

셀룰로오스 나노크리스탈 (CNC)을 활용한 NT/BT 융복합형 시멘트복합체 및 저수축 고인성 콘크리트 개발 최종보고서

2019. 02 . 28 .

2019

주관연구기관 / 금오공과대학교
위탁연구기관 / 한국건설생활환경시험연구원

저수축 고인성 콘크리트 개발 최종보고서
NT / BT 융복합형 시멘트복합체 및
셀룰로오스 나노크리스탈(CNC)을 활용한

국 토 교 통 과 학 기 술 진 흥 원
국 토 교 통 부

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

'셀룰로오스 나노크리스탈(CNC)을 활용한 NT/BT 융복합형 시멘트 복합체 및 저수축 고인성 콘크리트 개발'(연구개발 기간 : 2017. 6. 30 ~ 2019. 2. 28) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

주관연구기관명 : 금오공과대학교 산학협력단

(대표자) 정연구 (인)

위탁연구기관명 : 한국건설생활환경시험연구원

(대표자) 윤갑석 (인)

주관연구기관책임자: 김 우 석

위탁연구기관책임자: 강 용 학

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C133 534-02	해당 단계 연구 기간	2017.06.30. - 2019.02.28.	단계구분	2단계 / 총 2단계
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	셀룰로오스 나노크리스탈(CNC)을 활용한 NT/BT 융복합형 시멘트 복합체 및 저수축 고인성 콘크리트 개발			
연구책임자	김 우 석	해당단계 참여연구원 수	총: 8 명 내부: 6 명 외부: 2 명	해당단계 연구비	정부: 220,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 220,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 12 명 내부: 9 명 외부: 3 명	총 연구비	정부: 370,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 220,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	금오공과대학교 건축학부			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명: 한국건설생활환경시험연구원 (KCL)			연구책임자: 강용학	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반
-------------------------	----

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)	보고서 면수
---	--------

〈 국문 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	CNC를 활용한 NT/BT 융복합형 시멘트 복합체 및 저수축 고인성 콘크리트 개발 [핵심기술 1] CNC 적용 시멘트 복합체 기술 개발 • CNC 물리적 특성 평가 기법(안) 도출 - 탄성계수 측정을 위한 평가 기법 도출(이론적 계산, XRD 등) • CNC의 시멘트 복합체 내 분산 기법 개발 - 시멘트 복합체 내 CNC 분산성 확보를 위한 기법(계면활성제, 초음파 등) 개발 • CNC 적용 콘크리트를 위한 CNC 소재분석 - CNC 성능, 메커니즘, 경제성 등의 다양한 CNC 특성 분석 • CNC 적용 시멘트 복합체 최적 배합 도출 - 단열재, 콘크리트 패널 등 콘크리트 2차 제품 적용을 위한 최적 배합 도출 [핵심기술 2] CNC 활용 저수축 고인성 콘크리트 기술 개발 • CNC 활용 시멘트 복합체 적용 기술 도출 - 시멘트 복합체의 기초 물성(작업성, 압축강도, 휨강도, 인장강도 등) 평가 - 시멘트 복합체의 미세구조(SEM) 분석 • 시멘트 복합체 성능 향상을 위한 첨가제 기술 개발 - 저수축 고인성 콘크리트 개발을 위한 무기 첨가제 기술 개발 • CNC 특성 극대화를 위한 저수축 고인성 콘크리트 제조 기술 개발 - CNC 활용 콘크리트 제조 저수축 고인성 콘크리트 개발 - 단열재, 콘크리트 패널 등 콘크리트 2차 제품 적용 기술 개발 • CNC 활용 시멘트 복합체 장기내구성 평가 - 체적변화, 중성화, 염해저항성, 화학저항성 등				
연구개발성과	• CNC 물리적 특성 평가 기법(안) • 시멘트 복합체 내 CNC의 최적 분산 기법 • CNC 적용 시멘트 복합체의 물리적 특성 ⇒ 시멘트 복합체 수축률 25% 저감, 휨 및 인장성능 50% 향상 (Plain 대비) • CNC 활용 시멘트 복합체의 현장 적용성 평가 • CNC 활용 저수축 고인성 콘크리트 제조 기술				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	[활용계획] • 석유기반 고분자계 소재(파이버, 혼화제 등) 대체를 통한 생체친화형 콘크리트 2차 제품 제조 (단열재, 콘크리트 패널 등) • 일반 구조물용 콘크리트 재료 활용 (교량, 터널, 건축물 등) [기대효과] • 목질계 바이오매스로부터 추출된 CNC의 활용 다각화 • NT/BT 활용 원천기술 확보를 통한 해외기술 시장 선점 • 섬유기반 고분자계 혼화제 대체 생체친화형 소재 활용을 통한 친환경성 확보				
핵심어 (5개 이내)	셀룰로오스 나노크리스탈	NT/BT 융합기술	신소재	저수축 고인성 콘크리트	생체친화형 콘크리트

＜ SUMMARY ＞

Purpose & Contents	Development of NT / BT Convergence-type Cement Composite and Low-shrinkage High-ductile Concrete Using Cellulose Nanocrystal (CNC) [Core technology 1] Development of Cement Composite Technology applied CNC • Derivation of CNC physical property evaluation technique – Derivation of evaluation technique for elastic modulus measurement (theoretical calculation and XRD, etc.) • Development of dispersion technique in cement composites of CNC – Development of techniques (surface active agent and ultrasonic waves, etc.) for securing CNC dispersibility in cement composites • Analysis of CNC for concrete applied CNC – Analysis about properties of CNC such as performance, mechanism and economics • Derivation of optimum mix design applied CNC – Derivation of optimum mix design for application of concrete secondary product such as insulation and concrete panel etc. [Core technology 2] Development of Low-shrinkage High-ductile Concrete Technology using CNC • Development of cement composite application technology using CNC – Evaluation of basic properties (workability, compressive strength, flexural strength, and tensile strength, etc.) of cement composites – Microstructure (SEM) analysis of cement composites • Development of additive technology for performance improvement of cement composites – Development of inorganic additive technology for low-shrinkage, high-ductile concrete development • Development of low-shrinkage high-ductile concrete manufacturing technology for maximizing CNC characteristics – Manufacture of low-shrinkage high-ductile concrete using CNC – Development of application technology of concrete secondary product such as insulation and concrete panel etc. • Evaluation of long-term durability of cement composites using CNC – Volume change, neutralization, salt damage resistance, and chemical resistance, etc.				
	Results • CNC physical characteristic evaluation technique • Optimum dispersion technique of CNC in cement composites • Physical properties of binder applied CNC ⇒ Shrinkage reduction up to 25% & Flexure and tensile performance improvement up to 50% (compared with plain) • Evaluation of field application of cement composites using CNC • Manufacturing technology of lightweight high-strength concrete using CNC				
Expected Contribution	[Application plan] • Manufacture of bio-friendly concrete secondary products (insulation and concrete panels, etc.) by replacing petroleum-based polymer materials (fiber and chemical admixture, etc.) • Utilization of concrete materials for general structures (bridges, tunnels and buildings, etc.) [Expected effect] • Generating high value added CNC extracted from paper mill sludge as industrial waste • Overseas technology market preoccupation by securing source technology utilizing NT / BT • Acquisition of environmental Performance by utilizing bio-friendly materials				
Keywords	Cellulose Nanocrystal (CNC)	NT/BT convergence technology	Advanced materials	Low shrinkage high-ductile concrete	Bio-friendly concrete

< Table of Contents >

1. Introduction of Research and Development Project	
2. Current Trend of Technology in Korea and Other Countires	
3. Research Performances and Achievements	
4. Accomplishment of Objectives and Contribution to Related Field	
5. Application of Research Results and Performance	
6. Collection of International Science and Technology Information	
7. Disclosure Agreement about Research and Development	
8. Registration of Research Facilities and Equipment to national science and technology information system	
9. Research Laboratory and Facilities Safety Procedures	
10. Representative Research Achievement and Performance	
11. Other Information	
12. References	

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술개발 현황	4
3. 연구수행내용 및 성과	10
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	89
5. 연구개발성과의 활용 계획	94
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	95
7. 연구개발성과의 보안등급	98
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	98
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	98
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	100
11. 기타 사항	103
12. 참고 문헌	103

제1장. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목적

(1) 최종목표 및 최종성과물

셀룰로오스 나노크리스탈(CNC)을 활용한 NT/BT 융복합형 저수축 고인성 콘크리트 개발

[기술 정의] 본 개발 기술은 제지를 생산하는 단계에서 발생하는 목질계 바이오매스로부터 추출된 셀룰로오스 나노크리스탈을 활용한 NT 기술과 BT 기술을 융복합화한 시멘트 복합체와 저수축 고인성 콘크리트를 개발하는 기술임.

: 나노셀룰로오스는 높은 인장강도를 갖는 재생 가능한 유기고분자 재료로써 이 특성 극대화하기 위해 나노기술 및 친환경적 특성을 이용한 바이오기술을 접목시켜 융복합형 친환경 고성능 콘크리트를 개발하고자 함.

(가) 연구개발 최종 목표

- ① 본 연구는 목질계 바이오매스로부터 추출된 셀룰로오스 나노크리스탈(CNC)을 활용한 NT 기술과 BT 기술이 융복합된 시멘트 복합체와 저수축 고인성 콘크리트를 개발하는 것을 목표로 하는 원천기술임
- ② 콘크리트 수축 저감률 20%, 휨 및 인장강도 50% 향상 (Plain 대비)을 정량적 목표로 설정함

(나) 연구개발 최종성과물

- ① 본 연구의 최종성과물은 천연고분자인 셀룰로오스 나노크리스탈(CNC)을 활용한 NT/BT 융복합형 시멘트 복합체와 이를 활용한 저수축 고인성 콘크리트임

(2) 설정근거

(가) 본 연구는 셀룰로오스 나노크리스탈(CNC)을 건설재료에 활용하기 위한 기술 개발로 실험실 단계에서 시멘트 복합체 및 저수축 고인성 콘크리트를 개발함으로써, 실제 콘크리트 제품 적용을 위한 실험실 수준에서 그 성능을 증명하는 단계임

- ① 국내외의 건설분야 기술 수준은 TRL 1~2단계 정도로 판단되며, 나노 셀룰로오스 중 CNC를 활용한 기술은 극히 일부에 한정되어 있는 실정임
- ② 타 분야에서의 적용 실적 분석과 기존 나노 소재의 콘크리트 적용 기술을 접목함으로써 본 연구에서 설정한 목표성능을 충분히 증명할 수 있을 것이라 판단됨

나. 연구개발의 필요성

- (1) 우리나라는 세계 일류 나노산업 강국 실현을 목표로 나노기술 경쟁력을 확보하고 나노기술 산업화를 촉진시키기 위하여 2016년도 나노기술발전 시행계획(안)을 수립하고 다음과 같은 목표를 설정하였으나, 건설분야에서 나노 기술을 적용한 원천기술 개발 움직임은 CNT를 제외하고 거의 전무한 실정임

(가) 미국 대비 나노기술 수준 : 81%('15) → 92%('25)

(나) 나노기술 핵심연구 인력 수 : 8,548명('14) → 12,000명 ('25)

(다) 전체 산업(100%) 대비 나노융합제품 매출 비중 : 4%('13) → 12%('25)

(라) 나노 융합 기업 : 541개('13) → 1,000개('25)

(2) 최근 목재의 주성분 중 하나인 셀룰로오스와 같은 유기물을 이용한 강화재료로써 나노 셀룰로오스가 주목을 받고 있음

(가) 목질계 바이오매스로부터 얻어지는 나노 셀룰로오스는 자연에서 얻을 수 있는 고분자 나노 물질로 우수한 기계적 강도(인장강도가 강철이나 케블라와 비슷한 100~160GPa), 저밀도 (0.8~1.5g/cm³), 넓은 비표면적, 생분해성 등이 특징인 바이오 기반 소재임

⇒ 나노 셀룰로오스 : 셀룰로오스 나노파이버(CNF), 셀룰로오스 나노크리스탈(CNC)가 대표적임

(3) 국내에서는 2016년 국립산림과학원이 '제3차 나노 셀룰로오스 조인트 심포지움'을 개최하고, 나노 셀룰로오스 대량 생산 파일럿 제조 설비 구축과 국산재를 이용한 나노 셀룰로오스 제조 등 향후 5년간 나노 셀룰로오스를 이용한 기초 및 응용 연구사업을 추진할 계획임

(가) 적용분야 : 에너지 소재 적용, 의공학 소재 적용 등

⇒ 건설과 관련된 응용 분야에 대한 검토는 없었으나, 향후 건설소재로의 활용 기술 검토가 필요

(4) 국외에서는 목질계 바이오매스로부터 추출된 나노 셀룰로오스에 대하여 CNT, 그래핀에 이어 고성능·친환경의 차세대 신소재로써 주목을 받고 있으며, 상용화를 위해 선진 각국의 정부에서는 민간과 협력하여 응용 제품 개발에 집중하고 있음

(가) 독일, 스웨덴의 경우 국제적 협업 연구를 통해 셀룰로오스 나노 미세섬유 조직을 이용해서 경량 초고강도 셀룰로오스 섬유를 개발함

(나) 일본의 나노셀룰로오스 관련 시장은 2016년에 1.4억엔 2020년에 12억엔, 2030년에 연간 1조엔까지 확대하는 것을 목표로 삼고 있음

⇒ 178개 기업, 대학, 연구소 등이 모여 '나노 셀룰로오스 포럼'을 조직하고 산업화에 대한 검토가 진행 중

(다) 미국 및 유럽 등을 중심으로 셀룰로오스 나노크리스탈(CNC)을 건설 재료화하기 위한 원천 기술을 개발하기 위해 건축내외장재 및 단열재 등으로의 활용 가능성을 검토하고 있는 실정임

⇒ 미국 : 나노 셀룰로오스를 활용한 압전성, 광자성, 자가 조립성 등의 특성 부여 기술개발

⇒ 유럽 : 유해 물질이 발생하지 않는 건축물 내부 단열재료 제조 기술 발

(5) 최근 국·내외 적으로 나노 사이즈의 원소재를 이용하여 강화 복합 소재(나노 복합 소재)를 만들려는 노력이 이루어지고 있으며, 세계적으로 나노 소재 관련 시장은 폭발적으로 성장하고 있음

(가) 국내 나노분야 매출은 2013년 기준 282억 달러 수준으로 미국, 일본, 독일에 이어 세계 4 위 수준으로 도약했다고 평가됨

⇒ 지속적인 성장을 위해서는 나노 소재 관련 원천기술의 확보가 필요함

(6) 본 연구는 석유기반 고분자계 건설 소재를 대체하여 생체친화적인 셀룰로오스 나노크리스탈 (CNC)을 활용한 자기 수축이 적고 고인성이 발현되는 건설재료를 개발하기 위한 NT/BT 융 복합형 신소재 적용 원천 요소 기술임

(가) CNC는 높은 기계적 성질과 열적 안정성 등이 뛰어난 신소재로 이를 활용함으로써 콘크리트의 기계적 성질과 친환경성을 높일 수 있는 기술임

(나) 기존 건설 재료기술에 NT 기술과 BT 기술을 융복합할 수 있는 중요한 요소 기술임

- 2016년도 바이오·화학 분야 특허미래기술 TOP 20 -		
특허미래기술	기술설명	부상도
1. 바이오마커	단백질이나 DNA, RNA(리보핵산), 대사 물질 등을 이용해 몸 안의 변화를 알아낼 수 있는 지표.	44.53%
2. 폴리디메틸실록산(PDMS)	실리콘의 한 종류. 액체와 증기에 침투성이 있고 유연해 인공아가미나 인공심장밸브 등에 이용.	35.16%
3. 약물전달 캐리어	약물 방출 속도를 조절하거나 약물을 목표 부위에 전달하기 위한 표를 물질.	35.62%
⋮	⋮	⋮
17. 나노셀룰로오스 셀룰로오스를 나노 수준으로 분해한 고분자 물질로, 높은 강도와 열 안정성을 가진다. 70.54%		
18. 암 면역요법	면역 능력을 높여서 암에 대한 숙주 저항성을 높이는 치료법.	41.37%
19. 나노코팅	미세한 나노 입자를 코팅해 방수 등 효과를 얻는 기법.	46.99%
20. 크리스퍼(CRISPR) 가위	유전자의 특정 부위를 절단해 유전체 교정을 가능하게 하는 리보핵산(RNA) 기반 인공 제한효소.	92.20%

그림 1 바이오·화학 분야 특허미래기술 TOP 20

다. 연구개발 범위

(1) 연구 범위 및 연구수행방법

연구 범위	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
선행연구 사례조사	- CNC 제조 프로세스 조사 - CNC 적용 산업분야 및 제품 조사 및 분석 - 건설재료로의 적용 연구 현황 조사 및 분석 - 기존 나노 기술과의 차이점 도출	- 셀룰로오스 관련 기존 문헌 조사 (CNC, CNF 등 나노재료관련) - 나노재료관련 실험 장비 및 방법 조사 (AFM, XRD, 라만분광법 등) - CNC의 추출 메커니즘 및 제조과정 등을 조사 - CNC가 시멘트내 작용에 관한 실험 및 문헌조사
CNC의 성분 분석	- CNC 형태 분석 - CNC 성분 분석	- TEM, SEM 분석을 통하여 CNC의 형태(분산전, 후) 및 성분 분석을 진행
CNC의 물리적 특성 평가 기법(안)도출	- CNC 탄성계수 평가 기법(안)도출	- AFM, XRD, 라만분광법을 이용한 CNC 탄성계수 측정 및 평가의 경우 관련 장비 현황파악이 안되어 측정이 힘든 상황 → (CNC를 혼입한 시멘트 복합체의 강도 특성을 통해 CNC 혼입 기술을 개발함)
시멘트 복합체 내 CNC 분산기법 개발	- 시멘트 복합체 내 분산성 확보 기술	- 초음파 분산기(Ultrasonication processor), 자력교반기(Magnetic stirrer), 계면활성제(Surfactant)를 이용한 분산기법 개발

제2장. 국내외 기술개발 현황

가. 연구개발 대상의 국내 현황

(1) 국내현황

- (가) 셀룰로오스 나노크리스탈에 관한 국내 연구는 포장재료, 생체의학, 접착제, 전자-전기재료 등에 관한 기술연구는 활발하나 건설 관련 기술은 미흡하며, 콘크리트에 관련한 기술은 전무함
- (나) 국내에서는 기존의 범용 플라스틱의 사용량 증가에 따라 폐(廢)플라스틱의 처리에 따른 환경문제가 지속적으로 야기되어 관련 연구가 증가하고 있으며, 기존의 플라스틱을 대체하기 위한 방법으로 고기능성 생분해성 고분자에 대한 연구개발이 점차 증가하고 있는 실정임
- (다) 국립산림과학원 기능소재연구실에서는 목분, 폴리프로필렌(PP) 및 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 수지 이외에 황토와 나노클레이를 이용하여 제조된 복합재 연구가 진행 중인데, 제조된 복합재의 열적, 기계적 및 기능적인 성질을 연구함

(2) 국내정책동향

- (가) 2011년 교육과학기술부에서 재단법인 차세대 바이오매스 연구단 개소식을 개최함
- (나) 세계적인 원천기술 및 연구그룹 확보를 통한 국가기술력 제고 및 먹거리 창출을 위해 추진한 사업으로 10~21년간 15개 연구단(9년, 약 100~150억원/연)지원 예정이며 연구단은 9년간 3단계에 걸쳐 진행될 예정임
 - ⇒ 1단계 환경친화형 고성능 바이오매스 개발을 위한 핵심기반기술을 개발
 - ⇒ 2단계 바이오매스 소재(목질계 및 미세조류)의 형질전환체 등 제작
 - ⇒ 3단계 차세대 바이오매스 생산 전환 공정의 최적화 실용화기술을 개발
- (다) 2012년 “나노융합 확산전략”을 발표하고 2020년까지 총 9,300억원 규모의 투자를 통해 세계 수준의 나노강소기업 20개를 육성함과 동시에 나노융합산업 매출 2,500억달러 달성 과 일자리 5만개 창출을 위한 전략을 수립하였으며, 나노관련기업은 2005년 214개에서 2011년 690개로 대폭 증가함

(3) 국내 연구개발 현황

- (가) 본 연구와 직접적으로 관련된 국내 연구는 전무한 것으로 확인됨
- (나) 여러 분야에 걸쳐 나노셀룰로오스를 사용한 나노 복합체, 신소재 개발에 초점을 맞추고 연구가 진행 중임
- (다) 나노셀룰로오스에는 대표적으로 나노 피브릴, 나노크리스탈이 있는데, 국내의 연구는 나노 피브릴에 관련된 연구가 대부분으로 이루고 있으며, 원료에 따라 성능의 차이가 있는 나노 셀룰로오스의 특성상 다양한 원료에 대한 나노셀룰로오스의 제조 및 특성을 분석하는 연구가 다양하게 진행 중임
- (라) 나노크리스탈을 활용한 연구는 의료, 화학공학 등의 나노소재의 활용이 필요한 분야에 진행되는 연구가 대부분임

표 2-1 국내 R&D 현황

부처명	사업명	과제명	연구기간	예산(천원)
교육부	이공학개인 기초연구지원	폐지의 고부가가치 자원화를 위한 나노셀룰로오스의 제조 및 특성화	16.11.01~ 19.10.31	146,580
교육부	이공학개인 기초연구지원	소다셀룰로오스 기반 셀룰로오스 나노피브릴 제조 및 특성에 관한 연구	16.11.01~ 18.10.31	100,000
미래창조과학부	중견연구자지원	Nano 재료 기반 콘크리트 성능향상 및 기능화 연구	14.05.01~ 17.04.30	303,000
미래창조과학부	개인연구지원	나노 및 바이오 기술융합 고성능·기능성 차세대 건설재료 개발	15.11.01~ 18.10.31	864,000

(4) 국내 논문 현황

- (가) 나노셀룰로오스를 시멘트 복합체에 적용한 연구가 주를 이루고 있으며, 사용한 나노셀룰로오스는 나노 피브릴을 사용한 연구만 진행됨
- (나) 직접 건설분야에 적용한 논문은 거의 없으며, 산업 전반에 걸쳐 나노셀룰로오스의 활용방안과 동향, 제조 특성에 관한 연구가 대부분으로, 국내에서 나노셀룰로오스를 건설에 적용하는 연구는 기초단계임

표 2-2 국내 논문 현황

논문제목	저자	논문개요 및 상세
나노셀룰로오스가 시멘트복합체의 역학적 특성 및 자기수축 특성에 미치는 영향	김선우 외1명	[개요] 나노셀룰로오스가 함유된 시멘트복합체의 압축강도를 기존 시멘트복합체와 비교 ○ 인장강도와 휨강도가 기존 시멘트복합체에 개선. ⇒ 각 49.7%, 38.8% ○ 나노셀룰로오스가 혼합된 시멘트복합체의 자기수축률은 타설 후 1일 경과시 18.9%, 28일 경과시 5.9%의 저감효과.
콘크리트 내 셀룰로오스 칩 화이버분산 특성에 관한 실험적 연구	박종진 외 4명	[개요] 셀룰로오스 칩 화이버 혼입 콘크리트의 실용화를 위한 기초적 실험연구 ○ 분산과 믹싱시간 감소가 주요 목표. 이를 위해 칩 화이버를 슬러리 상태로 만들어 실시. 충분한 분산성능 확보.     <Chip type> <Slurry type> < 분산 성상> ○ 현격한 블리딩 감소., 우수한 표면처리 성능. ○ 7일 압축강도 측정시 일반모르타르에 비해 약간 감소, 휨강도의 경우 약간 증가.

Nanocellulose를 이용한 나노복합체의 최근 연구 동향	조미정 외 1명	[개요] 나노셀룰로오스의 원료의 종류, 단리방법과 나노셀룰로오스의 특성분석, 이를 바탕으로 한 나노복합체의 최근 연구동향을 검토. ○ 단리방법은 물리적, 기계적 및 화학적 방법들이 사용되고 있으며 이들 단리방법에 따라 나노셀룰로오스의 특성은 다름. ○ 나노셀룰로오스의 길이와 폭은 사용된 원료 종류와 단리방법에 따라 크게 영향을 받음. ○ 길이는 약 100~300nm 폭은 5~50nm로 다양. ○ 나노셀룰로오스를 대량으로 제조 할 수 있는 연구와 기술개발이 향후에 필요.
국내 주요 수종을 이용한 나노셀룰로오스 제조 및 특성 평가	박찬우 외 5명	[개요] 국내 주요수종을 이용하여 나노셀룰로오스를 제조, 그 특성을 평가. ○ 국내주요 활엽수 3수종(백합나무, 은사시나무, 신갈나무), 침엽수 3수종(소나무, 낙엽송, 잣나무)을 이용하여 디스크밀링 및 산 가수분해 처리하여 나노셀룰로오스(CNF, CNC)를 제조, 제조 효율 및 특성평가

(5) 국내 특허 현황

(가) 본 과제와 연관된 국내 특허는 발견되지 않음

(나) 국내의 나노셀룰로오스 관련 특허는 대부분 셀룰로오스 나노섬유에 치우쳐 있으며, 대부분이 이의 제조방법에 관한 특허

(다) 건축분야에 나노셀룰로오스를 적용한 특허는 없음

표 2-3 국내 특허 현황

특허등록번호	출원인	특허내용
1715085	한국화학연구원	셀룰로오스 분말을 산 용액 내에서 반응시켜 셀룰로오스 나노 결정체를 제조하는 방법
1487478	자동차부품연구원	친환경적이며 산업적 적용확대를 위한 경제성을 확보하고 높은 수율과 생산성을 갖는 새로운 나노 셀룰로오스 섬유의 제조방법 및 제조장치
0856464	박원호	셀룰로오스 아세테이트로부터 셀룰로오스 나노섬유를 제조하는 방법

나. 연구개발 대상의 국외 현황

(1) 북미

(가) 나노기술의 경쟁력 확보를 위하여, 2000년 ‘국가나노기술전략(NNI)’을 수립하고 원천기술 개발지원, 대학 및 연구기관의 연구시설 확장, 나노기술 전문 인력 양성, 기술개발 및 기반구축 뿐 아니라, 학제간 네트워크구축 및 협력 장려, 정보확산 촉진, 나노기술 관련 소기업 창업 등을 지원하는 정책을 실시하고 있으며, 2009년에는 연방정부의 투자액이 15억 3,000만 달러에 이르고 있음

- (나) 퍼듀대학교 연구팀은 셀룰로오스의 원자구조에 기반한 정확한 모델을 사용한 계산으로 셀룰로오스의 나노크리스탈이 철에 견줄만한 강도를 가지고 있음을 발견, 이것을 바탕으로 나노크리스탈이 앞으로 다양한 범위에서 사용되는 바이오재료가 될 것으로 기대하고 있음
- (다) 캐나다 표준국의 CSA Z5100-14에서는 셀룰로오스 나노재료의 특성 실험방법을 규정하고 있으며, CNC, CNF 등의 나노재료의 특성분석 방법을 제공하고 있음

(2) 일본

- (가) 시장지향의 제품개발에 지원의 중심을 두는 나노기술 육성계획과 제3기 과학기술기본계획(2006-2011)을 바탕으로 산업화를 염두에 둔 제품화와 수요지향형 연구 개발에 역점을 두고 있으며, 혁신적 기반기술 연구와 나노기술의 비전 공유 및 산학간/학제간 네트워크 구축 등을 강조하는 정책을 실시하고 있음
- (나) 일본 정부의 나노기술 투자 예산은 2006년 762억엔에서 2010년 1,128억엔으로 연평균 10%씩 증가하고 있음
- (다) 최근 일본에서는 나무 등에서 나노 섬유를 보다 쉽게 추출하는 방법에 대한 연구와 양산 노력이 활발. 이소가이 아키라 도쿄대학 교수는 TEMPO라는 약품을 사용해 목재에서 나노 섬유를 쉽게 추출하는 방법을 발견, 2015년 노벨상을 수상함
- (라) 일본제지는 CNF 양산 성공, 시네마현에 연간 100만톤까지 증산이 가능한 공장 건설하였으며, 2017년 9월부터 가동 예정임
- (마) 2016년 일본재흥전략에서 공격적 농림수산업 전개 및 수출역량 강화를 위해 바이오매스 이용 촉진, CNF 국제 표준화 및 제품화를 위한 연구개발 진행을 명기함
- (바) 2016년 정부예산으로 CNF 국제표준화를 위한 연구개발 지원을 위해 CNF 등 차세대 소재 활용 추진 사업(33억엔) 등 환경성, 경제산업성 등 관련 부처에 약 119억엔 배정함
- (사) 경제산업성은 2014년 '제지산업 장래 전망 및 과제 관련 조사'에서 2030년 CNF 시장 목표 규모를 1조 엔으로 명기함

(3) EU

- (가) 제7차 프레임워크 프로그램(FP7)의 총예산 505억 2,100만 유로 중에서 34억 7,500만 유로를 나노기술부문의 예산으로 책정하였음
- (나) 영국은 2010년에 범부처 차원의 '영국 나노기술전략(UK Nanotechnologies Strategy)'을 발표하고, 나노기술의 경제적 및 사회적 혜택을 극대화하고, 특히 안전하고 책임감 있는 연구개발을 추진함
- (다) 2010년 독일정부의 나노기술 지원규모는 4억 유로로, 이는 미국, 러시아, 일본에 이어 세계 4위 수준이고 독일 연방 교육연구부(BMBF)를 중심으로 7개의 성(省)이 연계하여 'Nano Initiative Action Plan'이 책정되고 있으며, 2011년에 BMBF는 '나노기술 액션플랜 2015'를 발표. 나노기술 관련 논문 실적은 미국, 중국, 일본에 이어 세계 4위임

표 2-4 국가별 중점 나노셀룰로오스

Type	Synonyms/Acronyms	Typical Sources	Preparation and average size
Cellulose nanocrystals (CNC) (Canada, USA)	nanocrystalline cellulose(NCC), crystallites, whiskers, microcrystals	wood, cotton, hemp, flax, ramie, MCC, tunicin, algae, bacteria, etc.	acid hydrolysis or APS oxidation (d=5~70nm, l=100~250nm)
Cellulose nanofibrils (CNFs) (Europe)	nanofibrillated cellulose(NFC), microfibrillated cellulose(MFC), microfibrils	wood, sugar beet, potato tuber, hemp, flax	Delamination of wood pulp by mechanical pressure and/or after chem/enzyme treatment (d=5~60nm, l=several microns)
Microcrystalline cellulose(MCC)	powered cellulose, Avicel	wood	HCl hydrolysis(agggregated polydisperse micron-size chunks)
Bacterial nanocellulose	bacterial cellulose, microbial cellulose, biocellulose	low-Mwt sugars and alcohols	bacterial synthesis (d=20~100nm, nanofiber networks)

*출처. Nanocellulose: Advanced Functional Materials from Nature. Emily D. Cranston

(4) 국외 특허 현황

(가) 국내보다 나노셀룰로오스에 대한 특허가 다수 검색됨

(나) 미국출원특허 15311893, 15211804는 시멘트 조성물에 셀룰로오스 나노크리스탈을 적용하는 방법에 관한 특허임

(다) 본 연구가 최종적으로 목표하는 셀룰로오스 나노크리스탈을 적용한 친환경 고성능 콘크리트의 중간단계 정도로 생각할 수 있으며 혼화제 개념으로 사용되는 것이 특징임

(라) 국외도 건설산업에 셀룰로오스 나노크리스탈을 적용한 경우가 국내보다 많지만 매우 미비한 실정임

표 2-5 국외 특허 현황

특허등록번호	출원인	특허내용
15311893 (출원, US)	Yissum Research Development Company	셀룰로오스 나노크리스탈을 함유한 시멘트질 제조 방법
09464142 (US)	Oded Shoseyov et al.	셀룰로오스를 함유한 폐기물에서 셀룰로오스 나노크리스탈을 생산하기 위해 순수한 셀룰로오스를 추출하는 방법.
15211804 (출원, US)	Purdue Research Fondation et al.	셀룰로오스 나노크리스탈을 포함하는 시멘트 조성물의 제작에 관한 방법
09174873 (US)	Antti Laukkanen et al.	셀룰로오스 마이크로피브릴을 함유한 시멘트 조성물과 그 용도
02914772 (EU)	UPM-Kymmene Corporation	기계적 공정을 통해 나노피브릴라 셀룰로오스를 준비하기 위한 방법
05880827 (JP)	国立研究開発法人産業技 術総合研究所	효소반응 효율이 우수하고 형상비와 결정화도 조절이 쉬운 셀룰로오스 나노섬유의 제조 방법
1141321 (CN)	Guangzhou Inst. of Chemistry, Chinese Academy of Sciences	무기산으로 셀룰로오스 섬유를 가수분해하여 셀룰로오스 나노크리스탈을 얻는 방법

제3장. 연구수행내용 및 성과

가. 연구개발 추진 전략·방법

(1) 연구개발 추진 전략·방법

(가) 기존 국내외 관련 연구의 심층적 분석 및 중복 회피 전략 수립

- ① 기존 국내외의 건설분야를 포함한 광범위적 관련 연구를 대상으로 연계성 분석 및 검토
 - ※ 심층 분석을 통한 원천 기술의 중복 회피 전략 수립
- ② 본 연구 내용을 중심으로 추진체계와 전략을 수립하고 기관별 연구역량 분석
- ③ 타 기술분야와의 연계를 통한 기술교류 추진 및 협업체계 구성 추진
- ④ NT/BT 융복합 건설재료 기술 개발을 통한 시장 선도 및 원천기술 확보 전략 추진
 - ※ 공백 기술에 대한 지적재산권 우선 확보
 - ※ 본 연구에서 설정된 성과의 철저한 검증 및 관리

(나) 해외 건설시장 선도형 NT/BT 융복합형 기술 개발 추진

- ① 해외 건설시장 선도 및 원천기술 확보가 가능한 기술을 중심으로 전략적 추진
- ② 해외 선진 연구기관과의 협력을 통한 관련 기술교류 추진

(다) 국내 우수 연구인프라 활용

- ① 한국건설기술 연구원, 국토교통 인프라 운영원 등 정부출연 연구기관을 비롯한 한국건설 생활환경시험연구원 등 공인시험연구기관이 보유한 시험 연구장비 활용을 적극 추진
- ② 불필요한 장비 도입 및 투자를 피하고 기 구축된 인프라를 적극 활용하는 방향으로 연구 추진

(라) 전문가 확보 및 국내 연구기관과의 협력

- ① 본 연구와 관련된 국내외 전문가를 대상으로 기술교류 및 자문 등을 통하여 네트워크를 구성하고 관련 기술에 대한 정보를 습득
- ② 국내외 학회 활동, 전시회 참가 등을 통하여 산·학·연 교류를 추진하고 여러 분야의 의견을 수렴하여 본 연구 개발의 전략 수립
- ③ 건설관련 학회의 건설재료 관련 분과위원회 및 본 연구와 관련된 협회 등 기관과 협력체계 구축
- ④ 관련 국내 연구기관(대학, 연구소 등)과의 협조체계 구축 및 위탁연구 추진

(마) 국외 전문 기관과의 협력

- ① 해외 선진 연구기관(대학, 연구소 등) 및 전문가와의 협력체계 구축
- ② 향후 국제공동연구 추진과 본 연구의 기술적 완성도를 높이기 위한 본 연구 관련 연구자들의 선진 연구기관 방문 추진 및 관련 국외 전문가 자문을 통한 국제 네트워크 구성

(바) 기술 및 정보 수집·활용

- ① 국제 표준 및 선진 각국 표준을 중심으로 본 연구와 관련된 규정의 비교·분석 실시
- ② 인터넷 등을 통한 관련분야 국내외 최신 연구 동향 수집과 본 연구와 관련된 서적 및 논문 구입 등을 통한 정보 수집
- ③ 기 구성된 국제 네트워크를 활용한 본 연구 관련 기술 정보 및 신규 연구 정보에 대한 자료 입수 추진

(2) 연구개발 핵심성과 및 연구내용

연번	핵심성과물	성과유형	핵심성과 개요
1	CNC 적용 시멘트 복합체	재료·자재	CNC를 적용한 시멘트 복합체 제조 기술로, 시멘트 복합체 제조 시 물리·화학적 방법 등을 통한 시멘트 복합체 내 나 입자의 분산성을 확보하는 기술임
2	CNC 활용 저수축 고인성 콘크리트	재료·자재	CNC를 활용한 건설재료를 개발하기 위한 요소기술로써 콘크리트의 수축저감과 인성 증진을 위한 기술임 콘크리트 수축저감률 20%, 휨 및 인장강도 50% 향상 (Plain 대비)

(가) 핵심성과명 1 : CNC 적용 시멘트 복합체

- ① 나노 입자 분산성 확보를 통한 CNC 적용 시멘트 복합체를 제조하는 기술
 - 물리·화학적 방법 등을 통한 시멘트 복합체 내의 CNC의 분산성을 확보

연 차	주요 연구활동	세부 연구내용
1차 연도	■ 선행연구 사례조사	[CNC 적용방안 도출] • CNC 제조 프로세스 조사 • CNC 적용 산업분야 및 제품조사 및 분석 • 건설재료로의 적용 연구 현황조사 및 분석 • 기존 나노기술과의 차이점 도출
	■ CNC의 성분 분석	[CNC 형태·성분 분석] • CNC 형태 분석 - TEM 분석 • CNC 성분 분석 - XRD, XRF 분석
	■ CNC의 물리적 특성 평가 기법(안) 도출	[CNC 물리적 특성 평가 기법 도출] • CNC 탄성계수 평가 기법(안) 도출 - 이론적 계산식을 통한 평가 기법 - XRD를 이용한 평가 기법 - 라만분광법을 이용한 평가 기법
	■ 시멘트 복합체 내 CNC 분산 기법 개발	[시멘트 복합체 내 CNC 분산 기술 도출] • 시멘트 복합체 내 분산성 확보 기술 - CNC 표면 개질 활용 분산법 - 소니케이션 활용 분산법 - 계면활성제 활용 분산법

연 차	주요 연구활동	세부 연구내용
2차 연도	■ CNC 적용 시멘트 복합체 최적 배합 도출	[CNC 적용 최적배합 도출] • 성능 최적화 배합 도출 - 모르타르 및 콘크리트용 성능 최적화 시멘트 복합체 배합

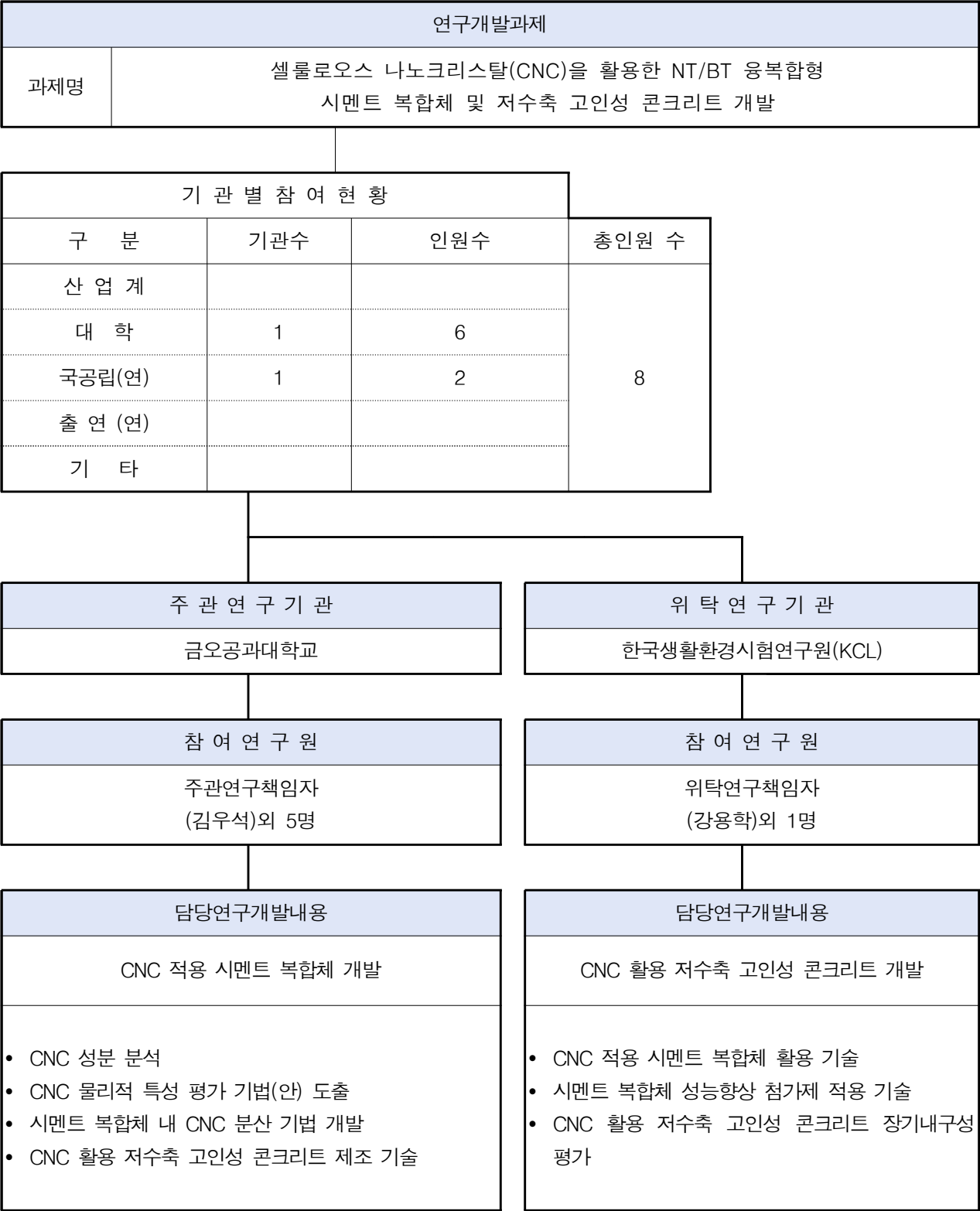
(나) 핵심성과명 2 : CNC 활용 저수축 고인성 콘크리트

- ① CNC 적용 시멘트 복합체 활용 저수축 고인성 콘크리트를 제조하는 요소 기술
- 콘크리트 수축저감률 20%, 휨 및 인장강도 50% 향상 (Plain 대비)

연 차	주요 연구활동	세부 연구내용
1차 연도	■ CNC 적용 시멘트 복합체 활용 기술 도출	[CNC 적용 시멘트 복합체 활용 기술] • 콘크리트 제품용 시멘트 복합체 활용 범위 도출 - 시멘트 복합체 활용 가능 콘크리트 제품 분석 - 콘크리트 제품별 요구성능 도출 • 시멘트 복합체 제조 및 성능 평가 - 응결, 플로우 특성 - 자기수축, 압축강도, 휨강도, 인장강도 특성 • CNC의 시멘트 수화 영향 평가 - 미소수화열 분석
2차 연도	■ 시멘트 복합체 성능 향상을 위한 첨가제 적용기술 개발	[성능 향상용 첨가제 적용 기술] • 저수축, 고인성을 위한 첨가제 기술 개발 - 수축저감제, 팽창제 적용 기술 - CNF, 셀룰로오스 섬유 병용 기술
	■ CNC 특성 극대화를 위한 저수축 고인성 콘크리트 제조 기술 개발	[저수축 고인성 콘크리트 제조 기술] • CNC 시멘트 복합체 활용 저수축 고인성 콘크리트 제조 기술 확립 - 구조부재, 콘크리트 2차 제품용 콘크리트용 배합 도출
	■ CNC 활용 저수축 고인성 콘크리트 장기내구성 평가	[장기내구성 평가] • 저수축 고인성 콘크리트 장기내구성 평가 - 중성화, 내염해성, 동결융해 등

나. 연구개발 추진 체계

(1) 연구수행 체계도

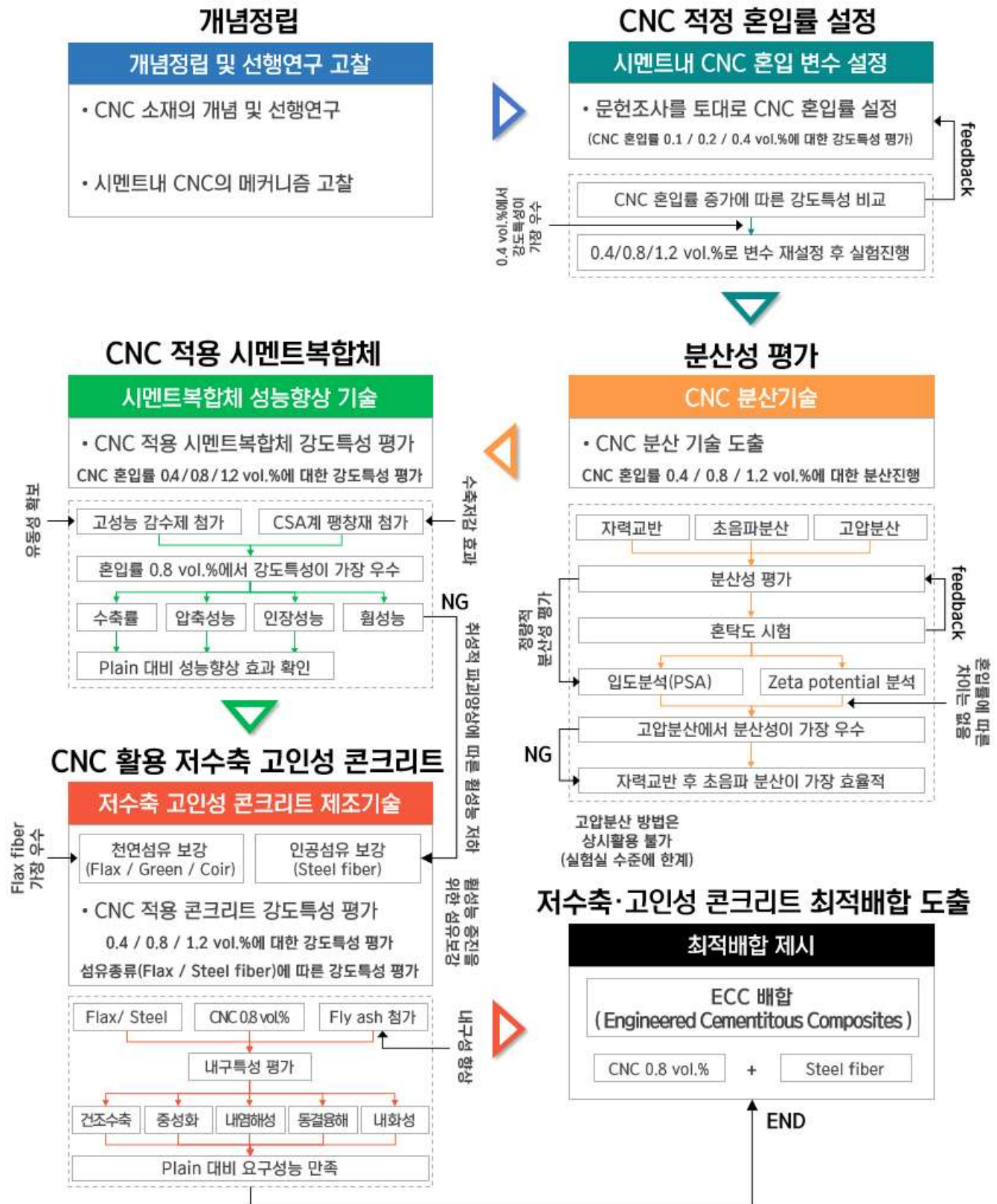


다. 연구개발 추진 일정

구분	연구과제명 (연구 수행기관)	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물	소요 연구비 (백만원)	1차년도				2차년도			
		핵심 성과	단위 성과	질적 성과지표				1/ 4	2/ 4	3/ 4	4/ 4	1/ 4	2/ 4	3/ 4	4/ 4
총괄															
주관 - 위탁	CNC 적용 시멘트 복합체 개발	1	1-1	1-1-①	CNC 관련 문헌 조사	보고서	5	5							
					CNC 형태 분석		10	10							
				1-1-②	CNC 성분 분석	보고서	20	20							
					CNC 탄성계수 평가 기법(안) 도출	논문	15	15							
			1-2	1-2-①	CNC 분산성 평가	보고서	30		30						
			1-3	1-3-①	시멘트 복합체 기초물성 평가	보고서	25				25				
					시멘트 복합체 최적배합 도출	논문 특허	25					25			
			1-4	1-4-①	CNC 소재 특성 분석	보고서	1					10			
	CNC 활용 저수축 고인성 콘크리트 개발	2	2-1		시멘트 복합체 활용범위 도출	보고서 논문	5	5							
				2-1-①	적용분야별 요구성능 도출		5	5							
				2-1-②											
				2-1-③	작업성 분석		30	30							
					미세구조 분석		30		30						
			2-2	2-2-①	성능 향상형 첨가제 적용	보고서 논문	35				35				
				2-2-②											
				2-2-③			CNF, 셀룰로오스 섬유 적용	35				35			
				2-2-④											
			2-3	2-3-①	시멘트 복합체 콘크리트 적용 기술	보고서 논문 특허	25					25			
				2-3-②	주수축 고인성 콘크리트 배합		25					25			
				2-3-③											
					장기내구성 평가		25					25			
			2-4	2-4-①	경제성 평가	보고서	10					10			
계							321	150			220				

라. 연구개발 성과

1. 연구성과 추진 전략



2. 1차년도 연구 성과

(1) 선행연구 사례조사

- 셀룰로오스 나노크리스탈(CNC)은 목질계 바이오매스를 통해 얻을 수 있는 셀룰로오스로부터 추출하여 기계적 공정을 거쳐 생산된 분말 형태의 재료
- 비결정영역(Non-crystalline)을 제외한 결정영역(Crystalline)으로만 이루어져 있으며 직경 5~30 nm, 길이 100~600 nm의 침상(막대) 형태를 나타냄(Fig.1.1,1.2)

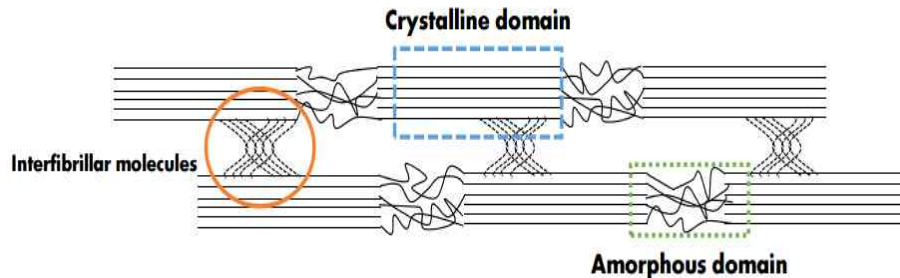


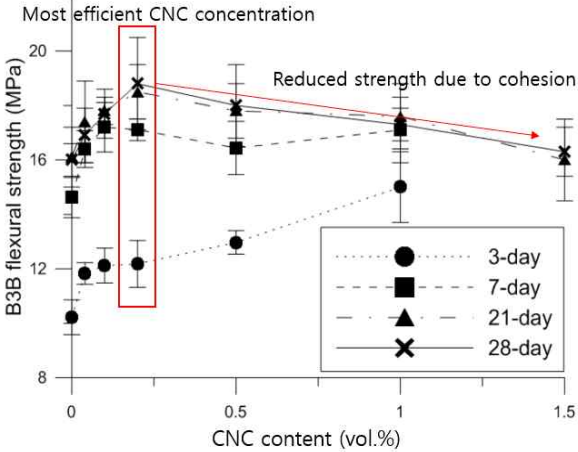
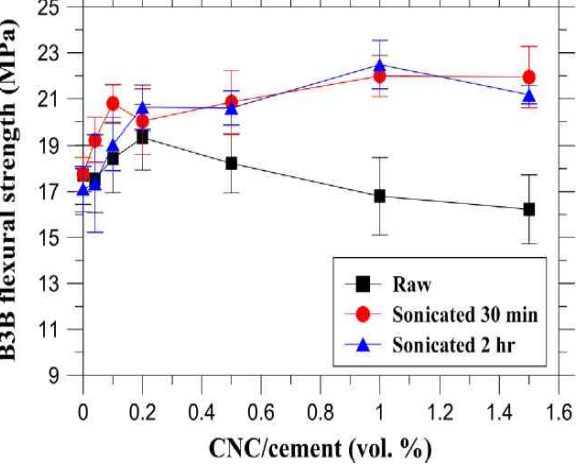
Fig. 1.1 The crystalline and amorphous regions of the cellulose fibers
(adapted from; Kim et al. 2016)



Fig. 1.2 After dispersion CNC type
(adapted from; "C" Company)

- 고 탄성률 및 고강도의 기능화가 가능한 특성을 가지고 있다는 점에서 시멘트의 나노 스케일 보강재로 유망한 재료
- CNC는 그동안 사용된 다양한 무기(inorganic) 나노입자에 비해 생체적합성(biocompatibility), 생분해성(biodegradability)의 특징을 갖고 있음
- 추출 공정 환경이 다른 타 건설재료에 비해 안전에 대한 위험성이 낮으며, 지속 가능성의 이점 이 있음
- 최근 CNC의 우수한 물리적 특성을 이용하여 건설 분야에 적용하려는 연구가 활발히 진행 중
- CNC를 시멘트 분야에 적용한 대표적인 연구를 Table 1.1에 정리하였으며, 대부분 CNC 시멘트 페이스트의 물리적, 화학적 특성을 평가하였음

Table 1.1 Review of existing literature on cellulose nanocrystal (CNC)

Authors	Synopsis
Cao et al. (2015)	 <B3B(ball-three-ball) bending strength according to CNC> - 시멘트 페이스트에 CNC 첨가에 따른 영향을 조사함 - CNC의 혼입률에 따른 강도 특성 평가를 진행하였으며 결과적으로 시멘트 대비 0.2(vol.%)에서 강도가 약 30% 향상되는 결과를 나타냄 - 이러한 CNC의 영향은 시멘트 내 미수화된 영역의 수화를 촉진시켜 강도 발현에 영향이 있는 C-S-H 형성을 증진 시키고 결과적으로 강도가 향상되는 것으로 판단함
Cao et al. (2016a)	- CNC의 수화촉진 메커니즘을 규명하기 위해 수화도 분석에 관한 연구를 진행함 - 유변학적 측정에 의해 CNC 혼입률이 1.35 (vol.%)를 초과한 경우 응집체가 생성됨 - 혼입률 증가에 따른 누적열량이 비례적인 경향을 나타내며 초기 발열속도는 혼입률이 높은 시험체에서의 반응이 상대적으로 늦게 나타남 - 이러한 결과는 시멘트 입자에 부착된 CNC가 시멘트와 물 사이의 반응 표면적을 감소시키는 것으로 판단 하였음
Cao et al. (2016b)	 <28 days B3B flexural strengths for the cement pastes with raw and sonicated CNC> - CNC의 분산에 관한 연구를 진행하였으며, 초음파를 이용한 CNC 응집체를 분산한 경우 시멘트 페이스트의 강도를 최대 50% 향상시키는 결과를 나타냄 - 이러한 결과는 이전연구에서 raw CNC 강도 향상률(20~30%)보다 높은 결과를 나타냈으며, 이를통해 CNC의 분산이 시멘트 페이스트의 강도 개선에 핵심임을 나타냄

Mazlan et al. (2016)	- CNC는 고성능 나노복합체를 제조하기 위해 복합재료의 보강재로 사용될 수 있다고 나타냄 - 시멘트 모르타르 매트릭스에 CNC를 첨가하면 시멘트 매트릭스의 작업성 및 밀도를 변화시키지 않고 콘크리트와 유사하게 모르타르 구조물의 강도를 향상시킬 수 있다고 판단함
Fu et al. (2017)	- CNC가 시멘트 복합체의 성능에 미치는 영향을 검토하기 위해 CNC 원료 종류 및 시멘트 종류에 따른 CNC 특성을 평가함 - 보편적으로 사용되는 일반 시멘트 Type I/II 와 알루미늄에이트 함량이 높은 Type V 시멘트를 사용하였음 - CNC 종류로는 wood pulp, cotton fiber, algae, acetate-grade dissolving pulp, rayon-grade dissolving pulp, pulp sludge from paper industry를 사용하였으며 aqueous suspension, dry powder 형태로 배합하였음 - 처리 방법은 Sulfuric acid hydrolysis, Transition metal catalyzed oxidation, Controlled acid hydrolysis를 사용 - Isothermal calorimetry(IC), thermogravimetric analysis(TGA), ball-on-three-ball(B3B) flexural strength test 를 진행하여 CNC 시멘트 복합재료의 성능을 정량화 함 - wood pulp를 원료로 사용하고 Sulfuric acid hydrolysis 처리한 CNC 와, Acetate-grade dissolving pulp 원료사용 transition metal catalyzed oxidation 처리를한 CNC에서 시멘트 종류와 상관없이 휨 시험에서 20% 증가하는 결과를 나타내었으며, 열 분석결과 모든 CNC 혼합물에서 수화도가 증가하는 경향을 나타냄

- CNC 특성을 활용한 기존 문헌(CNC 제조 프로세스 및 적용 산업분야, 건설재료로의 적용 연구현황, 기존 나노기술과의 차이점, 실험 장비 등)에 대한 조사 보고서 작성

-> CNC 관련 선행연구 사례 조사를 통한 개념을 확립하였음. 하지만, 분산 메커니즘에 관한 연구는 미비하여 CNC 활용 극대화를 위한 분산 방법이 우선적으로 검토되어야 할 것으로 판단

(2) CNC 분석 및 물리적 특성 평가 기법(안)

- 분산된 CNC에서의 성능이 raw 형태 대비 최대 20% 강도 상승을 나타낸 기존 연구 결과를 바탕으로 CNC의 활용을 위해 분산 메커니즘을 분석하였으며, 분산된 CNC의 특성을 분석하기 위한 압축 강도 시험 진행
- 본 연구에 사용된 CNC는 캐나다 'C' 사 제품을 사용

Table 2.1 Physical properties of CNC

Parameter	product form	appearance (color)	crystallite density	specific surface area	Particle diameter (crystallite)	particle length (crystallite)	pH
Specification	Powder	White	1.5g/cm ³	400m ² /g	2.3~4.5 nm (by AFM)	44~108 nm (by AFM)	6~7



Fig. 2.1 Powder type CNC

- CNC의 활용방법은 물과 같은 용매제를 이용하여 현탁액(suspension) 형태로 제조 후 시멘트에 적용하는 것임(시멘트 대비 vol.%) 본 연구에서는 1차 정화한 증류수를 용매제로 사용하였으며 일반적으로 시멘트 배합에 사용되는 배합 수를 대체하였음
- 본 연구에서는 선행연구에서와 같이 기계적 분산 방법인 초음파 분산법을 이용하였으며 추가적으로 일반적인 나노재료 분산에 사용되는 자력교반을 이용하여 분산을 진행하였음
- 초음파 분산 시 발생하는 열에 의한 시료 손상을 최소화 하기 위해 얼음을 이용하여 냉각 시킴
- 초음파, 자력교반을 이용한 분산은 1회 분산 시 최대 700ℓ 수용 가능-> 차후 콘크리트 제조에 필요한 대량 분산에 관한 방법 검토



Fig. 2.2 Magnetic stirrer & Ultrasonic process



Fig. 2.3 CNC suspension

- 분산 방법에 따른 분산성 평가에 앞서 초음파 분산을 이용한 분산을 실시하였으며, 시간 선정을 위해 초기 변수를 4, 7, 10분으로 하였음

- 분산 시간에 따른 CNC 특성을 분석하고자 혼입률은 기존 연구를 참고하여 0.1, 0.2(vol.%)에 대한 시멘트 페이스트(W/C=50%) 제조 후 강도 특성을 평가함

Table 2.2 CNC cement paste mixing design

Classification	wt. %		CNC/cement vol. %
	C	W	
C01	1	2	0.1
C02			0.2

- 양생 방법은 기존 고강도 콘크리트 양생 방법을 참고하여 단시간에 소요강도 확보가 가능한 고온 양생을 실시
- 변수에 따른 강도 특성 결과 분산 시간 10분, 혼입률 0.2 vol.%에서 강도 특성이 우수하게 나타남

Table 2.3 Compressive strength value according to CNC concentration

Classification	Mean compressive Strength (MPa)		
	4 min	7 min	10 min
C01	31.7	36.8	39.7
C02	31.2	38.4	50.7

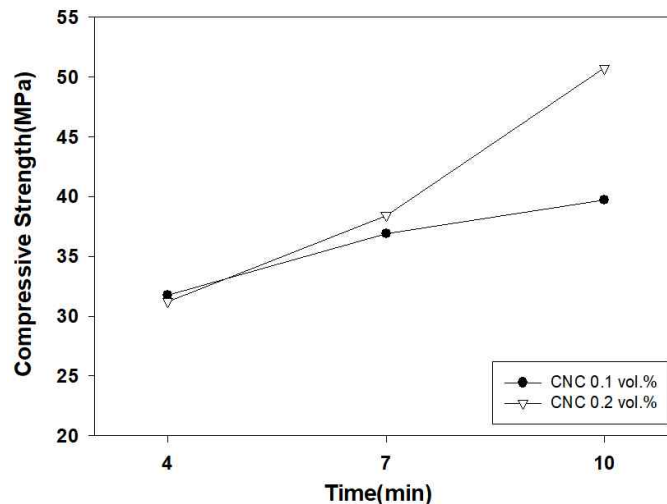


Fig. 2.4 Evaluation of mean compressive strength according to CNC concentration

- 강도 특성평가 결과 및 나노재료의 탄성계수 측정법에 관한 물리적 특성평가 보고서 작성 (나노재료의 탄성계수 측정방법은 AFM, 라만분광법, XRD이 있으며 분석에관한 내용은 조사하였으나, 사용되는 장비의 메커니즘 부재로 인한 직접적인 측정에 어려움이 있었음->차후 미소 수화 분석, 열 중량 분석을 통해 물리적 특성평가를 보완해야 할 것으로 판단됨)
- 앞선, 분산 시간 및 혼입률에 따른 강도 특성 결과를 바탕으로 단시간에 소요강도를 확

보할 수 있는 양생법인 증기양생(48hr)에 따라 CNC시멘트 양생에서도 그 효과를 나타내는지에 대한 평가를 하기위해 양생시간(6, 24, 48hr)에 따른 CNC 특성 변화를 살펴 보기 위한 실험 진행하였음

- 분산 방법은 자력교반, 초음파 분산, 자력교반과 초음파 분산을 동시에 진행하여 실시하였으며, 분산 시간은 앞선 강도 평가 결과를 통해 10분으로 하였음

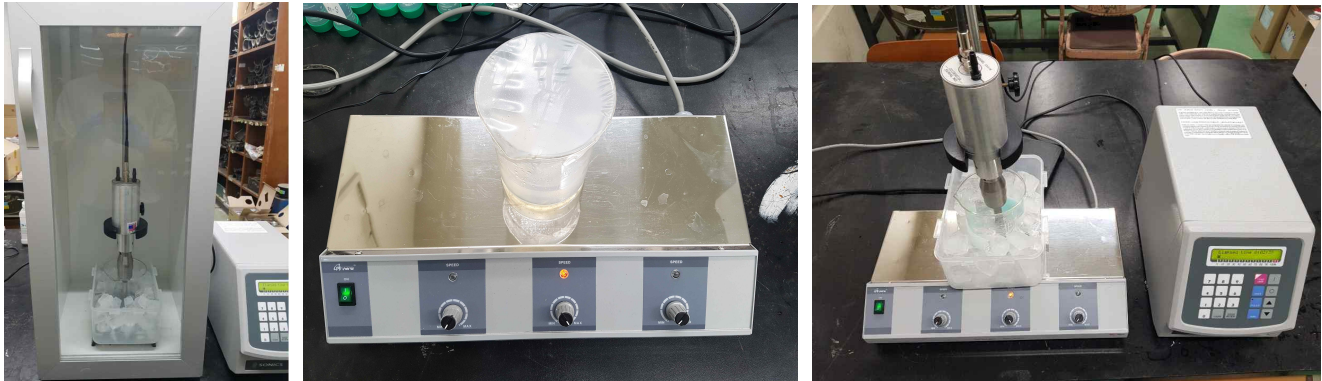
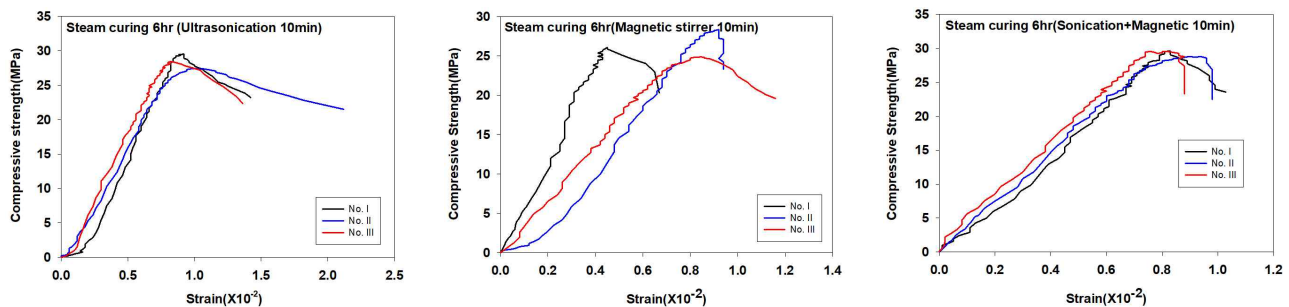


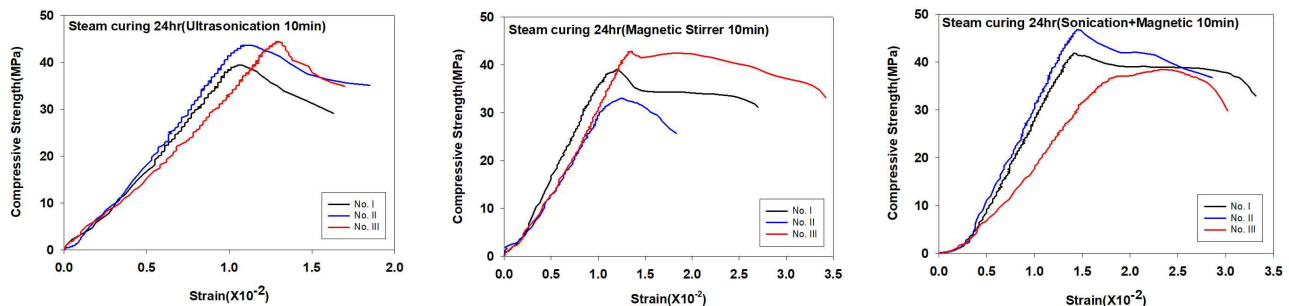
Fig. 2.5 Magnetic stirrer & Ultrasonic process

Table 3.3 Compressive strength value according to dispersion method and steam curing time

Classification	Compressive strength (MPa)		
	6 hr	24 hr	48 hr
Magnetic stirrer	28.4	38.1	36.3
Ultrasonic process	26.4	42.5	45.4
Magnetic stirrer+Ultrasonic process	29.2	41	45.1



(a) 6hr Strength Characteristics



(b) 24hr Strength Characteristics

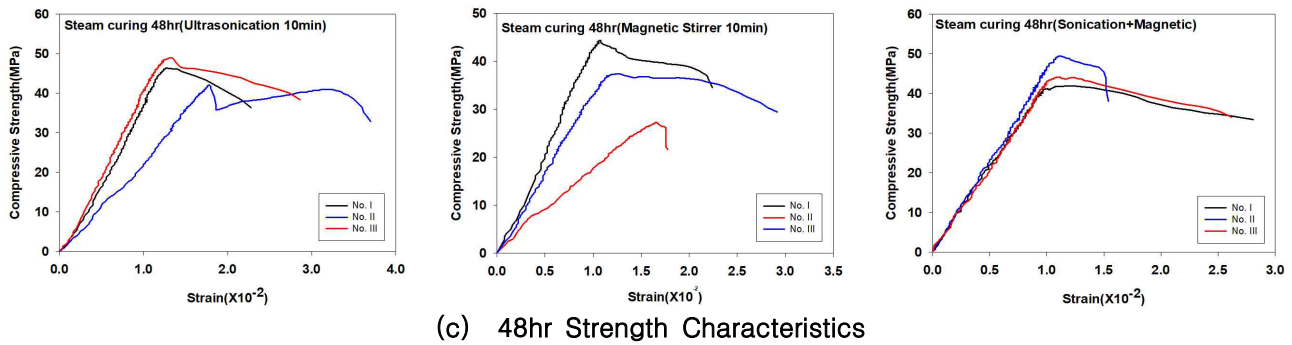


Fig. 2.5 Evaluation of compressive strength according to dispersion method and steam curing time

- 분산 방법에 따른 강도 특성 평가 결과 초음파 분산에서의 강도 성능이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 자력과 초음파를 동시에 사용한 경우에서도 비슷한 양상을 나타냄
- > 분산 방법에 따른 CNC 특성을 평가하기 위해 강도 실험을 진행하였으며, 본 실험에서의 강도 향상 메커니즘을 구체적으로 규명하기 위한 CNC의 분산성 평가가 필요할 것으로 판단됨

(3) 분산성 평가 및 응결, 플로우 시험

- 앞선 강도 특성 평가 결과를 바탕으로 초음파 분산 시간 증가에 따른 분산성 평가를 실시하였으며, 평가 방법은 탁도계를 이용하여 측정 후 그 결과를 토대로 분산성 평가(안) 제시-> 혼탁도 분석은 CNC의 분산 특성을 간접적으로 파악할 수 있기 때문에 분산성 평가를 정량적으로 도출하기 위한 추가적 분석방법이 보완되어야 할 것으로 판단
 - CNC 혼입률은 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 vol.% 분산 시간은 5~30분 까지 5분 간격으로 증가시켰으며, 혼탁도 측정은 분산 직후부터 2시간 후까지의 분석을 진행
 - 분산 시간과 CNC 혼입량에 따른 분산 특성 결과, 분산 시간이 증가할수록 혼탁도가 증가하는 경향을 나타냄
 - 25분 이전까지는 분산 시간에 따른 혼탁도 값이 유사한 결과를 보였으며 25분에서는 거의 동일한 값을 나타내었으나, 30분에서는 CNC 0.2, 0.4 (vol.%)에서 10NTU이상 높은 값을 나타냈으며, CNC 0.3 (vol.%)은 CNC 0.1 (vol.%)과 유사한 값을 나타냄
 - 이를 통해 CNC를 물과 혼합할 경우 CNC 간의 뭉침 현상이 발생하며, 초음파 분산을 통해 저감 시킬 수 있다는 것으로 판단됨(Fig. 3.1)
- (하지만, 분산 시간 30분까지도 꾸준히 혼탁도가 증가하는 것으로 볼 때, 분산 시간을 보다 증가시킬 경우 혼탁도가 더 증가할 가능성이 있으므로, 충분한 분산을 확보했다고 판단하기는 어려움)

Table 3.1 Turbidity of distilled water (without CNC) (Unit:NTU)

Turbidity							
1.5	1.5	1.6	1.7	1.5	1.7	1.9	1.7

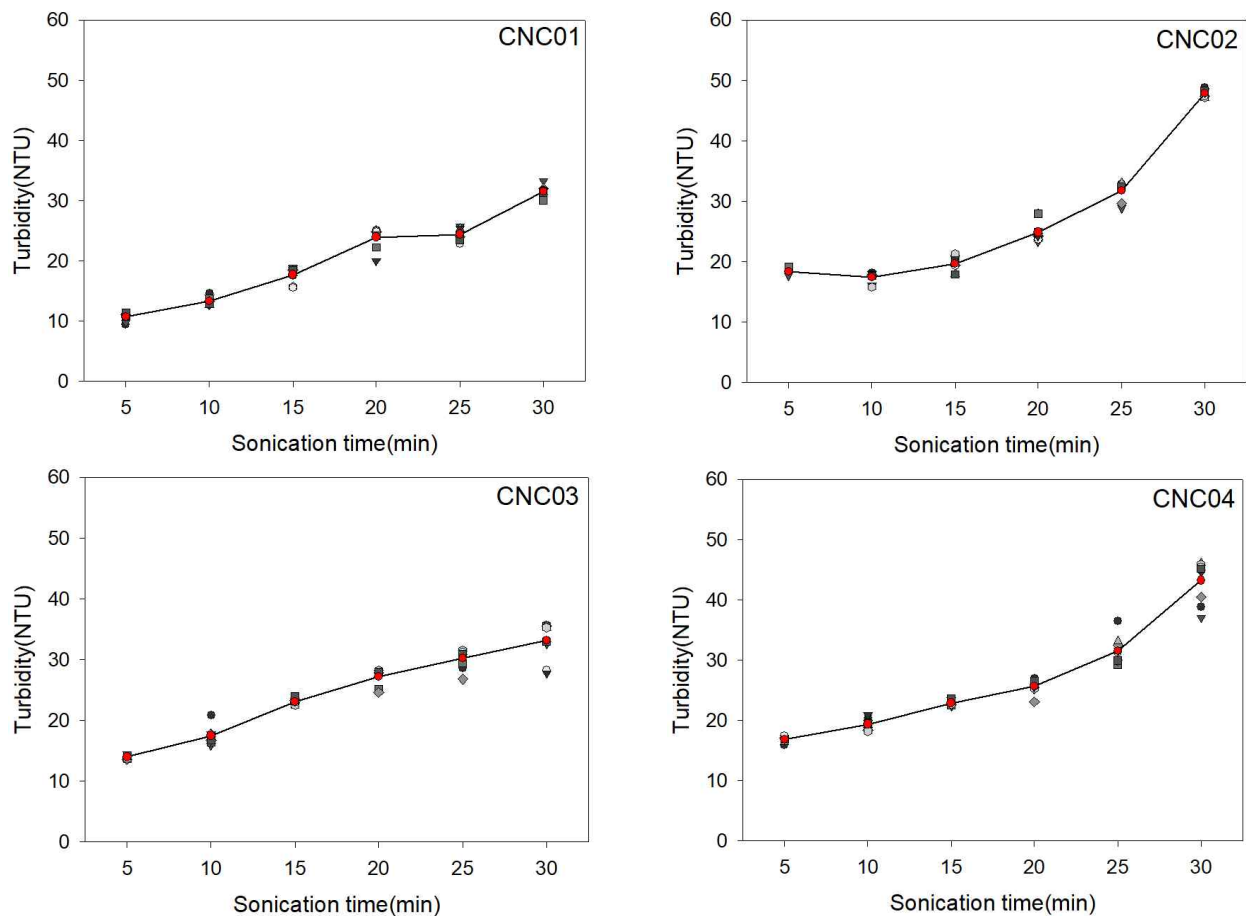


Fig. 3.1 Turbidity according to CNC concentration

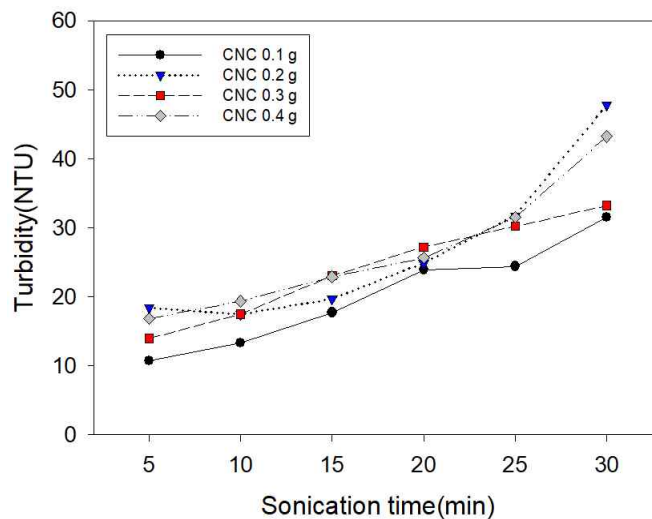


Fig. 3.2 Mean Turbidity according to CNC concentration

- 앞선, 분산성 평가 결과를 바탕으로 분산 시간 30분 CNC 혼입률 0.2, 0.4 (vol.%)의 분산 유지성 평가를 실시함
- 분산 시간과 경과시간에 따른 CNC 현탁액의 분산 유지성을 분석한 결과 분산 시간 5분 인 경우 CNC가 충분히 분산되지 않아, 경과시간에 따른 혼탁도의 변화가 거의 나타나 지 않음
- 분산 시간 10분~30분의 경우 경과시간에 따라 혼탁도가 지속적으로 감소하는 경향을 나타냄
- 혼탁도의 감소는 5~10분 초기에서 큰 경향을 나타내었는데, 이는 초음파 분산을 통해 CNC의 뭉침 현상을 저감시켰으나 초음파분산을 종료할 경우 다시 뭉치는 현상이 반복 적으로 발생하는 것으로 판단

- 따라서, 초음파 분산 후 CNC의 분산을 유지하기 위해서는 표면개질 등의 처리가 필요할 것으로 판단되며, 그렇지 않을 경우 분산 후 5~10분 이내에 혼합을 진행해야 할 것으로 판단됨

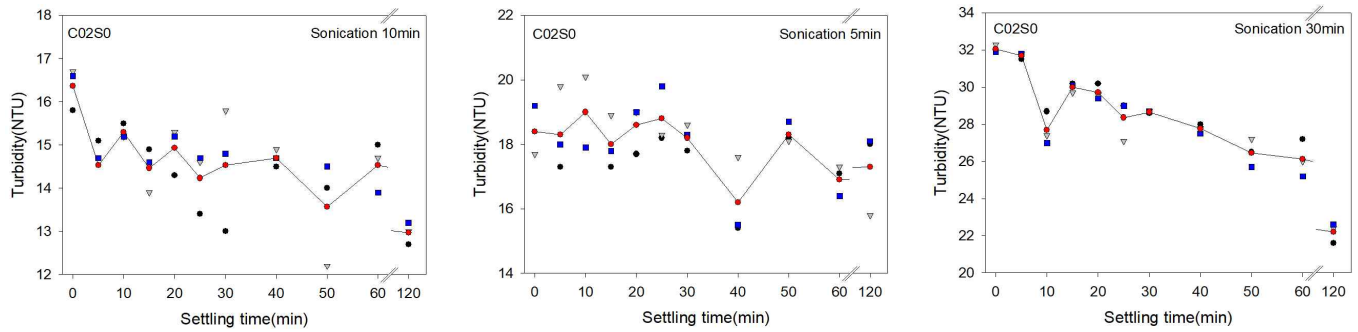


Fig. 3.3 CNC 0.2 vol.%, Evaluation of dispersion retention according to dispersion time

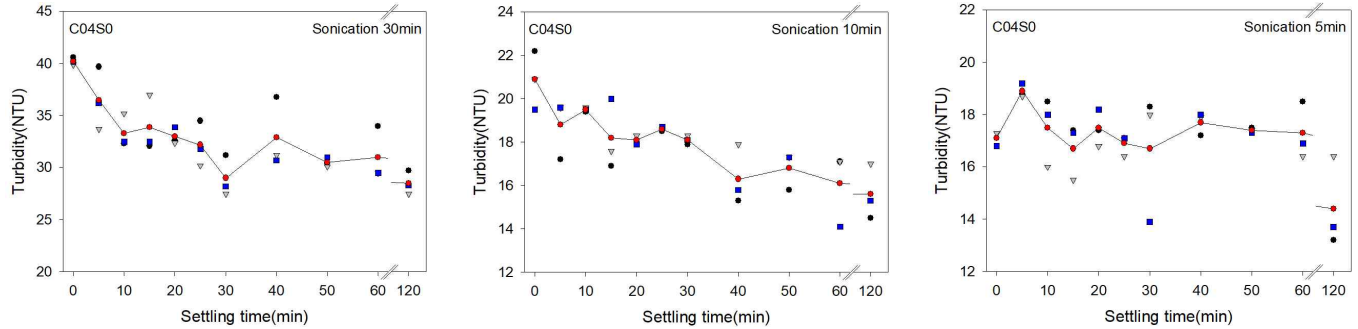


Fig. 3.4 CNC 0.4 vol.%, Evaluation of dispersion retention according to dispersion time

Table 3.1 Turbidity of dispersion specimen (Unit:NTU)

CNC (vol.%)	Sonication time(min)					
	5	10	15	20	25	30
0.1	10.7	13.3	17.7	24.0	24.4	31.5
0.2	18.4	17.4	19.7	24.9	31.8	47.9
0.3	14.0	17.5	23.1	27.2	30.3	33.2
0.4	16.9	19.4	22.9	25.7	31.6	43.3

Table 3.2 Turbidity of stability specimen (Unit:NTU)

Setting time (min)	Sonication time(min)					
	5	10	15	20	25	30
0	18.4	16.4	32.1	17.1	20.9	40.2
5	18.4	14.5	31.7	18.9	18.8	36.5
10	19.0	15.3	27.7	17.5	19.5	33.3
15	18.0	14.5	30.0	16.7	18.2	33.9
20	18.6	14.9	29.7	17.5	18.1	33.0
25	18.8	14.2	28.4	16.9	18.6	32.2
30	18.2	14.5	28.7	16.7	18.1	29.0
40	16.2	14.7	27.8	17.7	16.3	32.9
50	18.3	13.6	26.5	17.4	16.8	30.5
60	16.9	14.5	26.1	17.3	16.1	31.0
120	17.3	13.0	22.2	14.4	15.6	28.5

- 분산된 CNC 형상 확인을 위해 SEM(Scanning Electron Microscope), TEM(Transmission Electron Microscope) 분석 진행
- 분산 전 raw CNC의 형태는 구(毬) 형태를 나타내며 기계적 에너지를 이용한 분산 과정을 거친 결과 기존 연구에서와 같이 침상(막대) 형태의 CNC 형상을 확인

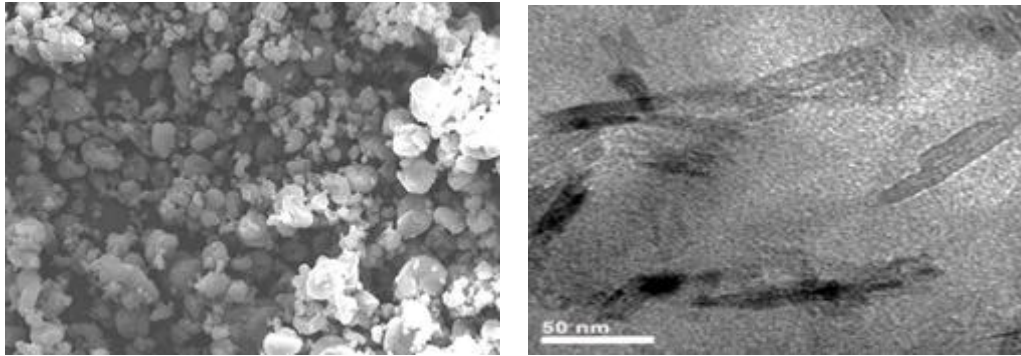


Fig. 3. Dispersion before & after shape analysis

- 분산된 CNC를 적용한 시멘트 페이스트의 유동성 평가를 위해 플로우 및 응결 시험을 실시하였음
 - 평가 방법은 KS L ISO 9597(시멘트의 응결 및 안정성 시험방법), KS L 5111(수경성 시멘트 시험용 플로 테이블)에 따라 진행하였음
 - 실험 결과 Plain 대비 평균 플로우 값은 다소 감소하였으나, 평균 값이 성과 목표치인 200mm 이상을 나타냄
 - 응결 시험 또한 목표치 8시간 이내에 종결을 나타내 CNC의 유동성이 확보되는 것으로 판단됨
- (하지만, 본 실험은 페이스트 형태로 진행한 것이며, 추후 골재 및 혼화재 등을 첨가한 시멘트 복합체 및 저수축 고인성 콘크리트에 관한 유동성 평가를 진행해야 할 것으로 판단됨)

Table 3.3 The results of flow test

Classification	flow (mm)				
	1	2	3	4	평균
Sonication+ Magnetic stirrer 30 (min)	227.67	233.36	229.95	235.23	231.55
Sonication+ Magnetic stirrer 10 (min)	227.37	229.28	229.76	234.97	230.35
Plain	245.28	250	248.4	248.79	248.12

Table 3.4 The results of Setting time test

Normal consistency test		
W/C(%)	C(g)	W(g)
28.5	500	142.5

Setting time test		
Classification	Initial time (min)	Final time (min)
PLAIN	240	313
SM30	232	326
SM20	230	321
SM10	233	326
SM5	220	317
S30	228	323
S10	226	321

-> 1차 연도에서의 연구성과는 선행연구 분석을 바탕으로 CNC의 개념 확립 및 특성을 극대화하기 위한 분산 방법을 확보하였으나, 필요 에너지양에 관한 정량적인 값을 도출해야 할 것으로 판단됨 (RPM 수치가 표기되는 디지털 방식의 자력 교반기 도입 및 초음파 분산 시간 대신 CNC 1g 분산에 필요한 에너지양(J/CNC(g)) 도출에 관한 연구 필요)

분산에 관하여 정립 후 혼입률 증가에 따른 CNC 특성 변화 및 대량 분산 방법 검토와 정량적인 분산성 평가에 관한 연구가 필요할 것으로 판단

또한, 시멘트 복합체 및 저수축 고인성 콘크리트의 제조를 위한 골재 및 적정 혼화재 선정 등에 관한 연구가 필요할 것으로 사료됨

(4) 1차연도 기술적성과

1) 연구성과관련 성적서

- 플로우 및 응결시험(한국건설자재시험연구원)



품질시험 성적서

시료명(생산국) : PLAIN, US-10, US-30, USM-10, USM-30

접 수 번 호 : KCM017-24955

시료채취일 : 2017년 11월 23일

접 수 일 자 : 2017년 11월 28일

시료채취자 : -

성과 이용 목적 : 연구과제 성과 증빙용

시료 채취 장소 : -

생 산 자 : -

의 외 인 : 서울특별시 금천구 가산디지털1로 199

강 용 학

귀하가 품질시험·검사를 의뢰한 위 시료에 대하여 아래 시험 방법에 따라 시험·검사한 결과를 다음과 같이 알려드립니다.

결 과

연번	시험검사종목	시험검사방법	시험검사결과	책임기술자			시험검사자	
				자격종목및번호	성 명	서 명	성 명	서 명
1	PLAIN 응결:초결 (분)	KS L ISO 9597	240	전설재료시험기사 07201051724L	차성운		송막균	
2	PLAIN 응결:중결 (분)	KS L ISO 9597	313					
3	PLAIN 유동성(Flow) (mm)	KS L 5111	248					
4	US-10 응결:초결 (분)	KS L ISO 9597	226					
5	US-10 응결:중결 (분)	KS L ISO 9597	321					
6	US-10 유동성(Flow) (mm)	KS L 5111	230					
7	US-30 응결:초결 (분)	KS L ISO 9597	228					

위 시험값은 축약인이 의뢰한 위 시료를 시험·검사하여 얻어진 수치로서 다른 목적으로의 사용을 금합니다.

[일반분야]

2017년 12월 04일

한국건설자재시험연구원

원 장 임 동



발급문서진위확인

TEL : 031) 419-3002 / FAX : 484-9977

주 소 : 경기도 안산시 상록구 사사안골3길 9(사사동)

유 의 사 항

책임기술자 및 시험검사자의 성명과 서명이 없는 경우에는 결과에 대한 보증을 할 수 없습니다.

품질시험 성적서

시료명 (생산국) : PLAIN, US-10, US-30, USM-10, USM-30

접 수 일 자 : 2017년 11월 28일

접 수 번 호 : KCM017-24955

생 산 자 : -

결 과

연번	시험검사종목	시험검사방법	시험검사결과	책임기술자			시험검사자	
				자격등록번호	성명	서명	성명	서명
8	US-30 용결:종결 (분)	KS L ISO 9597	323	전설재표시험기사 07201051724L	차성운		송택균	
9	US-30 유동성(Flow) (mm)	KS L 5111	231					
10	USM-10 용결:초결 (분)	KS L ISO 9597	233					
11	USM-10 용결:종결 (분)	KS L ISO 9597	326					
12	USM-10 유동성(Flow) (mm)	KS L 5111	230					
13	USM-30 용결:초결 (분)	KS L ISO 9597	232					
14	USM-30 용결:종결 (분)	KS L ISO 9597	326					
15	USM-30 유동성(Flow) (mm)	KS L 5111	232					

품질시험 성적서

시료명 (생산국) : PLAIN, US-10, US-30, USM-10, USM-30

접 수 일 자 : 2017년 11월 28일

접 수 번 호 : KCM017-24955

생 산 자 : -

[응결특성 배합표]

시료명	Cement(%)	Water(%)	W/B(%)	CNC (C × vol%)	분산조건	비고
Plain	77.8	22.2	28.5	0	N/A	KS L ISO 9597
US-10				0.2	초음파 10분	
US-30				0.2	초음파 30분	
USM-10				0.2	초음파+자력교반 10분	
USM-30				0.2	초음파+자력교반 30분	

[유동성(Flow) 배합표]

시료명	Cement (%)	Sand (%)	Water (%)	W/B (%)	CNC (C × vol%)	분산조건	비고
Plain	25.4	62.3	12.3	48.5	0	N/A	KS L 5111
US-10					0.2	초음파 10분	
US-30					0.2	초음파 30분	
USM-10					0.2	초음파+자력교반 10분	
USM-30					0.2	초음파+자력교반 30분	

– 30 –

4) 연구 성과 관련 특허 출원 실적

관 인 생 략

관 인 생 략

출원 번호 통지서

출원 일자 2017.11.24
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무)
출원번호 10-2017-0158962 (접수번호 1-1-2017-1176341-05)
출원인명칭 금오공과대학교 산학협력단(2-2004-035028-2)
대리인성명 특허법인 신태양(9-2011-100101-7)
발명자성명 김우석 이형주 김승기
발명의명칭 셀룰로오스 나노 크리스탈을 이용한 콘크리트 조성물 및 이의 제조방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 통보된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고격번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서비스다문로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의결서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr>-특허대당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자특고환허가서(PTO-SB-39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

출원 번호 통지서

출원 일자 2017.11.24
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무)
출원번호 10-2017-0158964 (접수번호 1-1-2017-1176343-96)
출원인명칭 금오공과대학교 산학협력단(2-2004-035028-2)
대리인성명 특허법인 신태양(9-2011-100101-7)
발명자성명 김우석 이형주 김승기
발명의명칭 셀룰로오스 나노 크리스탈을 이용한 시멘트 복합 조성물 및 이의 제조방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 통보된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고격번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서비스다문로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의결서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr>-특허대당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자특고환허가서(PTO-SB-39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

<특허출원 2017.11>

2. 2차 연도 연구 성과

(1) CNC소재 분석

- CNC 소재 자체의 심층적 분석을 위해 CNC의 원료인 셀룰로오스의 추출 및 주요 공급원 등을 분석(Table 1.1)하였으며, 나노재료의 분산 필요성 및 대량 분산 방법 도출을 위한 기계적 분산 방법에 관한 내용을 정리하였음
- CNC는 우수한 기계적 성질과 낮은 부피분율을 이용하여 다양한 고분자 매트릭스에 이상적인 보강재임
- CNC는 주로 폴리 비닐 아세테이트(PVAc)와 폴리 부틸 메타 크릴 레이트(PBMA) 매트릭스를 보강하는데 사용되며 시멘트 페이스트와 같은 무기 매트릭스를 보강하는데도 사용됨
- CNC는 광범위한 식물, 동물 및 박테리아에서 추출할 수 있으며 추출물은 추출된 셀룰로오스의 크기와 성질에 영향을 주기 때문에 매우 중요함

Table 1.1 Main sources and characteristics of cellulose

Plant	- 목재, 쌀, 껍질, sisal, 마, 아마, 양마, 코코넛 껍질 등 다양한 식물들로부터 셀룰로오스, 나노셀룰로오스를 추출 - 면 섬유는 목재와 비교하여 비교적 낮은 성분 함량을 활용하여 고품질의 원재료로 사용가능 - 목재는 풍부하기 때문에 셀룰로오스 및 나노셀룰로오스를 분리하기에 아주 좋은 재료이며 다공성 이방성 구조를 통한 고강도, 강성, 인성 및 저밀도의 특징이 있음 - 목재로부터 나노셀룰로오스를 추출하기 위해서는 화학적, 기계적 방법을 포함하는 단계적 공정이 필요
Tunicates	- Tunicates는 해양 무척추 동물(피낭류)을 나타냄 - Tunicates는 외부조직에 섬유소를 만들어 내는데, 이 조직에서 Tunicin 이름의 정제된 섬유소를 추출 할 수 있음 - Tunicate cellulose는 결정성이 높은 CI_{β} allomorph 형태의 거의 순수한 셀룰로오스로 이루어져 있으며 매우 큰 종횡비, 높은 비표면적을 갖고 있음
Algae	- 녹색, 적색, 회색 및 갈색의 다양한 조류도 셀룰로오스 및 나노셀룰로오스 공급원 - 산 가수분해 및 기계적 정제를 통해 조류 세포벽에서 큰 종횡비의 CMF를 추출
Bacteria	- 박테리아 셀룰로오스(BC)는 특정 유형의 박테리아 주요 대사과정의 산물 - 가장 널리 사용되는 BC는 <i>Gluconacetobacter xylinus</i> - BC의 결정은 주로 CI_{α}형이고 BC의 중합도는 대개 2000~6000 사이 - BC의 장점은 미생물 형성 및 결정화를 변경하기 위해 배양 조건을 조정 할 수 있음 - 또다른 장점으로는 식물성 셀룰로오스의 종류와 구별되는 높은 화학적 순도 - 박테리아가 합성한 셀룰로오스와 다양한 식물에서 추출한 셀룰로오스는 비슷한 분자구조를 가짐

- 일반적인 나노재료는 단상 또는 다상의 복합체로 구성되어 있으며, 단상 나노재료는 하나의 차원에서 100 nm 미만의 입자크기를 나타냄. 또한 단상의 나노재료는 나노입자 집합체, 클러스터 또는 응집체로 응집할 경우 예상한 특성을 발휘하지 못하며 더 나은 성능을 얻기 위해서 응집한 나노물질들을 분리할 필요가 있음
- 다상의 나노복합체는 단상 나노재료를 매트릭스에 첨가하여 구성한 것이며 나노 물질을 기존 제품에 첨가함으로써 강도, 내열성, 내화학적, 전도성 등을 향상시키거나 새로운 기

능을 제공

- 덩어리와 클러스터(응집체)를 형성하는 나노입자의 특성은 많은 응용 분야에서 나노입자의 효과적인 사용을 방해하는 심각한 문제
- 매트릭스 내에 나노재료를 균일하게 분산 시키기 위해 결합력을 극복해야 하며, 이를 위해 효과적인 응집 해제 및 분산 수단이 필요
- 나노재료의 기계적 분산 방법으로는 초음파처리, Ball milling, 전단력에 의한 분산 (stirring), High speed homogeniser, High pressure homogeniser, Ultrasound sonication bath 등이 있음

Table 1.2 Mechanical dispersion method of common nanoparticles

Method	Nano particle form	Operating principle	Benefits	Fault	Electric energy
Mills	건조, 젖은 분말	초미세 연삭공정	많은 양에 유용.	- 느림, 저효율 - 나노입자의 구조에 파손을 일으킬 수 있음 - 청소가 어려워 오염 발생가능	中
Stirring	나노입자가 액체배지에 들어있는 상태	Magnetic stirbar, overhead-stirring paddle 사용하여 회전을 발생	나노입자에 마모나 파손이 거의 발생하지 않음. 저렴함.	- 저효율 - 분산의 균질성을 향상시키고 응집을 감소시키기 사용 - 입자가 응집되거나 덩어리지는 것을 방지할 수 없음	小
High speed Homogeniser		Rotor stator 발생 탐침을 사용하여 액체를 재순환시키고 고형물을 부유. 이는 전단력을 가하여 충돌과 캐비테이션을 일으킴	2500mL까지의 대형시료에 적합.	- 나노입자의 분산을 위해 실험한 적 없음	나노입자 분산액에 사용된 적 없음.
High Pressure Homogeniser		가압된 액체증기의 속도를 증가시켜 전단과 캐피테이션을 발생	고효율. 대량생산가능	- 나노입자의 구조가 변경될 수 있음. - 분산액의 온도 증가	上
Ultrasound Sonication Bath		용기에 초음파와 캐비테이션을 작용	저렴함.	- 용기형식은 프로브 형식에 비해 효과 떨어짐 - 장시간 사용 시 온도증가 및 입자구조 변경	中
Ultrasound probe sonication or Ultrasonic Disruptor		작은 체적에 많은 에너지밀도를 전달	고효율.	- 프로브의 분해가 샘플을 오염시킬 수 있음 - 온도증가 및 입자구조 변경 - 낮은 가격, 가변적 성능	上

- > 본 연구에 사용된 CNC는 주요 공급원 중 고강도 및 고인성 저밀도의 특징을 갖는 목질계 셀룰로오스로부터 추출된 것을 사용하였으며, 기계적 분산 방법의 정립을 통해 고효율, 대량생산의 특징을 갖는 고압 분산 방법에 관한 연구가 필요할 것으로 판단됨

(2) CNC 분산 방법 검토

- 1차연도 탁도계를 이용한 분산성 평가 시 CNC 혼입률 0.2, 0.4 vol.%에서 우수한 분산성을 나타내어, 혼입률 증가에 따른 강도 특성 분석에 앞서 분산성을 평가하고자 하였음
- 용매제로 사용한 증류수에 CNC 혼입량 증가 시 뭉침 현상이 나타났으며, 이러한 뭉침 현상을 통해 생긴 큰 덩어리 형태의 CNC 입자들을 분산하지 않을 경우 Gel 형태가 되는 것을 관측할 수 있었음



Fig 2.1 Gel type CNC

- CNC는 표면에 많은 수산기(hydroxyl group)가 존재하고, 이를 통해 친수성의 성질을 갖고있음 하지만, CNC를 물에 첨가할 경우 입자끼리의 수소 결합을 통해 뭉침 현상이 관찰된 것으로 판단됨
- 뭉침 현상을 제거하기 위해 초음파 분산법을 이용한 분산을 실시하였지만, 다량의 CNC를 혼입한 경우 분산되지 않은 작은 덩어리들이 관측되어 효과적인 분산이 되지 않기 때문에 초음파 분산 전처리 과정이 필요할 것으로 판단됨
- 초음파 분산의 전처리 과정으로 자력 교반기를 이용하였으며, 자력교반 분산법은 마그네틱 바의 고속 회전에 따라 발생하는 vortex에 의하여 전체적으로 CNC 입자가 분산되는 것을 관측함
- CNC 혼입률 산정은 기존 연구에서 혼입률 1.35 vol.% 초과 시 CNC 응집을 초래한다는 결과를 바탕으로 최대 혼입률에 대한 한계점을 두었음
- 따라서, CNC 혼입률은 0.2 vol.%을 비롯한 우수한 분산성을 나타낸 CNC 0.4 vol.% 기준으로 혼입률 증대에 따른 평가를 하기 위해 0.8, 1.2 vol.%로 산정함
- CNC 혼입률 산정 후 자력교반 및 초음파 분산법과 대량 분산을 방법인 고압 분산을 이용하여 분산을 진행하였으며 이에따른 분산성 평가를 실시함
- 정량적 에너지양을 도출하기 위하여 3position 디지털 자력교반 분산기를 도입함(최대 에너지양1300 RPM)



Fig 2.2 3position Digital magnetic stirrer

- 3position 자력 교반의 경우 최대 에너지인 1300RPM을 사용함
- 초음파 분산의 경우 다량의 CNC 분산을 위한 장시간 분산 시 CNC 손상 및 입자의 측정 한계 이하로 떨어져 시료가 관측되지 않는 현상이 나타남. 따라서, 적정 에너지양 도출이 필요할 것으로 판단하였으며, CNC g 당 필요 에너지양을 산출을 위해 다수의 실험을 실시한 결과 5000 J/g 일 때의 분산성이 적정하다는 것을 나타내었음
- 고압을 이용한 분산 방법은 실험실 수준에서의 작업이 불가능하여 분산 전문 업체에 의뢰에 의한 시료를 제작하였으며, 필요 압력은 경험치에 의해 1587×10^5 Pa를 사용함

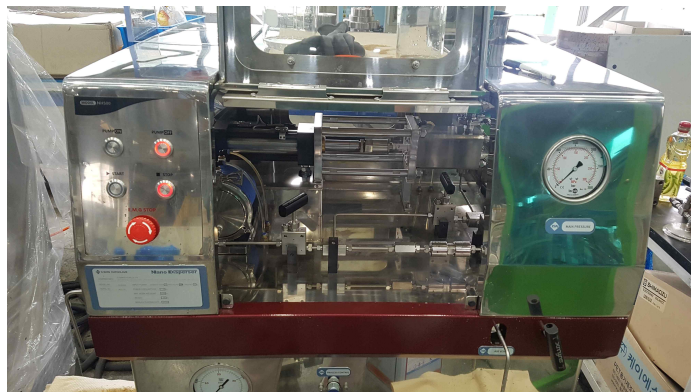


Fig 2.3 High-pressure dispersion machine
(by Ilshin autoclave co.)

Table 2.1 Methods used to disperse CNC and corresponding parameters

Classification	Dispersion Time	Amount of Energy	Number of Dispersion Passes
Magnetic Stirrer	up to 30min	1300 RPM	-
Ultrasonication	-	5000J/g	-
High Pressure	-	1587×10^5 Pa	1~3

- 분산성 평가 방법은 입자의 크기 및 입자의 분포가 얼마나 안정적으로 분산되어 있는지 측정하기 위해 PSA(Particle Size Analysis)와 Zeta potential analysis을 진행함
- PSA의 경우 용매제에 분산되어있는 입자들에 레이저를 방사하여 실시간으로 크기를 측정하는 방법으로 넓은 입도분석 범위의 장점이 있으나, 입자 포지셔닝에 따라 크기 측정치 상이한 특징이 있음 따라서, PSA를 이용한 분산 정도의 판단은 측정된 입자의 최대, 최소 크기 범위가 적고 그 범위 안에서의 입자들이 얼마나 많이 분포되어 있는가에 따라 판단

하는 것임

- Zeta potential analysis는 용매제에 분산되어있는 입자 사이에서 반발력 및 인력을 측정한 결과로써 측정 절대값이 클수록 분산성이 우수함
- 분산성 평가 기준은 ASTM D4187-82에 의한 기준을 참고하여 분석하였음

Table 2.2 Index of evaluation of dispersion stability according to zeta potential value

Zeta potential, ζ (mV)	Stability behavior of the colloid
From 0 to ± 5	Rapid coagulation or flocculation
From 10 to ± 30	Incipient instability
From 30 to ± 40	Moderate stability
From 40 to ± 60	Good stability
More than ± 61	Excellent stability

Source : ASTM Standard D4187-82, American Society for Testing and Materials



Fig 2.4 PSA & Zeta potential analyzer

- PSA 및 Zeta potential analysis를 이용하여 초음파 및 고압의 1, 7, 30일까지의 입자 크기 및 분포도 측정을 통해 분산성 및 분산 유지성을 비교함

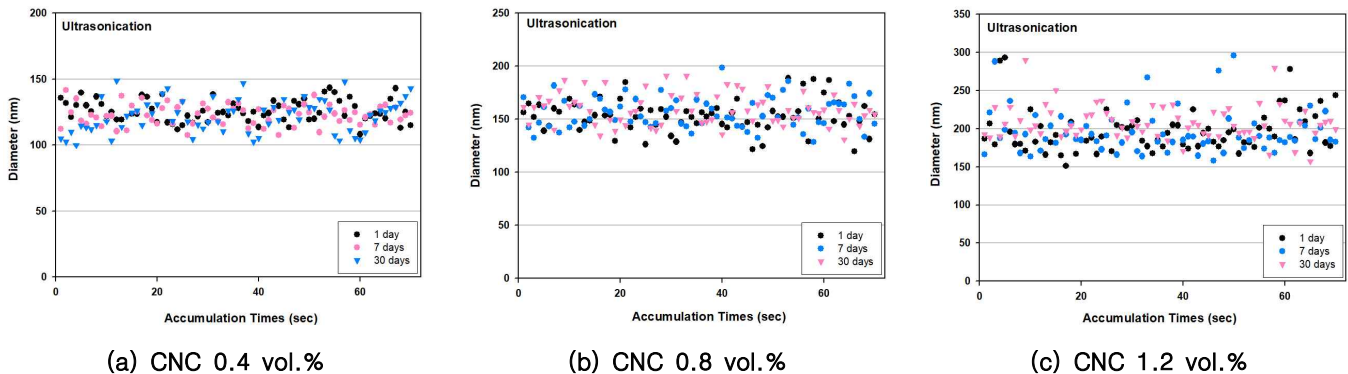


Fig. 2.5 Evaluation of Ultrasonic Dispersion Method Dispersibility and Dispersion Retention

Table 2.3 Mean diameter and dispersion retention according to Ultrasonication dispersion method

Classification	Mean Diameter(nm)								
	0.4 (vol.%)			0.8 (vol.%)			1.2 (vol.%)		
	1	7	30	1	7	30	1	7	30
Ultrasonication	125	122	122	153	153	159	196	195	207

- 초음파 분산의 PSA 결과 혼입률이 증가할수록 평균 입자 크기는 증가하였으나, 분산

후 1, 7, 30일의 입도 분포 및 입경 크기의 변화는 시간 경과와 관계없이 유사한 평균 크기를 나타냄

- 이러한 결과는 초음파 분산을 진행한 CNC가 30일까지 분산성 유지가 가능하다는 것으로 판단됨

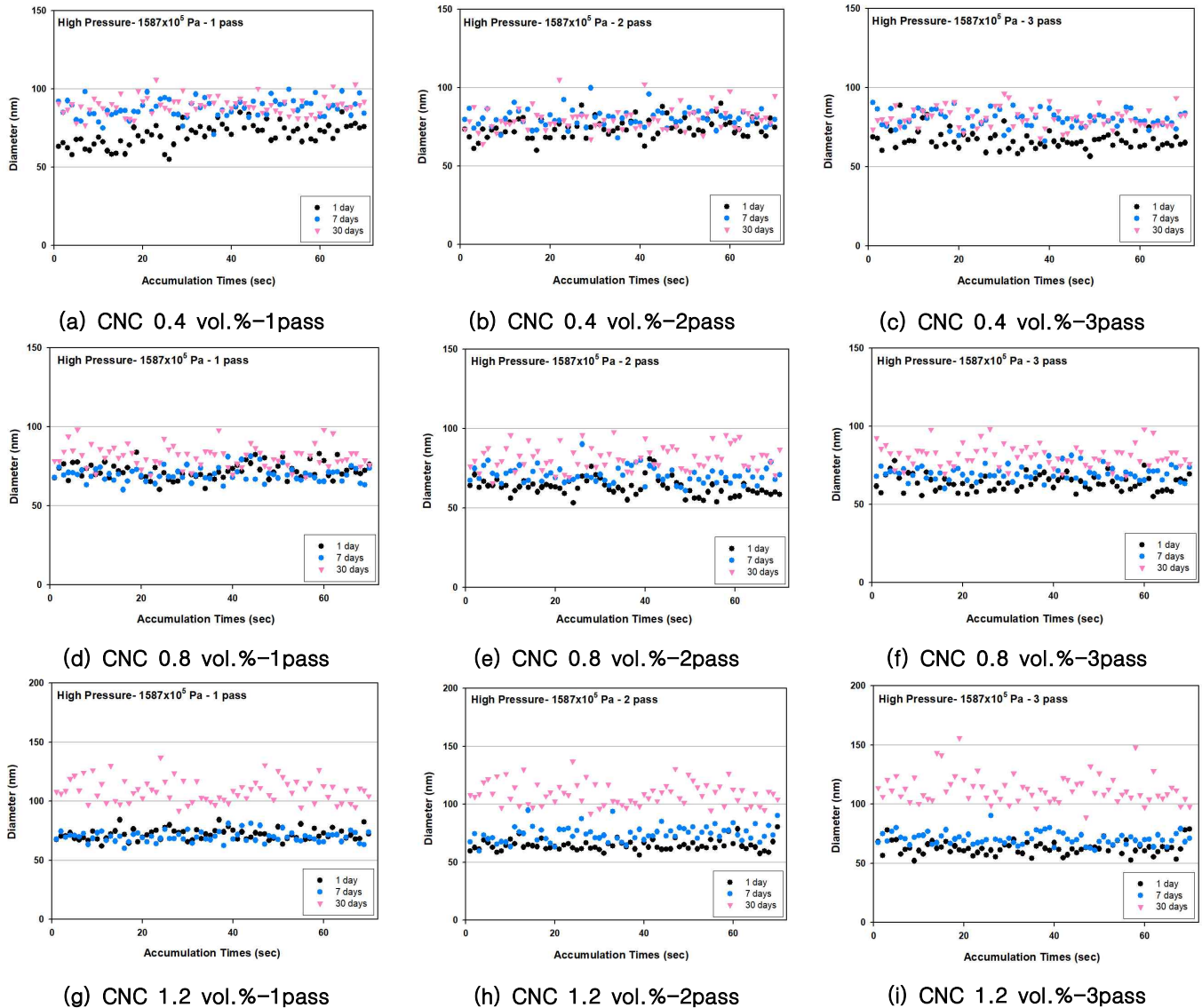


Fig. 2.6 Evaluation of High Pressure Method Dispersibility and Dispersion Retention

Table 2.4 Mean diameter and dispersion retention according to High pressure dispersion method

Classification		Mean Diameter(nm)								
		0.4 (vol.%)			0.8 (vol.%)			1.2 (vol.%)		
		1	7	30	1	7	30	1	7	30
High Pressure	1 pass	71	87	89	72	69	81	71	69	109
	2 pass	74	80	80	63	70	81	64	74	109
	3 pass	67	80	81	63	69	81	62	70	112

- 고압 분산의 경우 0.4, 0.8 vol.%에서의 입도 변화는 큰 차이가 없었지만, 1.2 vol.% 30

- 일 경과 후 측정 시 1, 7일에 비해 평균 크기가 증가하는 결과를 나타냄 이는 상대적으로 많은 CNC 입자들이 시간 경과에 따라 다시 뭉치는 현상에 기인한 것으로 판단되며, 초음파 분산과 비교하였을 때, 평균 입자크기가 작고, 입도분포 또한 고른 경향을 나타냄
- Zeta potential의 경우 초음파 분산의 시간 경과에 따른 분산성 결과 시간 경과에 따라 측정값이 감소하였지만, CNC 0.4, 0.8 vol.%에서 모두 -40 mV 이상인 Good stability를 나타냈으며, CNC 1.2 vol.%에서는 1일을 제외하곤 7일에서 -37 mV, 30일에서 -35 mV를 나타내 Moderate stability를 나타냄
 - 고압 분산의 경우 혼입률 및 분산 횟수에 따라 초음파분산과 유사한 경향을 나타내었으며, 초음파 분산 대비 전체적으로 우수한 분산성을 나타냄

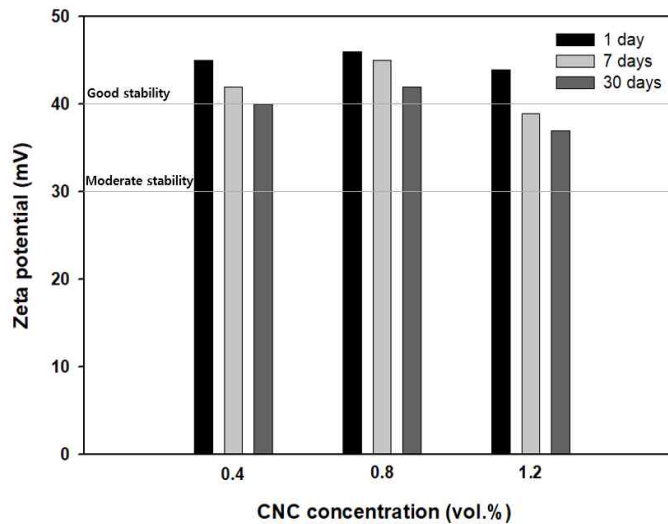
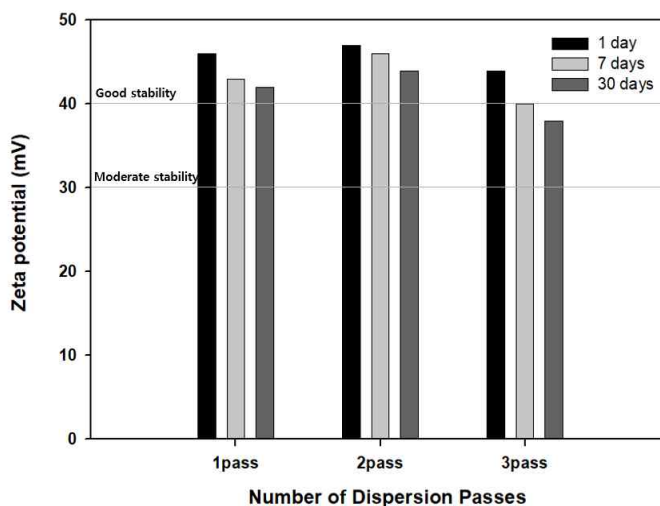
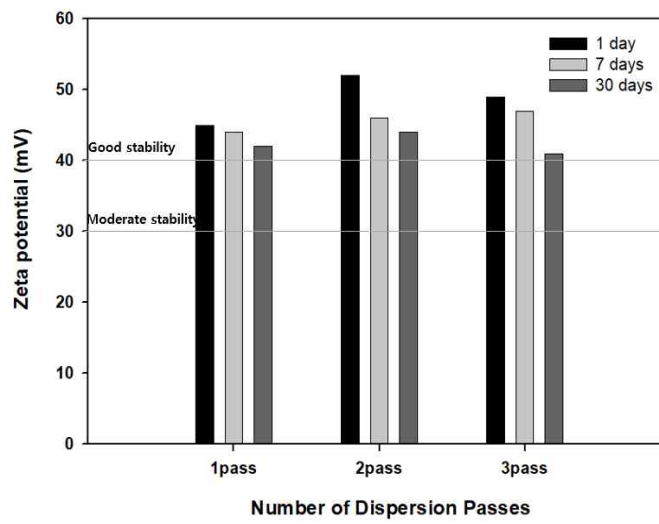


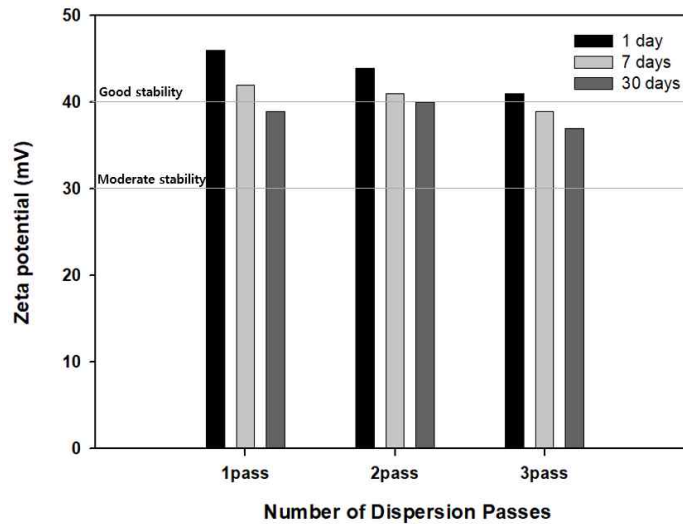
Fig. 2.7 Ultrasonication Dispersed Zeta potential Analysis



(a) CNC 0.4 (vol.%)



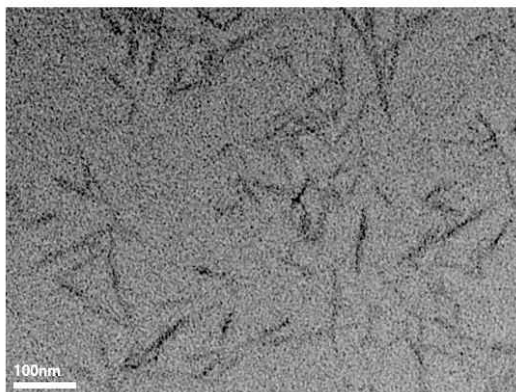
(b) CNC 0.8 (vol.%)



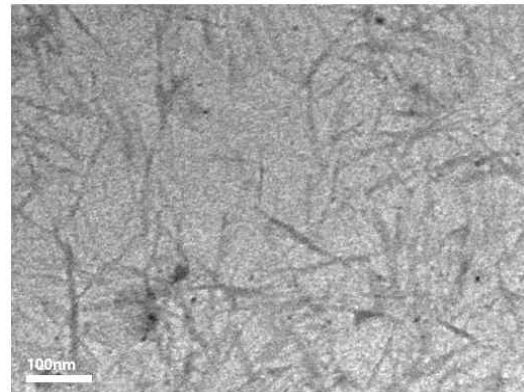
(c) CNC 1.2 (vol.%)

Fig. 2.8 High Pressure Dispersed Zeta potential Analysis

- 분산성 평가 결과를 토대로 분산 후 CNC 형상 확인을 위해 TEM(Transmission Electron Microscope) 분석을 실시하였으며, 분석 결과 기존연구에서와 같이 침상(막대) 형상을 확인할 수 있었음



(a) Ultrasonication Dispersion Method



(b) High Pressure Dispersion Method

Fig. 2.9 TEM Analysis according to Dispersion Method

- 초음파 분산 및 고압 분산 평가 결과를 바탕으로 각 분산 장비에 따른 특징 및 적정 에너지량을 정리하였음

Table. 2.4 Specification according to dispersion method

Dispersion Method	Content
 <Magnetic Stirrer>	-분산 시 사용된 Magnetic bar의 크기는 23mm -육안 관측시 CNC 입자 덩어리들이 증류수에 분산되는 시간은 최대 30분이며, CNC양에 따라 상이함
 <Ultrasonication>	-CNC 1g당 필요한 에너지량은 5000J이며, 장시간 분산 시 CNC 손상 및 입자가 측정한계 이하로 떨어져 분산성 평가 시 시료가 관측되지 않은 현상이 나타남 -1회 수용가능한 용량 up to 700ℓ
 <High Pressure>	-고압을 이용한 나노재료 분산 시 경험치에 의해 1587×10^5 Pa 를 사용하고 있음 -CNC와 같은 고운 분말형태의 시료는 1587×10^5 Pa 초과 하는 압력을 사용할 경우 시료 손상 및 측정한계 이하 -up to 500ml/min 생산 가능

→ 분산 방법에 따른 분산성 평가 결과 대량 분산이 가능하고 우수한 분산성을 나타낸 고압 분산이 가장 효율적인 방법으로 판단함. 하지만, 고압 분산 장비의 부재로 인해 실험실 수준에서 분산 작업이 불가능하고 전문 업체에 의존해야 하기 때문에 상시적으로 활용이 불가능하다는 단점이 있음. 따라서, 본 연구에서는 자력교반을 이용하여 전처리 과정을 거친 후 초음파 분산을 이용한 방법을 사용하였으며 초음파 분산을 거친 CNC의 영향을 분석하기 위해 시멘트와의 결합을 통한 특성 평가를 진행해야 될 것으로 판단됨

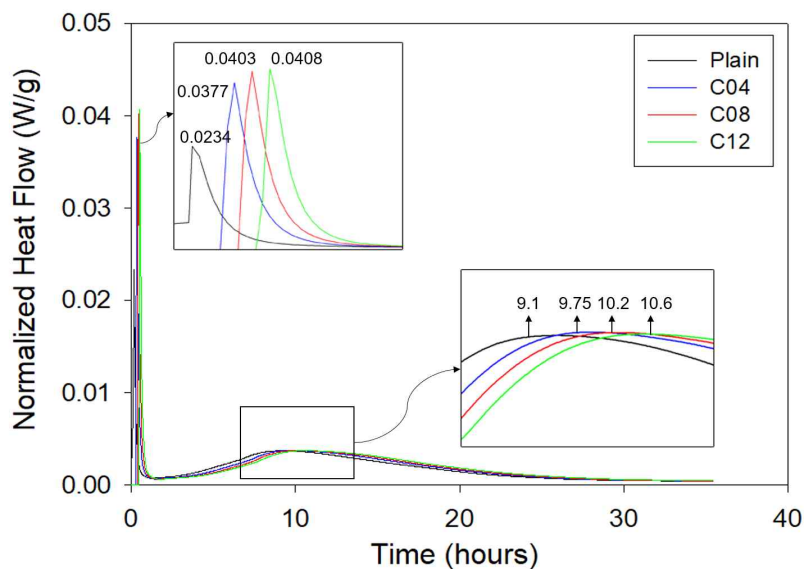
(3) CNC 시멘트의 수화열 분석

- 초음파 분산을 거친 CNC의 혼입률에 따른 시멘트의 수화 특성 분석을 위해 미소 수화열 분석을 실시하였으며, 경화된 시멘트 페이스트의 수화 생성물량을 측정하기 위해 TG(Thermogravimetric) 분석을 실시함
- 시멘트의 수화는 발열 반응이기 때문에 열흐름 및 누적 발열량은 수화 속도 및 수화도 (DOH)와 직접적으로 관련이 있음
- 시험체는 CNC 혼입률 0.4, 0.8, 1.2 vol.%에 따라 시멘트 페이스트를 제조하여 분석을 실

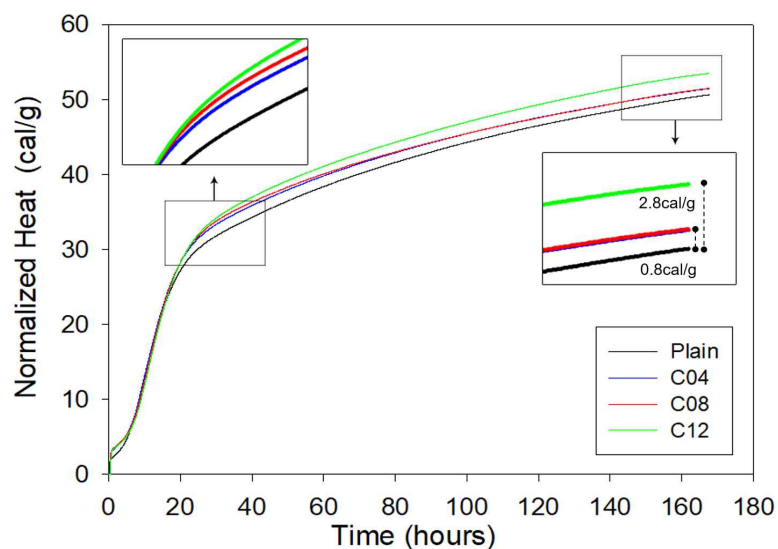
Table 3.1 CNC cement composite mixing design

Mixture No.	wt. %		CNC/Cement (vol. %)
	W	C	
Plain	1	2	—
C04			0.4
C08			0.8
C12			1.2

- 시간에 따른 발열량은 약 9시간의 유도기 이후 강도 발현이 시작된 것으로 나타났으며, 초기 누적 발열량은 Plain과 비슷한 경향을 나타냄
- 160시간이 지난 시점에서 누적 발열량 차이는 C04, C08에서 0.8 cal/g, C12에서 2.8 cal/g를 나타내어 Plain 대비 소폭 상승하는 결과를 나타냄 이는 혼입률에 따라 수화도가 점차 증가하는 것으로 판단됨



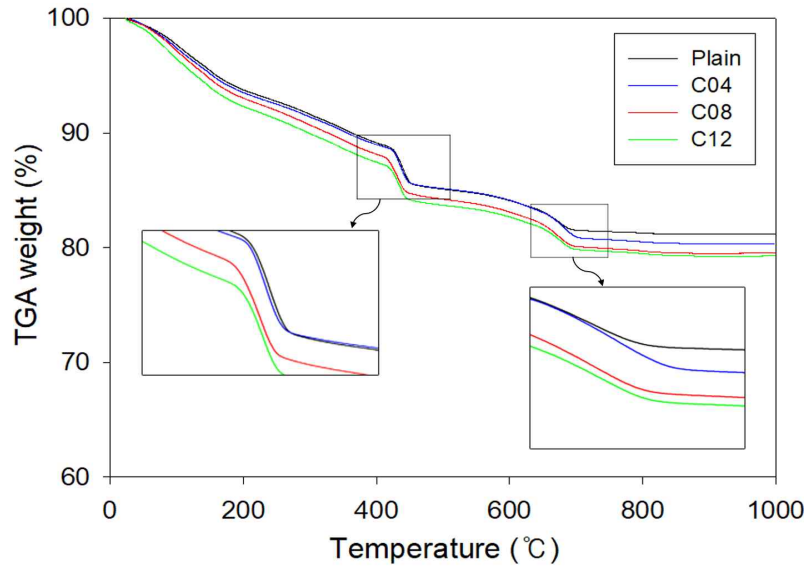
(a) Heat flow for mixtures during the test



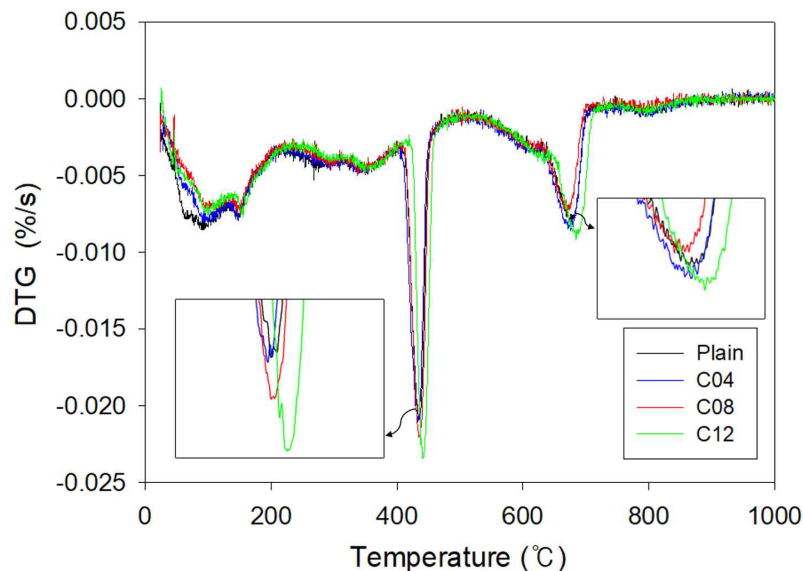
(b) Cumulative heat for mixtures during the test

Fig. 3.1 The results of Isothermal Conduction Calorimetry Analysis

- TG 분석에 의한 질량 변화에서는 열을 가함에 따라 일정한 온도에서 분해되는 고유한 수화물이 존재하기 때문에 모두 유사한 패턴으로 감소하였음
- 흡열반응을 나타낸 450℃에서는 수산화칼슘만 분해하는 구간으로 Plain 대비 전체적으로 CNC 혼입량이 증가할수록 수산화칼슘 생성량에 따른 분해량이 증가하여 질량 손실이 증가함
- Plain에서의 최종 중량은 81.2%, C12에서는 79.2%를 나타내었으며, 두 시험체의 중량 손실 차이는 2%로 나타남. 이러한 결과는 CNC를 혼입하였을 때 시멘트와 더 많은 물이 반응하여 수화 생성물량이 증가하고, 증가한 수화생성물량이 많기 때문에 흡열 피크가 발생된 450℃, 700℃에서의 분해량이 많은 것으로 판단됨



(a) Weight change according to heat



(b) Calorific change according to heat

Fig. 3.2 The results of TGA

- > CNC 혼입률에 따른 수화열 분석 결과 CNC 혼입률 증가에 따라 생성되는 수화 물량이 증가하여 강도 발현에 영향이 있을 것으로 판단하였으며, 구체적인 규명을 위해 강도 특성 분석을 해야 할 것으로 판단됨

(4) CNC 시멘트 강도 특성 평가

- 시멘트 수화에 관한 분석을 구체적으로 규명하기 위해 CNC 혼입률에 따른 강도 특성 평가를 진행하였음
- 강도 특성 평가는 KS L 5105 및 KS L ISO 679에 의거하여 초기 및 장기 강도 특성을 분석하기 위해 재령일 3, 7, 28 일을 평가함
- 시험체 제작은 표준사를 첨가한 모르타르로 제조하였으며, 배합설계는 시멘트 모르타르 표준배합인 1:2:6으로 진행함

Table 4.1 CNC cement mortar mixing design

Classification	wt. %			CNC (compared with cement vol.%)
	W	C	S	
Plain	1	2	6	-
C04				0.4
C08				0.8
C12				1.2

- 압축강도의 경우 모든 재령 일에서 CNC를 혼입한 시험체가 Plain 대비 강도가 향상되는 경향을 나타냄
- 재령 3일에서는 CNC 혼입한 시험체의 강도는 비슷한 경향을 나타내었지만, 7일 에서 부터 C08 시험체의 강도 값은 Plain 대비 약 40% 향상되었으며, 28일에서는 약 30% 향상되는 결과를 나타냄
- 이러한 결과는 기존 연구에서와 같이 수화 생성물 증가에 따른 C-S-H 형성이 높아져 시멘트 매트릭스 구조가 견고해지기 때문인 것으로 판단됨
- CNC 혼입률에 따른 경향은 C08 시험체까지 강도가 증진되었다가 C12 시험체에서 강도가 감소되는 결과를 나타냄 이러한 결과는 기존 연구에서와 같이 수화 생성물량이 고도로 증가함에 따라 취성적 경향이 강해지고 이에 따른 강도 감소 현상이 나타나는 것으로 판단됨
- 휨강도 시험에서는 최대하중이후 급격한 강도 감소에 따른 취성파괴 거동을 나타냄. 초기강도 경향은 Plain과 유사한 경향을 나타냈으나, 28일에서는 Plain에 비해 감소하는 경향을 나타냄. 이러한 결과는 일반적인 고강도 콘크리트의 파괴양상에 따른 것으로 기존 연구결과에서와 같이 CNC 혼입에 따라 생성되는 수화물(C-S-H)로 인해 강도 향상에 영향이 있으나 시멘트 내부의 매트릭스가 견고해짐에 따른 취성적 파괴로 인하여 휨성능이 감소하는 것으로 판단됨
- Plain을 제외한 CNC 혼입률에 따른 비교에서는 C08 시험체에서 가장 높은 값을 나타냄

Table 4.2 Mean strength according to Age

days Strength (MPa)	3				7				28			
	P	C04	C08	C12	P	C04	C08	C12	P	C04	C08	C12
Compression	18	20	21	22	23	30	33	25	39	47	52	45
Flexure	0.9	0.9	1.2	1.1	1.4	1.3	1.6	1.3	2.9	1.4	1.9	1.3

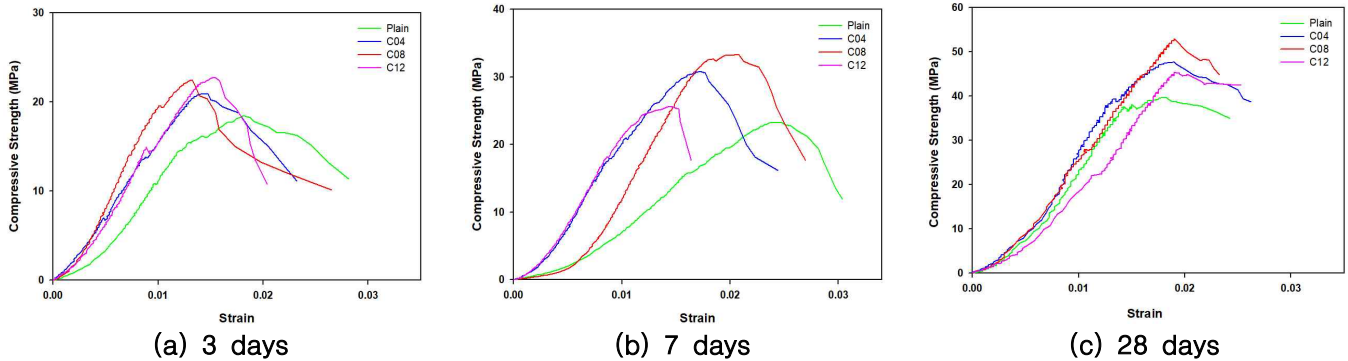


Fig. 4.1 Stress-strain curves of compression tests according to age

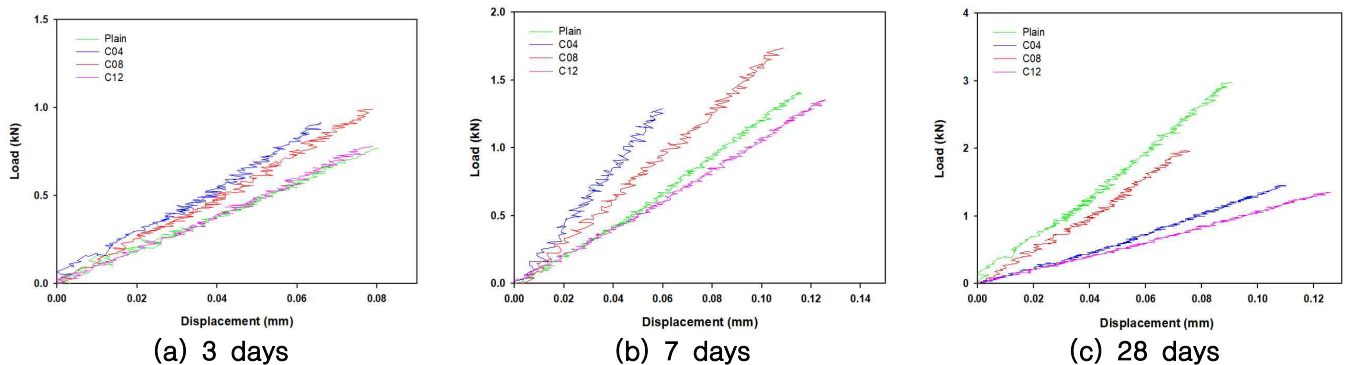


Fig. 4.1 Load-displacement curves of flexure tests according to age

-> CNC의 특성은 앞서 언급하였듯이 미수화된 시멘트의 수화를 촉진시키는 특성을 갖고 있으며 이에 따라 내부 수분이 손실되어 발생하는 수축 현상을 초래할 것으로 판단함 따라서, 팽창성의 수화물을 형성하여 수축을 보상하기 위해 사용되는 팽창재를 첨가하여 CNC 유무에 따른 수축 효과를 분석해야 될 것으로 판단됨

(5) 팽창재를 혼입한 CNC 시멘트 복합체의 자기수축 및 강도 특성 평가

- 앞선 강도 특성 평가 결과 가장 우수한 강도 값을 나타낸 CNC 혼입률 0.8 vol.%와 CNC를 혼입하지 않은 Plain에 대하여 CSA 계 팽창재를 첨가한 시험체의 수축률 및 강도 특성을 비교함
- 압축, 휨, 수축 측정을 위한 시험체 제작은 KS L ISO679(시멘트의 강도 시험 방법) 및 KS F 2424(모르타르 및 콘크리트의 길이 변화 시험 방법)에 따라 제작하여 실험을 진행하였으며, 직접 인장강도 시험의 경우 KS L 5104에 따라 도그본(dog bone) 형태로 제작하였음
- 강도 시험은 28일 강도 측정을 진행하였으며, 길이 변화 시험의 경우 7일(팽창), 28일

(수축)에 따라 수축률을 평가하였음

- 팽창재 치환율은 팽창재가 10% 이상 치환될 경우 초기 경화 구간에서의 에트린자이트 과다 생성에 의한 팽창 현상을 불리하게 보고 10% 이내의 치환율을 제안하고 있으나, 치환율 변수에 따른 특성을 알아보고자 5, 10, 15%의 변수를 선정하여 비교하였으며, 실험분석은 공인 시험기관에 의뢰하였음

Table 5.1 Evaluation of characteristics of CNC cement composites

구 분		평균 압축강도(MPa) (KS F 2405)	평균 휨강도(MPa) (KS F 2408)	평균 직접인장강도(MPa) (KS L 5104)	길이변화율(%) (KS F 2424)	
type	wt. %				7일	28일
Plain	5	28.9	13.3	1	0.021	-0.148
	10	34.5	16.8	0.9	0.031	-0.138
	15	35.4	13.3	0.7	0.063	-0.127
C08	5	36.1	11.8	2.2	0.018	-0.042
	10	34.1	11.8	1.8	0.045	-0.035
	15	41.7	11.4	1.7	0.116	0.037

- 팽창재 치환율에 따른 실험 결과 압축강도의 경우 치환율 10%를 제외하곤 CNC를 혼입한 시험체에서 압축강도가 상승되는 결과를 나타냄 또한 직접 인장강도 시험에서도 Plain대비 최대 2배 이상 증가한 결과를 나타냄
- 휨강도의 경우 다소 감소하는 경향을 나타냄. 이러한 결과는 앞선 강도 실험을 통해 기술한 바와 같이 CNC 혼입으로 인한 시멘트 매트릭스 구조가 견고해짐에 따른 취성적 파괴에 기인한 것으로 압축에는 비교적 강하나 휨 성능은 약한 것으로 판단됨
- 길이 변화율 측정에서는 앞서 수축률이 증가할 것이라고 예상했던 결과와는 달리 CNC를 혼입한 시험체에서 팽창에 대한 수축률이 Plain 대비 약1.2배 향상되는 결과를 나타냄
- 이러한 결과는 일반적인 팽창재를 이용한 수축 균열 제어 메커니즘을 통해 설명되는데 시멘트의 경화 과정에서 팽창성의 수화물을 형성하는 것으로 에트린자이트 와 수산화칼슘 생성에 의한 팽창력을 이용하는 것임. 따라서, CNC의 수화반응 촉진으로 인해 생성되는 수화물로 인하여 팽창력이 증대되고 상대적으로 수축이 저감 되는 효과가 나타나는 것으로 판단됨

-> CNC의 첨가는 압축강도 성능 향상 및 수축률을 저감 시키는 효과는 있으나, 취성파괴에 의한 휨 성능이 저감 되는 양상을 나타내어 섬유 보강을 통한 휨 성능 개선이 필요할 것으로 판단됨

(6) 천연 섬유보강 ECC 콘크리트 특성 평가

- CNC 적용 시멘트 복합체의 휨 성능 개선 방법으로 셀룰로오스계 천연섬유인 Coir, Flax, Green fiber를 보강하였음
- 천연섬유 종류에 따른 물리적 특성을 판단하기 위해 각 섬유에 대한 강도 실험을 진행함

Table 6.1 Natural fiber physical properties

Classification	Density	Diameter (μm)	length (mm)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)
Flax	1.5	40–600	10	345–1500	27.6
Coir	1.15	100–460		131–220	4–6
Green	1.4	16–22		930	53

- 섬유 혼입률은 기존 ECC의 강도 특성 관련 연구를 참고하여 1%로 선정하였으며, 천연 섬유의 흡습 효과에 따라 배합 시 유동성 저하를 방지하기 위한 고성능 감수제를 첨가하였음

Table 6.2 Natural Fiber Reinforced ECC Mixing Design

Fiber Type	wt.(%) (W/C=50%)			vol.%	
	W	C	S	S.P	Fiber
Flax	1	2	6	0.25	1
Coir					
Green					

- 천연섬유 종류에 따른 강도 특성평가 결과 Coir fiber를 보강한 시험체에서 압축강도가 약 41 MPa로 가장 높게 나타났으나, 휨강도에서는 Flax fiber를 보강한 시험체에서 약 8.8 MPa로 가장 높은 결과를 나타냄

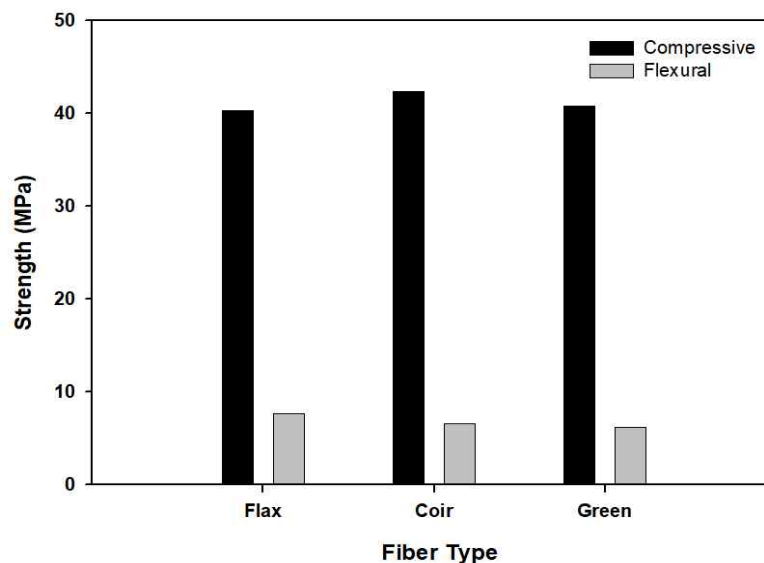


Fig. 6.1 Strength test results according to fiber type

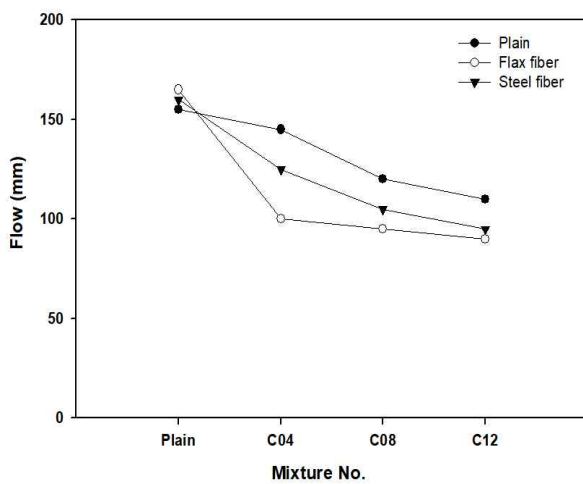
- > 천연섬유를 보강한 강도 특성 평가 결과를 바탕으로 저수축 고인성 콘크리트 제조를 위한 배합사항으로 Flax fiber를 첨가한 시험체의 강도 특성 및 수축 저감 성능 실험을 진행해야 할 것으로 판단되며, 추가적으로 일반적으로 섬유 보강에 가장 많이 사용되는 인공섬유인 Steel fiber와의 비교를 통해 최적 섬유 혼입에 관한 분석을 진행해야 될 것으로 판단됨 또한, 최적 배합 사항 도출을 위해 우선적으로 유동성 평가가 진행되어야 할 것으로 사료됨

(7) 섬유보강 ECC콘크리트의 유동성 평가

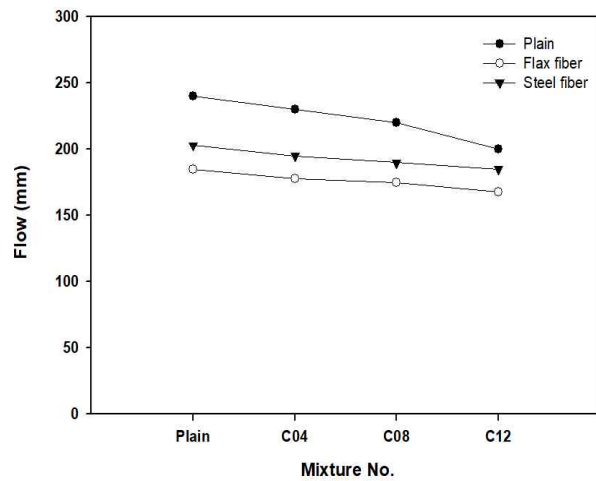
- 섬유 보강 ECC의 수축 및 강도 특성을 평가하기 전 우선적으로 Flow test를 통한 유동성 평가를 실시하였음
- 강섬유의 경우 직경 200~600 μm , 인장강도 400~20000 MPa, 비중 7.75 길이 13mm를 사용함
- 배합 시 사용된 시멘트는 일반 포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였으며, 혼화재로는 장기에 걸쳐 강도가 증진되고 수밀성, 내구성 향상에 효과가 있는 Fly ash를 사용하였음. 치환율은 기존 ECC에 관한 연구를 바탕으로 강도향상에 가장 적합한 사항을 검토하였으며, 이에 따라 시멘트 중량 대비 25%로 하여 실험을 진행함
- 또한, 잔골재의 경우 모르타르 배합의 사용기준인 표준사를 사용하였음 (ISO 679·2009에 따른 SiO₂ 함량 98% 이상)
- 유동성 향상을 위해 사용된 감수제는 일반 감수제보다 분산 효과가 뛰어난 고성능 감수제(superplasticizer)를 사용하였으며, CNC 혼입률 증가에 따른 유동성 저하를 방지하기 위해 감수제량을 조정하여 최적 첨가량을 선정하였음
- W/C 및 W/B 산정 기준은 설계강도에 따라 배합이 상이하기 때문에 기존 ECC 배합에 따른 연구를 참고하여 비율을 사용함
- 실험 방법은 KS L 5111에 따른 수경성 시멘트 시험용 flow table을 사용하였으며, KS L 5105에 따라 실험을 진행함
- CNC를 혼입하지 않은 Plain과 CNC 혼입률에 따른 flow test 결과 CNC 혼입률이 높을수록 flow 값이 감소하는 경향을 나타냈으며, CNC 0.8 vol.%부터 급격히 낮아지는 경향을 나타냄 이는 시멘트와 배합 시 초기 수화 촉진에 따른 온도 상승으로 인하여 초결 시간이 일반 Plain에 비해 빠르게 진행되어 유동성이 저하되는 것으로 판단됨
- 또한, flax fiber를 첨가한 시험체에서 CNC를 혼입한 경우 flow 값이 Plain 기준 최대 오차가 -85mm를 나타냄 이는 flax fiber 의 흡습성에 따라 배합 과정에서의 수분 흡수에 의한 영향으로 판단됨
- 하지만 고성능 감수제를 사용하였을 때의 전체적인 flow 값은 Plain 과의 오차가 평균 -10mm로 나타나 충분한 유동성이 확보되는 것으로 나타남

Table 7.1 Fly ash properties

SiO ₂ (%)	density (g/m ³)	specific surface area (cm ² /g)	moisture (%)	ignition loss (%)
45	1.95	4,500	1	3



(a) Flow test result
(without superplasticizer)



(b) Flow test result
(with superplasticizer)

Fig. 7.1 The results of flow test

Table 7.2 ECC mixing design

Mixture No.	wt.%/m ³ (W/B=30%)				vol.%		CNC/Cement (vol.%)
	W	C	S	FA	S.P	Fiber	
Plain	0.375	1	0.369	0.25	0.25	Flax, Steel 1 (Use for strength evaluation)	-
C04SP075					0.75	-	0.4
C04F1SP075						Flax 1	
C04S1SP075						Steel 1	
C08SP125					1.25	-	0.8
C08F1SP125						Flax 1	
C08S1SP125						Steel 1	
C12SP225					2.25	-	1.2
C12F1SP125						Flax 1	
C12S1SP125						Steel 1	

-> 고성능 감수제 사용으로 인한 유동성 확보를 통해 배합 사항을 도출하였으며 섬유 종류에 따른 역학적 성능을 평가하기 위하여 수축률 및 강도 특성 분석을 진행해야 될 것으로 판단됨

(8) 섬유 보강 ECC콘크리트의 수축 변화율 측정

- 앞서 진행한 길이 변화 시험에서 CNC첨가로 인해 나타나는 수화생성물인 에트린자이트로 인해 팽창성을 확보한 결과를 토대로 팽창제를 첨가하지 않고 CNC 자체의 수축저감 성능을 평가하기 위한 실험을 진행하였음
- ECC 콘크리트의 수축 변화를 측정하기 위해 양단 중심에 타공된 40×40×160mm 각주형 몰드를 사용하여 수축에 방해되지 않도록 매립게이지를 시험체 중심부에 위치시켜 와이어로 고정시킨 후 몰드의 바닥과 양단에 1mm 두께의 테프론 시트(teflon sheet)를 적용하여 공시체의 이동이 몰드에 의해 구속받지 않도록 하였음. 또한, 각 변수에 따라 시멘트 복합체를 타설 후 수분 증발 및 흡수를 막기 위해 폴리에스테르 필름으로 외기와 격리 시켜

측정에 적합한 환경을 조성함

- 타설 직후 수축 변형률을 측정하고 24시간 후에 시험체를 탈형 하였으며, 외부와의 수분 이동을 차단하기 위해 알루미늄 접착테이프로 노출면을 밀봉하여 항온·항습 조건에서 데이터 로거를 이용한 재령 1일, 7일, 30일, 60일 경과 시 수축 변형률을 측정함

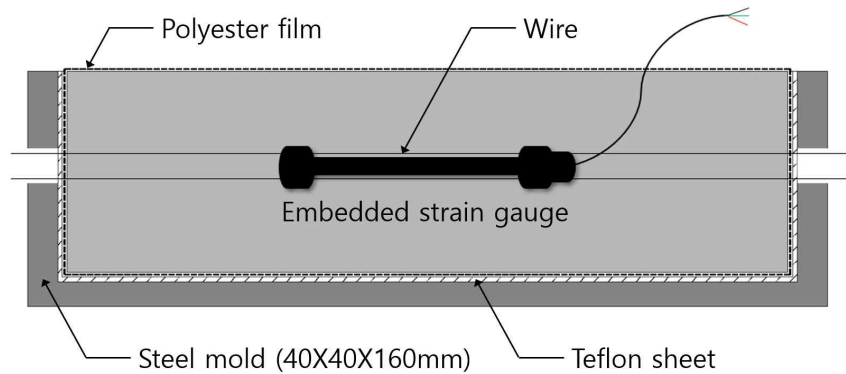


Fig. 8.1 Embedded strain gauge detail



Fig. 8.2 shrinkage test set-up

- 수축 변형률 측정 결과, 전체적으로 타설 후 약 1일까지는 팽창하였으며 그 후 약 30일까지 수축량이 급격하게 증가하는 양상을 나타내었으며 그 후에는 완만해지는 경향을 나타내었음
- CNC 혼입 시험체의 경우 초기 팽창률이 다소 큰 경향을 나타내었는데, 일반적으로 팽창 현상은 수화 생성물 중 에트린자이트에 의해 시멘트를 팽창시키는 것으로 알려져 있으며, 본 실험에서의 팽창 현상은 CNC 혼입함으로써 Plain 시험체 대비 더 많은 수화 생성물 생성되어 팽창률이 증가한 것으로 판단됨
- Plain 시험체의 경우 초기 7일까지 급격한 수축을 나타내지만 CNC를 혼입한 경우 30일까지 비교적 완만하게 수축량이 증가하는 경향을 나타냄

Table 8.1. Drying shrinkage strain of cementitious composites over time

Series	Final shrinkage (μm)			
	1 Day	7 Days	30 Days	60 Days
Plain	111.43	-264.08	-606.67	-874.95
C04	227.62	37.62	-459.05	-666.43
C04F1	200.95	75.95	-256.71	-490.10
C04S1	242.86	52.86	-475.29	-684.72
C08	282.86	86.86	-268.81	-394.14
C08F1	249.52	173.52	-232.19	-430.57
C08S1	254.29	110.29	-427.57	-612.05
C12	165.71	-54.29	-542.00	-765.10
C12F1	205.71	85.71	-308.00	-524.76
C12S1	233.33	-26.67	-531.81	-746.00

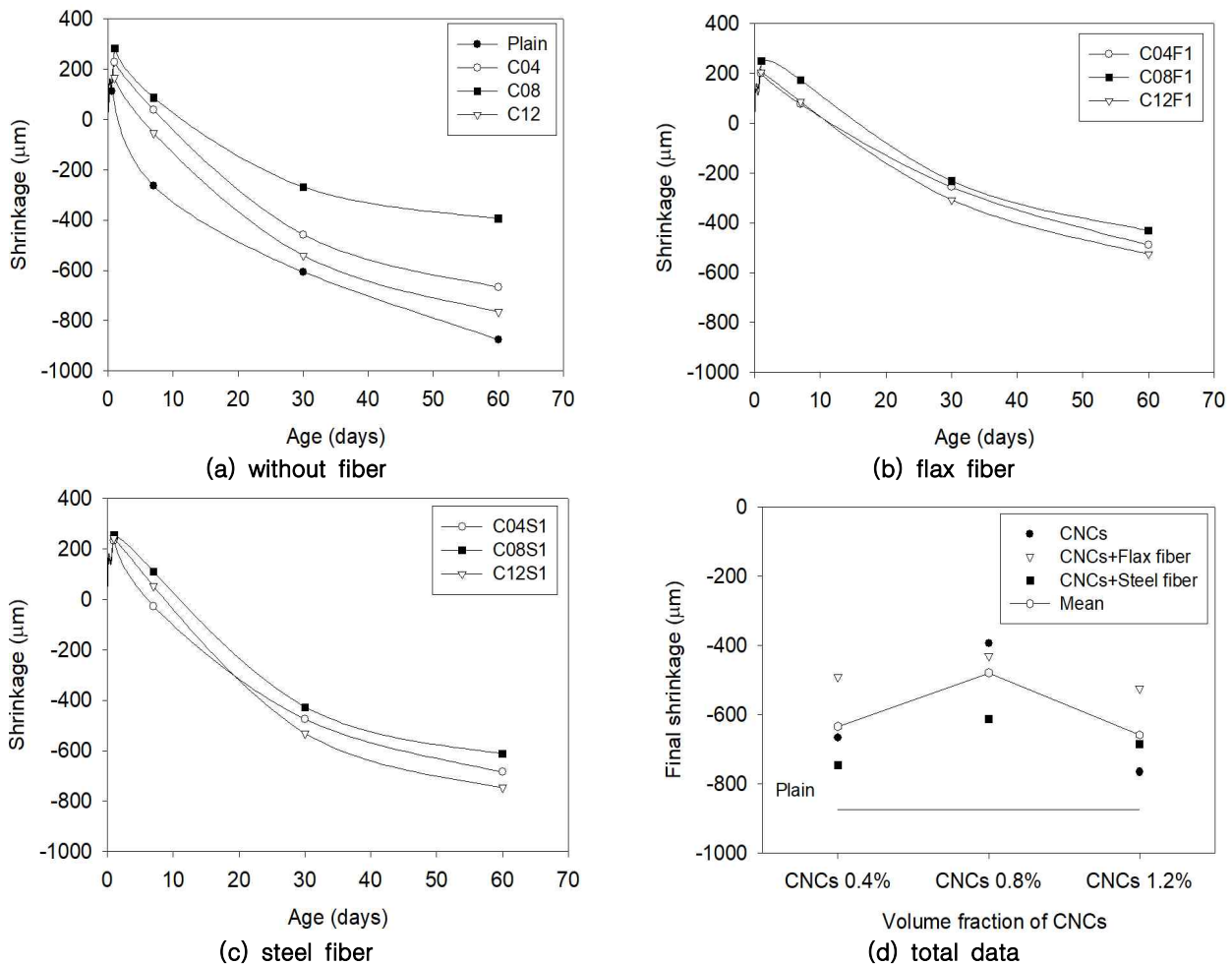


Fig. 8.3 shrinkage curves

- CNC 혼입률에 따른 수축 변형률을 분석한 결과, 재령 60일에서 Plain 시험체의 최종 수축 변형률은 $-874.95\mu\text{m}$ 였으며, CNC를 혼입한 경우 각각 C04 시험체는 $-666.43\mu\text{m}$, C08 시험체는 $-394.14\mu\text{m}$, C12 시험체는 $-765.10\mu\text{m}$ 를 나타내어 CNC 혼입률에 상관없이 Plain 대비 수축률이 저감 되는 효과를 나타냄
- 이러한 결과는 CNC의 수화반응 촉진 특성에 의한 영향으로 생성된 에트린자이트량이 증가함에 따라 팽창성이 Plain 대비 높아져 수축률이 저감되는 효과가 나타난 것으로 판단
- 특히 CNC 0.8 vol.% 혼입 시 수축 변형률이 Plain 대비 55% 감소를 나타내며 수축 저감

성능이 가장 우수한 것으로 나타남

- C04, C12에서는 유사한 수축률 경향을 나타냈으나, 섬유 혼입에 따른 인장 내력 차이가 시험체의 강도에 영향을 미칠 것으로 판단됨
- > CNC 혼입 ECC의 수축률과 강도 특성의 관계 규명을 위해 강도 특성 평가를 진행해야 될 것으로 판단됨

(9) 섬유 보강 ECC의 강도 특성 평가

- 시멘트 복합체 강도 실험을 통해 확인된 취성적 파괴 양상으로 인한 휨성능이 저하되는 점을 보완하기 위하여 천연섬유 및 인공섬유로 보강한 ECC를 제작하였으며, CNC 혼입률 및 섬유의 종류를 변수로 압축 및 휨강도 실험을 수행하였음 이를 통해 각 변수에 따른 강도 향상 효과를 분석하여 고인성에 요구되는 성능에 대한 CNC의 유효성을 평가함

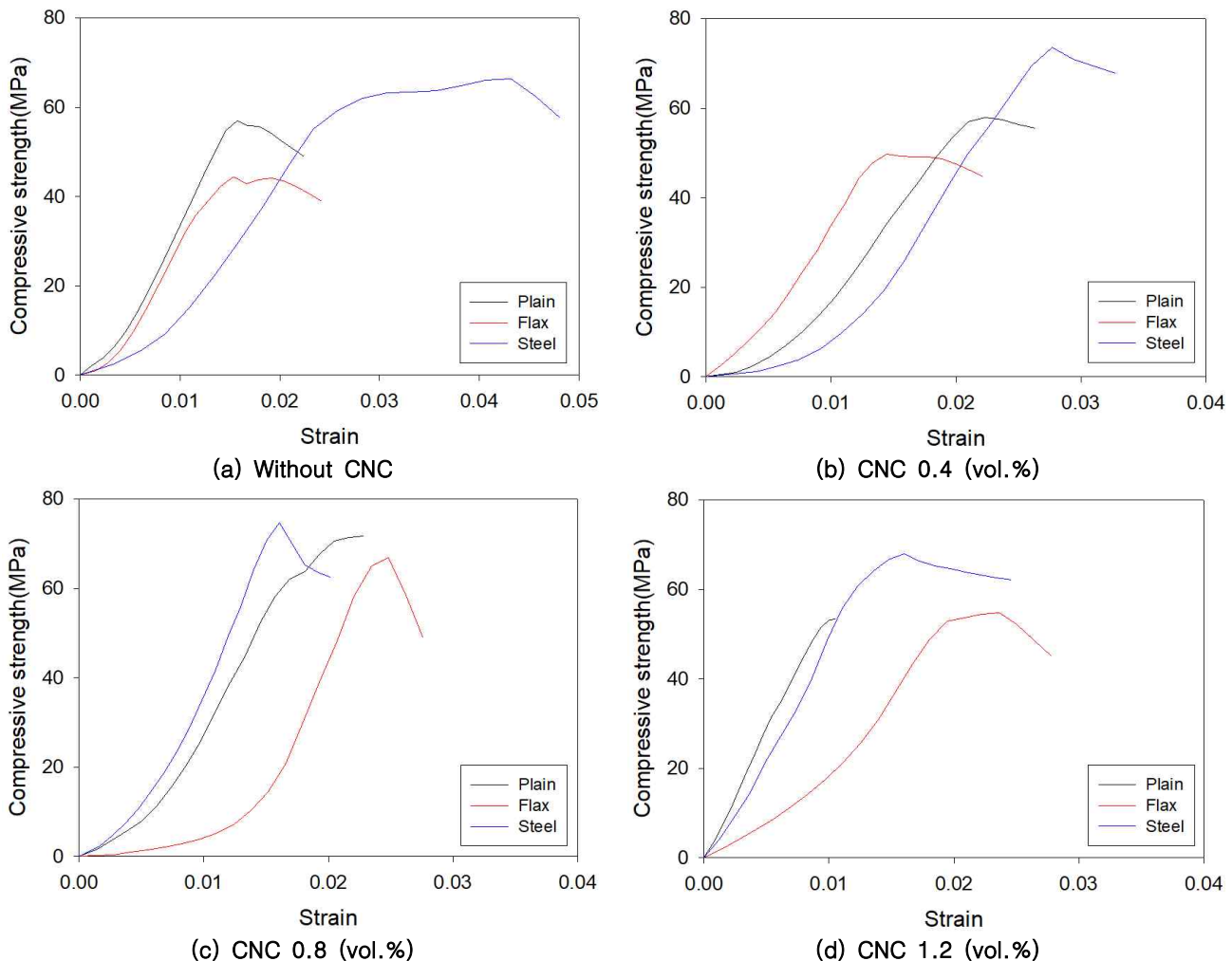


Fig. 9.1 Stress-strain curves of compression tests according to fiber type

- CNC를 혼입하지 않은 시험체에서 flax fiber 보강은 일반 Plain 시험체에 비해 압축강도가 감소하는 경향을 나타냈으며 이는 섬유의 강성 및 밀도와 관련이 있는 것으로 판단되며, 섬유가 시멘트 조성물에 혼합될 때 시멘트 조성물의 일부를 대체하며 이로 인해 총 밀도 및 강성이 감소함을 의미함
- 하지만 steel fiber를 보강한 시험체에서는 압축강도가 향상되었으며, 이는 steel fiber가 flax fiber보다 밀도 및 강성이 높기 때문인 것으로 판단됨

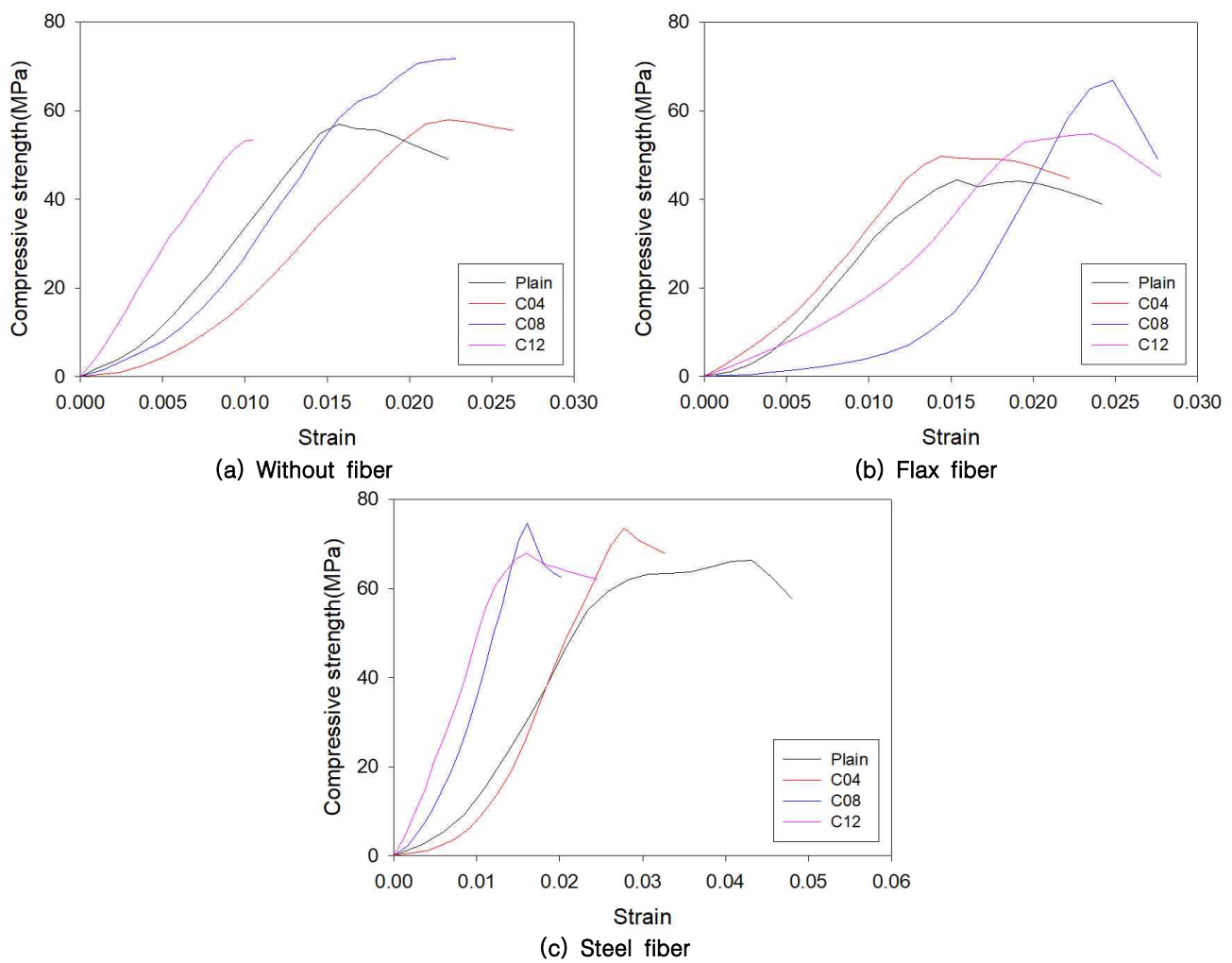


Fig. 9.2 Stress-strain curves of compression tests according to CNC concentration

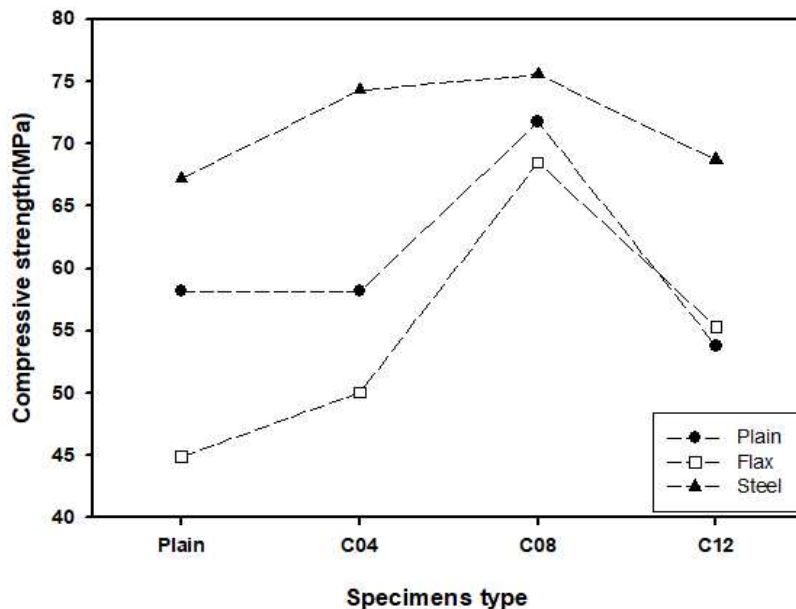


Fig. 9.3 Compressive strength trend of compression tests

- CNC 혼입률에 따른 압축강도 실험 결과 섬유를 보강하지 않은 시험체에서 CNC 혼입률 0.8 vol.%이 다른 시험체 대비 10~20% 강도가 향상되는 경향을 나타내었으며, 섬유를 보강하지 않은 시험체와 flax fiber를 보강한 시험체의 강도 양상이 비슷한 결과를 나타냄
- 전체 ECC 시험체에 관한 압축강도 시험 결과의 경향을 분석했을 때 CNC 최적 혼입률은 앞선 시멘트 복합체의 실험 결과와 동일하게 CNC 혼입률 0.8 vol.%에서 가장 우수함을

확인할 수 있었음

- CNC 혼입 유무에 따른 강도 향상률을 비교한 결과 Plain 대비 CNC 혼입률 0.4, 0.8 및 1.2 vol.%에 대한 섬유를 보강하지 않은 시험체에서는 강도 향상률이 각각 0%, 23%, -8%로 나타났으며, flax fiber로 보강한 경우 11%, 53%, 23%, steel fiber로 보강한 시험체에서는 10%, 12%, 2%로 나타내어 CNC 혼입으로 인한 성능 개선 효과를 확인할 수 있었음
- 하지만 섬유를 보강하지 않은 시험체의 경우 강도가 감소하는 경향을 나타내었으며, CNC 혼입에 의한 효과는 섬유의 유무와 관계없이 CNC 혼입률 0.8 vol.%에서 가장 두드러지는 결과를 나타냄

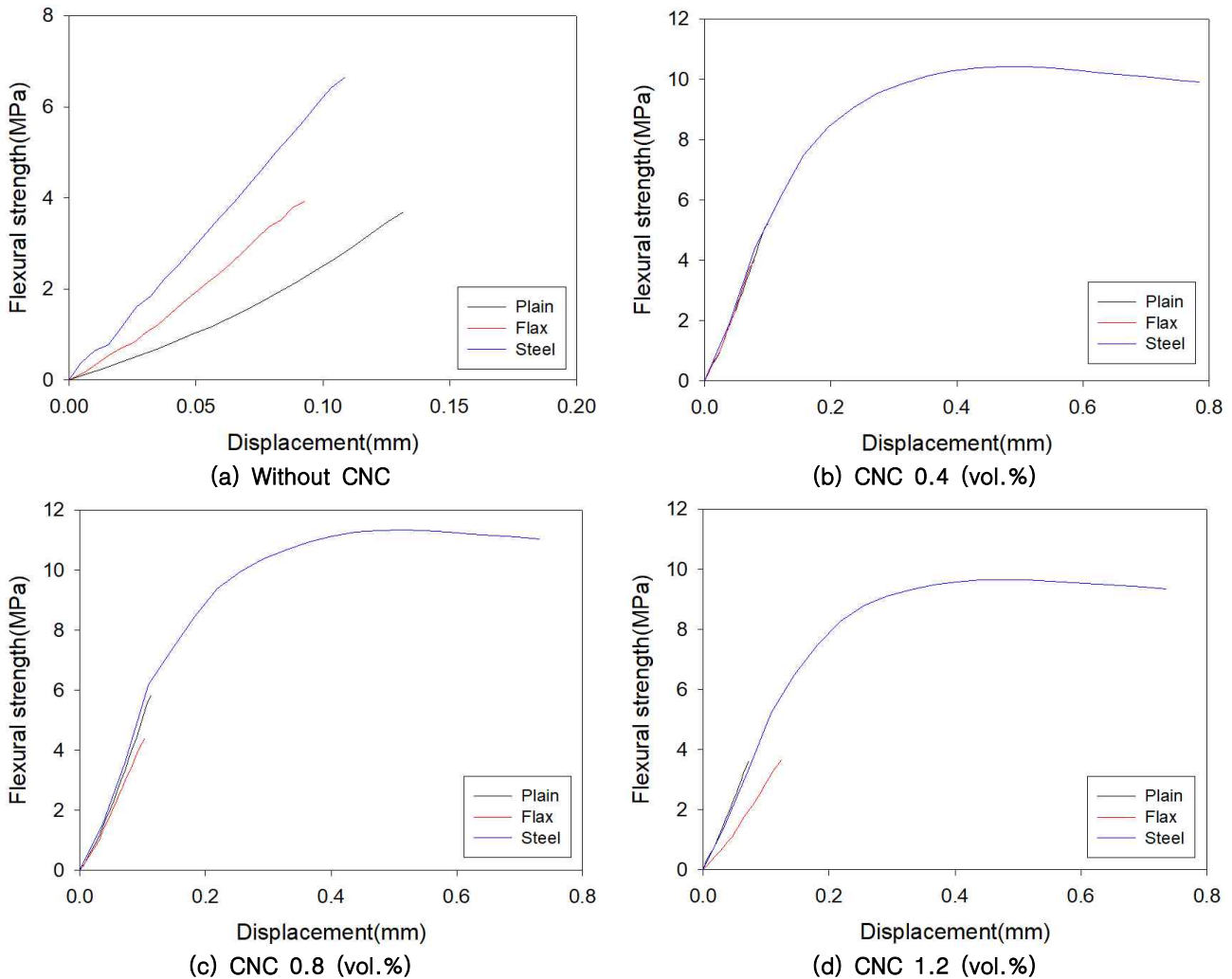


Fig. 9.4 Stress-displacement curves of flexural tests according to fiber type

- 휨강도 실험 결과 flax fiber는 ECC에 효과적인 결과를 나타내지 않았으며, CNC 0.4, 0.8 vol.%를 혼입한 경우 휨강도는 일반 Plain 시험체 대비 휨강도가 감소하는 경향이 나타남

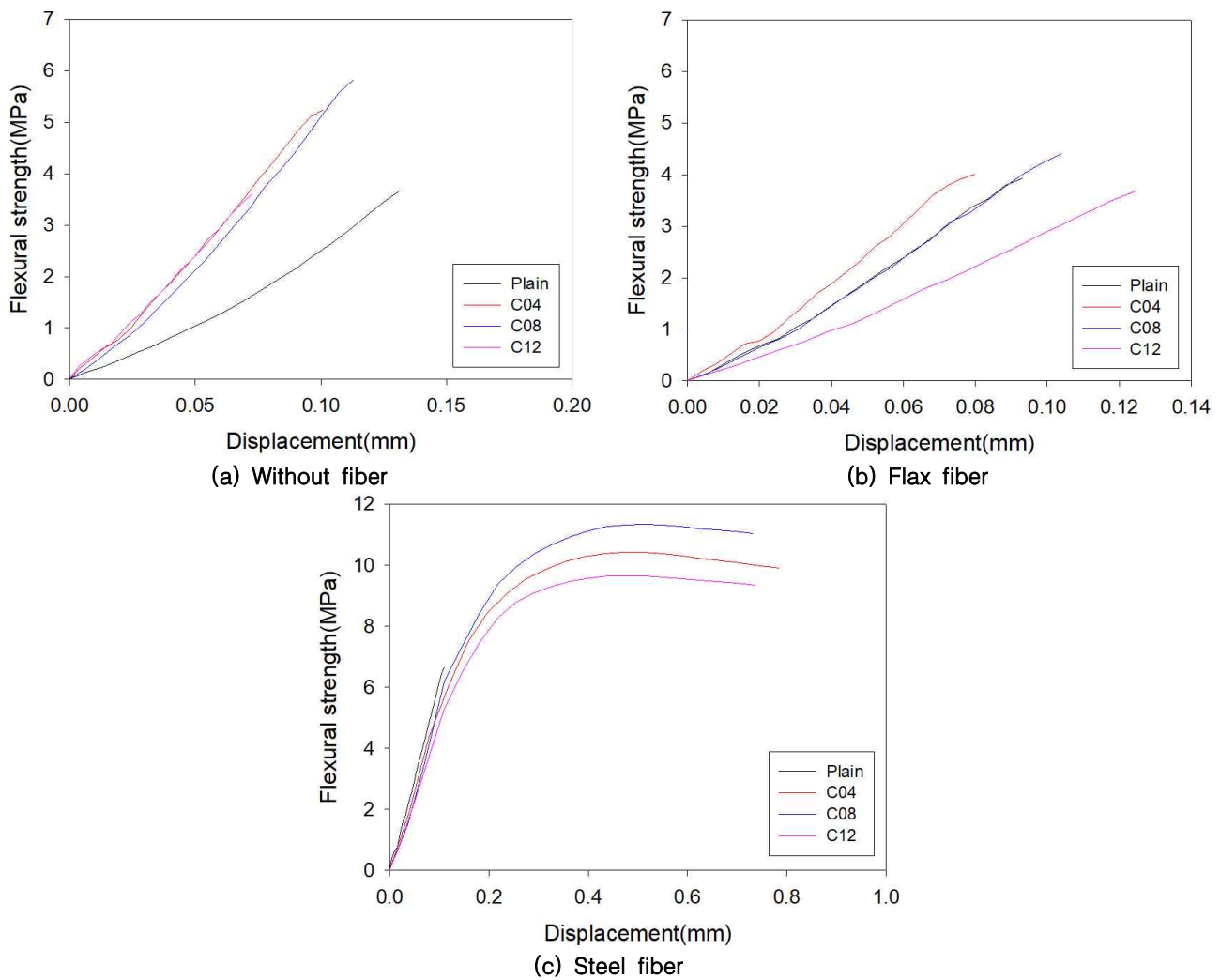


Fig. 9.5 Stress-displacement curves of flexural tests according to CNC concentration

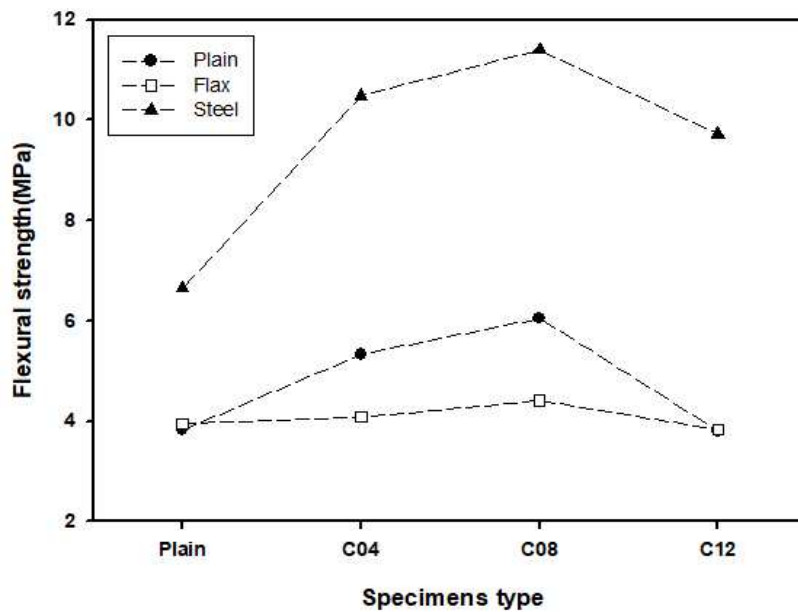


Fig. 9.6 Flexural strength trend of flexure tests

- 하지만 steel fiber로 보강한 시험체에서는 CNC 혼입률에 관계없이 우수한 강도를 나타냈으며 섬유를 보강하지 않은 시험체를 제외하고는 연성 거동을 나타냄
- 또한, 시멘트 내 CNC의 형상을 확인하기 위하여 SEM 분석을 실시하였으며, 분석 결과 침상 형태의 CNC 입자가 시멘트 내에 분포되어있는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 기존 연구에서의 CNC 메커니즘과 같이 시멘트 코어로의 수화를 증진시키기 위한 water way

역할을 하는 것으로 판단됨

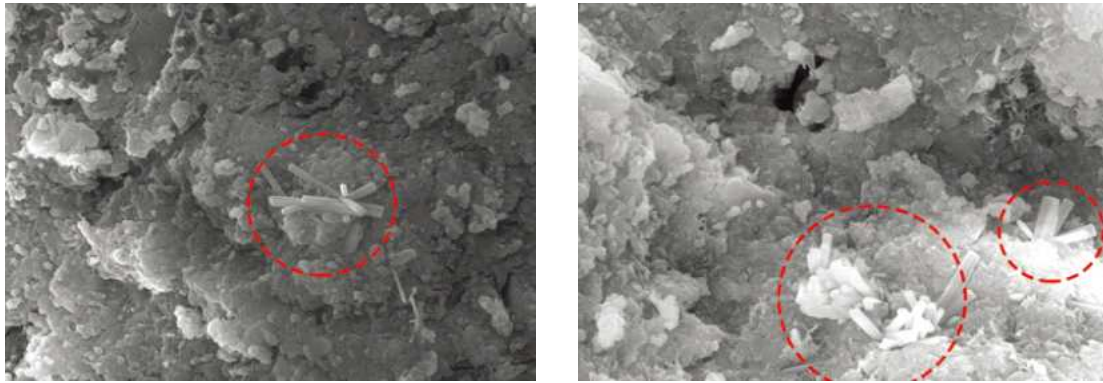


Fig. 9.7 CNC shape in cement

-> CNC 혼입 ECC의 강도 특성 평가 결과 강도가 개선되는 효과를 나타냈으며, 고온 환경에서의 내부 수화물 분해에 따른 강도 저하 및 공극 구조 변화를 살펴보기 위해 내화성 평가 및 공극을 분석이 필요할 것으로 판단하였음

(10) 내화성 평가

- 앞선, 강도 특성 평가 결과를 바탕으로 CNC 혼입률 및 steel fiber 보강에 따른 특성 변화를 살펴보기 위해 내화성 평가를 수행하였음
- 시험체의 내화성 평가 방법으로는 기계적 특성을 평가하기 위한 잔존 강도 평가와 화학적 특성을 평가하기 위한 MIP(mercury intrusion porosimetry) 분석을 수행하였음
- 내화실험의 가열 조건은 100, 200, 400, 600, 800℃ 5개의 가열 온도에 대하여 승온 온도 2℃/min으로 설정하여 목표 온도 도달 후 2시간 동안 해당 온도를 유지한 후 가열을 종료하였음
- 가열 종료 후, 내화로를 개방하여 냉각을 진행하였으며, 가열한 시험체를 충분히 식힌 후 잔존 압축강도 및 휨강도를 측정하였음



(a) Electronic furnace



(b) Electronic furnace complete view



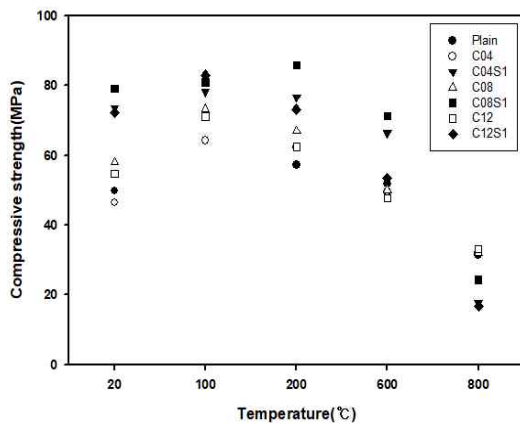
(c) Compressive strength tests set-up



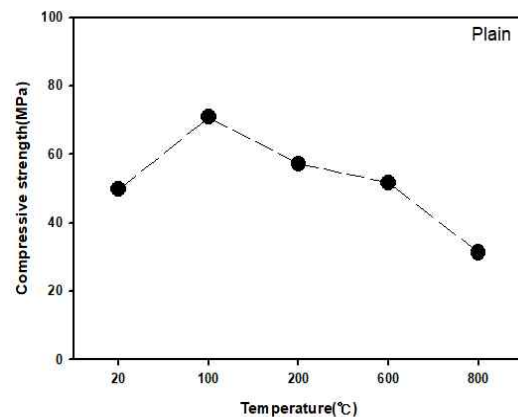
(d) Flexural strength tests set-up

Fig. 10.1 Fire resistance tests

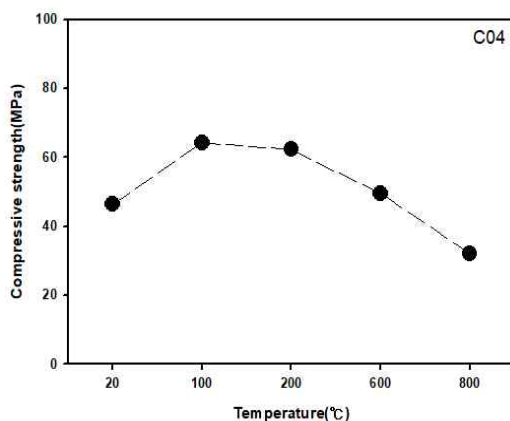
- 잔존 압축강도 실험 결과 섬유 혼입과 CNC 혼입률에 따라 잔존 압축강도 양상이 다르게 나타남
- Plain 시험체의 경우 100℃에서 상온 대비 약 50%의 강도증진효과가 나타났으며, 200℃에서도 약 15%의 강도 증진효과가 나타났음
- 600℃에서는 상온과 유사한 강도를 나타냈으며, 800℃에서는 급격한 강도 감소를 나타냄
- 섬유를 보강하지 않은 C04, C08, C12의 결과를 비교해보면, C08에서 가장 높은 압축강도를 나타냈으며, 이러한 결과는 잔존압축강도에서도 유사하게 나타났으나, 800℃를 제외하면 C08 시험체가 가장 높은 압축강도를 나타냄
- 이를 통해 CNC 혼입이 압축강도에 영향을 미치나, 잔존 압축강도 양상에는 큰 영향이 없음을 확인할 수 있음
- steel fiber를 혼입한 C04S1, C08S1 및 C12S1의 결과를 비교해보면, 상온 압축강도는 C08S1이 가장 높게 나타났으며, 이를 통해 CNC 0.8 (vol.%)가 가장 최적의 혼입률로 판단됨
- 대부분 시험체가 100℃ 이후부터 강도가 감소되는 압축강도 양상을 나타냈으나 C08S1에서는 200℃ 이후 강도가 감소하는 양상을 나타냄
- 섬유 혼입 유무에 따른 강도 차이를 보면 CNC의 영향보다 steel fiber의 영향이 큰 것으로 판단됨
- 상온 압축강도는 steel fiber 혼입 후 CNC 혼입률 0.4, 0.8, 1.2%에서 각각 58%, 36%, 32% 향상되었으며, CNC 혼입률이 낮을수록 steel fiber 혼입으로 인한 강도증진 효과가 큰 것으로 나타남



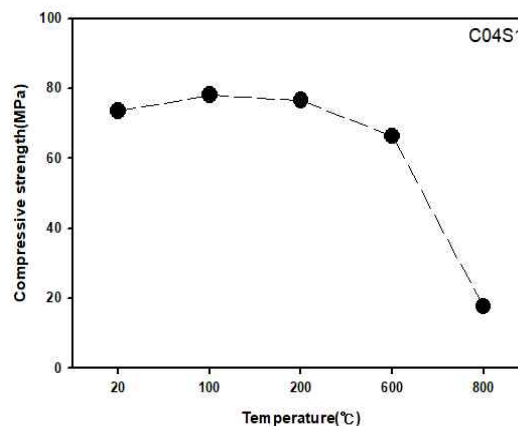
(a) All specimens



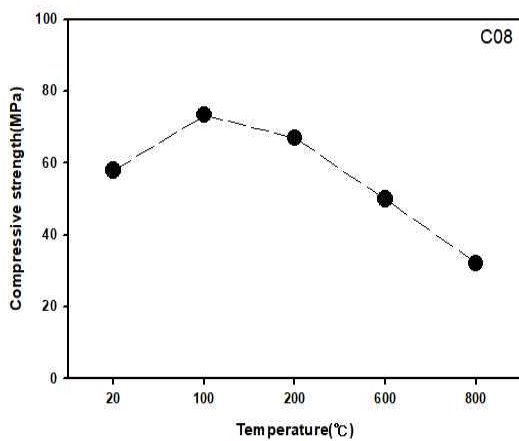
(b) Plain



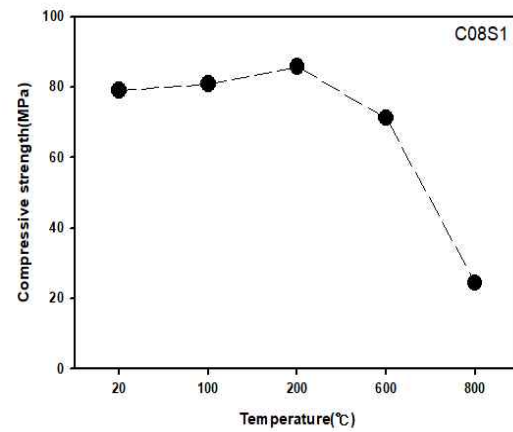
(c) CNC 0.4 (vol.%)



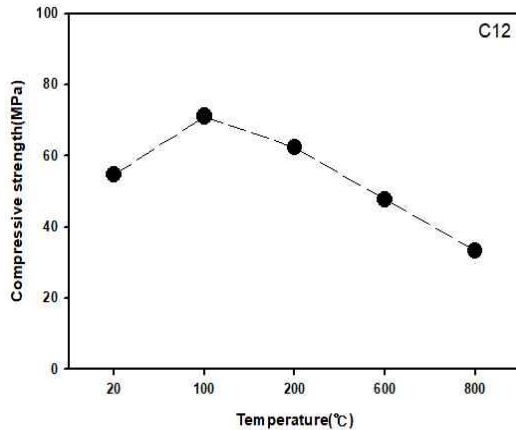
(d) CNC 0.4(vol.%) with steel fiber



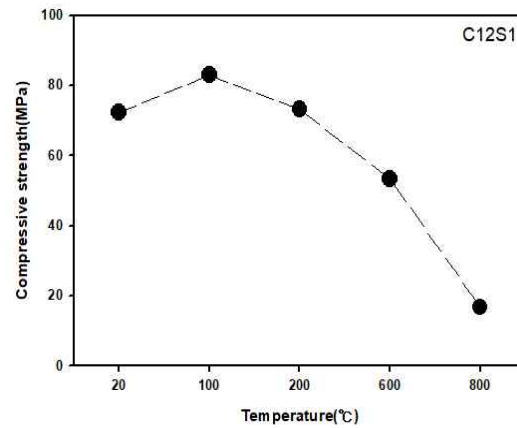
(e) CNC 0.8 (vol.%)



(f) CNC 0.8(vol.%) with steel fiber



(g) CNC 1.2 (vol.%)



(h) CNC 1.2 (vol.%) with steel fiber

Fig. 10.2 Maximum of residual compressive strength according to temperature

Table. 10.1 Maximum strength of compression test (Unit: MPa)

Temp.(°C)	Plain	C04	C04S1	C08	C08S1	C12	C12S1
20	49.8	46.5	73.6	58.0	79.1	54.8	72.3
100	70.9	64.3	78.1	73.3	80.9	71.1	83.0
200	57.3	62.3	76.6	67.0	85.8	62.4	73.2
600	51.8	49.5	66.4	50.0	71.2	47.8	53.4
800	31.3	32.0	17.6	32.1	24.4	33.2	16.8

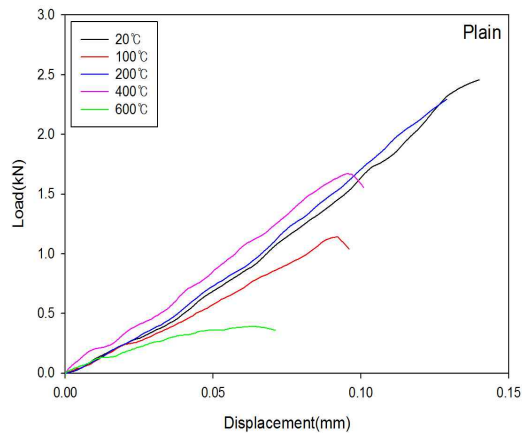
- 잔존 휨강도 실험 결과 Plain 시험체의 경우 100°C에서 상온의 3.82 MPa보다 다소 감소한 2.73 MPa를 나타내었으나, 200°C에서는 상온의 강도와 비슷한 5.4MPa까지 증가 후 온도가 증가할수록 감소하는 양상을 나타냄
- 600°C의 경우 강도가 급격히 감소하는 모습을 보였는데, 이는 600°C 이후에 내부 화합물의 분해로 인해 급격한 강도 감소가 나타난 것으로 판단됨
- C04, C08 및 C12를 통해 CNC 혼입률에 따른 특성을 비교해보면, 상온 휨강도는 C08이 3.58MPa로 가장 높은 강도를 나타냄
- 100°C에서 C04는 강도가 다소 감소하였으나 C08, C12의 경우 상온보다 강도가 증가하였음
- 600°C 이후에는 C04, C08 및 C12 시험체 모두 급격한 강도 감소가 나타났으며, 800°C에서는 매우 낮은 강도로 인한 측정 한계로 나타남
- C04S1은 100°C에서 강도가 약간 증가한 후, 온도에 조금씩 증가, 감소하는 양상을 나타냈으며, 800°C에서는 급격한 강도 감소가 나타남
- C08S1과 C12S1의 경우 400°C까지 상온보다 높은 휨강도를 보이다가 600°C 이후로 상온

보다 낮은 강도로 떨어지고 800℃에서는 급격한 강도 감소를 나타냄

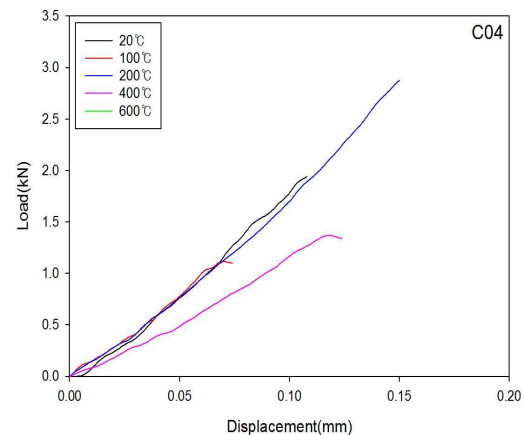
- CNC 혼입률이 증가할수록 200, 400℃에서 강도가 증가하는 양상을 나타냄
- 섬유를 혼입하지 않은 Plain, C04, C08, C12 시험체의 하중-변위 곡선을 보면, 최대하중 이후 급격한 강도 감소와 함께 파괴되는 전형적인 취성파괴 거동을 나타냄
- Plain의 경우 온도에 따른 하중-변위 그래프의 양상이 큰 변화를 나타내지 않았으며, 600℃에서 그래프의 기울기가 감소하는 경향을 나타냄
- C04의 경우 가열 온도 400℃ 이상에서 하중-변위 그래프의 기울기가 변하였으며, C08의 경우 가열 온도가 증가할수록 기울기가 서서히 감소하는 양상이 관찰됨
- C12는 가열 온도에 따라 기울기가 큰 변화를 보였으나, 가열 온도와 선형적인 관계가 나타나진 않았음
- steel fiber를 혼입한 시험체는 800℃를 제외한 모든 온도에서 최대하중 이후 변위가 증가하면서 하중이 서서히 증가하는 연성적인 거동이 관찰되었음
- 또한, 세 시험체 모두 온도의 증가에 따라 최대하중 이전까지의 그래프 기울기가 서서히 감소하는 양상을 나타냄

Table. 10.2 Maximum strength of flexure test (Unit: MPa)

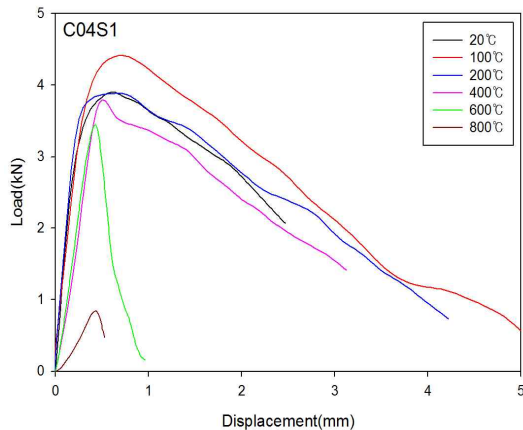
Temp.(℃)	Plain	C04	C04S1	C08	C08S1	C12	C12S1
20	3.82	3.22	9.47	3.58	10.85	2.62	10.08
100	2.73	2.78	10.44	3.74	11.41	4.92	11.02
200	5.40	6.77	9.17	4.73	12.76	11.02	15.47
400	4.01	3.27	9.57	3.78	12.66	4.69	15.00
600	0.93	0.60	8.18	1.58	8.56	3.52	9.38
800	2.22	1.66	2.05	1.34	2.26	2.34	2.81



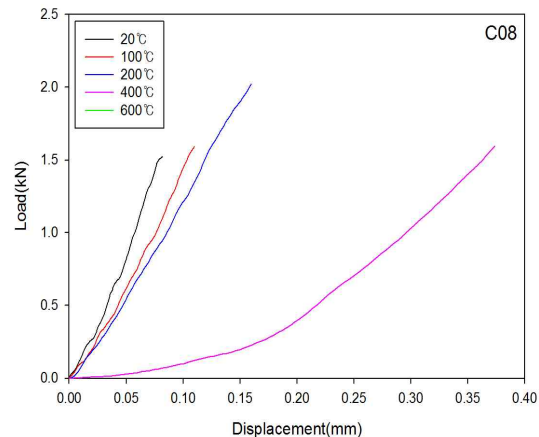
(a) Plain



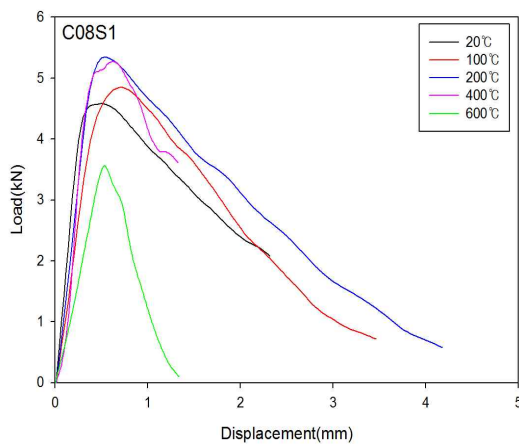
(b) CNC 0.4 (vol.%)



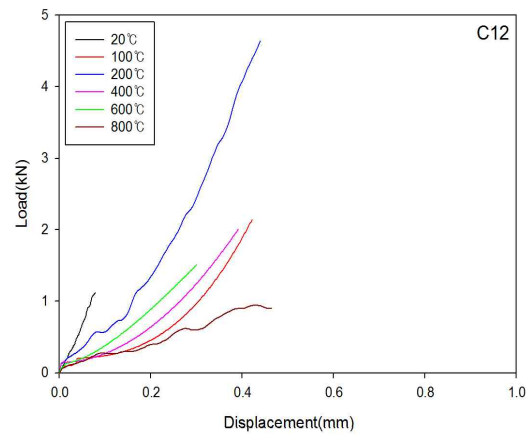
(c) CNC 0.4(vol.%) with steel fiber



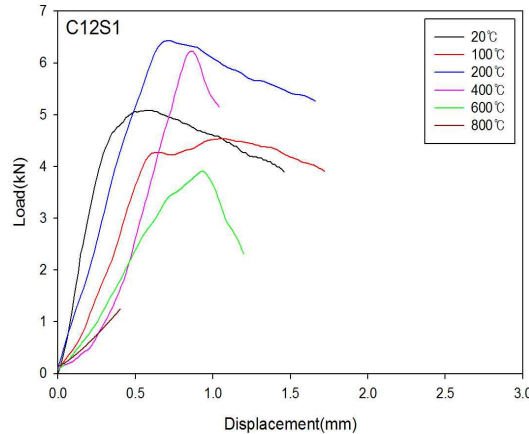
(d) CNC 0.8 (vol.%)



(e) CNC 0.8(vol.%) with steel fiber



(f) CNC 1.2 (vol.%)



(g) CNC 1.2 (vol.%) with steel fiber

Fig. 10.3 Load-displacement curve of flexural strength specimens

- 하중-변위 그래프의 면적을 계산하여 휨인성을 평가하였음
- 최대하중 이후 연성거동이 관찰되지 않은 Plain, C04, C08, C12 시험체는 최대하중까지의 면적(A_p)를 계산하여 비교하였으며, 연성거동이 관찰된 C04S1, C08S1, C12S1 시험체는 최대하중까지의 면적(A_p)로 최대하중 대비 하중이 80% 감소한 위치까지의 면적(A_p , 80)를 나누어 휨인성지수로 표현하여 나타냄
- 시험체의 휨인성 평가 결과 섬유가 혼입되지 않은 시험체는 휨인성이 큰 차이를 보이지 않았으며, C12가 그중 가장 높은 값을 나타냄
- steel fiber를 혼입한 시험체는 강도와 파괴 변위가 크게 증가하여 섬유를 혼입하지 않은 시험체와 비교할 때, 휨인성이 크게 증가한 것을 확인할 수 있으며, 600°C까지는 온도에 따른 휨인성의 변화 양상이 비슷하게 나타났으나, C08S1의 400°C에서만 큰 차이를 나타냄
- C04S1 시험체의 경우 100°C에서 약간 증가하는 양상을 보이고 이후 온도의 증가에 따라 감소하는 양상을 나타냄
- C08S1 시험체의 경우 상온에서 다른 시험체보다 약 1.5배 높은 휨인성지수 값을 나타내었으며, 이후 온도의 증가에 따라 대체적으로 감소하는 양상을 나타냄
- C12S1 시험체의 경우 200°C에서 휨인성지수가 다소 증가하였으나, 이후 감소하는 양상을 나타내었으며, 600°C 이상의 고온에서는 CNC 혼입률에 상관없이 연성 능력을 거의 상실하는 것으로 판단됨

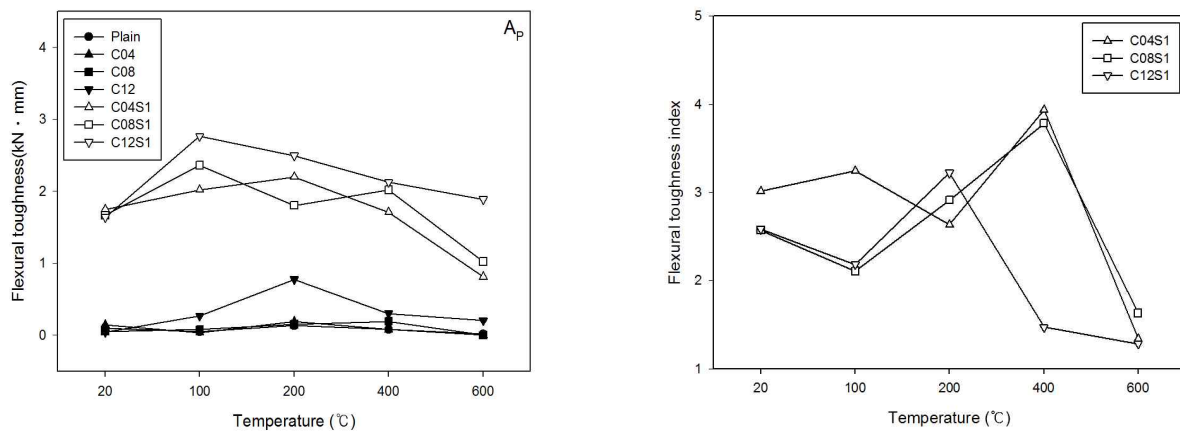
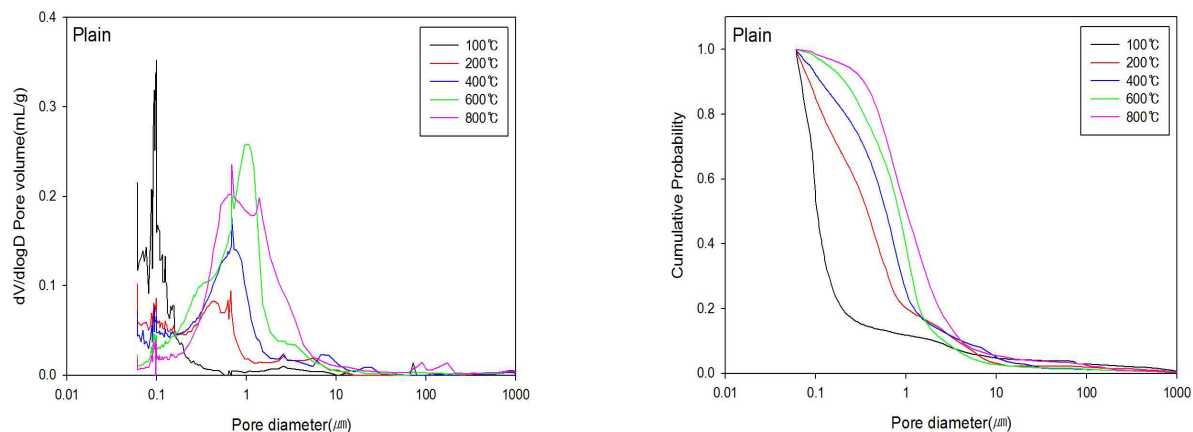
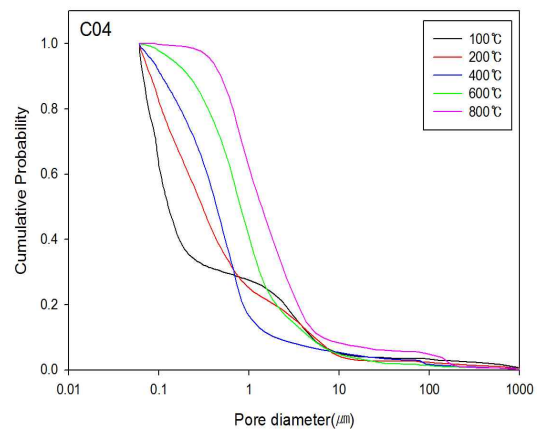
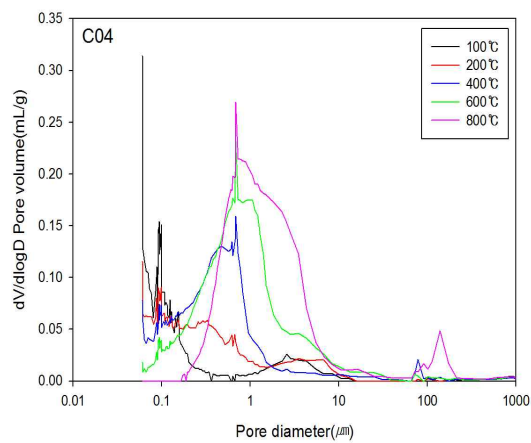


Fig. 10.4 Flexural toughness (A_p) & index

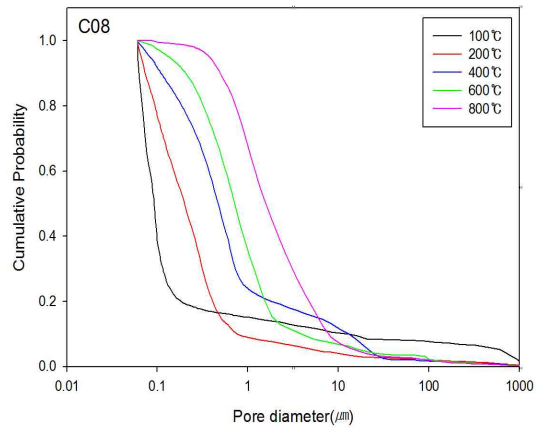
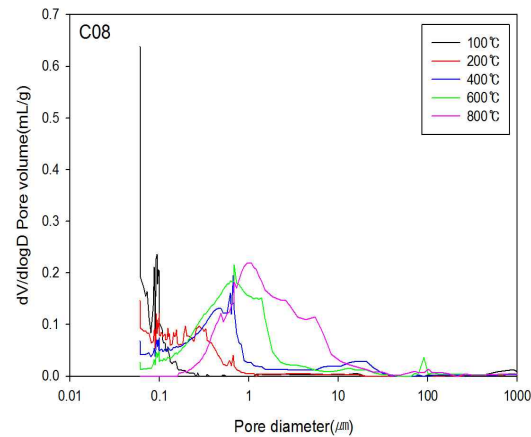
- 내화실험 후 시멘트 복합체의 미세구조를 분석하기 위해 MIP 분석을 진행하였으며 각 시험체의 공극 직경에 따른 부피 및 적분 값을 나타내었음
- Plain 시험체의 MIP 분석 결과 100°C에서는 공극의 직경이 약 $0.1\mu\text{m}$ 에 집중되어있는 것을 확인할 수 있으며, 적분 그래프에서도 $0.1\mu\text{m}$ 부근에서 기울기가 급증하는 것을 확인할 수 있음
- 200°C에서는 공극의 직경이 $0.1\mu\text{m}$ 와 $1\mu\text{m}$ 사이에 넓게 분포하고 있으며, 100°C와 비교 시 공극의 직경이 증가했음을 알 수 있음
- 400°C는 200°C보다 공극의 분포가 $1\mu\text{m}$ 로 이동한 것을 확인할 수 있으나 대부분 $1\mu\text{m}$ 보다 낮은 값으로 공극이 분포하고 있음
- 600°C에서는 $1\mu\text{m}$ 에 대부분의 공극이 분포하고 있으며, 800°C에서는 $1\mu\text{m}$ 부근으로 공극이 넓게 분포하며 공극의 편차가 600°C보다 증가함을 확인할 수 있다. 노출 온도가 높아질수록 그래프가 오른쪽으로 이동하고 있으며, 기울기가 급증하는 구간 역시 오른쪽으로 이동하는 양상을 나타내었으며, 이를 통해 노출 온도가 높아짐에 따라 공극이 커지는 것을 확인할 수 있음
- C04 시험체의 MIP 분석 결과 100°C에서는 $0.06\mu\text{m}$ 과 $0.1\mu\text{m}$ 에서 가장 높은 피크를 나타내었으며, 200°C의 경우 피크 직경은 100°C와 유사하게 나타났으나, $0.1\mu\text{m}$ 이상 직경의 부피가 증가함



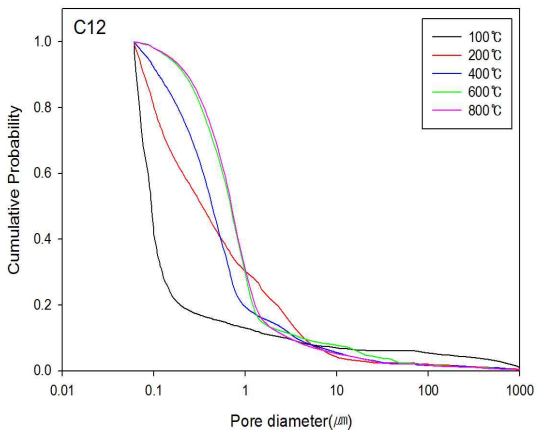
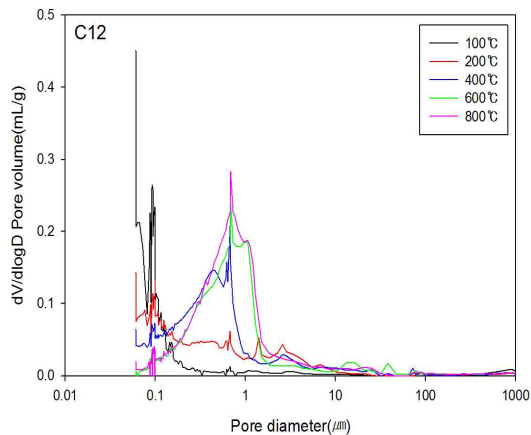
(a) The results of MIP analysis on plain specimen



(b) The results of MIP analysis on CNC 0.4 (vol.%) specimen



(c) The results of MIP analysis on CNC 0.8 (vol.%) specimen

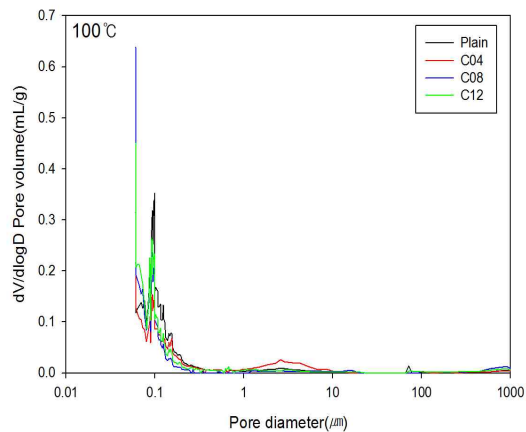


(d) The results of MIP analysis on CNC1.2 (vol.%) specimen

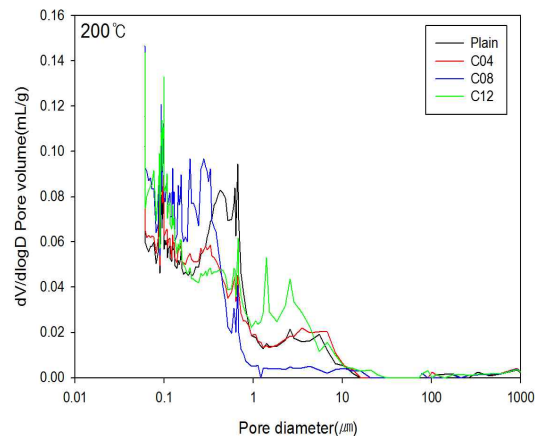
Fig. 10.5 The results of MIP analysis

- 400°C에서는 0.1 μm 부근의 피크가 감소하며 1 μm 피크가 급격히 증가하는 양상이 나타남
- 600°C에서는 1 μm 피크가 다소 증가하고 0.1 μm 피크가 다소 감소하는 모습을 보였으나, 전체적인 양상은 400°C와 유사하게 나타남
- 800°C에서 피크 위치는 400°C와 유사하나 1 μm 이하의 부피가 감소하며 1 μm 이상의 부피가 증가하는 양상을 나타냄
- C08 시험체의 MIP 분석 결과 100°C에서는 plain 시험체와 유사하게 0.1 μm 에서 대부분의 피크가 나타나는 양상이었으며, 200°C에서는 0.1~0.5 μm 사이에서 피크가 넓게 분포한 결과를 나타냄
- 이후 400°C에서는 피크가 1 μm 부근으로 이동하는 양상을 나타냈으며, 0.1 μm 피크는 200°C보다 감소하였으며, 600°C에서는 400°C보다 0.1 μm 피크가 감소하면서 1 μm 피크가 증가하는 양상이 나타났으며, 1~1.5 μm 위치의 피크가 크게 증가함

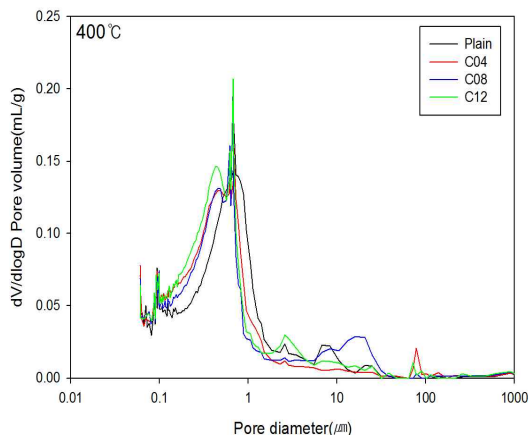
- 800℃에서는 600℃와 유사한 그래프 양상이나 전체적으로 공극의 크기가 증가하면서 오른쪽으로 이동한 것을 확인할 수 있음
- C12 시험체의 MIP 분석 결과 100℃에서는 0.1 μm 부근의 피크와 0.06 μm 에서 매우 높은 피크가 나타났으며, 이는 C04, C08 시험체의 결과와 유사함
- 200℃에서는 0.1 μm 피크가 다소 감소하면서 피크 값이 0.1~1 μm 사이에서 0.05 mL/g 정도로 넓게 분포하는 양상을 나타냄
- 400℃에서는 1 μm 부근의 피크가 크게 증가하는 양상을 나타내었으며, 600℃에서는 1 μm 피크가 조금 더 증가하며 전체적으로 400℃와 유사한 양상이나 직경이 증가한 것으로 나타남
- 800℃에서는 피크의 위치와 그래프 형상이 600℃와 큰 차이를 보이지 않았으나, 800℃에서는 다른 시험체보다 공극의 직경이 작게 나타남
- C12 시험체의 MIP 분석 결과 CNC 혼입 유무와 혼입률에 따라 큰 차이는 나타나지 않았으나, Plain 대비 CNC 혼입 시험체의 공극 직경이 조금 작게 나타난 것을 확인할 수 있음
- 100℃에서는 0.1 μm 에서 동일한 피크가 나타났으나, CNC를 혼입한 경우 약 0.06 μm 에서 더 높은 피크가 나타난 것을 확인하였음
- 200℃에서는 전체적인 그래프의 형태가 Plain보다 왼쪽에 위치하였으며, 공극의 직경이 다소 작게 나타남
- 400~800℃까지 모두 그래프의 형태 및 피크는 유사하게 나타났으나, Plain보다 왼쪽으로 이동한 것을 확인하였으며, 이를 통해, CNC 혼입이 고온에 노출된 시멘트 복합체의 내부 공극을 감소시킬 수 있다는 것을 확인하였음



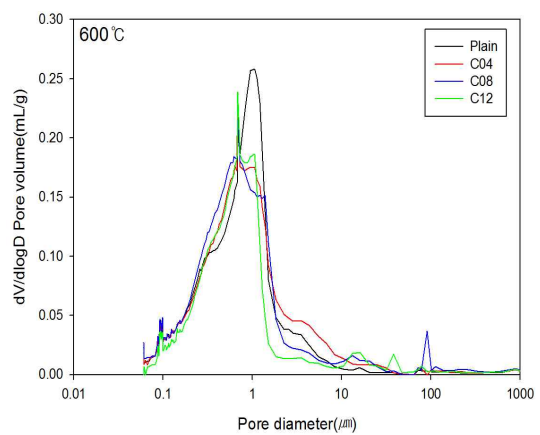
(a) 100℃



(b) 200℃



(c) 400℃



(d) 600℃

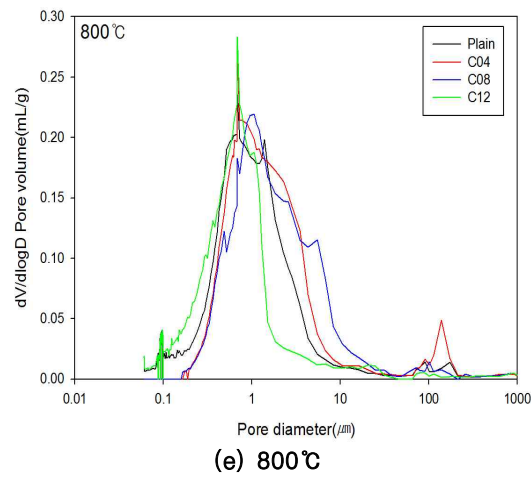


Fig. 10.6 The results of MIP analysis according to exposed temperature

- 온도에 따른 MIP 분석 결과 Plain 시험체와 CNC 혼입 시험체의 그래프 형상은 유사하게 나타남
 - 100°C의 경우 CNC 혼입 시험체는 0.06 μ m에서 피크가 나타났으나, Plain 시험체는 나타나지 않은 것을 제외하면 큰 차이를 나타내지 않았음
 - 200°C 이후부터는 CNC 혼입 시험체가 Plain 시험체보다 그래프가 왼쪽에 위치하고 있으며, 이는 공극 직경이 상대적으로 작다는 것을 의미함
- > 온도 변화에 따른 잔존 강도 및 미세공극 구조 분석 결과를 바탕으로 CNC 혼입률 0.8 vol.%이 가장 적절한 혼입률로 나타났으며, 최적 배합 도출을 위한 장기 내구성능 평가가 진행되어야 할 것으로 판단됨

(11) 동결융해, 중성화, 내염해성 특성 평가

- CNC 0.8 vol.%에 대한 시험체의 강도 특성 및 내화성능 평가 결과를 바탕으로 구체적인 내구성능을 평가하기 위해 동결융해, 중성화, 내염해성 실험을 진행함
- 실험분석은 공인시험 기관에 의뢰하였으며, 실험 방법은 동결융해 KS L 2456, 중성화 KS F 2584, 내염해성 KS F 2711(ASTM C 1202)으로 실시함
- 동결융해 후 압축강도 실험 결과 Plain 대비 C08에서 약 23%, C08F1 약 17%, C08S1에서 약 30%의 강도 증진율을 나타냄 이는 앞선, 동결융해를 거치지 않은 시험체(각 20%, 15%, 31%)에서와 유사한 결과를 나타냄
- 중성화(탄산화 촉진) 시험의 경우 고강도일수록 탄산화 깊이가 얇은 결과를 나타내었으며, 이는 압축강도와 탄산화 간 관계 규명에 따라 고강도일수록 공극이 없는 치밀한 조직 구조를 나타내고, 규산칼슘 수화물(C-S-H)이 대부분을 차지하여 탄산화에 따른 탄산칼슘이 관찰되지 않아 저강도에 비해 탄산화 진행 속도가 느리고 그 깊이가 얇은 것으로 판단됨
- 내염해성(염소 이온 침투저항성) 시험의 경우 Plain 대비 시멘트 내부 공극이 증가된 수화 생성물로 인하여 상대적으로 가장 치밀한 C08 시험체에서 가장 낮은 통과 전하량을 나타냈으며, flax fiber의 경우 시멘트의 와의 부착면에 미세 공극 발생으로 인해 통과 전하량이 증가된 것으로 판단됨. 또한, 강섬유의 경우 염소 이온으로 인한 부식에 의해 다량의 공극이 발생되고 이에 따른 통과 전하량이 가장 높은 것으로 판단됨

Table 11.1 Evaluation of Durability Characteristics of Low Shrinkage and High Toughness Concrete

구 분	동결융해 후 평균 압축강도 (MPa) (KS F 2456)	중성화 (mm) (탄산화 촉진시험) (KS F 2584)	내염해성 (coulombs) (염소이온 침투저항시험) (KS F 2711, ASTM C 1202)		
Plain	53.6	11.42	890	913	921
		10.7			
		9.77			
		10.01			
C08	64.3	7.43	885	888	892
		8.42			
		8.61			
		8.4			
C08F1	61.6	9.69	943	969	982
		9.28			
		9.25			
		8.46			
C08S1	70.3	7.27	1507	1584	1606
		7.54			
		6.64			
		7.58			

(12) 총 결론

- 본 연구는 우수한 물리적 특성을 가진 셀룰로오스 나노크리스탈(CNC)을 건설재료로써 활용하고자, 시멘트 복합체 및 저수축·고인성 콘크리트(ECC) 제조에 관한 실험적 연구를 수행하였음
- 기존 연구에서는 CNC를 혼입한 시멘트 복합체의 물리적, 화학적 특성에 관한 연구가 대부분이였으며, 본 연구를 통해 CNC의 최적 분산법을 도출하였고 이에 따른 특성 평가를 통하여 물리적 성능이 향상되는 결과를 나타냄
- 그중에서도 CNC 최적 혼입률은 0.8 vol.%이며, steel fiber를 보강하였을 때 휨 성능 향상이 가장 우수하였으며, 성능 평가를 통해 도출해낸 CNC 시멘트 복합체 및 저수축·고인성 콘크리트(ECC)의 최적 배합 사항은 아래 표에 나타냄

CNC cement composite and low shrinkage high-toughness concrete (ECC)
Optimum formulation

wt.% (W/B=30%)				vol.%		CNC/Cement (vol.%)
W	C	S	FA	S.P	Fiber	
0.375	1	0.369	0.25	1.25	Steel 1	0.8

- 본 연구를 통해 CNC를 건설재료로써 활용 가능성에 대해 규명하였으며, 추후 분산 방법 개선에 따라 대량생산이 가능해진다면, 고강도 콘크리트뿐만 아니라 휨 인성 및 수축 저감효과를 이용해 균열 보수·보강재로써의 활용성이 다양해질 것으로 판단됨

(13) 경제성 평가

- 본 연구를 통해 개발한 CNC 시멘트 관련 기술의 경제성 평가를 실시하였으며, 평가 방법은 전문 분석업체를 통해 진행하였음

- 유사분야의 TRL 평가지표 비교를 통해 기술측면에서의 상용화 수준을 검토하였으며, 기술, 시장, 비즈니스 측면에서의 기술사업화 타당성을 검토 하였음
- 구체적인 사안의 관점에서 사업화의 가능과 보완점을 검토하여 기술사업화의 방향성을 체크함

▪ 기술인가, 제품인가	✓ 기술이전 할 것인가 ✓ 최종제품 까지 진행할 것인가
▪ 최종제품 or 중간제품	✓ 최종제품이 되기 위한 기술적 요소들과 나와 기술과의 관계 -보완적인지, 기술의 발전이
▪ 사업화에 용이한 기술인지	✓ 사업화 까지 소요되는 시간을 계산
▪ 응용 기술인 경우 최신 trend에 적합한 기술	✓ K- beauty
▪ B2B 비즈니스의 전체 Map을 그릴 수 있는가	✓ 최적의 파트너는 누구인가

Fig. 13.1 Direction check of technology commercialization

- 분석 전문 기관에서 구축한 기술사업화 유형(창업유형, 기술이전 유형)에 대해 검토하였으며, 기술이전의 경우 어떤 기술이전의 형태가 바람직한 것인가에 대해 상세하게 고찰하였음

Table 13. 1Types of technology commercialization

분류	기술사업화유형	개요	수익/전략
창업	기술창업	기술보유자의 연구자 등 소속직원이 직무발명 등을 이 전받아 창업하거나 창업에 참여함	라이선스/제조,판매 기술성/시장성/사업성고려
	합작투자	기술보유자와 기술도입자가 합작하여 제3의 기업을 설립 하고 사업화를 추진함 기술 보유자가 공공연구기관인 경 우는 주로 보유기술을 현물 출자하여 참여함	라이선스/제조,판매 기술성/시장성/사업성고려
	지주회사	기술보유자가(공공연구기관, 대학 등)기술지주회사를 설 립하고, 보유기술을 자본금 형식으로 출자하여 기술사업 화를 목적으로 하는 자회사 를 운영함	라이선스/제조,판매 기술성/시장성/사업성고려
	M&A	기술도입자(민간기업 등)가 사업화 추진을 위해 필요한 기술과 경영 인프라를 보유 한 기술보유자(민간기업 등) 를 인수·합병함	라이선스/제조,판매 대상기업 탐색

기술이전	특허양도	기술보유자(공공연구기관, 민간기업)가 기술도입자(민간, 기업 등)에게 기술의 소유권을 이전함	라이선스/제조, 판매 대상기업 탐색
	실시권허락	기술보유자가 기술도입자에게 기술의 실시권(License)을 허락함	서브라이선스/제조, 판매 대상기업 탐색
	기술지도	기술보유자가 기술도입자에게 기술의 적용을 위한 교육/훈련을 제공함. 양도, 혹은 실시권 허락과 병행하여 이루어짐	라이선스/제조, 판매 기업니즈파악
공동연구	공동연구	기술보유자(공공연구기관, 대학 등)가 기술도입자에게로 기술이전을 목적으로 공동연구를 수행함	라이선스/제조, 판매 기업니즈 파악

- 기초원천 기술의 추가 기술개발의 방향성을 제시 하였으며, 최종 개발된 개발 기술을 최종상품으로 간주하고, 소비자의 니즈를 고려하여 MGPP 양식을 통한(Multi Generation Product Plan) 다세대 상품기획을 진행하였음

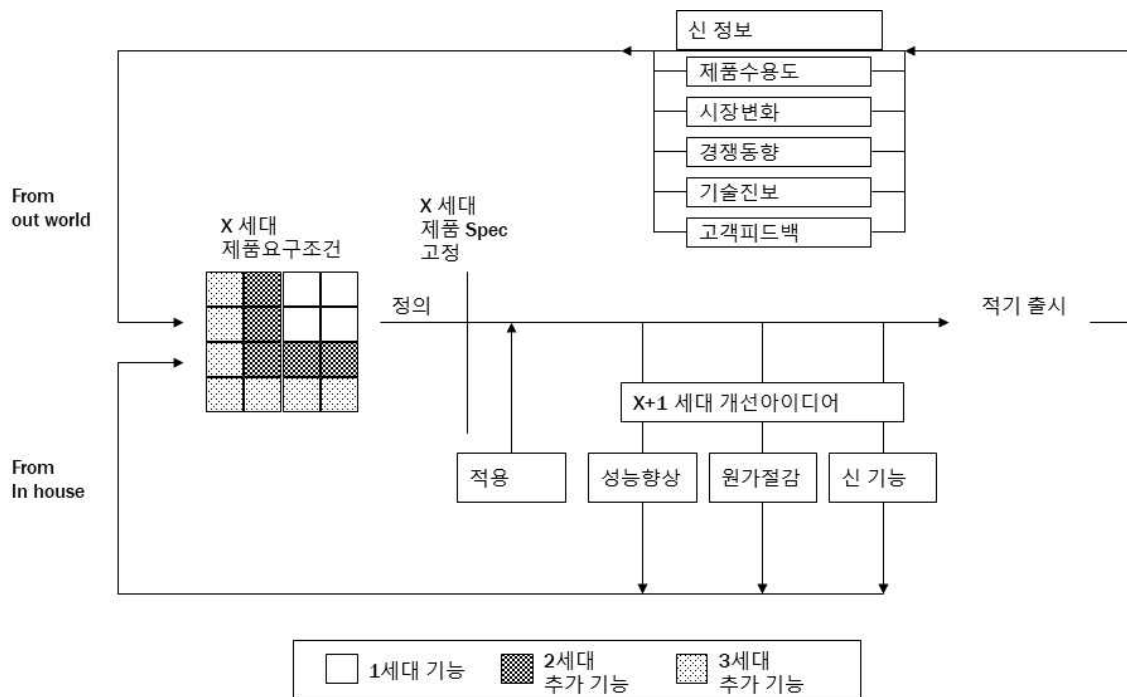


Fig. 13.2 Reasons for Planning Multi-Generation Products

- 시멘트 관련 및 건설사(현대건설, GS건설, 쌍용상회, 아세아시멘트, 삼표시멘트)의 손익계산 파악을 통해 기술수요자 대상을 검토함
- CNC 단가 측면에서는 일반강도 콘크리트 및 고강도 콘크리트와의 단가 비교를 통해 CNC 시멘트의 시장성을 비교함
- 노무비를 제외한 콘크리트 제조 시 필요한 재료에 소요되는 비용을 비교하였음
- 산정기준은 한국응용통계연구원 유통물가 및 전문 판매업체를 참고하였으며, 각 재

료별 단가는 통상적 판매되는 단위에 따른 금액을 기준으로 하였음

- CNC의 경우 국내생산이 되지 않은 고나계로 캐나다 C사에서 구매를 진행하였으며, 초기 구매 시 (2017.07.18.) kg 당 단가는 500(USD)였으나, 추후 두차례 구매 시 kg 당 50(USD)로 (2017.11.29., 2018.01.04.) 1/10 수준으로 단가가 변동됨
- 향후 나노재료에 대한 수요증가에 따라 양산체제 구축 등을 통한 지속적인 가격인하가 예상되는 것으로 판단함
- 일반 배합의 경우 일반콘크리트 단위중량 2400kg/m^3 에 대한 재료 단가이며 고강도의 경우 혼화재가 첨가된 비용을 나타내었음(일반 W/C=50%, 고강도, CNC W/B=30% 기준)
- 혼화재의 경우 경제성을 고려하여 실리카흙 대비 Fly ash를 사용했을 때의 기준으로 산정하였음
- W/C 및 W/B 산정 기준은 설계강도에 따라 배합이 상이하기 때문에 기존 연구에 따른 통상적인 일반 및 고강도, ECC 배합에 따른 비율을 사용하였음

Table 13.2 Unit price by material

(단위: 원)

Classification	Normal concrete	High strength concrete	Using CNC Low shrinkage & High toughness concrete
시멘트 (40kg)	4,180	4,180	4,180
잔골재 (m^3)	20,020	20,020	20,020
25mm 굵은 골재 (m^3)	23,023	23,023	-
혼화재 (kg)	-	1,600	-
		150	150
혼화제 (고성능 감수제, kg)	-	2,400	2,400
CNC(kg)	-	-	56,520 (19.2월 환율 기준)

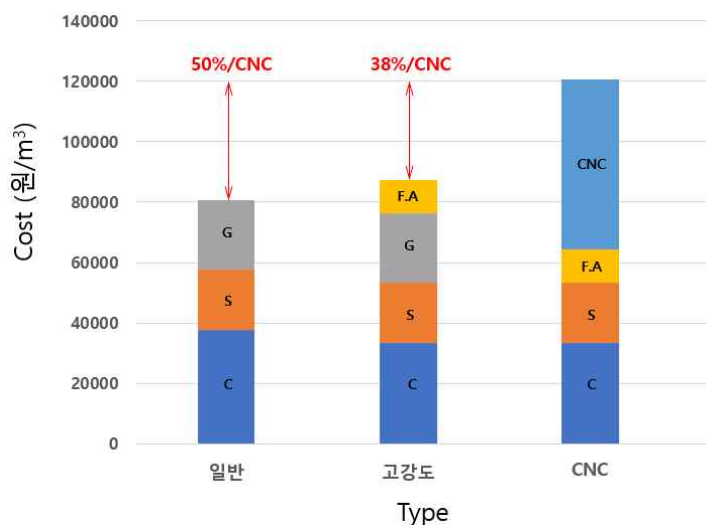


Fig. 13.3 Comparison of cost per concrete type

- CNC 혼입 시 고인성, 저수축 등 재료성능면에서는 뚜렷한 개선 효과가 있으나, 경제성 측면에서는 장점이 없는 상태임. 따라서, 현재 시점에서 상용화되기에는 경제성 및 효율성이 다소 떨어진다고 판단됨
- 그러나, 본 연구를 통해 개발된 CNC 혼입 저수축·고인성 콘크리트(ECC)는 구조 재료적 성능에서 분명 탁월한 효과가 나타나는 바, 차후 대량생산이 가능하다면 확실한 사업성을 확보할 수 있으며 상업화를 기대할 수 있음

(14) 2차연도 기술적 성과

1) 연구관련 학술기사(복합신소재구조학회지 9권2호 2018.06)

셀룰로오스 나노크리스탈(CNC)이 혼입된 시멘트복합체 제조에 관한 기초연구



1. 서 론

최근 나노 크기 재료의 우수한 물리적 성질을 이용한 나노복합소재를 만들려는 관심이 전 세계적으로 크게 증가하고 있다. 첨단나노기술은 4차산업혁명을 이끌어 갈 기술 중 하나이며 나노소재, 나노전자, 나노바이오/의료, 나노 장비 등의 다양한 연구가 진행되고 있다.

이러한 첨단 나노기술에 이용되고 있는 바이오매스는 화학적 에너지로 사용가능한 동·식물 등의 생물체, 즉 바이오에너지의 에너지원을 의미한다.

나노셀룰로오스는 목질계 바이오매스로부터 얻을 수 있는 고분자 나노물질로 우수한 기계적 강도(인장강도가 강철이나 케블라와 비슷한 100~160 GPa), 저밀도(0.8~1.5 g/cm³)의 넓은 비표면적, 생분해성 등이 특징인 바이오 기반 소재이다.

이러한 특징을 이용하여 산업 전반에 걸쳐 관련 연구가 증가하고 있으며, 건설산업에서도 나노셀룰로오스

에 대한 연구가 증가하고 있는 추세이다.

나노셀룰로오스는 추출방법에 따라 크게 2가지로 구분할 수 있다. 두 영역의 연결을 끊어내지 않고 기계적 처리로 생산한 것을 CNFs (Cellulose Nano-Fibrils)라고 하며, 산 가수분해와 같은 화학적 처리를 통해 비결정영역(Non-Crystalline)을 배제한 결정영역(Crystalline)을 따로 분리한 것을 CNCs (Cellulose Nano-Crystals)이라고 한다.

CNC는 대표적으로 목재 펄프나 비목재 식물에서 하향식 처리(top-down)를 통해 얻을 수 있다. 분산 전 분말(Powder) 형태로 1~50 μm 크기를 갖고 있으며, 용매제를 통해 분산된 CNC는 직경 2~5 nm, 길이 40~100 nm 갖고 있다.

잘 분산된 CNC는 시멘트 내에서 수화되지 않은 시멘트 핵(Core)의 물길(waterway) 역할을 하여 수화물도와 C-S-H 생성에 영향을 주어 결과적으로 강도를 증진시키는 역할을 한다.

2) 연구성과관련 성적서

- 인장강도 시험(한국 SGS)



품질시험·검사성적서

- | | | | |
|-------------|---|-----------|------------------|
| 1. 성적서 번호 : | CMT2019 - 0696 | 5. 접수일자 : | 2019 년 01 월 22 일 |
| 2. 의뢰인 | 업체명 : 금오공과대학교 산학협력단 | 6. 발급일자 : | 2019 년 01 월 30 일 |
| | 주 소 : 경북 구미시 대학로61(양호동) 금오공과대학교 글로벌관 510호 | | |
| | 성 명 : 이 형 주 | | |
| 3. 성과이용목적 : | 연구과제 제출용 | | |
| 4. 시 료 명 : | P-CSA | | |

시 험 결 과

구 분	시험 · 검사종목	단 위	시험 · 검사방법	시험 · 검사결과
5%	인장강도	N/mm ²	KS L 5104 : 2017	1.0
10%	인장강도	N/mm ²	KS L 5104 : 2017	0.9
15%	인장강도	N/mm ²	KS L 5104 : 2017	0.7

※ 상기 시험 · 검사 결과는 의뢰자가 제작하여 제공한 시험편에 대한 결과임.

※ 시료채취장소 : 금오공과대학교

담당자 : 문 승 권

Tel : 031-646-0811

기술책임자 : 신 도 철

Tel : 031-646-0801

- ※ 비 고 :
1. 이 시험성적서는 당초 의뢰자가 제출한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증 하지는 않습니다.
 2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
 3. 이 성적서의 원본 진위확인온 한국에스지이에스 온라인 성적서 조회 홈페이지(<http://e-checking.kr.sgs.com/construction/>)에서 열람이 가능합니다.

한국에스지이에스(주) 건설시험연구원

주 소 : 경기도 화성시 동탄면 동탄산단10길 20 전화번호 (031)669-0600

유의사항 : 기술책임자의 성명과 서명이 없는 경우에는 결과에 대한 보증을 할 수 없습니다.

페이지 1 / 1

This document is issued by the Company under its General Conditions of Service accessible at <http://www.sgs.com/en/Terms-and-Conditions.aspx>. Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any holder of this document is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.

KCP-2519-001-507 (07)



SGS Korea Co., Ltd. | 20, Dongtansandan 10-gil, Dongtan-myeon, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Korea, 18487 t +82(0)31 646 0600 f +82(0)31 646 0888 www.sgs.com

Member of SGS Group(Société Générale de Surveillance)

- | | | | |
|-------------|---|-----------|------------------|
| 1. 성적서 번호 : | CMT2019 - 0697 | 5. 접수일자 : | 2019 년 01 월 22 일 |
| 2. 의뢰인 | 업체명 : 금오공과대학교 산학협력단 | 6. 발급일자 : | 2019 년 01 월 30 일 |
| | 주 소 : 경북 구미시 대학로61(양호동) 금오공과대학교 글로벌관 510호 | | |
| | 성 명 : 이 형 주 | | |
| 3. 성과이용목적 : | 연구과제 제출용 | | |
| 4. 시 료 명 : | C08-CSA | | |

시 험 결 과

구 분	시험 · 검사종목	단 위	시험 · 검사방법	시험 · 검사결과
5%	인장강도	N/mm ²	KS L 5104 : 2017	2.2
10%	인장강도	N/mm ²	KS L 5104 : 2017	1.8
15%	인장강도	N/mm ²	KS L 5104 : 2017	1.7

※ 상기 시험 · 검사 결과는 의뢰자가 제작하여 제공한 시험편에 대한 결과임.

※ 시료채취장소 : 금오공과대학교

담당자 : 문 승 권

Tel : 031-646-0811

기술책임자 : 신 도 철

Tel : 031-646-0801

- ※ 비 고 :
1. 이 시험성적서는 당초 의뢰자가 제출한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증 하지는 않습니다.
 2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
 3. 이 성적서의 원본 진위확인온 한국에스지이에스 온라인 성적서 조회 홈페이지(<http://e-checking.kr.sgs.com/construction/>)에서 열람이 가능합니다.

한국에스지이에스(주) 건설시험연구원

주 소 : 경기도 화성시 동탄면 동탄산단10길 20 전화번호 (031)669-0600

유의사항 : 기술책임자의 성명과 서명이 없는 경우에는 결과에 대한 보증을 할 수 없습니다.

페이지 1 / 1

This document is issued by the Company under its General Conditions of Service accessible at <http://www.sgs.com/en/Terms-and-Conditions.aspx>. Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any holder of this document is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.



SGS Korea Co., Ltd. | 20, Dongtansandan 10-gil, Dongtan-myeon, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Korea, 18487 t +82(0)31 646 0600 f +82(0)31 646 0888 www.sgs.com

Member of SGS Group(Société Générale de Surveillance)



품질시험·검사성적서

- | | | | |
|-------------|---|-----------|------------------|
| 1. 성적서 번호 : | CMT2019 - 0694 | 5. 접수일자 : | 2018 년 12 월 11 일 |
| 2. 의뢰인 | 업체명 : 금오공과대학교 산학협력단 | 6. 발급일자 : | 2019 년 01 월 30 일 |
| | 주 소 : 경북 구미시 대학로61(양호동) 금오공과대학교 글로벌관 510호 | | |
| | 성 명 : 이 형 주 | | |
| 3. 성과이용목적 : | 연구과제 제출용 | | |
| 4. 시 료 명 : | P-CSA | | |

시험 결과

구 분	시험 · 검사종목		단 위	시험 · 검사방법	시험 · 검사결과
5%	길이변화율	재령 7일	%	KS F 2424 :2015	0.021
		재령28일	%		-0.148
10%	길이변화율	재령 7일	%	KS F 2424 :2015	0.031
		재령28일	%		-0.138
15%	길이변화율	재령 7일	%	KS F 2424 :2015	0.063
		재령28일	%		-0.127

※ 상기 시험 · 검사 결과는 의뢰자가 제작하여 제공한 시험편에 대한 결과임.

※ 시료채취장소 : 금오공과대학교

담당자 : 문 승 권

Tel : 031-646-0811

문승권

기술책임자 : 신 도 철

Tel : 031-646-0801

skm

- ※ 비 고 :
1. 이 시험성적서는 당초 의뢰자가 제출한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증 하지는 않습니다.
 2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
 3. 이 성적서의 원본 진위확인온 한국에스지이에스 온라인 성적서 조회 홈페이지(<http://e-checking.kr.sgs.com/construction/>)에서 열람이 가능합니다.

한국에스지이에스(주) 건설시험연구원

주 소 : 경기도 화성시 동탄면 동탄산단10길 20, 전화번호 (031)669-0600

유의사항 : 기술책임자의 성명과 서명이 없는 경우에는 결과에 대한 보증을 할 수 없습니다.

페이지 1 / 1

This document is issued by the Company under its General Conditions of Service accessible at <http://www.sgs.com/en/Terms-and-Conditions.aspx>. Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any holder of this document is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.

KCP-2510-901-007 (07)



SGS Korea Co., Ltd. 20, Dongtansandan 10-gil, Dongtan-myeon, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Korea, 18487 t +82(0)31 646 0600 f +82(0)31 646 0888 www.sgs.com

Member of SGS Group (Société Générale de Surveillance)

1. 성적서 번호 : CMT2019 - 0695
 2. 의뢰인 : 업체명 : 금오공과대학교 산학협력단
 주소 : 경북 구미시 대학로61(양호동) 금오공과대학교 글로벌관 510호
 성명 : 이형주
 3. 성과이용목적 : 연구과제 제출용
 4. 시료명 : C08-CSA
 5. 접수일자 : 2018년 12월 11일
 6. 발급일자 : 2019년 01월 30일

시험결과

구분	시험·검사종목		단위	시험·검사방법	시험·검사결과
5%	길이변화율	재령 7일	%	KS F 2424 :2015	0.018
		재령28일	%		-0.042
10%	길이변화율	재령 7일	%	KS F 2424 :2015	0.045
		재령28일	%		-0.035
15%	길이변화율	재령 7일	%	KS F 2424 :2015	0.116
		재령28일	%		0.037

※ 상기 시험·검사 결과는 의뢰자가 제작하여 제공한 시험편에 대한 결과임.

※ 시료채취장소 : 금오공과대학교

담당자 : 문승권

Tel : 031-646-0811

기술책임자 : 신도철

Tel : 031-646-0801

※ 비고 : 1. 이 시험성적서는 당초 의뢰자가 제출한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
 2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
 3. 이 성적서의 원본 진위확인인 한국에스지이에스 온라인 성적서 조회 홈페이지(<http://e-checking.kr.sgs.com/construction/>)에서 열람이 가능합니다.

한국에스지이에스(주) 건설시험연구원

주소 : 경기도 화성시 동탄면 동탄산단10길 20 전화번호 (031)669-0600

유의사항 : 기술책임자의 성명과 서명이 없는 경우에는 결과에 대한 보증을 할 수 없습니다.

페이지 1 / 1

This document is issued by the Company under its General Conditions of Service accessible at <http://www.sgs.com/en/Terms-and-Conditions.aspx>. Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any holder of this document is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its intervention only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.



SGS Korea Co., Ltd. | 20, Dongtansandan 10-gil, Dongtan-myeon, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Korea, 18487 t +82(0)31 646 0600 f +82(0)31 646 0888 www.sgs.com

Member of SGS Group(Société Générale de Surveillance)



시험 성적서

시료명(생산국) : Plain-CSA,5,10,15%, C08-CSA5,10,15%

접 수 번 호 : KCM019-00632

접 수 일 자 : 2019년 01월 17일

시료 채취 장소 :

시료 채취 일 : -

의뢰인 : 경북 구미시 대학로61(양호동) 금오공과대학교

성과 이용 목적 : 연구과제제출용

이 형 주

생 산 자 : -

결 과

연번	시험검사종목	시험검사방법	시험검사결과			책임기술자			시험검사자	
			S ₁	S ₂	S ₃	자격종목및번호	성명	서명	성명	서명
1-1	압축강도	KS F 2405 : 2010	27.9	29.6	31.4	건설재료시험기사 16202102288F	박현열		송락균	
			31.9	27.8	25.3					
1-2	휨강도	KS F 2408 : 2016	11.8	12.9	15.2					
			-	-	-					

- 시료채취자 : 금오공과대학교 고성능구조재료연구실 박사과정 이 형 주
- Plain-CSA5%

[일반분야]

2019년 02월 28일

한국건설자재시험연구원

원 장 임 동



발급문서진위확인

TEL : 031) 419-3002 / FAX : 484-9977

주 소 : 경기도 안산시 상록구 사사안골3길 9(사사동)

유의사항

1. 위 시험 · 검사 결과는 당초 의뢰 시 제출된 시료에 대한 결과이므로 다른 목적으로의 이용을 금합니다.
2. 책임기술자 및 시험검사자의 성명과 서명이 없는 경우에는 결과에 대한 보증을 할 수 없습니다.

KCM-Q-12-F01(01)(1/6)

한국건설자재시험연구원

A4(210 × 297)

시험 성적서

시료명(생산국) : Plain-CSA,5,10,15%, C08-CSA5,10,15%

접 수 일 자 : 2019년 01월 17일

접 수 번 호 : KCM019-00632

생 산 자 : -

결 과

연번	시험검사종목	시험검사방법	시험검사결과			책임기술자			시험검사자	
			S ₁	S ₂	S ₃	자격종목및번호	성명	서명	성명	서명
			S ₄	S ₅	S ₆					
2-1	압축강도	KS F 2405 : 2010	32.8	29.0	37.0	건설재료시험기사 16202102288F	박현열	Oh	송락균	張
			37.3	34.4	36.9					
2-2	휨강도	KS F 2408 : 2016	17.4	17.4	15.8					
			-	-	-					

- Plain-CSA10%

TEL : 031) 419-3002 / FAX : 484-9977

주 소 : 경기도 안산시 상록구 사사안골3길 9(사사동)

시험 성적서

시료명(생산국) : Plain-CSA,5,10,15%, C08-CSA5,10,15%

접 수 일 자 : 2019년 01월 17일

접 수 번 호 : KCM019-00632

생 산 자 : -

결 과

연번	시험검사종목	시험검사방법	시험검사결과			책임기술자			시험검사자	
			S ₁	S ₂	S ₃	자격종목및번호	성명	서명	성명	서명
			S ₄	S ₅	S ₆					
3-1	압축강도	KS F 2405 : 2010	34.0	34.9	38.6	건설재료시험기사 16202102288F	박현열		송탁균	
			31.0	37.1	36.9					
3-2	휨강도	KS F 2408 : 2016	10.7	15.8	13.5					
			-	-	-					

- Plain-CSA15%

TEL : 031) 419-3002 / FAX : 484-9977

주 소 : 경기도 안산시 상록구 사사안골3길 9(사사동)



시험 성적서

시료명 (생산국) : Plain-CSA,5,10,15%, C08-CSA5,10,15%

접 수 일 자 : 2019년 01월 17일

접 수 번 호 : KCM019-00632

생 산 자 : -

결 과

연번	시험검사종목	시험검사방법	시험검사결과			책임기술자			시험검사자	
			S ₁ S ₄	S ₂ S ₅	S ₃ S ₆	자격종목및번호	성명	서명	성명	서명
4-1	압축강도	KS F 2405 : 2010	34.8	35.9	39.6	건설재료시험기사 16202102288F	박현열		송락균	
			37.8	36.6	32.0					
4-2	휨강도	KS F 2408 : 2016	12.4	13.5	9.6					
			-	-	-					

- C08-CSA5%

TEL : 031) 419-3002 / FAX : 484-9977

주 소 : 경기도 안산시 상록구 사사안골3길 9(사사동)

시험 성적서

시료명(생산국) : Plain-CSA,5,10,15%, C08-CSA5,10,15%

접 수 일 자 : 2019년 01월 17일

접 수 번 호 : KCM019-00632

생 산 자 : -

결 과

연번	시험검사종목	시험검사방법	시험검사결과			책임기술자			시험검사자	
			S ₁	S ₂	S ₃	자격종목및번호	성명	서명	성명	서명
			S ₄	S ₅	S ₆					
5-1	압축강도	KS F 2405 : 2010	37.1	31.4	35.0	건설재료시험기사 16202102288F	박현열	Oh	송탁균	송
			33.6	35.5	32.5					
5-2	휨강도	KS F 2408 : 2016	15.2	9.6	10.7					
			-	-	-					

- C08-CSA10%

TEL : 031) 419-3002 / FAX : 484-9977

주 소 : 경기도 안산시 상록구 사사안골3길 9(사사동)

시험 성적서

시료명 (생산국) : Plain-CSA,5,10,15%, C08-CSA5,10,15%

접 수 일 자 : 2019년 01월 17일

접 수 번 호 : KCM019-00632

생 산 자 : -

결 과

연번	시험검사종목	시험검사방법	시험검사결과			책임기술자			시험검사자	
			S ₁	S ₂	S ₃	자격종목및번호	성명	서명	성명	서명
			S ₄	S ₅	S ₆					
6-1	압축강도	KS F 2405 : 2010	47.0	44.1	37.1	건설재료시험기사 16202102288F	박현열		송락균	
			40.4	40.0	42.1					
6-2	휨강도	KS F 2408 : 2016	12.9	11.3	10.1					
			-	-	-					

- C08-CSA15%

TEL : 031) 419-3002 / FAX : 484-9977

주 소 : 경기도 안산시 상록구 사사안골3길 9(사사동)



시험 성적서

시료명(생산국) : Plain, C08, C08F1, C08S1

접 수 번 호 : KCM018-08453

접 수 일 자 : 2018년 12월 26일

시료 채취 장소 : -

시료 채취 일 : -

의뢰인 : 경북 구미시 대학로61(양호동) 금오공과대학교

성과 이용 목적 : 연구 과제 제출용

이 형 주

생 산 자 : -

결 과

연번	시험검사종목	시험검사방법	시험검사결과	책임기술자			시험검사자	
				자격종목및번호	성명	서명	성명	서명
1	중성화(탄산화 촉진시험) : Plain - 1	KS F 2584:2010	11.42	건설재료시험기사 16202102288F	박현열		송탁균	
2	중성화(탄산화 촉진시험) : Plain - 2	KS F 2584:2010	10.70					
3	중성화(탄산화 촉진시험) : Plain - 3	KS F 2584:2010	9.77					
4	중성화(탄산화 촉진시험) : Plain - 4	KS F 2584:2010	10.01					
5	중성화(탄산화 촉진시험) : C08 - 1	KS F 2584:2010	7.43					
6	중성화(탄산화 촉진시험) : C08 - 2	KS F 2584:2010	8.42					
7	중성화(탄산화 촉진시험) : C08 - 3	KS F 2584:2010	8.61					

[일반분야]

2019년 02월 28일

한국건설자재시험연구원

원 장 임 동



발급문서진위확인

TEL : 031) 419-3002 / FAX : 484-9977

주 소 : 경기도 안산시 상록구 사사안골3길 9(사사동)

유의사항

1. 위 시험 · 검사 결과는 당초 의뢰 시 제출된 시료에 대한 결과이므로 다른 목적으로의 이용을 금합니다.
2. 책임기술자 및 시험검사자의 성명과 서명이 없는 경우에는 결과에 대한 보증을 할 수 없습니다.

KCM-Q-12-F01(01)(1/2)

한국건설자재시험연구원

A4(210 × 297)

시험 성적서

시료명(생산국) : Plain, C08, C08F1, C08S1

접 수 일 자 : 2018년 12월 26일

접 수 번 호 : KCM018-08453

생 산 자 : -

결 과

연번	시험검사항목	시험검사방법	시험검사결과	책임기술자			시험검사자	
				자격종목및번호	성명	서명	성명	서명
8	중성화(탄산화 촉진시험) : C08 - 4	KS F 2584:2010	8.40	건설재료시험기사 16202102288F	박현열		송락균	
9	중성화(탄산화 촉진시험) : C08F1 - 1	KS F 2584:2010	9.69					
10	중성화(탄산화 촉진시험) : C08F1 - 2	KS F 2584:2010	9.28					
11	중성화(탄산화 촉진시험) : C08F1 - 3	KS F 2584:2010	9.25					
12	중성화(탄산화 촉진시험) : C08F1 - 4	KS F 2584:2010	8.46					
13	중성화(탄산화 촉진시험) : C08S1 - 1	KS F 2584:2010	7.27					
14	중성화(탄산화 촉진시험) : C08S1 - 2	KS F 2584:2010	7.54					
15	중성화(탄산화 촉진시험) : C08S1 - 3	KS F 2584:2010	6.64					
16	중성화(탄산화 촉진시험) : C08S1 - 4	KS F 2584:2010	7.58					

TEL : 031) 419-3002 / FAX : 484-9977

주 소 : 경기도 안산시 상록구 사사안골3길 9(사사동)



시험 성적서

시료명(생산국) : Plain, C08, C08F1, C08S1

접 수 번 호 : KCM018-08454

접 수 일 자 : 2018년 12월 26일

시료 채취 장소 : -

시료 채취 일 : -

의뢰인 : 경북 구미시 대학로61(양호동) 금오공과대학교

성과 이용 목적 : 연구 과제 제출용

이 형 주

생 산 자 : -

결 과

연번	시험검사종목	시험검사방법	시험검사결과	책임기술자			시험검사자	
				자격종목및번호	성명	서명	성명	서명
1	동결융해 후 압축강도(200cycle) : Plain	KS F 2456:2013	53.6	건설재료시험기사 16202102288F	박현열		송락균	
2	동결융해 후 압축강도(200cycle) : C08	KS F 2456:2013	64.3					
3	동결융해 후 압축강도(200cycle) : C08F1	KS F 2456:2013	61.6					
4	동결융해 후 압축강도(200cycle) : C08S1	KS F 2456:2013	70.3					

[일반분야]

2019년 02월 28일

한국건설자재시험연구원

원 장 임 동



발급문서진위확인

TEL : 031) 419-3002 / FAX : 484-9977

주 소 : 경기도 안산시 상록구 사사안골3길 9(사사동)

유의사항

1. 위 시험 · 검사 결과는 당초 의뢰 시 제출된 시료에 대한 결과이므로 다른 목적으로의 이용을 금합니다.
2. 책임기술자 및 시험검사자의 성명과 서명이 없는 경우에는 결과에 대한 보증을 할 수 없습니다.

KCM-Q-12-F01(01)(1/1)

한국건설자재시험연구원

A4(210 × 297)



시험성적서

시료명(생산국) : Plain, C08, C08F1, C08S1(대한민국)

접 수 번 호 : KCM019-01026

접 수 일 자 : 2019년 02월 07일

시료 채취 장소 : 금오공과대학교

시 료 채 취 일 : -

의 퇴 인 : 경북구미시 대학로61(양호동) 금호공과대학교 글로벌관 510호 성과 이용 목적 : 연구과제 제출용

이 형 주

생 산 자 : 금오공과대학교

결 과

연번	시험검사종목	시험검사방법	시험검사결과			책임기술자			시험검사자	
			S ₁	S ₂	S ₃	자격종목및번호	성명	서명	성명	서명
1	염소이온 침투저항시험 : Plain	KS F 2711(ATSM C 1202)	890	913	921	건설재료시험기사 16202102288F	박현열		송락균	
2	염소이온 침투저항시험 : C08	KS F 2711(ATSM C 1202)	885	888	892					
3	염소이온 침투저항시험 : C08F1	KS F 2711(ATSM C 1202)	943	969	982					
4	염소이온 침투저항시험 : C08S1	KS F 2711(ATSM C 1202)	1507	1584	1606					

- 시료채취자 : 금오공과대학교 건축공학과 연구원 이 형 주

[일반분야]

2019년 02월 28일

한국건설자재시험연구원

원 장 임 동



발급문서진위확인

TEL : 031) 419-3002 / FAX : 484-9977

주 소 : 경기도 안산시 상록구 사사안골3길 9(사사동)

유의사항

1. 위 시험 · 검사 결과는 당초 의뢰 시 제출된 시료에 대한 결과이므로 다른 목적으로의 이용을 금합니다.
2. 책임기술자 및 시험검사자의 성명과 서명이 없는 경우에는 결과에 대한 보증을 할 수 없습니다.

KCM-Q-12-F01(01)(1/1)

한국건설자재시험연구원

A4(210 × 297)

3) 연구 성과 관련 게재논문 실적

셀룰로오스 나노크리스탈을 혼입한 섬유보강 고인성 시멘트 복합체의 역학적 특성에 관한 연구

이형주¹ · 이현석² · 김준호³ · 최승원⁴ · 김우석⁵

금오공과대학교 건축공학과 박사과정¹, 금오공과대학교 건축학부 학사과정², 금오공과대학교 건축학부 교수³

A Study on the Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites Containing Cellulose Nano-crystals

Lee, Hyung-Joo¹ · Lee, Heon-Seok² · Kim, Jun-Ho³ · Choi, Seung-Won⁴ · Kim, Woo-Suk⁵

¹Ph.D Student, Department of Architectural Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea
²Undergraduate Student, School of Architecture, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea
Professor, School of Architecture, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea

Abstract: In this study, an experiment was conducted to investigate the improvement of strength of cement pastes using Cellulose Nano-Crystals (CNCs) aqueous solution. First, to determine the performance of CNCs, an aqueous solution was prepared according to the mixing amount to compare the strength of cement pastes containing no aggregates. The amount of CNC was 0.1, 0.2, and 0.4 (vol.%) compared to cement and the flexural strength was increased about 8 times compared with plain at 0.4 (vol.%). Based on the previous basic experiments, the authors propose a new Engineered Cementitious Composites (ECC) type using steel and flax fibers for improving structural performance by evaluating the strength characteristics after manufacturing ECC with 0.4, 0.8, and 1.2 (vol.%) aqueous solution of CNCs.

Key Words: cellulose nano-crystals (CNCs), nano-technology, engineered cementitious composites (ECC), steel fiber, flax fiber, dispersion

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

현재 나노기술을 이용한 분야는 전자, 바이오, 의료 등에서 다양한 연구 및 상용화 단계에 이르고 있다. 하지만 건설 분야에서는 나노기술을 이용한 연구가 미비한 실정이며 나노재료인 시멘트에 직접적으로 사용한 연구는 미미한 실정이다.

Corresponding author: Kim, Woo-Suk
School of Architecture, Kumoh National Institute of Technology,
Daehak-ro 61, Gumi, Gyeongbuk 39177, Korea.
Tel: +82-54-78-7591, Fax: +82-54-78-7600,
E-mail: kimw@kumoh.ac.kr

Received November 16, 2018 / Revised December 6, 2018 /
Accepted December 6, 2018

· 본 논문은 대한 포커스 2019년 2월 28일까지 학회료
포함유인인 2019년 2월호에 발표될 것을 약속하셨습니다.

Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures

101

Article

State-of-the-Art of Cellulose Nanocrystals and Optimal Method for their Dispersion for Construction-Related Applications

Hyung-Joo Lee^{1,†}, Heon-Seok Lee^{1,†}, Junwon Seo^{2,†}, Yong-Hak Kang^{3,†}, Woosuk Kim^{1,4,†} and Thomas H.-K. Kang⁴

¹ Department of Architectural Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea; hj1102@kumoh.ac.kr (H.-J.L.); hse@kumoh.ac.kr (H.-S.L.)
² Department of Civil and Environmental Engineering, South Dakota State University, Brookings, SD 57007, USA; junwonseo@state.sd.edu
³ Construction Technology Research Center, Korea Conformity Laboratories, Seoul 08503, Korea; yhkang@kcl.net
⁴ Department of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea; hkang@snu.ac.kr
[†] Correspondence: kimw@kumoh.ac.kr; Tel.: +82-54-78-7591

Received: 17 November 2018; Accepted: 10 January 2019; Published: 27 January 2019



Abstract: In this paper, we reviewed the existing literature on the fabrication of nanocomposites based on cellulose and cellulose nanocrystals (CNCs), and analyzed their dispersion mechanism with respect to their use in the field of construction. First, the existing literature on CNC-based nanocomposites that exhibit the physical and chemical properties of nanocellulose and CNCs was reviewed. Next, the optimal mechanical method for their dispersion as an alternative to the currently used harmful chemical techniques. To this end, we evaluated the dispersibility of colloidal CNCs using two dispersion methods: magnetic stirring (for stirring times of 60 min, 120 min, and 180 min) and high-pressure dispersion (at pressures of 345×10^5 Pa, 1035×10^5 Pa, and 1587×10^5 Pa, and one to three dispersion passes). The optimal dispersion conditions were determined by analyzing the size and zeta potential of the CNC particles. It was found that the difference in the average diameter was reduced by approximately 76% at 1587×10^5 Pa during high-pressure dispersion.

Keywords: cellulose nano-crystals (CNC); optimal dispersion; construction applications

1. Introduction

Nanocellulose is a biological material that shows tensile strength that is similar to that of steel or Kevlar (100 to 160 GPa) along with low density (0.8 to 1.5 g/cm³), high specific surface area, and good biodegradability [1]. Given these advantages, it is being explored for use in various devices and fields, including packaging materials, biomedical devices, adhesives, and electronic and electrical materials [2–15].

Recently, Cao et al. [16] explored novel cellulose cement composites with improved mechanical performance based on cellulose nanocrystals (CNCs). CNCs are environmentally friendly because they can be produced from abundantly available natural sources and are biodegradable in nature. Scanning electron microscopy (SEM) analysis has revealed that CNCs dispersed in an undehydrated cement core act as water channels and enhance hydration in the core, thus improving the strength of the cement.

Alain [17] studied the Young's modulus of nanocellulose with the density of crystalline cellulose of approximately 1.5 – 1.6 g/cm³. Further, it is known that CNCs are stronger than steel (Young's

Appl. Sci. 2019, 9, 426; doi:10.3390/app9030426

www.mdpi.com/journal/applsci

< 한국복합신소재구조학회 논문집 2018.12 >

< MDPI-applied science 2019.01 >

A Study on the Drying Shrinkage and Mechanical Properties of Fiber Reinforced Cement Composites Using Cellulose Nanocrystals

Hyung-Joo Lee¹, Seung-Ki Kim¹, Heon-Seok Lee¹ and Woosuk Kim^{2*}

Abstract

As part of the research on cement composites using cellulose nanocrystal (CNC) aqueous solution instead of general water, this study produced high-toughness cement composites reinforced with flax and steel fibers to improve the tensile deformation capacity, assessing the isothermal conduction calorimetry analysis, drying shrinkage, and strength characteristics. The mixing amount of CNCs was 0.4, 0.8, and 1.2 vol.% by volume of cement, and an aqueous solution was prepared using the ultrasonication dispersion method. When comparing the results of the experiment according to the CNC mixing ratio, CNCs at 0.8 vol.% led to an improvement in the shrinkage rate and mechanical performance compared with the plain specimen.

Keywords: cellulose nanocrystals, drying shrinkage, strength properties, isothermal conduction calorimetry analysis

*Correspondence: kimw@kumoh.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi, Gyeongsangbuk-do 39177, Republic of Korea

1. Introduction

Cellulose nanocrystals (CNCs) are characterized by strong rigidity because they consist only of crystalline regions, with the noncrystalline regions extracted from nanocellulose. (1) Cao et al. (2015) reported that CNCs acted as a water pathway in the undehydrated part of a cement core, as a result, hydration was affected, resulting in a 30% improvement in the cement paste compared with plain cement. (2) Currently, studies on CNC cement have been conducted on cement paste type. In this study, to improve the tensile deformation capacity of cement composites, we intend to propose a new construction material that is more durable and superior in structural performance through the production of high strength cement composites reinforced with fibers.

Therefore, in this study, CNCs were prepared with various concentration ratios (0.4, 0.8, or 1.2 vol.% volume of cement) using the ultrasonication dispersion method, and the drying shrinkage and mechanical properties of high-toughness cement composites reinforced with flax and steel fibers were investigated.

The existing literature on nanocellulose cement and previous studies on strength and shrinkage in relation to this study are summarized in Table 1.

Date: 16 Apr 2019

To: "Woosuk Kim" kimw@kumoh.ac.kr

From: "International Journal of Concrete Structures and Materials Editorial Office" neelu.sekar@springernature.com

Subject: Your submission to International Journal of Concrete Structures and Materials - CSTR-D-19-00028

CSTR-D-19-00028

A Study on the Drying Shrinkage and Mechanical Properties of Fiber Reinforced Cement Composites Using Cellulose Nanocrystals (CNCs)

Hyung-Joo Lee; Seung-Ki Kim; Heon-Seok Lee; Woosuk Kim, Ph.D.

International Journal of Concrete Structures and Materials

Dear Dr. Kim,

Your manuscript "A Study on the Drying Shrinkage and Mechanical Properties of Fiber Reinforced Cement Composites Using Cellulose Nanocrystals (CNCs)" (CSTR-D-19-00028) has been assessed by our reviewers. Based on these reports, and my own assessment as Editor, I am pleased to inform you that it is potentially acceptable for publication in International Journal of Concrete Structures and Materials, once you have carried out some essential revisions suggested by our reviewers.

<IJCSM 게재예정>

현재 Accept 상태로 **IJCSM(Impact Factor: 2.737)** 2019년 7월호에 게재될 예정

<ICAMF 2018 2018.08>

<한국복합신소재구조학회 학술발표대회 2018.04>

<ICAMF 2018 2018.08>

5) 연구 성과 관련 특허 출원 실적

관 인 생 략

관 인 생 략

출원 번호 통지서

출원일자 2018.08.01
특기사항 심사청구(우) 공개신청(무)
출원번호 10-2018-0089789 (결수번호 1-1-2018-0761180-17)
출원인명칭 금오공과대학교 산학협력단(2-2004-035028-2)
대리인성명 특허법인 신태양(9-2011-100101-7)
발명자성명 김우석 이형주 김승기 이현석
발명의영향 분산성이 향상된 셀룰로오스 나노크리스탈 및 이의 제조방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(명경), 변경신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허포(patent.go.kr) 접속 > 민원서비스다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보장이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드>
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원권 기조로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

<특허출원 2018.08>

출원 번호 통지서

출원일자 2019.02.25
특기사항 심사청구(무) 공개신청(무)
출원번호 10-2019-0021862 (결수번호 1-1-2019-0195518-14)
출원인명칭 금오공과대학교 산학협력단(2-2004-035028-2)
대리인성명 이선택(9-2011-000570-1)
발명자성명 김우석 이형주 김승기 이현석
발명의영향 셀룰로오스 나노 크리스탈을 이용한 섬유보강 고인성 시멘트 복합 조성물 및 이의 제조방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(명경), 변경신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허포(patent.go.kr) 접속 > 민원서비스다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보장이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드>
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원권 기조로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

<특허출원 2019.02>

6) 연구 성과 관련 특허 등록 실적

등록특허 10-1953875

등록특허 10-1953870

(19) 대한민국특허청(KR)		(46) 공고일자	2019년03월04일
(12) 등록특허공보(B1)		(11) 등록번호	10-1953875
		(24) 등록일자	2019년02월25일
(61) 국제특허분류(Int. Cl.)			
C04B 18/02 (2006.01) C04B 18/14 (2006.01)			
C04B 20/00 (2006.01) C04B 28/02 (2006.01)			
C04B 40/00 (2006.01) C04B 111/00 (2006.01)			
C04B 111/34 (2006.01)			
(62) CPC특허분류			
C04B 18/02 (2013.01) C04B 18/14 (2013.01)			
(21) 출원번호 10-2017-0158962			
(22) 출원일자 2017년11월24일			
심사청구일자 2017년11월24일			
(56) 선행기술조사본헌 JP2010001208 A*			
Yizheng Cao et. al., The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste, Cement and Concrete Composites, vol. 56, pp. 73-83, 2014.11.18.*			
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌			

전체 청구항 수 : 총 3 항

심사관 : 본명준

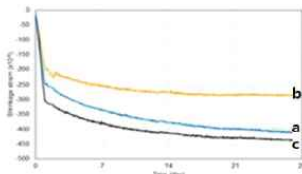
(54) 발명의 명칭 셀룰로오스 나노크리스탈을 이용한 콘크리트 조성물 및 이의 제조방법

(67) 요약

본 발명은 셀룰로오스 나노크리스탈을 이용한 콘크리트 조성물에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 조유과 및 고반 전지리인 셀룰로오스 나노크리스탈을 사용하여 수축 저감 및 휨 인장강도가 향상된 콘크리트 조성물에 관한 것이다.

본 발명에 따른 셀룰로오스 나노크리스탈을 이용한 콘크리트 조성물은 시멘트 40 내지 75중량%, 고반 슬래그 25 내지 60 중량%, 포함하는 결합재 100중량부에 대하여 150 내지 300중량부 첨가되는 골재;와 상기 시멘트 전체 무게에 대하여 0.05 내지 1%(v/v) 첨가되는 셀룰로오스 나노크리스탈(CNC) 분말;과 W/B(물/결합재의 중량 혼합비) 40 내지 60%로 혼합되는 물을 포함한다.

대표도 - 도3



(19) 대한민국특허청(KR)		(46) 공고일자	2019년03월04일
(12) 등록특허공보(B1)		(11) 등록번호	10-1953870
		(24) 등록일자	2019년02월25일
(51) 국제특허분류(Int. Cl.)			
C04B 18/02 (2006.01) C04B 14/06 (2006.01)			
C04B 20/00 (2006.01) C04B 28/02 (2006.01)			
C04B 40/00 (2006.01)			
(52) CPC특허분류			
C04B 18/02 (2013.01) C04B 14/06 (2013.01)			
(21) 출원번호 10-2017-0158964			
(22) 출원일자 2017년11월24일			
심사청구일자 2017년11월24일			
(56) 선행기술조사본헌 JP2010001208 A*			
Yizheng Cao et. al., The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste, Cement and Concrete Composites, vol. 56, pp. 73-83, 2014.11.18.*			
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌			

전체 청구항 수 : 총 2 항

심사관 : 본명준

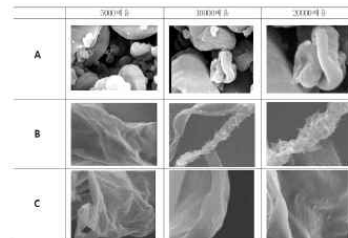
(54) 발명의 명칭 셀룰로오스 나노크리스탈을 이용한 시멘트 복합 조성물 및 이의 제조방법

(67) 요약

본 발명은 셀룰로오스 나노크리스탈을 이용한 시멘트 복합 조성물 및 이의 제조방법에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 조유과 및 고반 전지리인 셀룰로오스 나노크리스탈을 사용하여 압축강도를 향상시킨 시멘트 복합 조성물에 관한 것이다.

본 발명은 셀룰로오스 나노크리스탈을 이용한 시멘트 복합 조성물은 시멘트 100중량부;와 상기 시멘트 100중량부에 대하여 물 30 내지 50중량부;와 상기 시멘트 100중량부에 대하여 0.05 내지 700중량부;와 상기 시멘트 전체 무게에 대하여 셀룰로오스 나노크리스탈(CNC) 분말 0.05 내지 15%(v/v)를 포함하는 것을 특징으로 한다.

대표도 - 도3



발명의 명칭 Title of the Invention
셀룰로오스 나노크리스탈을 이용한 시멘트 복합 조성물 및 이의 제조방법

특허권자 Patentee
금오공과대학교 산학협력단(176071-*****)
경상북도 구미시 대학로 61 (양호동)

발명자 Inventor
등록사항란에 기재

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.

This is to certify that, in accordance with the Patent Act, a patent for the invention has been registered at the Korean Intellectual Property Office.



2019년 02월 25일

특허청장
COMMISSIONER
KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

박원주



QR코드로 전자기초
등록사항을 확인하세요

등록사항	
특허	등록 제 10-1953870 호
발명자 Inventors	김우석(750717-*****) 경상북도 구미시 선거로3길 51 ,101동1603호(남동동,금오산금호아울림1단지) 이형주(871102-*****) 경상북도 구미시 대학로 61 금오공과대학교 푸름관 4동 102호 김승기(911112-*****) 대구광역시 수성구 청호로88길 43-4 1층

<특허등록 2019.02>



등 록 사 항	
특 허	등록 제 10-1953875 호
Patent Number	
발명자 Inventors	김우석(750717-*****) 경상북도 구미시 선기로3길 51 ,101동1603호(남동동,금오산금호어울림1단지) 이형주(871102-*****) 경상북도 구미시 대학로 61 금오공과대학교 푸른관 4동 102호 김승기(911112-*****) 대구광역시 수성구 청호로88길 43-4 1층

<특허등록 2019.02>

(15) 경제적 성과

- CNC 관련 연구 진행을 통한 캐나다 'C' 회사와의 지속적 교류를 통해 구매 단가 감소
- 1차 구매 시 kg당 단가는 500(USD), 추후 두 차례 구매 시 kg당 50(USD)(약 90% 저감효과)

DESCRIPTION	Quantité Quantity	Unité Unit	Prix unitaire Unit Price	Total Net Net Total
Cellulose Nano Crystals - NCV-100 Celluforce NCC™ HS Classification: 3912.90.0090	4.0	kg	\$ 500.00	\$ 2,000.00
Made in Canada				
<u>PACKAGING</u>				
0.5kg Packaging - Cylindrical Jar 1500ML (51 OZ)	8			\$ 0.00
<u>SHIPPING</u>				
FEDEX - International Priority FCA Windsor				\$ 190.00
Customs, duties will be paid directly by the customer				
				\$ 2,190.00

DESCRIPTION	Quantité Quantity	Unité Unit	Prix unitaire Unit Price	Total Net Net Total
Cellulose Nano Crystals - NCV-100 Celluforce NCC™ HS Classification: 3912.90.0090	15.0	kg	\$ 50.00	\$ 750.00
Made in Canada				
<u>PACKAGING</u>				
15kg Packaging - Pail 6 USD/22.7L	1			\$ 0.00
<u>SHIPPING</u>				
FEDEX - International Priority FCA Windsor				\$ 605.00
Brokerage fees, duties & taxes will be paid directly by the customer				
				\$ 1,355.00
				USD

DESCRIPTION	Quantité Quantity	Unité Unit	Prix unitaire Unit Price	Total Net Net Total
Cellulose Nano Crystals - NCV-100 Celluforce NCC™ HS Classification: 3912.90.0090	50.0	kg	\$ 50.00	\$ 2,500.00
Made in Canada				
<u>PACKAGING</u>				
15kg Packaging - Pail 6 USD/22.7L	3			\$ 0.00
5kg Packaging - Pail 2 USG/7.6L	1			
<u>SHIPPING</u>				
FEDEX - International Priority FCA Windsor				\$ 1,010.00
Brokerage fees, duties & taxes will be paid directly by the customer				
				\$ 3,510.00

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표 달성도

(1) 최종 성과목표 및 평가 방법

(가) 총괄

구분	핵심성과 (CTE)	단위성과	성과점검기준							양적 성과 건수		
			질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치				
주관	1	CNC 적용 시멘트 복합체	1-1	CNC 물성 평가	①	문헌조사	1건	1건	문헌조사 보고서	보고서유무	5	특허: 출원 2건 등록 2건 논문: SQ급 1건 비SQ급 1건
					②	물리적 특성 평가(안)	1건	1건	평가 방법 (안)	보고서유무	5	
			1-2	CNC 분산 기술	①	분산성 평가(안)	1건	1건	자체평가	보고서유무	5	특허: 출원 2건 등록 2건 논문: SQ급 1건 비SQ급 2건
			1-3	CNC 시멘트 최적배합 도출	①	최적 배합(안)	1건	1건	자체평가	보고서유무	5	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: SQ급 1건 비SQ급 1건
			1-4	CNC 소재 특성 분석	①	문헌조사	1건	1건	문헌조사 보고서	보고서유무	5	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: SQ급 1건 비SQ급 1건
	2	CNC 활용 저수축 고인성 콘크리트	2-1	시멘트 복합체 활용 기술 도출	①	문헌조사	1건	1건	문헌조사 보고서	보고서유무	5	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: SQ급 1건 비SQ급 1건 시제품: 1건 SW: 1건
					②	응결(중결)	8시간 이내	6시간이내	KS L ISO 9597	공인성적서	5	
					③	플로우	200mm 이상	231mm 이상	KS L 5111	공인성적서	5	
			2-2	시멘트 복합체 성능향상 기술	①	자기 수축 (Plain 대비)	25% 개선	92% 개선	KS F 2586	공인성적서	5	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: SQ급 1건 비SQ급 1건 시제품: 1건 SW: 1건
					②	압축강도 (Plain 대비)	90% 이내	14% 개선	KS F 2405	공인성적서	5	
					③	휨강도 (Plain 대비)	50% 증가	18% 감소	KS F 2408	공인성적서	5	
					④	인장강도 (Plain 대비)	50% 증가	121% 개선	KS L 5104	공인성적서	5	
			2-3	저수축 고인성 콘크리트 제조 기술	①	중성화 (Plain 대비)	90% 이내	22% 이내	KS F 2584	공인성적서	10	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: SQ급 1건 비SQ급 1건 시제품: 1건 SW: 1건
					②	내염해성 (Plain 대비)	90% 이내	2% 개선	ASTM C 1202	공인성적서	10	
					③	동결융해 (Plain 대비)	80% 이내	22% 개선	KS F 2456	공인성적서	10	
					④	내화성 평가	1건	1건	자체평가	보고서유무	5	
					⑤	경제성 평가	1건	1건	평가보고서	보고서유무	5	
			계									100

(나) 1차 연도 (2017)

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수					
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치						
주관	1	CNC 적용 시멘트 복합체	1-1	CNC 물성 평가	①	문헌조사	1건	1건	문헌조사 보고서	보고서유무	10	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: SO급 <u> </u> 건 비SO급 <u> </u> 건				
					②	물리적 특성 평가(안)	1건	1건	평가 방법 (안)	보고서유무	20					
	2	CNC 활용 저수축 고인성 콘크리트	1-2	CNC 분산 기술	①	분산성 평가(안)	1건	1건	자체평가	보고서유무	30	특허: 출원 <u> </u> 2 건 등록 <u> </u> 2 건 논문: SO급 <u> </u> 1 건 비SO급 <u> </u> 2 건				
					2-1	시멘트 복합체 활용 기술 도출	①	문헌조사	1건	1건	문헌조사 보고서		보고서유무	10	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: SO급 <u> </u> 건 비SO급 <u> </u> 건	
							②	응결(중결)	8시간 이내	6시간 이내	KS L ISO 9597		공인성적서	15		사제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건
							③	플로우	200mm 이상	231mm 이상	KS L 5111		공인성적서	15		
계											100	특허: 출원 <u> </u> 2 건 등록 <u> </u> 2 건 논문: SO급 <u> </u> 1 건 비SO급 <u> </u> 2 건 사제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건				

(다) 2차 연도 (2018)

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
주관	1	CNC 적용 시멘트 복합체	1-3	CNC 시멘트 최적배합 도출	①	최적 배합(안)	1건	1건	자체평가	보고서유무	5	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: SO급 <u> </u> 건 비SO급 <u> </u> 건
			1-4	CNC 소재 특성 분석	①	문헌조사	1건	1건	문헌조사 보고서	보고서유무	5	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: SO급 <u> </u> 건 비SO급 <u> </u> 건
	2	CNC 활용 저수축 고인성 콘크리트	2-2	시멘트 복합체 성능향상 기술	①	자기 수축 (Plain 대비)	25% 개선	92% 개선	KS F 2586	공인성적서	10	특허: 출원 <u> </u> 1 건 등록 <u> </u> 건 논문: SO급 <u> </u> 1 건 비SO급 <u> </u> 1 건 사제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건
					②	압축강도 (Plain 대비)	90% 이내	14% 개선	KS F 2405	공인성적서	10	
					③	휨강도 (Plain 대비)	50% 증가	18% 감소	KS F 2408	공인성적서	10	
					④	인장강도 (Plain 대비)	50% 증가	121% 개선	KS L 5104	공인성적서	10	
			2-3	저수축 고인성 콘크리트 제조 기술	①	중성화 (Plain 대비)	90% 이내	22% 개선	KS F 2584	공인성적서	10	특허: 출원 <u> </u> 1 건 등록 <u> </u> 건 논문: SO급 <u> </u> 건 비SO급 <u> </u> 건 사제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건
					②	내염해성 (Plain 대비)	90% 이내	2% 개선	ASTM C 1202	공인성적서	10	
					③	동결융해 (Plain 대비)	80% 이내	22% 개선	KS F 2456	공인성적서	10	
					④	내화성 평가	1건	1건	자체평가	보고서유무	10	
			⑤	경제성 평가	1건	1건	평가보고서	보고서유무	10	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: SO급 <u> </u> 건 비SO급 <u> </u> 건 사제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건		
계										100	특허: 출원 <u> </u> 2 건 등록 <u> </u> 건 논문: SO급 <u> </u> 1 건 비SO급 <u> </u> 1 건 사제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건	

(2) 최종 성과 목표 달성도

성과지표		최대 성과 목표	최소 성과 목표	달성치	달성도(%)
국외 논문 게재	SCI	3	2	2	100%
	비SCI				
	계				
국내 논문 게재	SCI				
	비SCI	3	2	3	150%
	계				
특허 출원	국내	2	1	4	400%
	국외				
	계				
특허 등록	국내	-	-	2	200%
	국외				
	계				
인력 양성	석사	-	-	1	100%
	박사				
	계				
기술 이전	계약 건수				
	계약액				
	징수액				
국제 표준화	기고서 제출				
	기고서 채택				
	표준안 채택				
국내 표준화	기고서 제출				
	기고서 채택				
	표준안 채택				
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문				
	연구시설·장비				
	기술요약정보				
	생명자원	생명정보			
		생물자원			
		신 품 종			
	소프트웨어				
	화학물				
기타	시제품				
	성과 홍보	-	-	1	100%
	일자리 창출				

나. 관련 분야 기여도

구분	관련분야 기여도					
	R&D 전			R&D 후		
소분류	국외 기술수준	국내 기술수준	분석	국외 기술수준	국내 기술수준	분석
CNC 적용 시멘트 복합체 기술	CNC와 시멘트 간의 메커니즘과 실험실 수준의 시멘트 복합체 실험.	CNC를 적용한 시멘트복합체의 특성에 관한 연구는 있으나, 최적배합비 도출 연구는 없음.	CNC를 적용하여 시멘트 복합체의 성능향상을 확인하였으나, 최적배합비 도출 연구는 없음.	CNC와 시멘트 간의 메커니즘과 실험실 수준의 시멘트 복합체 실험.	CNC 적용 시멘트 복합체의 최적배합비 도출	CNC 적용 시멘트 복합체의 최적배합비 도출.
CNC 활용 저수축 고인성 콘크리트 기술	해당 사례 없음	해당 사례 없음	CNC를 콘크리트 제품에 적용한 연구가 없음.	해당 사례 없음	콘크리트에 특성을 개선하는 CNC 적용 기술 확보.	콘크리트에 특성을 개선하는 CNC 적용 기술 확보.

다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책

- CNC 혼입에 따른 강도 특성 평가 시 휨강도개선 50% 향상에 관한 목표치를 달성하지 못하였음. 이러한 결과는 CNC 혼입으로 인한 시멘트 내부 구조의 취성적 양상에 의한 것으로 판단됨. 따라서 휨성능 개선 방안으로 섬유 보강을 통해 강도 특성을 평가하였으며 그 결과 최대 Plain 대비 20%향상을 확인하였음
- CNC 혼입으로 인한 팽창성 증대에 따른 결과는 앞선 미소 수화열 분석 및 TG 분석을 통해 CNC를 혼입하지 않은 Plain대비 생성되는 수화물량이 증가하는 것은 확인하였으나, 차후 XRD, XRF를 통해 생성되는 수화물에 대한 구체적인 분석이 필요할 것으로 판단됨
- 본 연구에서는 천연섬유인 아마섬유와 인공섬유인 강섬유와의 비교분석을 실시하였으며, 차후 CNC 시멘트의 성능개선을 위한 양마, 코이어 섬유 등과 같은 천연섬유 및 PP, 파라아라미드 섬유등과 같은 복합섬유와 실리카흙 등의 다양한 혼화재를 결합한 CNC 시멘트 복합체의 실험적 분석을 통해 CNC 시멘트의 가장 적합한 혼합소재를 규명하고, 성능향상에 관한 연구를 진행할 예정임

제5장. 연구개발성과의 활용계획

가. 연구개발 성과의 활용방안

- (1) 생체친화형 건축 내외장재 및 콘크리트 저수축, 고인성이 필요 시 되는 제품에 적용 가능
- (2) 프리캐스트 2차제품(PC구조부재), 구조용 콘크리트(토목, 건축구조물) 제품에 적용 가능
- (3) 일반 시멘트 대비 CNC 적용 시멘트의 빠른 초결시간을 이용하여 응결경화반응 지연의 문제점인 한중콘크리트에 대한 요구성능을 충족시킬 수 있을 것으로 판단됨



나. 기대효과

(1) 기술적 측면

(가) 천연소재 활용을 통한 건설재료 개발을 통한 원천기술 확보 및 국가경쟁력 제고

- ① 현재 석유기반 고분자계 혼화제를 대체하는 천연소재를 건설재료에 대한 적용 기술은 초기 기술 개발 단계 수준이며 본 연구개발을 통하여 천연소재 활용 건설재료 관련 원천기술 확보 및 국가경쟁력 제고가 가능할 것으로 판단됨

(나) NT 기술과 BT 기술의 융복합을 통한 관련 시장 확대 및 기능성 건설재료 신시장 창출

- ① 기존 재료에 NT기술과 BT 기술을 융복합화하여 기존 재료의 성능을 향상시킴으로써 관련 시장 확대와 기능성 건설재료에 대한 새로운 시장의 창출이 가능함
- ② 융복합 기술에 대한 다변화로 국내 관련 R&D의 활성화와 기반 기술에 대한 정립이 가능함

(2) 경제적·산업적 측면

(가) 첨단 소재로의 적용을 통한 기능성 건설재료의 고부가가치화 가능

- ① 첨단 소재와의 융복합을 통한 세계시장 선점 및 기능성 건설재료의 고부가가치화로 기술 수출에 따른 경제적 이익 발생 가능
- ② 관련 산업 활성화에 따른 고용창출 효과 발생

(나) 산업폐기물의 고부가가치 활용을 통한 관련 산업 활성화

- ① 셀룰로오스 나노크리스탈은 폐목재, 제지슬러지와 같은 건설·산업폐기물로부터도 추출이 가능하여 관련 산업의 활성화 견인과 함께 이익 창출 지원이 가능

(다) 나노셀룰로오스 관련 산업 활성화에 따른 생산 설비 구축화

- ① 최근 산림청 국립산림과학원에서의 셀룰로오스 나노섬유(CNF) 대량생산용 파일럿 설비 구축에 따라 생산단가를 낮추고 안정적인 생산기반을 마련함으로써 나노셀룰로오스관련 연구개발의 지속성이 가능해졌으며, 본 연구와 같은 건설분야 뿐만 아니라 다양한 분야에서 CNC의 우수한 특성을 이용한 제품 연구 개발이 지속적으로 수행되고 있기 때문에, CNC 관련 생산설비 또한 빠른 시간내 구축될 것으로 판단됨

(3) 사회적 측면

(가) 천연소재 활용 및 NT/BT 융복합 기술을 통한 지속가능한 사회 구축을 지원

- ① 천연소재 활용으로 부존 자원의 보전, 환경오염의 개선 등이 가능하며, 융복합 기술을 통한 성능향상으로 지속가능한 사회 구축에 이바지함

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

-Cao et al.(2015) 연구에서는 시멘트 페이스트에 CNC 첨가에 따른 영향을 조사함. 이 연구에서는 CNC의 혼입율에 따른 특성 평가를 진행하였으며 결과적으로 시멘트 대비 0.2%에서 휨강도가 약 30% 증가되는 결과를 나타냄.(Fig. 1)

이러한 CNC 영향에 따른 시멘트 강도 증진 메커니즘은 Fig. 2와 같이 CNC가 미수화된 시멘트 코어의 물길(Water way)역할을 통해 결과적으로 수화도(Degree of hydration, DOH)를 증진시켜 수화생성물인 C-S-H 생성에 따라 강도가 증진되는 것으로 판단함

또한, CNC 혼입율에 따른 시멘트 수화도 측정 실험 결과 혼입율이 증가 할수록

누적열량이 증가하는 경향을 나타냄.(Fig. 3) 이러한 결과는 강도 실험 결과와 관련이 있

으며, 혼입율이 증가할수록 수화열 증진에 따른 강도 감소가 발생하는 것으로 판단함

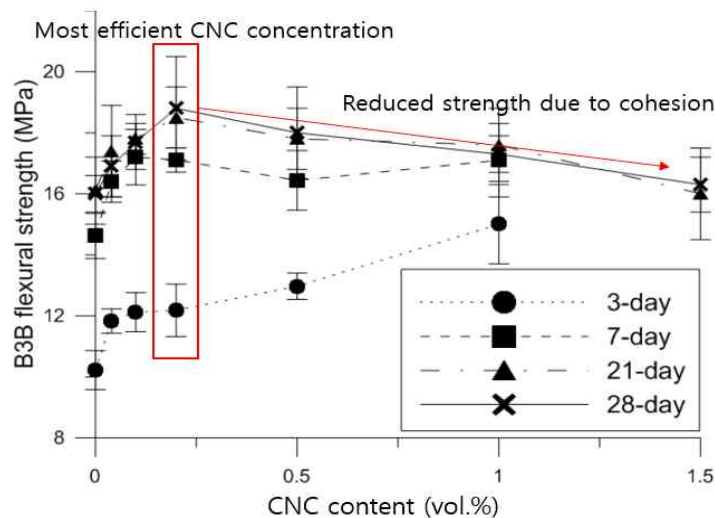


Fig. 1 B3B(ball-three-ball) bending strength according to CNC

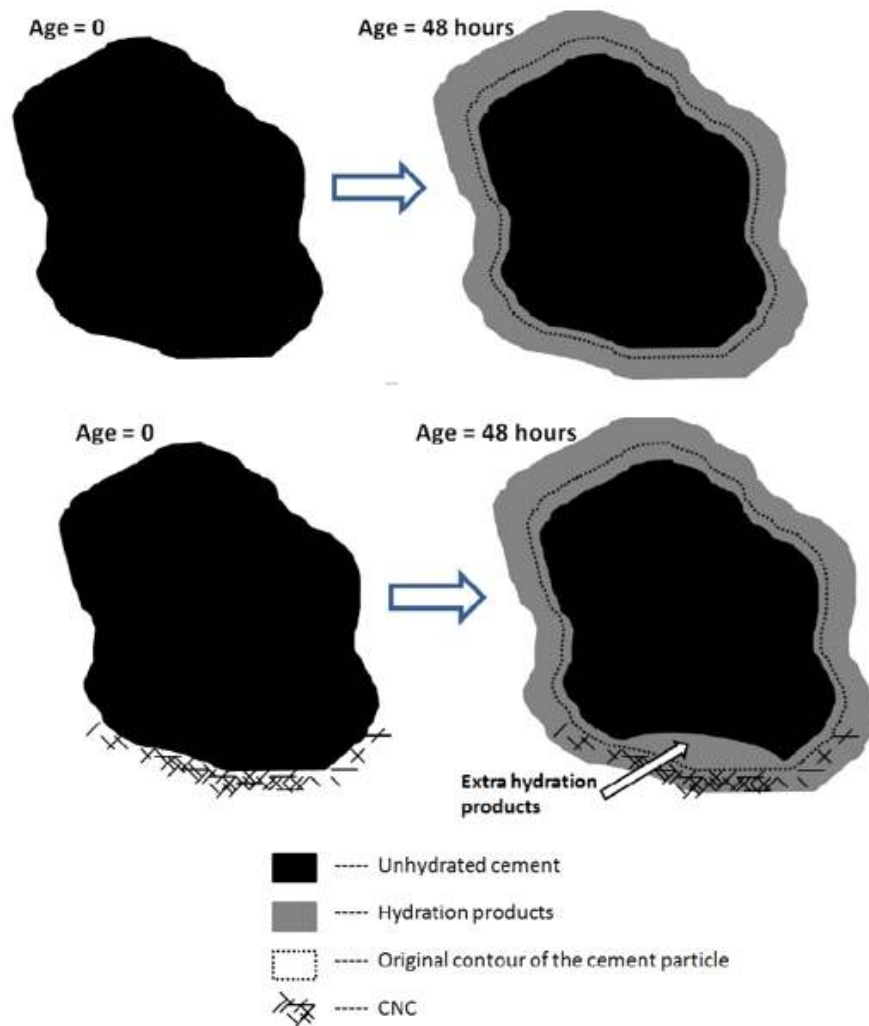


Fig. 2 Comparing Cement Core Hydration Mechanism of General Cement to CNC

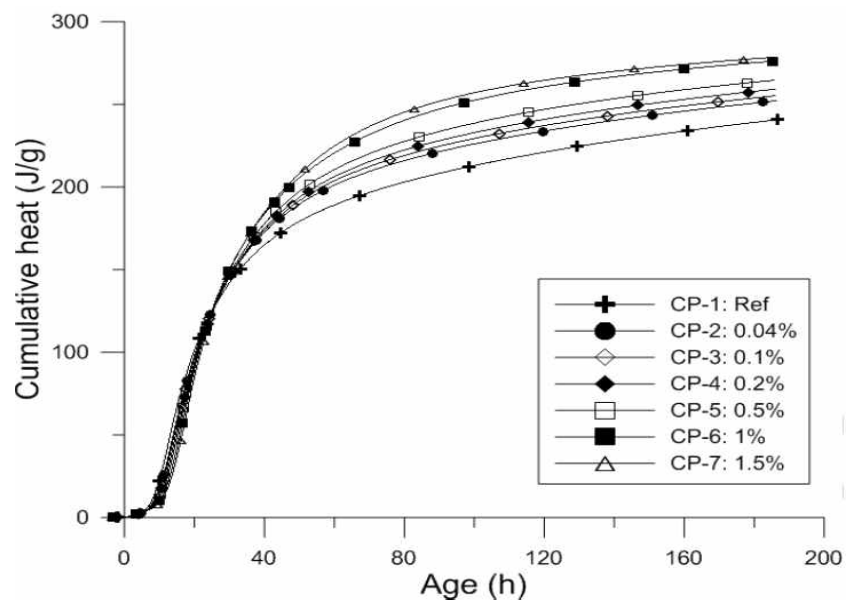


Fig. 3 The cumulative calorific value of CNC cement paste for 200 hours according to the CNC concentration

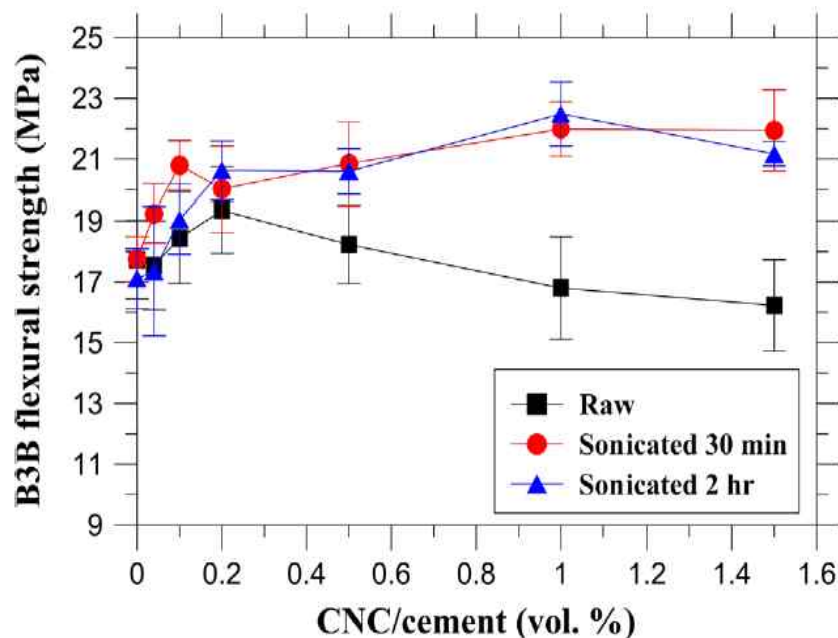


Fig. 4 28-day B3B flexural strengths for the cement pastes with raw and sonicated CNCs.

(Cao et al. 2016 The Relationship Between Cellulose Nano Crystal Dispersion and Strength)

-Cao et al.(2016) 연구에서는 초음파를 이용하여 CNC 응집체를 분산하는 방법을 이용하여 시멘트 페이스트 강도를 최대 50%까지 향상시키는 결과를 나타냄

이러한 결과는 이전연구에서의 raw CNC의 강도증진률 (20~30%)에서 보다 높은 결과를 나타내었으며, 이를 통해 CNC의 분산이 시멘트 페이스트의 휨강도 개선에 핵심임을 나타냄

-Mazlan et al.(2016) 연구에서는 CNC는 고성능 나노복합체를 제조하기 위해 복합 재료의 보강재로 사용될 수 있다고 나타냈으며, 시멘트 모르타르 매트릭스에 CNC를 첨가하면 시멘트 매트릭스의 작업성 및 밀도를 변화시키지 않고 콘크리트와 유사하게 모르타르 구조물의 강도를 향상시킬 수 있다고 판단함

- Fu et al.(2017) 연구에서는 CNC가 시멘트 복합체의 성능에 미치는 영향을 검토하기 위해 CNC 원료 종류 및 시멘트 종류에 따른 CNC 특성을 평가하였으며 보편적으로 사용되는 일반 시멘트 Type I/II 와 알루미네이트 함량이 높은 Type V 시멘트를 사용하였음. CNC 종류로는 wood pulp, cotton fiber, algae, acetate-grade dissolving pulp, rayon-grade dissolving pulp, pulp sludge from paper industry를 사용하였으며 aqueous suspension, dry powder 형태로 배합하였음

처리 방법은 Sulfuric acid hydrolysis, Transition metal catalyzed oxidation, Controlled acid hydrolysis를 사용하였고 실험방법은 Isothermal calorimetry(IC), thermogravimetric analysis(TGA),ball-on-three-ball(B3B) flexural strength test를 진행하여 CNC 시멘트 복

합재료의 성능을 정량화함

실험 결과 wood pulp를 원료로 사용하고 Sulfuric acid hydrolysis 처리한 CNC와, Acetate-grade dissolving pulp 원료 사용 transition metal catalyzed oxidation 처리를 한 CNC에서 시멘트 종류와 상관없이 휨 시험에서 20% 증가하는 결과를 나타내었으며, 열 분석 결과 모든 CNC 혼합물에서 수화도가 증가하는 경향을 나타냄

제7장. 연구개발성과의 보안등급

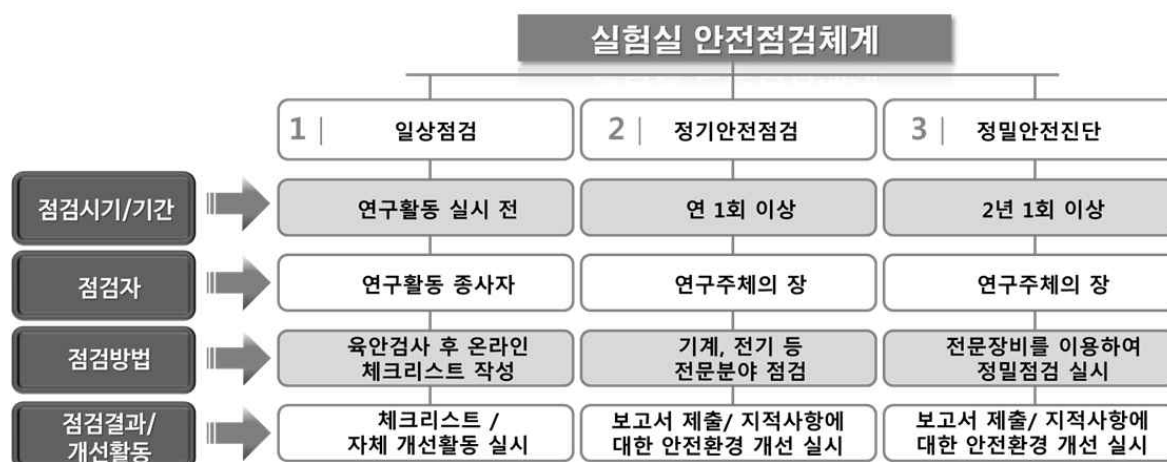
제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

가. 연구실 안전조치 이행계획

(1) 기술적 위험 요소 분석, 안전 관리 대책



(가) 실험실 일상 점검

- 연구활동 시작 전 각 실험실 책임자가 육안으로 장비 및 시설을 매일 점검.

(나) 실험실 정기 안전 점검

- 내용 및 실시 : 과학기술분야 실험실의 일반안전, 산업위생, 전기안전, 소방안전, 화공안전,

가스안전, 기계안전, 생물안전 등의 전문분야 점검으로 연 1회 이상 점검.

(다) 실험실 정밀안전진단

- 대상 : 연구개발활동에 유해화학물질 관리법 제2조 7호에 따른 유해화학물질을 취급하는 연구실, 산업안전보건법 제39조에 따른 유해인자를 취급하는 연구실, 과학기술부령이 정하는 독성가스를 취급하는 연구실.
- 실시 : 2년마다 1회 이상 외부 전문기관에 의뢰하여 정밀안전진단을 실시

나. 교육훈련

- (1) 개요 : 실험실의 안전을 확보하고 종사자의 건강을 보호하여 실험 및 연구활동에 기여하고, 또한 연구실 안전환경조성에 관한 법률에 의거하여 실험실의 환경안전교육이 의무화됨에 따라 이공계열 대학원생 및 관련자 전원은 환경안전교육을 의무적으로 수강
- (2) 교육대상 : 교수, 대학원생, 소속연구원, 전문직원, 실험참여 학부생 등
- (3) 교육실시

교육과정	교육대상	교육시간
1. 정기교육·훈련	연구활동 종사자	반기별 6시간 이상
2. 신규채용 등에 따른 교육·훈련	대학연구기관 등에 채용된 자 외의 자로서 신규로 연구개발활동에 참여하는 연구활동종사자(대학생·대학원생 등)	2시간 이상
3. 특별안전 교육·훈련	중대 연구실사고 발생 및 연구내용 변경 등의 경우 연구주체의 장이 필요하다고 인정하는 연구활동 종사자	2시간 이상

다. 건강 검진 및 보험가입

- (1) 개요 : 인체에 치명적인 위험물질 및 바이러스 등에 노출될 위험성이 있는 연구활동 종사자의 건강을 보호함.
- (2) 건강검진 : 산업안전보건법 시행령 제29조에 따른 유해물질 및 같은 법 시행규칙 별표 12의 2에 따른 유해인자를 취급하는 연구활동 종사자에 대하여 매년 1회 건강검진 대상자를 선정하여 종합병원 건강증진센터에 의뢰하여 일반건강검진과 특수건강검진을 실시.
- (3) 보험가입 : 연구활동종사자의 상해, 사망에 대비하여 연구활동종사자를 피보험자 및 수익자로 하는 보험에 가입.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부	특기 사항
1	게재 논문	증기양생과 분산 방법에 따른 셀룰로오스 나노크리스탈 (CNC) 혼입 시멘트 복합체의 강도 특성에 관한 연구 Vol.8 No.4	금오 공과 대학교	실험 및 분석, 논문 작성	한국복합 신소재 구조학회 논문집	-	2017.12.26	단독 사사	비SCI
2	게재 논문	시멘트복합체 보강용 셀룰로오스 나노크리스탈 (CNC)의 분산성평가 Vol.8 No.4	금오 공과 대학교	실험 및 분석, 논문 작성	한국복합 신소재 구조학회 논문집	-	2017.12.26	단독 사사	비SCI
3	게재 논문	셀룰로오스 나노크리스탈을 혼입한 섬유보강 고인성 시멘트 복합체의 역학적 특성에 관한 연구 Vol.9 No.4	금오 공과 대학교	실험 및 분석, 논문 작성	한국복합 신소재 구조학회 논문집	-	2018.12.06	단독 사사	비SCI
4	게재 논문	State-of-the- Art of Cellulose Nanocrystals and Optimal Method for their Dispersion for Construction- Related Applications Vol.9 No.3	금오 공과 대학교	실험 및 분석, 논문 작성	MDPI-ap plied science (스위스)	1.689	2019.01.27	단독 사사	SCI
5	게재 논문	A Study on the Drying Shrinkage and Mechanical Properities of Fiber Reinforced Cement Composites Using Cellulos Nanocrystals	금오 공과 대학교	실험 및 분석, 논문 작성	IJCSM	2.737	2019.07 (게재예정)	단독 사사	SCI
6	학술 발표 논문	A Study on Optimum Cellulose Nano-crystal (CNC) Dispersion Method for Cement Composite	금오 공과 대학교	실험 및 분석, 논문 작성	ICNNN 2017 (일본)	-	2017.10.27	단독 사사	-

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일/ 논문 발표일/ 특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
7	학술 발표 논문	시멘트 복합체 제작을 위한 셀룰로오스 나노크리스탈 (CNC)의 분산처리 방법에 따른 결정 구조 비교 분석	금오 공과 대학교	실험 및 분석, 논문 작성	한국콘크 리트학회 추계 학술대회	-	2017.11.02	단독 사사	-
8	학술 발표 논문	A Study on the Strength Properties of Cement Mortar Containing Cellulose Nanocrystals and Cellulose Nanofibrils	금오 공과 대학교	실험 및 분석, 논문 작성	ICAMR 2018 (일본)	-	2018.01.21	단독 사사	-
9	학술 발표 논문	나노재료의 건설분야 적용을 위한 나노관련기술 고찰	금오 공과 대학교	실험 및 분석, 논문 작성	한국복합 신소재 구조학회 학술 발표회	-	2018.04.19	단독 사사	-
10	학술 발표 논문	State-of-the- Art Research on Cellulose Nano-Crystals as Alternatives to Cement-based Composites	금오 공과 대학교	실험 및 분석, 논문 작성	ICAFM 2018 (미국)	-	2018.08.04	단독 사사	-
11	학술 발표 논문	A Study on Evaluation of Dispersion Characteristics for Applying Cellulose Nano-Crystals to Cement Composites	금오 공과 대학교	실험 및 분석, 논문 작성	ICAFM 2018 (미국)	-	2018.08.04	단독 사사	-
12	특허 출원	셀룰로오스 나노크리스탈을 이용한 콘크리트 조성물 및 이의 제조방법 (1020170158962)	금오 공과 대학교	주관	대한민국	-	2017.11.24	단독 사사	-
13	특허 출원	셀룰로오스 나노크리스탈을 이용한 시멘트 복합 조성물 및 이의 제조방법 (1020170158964)	금오 공과 대학교	주관	대한민국	-	2017.11.24	단독 사사	-
14	특허 출원	분산성이 향상된 셀룰로오스 나노크리스탈 및 이의 제조방법 (1020180089789)	금오 공과 대학교	주관	대한민국	-	2018.08.01	단독 사사	-

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일/ 논문 발표일/ 특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
15	특허 출원	셀룰로오스 나노크리스탈을 이용한 섬유보강 고인성 시멘트 복합 조성물 및 이의 제조방법 (1020190021862)	금오 공과 대학교	주관	대한민국	-	2019.02.25	단독 사사	-
16	특허 등록	셀룰로오스 나노크리스탈을 이용한 콘크리트 조성물 및 이의 제조방법 (1019538750000)	금오 공과 대학교	주관	대한민국	-	2019.02.25	단독 사사	-
17	특허 등록	셀룰로오스 나노크리스탈을 이용한 시멘트 복합 조성물 및 이의 제조방법 (1019538700000)	금오 공과 대학교	주관	대한민국	-	2019.02.25	단독 사사	-

제11장. 기타 사항

해당사항 없음

제12장. 참고 문헌

1. Un, K.Y. Present and future of nano-cellulose. *NICE* **2016**, *34*, 500–504.
2. Eriksen, Ø.; Syverud, K.; Gregersen, Ø. The use of microfibrillated cellulose produced from kraft pulp as strength enhancer in TMP paper. *Nord. Pulp Pap. Res. J.* **2008**, *23*, 299–304.
3. Siró, I.; Plackett, D. Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: A review. *Cellulose* **2010**, *17*, 459–494.
4. Chakraborty, A.; Sain, M.; Kortschot, M. Cellulose microfibrils: A novel method of preparation using high shear refining and cryocrushing. *Holzforschung* **2005**, *59*, 102–107.
5. Chen, W.; Yu, H.; Liu, Y.; Hai, Y.; Zhang, M.; Chen, P. Isolation and characterization of cellulose nanofibres from four plant cellulose fibres using a chemical-ultraW-sonic process. *Cellulose* **2011**, *18*, 433–442.
6. Dufresne, A. *Nanocellulose: From Nature to High Performance Tailored Materials*; Walter de Gruyter GmbH: Berlin, Germany 2013.
7. Börjesson, M.; Westman, G. Cellulose—Fundamental aspects and current trends. In *Chapter 7: Crystalline Nanocellulose—Preparation, Modification, and Properties*; Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2015.
8. Dong, X.M.; Kimura, T.; Revol, J.-F.; Gray, D.G. Effects of ionic strength on the isotropic–chiral nematic phase transition of suspensions of cellulose crystallites. *Langmuir* **1996**, *12*, 2076–2082.
9. Rojas, O.J.; Montero, G.A.; Habibi, Y. Electrospun nanocomposites from polystyrene loaded with cellulose nanowhiskers. *J. Appl. Polym. Sci.* **2009**, *113*, 927–935.
10. Bai, W.; Holbery, J.; Li, K. A technique for production of nanocrystalline cellulose with a narrow size distribution. *Cellulose* **2009**, *16*, 455–465.
11. Araki, J.; Wada, M.; Kuga, S.; Okano, T. Flow properties of microcrystalline cellulose suspension prepared by acid treatment of native cellulose. *Colloids Surf. A Phys. Eng. Asp.* **1998**, *142*, 75–82.
12. Fahma, F.; Iwamoto, S.; Hori, N.; Iwata, T.; Takemura, A. Effect of pre-acid-hydrolysis treatment on morphology and properties of cellulose nanowhiskers from coconut husk. *Cellulose* **2011**, *18*, 443–450.
13. Dong, X.M. Effect of microcrystallite preparation conditions on the formation of colloid crystals of cellulose. *Cellulose* **1998**, *5*, 19–32.
14. Henriksson, M.; Henriksson, G.; Berglund, L.A.; Lindström, T. An environmentally friendly method for enzyme-assisted preparation of microfibrillated cellulose (MFC) nanofibres. *Eur. Polym. J.* **2007**, *43*, 3434–3441.
15. Man, Z.; Muhammad, N.; Sarwono, A.; Bustam, M.A.; Kumar, M.V.; Rafiq, S. Preparation of cellulose nanocrystals using an ionic liquid. *J. Polym. Environ.* **2011**, *19*, 726–731.
16. Cao, Y.; Zavatterri, P.; Youngblood, J.; Moon, R.; Weiss, J. The influence of cellulose nano crystal additions on the performance of cement paste. *Cem. Concr. Compos.* **2015**, *56*, 73–83.
17. Alain, D. Nanocellulose: A new ageless bionanomaterial. *Mater. Today* **2013**, *16*, 220–227.
18. Mazlan, D.; Din, M.F.M.; Tokoro, C.; Ibrahim, I.S. Cellulose nanocrystals addition effects on cement mortar matrix properties. *Int. J. Adv. Mech. Civ. Eng.* **2016**, *3*, 44–48.
19. Fu, T.; Montes, F.; Suraneni, P.; Youngblood, J.; Weiss, J. The influence of cellulose nanocrystals on the Hydration and Flexural Strength of Portland Cement

- Pastes. *Polymers* **2017**, *9*, 424.
20. Cao, Y.; Zavattieri, P.; Youngblood, J.; Moon, R.; Weiss, J. The relationship between cellulose nanocrystal dispersion and strength. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *119*, 71–79.
 21. Cao, Y.; Tian, N.; Bahr, D.; Zavattieri, P.D.; Youngblood, J.; Moon, R.J.; Weiss, J. The influence of cellulose nanocrystals on the microstructure of cement paste. *Cem. Concr. Compos.* **2016**, *74*, 164–173.
 22. Siqueira, G.; Bras, J.; Follain, N.; Belbekhouche, S.; Marais, S.; Dufresne, A. Thermal and mechanical properties of bio-nanocomposites reinforced by *Luffa cylindrica* cellulose nanocrystals. *Carbohydr. Polym.* **2013**, *91*, 711–717.
 23. Heux, L.; Chauve, G.; Bonini, C. Nonflocculating and chiral-nematic self-ordering of cellulose microcrystals suspensions in nonpolar solvents. *Langmuir* **2000**, *16*, 8210–8212.
 24. Pei, A.; Zhou, Q.; Berglund, L.A. Functionalized cellulose nanocrystals as biobased nucleation agents in poly(l-lactide)(PLLA)–Crystallization and mechanical property effects. *Compos. Sci. Technol.* **2010**, *70*, 815–821.
 25. Kloser, E.; Gray, D.G. Surface grafting of cellulose nanocrystals with poly(ethylene oxide) in aqueous media. *Langmuir* **2010**, *26*, 13450–13456.
 26. Habibi, Y.; Dufresne, A. Highly filled bionanocomposites from functionalized polysaccharide nanocrystals. *Biomacromolecules* **2008**, *9*, 1974–1980.
 27. Mendez, J.; Annamalai, P.K.; Eichhorn, S.J.; Rusli, R.; Rowan, S.J.; Foster, E.J.; Weder, C. Bioinspired mechanically adaptive polymer nanocomposites with water-activated shape-memory effect. *Macromolecules* **2011**, *44*, 6827–6835.
 28. Dagnon, K.L.; Shanmuganathan, K.; Weder, C.; Rowan, S.J. Water-triggered modulus changes of cellulose nanocomposites with hydrophobic polymer matrices. *Macromolecules* **2012**, *45*, 4707–4715.
 29. Espino-Pérez, E.; Bras, J.; Ducruet, V.; Guinault, A.; Dufresne, A.; Domenek, S. Influence of chemical surface modification of cellulose nanowhiskers on thermal, mechanical, and barrier properties of poly(lactide) based bionanocomposites. *Eur. Polym. J.* **2013**, *49*, 3144–3154.
 30. Landry, V.; Alemдар, A.; Blanchet, P. Nanocrystalline cellulose: Morphological, physical and mechanical properties. *Prod. J.* **2011**, *61*, 104–112.
 31. Boufi, S.; Kaddami, H.; Dufresne, A. Mechanical performance and transparency of nanocellulose reinforced polymer nanocomposites. *Macromol. Mater. Eng.* **2014**, *299*, 560–568.
 32. Cho, J.W.; Cho, D.H.; Choi, T.J. *Nanocellulose Technology and Application Industry Trend*; KEIT PD Issue Report; Sejong University, Seoul, Korea 2017, 17, 17–29.
 33. Zoppe, J.O.; Ruottinen, V.; Ruotsalainen, J.; Rönkkö, S.; Johansson, L.-S.; Hinkkanen, A.; Järvinen, K.; Seppälä, J. Nanocrystals carrying tyrosine sulfate mimetic ligands and inhibition of alphavirus infection. *Biomacromolecules* **2014**, *15*, 1534.
 34. Fang, Z.; Zhu, H.; Yuan, Y.; Ha, D.; Zhu, S.; Preston, C.; Chen, Q.; Li, Y.; Han, X.; Lee, S.; et al. Novel nanostructured paper with ultrahigh transparency and ultrahigh haze for solar cells. *Nano Lett.* **2014**, *14*, 765–773.
 35. Lee, J.Y.; Kim, E.H.; Park, T.U.; Jo, H.M.; Kim, C.H.; Jeun, J.P. Development of metal ion absorbing filter using cellulose nanofibrils. *J. Korea Tappi* **2017**, *49*, 95–101.
 36. Pushparaj, V.L.; Shaijumon, M.M.; Kumar, A.; Murugesan, S.; Ci, L.; Vajtai, R.; Linhardt, R.J.; Nalamasu, O.; Ajayan, P. Flexible energy storage devices based on nanocomposite paper. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2007**, *104*, 13574–13577.
 37. Okahisa-Kobayashi, Y.; Yoshida, A.; Miyahuchi, S.; Yano, H. Optically transparent wood-cellulose nanocomposite as a base substrate for flexible organic light-emitting diode displays. *Compos. Sci. Technol.* **2009**, *69*, 1958–1961.
 38. Hübler, A.; Trnovec, B.; Zillger, T.; Ali, M.; Wetzold, N.; Mingebach, M.; Wagenpfahl, A.; Deibel, C.; Dyakonov, V. Printed Paper Photovoltaic Cells. *Adv. Energy Mater.* **2011**, *1*, 1018–1022.
 39. Barr, M.C.; Rowehl, J.A.; Xu, J.; Wang, A.; Boyce, C.M.; Im, S.G.; Bulović, V.; Gleason, K.K. Direct monolithic integration of organic photovoltaic circuits on

-
- unmodified paper. *Adv. Mater.* **2011**, *23*, 3500–3505.
40. Yibo, Y.; Zhenming, C.; Xiaoding, W.; Xinxing, Z.; Guiping, Y. Nanoporous cellulose membrane doped with silver for continuous catalytic decolorization of organic dyes. *Cellulose* **2018**, *25*, 2547–2558.
41. Partha, S.; Virginia, D.A. Photonic properties and applications of cellulose nanocrystal films with planar anchoring. *Appl. Nano Mater.* **2018**, *1*, 2175–2183.
42. Singh, L.P.; Goel, A.; Bhattacharyya S.K.; Ahalawat, S.; Sharma, U.; Mishra, G. Effect of morphology and dispersibility of silica nanoparticles on the mechanical behaviour of cement mortar. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* **2015**, *9*, 207–217.
- 43 Roychand, R.; De silva, S.; Law, D.; Setunge, S. Micro and nano engineered high volume ultrafine fly ash cement composite with and without additives. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* **2016**, *10*, 113–124.
-

9. 뒷면지

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.