15CTAP-C097359-01

발간등록번호
11-1613000-001911-01

FRP와 UHPC 복합구조를 이용한 일방향 철근콘크리트 슬라브의 휨/전단 보강방법 및 설계기법 개발 최종보고서

2017

국토교통과학기술진흥원

국토교통부

Land Infrastructure and Transport R&D Report

보안 과제( ), 일반 과제(√) / 공개(√), 비공개( )

국토교통기술촉진연구사업 최종보고서

R&D / 15CTAP-C097359-01

FRP와 UHPC 복합구조를 이용한 일방향 철근콘크리트 슬라브의 휨/전단 보강방법 및 설계기법 개발 최종보고서

2017. 9. 8.

주관연구기관 / 경남대학교 산학협력단

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'FRP와 UHPC 복합구조를 이용한 일방향 철근콘크리트 슬라브의 휨/전단 보강방법 및 설계기법 개발'(연구개발 기간 : 2015. 06. 18 ~ 2017. 06. 17) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2017. 8. 21.

주관연구기관명 : 경남대학교 산학협력단 (대표자) 강재관 (인)

주관연구기관책임자: 김정중 (인)

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>15CTAP-C097359-01</td><td>해당 단계
연구 기간</td><td>2016.06.18 -
2017.06.17</td><td>단계구분</td><td>2/2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">창의도전 창조형모험</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">FRP와 UHPC 복합구조를 이용한 일방향 철근콘크리트 슬라브의 휨/전단 보강방법 및 설계기법 개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">김정중</td><td>해당단계
참여
연구원 수</td><td>총: 3명
내부: 3명
외부: 0명</td><td>해당단계
연구개발비</td><td>정부:50,000천원
기업: 천원
정부 외: 천원
계:50,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간
참여
연구원 수</td><td>총: 3명
내부: 3명
외부: 명</td><td>총 연구개발비</td><td>정부:100,000천원
기업: 천원
정부 외: 천원
계:100,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속 부서명</td><td colspan="2">경남대학교 산학협력단 (토목공학과)</td><td colspan="3">참여기업명 (해당없음)</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="2">상대국명:(해당없음)</td><td colspan="3">상대국 연구기관명:(해당없음)</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="2">연구기관명:(해당없음)</td><td colspan="3">연구책임자:(해당없음)</td></tr>
<tr><td colspan="3">요약
○ FRP-UHPC 복합 보강 기법의 설계조건 및 보강된 RC 슬라브의 휨/전단 강도 유도
○ FRP 탈착을 고려할 수 있는 유한요소해석 모형을 개발하고 실험을 통해 유도된 설계조건 및 이론식 검증
○ FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재의 파괴모드 해석 및 휨 파괴를 유도하기 위한 휨 보강한계 제안
○ 추가적인 전단보강 기법의 제안 및 실험에 의한 검증</td><td colspan="3">보고서 면수 49쪽</td></tr>
</table>

〈 국문요약문 〉

연구의 목적 및 내용	본 연구에서는 섬유보강플라스틱 (FRP) 및 초고거동 콘크리트 (UHPC)를 이용하여 일방향 철근 콘크리트(RC) 슬라브의 휨 강도를 보강하는 방법에 대한 설계조건과 보강된 RC 슬라브의 휨 강도를 이론적으로 유도한다. FRP의 탈착파괴를 고려할 수 있는 유한요소해석 모형을 개발하고 유도된 이론식을 검증한다. 또한, 휨 강도 증가에 따른 슬라브의 전단 파괴가 예상되므로 보강된 슬라브의 연성 파괴를 유도하기 위한 휨 강도의 보강한계를 제안할 것이다. FRP-UHPC 복합 휨 보강방안의 활용성을 높이기 위하여 추가적인 전단 보강 방법도 제안할 것이다. FRP-UHPC로 보강된 슬라브의 기본 개념은 부(-)의 모멘트 구간에서는 주로 FRP의 인장력에 의한 휨 보강 기능을 발휘하는 반면, 정(+)의 모멘트 구간에서는 파괴 시 구조단면의 중립축을 UHPC층 내에 위치하도록 하는 것이다. 따라서 파괴 시 중립축이 UHPC층 내에 위치하도록 FRP의 양과 UHPC의 두께에 대한 설계조건을 결정하여야 한다. 1차년도 1단계 연구에서는 FRP와 콘크리트의 계면에서 FRP의 탈착을 고려함과 동시에 콘크리트 강도에 따른 등가응력 사각형 계수들의 변화를 추가변수로 고려하여 FRP-UHPC 복합 보강기법의 설계조건식과 보강된 휨 부재의 단면력 (휨/전단 강도) 산정식을 유도하였다. 1차년도 2단계 연구에서는 FRP와 콘크리트의 계면에서 FRP의 탈착을 고려한 유한요소 해석 모형을 개발하였고, 변수해석과 슬라브 휨 강도 실험을 통하여 1단계에서 유도된 이론식들을 검증하였다. 2차년도 3단계 연구에서는 다양한 지지 조건 (단부, 내부 슬라브)을 가지는 슬라브의 휨 강도와 전단 강도간의 관계를 고려하여 FRP-UHPC로 복합 보강된 RC 휨 부재 단면의 파괴모드 결정방법을 제안하였다. 3차원 유한요소해석 결과와 변수 해석 결과를 이용하여 제안된 휨 강도 보강한계를 검토하였다. 2차년도 4단계 연구에서는 이론적인 전단 설계 방안에 대하여 연구를 수행한 후 실험 및 비선형 유한요소해석을 이용하여 FRP-UHPC 복합 보강 기법과 함께 사용이 가능한 전단 보강 방안을 제안하였고, 휨 실험으로 제안된 보강 기법의 유효성을 검증하였다.
연구개발성과	(1) 유한요소모형을 바탕으로 한 FRP-UHPC로 복합 보강된 슬라브의 설계조건 및 휨강도 해석 (2) 유한요소모형을 바탕으로 한 FRP-UHPC로 복합 보강된 슬라브의 파괴모드 해석 (3) FRP-UHPC로 복합 보강된 슬라브의 전단 보강방안의 설계기준 관련된 SCI급 논문 1편, 국내논문 2편, 특허출원 1건
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 시공성이 우수하여 RC 휨 부재 보강에 활용성이 큼 ○ 내폭설계에 적합한 수준으로 기존의 구조물을 보강하는 방안으로도 활용 ○ 노후 도심재생을 위한 핵심기술 로 활용함으로써 국가적 차원에서 자원관리의 효율성이 크게 증대 ○ 건물 수명연장을 통해 부동산 가치를 확보 ○ 층간소음 저감을 위한 방안으로 활용

핵심어 (5개 이내)	섬유보강 플라스틱	초고거동 콘크리트	합성구조	보강기법	슬라브 설계

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	In this study, design criteria and flexural strength of a retrofit system using fiber reinforced plastic (FRP) and ultra high performance concrete (UHPC)for reinforced concrete (RC) slab is developed theoretically. The derived design criteria and flexural strength are verified with finite element (FE) model that can consider debonding behavior of FRP. As unexpected shear failure can be possible due to the increase of flexural strength of RC slab, a limitation to enhance flexural strengthening for ductile failure is derived. For the practical use of the proposed FRP-UHPC system, additional methodology to enhance shear strength is proposed. The enhancing mechanism of the proposed FRP-UHPC system under negative moments is similar to a conventional way of retrofit of RC slab with FRP, which the tensile strength of FRP enhances the flexural strength of slab. However, the enhancing mechanism under positive moments is different with the conventioanl way such as the use of UHPC overlay on the top of the slab can pull the neutral axis towards the UHPC overlay zone. Therefore, a design criteria is required to ensure that the neutral axis depth shall be less or equal to the HPC overly thickness. For the first step in the first year study, design criteria and flexural strength of a retrofit system using FRP and UHPC for reinforced concrete (RC) slab is developed theoretically. FRP debonding and the change of compressive stress distribution in concrete are considered. For the second step in the first year of study, design criteria and flexural strength of a retrofit system using FRP and UHPC for reinforced concrete (RC) slab is verified with FE model and experiments. For the third step in the second year of study, a limitation to enhance flexural strengthening for ductile failure is derived. A design chart is proposed and verified with FE model. For the final step in the second year of this study, FRP-UHPC retrofit system including additional shear system is proposed and verified with FE model and experiments.
Results	(1) design criteria and flexural strength of a retrofit system using FRP and UHPC for reinforced concrete (2) Design limitation to enhance flexural strengthening for ductile failure (3) FRP-UHPC retrofit system including additional shear system 1 international journals (SCI), 2 domestic journals and 1 patents were accomplished including the development results (1), (2) and (3)
Expected Contribution	○ High applicability for flexural strengthening of RC slab due to easy installation system ○ Application for blast-resisting system ○ Increase of the efficiency of national resource management as urban regeneration technique ○ Increase of the building value due to the increase of service life ○ Application to reduce noise complaint issues from adjacent neighbors in apartment and buildings

Keywords	FRP	UHPC	Hybrid structure	Retrofit method	Slab design

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 6
2. 국내외 기술 개발 현황 ····· 12
3. 연구 수행 내용 및 성과 ····· 19
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 36
5. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 39
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 42
7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 43
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 ····· 44
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 45
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 46
11. 기타 사항 ····· 47
12. 참고 문헌 ····· 48

〈 CONTENTS 〉

1. Introduction ····· 6
2. Status of domestic and overseas technology development ····· 12
3. Research performance and achievements ····· 19
4. Achievement of goal and contribution to relevant field ····· 36
5. Plan to utilize R & D achievements ····· 39
6. Overseas science and technology information collected during the research process ····· 42
7. Security rating of R & D achievement ····· 43
8. Status of research facilities and equipment registered in the National Science and Technology Comprehensive Information System ····· 44
9. Implementation of safety measures in laboratories due to R & D tasks ····· 45
10. Representative research achievements of R & D tasks ····· 46
11. Others ····· 47
12. References ····· 48

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

본 연구에서는 섬유보강플라스틱 (FRP) 및 초고거동 콘크리트 (UHPC)를 이용하여 일방향 철근콘크리트(RC) 슬라브의 휨 강도를 보강하는 방법에 대한 설계조건과 보강된 RC 슬라브의 휨 강도를 이론적으로 유도한다. FRP의 탈착파괴를 고려할 수 있는 유한요소해석 모형을 개발하고 실험과 병행하여 유도된 이론식을 검증한다. 또한, 휨 강도 증가에 따른 슬라브의 전단 파괴가 예상되므로 보강된 슬라브의 연성 파괴를 유도하기 위한 휨 강도의 보강한계를 제안할 것이다. FRP-UHPC 복합 휨 보강방안의 활용성을 높이기 위하여 추가적인 전단 보강 방법도 제안할 것이다.

2. 연구개발의 필요성

가. 연구개발과제의 설명

건축물의 노화와 재하하중의 증가로 인한 철근콘크리트(RC) 구조물의 보강에 대한 요구는 증가하는 추세이다. 또한 내폭설계에 적합한 수준으로 기존의 구조물을 보강하는 방안에 대한 연구도 많은 관심을 끌고 있다 (Mosalam and Mosallam, 2001; Mosallam and Mosalam, 2003; Nam et al., 2010). RC 휨 부재 (슬라브 혹은 보)의 휨 보강은 그림 1과 2에서 보여 지는 것처럼 일반적으로 구조용 강재나 섬유보강플라스틱 (FRP) 같은 인장재를 구조 단면의 인장지역에 보강함으로써 이루어 진다 (Fleming and King, 1967; Emmonds et al., 1998; Rizkalla et al., 2003).

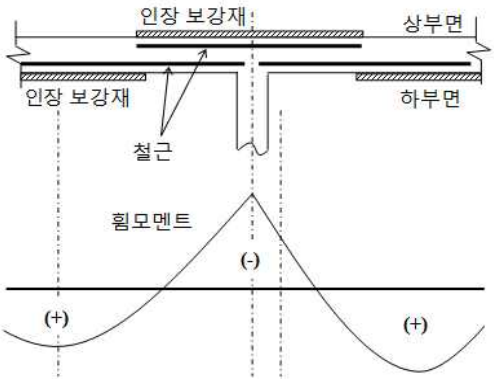


그림 1. 인장부 보강 슬라브와 휨 모멘트 선도.

그림 2. 인장부 FRP 보강 시공.

그림 3. 인장부 FRP 보강 시공 절차.

슬라브의 정(+)의 모멘트 구간의 휨 보강을 위해서는 슬라브의 하부에 인장재를 부착해야 하는데, 일반적으로 건물 내 슬라브의 하부에는 소방파이프, 전기배선 등의 설비가 설치되어 있다. 이러한 슬라브 하부의 설비들은 인장재 시공에 방해 요소가 될 뿐만 아니라 설비들을 철거 후 재설치 해야 하는 추가비용을 발생 시킨다 (그림 3 참조). 또한, 접착제를 이용하여 슬라브의 하부에 인장재를 시공 시 균일한 상향의 초기 부착압을 주기가 매우 어렵다. 이러한 시공의 어려움은 인장재의 구조물에 대한 부착력의 품질을 저하시키는 원인이 될 수 있다. 인장보강재로써 외부에 부착된 FRP의 구조적 거동은 주로 구조물과의 부착력에 의해 지배되기 때문에 (Ziraba et al., 1994; Malek et al., 1998; Ahmed et al., 2001; Coronado and Lopez, 2005; Meshgin et al., 2009), FRP 부착력의 품질의 저하는 보강된 단면의 구조적 성능의 저하를 발생시킬 수 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위하여 정(+)의 모멘트 구간과 부(-)의 모멘트 구간 모두 그림 4와 같이 RC 슬라브의 상부면에 시공할 수 있는 초고거동 콘크리트 (UHPC)와 FRP의 하이브리드 구조가 제안되었다 (Mosallam et al., 2012, Kim et al., 2013).

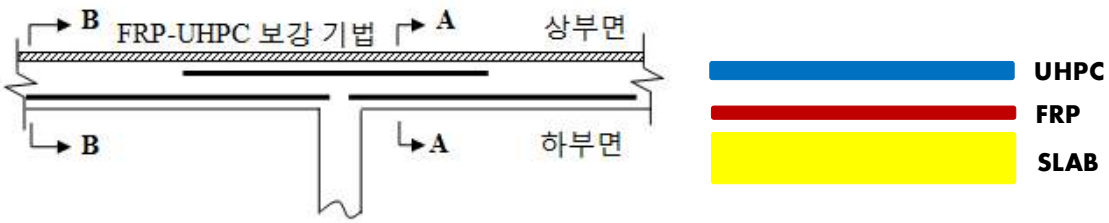


그림 4. FRP와 UHPC로 복합 보강된 휨 부재.

그림 4에 보인 FRP와 UHPC를 이용한 보강 기법은 휨 부재의 상부에 먼저 FRP를 부착한 후 UHPC를 타설하기 때문에 하부에 FRP를 부착하는 방법에 비하여 더욱 간단히 휨 부재를 보강할 수 있다. 상부에 FRP를 부착하기 때문에 하부에 FRP를 부착하는 방법에 비하여 보다 균일한 부착력을 확보할 수 있다. 또한, UHPC층이 FRP를 외부환경으로부터

보호하기 때문에 자외선과 같은 외부환경에 대하여 FRP의 열화손상을 방지할 수 있다. 이렇게 FRP와 UHPC를 이용하여 휨 부재를 보강하는 경우 중요한 변수는 보강을 위해 사용하는 FRP의 양과 UHPC의 두께이다. 그림 4에 보인 FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재는 부(-)의 모멘트 구간에서는 주로 FRP의 인장력에 의한 휨 보강 기능을 발휘한다. 반면에, 정(+)의 모멘트 구간에서는 FRP가 압축력을 받아 미세좌굴을 일으키는 것을 방지하기 위하여 파괴 시 슬라브의 중립축을 UHPC층 내에 위치하도록 설계하여야 한다. UHPC가 압축재로 FRP가 인장재로 작용하게 하는 구조이다.

나. 연구개발의 중요성

(1) 기술적 측면

구조부재의 휨 보강을 보다 쉽고 효율적으로 하기 위해 제안된 FRP-UHPC 구조의 설계에 있어서, 정(+)의 모멘트 구간에서의 파괴 시 중립축의 위치가 보강된 UHPC층 내에 위치하도록 FRP의 양과 UHPC의 두께를 결정하는 것이 중요하다. 또한, 이를 실제로 RC슬라브의 보수보강에 사용하기 위한 설계 기술에 대한 연구는 미진하다. FRP-UHPC로 보강된 휨 부재는 일반 RC 휨 부재와는 하중 저항 매카니즘이 상이하며, 이에 대한 기초 연구는 일부 연구자들에 의하여 수행 되었다 (김정중 외, 2013). 하지만 이러한 기초 연구는 FRP 및 UHPC를 완전부착으로 가정하고 콘크리트 등가응력 계수를 0.85로 고정하여 수행되었으므로 FRP의 탈착과 콘크리트 강도에 따른 등가응력 계수를 고려한 비선형 유한요소 해석을 수행하여 이론적인 설계조건, 휨 강도, 파괴 매카니즘을 검증할 필요가 있다. 또한 기 수행된 연구에서 FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재의 휨 강도 증가를 확인하였으나 보강된 휨 부재는 휨 강도의 증가로 인해 콘크리트의 전단에 의한 취성 파괴가 문제가 될 수 있음이 보고되었다. 따라서 FRP-UHPC 복합 보강 기법 사용 시 이러한 전단 파괴를 방지하고 휨 파괴를 유도하기 위한 휨 부재 단면의 휨 강도 보강 한계를 설정할 필요가 있으며, 제안된 기법의 활용성을 높이기 위하여 휨 보강과 함께 추가적인 전단 보강을 수행하는 방안을 고려해 볼 수 있다.

(2) 경제적 측면

국내 도시재생 관련사업 시장은 최소 200조원 이상을 훨씬 상회할 것으로 전문가들은 추정하고 있으며, 이 중 서울, 부산 등 대도시의 12개 정비예정 구역 도시재생 관련사업 시장규모는 표 1에서 볼 수 있듯이 약 175조원으로 추정된다. 따라서, 건축구조물 보수보강 기술은 재생기술인 성능복원 기술 과제와 연관성을 가지고 있으며, 중점적으로 연구가 진행 되어야 할 부분이다. 특히 휨 부재는 기둥요소와 더불어 건축구조물을 구성하고 있는 주요 부재이며, 본 연구에서 제안하고 있는 FRP-UHPPC로 복합 보강된 휨 부재의 경우 기타 다른 휨 부재 보강 방법보다 휨 부재 상부에 직접 FRP와 UHPC를 시공함으로 더욱 경제적이고 시공성이 우수하다.

(3) 사회문화적 측면

공동주택 거주자의 삶의 질에 대해 가장 큰 영향 요소는 층간소음으로, 국민의 삶의 질 향상을 목표로 거주환경 개선을 위해서 층간소음 개선이 추진되어 왔다. 슬라브 및 보를 FRP를 이용하여 보강하는 경우 층간 소음이 저감되는 것으로 보고되었으며, FRP-UHPC로 복합 보강하는 경우에는 UHPC층이 추가되므로 충격음 감소에 보다 우수한 효과를 나타낼 것으로 예상된다.

(4) 정부지원의 필요성

- 건축물의 성능향상 및 재사용을 위한 기술은 현재 선진국에서도 적극적으로 연구를 하고 있는 분야로 구조 안정성을 확보하는 보강 기법에 대한 연구는 그 가치가 크다고 판단됨
- 본 연구에서 개발될 FRP-UHPC 보강기법을 통한 구조물 재활용은 건설폐기물 감소 및 신규 건설에 필요한 탄소량을 대폭 절감하여 저탄소 녹색성장의 국가 정책 기조에 적극적으로 부합됨
- 본 연구에서 개발될 FRP-UHPC 보강기법은 ‘층간소음 저감’에도 효과가 있을 것이다. 이는 국민생활의 질 향상에 기여할 것이고 한국사회의 15대 메가트렌드의 하나인 ‘국민의 삶의 질이 중시되는 복지사회’와 부합됨

다. 연구개발 단계

제안된 FRP-UHPC의 보강 구조에 대한 이론적 연구와 기술적인 개념은 정립 되었다. 이러한 기초 연구는 FRP 및 UHPC를 완전부착으로 가정하여 수행되었으므로 본 연구의 단계에서는 FRP-UHPC로 보강된 슬라브의 FRP 탈착 파괴, 전단파괴, 휨 파괴 등 다양한 파괴 매카니즘을 조사할 수 있는 정밀한 비선형 유한요소 모델을 개발할 것이다. 개발된 유한요소 모델을 사용하여 다양한 설계변수에 대한 파괴 매카니즘을 검증할 것이다.
또한, 기 수행된 연구에서 FRP-UHPC로 보강된 휨 부재는 휨 강도 증가에 따라 휨 파괴보다 전단에 의한 취성 파괴가 먼저 발생하는 것으로 보고되었다. 이러한 전단 파괴는 갑작스럽기 때문에 설계상 바람직하지 않다. 그러므로 본 연구 단계에서는 제안된 기법의 실용적이고 효과적인 사용을 위하여 전단파괴 방지를 위한 휨 강도 보강한계를 제안할 것이다. FRP-UHPC 복합 보강 기법의 활용성을 높이기 위한 추가적인 전단보강 방법을 제시하고, 실험을 통하여 추가적인 전단보강 방법의 효과를 검증할 것이다. 결론적으로 본 연구의 개발단계는 정립된 이론과 기술에 대한 실험적 증명단계 (TRL 3)이다.

구분		표기	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	☐	TRL 1 이론적 연구단계
	TRL 2	☐	TRL 2 기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☑	TRL 3 실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	TRL 4 실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	TRL 5 유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	TRL 6 유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	TRL 7 실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	TRL 8 시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	TRL 9 현장적용/사업화 단계

라. 타산업 연계 및 국제협력 가능성

(1) 타산업 연계

- 휨 부재의 상부에만 시공하는 FRP-UHPC 보강기법은 건축물의 RC 슬라브뿐만 아니라, 교량의 하부에 안전점검시설이 설치되어 있는 RC교량의 보수보강에도 적용될 수 있을 것으로 사료됨
- 제안된 보수보강 기법은 정(+)모멘트와 부(-)모멘트 구간에 모두 적용이 가능하므로, 지반반력의 불확실성에 의해 정(+)모멘트와 부(-)모멘트 작용구간이 불확실한 철도궤도용 콘크리트 침목의 보강방안으로도 사용될 수 있을 것으로 사료됨

(2) 국제협력

FRP-UHPC 복합 보강 기법에 대한 정밀한 유한요소 모델을 개발하고, 추가적인 전단보강 방법과 휨 강도 보강한계를 제안하여, 미국 캘리포니아 대학, 어바인(Irvine)의 Ayman Mosallam교수, 미국 뉴멕시코 대학의 Mahmoud Reda Taha 교수와 공동연구 및 기술 협력이 가능할 것으로 판단된다.

3. 연구개발 범위

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	▪ FRP-UHPC 복합 보강 기법의 설계조건 및 보강된 RC 슬라브의 휨/전단 강도의 이론적 유도	▪ FRP-UHPC 복합 휨 보강 기법의 설계조건 유도 ▪ UHPC 한계 타설 깊이 제안 ▪ 보강된 휨 부재의 휨 강도식 산정 ▪ 보강된 휨 부재의 전단 강도식 산정
	▪ 유한요소해석과 실험을 이용한 FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재의 설계조건 및 휨 강도 해석	▪ FRP 탈착을 고려할 수 있는 유한요소 모델 개발 및 기존 실험 결과를 이용한 검증 ▪ 유한요소해석을 이용하여 유도된 설계조건 및 휨 강도, 전단 강도 식의 검증 ▪ FRP-UHPC로 휨 보강된 RC슬라브의 파괴 실험 수행
2차년도	▪ FRP-UHPC로 보강된 휨 부재의 파괴모드 해석 및 휨 파괴 유도를 위한 휨 보강한계 제안	▪ 휨 강도와 전단강도간의 관계에 따른 FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재의 소성파과 매카니즘을 이용한 파괴모드 해석 ▪ 유한요소해석을 이용한 파괴모드 해석 검증 ▪ FRP-UHPC 복합 휨 보강 기법으로 보강된 휨 부재의 휨 파괴를 유도하기 위한 휨 보강한계 제안
	▪ FRP-UHPC 복합 보강 기법에 대한 추가적인 전단 보강 방안 제안 및 실험적 검증	▪ 추가적인 전단보강기법 제안 ▪ 유한요소 해석을 바탕으로 전단 보강 기법의 효과 검증 ▪ 추가적인 전단보강기법을 적용한 FRP-UHPC로 휨 보강된 RC슬라브의 파괴 실험 수행

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과

가. 국가 연구개발사업 유사연구 실적

(1) 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사 및 검토결과

FRP를 이용한 보강방법에 대한 연구 과제를 조사한 결과는 다음 표와 같다. 5개 과제 모두 FRP를 이용한 보강방법을 연구하였으나 본 연구과제에서 제시하고 있는 FRP와 UHPC를 함께 사용하는 보강방법에 대한 내용은 포함되어 있지 않다.

(단위 : 억원)

부처명	사업명	과제명	예산	비고
교육과학기술부	일반연구자 지원사업	고온에 노출된 FRP 보강 시스템의 구조성능(2010 ~ 2013)	1.76	
교육과학기술부	일반연구자 지원사업	건설용 복합재료(FRP) 전단비선형 재료특성 조사와 보강구조물의 장기성능 평가 및 최적설계 (2009 ~ 2011)	1.03	
교육과학기술부	일반연구자 지원사업	슈퍼섬유 복합재를 이용한 RC 내진보강 시스템 개발 (2010 ~ 2013)	1.76	
교육과학기술부	일반연구자 지원사업	FRP 콘크리트 보 전단내력 향상을 위한 독창적 스터럽 개발 (2010 ~ 2013)	1.78	
교육과학기술부	일반연구자 지원사업	섬유강화플라스틱 집성재의 개발 및 강도성능 평가 (2009 ~ 2012)	1.63	
교육과학기술부	일반연구자 지원사업	FRP-보강근 콘크리트 부재의 처짐 제어를 위한 개선된 설계지침 개발 (2009 ~ 2012)	1.40	

제안된 보강기법은 FRP와 UHPC를 함께 사용하는 새로운 철근 콘크리트 슬라브의 휨 보강 방법으로 본 과제와 관련하여 국토교통부 소관 연구개발사업 및 타 부처 연구개발 사업으로 기 수행되었거나 수행 중인 유사과제와의 중복 여부에 대하여 조사 및 검토 결과, 유사하거나 중복되는 과제가 전혀 없는 것으로 나타났다.

유사과제 검색결과		
검색조건	기본조건	
검색일시	2015.05.02	
유 사 도	60	
검색현황	등록과제 수	유사과제 수
	1 건	1 건

세 부 검 색 결 과

순번	과 제 명	연구책임자	유사과제여부		제재여부
			기수행과제	타인등록과제	
1	FRP와 UHPC 복합구조를 이용한 일방향 철근콘크리트 슬라브의 휨/전단 보강방법 및 설계기법 개발	김정중	X	O	X

주1) 기본조건 : 기수행과제 및 타인등록과제 전체, 유사도 60
주2) 기수행과제 : 타부처 및 기관에서 기 수행된 과제(조사분석 수집과제)
주3) 타인등록과제 : 타사용자가 등록한 과제

상기 내용은 과제개요 내 주요 텍스트 비교를 통한 1차적인 유사과제 결과이며, 최종적인 과제의 유사여부는 발주기관의 연구심의위원회에서 결정됩니다.

국 가 과 학 기 술 지 식 정 보 서 비 스

(2) 연구개발과제의 차별화 방안

중복되는 과제가 전혀 없는 것으로 조사 되었다. FRP와 UHPC를 함께 사용하는 보강기법은 본 연구자가 독창적으로 제안한 보강기법으로 타인등록 유사과제는 2014년 검색 시 등록되고 미 수행된 연구책임자 본인의 과제임.

나. 관련분야의 국내외 연구동향 및 학술적 흐름 분석

(1) 국내연구동향

- 국내의 경우 1990년대 중반부터 FRP를 사용한 RC 구조물의 보강에 대한 연구가 본격적으로 수행되었음
- 1990년대 후반 유지관리의 중요성이 대두되면서 보강 재료인 탄소섬유쉬트 개발을 중심으로 FRP 보강기술에 대한 연구가 활발히 진행되었음
- 국내에서 수행된 FRP를 사용한 RC 구조물 보강에 대한 연구를 살펴보면, 보강공법의 기본적인 역학적 거동을 파악하고 설계단계로 발전시키고 있음
- 고정하중에 대한 휨 및 전단에 대한 보강에서 지진과 같은 동적인 하중에 대한 효과의 검증으로 발전하고 있음
- 구조물의 거시적 거동에 초점을 맞추어 휨/전단 강도의 증가는 확인하고 있으나, FRP 탈착과 같은 국부적인 파괴에 대한 규명이 미흡함.

(2) 국외연구동향

- 인장재를 이용한 RC구조물의 보강은 1960년대 강판 부착하는 방법을 시작으로 현재 FRP를 이용하는 방법으로 발전되고 있음
- 일본의 경우, 탄소섬유는 1959년에 대판공업시험소에서 발명되고, 1970년대에 실용화가 시작되었음
- 1984년 최초로 탄소섬유 쉬트를 이용하여 기존 건물의 내진보강을 실시하였음
- 1990년 건축 구조물에 대한 '탄소섬유보강공법의 설계·시공지침'이 마련되었음
- 1989년부터 고속도로 및 철도의 교각에 탄소섬유를 이용한 내진보강이 시험적으로 실시되었음
- '탄소섬유쉬트에 의한 철근콘크리트 교각의 보강공법 설계·시공요령'이 1995년에 발행되었음
- 2000년에는 '연속 섬유 쉬트를 이용한 콘크리트 구조물의 보수보강지침'을 발간함
- 유럽의 경우, 약 84,000개의 철근콘크리트 및 프리스트레스트콘크리트 교량들이 보수, 보강이 필요한 것으로 파악되고 있음
- 40t의 차량하중을 견디어야 하는 EU 기준에 미달되는 교량들의 내하력 증대를 위해 영국, 프랑스, 스위스 등을 중심으로 노후 교량의 보강에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음
- 1996년 CEB Task Group(TG 3.10)이 결성되어 콘크리트 구조물의 FRP보강에 대한 연구를 담당하고 있음
- 1998년 6월부터 fib TG 9.3 'FRP Reinforcement for concrete structures'로 전환되어 다양한 연구를 진행하고 있음
- 미국은 전체 약 55만개의 교량중 25만교 이상이 성능개선이 필요한 것으로 파악되고 있음
- 1990년 중반부터 연방정부에서 많은 예산을 투자하여 노후교량의 보강에 관한 연구를 진행하고 있음
- 1998년 이후부터는 교량 혁신 프로그램(IBRP, Innovative Bridge Research Program: Building for the Future)에 의거하여 복합소재를 이용한 교량구조의 개발 및 보강에 많은 예산을 투입하고 있음
- 2002년 ACI 440위원회에서 "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures"를 발간함

2. 국내외 관련 기술 특허 동향

- FRP-UHPC로 복합 보강된 RC 휨부재와 관련된 국내 및 국외특허는 없음
- 콘크리트 구조물에 대한 FRP 또는 UHPC를 사용한 보강 관련 국내특허는 7건으로 집계되었으며 아래 표에 정리하였음

특허제목	출원년도
보강재로 섬유강화 플라스틱 바를 사용하는 콘크리트구조물	2002
복합에프알피 보강판넬	2005
섬유강화플라스틱 데크를 내장한 ＦＲＰ-콘크리트합성바닥판	2007
섬유 강화 플라스틱 보강재 및 상기 섬유 강화 플라스틱 보강재를 포함하는 철근 콘크리트 구조물	2009
초고성능 콘크리트를 이용한 콘크리트 구조물용 철근 간격재 및 이를 이용하여 철근이 배근된 콘크리트 구조물	2009
휨모멘트 제로점에서의 연결철근 접합을 이용한 ＵＨＰＣ 프리캐스트 바닥판의 연결구조 및 연결시공방법	2010
UHPC 부재를 거푸집과 구조재로서 이용하는 대형 콘크리트 거더 및 그 제작방법	2012

- 콘크리트 구조물에 대한 FRP 또는 UHPC를 사용한 보강 관련 국외특허는 미국 6건, 유럽 2건, 중국 2건, 일본 2건으로 집계되었으며 아래 표에 정리하였음

출원국	특허제목	출원년도
미국	Fiber reinforced plastic (FRP) composite structural system for decks, docks, boardwalks, walkways, spa decks, hot tub decks and gazebos and components therefore and method of making same	1998
	Pre-stressed FRP-concrete composite structural members	1998
	Fiber reinforced plastic structural member	2003
	Fiber reinforced plastics bearing deck module having integrated shear connector and concrete composite bearing deck using the same	2006
	GEOPOLYMER COMPOSITE FOR ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE	2011
	INTERLOCKING REINFORCEMENT INCLUSIONS USABLE IN ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE AND OTHER APPLICATIONS, IMPROVED UHPC MATERIAL AND METHOD OF MAKING SAME	2012
유럽	Fiber reinforced plastic reinforcement for concrete	1993
	FRP STRUCTURE BODY AND PRODUCTION METHOD THEREFOR	2000
중국	High-strength reinforcement built-in ultra high performance concrete (UHPC) beam member	2011
	High-strength steel bar enhanced engineered cementitious composites (ECC)-hollow steel pipe ultra high performance concrete (UHPC) combination column member and manufacturing method thereof	2012
일본	REINFORCING METHOD, FRP REINFORCING TAPE AND REINFORCING ADHESIVE FOR CONCRETE STRUCTURAL MEMBER	1998
	FRP REINFORCED CONCRETE STRUCTURE	1998

3. 국내외 시장분석 및 산업동향

- 미국 Reinforced Plastic magazine 의 조사에 따르면, 2008년 FRP에 대한 전 세계적인 수요는 47,000 톤 이었으며 2020년 208,000 톤까지 증가할 것으로 예상함
- 미국의 경우, 1997년 10월 FHWA가 유럽과 일본의 복합재료 교량 적용현황을 파악하는 연구를 수행하였으며 (FHWA : 1997), 1998년에서 2001년까지 FHWA의 IBRC (Innovative Bridge Researchand Construction) 프로그램에서 175개 프로젝트를 지원하는 것 중에 84개가 FRP 관련 사업으로 계획되어 약 50% 정도의 연구가 FRP 활용 연구에 집중되어 있었음.
- 산업별 FRP의 소비동향을 1996~1998년까지 살펴보면 아래와 같으며 건설관련 소비가 상당히 많음을 확인할 수 있음

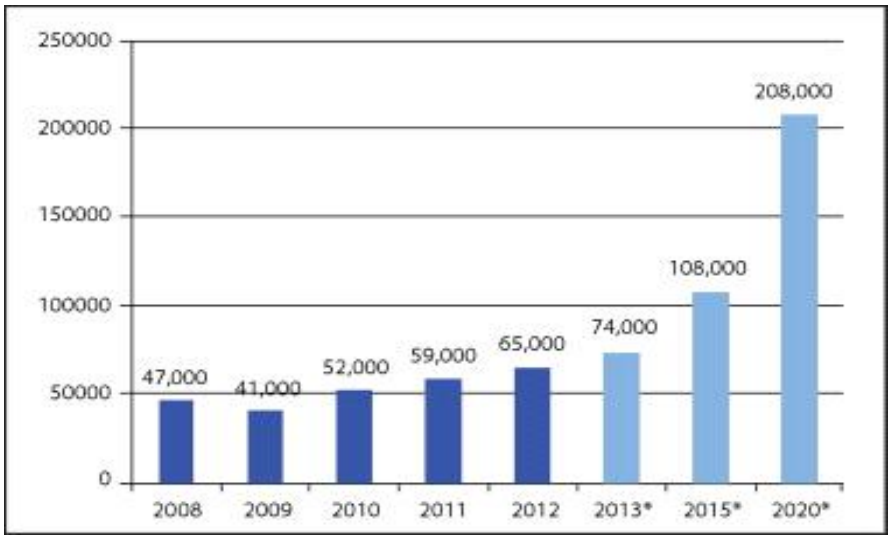


그림 5. FRP에 대한 전 세계의 수요량 (단위 : 톤)
(Reinforced Plastic magazine, 2014)

- 독일 탄소섬유협회 Carbon Composites e. V. (CCeV)의 2012년 연간 보고서 (2012년 11월 6일 발표)에 따르면, 2011년 탄소섬유 화합물 수요는 약 3만 7000톤 이었으며 2012년에는 약 4만 2000톤, 2015년 수요는 7만 3000톤에 달할 것으로 예상함.
- 탄소섬유강화 플라스틱 시장 매출은 2009년부터 2015년 까지 140억 유로로 현재의 2배 이상이 될 것으로 예상하였음
- 인도의 경우, 2007년 FRP의 총 생산량 125,000 톤 중 약 24%를 빌딩 및 토목시설물에 적용하였음

FRP CONSUMPTION
(IN MILLION POUNDS)

INDUSTRY	1996	1997	1998
Aircraft	23.7	23.9	24.2
Appliance/Bus Equip	176.9	186.0	189.3
Construction	655.1	699.6	735.5
Consumer	194.2	210.0	218.6
Corrosion Resistant	381.1	396.0	374.9
Electrical/Electronic	318.8	348.2	348.2
Marine	367.9	353.0	353.0
Transportation	998.5	1095.2	1135.4
Other	107.3	110.8	114.9
TOTAL	**3223.5**	**3421.7**	**3494.0**

DOT-Federal Highway Administration

Source: SPI CI, April 99

그림 6. 분야별 FRP 소비동향

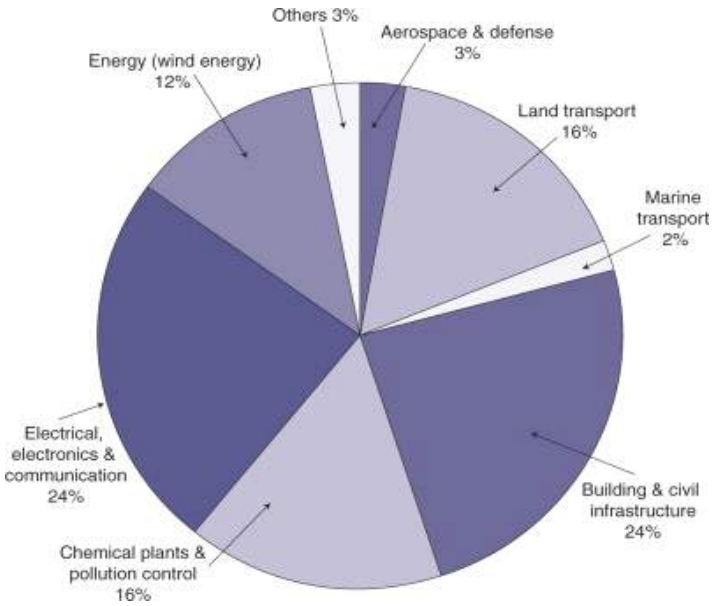


그림 7. 분야별 FRP의 적용

4. 종합결론

- RC 구조물의 유지관리의 중요성이 대두되고 있으며, 보수보강 시장이 확대 되고 있음 (O)
- FRP를 이용한 보강기법의 설계기준 마련과 표준화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음 (O)
- FRP를 이용한 보수보강에 대한 연구는 그 방법과 보강효과의 검증 위주로 진행되고 있으며, FRP의 탈착과 같은 국부적 파괴에 대한 연구는 미흡함 (T)

- FRP를 사용한 보수 보강시 자외선에 의한 열화를 고려해야 함 (T)
- 이상의 외부기회(O), 위협(T)요인과 제안된 FRP-UHPC 복합 보강 기법의 강점(S)과 약점(W)을 고려하여 SWOT분석을 수행하고 아래 표에 결과를 정리하였음

제안된 보강기법 / 외부환경	강점(S) ● 휨부재 상부면에 시공하므로 시공성 우수 ● FRP와 RC휨부재의 부착력 향상 ● UHPC를 추가 타설하여 외부환경 노출에 의한 FRP의 열화 방지	약점(W) ● 추가 휨 보강에 의한 휨부재의 전단파괴 가능성 ● FRP 탈착 파괴 가능성
외부기회(O) ● RC 구조물의 보수보강 시장 확대 ● FRP를 사용한 보수보강 시장의 확대	SO: 제안된 보강기법의 시공 편의성으로 시장의 수요에 부응	WO: 추가적인 전단 보강 방안을 마련하여 시장 요구에 대응
외부위협(T) ● FRP 탈착과 같은 국부적인 파괴에 대한 연구 미흡 ● FRP의 열화에 대한 우려로 인한 FRP사용 기피	ST: UHPC를 함께 사용하는 구조로 FRP의 단점을 극복하여 시장수요 확대	WT: 휨 파괴를 유도할 수 있는 체계적인 설계법 제안으로 약점과 외부위협 극복

- 결론적으로, 본 연구에서 개발될 FRP-UHPC 복합 보강 기법은 시공의 편의성으로 시장 확대에 부응할 수 있음 (SO)
- FRP 시공 후 UHPC를 추가 타설함으로써 FRP의 외부환경 노출에 의한 열화를 방지함 (ST)
- 추가 전단보강 기법을 함께 제안하여 그 활용성을 높일 수 있음 (WO)
- 제안된 FRP-UHPC 복합 보강 기법의 설계식과 휨 보강한계를 제안하여 휨 파괴 유도 (WT)

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 연구개발 최종목표

가. 최종목표

본 연구의 최종 목표는 RC 휨 부재를 FRP와 UHPC로 함께 보강하는 방안에 대한 설계 핵심 기술을 확보하는데 있다. 이를 위하여 먼저 FRP-UHPC로 보강된 휨 부재의 파괴 매카니즘에 대한 연구가 필요하며, 비선형 유한요소해석을 통하여 이를 검증하여야 한다. 또한 UHPC의 보강 두께에 따라 파괴 모드 (휨 파괴 혹은 전단 파괴)가 변화할 것이므로 FRP-UHPC로 보강된 휨 부재 사용 시 전단파괴를 방지하고 휨 파괴를 유도하기 위한 연속 슬라브 단면의 휨 강도 보강 한계가 검토 되어야 한다. 마지막으로, 휨 보강에 의한 취성 파괴를 방지하기 위한 전단 보강 방법에 대한 연구도 필요하다. 이를 간단히 요약하면 본 연구의 주요 연구 목표는 아래와 같다.

- ✓ FRP-UHPC 복합 보강 기법의 설계조건 및 보강된 RC 슬라브의 휨/전단 강도 유도
- ✓ FRP 탈착을 고려할 수 있는 유한요소해석 모형을 개발하고 실험을 통해 유도된 설계조건 및 이론식 검증
- ✓ FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재의 파괴모드 해석 및 휨 파괴를 유도하기 위한 휨 보강한계 제안
- ✓ 추가적인 전단보강 기법의 제안 및 실험에 의한 검증

나. 최종목표의 성격 및 설정근거

(1) 최종목표의 성격

- 제안된 FRP-UHPC 구조의 설계에 있어서, 정(+)의 모멘트 구간에서의 파괴 시 중립축의 위치가 보강된 UHPC의 내에 위치하도록 FRP와 UHPC의 설계두께를 결정하는 것이 중요하므로, 1차년도 1단계의 목표는 기존의 연구결과를 바탕으로 등가응력 계수를 추가변수로 고려하여 파괴시 중립축의 위치가 UHPC층 내에 위치하도록 설계조건을 유도하고 이러한 가정을 바탕으로 보강단면의 휨/전단 강도를 유도하는 기존 연구의 벤치마크 성격의 목표임
- 이론적으로 유도된 설계조건과 휨/전단 강도는 FRP와 UHPC가 파괴시까지 완전 부착을 가정으로 유도되었으며, 이를 보완하기 위하여 1차년도 2단계의 목표는 FRP 탈착을 고려할 수 있는 유한요소모형을 개발하여 유도된 설계조건과 이론식을 검증하는 기술적 정립 성격의 목표임
- 기 수행된 연구에서 FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재의 휨 강도 증가로 인해 콘크리트의 전단에 의한 취성적 파괴가 문제가 될 수 있음이 보고되었으므로, 2차년도 3단계의 목표는 전단 파괴를 방지하고 휨 파괴를 유도하기 위한 휨 부재 단면의 휨 강도 보강한계를 설정하는 기술적 정립 성격의 목표임

- 추가적인 전단보강을 병행하여 FRP-UHPC에 의한 휨 강도 보강기법이 더욱 효율적으로 사용될 수 있을 것이므로, 2차년도 4단계의 목표는 전단 보강방안을 제안하고 유한요소 해석을 통해 가능성을 확인한 후 실험을 통해 검증하는 실험적 증명 성격의 목표임

(2) 최종목표의 설정근거

- 제안된 FRP-UHPC 구조의 설계에 있어서, 정(+)의 모멘트 구간에서의 파괴 시 중립축의 위치가 보강된 UHPC층 내에 위치하도록 FRP와 UHPC의 설계두께를 결정하는 것이 중요하므로, 파괴시 중립축의 위치가 UHPC내에 위치하도록 설계조건을 유도하여야 한다. 이러한 가정을 바탕으로 보강단면의 휨/전단 강도를 유도할 수 있기 때문에 1차년도 1단계의 연구목표를 FRP-UHPC 복합 보강 기법의 설계조건 및 보강된 RC 슬라브의 휨/전단 강도 유도로 설정하였음
- 이론적으로 유도된 설계조건과 휨/전단 강도는 FRP와 UHPC가 파괴시까지 완전 부착을 가정으로 유도되었으며, 이를 보완하기 위하여 FRP탈착을 고려할 수 있는 유한요소모형을 개발하여 유도된 설계조건과 이론식을 검증하고자 1차년도 2단계의 연구목표를 FRP 탈착을 고려할 수 있는 유한요소해석 모형을 개발하여 유도된 설계조건 및 이론식 검증으로 설정하였음
- 기 수행된 연구에서 FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재의 휨 강도 증가를 확인하였으나 보강된 휨 부재는 휨 강도의 증가로 인해 콘크리트의 전단에 의한 취성적 파괴가 문제가 될 수 있음이 보고되었다. 따라서 FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재 사용 시 이러한 전단 파괴를 방지하고 휨 파괴를 유도하기 위한 휨 부재 단면의 휨 강도 보강한계를 설정할 필요가 있으므로 2차년도 3단계의 연구목표를 FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재의 파괴모드 해석 및 휨 파괴를 유도하기 위한 휨 보강한계 제안으로 설정하였음
- 제안된 휨 보강기법의 활용성을 높이기 위하여 휨 보강과 함께 추가적인 전단 보강을 함께하는 방안을 고려해 볼 수 있다. 추가적인 전단보강을 병행하여 FRP-UHPC에 의한 휨 강도 보강기법이 더욱 효율적으로 사용될 수 있을 것이다. 유한요소 해석을 통해 가능성을 확인한 후 전단 보강방안을 제안하고 실험을 통해 검증하고자 2차년도 4단계의 연구목표를 추가적인 전단보강 기법의 제안 및 실험에 의한 검증으로 설정하였음

2. 연구수행 내용

가. 연차별 연구목표 및 내용

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	■ FRP-UHPC 복합 보강 기법의 설계조건 및 보강된 RC 슬라브의 휨/전단 강도의 이론적 유도	- FRP-UHPC 복합 휨 보강 기법의 설계조건 유도 - UHPC 한계 타설 깊이 제안 - 보강된 휨 부재의 휨 강도식 산정 - 보강된 휨 부재의 전단 강도식 산정
	■ 유한요소해석과 실험을 이용한 FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재의 설계조건 및 휨 강도 해석	- FRP 탈착을 고려할 수 있는 유한요소 모델 개발 및 기존 실험 결과를 이용한 검증 - 유한요소해석을 이용하여 유도된 설계조건 및 휨 강도, 전단 강도 식의 검증 - FRP-UHPC로 휨 보강된 RC슬라브의 파괴 실험 수행
2차년도	■ FRP-UHPC로 보강된 휨 부재의 파괴모드 해석 및 휨 파괴 유도를 위한 휨 보강한계 제안	- 휨 강도와 전단강도간의 관계에 따른 FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재의 소성파과 매카니즘을 이용한 파괴모드 해석 - 유한요소해석을 이용한 파괴모드 해석 검증 - FRP-UHPC 복합 휨 보강 기법으로 보강된 휨 부재의 휨 파괴를 유도하기 위한 휨 보강한계 제안
	■ FRP-UHPC 복합 보강 기법에 대한 추가적인 전단 보강 방안 제안 및 실험적 검증	- 추가적인 전단보강기법 제안 - 유한요소 해석을 바탕으로 전단 보강 기법의 효과 검증 - 추가적인 전단보강기법을 적용한 FRP-UHPC로 휨 보강된 RC슬라브의 파괴 실험 수행

나. 주요 연구 내용

(1) 주요 연구목표 Ⅰ

- **FRP-UHPC 복합 보강 기법의 설계조건 및 보강된 RC 슬라브의 휨/전단 강도의 이론적 유도**

본 연구의 첫 번째 주요 연구 목표는 FRP-UHPC 복합 보강 기법이 정(+)모멘트 구간에서 휨 강도를 발휘할 수 있도록, 파괴시 중립축의 위치를 UHPC층 내에 위치하도록 설계조건식을 유도하는 것이다. 또한 휨 보강을 위하여 시공되는 FRP는 압축력에 의해 미세좌굴을 일으킬 수 있으므로, FRP를 휨 보강재로써 휨 단면의 압축지역에 설치하는 것은 바람직하지 않다. 따라서, 정(+) 모멘트 부에서는 파괴 시 중립축의 위치가 UHPC

층 내에 위치하여야 한다. 중립축의 위치는 타설 된 UHPC의 두께에 의하여 결정 될 것이므로 UHPC의 두께는 주요한 변수가 된다.

먼저, 그림 8, 9와 같이 부(-) 및 정(+)모멘트가 작용하는 단면에 대한 변형률 분포를 가정하여 힘의 평형 방정식을 세우고 각 단면의 휨 강도를 산정할 수 있을 것이다. 휨 강도 산정 방법은 파괴시 기 건설된 휨부재, FRP 및 UHPC가 완전 부착 되어 있다는 가정 하에 유도 될 것이다. 하지만 계면에서 FRP의 탈착이 발생 할 수 있으며, 국부적인 좌굴이 발생 할 수도 있을 것으로 판단된다. 따라서 이론으로 유도된 휨강도 산정 방법은 유한요소해석을 통하여 추가 검증이 필요할 것으로 판단된다.

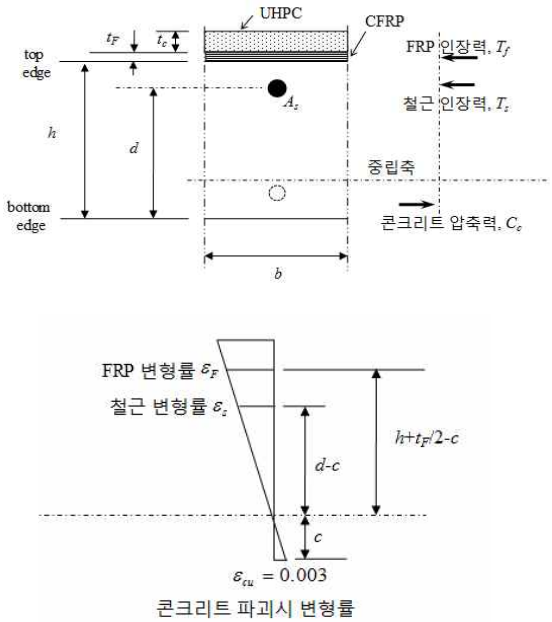


그림 8. 부(-)모멘트 부의 하중 평형 및 변형률 분포

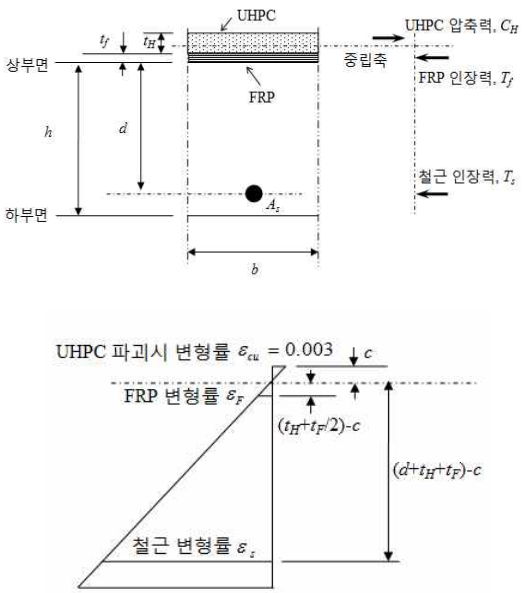


그림 9. 정(+)모멘트 부의 하중 평형 및 변형률 분포

앞의 그림 9 (정모멘트가 작용하는 FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재의 변형률 분포)에서 파괴 시 FRP가 인장을 받기 위해서는 중립축의 깊이 c가 타설된 UHPC의 두께 t_H 보다 작아야 할 것이다. 이로부터 UHPC의 강도, 타설 두께와 FRP의 두께 t_f 간의 관계식이 식 (1)과 같이 유도 될 수 있을 것이다.

$$f_H \geq 0.0021E_f\left(\frac{t_f}{t_H}\right)^2 + \frac{f_y(A_s/b)}{0.7225t_H} \qquad (1)$$

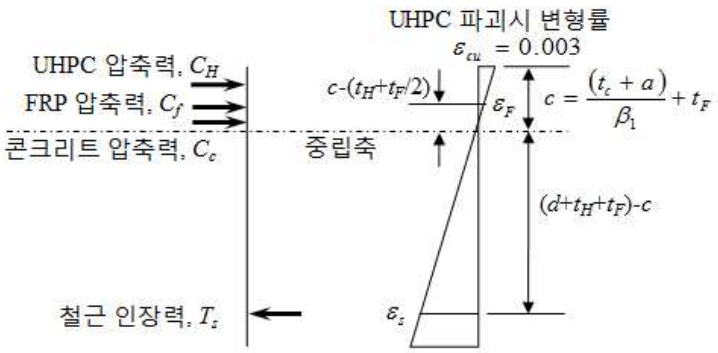
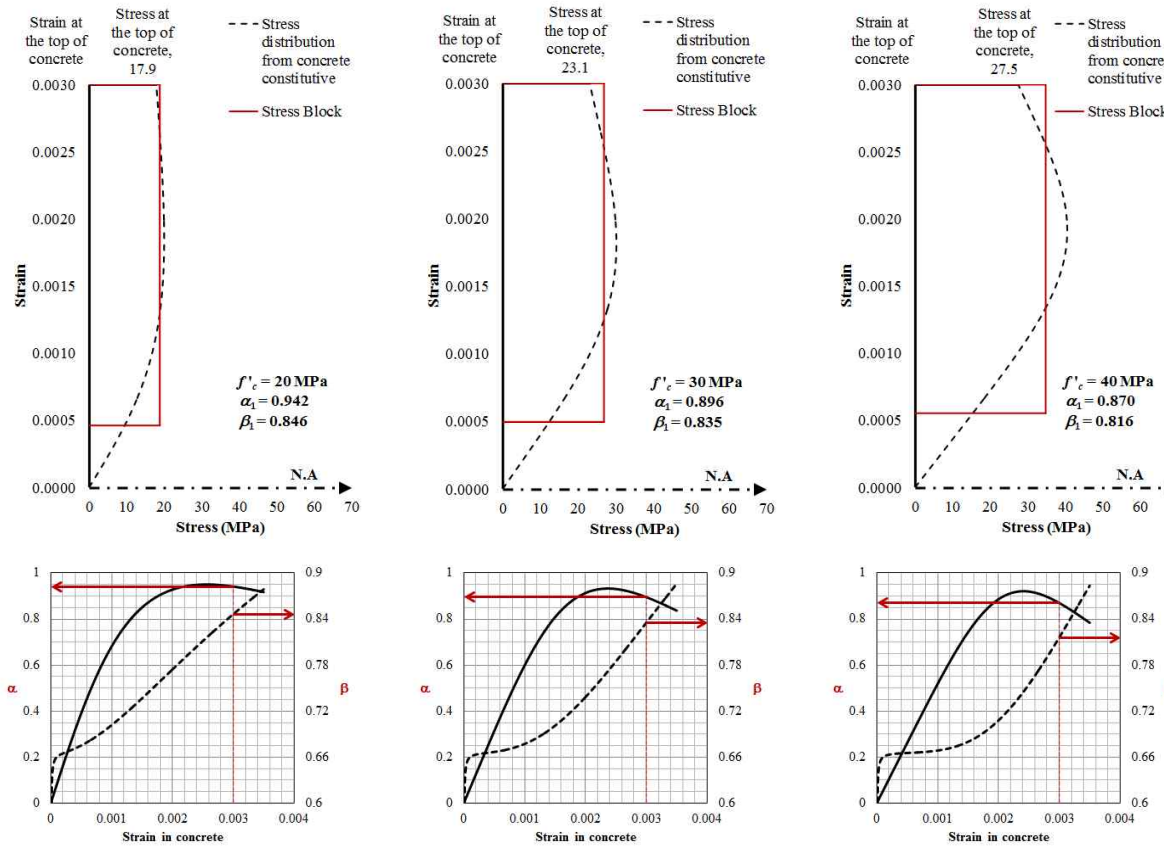


그림 10. 정(+) 모멘트부에서 바람직하지 않은 하중 평형 및 변형률 적합 조건

또 다른 조건으로 그림 10과 같이 FRP가 압축력을 받는 것으로 가정된 변형률 적합조건에서 계산된 중립축의 깊이 c 가 타설된 UHPC의 두께 t_H 보다 작게 계산되어 가정을 만족하지 않아야 할 것이다. 이로부터 식 (2)의 관계식이 유도 될 수 있다.

$$f_H \geq 0.15f_c^{'} + 0.0018E_f\left(\frac{t_f}{t_H}\right)^2 + \frac{f_y(A_s/b)}{0.85t_H} \qquad (2)$$

식 (1)과 (2)의 유도과정을 살펴보면, 콘크리트 파괴시의 극한변형률은 0.003을 사용 하였고, 콘크리트 등가응력 사각형의 응력의 크기와 깊이의 계수인 α_1과 β_1은 모두 0.85를 사용하였다. 하지만, 등가응력 사각형의 계수인 α_1과 β_1은 그림 11과 같이 콘크리트의 강도에 따라 변할 것이다. 1차년도 1단계 연구에서는 계면에서 FRP의 탈착을 고려하고, 콘크리트 강도에 따른 등가응력 사각형의 계수 α_1과 β_1의 변화를 추가변수로 고려하여 FRP-UHPC 복합 보강 기법의 설계조건식과 보강된 휨 부재의 단면력 (휨/전단강도) 산정식을 유도하였다.



(a) f’ c = 20 MPa (b) f’ c = 30 MPa (c) f’ c = 40 MPa

그림 11. 콘크리트 강도에 따른 등가응력 사각형의 계수 변화

(2) 주요 연구목표 II

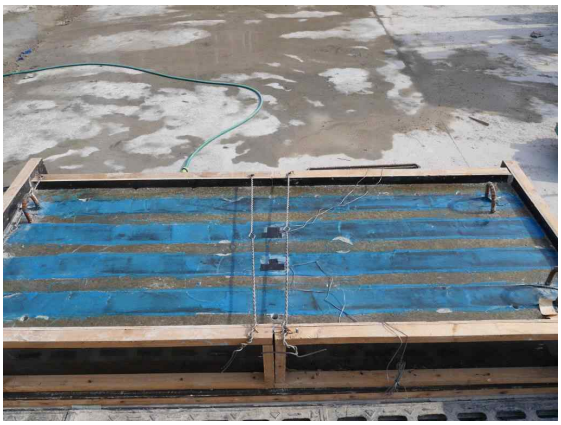
- **유한요소해석과 실험을 이용한 FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재의 설계조건 및 휨 강도 해석**

기존의 실험결과를 바탕으로 유한요소모델을 개발하고 검증하였다. 다양한 설계변수에 대하여 유한요소해석을 수행하여 FRP-UHPC로 보강된 RC슬라브의 파괴 시 중립축의 위치를 확인하였다. 이론적으로 유도된 설계식과 휨 강도 산정식을 유한요소해석 결과와 비교 검증하였다. 본 연구에서는 범용구조해석프로그램 ABAQUS (2009)를 이용하여 비선형 유한요소해석을 수행 하였고, Concrete damaged plasticity를 이용하여 콘크리트를 모델링 하였다. 이 모델은 Lubliner 등 (1989)와 Lee and Fenves (1998)에 의하여 제안된 모델로서 다축 응력 상태에 놓인 콘크리트의 비탄성 거동을 모사하는 데 적합한 것으로 알려져 있다. 콘크리트 손상 소성 모델은 비상관 소성 흐름 법칙 (Non-associated flow rule)을 적용하고 있다. 따라서, 항복면 (Yield surface)과 유동 포

텐셜 (Flow potential)이 같지 않으며 유동 포텐셜은 팽창각 (Dilation angle)의 함수이다. 철근과 FRP는 ABAQUS에서 제공하는 Embedded 옵션을 이용하여 모사를 할 수 있다. 그림 12는 본 연구자가 수행한 슬라브 제작 및 실험 사진을 보여준다. 슬라브 실험결과를 바탕으로 그림 13에 보인 유한요소모델을 개발하고 분석하였다.

(a)

(b)



(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

그림 12. (a) 철근 배근 및 게이지 설치, (b) 슬래브 및 공시체 콘크리트 타설, (c) CFRP쉬트 부착, (d) 오버레이 콘크리트 타설, (e) 컨트롤 슬래브 실험, (f) 컨트롤 슬래브 중앙부 균열 상태, (g) FRP-UHPC 보강 슬래브 실험, (h) 단부 오버레이 콘크리트 탈착

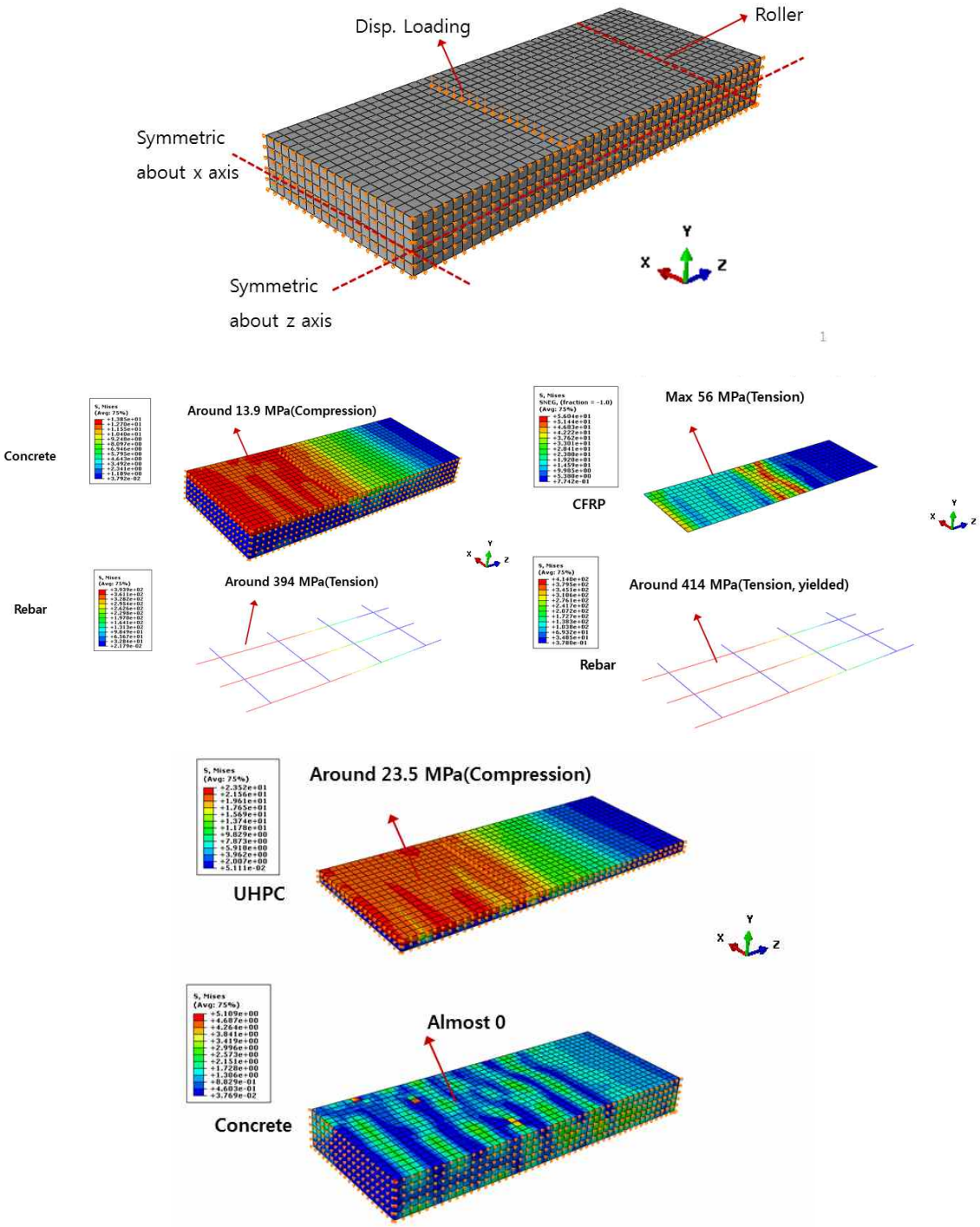


그림 13. 슬래브 실험체의 유한요소해석 모델 (1/4모델)

그림 14의 힘-변위 곡선과 그림 15의 균열양상에서 보이는 것처럼 슬래브에 대한 3차원 비선형 유한요소해석 모델이 실험 결과와 잘 일치하였다. 1차년도 2단계 연구에서는 계면에서 FRP의 탈착을 고려한 유한요소 해석 모형을 개발하였고, 변수해석을 통하여 1단계에서 유도된 이론식들을 검증하였다. 또한 슬라브 휨 강도 실험을 수행하여 유도된 이론식들을 검증하였다.

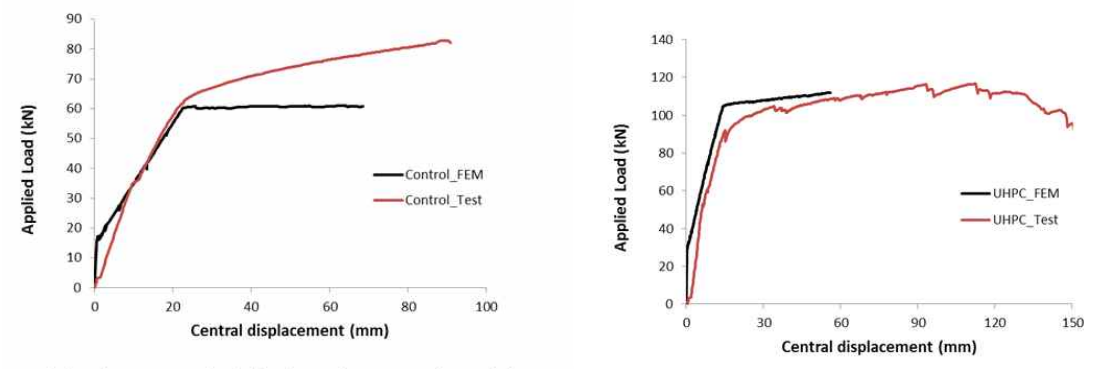
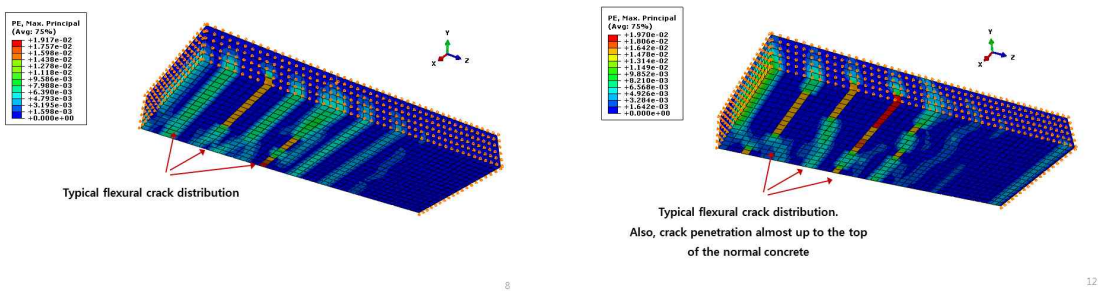


그림 14. 슬래브 실험체 결과와 유한요소해석 결과의 비교: (a) 컨트롤 실험체; (b) FRP-UHPC 보강 실험체



(a) (b)

그림 15. (a) 컨트롤 슬라브, (b) FRP-UHPC 보강 슬래브의 유한요소해석 결과에 의한 균열

(3) 주요 연구목표 Ⅲ

- **FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재의 파괴모드 해석 및 휨 파괴 유도를 위한 휨 보강한계 제안**

일반적으로 RC 슬라브의 파괴는 휨이 지배하기 때문에 전단에 대한 보강은 이루어지지 않고 있다. 하지만 휨 보강된 슬라브 단면의 휨 강도는 단면의 전단 강도를 상회 할 수 있고 전단에 의한 파괴가 발생할 수 있다. 이러한 전단파괴는 갑작스럽기 때문에 설계상 바람직하지 않다. 보강된 RC 슬라브의 휨 파괴를 유도하기 위하여 FRP의 사용량을 조절할 수 있으며, 이를 위하여는 휨 파괴를 일으키기 위한 RC 휨 부재 단면의 휨 강도와 전단 강도간의 관계를 살펴 볼 필요가 있다.
그림 16과 같은 일방향 RC 슬라브의 설계에 있어서 내부 슬라브의 위험단면 N-N 과

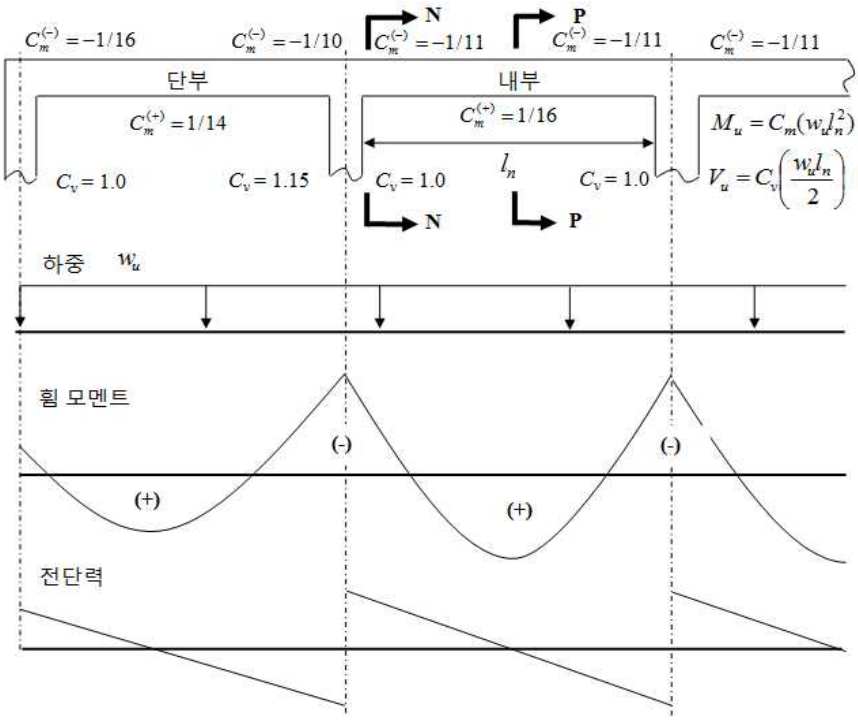


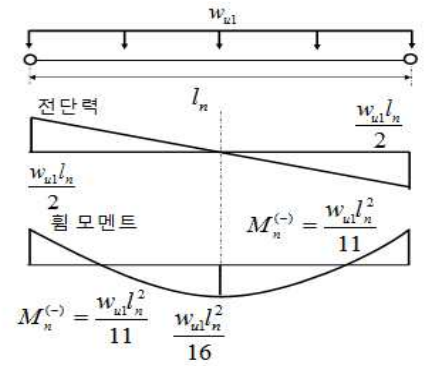
그림 16. 연속 일방향 슬라브에서의 전단 및 휨모멘트 분포도 및 계수 (ACI 318, 2005)

P-P에 작용하는 재하하중에 의한 모멘트와 전단력은 그림 16에 나타난 ACI(2005)에서 제안된 모멘트 계수와 전단력 계수 (C_m 및 C_v)를 이용하여 계산할 수 있다. 단면 N-N과 P-P 의 공칭 휨 강도를 각각 $M_n^{(-)}$과 $M_n^{(+)}$라고 하면 작용 모멘트와 휨 강도 사이의 관계를 식 (3)과 같이 고려할 수 있다.

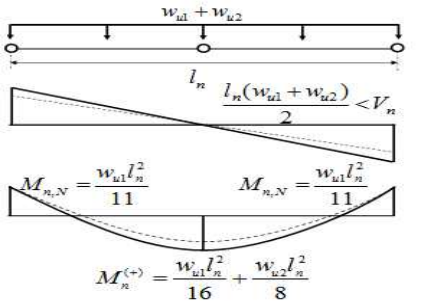
$$\frac{M_n^{(-)}}{M_n^{(+)}} = \frac{C_m^{(-)}}{C_m^{(+)}} \tag{3}$$

일반적으로 정(+), 부(-) 모멘트 구간의 단면의 휨 강도는 같게 설계되는데, 이 경우 식 (3)의 왼쪽 항은 1.0 이 된다. 그림 16의 내부 슬라브의 경우 식 (3)의 오른쪽 항은 (부호를 고려하지 않은 상태로) 1.45 로 계산된다. 이렇게 왼쪽 항이 오른쪽 항 보다 작게 설계된 슬라브의 경우에는 그림 17(a)와 같이 슬라브의 끝단 (단면 N-N)에서 일차적으로 휨 파괴가 발생할 것이다. 이후 그림 17(b)와 같이 끝단의 모멘트는 유지된 상태에서 슬라브 중앙의 모멘트가 단면의 휨 강도에 도달할 때까지 증가되는 단순보와 같은 거동을 할 것이다.

반대로 식 (3)의 왼쪽 항이 오른쪽 항보다 크게 설계된 슬라브의 경우에는 그림 18과 같이 슬라브의 중앙에서 휨 파괴가 발생된 후 끝단의 휨 파괴에 의해서 슬라브의 최종파괴가 일어날 것이다. 이때, RC 슬라브 단면의 전단강도를 휨 강도와 함께 고려하여 FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재의 파괴모드 (휨 파괴 혹은 전단 파괴를)를 그림 19와 같이 $M_n^{(-)}$과 $M_n^{(+)}$에 따라 결정 할 수 있다.

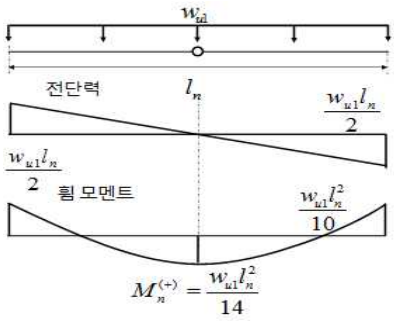


(a)

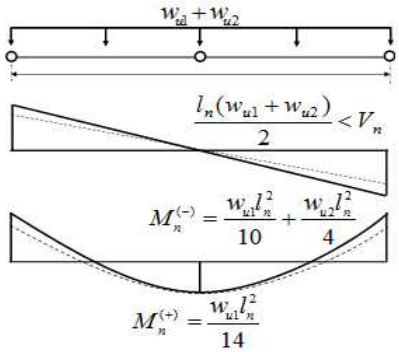


(b)

그림 17. 소성파괴 메커니즘 1 (양단 소성 힌지 발생 후 중앙부 소성 힌지 발생): (a) N-N 단면; (b) P-P 단면



(a)



(b)

그림 18. 소성파괴 메커니즘 2 (중앙부 소성 힌지 발생 후 양단 소성 힌지 발생):(a) P-P 단면 ; (b) N-N 단면

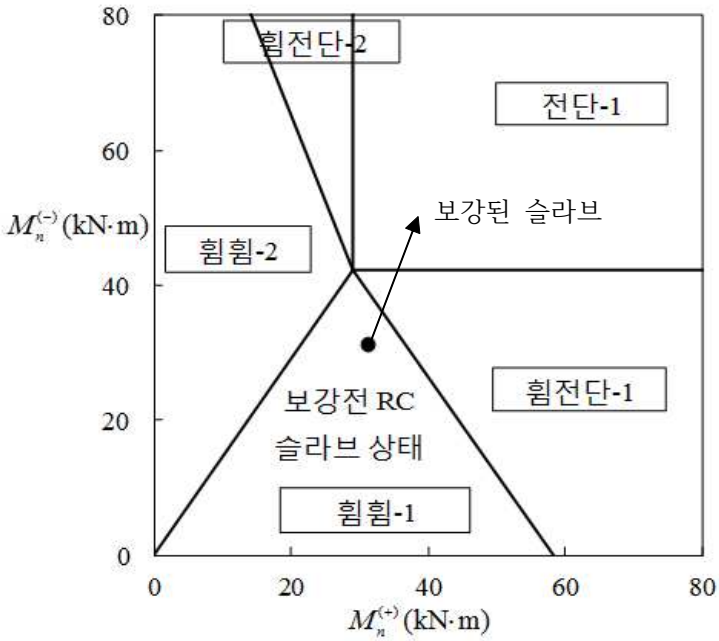


그림 19. $M_n^{(-)}$ 과 $M_n^{(+)}$ 에 따른 FRP-UHPC로 복합 보강된 휨부재의 파괴 모드 결정

본 연구의 2차년도 3단계 연구에서는 다양한 지지 조건 (단부, 내부 슬라브)을 가지는 슬라브의 휨 강도와 전단 강도간의 관계를 고려하여 FRP-UHPC로 복합 보강된 단면의

파괴모드 결정 방법을 제안하였다. 3차원 유한요소해석 결과와 변수 해석 결과를 이용하여 제안된 휨 강도 보강한계를 검토하였다.

(4) 주요 연구목표 Ⅳ

▪ **추가적인 전단보강 방안 제안 및 실험적 검증**

앞서 언급하였듯이 FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재 단면은 휨강도가 전단 강도를 상회 할 수 있다. FRP-UHPC로 보강된 실험체의 파괴실험 결과를 보면 그림 20과 같은 전단 파괴에 의한 취성파괴를 일으킬 수 있음을 볼 수 있다. 따라서 전단에 의한 취성적 파괴를 방지하기 위해서는 휨 강도의 보강을 일정 수준 이하로 제한하는 휨 보강의 한계를 검토하여야 한다. 이러한 보강한계는 기존 슬라브의 전단강도에 의해 지배되므로, 추가적인 전단보강을 실시하여 휨 보강한도를 증대시킬 수 있다. FRP-UHPC 복합 보강 기법과 함께 사용하여 제안된 보강기법의 활용성을 증대시킬 수 있을 것이다.

그림 20. FRP-UHPC로 복합 보강된 휨 부재의 전단 파괴

FRP-UHPC 복합 보강기법에 대한 추가적인 전단보강 방안이 제안될 것이다. 다양한 안에 대하여 유한요소 해석을 수행하고 효과를 검증할 것이다. 하나의 예로 그림 21과 같이 스테플러 형태의 전단 보강재를 기 건설된 휨 부재에 삽입한 후 에폭시 혹은 몰타르를 이용하여 일체화 시키는 전단 보강 방안(안)을 고려할 수 있다. 이러한 전단 보강 방법을 사용하기 위해서는 먼저 전단 보강재의 적절한 천공 깊이, 간격 등에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 그 형태와 시공 상세는 유한요소해석을 통하여 결정될 것이다. 본 연구의 2차년도 4단계 연구에서는 이론적인 전단 설계 방안에 대하여 연구를 수행한 후 실험 및 비선형 유한요소해석을 이용하여 FRP-UHPC 복합 보강 기법과 함께 사용이 가능한 전단 보강 방안을 제안하고 실험으로 검증하였다.

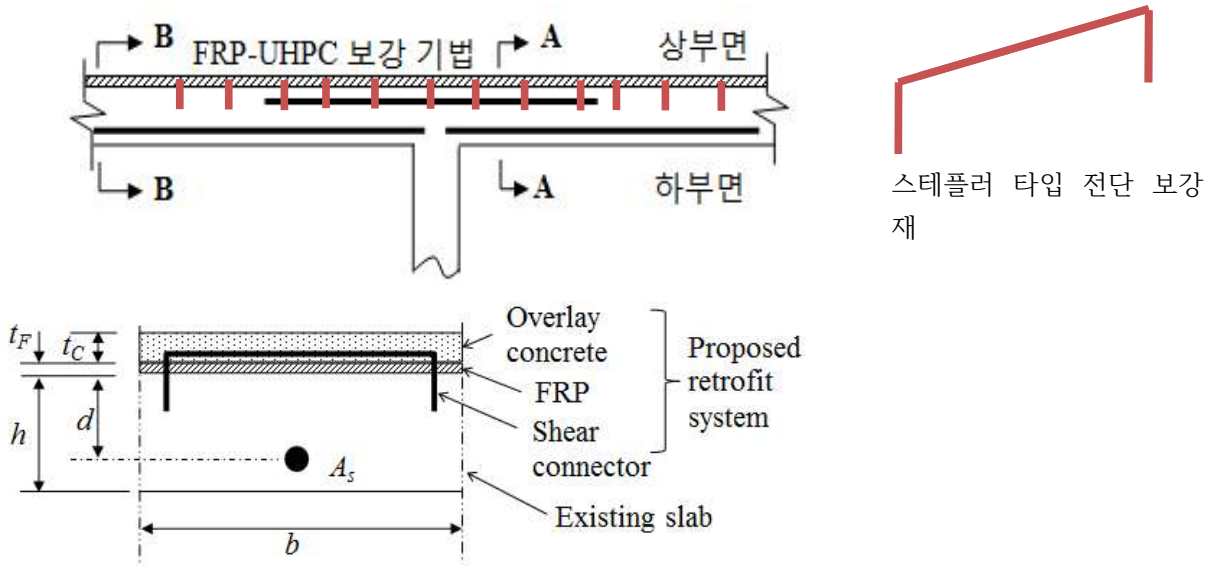
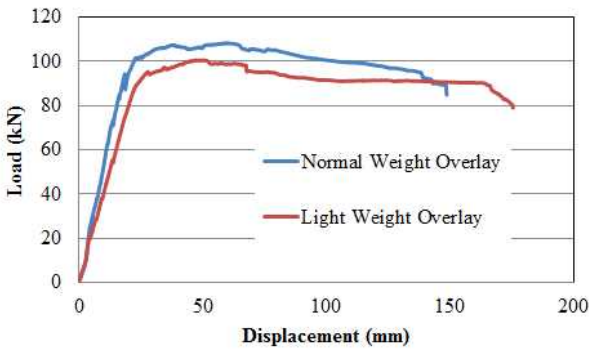


그림 21. FRP-UHPC 복합 보강 휨부재의 전단 보강 방안

(a) 보통 중량 콘크리트 보강 (b) 경량 콘크리트로 보강



(c) 하중-변위곡선 비교

그림 22. 2차년도 전단보강이 포함된 FRP-UHPC 슬래브의 실험 결과

그림 22와 같이 전단보강이 포함된 FRP-UHPC 실험체 2기를 제작하고, 슬래브 강도 실험을 수행하였다. 그림 22. (a)의 슬래브 1은 일차년도에 사용한 고강도 콘크리트로 오

버레이(UHPC층)을 타설하였고, 그림 2(b)의 슬래브 2는 경량콘크리트를 사용하여 오버레이를 타설하였다. 두 슬래브 모두 1차년도에서 실험한 컨트롤 슬래브의 파괴 강도를 상회하고, 인성과 연성이 증가함을 볼 수 있다. 보통 콘크리트 오버레이에 비하여 경량콘크리트 오버레이를 사용할 경우에도 슬래브의 휨 강도가 차이가 나지 않았다. 오버레이를 경량콘크리트로 사용함으로써 보강으로 인한 사하중의 증가를 감소시킴으로써 제안된 보강기법의 활용성을 더 높일 수 있을 것으로 기대 된다.

3. 연구수행 성과

가. 성과목표 및 달성 성과

성과지표	성과목표	최소성과목표	달성
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	3건 (6점)	1건 (2점)	1건 (2점)
일반학술지게재(1점)	3건 (3점)	1건 (1점)	2건 (2점)
특허출원(1점)	2건 (2점)		1건 (1점)
특허등록(2점)			
디자인 등록(1점)			
소프트웨어(1점)			
하드웨어(1점)			
기타(1점)			
소계(점수)	11점	3점	5점

나. 연구개발 핵심성과

(1) 핵심성과 리스트

연번	핵심성과물	성과유형	계획	달성
1	설계 조건식과 단면력 산정 방법의 이론적 유도	공법• 기법	국내 논문	국내 학술대회, 특허출원
2	유한요소해석과 실험을 이용한 설계 조건식과 단면력 산정식의 검증	공법• 기법	SCI(E)논문 국내 논문 (최소성과)	국내 논문 (최소성과)
3	연성파괴를 위한 휨강도 보강한계 설정	공법• 기법	SCI(E)논문, 특허	국내 논문
4	추가전단보강방안	공법• 기법	SCI(E)논문 (최소성과) 국내 논문 특허	SCI(E)논문 (최소성과)

(2) 핵심성과물별 세부 설명

(가) 설계 조건식과 단면력 산정 방법의 이론적 유도

정의	이론식	
목적	제안된 기법이 정모멘트 구간에서 휨 강도를 발현하기 위한 설계조건식을 유도하고 이를 바탕으로 단면력을 산정한다.	
성능목표	(기존기술 수준) FRP 접착력 비고려, 단순한 콘크리트 등가응력 사각형 사용 (개발기술 수준) FRP 접착력을 고려하고 콘크리트 강도에 따른 등가응력 사각형을 사용	
성과달성 책임자 (소속기관)	김정중(경남대학교)	
소요기간	'15.06 ~'15.11(0년6개월, 1년차)	
성과달성 확인방법	특허출원 및 국내외 학술대회 발표로 달성 여부 확인	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	1건
	논문	0건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	국내외 학술대회 발표 : 3건

(나) 유한요소해석과 실험을 이용한 설계 조건식과 단면력 산정식의 검증

정의	이론식 및 설계기법	
목적	FRP-UHPC 복합 보강기법을 위해 유도된 설계조건식과 단면력 산정식을 유한요소해석과 실험으로 검증하고 설계기법을 확립한다.	
성능목표	(기존기술 수준) 이론적 유도와 제한된 실험에 의한 검증 (개발기술 수준) 유한요소해석 모형을 개발하여 다양한 변수에 대한 해석을 수행하고 실험을 통해 설계기법을 확립한다.	
성과달성 책임자 (소속기관)	김정중(경남대학교)	
소요기간	' 15.12 ~ ' 16.06(0년6개월, 1년차)	
성과달성 확인방법	국내학술지를 발간함으로써 심사자의 평가로 달성 여부 확인	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	국내학술지 : 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

(다) 연성파괴를 위한 휨 강도 보강한계 설정

정의	설계기법	
목적	FRP-UHPC 복합 보강기법 적용시 휨 보강한계를 설정하여 보강된 휨 부재의 연성파괴를 유도한다.	
성능목표	(기존기술 수준) 보강된 휨 부재의 전단에 의한 취성파괴 (개발기술 수준) 연성파괴를 유도하는 휨 보강 한계를 설정하여 설계에 반영한다.	
성과달성 책임자 (소속기관)	김정중(경남대학교)	
소요기간	’ 16.06 ~ ’ 16.11(0년6개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	국내학술지를 발간함으로써 심사자의 평가로 달성 여부 확인	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	국내학술지 : 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

(라) 추가전단보강방안

정의	공법•기법	
목적	FRP-UHPC 복합 보강기법의 활용성 증대를 목적으로 추가적인 전단보강방안을 개발한다.	
성능목표	(기존기술 수준) 보강된 휨 부재의 전단에 의한 취성파괴 (개발기술 수준) 추가적인 전단보강을 수행하여 휨 보강 한계를 높이고, FRP-UHPC 복합 보강기법의 활용성을 증대시킨다.	
성과달성 책임자 (소속기관)	김정중(경남대학교)	
소요기간	’ 16.12 ~ ’ 17.06(0년6개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	국제논문을 발간함으로써 심사자의 평가로 달성 여부 확인	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	SCI(E) : 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 최소 성과 목표 - (기초원천, 창조형 모험 분야만 해당)

성과지표	성과목표	최소성과목표	달성
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	3건	1건	1건
일반학술지게재(1점)	3건	1건	2건
특허출원(1점)	2건		1건
특허등록(2점)			
디자인 등록(1점)			
소프트웨어(1점)			
하드웨어(1점)			
기타(1점)			
소계(점수)	11점	3점	5점

나. 성과점검기준표 - (기초원천, 첨단융합, 사회이슈 분야 해당)

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		최종 성과점검기준							양적 성과 목표	양적 성과 달성
						질적 성과지표	목표치	달성치	측정 방법	검증방법	가중치		
주관	1	설계 조건 식과 단면력 산정 방법의 이론적 유도	1-1	설계조건식	①	설계식	100%	100%	이론적 검증	학술회의발표	2	특허 : 출원 1건 등록 건 논문 : 1건 시제품 : 건 SW : 건	특허 : 출원 1건 등록 건 논문 : 건 시제품 : 건 SW : 건
			1-2	휨 강도 산정식	②	휨강도 설계식	100%	100%	이론적 검증	논문발표	2		
	2	유한요소해석과 실험을 이용한 설계조건식과 단면력 산정식의 검증	2-1	설계조건식 검증	①	유한요소해석	100%	100%	파괴모드	논문발표	1	특허 : 출원 건 등록 건 논문 : 2건 시제품 : 건 SW : 건	특허 : 출원 건 등록 건 논문 : 1건 시제품 : 건 SW : 건
					②	실험결과	100%	100%	파괴모드	논문발표	2		
			2-2	휨 강도 산정식의 검증	①	유한요소해석	휨강도 설계식과 10%오차	휨강도 설계식과 10%오차	휨강도	논문발표	1		
					②	실험결과	휨강도 설계식과 15%오차	휨강도 설계식과 15%오차	휨강도	논문발표	2		
	3	연성파괴를 위한 휨강도 보강한계 설정	3-1	파괴모드 해석	①	소성파괴 매카니즘을 이용한 파괴모드 결정법	100%	100%	이론적 검증	특허출원	1	특허 : 출원 건 등록 건 논문 : 1건 시제품 : 건 SW : 건	특허 : 출원 건 등록 건 논문 : 1건 시제품 : 건 SW : 건
					②	유한요소해석	10%오차	10%오차	휨강도	학술회의발표	1		
			3-2	휨 보강 한계 제안	①	설계식	100%	100%	이론적 검증	학술회의발표	1		
					②	유한요소해석	설계식과 10%오차	설계식과 10%오차	휨강도, 파괴모드	논문발표	2		
	4	추가 전단보강 방안	4-1	전단보강 방안 제안	①	설계기법	100%	100%	이론적 검증	특허출원	1	특허 : 출원 1건 등록 건 논문 : 2건 시제품 : 건 SW : 건	특허 : 출원 건 등록 건 논문 : 1건 시제품 : 건 SW : 건
					②	유한요소해석	설계식과 10%오차	설계식과 10%오차	휨강도	논문발표	2		
			4-2	전단보강 방안 실험적 검증	①	실험결과	설계식과 15%오차	설계식과 15%오차	휨강도	논문발표	2		
계											20	특허 : 출원 2건 등록 건 논문 : 6건 시제품 : 건 SW : 건	특허 : 출원 1건 등록 건 논문 : 3건 시제품 : 건 SW : 건

2. 관련 분야 기여도

○ 시공성이 우수하여 RC 휨 부재 보강에 활용성이 큼

○ 경량골재 콘크리트를 오버레이로 사용함으로써 활용성을 높일 수 있음

○ 내폭설계에 적합한 수준으로 기존의 구조물을 보강하는 방안으로도 활용

○ 노후 도심재생을 위한 핵심기술 로 활용함으로써 국가적 차원에서 자원관리의 효율성이 크게 증대

○ 건물 수명연장을 통해 부동산 가치를 확보

○ 층간소음 저감을 위한 방안으로 활용

○ 기술적 측면: FRP-UHPC 복합 보강 기법은 기존의 다른 휨 부재 보강 방법보다 경제적이고 시공성이 우수하여 RC 휨 부재 보강에 활용성이 큼

○ 경제적·산업적 측면: 국내 도시재생 관련사업 시장은 최소 200조원 이상을 훨씬 상회할 것으로 전문가들은 추정하고 있으며, 이 중 서울, 부산 등 대도시의 12개 정비예정 구역 도시재생 관련사업 시장규모는 약 175조원으로 추정됨

○ 사회적 측면으로 공동주택 거주자의 삶의 질에 대해 가장 큰 영향 요소는 층간소음으로, 국민의 삶의 질 향상을 목표로 거주환경 개선을 위해서는 층간소음 개선이 추진되어 왔으며, FRP-UHPC로 보강하는 경우에는 UHPC층이 추가되므로 충격음 감소에 보다 우수한 효과를 나타낼 것으로 예상됨

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 연구결과의 활용방안

최근 우리나라의 수도권 지역 및 대도시를 중심으로 낡은 아파트 건물이나 상가건물을 대상으로 철거 후 재건축이나 재개발이 아닌 도시재생의 새로운 개념인 구조물 리모델링 사업이 증가추세에 있다. 이와 같은 수복형 도시재생 사업을 통한 구조물 재활용은 건설 폐기물 감소 및 신규 건설에 필요한 탄소량을 대폭 절감하여 저탄소 녹색성장의 국가 정책 기조에 적극적으로 부합된다. 국내 도시재생 관련사업 시장은 최소 200조원 이상을 훨씬 상회할 것으로 전문가들은 추정하고 있으며, 이 중 서울, 부산 등 대도시의 12개 정비 예정 구역 도시재생 관련사업 시장규모는 표에서 볼 수 있듯이 약 175조원으로 추정된다.

국내 도시재생 관련 산업의 시장규모 분석(도시재생사업단 상세기획보고서 2007)

구 분	면 적(ha)	면 적(㎡)	면적당비용(천원/㎡)	총 사업비 규모(억원)
서울	2,505.80	25,058,000	3,756	941,115.5
부산	1,962.40	19,624,000	1,500	294,360.0
인천	643.7	6,437,000	1,151	74,083.5
대구	1,173.00	11,730,000	1,177	138,110.3
광주	449	4,490,000	973	43,676.3
대전	1,042.00	10,420,000	947	98,698.2
울산	514.7	5,147,000	1,000	51,470.0
성남	293.9	2,939,000	990	29,096.1
부천	399	3,990,000	990	39,496.8
안양	145.3	1,453,000	1,552	22,556.1
수원	142.4	1,424,000	990	14,097.6
안산	95.65	956,500	900	8,608.5
계	9,366.85	93,668,500	15,926	1,755,369

따라서, 건축구조물 보수보강 기술은 재생기술인 성능복원 기술 과제와 연계를 가지고 있으며, 중점적으로 연구가 진행 되어야 할 부분으로 생각된다. 특히 휨부재는 기둥요소와 더불어 건축구조물을 구성하고 있는 주요 부재이다.

본 연구에서 제안하고 있는 FRP-UHPPC로 복합 보강된 휨부재의 경우 기타 다른 휨부재 보강 방법보다 휨부재 상부에 직접 FRP와 UHPC를 시공함으로 경제적이고 시공성이 우수하여 그 활용성이 크다고 판단된다.

본 연구의 결과물 적용 시 시공현장에서의 시공성과 구조적 안정성은 매우 중요한 요소이다. 시공성의 경우, 기존의 다른 휨 부재 보강방법에 비하여 시공이 쉽고 작업환경이 우수하므로 숙련된 기술자가 아니어도 손쉽게 시공이 가능하며, 요구하는 품질을 생산할 수 있을 것이다. 이로 인해 인건비의 절감이 가능할 것이다. 구조적 안정성의 경우, 오버

레이 콘크리트의 타설로 인한 설계 사하중의 증가를 고려하여, 구조물을 재해석해야 한다. 오버레이 콘크리트로 인한 사하중의 영향을 최소화하여 본 연구에서 개발된 보강기법의 효과를 극대화하는 방법으로 경량골재콘크리트를 사용하는 방안도 고려할 수 있다.

2. 기대성과 및 파급효과

노후 건축물의 성능향상 및 재사용을 위한 핵심기술로 구조 안전성을 확보하는 기술은 일본, 미국을 중심으로 성능평가, 보수보강 및 유지관리 기술이 선도적으로 개발되어져 왔다. 그러나 이러한 해외기술은 국내와 건물의 구조적 특성이 다르기 때문에 국내에 직접 적용하기에는 부적합 부분이 있다. 따라서, 국내 실정에 맞는 구조물의 보강 방안에 대한 연구는 필요하며, 본 연구에서 제안한 FRP-UHPPC로 복합 보강된 휨부재에 대한 연구가 필요하다. 본 연구를 통하여 아래와 같은 기대성과 및 파급 효과가 기대 된다.

<u>노후 도심재생을 위한 핵심기술로 활용</u>

2014년 400만호로 예상되는 노후 공동주택 리모델링의 핵심요소인 구조안전성 확보를통하여 리모델링 시장 활성화에 기여하고, 고성능・고효율・저비용 리모델링 핵심기술 개발로 수직 증축형 리모델링과 같이 높은 수준의 구조안전성이 필요한 건축물도 효과적으로 보강이 가능해질 전망이다.

<u>자원관리의 효율성</u>

휨부재의 성능 향상 및 보강을 위한 기술 개발을 통하여 기존 건축물의 철거와 재건축에 따른 막대한 건설폐기물 발생 및 환경개선 비용을 절감하고 공용수명을 연장함으로써 국가적 차원에서 자원관리의 효율성이 크게 증대될 것으로 판단된다. 또한, 건물 수명연장을 통해 부동산 가치를 확보할 수 있을 것으로 생각된다.

<u>층간소음 저감 효과</u>

2002. 6월 전국민의 소음 인식도 여론조사 결과 소음 진동이 가장 시급히 개선되어야 할 환경문제로 나타났으며, 1986년부터 1999년까지 실시된 공동주택의 소음실태에 관한 각종 설문조사 결과 공동주택 거주자들은 “아이들이 뛰노는 소리(중량충격음)” 에 대하여 가장 많은 불만을 갖는 것으로 조사되었다. 이와 같이 공동주택 거주자의 삶의 질에 대해 가장 큰 영향 요소는 층간소음으로, 국민의 삶의 질 향상을 목표로 거주환경 개선을 위해서는 층간소음 개선이 추진되어 왔다.

현재는 경량충격음 58dB, 중량충격음 50dB 이하가 되도록 주택건설기준이 제정 되었으며, 표준 바닥 구조 사용 시 슬라브 두께는 벽식구조의 경우 210mm, 무량판구조의 경우 180mm, 라멘구조의 경우 150mm를 사용하도록 하고 있다. 하지만 추가적으로 이러한 기준을 보강하기 위한 시방 기준 및 성능기준을 개정하고 있으며, 층간 소음 저감에 대한 연구는 현재 꾸준히 수행되고 있다. 사례 연구를 보면 슬라브 및 보를 보강하는 경우 층간 소음이 저감되는 것으로 보고 되고 있다 (기존 아파트 층간소음 저감 방안 및 개선 사례, 대림건설, 2013). FRP로 기존 휨부재를 보강하는 경우, 그림 23과 같이 경량 및 중량 충격음 모두 감소하는 것을 알 수 있다. FRP-UHPC로 복합 보강하는 경우도 이와 유

사하게 충격음이 감소할 것으로 예상되며, 초강소음 저감에 도움을 줄 것으로 판단되어 연구의 가치가 있다고 판단된다.

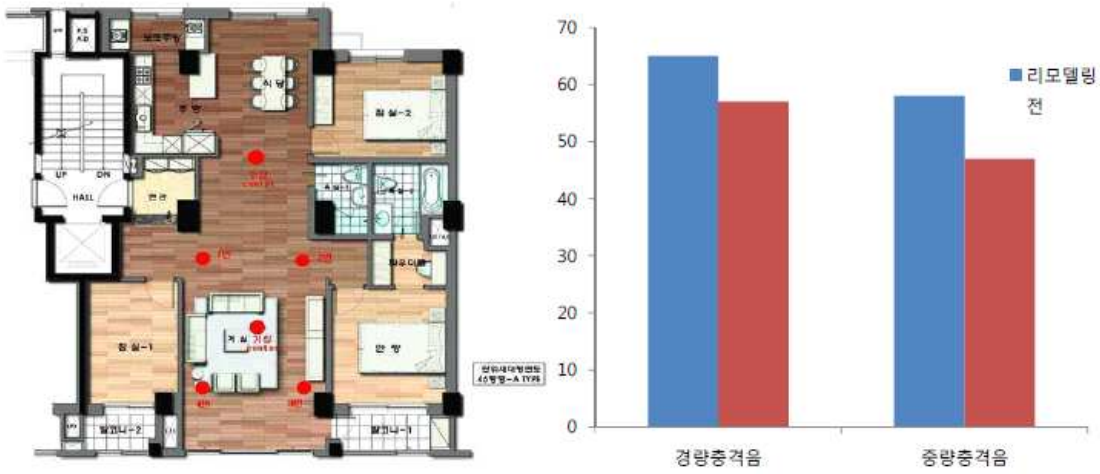


그림 23. 보강 전 후 층격음 비교.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

해당 없음

제7장. 연구개발성과의 보안등급

해당 없음

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

실험 외주로 해당 없음

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일/특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	연성파괴 유도를 위한 RC 슬래브의 휨 보강 한계	경남대학교	단독저자	한국방재학회 논문집	-	2016.04.30	단독	등재지
2	특허	건축물 천장 슬라브 구조	경남대학교	단독	대한민국	-	출원일 2016.05.13	단독	-
3	논문	RC 슬래브 휨 보강을 위한 복합보강 시스템의 정모멘트 구간에 대한 실험적 검증	경남대학교	단독저자	한국방재학회 논문집	-	2017.04.30	단독	등재지
4	논문	Flexural Strengthening of RC Slabs Using a Hybrid FRP-UHPC System Including Shear Connector	경남대학교	교신저자	Advances in Materials Science and Engineering	1.299	2017.06.02	단독	SCI(E)

제11장. 기타 사항

제12장. 참고 문헌

김정중, 노혁천, 마흐무드 레다 타하 (2012). FRP-UHPC 복합 보강기법으로 보강된 RC 슬라브의 휨 파괴를 위한 설계 조건. 한국복합신소재구조학회 논문집, 제3호 제2호, pp. 11-18.

“국내 도시재생 관련 산업의 시장규모 분석”, 도시재생사업단 상세기획보고서, 2007.

이병권 (2013) 기존 아파트 층간소음 저감 방안 및 개선 사례, 대림산업, 2013.

ABAQUS (2010). Abaqus Analysis User’s Manual version 6.10., Dassault Systèmes Simulia Corp.

ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (318R-05), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005.

Mosalam KM., Mosallam AS. Nonlinear transient analysis of reinforced concrete slab subjected to blast loading and retrofitted with CFRP composites. Composite Part B 2001;32:623-36.

Ahmed O, Gemert DV, Vandeewall L. Improved model for plate-end shear of CFRP strengthened RC beams. Cem Concr Compos 2001;23(1):3-19.

Coronado CA, Lopez MM. Modeling of FRP-concrete bond using nonlinear damage mechanics. In: Proceedings of the seventh international symposium on fiber reinforced polymer (FRP) reinforcement for concrete structures, Kansas City, MO, SP-230-22; November 6-9, 2005.

Emmons PH, Vaysburd AM, Thomas J. Strengthening concrete structure, part II. Concr Int 1998;20(4):56-60.

Fleming CJ, King GEM. The development of structural adhesives for three original uses in South Africa. RILEM International Symposium, Synthetic Resins in Building Construction, Paris 1967:75-92.

Kim JJ, Noh H-C, Reda Taha MM, Mosallam A (2013) Design limits for RC slabs strengthened with hybrid FRP-UHPC retrofit system, Composites: Part B 51, 19-27.

Lee, J., and Fenves, G. L. (1998). Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. Journal of Engineering Mechanics ASCE, 124(8), 892-900.

Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., and Oñate, E. (1989). A plastic-damage model for concrete. International Journal of Solids and Structures, 25, 299-329.

Malek AM, Saadatmanesh H, Ehsani MR. Prediction of failure load of RC beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end. Struct Eng 1998;95(2):142-52.

Meshgin P., Choi K., Reda Taha MM. Experimental and analytical investigations of creep of epoxy adhesives at the concrete-FRP interface. Int. Journal of Adhesion & Adhesives, 56; 2009:56-66.

Mosalam, A., Reda Taha, M.M., Kim J.J. and Nasr, A.(2012) Strength and ductility of RC slabs strengthened with hybrid high-performance composite retrofit system, Engineering Structures, Vol.36, No.1, 2012, pp.70-80.

Mosallam, A.S. and K.M Mosallam, Strengthening of two-way concrete slabs with FRP composite laminates. Construction and Building Materials 17 (2003) 43–54.

Mosalam KM., Mosallam AS. Nonlinear transient analysis of reinforced concrete slab subjected to blast loading and retrofitted with CFRP composites. Composite Part B 2001;32:623-36.

Nam J., Kim H, Kim S., Yi N., Kim JJ. Numerical evaluation of the retrofit effectiveness for GFRP retrofitted concrete slab subjected to blast pressure. Composite Structures 2010;92:1212-22.

Rizkalla S, Hassan T, Hassan N. Design recommendations for the use of FRP for reinforcement and strengthening of concrete structures. Prog Struct Eng Mater 2003;5(1):16–28.

Ziraba YN, Baluch MH, Basunbul IA, Sharif AM, Azad AK, Al-Sulaimani AJ. Guidelines toward the design of reinforced concrete beams with external plates. Struct Eng 1994;91(6):639–46.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

비매품/무료
93530
9 791195 001804
ISBN 979-11-950018-0-4