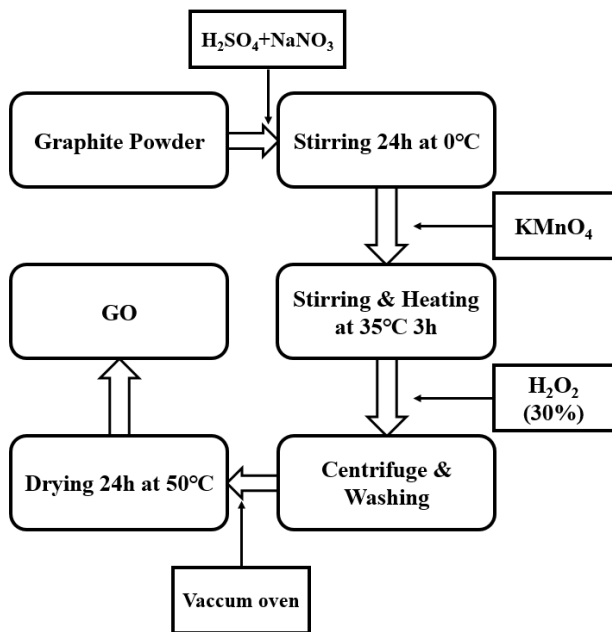


Fig. 1. Schematic of GO synthesis by a modified Hummers method

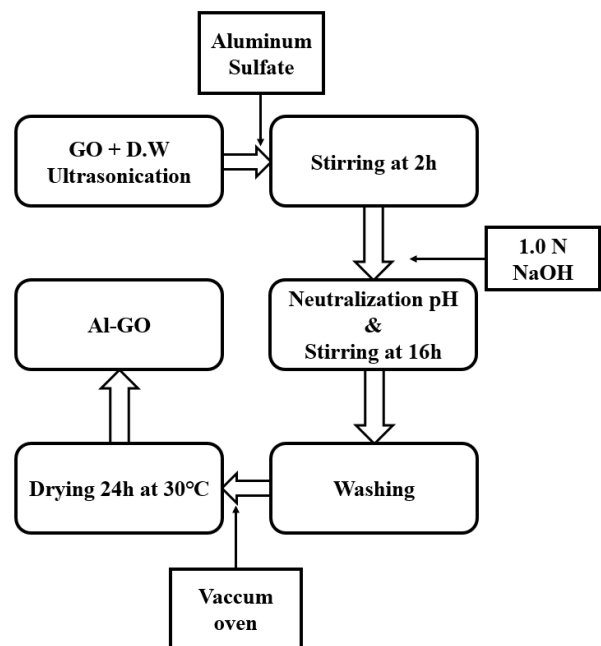


Fig. 3. The fabrication method of Aluminum-functionalized Graphene Oxide (Al-GO)

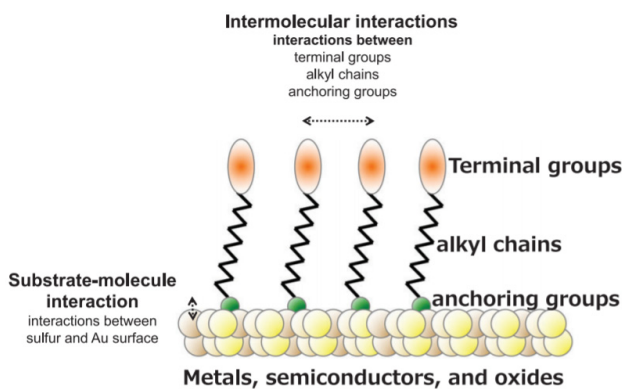


Fig. 2. Schematic illustration of self-assembled monolayers (Chang et al., 2018)

versal 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 진공오븐

에서 24시간 건조시키는 과정을 통해 흑연으로부터 GO를 분리하였으며, 그 과정을 요약하면 Fig. 1과 같다.

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 알킬사슬(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 전기전도 특성을 개선하고자 금속(알루미늄)을 적용하였다. 이렇게 부여된 반응기는 시멘트 복합체 관점에서의 결합(부착) 또는 강도(인장 및 압축) 증진 측면에서의 유용한 선택이 될 수 있을 것이다.

Fig. 3은 GO의 알루미늄 기능화를 요약한 것으로 3차 증류수 100ml에 0.2g의 GO를 초음파 파쇄기를 이용하여 15분 간격으로 1시간 동안 분산시킨 후 6.30g의 황산알루미늄( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 \sim 18H_2O$ , Daejung Chemicals & Metals)을 분산된 용액에 첨가하여 2시간 동안 교반한다. 교반을

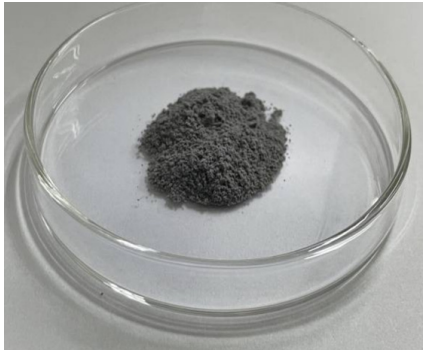


Fig. 4. Aluminum-functionalized Graphene Oxide (Al-GO)

Table 1. Experimental conditions

Sample No. Materials	Mixed ratio (g)			Curing time (Day)
	EXP-S	EXP-GO	EXP-AIGO	
W <sup>*1</sup>	3,089	3,089	3,089	3, 28
C <sup>*2</sup>	6,012	6,012	6,012	
S <sup>*3</sup>	14,548	14,548	14,548	
G <sup>*4</sup>	19,374	19,374	19,374	
GO <sup>*5</sup>	-	0,6012	0,6012	

\*1 : Water, \*2 : Cement, \*3 : Sand, \*4 : Gravel, \*5 : Graphene Oxide

마치면 1.0 mol L<sup>-1</sup>의 수산화나트륨을 이용하여 pH meter (S20, Mettler Toledo, Urdorf, Switzerland)를 이용하여 7.0으로 조정후 16시간 추가 교반시킨다. 교반을 통해 반응처리된 용액을 필터페이퍼를 통해 여과시키고 3차 증류수로 수차례 세척하여 황산이온을 제거한다. 최종적으로 30°C에서 진공건조하여 Fig. 4와 같이 알루미늄 기능화된 GO(이하, Al-GO)를 확보하였다(Barathi et al., 2014).

## 2.2 시멘트 복합체 배합 및 공시체 제작

실험용 공시체 제작에 있어 최종 배합비는 절대용적법을 이용하여 Table 1과 같이 산출하였다. 시멘트 복합체의 물-시멘트비(W/C)는 실험을 통해 설계기준강도 43.5MPa를 맞추기 위해 W/C=48.5%로 하여 각 재료의 소요량을 계산한 후 직경 100mm, 높이 200mm의 실험용 원통형 공시체를 제작하였다.

## 3. 결과분석

### 3.1 산화그래핀 및 기능화 결과분석

흑연은 열에 매우 안정적으로 열처리에 따른 중량손실

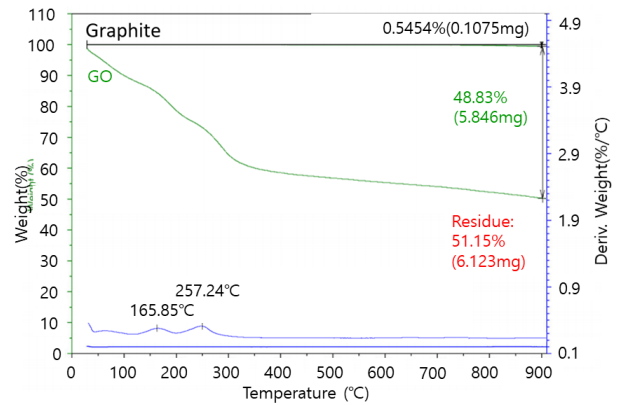
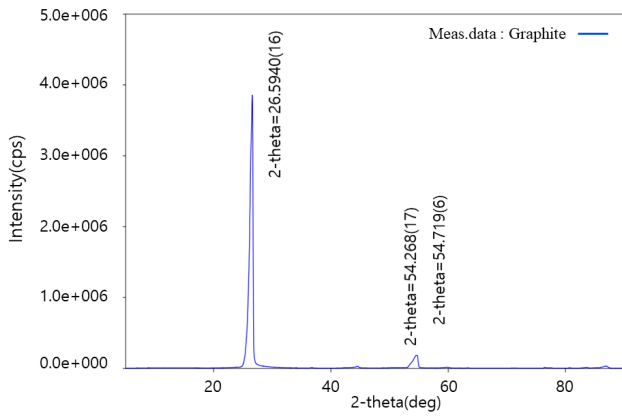


Fig. 5. TGA curves of graphite and GO

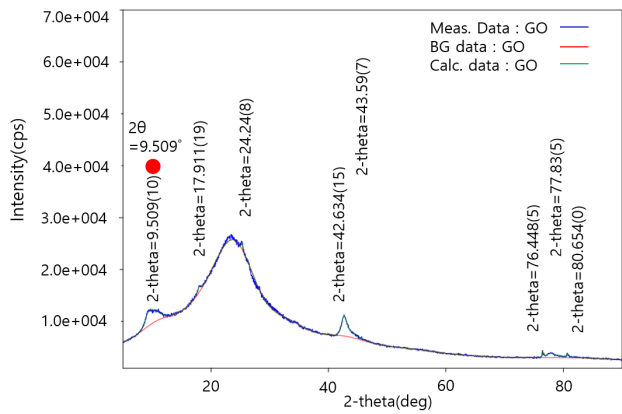
이 발생하지 않으나 GO는 박리과정에서 표면에 산소그룹의 생성으로 열처리시 산소기가 손실하여 열중량이 감소하게 된다. Fig. 5는 열중량분석(TGA, TGA-Q500, TA Instrument, New Castle, USA)결과를 나타낸 것으로 GO는 흑연대비 약 50%의 열손실이 발생하여 흑연으로부터 성공적으로 박리된 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 6은 흑연, GO 및 Al-GO의 X-선 회절분석(XRD, Rigaku 2500, Rigaku, Tokyo, Japan)결과를 나타낸 것이다. 어떤 물질에 파장  $\lambda$ 인 X선을 입사각  $\theta$ 로 물질에 조사하면, X선은 원자에 의해 모든 방향으로 산란되며 회절현상이 발생한다. 이때, 측정된 최대회절 Peak를 Bragg's law에 적용하면 GO시트의 층간간격을 산출할 수 있다. 흑연의 최대회절 Peak는  $2\theta=26.4^\circ$ 로 산출된 층간간격은 0.34nm이며, 흑연으로부터 분리된 GO의 최대회절 Peak는 각  $2\theta=9.5^\circ$ 로 층간간격은 0.93nm, 알루미늄으로 기능화시킨 Al-GO의 최대회절 Peak는  $19.33^\circ \sim 61.54^\circ$ 로 층간간격은 0.15~0.46nm이다. 흑연으로부터 분리된 GO의 층간간격의 증가는 GO표면에 산소함유 작용기에 의한 결과이며, 알루미늄으로 기능화 시켰을 때 산소함유 그룹의 제거에 의해 다시 감소하는 결과를 보였다. 이것은 알루미늄분자 및 알킬사슬이 성공적으로 GO시트표면에 접목되었음을 의미한다.

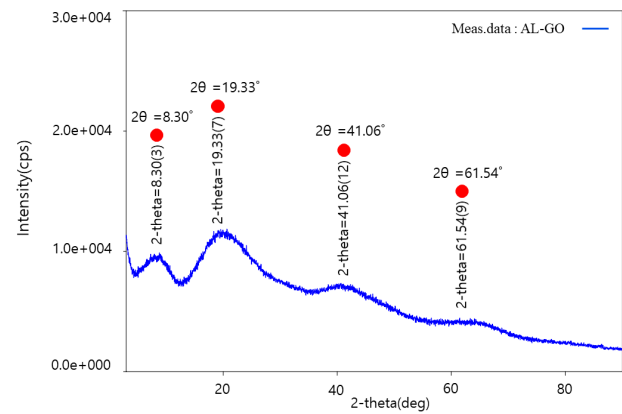
적외선형광분석은 비파괴 화학분석 방법으로 GO표면에 특정한 산소기능 그룹에 관한 정보를 손쉽게 확보할 수 있다. Fig. 7은 FT-IR(Nicolet 6700, Thermo Scientific, Massachusetts, USA)측정 결과로 흑연으로부터 박리된 GO는 O-H peak( $3392.18\text{cm}^{-1}$ ), C=O peak( $1723.3\text{cm}^{-1}$ ), Sp<sup>2</sup> C=C peak( $1577\text{cm}^{-1}$ ), C-O peak( $1156.2\text{cm}^{-1}$ )를 확인하였다. Al-GO의 O-H peak( $3391.4\text{cm}^{-1}$ ), Sp<sup>2</sup> C=C peak



(a)



(b)



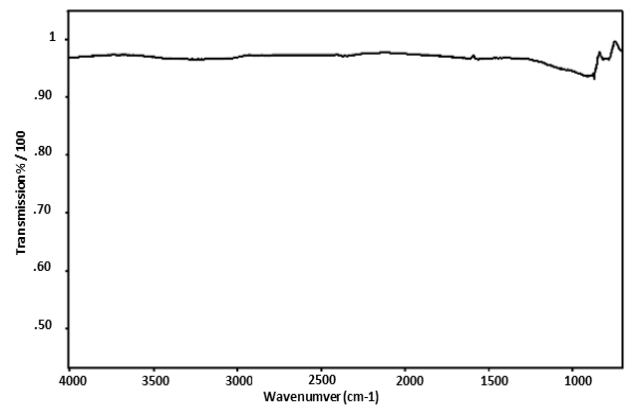
(c)

Fig. 6. XRD patterns (a) graphite, (b) GO and (c) Al-GO

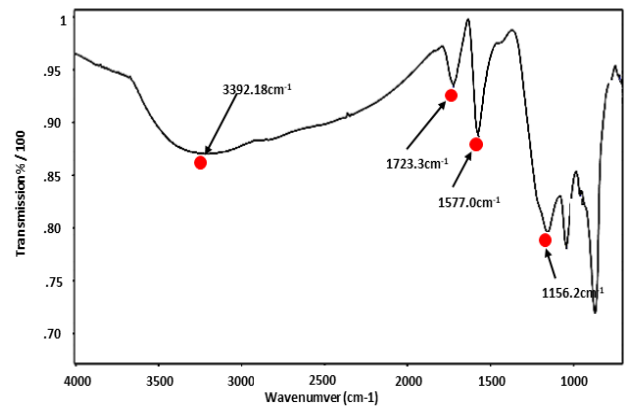
( $1637.3\text{cm}^{-1}$ ), C-O peak( $1101.4\text{cm}^{-1}$ )를 확인하였다. 지문 영역으로 불리는  $1000\text{cm}^{-1}$  이하의 영역에서는 물질의 이성질체(Isomer) 판별에 사용되는 영역으로 기능화를 확인하기 위한 단계에서는 큰 연관이 없는 것으로 판단되어 분석에서 제외하였다(Barathi et al., 2014).

### 3.2 전기전도 측정 결과

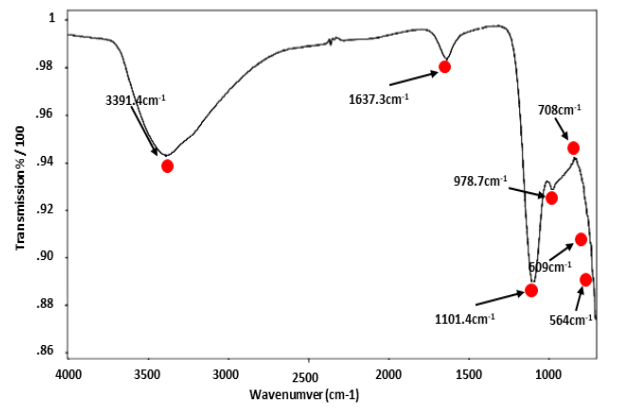
기능화된 산화그래핀의 전기전도 특성 분석을 위해 Fig.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. FT-IR spectra (a) Graphite, (b) GO and (c) Al-GO

8과 같이 비파괴 전도율 측정장치인 RCON™(Gigatec, Ottawa, Canada)를 사용하였으며, 전기전도도는 단순저항 값이 아닌 비저항값을 측정하였다. Fig. 9, 10은 각 공시체의 전기저항 측정결과로 대조군인 EXP-S와 대비할 때 GO 및 Al-GO가 함유된 공시체에서 3일 양생구간에서 각각 약 17.8%, 33.9% 개선되었으며, 28일 양생구간에서 각각 약 10.2%, 15.9% 개선되었다. 이것은 GO 및 Al-GO가 시멘트 내부균열간에 bridging을 통해 전류 흐름이 원활하게 작용하고 알루미늄 분자를 GO 시트 표면에 기능화시



Fig. 8. Non-Destructive Resistivity Measurement Test (RCOM™)

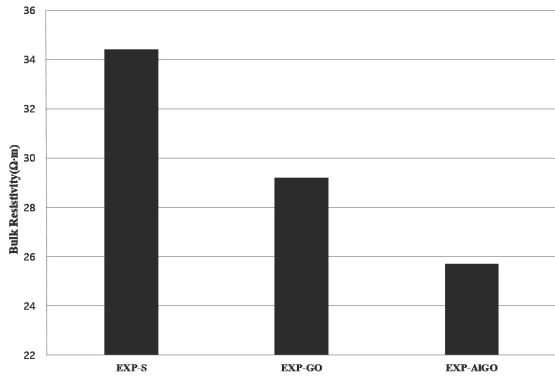


Fig. 9. Comparison of Bulk Resistivity (at 3 days)

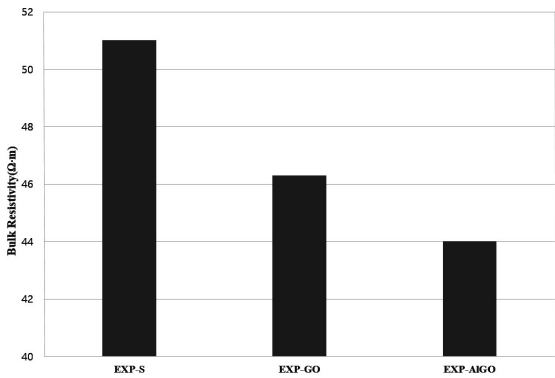
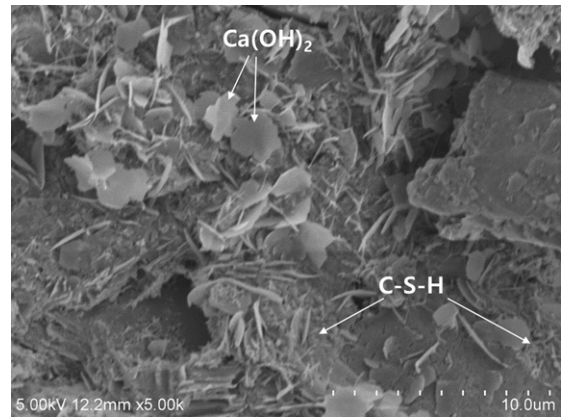


Fig. 10. Comparison of Bulk Resistivity (at 28 days)

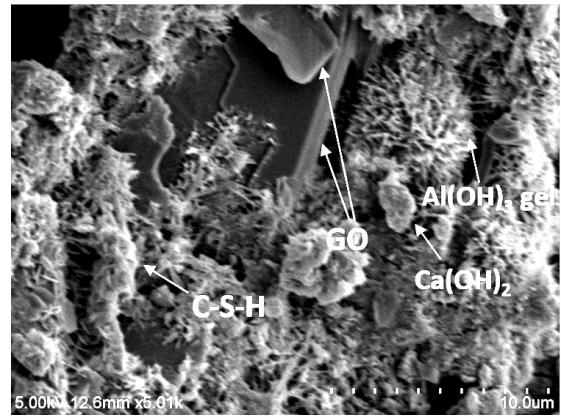
킴에 의해 전기적 특성이 크게 발현된 것으로 판단된다.

### 3.3 미세구조분석

주사전자현미경(SEM, S-3400N, Hitachi, Tokyo, Japan)



(a)



(b)

Fig. 11. SEM Image (5,000X) (a) GO and (b) Al-GO

을 통해 EXP-S와 EXP-AIGO 공시체의 28일 양생구간에서의 미세구조를 분석하였다. Fig. 11(a), (b)에서 수화물인 C-S-H와 Ca(OH)<sub>2</sub>가 형성됨을 확인하였고 Ca(OH)<sub>2</sub>는 액체 혹은 용융 조건에서는 전류를 이동시켜주는 전해질의 기능이 가능하나 고체의 상태에서는 반대로 전류의 흐름에 도움이 되지 못한다. 그러나, Al-GO의 첨가에 따라 Al(OH)<sub>3</sub> gel이 형성되었는데 이는 기계적 특성을 발현하여 밀도를 향상시켜줌에 따라 전류의 흐름을 원활하게 하여 전기적 특성에 관여한 것으로 판단된다. 또한, Al-GO의 첨가로 인하여 Fig. 10(b)와 같이 시멘트 매트릭스에서 GO가 bridging 역할을 하여 미세공극이 조밀하게 개선됨을 확인하였다. 이는, 육각형의 벌집구조 형태를 이룬 탄소 동소체인 GO의 π-전자가 한쪽 끝에서 다른쪽 끝까지 자유로이 이동할 수 있는 특징이 시멘트 매트릭스에서 발현되어 전기적 특성이 발현된 것으로 판단된다.

### 4. 결론

본 연구에서는 GO 및 기능화된 GO를 활용하여 시멘트

복합체의 전기적 특성에 관한 실험적 연구를 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. GO 및 기능화된 GO가 첨가된 실험군의 경우 bridging 역할에 의해 미세공극이 감소함에 따라 전류 흐름을 원활하게 하여 전기전도도의 개선에 영향을 미쳤음을 확인하였다.
2. 전기저항 측정결과 대조군인 표준공시체와 대비할 때 GO 및 AI-GO가 함유된 공시체에서 각각 10.2%, 15.9% 개선되어 도체로서의 활용 가능성을 확인하였다.
3. 미세구조분석 결과 AI-GO의 첨가에 따라  $\text{Al}(\text{OH})_3$  gel 형성을 확인하였으며, 이로 인해 공시체의 밀도를 향상시켜 전류의 흐름을 원활하게 개선시킨 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 Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement under the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government.(Project Number: 22CTAP-C164339-02)

## References

1. Al-Dahawi, A., Harron, M., Sarwary, Ozturk, O., Yildirim, G., Akin, A., Sahmaran, M. and Lachemi, M. (2016), "Electrical percolation threshold of cementitious composites possessing self-sensing functionality incorporating different carbon-based materials," *Smart Materials and Structures*, Vol.25, No.10, 105005.
2. Barathi, M., Kumar, A. S. K., Kumar, C. U. and Rajesh, N. (2014), "Graphene oxide-aluminum oxyhydroxide interaction and its application for the effective adsorption of fluoride", *RSC Advances*, Vol.4, pp.53711-53721.
3. Chang, R., Asatyas, S., Lkhamsuren, G., Hirohara, M., Mondarte, E. A. Q., Suthiwanich, K., Sekine, T. and Hayashi, T. (2018), "Water near bioinert self-assembled monolayers", *Polymer Journal*, Vol.50, pp.563-571.
4. Dimov, D., Amit, I., Gorrie, O., Barnes, M. D., Neves, N. J. T. A. I., Withers, F., Russo, S. and FeliciaCraciun, M. (2018), "Ultrahigh performance nanoengineered graphene-concrete composites for multifunctional applications", *Adv. Funct. Mater.*, Vol.28, 1705183
5. Du, H. and Pang, S. D. (2019), "High performance cement composites with colloidal nanosilica", *Construction and Building Materials*, Vol.24, No.10, pp.317-325.
6. Fraç, M. and Pichór, W., (2020), "Piezoresistive properties of cement composites with expanded graphite", *Composites Communications*, Vol.19, pp.99-102.
7. Guo, L., Wu, J. and Wang, H. (2020), "Mechanical and perceptual characterization of ultrahigh-performance cement-based composites with silane-treated graphene nano-platelets", *Construction and Building Materials*, Vol.240, 117926.
8. Han, B., Sun, S., Ding, S., Zhang, L., Yu, X. and Ou, J. (2015), "Review of nanocarbon-engineered multifunctional cementitious composites", *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, Vol.70, pp.69-81.
9. Han, B., Zhang, L. and Ou, J. (2017), *Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures*, Springer, Singapore.
10. 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 : Applied Science and Manufacturing*, Vol.75, pp.11-17.
11. Mindess, S., Young, F. and Darwin, D. (2003), *Concrete 2nd Edition*, Technical Documents, Prentice Hall, Pearson Education, New Jersey.
12. Qureshi, T. and Panesar, D. K. (2019), "A comparison of graphene oxide, reduced graphene oxide and pure graphene: early age properties of cement composites", *2nd RILEM Spring Convention & International Conference on Sustainable Materials(SMSS 2019) New Generation of Construction Materials*, Rovinj, Croatia.
13. Sobolkina, A., Mechtcherine, V., Khavrus, V., Maier, D., Mende, M., Ritschel, M. and Leonhardt, A. (2012), "Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix", *Cement and Concrete Composites*, Vol.34, No.10, pp.1104-1113.
14. Talga (2018), Global breakthrough as Talga's graphene-infused concrete conducts electricity.
15. Tao, J., Wang, J. and Zeng, Q. (2019), "A comparative study on the influences of CNT and GNP on the piezoresistivity of cement composites", *Materials Letters*, Vol.259, No.15, 126858.
16. Xu, J., and Zhang, D. (2017), "Pressure-sensitive properties of emulsion modified graphene nanoplatelets/cement composites", *Cement and Concrete Composites*, Vol.84, pp.74-82.