



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](#)

2024년 2월
석사학위 논문

120MPa 고성능 강섬유 시멘트
복합체의 압축, 인장, 휨
및 전단 특성

조선대학교 산업기술창업대학원
건축공학과
양진영

120MPa 고성능 강섬유 시멘트
복합체의 압축, 인장, 휨
및 전단 특성

Compressive, Tensile, Bending and Shear
Characteristics of 120MPa High Performance Steel
Fiber Cement Composites

2024년 2월 23일

조선대학교 산업기술창업대학원
건축공학과
양진영

120MPa 고성능 강섬유 시멘트
복합체의 압축, 인장, 휨
및 전단 특성

지도교수 조 창 근

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2023년 10월

조선대학교 산업기술창업대학원

건 축 공 학 과

양 진 영

양진영의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김형기 (인)

위원 조선대학교 교수 최재혁 (인)

위원 조선대학교 교수 조창근 (인)

2023년 11월

조선대학교 산업기술창업대학원

<목 차>

제1장 서론	1
제1절 연구 배경 및 목적	1
제2절 연구 동향	2
제3절 연구내용 및 방법	6
제2장 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체	8
제1절 섬유 시멘트 복합체	8
1. 개요	8
2. 섬유 종류	9
제2절 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체	10
1. 개요	10
2. 강섬유 종류 및 특성	10
3. 역학적 특성	13
제3장 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체 배합 및 역 학실험	16
제1절 배합	16
1. 사용재료	16
2. 배합	20
제2절 역학실험 개요 및 방법	23
1. 개요	23
2. 슬럼프 플로 시험	23
3. 압축 실험	24
4. 인장 실험	24

5. 횡인장 실험	25
6. 전단 실험	27
제4장 역학실험 결과 및 분석	28
제1절 개요	28
제2절 역학실험 결과 및 분석	28
1. 슬럼프 플로 시험	28
2. 압축 실험	29
3. 인장 실험	38
4. 횡인장 실험	49
5. 전단 실험	61
제3절 연구적 고찰	70
제5장 결론	71
참고문헌	73

<표 목차>

[표 1.1] 연구 내용 및 방법	7
[표 2.1] 각종 섬유의 물리적 특성	10
[표 3.1] 1종 포틀랜드 시멘트 특성	16
[표 3.2] 고로슬래그 미분말 특성	17
[표 3.3] 지르코늄 미분말 특성	17
[표 3.4] 충전재 특성	18
[표 3.5] 팽창재 특성	18
[표 3.6] 강섬유 특성	19
[표 3.7] 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 배합표	20
[표 4.1] 강섬유 혼입률에 따른 슬럼프 플로 시험 결과	28
[표 4.2] 강섬유 혼입률 0.0% 압축 실험 결과	29
[표 4.3] 강섬유 혼입률 0.5% 압축 실험 결과	30
[표 4.4] 강섬유 혼입률 1.0% 압축 실험 결과	30
[표 4.5] 강섬유 혼입률 1.5% 압축 실험 결과	31
[표 4.6] 강섬유 혼입률 2.0% 압축 실험 결과	31
[표 4.7] 강섬유 혼입률별 재령 14일, 28일 평균 압축강도	32
[표 4.8] 강섬유 혼입률 0.0% 인장 실험 결과	39
[표 4.9] 강섬유 혼입률 0.5% 인장 실험 결과	39
[표 4.10] 강섬유 혼입률 1.0% 인장 실험 결과	40
[표 4.11] 강섬유 혼입률 1.5% 인장 실험 결과	40
[표 4.12] 강섬유 혼입률 2.0% 인장 실험 결과	41
[표 4.13] 강섬유 혼입률별 재령 14일, 28일 평균 인장강도 및 변형률	41
[표 4.14] 강섬유 혼입률 0.0% 휨인장 실험 결과	51
[표 4.15] 강섬유 혼입률 0.5% 휨인장 실험 결과	51
[표 4.16] 강섬유 혼입률 1.0% 휨인장 실험 결과	52
[표 4.17] 강섬유 혼입률 1.5% 휨인장 실험 결과	52
[표 4.18] 강섬유 혼입률 2.0% 휨인장 실험 결과	53
[표 4.19] 강섬유 혼입률별 재령 14일, 28일 평균 휨인장강도 및 변형률	53
[표 4.20] 강섬유 혼입률 0.0% 전단 실험 결과	62
[표 4.21] 강섬유 혼입률 0.5% 전단 실험 결과	62
[표 4.22] 강섬유 혼입률 1.0% 전단 실험 결과	62
[표 4.23] 강섬유 혼입률 1.5% 전단 실험 결과	63

[표 4.24] 강섬유 혼입률 2.0% 전단 실험 결과	63
[표 4.25] 강섬유 혼입률별 재령 14일, 28일 평균 전단강도	63

<그림 목차>

[그림 2.1] 강섬유 형상	12
[그림 2.2] 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 파괴 매커니즘	15
[그림 2.3] 강섬유 혼입률에 따른 인장응력-변형을 곡선	15
[그림 2.4] 휨응력에 대한 하중-처짐 곡선	15
[그림 3.1] 강섬유 형상 및 길이	19
[그림 3.2] 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 제조 및 양생	22
[그림 3.3] 슬럼프 플로 시험	23
[그림 3.4] 압축 실험 형상	24
[그림 3.5] 인장 실험 형상	25
[그림 3.6] 휨인장 실험 형상	26
[그림 3.7] 전단 실험 형상	27
[그림 4.1] 강섬유 혼입률 0.0% 압축 실험 결과	32
[그림 4.2] 강섬유 혼입률 0.5% 압축 실험 결과	33
[그림 4.3] 강섬유 혼입률 1.0% 압축 실험 결과	33
[그림 4.4] 강섬유 혼입률 1.5% 압축 실험 결과	34
[그림 4.5] 강섬유 혼입률 2.0% 압축 실험 결과	34
[그림 4.6] 재령 14일 강섬유 혼입률별 압축 실험 결과	35
[그림 4.7] 재령 28일 강섬유 혼입률별 압축 실험 결과	35
[그림 4.8] 강섬유 혼입률 0.0% 압축 파괴 형상	36
[그림 4.9] 강섬유 혼입률 0.5% 압축 파괴 형상	36
[그림 4.10] 강섬유 혼입률 1.0% 압축 파괴 형상	37
[그림 4.11] 강섬유 혼입률 1.5% 압축 파괴 형상	37
[그림 4.12] 강섬유 혼입률 2.0% 압축 파괴 형상	38
[그림 4.13] 강섬유 혼입률 0.0% 재령 14일 인장 실험 결과	42
[그림 4.14] 강섬유 혼입률 0.0% 재령 28일 인장 실험 결과	42
[그림 4.15] 강섬유 혼입률 0.5% 재령 14일 인장 실험 결과	43
[그림 4.16] 강섬유 혼입률 0.5% 재령 28일 인장 실험 결과	43
[그림 4.17] 강섬유 혼입률 1.0% 재령 14일 인장 실험 결과	44
[그림 4.18] 강섬유 혼입률 1.0% 재령 28일 인장 실험 결과	44
[그림 4.19] 강섬유 혼입률 1.5% 재령 14일 인장 실험 결과	45
[그림 4.20] 강섬유 혼입률 1.5% 재령 28일 인장 실험 결과	45
[그림 4.21] 강섬유 혼입률 2.0% 재령 14일 인장 실험 결과	46

[그림 4.22]	강섬유 혼입률 2.0% 재령 28일 인장 실험 결과	46
[그림 4.23]	강섬유 혼입률 0.0% 인장 파괴 형상	47
[그림 4.24]	강섬유 혼입률 0.5% 인장 파괴 형상	47
[그림 4.25]	강섬유 혼입률 1.0% 인장 파괴 형상	48
[그림 4.26]	강섬유 혼입률 1.5% 인장 파괴 형상	48
[그림 4.27]	강섬유 혼입률 2.0% 인장 파괴 형상	49
[그림 4.28]	강섬유 혼입률 0.0% 재령 14일 휨인장 실험 결과	54
[그림 4.29]	강섬유 혼입률 0.0% 재령 28일 휨인장 실험 결과	54
[그림 4.30]	강섬유 혼입률 0.5% 재령 14일 휨인장 실험 결과	55
[그림 4.31]	강섬유 혼입률 0.5% 재령 28일 휨인장 실험 결과	55
[그림 4.32]	강섬유 혼입률 1.0% 재령 14일 휨인장 실험 결과	56
[그림 4.33]	강섬유 혼입률 1.0% 재령 28일 휨인장 실험 결과	56
[그림 4.34]	강섬유 혼입률 1.5% 재령 14일 휨인장 실험 결과	57
[그림 4.35]	강섬유 혼입률 1.5% 재령 28일 휨인장 실험 결과	57
[그림 4.36]	강섬유 혼입률 2.0% 재령 14일 휨인장 실험 결과	58
[그림 4.37]	강섬유 혼입률 2.0% 재령 28일 휨인장 실험 결과	58
[그림 4.38]	강섬유 혼입률 0.0% 휨인장 파괴 형상	59
[그림 4.39]	강섬유 혼입률 0.5% 휨인장 파괴 형상	59
[그림 4.40]	강섬유 혼입률 1.0% 휨인장 파괴 형상	60
[그림 4.41]	강섬유 혼입률 1.5% 휨인장 파괴 형상	60
[그림 4.42]	강섬유 혼입률 2.0% 휨인장 파괴 형상	61
[그림 4.43]	강섬유 혼입률 0.0% 전단 실험 결과	64
[그림 4.44]	강섬유 혼입률 0.5% 전단 실험 결과	64
[그림 4.45]	강섬유 혼입률 1.0% 전단 실험 결과	65
[그림 4.46]	강섬유 혼입률 1.5% 전단 실험 결과	65
[그림 4.47]	강섬유 혼입률 2.0% 전단 실험 결과	66
[그림 4.48]	재령 14일 강섬유 혼입률별 전단 실험 결과	66
[그림 4.49]	재령 28일 강섬유 혼입률별 전단 실험 결과	67
[그림 4.50]	강섬유 혼입률 0.0% 전단 파괴 형상	67
[그림 4.51]	강섬유 혼입률 0.5% 전단 파괴 형상	68
[그림 4.52]	강섬유 혼입률 1.0% 전단 파괴 형상	68
[그림 4.53]	강섬유 혼입률 1.5% 전단 파괴 형상	69
[그림 4.54]	강섬유 혼입률 2.0% 전단 파괴 형상	69

ABSTRACT

Compressive, Tensile, Bending and Shear Characteristics of 120MPa High Performance Steel Fiber Cement Composites

Yang Jin Young

Advisor : Prof. Cho Chang-Geun, Ph.D.

Department of Architectural Engineering,

Graduate School of Chosun University

In this study, in order to solve problems such as brittle behavior of general concrete and weak properties on the impact of the external environment, a high-performance fiber cement composite mixing design was proposed by utilizing fiber cement composite according to the mixing ratio of steel fibers. To verify the high performance, high durability, and high fluidity of the proposed mixing design, mechanical experiments of fiber cement composite according to steel fiber mixing ratio were performed and basic data were secured.

The fiber cement composite is a cement composite mixing fiber. If fibers are mixed with general concrete mixing, sufficient performance cannot be secured due to the lack of viscosity of concrete. In order to secure sufficient performance, a combination of high-strength concrete is required. In addition, performance is affected by the type, mixing rate, arrangement, etc. of fibers. Due to the material characteristics of irregular concrete, the performance is affected by the mixing when pouring concrete and the capacity of the mixed mixture. Therefore, mechanical data and basic studies are needed to utilize a high-performance fiber cement composite mixed with fibers.

In this study, a combination of fiber cement composites mixed with steel fibers was proposed using a high-strength concrete combination. The mixing ratio of steel fibers were planned as 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, and 2.0%. It has high compression and tensile strength, and has high toughness and high ductility properties. In addition, it has a dense structure to have high resistance to the effects of external environments such as carbonation, salt dissolution, and freeze melting. At the same time, fluidity was high, so mixing was minimized and excellent workability was achieved.

In order to verify the performance of the mix proposed in this study, mechanical experiments such as slump flow, compression, tension, bending tension, and shear according to the steel fiber mixing ratio were performed. Based on the results of the mechanical experiment, it was confirmed that the mechanical performance of the fiber cement composite was improved when steel fibers were mixed. In addition, it behaves in the form of ductility failure, and due to its high fluidity, the performance of high performance, high durability, and high fluidity was confirmed. Through this, it is believed that sufficient basic data have been secured. It is believed that research and development through experiments are necessary by applying this to structural members.

제1장 서론

제1절 연구 배경 및 목적

건축에 있어서 재료의 선정은 적합한 구조물의 형태를 구체화하기 위한 필수적 요소이다. 필수적 요소인 구조물의 재료로써 콘크리트가 주로 사용되고 있다. 콘크리트는 압축강도가 높고 내구성이 우수하며, 성형성이 높아 구조물의 자유로운 형태의 구현이 가능하다. 하지만, 주로 사용되는 일반 콘크리트는 높은 압축강도에 비해 인장강도와 연성이 현저히 낮은 특성으로 인해 여러 문제가 발생한다. 일반 콘크리트는 구조부재의 응력집중이 발생하여 국부적인 균열로 인한 취성파괴가 발생한다. 취성파괴는 파괴에 도달할 때까지 거의 소성변형이 일어나지 않고 파괴 시 균열이 급격하게 확대되어 위험성이 크다. 또한, 일반 콘크리트는 치밀하지 않은 조직 구성으로 인한 탄산화, 염해, 동결융해 등의 외부환경에 취약하다. 이와 같은 특성으로 인해 콘크리트의 균열을 초래하여 점진적인 콘크리트 박리와 파괴 현상이 발생한다. 이에 따라 구조부재의 구조적 성능이 감소하며, 외관적 문제가 발생한다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁹⁾⁻⁽²⁴⁾

일반 콘크리트의 문제점을 해결하기 위한 방법으로 다양한 섬유를 혼입하여 성능을 향상시키는 섬유 시멘트 복합체에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 섬유 시멘트 복합체는 높은 인장강도와 탄성률을 가진 섬유를 이용하기 때문에 균열 발생 시 균열면에서 자체 응력으로 작용하며, 섬유의 가교작용으로 다중미세 균열을 발생시키면서 균열폭의 확장을 지연시킨다. 하지만, 일반 콘크리트의 배합에 섬유를 혼입하는 섬유 시멘트 복합체는 콘크리트의 점성 부족으로 섬유의 혼입률이 낮고 이로 인해 충분한 인성을 확보하지 못한다. 또한, 섬유의 종류, 섬유의 혼입률, 혼입된 섬유의 배열 등에 따라 콘크리트의 성능에 영향이 있다. 이에 따라 충분한 인성을 확보하기 위한 고강도 콘크리트의 배합이 요구되며, 적절한 섬유의 종류와 섬유의 혼입률이 요구된다.⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁸⁾⁽²⁰⁾⁽²⁴⁾

본 연구에서는 일반 콘크리트의 문제점들을 해결하기 위해 충분한 역학적 성능 확보의 일환으로 강섬유를 이용하였다. 강섬유의 혼입률에 따른 섬유 시멘트 복합체의 활용으로써 섬유 시멘트 복합체의 배합 설계를 제시하였다. 또한, 강섬유 혼입률에 따른 슬럼프 플로, 압축, 인장, 휨인장, 전단 등의 역학 실험을 통하여 고성능, 고내구성, 고유동성의 성능을 검증하고 기초적 자료의 확보 및 추후 방향성을 제안하고자 한다.

제2절 연구 동향

현대의 구조물의 재료로써 필수적 요소인 콘크리트는 압축강도가 높고 내구성, 성형성이 우수하다. 하지만, 인장강도와 연성이 현저히 낮음으로 인해 취성적 파괴가 일어나거나 외부환경에 취약하다는 등의 여러 문제가 발생하였다. 이를 해결하기 위하여 콘크리트의 인장, 연성 및 인성을 높여줄 수 있는 다양한 섬유를 혼입하여 구조적 성능의 향상을 위한 연구가 많이 진행되었으며, 대표적인 연구사례 및 적용사례를 조사하였다.⁽³⁾⁻⁽²⁴⁾

하기주 외 3인(1999)⁽¹⁵⁾은 강섬유(Steel Fiber)를 보강한 초기재령 철근콘크리트 보의 구조성능 평가를 수행하여 철근콘크리트 구조물의 장스팬화, 고층화에 따른 콘크리트의 구조성능을 개선하고자 하였다. 건조수축과 크리프 등의 장기변형을 개선한 사용성, 안정성 및 신뢰성이 우수한 고성능, 고품질 콘크리트를 개발하고자 강섬유 혼입율 변화 및 조합에 따른 실험체를 제작하고 실험을 실시하였다. 실험 결과로 강섬유 혼입율이 0.75% 이상일 경우 내력 및 연성능력을 충분히 확보하는 것으로 판단하였다. 또한, 강섬유의 혼입율이 증가할수록 횡-전단파괴 및 횡파괴 형태의 연성적인 파괴형태를 나타내는 것을 확인하여 강섬유 보강 철근콘크리트 부재의 설계 및 적용을 위한 기초적 자료를 제시하였다.

조창근 (2004)⁽¹⁶⁾은 횡과 전단을 받는 섬유보강폴리머(fiber reinforced polymer, FRP)로 구속된 콘크리트 복합구조 부재 시스템의 비선형적인 횡 및 전단거동 예측을 위한 부재 해석 알고리즘을 제시하였다. 콘크리트의 구속현상을 비선형적으로 반영한 이력-의존성 구속현상에 관한 모델링은 섬유보강폴리머 층의 배열 방향, 층수, 두께, 각 개별층의 재료특성에 따라 제시하였다. 이와 같은 횡과 전단을 동시에 받는 FRP 콘크리트 복합 구조부재의 비선형 전단거동에 대한 예측과 전단파괴에 대한 추정을 위해 단면 총상화 개념을 적용하였다. 실험 결과와 예측 모델을 비교한 결과, 섬유보강폴리머 구속 콘크리트의 전하중 단계에 대한 거동의 예측이 잘 이루어졌다고 판단하였다.

한성진 (2013)⁽¹⁷⁾은 횡하중으로 인해 기둥의 하단에 집중되는 휨모멘트의 단부 국부 휨파괴를 극복하기 위한 방법으로 PVA섬유를 혼입하여 프리캐스트 고

인성 섬유 복합체를 적용한 내진개선 콘크리트 기동 공법의 개발을 하고자 하였다. 프리캐스트 박스 형태를 미리 제작하여 기동의 단부 소성한지 부분에 적용하고 상부에 일반 콘크리트를 후타설하여 이음 시공함으로써 일체화시켰다. 그 결과 소성한지 부근의 휨 및 전단균열억제, 국부파괴, 주철근의 좌굴 등을 억제함으로써 기동의 휨 거동능력향상 및 축하중 안전성을 확보하였다. 또한, 일반 철근콘크리트 기동과 비교실험 결과 전단철근이 없이도 전단성능을 확인하였고 휨성능이 증가한 것을 확인하였다.

박창환 (2013)⁽¹⁸⁾은 일반 콘크리트의 취성을 개선하기 위하여 비정질 마이크로 강섬유를 혼입한 섬유 복합체의 개발하고자 하였다. 15mm, 30mm의 비정질 마이크로 강섬유를 체적비 0.5%~1.5%로 혼입한 비정질 마이크로 강섬유 복합체의 배합을 제시하기 위하여 역학 실험을 통한 구조적 성능을 확인하였다. 또한, 역학 실험의 결과를 토대로 비정질 마이크로 강섬유 복합체를 적용한 콘크리트 보의 실험을 통하여 구조적 성능을 확인하였다. 그 결과로 비정질 마이크로 강섬유 복합체를 구조체에 적용 시 우수한 성능을 발휘함을 파악하였고, 추후 건축 구조재료로써 충분한 연구 가치가 있다고 판단하였다.

이승중 (2014)⁽¹⁹⁾은 건설 환경 변화와 기존 철근콘크리트 슬래브공법의 문제점을 개선하기 위해 PVA섬유를 혼입한 섬유보강 시멘트 복합체를 활용하여 거푸집의 유니트화, 무지주, 무거푸집 시공이 가능하고 균열과 누수문제 해결에 효과적인 하프프리캐스트 SHCC 패널을 개발하고자 하였다. 기존 철근콘크리트 휨거동 특성과 비교 분석하여 SHCC로 성능이 개선된 슬래브 휨거동을 예측하기 위해 해석모델 및 설계강도 산정방법을 제시하였다. 복합슬래브 인장부에 위치하는 하프프리캐스트 SHCC 패널의 재하실험 시 휨내력에 안전성을 확보하였고 기존 철근콘크리트 슬래브보다 휨거동 및 균열제어효과가 높게 나타난 것을 확인하였다. 또한, 이를 현장에 적용하여 무지주, 무거푸집공법으로 시공성, 안전성 뿐만 아니라 공기단축효과를 검증하였다.

문형주 (2019)⁽²⁰⁾는 콘크리트의 재료적 특성을 개선하기 위하여 합성섬유로 PVA섬유와 Vectran섬유를 혼입한 고연성시멘트복합체(Strain Hardening Cementitious Composites; SHCC)를 활용하여 고성능 섬유 시멘트 복합체의 배합

기술에 대한 확보와 연성, 균열제어능력, 내구성 등이 우수한 고성능 구조부재를 개발하고자 하였다. 고성능 섬유 시멘트 복합체의 배합 및 역학실험을 통해 우수한 성능을 확인 및 평가하였다. 각 변수에 따른 복합바닥구조 실험체를 제작하여 구조성능 평가 결과, 다중미세균열 거동에 의한 초기균열 제어, 국부균열 제어, 처짐개선, 처짐 제어효과를 확보하였으며, 휨내력이 크게 개선되었다. 또한, 고강도 콘크리트를 대체하기 위한 연구로써 섬유 혼입률 1.0% 적용 시 고강도 콘크리트 대비 휨내력이 향상되었고, 전단평가에서도 전단철근량을 절감시켰음에도 내력이 향상되어 실용화 방안을 위한 충분한 기초자료를 확보한 것으로 판단하였다.

김호연 (2019)⁽²¹⁾은 합성섬유로써 강섬유를 적용하여 고성능 섬유보강 시멘트복합재를 활용한 곡선 및 비정형 구조부재의 실험적, 해석적 성능검증을 통해 활용 가능성을 검토하였고 이에 대한 기초자료를 확보하고자 하였다. 높은 압축강도 및 인장강도와 고인성 특성을 가진 고성능 섬유보강 시멘트복합재를 적용함으로써 기존의 철근콘크리트 부재보다 중량을 감소시키면서도 구조적 성능이 향상된 것을 확인하였다. 이를 통해 곡선 및 비정형 구조부재의 구조적 성능에 만족할 뿐만 아니라 노출부재로 적용함으로써 곡선미 및 부재 설계가 가능하며, 구조부재로 활용가치가 높을 것으로 판단하였다.

이승윤 (2020)⁽²²⁾은 직선형 강섬유 혼입률에 따른 100MPa의 압축강도를 갖는 초고성능 시멘트 복합체의 적절한 배합설계를 제시하였다. 이를 통해 목표한 슬럼프 플로우 시공성을 확보하고 압축강도, 인장강도 및 인장 변형률, 전단강도 및 전단변형률의 실험에 의한 역학 성능을 검증하고자 하였다. 이를 위하여 강섬유 19.5mm와 16.3mm를 2:1로 배합하여 혼입률을 1%, 1.25%, 1.5%, 1.75%로 나누어 변수로 적용하였다. 역학 실험을 수행한 결과, 유동성이 높고 인장, 전단 성능 및 전단 변형률이 우수한 것을 확인하였다.

임현진 (2021)⁽²³⁾은 시멘트의 제조과정에서 발생하는 온실가스의 배출량을 저감하기 위하여 알칼리 자극제로 활성화시킨 고로슬래그를 결합재로 사용하였다. 또한, 기존의 콘크리트의 취성적인 문제점을 개선하기 위하여 알칼리활성 슬래그에 합성섬유인 PVA섬유를 혼입하여 친환경적이며, 고연성과 같은 역학적

성능을 가진 알칼리활성 슬래그 섬유복합체(Alkali Activate Slag Fiber Composites, AASFC)를 개발하고자 하였다. 개발을 위해 섬유혼입률(1.00~2.00%)에 따른 재료의 유동성, 압축강도, 휨성능, 전단성능을 평가하여 최적의 배합을 제시하였다. 섬유혼입률이 증가함에 따라 다소 유동성 감소가 있었지만 역학적 성능은 선형적 향상되는 결과를 확인하였다.

최용준 (2022)⁽²⁴⁾은 기존 프리캐스트 콘크리트 보의 접합부의 성능 향상을 위하여 접합부에 우수축 몰탈, 고성능 콘크리트와 강섬유가 보강된 초고성능 콘크리트를 적용하여 구조 역학실험 및 보의 성능 평가를 실시하였다. 보는 휨 파괴형 실험체와 전단 파괴형 실험체로 나누어 진행하였다. 휨 파괴형 실험체에서는 보의 균열하중, 항복 하중, 극한 하중으로 나누어 내력을 평가하였다. 전단 파괴형 실험체에서는 보의 전단 내력을 평가하였다. 그 결과로 초고성능 콘크리트를 접합부에 적용하였을 때 기존에 사용되던 일반 우수축 몰탈에 비해 우수한 성능이 발휘됨을 확인하였다. 추후 초고성능 콘크리트를 적용하여 다양한 접합부 설계가 가능할 것으로 보았다.

상기의 연구동향 및 결과를 보았을 때 취성적인 특성을 가진 일반 콘크리트에 대한 단점을 해결하기 위하여 강섬유, 유리섬유, 탄소섬유 등의 높은 인장강도를 가진 고성능의 복합재료에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이와 같은 다양한 섬유가 혼입된 섬유 시멘트 복합체를 활용하여 역학적 실험을 통한 구조적 성능을 확인하고 이를 보, 기둥, 슬래브와 같은 구조부재에 적용하여 고연성, 고인성을 가진 구조적 성능을 검증하였다. 그 결과로 일반 콘크리트와 비교하였을 때 섬유 시멘트 복합체를 이용한 구조 부재의 구조적 성능의 향상 및 기존 일반 콘크리트의 단점을 극복할 수 있다. 하지만, 섬유의 종류와 혼입률에 대한 다양성으로 인해 변수가 많고 섬유 시멘트 복합체의 타설 시 섬유의 배열에 따른 성능의 차이와 같은 문제점들이 발생하였다. 또한, 콘크리트의 불규칙적인 재료 특성상 타설 시 다짐과 배합된 혼화제의 용량으로 인한 영향과 같은 여러 문제들이 발생하였다. 따라서, 섬유를 활용하기 위해서는 특정 섬유가 혼입되는 섬유 시멘트 복합체에 대한 역학적 데이터의 필요성이 요구되며, 이에 대한 기초적 연구가 필요할 것으로 사료된다.

제3절 연구 내용 및 방법

건축에 있어서 필수적 요소인 콘크리트의 취성적인 특성과 여러 문제점들을 개선하기 위한 초고성능 콘크리트와 섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체에 대한 연구가 활발히 진행되었다.⁽³⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁹⁾⁻⁽²⁴⁾ 기존의 연구는 다양한 섬유 시멘트 복합체를 구조부재나 프리캐스트의 접합부에 적용하여 보, 기둥, 슬래브와 같은 구조부재의 성능 향상을 검증하였다. 섬유 시멘트 복합체는 균열 발생 시 균열면에서 자체 응력으로 작용하고 섬유의 가교작용으로 균열 폭의 확장을 지연시키는 효과를 보였다. 하지만, 섬유 시멘트 복합체는 일반 콘크리트의 배합에 섬유를 혼입 시 콘크리트의 점성 부족으로 충분한 성능을 확보하지 못하기 때문에 고강도 콘크리트의 배합이 요구되며, 섬유의 종류, 혼입률, 배열 등에 따라 성능에 영향이 존재한다. 불규칙적인 콘크리트의 재료적인 특성상 타설 시 다짐과 배합된 혼화제의 용량에 따라 성능에 영향이 존재한다.⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽²⁰⁾⁽²⁴⁾ 따라서, 섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체를 활용하기 위해서는 이에 대한 역학적 데이터 및 기초적 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 고강도의 콘크리트 배합을 이용하여 조밀한 구조를 가진 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체로 높은 압축, 인장 강도를 가지며, 고인성, 고연성의 특성을 가지는 섬유 시멘트 복합체의 배합을 제시하고자 한다. 또한, 치밀한 구조를 가져 탄산화, 염해, 동결융해와 같은 외부환경의 영향에 대한 높은 저항 능력을 갖도록 하였으며, 유동성이 높아 다짐의 최소화와 우수한 작업성을 가지는 섬유 시멘트 성능을 검증하고 이에 대한 역학적 데이터 및 기초적 연구를 제시하고자 하였다.

최적의 섬유 시멘트 복합체의 배합 설계를 제시하기 위하여 섬유 시멘트에 배합되는 재료들의 특성을 분석하고 강섬유에 대한 특성을 분석하였다. 또한, 강섬유의 혼입률에 따라 섬유 시멘트 복합체의 역학적 성능의 영향과 변화를 파악하기 위하여 강섬유의 혼입률을 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%로 변수를 계획하였다. 계획된 강섬유 혼입률에 따른 섬유 시멘트 복합체의 역학 실험을 수행하였다. 역학 실험은 압축, 인장, 휨인장, 전단으로 나누어 실험을 수행하였다. 수행한 역학적 데이터를 기반으로 하여 성능을 분석하고 평가 함으로써 높은 강도, 연성 및 인성을 가진 고성능, 외부환경에 높은 저항능력을 가진 고내구성, 우수한 작업성을 가진 고유동성 등의 성능을 검증하였다.

[표 1.1] 연구 내용 및 방법

<p>1. 연구목표</p>	<ul style="list-style-type: none"> □ 섬유 시멘트 복합체의 배합 제시 □ 강섬유 혼입률에 따른 섬유 시멘트 복합체의 역학 실험 제시 □ 강섬유 혼입률에 따른 섬유 시멘트 복합체의 역학 실험을 통한 고성능, 고내구성, 고유동성 성능 검증
<p>2. 연구내용 및 방법</p>	<ul style="list-style-type: none"> □ 섬유 시멘트 복합체의 재료 분석 및 배합 설계 <ul style="list-style-type: none"> 섬유 시멘트 복합체 분석 강섬유의 재료 특성 분석 섬유 시멘트 복합체 배합 설계 □ 강섬유 혼입률에 따른 섬유 시멘트 복합체의 역학 실험 <ul style="list-style-type: none"> 강섬유 혼입률별 압축 실험 강섬유 혼입률별 인장 실험 강섬유 혼입률별 휨인장 실험 강섬유 혼입률별 전단 실험 □ 강섬유 혼입률에 따른 섬유 시멘트 복합체의 역학 성능 분석 및 평가

제2장 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체

제1절 섬유 시멘트 복합체

1. 개요

일반적인 콘크리트는 압축강도가 높고 내구성이 우수하며, 성형성이 높아 구조물의 자유로운 형태의 구현이 가능하다. 하지만, 높은 압축강도에 비해 인장강도와 연성이 현저히 낮아 취성파괴가 발생한다. 취성파괴는 파괴에 도달할 때까지 소성변형이 일어나지 않다가 파괴 시 균열이 급격하게 확대되어 급작스러운 파괴로 인해 위험성이 크다. 또한, 조직 구성이 치밀하지 않기 때문에 탄산화, 염해, 동경응해 등의 외부환경에 취약한 특성이 있다.⁽³⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁹⁾⁻⁽²⁴⁾ 이러한 이유로 인해 다양한 섬유를 혼입하여 콘크리트의 성능을 향상시키고자 섬유 시멘트 복합체가 사용되고 있다. 섬유 시멘트 복합체는 높은 인장강도와 탄성률을 가지는 보강용 섬유를 혼입하여 인장강도, 휨강도, 균열에 대한 저항성, 연성, 전단강도, 내충격성 및 내마모성 등의 개선을 목적으로 한 복합재료이다. 하중 또는 체적변화 등에 의한 균열의 제어를 목적으로 혼입된 섬유를 이용하여 균열 발생 시 균열면에서 자체 응력으로 작용하며, 섬유의 가교작용으로 다중미세균열을 발생시키면서 균열폭의 확장을 지연시킨다. 하지만, 일반적인 콘크리트의 배합은 점성이 부족하여 섬유의 혼입률이 낮아 충분한 인성을 확보하지 못한다. 또한, 섬유의 종류, 섬유의 혼입률, 혼입된 섬유의 배열 등에 따라 콘크리트의 성능에 영향이 있다. 따라서, 적합한 섬유의 종류와 섬유 시멘트 복합체의 배합이 요구되며, 섬유 시멘트 복합체의 시공과 품질의 관리를 고려해야 한다.⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽²⁰⁾⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾ 섬유 시멘트 복합체의 시공은 재료, 배합, 비비기 설비, 시공 관리 등에 대하여 충분히 고려하여 소요의 품질이 얻어지도록 실시하여야 한다. 섬유 시멘트 복합체의 품질은 소요의 강도, 인성, 내구성, 수밀성, 강재를 보호하는 성능, 작업에 적합한 워커빌리티를 가지고, 품질의 변동이 작은 것이어야 한다.

2. 섬유 종류

섬유 시멘트 복합체에 혼입되는 섬유는 섬유와 시멘트 결합재 사이의 부착성이 양호하고 인장강도가 크며, 내구성 및 외부환경에 대한 저항능력이 우수하여야 한다. 섬유는 무기계 섬유와 유기계 섬유로 나누어진다. 시멘트계 복합재료용 섬유로써 강섬유, 유리섬유, 탄소섬유 등의 무기계 섬유와 아라미드섬유, 폴리프로필렌섬유, 비닐론섬유, 나일론섬유 등의 유기계 섬유를 사용할 수 있다.⁽²⁵⁾ 각종 섬유의 물리적 특성은 [표 2.1]에 나타냈다.⁽²⁶⁾

[표 2.1] 각종 섬유의 물리적 특성

구분		직경 (10-3mm)	길이 (mm)	밀도 (10 ⁻³ kg/m ³)	탄성 계수 (MPa)	인장 강도 (MPa)	파괴 변형률 (%)
석 면	크리스탈일	0.02~30	<40	2.55	16.70	204~1,840	2~3
	청석면	0.1~20		3.37	20.00		2~3
탄 소 섬 유	PAN	7~8		1.78	37.00	3,570	≤0.5
	Pitch계	9		2.00	28.00		≤1.0
유 리 섬 유	E-glass	8~10	10~50	2.54	7.35	2,500	4.8
	Cem-Fil	12.5		2.54	8.16	2,500	3.6
강섬유		200~600	10~60	7.85	20.00	400~2,000	3.5
비닐론섬유				1.30	1.10~3.70	310~710	3~13
폴리프로필렌섬유		100~600		0.90	0.36~1.80	260~710	5~21
아라미드섬유				1.45	6.30~13.60	70~920	2.1~2.7
나일론		>4	5~50	1.14	0.41	765~918	13.5
폴리에틸렌섬유				0.95	0.01~0.22	200~2,960	10~15
폴리에스테르섬유				1.40	0.81	740~880	11~13
PAN 섬유				1.18	1.70~1.90	350~950	9~11
레이온섬유				1.20	1.02	310~510	10~20

제2절 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체

1. 개요

강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체는 짧은 강섬유의 특성을 이용하여 콘크리트 속에 분산시켜 혼입함으로써 치밀하고 균질하며, 각종 역학적 성질을 개선시키는 복합재료이다.⁽²⁷⁾ 이는 불연속적인 특성이 있으며, 인장강도, 휨강도, 균열에 대한 저항성, 연성, 전단강도, 내충격성 등의 개선을 목적으로 한다. 주로 포장, 터널라이닝, 덧씌우기, 팻칭, 수리구조물, 얇은 쉘, 방파제, 암반의 경사안정, 내화콘크리트 교량의 슬래브 그리고 프리캐스트 제품 등에 널리 이용되고 있다.⁽²⁶⁾ 강섬유 혼입 섬유 시멘트 복합체는 콘크리트 내부에 분산되어 강섬유가 선재하는 내부 균열진전을 구속하며, 응력 발생 시 다중미세균열을 확산시킨다. 또한, 섬유의 가교작용을 통해 균열발생에 대한 저항성과 균열의 진전을 억제하며, 강섬유의 혼입률이 증가함에 따라 인장강도도 증가하게 된다.

2. 강섬유 종류 및 특성

강섬유는 길이가 짧고 단면이 작은 강선으로 콘크리트 배합에 불규칙하게 분산시켜 각종 역학적 성질을 개선하기 위해 사용되는 섬유를 말한다. 콘크리트용 강섬유는 다양한 형상을 가지고 있으며, 크기가 매우 작은 특성을 가지고 있다. 강섬유는 요구 성능과 적용 분야에 따라 다양한 형상으로 제작되어 사용되고 있으며, 소재에 의한 제작 방법에 따라 4종류로 나뉜다. 제1종은 와이어 섬유(cold drawn wire fiber), 제2종은 이형 절단 시트 섬유(deformed cut sheet fiber), 제3종은 용융 추출 섬유(melt-extracted fiber), 제4종은 상기 이외의 섬유인 기타 섬유(other fibers)이다. 제4종은 형상비로 강섬유의 특성이 표시된다. 각각의 강섬유는 직선 또는 이형 섬유를 포함하며, 형상은 [그림 2.1]에 나타냈다.⁽²⁷⁾ 강섬유의 재질은 탄소강과 스테인리스강으로 나뉘어진다.

초기의 강섬유는 얇은 철판이나 철선을 절단하는 형태로 제작되어 원형 또는 직사각형 단면을 갖는 직선 형태를 가졌다. 하지만 혼입 시 콘크리트와의 부착력이 약하여 성능의 확보가 되지 않아 강섬유의 끝을 구부리거나 표면 전체에 굴곡 및 요철을 둔 강섬유가 개발되어 사용되고 있다. 현재 강섬유는 KS F 2564⁽²⁷⁾의 기준에 적합한 것이어야 한다. 강섬유의 인장강도는 350~2,100MPa 정도이지만 KS F 2565⁽²⁸⁾의 기준에 의거하여 강섬유 각각의 인장강도가 650MPa 이

상이고 평균 인장강도가 700MPa 이상이어야 한다. 특히 초고성능 섬유 시멘트 복합체에 사용되는 강섬유의 인장강도는 2,000MPa 이상이어야 한다.⁽²⁵⁾ 강섬유는 건조한 상태에서 녹이 없어야 하며, 기름이나 다른 이물질에 의한 오염이 없고 표면이 코팅되지 않아야 한다. 일반적으로 길이 25~50mm, 직경 0.3~0.6mm, 형상비 50~80, 콘크리트 내의 혼입률은 1.5~2%를 사용되며, 강섬유의 기본 물성은 형상비, 섬유인장강도를 통해 평가한다.⁽²⁶⁾ 섬유의 인장강도 평가 시 일반적인 경우 전단 가공에 의한 영향으로 강섬유의 인장강도가 소재의 인장 강도에 비해 크게 나타나는 경향이 있다. 따라서, 시험기 및 장치, 재하 속도 등 영향 인자를 충분히 고려하여야 하며, 강섬유의 인장강도 시험 방법을 일반 금속 재료와는 별개로 규정해야한다.

강섬유의 형상비는 강섬유의 길이를 단면의 유효직경으로 나눈 값으로 정의한다. 형상비는 강섬유의 중요한 특성으로 인장강도에 미치는 영향은 크지 않지만 균열 이후의 균열 발생의 저항성과 강도에 상당한 영향을 미친다. 일반적으로 강섬유의 형상비가 증가함에 따라 섬유 시멘트 복합체의 강도 및 연성 등의 성능이 개선된다고 평가한다. 하지만, 강섬유의 형상비가 지나치게 증가할 경우 부착력이 부족하여 강섬유끼리 뭉치게 되는 뭉침 현상이 발생하며, 분산과 비빔의 문제로 인해 성능 발현하지 못하고 시공성이 떨어진다. 반대로 형상비가 지나치게 감소할 경우 강도가 부족하여 충분한 성능을 발현하지 못하는 문제가 발생한다. 이는 강섬유 혼입 섬유 시멘트 복합체가 하중을 받아 파괴 시 강섬유의 파단에 의한 파괴보다 강섬유의 인발에 의한 영향이 더 크게 작용하기 때문이다. 주로 강섬유의 형상비는 30~150으로 다양하게 사용되고 있으며, 강섬유의 형상비를 적절하게 고려하는 것이 중요하다. 강섬유의 혼입률은 섬유보강 콘크리트 1m³ 중에 포함된 섬유의 용적백분률(%)로 정의한다. 일반적으로 혼입률이 증가할수록 강도 및 연성 등의 성능이 개선되지만 지나치게 증가할 시 뭉침 현상이 발생하기 때문에 강섬유의 혼입 시 잘 분산되도록 해야한다. 또한, 강섬유의 균일한 분포가 어렵고 강섬유의 배열에 따라 성능이 상이하게 발생하기 때문에 혼입률은 2.0~2.5% 이하로 하는 것이 바람직하다.⁽¹⁸⁾⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾⁽²⁹⁾

강섬유 혼입 섬유 시멘트 복합체의 경우 강섬유의 재료적 특성으로 인해 비중이 높아 구조물의 중량을 증가시킬 수 있으며, 구조물의 표면에 수분이 많은 장소나 지하수 같은 물이 침투할 시 재료의 부식으로 인해 구조적 성능 저하 및 미관상 문제가 발생할 수 있다.



(a) 직선 와이어 섬유



(b) 이형 와이어 섬유



(c) 이형 절단 시트-1



(d) 이형 절단 시트-2



(e) 이형 절단 시트-3



(f) 용융 추출 섬유

[그림 2.1] 강섬유 형상

3. 역학적 특성

가. 파괴 매커니즘

강섬유 혼입 섬유 시멘트 복합체의 균열 발생 이전에는 강섬유와 시멘트 복합체 간의 부착에 의해 균열 발생을 억제한다. 이후 균열 발생 시 균열면에서 자체 응력으로 작용하며, 강섬유 주변에 다중미세균열을 발생시킨다. 발생한 균열은 강섬유로 인해 방향이 변경되거나 평행하게 진행하여 균열의 진전을 억제한다. 하중이 가해질수록 강섬유와 시멘트 복합체 사이의 부착력이 떨어지면서 분리되어 균열이 발생한다. 이때 균열 사이에서 섬유끼리 균열면의 양쪽에서 다리로 연결되는 가교작용을 하여 균열의 폭을 제어하고 변형연화 및 변형경화의 현상이 발생한다. 이후 균열의 폭이 증가함에 따라 강섬유와 시멘트복합체 사이에서 뿔침현상이 발생하거나 섬유의 파단이 일어난다. 이와 같은 파괴 매커니즘을 가지는 강섬유 혼입 섬유 시멘트 복합체는 취성적인 파괴가 일어나는 기존의 시멘트 복합체와는 달리 강섬유를 혼입함으로써 연성적인 파괴를 유도하여 급작스러운 취성파괴의 위험을 극복할 수 있다. 강섬유 혼입 섬유 시멘트 복합체의 파괴 매커니즘은 [그림 2.2]에 나타냈다. 섬유의 표면형상 및 물성, 시멘트 복합체의 강도가 부착성능에 많은 영향을 미치며, 강섬유와 시멘트 복합체의 부착 성능이 향상할수록 인장강도, 휨강도, 균열에 대한 저항성, 연성, 전단강도, 내충격성 및 내마모성 등의 성능이 향상한다.⁽³⁰⁾ 또한, 하중 발생 시 큰 균열을 제어하면서 다중미세균열을 발생시키기 때문에 건조수축 균열발생률이 낮으며, 외부환경에 의한 물질의 침투가 어렵고 응력집중현상을 완화시킬 수 있다. 혼입된 강섬유는 구조물의 단면에 균열이 발생하는 경우에도 균열의 폭에 상관 없이 힘 전달이 이루어지며, 혼입된 강섬유들 주위로 미세한 균열을 분산시킨다. 이때 발생하는 균열 폭의 합계는 같지만 각각의 균열 폭이 감소한다. 보의 경우 단면 내 중립축의 이동과 균열의 깊이를 감소시킨다.⁽³¹⁾⁽³²⁾

나. 압축거동

강섬유 혼입 섬유 시멘트 복합체의 압축강도는 강섬유의 혼입률이 증가함에 따라 점진적으로 증가하지만 압축강도에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 강섬유의 혼입률이 지나치게 높을 경우 섬유의 분산이 잘 이루어지지 않고 뭉침현상이 발생하여 압축강도가 저하되는 경우도 있다. 물/결합재비가 감소함에 따라

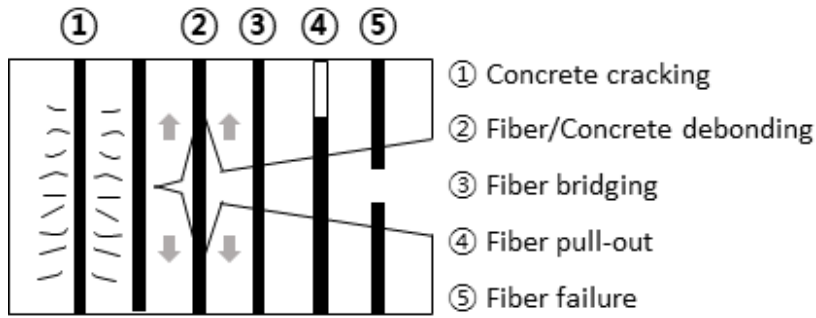
압축강도가 증가하며, 강섬유의 배열과 하중을 받는 방향에 따라 영향을 받는다. 또한, 강섬유의 혼입율이 증가함에 따라 압축 응력을 받았을 시 발생하는 균열을 억제하고 콘크리트를 구속하기 때문 소성 변형 능력 및 에너지 흡수 능력을 증가시킬 수 있다. 따라서, 압축 응력으로 인한 파괴 시 급격한 파괴를 나타내지 않으며 변형이 일어난 후에도 압축인성을 나타낸다.⁽³³⁾

다. 인장거동

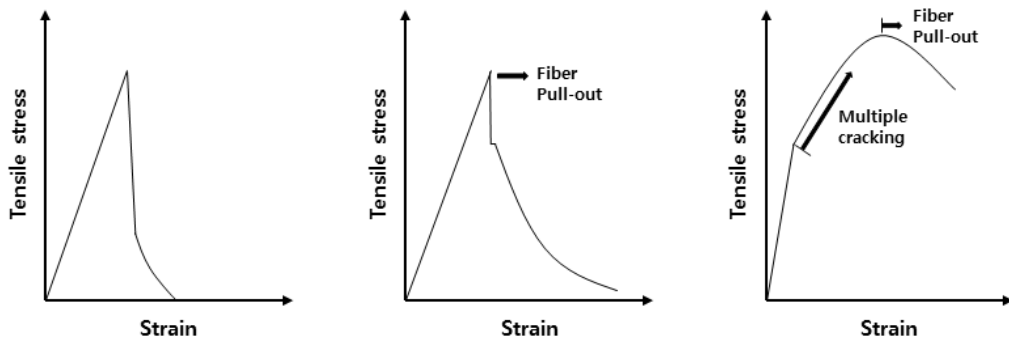
강섬유 혼입 섬유 시멘트 복합체의 인장강도는 강섬유의 혼입률이 증가함에 따라 향상하게 되며, 연성 능력이 향상된다. 이는 시멘트 복합체 내의 강섬유가 인장응력에 대한 균열 확산을 제어하고 다중미세균열이 발생하기 때문이다. 또한, 극한강도에 이르면 큰 균열이 형성되며, 이 균열에서 강섬유의 뿔침현상이 발생하여 연성 및 에너지 흡수 능력을 크게 증가시킨다. 강섬유 혼입 시멘트 복합체의 인장거동은 강섬유의 혼입률에 따라 세 가지 형태로 나타나며, 이에 대한 강섬유 혼입률에 따른 인장응력-변형률 곡선을 [그림 2.3]에 나타냈다. 먼저 강섬유의 혼입이 없거나 혼입률이 미량일 경우에는 시멘트 복합체에 균열이 발생하기 시작하면 급격하게 파괴가 된다. 강섬유의 혼입률이 적은 경우에는 복합체의 균열이 발생하면 약간의 강도감소가 발생하지만 강섬유로 전이되어 하중을 지지하는 연성적 거동을 보이며, 변형연화거동을 보인다. 강섬유의 혼입률이 큰 경우에는 복합체의 균열이 발생한 이후에도 강섬유로 인해 인장강도가 증가하며, 인장응력이 일정 변형률까지 상승하며, 변형경화거동을 보인다.⁽³⁰⁾

라. 휨거동

강섬유 혼입 섬유 시멘트 복합체의 휨강도는 강섬유의 길이가 증가함에 따라 증가된다. 이는 휨파괴가 휨모멘트 구간 중에 가장 단면이 약한 곳에서 발생되며, 강섬유의 길이가 길수록 발생 확률이 감소한다. 따라서, 사용되는 강섬유의 종류나 길이에 따라 휨강도는 상이하게 나타난다. 강섬유 혼입 섬유 시멘트 복합체가 하중을 받을 때 나타나는 휨거동에 대한 하중-처짐 곡선을 [그림 2.4]에 나타냈다. 휨응력으로 인한 파괴 시 인장측에서 먼저 균열이 발생하고 진전되면서 초기균열 지점에서 균열이 발생한다. 이후 강섬유의 부착강도에 의해 최대하중 지점에 이르며, 균열이 계속 진전되면 중립축이 상승하여 인장변형이 급격히 증대됨에 따라 강섬유가 인발되면서 파괴된다.⁽³⁴⁾

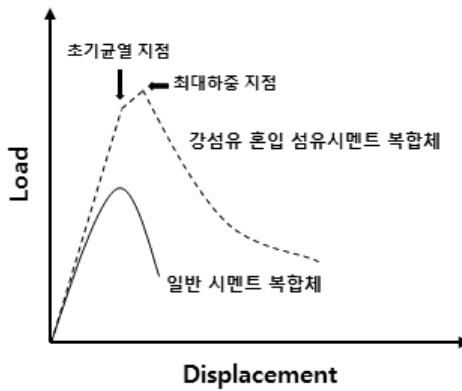


[그림 2.2] 강섬유 혼입 섬유 시멘트 복합체의 파괴 매커니즘



(a) 강섬유가 미량인 경우 (b) 강섬유 혼입률이 적은 경우 (c) 강섬유 혼입률이 많은 경우

[그림 2.3] 강섬유 혼입률에 따른 인장응력-변형률 곡선



[그림 2.4] 휨응력에 대한 하중-처짐 곡선

제3장 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체 배합 및 역학실험

제1절 배합

1. 사용 재료

본 연구에서 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체를 제조하기 위하여 필요한 재료는 시멘트, 고로슬래그 미분말, 지르코늄 미분말, 충전재, 팽창재, 규사, 강섬유, 혼화제로 구성되어 있으며, 사용 재료의 화학적 또는 물리적 특성은 다음과 같다.

가. 시멘트

본 연구에서는 KS L 5201⁽³⁵⁾의 규정에 준하여 생산되는 국내 S사의 제 1종 포틀랜드 시멘트(Cement, C)를 사용하였다. 사용된 시멘트의 밀도는 3.15g/cm³이고, 분말도는 3,413cm²/g이다. 역학실험에서 사용된 1종 포틀랜드 시멘트의 특성은 [표 3.1]에 나타냈다.

[표 3.1] 1종 포틀랜드 시멘트 특성

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	화학적 구성 (%)							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃
3.15	3,413	21.00	6.40	2.36	62.72	1.97	0.13	0.81	3.34

나. 고로슬래그 미분말

본 연구에서는 KS F 2563⁽³⁶⁾의 규정에 준하여 생산되는 고로슬래그 미분말 (Blast furnace slag, BS) 3종을 사용하였다. 고로슬래그 미분말은 콘크리트 및 모르타르의 혼화재로 사용된다. 사용된 고로슬래그 미분말의 밀도는 2.13g/cm³이고, 분말도는 3,850cm²/g이다. 역학실험에서 사용된 고로슬래그 미분말의 특성은 [표 3.2]에 나타냈다.

[표 3.2] 고로슬래그 미분말 특성

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	화학적 구성 (%)							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃
2.13	3,850	37.49	11.58	8.61	36.22	2.00	0.68	0.95	0.16

다. 지르코늄 미분말

본 연구에서 섬유 시멘트 복합체의 결합재 중 하나로써 산화지르코늄의 정제 시 발생하는 부산물인 지르코늄 미분말(Zirconium micropowder, Zr)을 사용하였다. 지르코늄 미분말은 일반적인 실리카폼에 비하여 입경이 커서 유동성이 향상되고, 충전성의 역할을 한다. 이산화 규소의 함량이 높아 수산화칼슘과 반응하여 불용성화합물을 생성하는 포졸란 특성이 우수하며, 이 특성은 시멘트 복합체의 강도 증가에 효과가 있다. 사용된 지르코늄 미분말의 비표면적은 8.76m²/g 이고, 수분흡착량과 수분탈착량은 각각은 10.80cm²/g, 2.00cm²/g이다. 역학실험에서 사용된 지르코늄 미분말의 특성은 [표 3.3]에 나타났다.

[표 3.3] 지르코늄 미분말 특성

비표면적 (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

라. 충전재

본 연구에서 섬유 시멘트 복합체의 결합재 중 하나로써 섬유 시멘트 복합체의 미세공극을 충전하여 내부 조직을 치밀하게 하는 충전재를 사용하였다. 충전재는 치밀한 조직을 형성하여 탄산화, 염해, 동결융해와 같은 외부환경의 영향에 대한 효과가 있다. 역학실험에서 사용된 충전재의 특성은 [표 3.4]에 나타났다.

[표 3.4] 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

마. 팽창재

본 연구에서 섬유 시멘트 복합체의 결합재 중 하나로써 석회, 석고, 보크사이트가 주성분인 소성화합물을 적당한 입도로 분쇄한 팽창재를 사용하였다. 팽창재는 아우인, 유리 석회, 유리 석고 등으로 구성되어 있으며, 건조수축의 저감, 체적팽창, 수화열의 억제 등의 효과가 있다. 본 연구에서는 물/결합재 비가 적기 때문에 물이 수화반응으로 거의 소모되므로 건조수축의 저감 용도가 아닌 자기수축의 저감 용도로 사용하였다. 역학실험에서 사용된 팽창재의 특성은 [표 3.1]에 나타냈다.

[표 3.5] 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

바. 규사

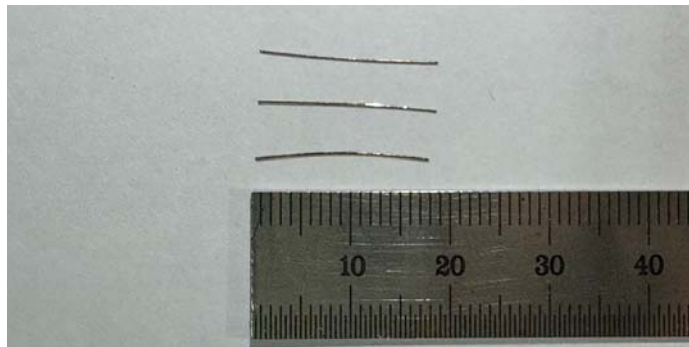
본 연구에서 유동성을 확보하고 섬유 시멘트 복합체의 안정상태 균열이 발생할 확률이 커지기 때문에 굵은 골재는 사용하지 않았으며, 섬유복합체의 수축량을 줄이고 충분한 강성 확보를 위한 잔골재로써 규사(Silica sand) 7호를 사용하였다. 사용된 규사의 평균 직경은 $100\mu\text{m}$ 이고, 비중은 2.65이다.

사. 강섬유

본 연구에서는 강섬유를 사용하여 시멘트복합체와 강섬유 사이의 계면 특성 및 부착성을 높이고 균열폭을 제어하여 인장강도를 개선하고자 하였다. 강섬유는 직선형의 직경 0.2mm, 길이 18mm로 형상비는 길이를 직경으로 나눈 값이기 때문에 90이다. 강섬유의 탄성계수는 200,000MPa이고 인장강도는 2,700MPa이다. 역학실험에서 사용된 강섬유의 특성은 [표 3.7]에 나타냈으며, 강섬유의 형상은 [그림 3.1]에 나타냈다.

[표 3.6] 강섬유 특성

형태	직경(mm)	길이(mm)	형상비	인장강도(MPa)
직선형	0.2	18	90	2,700



[그림 3.1] 강섬유 형상 및 길이

아. 혼화제

본 연구에서 혼입되는 혼화제로써 고성능감수제, 소포제, 수축저감제 등을 사용하였다. 섬유 시멘트 복합체에 혼입되는 강섬유의 균등한 분산과 고유동성을 발휘하기 위하여 KS F 2560⁽³⁷⁾의 규정에 준하여 생산되는 고성능감수제를 결합재의 2% 이내로 사용하였다. 소포제는 배합 시 발생하는 큰 기포를 제거하고 공극을 최소화하기 위하여 사용하였다. 또한, 액상의 수축저감제는 물/결합재비 낮은 섬유 시멘트 복합체의 특성으로 인해 단위 수량을 감소시키고 소성수축과 건조수축을 막기위하여 사용하였다.

2. 배합

가. 배합표

본 연구에서 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체에 대한 최적의 배합 설계를 제시하고자 목표 압축강도를 120 MPa로 설정하고 강섬유의 혼입률을 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%로 변수를 계획하였다. 강도 증진을 위하여 물-결합재비를 0.23으로 하였다. 또한, 반응성 결합재 사용으로 수화생성물의 증대시켰으며, 반응성 결합재인 시멘트, 지르코늄 미분말, 고로슬래그 미분말의 비율은 1:0.75:0.175의 비율로 적용하였다. 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 배합표는 [표 3.7]에 나타냈다.

[표 3.7] 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 배합표

W/B	화학적 구성 (%)						
	단위수량	프리믹싱 결합재	규사	강섬유 혼입률	강섬유 (18mm)	고성능 감수제	공기량 조절제
0.23	204.0	1,160.7	780.4	0.0%	-	17.6	0.7
				0.5%	37.5		
				1.0%	75.0		
				1.5%	112.5		
				2.0%	150.0		

나. 제조 및 양생

섬유 시멘트 복합체에 있어서 배합은 KCS 14 20 22⁽²⁵⁾의 규정에 준하여 실시해야 한다. 섬유 시멘트 복합체의 배합은 소요의 품질을 만족할 수 있도록 단위수량을 될 수 있는 대로 적게 되도록 정하여야 한다. 섬유의 형상, 치수 및 혼입률은 섬유 시멘트 복합체의 압축강도, 휨강도 및 인성 등의 요구성능을 고려하여 정하는 것을 원칙으로 한다. 배합의 표시 방법은 KCS 14 20 10(2.2.11)⁽²⁾의 규정에 준하며, 여기에 섬유의 형상, 치수 및 섬유 혼입률을 명시하여야 한다. 또한, 섬유 시멘트 복합체의 비비기 시간은 시험에 의해 정하며, 소요의 품질이 얻어지도록 충분히 비벼야 한다. 강제식 믹서를 사용하는 것을 원칙으로 하며, 섬유를 믹서에 투입할 때에는 섬유를 콘크리트 속에 균일하게 분산시킬 수 있는 방법으로 하여야 한다.

강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 제조 및 양생은 다음과 같으며, [그림 3.2]에 나타냈다. 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 배합을 하기 전, 배합에 따라 각 재료를 계량하였다. 계량한 프리믹싱 결합재와 규사를 믹서기에 투입하여 건비빔을 10분간 실시하였다. 이후 배합수에 고성능감수제, 소포제, 수축저감제 등의 혼화제를 투입하고 믹서기에 투입하여 5분간 비빔을 실시하였다. 이때 계절, 날씨에 따라 유동성에 차이가 있기 때문에 눈으로 확인하면서 비빔을 해야 한다. 비빔 후 유동성이 확보되었는지 확인하고 확보되지 않았을 시 고성능감수제를 소량씩 투입하여 적당한 유동성을 확보한다. 고성능감수제를 투입할 시 과다하게 투입될 경우 재료 분리가 생길 수 있어 유의해야 한다. 유동성 확보가 완료되면 강섬유를 뭉치지 않도록 분산시켜 투입하고 강섬유가 다 풀어지면 배출하여 타설하여 실험체를 제작하였다. 타설을 완료한 후 수분 증발을 막기 위하여 비닐로 노출된 표면을 감싸고, 3일 동안 습윤 양생을 실시하였다. 실험체 경화 후에 탈형을 하고 각 14일과 28일이라는 목표 일수까지 수중양생을 실시하였다.



(a) 재료 준비



(b) 결합재 투입



(c) 건비빔



(d) 배합수 및 혼화제 혼합



(e) 배합수 투입



(f) 비빔



(g) 강섬유 투입



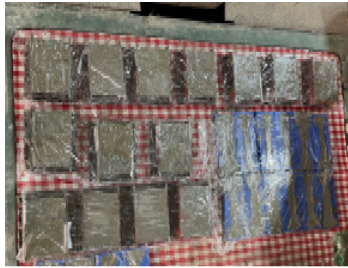
(h) 비빔



(i) 배출



(j) 타설



(k) 습윤양생



(l) 수중양생

[그림 3.2] 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 제조 및 양생

제2절 역학 실험 방법

1. 개요

본 장에서는 배합표에 따른 배합으로 재료 특성을 파악하고 강섬유의 혼입률에 따른 섬유 시멘트 복합체의 역학적 특성을 파악하여 성능을 분석하고 평가하기 위하여 재료의 역학 실험을 실시하였다. 굳기 전의 재료 특성을 파악하기 위하여 슬럼프 플로우 시험을 실시하였으며, 굳은 후의 역학적 특성을 파악하고자 압축, 인장, 휨인장, 전단으로 나누어 실험을 실시하였다.

2. 슬럼프 플로 시험

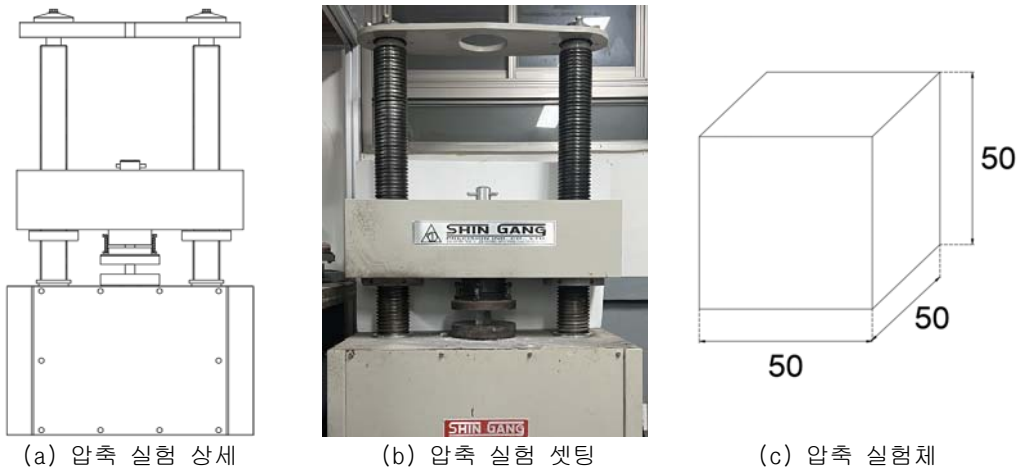
강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 굳지 않은 콘크리트의 성질인 유동성을 파악하고자 슬럼프 플로우 시험을 실시하였다. 슬럼프 플로우 시험은 KS F 2594⁽³⁸⁾에 규정에 준하여 100×200×300mm의 슬럼프 콘으로 실시하였다. 시험시 슬럼프 콘 높이의 3분의 1지점마다 다짐봉으로 5회 다짐을 실시하였다. 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체를 슬럼프 콘의 상단까지 타설한 후 슬럼프 콘을 연직 방향으로 들어올려 유동성을 확인하고 시간이 지난 후 움직임이 멈춘 후 퍼짐의 정도가 최대라고 생각한 지름과 수직한 방향의 지름을 측정하였다. 슬럼프 플로 시험의 과정은 [그림 3.3]에 나타냈다.



[그림 3.3] 슬럼프 플로 시험

3. 압축 실험

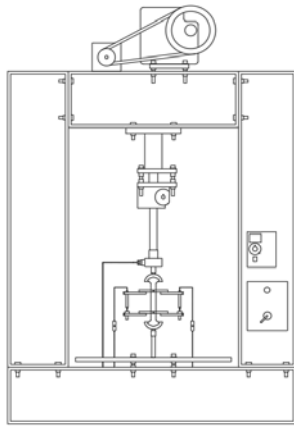
강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 압축강도를 파악하고자 압축 실험을 실시하였다. 압축 실험은 KS L 5105⁽³⁹⁾에 규정에 준하여 50mm의 입방체 실험체를 사용하여 실시하였다. 타설 후 14일과 28일 경과 후 양생이 완료된 실험체를 KS B 5533⁽⁴⁰⁾ 인증제품인 100kN 용량의 유압 전동식 시험기를 이용하여 압축강도를 측정하였다. 압축 실험의 상세 및 셋팅과 압축 실험체의 형상은 [그림 3.4]에 나타냈다.



[그림 3.4] 압축 실험 형상

4. 인장 실험

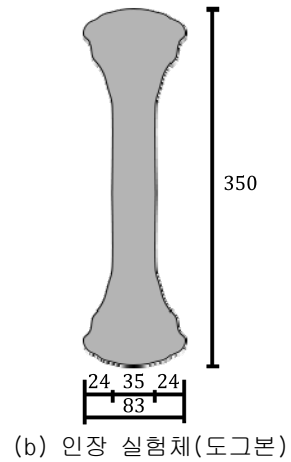
강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 인장강도를 파악하고자 인장 실험을 실시하였다. 인장 실험은 실험 시 실험체 단부의 파괴를 방지하기 위해 도그본 형태로 제작하여 실시하였다.⁽⁴¹⁾ 타설 후 14일과 28일 경과 후 양생이 완료된 실험체의 양쪽을 지그로 맞물려 하중을 가력하여 상단의 로드셀을 통해 인장강도를 측정하였다. 또한, 실험체의 양쪽에 LVDT를 부착하여 150mm에 대한 실시간 변위를 측정하여 인장변형률을 측정하였고 이를 응력-변형률 관계로 환산하였다. 인장 실험의 상세 및 셋팅과 인장 실험체인 도그본의 형상은 [그림 3.5]에 나타냈다.



(a) 인장 실험 상세



(b) 인장 실험 셋팅



(b) 인장 실험체(도그본)

[그림 3.5] 인장 실험 형상

5. 휨인장 실험

강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 휨인장강도를 파악하고자 휨인장 실험을 실시하였다. 휨인장 실험은 40mm×40mm×160mm의 실험체를 사용하여 3점 가력 실험을 실시하였다. 타설 후 14일과 28일 경과 후 양생이 완료된 실험체의 상부 가운데 지점과 하부 양 끝단에서 20mm 떨어진 곳을 2개의 지점으로 하여 휨인장강도를 측정하였다. 휨인장강도는 재료를 굽히는 힘에 대해 파괴되기 전의 최대 응력이다. 굽힘면의 안쪽에 있는 물체의 가장자리에서의 응력은 최대 압축 응력 값이 된다. 굽힘면의 바깥쪽에서의 응력은 최대 인장값이 된다. 따라서 재료의 파괴가 일어나기 전의 최대 인장응력 값을 휨인장강도로 하였다. 휨인장강도를 구하는 식은 [식 3.1]에 나타났다.

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2} \quad [\text{식 3.1}]$$

여기서, σ : 휨인장강도(MPa)

F : 가해지는 힘(N)

L : 경간의 길이(mm)

b : 실험체의 폭(mm)

d : 실험체의 두께(mm)

또한, 휨인장 실험을 통하여 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 최대처짐을 측정하여 연성능력을 파악하였으며, 하중-처짐의 관계를 통한 휨인성을 구하여 인성능력을 파악하였다. 휨인성은 휨인성계수(등가휨강도)로 나타낸다. 휨인성 계수는 [식 3.2]에 나타난 식으로 구하며, 유효숫자 3자리까지 구한다. 휨인장 실험의 상세 및 셋팅과 휨인장 실험체의 형상은 [그림 3.6]에 나타냈다.

$$\sigma_b = \frac{Tb}{\delta tb} \times \frac{\ell}{bd^2} \quad [\text{식 3.2}]$$

여기서, σ_b : 휨인성계수 (MPa)

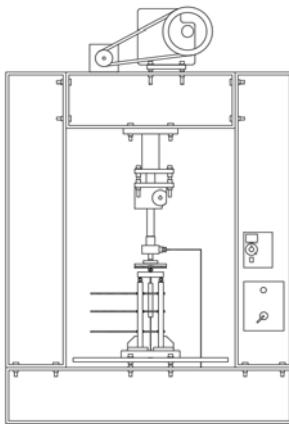
tb : δtb 까지의 면적 ($N \cdot mm$)

δtb : 스팬의 1/150의 처짐 (mm)

L : 스팬 (mm)

b : 실험체의 폭 (mm)

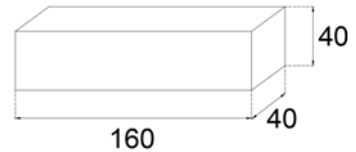
d : 실험체의 두께 (mm)



(a) 휨인장 실험 상세



(b) 휨인장 실험 셋팅

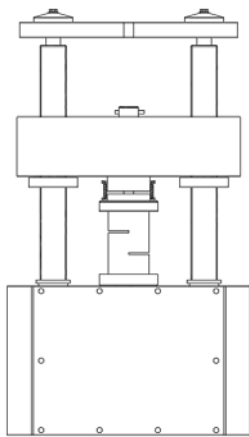


(c) 휨인장 실험체

[그림 3.6] 휨인장 실험 형상

6. 전단 실험

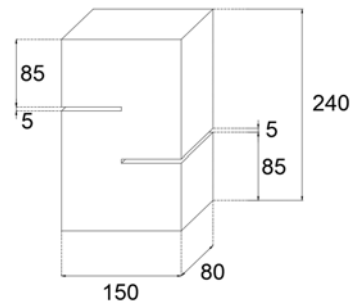
강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 전단강도를 파악하고자 전단 실험을 실시하였다. 전단 실험은 150mm×80mm×240mm의 실험체로 전단파괴를 유도하기 위하여 전단 측정면의 양측에 노치를 5mm로 두고 제작하여 실시하였으며, 전단면은 80×60mm으로 하였다. 타설 후 14일과 28일 경과 후 양생이 완료된 실험체를 KS B 5533⁽⁴⁰⁾ 인증제품인 100kN 용량의 유압 전동식 시험기를 이용하여 전단강도를 측정하였다. 전단 실험의 상세 및 셋팅과 전단 실험체의 형상은 [그림 3.7]에 나타냈다.



(a) 전단 실험 상세



(b) 전단 실험 셋팅



(c) 전단 실험체

[그림 3.7] 전단 실험 형상

제4장 역학실험 결과 및 분석

제1절 개요

본 장에서는 제시한 강섬유의 혼입률에 따른 섬유 시멘트 복합체의 배합표에 따라 역학실험의 각 실험체를 제조 및 양생을 하였고 이를 통한 슬럼프 플로우 시험, 압축, 인장, 휨인장, 전단으로 나누어 실험을 실시하였다. 실험을 통한 역학실험의 결과를 토대로 강섬유의 혼입률에 따른 섬유 시멘트 복합체의 역학적 특성을 파악하여 성능을 분석하고 평가하였다.

제2절 역학실험 결과 및 분석

1. 슬럼프 플로 시험

강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 슬럼프 플로 시험 결과는 [표 4.1]에 나타났다. 슬럼프 콘을 연직 방향으로 들어올려 시간이 지난 후 움직임이 멈춘 후 퍼짐의 정도가 최대라고 생각한 지름과 수직인 방향의 지름을 측정하였으며, 이에 대한 평균 값을 산정하였다. 슬럼프 플로 평균값은 $700 \pm 30\text{mm}$ 로 측정되었으며, 유동성이 높아 자기충전과 시공성의 확보가 충분한 것으로 판단하였다. 강섬유의 혼입률별 슬럼프 플로는 외부 환경적인 요소와 그로 인한 고성능 감수제의 투입으로 인해 약간의 차이가 발생하였다. 슬럼프 플로는 KS F 2594⁽³⁸⁾에 규정에 준하여 최대 지름의 평균값을 5mm 단위로 표시한다.

[표 4.1] 강섬유 혼입률에 따른 슬럼프 플로 시험 결과

강섬유 혼입률	지름 (mm)	직교 방향 지름 (mm)	평균 (mm)
0%	730	710	720
0.5%	700	690	695
1.0%	740	710	725
1.5%	700	690	695
2.0%	660	680	670

2. 압축 실험

강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 압축 실험 결과는 [표 4.2~7]과 [그림 4.1~7]에 나타났다. 강섬유 혼입률 0.0%의 재령 14일과 28일의 평균 압축강도는 각각 93.00MPa, 106.29MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률 0.5%의 재령 14일과 28일의 평균 압축강도는 각각 98.90MPa, 110.65MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률 1.0%의 재령 14일과 28일의 평균 압축강도는 각각 101.79MPa, 112.56MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률 1.5%의 재령 14일과 28일의 평균 압축강도는 각각 115.99MPa, 128.05MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률 2.0%의 재령 14일과 28일의 평균 압축강도는 각각 123.31MPa, 131.04MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률에 따른 각 실험체 압축강도의 오차는 ± 13 MPa 이내로 측정되었다. 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 압축강도가 향상하였지만 정도가 크지 않았다. 1.5%일 때 다소 크게 향상하였으며, 강섬유 혼입률 1.5%와 2.0%가 목표 압축강도 120MPa에 충족하였다. 재령 14일과 28일의 압축강도 차이는 8.44~14.49MPa 정도로 비슷한 차이를 보였다. 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 압축 파괴 형상은 [그림 4.8~12]에 나타났다.

[표 4.2] 강섬유 혼입률 0.0% 압축 실험 결과

강섬유 혼입률	구분	재령 14일 압축강도 (MPa)	재령 28일 압축강도 (MPa)
0.0%	1	86.94	97.19
	2	86.98	99.43
	3	87.56	102.33
	4	91.47	103.22
	5	92.04	104.58
	6	94.47	106.17
	7	95.38	109.07
	8	95.78	112.54
	9	97.77	113.73
	10	101.63	114.66

[표 4.3] 강섬유 혼입률 0.5% 압축 실험 결과

강섬유 혼입률	구분	재령 14일 압축강도 (MPa)	재령 28일 압축강도 (MPa)
0.5%	1	95.26	104.10
	2	96.17	104.80
	3	96.31	106.56
	4	96.97	110.30
	5	98.91	111.05
	6	98.95	111.71
	7	100.88	112.76
	8	101.46	114.43
	9	101.72	114.74
	10	102.38	116.11

[표 4.4] 강섬유 혼입률 1.0% 압축 실험 결과

강섬유 혼입률	구분	재령 14일 압축강도 (MPa)	재령 28일 압축강도 (MPa)
1.0%	1	92.92	107.31
	2	97.48	108.93
	3	97.85	109.20
	4	99.47	110.12
	5	102.47	111.11
	6	103.08	111.80
	7	104.53	113.86
	8	105.20	116.50
	9	106.03	117.82
	10	108.85	118.92

[표 4.5] 강섬유 혼입률 1.5% 압축 실험 결과

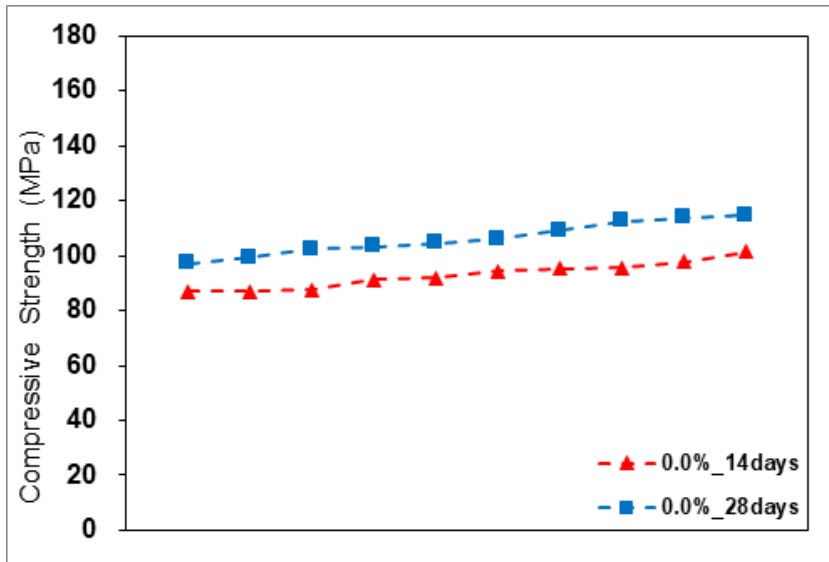
강섬유 혼입률	구분	재령 14일 압축강도 (MPa)	재령 28일 압축강도 (MPa)
1.5%	1	110.74	122.19
	2	110.83	122.44
	3	111.05	123.16
	4	114.94	126.39
	5	115.30	126.41
	6	115.38	127.77
	7	118.97	130.55
	8	119.02	132.21
	9	121.15	132.56
	10	122.49	136.83

[표 4.6] 강섬유 혼입률 2.0% 압축 실험 결과

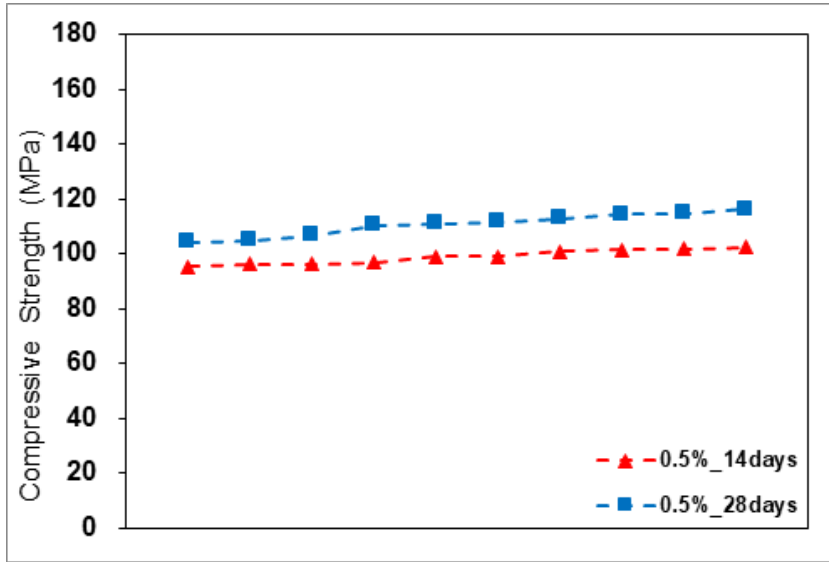
강섬유 혼입률	구분	재령 14일 압축강도 (MPa)	재령 28일 압축강도 (MPa)
2.0%	1	111.47	124.42
	2	114.70	127.11
	3	116.47	129.62
	4	120.23	130.11
	5	123.86	130.63
	6	125.83	131.13
	7	126.68	132.21
	8	129.27	132.78
	9	131.73	135.61
	10	132.89	136.83

[표 4.7] 강섬유 혼입률별 재령 14일, 28일 평균 압축강도

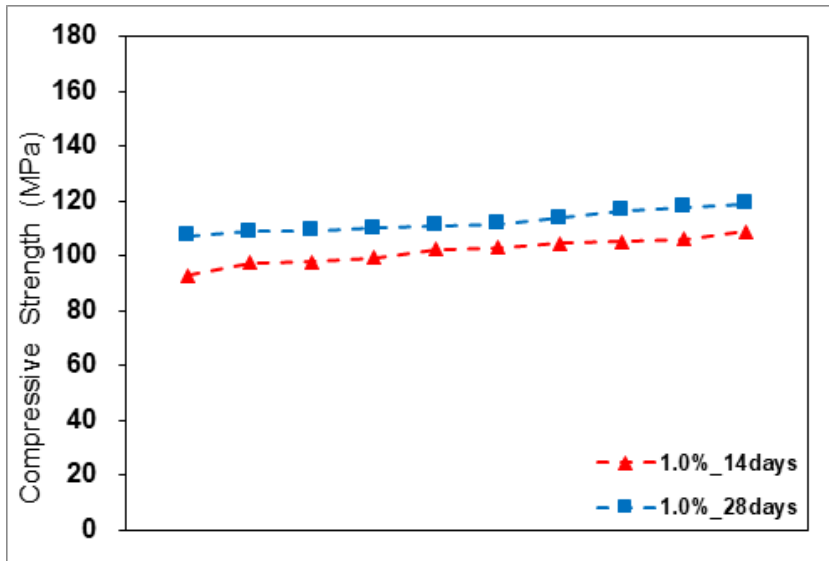
강섬유 혼입률	재령 14일 평균 압축강도 (MPa)	재령 28일 평균 압축강도 (MPa)
0.0%	93.00	106.29
0.5%	98.90	110.65
1.0%	101.79	112.56
1.5%	115.99	128.05
2.0%	123.31	131.04



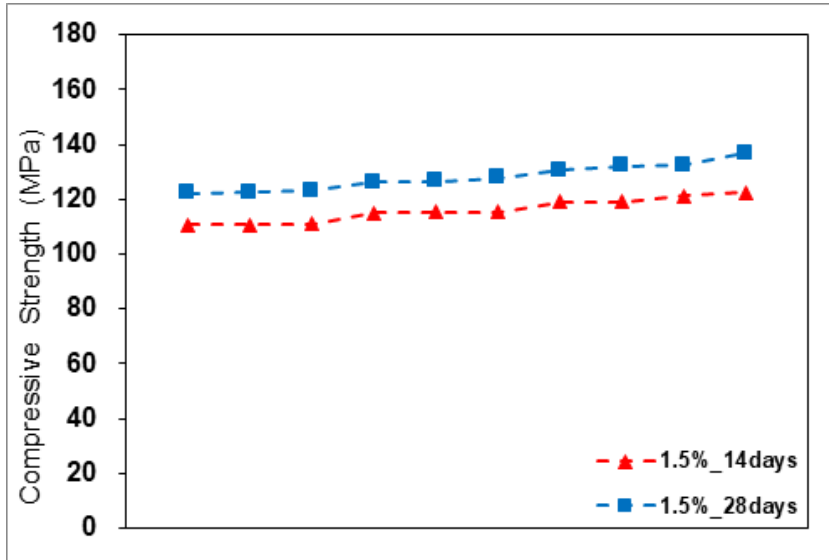
[그림 4.1] 강섬유 혼입률 0.0% 압축 실험 결과



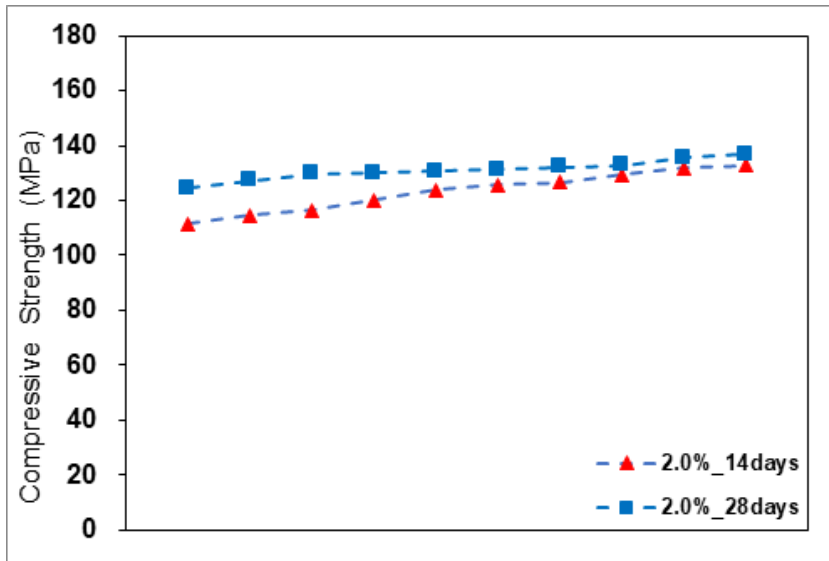
[그림 4.2] 강섬유 혼입률 0.5% 압축 실험 결과



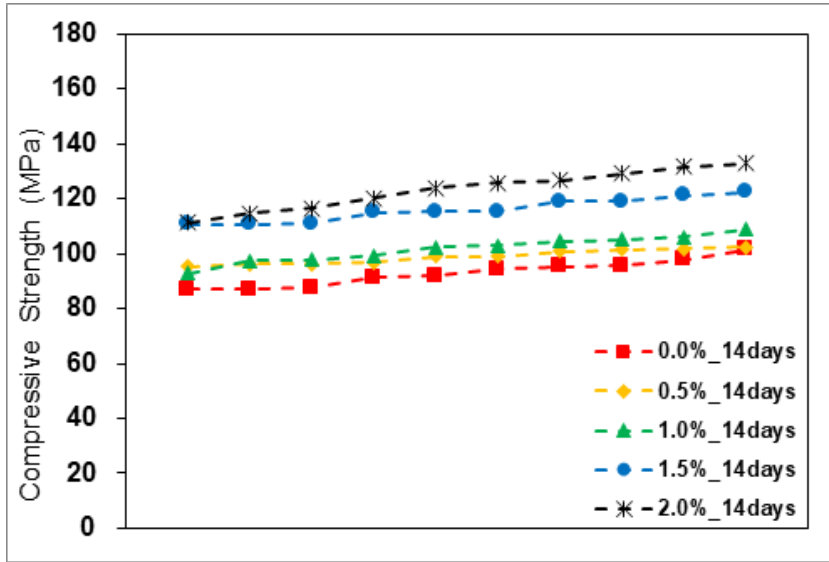
[그림 4.3] 강섬유 혼입률 1.0% 압축 실험 결과



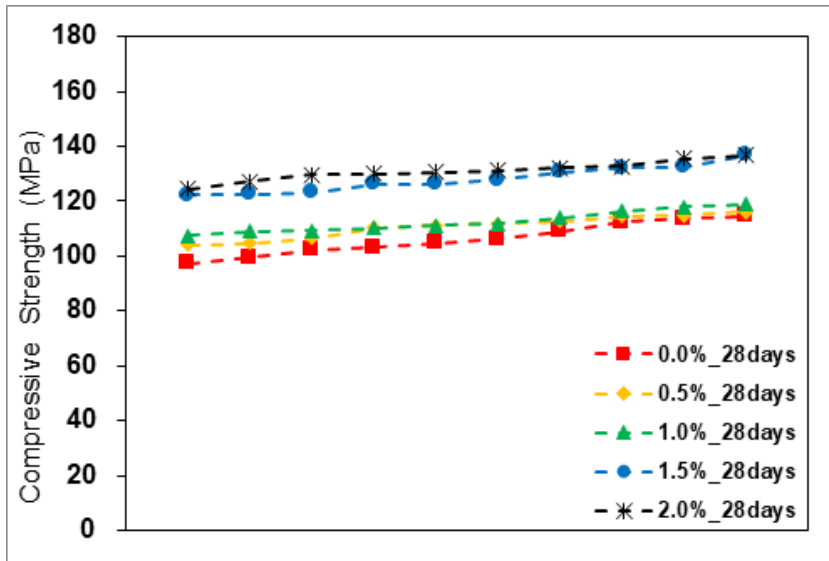
[그림 4.4] 강섬유 혼입률 1.5% 압축 실험 결과



[그림 4.5] 강섬유 혼입률 2.0% 압축 실험 결과



[그림 4.6] 재령 14일 강섬유 혼입률별 압축 실험 결과



[그림 4.7] 재령 28일 강섬유 혼입률별 압축 실험 결과



(a) 재령 14일 파괴 전



(b) 재령 14일 파괴 후



(c) 재령 14일 파괴 형상



(d) 재령 28일 파괴 전



(e) 재령 28일 파괴 후



(f) 재령 28일 파괴 형상

[그림 4.8] 강섬유 혼입률 0.0% 압축 파괴 형상



(a) 재령 14일 파괴 전



(b) 재령 14일 파괴 후



(c) 재령 14일 파괴 형상



(d) 재령 28일 파괴 전



(e) 재령 28일 파괴 후



(f) 재령 28일 파괴 형상

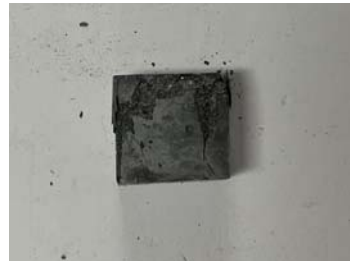
[그림 4.9] 강섬유 혼입률 0.5% 압축 파괴 형상



(a) 재령 14일 파괴 전



(b) 재령 14일 파괴 후



(c) 재령 14일 파괴 형상



(d) 재령 28일 파괴 전



(e) 재령 28일 파괴 후



(f) 재령 28일 파괴 형상

[그림 4.10] 강섬유 혼입률 1.0% 압축 파괴 형상



(a) 재령 14일 파괴 전



(b) 재령 14일 파괴 후



(c) 재령 14일 파괴 형상



(d) 재령 28일 파괴 전

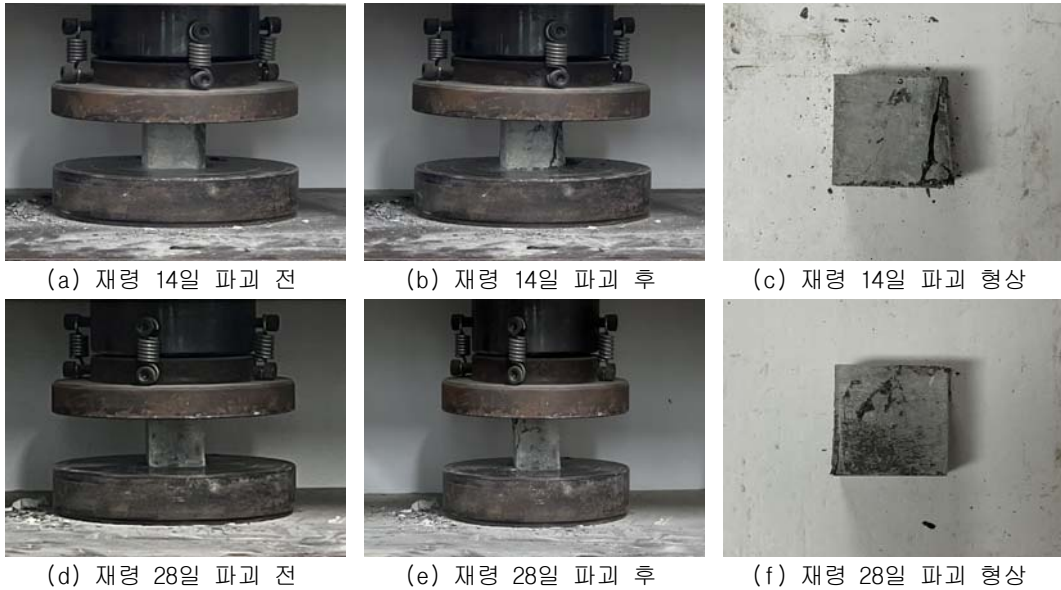


(e) 재령 28일 파괴 후



(f) 재령 28일 파괴 형상

[그림 4.11] 강섬유 혼입률 1.5% 압축 파괴 형상



[그림 4.12] 강섬유 혼입률 2.0% 압축 파괴 형상

3. 인장 실험

강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 인장 실험 결과는 [표 4.8~13]에 나타냈으며, 결과에 따른 인장강도와 인장변형률 관계를 [그림 4.13~22]에 나타냈다. 강섬유 혼입률 0.0%의 재령 14일과 28일의 평균 인장강도는 각각 5.46MPa, 6.84MPa이고 평균 최대변형률은 각각 0.016%, 0.015%로 측정되었다. 강섬유 혼입률 0.5%의 재령 14일과 28일의 평균 인장강도는 각각 6.50MPa, 7.76MPa이고 평균 최대변형률은 각각 2.635%, 3.241%로 측정되었다. 강섬유 혼입률 1.0%의 재령 14일과 28일의 평균 인장강도는 각각 9.75MPa, 10.10MPa이고 평균 최대변형률은 각각 3.710%, 4.083%로 측정되었다. 강섬유 혼입률 1.5%의 재령 14일과 28일의 평균 인장강도는 각각 9.49MPa, 10.12MPa이고 평균 최대변형률은 각각 3.436%, 3.985%로 측정되었다. 강섬유 혼입률 2.0%의 재령 14일과 28일의 평균 인장강도는 각각 11.70MPa, 11.91MPa이고 평균 최대변형률은 각각 3.403%, 3.976%로 측정되었다. 강섬유 혼입률에 따른 각 실험체 인장강도 및 최대변형률의 오차는 각각 $\pm 1.68\text{MPa}$, 0.672% 이내로 측정되었다. 인장 실험 시 초기 균열이 발생한 후 다중미세균열이 발생하였고 균열부위에 응력이 집중되어 균열의 폭이 커짐에 따라 강섬유의 가교작용으로 인해 응력의 재분배가 이루어지며 균

열의 폭을 제어하여 변형연화거동현상이 발생하면서 인장강도 및 연성능력이 향상하였다. 강섬유 혼입률 0.5%, 1.0%에서는 최초인장균열 발생 이후 강도 저하가 크게 발생하였지만 강섬유 혼입률 1.5%, 2.0%에서는 다소 적게 발생하였으며, 이후 변형연화거동현상이 발생하였다. 또한, 재령 28일이 14일보다 변형률이 증가하여 연성능력이 향상됨을 확인하였다. 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 인장 파괴 형상은 [그림 4.23~27]에 나타났다.

[표 4.8] 강섬유 혼입률 0.0% 인장 실험 결과

강섬유 혼입률	구분	재령 14일			재령 28일		
		최대인장강도		최대변형률 (%)	최대인장강도		최대변형률 (%)
		인장강도 (MPa)	변형률 (%)		인장강도 (MPa)	변형률 (%)	
0.0%	1	5.96	0.012	0.016	7.45	0.016	0.016
	2	5.69	0.001	0.020	7.19	0.018	0.018
	3	5.36	0.018	0.019	6.93	0.018	0.018
	4	5.32	0.008	0.014	6.64	0.012	0.013
	5	4.95	0.012	0.013	5.99	0.008	0.012

[표 4.9] 강섬유 혼입률 0.5% 인장 실험 결과

강섬유 혼입률	구분	재령 14일			재령 28일		
		최대인장강도		최대변형률 (%)	최대인장강도		최대변형률 (%)
		인장강도 (MPa)	변형률 (%)		인장강도 (MPa)	변형률 (%)	
0.5%	1	6.62	0.005	3.054	8.77	0.018	2.806
	2	6.67	0.018	2.396	7.93	0.014	3.275
	3	6.56	0.015	2.396	7.67	0.010	3.249
	4	6.44	0.011	2.865	7.37	0.015	3.753
	5	6.23	0.008	2.466	7.05	0.014	3.123

[표 4.10] 강섬유 혼입률 1.0% 인장 실험 결과

강섬유 혼입률	구분	재령 14일			재령 28일		
		최대인장강도		최대변형률 (%)	최대인장강도		최대변형률 (%)
		인장강도 (MPa)	변형률 (%)		인장강도 (MPa)	변형률 (%)	
1.0%	1	10.36	0.014	3.625	10.97	0.022	4.294
	2	10.13	0.017	3.898	10.50	0.023	4.153
	3	9.56	0.019	3.892	10.11	0.026	4.278
	4	9.52	0.017	3.636	9.59	0.020	3.813
	5	9.16	0.011	3.497	9.34	0.016	3.875

[표 4.11] 강섬유 혼입률 1.5% 인장 실험 결과

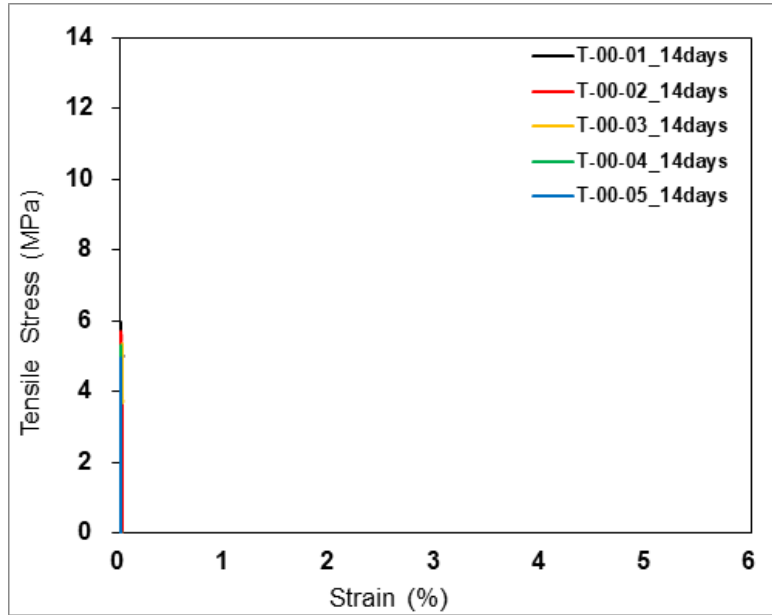
강섬유 혼입률	구분	재령 14일			재령 28일		
		최대인장강도		최대변형률 (%)	최대인장강도		최대변형률 (%)
		인장강도 (MPa)	변형률 (%)		인장강도 (MPa)	변형률 (%)	
1.5%	1	10.32	0.142	3.452	11.44	0.023	4.116
	2	10.18	0.142	3.500	10.68	0.002	3.871
	3	9.51	0.230	3.481	10.31	0.017	3.787
	4	8.84	0.066	3.520	9.32	0.172	4.020
	5	8.62	0.032	3.229	8.85	0.130	4.131

[표 4.12] 강섬유 혼입률 2.0% 인장 실험 결과

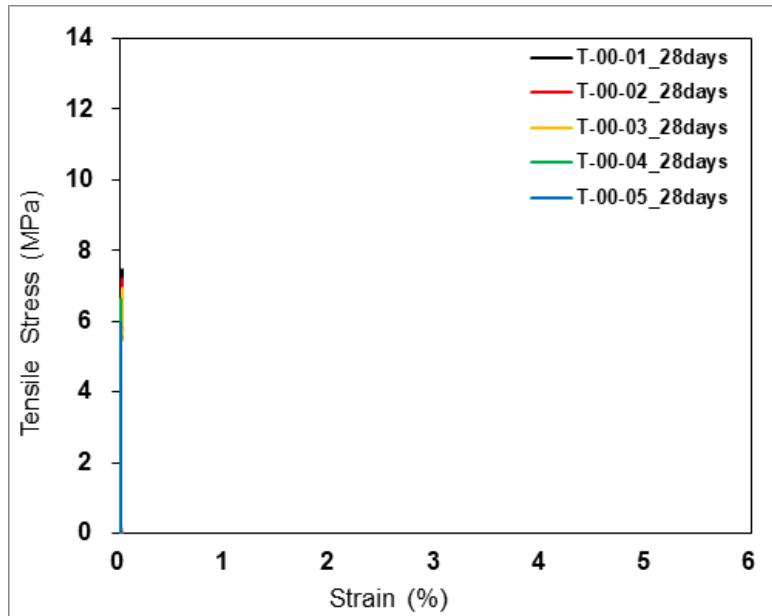
강섬유 혼입률	구분	재령 14일			재령 28일		
		최대인장강도		최대변형률 (%)	최대인장강도		최대변형률 (%)
		인장강도 (MPa)	변형률 (%)		인장강도 (MPa)	변형률 (%)	
2.0%	1	12.71	0.023	3.140	13.19	0.267	3.251
	2	12.24	0.137	3.402	12.57	0.251	4.648
	3	11.96	0.055	3.247	12.23	0.226	4.109
	4	11.24	0.032	4.059	11.32	0.331	3.501
	5	10.36	0.160	3.167	10.23	0.269	4.373

[표 4.13] 강섬유 혼입률별 재령 14일, 28일 평균 인장강도 및 변형률

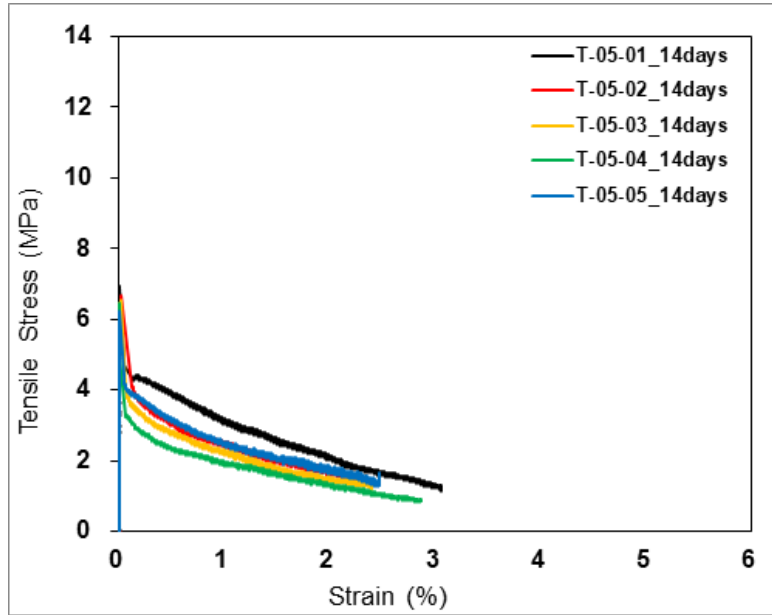
강섬유 혼입률	재령 14일			재령 28일		
	평균 최대인장강도		평균 최대변형률 (%)	평균 최대인장강도		평균 최대변형률 (%)
	인장강도 (MPa)	변형률 (%)		인장강도 (MPa)	변형률 (%)	
0.0%	5.46	0.010	0.016	6.84	0.014	0.015
0.5%	6.50	0.011	2.635	7.76	0.014	3.241
1.0%	9.75	0.016	3.710	10.10	0.021	4.083
1.5%	9.49	0.122	3.436	10.12	0.069	3.985
2.0%	11.70	0.081	3.403	11.91	0.269	3.976



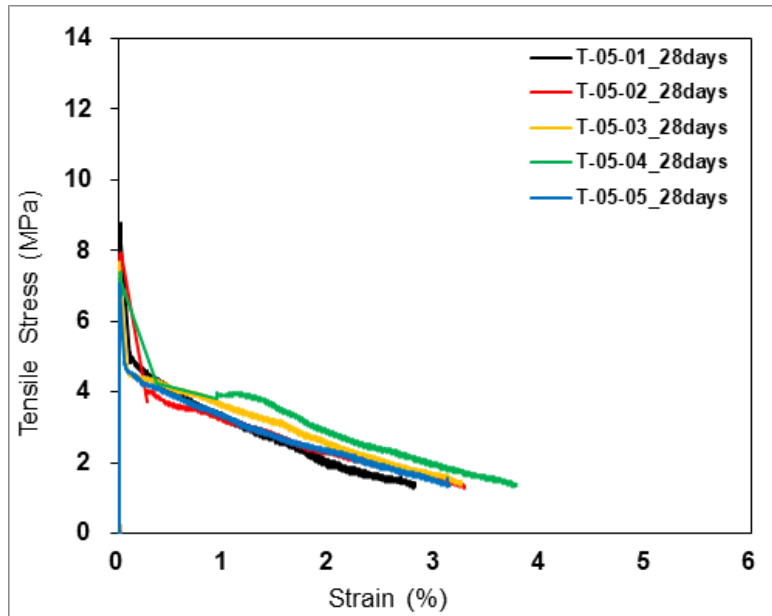
[그림 4.13] 강섬유 혼입률 0.0% 재령 14일 인장 실험 결과



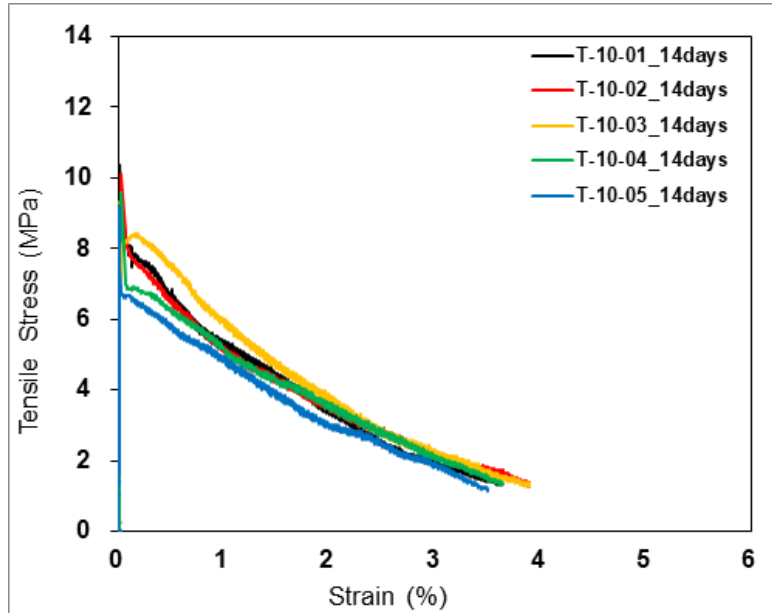
[그림 4.14] 강섬유 혼입률 0.0% 재령 28일 인장 실험 결과



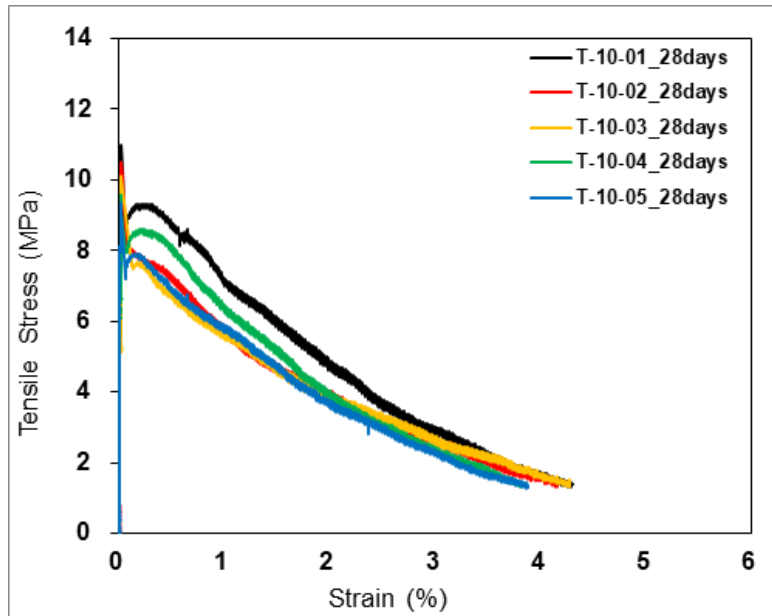
[그림 4.15] 강섬유 혼입률 0.5% 재령 14일 인장 실험 결과



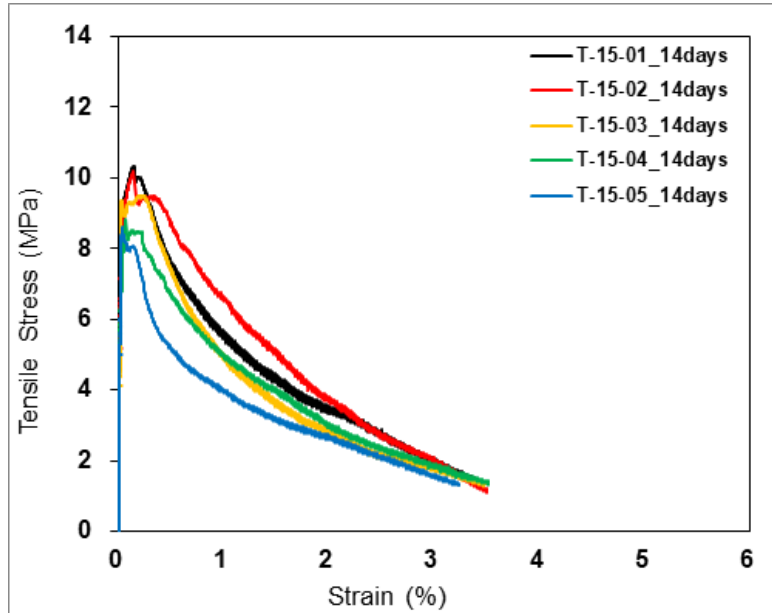
[그림 4.16] 강섬유 혼입률 0.5% 재령 28일 인장 실험 결과



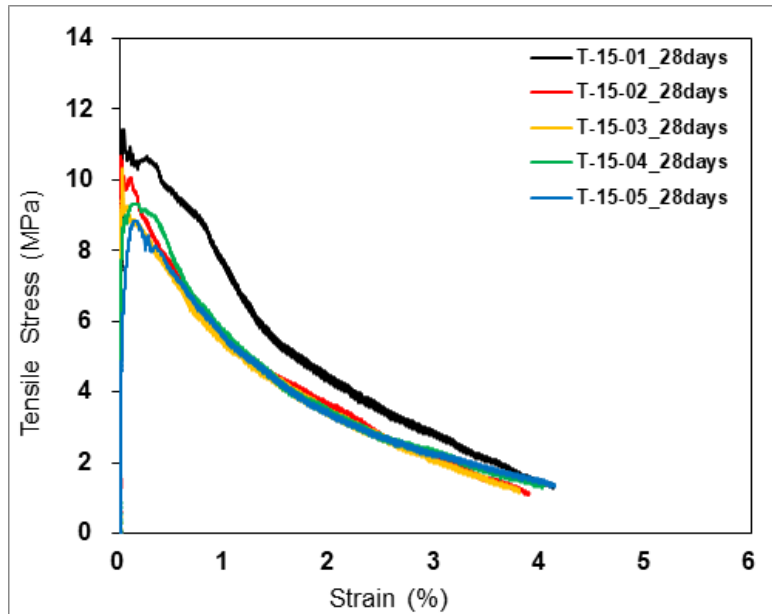
[그림 4.17] 강섬유 혼입률 1.0% 재령 14일 인장 실험 결과



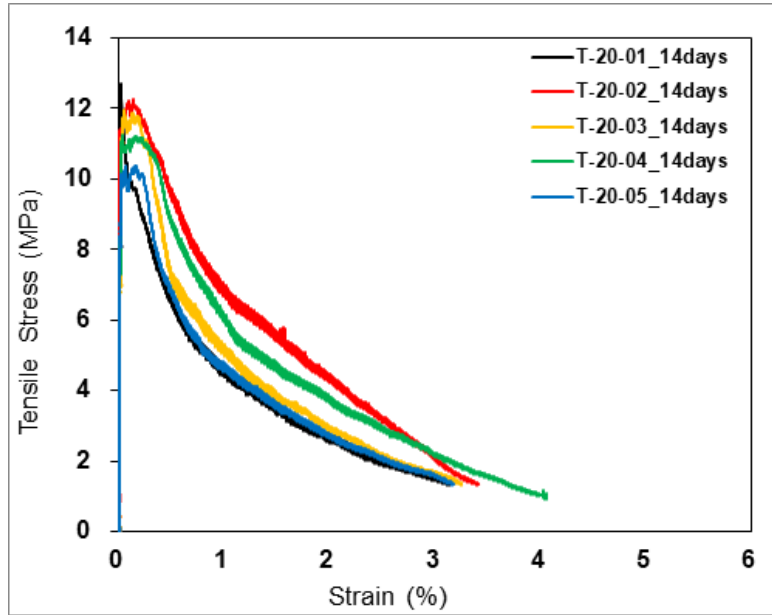
[그림 4.18] 강섬유 혼입률 1.0% 재령 28일 인장 실험 결과



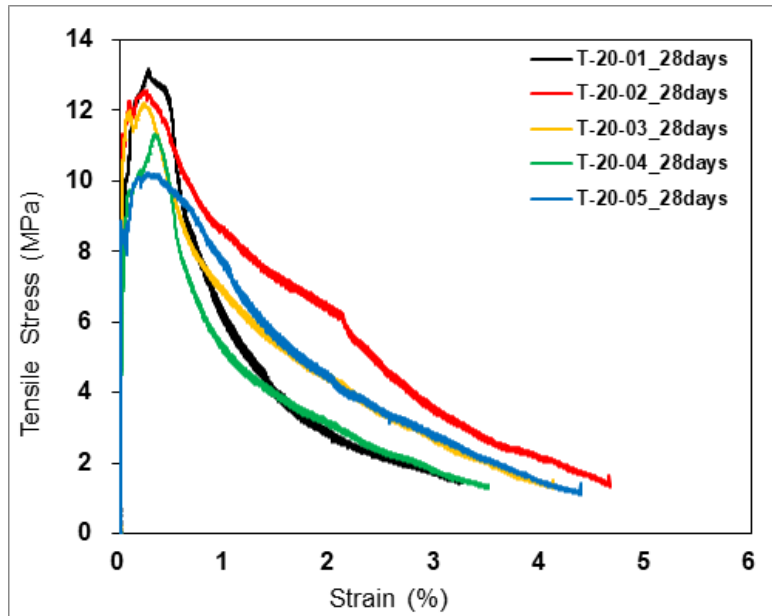
[그림 4.19] 강섬유 혼입률 1.5% 재령 14일 인장 실험 결과



[그림 4.20] 강섬유 혼입률 1.5% 재령 28일 인장 실험 결과



[그림 4.21] 강섬유 혼입률 2.0% 재령 14일 인장 실험 결과



[그림 4.22] 강섬유 혼입률 2.0% 재령 28일 인장 실험 결과



(a) 재령 14일 파괴 전



(b) 재령 14일 파괴 후



(c) 재령 14일 파괴 형상



(d) 재령 28일 파괴 전



(e) 재령 28일 파괴 후



(f) 재령 28일 파괴 형상

[그림 4.23] 강섬유 혼입률 0.0% 인장 파괴 형상



(a) 재령 14일 파괴 전



(b) 재령 14일 파괴 후



(c) 재령 14일 파괴 형상



(d) 재령 28일 파괴 전



(e) 재령 28일 파괴 후



(f) 재령 28일 파괴 형상

[그림 4.24] 강섬유 혼입률 0.5% 인장 파괴 형상



(a) 재령 14일 파괴 전



(b) 재령 14일 파괴 후



(c) 재령 14일 파괴 형상



(d) 재령 28일 파괴 전



(e) 재령 28일 파괴 후



(f) 재령 28일 파괴 형상

[그림 4.25] 강섬유 혼입률 1.0% 인장 파괴 형상



(a) 재령 14일 파괴 전



(b) 재령 14일 파괴 후



(c) 재령 14일 파괴 형상



(d) 재령 28일 파괴 전

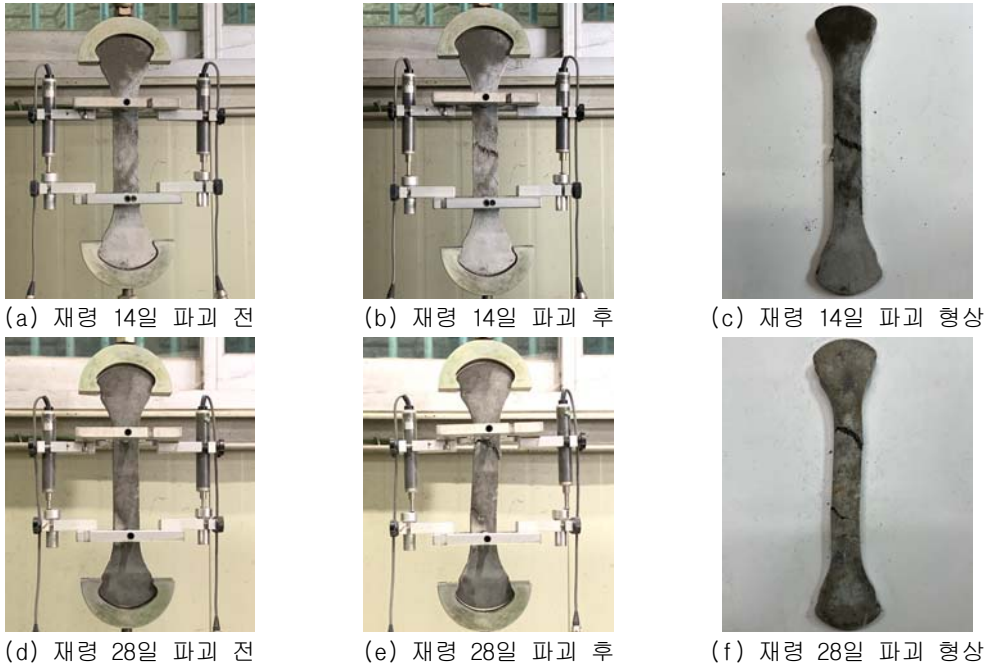


(e) 재령 28일 파괴 후



(f) 재령 28일 파괴 형상

[그림 4.26] 강섬유 혼입률 1.5% 인장 파괴 형상



[그림 4.27] 강섬유 혼입률 2.0% 인장 파괴 형상

4. 휨인장 실험

강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 휨인장 실험 결과는 [표 4.14~19]에 나타냈으며, 결과에 따른 휨인장강도와 휨인장변형을 관계를 [그림 4.28~37]에 나타냈다. 강섬유 혼입률 0.0%의 재령 14일과 28일의 평균 최대휨인장강도는 각각 18.52MPa, 20.77MPa이고 평균 최대처짐은 각각 0.24mm, 0.21mm로 측정되었다. 강섬유 혼입률 0.5%의 재령 14일과 28일의 평균 최대휨인장강도는 각각 20.82MPa, 24.29MPa이고 평균 최대처짐은 각각 7.30mm, 9.07mm로 측정되었다. 강섬유 혼입률 1.0%의 재령 14일과 28일의 평균 최대휨인장강도는 각각 28.18MPa, 34.38MPa이고 평균 최대처짐은 각각 8.58mm, 11.27mm로 측정되었다. 강섬유 혼입률 1.5%의 재령 14일과 28일의 평균 최대휨인장강도는 각각 34.00MPa, 39.96MPa이고 평균 최대처짐은 각각 7.32mm, 16.131mm로 측정되었다. 강섬유 혼입률 2.0%의 재령 14일과 28일의 평균 최대휨인장강도는 각각 44.33MPa, 48.01MPa이고 평균 최대처짐은 각각 10.21mm, 12.85mm로 측정되었다. 강섬유 혼입률에 따른 각 실험체 휨인장강도 및 최대변형률의 오차는 각각

±3.82MPa, ±1.69mm 이내로 측정되었다. 휨인장 실험 시 강섬유의 가교작용으로 인해 균열의 폭을 제어하여 변형연화거동 및 변형경화거동현상이 발생하면서 최대휨인장강도 및 최대처짐이 증가하였다. 재령 28일과 재령 14일의 최대처짐을 비교 시 재령 28일의 경우 최대처짐이 더욱 증가하였다. 이를 통하여 연성능력이 향상된 것을 확인하였다. 또한, 하중-처짐의 관계를 통하여 휨인성계수를 구하였다. 강섬유 혼입률 0.0%의 재령 14일과 28일의 평균 휨인성계수는 각각 1.361MPa, 1.684MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률 0.5%의 재령 14일과 28일의 평균 휨인성계수는 각각 10.531MPa, 10.991MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률 1.0%의 재령 14일과 28일의 평균 휨인성계수는 각각 13.299MPa, 13.995MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률 1.5%의 재령 14일과 28일의 평균 휨인성계수는 각각 16.570MPa, 16.131MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률 2.0%의 재령 14일과 28일의 평균 휨인성계수는 각각 16.505MPa, 15.523MPa로 측정되었다. 재령 28일과 재령 14일의 휨인장계수를 비교 시 차이가 미비하였다. 강섬유 혼입률 1.5%와 2.0%에서의 휨인성계수의 증가에 대한 차이는 미비하였지만 전반적으로 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 휨인성계수가 증가하였다. 이를 통하여 인성능력이 향상된 것을 확인하였다. 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 휨인장 파괴 형상은 [그림 4.38~42]에 나타냈다.

[표 4.14] 강섬유 혼입률 0.0% 휨인장 실험 결과

강섬유 혼입률	구분	재령 14일			재령 28일		
		최대 휨인장강도 (MPa)	최대처짐 (mm)	휨인성 계수 (Mpa)	최대 휨인장강도 (MPa)	최대처짐 (mm)	휨인성 계수 (Mpa)
0.0%	1	18.98	0.27	1.065	22.14	0.20	1.853
	2	18.93	0.18	1.194	20.84	0.20	1.630
	3	18.72	0.32	2.057	20.58	0.25	1.867
	4	18.06	0.26	1.777	20.44	0.19	1.579
	5	17.90	0.16	0.720	19.83	0.21	1.489

[표 4.15] 강섬유 혼입률 0.5% 휨인장 실험 결과

강섬유 혼입률	구분	재령 14일			재령 28일		
		최대 휨인장강도 (MPa)	최대처짐 (mm)	휨인성 계수 (Mpa)	최대 휨인장강도 (MPa)	최대처짐 (mm)	휨인성 계수 (Mpa)
0.5%	1	22.06	8.09	11.799	27.06	8.81	13.054
	2	21.54	6.69	10.639	25.68	9.68	10.033
	3	20.87	6.65	10.721	24.25	10.10	10.609
	4	20.50	8.06	10.065	23.22	8.52	11.373
	5	19.11	7.02	9.433	21.24	8.23	9.888

[표 4.16] 강섬유 혼입률 1.0% 휨인장 실험 결과

강섬유 혼입률	구분	재령 14일			재령 28일		
		최대 휨인장강도 (MPa)	최대처짐 (mm)	휨인성 계수 (Mpa)	최대 휨인장강도 (MPa)	최대처짐 (mm)	휨인성 계수 (Mpa)
1.0%	1	31.70	9.84	12.106	37.75	11.67	19.448
	2	30.46	7.71	13.567	35.89	10.87	11.073
	3	27.35	7.67	14.670	33.69	11.65	10.611
	4	25.99	8.21	14.123	32.47	10.43	14.564
	5	25.40	9.45	12.029	32.09	11.75	14.279

[표 4.17] 강섬유 혼입률 1.5% 휨인장 실험 결과

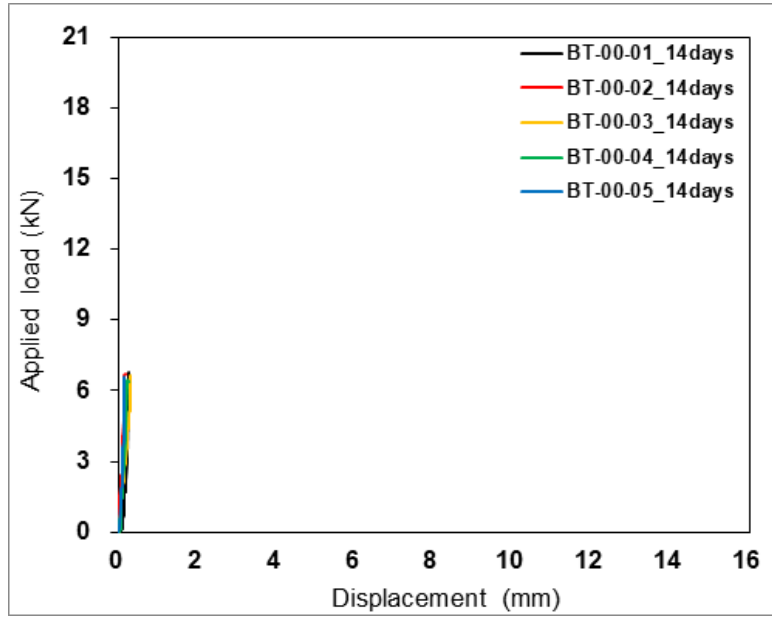
강섬유 혼입률	구분	재령 14일			재령 28일		
		최대 휨인장강도 (MPa)	최대처짐 (mm)	휨인성 계수 (Mpa)	최대 휨인장강도 (MPa)	최대처짐 (mm)	휨인성 계수 (Mpa)
1.5%	1	35.78	8.14	18.037	40.99	9.82	15.928
	2	35.46	6.94	16.374	40.45	10.35	15.090
	3	34.86	6.84	16.374	39.97	11.83	14.392
	4	33.18	7.84	16.039	39.95	10.08	17.443
	5	30.73	6.84	16.028	38.42	9.11	17.804

[표 4.18] 강섬유 혼입률 2.0% 휨인장 실험 결과

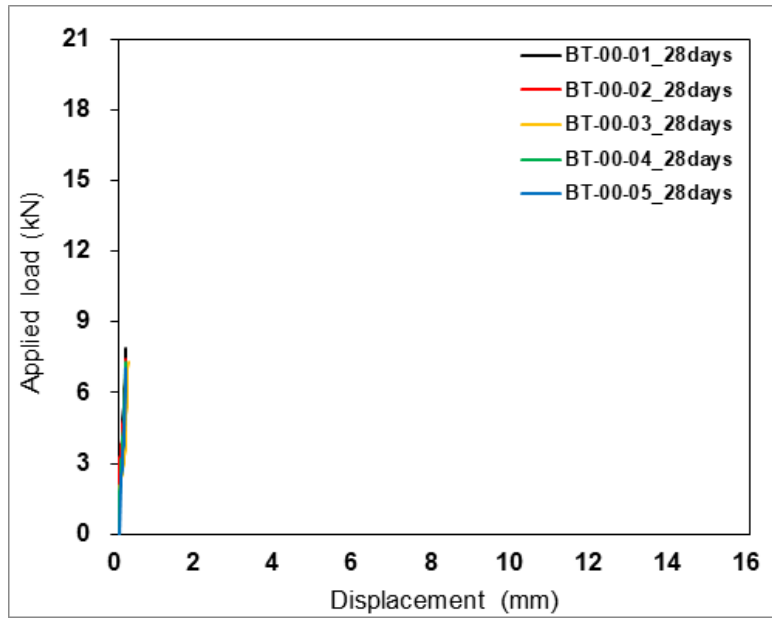
강섬유 혼입률	구분	재령 14일			재령 28일		
		최대 휨인장강도 (MPa)	최대처짐 (mm)	휨인성 계수 (Mpa)	최대 휨인장강도 (MPa)	최대처짐 (mm)	휨인성 계수 (Mpa)
2.0%	1	47.48	11.37	16.449	50.27	12.70	17.940
	2	46.01	9.18	18.197	48.55	13.37	15.021
	3	45.65	9.41	15.587	48.32	12.62	12.997
	4	41.99	11.54	16.799	46.70	13.23	17.639
	5	40.51	9.57	15.494	46.19	12.31	14.019

[표 4.19] 강섬유 혼입률별 재령 14일, 28일 평균 휨인장강도 및 변형률

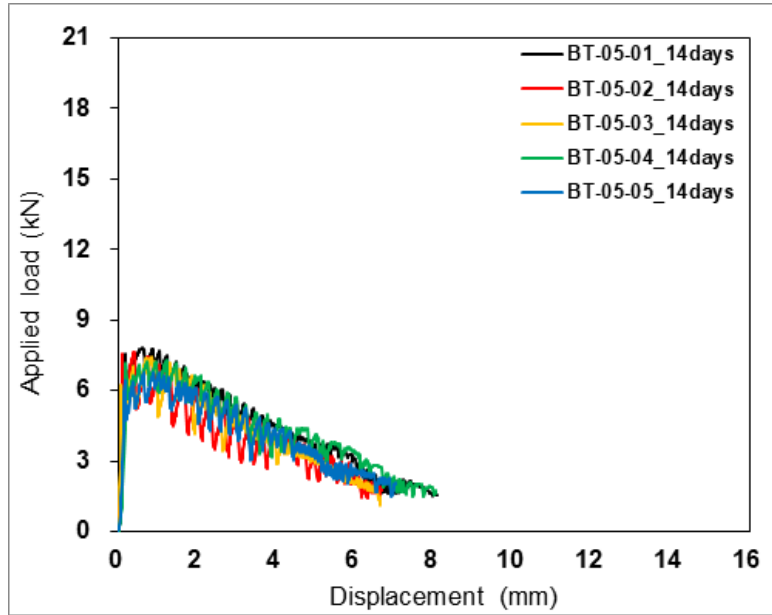
강섬유 혼입률	재령 14일			재령 28일		
	평균 최대 휨인장강도 (MPa)	평균 최대처짐 (mm)	평균 휨인성 계수 (Mpa)	평균 최대 휨인장강도 (MPa)	평균 최대처짐 (mm)	평균 휨인성 계수 (Mpa)
0.0%	18.52	0.24	1.361	20.77	0.21	1.684
0.5%	20.82	7.30	10.531	24.29	9.07	10.991
1.0%	28.18	8.58	13.299	34.38	11.27	13.995
1.5%	34.00	7.32	16.570	39.96	10.24	16.131
2.0%	44.33	10.21	16.505	48.01	12.85	15.523



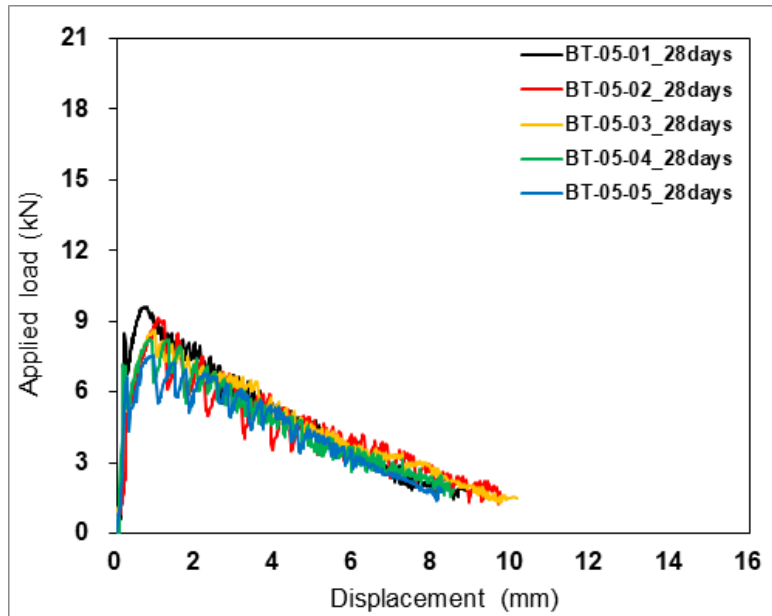
[그림 4.28] 강섬유 혼입률 0.0% 재령 14일 휨인장 실험 결과



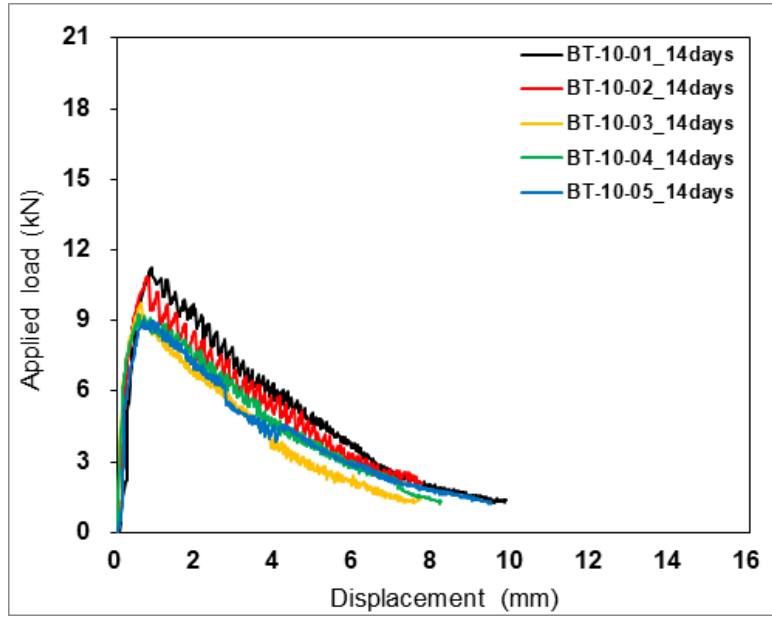
[그림 4.29] 강섬유 혼입률 0.0% 재령 28일 휨인장 실험 결과



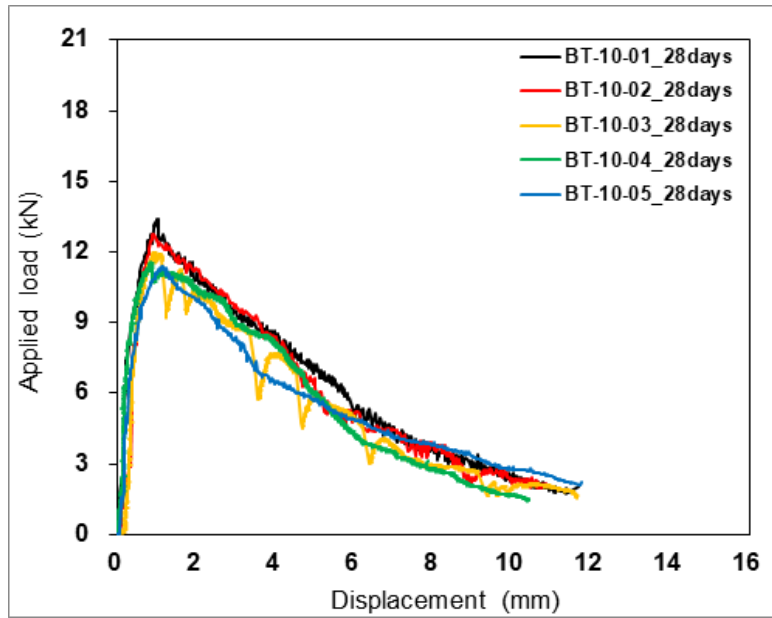
[그림 4.30] 강섬유 혼입률 0.5% 재령 14일 휨인장 실험 결과



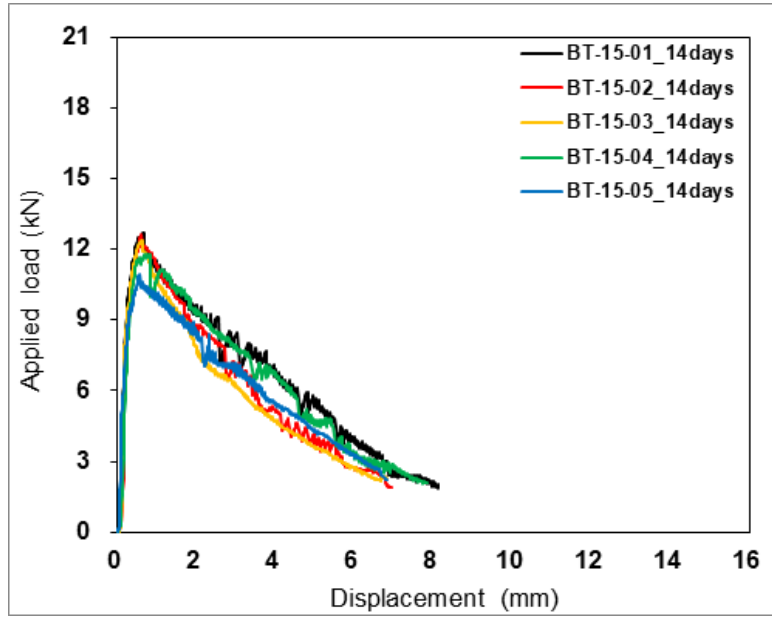
[그림 4.31] 강섬유 혼입률 0.5% 재령 28일 휨인장 실험 결과



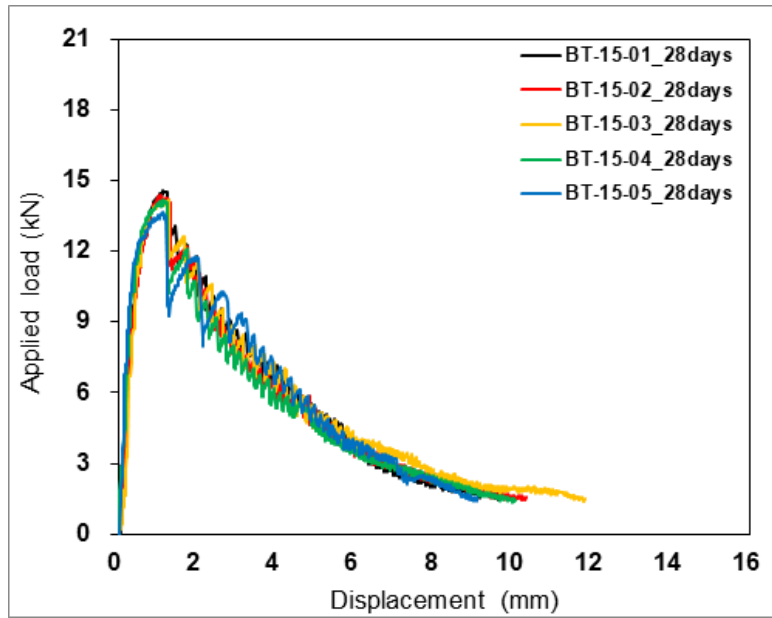
[그림 4.32] 강섬유 혼입률 1.0% 재령 14일 휨인장 실험 결과



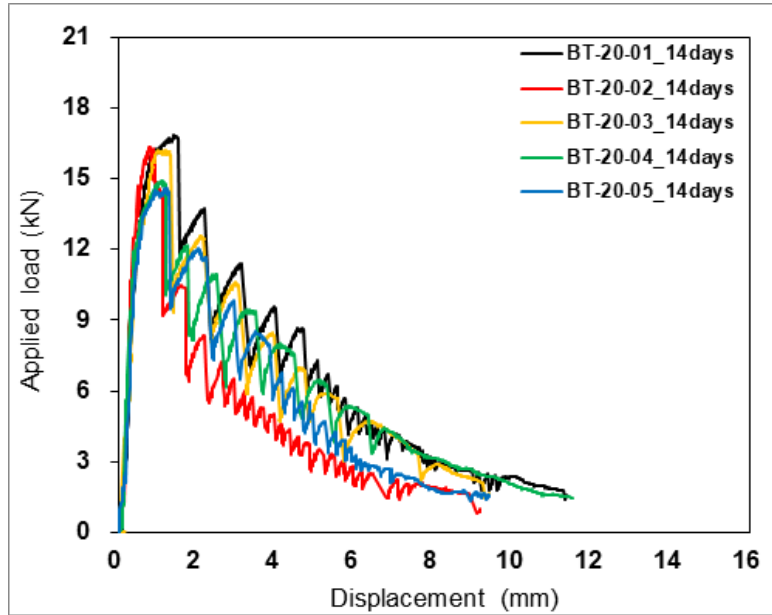
[그림 4.33] 강섬유 혼입률 1.0% 재령 28일 휨인장 실험 결과



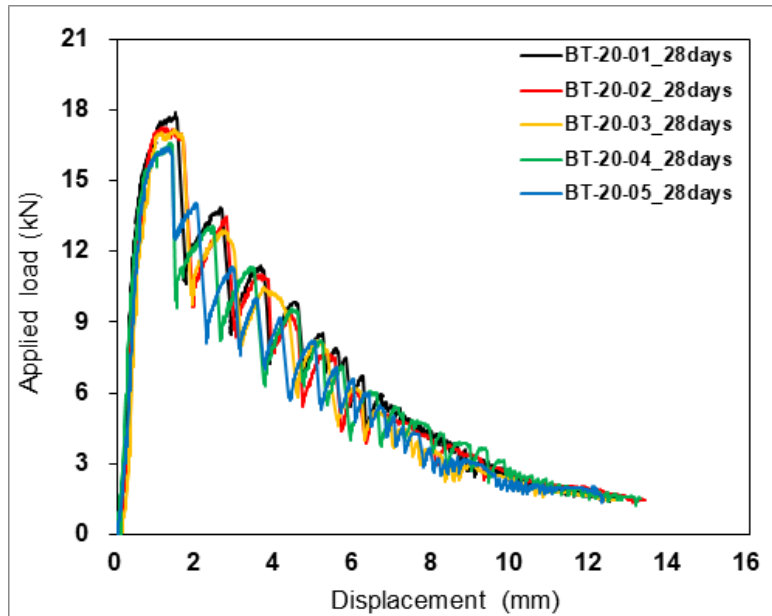
[그림 4.34] 강섬유 혼입률 1.5% 재령 14일 휨인장 실험 결과



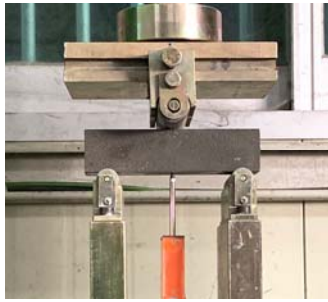
[그림 4.35] 강섬유 혼입률 1.5% 재령 28일 휨인장 실험 결과



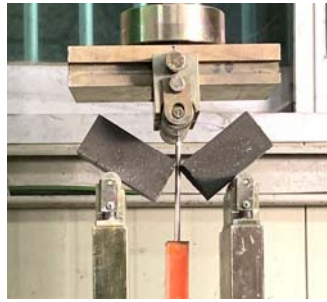
[그림 4.36] 강섬유 혼입률 2.0% 재령 14일 휨인장 실험 결과



[그림 4.37] 강섬유 혼입률 2.0% 재령 28일 휨인장 실험 결과



(a) 재령 14일 파괴 전



(b) 재령 14일 파괴 후



(c) 재령 14일 파괴 형상



(d) 재령 28일 파괴 전

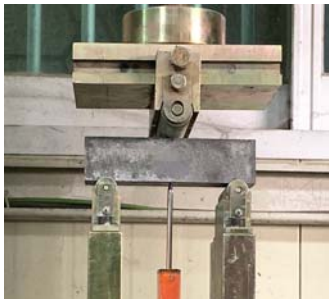


(e) 재령 28일 파괴 후



(f) 재령 28일 파괴 형상

[그림 4.38] 강섬유 혼입률 0.0% 휨인장 파괴 형상



(a) 재령 14일 파괴 전



(b) 재령 14일 파괴 후



(c) 재령 14일 파괴 형상



(d) 재령 28일 파괴 전



(e) 재령 28일 파괴 후



(f) 재령 28일 파괴 형상

[그림 4.39] 강섬유 혼입률 0.5% 휨인장 파괴 형상



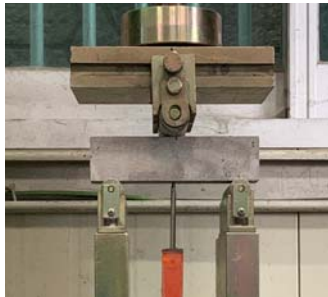
(a) 재령 14일 파괴 전



(b) 재령 14일 파괴 후



(c) 재령 14일 파괴 형상



(d) 재령 28일 파괴 전



(e) 재령 28일 파괴 후



(f) 재령 28일 파괴 형상

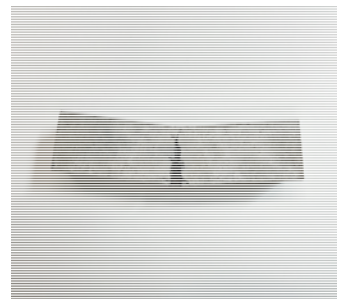
[그림 4.40] 강섬유 혼입률 1.0% 휨인장 파괴 형상



(a) 재령 14일 파괴 전



(b) 재령 14일 파괴 후



(c) 재령 14일 파괴 형상



(d) 재령 28일 파괴 전

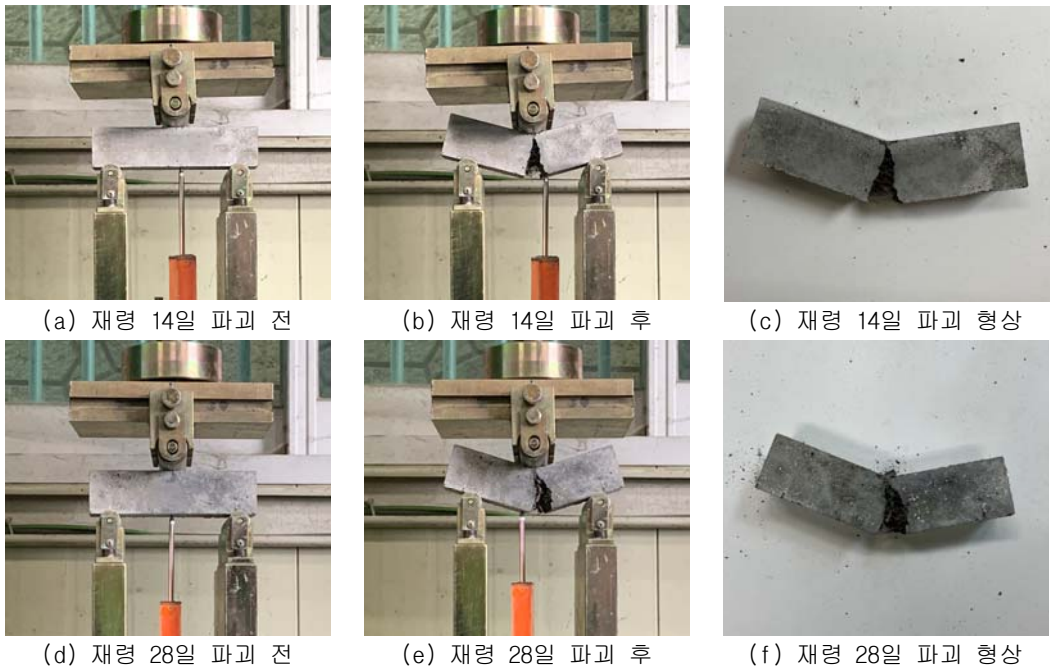


(e) 재령 28일 파괴 후



(f) 재령 28일 파괴 형상

[그림 4.41] 강섬유 혼입률 1.5% 휨인장 파괴 형상



[그림 4.42] 강섬유 혼입률 2.0% 휨인장 파괴 형상

5. 전단 실험

강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 전단 실험 결과는 [표 4.20~25]과 [그림 4.43~49]에 나타냈다. 강섬유 혼입률 0.0%의 재령 14일과 28일의 평균 전단강도는 각각 9.30MPa, 12.16MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률 0.5%의 재령 14일과 28일의 평균 전단강도는 각각 11.97MPa, 13.93MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률 1.0%의 재령 14일과 28일의 평균 전단강도는 각각 14.17MPa, 17.12MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률 1.5%의 재령 14일과 28일의 평균 전단강도는 각각 19.42MPa, 23.16MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률 2.0%의 재령 14일과 28일의 평균 전단강도는 각각 24.92MPa, 27.89MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률에 따른 각 실험체 전단강도의 오차는 $\pm 2.95\text{MPa}$ 이내로 측정되었다. 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 전단강도가 향상되었고 1.5% 이후로 다소 크게 향상하였다. 재령 14일과 28일의 전단강도 차이는 1.96~3.74MPa 정도로 비슷한 차이를 보였다. 강섬유 혼입률에 따른 파괴 형상을 보았을 때 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 갑작스러운 취성파괴가 아닌 연성파괴의 형태로 거동하였다. 또한, 모든 실험체가

전단균열을 유도한 전단면에서 균열이 발생하여 최종파괴가 일어났다. 강섬유를 혼입한 섬유 시멘트 복합체의 전단 파괴 형상은 [그림 4.50~54]에 나타냈다.

[표 4.20] 강섬유 혼입률 0.0% 전단 실험 결과

강섬유 혼입률	구분	재령 14일 전단강도 (MPa)	재령 28일 전단강도 (MPa)
0.0%	1	8.69	10.68
	2	8.89	11.83
	3	9.35	12.15
	4	9.56	12.81
	5	10.04	13.34

[표 4.21] 강섬유 혼입률 0.5% 전단 실험 결과

강섬유 혼입률	구분	재령 14일 전단강도 (MPa)	재령 28일 전단강도 (MPa)
0.5%	1	10.75	13.18
	2	11.30	13.86
	3	12.35	13.91
	4	12.49	14.09
	5	12.97	14.62

[표 4.22] 강섬유 혼입률 1.0% 전단 실험 결과

강섬유 혼입률	구분	재령 14일 전단강도 (MPa)	재령 28일 전단강도 (MPa)
1.0%	1	13.13	15.61
	2	13.52	16.50
	3	14.60	17.71
	4	14.71	17.85
	5	14.87	17.92

[표 4.23] 강섬유 혼입률 1.5% 전단 실험 결과

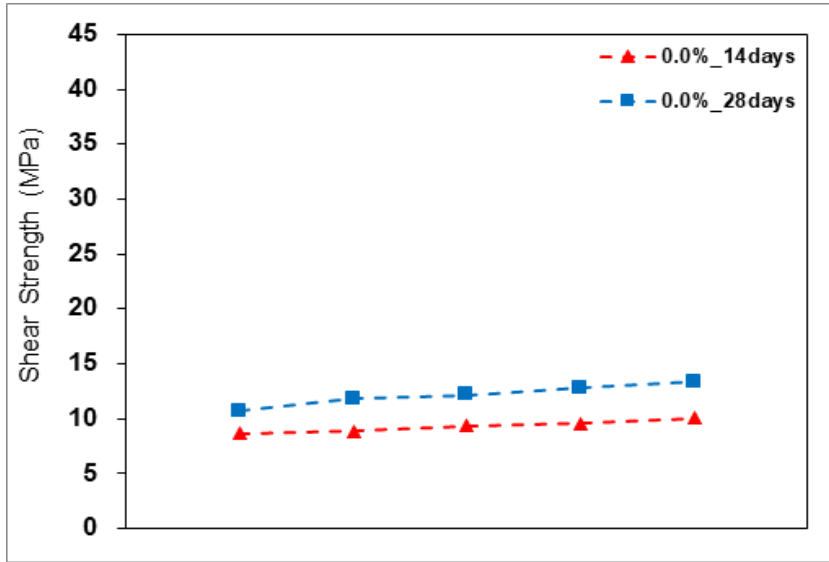
강섬유 혼입률	구분	재령 14일 전단강도 (MPa)	재령 28일 전단강도 (MPa)
1.5%	1	16.48	21.86
	2	19.73	21.95
	3	20.05	23.31
	4	20.33	23.47
	5	20.53	25.23

[표 4.24] 강섬유 혼입률 2.0% 전단 실험 결과

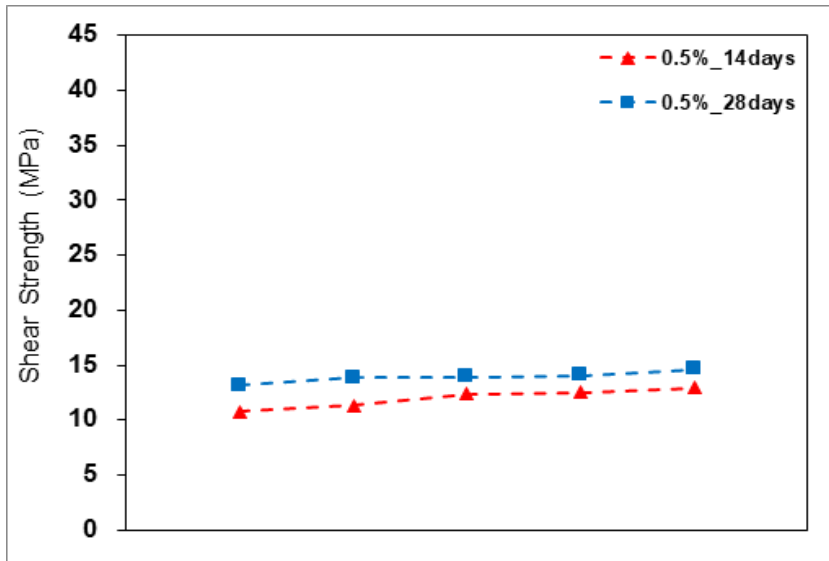
강섬유 혼입률	구분	재령 14일 전단강도 (MPa)	재령 28일 전단강도 (MPa)
2.0%	1	23.38	27.00
	2	25.16	27.32
	3	25.19	27.87
	4	25.41	28.28
	5	25.44	29.01

[표 4.25] 강섬유 혼입률별 재령 14일, 28일 평균 전단강도

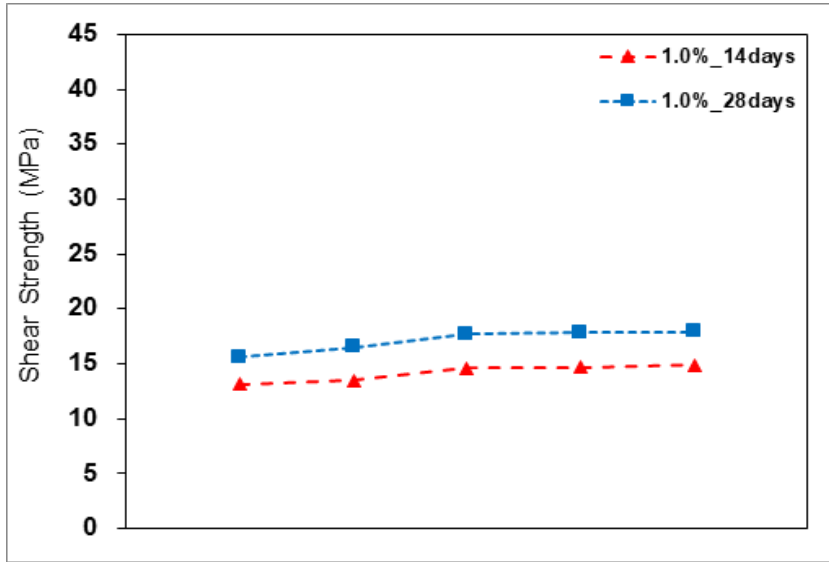
강섬유 혼입률	재령 14일 평균 전단강도 (MPa)	재령 28일 평균 전단강도 (MPa)
0.0%	9.30	12.16
0.5%	11.97	13.93
1.0%	14.17	17.12
1.5%	19.42	23.16
2.0%	24.92	27.89



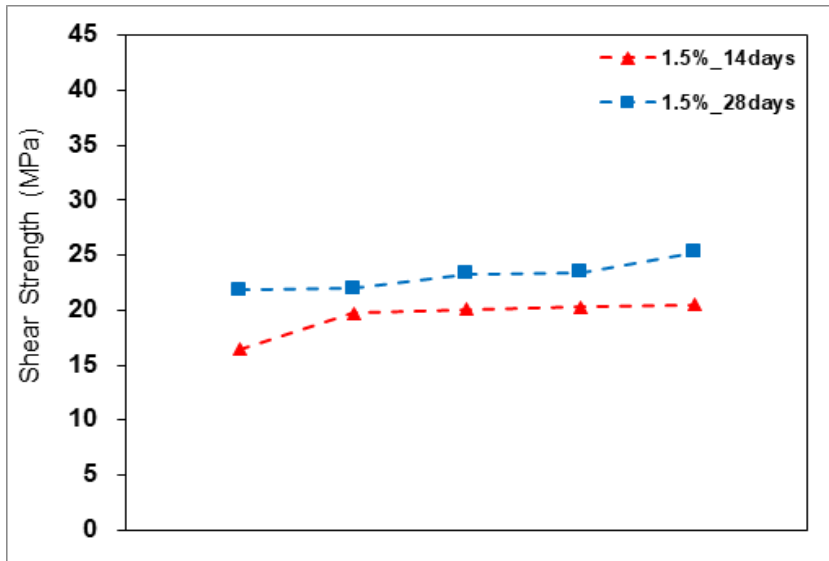
[그림 4.43] 강섬유 혼입률 0.0% 전단 실험 결과



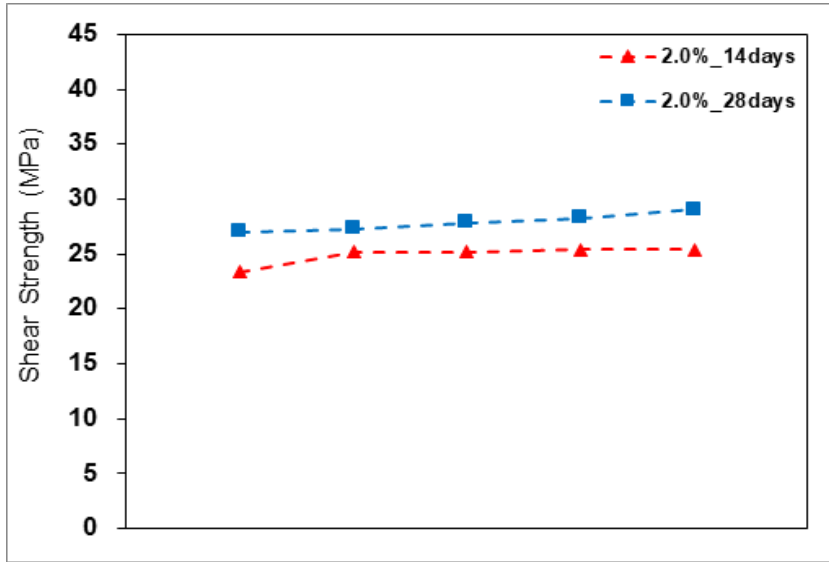
[그림 4.44] 강섬유 혼입률 0.5% 전단 실험 결과



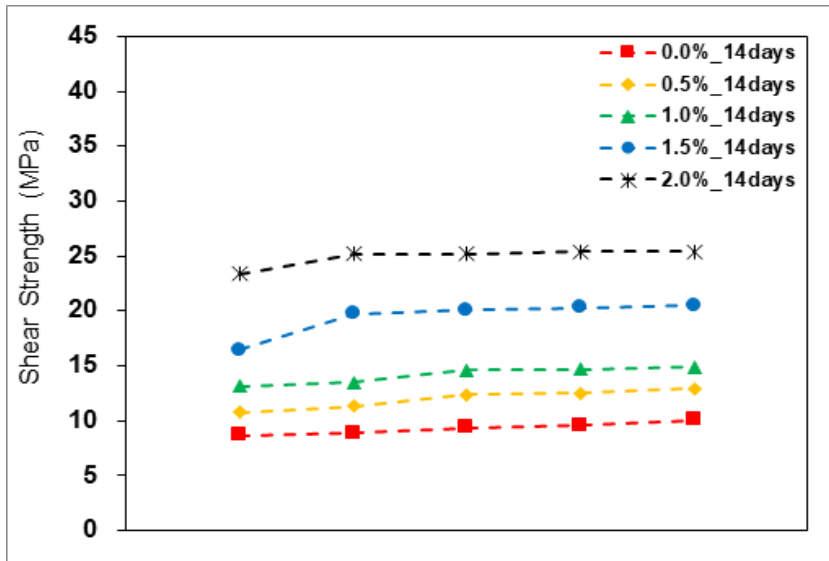
[그림 4.45] 강섬유 혼입률 1.0% 전단 실험 결과



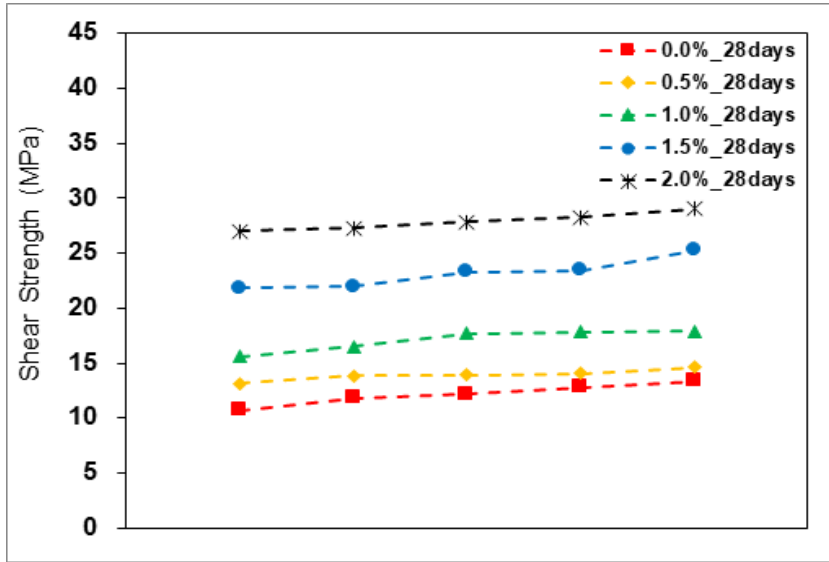
[그림 4.46] 강섬유 혼입률 1.5% 전단 실험 결과



[그림 4.47] 강섬유 혼입률 2.0% 전단 실험 결과



[그림 4.48] 재령 14일 강섬유 혼입률별 전단 실험 결과



[그림 4.49] 재령 28일 강섬유 혼입률별 전단 실험 결과



[그림 4.50] 강섬유 혼입률 0.0% 전단 파괴 형상



(a) 재령 14일 파괴 전



(b) 재령 14일 파괴 후



(c) 재령 14일 파괴 형상



(d) 재령 28일 파괴 전



(e) 재령 28일 파괴 후



(f) 재령 28일 파괴 형상

[그림 4.51] 강섬유 혼입률 0.5% 전단 파괴 형상



(a) 재령 14일 파괴 전



(b) 재령 14일 파괴 후



(c) 재령 14일 파괴 형상



(d) 재령 28일 파괴 전



(e) 재령 28일 파괴 후



(f) 재령 28일 파괴 형상

[그림 4.52] 강섬유 혼입률 1.0% 전단 파괴 형상



(a) 재령 14일 파괴 전



(b) 재령 14일 파괴 후



(c) 재령 14일 파괴 형상



(d) 재령 28일 파괴 전



(e) 재령 28일 파괴 후



(f) 재령 28일 파괴 형상

[그림 4.53] 강섬유 혼입률 1.5% 전단 파괴 형상



(a) 재령 14일 파괴 전



(b) 재령 14일 파괴 후



(c) 재령 14일 파괴 형상



(d) 재령 28일 파괴 전



(e) 재령 28일 파괴 후



(f) 재령 28일 파괴 형상

[그림 4.54] 강섬유 혼입률 2.0% 전단 파괴 형상

제3절 연구적 고찰

본 연구에서는 건설 현장에서 사용하는 일반콘크리트는 조직 구성이 치밀하지 않아 탄산화, 염해, 동결융해 등으로 균열이 발생하여 구조적 성능이 감소하고 구조물에 응력 집중이 발생할 시 취성적 파괴 양상이 되어 자칫 인명사고가 발생하게 된다. 이러한 문제점들을 해결하고자 강섬유 혼입률에 따른 시멘트 복합체를 연구하여 배합설계를 제시하였으며, 역학 실험을 수행하였다.

역학 실험을 수행함에 있어 실험체 제조과정에서 강섬유를 뭉치지 않도록 분산시켜 투입하였으나 슬럼프 플로 시험 시 강섬유의 뭉침 현상이 발생하여 강섬유의 균일한 분포의 어려움을 확인하였다.

압축 실험 시 강섬유 혼입률 0.0%, 0.5%, 1.0%의 압축강도가 목표 압축강도에 도달하지 못한 실험 결과를 보면서 강섬유의 균일한 분포와 혼입된 섬유의 배열 방법에 따른 연구가 앞으로 더 진행되어야할 과제라고 판단하였다.

인장 및 휨인장 실험을 통하여 최대 인장강도 도달 시 바로 파괴되지 않고 강섬유의 혼입으로 다중미세균열의 발생과 강섬유의 가교작용으로 변형연화거동 및 변형경화거동현상의 발생 및 휨인성 계수가 향상되는 것들을 통해 연성능력 및 인성능력이 확보됨을 확인하였다.

전단 실험 시 강섬유의 혼입률에 따른 파괴 형상을 보면서 갑작스런 취성파괴가 일어나지 않고 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 연성파괴의 형태로 거동함을 확인하였다.

강섬유 시멘트 복합체의 역학실험 결과 강섬유 혼입 시 섬유 시멘트 복합체의 역학적 성능이 향상됨을 확인하였고 특히 연성능력 및 인성능력이 향상하는 것을 확인하였지만 불규칙적인 재료적 특성이 있어 지진이 자주 발생하는 지역의 학교나 병원 등의 공공건물의 현장에 적용되기 위해서는 더 많은 연구와 명확한 규정이 마련되어야 한다고 사료된다.

제5장 결론

본 연구에서는 일반 콘크리트의 취성적 거동과 외부환경의 영향에 대한 취약한 특성 등의 문제점들을 해결하기 위하여 강섬유의 혼입률에 따른 섬유 시멘트 복합체의 활용으로 섬유 시멘트 복합체의 배합 설계를 제시하였다. 제시한 배합 설계의 고성능, 고내구성, 고유동성의 성능을 검증하고자 강섬유 혼입률에 따른 슬럼프 플로, 압축, 인장, 휨인장, 전단 등의 역학 실험을 수행하였고 기초적 자료를 확보하였다. 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 슬럼프 플로 시험 결과 평균값이 700mm로 측정되었고 그 오차가 30mm 이내로 측정되었다. 오차는 외부 환경적인 요소와 그로 인한 고성능 감수제의 투입으로 발생한 것으로 판단된다. 강섬유 혼입률 2.0%에서는 약간의 뭉침현상이 발생하였으나 유동성이 높아 자기충전과 시공성의 확보가 충분한 것으로 판단된다.
- 2) 압축 실험 결과 강섬유 혼입률 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%에 따른 재령 28일의 평균 압축강도가 각각 106.29MPa, 110.65MPa, 112.56MPa, 128.05MPa, 131.04MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률 0.0%, 0.5%, 1.0%가 목표 압축강도에 충족하지 못하였지만 강섬유 혼입률 1.5%와 2.0%가 목표 압축강도 120MPa에 충족하였다. 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 압축강도가 향상하였지만 정도가 크지 않았고 1.5%일 때 다소 크게 향상하였다.
- 3) 인장 실험 결과 강섬유 혼입률 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%에 따른 14일의 평균 인장강도가 최소 5.46MPa, 최대 11.70MPa이며, 재령 28일의 평균 인장강도가 최소 6.84MPa, 최대 11.91MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 인장강도가 향상하였다. 또한, 강섬유 혼입률 0.0%의 평균 최대변형률이 재령 14일과 28일 각각 0.016%, 0.015%이지만 강섬유 혼입 시 평균 최대변형률이 재령 14일과 28일 각각 2.635~3.710%, 3.241~4.083%로 향상하였다. 인장 실험 시 다중미세균열의 발생과 강섬유의 가교작용으로 인해 균열의 폭을 제어하여 변형연화거동현상이 발생하였고 이를 통해 인장강도 및 연성능력의 확보가 충분한 것으로 판단된다.

4) 휨인장 실험 결과 강섬유 혼입률 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%에 따른 14일의 평균 최대휨인장강도가 최소 18.52MPa, 최대 44.33MPa이며, 재령 28일의 평균 최대휨인장강도가 최소 20.77MPa, 최대 48.01MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률 0.0%의 평균 최대처짐이 재령 14일과 28일 각각 0.24mm, 0.21mm이지만 강섬유를 혼입 시 최대처짐이 재령 14일과 28일 각각 7.30~10.21mm, 9.07~12.85mm로 대폭 증가하였다. 이를 통해 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 최대휨인장강도와 최대처짐이 증가하는 것을 확인하였다. 휨인장 실험 시 다중미세균열의 발생과 강섬유의 가교작용으로 인해 균열의 폭을 제어하여 변형연화거동 및 변형경화거동현상이 발생하였다. 이를 통하여 강섬유를 혼입 시 휨인장강도 및 연성 능력이 향상하는 것을 확인하였다. 또한, 강섬유 혼입률 0.0%의 평균 휨인성계수가 재령 14일과 28일 각각 1.361MPa, 1.684MPa이지만 강섬유를 혼입 시 평균 휨인성계수가 재령 14일과 28일 각각 10.531~16.570MPa, 10.991~16.131MPa로 대폭 증가하였다. 이를 통하여 강섬유를 혼입 시 인성 능력이 향상하는 것을 확인하였다.

5) 전단 실험 결과 강섬유 혼입률 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%에 따른 재령 14일의 평균 전단강도가 최소 9.30MPa, 최대 24.92MPa이며, 재령 28일의 평균 전단강도가 최소 12.16MPa, 최대 27.89MPa로 측정되었다. 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 전단강도가 향상하였고 1.5% 이후로 다소 크게 향상하였다. 강섬유 혼입률에 따른 파괴 형상을 보았을 때 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 갑작스러운 취성파괴가 아닌 연성파괴의 형태로 거동하는 것을 확인하였다.

5) 역학 실험 결과 강섬유 혼입률 0.0%, 0.5%, 1.0%가 목표 압축강도에 충족하지 못하였지만 강섬유 혼입률 1.5%와 2.0%가 목표 압축강도 120MPa에 충족하였다. 강섬유 혼입 시 섬유 시멘트 복합체의 역학적 성능이 향상됨을 확인하였고 연성파괴의 형태로 거동하며, 높은 유동성으로 인해 고성능, 고내구성, 고유동성의 성능을 확인하였다. 하지만 불규칙적인 재료적 특성이 있어 현장에 적용되기 위해서는 더 많은 연구와 명확한 규정이 마련되어야 한다고 사료된다.

참고문헌

1. 국토교통부, “콘크리트공사 일반사항”, KCS 14 20 01, 2022
2. 국토교통부, “일반콘크리트”, KCS 14 20 10, 2022
3. 문길현, "비정형 곡면 콘크리트 및 시멘트 복합체 가새 시스템 적용 빌딩 내 진설계 및 평가", 석사논문, 조선대학교, 2023
4. 조창근, 한병찬, “이정환, 김윤용, 압출성형 ECC 패널을 이용하여 제작된 복합바닥슬래브의 휨거동”, 한국콘크리트학회 논문집, Vol.22(5), pp.695-702, 2010
5. Cho, C.G., Kim, Y.Y., Feoc, L., Huid, D., “Cyclic Responses of Reinforced Concrete Composite Columns Strengthened in the Plastic Hinge Region by HPFRC Mortar, Composite Structures”, Vol.94(7), pp.2246-2253, 2012
6. Cho, C.G., Lee, B. Y., Kim, Y.Y., Han, B. C., Lee, S. J., “Flexural Behavior of Extruded DFRCC Panel and Reinforced Concrete Composite Slab”, Advances in Materials Science and Engineering, Vol.2012, pp.1-8, 2012
7. 박완신, 윤현도, 전에스더, 남상현, "섬유의 혼입이 변형 경화형 시멘트 복합체에 미치는 영향", 대한건축학회논문집, Vol.25(11), pp.29-36, 2009
8. 조창근, 박창환, 김화중, "비정질 강섬유 혼입시멘트 모르타르의 직접인장특성", 한국콘크리트학회 논문집, Vol.23(2), pp.237-238, 2011
9. 김경철, “휨을 받는 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 보의 구조 거동”, 박사논문, 군산대학교, 2018
10. 김철구, 박홍근, 홍건호, 강수민, “강섬유보강 콘크리트와 일반 콘크리트 합성보의 전단강도”, 콘크리트학회논문집, Vol.27(5), pp.501-510, 2015
11. 배백일, 최현기, 최창식, “초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장강도와 압축강도 사이의 상관관계에 관한 연구”, 콘크리트학회논문집, Vol.27(3), pp.252-262, 2015
12. 박지웅, 이건철, 고경택, 류금성, “강섬유 보강 UHPC의 직접인장 특성 및 신뢰성 검토에 관한 연구”, 한국건축시공학회지 Vol.18(2), pp.125-132, 2018

13. 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, 2015
14. Kostova, K., Ibell, T., Darby, A. and Evernden, M., “Using Fabric to Shape Appropriate Concrete Structures”, *SCMT4*, 2016
15. 하기주, 신종학, 곽윤근, 권철성, “초기재령 강섬유보강 철근콘크리트 보의 구조성능 평가 및 개선”, *한국구조물진단학회*, Vol.3(3), pp.129-137, 1999
16. 조창근, “FRP 콘크리트 복합구조 부재시스템의 휨 및 전단 거동예측”, *대한건축학회논문집*, Vol.20(8), pp.35-42, 2004
17. 한성진, “고인성 섬유복합체 활용 내진 개선 콘크리트 기동공법”, 석사논문, *조선대학교*, 2013
18. 박창환, “비정질 마이크로 강섬유 복합체 적용 콘크리트 보의 거동 및 설계”, 석사논문, *조선대학교*, 2013
19. 이승중, “고연성시멘트복합체를 활용한 철근콘크리트 복합슬래브의 구조 및 시공 특성”, 박사논문, *조선대학교*, 2014
20. 문형주, “합성섬유 보강된 고성능 시멘트복합체를 사용한 구조부재의 성능평가”, 박사논문, *조선대학교*, 2019
21. 김호연, “고성능 섬유보강 시멘트복합재 활용 곡선 및 비정형 구조부재의 성능평가”, 박사논문, *조선대학교*, 2019
22. 이승윤, “100MPa 초고성능 시멘트 복합체의 강섬유 혼입률에 따른 역학적 성능”, 석사논문, *조선대학교*, 2020
23. 임현진, “알칼리활성 슬래그 무시멘트 섬유복합체 개발 및 구조부재의 성능평가”, 박사논문, *조선대학교*, 2021
24. 최용준, “초고성능 콘크리트를 적용한 프리캐스트 보의 접합부 설계”, 석사논문, *조선대학교*, 2022
25. 국토교통부, “섬유보강 콘크리트”, KCS 14 20 22, 2022
26. 서울특별시, “섬유보강 콘크리트”, SMCS 14 20 22, 2018
27. 산업표준심의회, “콘크리트용 강섬유”, KS F 2564, 2019
28. 산업표준심의회, “콘크리트용 강섬유의 인장강도 시험방법”, KS F 2565, 2020

29. 최종구, “강섬유 혼입 초고강도 콘크리트의 역학적 성질에 관한 연구”, 국립한국교통대학교, 석사논문, 2016
30. Kim, H.S., Nam, J.S., KIM, j.h., Han, S.H., Kim, G.Y., “Effect of Pull-out Property by Shape and Mechanical Property of Reinforcing Fiber on the Flexural Behavior of Concrete”, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 18(5), pp.41-50, 2014
31. 이차돈, “강섬유 보강 콘크리트의 물성과 구조물예의 응용”, 대한강구조학회지, Vol.4(2), pp.53-59, 1992
32. Heiland, Dieter, “Untersuchungen zum Dampungsverhalten von stahlfaserverstärktem Stahlbeton bei globaler und elementweise differenzierter Betrachtungsweise”, na, 1991
33. 이병철, “탄성지반상의 강섬유보강 콘크리트 패널의 내하거동”, 명지대학교 석사학위논문, 2003
34. 문정규, “강섬유보강 철근콘크리트 일방향 슬래브의 휨거동에 관한 실험적 연구”, 명지대학교, 석사논문, 2001
35. 산업표준심의회, “포틀랜드 시멘트”, KS L 5201, 2021
36. 산업표준심의회, “콘크리트용 고로슬래그 미분말”, KS F 2563, 2020
37. 산업표준심의회, “콘크리트용 화학 혼화제”, KS F 2560, 2019
38. 산업표준심의회, “굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 플로 시험 방법”, KS F 2594, 2021
39. 산업표준심의회, “수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험 방법”, KS L 5105, 2022
40. 김윤용, 조창근, 하기주, 배수호, “고성능 섬유복합재료 HPFRCC의 개발전략”, 콘크리트학회지, Vol.18(3), pp.82-86, 2006
41. 조창근, 김윤용, “섬유보강 고인성 시멘트 복합체 패널의 2축 전단 비선형 모델”, 한국전산구조공학회논문집, Vol.22(6), pp597-605, 2009
42. 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