

## 분산제의 종류 및 사용량에 따른 CNT 보강 시멘트 복합체의 강도변화

### Strength of CNT Cement Composites with Different Types of Surfactants and Doses

하성진<sup>1)</sup>                      강수태<sup>2)\*</sup>                      이종한<sup>3)</sup>  
Sung-Jin Ha                      Su-Tae Kang                      Jong-Han Lee

#### Abstract

This study was aimed to investigate the difference in strength of Carbon Nanotube (CNT) reinforced cement mortars with different types of surfactants and doses. In the experimental program, CTAB, SDBS and TX10 which were common surfactants adopted to improve CNTs dispersion in fabricating CNT composites in many industrial fields were included and superplasticizer which was revealed to be effective to disperse CNTs especially in CNT reinforced cementitious composites were added as well. Superplasticizer presented less strength reduction in cement mortar and more strength gain by adding CNTs among four types of surfactants. Higher dosage of superplasticizer caused lower strength of cement mortar. Adding CNTs of 0.4 wt.% or less to cement didn't show strength enhancement by adding CNTs but 0.8 wt.% of CNTs resulted in strengthening effect after all. Finally, a combination of 0.1 wt.% of CNTs, superplasticizer and sonication treatment could lead to strength improvement by adding CNTs in cement mortar.

Keywords : Carbon Nanotube surfactant, Superplasticizer, Dispersion, Strength

#### 1. 서론

모르타르나 콘크리트와 같이 시멘트를 기반으로 한 재료는 우수한 경제성과 성능으로 건설산업에서 가장 많이 사용되고 있는 건설재료이다. 하지만 취성적인 거동을 보이는 특성과 압축강도에 비해 인장강도가 매우 작다는 약점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 극복하는 가장 일반적인 방법으로는 인장저항력을 향상시킬 수 있도록 섬유를 혼입하는 것이며, 이와 같은 보강방법과 관련해 지난 수 십 년간 강, 탄소, 유리 등을 포함한 다양한 재료들을 소재로 제조된 섬유들이 개발되었으며, 모르타르 또는 콘크리트 내 보강재로서 사용되어 시멘트재료의 역학적 특성을 향상시키는데 큰 역할을 해왔다. 그러나 기존의 섬유들은 길이가 수 내지 수십 mm로 매트릭스에 형성된 균열의 진전을 억제하는 역할에 주로 초점이 맞춰져 있으며 균열의 발생을 억제하지는 못한다. 미세한 마이크로미터 스케일로 존재하는 내부 결함의 보완과 균

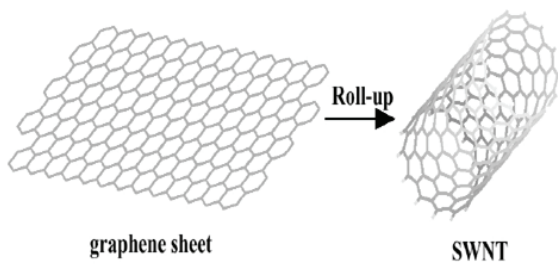
열 발생의 효율적인 억제를 위해서는 유사한 스케일의 섬유가 전체 부피에 걸쳐 고르게 분포해 있는 것이 효과적일 것이다. 이와 같은 맥락에서 최근 나노 스케일의 입경과 마이크로 스케일의 길이를 가진 탄소나노튜브를 보강섬유로 활용하고자 하는 관심과 연구가 시작되고 있다 (Li et al., 2005; Konsta-Gdoutos et al., 2010; Chan and Andrawes, 2010).

탄소나노튜브 (Carbon Nanotube)는 1991년에 일본의 Iijima (1991) 교수에 의해 발견된 이래 우수한 역학적 특성, 전기 전도성, 열전도성, 낮은 단위중량, 우수한 부식에 대한 저항성 때문에 많은 관심을 받고 있으며 재료분야를 포함한 여러 분야에서 활용되고 있다. 탄소나노튜브는 탄소원자가 육각별 집구조형태로 말려진 그래핀 (Graphene)이 한 겹 또는 여러 겹으로 말려져 있는 형태이고, 한 겹으로 말려진 탄소나노튜브를 SWCNT (Single-walled CNT), 여러 겹으로 말려진 탄소나노튜브를 MWCNT (Multi-walled CNT)로 구분할 수 있다. 탄소나노튜브의 형태는 Fig. 1에 나타내었다. 탄소나노

1) 학생회원, 대구대학교 토목공학과 석사과정  
2) 정회원, 대구대학교 토목공학과 조교수, 교신저자  
3) 정회원, 대구대학교 토목공학과 조교수

\* Corresponding author : stkang@daegu.ac.kr

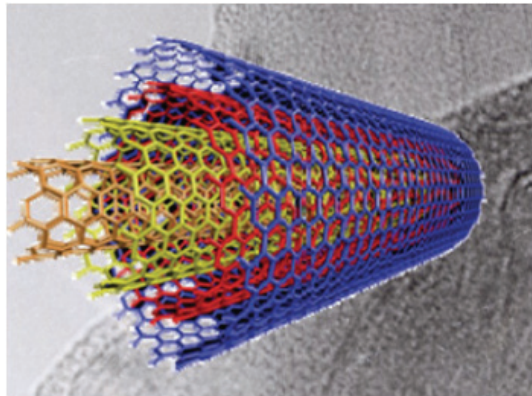
• 본 논문에 대한 토의를 2015년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2015년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.



graphene sheet

SWNT

(a) Single-walled CNT



(b) Multi-walled CNT

Fig. 1 The shape of Carbon nanotube (Ferro et al., 2011)

튜브의 탄성계수는 약 1TPa, 인장강도는 약 60GPa에 이르는 것으로 알려져 있으며 강재와 비교하였을 때 탄성계수는 5배 이상 높고 인장강도는 100배 이상 더 높다. 그러나 단위 중량의 경우, 강재의 약 1/6 수준에 지나지 않는 것으로 보고되고 있다 (Zhi and Gao, 2008; Rana et al., 2009; Li et al., 2007).

최근 건설재료분야에서도 이러한 탄소나노튜브의 우수한 특성을 활용하고자 하는 연구가 진행되고 있으나 탄소나노튜브 입자간의 강한 반데르발스 힘으로 인한 배합수로 사용될 분산액에서 효과적인 분산상태를 얻는 것이 가장 필수적인 기술로 인식되고 있다 (Yun and Lee, 2007). 탄소나노튜브의 분산성을 향상시키는 방법으로는 크게 세 가지 방법이 주로 사용되며, 첫 번째는 기계적 방법으로 용매와 탄소나노튜브 혼합 용액에 초음파를 가하여 분산시키는 방법이다. 두 번째는 탄소나노튜브의 물리적 개질 방법으로 계면활성제를 첨가하여 탄소나노튜브와 매트릭스 사이에 친화력을 부여하는 방법이다. 그리고 세 번째 방법은 탄소나노튜브의 화학적 개질 방법으로 탄소나노튜브 표면에 관능기를 도입하여 탄소나노튜브와 매트릭스 사이의 부착력을 향상시키고 분산성도 함께 향상시키는 방법이다. 이 중 계면활성제를 이용한 방법이 시멘트계 재료의 취급과 관련하여 가장 익숙한 방법

이며, 특별한 장비나 가공과정을 거치지 않기 때문에 가장 경제적인 방법이라 할 수 있다.

CNT로 보강된 시멘트계 재료에 관한 연구에서 다양한 계면활성제에 대한 검토가 이루어져 왔으나, 아직까지 명확한 결론이 도출되지는 않은 상태로 보인다. Luo et al. (2009)은 두 가지 음이온계 계면활성제, 두 가지 비이온계 계면활성제, 그리고 한 가지 비이온계 계면활성제에 대해 실리카폼과 시멘트를 사용한 페이스트를 대상으로 나노튜브의 분산성 평가와 함께 휨강도 및 압축강도 평가를 통해 계면활성제의 영향을 비교하였다. 그 결과 음이온계 계면활성제 또는 음이온계와 비이온계를 혼합하여 사용한 경우가 분산에 가장 효과적인 것으로 나타났으며, 강도실험에서는 또다른 음이온계 계면활성제를 사용했을 때 강도향상 효과가 가장 크게 나타났다. 또 Makar et al. (2005)는 초음파 처리기법과 함께 에탄올을 사용할 경우 CNT 분산에 효과적이라고 밝힌 바 있다. 한편 Ipperico et al. (2009)은 변형 아크릴 고분자 형태의 고성능 감수제를 사용할 경우 수용액 상태에서 CNT를 분산시키는 데 효과적이라고 밝힌 바 있으며, Konsta-Gdoutos et al. (2010)은 콘크리트 또는 모르타르 제조 시 일반적으로 사용하는 일반적인 고성능감수제를 초음파처리와 함께 적용해도 효과적으로 CNT를 분산시킬 수 있으며 따라서 강도도 향상시킬 수 있다고 보고하였다.

이상의 기존 연구결과들을 살펴볼 때, 계면활성제가 CNT 시멘트 복합체에 미치는 영향이 계면활성제의 특성에 따라 명확한 경향이 밝혀지지 않았으며, 따라서 고성능의 CNT 시멘트 복합체를 개발하기 위해서는 이에 대한 추가적인 연구가 반드시 필요한 것으로 판단하였다.

따라서 이 연구에서는 CNT 폴리머 복합체에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 양이온계, 음이온계 및 비이온계 계면활성제 각 1종씩과 콘크리트 산업에서 일반적으로 사용되는 계면활성제인 폴리카르본산계 고성능감수제를 대상으로 CNT 시멘트 복합체의 강도 및 다른 재료특성에 대한 영향을 비교평가 하고자 하였다.

## 2. 실험 (I) : 계면활성제 종류에 따른 영향

### 2.1 재료구성 및 배합

우선 CNT 폴리머 복합체에 가장 일반적으로 사용되는 양이온계, 음이온계 및 비이온계 계면활성제를 대상으로 CNT 시멘트 복합체에 대한 적용성 평가를 목적으로 실험을 수행

Table 1 Properties of cement and sand

Types	Items	Chemical composition (%)				Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	
OPC		21.91	5.25	3.51	63.38	3.15
Sand		99.93	0.04	0.01	0.01	2.65

Table 2 Properties of Multi-walled CNT

Purity (wt%)	Avg. Diameter (nm)	Length (μm)	Metal Oxide (wt%)	BulkDensity (g/cm <sup>3</sup> )	Specific surface area (m <sup>2</sup> /g)
> 95	20	1 - 25	< 5	0.03 - 0.05	150 - 250

하였다. 실험에서는 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 S사에서 생산되는 평균입경 0.5mm 이하의 규사를 잔골재로 사용하였다. 시멘트와 잔골재의 물리적, 화학적 특성을 Table 1에 나타내었다. 그리고 보강재로 사용된 탄소나노튜브는 다중벽 탄소나노튜브 (MWCNT, Multi-walled CNT)를 사용하였으며, 그 특성은 Table 2에 나타내었다. 실험에 사용된 탄소나노튜브의 사용량은 시멘트중량의 0.4%로 적용하였다. 실험의 주된 변수로 고려한 계면활성제는 앞서 언급한 바와 같이 CNT 폴리머 복합체에 가장 일반적으로 사용되는 양이온계, 음이온계, 그리고 비이온계 계면활성제를 각각 사용하였다.

양이온계 계면활성제로는 CTAB (C<sub>16</sub>H<sub>33</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>NBr, Cetyl trimethyl ammonium bromide)를, 음이온계 계면활성제로는 SDBS (C<sub>12</sub>H<sub>25</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>SO<sub>3</sub>Na, Sodium dodecyl benzene sulfonate)를, 그리고 비이온계 계면활성제로는 TX10 (C<sub>8</sub>H<sub>17</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(OCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>)<sub>10</sub>OH, Triton X-100)을 사용하였다. 종류별 계면활성제는 CNT 농도 1%로 초음파 처리하여 미리 제조된 수용액 상태로 구매하여 사용하였으며, 이 때 계면활성제는 배합수량 대비 중량비로 2% 비율로 혼합되었다.

계면활성제가 시멘트 모르타르 및 CNT 분산에 미치는 영향을 분리하여 분석하기 위하여 CNT 혼입없이 계면활성제만을 투입한 경우에 대해서도 실험체를 제작하였으며, 따라서 배합은 Table 3에 나타난 바와 같이 정리할 수 있다.

## 2.2 시험체 제작 및 시험 방법

시험체의 제작은 KS L 5105 규정에 따라서 50mm×50mm×50mm 크기의 모르타르 압축강도 시험체로 제작하였으며, 재료의 투입순서는 시멘트와 잔골재를 건비빔한 후 탄소나노튜브와 계면활성제가 혼합 후 초음파 처리된 수용액을 건비빔된 재료에 혼합하여 타설하였다. 타설이 종료된 실험체는 하루 경과 후에 20±3°C의 수조에서 수중양생 후 14일

Table 3 Mix proportion(I) of CNT/cement mortar

Specimen	W/C (%)	C (g)	W (g)	Fine Agg. (g)	CNT (g)	Surfactant
Plain-1	40	2,400	960	3,600	0	-
Plain-2					9.6	
COCT	40	2,400	960	3,600	0	CTAB
COSD						SDBS
COTX						TX10
C1CT	40	2,400	960	3,600	9.6	CTAB
C1SD						SDBS
C1TX						TX10

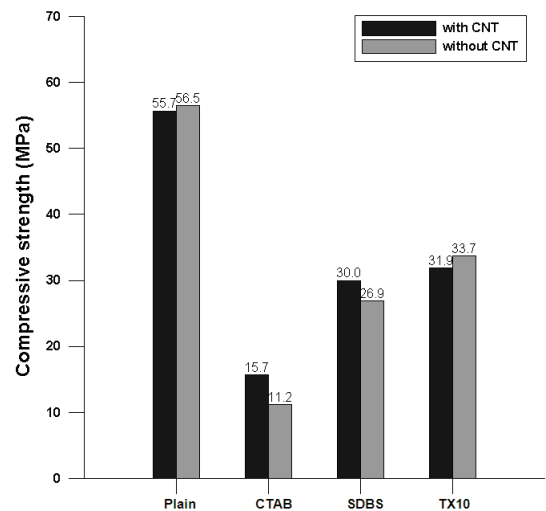


Fig. 2 The effect of type of surfactant

재령에서 압축강도를 평가하였다.

## 2.3 계면활성제 종류에 따른 복합체 특성 비교

계면활성제 종류에 따른 압축강도는 Fig. 2를 통해 비교할 수 있다. Plain 시험체에 비하여 계면활성제와 탄소나노튜브

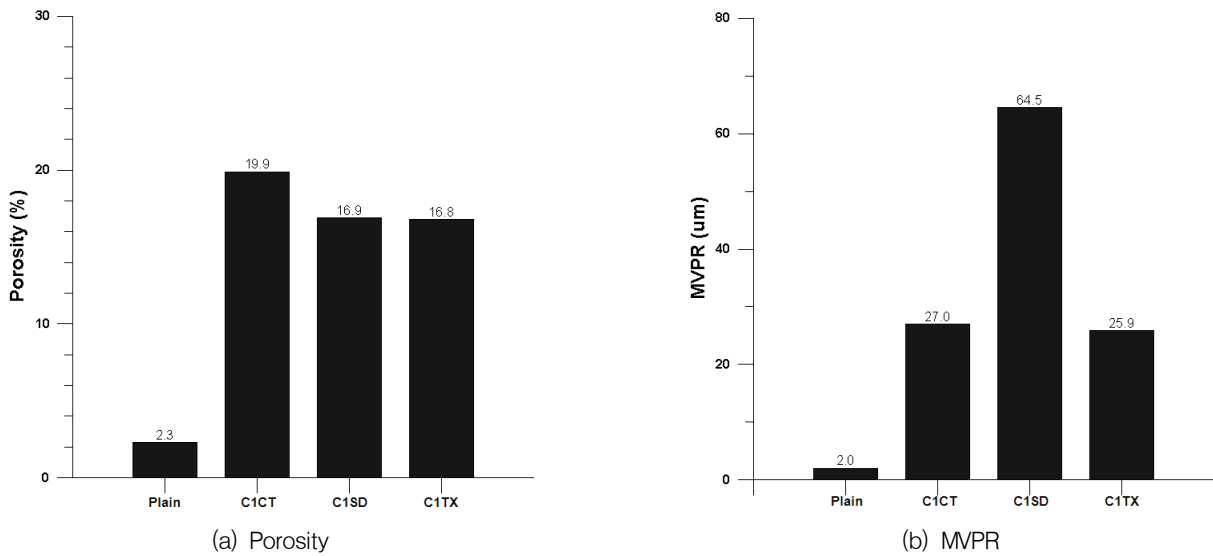


Fig. 3 The results of MIP analysis

를 혼합한 실험체의 강도가 계면활성제 종류에 관계없이 모두 낮게 나타났으며, Plain 시험체를 제외하고 계면활성제를 사용한 시험체들 중에서는 비이온계 계면활성제인 TX10을 혼합한 시험체의 강도가 가장 큰 것으로 나타났다. CNT를 포함한 경우와 포함하지 않은 경우에 대해 모두 강도의 대소 경향은 유사하게 나타났으며, CNT의 혼입 유무에 따른 강도의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. Plain 시험체에서 CNT 유무에 따른 강도변화가 거의 없는 것은 CNT의 분산이 제대로 이루어지지 않아서 보강효과가 거의 나타나지 않은 것으로 판단할 수 있다. 한편 계면활성제를 사용한 시험체들에서 나타난 강도저하 현상은 내부에 발생한 다량의 공극과 밀접한 연관이 있는 것으로 판단된다. 시험체 제조 시 다량 발생한 기포들은 CNT의 유무와 관계없이 나타났으며, 따라서 기포의 발생이 CNT 때문이 아니라 계면활성제의 영향임을 확인할 수 있다. Fig. 3은 각 시험체로부터 측정된 MIP (Mercury Intrusion Porosimetry) 측정결과를 나타낸 것이다. 그 결과에서 쉽게 알 수 있듯이, Plain 시험체에 비해 계면활성제를 사용한 시험체들이 훨씬 큰 공극률 및 MVPR (Mean volume pore radius, 총 수은의 50%를 압입 하였을 경우 가장 작은 공극의 반경을 나타냄) 값을 보이고 있다. 시험체 제작과정에서 충분한 다짐을 실시하였음에도 이처럼 다량의 공극이 존재하는 것으로 나타났다.

그러면 내부에 갇힌 기포를 소포제를 이용하여 제거할 경우, 강도의 향상을 기대할 수 있을지 실험을 통해 확인해 보았다. 이 실험에서는 양이온계, 음이온계 및 비이온계 계면활성제 중 압축강도가 가장 큰 것으로 나타난 비이온계 계면

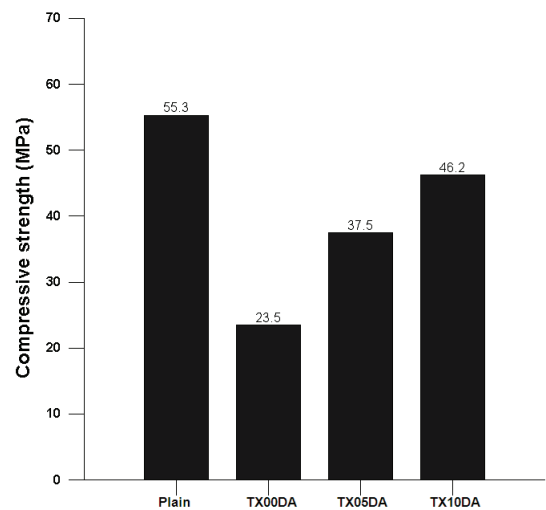


Fig. 4 The effect of using antifoaming agent

활성제인 TX10을 대상으로 소포제 (Defoaming Agent, DA) 사용량을 각각 시멘트 중량의 0, 0.5, 1.0% 사용한 경우 (각각 TX00DA, TX05DA 및 TX10DA로 명명함)에 대해 압축강도를 비교해 보았다. 이 때 소포제 사용량과 공극, 그리고 압축강도와의 상관관계를 파악할 목적으로 CNT는 혼합하지 않았다. 시험체 제작 시 소포제 사용량 증가에 따른 발생 기포의 감소는 육안으로도 쉽게 확인할 수 있었다. 압축강도 결과는 Fig. 4에 나타난 것과 같다. Fig. 4에서 소포제 사용량이 증가함에 따라 강도가 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며, 따라서 시험체 내부에 형성된 공극이 압축강도에 지배적 영향인이었음을 확인할 수 있었다. 하지만 소포제를 사용하였음에도 불구하고 Plain에 비해서 압축강도가 여전히

작게 나타났다. 이는 계면활성제가 시멘트의 수화반응 또는 수화생성물에 영향을 미치는 것으로 추측할 수 있다. Fig. 2와 Fig. 4에 나타난 Plain 시험체의 압축강도 및 CNT 유무에 따른 강도 향상 정도를 고려할 때 소포제를 사용하여 기포를 상당부분 제거한다고 하여도 CNT 보강에 따른 강도향상을 크게 기대하기 어려울 것으로 판단된다.

이상 세 가지 종류의 계면활성제 사용에 따른 CNT 시멘트 복합체의 압축강도를 비교평가한 결과, 다른 산업에서 활용하고 있는 CNT 폴리머 복합체에 일반적으로 사용되고 있는 CTAB, SDBS, TX10과 같은 계면활성제는 CNT 시멘트 복합체를 제조하는데 활용하기에는 한계가 있는 것으로 판단된다.

### 3. 실험 (II) : 고성능감수제 사용 효과 평가

#### 3.1 고성능감수제의 분산성 향상 효과 비교

서론에서 언급한 바와 같이, 다수의 연구자들이 콘크리트 제조 시 사용되고 있는 일반적인 고성능감수제가 CNT 분산에 효과가 있다는 연구결과를 밝힌 바 있다 (Ipperico et al., 2009; Konsta-Gdoutos et al., 2010). 따라서 이 연구에서도 일반 고성능감수제에 대한 검토를 실시하였으며, 최근 가장 많이 사용되고 있는 폴리칼본산계 고성능감수제를 대상으로 하였다. 사용된 고성능감수제는 암갈색으로 밀도  $1.01\text{g/cm}^3$ , 고형성분 30%의 특징을 가진다.

우선 고성능감수제를 사용했을 때 CNT 분산 및 강도증진 효과를 실험 (I)에서 검토한 계면활성제 종류에 따른 압축강도 결과와 비교하여 살펴보았다. 이 때 고성능감수제는 앞서 검토한 세 종류의 계면활성제와 동일한 사용량 (배합수량의 2% 또는 시멘트 중량의 0.8%)을 적용하였으며 별도의 초음파처리를 실시하지 않고, 일반적으로 콘크리트 제조 시의 사용방법에 따라 투입하였다. 시험체는 계면활성제 종류만 달리하고 Table 3과 기본적으로 동일한 배합을 적용하였다. 압축강도에 대한 비교결과는 Fig. 5에 나타내었다.

실험결과를 살펴보면 폴리칼본산계 고성능감수제를 사용함으로 인해 다른 계면활성제와 마찬가지로 모르타르의 압축강도 저하가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이온계 및 비이온계 계면활성제와 비교했을 때 강도저하 현상은 상대적으로 크지 않으며 비이온계의 TX10과 유사하게 나타났다. 하지만 계면활성제와 CNT를 같이 사용한 경우를 살펴보면 폴리칼본산계 고성능감수제의 효과가 가장 좋은 것으로 나타났다.

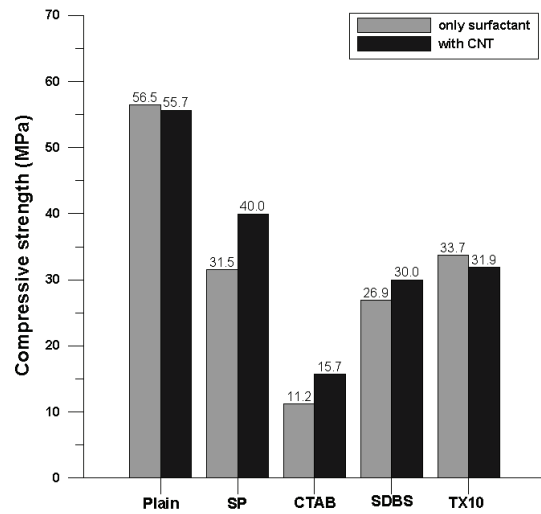


Fig. 5 The comparison for compressive strengths with different types of surfactants

다른 계면활성제를 사용한 경우 강도가 저하되거나 증가가 미미하게 나타난 반면 고성능감수제를 사용한 경우에는 CNT를 포함하지 않은 모르타르 강도와 비교했을 때 25% 이상의 강도 증진 효과를 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 폴리칼본산계 고성능감수제가 CNT를 효과적으로 분산시켜서 강도증진에 기여하였다고 해석할 수 있다. 하지만 고성능감수제 사용으로 인해 모르타르 강도가 저하되고, 또한 Plain 모르타르와 비교했을 때 여전히 강도가 낮게 나타나는 문제점은 가지고 있다.

#### 3.2 고성능감수제 사용량에 따른 복합체의 특성변화

폴리칼본산계 고성능감수제를 사용한 모르타르의 강도저하 현상은 사용량과 관련이 있을 것으로 판단하여, 사용량 조절을 통해 강도향상과 궁극적으로 CNT 시멘트 복합체의 강도증진 효과를 얻을 수도 있을 것이라 생각할 수 있다. 따라서 고성능감수제 사용량을 변수로 한 추가실험을 수행하였으며, 실험에 사용한 배합은 Table 4와 같다.

고성능감수제 사용량 변화에 따른 유동성 변화는 플로우 실험을 통해 평가하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다. 고성능감수제의 사용량이 증가할수록 플로우가 증가함을 볼 수 있으며, 고성능감수제 양이 동일할 경우 CNT를 혼입하게 되면 유동성이 저하되는 것을 알 수 있다. 고성능감수제 사용량에 따른 압축강도에 대한 실험결과는 Fig. 7로 나타내었다. CNT를 혼입하지 않은 시험체에서는 고성능감수제의 사용량이 증가함에 따라 강도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 반

Table 4 Mix proportion(II) of CNT/cement Mortar

Specimen	W/C (%)	C (g)	W (g)	Fine Agg. (g)	CNT (g)	SP (wt.% of cement)
COSPO	40	2,400	960	3,600	0	0
COSP08						0.2
COSP16						0.4
COSP32						0.8
C1SP0					9.6	0
C1SP08						0.2
C1SP16						0.4
C1SP32						0.8

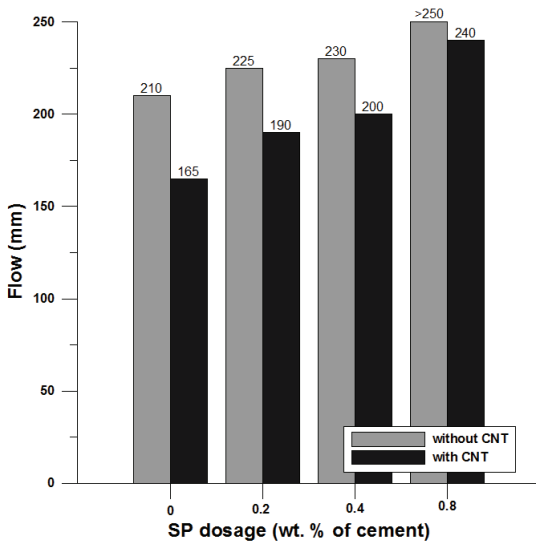


Fig. 6 The effect of SP dosage in flowability

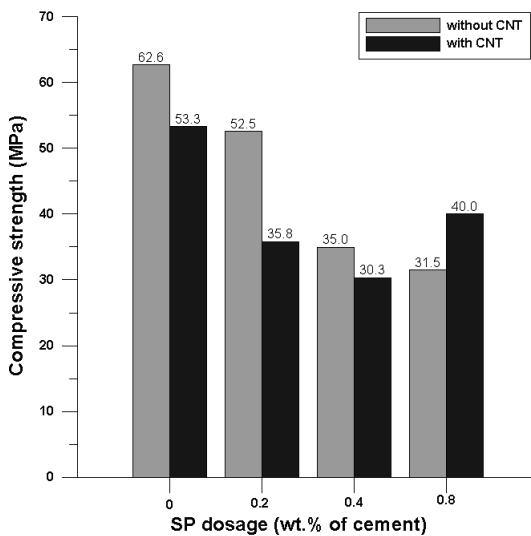


Fig. 7 The effect of SP dosage in compressive strength

면 CNT를 혼합한 시험체의 경우에는 고성능감수제의 사용량이 0.4%까지는 강도가 저하되는 결과를 보이다가 0.8%에서는 크게 증가하는 결과를 나타내었다. 갑작스런 강도증가에 대한 명확한 설명을 할 수는 없지만, CNT의 적절한 분산을 위해서는 일정량 이상의 많은 고성능감수제가 필요한 것으로 판단되며, 고성능감수제를 줄일 경우 일정부분 강도의 회복은 기대할 수 있으나 CNT 보강에 따른 강도증진 효과를 기대할 수 없는 것으로 판단된다.

### 3.3 초음파 처리와 고성능감수제의 복합 적용

Plain 시멘트 모르타르와 비교했을 때 고성능감수제의 사용에서도 탄소나노튜브로 인한 보강효과는 크지 않은 것으로 나타났다. 실용적인 측면에서 초음파 처리 공정을 사용하지 않고 적용할 수 있는 방법을 우선 검토하였다. 하지만 초음파 처리 공정없이 CNT 보강을 통한 강도증진 효과를 얻기가 쉽지 않은 것으로 나타났다. 따라서 보다 강제적인 CNT 분산방법으로 초음파처리 공정을 포함하면서 고성능감수제를 사용할 경우에 대해 추가적으로 살펴보았다. 초음파처리를 하지 않는 경우 CNT의 고른 분산을 보장할 수 없기 때문에 모르타르 내 부분적으로 발생가능한 CNT의 결핍을 막기 위해 시멘트 중량 대비 0.4%의 많은 양의 CNT를 혼합하였다. 하지만 초음파처리를 실시하는 경우에는 초음파처리가 CNT의 고른 분산에 크게 역할을 하기 때문에 강도향상을 위한 CNT의 사용량을 크게 줄일 수 있다. 최근 Konsta-Gdoutos et al. (2010)은 실험에서 초음파로 분산처리한 CNT를 사용하고 시멘트중량의 0.4% 보다 훨씬 적은 양인 약 0.1%의 CNT를 사용해도 효과적인 시멘트재료의 보강효과가 있음을 확인하였으며, Kang and Park (2014)도 초음파 처리에 따른 CNT 분산효과를 광학현미경을 통해 확인하고 이에 따른 강도향상 효과를 밝힌 바 있다. 일반적으로 고성능감수제는 시멘트계 분체에 흡착하여 입체장애를 통해 입자들간의 반발력을 유도하는 방법으로 감수효과를 얻기 때문에 사용량을 시멘트 중량에 비례하여 사용한다. 하지만 본 연구에서는 고성능감수제의 주된 사용목적이 CNT 분산성 향상이기 때문에 사용량을 CNT의 혼입량에 비례하여 고려하는 것이 논리적이다. 앞서 실시한 실험과 동일한 비율을 적용할 경우 고성능감수제의 사용량은 CNT 중량의 2배에 해당하고, CNT 혼입량을 1/4로 줄일 경우 고성능감수제의 사용량도 그만큼 줄게 되어, 앞선 실험에서 나타난 고성능감수제 사용량 증가에 따른 강도감소 현상을 고려할 때 모르타르의 압축강도 저

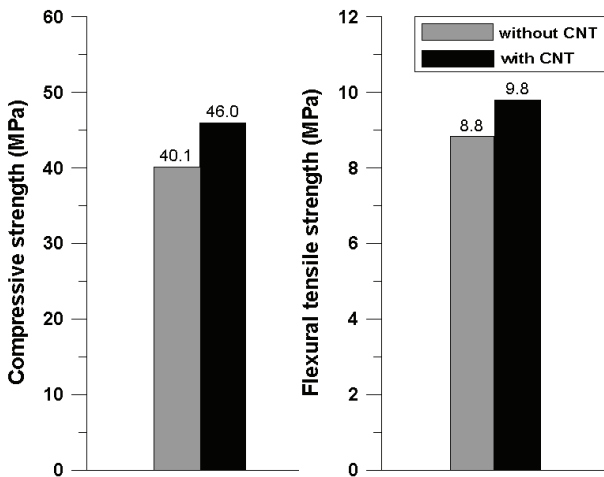


Fig. 8 The effect of CNT addition in compressive and flexural tensile strength

하를 크게 줄이는 효과를 기대할 수 있다. 한편 고성능감수제를 사용할 경우 실리카폼의 적절한 사용은 CNT의 분산성 향상에 효과가 있는 것으로 알려져 있다 (Sanchez and Ince, 2009).

실험에서는 초음파처리 공정을 포함하고, CNT의 사용량은 시멘트 중량의 0.1%로 고려하였다. 또한 CNT 분산성 향상에 도움이 되는 것으로 알려진 실리카폼을 시멘트 중량의 10%만큼 치환하여 사용하였다. 고성능감수제는 시멘트와 CNT의 분산을 함께 고려하여 CNT 사용량의 4배로 사용하였는데, 이 양은 CNT 사용량이 1/4로 줄어들었기 때문에 실질적인 고성능감수제의 사용량은 이전 실험과 비교했을 때 1/2로 줄인 것과 같다.

초음파처리는 최대전력 750W의 초음파파쇄기 (S사 VCX 750)를 사용하여 50% 출력진폭으로 5초간 초음파 처리한 후 15초간 멈추는 과정을 반복하여 4시간 동안 실시하였다. 강도평가는 압축강도 및 휨인장강도를 측정하여 비교하여 실시하였다. CNT 혼입으로 인한 보강효과를 평가하기 위한 비교기준 모르타르는 실리카폼을 동일한 10% 치환율로 포함한 배합으로 하여 시험체를 제작하였다. 휨인장강도는 40mm×40mm×160mm 시험체를 제작하여 지간 120mm로 3등분점 재하시험으로 수행하였다.

Fig. 8은 강도비교 결과를 나타낸 것으로, 압축강도와 휨강도 모두 CNT 혼입을 통하여 약 10~15% 정도의 강도향상이 나타남을 알 수 있다. 이는 적은 양의 CNT를 혼입하면서 초음파처리와 고성능감수제 사용 및 실리카폼의 치환이 CNT의 고른 분산성 확보에 효과가 있었음을 의미한다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 CNT를 혼입한 시멘트 복합체의 역학적 성능에 있어서 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 CNT 분산성을 확보하기 위하여 여러 가지 방법들에 대해 검토하였다. 먼저 CNT 폴리머 복합체 제조에 일반적으로 사용되는 대표적인 몇 가지 계면활성제와 함께 콘크리트 산업에서 주로 사용되는 고성능감수제의 사용에 따른 영향을 평가하였다. 또한 고성능감수제의 사용과 함께 초음파처리에 따른 영향도 함께 검토하였다. 나노크기의 CNT의 분산정도를 직접적으로 확인하는데 어려움이 있어서 강도평가를 통해 CNT 분산 및 혼입 효과를 간접적으로 평가하고자 하였다. 본 실험연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) CNT 폴리머 복합체 제조에 사용되는 일반적인 계면활성제 세 가지 타입에 대해 시멘트 복합체에도 적용이 가능한지 우선 검토하였다. 양이온계의 CTAB, 음이온계의 SDBS, 그리고 비이온계 TX10을 대상으로 실험을 수행하였으며, 그 결과 세 타입 중 TX10이 가장 좋은 결과를 나타내었다. 하지만 계면활성제 혼입으로 인해 내부에 많은 양의 공극이 발생하여 Plain 모르타르에 비해 강도가 크게 저하되는 결과를 보였다. 소포제를 사용하여 내부에 갇힌 기포들을 제거할 경우 강도회복을 보이지만 여전히 Plain 모르타르보다 작은 강도를 나타내었다. 이는 계면활성제가 시멘트 수화반응 또는 수화생성물에 영향을 미친 것으로 판단되며, 결과적으로 세 타입의 계면활성제, CTAB, SDBS, TX10은 CNT 시멘트 복합체에서는 강도향상에 효과를 발휘하지 않는 것으로 보인다.
- (2) 폴리칼본산계 고성능감수제를 계면활성제로 사용하여 CNT 시멘트 모르타르에 대해 강도평가를 통해 CNT 혼입효과를 살펴본 결과, CNT 중량의 1배 이내의 적은 양의 고성능감수제 사용으로는 CNT 혼입으로 인한 강도증가가 나타나지 않았으며, CNT 중량의 2배의 고성능감수제를 사용했을 경우에 강도증가가 크게 나타났다. 이는 많은 양의 고성능감수제를 사용해야 비로소 CNT의 분산을 적절하게 얻는 것으로 볼 수 있다. 한편 고성능감수제 사용량이 증가함에 따라 모르타르의 강도가 저하되는 현상이 나타나기 때문에 사용량을 증가시키는데 한계를 나타내었다.
- (3) 초음파처리 공정 없이 계면활성제의 사용만으로는 효

과적인 CNT 분산과 CNT 혼입에 따른 시멘트 모르타르의 강도향상을 확보하는데 어려움이 있는 것으로 나타났다. CNT 사용량을 시멘트 중량 대비 0.1%로 줄이면서 초음파처리와 고성능감수제를 함께 사용한 경우에는 압축강도와 휨인장강도 모두 10% 이상의 강도증진효과를 얻을 수 있었다.

- (4) CNT는 시멘트계 재료에 혼입되는 섬유재료로서 매우 많은 장점들을 가지고 있지만, 효과적인 분산성 확보 문제로 인해 사용에 큰 한계를 나타내고 있다. 실용적인 관점에서 볼 때 CNT의 분산을 효과적으로 얻어내면서 동시에 CNT 시멘트 복합체 제조 공정을 단순화할 필요가 있으며, 이에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2012R1A1A1010626).

#### References

1. Chan, L. Y., and Andrawes, B. (2010), Finite element analysis of carbon nanotube/cement composite with degraded bond strength, *Computational Materials Science*, 47(4), 994-1004.
2. Ferro, G., Tulliani, J., and Musso, S. (2011), Carbon Nanotubes Cement Composites, *Proceedings of Cassino (FR)*, Italia, 13-15, 49-59.
3. Ijiima, S. (1991), Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, 354, 56-58.
4. 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.
5. Kang, S. T., and Park, S. H. (2014), Experimental Study on Improving Compressive Strength of MWCNT Reinforced Cementitious Composites, 26(1), 63-70 (in Korean, with English abstract).
6. Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., and Shah, S. P. (2010), Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials, *Cement and Concrete Research*, 40, 1052-1059.
7. Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., and Shah, S. P. (2010), Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age straining capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites, *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 110-115.
8. Li, G. Y., Wang, P. M., and Zhao, X. (2005), Mechanical behavior and microstructures of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes, *Carbon*, 43(6), 1239-1245.
9. Li, G. Y., Wang, P. M., Zhao, X. (2007), Pressure-sensitive and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites, *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 377-382.
10. Luo, J., Duan, Z., and Li, H. (2009), The influence of surfactant on the processing of multi-walled carbon nanotubes in reinforced cement matrix composites, *Physica Status Solidi A*, 206(12), 2783-2790.
11. 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.
12. Rana, A. K., Rana, S. B., and Chaipanich, A. (2009), Significance of nanotechnology in construction engineering, *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 4, 46-48.
13. Sanchez, F., and Ince, C. (2009), Microstructure and macroscopic properties of hybrid carbon nanofiber/silica fume cement composites, *Composites Science and Technology*, 69, 1310-1318.
14. Yun, C. H., and Lee, H. S. (2007), Carbon Nanotube Composites, *Polymer Science and Technology*, 18(1), 4-7.
15. Zhi, G., and Gao, Z. (2008), Applications of nanotechnology and nanomaterials in construction, *Proceedings of the 1st International Conference on Construction on Developing Countries (ICCDC-1 '08)*, Advancing and Integrating Construction Education, Research & Practice, Pakistan, Iran.

Received : 08/27/2014  
 Revised : 10/29/2014  
 Accepted : 11/10/2014



---

## 요 지

이 연구는 탄소나노튜브의 우수한 역학적 특성을 시멘트재료에 활용하여 역학적인 특성을 향상시키고자 현재 탄소나노튜브를 활용하고 있는 분야에서 탄소나노튜브의 분산성을 향상시키는데 사용되고 있는 계면활성제인 CTAB, SDBS, TX10 및 문헌조사를 통하여 유효하다 알려진 고성능감수제와 탄소나노튜브를 혼합한 모르타르 강도 시험체를 제작하여, 계면활성제 종류에 따른 특성 및 사용량에 따른 복합체의 강도변화를 평가하였다. 계면활성제 중에서는 고성능감수제가 작은 강도저하 현상 및 CNT 보강에 따른 높은 강도향상 효과를 나타내었다. 고성능감수제의 사용량에 따른 강도변화에서는 사용량 증가에 따라 시험체의 강도는 감소하였으며, CNT 보강에 따른 강도향상 효과는 시멘트 중량 대비 0.4% 이하에서는 나타나지 않으며 0.8%이상의 사용량에서 나타났다. 마지막으로 CNT의 사용량을 감소시키고 초음파로 처리한 탄소나노튜브를 보강한 시험체의 경우 탄소나노튜브를 혼합하지 않은 시험체보다 강도가 증가하는 결과를 얻을 수 있었다.

**핵심 용어 :** 탄소나노튜브, 계면활성제, 고성능감수제, 분산, 강도

---