

THz 전자기파를 이용한 나노시멘트 광학물성 측정

Measurement of Optical Properties of Nano-Cement Using THz Electromagnetic Waves

김현영*,**, 강동훈*,†, 오승재**, 주철민***

Heonyoung Kim***, Donghoon Kang*†, Seung Jae Oh** and Chulmin Joo***

초 록 탄소나노튜브와 그래핀 등으로 대표되는 탄소 동소체기반 나노재료의 우수한 기계적 특성을 이용해 콘크리트의 압축강도를 증가시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로, 나노재료 적용을 통한 강도 향상을 위해서는 콘크리트 내 나노재료의 분산성이 높아야 하며, 이를 검증하기 위해 외부에서 비파괴적으로 확인할 수 있는 검사 기술이 요구된다. 본 연구에서는, 적외선의 직진성과 마이크로파의 투과성을 동시에 갖고 있는 THz 전자기파를 이용하여 MWCNT 및 GO가 포함된 두 종류의 나노시멘트 모르타르 시편을 제작하여 굴절률 및 흡수율과 같은 기초 광학물성 측정 시험을 수행하였다. 시험을 통해 일반 시멘트 모르타르에 비해 나노재료가 포함된 시편에서 굴절률은 평균 1.0~2.5%, 흡수율은 평균 -14~28% 차이로 측정됨을 확인하였다. 이를 통해, 비파괴적으로 콘크리트 내부에 포함된 나노재료의 분포도를 영상화할 수 있는 기술의 실현 가능성을 확인하였다.

주요용어: 나노시멘트, 테라헤르츠 전자기파, 광학물성, 비파괴검사

Abstract Enhancing mechanical strength of concrete has been fascinated using carbon-based nanomaterials such as CNT and graphene. The key to improving strength is a dispersion of nanomaterials. A novel method is required to investigate the dispersion inner concrete nondestructively. In this study, the optical optical properties such as refractive index and absorption coefficient are measured in nano-cement mortar specimens containing MWCNT and GO using THz electro-magnetic waves. From the results, the properties of nano-cement mortar are confirmed to be 1.0% to 2.5% higher in refractive index, and -14% to 28% higher in absorption coefficient than those of cement mortar at the average values. Using these characteristics, visualizing the dispersion of nano-concrete structures seems possible in future.

Keywords: Nano-Cement, THz Electromagnetic Wave, Optical Properties, Nondestructive Testing

1. 서 론

최근 기존의 기계나 항공·우주분야 뿐만 아니라 토목, 교통분야 등 다양한 분야에서 첨단 나노기술을 적용하기 위한 응용연구가 전 세계적으로 매우 활발히 진행되고 있다. 나노기술(nano technology)은 크게 나노단위의 물리량을 측정하기 위한 연구와 나노크기의 물질을 활용하기 위한 연구로 구분된다. 여기서, 나노크기의 물질을 일반적으로 나노재료(nano materials)라 부르며 해

당 재료가 가진 여러 우수한 물리적 특성들을 이용하여 역학적으로 성능이 탁월하면서 기능적으로 우수한 소재를 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 많은 종류의 나노재료 중에서 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)와 그래핀(graphene) 등으로 대표되는 탄소 동소체기반 나노재료의 경우 기존 재료에 비해 월등히 우수한 기계적, 전기적, 열적 특성을 가지고 있어 다양한 분야에서 가장 활발히 연구가 진행되고 있다[1-3]. 특히, 건설재료 분야의 경우 콘크리트와 강재로

[Received: July 1, 2016, Accepted: September 7, 2016] *한국철도기술연구원 첨단소재연구팀, **연의-생공연 메디컬 융합 연구소, ***연세대학교 기계공학과, †Corresponding Author: Advanced Materials Research Team, Korea Railroad Research Institute, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16105, Republic of Korea (E-mail: dhkang@krii.re.kr)

구분되는 기존의 패러다임에서 섬유강화플라스틱 (fiber reinforced plastics, FRP)이나 나노재료와 같은 첨단 신소재의 적용[4,5]을 통해, 경량화를 실현함과 동시에 구조적인 성능향상을 구현하는 새로운 패러다임으로 점차 전환되고 있다. 뿐만 아니라, 기존과 같이 구조물이 하중부재로서의 수동적 역할만 하는 것이 아니라 구조물에 다양한 센싱기능을 부가해 외란에 대해 구조물이 능동적으로 반응하는 스마트 구조물[6-8]에 대한 연구도 활발히 진행 중에 있다. 나노재료의 경우 이러한 두 목적에 가장 부합되는 재료로서, 다양한 선행 연구를 통해 그 가능성이 점차 확인되고 있다.

나노재료의 건설/토목분야 적용관련 선행연구를 살펴보면, 다중벽 탄소나노튜브(multi-walled carbon nano tube, MWCNT)가 0.5wt% 배합된 나노콘크리트와 일반 콘크리트의 압축강도 비교 연구[9], 다중벽 탄소나노튜브가 배합된 나노콘크리트의 양생 기간에 따른 압축강도 변화 분석 연구[10], 시멘트에 배합된 다중벽 탄소나노튜브가 압축강도에 미치는 영향 평가 연구[11] 등 주로 건설재료의 대표적인 콘크리트의 강도향상을 위한 연구가 주를 이루고 있다. 해당 연구의 결과로부터, 실제 나노재료를 시멘트에 적용하여 나노시멘트화 할 경우 압축강도가 약 30% 이상 증가[12]하는 것으로 보고되고 있다. 뿐만 아니라, 최근에는 전자기파 차폐를 위한 연구로 탄소나노튜브 파우더의 철근 콘크리트 적용 연구[13], 산화그래핀의 포틀랜드 시멘트 적용 연구[14] 등 나노재료를 이용한 건설재료의 기능화 연구도 점차 그 비중을 늘려가고 있어 향후 나노재료의 건설재료로의 실용화 기대감이 점차 높아지고 있다.

한편, 일반적으로 시공 후 수 십년 이상을 사용하게 되는 콘크리트 구조물의 경우 노후화에 따라 발생 가능한 균열(crack)이나 부식(corrosion) 등의 탐지를 위해 투수성(permeability) 검사, 초음파(ultrasonics) 검사 등의 방법이 주로 활용된다. 하지만, 최근 활발히 연구 중인 나노재료가 적용된 콘크리트 제품의 상용화를 위해서는 나노재료의 분산성(dispersity) 확보가 매우 중요하다. 그 이유는, 나노재료의 분산성이 낮을 경우 오히려 구조물에 결함(defect)으로 작용되어 강도저하의 원인이 되는 것으로 보고[15]되고 있기 때문이다. 따라서, 향후 나노콘크리트의 상용화를 위해서는 콘크리트 내부에 포함된 나노재료의 분산성을 비

과파적으로 확인할 수 있는 기술이 필수적으로 요구된다.

본 연구에서는 콘크리트 내 나노재료의 분산도 비파괴검사 기술 개발을 위해, 그 기초연구로서 나노재료가 포함된 시멘트 모르타르를 제작하고 나노재료 함유에 따른 기초 광학물성 변화를 측정하였다. 비파괴검사 방법으로는, 적외선의 직진성과 마이크로파의 투과성을 동시에 갖고 있어 최근 다양한 연구[16,17]가 진행 중인 테라헤르츠 (THz) 전자기파를 이용한 비파괴검사 방법을 적용하였다. 이를 위해, MWCNT 및 산화그래핀(graphene-oxide, GO)이 포함된 나노시멘트 모르타르 시편을 제작하여 THz 전자기파를 이용한 굴절률 및 흡수율 측정 시험을 수행하였다. 이를 바탕으로, 본 연구에서 궁극적인 목표로 하고 있는 THz 전자기파를 이용한 콘크리트 내 나노재료 분포도 영상화 기술의 실현 가능성을 확인하였다.

2. 광학물성 이론

일반적인 시공간 전기장(electric field, $E(z, \omega)$)은 식(1)과 같이 표현된다.

$$E(z, \omega) = E_0 e^{i(K(\omega)z - \omega t)} \quad (1)$$

웨이브 벡터(K)는 식(2)와 같이 복소굴절률(complex refractive index, \tilde{n})과 주파수(angular frequency, ω), 광속(speed of light, c)에 의한 식으로 표현된다. 복소굴절률은 굴절률(normal refractive index, n)과 흡광계수(extinction coefficient, k)에 관한 식이다.

$$K = \frac{\omega}{c} \tilde{n} = \frac{\omega}{c} (n + ik) \quad (2)$$

따라서, 복소굴절률을 고려하여 전기장 방정식을 식(3)과 같이 정리할 수 있다.

$$E(z, \omega) = E_0 e^{i\left(\frac{n\omega}{c}z - \omega t\right)} e^{-\frac{k\omega}{c}z} \quad (3)$$

전기장의 강도(intensity)는 Beer의 법칙에 의해 식(4-1), (4-2)와 같이 표현된다.

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \quad (4-1)$$

$$I(z) \propto EE^* = E_0^2 e^{-2\frac{k\omega}{c}z} \quad (4-2)$$

식(4-1), (4-2)를 통해 흡수율은 흡광계수와 주파수에 대한 식으로 정리된다.

$$\alpha = 2\frac{k\omega}{c} \quad (5)$$

굴절률 및 흡수율과 매질의 두께(z)에 따른 전기장은 다음과 같이 정리된다.

$$E(z, \omega) = E_0 e^{i\left(\frac{n\omega}{c}z - \omega t\right)} e^{-\frac{\alpha}{2}z} \quad (6)$$

매질을 기준으로 Fresnel 방정식의 투과계수(T)를 이용해 input 신호와 output 신호의 관계로 식을 정리하면 다음과 같다.

$$E_{output} = E_{input} T e^{i\left(\frac{\omega z}{c}n - \frac{\omega z}{c}n_{vacuum}\right)} e^{-\frac{\alpha}{2}z} \quad (7-1)$$

$$E_{output} = E_{input} T e^{i\frac{\omega}{c}z(n-1)} e^{-\frac{\alpha}{2}z} \quad (7-2)$$

$$\frac{E_{output}}{E_{input}} = T e^{i\frac{\omega}{c}z(n-1)} e^{-\frac{\alpha}{2}z} = \rho e^{i\Delta\phi} \quad (7-3)$$

식(7)에서 굴절률 및 흡수율 값을 도출하면 식(8)과 같다.

$$n = 1 + \Delta\phi \frac{c}{\omega z} \quad (8-1)$$

$$\alpha = -\frac{2}{z} \ln\left(\frac{\rho}{T}\right) \quad (8-2)$$

위 식을 통해 서로 다른 광학특성을 갖는 두 종류의 물질은 굴절률 차이로 인해 상호 구분이 가능하다. 또한, 측정 위치를 이동하며 스캐닝 할 경우 해당 물질의 분포도를 입체적으로 확인 가능하게 된다.

3. 광학물성 측정 실험 및 결과

3.1. 예비 시험 - 시멘트 모르타르 시편

본 연구에서 목표로 하고 있는 나노시멘트의 광학물성 측정에 앞서, 시험대상의 모재(base) 물질인 시멘트 모르타르를 대상으로 THz 전자기파

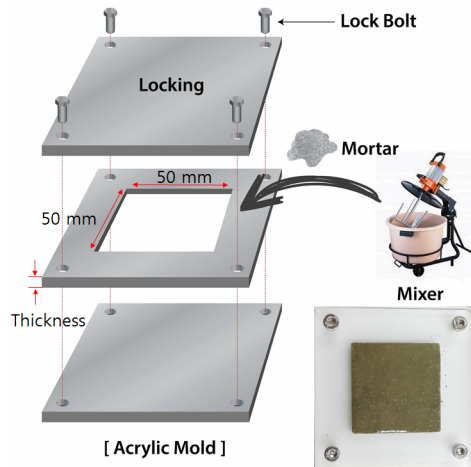


Fig. 1 Preparation of test specimens (cement mortar)

의 투과특성 확인을 위한 예비 시험을 수행하였다. 본 시험은 시멘트 모르타르에 대한 THz 전자기파의 투과특성을 고려하여 대상 시편 최적두께와 입사파의 최적주파수를 찾는 것을 그 목적으로 한다.

우선, 시멘트 모르타르 시편 제작을 위해 Fig. 1과 같은 아크릴 몰드(50 mm × 50 mm × thickness)를 통해 서로 다른 두께를 갖는 4가지(2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm) 종류의 시편을 제작하였다. 시편은 몰드에서 탈형 후 일반적인 수중양생(curing) 방법으로 28일간 양생하여 최종 완성하였다.

3.2. 실험 장치 및 방법

THz 전자기파를 이용하여 시멘트 모르타르 시편의 광학물성 측정을 위해, 본 연구에서는 펄토초 레이저와 광전도 안테나 방식을 이용하여 THz 전자기파를 발생시키고, 광전도 표본 추출법(17)을 통해 광학 물성을 측정하였다. 광전도 표본 추출법은 극초단파 펄스 레이저(pulsed laser)의 빔을 선속분할기(beam splitter)를 통해 두 개로 분할한 후, 하나는 THz 전자기파 발생기로, 다른 하나는 전자기파 검출기로 투과시키는 방법이다. 또한, THz 전자기파의 파형 및 두께에 따른 정보를 얻기 위해서 시간지연(time delay)을 위한 경로 차 구성을 포함한다. 본 연구에 적용된 실험장치 구성은 Fig. 2와 같다.

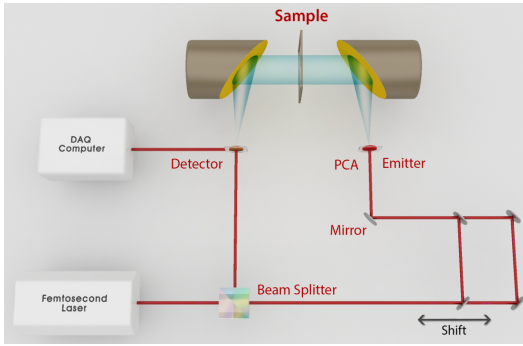


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

본 연구에서는 포물면 거울(parabolic mirror)을 지나 시편을 투과하는 THz 전자기파의 직경, 즉 검출 가능 영역이 20 mm로 제한되며, 66.67ps의 시간동안 500개의 데이터를 수집하였다. 또한, 공기를 통과할 때 발생 가능한 광 경로의 측정오차를 최소화하기 위해 시편 주변을 진공상태로 유지하였다.

3.3. 예비 시험 결과

Fig. 3은 시멘트 모르타르 시편에 대한 시간 영역에서의 THz 전자기파 투과 신호이다. 그림에서와 같이 시편이 두꺼워짐에 따라 투과 신호의 세기가 급격히 감소하였다. 투과 신호의 감소량을 Fig. 4와 같이 정량적으로 확인해보면, 입사 신호 강도, 즉 자유 공간을 투과하는 펄스의 강도에 비해 시멘트 모르타르 시편을 투과하는 펄스는 2 mm 두께에서 약 10%, 4 mm에서 약 1%, 8 mm에서는 약 0.1% 미만으로 지수함수적(exponential)으로 감쇠가 발생하였다. 따라서, 신호의 관별이 가능한 2 mm, 4 mm 두께의 시편을 대상으로 광학물성 측정 시험을 진행하였다. 시험 결과, 주파수에 따른 굴절률 변화를 나타내는 Fig. 5와 흡수율 변화를 나타내는 Fig. 6을 통해 주파수 변화에 대해 굴절률이 일정한 값을 유지하는 구간과 흡수율이 선형적으로 변화하는 구간이 약 500 GHz(0.5 THz) 이내의 영역임을 확인하였다. 이를 통해, 나노시멘트 모르타르의 광학 물성을 측정함에 있어 최적화된 시편 두께(2~4 mm)와 주파수(~0.5 THz) 영역을 도출하였다.

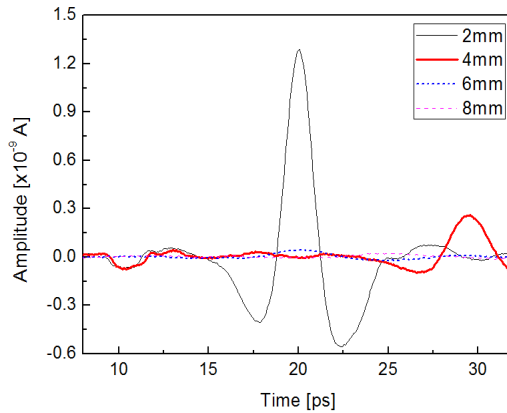


Fig. 3 THz wave signals of cement mortar in time-domain

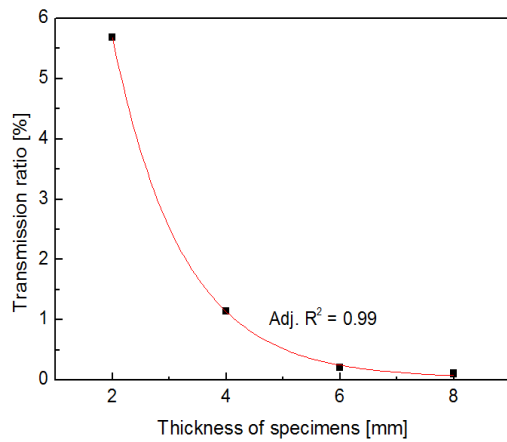


Fig. 4 Transmission ratio depending on specimen thickness

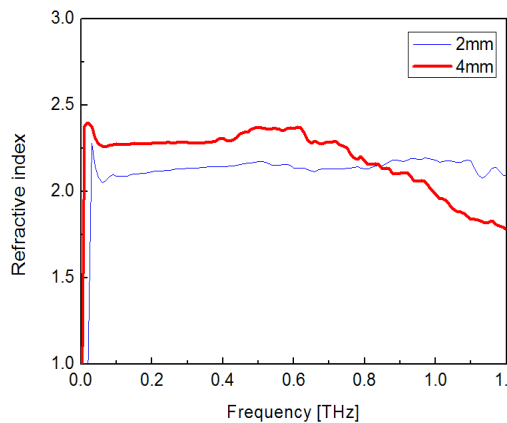


Fig. 5 Refractive index of cement mortar specimens

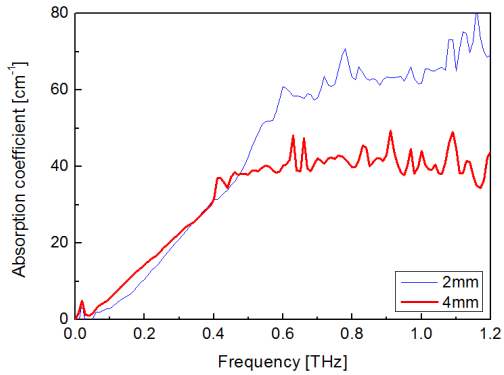


Fig. 6 Absorption coefficient of cement mortar specimens

3.4. 본 시험 - 나노시멘트 모르타르 시편

나노재료가 포함된 나노시멘트 모르타르 시편의 THz 전자기파 투과 시험을 위해 두 가지 종류의 나노재료, 즉 CNT와 그래핀이 포함된 나노시멘트 모르타르 시편과 비교를 위한 일반 시멘트 모르타르 시편 등 총 3가지 종류의 시편을 제작하였다. 시편 제작은 예비 시험에서와 동일한 방법으로 제작하였다.

본 시험을 위한 시편의 두께는 예비 시험에서 결정된 최적두께인 2~4 mm를 목표로 해당 두께의 시편 제작을 위해 3 mm의 두께를 갖는 새로운 몰드로 시험 시편을 제작하였다.

시험에 사용된 두 가지 나노재료는 MWCNT와 GO이며, 각각 디토테크놀로지(DT-CNTS-2DI)와 그래핀올(GAGO-001)의 상용 제품을 구입하여 사용하였다. 두 제품 모두 나노재료가 물에 잘 분산되어 있는 분산수용액(2.0wt%) 제품이며, 시멘트 모르타르 제작 시 나노재료의 배합비율 결정은 나노재료를 이용한 시멘트 모르타르의 강도향

상과 관련되어 일반적으로 압축강도 향상효과가 높은 배합비율로 알려진 약 0.045wt%를 적용하였다. 이를 위해, 당초 2.0wt%의 분산수용액을 증류수를 이용해 희석하여 사용하였다. Fig. 7은 제작된 나노시멘트 모르타르 시편의 모습이며, 28일 양생이 모두 완료된 후 나노시멘트 모르타르 시편의 두께는 Fig. 7과 같이 약 3.6~4.1 mm 정도로 측정되었다.

3.5. 시험 결과 및 고찰

시험 결과 Fig. 8에서와 같이 자유공간을 진행하는 THz 전자기파에 비해, 본 시험에 사용된 3가지 종류의 시편 모두 시편을 투과한 광 강도가 약 5% 정도임을 확인할 수 있다. 또한, 일반 모르타르 시편에 비해 나노재료가 포함된 두 가지 시편의 경우 모두 시간 영역에서 신호에 시간 지연이 발생해 측정 대상에 대한 분별 가능성을 확인할 수 있다. 보다 구체적인 신호특성 변화의 확인을 위해, 주파수별 THz 전자기파에 대한 굴절률(refractive index) 및 흡수율(absorption coefficient)을 측정하였으며 Fig. 9, Fig. 10과 같다. 굴절률의 경우 3가지 시편 모두 전체적으로 2.2~2.5의 값을 가지며 시편 간 구분이 가능할 정도로 차이를 보임을 확인할 수 있다. 즉, 해당 굴절률 차이를 통해 시멘트 모르타르에 나노재료의 포함여부 및 그 종류를 구분해낼 수 있게 된다. 정량적으로 살펴보면, 0.5 THz 이하 주파수 영역에서 일반 시멘트 모르타르에 비해 MWCNT 시편은 평균 약 0.05(약 2.5%), GO 시편은 평균 약 0.02(약 1.0%) 각각 높은 값을 나타냈다. 한편, 흡수율의 경우 3가지 시편 모두 30/cm 이하의 값이 도출되었고, 주파수에 대해 비선형적인 굴절률과는 달리 다소 선형적인 상관관계를 보였다. 정량적으로 살펴보면, 일반 시멘트 모르타르 시편에 비해 MWCNT 시편은 평균 약 3.51/cm(약 28%) 높은 값을 보인 반면, GO 시편은 평균 약 1.74/cm(약 14%) 낮은 값을 나타냈다.

이상과 같은 결과는, 일반적으로 그래핀은 MWCNT보다 전도도가 높은 것으로 알려져 있지만, GO의 경우 친수성(hydrophilic)인 산소기의 영향으로 전도도가 낮아지는 이유와 두 재료가 갖는 구조적인 형상(MWCNT: 1D 선형, GO: 2D 평판) 차이에 의한 영향으로 판단된다.



A. Cement mortar (3.6 mm)
B. Cement mortar + MWCNT (3.6 mm)
C. Cement mortar + GO (4.1 mm)

Fig. 7 Test specimens of cement mortar and cement mortar containing nano-materials

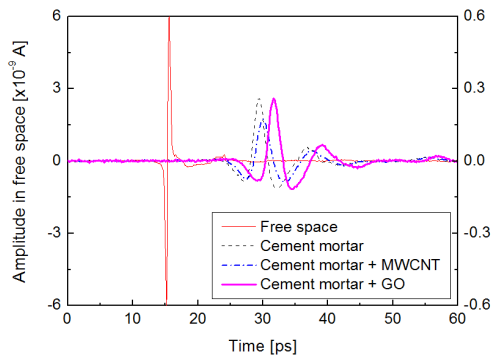


Fig. 8 THz wave signals of nano-cement mortar in time-domain

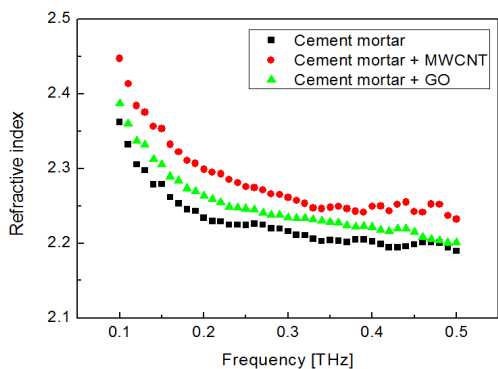


Fig. 9 Refractive index of nano-cement mortar specimen

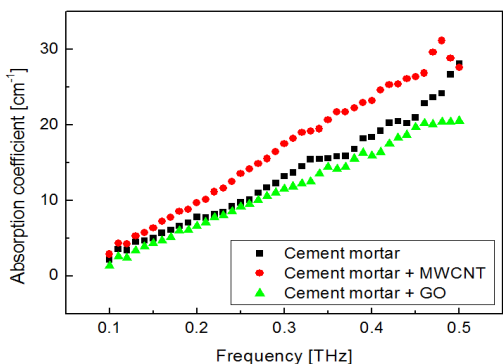


Fig. 10 Absorption coefficient of nano-cement mortar specimen

4. 결론

본 연구에서는 MWCNT 및 GO 두 가지 나노재료가 포함된 시멘트 모르타르 시편에 대한 THz 전자기파 투과시험을 수행하였다. 시험을 통해 굴절률과 흡수율을 측정하였으며, 굴절률의

경우 일반 시멘트 모르타르에 비해 MWCNT 시편은 평균 약 0.05(약 2.5%), GO 시편은 평균 약 0.02(약 1.0%) 각각 높은 값을 나타냈고 GO보다 MWCNT가 더 큰 값을 가져 상호 구분이 가능하였다. 한편, 흡수율의 경우 일반 모르타르 시편 대비 MWCNT 시편은 평균 약 3.51/cm(약 28%) 높은 값을 보인 반면, GO 시편의 경우 오히려 1.74/cm(약 14%) 낮은 값을 보여 굴절률과 다른 경향을 나타냈다. 따라서, 흡수율의 차이는 작고 굴절률 차이는 큰 방향으로 최적화된 특정 주파수를 선택하여 비파괴검사를 수행할 경우 시멘트에 포함된 나노재료에 대한 분별이 가능함을 확인하였다. 또한, 향후 초점영역 조절 및 x, y 방향의 이송장치 적용을 통해 본 연구에서 궁극적인 목표로 하고 있는 THz 전자기파를 이용한 콘크리트 내 나노재료 분포도 영상화 기술이 실현 가능함을 확인하였다.

후기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원 및 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 기초연구사업(No. 2015R1A5A1037668)으로 수행되었습니다.

References

[1] J. N. Coleman, U. Khan and Y. K. Gun'ko, "Mechanical reinforcement of polymers using carbon nanotubes," *Advanced Materials*, Vol. 18, No. 6, pp. 689-706 (2006)

[2] D. A. Dikin, S. Stankovich, E. J. Zimney, R. D. Piner, G. H. Dommett, G. Evmenenko, S. T. Nguyen and R. S. Ruoff, "Preparation and characterization of graphene oxide paper," *Nature*, Vol. 448, No. 7152, pp. 457-460 (2007)

[3] M. K. Zalalutdinov, J. T. Robinson, C. E. Junkermeier, J. C. Culbertson, T. L. Reinecke, R. Stine, P. E. Sheehan, B. H. Houston and E. S. Snow, "Engineering graphene mechanical systems," *Nano Letters*, Vol. 12, No. 8, pp. 4212-4218 (2012)

[4] W. S. Chung, D. H. Kang and Z. O. An, "Behavior of strut in concrete-filled FRP PSC

- bridge using FBG sensors," *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 6, pp. 11-15 (2009)
- [5] D. Kang, D. H. Kim and S. Jang, "Design and development of structural health monitoring system for smart railroad- gauge-facility using FBG sensors," *Experimental Techniques*, Vol. 38, No. 5, pp. 39-47 (2014)
- [6] S. Pyo, K. Wille, S. El-Tawil and A. E. Naaman, "Strain rate dependent properties of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under tension," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 56, pp. 15-24 (2015)
- [7] K. Choi, D. Kang, S. B. Park and L. H. Kang, "A study on impact monitoring using a piezoelectric paint sensor," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 35, No. 5, pp. 349-357 (2015).
- [8] D. Kang, H. Y. Kim and D. H. Kim, "Study on smart seat technology for railroad vehicles using piezoelectric sensors," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 34, No. 5, pp. 390-396 (2014)
- [9] X. Yu and E. Kwon, "A carbon nanotube/cement composite with piezoresistive properties," *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 5, pp. 055010 (2009)
- [10] M. S. Morsy, S. H. Alsayed and M. Aqel, "Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar," *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 1, pp. 145-149 (2011)
- [11] S. Kumar, P. Kolay, S. Malla and S. Mishra, "Effect of multiwalled carbon nanotubes on mechanical strength of cement paste," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 84-91 (2011)
- [12] H. Choi, D. Kang, G. S. Seo and W. Chung, "Effect of some parameters on the compressive strength of MWCNT-Cement composites," *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2015, Article ID 340808 (2015)
- [13] D. Micheli, R. Pastore, A. Vricella, R. B. Morles, M. Marchetti, A. Delfini, F. Moglie, V. Mariani Primiani, "Electromagnetic characterization and shielding effectiveness of concrete composite reinforced with carbon nanotubes in the mobile phones frequency band," *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 188, pp. 119-129 (2014)
- [14] A. P. Singh, M. Mishra, A. Chandra and S. K. Dhawan, "Graphene oxide/ferrofluid/cement composites for electromagnetic interference shielding application," *Nanotechnology*, Vol. 22, No. 46, pp. 465701 (2011)
- [15] S. Parveen, S. Rana and R. Fangueiro, "A review on nanomaterial dispersion, microstructure, and mechanical properties of carbon nanotube and nanofiber reinforced cementitious composites," *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2013, No. 80 (2013)
- [16] S. R. Tripathi, H. Ogura, H. Inoue, T. Hasegawa, K. Takeya and K. Kawase, "Measurement of chloride ion concentration in concrete structures using terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS)," *Corrosion Science*, Vol. 62, pp. 5-10 (2012).
- [17] C. Kang, I. H. Maeng, S. J. Oh, S. C. Lim, K. H. An, Y. H. Lee and J. H. Son, "Terahertz optical and electrical properties of hydrogen-functionalized carbon nanotubes," *Physical Review B*, Vol. 75, No. 8, pp. 085410 (2007)