Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 21, No. 6, November 2017, pp.162-168
https://doi.org/10.11112/jksmi.2017.21.6.162

pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

CNT 첨가량에 따른 시멘트의 역학성능 및 미세구조의 영향

오성우[1], 오경석[2], 정상화[3], 정원석[4], 유성원[5*]

Effects of CNT Additions on Mechanical Properties and Microstructures of Cement

Sungwoo Oh[1], Kyeong-seok Oh[2], Sang-hwa Jung[3], Wonseok Chung[4], Sung-won Yoo[5*]

Abstract: Carbon nanotube(CNT) is one of the promising construction materials to produce concrete with high strength and durability by adding in the concrete mixtures from various researches. Also, its superior heat conductivity can be one of the options to develop self-heating concrete. In this research, the fundamental study was conducted to investigate mechanical properties and microstructures of cement pastes and mortars by strength tests and porosity measurement with several CNT additions, which were 0 wt%, 0.115 wt%, 0.23 wt% and 0.46 wt% of CNT-cement ratio. Compressive and flexural strength test were conducted at 3, 7 and 28 days, and pore characteristics were investigated by mercury intrusion porosimetry. SEM-EDS and Thermogravimetric analysis(TGA) were conducted to prove the hydration product types and CNT dispersion in the cement matrix. As a result, even though high amount of CNT additions were caused worse performance, mixtures with 0.115 wt% of CNTs developed the similar performance with plain mixture.

Keywords: Cement, CNT addition, Mechanical properties, Microstructures, MIP, SEM, Strength, TGA

1. 서 론

시멘트는 콘크리트의 주성분으로, 주요광물로 Calcium silicate(C_3S, C_2S) 및 Calcium aluminate(C_3A)로 구성되어 있다. 이는 물과 반응하여 C-S-H 또는 $Ca(OH)_2$ 등의 수화생성물을 만들어 내며(Cho et al., 2008), 수화반응이 지속됨에 따라 수화생성물량의 증가로 인한 역학성능 개선 및 미세구조가 치밀해지는 효과가 나타난다. 이러한 시멘트의 역학성능 개선을 위한 노력으로 탄소나노튜브(Carbon NanoTube, CNT) 및 그래핀(Graphene)이 알려져 있으며, 이를 혼입한 시멘트 복합체에 관한 연구가 최근 수행되고 있다. CNT는 6각형의 고리형태로 연결된 탄소 원자들이 튜브 형태를 이루고 있으며, 열전도 및 전기전도도가 매우 우수한 재료로 알려져 있다(Jo et al., 2013).

CNT는 강재보다 100배 이상의 인장강도와 1 TPa의 탄성계수를 가지고 있으며, 파단변형률은 280%에 이른다고 알려져 있다(Wong et al., 1997; Yu et al., 2000). 이러한 특성 때문에, CNT 혼입에 따른 시멘트계 복합체의 역학적 성능에 대한 연구가 진행되고 있다. CNT 혼입 시 강도발현이 우수하다고 알려져 있으며, 비표면적이 큰 CNT는 시멘트 수화물 생성을 촉진하고 C-S-H gel의 비율을 증가시키는 역할을 한다고 알려져 있다(Li et al., 2004; Li et al., 2005; Konsta-Gdoutos et al., 2010). 그러나, 연구자들에 따라 실험결과가 상이하게 나타나고 있는데, 압축강도는 시멘트 중량 대비 0.1%의 CNT 혼입에서 15%, 0.5%의 혼입에서는 11%의 압축강도 증가를 보였으나(Xu and Eil, 2009; Musso et al., 2009), w/c 0.5 배합에서 시멘트 중량비 0.5%를 혼입할 경우 오히려 8%의 압축강도 저하가 보고되기도 하였다(Colins et al., 2012).

시멘트계 CNT 복합체의 미세구조 분석에 대한 연구도 진행되었으며, CNT의 혼입에 따른 강도증진은 추가적으로 수화반응을 생성하는 화학적 반응이 아닌 Filling effect로서 물리적 개선의 영향이 크다고 보고되었다(Li et al., 2005; Chaipanch et al., 2010; Kang and Park, 2014; Xu et al., 2015). CNT 혼입에 따른 역학적 성능평가와 미세구조 분석에 대한 하지만, 여러 연구에도 불구하고 CNT 입자간 반데르발스 힘에 의해 매트릭스 내에 균일하게 분산되어 있지 못한다는 점에 따라 강도증진을 발현하기는 어려운 실정이다. 국내에서도 분산성 개선을 위해 여러 방법을 적용하여 강도변화의 차이를 분석하는 연구가 진행되었지만(Ha et al., 2015), 역학성능 개선을 위한 최적 CNT 사

[1]정회원, (재)한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구센터, 선임연구원
[2]정회원, (재)한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구센터, 연구원
[3]정회원, (재)한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구센터, 센터장
[4]정회원, 경희대학교 토목공학과, 교수
[5]정회원, 가천대학교 토목환경공학과, 교수, 교신저자
***Corresponding author:** imysw@gachon.ac.kr
Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University, Seong-Nam, Gyeonggi-do
• 본 논문에 대한 토의를 2017년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright Ⓒ 2017 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

용량이 명확하게 제시되어 있지 않은 실정이다.

위의 역학적 성능 이외에, CNT의 높은 열전도도 특성을 활용한 시멘트계 복합체를 활용한 콘크리트 개발에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. CNT 첨가 시, 기존 OPC 대비 발열성능이 우수한 것으로 평가되고 있으며, 국내 일부 연구자들에 의하여, 0.125 wt% CNT 첨가 시 OPC 대비 20배 이상 우수한 발열성능을 나타내는 것으로 알려졌다(Lee et al., 2017).

본 연구에서는, 분산성능을 향상시킨 CNT 용액을 활용하여 압축강도 및 휨강도 측정을 실시하였다. 또한, 기공특성 분석을 위하여 수은압입법(Mercury Intrusion Porosimetry, MIP)을 활용하였으며, 이를 압축강도 결과와 비교하여 CNT 첨가량과의 관계를 도출하였다. 열분석 및 SEM-EDS 등의 미세구조분석을 통해 시멘트계 CNT 복합체의 생성물 종류 및 구성성분을 확인하였으며, CNT의 분포형상을 제시하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료

본 연구에서는 국내 A사에서 주문 및 제작된 연구용 시멘트(Research cement)가 주원료로 사용되었다. 클링커 95%와 석고 5%가 첨가된 연구용 시멘트는 Table 1과 같이 포틀랜드 시멘트와 화학조성이 유사하다. 하지만 Fig. 1의 연구용 시멘트의 XRD 정성분석 결과에서 나타내는 바와 같이 $CaCO_3$ 및 SiO_2 등의 혼합재 및 불순물이 첨가되지 않았으며, 이로 인한 시멘트 역학성능 및 미세구조분석 시 신뢰성 있는 결과를 얻기 위하여 사용되었다.

Table 1 Mechanical and chemical properties of raw materials

	Chemical compositions(%)						Density (g/cm^3)	Specific surface area (cm^2/g)
	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	SO_3	Fe_2O_3		
OPC	57.9	20.5	4.4	2.0	1.7	3.9	3.15	3 580
Research cement	65.2	18.1	4.3	2.9	3.6	3.8	3.19	3 680

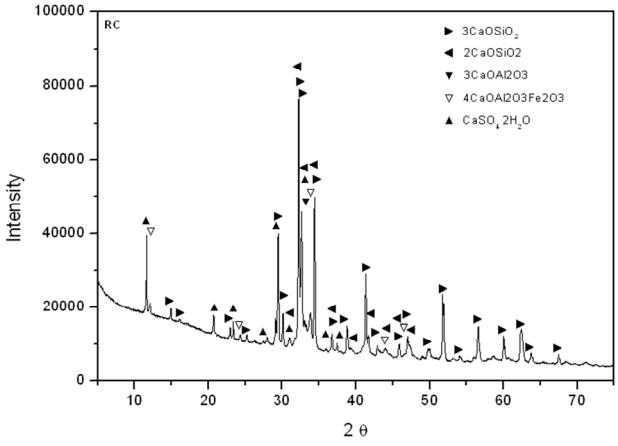

Fig. 1 XRD result for Research cement

연구용 시멘트의 밀도와 비표면적은 각각 3.19 g/cm^3과 3,680 cm^2/g이며, 화학조성은 XRF 분석을 수행하였으며, 산화물 형태의 결과를 나타내었다. Fig. 2은 연구용 시멘트의 입도분포 및 누적곡선을 나타내고 있다. 연구용 시멘트의 평균 입도는 각각 11.9 μm다.

본 연구에서 사용된 CNT는 용액 형태로 제조된 재료를 사용하였다. 국내 A사에서 제조된 2 wt% 농도의 CNT 용액은 물을 용매로 하여 미량의 분산제가 첨가되었으며, 투입된 분말형 CNT의 직경 및 길이는 각각 10 nm와 1.5 μm이다.

본 배합에 사용된 모래는 KS L ISO 679에 의해 생산된 표준사로, SiO_2가 98% 함유되어있는 제품을 이용하였으며. 다음 Table 2는 ISO 잔골재의 입도를 나타내고 있다.

2.2 실험방법

2.2.1 배합비

연구용 시멘트 및 시멘트 중량 대비 0.115, 0.23, 0.46%의 CNT가 첨가되었을 때의 영향을 분석하기 위하여 아래 Table 3

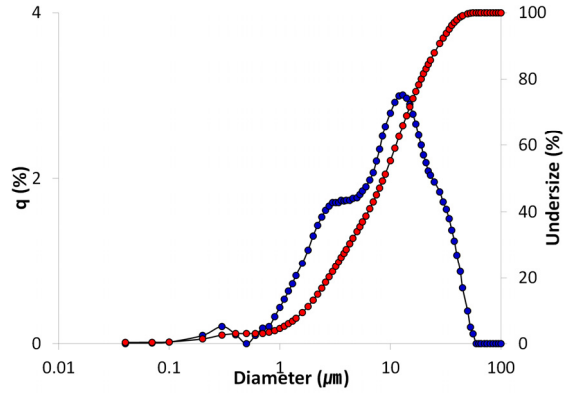

Fig. 2 Particle size distribution and cumulative passing rate of Research cement

Table 2 ISO sand grain size cumulative distribution

Square mesh size(mm)	Cumulative retained(%)
2.00	0
1.60	7±5
1.00	33±5
0.50	67±5
0.16	87±5
0.08	99±1

Table 3 Mix proportions

	W/C	W	C	CS	S
PC00	46	46	100	-	-
PC12		40.4		5.6	
PC23		34.7		11.3	
PC46		23.5		22.5	
MC00	46	46	100	-	200
MC12		40.4		5.6	
MC23		34.7		11.3	
MC46		23.5		22.5	

* W : water, C : research cement, CS : CNT solution, S : ISO sand
* PC12, MC12 : mixtures with 0.115 wt% of CNT/Cement

과 같은 배합비를 선정하였다. 사전 문헌분석 결과로부터 0.2% 전 후의 CNT 첨가 시 동등수준 이상의 역학성능을 발현할 수 있다는 근거를 통해, 배합비를 도출하였다. 물-시멘트비는 46%로 일정하게 유지시켰으며, 이때 배합수량은 2% CNT 용액에서 고형분량을 제거한 값을 사용하였다. 모르타르 압축강도 및 휨강도 시험을 위하여 ISO 표준사를 사용하였으며, 시멘트-골재비는 50%로 하였다. 공극특성 및 미세구조분석을 위하여, Table 3 중 PC로 시작하는 네 개의 배합은 페이스트 시편으로 제작되었으며, 압축강도 및 휨강도 시험을 위하여 아래 네 개의 배합은 모르타르 시편으로 제작되었다.

페이스트 시편은 시멘트에 CNT 용액을 가한 뒤 30초간 섞은 뒤 추가 배합수를 가하여 3분 동안 고속으로 배합하였다. 20개의 30 mm×30 mm×30 mm 크기의 시편을 제작하기 위한 cube형 몰드에 타설 한 뒤 24시간 동안 (21±3)°C 및 (95±5)% R.H.의 챔버에서 양생을 실시하였다. 탈형 후, (21±3)°C에서 수중양생을 거치고, 측정재령에 꺼내어 시험에 맞는 크기로 전처리과정을 거쳤다.

모르타르 시편 제작 시, CNT 입자의 시편 내 고른 분산을 위하여, 골재와 CNT 용액을 30초 동안 건비빔 한 뒤, 시멘트와 추가 배합수를 가하여 3분 동안 고속으로 배합하였다. 공시체는 3연식 40 mm×40 mm×160 mm의 몰드를 사용하였으며, 페이스트 시편과 같은 양생과정을 실시하였다.

2.2.2 압축강도 및 휨강도 시험

압축강도 및 휨강도 시험은 KS L ISO 679에 준하여 실시하였다. 휨강도 시험은 3점 재하를 기반으로 실시하였으며, 지간은 100 mm, 높이 40 mm의 시편을 약 60 N/s의 속도로 하중재하를 실시하였다. 휨강도 시험 이후, 절단된 시편으로 압축강도 시험을 실시하였다. 압축강도 시험 시, 재하면의 면적은 2,500 mm^2으로, 2,400 N/s의 속도로 시험을 실시하였다. 이후, 재령 3, 7 및 28일에 대한 강도평가를 실시하였다.

2.2.3 수은압입법(MIP) 시험

본 연구에서는 CNT 첨가량에 따른 강도와 공극특성의 관계를 확인하기 위해 수은압입법을 사용하였다. 수은압입법은 시멘트계 재료의 공극구조 특성을 파악하기 위해 많은 연구에서 주로 쓰인다. 시편에 수은을 압입함으로써 압력에 따른 공극분포 및 총 공극률을 측정하는 방법이다. 본 연구에서는 공극구조의 특성을 파악하기 위해 페이스트 시편을 제작하였다. 페이스트의 재령은 7일 및 28일을 기준으로 Silica-gel과 Isopropanol alcohol을 사용하여 수화정지를 하여 측정하였다. 시편은 직경 5 mm의 구형으로 4~6개 정도 제작한 뒤 40°C에서 24시간동안 건조시킨다. 공극 측정 장비는 Micromeritics사의 Autopore IV 9500을 이용하였다. 이 장비의 공극측정은 저압부와 고압부로 나뉘는데, 저압부에서의 압력은 0~0.15 MPa, 공극직경은 약 8 μm~120 μm의 범위 내에서 측정이 가능하고, 고압부에서의 압력은 최대 206 MPa, 공극직경은 약 6 nm~100 μm까지 측정이 가능하다.

2.2.4 SEM-EDS 분석

시멘트 매트릭스 내 CNT 형상 및 분포를 확인하기 위하여, SEM 이미지를 촬영하였으며, 분석 장비는 TESCAN사의 MIRA LMH 모델을 사용하였다. 제작된 페이스트 시편을 조쇄한 뒤 박편으로 제작한 뒤, 40°C에서 24시간동안 건조 한 뒤 분석을 실시하였다. 30 kV당 1 nm의 분해능을 갖고 최대 1,000,000 배율로 이미지를 촬영할 수 있다. 수화생성물의 성분을 확인하기 위하여, Bruker사의 EDS 디텍터로 구성성분 분석을 추가로 실시하였다.

2.2.5 열중량분석

7일 및 28일 재령에 따른 시멘트 페이스트의 주생성물 분석 및 $Ca(OH)_2$ 및 $CaCO_3$의 생성량을 분석하기 위하여, 열분석을 실시하였다. 제작된 페이스트 시편 1 g을 분쇄하여 모두 150 μm 체를 통과시킨 뒤, 40°C에서 24시간 건조시킨 뒤 분석을 실시하였다. 장비는 Rigaku사의 Thermo Plus EVO II이며, 승온 속도는 분당 10°C로 일정하게 하면서, 질소가스 환경에서 분석을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 압축강도 및 휨강도

배합별 압축강도 결과는 아래 Fig. 3과 같다. CNT 첨가량이 증가 할수록 압축강도 값은 감소하는 경향이 나타났다. 이는, 용액 내 CNT가 고르게 분산되었다 할지라도 배합 과정에서 CNT의 반데르발스 힘에 의한 뭉침 현상이 나타나 일부 공극의 역할

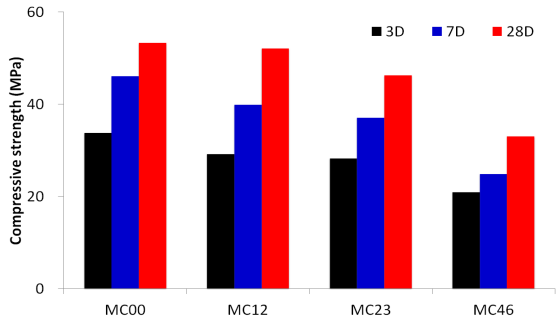

Fig. 3 Compressive strength results for mortar specimens

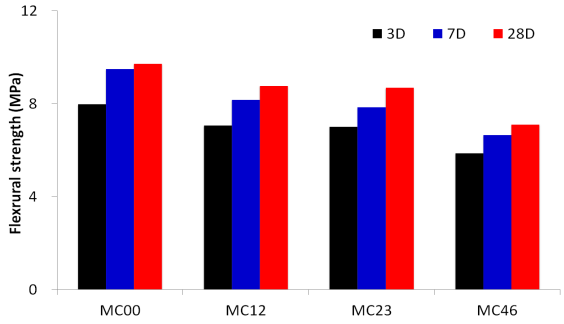

Fig. 4 Flexural strength results for mortar specimens

을 하여 강도 저하에 영향을 끼친 것으로 분석된다. MC12의 경우, 28일 압축강도는 MC00과 유사한 수준으로 나타났으며, 장기재령으로 갈수록 강도 발현 속도가 증가하는 것을 알 수 있다. MC의 압축강도는 3일, 7일 및 28일 재령에서 각각 33.8 MPa, 46.1 MPa 및 53.3 MPa로 가장 높에 나타났으며, MC12의 경우, 29.3 MPa, 40.0 MPa 및 52.2 MPa로 그 뒤를 이었다. 3일 및 7일 재령에서 두 배합의 강도차이는 4.5 MPa, 6.1 MPa로 나타났으나, 28일 재령에서는 1.1 MPa로 그 차이가 줄어들었음을 확인할 수 있었다. MC23과 MC46의 경우, MC00대비 평균 83%, 60% 수준으로 나타났다. 이에, CNT의 0.23 wt% 이상 첨가 시, 압축강도 성능은 저하되는 것을 알 수 있다.

휨강도 측정 결과는 아래 Fig. 4와 같다. 압축강도 실험결과와 유사하게, MC00에서 가장 높은 휨강도 값이 측정되었다. MC00의 경우, 7일에서의 휨강도 결과와 28일 재령에서의 휨강도 결과에 큰 차이가 나타나지 않았으나, CNT가 첨가된 배합에서는 강도 발현 속도가 상대적으로 크게 나타났다. MC00의 경우, 3일, 7일 및 28일 재령에서의 휨강도는 8.0 MPa, 9.5 MPa 및 9.7 MPa로 나타났으며, MC12의 경우, 7.1 MPa, 8.2 MPa 및 8.8 MPa로 나타났다.

3.2 공극 특성

수은압입법을 활용한 배합별 페이스트 시편의 밀도 및 공극률을 측정한 결과는 Table 4와 같다. 밀도는 재령이 증가함에 따라

Table 4 Bulk density and total porosities for the mixtures

	Bulk Density(g/mL)		Porosity(%)	
	7D	28D	7D	28D
PC00	1.78	1.80	26.6	19.4
PC12	1.50	1.79	24.2	20.1
PC23	1.44	1.70	30.7	25.4
PC46	1.40	1.61	31.0	29.0

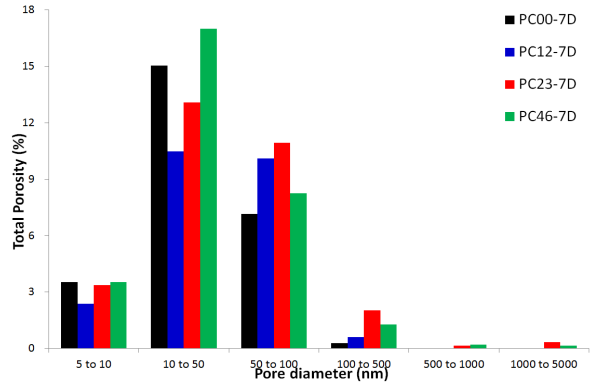

Fig. 5 Pore size distribution for paste mixtures at 7 days

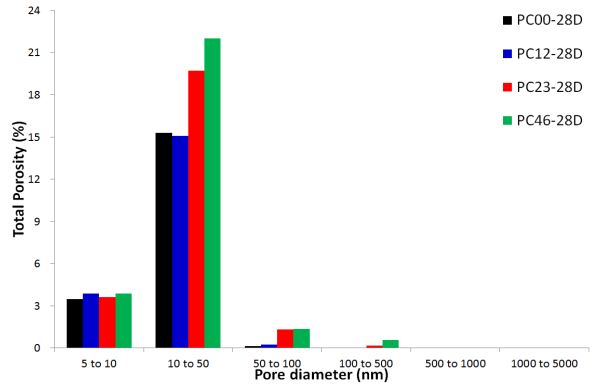

Fig. 6 Pore size distribution for paste mixtures at 28 days

모든 배합에서 증가하는 경향이 나타났으며, 공극률도 재령의 증가에 따라 감소하는 경향이 나타났다. PC12-7D의 공극률이 PC00-7D보다 작게 나타났다. 이는 분석 중 PC12-7D에 주입된 수은의 양(0.16 mL/g)이 PC00-7D의 수은양(0.15 mL/g)보다 크지만, PC00의 밀도가 상대적으로 크기 때문에 공극률이 증가하는 것으로 나타난 것이다. 7일과 28일 재령에서의 MIP 측정결과, PC00과 PC12의 밀도 및 공극률은 유사한 것으로 분석되며, 이는 7일 및 28일 압축강도 결과와 같이 동등 수준의 성능을 갖는 것으로 볼 수 있다.

Figs. 5 and 6은 7일과 28일 재령에서의 PC 시편의 공극분포를 나타낸 것이다. 재령 7일 공극분포 결과에서, 0.5 μm이상의 공극을 갖는 배합이 PC23과 PC46으로, 이로 인해 총 공극량이

증가하는 경향을 보이고 있다. PC00의 경우, 가장 많은 직경 50 nm 이하의 공극을 갖고 있으나, 상대적으로 50 nm보다 큰 공극을 가장 적게 갖고 있어, 총 공극률이 감소하는 것으로 확인된다. 28일 재령에서의 공극분포는 7일과 비교 하였을 때 모든 배합에서 0.1 μm의 직경을 갖는 공극이 거의 발견되지 않았으며, 이는 재령의 증가에 따라 공극구조가 치밀해 진 것을 의미한다. Fig. 6에 따르면, 50~100 nm의 공극이 PC00과 PC12에서 대부분 50 nm이하의 공극으로 변화된 것을 알 수 있다.

3.3 SEM-EDS 분석

Fig. 7은 재령 7일에서의 PC00의 SEM 분석 이미지를 나타낸 것이다. 주로 C-S-H 및 $Ca(OH)_2$가 관찰되었으며 우측에는 에트린자이트가 형성된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 주된 수화생성물인 C-S-H와 일부 $Ca(OH)_2$ 등 주변에 위치한 CNT를 확인하기 위해 나타내었다. CNT의 SEM 이미지는 에트린자이트 또는 C-S-H와 유사하게 보이나, 직경이 더 작고, 곡선 형태로 휘어진 것으로 확인된다. CNT는 이미지 상에서 수화물 주변에 고루 분산되어있음을 확인할 수 있으며, 수화물간의 연결고리 역할을 하여 공극구조를 더 밀실하게 하는 역할을 할 것으로 판단된다.

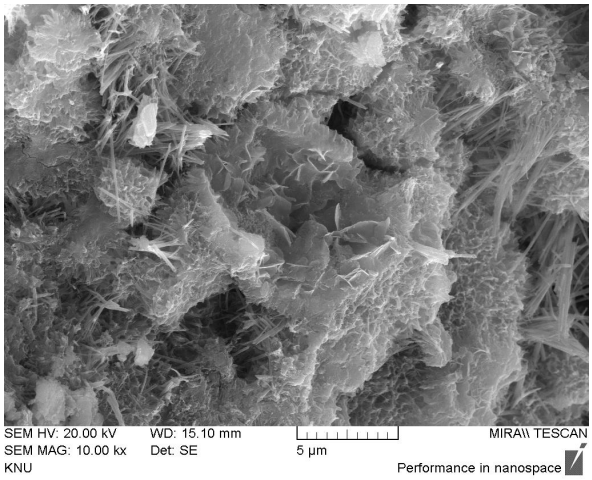

Fig. 7 SEM image for PC00-7D

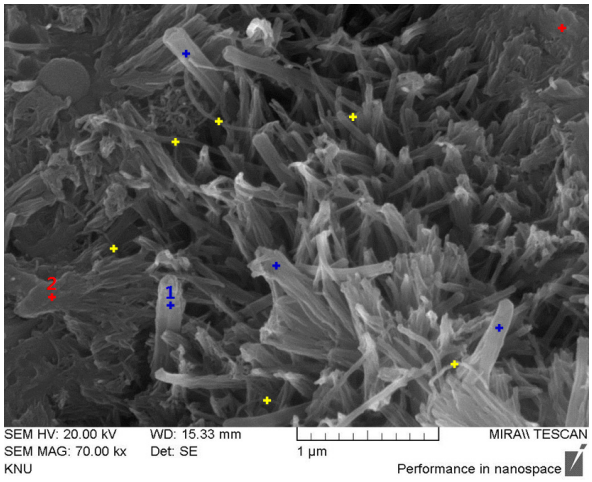

Fig. 8 SEM-EDS analysis result for PC12-7D

Table 5 EDS results from SEM image

	Chemical compositions(mass%)					
	Ca	Si	Al	O	C	others
1	22.7	9.3	1.8	50.6	11.4	4.2
2	40.3	1.2	0.9	50.9	4.4	2.3

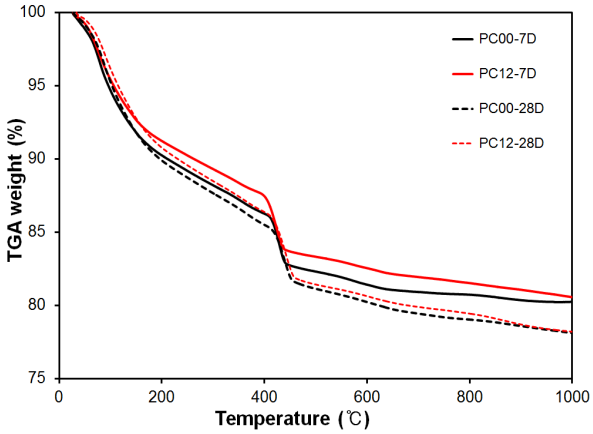

Fig. 9 Thermogravimetry analysis for PC00 and PC12

Table 6 $Ca(OH)_2$ and $CaCO_3$ contents in PC00 and PC12

	PC00		PC12	
	$Ca(OH)_2$	$CaCO_3$	$Ca(OH)_2$	$CaCO_3$
7D	16.2	1.6	17.0	2.3
28D	17.9	2.7	20.3	2.7

수화생성물 성분 분석을 위해, EDS 분석을 통하여, Ca, Si, Al, O 등의 구성비를 다음 Table 5에 나타내었다. 파란색 점(1)으로 표시된 성분은 C-S-H로, 수화물로 생성된 $Ca(OH)_2$와 시멘트 내부의 SiO_2 및 Al_2O_3 등의 가용성분이 반응하여 C-S-H 또는 C-A-H 등을 형성하였기 때문이다. 빨간색 점(2)으로 표시된 부분은 판상형의 $Ca(OH)_2$를 의미하며, 대부분의 수화물은 C-S-H 형태로 존재하고 있다. 본 배합에서 PC00 및 PC12에 대한 $Ca(OH)_2$ 및 $CaCO_3$ 구성비는 다음 3.4절의 열중량분석에 의하여 나타내었다. 노란색의 점으로 표시된 CNT는 이미지 내에서 고루 분산되어 있음을 확인할 수 있다.

3.4 열중량분석

7일 및 28일 재령에서 PC00 및 PC12에 대한 열중량감소 곡선

은 아래 Fig. 9에 나타내었다. 열중량분석으로부터 계산이 가능한 수화물은 $Ca(OH)_2$ 및 $CaCO_3$로, 이들이 구성하고 있는 비율을 배합 및 재령에 따라 Table 6에 나타내었다. $Ca(OH)_2$의 분해는 일반적으로 400~500°C에서 이루어지며, 이 구간에서 발생한 탈수과정으로 인하여 CaO 및 H_2O로 분해되는 양을 분자량의 비로 곱하여 측정할 수 있다. $CaCO_3$의 경우, 600~800°C 구간에서 CaO 및 CO_2로 분해되며, 그 과정에서 감소한 중량을 측정하여 분자량의 비로 계산하여 분석시료 중의 구성비를 알 수 있다.

총 중량 감소율은 CNT가 첨가된 경우 다소 증가하는 것으로 나타났으나 그 차이는 크게 나타나지 않았다. 주된 수화생성물은 C-S-H, $Ca(OH)_2$ 등으로 나타났다. C-S-H는 비정질의 수화물로, 분해범위가 100~400°C이며, 수화물의 대부분을 차지하고 있다.

열중량분석 결과, CNT는 수화물 생성 시 시멘트와 화학 반응이 아닌, 시멘트 공극구조를 개선시키는 역할을 하는 것으로 확인되었다(Li et al., 2005; Chaipanch et al., 2010).

4. 결 론

CNT가 첨가된 배합의 역학성능평가 및 미세구조분석 결과, 다음과 같은 결론을 도출해 낼 수 있었다.

1) CNT의 첨가량이 증가할 수록 시멘트의 압축강도 및 휨강도는 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 특히, 시멘트의 0.115 wt%의 CNT를 첨가한 경우 동등 수준의 28일 압축강도 및 휨강도 결과가 나타났으며, 이를 통하여 0.2 wt%가 넘는 CNT 첨가는 반데르발스의 힘 생성에 따른 강도저하의 요인으로 판단된다.
2) 강도특성과 직접적으로 관계가 있는 공극특성 분석 결과, 압축강도 결과와 동일하게, 0.23 wt%의 CNT 첨가배합의 경우 공극률이 증가하는 것으로 나타났다.
3) SEM 분석 결과, 용액 타입의 CNT를 시멘트 계 복합체로 적용 시 분산은 용이하게 이루어지고, 페이스트 간의 연결고리 역할을 하는 것을 확인할 수 있었다.
4) 소량의 CNT 첨가에 따라, 시편의 주 수화생성물의 차이는 없는 것으로 확인할 수 있었다. 재령 28일에, 양생과정을 통한 $Ca(OH)_2$ 및 $CaCO_3$ 등 수화생성물이 다소 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 CNT가 화학반응이 아닌 filler effect로, 역학적 성능에 영향을 끼치는 것을 알 수 있다.

위의 실험결과로부터, 일반 시멘트 배합과 0.115 wt%의 CNT가 첨가된 배합의 역학성능은 거의 유사하게 나타났다. 이 결과를 토대로, 발열성능 평가를 추가로 실시하여 도로의 융설/융빙이 가능한 콘크리트의 개발이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (17CTAP-C129720-01, 극한환경(-30°C)에서 발열양생 및 융설/융빙(-30°C/10 min)이 가능한 나노 콘크리트 기술 개발).

References

Chaipanich, A., Nochaiya, T., Wongkeo, W., and Torkittikul, P. (2010), Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes–fly ash cement composites, Materials Science and Engineering A, 527, 1063-1067.

Cho, I. H. and Sung, C. Y. (2008), Hydration Reaction Properties of Concrete With Binders and Admixtures, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 50(2), 27-34.

Colins, F., John, L., and Duan, W. (2012), The influences of admixtures on the dispersion, workability, and strength of carbon nanotube-opc paste mixtures, Cement & Concrete Composites, 34(2), 201-207.

Ha, S. J. and Kang, S. T. (2016), Flowability and Strength of Cement Composites with Different Dosages of Multi-Walled CNTs, Journal of the Korea Concrete Institute, 28(1), 67-74.

Ha, S. J., Kang, S. T., and Lee, J. H. (2015), Strength of CNT Composites with Different Types of Surfactants and Doses, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 19(2), 99-107.

Ipperico, M., Ferro, G., Musso, S., Tulliani, J. M., and Tagliaferro (2009), Calcestruzzo autocompattante nanorinforzato (CNTSCC): proprietà meccaniche e potenzialità, A. Atti del 20° Convegno Nazionale del Gruppo Italiano Frattura (IGF), Torino, Italy, 103-112.

Jo, B. W., Kim, S. K., Choi, J. S., Kim, D., and Kim, T. Y. (2013), Basic Study by Multi-Walled Carbon NanoTube(MWCNT) for Radiation shielding Concrete, Korea Society of Civil Enginerrs, 10, 16-18.

Kang, S. T. and Park, S. H. (2014), Experimental Study on Improving Compressive Strength of MWCNT Reinforced Cementitious Composites, Journal of the Korea Concrete Institute, 26(1), 63-70.

Kang, S. T., and Park, S. H. (2014), Experimental Study on Improving Compressive Strength of MWCNT Reinforced Cementitious Composites, Journal of the Korea Concrete Institute, 26(1), 63-70.

Kim, S. K., Kwark, J. W., Kwahk, I. J., Choi, E. S., and Lee, J. W. (2014), Study into Mortar Quality Mixed with CNT, The Korea Institute For Structural Maintenance and Inspection, 18(1), 238-241.

Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., and Shah, S. P. (2010), MultiScale Mechanical and Fracture Characteristics and Early-age Strain Capacity of High Performance Carbon Nanotube/Cement Nanocomposites, Cement and Concrete Composites, 32(2), 110-115.

Lee, H., Kang, D., Song, Y., and Chung W. (2017), Heating experiment of CNT cementitous composites with single-walled and multiwalled carbon nanotubes, Journal of Nanomaterials, 2017, 3691509.

Li, G. Y., Wang, P. M., and Zhao, X. (2005), Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes, Carbon, 43, 1239-1245.

Li, H., Xiao, H.-G., Yuan, J., and Ou, J. (2004), Microstructure of Cement Mortar with Nano-Particles, Composites Part B: Engineering, 35, 185-189.

Makar, J. M., Margeson, J., and Luh, J. (2005), Carbon Nanotube/Cement Composites - Early Results and Potential Applications, Proceedings of the 3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, Vancouver, Canada, 1-10.

Musso, S., Tulliani, J. M., and Ferro, G. (2009), Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites, 69(11-12), 1985-1990.

Wong, E. W., Sheehan, P. E., and Lieber, C. M. (1997), Nanobeam mechanics: elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes, Science, 277, 1971-1975.

Xu, S., Liu, J., and Li, Q. (2015), Mechanical properties and microstructure of multi-walled carbon nanotube-reinforced cement paste, 76, 16-23.4.

Xun, Y. and Eil, K. (2009), Carbon nanotube/cement Composite with piezoresistive properties. Smart Mater Structures, 18(5), 1-5.

Yu, M. F., Lourie, O., and Dyer, M. J. (2000), Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load. Science, 287, 637-640.

Received : 09/25/2017
Revised : 09/29/2017
Accepted : 10/10/2017

요 지 : 탄소나노튜브는 고강도, 고내구성 콘크리트의 생산을 위한 새로운 재료 중 하나로 여겨지며, 많은 연구자들에 의하여 연구되고 있다. 탁월한 열전도도는 향후 자가발열 콘크리트의 개발에 필수적이며, 이 연구에서는 다양한 목적을 갖는 콘크리트의 개발을 위한 역학적 특성 및 미세구조 분석을 실시하였다. CNT 첨가량은 시멘트 중량대비 0.115, 0.23, 0.46wt%로 하였다. 압축강도/휨강도 시험은 재령 3, 7, 28일에 실시하였으며, 공극률은 MIP 시험을 통해 실시하였다. CNT 분산성 및 수화생성물 분석을 위하여, SEM 분석 및 열분석을 실시하였다. 그 결과, CNT 첨가에 따른 역학성능은 다소 감소하는 경향을 나타내었으나, 0.115wt% 첨가한 경우 플레인 배합과 동등 수준의 결과를 확인할 수 있었다. 향후, 기존 콘크리트와 동일한 역학성능을 보유한 CNT 첨가 배합의 개발을 통한 발열성능 확보가 가능할 것으로 기대된다.

핵심용어 : 시멘트, CNT 첨가량, 역학특성, 미세구조, MIP, SEM, 강도, TGA