



다중벽 탄소나노튜브의 혼입량에 따른 시멘트 복합체의 유동성 및 강도 변화

하성진¹⁾ · 강수태^{1)*}

¹⁾대구대학교 토목공학과

Flowability and Strength of Cement Composites with Different Dosages of Multi-Walled CNTs

Sung-Jin Ha¹⁾ and Su-Tae Kang^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

ABSTRACT With several different dosages of multi-walled CNTs which was 0.1, 0.3, and 0.5% of the weight of binder, the fluidity in fresh CNT cement composites, as well as the strength and strength development with age of the hardened composites were investigated in this experimental study. The experimental results from flow test indicated that the increase in the dosage of CNTs badly impacted on the workability of fresh composites, and the results from rheological measurements presented the decrease in plastic viscosity and the increase in yield stress according to the amount of CNTs. In addition, the thixotropy in the flow curve obtained from the rheology test was observed more noticeably in the composites with higher dosage of CNTs. With the experiments on the strength properties, the improvement of both compressive and tensile strengths with the increase of CNTs dosage could be obtained. Moreover, early strength development by adding CNTs was found when it was compared with plain cementitious matrix without CNT.

Keywords : carbon nanotubes, flowability, rheology, compressive strength, tensile strength

1. 서 론

1991년 Iijima¹⁾ 교수에 의해 발견된 탄소나노튜브(Carbon Nanotubes, CNT)는 우수한 역학적 특성, 전기전도성, 열전도성 등으로 엄청난 관심을 불러 일으켰으며 현재 전기·전자 재료, 바이오, 환경 및 에너지, 화학 분야 등 다양한 산업 분야에서 매우 활발히 사용되고 있다. 탄소나노튜브는 탄소원자가 육각벌집구조형태로 결합된 그래핀(Graphene)이 나노 크기의 직경으로 둥글게 말려진 형태로서, 각도와 구조에 따라서 도체 또는 반도체의 특성을 나타낸다. 탄소나노튜브의 말려진 겹 수에 따라 한 겹으로 말려진 단일벽 탄소나노튜브(Single-walled CNT, SWCNT)와 두 겹 이상의 여러 겹으로 말려진 다중벽 탄소나노튜브(Multi-walled CNT, MWCNT)로 구분된다. 탄소나노튜브는 전기전도도가 구리와 비슷하고, 열전도율은 자연계에서 가장 뛰어난 다이아몬드와 같으며, 강도는 강재보다 100배나 뛰어난 것으로 알려져 있다. 또한 탄소섬유는

1%만 변형시켜도 끊어지는 반면 탄소나노튜브는 15%가 변형되어도 견딜 수 있다고 한다.²⁾

한편, 모르타르나 콘크리트와 같이 시멘트를 기반으로 한 재료는 우수한 경제성과 성능으로 건설 산업에서 가장 많이 사용되고 있는 건설재료이지만 취성적인 거동을 보이는 특성과 압축강도에 비해 인장강도가 매우 작다는 약점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 100여 년 전부터 섬유를 시멘트계 재료에 혼입하는 방법을 사용해 왔다. 혼입된 섬유가 시멘트계 재료에 가해지는 인장력의 일부를 분담하고, 또 균열 이후에 섬유가 지속적으로 인장에 저항하여 인장강도 및 인성 향상에 기여하는 것이다.³⁻⁵⁾ 가장 일반적으로 사용된 섬유 소재로는 강, 합성섬유, 탄소, 유리 등을 예로 들 수 있으며, 시멘트계 재료의 보강 목적으로 사용되는 보강섬유의 가장 큰 특징은 재료의 높은 인장강도와 기하학적으로 큰 형상비를 가지는 것이다. 이외에도 시멘트계 재료 내에서의 적절한 분산성과 시멘트계 재료와의 부착성능 등을 들 수 있다.

이러한 관점에서 볼 때, 아주 높은 인장강도를 가지고 제조 시 일반적으로 1000 이상의 형상비를 가지는 탄소나노튜브는 매우 이상적인 보강섬유 재료라고 할 수 있다. 특히 나노 크기의 직경과 마이크로 크기의 길이를 가

*Corresponding author E-mail : stkang@daegu.ac.kr
 Received August 4, 2015, Revised October 19, 2015,
 Accepted October 28, 2015
 ©2016 by Korea Concrete Institute

지고 있어서 시멘트 복합체에서 취약한 영역인 계면전이 영역(Interfacial Transition Zone, ITZ)에서의 보강효과를 기대할 수 있어서 기존의 다른 섬유들과는 달리 초기균열발생강도의 향상에도 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 그래서 최근 관심이 증대되고 있는 탄소나노튜브를 건설산업에 활용하기 위한 연구의 주된 연구방향 중의 하나가 CNT 보강을 통한 시멘트 복합체의 역학적 성능 향상에 관한 연구이다.⁶⁻¹⁸⁾

CNT 보강 시멘트 복합체의 강도 향상과 관련한 최근의 연구결과들을 대략적으로 살펴보면 다음과 같다. Campillo et al.⁶⁾은 CNT와 시멘트의 복합체에 대한 압축실험을 통해 SWCNT와 MWCNT가 각각 6%와 30%의 강도증진 효과를 나타냄을 확인한 바 있다. 그리고 Li et al.⁷⁾는 시멘트 중량비로 0.5%의 MWCNT를 표면개질 후 혼입한 시멘트 모르타르 복합체에서 약 25%의 압축강도 향상을 얻은 바 있으며, Brenner et al.⁸⁾은 0.1%의 MWCNT를 혼입하여 휨강도가 약 7% 정도 향상되는 효과를 얻었다. 그리고 Chan and Andrawes⁹⁾은 0.25%의 MWCNT를 혼입한 CNT 시멘트 페이스트 복합체에서 휨강도와 인성이 약 25% 증가한다는 결과를 보인 바 있으며, Konsta-Gdoutos et al.¹⁰⁾은 0.05% 정도의 소량의 MWCNT 혼입으로도 휨강도가 약 25% 증가한다는 실험결과를 보였다. 이상의 관련 연구결과들을 살펴볼 때 가장 효과적으로 강도증진을 이룰 수 있는 적절한 CNT 혼입량이 어느 정도인지 아직까지 명확히 규명되지 않은 상태이며, 일반 섬유보강 콘크리트에서도 작업성, 섬유분산 현상 등으로 인해 적정 범위의 섬유혼입률 범위가 있음을 고려할 때 CNT 시멘트 복합체에서도 적정 혼입률이 존재할 것으로 추측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 CNT 혼입량 변화에 따른 균질한 상태에서의 유동성 및 경화 후 강도 특성을 살펴보고자 실험연구를 수행하였다.

2. 실험

2.1 배합 및 실험체 제작

CNT 혼입량에 따른 시멘트 복합체의 특성변화를 확인하기 위해 시멘트 페이스트를 대상으로 실험을 수행하였

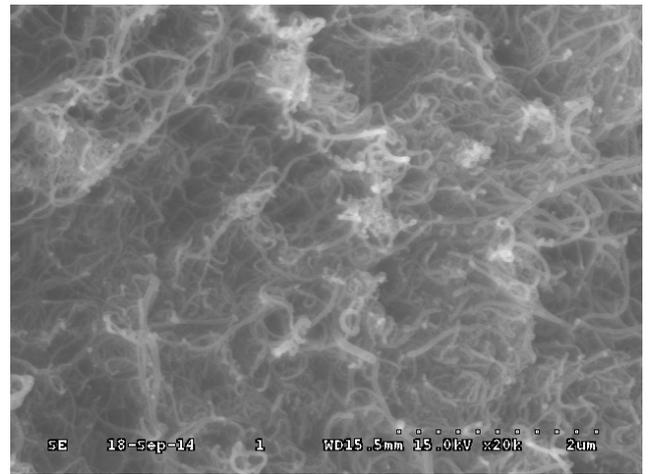


Fig. 1 SEM image of MWCNTs

다. CNT 시멘트 복합체를 제조하는 데 있어서 가장 중요한 문제는 CNT의 고른 분산성을 확보하는 것이다. CNT는 입자 상호간에 작용하는 반데르발스 반발력과 소수성의 성질로 인해 매트릭스 내 고르게 분산시키는 것이 매우 어렵다.

실험에서 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, CNT의 분산성 향상에 효과가 있는 것으로 알려진 실리카폼을 시멘트의 중량의 일정량만큼 치환하여 사용하였다.¹⁹⁾ 실험에 사용된 시멘트와 실리카폼의 물리적, 화학적 특성은 Table 1에 나타낸 바와 같다. 또한 CNT의 분산성 향상과 소정의 워커빌리티 확보를 위하여 폴리카본산계(polycarboxylic) 고성능감수제(superplasticizer, SP)를 결합재 중량 대비 0.4%로 혼입하여 사용하였다. 본 연구에서 사용된 CNT는 MWCNT이고, 그 특성은 Table 2와 같으며, Fig. 1은 SEM으로 촬영한 MWCNT의 형상을 나타낸 것이다. 실험변수 CNT 혼입량을 시멘트 중량 대비 0, 0.1, 0.3, 0.5%로 달리 적용하였으며, 그 배합은 Table 3에 나타낸 바와 같다.

배합순서는 먼저 배합수와 고성능감수제를 혼합한 용액에 CNT를 투입한 후 소니케이터(sonicator)를 이용하여 초음파 처리를 실시하여 CNT 분산액을 제조한다. 이때 사용한 소니케이터는 최대전력 750 W의 S사 VCX 750을 이용하였으며, 출력 진폭 50%로 20초를 주기로 한 주기

Table 1 Properties of cement and silica fume

Types	Items	Chemical composition (%)				Specific gravity (g/cm ³)	
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO		MgO
Portland Cement		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 (MWCNT)

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

Table 3 Mix proportions of CNT/cement mortars

Mix	W/B(%)	Cement(g)	Silica fume(g)	Water(g)	SP(g)	CNT(g)
Plain	40	900	100	400	4	-
CNT-0.1						1
CNT-0.3						3
CNT-0.5						5

내 5초 동안 초음파를 가하는 방법으로 총 2시간에 걸쳐 초음파 처리를 한다. 다음으로 시멘트와 실리카폼을 함께 믹서기에 넣고 건비빔을 실시한 후 준비된 CNT 분산 용액과 혼합하여 CNT 시멘트 복합체를 제조한다.

2.2 실험방법

실험은 굳지 않은 상태 및 굳은 상태에 대해 각각 유동성, 압축 및 인장강도 비교, 재령에 따른 강도발현 특성 등을 살펴보았다.

시멘트 복합체의 유동성 평가는 KS L 5105에 따른 플로우 콘을 이용한 플로우 실험과 Haake RS150 레오미터로 35 mm의 평행원판을 이용하여 실시한 레올로지 실험을 통해 평가하였다. 압축강도는 50×50×50 mm 크기의 입방체 공시체를 이용하였고, 인장강도는 $\Phi 25 \times 50$ mm 크기의 원주형 공시체를 제작하여 쪼갬인장강도로 측정하였다. 강도는 재령 14일에 측정하여 비교하였다. 재령에 따른 강도발현 특성은 재령 1, 3, 7, 14, 28일에 강도를 측정하여 나타내었다. 강도 측정을 위해 제작된 실험체는

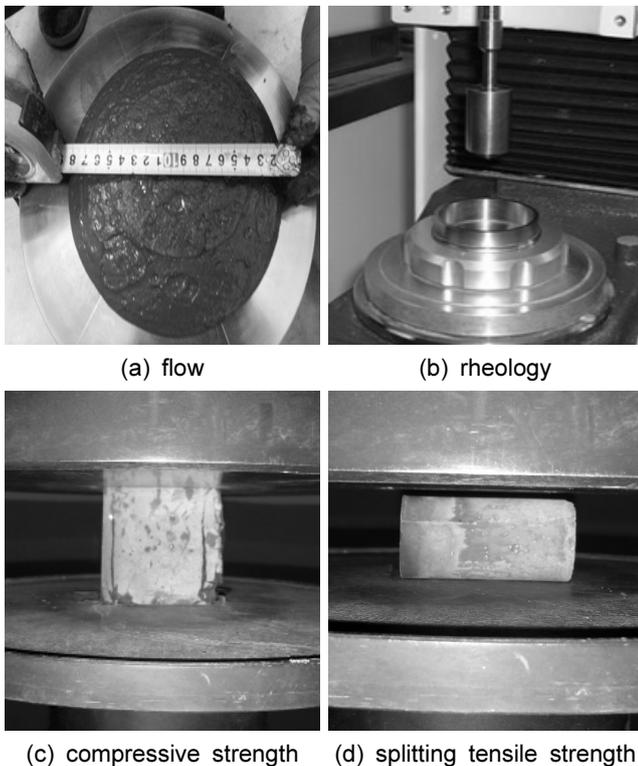


Fig. 2 Test methods

타설 후 24시간 기건양생 후 탈형하여 온도 20±3°C의 항온수조에서 실험재령까지 수중양생을 실시하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 유동특성

Fig. 3은 CNT 혼입량 변화에 따른 플로우 값의 변화를 나타낸 것이다. CNT 혼입량이 증가함에 따라 플로우 값이 점차적으로 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 이와 같은 결과는 일반적인 섬유보강 콘크리트에서 섬유혼입률 증가에 따라 슬럼프값이 감소하는 경향과 동일한 것이다. Fig. 4는 CNT 혼입량 변화에 따른 굳지 않은 CNT 시멘트 복합체의 흐름곡선, 즉 전단속도-전단응력과의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 근사적으로 Bingham 유체 모델에 근거하여 항복응력과 소성점도의 레올로지 정수를 구하였다. 이 때 CNT 시멘트 복합체의 낮은 전단속도구간에서 나타나는 틱소트로피 현상을 고려하여 일정 크기 이상 전단속도에서의 선형적 거동에 근거하여 항복응력 및 소성점도를 도출하였다.²⁰⁾ CNT 혼입량에 따른 항복응력 및 소성점도의 변화는 Fig. 5에서 보는 바와 같다.

CNT 혼입량이 증가함에 따라 항복응력은 증가하고 소성점도는 감소하는 것으로 나타났다. CNT 혼입량 증가에 따른 항복응력의 증가는 플로우 실험에서의 플로우 값의 감소 경향과 연관성이 있으며,²¹⁾ 높은 CNT 혼입량의 CNT 시멘트 복합체에서 점착성이 저하되는 경향을 직접 체감할 수 있었는데 소성점도의 감소로 객관적으로 입증된 것이다.

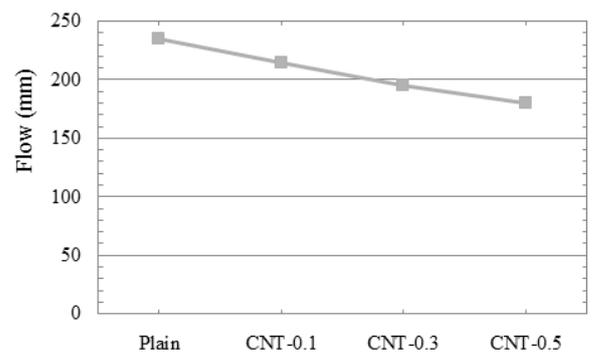
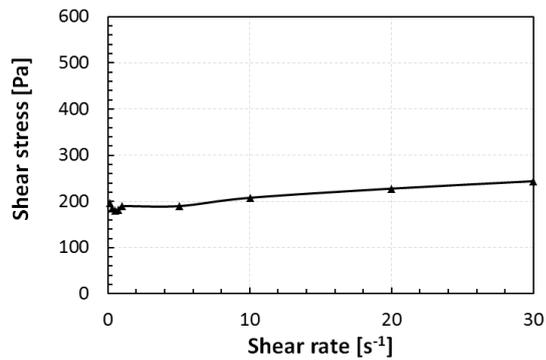
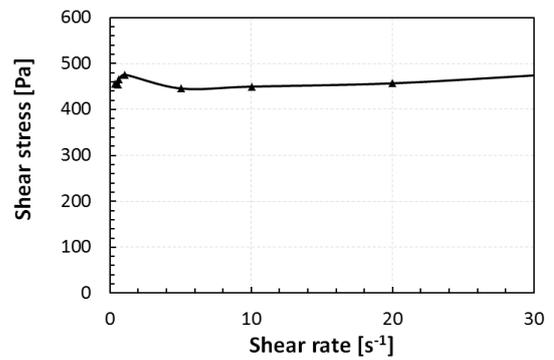


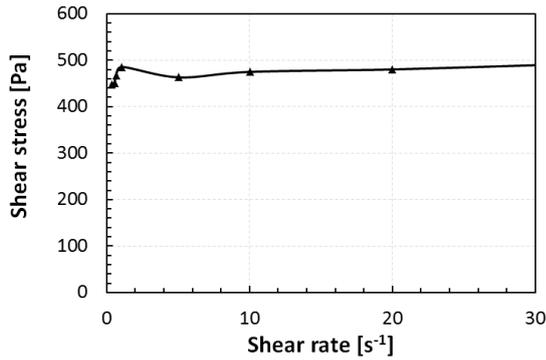
Fig. 3 Flow test results with different dosages of CNTs



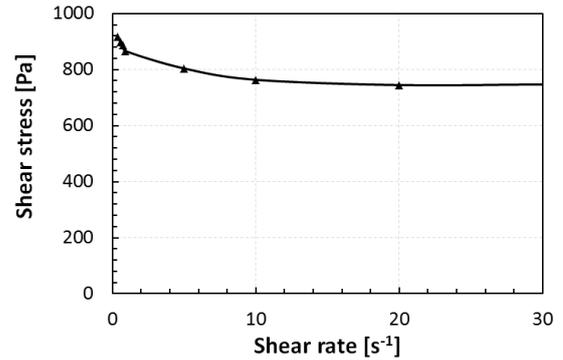
(a) plain



(b) CNT-0.1



(c) CNT-0.3



(d) CNT-0.5

Fig. 4 Flow curves with different CNT dosages

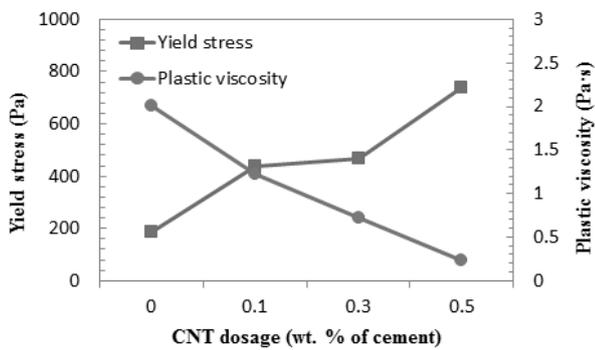
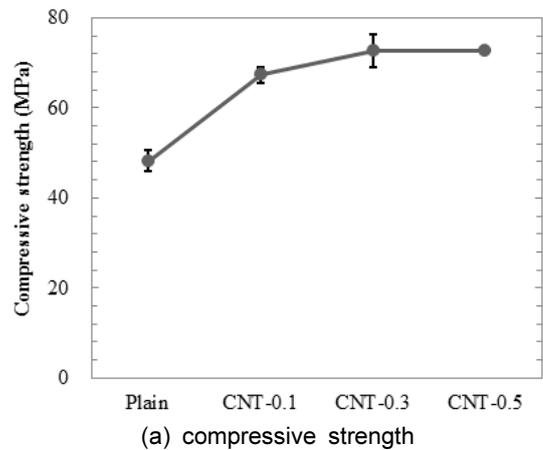


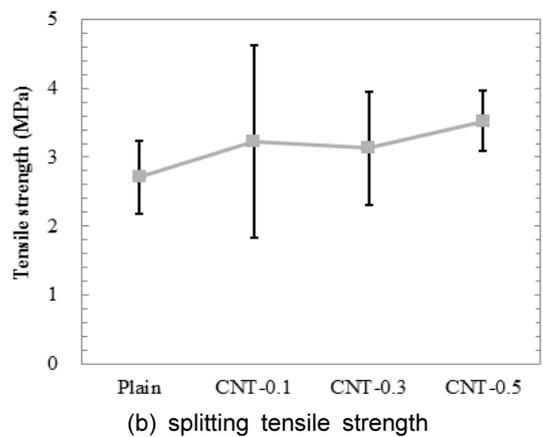
Fig. 5 The Effect of CNT dosage on yield stress and plastic viscosity

3.2 강도특성

CNT 혼입률 변화에 따른 압축강도 및 쪼갬인장강도의 변화는 Fig. 6에 나타난 바와 같다. Fig. 6(a)는 압축강도를 비교하여 나타낸 것으로 CNT 혼입량이 증가함에 따라 강도가 증가하며, 증가경향이 비선형적으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 반면에 Fig. 6(b)는 쪼갬인장강도를 나타낸 것으로 압축강도에서처럼 높은 혼입량에서 더 큰 강도를 나타내지만 압축강도에서만큼 뚜렷한 비선형성은 나타나지 않았다. Fig. 7은 Plain 실험체의 강도와 비교하여 CNT를 혼합했을 때의 강도증가율을 나타낸 것으로, 압축강도는 최대 50%까지 강도가 증가하는 것으로 나타



(a) compressive strength



(b) splitting tensile strength

Fig. 6 Comparison of strengths with different CNT dosages

났으며 인장강도는 최대 약 30%까지 강도증가를 보였다. 이와 같은 결과는 일반적인 섬유보강 콘크리트에서 섬유 혼입에 따른 효과가 압축에서는 미미한 반면 인장에서 훨씬 크게 나타나는 경향과 비교했을 때, 다소 상이한 결과를 나타내는 것이다.

이와 같은 결과가 의미하는 바는 일반 섬유와는 다른 방법으로 CNT 혼입이 압축강도 향상에 기여하는 바가

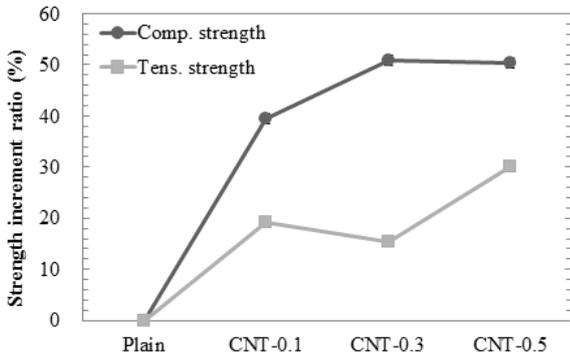


Fig. 7 Strength increment ratios by adding different dosages of CNTs

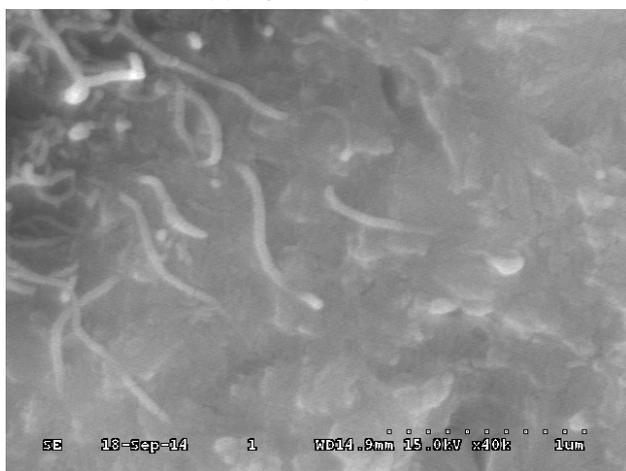
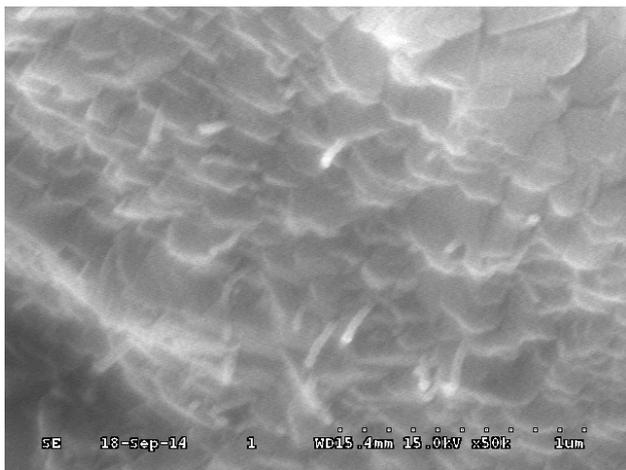


Fig. 8 Crystalline and amorphous hydration products formed around CNTs

있다는 것이다. 실제 Konsta-Gdoutos et al.¹⁸⁾은 CNT 혼입 시멘트 페이스트에 대한 나노 인텐테이션 실험을 통해 CNT 혼입으로 인해 강성이 큰 CSH 겔의 생성비율이 증가한다고 밝힌 바 있다. 또한 단위부피당 비표면적이 매우 큰 CNT는 시멘트 수화물이 생성되는 생성 핵의 역할을 수행하여 수화물의 생성을 촉진하기도 하고,^{22,23)} 나노 크기의 미세한 CNT가 CSH 겔 사이의 미세공극의 채워서 공극률을 감소시키는 역할을 하기도 한다.²⁴⁾ 이와 같은 CNT 혼입 효과로 인해 압축강도가 크게 향상되었다고 판단할 수 있다. Fig. 8은 결정상 및 비결정상 수화물 주변의 CNT의 모습을 보여주는 것으로 CNT 주변으로 큰 공극 없이 결정상 및 비결정상이 잘 형성되어 있음을 볼 수 있다.

한편 인장 측면에서는 살펴보면, CNT의 길이는 마이크로미터 크기를 가지기 때문에 일반적인 섬유가 뽑히면서 균열면에서 가교저항 역할로 균열이후 인장강도를 향상시키는 것을 기대하기는 어렵다. 따라서 미세균열에 대한 균열저항을 통한 균열강도의 향상만을 기대할 수 있으며, 이 같은 관점에서 살펴볼 때 인장에 대한 초기균열발생강도의 향상이 20% 정도라는 것은 결코 작은 값이 아니라고 볼 수 있다. Fig. 9는 미세균열면에서의 CNT가 가교저항 역할로 인장강도 향상에 기여함을 보여주고 있다.

CNT 혼입량이 증가함에 따라 선형적으로 강도가 증가하지 않은 것은 매트릭스 CNT의 분산성이 동일하지 않았기 때문으로 판단된다. 동일한 양의 계면활성제와 동일한 크기의 소니케이션 에너지로부터 동일한 분산성을 얻지 못한 것으로 보인다. 실제 SEM 사진에서 많은 양의 CNT를 혼입한 경우 매트릭스 내 위치별 CNT의 분산성에 차이가 나타남을 확인할 수 있었다. Fig. 10은 CNT를 시멘트 중량 대비 0.3% 혼입한 경우인 CNT-0.3의 실험체로부터 얻은 SEM 사진을 보여주는 것으로, CNT의 분포 밀도가 낮은 경우와 높은 경우가 함께 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 CNT-0.5에서도 동일하게 나타났다.

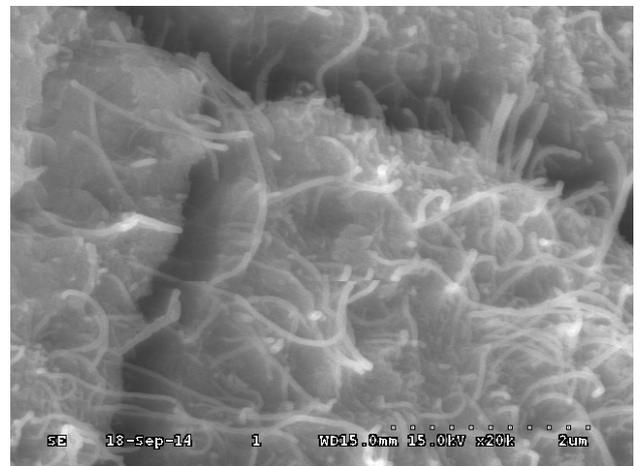
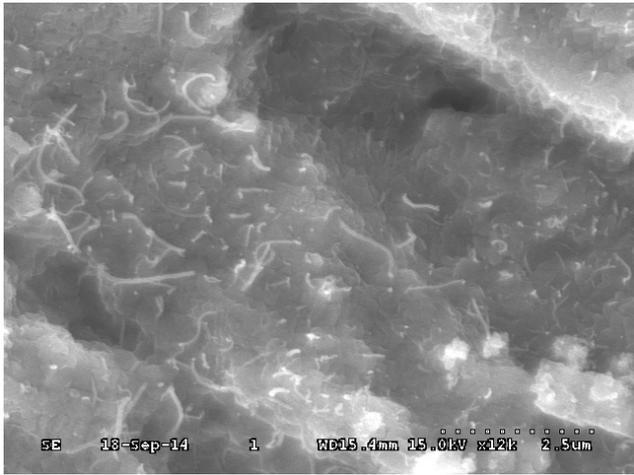
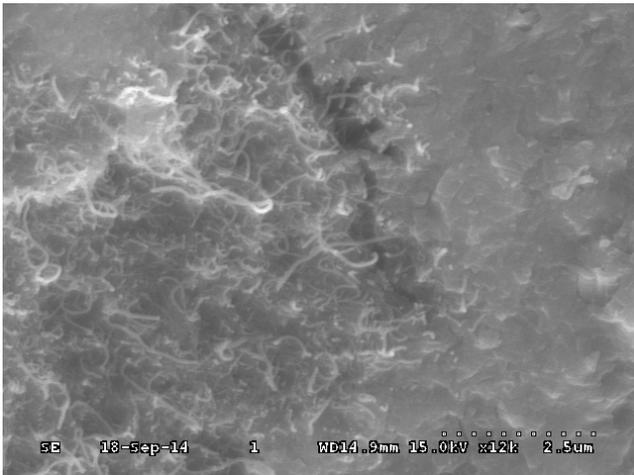


Fig. 9 Bridging resistance of CNTs on a cracked surface



(a) low density distribution of CNTs

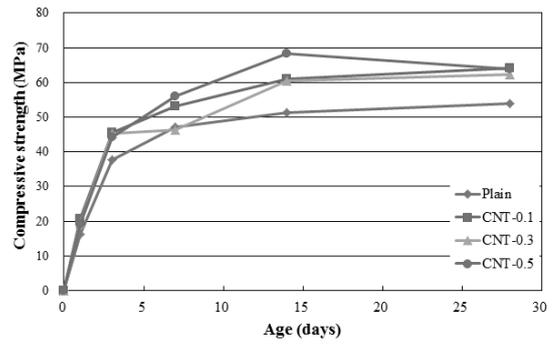


(b) high density distribution of CNTs

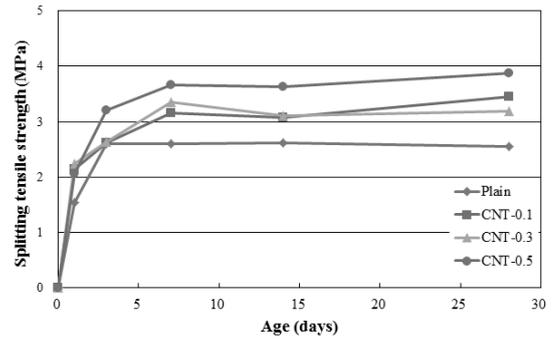
Fig. 10 Two aspects of CNT dispersion detected in CNT-0.3 specimen

한편, Fig. 6에서는 강도의 평균값과 함께 표준편차에 대한 오차막대를 함께 나타내었다. 압축강도의 경우 평균값에 대한 표준편차가 상대적으로 크지 않으며 Plain과 비교했을 때, CNT를 혼입한 경우 전체적으로 표준편차가 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타났지만, 인장강도의 경우를 살펴보면 CNT를 0.1% 혼입한 경우에는 Plain에 비해 표준편차가 현저히 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 CNT의 혼입량이 증가함에 따라 표준편차가 점차적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 섬유 분산성과 관련이 있을 것으로 판단되는데, 즉 적은 양의 CNT를 혼입하였을 때는 상대적으로 각 실험체별 균열면에 존재하는 CNT의 개체수의 차이가 크게 작용하는 반면에 많은 양의 CNT를 혼입한 경우에는 전체적으로 CNT가 많이 존재하여 실험체별 균열면에서의 CNT 개체수의 차이가 상대적으로 작기 때문에 강도값의 편차가 줄어든 것으로 판단된다.

마지막으로 재령에 따른 강도발현 특성을 살펴보았다. Fig. 11은 재령에 따른 압축강도 및 인장강도의 변화를 나타낸 그래프이다. 우선 28일 재령까지 각 재령에서 강



(a) compressive strength



(b) splitting tensile strength

Fig. 11 Strength development of CNT cement composites with age

도를 비교했을 때 CNT 혼입량이 증가할수록 강도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또 한 가지 주목할 만한 결과는 1, 3일 재령의 초기재령에의 강도를 비교했을 때 CNT를 혼입함으로 인해 강도발현 속도가 빨라지는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 앞서 언급한 바와 같이 큰 비표면적의 CNT가 시멘트 수화물이 생성되는 생성 핵의 역할을 하여 수화물의 생성을 촉진하였고, 또 한편으로는 초기재령에서부터 고강성의 CSH 겔 생성비율을 증대시켜 강도가 증가한 것으로 판단된다. 이와 같은 초기재령 강도향상 효과는 기존의 연구결과^{10,18)}와도 잘 일치한다.

4. 결 론

이 연구에서는 CNT 혼입량 변화에 따른 CNT 시멘트 복합체의 유동성 및 강도특성의 변화를 실험을 통해 살펴보았으며, CNT 혼입량은 시멘트 중량 대비 0.1, 0.3 및 0.5%를 고려하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) CNT 혼입량이 증가함에 따라 플로우 값이 점차적으로 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났으며, 레올로지 실험에서는 CNT 혼입량이 증가함에 따라 항복응력은 증가하고 소성점도는 감소하는 것으로 나타났다. CNT 시멘트 복합체의 흐름곡선에서는 CNT 혼입량이 증가할수록 낮은 전단속도에서의 틱소트

로피 현상이 더 뚜렷하게 나타나는 것도 확인할 수 있었다.

- 2) CNT 혼입량이 증가함에 따라 CNT 시멘트 복합체의 압축 및 인장강도가 증가하였으며, 증가경향이 비선형적으로 나타났다. CNT 혼입에 따른 강도 향상은 CNT 혼입으로 인해 강성이 큰 CSH 겔의 생성비율이 증가하고, 단위부피당 비표면적이 매우 큰 CNT가 시멘트 수화물 생성 핵의 역할을 수행하여 수화물의 생성을 촉진하며, 그리고 나노크기의 미세한 CNT가 공극률을 감소시키는 역할을 하기 때문이다. CNT 혼입량이 증가함에 따라 선형적으로 강도가 증가하지 않은 것은 매트릭스 CNT의 분산성이 동일하지 않았기 때문으로 판단된다.
- 3) 28일 재령까지 각 재령에서 강도를 비교했을 때 CNT 혼입량이 증가할수록 강도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 재령 1, 3일의 초기재령에서 강도를 비교했을 때 CNT를 혼입함으로 인해 강도발현 속도가 빨라지는 것도 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2013학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Ijiima, S., "Helical Microtubules of Graphitic Carbon", *Nature*, Vol.354, 1991, pp.56-58.
2. Yun, C. H., and Lee, H. S., "Carbon Nanotube Composite", *Polymer Science and Technology*, Vol.18, No.1, 2007, pp.1-4.
3. Koo, B. K., Jung, K. S., and Kim, T. B., "Evaluation of Effective Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.4, No.2, 1992, pp.103-110.
4. Park, C. K., Noh, M. H., and Park, T. H., "Flexural and Workable Properties of High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.17, No.4, 2005, pp.543-550.
5. Kang, S. T., Kim, Y. Y., Lee, B. Y., and Kim, J. K., "Fiber Orientation Impacts on the Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.20, No.6, 2008, pp.731-739.
6. Campillo, I., Dolado, J. S., and Porro, A., "High Performance Nanostructured Materials for Construction", *Proceedings of the First International Symposium on Nanotechnology and Construction*, The Royal Society of Chemistry, Paisley, Scotland, 23-25, June, 2003, pp.215-226.
7. Li, G. Y., Wang, P. M., and Zhao, X., "Mechanical Behavior and Microstructures of Cement Composites Incorporating Surface-Treated Multi-Walled Carbon Nanotubes", *Carbon*, Vol.43, No.6, 2005, pp.1239-1245.
8. Brenner, M., Kavi, A. M., and Li, G. Y., *Carbon nanotube fiber reinforced cement and concrete*, United States Patent Application 20080134942.
9. Chan, L. Y., and Andrawes, B., "Finite Element Analysis of Carbon Nanotube/Cement Composite with Degraded Bond Strength", *Computational Materials Science*, Vol.47, No.4, 2010, pp.994-1004.
10. 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, 2010, pp.1052-1059.
11. Zhi, G., and Gao, Z., "Applications of Nanotechnology and Nanomaterials in Construction", *Proceedings of the 1st International Conference on Construction on Developing Countries (ICCIDC-1 '08)*, Advancing and Integrating Construction Education, Research & Practice, Pakistan, Iran, 2008.
12. 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.
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.
14. Ferro, G., Tulliani, J., and Musso, S., "Carbon Nanotubes Cement Composites", *Proceedings of Cassino(FR)*, Italia, 13-15, June, 2011, pp.49-59.
15. Luo, J., Duan, Z., and Li, H., "The Influence of Surfactant 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.
16. Makar, J. M., Margeson, J., and Luh, J., "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, 2005, pp.1-10.
17. Ipperico, M., Ferro, G., Musso, S., Tulliani, J. M., and Tagliaferro A., "Calcestruzzo Autocompattante Nanorinforzato (CNTSCC): Proprietà Meccaniche e Potenzialità", *A. Atti del 20° Convegno Nazionale del Gruppo Italiano Frattura (IGF)*, Torino, Italy, 2009, pp.103-112.
18. Konsta-Gdoutos, M.S., Metaxa, Z.S., and Shah, S.P., "Multi-Scale Mechanical and Fracture Characteristics and Early-age Strain Capacity of High Performance Carbon Nanotube/Cement Nanocomposites", *Cement and Concrete Composites*, Vol.32, No.2, 2010, pp.110-115.
19. 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.
20. Khayat, K.H., Saric-Coric, M., and Liotta, F., "Influence of Thixotropy on Stability Characteristics of Cement Grout and

- Concrete”, *ACI Materials Journal*, Vol.99, No.3, 2002, pp.234-241.
21. Ferraris, C.F., Obla, K.H., and Hill, R., “The Influence of Mineral Admixtures on The Rheology of Cement Paste and Concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol.13, No.2, 2001, pp.245-255.
 22. Maker, J.M., and Chan, G.W., “Growth of Cement Hydration Products on Single-Walled Carbon Nanotubes”, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.92, No.6, 2009, pp.1303-1310.
 23. Li, H., Xiao, H.-G., Yuan, J., and Ou, J., “Microstructure of Cement Mortar with Nano-Particles”, *Composites Part B: Engineering*, Vol.35, 2004, pp.185-189.
 24. 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, 2005, pp.1239-1245.

요 약 이 연구에서는 다중벽 탄소나노튜브(Multi-walled CNT) 혼입량을 Binder 중량 대비 0.1, 0.3, 0.5%로 다르게 하여 CNT 혼입량에 따른 CNT 보강 시멘트 복합체의 굳지 않은 상태에서의 유동특성, 강도 및 강도발현 특성 등을 살펴보았다. 유동특성에 대한 실험결과, CNT 혼입량이 증가함에 따라 굳기 전 상태의 작업성이 저하되는 것으로 나타났으며, 레올로지 실험에서는 CNT 혼입량 증가에 따라 소성점도의 감소와 항복응력의 증가를 확인할 수 있었다. 또한 레올로지 실험에서 얻은 흐름곡선에서는 낮은 전단속도에서의 톱소트로피 현상이 높은 CNT 혼입량에서 더욱 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있었다. CNT 혼입량 증가에 따른 강도특성 실험결과에서는 압축강도 및 인장강도 모두 CNT 혼입량이 증가함에 따라 향상되는 것으로 나타났으며, 압축강도에 대한 CNT 보강에 따른 강도향상 효과가 인장강도에 비해 더 크게 나타났다. 한편 재령별 강도 측정 결과에 따르면 CNT 혼입이 초기강도 발현에도 효과적인 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 탄소나노튜브, 유동성, 레올로지, 압축강도, 인장강도