

R&D/
18AUDP-B
069631-06

최종보고서
슈퍼콘크리트
구조성능
검증
및
설계지침
개발
2020
국
토
교
통
부
국토교통과학기술진흥원

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()
건설기술연구사업 제6차 연도 최종보고서

R&D /
18AUDP-B069631-06

SUPER Concrete 구조성능 검증 및 설계지침 개발 최종보고서

2020. 3. 11.

주관연구기관 / 한국콘크리트학회

공동연구기관 / 군산대학교

충청대학교

서울대학교

한국건설기술연구원

우석대학교

국민대학교

서경대학교

국 토 교 통 부

(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘SUPER Concrete 구조성능 검증 및 설계지침 개발’(연구개발 기간 : 2013.12. ~ 2019.06.) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2020. 3. 11.



주관연구기관명 : 한국콘크리트학회 (이재훈)

공동연구기관명 : 군산대학교 산학협력단 (김영철)
충청대학교 산학협력단 (정식한)
서울대학교 산학협력단 (김성철)
한국건설기술연구원 (한승헌)
우석대학교 산학협력단 (김주석)
국민대학교 산학협력단 (차주헌)
서경대학교 산학협력단 (이석형)

주관연구기관책임자: 최 정 욱

공동연구기관책임자: 양 인 환
최 충 식
홍 성 결
조 창 빈
유 성 원
최 석 환
김 지 상

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서(2세부)

과제 고유 번호	18AUDP- B069631-06	해당 단계 연구 기간	2013. 12. ~ 2019. 06.	단계구분	1/1
연구사업명	건설기술연구사업				
연구과제명	SUPER Concrete 구조성능 검증 및 설계지침 개발				
연구책임자	최 정 옥	해당단계 참여연구원 수	총 : 67명 내부 : 65명 외부 : 2명	해당단계 연구비	정부 : 4,300,000 천원 민간 : 1,442,900 천원 계 : 5,742,900 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총 : 67명 내부 : 65명 외부 : 2명	총 연구비	정부 : 4,300,000 천원 민간 : 1,442,900 천원 계 : 5,742,900 천원
연구기관명 및 소속 부서명	(2세부 주관) 한국콘크리트학회 (2세부 공동) 군산대학교, 충청대학교, 서울대학교, 우석대학교, 한국건설기술연구원, 국민대학교, 서경대학교			(2세부) 참여기업명 : (주)파일테크, (주)세니츠코퍼레이션, 범창산업, 구마엔지니어링, 태평림건설, 메트로티앤씨, 한국재난연구원	
국제공동연구	상대국명 : 없음			상대국 연구기관명 : 없음	
위탁연구					

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	- SUPER Concrete 구조설계지침은 SUPER Concrete 적용 구조물의 설계, 시공, 유지관리 분야에 적극 활용하기 위한 것으로, 연구과제 보안등급의 분류상 <u>일반과제</u> 로 분류하는 것이 합당
----------------------	--

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문 /학술대회	특허	보고서 원문	연구시설· 장비	기술요약 정보 (지침/예제집)	소프트 웨어 /학회표준	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기탁 번호	46/73	-	-	-	5	2/5	-	-	-	-	-

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

요약

- 연구목표
 - SUPER Concrete 구조 성능 검증 및 설계지침 개발
 - SUPER Concrete의 성능을 100% 활용할 수 있는 구조 거동별 설계법 확보
 - SUPER Concrete 구조의 성능 검증을 통한 실증적 구조설계지침 개발
- 연구내용
 - SUPER Concrete 구조 거동별 성능평가 및 설계지침 개발
 - SUPER Concrete 구조 실험 및 상세 설계지침 개발
- 연구 개발 성과
 - 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침 2건 (국문/영문)
 - 굵은골재 SUPER Concrete 구조설계지침 2건 (국문/영문)
 - SUPER Concrete 구조설계지침 예제집 1건
 - 논문게재 46건, 학술회의 73건, 학회표준 5건, 소프트웨어 2건, 학회지 1건
- 활용 계획
 - SUPER Concrete를 활용하는 국내외 건설사업의 구조설계에 활용
 - SUPER Concrete 구조기술의 확장 및 신뢰성 확보에 활용

보고서 면수

100면

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 연구의 목적 SUPER Concrete 구조 성능 검증 및 설계지침 개발 압축강도 80MPa – 180MPa SUPER Concrete 구조설계지침 개발 • 1차년도: SC180f 구조성능 검증 및 설계지침 작성 • 2차년도: SC120f, SC150f 구조성능 검증 및 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침 작성 • 3차년도: SC80 구조성능 검증 및 설계지침 작성 • 4차년도: SC100, SC120 구조성능 검증 및 굵은골재 SUPER Concrete 구조설계지침 작성 • 5차년도: SUPER Concrete 구조성능 검증 보완 및 구조설계지침(수정안) 작성 • 6차년도: SUPER Concrete 구조설계지침 및 예제집 작성 ※ SC80, SC100, SC120: SUPER STRUCTURE 2020에서 개발한 압축강도 80MPa, 100MPa, 120MPa의 굵은골재 SUPER Concrete ※ SC120f, SC150f, SC180f: SUPER STRUCTURE 2020에서 개발한 압축강도 120MPa, 150MPa, 180MPa의 섬유보강 SUPER Concrete SUPER Concrete 구조의 성능 검증을 통한 실증적이고 물량 절감이 가능한 구조설계지침 개발 ○ 연구 내용 • SUPER Concrete 구조 거동별 성능평가 및 설계지침 개발 – 휨 거동평가 및 설계법 – 압축 거동평가 및 설계법 – 전단/뿔림전단 거동평가 및 설계법 – 비틀림 거동평가 및 설계법 – 합성 거동평가 및 설계법 • SUPER Concrete 구조실험 및 상세 설계지침 개발 – 균열 등의 사용성 평가 및 설계법 – 철근상세 성능평가 및 설계법 – 적용 보강재의 정착/이음 성능평가 및 설계법 – 프리스트레스트 정착구역 성능평가 및 설계법 ○ 연구 범위 • 압축강도 6종(SC80, SC100, SC120, SC120f, SC150f, SC180f)에 대한 성능실험 • 특정배합에 최적화된 맞춤형 구조설계지침
연구개발성과	○ 질적 연구개발성과 • SUPER Concrete 구조 거동별 설계기술 – SUPER Concrete의 성능을 100% 활용할 수 있는 구조 거동별(휨/압축, 전단/뿔림전단, 비틀림, 합성 거동 등) 설계법 확보 – SUPER Concrete의 사용성 및 구조상세(부재상세, 정착/이음, PSC 정착구역) 설계기술 확보 • SUPER Concrete 구조설계지침 – 실험적으로 성능이 검증되고 물량절감이 가능한 SUPER Concrete 구조설계지침 확보 ○ 양적 연구개발성과 • 구조설계 지침/예제집: 5권 • SCI급 논문 게재: 10편 • 비SCI급 논문 게재: 36편 • S/W 등록: 2건 • 학회표준: 5건 • 학회지(홍보): 1편

연구개발성과의
활용계획
(기대효과)

○ 활용계획

• 활용 실적(과제 기간 중)

- 강원도 춘천 레고랜드 진입 교량 공사 (사장교-SC180f, 2015-2017)
- 울릉도 힐링 플러스 신축 공사 (건축구조물-SC120f, 2016-2017)
- 삼성동 하나은행 리모델링 벽체 보강 공사 (건축구조물-SC150f, 2016)
- 부산 에코델타시티 2단계 공사 제8교 (보도교-SC150f, 2020-2021)
- 미국 아이오와 교량 교체 공사 (Hawkeye UHPC Bridge-SC180f, 2015)
- 미얀마 양곤-만달레이 고속도로 교량 확장공사 (M-UHPC Bridge-SC150f, 2015)
- 세종-포천 고속도로 고덕대교 (사장교-SC80, 2018-2022)

• 활용 계획(과제 기간 후)

- SUPER Concrete를 활용한 구조물의 구조설계에 활용
- SUPER Concrete를 활용한 건설공사의 소개 및 계약의 기본도서로 활용
- SUPER Concrete의 기준내용을 ACF(Asia Concrete Federation)의 UHPC(Ultra High Performance Concrete) 설계지침에 적극적 반영

○ 기대효과

• 섬유보강 SUPER Concrete

- 휨 설계모델 제시: 인장기여효과 고려 ⇨ 기존 모델 대비 50~100% 휨강도 증가
- 전단 설계모델 제시: 강섬유저항 고려 ⇨ 강섬유저항은 콘크리트저항의 3~5배 정도
- 비틀림 설계모델 제시: 인장기여효과 고려 ⇨ SC 비틀림저항은 철근트러스 비틀림저항의 2~4배
- 피복두께: 일반콘크리트 구조물에 비하여 피복두께 대략 2.5배 감소 가능
- 최소철근비: 최소철근비 필요 없음.
- 이음 및 정착: 일반콘크리트 구조물에 비하여 정착강도가 매우 커서 정착 및 이음길이 대략 2.5배 감소

• 굵은골재 SUPER Concrete

- 기존 코드(도로교설계기준/EC2)는 설계기준압축강도 90MPa 까지 적용 가능 ⇨ 굵은골재 SUPER Concrete 구조설계지침은 120MPa까지 적용 가능
 - 해석/설계를 위한 응력-변형률 모델, 직사각형 응력-변형률 모델
 - 휨설계모델, 전단/뒤틀림전단설계모델, 비틀림설계모델

국문핵심어 (5개 이내)	콘크리트 구조물	세계 선도	저탄소	장수명	고성능 재료
영문핵심어 (5개 이내)	Concrete structures	Global leading	Low-carbon	Long life	High-performance materials

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
가. 연구개발 목표	1
나. 연구개발 필요성	6
2. 연구수행내용 및 성과	11
가. 연구수행내용	11
나. 연구성과	82
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	91
가. 목표 달성도	91
나. 관련분야 기여도	96
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	97
가. 추가 연구의 필요성	97
나. 활용 실적	97
다. 활용 계획	97
붙임. 참고 문헌	98

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목표

○ SUPER Concrete 구조 성능 검증 및 설계지침 개발

최종목표	저비용(제조비용 20%~50% 이상 절감), 장수명(내구수명 100% 증진), 성능 맞춤형(강도 80MPa~180MPa 3종 이상, 제작·시공방법 현장타설/공작제작) SUPER Concrete의 성능을 100% 구현할 수 있는 설계법 및 설계지침 개발
------	--

- 정의: SUPER Concrete 구조의 성능을 실험적으로 검증하고 이를 바탕으로 실증적이고
물량절감이 가능한 SUPER Concrete 구조설계지침 개발
- 주요 연구 내용
 - SUPER Concrete 구조 거동별 성능평가 및 설계지침 개발
 - SUPER Concrete 구조 실험 및 상세설계지침 개발

(1) 최종 연구 목표

공동 과제명	최종 목표		
SUPER Concrete 휨 거동 평가 및 설계법 개발 (군산대학교)	휨	최종목표	저비용, 장수명 SUPER Concrete의 휨 구조성능 검증 및 설계기법 개발
		기술성과 수준	◦ SUPER Concrete의 휨 거동 평가 및 예측기법 ◦ SUPER Concrete의 경제적인 휨 설계기법
SUPER Concrete 압축 거동 평가 및 설계법 개발 (충청대학교)	압축	최종목표	SUPER Concrete의 압축 구조성능 검증 및 설계기법 개발
		기술성과 수준	◦ SUPER Concrete의 압축 성능 ◦ 5000kN 이상의 축하중 실험
SUPER Concrete 전단/휨전단 거동 평가 및 설계법 개발 (서울대학교)	전단	최종목표	실용적이고 경제적인 전단 설계를 위한 SUPER Concrete 전단/휨전단 거동 평 가 및 설계기법 개발
		기술성과 수준	◦ SUPER Concrete 파괴 이론 ◦ SUPER Concrete 전단/휨전단 강도 모델
SUPER Concrete 비틀림 거동 평가 및 설계법 개발 (한국건설기술연구원)	비틀림	최종목표	실용적이고 경제적인 비틀림 설계를 위한 SUPER Concrete 비틀림거동 평가 및 설계기법 개발
		기술성과 수준	◦ 단면형상을 고려한 SUPER Concrete 비틀림거동 평가 및 예측기법 ◦ 보강재 사용을 최소화한 SUPER Concrete 비틀림 설계기법 ◦ SUPER Concrete의 경제적인 비틀림 설계기법
SUPER Concrete 합성 거동 평가 및 설계법 개발 (우석대학교)	합성	최종목표	실용적이고 경제적인 SUPER Concrete 합성 설계기법 개발
		기술성과 수준	◦ 고성능 콘크리트 및 고강도 강재의 이질 재료 합성 거동 연구 및 최적 연결 방법 ◦ SUPER Concrete 합성부재 설계기법
SUPER Concrete 균열 및 철근상세 거동 평가 및 설계법 개발 (국민대학교)	균열 상세	최종목표	SUPER Concrete 균열 제어 및 철근 상세 설계 지침 개발
		기술성과 수준	◦ SUPER Concrete와 강구조 접합부용 앵커 설계기법 및 확대머리철근 정착길이 설계기법 개발 ◦ 고성능 콘크리트의 장점을 적극적으로 활용한 배근 상세의 단순화 및 최적화
SUPER Concrete 적용 보강재 정착/이음 및 PSC 정착구역 설계법 개발 (서경대학교)	정착 이음	최종목표	SUPER Concrete와 고강도 보강재에 대한 구조상세 및 프리스트레스트 정착구역 설계기법 개발
		기술성과 수준	◦ 보강재 수량 감소로 인한 경제성 향상 ◦ PSC 정착구역의 단순화 및 배근량 감소에 따른 시공성 개선

SUPER Concrete 구조설계지침 개발 (한국콘크리트학회)	지침	최종목표	SUPER Concrete 구조설계 지침 개발
		기술성과 수준	- 구조 거동별로 고효율의 단면을 설계할 수 있는 SUPER Concrete 구조설계 지침 - 설계 실무자가 쉽게 이해할 수 있는 SUPER Concrete 구조설계 예제집

(2) 연차별 연구 목표

○ SUPER Concrete 휨 거동 평가 및 설계법 개발

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	SC180 (UHPC) SUPER Concrete 부재의 휨 성능 예측기법 개발	- UHPC 휨 설계를 위한 응력-변형률 관계정립 - UHPC 보의 휨성능실험 및 결과 분석 - UHPC 보의 휨성능 평가 및 설계기법 제시
2차년도	SUPER Concrete의 휨응력 구배 모델링 기법 개발 (SC80~150)	- SUPER Concrete의 휨 응력구배 특성 실험 - SUPER Concrete의 휨 응력 특성 평가 - SUPER Concrete의 응력블록변수 도출 - SUPER Concrete의 응력블록 모델링
3차년도	SUPER Concrete의 휨 성능평가 및 설계기법 개발 (SC80)	- SUPER Concrete의 휨응력 특성 및 성능 평가 - SUPER Concrete의 휨성능 예측기법 개발 - SUPER Concrete의 휨 설계기법 도출
4차년도	SC100, SC120의 휨 성능평가	- SC100, SC120의 휨 거동 실험 및 성능 평가 - SC100, SC120의 휨 설계지침 제시
5차년도	SUPER Concrete의 휨 성능평가 및 설계지침 제시	- SUPER Concrete의 고강도 특성을 고려한 응력블록 모델링 검증실험 - SUPER Concrete의 휨성능평가 및 설계지침 제시

○ SUPER Concrete 압축 거동 평가 및 설계법 개발

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	SC180급 SUPER Concrete (UHPC) 압축 성능 평가 기법 개발	- UHPC 부재 압축 설계를 위한 장기 응력-변형률 관계 특성 평가 - UHPC 적용 압축 부재의 구조성능 평가
	SC180급 SUPER Concrete (UHPC) 파일 성능 평가	고강도 및 초고강도 콘크리트 파일의 성능 평가 기술 조사
2차년도	SUPER Concrete의 압축 부재의 성능평가	- 일반 및 고성능 보강재의 정착 및 부착특성 평가 - 중심 축하중을 받는 SUPER Concrete 압축 부재의 구조 성능 평가 - 하부구조 적용성 조사 및 분석
3차년도	SUPER Concrete 압축 부재의 성능평가 및 설계기법 개발 (SC80)	- SUPER Concrete 압축부재 횡방향 보강 영향 평가 - 편심 축하중을 받는 SUPER Concrete 압축 부재(SC80)의 성능 평가

○ SUPER Concrete 전단/휨전단 거동 평가 및 설계법 개발

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	UHPC 전단/휨전단 국·내외 기준과 기존 연구 비교 분석	- 기존 UHPC 휨인장 강도 모델 분석 - 기존 UHPC 전단 강도 모델 분석 - UHPC 전단/휨전단 실험체 변수 연구 - UHPC와 SUPER Concrete 재료 강도 실험 - UHPC의 항복 이론 정립

2차년도	SUPER Concrete 전단 실험 및 전단 강도 모델 제시	• SUPER Concrete를 사용한 전단 실험체 제작 및 실험 • SUPER Concrete 전단 거동 및 성능 평가 • SUPER Concrete 전단 강도 모델 제시 • SUPER Concrete 전단 설계 기법 도출
3차년도	SC80 전단/휨전단 실험 및 강도 모델 제시	• SC80을 사용한 전단/휨전단 부재 실험 • SC80 전단/휨전단 부재 파괴모드 정립 • SC80 전단/휨전단 강도모델 제시
	SC100 전단/휨전단 실험체 제작	• SC100 전단/휨전단 실험계획 수립 및 실험체 1단계 제작
4차년도	SC100/SC120 전단/휨전단 성능평가	• SC100/120 전단/휨전단 성능평가 • 기존 RC부재를 SUPER Concrete 오버레이 공법으로 보강하는 기술 연구
5차년도	경제적 설계를 위한 SUPER Concrete 전단/휨전단 설계지침 제시	• 경제적 설계를 위한(합리적 최소철근비) SC부재 전단/휨전단 성능평가 및 설계지침 제시

○ SUPER Concrete 비틀림 거동 평가 및 설계법 개발

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	SC180 비틀림 설계법 개발	• SC180 비틀림 설계법 문헌 조사 • SC180 비틀림 거동 실험 • SC180 비틀림 설계지침 개발
2차년도	SUPER Concrete 충실단면 비틀림 설계법 개발(SC80-SC150)	• SUPER Concrete 충실단면 비틀림 설계법 문헌 조사 • SUPER Concrete 충실단면 비틀림 거동 실험 • SUPER Concrete 충실단면 비틀림 설계지침 개발(SC80-SC150)
3차년도	80MPa급 SUPER Concrete (SC80) 비틀림 설계법 개발	• 80MPa급 SUPER Concrete (SC80) 비틀림 설계법 문헌 조사 • 80MPa급 SUPER Concrete (SC80) 비틀림 거동 실험 • 80MPa급 SUPER Concrete (SC80) 비틀림 설계지침 개발
	SC100 비틀림 실험체 제작	• 100MPa급 SUPER Concrete (SC100) 비틀림 설계법 문헌 조사 및 실험체 1단계 제작
4차년도	연성거동을 고려한 SUPER Concrete 비틀림 설계법 개발	• 굽은골재가 있는 SUPER Concrete보의 철근비에 따른 비틀림 연성도 실험 • 소요연성을 고려한 굽은골재가 있는 SUPER Concrete 비틀림 설계지침 개발
5차년도	SUPER Concrete 비틀림 설계지침 수정안 작성(80-180MPa)	• 비틀림 구조거동 관련 설계모델 상세검토 및 개선 • 크기효과를 고려한 복합모드 파괴거동 실험 • 비틀림 관련 SUPER Concrete 구조설계지침 (수정안) 작성 (대상범위: SC80, SC100, SC120) • 비틀림 관련 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침 (수정안) 작성 (대상범위: SC120f, SC150f, SC180f)
6차년도	SUPER Concrete 연성도 평가실험 및 비틀림 설계모델 작성	• 섬유보강 SUPER Concrete 부재의 연성도 평가 실험 수행 • SUPER Concrete 구조설계지침의 비틀림 설계모델 작성

○ SUPER Concrete 합성 거동 평가 및 설계법 개발

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	180MPa급 SUPER Concrete (UHPC) 합성거동 평가기법 개발	• UHPC 합성보의 전단연결재 선정 • UHPC 합성보의 수평전단강도 산정 • UHPC 합성보의 2차응력 예측 및 검증 • UHPC 합성거동 평가 및 설계기법 제시
2차년도	SUPER Concrete의 합성성능 평가 (80-150MPa)	• SUPER Concrete 합성보의 합성거동 특성 평가(push-out test) • SUPER Concrete 합성보의 바닥판 연결부의 극한강도 평가 • SUPER Concrete 합성보의 균열 평가

3차년도	SUPER Concrete의 합성성능 평가 (SC80)	- SC80 합성보의 거동실험 및 특성평가 - SC80 합성보의 바닥판 연결부의 극한강도 평가(합성거동에 필요한 기준 제시) - SC80 합성보의 균열 평가 및 해석모델 개발 및 평가
	SUPER Concrete의 SC100 실험체 제작	- SC100 부재의 실험체 설계 및 1단계 제작 - 휨성능 평가용 / 압축성능 평가용 / 합성휨성능 평가용
4차년도	SC100, SC120의 합성성능 평가	- SC100, SC120 합성보의 거동실험 및 특성평가 - SC100, SC120 합성보의 바닥판 연결부의 극한강도 평가(합성거동에 필요한 지침 제시)

○ SUPER Concrete 균열 및 철근상세 설계법 개발

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	UHPC 균열 및 처짐 기준 분석 및 철근상세 평가	- UHPC, SC, HSC, NSC에 대한 균열 및 처짐 제어 기준, 철근상세 및 피복두께 국내의 기준 분석 - UHPC에 정착된 선설치 앵커 실험 및 정착강도 평가
2차년도	균열 및 처짐 거동 및 철근상세 성능 평가	- 콘크리트 복수 균열 측정 프로그램 개발 - 콘크리트 균열 간격 측정 프로그램 개발 - UHPC에 정착된 확대머리철근 실험 및 정착강도 평가 - 본 실험 계획 수립 - 진동 및 화재 거동 조사/분석
3차년도	사용성 평가기준 및 철근상세 평가식 개발	- SUPER Concrete 부재에 대한 사용성 평가 기준 정립 - SUPER Concrete에 정착된 확대머리 철근 실험 - SC100에 정착된 인장을 받는 선설치앵커 실험체 제작
4차년도	굵은골재사용 SUPER Concrete의 접합부 철근상세 제시	- 대변형 측정 프로그램 개발 - 굵은골재사용 SUPER Concrete에 정착된 확대머리철근 및 선설치앵커의 정착강도 및 상세 제시

○ SUPER Concrete 적용 보강재 정착/이음 및 PSC 정착구역 설계법 개발

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	UHPC 보강재의 정착/이음 평가 및 설계기법 개발 - UHPC 보강재의 부착-슬립 관계 도출 - UHPC 보강재의 정착길이 산정 기법 연구	- 일반 콘크리트 및 UHPC 부재의 보강재 정착 관련 연구 조사/분석 - 보강재의 정착 요구조건 도출 - UHPC 보강재의 부착-슬립 관계 연구 - UHPC 보강재의 직접 인장 균열 평가식 연구 - UHPC 보강재 정착 설계기법 연구
	고강도 철근 및 SC 적용 PSC 정착구역의 요구조건 도출	- 고강도 철근 적용 PSC 정착구역 설계 고려사항 조사/분석 - SC 적용 PSC 정착구역의 설계 고려사항 조사/분석
2차년도	SC80-150 보강재의 정착/이음 평가 및 설계기법 개발 - SC80-150 강도 수준별 부착강도 평가 - SC80-150 보강재 정착길이 산정 기법 개발	- SC80-150 부재 보강재의 정착/이음 요구 조건 도출 - SC80-150 보강재의 정착길이/이음길이 평가 실험 수행 - SC80-150 보강재의 부착-슬립 관계 구명 - 시험법 표준화 - SC80-150 부재 보강철근의 정착/이음 설계 기법 제시
3차년도	SC80 보강재의 전달길이 평가 및 설계기법 개발 - SC Pretension 부재의 긴장재 전달길이 산정식 제시 - 요구 보강재 상세 제시	- 보통 PS콘크리트 보강재 전달길이 평가 기법 조사/분석 - SC80 부재 전달길이 확보 요구조건 도출 - SC80 부재 전달길이 평가 실험 - SC80 부재 전달길이 평가기법 및 확보 방안 제시 - 부분안전계수(재료 및 부재계수) 도출을 위한 신뢰성 분석
	SC100 보강재 정착길이/전달길이 평가용 실험체 제작	SC100 보강재의 응력전달길이 및 정착길이 평가용 실험체 설계 및 1단계 제작

4차년도	SC80-SC150f 적용 PSC 정착구역 성능평가	• 단일정착구역 성능평가 실험 • SC80-SC150f 적용 최적 정착장치 요구 조건 도출
	SC100-SC180f 적용 보강재의 응력전달길이 성능평가	• SC100-120 적용 보강재의 응력전달길이 성능평가 실험 • SC80-SC180f 프리텐션 응력 전달길이 제시
5차년도	SUPER Concrete 부착강도 제시	• SUPER Concrete 부착강도 실험 및 설계부착강도 제시
	SUPER Concrete의 접합부 철근상세 성능 검증	• SUPER Concrete 접합부 실험을 통한 철근 상세 성능 검증

○ SUPER Concrete 구조설계지침 개발

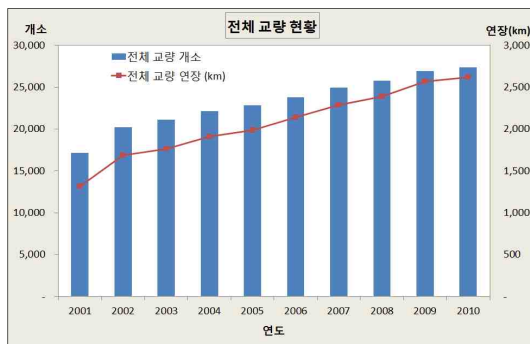
연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침 초안 작성 (SC180f)	• SC180f에 대한 각 분야별(휨, 압축, 전단, 비틀림, 합성부재, 균열/처짐/배근 상세, 이음/정착) 성능평가를 수행하고 이에 대한 지침 작성
2차년도	섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침 작성 (SC120f, SC150f, SC180f)	• SC120f, SC150f에 대한 분야별 성능평가를 수행하고 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침 작성 (SC120f, SC150f, SC180f)
3차년도	SUPER Concrete 구조설계지침 초안 작성 (SC80)	• SUPER Concrete 구조설계지침 구성 및 작성 방향 설정 • SC80에 대한 각 거동별 실험결과에 기초하여 SUPER Concrete 구조설계지침 초안 작성 (SC80)
	섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침 영문본 작성	• 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침 영문본 작성
4차년도	신뢰성 분석	• 부분안전계수 도출을 위한 신뢰성 분석
	SUPER Concrete 구조설계지침 작성 (SC80, SC100, SC120)	• SC100, SC120에 대한 각 거동별 성능평가를 수행하고 이에 기초하여 SUPER Concrete 구조설계지침 작성 (SC80, SC100, SC120) • 굽은골재 SUPER Concrete 구조설계지침 작성
5차년도	신뢰도기반 부분안전계수(안) 제시	• SUPER Concrete 신뢰도 분석 • 목표 신뢰도 지수를 만족하는 부분안전계수(안) 제시
	구조설계지침(수정안) 작성	• 굽은골재 SUPER Concrete 구조설계지침 (수정안) 작성 (SC80, SC100, SC120) • 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침 (수정안) 작성 (SC120f, SC150f, SC180f)
6차년도	신뢰도기반 부분안전계수 결정	• 목표 신뢰도 지수를 만족하는 부분안전계수 결정
	구조설계지침 완성	• SUPER Concrete 부착성능 보완실험 수행 • 굽은골재 SC 및 섬유보강 SC의 구조설계모델 최종 결정 • 굽은골재 SUPER Concrete 구조설계지침 완성 및 영문본 작성 (SC80, SC100, SC120) • 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침 완성 및 영문본 작성 (SC120f, SC150f, SC180f)
	구조설계지침 예제집 작성	• 굽은골재 및 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침에 대한 예제집 작성

나. 연구개발 필요성

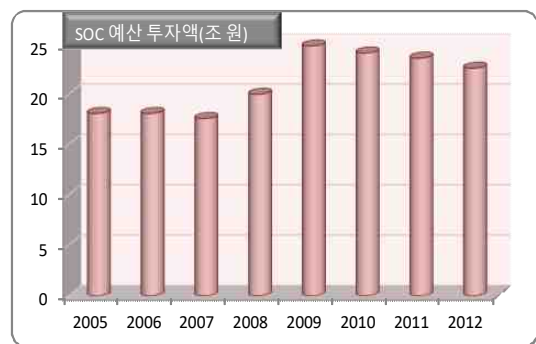
(1) 연구 배경 및 목적

(가) 예산 절감형 SOC 시설물 기술 수요 증대

- 도로·철도 구조물 등 SOC 시설물은 국가 교통망의 핵심시설이며 대표적인 공공시설물로서 지역균형 개발, 물류·교통망의 구축, 해양공간의 효율적인 활용 등에 필수적이므로 향후에도 지속적인 수요가 예상된다.
- 국내 도로교는 총 27,381개(2010년)로 매년 약 1,000개씩 증가하고 있고, 연간 교량 수주액도 2000년 이후 꾸준히 증가하고 있으나, SOC 전체 투자 예산은 2009년 24.8조 원에서 2012년 22.6조 원으로 감소 추세임.
- 따라서 한정된 예산으로 SOC 시설물을 효율적으로 건설하기 위해서는 비용절감형 SOC 시설물 기술 개발이 필요함.



[그림] 교량 개소 수 및 연장 증가 추세



[그림] SOC 투자액 감소 추세

(나) SOC 시설물의 유지관리 비용으로 많은 국가예산 소요

- 비용 측면의 경쟁력으로 인해 SOC 시설물에는 콘크리트가 주로 사용되고 있음. 예를 들어 국내 교량 수의 80% 정도가 콘크리트 교량임.
- 일반 콘크리트로는 SOC 시설물 비용절감에 한계가 있음. 국내 교량의 경우에 평균 수명은 30년~50년 정도로 선진국 50년~100년에 비해 상대적으로 짧아 유지관리비용이 많이 소요되어 국가예산 측면에서 상당한 부담이 있음.
- SOC 시설물 중 대표적인 구조물인 교량의 잦은 보수·보강 및 교체 공사는 교통 체증 및 사고를 유발함으로써 국민 삶의 질을 저하시키고 물류비용을 증가시켜 엄청난 사회적 비용의 지출을 요구하게 되며 국가예산을 낭비시키는 원인이 됨.
 - ※ 전국 교통혼잡 비용은 2007년도 25.9조 원으로 1998년도 12.2조 원에 비해 2배 이상 증가되고 있음(국가통계포털, KOSIS, 2010)
- 따라서 SOC 시설물 수명을 연장시키는 것은 국민 삶의 질 향상뿐만 아니라 국가예산 절감 측면에서도 매우 중요함.
 - ※ 교량 수명 1년 연장 시 국가예산 연간 560억 원 절감
- 국내 신규건설 투자는 2007년 기준 약 85조 원, 유지관리 수요는 약 23조 원으로 꾸준히 증가하고 있으며 SOC 및 도시 건축 시설물의 노후화에 따라 관련분야 수요의 비중 또한 2007년 기준 건설투자비용에 약 27% 수준으로 꾸준히 증가하고 있음. 이러한 유지관리비용의 비중은 시설물의 노후화가 많이 진행된 유럽·미국·일본 등과 비교할 때 아직 낮은 수준으로(서구 15개국 평균이 약 44%) 앞으로 국내 사회기반시설의 노후화가 30년을 넘는 시점부터 급격하게 증가할 것으로 예측됨.



[그림] 주요시설물 유지관리비용 증가 추세



[그림] 국가별 교량 수명

(다) 국내 건설산업 침체를 타파하기 위해 다양한 해외 건설시장 확대가 필수

- 국내 SOC 시설물에 대한 국가예산은 감소 추세인 반면, 동남아시아를 비롯한 개발도상국 및 중동 지역을 중심으로 한 해외 건설시장은 섬과 육지 간의 연결, 해양 지하 공간 확충, 초고층 건물 건설 등 다양한 환경에 대한 건설 수요가 급격히 증가하고 있음.
- 최근 중동지역의 민주화 사태가 마무리됨에 따라 기 예정된 발주물량 이외에 각종 전후 복구사업의 추가로 인프라 발주가 확대될 가능성이 매우 높음.
- 아프리카, 알제리의 경우 2014년까지 약 420억불을 투입하여 인프라 구축예정이며 남수단에서도 인프라 개발 10개년 계획에 따라 주바와 주도를 잇는 교량 건설을 계획 중임.
- 따라서 국내 건설산업 침체를 타파하기 위해서는 다양한 해외 건설시장 확대가 필수적으로 요구됨.



[그림] 국내 건설사의 국내외 건설 수주액



[그림] 세계 건설시장 규모

(라) 국내 기술력 미약으로 인한 해외시장 진출 분야 편중 및 순이익률 하락

- SOC 시설물에 대한 국내 기술력은 선진국 대비 80% 수준으로 낮으며(제4차 건설 기술진흥기본계획 수정계획(국토해양부), 2009. 7), 특히 건설엔지니어링 분야의 세계시장 점유율은 1.2%(수주액 8억 달러, 2012년 기준) 정도로서 고부가가치 분야에 대한 기술력은 미약한 수준.
- 이로 인해 해외건설 수주는 증가하고 있으나(2011년 해외건설 수주액은 580억 달러, 2012년 650억 달러 달성, 2013년 700억 달러 수주 목표), 플랜트가 80%를 차지할 정도로 한 분야에 편중되어 있고, 순이익률 또한 저조한 문제점을 야기함
- 이러한 해외 건설시장 진출의 문제점을 극복하기 위해서는 다양한 SOC 시설물 분

야에 대한 기술개발을 통해 설계 엔지니어링 등 고부가가치 분야의 해외 진출이 필요함.

- 이를 위해서는 R&D에 의해 가격 경쟁력이 확보된 원천기술을 개발하여야 할 뿐만 아니라 제도·기준의 글로벌 스탠더드화를 주도하는 등 세계시장에서의 기술 우위권을 확보하여야 함.
- 또한 세계 시장 진출 시에는 R&D에 의한 원천기술뿐만 아니라 민간기업의 설계·시공 기술과 함께 정부의 자금 조달 등 관리 기술이 함께 어우러진 패키지 형태의 진출이 이루어져야 함.

(2) 연구개발과제의 정의 및 구성

(가) 총괄 기술의 정의

SUPER Structure 2020의 정의

첨단 재료기술과 핵심 설계·제작·시공 기술의 융·복합을 통한
세계 최고 수준의 콘크리트 구조물 건설기술

SUPER Structure 2020: Sustainable, Ultra performing, Pioneering, Economic,
Remarkable Structure with 20% cost reduction and 20% share of oversea
market by 2020

- **첨단 재료기술(SUPER Concrete):** 압축강도 80MPa~180MPa급의 현장타설 및 공장제작이 가능한 저비용·장수명·고품질 성능 맞춤형 콘크리트
※ 향후 2단계 추진 시, 300MPa까지 확장 가능
- **세계 최고 수준의 콘크리트 구조물(SUPER Structure):** SUPER Concrete를 활용하여 공사비 20% 절감 및 해외시장 점유율 20%를 달성할 수 있는 저비용·장수명·고품질 콘크리트 구조물
- **세계 최고 수준:** 기존 구조물 대비 동등 이상의 성능을 유지하면서 공사비는 20% 절감할 수 있는 기술 수준
※ 기존 기술보다 동등 이상의 성능을 유지하면서 공사비를 10%~20% 절감해야만 시장진입에 성공할 수 있고, 이를 시작으로 시장 점유율이 상승하게 되는 것이므로 이를 세계 최고 수준의 기술로 정의

(3) 연구개발의 중요성

(가) 기술적 측면

- 온실가스 배출량을 줄이기 위한 국가적 정책 요구 증대에 따라 이를 뒷받침하기 위한 친환경 기술개발의 중요성이 부각되고 있음.
- 교량 분야에서도 탄소 배출량 저감을 위해 건설재료의 절감, 건설재료 라이프사이클 연장, 급속시공 등의 기술개발이 요구되는 상황임.

(나) 경제-산업적 측면

- 교량의 신소재 기술개발은 기존 교량의 주재료인 콘크리트 및 강재 사용량을 절감

- 시켜 재료의 생산, 시공 과정에서 발생하는 탄소 발생량을 최소화 시킬 수 있음.
- 탄소배출량 저감 측면 외에 본 연구단을 통한 기술개발은 교량 수명연장 및 공기 단축을 통한 사회비용 절감효과 측면에서 국가적으로 중요하게 부각되고 있음.
 - 국내 건설산업 침체를 타파하기 위하여 국토해양 R&D 전략에서도 세계 최고 기술 개발과 이를 통한 해외 시장 점유율 확대를 주요한 목표로 설정하고 있음.
 - 탄소배출량 저감과 해외시장 개척을 위한 정부의 정책지원 및 사회비용 절감 측면에서 본 연구단의 산업, 국토개발 정책적 중요성은 타당하게 서술되어 있다고 판단됨.

(다) 사회적 측면

- 첨단 재료 및 설계·제작 핵심기술 확보에 따라 구조물 장수명화를 이룰 수 있으며 주요 구조물의 시공 및 유지관리 관련 국가 예산 절감에 기여
- 월드베스트 기술의 확보로 세계 건설시장 수주 확대에 기여하며, 관련기술의 글로벌 경쟁력 강화에 기여
- 본 사업을 통해 개발된 기술의 교량, 건물 등의 시설물에 적용을 통한 관련기술 파급효과
- 제안 기술은 기존 기술 대비 내구성 및 안전성이 강화된 기술로서 재해·재난에 대한 안전성 강화 및 예방중심적 기술로서 국민행복기술에 해당

(라) 정부정책적 측면

- 구조물의 저비용·장수명화에 요구되는 기술개발 및 활용에 필요한 관련기준 개발은 공공적 성격이 강함.
- 관련연구에 대한 기업 및 대학에서의 개별적 진행으로 설계기준/지침 및 시방서 등을 제시하기 위한 데이터의 축적이 이루어지지 못함.
- 설계기준 및 시방서는 관련 기술의 실용화를 위한 필요조건으로 이는 정부차원에서 지원하는 것이 마땅하다고 판단됨.
- 연구개발의 실용화를 위한 테스트베드 후보지 선정 및 건설에 정부의 적극적인 지원이 필요함.
- 콘크리트 구조물은 주요 선진국에서도 가장 큰 비중을 차지하는 구조물로 미국, 프랑스, 독일 등 주요 국가들에서 정부 차원에서 예산을 지원하여 콘크리트 구조물의 품질 및 내구성 향상을 위해 고성능 및 초고성능 콘크리트를 활용하기 위한 기술개발에 박차를 가하고 있으므로 이들 국가들과 경쟁하기 위해서는 정부차원의 연구개발 투자가 반드시 필요함.
- 본 연구단의 과제들은 단기 영업이익을 산출하기보다는 장기적인 연구개발이 필요하며, 국제적인 기술우위를 점유하기 위해서는 정부지원 하에 체계적인 연구개발이 필요함.
- 개별 진행되는 연구의 통합, 사회간접비용 절감, 건설 분야 탄소배출량 저감 및 장기적인 연구개발의 필요 측면에서 본 연구단에 대한 정부의 지원은 타당하다고 판단됨.

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연구수행내용

(1) SUPER Concrete 휨 거동 평가 및 설계법 개발

(가) 섬유보강 SC의 휨 거동 평가 및 설계법 개발

① 연구배경 및 목적

- 본 연구에서는 UHPC의 설계기준 압축강도 120(SC120f), 150(SC150f) 및 180(SC180f) MPa를 갖는 콘크리트 보의 정적 재하 실험을 통해 휨 성능을 평가
- 휨 설계를 위한 휨강도를 예측하여 휨강도의 예측 적합성을 파악하고, 이를 기초하여 구조설계지침을 제시

② 섬유보강 SC의 압축 및 인장 특성

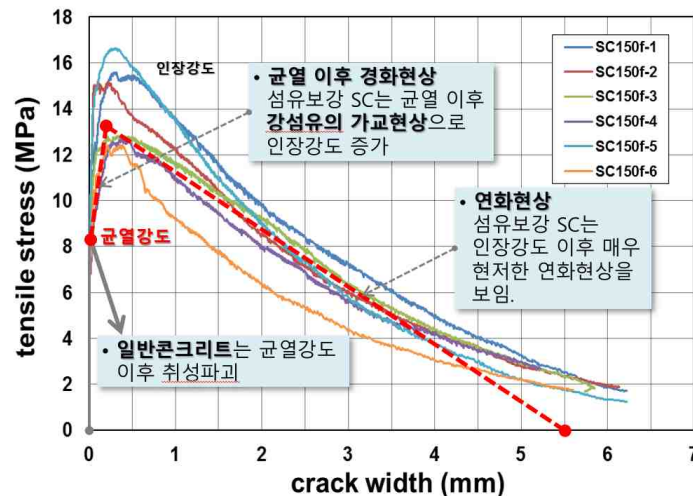


그림 1.1 섬유보강 SC의 인장 응력-변형률 모델

㉠ 압축 특성

- 섬유보강 SC는 공극이 작고 치밀하여 압축 응력-변형률 관계가 거의 직선형
- 섬유보강 SC는 강섬유 영향으로 변형률 증가

㉡ 인장 특성

- 섬유보강 SC는 균열 이후 강섬유의 가교현상으로 인장강도 증가
- 섬유보강 SC는 인장강도 이후 매우 현저한 연화현상을 보임.

③ 휨 설계모델 제시

- 인장강도 기여효과: 대략 50%-100% 정도 휨강도 증가
- 강섬유 콘크리트의 연성능력
 - 인장성능 100% 활용 (경제적 설계)
 - 최소철근비 제약 없음.

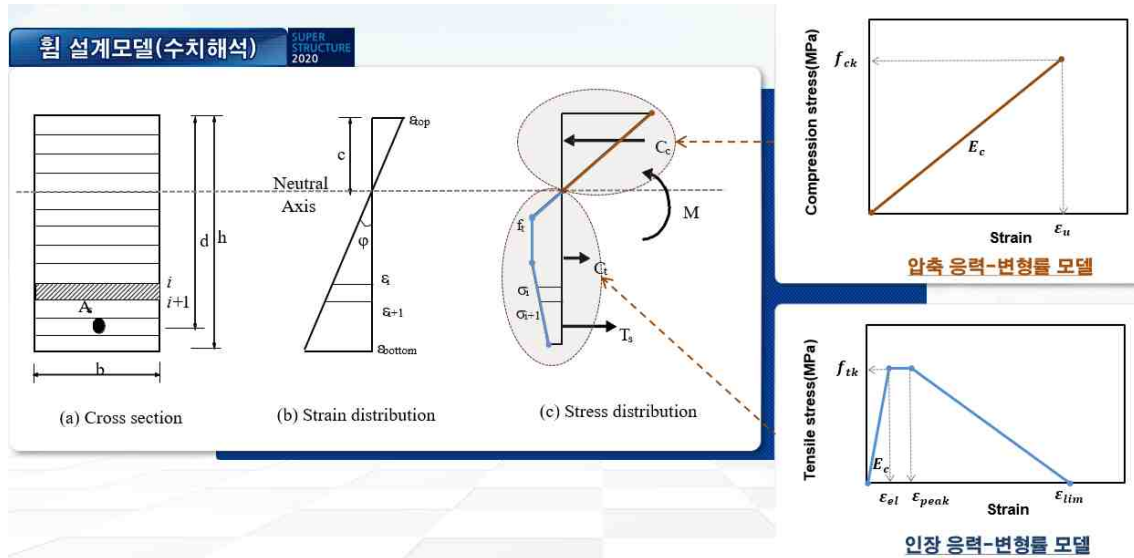


그림 1.2 휨 설계모델 제시

④ 휨 구조성능 실험

㉓ 실험계획 및 수행

- 실험 목적: 섬유보강 SC의 인장기여효과 및 휨설계모델 평가 (그림 1.3, 1.4)
- 실험 변수: 35개(26+9) 실험체 (SC120f, SC150f 및 SC180f)
 - 휨 철근비 (0.79%, 1.18%, 1.58%)
 - 강섬유 부피비 (1.0%, 1.5%, 2.0%)

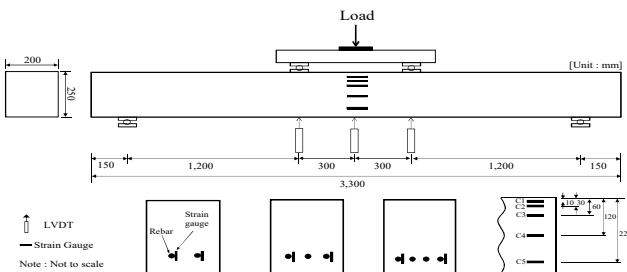


그림 1.3 계측시스템



그림 1.4 부재 실험 장치도

⑤ 휨 성능평가 및 설계기법 검증

㉓ 휨 강도 설계기법 (응력-변형률)

- 단면 층을 여러 개로 분할하여 휨강도를 예측하는 적층 단면기법을 적용하여 부재의 단면해석을 수행
- 적층 단면기법은 간편성으로 인하여 비선형 유한요소해석기법보다 더 선호하고 있으며, 부재의 단면을 여러 개의 층으로 분할 하며 부재 단면에 걸쳐 변형률은 선형으로 분포한다고 가정
- 그림 1.5는 적층 단면 모델링 기법에 의한 단면력 산정을 나타냄.
- 변형률 분포를 결정한 다음 재료 모델링으로 구한 UHPC와 철근의 응력-변형률 관계식으로부터 각층별 응력을 산정

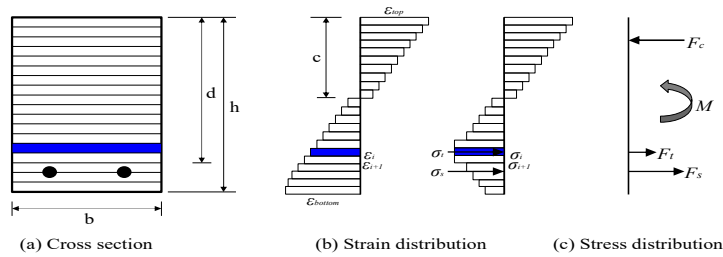


그림 1.5 적층 단면 모델링 기법에 의한 단면력 (응력-변형률)

㉠ 강섬유 부피비 영향 (인장강도 기여효과) (그림 1.6)

- 섬유보강 유/무에 따른 휨강도 차이 1.5배-2.0배 정도
- 섬유보강 정도에 따른 강도 연성도 차이 작음.

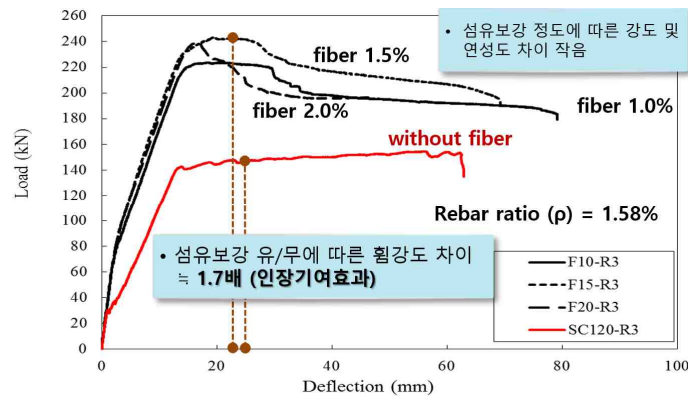
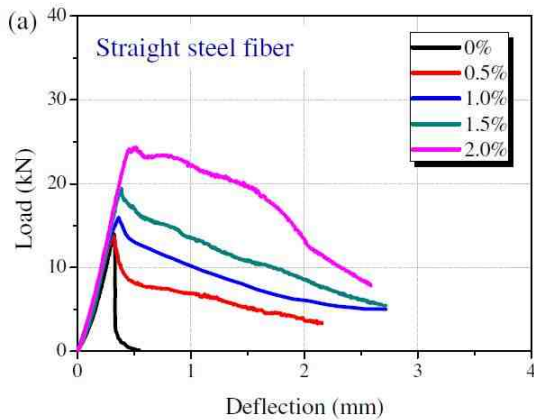


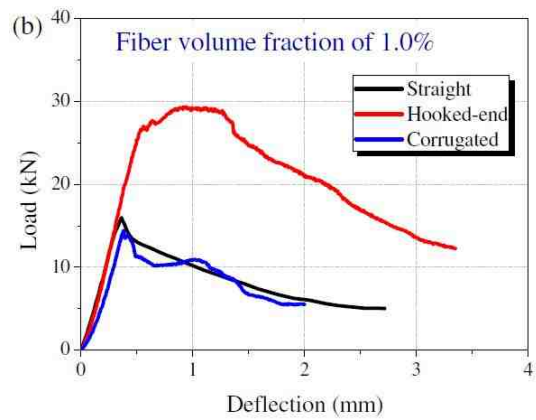
그림 1.6 강섬유 보강 SC 콘크리트 보의 휨거동 (강섬유량의 영향)

㉠ 섬유보강 SUPER Concrete와 기존 강섬유보강 콘크리트 보의 휨강도 비교

- 섬유보강 SUPER Concrete 보와 기존 강섬유보강 콘크리트 보의 강섬유 부피비에 따른 휨강도를 비교·분석함.
- 본 연구에서 개발한 섬유보강 SUPER Concrete 보는 강섬유량 1.0, 1.5, 2.0% 보강에 따라 보강되지 않은 콘크리트 보에 비해, 최대 휨강도가 각각 46.7, 70.0, 67.5% 증가함 (그림 1.6).
- 반면 기존 강섬유보강 콘크리트 보의 최대 휨강도는 각각 6.7, 30.0, 63.0% 증가함. 따라서, 본 연구에서 개발한 섬유보강 SUPER Concrete의 휨강도가 기존 강섬유보강 콘크리트의 휨강도에 비해 훨씬 우수한 휨강도 성능을 보임 (그림 1.7(a)).
- 또한, 본 연구에서 개발한 섬유보강 SUPER Concrete 보의 최대하중 도달 후 하중 지지력이 서서히 감소 (그림 1.6)한 반면, 기존 강섬유보강 콘크리트 보의 최대하중 도달 후 하중 지지력이 급격히 감소함 (그림 1.7(a)). 따라서 연성 및 변위능력에 있어, 섬유보강 SUPER Concrete가 훨씬 우수함을 확인함.



(a) 강섬유량에 따른 힘 거동



(b) 강섬유 형상에 따른 힘 거동

그림 1.7 기존 연구 강섬유보강 콘크리트의 보의 휨거동 (Li et al. (2018))

㉔ 재료실험 측정값을 적용한 휨강도 산정

- 전반적으로 SC120f, SC150f의 철근비(ρ) 0.59% 이하에서는 휨강도의 예측 정확도가 낮게 나타나며, 이는 재료시편과 보 부재의 크기효과에 따른 측정 휨강도의 감소로 인한 것으로 판단됨.
- 각 주요설계기준에 따른 휨강도 예측값 비교는 그림 1.8~1.10와 같음.

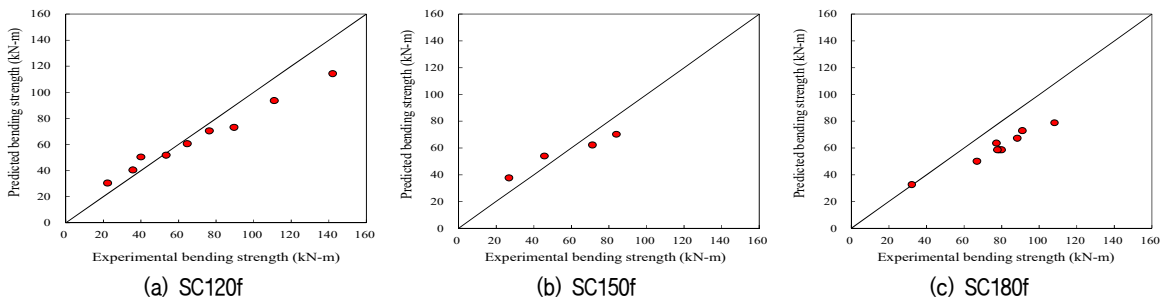


그림 1.8 재료실험 측정값을 적용한 휨강도 예측값 비교 (AFGC 지침)

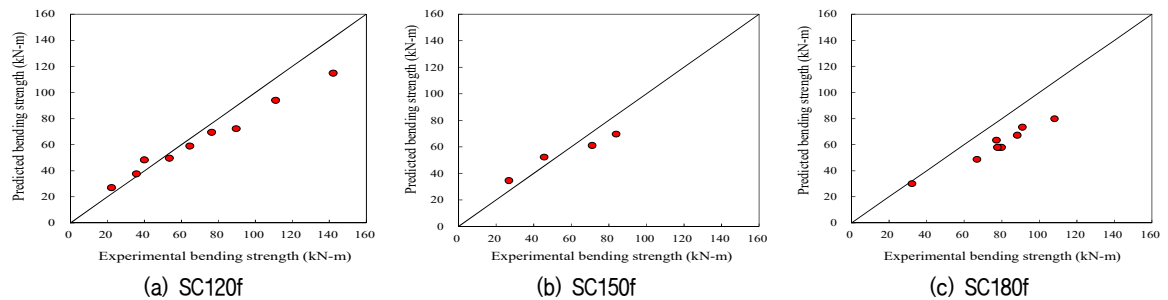


그림 1.9 재료실험 측정값을 적용한 휨강도 예측값 비교 (JSCE 지침)

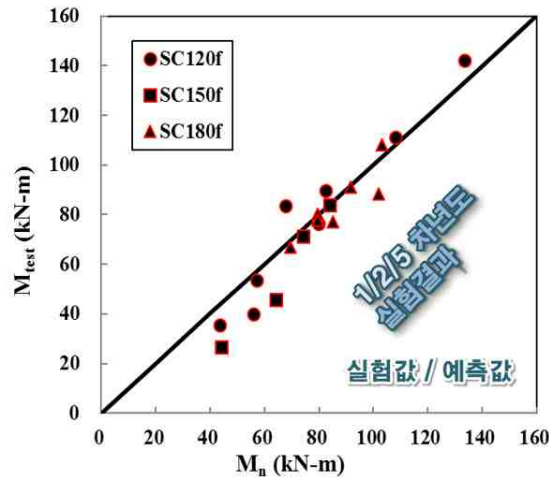


그림 1.10 재료실험 측정값을 적용한 휨강도 예측값 비교
(섬유보강 SC 지침)

- 제시 모델은 SC120f, SC150f, SC180f 부재의 휨강도를 합리적으로 예측 → 섬유보강 SC의 휨 설계모델 적용성 검증

⑥ 휨철근이 배근된 보의 대균열 파괴에 의한 연성도

㉑ 실험계획 및 수행

- 실험목표: 강섬유 부피비 및 휨철근비에 따라 한계상태에서 섬유보강 SC 부재가 가지는 휨전단거동의 특성을 알아보기 위하여, 노치가 있는 3점 재하 실험을 수행하여 실험결과를 비교, 분석 (30개 실험체 (SC180f))
- 실험변수: 강섬유 부피비(V_f), 휨철근비(ρ_l), 초기균열 발생 위치($2x/l$) (그림 1.11)

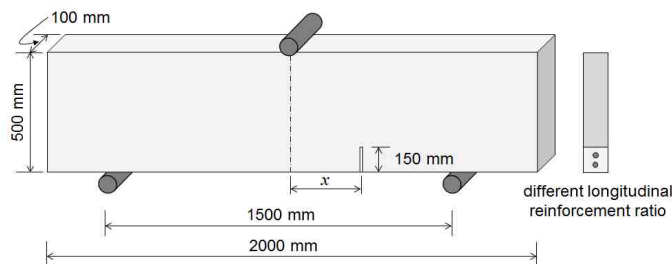


그림 1.11 실험체 설계

㉒ 실험 결과

- 강섬유 보강 효과에 따른 강도 및 연성도 평가 (그림 1.12)
 - 최대강도: “철근항복강도 + 대균열에서의 강섬유 보강효과”로 결정. 강도는 대략 1.5배-2배 차이
 - 연성도: 대균열에서 철근 파단 혹은 압축측 변형한계(0.004)에 의해 파괴. 연성도는 거의 차이가 없음. (그림 1.12)
 - 철근 국부파단으로 RC부재에 비해 감소된 연성도에 대해서는 검토 필요

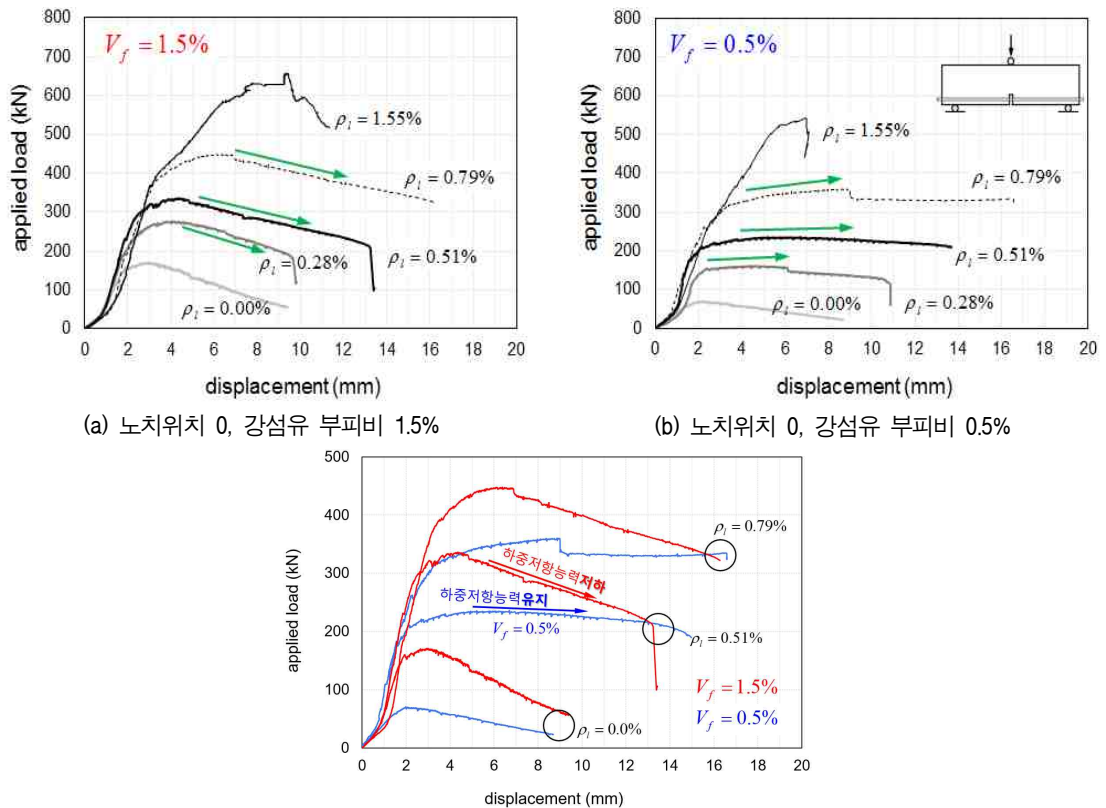


그림 1.12 가운데 노치가 있는 실험체의 휨철근비에 따른 하중-변위 곡선

- 가운데 아닌 노치가 있는 실험체의 파괴거동
 - 1/3 노치를 가진 실험체: 강섬유 부피비에 관계없이 휨철근항복 후 대균열에 의한 변형증가로 파괴. 미세균열 구간이 넓어진 휨지배적인 거동
 - 2/3 노치를 가진 실험체: 강섬유 부피비 1.5%, 휨철근비가 0.00~0.79%인 실험체의 경우 휨철근이 항복하지 않고 대균열 주변부 미세균열 구간을 크게 가지며 전단파괴로 변이됨.
 - 휨철근비가 1.55%인 실험체는 실험변수에 관계없이 압축대 압괴 파괴
- 휨철근비에 따른 휨전단거동
 - 강섬유 부피비 1.5%: 초기 균열위치가 2/3인 경우 예외적으로 휨철근비에 관계없이 전단거동과 유사한 경향을 보임.
 - 강섬유 부피비 0.5%: 초기 균열위치에 관계없이 일반적인 철근콘크리트 거동과 유사한 경향을 보임.

(나) 짧은골재 SC의 휨 거동 평가 및 설계법 개발

① 연구배경 및 목적

- 콘크리트 압축강도 120MPa 수준을 갖는 고강도 콘크리트 보의 정적재하 실험을 통하여 순수 휨을 받는 콘크리트 보의 휨 거동 특성을 파악
- 주요설계기준에서 제시하고 있는 휨강도 평가식을 적용하여 공칭휨강도와 설계휨강도를 예측하였으며, 실험을 통해 측정된 측정값과 예측값의 비교·분석을 수행하고 휨 설계지침을 제시

② 압축 응력-변형률 모델 비교

- 휨 설계모델: 단순화된 응력-변형률 모델을 이용한다는 점에서 강도설계법(ACI 318, KCI) 개념과 한계상태설계법(EC2, 도로교) 개념은 유사함.
- EC2/도로교 기준이 ACI/KCI 기준에 비하여 더욱 다양한 응력-변형률 모델 제시

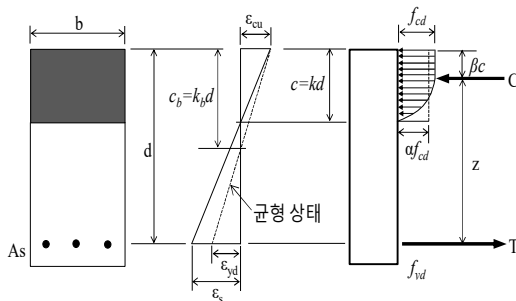
구분	단면 설계	비선형 해석
ACI 318 (KCI)		
Eurocode 2		
도로교		
JSCE		
	Rectangular P-R Bi-linear	

그림 1.13 압축 응력-변형률 모델 비교

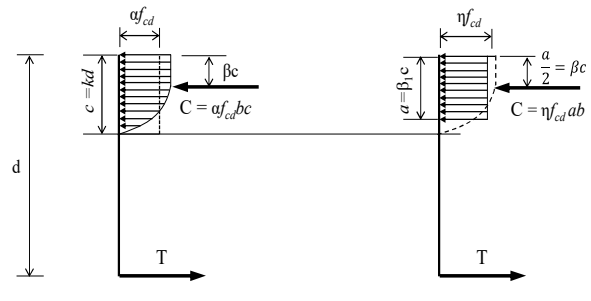
③ 휨 설계모델 제시

㉑ 휨강도 설계기법 제시

- 포물선-직선 응력 분포를 이용하여 휨강도를 산정 (그림 1.15, 그림 1.16)
- 그림 1.13과 같이 등가 사각 응력 블록을 이용하여 휨강도를 산정 (그림 1.15, 그림 1.17)
- 등가사각응력 블록은 P-R 곡선의 압축력 크기와 작용점이 같도록 작성
- 도로교 설계기준에서 90MPa까지 제시하고 있는 계수값을 SC 설계지침에서 120MPa까지 확장 (그림 1.16, 그림 1.17)



(a) 단면 (b) 변형률 분포 (c) 응력 분포
그림 1.14 휨 부재의 단면 변형률과 응력 분포



(a) 응력 분포 (b) 등가 사각 응력 블록
그림 1.15 단면설계를 위한 P-R 곡선과 등가사각응력 블록

f_{ck} (MPa)	18	21	24	27	30	35	40	50	60	70	80	90	100	110	120
f_{cm} (MPa)	22	25	28	31	34	39	44	56	66	76	86	96	106	116	126
$\epsilon_{co,r} (\times 10^{-3})$	1.83	1.90	1.97	2.03	2.09	2.18	2.26	2.42	2.57	2.68	2.79	2.80	2.80	2.80	2.80
$\epsilon_{cu,r} (\times 10^{-3})$	3.3							3.2	3.1	3.0	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8
n	2.0							1.92	1.50	1.29	1.22	1.20	1.20	1.20	1.20
$\epsilon_{co} (\times 10^{-3})$	2.0							2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.65	2.65
$\epsilon_{cu} (\times 10^{-3})$	3.3							3.2	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.65	2.65

도로교설계기준

SC설계지침

그림 1.16 해석/설계를 위한 응력-변형률 곡선의 계수값

등급	콘크리트 강도 f_{ck} (MPa)	η		β_1	
		계산값	제안값	계산값	제안값
C10	10	0.97	1.00	0.82	0.80
C20	20	0.97	1.00	0.82	0.80
C30	30	0.97	1.00	0.82	0.80
C40	40	0.97	1.00	0.82	0.80
C50	50	0.96	0.97	0.82	0.80
C60	60	0.94	0.95	0.76	0.76
C70	70	0.91	0.91	0.73	0.74
C80	80	0.88	0.87	0.71	0.72
C90	90	0.85	0.84	0.70	0.70
C100	100	0.81	0.80	0.69	0.68
C110	110	0.79	0.80	0.69	0.68
C120	120	0.79	0.80	0.69	0.68

그림 1.17 압축 합력의 계수값

④ 휨 구조성능 실험

㉠ 실험계획 및 수행

- 실험 목적: SC80/100/120 부재 휨성능 평가 (강도/연성)
- 실험 변수: 33개 실험체 (SC80, SC100, SC120)
 - 콘크리트 압축강도 (SC80/SC100/SC120)
 - 휨 철근량
 - 철근의 강도 (SD 400, SD 600)
 - 단면크기 (200×250, 200×300 mm)

⑤ 휨 설계모델 검증

㉠ 휨 설계모델 검증

- SUPER 콘크리트 구조설계지침(2016), 콘크리트구조기준(2012) 및 EC2의 재료계수는 각각 $\gamma_c = 1.0$, $\gamma_s = 1.0$ 을 사용
- 주요설계기준의 $M_{test}/M_{n,code}$ 비는 그림 1.18과 같음.
- SUPER Concrete 지침에서 제시하는 비선형해석모델/P-R곡선모델 /직사각형모델의 공칭휨강도는 SC80, SC100, SC120 부재의 휨강도를 합리적으로 예측 $\Rightarrow$ 도로교 설계기준의 응력-변형률 모델 확장

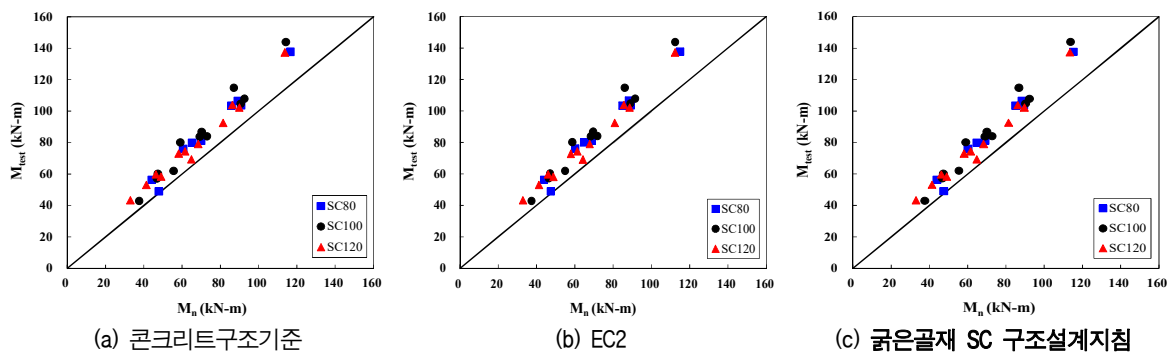


그림 1.18 실험값 / 제시모델값 비교

(2) SUPER Concrete 압축 거동 평가 및 설계법 개발

(가) SC180급 기둥의 압축성능 평가

① SC180 사각기둥 압축성능 평가

㉠ 실험 계획 및 수행

- 주철근 종류와 띠철근의 간격과 강섬유 부피비를 변수로 하여 실험체 제작 (SC180f: 5개)
- 180MPa급 콘크리트는 철근 배근 상황을 고려하여 16mm와 19mm 강섬유를 하이브리드로 혼합하여 1.5%를 적용한 배합과 13mm의 강섬유를 2% 적용한 배합을 각각 사용함.

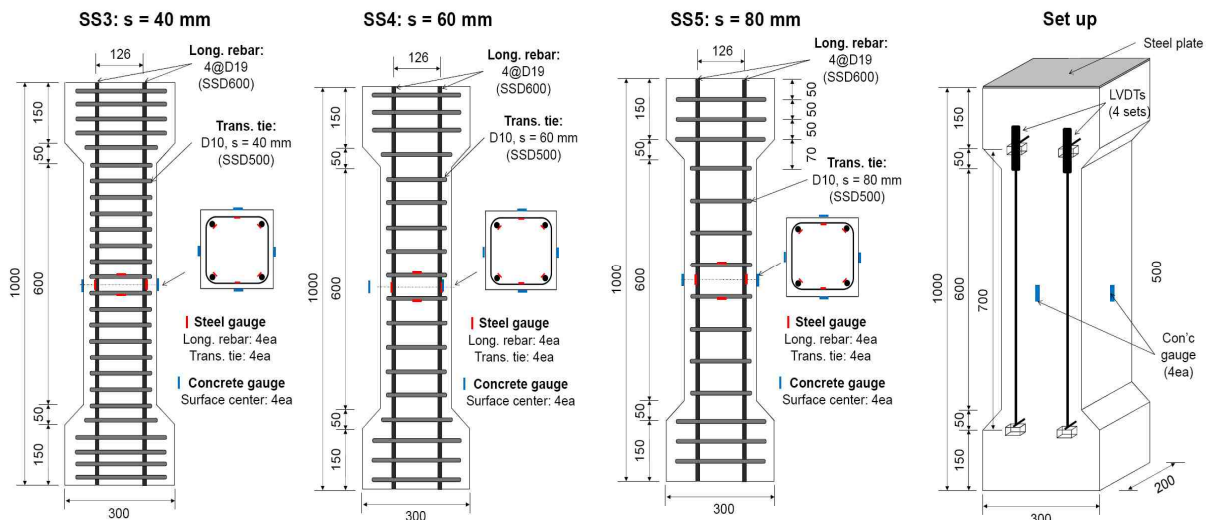


그림 2.1 SC180f 사각기둥 압축실험 부재

㉡ SC180f 부재의 압축성능 평가

- 각 시험체의 극한 하중 및 극한 변형률은 표 2.1과 같고 6.0~7.5MN의 최대하중과 0.0032~0.0048mm/mm의 변형률 측정
- 하중 제어의 실험 조건상 극한하중 이후의 변형 연화 구간은 관측하기 어려웠으며, 추후 실험에서는 변형 제어의 실험을 수행할 필요가 있음.
- 부재 중앙의 파괴를 유도하였으나, 부재 상단의 편심 제어와 헌치부에서의 응력 집중으로 인해 부재 중앙의 파괴보다는 두부 및 헌치부에서의 쪼갬 파괴의 현상이 나타남.

표 2.1 중실 사각 기둥의 압축 거동

Specimen ID	19mm, 16mm vf = 1.5%		13mm vf = 2.0%	
	Ultimate load (kN)	Ultimate strain (mm/mm)	Ultimate load (kN)	Ultimate strain (mm/mm)
SS1	6,220	0.0038	6,014	0.0032
SS2	7,260	0.0048	7,212	0.0043
SS3	6,787	0.0035	7,196	0.0043
SS4	7,026	0.0037	7,447	0.0037
SS5	7,111	0.0035	7,556	0.0037

② 박판 UHPC의 좌굴성능 평가

㉠ 실험 계획 및 수행

- 박판 부재의 두께는 25mm로 고정하고, 부재의 길이를 500mm~1500mm로 달리하여 실험체 제작 (SC180f: 5개)

- 사각 기둥 실험체와 같이 16mm와 19mm 강섬유를 하이브리드로 혼합하여, 1.5%를 적용한 배합(1)과 13mm의 강섬유를 2% 적용한 배합(2)을 각각 사용

㉞ 좌굴거동 실험 결과 및 분석

- 부재 길이/두께 비(l/t)가 60인 TB5 부재를 제외하고는 최대하중 이후에 급작스럽게 중앙에서 균열이 확장되는 파괴형태가 나타남. 시험결과는 표 2.2와 같음.

표 2.2 박판 UHPC의 극한 상태 하중 및 변형

Specimen ID	19,16mm $v_f = 1.5\%$			13mm $v_f = 2.0\%$		
	Peak load (kN)	Midspan Disp. (mm)	Midspan long. strain ($\times 10^{-6}$)	Peak load (kN)	Midspan disp. (mm)	Midspan long. strain ($\times 10^{-6}$)
TB2	123.4	7.94	286	219.4	9.29	249
TB3	104.2	11.17	739	189.6	13.41	388
TB4	116.6	9.72	334	241.6	5.39	234
TB5	59.8	13.06	314	74.4	13.27	389

(나) SC180급 파이프의 압축성능 평가

① SC180f 원형파이프의 압축성능 평가 실험

㉞ 실험 계획 및 수행

- 부재 단면의 면적을 $40,000\text{mm}^2$ 이내로 하고 단면의 형상을 변수로 하여 실험체 제작 (SC180f: 6개)
- 180MPa급 콘크리트는 부재의 두께가 얇고 철근이 밀집해 있는 상황을 고려하여 13mm의 강섬유를 2% 적용

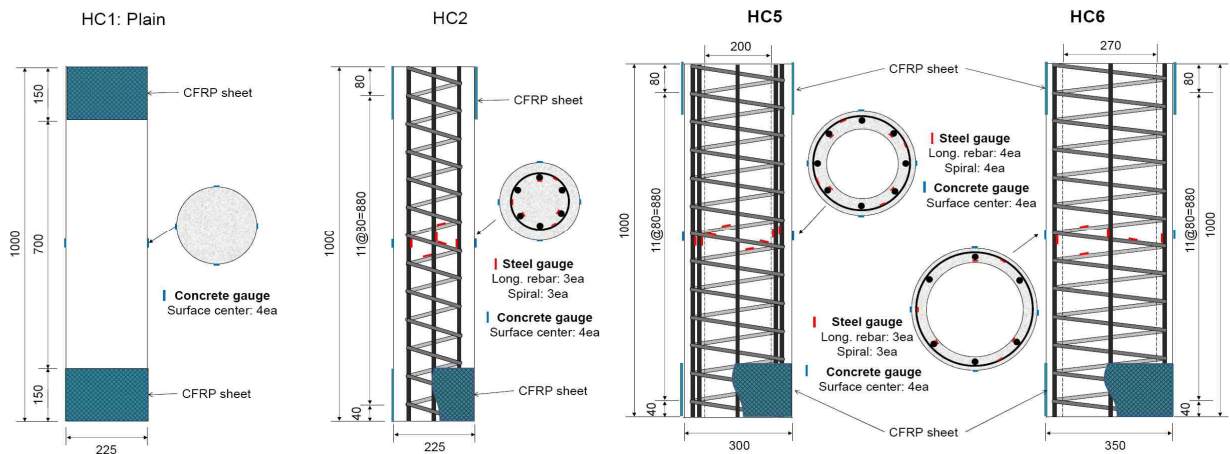


그림 2.2 원형 SC 파이프 실험체

㉞ SC파이프 편심 압축성능실험 결과 및 분석

- 각 시험체의 극한 하중 및 극한 변형률은 표 2.3과 같음.
- 하중-변형률 관계는 하중 제어의 실험 조건상 극한하중 이후에는 급격히 하중이 감소하고 변형 연화 구간은 관측하기 어려웠음.

표 2.3 원형 SC 파이프 실험 최대 하중 및 최대 변형률

Specimen ID	Peak load (kN)	Peak average strain ($\times 10^{-6}$)
HC1	6248	2896
HC2	7442	3109
HC3	5495	2078
HC4	4059	1808
HC5	4719	1932
HC6	3570	1519



그림 2.3 SC파이프 압축실험

(다) 섬유보강 SUPER Concrete의 압축 거동 평가

① 섬유보강 SC 기둥부재의 압축성능 평가 및 설계법

㉠ 구조성능 실험

- SC120f~180f의 사각형 단면($220 \times 220\text{mm}$)과 원형 단면(직경 250mm 및 340mm)의 기둥 23개를 제작하여 중심축 하중 재하 실험을 수행하여 압축 거동 평가 (사각부재: 11개, 원형부재: 12개)
- 기둥 부재의 높이 900mm, 중앙 600mm에 대해서, 실험 변수에 따른 횡보강 철근량을 배치(보강재의 정착 및 부착 특성). 중심축 하중을 재하하고 변위제어로 실험을 수행
- 사각형 단면은 콘크리트 강도(120f, 150f, 180f)와 연성비(ductility)를 변수로 설정
- 원형 단면은 실험체 단면적(250mm 및 340mm)과 콘크리트 강도(120f, 150f, 180f), 나선철근량을 변수로 함.

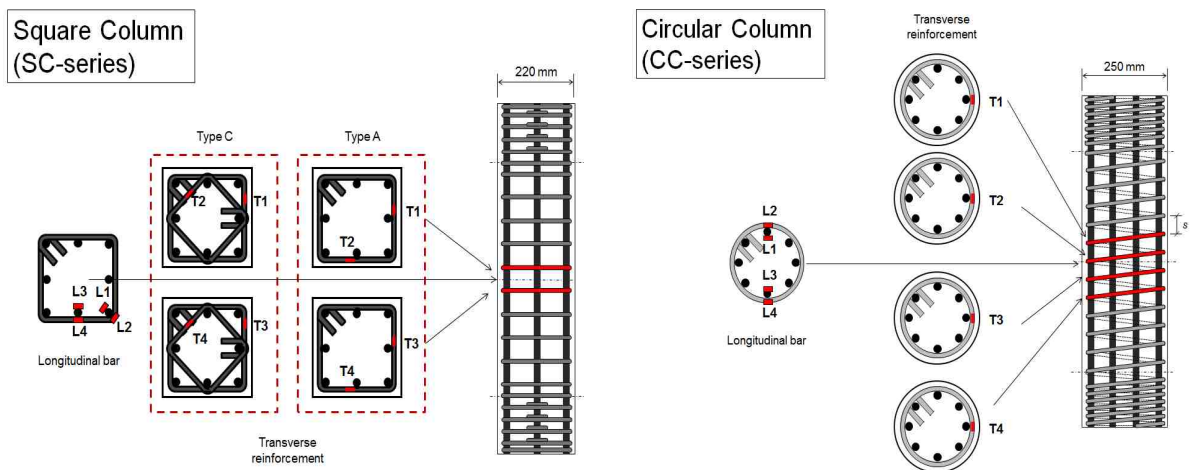


그림 2.4 섬유보강 SC 압축부재의 성능평가 실험(횡방향 보강 영향)

표 2.4 사각형 기둥 부재 상세

	No.	f_{ck}	Longitudinal rebar			Transverse reinforcement			Reinforcement ratio			연성도
			Dia.	f_{yl}	ρ_l	Dia.	s (mm)	f_{yh}	A_g/A_{ch}	ρ_{sh}/ρ_{code}	ρ_s (volume)	
Square column ($220 \times 220\text{mm}$)	SC1	180f	8D16	497.5	3.233	D10	40	550	1.34	0.53	3.60%	
	SC2	180f	8D16	497.5	3.233	D10	54	550	1.34	1	4.50%	2.5
	SC3	180f	8D16	497.5	3.233	D10	40	550	1.34	1.01	6.10%	4
	SC4	180f	8D16	497.5	3.233	D13	40	495	1.34	1	10.80%	ACI318-14
	SC5	150f	8D16	497.5	3.233	D10	48	550	1.34	0.53	3.00%	
	SC6	150f	8D16	497.5	3.233	D10	65	550	1.34	1	3.70%	2.5
	SC7	150f	8D16	497.5	3.233	D10	48	550	1.34	1.01	5.10%	4
	SC8	120f	8D16	497.5	3.233	D10	165	550	1.34	0.2	0.90%	1.5
	SC9	120f	8D16	497.5	3.233	D10	60	550	1.34	0.53	2.40%	
	SC10	120f	8D16	497.5	3.233	D10	80	550	1.34	1.01	3.00%	2.5
	SC11	120f	8D16	497.5	3.233	D10	60	550	1.34	1.01	4.00%	4

표 2.5 원형 기둥 부재 상세

	No.	f_{ck}	Longitudinal rebar			Transverse reinforcement				Reinforcement ratio		
			Dia.	f_{yt}	ρ_l	Dia.	Area (mm ²)	s (mm)	f_{yh} (mm)	A_g/A_{ch}	h_c	ρ_s (volume)
Circular column (250mm dia.)	CC1	180f	8D16	497.5	3.233	D10	71.33	35	550	1.34	206.5	3.60%
	CC2	150f	8D16	497.5	3.233	D10	71.33	42	550	1.34	206.5	3.00%
	CC3	120f	8D16	497.5	3.233	D10	71.33	52	550	1.34	206.5	2.40%
	CC4	180f	8D16	497.5	3.233	D13	126.7	40	495	1.34	206.5	5.50%
	CC5	150f	8D16	497.5	3.233	D10	71.33	30	550	1.34	206.5	4.20%
	CC6	120f	8D16	497.5	3.233	D10	71.33	38	550	1.34	206.5	3.30%
Circular column (340mm dia.)	CC7	180f	8D22	497.5	3.411	D13	126.7	35	495	1.45	290.5	3.63%
	CC8	150f	8D22	497.5	3.411	D13	126.7	42	495	1.45	290.5	2.97%
	CC9	120f	8D22	497.5	3.411	D13	126.7	52	495	1.45	290.5	2.52%
	CC10	180f	8D22	497.5	3.411	D13	126.7	40	495	1.45	290.5	5.45%
	CC11	150f	8D22	497.5	3.411	D13	71.33	30	495	1.45	290.5	4.09%
	CC12	120f	8D22	497.5	3.411	D13	71.33	38	495	1.45	290.5	3.27%

㉔ 섬유보강 구조설계법 제시

- 현행 K-UHPC 설계에서는 압축부재의 설계 내용이 없고 휨-압축에 대한 전반적인 내용만을 다루고 있음. 또한 콘크리트 구조기준과 ACI 318의 기둥 설계는 일반 내용과 내진 설계 부분이 별도로 구성되어 있음.
- CSA의 에너지 소산에 따른 연성도는 모멘트-골조의 저항능력에 따라 1.5 (conventional construction), 2.5 (moderately ductile), 4 (ductile)의 3단계로 구분
- 나선 철근량에 대한 제한 조건은 다음 식과 같으며, **현행 기준이 다소 보수적임.**

$$\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_y} \quad : \text{CSA 2004 \& ACI 318-14}$$

$$\rho_s = 0.5 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right)^{1.4} \frac{f'_c}{f_y} \quad : \text{CSA 2014}$$

- 이에 따라, CSA(Canadian Standard Association)-2014와 ACI 318-14의 설계 내용을 반영하여 보완하되, 연성도(ductility)와 나선철근량에 대한 실험결과도 동시에 반영하여야 함.

(라) 짧은골재 SUPER Concrete(SC80)의 압축 거동 평가

① SC80 기둥부재의 압축성능 평가

㉔ 구조성능 실험 (횡방향 보강 영향)

- 직사각형 단면 형상을 갖는 SC80의 콘크리트 기둥 부재를 총 12개로 제작하여 일축 압축하중 재하 실험을 통해 압축 거동 특성을 파악함. (SC80: 12개)
- 실험부재의 변수는 **횡방향 철근의 형상 및 간격, 피복두께**로 설정함.
- 횡방향 철근의 상세는 그림 2.5와 같고 시험체의 단면은 그림 2.6과 같으며, 종방향 및 횡방향 철근의 항복강도는 모두 400MPa로 동일함.

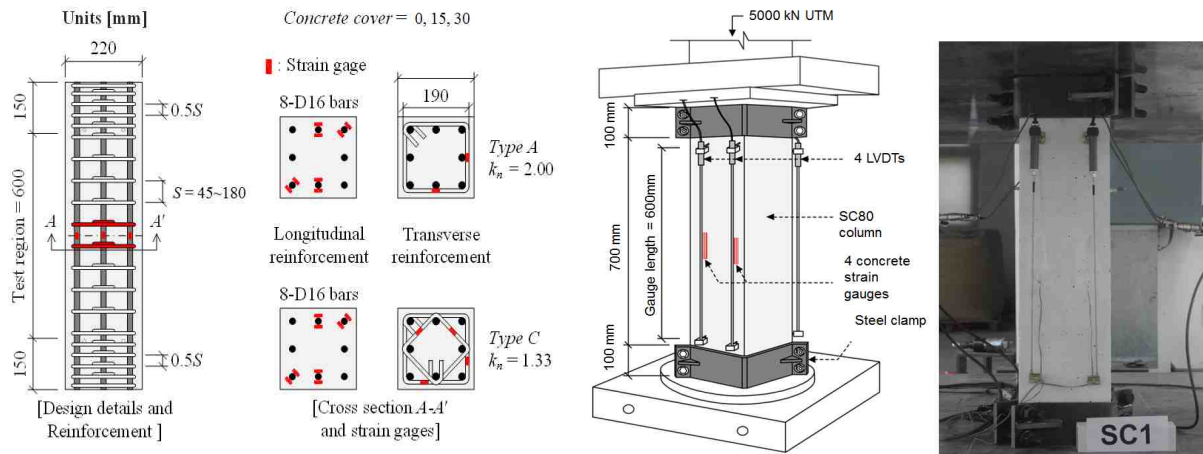


그림 2.5 SC80 압축성능 실험

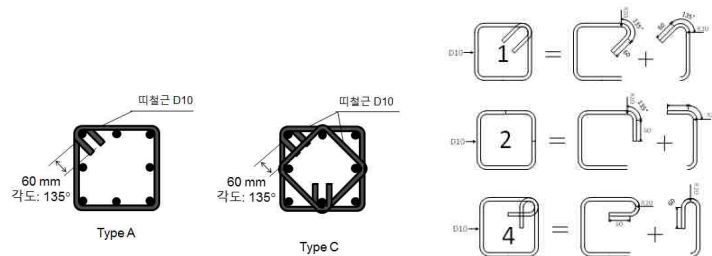


그림 2.6 횡방향 철근 상세 (횡방향 보강 영향)

㉠ SC80 기둥의 압축성능 평가

- 실험 결과에 따른 실험 부재 단면의 강도 및 파괴 모드는 표 2.6과 같음.
- 횡방향 철근량이 충분하지 않은 SC4 부재를 제외한 나머지 부재에서는 최대하중/공칭강도비가 모두 1을 상회하는 것으로 나타남.

표 2.6 굵은골재 SC 부재의 시험 결과

Column No.	Axial loads								Axial strain	Final failure mode
	P_{yield} (kN)	$\frac{P_{yield}}{P_{max}}$	P_{max} (kN)	$\frac{P_{max}}{P_o}$	P_c (kN)	$\frac{P_c}{P_{oc}}$	P_{cc} (kN)	$\frac{P_{cc}}{P_{occ}}$	$\epsilon_{cP_{max}}$	
SC1	3987	0.892	4468	1.170	3832	1.204	3104	1.265	0.0031	Rebar buckling
SC2	3689	0.873	4226	1.107	3590	1.128	2862	1.166	0.0030	Rebar buckling
SC3	3644	0.8	4556	1.193	3920	1.232	3192	1.300	0.0030	Rebar buckling
SC4	2086	0.556	3750	0.982	3114	0.978	2386	0.972	0.0032	Concrete crushing (Brittle)
SC5	3532	0.797	4431	1.160	3795	1.192	3067	1.249	0.0039	Rebar buckling
SC6	2242	0.64	3502	1.125	2866	1.157	2844	1.158	0.0031	Rebar buckling
SC7	2801	0.75	3733	1.199	3097	1.250	3075	1.252	0.00391	Rebar buckling
SC8	3155	0.71	4445	1.038	3809	1.044	2617	1.066	0.0037	Clamp breaking
SC9	3437	0.759	4527	1.057	3891	1.067	2699	1.099	0.0043	Rebar buckling
SC10	2668	0.747	3572	1.147	2936	1.185	2914	1.187	0.0032	Clamp breaking
SC11	3065	0.83	3680	1.182	3044	1.229	3022	1.231	0.0036	Rebar buckling
SC12	2742	0.704	3893	1.250	3257	1.315	3235	1.318	0.0032	Rebar buckling

(3) SUPER Concrete 전단/휨전단 거동 평가 및 설계법 개발

(가) 섬유보강 SC의 전단/휨전단 거동 평가 및 설계법 개발

① 전단/휨전단 설계기준 분석

㉠ UHPC 전단강도 모델 분석

- AFGC(프랑스토목학회)에서 발간한 ‘UHPFRC 설계지침’
- JSCE(일본토목학회)에서 발간한 ‘초고강도 섬유보강콘크리트의 설계·시공지침(안)’
 - 주요 파괴모드는 사인장균열에 의한 전단파괴로 보고 콘크리트 스트럿 압괴에 의한 극한강도를 넘지 않도록 규정
 - 사인장균열에 의한 전단강도는 매트릭스 전단강도와 강섬유 전단강도의 합으로 정의

㉡ UHPC 휨전단강도 모델 분석

- AFGC는 국부적 효과를 고려한 강섬유 방향성 계수로 안전율을 낮춘 응력값의 제한으로 정의한 반면, JSCE는 크기효과, 철근비 제한 등을 고려함.
- 위험단면: 기둥면부터 슬래브두께의 0.5배에 해당하는 슬래브 폭 이내
- 유로코드 RC 내용과 유사하며, 주요변수는 위험단면 폭과 유효슬래브두께로 나타나는 위험단면 넓이, 전단 파괴 방향과 수직 방향의 인장력

② 전단/휨전단 설계모델 개발

	전단 강도모델	휨전단 강도모델
FRSC 전단강도	· 사인장균열파괴: $V_d = V_{rpsc} + V_{fd} + V_{sd} + V_{ped}$ 전단저항=콘크리트+강섬유+스트럿+긴장력 · 콘크리트스트럿 압괴: $V_{wcd} = \phi [0.84 f_{cd}^{2/3} \sin(2\beta_u) b_w d]$	$V_{ped} = \phi f_{vd} u_p d$
모델링개념 (파괴모드)	· 사인장 균열 파괴: 복합재료로서 단일 항이 아닌, 섬유보강 SUPER Concrete 내 매트릭스강도(기존 콘크리트강도)와 강섬유강도의 합	· 일반 철근콘크리트의 설계개념과 동일 (위험단면에서의 2방향 국부파괴)
주요변수	$V_{rpsc} = \phi (0.18 \sqrt{f_{cd}} b_w d)$ · 크기효과에 대한 고려 없음 $V_{fd} = \phi \frac{f_{vd}}{\tan \beta_u} b_w z$	$f_{vd} = \frac{1}{w_v} \int_0^{w_v} \phi \sigma_k(w) d_w$ 사인장균열 직각방향의 설계평균 인장강도

그림 3.1 섬유보강 SC 전단/휨전단 설계모델 개발

㉠ 섬유보강 SC 전단설계

- 섬유보강 SC 전단강도식

- 보 부재의 설계전단강도는 매트릭스 전단강도, 강섬유 분담 전단강도, 전단보강재와 축방향 긴장재에 의한 전단강도의 합으로 나타냄.

$$V_d = V_{rpsc} + V_{fd} + V_{sd} + V_{ped} \quad (3.1)$$

- 복부 콘크리트의 전단에 대한 사인장 압축강도는 식 (3.2)로 정의

$$V_{wcd} = \phi_b [0.84 f_{cd}^{2/3} \sin(2\beta_u) b_w d] \quad (3.2)$$

㉡ 섬유보강 SC 휨전단 설계

- 섬유보강 SC 휨전단강도식

- 면 부재에 국부적인 하중이 작용하는 경우, 설계휨힘전단강도식

$$V_{pcd} = \phi_b f_{cd} u_p d \quad (3.3)$$

③ 전단 성능평가 및 설계모델 검증

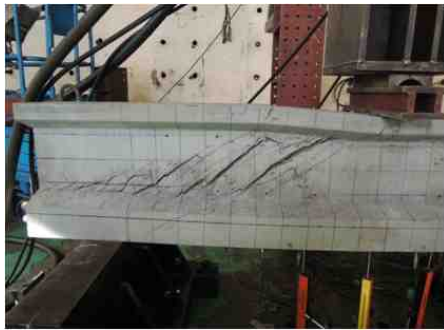
㉔ 보의 전단 성능평가

- 실험 개요

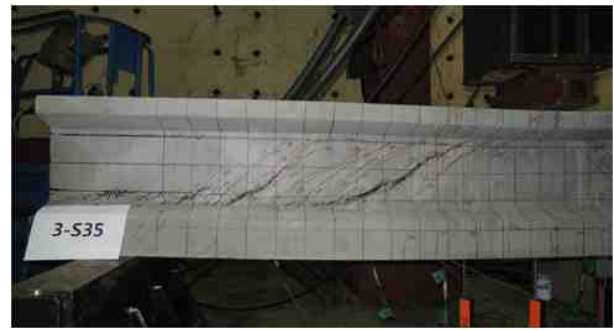
- 섬유보강 SC 3종(SC180f, SC150f, SC120f)에 대해 전단지간비(a/d)와 크기효과(d)를 실험변수로, 총 9개의 I형 보를 제작, 정적하중 재하 실험 수행 (섬유보강 SC: 9개)
- I형 단면 복부에는 스티럽 배근없이 강섬유에 의한 재료 인장강도에 의해 지지되도록 하였으며, 휨 철근은 충분히 크게 배근하여 복부 전단파괴 유도

- 전단지간비(a/d)에 따른 실험체 파괴 형상 (그림 3.2)

- 전단지간비가 2.5인 경우: 최대강도 도달 후 즉시 주균열과 가력부 사이에 압괴 혹은 상부 플랜지 변형으로 취성적 최종 파괴
- 전단지간비가 3.5인 경우: 최대강도 도달 후에도 주균열이 계속해서 벌어지면서 대변형을 수반하면서 연성 구간을 일부 유지하였으며, 상부 플랜지 변형으로 최종 파괴



(a) a/d=2.5인 경우 파괴 형상



(b) a/d=3.5인 경우 파괴 형상

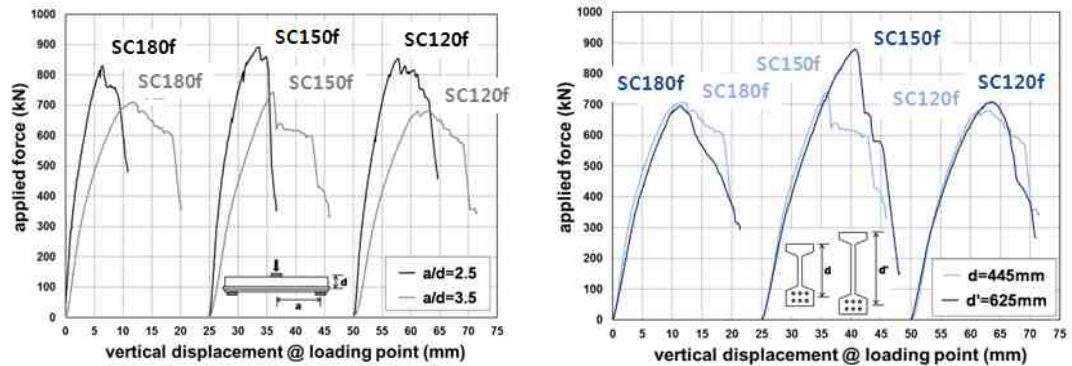
그림 3.2 전단지간비(a/d)에 따른 실험체 파괴 형상

- 크기효과(d)에 따른 균열 및 파괴 거동

- 최대강도는 주균열에 의한 사인장 파괴에 의해 결정되며, 유효높이가 클수록 휨인장변형이 더욱 눈에 띄게 나타남. (그림 3.3)
- 최대전단응력($\tau_u = V_u / (b_w d)$)에 대해 실험변수를 비교해보면, 크기효과에 의해 최대전단응력이 감소하는 경향이 확인됨.

- 실험결과 분석

- 초기 균열 및 파괴모드는 크기효과보다 전단지간비가 지배: 전단지간비가 2.5인 경우는 아치효과가 나타나며, 전단지간비가 3.5인 경우는 휨인장균열이 발생하고 유효높이가 커질수록 이러한 경향이 증대
- 파괴모드는 실험변수에 관계없이 주균열에 의한 사인장 파괴로 모든 실험체에서 동일하게 나타남.



(a) 전단지간비(a/d)에 따른 결과 (d=445mm) (b) 크기효과(d)에 따른 결과 (a/d=3.5)

그림 3.3 실험변수에 따른 전단 하중-변위 관계

㉔ 보의 전단 설계모델 검증

- 설계예상값과 실험값을 비교한 결과, 섬유보강 SC 전단강도식은 실험결과의 64%로 충분한 안전율을 확보하고 있음을 확인 (그림 3.4과 표 3.1)

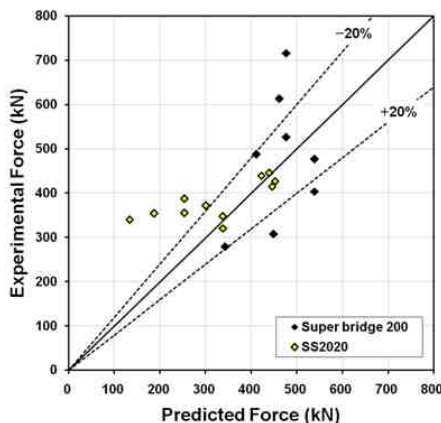


그림 3.4 전단강도 설계예상값과 실험결과값 비교

표 3.1 SCf 전단설계지침 제안식의 검증

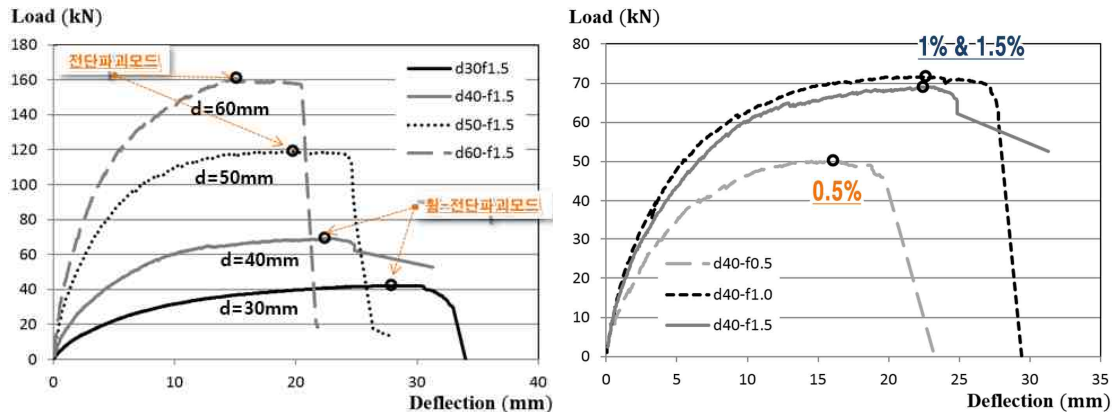
Specimen ID	실험값 (kN)	설계값 (kN)	설계값/실험값
	A	B	B/A
1-S25	415.6	343.2	0.827
1-S35	355.6	195.5	0.550
1-S35-b	347.6	260.3	0.749
2-S25	445.9	338.7	0.760
2-S35	371.8	231.5	0.623
2-S35-b	439.7	325.2	0.740
3-S25	427.7	348.1	0.814
3-S35	340.3	102.5	0.301
3-S35-b	354.5	144.0	0.406
평균			0.644

④ 뿔립전단 성능평가 및 설계모델 검증

㉔ 슬래브의 뿔립전단 성능평가

- 실험 개요
 - 실험변수는 슬래브 두께(t)와 강섬유 부피비(V_f)이며, SC180f의 7개의 1600×1600mm 정사각형 형태의 슬래브를 제작, 정적하중 재하 실험 수행 (SC180f: 7개)
 - 재하판의 크기는 50×50mm로, 휨파괴를 유도하지 않는 크기 내에서 브릿지 데크의 운하중을 형상화
- 실험변수에 따른 하중-변위 관계 (그림 3.5)
 - 슬래브 두께가 증가함에 따라 강성과 강도가 비례하여 증대됨: 슬래브 두께가 50, 60mm인 경우는 뿔립전단 거동이 뚜렷, 슬래브 두께가 30, 40mm로 얇은 경우는 휨 거동을 동시에 보이며 뚜렷한 하중증가 없이 변형만 크게 증가되는 경향
 - 강섬유 부피비가 1.0%와 1.5%의 경우 하중-변위관계가 유사하여 큰 차이가 없으며, 강섬유 부피비 0.5%의 경우는 강성 및 강도가 줄어듦: 강섬유 부피비에 따른

- 재료인장강도의 경향과 유사하여, 재료인장강도에 비례
- 슬래브 두께에 따른 뚫림전단 파괴형상
 - 슬래브 두께가 30mm인 경우를 제외하고, 콘형태로 재하면에서 일정거리를 두고 파괴단면이 형성되며 슬래브 두께가 증가함에 따라 인장측 파괴 면적이 크게 증대
 - 슬래브 두께가 30mm인 경우는 슬래브 두께 40mm인 경우보다 파괴 면적이 오히려 증가하였으며 콘형태가 아닌 일방향으로 길어진 형태를 보임.



(a) 슬래브 두께에 따른 영향 (b) 강섬유 부피비에 따른 영향
그림 3.5 실험변수에 따른 뚫림전단 하중-변위 관계

㉔ 슬래브의 뚫림전단 설계모델 검증

- 설계예상값과 실험값을 비교한 결과 섬유보강 SC 뚫림전단강도식은 실험결과와의 87%로 충분한 안전율을 확보하고 있음을 확인 (표 3.2)

표 3.2 부재의 균열하중 및 극한하중

Specimen ID	main parameter		test results		verification	
	Slab thickness (mm)	Fiber volume ratio (%)	δ_{max} (mm)	V_u (kN)	V_{pred} (kN)	$\frac{V_{pred}}{V_u}$
D30-f1.5	30	1.5	27.90	42.19	45.04	1.07
D40-f1.5	40	1.5	22.44	69.05	67.56	0.98
D50-f1.5	50	1.5	19.81	118.94	93.83	0.79
D60-f1.5	60	1.5	15.12	160.80	123.86	0.77
D40-f1.0	40	1.0	22.65	71.65	63.88	0.89
D40-f0.5	40	0.5	16.1	50.33	51.20	1.02
D40-f0.0	40	0.0	4.13	15.43	9.53	0.62
평균						0.87

⑤ 섬유보강 SC의 균열-파괴거동 (size effect)

㉔ 크기효과를 고려한 복합모드 파괴거동

- 실험계획 (표 3.3과 그림 3.6)
 - 실험목표: 노치가 있는 3점 재하 보 실험을 통해 섬유보강에 의한 미세균열구간과 크기효과에 대해 알아보고, 균열진행방향에 따라 순수인장과 면내전단이 동시에 작용하는 혼합 모드 파괴에서 면내전단 기여도 파악 (24개 실험체(SC180f))
 - 실험변수: 강섬유 부피비(V_f), 실험체 높이(h), 초기균열 발생 위치($2x/l$)

표 3.3 실험 변수

specimen ID	$V_f(\%)$	$h(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	$2x/l$			
A1 - 1,2,3,4	1.5	100	100	0	1/3	1/2	2/3
A2 - 1,2,3,4		250		0	1/3	1/2	2/3
A3 - 1,2,3,4		500		0	1/3	1/2	2/3
B1 - 1,2,3,4	0.5	100		0	1/3	1/2	2/3
B2 - 1,2,3,4		250		0	1/3	1/2	2/3
B3 - 1,2,3,4		500		0	1/3	1/2	2/3

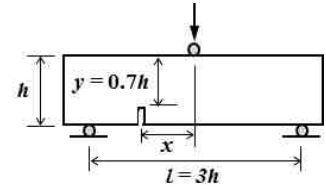


그림 3.6 실험체 설계 변수

- 강섬유 혼입량에 따른 파괴역학 변수 고찰 (등가탄성균열모델 적용)
 - 임계유효탄성균열길이 및 부재크기에 대한 비율(a_c/h)이 유사한 반면, 파괴에너지 및 응력집중계수 등에는 약 3배의 차이(미세균열 구간크기로 해석)
- 크기효과 검토 (그림 3.7)
 - 강섬유 부피비 1.5%: 부재크기에 따른 최대강도 및 취성도에 경향성은 없으며, 휨 거동에 비선형성이 크게 나타남.
 - 강섬유 부피비 0.5%: 부재크기에 따른 최대강도는 감소하지 않으며, 취성도는 크기에 따라 증가

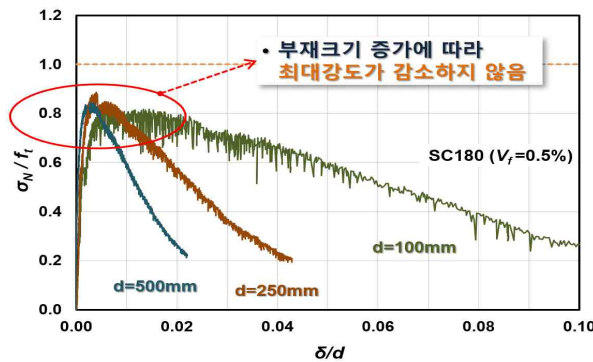


그림 3.7 재료인장강도 및 부재크기로 정규화된 하중-변위 곡선

- 최대응력기준을 기준한 휨-전단균열 진전 시 면내전단 기여도 비교
 - 휨전단 균열 진전방향: 높이 500mm 실험체에서는 균열진전이 선형성을 보이며, 균열위치에 따른 균열진전각도의 변화가 가시적으로 나타남
 - 실험결과에 따른 실험체별 평균 균열진전각도와 최대응력에 따른 재료별 면내전단 기여도를 비교한 결과, 강섬유보강 SUPER Concrete의 면내전단기여도는 무시할 수 없을 정도로 크게 나타남.
- ④ 섬유보강 SC의 균열-파괴거동
 - 크기효과를 고려한 복합모드 파괴거동
 - 실험적으로 500mm 이하, 이론적으로 1000mm 이하 크기의 섬유보강 SC 보 휨거동에 대해 휨철근이 없는 경우에도 크기효과를 무시할 수 있음.
 - 크기효과에 대한 기존연구가 최대 시편 크기 150mm로 분석된 것에 비해 실제 부재사이즈에 가까운 실증적인 자료를 제시
 - 최소전단철근비 제한 규정 확인
 - 섬유보강 SC는 재료적 성질에 의해 전단거동에 효과적으로 저항함을 확인
 - 휨철근이 배근된 보의 대균열 파괴에 의한 연성도 검토
 - 콘크리트-철근 부착파괴가 발생하지 않으며, 강섬유 부피비에 관계없이 최종파괴는

대균열 국부변형에 의해 일어남.

- 노치 주변에서 균열이 철근을 따라 발생하지 않으며, 대균열을 기준으로 강제거동을 하는 것으로 가정하여 해석 가능

⑥ 섬유보강 SUPER Concrete와 기존 섬유보강 콘크리트의 전단성능 비교

㉑ 기존 섬유보강콘크리트 전단강도 모델 분석

- 섬유보강콘크리트(Fiber reinforced concrete, FRC)와 SUPER Concrete의 재료성질

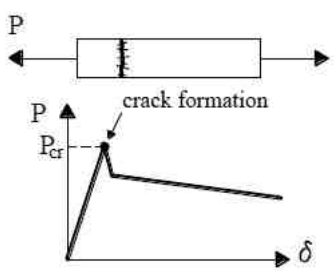
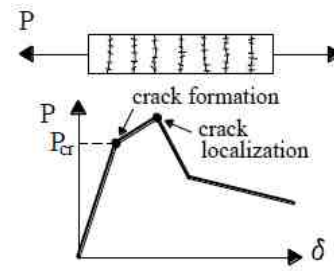
- FRC는 보강섬유 및 콘크리트 종류가 다양하나, 구조용으로는 골재가 있는 일반콘크리트에 강섬유를 사용하는 것이 일반적.
- SUPER Concrete는 HPC(High-Performance Concrete)계열로 골재없는 시멘트계 화합물을 콘크리트로 사용하며 공극이 거의 없는 미세구조로 강섬유와 부착응력이 뛰어나, 압축과 인장 재료성능이 모두 뛰어나. (높은 강도 · 강성, 인장경화거동)

- fib model code 2010의 FRC기준과 SUPER Concrete 구조성능 비교

- FRC의 전단구조성능은 강도 및 연성증대 효과로 설명할 수 있고, 이는 강도설계식에서 재료인장강도로 반영하나 기본적인 구조거동은 RC를 기반으로 함.
- SUPER Concrete는 구조거동에서 미세균열 발생 이후에도 강성저하가 거의 없으며 전단강도식에서 강섬유기여분을 별도로 고려할 정도로 강도증가 기여분이 큼.

- SUPER Concrete 구조성능을 이용한 부재설계 응용

- 높은 재료강도 및 철근량 저감에 따른 세장한 단면설계가 가능.
- 고내구성을 요하는 경량부재 설계에 유리.

		섬유보강콘크리트(FRC)	섬유보강 SUPER Concrete
재료 성능	압축	일반 콘크리트와 유사 $f'_c = 30 \sim 40 \text{ MPa}$ 가 일반적	골재없는 시멘트계 화합물, 고유동성 $f'_c = 120 \sim 180 \text{ MPa}$
	인장	3점재하 휨실험(역해석으로 인장강도 추정) $f_t = 3 \sim 4 \text{ MPa}$, 인장연화거동 	직접인장강도 실험 $f_t = 7 \sim 11 \text{ MPa}$, 인장경화거동 
구조 성능	강도설계식	$V_{Rd} = V_{Rd,F} + V_{Rd,s}$ 섬유보강효과 고려한 콘크리트기여분 $V_{Rd,F}$ 과 전단철근보강분 $V_{Rd,s}$ 의 합	$V_d = V_{rped} + V_{fd} + V_{sd}$ 콘크리트기여분 V_{rped} , 강섬유기여분 V_{fd} , 전단철근보강분 V_{sd} 의 합
	전단보강	전단철근이 배근되지 않은 경우, 일반콘크리트와 마찬가지로 크기효과와 휨철근비 등에 제한을 받음(유로코드 참고)	전단철근보강없이 설계가능하며, 이는 설계식에서 강섬유기여분을 별도 고려하는 것으로 반영하고 있음
	사용성	강섬유의 역할로 콘크리트 균열 지연에 의해 강도 및 연성도가 증가 (강섬유 및 철근량에 따라 차이가 있으나, 기본적인 균열패턴은 RC와 유사)	초기 강성이 크며 마이크로 균열에 의한 강성저하가 거의 없어, 대균열 발생 전까지 구조체 강성 저하가 크지 않음 (내구성, 사용성 개선효과가 매우 뛰어나)

(나) 상부중타 슬래브의 뚫림전단 성능평가 (오버레이 공법)

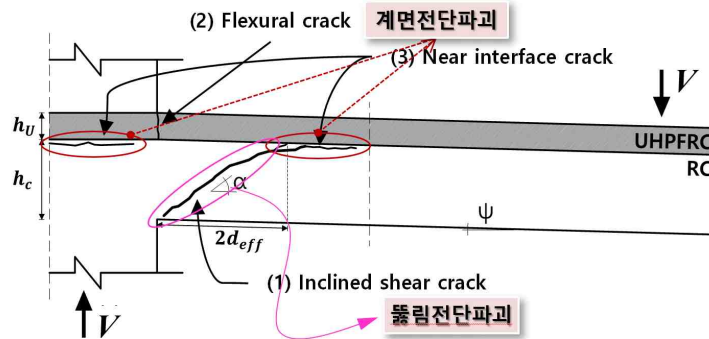


그림 3.8 섬유보강 SC로 상부중타한 슬래브의 파괴형태

- ① 섬유보강 SC로 상부중타한 슬래브의 뚫림전단설계 (오버레이 뚫림전단강도식 제시)
 - ㉓ SC180f-RC 슬래브-기둥 접합부 뚫림전단강도 설계식 현행기준 검토
 - 현행 설계기준에서 부재의 뚫림전단내력을 결정하는 주요 변수인 깊이값(d_{sc})과 인장철근비(ρ_{sc})를 각각 유효깊이값(d_{eff})과 유효인장철근비(ρ_{eff})로 대체하여 섬유보강SC의 보강효과를 반영
 - ㉔ SC180f-RC 슬래브-기둥 접합부 뚫림전단강도 설계식 제안
 - RC 면부재의 보강면이 충분히 거칠게 면처리되어 있는 경우, 면부재는 **완전합성단면**으로 가정하고 등가유효깊이 d_{eq} 와 등가위험단면 u_{peq} 를 고려

$$v_{od} = \phi_b k_s k_{bo} f_{tc} \cot \psi (c_u / d_{eq}) \quad (3.4)$$

② 뚫림전단 성능평가 및 설계모델 검증

- ㉓ 실험 개요
 - 실험계획: SC180f 상부중타된 RC 슬래브-기둥 접합부의 뚫림전단강도 V_u 에 대한 실험을 수행 (SC180f 오버레이 실험체: 5개)
 - 실험목표: SC180f 상부중타 두께와 중타부 배근 철근량을 변수로 설정하여 변수에 따른 뚫림전단강도 및 파괴모드 정립
 - 계면처리 방법: 이중 콘크리트 간 계면은 기존 연구 결과 우수한 계면 성능을 발현하는 것으로 입증된 샌드 블라스팅(Sand-blasting) 공법을 사용
- ㉔ 슬래브-기둥 접합부 실험방법
 - SC180f-RC 합성 슬래브의 뚫림전단강도 산정을 위해 모든 실험체는 대각전단균열에 의한 전단 파괴되도록 계획
 - 기둥 중심으로부터 1250mm에 위치한 방사형 포인트 8곳에서 고정단지지 후 집중하중에 의한 단조가력실험을 수행

표 3.4 SC180f-RC 슬래브-기둥 접합부 실험결과

실험체명	h_U [mm]	ρ_{sU} [%]	ρ_{sc} [%]	Failure mode	Inclined shear crack angle	Load stage		
						Cracking stage	Ultimate stage	Failure stage
					α [°]	V_{cr} [kN]	V_u [kN]	$V_{failure}$ [kN]
R	-	-	1.24	FS	29.6	126.1	644.4	636.1
U30	30	-	1.24	S/DB	26.5	200.7	758.4	707.7
U50	50	-	1.24	S/DB	22.6	235.4	908.9	855.1
U50S	50	0.226	1.24	S/DB	24.4	259.4	984.5	879.1
U50L	50	0.452	1.24	S/DB	25.5	278.2	1170.6	1157

㉔ SC180f-RC 합성슬래브 전단거동 및 파괴모드

- R : 대각전단균열파괴 (Diagonal shear)
- U30 : 대각전단균열+계면분리파괴 (Diagonal shear + Debonding)
- U50 : 대각전단균열+계면분리파괴 (Diagonal shear + Debonding)
- U50S : 대각전단균열+계면분리파괴 (Diagonal shear + Debonding)
- U50L : 대각전단균열+계면분리파괴 (Diagonal shear + Debonding)

㉕ SC180f-RC 슬래브-기둥 접합부 뚫림전단 실험결과 (표 3.4와 그림 3.9)

- SC180f 보강 레이어의 두께를 증가시킬수록 구조적 강성이 크게 증진되었으며, 내력의 경우 기준실험체 대비 U30은 약 18%, U50은 약 41% 증진
- 단면중타 보강 두께(h_U)는 합성 슬래브의 뚫림전단내력 산정에 직접 기여
- 추가 배근되는 철근량은 합성 슬래브의 구조성능에 큰 영향을 미쳤으며 내력은 기준 실험체 대비 최대 81% 향상

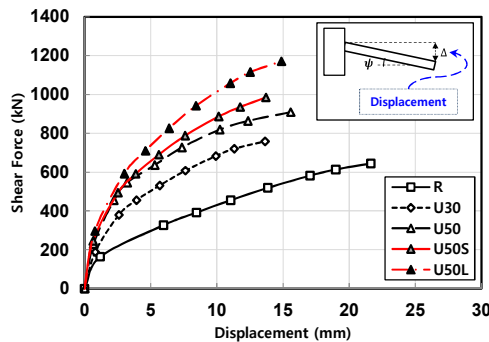


그림 3.9 SC180f-RC 슬래브-기둥 접합부 하중-변위 거동

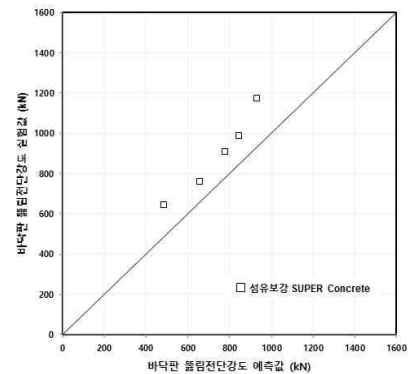


그림 3.10 비무보강 뚫림전단강도 실험값예측값 비교

㉖ 설계모델 검증

- 제안 설계식에 따른 뚫림전단강도는 실험값의 약 78%로 안전측으로 확인 (그림 3.10)

(다) 짧은골재 SC의 전단/뚫림전단 거동 평가 및 설계법 개발

① 전단/뚫림전단 설계기준 분석

㉑ 고강도 콘크리트 전단강도모델 현행기준 검토

- 전단강도에서 콘크리트 기여분 V_c

• ACI 318-11: $\sqrt{f'_c}$ 에 비례, 70MPa 이상 콘크리트에서 식 검토 필요

$$V_c = 0.17 \sqrt{70} b_w d \quad \text{where } A_v \geq A_{v, \min} \text{ (for } f_{ck} > 70 \text{MPa)}$$

- 유로코드: 유로코드는 압축강도 90MPa까지 적용되는 식으로써, 콘크리트 압축강도 외에도 크기효과 및 휨철근비 등의 변수를 함께 고려

$$V_{Rd,c} = [0.18k(100\rho f_{ck})^{1/3}]b_w d \geq v_{\min} b_w d \quad \text{where } k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0$$

- 최소 전단 철근량 (그림 3.11)

- 철근항복강도에 대한 콘크리트 압축강도로 정의된 (유효)인장강도에 최소전단철근비가 비례하는 것으로 정의
- 최소전단철근비 상수값에는 기준별로 차이가 있어, 이에 대한 검토가 필요

• ACI 318-11: $\rho_{v,\min} = 0.062 \frac{\sqrt{f_c'}}{f_{yt}} \geq 0.35/f_{yt}$

• 유로코드: $\rho_{v,\min} = 0.08 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$

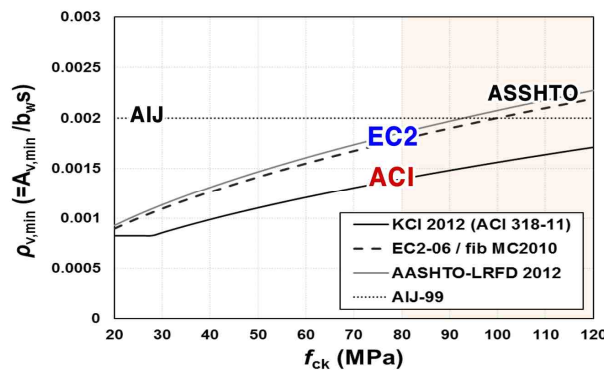


그림 3.11 압축강도에 따른 현행기준 최소전단철근비 $\rho_{v,\min}$

구분	ACI(KCI) 전단모델	EC2(도로교) 전단모델
기본개념	• 전단철근이 없는 부재 - $V_n = V_c$ • 전단철근이 배근된 부재 - $V_n = V_c + V_s$ • 전단저항 = 콘크리트 + 보강근 기여	• 전단철근이 없는 부재 - $V_n = V_c$ • 전단철근이 배근된 부재 - $V_n = V_s$ (전단철근 항복) - V_{max} (콘크리트 압괴) • 한계상태에 따라 정의
주요변수 및 강도제한	• 콘크리트 전단강도 - $V_c = 0.17 \sqrt{f_{ck}} b_w d$ • 콘크리트강도 - $f_{ck} \leq 70 \text{ MPa}$ • 철근강도 - $V_s = \frac{A_s f_y (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s)}{s_s} d$ • 영향변수 • 적용강도한계	• 콘크리트 전단강도 - $V_c = 0.18 k (100 \rho f_{ck})^{1/3} b_w d$ • 크기효과, 휨철근량, 콘크리트강도 - $f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$ • 철근강도 - $V_s = \frac{A_s f_y (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s)}{s_s} d$
최소철근비	- $A_{v,\min} = 0.0625 \sqrt{f_{ck}} \frac{b_w s}{f_y}$ • 최소철근비	- $A_{v,\min} = 0.08 \sqrt{f_{ck}} \frac{b_w s}{f_y}$

그림 3.12 SUPER Concrete 전단강도 모델 비교

② 짧은골재 SC 전단/휨전단 성능평가

㉑ 보의 전단 성능평가

- 실험 개요 (표 3.5)

- SC80 보부재 전단철근 배근량에 따른 파괴모드 정립 ($a/d=3.0$)
- SC80, SC100, SC120 콘크리트 전단강도 V_c 및 최소전단철근비 검토

표 3.5 SC80, SC100, SC120 전단보 실험변수

실험체명		f_{ck} [MPa]	d [mm]	b_w [mm]	L [mm]	ρ_l [%]	ρ_v [%]	스터럽간격 [mm]
기준실험군 (전단철근비에 따른 거동)	A1	80	520	130	2900	5.78	0.00	-
	A2						0.17	D6 @260
	A3						0.42	D10@260
	A4						1.69	D10@ 65
재료압축강도	B1	100	520	130	2900	5.78	0.00	-
	B2						0.20	D6 @220
재료압축강도	C1	120	520	130	2900	5.78	0.00	-
	C2						0.20	D6 @220
휨 철근량	C3					2.54	0.00	-
	C4						0.20	D6 @220
유효높이 (크기효과)	C5		770		4200	5.78	0.00	-
	C6						0.20	D6 @220

- 전단철근량에 따른 보의 전단거동 (그림 3.13, 3.14)
 - 초기균열: 가력부에서 d 떨어진 위치에서 45° 복부 사인장 균열 발생
 - 전단보강근이 배근되지 않은 보: 발생한 균열폭이 커지면서 복부에 더 이상 사인장 균열이 발생하지 않음.
 - 최소전단보강근이 배근된 보: 최고강도는 스테럽이 최종적으로 항복하는 순간, 혹은 이보다 조금 더 버티면서 압축대 파괴를 수반하며 기록됨.

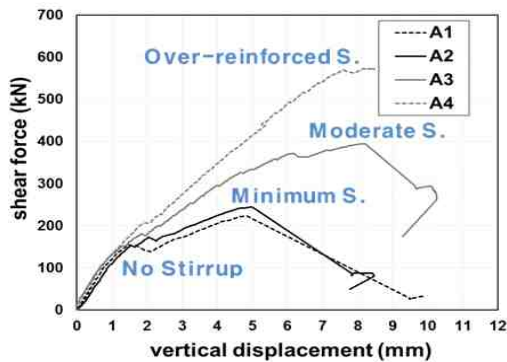


그림 3.13 SC80 전단보실험 하중-변위 관계

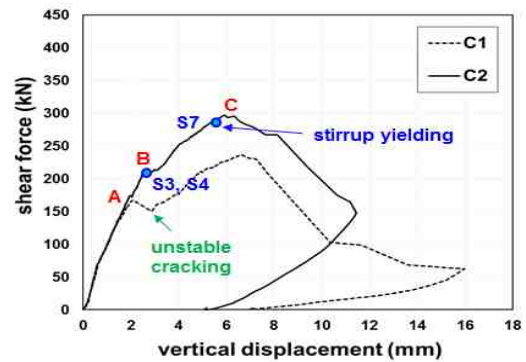


그림 3.14 SC120 전단보 C1, C2 하중-변위 관계

- 휨철근비에 따른 전단거동 (그림 3.15)
 - 전단보강근이 없는 경우(C3)와 있는 경우(C4)의 거동이 거의 유사하고, 휨 영향을 크게 받아 전단지배적인 부재로 보기 어려움.
- 유효높이에 따른 전단거동: 크기효과 (그림 3.16)
 - 전단보강근이 배근되지 않은 경우 크기효과가 지배적이나, 전단보강근이 배근된 경우 하중이 안정적으로 증가하여 크기효과가 상쇄

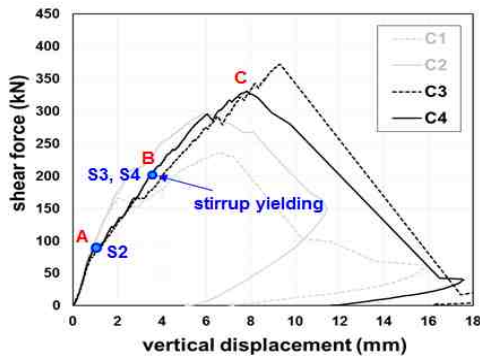


그림 3.15 SC120 전단보 C3, C4 하중-변위 관계

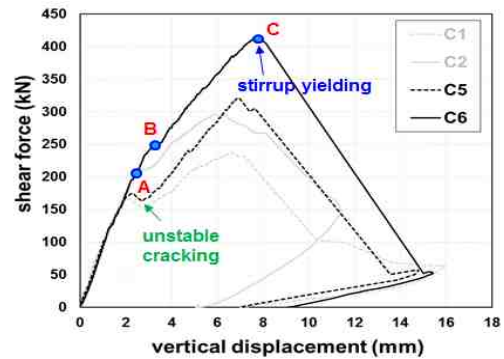


그림 3.16 SC120 전단보 C5, C6 하중-변위 관계

③ 전단/휨전단 설계모델

㉔ 굽은골재 SC 전단 설계식 검증

- 최소전단철근비 검토

- 여유내력의 정의: 위험사인장균열 발생강도 V_{cr} 에 대한 전단강도 V_u 의 비
- 검토 방법: 사인장 균열 발생 후 충분한 여유내력을 가지는 지 검증
- 검토 결과: 압축강도가 120MPa까지 증가하여도 최소전단철근을 배근하면, 그림 3.17, 3.18와 같이 충분한 여유내력을 가지는 것으로 확인

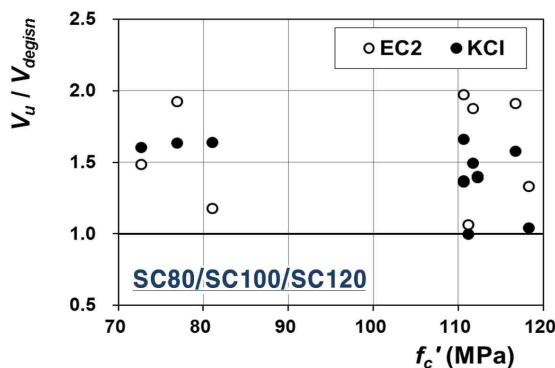


그림 3.17 압축강도에 따른 전단강도 현행기준 설계식에 대한 실험값 비

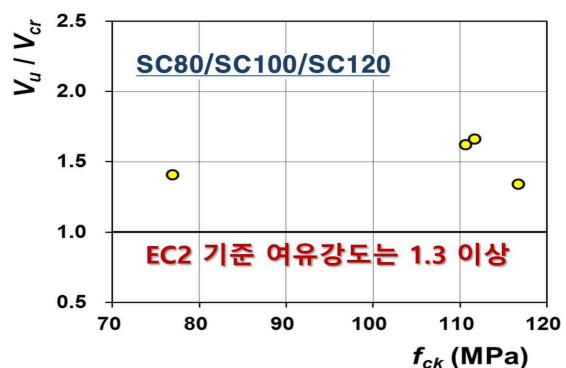


그림 3.18 최소전단보강시 압축강도에 따른 여유내력

(나) 굵은골재 SC 기둥 - 일반강도 콘크리트 슬래브 상세제안 및 성능평가

㉓ SC기둥-NC슬래브 접합부 상세제안

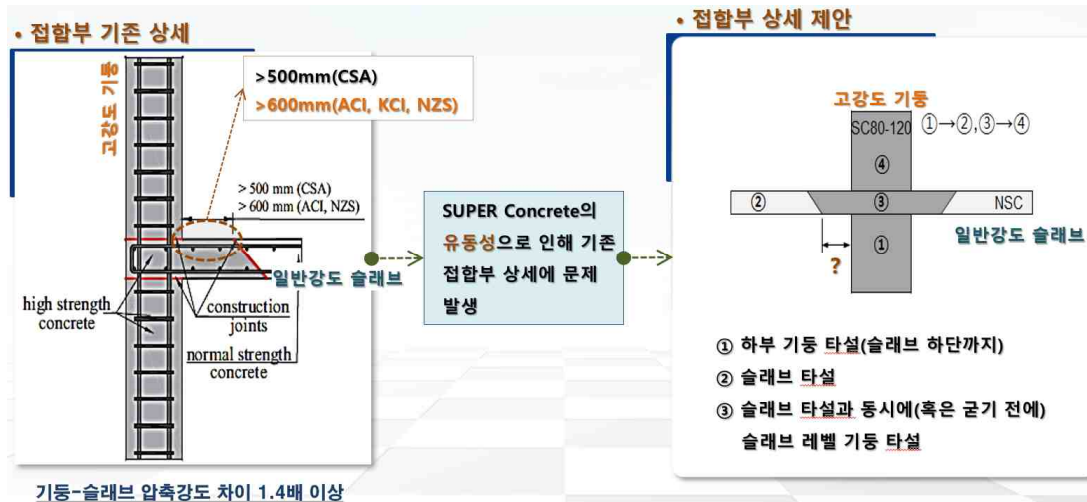


그림 3.19 SC기둥-NC슬래브 접합부 상세

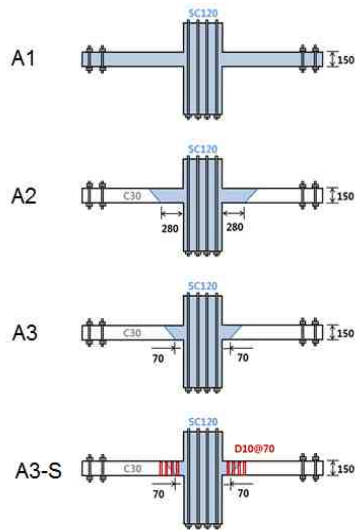
㉔ 고강도 콘크리트 뚫림전단모델 기존연구

- 고강도 콘크리트의 뚫림전단 강도 산정에서의 이슈는 전단철근이 없는 슬래브의 뚫림전단식에서 뚫림전단강도가 압축강도 증가에 대해 얼마나 증가하는지로, 압축강도의 승수 '1/n'로 요약할 수 있음.
- CEB-FIP model code 1990: 전단철근 없는 슬래브 120MPa 까지 적용 가능

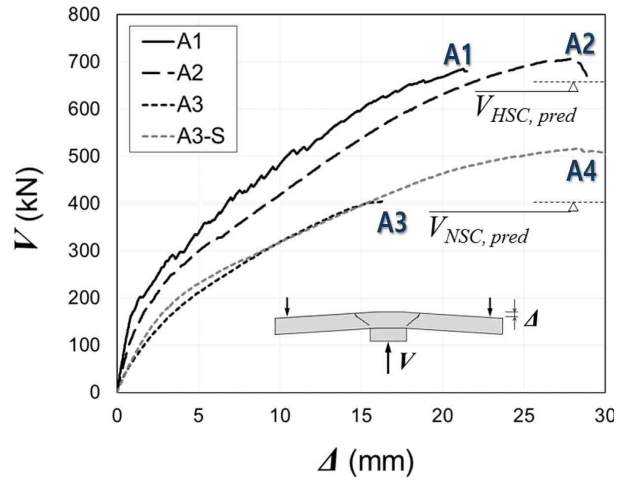
$$V_{Rd,c} = [0.12k(100\rho f_{ck})^{1/3}]b_w d \quad \text{where } k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0$$

㉕ SC기둥-NC슬래브 접합부 뚫림전단 성능 실험

- 굵은골재 SC는 유동성이 기존 고강도 콘크리트에 비해 매우 크기 때문에 기존 상세를 만족시키기 힘들 → 그림 3.20의 A2와 같은 상세를 제안
- 굵은골재 SC 기둥 - 일반강도 콘크리트 슬래브 성능평가 (접합부 실험) (그림 3.20)
 - A1: SC120으로 기둥-슬래브가 일체 타설된 경우, 위험단면은 2d보다 작은 범위에서 발생, 최종파괴는 기둥부 압축대에서 발생하여 취성적인 파괴
 - A2: 초기균열은 A1과 마찬가지로 2d보다 작은 범위에서 발생하나, 이후 위험단면이 NSC가 타설된 슬래브로 확대되면서 연성적인 거동
 - A3: 위험단면이 SC120과 NSC 계면을 따라 발생하여, 위험단면 발생 후 휨철근 및 콘크리트 압축대가 거의 저항하지 못하고 즉시 파괴됨
 - A3-S: 위험단면이 SC120과 NSC 계면을 따라 발생한 이후, 전단철근이 저항에 의해 슬래브에 휨균열이 발생하며 연성적으로 거동



(a) 실험변수에 따른 부재단면 상세



(b) 하중-변위 관계

그림 3.20 슬래브(일반강도)-기둥(고강도) 접합부 실험 결과

㉔ 굵은골재 SC 슬래브의 뚫림전단 설계식 검토 및 상세 제안

- SC기둥-NC슬래브 상세 제안

- SC기둥-NC슬래브 타설 시 기둥 주변의 바닥판은 기둥과 동일한 강도를 가진 콘크리트로 이어치기하여 시공하는 경우, 그림 3.21과 같이 기둥면에서 슬래브 내로 최단거리를 $2d$ 이상 확보하여야 함. 이때, 슬래브의 뚫림전단강도는 SUPER Concrete 강도를 적용하여 산정할 수 있음. (극한한계상태에서의 $\phi_c=0.65$)

$$V_{Rd,c} = [0.18\phi_c k (100\rho_{fck})^{1/3}] b_w d \geq v_{\min} b_w d \quad (3.5)$$

- SC기둥-NC슬래브 상세 검토

- 제안식의 예측값과 실험값 비교 결과, 안전측으로 만족 (표 3.6)

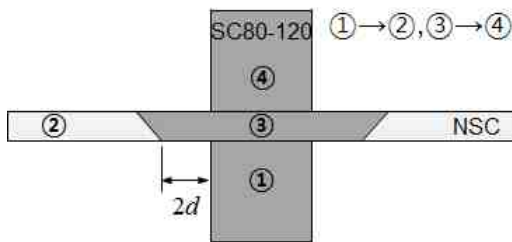


그림 3.21 SC기둥-일반강도콘크리트 슬래브의 기둥 주변 바닥판 타설 상세

표 3.6 뚫림전단 실험결과와 예측값의 비교

specimen ID	뚫림전단 실험값 (kN)	뚫림전단 예측값 (kN)	실험값/예측값
A1	684.78	672.97	1.018
A2	705.86	672.97	1.049
A3	403.98	401.19	1.007
A4	515.65	497.89	1.036

(4) SUPER Concrete 비틀림 거동 평가 및 설계법 개발

(가) 섬유보강 SC의 비틀림 거동 및 설계법

① 섬유보강 SC의 인장거동을 고려한 비틀림 설계 이론

- 섬유보강 SC(이하 SCf) 보의 비틀림 거동은 일반콘크리트 보에서는 무시해온 인장거동을 고려해야 합리적으로 설명할 수 있음.
- 섬유보강 SC 보의 비틀림 극한강도를 구하기 위해서 비틀림 T 에 의해서 균열이 발생한 섬유보강 SC 보를 그림 4.1과 같이 박벽관으로 이상화함.

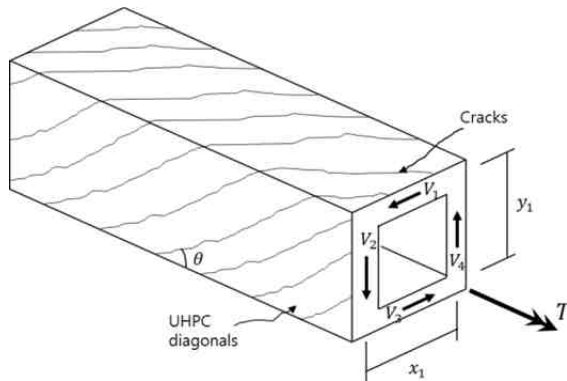


그림 4.1 Thin-walled Tube 근사화

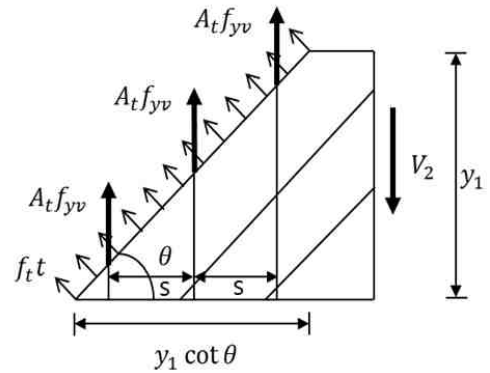


그림 4.2 섬유보강 보 왼쪽면의 수직력

② 섬유보강 SC의 비틀림 설계모델 제시

$$\begin{aligned}
 & \text{- 비틀림강도} & \text{SC의 비틀림 강도 (인장기여효과)} & \text{- 균열비틀림강도} \\
 & T_n = T_s + T_{SCf} & & T_{cr} = 2f_{cr}A_0t \\
 & \text{철근 인장력저항+SC저항} & & \text{- 소요 주철근량} \\
 & = \frac{2A_0A_t f_{yv}}{s} \cot \theta + 2A_0 f_t t \cot \theta & & A_l = \frac{T_n P_h}{2A_0 f_{yl}} \cot \theta - \frac{f_t t P_h}{f_{yl}}
 \end{aligned}$$

설계모델

그림 4.3 SUPER Concrete의 비틀림 설계모델

- 그림 4.1과 4.2를 참고하여 철근과 섬유보강 SC가 항복한 극한상태의 평형을 고려하면, 식 (4.1)과 같이 극한비틀림모멘트(T_n)를 구할 수 있으며, 이때 평형을 고려한 종방향 철근량은 식 (4.2)로 주어짐.

$$T_n = T_s + T_{SCf} = \frac{2A_0A_t f_{yv}}{s} \cot \theta + 2A_0 f_t t \cot \theta \quad (4.1)$$

$$A_l = \frac{P_h}{f_{yl}} \cot^2 \theta \left(\frac{A_t f_{yv}}{s} + f_t t \right) - \frac{f_t P_h}{f_{yl}} \quad (4.2)$$

- 균열비틀림모멘트(T_{cr})도 박벽보이론을 적용하여, 식 (4.3)과 같이 구할 수 있음.

$$T_{cr} = 2A_0 t_{cr} f_{cr} \quad (4.3)$$

- 섬유보강 SC의 경우 최소철근비가 없으며, 스테럽에 의해서 저항되는 최대 전단력에 제한도 없음. 보통콘크리트 구조 설계의 경우, 사용하중 수준의 전단, 비틀림 및 합력의 작용에 의해 과도한 균열이 생기는 것을 막기 위해 최소철근비나 스테럽에 의

해서 저항되는 최대 전단력을 제한하고 있음.

- 그러나 섬유보강 SC 구조는 강섬유의 작용으로 사용하중 수준에서는 균열이 거의 발생하지 않으며, 발생할 경우에도 그 폭이 0.3mm 이하이므로 이를 고려하여 관련 제한을 두지 않음.
- 섬유보강 SC 비틀림 설계법의 상세한 설명과 변수는 참고문헌(Kwahk et. al, 2015) 참조.

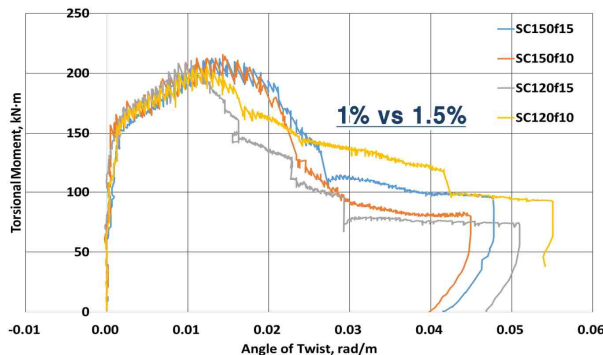
③ 섬유보강 SC 보의 비틀림 성능평가

㉔ SC120f 및 SC150f 비틀림 실험(슈퍼콘크리트연구단, 2015) (8개)

- 실험변수: 종방향 철근량 / 띠철근 간격 / 강섬유량(1.0%, 1.5%)

표 4.1 SC120f 보 비틀림 실험체

연번	부재명	강섬유 (%)		철근(mm)		띠철근 간격 (mm)
		16.5 mm	19.2 mm	띠철근	종방향	
13, 14	SC120f10	-	1.0	D10	D16@4	D10@170
15, 16	SC120f15	0.5	1.0	D10	D16@4	D10@170
17, 18	SC150f10	-	1.0	D10	D16@4	D10@170
19, 20	SC150f15	0.5	1.0	D10	D16@4	D10@170



(a) SC150f 비틀림 거동



(b) 최종 파괴형상(SC150f10)

그림 4.4 SC150f 부재 대표적 균열 및 파괴 형상

- 부재 SC120f 및 SC150f의 비틀림모멘트-각도 곡선을 비교하여, 그림 4.4(a)에 나타냄. SC120f 및 SC150f 보는 유사한 비틀림 거동은 보임. 즉, 강섬유가 포함된 섬유보강 SC 부재의 경우 초기하중 재하 단계에서 비틀림모멘트-각도 곡선은 선형 관계를 나타냄.
- 초기 비틀림균열 이후 비틀림모멘트가 증가함에 따라 더욱 많은 비틀림 균열이 시간에 걸쳐 발생함. 부재는 초기 균열 이후에도 추가로 상당한 비틀림 하중을 부담하며, 각 부재의 최대비틀림모멘트에 도달함.
- 최대비틀림모멘트 도달이후 비틀림모멘트는 점진적으로 감소하며, 이와 더불어 다른 균열에 비하여 주사인장균열 폭이 급격히 증가함. 이러한 현상은 균열하중에서 극한하중 상태까지 강섬유의 가교역할로 인해 비틀림 하중분담 능력은 증가하나, 극한하중 이후에는 주사인장균열에서의 강섬유의 가교역할이 감소하여 이에 따라 부재의 비틀림 하중도 감소한다고 판단됨.
- 그림 4.4(b)는 SC120f와 SC150f 부재의 대표적인 균열 및 파괴형상을 나타낸 것임.

㉕ SC180f 비틀림 실험(Kwahk et. al, 2015) (8개)

- 실험변수: 종방향 철근량 / 띠철근 간격 / 강섬유량(1.0%, 1.5%)

표 4.2 SC180f 보 비틀림 실험체의 제원 (unit : mm)

연번	부재명	강섬유 (%)		철근		띠철근 간격
		16.5 mm	19.2 mm	띠철근	종방향	
1, 2	SH-P0-F1.5-L1-S1-1,2	0.5	1	D10	D13@4	5@340
3, 4	SH-P0-F1.5-L2-S1-1,2	0.5	1	D10	D10@4	5@340
5, 6	SH-P0-F1.5-L1-S2-1,2	0.5	1	D10	D10@4	10@170
7, 8	SH-P0-F1-L1-S1-1,2	0.5	0.5	D10	D13@4	5@340

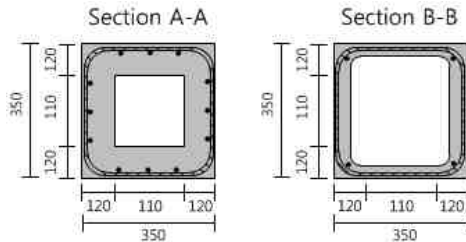


그림 4.5 SC180f 실험체 - 단면도

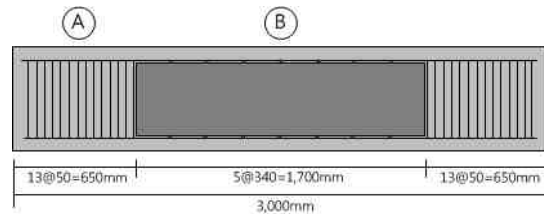


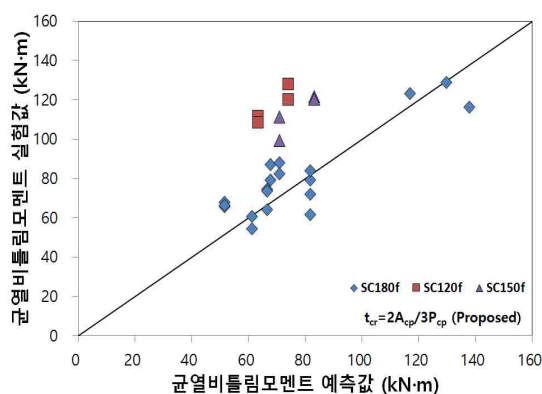
그림 4.6 SC180f 보 - 측면도

- SC180f 보의 비틀림 거동도 SC120f 및 SC150f 보의 비틀림 거동과 유사한 양상을 보임. 즉, 균열 후 강섬유의 가교작용으로 섬유보강 SC와 횡철근이 하중을 분담하며 극한비틀림모멘트에 도달함.
- 이후에도 강섬유의 영향으로 상대적으로 큰 연성적인 거동을 보임.

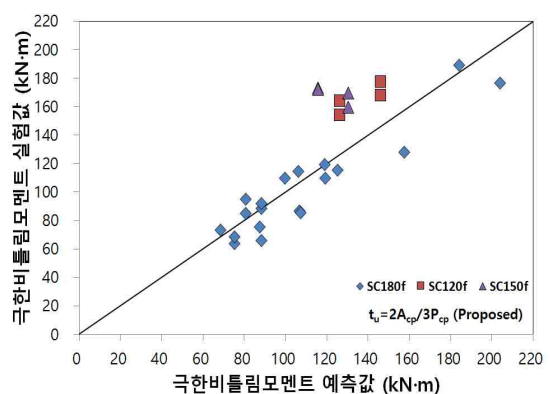
④ 섬유보강 SC 비틀림 설계모델 검증

㉠ 설계법(한국콘크리트학회, 2019)

- 비틀림을 받는 섬유보강 SC 보의 거동을 실험결과로부터 확인함. 특히 강섬유의 가교효과를 통한 연성적 인장거동과 비틀림 강도에 기여함을 확인함.
- 이론적으로 이를 고려하여 극한비틀림모멘트 식 (4.1)과 균열비틀림모멘트 식 (4.3)을 유도함. 이 설계방법에 의해 예측된 균열과 극한 강도를 각각 실험에서 관측된 값과 비교함(그림 4.7).
- 제안된 설계방법이 실험 결과값을 합리적으로 예측



$$T_{cr} = 2A_0 t_{cr} f_{cr}$$



$$T_n = T_s + T_{SCF} = \frac{2A_0 A_t f_{yv}}{s} \cot \theta + 2A_0 f_t t \cot \theta$$

그림 4.7 SCf의 설계식과 실험값의 비교

⑤ 섬유보강 SUPER Concrete와 기존 섬유보강 콘크리트의 비틀림 성능 비교

㉠ 기존 섬유보강 콘크리트 (FRC)

- 기존 섬유보강 콘크리트 (Fiber Reinforced Concrete, FRC)는 콘크리트에 분산된 섬유

유를 첨가하여 균열 후 인장거동을 보강한 것임. 사용되는 섬유에는 강섬유, 합성섬유, 유리섬유, 천연섬유 등이 있음.

- 구조적인 거동을 향상시킬 목적으로는 보통 길이 25mm 이상의 강섬유를 60kg/m^3 정도 첨가 (Jansson et. al, 2008).
- 강섬유의 첨가로 인해, 균열 강도의 증가는 크지 않지만, 균열 후 강섬유의 가교작용으로 인장력이 서서히 감소하는 변형 연화현상을 보임.
- FRC의 변형연화로 인해 FRC 부재의 비틀림 강도와 연성이 증가함. 2017년까지의 관련 실험을 정리한 연구(Amin & Bentz, 2018)를 보면 이 현상을 확인할 수 있음.

㉞ 섬유보강 SUPER Concrete와 기존 섬유보강 콘크리트의 **비틀림 성능 비교**

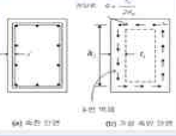
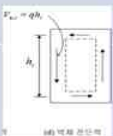
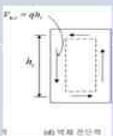
- 개념적으로 섬유보강 SUPER Concrete (FRSC)는 기존 섬유보강 콘크리트 (FRC)와 유사하지만, 실제적으로 인장강도가 기여하는 효과가 크게 다름. 섬유보강 SUPER Concrete는 균열 후에도 인장강도가 크게 증가하여 설계인장강도가 7-11MPa에 달하는 반면, 기존 섬유보강 콘크리트는 설계에 활용하는 잔류인장강도가 보통 1MPa 미만임 (Amin & Bentz, 2018). 그러므로 기존 섬유보강 콘크리트의 경우 비틀림강도 증가에 대한 기여가 작은 반면, 섬유보강 SUPER Concrete는 섬유보강 SC만으로도 비틀림에 저항할 수 있을 정도로 비틀림강도에 대한 기여가 매우 크다는 것을 확인하였고 이것은 SS2020 연구단의 실험을 통해 검증함.
- 균열 제어 측면에서, 기존 섬유보강 콘크리트도 일반 콘크리트에 균열폭이 작지만, 섬유보강 SUPER Concrete는 최대인장강도에 도달 시 평균 균열폭이 대략 0.3mm 정도로, 사용하중 상태에서 균열폭이 매우 미세하거나 아예 발생하지 않는 경우도 있음. 결국 균열 제어에 있어서도 이번 연구에서 개발된 섬유보강 SUPER Concrete가 기존 섬유보강 콘크리트에 비해 훨씬 월등함.

(나) 짧은골재 SC의 비틀림 거동 및 설계법

① 박벽관 입체 트러스 이론

- 짧은골재 SC(이하 SC)의 경우, 일반콘크리트보다 강도는 월등이 높지만 골재가 있어 거동이 유사함. 따라서 대표적인 콘크리트 구조설계기준인 EuroCode 및 ACI의 이론인 박벽관 입체 트러스이론을 적용할 수 있음.
- 표 4.3에 대표적인 비틀림 설계모델을 비교함.

표 4.3 비틀림 설계모델 비교

구분	SUPER Concrete	ACI/KCI	EC2/도로교 설계기준 (한계상태)
기본개념	- Thin-walled tube theory - 균열 후, Space truss analogy - 강섬유가 있는 경우, 콘크리트의 인장력 기여 인정 (T_K-UHPC)		- 기본적으로 ACI/SUPER Concrete와 같음 - 비틀림을 각 면에 작용하는 전단력으로 나누어 설계 
적용식	$T_u \leq \phi T_n$ $T_n = T_s + T_{K-UHPC}$ $= \frac{2A_0 A_t f_{yv}}{s} \cot \theta + 2A_0 f_{td} t \cot \theta$	$T_u \leq \phi T_n$ $T_n = \frac{2A_0 A_t f_{yt}}{s} \cot \theta$	전단 참조 
최소철근량	필요 없음	$A_v + 2A_t$ 제한, $A_{l,min}$	전단 참조
제한조건	강섬유 없음 $f_{ck} = 80MPa, 100MPa, 120MPa$ 강섬유 있음 $f_{ck} = 120, 150, 180MPa$ $f_{tk} \leq 13MPa$	$f_{ck} < 70MPa$	$f_{ck} < 90MPa$
재료계수	$\phi_c = 0.91$ (압축), $\phi_c = 0.8$ (인장), $\phi_s = 1.0$ (목시적)	사용하지 않음	$\phi_c = 0.65$, $\phi_s = 0.95$
강도감소계수	$\phi_b = 0.77$	$\phi_b = 0.75$	사용하지 않음

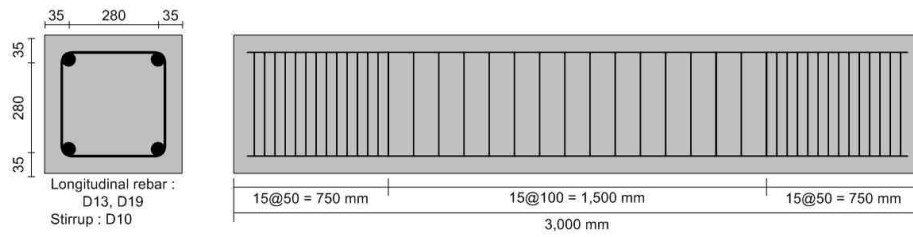
- 다만 고강도 신재료이므로 실험을 통해 전반적인 거동을 검증할 필요가 있음.
- 즉, 최소철근비 등에 대한 규정, 횡철근비/종철근비($\rho_v f_{yv} / \rho_l f_{yl}$), 전체철근비($\rho_v + \rho_l$)가 비틀림 균열과 연성에 미치는 영향 등에 대한 검토가 필요함($\rho_v f_{yv} / \rho_l f_{yl}$ 이 작으면 취성파괴 가능성).

② 짧은골재 SC 비틀림 성능 평가

㉦ SC80 및 SC100 보 비틀림 실험(슈퍼콘크리트연구단, 2015)

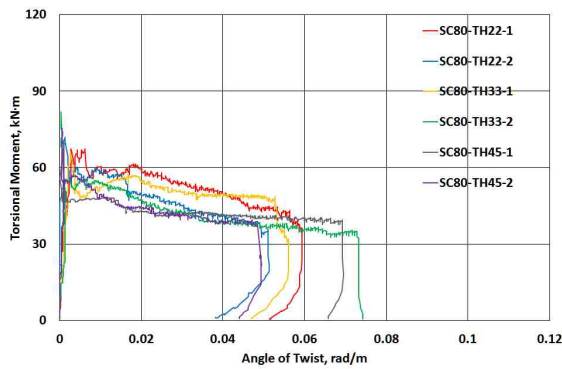
표 4.4 SC80 및 SC100 보 비틀림 실험체의 제원

연번	부재명	강섬유 (%)		철근(mm)		띠철근 간격 (mm)
		16.5 mm	19.2 mm	띠철근	종방향	
1, 2	SC80-TH22	-	-	D10	D16@4	D10@170
3, 4	SC80-TH33	-	-	D10	D13@4	D10@100
5, 6	SC80-TH45	-	-	D10	D10@4	D10@70
7, 8	SC100-TH22	-	-	D10	D16@4	D10@170
9, 10	SC100-TH33	-	-	D10	D13@4	D10@100
11, 12	SC100-TH45	-	-	D10	D10@4	D10@70



SC80-TH33, SC100-TH33(TH22와 TH45는 스테럽 배근간격만 다름

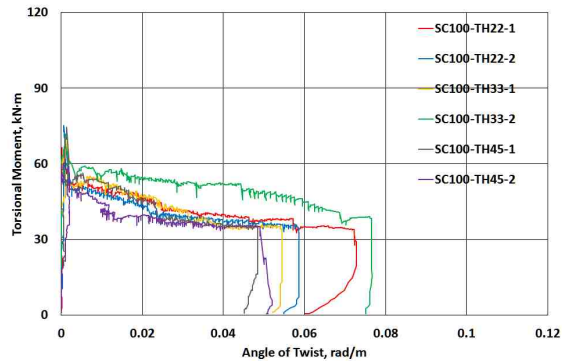
그림 4.8 SC80, SC100 보 비틀림 실험체 형상 및 제원



(a) SC80 보 비틀림 거동



(b) 최종 파괴형상(SC80-TH33)



(c) SC100 보 비틀림 거동



(d) 최종 파괴형상(SC100-TH33)

그림 4.9 SC80 및 SC100 보 대표적 비틀림 균열 및 파괴 형상

- 부재 SC80 및 SC100 보의 비틀림모멘트-각도 곡선을 비교하여, 그림 4.9(a)(c)에 나타냄.
 - 초기하중 재하 단계에서 비틀림모멘트-각도 곡선은 선형 관계를 나타냄. 초기 비틀림 균열 이후 비틀림모멘트가 증가함에 따라 더욱 많은 비틀림 균열이 지간에 걸쳐 발생함.
 - 부재는 초기 균열 이후에도 관통균열까지 추가로 약간의 비틀림 하중을 부담하며, 최대비틀림모멘트(T_u)에 도달함.
 - 이후, 횡방향 스테럽이 비틀림하중에 저항하며 하중이 재분배됨. 이 과정에서 초기균열 각도도 낮아짐. 대표적인 균열 및 파괴형상을 그림 4.9(b)(d)에 나타냄.
- ㉠ SC80(추가) 보 비틀림 실험(Joh et. al, 2019) (15개)
- 실험부재의 변수는 **횡/중 철근비의 비**, **전체 철근비** 및 **철근의 종류**로 설정하였으며, 단면의 제원과 철근비는 참고문헌(Joh et. al, 2019) 참조.

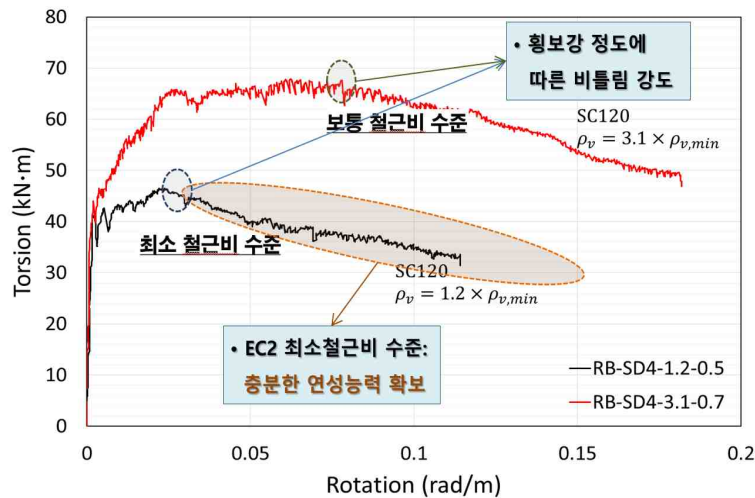


그림 4.10 대표적인 비틀림 vs. 회전변위



(a) 취성적 파괴(RA-SD4-1.3-0.5)



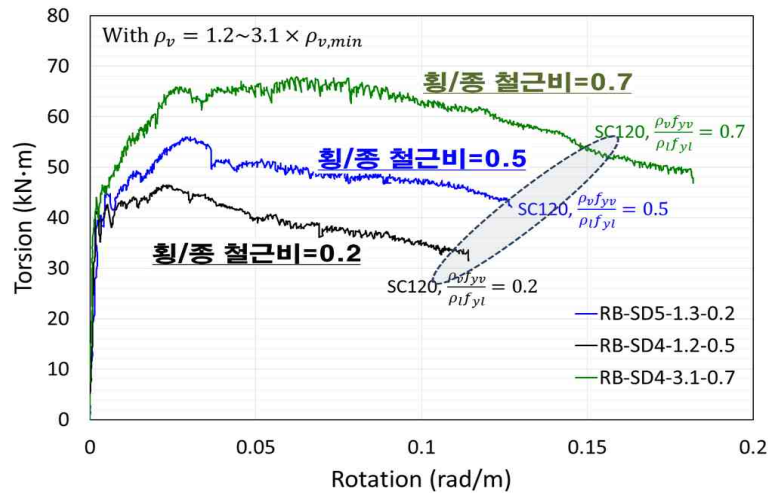
(b)연성적 파괴 (RA-SD4-3.2-0.3)

그림 4.11 철근비에 따른 SC80 보 비틀림 거동

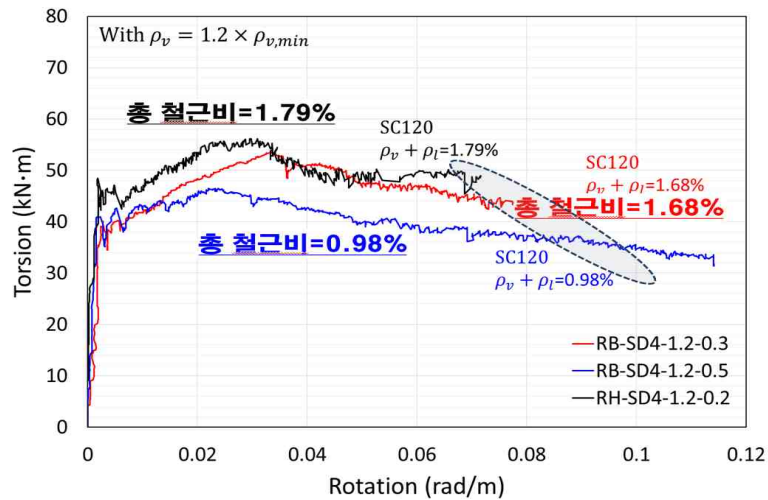
- 비틀림 거동: 취성적인 경우(그림 4.11(a))
 - 횡방향 철근비($1.3 \sim 1.5 \times \rho_{v,min}$)가 최소철근비에 근접해 있고, 전체 철근비($\rho_v + \rho_l$)가 0.92~1.62%정도인 실험체의 경우, 초기균열비틀림 이후에 더 이상 비틀림 하중을 지지하지 못하고 비틀림강도가 초기균열비틀림의 70%정도로 저하됨.
 - 그러나 실험에서처럼 변위조절이 되는 경우(적합비틀림 조건), 균열직후에서 0.08rad/m까지(균열비틀림강도의 70% 수준일 때 변위) 구간에서는 완만한 강도 저하와 함께 연성적인 거동을 보임.
- 비틀림 거동: 연성적인 경우(그림 4.11(b))
 - 횡방향 철근비($3.2 \times \rho_{v,min}$)가 최소철근비에 근접해 있고, 전체 철근비($\rho_v + \rho_l$)가 3.2% 정도인 실험체의 경우, 초기균열비틀림 이후에도 연성적인 거동으로 추가적인 비틀림 하중을 지지하여, 비틀림강도에 도달한 후에도 안정적으로 비틀림 강도가 저하함.
 - 실험에서처럼 변위조절이 되는 경우(적합비틀림 조건), 약 0.02rad/m 정도의 회전변위에서 비틀림강도에 도달하며, 이후 0.12rad/m(비틀림강도의 70% 수준일 때 변위)까지 강도의 완만한 저하와 함께 연성적인 거동을 보임.

㉔ SC120 보 비틀림 실험(Joh et. al, 2019) (15개)

- 실험부재의 변수는 횡/중 철근비의 비, 전체 철근비 및 철근의 종류로 설정하였으며, 단면의 제원과 철근비는 참고문헌(Joh et. al, 2019) 참조.



(a) $\rho_{v,min}$ 에 근접한 경우 비틀림 거동(연성적)



(b) $\rho_{v+l} \approx 1.0\%$ 인 경우도 비틀림 거동(연성적)

그림 4.12 SC120보의 철근비에 따른 비틀림 거동

- SC120 실험체 연성적 거동과 한계 (연성도 실험)
 - 건조수축 잔류응력(약 5.2MPa) 영향으로 예상하중의 약 50%에서 균열발생. 그 결과, 모든 SC120 실험체는 최소철근비에도 균열 후 연성적 거동을 보임.
 - 그러나 일반적으로 인장강도도 큰 SC의 경우, T_{cr} 이 상대적으로 커서, 도로교설계기준(한계상태)/Eurocode의 최소철근비로($\rho_{v,min}$)는 균열 후 급격한 비틀림 강도 저하를 방지하기 어려움(SC80 실험에서 확인).
 - 같은 이유로, ACI의 추가적인 $\rho_{v+l} \geq 1.0\%$ 규정으로도 균열 후 비틀림강도의 급격한 감소를 효과적으로 제어할 수 없음 (SC80 실험에서 확인).
- 그러나, 비틀림 거동의 특성을 고려하면 현재규정을 변경할 필요 없음.
 - 구조물의 안전에 직접적인 영향을 미치는 평형비틀림에 대해서는 T_n 에 대해서 배근($T_n \leq T_{cr}$ 경우 T_{cr} 에 대해서 설계) 필수, 결국 $T_n \geq T_{cr}$ 이 되어 연성파괴가 유도될 수밖에 없음.
 - 그리고 부정적 구조물의 적합비틀림(부정정비틀림)에 대해서는 하중대신 변위가 증가하는 거동임으로, 도로교설계기준(한계상태)의 기존 $\rho_{v,min}$ 만으로도 비틀림모멘트 재분배가 가능할 정도의 변형성능을 확보(실험결과)할 수 있음. 또한, 비틀림 보강

상세 규정을 적용하면 일반적으로 $\rho_{v,\min}$ 보다 배근량이 커지는 경향도 있음.

③ 굽은골재 SC 비틀림 설계모델 (한국콘크리트학회, 2019)

㉔ 굽은골재 SC 비틀림 강도식

- 극한비틀림모멘트(T_{ult})

$$T_{ult} = \frac{2A_0 A_v f_{yv} k}{s} \cot \theta \quad (4.4)$$

- 종방향평형철근량(A_{sl})

$$\Sigma A_{sl} = \frac{T_u p_o}{2f_{yd} A_o} \cot \theta \quad (4.5)$$

㉕ 실험결과와 이론식 비교

표 4.5 SC80 보 설계식 검증

Spcs.	$\frac{\rho_v}{\rho_{v,\min}}$	$\frac{\rho_v}{\rho_l}$	$\rho_v + \rho_l$	Est./Test	Remarks
				T_{ult}	
1	1.3	0.3	1.62%	0.78	SC80,
2	1.5	0.2	1.62%	0.98	Solid
3	1.5	0.2	1.62%	1.03	Section
4	1.3	0.5	0.92%	0.69	SC80,
5	1.5	0.5	0.92%	0.71	Solid
6	1.5	0.4	0.95%	0.78	Section
7	3.2	0.3	3.28%	1.08	SC80,
8	3.2	0.3	3.21%	1.12	Solid
9	3.2	0.2	3.21%	1.26	Section
10	3.2	0.5	2.13%	0.93	SC80,
11	3.2	0.7	1.63%	0.86	Solid
12	3.2	0.6	1.63%	0.99	Section
13	3.2	1.1	1.33%	0.82	SC80,
14	3.2	1.0	1.26%	0.86	Solid
15	3.2	0.8	1.29%	0.81	Section
16	5.4	1.1	2.49%	0.88	SC80,
17	5.1	1.0	2.00%	0.93	Solid
18	5.1	0.9	2.00%	1.04	Section
			Avg.	0.92	

표 4.6 SC120 보 비틀림 설계식 검증

Spcs.	$\frac{\rho_v}{\rho_{v,\min}}$	$\frac{\rho_v}{\rho_l}$	$\rho_v + \rho_l$	Est./Test	Remark
				T_{ult}	
1	1.2	0.3	1.68%	0.85	SC120,
2	1.3	0.2	1.69%	0.94	Solid
3	1.3	0.2	1.69%	1.07	Section
4	1.2	0.5	0.98%	0.68	SC120,
5	1.3	0.5	1.00%	0.76	Solid
6	1.3	0.4	1.03%	0.86	Section
7	3.1	0.7	2.22%	1.08	SC120,
8	2.7	0.5	2.11%	1.23	Solid
9	2.7	0.5	1.78%	1.23	Section
10	1.2	0.2	1.79%	0.85	SC120,
11	1.3	0.2	1.69%	0.87	Hollow
12	1.3	0.2	1.69%	1.01	Section
			Avg.	0.95	
13	1.6	0.2	1.58%	0.98	NC40
14	1.6	0.2	1.58%	1.19	Solid
15	1.6	0.1	1.58%	1.23	Section

- SC80 실험체 설계지침 강도식에 따른 예측

· 굽은골재 SC 설계지침에 따른 비틀림강도(T_{ult}) 값의 예측은 각각 92%로 안전측으로 추정함.

- SC120 실험체 설계지침 강도식에 따른 예측

· 극한비틀림모멘트(T_{ult}) 실험값의 평균 95%로 안전측으로 예측(실제 재료강도), 공칭 강도를 적용 예측한 경우는 84% 안전측으로 예측. 철근비가 높은 경우, T_{ult} 를 비안전측으로 예측하는 경우도 발생

(5) SUPER Concrete 합성 거동 평가 및 설계법 개발

(가) 섬유보강SC-강 합성 거동 평가 및 설계법 개발

① SC120f, SC150f, SC180f 합성 구조실험

㉠ 실험변수

- 바닥판 두께: 50, 100mm (2종류)
- 스티드 간격: 50, 100, 200, 400mm (4종류)
- 강도 수준: 120, 150, 180MPa (3종류)

㉡ 부재상세

- 실험부재의 길이는 2.2m로 제작하여 하중 재하 시 지간 길이는 2.0m로 설정

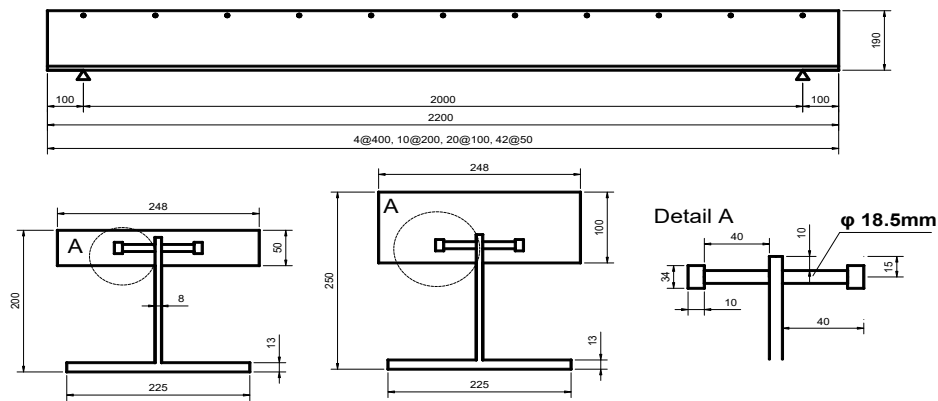


그림 5.1 실험부재 형상

표 5.1 섬유보강 SC 배합조건

ID	Unit Weight[kg/m³]							
	W	Premix binder1	Premix binder2	S	P	A	Steel fiber [mm]	
							19.5	16.3
UHPC120	221	1,259	-	847	17.7	0.7	78	-
UHPC150	197	1,288	-	866	24.4	0.9	78	39
UHPC180	183	-	1,281	861	18.0	0.5	78	39

W: water, S: Sand, P: Plasticizer, A: anifoaming agent

Premix binder1: cement, zirconium, blast furnace slag, filler, expansion agent, reduction agent of shrinkage

Premix binder2: cement, zirconium, filler, expansion agent, reduction agent of shrinkage

㉢ 휨거동 평가

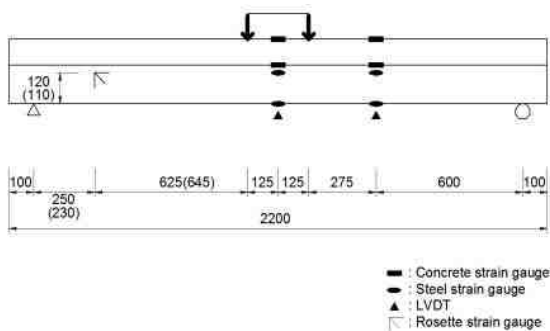


그림 5.2 부재 계측 시스템



그림 5.3 실험 부재 거동 평가

㉔ 강-SC 합성실험 결과

표 5.2 섬유보강SC-강 합성 거동 실험

ID	항복 하중(kN)	극한 하중(kN)	항복 처짐(mm)	극한 처짐(mm)	Failure pattern
120f-50-50	554.1	585.5	8.84	9.82	Flexural compression
120f-50-100	473.3	589.5	9.48	10.53	
120f-50-200	-	497.1	7.57	8.41	Flexural compression + Failure of concrete around stud
120f-50-400	-	302.4	5.36	5.96	
120f-100-50	500.2	702.6	9.74	10.82	Flexural compression
120f-100-100	572.0	666.6	8.57	9.52	
120f-100-200	585.0	647.2	8.51	9.45	Flexural compression + Failure of concrete around stud
120f-100-400	462.9	468.8	7.43	8.26	
150f-50-50	490.1	625.0	8.56	9.51	Flexural compression + Failure of concrete around stud
150f-50-100	598.2	631.5	9.45	10.50	
150f-50-200	473.6	557.9	8.74	9.71	Flexural compression
150f-50-400	-	418.0	7.32	8.13	
150f-100-50	555.9	684.3	8.30	9.22	Flexural compression
150f-100-100	595.5	691.9	9.33	10.33	
150f-100-200	536.9	699.6	8.87	9.86	Flexural compression + Failure of concrete around stud
150f-100-400	-	570.7	8.68	9.64	
180f-50-50	428.1	573.2	10.54	11.72	Flexural compression
180f-50-100	431.0	550.9	10.53	11.70	
180f-50-200	408.7	450.9	9.79	10.87	Flexural compression + Failure of concrete around stud
180f-50-400	278.9	281.4	15.16	16.84	
180f-100-50	567.2	807.4	11.05	12.28	Flexural compression
180f-100-100	558.7	755.8	10.53	11.70	
180f-100-200	535.9	583.2	9.69	10.77	Flexural tension
180f-100-400	-	435.4	9.41	10.45	

- 부재의 각 균열 및 하중단계별 비교

- 바닥판 두께가 두껍고 스테드 간격이 짧을수록 극한하중이 높은 것으로 나타남.
- 바닥판 두께가 100mm인 180MPa 부재를 제외한 모든 실험부재는 상부 콘크리트의 압축 파괴가 나타났으며, 이러한 상황으로 인해 콘크리트의 인장 강도에 대한 강섬유 양의 차이의 영향을 평가하는 것이 불가능
- 120f-50-400을 제외한 실험부재의 항복 및 극한 처짐의 경우 Eurocode-4에서 권장되는 6mm의 연성 거동 한계를 초과하기 때문에 모든 실험체가 충분한 연성 거동을 발생시키는 것으로 나타남.
- 바닥판 두께가 작고, 스테드 간격이 넓을수록 강재 주형을 따라 콘크리트 상면에 축방향 균열이 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 스테드 부위의 작은 영역에 집중되는 힘이 넓은 콘크리트내로 분산되면서 발생하는 인장응력에 의해서 유발되는 균열로 추정됨.
- 스테드 간격이 바닥판 두께의 2~3배 수준 이내일 때, 합성거동이 안정적이며, 또한 100 mm 수준이 경제적이며 적절할 것으로 예상됨.
- 바닥판 50mm, 스테드 400mm의 경우 스테드의 탈락 후, 바닥판 콘크리트와 강재 주형만의 거동으로 하중을 저항하는 것으로 유추할 수 있음.
- 바닥판 50mm, 스테드 400mm을 제외한 부재는 일반 콘크리트보다 SC180f 콘크리트의 성능이 우수하여 기존의 AASHTO LRFD 및 Eurocode-4의 식과 차이가 있음.

㉑ 합성거동 평가 및 설계기법 제시

- 완전 합성거동 해석모델 개발 및 S/W작성: 콘크리트와 강재와 완전히 일체거동을 하는 것으로 가정한 결과임을 감안할 때, 실험결과와 해석결과는 비교적 유사한 거동을 하는 것으로 나타남.
- 하중-처짐 관계에서는 바닥판두께가 증가할수록 구조 성능이 증대하는 것으로 나타났으며, 전단연결재의 간격은 감소할수록 구조성능이 증대하는 것으로 나타남.
- 또한, 전단 연결재 간격이 넓어서 전단연결재 탈락 후 비합성 거동을 하는 실험 부재와 해석결과의 차이는 전단연결재 간격이 넓을수록 크게 나타남.
- 일반 콘크리트보다 SC180f 콘크리트의 성능이 우수하여 기존의 AASHTO LRFD 및 Eurocode-4의 식과 차이가 있으나, 현 설계기준 준용 가능
- 강재 항복강재 항복이후 즉시 콘크리트 압축파괴 / 스티드 간격 200mm이상 → 스티드 접합부 탈락 파괴 / 스티드 간격 400mm : 구조 성능 저하

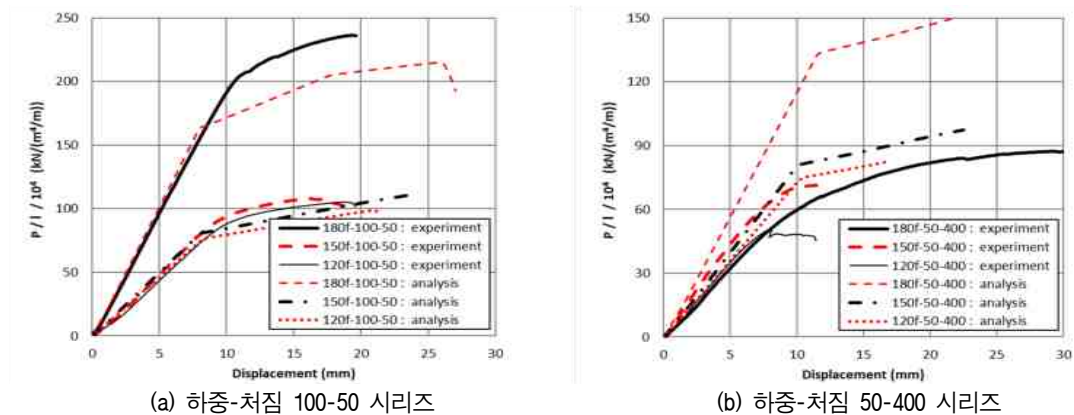


그림 5.4 섬유보강 SC - 강 합성 실험 결과

(나) 짧은골재SC-강 합성 거동 평가 및 설계법 개발

① SC80, SC100, SC120 합성 구조실험

㉒ 실험변수

- 전단 연결재 종류: stud, stud+reinforcement (2종류)
- 스티드 간격: 200, 400mm (2종류)
- 강도 수준: 80, 100, 120MPa (3종류)

표 5.3 짧은골재 SC 배합조건

	W/B (%)	S/a (%)	SP/B (%)	Unit mass(kg/m ³)										
				OPC	BS	SF	FA	Sand (Sea)	Sand (Crushed)	Agg	SP	W	수축 저감제	AE제
SC80	22.5	42	0.95	466.7	133.3	-	66.7	387.2	260.1	898.1	6.667	150	6.667	-
SC100	20.0	42	2.20	577.5	165.0	82.5	-	341.6	229.5	792.4	18.15	165	5.775	0.347
SC120	15.0	38	1.12	700.0	150.0	150.0	-	279.2	188.3	765.1	11.20	150	0.000	0.000

OPC: ordinary portland cement, BS: blast furnace slag, SF: silica fume
Agg: coarse aggregate, SP: super plasticizer, W: water

㉓ 실험방법

- 4점 하중재하방법을 통한 휨 실험을 수행하였으며, 부재의 양쪽 단부로부터 100mm 위치에 단순지지형태의 지점을 갖도록 하였으며, 지점과 지점 사이의 거리는 2,000mm로 설정함.

- 하중재하는 1.5mm/min의 속도로서, 변위제어방식으로 재하 하였으며, 정밀한 처짐을 측정하기 위하여, 하중가력지점에 변위계(LVDT)를 설치하여 처짐을 측정하였음.

표 5.4 실험부재 제원

ID	f_{ck} (MPa)	slab type	slab thickness (mm)	stud spacing (mm)	shear connector
80-N-200-N	80	in-site	100	200	stud
80-N-200-S					stud + reinforcement
80-N-400-N				400	stud
80-N-400-S					stud + reinforcement
80-P-200-N		precast		200	stud
80-P-200-S					stud + reinforcement
80-P-400-N				400	stud
80-P-400-S					stud + reinforcement
100-N-200-N	100	in-site	100	200	stud
100-N-200-S					stud + reinforcement
100-N-400-N				400	stud
100-N-400-S					stud + reinforcement
100-P-200-N		precast		200	stud
100-P-200-S					stud + reinforcement
100-P-400-N				400	stud
100-P-400-S					stud + reinforcement
120-N-200-N	120	in-site	100	200	stud
120-N-200-S					stud + reinforcement
120-N-400-N				400	stud
120-N-400-S					stud + reinforcement
120-P-200-N		precast		200	stud
120-P-200-S					stud + reinforcement
120-P-400-N				400	stud
120-P-400-S					stud + reinforcement

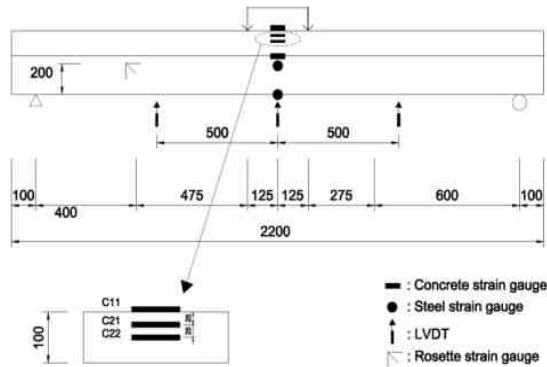


그림 5.5 부재의 계측시스템

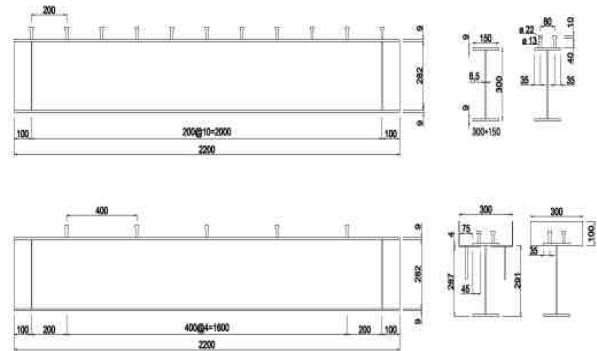


그림 5.6 실험부재 철근 상세도

㉔ 부재의 각 균열 및 하중단계별 비교

- 전단연결재의 간격이 넓을수록 강재 주형을 따라 콘크리트 상면에 축방향 균열이 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 전단연결재 부위의 작은 영역에 집중되는 힘이 넓은 콘크리트 내로 분산되면서 발생하는 인장응력에 의해서 유발되는 균열로 추정됨.
- 일체 타설 부재의 균열형상은 거의 유사하나, 프리캐스트 부재의 경우에는 일체타설 부재보다 균열 수 및 발생영역이 좁은 것으로 나타났음.
- 또한, 스티드+철근에 의한 연결이 스티드만의 연결보다는 다소 구조적으로 안정한 것으로 나타남.

표 5.5 굵은골재SC-강 합성 거동 실험

ID	crack load (kN)	yield load (kN)	ultimate load (kN)	failure load (kN)	displ. at 90% failure load (mm)	characteristic relative displacement (mm)	faliure pattern
80-N-200-N	90.8	524.8	779.2	779.7	10.35	9.32	FT+STUD
80-N-200-S	-	555.1	813.9	813.9	11.64	10.48	FT+STUD
80-N-400-N	91.8	546.3	740.3	740.3	11.15	10.03	FT+STUD
80-N-400-S	82.9	581.7	739.7	739.7	10.86	9.77	FT+STUD
80-P-200-N	91.3	449.3	769.0	769.0	11.35	10.22	FT+STUD
80-P-200-S	97.4	444.3	741.0	741.0	10.86	9.77	FT+STUD
80-P-400-N	118.3	485.9	651.7	651.7	9.87	8.88	FT+STUD
80-P-400-S	135.3	510.6	659.4	657.9	9.18	8.26	FT+STUD
100-N-200-N	413.5	497.6	752.3	747.9	8.74	7.87	FT+STUD
100-N-200-S	292.1	477.8	764.5	759.1	9.45	8.51	FT+STUD
100-N-400-N	280.5	433.0	672.5	671.6	9.53	8.67	FT+STUD
100-N-400-S	360.0	598.9	702.2	700.1	11.13	10.02	FT+STUD
100-P-200-N	225.9	470.3	689.8	666.4	7.64	6.88	FT+STUD
100-P-200-S	244.3	443.2	667.7	662.3	7.80	7.02	FT+STUD
100-P-400-N	146.6	418.7	659.8	653.9	11.68	10.51	FT+STUD
100-P-400-S	231.7	434.0	665.9	659.1	11.69	10.52	FT+STUD
120-N-200-N	517.9	548.7	786.1	732.2	7.98	7.18	FT+STUD
120-N-200-S	516.5	536.6	806.6	753.2	7.77	6.99	FT+STUD
120-N-400-N	541.9	554.7	718.1	718.1	8.61	7.75	FT+STUD
120-N-400-S	518.6	509.8	734.8	705.4	7.93	7.14	FT+STUD
120-P-200-N	559.2	394.6	760.7	758.8	8.69	7.82	FT+STUD
120-P-200-S	601.1	687.2	771.8	771.7	9.48	8.53	FT+STUD
120-P-400-N	520.7	533.3	618.0	618.0	7.92	7.13	FT+STUD
120-P-400-S	597.5	629.4	739.3	739.3	8.12	7.31	FT+STUD

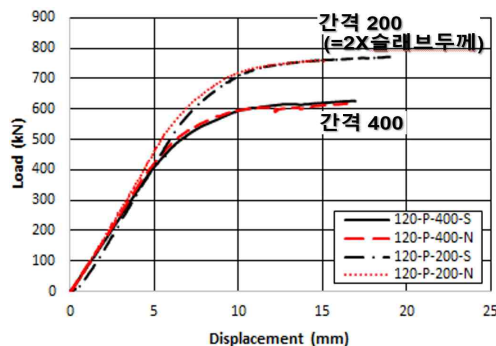
FC: flexural compression failure

FT: flexural tension failure

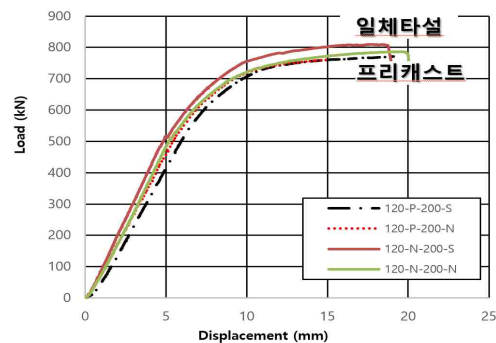
STUD: failure at contact surface of concrete and stud

라) 합성거동 평가 및 설계기법 제시

- 완전 합성거동 해석모델 개발 및 S/W작성: 실험결과와 유사하여 제안된 모델의 타당성을 확인함.
- 하중-곡률 관계에서 일체타설 부재는 해석치와 실험치가 비교적 유사함. 또한 스테드 간격이 200mm인 부재는 해석모델의 단순화로 해석결과보다 약간 크게 나타난 반면, 스테드 간격이 400mm인 부재는 스테드 탈락으로 해석결과보다는 다소 작게 나타남.
- 실험 및 해석결과, 거동차이가 60MPa급 고강도 콘크리트와 거동이 유사하여, 현 설계기준 준용 가능
- 스테드 간격에 따른 강도차이 발생
 - ACI(KCI), EC2(도로교): 스테드간격 $\leq 2 \times$ 슬래브두께
- 프리캐스트와 일체(현장)타설의 강도차이 미미. 프리캐스트 합성부재 적용가능 검증



(a) 하중-곡률 일체타설 시리즈(80MPa)



(b) 하중-곡률 프리캐스트 시리즈(100MPa)

그림 5.7 섬유보강 SC - 강 합성 실험 결과

(다) SUPER Concrete의 계면전단 거동 및 설계법 개발

① 이중 콘크리트 간 계면을 모사한 경사전단 실험

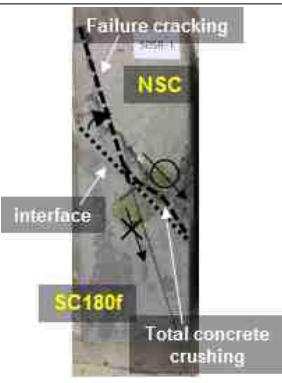
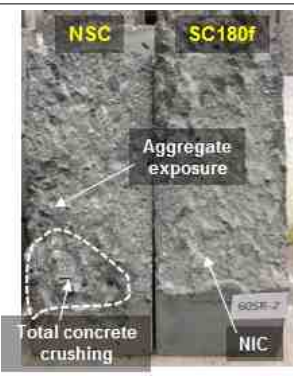
㉓ 실험 개요

- 검토배경: 일반 RC 부재에 섬유보강SC로 상부중타 공법 적용 시, 설계강도 도달 전 계면에서 파괴되는 것을 피하기 위하여 계면 전단강도를 산정하여 확인
- 실험계획: 계면 전단파괴를 모사하기 위하여 경사전단실험을 수행
 - 실험목표: 계면각도에 따른 파괴모드 변화, 계면파괴 계수를 도출
 - 실험변수: 양생조건(상온, 고온), 계면각도(50, 60, 70도), 표면처리(무처리, 샌드블라스팅) (42개 요소실험)

㉔ 실험 결과 (표 5.6)

- 실험변수에 따른 계면 부착강도 및 파괴양상
 - 표면처리: 샌드블라스팅 공법으로 면처리한 결과, 면처리되지 않은 실험체에 비해 SC180f-NSC 합성 부재의 계면 부착 성능이 크게 향상
 - 계면각도: 계면 경사각이 작아질수록 면내 수직응력이 증가하여 계면전단 강도 증가. 특히, 면처리한 실험체의 경우 파괴 모드가 계면 부근 콘크리트 파괴에서 낮은 압축강도 콘크리트의 압괴로 변화
 - 양생조건: SC180f 보강층의 양생 조건은 합성 부재의 최대 강도에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타남.

표 5.6 계면각도와 계면처리에 따른 실험체 파괴양상

실험변수	계면각도 50°	계면각도 60°	계면각도 70°
계면처리 (무처리)	 계면파괴	 계면파괴	 계면파괴
계면처리 (샌드블라스팅)	 콘크리트압괴	 콘크리트압괴+계면파괴	 계면파괴

㉔ 실험 결과 분석

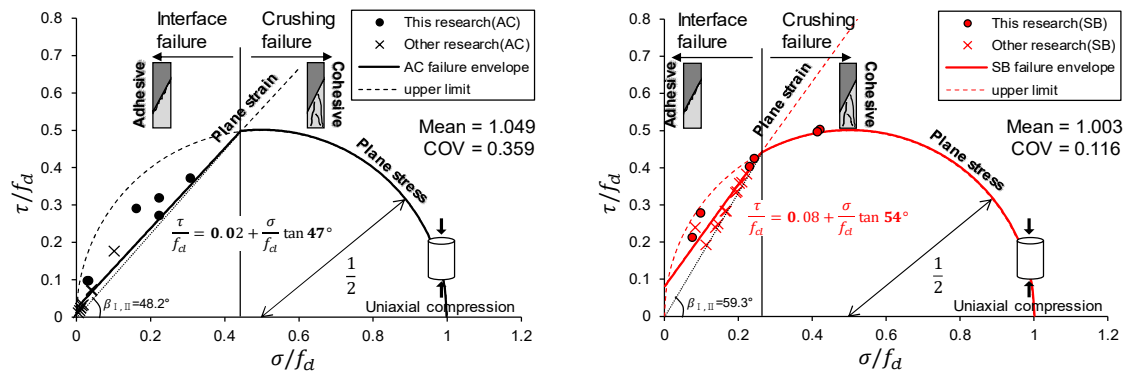
- 기존 설계식의 검토

- AASHTO-LRFD, CSA 및 MC2010: 합성 부재의 계면 전단 강도를 안전측으로 예측하지만, 면처리 되지 않은 실험체의 경우 편차가 큼.
- 현행 콘크리트 기준 (ACI, KCD): 전단 무보강 부재에 대해 점착력만을 고려하여 실험 결과를 과도하게 보수적으로 예측, 비경제적 설계 유도 우려

- 계면의 면거칠기에 따른 점착계수와 마찰계수를 제안 (그림 5.8)

: 제안된 점착계수와 마찰계수는 합성 부재가 NSC의 압괴에 의해 파괴강도가 결정되지 않는 경우에 한함

- 매끄러운면을 가진 계면: 점착계수 0.02, 마찰계수 47°
- 면처리를 한 계면: 점착계수 0.08, 마찰계수 54°



(a) 매끄러운면을 가진 계면 파괴기준

(b) 면처리를 한 계면 파괴기준

그림 5.8 계면처리에 따른 상수값 제안을 위한 파괴기준

② 완전합성단면을 가정한 계면 직접전단 실험

㉔ 실험 개요

- 검토배경: 강섬유부피비에 따른 전단균열양상과 전단저항기제를 확인
- 실험계획: 계면 전단파괴를 모사하기 위하여 경사전단실험을 수행
 - 실험목표: 계면각도에 따른 파괴모드 변화, **계면파괴 계수**를 도출
 - 실험변수: **강섬유 부피비(F15/10/05/00)**와 전단면에 직각으로 배근된 철근비(S00/09/16)으로 12개 종류 각 실험체별 2개씩 제작(그림 5.9) (**24개 요소실험**)

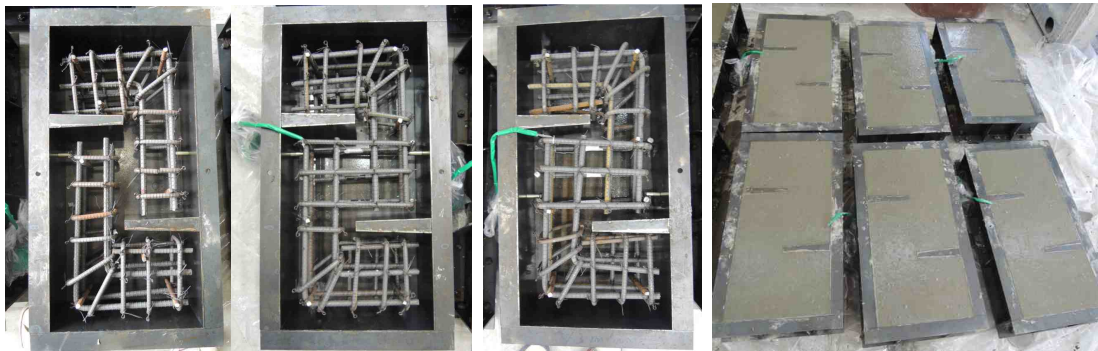


그림 5.9 전단강도 실험체 S00(좌), S09(중), S16(우)의 거푸집, 배근상태 및 타설 후 모습

㉞ 실험 결과 (표 5.7)

- 최대전단강도

- 최대전단강도는 강섬유 부피비의 증가에 비례하여 증가
- 최대전단강도는 인장철근의 유무에 크게 영향을 받지만 인장철근비 증가에 따른 강도증대효과는 미미함.

표 5.7 전단강도 실험체 최대전단하중

1차	S00	S09	S16	2차	S00	S09	S16
F15	27.58	32.03	32.84	F15	25.77	31.22	31.84
F10	15.27	26.93	27.37	F10	23.47	26.53	26.53
F05	16.63	24.67	27.20	F05	19.26	25.13	27.37
F00	13.72	21.03	22.54	F00	13.81	21.28	20.35

- 인장철근비의 영향 (그림 5.10)

- 인장철근비가 증가할수록 균열이 기울어지며, 균열 끝부분에서 압괴현상 발생
- 인장철근비의 증대가 전단강도증가보다는 전단면에서의 주응력방향 변화를 가져오며, 사인장균열을 유도



그림 5.10 인장철근비에 따른 균열양상 (좌-S00, 중-S09, 우-S16)

- 강섬유 부피비의 영향 (표 5.8)

- 최대전단강도는 강섬유 부피비에 비례하여 증가하고, 균열 후 전단강도 또한 증가
- 강섬유가 균열면에서 가교역할을 하면서 사인장균열 유도하고, 전단철근의 역할을 대체할 수 있음을 시사

표 5.8 강섬유 부피비에 따른 균열형태

	F00-S00	F05-S00	F10-S00	F15-S00
균열 형태				

③ 계면전단강도 설계법 개발

㉞ 서로 다른 시기에 타설한 콘크리트 계면전단 강도식

- 이종 콘크리트를 타설하는 경우, 계면의 직접 설계전단강도 v_d 는 식 (5.1)로 산정

$$v_d = \phi_c \mu_1 f_{ctk} + \mu_2 f_n + \phi_s \rho f_y (\mu_2 \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0.5 \phi_c v f_{ck} \quad (5.1)$$

- 균열발생강도 f_{crk} : 이종 콘크리트의 재료강도 중 작은 값을 적용
- 계면 계수 μ_1, μ_2 : 계면 거칠기에 따른 계수로 표 5.9에서 정한 값

표 5.9 계면의 표면에 따른 계면 계수

표면 구분	계수	해당 표면 상태
매끄러움	$\mu_1 = 0.1$ $\mu_2 = 0.5$	슬립폼 또는 사출 성형 거푸집에 타설한 표면 및 진동 다짐 후 더 이상의 표면처리하지 않은 자유 표면
거칠	$\mu_1 = 0.5$ $\mu_2 = 0.6$	표면을 긁어 거칠게 하거나 골재를 노출시키거나 또는 기타 방법을 통해 약 40 mm 간격에 적어도 3 mm 거칠이 있는 표면
요철 표면	$\mu_1 = 0.5$ $\mu_2 = 1.4$	5 mm 이상의 깊은 요철을 가지면 지침 해설 그림 9.3.1에 맞게 사전 제작된 표면

㉠ 실험결과와 이론식 비교

- 실험결과와 표 5.9의 계면계수와 콘크리트 압축강도 유효계수를 적용한 설계결과를 상호 비교한 결과, 기준의 설계식이 충분한 안전율을 확보하고 있음을 확인 (그림 5.11, 5.12)

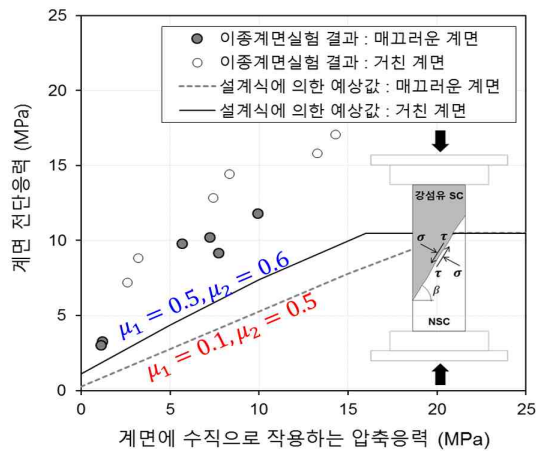


그림 5.11 이종 콘크리트 간 계면 경사전단실험 결과

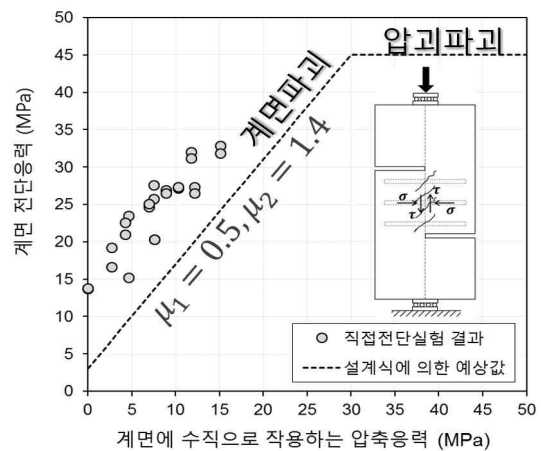


그림 5.12 강섬유 SC 직접전단실험 결과

(6) SUPER Concrete 균열 및 철근상세 설계법 개발

(가) 균열 및 처짐 등의 사용성 기준

① 각국의 균열 및 처짐 제어기준 분석

- 각국은 균열 제어기준을 기능적(function), 심미적(aesthetic aspect), 내구성(durability) 관점에서 검토함.
- 기능적 관점에서 보면, 공칭강도를 기준으로 한 설계법에서는 균열폭에 대해서는 별도의 제한을 두지 않으며, 심미적 관점은 주관적인 면이 강하기는 하나 약 0.4mm 이상의 균열폭에 대해서 불편한 마음이 생김.
- 또한 내구성 관점에서는 0.2-0.4mm 정도의 균열폭을 허용함.

표 6.1 각국의 균열 및 처짐 제어기준 분석

기준	균열	처짐
Eurocode2	- 노출등급에 따른 허용균열폭 제시(0.2-0.4mm) - 최소 철근량 제시 - 철근의 최대 지름 기준 - 철근의 최대 간격 기준	- 처짐 계산이 불필요한 경우 제시 - 처짐 계산을 수행해서 기준을 만족하는 방법 제시 - 단기 및 장기처짐 검토
ACI318M-11, USA	- 노출등급에 따른 허용균열폭 기준 삭제 - 균열폭과 강재 부식 사이의 관계가 밀접하지 않음을 연구결과로 확인 - 인장철근의 간격 기준을 통한 균열제어	- 처짐 계산이 불필요한 경우 - 처짐 계산을 수행해서 기준을 만족하는 방법
KCI(2012)	- 환경조건에 따른 허용균열폭 제시(0.2-0.4mm) - 노출 환경에 따른 철근의 간격 기준 제시 - Eurocode와 유사한 균열폭 계산법	- 처짐 검토 필요 없는 최소 높이, h 설정 - 순간처짐(탄성해석, 유효단면2차모멘트) - 장기처짐은 순간처짐에 계수를 곱함 - 최대 허용 처짐 설정 - ACI318M-11과 유사
도로교설계기준(2012)한계상태설계법	- 하중조합에 따른 허용균열폭 제시 - 철근비 기준을 통한 균열제어 - 철근의 최대 지름 기준 - 철근의 최대 간격 기준 - Eurocode2와 유사	- 처짐 계산 생략 - 지간유효깊이비 검토 - 처짐을 계산해서 허용처짐량 이내로 설계하는 방법 - Eurocode2와 유사
SETRA-AFGC 2002, France	- 철근이나 긴장재가 없는 경우에는 균열폭을 제한 - Eurocode2와 유사한 방식으로 하중조합에 따른 허용균열폭 제시 - 강섬유비의 최소값을 제시하고 있으며 취성(brittleness)의 정도에 대한 검토 요구	- 처짐 계산이 불필요한 경우 - 처짐 계산을 수행해서 기준을 만족하는 방법 - 단기 및 장기처짐 검토
UHSC, JSCE, Japan	- 균열이 발생한 후에도 강섬유의 가교작용(bridging action)으로 인해서 인장력을 받기 때문에 최소철근비 규정을 두고 있지 않음.	- 사용성에 대한 구체적인 기준 미흡

② 초고강도 콘크리트에 대한 사용성 기준 분석

- 콘크리트가 초고강도로 갈수록 사용성 기준에 대한 국제적인 기준이 미흡함. 프랑스를 중심으로 한 SETRA-AFGC가 선도적으로 기준을 제시하고 있으며, 일본 등도 기준을 제시함.
- SETRA-AFGC는 강섬유로 인한 연성거동을 중요하게 고려하여 강섬유비를 2% 이상 포함하는 것을 기본 배합으로 정함.
- Ductal(Australia)은 인장응력의 최대값을 제한함으로써 휨균열을 제어함. 단기처짐은 비균열 단면에서는 기존 방법을 적용하고, 균열이 발생하면 곡률을 적분해서 구함. 장기처짐은 재령보정 유효탄성계수(AAEM, age adjusted effective modulus)를 사용해서 구함.

- JSCE(Japan Society of Civil Engineers)는 등가응력블록 보다는 응력-변형률 곡선을 직접 사용해서 휨설계를 수행할 것을 권장함. 균열이 발생한 후에도 강섬유의 가교 작용(bridging action)으로 인해서 인장력을 받기 때문에 최소철근비 규정을 두고 있지 않음. UHPC에 대한 구체적인 기준을 제시하지 못함.

③ 콘크리트 복수 균열 및 균열 간격 예측 프로그램 개발

- 복수의 균열이 조밀하게 발생하는 경우 일반적인 변형률게이지, 변위계, 클립인게이지 등으로 균열폭을 예측하기 어려우므로 **화상연관기법(DIC)**을 적용하여, 변위를 예측하는 알고리즘 및 프로그램을 개발함.

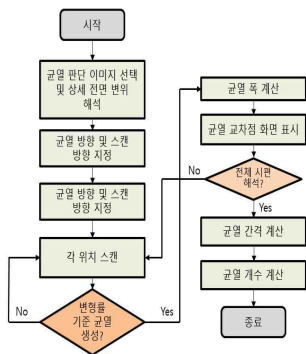


그림 6.1 복수 균열에서 균열폭 및 균열 간격 계산 프로그램

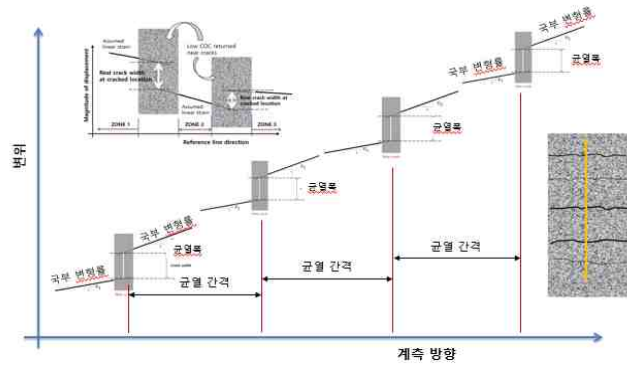


그림 6.2 복수 균열에서 균열폭과 균열간격 계산 기법

④ 사용성 평가기준 정립

- 고인성 섬유보강 모르타르 시편을 사용해서 인장실험을 통해 복수의 균열을 생성함. 복수 균열을 초기 재하 단계부터 탐지하고, 하중 단계별로 이미지를 확보한 후, 변위를 예측하여 분석함.

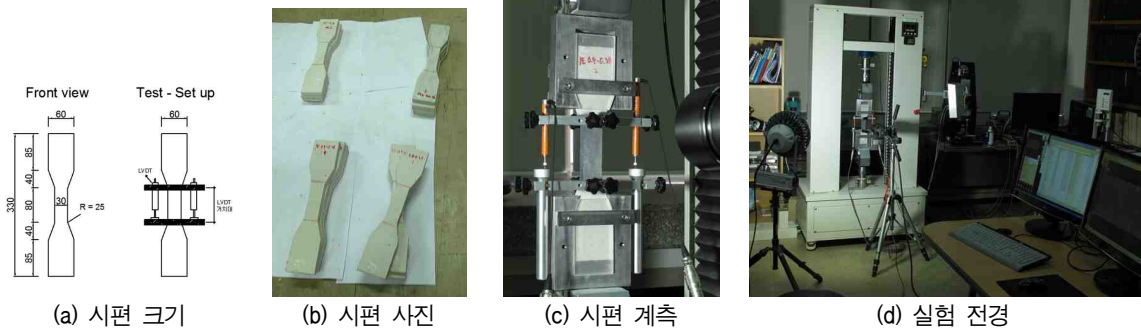
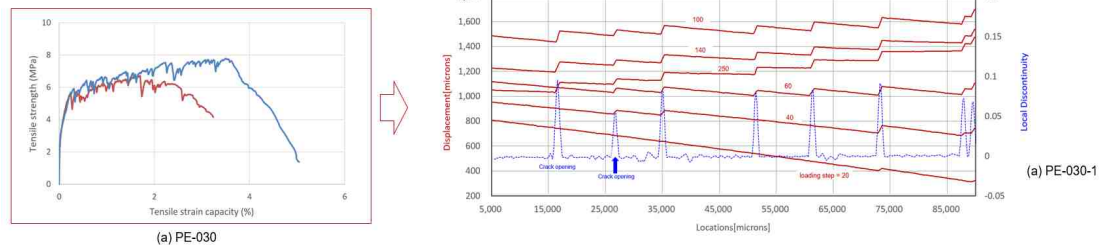


그림 6.3 인장 실험



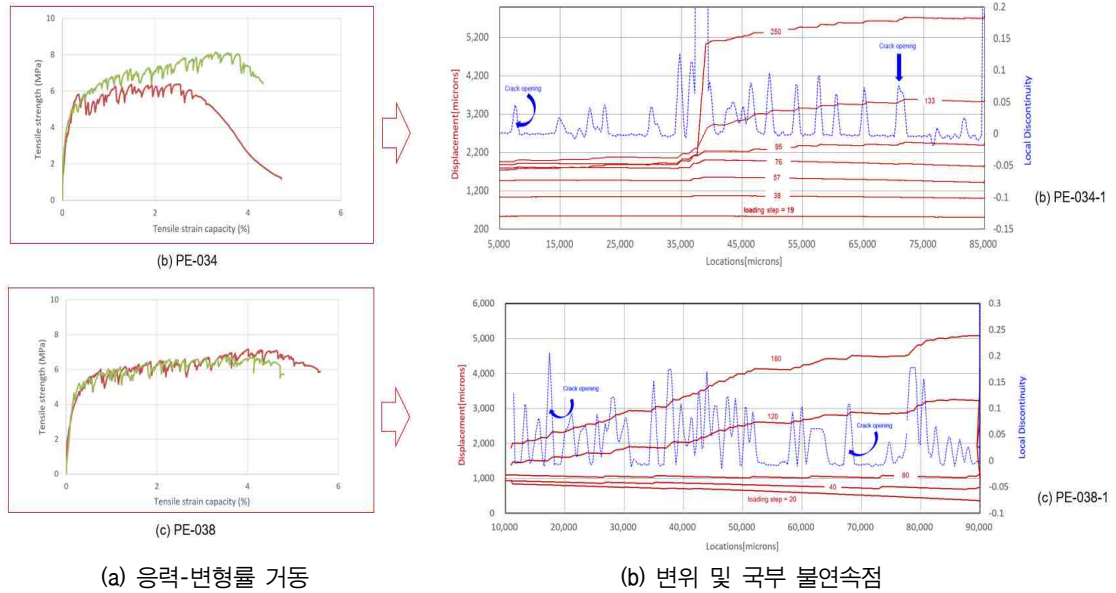


그림 6.4 복수균열에 대한 균열폭 분석

- 내구성 측면의 균열 평가 기준 정립

- 균열 제어 기준을 a) 내구성에 영향을 미쳐서 구조적인 성능을 저하시키는 경우, b) 구조물의 사용성(누수, 마감 손상)에 영향을 미치는 경우, (c) 심미적인 문제가 있는 경우로 구분함.
- 내구성을 기준으로 한 균열제어가 가장 엄격한 기준이므로, 이에 기반을 두어 정립함.

표 6.2 사용성 균열 제어 기준

균열제어 기준	기준 설정	내용
기능	- 균열폭에 대한 제한 없음 (EC2 crack control: Section 7.3) - 0.05-0.2mm: 정수압이 작용하는 경우(EN1992-3)	- 강도설계법 혹은 한계상태설계법 등의 설계법에서 균열 허용
내구성	- 직접 제어: 허용균열폭을 설정(환경조건, 하중조건) → 허용균열폭과 내구성 간의 상관성 불명확, 압축강도에 따른 허용균열폭 개념 없음. - 0.3mm: EN1992-1-1 - 간접 제어: 철근의 굵기 및 배근간격 설정	- 콘크리트의 성능저하 및 철근의 부식 고려 - 내구성이 균열폭에 의해서 결정된다기보다 콘크리트 배합 및 피복두께가 더 큰 영향을 미침.
외관	- 경험적으로 균열폭이 0.3mm를 넘으면 불안감을 준다고 함. - 구조물의 용도에 따라 정할 수 있음.(EN1992-1-1)	- 학문적 기준은 없음.

표 6.3 초고강도 콘크리트 영역의 균열 제어 기준

설계 기준	기준 설정	내용
AFGC-SETRA, French	- 환경조건에 따라 0.1~0.3 mm	- 보통강도콘크리트의 사용성 검토 기준 적용
Ekkehard Fehling, UHPC, Germany	- 허용균열폭을 제시하지 않음	- EC2와 유사한 방식으로 균열폭 계산식 개발, 보통강도콘크리트의 균열폭 계산식을 UHPC에 수정, 적용함. - 불안정한 균열 진전을 막는 것이 허용균열폭 설정의 목표임.
K-UHPC	- 균열폭이 0.3 mm로 유지되며, 별도의 균열 검토 불필요 - 사용하중 하에서 균열이 발생하지 않도록 하는 것이 설계의 방향.	- 보통강도콘크리트의 균열 검토 기준을 적용함. - 콘크리트구조기준(2012)의 균열폭 기준을 적용할 수 있음.

⑤ 대변형 측정 프로그램 개발

- 대변형 측정 알고리즘 및 프로그램을 개발함. 초기에 비재하 하중 단계에서의 변위를 기준으로 상대적인 변위를 각 재하단계 마다 분석하며, 원거리 지점간 상대변위는 각각의 외부 고정점을 이용하여 상대변위를 계측함.

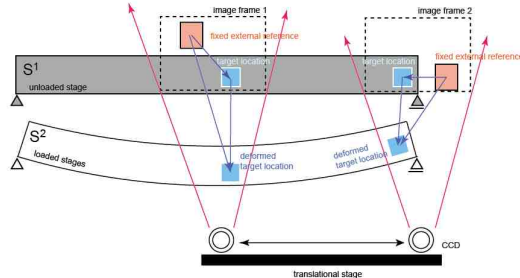


그림 6.5 대변형 계측 알고리즘

⑥ 내화설계 기준 분석

- 일본(Japanese building standards, 2000)은 서술적인 설계법과 성능기반 설계법을 제시하고, The building code of Japan (Building Standards Law of Japan, BSLJ 2000)은 단순화한 성능기반 설계법 제시함.

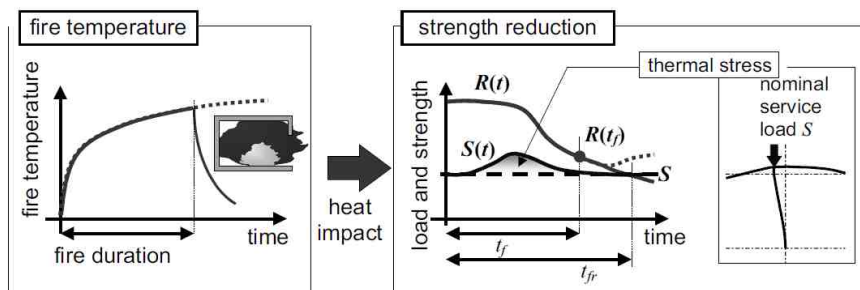


그림 6.6 기본적인 내화설계 개념(Japan)

- 유럽의 내화설계 기준은 CEB Bulletins의 Fire Design of Concrete Structures를 기반으로 하는데, 도표를 이용하는 방법, 단순화된 계산법, 정밀계산법 등 세 가지 방법을 제시함.
 - 정밀계산법은 기본 원칙만 주어져 있고, 단순화된 계산법은 CEB N° 208(500°C isotherm method)와 ENV 1992-1-2(zone method)로 주어짐.
 - 고강도콘크리트는 폭렬에 대비할 수 있는 방안으로 표면 강화 메쉬, 콘크리트에 대한 검증, 표면 보호층, 폴리프로필렌 섬유 혼입 등 4가지를 제시함.
- 미국의 내화설계 기준은 요소 위주의 서술적인 방식이며, 주로 거주자의 탈출시간 확보에 초점이 맞춰져 있고, 구조물 자체를 보호한다는 측면은 약함.
 - 내화설계에 관해서는 두 개의 모델 코드가 있음(The International Building Code 2000, International Code Council; The Building Construction and Safety Code NFPA 5000, The National Fire Protection Association).
 - 미국의 내화설계는 요소 중심의 서술적 방식이며, 이러한 방법으로 정한 내화등급은 실제 화재를 모사하지 않고 표준 시간-온도 곡선을 사용하기 때문에 구조물의 실제 거동을 반영하지 않음. 또한 고온에서의 콘크리트 거동은, 미국의 모델코드나 설계기준에서 제대로 반영되어 있지는 않음.

(나) 선설치앵커 실험 및 설계기법 제시

① 선설치 앵커 정착 특성

㉠ 정착 특성

- Super Concrete는 일반콘크리트에 비해 높은 인장강도를 갖음.
- 앵커의 주된 파괴는 콘크리트 파괴(concrete breakout failure)로 콘크리트의 인장강도에 의존하여 정착강도가 발현. SC의 높은 인장강도로 인해 앵커의 콘크리트 파괴강도는 매우 향상될 것으로 기대

㉡ 일반콘크리트에 정착된 선설치앵커의 파괴강도

$$N_{cbg} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \psi_{ec,N} \psi_{ed,N} \psi_{c,N} \psi_{cp,N} N_b \quad (6.1)$$

- 기존 콘크리트파괴강도(N_b)에 다음 항목에 따른 영향을 곱하여 산정
 - 앵커 간격과 연단거리에 따른 파괴면적의 영향(A_{Nc}/A_{Nco})
 - 연단거리로 인해 저하된 콘크리트 인장강도 ($\psi_{ed,N}$)
 - 편심의 영향 ($\psi_{ec,N}$)
 - 균열의 영향 ($\psi_{c,N}$)
 - 최소 철근의 배근 유무 ($\psi_{cp,N}$)

② 인장을 받는 선설치 앵커 정착실험

㉠ 실험 계획

- 문힘깊이: 30mm, 50mm
- 그룹앵커 실험은 100mm 또는 150mm 간격으로 설치된 4개 앵커 동시 인발
- 180MPa급 Super concrete는 매우 높은 인장강도로 인해, 얇은 문힘깊이에서도 높은 콘크리트 파괴강도. 앵커 강제 파괴 전에 콘크리트 파괴를 유발하기 위하여, 20mm 지름의 앵커를 사용

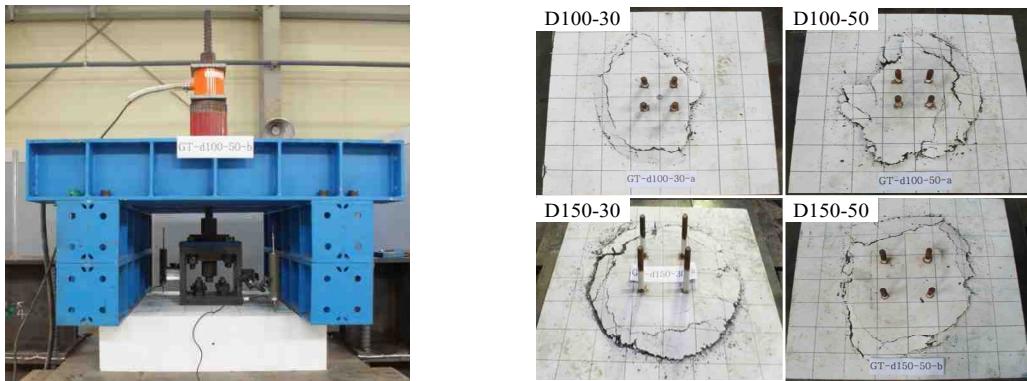


그림 6.7 인장을 받는 선설치 앵커 실험

㉡ 실험결과 및 설계기법 제시

- 4개 앵커로 구성된 그룹앵커 강도는 CCD방법과 동일하게 다음과 같이 가정

$$N_{cbg,p}' = \frac{A_{Nc}'}{A_{Nco}'} N_{b,p} = \frac{(2\alpha h_{ef} + s)^2}{4\alpha^2 h_{ef}^2} 26 \sqrt{f_{ck}} h_{ef}^{1.5} \quad (6.2)$$

- 그룹앵커 실험결과를 대입한 후, $N_{b,p}$ 로 나누고 제곱근을 취하여 정리

$$\alpha h_{ef} = \frac{s}{2 \left(\sqrt{\frac{P_e}{N_{b,p}}} - 1 \right)} \quad (6.3)$$

- 앵커가 개별파괴된 2개를 제외하고 6개 실험체에서 산정된 평균 α 값 2.08로, 일반콘크리트의 1.5보다 39% 증가
- 콘크리트 기본 저항면적은 다음과 같이 산정

$$A_{Nc}' = (2.08 h_{ef})^2 \quad (6.4)$$

③ 전단을 받는 선설치 앵커 정착실험

㉓ 실험 계획

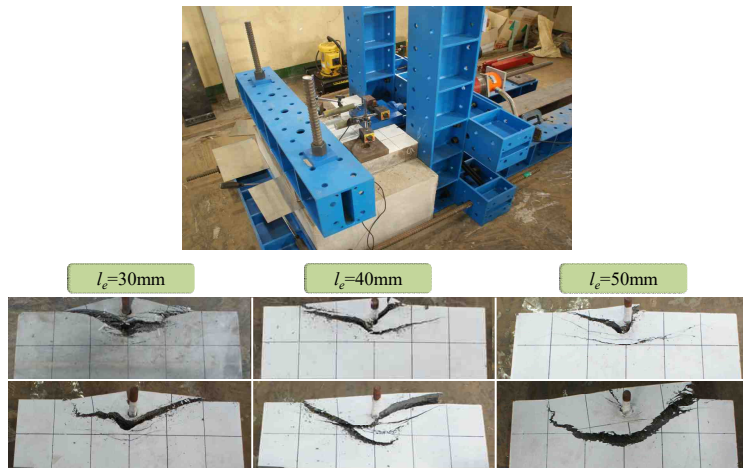


그림 6.8 전단을 받는 선설치 앵커 실험

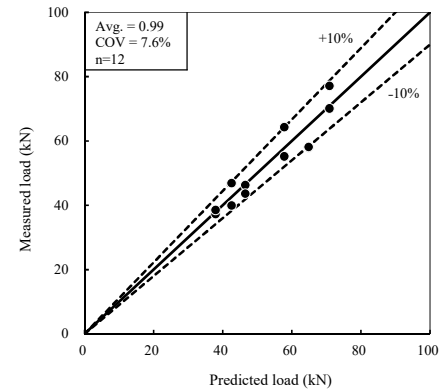


그림 6.9 전단을 받는 선설치 앵커 실험값과 예측값의 비교

㉔ 실험결과 및 평가식 개발

- 연단거리가 멀수록, 문힘깊이가 깊을수록 강도와 강성이 증가하였다. 최대하중은 2~4mm 범위에서 발생하며, 최대하중 이후 일반 콘크리트와 달리 일정 구간 하중을 유지
- 문힘깊이와 연단거리에 대한 2변수 비선형 회귀분석 결과

$$V_{b,p} = 4.04 \left(\frac{l_e}{d_a} \right)^{0.4} \sqrt{d_a} \sqrt{f_{ck}} (c_{a1})^{1.2} \quad (6.5)$$

- 일반 콘크리트에 정착된 전단을 받는 앵커의 콘크리트 파괴강도 평가식에 비해 계수가 크게 높아짐. Super concrete의 향상된 인장강도 효과로 평가
- 문힘깊이의 영향은 일반강도에서는 0.2제곱에서 0.4제곱으로 증가
- 실험결과와 상기 평가식을 비교한 결과, [실험값]/[예측값]의 평균은 0.99 변동계수는 7.6%로 평가

④ 반복하중을 받는 선설치앵커 정착실험

㉓ 실험 계획

- 고강도콘크리트의 강섬유 혼입 유무를 실험변수로 설정
- 콘크리트 강도와 문힘깊이: SCf120(90mm), SC120(150mm)
- 실험체는 강기둥과 고강도콘크리트를 타설한 기초판을 볼트 접합하여 제작



그림 6.10 반복하중을 받는 선설치앵커 실험체 제작과정

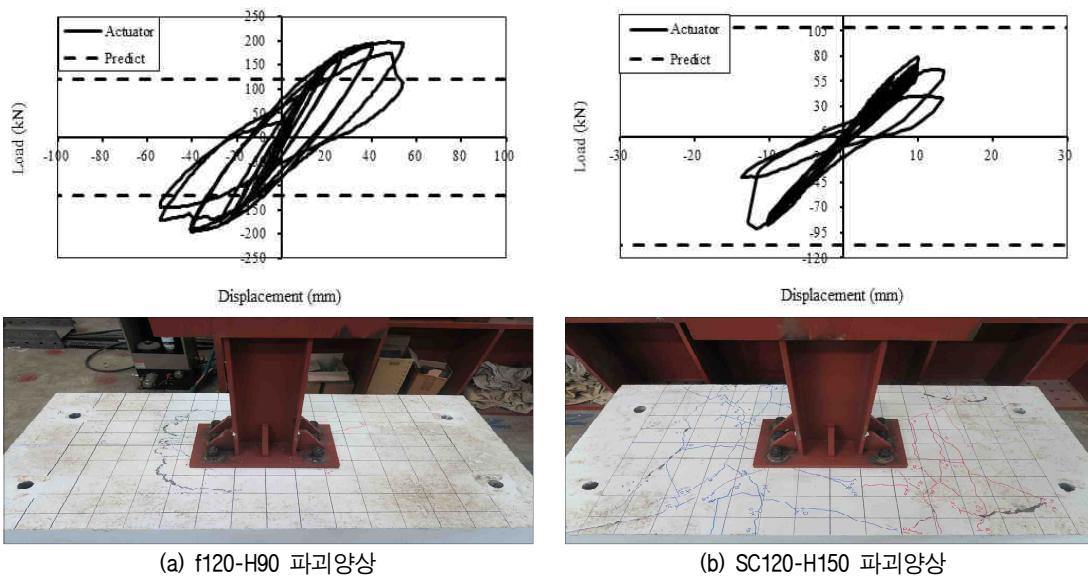


그림 6.11 반복하중을 받는 선설치 앵커 실험결과

- SC120-H150 실험체에서는 반복하중에 의한 강도저하 현상이 나타남.
- SC120-H150 실험결과는 KCI 2012에서 지진하중 시 콘크리트파괴에 0.75 추가 저감계수 규정과 부합하는 결과를 보여줌.

(다) 확대머리철근 실험 및 설계기법 제시

① 확대머리철근 정착 특성과 평가 방법

㉑ 정착 특성

- UHPC의 우수한 인장강도 활용
- 작은 UHPC 단면의 효과적인 철근 정착
- 예상 파괴 양상

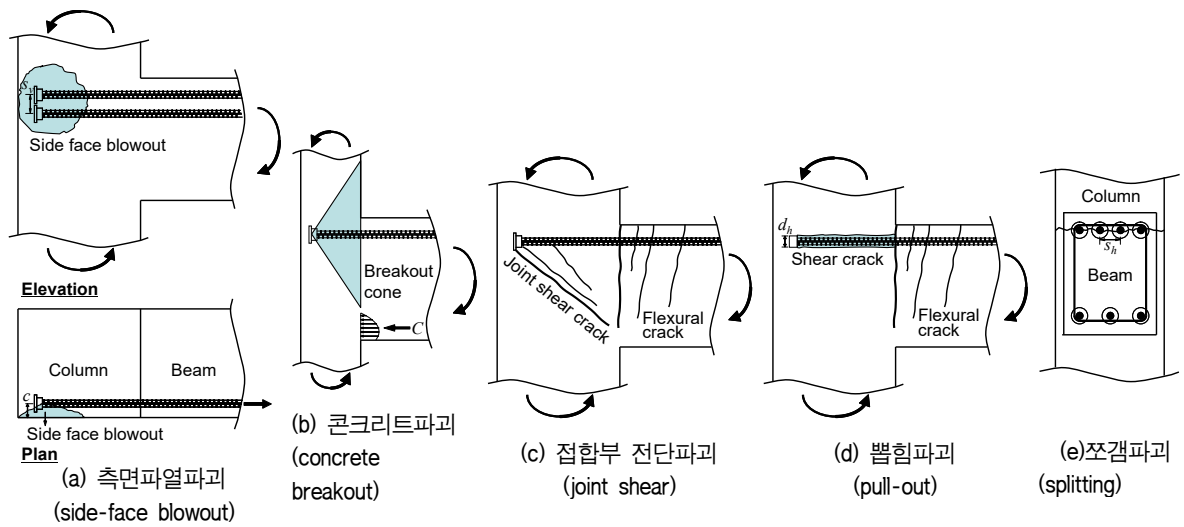


그림 6.12 보주근의 정착에 의해 발생 가능한 외부접합부 파괴유형

㉠ 정착강도 평가 방법

- headed bars의 적용 부위가 보-기둥 접합부이고, 비교 대상인 hooked bars의 현행 설계기준의 배경이 되는 실험방법을 따라 보-기둥 접합부 실험

표 6.4 확대머리 철근 정착실험 방법별 특징

실험방법	현행 설계기준 적용 대상	특징	파괴 유형	영향인자
겹침이음 휨실험	직선 정착길이 확대머리 정착길이	전통적인 부착강도 평가방법 매우 낮은 강도 발현	쪼갬파괴	정착길이 황보강철근
CCT절점 실험	-	보-기둥 접합부 실험과 유사함	측면파열 파괴	측면피복
깊은 인발 실험	앵커의 측면파열강도	쉽고 저렴한 실험	측면파열 파괴	측면피복
얕은 인발 실험	앵커의 콘크리트파괴 강도	매우 낮은 강도	콘크리트 breakout	정착길이
보-기둥 접합부 실험	hooked bars의 정착길이 설계식	높은 강도	측면파열 파괴	측면피복
TTC절점 실험	--	cut-off 철근 모사 휨과 전단이 동시에 작용하여 매우 낮은 강도 발현	쪼갬파괴	정착길이 황보강철근

② 섬유보강 SC의 정착실험

㉠ 실험 계획

- 콘크리트 강도: 180f, 150f, 120f (MPa)
- 측면피복 두께: 가장 중요한 변수로 측면파열파괴에 직접적인 기여를 함. 최소 피복 두께 $1d_b$ 가 필요하고 $2d_b$ 보다 큰 피복두께를 가질 경우, 측면파열파괴 발생 전에 철근 항복이 예상되므로 최소 $1d_b$, 최대 $2d_b$ 로 설정
- 정착길이: 일반 콘크리트에 정착된 headed bars의 측면파열 파괴강도 평가식을 이용하여 최대 $6d_b$, 비교를 위해 $4d_b$ 로 설정
- 철근 지름: SUPER Concrete의 높은 인장강도를 고려하여 고강도 철근 SD600 사용. 일반적인 철근 중 가장 큰 지름인 D32와 보 주철근으로 가장 많이 사용되는 D22를 추가하여 D32, D22로 설정

㉞ 실험결과

- 현행 설계기준을 그대로 사용하여도 매우 안전한 결과를 도출할 수 있으나, 보다 경제적인 설계를 위해 SC특성을 고려한 새로운 설계식의 개발이 필요함.

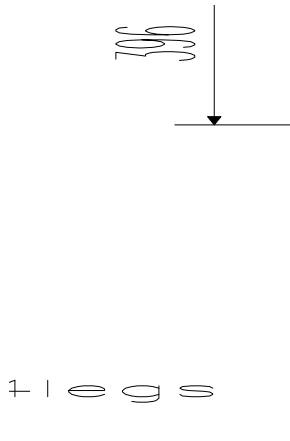


그림 6.13 확대머리철근 정착 실험체 상세 예

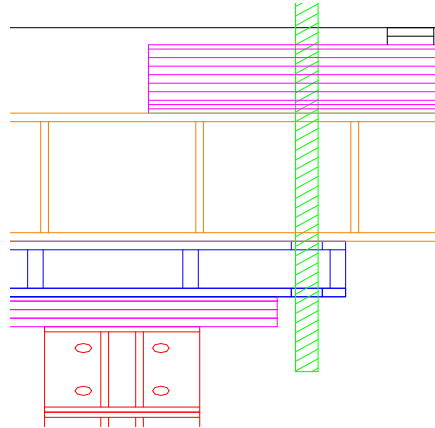


그림 6.14 확대머리철근 정착실험 가력장치도

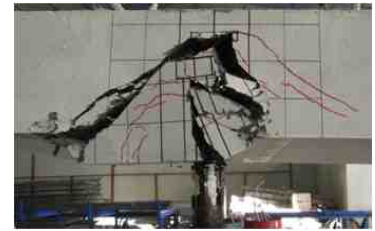


그림 6.15 확대머리철근 정착실험 파괴양상

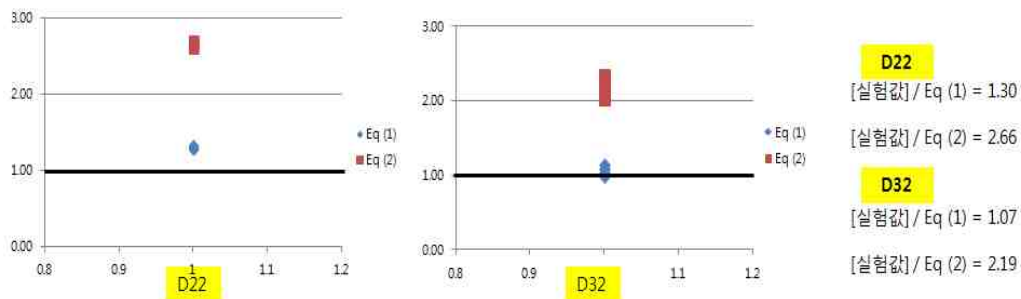


그림 6.16 SC180F에 정착된 확대머리철근 정착성능과 설계식 비교

③ 짧은골재 SC의 정착실험

㉞ 실험계획

- 콘크리트 강도: SC80, SC120
- 측면 피복두께: 가장 중요한 변수로 측면파열파괴에 직접적인 기여를 함. 최소 피복 두께 $1d_b$ 가 필요하고 $2d_b$ 보다 큰 피복두께를 가질 경우, 측면파열파괴 발생 전에 철근 항복이 예상되므로 최소 $1d_b$, 비교를 위한 $1.5d_b$ 로 설정
- 정착길이: 일반 콘크리트에 정착된 headed bars의 측면파열 파괴강도 평가식을 이용하여 최대 $9d_b$, 비교를 위해 $6d_b$ 로 설정
- 철근 지름: SUPER Concrete의 높은 인장강도를 고려하여 고강도 철근 SD600사용 일반적인 철근 중 가장 큰 지름인 D32 와 보 주철근으로 가장 많이 사용되는 D22를 추가하여 D32, D22로 설정

㉞ 실험결과

- 철근에 발현된 정착강도는 콘크리트와 철근 표면 사이의 부착과 확대머리의 지압으로 발현되며 최대하중을 단면적으로 나누어 산정
- 지압에 의해 발현된 강도를 산정하기 위해 확대머리 지압면에서 $1d_b$ 떨어진 위치에 변형률 게이지 2개를 부착함.
- 계측된 변형률에 철근 탄성계수를 곱하여 지압에 의해 발현된 강도를 산정

- 부착에 의해 발현된 강도는 전체 철근 응력에서 지압에 의해 발현된 강도를 빼서 산정
- Thompson's의 연구결과와 같이 가력 초기에는 주로 부착에 의해 응력이 발현되었으나, 철근 항복 후 확대머리에 의한 지압의 기여도가 크게 증가하는 것을 알 수 있음.



(a) SC80-D32-L6-C1-1



(b) SC120-D22-L9-C1-2

그림 6.17 굵은골재 SC에 정착된 확대머리철근 파괴양상

기존 모델	변경 모델
$l_{dt} = \frac{d_b f_{yk}}{2.3 \psi \sqrt{f_{ck}}} - 10d_b$	$l_{db} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6 \alpha_7 l_b$
$\psi = (0.7 + 0.3 \frac{c_{so}}{d_b})(1 + 0.13 \frac{K_{tr}}{d_b})$	• 섬유보강 SC $\alpha_7 = 1.3$ • 굵은골재 SC $\alpha_7 = \frac{0.93}{0.6 + 0.3 \frac{c_{so}}{d_b} + 0.38 \frac{K_{tr}}{d_b}} \geq 0.675$
ψ: 확대머리철근 정착길이 관련 변수 $\alpha_1 - \alpha_6$: 설계정착길이 관련 변수 α_7: 확대머리철근 관련 변수 c_{so}: 최소피복두께 K_{tr}: 횡방향 철근지수	

그림 6.18 확대머리철근 정착길이 모델 제시

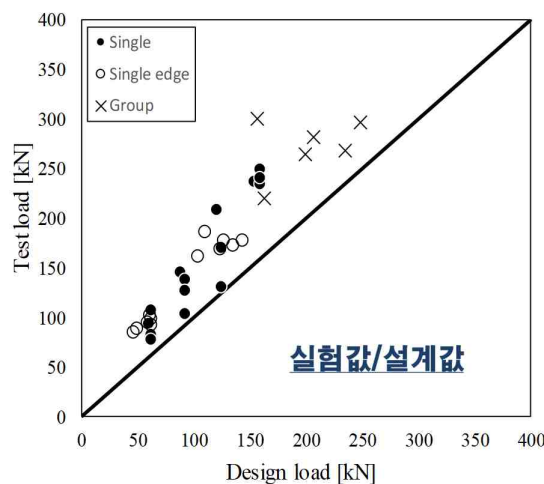


그림 6.19 굵은골재 SC에 정착된 확대머리철근 설계모델

(7) SUPER Concrete 적용 보강재 정착/이음 및 PSC 정착구역 설계법 개발

(가) SUPER Concrete 적용 보강재의 정착/이음 설계법

① SUPER Concrete 부착성능

㉔ 부착성능모델 분석

- 부착설계 목적: 부착파괴가 발생하도록 철근을 충분히 정착하는 것으로 부착력이 철근의 정착/이음 길이에 걸쳐 균등하다고 보는 것이 간편
- 정착길이 개념 도입

$$u = \frac{U}{\Sigma_0} = \frac{\Delta T}{\Delta l \Sigma_0} = \frac{\Delta f_s A_b}{\Delta l \Sigma_0} = \frac{\Delta f_s d_b}{4 \Delta l} \quad \text{and} \quad u = 20 \frac{\sqrt{f'_c}}{d_b} \leq 5.52 MPa \quad (7.1)$$

$$l_d = 0.019 A_b \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \quad (\text{ACI318-71}) \quad (7.2)$$

$$\text{or } l_d = 0.6 d_b \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \quad (\text{KCI와 동일}) \quad (7.3)$$

- 정착/부착 설계모델 분석

• ACI 318

$$\frac{l_d}{d_b} = 0.9 \frac{f_y}{\sqrt{f'_c} \left(\frac{c + K_{tr}}{d_b} \right)} \quad (7.4)$$

• ACI 408.3

- 횡구속 철근이 없는 경우

$$\frac{T_c}{f'_c{}^{1/4}} = \frac{A_b f_s}{f'_c{}^{1/4}} = [1.5 l_d (c_{\min} + 0.5 d_b) + 51 A_b] \left(0.1 \frac{c_{\max}}{c_{\min}} + 0.90 \right) \quad (7.5)$$

$$\text{여기서, } \left(0.1 \frac{c_{\max}}{c_{\min}} + 0.9 \right) \leq 1.25$$

- 횡구속 철근이 있는 경우

$$\frac{T_b}{f'_c{}^{1/4}} = \frac{T_c + T_s}{f'_c{}^{1/4}} = \frac{A_b f_s}{f'_c{}^{1/4}} \quad (7.6)$$

$$= [1.5 l_d (c_{\min} + 0.5 d_b) + 51 A_b] \left(0.1 \frac{c_{\max}}{c_{\min}} + 0.90 \right) + 53.3 t_r t_d \frac{N A_{tr}}{n} + 1019$$

• CEB-FIP Model Code

$$\frac{l_d}{d_b} = \frac{1}{6.55} \left(1.15 - 0.15 \frac{c_{\min}}{d_b} \right) \left(1 - K \frac{\sum A_{tr} - \sum A - tr, \min}{A_b} \right) \frac{M f_y}{\left(\frac{f'_c - 2.75}{10} \right)^{2/3}} \quad (7.7)$$

- 인장에 대한 최소정착길이

$$l_{d, \min} = \max \left[\frac{0.3}{6.55} \frac{M f_y}{\left(\frac{f'_c - 2.75}{10} \right)^{2/3}}, 10 d_b, 100 mm \right] \quad (7.8)$$

- 압축에 대한 최소이음길이

$$l_{s, \min} = \max \left[\frac{0.3 \alpha_b}{6.55} \frac{M f_y}{\left(\frac{f'_c - 2.75}{10} \right)^{2/3}}, 15 d_b, 200 mm \right] \quad (7.9)$$

- fib Model Code의 부착-슬립 관계

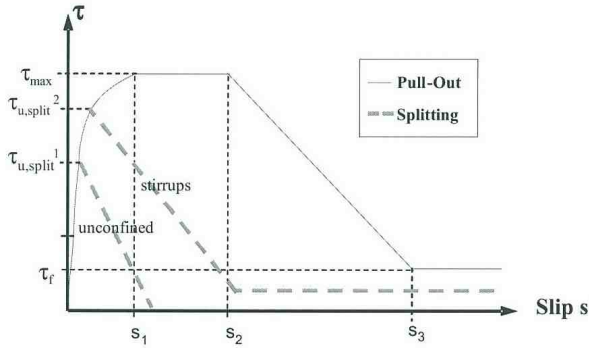


그림 7.1 Bond stress slip relationship (fib Model Code, 2010)

표 7.1 Bond Model Parameters

	Fully confined	
	Good bond condition	All other bond condition
s_1	1.0 mm	1.8 mm
s_2	2.0 mm	3.6 mm
s_3	rib spacing	rib spacing
α	0.4	0.4
τ_{max}	$2.5 \sqrt{f_{ck}}$	$2.0 \sqrt{f_{ck}}$
τ_f	$0.40 \tau_{max}$	$0.15 \tau_{max}$

$$\tau_b = \tau_{bmax} (s/s_1)^\alpha \quad (0 \leq s \leq s_1) \quad (7.10)$$

$$\tau_b = \tau_{bmax} \quad (s_1 \leq s \leq s_2) \quad (7.11)$$

$$\tau_b = \tau_{bmax} - (\tau_{bmax} - \tau_{bf})(s/s_2)/(s_3 - s_2) \quad (s_2 \leq s \leq s_3) \quad (7.12)$$

$$\tau_x = \tau_f \quad (s_x \leq s_3) \quad (7.13)$$

구분	ACI(KCI) 모델	EC2(도로교) 모델	SUPER Concrete 모델
설계모델	$l_d = \frac{0.6 d_b f_y}{\sqrt{f_{ck}}}$	$l_d = \frac{f_{yd} d_b}{4 f_{bd}}$ • $f_{bd} = \phi_c 2.25 \eta_1 \eta_2 f_{ctk}$	$l_d = \frac{f_{yd} d_b}{4 f_{bd}}$ • $f_{bd} = 0.65 \eta_1 \eta_2 f_{bdk}$
적용강도 한계	- $f_{ck} \leq 70 \text{ MPa}$	- $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$	SC120f, SC150f, SC180f SC80, SC100, SC120

그림 7.2 기본 정착길이 설계모델

㉠ 부착-슬립 실험 및 통계분석

- 직접인발시험을 통한 정착길이 설계식 제안
 - SUPER Concrete와 철근의 부착-슬립 관계식 규명
 - 보통강도 철근 및 고강도 철근 특성 차이 규명
 - 기존 정착길이 평가
 - SUPER Concrete 정착길이 제시

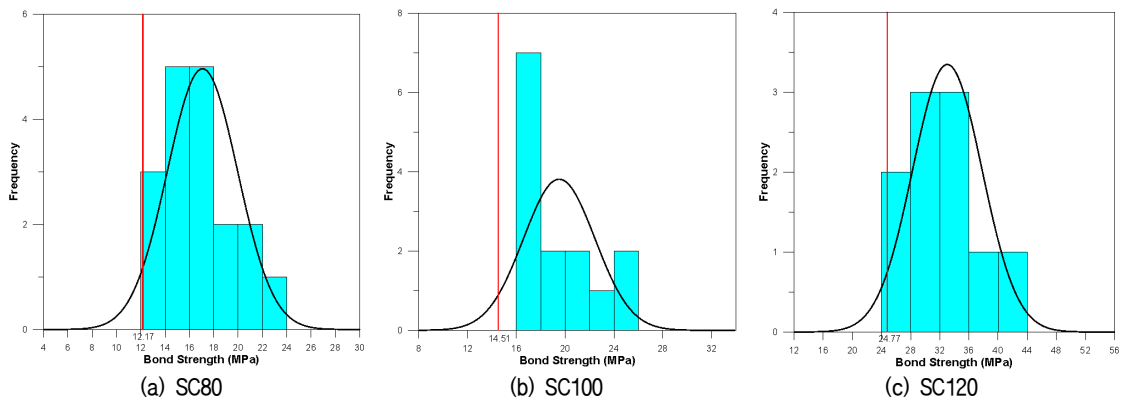


그림 7.3 굵은골재 SC의 부착강도 통계분석

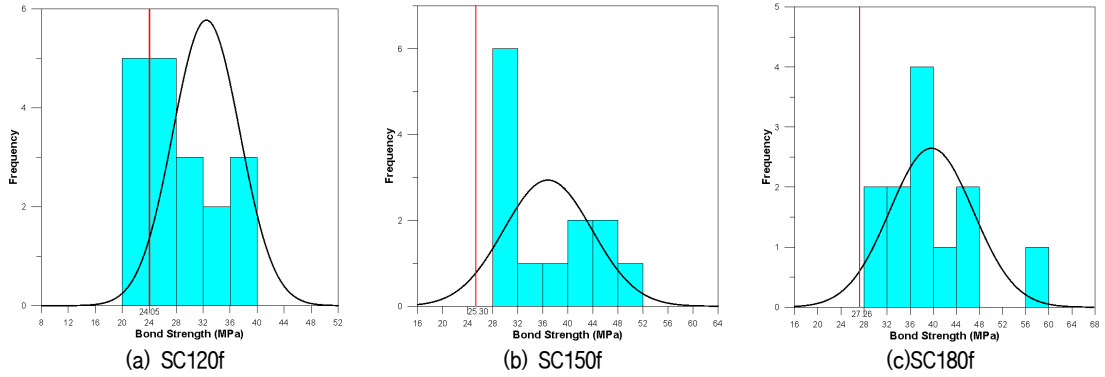


그림 7.4 섬유보강 SC의 부착강도 통계분석

표 7.2 굵은골재 SUPER Concrete 부착강도 통계적 특성

구분	평균(MPa)	표준편차(MPa)	하위5%분위값(MPa)
SC80	17.07	2.98	12.17
SC100	19.51	3.04	14.51
SC120	33.03	5.03	24.77

표 7.3 섬유보강 SUPER Concrete 부착강도 통계적 특성

구분	평균(MPa)	표준편차(MPa)	하위5%분위값(MPa)
SC120f	32.48	5.12	24.05
SC150f	37.39	7.35	25.30
SC180f	39.68	7.55	27.26

㉔ 정착/이음 설계기법 제시

- SUPER Concrete의 부착강도

$$f_{bd} = 0.65 \eta_1 \eta_2 f_{bdk} \quad (7.14)$$

CLASS (MPa)	μ (MPa)	σ	f_{bdk} (MPa) Test value	f_{bdk} (MPa) Code value
SC80	17.07	2.98	12.17	10.0
SC100	19.50	3.04	14.15	13.0
SC120	33.03	5.03	24.77	16.0
SC120f	32.48	5.12	24.05	18.0
SC150f	37.39	7.35	25.30	22.0
SC180f	39.68	7.55	27.26	26.0

그림 7.5 기본 부착강도 제시

표 7.4 굵은골재 SUPER concrete 부착강도

구분	설계부착강도(MPa)	
	굵은골재 SUPER Concrete 구조설계지침	KDS 24 14 21 콘크리트요 설계기준
SC80	6.5	4.49
SC100	8.4	4.49
SC120	13.0	4.49

표 7.5 섬유보강 SUPER concrete 부착강도

구분	설계부착강도(MPa)	
	섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침	KDS 24 14 21 콘크리트요 설계기준
SC120f	13.0	10.2
SC150f	13.0	13.2
SC180f	17.5	16.0

- SUPER Concrete 설계지침의 기본정착길이

$$l_b = (d_b/4)(\sigma_{sd}/f_{bd}) \quad (7.15)$$

- SUPER Concrete 설계지침의 설계정착길이

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6 l_b \geq l_{b, \min} \quad (7.16)$$

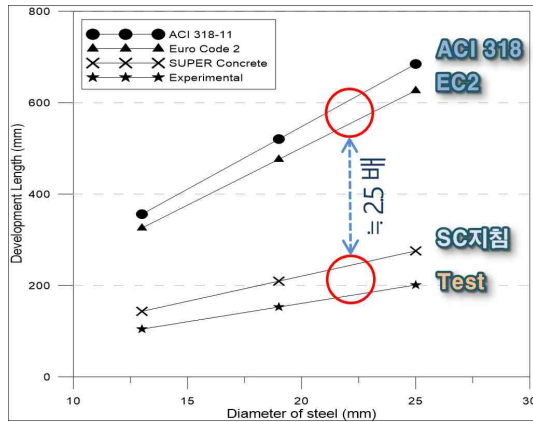


그림 7.6 정착길이 설계모델 비교

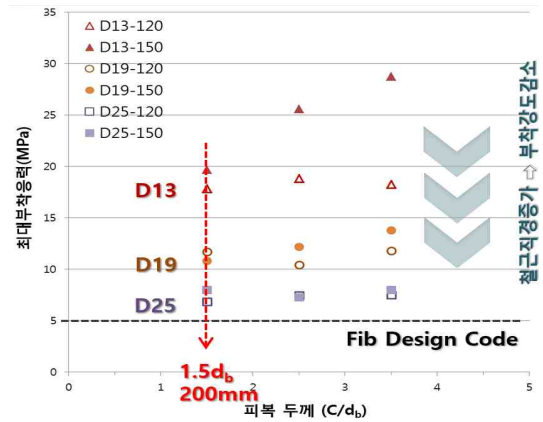


그림 7.7 섬유보강 SC 최소 피복두께 제시

(나) SUPER Concrete 응력전달길이 설계법

① SUPER Concrete 응력전달길이

㉓ 응력전달길이 기준 분석

- 프리텐션 부재의 경우, 콘크리트와 PS 긴장재의 부착으로, 긴장력이 콘크리트에 전달되는 것이므로, 프리텐션 콘크리트 부재의 끝단에서의 강도를 결정할 때 전달길이와 정착길이 내에서 긴장력의 점차적인 발현이 고려되어야 함.
- 프리스트레싱력은 부착이 시작되는 점에서 0.0, 전달길이에서 최대값이고, 이 구간에서 선형적으로 변한다고 가정할 수 있음.
- 프리텐션 부재에서 PS 긴장재의 응력전달길이를 산정할 때, 콘크리트 구조기준의 경우 다음 식과 같이 규정하고 있으며, AASHTO 기준의 경우 긴장재 지름의 60배를 취하도록 규정하고 있음

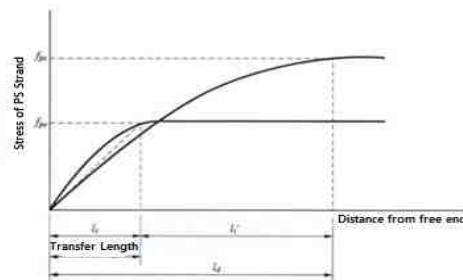


그림 7.8 Transfer Length and Development Length of PS Strands (Shin, 2012)

$$f_t = 0.145 \left(\frac{f_{se}}{3} \right) d_b \quad (7.17)$$

여기서, f_{se} = PS 강재의 유효 프리스트레스(MPa)

d_b = 긴장재의 지름(mm)

- 응력 전달길이 평가 설계기준

• KCI

$$l_d = \left(\frac{f_{se}}{3000} \right) d_b + \left(\frac{f_{ps} - f_{se}}{1000} \right) d_b \quad (7.18)$$

• ACI

$$l_d = 0.145 \left(\frac{f_{se}}{3} \right) d_b + 0.145 (f_{ps} - f_{se}) d_b \quad (7.19)$$

• EN 1992

$$l_{pt} = \alpha_1 \alpha_2 \Phi \sigma_{pmo} / f_{bpt} \quad (7.20)$$

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \eta_1 f_{ctd}(t) \quad (7.21)$$

$$f_{ctm}(t) = (\beta_{cc}(t))^\alpha f_{ctm} \quad (7.22)$$

표 7.6 콘크리트 강도 분류

콘크리트 강도 분류												분석-관계/설명	
f_{ck}	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	
$f_{ck,cube}$	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	
f_{cm}	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	$f_{cm} = f_{ck} + 8$
f_{ctm}	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.2	4.4	4.6	$= 0.3 \times f_{ck}^{\frac{2}{3}} \leq C50/60$ $= 2.12 \times \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60$

ACI(KCI) 모델	AASHTO LRFD(도로교) 모델
$l_t = 0.145 \left(\frac{f_{se}}{3} \right) d_b$	$l_t = 60 d_b$

f_{se} : PS 강재의 유효 스트레스트

그림 7.9 응력전달길이 기존 연구 분석 및 설계모형 제시

㉠ 정착이음길이 실험 및 설계법

- 실험을 통한 응력전달길이 설계식 제안

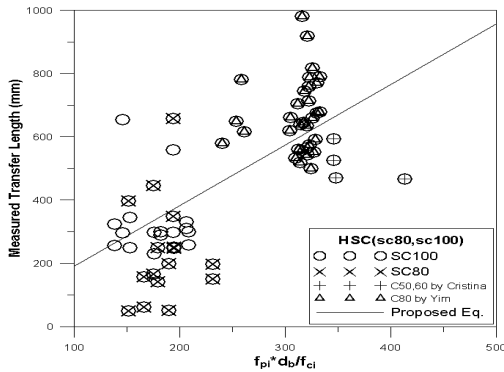


그림 7.10 짧은골재 SC 회귀분석

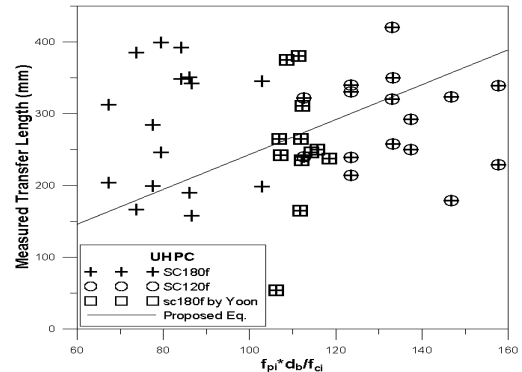


그림 7.11 섬유보강 SC 회귀분석

• 짧은골재 SC 전달길이 산정식:

$$l_t = 1.9 \left(\frac{f_{pi}}{f_{ci}} \right) d_b \quad (7.23)$$

• 섬유보강 SC 전달길이 산정식:

$$l_t = 2.5 \left(\frac{f_{pi}}{f_{ci}} \right) d_b \quad (7.24)$$

여기서, f_{pi} = 초기 긴장력에 의한 긴장재 응력 (MPa)

f_{ci} = 긴장력을 도입할 때의 콘크리트 압축강도 (MPa)

d_b = 긴장재의 지름 (mm)

(다) SUPER Concrete 적용 **PSC 정착구역** 설계법

① PSC 정착구역의 설계 개념

- 일반적으로 정착부는 정착 단부에서부터 정착부가 설치된 부재 높이와 동일한 거리까지의 영역에서 S 형상의 압축응력궤적과 이에 직각인 인장응력궤적을 보이며, 이와 같이 거리에 따라 변화하던 응력은 정착부에서부터 정착부가 설치된 부재 높이보다 긴 거리에 위치한 영역에 이르러 부재와 거의 평행한 압축응력궤적과 이에 직각인 인장응력궤적으로 안정화되는 역학적 특성을 보임.
- 파열응력(bursting stress), 지압응력(bearing stress), 박리응력(spalling stress)으로 구분함.

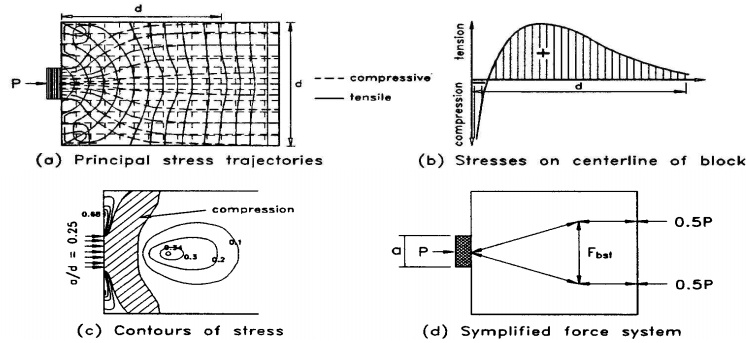


그림 7.12 PS 정착구역 설계 개념

② PSC 정착구역 설계기준 분석

㉓ 도로교설계기준

- 콘크리트 유효 지압강도:

$$f_b \leq 0.7\phi f_{ci}' \sqrt{\frac{A}{A_g}} \quad (7.25)$$

- 파열력:

$$T_{burst} = 0.25 \sum P_u (1 - a/h) + 0.5 P_u \sin \alpha \quad (7.26)$$

- 단부 인장력: 그림 7.13

㉔ 콘크리트구조기준

- 정착구역의 정의: 그림 7.14

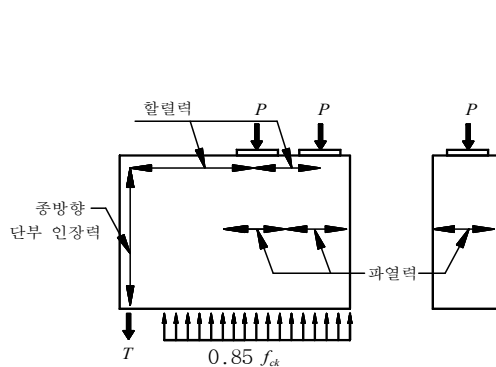


그림 7.13 단부 인장력

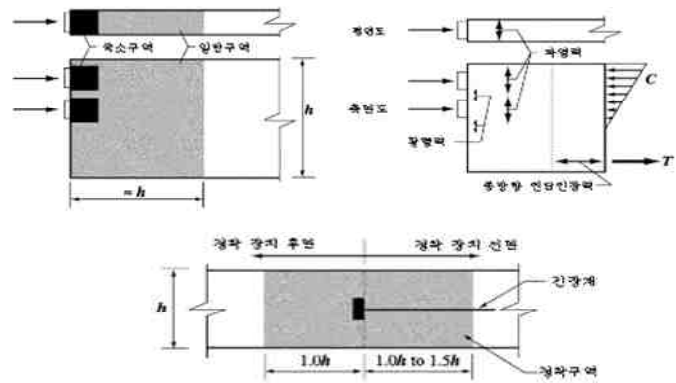


그림 7.14 정착구역의 정의

- 정착구역 설계:

- 스트럿 타이 모델
- 선형응력해석
- 적용가능한 간이 계산법
- 파열력:

$$T_{burst} = 0.25 \sum P_{pu} \left(1 - \frac{h_{anc}}{h} \right) \quad (7.27)$$

㉔ AASHTO

- 파열력:

$$T_{burst} = P_u \left(1 - \frac{a}{h}\right) + 0.5 \sum P_u \cdot \sin \alpha \quad (7.28)$$

㉔ SC 및 고성능 강재 적용 정착구역 설계 요구조건

- SUPER Concrete의 인장저항능력 및 고인성을 활용한 정착구역 크기 축소 가능성 검토 필요: 선행 연구에 따르면 현재설계기준에서 요구하고 있는 단부 보강 철근이 필요하지 않으므로 이를 설계 기준에 반영
- 고성능 강재의 특성을 반영하는 소형 고강도 정착장치 개발 필요: 기존의 연결과 반영 검토
- SUPER Concrete의 성능을 최대한 활용할 수 있도록 정착구역의 설계시 인장 저항능력을 전체 평형 기구에 반영

③ 정착구역 구조 실험 및 평가

- 실험을 통한 정착구역 설계법 제시

㉔ 설계기준에 맞춘 실험체

표 7.7 설계기준에 맞춘 실험체

구분	최대하중 (KN)	설계기준 (KN, 0.9fpy)	철근응력 (0.35Ppu)	설계기준 (0.35Ppu)	균열 폭 (최대하중) (mm)	설계기준 (mm)
SC80-R3	2492	1591	82.2	240	0.117	0.2
SC100-US-R4	2551	1591	121.4	240	0.126	0.2
SC120-R3	2487	1591	72.6	240	0.118	0.2

- 설계기준에서 제한하는 하중은 모두 만족하였으며, 2600KN보다 큰 하중도 저항할 수 있을 것으로 판단됨. 철근 응력과 균열 폭 또한 설계 기준 대비 여유가 충분함.

㉔ 철근 보강을 적게 실시한 실험체

표 7.8 철근보강을 적게 실시한 실험체

구분	최대하중 (KN)	설계기준 (KN, 0.9fpy)	철근응력 (0.35Ppu)	설계기준 (0.35Ppu)	균열 폭 (최대하중) (mm)	설계기준 (mm)
SC80-R2	2511	1591	92.3	240	0.156	0.2
SC80-R1	2490	1591	122.1	240	0.217	0.2
SC100-US-R3	2551	1591	56.2	240	0.123	0.2
SC100-US-R2	2551	1591	49.7	240	0.152	0.2
SC100-US-R1	2551	1591	50.6	240	0.147	0.2
SC100-NS-R4	2147	1591	62.1	240	0.189	0.2
SC100-NS-R3	2266	1591	105.7	240	0.318	0.2
SC100-NS-R2	2029	1591	49.2	240	0.258	0.2
SC100-NS-R1	1708	1591	22.2	240	0.296	0.2
SC120-R2	2485	1591	78.6	240	0.131	0.2
SC120-R1	2491	1591	26.2	240	0.175	0.2

- 고강도 콘크리트를 적용할 경우, 나선철근을 제거할 수 있으나 철근의 과도한 보강이 우려되는 부분이기 때문에, 나선철근의 제거는 무리가 있는 것으로 판단됨.
- 나선철근을 적용하고 고강도 콘크리트를 사용하여 정착구를 설계할 경우, 실험 결과와 비교하였을 때, 현행 설계기준은 고강도 콘크리트의 특성을 정확히 반영하고 있지 못한 것으로 판단됨.

(8) SUPER Concrete 구조설계지침 개발

(가) SUPER Concrete의 2축 응력 거동 및 균열-파괴 거동

① 인장-압축을 받는 섬유보강 SC 면부재의 2축 응력 거동

㉠ 실험 개요

- 검토배경

- 셀, 플레이트와 같은 면 부재뿐 아니라 휨 부재의 전단 및 비틀림 지배 구간은 2축 응력 상태로 나타낼 수 있음.
- 섬유보강 SC는 고강도, 고성능을 가진 재료로, 재료적 특성을 부재 설계 시 충분히 활용하기 위해서는 부재의 두께를 줄이면서 구조적으로 효율적인 단면-판재의 조합으로 이루어진 형태를 가진 부재의 설계가 필요

- 실험계획

- 실험목표: 재료파괴기준 및 전단 복부압괴시 압축강도 저감계수 도출
- 실험변수: 강섬유 배합 유무, 압축방향 횡철근의 유무, 철근 주인장 변형률
- 실험체설계: 240mm×190mm, 두께 90mm의 면부재의 형태로 2방향 거동을 하도록 설계하였으며, 인장력 도입 방향으로 길이 1200mm인 SD600 철근을 철근비 4.17%로 배근

- 가력계획: 인장-압축의 순차적인 제어(sequential loading) (그림 8.1)

- 인장 가력: 50ton 액추에이터를 이용하여 외부철근 변형률(0~3%)을 기준해 하중제어를 하였으며, 이 때 도입되는 인장 변형률은 SD600 철근의 항복점에 이르는 변형한계가 약 3%인 것을 감안하여 도입철근 항복 후 응력 재분배가 일어나지 않도록 탄성범위 내로 가력
- 압축 가력: 500ton 액추에이터를 이용해 0.013mm/sec로 실험체가 파괴될 때까지 변위제어로 가력하였으며, 가력속도는 재료압축실험의 공시체 가력속도를 기준



그림 8.1 실험체 셋업

㉡ 실험 결과

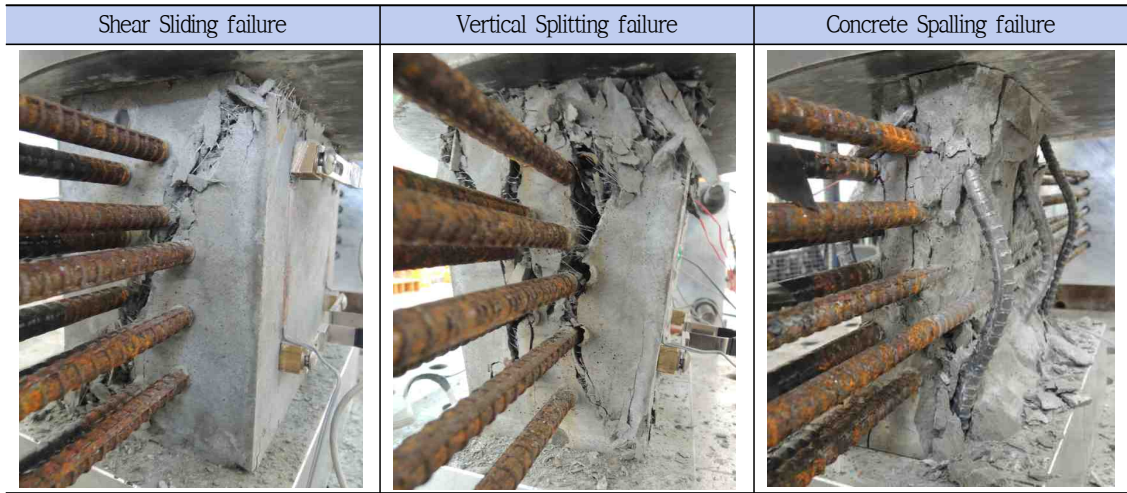
- 인장력 도입에 의한 균열 양상

- VN-실험군: 도입 변형률에 따라 균열의 개수가 점진적으로 증가
- VF, NF-실험군: 도입 변형률이 2% 미만인 경우는 균열이 관찰되지 않고, 도입 변형률에 3%인 경우는 균열개수가 1~2개, 균열폭도 미세한 양상

- 실험체 압축파괴 모드 (표 8.1)

- VN-실험군: 횡철근의 좌굴을 수반한 패널 전면에서의 폭열(CS)
- VF, NF-실험군: 인장철근을 따라 수직으로 쪼갬 파괴(VS)나 부재 단면이 사선으로 미끄러짐 파괴(SS)가 발생

표 8.1 대표적인 실험체 압축파괴 양상



㉔ 실험 결과 분석

- 강섬유에 의한 횡구속 효과: 횡철근 유무에 따른 파괴모드 및 도입 인장력에 따른 최대압축강도 변화가 거의 없음.
- 압축강도 감소 효과
 - SC120은 주인장 변형률이 커짐에 따라 압축강도가 40%까지 선형적으로 크게 감소 (그림 8.2)
 - SC150은 주인장 변형률에 따른 경향성은 보이지 않음. (그림 8.3)

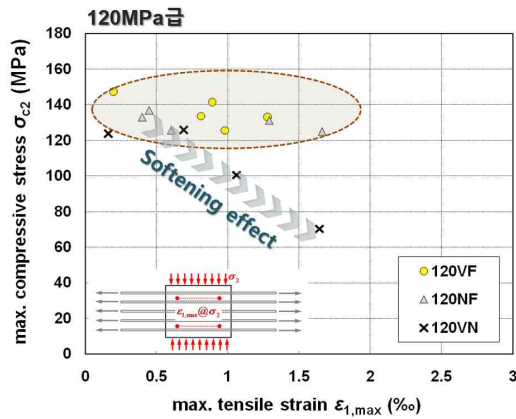


그림 8.2 SC120 주인장 변형률에 대한 최대압축강도

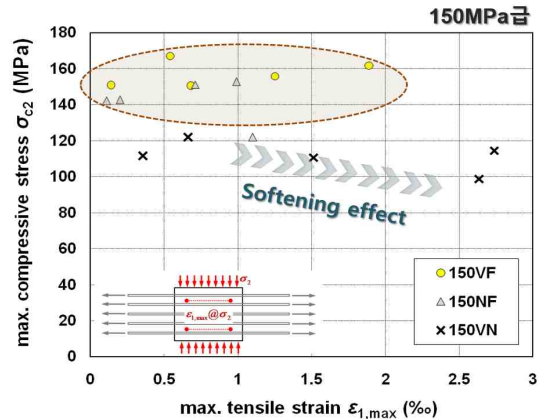


그림 8.3 SC150 주인장 변형률에 대한 최대압축강도

㉔ 설계법 개발 및 지침 작성

- SC 120f, 150f 파괴기준 제안 (그림 8.4, 8.5)
- 강섬유 혼입에 의해 failure envelope의 범위가 크게 확대됨.
- 인장-압축을 받는 섬유보강 SC 면부재는 maximum stress criterion에 가까운 형태로, 기존 철근(SD600급 이하)의 배근으로는 부재의 파괴가 섬유보강 SC 인장거동에 의해 지배될 것으로 예상 가능

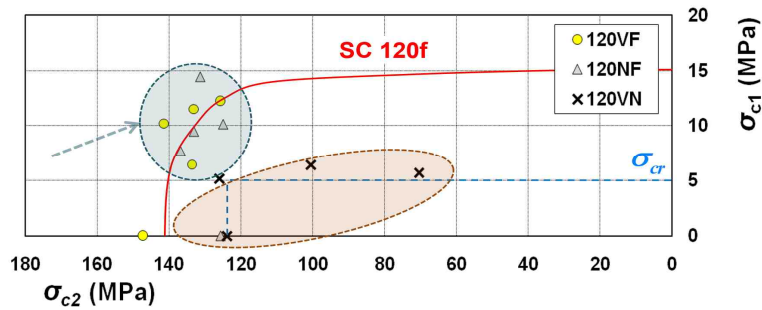


그림 8.4 SC150 failure envelope curve

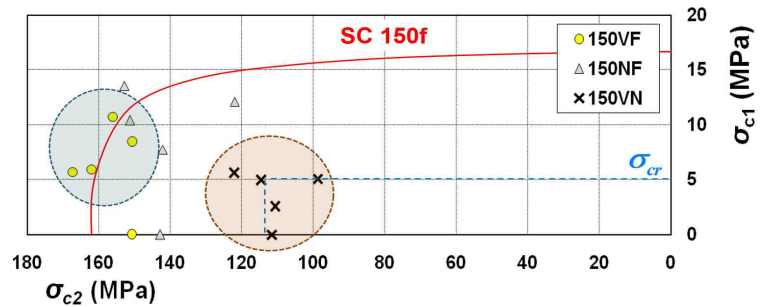


그림 8.5 SC120 failure envelope curve

(나) 섬유보강 SC의 부분안전계수 결정

① 통계특성 분석

- 신뢰도 분석을 통하여 부분안전계수를 결정하기 위해서는 단면강도 통계특성을 구해야 함.
- 재료강도, 단면치수, 강도 산정식의 통계특성을 모두 고려한 통계특성을 단면강도 통계특성이라 하며 편심계수를 λ_R , 변동계수를 V_R 로 나타냄.

㉠ 재료통계특성

- 1세부 재료 연구진이 작성한 섬유보강 SC 구조설계지침의 재료강도 데이터를 기반으로 압축강도 및 인장강도의 통계특성을 계산함.
- 실제 구조물과 시험체 사이에 강섬유의 방향성에 의한 차이를 고려하여 인장강도 통계특성에 방향성계수를 적용하여 계산함.

표 8.2 섬유보강 SC 압축강도 통계특성

압축 강도	설계 기준강도 (MPa)	평균 압축강도 (MPa)	표준편차 (MPa)	편심계수 λ	변동계수 V
120f 압축강도	120	132	5.42	1.100	0.041
150f 압축강도	150	161	5.43	1.073	0.034
180f 압축강도	180	189	5.11	1.050	0.027

표 8.3 섬유보강 SC 인장강도 통계특성

인장 강도	설계 기준강도 (MPa)	평균 (MPa)	표준편차 (MPa)	편심계수 λ	변동계수 V
120f 인장강도	7	8.0	0.76	1.143	0.095
150f 인장강도	9	8.8	0.59	0.978	0.067
180f 인장강도	11	10.4	0.6	0.945	0.058

㉡ 부재통계특성

- 휨강도 연구진이 구한 섬유보강 SC 휨 부재실험 데이터를 통해 휨 부재 통계특성을 계산함.
- 전단연구진이 수행한 섬유보강 SC 전단 보의 실험데이터를 통해 전단 부재 통계특성을 계산함.

표 8.4 섬유보강 SC 휨 부재 통계특성

부재	편심계수 λ	변동계수 V
SC120f	1.050	0.111
SC150f	1.020	0.067
SC180f	1.000	0.073
평균	1.023	0.084

표 8.5 섬유보강 SC 전단 부재 통계특성

부재	편심계수 λ	변동계수 V
SC120f	1.461	0.168
SC150f	1.142	0.104
SC180f	1.092	0.174
평균	1.231	0.148

㉔ 단면강도 통계특성

- 설계강도에 맞는 최소 단면을 설계하여 단면을 구성하는 기본 설계변수의 통계특성으로부터 랜덤 단면들을 생성한 후 단면강도들의 평균과 표준편차를 구하여 통계특성을 계산함.

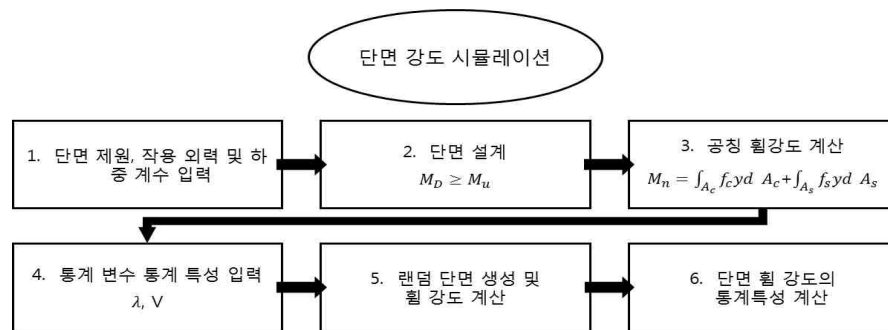


그림 8.6 휨 강도 시뮬레이션 흐름도

- 재료 및 부재 통계특성을 시뮬레이션에 적용하여 휨강도, 전단강도의 통계특성을 계산함.

표 8.6 섬유보강 SC 휨 강도 통계특성

부재	λ_{MF}	V_{MF}	λ_P	V_P	λ_R	V_R
SC 120f	1.162	0.060	1.050	0.111	1.220	0.126
SC 150f	1.095	0.064	1.020	0.067	1.117	0.093
SC 180f	1.075	0.064	1.000	0.073	1.075	0.097
평균	1.111	0.063	1.023	0.084	1.137	0.105

표 8.7 섬유보강 SC 전단강도 통계특성

부재	λ_{MF}	V_{MF}	λ_P	V_P	λ_R	V_R
SC 120f	1.129	0.095	1.461	0.168	1.650	0.193
SC 150f	0.986	0.080	1.142	0.104	1.126	0.131
SC 180f	0.956	0.079	1.092	0.174	1.044	0.191
평균	1.024	0.085	1.232	0.149	1.261	0.171

② 섬유보강 SC 부분안전계수 제시

㉔ 섬유보강 SC 저항계수 수정안

- 신뢰도분석을 위한 실험체의 수가 충분하지 않은 점과 실제 시공시 강섬유의 방향성 효과에 의한 불확실성을 고려하여 섬유보강 SC 저항계수 안을 제시함.
- 콘크리트 압축 재료계수를 0.80으로 변경, 인장 재료계수를 0.80으로 변경, 전단에 대한 부재계수 중 강섬유 성분에 대한 계수는 0.80으로 변경하여 제시함.

표 8.8 섬유보강 SC 구조설계지침의 저항계수 최종 제시 안

		섬유보강 SC 구조설계지침	
재료 계수	콘크리트	압축	ϕ_c 0.80
		인장	ϕ_c 0.80
	철근	ϕ_s 1.0	
부재 계수	휨 및 휨+압축		ϕ 0.90
	압축		ϕ 0.75
	전단	콘크리트	ϕ 0.80
		강섬유	ϕ 0.80
		전단보강재	ϕ 0.90
		축 방향 긴장재 성분	ϕ 0.90
	비틀림	강섬유 콘크리트	ϕ 0.80
		철근	ϕ 0.90
	철근의 정착 및 이음	철근의 정착 길이	ϕ 0.75

㉞ 섬유보강 SC 안전율 비교

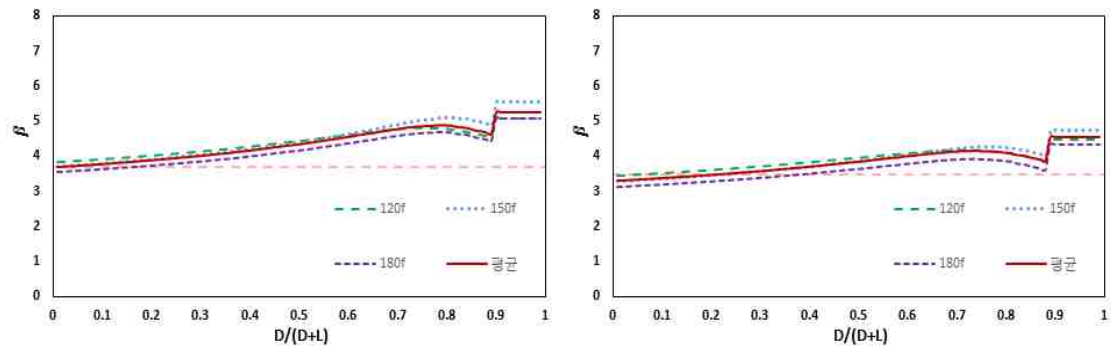
- 전단강도 설계식을 대상으로 섬유보강 SC의 등가부재계수를 계산하고, 국외 UHPC 설계지침과 비교함.
- 전단강도 설계식의 안전율이 국외 UHPC 설계지침의 안전율과 비슷한 수준을 보임.

표 8.9 섬유보강 SC 설계지침 안전율 비교

	섬유보강 SC 설계지침	프랑스 UHPC 설계지침	일본 UHPC 설계지침
콘크리트 전단강도	부재계수 $\phi = 0.80$, 재료계수 $\sqrt{\phi_c} = 0.894$	γ_E is a safety factor, $\gamma_c \gamma_E = 1.5$	부재계수 $\gamma_b = 1.3$, 재료계수 $\sqrt{\gamma_c} = 1.14$
	$0.80 \times 0.894 = 0.715$	$1/1.5 = 0.667$	$1/(1.3 \times 1.14) = 0.675$
강섬유 전단강도	부재계수 $\phi = 0.80$, 재료계수 $\phi_c = 0.80$	K is (fiber) orientation factor, 1.25	부재계수 $\gamma_b = 1.3$, 재료계수 $\gamma_c = 1.3$
	$0.80 \times 0.80 = 0.640$	$1/(1.25 \times 1.3) = 0.615$	$1/(1.3 \times 1.3) = 0.592$

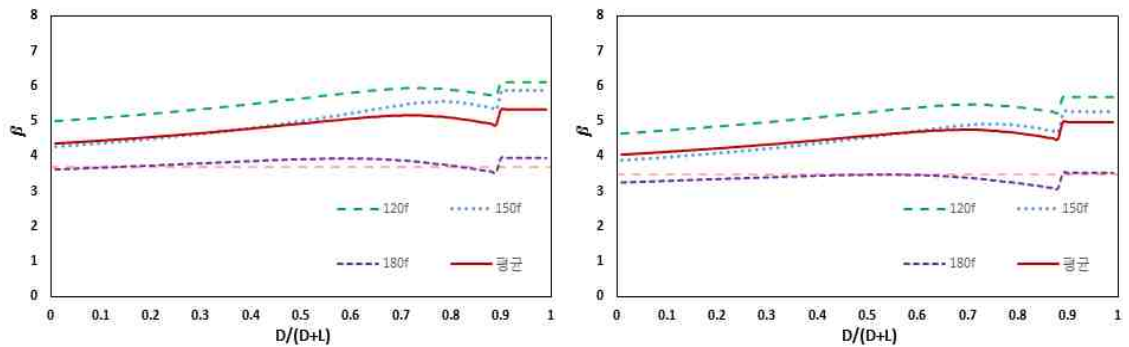
㉞ 섬유보강 SC 신뢰도 분석

- 섬유보강 SC 저항계수 수정안과 단면강도 통계특성을 적용하여 휨과 전단의 고정하중의 비율에 따른 신뢰도지수를 산출하여 분석함.
- 신뢰도지수 산출에 필요한 하중조합은 도로교설계기준과 콘크리트구조설계기준의 하중조합을 사용함.
- 목표신뢰도지수 β_T 는 콘크리트구조설계기준은 3.5로 하고, 도로교설계기준-한계상태 설계법은 3.7로 함.



(a) 도로교설계기준 하중조합 적용 (b) 콘크리트구조설계기준 하중조합 적용

그림 8.7 섬유보강 SC 휨 부재의 신뢰도지수



(a) 도로교설계기준 하중조합 적용 (b) 콘크리트구조설계기준 하중조합 적용

그림 8.8 섬유보강 SC 전단 부재의 신뢰도지수

(다) 굵은골재 SC의 부분안전계수 결정

① 통계특성 분석

㉠ 재료통계특성

- 1세부 재료 연구진이 작성한 굵은골재 SC 구조설계지침의 재료강도 데이터를 기반으로 압축강도 및 인장강도의 통계특성을 계산함.

표 8.10 굵은골재 SC 압축강도 통계특성

압축 강도	설계 기준강도 (MPa)	평균 압축강도 (MPa)	표준편차 (MPa)	편심계수 λ	변동계수 V
80 압축강도	80	90	4.18	1.125	0.046
100 압축강도	100	109.9	4.70	1.099	0.043
120 압축강도	120	131.5	5.03	1.096	0.038

㉡ 부재통계특성

- 휨강도 연구진이 구한 굵은골재 SC 휨 부재실험 데이터를 통해 휨 부재 통계특성을 계산함.

표 8.11 굵은골재 SC 휨 부재 통계특성

부재	편심계수 λ	변동계수 V
SC80	1.194	0.058
SC100	1.219	0.059
SC120	1.202	0.057
평균	1.205	0.058

- 굵은골재 SC 실험체는 SC 80, 100, 120으로 제작한 전단보강 철근이 없는 실험체와 전단보강 철근이 있는 실험체로 구성됨.

표 8.12 굵은골재 SC 전단 부재 통계특성

부재	편심계수 λ	변동계수 V
전단보강 철근이 없는 부재	1.342	0.143
전단보강 철근이 있는 부재	1.698	0.192

㉔ 단면강도 통계특성

- 재료 및 부재 통계특성을 시뮬레이션에 적용하여 휨강도와 전단강도의 통계특성을 계산함.

표 8.13 굵은골재 SC 휨 강도 통계특성

부재	λ_{MF}	V_{MF}	λ_P	V_P	λ_R	V_R
SC 80	1.202	0.115	1.194	0.058	1.435	0.129
SC 100	1.201	0.117	1.219	0.059	1.464	0.131
SC 120	1.202	0.116	1.202	0.057	1.445	0.129
평균	1.202	0.116	1.205	0.058	1.448	0.130

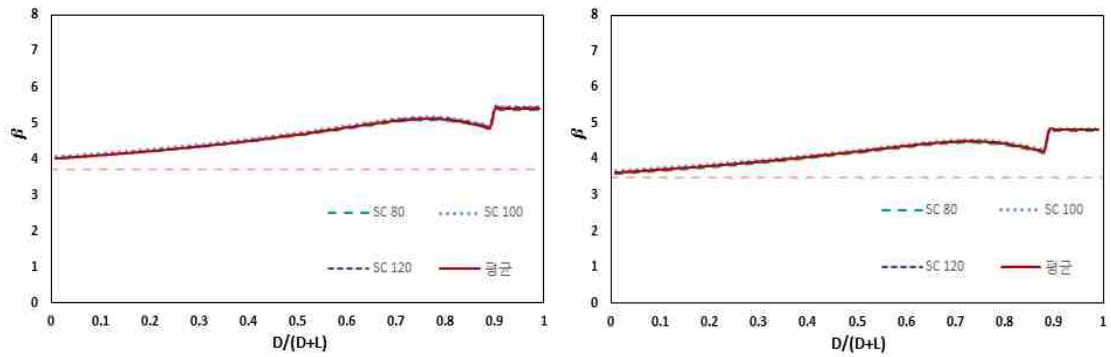
표 8.14 굵은골재 SC 전단강도 통계특성

부재	λ_{MF}	V_{MF}	λ_P	V_P	λ_R	V_R
전단보강 철근이 없는 부재	1.032	0.080	1.342	0.143	1.385	0.164
전단보강 철근이 있는 부재	1.174	0.112	1.698	0.192	1.994	0.222

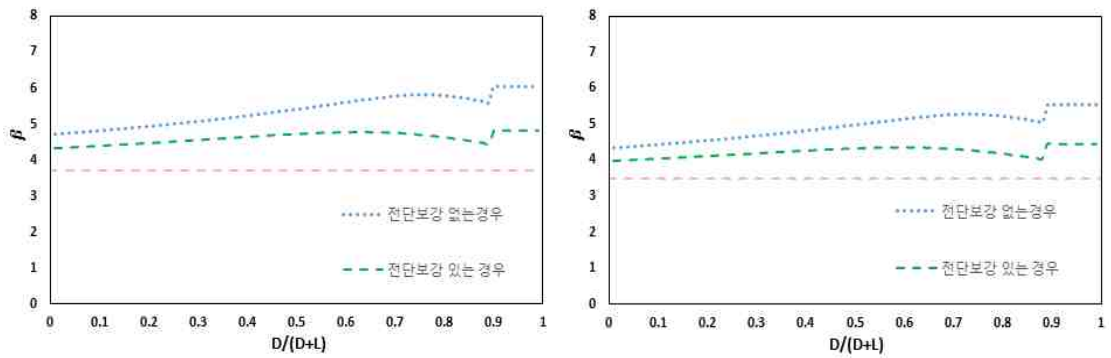
② 굵은골재 SC 부분안전계수 제시

㉔ 굵은골재 SC 신뢰도 분석

- 굵은골재 SC 저항계수와 단면강도 통계특성을 적용하여 휨과 전단의 고정하중의 비율에 따른 신뢰도지수를 산출하여 분석함.
- 신뢰도지수 산출에 필요한 하중조합은 도로교설계기준과 콘크리트구조설계기준의 하중조합을 사용함.
- 목표신뢰도지수 β_T 은 콘크리트구조설계기준은 3.5로 하고, 도로교설계기준-한계상태설계법은 3.7로 함.



(a) 도로교설계기준 하중조합 적용
(b) 콘크리트구조설계기준 하중조합 적용
그림 8.9 굽은골재 SC 힘 부재의 신뢰도지수



(a) 도로교설계기준 하중조합 적용
(b) 콘크리트구조기준 하중조합 적용
그림 8.10 굽은골재 SC 전단 부재의 신뢰도지수

㉠ 굽은골재 SC 저항계수 제시

- 굽은골재 SC의 경우 신뢰도지수가 목표신뢰도를 상회하고, 특히 전단보강 철근이 없는 실험체의 경우 신뢰도지수가 목표값보다 매우 크지만, 굽은골재 SC는 재료의 취성도가 일반콘크리트에 비해 크므로 적정한 안전율을 확보한다고 볼 수 있음.

표 8.15 굽은골재 SC 구조설계지침의 최종 저항계수

		굽은골재 SC 구조설계지침
재료계수	콘크리트	ϕ_c 0.65
	철근	ϕ_s 0.90
부재계수	휨 및 휨+압축	ϕ 1.0
	전단	
	비틀림	
	철근의 정착 및 이음	

(라) SUPER Concrete 구조설계지침 작성

① 구조설계지침 작성 방향

- 각 분야별(휨, 압축, 전단, 비틀림, 합성부재, 균열/처짐/배근상세, 이음/정착) 성능평가를 수행하고 이에 대한 지침 작성
- 3종 이상 강도 종류에 대한 성능실험(기존계획)에서 6종에 대한 성능실험(변경계획)으로 확정. 강도 종류 6종은 일반 SUPER Concrete인 SC80, SC100, SC120과 섬유보강 SUPER Concrete인 SC120f, SC150f, SC180f 임.
- 구조설계지침은 맞춤형(특정배합에만 적용 가능한 지침)으로 작성. 추후, 일반형(배합에 관계없이 일정 강도 범위 내에서 모두 적용 가능한 지침) 작성이 가능하도록 함.
- 구조설계지침은 기본적으로 굵은골재 SUPER Concrete(80, 100, 120MPa) 구조설계 지침과 섬유보강 SUPER Concrete(120f, 150f, 180f) 구조설계지침으로 구분 작성.

② 설계기준 체계 및 안전계수 분석

㉑ 설계기준 체계 분석

표 8.16 각국의 설계기준 체계

구분	미국형(ACI/KCI)	유럽형(EC2/도로교설계기준)	섬유보강 SC
설계철학	- Strength Design - 소요강도 $\leq$ 공칭강도	- Limit State Design - 하중의영향(E_d) $\leq$ 저항 (R_d)	- Limit State Design - 하중의영향 $\leq$ 저항
안전계수	부재계수 (Member Factor)	재료계수 (Material Factor)	재료계수 + 부재계수 (Member F. + Material F.)

㉒ 안전계수 체계 분석

표 8.17 각국의 부분안전계수 체계

구분	재료계수	부재계수	재료+부재 계수
적용 국가	- Eurocode - CSA(1984), 도로교설계기준 - DIN등	- USA(ACI, AASHTO) - CSA(1977), KCI - NZS 3101 등	JSCE
특징	- 재료별 적용계수 - 사용재료 합성분량에 따른 부재의 안전율 변화를 자동 반영할 수 있음	- 부재 및 거동별 적용계수 - 부재 파괴에 따른 안전율 변화를 반영할 수 있음	혼합형 적용계수
적용예	- Material Design Strength = f_k / γ_m or $\psi_m f_k$ - 부분안전계수/재료강도저감계수	- Member Design Strength = ψR_n - 부재강도저감계수	Material and Member Design Strength = γ_m and γ_b

- 개념적으로 재료계수는 재료의 불확실성, 부재계수는 부재의 불확실성을 반영. 실질적으로 이들은 모두 저항계수의 개념을 갖고 있음.
- 재료계수+부재계수 사용이 가장 논리적. 단, 계수 결정이 어렵고 계수 적용이 복잡.
- 섬유보강 SC 구조설계지침은 기본적으로 재료계수와 부재계수를 혼용하여 사용하는 것으로 정함.
- 굵은골재 SC 구조설계지침은 혼용 형태가 아닌 이미 전세계적으로 활용되고 있는 재료계수 또는 부재계수를 선택하여 사용

㉓ 설계모델 분석

- 설계모델 분석은 각 분야별(휨, 압축, 전단/뚫림전단, 비틀림, 합성, 균열/처짐, 정착/이음) 보고서 자료 참조

③ SUPER Concrete 구조설계지침 작성

㉓ 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침 작성

- SUPER Concrete SC180f 구조설계지침
- 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침 (초안→수정안→최종안)

㉔ The Structural Design Guidelines of Fiber Reinforced SUPER Concrete 작성

- The Structural Design Guidelines of Fiber Reinforced SUPER Concrete (초안→최종안)

㉕ 굵은골재 SUPER Concrete 구조설계지침 작성

- SC80 구조설계지침
- SUPER Concrete 구조설계지침 (초안→수정안→최종안)

㉖ The Structural Design Guidelines of SUPER Concrete 작성

- The Structural Design Guidelines of SUPER Concrete (초안→최종안)

㉗ SUPER Concrete 구조설계지침 예제집 작성

나. 연구성과

(1) 연구성과 요약

핵심성과	SUPER Concrete 구조성능 검증 및 설계지침 개발									
질적성과	1차년도	• SC180f 구조성능 검증 • SUPER Concrete SC180f 구조설계지침 작성								
	2차년도	• SC150f, SC120f 구조성능 검증 • 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침(초안) 작성								
	3차년도	• SC80 구조성능 검증 • SC80 구조설계지침 작성 • The Structural Design Guidelines of Fiber Reinforced SUPER Concrete(초안) 작성								
	4차년도	• SC100, SC120 구조성능 검증 • 굽은골재 SUPER Concrete 구조설계지침(초안) 작성 • The Structural Design Guidelines of SUPER Concrete(초안) 작성								
	5차년도	• SUPER Concrete 구조성능 보완 검증 • 신뢰성분석을 통한 부분안전계수(안) 제시 • SUPER Concrete 구조설계지침 수정안 작성 - 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침(수정안) - 굽은골재 SUPER Concrete 구조설계지침(수정안)								
	6차년도	• 신뢰성분석을 통한 부분안전계수 결정 • SUPER Concrete 구조설계지침 완성 - 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침 - The Structural Design Guidelines of Fiber Reinforced SUPER Concrete - 굽은골재 SUPER Concrete 구조설계지침 - The Structural Design Guidelines of SUPER Concrete • SUPER Concrete 구조설계지침 예제집 작성								
양적성과		논문게재		학술회의		표준/SW		지침/예제집		기타
		계획	실적	계획	실적	계획	실적	계획	실적	
	1차년도	2	3	-	4	-	5 (표준)	1 (초안)	2 (초안)	• 학회표준 5건 • SCI 1건 • 영문지침 1건
	2차년도	13	12	-	17	-	-	1 (초안)	1 (초안)	• SCI 2건
	3차년도	9	12	-	19	2 (S/W)	2 (S/W)	1 (초안)	3 (초안) 2 (부분개정)	• S/W 2건 • SCI 1건 • 영문지침 2건
	4차년도	7	9	-	20	-	-	1 (초안)	2 (초안)	• SCI 2건 • 영문지침 1건
	5차년도	4	5	-	8	-	-	2 (수정안)	2 (수정안)	• SCI 3건
	6차년도	3	5	-	5	-	-	5 (최종안)	5 (최종안)	• SCI 2건
	합계	38	46	-	73	2	7	11	16	

(2) 국내외 논문 게재 (총 47건)

(가) SCI(E) 학술지 (10건)

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI여부 (SCI/ 비SCI)	게재일	등록 번호
1	Behavior and Strengths of Single Cast-in Anchors in Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) Subjected to a Monotonic tension or Shear	KSCE Journal of Civil Engineering	Sokhwan Choi	Vol.19 No.4	국내	KSCE	SCIE	2014.11	10.1007
2	Headed Stud Shear Connector for Thin Ultrahigh-Performance Concrete Bridge Deck	Journal of Constructional Steel Research	Jee-Sang Kim	Vol. 108	국외	Science Direct	SCIE	2015.05	10.1016
3	Shear Tests for Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) Beams with Shear Reinforcement	International Journal of Concrete Structures and Materials	Woo-Young Lim	Vol.10 No.2	국외	Springer	SCI	2016.06	10.1007
4	Evaluation of the flexural behavior of composite beam with inverted-T steel girder and steel fiber reinforced ultra high performance concrete slab	Engineering Structures	Sung-Won Yoo	Vol. 118	국외	ELSEVIER	SCI	2016.07	10.1016
5	Biaxial tension-compression strength behaviour of UHPFRC in-plane elements	Materials and Structures	Ji-Hyung Lee	Vol.50 No.4	국외	RILEM	SCI	2016.08	10.1617
6	Headed bars in simulated exterior beam-column joints of UHPFRC	Magazine of Concrete Research	Hye-Jung Sim	-	국외	Institution of Civil Engineers	SCI	2017.10	10.1680
7	Structural Behavior of Durable Composite Sandwich Panels with High Performance Expanded Polystyrene Concrete	International Journal of Concrete Structures and Materials	Ji-Hyung Lee	Vol.12 No.2	국외	Springer	SCI	2018.02	10.1186
8	Effects of Single and Hybrid Steel Fiber Lengths and Fiber Contents on the Mechanical Properties of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete	Advances in Civil Engineering	Kyoung-Chul Kim	Vol. 2018	국외	Hindawi	SCIE	2018.03	10.1155
9	Flexural Design and Analysis of Composite Beams with Inverted-T Steel Girder with Ultrahigh Performance Concrete Slab	Advances in Civil Engineering	Wonchang Choi	Vol. 2018	국외	Hindawi	SCIE	2018.06	10.1155
10	Torsional Behavior of High-Strength Concrete Beams with Minimum Reinforcement Ratio	Advances in Civil Engineering	Changbin Joh	Vol. 2019	국외	Hindawi	SCIE	2019.02	10.1155

(나) 일반 학술지 (36건)

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI여부 (SCI/ 비SCI)	게재일	등록 번호
1	강섬유 보강 초고성능 콘크리트 보의 비틀림 거동 특성	한국콘크리트학회 논문집	양인환	Vol.26 No.1	국내	한국콘크리트학회	비SCI	2014.02	10.4334
2	초고성능 콘크리트 바닥판과 역T 형 강거더의 합성보를 위한 스티드 및 퍼즐스트립 전단연결재에 관한 연구	한국콘크리트학회 논문집	이경찬	Vol.26 No. 2	국내	한국콘크리트학회	비SCI	2014.04	10.4334

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI여부 (SCI/ 비SCI)	게재일	등록 번호
3	An Experimental Evaluation of Development Length of Reinforcements Embedded in Geopolymer Concrete	Applied Mechanics and Materials	Kim, Jee Sang	Vols. 578 - 579	국외	Applied Mechanics and Materials	비SCI (SCOPUS)	2014.06	10.4028
4	휨을 받는 하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 보의 구조 거동	한국콘크리트학회 논문집	양인환	Vol.26 No.6	국내	한국콘크리트학회	비SCI	2014.12	10.4334
5	강섬유로 보강된 초고성능 콘크리트 바닥판과 역T형 강거더 합성보의 휨거동 실험	한국콘크리트학회 논문집	유성원	Vol.26 No.6	국내	한국콘크리트학회	비SCI	2014.12	10.4334
6	Torsional Behavior Design of UHPC Box Beams Based on Thin-walled Tube Theory	Scientific Research	Imjong Kwahk	Vol.7	국외	Scientific Research	비SCI	2015.03	10.4236
7	Load Transfer Test of Post-Tensioned Anchorage Zone in Ultra High Performance Concrete	Scientific Research	Jee-Sang Kim	Vol.7	국외	Scientific Research	비SCI	2015.03	10.4236
8	소성 이론에 의한 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 전단 마찰 강도식 제안	한국콘크리트학회 논문집	이지형	Vol.27 No.3	국내	한국콘크리트학회	비SCI	2015.03	10.4334
9	인장연화거동을 고려한 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 바닥판과 역T형 강재 합성보의 휨거동 해석	한국콘크리트학회 논문집	유성원	Vol.27 No.2	국내	한국콘크리트학회	비SCI	2015.03	10.4334
10	하이브리드 강섬유 보강 초고강도 콘크리트 보의 휨강도	콘크리트학회 논문집	양인환	Vol.27 No.3	국내	콘크리트학회	비SCI	2015.06	10.4334
11	강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 전단 전달 모델	한국공간구조학회지	이지형	Vol.15 No.2	국내	한국공간구조학회	비SCI	2015.06	10.9712
12	강섬유 보강 초고성능 콘크리트 슬래브의 뚫림 전단 성능 평가	한국공간구조학회지	박지현	Vol.15 No.2	국내	한국공간구조학회	비SCI	2015.06	10.9712
13	180MPa 초고성능 콘크리트의 압축 부재에의 적용성에 대한 연구	한국산학기술학회 논문집	민정환	Vol.16 NO.6	국내	한국산학기술학회	비SCI	2015.07	10.5762
14	강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 탄성 계수 및 인장강도 평가	한국건설순환자원학회 논문집	류금성	Vol.3 No.3	국내	한국건설순환자원학회	비SCI	2015.09	10.14190
15	압축강도 수준을 고려한 강섬유 보강 UHPC와 역T형 강재 합성보의 휨거동 실험 연구	한국콘크리트학회 논문집	유성원	Vol.27 No.6	국내	한국콘크리트학회	비SCI	2015.12	10.4334
16	초고강도 콘크리트 바닥판과 역T형 강재 합성보의 휨성능 평가	한국구조물진단유지관리공학회 논문집	유성원	Vol.20 No.1	국내	한국구조물진단유지관리공학회	비SCI	2016.01	10.11112
17	Flexural Bond Behavior of Rebar in Ultra-High Performance Concrete Beams Considering Lap-Splice Length and Cover Depth	Engineering/Scientific Research	Seongjun Kim	Vol.8	국외	SCIRP	비SCI	2016.03	10.4236
18	강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 재료 특성 및 휨 거동 역학적 특성	한국콘크리트학회 논문집	김정철	Vol.28 No.2	국내	한국콘크리트학회	비SCI	2016.04	10.4334
19	하이브리드 강섬유로 보강된 UHPC의 파괴거동	한국콘크리트학회 논문집	임우영	Vol.28 No.2	국내	한국콘크리트학회	비SCI	2016.04	10.4334
20	하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 압축거동	한국콘크리트학회 논문집	임우영	Vol.28 No.2	국내	한국콘크리트학회	비SCI	2016.04	10.4334
21	An Experiment on Bond Properties of Reinforcements embedded in Ultra High Performance Concrete	Materials Science Forum	Kim, Jee-Sang	Vol. 857	국외	Trans Tech Publications Inc	비SCI (SCOPUS)	2016.05	10.4028
22	Bond-Slip Relation of Pretensioned Concrete Members for Various Tensioning Forces	Materials Science Forum	Kim, Jee-Sang	Vol. 857	국외	Trans Tech Publications Inc	비SCI (SCOPUS)	2016.05	10.4028

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI여부 (SCI/ 비SCI)	게재일	등록 번호
23	휨을 받는 강섬유 보강 고강도 철근 콘크리트 보의 구조 거동	한국구조물진단유지관리공학회 논문집	양인환	Vol.20 No.3	국내	한국구조물진단유지관리공학회	비SCI	2016.05	10.11112
24	120, 180 MPa 강섬유 보강 초고성능 콘크리트에 정착된 확대머리철근의 정착강도	한국콘크리트학회 논문집	심혜정	Vol.28 No.3	국내	한국콘크리트학회	비SCI	2016.06	10.4334
25	An Experiment on the Bond-Slip Behaviors of Pre-Tensioned Prestressed UHPC Members	Materials Science Forum	Kim, Jee-Sang	Vol. 878	국외	Trans Tech Publications Inc	비SCI	2016.11	10.4028
26	초고성능 섬유보강 콘크리트로 보강된 콘크리트의 계면 전단강도 결정을 위한 경사전단 실험	한국콘크리트학회 논문집	임우영	Vol.28 No.6	국내	한국콘크리트학회	비SCI	2016.12	10.4334
27	강섬유 보강 초고성능 콘크리트 (UHPRC) I형 보의 전단 강도	한국콘크리트학회 논문집	이지형	Vol.29 No.1	국내	한국콘크리트학회	비SCI	2017.02	10.4334
28	Inverse Analysis of UHPFRC Beams with a Notch to Evaluate Tensile Behavior	Advances in Materials Science and Engineering	Seong-Ch eol Lee	Vol. 2017	국외	Hindawi	비SCI	2017.04	10.1155
29	A Stress Analysis of the Post-Tensioned Anchorage Zones Using UHPC	Key Engineering Materials	Jee-Sang Kim	Vol. 737	국외	Trans Tech Publications Inc	비SCI	2017.06	10.4028
30	휨을 받는 압축강도 80 MPa 수준의 고강도 콘크리트 부재의 구조거동 실험 연구	한국구조물진단유지관리공학회 논문집	양인환	Vol.21 No.4	국내	한국구조물진단유지관리공학회	비SCI	2017.07	10.11112
31	80 MPa의 압축강도를 갖는 콘크리트 보의 휨강도 예측	한국콘크리트학회 논문집	김경철	Vol.29 No.4	국내	한국콘크리트학회	비SCI	2017.08	10.4334
32	UHPRC 보 휨 거동에 대한 설계변수 변동의 영향	한국건설순환자원학회 논문집	양인환	Vol.6 No.2	국내	한국건설순환자원학회	비SCI	2018.06	10.14190
33	경사전단 실험을 통한 초고성능 섬유보강 콘크리트로 보강된 일반 콘크리트의 계면 성능 평가	한국콘크리트학회 논문집	염현수	Vol.30 No.4	국내	한국콘크리트학회	비SCI	2018.08	10.4334
34	섬유 보강 고강도 콘크리트의 재료 특성 모델링	한국건설순환자원학회 논문집	양인환	Vol.6 No.4	국내	한국건설순환자원학회	비SCI	2018.11	10.14190
35	초고성능 콘크리트 프리텐션부재의 응력전달길이	한국건설순환자원학회 논문집	김지상	Vol.6 No.4	국내	한국건설순환자원학회	비SCI	2018.11	10.14190
36	초고성능 섬유보강 콘크리트로 보강된 이방향 슬래브-기둥 접합부의 뚫림 전단 강도 평가	한국콘크리트학회 논문집	염현수	Vol.31 No.1	국내	한국콘크리트학회	비SCI	2019.02	10.4334

(3) 국내 · 국제 학술회의 발표 (총 73건)

(가) 국제 학술회의 (14건)

번호	논문명 (회의 명칭)	발표자	발표 일시	장소	국명
1	Structural Behavior of UHPC Members Subjected to Pure Torsion (III All Russian(International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete)	Joh C., Yang I.H., Kim B.	2014.05.13	국외	러시아
2	Shear Transfer Strength Evaluation for Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (International Conference Data Mining, Civil and Mechanical Engineering (ICDMCME 2015))	Ji-hyung Lee, Sung-gul Hong	2015.02.02	국외	인도네시아
3	CONSTITUTIVE MODEL FOR SHEAR TRANSFER IN ULTRA HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE (fib Symposium 2015)	Ji-hyung Lee, Sung-gul Hong	2015.05.19	국외	덴마크
4	An Experiment on Bond Behaviours of Reinforcements embedded in Ultra-High Performance Concrete (International Conference on Material Engineering for Advanced Technology(ICMEAT 2015))	Jee-Sang Kim, JongHo park	2015.06.27	국외	영국
5	Structural Behavior and Design Guidelines of K-UHPC (1 'st International Symposium of Asian Concrete Federation on ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE)	Changbin Joh, Imhong Kwahk, JungWoo Lee, Byung-Suk Kim	2015.10.07	국외	인도
6	Case Studies Highlighting Innovative UHPC Bridge Applications of KICT (1st International Symposium of Asian Concrete Federation on ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE)	Byung-Suk Kim, Changbin Joh, SungYong Park, Jongbum Park	2015.10.07	국외	인도
7	Biaxial Compression-Tension-Strength of UHPC in Structural Panels (HiPerMat 2016 (4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Materials)	Ji-Hyung Lee, Sung-Gul Hong, Changbin Joh, Imjong Kwahk, Jung-Woo Lee	2016.03.10	국외	독일
8	Statistical Property of Shear Strength for PSC Girders of SC 180f (The 7th International Conference of Asian Concrete Federation (ACF 2016))	J. Jeong, H. Kim, G. Jeong, C. Joh and I. Paik	2016.11.01	국외	베트남
9	Load Transfer Test of Post-Tensioned Anchorage Zones in High Strength Concrete (International Conference on Research & Innovation in Environment, Civil and Architecture Engineering (RIECAE-17))	Kim, Jee-Sang, ByeongHun Woo	2017.02.06	국외	태국
10	An Experiment on Tension Stiffening Effects of High Strength Concrete (International Conference on Research & Innovation in Environment, Civil and Architecture Engineering (RIECAE-17))	Kim, Jee-Sang, Chan Hyuk Park	2017.02.06	국외	태국
11	Shear Strength of UHPFRC Beams Without Stirrups: Fracture Mechanics Approach (The 2017 fib Symposium)	Sung-Gul Hong, Namhee Hong, Ji-Hyung Lee	2017.06.12	국외	네델란드
12	Effect of Specimen Size and Initial Crack Location on Flexural Shear Behavior of UHPFRC (The 2017 fib Symposium)	Ji-Hyung Lee, Sung-Gul Hong, Chang-bin Joh	2017.06.12	국외	네델란드
13	An Experimental Evaluation of Post-tensioned Anchorage Zones using High Strength Concrete (6th Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering)	Kyung-Suk Yoo, Jee-Sang Kim, Byeong-Hun Woo, Young-Jae Jo	2018.05.15	국외	싱가포르
14	Fracture Mechanics Approach for Ultra-High Performance Concrete Structural Elements (Proceedings of the fib Symposium 2019)	Sung-Gul Hong, Ji-Hyung Lee, Changbin Joh	2019.05.28	국외	폴란드

(나) 국내 학술회의 (59건)

번호	논문명 (회의 명칭)	발표자	발표 일시	장소	국명
1	철근콘크리트 전단부재의 파괴역학 기반 변형 능력 모형 (한국콘크리트학회 2014 봄 학술대회)	이지형, 홍성걸	2014.05.15	국내	대한민국
2	K-UHPC 뿔립전단강도식에서의 인장강도 고려를 위한 균열폭 모델에 관한 연구 (한국콘크리트학회 2014 봄 학술대회)	박지현, 홍성걸	2014.05.15	국내	대한민국
3	UHPC 바닥판의 스티트 전단연결재 적용성 평가 (한국콘크리트학회 2014 봄 학술대회)	이경찬, 김지상, 박상혁, 조창빈, 최은식	2014.05.15	국내	대한민국
4	하이브리드 강섬유 보강 초고성능 콘크리트 보의 휨 특성 (한국콘크리트학회 2014 가을 학술대회)	양인환, 김경철, 신재혁, 정준영, 박창규	2014.10.16	국내	대한민국
5	강섬유보강 초고성능콘크리트의 전단특성에 관한 실험연구 (한국콘크리트학회 2014 가을 학술대회)	이지형, 홍성걸	2014.10.16	국내	대한민국
6	PS 텐던으로 긴장된 초고강도콘크리트 박스 보의 비틀림 거동 (한국콘크리트학회 2014 가을 학술대회)	곽임중, 이정우, 조창빈	2014.10.16	국내	대한민국
7	UHPC에 정착된 인장을 받는 그룹 선설치 앵커에서 간격의 영향 (한국콘크리트학회 2014 가을 학술대회)	천성철, 최석환, 조창빈	2014.10.16	국내	대한민국
8	인발시험에 의한 초고성능콘크리트의 부착 실험 (한국콘크리트학회 2014 가을 학술대회)	박종호, 김지상, 조창빈	2014.10.16	국내	대한민국
9	UHPC slab의 뿔립 전단 성능 평가 및 파괴 모델 제안 (한국콘크리트학회 2014 가을 학술대회)	박지현, 홍성걸	2014.10.17	국내	대한민국
10	강섬유가 함유된 UHPC 박벽보의 비틀림 설계방법에 관한 연구 (대한토목학회 2014 학술대회)	곽임중, 이정우, 조창빈	2014.10.23	국내	대한민국
11	180MPa급 초고성능 콘크리트박스 보의 비틀림 거동에 관한 실험 연구 (대한토목학회 2014 학술대회)	곽임중, 이정우, 조창빈	2014.10.23	국내	대한민국
12	초고성능 콘크리트박스보의 비틀림 거동 및 설계 (한국교량및구조공학회 2014년 기술컨퍼런스)	곽임중, 이정우, 조창빈	2014.11.14	국내	대한민국
13	180MPa급 초고성능 콘크리트 기둥 부재의 압축 거동에 관한 실험적 연구 (한국복합신소재구조학회 2015년 학술발표회)	민경환, 심원보, 장효범, 최홍식	2015.04.23	국내	대한민국
14	180MPa Super Concrete에 정착된 확대머리철근의 정착강도에 대한 정착길이의 영향 (한국콘크리트학회 2015 봄 학술대회)	천성철, 최석환, 심혜정, 배민서	2015.05.14	국내	대한민국
15	초고성능콘크리트의 부착-슬립 거동 실험 (한국콘크리트학회 2015 봄 학술대회)	박종호, 최동훈, 김지상	2015.05.14	국내	대한민국
16	휨을 받는 초고성능 콘크리트 부재의 강도 예측 (한국콘크리트학회 2015 봄 학술대회)	김경철, 양인환, 유성원	2015.05.14	국내	대한민국
17	강섬유 보강 초고성능 콘크리트 I형 보의 전단 거동 (한국콘크리트학회 2015 봄 학술대회)	이지형, 홍성걸	2015.05.15	국내	대한민국
18	지르코늄을 혼입한 초고성능 콘크리트 보의 휨 거동 (한국구조물진단유지관리공학회 2015년 가을 학술발표회)	양인환, 김경철, 정준영, 안슬기	2015.10.14	국내	대한민국
19	철근 겹침이음길이가 초고성능 콘크리트 휨 부재에 미치는 영향 (한국구조물진단유지관리공학회 2015년 가을 학술발표회)	김성준, 이정우, 곽임중, 조창빈	2015.10.14	국내	대한민국
20	초고성능 콘크리트 휨 부재에 미치는 최소피복두께 영향 (한국구조물진단유지관리공학회 2015년 가을 학술발표회)	김성준, 이정우, 곽임중, 조창빈	2015.10.14	국내	대한민국
21	긴장력 변화에 따른 프리텐션 부재의 응력전달 특성실험 (한국콘크리트학회 2015 가을 학술대회)	최동훈, 김지상	2015.10.21	국내	대한민국
22	강섬유량에 따른 UHPC의 인장강도 평가 (한국콘크리트학회 2015 가을 학술대회)	유성원, 김경태, 오경호	2015.10.22	국내	대한민국
23	섬유혼입 Super Concrete에 정착길이 4db를 갖는 확대머리철근의 정착강도 실험 (한국콘크리트학회 2015 가을 학술대회)	천성철, 최석환, 심혜정, 배민서	2015.10.22	국내	대한민국
24	인장-압축을 받는 UHPC 면부재의 역학적 거동 (한국콘크리트학회 2015 가을 학술대회)	이지형, 홍성걸, 조창빈, 곽임중, 이정우	2015.10.23	국내	대한민국
25	압축강도 80/100MPa 고강도 콘크리트 보의 비틀림 거동 실험 (2015 대한토목학회 정기학술 대회)	이정우, 곽임중, 조창빈	2015.10.28	국내	대한민국

번호	논문명 (회의 명칭)	발표자	발표 일시	장소	국명
26	겹침이음 길이 및 피복두께를 고려한 초고성능 콘크리트의 휨 특성 평가 (한국교량및구조공학회 2015년 기술 컨퍼런스)	김성준, 이정우, 박임중, 조창빈	2015.11.13	국내	대한민국
27	80MPa 고강도 콘크리트 강합성 보의 휨거동 실험 (한국건설순환자원학회 2016년 봄 학술대회)	유성원, 김경태, 오경호	2016.04.15	국내	대한민국
28	UHPRCC 기둥 부재의 일축 압축 거동에 관한 실험적 연구 (한국복합신소재학회 2016년 학술발표회)	민경환, 장효범, 정준영, 최홍식	2016.04.21	국내	대한민국
29	초고성능 콘크리트 프리텐션 부재의 응력 전달 특성실험 (한국콘크리트학회 2016 봄 학술대회)	최동훈, 유경석, 김지상	2016.05.11	국내	대한민국
30	순수휨을 받는 고강도 콘크리트 보의 거동 (한국콘크리트학회 2016 봄 학술대회)	양인환, 김경철, 이정환, 유성원	2016.05.12	국내	대한민국
31	강섬유 미혼입 80MPa, 120MPa에 정착된 확대머리철근의 정착강도 실험 (한국콘크리트학회 2016 봄 학술대회)	천성철, 최석환, 심혜정, 배민서	2016.05.12	국내	대한민국
32	인장응력 하에서 ECC의 하중단계별 균열 생성 특성 (한국콘크리트학회 2016 봄 학술대회)	김정민, 이방언, 천성철, 최석환	2016.05.12	국내	대한민국
33	고강도 콘크리트 보의 최소전단보강을 위한 실험연구 (한국콘크리트학회 2016 봄 학술대회)	이지형, 홍성걸	2016.05.13	국내	대한민국
34	초고성능 섬유보강 콘크리트 (UHPRC)로 보강된 RC 슬래브의 뚫림 전단 성능 평가 계획 (한국콘크리트학회 2016 가을 학술대회)	염현수, 홍성걸	2016.11.02	국내	대한민국
35	강섬유보강 초고성능 콘크리트의 혼합 모드 파괴 실험 (한국콘크리트학회 2016 가을 학술대회)	이지형, 홍성걸, 조창빈, 이정우	2016.11.02	국내	대한민국
36	초고성능 콘크리트의 인장증강효과 실험 (한국콘크리트학회 2016 가을 학술대회)	박찬혁, 김지상, 유경석	2016.11.02	국내	대한민국
37	초음파속도법을 이용한 자기치유 콘크리트의 주파수대역 변화 평가 (한국콘크리트학회 2016 가을 학술대회)	우병훈, 김지상, 최동훈, 이상현	2016.11.02	국내	대한민국
38	강섬유 미혼입 80MPa SUPER Concrete에 정착된 선설치 앵커의 인장 강도에 대한 문힘깊이 영향 (한국콘크리트학회 2016 가을 학술대회)	천성철, 김문길, 배민서, 심혜정, 최석환	2016.11.03	국내	대한민국
39	100MPa 고강도 콘크리트 강합성 보의 휨거동 실험 (한국건설순환자원학회 2017년 봄 학술대회)	유성원, 김경태	2017.04.06	국내	대한민국
40	100 MPa 수준의 압축강도를 갖는 콘크리트 보의 휨 성능 평가 (한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회)	양인환, 김경철, 전병관, 박지훈, 최정선, 한상훈	2017.05.10	국내	대한민국
41	초고성능 콘크리트로 보강된 RC 슬래브-기둥 내부 접합부의 뚫림 전단 보강 실험 (한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회)	염현수, 홍성걸	2017.05.10	국내	대한민국
42	80MPa급 고강도 콘크리트 부재의 비틀림 거동 (한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회)	이정우, 조창빈	2017.05.10	국내	대한민국
43	SD500으로 횡보강된 HSC보의 비틀림거동 사례 조사 (한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회)	조창빈, 이정우	2017.05.10	국내	대한민국
44	80MPa급 슈퍼 콘크리트 강합성보의 휨거동 (한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회)	유성원, 김경태, 최영철	2017.05.10	국내	대한민국
45	고강도 콘크리트 프리텐션부재의 응력 전달길이 실험 (한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회)	우병훈, 김지상, 최동훈	2017.05.10	국내	대한민국
46	고강도 콘크리트를 적용한 포스트텐션 정착구의 파열 응력 평가 실험 (한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회)	우병훈, 김지상, 유경석, 조영재	2017.05.10	국내	대한민국
47	SC80 구조설계지침의 설계 수식을 적용한 PSC 거더의 통계특성 분석 (한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회)	정주승, 김희성, 정길환, 백인열	2017.05.10	국내	대한민국
48	강섬유 미혼입 120MPa SUPER Concrete에 정착된 그룹 선설치 앵커의 인장강도에 대한 사이간격 영향 (한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회)	천성철, 김문길, 심혜정, 최석환	2017.05.11	국내	대한민국
49	고강도 콘크리트를 적용한 포스트텐션 정착구의 균열 폭 평가 실험 (한국콘크리트학회 2017 가을 학술대회)	우병훈, 김지상, 강원혁, 유경석	2017.11.03	국내	대한민국
50	인장강도 특성을 고려한 UHPC 보의 휨 모멘트-곡률 관계 해석 (한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회)	양인환, 김경철, 박지훈, 최정선, 부이광태	2018.05.03	국내	대한민국
51	강섬유보강 초고성능 콘크리트 직사각형보의 휨전단균열 거동 (한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회)	이지형, 홍성걸, 조창빈, 염현수	2018.05.03	국내	대한민국

번호	논문명 (회의 명칭)	발표자	발표 일시	장소	국명
52	고강도 콘크리트 보의 비틀림 거동 (한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회)	조창빈, 이정우	2018.05.03	국내	대한민국
53	고강도 콘크리트에 정착된 선설치 그룹앵커 반복가력실험 (한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회)	성민규, 천성철	2018.05.03	국내	대한민국
54	고강도 콘크리트에 대한 전단강도 설계식의 통계특성 분석 (한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회)	김아람, 김경현, 이성재, 백인열	2018.05.03	국내	대한민국
55	SUPER Concrete 구조설계지침 (한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회)	김지상, 최정욱	2018.05.03	국내	대한민국
56	AASHTO LRFD 설계식을 적용한 고강도 RC보의 전단강도 통계특성 산정 (한국콘크리트학회 2018 가을 학술대회)	김아람, 김경현, 이성재, 이성철, 백인열	2018.11.08	국내	대한민국
57	전단무보강 초고성능 섬유보강 콘크리트-일반 콘크리트 계면의 계면 전단강도 (한국콘크리트학회 2018 가을 학술대회)	염현수, 임우영, 홍성걸	2018.11.08	국내	대한민국
58	섬유보강 콘크리트 설계지침의 저항계수 체계 비교 (한국콘크리트학회 2019 봄 학술대회)	김경현, 유상선, 백인열	2019.05.09	국내	대한민국
59	섬유보강 SUPER 콘크리트 부재의 활하중 분포에 따른 신뢰도 지수 비교 (한국콘크리트학회 2019 봄 학술대회)	김아람, 이성재, 백인열	2019.05.09	국내	대한민국

(4) 지침/예제집 (총 16건)

(가) 구조설계 지침 (15건)

번호	지침명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율
1	SUPER Concrete SC180f 구조설계지침	2014.07	한국콘크리트학회	2014.07	-	한국콘크리트학회	100%
2	SUPER Concrete 구조설계지침 (초안)	2015.06	한국콘크리트학회	2015.07	KCI-M-15-003	한국콘크리트학회	100%
3	SC80 구조설계지침	2016.06	한국콘크리트학회	2016.06	KCI-M-16-013	한국콘크리트학회	100%
4	The Structural Design Guideline of the Fiber Reinforced SUPER Concrete (초안)	2016.06	한국콘크리트학회	2016.06	KCI-M-16-014	한국콘크리트학회	100%
5	The Structural Design Guideline of the SC80	2016.06	한국콘크리트학회	2016.06	KCI-M-16-015	한국콘크리트학회	100%
6	SC80 구조설계지침 (부분개정)	2017.04	한국콘크리트학회	2017.04	KCI-M-17-001	한국콘크리트학회	100%
7	섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침 (부분개정)	2017.04	한국콘크리트학회	2017.04	KCI-M-17-002	한국콘크리트학회	100%
8	SUPER Concrete 구조설계지침 (초안)	2017.08	한국콘크리트학회	2017.08	KCI-M-17-007	한국콘크리트학회	100%
9	The Structural Design Guideline of the SUPER Concrete (초안)	2017.08	한국콘크리트학회	2017.08	KCI-M-17-008	한국콘크리트학회	100%
10	SUPER Concrete 구조설계지침 (수정안)	2018.07	한국콘크리트학회	2018.07	KCI-M-18-004	한국콘크리트학회	100%
11	섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침 (수정안)	2018.07	한국콘크리트학회	2018.07	KCI-M-18-005	한국콘크리트학회	100%
12	SUPER Concrete 구조설계지침	2019.06	한국콘크리트학회	2019.06	KCI-M-19-003	한국콘크리트학회	100%
13	섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침	2019.06	한국콘크리트학회	2019.06	KCI-M-19-004	한국콘크리트학회	100%
14	The Structural Design Guidelines of SUPER Concrete	2019.06	한국콘크리트학회	2019.06	KCI-M-19-005	한국콘크리트학회	100%
15	The Structural Design Guidelines of Fiber Reinforced SUPER Concrete	2019.06	한국콘크리트학회	2019.06	KCI-M-19-006	한국콘크리트학회	100%

(나) 구조설계 예제집 (1건)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율
1	SUPER Concrete 구조설계지침 예제집	2019.06	한국콘크리트 학회	2019.06	KCI-M-19-007	한국콘크리트 학회	100%

(5) 저작권-소프트웨어 (2건)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율
1	복수균열 예측 프로그램	2016.06	최석환	2016.06	2016-014273	국민대학교 산학협력단	100%
2	복수균열 분석 프로그램	2016.06	최석환	2016.06	2016-014274	국민대학교 산학협력단	100%

(6) 표준화 (5건)

번호	수행 기관명	표준명	표준화 기구	표준화 단계	등록 번호	등록일	국가
1	한국콘크리트 학회	초고성능 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법	한국콘크리트 학회	학회표준	KCI-UC101 : 2014	2014.08.31	대한민국
2	한국콘크리트 학회	초고성능 콘크리트의 압축강도 시험방법	한국콘크리트 학회	학회표준	KCI-UC102 : 2014	2014.08.31	대한민국
3	한국콘크리트 학회	초고성능 콘크리트의 휨강도 시험방법	한국콘크리트 학회	학회표준	KCI-UC103 : 2014	2014.08.31	대한민국
4	한국콘크리트 학회	초고성능 콘크리트의 직접인장강도 시험방법(노치 없는 공시체)	한국콘크리트 학회	학회표준	KCI-UC104 : 2014	2014.08.31	대한민국
5	한국콘크리트 학회	초고성능 콘크리트의 직접인장강도 시험방법(노치 도입 공시체)	한국콘크리트 학회	학회표준	KCI-UC105 : 2014	2014.08.31	대한민국

(7) 홍보 (1건)

담당기관	실적
한국콘크리트학회	섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침 (콘크리트학회지, 특집-초고성능 콘크리트 기술의 현재와 미래, 2016.01)

(8) 전문 연구 인력 양성 (총 19명)

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별			성별			지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1		2015		3	3		5	1	3			3	
2		2016		5	1		6		3			3	
3		2017	1	1			1	1	2				
4		2018	1	3	1		5		2			3	

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표 달성도

(1) 연구개발의 최종 목표(2세부)

○ SUPER Concrete 구조 성능 검증 및 설계지침 개발

- 핵심성과의 질적 성과지표 및 양적 성과를 모두 달성함.

구분	핵심성과 (level1)	단위 성과 (level2)	최종 성과점검기준				달성도 (%)	
			질적성과지표		목표치			
2 세부	A	SUPER Concrete 구조설계지침	A-1	[휨] SUPER Concrete 휨 설계지침	①	SC180 휨 강도 예측 실험	휨성능 평가	100
					②	SC 180 설계지침 안 수정 보완	응력블록 모델 타당성	100
					③	SC80 휨 강도 예측	SC80 휨성능 확인	100
					④	SC100/120 휨 강도 예측	SC100/120 휨성능 확인	100
					⑤	SUPER Concrete 휨 강도 모델	휨 강도 모델 제시	100
			A-2	[압축] SUPER Concrete 압축 설계지침	①	SC 180 압축거동 실험	압축성능 평가	100
					①	SC 180 적용 파일의 거동 평가	파일의 압축성능 평가	100
					②	SC 80-150 중심축하중 압축거동	압축성능 평가	100
					③	SC80 편심 축하중 압축거동 실험	SC80 압축성능 확인	100
			A-3	[전단] SUPER Concrete 전단/휨전단 설계지침	①	SUPER Concrete 휨인장 강도 모델 및 파괴 이론 실험	모델/이론 적용성 확인	100
					②	SUPER Concrete 전단 강도 모델	강도모델 적용성	100
					③	SC80 전단/휨전단 강도 모델	강도모델 적용성	100
					④	SC100/120 전단/휨전단 강도 모델	강도모델 적용성	100
					⑤	SUPER Concrete 전단 강도 모델	전단 강도 모델 제시	100
			A-4	[비틀림] SUPER Concrete 비틀림 설계지침	①	SC180(UHPC) 비틀림거동 실험	SC180의 인장강도 효과 확인	100
					②	충실단면 비틀림 강도 예측	SC80-150의 성능 확인	100
					③	SC80 비틀림 강도 예측	SC80의 성능 확인	100
					④	굵은골재가 있는 SUPER Concrete 비틀림 연성도/강도 예측	SC100/120 비틀림성능 확인	100
					⑤	SUPER Concrete 비틀림 강도 모델	비틀림 설계강도 모델 제시	100
					⑥	SUPER Concrete 설계모델 완성	설계모델 완성	100
			A-5	[합성부재] SUPER Concrete 합성구조 설계지침	①	SC180 합성 거동 평가 실험	합성거동 성능평가	100
					②	SC 합성거동 모델링	합성거동 모델링기법	100
					③	SC80 합성거동 평가 실험	합성거동 성능평가	100
					④	SC100/120 합성 거동 평가 실험	합성거동 성능평가	100
			A-6	[균열/상세] SUPER Concrete 균열 및 처짐 제어 설계 지침	①	UHPC, SC, HSC, NSC에 대한 균열, 처짐, 철근상세 기준 분석	강도별, 국가별 기준 분석	100
					②	균열, 처짐, 철근상세 예비실험 및 평가이론 정립	균열 및 처짐 평가이론	100

구분			핵심성과 (level1)		단위 성과 (level2)		최종 성과점검기준			달성도 (%)
							질적성과지표		목표치	
					③	사용성 평가 기준 정립 및 확대머리 철근 실험/분석	균열평가 예측식/처짐제어 기준정립	100		
					④	균열제어 배근기준 및 앵커/확대머리 철근 강도 평가	평가기법	100		
			A-7	[정착 및 이음] SUPER Concrete 정착 설계지침	①	SC 적용 철근의 정착 및 이음 기술 현황 조사, 예비 실험	현황조사, 예비실험 수행	100		
					②	SC 적용 철근의 정착 및 이음 평가기법 개발	평가기법	100		
					③	프리텐션 부재 응력전달길이 평가기법 개발	평가기법	100		
					④	SC 적용 PSC 정착구역의 설계 및 평가기법 개발	평가기법	100		
					⑤	SUPER Concrete 부착 강도 모델	부착 강도 모델 제시	100		
			A-8	[설계지침] SUPER Concrete 구조설계지침	①	SC 180 설계지침 안) 수정 보완	지침 안)	100		
					②	SC 80-150 구조설계지침 1차안	지침 안)	100		
					③	SC80 구조설계지침	지침 안)	100		
					④	굵은골재 사용 구조설계지침 (SC80/100/120)	지침 안)	100		
					⑤	SUPER Concrete 구조설계지침 (수정안)	지침 수정안	100		
					⑥	SUPER Concrete 구조설계지침 완성	지침 완성	100		
					⑥	SUPER Concrete 구조설계 예제집 작성	예제집 작성	100		

(2) 연차별 질적 및 양적 성과

○ SUPER Concrete 구조 성능 검증 및 설계지침 개발

○ 수행기관: 군산대(휨), 충청대(압축), 서울대(전단/뚫림전단), 한국건설기술연구원(비틀림), 우석대(합성), 국민대(균열/상세), 서경대(정착/이음), 한국콘크리트학회(설계지침)

단위 성과 (level2)		최종 성과점검기준			양적 성과 건수	
		질적 성과지표	목표치	달성치		
1 차 년 도	[휨] SUPER Concrete 휨 설계 지침	1-①	SC180 휨 강도 예측 실험	휨성능 평가	휨성능 평가 · SC180f 보 12개 부재 실험	-
	[압축] SUPER Concrete 압축 설 계지침	2-①	SC 180 압축거동 실험	압축성능 평가	압축성능 및 좌굴성능 평가 · SC180f 기둥 5개 부재 실험 · SC180f 박판 5개 부재 실험	-
		2-②	SC 180 적용 파일의 거동 평가	파일의 압축성능 평가	파일성능 평가 · SC180f 파일 6개 부재 실험	-
	[전단] SUPER Concrete 전단/뚫 림전단 설계지침	3-①	SUPER Concrete 휨인장 강도 모델 및 파괴 이론 실험	모델/이론 적용성 확인	모델/이론 적용성 확인 · SC180f 6개 압축 재료요소 실험 · SC180f 12개 전단-슬립요소 실험	학술대회 2건
	[비틀림] SUPER Concrete 비틀림 설계지침	4-①	SC180(UHPC) 비틀림거동 실험	SC180의 인장강도 효과 확인	SC180의 인장강도 효과 확인 · SC180f 8개 비틀림부재 실험	논문게재 1건 학술대회 1건
	[합성부재] SUPER Concrete 합성구 조 설계지침	5-①	SC180 합성 거동 평가 실험	합성거동 성능평가	합성거동 성능평가 · SC180f 8개 합성부재 실험	-
	[균열/상세] SUPER Concrete 균열 및 처짐 제어 설계 지침	6-①	UHPC, SC, HSC, NSC에 대한 균열, 처짐, 철근상세 기준 분석	강도별, 국가별 기준 분석	강도별/국가별 기준분석 앵커 강도모델 개발 · 21개 인장앵커요소 실험 · 6개 전단앵커요소 실험	-
	[정착 및 이음] SUPER Concrete 정착 설 계지침	7-①	SC 적용 철근의 정착 및 이음 기술 현황 조사, 예비 실험	현황조사, 예비실험 수행	현황조사, 예비실험 수행 · 9개 부착-슬립요소 실험	논문게재 1건 학술대회 1건
[설계지침] SUPER Concrete 구조설 계지침	8-①	SC 180 설계지침 안) 수정 보완	지침 안)	지침 (초안) 작성 · SUPER Concrete K-UHPC 구조설계 지침	학회표준 5건 설계지침(국문) 1건	
2 차 년 도	[휨] SUPER Concrete 휨 설계 지침	1-②	휨 응력블록 모델	응력블록 모델 타당성	섬유보강 휨 응력블록 모델 제시 · SC150f 보 4개 부재 실험 · SC120f 보 10개 부재 실험	논문게재 2건 학술대회 2건
	[압축] SUPER Concrete 압축 설 계지침	2-②	SC 80-150 중심축하중 압축거동	압축성능 평가	압축성능 평가 · 섬유보강 사각기둥 11개 부재 실험 · 섬유보강 원형기둥 12개 부재 실험	논문게재 1건 학술대회 1건
	[전단] SUPER Concrete 전단/뚫 림전단 설계지침	3-②	SUPER Concrete 전단 강도 모델	강도모델 적용성	전단 / 뚫림전단 강도모델 제시 · 섬유보강 SC 9개 전단부재 실험 · SC180f 7개 뚫림전단부재 실험	논문게재 3건 학술대회 5건
	[비틀림] SUPER Concrete 비틀림 설계지침	4-②	충실단면 비틀림 강도 예측	SC80-150의 성능 확인	비틀림성능 평가 · SC 부재 10개 비틀림 실험 · 섬유보강 SC 30개 2방향 응력 실험	논문게재 1건 학술대회 4건
	[합성부재] SUPER Concrete 합성구 조 설계지침	5-②	SC 합성거동 모델링	합성거동 모델링기법	합성부재 성능평가 · 섬유보강 SC 16개 합성부재 실험	논문게재 2건
	[균열/상세] SUPER Concrete 균열 및 처짐 제어 설계 지침	6-②	균열, 처짐, 철근상세 예비실험 및 평가이론 정립	균열 및 처짐 평가이론	균열 및 처짐 이론 정립 확대머리철근 정착성능 평가 · 18개 확대머리철근요소 실험	논문게재 1건 학술대회 2건

단위 성과 (level2)		최종 성과점검기준			양적 성과 건수	
		질적 성과지표	목표치	달성치		
3 차 년 도	[정착 및 이음] SUPER Concrete 정착 설 계지침	7-②	SC 적용 철근의 정착 및 이음 평가기법 개발	평가기법	정착 및 이음 설계모델 제시 · 28개 부착-슬립 실험 · 16개 프리텐션 응력전달길이 실험	논문게재 3건 학술대회 3건
	[설계지침] SUPER Concrete 구조설 계지침	8-②	SC 80-150 구조설계지침 1차안	지침 안)	지침 (초안) 작성 · 섬유보강 SUPER Concrete 지침	설계지침(국문) 1건
	[휨] SUPER Concrete 휨 설계 지침	1-③	SC80 휨 강도 예측	SC80 휨성능 확인	휨성능 평가 · SC80 보 9개 부재 실험	논문게재 2건 학술대회 2건
	[압축] SUPER Concrete 압축 설 계지침	2-③	SC80 편심 축하중 압축거동 실험	SC80 압축성능 확인	압축성능 평가 · 굽은골재 SC 기둥 12개 부재 실험	학술대회 1건
	[전단] SUPER Concrete 전단/뿔 람전단 설계지침	3-③	SC80 전단/뿔람전단 강도 모델	강도모델 적용성	전단성능 평가 · 굽은골재 SC 12개 전단부재 실험	논문게재 3건 학술대회 3건
	[비틀림] SUPER Concrete 비틀림 설계지침	4-③	SC80 비틀림 강도 예측	SC80의 성능 확인	비틀림성능 평가 · SC80 18개 비틀림부재 실험	논문게재 1건 학술대회 6건
	[합성부재] SUPER Concrete 합성구 조 설계지침	5-③	SC80 합성거동 평가 실험	합성거동 성능평가	합성부재 성능평가 · 굽은골재 SC 8개 합성부재 실험	논문게재 3건 학술대회 2건
	[균열/상세] SUPER Concrete 균열 및 처짐 제어 설계 지침	6-③	사용성 평가 기준 정립 및 확대머리 철근 실험/분석	균열평가 예측식/처짐제어 기준정립	균열 S/W 개발 및 설계기준 제시 확대머리철근 정착성능 평가 · 16개 확대머리요소 실험	논문게재 1건 학술대회 3건 S/W 2건
	[정착 및 이음] SUPER Concrete 정착 설 계지침	7-③	프리텐션 부재 응력전달길이 평가기법 개발	평가기법	정착/이음 성능평가 · 9개 부착-슬립 실험 프리텐션 응력전단길이 평가 · 16개 응력전달길이 실험	논문게재 2건 학술대회 2건
	[설계지침] SUPER Concrete 구조설 계지침	8-③	SC80 구조설계지침	지침 안)	지침 (초안) 작성 · SC80 구조 설계지침 · The Structural Design Guidelines of SC80 · The Structural Design Guidelines of Fiber Reinforced SUPER Concrete	설계지침(국문) 1건 설계지침(영문) 2건
4 차 년 도	[휨] SUPER Concrete 휨 설계 지침	1-④	SC100/120 휨 강도 예측	SC100/120 휨성능 확인	휨 설계모델 제시 · SC100 보 12개 부재 실험 · SC120 보 12개 부재 실험	논문게재 2건 학술대회 1건
	[전단] SUPER Concrete 전단/뿔 람전단 설계지침	3-④	SC100/120 전단/뿔람전단 강도 모델	강도모델 적용성	전단 설계모델 제시 · SC180f 5개 뿔람전단 접합부 실험 · 오버레이 4개 뿔람전단 접합부 실험	논문게재 2건 학술대회 5건
	[비틀림] SUPER Concrete 비틀림 설계지침	4-④	굽은골재가 있는 SUPER Concrete 비틀림 연성도/강도 예측	SC100/120 비틀림성능 확인	비틀림성능 평가 · 굽은골재 SC 15개 비틀림부재 실험	논문게재 1건 학술대회 2건
	[합성부재] SUPER Concrete 합성구 조 설계지침	5-④	SC100/120 합성 거동 평가 실험	합성거동 성능평가	합성부재 성능평가 · 굽은골재 SC 12개 합성부재 실험	논문게재 1건 학술대회 2건
	[균열/상세] SUPER Concrete 균열 및 처짐 제어 설계 지침	6-④	균열제어 배근기준 및 앵커/확대머리 철근 강도 평가	평가기법	앵커 정착성능 평가 · 34개 앵커 정착요소 실험	학술대회 2건
	[정착 및 이음] SUPER Concrete 정착 설 계지침	7-④	SC 적용 PSC 정착구역의 설계 및 평가기법 개발	평가기법	부착 및 정착구 실험 · 68개 부착/정착요소 실험	논문게재 2건 학술대회 6건

단위 성과 (level2)		최종 성과점검기준			양적 성과 건수
		질적 성과지표	목표치	달성치	
5 차 년 도	[설계지침] SUPER Concrete 구조설 계지침	8-④	굵은골재 사용 구조설계지침 (SC80/100/120)	지침 안) 지침 (초안) 작성 · 굵은골재 SUPER Concrete 구조설 계지침 · The Structural Design Guidelines of SUPER Concrete	학술대회 2건 설계지침(국문) 1건 설계지침(영문) 1건
	[휨] SUPER Concrete 휨 설계 지침	1-⑤	SUPER Concrete 휨 강도 모델	휨강도 모델 제시 · SC120f 보 9개 휨부재 인장기여효 과 실험	논문게재 1건 학술대회 1건
	[전단] SUPER Concrete 전단/휨 전단 설계지침	3-⑤	SUPER Concrete 전단 강도 모델	전단강도 모델 제시 · 섬유보강 SC 30개 휨-전단 균열 (연 성도) 부재 실험 · 섬유보강 SC 42개 계면 경사 전단 요소 실험	논문게재 1건 학술대회 1건
	[비틀림] SUPER Concrete 비틀림 설계지침	4-⑤	SUPER Concrete 비틀림 강도 모델	비틀림 설계강도 모델 제시 · 섬유보강 SC 24개 복합모드 파괴거 동 부재 실험	논문게재 1건 학술대회 1건
	[정착 및 이음] SUPER Concrete 정착 설 계지침	7-⑤	SUPER Concrete 부착 강도 모델	부착강도 모델 제시 · 18개 부착강도 요소 실험 · 2개 선설치앵커 반복가력 접합부 실험	논문게재 1건 학술대회 3건
	[설계지침] SUPER Concrete 구조설 계지침	8-⑤	SUPER Concrete 구조설계지침 (수정안)	지침 수정안 지침 (수정안) 작성 · 굵은골재 SUPER Concrete 구조설 계지침 (수정안) · 섬유보강 SUPER Concrete 구조설 계지침 (수정안)	학술대회 2건 설계지침(국문) 2건
6 차 년 도	[비틀림] SUPER Concrete 비틀림 설계지침	4-⑥	SUPER Concrete 설계모델 완성	설계모델 보완 수정 · 섬유보강 SC 보 8개 연성도 실험	논문게재 1건
	[설계지침] SUPER Concrete 구조설 계지침	8-⑥	SUPER Concrete 구조설계지침 완성	지침 완성 보완실험 수행 · 부착-슬립 114개 요소 실험 구조설계지침 완성 · 굵은골재 SUPER Concrete 구조설 계지침 · The Structural Design Guidelines of SUPER Concrete · 섬유보강 SUPER Concrete 구조설 계지침 · The Structural Design Guidelines of Fiber Reinforced SUPER Concrete	논문게재 5건 학술대회 5건 설계지침(국문) 2건 설계지침(영문) 2건 설계예제집 1건
			SUPER Concrete 구조설계 예제집 작성	예제집 작성 · SUPER Concrete 구조설계지침 예 제집	

나. 관련 분야 기여도

(1) 기술적 측면

- 공공적 성과
 - SUPER Concrete를 공공적으로 활용하기 위한 SUPER Concrete 구조설계지침 발간
 - SUPER Concrete 구조설계지침의 국제적 활용을 위한 SUPER Concrete 구조설계지침 영문본 발간
 - 구조설계지침을 쉽게 이해하고 활용하기 위한 SUPER Concrete 구조설계지침 예제집 발간
- 기술적 성과
 - SUPER Concrete를 활용한 보강공사 ⇨ 2종 콘크리트의 뿔집전단강도 모델 및 계면전단강도 모델 제시
 - 초고층 구조물에 SUPER Concrete 활용 ⇨ SC기둥-NC슬래브 접합부의 상세 및 설계기준 제시
- 학술적 성과
 - 섬유보강 SUPER Concrete
 - 섬유보강 SUPER Concrete의 인장기여효과를 고려한 휨, 전단, 뿔집전단 설계모델 개발
 - 최소철근비 및 내구성 연구를 통하여 섬유보강 SUPER Concrete에 대한 학술적 이해도 증진
 - 섬유보강 SUPER Concrete의 부착-슬립 특성을 연구하여 새로운 정착모델 개발
 - 굵은골재 SUPER Concrete
 - 기존 코드(도로교설계기준/EC2)에 대한 역학적 구조특성(휨, 압축, 전단/뿔집전단, 비틀림, 합성) 검증 수행
 - 구조설계가 가능한 설계기준압축강도 한계를 90MPa에서 120MPa로 상향

(2) 경제적 측면

- 섬유보강 SUPER Concrete
 - 휨 설계모델 제시: 인장기여효과 고려 ⇨ 기존 모델 대비 50~100% 휨강도 증가
 - 전단 설계모델 제시: 강섬유저항 고려 ⇨ 강섬유저항은 콘크리트저항의 3~5배 정도
 - 비틀림 설계모델 제시: 인장기여효과 고려 ⇨ SC 비틀림저항은 철근트러스 비틀림저항의 2~4배
 - 피복두께: 일반콘크리트 구조물에 비하여 피복두께 대략 2.5배 감소 가능
 - 최소철근비: 최소철근비 필요 없음.
 - 이음 및 정착: 일반콘크리트 구조물에 비하여 정착강도가 매우 커서 정착 및 이음길이 대략 2.5배 감소
- 굵은골재 SUPER Concrete
 - 기존 코드(도로교설계기준/EC2)는 설계기준압축강도 90MPa 까지 적용 가능 ⇨ 굵은골재 SUPER Concrete 구조설계지침은 120MPa까지 적용 가능
 - 해석/설계를 위한 응력-변형률 모델, 직사각형 응력-변형률 모델
 - 휨설계모델, 전단/뿔집전단설계모델, 비틀림설계모델

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 추가 연구의 필요성

- 이 과제에서 개발한 SUPER Concrete 구조설계지침은 특정 배합과 특정 설계압축강도를 대상으로, 최소한의 재료시험 및 부재실험을 수행하여, 작성한 맞춤형 지침임. 그러므로 이 구조설계지침은 특정한 배합과 설계압축강도로 제작된 SUPER Concrete 구조부재에 국한하여 유효하게 사용할 수 있음.
- 이 맞춤형 지침을 배합과 설계압축강도에 관계없이 콘크리트 구조물에 활용하기 위해서는 더욱 많은 연구(구조검증, 설계모델, 신뢰성분석)가 이루어져야 하고 이를 토대로 맞춤형 지침을 일반형 지침으로 발전시켜야 함.
- 아울러, 구조설계지침이 국제적으로 활용되기 위해서는, 표준화기구(ISO, ACF)를 통한 개발 지침의 국제표준화가 매우 중요함.

나. 활용 실적 (과제 기간 중)

- 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침
 - 강원도 춘천 레고랜드 진입 교량 공사 (사장교-SC180f, 2015-2017)
 - 울릉도 힐링 플레이스 신축 공사 (건축구조물-SC120f, 2016-2017)
 - 삼성동 하나은행 리모델링 벽체 보강 공사 (건축구조물-SC150f, 2016)
 - 부산 에코델타시티 2단계 공사 제8교 (보도교-SC150f, 2020-2021)
- The Structural Guidelines of Fiber Reinforced SUPER Concrete
 - 미국 아이오와 교량 교체 공사 (Hawkeye UHPC Bridge-SC180f, 2015)
 - 미얀마 양곤-만달레이 고속도로 교량 확장공사 (M-UHPC Bridge-SC150f, 2015)
- 굽은골재 SUPER Concrete 구조설계지침
 - 세종-포천 고속도로 고덕대교 (사장교-SC80, 2018-2022)

다. 활용 계획 (과제 종료 후)

- SUPER Concrete 구조설계지침의 홍보 및 배포 (현재 진행 중)
 - SUPER Concrete 구조설계지침
 - 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침
 - The Structural Design Guidelines of SUPER Concrete
 - The Structural Design Guidelines of Fiber Reinforced SUPER Concrete
 - SUPER Concrete 구조설계지침 예제집
- SUPER Concrete 구조설계지침의 활용 (현재 진행 중)
 - SUPER Concrete를 활용한 구조물의 구조설계에 활용
 - SUPER Concrete를 활용한 건설공사의 소개 및 계약의 기본도서로 활용
- SUPER Concrete 구조설계지침의 국제화 (현재 진행중)
 - “The Structural Design Guidelines of Fiber Reinforced SUPER Concrete”의 기준내용을 ACF(Asia Concrete Federation)의 UHPC(Ultra High Performance Concrete) 설계지침에 최대한 반영할 수 있도록, UHPC 설계지침 작성에 적극적 참여

붙임. 참고문헌

1. 양인환, 조창빈, 김병석, “Flexural Response Predictions for Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete Beams” , Magazine of Concrete Research, 64(2), 2012, pp. 113-127.
2. 양인환, 조창빈, 김병석, “Flexural Strength of Large Scale Ultra High Performance Concrete Prestressed T-Beams” , Canadian Journal of Civil Engineering, 38, 2011, pp. 1185-1195.
3. 양인환, 조창빈, 김병석, “인장연화거동을 고려한 강섬유보강 초고성능 콘크리트 보의 모멘트-곡률 해석” , 한국전산구조공학회논문집, 2011, pp. 237-248.
4. 강수태, 류금성, 박정준, 고경택, 김성욱, “Flexural Performance of Lightly Reinforced Concrete Beams with Ultra-High Strength Fiber-Reinforced Concrete (UHSFRC)” , Advanced Science Letters, Vol. 4, No. 3, 2011, pp. 1032-1038.
5. 양인환, 조창빈, 김병석, “강섬유 보강 초고성능 콘크리트 프리스트레스트 거더의 휨거동 실험 연구” , 콘크리트학회논문집, 2010, pp. 777-786.
6. 양인환, 조창빈, 김병석, “Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending” , Engineering Structures, 32, 2010, pp. 3478-3487.
7. 양인환, 조창빈, “강섬유 보강 초고강도 콘크리트 보의 휨강도 예측기법의 제안” , 대한토목학회논문집, 제30권 3A호, 2010, pp. 317-328.
8. 한국건설기술연구원, “초고성능 콘크리트 활용 원천기술 개발” , Super Bridge 200 3차년도 보고서, 건기연 2009- 095, 2009.
9. 양인환, 조창빈, 강수태, 김병석, “강섬유로 보강된 초고성능 콘크리트의 휨 거동” , 콘크리트학회논문집, 2009, pp. 737-744.
10. 한국콘크리트학회, “SUPER Concrete 구조설계지침” , 한국콘크리트학회, 2015.
11. AFGC/SETRA, “Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concretes” , Interim Recommendations, Association Française du Génie Civil (AFGC), SETRA, France, 2002.
12. AFGC, “Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concretes” , Association Française du Génie Civil (AFGC), SETRA, France, 2013.
13. JSCE, “초고강도 섬유보강 콘크리트의 설계·시공지침(안)” , JSCE, Japan, 2004.
14. 국토해양부, “도로교 설계기준 (한계상태설계법)” , (사)한국도로교통협회, 2012.
15. 한국콘크리트학회, “콘크리트기준 해설 2012” , 한국콘크리트학회, 2013.
16. 김우, “콘크리트구조 한계상태설계” , 2014.
17. 한국교량및구조공학회 · 교량설계핵심기술연구단, “도로교설계기준(한계상태설계법) 해설” , 2015.
18. 한국콘크리트학회, “SUPER Concrete 구조설계지침” , 한국콘크리트학회, 2017.
19. FIB, “Model Code 2010” , International Federation for Structural Concrete.
20. CEN, “EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings” , European Committee for Standardization, Brussels, 2004.
21. AFGC-SETRA, “Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concretes Interim Recommendations” , Bagneux, France, 2013.
22. JSCE, “초고강도 섬유보강 콘크리트의 설계·시공지침(안)” , JSCE, Japan, 2004.
23. CEN, “EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings” , European Committee for Standardization, Brussels,

- 2004.
24. ACI 318, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318M-11)” , American Concrete Institute, 2011.
 25. AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 4th edition. Washington, D.C. 2007.
 26. fib, Punching of structural concrete slabs, fib Technical report, 2001.
 27. CEB-FIP Model Code 90, CEB Bulletin No. 213/214, 1993.
 28. Kwahk, I., Joh, C., & Lee, J. W. (2015). Torsional behavior design of UHPC box beams based on thin-walled tube theory. *Engineering*, 7(03), 101.
 29. Joh, C., Kwahk, I., Lee, J., Yang, I. H., & Kim, B. S. (2019). Torsional Behavior of High-Strength Concrete Beams with Minimum Reinforcement Ratio. *Advances in Civil Engineering*, 2019.
 30. 한국콘크리트학회, 섬유보강 SUPER Concrete 구조설계지침, 2019.
 31. 한국콘크리트학회, 굽은골재 SUPER Concrete 구조설계지침, 2019.
 32. 한국콘크리트학회, SUPER Concrete 구조설계지침 예제집, 2019.
 33. Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, Association Française du Génie Civil, AFGC-SETRA, 2013.
 34. Japan Society of Civil Engineers, Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC), 2008.
 35. 최석환 외, “인장응력 하에서 ECC의 하중단계별 균열 생성 특성,” 콘크리트학회 봄학술대회, 여수, 2016, pp.401~402.
 36. Ultra-High Performance Concrete UHPC, Fundamentals, Design, Examples, Ekkehard Fehling, Ernst&Sohn, 2014.
 37. Kazunori Harada, “Actual State of the Codes on Fire Design in Japan,” Fire Design of Concrete Structures, Proceedings of the 2nd International Workshop, Milan, Italy, 2004.
 38. Tauno Hietanen, “Actual State of the Codes on Fire Design in Europe,” Fire Design of Concrete Structures, Proceedings of the 2nd International Workshop, Milan, Italy, 2004.
 39. Long Phan, “Codes and Standards for Fire Safety Design of Concrete Structures in the US,” Fire Design of Concrete Structures, Proceedings of the 2nd International Workshop, Milan, Italy, 2004.
 40. Choi, Sokhwan, Joh, Changbin, and Chun, Sung-Chul, “Behavior and Strengths of Single Cast-in Anchors in Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC) Subjected to a Monotonic Tension or Shear,” KSCE Journal of Civil Engineering, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 19, No. 4, May, 2015, pp. 964-973, DOI 10.1007/s12205-013-0246-8, ISSN: 1226-7988.
 41. 한국콘크리트학회, 콘크리트용 앵커 설계법 및 설계 예제집, 한국콘크리트학회, 2010.
 42. 김문길, 고강도 콘크리트에 정착된 인장을 받는 선설치 앵커의 콘크리트 파괴강도 평가, 인천대학교 석사학위 논문, pp. 79, 2017.
 43. Chun, Sung-Chul, Bae, Min-Seo, and Lee, Byung-Soo, Side-Face Blowout Strength of 43 and 57 mm (No. 14 and No. 18) Hooked Bars in Beam-Column Joints,” *ACI Structural Journal*, Vol. 114, No. 5, Sep.-Oct., 2017, pp. 1227-1238 ISSN: 0889-3241.

44. Hye-Jung Sim, Sungchul Chun, Sokhwan Choi, Eunjong Yu, "Headed bars in simulated exterior beam.column joints of UHPFRC," Magazine of Concrete Research, , Vol. 70, No. 19, Oct., 2018, pp. 1016-1026, <http://dx.doi.org/10.1680/jmacr.17.00355>, Online published 30, Oct. ISSN: 0024-9831.
45. ACI Committee 318, "Building code requirements for structural concrete and commenary(ACI 318M-05)", American Concrete Institute, Mich, 2005.
46. ACI Committee 408, "Bond and development of straight reinforcing bars in tension(ACI 408R-03)", American Concrete Institute, Mich, 2003.
47. fib, "fib Model Code for Concrete Structures 2010", International Federation for Structural Concrete, Switzerland, 2013.
48. AASHTO, "AASHTO LRFD Bridge Design Specification", 5th edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C, 2010.
49. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs · Highway Bridge Design Code(Limit State Design Code), Chapter 5, Concrete Bridge, 2012.
50. CT LRFD, "Anchorage Zone Design", Memo to Designers, 2012.
51. EOTA, ETAG013, Chapter B, 2002.
52. 신현목, 제10판 프리스트레스트 콘크리트, 동명사, 2012.
53. Shah et al., "Fracture Mechanics of Concrete: Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials ", John Wiley & Sons, 1995.
54. Kupfer H., Hilsdorf H. K., and Rusch H., "Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses" ACI Journal Proceedings, V. 66, No. 8, Aug., 1969.
55. 프랑스토목공학회, "French standard NF P 18-710," 2016.
56. 일본토목학회, "초고강도섬유보강콘크리트의 설계 시공지침(안)," 2006.
57. Jansson, A. M., Lövgren, I., & Gylltoft, K. (2008). Design methods of fibre reinforced concrete: a state-of-the-art review. Submitted to Nordic Concrete Research.
58. Amin, A., & Bentz, E. C. (2018). Strength of steel fiber reinforced concrete beams in pure torsion. Structural Concrete, 19(3), 684-694.
59. fib model code 2010, 5.6. Fibre reinforced concrete / 7.7 Verification of safety and serviceability of FRC structures, pp. 144~150, pp. 296~303

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설기술연구 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 건설기술연구 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.