



## MWCNT 보강 시멘트 복합체의 압축강도 향상에 대한 실험적 연구

강수태 <sup>1)\*</sup> · 박순홍 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>대구대학교 토목공학과

### Experimental Study on Improving Compressive Strength of MWCNT Reinforced Cementitious Composites

Su-Tae Kang <sup>1)\*</sup> and Soon-Hong Park <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan 712-714, Korea

**ABSTRACT** This experimental study was intended to improve the compressive strength of multi-walled CNT reinforced cementitious composites with efficiency. The variables considered are the degree of sonication, the amount of surfactant, the replacement ratio of silica fume, etc. Optical microscope informed that fiber dispersion of CNT was improved with the increase of sonication time, and the compressive strength was proved to be enhanced as the degree of sonication increased. When superplasticizer as a surfactant had SP/CNT ratio of 4~6, the best improvement in strength was obtained. Silica fume was shown to produce the highest compressive strength at 10% replacement. Microstructure of CNT composites was also analyzed; XRD and SEM results indicated that CNT addition hardly changed hydration products and microstructure, and MIP analysis found the reduction of total porosity as well as the increase of nano-pores with the size of tens of nm instead of the decrease of pore distribution in the region of around 10 μm and 100 nm. The results of microstructure analysis explains that the strength improvement is closely related to physical contribution rather than chemical influence by adding CNT.

**Keywords** : carbon nanotubes, cement, fiber dispersion, surfactant, sonication

### 1. 서 론

시멘트계 재료는 건설재료로서 가장 널리 사용되는 재료이면서도, 압축강도에 비해 상대적으로 매우 작은 인장강도와 취성적인 거동 특성 등에 약점이 있다. 그래서 지금까지 인장강도의 향상과 연성 확보를 위하여 수많은 연구 노력들이 이루어져 왔다. 그 중 가장 일반적으로 고려된 방법으로는 역학적 성능이 우수한 다양한 종류의 섬유들을 혼입하는 방법이었고, 지금도 이에 대한 활발한 연구가 여전히 진행되고 있다. 그런데 기존의 섬유들은 밀리미터 스케일의 크기로 시멘트계 재료에 혼입되어 균열의 발생과 진전을 억제하는 효과를 나타내는 반면에 시멘트계 재료에서 초기 미세균열의 발생은 대부분 마이크로미터 스케일로 존재하여 초기 미세균열을 효과적으로 제어하는데 있어 한계가 있는 것이 사실이다. 초기 미세균열을 억제하기 위해서는 발생영역과 균열크기와 유

사한 스케일의 섬유를 사용하는 것이 효과적일 것이다.

탄소나노튜브(carbon nanotubes, 이하 CNT)는 나노미터 스케일을 가진 섬유로서 근래 많은 학자들로부터 관심을 받고 있다.<sup>1-7)</sup> CNT는 1991년에 일본의 Iijima 교수에 의해 발견되었는데,<sup>8)</sup> 지난 30여 년간 발견된 새로운 재료들 중에 가장 많은 관심을 받고 있는 재료 중의 하나이다. CNT는 우수한 역학적 특성, 전기전도성, 열전도성, 낮은 단위중량, 우수한 부식에 대한 저항성 등으로 인해 다양한 산업분야에서 널리 활용되고 있다.<sup>1-5,9-11)</sup> CNT는 탄소원자를 육각 벌집구조로 평평하게 배열한 그래핀(Graphene)의 변형된 형태로, 한 겹 또는 여러 겹의 그래핀이 튜브 구조로 말려져 있는 상태로, 한 겹으로 구성된 것을 SWCNT(single-walled carbon nanotubes)라고 하고, 여러 겹으로 된 것을 MWCNT(multi-walled carbon nanotubes)라고 부른다(Fig. 1).

CNT의 역학적 특징을 살펴보면, 탄성계수는 약 1 TPa, 인장강도는 약 60 GPa에 이르며 강재와 비교하였을 때 탄성계수는 5배, 인장강도는 100배 이상 더 높다. 한편 단위중량의 경우, 강재의 약 1/6 수준에 지나지 않는다.<sup>7,13-15)</sup> 최근 건설재료분야에서도 이러한 CNT의 우수한 특성을 활용하고자 하는 연구가 다수 진행되고 있다. 그

\*Corresponding author E-mail : stkang@daegu.ac.kr

Received August 5, 2013, Revised October 1, 2013,

Accepted October 2, 2013

©2014 by Korea Concrete Institute

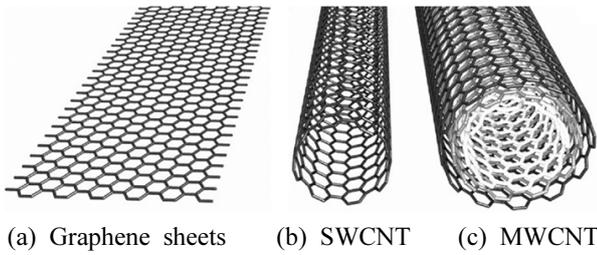


Fig. 1 Graphene vs. carbon nanotubes<sup>12)</sup>

러나 현재까지 대부분의 연구가 CNT의 우수한 전기전도성을 활용한 콘크리트 구조물의 자가센싱 효과에 집중되고 있으며,<sup>16-20)</sup> 높은 열전도성을 이용한 수화열 저감에 관한 연구가 일부 수행된 바 있으나,<sup>21,22)</sup> CNT의 역학적 우수성을 활용하여 CNT 보강 모르타르 또는 콘크리트의 역학적 성능 향상에 대한 연구에서는 많지 않으며 큰 성과도 얻지 못하고 있는 상황이다. CNT 입자간에 작용하는 반데르발스 힘으로 인하여 매트릭스 내에서 효과적인 분산을 얻기 힘들다는 점과 CNT와 매트릭스간의 부착력이 상대적으로 크지 않다는 점이 CNT 시멘트 복합체의 역학적 성능 향상을 제한하는 것으로 알려지고 있다.<sup>7,23,24)</sup>

CNT 보강 시멘트 복합체의 압축강도에 대하여 지금까지 다수의 연구들이 수행되었으며, 강도 향상의 정도에 있어서 다양한 결과를 보여주고 있다.<sup>6,25-28)</sup> 대부분의 연구에서 공통적으로 CNT의 분산성을 향상시키기 위해서는 계면활성제의 사용과 초음파 처리가 효과적임을 보이고 있다. 계면활성제는 종류에 따라서 CNT 복합체의 강도증진 효과가 크게 달라지며, 일반적으로 콘크리트 제조 시 사용하고 있는 폴리카복실계 고성능감수제를 시멘트계 CNT 복합체에 사용할 경우 섬유 효과적 분산과 함께 강도증진에 효과가 있다고 밝히고 있다.<sup>6,27)</sup> 하지만 CNT의 혼입량, 계면활성제의 종류 및 사용량, 초음파 처리 방법 및 시간 등에 있어서 다양한 방법들을 적용하고 있으며, 관련 변수들의 영향에 대한 연구는 아직까지 체계적으로 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

따라서 이 연구에서는 CNT 보강 시멘트 복합체의 효과적인 압축강도 향상을 위하여 CNT 혼입 유무, 섬유 분산을 위한 초음파 처리 정도 및 계면활성제의 사용량 등

을 실험변수로 하여, 그 영향을 실험적으로 살펴보고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 사용재료 및 배합

이 연구에서 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고 CNT의 분산을 돕고자 시멘트의 중량의 일정량을 입자크기가 상대적으로 작은 실리카폼으로 치환하여 사용하였다. Sanchez and Ince<sup>28)</sup>는 실험연구를 통해 실리카폼이 CNT의 분산에 도움이 된다고 밝힌 바 있다. 사용된 시멘트와 실리카폼의 물리적, 화학적 특성은 Table 1에 나타내었다. CNT의 분산성 향상과 소정의 워커빌리티 확보를 위하여 폴리칼본산계(polycarboxylic) 고성능감수제(superplasticizer, SP)를 결합재 중량 대비 0~0.8% (배합수량 대비 0~2%)를 혼입하여 사용하였다. 이 연구에서 사용된 CNT는 MWCNT이며, 그 특성은 Table 2와 같다. Fig. 2는 SEM으로 촬영한 MWCNT의 모습을 나타낸 것이다. 실험변수를 고려한 시험체들의 배합은 Table 3으로 나타내었다. 고성능감수제 사용량에 따른 변화를 SP/CNT비 0, 2, 4, 6, 8로 고려하여 검토하였으며, 각각

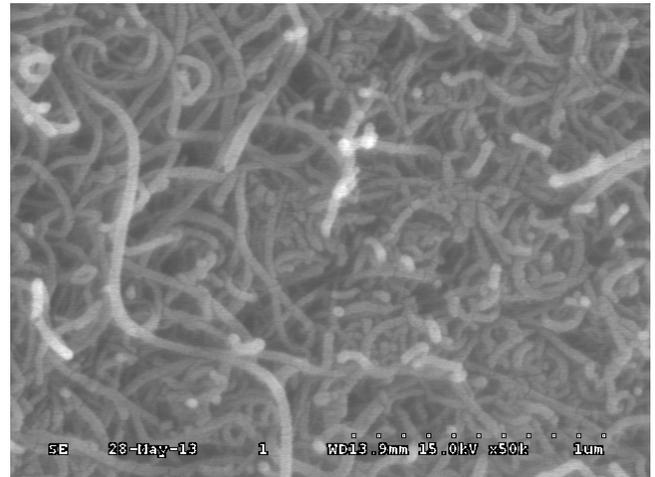


Fig. 2 SEM image of MWCNT

Table 1 Properties of cement and silica fume

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	MgO	
OPC		21.91	5.25	3.51	63.38	2.10	3.15
Silica fume		99.47	0.40	0.05	0.01	0.01	2.65

Table 2 Properties of multi-walled carbon nanotubes (CNT)

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

에 대해 CNT 혼입 유무에 따른 영향도 실험계획에 반영하였다. CNT를 혼입한 경우 사용량은 중량비로 결합재량(시멘트와 실리카폼을 합한 총 중량)의 0.1%에 해당하는 1g을 사용하였다. 또 초음파 처리 정도에 따른 영향은 초음파 처리 시간을 실험변수로 하여, 처리시간 0, 2, 4시간인 경우에 대해 검토하였다. 그리고 실리카폼 치환에 따른 영향도 치환율 0, 10%, 20%, 30%로 고려하였다.

## 2.2 초음파 처리를 통한 탄소나노튜브 분산성 파악

우선 초음파 처리 정도에 따른 배합수 내 CNT의 분산성 향상을 파악하기 위하여 최대 3.2×3.2(μm)의 픽셀크기로 2048×1536 픽셀의 해상도의 이미지 촬영이 가능한 광학현미경(L사 ICC50)을 사용하여 분산형태를 비교하였다. 초음파는 최대전력 750 W의 S사 VCX 750 초음파 파쇄기를 이용하였으며, 출력 진폭 50%로 20초 주기로 5초 동안 초음파를 가하는 방법으로 진행되었다.

## 2.3 시험체 제작 및 시험방법

Table 3에 나타난 시험체는 KS L 5105에 따라서 50×50×50 mm<sup>3</sup> 크기의 모르타르 압축강도 시험체로 제작되었다. 시험체 제작과정을 살펴보면, 우선 MWCNT와 고성능 감수제를 혼합한 수용액을 최대전력 750 W의 초음파파쇄기(S사 VCX 750)를 50% 출력진폭으로 5초간 초

Table 3 Mix proportion of cement paste

Specimen	W/B (%)	W (g)	C (g)	SF (g)	CNT (g)	SP (g)	ST (hour)				
S0C0	40	400	900	100	-	0	-				
S2C0						2					
S4C0						4					
S6C0						6					
S8C0						8					
S4C0-OC						1,000		-	4		
S4C0-F20						800		200	4		
S4C0-F30						700		300	4		
S0C1			1	900	100	-		0	4		
S2C1								2			
S4C1								4			
S6C1								6			
S8C1								8			
S4C1-OC								1,000		-	4
S4C1-F20								800		200	4
S4C1-F30								700		300	4
S4C1-0	900	100					0				
S4C1-2	900	100					2				

Note) SF=silica fume, ST=sonication time, SP=superplasticizer

음파 처리한 후 15초간 멈추는 과정을 반복하여 2시간 또는 4시간 동안 처리하여 분산액을 제조하였다. 재료의 투입순서는 시멘트와 실리카폼을 건비빔한 후 분산액과 혼합하여 시험체를 제작하였으며, 타설이 종료된 시험체는 24시간 기건 양생 후에 20±3°C의 수조에서 재령 14일까지 수중양생을 실시하였다. 압축강도는 2000 kN 용량의 UTM을 이용하여 0.8 MPa/sec의 하중제어방식으로 측정하였다. 재령 14일에서 각각 3개씩 시험을 실시하여 평균값을 14일 압축강도로 하여 비교하였다. 압축강도 시험이 종료된 시험체는 탄소나노튜브의 혼합이 수화물 생성에 미칠 수 있는 영향을 파악하기 위하여 시험체를 분쇄하여 X-선 회절장치(R사의 D/MAX-2500/PC)를 이용하여 XRD분석을 실시하였다. 또, 시험체 내의 공극의 특성을 파악하고자 Porosimeter(M사의 ASAP 2020)를 이용하여 MIP분석도 실시하였다.

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 초음파 처리에 따른 CNT 분산 효과

초음파 처리 시간에 따른 분산액 내의 CNT 분산정도

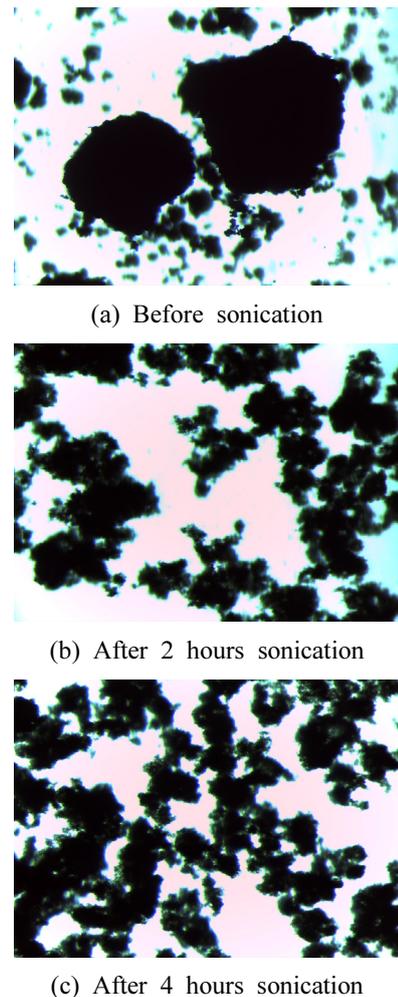


Fig. 3 Changes of CNT dispersion in solution

의 변화는 크게 덩어리져 있던 부분들이 시간이 지남에 따라 작은 덩어리로 나누어지며 분산되는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 3은 초음파 처리 시간에 따른 분산성을 광학현미경으로 촬영한 이미지로 비교하여 나타낸 것이다. 초음파 처리 전과 2시간 처리 후의 CNT 분산성을 비교했을 때 확연한 차이를 볼 수 있었으며, 초음파 2시간과 4시간 적용에 따른 CNT 분산성에 있어서는 4시간의 경우가 약간 향상된 경향을 보이지만 처리 전과 2시간 처리 사이에서의 차이만큼의 큰 차이는 보이지 않았다. 최대 초음파 처리 시간으로 설정한 4시간 동안의 초음파 처리를 실시한 분산액 내의 CNT 분산성이 상대적으로 가장 좋은 것으로 보인다. 일반적으로 서로 얽혀있는 CNT의 분산을 좋게 하기 위해서는 CNT의 길이를 짧게 하는 것이 좋다. 초음파를 가하면 유체 내 기포의 생성과 폭발이 발생하게 되고, 이 에너지로 인해 CNT가 파단되어 길이가 짧아지게 된다. 따라서 초음파 처리 시간이 증가할수록 CNT의 분산성이 향상된 것으로 판단된다.

### 3.2 고성능 감수제 사용량에 따른 영향

고성능 감수제의 혼입량에 따른 압축강도의 결과는 Fig. 4로 나타내었다. Fig. 4에서 검정색 막대 그래프는 CNT를 혼입한 경우의 압축강도를 SP 사용량에 따라 나타낸 것이고, 회색 막대 그래프는 동일한 배합에 대해 다만 CNT를 혼입하지 않은 경우를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 모든 경우에 대해 CNT를 혼입한 경우가 그렇게 많은 경우에 비해 압축강도가 증가하는 것으로 나타났다. CNT를 혼입하지 않은 경우는 고성능감수제의 사용량(0~8g 범위, 결합제 중량 대비 0~0.8%)에 따른 압축강도의 변화는 거의 없는 것으로 나타났으며, 따라서 압축강도의 변화는 대부분 CNT 혼입에 따른 영향으로 볼 수 있다. 고성능감수제를 첨가하지 않은 시험체에서는 CNT 혼입에 따른 압축강도의 증가가

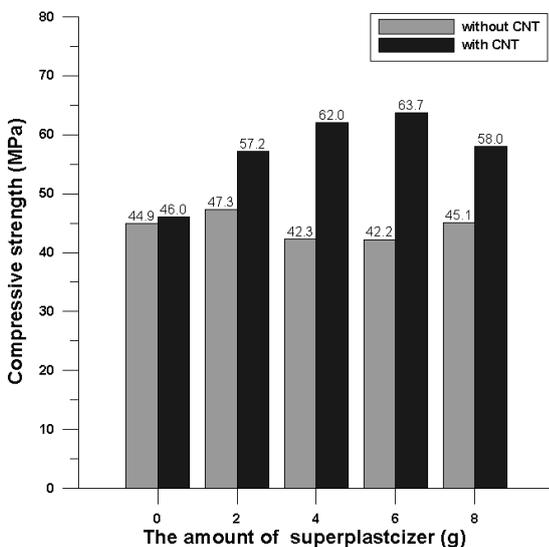


Fig. 4 The effect of SP/CNT ratio

매우 작게 나타났지만, SP/CNT.비가 증가함에 따라 압축강도가 크게 증가하는 경향을 볼 수 있었으며, 특히 SP/CNT비가 4 또는 6일 때(즉, SP 사용량이 4 또는 6g일 때) 압축강도의 증가가 약 46.6% 및 50.9%로 가장 크게 나타났다. SP/CNT비를 8까지 증가시켰을 때는 증가폭이 다소 감소하는 것으로 나타났다. 고성능감수제의 사용으로 SP/CNT비 6까지는 감수제 사용으로 인한 CNT 분산성 향상으로 강도가 증가한 반면에 SP/CNT비 8에서는 CNT에 흡착된 감수제로 인한 계면접착력 감소와 그 결과 나타난 응력전달 저해의 영향이 상대적으로 더 크게 작용했기 때문으로 판단된다. CNT 첨가에 따른 압축강도의 증가는 매트릭스 내에 혼입된 CNT가 미세균열의 생성 및 진전을 억제하도록 적절한 가교저항 역할을 하기 때문으로 판단되며, Fig. 5는 균열면에서 SEM촬영을 통해 확인된 CNT의 가교저항 현상을 보여주고 있다.

### 3.3 실리카폼 치환율에 따른 영향

실리카폼 치환율에 따른 압축강도의 변화는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 CNT가 혼입되지 않은 경우만을 비교했

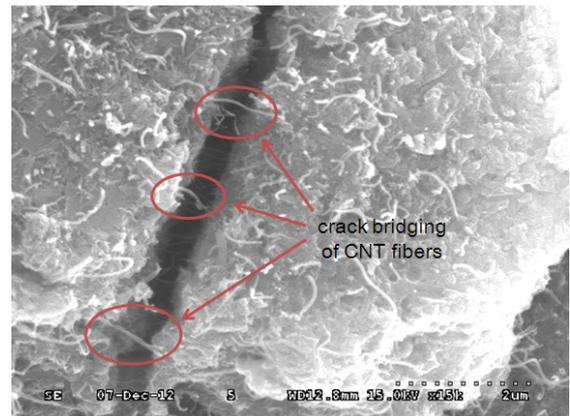


Fig. 5 Bridging effect of CNT fibers on cracked surface

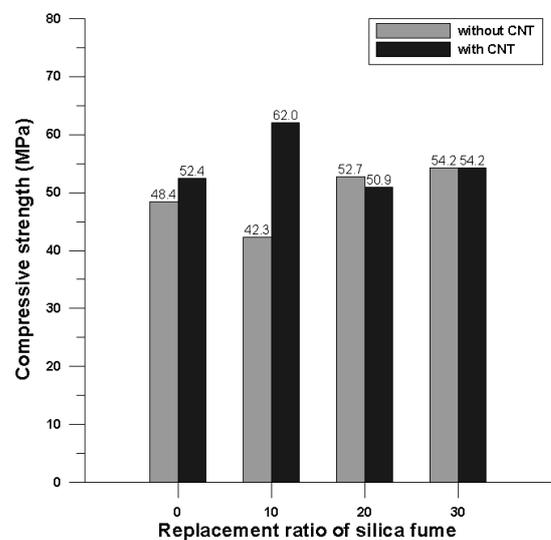


Fig. 6 The effect of silica fume replacement

을 때 실리카폼을 10% 치환한 경우가 나머지 결과에 비해 강도가 작게 나타나는데, 이는 나머지 시험체들과 별도로 제작되었기 때문에 발생한 변동성으로 이해할 수 있다. 따라서 결과의 비교에서는 각각의 실리카폼 치환율에서 CNT 유무에 따른 강도변화만을 비교하였다. 실리카폼을 전혀 사용하지 않은 경우에는 CNT 혼입에 따른 압축강도의 증가가 8.3% 정도인 반면에, 실리카폼을 10% 치환했을 때에는 강도 증가율이 46.6%로 크게 향상되는 것을 볼 수 있다. 하지만 실리카폼을 20% 또는 30% 치환했을 때에는 CNT 혼입에 따른 강도 증가가 전혀 나타나지 않았다. 실리카폼을 10% 치환했을 때는 CNT 섬유간의 상호작용력을 이완하고 분산을 돕는 역할과 함께 수화생성을 촉진하는 역할로 강도증진 효과가 크게 나타난 것으로 판단된다. 치환율 20% 및 30%에서는 결과적으로 CNT 분산효과가 거의 없는 것으로 보이나, 이에 대해서는 미세구조적 관점에서의 추가적인 분석이 더 필요할 것으로 보인다.

### 3.4 초음파 처리 시간에 따른 비교

Fig. 7은 CNT 분산액의 초음파 처리 시간에 따른 압축강도의 변화를 비교하여 나타내었다. 초음파 처리를 하지 않은 시험체의 압축강도가 가장 낮게 나타났으며, 초음파 처리 시간이 증가함에 따라 압축강도는 증가하는 것을 볼 수 있다. 초음파 처리를 하지 않은 시험체의 압축강도와 비교했을 때, 2시간 초음파 처리를 한 경우는 17.3%, 4시간 초음파 처리를 한 경우는 41.2%만큼 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 앞서 CNT 분산액 상태에서 초음파 처리 시간에 따른 분산성 향상에 따른 결과로 판단할 수 있다. 다만, 광학현미경 상으로 파악했을 때는 처리 전과 2시간 사이에서의 분산성 변화에 비해 2시간과 4시간 사이에서의 분산성 변화

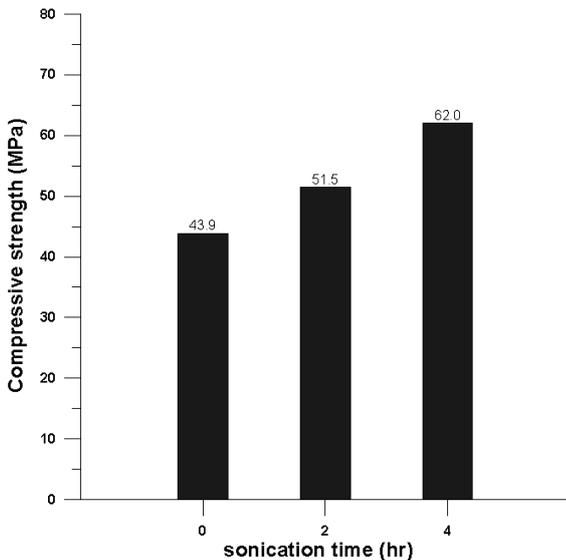
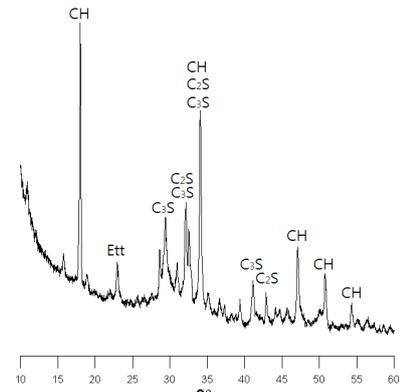
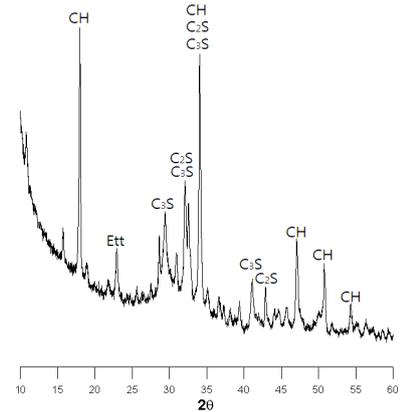


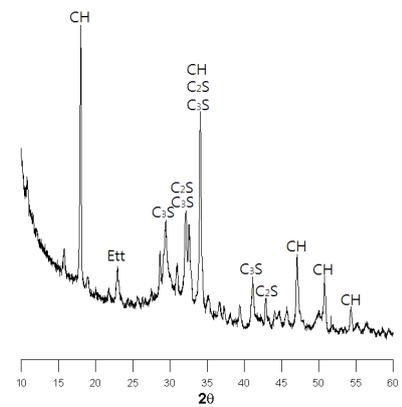
Fig. 7 The effect of sonication time



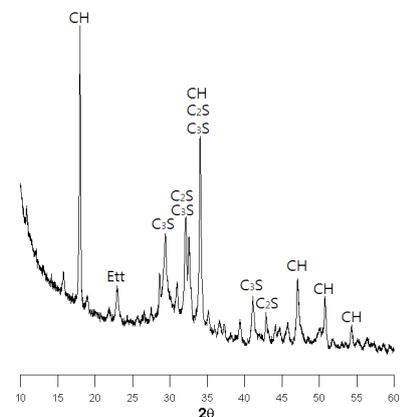
(a) S4C0



(b) S4C1



(c) S6C0



(d) S6C1

Fig. 8 The result of XRD analysis

가 상대적으로 적은 것으로 보였는데 반해, 강도증가는 증가추세가 거의 비슷하게 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 강한 반데르발스 힘으로 뭉쳐져 있는 CNT를 얼마나 미세하게 분산시키느냐에 따라 강도가 크게 달라질 수 있을 것으로 판단된다. 또한 초음파 처리 시간과 압축강도 사이에 정량적인 상관관계에 대해서는 추가적으로 충분한 실험 연구를 통해서 명확히 밝힐 수 있을 것으로 판단된다.

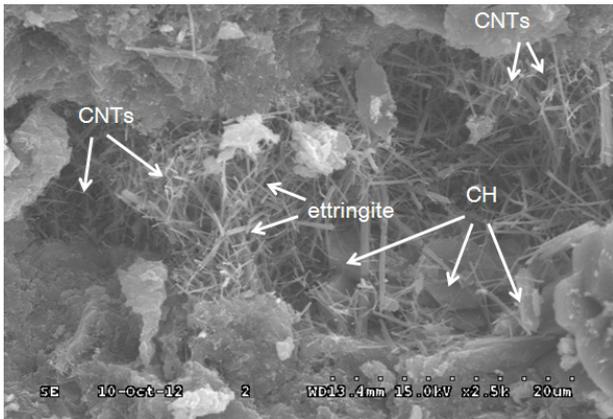
### 3.5 미세구조 분석 결과

압축강도 결과에서 CNT의 혼합으로 강도가 상대적으로 크게 증가하였던 S4시리즈와 S6시리즈의 시험체를 대상으로 미세구조 분석을 실시하였다. Fig. 8은 XRD 분석 결과를 나타낸 것이다. 전체적인 분석 결과를 살펴보면 주로 시멘트 광물  $C_2S$ ,  $C_3S$ 와 수산화칼슘(CH), 에트링사이트(ettringite) 등을 확인할 수 있었으며, CNT 혼입으로 인한 시멘트 복합체 내 수화생성물의 차이는 크게 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 CNT 혼입으로 수화반응 및 수화생성물의 변화가 거의 없음을 의미한다. 한편 MWCNT는 소수성(hydrophobicity)의 성

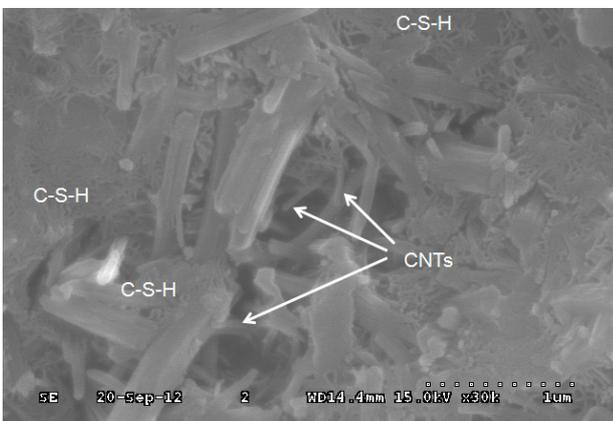
질을 가지고 있어서 시멘트 복합체로 혼합했을 때 CNT 주변에 수화생성물 형성에 영향을 미칠 수 있다. Fig. 9는 CNT 주변의 수화생성물을 보여주는 SEM 사진으로, CNT가 에트링사이트, 수산화칼슘, CSH 겔 등의 주변 수화생성물들과 함께 섞여서 자리 잡고 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 미세구조 관찰을 통해 CNT가 주변 수화물의 생성을 방해하지 않는 것으로 판단할 수 있다.

CNT의 혼입이 미세공극 구조에 어떠한 변화를 일으키는 지 파악하기 위하여 MIP분석을 통해 공극분포를 파악하였다. XRD 분석과 마찬가지로 S4시리즈와 S6시리즈에 대해 분석을 실시하였다. MIP 분석 결과는 Fig. 10에 나타내었다. S4와 S6 시리즈 모두에서 CNT 혼입으로 인해 공극량이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 공극분포에서도  $10\mu m$  크기의 공극이 크게 줄어들었음을 알 수 있으며, 나노미터 크기 범위에서는  $50\sim 100\text{ nm}$  크기의 공극이 현저히 줄어들고 대신에  $20\sim 50\text{ nm}$  크기의 공극이 증가한 것을 확인할 수 있다. 따라서 시멘트 페이스트 내에 잘 분산된 CNT는 공극구조 향상에 도움이 되는 것으로 판단된다.

결과적으로, CNT 혼입으로 인한 수화생성물의 변화는 거의 없으며 미세구조의 공극률을 줄이고 공극의 크기를 작게 하는 물리적 효과가 큰 것으로 나타났으며, 이러한 영향과 CNT의 효과적인 균열저항 성능으로 인해 CNT 보강 시멘트 페이스트의 압축강도 증가가 나타난 것으로 판단된다.

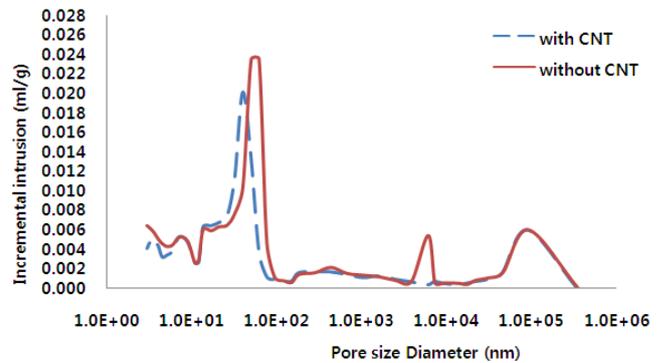


(a)

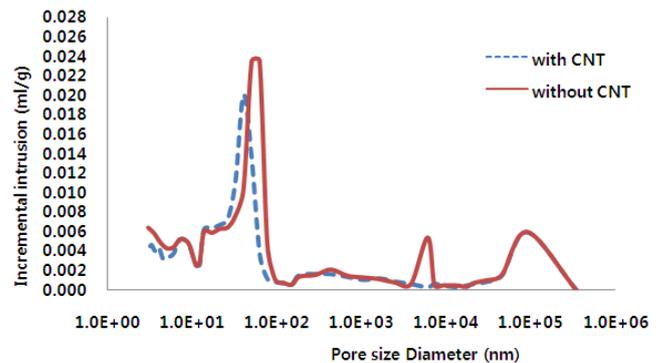


(b)

Fig. 9 SEM images of CNT composites at (a)  $\times 2500$  and (b)  $\times 30,000$



(a) S4 series



(b) S6 series

Fig. 10 The results of MIP analysis

이 연구에서는 탄소나노튜브의 우수한 역학적 특성을 시멘트계 재료에 활용하고자 하는 목적으로, 압축강도에 대한 CNT 보강 효과를 여러 가지 변수들을 고려하여 실험적으로 살펴보았다. CNT 보강 시멘트 복합체의 역학적 특성을 좌우하는 가장 큰 영향인자는 CNT의 분산성이며, 이와 관련하여 초음파 처리 정도, 계면활성제 사용량 및 실리카폼 치환율 등을 실험에서 변수로 고려하였다. 실험 결과에 대한 종합적인 결론은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 초음파 처리 시간에 따른 CNT 분산성의 변화를 광학현미경을 통해 관찰하였다. 초음파 처리에 따른 확연한 분산성 변화를 확인할 수 있었으며, CNT 시멘트 복합체의 압축강도에서도 초음파 처리 정도에 따라 강도가 향상됨을 확인하였다.
- 2) 계면활성제로 사용한 고성능감수제의 사용량에 따른 압축강도는 SP/CNT비가 4~6일 때 강도향상 효과가 가장 좋은 것으로 나타났다. 고성능감수제가 CNT 분산성 향상에 기여하여 강도향상에 긍정적 요소로 작용할 수 있는 한편, CNT에 흡착하여 계면 접착력을 감소시키는 부정적인 요소의 면도 동시에 가지고 때문에 강도측면에서 적정한 사용량 범위가 존재하는 것으로 판단된다.
- 3) 실리카폼 치환율에 따른 압축강도의 변화에서는 실리카폼을 10% 치환했을 때에 강도에 대한 CNT 보강효과가 약 47% 정도로 크게 나타난 반면, 20% 및 30%에서는 CNT 혼입에 따른 강도증진 효과는 전혀 나타나지 않았다. 실리카폼 치환에 따른 강도 증진 효과는 CNT 섬유간의 상호작용력을 이완하고 분산을 돕는 역할과 함께 수화생성을 촉진하는 역할 때문으로 판단된다.
- 4) CNT 보강 시멘트 복합체의 미세구조 분석을 실시하였으며, XRD와 SEM 분석을 통해 CNT 혼입으로 인한 수화생성물 및 미세구조의 변화는 거의 없는 것으로 나타났으며, MIP 분석을 통해서도 공극률 감소와 함께, 10  $\mu\text{m}$  및 100 nm 크기 전후의 공극분포가 줄어들는 대신 수 십 나노미터 크기의 작은 공극들의 분포가 증가함을 확인하였다. 이를 통해 CNT의 혼입에 따른 압축강도 증가는 화학적 영향보다는 물리적 영향이 큰 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이다 (No. 2012R1A1A1010626).

1. Qian, D., Dickey, E. C., Andrews, R., and Rantell, T., "Load Transfer and Deformation Mechanisms in Carbon Nanotube-Polystyrene Composites," *Applied Physics Letters*, Vol. 76, No. 20, 2000, pp. 2868-2870.
2. Andrews, R., Jacques, D., Minot, M., and Rantell, P., "Fabrication of Carbon Multiwall Nanotube/Polymer Composites by Shear Mixing," *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 287, 2002, pp. 395-403.
3. Park, J. M., Kim, D. S., Lee, J. R., and Kim, T. W., "Nondestructive Damage Sensitivity and Reinforcing Effect of Carbon Nanotube/Epoxy Composites Using Electro-Micromechanical Technique," *Materials Science Engineering: C*, Vol. 23, No. 6-8, 2003, pp. 971-975. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2003.09.131>)
4. Flahaut, E., Peigney, A., Laurent, C. H., Marlière, C. H., Chastel, F., and Rousset, A., "Carbon Nanotube-Metal-Oxide Nanocomposites: Microstructure Electrical Conductivity and Mechanical Properties," *Acta Materialia*, Vol. 48, 2000, pp. 3803-3812. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00147-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00147-6))
5. Peigney, A., Laurent, C. H., Flahaut, E., and Rousset, A., "Carbon Nanotubes in Novel Ceramic Matrix Nanocomposites," *Ceramics International*, 2000, Vol. 26, pp. 677-683. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0272-8842\(00\)00004-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00004-3))
6. Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., and Shah, S. P., "Highly Dispersed Carbon Nanotube Reinforced Cement Based Materials," *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 7, 2010, pp. 1052-1059. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.02.015>)
7. Li, G. Y., Wang, P. M., and Zhao, X., "Mechanical Behavior and Microstructure of Cement Composites Incorporating Surface-Treated Multi-Walled Carbon Nanotubes," *Carbon*, Vol. 43, No. 6, 2005, pp. 1239-1245. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2004.12.017>)
8. Iijima, S., "Helical Microtubules of Graphitic Carbon," *Nature*, Vol. 354, 1991, pp. 56-58.
9. Saez de Ibarra, Y., Gaitero, J. J., Erkizia, E., and Campillo, I., "Atomic Force Microscopy and Nanoindentation of Cement Pastes with Nanotube Dispersions," *Physica Status Solidi A*, Vol. 203, No. 6, 2006, pp. 1076-1081. (doi: <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.200566166>)
10. Wansom, S., Kidner, N. J., Woo, L. Y., and Mason, T. O., "AC-Impedance Response of Multiwalled Carbon Nanotube/Cement Composites," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, No. 6, 2006, pp. 509-519. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.014>)
11. Cwirzen, A., Habermehl-Chirzen, K., and Penttala, V., "Surface Decoration of Carbon Nanotubes and Mechanical Properties of Cement/Carbon Nanotube Composites," *Advances in Cement Research*, Vol. 20, No. 2, 2008, pp. 65-73. (doi: <http://dx.doi.org/10.1680/adcr.2008.20.2.65>)
12. Kreupl, F., Graham, A. P., Liebau, M., Duesberg, G. S. Seidel, R., and Unger, E., "Carbon Nanotubes for Interconnect Applications," *Proceedings of the IEEE*

- International Electron Devices Meeting (IEDM '04)*, 2004, pp. 683-686.
13. Li, G. Y., Wang, P. M., and Zhao, X., "Pressure-Sensitive and Microstructure of Carbon Nanotube Reinforced Cement Composites," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, No. 5, 2007, pp. 377-382. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.011>)
  14. Zhi, G. and Gao, Z., "Applications of Nanotechnology and Nanomaterials in Construction," *Proceedings of the 1st International Conference on Construction on Developing Countries (ICCIC-1 '08), Advancing and Integrating Construction Education*, Research & Practice, Pakistan, Iran, 2008.
  15. Rana, A. K., Rana, S. B., and Chaipanich, A., "Significance of Nanotechnology in Construction Engineering," *International Journal of Recent Trends in Engineering*, Vol. 4, 2009, pp. 46-48.
  16. Saafi, M., "Wireless and Embedded Carbon Nanotube Networks for Damage Detection in Concrete Structures," *Nanotechnology*, Vol. 20, 2009, pp. 1-7. (doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/20/39/395502>)
  17. Kang, I., Heung, Y. Y., Kim, J. H., Lee, J. W., Gollapudi, R., Subramaniam, G., Narasimhadevara, S., Hurd, D., Kirikera, G. R., Shanov, V., Schulz, M. J., Shi, D., Boerio, J., Mall, S., and Ruggles-Wren, M., "Introduction to Carbon Nanotube and Nanofiber Smart Materials," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 37, 2006, pp. 382-394. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.02.011>)
  18. Yu, X. and Kwon, E., "A Carbon Nanotube/Cement Composite with Piezoresistive Properties," *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, 2009, pp. 1-5. (doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/18/5/055010>)
  19. Kang, I., Schulz, M. J., Kim, J. H., Shanov, W., and Shi, D., "A Carbon Nanotube Strain Sensor for Structural Health Monitoring," *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, 2006, pp. 737-748. (doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/15/3/009>)
  20. Han, B., Yu, X., and Kwon, E., "A Self-Sensing Carbon Nanotube/Cement Composite for Traffic Monitoring," *Nanotechnology*, Vol. 20, 2009, pp. 1-5. (doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/20/44/445501>)
  21. Lee, J. H., Park, H. G., Lee, J. S., Ryu, Y. S., Hong, S. B., and Kim, W. J., "A Study on the Dynamics of CNT Contained Functional Concrete and Temperature Characteristics," *Proceedings of Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 2, 2011, pp. 365-366.
  22. Lee, J. H., Lee, J. W., Lee, J. S., Hong, S. B., Kim, W. J., and Ryu, Y. S., "The Research on the Hydration Heat Reduction Characteristics of CNT Mixing Functionality Concrete," *Proceedings of Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 2, 2012, pp. 733-734.
  23. Xie, X. L., Mai, Y. W., and Zhou, X. P., "Dispersion and Alignment of Carbon Nanotubes in Polymer Matrix: A Review," *Materials Science and Engineering R*, Vol. 49, 2005, pp. 89-112. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mser.2005.04.002>)
  24. Makar, J. M. and Beaudoin, J. J., "Carbon Nanotubes and Their Applications in the Construction Industry," *Proceedings of the 1st International Symposium on Nanotechnology in Construction*, Paisley, Scotland, 2003, pp. 331-341.
  25. Shah, S. P., "Nanoscale Modification of Cementitious Materials," *Nanotechnology in Construction 3: Proceedings of the NICOM3*, 2009, pp. 125-130.
  26. Ferro, G. J., Tulliani, M., and Musso, S., "Carbon Nanotubes Cement Composites," *Convegno IGF XXI Cassino 2011*, Italy, 2011, pp. 49-59.
  27. Luo, J., Duan, J. Z., and Li, H., "The Influence of Surfactants on the Processing of Multi-Walled Carbon Nanotubes in Reinforced Cement Matrix Composites," *Physica Status Solidi A*, Vol. 206, No. 12, 2009, pp. 2783-2790. (doi: <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.200824310>)
  28. Sanchez, F. and Ince, C., "Microstructure and Macroscopic Properties of Hybrid Carbon Nanofiber/Silica Fume Cement Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 69, 2009, pp. 1310-1318. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.03.006>)

**요약** 이 연구에서는 multi-walled CNT 보강 시멘트 복합체의 효과적인 압축강도 향상을 위하여 섬유 분산을 위한 초음파 처리 정도, 계면활성제의 사용량, 실리카폼 치환율 등을 실험변수로 하여, 그 영향을 실험적으로 살펴보았다. 초음파 처리 시간에 따른 CNT 분산성 변화는 광학현미경을 통해 확인하였으며, CNT 시멘트 복합체의 압축강도가 초음파 처리 정도에 따라 향상됨을 확인할 수 있었다. 계면활성제로 사용된 고성능감수제 사용량의 영향은 SP/CNT비가 4-6일 때 강도향상 효과가 가장 좋은 것으로 나타났다. 한편, 실리카폼 치환율에 따른 압축강도의 변화에서는 실리카폼을 10% 치환했을 때 강도에 대한 CNT 보강효과가 가장 큰 것으로 나타났다. CNT 보강 시멘트 복합체의 미세구조 분석도 함께 실시하였는데, XRD와 SEM 분석 결과에서는 CNT 혼입으로 인한 수화생성물 및 미세구조의 변화는 거의 없는 것으로 나타났으며, MIP 분석을 통해서도 공극률 감소와 함께, 10 μm 및 100 nm 크기 전후의 공극분포가 줄어드는 대신 수십 나노미터 크기의 작은 공극들의 분포가 증가함을 확인하였다. 이를 통해 CNT의 혼입에 따른 압축강도 증가는 화학적 영향보다는 물리적 영향이 큰 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 탄소나노튜브, 시멘트, 섬유분산, 계면활성제, 초음파 처리