creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000284815

2020년 2월

석 사 학 위 논 문

100MPa 초고성능 시멘트 복합체의 강섬유 혼입률에 따른 역학성능

조선대학교 산업기술융합대학원

건 축 공 학 과

이 승 윤

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

100MPa 초고성능 시멘트 복합체의 강섬유 혼입률에 따른 역학성능

Mechanical Performances of 100MPa Ultra-High Performance Cementitious Composites Varying with Volume Fractions of Various Steel Fibers

2020年 2月 25日

조선대학교 산업기술융합대학원

건 축 공 학 과

이 승 윤

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

100MPa 초고성능 시멘트 복합체의 강섬유 혼입률에 따른 역학성능

지도교수 조 창 근

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2019년 11월

조선대학교 산업기술융합대학원

건 축 공 학 과

이 승 윤

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이승윤의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 형 기 印

위 원 조선대학교 교수 김 태 훈 印

위 원 조선대학교 교수 조 창 근 印

2019년 11월

조선대학교 산업기술융합대학원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

<목 차>

표 차례 ····· III

그림 차례 ····· IV

Abstract ····· VI

1. 서 론 ····· 1

1.1 연구 배경 및 목적 ····· 1

1.1.1 연구 배경 ····· 1

1.1.2 연구 목적 ····· 5

1.2 유사 연구 사례 ····· 7

1.3 연구 내용 및 방법 ····· 11

2. 초고성능 시멘트 복합체 구성재료 ····· 14

2.1 섬유의 종류 및 특성 ····· 14

2.1.1 일반적 보강 섬유 ····· 14

2.1.2 강섬유 특성 ····· 16

2.1.3 강섬유(직선형)의 물리적 특성 ····· 17

2.1.4 섬유와 매트릭스의 부착 메커니즘 ····· 17

2.2 배합재료의 특성 ····· 19

3. 초고성능 시멘트 복합체 배합설계 및 재료실험방법 ····· 25

3.1 배합 설계 ····· 25

3.2 재료 실험 방법 ····· 28

3.2.1 실험개요 ····· 28

3.2.2 슬럼프 플로 ····· 28

3.2.3 압축강도 시험 ····· 29

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.2.4 직접 인장 시험 ····· 30
3.2.5 순수 전단 시험 ····· 32

4. 강섬유 혼입률에 따른 실험결과 ····· 33
4.1 슬럼프 플로 ····· 35
4.2 압축강도 ····· 36
4.3 직접 인장강도 ····· 40
4.5 순수 전단강도 ····· 51

5. 결론 ····· 55

6. 국문 초록 ····· 57

참 고 문 헌 ····· 59

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

<표 차례>

[표 2.1] 보강섬유의 물리적 특성 ····· 15
[표 2.2] 강섬유 및 PVA의 특성 ····· 16
[표 2.3] 강섬유의 물리적 특성 ····· 17
[표 2.4] 시멘트 종류별 특성 및 용도 20 ····· 20
[표 2.5] 1종 포틀랜드 시멘트 특성 ····· 21
[표 2.6] 지르코늄 미분말 특성 ····· 21
[표 2.7] 팽창재 특성 ····· 22
[표 2.8] 충전재 특성 ····· 23
[표 2.9] 잔골재(규사) 특성 ····· 23
[표 3.1] 초고성능 시멘트 복합체 배합표:1,000L 배합기준 ····· 25
[표 4.1] 슬럼프 플로우 시험 결과 ····· 35
[표 4.2] 압축강도 시험 결과 ····· 36
[표 4.3] 직접 인장강도 시험 결과 ····· 41
[표 4.4] 순수 전단강도 시험 결과 ····· 52

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

<그림 차례>

[그림 1.1] UHPC 기능 ····· 2
[그림 1.2] 국내 UHPC 사례 ····· 4
[그림 1.3] 연구 목적 ····· 6
[그림 1.4] 연구 내용 및 방법 ····· 13
[그림 2.1] 균열 발생된 콘크리트의 전단전달 메커니즘 ····· 18
[그림 2.2] 콘크리트에 혼입된 섬유의 배열상태 ····· 18
[그림 3.1] 초고성능 시멘트 복합체 배합재료 ····· 26
[그림 3.2] 초고성능 시멘트 복합체 배합과정 ····· 27
[그림 3.3] 초고성능 시멘트 복합체 배합재료 ····· 29
[그림 3.4] 압축강도 시험방법 ····· 30
[그림 3.5] 직접 인장강도 시험제와 몰드 형상 ····· 31
[그림 3.6] 직접 인장강도 시험 설치모습 ····· 31
[그림 3.7] 변위계 위치 ····· 32
[그림 3.8] 순수 전단강도 시험체와 몰드 형상 ····· 33
[그림 3.9] 순수 전단강도 시험 설치 모습 ····· 34
[그림 3.10] 변위계 위치 ····· 34
[그림 4.1] 압축강도 시험 결과 ····· 37
[그림 4.2] 압축 시험 파괴 양상 ····· 38
[그림 4.3] 파괴 형태의 분류 ····· 39
[그림 4.4] 직접 인장 시험 결과 응력 변형률 관계 그래프 ····· 43
[그림 4.5] 직접 인장시험 파괴 양상 ····· 46
[그림 4.6] 기존 연구자료들의 응력 변형률 관계 그래프 ····· 49
[그림 4.7] 각 섬유별 평균 인장강도 ····· 50
[그림 4.8] 각 섬유별 평균 인장 변형률 ····· 50
[그림 4.9] 균열확장 과정 ····· 51
[그림 4.10] 순수 전단시험 결과 응력 변형률 관계 그래프 ····· 53
[그림 4.11] 순수 전단시험 파괴 양상 ····· 54

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Abstract

Mechanical Performances of 100MPa Ultra-High Performance Cementitious Composites Varying with Volume Fractions of Various Steel Fibers

Lee, Seung Yun
Advisor : Prof. Cho Chang Geun, Ph,D
Department of Architectural Engineering,
Graduate School of Industry, Chosun University

Recently, the infinite possibilities of human are being tested with the development of highrise building technologies with a height of over 1 kilometer in domestic and oversea. Moreover with concrete has excellent in forming with plasticity in fresh concrete, the required performances for building structures that can satisfy long span, non-uniform, and diversity in architectural design are becoming higher for clients. In particular, for concrete to satisfy diverse required performances, researches for the resolution of weak characteristics such as brittle failure, explosive spalling and shrinkage problems is needed.

This objective of this research is to present reasonable mix designs of Ultra High-Performance Cementitious Composites (UHPCC) with compression strengths of 100MPa varying with volume fractions of straight-line steel fibers. For this reason, it was demonstrated that the developed UHPCC is possible to secure targeted slump flow for constructability, and was verify mechanical performances through the testing of compression strength, direct tensile strength and tensile strain, and shearing strength and shear strain in order to present UHPCC that

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

overcomes the limitations of normal concrete. For this, it was mixed 19.5mm and 16.3mm steel fiber with a ratio of 2:1 and added admixtures such as high range water reducing ad, expansive additives, and zirconia silica fume, with W/B=0.18 according to volume fractions (1%, 1.25%, 1.5%, 1.75%), presented reasonable combinations for ultra high-performance cementitious composites that satisfy 100MPa compression strength performance to figure out slump flow, tensile performance, and shear performance.

The following results were presented. First, constructability was secured with the slump flow of 700mm or more regardless of steel fiber volume fraction and with the appropriate combination ratio of steel fiber 2:1, there was not much fiber ball. Second, compression strength tests showed that the high compression strength of 110MPa was satisfied, regardless of steel fiber volume fractions. Third, direct tensile strength tests showed that tensile performance appeared to be higher in cases where fiber volume fraction was high and in cases of 1% fiber volume fractions with identical average tensile strength and average tensile strain, comparisons made with cement composites that mix amorphous steel fiber and Bundrex steel fiber with a volume fraction of 1% verified tensile performance that was approximately twice as high. also, comparisons of cement composites that mix PVA fibers with an identical volume fraction of 1% showed that UHPCC mixed with straight steel fiber has tensile strength that is approximately 2 times stronger but cement composites mixed with PVA fiber had tensile strain that was approximately 4 times stronger. However, such comparisons were comparisons of general material combinations and are not comparative data of the fiber itself. Also, verifications made of the cutting planes of tensile test subjects showed that most steel fiber was parallel with tension stress and that steel fiber aspect ratios of 2:1 were effective. Fourth, pure shearing strength tests showed that in cases of fiber volume fractions of 1%, pure shear strength was measured to be 1.3 times weaker than in cases of

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.5% but shear strain showed excellent results.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

1.1.1 연구 배경

과학기술의 발전으로 [그림 1.1(a)]와 같이 세계적인 초고층 빌딩은 지상높이 1km에 육박할 정도로 인간의 무한한 가능성을 계속적으로 시험하고 있다. [그림 1.1 (b)]는 프랑스의 MuCEM Museum으로 크기에 제한이 있는 석재에 비해 경량화되고 자유로운 디자인과 뛰어난 성형성 등 고객의 다양한 요구조건을 만족시키는 UHPC의 연구가 진행되어지고 있다. 또한 [그림 1.1 (c)]와 같이 최소비용으로 최대의 신축, 팽창 저항성을 높이기 위해 탄성계수가 200GPa로 가장 높은 강섬유를 혼입한 UHPC를 교량의 조인트구간 등의 특수부위에 국한적으로 사용되기도 하고, [그림 1.1 (d)]와 같이 강섬유 등의 섬유 결합조직을 이용하여 취성 파괴되기 쉬운 콘크리트의 단점을 보완하여 100MPa이상의 초고강도의 압축강도 성능을 만족하면서 인장, 전단 강도 및 변형률을 개선시킨 UHPC의 사용범위가 국내외적으로 점차 확대되고 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(a) 세계의 초고층 빌딩

(b) 뛰어난 성형성[MuCEM Museum, France]

(c) 교량의 조인트구간

(d) 섬유의 결합구조

[그림 1.1] UHPC 기능

최근 UHPC를 이용하여 건설된 국내 구조물은 다음과 같다. [그림 1.2 (a)]은 2018년에 개통한 춘천대교로 대림산업이 시공한 세계 최초의 UHPC 도로 사장교이다. 일반적인 타워형 주탑보다 미관이 우수하고 레고랜드의 상징성을 나타낼 수 있는 원형 주탑으로 시공하기 위해 강섬유를 혼입한 UHPC를 사용하여 상판의 무게를 30% 감소시키고 케이블 물량 절감을 통해 공사비 9%를 절감하였다. [그림 1.2 (b)]는 2017년에 준공한 KOSMOS 리조트로 코오롱건설(주)이 시공한 세계 최초의 UHPC를 적용한 건축 구조물이다. 강섬유를 혼입한 초고성능 시멘트 복합체인 UHPCC로 120mm 두께의 쉘형 외벽 구조체를 철근 배근 없이 시공하여 기존 일반 콘크리트벽체두께보다 60% 까지 감소시켰다. 조직이 치밀하여 열화인자의 침입이 어렵고, 내염해성, 동결융해 저항성 및 수밀성, 우수한 내구성으로 해안가의 염화물 피해를 해소하였다. 외벽에 사용하여 콘크리트 표면에 가까운 강섬유는 주변의 탄산화로 인한 부식 흔적이 보이기는 하지만, 이로 인한

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

균열폭은 매우 작아서 섬유길이에 대한 피복두께만 유지된다면 강섬유의 부식은 내구성능면에서 큰 영향이 없음을 확인할 수 있고, 거푸집 해체후 발생된 에어포켓이나 시공이음, 강섬유의 노출 등을 정밀하게 면처리하여 수성페인트 마감함으로써 완성도를 높혔다. [그림 1.2 (a)]와 [그림 1.2 (b)]는 미국 연방도로국(FHWA)과 아이오와주립대가 공동 주관하고 미국 콘크리트학회(ACI), 유럽 콘크리트학회(FIB)등이 후원한 'Second International Iteractive Symposium On UHPC'에서 각각 '인프라 부분'과 '빌딩 부분'에서 혁신상을 단독 수상을 하였다.

[그림 1.2(c)]는 삼성동 하나은행으로 PVA섬유를 사용하여 국내 최초 UHPC 곡면외장패널을 적용하였다. 일반적으로 비정형 주요외장 마감재인 금속, 유리, FRP는 3D입체형상을 위해 제작 프로세스가 복잡하고 제작기간 문제가 발생하는데 삼성동 하나은행은 중량이 가벼운 FRP로 거푸집을 제작하여 4개월만에 UHPC 곡면외장패널제작을 완료하였다. 이러한 기술의 발전과 더불어 고객의 다양한 요구성능을 만족시키기 위해 강섬유 혼입률에 따른 압축강도 100MPa 이상의 초고성능 시멘트복합체 배합기준을 제시하고 역학성능을 확인하고자 한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(a) 춘천 대교

(b) 울릉도 KOSMOS 리조트

(c)-1 삼성동 하나은행

(c)-2 삼성동 하나은행 (외벽 패널)

[그림 1.2] 국내 UHPC 사례

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

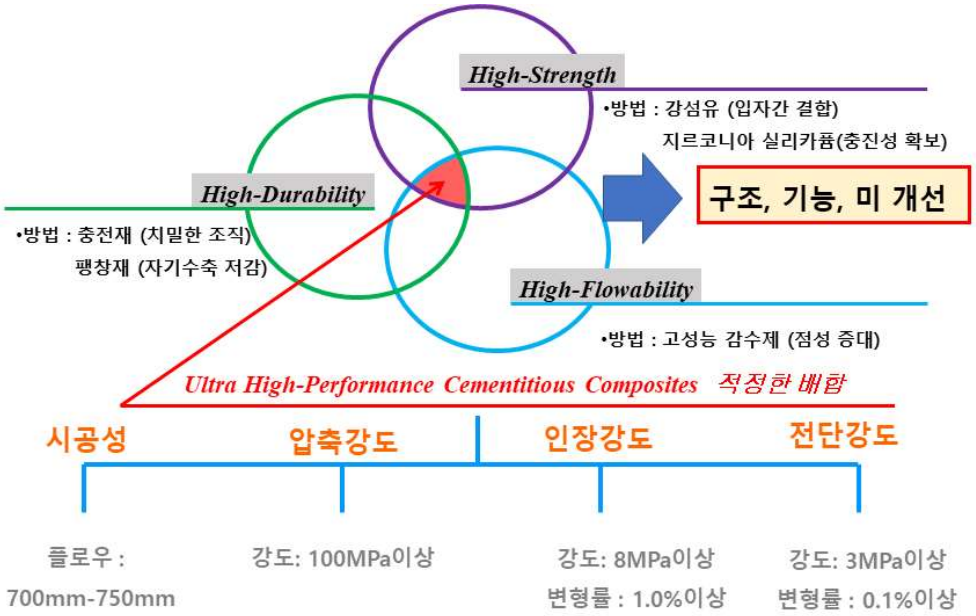
1.1.2 연구목적

일반적으로 철근콘크리트구조에서 콘크리트는 압축력에 저항하기 위한 목적으로 주로 사용하지만, 사용되는 부위 및 여러 조건에 따라 인장, 휨, 전단력 등의 응력을 받아야 하는 경우도 있다. 예를 들어 철근콘크리트 보의 경우 휨과 전단응력의 조합에 의한 주응력이 약 45° 방향으로 발생하게 되고, 인장력이 취약한 콘크리트가 이로 인해 45° 방향의 사인장 균열이 발생 된다. 보통 콘크리트의 경우 배합조건 등에 따라 달라지지만, 압축강도에 비해 인장강도는 약 1/10~1/13, 휨강도는 약 1/5~1/8, 전단강도는 약 1/4~1/7 정도로 매우 작으므로, 콘크리트 인장강도는 구조 계산시 zero로 보면서 무시하고 휨, 전단강도는 철근에 부담시키거나 철근과 복합으로 고려하고 있다. 이러한 보통 콘크리트의 취성파괴, 폭열 및 수축현상 등의 문제점을 개선하기 위해 고강도, 고내구성, 고유동성 3가지를 충족시키는 초고성능 시멘트 복합체의 적정한 배합설계를 제안한다.[6]

첫째, 고강도를 위한 방법으로 여러 가지 보강섬유 중 강섬유를 이용하여 입자 간 단단한 결합을 유도하고 지르코늄 실리카흄으로 충진성을 확보한다. 둘째, 고내구성을 위한 방법으로 적정한 양의 충전재를 사용하여 치밀한 조직을 만들고, 팽창재를 사용하여 시멘트 복합체의 자기수축 저감을 기대한다. 셋째, 고유동성을 위한 방법으로 고성능 감수제의 사용으로 수화반응을 위한 최소의 물만 사용함에도 불구하고 점성을 증대시켜 시공성을 확보한다.

본 연구에서는 직선형 강섬유 혼입률에 따른 100MPa 압축강도를 갖는 초고성능 시멘트 복합체(UHPCC:Ultra High-Performance Cementitious Composites)의 적정한 배합설계를 제시하고 목표한 슬럼프 플로우 시공성을 확보하고 압축강도, 인장강도 및 인장변형률, 전단강도 및 전단변형률의 실험에 의한 역학성능을 검증 함으로써, 보통 콘크리트의 한계를 뛰어넘는 UHPCC를 제안하는데 목적이 있다. [14.15] [그림 1.3]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 1.3] 연구 목적

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.2 유사 연구 사례

최근 국내에서 섬유를 이용한 섬유 보강 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다. 특히, 콘크리트 재료의 연성을 증가시키기 위한 연구가 주로 이루어지고 보강섬유의 혼입에 따른 압축, 휨 및 인장강도, 변형능력 등 거동 특성에 대한 연구를 통해 콘크리트의 단점을 보완하는 연구가 수행되고 있다.

하기주(1999) [7]은 강섬유(Steel Fiber)를 보강한 초기재령 철근콘크리트 보의 구조성능 평가를 통해 철근콘크리트 구조물의 장경간화, 고층화에 따른 콘크리트의 구조성능 개선을 보여준다. 건조수축과 크리프 등의 장기변형은 구조물의 내구성 저하의 원인이 되며, 이러한 단점을 개선하기 위하여 사용성, 안정성 및 신뢰성이 우수한 고성능 콘크리트 개발과 강섬유를 보강한 초기재령 철근콘크리트 부재의 설계 및 구조물 부재에 적용을 위한 기초적 자료를 제시하는 연구이다.

조창근(2004) [34]은 섬유보강폴리머(fiber reinforced polymer, FRP)로 구속된 콘크리트 복합구조 부재 시스템의 비선형성을 고려한 휨 및 전단거동 예측을 위한 부재 해석 알고리즘을 제시하였다. 휨과 전단을 동시에 받는 FRP 콘크리트 복합 구조부재의 비선형 전단거동에측 및 전단파괴 추정을 위한 단면 층상화 개념을 적용함으로서 전단력에 따른 전단변형률의 비선형거동 관계를 예측을 위한 방법을 연구하였다.

한성진(2013) [23]은 최근 지진피해에 대처하기 위한 방안으로 횡하중으로 인해 기둥의 하단에 집중되는 휨모멘트의 단부 국부 휨 파괴를 극복하기 우해 PVA섬유를 혼입한 고인성 섬유복합체를 프리캐스트 박스 형태로 미리 제작하여 기둥의 단부 소성힌지 부분에 적용하고 상부에 일반 콘크리트를 후타설하여 이음 시공함으로써 일체화시켰다. 그 결과 소성힌지 부근의 휨 및 전단균열억제, 국부파괴, 주철근의 좌굴 등을 억제함으로써 기둥의 휨 거동능력향상 및 축하중 안전성을 확보하였다. 또한 일반 철근콘크리트 기둥과 비교실험결과 전단철근이 없이도 전단성능을 혹인하였고 휨 성능이 약11% 증가한 것으로 나타났다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

박창환(2013) [25]은 비정질 마이크로 강섬유를 사용한 섬유 시멘트복합체를 개발하여 일반 콘크리트의 취성적 단점을 개선하고자하였다. 비정질 강섬유 길이와 혼입율을 변수로 한 비정질 마이크로 강섬유 복합체 역학실험을 통해 최적의 배합을 제시하였다. 이에 따른 성능 개선된 시멘트복합체 부재의 설계 강도 산정법을 제시하여 휨 및 전단 성능을 추정하였다. 역학적 시험 결과 보강 섬유의 혼입률이 1.5% 이상이 되면 강도 저하가 발생함을 확인하여 비정질 마이크로 강섬유의 최적 혼입률을 1.0%로 결정하였다. 또한 제시한 혼입률의 배합을 가진 보 부재 성능 평가를 위해 추가 실험을 실시하였다. 성능 실험 결과 비정질 강섬유가 혼입된 보부재의 경우 초기균열강도와 극한내력이 크게 증가되었다. 이것은 섬유가 시멘트 매트릭스 내에 분산성 및 부착성능이 뛰어나 균열폭 증가 억제 효과로 인해 부재 성능이 개선된다고 보았다.

이승중(2014) [26]은 콘크리트의 성능을 개선시키기 위해 PVA섬유를 혼입한 섬유보강 시멘트복합체를 활용한 철근콘크리트 복합 슬래브 공법을 개발하여 기존철근콘크리트 휨 거동 특성과 비교 분석하였고 SHCC로 성능개선된 슬래브 휨 거동을 예측하기 위해 해석모델 및 설계강도 산정방법을 제시하였다 시공하중 재하실험으로 복합슬래브 인장부에 위치하는 하프 프리캐스트 SHCC 데크는 휨내력에 안전성을 확보하였고, SHCC 복합슬래브는 기존 철근콘크리트 슬래브보다 휨 거동 및 균열제어효과가 높게 나타났다. 또한 무지주, 무거푸집공법으로 시공성,안전성 뿐만 아니라 공기단축효과를 검증하였다

Kusumawardaningsih, Y. 외 3인(2015)[39]는 Ultra High Performance Concrete(이하 UHPC) 및 Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete(이하 UHPFRC)의 인장거동특성에 대한 연구를 수행하였다. UHPC는 강도가 향상된 초고강도 콘크리트이고 UHFRC는 강도뿐만 아니라 보강 섬유를 추가 사용하여 내구성을 증가시킨 초고강도 콘크리트이다. UHPC는 높은 압축강도(150MPa까지)와 인장강도(15MPa까지)에 도달하며 연성거동특성을 보이며 필요 보강 철근 개수를 감소시킬 수 있다. 이는 다양한 구조적 형태 및 형상으로 적용시킬 수 있는 조건을 충족시킨다고 보았다. 뿐만 아니라 보강 섬유를 혼입하지 않은 UHPC와 보강 섬유를 2%(Vol.) 혼입한 UHFRC의 인장거동 특성 파악을 위하여 역학실험을 수행하였고 그 결과 UHPFRC가 UHPC보다 높은 인장강도 대비

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

작은 균열폭의 양상을 보였다. 또한 UHPC는 극한인장강도 이후 취성파괴가 발생하며 최대인장응력 이후의 거동이 나타나지 않은 반면에 UHFRC는 균열 발생 후에도 강도가 점차 감소하는 연성거동을 보여주었다. 실험체 성능의 경우 고온고압 등의 양생 조건에 따라 다르게 나타날 수 있지만 가변적 양생 조건에서도 보강 섬유 사용으로 UHFRC의 인장 성능은 명백한 우호적 영향을 보일 것으로 예상하였다.

Kostova, K. 외 3인(2016)[38]은 FRP 섬유 혼입 부재의 최적성능검증과 현장적용에 대한 가능성을 연구하였다. FRP 섬유 혼입 철근콘크리트 구조부재 제작 시에 형상이 자유로운 부재에 최적화된 직물 거푸집을 사용하여 FRP 부재를 제작하였고 성능검증 실험을 실시하였다. FRP 섬유 혼입에 최적화된 부재 설계 시에 전단 나선형 철근 안에 나선형 철근을 이중으로 배근하여 콘크리트의 구속력을 높였다. 성능실험 결과 전단성능이 개선되며 보강 철근과의 사이가 확실히 보호되는 것으로 나타났다. 또한 연성 거동 특징이 나타나 부재의 취성파괴가 방지되는 것을 알 수 있었다.

최중구(2016)[21]는 강섬유 보강 콘크리트의 굳지 않은 상태와 경화된 상태의 역학적 성질에 대해 강섬유 혼입 초고강도 콘크리트의 역학적 성질에 관한 연구 분석을 통해 설계기준 압축강도가 120MPa, 150MPa일 때 직선형 강섬유 혼입률 및 형상비 변화에 따라 분석하였다. 굳지 않은 상태의 역학적 성질을 슬럼프 플로 및 공기량 측정시험을 통해 파악하고, 경화된 상태의 역학적 성질을 파악하기 위해 압축강도, 휨인장강도, 직접인장강도 및 신장량을 실험하였다. 실험 결과 강섬유 혼입률 및 형상비는 120MPa, 150MPa의 압축강도를 갖는 섬유보강 콘크리트의 압축거동에 미치는 영향은 매우 적었다. 하지만 강섬유 혼입률 및 형상비가 증가할 수 록 휨강도와 직접인장강도 증가에 효과적인 것으로 나타났다. 이때, 강섬유 혼입률이 2%, 형상비가 100일 때 가장 우수한 결과를 보여주었다. 이는 혼입된 강섬유의 가교 작용이 단면 내에 작용하는 균열의 확산을 구속할 수 있어 휨 및 인장성능이 향상된 것으로 보인다. 뿐만 아니라 강섬유 혼입율은 1.5% 이고 형상비가 100일 때 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 개발에 있어 경제성, 시공성 및 역학적 성능 측면에서 효과적일 것으로 기대하고 있지만 추가적인 연구가 필요할 것으로 보았다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

배백일 외 2인(2017)[35]은 전단철근으로 보강되지 않은 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 전단강도에 관한 실험적 연구를 통해 강섬유 보강 초고강도 콘크리트를 사용하기 위한 설계기준의 안전성에 대한 실험적 검증을 하고자 하였다. 실험 시에 강섬유 보강 초고강도 콘크리트 보에 전단력이 작용할 때 파괴 거동 파악과 전단강도를 평가하고자 압축강도, 강섬유의 혼입 여부 및 전단 경간 비를 주요 변수로 설정하여 실험을 실행하였다. 실험 결과 전단 경간 비의 영향은 일반 콘크리트와 같은 것으로 나타났다. 하지만 강섬유가 2% 혼입되었을 때 휨인장 강도는 2배 확보되었고 강섬유 보강은 10% 내외로 압축강도가 증가하였다. 강섬유가 혼입된 보 부재의 전단 성능은 일반 철근콘크리트 보 부재보다 향상되었다. 이는 초고강도 콘크리트를 사용했을 때에도 강섬유에 의한 인장효과가 뛰어날 것을 보여준다. 또한, 실험 결과와 현행 설계기준 및 제안된 실용식을 비교하였는데 기존의 전단강도 산정식에서 섬유를 보강하지 않은 경우는 전단 성능이 안전하지 못한 것으로 예측하였으나 섬유를 보강한 경우는 안전 측에서 예측하였다.

문형주(2019)[24]는 콘크리트의 취성, 폭열, 건조수축 등 재료특성을 개선하는 방법으로 고연성을 요구하는 바닥구조에는 PVA섬유를 활용한 고연성시멘트복합체(Strain Hardening Cementitious Composites; SHCC)와 휨과 전단성능을 요구하는 보 구조부재에는 Vectran 섬유를 활용한 초고강도 섬유 시멘트 복합체의 배합 및 역학실험을 통해 우수한 성능을 확인 및 평가하였다. 첫 번째 SHCC 및 RC 복합바닥구조 실험체를 제작하여 구조성능 평가 결과 다중미세균열 거동에 의한 초기균열 제어, 국부균열 제어, 처짐개선, 처짐 제어효과를 확보하였으며, 휨 내력 또한 크게 개선되었다. 두 번째 초고강도 Vectran 섬유시멘트복합체는 고강도 콘크리트를 대체하기 위한 연구로서 섬유 혼입률 1.0% 적용시 고강도 콘크리트 대비 120% 이상 휨내력이 향상되었고, 전단평가에서도 전단철근량을 절감시켰음에도 230% 이상 내력이 향상되었다. 이는 신축성과 유연한 Vectran 섬유의 특성이 시멘트 매트릭스 내 뭉치는 효과 없이 분산 및 부착성능이 뛰어나 균열폭 증가를 억제함으로 전단강도 향상에 기여하는 것으로 판단하였다.

김호연(2019)[36]는 성형성이 높지만 인장강도가 낮은 콘크리트의 취약점을 보완한 철근콘크리트 구조부재의 응력분포에 대한 형상 설계개념을 바탕으로 곡선 및 비정형 구

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

조부재를 제안하였다. 높은 압축강도 및 인장강도와 고인성특성을 가진 고성능 섬유보강 시멘트 복합재를 적용함으로써 새롭게 제안된 부재와 기존의 철근콘크리트 부재가 같은 성능이 확보될 수 있도록 하였다. 고성능 섬유보강 시멘트 복합재의 높은 성형성을 활용하여 새로운 부재 형상이 곡선미와 비정형성이 나타날 수 있도록 새로운 형상을 제안하였다. 부재 단면형태가 직육면체형인 RC는 트러스형인 HPC보다 초기항복 강성은 높게 나타났지만, 전체 체적을 최대 약 42% 절감한 곡선 및 비정형 트러스 구조부재는 강섬유 혼입효과로 인해 균열폭 제어와 강도 향상에 기여로 기존 RC 직사각형 부재보다 우수한 성능을 나타내는 것으로 판단된다. 고성능 섬유보강 시멘트 복합재 적용 곡선 및 비정형 구조부재는 기존의 철근콘크리트 직사각형 부재보다 중량을 감소시키면서도 성능이 높게 나타나서 곡선 및 비정형 구조부재로서의 구조적 기능에 만족하며, 노출부재로 적용함으로써 곡선미 및 부재설계가 가능하며, 구조부재로써 활용가치가 높을 것으로 판단하였다.

1.3 연구 내용 및 방법

본 연구에서는 강섬유의 혼입률(1.0%, 1.25%, 1.5%, 1.75%)의 변화에 따라 압축강도 100MPa의 초고성능 시멘트 복합체의 역학적 성능에 대한 실험을 통해 분석하고자 한다. 본 연구는 [그림 1.4]와 같이 진행하려 한다.

제 2장 초고성능 시멘트 복합체 구성재료에서는 섬유의 종류 및 특성, 배합재료의 물리적 특성에 대한 이론적 고찰을 하였다.

제 3장 초고성능 시멘트 복합체 배합설계 및 재료실험방법에서는 압축강도 100MPa인 초고성능 시멘트 복합체에 대한 배합설계와 역학적 성능에 대하여 굳지 않은 콘크리트의 성질 중 하나인 유동성을 파악하고자 슬럼프 플로와 굳은 콘크리트의 물리적 성질인 압축강도 시험, 직접인장강도 시험, 순수전단강도 시험을 실시하였다.

제 4장 강섬유 혼입률에 따른 실험결과에서는 실험에서 얻어진 결과들을 정리하고 비교・분석하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5장 결론에서는 앞장에서 얻어진 결과를 통한 100MPa 초고성능 시멘트 복합체의 기초자료를 확보하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[그림 1.4] 연구 내용 및 방법

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 초고성능 시멘트 복합체 구성재료

2.1 섬유의 종류 및 특성

2.1.1 일반적 보강 섬유

일반 콘크리트는 높은 압축강도를 가지고 있으나 인장 응력에는 취약한 모습을 보이며 취성재료라는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 높은 인장강도와 탄성률을 가진 섬유를 이용하여 보강하는 섬유보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete)의 실험 및 이론적인 연구가 이루어지고 있다.[11-15,21-33]

섬유보강 콘크리트란 콘크리트 배합 시 보강용 섬유를 혼입하여 주로 인성, 균열 억제, 내충격성 및 내마모성 등을 높인 콘크리트이다. 이때 보강되는 섬유는 섬유와 시멘트 결합재 사이의 부착성이 양호하여야 하고 섬유의 인장강도가 크며 내구성 내열성 및 내후성이 우수하여야 한다. 이들의 종류에는 강섬유, 유리섬유, 탄소섬유 등의 무기계 섬유와 아라미드섬유, 폴리프로필렌섬유, 비닐론섬유, 나일론 등의 유기계 섬유들이 있다. [표 2.1]은 각종 섬유의 물리적 성질을 나타낸 것이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[표 2.1] 보강섬유의 물리적 특성

(a) steel fiber

(b) PVA fiber

(c) PE fiber

(d) PP fiber

종류	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	연신율 (%)	밀도 (g/cm³)
(a) Steel fiber	400~2,500	200	-	7.85
(b) PVA fiber	690~1,500	11~36	3~13	1.30
(c) PE fiber	250~700	1.4~2.2	10~15	0.95
(d) PP fiber	300~750	1.4~2.2	10~15	0.91
Vectran fiber	2,300~3,200	62~75	3~4	1.41
Acrylics fiber	200~390	2~11	25~45	1.18
High performance PVA fiber	2,000~2,600	39~41	5~6	1.30

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.1.2 강섬유 특성

강섬유는 일반적으로 콘크리트 내부에 분산되어 시멘트 복합체가 인장응력을 받을 때 발생하는 다중 미세균열 확장 및 균열 진전을 섬유의 가교작용을 통하여 억제한다. [표 2.2]는 본 연구에 사용한 직선형 강섬유와 번드렉스 강섬유, 비정질 강섬유, PVA 섬유의 특성에 대하여 나타낸 것이다.

[표 2.2] 강섬유 및 PVA의 특성

종류	사진	특성	인장강도(Mpa)
Steel fiber (직선형) [본 연구사용]		**재료투입시 낱개로 흩어지며 내고온성,인성 및 피로저항성 증대, 균열억제효과 뭉침현상 주의하여 배합필요**	• **2,500 이상**
Steel fiber (번드렉스)		수용성 본드로 여러 가닥을 부착하여 만들어 투입시 물과 반응하여 본드가 녹아 분산 용이 제품손실저하 높은형상비로 부착력우수	• 900~1,000
Steel fiber (비정질)		섬유의 분산 및 부착이 용이	• 1700
PVA fiber		친수성 및 알칼리에 대한 저항성이 높음 고인성 및 고유동성 확보 유해물질 침투속도 감소	• 690~1,500

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.1.3 강섬유(직선형)의 물리적 특성

강섬유는 형상비가 높을수록 부착력이 우수하나, 섬유의 뭉침현상이 생겨 분산성에 문제가 발생된다. 본 연구에서는 19.5㎜ 100 형상비와 16.3㎜ 80 형상비를 2:1로 배합하여 부착력 과 분산성을 동시에 만족시키고자 하였다.

본 연구에 사용된 직선형 강섬유의 물리적 특성은 [표 2.3]에 나타내었으며, 배합비는 2:1로 배합하고 섬유의 혼입률은 1.0%, 1.25%, 1.5%, 1.75%로 하였다.

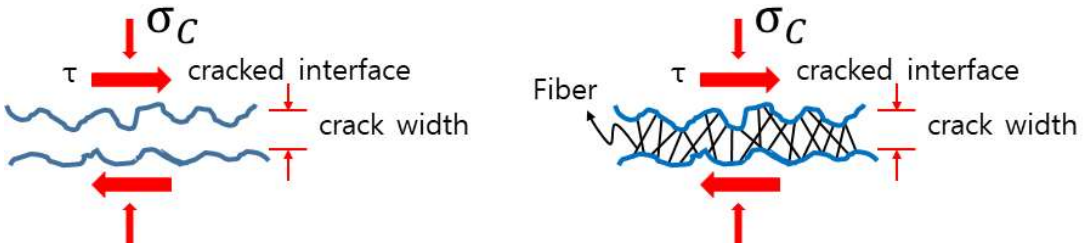
[표 2.3] 강섬유의 물리적 특성

길이 (L_f, mm)	지름 (L_f, mm)	형상비 (L_f, mm)	밀도 (kg/m^3)	인장강도 (MPa)	배합비
19.5	0.2	97.5	7.85	2,500	2
16.3	0.2	81.5	7.85	2,500	1

2.1.4 섬유와 매트릭스의 부착 메커니즘

섬유와 시멘트 매트릭스의 부착 메커니즘은 [그림 2.1],[그림 2.2]와 같이 나타난다. 균열면에 수직으로 작용하는 압축응력과 균열면의 전단응력의 관계가 일반 콘크리트에서는 골재 맞물림으로 골재의 영향을 주로 받고, 섬유보강 콘크리트에서는 혼입된 섬유가 자체응력으로 균열발생을 지연시키고, 균열이 발생되면 섬유는 가교작용으로 균열폭 확장을 지연시키며 다중미세균열을 발생시킨다.

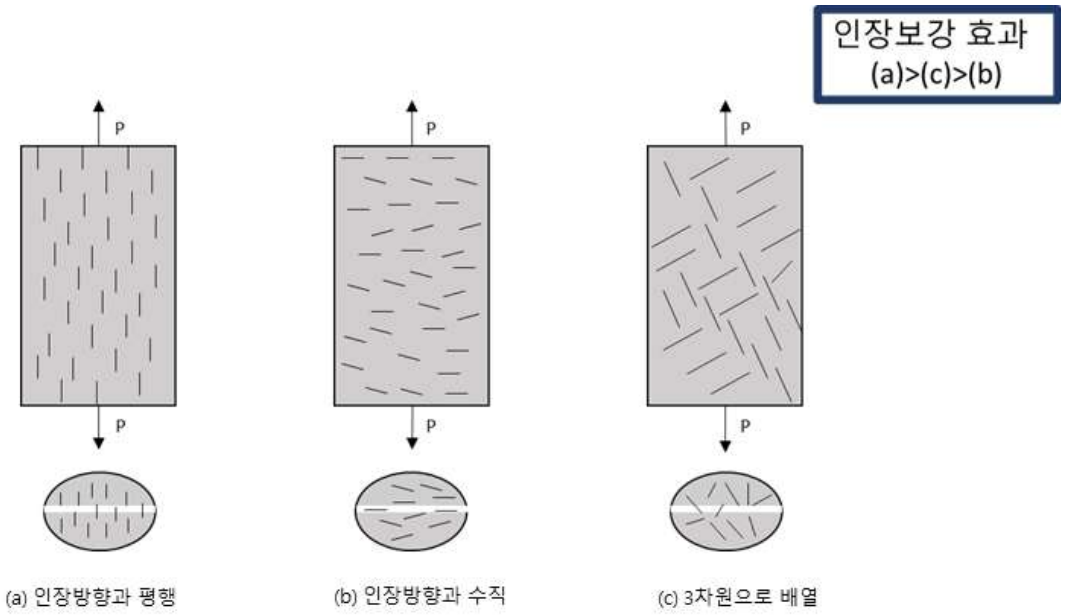
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 일반 콘크리트 (b) 섬유보강 콘크리트

[그림 2.1] 균열 발생된 콘크리트의 전단전달 메커니즘 [32]

하지만 [그림 2.2 (b)]와 같이 섬유의 배열이 좋지 않아 인장방향과 수직으로 매립되어있으면 섬유를 보강한 효과를 크게 보지 못한다. 섬유 혼입에 대한 효과를 극대화를 시키려면 [그림 2.2 (a)]와 같이 인장방향과 평행하게 배열되어있는 것이 인장응력 및 균열확장을 억제하는 것으로 보고된 바 있다.



[그림 2.2] 콘크리트에 혼입된 섬유의 배열상태 [21]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

섬유를 보강한 시멘트 복합체를 제작할 경우 섬유의 분산이 골고루 이루어져야 한다. 섬유의 분산성이 고르지 못하고 한곳에 집중되어 섬유 뭉침(fiber ball) 현상이 발생 되면 섬유를 보강한 효과를 보지 못하고 섬유의 수가 적은 부분에서 인장파괴가 일어나게 된다. 섬유 뭉침 현상이 일어나게 되는 원인은 섬유의 형상과 크기,혼입률이다. 섬유의 단면이 1.0㎜ 이상이고 형상비가 100이상인 경우 섬유 뭉침 현상이 발생하지 않지만 섬유의 혼입률이 2%가 넘는 경우 분산성이 현저히 저하되어 적절한 배합설계와 다짐을 필요로 한다. [21]

2.2 배합재료의 특성

2.2.1 초고성능 시멘트 복합체 구성 재료

본 연구에 사용되는 초고성능 시멘트 복합체 구성재료는 결합재(시멘트, 지르코늄 미분말, 팽창재), 충전재, 규사, 혼화제, 강섬유로 구성되어 있으며, 강섬유를 제외한 각 재료의 물리적 특성은 다음과 같다.

1) 시멘트

시멘트 종류에는 [표 2.4]와 같이 1종~5종이 있는데 그 중 1종 포틀랜드 시멘트를 본 연구 역학실험에 사용하였다. 역학실험에 사용된 시멘트는 국내 S사의 1종 포틀랜드 시멘트로써 화학적 특성은 [표 2.5]와 같다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[표 2.4] 시멘트 종류별 특성 및 용도 [20]

구분	특성	용도
1종 (보통)	일반적으로 콘크리트 공사용으로 가장 만이 사용되고 있는 시멘트로 국내에서 생산되는 시멘트의 대부분을 차지함.	
2종 (중용열)	-C_3S와 C_3A를 가능한 감소시키고,장기강도를 발현하는 C_2S를 최대화해 수화과정에서 초기 수화열을 낮추고 투수저항성을 높임.	-큰 체적의 콘크리트 구조물 (댐공사의 매스콘크리트 공사) -도로보수용 콘크리트
3종 (조강)	-수화는 신속하고 단기강도가큼. -재령 1일의 강도가 보통 포틀랜드시멘트의 재령 3일 강도와 거의 같음. -시멘트 1g당 발열량이1~3일에서 보통 포틀랜드시멘트 보다1.3배 정도 높음.	-도로 및 수중공사 등 긴급공사 -일반적인 콘크리트 공사에서 공기를 단축하기 위해 사용
4종 (저열)	-중용열 시멘트보다 C_2S의 함량을 높이고, 수화열이 높은 C_3A 및 C_3S의 함량을 대폭 줄여, 수화열을 낮춤. 일반적으로 C_2S 함량이 C_3S 함량보다 높음.	-2종과 유사 용도 -대규모 매스콘크리트 공사 -지하철 기반공사 등
5종 (내황산염)	-중용열 시멘트 보다 C_3S의 함량을 줄이고 내황산염 저항성이 큰 C_4AF를 중용열 시멘트 보다 늘림. 보통 시멘트보다 강도가 약간 낮음.	-황산염을 많이 함유한 토양, 지하수가 닿는 곳의 콘크리트 공사 -터널 수로 라이닝, 암거 등

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[표 2.5] 1종 포틀랜드 시멘트 특성

밀도 (g/cm^3)	분말도 (cm^2/g)	화학적 구성 (%)								
		SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	SO_3	Na_2O	K_2O	Fe_2O_3	lg.$loss$
3.15	3,200	21.24	5.97	2.36	62.72	1.97	0.13	0.81	3.34	1.46

2) 지르코늄 미분말

초고성능 시멘트 복합체의 결합재 중 하나로 내화물 등에 사용되는 산화지르코늄의 정제 시 발생되는 부산물로서, 일반적인 실리카퓸에 비하여 입경이 커서 유동성이 향상되고, 충진성의 역할이 크다. 이산화 규소의 함량이 95% 이상으로 높아 포졸란 특성(물속에서 수산화칼슘과 반응하여 불용성화합물 생성)이 우수하며 시멘트 복합체의 강도 증가에 도움이 된다. 지르코늄 미분말의 특성은 [표 2.6]와 같다.

[표 2.6] 지르코늄 미분말 특성

비표 면적 (m^2/g)	수분 흡착량 (cm^2/g)	수분 탈착량 (cm^2/g)	화학적 구성 (%)			
			SiO_2	ZrO_2	MgO	lg.$loss$
8.76	10.80	2.00	95.60	3.90	0.02	1.01

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3) 팽창재

초고성능 시멘트 복합체의 결합재 중 하나로 석회, 석고, 보크사이트를 주성분으로 하는 소성화합물을 적당한 입도로 분쇄한 것으로 아우인, 유리 석회, 유리 석고 등으로 구성되어 있다. 일반적으로 건조수축의 저감, 체적팽창, 수화열의 억제등의 용도로 쓰인다. 본 연구에 사용된 물은 시멘트 중량의 23%로 수화반응으로 인해 거의 소모되므로 본 연구에서 팽창재는 건조수축 저감 용도가 아닌 자기수축 저감 용도로 사용하였다. 팽창재의 특성은 [표 2.7]과 같다.

[표 2.7] 팽창재 특성

밀도(g/cm^3)	분말도 (cm^2/g)	화학적 구성 (%)					
		SiO_2	SO_3	Al_2O_3	CaO	K_2O	$F-CaO$
2.98	3,117	3.80	28.66	13.55	51.35	0.56	16.02

4) 충전재

초고성능 시멘트 복합체의 Filler역활을 하는 충전재는 미세공극을 충전하여 시멘트 복합체 내부에 조직을 치밀하게 하여 동결융해 저항성을 높인다. 충전재의 특성은 [표 2.8]와 같다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[표 2.8] 충전재 특성

입자크기(μm)	밀도(g/cm^3)	화학적 구성 (%)					
		Al_2O_3	MgO	CaO	Fe_2O_3	SiO_2	lg.$loss$
10	2.61	0.15	0.004	0.03	0.01	99.3	0.01

5) 규사

골재는 유동성 및 섬유 혼입을 위하여 굵은 골재를 사용하지 않았으며 평균 입도 사이즈 0.22㎜인 7호 규사를 사용하였다. 골재의 특성은 [표 2.9]과 같다.

[표 2.9] 잔골재(규사) 특성

황색도	밀도 (g/cm^3)	흡유량 ($g/100g$)	모스경도 Hardness Mohss	pH	평균입도사이즈 (mm)
1.71	2.62	28.0	7	6.5	0.22(#7호사)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6) 혼화제

본 연구에 사용되는 혼화제는 고성능 감수제, 공기량 조절제, 수축저감제를 사용하였다. 조기 강도 발현과 재료분리의 저항성, 단위 수량 저감, 점성 증대를 위해 액상형 폴리카르본산계 고성능 감수제를 사용하였고 소성수축과 건조수축을 막기위해 수축저감제를 사용하였다. 또한, 초고성능 시멘트 복합체 배합 시 공기량을 조절하기 위해 공기량 조절제를 추가로 사용하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 초고성능 시멘트 복합체 배합설계 및 재료실험 방법

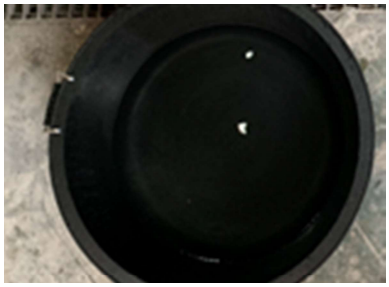
3.1 배합 설계

본 연구에서는 강섬유의 혼입률을 1.0%, 1.25%, 1.5%, 1.75%로 변수를 두어 배합 설계를 하였다. 배합은 믹서용량을 고려하여 80L 단위로 배합하였고, 초고성능 시멘트 복합체 배합순서는 프리믹싱 결합재(시멘트 783.2kg, 지르코늄 미분말 195.8kg, 팽창재 58.7kg)와 충전재, 규사를 넣고 건비빔을 10분간 실시한 후 배합수와 고성능 감수제, 수축저감제, 공기량 조절제를 섞어서 7~8분간 비빔을 하였다. 마지막으로 강섬유을 투입한 후 1~2분간 비빔을 한 후 배출하여 시험체를 제작하였다. 본 연구에서 사용되는 배합표 및 배합재료는 [표 3.1],[그림 3.1]과 같고 [그림 3.2]와 같은 순서로 비빔을 하였다.

[표 3.1] 초고성능 시멘트 복합체 배합표:1,000L 배합기준

W/B	단위질량[kg/m^3]									
	단위수량	프리믹싱 결합재	충전재	규사	강섬유 혼입률	강섬유		고성능감수제	공기량조절제	수축저감제
						16.3 mm	19.5 mm			
0.18	183.0	1037.7	235.0	861.5	1.0%	26	52	18.3	0.5	7.8
					1.25%	32	65			
					1.5%	39	78			
					1.75%	46	91			

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 배합수

(b) 프리믹싱 결합재, 충전재, 규사, 강섬유

(c) 고성능 감수제, 공기량 조절제, 수축저감제

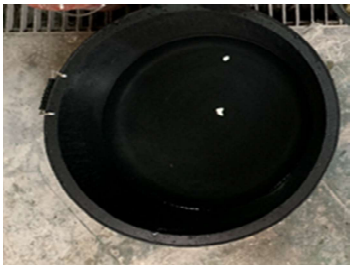
[그림 3.1] 초고성능 시멘트 복합체 배합재료

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(a) 배합재료 준비

(b) 배합재료 투입

(c) 건비빔



(d) 배합수에 혼화제 혼입

(e) 강섬유 투입

(f) 배출

[그림 3.2] 초고성능 시멘트 복합체 배합과정

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.2 재료 실험 방법

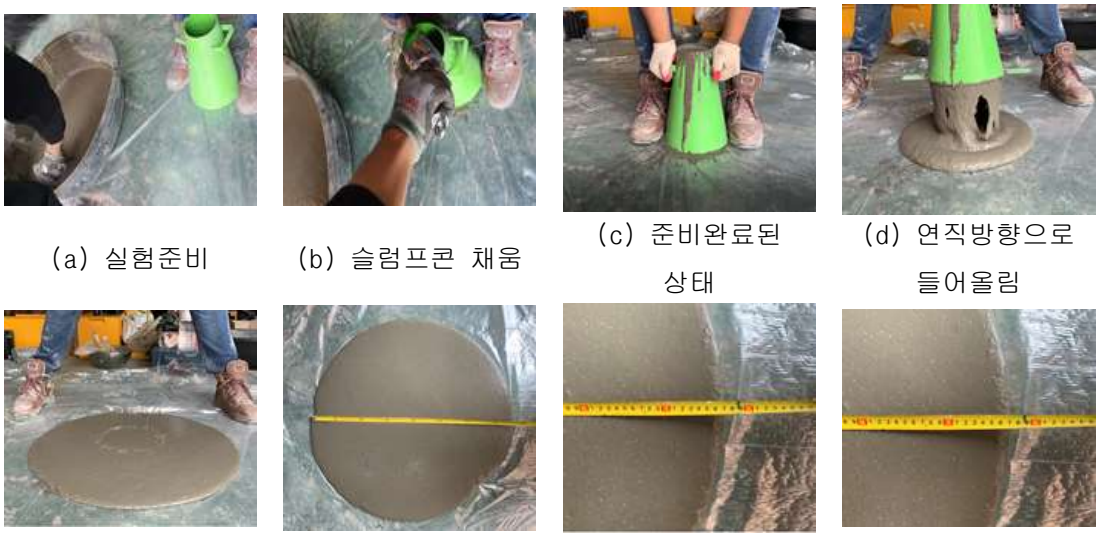
3.2.1 실험개요

배합표에 따른 배합으로 초고성능 시멘트 복합체의 역학적 성능에 대하여 굳지 않은 콘크리트의 성질 중 하나인 유동성을 파악하고자 슬럼프 플로와 굳은 콘크리트의 물리적 성질인 압축강도 시험, 직접인장강도 시험, 순수전단강도 시험을 실시하였다.

3.2.2 슬럼프 플로우 시험

굳지 않은 콘크리트의 성질 중 하나인 유동성을 파악하고자 초고성능 시멘트 복합체의 슬럼프 플로우 시험을 실시하였다. KS F 2594 [17] 에 따라 슬럼프 플로우 시험을 실시 하였다. 슬럼프 콘의 규격은 100x200x300㎜이다. 총 높이에 3분의 1지점마다 다짐봉으로 충분히 다진 후 슬럼프 콘을 수직으로 들어 올렸을 때 20~30초정도 시간이 지난후 콘크리트의 퍼짐 정도를 줄자로 지름과 직교지름을 측정하였다. [그림 3.3]는 슬럼프 플로우 시험 순서를 나타낸 것이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 실험준비 (b) 슬럼프콘 채움 (c) 준비완료된 상태 (d) 연직방향으로 들어올림

(e) 3~20초 정도 대기 (f) 측정 방법 (g) 지름측정 (h) 직교 지름측정

[그림 3.3] 초고성능 시멘트 복합체 배합재료

3.2.3 압축강도 시험

초고성능 시멘트 복합체의 최대 압축강도 시험은 KS L 2403 [16] 에 규정 된 100x200㎜ 규격의 시험용 공시체를 제작하였고 KS L 2405 [18] 에 규정된 방법을 따랐다. 72시간 경과 시킨 후 탈형 하였으며, 상온 10~23℃에 수중 양생을 실시하였다. 28일 경과 후 양생 완료된 시험용 시험체의 윗면을 연마하고, KS B 5533 [19] 인증제품인 유압 전동식시험기를 [그림 3.4]과 같이 사용하여 시험용 공시체의 최대 압축강도를 측정하였다.

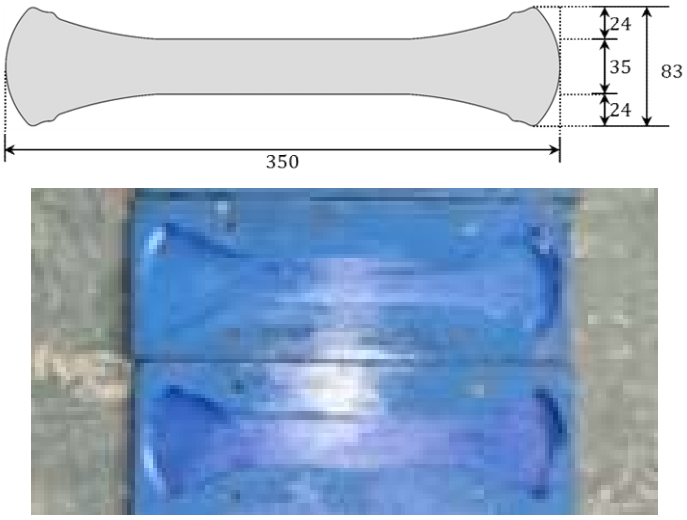
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[그림 3.4] 압축강도 시험방법

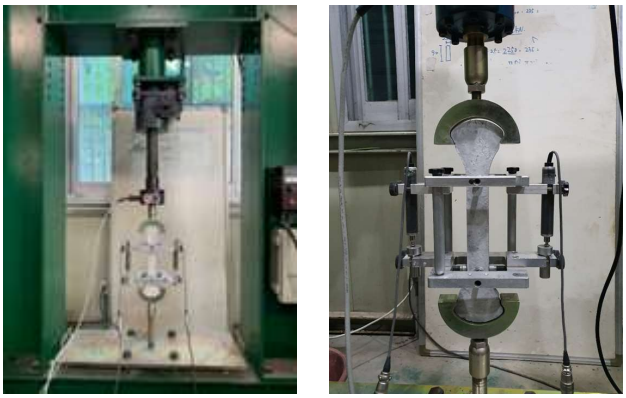
3.2.4 직접인장 시험

초고성능 시멘트 복합체의 최대 직접인장 강도 측정을 위해 직접인장 시험을 실시하였다. 실험체는 인장 시험 시 단부의 파괴를 방지하기 위해 도그본 형태로 제작하였으며, 실험체와 몰드 형상은 [그림 3.5]와 같다. 몰드에 초고성능 시멘트 복합체를 타설하고 내부에 섬유가 일정한 방향성을 가질 수 있도록 다지고 상온에서 72시간 경과시킨 후 탈형 하였으며, 상온 10~23℃의 수조에 수중 양생을 실시하였다. 28일 경과 후 양생 완료된 실험체를 [그림 3.6]와 같이 20t 용량 UTM을 사용하여 하중을 가하였다. 변위 측정을 위해 [그림 3.7]처럼 실험체의 중앙 부분 양쪽에 25㎜의 LVDT를 설치하여 변위를 측정하였다. 실험을 통하여 최대 직접인장 강도와 인장변형률을 환산하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

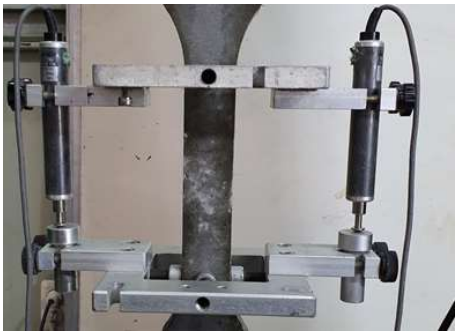


[그림 3.5] 직접 인장강도 시험제와 몰드 형상



[그림 3.6] 직접 인장강도 시험 설치모습

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 3.7] 변위계 위치

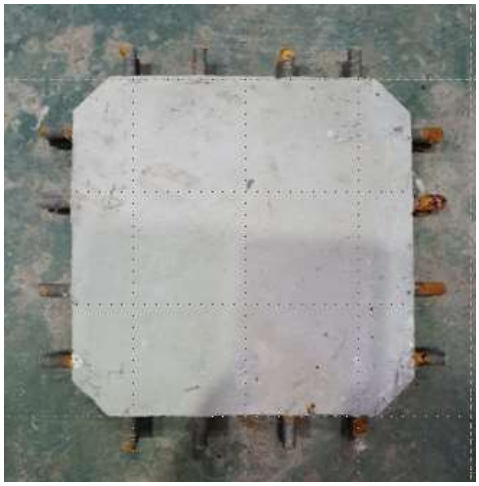
3.2.5 순수 전단강도 시험

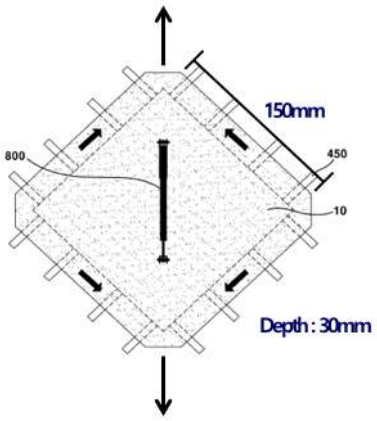
보나 바닥판부재에는 휨강도와 함께 가위로 어느 물체를 자를때와 같은 전단력이 발생하게 되는데, 콘크리트는 이에 대응하기 위한 저항응력도 즉 전단강도가 필요하게 된다. 지금까지 순수전단 시험장치는 여러개의 잭을 사용하여 전단력을 측정하거나, 압축력으로 전단응력이나 전단변형률을 측정하는 시험방법을 사용하였다, 또한 순수전단 시험에 관련되는 장비가 많고 복잡하며, 시험대상이 되는 시험체가 커서 시험체 제작과 시험 수행에 문제가 있었다. 본 연구에서는 '조창근,임현진'이 발명한 '섬유를 포함하는 모르타르에 대한 순수전단 시험장치'를 이용하여 비교적 시험체가 작고 간단한 방법으로 전단응력과 전단변형률을 측정하였다. 측정 방법은 인장력을 이용하여 하부는 고정시키고 상부에 힘을 가하여 와이어로프를 이용하여 2축방향으로 전단력을 가하는 형태로 시험을 실시하였다. [그림 3.9] 전단성능 측정은 선형거리 차이를 측정하는 전기적 변환기인 LVDT(The Linear Variable Differential Transformer)로 시험체 중앙부에 설치하여 보의 사인장균열의 형태를 유도함으로써 콘크리트의 전단응력 및 전단변형률을 동시에 확인하고자 하였다. [30] [그림 3.10]

초고성능 시멘트 복합체의 순수 전단강도를 파악하고자 150x150x30mm 규격 (위험 전단면적 150x30mm)의 시험체를 제작하였다. 실험체와 몰드 형상은 [그림 3.8]와 같다. 몰드에 초고성능 시멘트 복합체를 타설하고 내부에 섬유가 일정한 방향성을 가질 수 있도록 다지고 상온에서 72시간 경과시킨 후 탈형 하였으며, 상온 10~23℃의 수조에

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

수중 양생을 실시하였다. 28일 경과 후 양생이 완료된 실험체를 [그림 3.9]와 같이 20t 용량 UTM을 사용하여 하중을 가하였다. 변위 측정을 위해 [그림 3.10]처럼 실험체의 중앙 부분에 10mm의 LVDT를 설치하여 변위를 측정하였다. 실험을 통하여 순수전단강도와 전단변형률을 환산하였다.





[그림 3.8] 순수 전단강도 시험체와 몰드 형상

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[그림 3.9] 순수 전단강도 시험 설치 모습

[그림 3.10] 변위계 위치

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 강섬유 혼입에 따른 실험결과

4.1 슬럼프 플로우

초고성능 시멘트 복합체의 슬럼프 플로우 시험 결과 [표 4.1]과 같고 지름과 직교 지름을 통하여 평균 값을 산정하였다. 강섬유 혼입률에 상관없이 슬럼프 값이 700㎜ 이상을 확보하였고 충분한 유동성을 확보하여 시공성 확보가 충분한 것으로 판단하였다.

[표 4.1] 슬럼프 플로우 시험 결과

섬유 혼입률	지름 (mm)	직교 방향 지름 (mm)	평균 (mm)
1%	750	770	760
1.25%	750	760	755
1.5%	740	730	735
1.75	780	760	770

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

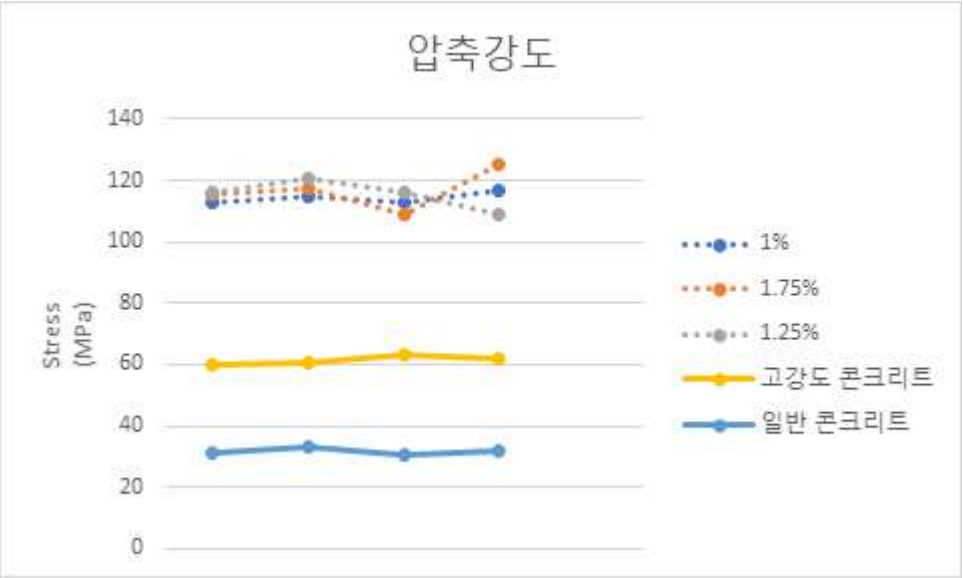
4.2 압축강도

초고성능 시멘트 복합체의 압축강도 시험은 재령 28일 후 실시하였으며, 편심 작용을 방지하기 위해 시험체 윗면을 연마하였다. 또한, 파편이 외부로 튀는 것을 막기 위해 옆면을 랩핑을 하여 실시하였다. 비교를 위해 실제 현장에 사용된 설계기준강도 24MPa 일반 콘크리트와 49MPa 고강도 콘크리트의 압축강도를 비교하였다. 실험체의 하중이 증가함에 따라 수직 방향으로 미세한 균열이 발생하기 시작하였으며 최대 하중을 받았을 때 큰 소음과 함께 파괴가 일어났다. 초고성능 시멘트 복합체의 섬유 혼입률 1%일 경우 평균 압축강도가 114.39MPa, 1.25%일 경우 115.4MPa, 1.75%일 경우 116.76MPa로 측정되었다. 일반 콘크리트는 평균 31.6MPa, 고강도 콘크리트는 61.4MPa로 나타났다. 강섬유의 혼입률에 따른 강도의 증가는 미세하였으며 일반 콘크리트와 비교를 하였을 때 약 3배 고강도 콘크리트와 비교 하였을 때 약 2배 높은 결과를 보였다. 또한, 파괴형상으로 보아 일반 고강도 콘크리트의 경우 시편이 떨어져 나가 취성 파괴현상이 나온 반면, 강섬유를 혼입한 초고성능 시멘트 복합체의 경우 강섬유가 입자 간 결합재 역활을 하여 안정적인 파괴양상을 확인할 수 있었다. [표 4.2]와 [그림 4.1] 같이 시험 결과를 정리하였으며, 파괴 형상은 [그림 4.2]와 같다.

[표 4.2] 압축강도 시험 결과

혼입률	압축강도 (MPa)	평균	종류	압축강도 (MPa)	평균
1%	112.72	114.39	고강도 콘크리트	59.9	61.4
	114.65			60.8	
	113.07			63.2	
	117.1			61.4	
1.25%	116.23	115.4	일반 콘크리트	31.3	31.6
	120.38			33	
	116.26			30.6	
	108.69			31.6	
1.75%	115.44	116.76			
	117.33				
	108.67				
	125.58				

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 4.1] 압축강도 시험 결과

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(a) 섬유혼입률 1%

(b) 섬유혼입률 1.25%

(c) 섬유혼입률 1.75%

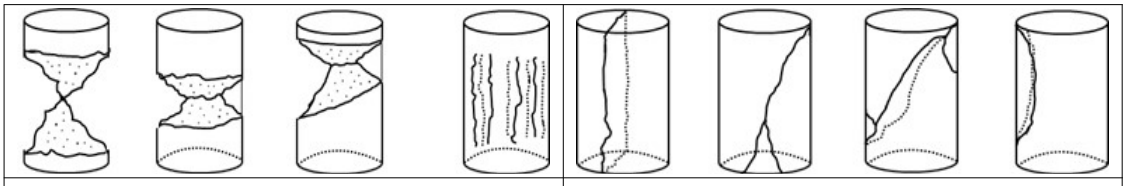
(d)고강도 콘크리트

(e)일반 콘크리트

[그림 4.2] 압축 시험 파괴 양상

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

압축강도는 시험체의 파괴 형상을 보면 시험의 적정성을 판단할 수 있다. [그림 4.3]의 합격 된 모양으로 파괴된 경우는 그 값을 압축강도로 사용해도 되지만 불합격 한 공시체는 그 값을 압축강도로 취급해서는 안된다. 본 연구에서는 편심이 걸리지 않고 합격 된 모양으로 파괴가 되어 압축강도로 사용하였다.



(a) 합격 된 모습	(a) 불합격 된 모습

[그림 4.3] 파괴 형태의 분류

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.3 직접인장 시험

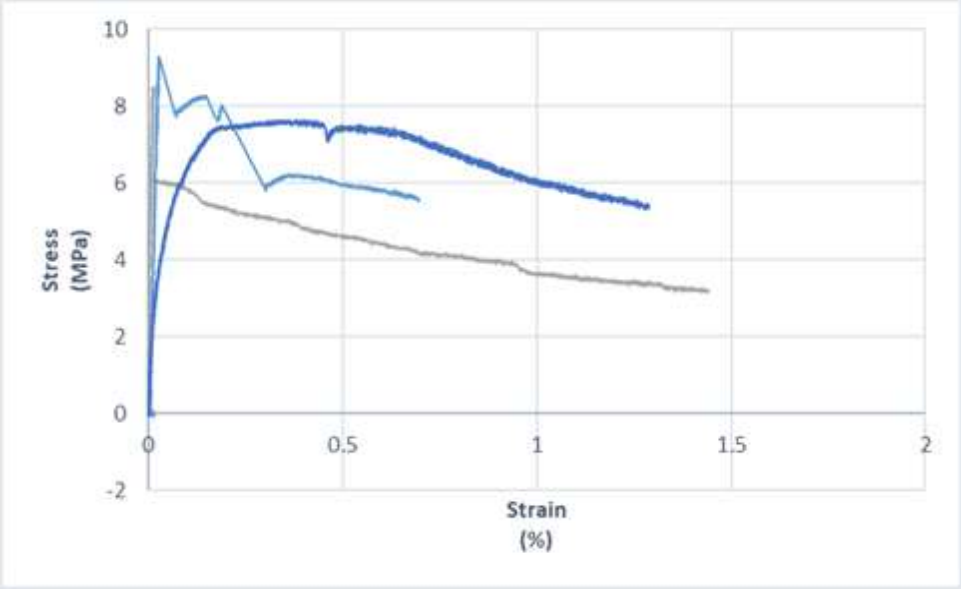
초고성능 시멘트 복합체의 최대 직접인장 강도 측정은 재령 28일 후 실시하였으며, 편심 작용을 방지하기 위해 시험체를 잡는 부분에 있는 힌지를 풀어주어 시험체가 하중이 가해지는 방향으로 거동을 하게 하였다. 또한, 하중을 일정하고 천천히 주어 실험체가 위험 구간에 균열이 나도록 유도하였다. 실험체의 하중이 증가함에 따라 위험 구간에 미세한 균열이 발생하기 시작하였으며 최대 하중을 받았을 때 균열 점차 확장되었다. 최대 변형률이 측정되었을 때 완전히 파괴가 일어났다. 최대 하중을 받을 때까지 탄성 거동이 일어났고 최대 하중을 받은 이후에는 변형연화 거동이 나타났다. 초고성능 시멘트 복합체의 섬유 혼입률 1%일 경우 평균 최대인장강도가 8.48MPa, 1.25%일 경우 8.11MPa, 1.75%일 경우 9.78MPa로 측정되었다. 섬유 혼입률 1%와 1.25%일 때 유사한 인장강도와 변형률이 측정되었고 1.75%일 때 조금 더 높은 인장강도와 변형률이 측정되었다. 섬유의 혼입률에 따라 인장강도는 증가하는 것으로 확인하였다. [표 4.3]와 [그림 4.4] 같이 시험 결과를 정리하였으며, 파괴 형상은 [그림 4.5]와 같다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

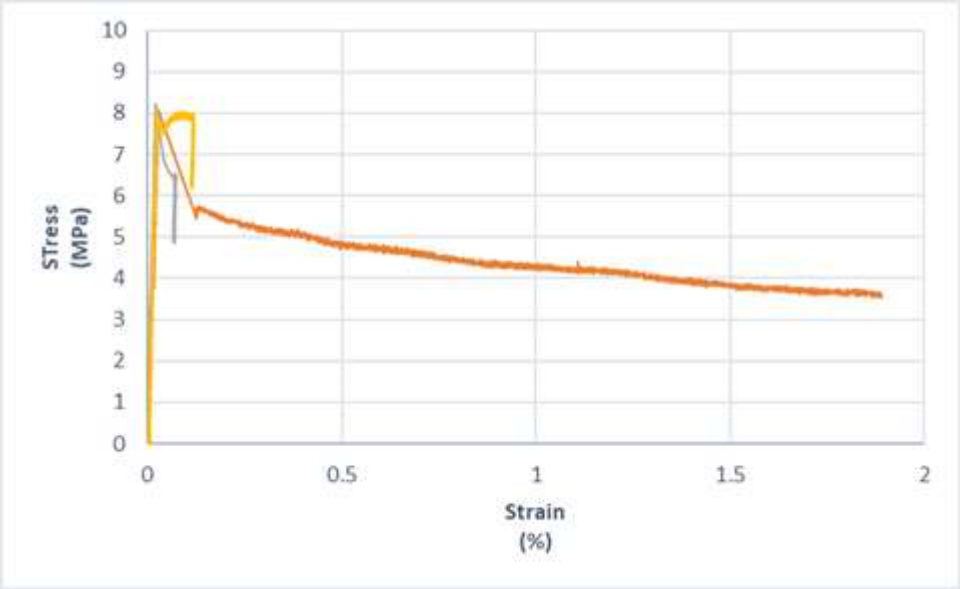
[표 4.3] 직접 인장강도 시험 결과

혼입률	직접 인장강도 (MPa)	평균 인장강도 (MPa)	인장변형률	평균 인장변형률
1%	9.29	8.48	0.697	1.143
	8.52		1.444	
	7.64		1.289	
1.25%	8.07	8.11	1.889	0.695
	8.22		0.074	
	8.03		0.121	
1.75%	8.86	9.78	4.018	4.495
	9.54		6.782	
	10.93		2.686	

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

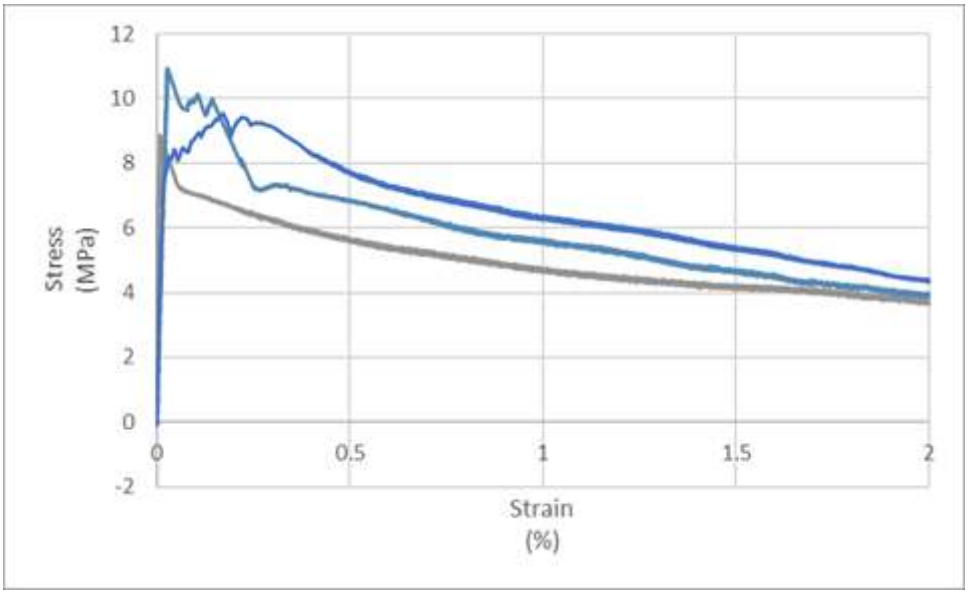


(a) 섬유혼입률 1%



(b) 섬유혼입률 1.25%

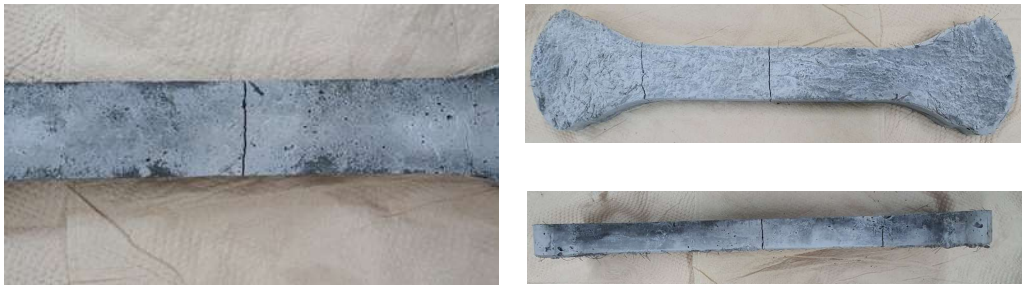
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



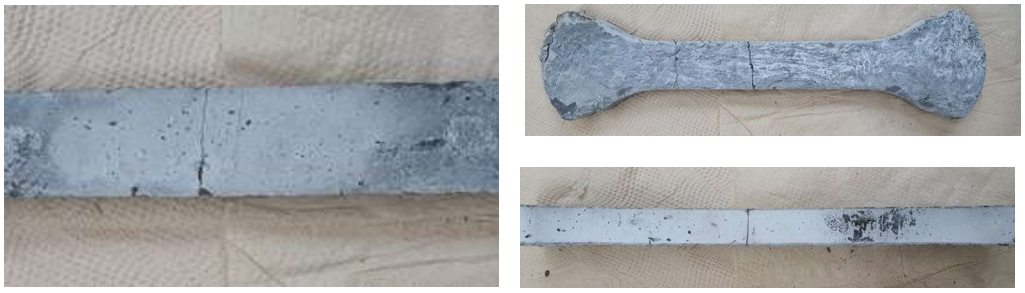
(c) 섬유혼입률 1.75%

[그림 4.4] 직접 인장 시험 결과 응력 변형률 관계 그래프

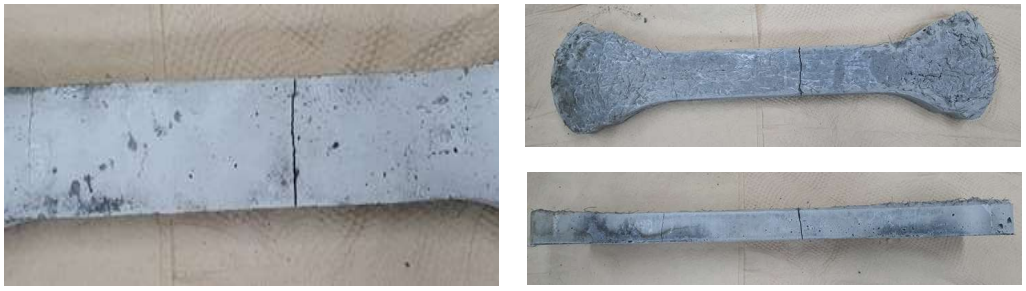
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 섬유 혼입률 1%-1



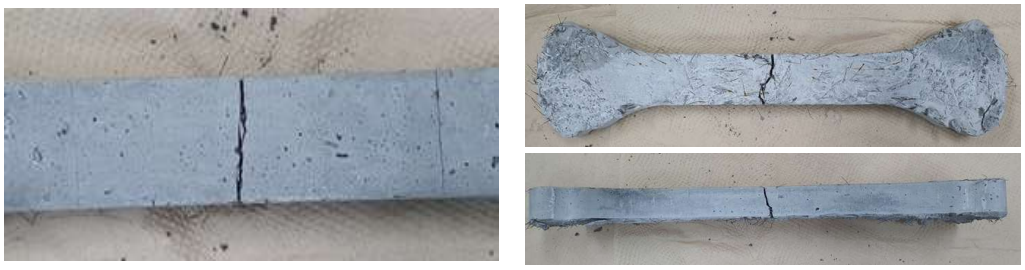
(b) 섬유 혼입률 1%-2



(C) 섬유 혼입률 1%-3

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

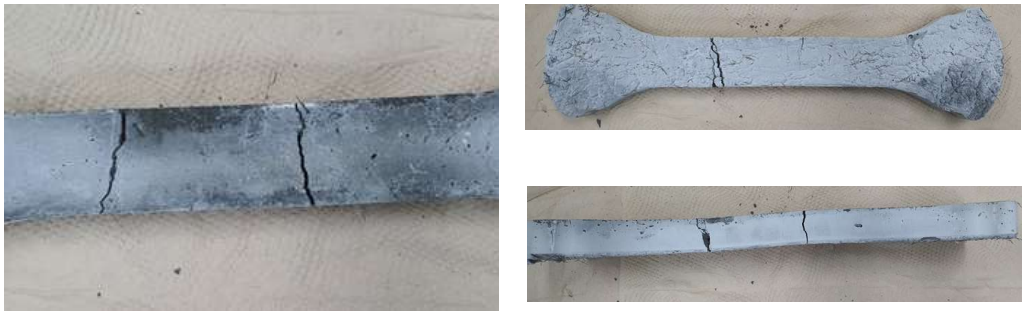
(c) 섬유 혼입률 1.25%-1



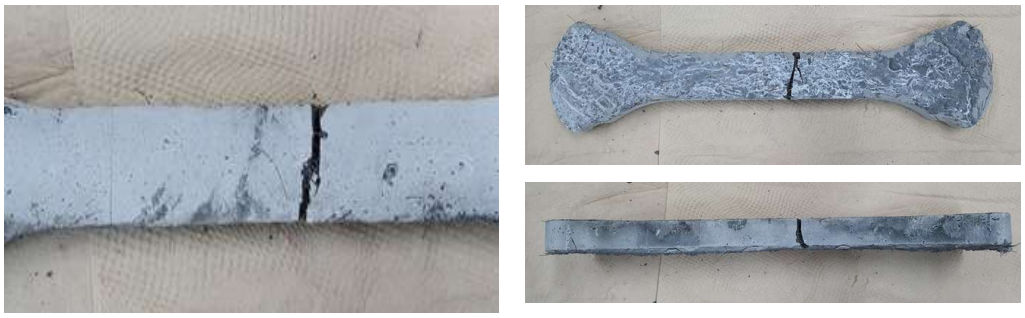
(d) 섬유 혼입률 1.25%-2

(e) 섬유 혼입률 1.25%-3

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(c) 섬유 혼입률 1.75%-1



(d) 섬유 혼입률 1.75%-2

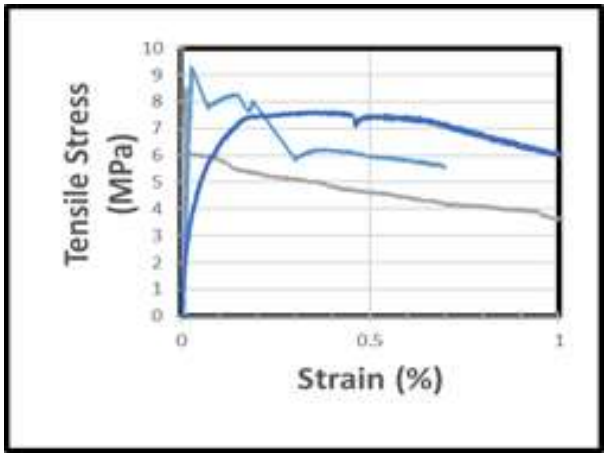
(e) 섬유 혼입률 1.75%-3

[그림 4.5] 직접 인장시험 파괴 양상

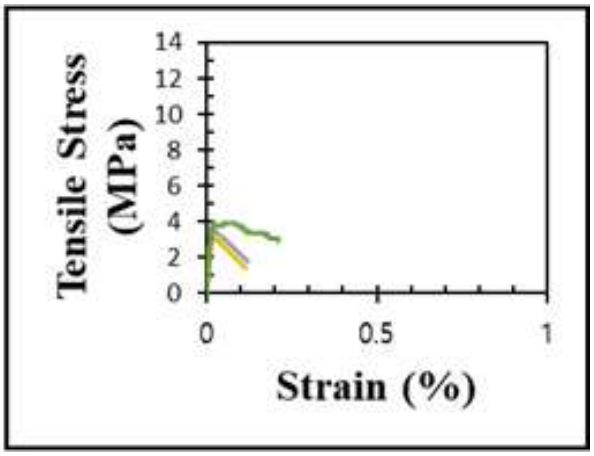
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

동일한 섬유 혼입률 1%에 대하여 기존연구자료(번드렉스 강섬유 적용 시멘트 복합체, 비정질 강섬유 적용 시멘트 복합체, PVA섬유 시멘트복합체)들의 배합 역시 최적의 배합으로 이루어진 것으로 판단하고 비교를 실시하였다. [그림 4.6]은 기존연구자료들의 인장-변형률 곡선이다. 번드렉스 강섬유 적용 시멘트 복합체의 평균 인장강도는 4.01MPa이고 변형률은 0.15%, 비정질 강섬유 적용 시멘트 복합체는 평균 인장강도 3.59MPa이고 변형률은 0.71%, PVA섬유 시멘트 복합체는 평균 인장강도 3.21MPa이고 변형률은 5.41%이다. 본 연구에 사용된 직선형 강섬유 혼입률 1%인 경우 평균 인장강도 8.48MPa, 평균 인장변형률 1.143%의 높은 인장성능이 확보되었으며, 동일한 혼입률 1%인 번드렉스 강섬유와 비정질 강섬유를 혼입한 시멘트 복합체와 비교시 약 2배이상의 높은 인장성능을 확인하였다. 또한, 동일한 혼입률 1%인 PVA 섬유를 혼입한 시멘트 복합체와 비교시 인장강도는 직선형 강섬유 혼입한 UHPCC가 약 2배이상 우수하나, 인장변형률은 PVA섬유를 혼입한 시멘트 복합체가 약 4배이상 우수한 것으로 확인되었다. 단, 본 비교는 전체 재료배합의 비교이고, 섬유자체만의 비교자료가 아니다. 또한, 섬유와 매트릭스의 부착메커니즘에서 인장방향과 섬유배열이 평행일 때 인장보강효과가 가장 좋다고 보고된 바 있어 인장실험체의 절단면을 확인한 결과 대부분의 강섬유가 인장응력과 평행을 이룬 것으로 보아 강섬유 형상비에 따른 2:1배합이 효과적임을 판단 할수 있다. 따라서, 초고성능 시멘트 복합체가 다른 섬유 시멘트 복합체보다 인장파괴가 일어날 때까지 섬유의 가교작용으로 인해 응력 재분배가 크다고 판단하였고 변형에너지의 흡수는 PVA섬유를 혼입한 시멘트 복합체가 크다고 판단하였다. [그림 4.7]과 [그림 4.8]는 비교 그래프를 나타낸 것이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

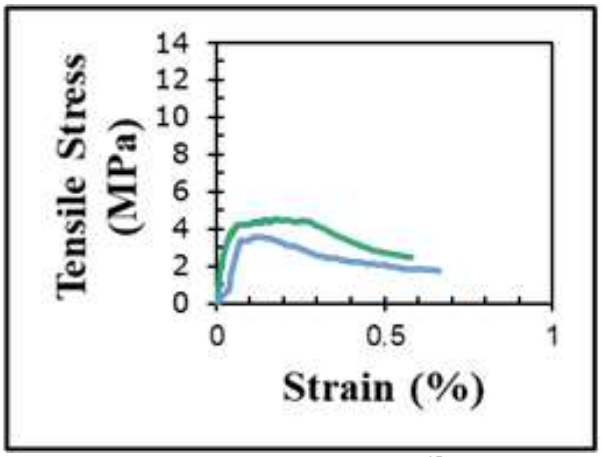


(a) 직선형 강섬유(본 연구) 혼입률 1%

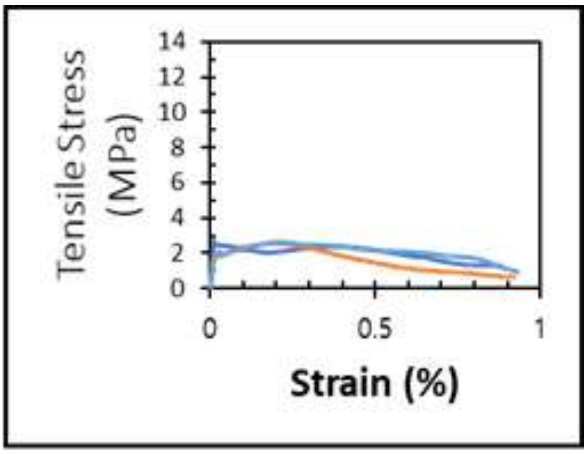


(b) 번드렉스 강섬유 혼입률 1% [25]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



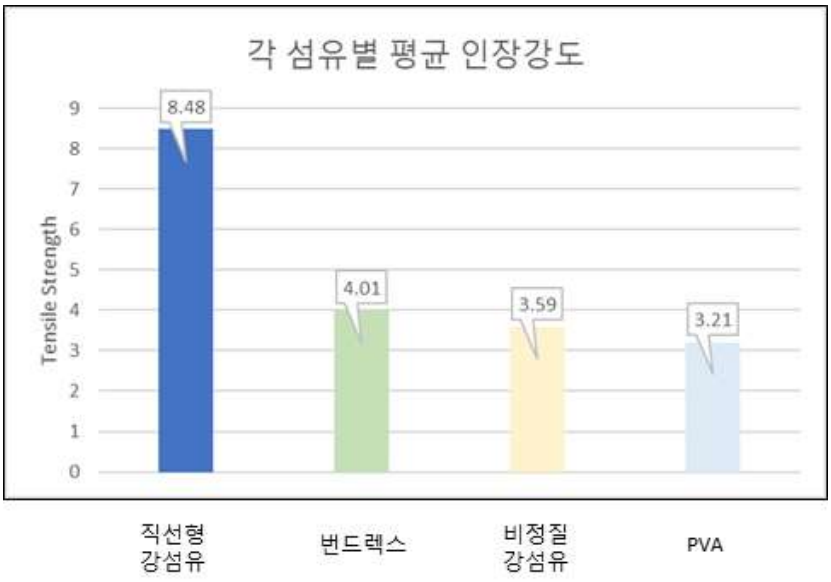
(c) 비정질 강섬유 혼입률 1% [25]



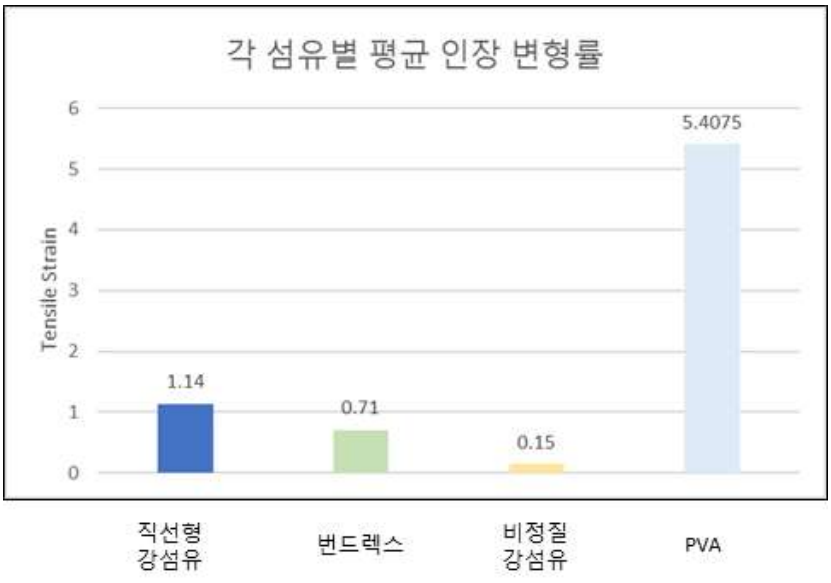
(d) PVA 섬유 혼입률 1% [23]

[그림 4.6] 기존 연구자료들의 응력 변형률 관계 그래프

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 4.7] 각 섬유별 평균 인장강도

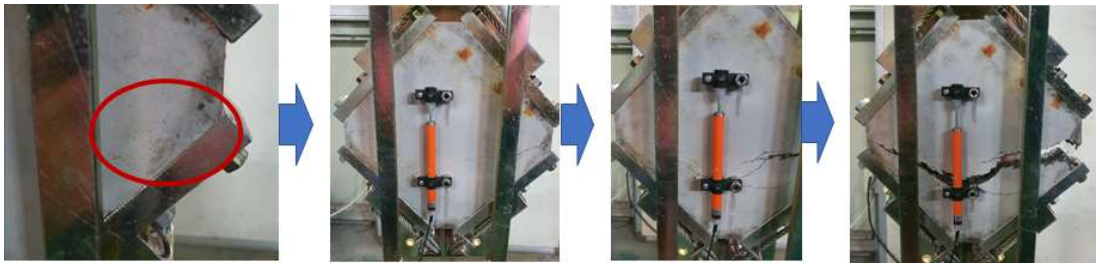


[그림 4.8] 각 섬유별 평균 인장 변형률

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.4 순수 전단강도

초고성능 시멘트 복합체의 순수 전단강도 측정은 재령 28일 후 실시하였으며, 편심 작용을 방지하기 위해 시험체를 잡는 부분에 있는 힌지를 풀어주어 시험체가 하중이 가해지는 방향으로 거동을 하게 하였다. 또한, 하중을 일정하고 천천히 주어 실험체가 전단 위험 구간에 균열이 나도록 유도하였다. 실험체의 하중이 증가함에 따라 실험체와 결합을 위해 볼트를 체결한 부분에서 균열이 발생하기 시작하였으며 점진적으로 하중이 증가함에 따라 균열이 확장되면서 전단파괴가 일어났다. [그림 4.9] 은 초기 균열부터 최종 균열까지 진전해가는 모습을 나타낸 것이다. 초고성능 시멘트 복합체의 섬유 혼입률 1%일 경우 평균 순수 전단강도가 3.57MPa, 1.5%일 경우 4.68MPa로 측정되었다. [표 4.4]와 [그림 4.10] 같이 시험 결과를 정리하였으며, 파괴 형상은 [그림 4.11]와 같다.



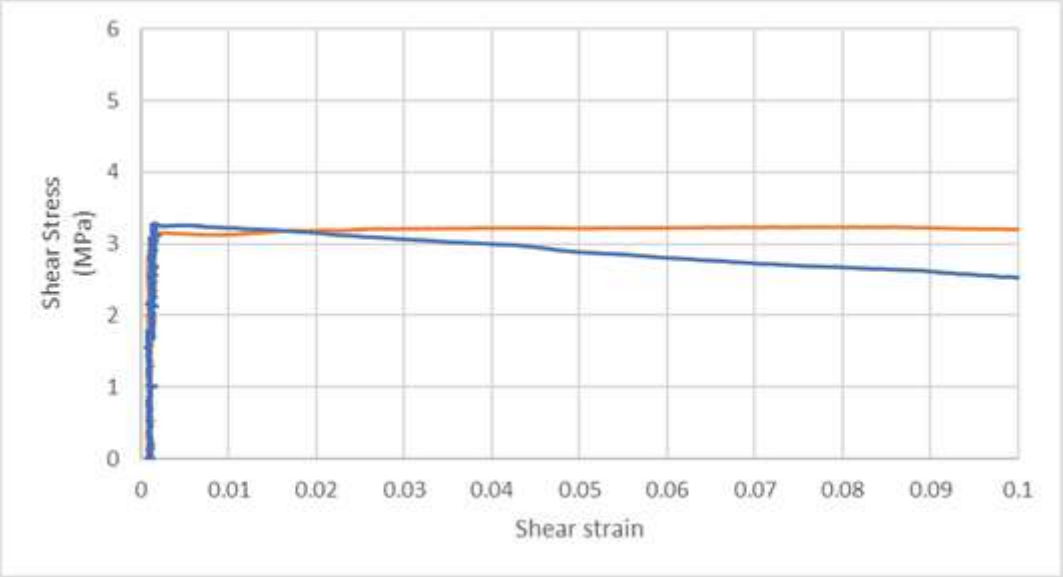
[그림 4.9] 균열확장 과정

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

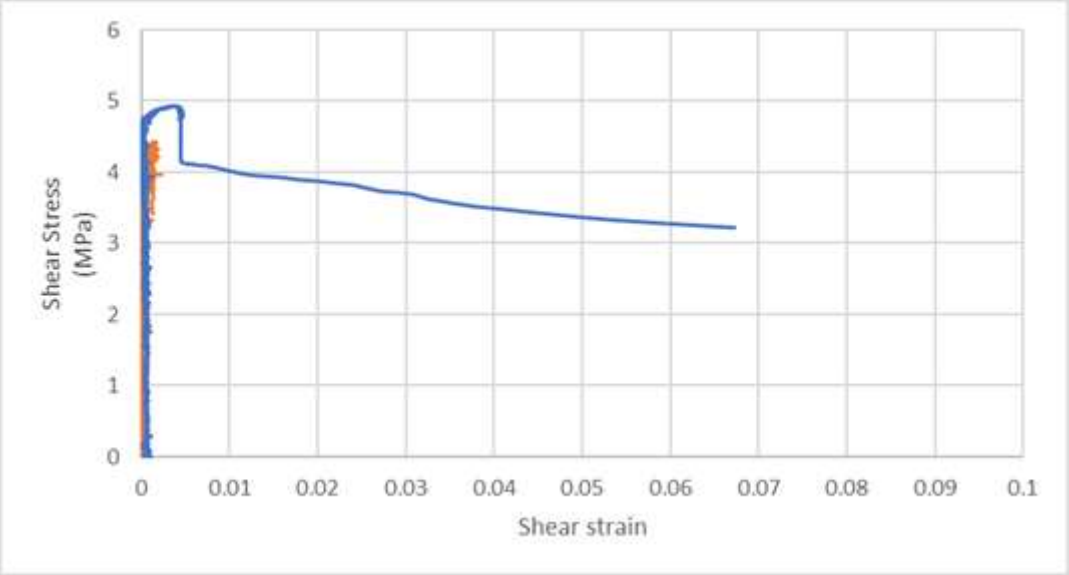
[표 4.4] 순수 전단강도 시험 결과

섬유 혼입률	순수 전단강도 (MPa)	평균 전단강도 (MPa)	전단 변형률	평균 전단변형률
1%	3.86	3.575	0.173	0.268
	3.289		0.362	
1.5%	4.43	4.68	0.002	0.035
	4.93		0.067	

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 섬유혼입률 1%

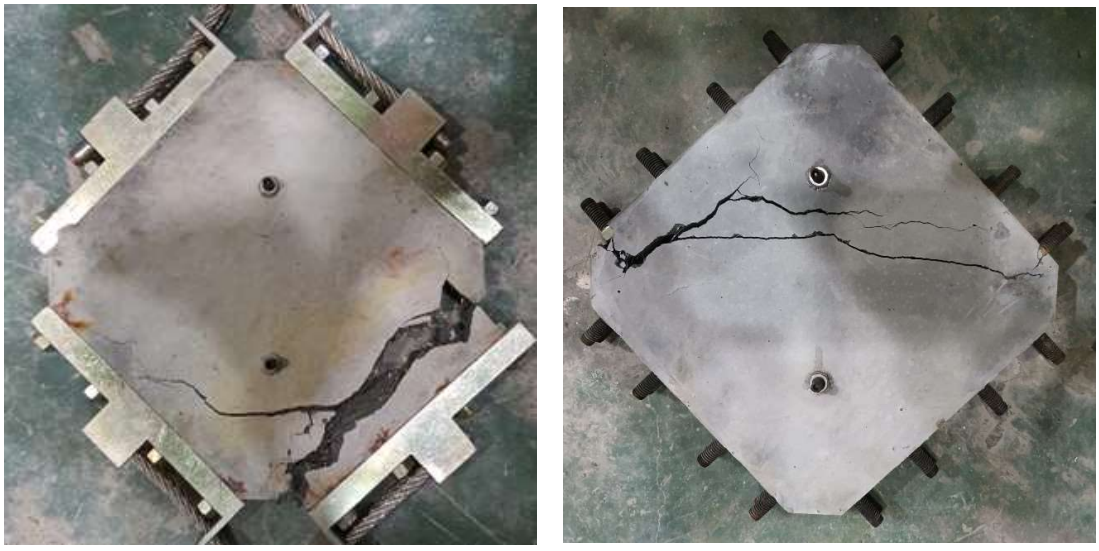


(b) 섬유혼입률 1.5%

[그림 4.10] 순수 전단시험 결과 응력 변형률 관계 그래프

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(a) 섬유혼입률 1%



(b) 섬유혼입률 1.5%

[그림 4.11] 순수 전단시험 파괴 양상

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5. 결 론

본 연구에서는 부착력과 분산성을 동시에 만족시키기 위해 강섬유 19.5㎜ 100 형상비와 16.3㎜ 80 형상비를 2:1로 배합하여 강섬유 혼입률(1%, 1.25%, 1.5%, 1.75%)에 따라 W/B=0.18로 지르코늄 미분말, 팽창재와 고성능 감수제 등의 혼화제를 첨가하여 100MPa 압축강도 성능을 만족하는 초고성능 시멘트 복합체의 적정배합을 제시하고, 슬럼프 플로우 및 인장성능 및 전단성능을 파악하였으며, 수행한 결과는 다음과 같다.

첫째, 강섬유 혼입률에 상관없이 슬럼프 플로우 700㎜이상의 유동성으로 시공성을 확보하였고 강섬유 2:1 적정 배합으로 섬유의 뭉침 현상 또한 낮게 나타났다.

둘째, 압축강도 실험결과 강섬유 혼입률에 상관없이 높은 압축강도 110MPa을 만족하였다.

셋째, 직접 인장강도 실험 결과 섬유혼입률이 높을수록 인장성능이 높게 나타났다. 단, 섬유혼입률이 증가할수록 1,000L기준 0.25%당 약 20kg의 강섬유 재료비가 추가 소요됨을 감안하여 경제성을 검토하여 적정한 섬유혼입률을 결정할 필요가 있다. 섬유혼입률 1%인 경우 평균인장강도 8.48MPa, 평균인장변형률 1.143%의 높은 인장성능이 확보되었으며, 동일한 혼입률 1%인 번드렉스 강섬유와 비정질 강섬유를 혼입한 시멘트복합체와 비교시 약 2배이상의 높은 인장성능을 확인하였다. 또한, 동일한 혼입률 1%인 PVA섬유를 혼입한 시멘트복합체와 비교시 인장강도는 직선형 강섬유 혼입한 UHPCC가 약 2배이상 우수하나, 인장변형률은 PVA섬유를 혼입한 시멘트복합체가 약 4배이상 우수한 것으로 확인되었다. 단, 본 비교는 전체 재료배합의 비교이고, 섬유자체만의 비교자료가 아니다. 또한, 섬유와 매트릭스의 부착메커니즘에서 인장방향과 섬유배열이 평행일 때 인장보강효과가 가장 좋다고 보고된 바 있어 인장실험체의 절단면을 확인한 결과 대부분의 강섬유가 인장응력과 평행을 이룬 것으로 보아 강섬유 형상비에 따른 2:1배합이 효과적인 것으로 나타났다.

넷째, 순수 전단강도 실험 결과 섬유 혼입률 1%일 경우 평균순수전단강도 3.57MPa,

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

평균전단변형률 0.268%로서, 섬유 혼입률 1.5%일 경우보다 순수전단강도가 약 1.3배 낮게 측정되었으나 전단변형률은 우수한 결과가 나왔다.

본 연구에서는 초고성능 시멘트 복합체의 직선형 강섬유 혼입률에 따른 역학성능을 확인하여 충분한 기초자료를 확보한 것으로 사료되며, 앞으로 더욱 정밀한 테스트와 현장적용실험을 통한 연구개발을 필요로 한다. 또한 국내 UHPC기술이 해외에 진출하여 해외교량 사업 등 토대를 구축하고 있고, 건축에서는 아직까지는 시공성 문제로 습식공법 적용에는 한계가 있으나, 프리캐스트 비정형 구조부재나 최근 초고층빌딩이나 도심지 밀집화에 따른 TOP DOWN공법의 수요가 늘어남에 따라 현장콘크리트말뚝인 PRD공법의 지하층 기둥에 사용하는 CFT(Concrete Filled Steel Tube)공법 의 내부 채움콘크리트에 UHPCC를 사용하면 지하층 본 기둥 단면축소 뿐만 아니라 일반 고강도콘크리트의 단점인 폭열문제도 해결되며, 강섬유 노출에 대한 부식우려도 없을 것으로 사료된다. 이러한 강섬유를 보강한 초고성능 시멘트 복합체의 축적된 기술을 바탕으로 UHPCC 적용시장을 개척해 나갈수 있으며, 더 나아가 국가 성장동력으로 발전시킬수 있기를 기대해 본다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6. 국문초록

최근 국내외 과학기술의 발전으로 지상높이 1km에 육박한 초고층빌딩으로 인간의 무한한 가능성을 시험하고 있고, 고객의 다양한 요구조건을 만족시키기 위해 뛰어난 성형성을 가지는 콘크리트로 구조물의 장지간화, 비정형화, 대형화, 다양한 디자인을 만족시킬 수 있는 요구성능이 높아지고 있다. 특히 콘크리트는 다양한 요구성능을 만족시키기 위해서는 단점인 취성파괴, 폭열현상, 수축문제를 해결하기 위한 연구가 더욱 필요하다.

본 연구에서는 직선형 강섬유 혼입률에 따른 100MPa 압축강도를 갖는 초고성능 시멘트 복합체(UHPCC:Ultra High-Performance Cementitious Composites)의 적정한 배합설계를 제시하고 목표한 슬럼프 플로우로 시공성을 확보하고 압축강도, 인장강도 및 인장변형률, 전단강도 및 전단변형률의 실험에 의한 역학성능을 검증 함으로써, 보통 콘크리트의 한계를 뛰어넘는 UHPCC를 제안하는데 목적이 있다. 이를 위해 강섬유 19.5mm와 16.3mm를 2:1로 배합하여 혼입률(1%, 1.25%, 1.5%, 1.75%)에 따라 W/B=0.18로 지르코늄 미분말, 팽창재와 고성능감수제 등의 혼화제를 첨가하여 100MPa 압축강도 성능을 만족하는 초고성능 시멘트 복합체의 적정배합을 제시하고 슬럼프 플로우 및 인장성능 및 전단성능을 파악하였다.

다음과 같은 결과를 제시한다. 첫째, 강섬유 혼입률에 상관이 슬럼프 플로우 700mm 이상의 유동성으로 시공성을 확보하였고 강섬유 2:1 적정배합으로 섬유의 뭉침 현상 또한 낮게 나타났다. 둘째, 압축강도 실험결과 강섬유 혼입률에 상관없이 높은 압축강도 110MPa을 만족하였다. 셋째, 직접 인장강도 실험 결과 섬유혼입률이 높을수록 인장성능이 높게 나타났고, 섬유혼입률 1%인 경우 평균 인장강도와 평균 인장변형률은 동일한 혼입률 1%인 번드렉스 강섬유와 비정질 강섬유를 혼입한 시멘트 복합체와 비교시 약 2배이상의 높은 인장성능을 확인하였다. 또한, 동일한 혼입률 1%인 PVA섬유를 혼입한 시멘트 복합체와 비교시 인장강도는 직선형 강섬유 혼입한 UHPCC가 약 2배이상 우수하나, 인장변형률은 PVA섬유를 혼입한 시멘트 복합체가 약 4배이상 우수한 것으로 확인되었다. 단, 본 비교는 전체 재료배합의 비교이고, 섬유자체만의 비교자료가 아니다. 또한 인장실험체의 절단면을 확인한 결과 대부분의 강섬유가 인장응력과 평행을 이룬 것으로 보아 강섬유 형상비 2:1배합이 효과적인 것으로 나타났다. 넷째. 순수 전

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

단강도 실험 결과 섬유 혼입률 1%일 경우, 1.5% 경우보다 순수전단강도가 약 1.3배 낮게 측정되었으나 전단변형률은 우수한 결과가 나왔다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참 고 문 헌

1. 국토교통부, “콘크리트공사 일반사항”, KCS 14 20 01, 2016
2. 국토교통부, “일반콘크리트”, KCS 14 20 10, 2016
3. 국토교통부, “섬유보강 콘크리트”, KCS 14 20 22, 2016
4. 국토교통부, “고유동 콘크리트”, KCS 14 20 32, 2016
5. 국토교통부, “고강도 콘크리트”, KCS 14 20 33, 2016
6. 한천구, ” 레미콘 품질관리 실무”, 기문당 2014
7. 하기주, "초기재령 강섬유보강 철근 콘크리트 보의 휨성능에 대한 실험적 연구." 대한건축학회 학술발표대회 논문집-구조계 21.1 (2001): 75-78.
8. 조창근, 김윤용 등, “압출성형 ECC 패널의 섬유분포 특성과 휨 성능”, 한국콘크리트학회논문집 Vol.21(5), pp.573-580, 2009
9. 김윤용 외, “고인성 섬유 복합재료 ECC의 특성과 적용”, 한국콘크리트학회논문집, Vol.16(5), pp.64-72, 2004
10. Cho, C.G., et al., Groove and embedding techniques using CFRP trapezoidal bars for strengthening of concrete structures, Engineering Structures, Vol.30, pp. 1067-1078, 2008
11. 한유정 등, “섬유 제조방법 및 혼입률 변화에 따른 강섬유보강콘크리트의 섬유가교현상 분석”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, pp.917-918, 2016
12. 김우석, “강섬유보강 콘크리트보의 거동에 관한 연구”, 금오공과대학교 박사학위논문, 2003
13. 안유리, “시멘트 복합물에의 비정질 강섬유의 성능 평가”, 고려대학교 석사학위논문, 2013
14. 한국건설기술연구원, “SUPER Concrete의 제조시방 및 품질관리 지침(안)-SC180 콘크리트-”, 2014
15. 한국콘크리트학회, “초고성능 콘크리트 K-UHPC 구조설계지침“, KCI-M-12-003, 한국, 2012
16. 한국표준협회, “콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법”, KS F 2403, 2014
17. 한국표준협회, “굳지 않는 콘크리트의 슬럼프 플로 시험방법”, KS F 2594,2015

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

18. 한국표준협회, “콘크리트 압축 강도 시험방법”, KS F 2405, 2017
19. 한국표준협회, “압축시험기”, KS B 5533, 2018
20. 한국표준협회, “포틀랜드 시멘트”, KS L 5201, 2016
21. 최중구, “강섬유 혼입 초고강도 콘크리트의 역학적 성질에 관한 연구”, 고려대학교 대학원, 2016
22. 건설교통부, “강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트 보의 거동 및 보수에 관한 연구”, 1998
23. 한성진, “고인성 섬유복합체 활용 내진 개선 콘크리트 기둥공법”, 석사논문, 조선대학교, 2013
24. 문형주, “합성섬유 보강된 고성능 시멘트복합체를 사용한 구조부재의 성능평가”, 박사논문, 조선대학교, 2019
25. 박창환, “비정질 마이크로 강섬유 복합체 적용 콘크리트 보의 거동 및 설계”, 석사논문, 조선대학교, 2013
26. 이승중, “고연성시멘트복합체를 활용한 철근콘크리트 복합슬래브의 구조 및 시공특성”, 박사논문, 조선대학교, 2014
27. 윤현도, 한병찬, 김윤용, 조창근, 권성준, “철근콘크리트구조”, 동화기술, 2015
28. 김병석, 고경택, 박성용, 정길제, 최정욱, 김지상, 김영진, 곽종원, 홍성걸, “압축강도 80~180MPa급 맞춤형 SUPER Concrete 재료 및 구조물 기술 개발 (SUPER Structure 2020)”, 대한토목학회지, Vol.62(11), pp.10-24(15), 2014
29. 김태정, “2018 울릉도 HEALING STAY KOSMOS 건립공사,“UHPC 시공사례를 중심으로””, 대한건축학회, Vol.62(10), pp.65-69(5), 2018
30. 임현진, 조창근, “순수전단 시험장치”, 대한민국특허청, 2017
31. 최정욱, 조창빈, 김지상, “섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침”, 한국콘크리트학회지, Vol.28(1), pp.26-30(5), 2016
32. 조창근, 김윤용. "섬유보강 고인성 시멘트 복합체 패널의 2축 전단 비선형 모델." 한국전산구조공학회논문집 22.6 (2009): 597-605.
33. 조창근 등, "고인성 섬유보강 무시멘트 복합체의 기초 배합 및 역학 실험." 콘크리트학회 논문집 24.2, pp. 121-127, 2012
34. 배백일, 최현기, 최창식, “전단철근으로 보강되지 않은 강섬유보강 초고강도 콘

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

크리트의 전단강도에 대한 실험적 연구”, 대한건축학회, Vol.33(3),pp.3-12(10), 2017

35. 김호연 고성능 섬유보강 시멘트복합재 활용 곡선 및 비정형 구조부재의 성능평가

36. Kusumawardaningsih, Y., Fehling E., Ismail, M. and Aboubakr, A.A.M., “Tensile Strength Behavior of UHPC and UHPFRC”, Procedia Engineering, Vol.125, pp.1081-1086(6), 2015

37. Kostova, K., Ibell, T., Darby, A. and Evernden, M., “Using Fabric to Shape Appropriate Concrete Structures”, SCMT4, 2016