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

[UCI]I804:24011-200000276222

2014年 08月

博 士 學 位 論 文

고연성시멘트복합체를 활용한 철근콘크리트 복합슬래브의 구조 및 시공특성

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

建 築 工 學 科

이 승 중

고연성시멘트복합체를 활용한 철근콘크리트 복합슬래브의 구조 및 시공특성

Structural and Constructional Characteristics of Reinforced Concrete Composite Slabs Using SHCC

2014年 8月 25日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

建 築 工 學 科

이 승 중

dCollection @ chosun

고연성시멘트복합체를 활용한 철근콘크리트 복합슬래브의 구조 및 시공특성

指導敎授　조　창　근

이 論文을 工學 博士學位申請 論文으로 提出함.

2014年　4月

朝 鮮 大 學 校　大 學 院

建 築 工 學 科

이　승　중

dCollection @ chosun

이승중의 博士學位論文을 認准함

委員長	한국교통대학교	教授	서 수 연	印
委員	전남대학교	教授	송 진 규	印
委員	충남대학교	教授	윤 현 도	印
委員	조선대학교	教授	최 재 혁	印
委員	조선대학교	教授	조 창 근	印

2014年 6月

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

dCollection @ chosun

<목 차>

1. 서 론 ····· 1
1.1 연구배경 ····· 1
1.1.1 연구 필요성 및 목적 ····· 1
1.1.2 철근콘크리트 슬래브의 성능개선 관련 기존 공법 사례 ····· 4
1.2 연구 동향 ····· 8
1.3 SHCC 및 RC 복합 바닥슬래브의 기존연구 동향 ····· 10
1.3.1 압출성형 SHCC 패널 철근콘크리트 복합슬래브 ····· 10
1.4 연구 내용 및 방법 ····· 16
1.4.1 연구진행흐름도 ····· 17

2. 현장타설 SHCC 복합바닥 슬래브의 기초 평가실험 ····· 18
2.1 개요 ····· 18
2.2 SHCC의 개발을 위한 최적 배합비 선정 ····· 19
2.2.1 SHCC의 제조배합 결정 ····· 19
2.3 슬래브 실험체 제작 및 성능평가 ····· 23
2.3.1 슬래브 실험체 제작 ····· 23
2.3.2 현장타설 SHCC 복합바닥구조시스템의 성능평가 ····· 28
2.4 소결 ····· 34

dCollection @ chosun

3. SHCC 및 RC 복합슬래브의 휨 실험 ·····35
3.1 실험계획 ·····35
3.2 슬래브 실험체 제작 ·····38
3.3 실험 방법 ·····44
3.3.1 시공하중 재하실험 ·····44
3.3.2 극한하중 실험 ·····46
3.4 SHCC 및 RC 복합슬래브 휨 실험결과 및 분석 ·····48
3.4.1 시공성하중 실험 결과 ·····48
3.4.2 극한하중 실험 결과 ·····51
3.4.3 균열 및 파괴양상 ·····61
3.5 소결 ·····77

4. SHCC 및 RC 복합슬래브의 휨 설계 및 비선형 해석 모델 개발 ·78
4.1 SHCC 및 RC 복합슬래브의 설계 휨강도 제안(고연성 변형률 적용) ·78
4.1.1 일반 RC 슬래브 설계 휨강도(KCI-2012) ·····78
4.1.2 SHCC 및 RC 복합슬래브 휨 휨강도 제안(고연성 인장변형률 고려) 81
4.2 SHCC 및 RC 복합슬래브의 비선형 해석 모델 및 결과 ·····85
4.2.1 SHCC 및 RC 복합슬래브의 비선형 해석 모델 ·····85
4.2.2 SHCC 및 RC 복합슬래브의 비선형 해석 결과 ·····92

dCollection @ chosun

5. SHCC 및 RC 복합슬래브의 현장적용 및 시공특성(무지주·무거푸집) ····98
5.1 SHCC 및 RC 복합바닥슬래브의 현장적용 상세검토 ·····98
5.2 현장적용방법(Half Precast SHCC 및 RC 복합바닥슬래브 공법) ·····102
5.3 SHCC 및 RC 복합슬래브 현장적용 ·····105
5.3.1 현장적용(Half Precast SHCC 및 RC 복합바닥슬래브 공법) ·····105
5.4 슬래브 공법별 비교 분석(Half Precast SHCC 및 RC 복합바닥슬래브 공법) 109
5.4.1 슬래브 거푸집 및 강관동바리의 시공 고찰 ·····109
5.4.2 슬래브 공법별 시공과정 ·····112
5.5 SHCC 복합바닥구조시스템의 생산성 분석 ·····119
5.5.1 사이클론 시뮬레이션 방법론 ·····119
5.5.2 슬래브 공법별 시뮬레이션 모델 ·····120
5.5.3 시뮬레이션 모델 ·····131
5.5.4 생산성 분석 및 비교 ·····137
5.5.5 생산성 분석 결론 ·····139

6. 결 론 ·····143

참고문헌 ·····144
부록 1. SHCC 복합바닥구조시스템 설계지침 및 시공지침 ·····150
부록 2. 웹사이크클론 데이터 코드 ·····165
국문초록 ·····171

dCollection @ chosun

<그림 차례>

[그림 1.1] 바닥구조 문제점 및 해결책 ·····2
[그림 1.2] 고연성 시멘트복합체의 특성 ·····4
[그림 1.3] 바닥판 골조와 콘크리트가 합성된 복합형 바닥판 ·····4
[그림 1.4] 프리캐스트 콘크리트 패널을 이용한 슬래브 ·····5
[그림 1.5] 바닥판 골조와 콘크리트가 합성된 복합형 바닥판 ·····6
[그림 1.6] 요철형 데크플레이트와 I형 빔의 복합형 합성 바닥판 ·····6
[그림 1.7] 층고 절감형 합성 슬래브 거더 ·····7
[그림 1.8] ECC 패널 및 RC 복합슬래브 개발(조창근, 김윤용 2011) ·····10
[그림 1.9] ECC 패널 및 RC 복합슬래브 실험체 상세-1 ·····11
[그림 1.10] ECC 패널 및 RC 복합슬래브 실험체 상세-2 ·····11
[그림 1.11] ECC 패널 및 RC 복합슬래브 제작과정-1 ·····12
[그림 1.12] ECC 패널 및 RC 복합슬래브 제작과정-2 ·····12
[그림 1.13] 실험체의 휨 재하실험 방법 ·····13
[그림 1.14] 실험체의 (극한하중 시) 하중-변위 곡선 ·····14
[그림 1.15] 실험체의 (극한하중 시) Moment-curvature 곡선 ·····14
[그림 1.16] 실험체의 (극한하중 시) 휨 균열상태 ·····15
[그림 1.17] SHCC 및 RC 복합바닥 슬래브 개요 ·····16
[그림 1.18] 연구진행흐름도 ·····17

[그림 2.1] SHCC 복합구조 바닥슬래브 실험체별 상세(단면도) ·····19
[그림 2.2] 직접인장 및 압축강도 실험 개요 ·····22
[그림 2.3] SHCC 인장 응력-변형률 그래프 ·····22
[그림 2.4] SHCC의 다중미세균열 ·····22

dCollection @ chosun

[그림 2.5] 실험체 제작 순서 ·····23
[그림 2.6] 실험체 제작과정(철근조립 및 거푸집제작) 1 ·····24
[그림 2.7] 실험체 제작과정(철근조립 및 거푸집제작) 2 ·····25
[그림 2.8] 실험체 제작과정(SHCC 타설) ·····26
[그림 2.9] 실험체 제작과정(상부 콘크리트 타설) ·····27
[그림 2.10] 실험장치 및 Set-up] ·····28
[그림 2.11] 실험체 하중재하 방법 ·····29
[그림 2.12] 슬래브 실험체 재하 실험 ·····29
[그림 2.13] 실험체 하중-변위 곡선 ·····30
[그림 2.14] 슬래브 RC-OA실험체 재하 실험 후 균열상태 ·····31
[그림 2.15] 슬래브 SRC-40A 실험체 재하 실험 후 균열상태 1 ·····32
[그림 2.16] 슬래브 SRC-40A 실험체 재하 실험 후 균열상태 2 ·····33
[그림 2.17] 실험체별 재하 실험 후 슬래브 하부 균열양상 ·····33

[그림 3.1] 표준실험체 계획(단면도) ·····36
[그림 3.2] 실험체 계획도 ·····36
[그림 3.3] 실험체별 상세(단면도) ·····36
[그림 3.4] 실험체 모델링 ·····37
[그림 3.5] 실험체 제작 순서 ·····38
[그림 3.6] 하프 PCa SHCC 데크 제작과정 ·····42
[그림 3.7] 하프 PCa SHCC 및 RC 복합슬래브 실험체 제작과정 ·····44
[그림 3.8] 시공하중 재하실험(4점 재하방식) ·····45
[그림 3.9] 시공하중 재하실험(등분포하중) ·····45
[그림 3.10] 시공하중 실험장치 Set-up ·····45
[그림 3.11] 실험장치 및 Set-up ·····46

dCollection @ chosun

[그림 3.12] 실험체 하중재하 방법 ····· 47
[그림 3.13] 측정장치 부착 상세 ····· 47
[그림 3.14] 시공성하중 실험(4점 재하방식) ····· 48
[그림 3.15] 시공성하중 실험(등분포하중) ····· 48
[그림 3.16] 시공성하중 실험 ····· 50
[그림 3.17] 시공성하중 실험(Cement) ····· 50
[그림 3.18] 실험체 하중-변위 곡선 ····· 53
[그림 3.19] 실험체 Moment-Curvature 곡선 ····· 54
[그림 3.20] 실험체별 최대 하중 비교 ····· 55
[그림 3.21] 실험체별 최대 변위 비교 ····· 56
[그림 3.22] 실험체별 항복하중 비교 ····· 58
[그림 3.23] 실험체별 강성 비교 ····· 59
[그림 3.24] 실험체별 항복-강성 비교 ····· 60
[그림 3.25] 슬래브 RC-01 실험체 재하 실험 후 균열상태 1 ····· 62
[그림 3.26] 슬래브 RC-01 실험체 재하 실험 후 균열상태 2 ····· 63
[그림 3.27] 슬래브 PCSH-40-150 실험체 재하 실험 후 균열상태 1 ····· 64
[그림 3.28] 슬래브 PCSH-40-150 실험체 재하 실험 후 균열상태 2 ····· 65
[그림 3.29] 슬래브 PCSH-40-180 실험체 재하 실험 후 균열상태 1 ····· 67
[그림 3.30] 슬래브 PCSH-40-180 실험체 재하 실험 후 균열상태 1 ····· 68
[그림 3.31] 슬래브 PCSH-60-150 실험체 재하 실험 후 균열상태 1 ····· 69
[그림 3.32] 슬래브 PCSH-60-150 실험체 재하 실험 후 균열상태 2 ····· 70
[그림 3.33] 슬래브 PCSH-60-180 실험체 재하 실험 후 균열상태 1 ····· 72
[그림 3.34] 슬래브 PCSH-60-180 실험체 재하 실험 후 균열상태 2 ····· 73
[그림 3.35] 실험체별 재하 실험 후 슬래브 하부 균열상태 ····· 76

dCollection @ chosun

[그림 4.1] 실험체 상세 및 휨모멘트 작용 평형 관계 2 ·····78
[그림 4.2] 슬래브 단면에서의 평형 관계 ·····81
[그림 4.3] SHCC 및 RC 슬래브 복합단면 ·····85
[그림 4.4] 비선형 층상화 휨 해석모델 ·····86
[그림 4.5] 콘크리트 및 철근 응력-변형률 모델 ·····87
[그림 4.6] SHCC의 응력-변형률 관계 모델 ·····88
[그림 4.7] 단계별 휨곡률 분포 모델 ·····89
[그림 4.8] 비선형 해석 Moment-Curvature 곡선 비교 ·····92
[그림 4.9] 비선형해석 하중-변위 곡선 비교 ·····93

[그림 5.1] 광주○○청사 공사현장 조감도 ·····98
[그림 5.2] 광주○○법원 공사현장 위치 ·····99
[그림 5.3] 현장적용 위치(입면도) ·····100
[그림 5.4] 하프프리캐스트 SHCC 및 RC 슬래브 단면도 ·····102
[그림 5.5] 하프프리캐스트 슬래브 상세(모델링) ·····102
[그림 5.6] 하프프리캐스트 슬래브 현장적용 계획 ·····103
[그림 5.7] 현장적용 순서 ·····105
[그림 5.8] 현장적용을 위한 모델링 ·····106
[그림 5.9] SHCC 및 RC 복합슬래브 현장 시공 전경 ·····108
[그림 5.10] 슬래브 거푸집 해체 작업 모습 ·····111
[그림 5.11] 광주가정법원 지상 5층 구조바닥평면도 및 지상 5층 평면도 ·122
[그림 5.12] SHCC 슬래브 공법 시뮬레이션 모델 ·····133
[그림 5.13] 기존 재래식 슬래브 공법 시뮬레이션 모델 ·····136
[그림 5.14] 슬래브 공법별 생산성 비교 ·····137

dCollection @ chosun

<표 차례>

<표 1.1> 복합바닥구조 구성 및 상세 ·····10
<표 1.2> 실험체별 실험 결과 ·····13

<표 2.1> 실험체 규격 ·····18
<표 2.2> 혼합 재료의 특성 ·····20
<표 2.3> 혼화제의 특성 ·····20
<표 2.4> PVA 섬유의 특성 ·····20
<표 2.5> SHCC 배합설계(고연성 변형률 2.0% 이상확보) ·····21
<표 2.6> 일반콘크리트 배합설계(표준강도 : 30MPa) ·····21
<표 2.7> SHCC 역학성능 ·····23
<표 2.8> 실험체 실험 결과 ·····30

<표 3.1> 실험체 상세 ·····35
<표 3.2> 실험체 실험 결과(150mm) ·····49
<표 3.3> 실험체 실험 결과(180mm) ·····49
<표 3.4> 실험체 실험 결과(150mm) ·····51
<표 3.5> 실험체 실험 결과(180mm) ·····51

<표 4.1> 대상 실험체의 실험에 의한 극한 내력 및 설계강도 추정결과 비교(150mm) ·····84
<표 4.2> 대상 실험체의 실험에 의한 극한 내력 및 설계강도 추정결과 비교(180mm) ·····84
<표 4.3> 실험에 의한 극한 내력 및 비선형해석 결과 비교(150mm) ·····94

dCollection @ chosun

<표 4.4> 실험에 의한 극한 내력 및 비선형해석 결과 비교(180mm) ·····94
<표 4.5> SHCC 및 RC 복합슬래브의 실험결과, 공칭 휨강도, 비선형해석 비교(150mm) ·····96
<표 4.6> SHCC 및 RC 복합슬래브의 실험결과, 공칭 휨강도, 비선형해석 비교(180mm) ·····96

<표 5.1> 설계개요 ·····101
<표 5.2> 하프프리캐스트 SHCC 및 RC 슬래브 현장적용 계획 ·····104
<표 5.3> 슬래브 거푸집 자재 구조 검토 과정 ·····110
<표 5.4> 기존 재래식 공법(합판거푸집(3회)+강관 동바리(3개월) 적용) 시공-1 112
<표 5.5> 기존 재래식 공법(합판거푸집(3회)+강관 동바리(3개월) 적용) 시공-2 113
<표 5.6> Truss Deck 공법 시공-1 ·····114
<표 5.7> Truss Deck 공법-2 ·····115
<표 5.8> Half PCa-SHCC 적용 복합바닥 슬래브 공법-1 ·····116
<표 5.9> Half PCa-SHCC 적용 복합바닥 슬래브 공법-2 ·····117
<표 5.10> 시험시공을 통한 공법 특성비교 ·····118
<표 5.11> 사이클론의 기본 요소73) ·····119
<표 5.12> 사례 현장 개요 ·····121
<표 5.13> 공법별 작업프로세스 비교 및 시뮬레이션 분석 여부 ·····126
<표 5.14> SHCC 슬래브 공법 작업 상세(562.5㎡) ·····128
<표 5.15> 기존 재래식 슬래브 공법 작업 상세(562.5㎡) ·····130
<표 5.16> 생산성 및 사이클 시간 ·····138
<표 5.17> 슬래브 공법별 공기 및 단가 비교(계속) ·····141
<표 5.18> 슬래브 공법별 공기 및 단가 비교 ·····142

dCollection @ chosun

Abstract

Structural and Constructional Characteristics of Reinforced Concrete Composite Slabs Using SHCC

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

Demand of high rise buildings and long span structures in construction industry is increasing. Recently, there are many researches about structure systems and structure materials for the application high performance concrete in buildings.

Concrete is one of the most common materials used in structural members However, concrete has some disadvantages such as in local cracking and brittle failure.

In this study, the concrete performance can be improved by applying PVA fibers mixed into a cemetitious composite and a fiber-reinforced composite having special properties like high ductility and strain-hardening behavior after cracking is called a strain-hardening cementitious composites(SHCC). SHCC has been shown a high ductile deformation capacity after tensile cracking strength caused from the behavior of micro multiple crack.

Precast concrete systems have many advantages over cast-in-place concrete

dCollection @ chosun

system in construction process and ensuring better and more uniform quality of concrete product.

In this study, a new reinforced concrete composite slab system which made by cast-in-place and precast strain-hardening cementitious composites(SHCC) deck and reinforced concrete are introduced and compared with their bending behaviors with conventional reinforced concrete slabs.

A model for a nonlinear flexural analysis of the reinforced SHCC and concrete composite slabs has been presented to predict nonlinear performances of the system. In the nonlinear flexural model, the SHCC in tension after cracking was considered to model its high-ductile and strain hardening behaviors. A series of construction load tests was conducted on the half precast SHCC decks that were located at the bottom of the half composite slab in order to secure flexural strength during construction stages. A series of experiments on the half precast composite slabs were carried out and compared with reinforced concrete slabs by a 4-point bending test.

At the experiments on bending performance, the developed slabs have improved flexural behavior, controlling cracks, and deformation capacity in comparison with the existing reinforced concrete slabs. The results of nonlinear flexural analysis were well predicted with the experiment tests.

According to the analysis and experimental results, the half precast composite slab system has advantages in high tensile ductility after cracking and crack control and improving bending and displacement capacity. By applying the developed slab system in a structure, it can be possible to reduce construction cost as well as construction period by reducing form-work process and using non-supporting form construction system.

dCollection @ chosun

1. 서 론

1.1 연구배경

1.1.1 연구 필요성 및 목적

국내의 건축기술이 발전 하면서, 보편적인 건설재료인 콘크리트의 생산 기술 또한 발달하고 있다. 건축기술이 발전함에 따라 건축 구조물은 대형화 및 장지간화 되면서 보편적인 건설재료인 콘크리트의 구조재료에 대한 요구 성능이 높아지고 있다. 특히 콘크리트의 고성능화가 더욱 요구되고 있는 실정이다. 구조재료로서 가장 많이 사용되고 있는 콘크리트의 경우 재료 자체의 수축과 취성, 폭열 문제 등 해결해야 할 문제점을 가지고 있으며, 압축강도에 비해 인장강도가 적고 국부 균열 발생으로 의한 취성파괴 되는 단점을 가지고 있다. 또한, 건축물의 사용년한 중에 콘크리트의 균열로 인한 누수발생으로 현상이 일어나기도 한다.

건축기술과 콘크리트 기술이 발전하였지만, 특히 철근 콘크리트 슬래브 공사 시 동바리를 세우고 멍에, 장선 위에 합판거푸집을 설치한 후 박리제 도포, 철근을 배근 한 후 콘크리트 타설 및 양생과정을 거처 거푸집 해체 및 현장정리 순으로 진행되는 복잡한 절차와 자재 검수 및 구조 검토가 필요하다. 또한 이러한 시공 방법에는 여러 가지 문제점이 발생한다.

예를 들어 복잡한 절차에 따른 공사의 장기화, 높은 인력 의존율, 3D 업종의 기피현상으로 인한 기능인력 감소와 이에 따른 숙련공 부족 현상으로 인한 품질 저하, 노무비 상승 등을 들 수 있으며, 공사 규모의 대형화, 장지간화 및 고층화 되면서, 안전관리 및 공사현장 내 환경관리 등이 더욱 절실히 필요 하며, 최근 거푸집 설치 중에나 콘크리트 타설시, 거푸집 및 동바리 등의 부실시공으로 인하여 슬래브 거푸집이 붕괴되는 사고가 빈번히 일어나고 있는 실정이다. 이에 따라 건설 환경 변화와 기존 철근 콘크리트 슬래브공법의 문제점 개선이 필요하다. ([그림 1.1] 참조)

dCollection @ chosun

(a) 바닥구조 공사시 동바리 및 거푸집 상황[1)]

(b) 바닥구조 공사시 붕괴 발생[2)3)]

(c) 바닥구조의 균열 및 누수[3)]

(d) 바닥구조 무지주, 무거푸집 공사[1)]

[그림 1.1] 바닥구조 문제점 및 해결책

1) 광주 가정지방법원 현장
2) "공사중인 대우건설 판교오피스텔 바닥붕괴", 한국경제 디지털신문, 2013.1.18.
3) 한국시설안전공단 사례집

dCollection @ chosun

이러한 문제를 해결하고자 본 연구에서는 고연성 시멘트 복합체를 활용하여 거푸집의 UNIT화, 동바리와 거푸집 자체를 없앤 무지주, 무거푸집 시공이 가능하고 균열제어, 누수문제해결 등 고품질의 바닥구조인 하프프리캐스트 SHCC 패널을 개발하고자 한다.

고연성 시멘트 복합체(Strain Hardening Cementitious Composites;SHCC)는 시멘트 복합체 내에서 최초 균열이 발생될시 혼입된 단섬유가 균열면에서 가교작용을 하면서 응력과 파괴에너지를 부담함으로써 최초균열 발생 후에도 즉시 파괴에 도달하지 않고, 2차 균열을 유도하도록 설계한 재료이다. 이로 인해 SHCC는 1축 인장 하에서 다중미세균열(multiple micro-cracks)이 발생하여 큰 연성을 갖는 변형 경화형 시멘트 복합체이며, 현재까지 국내의 SHCC에 대한 재료 연구는 단섬유를 3차원 방향으로 무작위 분산 배합하여 제작하는 타설형 또는 뿜칠형으로 초점이 맞추어져 왔다. SHCC 재료에는 시멘트, 섬유, 규산질 원료, 세피올라이트(sepiolite) 등과 같은 천연광물과 보강용 섬유를 배합비에 맞춰 혼입하여 휨 강도 및 휨 강성을 증가시키기 위해 제작하는 제품이다. [그림 1.2]

이러한 방법을 SHCC에 적용함으로 인해 비례한도 내에서는 재료의 강도 및 탄성계수를 크게 향상시킬 수 있고, 비례한도 이후에는 높은 연성이 유지되도록 만들 수 있다. 또한 SHCC와 같이 비교적 많은 양의 섬유가 혼입된 시멘트복합재료를 제작 할 때 압출성형 기법을 사용하면, 섬유의 방향성을 의도적으로 부여할 수 있다는 장점이 있다.[1-16),22-26),33-34),41-59)]

그러나 기존의 타설 공법으로 고연성시멘트복합체를 현장에 적용하기에는 문제점이 있다. 먼저 고연성시멘트복합체의 제조단가가 매우 고가이므로 바닥구조 전체에 고연성 시멘트복합체를 사용하는 것은 비효율적이고 시공 비용을 상승시키는 문제점이 있다. 그리고 현장에서 고연성 시멘트복합체 타설시, 일반 콘크리트와 고연성 시멘트복합체를 별도로 타설하여야 되는데 이는 고연성 시멘트복합체가 먼저 타설되어 양생된 이후에 일반 콘크리트를 타설해야 되기 때문이다. 따라서 현장에서 고연성 시멘트복합체를 타설하는 것은 시공 시 추가적인 비용 발생의 소지가 있으며 시공 절차상 복잡하고 시공 효율을 저하시키는 문제점도 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 위와 특징을 갖는 SHCC를 복합바닥구조시스템 활용하여 기존 철근콘크리트 슬래브의 인장측을 철근트러스 SHCC 데크로 대체

dCollection @ chosun

하는 하프프리캐스트 SHCC 및 RC 복합바닥 슬래브를 개발하고 현장 적용을 위한 공법을 제시하고자 한다. 이를 통해, 일반 콘크리트에 비해 비교적 고가인 고연성시멘트복합체를 최적위치에 시공함으로써 시공비용을 감소시킴과 동시에 공기를 단축시키고 작업 효율을 상승시키는 이점이 있을 것으로 기대된다. 또한 개발된 바닥구조의 성능을 검증하고 기존 공법과의 비교분석을 통해 실용화를 위한 기초 자료를 확보하고자 한다.

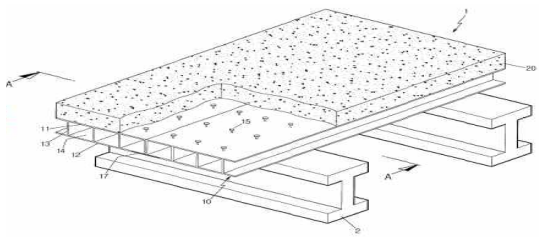
PVA섬유 고유동성 다중균열 일반콘크리트 고연성시멘트복합체

[그림 1.2] 고연성 시멘트복합체의 특성

1.1.2 철근콘크리트 슬래브의 성능개선 관련 기존 공법 사례

최근 국내 건축구조물의 바닥슬래브 공법은 공정 단축과 공사비 저감 및 고품질의 바닥슬래브를 얻기 위해 지속적으로 발전해 왔으며 최근에는 자동화 장비의 개발과 더불어 새로운 바닥구조 개념의 대두로 인한 기존공법 등의 개선을 위하여 기술개발이 활발히 이루어지고 있다. 본 연구를 위해 기존의 슬래브 공법 사례를 살펴보고자 한다.

1) 바닥판 골조와 콘크리트가 합성된 복합형 바닥판[40)]

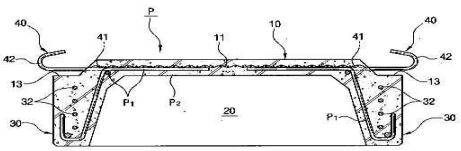


[그림 1.3] 바닥판 골조와 콘크리트가 합성된 복합형 바닥판

dCollection @ chosun

바닥판 골조와 콘크리트가 합성된 복합형 바닥판은 철근 콘크리트 바닥판과 골조형식의 바닥판이 가지는 장점을 모두 발휘할 수 있어 구조적인 안정성이 제고되고 시공성이 용이하며 공기와 공사비를 현저하게 절감할 수 있는 새로운 구조의 복합형 바닥판이다. 이 바닥판은 상부판 및 하부판의 사이에 형성되어 있는 격벽으로 구성되어 상부판과 하부판 사이의 격벽에 의하여 형성된 공동부가 횡방향으로 길게 형성되어 튜브형태를 이루게 되는 구조를 가진다. 하부골조와 상기 하부골조의 상부에 일체로 결합되어 있는 소정 두께의 콘크리트 슬래브로 구성되는 특징을 갖는 복합형 바닥판이다. ([그림 1.3] 참조)

2) 프리캐스트 콘크리트 패널 및 그를 이용한 슬래브의 시공방법[40)]

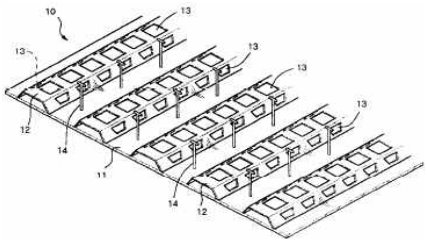


[그림 1.4] 프리캐스트 콘크리트 패널을 이용한 슬래브

프리캐스트 콘크리트 패널을 이용한 슬래브는 판체부 하부의 둘레에 분할형 작은 보가 배치되도록 하고 판체부의 양측 코너부에는 연결철물들이 배열되도록 프리캐스트 콘크리트 패널을 구성하여 거치 상태를 개선시키고 접합부 강성을 증대시켜 주는 동시에 습식구조로 견고히 연결 접속되도록 시공할 수 있게 한다. 따라서 프리캐스트 콘크리트 패널이나 큰 보가 압축력에 의해 손상되는 현상이 발생됨을 방지하면서도 프리캐스트 콘크리트 패널과 큰 보 사이의 상부에 덮여진 상부 콘크리트가 들떠서 균열이 발생됨을 방지하고 프리캐스트 콘크리트 패널 간의 접합부에 균열이 발생됨을 방지하며 조립 설치된 프리캐스트 콘크리트 패널의 접합부가 이완되는 일이 없이 연속성을 유지할 수 있게 한 것이다. ([그림 1.4] 참조)

dCollection @ chosun

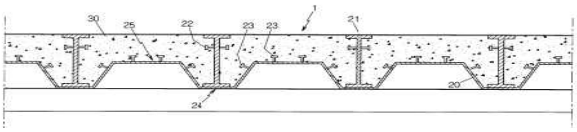
3) 바닥판 골조와 콘크리트가 합성된 복합형 바닥판[40)]



[그림 1.5] 바닥판 골조와 콘크리트가 합성된 복합형 바닥판

이 바닥판의 목적은 데크플레이트를 고정판형으로 함으로써 시공이 용이하고 콘크리트와의 부착력이 우수하여 미관을 해치지 않도록 하기 위한 것이며 이와 같은 목적을 달성하기 위하여 교량의 상판이나 건축물의 각 층 바닥에 설치되는 공지의 데크플레이트에 있어서 평판상에 다수의 통공을 갖는 골판과 스터드를 일정 간격으로 형성하는 특징이 있다. ([그림 1.5] 참조)

4) 요철형 데크플레이트와 I형 빔의 복합형 합성 바닥판 및 그 시공방법[40)]

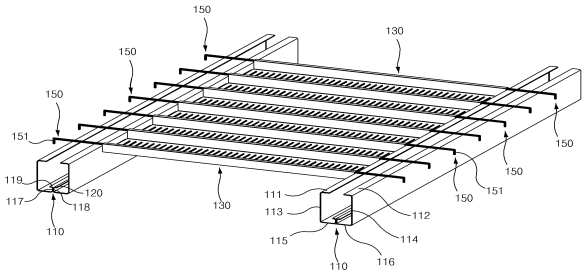


[그림 1.6] 요철형 데크플레이트와 I형 빔의 복합형 합성 바닥판

이 바닥판은 데크플레이트에 I형강을 설치하여 콘크리트에 매립함으로써 구조적인 성능이 더욱 향상되어 교량 등의 토목 구조물에도 사용할 수 있는 새로운 구조의 복합형 합성 바닥판이다. 오목부와 볼록부로 이루어진 요철이 형성되어 있으며 표면에는 콘크리트와의 전단합성을 위한 전단 연결재가 구비되어 있는 데크플레이트와 오목부에서 일체로 결합되어 설치되며 그 외면에는 콘크리트와의 전단합성을 위한 전단 연결재가 구비되어 있는 I형 빔과 데크플레이트의 상부에서 I형 빔이 내부에 매립되도록 소정 높이로 타설되어 데크플레이트 및 I형 빔과 일체로 결합되어 이루어지는 구성을 가지고 있는 것을 특징으로 하는 복합형 합성 바닥판 및 그 시공방법이다. ([그림 1.6] 참조)

dCollection @ chosun

5) 층고 절감형 합성 슬래브 거더[40]



[그림 1.7] 층고 절감형 합성 슬래브 거더

이 슬래브는 보의 상부 면에 용접 고정한 철근에 데크를 거치하여 층고 절감뿐만 아니라 보강철근, 불연속 구간을 연속구간으로 형성하여 전단력 보강, 스터드 철근 역할을 할 수 있는 합성 슬래브 거더에 관한 것이다. 보의 상부 면에 데크를 거치할 철근을 용접 고정하기 때문에 작업 공간을 충분히 확보하여 시공이 편리하면서 층고 절감을 구현하고 보와 데크 사이의 불연속 구간(전단력 취약구간)을 환봉의 데크 거치 철근이 연속 구간으로 형성하여 전단력을 보강하여 휨 강성을 증가시킨다. 또한 이형 철근과 달리 환봉으로 용접하기 때문에 보와 환봉간의 용접면적을 충분히 확보하여 우수한 용접성과 결합성을 확보한다. 데크 거치 철근의 끝단이 스터드 역할을 하여 콘크리트 접합면에서 슬라이딩이 발생하지 않도록 하여 완전한 합성 구조체를 이루는 것이 특징이다. ([그림 1.7] 참조)

dCollection @ chosun

1.2 연구 동향

최근 콘크리트의 단점으로 균열 및 취성적 특성이 있다. 이러한 단점을 보완하고자 콘크리트의 인장응력 하에서의 균열제어능력의 개선 또는 균열 발생 후에도 국부적인 균열폭 균열폭 증가에 따른 취성적 특성을 개선하여 연성 거동능력을 향상시키는 SHCC(Strain Hardening Cementitious Composites) 또는 ECC(Engineered Cementitious Composite)의 연구가 활발히 진행되어지고 있다.[1-10]

SHCC는 1990대 초반에 미시간대학의 Vitor Li 교수는 마이크로 역학(Micromechanics)[54-56]과 안정상태 균열이론(Steady-State Cracking Theory)[57]에 근거로 한 재료설계에 대한 개념을 도입하였다. 휨, 인장 및 파괴시에 인성이 크게 향상되며, 휨 응력 하에서도 다중미세균열(Multiple Cracking)이 발생되는 특성을 갖는 고연성시멘트복합체로 개발하였다. 또한 이와 같이 개발된 재료를 여러 분야에서 공법 및 구조물 등에 적용하는 연구가 진행되고 있다. 고연성시멘트복합체의 특성은 1축 인장 하에서 변형률경화거동을 함으로써 기존구조물의 보수·보강 등에 주로 활용되며, 이 재료를 적용하였을 때에 구조물의 성능 개선이 우수한 것으로 보고하고 있다.[12),58-59]

국외뿐만 아니라 국내에서도 콘크리트의 단점을 보완하는 소재의 필요성이 증가하면서 섬유복합재료를 이용한 구조체 개발 및 보수·보강 기법에 대한 연구가 진행되고 있다. 국내에서 수행된 섬유보강 재료는 다양한 분야에서 수많은 연구자들이 연구를 수행하였으며, 그 연구의 대표적인 결과는 다음과 같다.

조창근, 김호연 (2014)[11]은 “고인성 시멘트복합체 적용 철근콘크리트 기둥을 고려한 골조 구조물의 내진성능평가”에서 성능개선 된 개발 기둥의 단자유도 시스템에 대하여 역량스펙트럼방법(CSM), 직접변위기반설계법(DDBD) 및 변위계수법(DCM)을 이용하여 내진성능평가를 수행하였다.

조창근, 한성진 (2013)[12]은 “고연성시멘트복합체 활용 내진 개선 콘크리트 기둥공법”에서 고연성시멘트복합체의 배합설계와 성능분석을 하여 프리캐스트 고연성시멘트복합체를 활용한 내진개선 콘크리트 기둥공법을 개발하고 이를 현장에 적용하였다.

dCollection @ chosun

조창근, 김윤용, 서정환, 이승중 (2012)[1]은 “압출성형 ECC 패널 RC 복합 슬래브의 해석모델”에서 압출성형한 ECC 패널을 활용한 철근콘크리트 복합슬래브 구조에 대하여 비선형 휨 해석 모델을 새롭게 제시하여 ECC 패널 및 철근콘크리트 복합슬래브의 휨 실험결과와 비교분석하였다.

조창근, 권민호 (2011)[3]는 “Nonlinear Failure Prediction of Concrete Composite Columns by a Mixed Finite Element Formulation, Engineering Failure Analysis”의 연구를 국제학술지에 게재하였으며, 기존 철근콘크리트와 FRP 가 복합된 골조시스템의 거동과 단면에서 부분적인 손상에 대하여 정확하게 예측하기 위하여 유한요소 공식을 제시하는 연구를 하였다.

조창근, 하기주 (2010)[9]는 “철근콘크리트 보의 휨 및 전단파괴 예측의 3차원 유한요소 모델”에서 철근콘크리트 보의 휨 및 전단파괴 예측을 위한 철근콘크리트 부재의 3차원 유한요소모델을 개발하였다. 3축 하에서 콘크리트의 균열 거동을 위해 균열 발생 후 인장연화거동, 골재맞물림 및 다우얼효과를 고려한 균열면 전단전달특성을 고려토록 하는 연구를 하였다.

조창근, 한병찬 (2010)[2]은 “압출성형 ECC 패널을 이용하여 제작된 복합바닥슬래브의 휨 거동”을 통해 고인성 압출성형한 ECC 패널을 활용한 철근콘크리트 복합슬래브 시스템을 개발하였다. ECC 패널이 현장타설 콘크리트와 함께 무거푸집 또는 하프프리캐스트 공법을 슬래브 공사에 적용할 수 있는 장점을 확인하였다.

이방연, 한병찬, 조창근, 권영진, 김윤용 (2009)[7]은 “압출성형 ECC 패널의 섬유분포 특성과 휨 성능”에서 압출성형된 ECC를 제조하기 위하여 이론적/실험적 연구 및 ECC 내부의 섬유분포 특성이 휨 성능에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다.

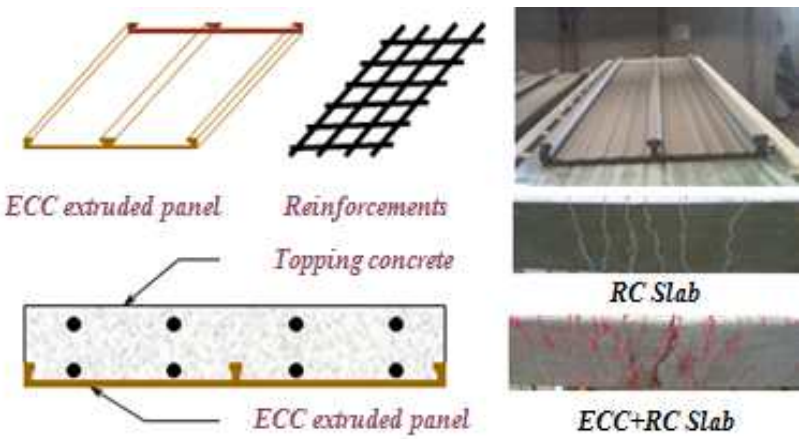
조창근, 김화중 (2008)[10]은 “점소성 유동 입자법에 의한 굳지않은 콘크리트의 유동해석 모델”에서 굳지 않은 콘크리트 및 유동 콘크리트의 흐름 현상을 예측하기 위한 해석모델 개발을 위해 Navier-Stokes 방정식에 의한 유체 운동이론과 해석기법을 활용한 유동콘크리트의 레올로지 특성 및 점소성 구성관계를 고려한 2차원 해석모델을 소개하였다.

dCollection @ chosun

1.3 고연성시멘트복합체 바닥슬래브의 기존연구 동향

1.3.1 압출성형 ECC 패널 철근콘크리트 복합슬래브

본 연구의 프리캐스트 복합바닥구조시스템 공법 개발을 위해 최근 국내에서 연구가 이루어졌던 압출성형 슬래브의 연구결과에 대해 조사하였다. 압출성형 슬래브 연구는 일반 콘크리트의 취성적인 성능을 개선하고자 고연성시멘트복합재료를 이용하여 압출성형 ECC 패널로 제작되었다. 압출성형 ECC 패널 및 RC 복합슬래브 개발에 대한 연구 내용은 다음과 같다. ([그림 1.8] 참조)



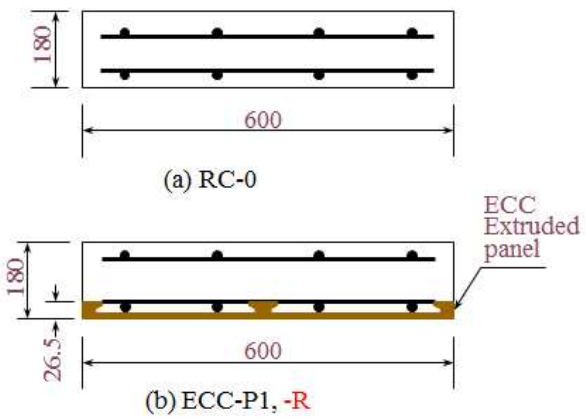
[그림 1.8] ECC 패널 및 RC 복합슬래브 개발(조창근, 김윤용 2011)

압출성형 ECC 패널 및 RC 복합슬래브 슬래브 실험체 제작은 아래 <표 1.1>, [그림 1.9] ~ [그림 1.12]와 같이 제작하였다.

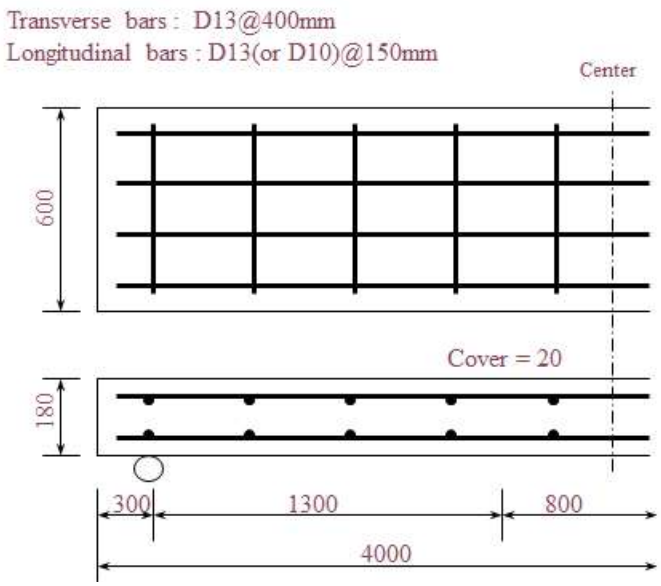
<표 1.1> 복합바닥구조 구성 및 상세

Specimen	Details	Section Geometry (mm)	f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)	ECC panel (mm)	Longitudinal Reinforcement	ρ_s (%)	Transverse Reinforcement
RC-0	prototype	600×180	24	400	-	D13@150mm	0.47	D10@150mm
ECC-P1,-P2	ECC^{XP}&4-D13				600×20(26.5)			
ECC-R	ECC^{XP}&4-D10					D10@150mm		

dCollection @ chosun

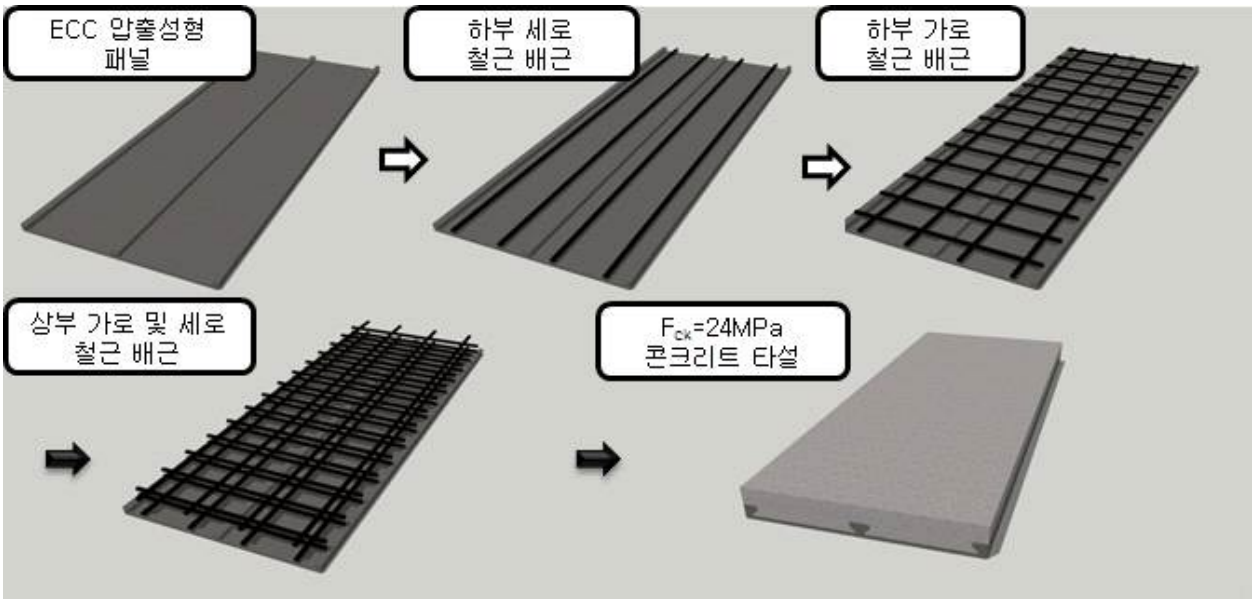


[그림 1.9] ECC 패널 및 RC 복합슬래브 실험체 상세-1



[그림 1.10] ECC 패널 및 RC 복합슬래브 실험체 상세-2

dCollection @ chosun

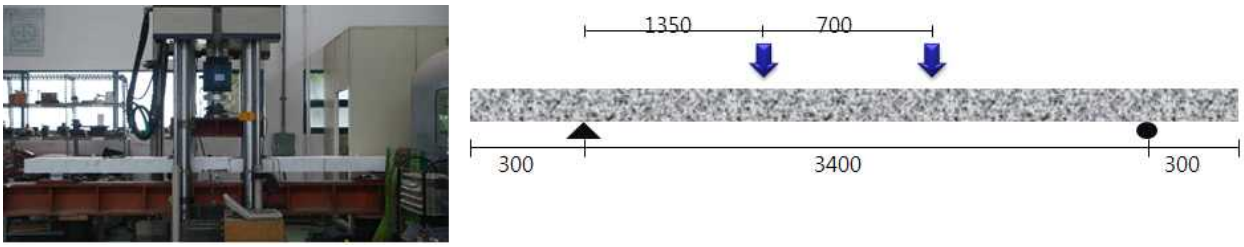


[그림 1.11] ECC 패널 및 RC 복합슬래브 제작과정-1

[그림 1.12] ECC 패널 및 RC 복합슬래브 제작과정-2

ECC Panel+RC 복합바닥슬래브의 제작과정입니다. ECC를 압출성형한 패널을 준비하여 하부세로 철근배근을 하였으며, 이후 하부가로 철근을 배근합니다. 그 다음 압축측인 상부 가로 및 세로 철근을 배근하고, 24MPa의 일반콘크리트를 상부에 타설하고 양생하여 실험체를 제작하였다.

dCollection @ chosun



[그림 1.13] 실험체의 휨 재하실험 방법

실험은 3,000kN 용량의 UTM(Universal Testing Machine)을 이용하여 [그림 1.13]과 같이 4점 재하방식으로 실시하였다. 실험체의 양 단부로부터 300 mm 위치에 회전단을 설치하여 단순지지 되도록 하였으며, 순경간(Net span)은 3,400 mm로 하였다. 2점 하중 가력점 사이의 거리는 700 mm로서, 이 영역에서 순수 휨이 작용하도록 하였다. 하중은 변위제어 방식으로 압축부 콘크리트가 파쇄 될 때까지 가력 하였다. 또한 보다 정확한 하중값을 얻기 위하여 50kN 용량의 로드셀을 설치하여 측정하였다. 실험체의 처짐 및 변형, 변형률은 실험체 각각의 위치에 변위계(LVDT), 콘크리트 변형률 게이지, 철근 변형률 게이지를 부착하여 측정하여 아래와 같은 결과를 얻었다. (<표 1.2> 참조)

<표 1.2> 실험체별 실험 결과

Spec. name	M_i	δ_i	ϕ_i	M_y	δ_y	ϕ_y	EI_e*	M_{max}	δ_{max}**	ϕ_{max}**	ϕ_{max}/ϕ_y	M_u***	ϕ_u	ϕ_u/ϕ_y
	kN · m	mm	mm^{-1}	kN · m	mm	mm^{-1}	kN · m^2	kN · m	mm	mm^{-1}		kN · m	mm^{-1}	
RC-0	5.17	1.649	1.77×10^{-6}	31.59	28.43	3.09×10^{-5}	907	34.57	93.5	1.53×10^{-4}	4.95	34.27	0.77×10^{-4}	2.49
ECC-P1	8.06	3.562	3.09×10^{-6}	35.84	21.37	1.63×10^{-5}	2,103	41.80	110.0	2.18×10^{-4}	13.37	40.38	1.23×10^{-4}	7.55
ECC-P2	8.58	2.120	2.61×10^{-6}	36.78	23.35	1.84×10^{-5}	1,786	40.00	97.5	1.65×10^{-4}	8.97	40.19	1.16×10^{-4}	6.30

* equivalent stiffness after first crack $EI_e = (M_y - M_i)/(\phi_y - \phi_i)$

** δ_{max}, ϕ_{max} : maximum midspan deflection and curvature

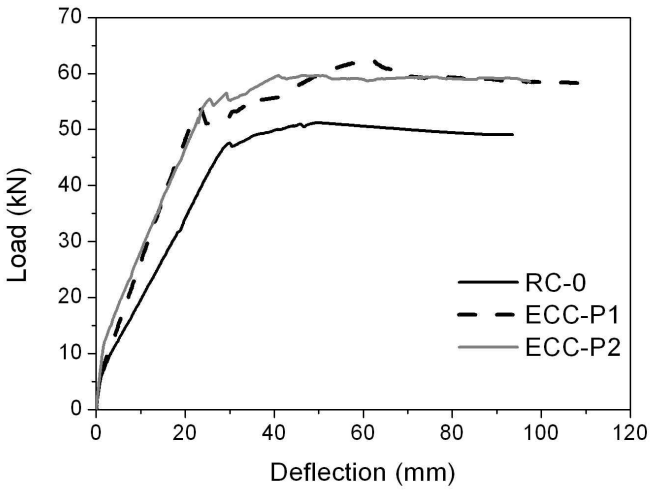
*** M_u, ϕ_u : moment and curvature when the strain at the extreme compression fiber reaches 0.003

dCollection @ chosun

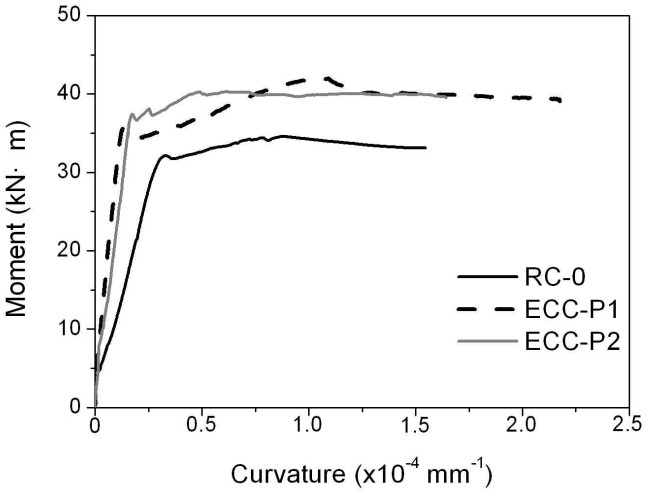
실험 결과 실험체의 지간중앙에서 측정한 모멘트-곡률 및 수직 하중-처짐 관계에 대한 재하실험 결과를 각각 그래프에 나타내었다. [그림 1.14] ~ [그림 1.15]

그래프에서 알 수 있듯 사용성 상태에서의 처짐이나 극한내력 내에서 효과가 우수하다는 것을 알 수 있으며, ECC 패널을 적용한 복합바닥 슬래브가 균열폭의 증가를 억제하여 휨 내력 및 휨 변형능력이 향상된 것으로 사료된다.

ECC-R 실험체의 경우 철근량을 감소하였지만, 표준실험체와 내력은 유사하나, 연성은 높게 나타나는 장점을 보였다.



[그림 1.14] 실험체의 (극한하중 시) 하중-변위 곡선



[그림 1.15] 실험체의 (극한하중 시) Moment-curvature 곡선

dCollection @ chosun

표준실험체인 RC-0 실험체는 지간중앙에서 초기균열 발생 후 하중증가와 함께 균열이 상부로 확대되었고, 하중증가에 따라 균열이 추가적으로 발생하였다. 이후 기존 균열의 폭이 점차 증가하면서 철근 항복 이후 급격한 균열폭 증가현상을 보이면서 최종적으로 중립축이 급상승하여 콘크리트가 압축 파괴되는 휨 파괴에 도달했다.

ECC-P1 실험체는 초기균열이 지간중앙의 발생하면서, 하중증가와 함께 다중미세 휨균열이 무수히 발생하였으며, 인장철근의 항복 이후에도 하중은 안정적으로 증가하는 것으로 나타났다. 다중미세균열 거동으로 처짐 110㎜까지 안정적인 연성 거동을 보였으며, 최종파괴는 중앙지간부 콘크리트 휨 압축파괴로 나타났다. 복합슬래브 모두 유사한 경향을 나타냈다.

RC-0

ECC-P1

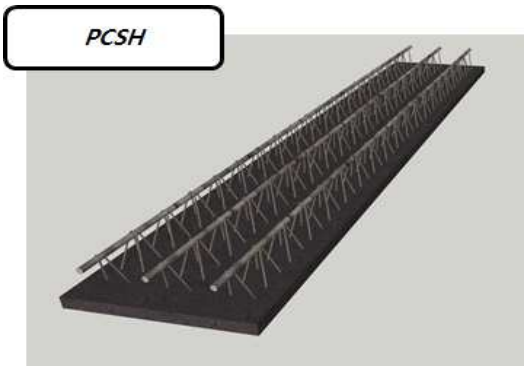
ECC-R

[그림 1.16] 실험체의 (극한하중 시) 휨 균열상태

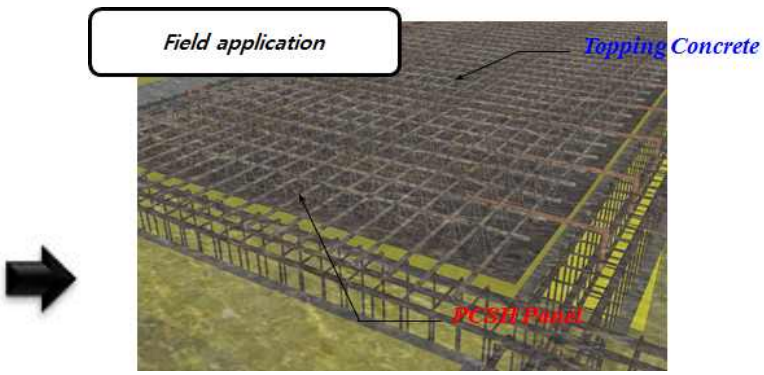
dCollection @ chosun

1.4 연구 내용 및 방법

본 연구에서 개발하고자 하는 고연성시멘트복합체 철근콘크리트 복합슬래브는 기존 철근콘크리트 슬래브의 공법분석을 통해 문제점을 파악하고 이에 따른 하프프리캐스트 방식의 SHCC 및 RC 복합바닥 슬래브 시스템을 제작한다. 또한 실제 시공현장에 적용하기 위해서 철근트러스 SHCC 데크의 시공하중실험을 통해 현장 적용시 안정성에 대해서도 검토한다. 이후 하프프리캐스트 SHCC 및 RC 복합바닥 슬래브의 구조성능을 실험을 통해 파악한 후, 실제 현장에 적용하여 시공특성을 분석하여 본 슬래브의 우수함을 평가하고자 한다. ([그림 1.17] 참조)



(a) 하프프리캐스트 SHCC 슬래브



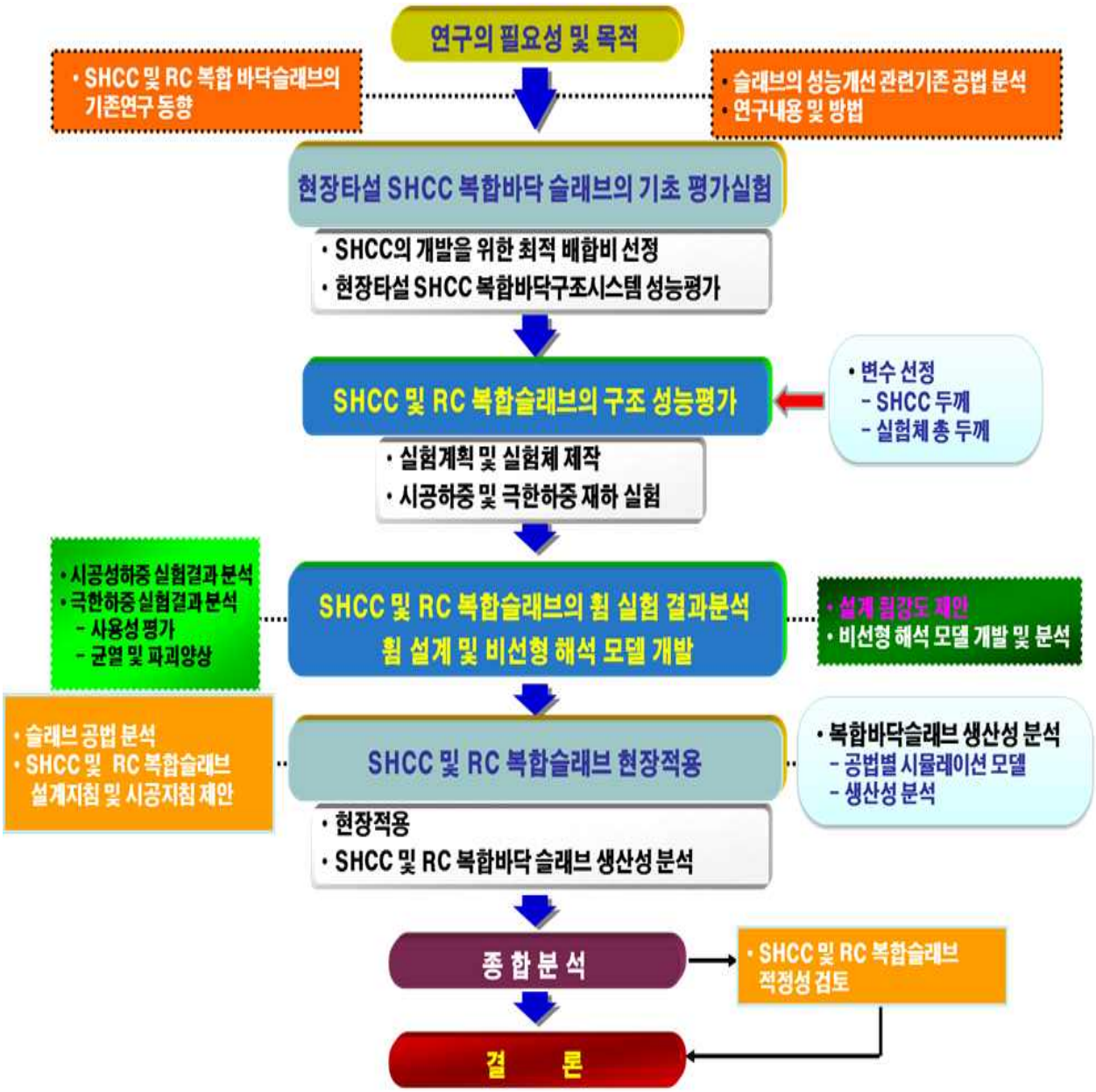
(b) SHCC 및 RC 복합바닥 슬래브의 현장적용 안

[그림 1.17] SHCC 및 RC 복합바닥 슬래브 개요

dCollection @ chosun

1.4.1 연구진행흐름도

하프프리캐슬 방식의 SHCC 및 RC 복합바닥슬래브 시스템의 연구진행을 [그림 1.18]에 나타냈다.



[그림 1.18] 연구진행흐름도

dCollection @ chosun

2. 현장타설 SHCC 복합바닥 슬래브의 기초 평가실험

2.1 개요

고연성 시멘트복합재료는 인장측에서 다중미세균열로 인한 균열제어를 통하여 취성적인 거동이 아닌 연성적인 거동을 보인다. 또한 높은 휨 및 인장 변형 능력을 발휘하는 특징이 있다.

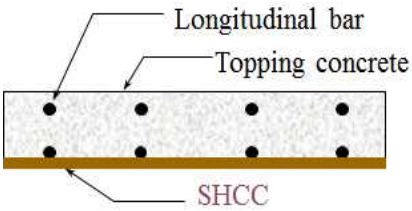
이러한 특징을 갖는 SHCC를 복합바닥구조시스템 활용하여 기존 철근콘크리트 슬래브의 인장 측을 SHCC로 대체하는 하프프리캐스트 SHCC 및 RC 복합바닥 슬래브를 개발하고자 한다.

실험체의 제작은 내측 크기가 600 ㎜ × 180 ㎜ × 4,000 ㎜ 가 되도록 먼저 거푸집을 제작하였으며, 동시에 철근을 현장조립 하였다. 제작순서는 동일하며, 철근 배근을 한 이후 휨 철근의 변형률을 얻기 위하여 주방향 하부 철근 2개의 중앙부에 변형률 게이지(WSG)를 부착한 이후 철근을 거푸집에 넣고, 실험 변수별로 SHCC를 타설하여 양생하였다. SHCC 양생 4주후 콘크리트의 설계기준압축강도 30MPa의 일반콘크리트를 사용하여 현장 타설하였으며, 콘크리트 경화 이후 습윤 양생 조건을 충족하기 위하여 양생포를 씌우고 물을 뿌려 4주간 양생을 실시하였다. 실험체 제작순서는 철근조립 및 거푸집 제작, SHCC 배합 및 타설, 슬래브 상부 콘크리트 타설 순으로 제작하였다. (<표 2.1>, [그림 2.1] 참조)

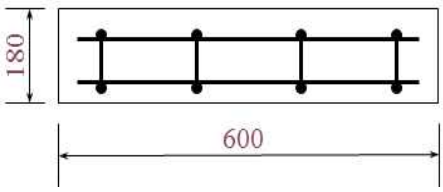
<표 2.1> 실험체 규격

Specimen	Details (Thickness of SHCC, ㎜)	Cross-Section of Slab (㎜)	f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)	Cross Section of SHCC (㎜)	Longitudinal / Transverse Reinforcements
RC-0A	Prototype	600×180	30	400	-	D13@150㎜ (ρs= 0.47 %) / D13@400㎜
SRC-40A	40				600×40	

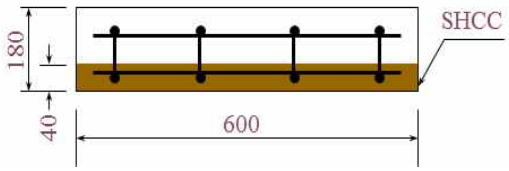
dCollection @ chosun



○ SHCC Specimen



(a) Specimen RC-0A



(b) Specimen SRC-40A

[그림 2.1] SHCC 복합구조 바닥슬래브 실험체별 상세(단면도)

2.2 SHCC의 개발을 위한 최적 배합비 선정

2.2.1 SHCC의 제조배합 결정

2.2.1.1 사용재료

SHCC에 사용된 혼합 재료의 물리적·화학적 특성은 <표 2.2>와 같다. 밀도 3.14 g/cm^{3}의 보통 포틀랜드 시멘트와 SHCC 파우더를 결합재로 사용하였다. SHCC 파우더는 시멘트 매트릭스 강도보강, 압출성형 시 형상유지 및 생산성 향상, 그리고 부가적인 내화성능 향상을 위한 분말재료로 구성되어 있다. 또한 밀도 2.16 g/cmm^3, 비표면적 3,645 cm^2/g 인 규사미분(Silica Powder)과 밀도 2.64 g/cm^3, 평균입경 0.2mm 인 규사(Silica sand)를 골재로 사용하였다. <표 2.3>에는 SHCC의 섬유의 분산성과 유동성을 조절하기위해 혼입된 증점제와 유동화제, 배합 시 혼입되는 유해한기포의 제거를 위해 사용된 소포제의 타입 및 밀도가 나와 있다. 섬유는 PVA 섬유로 직경 39 μm, 길이 12 mm를 이용하였으며, PVA 섬유의 특성은 <표 2.4>와 같다.

dCollection @ chosun

<표 2.2> 혼합 재료의 특성

Types	Density g/cm^3	Fineness cm^2/g	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Ig.loss
OPC	3.14	3,200	21.24	5.97	3.34	62.72	2.36	1.97	1.46
Silica Sand	2.64	0.2	96.9	1.44	0.34	0.11	0.03	-	-
FA	2.16	3,645	50.5	-	-	-	-	-	3.04
BFS	2.94	4,310	34.7	13.8	0.11	44.6	5.62	0.23	0.64

Diameter (mm)

<표 2.3> 혼화제의 특성

	PCSP	HPMC	Defoamer
Density (g/cm^3)	0.37	0.60	0.26
Type	brownish powder	white powder	white powder

<표 2.4> PVA 섬유의 특성

Ingredient	Density (g/cm^3)	Length (mm)	Diameter (㎛)	Surface Treatment	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation (%)	Alkali resistance
Polyvinyl alchol (PVA)	1.3	12	39	Oiling Agent	1,600	40	3 ~ 6	High

dCollection @ chosun

2.2.1.2 배합 조건에 관한 검토

SHCC의 제조방식은 분체 재료를 옴니믹서를 이용하여 건비빔을 하고 섬유의 고른 분산을 위하여 배합수의 1/2을 첨가하여 섬유를 투입하여 분산시킨다. 다음으로 옴니믹서에서 혼합된 분 체계에 이를 투입한다. 배합 시간은 총 15분으로 건식 배합 4분, 습식 배합 6분으로 구성된다. 배합 조건을 결정하기 위하여 물/바인더비(W/B), 플라이애시(FA/B), 규사(S/B)를 각각 45%, 20%, 20%로 설정하였으며, 증점제(메틸셀룰로스계)의 양을 조절하면서 섬유의 분산성을 높이는 방안을 검토하였다. 배합조성물은 <표 2.5>와 같으며, 실험결과 고연성 변형률 2.0% 이상을 나타냈다.

<표 2.5> SHCC 배합설계(고연성 변형률 2.0% 이상확보)

W/B wt.%	S/C wt.%	FA/B wt.%	Slag/B wt.%	unit (kg/㎥)									
				W	B	OPC	FA	BFS	Silica Sand	PCSP	HPMC	Defoamer	PVA vol.%
45	71	20	20	375	833	500	167	167	692	0.37	0.18	0.45	2.0

슬래부 상부의 RC 배합은 <표 2.6>과 같다.

<표 2.6> 일반콘크리트 배합설계(표준강도 : 30MPa)

W/B (%)	S/A (%)	unit. kg/㎥						
		W	B	OPC	FA	Admixtures	Fine agg.	Coarse agg.
40.1	47.5	166	414	331	83	4.97	802	900

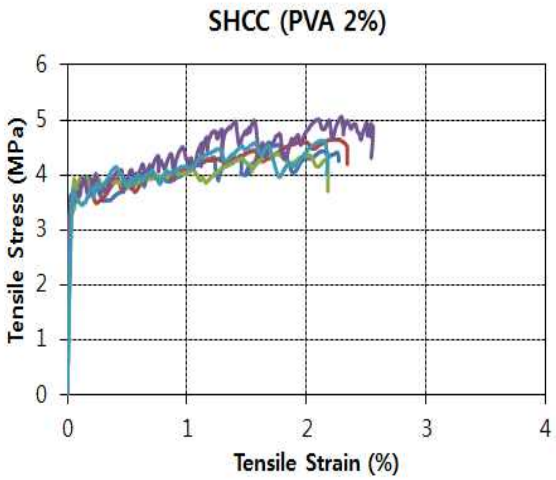
SHCC재료의 성능을 평가하기위해 압축강도시험과 직접인장실험을 수행하였다. 실험방법은 [그림 2.2]와 같다.

dCollection @ chosun

a. 직접인장실험 개요 b. 압축강도 실험

[그림 2.2] 직접인장 및 압축강도 실험 개요

직접인장실험을 통해 [그림 2.3]과 같이 SHCC의 다중미세균열로 인한 인장변형률 경화거동을 확인하였으며 2%이상의 인장변형률을 확보하였다. [그림 2.4]에서 볼 수 있듯이 미세균열은 100㎛ 이하의 균열폭이 2~3mm 간격으로 나타남을 알 수 있다. 1축 압축강도 실험결과 48.5 MPa 결과 값을 얻었다. SHCC의 역학성능은 <표 2.7>에 정리되어 있다.



[그림 2.3] SHCC 인장 응력-변형률 그래프

[그림 2.4] SHCC의 다중미세균열

dCollection @ chosun

<표 2.7> SHCC 역학성능

	Compressive Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Tensile Strain (%)
SHCC	48.5	3.5 <	2.3~2.5

2.3 슬래브 실험체 제작 및 성능평가

2.3.1 슬래브 실험체 제작

실험체의 제작은 내측 크기가 600 ㎜ × 180 ㎜ × 4,000 ㎜ 가 되도록 먼저 거푸집을 제작하였으며, 동시에 철근을 현장조립 하였다. 제작순서는 동일하며, 철근 배근을 한 이후 휨 철근의 변형률을 얻기 위하여 주방향 하부 철근 2개의 중앙부에 변형률 게이지(WSG)를 부착한 이후 철근을 거푸집에 넣고, 실험 변수별로 SHCC를 타설하여 양생하였다. SHCC 양생 4주후 콘크리트의 설계기준압축강도 30MPa의 일반콘크리트를 사용하여 현장 타설하였으며, 콘크리트 경화 이후 습윤 양생 조건을 충족하기 위하여 양생포를 씌우고 물을 뿌려 4주간 양생을 실시하였다. 실험체 제작순서는 철근조립 및 거푸집 제작, SHCC 배합 및 타설, 슬래브 상부 콘크리트 타설 순이며, 그 순서 및 제작과정은 [그림 2.5] ~ [그림 2.9]와 같다.

[그림 2.5] 실험체 제작 순서

dCollection @ chosun

a. 실험체 철근 조립

b. 실험체 거푸집 조립

c. 실험체 철근 조립후 거푸집 삽입

[그림 2.6] 실험체 제작과정(철근조립 및 거푸집제작) 1

dCollection @ chosun

d. 철근 용접

e. 실험체 게이지 부착

f. 거푸집에 조립된 철근 장착

g. 거푸집 철근 삽입 전경

[그림 2.7] 실험체 제작과정(철근조립 및 거푸집제작) 2

dCollection @ chosun

a. SHCC 배합

b. SHCC 슬래브 하부 타설

c. SHCC 양생

d. SHCC-20A

e. SHCC-40A

f. SHCC-60A

[그림 2.8] 실험체 제작과정(SHCC 타설)

dCollection @ chosun

a. 상부 콘크리트 타설

b. 콘크리트 타설 후 마감

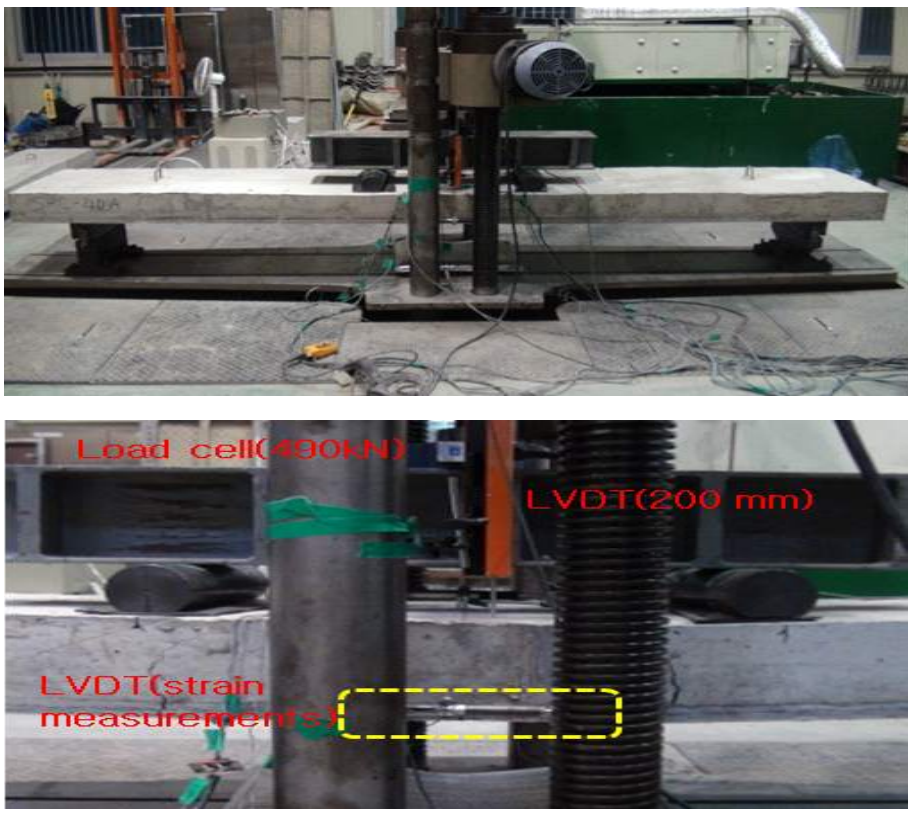
c. 슬래브 양생

[그림 2.9] 실험체 제작과정(상부 콘크리트 타설)

dCollection @ chosun

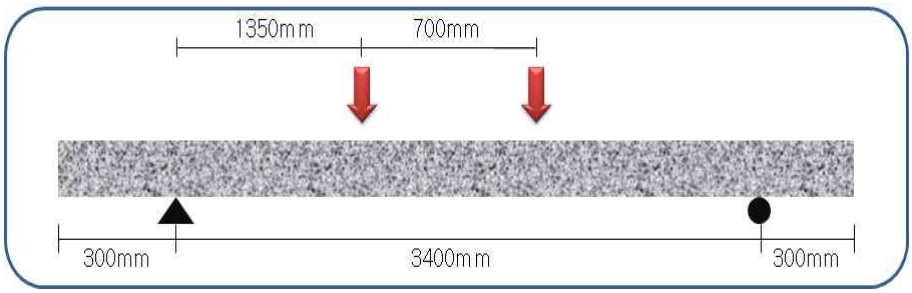
2.3.2 현장타설 SHCC 복합바닥구조시스템의 성능평가

실험은 1,000 kN 용량의 UTM(Universal Testing Machine)을 이용하여 [그림 2.11] ~ [그림 2.12]와 같이 4점 재하방식으로 실시하였다. 실험체의 양 단부로부터 300 ㎜ 위치에 회전단을 설치하여 단순지지 되도록 하였으며, 순경간(Net span)은 3,400 ㎜로 하였다. 2점 하중 가력점 사이의 거리는 700 ㎜로서, 이 영역에서 순수 휨이 작용하도록 하였다. 하중은 변위제어 방식으로 압축부 콘크리트가 파쇄 될 때까지 가력 하였다. 또한 보다 정확한 하중값을 얻기 위하여 500 kN 용량의 로드셀을 설치하여 측정하였다. 실험체의 처짐 및 변형, 변형률은 각각의 위치에 변위계(LVDT), 콘크리트 변형률 게이지, 철근 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다. ([그림 2.10] 참조)

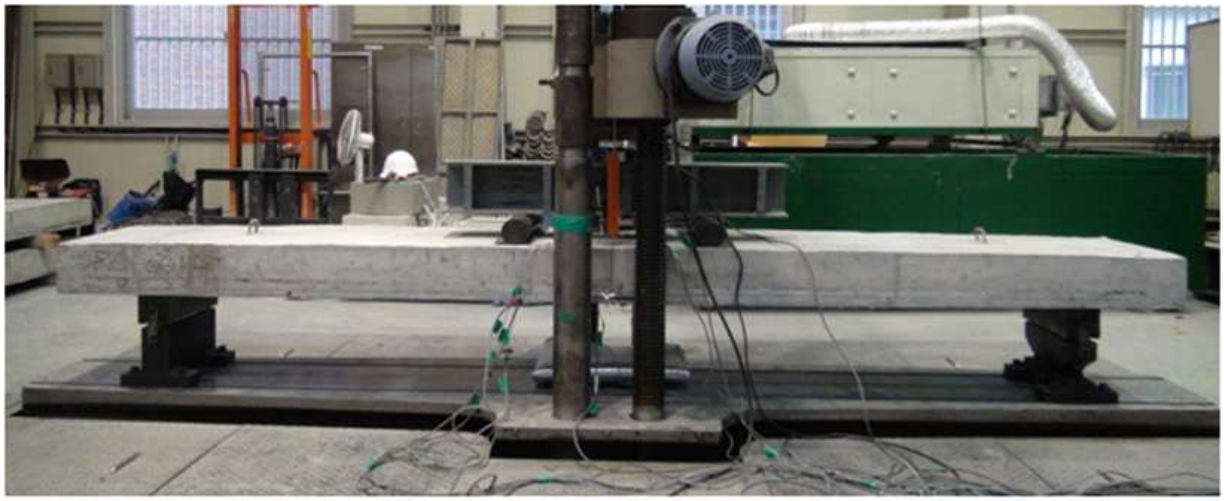


[그림 2.10] 실험장치 및 Set-up]

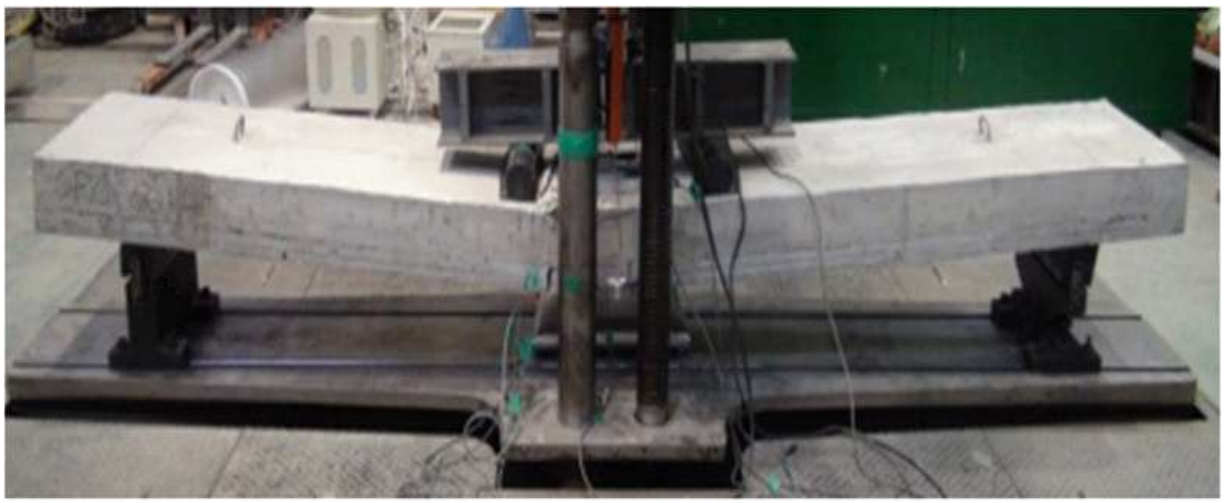
dCollection @ chosun



[그림 2.11] 실험체 하중재하 방법



(a) 실험체 재하



(b) 실험체 재하 후

[그림 2.12] 슬래브 실험체 재하 실험

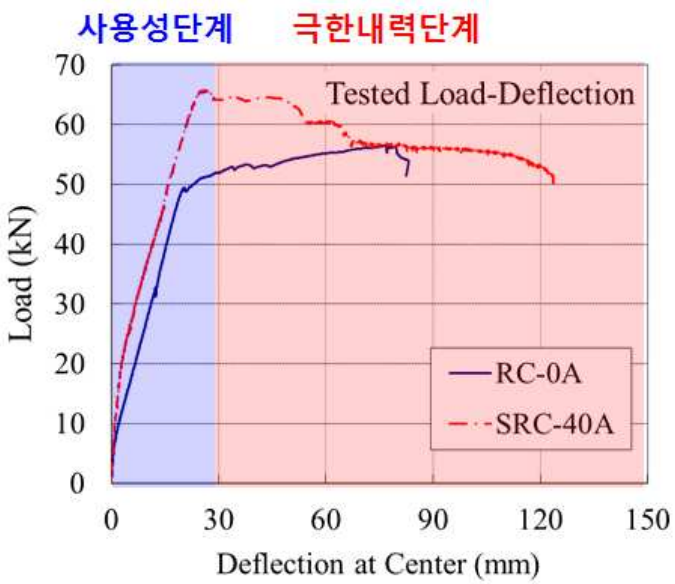
dCollection @ chosun

1) 실험결과

실험체의 재하실험에서 <표 2.8>과 같은 결과를 나타냈다. 기준 실험체 대비 실험체의 항복하중은 SRC-40A에서 1.3% 증가한 것을 알 수 있다. 실험체의 최대하중은 SRC-40A가 16.4% 높은 증가율을 보였다. 표준실험체에 비해 SRC-40 실험체는 강도와 강성이 높게 나타나 다중미세균열로 인해 처짐제어 효과 뿐 아니라 높은 강도와 강성 기여 효과는 크다는 것을 알 수 있다. 극한실험에서 나타난 사용성 단계부터 극한내력 단계까지의 결과를 [그림 2.13]의 실험체 하중-변위 곡선에 나타내었다.

<표 2.8> 실험체 실험 결과

Specimen name	Second slope after cracks		Initial yielding of bar		Max. values		Variation of load (%)	Ductility ratio	Secant stiffness at yielding (kN/mm)
	Disp. (mm)	Load (kN)	Disp. (mm)	Load (kN)	Disp. (mm)	Load (kN)			
RC-0A	0.9	6.6	21.4	49.0	82.3	55.3	-	3.85	2.3
SRC-40A	3.1	21.0	24.0	64.3	123.6	65.7	19	5.15	2.7



[그림 2.13] 실험체 하중-변위 곡선

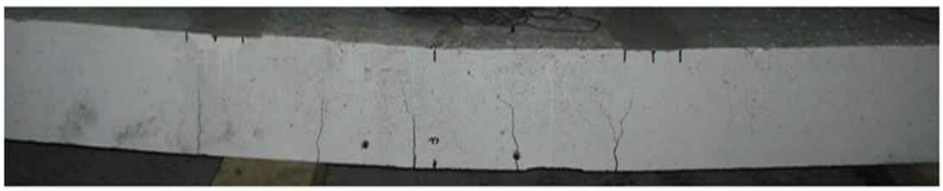
dCollection @ chosun

2) SHCC 복합바닥구조 균열 및 파괴 양상

(1) RC-OA 실험체

표준실험체로 순수 철근콘크리트로 이루어진 RC-OA 실험체는 재하 시작 이후 6.6kN에서 중앙부 인장연단에 초기균열이 발생하였다. 이후 균열의 상부 진전과 함께 100 ㎜ ~ 150 ㎜ 간격으로 균열이 발생하였으며, 하중이 커짐에 따라 균열이 상부로 진전되면서 동시에 균열폭이 점차 커졌다. 또한 부재 항복 이후 급격한 균열폭 증가가 있었으나 하중의 저하는 없었으며, 처짐 90 ㎜ 까지 안정적인 거동을 보였다. 최종 파괴는 가력점 중앙부의 콘크리트가 압축 파괴되는 휨 압축 파괴의 형태를 나타냈다. 재하실험 후 균열상태는 [그림 2.14]에 나타냈다.

(a) 슬래브 재하실험 후 전경



(b) 슬래브 측면 균열

(c) 슬래브 균열상태

[그림 2.14] 슬래브 RC-OA실험체 재하 실험 후 균열상태

dCollection @ chosun

(2) SRC-40A 실험체

SRC-40A 실험체는 초기균열이후 21 kN 부근에서 하중이 증가함에 따라 미세하게 변위량이 늘어났으며, 높은 처짐 제어 효과를 보였으며, 하중 증가와 함께 다중미세 휨균열이 무수히 발생하였다. 인장철근의 항복 이후에도 하중은 안정적으로 증가하였으며, 다중 미세균열 거동으로 처짐 122 mm까지 안정적인 연성 거동을 보였다. 재하 실험 후 균열상태는 [그림 2.15] ~ [그림 2.16]에 나타냈다.

(a) 슬래브 재하실험 후 전경

(b) 슬래브 재하실험 후 전경

[그림 2.15] 슬래브 SRC-40A 실험체 재하 실험 후 균열상태 1

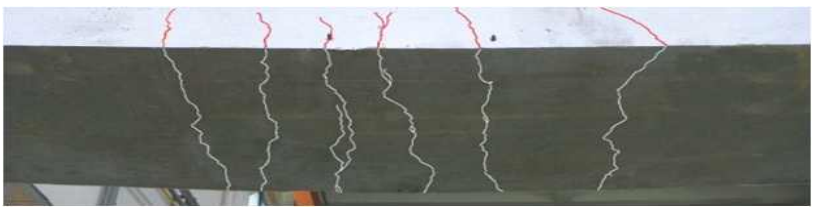
dCollection @ chosun

(c) 슬래브 하부 균열

(d) 슬래브 측면 균열

[그림 2.16] 슬래브 SRC-40A 실험체 재하 실험 후 균열상태 2

실험체별 재하 실험 후 슬래브 균열양상은 [그림 2.17]에 나타냈다.



(a) RC-0A

(b) SRC-40A

[그림 2.17] 실험체별 재하 실험 후 슬래브 하부 균열양상

dCollection @ chosun

2.4 소결

SHCC 복합구조 바닥슬래브의 현장타설 후 성능 평가에 대한 연구에서 다음과 같은 결과를 나타냈다.

1) 개발된 복합구조 바닥슬래브의 공법은 SHCC를 활용한 것으로서 기존 콘크리트 바닥구조에 비해 균열제어에 우수할 뿐만 아니라 현장 후 타설 콘크리트와 함께 슬래브 공사의 시공효율성 개선에도 장점이 있다.

2) 개발된 복합바닥구조시스템의 4점 휨 실험에 의한 성능평가에서 기존 철근콘크리트 슬래브 구조에 비해 다중미세균열 유발에 의한 국부균열 및 휨 균열 제어 효과로 인해 높은 휨 내력을 발휘하였다.

3) 시공공정 및 구조상세 개발과 함께 SHCC 패널의 현장적용에 관한 구체적인 추가 연구를 통해서 실용화 공법으로의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

dCollection @ chosun

3. SHCC 및 RC 복합슬래브의 휨 실험

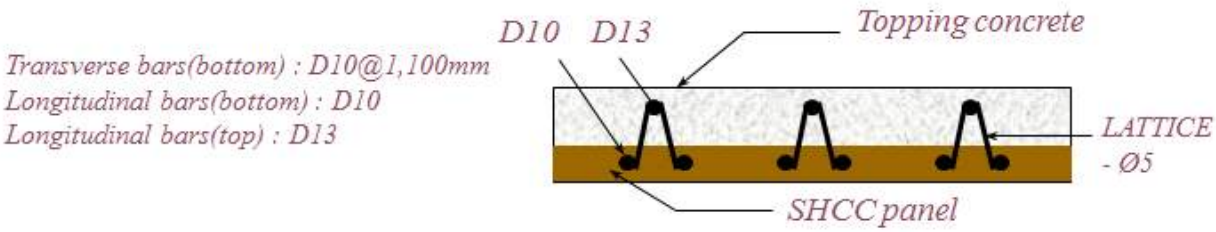
3.1 실험계획

본 연구의 실험에 사용된 실험체는 철근트러스 SHCC 하프프리캐스트 RC 복합슬래브의 구조이며 그 성능을 파악하기 위하여 <표 3.1>과 같은 실험을 계획하였다. 실험체는 일방향 슬래브 형식으로 SHCC 및 슬래브 두께를 주요 변수로 설정하였다. 실험체의 형상 및 크기는 아래 그림과 같다. RC-01 실험체는 동일 조건의 철근콘크리트 슬래브로써 표준실험체로 이용하였으며 슬래브 총 두께 150 mm 실험체만 제작하였으며, 총 두께 180 mm 실험체는 설계 공칭휨강도 값을 산정하여 계획하였다. SHCC 및 RC 복합슬래브 실험체는 [그림 3.1] ~ [그림 3.4]와 같이 SHCC를 바닥 피복콘크리트 및 DW-DECK의 아연도 강판에 대체하여 제작하였다.

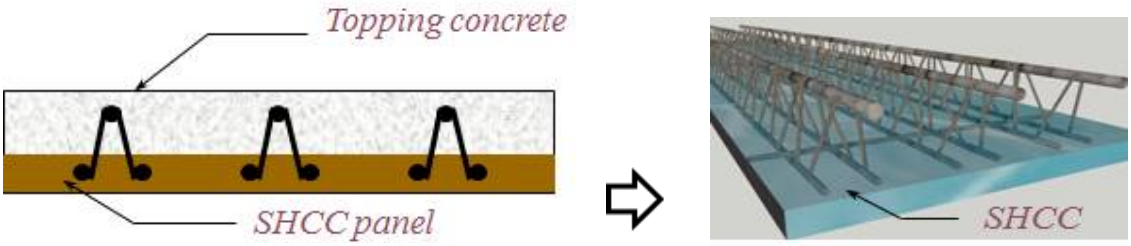
<표 3.1> 실험체 상세

Specimen	Details (Thickness of SHCC, mm)	Cross-Section of Slab (mm)	f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)	Cross Section of SHCC (mm)	note
RC-01	표준실험체	590×150	30	400	-	실험체 순지간 : 2,200mm
PCSH-40-150	40				590×40	
PCSH-60-150	60				590×60	
PCSH-40-180	40	590×180			590×40	
PCSH-60-180	60				590×60	

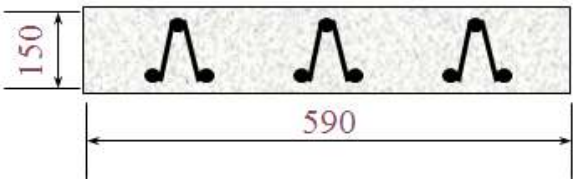
dCollection @ chosun



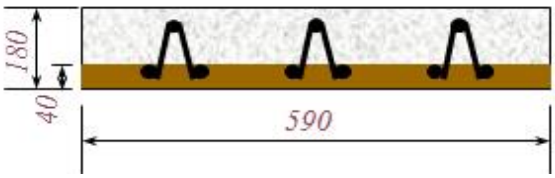
[그림 3.1] 표준실험체 계획(단면도)



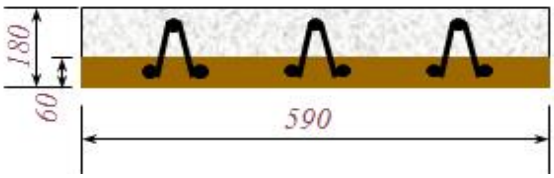
[그림 3.2] 실험체 계획도



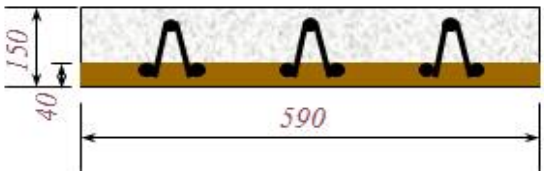
(a) Specimen RC-0A



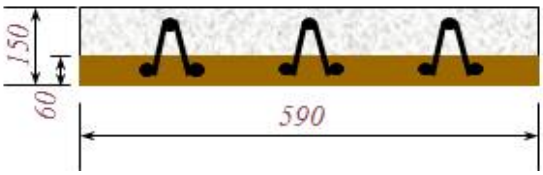
(b) Specimen PCSH-40-180



(c) Specimen PCSH-60-180



(d) Specimen PCSH-40-150

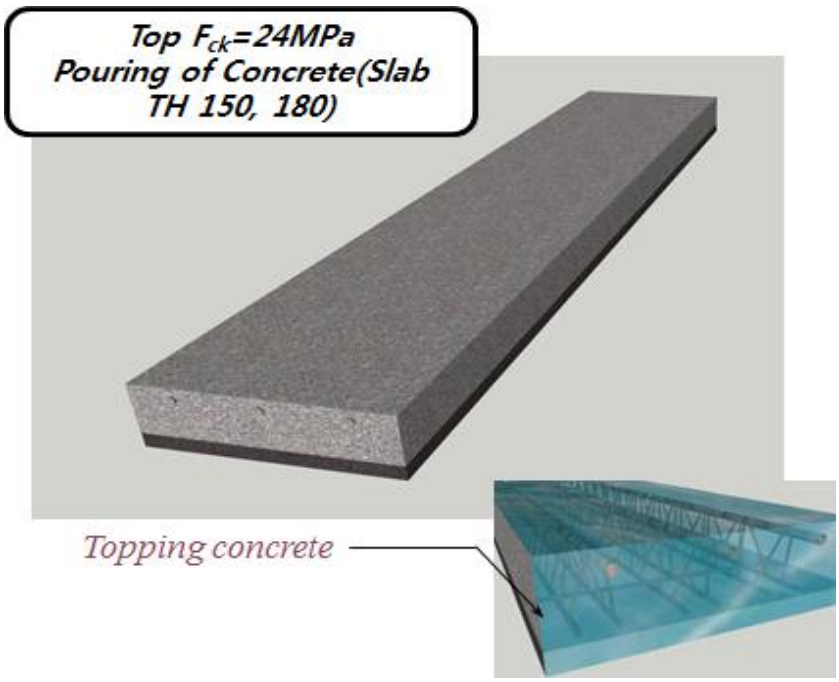


(e) Specimen PCSH-60-150

[그림 3.3] 실험체별 상세(단면도)

dCollection @ chosun

(a) SHCC 하프프리캐스트 슬래브



(b) SHCC 및 RC 복합바닥 슬래브

[그림 3.4] 실험체 모델링

dCollection @ chosun

3.2 슬래브 실험체 제작

실험체는 실제 현장적용을 위한 SHCC 및 RC 복합슬래브의 크기와 동일하며 내측 크기가 590 ㎜ × 180(150) ㎜ × 2,700 ㎜ 가 되도록 먼저 거푸집을 제작하였으며, 동시에 철근을 현장조립 하였다. 제작순서는 동일하며, 철근 배근을 한 이후 휨 철근의 변형률을 얻기 위하여 주방향 하부 철근 2개의 중앙부에 변형률 게이지(WSG)를 부착한 이후 철근트러스를 거푸집에 넣고, 실험 변수별로 SHCC를 타설하여 양생하였다. SHCC 양생 2주후 시공성하중 실험을 한 후 콘크리트의 설계기준압축강도 30MPa의 일반 콘크리트를 사용하여 슬래브의 상부에 현장 타설하였으며, 콘크리트 경화 이후 습윤 양생 조건을 충족하기 위하여 양생포를 씌우고 물을 뿌려 4주간 양생을 실시하였다. 실험체 제작순서는 DECK 조립 및 거푸집 제작, SHCC 배합 및 타설, 슬래브 시공하중 실험, 슬래브 상부 콘크리트 타설 후 양생 순이며, 그 순서는 [그림 3.5] ~ [그림 3.7]과 같다.

DECK 조립 및 거푸집 제작

⇩

SHCC 슬래브 바닥 타설

⇩

SHCC 양생

⇩

SHCC 슬래브 시공성하중 실험(양생 14일)

⇩

슬래브 시공성하중 실험 후 상부 콘크리트 타설

⇩

콘크리트 타설후 양생

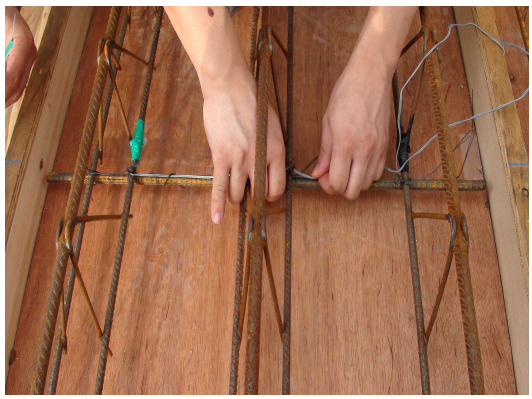
[그림 3.5] 실험체 제작 순서

dCollection @ chosun

(d) SHCC 타설-2

(e) SHCC 타설-3

(a) 거푸집 설치 및 철근배근



(b) 인장철근 스트레인 게이지 설치

(c) 철근배근 및 인장측정 게이지 설치 완료

(계속)

dCollection @ chosun

(d) SHCC 재료배합

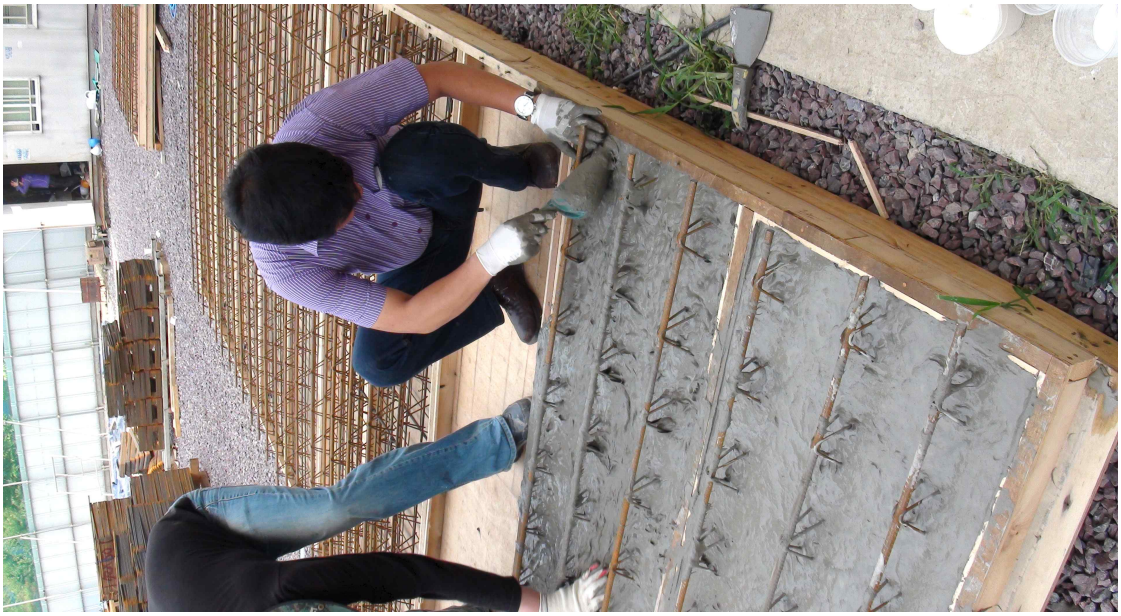
(e) SHCC 배합완료

(f) SHCC 타설-2

(g) SHCC 타설-3

(계속)

dCollection @ chosun



(h) SHCC 타설-4

(i) SHCC 타설-5

(계속)

dCollection @ chosun

(j) SHCC panel 양생-1

(k) SHCC 양생-2

[그림 3.6] 하프 PCa SHCC 데크 제작과정

dCollection @ chosun

(a) Toping Concrete 타설-1

(b) Toping Concrete 양생-1

(c) Toping Concrete 양생-1

(계속)

dCollection @ chosun

(d) 슬래브 실험체 재령 28일 후

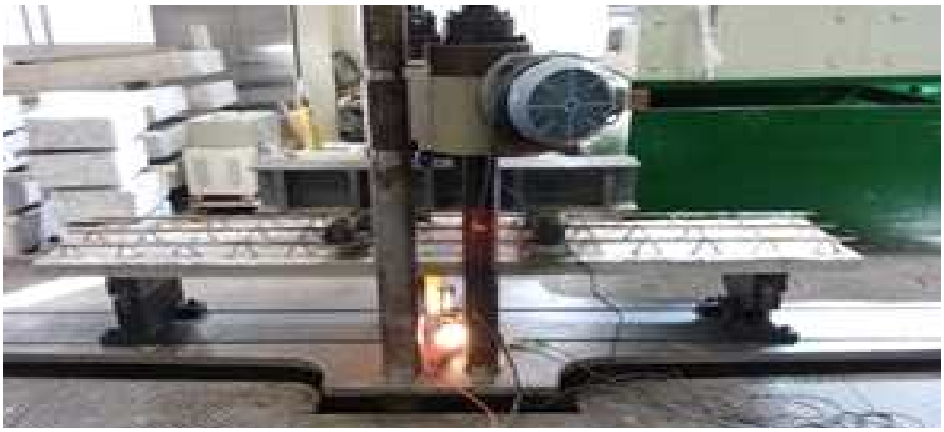
[그림 3.7] 하프 PCa SHCC 및 RC 복합슬래브 실험체 제작과정

3.3 실험 방법

3.3.1 시공하중 재하실험

SHCC 하프프리캐스트 슬래브 시공하중 재하실험은 현장적용을 위한 실험으로 SHCC 양생 2주후 실시하였다. 실험은 1,000 kN 용량의 UTM(Universal Testing Machine)을 이용한 [그림 3.8]과 같이 4점 재하방식과 [그림 3.9]와 같이 40 kg의 시멘트 25포(10 kN)를 이용한 등분포하중으로 나누어 실시하였다. 4점 재하방식은 실험체의 양 단부로부터 250 ㎜ 위치에 회전단을 설치하여 단순지지 되도록 하였으며, 순경간(Net span)은 2,200 ㎜로 하였다. 2점 하중 가력점 사이의 거리는 700 ㎜로서, 이 영역에서 순수휨이 작용하도록 하였다. 또한 보다 정확한 하중값을 얻기 위하여 500 kN 용량의 로드셀을 설치하여 측정하였다. 사용성 하중 재하실험은 고정하중, 작용하중, 충격하중을 고려하여 8.4 kN으로 선정하여 이 부분까지 도달 할 때까지 가력 하였다. 시멘트를 이용한 실험은 최대하중 10 kN으로 정하여 실험을 실시하였다. 실험체의 처짐은 슬래브의 중앙부 위치에 변위계(LVDT) 부착하여 측정하였다. 실험 데이터는 2개 실험 모두 데이터로그를 이용하여 수집하였다. ([그림 3.10] 참조)

dCollection @ chosun



[그림 3.8] 시공하중 재하실험(4점 재하방식)

[그림 3.9] 시공하중 재하실험(등분포하중)

[그림 3.10] 시공하중 실험장치 Set-up

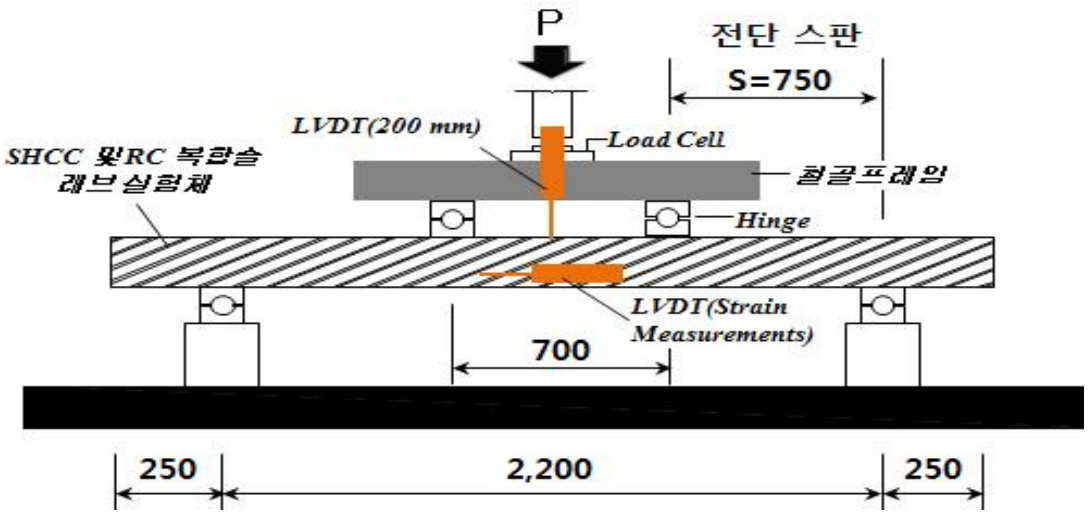
dCollection @ chosun

3.3.2 극한하중 실험

극한하중 재하실험은 1,000 kN 용량의 UTM(Universal Testing Machine)을 이용하여 [그림 3.11] ~ [그림 3.12]와 같이 4점 재하방식으로 실시하였다. 실험체의 양 단부로부터 250 mm 위치에 회전단을 설치하여 단순지지 되도록 하였으며, 순경간(Net span)은 2,200 mm로 하였다. 2점 하중 가력점 사이의 거리는 700 mm로서, 이 영역에서 순수 휨이 작용하도록 하였다. 하중은 변위제어 방식으로 압축부 콘크리트가 파쇄 될 때까지 가력 하였다. 또한 보다 정확한 하중값을 얻기 위하여 500 kN 용량의 로드셀을 설치하여 측정하였다. 실험체의 처짐 및 변형, 변형률은 [그림 3.13]과 같이 각각의 위치에 변위계(LVDT), 콘크리트 변형률 게이지, 철근 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다.

[그림 3.11] 실험장치 및 Set-up

dCollection @ chosun



[그림 3.12] 실험체 하중재하 방법

a. 실험체 Set-up-1

b. 실험체 Set-up-2

c. LVDT(Strain measurements) 설치

d. 측정장치 Set-up

[그림 3.13] 측정장치 부착 상세

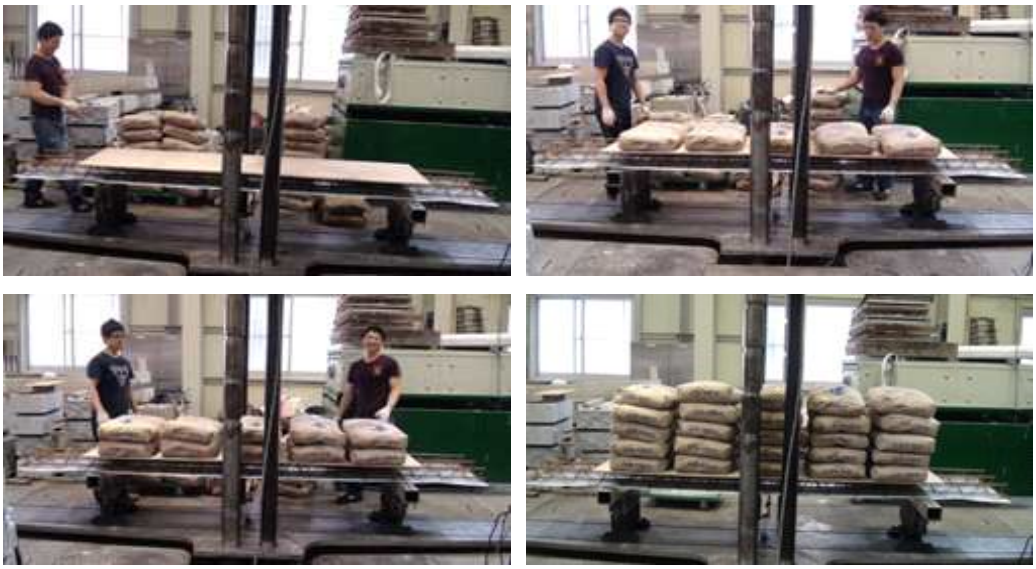
dCollection @ chosun

3.4 SHCC 및 RC 복합슬래브 휨 실험결과 및 분석

3.4.1 시공성하중 실험 결과

시공성 하중 실험은 SHCC 하프프리캐스트 RC 복합슬래브를 실제 현장에 적용하기 위하여 공사시 발생하는 고정하중, 작용하중, 충격하중을 고려하여 [그림 3.14] ~ [그림 3.15]와 같이 실험을 실시하였다.

[그림 3.14] 시공성하중 실험(4점 재하방식)



[그림 3.15] 시공성하중 실험(등분포하중)

시공성하중 재하실험은 충격하중, 작업하중, 고정하중을 고려하여 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 시공성 하중 실험 결과는 <표 3.2> ~ <표 3.3> 와 같다.

dCollection @ chosun

4점 재하 실험에서 SHCC 실험체는 TF-DECK 실험체에 비해 강성이 2.6배, 4.9배 높게 나타났으며, 시멘트포대를 이용하여 실시한 재하실험 결과 4.1배, 5.8배 높게 나타났다.

또한 처짐은 4점 재하실험에서 TF-DECK 실험체에 비해 SHCC를 적용한 실험체에서 61%, 79% 처짐이 감소되었으며, 시멘트포대를 이용한 실험에서는 76%, 83%정도 처짐량이 감소 하는 것으로 나타났다.

공사중에 발생하는 여러 가지 변수들을 고려했을 때 SHCC 하프프리캐스트 슬래브는 TF-DECK에 비해 처짐감소, 내구성 및 사용내력등이 향상되어 실제 현장에 적용하여도 이상이 없는 것으로 판단된다.

시공하중 실험에서 하중재하에 따른 중앙부 처짐은 [그림 3.16] ~ [그림 3.17]에 나타냈다.

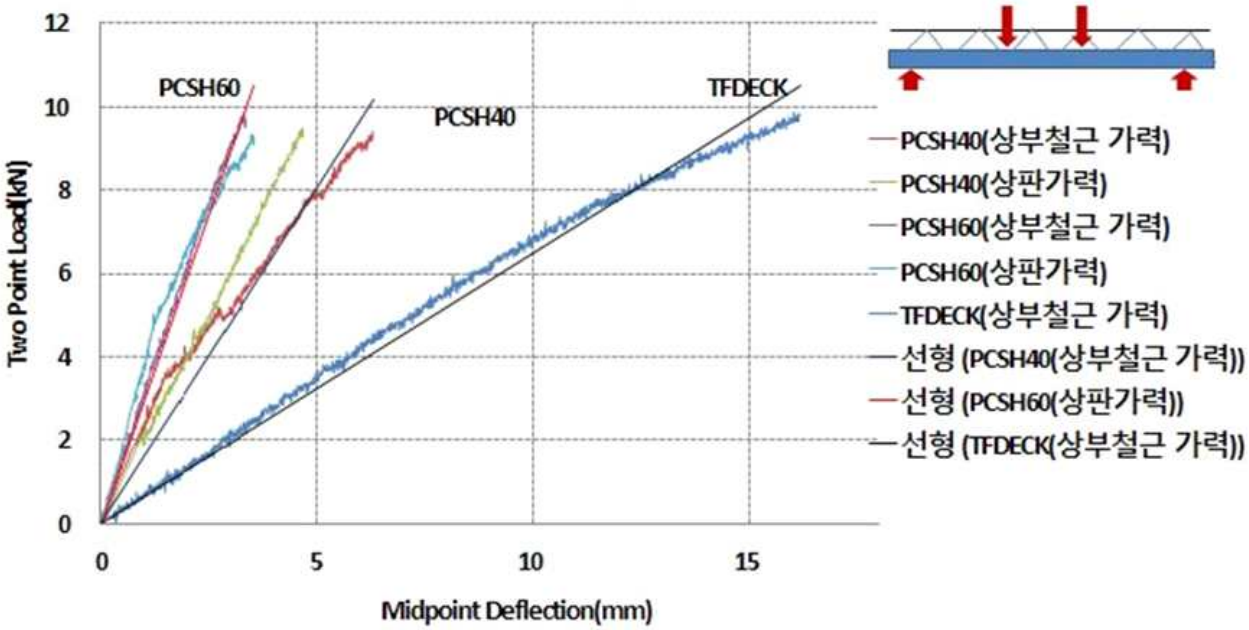
<표 3.2> 실험체 실험 결과(150mm)

Division	Specimen name	Load (kN)	Disp. (mm)	Secantstiffness of experimental measured value	Variation of Secant stiffness	Note
4 Point Loading Test	TF-DECK	9.8	16.2	0.60		
	PCSH-40-150		6.3	1.56	2.57	
	PCSH-60-150		3.3	2.97	4.91	

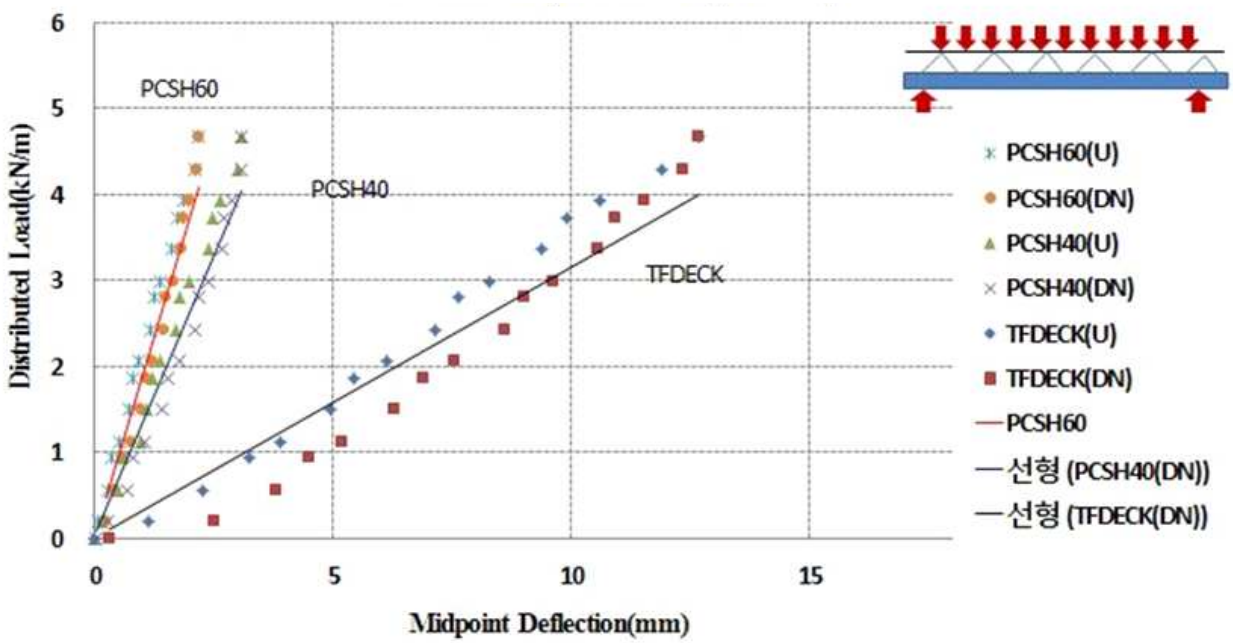
<표 3.3> 실험체 실험 결과(180mm)

Division	Specimen name	Load (kN)	Disp. (mm)	Secantstiffness of experimental measured value	Variation of Secant stiffness	Note
Uniform Loading Test (Cement)	TF-DECK	9.8	12.7	0.77		
	PCSH-40-180		3.1	3.16	4.10	
	PCSH-60-180		2.2	4.45	5.77	

dCollection @ chosun



[그림 3.16] 시공성하중 실험



[그림 3.17] 시공성하중 실험(Cement)

dCollection @ chosun

3.4.2 극한하중 실험 결과

SHCC 및 RC 복합바닥 슬래브의 극한 하중 재하 실험에 따른 슬래브 실험체의 최초균열, 인장철근의 항복, 그리고 극한하중 단계에서의 실험에 의한 수직 하중 및 처짐값을 비교하여 <표 3.4> ~ <표 3.5>와 같이 나타냈으며, 표준실험체는 슬래브 총 두께 150 mm 실험체의 일반콘크리트로 제작하였으며, 총 두께 180 mm 실험체는 설계 공칭휨강도 값을 산정하여 SHCC 및 RC 복합바닥슬래브의 실험결과와 비교하였다.

<표 3.4> 실험체 실험 결과(150mm)

Specimen name	Second slope after cracks		Initial yielding of bar		Max. values		Variation of Max load (%)	Ductility ratio	Secant stiffness at yielding (kN/mm)
	Disp. (mm)	Load (kN)	Disp. (mm)	Load (kN)	Disp. (mm)	Load (kN)			
RC-01 (표준실험체)	1.8	11.4	19.3	52.1	46.3	59.7	-	2.40	2.7
PCSH-40-150	1.6	22.7	18.0	78.1	48.7	80.5	34.8	2.71	4.3
PCSH-60-150	1.7	25.9	16.6	80.1	45.8	90.5	51.6	2.76	4.8

<표 3.5> 실험체 실험 결과(180mm)

Specimen name	Second slope after cracks		Initial yielding of bar		Max. values		Variation of Max load (%)	Ductility ratio	Secant stiffness at yielding (kN/mm)
	Disp. (mm)	Load (kN)	Disp. (mm)	Load (kN)	Disp. (mm)	Load (kN)			
RC-01-180 (Nominal bending strength) (Predicted)	-	-	-	-	-	65.2	-	-	-
PCSH-40-180	2.3	29.3	17.4	97.7	38.7	100.5	54.1	2.22	5.6
PCSH-60-180	2.1	33.5	16.1	106.8	42.0	111.6	71.2	2.61	6.6

dCollection @ chosun

3.4.2.1 극한내력 및 성능평가

하중 재하에 따른 슬래브 실험체의 최초균열, 인장철근의 항복, 그리고 극한하중 단계에서의 실험에 의한 수직 하중 및 처짐값을 비교하여 <표 3.4> ~ <표 3.5>에 나타내었다.

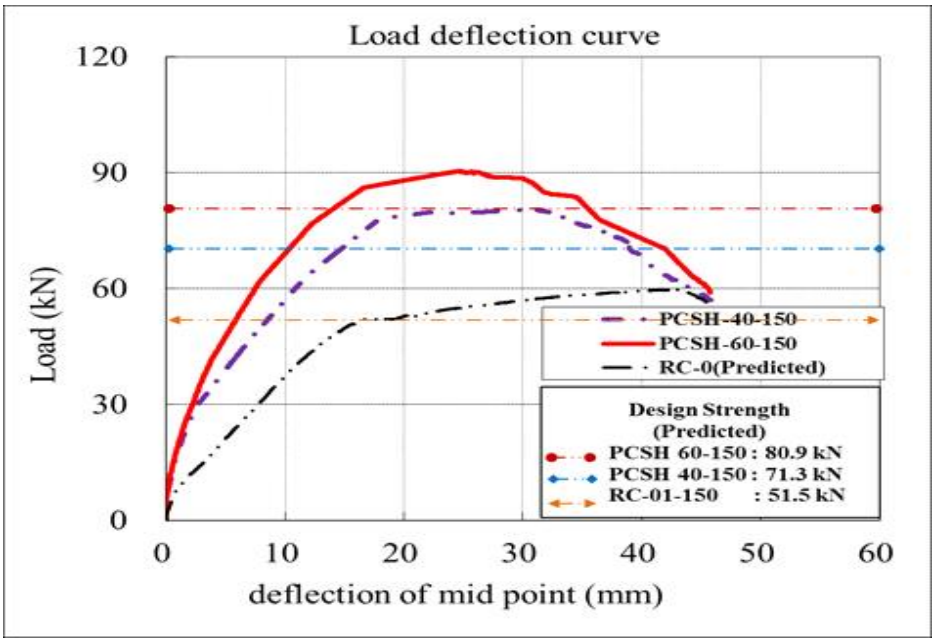
표에서부터 최초 인장철근의 항복까지 슬래브 실험체의 휨강성을 비교한 결과, 항복하중은 RC-01 실험체 52.1 kN, PCSH-40-150 실험체 78.7 kN, PCSH-60-150 실험체 80.1 kN, 표준실험체인 RC-01 실험체에 비해 PCSH-40-150 실험체에서 50.0%, PCSH-60-150 실험체에서 53.7% 더 높은 항복내력을 나타났으며, PCSH-40-180 실험체 97.7 kN, PCSH-60-180 실험체 106.8 kN, PCSH-40-180 실험체와 PCSH-60-180 실험체 비교결과 SHCC 두께 60mm에서 1.0% 의 높은 내력증가를 나타냈다. 이는 SHCC를 활용한 철근콘크리트 복합슬래브의 휨 인장부분에 일정 두께의 SHCC를 적용, 일반 철근콘크리트 슬래브와 다르게 SHCC가 2.0% 이상의 인장변형률에 도달할 때까지 인장응력을 부담하여 최초 인장철근의 항복 내력을 높일 수 있어서 슬래브의 사용성 하중의 내력이 증가하는 것을 확인하였다.

최대하중은 RC-01 실험체 59.7 kN, PCSH-40-150 실험체 80.5 kN, PCSH-60-150 실험체 90.5 kN, 표준실험체에 비해 PCSH-40-150 실험체에서 34.8%, PCSH-60-150 실험체에서 51.6% 최대내력 증가를 나타냈으며, PCSH-40-150 실험체와 PCSH-60-150 실험체 비교 결과 SHCC 두께 60mm를 적용한 실험체가 40mm 실험체에 비해 12.4% 더 높게 최대내력이 증가한 것으로 평가되었다. 총두께 180mm 실험체의 표준실험체는 설계 공칭휨강도 값을 활용하였으며, RC-01-180 실험체 65.2 kN, PCSH-40-180 실험체 100.5 kN, PCSH-60-180 실험체 111.6 kN, 비교결과 표준실험체의 설계값에 비해 PCSH-40-180 실험체가 54.1%, PCSH-60-180 실험체는 71.2% 최대내력이 증가하였으며, PCSH-40-180 실험체와 PCSH-60-180 실험체 비교 결과 SHCC 두께 60mm를 적용한 실험체가 40mm 실험체에 비해 11.0% 높은 최대 내력의 증가 효과가 있었다. 슬래브 총 두께 150mm, 180mm 모두에서 표준실험체에 비해 SHCC 및 RC 복합슬래브에서 최대내력 증가 효과가 있었으며, SHCC 두께 40 mm에 보다 60 mm를 적용한 실험체가 더 높은 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

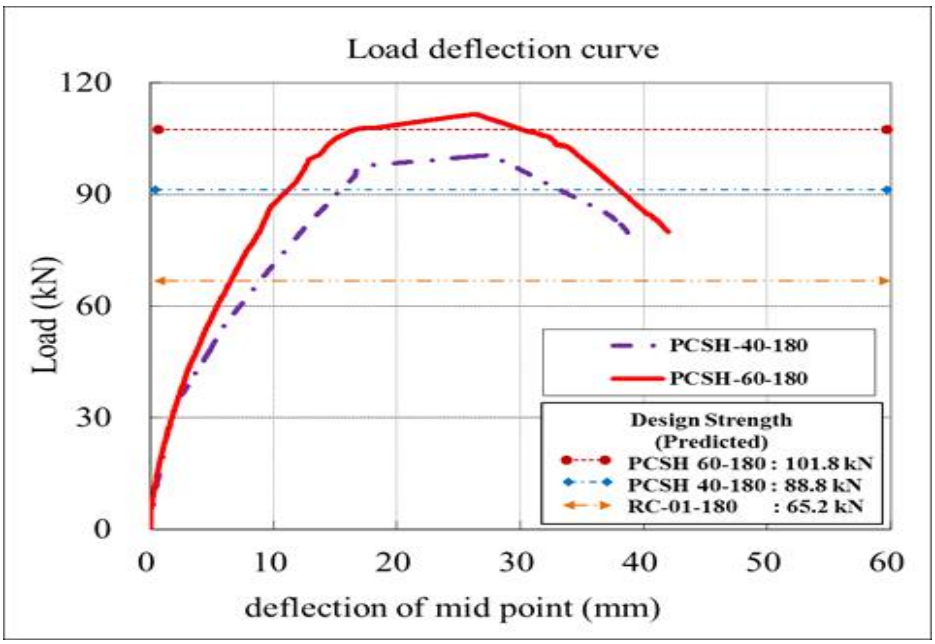
따라서 SHCC를 활용한 철근콘크리트 복합슬래브의 경우 사용성 하중 단계에서의 균열제어, 슬래브의 수직 처짐을 억제하고 최대내력 또한 높일 수 있는 장점이 있다.

실험에 따른 하중-변위 곡선, Moment-Curvature 곡선, 최대하중, 최대변위 비교는 [그림 3.18] ~ [그림 3.21]에 나타냈다.

dCollection @ chosun



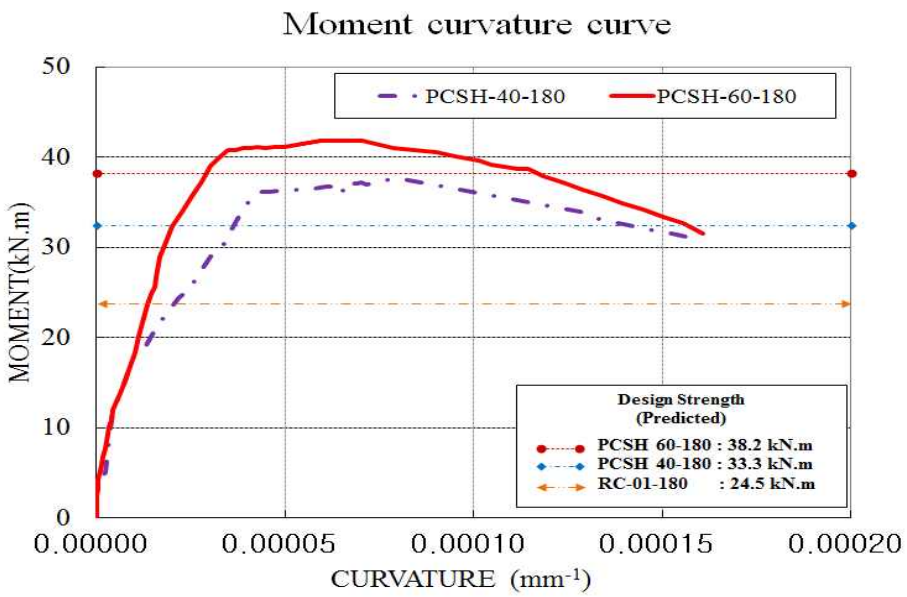
(a) 슬래브 총 두께 150㎜ 비교



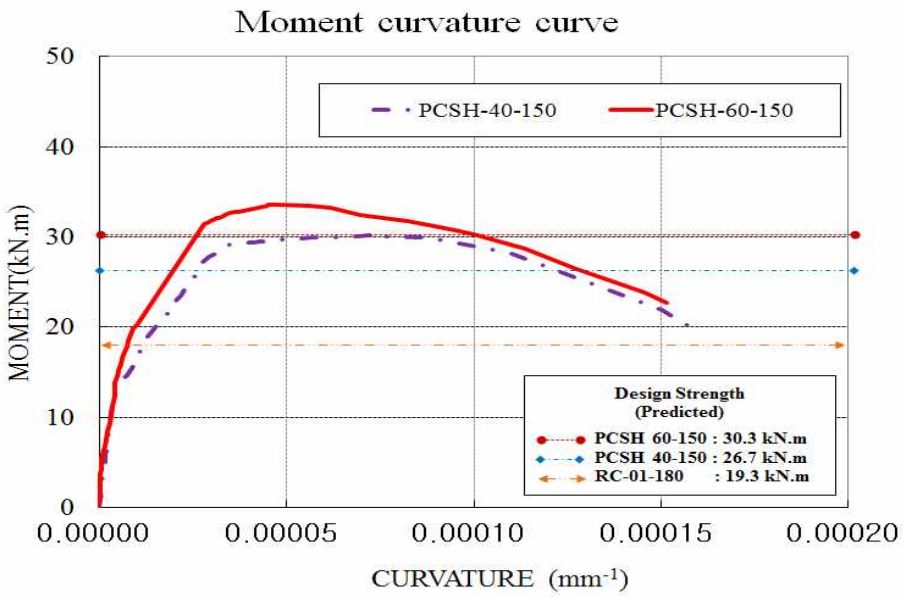
(b) 슬래브 총 두께 180㎜ 비교

[그림 3.18] 실험체 하중-변위 곡선

dCollection @ chosun



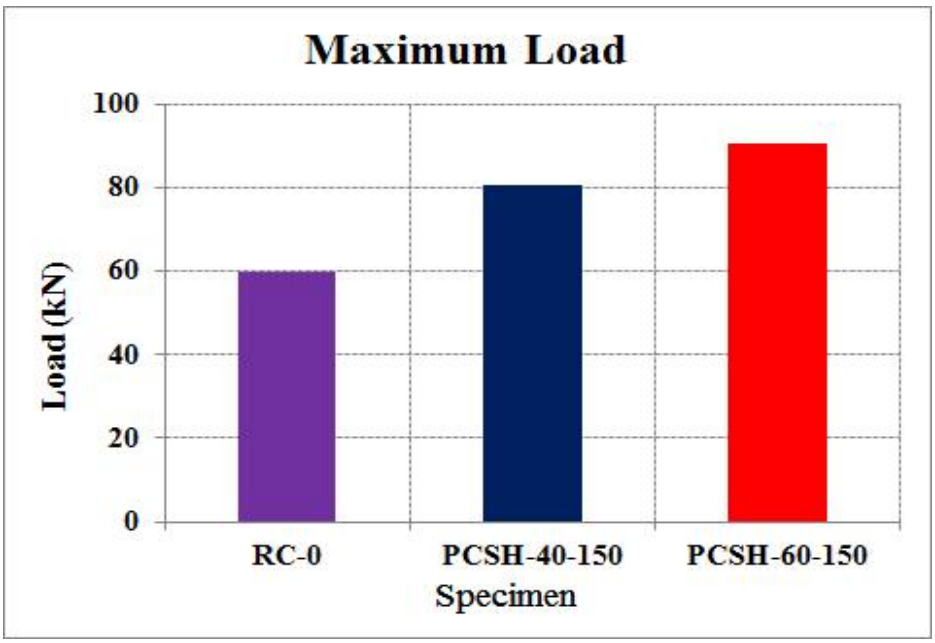
(a) 슬래브 총 두께 180mm 비교



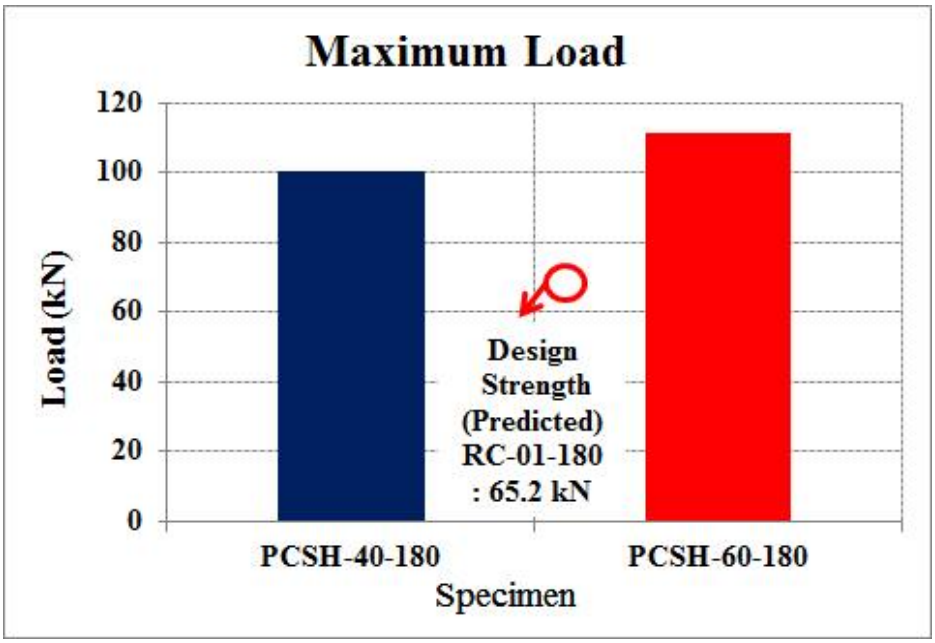
(b) 슬래브 총 두께 150mm 비교

[그림 3.19] 실험체 Moment-Curvature 곡선

dCollection @ chosun



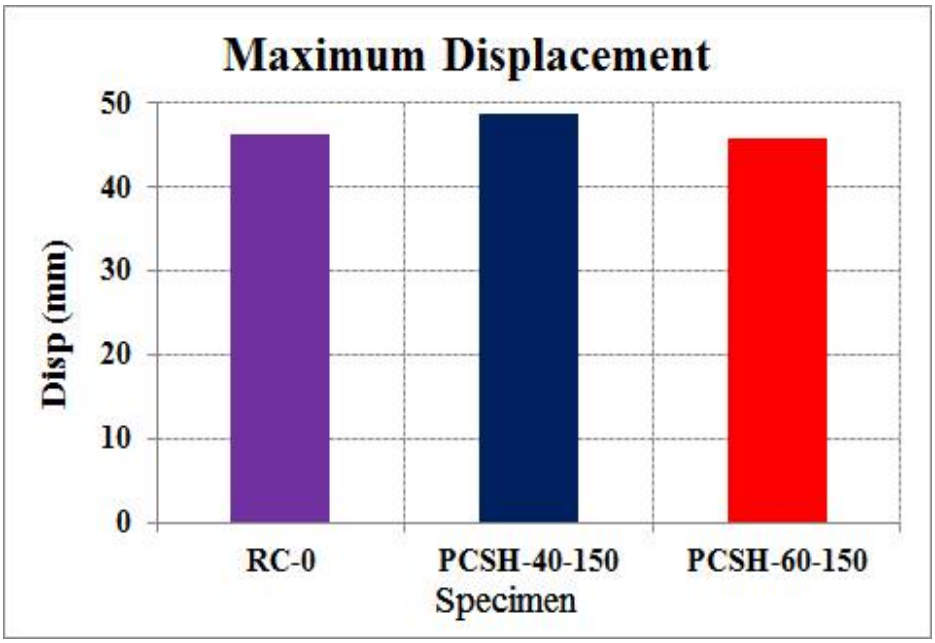
(a) 슬래브 총 두께 150mm 비교



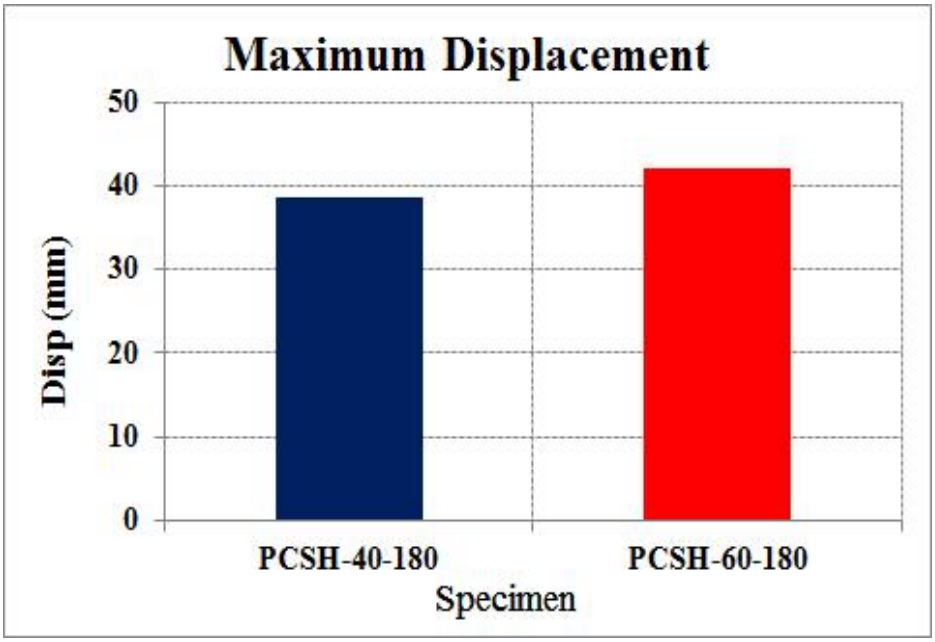
(b) 슬래브 총 두께 180mm 비교

[그림 3.20] 실험체별 최대 하중 비교

dCollection @ chosun



(a) 슬래브 총 두께 150mm 비교



(b) 슬래브 총 두께 180mm 비교

[그림 3.21] 실험체별 최대 변위 비교

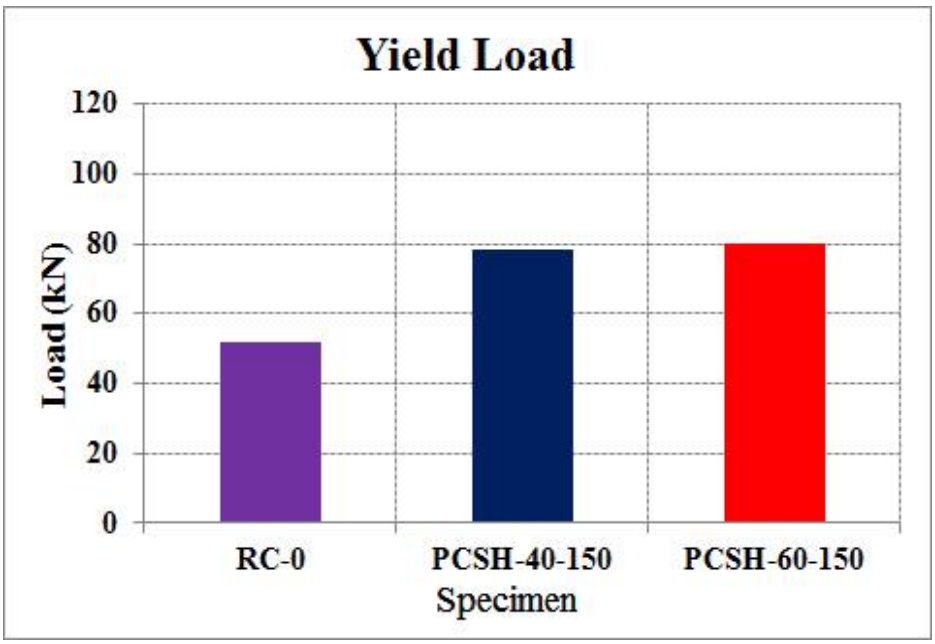
dCollection @ chosun

3.4.2.2 사용성 평가

1) 항복하중

SHCC 및 RC 복합슬래브의 극한실험에서 최초 인장철근의 항복까지의 항복하중은 RC-01, PCSH-40-150, PCSH-60-150 실험체는 52.1 kN, 78.1 kN, 80.1 kN, RC-01 실험체에 비해 PCSH-40-150 실험체에서 50.0%, PCSH-60-150 실험체에서 53.7% 더 높은 항복내력을 나타났다. PCSH-40-180, PCSH-60-180 실험체는 97.7 kN, 106.8 kN에서 항복하였다.

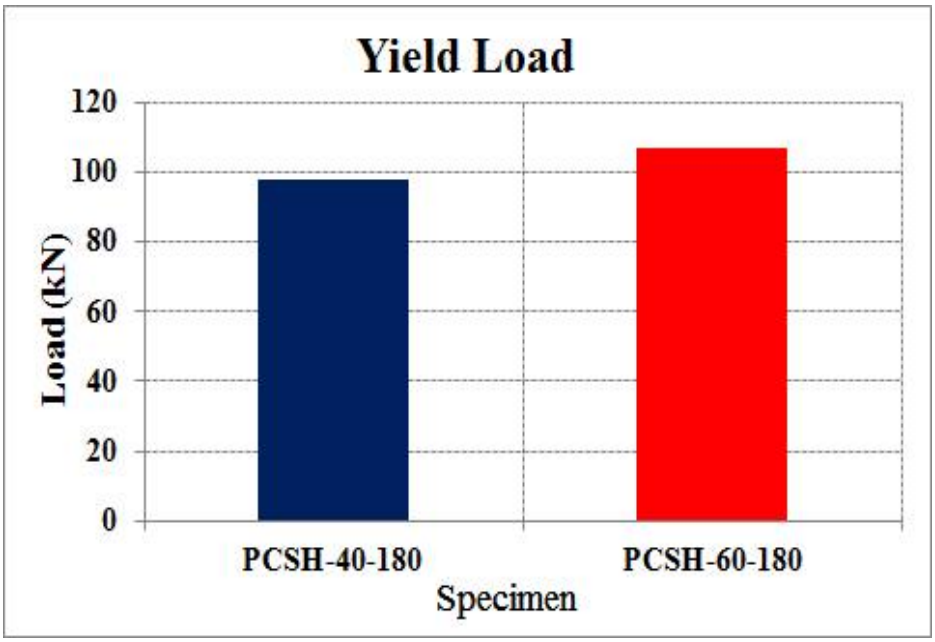
실험체 비교결과 SHCC 두께 60mm에서 1.0% 의 높은 내력증가를 나타냈으며, 슬래브의 휨 인장부분에 SHCC 두께 60 mm를 적용한 실험체는 40 mm를 적용한 실험체에 비해 슬래브 총 두께 150 mm에서 1.03배, 총 두께 180 mm 에서 1.09배 정도 항복내력이 높게 평가되었다. 항복하중을 [그림 3.22] 와 같이 그래프로 나타냈다.



(a) 슬래브 총 두께 150mm 비교

(계속)

dCollection @ chosun



(b) 슬래브 총 두께 180mm 비교

[그림 3.22] 실험체별 항복하중 비교

2) 강성평가

SHCC 및 RC 복합바닥 슬래브 실험체의 강성은 Secant Stiffness at yielding으로 평가하였으며, [식 3.1]과 같다.

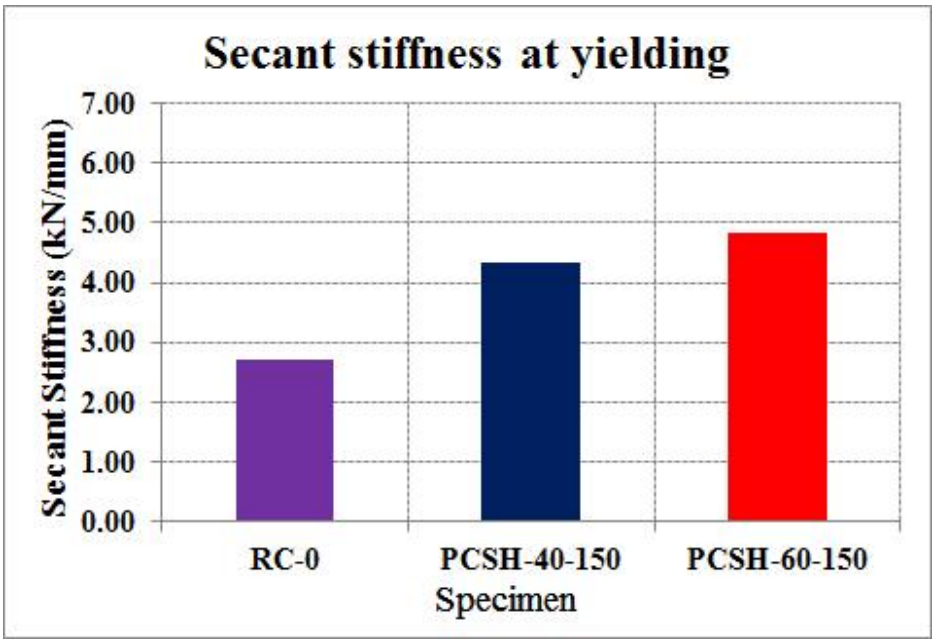
$$K_E = \frac{M_y}{\phi_y} \qquad \text{[식 3-1]}$$

여기서 K_E는 초기강성으로서, M_y는 항복하중을, ϕ_y는 항복곡률을 나타낸다. 강성을 비교해 보면, PCSH-40-180 실험체는 5.6 kN/㎜, PCSH-60-180 실험체는 6.6 kN/㎜, RC-01 실험체는 2.7 kN/mm, PCSH-40-150 실험체는 4.3 kN/㎜, PCSH-60-150 실험체는 4.8 kN/mm으로 나타났다. 총 두께 150 mm 실험체에서 표준실험체에 비해 SHCC 두께 40 mm 실험체가 59.2 %, 60 mm 실험체에서 77.8 % 높게 평가되었다.

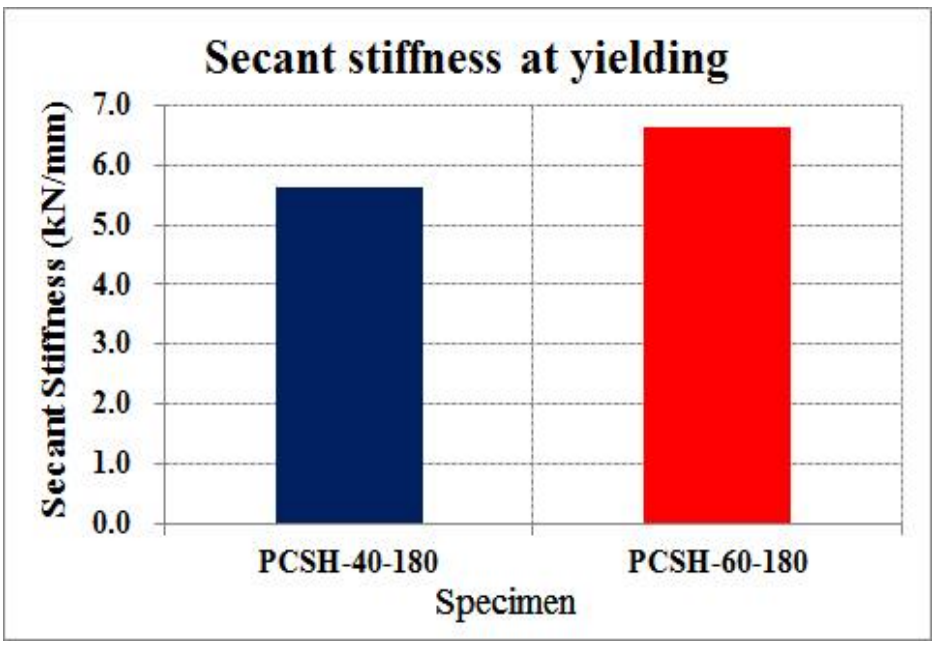
각 실험체 총 두께 180 mm, 150 mm 별로 SHCC 두께 40 mm 에 비해 두께 60 mm 실험체가 1.11배, 1.18배 높게 나타났다.

dCollection @ chosun

강성을 실험체 총 두께 150 ㎜, 180 ㎜ 별로 비교하여 나타낸 그래프는 아래 [그림 3.23]과 같다.



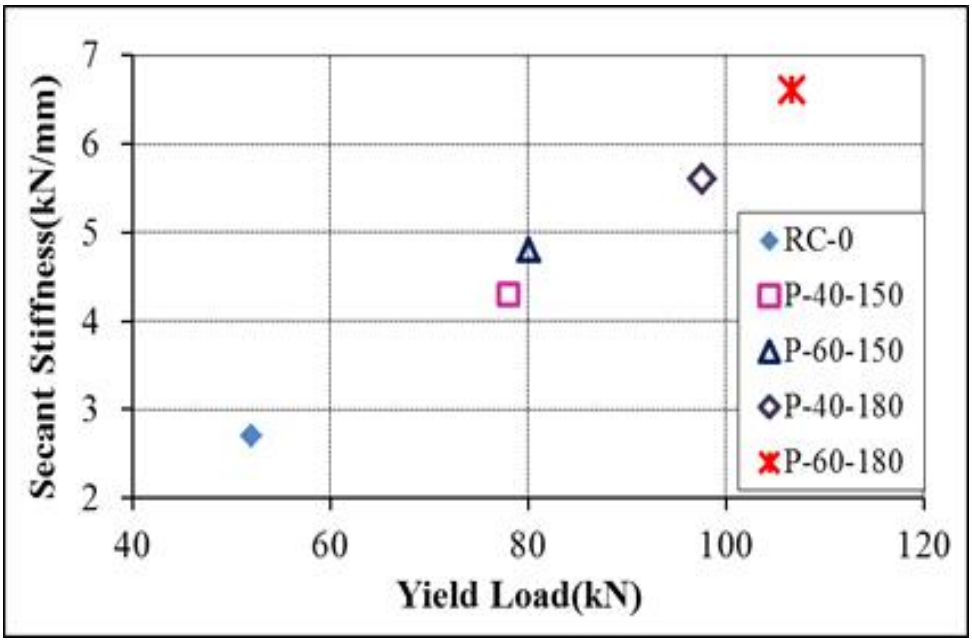
(a) 슬래브 총 두께 150㎜ 비교



(b) 슬래브 총 두께 180㎜ 비교

[그림 3.23] 실험체별 강성 비교

dCollection @ chosun



[그림 3.24] 실험체별 항복-강성 비교

따라서, SHCC를 적용한 복합바닥 슬래브의 경우 인장철근 항복이전까지인 사용하중단계에서의 초기균열발생, 균열폭 제어 및 국부균열 손상억제가 우수하였으며, 인장철근 항복단계까지 내력이 향상되어 사용하중 내력을 높일 수 있었다. 표준실험체인 RC 실험체에 비해 현저히 높은 성능을 보였으며, SHCC 두께별 비교에서는 SHCC 두께 60 mm 실험체는 40 mm 실험체에 비해 그 성능이 높은 것으로 나타났다. ([그림 3.24] 참조)

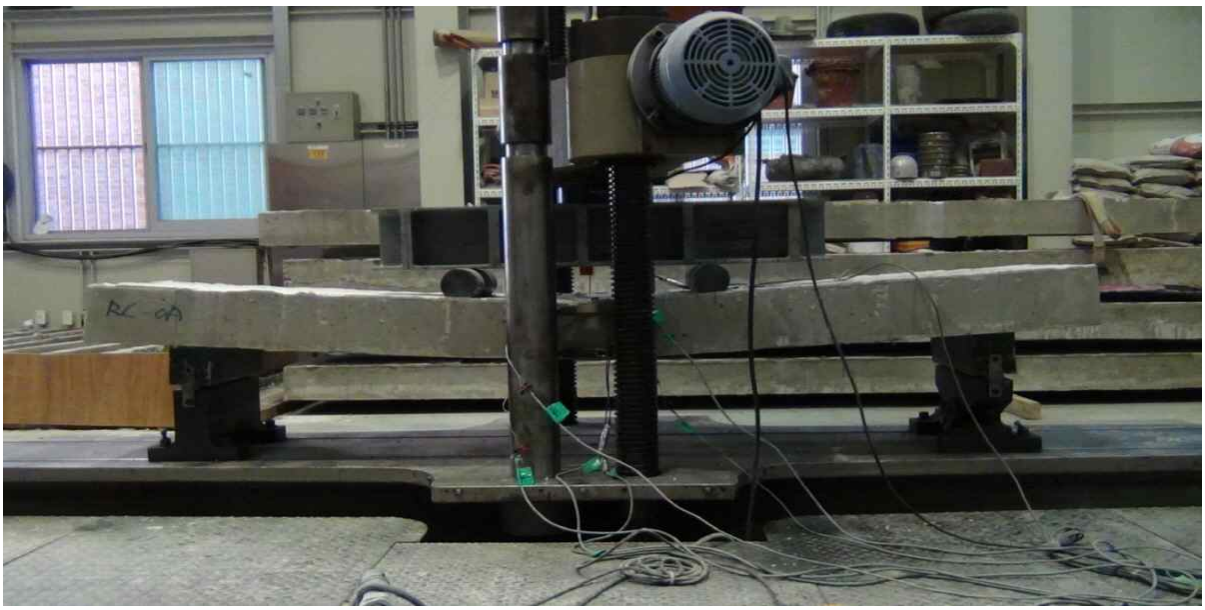
이와 같은 측면에서 본 복합슬래브 구조형식은 SHCC를 활용한 철근콘크리트 복합슬래브의 휨 인장부분에 일정 두께의 SHCC를 적용, 일반 철근콘크리트 슬래브와 다르게 SHCC가 2.0% 이상의 인장변형률에 도달할 때까지 인장응력을 부담하여 최초 인장철근의 항복 내력을 높일 수 있어서 사용성 하중단계에서의 균열억제, 처짐감소, 내구성 및 사용내력 향상에 우수한 효과를 나타내는 것으로 평가되었다.

dCollection @ chosun

3.4.3 균열 및 파괴양상

1) 실험체 RC-01

표준실험체인 일반 콘크리트로 이루어진 RC-01 실험체는 재하 시작 이후 6.8 kN에서 중앙부 인장연단에 초기균열이 발생하였다. 하중이 커짐에 따라 균열이 상부로 진전되면서 동시에 균열폭이 점차 커졌다. 또한 부재 항복 이후 급격한 균열폭 증가가 있었으나 하중의 저하는 없었다. 최대하중 59 kN 부근에서 하중은 급격히 감소하였으며, 가력점 중앙부의 콘크리트가 압축 파괴되었음에도 하부의 아연철판에 의해 처짐 46 ㎜ 까지 안정적인 거동을 보였다. 실험 후 균열상태는 [그림 3.25]~[그림 3.26]과 같다.



(a) 실험체 재하실험 후 전경

dCollection @ chosun

(b) 재하실험 후 초기 및 파괴후 균열 발생

[그림 3.25] 슬래브 RC-01 실험체 재하 실험 후 균열상태 1

(a) 슬래브 하부

dCollection @ chosun

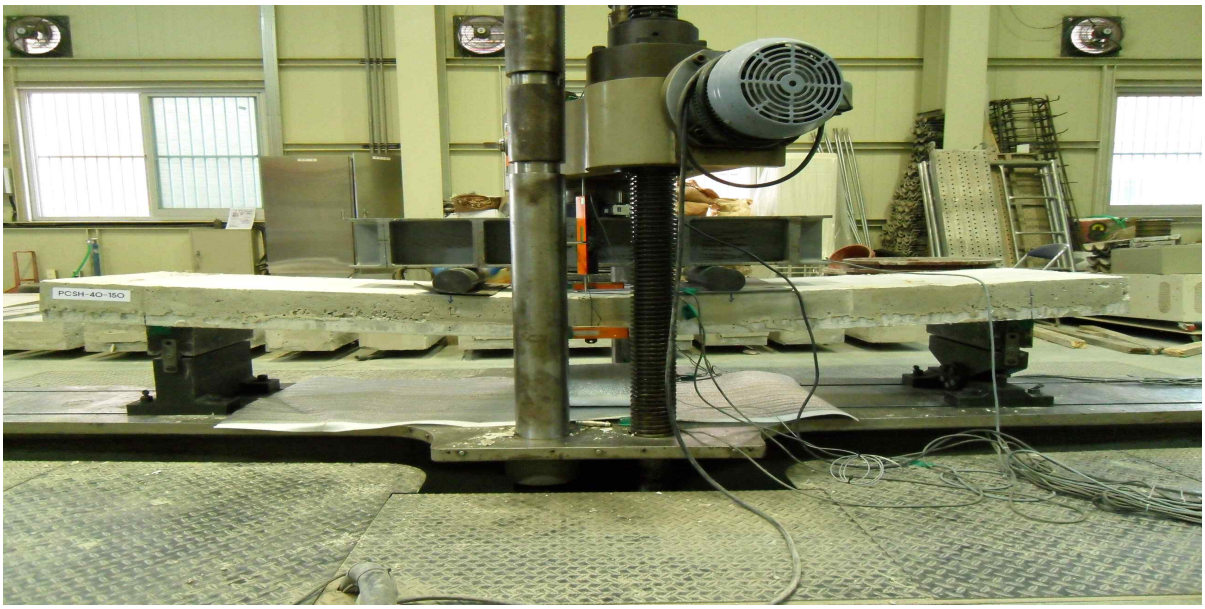
(b) 슬래브 측면 균열

[그림 3.26] 슬래브 RC-01 실험체 재하 실험 후 균열상태 2

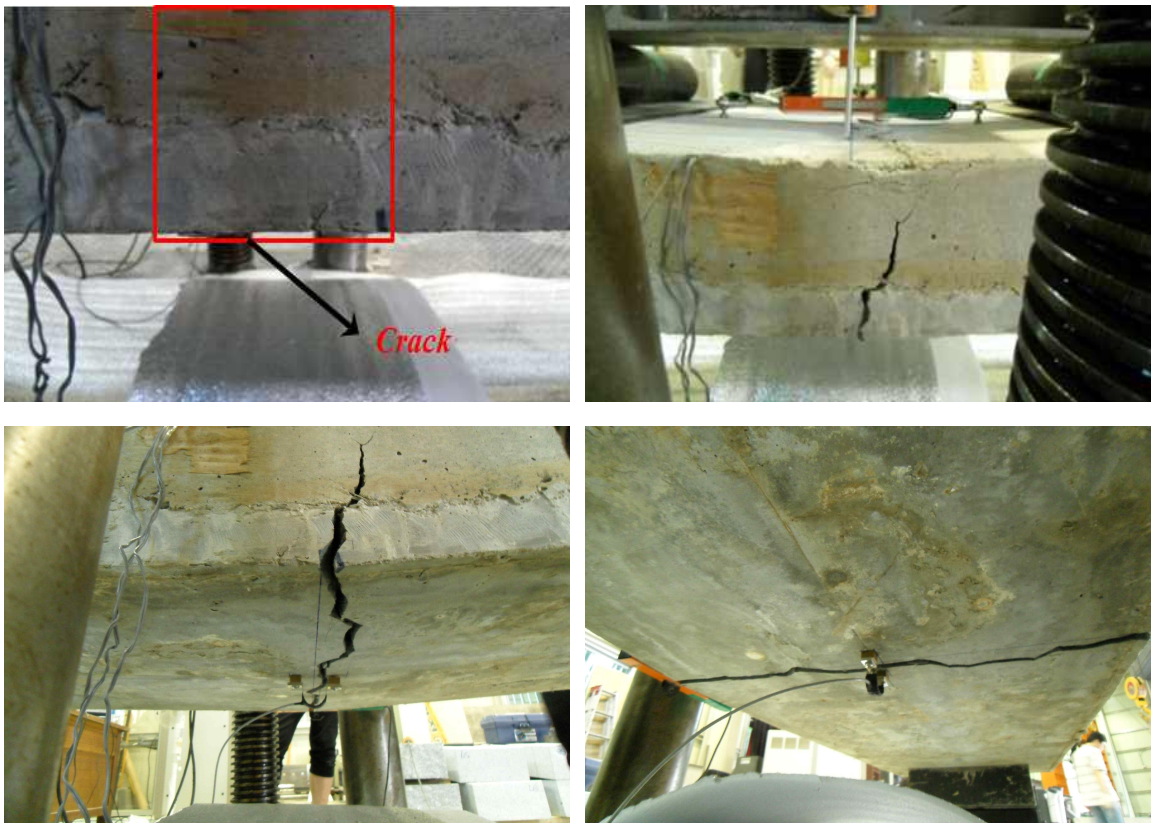
2) 실험체 PCSH-40-150

PCSH-40-150 실험체는 초기균열이 22.7 kN에서 발생하였으며, 이후 하중이 증가함에 따라 미세하게 변위량이 늘어났으며, 처짐 제어 효과를 보였다. 하중 증가와 함께 다중미세 휨 균열이 무수히 발생하였다. 인장철근의 항복 이후에도 하중은 안정적으로 증가하였으며, 다중 미세균열 거동으로 처짐 48 ㎜까지 안정적인 연성 거동을 보였다. 실험체는 지간 중앙부의 콘크리트 휨 압축 파괴에 도달하면서 최대하중 80.5 kN에 도달한 후에 점차로 내력을 상실하였다. 실험 후 균열상태는 [그림 3.27]~[그림 3.28]과 같다.

dCollection @ chosun



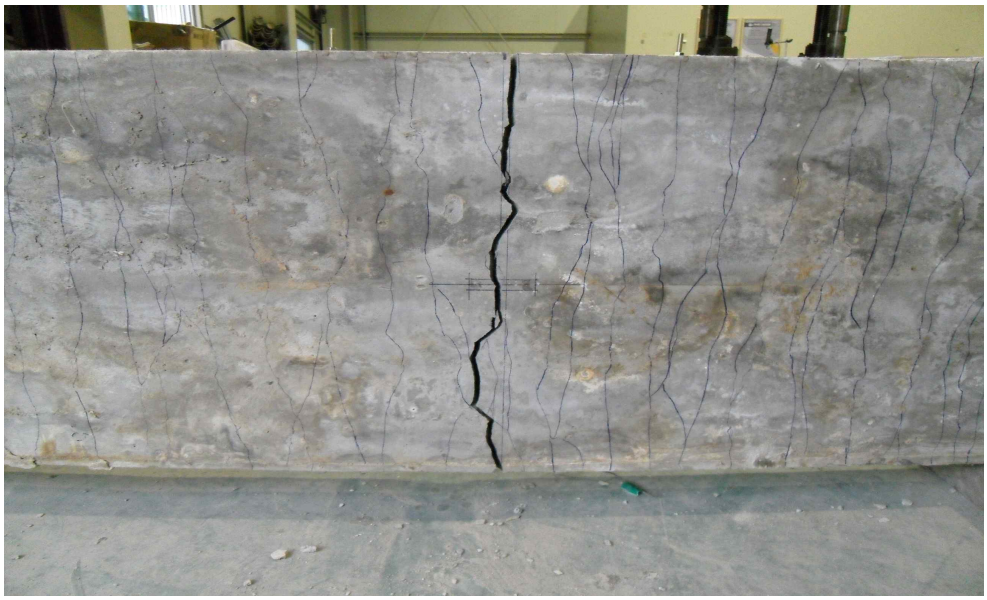
(a) 슬래브 재하실험 후 전경



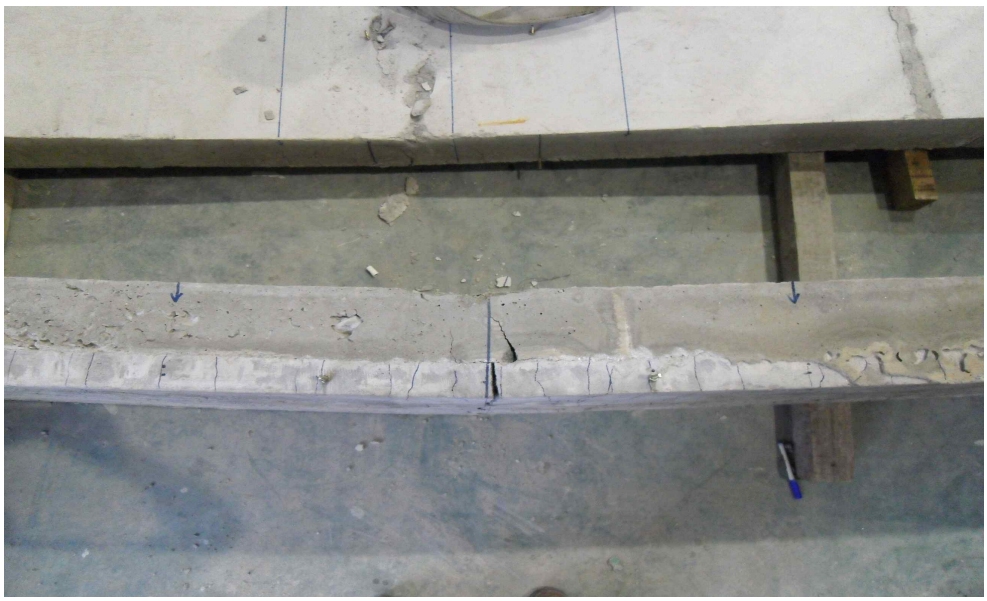
(b) 슬래브 재하실험 후 균열 발생

[그림 3.27] 슬래브 PCSH-40-150 실험체 재하 실험 후 균열상태 1

dCollection @ chosun



(a) 슬래브 하부 균열



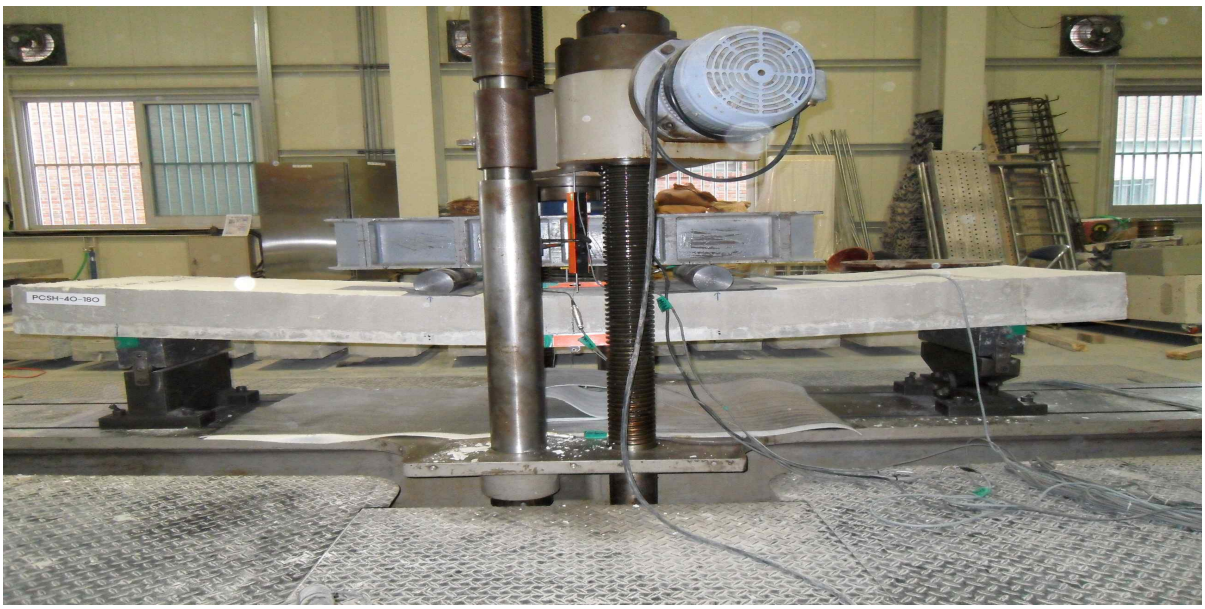
(b) 슬래브 측면 균열

[그림 3.28] 슬래브 PCSH-40-150 실험체 재하 실험 후 균열상태 2

dCollection @ chosun

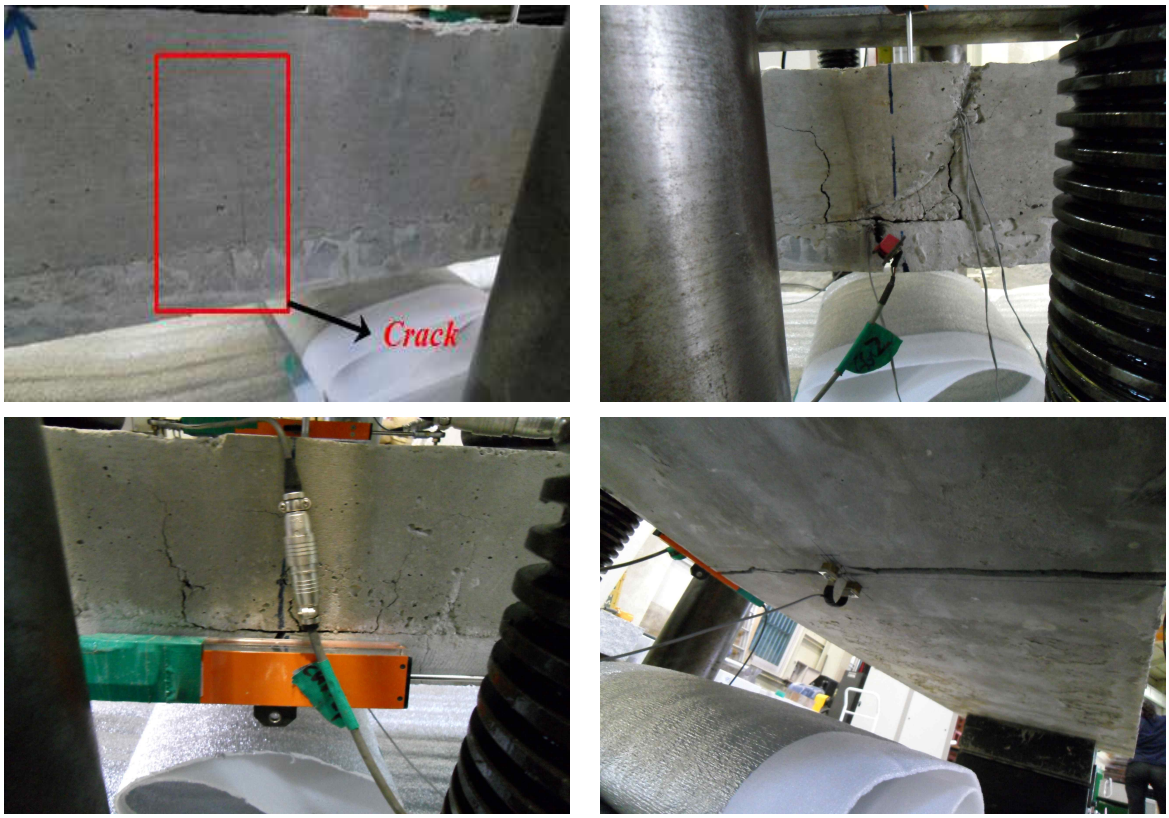
3) 실험체 PCSH-40-180

PCSH-40-180 실험체는 초기균열은 29.3 kN에서 발생하였으며, 이후 하중이 증가함에 따라 미세하게 변위량이 늘어났으며, 처짐 제어 효과를 보였다. 하중 증가와 함께 다중미세 휨 균열이 무수히 발생하였다. 인장철근의 항복 이후에도 하중은 안정적으로 증가하였으며, 다중 미세균열 거동으로 처짐 39 ㎜까지 안정적인 연성 거동을 보였다. 실험체는 지간 중앙부의 콘크리트 휨 압축 파괴에 도달하면서 최대하중 100.5 kN에 도달한 후에 점차로 내력을 상실하였다. 실험 후 균열상태는 [그림 3.29]~[그림 3.30]과 같다.



(a) 슬래브 재하실험 후 전경
(계속)

dCollection @ chosun



(b) 슬래브 재하실험 후 균열 발생

[그림 3.29] 슬래브 PCSH-40-180 실험체 재하 실험 후 균열상태 1

(a) 슬래브 하부 균열

(계속)

dCollection @ chosun

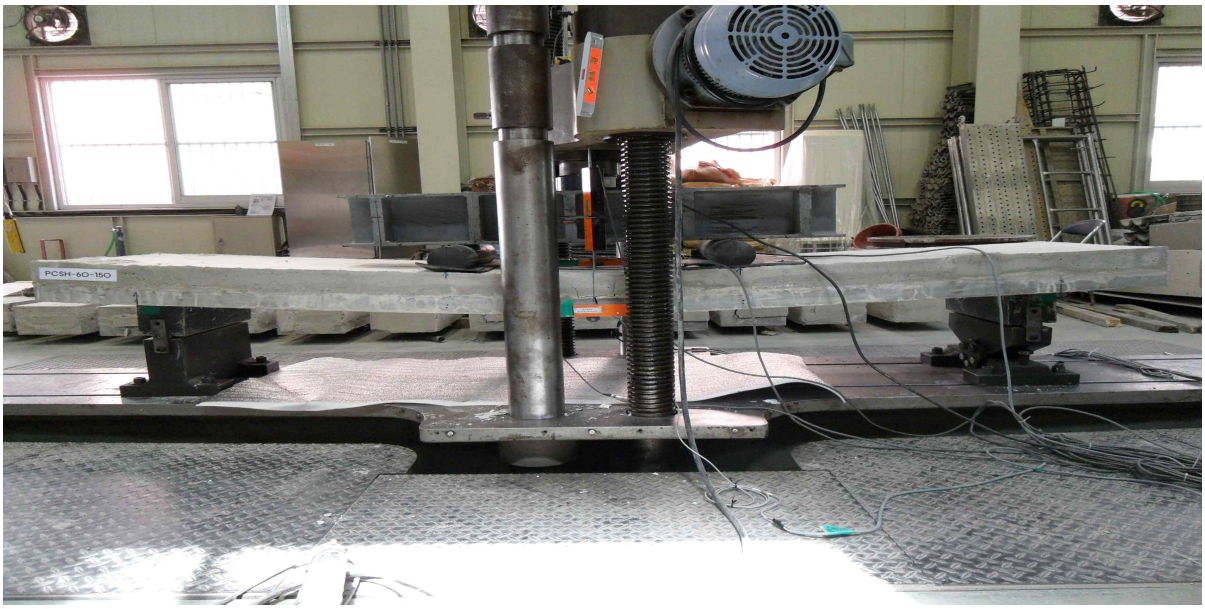
(b) 슬래브 측면 균열

[그림 3.30] 슬래브 PCSH-40-180 실험체 재하 실험 후 균열상태 1

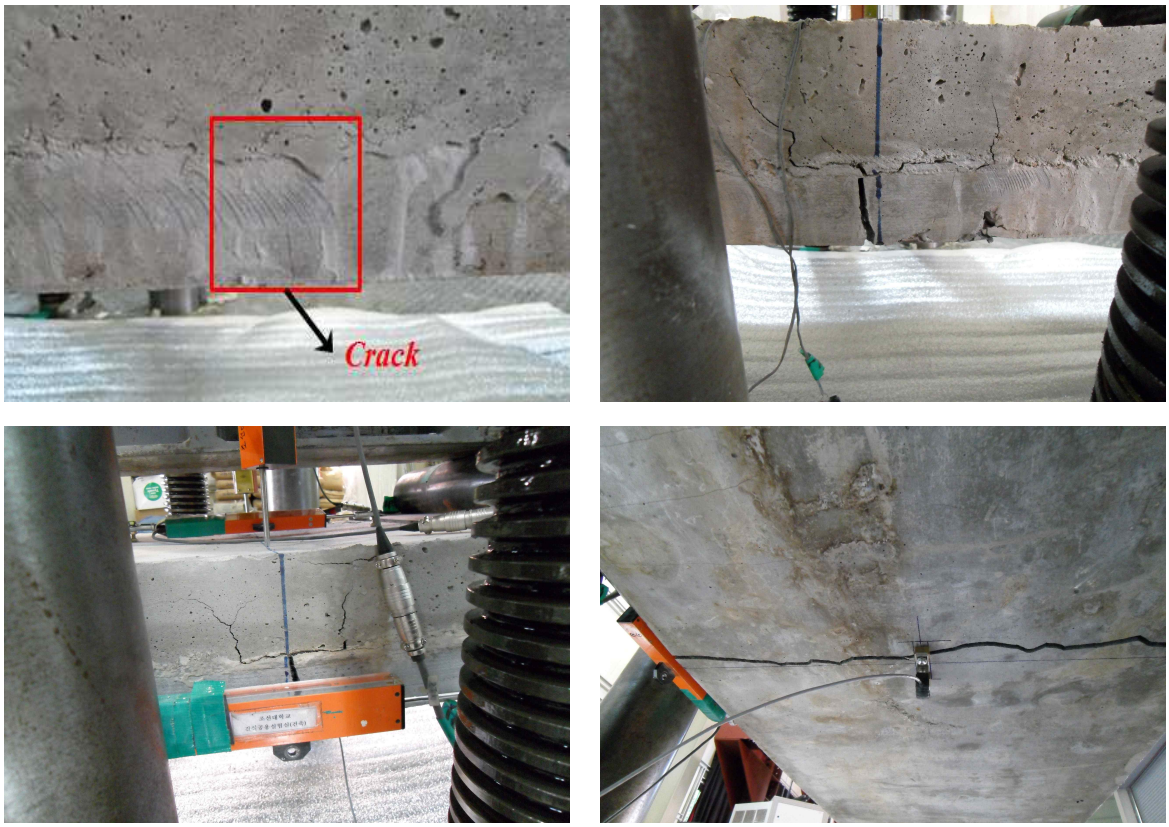
4) 실험체 PCSH-60-150

PCSH-60-150 실험체는 초기균열이 25.9kN에서 발생하였으며, 이후 하중이 증가함에 따라 미세하게 변위량이 늘어났으며, 처짐 제어 효과를 보였다. 하중 증가와 함께 다중미세 휨 균열이 무수히 발생하였다. 인장철근의 항복 이후에도 하중은 안정적으로 증가하였으며, 다중 미세균열 거동으로 처짐 45㎜까지 안정적인 연성 거동을 보였다. 실험체는 지간 중앙부의 콘크리트 휨 압축 파괴에 도달하면서 최대하중 90.5kN에 도달한 후에 점차로 내력을 상실하였다. 실험 후 균열상태는 [그림 3.31]~[그림 3.32]과 같다.

dCollection @ chosun



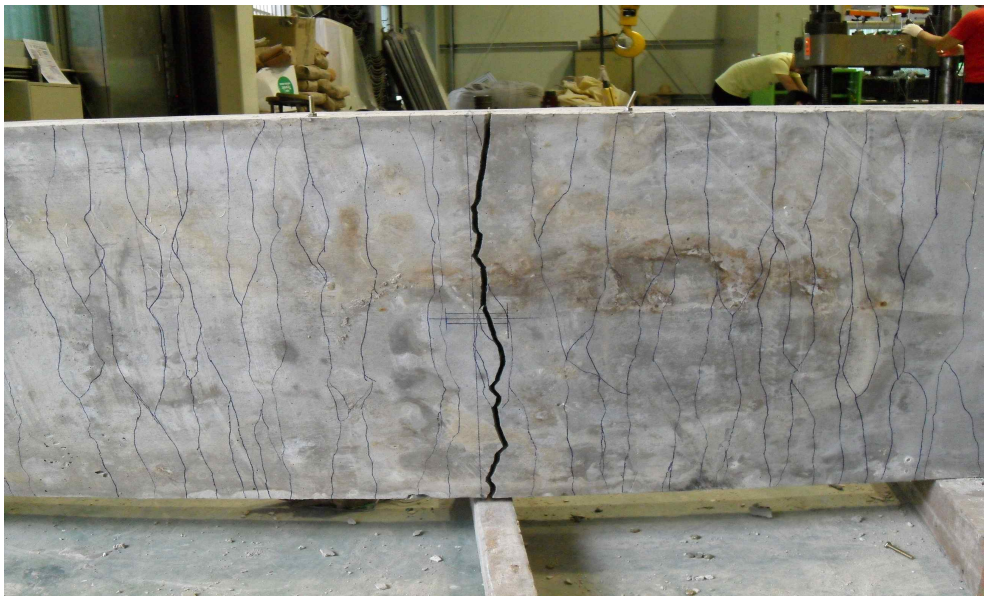
(a) 슬래브 재하실험 후 전경



(b) 슬래브 재하실험 후 균열 발생

[그림 3.31] 슬래브 PCSH-60-150 실험체 재하 실험 후 균열상태 1

dCollection @ chosun



(a) 슬래브 하부 균열

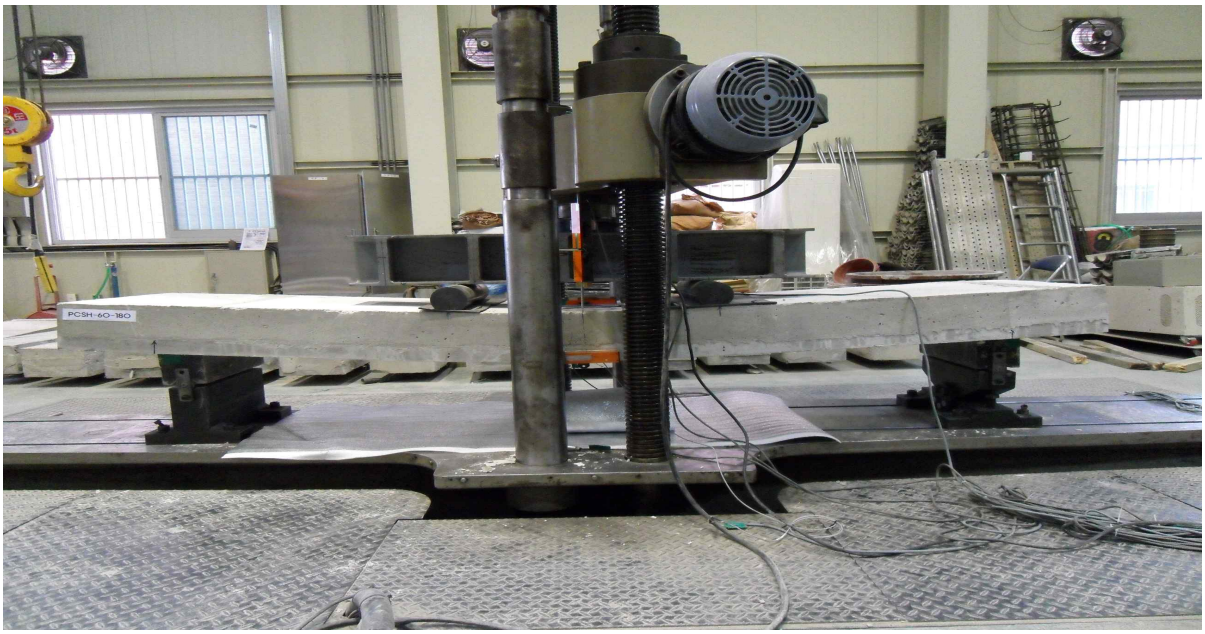
(b) 슬래브 측면 균열

[그림 3.32] 슬래브 PCSH-60-150 실험체 재하 실험 후 균열상태 2

dCollection @ chosun

5) 실험체 PCSH-60-180

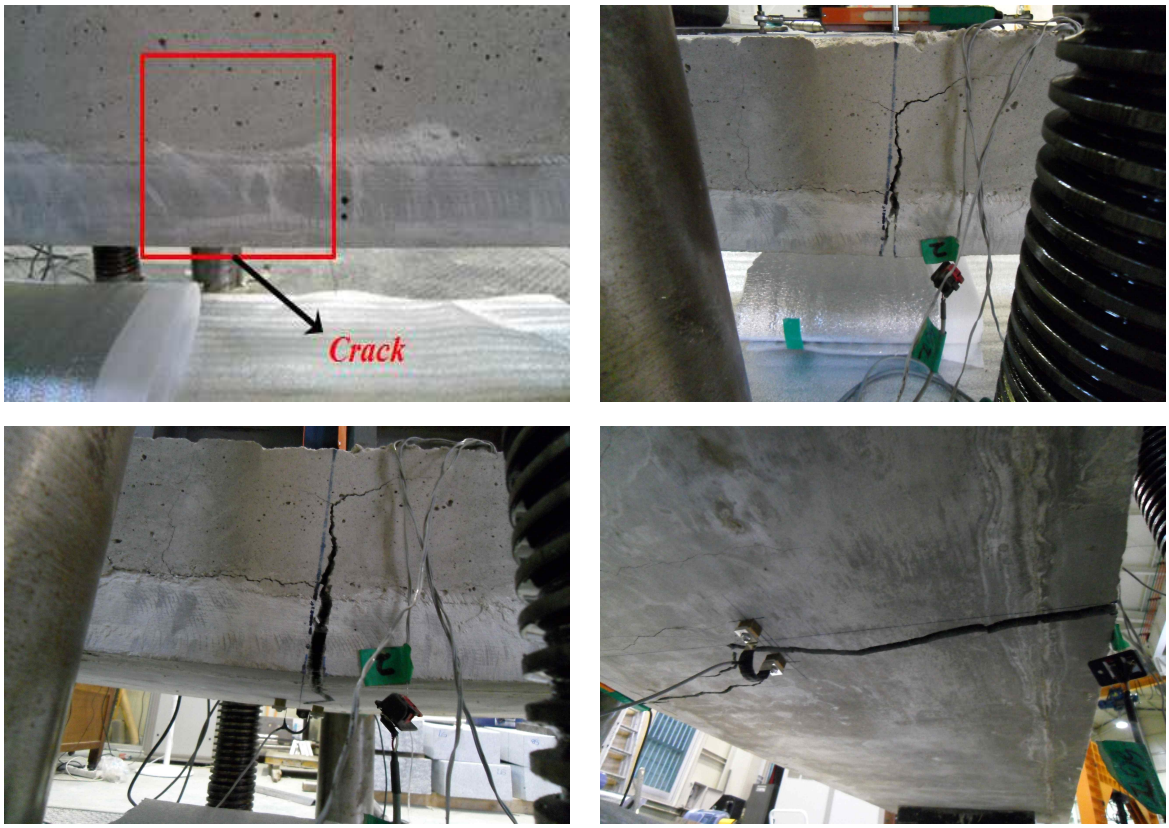
PCSH-60-180 실험체는 초기균열이 33.5kN 내외에서 지간 중앙의 SHCC 바닥면에 발생하기 시작하였으며, 이후 하중 증가와 함께 다중미세 휨 균열이 무수히 발생하였다. 재하하중 40kN 내외에 도달할 때까지도 육안으로 균열을 쉽게 알아볼 수 없을 정도의 작은 균열이 관찰되었다. 하중이 증가함에 따라 이 균열 주위로 미세균열이 다수 증가하는 양상을 보였다. 106kN의 재하하중을 넘어서면서 최초 인장철근의 항복이후 다중미세균열은 더욱 증가하였다. 이후 SHCC 패널 바닥면의 지간중앙 부근에서 1개 균열의 폭이 점차 확대되기 시작하면서 콘크리트 면까지 균열이 단면 상연쪽으로 진전하였다. 수직방향 처짐 40mm까지 하중에 따른 변형은 안정적인 연성 거동을 보였다. 이후 지간중앙부의 콘크리트 휨 압축 파괴에 도달하면서 최대하중 111.6kN에 도달한 후에 점차로 내력을 상실하였다. 실험 후 균열상태는 [그림 3.33]~[그림 3.34]와 같다.



(a) 슬래브 재하실험 후 전경

(계속)

dCollection @ chosun



(b) 슬래브 재하실험 후 균열 발생

[그림 3.33] 슬래브 PCSH-60-180 실험체 재하 실험 후 균열상태 1

dCollection @ chosun

(a) 슬래브 하부 균열

(b) 슬래브 측면 균열

[그림 3.34] 슬래브 PCSH-60-180 실험체 재하 실험 후 균열상태 2

dCollection @ chosun

표준실험체인 RC-01부터 PCSH-60-180 실험체의 슬래브 하부 균열 및 다중 미세균열 상태는 다음 [그림 3.35]와 같다.

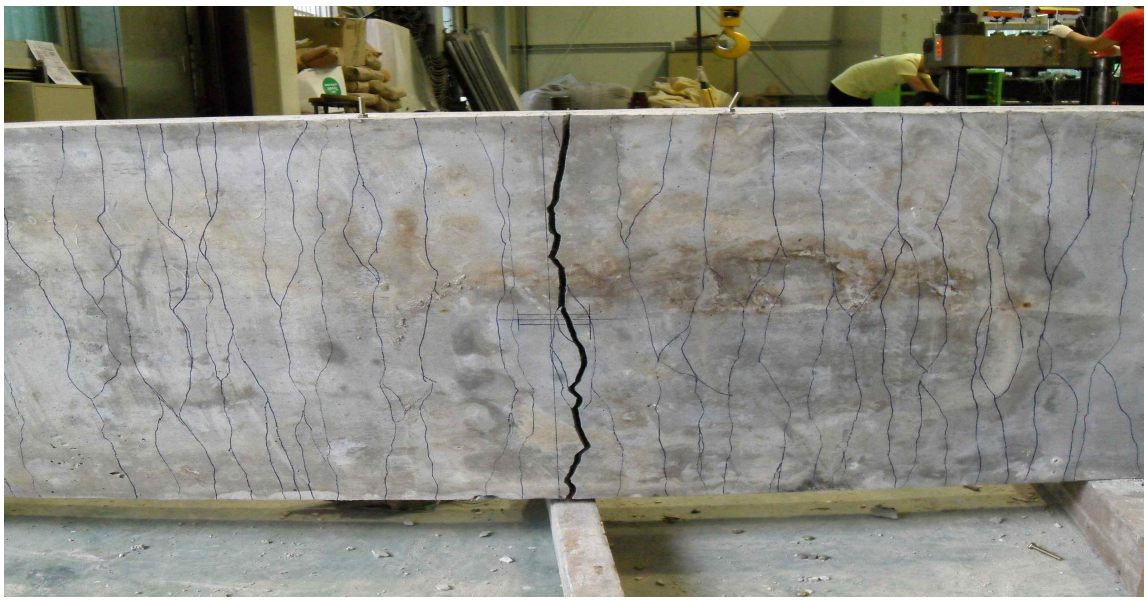
(a) RC-0A(Prototype)

(b) PCSH-40-150

(계속)

dCollection @ chosun

(c) PCSH-40-180



(d) PCSH-60-150

(계속)

dCollection @ chosun

(e) PCSH-60-180

[그림 3.35] 실험체별 재하 실험 후 슬래브 하부 균열상태

dCollection @ chosun

3.5 소결

고연성시멘트복합체를 철근콘크리트 슬래브 단면 하단부에 일정 두께로 적용한 SHCC 및 RC 복합슬래브의 휨 재하실험에 대한 평가결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 콘크리트의 인장 및 휨 거동 하에서의 균열 및 취성적 특성에 따른 단점을 개선하기 위하여 SHCC를 슬래브 단면 하단부의 인장측에 두께 40mm, 60mm로 적용하였으며, 슬래브 총 두께는 150, 180mm로 제작하여 휨 재하실험을 한 결과 모두 다중미세균열 거동에 의한 슬래브의 휨 균열제어, 처짐 개선 및 내력증진에 효과가 있는 것으로 판단되었다.

2) SHCC를 적용한 복합바닥 슬래브의 경우 인장철근 항복이전까지인 사용하중단계에서의 초기균열발생, 균열폭 제어 및 국부균열 손상억제가 우수하였으며, 인장철근 항복단계까지 내력이 향상되어 사용하중 내력을 높이는 것으로 판단되며, 사용성하중 평가에서 균열억제, 처짐 감소, 내구성 및 사용내력 향상에 우수한 효과를 나타내는 것으로 평가되었다.

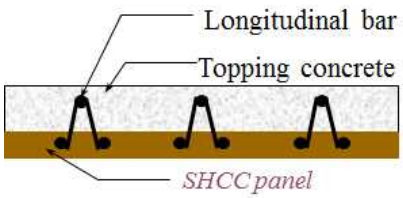
3) 개발된 하프프리캐스트 SHCC 및 RC 복합바닥 슬래브의 공법은 SHCC를 활용한 것으로서 기존 콘크리트 바닥구조에 비해 균열제어에 우수할 뿐만 아니라 현장 후 타설 콘크리트와 함께 슬래브 공사의 시공효율성 개선에도 장점이 있을 것으로 판단된다.

dCollection @ chosun

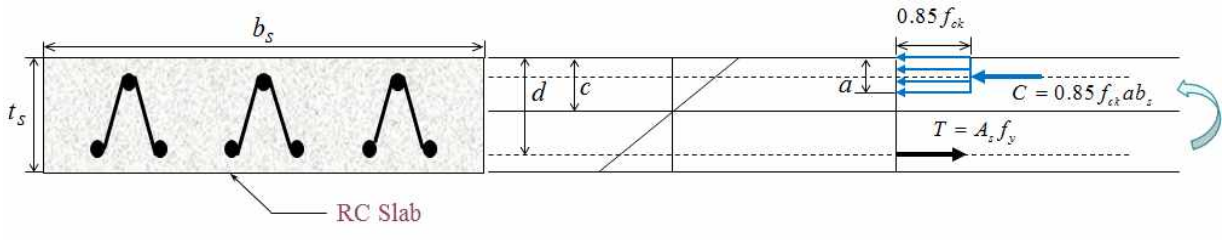
4. SHCC 및 RC 복합슬래브의 휨 설계 및 비선형 해석 모델 개발

4.1 SHCC 및 RC 복합슬래브의 설계 휨강도 제안(고연성 변형률 적용)

고연성 시멘트복합재료를 활용한 복합바닥구조시스템 개발을 위한 SHCC 슬래브 실험체 상세는 [그림 4.1(a)]와 같으며 일반 RC 슬래브의 휨모멘트 작용평형 단계는 [그림 4.1(b)]와 같다.



(a) SHCC 슬래브 실험체 상세 (평면도, 단면도)



(b) 휨모멘트 작용 일반 RC슬래브단면에서의 평형 관계

[그림 4.1] 실험체 상세 및 휨모멘트 작용 평형 관계 2

4.1.1 일반 RC 슬래브 설계 휨강도(KCI-2012)

일반 RC 슬래브에 작용하는 휨모멘트의 작용평형 관계는 [그림 4.1]과 같으며, 작용하중에 의해서 발생하는 휨모멘트에 평형을 이루기 위하여 내적으로 같은 크기의 저항 휨모멘트가 발생한다.

dCollection @ chosun

내적으로 압축영역에 기여하는 압축응력, C 는 [식 4-1]과 같다.

$$C = 0.85 f_{ck} a b_s \qquad \text{[식 4-1]}$$

인장영역에 기여하는 인장응력, T 는 [식 4-2]에 의하여 추정할 수 있다.

$$T = A_s f_y \qquad \text{[식 4-2]}$$

부재에 작용하는 합력, $N(\sum F = 0)$ 은 0 이므로, [식 4-3]과 같다.

$$C - T = 0$$
$$C = T \qquad \text{[식 4-3]}$$

콘크리트의 실제 비선형 응력분포에서 얻어지는 압축응력의 크기와 작용위치가 같도록 하는 등가의 직사각형 응력블럭의 깊이, a 는 [식 4-4]에 의하여 추정할 수 있다.

[식 4-3]에서, $C = T$ 이므로

$$0.85 f_{ck} a b_s = A_s f_y$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_{ck} b_s} \qquad \text{[식 4-4]}$$

실험결과에 따라 직사각형의 응력블럭의 깊이 a 는 압축연단에서 중립축 c 와의 관계는 [식 4-5]와 같이 정의한다.

$$c = \frac{a}{\beta_1} \qquad \text{[식 4-5]}$$

dCollection @ chosun

부재의 인장영역에서 작용하는 인장기여모멘트 M_{n1} 은 [식 4-6]과 같이 산정된다. T 가 작용하는 점에서 휨모멘트 M_{n1} 를 구하면,

$$M_{n1} = Cjd = 0.85 f_{ck} ab(d - \frac{a}{2}) \qquad \text{[식 4-6]}$$

부재의 압축영역에서 작용하는 압축기여모멘트 M_{n2} 는 [식 4-7]과 같이 산정된다. C 가 작용하는 점에서 휨모멘트 M_{n2} 를 구하면,

$$M_{n2} = Tjd = A_s f_y (d - \frac{a}{2}) \qquad \text{[식 4-7]}$$

내부 저항력은 수평방향(축방향) 평형방정식을 만족하기 위하여 동일한 팔거리를 가지므로 크기가 같아야 한다. 따라서, $M_{n1} + M_{n2} = M_n$ 이 되어 단면의 공칭 휨모멘트 강도 M_n 은 [식 4-8]과 같다.

$$\begin{aligned} M_n &= (C \text{ or } T)(d - \frac{a}{2}) \qquad \text{[식 4-8]} \\ &= 0.85 f_{ck} ab(d - \frac{a}{2}) = A_s f_y (d - \frac{a}{2}) \end{aligned}$$

여기서,

b_s, t_s, d : 슬래브단면의 폭, 높이, 유효깊이

A_s : 인장철근의 단면적

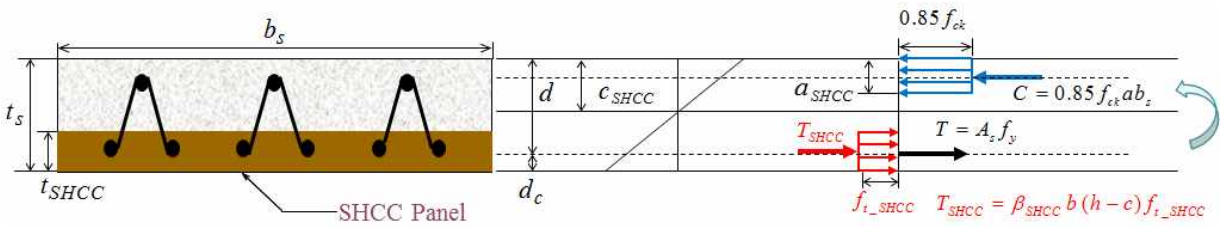
f_{ck}, f_y : 일반 콘크리트의 압축강도, 인장철근의 응력

jd : 팔길이, $d - \frac{a}{2}$

β_1 : (ACI)에서 제시, 0.85

dCollection @ chosun

4.1.2 SHCC 및 RC 복합슬래브 휨 휨강도 제안(고연성 인장변형률 고려)



(c) 휨모멘트 작용 SHCC-Panel 슬래브단면에서의 평형 관계

[그림 4.2] 슬래브 단면에서의 평형 관계

작용하중에 의해서 발생하는 휨모멘트에 평형을 이루기 위하여 내적으로 같은 크기의 저항 휨모멘트가 발생한다.

내적으로 압축영역에 발달하는 압축합력, C_{shcc} 는 [식 4-9]와 같다.

$$C_{shcc} = 0.85 f_{ck} a b_s \qquad \text{[식 4-9]}$$

인장영역에 생기는 인장합력, T_{shcc} 는 [식 4-10]과 같이 산정한다.

$$T_{shcc} = A_s f_y + f_{t_shcc} t_{shcc} b_s \qquad \text{[식 4-10]}$$

외적으로 작용하는 합력, N_{shcc} ($\sum F = 0$) 은 0 이므로, [식 4-11]과 같다.

$$C - T = 0$$

$$C = T \qquad \text{[식 4-11]}$$

고연성 콘크리트의 실제 비선형 응력분포에서 얻어지는 압축응력의 크기와 작용위치가 같도록 하는 등가의 직사각형 응력블럭의 깊이 a_{shcc} 는 아래와 같이 표현된다. [식 4-9], [식 4-10]을 참고 하여 다시 식을 유도한다. [식 4-11]에서, $C = T$ 이므

dCollection @ chosun

로 [식 4-12]와 같이 산정된다.

$$0.85 f_{ck} a b_s = A_s f_y + f_{t_shcc} t_{shcc} b_s$$

$$a_{shcc} = \frac{A_s f_y + f_{t_shcc} t_{shcc} b_s}{0.85 f_{ck} b_s} \qquad \text{[식 4-12]}$$

실험결과에 따라 직사각형의 응력블럭의 깊이 a_{shcc} 는 압축연단에서 중립축 c_{shcc} 와 관계는 [식 4-13]과 같이 정의한다.

$$c_{shcc} = \frac{a_{shcc}}{\beta_1} \qquad \text{[식 4-13]}$$

여기서,

b_s, h, d : 슬래브단면의 폭, 높이, 유효깊이

t_{shcc} : SHCC의 두께

A_s : 인장철근의 단면적

f_{ck}, f_{t_shcc}, f_y : 일반 콘크리트의 압축강도, SHCC의 인장강도, 인장철근의 응력

β_1 : (ACI)에서 제시[36], 0.85

작용하중에 의해서 발생하는 휨모멘트는 SHCC 복합 슬래브 중에서 중립축 c_{shcc} 의 위치를 기준으로 하여 압축영역과 인장영역에서 각각의 저항 휨모멘트가 발생한다.

중립축 위치 c_{shcc} 에서 압축영역에 작용하는 휨모멘트 M_{n_shcc1} 를 구하면, [식 4-14]와 같이 산정된다.

dCollection @ chosun

$$M_{n_shcc1} = 0.85 f_{ck} a_{shcc} b_s (c_{shcc} - \frac{a_{shcc}}{2})$$ [식 4-14]

중립축 위치 c_{shcc} 에서 인장영역에 작용하는 휨모멘트 M_{n_shcc2} 를 구하면, [식 4-15]와 같이 산정된다.

$$M_{n_shcc2} = \beta_{shcc} f_{t_shcc} b_s t_{shcc} (t_s - c_{shcc} - \frac{t_{shcc}}{2}) + A_s f_y (t_s - c_{shcc} - d_c)$$

[식 4-15]

가 된다. 여기서, β_{shcc} = 1 이다. 내부저항력은 중립축 위치 c_{shcc} 를 기준으로 압축영역과 인장역역 발생한 휨모멘트는의 응력에 의하여 유도할 수 있다. 따라서, $M_{n_shcc} = M_{n_shcc1} + M_{n_shcc2}$ 이 되어 단면의 공칭 휨모멘트 강도 M_{n_shcc} 은 [식 4-16]과 같다.

$$M_{n_shcc2} = \beta_{shcc} f_{t_shcc} b_s t_{shcc} (t_s - c_{shcc} - \frac{t_{shcc}}{2}) + A_s f_y (t_s - c_{shcc} - d_c)$$

[식 4-16]

dCollection @ chosun

3) SHCC 및 RC 복합슬래브 실험체의 설계 휨강도

본 장의 앞에서 소개된 고연성 시멘트 복합재료를 이용한 SHCC 및 RC 복합슬래브에 대한 설계 강도 산정을 이용하여, SHCC 및 RC 복합슬래브에 대한 설계강도를 추정하였다. 대상 실험체의 실험 결과에 의한 극한 내력과 설계 강도 추정 결과를 비교하여 다음 <표 4.1> ~ <표 4.2>에 나타냈다.

<표 4.1> 대상 실험체의 실험에 의한 극한 내력 및 설계강도 추정결과 비교(150mm)

Specimen Name	Second slope after cracks		Initial yielding of bar		Max. values (Test)		Design values (Predicted)	
	Disp. (mm)	Load (kN)	Disp. (mm)	Load (kN)	disp. (mm)	Load (kN)	Mn (kN-m)	Load (kN)
RC-01-150 (Nominal bending strength) (Predicted)	1.8	11.4	19.3	52.1	46.3	59.7	19.3	51.5
PCSH-40-150	1.6	22.7	18.0	78.1	48.7	80.5	26.7	71.3
PCSH-60-150	1.7	25.9	16.6	80.1	45.8	90.5	30.3	80.9

<표 4.2> 대상 실험체의 실험에 의한 극한 내력 및 설계강도 추정결과 비교(180mm)

Specimen Name	Second slope after cracks		Initial yielding of bar		Max. values (Test)		Design values (Predicted)	
	Disp. (mm)	Load (kN)	Disp. (mm)	Load (kN)	disp. (mm)	Load (kN)	Mn (kN-m)	Load (kN)
RC-01-180 (Nominal bending strength) (Predicted)	-	-	-	-	-	-	24.5	65.2
PCSH-40-180	2.3	29.3	17.4	97.7	38.7	100.5	33.3	88.8
PCSH-60-180	2.1	33.5	16.1	106.8	42.0	111.6	38.2	101.8

dCollection @ chosun

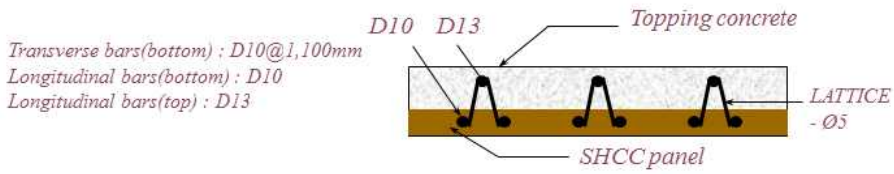
4.2 SHCC 및 RC 복합슬래브의 비선형 해석 모델 및 결과

4.2.1 SHCC 및 RC 복합슬래브의 비선형 해석 모델

앞에서 소개된 SHCC 및 RC 복합바닥슬래브 실험체의 단순지점인 경우 4점 휨 재하실험과 동일한 조건으로 비선형 해석모델에 의해 슬래브 휨 해석을 수행하였다. 본 해석에서, 슬래브 실험체의 극한하중 상태는 콘크리트 구조설계기준에 준하여 콘크리트 압축변형률 $\epsilon_{cu} = 0.003$ 에 도달하는 경우 압축 휨 파괴가 일어난 것으로 보고, $\epsilon_{cu} = 0.003$ 에 도달 할 때까지 실시하였다.[36),62)]

비선형 휨 해석 모델은 5개 실험체 모두에서 초기균열 발생 단계 및 균열 발생 이후의 휨강성 변화 예측에 있어서도 실험 결과를 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다.

본 장에서는 SHCC 하프프리캐스트 RC 복합바닥구조 시스템에 대한 비선형 휨 해석 모델에 관한 정식화를 다루고 있으며, SHCC 및 RC 복합바닥 슬래브는 [그림 4.3]과 같은 복합 단면의 구조이다.



[그림 4.3] SHCC 및 RC 슬래브 복합단면

복합슬래브단면의 비선형 휨 해석 모델의 정식화를 위해, 슬래브 단면의 콘크리트, 철근, 및 SHCC 재료의 비선형 재료특성을 고려한 층상화 단면 휨 해석법을 [그림 4.4]과 같이 시도하였다.[3),6),60),61)] 그림에서처럼, 단면의 임의 위치에서의 변형률 증분 $d\epsilon(z)$ 는 도심에서의 축변형률 증분 $d\epsilon_o$ 와 단면의 휨곡률 증분 $d\phi$ 의 합으로서 다음 [식 4-17]과 같다.

$$d\varepsilon(z) = d\varepsilon_o + z\,d\phi \qquad \text{[식 4-17]}$$

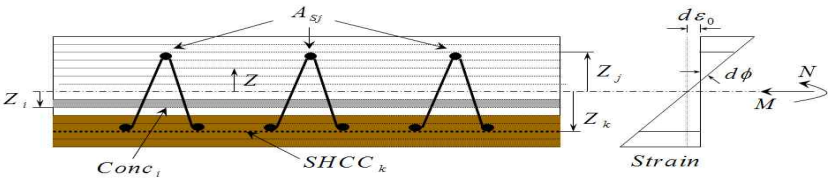
dCollection @ chosun

단면에 작용하는 축방향 응력 N 및 모멘트 M은 각각 다음 [식 4-18] ~ [식 4-19]와 같이 산정된다.

$$N = \int E\, d\varepsilon(z)\, dA \qquad \text{[식 4-18]}$$

$$M = \int E\, d\varepsilon(z)\, z\, dA \qquad \text{[식 4-19]}$$

여기서, E는 단면 각 층(fiber)에 대응하는 콘크리트, 철근, 또는 SHCC 재료의 탄성계수, z는 기준축에서 대응하는 각 층까지의 거리이다. ([그림 4.4] 참조)



[그림 4.4] 비선형 층상화 휨 해석모델

[식 4-17] ~ [식 4-19]로부터 층상화에 의해 유한분할화한 경우 축력의 유한증분 ΔN은 다음 [식 4-20]과 같이 유도된다.

$$\Delta N = \left(\sum_{i=1}^{conc} f_{ci} A_{ci} + \sum_{j=1}^{As} f_{sj} A_{sj} + \sum_{k=1}^{SHCC} f_{ECCk} A_{ECCk} \right) d\varepsilon_o + \left(\sum_{i=1}^{SHCC} f_{ci} A_{ci} z_i + \sum_{j=1}^{As} f_{sj} A_{sj} z_j + \sum_{k=1}^{SHCC} f_{ECCk} A_{ECCk} z_k \right) d\phi \qquad \text{[식 4-20]}$$

여기서, $conc$, As, $SHCC$는 각각 콘크리트, 철근, 및 SHCC 재료의 층수, f_{ci},

dCollection @ chosun

f_{sj} , f_{SHCCk} 는 각각 콘크리트, 철근, 및 SHCC 재료의 응력, A_{ci} , A_{sj} , A_{SHCCk} 는 각각 콘크리트, 철근, 및 SHCC 재료의 각 층 면적, 그리고 z_i , z_j , z_k 는 각각 콘크리트, 철근, 및 SHCC 재료의 기준축에서 대응하는 각 층까지의 거리이다. [식 4-20]은 SHCC 패널의 폭을 변화시켜 SHCC 전단연결재가 기여하는 면적을 계산에 고려하고 있다.

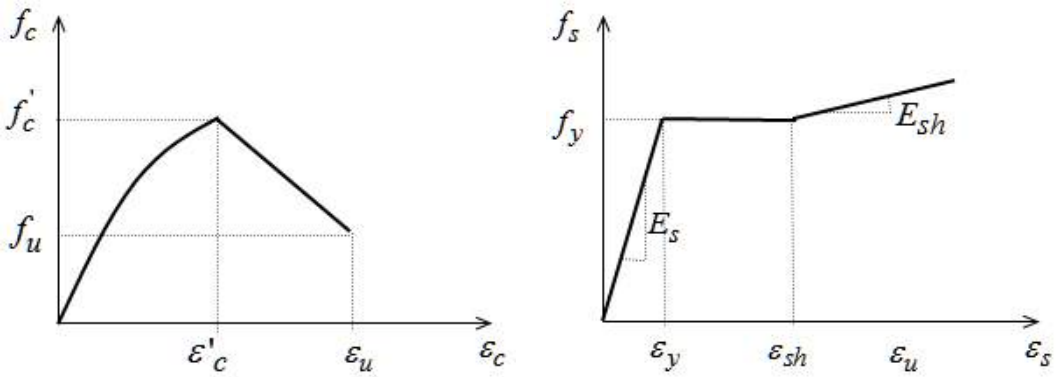
위 식들로부터 매 하중증분 단계에서의 평형조건을 만족하기 위한 축방향의 불평형력으로부터 기인되는 도심에서의 축변형률 유한증감 $\Delta\epsilon_o$ 는 다음 [식 4-21] ~ [식 4-23]과 같이 유도된다.

$$\Delta\varepsilon_o = (\Delta N - E_x\,\Delta\phi)/E_a \qquad \text{[식 4-21]}$$

$$E_a = \sum_{i=1}^{conc} f_{ci}\,A_{ci} + \sum_{j=1}^{As} f_{sj}\,A_{sj} + \sum_{k=1}^{SHCC} f_{ECCk}\,A_{ECCk} \qquad \text{[식 4-22]}$$

$$E_x = \sum_{i=1}^{conc} f_{ci}\,A_{ci}\,z_i + \sum_{j=1}^{As} f_{sj}\,A_{sj}\,z_j + \sum_{k=1}^{SHCC} f_{ECCk}\,A_{ECCk}\,z_k \qquad \text{[식 4-23]}$$

위 식에서 산정된 도심에서의 변형률 증분은 이전 단계에서의 값에 추가되어 갱신된 변형률 분포가 산정된다. 계산된 축력이 작용하는 축력과 같게 수렴할 때까지 반복 및 수렴 과정을 거쳐 비선형 증분해석을 수행하도록 하였다.



(a) 콘크리트의 응력-변형률관계 (b) 철근의 응력-변형률관계

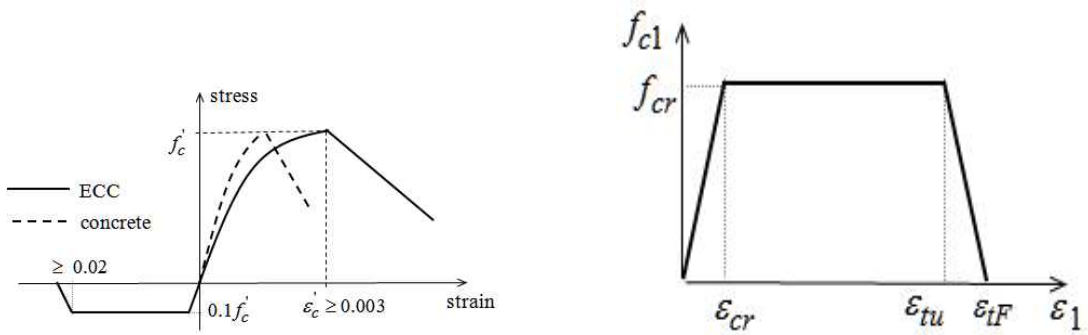
[그림 4.5] 콘크리트 및 철근 응력-변형률 모델

dCollection @ chosun

한편, 콘크리트 및 철근 재료의 비선형 재료특성을 고려하기 위하여 [그림 4.5]와 같이 콘크리트와 철근의 응력-변형률 관계곡선을 고려하였다. 콘크리트의 압축 응력-변형률 관계는 일축압축강도 f'_c에 도달할 때까지는 [식 4-24]와 같이 2차포물선 곡선으로 고려토록 하였고, f'_c에 도달 이후에는 직선적으로 극한응력 f_u까지 선형적으로 감소하는 것으로 고려하였다.

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right] \qquad \text{[식 4-24]}$$

철근의 경우는 항복응력 f_y에 도달할 때까지 선형탄성거동을 하다가 항복 이후 직선적으로 증가하는 소성거동을 하는 것으로 고려하였다. ([그림 4.6] 참조)



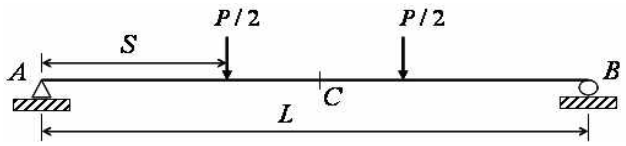
(a) SHCC의 압축 및 인장 특성 (b) SHCC의 인장 응력-변형률 관계

[그림 4.6] SHCC의 응력-변형률 관계 모델

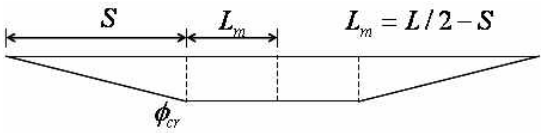
SHCC 재료의 경우 [그림 4.6]과 같이 압축 측 거동은 일축압축강도에 대응하는 압축변형률이 0.003 내외로서 일반 콘크리트의 0.002 보다 큰 것을 제외하면 일반 콘크리트와 비슷하게 고려할 수 있다. 하지만 인장 측은 그림과 같이 균열 발생 이후에도 다중미세균열의 거동으로 인해 인장변형률 0.02 이상에 도달할 때까지 인장응력을 부담할 수 있는 고연성시멘트복합체로 고려하여 인장 응력-변형률 관계를 모델링하였다.

dCollection @ chosun

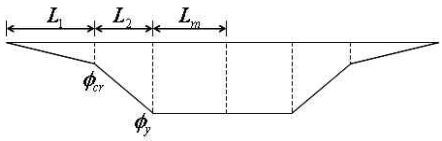
이상에서 소개한 층상화 단면 휨해석 모델로부터 슬래브 복합단면에서의 비선형 휨 모멘트-곡률 관계 거동에 관한 예측이 가능하다.



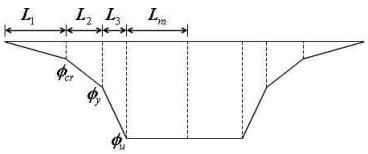
(a) 4절점 휨하중 조건



(b) 최초균열 발생시



(c) 최초 인장철근 항복시



(d) 극한하중 도달시

[그림 4.7] 단계별 휨곡률 분포 모델

한편 [그림 4.7]과 같이 단순지점의 슬래브가 4점 휨 재하시험을 수행하는 경우 최초 인장균열이 발생한 경우, 최초 인장철근이 항복한 경우, 그리고 극한하중에 도달한 경우에서의 휨 곡률 분포를 그림과 같이 각각 가정할 수 있다. 이때 최초 균열 발생 시의 휨곡률 ϕ_{cr} , 최초 인장철근 항복 시의 휨곡률 ϕ_y , 그리고 극한하중에 도달 시의 휨곡률 ϕ_u 값은 앞에서 소개한 층상화 단면 휨 해석을 통해 각 단계별로 추정된다. 이렇게 추정된 단계별 휨 곡률 산정 값과 [그림 4.7]의 각 단계별 휨 곡률 분포로부터 슬래브의 A점 처짐각 θ_A 및 지간 중앙 C점에서의 연직방향 처짐 Δ_C 를 각각 단

dCollection @ chosun

계별로 다음 [식 4-25] ~ [식 4-30]과 같이 유도하여 산정할 수 있다.

최초 균열 발생시;

$$\theta_A = \phi_{cr}\left(\frac{1}{2}S + L_m\right) \qquad \text{[식 4-25]}$$

$$\Delta_C = \frac{1}{2}\theta_A L - \phi_{cr}\left[\frac{1}{2}S\,L_m + \frac{1}{6}S^2 + \frac{1}{2}L_m^2\right] \qquad \text{[식 4-26]}$$

인장철근 항복시;

$$\theta_A = \frac{1}{2}\phi_{cr}L_1 + \frac{1}{2}\left(\phi_{cr} + \phi_y\right)L_2 + \phi_y L_m \qquad \text{[식 4-27]}$$

$$\begin{aligned}\Delta_C = &\frac{1}{2}\theta_A L - \frac{1}{2}\phi_{cr}L_1\left(L_m + L_2 + \frac{1}{3}L_1\right)\\ &-\phi_{cr}L_2\left(L_m + \frac{1}{2}L_2\right)\\ &-\frac{1}{2}\left(\phi_y - \phi_{cr}\right)L_2\left(L_m + \frac{1}{3}L_2\right)\\ &-\phi_y L_m\left(\frac{1}{2}L_m\right)\end{aligned} \qquad \text{[식 4-28]}$$

극한하중 상태;

$$\begin{aligned}\theta_A = &\frac{1}{2}\phi_{cr}L_1 + \frac{1}{2}\left(\phi_{cr} + \phi_y\right)L_2\\ &+\frac{1}{2}\left(\phi_y + \phi_u\right)L_3 + \phi_u L_m\end{aligned} \qquad \text{[식 4-29]}$$

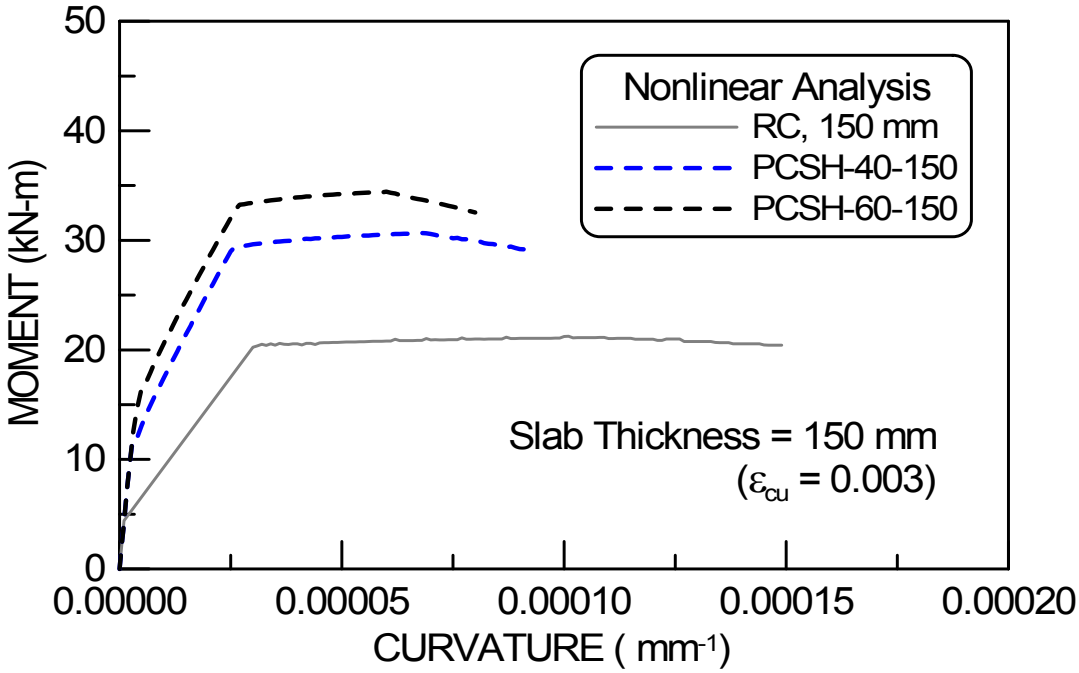
dCollection @ chosun

$$
\begin{aligned}
\Delta_C = & \frac{1}{2}\theta_A L - \frac{1}{2}\phi_{cr} L_1 \left(L_m + L_3 + L_2 + \frac{1}{3} L_1 \right) \\
& - \phi_{cr} L_2 \left(L_m + L_3 + \frac{1}{2} L_2 \right) \\
& - \frac{1}{2}\left(\phi_y - \phi_{cr} \right) L_2 \left(L_m + L_3 + \frac{1}{3} L_2 \right) \\
& - \phi_y L_3 \left(L_m + \frac{1}{2} L_3 \right) \\
& - \frac{1}{2}\left(\phi_u - \phi_y \right) L_3 \left(L_m + \frac{1}{3} L_3 \right) - \phi_u L_m \left(\frac{1}{2} L_m \right)
\end{aligned}
\qquad \text{[식 4-30]}
$$

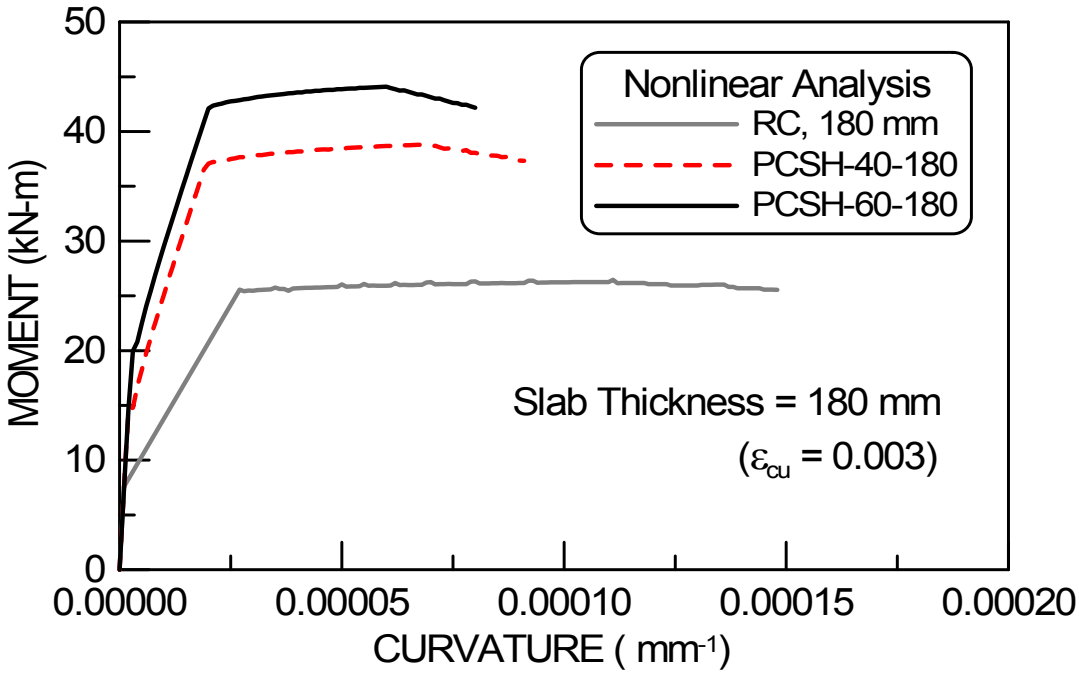
이상으로부터, 4점 휨 재하시험을 받는 단순 슬래브 시스템의 연직방향 하중-처짐 관계에 관한 비선형 거동 예측에 관한 정식화 및 해석모델을 제시하였다.

dCollection @ chosun

4.2.2 SHCC 및 RC 복합슬래브의 비선형 해석 결과



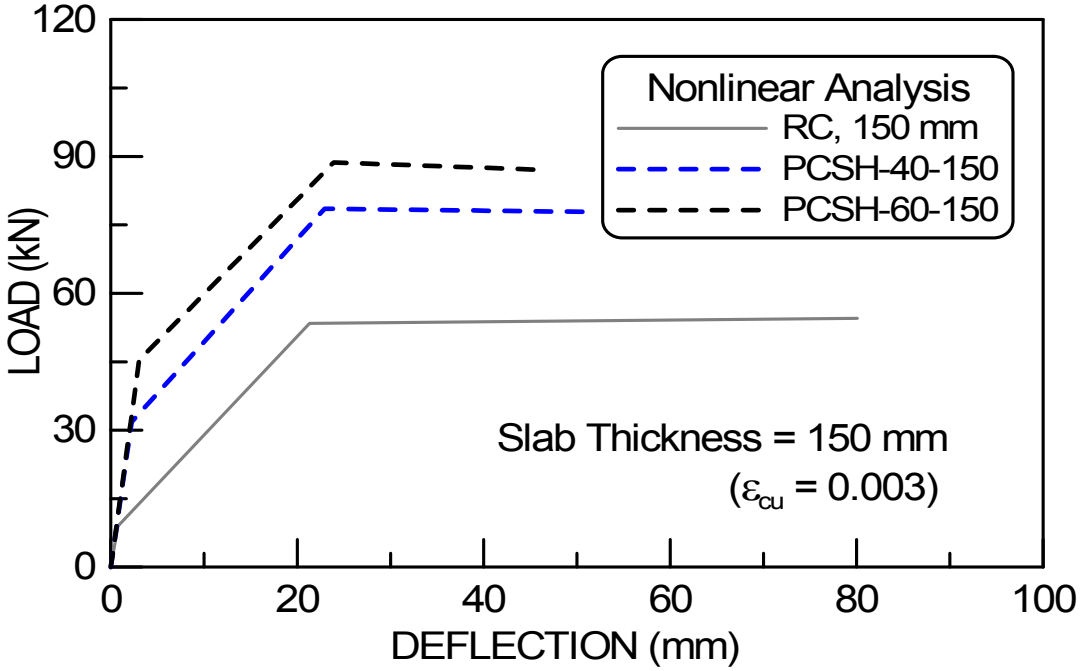
(a) 슬래브 총 두께 150mm 비교



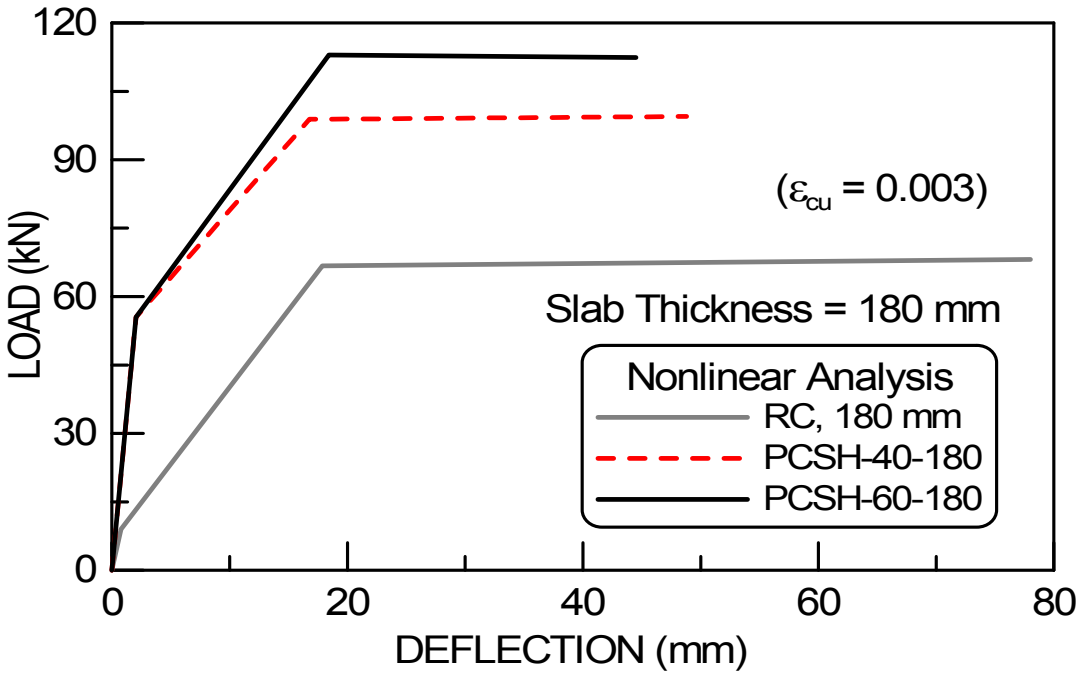
(b) 슬래브 총 두께 180mm 비교

[그림 4.8] 비선형 해석 Moment-Curvature 곡선 비교

dCollection @ chosun



(a) 슬래브 총 두께 150㎜ 비교



(b) 슬래브 총 두께 180㎜ 비교

[그림 4.9] 비선형해석 하중-변위 곡선 비교

dCollection @ chosun

<표 4.3> 실험에 의한 극한 내력 및 비선형해석 결과 비교(150㎜)

Specimen Name	Test				Nonlinear Analysis (Design strength)			
	Initial yielding of bar		Max. values		Initial yielding of bar		Max. values	
	Disp. (㎜)	Load (kN)	disp. (㎜)	Load (kN)	disp. (㎜)	Load (kN)	Mn (kN-m)	Load (kN)
RC-01-150	19.3	52.1	46.3	59.7	21.3	53.4	21.0 (19.3)	54.5 (51.5)
PCSH-40-150	18.0	78.1	48.7	80.5	22.9	78.5	30.7 (26.7)	77.8 (71.3)
PCSH-60-150	16.6	80.1	45.8	90.5	23.9	88.7	34.4 (30.3)	87.0 (80.9)

<표 4.4> 실험에 의한 극한 내력 및 비선형해석 결과 비교(180㎜)

Specimen Name	Test				Nonlinear Analysis (Design strength)			
	Initial yielding of bar		Max. values		Initial yielding of bar		Max. values	
	Disp. (㎜)	Load (kN)	disp. (㎜)	Load (kN)	disp. (㎜)	Load (kN)	Mn (kN-m)	Load (kN)
RC-01-180 (Nominal Analysis) (Design strength)	-	-	-	-	17.9	66.8	26.5 (24.5)	68.1 (65.2)
PCSH-40-180	17.4	97.7	38.7	100.5	16.8	98.9	38.8 (33.3)	99.5 (88.8)
PCSH-60-180	16.1	106.8	42.0	111.6	18.4	113.0	44.1 (38.2)	112.4 (101.8)

dCollection @ chosun

비선형 휨 해석 결과, 타입별 실험체의 모멘트-곡률 관계 및 수직방향 하중-처짐 관계에 대한 극한하중에 도달될 때까지의 예측 결과를 각각 [그림 4.8] ~ [그림 4.9] 에 나타냈다. 실험에 의한 극한 내력 및 비선형해석 결과는 <표 4.3> ~ <표 4.4>에서 비교하였다. 실험에서처럼 해석결과에서도 SHCC 패널을 적용한 실험체의 경우 인장철근 항복시 실험체 총 두께 150mm, 180mm 별로 PCSH-40-150, PCSH-60-150 실험체가 1.13 배, PCSH-40-180 보다 PCSH-60-180 실험체가 1.14 배 항복내력이 증가하였으며, 극한하중시 PCSH-40-150, PCSH-60-150 실험체가 1.12배, PCSH-40-180 보다 PCSH-60-180 실험체가 1.13배 정도로 휨 내력이 향상된 거동을 나타낸 것으로 예측되었다.

dCollection @ chosun

<표 4.5> SHCC 및 RC 복합슬래브의 실험결과, 공칭 휨강도, 비선형해석 비교(150mm)

Specimen Name	Max. values					
	Test		Design strength		Nonlinear Analysis	
	Mn (kN-m)	Load (kN)	Mn (kN-m)	Load (kN)	Mn (kN-m)	Load (kN)
RC-01-150	23.3	59.7	19.3	51.5	21.0	54.5
PCSH-40-150	30.3	80.5	26.7	71.3	30.7	77.8
PCSH-60-150	33.6	90.5	30.3	80.9	34.4	87.0

<표 4.6> SHCC 및 RC 복합슬래브의 실험결과, 공칭 휨강도, 비선형해석 비교(180mm)

Specimen Name	Max. values					
	Test		Design strength		Nonlinear Analysis	
	Mn (kN-m)	Load (kN)	Mn (kN-m)	Load (kN)	Mn (kN-m)	Load (kN)
RC-01-180 (Nominal Analysis) (Design strength)	-	-	24.5	65.2	26.5	68.1
PCSH-40-180	37.7	100.5	33.3	88.8	38.8	99.5
PCSH-60-180	41.8	111.6	38.2	101.8	44.1	112.4

dCollection @ chosun

SHCC 및 RC 복합슬래브의 실험결과와 공칭 휨강도, 비선형해석 결과를 비교하여 <표 4.5> ~ <표 4.6>에 나타냈다.

비교 결과 총 두께 150 mm, 180 mm 별로 극한하중 값을 비교 하였다. 재하실험 결과와 공칭 휨 강도 설계값의 극한내력을 비교 했을 때, RC-01, PCSH-40-150, PCSH-60-150, PCSH-40-180, PCSH-60-180 실험체가 1.16배, 1.13배, 1.12배, 1.13배, 1.1배 정도로 실험값이 더 높게 나타났다.

재하실험결과와 비선형해석과의 극한내력 비교에서는 RC-01, PCSH-40-150, PCSH-60-150, PCSH-40-180, PCSH-60-180 실험체가 1.1배, 1.04배, 1.04배, 1.01배, 1.0배 정도로서 비선형해석 결과값에 비해 실험값이 더 높게 나타나 해석에 의한 결과는 실험에 의한 거동 특성을 비교적 잘 예측 한 것으로 판단된다.

공칭 휨 강도 설계값과 비선형해석 값과의 극한내력 차이는 RC-01, PCSH-40-150, PCSH-60-150, PCSH-40-180, PCSH-60-180 실험체가 1.06배, 1.09배, 1.08배, 1.12배, 1.1배로 비선형 해석 값이 좀더 높게 예측되었다.

dCollection @ chosun

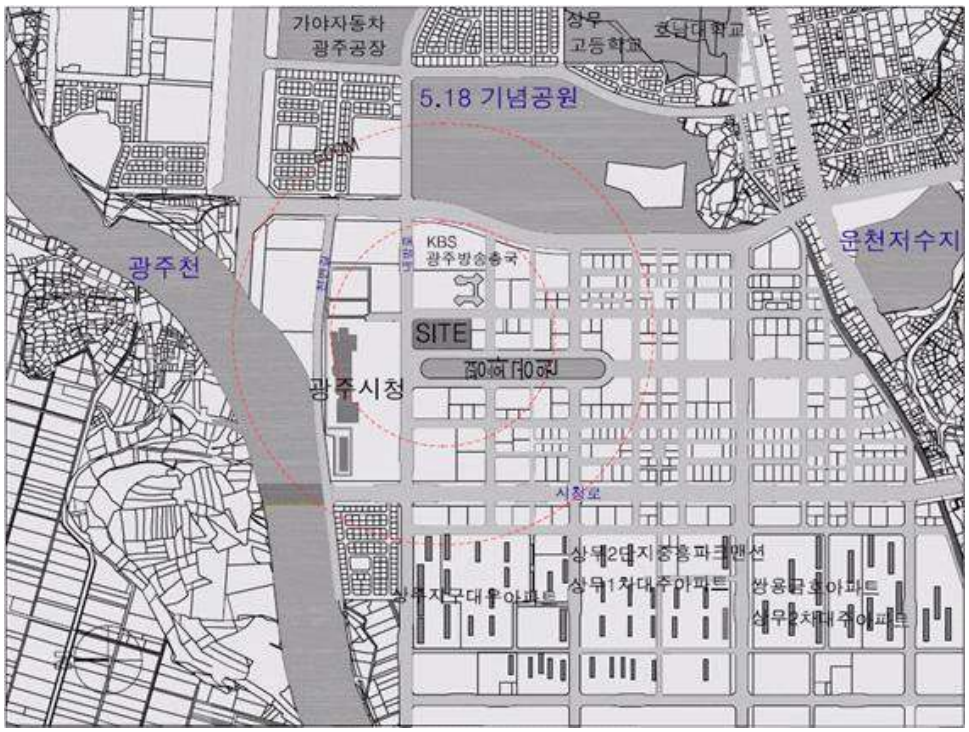
5. SHCC 및 RC 복합슬래브의 현장적용 및 시공특성(무지주・무거푸집)

5.1 SHCC 및 RC 복합바닥슬래브의 현장적용 상세검토

본 연구에서 개발된 고연성시멘트복합체는 앞에 4장에서 구조성능을 확인하였으며, 프리캐스트 슬래브의 경우 시공(양중)중에 국부적인 균열이나 잘 손상되는 문제가 발생하지만 본 슬래브는 그러한 문제가 발생되지 않고 잘 견디는 장점이 있다. 따라서 개발된 SHCC 하프프리캐스트 RC 복합슬래브는 고연성시멘트복합체를 하프프리캐스트 형식으로 제작하여 현장을 현장에 적용하는 공법이다. [그림 5.1]과 [그림 5.2]는 본 공법을 적용하게 될 공사현장의 조감도와 공사현장의 위치다. [그림 5.3]은 SHCC 복합바닥구조시스템을 적용하게 될 현장적용부의 위치를 나타낸 것이다. <표 5.1>은 본 공법을 적용하게 될 공사현장의 설계개요이다.

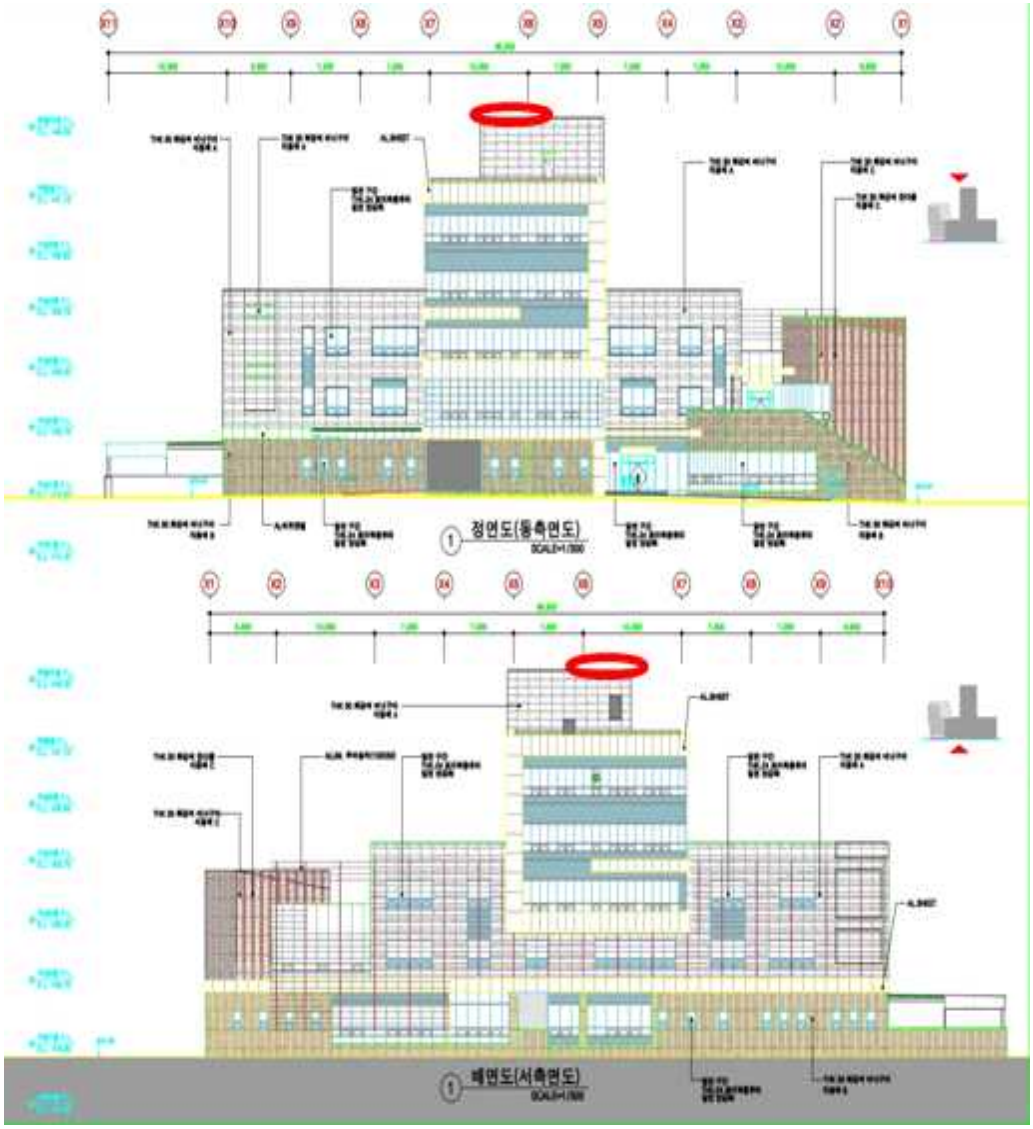
[그림 5.1] 광주○○청사 공사현장 조감도[12)]

dCollection @ chosun



[그림 5.2] 광주○○법원 공사현장 위치[12)]

dCollection @ chosun



[그림 5.3] 현장적용 위치(입면도)

dCollection @ chosun

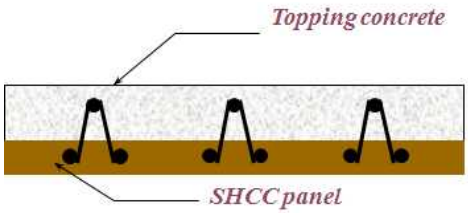
<표 5.1> 설계개요[12)]

구분		내용			비고
사업명		광주ㅇㅇ청사 신축 공사			
대지위치		광주광역시 서구 치평동			
지역지구		도시지역, 중심상업지역, 지구단위계획구역			
용도		업무시설(공공청사)			
대지면적		이전공사 (등기국)	금회공사 (가정법원)	계	
		3,510 ㎡ (1,061.78 평)	7,020.4 ㎡ (2,123.67 평)	10,530.4 ㎡ (3,185.45 평)	
건축면적		2,138.56 ㎡ (646.91 평)			
면적	지상	6,072.55 ㎡ (1,836.95 평)			
	지하	538.43 ㎡ (162.88 평)			
	총계	6,610.98 ㎡ (1,999.82 평)			
건폐율		30.46 %			법정: 70.0 %
용적률		83.52 %			법정: 1300.0% (주차장제외)
규모		지하 1층, 지상 5층			
최고높이		27.6 m			
외부마감		THK24 로이복층유리, 화강석, 암루미늄시트, 알루미늄			
조경면적		3,201.0 ㎡ (968.3 평) / 45.60 %			법정: 대지면적의 15% 이상
주차 대수	지상	69 대 (장애인주차장 3대 포함)			법정: 64.02대 (1대/100㎡)
	지하				
	총계	69 대			

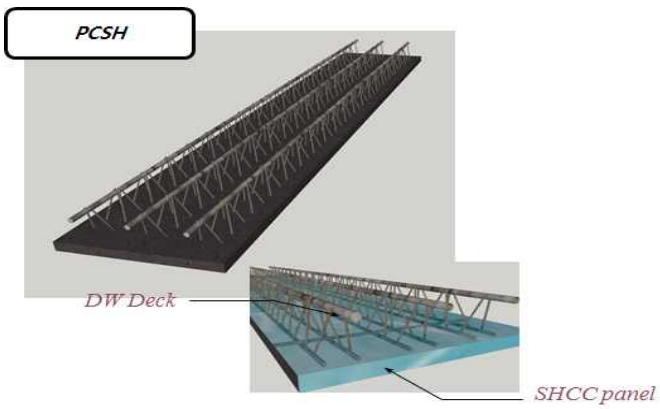
dCollection @ chosun

5.2 현장적용방법(Half Precast SHCC 및 RC 복합바닥슬래브 공법)

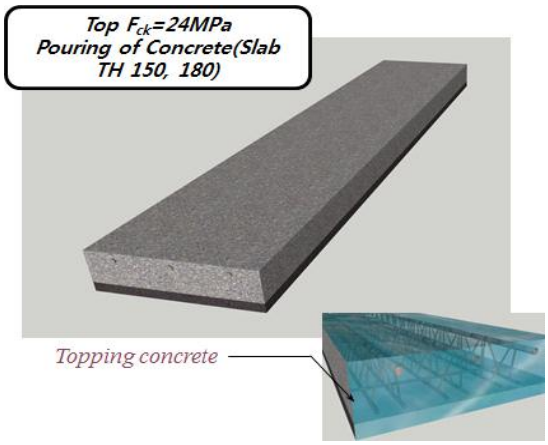
SHCC 복합바닥구조시스템은 다음 [그림 5.4]와 같으며, Half Precast SHCC 및 RC 복합바닥슬래브 상세는 [그림 5.5]와 같다.



[그림 5.4] 하프프리캐스트 SHCC 및 RC 슬래브 단면도



(a) Half Precast SHCC Slab

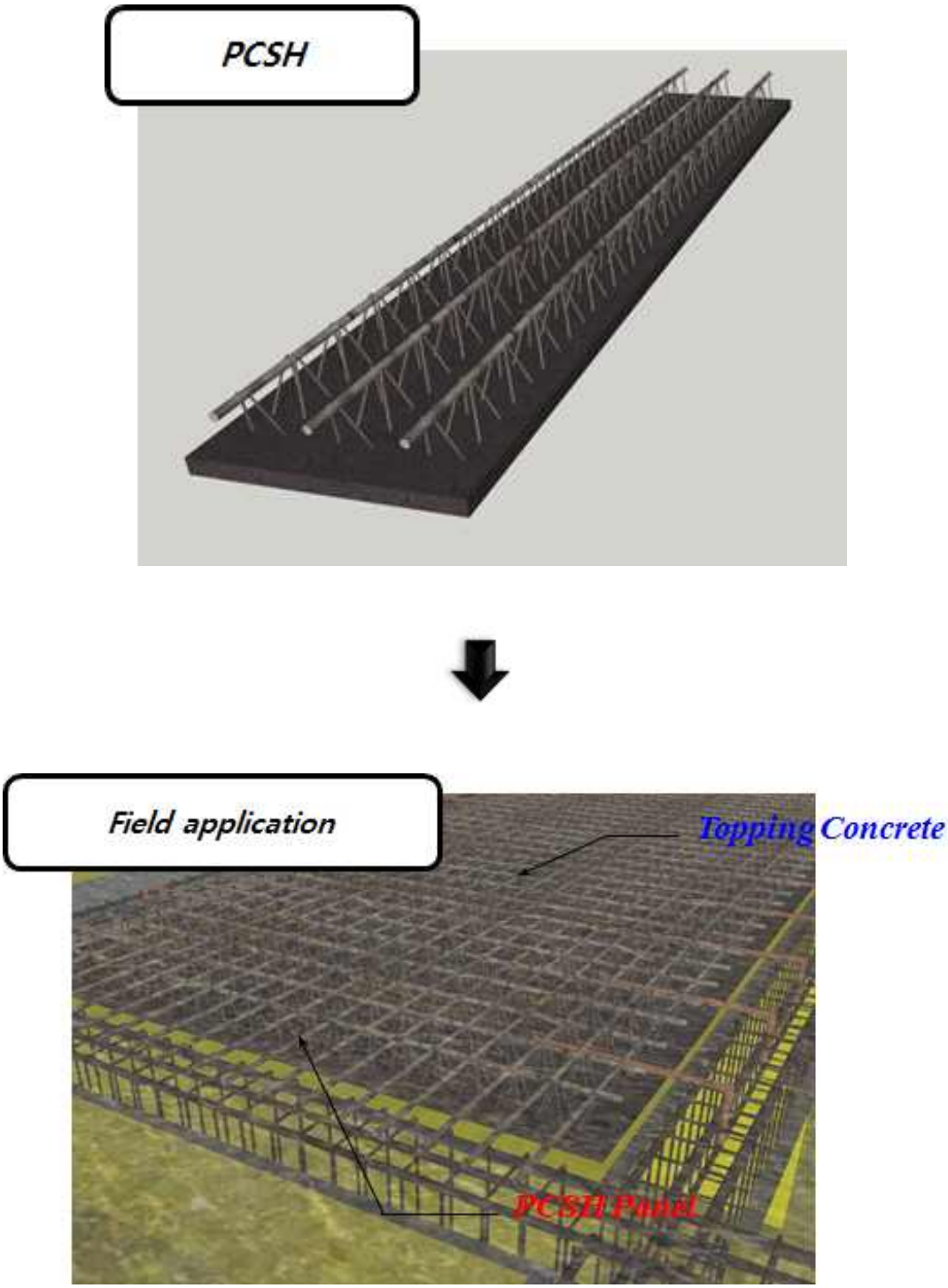


(b) Half Precast SHCC 및 RC Slab

[그림 5.5] 하프프리캐스트 슬래브 상세(모델링)

dCollection @ chosun

Half Precast SHCC 및 RC 복합바닥슬래브 공법은 [그림 5.6]과 같이 현장적용 한다.

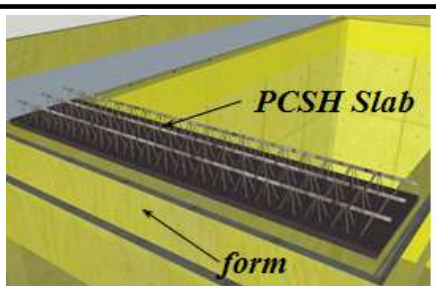
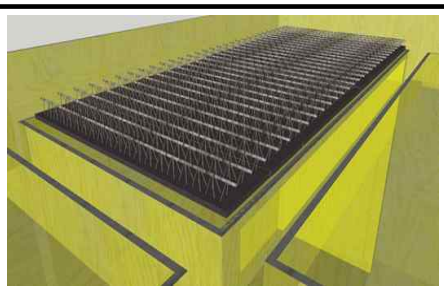
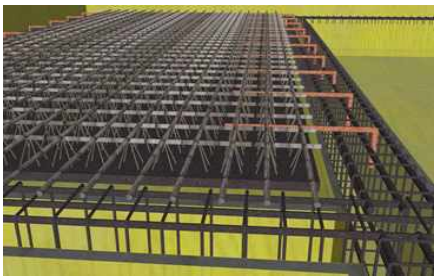
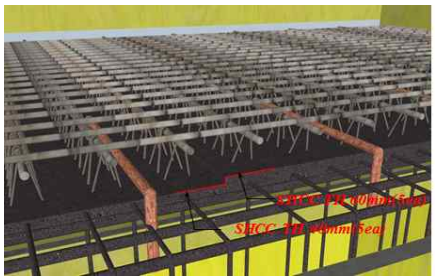
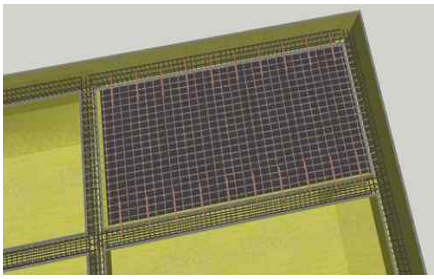
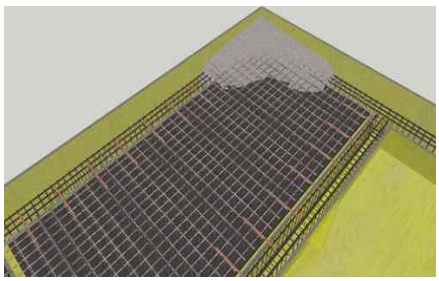


[그림 5.6] 하프프리캐스트 슬래브 현장적용 계획

dCollection @ chosun

SHCC 및 RC 복합바닥슬래브의 현장적용은 SHCC 하프프리캐스트 바닥판을 인양하여 시공할 위치로 이동한 후 SHCC 바닥판을 보 거푸집 위에 거치한다. 이후 SHCC 하프프리캐스트 바닥판을 거치 할 때는 바닥판과 밀착시공 해야 한다. 프리캐스트 슬래브와 슬래브 사이의 공간을 고정시키기 위하여 유동성이 좋으며 성능이 뛰어난 고성능 무수축 모르터를 주입함으로 양생에 의한 수축으로 인해 프리캐스트 슬래브가 이동되는 현상을 방지하도록 한다. 슬래브의 적재 및 설치가 완료되면, 기둥과 보에 설계된 모든 철근을 배근하고, SHCC 하프프리캐스트와 다른 구조 부재간에 일체성을 부여하기 위해 슬래브 주근 및 보 주근과의 충분한 철근 이음 및 갈고리 정착이 필요하다. 그 다음으로 상부에 콘크리트를 타설하여 적당한 온도와 수분을 유지하며 양생하도록 한다.

<표 5.2> 하프프리캐스트 SHCC 및 RC 슬래브 현장적용 계획

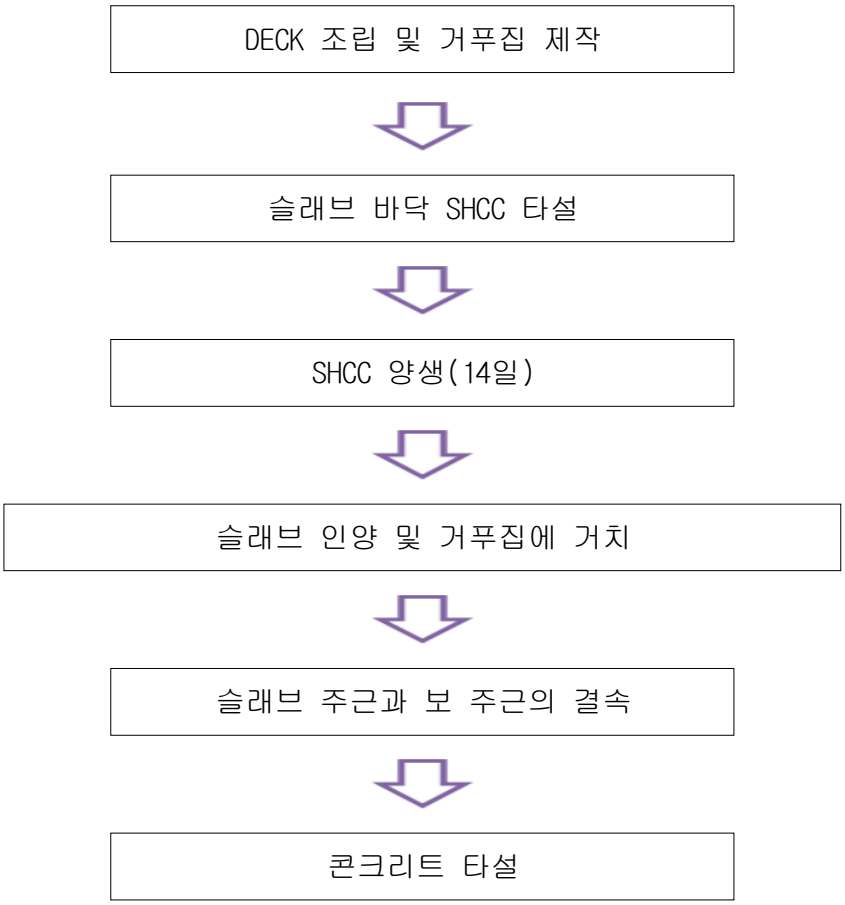
	
1. 슬래브 인양 및 설치	2. 슬래브 거푸집상부 설치 완료
	
3. 슬래브 주근 및 보 주근과의 결속	4. 슬래브 두께별 각각 5ea 설치
	
5. 설치 및 결속 완료	6. 상부 콘크리트 타설

dCollection @ chosun

5.3 SHCC 및 RC 복합슬래브 현장적용

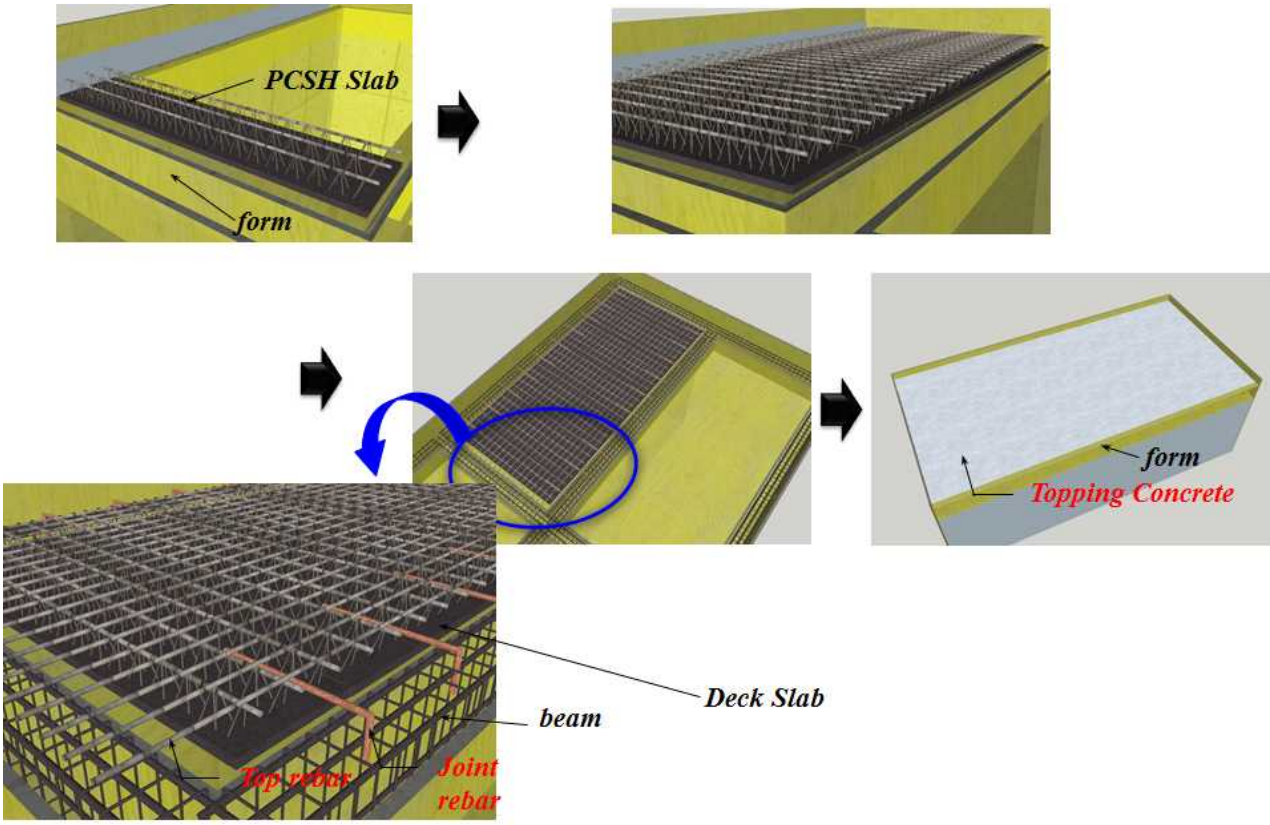
5.3.1 현장적용(Half Precast SHCC 및 RC 복합바닥슬래브 공법)

SHCC 및 RC 복합바닥구조시스템의 현장적용을 위한 슬래브 공법은 하프프리캐스트 SHCC 및 RC 복합바닥슬래브 공법을 적용하였다. 현장에 대한 상세검토는 위의 [그림 5.1] ~ [그림 5.3], <표 5.1>에 언급한바와 같다. SHCC 패널을 활용한 무거푸집/프리캐스트 복합슬래브를 현장에 적용하는 순서는 [그림 5.7]과 같으며, 현장적용을 위한 모델링과 시공시 전경은 [그림 5.8] ~ [그림 5.9]와 같이 실시하였다.



[그림 5.7] 현장적용 순서

dCollection @ chosun



[그림 5.8] 현장적용을 위한 모델링

a. PCSH패널 크레인 연결　　b. 패널현장적용 지점으로 이동-1

(계속)

dCollection @ chosun

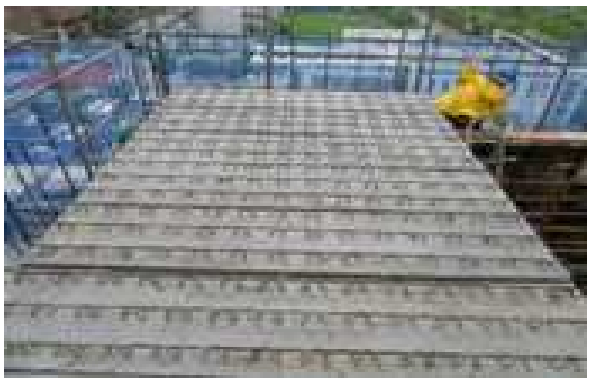
c. 패널현장적용 지점으로 이동-2

d. 패널 옥탑층거푸집 상부안착-1

e. 패널 옥탑층 거푸집 상부안착-2

f. 프리캐스트 패널 안착

g. 프리캐스트패널 안착후 하부 전경



h. 상부전경

(계속)

dCollection @ chosun

i. 슬래브-보 이음철근 설치

j. 슬래브-보 이음부 상세

k. 프리캐스트패널 설치완료

l. Topping Concrete 타설-1

m. Topping Concrete 타설-2

n. Topping Concrete 타설완료

[그림 5.9] SHCC 및 RC 복합슬래브 현장 시공 전경

dCollection @ chosun

5.4 슬래브 공법별 비교 분석(Half Precast SHCC 및 RC 복합바닥 슬래브 공법)

5.4.1 슬래브 거푸집 및 강관동바리의 시공 고찰

거푸집은 콘크리트를 부어넣어 콘크리트 구조체를 형성하는 거푸집 널과 이것을 정확한 위치로 유지하는 지지틀의 총칭으로 콘크리트를 일정한 형상과 치수로 유지시켜 주며, 그 경화에 필요한 수분의 누출을 방지하고 외기의 영향을 막아 적절한 양생이 되도록 사기 위한 가설구조물이다. 철근콘크리트조 건축공사에서 거푸집 공사비는 일반적으로 구조체 공사비의 30~40%, 전체 공사비의 10%, 공사기간은 전체공사기간의 25%정도의 비중을 차지하고 있다. 따라서 거푸집 공사의 생산성 향상은 전체 공사비의 절감 및 공기단축을 위해서 꼭 필요하며 거푸집 공사의 계획 및 합리적인 공법의 선정이 매우 중요하다. 이러한 거푸집 시공은 기술력과 시공경험에 대한 의존도가 높으며, 품질과 안전 측면에서 중요하므로 관련 규정 및 시방서 항목을 면밀히 검토하여야 한다. 국토교통부는 건설기술관리법에서 건설공사와 전반적인 안전에 대하여 규정하고 있으며, 표준시방서를 제정하여 품질, 안전 확보를 위한 시공지침을 제공하고 있다. 특히 거푸집 공사 안전지침 사항은 콘크리트공사 표준 안전 작업 지침 제2장 거푸집 공사(고시번호 : 고시 제 2001-13호)에 명시되어 있으며, 거푸집 및 동바리 시공에 대한 세부항목은 다음과 같다.

- 거푸집 재료 및 조립 : 19항목
- 박리재 도포 : 2항목
- 거푸집 해체 : 5항목
- 거푸집의 존치기간 : 6항목
- 받침기둥 바꾸어 세우기 : 5항목
- 지주 떼내기 : 1항목
- 자재 : 6항목 + 구조검토 산식

이러한 거푸집 시공은 안전을 위해 규정을 준수하고 정확한 구조검토를 거쳐 시공계획에 이르게 되며 해당 과정은 다음 <표 5.3>과 같이 이루어진다.

dCollection @ chosun

<표 5.3> 슬래브 거푸집 자재 구조 검토 과정

1) 하중계산

고정하중=2,400kg/m2 × 0.15m(slab 두께)=360kg/m2

충격하중=고정하중 × 50%=180kg/m2

작업하중=150kg/m2

따라서,

W = (2,400kg/m2 × 0.15m)+(360kg/m2 × 0.5) + 150kg/m2

= 690kg/m2 = 0.0690kg/cm2

1. 하중계산

(1) 거푸집널 : Ply wood THK 12㎜ - 장선 배치간격 결정됨

① 하중계산(단위폭 1㎝에 작용하는 하중)

W = 0.0690kg/cm2 × 1㎝ = 0.0690kg/㎝

② 휨검토 : 장선간격은 1번 설계조건에 제시한 간격 45cm로 계산한다.

Mmax = 1/8Wℓ2 = 1/8 × 0.0690kg/cm × $(45)^2$ = 17.46kg.㎝

Z = bh^2/6 = 0.24cm3

휨응력도 = Mmax/Z = 17.46kg.cm/0.24cm3 = 72.75kg/cm2 〈 Fb

= 240kg/cm2 ∵ OK

③ 처짐검토

∂max = 5W$ℓ^4$/ 384EI

= 5 × 0.0690 × $(45)^4$ / 384 × 7 × 10^4 × 0.144

= 0.07cm 〈 0.3cm ∵ OK

2. 거푸집널 구조검토

(2) 장선검토 : 미송각재 90*90 사용 - 멍에 배치간격 결정됨

① 하중계산 : 멍에간격을 90cm 로 가정하여 장선 1본에 작용하는 하중산출

W = 0.0690 kg/cm2 × 45cm = 3.11kg/㎝

② 휨검토

Mmax = 1/8Wℓ2 = 1/8 × 3.11kg/cm × $(90)^2$ = 3,148.9kg.㎝

∂b = Mmax/Z = 3,148.9/121.5 = 25.92kg/cm2 〈 Fb = 105kg/cm2 ∵ OK

③ 처짐검토

∂max = 5W$ℓ^4$/ 384EI

= 5 × 3.11 × $(90)^4$/ 384 × 7 × 10^4 × 547

= 0.07cm 〈 0.3cm ∵ OK

④ 전단검토 : 목재의 경우는 전단에 대한 검토를 한다.

Vmax = 1/2Wℓ= 1/2 × 3.11 × 90 = 139.95kg

∂b = Vmax / A = 139.95 / 9x9 = 1.73kg/cm2 〈 Fg = 7.5kg/cm2 ∵ OK

3. 장선 구조검토

(3) 멍에검토 : 미송각재 90*90 사용 - 파이프서포트 배치간격 결정됨,또한 일반부분과 켄틸레버부분을 나누어 계산함.

① 하중계산 : 멍에 1본에 작용하는 하중산출

W = 0.069kg/cm2 × 90cm = 6.21kg/㎝

② 휨검토

Mmax = 1/8W$ℓ^2$ = 1/8 × 6.21kg/cm × $(90)^2$ = 6,287.6kg.㎝

∂b = Mmax/Z = 6,287.6/121.5 = 51.7kg/cm2 〈 Fb = 105kg/cm2 ∵ OK

③ 처짐검토

∂max = 5W$ℓ^4$/ 384EI

= 5 × 6.21 × $(90)^4$/ 384 × 7 × 10^4 × 547

= 0.014cm 〈 0.3cm ∵ OK

④ 전단검토 : 목재의 경우는 전단에 대한 검토를 한다

Vmax = 1/2Wℓ= 1/2 × 6.21 × 90 = 279.8kg

∂b = Vmax / A = 279.8 / 9x9 = 3.4kg/cm2 〈 Fg = 7.5kg/cm2 ∵ OK

4. 멍에 구조검토

(4) 멍에단부(켄틸레버)검토 : 미송각재 90*90 사용

① 하중계산 : 멍에단부(장선재)에 집중하중이 작용하는 켄틸레버보로 가정하여 장선재 1본에 작용하는 하중산출

P = 0.0690kg/cm ×ℓ× 90cm = 6.21ℓ.kg

② 휨검토

∂b = Mmax/Z = 6.21$ℓ^2$/121.5 〈 Fb = 105cm2

∵ = $ℓ^2$ 〈105 × 121.5/6.21 = 2054.3

∵ = ℓ 〈 45.3cm

③ 전단검토 : 멍에의 내민길이(장선재 위치)를 45cm로 하면

Qmax = P = 6.21 × 45cm = 279.4

T = K.Qmax / A = 1.5 × 279.4 / 9x9 = 5.2kg/cm 〈 Fg = 7.5kg/cm ∵ OK

④ 처짐검토

∂max = P$ℓ^3$/ 3EI

= 279.4 × $(45)^3$/ 3 × 7 × 10^4 × 547 = 0.22cm 〈 0.3cm ∵ OK

5. 멍에단부 구조검토

(5) Pipe Support 검토

① 하중계산

Pipe Support 허용축하중 검토

N = 0.0690 × 90 × 90 = 558.9kg

Pipe Support의 허용하중을 안전율(Fs=1.3) 적용하여 검토

N = 558.9kg 〈 750kg/1.3 = 577kg ∵ OK

6. 강관동바리 구조검토

dCollection @ chosun

적정 거푸집 및 동바리 설치 후 콘크리트 타설 및 양생과정이 끝나면 거푸집과 동바리를 해체한다. 그러나 거푸집공사 재해사례 분석 연구 결과에 따르면, 거푸집 조립, 운반, 해체 과정 중 해체 과정의 재해사례가 40.0%에 달한다. 이는 거푸집 해체에 인력 작업 의존율이 크며, 비계와 작업발판과 같은 가설물이 꼭 필요한 작업이며, 자재 추락 가능성이 높고, 공간 협소로 인한 적은 인원 투입 등의 이유에서 기인하였다[27]. [그림 5.10]은 실제 현장에서의 거푸집 해체 전경을 보여준다.

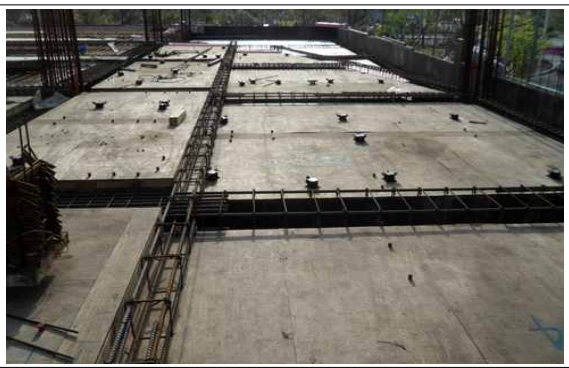
[그림 5.10] 슬래브 거푸집 해체 작업 모습

dCollection @ chosun

5.4.2 슬래브 공법별 시공과정

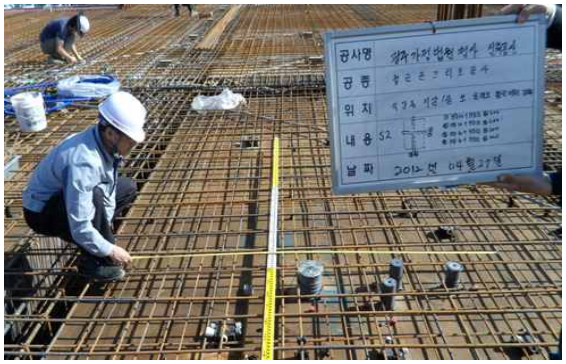
기존재래식 공법의 시공은 <표 5.4> ~ <표 5.5>와 같으며, 관급공사 내역 표준인 합판 거푸집(3회) 및 강관동비리 3개월로서 적용되고 있다.

<표 5.4> 기존 재래식 공법(합판거푸집(3회)+강관 동바리(3개월) 적용) 시공-1

2. 자재반입	2. 벽체 기둥거푸집 설치
3. 보 거푸집 설치	4. 장선 멍에 강관동바리 설치
	
5. 한판 거푸집 설치	6. 합판 슬래브 완성

dCollection @ chosun

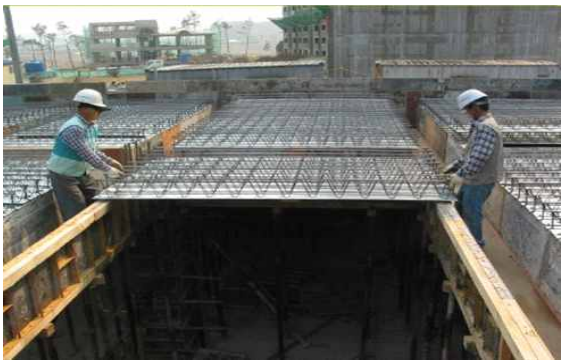
<표 5.5> 기존 재래식 공법(합판거푸집(3회)+강관 동바리(3개월) 적용) 시공-2

	
7. 철근배근	8. 콘크리트 타설
9. 콘크리트 타설 완료	10. 거푸집 해체 및 자재정리

dCollection @ chosun

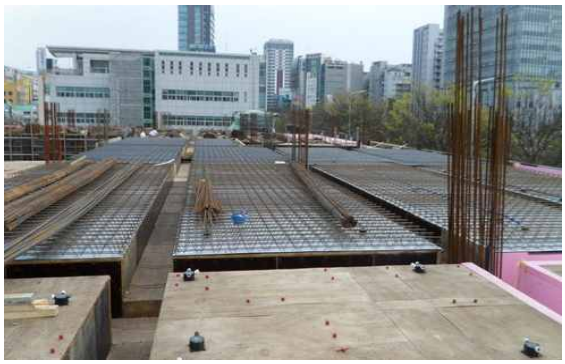
다음 <표 5.6> ~ <표 5.7>은 Truss Deck(T-F데크) 공법의 시공과정을 나타낸 것으로 T-F 데크 공법은 보 거푸집 상단에 데크판을 고정하고, 철근을 인양하여 보 철근 및 상부 배력근을 배근한다. 이 공법은 무지주 , 무거푸집으로 콘크리트를 타설하는 공법이다.

<표 5.6> Truss Deck 공법 시공-1

1. Truss Deck 반입	2. Truss Deck 인양
	
3. 임시 적치	4. TRUSS DECK 설치
5. Truss Deck 설치중	6. Truss Deck 설치 완료

dCollection @ chosun

<표 5.7> Truss Deck 공법-2

	
7. 철근인양	8. 상부근 배근
9. Truss Deck 설치(무지주)	10. 콘크리트 타설

dCollection @ chosun

하프프리캐스트 SHCC 및 RC 복합바닥슬래브 공법의 시공과정을 <표 5.8> ~ <표 5.9>에 나타냈다.

<표 5.8> Half PCa-SHCC 적용 복합바닥 슬래브 공법-1

1. 현장 타설 완료	2. 슬래브판 인양
3. 슬래브판 설치	4. 슬래브판 설치 완료
5. 슬래브판 설치 완료(무지주)	6. 배력근과 보 철근 정착이음

dCollection @ chosun

<표 5.9> Half PCa-SHCC 적용 복합바닥 슬래브 공법-2

7. 콘크리트 타설	8. 타설 완료
9. 완료-1	10. 완료-2

dCollection @ chosun

다음은 기존재래식 공법, Truss Deck 공법, SHCC 슬래브 공법의 공기현황 및 단가 비교를 <표 5.10>에 나타냈다. 공법별 비교에서 기존재래식 공법은 철근재료비가 포함되지 않아 두 공법에 비해 단가는 줄어들었으나, 공사기간이 더 길어지고 인력이 Truss Deck 공법 16배, SHCC 슬래브 공법 6배 더 필요한 것으로 확인되었다. 다음 표에 나온 비교에서 SHCC 및 RC 복합슬래브 공법은 두 공법에 비해 공기절감 및 원가 절감이 가능할 것으로 사료된다.

<표 5.10> 시험시공을 통한 공법 특성비교

		기존재래식 한판슬래브공법 (3회 적용)	Truss Deck 공법	SHCC 및 RC 복합슬래브 공법
공기현황 및 단가비교	작업일수 (일)	- 슬래브 거푸집 설치 : 8일 - 철근조립 : 2.5일 - 해체 : 3일 - 자재정리 : 5일	- 설치 : 2.5일 - -철근조립(배력근) : 1일	- 설치 : 6.5 ~ 7.5일 - 철근조립 : 1일
	총	18.5일	3.5일	7.5 ~ 8.5일
	작업인원 (명)	- 슬래브 거푸집 설치 : 130명 - 철근조립 : 13명(12~13 Ton) - 해체 : 24명 - 자재정리 : 35명	- 설치 : 10명 - -철근조립(배력근) : 2.5명 (작업량 : 2.5 Ton)	- 설치 : 25 ~ 30명 - 철근조립 : 2.5명 (작업량 : 2.5 Ton)
	총	202명	12.5명	27.5 ~ 32.5명
	장비	1일	0.5일	5.5~6.5일
	단가 (㎡)	44,742원	54,863원	약 48,000원
	총비용 (1,000㎡)	4,474.2 만원	5,486.3 만원	4,800 만원

※ 단, 광주 가정법원 청사 신축 공사 현장 분석에 한함.

※ 층고 4.5m, 1,000㎡ 기준

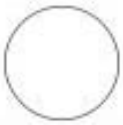
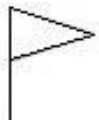
dCollection @ chosun

5.5 SHCC 복합바닥구조시스템의 생산성 분석

5.5.1 사이클론 시뮬레이션 방법론

사이클론(CYCLONE) 시뮬레이션 기법은 현장에서의 작업을 이산 사건 기반의 네트워크 프레임워크 모델링 형태로 개발된 것이며, Halpin 교수에 의해 개발되었다. 이 기법은 반복적인 건설 프로세스의 시뮬레이션과 모델링을 위하여 시험되었고, 이후 Micro CYCLONE이 개발되었다[28]. 사이클론 모델링 요소들은 다음 <표 5.11>과 같다.

<표 5.11> 사이클론의 기본 요소[73]

기호	기호명	기능
	NORMAL	시간이 소요되는 작업에 사용 모든 요소가 선행될 수 있음 자원 투입에 상관없이 진행
	COMBI	시간이 소요되는 작업에 사용 자원이 투입되어야 하는 작업에 사용 Queue 요소가 선행되어야 함 자원이 투입될 때까지 지연됨
	QUEUE	반드시 Combi 앞에 선행 시간이 소요되지 않는 요소 자원을 포함하는 요소 선행 자원 증가(GEN) 기능
	CONSOLIDATE	작업 순회 회수 체크 일정 자원이 모일 때가지 대기 기능
	COUNTER	작업 순환 회수 체크하는 곳에 사용
	ARROW	논리관계 연결 작업 흐름 방향 지시

사이클론은 자원(resources) 및 작업시간(work task durations), 작업간의 논리적인

dCollection @ chosun

(logic) 상호관계를 적용시켜 생산성을 측정하는 관리도구로 알려져 있다. 또한 작업간의 상호관계를 단순화하여 도표 및 그래프를 통하여 모델의 결과물을 제시하는 장점을 갖고 있다[30]. 본 연구의 사이클론 시뮬레이션은 공개 웹사이클론 사이트를 이용하여 실시하였다[31].

시뮬레이션을 활용한 생산성에 관한 기존 연구에 대한 내용은 다음과 같다.

송창엽, 이환철, 박소현, 조규만, 현창택 (2010)[28]은 "알루미늄 폼을 이용한 골조공사의 생산성 분석에 관한 연구"에서 골조공사에서 유로 폼과 알루미늄 폼의 시뮬레이션을 실시하였으며, 알루미늄 폼 적용으로 인한 생산성 향상 및 최적의 작업공간 수, 작업조 수를 제시하고 실제사례와 유사한 점을 입증하여 시뮬레이션 결과를 증명하였다.

강석길 (2010)[32]은 "철골세우기 공사의 작업조 구성에 따른 생산성 분석에 관한 연구"에서 철골세우기 공사에 대한 시뮬레이션을 실시하였으며, 현장관리자가 사전에 결정할 수 있는 최적의 철골 세우기 공사 작업조 수 및 장비 수를 도출하였다.

위의 기존연구 이외에도 대부분의 생산성 관련 연구는 기존 기술 및 사례간의 비교와 각 기술에서의 최적화된 조합을 도출하는 연구가 대부분이다. 본 연구는 SHCC 슬래브라는 신기술에 관한 분석을 수행함으로서, 해당 기술의 실용화 과정에서의 고려사항 판단의 근거로 활용하고자 한다.

5.5.2 슬래브 공법별 시뮬레이션 모델

슬래브 공법별 작업프로세스의 시뮬레이션 모델링을 위하여, 1) 작업프로세스, 2) 작업별 투입자원 및 작업시간을 조사하였으며, 이를 바탕으로 <표 5.11>에서 제시한 모델링 요소를 이용하여 시뮬레이션 모델을 완성하였다.

5.5.2.1 작업프로세스

작업프로세스 분석을 위한 SHCC 슬래브가 적용된 현장은 광주○○청사 신축공사이다. 광주광역시 서구 치평동에 위치하며, 기존의 등기국(대지면적 3,510.00㎡) 옆에 광주○○청사(대지면적 7,020.40㎡)를 신축한 것이다. 해당 건물은 연면적 6,610.98

dCollection @ chosun

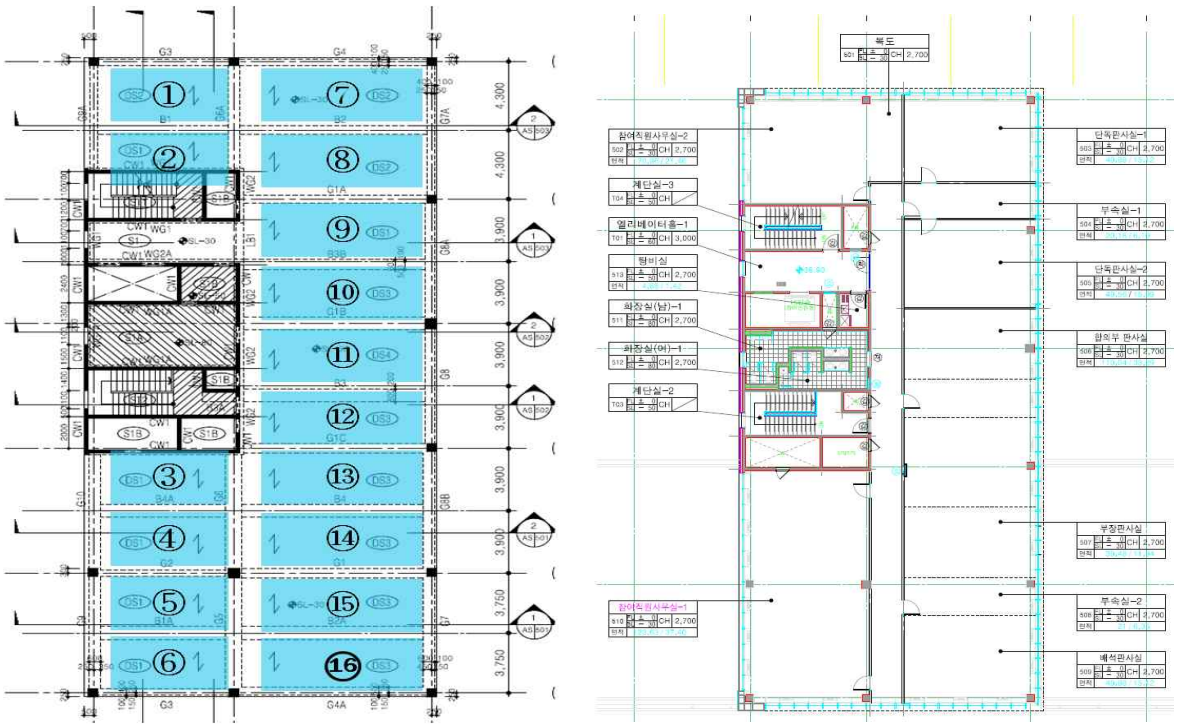
㎡, 지상 5층, 지하 1층의 총 6층 규모의 건물이며, 특히 5층 슬래브 공사에 SHCC 슬래브가 시범 적용되었다. <표 5.12>는 현장의 개요를 요약한 것이다.

<표 5.12> 사례 현장 개요

사 업 명	광주○○청사 신축공사
대지위치	광주광역시 서구 치평동
지역지구	도시지역, 중심상업지역, 지구단위계획구역
용 도	업무시설(공공청사)
구조 형식	철골철근콘크리트조(SRC조)
규모	지하 1층, 지상 5층
대지면적	10,530.40㎡
건축면적	2,138.56㎡
연면적	6,610.98㎡
SHCC 슬래브 적용 층	5층
SHCC 슬래브 면적	564.2㎡
층고	4.5m

SHCC 슬래브가 적용된 5층의 면적은 약 564.2㎡로서 이는 코어(core)벽체로 이루어진 부분은 제외한 면적이다. 일반적으로 슬래브 시공은 벽체와 보 거푸집이 설치된 후 벽체와 보 거푸집에 슬래브 거푸집을 연결함으로서 시작된다. 가정법원청사 5층에서는 이러한 과정의 슬래브 시공이 16번 반복되었다. 상세 도면은 다음 [그림 5.11]과 같다.

dCollection @ chosun



[그림 5.11] 광주가정법원 지상 5층 구조바닥평면도 및 지상 5층 평면도

가. SHCC 슬래브 공법 프로세스

슬래브 시공 공법은 해당 슬래브 하부의 벽체, 보, 기둥 시공과의 연계 없이 이루어질 수 없다. 따라서 슬래브 시공의 일반적인 전 과정을 설명하고자 한다. SHCC 슬래브 시공의 세부 과정은 다음과 같다.

① 먹메김 : 도면에 표시된 치수대로 먹매김을 하여 이후 거푸집 시공을 용이하게 한다.

② 바닥 수평목 설치 : 수직 벽체 거푸집 설치 시 수평 유지를 위한 거푸집하단 수평목을 설치한다.

③ 철근 반입 : 벽체, 기둥에 필요한 철근을 반입한다. 상부 층 시공의 경우 크레인을 이용하여 양중 한다.

④ 벽체, 기둥 철근 배근 : 벽체 및 기둥 거푸집 설치 이전에 철근을 배근하고, 철근 배근 완료 후 전기, 통신, 소방 등의 배관을 설치한다.

⑤ 거푸집 자재 반입 : 벽체, 보 거푸집 시공을 위한 자재를 현장에 반입하여 적치

dCollection @ chosun

장소에 보관한다. 상부 층 시공의 경우 크레인을 이용하여 양중 한다.

⑥ 벽체, 기둥 거푸집 설치 : 벽체, 기둥의 거푸집을 박리제 도포 후 설치한다. 특히 이 과정에서는 먹줄 선에 따라 수평 유지용 각재를 고정 설치하여 콘크리트 타설 시의 거푸집 이탈을 방지한다.

⑦ 보 거푸집 설치 : 벽체의 상부 혹은 기둥과 기둥 사이의 보 거푸집을 설치한다.

⑧ SHCC 슬래브 양중 및 설치 : 미리 공장 제작된 SHCC 슬래브 패널을 현장 반입하고 양중 한다. 특히 SHCC 슬래브는 하프-PC(Half-Precast) 형태로 제작되기 때문에, 슬래브 자중이 무겁다. 따라서 양중을 위해 크레인(crane) 장비가 필요하다. 크레인을 이용해 양중 된 슬래브를 인력을 통해 정밀 조작하여 보 거푸집에 체결한다.

⑨ 슬래브, 보 철근 양중 : SHCC 슬래브는 앞서 언급한 바와 같이 하프-PC 형태이기에 설치 후 콘크리트 타설이 필요하다. 타설 전에 배력근과 보 철근과의 정착이음을 위한 철근과 슬래브 철근 배근 후 보 철근 배근을 위한 자재를 양중 한다.

⑩ 보 철근 배근 : 벽체 상부 혹은 기둥과 기둥 사이의 보에 해당되는 철근을 배근한다.

⑪ 배력근과 보 철근 정착이음 : 양중 한 철근을 배력근과 보 철근과 정착 이음 한다.

⑫ 타설 및 양생 : 펌프카를 통해 후 타설 콘크리트를 붓고 양생한다.

나. 기존 재래식 슬래브 공법 프로세스

강관동바리 및 합판 거푸집(3회 사용) 사용을 기준으로 하는 기존 재래식 슬래브 시공의 세부 과정은 다음과 같다.

① 먹메김 : 도면에 표시된 치수대로 수직, 수평 먹매김을 하여 이후 거푸집 시공을 용이하게 한다.

② 바닥 수평목 설치 : 수직 벽체 거푸집 설치 시 수평 유지를 위한 거푸집하단 수평목을 설치한다.

③ 철근 반입 : 벽체, 기둥에 필요한 철근을 반입한다. 상부 층 시공의 경우 크레인을 이용하여 양중 한다.

④ 벽체, 기둥 철근 배근 : 벽체 및 기둥 거푸집 설치 이전에 철근을 배근하고, 철근 배근 완료 후 전기, 통신, 소방 등의 배관을 설치한다.

dCollection @ chosun

⑤ 거푸집 자재 반입 : 벽체, 보 거푸집 시공을 위한 자재를 현장에 반입하여 적치 장소에 보관한다. 상부 층 시공의 경우 크레인을 이용하여 양중한다.

⑥ 벽체, 기둥 거푸집 설치 : 벽체, 기둥의 거푸집을 박리제 도포 후 설치한다. 특히 이 과정에서는 먹줄 선에 따라 수평 유지용 각재를 고정 설치하여 콘크리트 타설 시의 거푸집 이탈을 방지한다.

⑦ 보 거푸집 설치 : 벽체의 상부 혹은 기둥과 기둥 사이의 보 거푸집을 설치한다.

⑧ 장선, 멍에, 강관동바리 설치 : 슬래브 거푸집을 지지하기 위한 장선, 멍에, 강관동바리를 설치한다. 특히, 강관동바리 설치 높이가 3.5m를 초과한 경우 안전성을 위하여 높이 2m 이내마다 격자로 설치하는 수평연결재를 추가로 설치해야 한다.

⑨ 슬래브 거푸집 설치 : 동바리에 지지를 받아 장선, 멍에 위에 거푸집을 설치한다.

⑩ 슬래브, 보 철근 양중 : SHCC 슬래브는 앞서 언급한 바와 같이 하프-PC 형태이기에 설치 후 콘크리트 타설이 필요하다. 타설 전에 배력근과 보 철근과의 정착이음을 위한 철근과 슬래브 철근 배근 후 보 철근 배근을 위한 자재를 양중 한다.

⑪ 보 철근 배근 : 벽체 상부 혹은 기둥과 기둥 사이의 보에 해당되는 철근을 배근한다

⑫ 슬래브 철근 배근 : 슬래브 거푸집 위에 철근 배근을 실시한다.

⑬ 타설 및 양생 : 펌프카를 통해 후 타설 콘크리트를 붓고 양생한다.

⑭ 거푸집 해체 및 자재정리 : 다음 공사 과정을 위해 동바리 및 거푸집을 해체하고 정리한다.

5.5.2.2 데이터 수집

데이터 수집은 작업이 수행된 실제 사례(광주가정법원)의 분석을 통해 수행되었다. 앞서 분석한 두 슬래브 공법의 작업프로세스를 기반으로, 실제 작업수행 시간을 측정하였다. 단, 두 공법은 슬래브 시공시간과 이후 양생시간, 자재정리 시간에서 차이를 보이며, 그 외는 동일한 공정으로 이루어져 있다. 작업시간 측정은 공정표, 물량산출표, 표준품셈을 이용하여 측정하였다.

dCollection @ chosun

가. 데이터 수집 및 시뮬레이션 범위 결정

슬래브 공사는 해당 슬래브 하부에 설치된 벽체, 기둥, 보 시공과 연계성을 가지고 있다. 그러나 본 연구에서는 슬래브 공법에 대한 비교를 하고자 하므로 중복된 프로세스에 대한 데이터 분석은 불필요하다. 따라서 공통 작업인 '먹매김', '바닥 수평목 설치', '철근 반입', '벽체, 기둥 철근 배근', '거푸집 자재 반입', '벽체, 기둥 거푸집 설치', '보 거푸집 설치'의 슬래브 시공 전(前)과정과 '보 철근 배근', '콘크리트 타설'의 슬래브 거푸집 시공 후 과정은 동일하므로 각각의 데이터는 동일한 값을 사용한다. 그러나 전기·기계설비, 소방, 통신 등의 배관 슬리브 시공의 내용은 현장에 따라 작업내역이 매우 상이하므로 본 연구에서는 제외한다(<표 5.13> 참조).

한편 두 공법은 슬래브 거푸집 시공까지는 세부 공정이 반복되는 사이클(cycle) 형식의 작업이 이루어지나, 모든 거푸집 설치가 완료된 이후의 과정(콘크리트 타설, 양생, 거푸집 해체, 자재정리 및 운반)은 반복이 아닌 일회성 작업이다. 따라서 해당 과정은 슬래브 거푸집 작업 사이클이 모두 완료된 후 작업을 수행하는 방식으로 진행한다.

dCollection @ chosun

<표 5.13> 공법별 작업프로세스 비교 및 시뮬레이션 분석 여부

	SHCC 슬래브 공법	기존 재래식 슬래브 공법	시뮬레이션 분석 여부	주요 비교 대상 여부
공법 프로세스	먹메김	먹메김	○	
	바닥 수평목 설치	바닥 수평목 설치	○	
	철근 반입	철근 반입	○	
	벽체, 기둥 철근 배근	벽체, 기둥 철근 배근	○	
	거푸집 자재 반입	거푸집 자재 반입	○	
	벽체, 기둥 거푸집 설치	벽체, 기둥 거푸집 설치	○	
	보 거푸집 설치	보 거푸집 설치	○	
	SHCC 슬래브 양중 및 설치	장선, 멍에, 강관동바리 설치	○	○
		슬래브 거푸집 설치	○	○
	배관 슬리브 시공	배관 슬리브 시공		
	슬래브, 보 철근 양중	슬래브, 보 철근 양중	○	○
	보 철근 배근	보 철근 배근	○	
	배력근과 보 철근 정착이음	슬래브 철근 배근	○	○
	콘크리트 타설	콘크리트 타설	○	○
	콘크리트 양생	콘크리트 양생	○	○
	거푸집 해체(기둥, 벽)	거푸집 해체	○	○
	거푸집 해체(보)		○	○
	자재정리 및 운반 (기둥, 벽)	자재정리 및 운반	○	○
	자재정리 및 운반(보)		○	○

dCollection @ chosun

나. SHCC 슬래브 공법

광주가정법원 현장의 실제 공정표 및 물량산출표를 통해 SHCC 슬래브 공법 적용 시의 투입자원과 세부공종별 작업시간에 관한 데이터를 수집하였다(<표 5.14> 참조). 공정표의 1일은 법정근로시간 8시간의 작업을 의미하므로 1일=8시간으로 환산하여 표현하였다.

먼저 형틀목공(3인 1조)을 통한 먹메김 작업 8시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 형틀목공(9인 1조)을 통한 바닥 수평목 설치가 8시간, 철근공(5인 1조)과 크레인을 이용한 철근반입이 1시간, 형틀목공(4인 1조)과 크레인을 이용한 거푸집 자재 반입이 3시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 철근공(8인 1조)을 통한 벽체, 기둥 철근배근 16시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 형틀목공(15인 1조)을 통한 벽체, 기둥 거푸집설치가 32시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 형틀목공(15인 1조)과 크레인을 이용한 보 거푸집 설치가 16시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 형틀목공(5인 1조)과 크레인을 이용한 SHCC 슬래브 양중 및 설치가 32시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 철근공(5인 1조)과 크레인을 이용한 슬래브, 보 철근 양중이 3시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 철근공(13인 1조)을 통한 보 철근 배근이 24시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 철근공(6인 1조)을 통한 슬래브 철근 배근이 8시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 콘크리트공(8인 1조)과 펌프카를 이용한 타설 작업이 7시간에 걸쳐 이루어졌다. 타설 작업까지 끝나면 기둥, 벽체 양생기간 4일, 보 양생기간 13일이 소요된다. 기둥, 벽체 양생기간이 끝나면 형틀목공(8인 1조)을 통한 거푸집 해체가 16시간에 걸쳐 이루어지며, 이후 자재정리 및 운반이 16시간에 걸쳐 이루어진다. 보 양생기간이 끝나면 형틀목공(6인 1조)을 통한 거푸집 해체가 8시간에 걸쳐 이루어지며, 이후 자재정리 및 운반이 8시간에 걸쳐 이루어진다. SHCC 슬래브 공법의 데이터상의 총 작업시간은 198시간+19일로 조사되었다.

dCollection @ chosun

<표 5.14> SHCC 슬래브 공법 작업 상세(562.5㎡)

작업명	작업조 수	작업조 작업시간 (h)	기계장비	기계장비 사용시간 (h)	비고
먹메김	3인 1조	8.0	-	-	
바닥수평목 설치	9인 1조	8.0	-	-	
철근 반입	5인 1조	1.0	크레인	1.0	8.5t 반입
벽체, 기둥 철근 배근	8인 1조	16.0	-	-	8.5t 작업
거푸집 자재 반입	4인 1조	3.0	크레인	3.0	
벽체, 기둥 거푸집 설치	15인 1조	32.0	-	-	
보 거푸집 설치	15인 1조	16.0	크레인	16.0	
SHCC 슬래브 양중 및 설치	5인 1조	24.0	크레인	24.0	
슬래브, 보 철근 양중	5인 1조	3.0	크레인	3.0	26.1t 반입
보 철근 배근	13인 1조	24.0	-	-	24t 작업
슬래브 철근 배근	6인 1조	8.0	-	-	2.1t 작업
콘크리트 타설	8인 1조	7.0	펌프카	7.0	237㎥ 타설
콘크리트 양생	-	-	-	-	13일 소요
거푸집해체 (기둥, 벽)	8인 1조	16.0	-	-	4일 양생 후 작업
자재정리 및 운반 (기둥, 벽)	6인 1조	16.0	-	-	4일 양생 후 작업
거푸집해체 (보)	6인 1조	8.0	-	-	13일 양생 후 작업
자재정리 및 운반 (보)	6인 1조	8.0	-	-	13일 양생 후 작업
총 작업시간		198.0			

dCollection @ chosun

다. 기존 재래식 슬래브 공법

광주가정법원 현장의 실제 공정표 및 물량산출표를 통해 SHCC 슬래브 공법 적용 시의 투입자원과 세부공종별 작업시간에 관한 데이터를 수집하였다(<표 5.15> 참조). 공정표의 1일은 법정근로시간 8시간의 작업을 의미하므로 1일=8시간으로 환산하여 표현하였다.

먼저 형틀목공(3인 1조)을 통한 먹메김 작업 8시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 형틀목공(9인 1조)을 통한 바닥수평목 설치가 8시간, 철근공(5인 1조)과 크레인을 이용한 철근반입이 1시간, 형틀목공(4인 1조)과 크레인을 이용한 거푸집 자재 반입이 3시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 철근공(8인 1조)을 통한 벽체, 기둥 철근배근 16시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 형틀목공(15인 1조)을 통한 벽체, 기둥 거푸집설치가 32시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 형틀목공(15인 1조)과 크레인을 이용한 보 거푸집 설치가 16시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 크레인을 이용한 동바리 양중이 4시간, 형틀목공(15인 1조)을 통한 장선, 멍에, 강관동바리 설치가 16시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 크레인을 이용한 슬래브 거푸집 양중이 4시간, 형틀목공(15인 1조)을 통한 슬래브 거푸집 설치가 40시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 철근공(5인 1조)과 크레인을 이용한 슬래브, 보 철근 양중이 3시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 철근공(13인 1조)을 통한 보 철근 배근이 24시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 철근공(6인 1조)을 통한 슬래브 철근 배근이 24시간에 걸쳐 이루어졌다. 다음으로 콘크리트공(8인 1조)과 펌프카를 이용한 타설 작업이 8시간에 걸쳐 이루어졌다. 타설 작업까지 끝나면 콘크리트 양생기간 13일이 소요된다. 양생기간이 끝나면 형틀목공(8인 1조)을 통한 거푸집 해체가 16시간에 걸쳐 이루어지며, 이후 자재정리 및 운반이 40시간에 걸쳐 이루어진다. 기존 재래식 슬래브 공법의 데이터상의 총 작업시간은 271시간+13일로 조사되었다.

dCollection @ chosun

<표 5.15> 기존 재래식 슬래브 공법 작업 상세(562.5㎡)

작업명	작업조 수	작업조 작업시간 (h)	기계장비	기계장비 사용시간 (h)	비고
먹메김	3인 1조	8.0	-	-	
바닥수평목 설치	9인 1조	8.0	-	-	
철근 반입	5인 1조	1.0	크레인	1.0	8.5t 반입
벽체, 기둥 철근 배근	8인 1조	16.0	-	-	8.5t 작업
거푸집 자재 반입	4인 1조	3.0	크레인	3.0	
벽체, 기둥 거푸집 설치	15인 1조	32.0	-	-	
보 거푸집 설치	15인 1조	16.0	크레인	16.0	
장선, 멍에, 강관동바리 설치	15인 1조	16.0	크레인	4.0	
슬래브 거푸집 설치	15인 1조	56.0	크레인	4.0	
슬래브, 보 철근 양중	5인 1조	3.0	크레인	3.0	32.5t 반입
보 철근 배근	13인 1조	24.0	-	-	24t 작업
슬래브 철근 배근	6인 1조	24.0	-	-	8.5t 작업
콘크리트 타설	8인 1조	8.0	펌프카	8.0	260㎥ 타설
콘크리트 양생	-	-	-	-	13일 소요
거푸집 해체	8인 1조	16.0	-	-	13일 양생 후 작업
자재정리 및 운반	6인 1조	40.0	-	-	13일 양생 후 작업
총 작업시간		271.0			

dCollection @ chosun

5.5.3 시뮬레이션 모델

SHCC 슬래브 공법 및 기존 재래식 슬래브 공법에 대한 작업프로세스 및 작업데이터를 바탕으로 시뮬레이션 모델을 생성하였다. 작업 프로세스별로 모델링을 실시하고 공개 웹사이클론 사이트를 통해 작업 단위의 생산성을 도출할 수 있다.

5.5.3.1 SHCC 슬래브 공법

SHCC 슬래브 공법의 작업프로세스 및 투입자원에 대한 데이터 정보를 반영하여 [그림 5.12]와 같이 모델링을 실시하였다. 해당 사이클론 모델은 i) '슬래브 시공 이전 공통과정', ii) 'SHCC 슬래브 시공과정', iii) '슬래브 시공 이후 공통과정'으로 세 가지 부분으로 나뉜다.

첫 번째 과정인 '슬래브 시공 이전 공통과정'은 슬래브 하부에 위치한 벽체, 기둥, 보 거푸집 시공에 대한 과정이다. 먼저 먹메김을 위한 준비를 실시한다(Node 1). 이후 먹메김을 실시(Node 2)하며, 형틀목공(Node 3)이 투입된다. 먹메김이 끝나면 바닥 수평목을 설치(Node 5)하며, 형틀목공(Node 6)이 투입된다. 이후 단계는 벽체, 기둥 시공을 위한 자재 반입하는 단계로서, 철근 반입(Node 8) 및 거푸집자재 반입(Node 9)을 실시하며, 각각 철근공(Node 10), 형틀목공(Node 11)이 투입된다. 특히 본 연구는 지상 5층 슬래브 시공을 대상으로 하므로 자재 양중을 위한 크레인(Node 12) 사용을 추가하였다. 자재 반입 이후에 벽체, 기둥 철근 배근(Node 14)을 실시하며, 철근공(Node 15)이 투입된다. 철근 배근 완료 후 벽체, 기둥 거푸집설치(Node 17) 및 보 거푸집설치(Node 19)를 실시하며, 형틀목공(Node 20)과 크레인(Node 12)이 투입된다. 1부터 20 Node에 걸쳐 '슬래브 시공 이전 공통과정'이 완성된다.

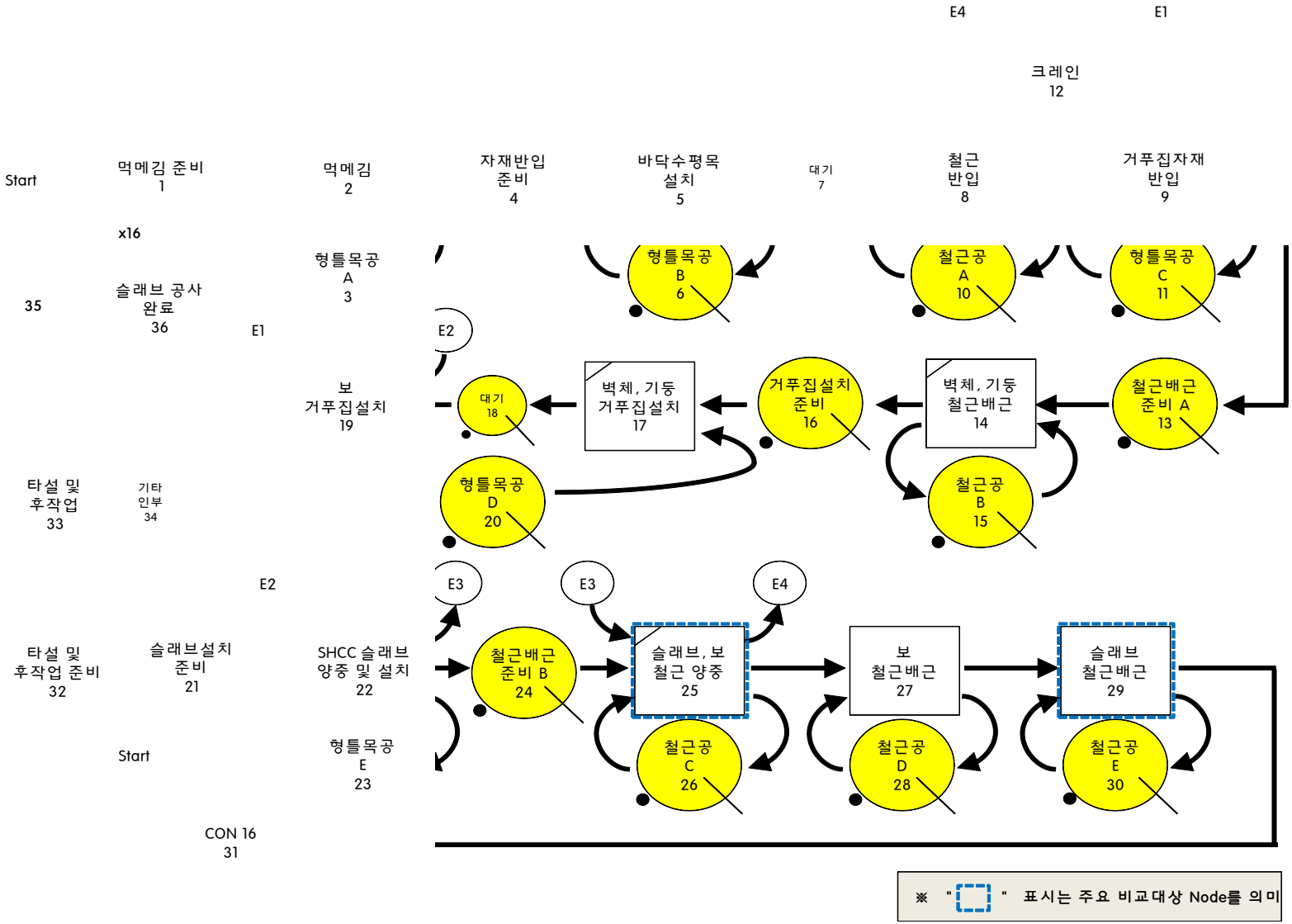
두 번째 과정인 'SHCC 슬래브 시공과정'은 공장 제작된 하프-PC 형태의 슬래브를 양중하고 설치하는 과정이다. 먼저 SHCC 슬래브를 설치 층까지 양중하고 벽체, 보 거푸집에 맞추어 설치(Node 22)하며, 형틀목공(Node 20)과 크레인(Node 12)이 투입된다. 슬래브 설치가 완료되면 배력근 및 보 철근 배근을 위한 철근을 양중(Node 25)하며, 철근공(Node 26)과 크레인(Node 12)이 투입된다. 양중한 철근으로 보 철근 배근을 실시(Node 27)하며, 철근공(Node 28)이 투입된다. 또한 슬래브 철근 배근을 실시(Node

dCollection @ chosun

29)하며, 철근공(Node 30)이 투입된다. 22부터 30 Node에 걸쳐 'SHCC 슬래브 시공과정'이 완성된다.

세 번째 과정인 '슬래브 시공 이후 공통과정'은 콘크리트 타설 및 후속 자재정리와 운반에 대한 과정이다. 해당 과정은 반복 작업이 아닌 일회성 작업이므로 앞선 슬래브 시공과정(Node 1~30)이 16회 완료된 후 시작된다. 따라서 일정 자원 투입까지 대기 기능의 CONSOLIDATE를 이용하여 표현하였다. CONSOLIDATE(Node 31)에 자원 값 16을 적용하였으며, 이것은 슬래브 거푸집 시공 작업이 16회 반복되기 전까지 작업을 수행하지 않고 대기하는 것을 의미한다. 슬래브 거푸집 시공 작업의 16회 반복이 끝나면 해당 층 전체에 대한 타설 및 후작업(Node 33)이 1회 이루어지며, 형틀목공을 포함한 기타인부(Node 34)가 투입된다. 모든 Node를 거쳐 COUNTER(Node 35)에 도달하면 시뮬레이션 사이클이 종료되어 횟수가 체크되며, 슬래브 공사 시뮬레이션이 종료된다.

dCollection @ chosun



[그림 5.12] SHCC 슬래브 공법 시뮬레이션 모델

dCollection @ chosun

5.5.3.2. SHCC 슬래브 공법기존 재래식 슬래브 공법

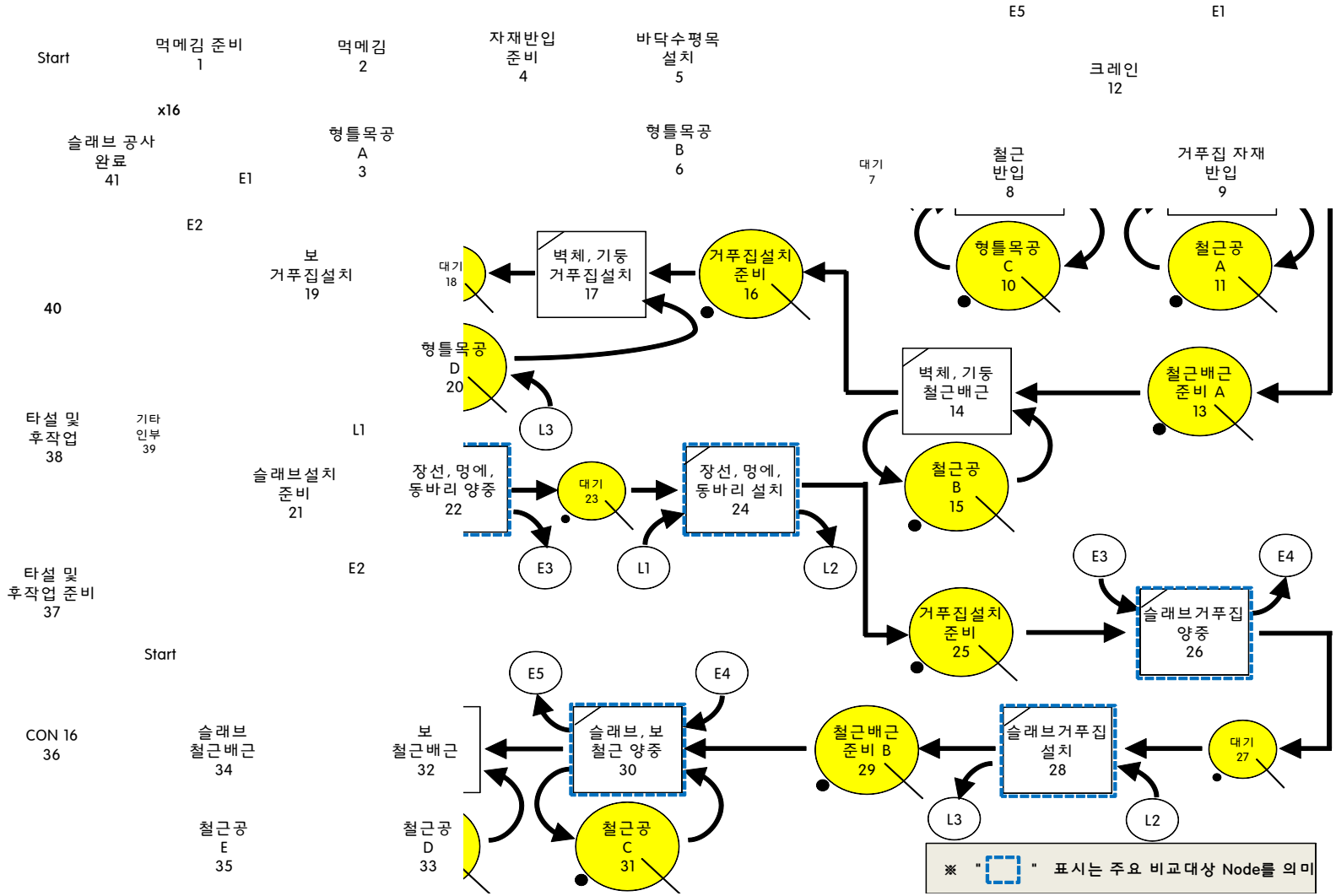
기존 재래식 공법의 작업프로세스 및 투입자원에 대한 데이터 정보를 반영하여 [그림 5.13]과 같이 모델링을 실시하였다. 해당 사이클론 모델은 i) '슬래브 시공 이전 공통과정', ii) '재래식 슬래브 시공과정', iii) '슬래브 시공 이후 공통과정'으로 세 가지 부분으로 나뉜다.

첫 번째 과정인 '슬래브 시공 이전 공통과정'은 슬래브 하부에 위치한 벽체, 기둥, 보 거푸집 시공에 대한 과정이다. 먼저 먹메김을 위한 준비를 실시한다(Node 1). 이후 먹메김을 실시(Node 2)하며, 형틀목공(Node 3)이 투입된다. 먹메김이 끝나면 바닥 수평목을 설치(Node 5)하며, 형틀목공(Node 6)이 투입된다. 이후 단계는 벽체, 기둥 시공을 위한 자재 반입하는 단계로서, 철근 반입(Node 8) 및 거푸집자재 반입(Node 9)을 실시하며, 각각 철근공(Node 10), 형틀목공(Node 11)이 투입된다. 특히 본 연구는 지상 5층 슬래브 시공을 대상으로 하므로 자재 양중을 위한 크레인(Node 12) 사용을 추가하였다. 자재 반입 이후에 벽체, 기둥 철근 배근(Node 14)을 실시하며, 철근공(Node 15)이 투입된다. 철근 배근 완료 후 벽체, 기둥 거푸집설치(Node 17) 및 보 거푸집설치(Node 19)를 실시하며, 형틀목공(Node 20)과 크레인(Node 12)이 투입된다. 1부터 20 Node에 걸쳐 '슬래브 시공 이전 공통과정'이 완성된다.

두 번째 과정인 '재래식 슬래브 시공과정'은 동바리를 설치하고 슬래브를 시공하는 과정이다. 먼저 장선, 멍에, 강관동바리를 양중(Node 22)하며, 크레인(Node 12)이 투입된다. 이후 장선, 멍에, 강관동바리를 설치(Node 24)하며, 형틀목공(Node 20)이 투입된다. 동바리 설치 후 슬래브 거푸집을 설치하는 단계로서, 먼저 슬래브 거푸집을 양중(Node 26)하며, 크레인(Node 12)이 투입된다. 이후 슬래브 거푸집을 설치(Node 28)하며, 형틀목공(Node 20)이 투입된다. 이후 슬래브, 보 철근 배근을 위한 철근 양중(Node 30)을 실시하며, 철근공(Node 31)과 크레인(Node 12)이 투입된다. 양중한 철근으로 보 철근 배근을 실시(Node 32)하며, 철근공(Node 33)이 투입된다. 또한 슬래브 철근 배근을 실시(Node 34)하며, 철근공(Node 35)이 투입된다. 22부터 35 Node에 걸쳐 '재래식 슬래브 시공과정'이 완성된다.

세 번째 과정인 '슬래브 시공 이후 공통과정'은 콘크리트 타설 및 후속 자재

정리와 운반에 대한 과정이다. 해당 과정은 반복 작업이 아닌 일회성 작업이므로 앞선 슬래브 시공과정(Node 1~35)이 16회 완료된 후 시작된다. 따라서 일정 자원 투입까지 대기 기능의 CONSOLIDATE를 이용하여 표현하였다. CONSOLIDATE(Node 36)에 자원 값 16을 적용하였으며, 이것은 슬래브 거푸집 시공 작업이 16회 반복되기 전까지 작업을 수행하지 않고 대기하는 것을 의미한다. 슬래브 거푸집 시공 작업의 16회 반복이 끝나면 해당 층 전체에 대한 타설 및 후 작업(Node 38)이 1회 이루어지며, 형틀목공을 포함한 기타인부(Node 39)가 투입된다. 모든 Node를 거쳐 COUNTER(Node 40)에 도달하면 시뮬레이션 사이클이 종료되어 횟수가 체크되며, 슬래브 공사 시뮬레이션이 종료된다.



[그림 5.13] 기존 재래식 슬래브 공법 시뮬레이션 모델

dCollection @ chosun

5.5.4 생산성 분석 및 비교

개발된 시뮬레이션 모델의 수행을 위해, 웹사이클론을 활용하였으며, 이를 위해 [그림 5.12], [그림 5.13]의 모델에 대한 논리적 코드(logical code)를 작성하였다. 시뮬레이션 조건은 실제 광주가정법원 5층 시공 작업프로세스 및 투입자원을 기반으로 한 슬래브 거푸집 시공의 16회 반복 작업으로 가정하였다.

시뮬레이션 수행 결과, SHCC 슬래브 공법은 16사이클 동안 55.9시간, 기존 재래식 슬래브 공법은 185.4시간이 소요되었으며, 생산성은 SHCC 슬래브 공법은 0.286353 cycle/hr, 기존 재래식 슬래브 공법은 0.086582 cycle/hr의 결과가 도출됐다. 다음의 [그림 5.14]는 시뮬레이션 결과 그래프이다.

[그림 5.14] 슬래브 공법별 생산성 비교

생산성 분석 결과 SHCC 슬래브 공법이 기존 재래식 슬래브 공법에 비해 총 작업시간이 129.5 시간 빠르며, 약 3.3배의 더 나은 생산성을 나타냈다(<표 5.16> 참조). 작업시간의 차이는 공기단축을 의미하며, SHCC 슬래브 공법이 기존 재래식 슬래브 공법에 비해 129.5시간(법정근로시간을 반영한 경우 16.1875일(=약 16일))의 공기단축이 가능함을 의미한다. 특히 슬래브 시공 이후 과정(타설, 양생기간,

자재정리 및 운반)에서 SHCC 슬래브 공법은 동바리 사용이 필요치 않으므로 기둥, 벽 거푸집을 4일의 양생기간 후 해체가 가능하며, 이는 재래식 공법의 양생기간(13일)에 비해 9일 빠르고, 후속공정을 9일 앞서 진행할 수 있는 이점이 있다.

<표 5.16> 생산성 및 사이클 시간

-	시뮬레이션 시간	시뮬레이션 횟수	생산성 (/단위시간)	평균 사이클 시간(h)	총 공사일수 (day)*)
SHCC 슬래브(A)	55.9	16	0.286353	3.494	6.9875
기존 재래식 슬래브(B)	185.4	16	0.086282	11.588	23.175
차이 값(B-A)	129.5	-	-	8.094	16.1875

*) 법정근로시간 1일 = 8시간을 기준으로 하며, 타설 및 후작업을 반영하지 않은 공사일수를 의미함

5.5.5 생산성 분석 결론

건설시뮬레이션을 이용하여 두 슬래브 공법간이 생산성을 비교 분석함으로써 신기술인 SHCC 슬래브 공법의 현장 적용성에 대하여 검토하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다(<표 5.17> ~ <표 5.18> 참조).

(1) 공법별 프로세스 정리 : 두 공법의 생산성 비교를 위한 시뮬레이션을 위해 공법별 프로세스를 정리하였다. 두 공법은 공통적으로 먹메김으로 시작하여 벽체, 기둥, 보, 슬래브 순서로 시공이 진행되었고 타설 및 후작업의 형태를 가졌다. 주요한 차이점은 SHCC 슬래브의 경우 미리 제작된 슬래브 판을 양중하여 설치하였고 타설 이후 작업이 없었으나, 기존 재래식 공법은 동바리를 설치하고 거푸집을 설치하는 형태로 슬래브 시공이 이루어졌으며 타설 이후 작업이 존재했다.

(2) 데이터 수집 및 시뮬레이션 범위 결정 : 두 공법의 작업 수행 실제 사례(광주가정법원)를 통해 데이터를 획득하였다. 특히 두 공법 프로세스는 슬래브 거푸집 시공부분에서 차이가 있으나 그 외 부분은 동일한 프로세스를 가지므로 슬래브를 제외한 부분은 동일한 데이터를 사용하였다. 한편 슬래브 시공 중 철근 배근 및 거푸집 조립의 과정은 반복적인 순환 작업의 형태를 이루고 있으나, 콘크리트 타설 및 양생의 경우 모든 거푸집 시공이 완료된 상태에서 1회 실시한다. 따라서 슬래브 거푸집 시공 전 단계는 반복성 작업으로, 타설 및 후작업은 1회성 작업으로 시뮬레이션 수행범위를 정하였다.

작업데이터는 SHCC 슬래브 공법의 경우 작업 조 작업이 198시간, 콘크리트 양생기간 13일이 소요되는 데이터를 얻었다. 기존 재래식 슬래브 공법의 경우 작업 조 작업이 271시간, 콘크리트 양생기간 13일이 소요되는 데이터를 얻었다.

(3) 시뮬레이션 모델 생성 : 두 공법의 작업프로세스 및 작업데이터를 기반으로 사이클론 모델을 생성하였다. 모델은 동일한 i) 슬래브 시공 이전 공통과정, ii) 슬래브 시공과정, iii) 슬래브 시공 이후 공통과정으로 구분하여 모델링하였으며, 두 공법의 차이는 ii) 슬래브 시공과정에서 이루어졌다. SHCC 슬래브 공법 모델은 총 35개의 Node를, 기존 재래식 슬래브 공법 모델은 총 40개의 Node에 걸쳐 모델

링을 실시하였다.

(4) 생산성 분석 및 비교 : 시뮬레이션 수행 결과 SHCC 슬래브 공법은 55.9시간, 기존 재래식 슬래브 공법은 185.4시간이 소요되었으며, 생산성은 각각 0.286353 cycle/hr, 0.086582 cycle/hr로 도출되었다. 두 공법의 분석결과를 비교하면, 공기절감 측면에서 SHCC 슬래브 공법이 129.5시간 공기단축이 가능하며 법정근로시간을 반영하면 약 16일의 공기단축이 가능하다. 또한 생산성 측면에서 SHCC 슬래브 공법이 약 3.3배의 더 나은 생산성을 나타냈다.

<표 5.17> 슬래브 공법별 공기 및 단가 비교(계속)

-	기존 재래식 합판 슬래브 공법(A)	SHCC 슬래브 공법(B)	공법별 비교(A-B)
순 작업일수 (day)	- 먹메김 : 1일 - 바닥수평목 설치 : 1일 - 철근반입 및 양중(전체 41톤) : 0.5일 - 철근 배근(전체 41톤) : 8일 - 동바리 설치 : 2일 - 거푸집자재반입 : 0.4일 - 거푸집 설치 : 13일 - 콘크리트 타설 : 1일 - 콘크리트 양생기간(전체) : 13일 - 해체 : 2일 - 자재정리 및 운반 : 5일	- 먹메김 : 1일 - 바닥수평목 설치 : 1일 - 철근반입 및 양중(전체 34.6톤) : 0.5일 - 철근 배근(전체 34.6톤) : 6일 - 동바리 설치 : 0일 - 거푸집자재반입 : 0.4일 - 거푸집 설치 : 6일 - 콘크리트 타설 : 0.9일 - 콘크리트 양생기간(전체) : 13일 - 해체 : 3일 - 자재정리 및 운반 : 3일	- 철근 배근 : 2일 - 동바리 설치 : 2일 - 거푸집 설치 : 7일 - 콘크리트 타설 : 0.1일 - 해체 : -1일 - 자재정리 및 운반 : 2일
(소계)	46.9일	34.8일	12.1일
시뮬레이션 작업일수 (day)	약 43일 (43.175일)	약 26일 (25.9875일)	약 17일 (17.1875일)

dCollection @ chosun

<표 5.18> 슬래브 공법별 공기 및 단가 비교

순 작업인원(명)	- 먹메김 : 3명 - 바닥수평목 설치 : 9명 - 철근반입 및 양중(전체 41톤) : 10명 - 철근 배근(전체 41톤) : 73명 - 동바리 설치 : 30명 - 거푸집자재반입 : 4명 - 거푸집 설치 : 180명 - 콘크리트 타설 : 8명 - 해체 : 16명 - 자재정리 및 운반 : 30명	- 먹메김 : 3명 - 바닥수평목 설치 : 9명 - 철근반입 및 양중(전체 34.6톤) : 10명 - 철근 배근(전체 34.6톤) : 61명 - 동바리 설치 : 0명 - 거푸집자재반입 : 4명 - 거푸집 설치 : 90명 - 콘크리트 타설 : 8명 - 해체 : 22명 - 자재정리 및 운반 : 18명	- 철근 배근 : 12명 - 동바리 설치 : 30명 - 거푸집 설치 : 90명 - 해체 : -6명 - 자재정리 및 운반 : 12명
(소계)	363명	225명	138명
시뮬레이션 작업인원(명)	120명	95명	25명
장비사용일수**)	7일	8일	-1일
재료단가 (㎡당)***)	- 강관동바리 : 23,400원 - 합판거푸집 : 9,158원 - 레미콘 : 13,000원 (0.2m 두께 기준) - 철근 : 34,000원(25.5톤 기준)	- 약 48,000원 (공장제작 적용 전 기준)	-
(소계)	79,558원	약 48,000원	약 31,558원

*) 광주 가정법원 청사 신축 공사 현장 분석에 한함, 층고 4.5m, 면적 562.5㎡ 기준.
**) 크레인과 펌프카 사용 일수를 합한 것임.
***) 슬래브 시공 단가만을 다룬 것이며, 인건비 항목은 제외한 단가임.

dCollection @ chosun

6. 결 론

SHCC 및 RC 복합슬래브의 구조 및 시공특성 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 하프프리캐스트 SHCC 적용 RC 복합바닥슬래브의 구조실험을 통해 SHCC 실험체가 일반 RC 슬래브실험체에 비해 사용성 하중에서의 균열제어 효과가 우수하다고 판단된다.
   - 다중미세균열 유발에 의한 국부균열 및 처짐 제어 효과가 우수하다.
   - 극한하중에 대한 내력효과 또한 높게 나타나 슬래브의 휨 내력이 크게 개선되었다.

2) 고연성 시멘트복합체 활용 복합슬래브를 현장에 적용하여 현장 후타설 콘크리트와 함께 무지주 및 무거푸집 또는 하프프리캐스트 공법으로 슬래브 공사의 공기절감과 안전성을 확보하였다. 또한 시공지침과 설계지침의 작성을 통해서 실용화공법으로의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

3) 생산성 분석 및 비교를 하여 기존재래식 공법과 SHCC 및 RC 복합슬래브 두 공법의 분석결과를 비교하면, 공기절감 측면에서 SHCC 및 RC 복합슬래브 공법이 129.5시간 공기단축이 가능하며 법정근로시간을 반영하면 약 16일의 공기단축이 가능하다. 또한 생산성 측면에서 SHCC 슬래브 공법이 약 3.3배의 더 나은 생산성을 나타냈다.

4) 추후 SHCC 및 RC 복합슬래브의 장스팬화 구조상세 개발에 관한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 조창근, 김윤용, 서정환, 이승중, 압출성형 ECC 패널 RC 복합 슬래브의 해석 모델, 12(1), pp. 55-58, 2012
2. 조창근, 한병찬 등, 압출성형 ECC 패널을 이용하여 제작된 복합바닥슬래브의 휨 거동, 한국콘크리트학회 논문집, 22(5), pp. 695-702, 2010
3. 조창근, 권민호, Nonlinear Failure Prediction of Concrete Composite Columns by a Mixed Finite Element Formulation, Engineering Failure Analysis, 18, Engineering failure analysis, pp. 1723-1734, 2011
4. Cho, C. G, Kwon, M., and Spacone, E., "Analytical Model of Concrete-Filled Fiber-Reinforced Polymer Tudes based on Multiaxial Constitutive Laws," ASCE Journal of Structural Engineering, 131(9), pp.1426~1433, 2005
5. 조창근, 김윤용, Luciano Feoc, David Hui, Cyclic Responses of Reinforced Concrete Composite Columns Strengthened in the Plastic Hinge Region by HPFRC Mortar, Composite Structures, 94, pp. 2246-2253, 2012
6. 조창근, "FRP 콘크리트 복합구조 부재시스템의 휨 및 전단거동예측," 대한건축학회 구조계 논문집, 20(8), pp.35~42, 2004
7. 이방연, 한병찬, 조창근, 권영진, 김윤용, 압출성형 ECC 패널의 섬유분포 특성과 휨 성능, 콘크리트학회논문집, 21(5), pp.573-580, 2009
8. Cho, C. G., Ha, G. J., and Kim, Y. Y., "Nonlinear Model of Reinforced Concrete Frames Retrofitted by In-Filled HPFRCC Walls," Structural Engineering and Mechanics, Vol. 230, No. 2, pp. 211~223, 2008
9. 조창근, 하기주 등, 철근콘크리트 보의 휨 및 전단파괴 예측의 3차원 유한요소 모델, 한국구조물진단학회 논문집, 14(6), pp. 109-116, 2010
10. 조창근, 김화중 등, 점소성 유동 입자법에 의한 굳지않은 콘크리트의 유동해석 모델, 한국콘크리트학회 논문집, 20(3), pp. 317-322, 2008

11. 김호연, “고인성 시멘트복합체 적용 철근콘크리트 기둥을 고려한 골조 구조물의 내진성능평가”, 조선대학교 석사학휘논문, 2014.2
12. 한성진, 고인성 시멘트복합체 활용 콘크리트 내진기둥공법, 조선대학교 석사학위논문, 2013.2
13. 박창환, 비정질 마이크로 강섬유 복합체 적용 콘크리트 보의 거동, 조선대학교 석사학위논문, 2013.2
14. 김윤용, 김정수, 김광련 (2004), 고인성 섬유 복합재료 ECC의 특성과 적용 - On Engineered Cementitious Composites (ECC), A Review of the Material and Its Applications, 한국콘크리트학회지, Vol.16 No.5, pp.64-72.
15. 김윤용, 김정수, 김광련 (2004), 고인성 섬유 복합재료 ECC의 특성과 적용 - On Engineered Cementitious Composites (ECC), A Review of the Material and Its Applications, 한국콘크리트학회지, Vol.16 No.5, pp.64-72.
16. 김윤용 (2007), 시멘트계 모르타르 매트릭스를 활용한 섬유복합재료 ECC (Engineered Cementitious Composite)의 설계와 시공 성능, 한국복합재료학회지, Vol.20 No.2, pp.21-26.
17. 김윤용, 하기주, 신종학 (2007), 마이크로역학과 안정상태 균열이론에 의한 ECC (Engineered Cementitious Composite) 매트릭스 배합의 설계, 대한건축학회논문집 - 구조계, Vol.23 No.5, pp.11-19.
18. 김영진 (2004), 혼화재료를 혼입한 압출성형 경량 콘크리트 패널에 관한 실험적 연구, 단국대학교 석사학위논문.
19. 공민호 (2003), 혼화재를 사용한 경량콘크리트 2차 제품의 배합에 관한 실험적 연구, 단국대학교 석사학위논문.
20. 이방연 (2009), 이미지 프로세싱 기반 섬유 분포 특성 평가 및 섬유 분포 특성이 시멘트 복합체의 인장거동에 미치는 영향, KAIST 박사학위논문.
21. 김광윤 (2009), ECC를 활용한 고강도콘크리트 기둥의 폭렬 저감 방안에 대한 실험적 연구, 한양대학교 석사학위논문.
22. 김재환. 김영덕, 김갑수, 조봉석, 장종호, 김무한 (2003), PVA-ECC를 활용한 Half PC 복합체의 역학적 특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표대

회 논문집 - 계획계/구조계, Vol.23 No.2, pp.419-422.
23. 강철호, 환경친화형 고인성 시멘트 복합체의 역학적 특성 및 환경유해성에 관한 연구, 충남대학교 박사학위논문, 2010
24. 김윤용, 이방연, 김정수, 김진근 (2007), 이미지 프로세싱 기법을 이용한 섬유복합재료의 정량적인 섬유분산성 평가, 비파괴검사학회지, Vol.27, No.2, pp.148-156.
25. 김정수, 이방연, 김진근, 김윤용, (2009), "수정된 섬유 가교 특성을 고려한 ECC의 인장변형특성," Vol. 21, No. 5, pp. 541-548, October
26. 김윤용, 이방연, 김진근 (2008), PVA-ECC 단면 이미지의 섬유 분류 및 검출 기법, 한국콘크리트학회 논문집, Vol.20, No.4, pp. 513-522.
27. 오준호 (2002), 재해사례 분석을 통한 거푸집공사 안전관리 방안, 부경대학교 석사학위논문
28. 송창엽, 이환철, 박소현, 조규만, 현창택 (2010), 알루미늄 폼을 이용한 골조공사의 생산성 분석에 관한 연구, 한국건설관리학회, 26호, 4권 113-121쪽
29. Halpin, D. W. and Riggs, L. S. (1992), Planning and analysis of construction operations., Wiley Interscience. New York.
30. 박동근 (2008), 건설 시뮬레이션을 활용한 커튼월 적층공법의 생산성 분석방안, 인하대학교 석사학위논문
31. Web-Cyclone, http://cyclone.ecn.purdue.edu:8080/WebCYCLONE/Cyclone.jsp, (2014.04.12.일 접속)
32. 강석길 (2010), 철골세우기 공사의 작업조 구성에 따른 생산성 분석에 관한 연구, 서울시립대학교 석사학위논문
33. 방진욱, 김정수, 이방연, 장영일, 김윤용, 하이브리드 섬유로 보강된 고강도 경량 시멘트 복합체의 개발, 한국복합재료학회 논문집, 23(4), pp. 35-43, 2010
34. 방진욱,(2010) 마이크로역학을 이용한 Hybrid 섬유보강 경량 시멘트 복합체의 개발, 충남대학교 석사학위논문.
35. 민창식, 철근콘크리트공학, 구미서관, 2009.

36. KCI, 콘크리트구조설계기준(2012), 국토해양부
37. 김우, 김진근, 오병환, 정란, 최완철, 콘크리트구조설계, 동화기술, 2009.
38. KS F 2408 (2000), 콘크리트의 휨 강도 시험 방법.
39. KS F 2405 (2002), 콘크리트 압축강도 시험 방법.
40. 참고자료, 한국특허정보원
41. Wang, Shuxin (2003), Micromechanics based matrix design for engineered cementitious composites, Thesis (Ph.D.) University of Michigan.
42. Wu, Cynthia (2001), Micromechanical tailoring of PVA-ECC for structural applications, Thesis (Ph.D.) University of Michigan.
43. Y. Shao and S.P. Shah, (1997) Mechanical Properties of PVA Fiber Reinforced Cement Composites Fabricated by Extrusion Processing, ACI Material Journal, Vol.94 No.6, pp.555-564.
44. H. Stang and V.C. Li, (1999) Extrusion of ECC-Material, in Proc. of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 3(HPFRCC 3), Ed. Reinhardt and A. Naaman, Chapman & Hull, pp.203-212
45. Lin, Z. and Li, V.C. (1997), Crack Bridging in Fiber Reinforced Cementitious Composites with Slip-hardening Interfaces, J. Mechanics and Physics of Solids, Vol.45 No.5, pp.763-787.
46. Lin, Z., Kanda, T., and Li, V.C. (1999), On interface property characterization and performance of fiber reinforced cementitious composites, Concrete Science and Engineering (RILEM), Vol.1, pp.173-184.
47. Akkaya, Y., Shah, S.P., and Ankenman, B. (2001), Effect of Fiber Dispersion on Multiple Cracking of Cement Composites, J. Eng. Mat. Civil Eng., Vol.127, No.4, pp.311-316.
48. Ozyurt, N., Woo, L.Y., Mason, T.O., and Shah, S.P. (2006), Monitoring Fiber Dispersion in Fiber-Reinforced Cementitious Materials: Comparison

of AC-Impedance Spectroscopy and Image Analysis, ACI Mater. J., Vol.103, No.5, pp.340-347.

49. Torigoe, S., Horikoshi, T., and Ogawa, A. (2003), Study on evaluation method for PVA fiber distribution in engineered cementitious composite, J. Adv. Concr. Technol., Vol.1, No.3, pp.265-268.
50. Kobayashi, K. (1981), Fiber reinforced concrete, Tokyo: Ohm-sha.
51. Li, V.C., Shuxin, Wang., Cynthia Wu (2001), Tensile Strain-Hardening Behavior of PolyvinylAlcohol Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC), ACI Material Journal, Vol. 98, No.6, pp. 483-492.
52. Lin, Z., Kanda, T., Li, V.C. (1999), On interface property characterization and performance of fiber-reinforced cementitious composites Concrete Science and Engineering, 1, pp. 173-184.
53. Yoshioka, K., Sakai, E., Daimon, M., and Kitahara, A. (1997), role of steric Hindrance in the Performance of concentrated Cementitious Suspensions for concrete, Journal of the American Ceramic Society, Vol.80 No.10, pp.2667-2671.
54. Li,V.C.,From Micromechanics to Structural Engineering - The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications ,Journal of Structural Mechanics and Earthquake, Vol.1-24,No.417, 1993
55. Naaman, A. F. and Reinhardt, H. W. “Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites,” HPFRCC, High performance Fiber einforced Cement Composites 2 (HPFRCC2). PP.1-3, 1996
56. Li, V. C. and Leung, C. K. Y., (1992), “teady State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites,”ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 188, No. 11, pp. 2246-2264.
57. Marshall, D.B., Cox, B.N., A J-integral method for calculating steady - statematrix cracking stressedin composites, Mechanics of Materials,

Vol.7, No.2, pp.127-133, 1988

58. Li, V. C., Hashida, T., Engineering ductile fracture in brittle matrix composites, J. of Materials Science Letters, 12, pp. 898~901, 1993
59. Li,V.C., Damage tolerance of engineered cementitious composites, in: Advances in Fracture Research, Proc. 9th ICF Conference on Fracture, Sydney, Austra, 1997
60. Cho, C.G., Kwon, M., Development and Modeling of Frictional Wall Damper and Its Application in R/C Frame Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 33, No. 7, pp.821-838, 2004
61. Cho, C.G., Kwon, M., Prediction of Nonlinear Bending Behavior for FRP Concrete Beams based on Multi-axial Constitutive Laws. Engineering Structures, Vol. 30, pp.2311-2320, 2008
62. Xia, M., Hamada, H., Maekawa, Z. (1995), Flexural Stiffness of Injection Molded Glass Fiber Reinforced Thermoplastics, International Polymer Processing, Vol.10, No.1, pp.74-81.

부록 1. SHCC 복합바닥구조시스템 설계지침 및 시공지침

1) Half PCa SHCC 및 RC 복합바닥슬래브 공법 제안

일반 콘크리트와 고연성시멘트복합체를 현장에서 각각 타설하게 될 경우 시공절차상 복잡하고 시공효율이 저하되는 문제점을 가지고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 고연성시멘트복합체(SHCC, Strain Hardening Cementitous Composites 변형 경화형 시멘트복합체)의 바닥슬래브 적용 부분을 프리캐스트 화하여 고연성시멘트복합체를 효율적으로 적용하는 공법을 제안하고자 한다. 프리캐스트 고연성시멘트복합체로 이루어진 프리캐스트 슬래브를 바닥구조에 적용하고, 프리캐스트 슬래브에 일반 콘크리트를 후타설하여 이음시공 함으로 효율적인 현장 적용이 이루어지도록 하였다.

SHCC 하프프리캐스트 철근콘크리트 복합슬래브는 일반콘크리트와의 부착성을 증가시키기 위해 상하부 주철근을 ∅5의 철선으로 트러스 형태를 가지게 구부려 LATTICE재로 상·하부 용접하여 제작, 결합부에서 미끌려서 부착성이 약해지는 현상을 방지한다. SHCC(Strain Hardening Cementitous Composites 변형경화형 시멘트 복합체)를 프리캐스트 하단에 적용해 일체화한 거푸집과 동바리가 필요 없는 슬래브 시공 공법이다. 프리캐스트 바닥판 보 거푸집 위에 설치되며, 설치 후에 부재 간에 철근이음 및 정착을 통해 일체성을 높인다. 설치 후 탑핑 콘크리트가 타설되며, 이때 타설되는 콘크리트의 하중과 작업하중, 충격하중 등에 프리캐스트 부재의 처짐을 최소화하기 위해 바닥판 제조 전에 상하부 철근 및 LATTICE 철선의 직경을 정하고 SHCC가 타설되는 두께를 결정하여야 한다.

2) 하프프리캐스트 SHCC 슬래브 제작단계

가) 재료

고연성시멘트복합체 적용 철근콘크리트 복합바닥슬래브를 설계할 때 사용하는 재료의 품질과 시험은 이 장에서의 지침과 콘크리트구조설계기준 및 콘크리트 표준시방서에 따라야 한다.

1) 이 지침에 따라 적용되는 콘크리트, 철근 및 강재 등과 같이 사용되는 구조재료는 건설교통부 제정 철근 콘크리트 구조설계기준(KCI-07)에서 정하는 재료특성, 역학특성 및 시공특성을 만족해야만 한다.

2) 프리캐스트로 제작되는 고연성시멘트복합체는 직접인장실험에 의해 다중미세균열을 발휘할 뿐만 아니라 인장균열강도 도달 이후에도 1.0 ~ 2.0% 이상의 고연성 인장변형률 거동을 발휘하도록 권장한다.

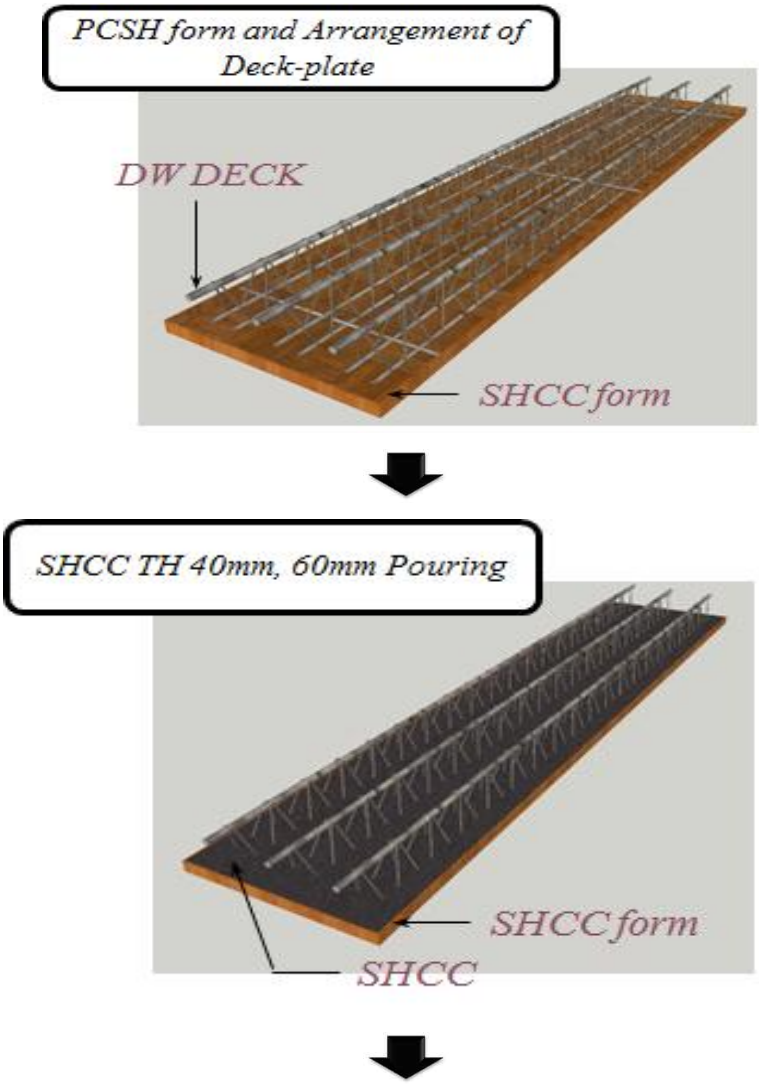
3) 프리캐스트로 제작되는 고연성시멘트복합체는 배합, 제작과정 및 운송과 거치, 그리고 완공된 이후에도 요구되는 역학적특성, 내구성 및 품질확보가 충분히 유지되어야만 한다.

4) 프리캐스트로 제작되는 고연성시멘트복합체는 배합과정에서도 섬유와 시멘트모르터 간에 섬유볼현상과 같은 뭉침현상이 일어나지 않고 충분히 섬유가 분산되어 타설되도록 배합하여야 하고, 양생 과정에서도 충분한 품질을 확보할 수 있도록 배합 및 제작 과정에서의 관리가 적절하게 이루어져야만 한다.

나) 하프프리캐스트 슬래브 제작과정

1) SHCC 하프프리캐스트 철근콘크리트 복합슬래브의 적용 순서

(1) SHCC 하프프리캐스트 바닥판 제조단계
(2) 건축물의 하부 기둥 및 보 거푸집 설치
(3) SHCC 하프프리캐스트 바닥판을 시공현장의 보 거푸집에 시공하는 단계
(4) SHCC 하프프리캐스트 바닥판의 상부가로철근 및 부재간 이음 철근 시공 단계
(6) SHCC 하프프리캐스트 바닥판에 탑핑 콘크리트 타설 및 양생 단계



[그림 1] 하프프리캐스트 SHCC슬래브 제작

① 하프프리캐스트 슬래브는 대략 장방향의 형태로 구성되고, 제조공장에서 미리 성형된 제품으로 하프프리캐스트 슬래브를 구성한다.

② 하프프리캐스트 슬래브는 현장에 적용한 뒤 중공은 슬래브와 슬래브 사이를 무수축 모르터를 사용하여 채우고, 프리캐스트 슬래브와 보와의 일체화를 시키기 위해 슬래브-보의 주철근 부분을 이음 철근을 설치하여 일체화를 시켜야한다.

③ 프리캐스트 슬래브와 후 타설 하게 되는 일반콘크리트와의 결합면에서의 부착성을 증가시키기 위한 방법으로 프리캐스트 슬래브의 주철근 상부와 하부를 ∅5의 철선으로 트러스 형태를 가지게 구부려 LATTICE재로 상・하부 용접하여 제작하므로써 결합부에서 미끌려서 부착성이 약해지는 현상을 방지한다.

2) SHCC를 이용한 하프프리캐스트 바닥판 제조

SHCC 하프프리캐스트 바닥판은 미리 제작된 래티스에 의해 결합된 상하부 철근에 SHCC를 스팬에 맞는 두께로 타설하여 직사각형 형태로 제조한다.
SHCC 하프프리캐스트 바닥판은 밑의 일부만 SHCC로 구성되어지고 나머지는 후타설 콘크리트를 타설하도록 구성된다.

< SHCC 하프프리캐스트 바닥판 제작 >

(a) SHCC 하프프리캐스트 바닥판 철근배근

(b) SHCC 하프프리캐스트 바닥판 타설

1. 하프프리캐스트 바닥판에 선 타설 되는 SHCC는 적용되는 스팬에 따라 두께는 달라 질수 있다.

2. 래티스 및 래티스에 의해 조립되어진 상하부 철근은 스팬에 따라 직경이 달라 질수 있다.

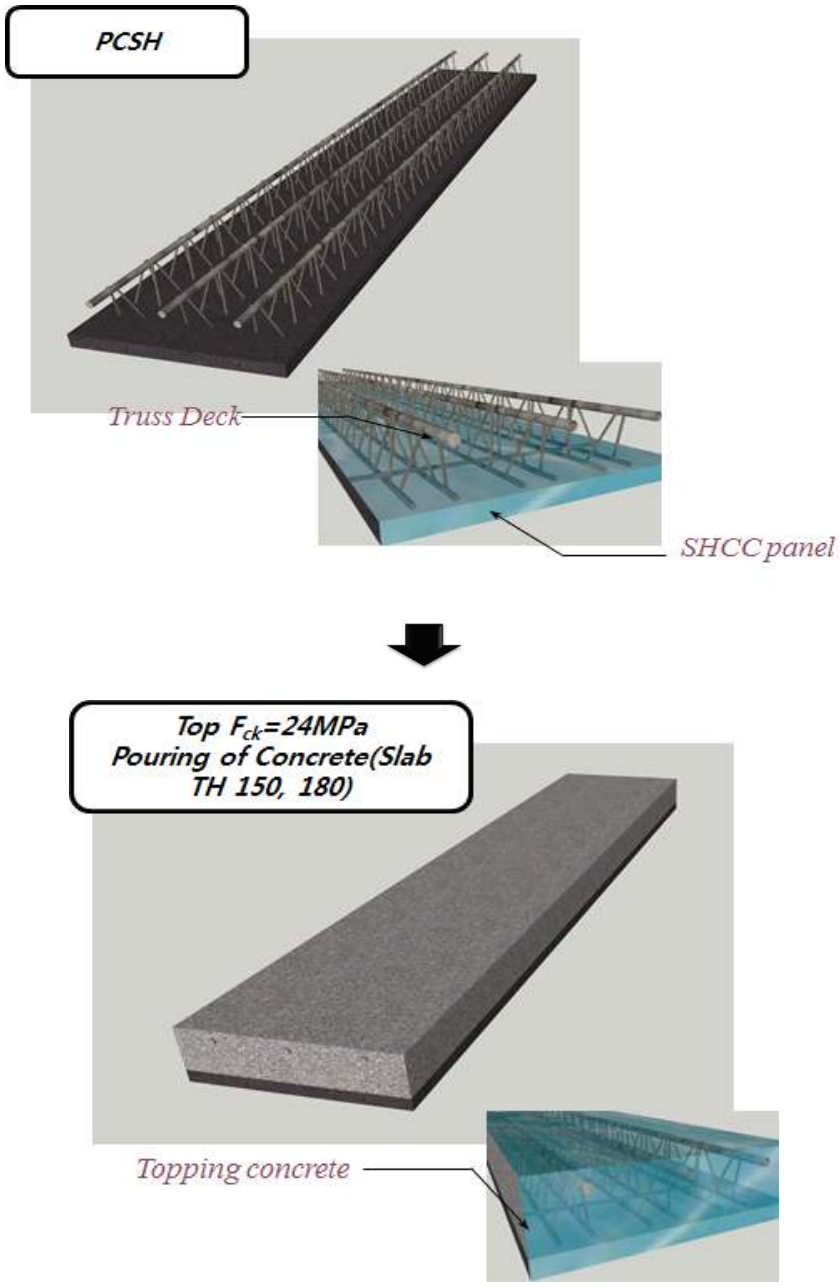
3. SHCC 마감면은 후타설 콘크리트와 부착력을 갖기 위하여 거친마감 처리한다.

4. 하부철근은 피복두께를 유지하고 바닥판이 일체화 되도록 SHCC가 하부철근보다 높게 타설된다.

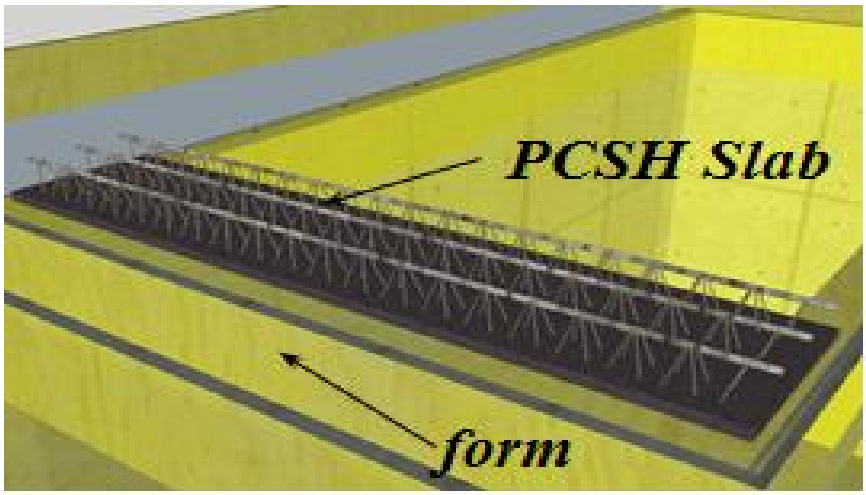
dCollection @ chosun

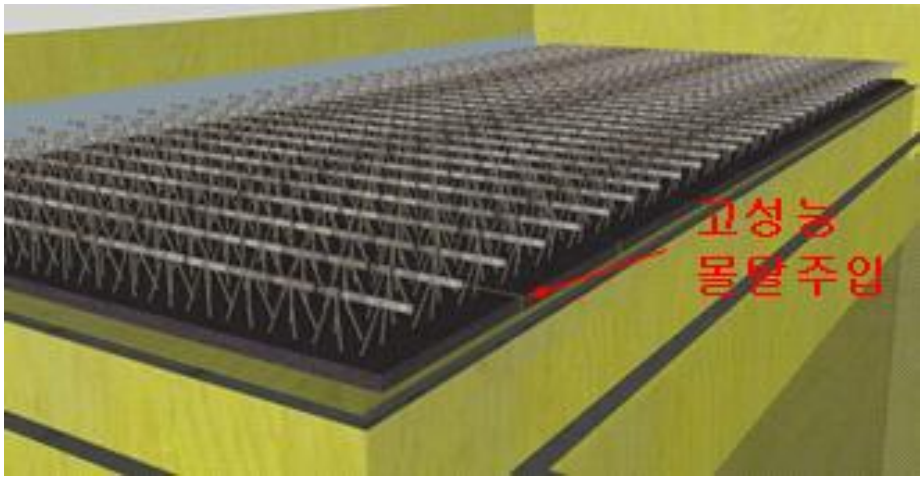
3) SHCC 하프프리캐스트 복합바닥구조 시공단계

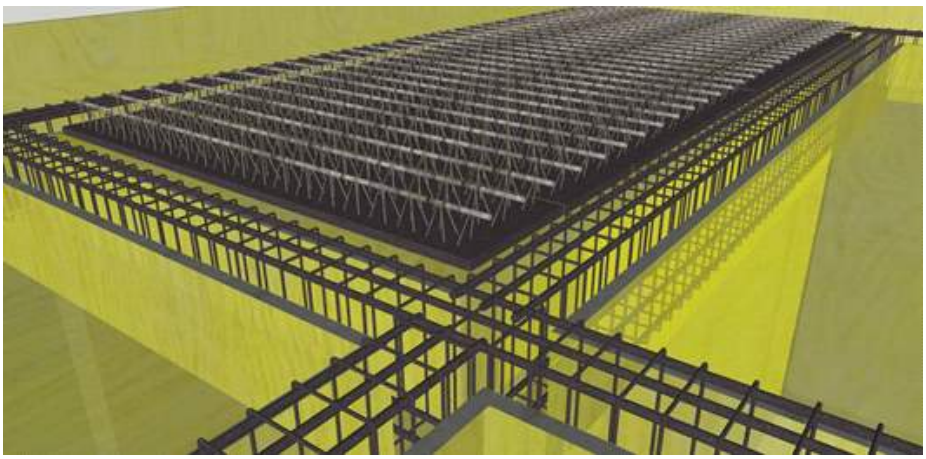
(1) SHCC 하프프리캐스트 복합바닥구조 시공단계 및 현장적용 과정

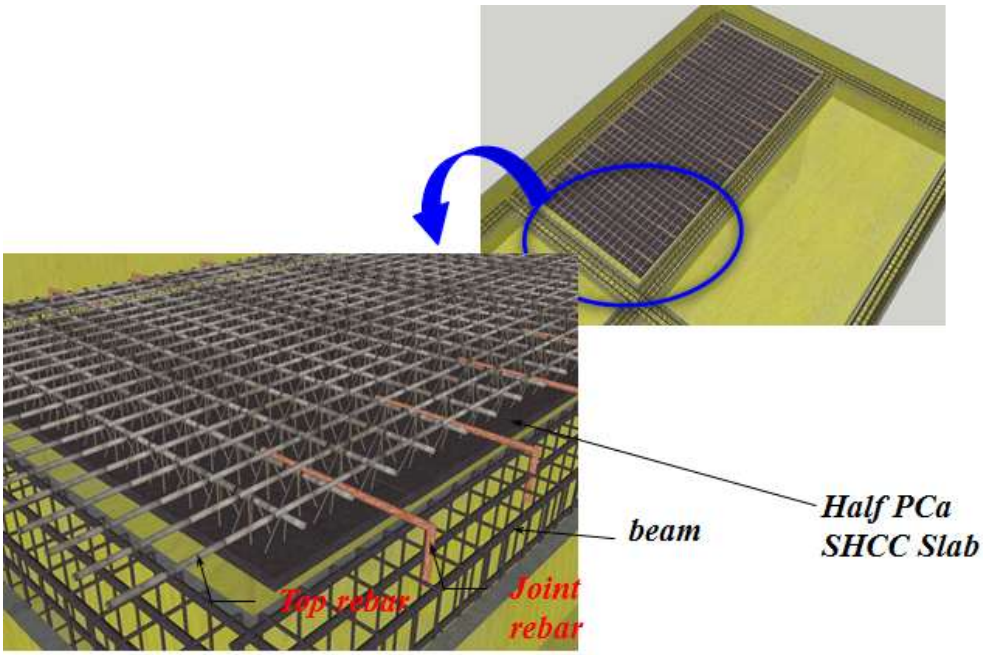


[그림 2] SHCC 및 RC 하프프리캐스트 복합바닥슬래브 제작단계


PCSH Slab
form


고성능
몰탈주입





[그림 3] SHCC 및 RC 하프프리캐스트 복합바닥슬래브 현장적용 단계

1. SHCC 하프프리캐스트 바닥판은 양중장비를 이용하여 시공할 위치로 이동한 후 바닥판을 보 거푸집위에 거치한다.

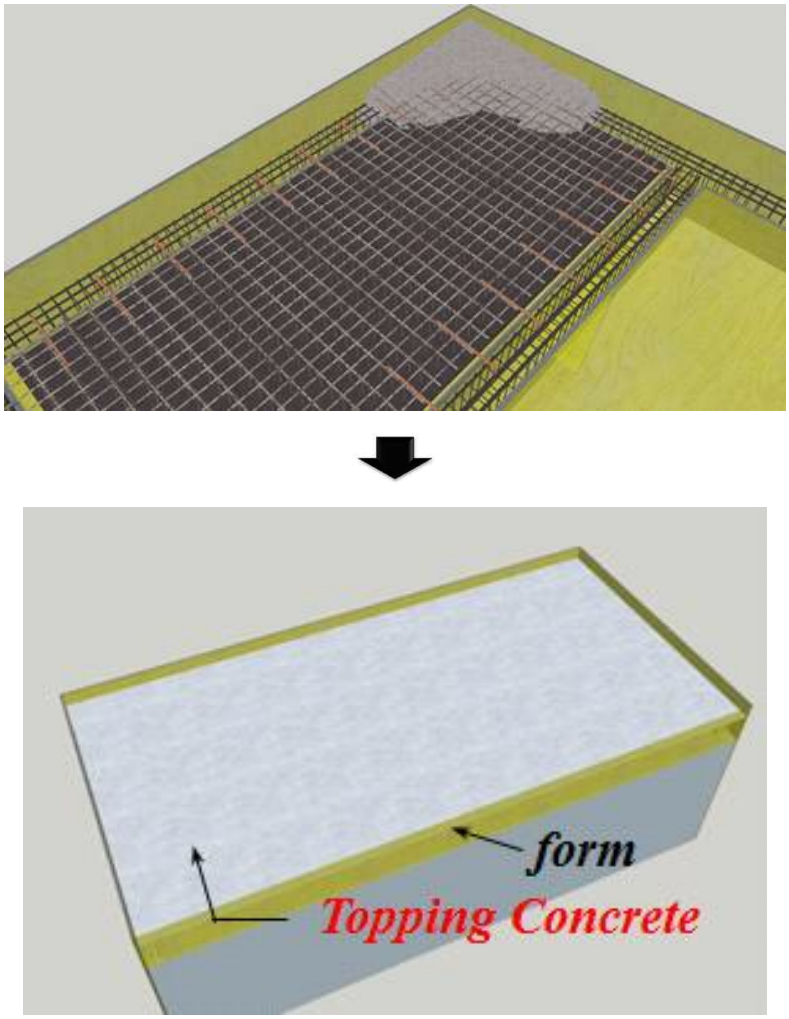
2. SHCC 하프프리캐스트 바닥판을 거치 할 때는 바닥판과 밀착시공 해야한다.

3. SHCC 하프프리캐스트 바닥판 이음부 처리 및 부재간의 철근 이음 및 정착을 하는 단계이다.

4. SHCC 하프프리캐스트 이음부는 탑핑콘크리트 타설 시에 누수가 염려되므로 적절한 재료를 사용하여 누수방지처리를 해야 한다.
   - 프리캐스트 슬래브를 인양하여 거푸집에 적재를 완료 한 후 프리캐스트 슬래브와 슬래브 사이의 공간을 고정시키기 위하여 유동성이 좋으며 성능이 뛰어난 고성능 무수축 모르터를 주입함으로 양생에 의한 수축으로 인해 프리캐스트 슬래브가 이동되는 현상을 방지하도록 한다. 슬래브의 적재 및 설치가 완료되면, 기둥과 보에 설계된 모든 철근을 배근한다.

5. SHCC 하프프리캐스트와 다른 부재간에 일체성을 부여하기 위해 충분한 이음 및 갈고리 정착이 필요하다.
   - 프리캐스트 공법을 사용할 경우 미리 제작된 하프프리캐스트 슬래브 부분과

보 부분과의 결응력의 약화로 인하여 프리캐스트 슬래브와 보 부분과의 경계면에서의 균열이 크게 발생할 수 있는 위험이 존재한다. 따라서 결집 응력을 높이고 위험성을 줄이기 위해 일정 길이 이상의 Joint Rebar를 프리캐스트 슬래브의 상부 주철근과 보의 주철근을 결합하여 바닥판을 제작하였다.



[그림 4] 프리캐스트 슬래브 상부의 일반콘크리트 후타설 과정

1. SHCC 하프프리캐스트 바닥판 위에 일반콘크리트 후 타설하는 단계이다.
2. SHCC 하프프리캐스트 바닥판이 설치된 위치에서 이탈되지 않도록 주의하고, 일반콘크리트 후 타설 시에 너무 많은 충격 및 작업하중이 부여되지 않도록 주의하여 타설하여야 한다.
3. 타설이 완료된 후 적당한 온도와 수분을 유지하여 양생하도록 한다.

[단계 1] SHCC 하프프리캐스트 슬래브 제작

(a) SHCC 재료배합-2

(b) SHCC 배합완료

(c) SHCC 타설-1

(d) SHCC 타설-2

(e) SHCC 타설-3

(f) SHCC panel 양생

[그림 5] SHCC 하프프리캐스트 슬래브 제작과정

[단계 2] SHCC 하프프리캐스트 슬래브 양중 및 현장적용

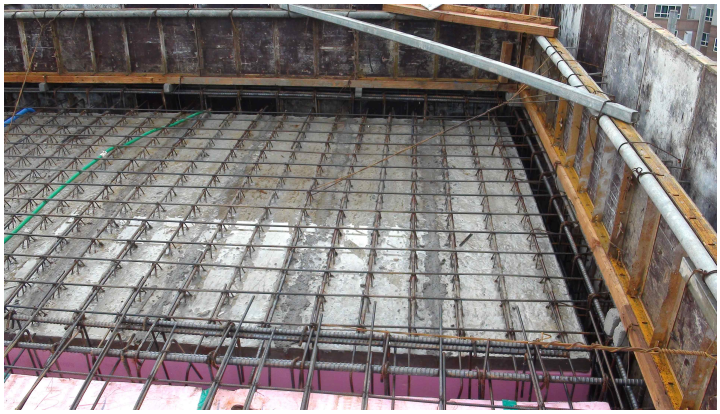
1. SHCC하프프리캐스트 슬래브 양중

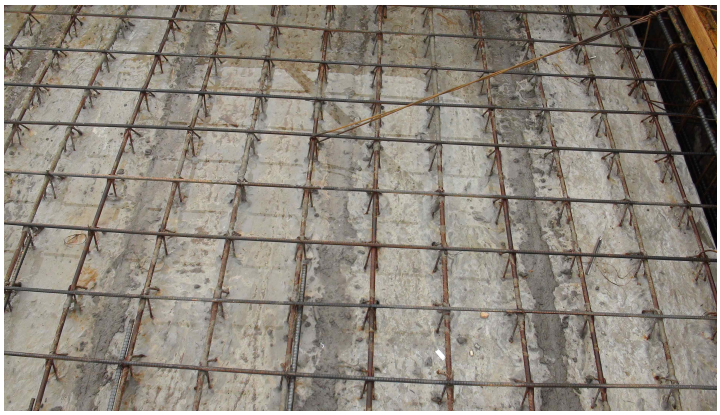
2. 보 거푸집에 시공

3. SHCC 하프프리캐스트 슬래브 시공완료

[그림 6] SHCC 하프프리캐스트 슬래브 현장적용

[단계 3] SHCC 하프프리캐스트 슬래브 이음부처리 및 철근 이음·정착





1. 프리캐스트 슬래브 이음부 누수처리 및 바닥판 상부 가로철근 이음

2. 프리캐스트 슬래브-보-일반슬래브 철근이음 및 정착

[그림 7] SHCC 하프프리캐스트 슬래브 이음부처리 및 철근이음·정착 상세

[단계 4] 상부 일반콘크리트(Topping Concrete) 타설

1. 상부 일반콘크리트 타설

2. 일반콘크리트 타설-2

dCollection @ chosun

3. 상부 콘크리트 타설 완료

4. 양생 완료

[그림 8] 상부 일반콘크리트(Topping Concrete) 타설

부록 2. 웹사이클론 데이터 코드

1) SHCC 슬래브 공법 데이터 코드

```
NAME SHCC SLAB PROCESS LENGTH 10000 CYCLE 16
NETWORK INPUT
1 QUE '먹메김 준비'
2 COM '먹메김' SET 2 PRE 1 3 FOL 3 4
3 QUE '형틀목공A'
4 QUE '자재반입 준비'
5 COM '바닥수평목 설치' SET 5 PRE 4 6 FOL 6 7
6 QUE '형틀목공B'
7 QUE '대기'
8 COM '철근 반입' SET 8 PRE 7 10 12 FOL 9 10
9 NOR '거푸집자재 반입' SET 9 FOL 11 12 13
10 QUE '철근공A'
11 QUE '형틀목공C'
12 QUE '크레인'
13 QUE '철근배근 준비A'
14 COM '벽체, 기둥 철근배근' SET 14 PRE 13 15 FOL 15 16
15 QUE '철근공B'
16 QUE '거푸집설치 준비'
17 COM '벽체, 기둥 거푸집설치' SET 17 PRE 16 20 FOL 18
18 QUE '대기'
19 COM '보 거푸집 설치' SET 19 PRE 12 18 FOL 12 20 21
20 QUE '형틀목공D'
21 QUE '슬래브설치 준비'
22 COM 'SHCC슬래브 양중 및 설치' SET 22 PRE 12 21 23 FOL 12 23 24
23 QUE '형틀목공E'
```

24 QUE '철근배근 준비B'

25 COM '슬래브, 보 철근 양중' SET 25 PRE 12 24 26 FOL 12 26 27

26 QUE '철근공C'

27 NOR '보 철근배근' SET 27 FOL 28 29

28 QUE '철근공D'

29 NOR '슬래브 철근배근' SET 29 FOL 30 31

30 QUE '철근공E'

31 FUN CON 16 'CON16' FOL 32

32 QUE '타설 및 후 작업 준비'

33 COM '타설 및 후 작업' SET 33 PRE 32 34 FOL 34 35

34 QUE '기타 인부'

35 FUN COU FOL 36 QUA 1

36 QUE '슬래브 공사 완료'

DURATION INPUT

SET 2 DET 0.5

SET 5 DET 0.5

SET 8 DET 0.0625

SET 9 DET 0.1875

SET 14 DET 1.0

SET 17 DET 2.0

SET 19 DET 1.0

SET 22 DET 1.5

SET 25 DET 0.1875

SET 27 DET 1.5

SET 29 DET 0.5

SET 33 DET 55.0

RESOURCE INPUT

16 '먹메김 준비' AT 1

1 '형틀목공A' AT 3

1 '형틀목공B' AT 6

1 '형틀목공C' AT 10

```
1 '철근공A' AT 11
1 '크레인' AT 12
1 '철근공B' AT 15
1 '형틀목공D' AT 20
1 '형틀목공E' AT 23
1 '철근공C' AT 26
1 '철근공D' AT 28
1 '철근공E' AT 30
1 '기타 인부' AT 34
END DATA
```

2) 기존 재래식 슬래브 공법 데이터 코드

```
NAME NORMAL SLAB PROCESS LENGTH 10000 CYCLE 16
NETWORK INPUT
1 QUE '먹메김 준비'
2 COM '먹메김' SET 2 PRE 1 3 FOL 3 4
3 QUE '형틀목공A'
4 QUE '자재반입 준비'
5 COM '바닥 수평목 설치' SET 5 PRE 4 6 FOL 6 7
6 QUE '형틀목공B'
7 QUE '대기'
8 COM '철근 반입' SET 8 PRE 7 10 12 FOL 9 10
9 NOR '거푸집자재 반입' SET 9 FOL 11 12 13
10 QUE '철근공A'
11 QUE '형틀목공C'
12 QUE '크레인'
13 QUE '철근배근 준비A'
14 COM '벽체, 기둥 철근배근' SET 14 PRE 13 15 FOL 15 16
15 QUE '철근공B'
16 QUE '거푸집설치 준비'
17 COM '벽체, 기둥 거푸집설치' SET 17 PRE 16 20 FOL 18
18 QUE '대기'
19 COM '보 거푸집 설치' SET 19 PRE 12 18 FOL 12 20 21
20 QUE '형틀목공D'
21 QUE '슬래브설치 준비'
22 COM '장선, 멍에, 동바리 양중' SET 22 PRE 12 21 FOL 12 23
23 QUE '대기'
24 COM '장선, 멍에, 동바리 설치' SET 24 PRE 20 23 FOL 20 25
25 QUE '거푸집설치 준비'
26 COM '슬래브거푸집 양중' SET 26 PRE 12 25 FOL 12 27
```

27 QUE '대기'

28 COM '슬래브거푸집 설치' SET 28 PRE 20 27 FOL 20 29

29 QUE '철근배근 준비B'

30 COM '슬래브, 보 철근 양중' SET 30 PRE 12 29 31 FOL 12 31 32

31 QUE '철근공C'

32 NOR '보 철근배근' SET 32 FOL 33 34

33 QUE '철근공D'

34 NOR '슬래브 철근배근' SET 34 FOL 35 36

35 QUE '철근공E'

36 FUN CON 16 'CON 16' FOL 37

37 QUE '타설 및 후작업 준비'

38 COM '타설 및 후작업' SET 38 PRE 37 39 FOL 39 40

39 QUE '기타 인부'

40 FUN COU FOL 41 QUA 1

41 QUE '슬래브 공사 완료'

DURATION INPUT

SET 2 DET 0.5

SET 5 DET 0.5

SET 8 DET 0.0625

SET 9 DET 0.1875

SET 14 DET 1.0

SET 17 DET 2.0

SET 19 DET 1.0

SET 22 DET 0.25

SET 24 DET 1.0

SET 26 DET 0.25

SET 28 DET 3.5

SET 30 DET 0.1875

SET 32 DET 1.5

SET 34 DET 1.5

SET 38 DET 64.0

```
RESOURCE INPUT
16 '먹메김 준비' AT 1
1 '형틀목공A' AT 3
1 '형틀목공B' AT 6
1 '형틀목공C' AT 10
1 '철근공A' AT 11
1 '크레인' AT 12
1 '철근공B' AT 15
1 '형틀목공D' AT 20
1 '철근공C' AT 31
1 '철근공D' AT 33
1 '철근공E' AT 35
1 '기타 인부' AT 39
END DATA
```

dCollection @ chosun

국문초록

국내의 건축기술이 나날이 발전 하면서, 보편적인 건설재료인 콘크리트의 생산기술 또한 발달하고 있다. 건축기술이 발전함에 따라 건축 구조물은 대형화 및 장지간화 되면서 보편적인 건설재료인 콘크리트의 구조재료에 대한 요구 성능이 높아지고 있다. 특히 콘크리트의 고성능화가 더욱 요구되고 있는 실정이다. 현재 많은 연구자들은 이러한 단점을 보완하고 구조물의 고성능화에 필요한 새로운 구조공법과 구조 재료를 개발하고 건설현장에 적용하기 위한 연구들이 많이 진행되고 있다.

건축물의 주요 구조 부재 재료로서 일반적으로 콘크리트가 주로 사용되고 있다. 그러나 구조재료로서 가장 많이 사용되고 있는 콘크리트의 경우 재료 자체의 취성, 폭열, 건조수축 문제 등 해결해야 할 문제점을 가지고 있으며, 압축강도에 비해 인장강도가 적어서 균열 발생으로 인한 취성파괴되는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 콘크리트의 성능을 개선시키기 위하여 시멘트 모르타르에 PVA 섬유를 혼입한 섬유보강 시멘트복합체를 활용하였다. 섬유보강 시멘트복합체는 일반 모르타르와는 다르게 고연성 능력과 균열이후의 변형경화형으로 거동하는 특징이 있으며, 실제로 고연성 시멘트 복합체(이하, SHCC)라고 부른다. SHCC는 다중미세균열 거동으로 인해 인장균열 강도 이후에도 높은 연성의 변형능력을 보여준다.

프리캐스트 콘크리트 공법은 현장 타설 콘크리트 공법에 비교하여 시공공정 개선, 높고 일정한 품질확보로 구조 및 시공적 측면에서 많은 장점을 나타낸다.

본 논문에서는 SHCC를 활용한 철근콘크리트 복합 슬래브 공법에 관한 개발로서 소개하였으며, 새롭게 개발된 공법을 기존 철근콘크리트 슬래브의 휨 거동 특성과 비교하여 구조성능을 분석하였다.

SHCC를 적용시켜 성능이 개선 된 슬래브의 비선형 휨 거동을 예측하기 위하여 해석모델 및 설계강도 산정 방법을 제시하였다. 비선형 휨 해석 및 설계강도 산정 모델에서는 SHCC의 균열이후 인장거동을 고려하기 위하여 SHCC의 고연성 및 변형경화 거동에 대한 재료특성을 반영하였다.

시공하중 재하 실험에 의해, 복합슬래브의 인장부에 위치하는 하프 프리캐스트 SHCC 데크는 시공중 하중에 대해 충분한 휨 강성 및 휨 내력에 대한 안전성을 확보하는 것으로 나타났다.

극한내력에 대한 4-점 휨 재하실험을 통해 각각의 실험단계에 따라 일반 콘크리트 슬래브의 휨 성능을 비교하도록 하였다.

휨 거동에 대한 실험결과에서, SHCC 복합슬래브는 기존의 철근콘크리트 슬래브보다 휨 거동이 향상, 균열 제어효과 및 변위 능력이 향상되었다.

비선형 휨 해석결과는 실험 결과를 비교적 잘 예측하였다. 해석 및 실험결과, 하프프리캐스트 복합 슬래브 공법은 균열이후의 고연성 능력과 균열 제어 등의 장점을 가지고 있으며 휨과 변형 능력을 향상 시킬 수 있었다.

실제의 건축 시공현장에서 구조부재로 적용될 경우 본 복합슬래브 공법은 무지주, 무거푸집 공법으로 시공이 가능하여, 건축시공 현장내 안전관리 및 환경관리 등의 효율을 높일 수 있으며, 공사기간 단축 및 생산성을 높일 수 있었다.