국토건설교통기술촉진연구사업

R&D-14CHUD-C061948-03

내화피복이 없는 층고절감형 7.5M 보의 3시간 내화성능 확보 공법 개발에 관한 연구 최종보고서

2015. 05. 11.

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 한국건설기술연구원
공동연구기관 / 서울시립대학교
공동연구기관 / 목양종합건축사무소

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 "내화피복이 없는 층고절감형 7.5M 보의 3시간 내화성능 확보 공법 개발에 관한 연구"과제의 보고서로 제출합니다.

2015. 05. 11.

주관연구기관명 : 한국건설기술연구원
주관연구책임자 : 김홍열
연 구 원 : 여인환
연 구 원 : 채승언
연 구 원 : 조범연
연 구 원 : 양승조
연 구 원 : 권기석

공동연구기관명 : 서울시립대학교
공동연구책임자 : 김강수
연 구 원 : 이득행
연 구 원 : 오재열
연 구 원 : 황진하
연 구 원 : 강 현
연 구 원 : 이은지

공동연구기관명 : 목양종합건축사사무소
공동연구책임자 : 원용호
연 구 원 : 김지은
연 구 원 : 송종욱

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>14CHUD-C061948-03</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2014.03.01.
~2015.02.09.</td><td>단 계 구 분</td><td>3단계/
3단계</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="5">국토건설교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="3">연 구 과 제 명</td><td>최 상 위
과 제 명</td><td colspan="4">내화피복이 없는 층고절감형 7.5m 보의 3시간 내화성능 확보 공법 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">단위과제명</td><td colspan="2">장스팬 슬림플로어보의
최적설계기술개발</td><td colspan="2">서울시립대학교</td></tr>
<tr><td colspan="2">장스팬 슬림플로어보의 현장적용
및 실용화 방안제시</td><td colspan="2">㈜목양종합
건축사사무소</td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>김홍열</td><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 15명
내부 : 7명
외부 : 8명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 542,000천원
기업 : 185,000천원
계 : 727,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한국건설기술연구원
화재안전연구소</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">㈜픽슨</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 : 해당사항 없음</td><td colspan="2">상대국연구기관명 : 해당사항 없음</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약</td><td>보고서면수</td><td>205</td></tr>
<tr><td colspan="6">최근 건축물이 대형화·고층화 되어감에 따라 장경간 실현과 층고절감을 동시에 만족할 수 있는 구조시스템에 대한 수요가 증대되고 있다. 이러한 동향에 따라 국내·외에서 새로운 합성구조 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만 대부분의 기존 시스템은 내화성능을 확보하기 위하여 추가적인 내화보강이 필요하다. 따라서 이 연구에서는 합성보의 충분한 강성 및 강도 확보와 함께 상·고온 조건에서 능동적 처짐제어를 할 수 있는 ‘프리스트레스가 도입된 파형웨브 합성보(이하 PS파형웨브 합성보)’를 개발하였다. 개발된 합성보의 상온 및 화재성능 평가를 위하여 실물실험과 해석적 연구를 병행하였다. 이 연구를 통하여 국내 최초로 7.5 m 경간을 갖는 무피복 합성보의 3 시간 내화성능을 확보하는 데에 성공하였으며, PS파형웨브 합성보에 적용할 수 있는 다양한 형태의 보-기둥 접합부 상세설계방안과 접합부 형태에 따르는 내화보강 방안을 제시함으로써 PS파형웨브 합성보의 실용화기술을 확보하였다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">파형웨브, 내화성능, 합성보, 프리스트레스, 장스팬, 무피복</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Corrugated Web, Fire Resistance Perfomance, Composite Beam, Prestress, Long-Span, non fire protection</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

내화피복이 없는 층고절감형 7.5m 보의 3시간 내화성능 확보 공법 개발

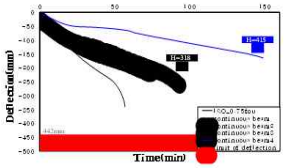
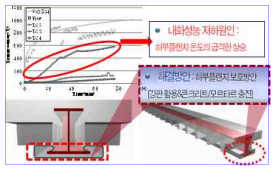
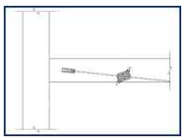
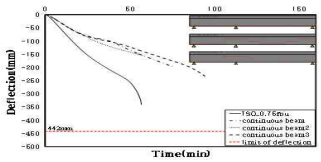
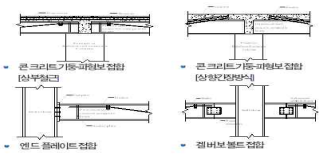
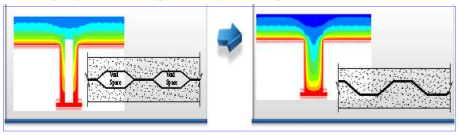
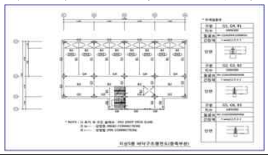
Ⅱ. 연구개발과제 개요

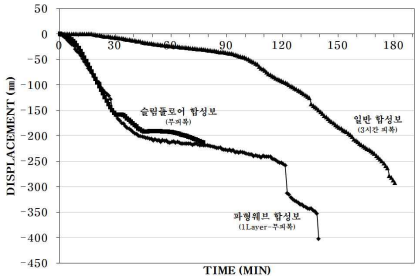
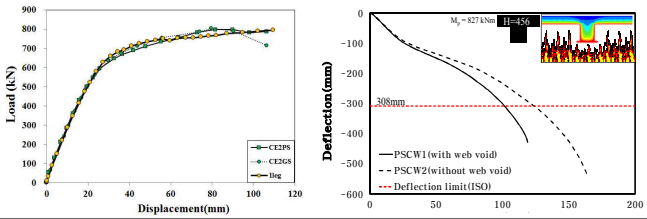
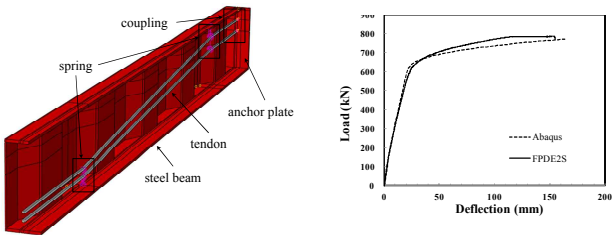
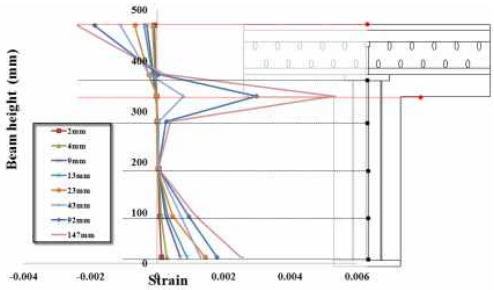
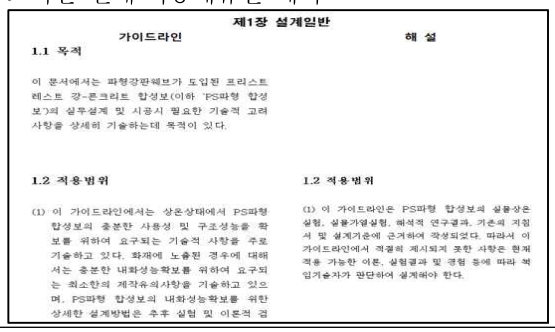
최근 건축물이 대형화, 고층화 되어감에 따라 장스팬과 층고절감에 대한 요구가 증대되고 있는 추세에서 국내·외에서 합성부재에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 그러나 층고절감에 효과적이면서 장경간 적용이 가능한 합성 부재에 대한 개발은 여전히 부족한 실정이다. 따라서 이 연구에서는 합성보의 충분한 강성 및 강도 확보와 함께 상·고온 조건에서 능동적 처짐제어를 할 수 있는 PS파형웨브 합성보를 개발하였다. 개발된 합성보의 성능평가를 위하여 실물화재성능 실험과 상온 성능실험을 실시하였으며, 해석적 연구를 병행하였다. 이 연구의 최종목표는 국내 최초로 7.5 m 경간을 갖는 무피복 합성보의 3 시간 내화성능을 확보하는 것이며, 이외에 추가적으로 PS파형웨브 합성보의 즉시현장적용을 위한 보-기둥 접합부 상세설계방안과 접합부 형태에 따르는 내화보강 방안을 제시하여 실용화기술을 확보하는 것이다.

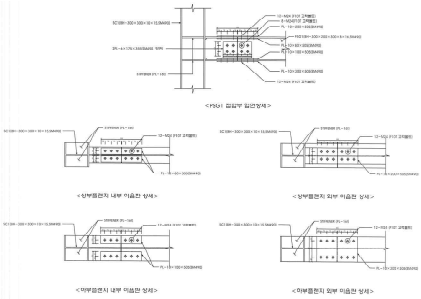
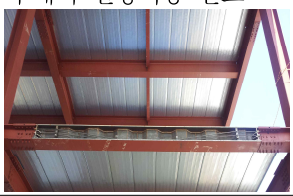
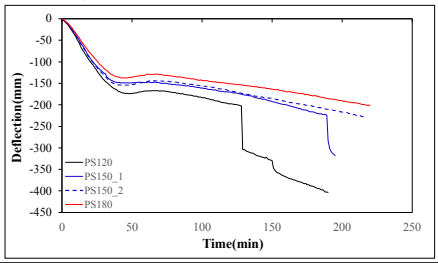
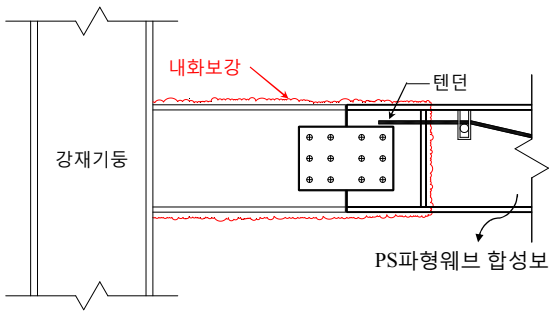
Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

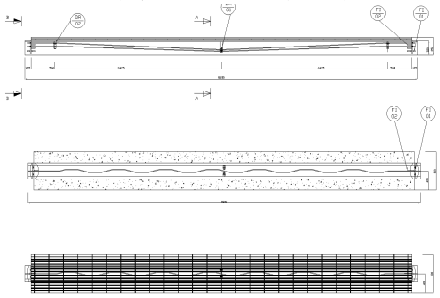
연차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	▪ 슬림플로어 보 유형별 내화성능 확보방안 제시[목표: 90분]	▪ 슬림플로어 보 내화실험[7.5M 합성보] - 대상: 일반합성보, 비대칭 슬림플로어보, PS파형웨브 합성보 ▪ PS도입에 따른 파형웨브 합성보의 내화성능 향상 효율도출 [내화성능 향상방안]
	▪ 세부구성 요소 이론적 고찰 및 시공공법 개발	▪ 적용 연구대상의 시공성 검토 및 접합부 구조성능 고찰 ▪ 프리스트레스 파형합성보의 현장적용을 위한 시공 디테일 검토 ▪ PS파형웨브 합성보의 실제 적용을 위한 연속화 시공공법 및 접합부 상세 개발
	▪ 개발기술[PS파형웨브 합성보] 설계적용	▪ PS도입 제작·시공시의 문제점 도출 [현장애로기술 제시] ▪ 개발기술 적용현장 선정 및 설계반영
2차년도	▪ 층고절감형 PS파형웨브 합성보의 무피복 내화성능 확보방안 제시[목표:120분]	▪ **녹색기술 인증 추진** ▪ PS파형웨브 합성보 내화실험 - 하중비개념도입[60%],120분성능확보 ▪ PS파형웨브 합성보 내화성능향상방안 제시
	▪ 접합부 및 파형웨브 합성보의 구조성능 해석모델 개발	▪ 개발된 연속화 시공공법에 대한 해석모델 개발 ▪ 보-기둥 접합부 거동에 대한 상세 해석 실시 ▪ FEM 해석 및 수치해석을 통한 PS파형웨브 합성보의 구조성능 해석 수행
	▪ 개발기술[PS파형웨브 합성보] 시공적용	▪ 개발기술 공공건물 시공현장 적용시 문제점 도출 ▪ 개발기술 시공현장적용 및 기술지원 ▪ **녹색기술 인증 공동추진**
3차년도	▪ 층고절감형 PS파형웨브 합성보의 무피복 내화성능확보 공법개발[목표:180분]	▪ 개발기술 실용화를 위한 내화실험 ▪ PS+파형웨브 기술도입 무피복 180분 내화성능 확보방안 제시 ▪ **내화구조 7.5M 3시간 인정추진**
	▪ 파형웨브 접합부 시공기법 검증 및 최적 접합방법 도출	▪ 접합부 상세 시공기법 도출 ▪ PS파형웨브 합성보의 내화 해석 및 검증 ▪ 현장 적용시 애로사항 해결방안 제시
	▪ 개발기술[PS파형웨브 합성보] 시공적용	▪ 개발기술 시공현장적용/기술지원 ▪ **내화구조 7.5M 3시간 인정추진**

Ⅳ. 최종 연구성과 및 적용실적

연차	주요 연구 내용	연구 결과
1차년도	▪ 슬림플로어보 내화실험[7.5M] - 대상: 일반합성보, 비대칭 슬림플로어보, PS파형웨브 합성보	• 공법별 화재거동 분석 
	▪ PS도입에 따른 파형웨브 합성보의 내화성능 향상효율도출[내화성능 향상방안]	• 내화성능 향상방안 1-보의 춤을 증가시킴으로써 내화성능 향상[0.316M→0.360M] • 내화성능 향상방안 2-합성보 하부플랜지 보호를 통한 내화성능 향상  
	▪ 적용 연구대상의 시공성 검토 및 접합부 구조성능 고찰	• PS파형웨브 합성보의 전단연결재 보강을 통한 수평전단 저항능력 향상 • 보의 측면 중앙부 양방향 긴장 정착부 개발-단부 긴장공간 생략으로 인한 시공성 향상   
	▪ PS파형웨브 합성보의 현장적용을 위한 시공디테일 검토	• PS 텐던 프로파일에 따른 거동분석 
	▪ PS파형웨브 합성보의 실제 적용을 위한 연속화 시공공법 및 접합부 상세 개발	• 실제 구조물의 적용조건을 고려한 연속기지 조건에서의 보·기둥 접합방식 검토 
	▪ PS도입 제작·시공시의 문제점 도출[현장애로기술 제시]	• 자동용접설비의 실용화를 위한 파형웨브 형상 간편화 
	▪ 개발기술적용 현장선정 및 설계반영	• 개발기술 설계반영 검토 • 개발기술의 장·단점 및 유사기술대비 경제성 도출  

<table>
<tr><td rowspan="4">2차년도</td><td>▪ 층고절감형 PS파형웨브 합성보의 무피복 내화성능 확보방안 제시[목표:120분]</td><td>• PS파형웨브 합성보 내화실험
- 138분 내화성능 확보(2차년도 목표:120분)
• 녹색기술 신청 완료
  </td></tr>
<tr><td>▪ 부재 내부 중공부위 유무에 따르는 부재 의 상온 성능 비교 및 화재 시 열전달 매커니즘에 따르는 성능차이 확인</td><td>• 중공부가 없는 PS파형웨브 합성보의 상온실험 수행을 통해 상온성능의 비교 수행
  </td></tr>
<tr><td>▪ 비선형유한요소해석 모델 개발 및 검증</td><td>• 시공절차를 반영한 비선형 유한요소 해석 모델 개발
 
• 수치해석을 통한 PS파형웨브 합성보의 구조성능 해석수행
  </td></tr>
<tr><td>▪ PS파형웨브 합성보의 현장적용을 위한 설계시공 매뉴얼 제시</td><td>• PS파형웨브 합성보의 설계 및 시공 시 유의 사항과 접합부를 고려한 설계·시공매뉴얼 제시
  </td></tr>
</table>

<table>
<tr><td rowspan="2">2차년도</td><td>▪ 개발기술[PS파형웨브 합성보] 현장적용</td><td>• 현장 적용성을 고려한 표준 접합부 상세안 제시
 
• 현장적용 디테일 검토를 통한 부재의 현장적용 완료
   </td></tr>
<tr><td rowspan="3">3차년도</td><td>▪ 층고절감형 PS파형웨브 합성보의 무피복 내화성능 확보방안 제시[목표:180분]</td><td>• 개발기술의 실물 내화실험
- 210분 내화성능확보(3차년도 목표: 180분)
• 녹색기술인증 획득
 
</td></tr>
<tr><td>▪ 접합부 내화보강 방안대안 마련</td><td>• 목표성능충족을 위한 내화보강 방안을 마련
 

-겔버보 접합부의 내화보강</td></tr>
<tr><td>▪ 개발기술[PS파형웨브 합성보] 현장적용</td><td>• 현장적용을 위한 내화구조인증 실험준비완료
  </td></tr>
</table>

Ⅴ. 연구목표 달성 및 효과

1. 기술적 효과

- 층고절감형 장경간 합성수평부재의 수요증가에 대응한 기술개발의 요구증가
- 충분한 화재저항성능(3시간 목표내화성능)을 갖는 합성수평부재의 개발 필요성 대두
- 고강도/고강성의 층고절감형 합성수평부재의 개발 필요
- 고강도 프리스트레스트 합성수평부재의 적절한 해석모델 미비
- 신기술개발에 대한 사회적 관심증가
- 고층건축물 적용시 저층부의 장경간 구조 실현 및 고층부의 층고절감을 통한 경제성 극대화, 국내 프리스트레스트 합성보 기술의 선진화 발판마련 및 구조 해석 기술의 발전

2. 사회·경제적 효과

- 금융비상승으로 인한 공기단축공법의 요구 증가
- 무지주 또는 최소한의 가설재 사용으로 인한 공기단축 및 철골부재의 효율적 사용을 통한 강재량 절감
- 재료 및 가설재의 절감을 통한 환경침해요인 완화 및 경제성 극대화 필요
- 고층화의 가속화를 통한 친환경적 공간확보 효과
- 층고절감을 통한 공간의 효율적인 사용 및 저층부의 녹색공간 확보증가

Ⅵ. 연구성과 활용계획

- 성능검증이 완료된 PS파형웨브 합성보의 건설 신기술 추진을 통하여 민간기업으로 기술이전 및 연구 성과의 확산이 가능함.
- 기존 합성구조의 경우 하부 플렌지에 내화피복을 적용해야만 법정요구내화시간인 3시간을 만족할 수 있지만, 제안된 PS파형웨브 합성보는 무피복으로 법정요구내화시간을 만족할 수 있으므로 경제적인 화재저항 설계기술로 활용이 가능함.

SUMMARY

Ⅰ. Title

The Development Method of Fire Resistance Structure for non-coating of Slim Floor Long Span Beam

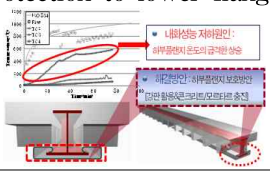
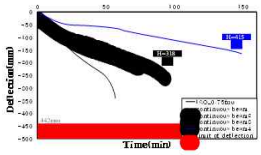
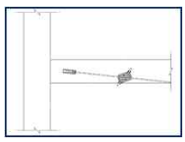
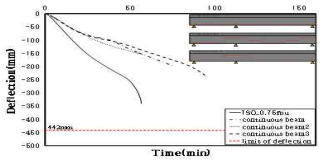
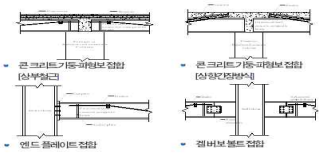
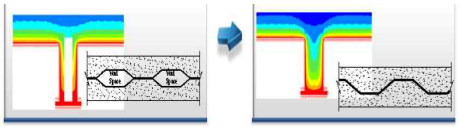
Ⅱ. Research and Development Project Overview

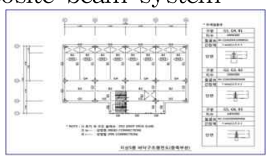
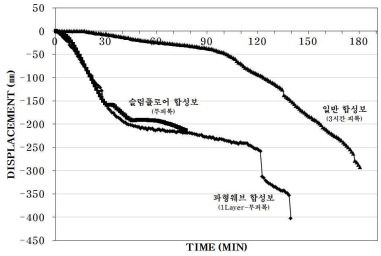
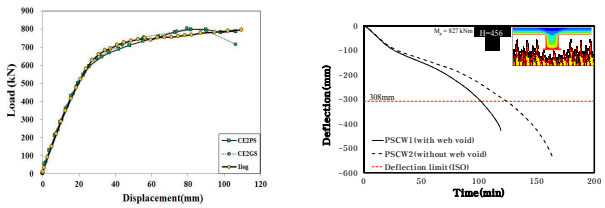
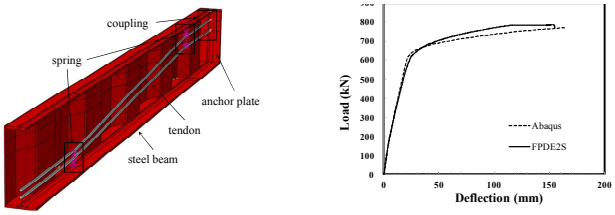
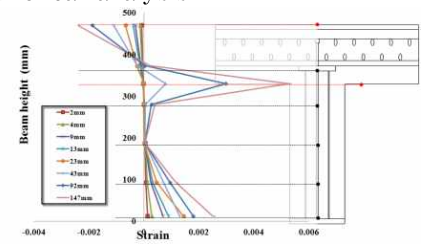
In recent years, the demands for the long-span structures and the story height savings have increased as the building structures become larger and taller, and thus many research efforts on new composite beams are still being made. However, there is still lack of effective composite beam systems, which can realize both story height reduction and long-span structures. This study, therefore, aimed to develop the corrugated webbed prestressed (CWPS) composite beam system with the sufficient structural performances and good deflection control capability under room temperatures and on fire events. The full-scale fire tests and loading tests at room temperature have been conducted to evaluate the performances of developed CWPS composite members, and the analytical studies were also carried out using the nonlinear finite element analysis program. The final goal of this research program is to secure 3 hour fire resistance performance of the CWPS composite beam, and development of the simple design details of beam-column connections for practical applications.

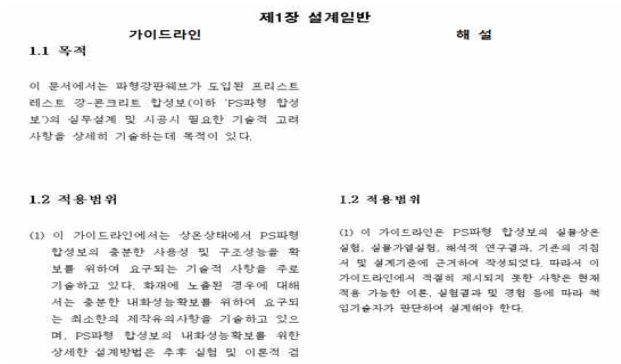
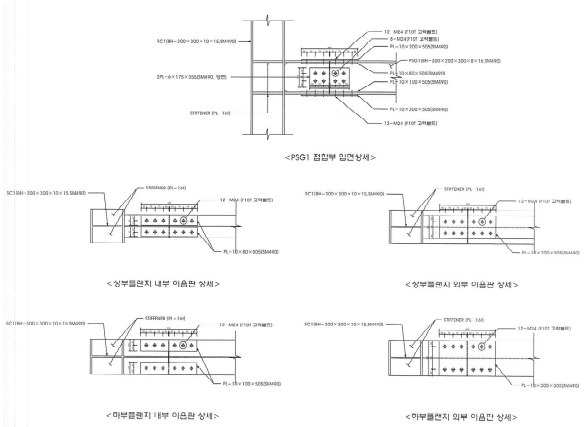
III. Content and Scope of Research and Development

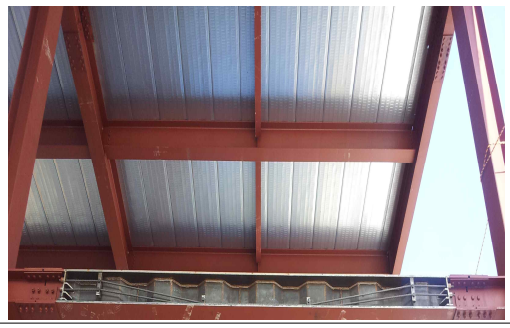
Year	Research Objective	Key Research Content
Year 1	▪ Presenting methods to ensure fire resistance performance according to various types of slim-floor beams [Target: 90 min.]	▪ Slim-floor beam fire resistance experiments [7.5M composite beam] - Target: general composite beams, asymmetric slim floor beams, CWPS composite beams ▪ Detemining fire resistance performance improvement efficiency of slim-floor beams due to PS introduction [fire resistance performance improvement method]
	▪ Theoretical review of specific components and development of construction methods	▪ Review on constructability of proposed composite beam system and structural performance of beam-column connections ▪ Review on construction details for field applications of CWPS composite beams ▪ Development of continuous construction method for practical applications of CWPS composite beam and its beam-column connections
	▪ Design applications for developed technology [CWPS composite beam]	▪ Review of difficulties in fabrication of CWPS composite structure [Providing solutions for difficulties of field applications] ▪ Selecting sites to apply CWPS composite beam and actual design application
Year 2	▪ Presenting the method to ensure fire resistance performance of CWPS composite beam with no cover [target: 120 min.]	▪ **Promoting toward green technology certification** ▪ Fire resistance performance tests for CWPS composite beams - load ratio [60%] and target fire-resisting time [120 min.] ▪ Presenting fire resistance performance improvement method for slim-floor beams
	▪ Development of analytic model for structural performance evaluation of corrugated composite beams and their connections	▪ Development of analytic model of developed continuous construction method ▪ Detailed analysis of behaviors of beam-column connections ▪ Structural performance analysis of PS corrugated composite beams through FEM analysis and numerical analysis
	▪ Construction applications for developed technology [CWPS composite beam]	▪ Review for applications of developed CWPS composite beam system into actual public building construction ▪ Application of developed CWPS composite beam system to actual construction site and providing technical support ▪ **Joint promotion for green technology certification**
Year 3	▪ Development of method to ensure fire resistance performance of CWPS composite beam with no cover [target: 180 min.]	▪ Fire test for practical application of developed CWPS composite beam system ▪ Presenting the suitable method to ensure 180 min. fire-resisting time of developed CWPS composite beam system with no fire protection ▪ **Promoting 3 hour fire-resisting time certification for full-scale specimens with 7.5 m span length**
	▪ Investigation on fabrication method of corrugated web connection and derivation of optimum connection	▪ Deriving connection details for actual construction ▪ Fire behavior analyses and detailed verifications of CWPS composite beams ▪ Providing solutions for field applications
	▪ Application of developed technology [CWPS composite beam] to construction	▪ Application of CWPS composite beam system to actual construction site and providing technical supports ▪ **Promoting 3 hour fire-resisting time certification for full-scale specimens with 7.5 m span length**

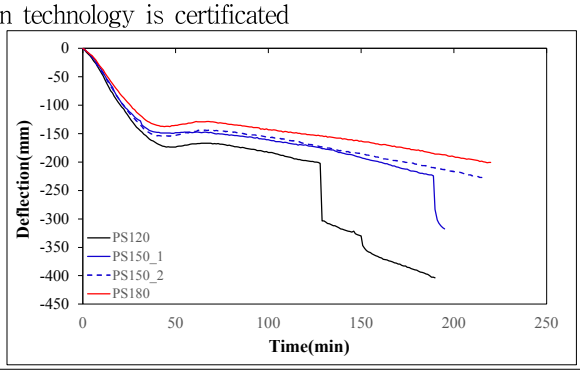
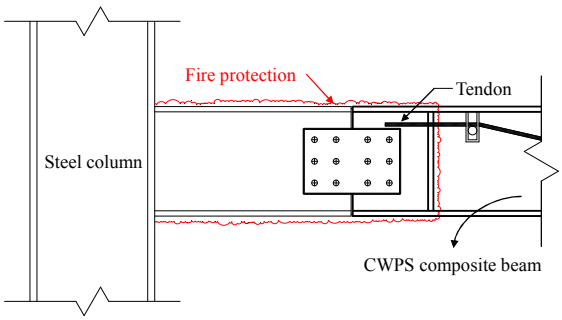
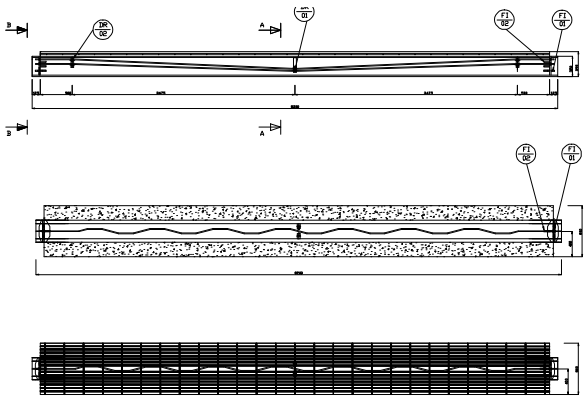
IV. Final Results and Applications

Year	Key Study Content	Study Results
Year 1	▪ Full scale fire tests [7.5M] - Targets: convnetional composite beams, asymmetric slim-floor beams, CWPS composite beams	▪ Realistic evaluations of fire behavior of various composite beam systems 
	▪ Verification of fire-resisting performance enhancements of various slim-floor beams due to prestress	▪ Fire resistance performance improvement method 1: improving fire resistance performance by increasing beam size ▪ Fire resistance performance improvement method 2: improving fire resistance performance by application of fire protection to lower flange of steel beam ▪  
	▪ Review on constructability of CWPS composite beam system and structural performance of its beam-column connections	▪ Improving horizontal shear resistance capacity by providing the shear connectors ▪ Developing bi-directional prestressing device to improve constructability   
	▪ Review on construction detail for field applications of CWPS composite beam system	▪ Parametric analysis study considering various tendon profiles 
	▪ Development of continuous construction method and connection details for practical applications of CWPS composite beam system	▪ Review of various types of beam-column connection methods considering actual conditions in construction fields 
	▪ Review of actual fabrications of CWPS composite beam [Providing solutions for difficulties of field applications]	▪ Simplifying shape of corrugated webs for application of automated welding equipment 
	▪ Actual field and design application of developed CWPS	▪ Review of actual field and design application of CWPS composite beam system

	composite beam system	▪ Deriving advantages and disadvantages of developed CWPS composite beam system  
Year 2	▪ Development of fire resistance performance with no fire protection [target: 120 min.]	▪ Fire testing for CWPS composite beams – 138 min. fire resistance performance was obtained from tests (Year 2 objective: 120 min) ▪ Application for green technology certification was completed 
	▪ Evaluation of effect of hollow area inside of CWPS composite members to their structural performances at room temperature, and investigating fire performance due to different heat transfer mechanism during fire	▪ Conducting comparisons in room temperature performance through loading tests on CWPS composite members with and without hollow web section 
	▪ Development and verification of nonlinear finite element analysis model	▪ Development of nonlinear finite element analysis model considering the construction stages  ▪ Structural performance analysis of CWPS composite beams through numerical analysis 
	▪ Development of design and construction manual for field application of CWPS composite beams	Development of design and construction manual for design and fabrications of CWPS composite beam and its beam-column connections ▪

<table>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td>

제1장 설계일반
가이드라인 해 설
1.1 목적
이 문서에서는 파형강판웨브가 도입된 프리스트레스트 강-콘크리트 합성보(이하 'PS파형 합성보')의 설무설계 및 시공시 필요한 기술적 고려사항을 상세히 기술하는데 목적이 있다.
1.2 적용범위
(1) 이 가이드라인에서는 상온상태에서 PS파형 합성보의 충분한 사용성 및 구조성능을 확보를 위하여 요구되는 기술적 사항을 주로 기술하고 있다. 화재에 노출된 경우에 대해서는 충분한 내화성능확보를 위하여 요구되는 최소한의 제작유의사항을 기술하고 있으며, PS파형 합성보의 내화성능확보를 위한 상세한 설계방법은 추후 실험 및 이론적 검
1.2 적용범위
(1) 이 가이드라인은 PS파형 합성보의 실물상은 실험, 실물가열실험, 해석적 연구결과, 기존의 지침서 및 설계기준에 근거하여 작성되었다. 따라서 이 가이드라인에서 적절히 제시되지 못한 사항은 현재 적용 가능한 이론, 실험결과 및 경험 등에 따라 책임기술자가 판단하여 설계해야 한다.
</td>
</tr>
<tr>
<td>Year 2</td>
<td>▪ Filed application of developed CWPS composite beam system</td>
<td>
▪ Development of standard connection details considering constructability

<PSG1 접합부 입면상세>
<상부플랜지 내부 이음판 상세>
<상부플랜지 외부 이음판 상세>
<하부플랜지 내부 이음판 상세>
<하부플랜지 외부 이음판 상세>
▪ Field application of CWPS composite members is completed



</td>
</tr>
<tr>
<td>Year 3</td>
<td>▪ Development of fire resistance performance with no fire</td>
<td>▪ Fire testing for CWPS composite beams
– 210 min. fire resistance performance was obtained from tests (Year 3 objective: 180 min)</td>
</tr>
</table>

	protection [target: 120 min.] [target: 180 min.]	▪ Green technology is certificated 
	▪ Preparing alternative fire protection method for beam-column connection of CWPS composite system	▪ Proper fire protection method for beam-column connection region was prepared to satisfy required fire-resisting performance.  - Fire protection method for Gerber-type beam-column connection
	▪ Field application of developed CWPS composite beam system	Test specimens to get the official certification of fire resistance from National Fire Protection Structure have been prepared, which will be very useful for actual filed application. 

Ⅴ. Achievement of Research Objectives and Impacts

1. Technical Impacts

- Increase of demands for technical development corresponding to demands on the composite beam member with long span and story height saving in domestic market.
- Needs on development of composite beam member with sufficient fire-resisting performances without fire proofing (3hr target fire rating).
- Needs on development of long-span composite beam member with high strength and stiffness
- Lack of development in story height reduction-type long-span horizontal members
- Lack of adequate analytic models for high-strength prestressed composite horizontal members
- Increased societal interest in new technology development
- Maximization of economic efficiency through long-span structure realization of lower floors and story height reduction of the upper floors when applying to high-rise buildings
- Availability of stepping stone for advancement of domestic prestressed composite beam technology and progress in the structural analysis techniques

2. Socioeconomic Impacts

- Increase in demands on fast-built method to reduce the financial costs
- Reduction of the amount of steel through the efficient use of steel members and shortened construction period by realizing non-support construction system or minimizing temporary support.
- Effects of ensuring eco-friendly space through acceleration of high-rise building construction
- Increase in efficient use of space and green space through story height reduction
- Need to reduce environmentally damaging factors and maximize economic efficiency through reducing materials and temporary materials
- Effects of ensuring eco-friendly space
- Increase in efficient use of life space and green space through story height reduction.

Ⅵ. Utilization Plans for Research Outcomes

- Transfer of developed technology to private companies and diffusion of research outcomes obtained from this research program is possible by promoting the national new technology certification of CWPS composite beam system.
- Although existing composite structures requires application of fire proofing cover in the

lower flange to meet the legally required 3 hours fire resistance time. On the other hand, the proposed CWPS composite beam method can satisfy the legally required 3 hours of fire resistance without fire protection, and thus it can be utilized as the effective and economical fire-resisting technology.

CONTENTS

Chapter 1. Research and Development Project Overview ····· 1

Section 1. Purpose of and Need for R&D ····· 1

Section 2. Definition, Scope, and Characteristics of R&D ····· 16

Section 3. Domestic/Overseas Technology Development in Related Areas ····· 24

Section 4. Status of R&D in Related Areas ····· 35

Chapter 2. Implementation and Results of Research and Development ····· 36

Section 1. Implementation Strategies and Methodology ····· 36

Section 2. Research Procedure and Content ····· 48

Chapter 3. Final Results and Applications ····· 55

Section 1. Improvement of Structural Performance ····· 55

Section 2. Connections/Construction Detail Structural Design Technology Development ·· 81

Section 3. Improvement of Fire Resistance Performance ····· 94

Section 4. Green Technology Certification ····· 136

Section 5. Approval of Fire Resistant Structure ····· 141

Section 6. Field Applications ····· 142

Chapter 4. Achievement of Research Objectives and Impacts ····· 165

Section 1. R&D Final Objective Achievement Rate ····· 165

Section 2. Technical Impact Analysis of R&D Outcomes ····· 167

Section 3. Economic Impact Analysis of R&D Outcomes ····· 168

Section 4. Corporate Utilization Plan for Research Outcomes ····· 173

Section 5. Policy Impact Analysis of R&D Outcomes ····· 191

Chapter 5. Use of Research Outcomes and Need for Further Research ····· 198

Section 1. Future Plan for Research Outcomes Use ····· 198

Section 2. Need for Further Research and Other ····· 202

References ····· 203

[Appendices]

1. Quantitative Outcomes including Publications and Patents and Qualitative Outcomes
2. Foreign Science and Technology Data Collected During Research and Development Process
3. Other (major research modifications, etc.)

목 차

제1장 연구개발과제 개요 ····· 1

제1절 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 1

제2절 연구개발의 정의, 범위, 특징 ····· 16

제3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황 ····· 24

제4절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치 ····· 35

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 36

제1절 연구수행 전략 및 방법론 ····· 36

제2절 연구수행과정 및 내용 ····· 48

제3절 연구수행결과 및 결과의 검증 방법 등 ····· 50

제3장 최종 연구성과 및 적용실적 ····· 55

제1절 구조성능 개선 ····· 55

제2절 접합부/시공 디테일 구조설계 기술개발 ····· 81

제3절 내화성능 개선 ····· 94

제4절 녹색기술 인증 ····· 136

제5절 내화구조 인정 ····· 141

제6절 현장적용 ····· 142

제4장 연구목표 달성 및 효과 ····· 165

제1절 연구개발 최종목표 달성도 ····· 165

제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석 ····· 167

제3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석 ····· 168

제4절 연구결과의 기업활용 방안 ····· 173

제5절 연구개발 성과의 정책적 효과분석 ····· 191

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성 ····· 198

제1절 연구성과 향후 활용방안 ····· 198

제2절 추가연구 필요성 등 ····· 202

참고문헌 ····· **203**

[부 록]

1. 논문, 특허 등 정량적 성과와 정성적 성과
2. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보
3. 기타사항(중요 연구 변경사항 등)

제1장 연구개발과제 개요

제1절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발 목적

○ 최근 건축물이 대형화, 고층화 되어감에 따라 장경간과 층고절감에 대한 요구가 증대되고 있다. 이러한 요구에 맞추어 최근에 국내·외에서 층고절감에 효과적인 새로운 합성 보에 대한 연구는 많이 진행되고 있지만, 층고절감에 효과적이면서 장경간 적용이 가능한 합성 보에 대한 개발은 매우 부족한 실정임.

○ 층고절감형 PS파형웨브 합성보는 철골보가 콘크리트에 매립되어 기존의 철골보 및 합성보에 비하여 내화성능 확보에 유리함. 그러나, 국내에서 프리스트레스트 부재의 내화성능에 관한 연구는 매우 드물며, 프리스트레스와 파형웨브가 동시에 도입된 합성보의 내화에 관한 연구는 전무함.

○ 따라서, 층고절감형 공법의 장스팬화를 위한 프리스트레스트와 파형웨브를 도입한 층고절감형 장스팬 PS파형웨브 합성보의 무피복 내화성능을 열전달 실험 및 FEM 해석을 통하여 검증하고자 함.

○ 또한, 개발된 부재의 해석모델에 대한 수정 보완을 통하여 실무적으로 해석 및 설계가 용이할 수 있도록 연구를 추진하고자 하며, 연속경간 구조물의 시공시 우수한 현장 적용성을 확보하기 위하여 여러 접합상세에 대한 보완/검증이 필요함.

- 본 연구는 층고절감형 장스팬 PS파형웨브 합성보가 콘크리트 매립에 의해 내포하고 있는 화재에 대한 기본적인 구조적인 성능을 실험 및 해석을 통해 검증하고, 층고절감형 장스팬 PS파형웨브 합성보의 현장적용기술을 제시하는 연구임.
- 합성 보를 활용한 합성플로어 시스템을 사용하는 관련 선진국의 경우에는 다양한 단면형상의 고강도 강재를 주요 보로 춤이 깊은 데크플레이트·중공 콘크리트 또는 H형강 등을 보조보로 구성하는 부재에 대한 내화성능 검증이 많은 부분 진행되었으나, 프리스트레스가 도입된 합성보의 내화성능 검증에 관한 연구는 국내는 물론 국외에서도 미진하며, 층고절감형 장스팬[7.5M] PS파형웨브 합성보에 관한 내화성능 검증 및 검토 역시 전무함.
- 그러므로, 기존에 축적된 내화 실험 및 해석기술을 바탕으로 층고절감형 장스팬 PS파형웨브 합성보의 열전달 특성을 검증하고, 이를 기반으로 하여 국내 실정에 적합하며 실제로 구조물에 적용될 층고절감형 장스팬 PS파형웨브 합성보의 화재조건에 대한 내화특성을 명확하게 규명해야 할 필요성이 제기됨.
- 특히, 내화성능 확보방안 제시를 통해 화재 발생 시에도 고품질의 내화성능 유지가 가능한

층고절감형 장스팬 PS파형웨브 합성보를 개발함으로서 대형 참사를 줄일 수 있는 기반을 마련하고, 화재 복구로 인한 보수·보강 공사비의 대폭적인 절감을 통해 국가 예산의 낭비를 막을 수 있음.

- 층고절감형 장스팬 PS파형웨브 합성보의 현장적용을 위하여 여러 접합 상세가 요구되며, 적합한 설계 상세 및 시공 방법을 제안하여 시공 시 우수한 현장적용성을 확보하고자 함.
- 현재 7.5M이상 스팬길이의 국가인정을 받은 합성 보 내화구조 공법은 전무함.

2. 연구개발 필요성

가. 장스팬 합성보 필요성

○ 최근 경제상황의 급격한 변화로 인하여 건축 시장의 경향 또한 최소한의 안정성이 확보된 경제적인 건축구조시스템이 요구되고 있다. 일반적으로 안정성의 증진을 위해서는 비용증가는 필연적으로 요구되기 때문에 이 두 요구는 매우 상반된 것이지만, 기존 시스템의 문제점을 획기적으로 개선한 프리스트레스트 매립형 합성보 및 긴장시스템을 통하여 구조적으로 안정적이면서도 경제적인 시스템을 실현할 수 있다. 보유기술의 필요성을 기술적 측면, 경제·산업적 측면 그리고 환경적 측면으로 나누어서 간략하게 정리하면 아래와 같다.

<표 1.1> 기술개발 필요성

구 분	필 요 성
기술적 측면	• 층고절감형 장경간 수평부재의 개발 미흡 • 고강도/고강성의 층고절감형 합성수평부재의 개발 필요 • 고강도 프리스트레스트 합성수평부재의 적절한 해석모델 미비 • 신기술개발에 대한 사회적 관심증가 • 고층건축물 적용시 저층부의 장경간 구조 실현 및 고층부의 층고절감을 통한 경제성 극대화, 국내의 프리스트레스트 합성보 기술의 선진화 발판마련 및 구조 해석 기술의 발전
경제·산업적 측면	• 금융비상승으로 인한 공기단축공법의 요구 증가 • 긴장작업의 어려움으로 인한 프리스트레스 공법의 적용성 미비 • 긴장작업의 어려움을 획기적으로 개선한 신 개념의 긴장방식 도입을 통한 시공성 향상 및 긴장 중 안정성 확보, • 무지주 또는 최소한의 가설재 사용으로 인한 공기단축 및 철골부재의 효율적 사용을 통한 강재량 절감
환경적 측면	• 재료 및 가설재의 절감을 통한 환경침해요인 완화 및 경제성 극대화 필요 • 고층화의 가속화를 통한 친환경적 공간확보 효과 • 층고절감을 통한 공간의 효율적인 사용 및 저층부의 녹색공간 확보증가

(1) 기술적 측면

○ PS파형웨브 합성보는 공기단축 및 지반굴착량 감소 · 층고감소를 통한 건축연면적 증가 · 내 외장재 저감 · 장경간 구조용이 · 시공성 향상 등의 장점을 기반으로, 층고절감 및 장경간을 충족하기 위해서 도입될 수 있음.

○ 그러나, 현재 국내 화재대응설계 및 응용기술 수준은 관련 선진국의 내화설계 기술과 비교하여 대략 30년 정도의 기술격차가 존재함에도 불구하고 국내 실정에 맞는 내화성능 평가를 수행하지 않은 상황에서 외국에서 개발된 복합 철골 합성구조에 대한 기술도입을 추진하고 있는 실정임.

○ 국내 구조물의 내화요구법규는 사양적 설계법을 기본으로 채택하고 있으며, 그 설계방식으로 고려되는 구조요소가 건물의 용도 · 크기 및 높이에 따라서 각각 다른 내화요구시간을 제시하고 있는 실정임.

○ 국내 사양적 내화설계방법으로는 그 요구된 내화시간에 대응하는 내구력을 확보하기 위하여 콘크리트의 경우에는 최소크기와 피복 깊이가 요구되며, 강구조의 경우에는 피복상태에서 최고온도가 550oC 이내로 유지되어야 함을 기본적인 거동 사양의 목표로 하고 있는 일률적인 설계지침만 존재함.

○ 그러나, 이러한 사양적 설계법은 화재시 구조물의 거동을 고려하는 것에서는 한계가 있기 때문에 발전적인 성능적 내화설계법의 적용이 필요함. 이 설계법은 최근에 도입된 강재의 단면형상계수를 고려하여 온도 산정법에 활용(KS F 2848)하려는 초기연구단계로서의 움직임은 있으나, 과학적이며 경제적인 구조물의 내화 거동과 연계된 다양한 요소들을 고려한 체계적인 연구와 전체 구조물에 대한 해석 시도는 전무한 실정임.

○ 최근 학계에서는 화재관련 연구의 필요성을 인식하고 다양한 분야에서의 접근을 시도하고 있으나, 전반적인 국내연구의 수준은 표준화재에 한정된 부재의 거동 분석 및 재료의 부분적 분석에 치중되어 있으며 발전적인 성능 분석을 적용하는 수준에는 도달하지 못하고 있음. 이는 관련분야에 대한 연구 자료 및 인적자원의 부족과 화재연구의 특성상 정부의 적극적이며 체계적인 지원이 필요함에도 불구하고 이에 대한 노력의 부재에 그 원인이 있다고 판단됨.

○ 또한, 국내의 사양적 내화설계지침에 의한 내화설계 방법만으로는 한계가 있으며, 현재까지 국내에서 산발적으로 수행된 화재관련 프로젝트는 그 사업의 방향성이 명확하지 않아서 결과물을 실무설계에 적용할 수 없으며, 그 규모면에서도 구조물의 전반적인 화재거동을 설명하기에는 많은 문제점을 내포하고 있는 실정임.

○ 이와 더불어, 국내에 적용되고 있는 사양적 내화 설계법은 화재시 구조물의 안전보장에 대한 한계성으로 인해 발전적 성능설계법으로의 활용이 필요하나, 이에 대한 과학적· 경제적 내화거동 특성분석 및 다양한 요소들을 복합적으로 고려한 체계적인 연구는 미비한 실정임.

○ 특히 추가적인 위험요소를 내포하고 있는 합성구조물 및 프리스트레스트 부재의 화재거동 및

열전달 해석을 기반으로 한 성능기반 화재대응 연구는 극히 미약한 실정이므로 이에 대한 합성구조물의 내화기술력 확보에 대한 관련연구가 필요한 시점임.

○ 이러한 국내 실정을 감안할 경우, 다양한 이점을 확보하고 있으며 미래 합성구조의 기술력 확보에 큰 비중을 차지 할 것으로 예측되는 PS파형웨브 합성보는 명확한 내화 설계지침 및 내화성능 평가 · 화재관련 연구 및 화재대응 설계기술 개발 · 응용 기술의 향상 등을 기반으로 한 성능기반 내화설계 요소기술개발의 초석을 마련하고 최적 내화향상 방안의 도출을 토대로 실제 건물구조에 적용하여야 대형 재난 참사를 미연에 방지할 수 있음.

○ PS파형웨브 합성보의 적합한 설계 상세 및 시공 방법을 제안하고, 실무에서 해석 및 설계가 용이하도록 해석기법을 수정, 보완함으로써 우수한 현장적용성을 확보하고자 함.

○ 따라서, PS파형웨브 합성보의 성능기반 내화설계 기준정립의 기초연구를 수행하고, 내화설계를 포함한 합성구조물의 설계지침의 초석을 마련하여 고층 건축물의 내화기술력 확보와 국가 경쟁력 제고 및 국민의 복지향상을 가능케 함.

(2) 경제 · 산업적 측면

○ 장경간/초고층 구조물에서는 화재 발생시 구조물붕괴 · 유독가스로 인한 대규모 인명 피해의 재난발생이 유발될 수 있으므로 이에 대한 적절한 성능기반 화재안전 기술적용을 통한 인적 · 물적 손실 및 복구비용의 최소화를 위한 요소기술개발의 필요성이 제기되고 있음.

○ 또한, 내화설계시 제반 환경요인에 대해 충분한 기반연구가 이루어져 있지 않으며, 최적 설계 방안의 도출을 위한 기술이 축적되어 있지 않아 주요 핵심기술을 선진외국에 의존하는 경우가 많기 때문에 앞으로 지속적으로 증가할 것으로 예상되는 합성구조물에 대한 비용 효율적(cost-effective)이고 이용객의 안전을 담보할 수 있는 성능기반 화재안전 최적화 내화설계기술 개발이 절실히 요구됨.

○ 초고층/장경간 건물에 적용되는 PS파형웨브 합성보의 특성으로 인해 유발할 수 있는 화재로 인한 대형 국가적 재난참사를 미연에 방지하고, 내화설계수행기반 유관산업(피복소재&생산설비&시공비용 등)의 활성화를 위한 최적 내화피복설계기술개발이 필요한 시점임.

○ 이러한 필요성으로 인해 건축물의 화재대응 안전성 확보를 위한 관련전문가들의 지속적인 연구가 수행되어 왔으나, 다양한 요소의 복합적인 상관관계로 인해 발생되는 화재의 속성상 완벽한 화재 안전성능 확보를 위한 방안제시에 기술적인 어려움이 상존하고 있음.

○ 이에 개별적인 설계특성을 내포하고 있는 합성구조물의 특수한 상황을 만족시킬 수 있는 고도화된 화재안전전략 및 성능설계요소기술을 개발하여 최적의 화재안전설계방안, 화재영향 평가기술 및 인명안전성 확보방안에 대한 고찰이 필요한 시점이라고 판단됨.

○ 성능기반 내화설계기술을 기반으로 PS파형웨브 합성보의 장점을 활용할 수 있으므로 기술경쟁력 상승으로 인한 수요가 더욱 증대될 것으로 전망됨.

○ 그러므로, 성능기반 화재안전 내화설계 요소기술의 개발을 통해 PS파형웨브 합성보 현장시공 적용성 향상 및 활용성 극대화, 보수 · 보강 공사비의 대폭적인 절감, 국가예산의 낭비억제 및 효율성 제고 및 국가 기술 경쟁력 확립에 기여할 수 있을 것으로 사료됨.

(3) 사회 · 문화적 측면

○ 최근 Windsor 타워 화재 붕괴(스페인, 2005), 대구지하철 참사 (한국, 2003), World Trade Center (미국, 2001)의 테러, 서울 홍제동 주택화재(한국, 2001)등과 같은 사고로 인해 국내 구조물의 화재안전에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이에 대한 적절한 연구가 필요하게 되었음.

○ 화재 통계 연보의 최근 10년간 국내 화재 현황(2000~2009)을 살펴보면

- 지난 10년 화재 건수는 매년 연 평균 4.3%씩 증가하여 2000년도에는 34,844건이던 화재 발생이 '09년도에는 47,318건으로 증가하여 '00년에 대비 35.8% 증가하였으며, 전체 화재중 건축물 화재가 연 평균 53.5%로 가장 큰 비율을 차지하고, 차량화재가 30.6%를 차지하여 건축물 화재에 대한 근본적인 대책 방안이 필요하다고 판단됨.
- 건축물화재는 '00년도 28,846건에서 소폭의 증가와 감소를 반복하면서 09년도에는 20,502건이 발생하였으며, 건축물화재의 수는 다소 감소하였으나 전체 화재 중 많은 부분을 차지하고 있으므로 이에 대한 개선방안으로 성능기반 건축물 화재대응 설계지침 제정 및 건축물 내화성능 향상방안에 대한 관련연구가 필요한 시점이라고 판단됨.
- 인명 피해(사망, 부상자)는 지난 10년간 연평균 2.2% 씩 증가하였으며, '09년도에는 2,711명의 인명피해가 발생하여 '00년도의 2,384명의 인명피해 대비 13.7%가 증가한 것으로 분석됨.
- 재산 피해는 연 평균 약 1,586억 원의 손실액이 발생하였으며, 연평균 9.8%의 증가율을 나타냄. 이것은 1일 당 103건 · 사망 1.4명 · 부상 5.3명 · 재산 피해 5억 원이 발생하는 것으로 화재에 의한 국가적 경제 손실이 매우 큰 것으로 분석되며, 이에 대한 범국가적 대책마련이 시급하다고 판단됨.

<표 1.2> 최근 10년간 원인별 화재 현황

구 분	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	증감율
총화재	34,844	36,169	32,966	31,372	32,737	32,340	31,778	47,882	49,631	47,318	4.6%
건축물	28,846	30,078	27,102	25,235	26,620	26,370	25,773	20,955	22,268	20,502	0.5%
차량	5,871	5,973	5,794	6,049	6,012	5,884	5,931	6,220	6,449	5,983	0.3%
선박	127	117	70	88	103	86	74	129	122	137	5.0%
항공기		1			2				5	3	
기타	8,828	9,759	8,838	7,361	8,336	8,363	5,000	20,578	20,787	20,693	30.0%

○ 또한, 인명 및 재산피해는 꾸준히 증가하여 최근 10년간 매년 4.3%의 증가율을 보이는데 이는 고층 빌딩의 아파트나 오피스에서의 사고가 증가하기 때문으로 판단됨.

○ 대형화재와 일반 화재를 비교했을 때 빈도에 비해 대형화재가 상당히 높은 피해규모를 보이므로, 대형화재의 발생가능성이 잠재되어 있는 장경간/고층빌딩 건물과 같은 대형 구조물에 대한 방재안전의 필요성이 부각되므로 장경간 및 초고층건물에 적용되는 PS파형웨브 합성보를 국내 구조물에 적용하기 위해서는 국내 현실에 적합한 내화성능에 관한 연구가 필요함.

○ 선진외국의 경우 최근 10년간 화재피해의 증가는 정지하고 있으며, 특히 미국의 경우에는 1991년대에 비하여 최근 11.7%의 화재피해 감소 추세에 있음. 또한 선진각국에서는 건축물 시설화재를 국가적 재난방지 차원에서 화재안전평가, 설계 및 제도를 주요 내용으로 하는 시설물 화재안전시스템을 구축 함.

○ 대규모 화재사고를 발생시키는 고층빌딩에서의 화재발생 및 사상자 수를 살펴보면 화재발생빈도는 건축물 수 등의 물리적인 양에 비례하지만 방재시스템의 질을 평가할 수 있는 사상자/화재사건은 화재안전 선진국에 비해 현저히 낮음.

○ 화재발생 자체를 줄이는 목적이외에도 발생된 화재의 피해를 최소화하기 위하여 안전하고 경제적인 화재안전시스템을 구축함으로서 지속적으로 증가하고 있는 화재피해로부터 국민의 생명과 재산을 효과적으로 예방, 조치할 수 있는 화재안전기술 확보가 필요함.

○ 이러한 화재안전 기술 확보를 기반으로 다양한 강점을 갖고 있는 합성구조인 합성 플로어 시스템의 상용화 및 경제성 · 기술력 확보가 가능하며, 화재로 인한 대형 재난참사 및 경제적 손실의 제어가 가능할 것으로 판단된다.

<표 1.3> 최근 10년간 경제적 화재피해 현황

구 분	건 수	인명피해(명)		재산피해 (백만원)
		사 망	부 상	
연평균	37,704	502	1,952	183,768
2009	47,318	409	2,302	251,853
2008	49,631	468	2,248	251,853
2007	47,882	424	2,035	248,417
2006	31,778	446	1,734	150,792
2005	32,340	505	1,837	171,374
2004	32,737	484	1,820	146,634
2003	31,372	744	2,089	151,590
2002	32,966	491	1,744	143,447
2001	36,169	516	1,860	169,750
2000	34,844	531	1,853	151,972
증감율	4.3%	-0.6%	1.6%	9.8%

<표 1.4> 고층건물 화재사건 발생수와 사상자 수('60-'93)

국 가	화재 발생건수	사상자 수	평균 화재발생빈도 당 사상자 수
미국	226	590	2.6
캐나다	11	26	2.4
멕시코	2	4	2.0
푸에르토리코	1	96	96.0
브라질	3	202	67.3
콜롬비아	1	4	4.0
프랑스	1	2	2.0
필리핀	1	10	10.0
일본	1	32	32.0
대한민국	2	201	100.5
인디아	1	1	1.0

○ 화재관련 선진국들은 최근 30여 년간 발전된 화재설계 기술에 관한 연구기반을 착실히 닦아 놓고 있으나, 국내에서는 이러한 연구기반이 거의 전무한 상태임. 학계·산업계에서는 아직도 제한적인 기초연구 수행 단계이며, 화재 관련 설계 규정 역시 미비한 상황임. 지난 10년간 국내 화재 발생건수는 연평균 4.3% 증가했으며 화재로 인한 피해역시 증가하는 추세이나, 미국·일본 등과 같은 화재에 관한 연구를 많이 한 선진국들의 경우 같은 기간 동안 오히려 화재피해 증가율이 정지한 실정임.

○ 그러므로, 국내에 각종 건축물의 화재안전 설계기술의 보급과 활용을 통해 국가 주요 건축물의 대형화재 사고예방 및 경제적 손실의 저감을 가능하게 할 필요가 있음. 화재피해 규모를 대략 30%로 감소 할 경우, 사망자(123명/년)와 피해액 (756억원/년)의 저감 효과가 부가적으로 발생할 것으로 추정됨.

(가) 국내 대규모 화재 피해 사례

① 대연각 화재

- 1971년 12월 25일 서울시 중구 충무로 대연각 호텔에서 발생.
- 인명피해 229명(사망 163, 부상 66), 재산피해 약 8억원 추정.
- 사고원인은 2층 커피숍 주방에서의 프로판가스 사용 부주의로 추정됨.
- 대형 참사의 원인분석 중 소방시설 (스프링쿨러 설비) 미설치가 크게 부각된 이후 대형건축물에서 스프링클러 설비의 설치가 의무화 됨.



[그림 1.1] 대연각 호텔 화재

② 씨랜드 화재

- 1999년 6월 30일 새벽에 경기도 화성군 씨랜드 수련원에서 발생.
- 30인의 인명피해(사망 23, 부상 7)와 약 7천만원의 재산피해.
- 모기향불이 인근 가연성물질(가스라이터, 종이, 의류)에 접촉되면서 화재발생.
- 주거시설로서는 인정할 수 없는 가건물 형태 건축물에서의 화재로 샌드위치 패널 등에서 발생한 유독가스에 의해 매우 큰 인명피해를 당함. 소방시설 전무.



[그림 1.2] 씨랜드 수련원 화재

③ 인천 호프집 화재

- 1999년 10월 30일 18:52분경 인천시 중구 인현동 상가에서 발생.
- 인명 피해 137명 (사망 57, 부상 80), 재산 피해 6천 4백만원.
- 화재 원인은 노래방에서 화기취급 부주의로 신나와 유증기가 인화되어 내부 장식재(우레탄 폼)에 연소되어 2층 호프집과 3층 당구장으로 화재가 확산되면서 화재발생.



[그림 1.3] 인천호프집 화재 후 전경

④ 대구 지하철 화재

- 2003년 2월 18에 대구 중앙로 지하철에서 발화함.
- 인명 피해 340명 (사망 192, 부상 148)
- 공공시설에서 발생한 방화사고로 전체 화재방지 및 진압 시스템에 총
- 괄적인 문제를 제기된 사건임.
- 재난대비 방재 시스템의 효율성 부재 및 화재안전 불감증으로 인해 국민의 공공건물에 대한 신인도가 현격히 저하된 사례임.
- 관련 유관기관 및 국가적 차원의 화재방재에 관한 연구지원이 필요하며, 성능적 개념의 내화설계기술 개발이 필요하다고 판단됨.



[그림 1.4] 화재 발생 후 전동차내부



[그림 1.5] 화재 중 연기 발산 전경

⑤ 고시원 방화 화재

- 2008년 7월 20일에 서울 용인시 고시원에서 방화 인한 화재.
- 인명 피해 13명 (사망 7명, 부상 6명)
- 화재비상벨이 울렸으나 워낙 불길이 거세고 유독가스가 많이 남.
- 고시원 구조의 특성상 환기가 제대로 되지않고 대피로가 좁아 화재가 나면 작은 불에도 많은 인명피해를 줌.



[그림 1.6] 고시원 방화 화재

⑥ 부산 실내사격장 화재

- 2009년 11월 4에 부산 부산 실내사격장에서 화재.
- 일본인 관광객 등 10명이 사망. 중경상 6명 인명피해를 냄.
- 실내 실탄사격장이라 사격시 발생할수 있는 화염이나 유탄, 파편에 의해 발화돼 잔류화약과 흡음제 등 가연물질이 옮겨붙으면서 급격하게 확산됨.



[그림 1.7] 화재 후 실내사격장

⑦ 해운대 주상복합아파트 화재

- 2010년 10월 1에 부산 해운대 주상복합 아파트 202세대 화재.
- 소방관 등 5명이 가벼운 상처를 입었고 54억8천만원(소방서 추산)에 이르는 재산피해를 낸 것으로 집계.
- 화재는 임의로 설치된 전기콘센트에서 불꽃이 튀면서 일어남.
- 화재 당시 외벽 알루미늄 패널 안 폴리에틸렌이 녹아내리면서 4층에서 발생한 불이 외벽을 타고 10분도 안 돼 38층까지 올라감.



[그림 1.8] 해운대 주상복합아트 화재

(나) 국외 주요 화재 피해 사례

① 미국 MGM 호텔 화재

- 1980년 11월 21일, 미국 라스베가스의 MGM호텔에서 발생, 사망자는 85명에 달함.
- 화재 원인은 1층 식당에서 전기합선으로 발화되어 화염은 상층으로 확대되지는 않았으나 연기 및 유독가스의 확산으로 인하여 상층부에서 보다 큰 인명피해 발생.



[그림 1.9] MGM 호텔 화재 상황

② 미국 WTC 테러 화재 (1차 폭탄테러)

- 1993년 뉴욕 미국 WTC 쌍둥이 빌딩의 타워1
- 인명 피해 사상자 1000여명 (사망 6명)
- 타워1의 지하주차장에서 450Kg의 다이너마이트를 이용한 폭탄테러로 수평 연쇄붕괴를 목적으로 하였으나 부분적 폭파에 그침. 가압방연 시스템이 작동하지 않아 연기가 최상층까지 퍼짐.



[그림 1.10] 건물 붕괴 후 수집된 철골 잔해

③ 제2차 비행기 테러에 의한 화재

- 2001년 9월 11일, 뉴욕의 미국 WTC 쌍둥이 빌딩의 타워1과 타워 2
- 인명피해 사망자4452명, 재산피해 1,050억 달러
- 타워 1과 타워 2에 18분 간격으로 비행기가 충 돌하여 화재발생. 약1시간 이후에 두건물이 모두 붕괴되었는데, 사고 조사 후 건물화재에 의한 빌딩 구조물의 붕괴가 주원인으로 밝혀졌으며, WTC 외의 주변건물 붕괴도 동반됨.



[그림 1.11] 테러 직후 화재 상황

④ 스페인 windsor 타워 화재

- 마드리드의 주요 고층 빌딩(32층)인 windsor tower의 21층에서 2005년 2월 12일 화재 발생하여 2층이상의 전층에 화재확산.
- 내화피복은 16층 이하에서 적용되었으며, 스프링클러는 설치되어 있지 못한 상황에서 17층 이상의 구조부중 외부 슬라브는 화재로 인하여 완전 붕괴됨.
- 16층 이하에서 강재부에 피복이 되어 있지 못한 9층에서는 외부 강재기둥의 국부좌굴이 목격됨.



[그림 1.12] Windsor Tower전경



[그림 1.13] windsor tower 화재상황

⑤ 5성급 메리어트호텔 화재

- 중국 랴오닝성 선양의 5성급 메리어트호텔에서 2011년 3월 3일 화재 발생하여 3개 동 중 2개 동의 내부가 전소.
- 호텔 외벽에 걸어 두었던 현수막에 옮겨 붙으면서 화재로 이어짐.



[그림 1.14] 5성급 호텔 화재

나. 내화성능확보 필요성

○ 재료의 열적 특성에 따라 철골부재의 열 전도율은 콘크리트부재의 열 전도율에 비해 약 50배 정도 높은 값을 갖는다. 이러한 열적특성만으로도 일반적인 철골부재의 내화성능이 콘크리트부재에 비해 상당히 취약하다는 것을 알 수 있다. 철골부재의 경우 부재내부 온도가 약 600℃ 이상이 되면 부재의 성능이 약 1/3이하로 저하되어 구조부재로서의 기능을 상실하게 된다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 철골부재는 재료의 열적특성으로 인하여 외부의 열이 부재내부로 전달되는 속도가 상당히 빠르기 때문에 화재에 노출 시 부재의 성능저하가 매우 급격히 발생하게 될 것이다.

○ 콘크리트는 철골에 비하여 매우 낮은 열 전도률을 갖지만 고강도 콘크리트는 높은 밀도로 인하여 고온의 화재에 노출 시 폭열 현상을 일으키게 된다. 콘크리트 구성 물질 중 수분은 수화작용에서 가장 중요한 재료로 사용이 되고 있으나 이러한 수분은 수화반응으로 이루어진 결합수와 수화반응 이후에 남은 자유수가 존재하게 된다. 이러한 수분이 고온에 영향을 받아 증발하게 되고, 고밀도 상태에서의 콘크리트 내부 수증기압으로 인해 폭열이 발생하게 되는 것이다. 폭열이 발생하게 되면 부재의 단면이 손실되어 강성저하와 부재 내부 철근의 화재 직접노출 등이 야기되어 부재의 성능저하가 급격히 발생할 수 있다. 단일 철골부재 및 철근콘크리트 부재를 사용한 부재에 비해 PS파형웨브 합성보의 경우 열 전도율이 철골부재에 상대적으로 매우 낮은 콘크리트를 이용하여 큰 내화피복효과를 얻을 수 있다.

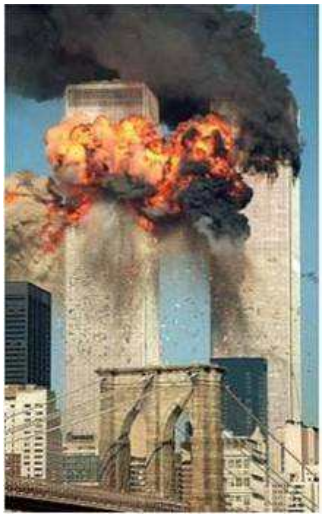
○ 대형화재에 노출된 건축물은 화해를 입어 부재의 내력이 저하되고 이로 인해 붕괴를 일으킬 수 있다. 이는 2001년 9월 11일 테러에 의해 건물내부에 큰 화재가 발생하고 붕괴된 월드트레이드 센터(WTC)의 사례를 봐도 알 수 있다. 사고가 발생한 후 조사에 따르면 WTC는 비행기의 연료로 인하여 강한 화염으로 화해를 입었으며 그 화염에 의해 골조가 약화 되어 붕괴된 것으로 밝혀졌다.

○ 그림 1.15의 (c)와 (d)에서 붕괴된 WTC의 북쪽타워의 튜브구조 시스템을 보여주고 있다. 타워의 외부는 256개의 각형 강관 기둥이 배치되고 내부에 코어가 놓인 시스템으로 강한 화염에 의해 외부의 철골조가 약화되어 붕괴의 원인이 되었다.

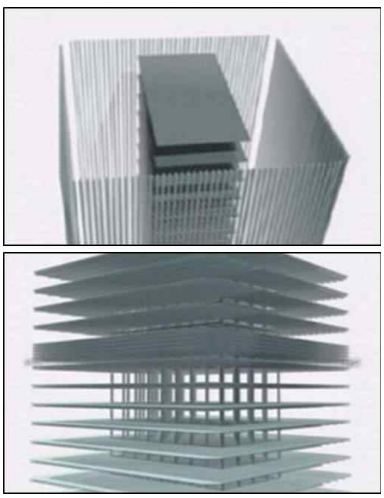
○ 이와 같이 화해로 인한 건물의 붕괴는 수많은 경제적 손실을 일으킬 수 있으며 특히 인적피해는 최소화 할 필요가 있다. 특히 최근 건축물의 설계 및 시공의 동향을 살펴보았을 때 장스팬의 대형 고층건물이 복합용도로서 인근 건축물과 인접하여 건설되고 있으며, 이러한 건축물에서의 대형 화재는 연쇄붕괴를 일으킬 수 있어 WTC의 사고피해 이상의 결과를 초래 할 수 있다. 이와 같은 사항을 고려 할 때 건축물에 활용되는 모든 부재는 내화성능 설계를 통해 내화성능 인증을 받음으로서 건축물이 대규모의 화재에 노출됐을 경우 구조체의 붕괴에 대한 건물내부의 실사용자들과 인근 건축물의 사용자들까지 모두 대피 할 수 있는 시간을 확보해야 한다. PS파형웨브 합성보 역시 앞서 소개된 구조성능과 함께 내화성능의 확보가 필요하며, 이에 따라 PS파형웨브 합성보의 내화성능 검증 및 내화설계법에 관한 연구가 절대적으로 필요하다.



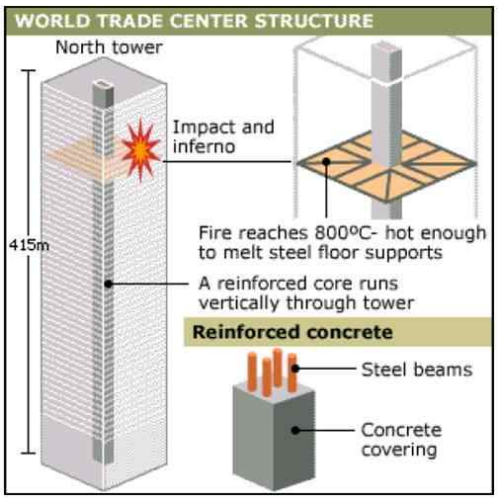
(a) 월드트레이드센터(WTC) 전경



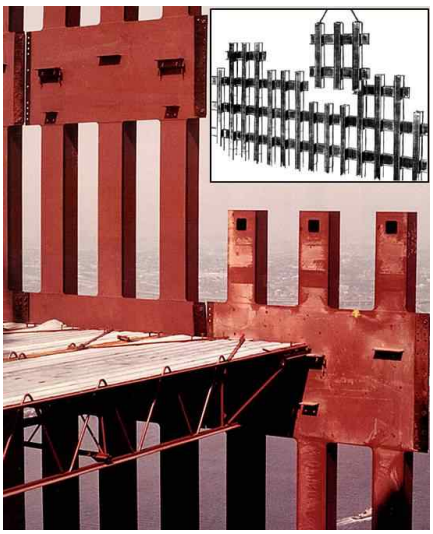
(b) 비행기 충돌 및 연료로 인한 화재



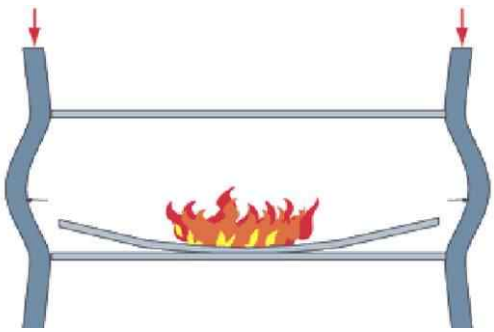
(c) 각형강관기둥이 배치된 튜브구조(WTC)



(d) 슬래브 및 코어



(e) 프리패브식 강철 격자구조 입면(WTC)



(f) 붕괴원인:화해로 인한 철골조의 연약화

[그림 1.15] 월드트레이드센터(WTC) 구조형식 및 붕괴원인

제2절 연구개발의 정의, 범위, 특징

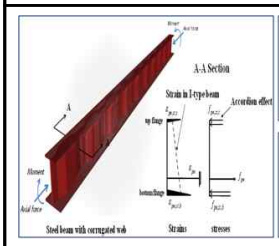
1. 연구개발 정의

○ 최근 건축물이 대형화, 고층화 되어감에 따라 장스팬과 층고절감에 대한 요구가 증대되고 있는 추세임[민간기업의 해외수출 경쟁력 확보를 위한 신공법 필요].

☞ 따라서, 철골 보와 철근콘크리트 보의 단점을 보완하고 혁신적인 형태의 웨브를 도입하여 프리스트레스 도입효율을 향상시킴으로써 구조성능 및 장스팬 무피복이 가능한 프리스트레스트 매립형 합성보 시스템개발.



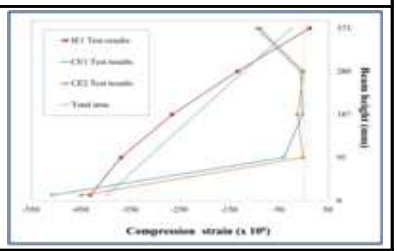
층고절감형 장스팬 합성보 내화성능확보 기술정의[PS & 파형 웨브]



[아코디언효과 및 비대칭 하중 저항성]



[콘크리트 & 철골 합성효과]



[프리스트레스 도입 효율향상]

○ 건축시장에서 요구되고 있는 장경간, 층고절감, 시공 중의 안정성 확보 및 비용절감 등을 만족시킬 수 있을 것으로 기대되므로 즉시 실용화가 가능하므로 이에 대한 구체적인 방안 모색이 필요함.

○ 또한 파형보가 콘크리트 내부에 매립되므로, 기존의 철골보 및 층고절감형 합성보에 비하여 우수한 내화성능이 기대되나, 실질적인 내화성능검증이 필요함.

2. 연구개발 범위

○ 본 연구에서는 국내 최초로 진행되는 7.5M스팬의 무피복 장스팬 합성보의 우수한 내화성능을 확보할 수 있는 공법을 개발하고 이를 FEM해석으로서 예측할 수 있는 해석 모델의 개발을 수행하고자 한다. 따라서 효율적인 연구 수행을 위해 각 연구연차별로 주관 및 공동 연구기관에서의 연구 수행에 대한 역할 분담을 통해 연구의 내용과 범위를 설정하여 연구를 진행하고자 한다.

- 1차년도: 기존의 슬림플로어 보와 일반 합성보, 그리고 본 연구의 대상 부재인 PS파형웨브 합성보가 목표 내화성능 시간 90분을 확보 할 수 있는 방안을 두고 부재 제작 및 실험 수행을 실시한다. 또한 대상 부재의 현장 적용을 위해 연속화 시공공법 및 접합부의 상세를 개발하고 적용대상 현장에 직접적인 설계적용을 실시하여 실제 시공시의 문제점을 도출하여 애로사항을 제시한다.
- 2차년도: 대상 부재 및 기존의 슬림플로어 보의 목표 내화성능 시간 120분 확보를 위한 내화성능 향상 방안을 제시하여 내화실험을 수행하고, 1차년도에 개발된 연속화 공법 및 접합부 상세에 대한 FEM해석 모델을 개발한다. 이러한 해석 모델의 개발은 그 합리성이 검증이 된다면 특정 부재의 내화성능을 보다 신속하고 경제적으로 예측해볼 수가 있을 것이다. 또한 개발 기술(PS파형웨브 합성보)을 직접 시공현장에 적용하기 위해 접합부 상세와 연속화 공법에 관한 기술지원을 함으로서 실제 현장적용에 따르는 개발 모델의 애로사항을 확인하고 개발 기술의 건설신기술을 도모할 수 있다.
- 3차년도: 7.5M스팬의 대상 부재를 내화구조로서 공인 3시간의 인증을 위한 내화성능 확보 공법을 개발하여 실물 실험을 수행하고 실험결과를 근거로 하여 개발된 해석모델의 해석 결과의 합리성 검증을 수행한다. 또한 접합부 상세 및 연속과 공법에 대하여 기존의 시공상의 애로사항에 대한 보완을 통해 우수한 현장 적용성을 확보 할 수 있도록 한다. 특히 실제 현장에 적용이 매우 용이하며 내화구조로서 공인 인증 3시간의 성능을 확보 하게 되면 민간 기업으로의 기술이전과 동시에 내화성능설계를 위한 발판을 마련할 수 있을 것으로 사료된다.

가. 대상공법 개발연혁/연구범위/파급효과

○ 대상공법연혁: 슬림플로어 합성보에 관한 연구는 2002년부터 시작되었으며, 2002년~2005년까지 민간기업 주도로 층고절감형 공법[슬림플로어]에 관한 기반연구가 진행되었음. 그 이후 2005년~2009년까지 국가 R&D로 4.5M기준 스팬에서의 내화성능에 관한 연구가 진행되었으며, 2006년~2010년까지 층고절감형 공법의 장스팬화에 대한 연구가 국가 R&D로 병행하여 진행되었음.

○ 연구 범위: 기 진행된 연구를 토대로 층고절감형 공법의 장스팬[현장적용 요구스팬: 7.5M*]PS파형웨브 합성보에 대한 내화성능 검증 및 무 피복 장스팬 합성 보를 통한 친환경 내화구조 공법 개발에 대한 연구를 추진하고자 함.

* 합성 보의 현장적용시 콘크리트 구조대비 경제성을 확보할 수 있는 최소 스팬 길이는 7.5M 이상임[출처: 현대제철 기술마케팅팀]

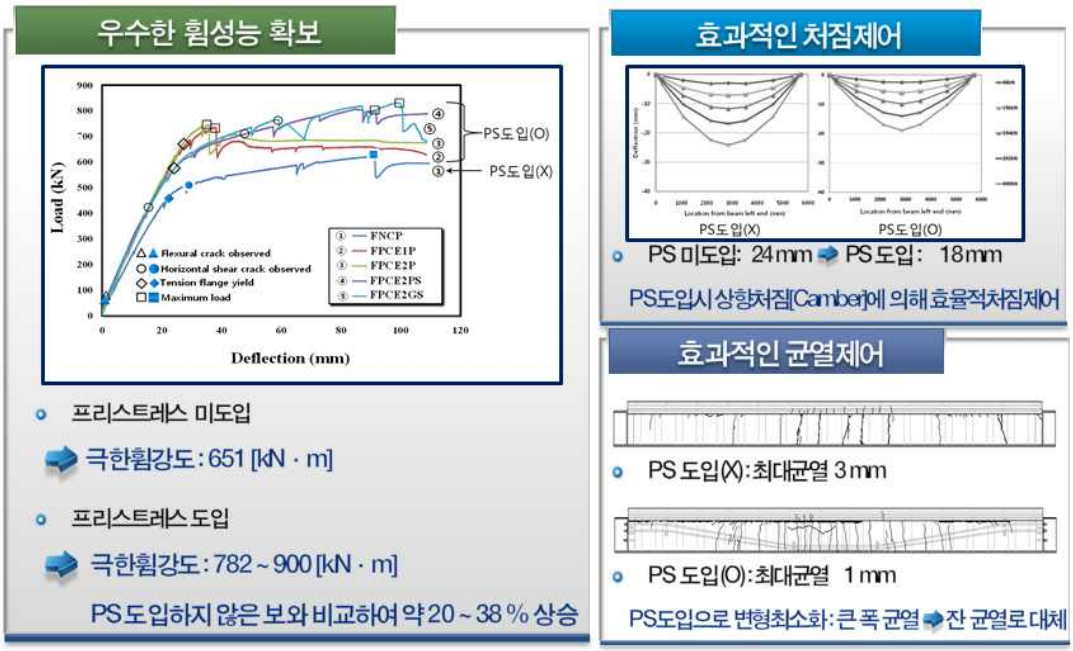
○ 파급 효과

- 실제 사용되는 스팬길이에서의 국내최초 국가인정 합성 보 내화공법제공: 현재 합성 보의 내화성능에 관한 시험성적서 및 내화구조 인정은 4.5M를 기준으로 현장에 적용되고 있음. 본 연구를 통해 국내최초로 국토부 인정조건에 부합하는 7.5M 이상의 무피복 장스팬 합성구조를 개발할 경우 합성구조의 현장적용 활성화를 기대할 수 있음.
- 층고절감형 PS파형웨브 합성보의 유형별 내화실험결과 제공: 본 연구를 통해 일반합성 보와 PS파형웨브 합성보의 화재거동을 분석할 수 있으므로, 건축 설계자들에게 층고절감이 가능한 장점을 보유한 공법을 선택적으로 사용할 수 있음.
- 장스팬 합성구조의 평가기술 및 시험 Know-HOW 축적: 기존 4.5M에서의 내화성능향상 공법에서 7.5M 장스팬조건에서의 내화성능을 평가할 수 있는 기술력을 축적함으로써 다양한 형태의 합성구조 공법의 개발을 유도할 수 있음.



3. 연구개발 특징

○ **PS도입을 통한 하중지지력 확보 기술:** 기술적 원리는 합성보에 프리스트레스를 도입하여 화재시 구조부재의 강성저하에 의한 처짐제어를 효과적으로 확보 할 수 있는 기술로서, PS도입에 따른 상온조건에서의 처짐제어 및 균열제어는 그림 1.16과 같은 PS 도입으로 인해 구조부재의 극한 휨강도는 PS를 도입하지 않는 보와 비교하여 최대 38% 이상 추가확보가 가능하며, PS 도입시의 상향처짐에 의해 효율적인 보 보부재의 처짐제어 [PS미도입 24㎜ → PS도입 18㎜]가 가능함. 또한 콘크리트 부분의 효과적인 균열제어가 가능하여 화재시 균열에 의한 열침투를 최소화 할 수 있는 장점을 보유하고 있음.



[그림 1.16] 대상공법의 PS도입을 통한 하중지지력 확보기술의 효과

○ **파형웨브를 통한 합성효과 증대기술:** 기술적 원리는 일자형 웨브를 파형형태의 웨브로 대체함으로써 철골보 상·하부 플랜지에 발생하는 비대칭 하중에 대한 안정성확보가 가능하며, 테두리 보에 적용되는 비대칭 하중에 대한 횡비틀림 좌굴 제어가 가능하기 때문에 구조적 안정성 향상 및 효율성 확보가 가능함. 또한 일자형 웨브대비 콘크리트와 철골 보의 합성면적이 중대되어 부착력을 확보할 수 있으며 웨브파형형태의 지압력 발생으로 일체성 확보가 가능함 특히 파형의 기하학적인 형상특성으로 아코디언 효과발현이 가능하여 상·하부 플렌지에 도입되는 프리스트레스의 효율을 효과적으로 증대할 수 있음. 이러한 구조적 안정성 확보 장정으로 인해 화재시에도 구조부재의 강성저하에 의한 변형을 효과적으로 제어함으로써 적은 두께의 열차단 피복재를 도포하여도 내화성능을 확보할 수 있는 기술이며, 파형웨브를 통한 구조적 안정성을 확보할 수 있는 효과는 그림 1.17과 같음.



[그림 1.17] 대상공법의 파형웨브 적용을 통한 구조적 안전성 향상효과

○ **간편 시공절차:** PS파형웨브 합성보의 내화공법은 프리스트레스력을 통한 처짐제어와 파형웨브 적용을 통한 합성효과 증대로 구성되며, 대상 공법의 시공절차를 요약하면 그림 1.18과 같음.

① 합성 보 제작 및 설치 : 파형 보에 PS도입 후 기둥부재에 합성보 설치

② 데크플레이트 및 거푸집 설치 : 합성 슬래브의 경우 Deep-Deck를 설치하고 일반 콘크리트 슬래브의 경우 거푸집을 설치함.

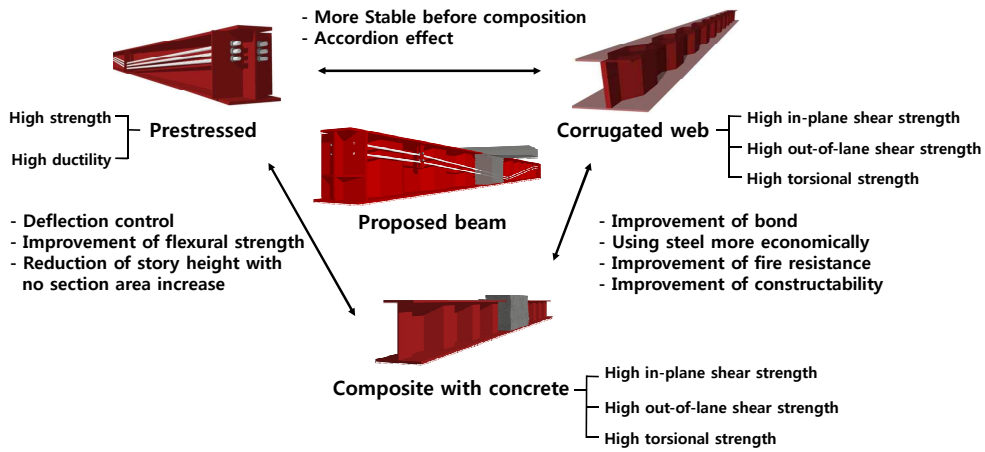
③ 슬래브 시공 : 콘크리트 슬래브 철근을 배근하고, 레미콘을 통한 콘크리트 타설 시공.

④ 거푸집 탈형 후 합성 보 및 슬래브 시공 완료.



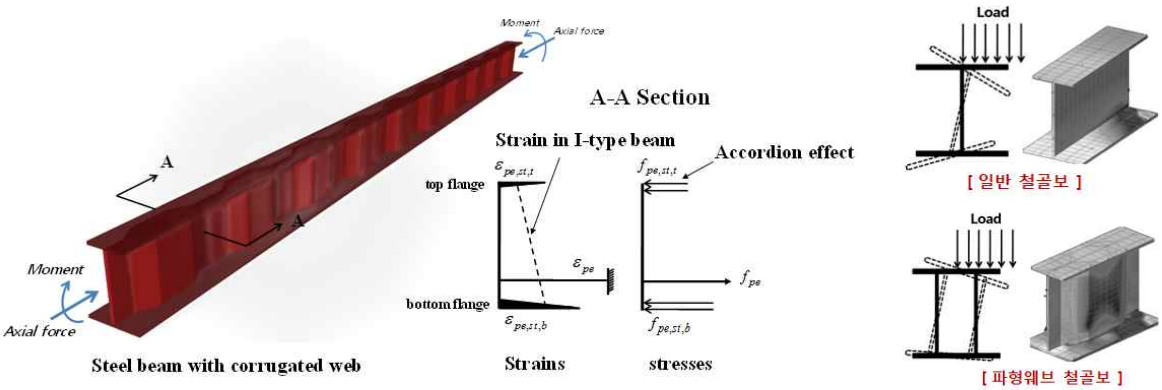
[그림 1.18] 대상공법의 시공절차

기존의 합성보 시스템을 개선하고자 I형강을 사용한 프리스트레스트 매립형 합성보 및 프리스트레스 도입이 용이한 매립형 합성보인 파형웨브 합성보를 개발하였다. PS파형웨브 합성보의 특징은 프리스트레스를 도입함으로서 보의 강성 및 강도를 높일 수 있어 장경간 및 층고절감을 실현할 수 있으며, 파형웨브를 도입함으로써 기존의 I형단면 및 합성단면의 축강성이 커서 프리스트레스 도입효율이 매우 떨어지는 점을 개선하여 아코디언효과로 알려진 상하부플렌지의 응력집중현상을 최대한 활용함으로써 프리스트레스 도입효율을 높일 수 있다. 또한 파형웨브철골보를 콘크리트에 매립함으로써 기존의 강과 콘크리트 사이에서 발생되는 부착응력에 파형웨브의 파고에 의한 콘크리트와 접촉면적의 증가로 인한 추가적인 지압면적을 확보하여 합성성능을 증대시킬 수 있다. 또한 파형웨브철골보의 단점으로 지적되던 국부좌굴을 콘크리트와 합성을 통해 방지할 수 있어 매우 효율적이다. PS파형웨브 합성보의 개념을 그림 1.19에 나타내었다. 먼저, 파형 철골보에 프리스트레스를 도입하였을 경우는 시공 중 강성 및 강도의 증가로 인하여 현장작업 시 안정성을 확보할 수가 있어 시공 중 발생할 수 있는 붕괴현상을 막아주며, 축강성이 작은 파형웨브 철골보를 사용함으로써, 아코디언 효과로 인하여 프리스트레스의 도입효율이 증대되어, 현재 많이 사용되고 있는 합성보들 보다 높은 요구강도와 처짐제어에 효율적으로 사용할 수 있는 장점이 있다. 두 번째로는 파형웨브철골보에 콘크리트를 타설할 경우 대부분의 합성보는 철골부재가 외부로 노출되어 있는 노출형 합성보를 많이 사용하고 있어서 철골부재의 내화성능이 필요하지만, PS파형웨브 합성보의 경우는 매립형 합성보이기 때문에 내화성능에 효과적이며, 매립형 합성보이기 때문에 콘크리트가 파형철골보에 발생하려는 좌굴을 구속시켜주는 장점이 있다. 마지막으로 프리스트레스를 도입한 철골부재가 콘크리트와 합성될 경우는 합성부재에 작용하는 인장력는 프리스트레스가 도입된 철골부재에 작용하며, 압축력은 콘크리트가 작용하여 휨강도가 향상된다. 또한, 프리스트레스가 도입되어 합성된 수평부재는 큰 휨강성의 효과로 인하여 층고절감을 기존의 합성보에 비하여 좀 더 효과적으로 실현할 수 있다.



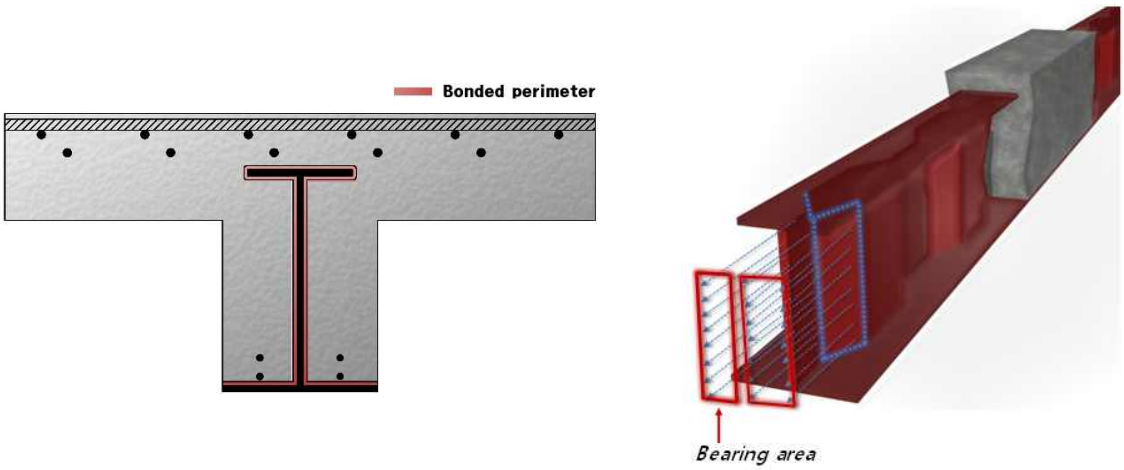
[그림 1.19] PS파형웨브 합성보

파형웨브 철골보에 프리스트레스트를 도입하면 그림 1.20에서 보여지는 파형철골보의 단면 A-A에서의 변형률 그래프와 같이 거동한다. 축강성이 큰 I형 철골보는 큰 웨브의 변형률이 발생하지만, 축강성이 작은 파형웨브 철골보에 프리스트레스트를 도입하였을 때의 변형률은 실선으로 표시된 것처럼 웨브의 변형률이 거의 없으며, 상·하부 플랜지에 큰 변형률이 발생하게 된다. 이것은 웨브에서 발생하지 않는 응력이 상·하부 플랜지로 도입되어 프리스트레스트의 도입효율이 증가된다는 것을 나타낸다. 이를 아코디언 효과 (accordion effect)라고 하며, Abba et al. 및 Huang et al.의 논문에 제시된 파형보의 실물실험을 통해 단면의 높이방향으로 변형률을 측정한 결과 파형웨브의 축강성이 일반 I형단면에 비해 작아서 상하부 플렌지에 응력이 집중되고 플렌지에서 일정부분 떨어진 웨브영역에는 응력이 거의 생기지 않음을 확인하여 아코디언 효과를 검증하였다. 또한, 현장에서 작업 시 비대칭하중이 작용하였을 경우 일반 I형철골보 같은 경우, 그림 1.20에서 나타난 것과 같이 비틀림 현상이 발생하는 문제점이 생기나, 파형웨브 철골보를 사용할 경우는 파고가 있기 때문에 상·하부 플랜지의 폭방향으로 지지되는 웨브의 면적이 크기 때문에 이러한 비틀림현상을 방지할 수 있다.



[그림 1.20] 파형웨브철골보에 프리스트레스트 도입 (합성 전)

프리스트레스가 도입된 파형웨브철골보에 콘크리트가 타설될 경우 그림 1.21(a)에서 나타낸 것과 같이 기존 I형 철골보에 콘크리트가 타설되는 경우는 부착성능이 접촉면 사이에서 발생되는 부착응력(surface bond stress at bond perimeter)에 의존하는 것에 비하여 부착성능이 접촉면 사이에서 발생되는 부착응력(surface bond stress at bond perimeter)에 의존하는 것에 비하여 그림 1.21(b)에 나타낸 바와 같이 파형웨브합성보의 경우 파고에 의한 지압응력(bearing stress)의 증가로 합성효율이 증가시킬 수 있어 압축응력에 강한 콘크리트가 압축력에 저항하고 강재의 많은 부분이 인장측에 위치하게 되어 콘크리트에 비하여 고가인 강재의 사용량을 줄여 경제성을 확보할 수 있으며, 콘크리트에 강재를 매립하면 콘크리트가 강재의 피복역할을 하여 내화성능을 향상시킬 수 있다. 이에 더불어 하부플렌지의 폭을 넓게 제작하여 보의 옆면에만 거푸집을 설치하여 거푸집량을 최소화 할 수 있어 경제적인 구조형식의 실현이 가능하다.



(a) I형 철골보와 콘크리트의 합성　　(b) 파형웨브 철골보와 콘크리트의 합성

[그림 1.21] 프리스트레스트가 적용된 파형웨브철골보에 콘크리트 타설(합성 후)

제3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황

1. 국내 현황

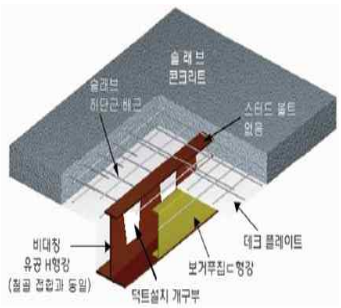
가. 국내의 기술 현황

○ 그림 1.22(a)에 보이는 iTECH 합성보는 기존에 파형 TEC-BEAM과 A-TEC 합성보를 발전시켜 완성된 형태로, 층고절감, 모멘트 접합 가능, 철골 물량 절감, 일체성 및 연속성 확보, 웨브 개구부의 설비공간 활용 등의 많은 장점을 가지고 있으나 제작 과정이 다소 복잡하고 일체성 확보를 위한 철근 배근이 용이하지 않으며, 시공 여건상 실제 현장에서 웨브의 개구부를 설비공간으로 활용하는 것이 어려움.

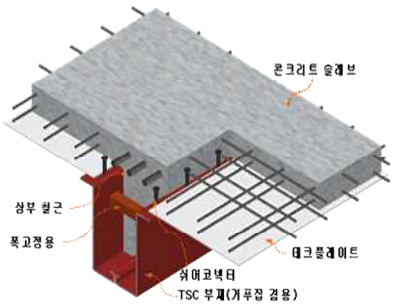
○ 그림 1.22(b)에 나타낸 TSC 합성보는 기둥이나 보의 외곽 구석에 형강을 배치하고 그 사이를 철근 래티스로 조립한 후 외곽 면에 내화피복을 겸하는 영구 거푸집을 설치하여 콘크리트를 타설하는 강합성 콘크리트 구조에서 시작된 후 수정 발전되어 현장에 적용된 합성보지만 아직 내화구조로 인정받지 못함.

○ 강판성형 합성보는 그림 1.22(c)에서 보는바와 같이 비대칭 절곡 강판을 서로 맞대어 용접된 형태로서 높이 조절 및 모멘트 접합이 용이한 장점이 있으나, 제작공정이 까다로워 비용이 다소 증가되는 단점이 있음.

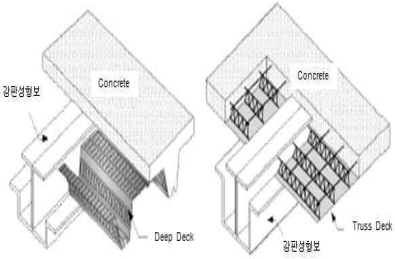
○ 철골보에 미리 설계하중을 재하시킨 후 철골보의 하부 플랜지에 고강도 콘크리트를 타설하여 콘크리트에 압축 프리스트레스를 도입하는 프리플렉스 합성보(그림 1.22(d) 참조), I-Girder의 둘레 형상으로 제작된 강재 내에 PS텐던을 배치하고 콘크리트를 타설한 SCP합성 공법, Steel Box Girder 및 파형강판 웨브 등의 토목구조용 합성보들이 있으나, 주로 대형 교량에 적합하게 개발되어 층고절감에 비효율적이며, 접합에 대한 고려가 없어서 적용하는 데에는 많은 한계들이 있음



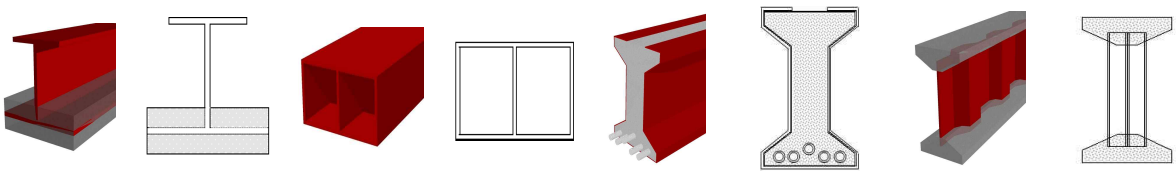
(a) iTECH 합성보



(b) TSC 합성보



(c) 강판성형 합성보



프리플렉스 합성보 Steel Box Girder SCP 합성 공법 파형강판 웨브

(d) 토목분야의 합성보

[그림 1.22] 국내의 합성보

나. 국내 시장 현황 및 예측

○ 그림 1.23에서 볼 수 있듯이 철골구조의 수요가 점진적으로 증가하고 있는 경향으로, 기술개발 완료 이후 층고절감형 장스팬 PS파형웨브 합성보가 H형강을 매년 1%씩 대체한다면, 대체물량은 매년 32,600톤씩 늘어갈 것으로 예상됨.

○ 층고절감형 장스팬 PS파형웨브 합성보는 층고절감 및 장경간에 유리하여 초고층 건물 및 대공간 구조물의 구조부재로 적절하므로, 향후 그 수요가 점차 증가될 것으로 기대됨. 따라서 층고절감형 장스팬 PS파형웨브 합성보의 내화성능 검증 및 내화성능 확보 방안은 필수적임.

○ 그림 1.23를 통해서 알 수 있듯이 국내 건설엔지니어링 분야의 기술수준은 선진국의 약 82%로 나타났으며, 그 중 설계기술은 약 80%로 종합수준 및 시공기술, 유지관리 기술에 비하여 다소 낮은 수준으로 나타남. 따라서 설계기술에 관한 보다 심화 연구가 필요할 것으로 판단되며, 내화설계기술도 이에 해당함.

○ 층고절감형 장스팬 PS파형웨브 합성보는 장경간에 적용되는 구조체이며 7.5m 장경간 내화실험을 수행하여, 법정 내화시간을 확보하고 이를 기반으로 장경간에의 적용이 늘어날 수 있을 것으로 전망됨.



[그림 1.23] 층고절감형 장스팬 PS파형웨브 합성보의 예상수요량

(1) 국내 주요 관련 업체

업체명	업체별 능력	비 고
(주)제일테크노스	- 내화구조용데크 · DEEP DECK : J.F(JOIST FLOOR)-DECK 15만M2/월 · FLUTED TYPE: KEM-DECK 15만M2/월 · FLAT TYPE: HI-DECK II 8만M2/월 - 철근일체형데크 TRUSS DECK, NT DECK 25만M2/월	건교부건설신기술: J.F-DECK (393호) -건설기술연구원 KEM DECK (115호) -대한건축학회
현대제철	· 국내 최초로 상부플랜지와 하부 플랜지 길이가 다른 비대칭 형상의 압연 H형강을 개발	H형강,앵글 유럽「CE 마크」인증.
상원DMC	철근일체형, 내화구조형 데크생산	-
윈스틸	국내 최초 신개념 판금접합공법인 TOX DECK 생산	-
동부제강	-플렌지의 상/하 폭 및 두께가 상이한 부등 FLANGE형강,WEB 편심형강 -TRUSS 용도의 T형강에 이어 최근 소형 ANGLE, CHANNEL 및 각관을 대체할 수 있는 소형박육 H형강(50× 45× 3.2× 3.2)의 개발에 성공함.	-
삼성중공업(주) (주)제일테크노스	춤이 깊은 합성 데크플레이트(J.F-DECK, 춤 250mm, 140mm)를 사용한 층고절감형 합성바닥판 공법	-
해동금속(주)	선조립철선트러스를 이용한 데크슬래브공법	-
삼성물산 포항종합제철 포스코개발	내화구조용KEM DECK를 이용한 합성슬래브공법	-

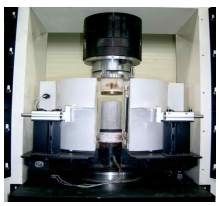
(2) 국내 전문가 및 연구기관 현황

항목	전문가	소속기관	기술개발현황	수준 (국외대비)
깊은 춤 데크플레이트	배규웅	한국건설기술연구원	내화구조용 합성데크(J.F/ HI DECKII DECK)	50%
	오상훈	RIST	내화구조용 합성데크(ACE DECK)	50%
	김원기	호서대	TRUSS DECK/ NT DECK 구조성능보고서	30%
내화구조 설계	최영환	서울시립대	내화구조용 합성데크(KEM DECK) 합성데크 바닥구조의 내화성능 및 시공표준 등 KS규격 제정 연구	40%
	김성배	센구조연구소	TSC 합성보 내화성능 연구	50%
내화성능 평가 기술	민병렬	한국건설기술연구원	구조부재 내화거동 평가기술	50%
	임홍순	방재시험연구원	구조부재 내화성능 평가기술	40%
구조체/재료 화재거동 예측기술	여인환	한국건설기술 연구원	장스팬 합성보 내화성능평가 기술	60%
	김흥열	한국건설기술연구원	고온상황 구조재료 열특성 분석 기술	50%

(2) 국내연구 인프라 수준

기술분야	인프라 항목	선진국 대비 인프라 수준				
		부족	다소부족	동등	우월	보다우월
구조·설계 분야	전문인력 보유정도		○			
	인프라 구축정도		○			
	국제 기술협력기반		○			
내화설계분야	전문인력 보유정도	○				
	인프라 구축정도		○			
	국제 기술협력기반	○				
내화평가 분야	전문인력 보유정도	○				
	인프라 구축정도		○			
	국제 기술협력기반		○			

(3) 본 연구수행을 위한 한국건설기술연구원 내화구조관련 실험장비

내화구조관련 실험장비[KICT]	실험장비 개요		측정항목
Wall Testing Furnace Slab Testing Furnace Column Testing Furnace 시험체 제작동(1,872㎡)			고성능 기둥(1000ton)/ 보·바닥(10m) 등 구조부재의 내화특성 평가
건축구조재료 고온 압축·인장강도 측정 장비 건축구조재료 열전도율 측정 장비 건축구조재료 열팽창율 측정장비			건축구조재료의 고온(1,000℃ 이상)시 압축·인장·열전도율 ·열팽창율·비열 성능 측정

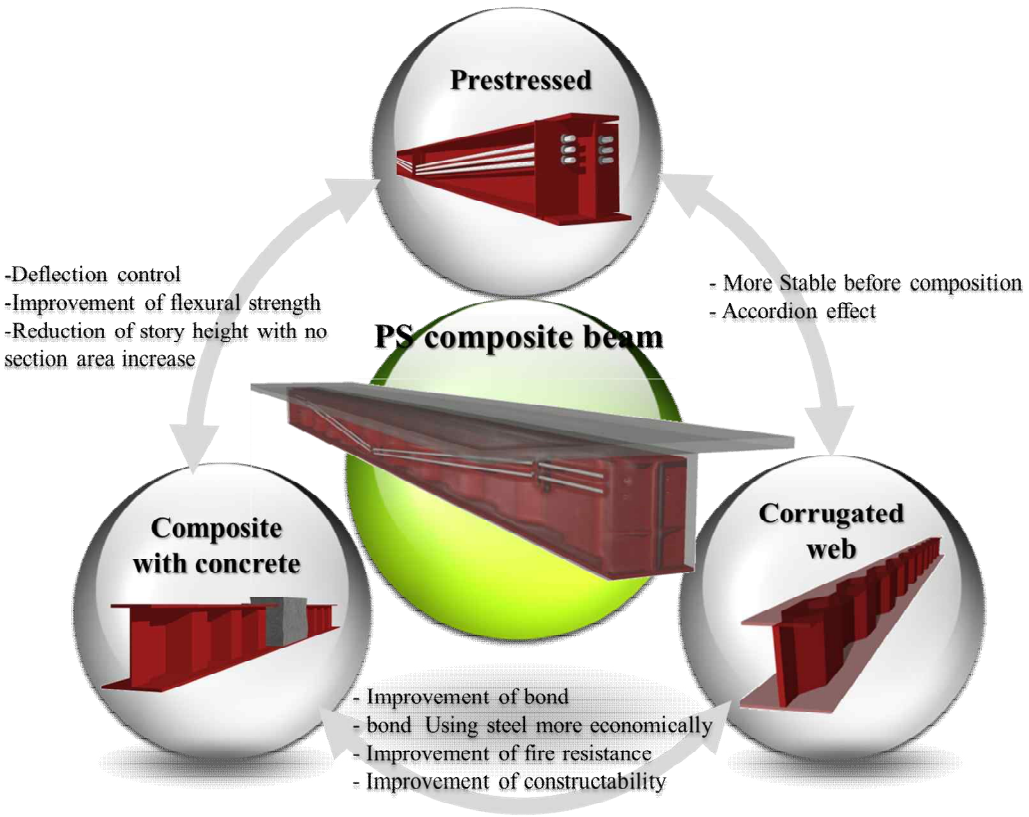
(3) 국내 기술개발 수준

세부기술 내용	국외 현황 (주요선진국명)	국내 개발 현황	수준 (국외대비)
데크플레이트개발	CORUS(영국) BHP사(호주)	J.F DECK , HI DECK II (건설기술연구원) ACE DECK(RIST 포항산업과학연구원) NT DECK(호서 대학교) KEM DECK(대한건축학회, 한양대,서울시립대)	80%
내화구조설계	CORUS(영국)	대한건축학회 KS F 1611-4 지정 (영국/국내실험 자료를 참조하여 개발)	50%
성능기반 내화설계 기술	영국, 일본	사양적 설계기준 정립 및 성능기반 내화설계 도입단계 (한국건설기술연구원)	30%
내화설계 기준 - EUROCODE 3,4 - BS 5950 Pt8	유럽, 영국	성능기반 내화설계 지침/기준 제정, KS F 2848 (한국건설기술연구원, 대한건축학회)	40%
구조물 화재조건 거동 연구	캐나다(NRCC,NFL) 미국(NIST).영국(BRE), 스웨덴(SNTRI),일본(BRI)	사양적 설계기반 화재거동 이론기반 연구 (성능기반 화재거동 연구성과 극히 미비함)	20%
강재 및 합성기둥의 내화거동	캐나다 (NRCC)	축소모형 실험 및 제한된 부재사이즈로의 화재거동 연구(사양적 내화평가)	20%

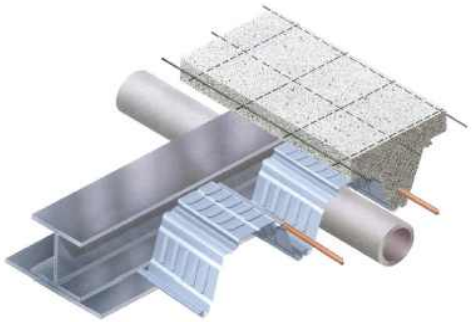
2. 국외의 기술 및 산업동향

가. 국외의 기술 현황

○ 국외에서는 주로 유럽 및 북미를 중심으로 합성보에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 대표적인 예로는 그림 1.24에 나타낸 슬림플로어 시스템, Delta Beam 및 Flex Frame System 등이 있음. 슬림플로어 시스템은 그림 1.25(a)에 보이는 바와 같이 개구부를 가진 철골보와 데크플레이트 슬래브로 이루어진 층고절감형 합성구조 시스템으로 국내의 iTECH 합성보와 성격이 유사함. Delta Beam은 1989년 핀란드의 Deltatek사가 개발하여 현재 북유럽에서 주로 사용중인 합성보임. 그림 1.25(b)에 나타낸 Delta Beam은 박스형태의 중공형 강재와 중공형 콘크리트 슬래브가 결합된 시스템으로, 비틀림 저항 및 내화성능이 우수하고 8m까지 무지주 시공이 가능하지만, 장경간을 실현하는 것은 매우 어려운 시스템임. 그림 1.25(c)에 보이는 Flex Frame System은 비대칭단면 철골보와 중공형 프리캐스트 슬래브를 사용하는 시스템으로 철골보의 형태는 다르지만 Delta Beam시스템과 유사한 장단점을 가짐.



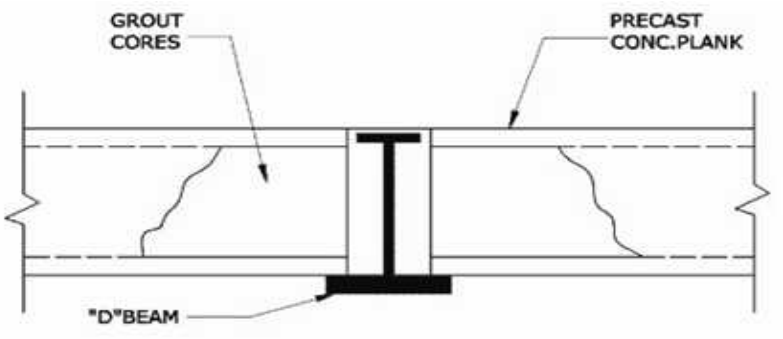
[그림 1.24] Prestressed composite beam



(a) 슬림플로어 시스템



(b) Delta Beam



(c) Flex Frame System

[그림 1.25] 국외의 합성보

나. 국외 산업동향

(1) 세계시장을 선도하는 주요 업체

업체명(국적)	업체별 능력	중점 분야
CORUS(영국)	합성플로어 공법관련 세계 제일 기술력 확보업체 SLIM DECK 시스템 형상과 설계지침서 개발 철골 접합부 해석소프트웨어 개발	철강 생산 (합성플로어)
TNO(네덜란드) WFRC(영국)	합성시스템 내화성능 분석 실험수행	내화실험분석
Cambridge Univ. (영국)	ASB 상현재 사용 12m Proto-Type Girder	ASB 관련 실험/분석
BRE(영국)	8층 합성시스템 적용 철골조 건축물 실물 실험	실물/내화 실험

(2) 주요국가의 시장규모

국가명	철강산업 규모 및 현황
네덜란드	· 세계 최대 철강생산업체인 네덜란드의 미탈스틸이 2위 아르셀로를 인수합병 · 전 세계 철강재 생산량의 10%를 생산하며 두 회사의 조강 생산량을 합쳐 1억 3000만톤에 이를 것으로 전망 · 3위 업체인 일본 신일본제철의 3200만 톤의 4배에 이름
영국	· 2004년 영국의 철강산업의 경우, 60% 정도의 철강 가격 상승에도 불구하고 산업성과 및 시장 점유율은 증가 · 영국에서의 철강 수요의 경우 1988년/1989년의 최고 기록치만큼 2004년 역시 높게 나타났으며, 2003년보다 성과에 있어서도 7.4% 증가를 기록 · 세계 각지의 철강과 관련한 네트워크를 구축하고 이와 관련한 조직들을 구성하려는 노력을 시도 · 영국 CORUS 최근 동향 - 대형 제철소 설비를 쇄신하여 고부가가치 제품의 증산을 서두르는 한편 뒤쳐진 신흥국에서의 사업전개 - 1999년의 대형합병으로 세계 3위로 부상했지만 지금은 최대기업의 3분의 1 규모 - 1999년 영국 브리티시 스틸과 네덜란드 후고벤스의 합병으로 탄생한 코러스의 최초 4년간은 합계에서 22억 파운드에 달하는 거액의 적자발생 - 최근 2년간은 인원삭감 등의 리스트럭처링 효과가 나타나고, 철강제품의 시세 급상승으로 연간 4억 5,000만 파운드의 최종이익을 확보
일본	· 일본 최대 철강 4개사 최고이익 갱신('06.3월 결산기), 재편에 대비하여 현 체제 강화 · 수익확대에 따른 투자여력의 상승으로 해외 대기업과 대등하게 세계 철강업계 재편에 대비할 수 있는 체제를 갖춤
미국	· 06.03월 미국 철강업계의 가동률은 97.2%으로 호황기 수준 · 2월 철강출하량은 893만 7천t으로 전년 동월대비 3.2%, 전월대비 0.2% 증가하였고 철강수입량은 351만1천1t으로 전년 동월대비 48.7%, 전월대비 11.6% 증가

(3) 해외 시장예측 및 발전전망

- 성능기반 구조물 내화설계법을 1990년부터 도입한 유럽의 주요 관련선진국에서는 파형합성보의 합성보를 다양한 방법으로 설계에 응용하여, 중장지간 구조물 등에 실제 적용함.
- 통계청 자료를 기반으로 철골공사에 약 10%정도에 화재안전 내화설계기술이 적용되어 내화성능이 확립된 합성플로어 시스템을 적용한다면, 철 구조물의 총 해외공사액 기준(통계청 2001~2005)으로 향후 5년간 약 935억원의 공사비 절감 효과가 나타날 것이며, 10년 후에는 약 1870억원의 공사비용 절감으로 인한 경제적 시너지효과가 유발될 것으로 예측됨.

(4) 해외 업체 · 연구기관과의 공동연구 필요성 및 추진 방안

- CORUS(영국)의 선진 화재관련 연구성과에 대한 자료 분석을 기반으로 수치해석을 수행할 필요성이 있으며, 이를 위하여 Edinburgh 대학과 CORUS가 Cardington에서 수행한 일련의 화재 실험과 연계하여 ABAQUS를 사용한 모델링 기법을 본 연구에 도입하고자함.
- 벨기에의 Liege 대학의 Franssen 교수의 연구성과를 기반으로 하여 구조물의 내화거동을 분석한 FE해석 프로그램인 SAFIR의 모델링 기법을 분석하고, 영국 BRE/캐나다의 NRC와의 연구성과의 공유를 통한 내화구조 성능예측을 추진하여 성공적인 과업을 완수할 예정임.

(5) 개발된 기술의 해외시장 진출 방안

- 강재 기술력이 세계적으로 강한 우리나라(현대제철: 비대칭 압연강관 공장생산)의 현실을 감안할 때, 구조적 · 경제적 이점을 보유하고 있는 비대칭 H형강을 활용하여 프리스트레스트 합성보 공법에 최적화 화재안전 내화성능검증으로 인한 화재안전성 확보방안이 부가될 경우, 그 시너지 효과로 인해 기반 인프라 시설 및 기술력이 상대적으로 낮은 주변국(인도·중국 등)에의 해외진출이 활발해 질 수 있으며, 관련 연구의 심화를 통해 화재관련 선진국과의 기술 경쟁력에서 우위를 차지할 수 있을 것으로 사료됨.
- 현행 사양적 설계법으로는 변화하는 건축자재 및 신기술/특허출원 구조공법에 대한 화재 안전성 확보가 불가능 하므로, 각각의 구조적/재료적 특성에 적합한 무피복 장스팬 합성구조 공법개발이 필요함.
- 그러므로, 기존 연구를 통해 확보된 기술을 현장 적용 및 기술사업화를 추진하기 위해서는 건축구조물에 적용하기 위한 법적 내화요구조건을 만족시킬 수 있으며, 접합 유형별 상세 설계방안을 도출하여 건축 구조실무자들이 적용할 수 있는 설계방안 도출이 선행되어야 함. 이러한 국내 건설현장적용을 위한 기술을 선행하여 확보하고, 이를 기반으로 해외 건설시장에의 진출을 도모할 경우, 성공적인 국내 우수기술의 해외시장 진출이 확보될 것으로 예측됨.

3. 특허 동향

발명의 명칭	특허권자	등록일
콘크리트 고온특성 실험용 이동식 가열로	한국건설 기술연구원	2004년 5월
비대칭형 철골보를 이용한 층고절감형 합성구조	서울시립대학교	2007년 6월
고온 가열 압축강도 시험 시스템 및 이를 이용한 이동식 자동 고온 가열 압축강도 시험방법	한국건설 기술연구원	2007년 6월
이동식자동고온가열로	한국건설 기술연구원	2007년 6월
인장보강을 위한 강판성형 철골보 및 이를 이용한 철골콘크리트 합성구조	서울시립대학교	2008년 2월
골형 웨브 강판 조립보	서울시립대학교	2008년 6월
프리스트레스트 웨브 골형강판 합성보	서울시립대학교	2008년 6월
중간지간 가열로	한국건설 기술연구원	2009년 10월
강재 조립보 및 그를 이용한 강 콘크리트 합성보	서울시립대학교	2009년 12월
파형웨브가 구비된 비대칭 합성보	서울시립대학교	2010년 2월
골형웨브 강판 조립보	서울시립대학교	2011년 1월
프리스트레스트 웨브 골형강판 합성보	서울시립대학교	2011년 2월
도르래형 양방향 긴장 정착구 및 이를 이용해 프리스트레스가 도입된 강재보	서울시립대학교	2011년 6월

- 국내·외 관련 선행 특허분석 및 향후 실용화 및 사업화시 고려해야 할 지적 재산권 및 연구성과와 관련되어 분쟁이 예상되는 특허에 관한 내용이 없는 것으로 조사됨.
- 본 연구수행을 위해 기존 연구에서 도출된 중·장지간 가열로 구축 및 실험평가기술을 기반으로, 호환성/신뢰성/편리성을 고려한 장스팬 합성구조 내화성능평가를 통한 실용화 기술을 확보할 예정임.

4. 정부지원정책 현황

가. 관련법령, 정부 정책 및 담당기관

관련법령/정책	주요내용	당해 연구와의 연관성
내화구조의 인정 및 관리기준 (국토해양부 고시 제 2008-154호, 2008,05,15)	내화구조의정의 내화구조성능기준 및 인정절차 내화구조관리 내화구조신청보완, 인정의개선및취소 내화구조인정 및 관리의 지도·감독 내화충전구조의 관리기준	합성보의 경우 내화구조 인정을 위해서는 성능평가가 이루어져야 현장에 적용할 수 있음. 이에 당해 연구의 대상인 층고절감형 합성보에 대해서 국가기준에 부합하는 내화성능확보를 위한 기술도입의 성능검증을 당해 연구에서 수행함.
KS F 2848	구조부재에 성능적 개념인 형상설계를 도입하여 구조부재에 피복설계 기술을 제시함. 국가 표준규격상 최초로 성능적 내화설계방안이 제정되었으며, 지속적인 성능적 개념의 화재안전 요소기술에 대한 표준규격 반영의 계기를 마련함.	사양적 내화피복 설계기술로만 적용된 구조부재의 내화성능 평가를 성능적 개념을 도입한 프리스트레스 도입 및 파형웨브의 춤을 변화시킴으로써 내화성능 확보방안을 도춤함. 이러한 성능적 개념의 도입으로 다양한 형상조건에 대한 실험이 장비한계로 인해 불가능 할 경우를 대비하여, 본 연구에서는 수치해석기법을 확보하여 구조부재의 내화성능 평가를 수행하고자 함.

나. 정부지원 정책사업 종류와 현황

(1) 국가 내화구조 인정기준에 적합한 내화구조공법개발 연구분야.

- 층고절감 장점을 내포한 장스팬 PS파형웨브 합성보의 현장적용을 위해서는 국토부 내화구조인정 획득이 필수적인 요소이나, 현재 7.5M 이상 합성보의 내화성능을 확보하고자 하는 연구가 전무함. 이에 층고절감형 공법의 경제성과 친환경적인 무피복 공법의 장점을 극대화 할 수 있고, 7.5M이상 현장적용 스팬길이에서의 국가인정이 가능한 내화구조공법에 관한 연구가 필요함.

(2) 무피복 장스팬 합성보의 내화성능확보방안을 통한 친환경 내화공법 구현.

- 현재 일반 철골보의 합성보의 경우, 화재에 노출된 철골에 내화피복 및 뿜칠재 도포 등을 통한 현장적용이 일반적인 상황임. 본 연구를 통한 철골자체의 온도차단공법이 아닌 내력상승을 통한 장스팬 합성보의 내화성능 확보공법에 관한 연구가 진행될 경우, 피복재에 의한 유독가스 및 탈락으로 인한 급격한 내화성능저하에 의한 붕괴를 예방할 수 있음. 이는 내화구조 공법의 무피복화를 통한 정부의 녹색성장정책 및 친환경 건설공법확보 정책과 부합하는 내용임.

5. 종합 결론

가. SWOT분석

○ 본 연구의 수행을 위한 기반 시설(한국건설기술연구원-화재안전연구센터)이 2006년 준공되었으며, 국가적 방재시스템 확립을 위한 선진국 수준의 고도화 화재관련 연구를 수행하기 위한 토대를 마련함.

○ 그러나, 현재까지는 국가 경제개발을 중점적 과제로 간주하여 화재에 관한 기술의 중요성을 간과하며 생산성 향상의 정책위주로 수행하였으며, 이로 인해 프리스트레스트 부재 및 합성구조와 같은 새로운 구조에 대한 성능평가는 이루어지지 않아 장스팬 합성보의 경우 화재안전에 극히 취약한 구조가 형성됨.

○ 층고절감형 장스팬 PS파형웨브 합성보의 5M 이상인 장경간 구조물에서의 현행 국내 실정상 내화성능 평가를 수행 할 수 있는 내화성능 평가 장비를 확보하였으나, 현재까지 장스팬 합성구조의 내화성능확보 연구는 국내에서 추진되지 않은 실정임. 이로 인해, 신기술·공법의 개발로 인한 현장 실무에 적용이 화재안전에 대한 인증·인정을 구축하지 못하여, 낙후된 규정으로 인한 과도한 피복제의 사용으로 인한 경제적 손실이 유발됨.

○ 국민의 소득향상 및 경제규모 확대로 인해 화재안전에 대한 국가적 관심이 증대되고 있으나, 기존 연구실적 및 기반 인프라 시설· 장비· 인력의 부재로 인해 적합한 화재안전성 확보로 인한 국가적 기술경쟁력 확립에 난관이 유발됨.(2006년 준공된 한국건설기술연구원의 화재안전연구센터의 적절한 활용으로 일정 부분이 해소될 것으로 기대됨.)

○ 또한, 선진국의 화재관련 기술 의존도가 심각한 상황에서 관련 공법들의 국산화를 위한 기술경쟁력 저하가 발생하며, 기술보호 장벽의 구축이 증대되고 있는 이 시점에서 그나마 현재까지 유지되고 있는 화재관련 기술도입도 점차 줄어들고 있음.

○ 이로 인해, 선진 외국업체와의 기술경쟁이 심각한 상황에서 국내업체의 기술경쟁력 저하로 인해 국가적 차원의 손실이 발생하게 되며, 국가간 기술이기주의의 팽배로 인한 정보공유의 부재로 인해 전반적인 국가 기술경쟁력의 저하가 유발되는 위협요인으로 제기됨.

강점	• 구조물 제반조건에 따른 화재안전성능평가 기반확보(건축물성능실험센타) • IT 및 소방/제어기술 연관기술 우수 • 중/장지간 내화성능평가장비 확보로 장스팬 합성구조 내화성능확보기술개발이 가능함.	약점	• 장스팬 합성구조의 내화관련 연구미비 • 화재안전 기술 중요성 간과 • 방재 유지설비 비용 증대 • 장스팬 내화성능 평가연구 미흡 • FE기반 화재안전 수치해석 기법 취약
기회 요인	• 구조물 제반 조건에 따른 화재안전 중요성 증대 • 국민 소득향상 및 경제규모확대 • 화재안전분야 시장 확대 예상	위협 요인	• 선진 외국업체와의 기술경쟁 심화 • 건축물 화재 위험요인 상존 • 철골구조 내화피복 도포필요 • 장스팬 구조의 내화성능평가 부재로 미 검증된 신공법의 실 건축물의 적용으로 인한 구조물의 화재로 인한 강성저하&붕괴 위험 상존

나. 시사점 및 결론

- 층고절감형 장스팬 PS파형웨브 합성보는 장경간 구조에 적용을 위해 개발되었으나, 장스팬 합성구조의 국내 내화성능 확보연구 미비 등의 특성으로 인해 현장적용이 미흡하여 우수기술의 건설실무에의 적용이 극히 미약한 실정이므로, 장스팬 합성구조의 내화성능 검증 및 국토부 내화구조 인정기준에 적합한 내화성능확보방안 제시를 통해 철강 및 건설산업의 활성화를 도모할 수 있음.
- 기존에 합성보가 적용된 구조물은 작은 보(BEAM)의 생략으로 인한 층고절감형 구조형식이나, 선진외국의 내화기술을 국내실정을 고려하지 않은 상황에서 적용하였기 때문에 과도한 피복제의 사용으로 인한 경제성 저하 및 화재안전성 확립이 검증되지 않은 상황이며, 이러한 상황을 본 연구를 통한 화재안전성 확보를 기반으로 적합한 화재 안전성 검증을 통해 장스팬 합성구조의 기술·경제적 경쟁력 향상을 기대할 수 있음.
- 본 연구에서는 신뢰성 있는 FE수치해석 기법을 통해 내화성능 검증을 실시하고자 하며, 화재실험 대비 상대적으로 경제성 있는 수치해석기법을 이용하여 슬림플로우 시스템의 일부인 PS파형웨브 합성보의 내화거동을 평가할 수 있는 기반을 마련할 수 있음.
- 표준화재조건에서의 층고절감형 장스팬 PS파형웨브 합성보 최적 모듈화 내화확보방안을 제시하여 적절한 내화성능을 확보하며, 구조물에서의 피복제의 사용량저감 및 품질향상의 고도화를 기반으로 요구내화성능을 최적화하여 경제성을 제고하고, 제반요소들의 기회비용 분석을 기반으로 실구조물에 적용할 수 있는 실용성 기반 화재안전 최적화 내화성능확보를 추진할 계획임.
- 층고절감형 장스팬 PS파형웨브 합성보에 적합한 내화성능 평가 및 검증을 수행하여 경쟁력 있는 신공법/기술의 건설영역에의 활발한 기술적 적용능력을 구축하고, 이를 기반으로 국가적 기술적/경제성 기반 국가적 위상제고 및 경쟁력 확보능력을 배양할 수 있음.

제4절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치

개념정립단계		기업화단계	√	기술의 안정화단계	

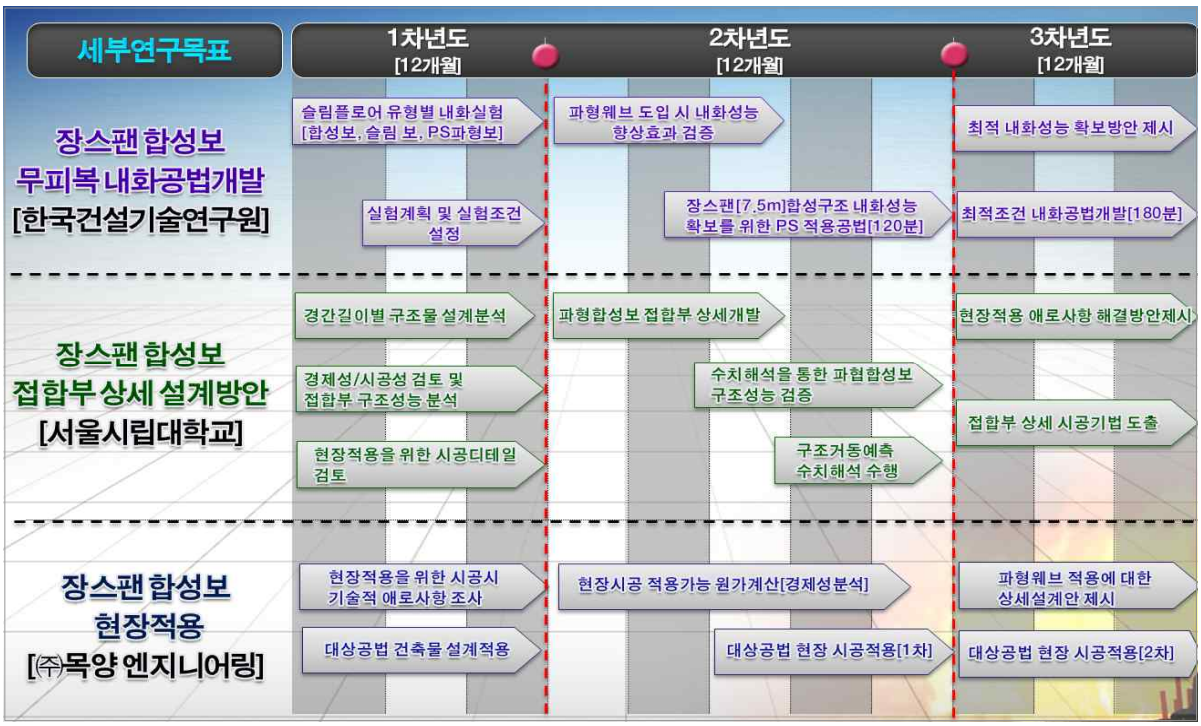
제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

제1절 연구수행 전략 및 방법론

1. 연구개발 추진체계



구 분	주관연구기관	협동연구기관	참여기업
1차년도 (2012~2013)	한국건설기술연구원 화재안전연구센터	서울시립대학교 건축공학과 (주)목양엔지니어링 건축사사무소	(주)픽슨
2차년도 (2013~2014)	한국건설기술연구원 화재안전연구센터	서울시립대학교 건축공학과 (주)목양엔지니어링 건축사사무소	(주)픽슨
3차년도 (2014~2015)	한국건설기술연구원 화재안전연구센터	서울시립대학교 건축공학과 (주)목양엔지니어링 건축사사무소	(주)픽슨



가. 연구개발 최종목표

(1) 최종목표

무피복 장스팬 합성구조의 국토부 인정 공인 3시간 내화성능확보 및 기술실시계약 달성을 통한 현장실용화 기술개발.

국내최초 장스팬 합성구조 7.5m기준 무피복 내화성능 확보를 기반으로 제품화 및 실용화 기술력을 향상시킴.

층고절감형 장스팬 PS파형웨브 합성보의 현장적용을 위한 보-기둥 접합부 상세설계방안이 제시되지 않고 있는 실정이므로, 실무 적용이 가능한 **다양한 보-기둥 접합방식의 개발 및 실 적용 설계방안을 확보함**으로서 우수한 현장적용성을 확보하고자 함.

본 연구는 다양한 요소기술(장스팬 무피복 내화성능 확보기술, 보-기둥 구조공법 조건별 접합부 상세설계방안, 실 구조물 적용 실시설계방안)을 포함함으로써, 연구대상 구조물이 과학적 & 합리적으로 내화성능평가를 통한 성능검증과 동시에 경제적인 최적화 설계 및 시공을 가능하게 하며, 유관업체(합성구조 제조 및 시공기업)의 현장적용 기술력 향상을 동시에 확보하고자 함.

(2) 최종목표의 성격 및 설정근거

최종 목표 성격

→ 합성구조의 특성상 우수한 경제성 및 성능을 보유하고 있음에도 불구하고 내화성능 미확보로 인해 우수 신공법의 건설현장에 활용되지 않고 있는 기술적 문제점을 해결하고자, 본 연구에서는 **국내 최초로 7.5m 장스팬 조건에서의 3시간 내화성능을 확보한 무피복 합성구조 시스템 기술을 확보**하고자 함.

목표 설정근거

→ 국내 장스팬 합성구조인 PS파형웨브 합성보의 경우, 실구조 스팬길이로 구조적 내화성능을 평가할 수 있는 실험장비를 보유하고 있지 못하였음.

- 본 연구에 주관으로 참여하는 한국건설기술연구원이 2010년에 구축한 중·장지간 가열로[최대 스팬길이 10m]를 활용한 내화구조 연구를 토대로 내화성능 평가를 수행함. 이러한 기술을 기반으로 합성구조의 건물 현장적용시 경제성을 확보할 수 있는 7.5m기준으로 내화피복량을 현저히 줄일 수 있는 구조공법 기술을 확보할 경우, 본 대상기술공법의 현장적용의 활성화가 가능할 수 있음.
- 또한, 대상기술의 제조사로 본 연구의 참여기업으로 컨소시엄을 구성한 (주)픽슨과 대상공법의 현장적용을 위한 (주)픽슨 이엔씨 시공사와의 현장제조 및 시공시의 문제점파악을 통해 기술적 애로사항을 해소하고, 보-기둥 접합부의 상세설계방안 도출을 통한 현장적용시의 파생되는 문제점을 본 연구를 통해 해결함으로써 당해과제 수행을 통한 성과기술를 사업화할 수 있음.

(3) 정량적 성과목표

연차	성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중치
1차년도	층고절감형 PS파형웨브 합성보의 내화성능 확보방안	학술지 게제 논문건수	국내외 학술지 논문게제 제시	2건	50%
		학술회의발표 논문건수	학술회의에 참가해 발표한 건수	2건	20%
		특허출원건수	해당사업을 통해 산출된 특허출원 건수	1건	30%
	소 계				100%
2차년도	층고절감형 PS파형웨브 합성보의 7.5m 무피복 내화공법 개발	SCI급 학술지 게재 논문건수	SIC급 학술지 논문게제 제시	1건	20%
		학술지 게제 논문건수	국내외 학술지 논문게제 제시	3건	20%
		학술회의발표 논문건수	학술회의에 참가해 발표한 건수	2건	10%
		주요 연구시설 활용도	연구장비의 이용건수	10건	10%
		현장적용	건설현장 적용 건수	1건	30%
		신기술인증	건설 신기술 인증	1건	10%
	소 계				100%
3차년도	층고절감형 PS파형웨브 합성보의 현장적용 실용화 기술개발	현장적용	건설현장 적용건수	1건	20%
		SCI급 학술지 게재 논문건수	SIC급 학술지 논문게제 제시	1건	50%
		학술지 게제 논문건수	국내외 학술지 논문게제 제시	2건	20%
		학술회의발표 논문건수	학술회의에 참가해 발표한 건수	2건	5%
		특허등록건수	특허등록원부 제시	1건	5%
	소 계				100%

나. 연구개발 목표 및 내용

○ 기술개발 목표 : PS파형웨브 합성보의 성능기반 내화설계 요소기술개발과 구조설계·해석기술 개발 및 실구조물 적용기술/설계(안) 제시

○ 최종 목표 성격 : 내화관련설계기법 및 기반연구의 미비로 PS파형웨브 합성보의 적용이 어려우며, PS파형웨브 합성보의 제품화, 실용화를 목적으로 다양한 내화 및 구조관련 요소기술을 개발하고자 함.

○ 목표 설정근거 : 국내 내화설계기준의 한계로 인해 PPS파형웨브 합성보에 적합한 내화검증이 어려우며, 기존 연구의 미비로 인해 규칙의 예외항목에도 인정되지 못함. 따라서 진보된 선진국가의 기준을 기초로 하여 국내의 실정에 맞는 내화설계법을 제안하고, 이를 기반으로 PS파형웨브 합성보의 활성화에 기여하고자 함.

(1) 연구개발 목표

(가) 추진방향 및 단계

연구수행기간(12개월)을 세분화하여 3단계 연구수행 추진을 통한 최종성과 성공적 도출

- 1단계: 자료분석을 통한 문제점 도출 및 성능향상 조건 도출[2개월]
- 2단계: 장스팬 합성보의 최적 구조공법 도출 및 성능확보 방안 제시[8개월]
- 3단계: 도출된 공법 및 성능확보 방안에 대한 자문회의 실시 및 수정·보완 [2개월]



(나) 연구목표 및 내용 (총괄)

본 연구의 최종 목표는 건축물 표준화재 조건(ISO Standard Fire & Parametric Fire)에서의 PS 파형웨브 합성보 성능기반 화재안전 내화설계 요소기술 개발과 구조설계 및 해석기술 개발에 있음. 이를 위하여 다양한 하중조건 구조물의 최적 단면형상 및 접합상세 연구가 동시에 수행됨. 본 연구로 획득된 성과는 제반요소(내화성능, 경제성, 시공성, 미관활용성 등)를 고려한 기회비용 분석기반 실구조물 적용기술/설계(안)를 최종적으로 제시함.

다. 연구대상기술의 개발 가능성

○ 기존의 PS파형웨브 합성보의 상온에서의 실험을 통하여 파형웨브가 도입된 합성보에서의 아코디언 효과로 인한 PS도입 효율의 증대와 이로인한 처짐제어 성능의 우수성과 PS도입 후 초기 강성의 증가와 같은 상온상태에서 구조성능의 우수성을 확보하였다. 또한 비대칭 H 형강을 적용한 슬림플로어 합성보의 다양한 하중비와 내화피복의 유무에 따른 실험을 통한 부재의 내화성능 향상을 위한 연구가 선행되어 본 연구에서 추구하는 대상 기술의 개발에 대한 가능성을 충분히 확보하였다.

2. 연차별 세부 추진계획 및 방법

연차	연구내용	세부추진 계획 및 방법	수행 기간	해당 기관
1차년도	• PS파형웨브 합성보 내화실험[7.5M] - 대상: 일반합성보. 비대칭 슬림플로어보, PS파형웨브 합성보	• 7.5M 장스팬 내화실험 치구설치 및 하중프레임 개조. • 동일 단면소성모멘트 대비 하중조건에 따른 화재거동 분석	6개월	KICT
	• PS도입에 따른 파형웨브 합성보의 내화성능 향상효율도출[내화성능 향상방안]	• 무피복 90분 내화성능 확보를 위한 PS도입에 따른 내화 영향성분석[장스팬 실험검증]	4개월	
	• 적용 연구대상의 시공성 검토 및 접합부 구조성능 고찰	• PS파형웨브 합성보 현장적용시 발생하는 문제점 도출[접합부]	2개월	UOS
	• PS파형웨브 합성보의 현장적용을 위한 시공디테일 검토	• 현장적용이 가능한 접합방법 제안 및 분석	3개월	
	• PS파형웨브 합성보의 실제 적용을 위한 연속화 시공공법 및 접합부 상세 개발	• 공기단축 및 현장용접물량 감소가 가능한 시공방법 및 접합부 개발	5개월	
	• PS도입 제작·시공시의 문제점 도출[현장애로기술 제시]	• 자동용접설비의 실용화를 위한 파형웨브 형상 간편화	7개월	목양
	• 개발기술적용 현장선정 및 설계반영	• 개발기술의 장·단점 및 유사기술대비 경제성 도출	3개월	
2차년도	• PS파형웨브 합성보 내화실험 - 하중비개념도입[60%],120분확보	• 최적 PS도입효율[70%, 80%]제시 • 최적 PS설치조건 도출[설치위치 및 설치갯수]	3개월	KICT
	• PS파형웨브 합성보 내화성능 향상방안제시	• PS파형웨브 합성보 단면형상에 따른 최적 설계방안제시[120분]	3개월	
	• 개발된 연속화 시공공법에 대한 해석모델 개발	• 95%의 해석신뢰도를 확보할 수 있는 해석모델 개발	4개월	UOS
	• 보-기둥 접합부 거동에 대한 상세 해석 실시	• 하중조건, 파괴양상을 고려한 상세 해석 실시	3개월	
	• FEM 해석 및 수치해석을 통한 PS 파형웨브 합성보의 구조성능 해석 수행	• 구조부재 시스템에 대한 상세 구조성능 해석 및 분석	5개월	
	• 개발기술 공공건물 시공현장 적용시 문제점 도출	• 시공시의 양중문제 및 접합부 타설 등의 문제점도출	4개월	목양
	• 개발기술 시공현장적용 및 기술지원.	• 시공 매뉴얼[문제점 목록/해결방안 수록]	8개월	
3차년도	• 개발기술 실용화를 위한 내화실험[하중비에 따른 내화설계기준]	• 현장적용 설계자들을 위한 하중조건에 따른 대상공법의 내화성능 조견표 작성	6개월	KICT
	• PS+파형웨브 기술도입 무피복 180분 내화성능 확보방안 제시	• PS파형웨브 합성보 의 내화성능 향상방안 제시[PS설치형상, 정착구 설치위치 등]	6개월	
	• 개발기술의 개선 및 보완을 통해 접합부 상세 시공기법 도출	• 즉각적인 현장적용이 가능한 접합부 상세 시공기법을 도출	4개월	UOS
	• PS파형웨브 합성보의 내화 해석 및 검증	• 프리스트레스와 파형의 특성이 반영된 내화해석 실시 및 향상된 내화성능 검증	5개월	
	• 현장 적용시 애로사항 해결방안 제시	• 시공시 문제점에 대한 해결방안 제시 및 매뉴얼 검토	3개월	
	• 개발기술 시공현장적용/기술지원	• 시공 매뉴얼[문제점 목록/해결방안 수록]	6개월	목양
	• 국가공인 내화구조 인정추진	• 무피복 내화구조공법 3시간 내화구조인정 추진	6개월	

3. 연구 추진역량

가. 연구진의 인적 능력

- 내진공학 및 내진설계 관련 분야의 연구경험이 있는 전문가는 2명임.(서울시립대학교 2명)
- 성능기반 내화설계 분야는 총 3명으로 구성되며, 건축물 구조설계 분야는 총 3명으로 구성됨. (한국건설기술연구원 2명, 목양엔지니어링 3명, 서울시립대학교 1명)
- FE수치해석 수행 경험이 있는 전문가는 1명이며, 내화 성능평가 평가분야는 2명으로 구성됨. (서울시립대학교 1명, 한국건설기술연구원 3명)
- 프리스트레스 분야는 총 3명으로 구성되며, 설계방안에 대해서는 총 2명의 전문가로 구성됨. (서울시립대학교 3명, 목양엔지니어링 2명)
- 선진외국의 관련 연구성과와의 비교 및 본 연구의 타당성· 신뢰성을 검증하기 위한 해외 화재관련 전문가는 Sheffield Uni./Colorado Uni 등의 화재관련 업무에 종사하는 박사급 인력으로 총 5명으로 구성됨.

참여 형태	연구담당분야	소속기관	성명	직급	학위	전공	학교
연구진	내진설계 확보방안 분야	서울시립 대학교	김강수	책임급 (부교수)	박사	건축공학	University of Illinois
		서울시립 대학교	이득행	원급 (연구원)	석사	건축공학	서울시립대
	성능기반 내화설계 분야	KICT	김홍열	책임급 (위원)	박사	건축공학 (화재공학)	건국대
		KICT	여인환	선임급 (수석)	석사	건축공학	서울시립대
		(주)목양 엔지니어링	박경훈	원급 (연구원)	석사	토목공학 (내화재료)	건국대
	건축물 구조설계	(주)목양 엔지니어링	원용호	책임급 (상무)	박사	토목공학	육군사관 학교
		(주)목양 엔지니어링	박영화	책임급 (이사)	박사	토목공학	경북대
	프리스트레스 공법 분야	서울시립 대학교	오재열	원급 (연구원)	석사	건축공학	서울시립대
	내화성능 평가분야	KICT	조범연	원급 (연구원)	석사	건축공학	한양대
		KICT	김정현	원급 (연구원)	학사	경영학과	동아대
	FE수치해석 분야	서울시립 대학교	강현	원급 (연구원)	석사	건축공학	서울시립대
자문 위원	성능기반 내화구조 분야	센구조	김성배	선임급	박사	건축공학	숭실대
		강원대학교	권인규	부교수	박사	구조공학 (강구조)	한양대
		한남대학교	이재승	부교수	박사	건축공학 (내화재료)	University of Colorado
		Arup Fire	Yong Wang	Senior Engineer	박사	화재공학	University of Sheffield
		Fabsec Ltd	Jun Cai	Senior Engineer	박사	구조공학 (합성구조)	University of Sheffield

나. 연구기기·장비·시설 구축 수준

○ 서울시립대학교는 대형 구조실험동을 보유하고 있으며, 반력벽, UTM, 엑튜에이터 등의 대형 실험기기와 계측기기 등을 보유하고 있으며, 본 연구과제에 대한 실험을 위하여 아래의 장비들을 활용할 계획임.

- 서울시립대학교 구조실험동 1000 kN 만능시험기
- 서울시립대학교 구조실험동 500 kN 유압잭
- 서울시립대학교 구조실험동 200 kN 강선 긴장용 유압잭



[그림 2.1] 서울시립대학교 연구장비 보유 현황

○ 화재관련 연구의 규모/비용적 특성상 국가적 차원의 차원에 의한 연구의 필요성과 30~40%수준으로 낙후된 상황에서의 화재로 인한 국민의 생명과 재산피해를 최소화하기 위한 화재공학 전문실험연구동 건립의 필요성이 제기됨.

○ 이에 정부출연기관인 한국건설기술연구원에서는 지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업단, 초고층복합빌딩사업단 등 국내 건축구조물의 내화성능 확보를 위한 제반연구 사업을 수행하며 성능기반 내화성능 기술기반을 수립하고 있음.

○ 한국건설기술연구원에서는 “비대칭 H형강 합성플로어 성능기반 내화거동 연구화” 과제를 통해 합성플로어 시스템을 대상으로 고온 상황에서의 다양한 단면형상의 열전달 실험과 FE해석을 수행 및 다양한 재하조건에서 합성구조물의 거동분석을 연구하였으므로 본 연구과제의 수행 목표에 부합하는 기관이라고 판단됨.

○ 한국건설기술연구원에서는 국내 최초로 7.5m 이상의 구조물 내화성능 평가를 수행할 수 있는 중장지간 가열로를 개발하여 장스팬 합성구조의 재하조건에서의 구조체 변형 및 제어성능을 검증하는 내화실험을 수행할 수 있음.

○ 장스팬 합성구조의 화재관련 실험에 대한 안정성을 확보하고, 내화실험 가열로의 적용을 통한 장스팬 무피복 내화공법의 최적 형상조건을 도출하여 파형웨브 도입과 포스트텐션공법의 도입에 따른 장스팬 합성구조의 최종 융합기술 성능 검증 및 화재안전 최적화 내화설계기술을 개발할 수 있을 것으로 판단됨.

<표 2.1> 한국건설기술연구원 화재안전연구실 보유장비

연구수행 기관	연구기자재 및 연구시설명	사진	규격	활용용도	보유 기관	확보 방안	비 고
공동-KICT	• 실규모 제배연 실험동		5층 규모	• 연기거동 및 연기제어 기술 실규모 성능평가	KICT	기보유	
공동-KICT	• Large Scale • Calorimeter		10MW	• 실물 화재시 연소가스(CO, CO2),발생량, 화재하중측정 • 특정 유독가스(HCL, HCN 등) 측정시에는 별도의 분석장치(FTT) 설치	KICT	기보유	
공동-KICT	• Single • Burning • Items(SBI) - EN 13823 - BS EN 13823		· TEST ROOM : 3X3X2.6(M) · 전체최소높이 : 4.5M	• 가구(의자, 책상 등) 등의 발열량, 발연속도, 가스발생량 측정 • 특정 유독가스(HCL, HCN 등) 측정시에는 별도의 가스분석장치(FTT) 설치 • 유럽기준 적용 • REAL SCALE TEST	KICT	기보유	
공동-KICT	• Room Corner • Tester - ISO 9705 - ASTM E 1537, 603 - prEN 14390		· TEST ROOM: 2.4X2.4X3.6 · DOOR: 0.8X2(M) · HOOD: 3X3X1.95 · DUCT: 0.4(∅)X5(M)	• 가구(의자, 책상 등) 등의 발열량, 발연속도, 가스발생량 측정 • 특정 유독가스(HCL, HCN 등) 측정시에는 별도의 가스분석장치(FTT) 설치 • ISO 기준 적용 • Dynamic test • REAL SCALE TEST	KICT	기보유	
공동-KICT	• Bomb • Calorimeter - ISO 1716		220V ~ 240V, 5A	• 건축재료의 연소시 필요한 열량 check • 완전 연소 시험	KICT	기보유	
공동-KICT	• LTOI • (Limited • Temperature • Oxygen Index) - KS M ISO 4589-1,2,3 - ISO 4589-1, 2, 3 - ASTM D 2863		· W : 350 · D : 370 · H : 280 · SIZE:160MAX (dia)X450(H)	• 건축재료의 연소시 산소소모량 측정 • Closed test • SDC와 병행하여 사용 가능	KICT	기보유	
공동-KICT	• SDC • (Smoke Density Chamber) - KS M ISO 5659-1,2 - ASTM E 662 - ISO 5659-1,2 - NFPA 258		· W : 1,630 · D : 660 · H : 1,900 *실험실: 1.63X0.85X2 *Swing space 1.1M	• 연기 밀도(농도) 측정 • Closed test • Mass Loss 측정 가능 • 별도 장치로 Gas 분석 가능 • Static Smoke tester • 자체 Hood 사용	KICT	기보유	
공동-KICT	• Toxicity Test • Apparatus - ASTM E 1678		· W:1,200 · D:800 · H:1,600	• 유독가스 측정(HCN, HCl 등) • Closed test • 자체 Hood 사용	KICT	기보유	

연구수행 기관	연구기자재 및 연구시설명	사진	규격	활용용도	보유 기관	확보 방안	비 고
공동-KICT	• Radiant Panel Test Apparatus		ASTM E 162	• 건축 내장재의 표면 화재확산 위험성 평가 및 DB구축	KICT	기보유	
공동-KICT	• 콘크리트 고온 압축 가열로		ISO	• 건축재료(콘크리트)의 화재시 고온 영역에서의 역학 특성 평가 및 DB 구축	KICT	기보유	
공동-KICT	• UL 94 • Flammability • Tester - UL 94 - ISO 9772		*Chamber inside volume: 0.85㎥	• 가연성 건축재료의 연소특성 평가(면/섬유/타일/카페트 등) • Closed test • 제작 가능 장비 • 수평, 수직 모두 가능 • 자체 Hood 사용	KICT	기보유	
공동-KICT	• Rate of Heat • Release • Apparatus - ASTM E 906		· W:1,600 · D:1,400 · H:2,500	• 건축재료의 발열량, 발연속도 측정	KICT	기보유	
공동-KICT	• NON-Combustibility • Tester - KS F ISO 1182 - ISO 1182 - JIS A 1321		· W:400 · D:400 · H:1,230	• 불연재료의 연소특성 평가 • Closed test • Cone Cal.로서 대체 가능 • 자체 Hood 사용	KICT	기보유	
공동-KICT	• 가열챔버 • (압축용/인장용)		· 로의 외경 : Φ 360 · 로의 내경 : Φ 180 · 로의 높이 : 460	• 강재 및 콘크리트의 고온 가열용(20~1.200℃) • 기존 실험장비에 부착	KICT	기보유	
공동-KICT	• Specific Heat • Tester(비열실험기)		· W:600 · L:800 · H:700	• 강재, 콘크리트 등 건축재료, 내화재료 등의 비열측정	KICT	기보유	
공동-KICT	• Thermal Conductivity • Tester(열전도율실험기) - ISO 8894-1,2 - ASTM C 1113		· W:1745 · L:740 · H:640	• 강재, 콘크리트 및 내화피복재료의 • 열전도율 측정	KICT	기보유	
공동-KICT	• Thermal Expansion • Coefficient • Tester(열팽창율실험기) - ASTM E 1461		· W:900 · L:310 · H:264	• 강재, 콘크리트 및 내화피복재료의 열팽창율 측정	KICT	기보유	

연구수행 기관	연구기자재 및 연구시설명	사진	규격	활용용도	보유 기관	확보 방안	비 고
공동-KICT	• 터널 • 실험동		10M×4M×40M	• 터널 화재 실물실험 수행시설	KICT	기보유	
공동-KICT	• 전기로		1300℃ 가열	• 고온에서의 재료의 물성 시험	KICT	기보유	
공동-KICT	• 벽용 내화시험 • 장치		3000 × 3000	• 벽체 재하 및 비 재하 가열 시험 • 방화문·방화창·방화셔터, • 승강기 문 등 가열시험	KICT	기보유	
공동-KICT	• 바닥용 내화시험 • 장치		· 4500 × 3500	• 바닥, 지붕 가열시험, • 데크플레이트, 보 재하 가열시험 • 콘크리트 공시체 가열 시험등	KICT	기보유	
공동-KICT	• 기둥용 내화시험 • 장치		높이 3000	• 기둥재하가열시험 • 피복재시험, 금고시험 등	KICT	기보유	
공동-KICT	• 1000ton 기둥가열로		· 기둥 길이 : 5m 재하 · 용량:1000ton	• 고강도 기둥구조부재 내화성능평가실험	KICT	기보유	
공동-KICT	• 중/장지간 가열로		· 보스팬:10m · 최대 하중 재하: 300ton	• 장스팬 합성구조 내화성능평가실험	KICT	기보유	

제2절 연구수행과정 및 내용

1. 연구목표 및 내용

연차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	▪ 슬림플로어 보 유형별 내화성능 확보방안 제시[목표: 90분]	▪ 슬림플로어 보 내화실험[7.5M 합성보] - 대상: 일반합성보. 비대칭 슬림플로어보, PS파형웨브 합성보 ▪ PS도입에 따른 파형웨브 합성보의 내화성능 향상효율도출[내화성능 향상방안]
	▪ 세부구성 요소 이론적 고찰 및 시공공법 개발	▪ 적용 연구대상의 시공성 검토 및 접합부 구조성능 고찰 ▪ 프리스트레스 파형합성보의 현장적용을 위한 시공디테일 검토 ▪ PS 파형합성보의 실제 적용을 위한 연속화 시공공법 및 접합부 상세 개발
	▪ 개발기술[PS파형웨브 합성보] 설계적용	▪ PS도입 제작·시공시의 문제점 도출[현장애로기술 제시] ▪ 개발기술 적용현장 선정 및 설계반영
2차년도	▪ 층고절감형 PS파형웨브 합성보 의 무피복 내화성능 확보방안 제시[목표:120분]	▪ 녹색기술 인증 추진 ▪ PS도입 PS파형웨브 합성보 내화실험 - 하중비개념도입[60%],120분성능확보 ▪ PS파형웨브 합성보 내화성능향상방안 제시
	▪ 접합부 및 파형웨브 합성보의 구조성능 해석모델 개발	▪ 개발된 연속화 시공공법에 대한 해석모델 개발 ▪ 보-기둥 접합부 거동에 대한 상세 해석 실시 ▪ FEM 해석 및 수치해석을 통한 PS 파형합성보의 구조성능 해석 수행
	▪ 개발기술[PS파형웨브 합성보] 시공적용	▪ 개발기술 공공건물 시공현장 적용시 문제점 도출 ▪ 개발기술 시공현장적용 및 기술지원. ▪ 녹색기술 인증 공동추진
3차년도	▪ 층고절감형 PS파형웨브 합성보 의 무피복 내화성능확보 공법개발[목표:180분]	▪ 개발기술 실용화를 위한 내화실험[하중비에 따른 내화설계기준] ▪ PS+파형웨브 기술도입 무피복 180분 내화성능 확보방안 제시 ▪ 내화구조 7.5M 3시간 인정추진
	▪ 파형웨브 접합부 시공기법 검증 및 최적 접합방법 도출	▪ 개발기술의 검증 및 보완을 통해 접합부 상세 시공기법 도출 ▪ PS 파형합성보의 내화 해석 및 검증 ▪ 현장 적용시 애로사항 해결방안 제시
	▪ 개발기술[PS파형웨브 합성보] 시공적용	▪ 개발기술 시공현장적용/기술지원 ▪ 내화구조 7.5M 3시간 인정추진

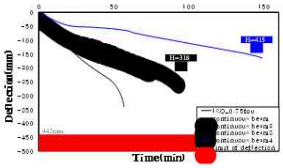
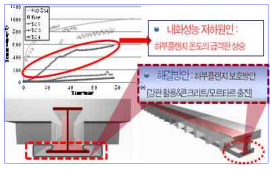
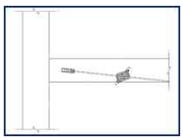
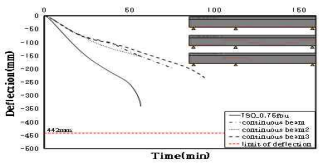
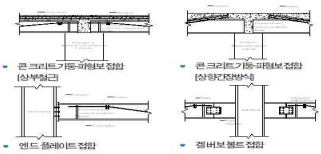
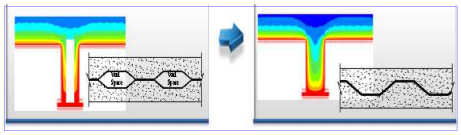
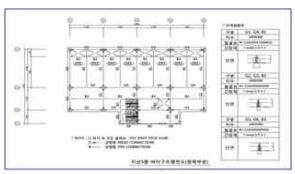
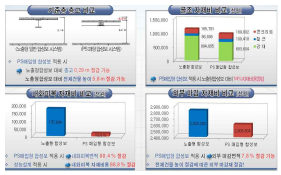
2. 연도별 주요 추진 일정

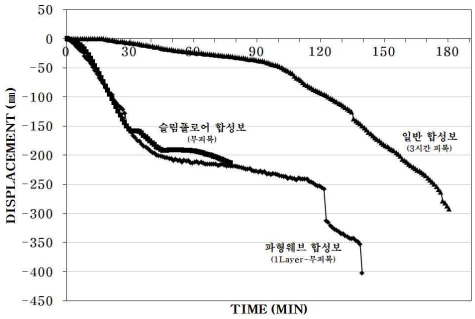
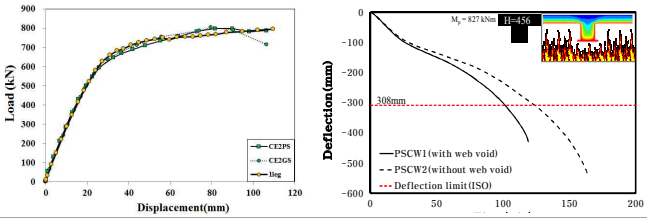
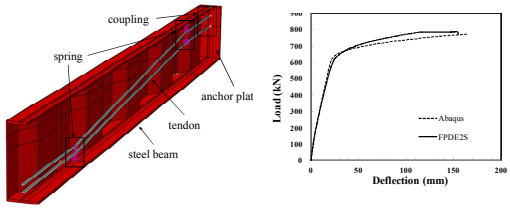
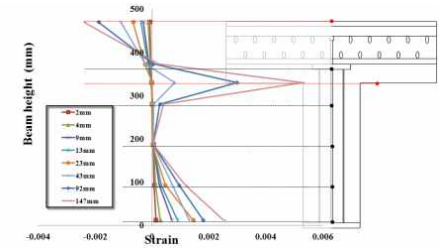
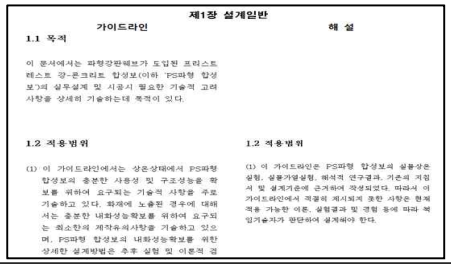
연차	연구목표	연 구 내 용	추 진 일 정												비중 (%)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1차년도	슬림플로어 유형별 내화성능 확보방안	슬림플로어 보 유형별 내화성능 확보방안 제시[목표: 90분]													37
		세부구성 요소 이론적 고찰 및 시공공법 개발													30
		개발기술[PS파형웨브 합성보] 설계적용													33
2차년도	층고절감형 • PS파형웨브 합성보의 7.5m 무피복 내화공법 개발 [120분]	층고절감형 PS파형웨브 합성보 의 무피복 내화성능 확보방안 제시[목표:120분]													34
		접합부 및 PS파형웨브 합성보의 구조성능 해석모델개발													31
		개발기술[120분] 현장 시공적용													19
		녹색기술인증 추진(안) 마련													16
3차년도	층고절감형 PS파형웨브 합성보의 현장적용 실용화 기술개발 [180분]	층고절감형 PS파형웨브 합성보 의 무피복 내화성능확보 공법개발[목표:180분]													33
		PS파형웨브 합성보의 접합부 시공기법 검증 및 최적접합방법도출													30
		내화구조 인정추진													7
		개발기술[180분] 현장 시공적용													17
		무피복 장스팬 합성구조공법개발 [설계/시공매뉴얼]													13

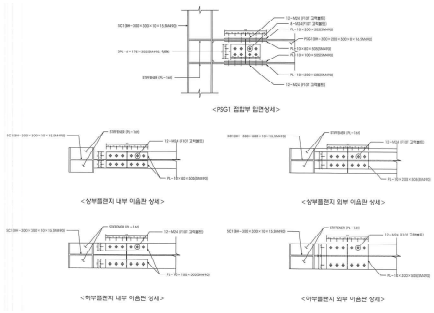
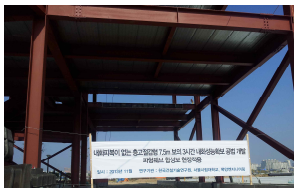
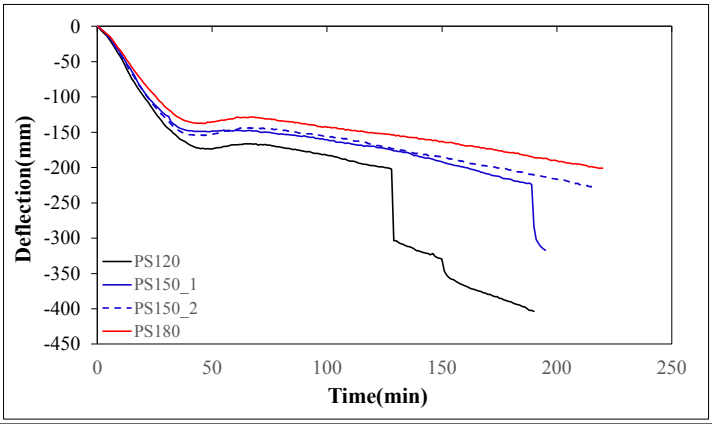
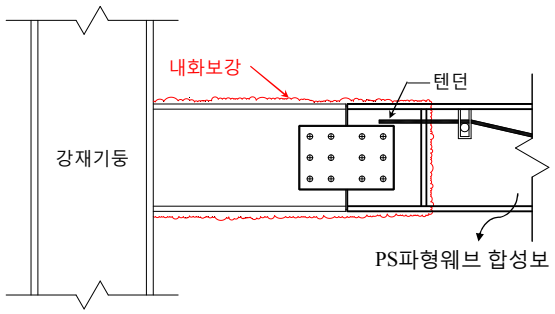
제3절 연구수행결과 및 결과의 검증방법 등

1. 연구개발결과 요약

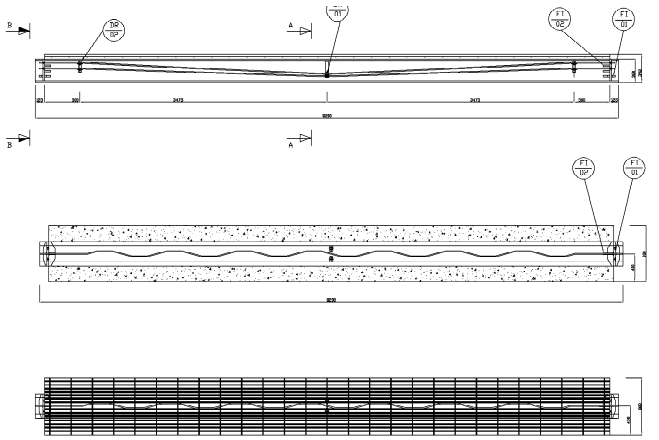
연차	연차별 성과목표	연구수행결과		검증방법
1차년도	층고절감형 PS파형웨브 합성보의 내화성능 확보방안 [90분]	질적목표	개발공법 무피복 90분 내화성능 확보	시험성적서
			연속화 시공법 개발	보고서
			보-기둥 접합상세 제시	보고서
			현장적용 방안 마련	설계도면
		양적지표	특허 출원 1건	특허 출원증
			국내 학술지 게재 2건	논문집
			국내 학술대회 발표 2건	학술발표집
2차년도	층고절감형 PS파형웨브 합성보의 7.5m 무피복 내화공법 개발 [120분]	질적목표	개발공법 무피복 120분 내화성능 확보	시험성적서
			연속화 시공법 해석모델 개발	보고서
			보-기둥 접합부 거동해석	보고서
		양적지표	SCI급 논문게재 1건	논문집
			국내 학술지 게재 3건	논문집
			국내 학술대회 발표 2건	학술발표집
			공동장비 활용 1건	공문
			현장적용 1건	보고서
3차년도	층고절감형 PS파형웨브 합성보의 현장적용 실용화 기술개발 [180분]	질적목표	개발공법 무피복 180분 내화성능 확보	시험성적서
			접합부/시공 디테일 제시	설계·시공 매뉴얼
		양적지표	SCI급 논문게재 1편	논문집
			국내 학술지게재 2편	논문집
			국내 학술대회 발표 2편	학술발표집
			특허 등록 1건	특허등록증
			현장적용 1건	보고서
			녹색기술 인증 1건	인증서
			내화구조 인정(무피복 3시간) 1건	인정서
			건설신기술 인증 1건	인증서

연 차	연구 내용	연구 결과
1차년도	▪ 슬림플로어보 내화실험[7.5M] – 대상: 일반합성보, 비대칭 슬림플로어보, PS파형웨브 합성보	• 동일 단면소성모멘트 대비 하중조건에 따른 합성보 공법별 화재거동 분석 
	▪ PS도입에 따른 PS파형웨브 합성보 의 내화성능 향상효율도출[내화성능 향상방안]	• 내화성능 향상방안 1-보의 춤을 증가시킴으로써 내화성능 향상[0.316M→0.360M] • 내화성능 향상방안 2-합성보 하부플랜지 보호를 통한 내화성능 향상  
	▪ 적용 연구대상의 시공성 검토 및 접합부 구조성능 고찰	• PS파형웨브 합성보의 전단연결재 보강을 통한 수평전단 저항능력 향상 • 보의 측면 중앙부 양방향 긴장 정착부 개발-단부 긴장공간 생략으로 인한 시공성 향상   
	▪ PS파형웨브 합성보의 현장적용을 위한 시공디테일 검토	• PS 텐던 프로파일에 따른 거동분석 
	▪ PS파형웨브 합성보의 실제 적용을 위한 연속화 시공공법 및 접합부 상세 개발	• 실제 구조물의 적용조건을 고려한 연속기지 조건에서의 보·기둥 접합방식 검토 
	▪ PS도입 제작·시공시의 문제점 도출[현장애로기술 제시]	• 자동용접설비의 실용화를 위한 파형웨브 형상 간편화 
	▪ 개발기술적용 현장선정 및 설계반영	• 개발기술 설계반영 검토 • 개발기술의 장·단점 및 유사기술대비 경제성 도출  

<table>
<tr><td rowspan="4">2차년도</td><td>▪ 층고절감형 PS파형웨브 합성보 의 무피복 내화성능 확보방안 제시[목표:120분]</td><td>• PS파형웨브 합성보 내화실험
- 138분 내화성능 확보(2차년도 목표:120분)
• PS파형웨브 합성보 내화성능향상방안 제시
• 녹색기술 신청 완료
  </td></tr>
<tr><td>▪ 부재 내부 중공부위 유무에 따르는 부재 의 상온 성능 비교 및 화재 시 열전달 매커니즘에 따르는 성능차이 확인</td><td>• 중공부가 없는 PS파형웨브 합성보의 상온실험 수행을 통해 상온성능의 비교 수행
• 파형웨브 형상 간편화를 통한 부재 중공부위 제거를 통해 부재성능 향상 검증
  </td></tr>
<tr><td>▪ 비선형유한요소해석 모델 개발 및 검증</td><td>• 시공절차를 반영한 비선형 유한요소 해석 모델 개발
 
• FEM 해석 및 수치해석을 통한 PS파형웨브 합성보의 구조성능 해석수행
  </td></tr>
<tr><td>▪ PS파형웨브 합성보의 현장적용을 위한 설계시공 매뉴얼 제시</td><td>• PS파형웨브 합성보의 설계 및 시공 시 유의 사항과 접합부를 고려한 설계·시공매뉴얼 제시
  </td></tr>
</table>

<table>
<tr><td rowspan="2">2차년도</td><td>▪ 개발기술[PS파형웨브 합성보] 현장적용</td><td>• 현장 적용성을 고려한 표준 접합부 상세안 제시
 
• 현장적용 디테일 검토를 통한 부재의 현장적용 완료
   </td></tr>
<tr><td rowspan="2">3차년도</td><td>▪ 층고절감형 PS파형웨브 합성보 의 무피복 내화성능 확보방안 제시[목표:180분]</td><td>• 개발기술의 실물 내화실험
• - 210분 내화성능확보(3차년도 목표: 180분)
• 녹색기술인증 획득
 
</td></tr>
<tr><td>▪ 접합부 내화보강 방안대안 마련</td><td>• 실험 여건을 고려하여 해석적 연구를 통하여 PS파형웨브 합성보를 연속보 시스템으로 내화성능을 평가하였으며, 그 결과를 근거로 접합부의 회전구속 여부에 따라 내화보강 방안을 마련함.
 

- 겔버보 접합부의 내화보강</td></tr>
</table>

3차년도	■ 개발기술[PS파형웨브 합성보] 현장적용	• 무피복 합성보에 대한 3시간 내화성능을 확보하고 시장진입이 가능할 것으로 분석된 최적 단면에 대하여 내화구조 인정 추진. **형상**: 스팬:7.5 보폭:0.8m, 보춤:0.392m **콘크리트 강도**: 45MPa **강재 (SS400)**: 비대칭 H-320*236* 346*14*22 **강연선**: Ø12.7 -4EA **슬래브 두께**: 120 ㎜ **데크**: deep-deck (Cap-deck Type) 

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

제1절 구조성능 개선

일반적인 I형 철골보는 단면의 축강성이 매우 크기 때문에 프리스트레스를 도입하면 긴장력의 도입효율이 매우 낮다. 그러나 표 3.1에 나타낸 바와 같이 파형웨브를 적용하여 긴장력 도입시 낮은 웨브의 축강성으로 인하여 발생하는 아코디언효과를 이용함으로써 상하부 플랜지의 프리스트레스 도입효율을 크게 증진시킬 수 있으며, 처짐제어 효율을 극대화시킬 수 있다. 또한, 프리스트레스트 철골보의 웨브 및 상부 슬래브에 콘크리트를 타설하여 합성보를 제작하면 철골부재와 콘크리트의 접착력에 더불어 파형단면에 의한 추가적인 지압면적을 통하여 합성효율을 향상시킬 수 있다. 따라서, 파형웨브를 적용한 프리스트레스트 합성보는 고강도 및 고강성을 확보할 수 있기 때문에 장스팬에 유리하면서도 층고절감에 효과적인 대안이 될 수 있다.

기존에 참여연구자들은 콘크리트와 합성전 파형철골보에 프리스트레스를 도입할 때 발생되는 아코디온효과를 유효단면개념을 적용하여 정량적으로 산정할 수 있는 방법을 고안하였고, 콘크리트와 합성후 합성보의 휨거동예측모델을 제안하였다. 파형웨브가 적용된 매립형 프리스트레스트 합성보의 구조성능을 실험적으로 검증하고, 휨거동예측모델의 정확성을 평가하기 위하여 표 3.1과 같이 총 5개의 파형웨브가 적용된 프리스트레스트 합성보의 휨실험을 수행하였다. 프리스트레스의 보강효과를 평가하기 위하여 4개의 실험체에는 프리스트레스를 도입하였고, 1개의 실험체에는 도입되지 않았다. 텐던의 배치방식은 1점절곡형과 2점절곡형 2가지 형태로 제작하여 텐던의 배치방식에 따른 휨거동의 차이를 비교하였다.

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계압축강도 35 MPa 그리고 철골보는 SS400 강종을사용하여 제작되었으며, 슬래브에 배치된 이형철근의 경우 SD400을 사용하였다. 또한 지름 12.7 mm인 인장강도 1860 MPa의 7연선 저이완 텐던을 사용하여 합성보에 프리스트레스를 도입하였다.

<표 3.1> 실험체 일람

실험체	웨브형상	프리스트레스 적용	드레이프드 포인트	전단연결재
FPCE1P	파형웨브	O	1	-
FPCE2P	파형웨브	O	2	
FPCE2PS	파형웨브	O	2	@300
FPCE2GS	파형웨브	O	2	@300
FNCP	파형웨브	X	-	

1. 프리스트레스 도입실험

가) 프리스트레스 도입

그림 3.1은 FPCE1P, FPCE2P, FPCE2PS 및 FPCE2GS 실험체에 프리스트레스 도입 시 보의 중앙단면에서 측정된 변형률을 단면의 높이에 따라 나타낸 것이다. 파형웨브의 아코디언효과에 의해서 웨브에 도입되는 프리스트레스의 크기는 매우 작은 반면 상·하부플랜지에 도입되는 프리스트레스의 크기는 큰 것을 확인할 수 있다. 측정된 변형률을 그림 3.1에 사선으로 나타낸 전단면적(gross section)을 이용한 (즉, 일반적인 I형 단면과 동일하게) 해석을 통해 계산된 변형률과 비교해 보면 파형보의 상부플랜지의 경우, 프리스트레스트 도입효율이 평균 4.3배 정도 증가하였고, 하부플랜지의 경우, 약 25%정도 증가된 것을 알 수 있다. 아코디언 효과를 해석에 반영하기 위하여 유효단면적(A_e) 및 유효단면2차모멘트(I_e)개념을 적용하였으며, 이는 식 (1) 및 (2)와 같이 웨브의 유효단면계수(η_a)와 유효단면2차모멘트계수(η_f)를 사용하여 산정할 수 있다.

$$I_e = \eta_f I_g \tag{1}$$

$$A_e = A_{flange} + \eta_a A_{web} \tag{2}$$

여기에서 I_g는 전단면 2차모멘트, A_{flange}는 철골보 상하부 플랜지 단면적의 합, A_{web}은 웨브의 단면적으로 정의되며, 유효단면2차모멘트 계수 및 유효웨브단면적계수는 다음 식 (3) 과(4)로 산정할 수 있다.

$$\eta_f = 0.7\left(\frac{d}{t_w}\frac{a}{h_w}\frac{b_f}{h_w}\right)^{0.15} \tag{3}$$

$$\eta_a = 0.3\left[\left(\frac{d}{t_w}\right)^{0.19}\left(\frac{a}{h_w}\right)^{0.19}\left(\frac{b_f}{h_w}\right)^{0.56}\right] \tag{4}$$

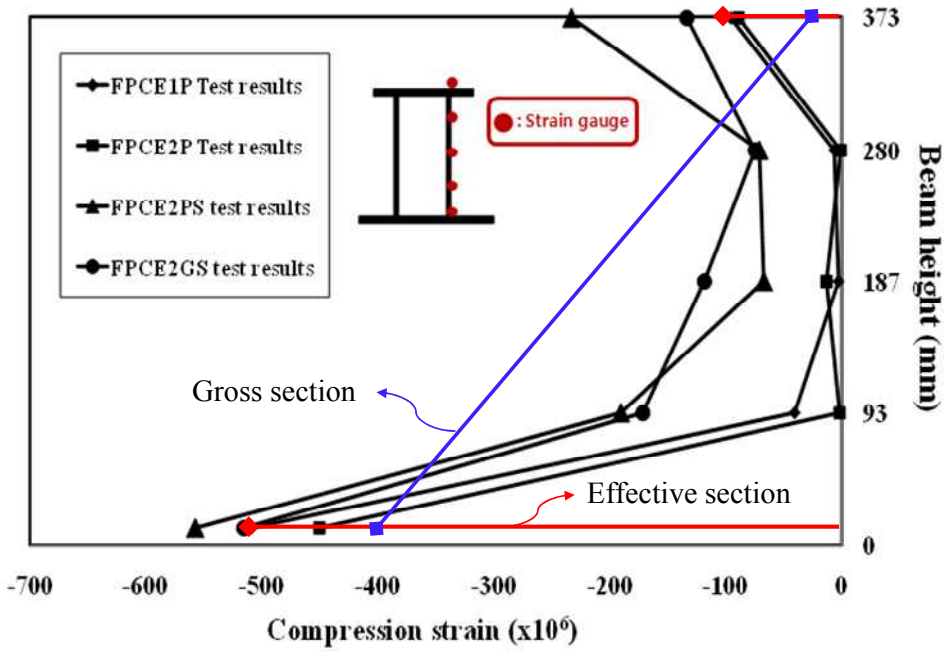
여기에서 d는 파형웨브의 파고, t_w는 웨브의 두께, a는 웨브의 패널폭, h_w는 웨브의 높이, b_f는 하부플랜지의 두께이다. 제안된 유효단면적 및 유효단면2차모멘트를 이용하여 상·하부플랜지의 변형률 및 응력으로 계산 할 수 있다.

$$\varepsilon_{pe,st,t} = \frac{\sigma_t}{E_s} = -\frac{P_e}{E_s A_e} + \frac{P_e e}{E_s I_e} y_t - \frac{M_{d,steel}}{E_s I_e} y_t \tag{5}$$

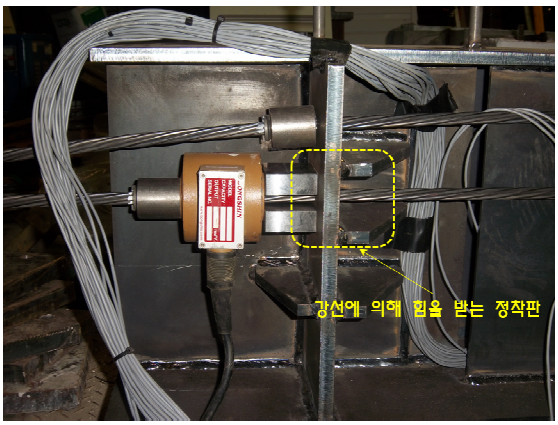
$$\varepsilon_{pe,st,b} = \frac{\sigma_b}{E_s} = -\frac{P_e}{E_s A_e} + \frac{P_e e}{E_s I_e} y_b - \frac{M_{d,steel}}{E_s I_e} y_b \quad (6)$$

여기서 P_e는 유효프리스트레스트 힘, E_s는 강재의 탄성계수, e는 단면의 도심축으로부터 긴장재 도심까지의 편심거리, $M_{d,steel}$은 철골보의 자중에 의한 휨모멘트, y_t는 단면의 도심으로부터 철골보 단면 최상부까지 거리, y_b는 단면의 도심으로부터 철골보단면의 최하부까지 거리이다. 식 (1)~(6)를 이용하여 계산된 유효단면2차모멘트 계수(η_f)와 유효단면적계수(η_a)는 각각 0.91와 0.39이다. 이는 일반 H형강에 비해 파형웨브를 도입한 철골보에 휨강성과 축강성이 각각 91%와 39% 감소한 것을 의미하고 이러한 강성의 감소를 통해 철골보에 도입되는 프리스트레스를 증가시킬 수 있음을 의미한다. 그림 3.1에 수평직선으로 나타낸 유효단면개념을 이용한 해석결과는 프리스트레스 도입시에 파형웨브가 적용된 철골보의 변형률을 비교적 간략한 방법으로 정확하게 평가할 수 있음을 보여주고 있다.

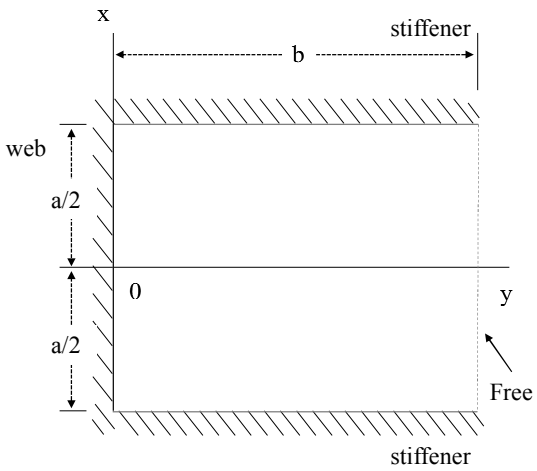
그림 3.2(a)에 보이는 바와 같이 텐던 정착판은 철골보의 웨브와 플랜지에 용접되어 있으며, 정착판의 앞면에 2개의 스티프너와 뒷면에 1개의 스티프너에 의해 보강되어 있으며, 그림 3.2(b)와 같이 단순화되어 표현될 수 있다. 설계의 편의성을 위해 정착판 전체에 동일한 등분포하중(q)이 작용하고 있다고 가정하여 각 부분의 처짐, 모멘트 및 전단력은 표 3.2에 의해서 간략하게 계산할 수 있다. 이렇게 산정된 작용모멘트(M_u)들 중 가장 큰 값이 정착판의 항복모멘트($F_y S_z$, 여기서 F_y는 철판의 항복강도 그리고 S_x는 철판의 단면 1차 모멘트(statical moment))의 50%인 $0.5M_y$ 보다 작게 설계하면 프리스트레스 도입시 발생할 수 있는 응력집중이나 제작 혹은 운반 중에 발생하는 부재의 초기결함에 대해서도 안정성을 확보할 수 있다. 정착판에 작용하는 작용모멘트가 $0.5M_y$ 보다 크게 산정되는 경우에는 정착판의 두께를 두껍게 하거나 스티프너의 간격을 줄여서 안전성을 확보해야 할 것이다.



[그림 3.1] 웨브의 위치에 따른 변형률의 분포



(a) 텐던 정착판의 모습



(b) 정착판의 해석적 단순화

[그림 3.2] 텐던 정착판

<표 3.2> 3면이 구속되고 1면이 자유로운 철판의 처짐, 모멘트 그리고 반력

$\frac{b}{a}$	$x=0, y=b$		$x=0, y=b/2$			$x=a/2, y=b$		$x=a/2, y=b/2$		$x=0, y=0$	
	$w = \alpha_1 \frac{qa^4}{D}$ α_1	$M_x = \beta_1 qa^2$ β_1	$w = \alpha_2 \frac{qa^4}{D}$ α_2	$M_x = \beta_2 qa^2$ β_2	$M_y = \beta_2' qa^2$ β_2'	$M_x = \beta_3 qa^2$ β_3	$V_x = \gamma_3 qa$ γ_3	$M_x = \beta_4 qa^2$ β_4	$V_x = \gamma_4 qa$ γ_4	$M_y = \beta_5 qa^2$ β_5	$V_y = \gamma_5 qa$ γ_5
0.6	0.00271	0.0336	0.00129	0.0168	0.0074	-0.0745	0.750	-0.0365	0.297	-0.0554	0.416
0.7	0.00292	0.0371	0.00159	0.0212	0.0097	-0.0782	0.717	-0.0439	0.346	-0.0545	0.413
0.8	0.00308	0.0401	0.00185	0.0252	0.0116	-0.0812	0.685	-0.0505	0.385	-0.0535	0.410

0.9	0.00323	0.0425	0.00209	0.0287	0.0129	-0.0836	0.656	-0.0563	0.414	-0.0523	0.406
1.0	0.00333	0.0444	0.00230	0.0317	0.0138	-0.0853	0.628	-0.0614	0.435	-0.0510	0.401
1.25	0.00345	0.0467	0.00269	0.0374	0.0142	-0.0867	0.570	-0.0708	0.475	-0.0470	0.388
1.5	0.00335	0.0454	0.00290	0.0402	0.0118	-0.0842	0.527	-0.0755	0.491	-0.0418	0.373

나) 프리스트레스의 손실

부재에 도입된 프리스트레스는 도입 직후 발생되는 즉시손실(instantaneous loss)과 시간이 경과함에 따라서 진행되는 시간적 손실(time dependent loss)이 발생하게 된다. 프리스트레스 손실의 원인으로는 정착장치의 활동에 의한 손실, 콘크리트의 탄성변형, 크리프 및 건조수축에 의한 손실 및 프리스트레싱 텐던의 릴렉세이션에 의한 손실 등이 있다. 이러한 프리스트레스의 손실률은 즉시손실과 시간적 손실을 모두 고려하였을 때, 최초 도입 프리스트레스의 약 20~35%의 범위에 있다. 이러한 프리스트레스 손실에 대하여 PS파형웨브 합성보와 같은 모든 프리텐션부재의 경우 프리스트레싱 텐던이 부재에 정착된 이후에는 프리스트레스의 손실에 대한 보정이 불가능하다. 그러나 콘크리트와 텐던이 완벽히 부착되는 기존의 프리스트레스트 공법에서는 콘크리트와 텐던이 부착되어 있기 때문에 보통 프리스트레스의 손실이 크지 않으며, 다만, 장기적인 프리스트레스 손실은 상당량 발생될 수 있기 때문에 설계단계에서 즉시손실 및 장기손실을 고려하여 합성보를 설계해야 한다. 이 같은 내용은 이미 현행설계기준에 반영되어 있으며, '설계시공매뉴얼'에 이 같은 사항들이 반영되어 있다. 참고로, 비부착방식의 긴장재를 사용하는 경우에는 그림 3.14 (b)에 나타낸 상향식 긴장법을 도입하면 손실이 발생된 경우에 적절한 추가긴장이 가능하다.

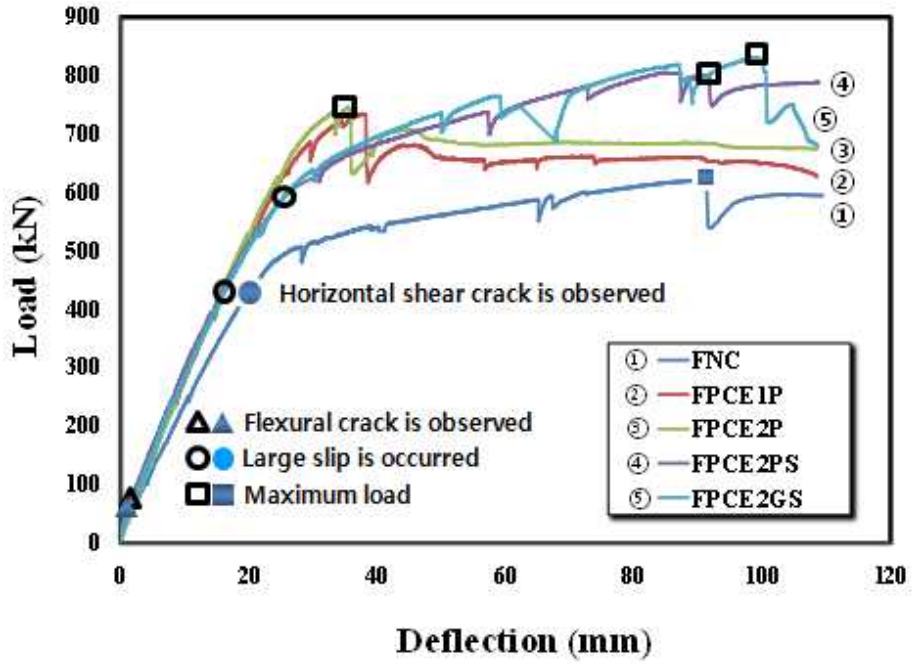
2. 휨실험

그림 3.2에는 파형웨브가 도입된 합성보의 휨실험결과를 하중-변위곡선으로 나타내었다. 프리스트레스가 도입되지 않은 FNCP실험체는 약 50 kN의 하중에서 초기 휨균열이 실험체의 중앙부에서 발생하였다. 520 kN 근처에서 수평전단균열이 관측되었으며, 최대하중 600 kN 부근에서는 수평전단균열이 최대모멘트구간(가력점)까지 발전하였다. 이 후 콘크리트 슬래브가 철골보 상부면에서 분리되면서 수평전단파괴 되기까지 완만한 기울기를 보였다.

프리스트레스가 도입된 FPCE1P와 FPCE2P는 프리스트레스가 도입되지 않은 FNCP에 비해 초기강성 및 강도가 뚜렷하게 증가하였다. 프리스트레스가 도입된 FPCE1P과 FPCE2P 실험체는 거의 비슷한 하중-처짐 거동을 보였으며, 프리스트레스가 도입되지 않은 FNCP실험체에 비하여 초기강성은 약 20%정도, 파괴하중도 약 25%가량 증가되었다. FPCE1P과 FPCE2P 실험체들은 FNCP실험체의 항복강도 이후에도 강성 변화가 거의 없이 650 kN 부근의 하중까지 선형적으로 증가하여 프리스트레스트 긴강재의 보강효과를 명확하게 관찰할 수 있었다. 초기 휨균열은 FNCP에 비해 약 40%정도 증가된 70 kN 부근에서 발생하였으며, 균열 직후에 강성의 저하는 전혀 나타

나지 않았다. 이후 FPCE1P는 하중 420 kN 정도에서 단부 슬래브와 보 사이에 수평전단균열이 발생하였으며, FNCP실험체와 마찬가지로 콘크리트 슬래브와 철골보의 상부면 사이의 슬립이 크게 발생하였고, 하중이 급격히 떨어지면서 수평전단파괴되었다. FPCE2P는 450 kN에서 수평전단균열이 관측되었으며, 745 kN에서 수평전단균열이 최대모멘트 구간내까지 진전되어 FPCE1P과 유사하게 콘크리트 슬래브와 철골보의 상부면이 분리되는 수평전단파괴양상을 보였다.

전단연결재가 배치되지 않은 FNCP, FPCE1P 및 FPCE2P는 합성단면의 콘크리트슬래브(합성단면의 플랜지)와 하부합성보가 분리되어 파괴되었다. 이러한 수평전단파괴를 방지하기 위하여 앞서 설명한 것과 같이 전단연결재로 보강된 FPCE2PS와 FPCE2GS를 계획하였다. 전단연결재가 배치된 FPCE2PS와 FPCE2GS는 그림 3.2에서 확인 할 수 있듯이 거의 동일한 거동을 보여주었다. FPCE2PS의 경우에는 66 kN에서 최초 휨균열이 관측되었으며, 690 kN 에서 수평전단균열이 발생되었다. 스터드가 배치된 실험체의 수평전단균열은 앞서 설명한 FPCE1P와 FPCE2P 보다 매우 큰 하중에서 발생된 것이다. 이는 전단스터드의 보강으로 인하여 수평전단균열강도가 높아진 것으로 판단된다. 또한, 스터드가 배치된 FPCE2PS실험체는 수평전단균열이 발생된 이후에도 큰 하중의 감소없이 계속적으로 하중이 증가하는 것을 확인 할 수 있다.



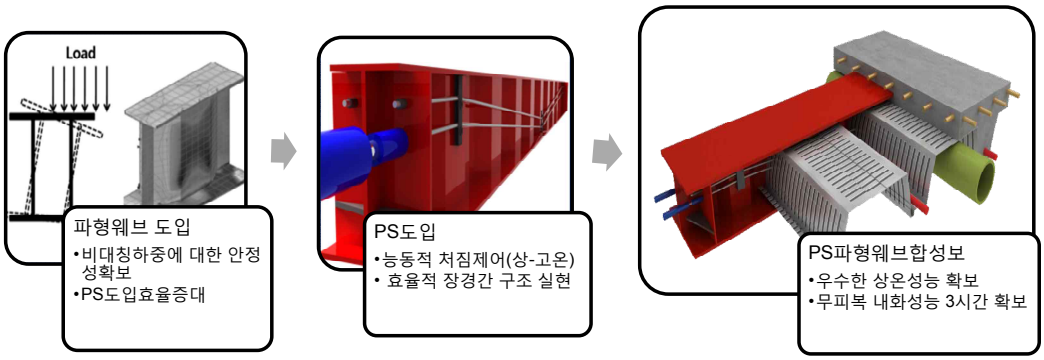
[그림 3.3] 하중-변위 관계(상온 휨 실험)

3. PS파형웨브 합성보의 구성요소에 의한 거동특성

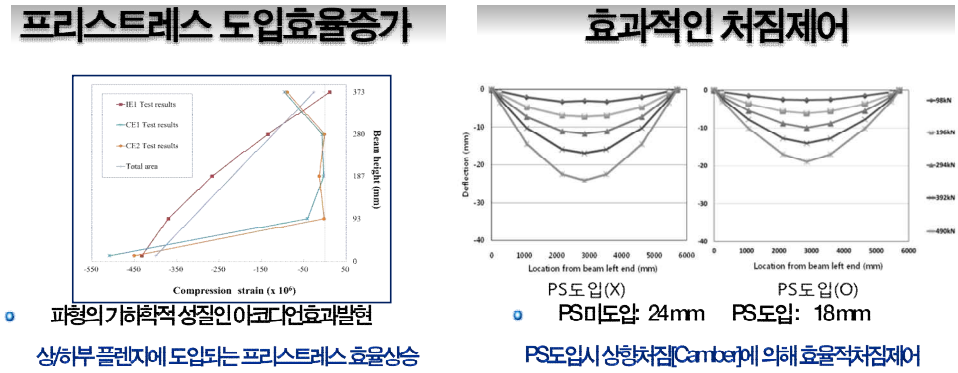
PS파형웨브합성보는 기존 합성보의 단점들을 개선하여 개발된 부재로서, 기존의 매립형합성보와는 다르게 H형강의 웨브부분이 평판이 아닌 파형강판으로 제작되었다. 이와 함께 부재에 PS를 도입하여 처짐성능 제어효과를 확보하고자 하였으며, 실험 및 해석과정을 통해 우수한 구조거동성능을 확인 할 수 있었다.

부재에 적용된 파형웨브는 그림 3.3에서 확인 할 수 있듯이 웨브에 골이 있는 형상으로서 부재가 테두리보에 적용될 경우 또는 시공하중 재하시 비대칭하중에 의한 안정성을 확보 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 파형웨브 적용의 궁극적인 목적은 PS도입 효율을 향상시키는데 있다. 기존 H형강은 웨브의 높이에 따라 부재의 축강성이 매우 크기 때문에 철골부재에 PS를 도입하는 과정에서 PS도입효율이 매우 떨어졌다. 이러한 기존 합성보의 단점을 극복하기 위해 철골보에 파형웨브를 도입함으로써 아코디온효과에 의한 PS도입효율을 극대화 할 수 있었다. 그 결과로 그림 3.4와 같이 부재에 도입된 PS에 의한 압축변형을 H형강의 상·하부플랜지에 집중시키고, 웨브의 기하학적 형태로 인하여 축강성이 약해진 웨브영역에는 PS에 의한 압축저항이 발생되지 않도록 함으로써 부재의 휨성능 및 처짐성능을 보다 향상시킬 수 있었다. 즉, PS파형웨브 합성보를 구성하고 있는 파형웨브 및 텐던에 의한 PS도입으로 인하여 부재의 상온성능 향상 뿐만 아니라 화해거동성능도 향상 시킬 수 있었다.

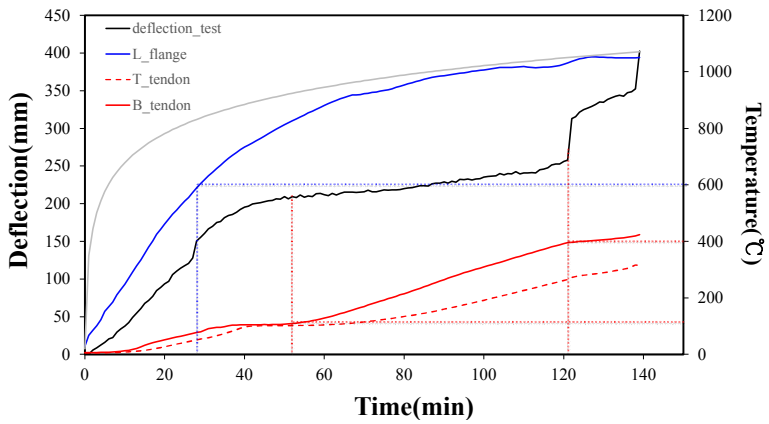
파형웨브적용 및 PS도입에 의한 거동특징은 고온조건에서도 뚜렷하게 나타났다. 이와 관련하여 그림 3.5에서 실물재하가열실험을 통해 고온조건에서 PS파형웨브 합성보의 처짐제어효과를 확인할 수 있다. 실험 초반(30분), 외부에 노출된 하부플랜지의 급격한 온도상승과 함께 부재의 처짐량 또한 매우 빠르게 발생되었으며, 하부플랜지의 온도가 약 600℃에 도달한 후 부재 내부의 텐던에 의한 처짐제어 효과가 발현되는 것을 확인 할 수 있다. 다만, 2차년도 실험체에서는 경과시간 약 120분 무렵에 하부 텐던의 온도가 400℃에 도달하면서 순간적으로 급격한 처짐이 발생하였으며, 실험 종료 직전에도 같은 상황이 발생한 것을 확인 할 수 있다. 그림 3.6에 보이는 바와 같이 3차년도 실험체에서는 drape point 철물의 접합을 상부플랜지로 이동시켰으며, 텐던편심을 감소시킴으로써 철골보 인장플랜지와의 거리를 크게 하고, 파고를 감소시켜 웨브콘크리트의 단열효과를 높였다. 그 결과, 3차년도 실험체에서는 3시간 내화성능을 확보할 수 있었다.



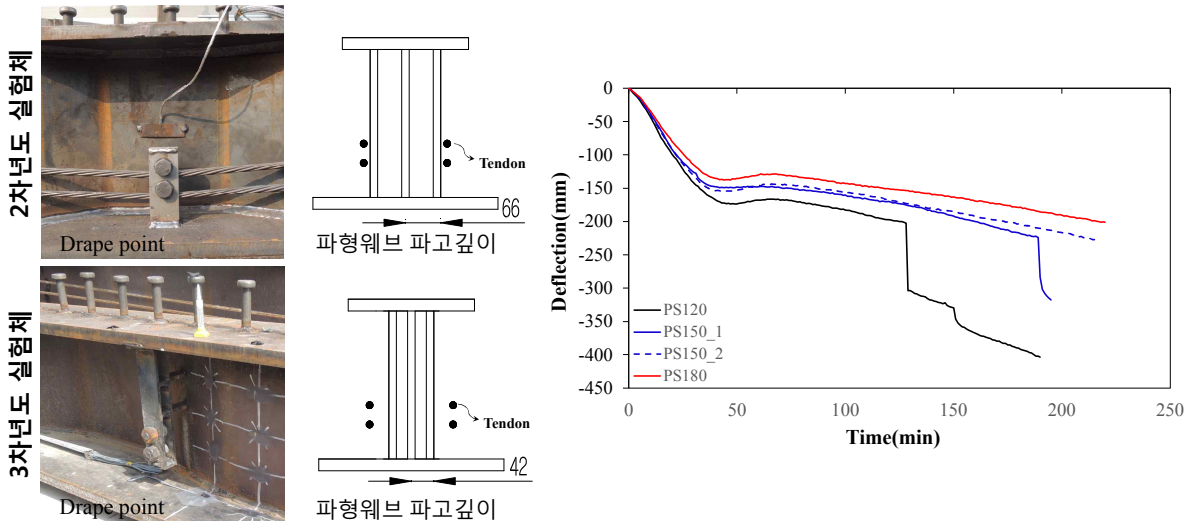
[그림 3.4] PS파형웨브 합성보의 구성요소



[그림 3.5] 부재구성요소에 의한 상온거동특성



[그림 3.6] 2차년도 실험체의 고온거동특성

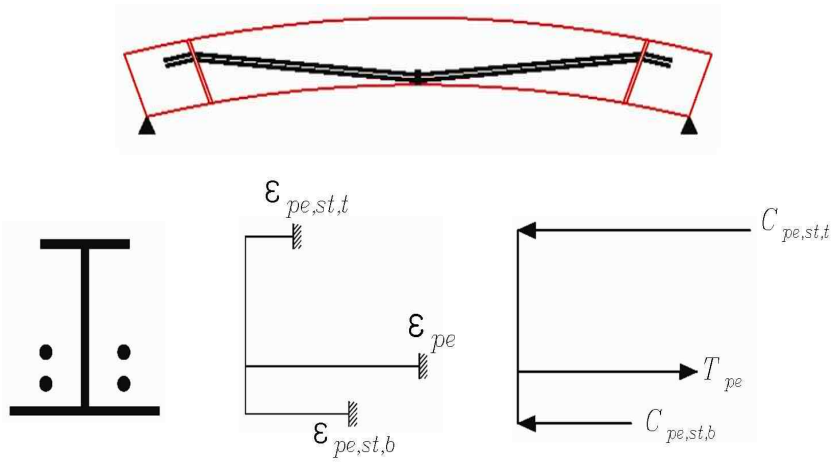


[그림 3.7] 실험체 제작변수 및 3차년도 실험체의 고온거동특성

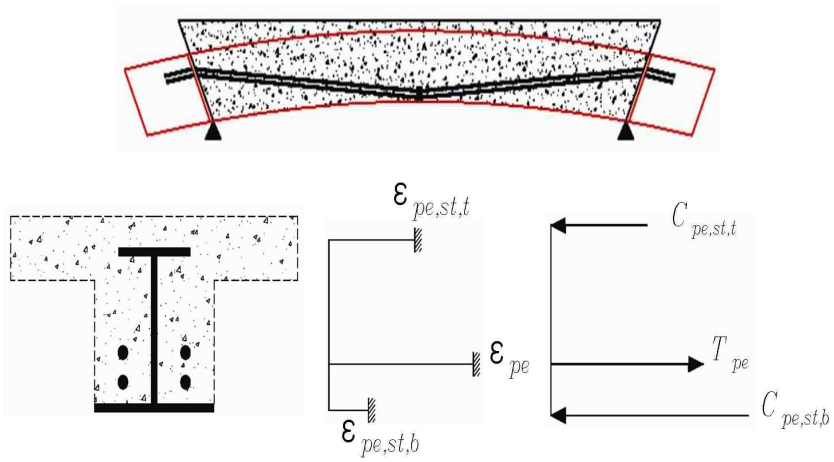
4. 비선형 해석을 통한 PS파형웨브 합성보의 상온거동 평가

가. PS파형웨브 합성보의 휨거동 및 휨강도

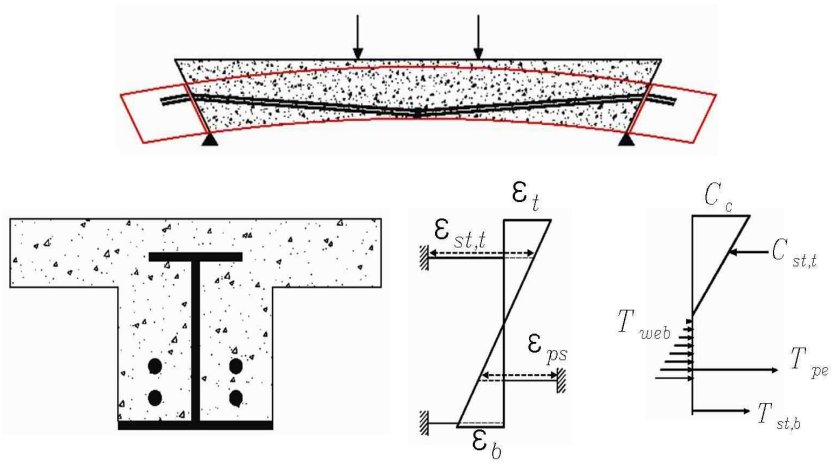
PS파형웨브 합성보의 휨거동을 예측하기 위해서는 PS파형웨브 합성보의 설치 및 시공단계에 따른 구조거동을 이해하여야 한다. PS파형웨브 합성보의 시공절차 첫 단계는 그림 3.7(1)에 나타낸 파형철골보에 프리스트레스를 도입하는 과정이다. 프리스트레스의 도입과정에서는 콘크리트와 합성 이전에 파형철골보가 탄성상태에 있으며, 프리스트레스 도입에 의하여 상향솟음(camber)이 발생하는 순간 철골보의 자중이 작용하게 된다. 또한 아코디언효과로 알려진 상하부플렌지에 응력집중현상 때문에 파형웨브에는 프리스트레스에 의한 변형률이 거의 발생하지 않는다. 다음으로 그림 3.7(2)에 나타낸 바와 같이 긴장된 철골보에 콘크리트를 타설하면 콘크리트의 자중이 실린다. 그림 3.7(3)에 나타낸 과정은 콘크리트와 합성 후 가력과정(사용하중 재하)이며, 단면은 콘크리트와 파형철골보의 합성단면이 된다. 이후 단계는 그림 3.7(4)와 같이 프리스트레스에 의한 변형률에 하중에 의해 증가된 변형률이 추가되어 하부플렌지가 항복하게 되고 콘크리트는 비선형거동을 시작한다. 작용하중이 더욱 증가하게 되면 그림 3.7(5)와 같이 합성 후 웨브의 변형률이 증가하여 웨브가 항복하고, 콘크리트의 비선형성은 더욱 커진다. 최종적으로 그림 3.7(6)와 같이 콘크리트압축측이 최대변형률에 도달하거나 파형철골보의 상하부플렌지가 모두 항복하여 극한상태에 도달한다. 이상의 구조적거동을 반영하여 해석 또한 먼저, 파형보에 프리스트레스를 적용한 후에 콘크리트와의 합성 후 가력하는 단계로 해석을 실시한다.



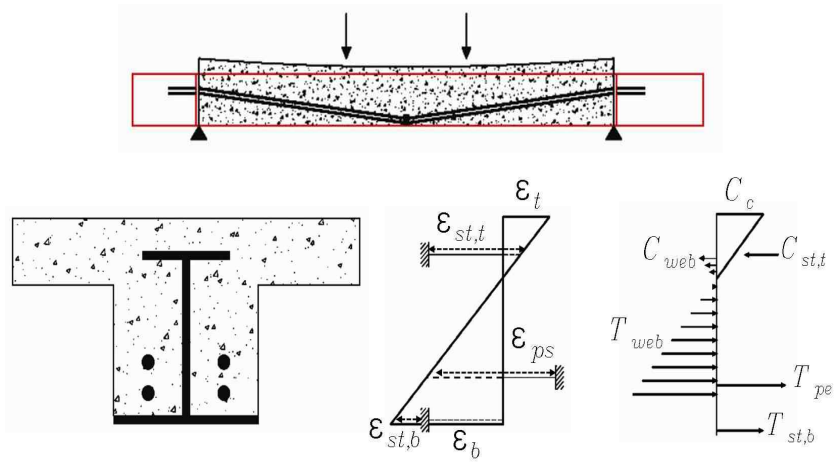
(1) 프리스트레스트 도입



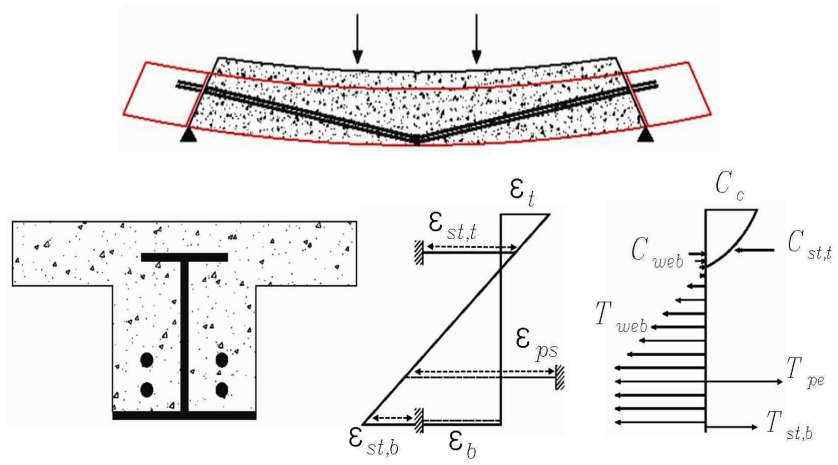
(2) 콘크리트 타설



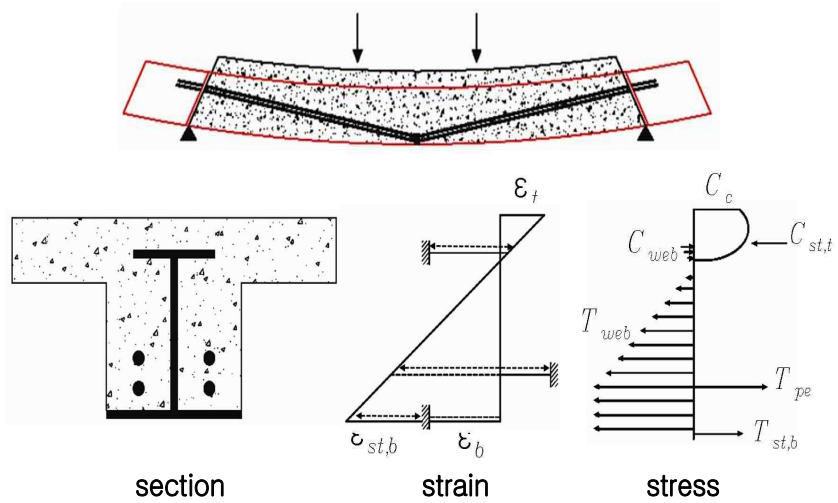
(3) 합성 후 하중가력



(4) 합성 후 하중가력에 의한 하부플랜지 항복



(5) 합성 후 하중가력에 의한 web 항복



(6) 극한하중 상태

[그림 3.7] 하중단계에 의한 응력과 변형률 상태

나. 웨브유효단면계수(η_a)와 유효단면2차모멘트계수(η_f)

I형 철골보에 프리스트레스를 도입 시 단면의 최상단 및 최하단의 축방향 변형률분포는 식 1a 및 1b로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{top} = \frac{\sigma_t}{E_s} = -\frac{P_e}{E_s A_g} + \frac{P_e e}{E_s I_g} y_t - \frac{M_{d,steel}}{E_s I_g} y_t \quad (1a)$$

$$\varepsilon_{bottom} = \frac{\sigma_b}{E_s} = -\frac{P_e}{E_s A_g} + \frac{P_e e}{E_s I_g} y_b - \frac{M_{d,steel}}{E_s I_g} y_b \quad (1b)$$

여기서, εtop 및 εbottom은 상·하부 플랜지의 변형률, σt 및 σb은 상·하부 플랜지의 응력, Es는 철골부재의 탄성계수, Pe는 유효 프리스트레스력, e는 단면의 도심으로부터 긴장재의 도심까지의 편심거리, yt 및 yb는 각각 단면의 도심으로부터 철골보 단면 최상단 및 최하단까지의 거리, Md,steel은 철골보 자중에 의한 휨모멘트이다. 그러나, 파형웨브가 적용된 철골보는 아코디언 효과 때문에 축강성 및 휨강성이 감소되므로 식 1로 계산되는 일반적인 I형단면의 해석결과보다 큰 도입응력이 발생한다.

$$\varepsilon_{pe,st,t} = \frac{\sigma_t}{E_s} = -\frac{P_e}{E_s A_{eff}} + \frac{P_e e}{E_s I_{eff}} y_t - \frac{M_{d,steel}}{E_s I_{eff}} y_t \quad (2a)$$

$$\varepsilon_{pe,st,b} = \frac{\sigma_b}{E_s} = -\frac{P_e}{E_s A_{eff}} + \frac{P_e e}{E_s I_{eff}} y_b - \frac{M_{d,steel}}{E_s I_{eff}} y_b \quad (2b)$$

따라서, 이번 연구에서 제안하는 아코디언 효과를 반영한 해석모델에서는 웨브의 변형률이 없는 것으로 해석하지 않고, 웨브가 약간의 축강성과 휨강성을 가지고 있다고 판단하여, 식 2a 및 식 2b와 같이 웨브유효단면적(Aeff)과 유효단면2차모멘트(Ieff)를 고려하여 해석하였다.

웨브유효단면적과 유효단면2차모멘트는 다음 식 3a 및 식 3b와 같다.

$$A_{eff} = A_{flange} + \eta_a A_{web} \quad (3a)$$

$$I_{eff} = \eta_f I_g \quad (3b)$$

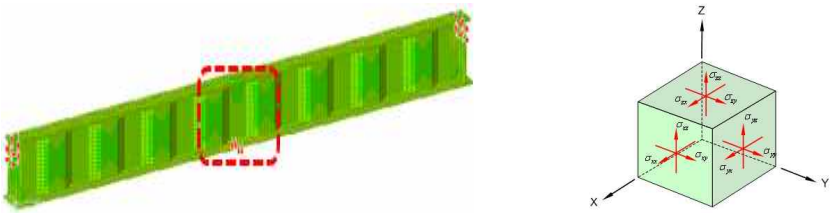
여기서, Aflange는 파형웨브 철골보 플랜지의 단면적이며, Aweb는 파형웨브 철골보 웨브의 단

면적, ηa는 웨브유효단면계수, ηf는 유효단면2차모멘트계수, Ig는 전체단면2차모멘트이다.

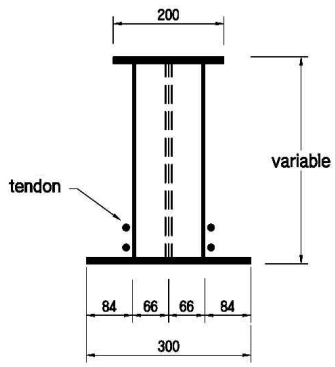
제안하는 웨브유효단면적 및 유효단면2차모멘트를 산정하기 위해서는 웨브유효단면계수와 유효단면2차모멘트계수를 먼저 결정하여야 한다. 웨브유효단면계수와 유효단면2차모멘트계수를 결정하기 위하여, 그림 3.8(1)과 같이 유한요소해석프로그램을 사용하였으며, 파형철골보의 유한요소는 그림 3.8(2)와 표 3.2에 나타낸 바와 같이 3차원응력요소(3D solid element)로 입력하였다.

<표 3.2> 유한요소해석모델의 제원

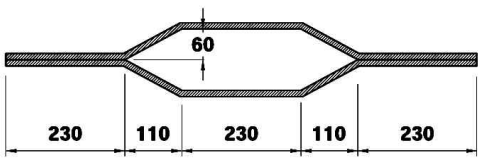
No.	h_w	d/t_w	a/h_w	a	t_w	No.	h_w	d/t_w	a/h_w	a	t_w
1	350	10.8	0.20	70.0	6.00	13	1000	10.8	0.20	200.0	6.00
2		10.8	0.51	178.5	6.00	14		10.8	0.51	510.0	6.00
3		15.0	0.20	70.0	4.33	15		15.0	0.20	200.0	4.33
4		15.0	0.51	178.5	4.33	16		15.0	0.51	510.0	4.33
5		20.0	0.20	70.0	3.25	17		20.0	0.20	200.0	3.25
6		20.0	0.51	178.5	3.25	18		20.0	0.51	510.0	3.25
7	600	10.8	0.20	120.0	6.00	19	1500	10.8	0.20	300.0	6.00
8		10.8	0.51	306.0	6.00	20		10.8	0.51	765.0	6.00
9		15.0	0.20	120.0	4.33	21		15.0	0.20	300.0	4.30
10		15.0	0.51	306.0	4.33	22		15.0	0.51	765.0	4.30
11		20.0	0.20	120.0	3.25	23		20.0	0.20	300.0	3.25
12		20.0	0.51	306.0	3.25	24		20.0	0.51	765.0	3.25



(1) 유한요소해석모델의 형상



(2) 유한요소해석 모델의 변수



(3) 파형웨브의 형상

[그림 3.8] 유한요소해석모델(웨브유효단면계수 및 유효단면2차모멘트 산정)

철골보의 높이를 해석변수로 370 mm, 470 mm, 570 mm, 670 mm으로 변화시켜 해석하였으며, 상부플렌지의 폭은 200 mm, 하부플렌지의 폭은 300 mm, 강재의 두께는 웨브의 경우 6 mm, 상하 플렌지의 경우 12 mm, 부재길이 5.5 mm의 단순지지된 보로 입력하였다. 파형웨브의 파고 및 파형의 상세는 그림 3.8(3)에 자세히 나타내었다. 강재는 SS400을 사용하였고, 탄성계수 및 항복강도가 각각 2.0x105 MPa 및 240 MPa이다. 강선은 높이가 370 mm인 기본해석모델의 경우 단면적이 98.2 mm2 (12.7 mm)인 강선 4개를 사용하였고 부재양단에서의 단면최상부에서 강선의 도심까지 거리는 110mm, 부재 중앙부에서의 단면최상부에서 강선의 도심까지 거리는 330mm로 설치하여 1개의 drape point를 갖게 텐던을 배치하였으며 긴장재량, 긴장력 및 양단부의 편심거리는 해석모델에 관계없이 동일하고, 부재중앙의 편심거리의 경우 부재의 높이가 470 mm, 570 mm, 670 mm으로 변화할 때마다 100 mm 씩 증가 시켜 입력하였다. 긴장력은 인장강도의 75%로 입력하여 해석을 실시하였다. 유한요소해석을 통하여 얻은 각 모델들의 상·하부 플랜지 응력값을 사용해 회귀분석을 하여 유효단면2차모멘트계수 η_f를 구하였고 표 3.3에 나타내었다. 표 3.4에서는 유한요소해석에 의하여 구해진 파형웨브 철골보의 응력과 식 6a와 식 6b에서 축력항을 제외한 휨응력 계산식을 이용하여 구한 I형단면의 응력을 나타내었다. 표 3.4에서 $\sigma_{t,elastic}$과 $\sigma_{b,elastic}$은 각각 I형 단면 철골보 상부 및 하부의 휨응력을 나타낸다.

파형웨브 철골보의 경우 휨강성 감소로 인하여 I형 단면 철골보 보다 플랜지 상하부 응력이 각각 평균 19%와 40% 정도로 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 유한요소해석 결과로부터 얻어진 상하부 응력($\sigma_{t,FEM}$와 $\sigma_{b,FEM}$)을 바탕으로 단면2차모멘트를 구하면 각각 식 4a 및 식 4b로 나타낼 수 있다.

$$I_{top} = \frac{M}{\sigma_{t,FEM}} \tag{4a}$$

$$I_{bottom} = \frac{M}{\sigma_{b,FEM}} \tag{4b}$$

I_{top} 및 I_{bottom}은 각각 유한요소해석을 하여 얻은 결과인 $\sigma_{t,FEM}$ 및 $\sigma_{b,FEM}$을 이용하여 역추정된 유효단면2차모멘트이다. 따라서, I형 단면 철골보의 단면2차모멘트를 I_g라 하면, 파형웨브 철골보의 유효단면2차모멘트계수 η_f는 식 5와 같이 구할 수 있다.

$$\eta_f = \frac{I_{eff}}{I_g} \approx \frac{(I_{top} + I_{bottom}/2)}{I_g} \tag{5}$$

<표 3.3> 유한요소해석 결과에 대한 유효단면2차모멘트계수

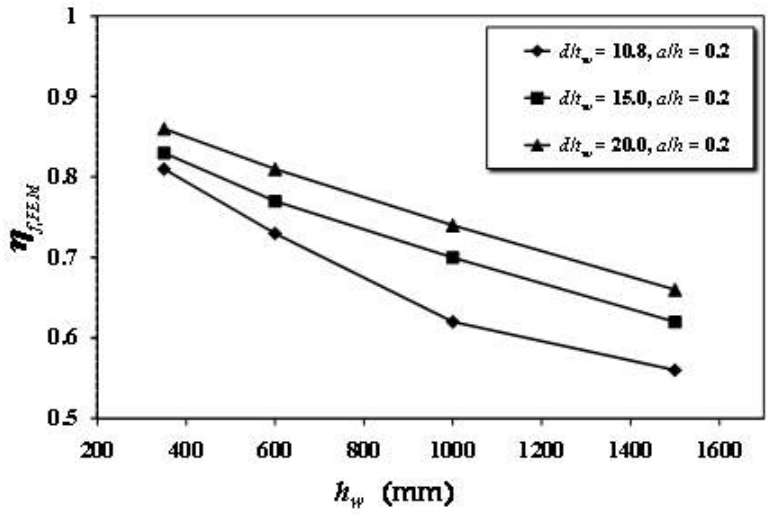
No.	η_f	σ_t,FEM (MPa)	σ_b,FEM (MPa)	σ_t,elasic (MPa)	σ_b,elasic (MPa)	σ_t, FEM / σ_t,elasic	σ_b,FEM / σ_b,elasic
1	0.81	-62.7	43.5	-47.80	3.80	1.32	1.15
2	0.87	-92.5	65.2	-76.30	6.09	1.22	1.06
3	0.83	-64.1	43.9	-51.00	3.95	1.27	1.11
4	0.90	-95.6	66.6	-81.70	6.34	1.18	1.05
5	0.86	-64.9	44.0	-53.20	4.05	1.22	1.09
6	0.91	-97.4	67.4	-85.30	6.48	1.14	1.04
7	0.73	-45.3	31.7	-30.38	25.51	1.49	1.25
8	0.81	-73.4	52.2	-54.95	46.14	1.33	1.14
9	0.77	-46.3	32.1	-33.57	27.30	1.37	1.18
10	0.84	-77.6	54.2	-60.72	49.37	1.28	1.10
11	0.81	-46.8	32.3	-35.85	28.42	1.30	1.14
12	0.86	-80.1	55.4	-64.83	51.40	1.23	1.08
13	0.62	-35.1	24.9	-20.09	17.66	1.75	1.41
14	0.77	-56.5	42.2	-40.18	35.31	1.41	1.19
15	0.70	-35.7	25.1	-23.00	19.61	1.56	1.28
16	0.80	-60.8	44.3	-46.00	39.23	1.32	1.12
17	0.74	-36.5	25.4	-25.19	20.94	1.45	1.22
18	0.84	-63.8	45.8	-50.38	41.88	1.27	1.10
19	0.56	-28.6	20.7	-14.48	13.14	1.96	1.59
20	0.71	-46.2	35.9	-30.91	28.05	1.49	1.28
21	0.62	-30.2	21.5	-17.10	15.11	1.75	1.43
22	0.77	-51.4	38.6	-36.49	32.25	1.41	1.19
23	0.66	-31.2	21.9	-19.16	16.55	1.64	1.32
24	0.79	-55.0	40.4	-40.89	35.31	1.35	1.15
Average of σb, FEM / σb, elasic and σt, FEM / σt, elastic						1.40	1.19

그림 3.9(1)에는 패널폭-웨브높이비(a/hw)가 0.2인 경우에 대한 해석결과로부터 산정된 η_f값을 웨브높이(hw)에 대하여 나타낸 것이다. η_f값이 0.86~0.56까지 분포하고 있으며, 모든 파고-웨브두께비 (d/tw)에 대하여 파형철골보의 웨브높이가 증가할수록 η_f가 작아져서 휨강성 감소가 크게 나타나는 경향을 보였다. 또한 d/tw값이 작아질수록, 즉, 웨브 두께가 두꺼울수록 η_f값이 작아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 응력이 거의 발생되지 않는 파형웨브가 차지하는 비율이 커질수록 휨강성 감소가 크게 발생된다는 것을 의미한다. 그림 3.9(2)에는 패널폭-웨브높이비(a/hw)가 0.51인 해석모델의 역추정 된 η_f값을 웨브높이에 대하여 나타내었다. 해석결과 값은 a/hw가 0.2인 경우와 마찬가지로 파형철골보의 웨브높이가 증가할수록 감소하였으며, 파고-웨브두께비(d/tw)가 작은 경우가 큰 경우에 비하여 상대적으로 η_f가 작게 나타났다. 그러나, η_f값의 크기가 0.91~0.71범위로서 a/hw가 0.2인 실험체에 비하여 η_f가 크게 나타난 것을 알 수 있다. 이는 a/hw가 커질수록 일반I형 단면에 가까워지므로 파형웨브에 의한 아코디언 효과가 줄어들기 때문이다.

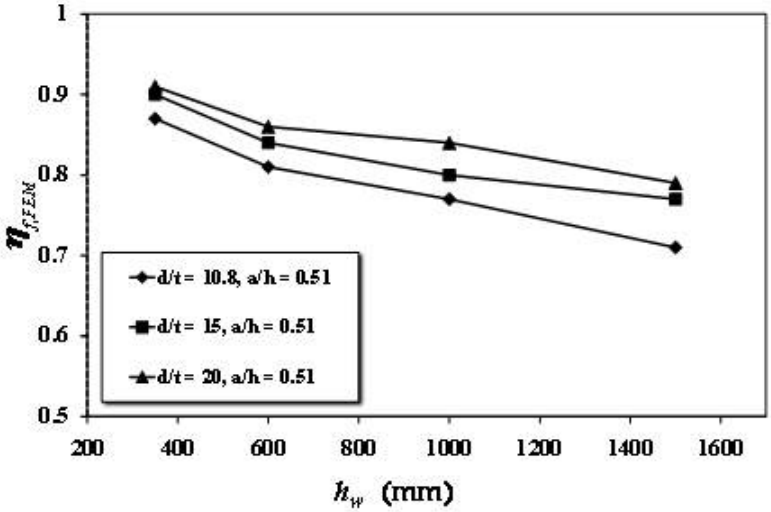
그림 3.9의 해석결과를 통하여 변수 a/hw , d/tw에 따라서 η_f의 분포가 일정한 경향성을 갖는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 주요인자를 변수로 하여 회귀분석(regression analysis)을 하여 유효단면2차모멘트계수 η_f를 식 6과 같이 나타냈다.

$$\eta_f = 0.70\left(\frac{d}{t_w}\frac{a}{h_w}\frac{b_f}{h_w}\right)^{0.15} \tag{6}$$

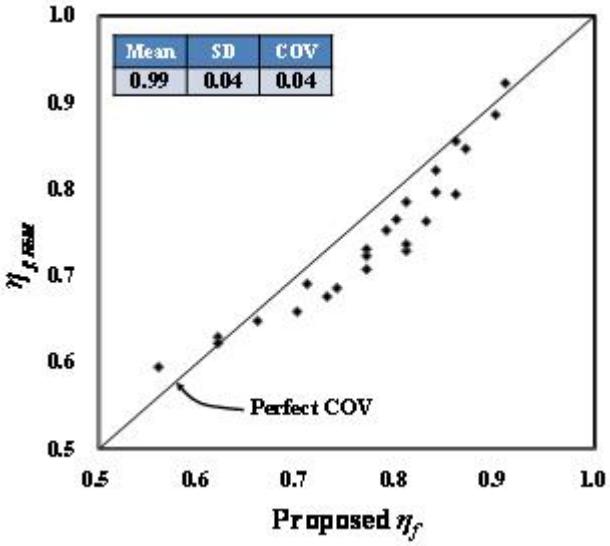
여기서, bf는 하부플렌지의 폭이며, 다른 변수들은 앞서 서술된 바와 같다. 그림 3.9(3)에는 식 6로 계산된 결과($\eta_{f,analysis}$)와 유한요소해석결과($\eta_{f,FEM}$)를 비교하여 나타내었으며, 회귀분석식을 이용한 해석결과는 평균(Mean) 0.99, 표준편차(SD) 0.04, 분산계수(COV) 0.04로 유한요소해석결과를 비교적 간단한 회귀식으로 매우 근사하게 예측함을 확인할 수 있다. 앞서 설명한 유효단면2차모멘트 개념을 근거로 한 η_f값은 휨강성 감소를 반영하는 반면, 프리스트레스 도입으로 인하여 단면에 작용하는 축방향력에 대한 강성 감소는 별도로 고려되어야 한다. 앞서 언급된 바와 같이 본 연구에서는 파형웨브의 축강성 감소를 반영 위하여 유효단면적 개념(effective area concept)을 적용하여 웨브유효단면적계수(η_a)를 추가적으로 도입하였다. η_a를 결정하기 위하여 역시 유한요소해석을 수행하였으며, 해석모델은 앞서 η_f값을 산정한 경우와 동일한 24개의 경우를 대상으로 하였다. 다만, 프리스트레스 축력의 영향만을 고려하기 위하여 자중 및 외력하중을 제거한 상태에서 편심이 발생되지 않도록 단면적이 98.2 mm2 (12.7 mm)인 텐던 4개를 단면의 도심에 배치하였으며, 도입응력은 기준시험체인 I형강보에 $0.75f_{pu}$로 긴장하였을 때 평균응력인 57.2 MPa을 설정하여 해석을 수행하였다.



(1) a/h = 0.2



(2) a/h = 0.51



(3) 회귀분석결과

[그림 3.9] 유효단면2차모멘트계수

표 3.4에는 축력을 받는 파형웨브 철골보의 유한요소해석결과($\sigma_{a,FEM}$)와 식 6a 와 식 6b에서 휨응력을 제외하고 축력만을 고려하여 산정된 해석결과($\sigma_{a,analysis}$)를 비교하여 나타내었다. 해석결과, 파형웨브 철골보의 아코디언효과로 인하여 축방향 도입응력이 I형단면을 가진 철골보에 비하여 평균 1.9배까지 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 해석을 통하여 얻어진 축방향 응력을 바탕으로 전체 웨브단면적(A_{web})에 대한 웨브의 유효단면적(A_{eff})을 역추정 하여, 식. 7로 나타내며, $\sigma_{a,FEM}$은 유한요소해석에 의해 산정된 평균 축방향 응력이다. 따라서, 웨브유효단면적계수(η_a)는 식 8로 산정할 수 있다.

$$A_{eff} = \frac{M}{\sigma_{b,FEM}} \tag{7}$$

$$\eta_a = \frac{(A_{eff} - A_{flange})}{A_{web}} \tag{8}$$

여기서, A_{flange}는 플랜지의 유효단면적이다.

그림 3.10(1)에는 패널폭-웨브높이비(a/hw)가 0.2인 경우에 대한 η_a값을 웨브높이(hw)에 대하여 나타내었다. 모든 d/tw에 대하여 웨브높이(hw)가 증가함에 따라서 η_a값이 0.40~0.15까지 감소되는 것을 볼 수 있으며, 이는 부재가 대형화 되면서 웨브의 단면적이 커질수록 아코디언효과가 커지는 것을 반영하는 결과이다. 마찬가지 이유로, 파고-웨브두께비(d/tw)가 작아질수록 웨브의 두께가 두꺼워지기 때문에 η_a값이 감소되었다. 즉, η_a값도 앞서 설명된 η_f값과 유사한 성질을 가지는 것을 의미한다. 그림 3.10(2)에는 패널폭-웨브높이비(a/hw)가 0.51인 경우에 대한 η_a값을 웨브높이(hw)에 대하여 나타내었다. 해석결과를 보면, 웨브높이(hw)가 증가할수록 η_a값이 0.47~0.20까지 감소하지만, a/hw가 0.2인 실험체에 비해서는 η_a가 큰 것을 알 수 있다. 이는 패널폭-웨브높이비(a/hw)가 커질수록 웨브의 파형특성이 감소하면서 아코디언효과가 줄어드는 것을 의미한다.

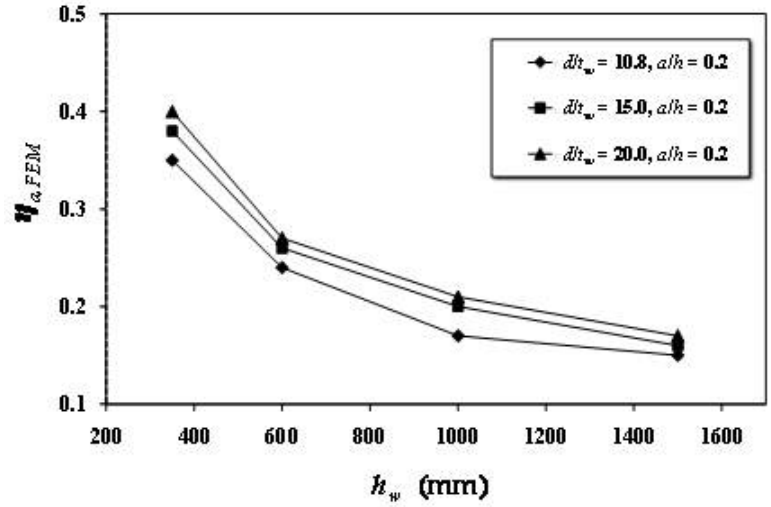
이와 같이 파형웨브 철골보의 η_a값이 앞서 결정된 η_f와 유사하게 변수 a/hw , d/tw에 따라서 일정한 경향성을 갖는 것을 알 수 있으며, 이를 회귀분석(regression analysis)을 통하여 수식화 하면 식 9으로 유도된다.

$$\eta_a = 0.30\left[\left(\frac{d}{t_w}\right)^{0.19}\left(\frac{a}{h_w}\right)^{0.19}\left(\frac{b_f}{h_w}\right)^{0.56}\right] \tag{9}$$

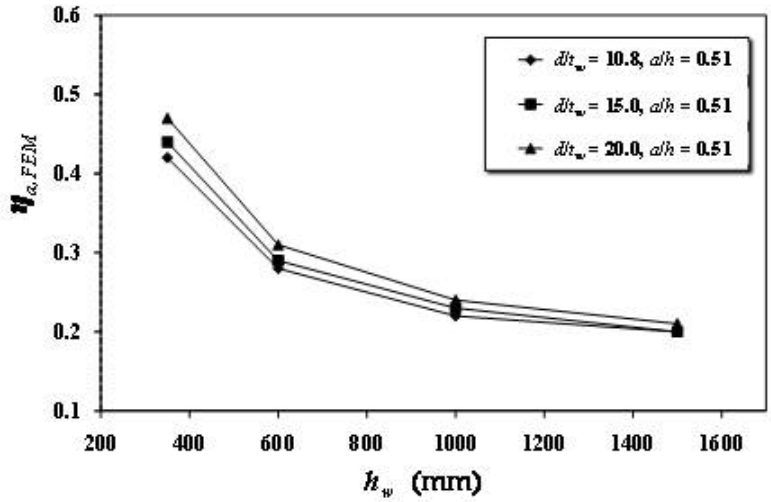
그림 3.10(3)에는 식 13로 계산된 η_a와 표 3.4에 나타낸 유한요소해석 결과로부터 구한 유효웨브단면적계수($\eta_{a,FEM}$)를 비교하여 나타내었으며, 식 9을 이용한 해석결과는 평균 1.06, 표준편차 0.06, COV 0.05로 유한요소해석결과를 비교적 근사하게 예측함을 알 수 있다.

<표 3.4> 유한요소해석 결과에 대한 웨브유효단면계수

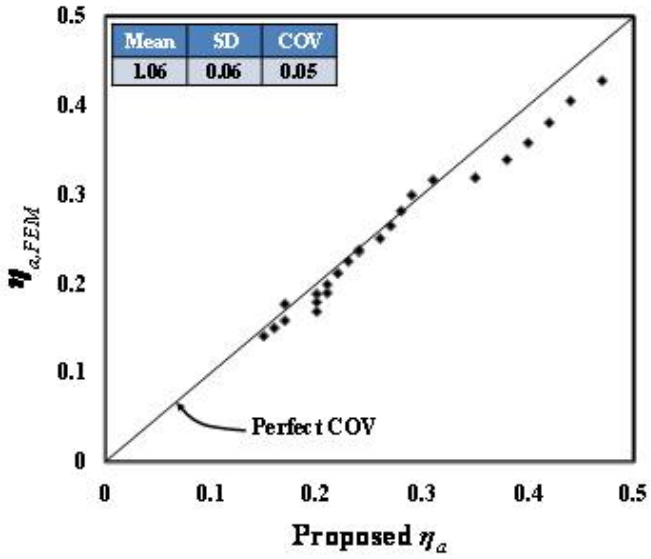
No.	η_a	σ_a,FEM (MPa)	σ_a,elasic (MPa)	σ_a, FEM / σ_a,elasic
1	0.35	82.4	57.18	1.44
2	0.42	79.3	57.18	1.39
3	0.38	76.0	57.18	1.33
4	0.44	73.4	57.18	1.28
5	0.40	71.7	57.18	1.25
6	0.47	69.7	57.18	1.22
7	0.24	106.8	57.18	1.87
8	0.28	101.6	57.18	1.78
9	0.26	94.0	57.18	1.64
10	0.29	90.9	57.18	1.59
11	0.27	85.9	57.18	1.50
12	0.31	83.9	57.18	1.47
13	0.17	141.5	57.18	2.47
14	0.22	130.5	57.18	2.28
15	0.20	119.0	57.18	2.08
16	0.23	114.0	57.18	1.99
17	0.21	106.1	57.18	1.86
18	0.24	102.9	57.18	1.80
19	0.15	177.0	57.18	3.10
20	0.20	158.0	57.18	2.76
21	0.16	149.5	57.18	2.61
22	0.20	137.5	57.18	2.40
23	0.17	131.0	57.18	2.29
24	0.21	123.0	57.18	2.15
Average of σa, FEM / σa, elasic				1.90



(1) a/h = 0.2



(2) a/h = 0.51



(3) 회귀분석결과

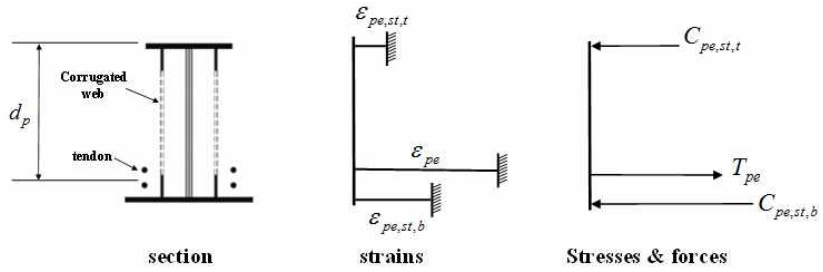
[그림 3.10] 웨브유효단면계수

$$\epsilon_{pe} = \frac{P_e}{A_p E_p} = \frac{f_{pe}}{E_p} \qquad (10)$$

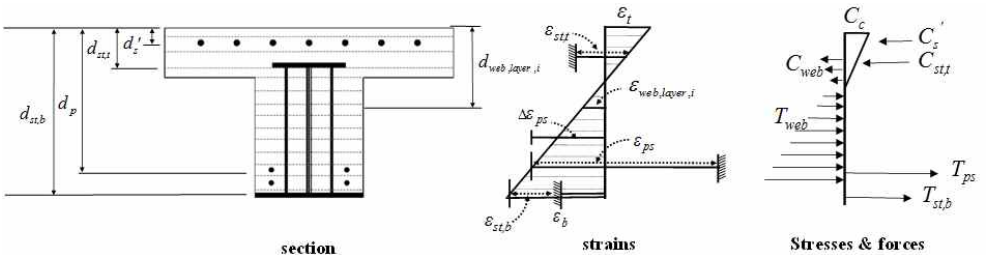
식 6 및 9의 η_a및 η_f를 식 5에 다시 적용하면, 아코디언효과가 반영된 파형철골보 단면 최외단의 유효프리스트레스변형률($\epsilon_{pe,st}$)을 식 2a 및 2b로 나타낼 수 있다. 이때, 텐던의 유효프리스트레스 변형률(ϵ_{pe})은 식 10로 계산할 수 있으며, 여기서, P_e는 유효프리스트 힘, A_p는 프리스트레스 텐던의 단면적, E_p는 프리스트레스 긴장재의 탄성계수, f_{pe}는 유효프리스트레스 응력이다.

다. PS파형웨브 합성보 단면해석

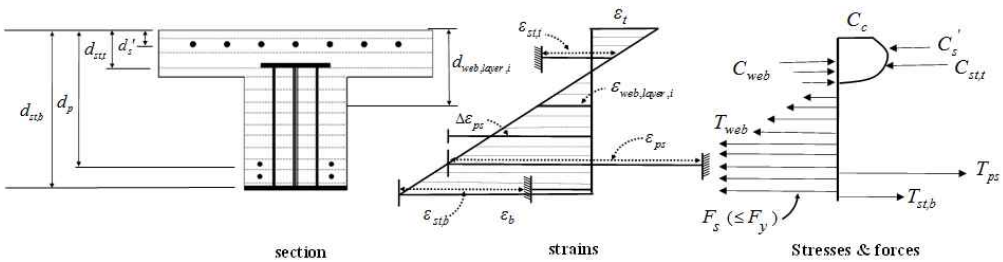
PS파형웨브 합성보의 단면해석과정은 그림 3.11에 개념적으로 나타낸 것과 같이 파형웨브 철골보에 프리스트레스를 도입하는 합성전 단계의 단면해석과 콘크리트 합성 후 단계의 단면해석으로 시공단계를 반영하여 진행된다. 해석에 사용된 재료의 구성방정식은 콘크리트의 경우에는 실제 압축강도실험결과와 유사한 결과를 나타낸 Collins model을 사용하였고, 철근과 강재플레이트의 경우 bilinear model로 가정하였으며, 긴장재의 경우 modified Ramberg-Osgood model을 사용하였다. 단면최상부 변형률(ϵ_t)을 가정한 후에 중립축의 크기를 변화시키면서 각 layer의 변형률, 응력 및 힘을 계산하여 단면에서 힘의 평형조건을 만족시키는 휨모멘트와 곡률을 구하고, 단면의 최상부변형률(ϵ_t)을 증가시켜 가면서 같은 과정을 반복시키면 합성보의 moment-curvature responses를 얻을 수 있다. 해석은 단면의 최상부변형률(ϵ_t)이 콘크리트의 최대압축변형률(ϵ_{cu})에 도달하면 종료되도록 하였다. 또한, 콘크리트요소는 프리스트레스 도입과정에서는 타설되지 않았으므로 프리스트레스가 도입된 이후에 재하된 하중에 의하여 증가된 변형률만을 고려하였으며, 파형철골보의 웨브의 경우에는 아코디온효과 때문에 거의 변형률이 발생되지 않으므로 콘크리트와 합성 후에 증가되는 변형률만을 고려하였다. 철골보의 압축플랜지 및 인장플랜지 그리고 텐던은 도입된 프리스트레스 변형률과 콘크리트와 합성 후 증가된 변형률을 누적하여 산정하였다.



(1) 프리스트레스 도입 단계



(2) 합성 후 사용하중 재하상태



(3) 극한상태

[그림 3.11] PS파형웨브 합성보의 단면해석

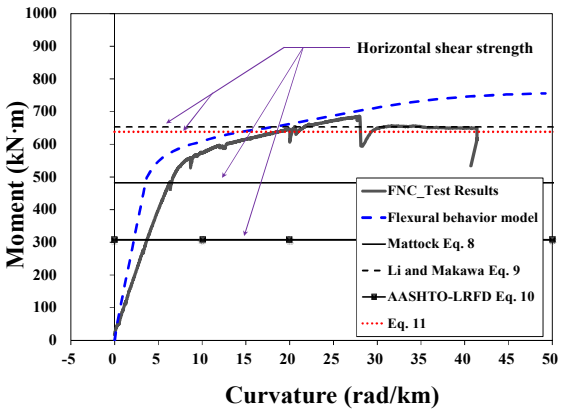
5. PS파형웨브 합성보의 상온성능 검증

그림 3.12에는 이 연구에서 얻어진 실험결과들을 해석결과들과 비교하였다. 먼저, 그림 3.12-(1)에는 프리스트레스가 도입되지 않은 FNCP 실험체의 휨거동예측결과와 실험결과를 비교하여 나타내었으며, 휨거동평가모델은 전반적인 비프리스트레스 합성부재의 휨거동을 잘 예측하였다. 다만, 실험체의 초기 휨강성을 다소 크게 평가하였는데, 이는 휨거동평가시에 파형웨브와 콘크리트의 완전합성가정을 가정하였기 때문에 실험체의 휨강성을 약간 과대평가한 것이다. 즉, 콘크리트와 합성된 이후에도 파형웨브에는 약간의 아코디온효과가 발생하는 것으로 판단된다. 그림 3.12-(2) 및 (3)에는 각각 스터드가 배치되지 않은 프리스트레스트 실험체인 FPCE1P 및 FPCE2P 실험체의 휨거동예측결과와 실험결과를 비교하였다. 앞서 설명한 것과 같이, 두 실험체의 다른 점은 텐던의 배치형상이며, drape point를 2개 가지고 있는 FPCE2P가 1개인 FPCE1P에 비하여 약간 큰 휨강성과 강도를 보였으나 실험결과 큰 차이는 관찰되지 않았다. 두 실험체는 최고하중에서 중립축의 위치가 철골보의 상부플랜지 위에 존재하였으며, 전단 스터드를 배치하지 않았기 때문에 급격한 수평전단균열의 진전을 보였다. 해석결과는 수평전단파괴이전까지 두 실험체의 휨거동을 비교적 정확하게 예측하였다. 그림 3.12-(1), (2)에는 가력하중의 증가에 따른 텐던의 응력변화거동을 제안된 해석 모델에 의하여 계산된 텐던응력값과 비교하여 나타내었다. 제안모델에 의하여 산정된 텐던의 응력이 FPCE1P 및 FPCE2P 실험체의 실험결과로 부터 측정된 실험값과 거의 정확하게 일치하는 것을 볼 수 있다. 그림 3.12-(4)와 (5)에는 각각 파형철골보의 상부에 전단연결재를 배치한 FPCE2PS와 FPCE2GS의 실험결과를 휨거동예측결과와 비교한 것이다. 두 시험체 모두 수평전단균열이 부재단부에서 발생된 이후에도 계속적으로 하중이 증가하여 예측휨강도에 근접하였으며, 예측모델은 다소의 강성차이는 있지만 사용하중에서 극한강도까지 휨거동 뿐만 아니라 파괴시점까지 매우 정확하게 예측하고 있어 해석모델의 합리성을 확인할 수 있다. 그림 3.12-(3), (4)가력하중의 증가에 따른 텐던의 응력변화를 계산된 응력과 비교하여 나타내었다. FPCE2PS와 FPCE2GS의 응력은 앞서 설명한 FPCE1P와 FPCE2P에 비하여 더욱 급격한 응력변화를 보여주었으며, 제안모델은 텐던의 응력거동을 정확히 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

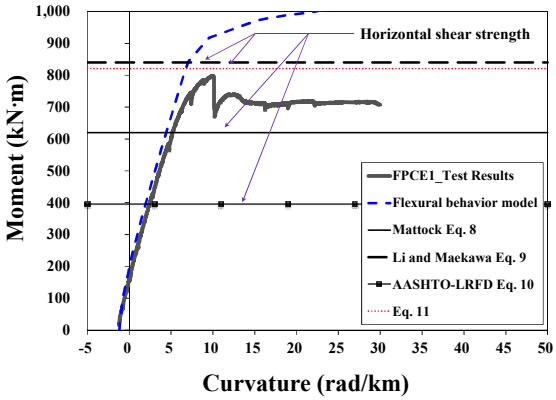
ACI318-11에서는 부착식 긴장재의 응력(f_{ps})을

$$f_{ps} = f_{pu}\left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1}\left\{\rho_p \frac{f_{pu}}{f_c'} + \frac{d}{d_p}(\omega - \omega')\right\}\right] \quad (7)$$

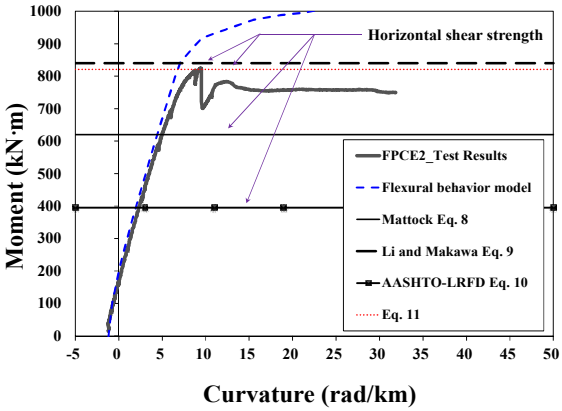
으로 제시하고 있으며, 여기서, ρ_p 는 긴장재비 $(A_{ps}/b_w d_p)$, γ_p는 $f_{py}/f_{pu} \geq 0.80$ 이므로 0.55를 사용하였고, d는 철근의 유효깊이, d_p는 긴장재의 평균유효깊이, ω와 ω'는 각각 인장철근과 압축철근의 강재지수이다. 그림 3.13에는 식(7)으로 산정된 긴장재의 극한강도를 수평선으로 나타내었다. ACI318-11에서 제공하는 부착식 긴장재의 극한응력 산정식은 실험결과와 매우 근사한 결과를 보여주었으며, 따라서 PS파형웨브 합성보의 설계시에 적용이 가능함을 확인 할 수 있다.



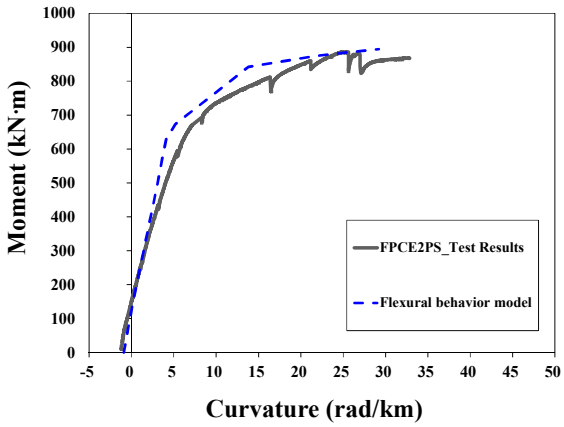
(1) FNCP 실험체



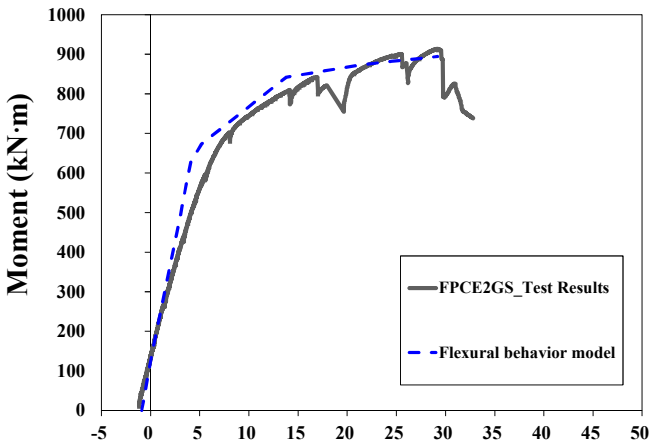
(2) FPCE1P 실험체



(3) FPCE2P 실험체

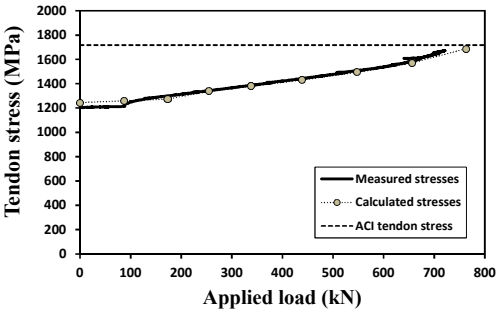


(4) FPCE2PS 실험체

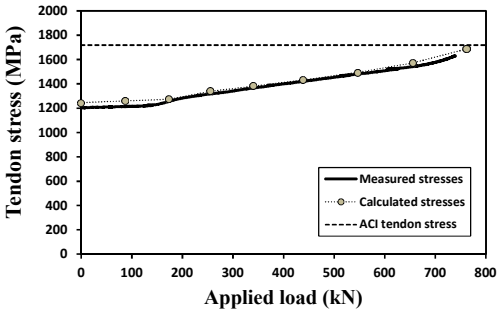


(5) FPCE2GS 실험체

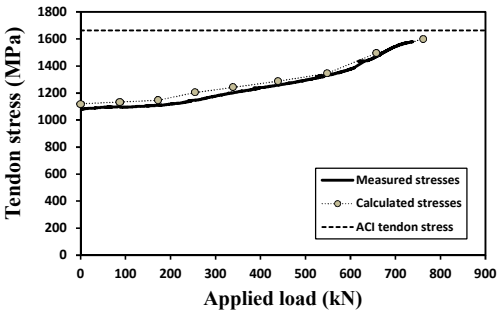
[그림 3.12] 실험 및 해석 데이터의 비교검증



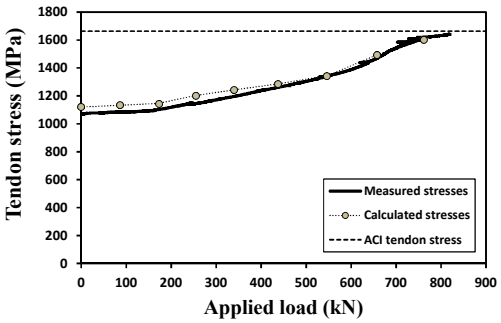
(1) FPCE1P 실험체



(2) FPCE2P 실험체



(3) FPCE2PS 실험체



(4) FPCE2GS 실험체

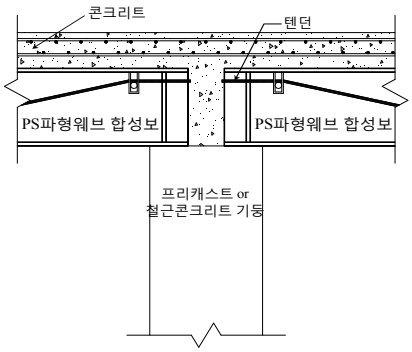
[그림 3.13] 가력하중에 의한 텐던의 응력변화 거동

제2절 접합부/시공 디테일 구조설계 기술개발

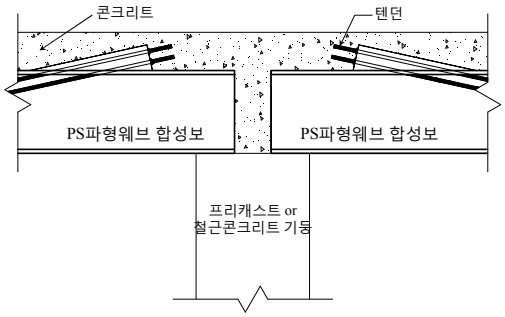
1. PS파형웨브 합성보의 실제 적용을 위한 연속화 시공공법 및 접합부 상세제안

개발된 PS파형웨브 합성보는 3시간 내화구조인정 및 건설신기술 추진을 통해 실질적인 구조부재로서 활용할 수 있도록 설계·시공 매뉴얼의 제시와 실제 건설현장에 적용이 되었다. 현장적용 과정을 위해 이 연구의 참여 연구진은 개발 부재의 다양한 접합부 상세 및 시공공법에 대한 제시가 선행되어야 했다. 따라서 아래의 항목과 같은 다양한 형태의 접합부 상세안을 제안할 수 있었다.

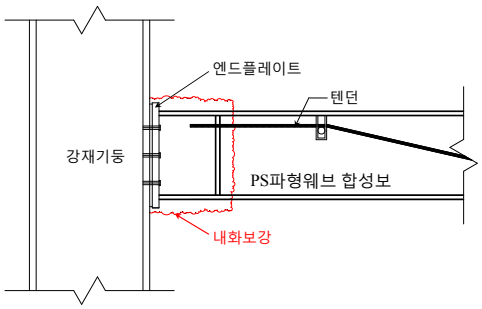
- 보·기둥 접합 방식 및 부재의 연속화 공법은 기둥부재가 철골은 물론 철근콘크리트 및 프리캐스트 콘크리트일 경우에도 시공이 가능하며, 다양한 접합 상세를 그림 3.14에 나타내었다.
- 그림 3.14-(1)는 프리캐스트콘크리트 및 철근콘크리트부재에 일반적인 상세를 나타내었으며, 설치 또는 타설된 기둥에 긴장력을 도입한 파형보를 올린 후 상부철근을 배근 하고 슬래브 및 보를 타설하게 된다.
- 그림 3.14-(2)는 그림 3.14(1)와 유사하나 파형보의 긴장방식이 다르며, 양방향 정착구를 이용하여 타설 이후 2차 긴장이 가능한 형식이다. 타설 이후의 2차 긴장작업은 부재의 연속성을 높여주므로 우수한 내진성능를 보여줄 수 있다.
- 그림 3.14-(3)는 공장에서 엔드플레이트를 용접하여 현장에서 철골기둥과 볼트결합하는 방식으로 시공이 간편한 형식이지만 공장에서 용접하기전에 미리 긴장력을 도입하기 때문에 운반 및 양중시에 주의를 요할 것으로 판단된다.
- 그림 3.14-(4)는 철골기둥에 겔버보를 내밀어 추후에 파형보와 볼트결합하는 방식이며, 겔버보로 내민 부분의 끝단에서 핀접합으로 이루어지기 때문에 정확한 구조검토를 요한다.
- 그림 3.14-(5)~(7)는 철골기둥의 약축에 파형보를 접합할 경우의 상세로서, 그림 3.14-(5)와 그림 3.14-(6)는 기본적으로 용접에 의해 접합시킨 후 수평스티프너를 추가하여 보강하는 형태이며, 그림 3.14-(7)는 철골기둥에 미리 설치된 플레이트와 볼트 접합한 후 수평스티프너를 추가하는 형태이다.
- 앞에서의 기술연혁에서 나타낸 바와 같이 철근콘크리트, 철골 및 강합성 구조 부재 등에 대한 내화실험 및 해석 기술을 확보하고 있으며, 본 과제를 통하여 프리스트레스트 매립형 합성보 시스템의 내화성능 검증 및 보완 방안을 모색하고자 하였다.



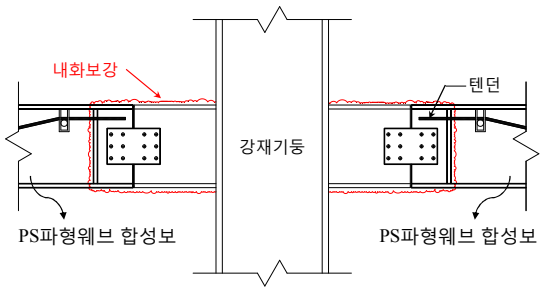
(1) 콘크리트 기둥 – 파형보 접합
(상부철근)



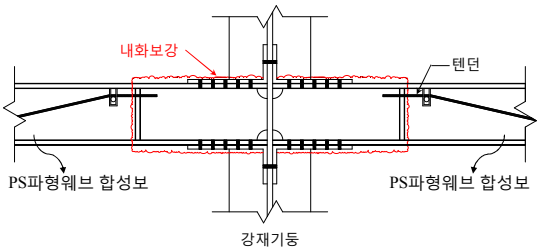
(2) 콘크리트 기둥 – 파형보 접합
(상향긴장방식)



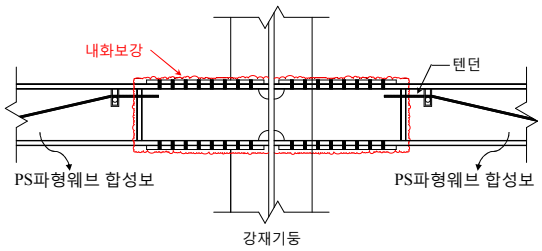
(3) 엔드플레이트 접합



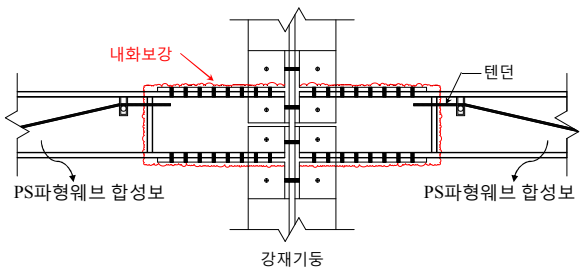
(4) 겔버보 볼트 접합



(5) 수평스티프너로 보강한 약축접합
상세(A)



(6) 수평스티프너로 보강한 약축접합
상세(B)



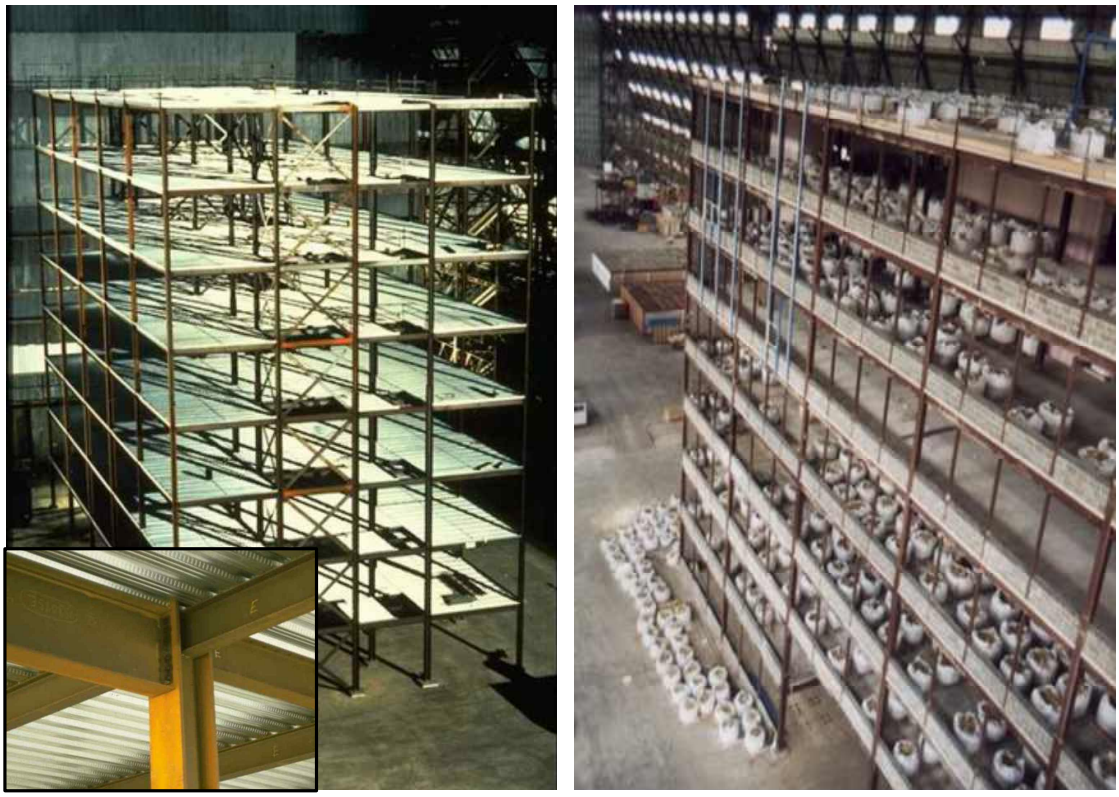
(7) 수평스티프너로 보강한 약축접합 상세 (볼트접합)

[그림 3.14] PS파형웨브 합성보의 보 · 기둥 접합방식

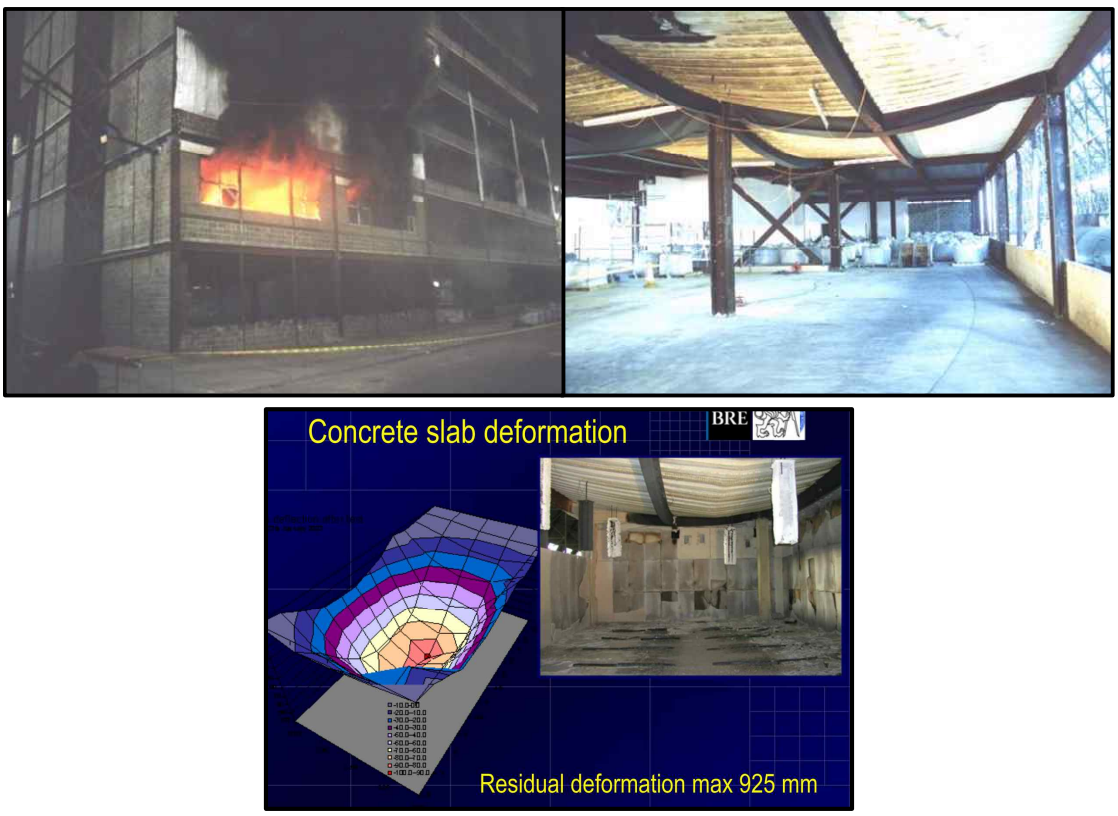
2. 지지형식에 따른 내화성능 검토(접합부의 내화성능검토)

가열로에서 실시하는 화재실험은 국내 실험설비 여건에 따라서 제한조건을 가질 수 밖에 없다. 이러한 이유로 국내에서 수행되는 화재실험은 보통 단순지지형태로 부재를 거치시킨 상태에서 실험이 진행된다. 그러나 이러한 실험여건과는 다르게 실제 시공은 그림 3.15에 보이는 바와 같이 다양한 접합형태를 갖는 형태로서 적용되는 것이 일반적이다. 국내를 비롯한 여러 국가에서 보-기둥 접합부를 포함한 연속시스템 구조체의 실물내화성능실험을 수행하는 것이 매우 어렵기 때문에 이러한 지지조건의 변화 등은 주로 해석적 연구로 대체하여 진행되고 있다. 그림 3.14-(1)과 (2)는 접합형태는 PS파형웨브 합성보가 기둥위에 걸쳐지고 슬래브 철근 및 콘크리트로 일체화되는 연속보형태를 보여준다. 일반적으로 연속보의 처짐은 단순보에 비하여 매우 작게 나타나기 때문에 고온에서도 거의 유사한 경향을 기대할 수 있다. 이를 뒷받침해줄 수 있는 실험적 근거는 지난 1990년대 영국에서 실시된 다양한 구조형식의 실물 화재 실험(Cardington Fire Tests)에서도 간접적으로 찾아볼 수 있다. 강-합성구조로 이루어진 8층 규모의 실제 구조물에 대하여 수행된 이 화재실험에서 엔드플레이트로 반강접 접합된 보-기둥의 접합부임에도 불구하고 최대 약 900mm에 이르는 수직변위에서도 구조물이 붕괴되지 않았다. 즉, 반강접으로 접합된 고차 부정정 구조물에서도 하중 재분배로 인하여 구조물의 붕괴가 발생되지 않은 것이다. 따라서, 부재의 접합부를 비롯한 연속화 시스템에서는 현재 실험여건에 따라 진행되고 있는 단순지지된 단일부재의 내화성능실험 결과보다 우수한 화해거동 성능을 보일 것이라 판단되며, 단순지지된 PS파형웨브 합성보가 3시간의 내화성능을 확보하였기 때문에 연속지지된 PS파형웨브 합성보 역시 최소 3시간 내화성능을 확보할 수 있다는 것을 의미한다. 이는 그림 3.16에서 보이는 바와 같이 해석결과를 통하여 확인할 수 있다. 즉, 고정지지된 PS파형웨브 합성보의 내화 성능이 단순지지된 PS파형웨브 합성보의 내화성능 보다 더 우수하게 나오는 것을 해석적으로 확인하였다.

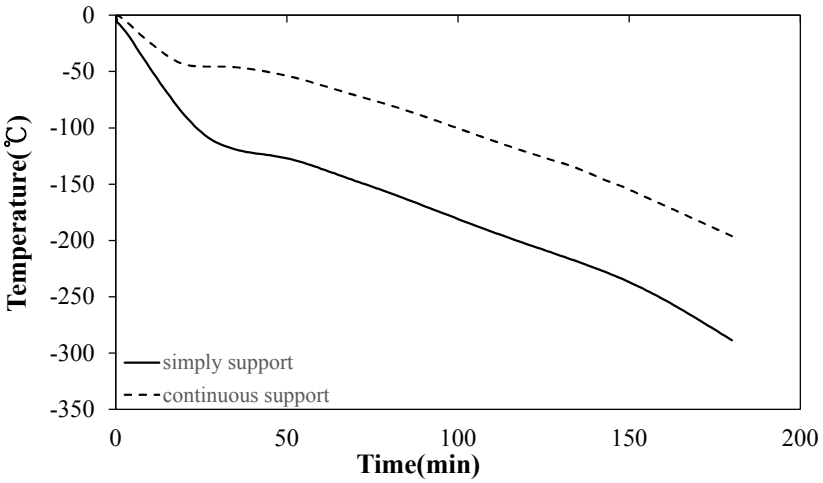
다만, 그림 3.14-(3)에 보이는 앤드플래이트 타입의 접합부에서는 앤드플래이트와 볼트에 내화보강(뿜칠, 보드, 페인트)을 해야 한다. 또한, 그림 3.14-(4)~(7)에 보이는 바와 같이 갤버보 또는 플래이트 접합형태로 시공되는 경우에는 그림 3.18에 보이는 바와 같이 기둥과 PS파형웨브 합성보 사이의 철골부분에 내화보강(뿜칠, 보드, 페인트)을 해야 하며, 다만, 이 경우에도 PS파형웨브 합성보 7.5m 구간은 무피복으로 시공 가능하다.



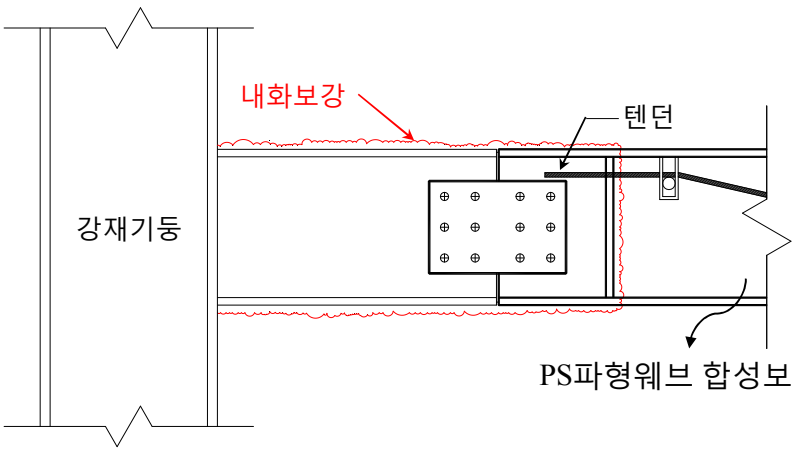
[그림 3.15] 실험체 전경 - Cardington fire test



[그림 3.16] 실험결과 - Cardington fire test



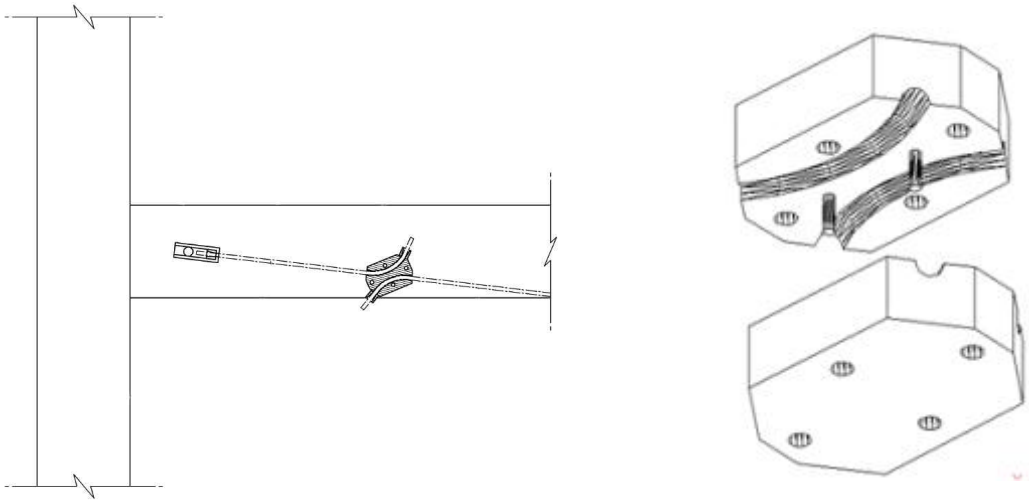
[그림 3.17] 단순지지부재와 연속지지부재의 화해거동결과비교 (해석적 연구)



[그림 3.18] 겔버보 접합부의 내화보강

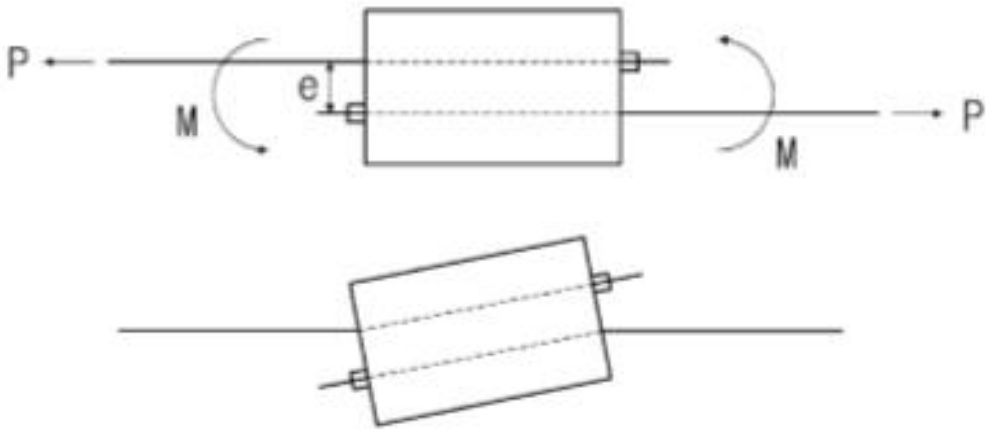
3. 시공성 개선을 위한 양방향 긴장 정착구 제안

본 연구에서는 시공성이 개선된 새로운 긴장 방식을 제안하기 위하여 보의 측면 중앙부에서 긴장재를 긴장할 수 있는 양방향 긴장 정착구를 개발하였다. 일반적으로 단부에서 긴장재를 긴장할 경우 단부에 별도의 긴장 공간이 필요하여 공정이 복잡해지기 때문에 양방향 긴장 정착구를 사용할 경우 시공성이 크게 향상될 수 있다. 그림 3.19-(1)는 양방향 긴장 정착구를 설치한 보의 모습을 나타내었으며, 그림 3.19-(2)는 정착구의 상세모습을 나타내었다. 정착구는 곡선의 홈의 파인 두 개의 철물로 제작되어 볼트 결합을 하기 때문에 그림 3.20과 같이 1열 배치할 경우 편심이 생겨 계산하지 못한 응력이 생길 수 있으므로, 편심이 생기지 않도록 긴장재를 X자 형태의 곡선으로 배치하였다. 그림 3.21은 실제로 제작된 양방향 긴장정착구 시작품 모습이다.



(1) 양방향 긴장정착구 설치　　(2) 정착구 상세

[그림 3.19] 양방향 긴장정착구



[그림 3.20] 정착구의 편심

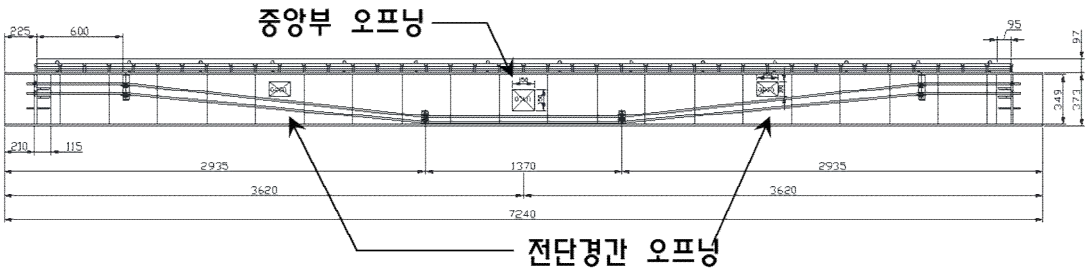


[그림 3.21] 양방향 긴장정착구 시작품

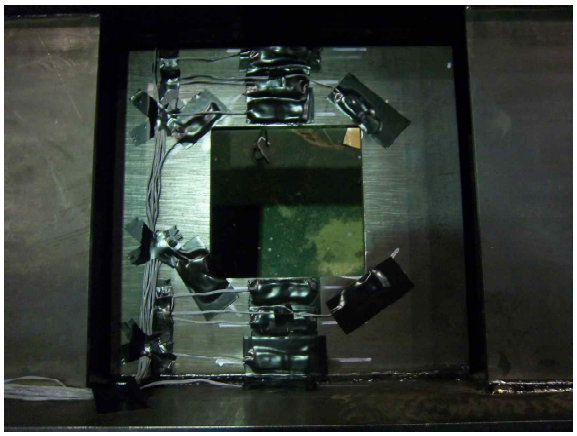
4. 설비배관(Facility penetration)을 위하여 파형 웨브 천공시 시공 및 보강방법

일반적으로 건물의 온수 및 냉수공급, 환기 배관, 전선 등의 설비배관은 보의 하부에 설치되기 때문에 층고를 높이는 원인이 된다. 그러나, 보의 웨브 부분을 천공하여 개구부를 확보하여 설비배관을 통과시키면 층고를 절감할 수 있다. 따라서, 이 연구에서는 그림 3.22에 나타낸 것과 같이 보의 중앙부와 중앙부와 지점의 사이에 각각 150×150㎜와 150×100㎜인 3개의 개구부를 설치한 실험체를 제작하여 개구부의 유무에 따른 휨성능을 평가하였다. 그림 3.22 (b)와 (c)에 나타낸 것과 같이 철골보 웨브를 절단하여 개구부를 형성하고 그림 3.23과 같이 스티로폼을 사용하여 콘크리트가 개구부 부분에 타설되는 것을 방지하였다. 그림 3.24에 나타낸 것과 같이 개구부가 있는 PS파형웨브 합성보에 대한 휨실험을 수행하였으며, 실험결과 개구부를 설치하는 않은 합성보와 거의 유사한 강성 및 강도를 가지는 것을 확인하였다.

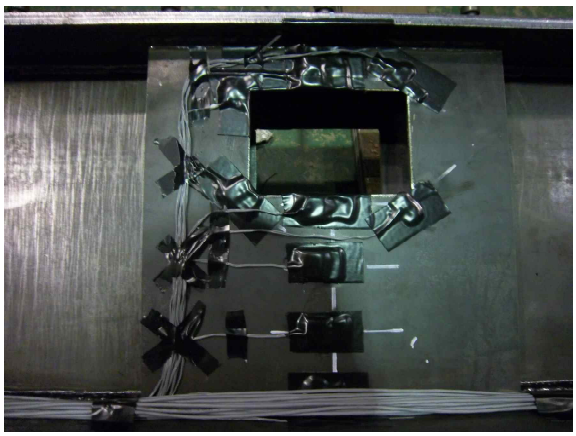
개구부의 형태는 원형, 직사각형 그리고 육각형 등 다양한 모양으로 시공이 가능하지만 응력의 집중을 피하기 위해 모서리는 각진 형태를 피하고 둥근 형태를 취하는 것이 바람직하다. 또한, 전단력에 의한 찢어짐이나 축력에 의한 국부적인 좌굴을 방지하기 위하여 그림 3.25와 같이 개구부 주위에 추가적인 하중 전달요소를 설치하여 보강하는 것이 좋으며, 일반적으로 스티프너나 철근이 많이 사용된다. 개발된 PS파형웨브 합성부재의 경우 압축에 의한 국부좌굴은 철판을 둘러싸고 있는 콘크리트에 의해 방지되기 때문에 전단에 대한 보강검토만 수행하면 된다.



(a) 실험체 개구부의 위치

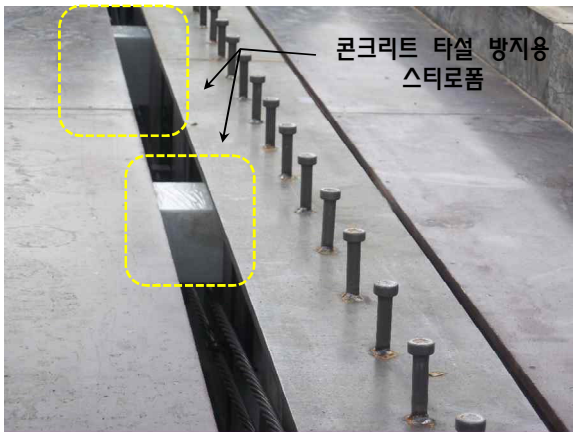


(b) 중앙부 개구부



(c) 전단경간 개구부

[그림 3.22] 실험체의 개구부

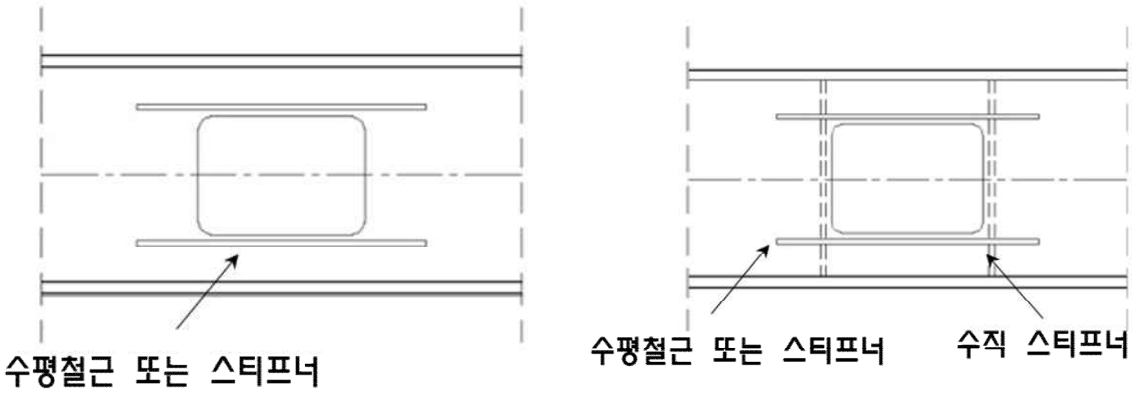




[그림 3.23] 콘크리트 타설 방지용 스티로폼



[그림 3.24] 웨브 오프닝이 있는 합성보



[그림 3.25] 개구부 보강방법

5. PS파형웨브 합성보의 현장설치 및 품질관리

PS파형웨브 합성보는 그림 3.26와 같이 공장에서 파형웨브 철골보를 제작하여 PS를 도입한 후, 현장으로 운반되어 일반 철골보와 동일하게 양중, 설치 및 현장 콘크리트 타설이 이루어진다. 전체적인 공정이 기존의 철골구조 및 합성구조와 유사하기 때문에 특별히 별도로 고려해야 할 시공상의 어려움은 없으며, 실제 수행된 2차례의 현장적용에서도 별다른 애로사항이 발생되지 않았다. 시공 및 현장 품질관리 점검사항들을 정리하여 표 3.5에 제시하였으며, 안전관리 유의사항을 설계시공 매뉴얼에도 기술하였다.



[그림 3.26] 현장 납품된 PS파형웨브 철골보

<표 3.5> PS파형웨브 합성보의 시공 및 현장 품질관리 점검표

현 장 명				현장주소	
내화구조명				검사시기	입고, 중간, 완료
제 조 자				시 공 자	
공 급 자				내화시공자	
시공기간				검사일자	
검사대상	검사항목			기준	측정결과
비대칭 파형웨브 H-Beam	강판두께			상세도면	
	보 경간 및 춤			상세도면	
	웨브 파고 깊이 및 주기			상세도면	
	플랜지 용접 유무 (무용접 제작)			육안검사	
	플랜지-웨브 용접상태			육안검사	
	부재 좌굴/비틀림 상태 확인			육안검사	
강선 및 고정철물	강선	개수		상세도면	
		직경		상세도면	
		PS도입 상태		육안 및 촉수검사	
	고정 철물	정착구 상태		육안검사	
		스티 프너	개수	상세도면	
			용접상태	육안검사	
Drape point	위치			상세도면	
	용접상태			육안검사	
	베어링[1]유무			비고 1)	
데크 플레이트	플레이트 두께			상세도면	
	데크 플레이트 형상			상세도면	
	설치 위치[2]			비고 2)	
접합부	접합형태[3]에 따르는 내화보강 유무			비고 3)	
	내화보강두께(해당시)			시방서	
콘크리트	배합강도			시방서	
	슬래브두께			상세도면	
특이사항					
검사자	소속		직책	성명:	(인)
확인자 (감리자)	소속		직책	성명:	(인)

<표 3.5> PS파형웨브 합성보의 시공 및 현장 품질관리 점검표_비고

비고 1) 강선의 프로파일에 따라 설치되는 Draped point에서 볼트의 나사산에 의한 강선의 손상을 방지하기 위하여 반드시 그림 비고-1과 같이 볼트에 링 베어링을 설치하도록 한다.

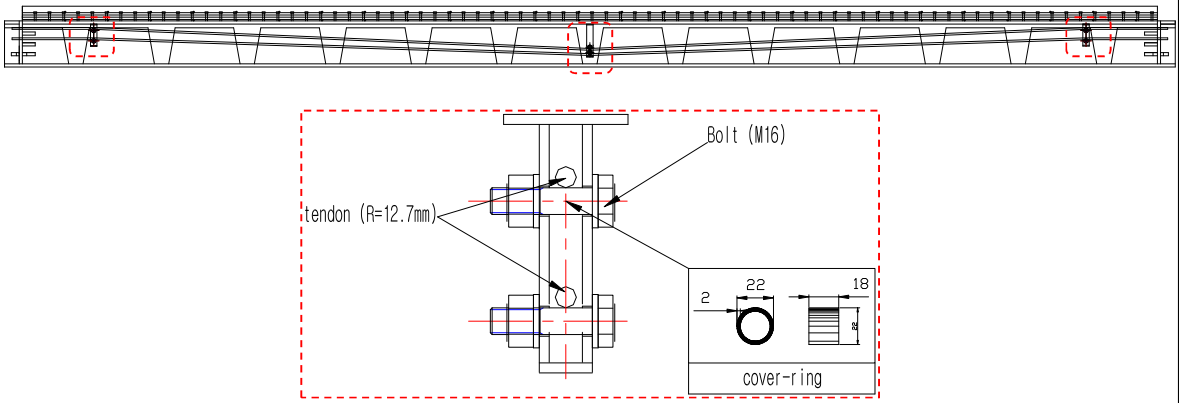
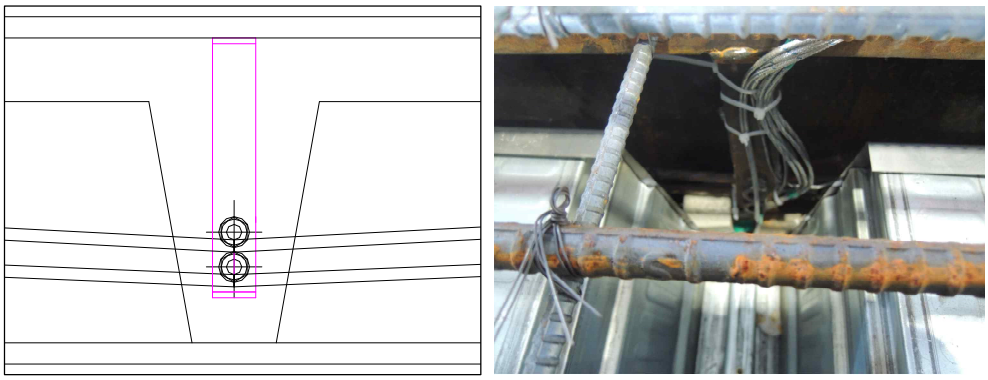
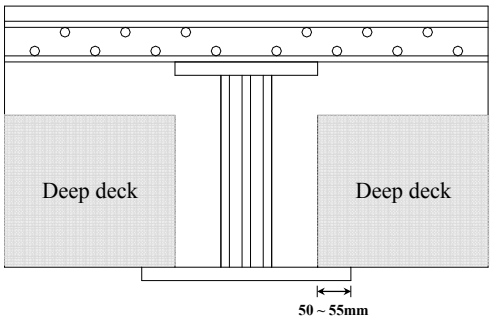


그림 비고-1

비고 2) 부재 내부 구간에 위치한 텐던 절곡점(Draped point)의 단열성능 확보가 유리하도록 Deep deck의 리브가 텐던 절곡점(Draped point)에 위치하도록 아래 그림 비고-2의(a)와 같이 설치한다. 또한, Deep deck의 하부플랜지 걸침길이는 그림 비고-2(b)와 같이 50~55mm를 확보하도록 한다.



(a) Deep deck 입면도

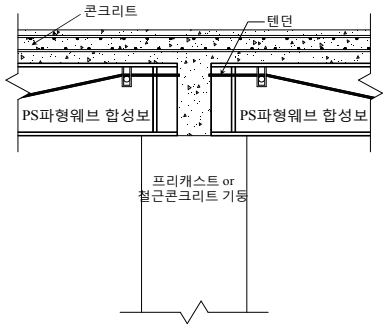


(b) Deep deck 단면도

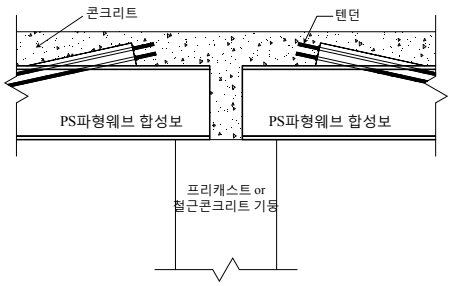
그림 비고-2 Deep deck 설치도

비고 3) PS파형웨브 합성보는 아래 그림 비고-3과 같은 접합부 형태를 사용하며, 내화보강 유무는 다음과 같다.

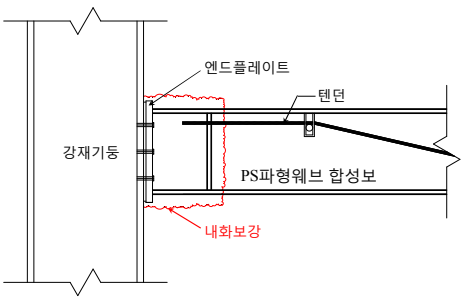
- (a) 및 (b) : 접합부 내화보강 불필요
- (c) : 엔드플레이트 및 접합볼트에 내화보강 실시
- (d) ~ (h) : 접합부 부근 일부구간 내화보강 실시



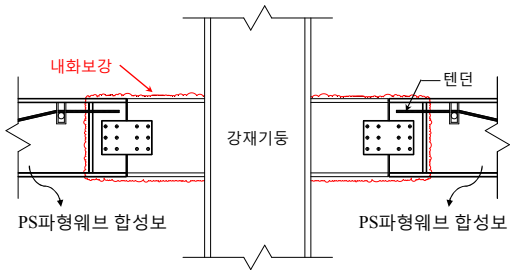
(a) 콘크리트 기둥 - 파형보 접합 (상부철근)



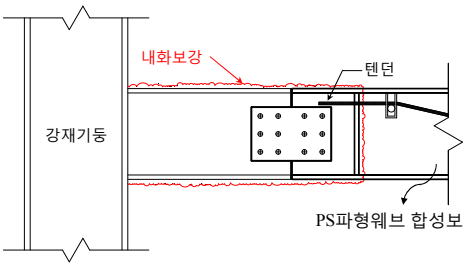
(b) 콘크리트 기둥 - 파형보 접합 (상향긴장방식)



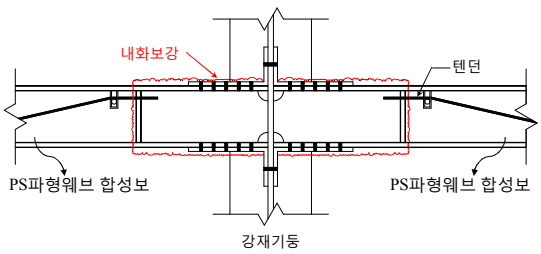
(c) 엔드플레이트 접합



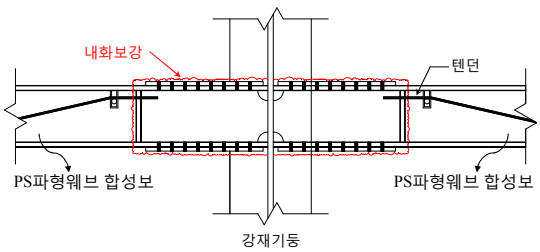
(d) 겔버보 볼트 접합1



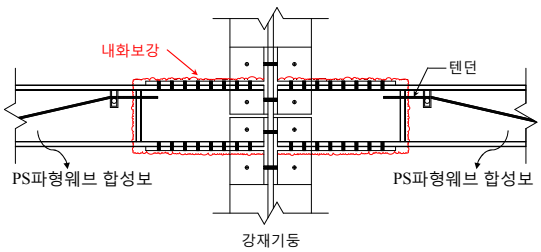
(e) 겔버보 볼트 접합2



(f) 수평스티프너로 보강한 약축접합 상세1



(g) 수평스티프너로 보강한 약축접합 상세2



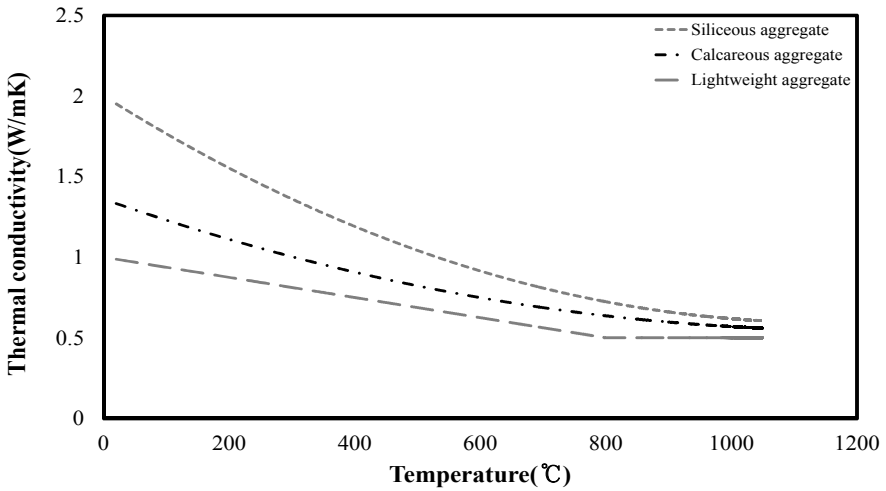
(h) 수평스티프너로 보강한 약축접합 상세 (볼트접합)

그림 비고-3 PS파형웨브합성보의 보·기둥 접합방식

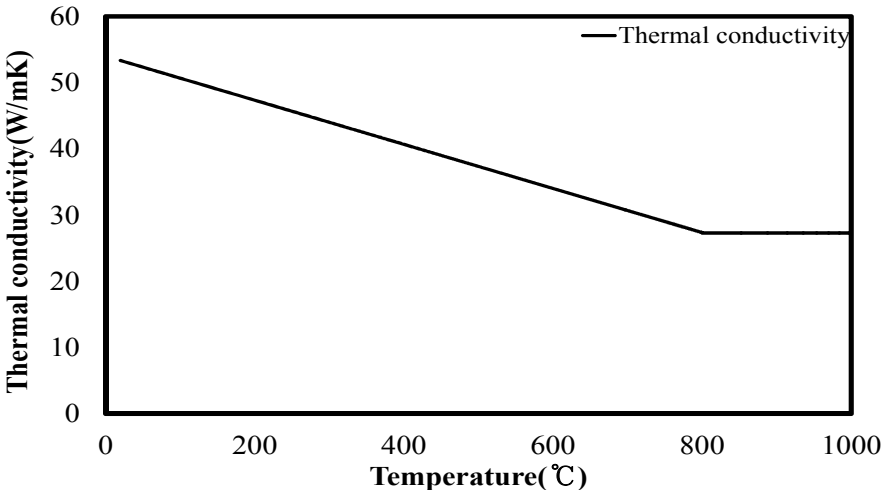
제3절 내화성능 개선

1. 해석을 통한 PS파형웨브 합성보 내화실험 결과분석 및 예측

콘크리트와 같은 세라믹계열의 재료가 탄소강재료(이하 강재)에 비하여 상대적으로 우수한 내화성능을 제공한 다는 것은 일반적으로 잘 알려진 사실이다. 이는 강재 및 콘크리트의 고유한 열적 특성들중 하나인 열전도율이 크게 차이나기 때문이며, 그림 3.22에 나타낸 것과 같이 콘크리트와 강재의 열전도율 차이는 콘크리트에 사용된 골재의 종류에 따라 다소 차이가 있기는 하지만 약 30배~50배의 차이를 나타낸다. 콘크리트 및 강재의 응력-변형률 거동은 온도에 따라 크게 달라지며, 그림 3.23에는 콘크리트 및 강재의 노출 온도에 따르는 응력-변형률 관계를 나타내었다. 노출온도가 높을수록 재료강도가 급격히 낮아지는 것을 알 수 있으며, 콘크리트의 경우 약 600℃ 정도에서 재료의 강도가 절반으로 감소하며, 텐던의 경우에는 300~400℃, 철근 및 강재의 경우에는 약 500℃ 정도에서 재료강도가 절반으로 감소되는 것을 확인할 수 있다.

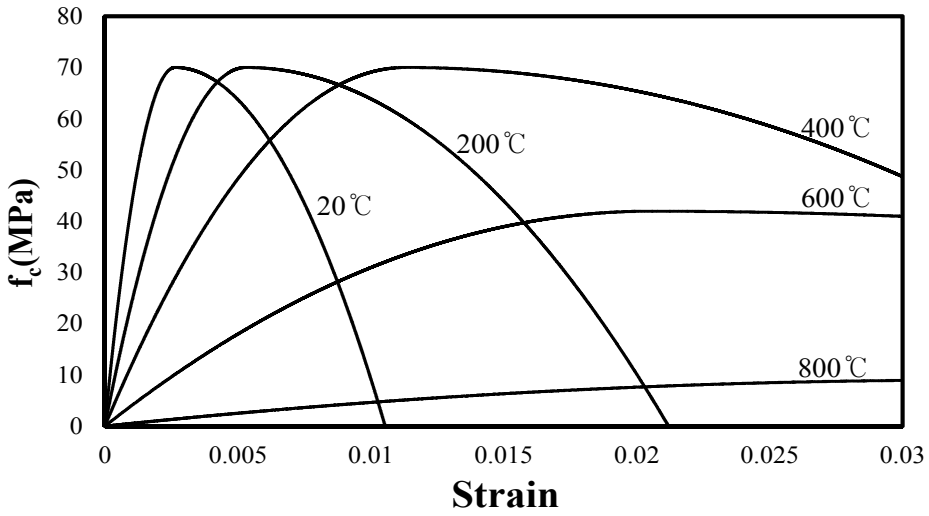


(A) 콘크리트의 열 전도율

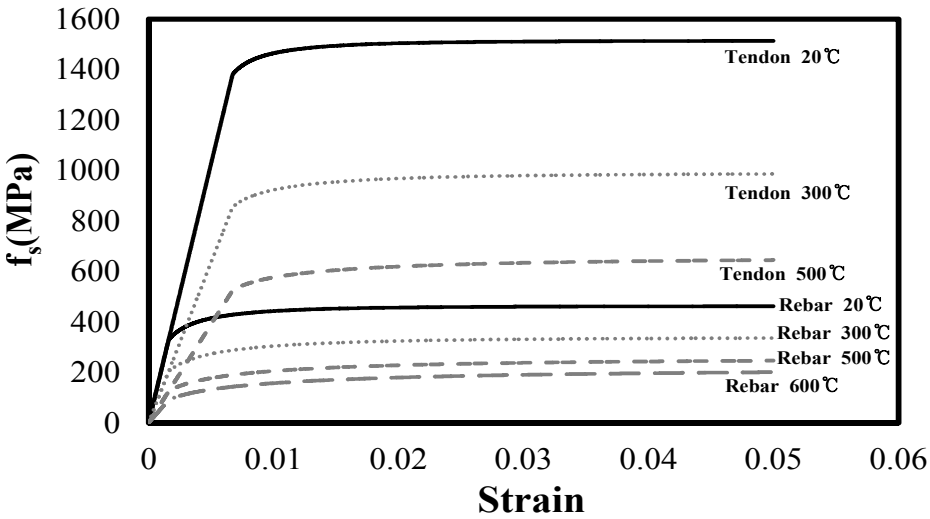


(B) 탄소강의 열 전도율

[그림 3.22] 건축재료의 열 전도율



(A) 콘크리트의 응력-변형률 관계



(B) 탄소강의 응력-변형률 관계

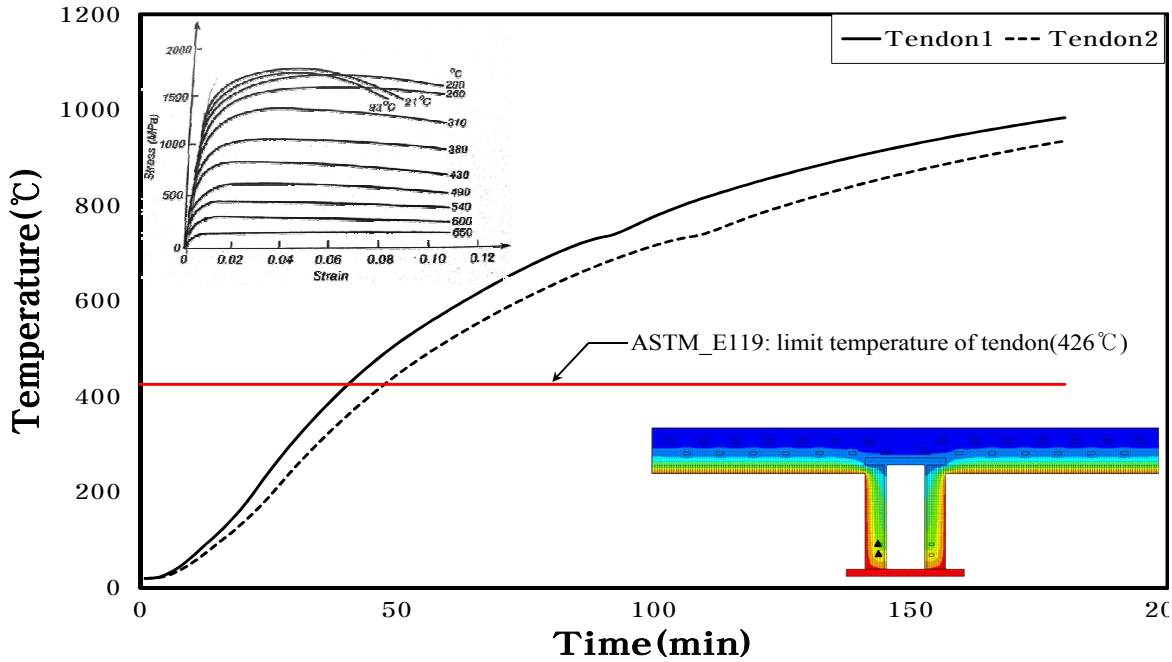
[그림 3.23] 노출온도에 따르는 응력-변형률 관계

기존의 적용되고 있는 내화성능 확보방안은 철골구조의 경우, 내화뿜칠, 내화도료, 내화보드 및 콘크리트 블록 등과 같이 열전도율이 낮은 외부보호재료를 이용하여 강재를 화염으로부터 보호하는 방법을 적용하고 있다. 그러나 이 같은 방법은 시공현장에서 추가적인 공정이 필요하고, 시공비용이 증가하기 때문에 이 연구에서는 추가적인 공정 없이 (또는 최소한의 간결한 방법)을 통하여 목표내화성능시간을 만족할 수 있는 PS파형웨브 합성보를 개발하고, 이를 현장적용을 하는 것을 최종목표로 하고 있다.

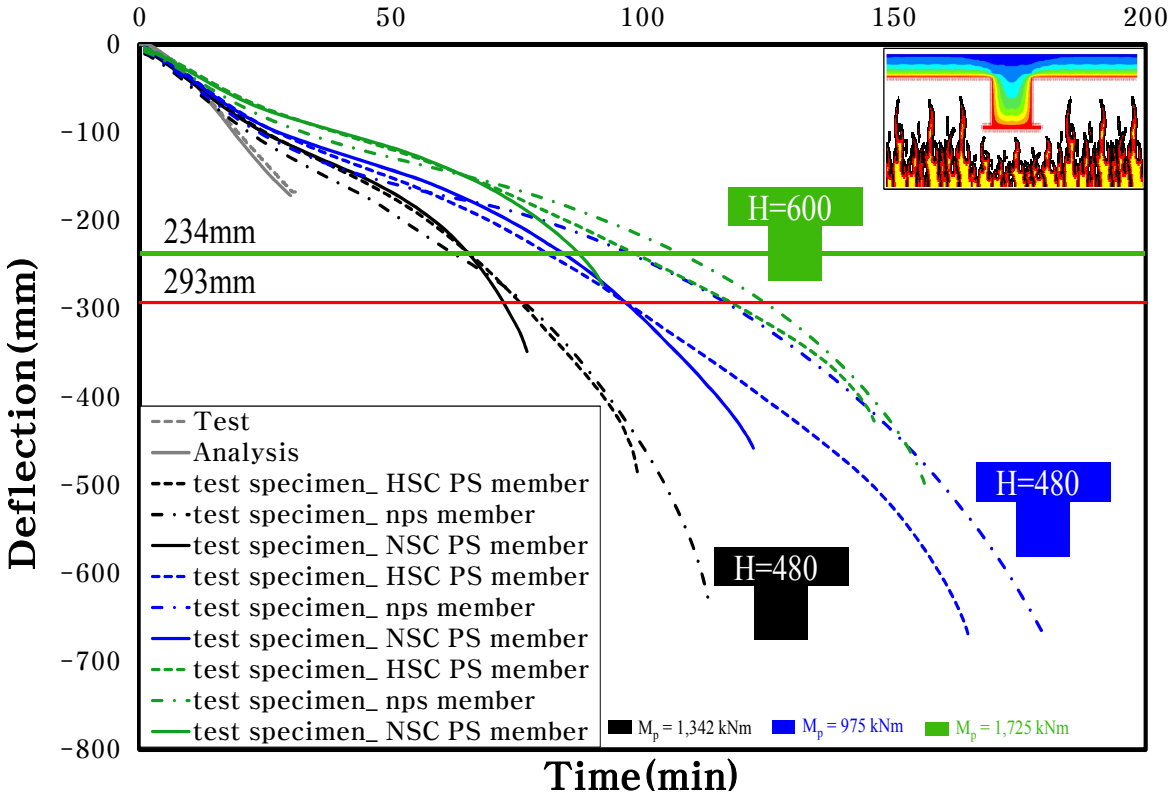
무피복 상태에서의 장스팬 합성보의 내화성능을 확보하기 위해서는 앞서 수행된 7.5 m 합성보 내화실험은 외에도 PS파형웨브 합성보의 상온거동 및 화해거동을 평가할 수 있는 해석모델의 개

발이 필요하며, 실제 구조설계를 위해서는 반드시 선행되어야 하는 부분이다. 또한, 더욱 효율적이고 경제적인 실험수행을 위하여 다양한 실험변수들 (예를들어, 도입 프리스트레스의 크기, 부재단면의 크기, 콘크리트 압축강도, 텐던의 개수, 부재의 구속조건, 텐던의 단열처리 유무 등)의 영향을 해석적으로 분석해 볼 필요가 있으며, 이 같은 해석모델의 구축을 통하여 추후에는 화재시나리오에 따른 성능설계법 개발의 초석을 다질 수 있을 것이다. 이 연구에서는 화해거동해석프로그램인 SAFIR를 사용하였으며, 이 프로그램은 온도해석 뿐만 아니라 하중조건에 따른 구조해석이 가능한 프로그램이다.

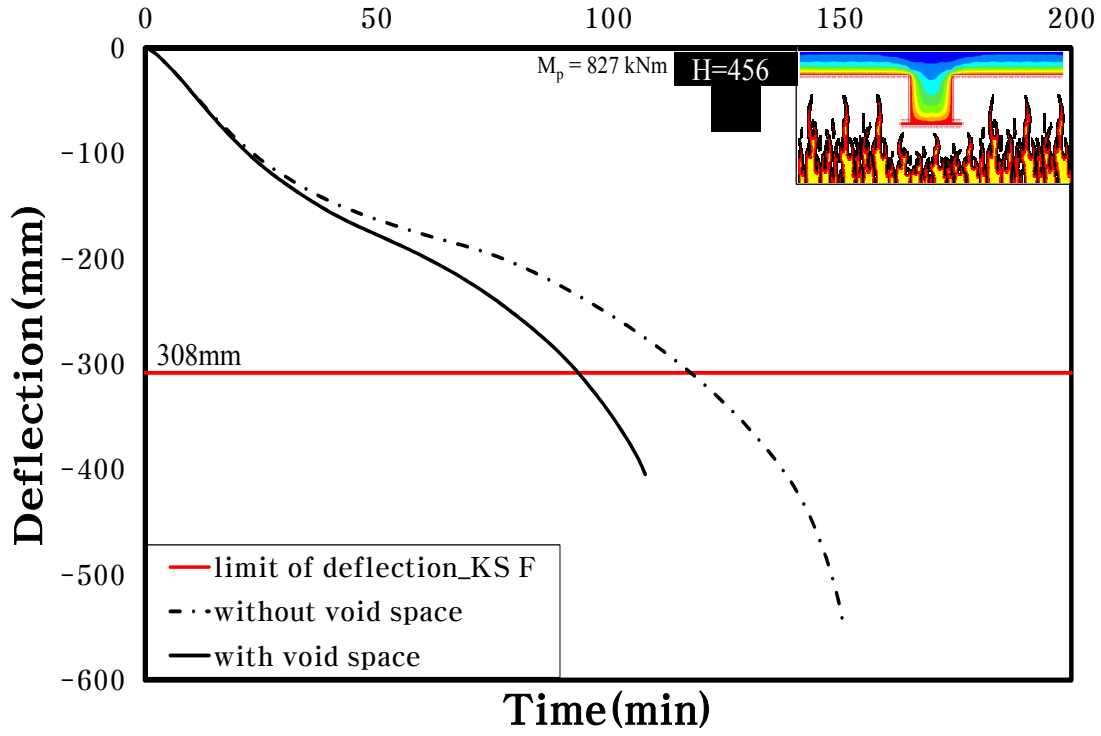
철근과 텐던 같은 탄소강 재료의 경우 ASTM E119에서는 철근 및 텐던의 한계온도를 지정하여 부재의 성능기준으로 사용할 수 있도록 하고 있다. 그림 3.24-(1)은 대상 부재의 온도해석을 통해 텐던의 온도 프로파일을 나타내고 있다. ASTM E119에서 제시하고 있는 텐던의 한계온도는 약 430℃로서 해당온도 이상에서 재료의 강도가 50% 이하로 저하되지 않도록 제한하고 있는 것이다. 그림 3.24-(1)에 나타낸 것과 같이, 텐던의 온도가 한계온도에 도달하는 시간은 화재 노출 후 약 50분으로 해당 시간 이후 텐던의 인장력분담률이 급격히 낮아질 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 상온거동에 큰 무리가 없는 범위에서 텐던의 유효깊이(단면의 최상부에서 텐던도심까지거리)를 상부 방향으로 50mm 높게 하였으며, 앞서 상온거동실험에서 언급한 것과 같이 텐던의 프로파일은 구조거동에 큰 영향이 없으며, 텐던의 변곡점을 줄일 수 있기 때문에 그림 3.25에 같이 변경하여 화재에 의한 영향을 최소화할 예정이다. 또한 국내 콘크리트구조설계기준에 근거하여 T형보의 유효폭을 1,500mm 결정하였으며, 1개의 일반 슬림플로어보와 2개의 PS파형웨브 합성보에 대해 그림 3.24-(2)에서 보는 바와 같이 부재의 높이, 콘크리트 압축강도(24 MPa 및 40 MPa) 및 작용하중을 변수로 하여 부재의 화해거동을 평가하였다. 화재초기거동은 PS파형웨브 합성보가 슬림플로어보에 상대적으로 처짐제어성능이 우수하게 나타나지만 종국에는 PS파형웨브 합성보의 거동성능이 상대적으로 크게 저하되는 경향을 보이고 있다.



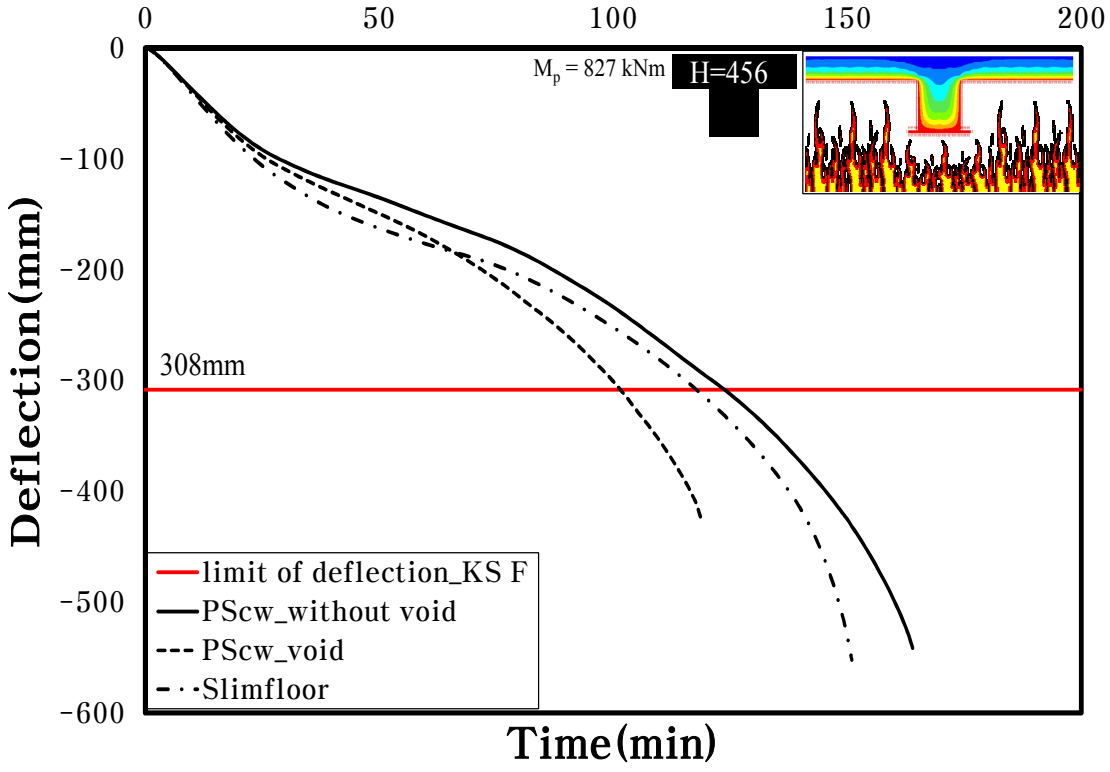
(A) 부재 내 텐던의 한계온도(Critical temperature)



(B) 작용하중 및 단면높이 변수에 따르는 화해거동

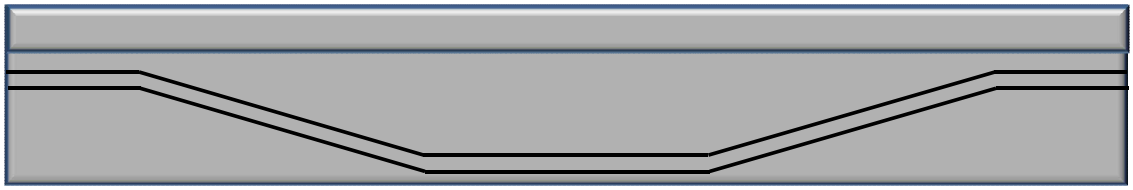


(C) 부재 내 중공유무에 따르는 거동차이

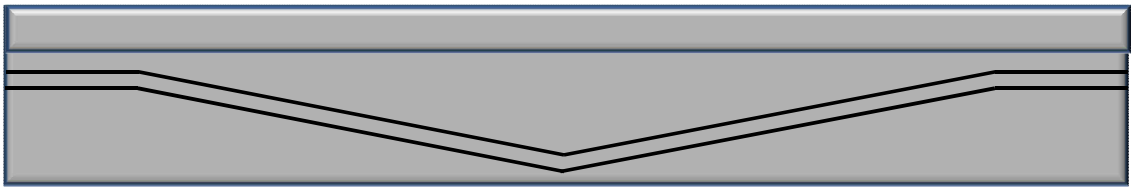


(D) 2차 계획 실험체의 화해거동

[그림 3.24] 다양한 변수고려한 부재의 화해거동



(A) 변경 전

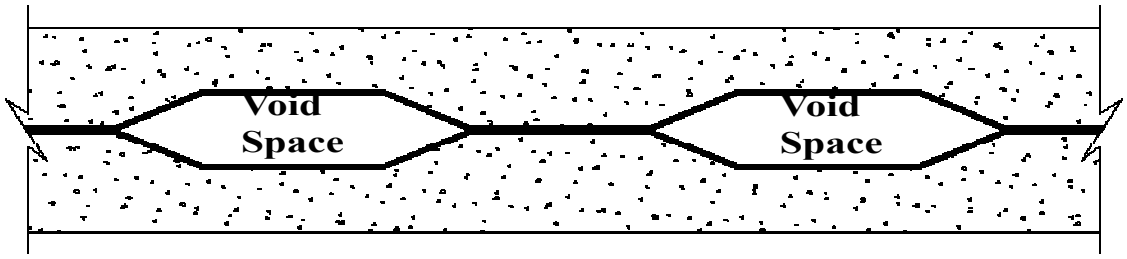


(B) 변경 후

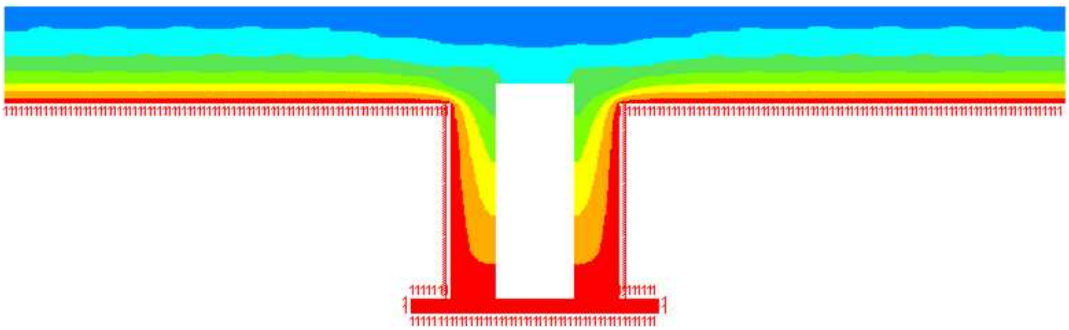
[그림 3.25] 텐던 프로파일 변경

2. 웨브형태변경을 통한 부재의 내화성능 향상방안 제시

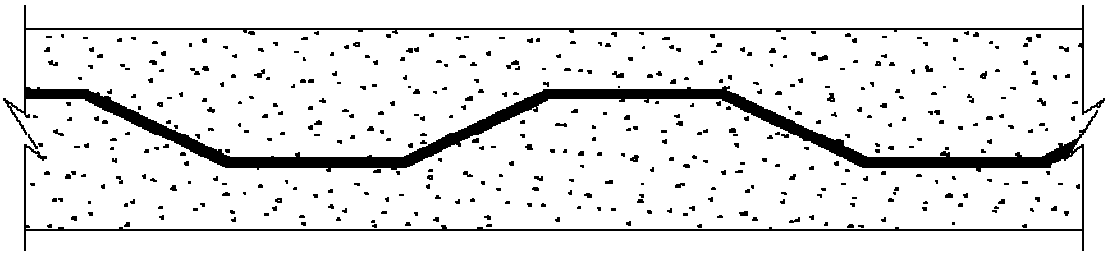
개발부재의 최초 형태는 그림 3.26-(1)과 같이 파형웨브의 형태로 인하여 단면내부에 중공부가 존재하였다. 상온 조건에서는 해당 사항이 부재의 물량 및 자중절감의 효과를 확보 할 수 있었던 반면에, 고온조건에서는 그림 3.27과 같이 해당 중공부에 기인한 단면내부의 열전달 메커니즘의 변화가 발생하여 중공부가 없는 부재와 구조성능 차이를 보이는 문제점이 제기되었다.



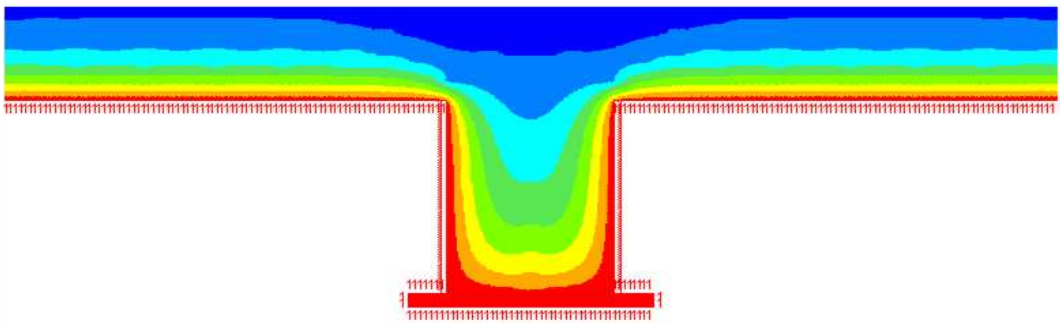
(1) 중공부가 없는 단면의 온도분포



(2) 1Leg web 실험체의 평면



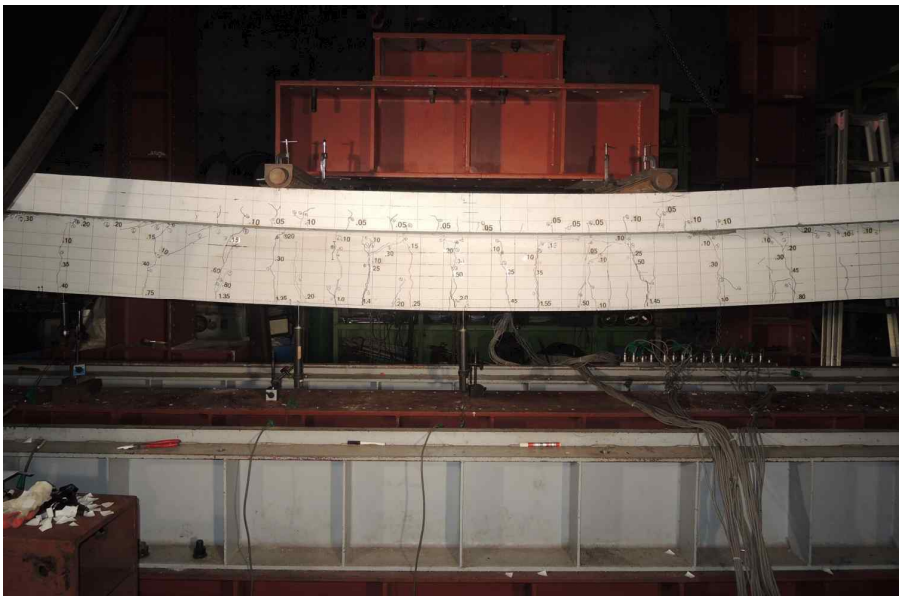
(3) 중공부가 있는 단면의 온도분포



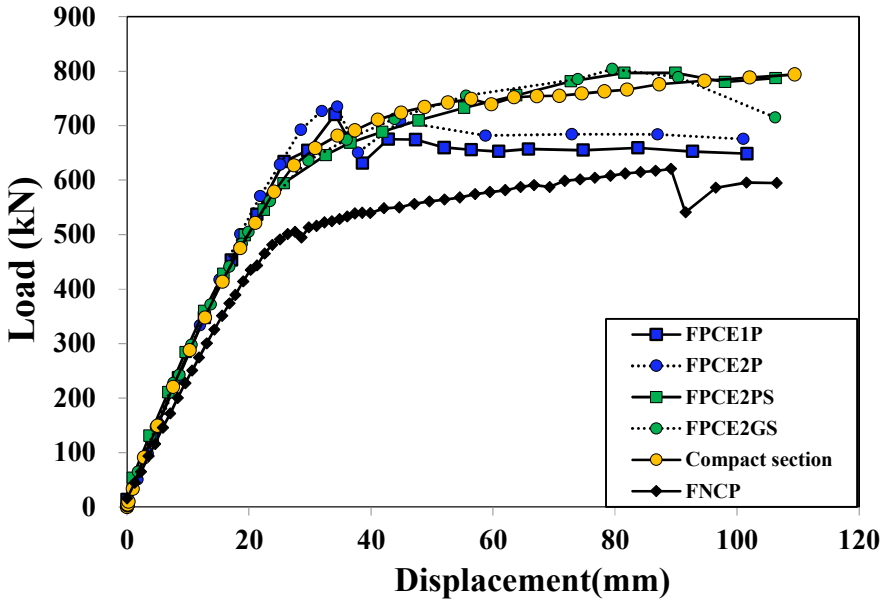
(4) 2Leg web 실험체의 평면

[그림 3.26] 부재 단면의 온도분포

이와 같은 해석적 연구를 통해 부재 내부의 중공부를 배제한 실험체를 새로 제안했으며, 해당 부재의 상온성능 실험을 실시하였다. 상온 실험체는 기 수행된 상온 실험체와 동일한 조건으로 제작되었으며 다만, 파형웨브의 형상을 그림 3.26-(3)와 동일하게 하여 부재내부의 중공부를 제거하였다. 그림 3.26-(1)은 중공부가 배제된 PS파형웨브 합성보의 상온 구조성능 실험 사진을 나타낸 것이며, 그림 3.26-(2)는 중공부가 있는 실험체와 중공부가 제거된 실험체(Compact section)의 하중변위관계를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 중공부가 배제된 실험체의 구조성능이 기 수행된 실험체와 대동소이한 것을 확인 할 수 있었으며, 새로 제안된 실험체를 통해 PS파형웨브 합성보의 추가적인 내화성능 향상을 확보 할 수 있었다.



(1) Compact section실험체



(2) 상온성능 검증

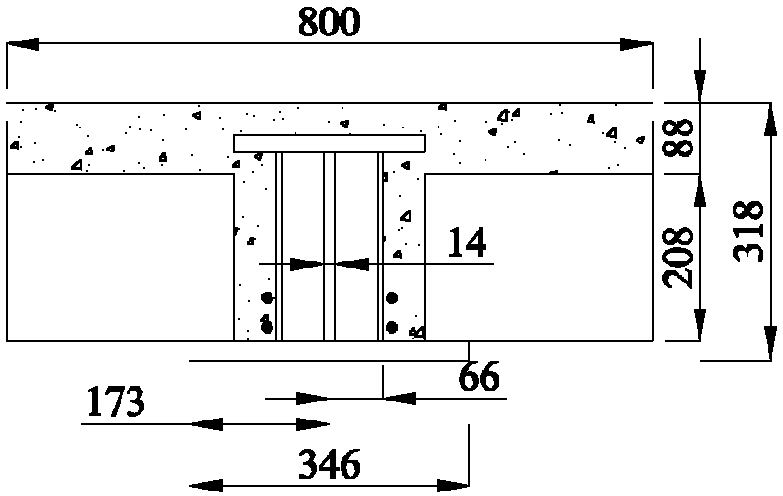
[그림 3.27] Compact section 실험체의 상온 구조성능 평가

3. PS도입에 따른 파형웨브 합성보의 내화성능 향상방안 도출 [7.5 M/3시간]

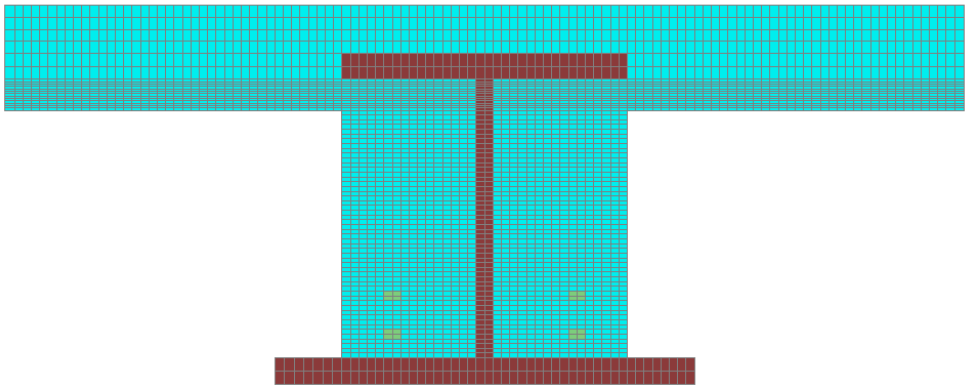
가. 해석을 통한 PS파형웨브 합성보 내화실험 결과분석 및 예측

그림 3.28-(1)에는 해석하고자 하는 실험체의 단면상세을 보여주고 있다. 해석에 사용된 콘크리트 및 텐던의 재료모델은 모두 EC2 part1-2모델을 강재의 경우 EC3 part1-2 모델을 적용하였다. SAFIR의 해석 인터페이스에서는 먼저 온도해석을 수행하고, 그 결과를 이용하여 미리 부여된 하중조건, 부재의 길이 및 지지조건에 따른 구조거동 해석이 수행되었다.

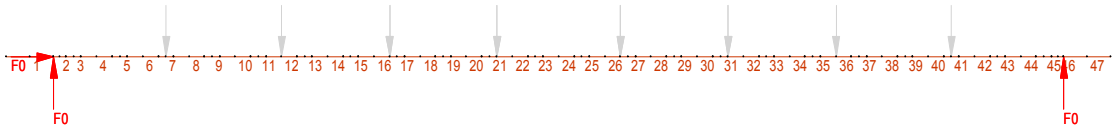
SAFIR를 이용한 PS파형웨브 합성보의 화해거동해석결과를 검증하기 위하여 실물 내화실험 데이터를 근거로 하여 PS파형웨브 합성보로 제작된 실험체 S-4와 S-5의 화해거동과 비교하고자 한다. 화해거동모델에서는 그림 3.28-(3)에 나타낸 것과 같이, 웨브의 형상에 따라 길이방향으로 47개의 요소로 합성보를 분할하였다. SAFIR에서는 연속적인 텐던(PS강연선)의 프로파일을 모사할 수 없기 때문에 이 연구에서는 길이방향요소마다 텐던의 배치깊이를 다르게 하여 비연속적으로 텐던의 프로파일을 반영하였다 (그림 3.28-(4) 참고). 프리스트레스는 SAFIR 프로그램에서 제공하는 잔류응력옵션(Residual stress option)을 이용하여 모델링하였고, 해석결과 프리스트레스에 의한 초기 상향치 올림(즉, 캠버)가 약 0.22 mm 정도 발생하였으며, 선형탄성해석결과와 거의 일치되는 결과였고, 다만, 실험체의 캠버는 계측되지 못하였기 때문에 비교할 수 없었다. 약 30분까지 계측된 PS파형웨브 합성보 실험체의 화해거동과 SAFIR를 통해 해석한 결과를 비교하여 그림 3.28-(5)에 나타내었다. 이 연구에서 제시한 비선형유한요소해석모델은 온도 및 외부 등분포하중을 받는 합성보 실험체의 시간에 따른 처짐거동을 매우 유사하게 평가하는 것으로 나타났다.



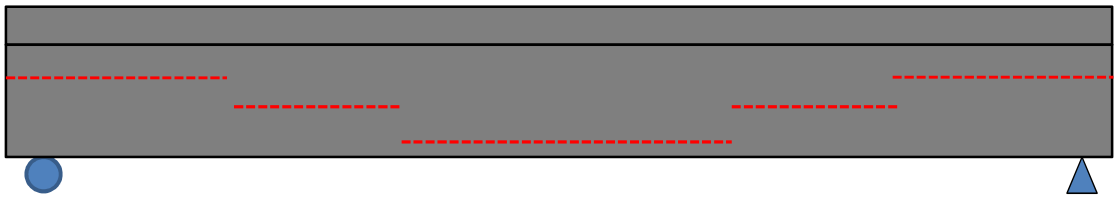
(1) 실험체 단면상세



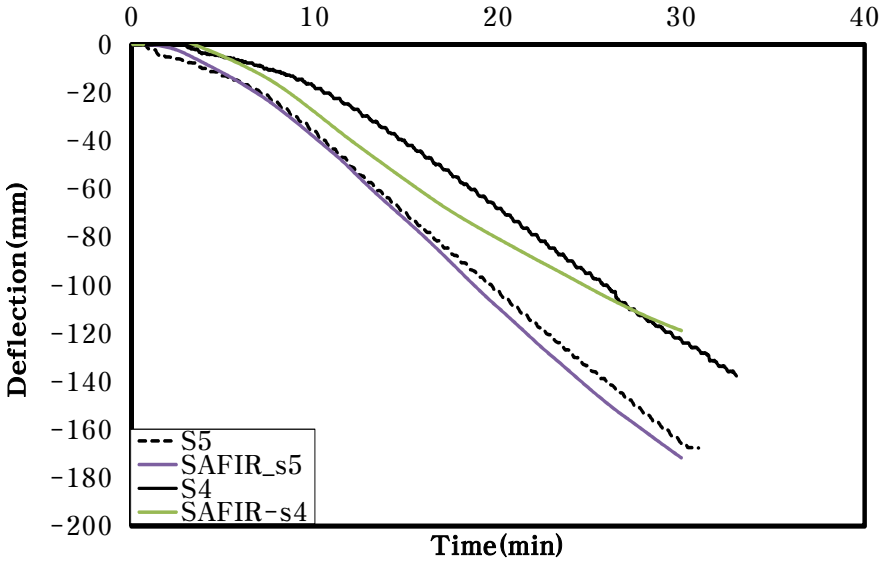
(2) Safir 단면 모델링



(3) Safir 부재 모델링



(4) 텐던 프로파일

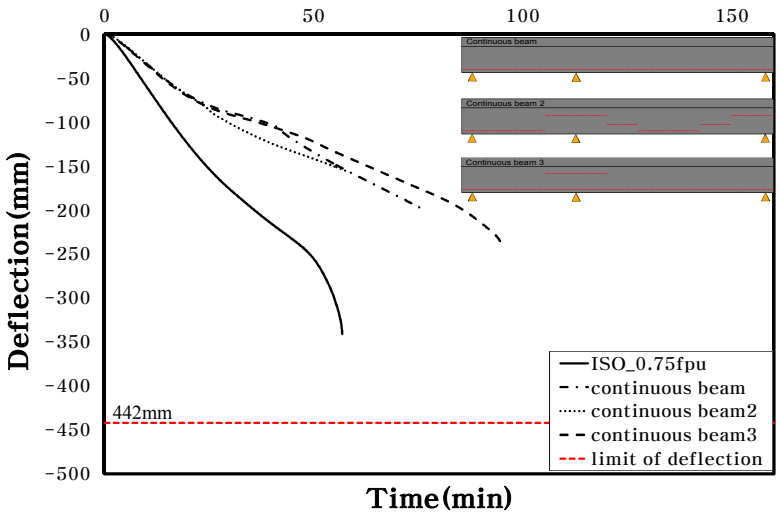


(5) 해석결과의 검증

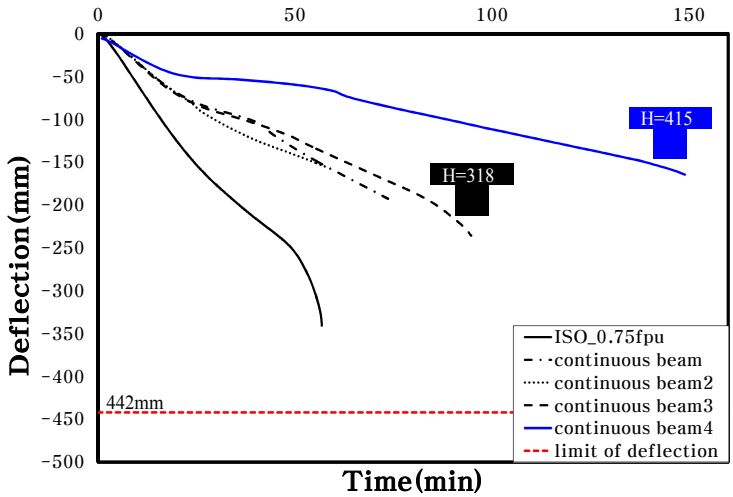
[그림 3.28] 다양한 변수고려한 부재의 화해거동

나. 보춤의 높이에 따른 내화성능 향상방안 도출

그림 3.29-(1)에는 단면높이가 315 mm인 연속 PS파형웨브 합성보의 화해거동을 보여주고 있다. 함께 나타낸 단순지지된 PS파형웨브 합성보에 비하여 크게 향상된 처짐거동을 보여주었으며, 내화시간은 약 100분이었고, 파괴시 처짐량이 43%정도 감소된 것으로 나타났다. 그러나 여전히 목표내화성능시간인 3시간에는 못미치는 것으로 나타났으며, 이를 확보하기 방안으로 단면높이를 약 30% 정도 높여 비선형유한요소해석을 추가적으로 수행하였다. 그림 3.29-(2)에는 단면높이가 415 mm인 연속 PS파형웨브 합성보의 화해거동을 보여주고 있다. 해석결과 단면높이가 415 mm인 연속 PS파형웨브 합성보의 내화성능시간은 단면높이가 315 mm인 PS파형웨브 합성보에 비하여 크게 증가된 약 150분정도로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 이후 구조상세에 대한 추가적인 보강을 통하여 목표내화성능을 충분히 확보할 수 있었다.



(1) 텐던 프로파일을 변수로 적용한 연속보 시스템 부재의 화해거동



(2) 연속보 시스템 부재의 단면 높이에 따르는 화해거동

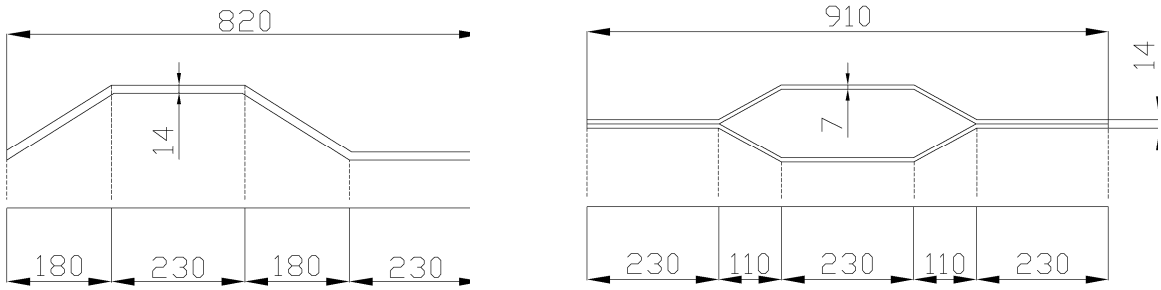
[그림 3.29] 다양한 변수를 고려한 PS파형웨브 합성보의 거동

1. 피복 두께 및 단면형상에 따른 내화실험

가. 실험개요

PS를 도입한 파형웨브 합성보의 내화성능을 평가하기 위하여 PS도입 유무 및 단면형상 그리고 보 하부의 내화피복 두께에 따라 내화실험을 진행하였다.

PS파형웨브 합성보의 내화성능은 일반합성보 및 본 공법과 가장 유사한 형태인 PS가 도입되지 않은 비대칭 H형강에 Deep-deck을 적용한 슬림플로어(slim floor) 합성보와의 내화성능 비교를 통해서 PS 및 파형웨브 도입 효과를 검증하였다. 파형웨브 합성보는 그림 3.30와 같이 단일(1layer) 파형웨브와 이중(2layer) 파형웨브로 구분하여 내화성능을 분석하였다. 또한 기존의 연구사례를 바탕으로 일반합성보 및 슬림플로어 합성보와 PS파형웨브 합성보 하부의 강재 부분에 3시간 이상의 내화성능을 확보할 수 있도록 습식 펄라이트계 내화피복재를 뿜칠시공 하였다. 장스팬 합성보에 대한 내화성능 분석을 위하여 실험체는 가열면 길이 7.5m, 지점길이 7.7m로 제작하였다.



(a) 단일(1layer) (b) 이중(2layer)

[그림 3.30] 파형웨브 형상 상세도

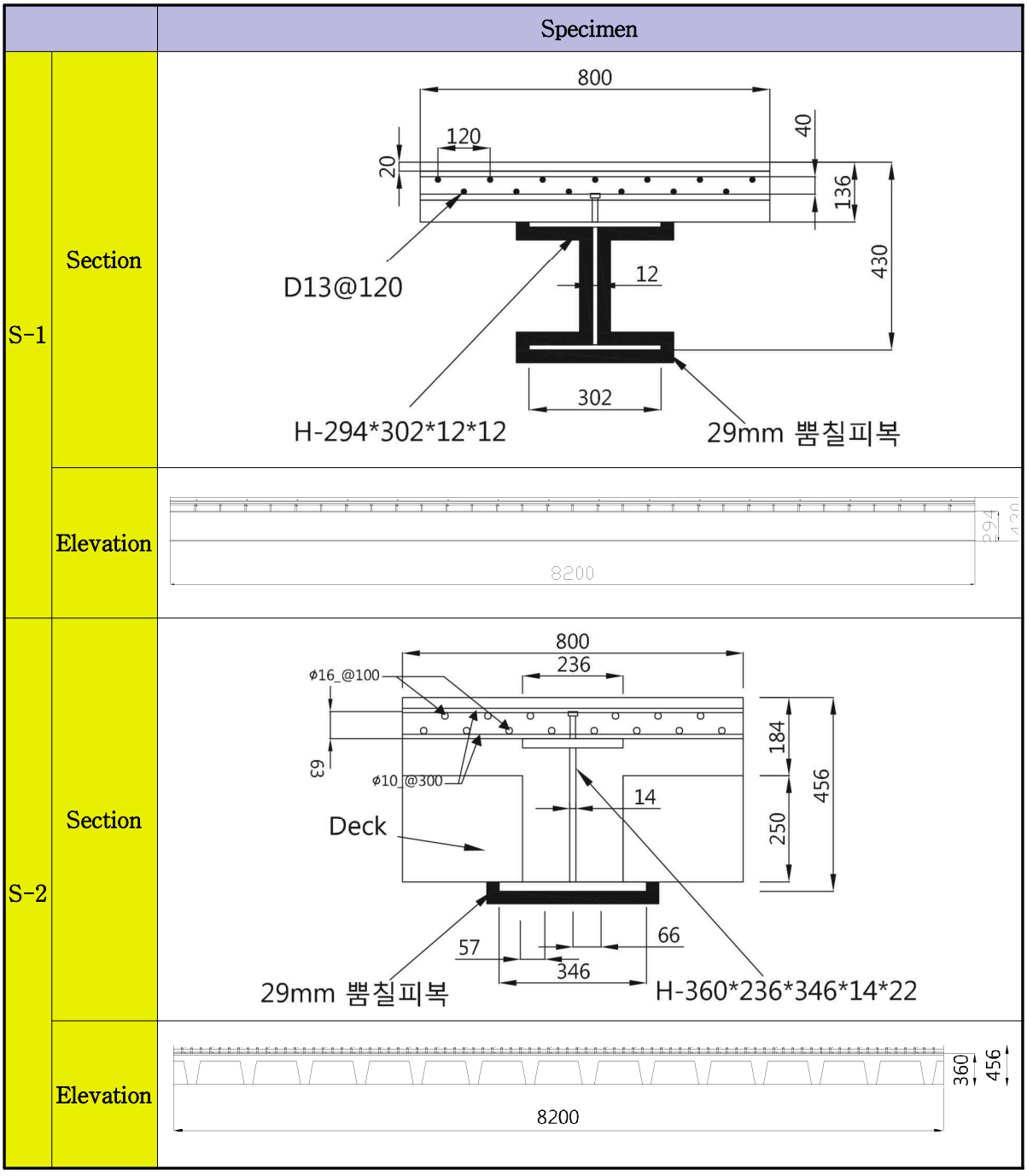
나. 실험체 제작 상세

표준화재 재하조건에서 PS파형웨브 합성보의 내화성능 평가를 위하여 표 3.5와 같이 실험체 구성하였다. 일반합성보[S-1] 및 PS를 도입하지 않고 비대칭 H형강에 deep-deck를 적용한 슬림플로어 합성보[S-2]와 직경 12.7 ㎜의 긴장재(tendon)로 PS를 도입하고 deep-deck을 적용한 파형웨브 합성보[S-3 & S-4]를 그림 3.20, 그림 3.21과 같이 제작하였다. 또한 파형웨브는 이중웨브[S-3]와 단일웨브[S-4]로 구분하여 웨브 형태에 따른 내화성능을 비교하였다. 선행 연구에서 슬림플로어 합성보는 경간거리 4.2 m, 하부 철골의 무피복 조건에서 89분의 내화성능을 만족하는 것으로 나타났다. 하지만 본 실험조건의 경우 경간길이를 7.7 m로 변경하여 3시간 내화성능 확보를 위해 피복재 29 ㎜를 뿜칠 시공하였다. 또한 파형웨브 합성보는 PS도입과 파형웨브로 인한 아코디언 효과를 감안하여 이중웨브의 경우 19 ㎜, 단위웨브의 경우 9 ㎜로 뿜칠 시공하였다.

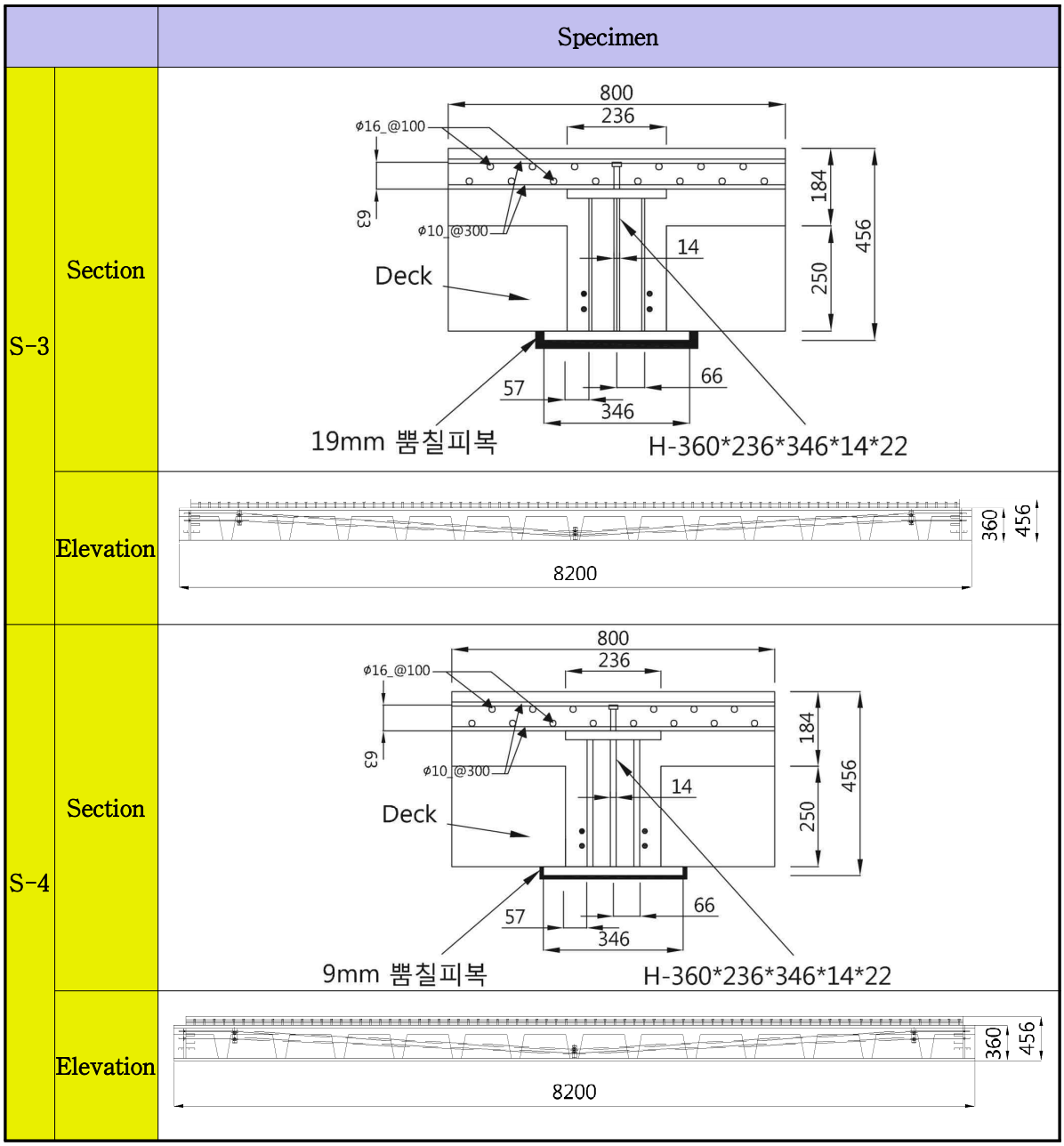
내화실험 시 강재와 콘크리트 내부의 온도변화를 관찰하기 위하여 그림 3.22과 같이 K-Type 1 ㎜ 열전대를 설치하여 실험체 내부 온도를 측정하였다.

<표 3.5> 실험체 구성

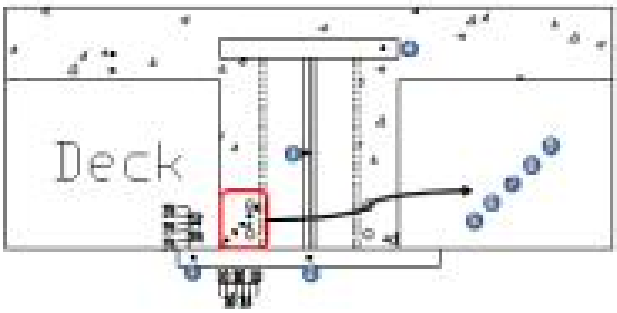
Specimen	Parameter	Prestress	Thickness of covering material (㎜)	H-beam Size (㎜)
S-1	Normal	×	29	294×302×12×12
S-2	Slim floor	×	29	360×236 ×346×14×22
S-3	2 layer corrugated web	○	19	
S-4	1 layer corrugated web	○	9	



[그림 3.20] 실험체 상세도[S-1 & S-2]



[그림 3.21] 실험체 상세도[S-3 & S-4]



[그림 3.22] 열전대 설치위치

라. 일반합성보 및 PS파형웨브 합성보 대비 효과적인 온도제어

- PS도입 유무 및 웨브 형태, 피복두께에 따른 강재(H형강)과 콘크리트 내부의 온도에 측정하여 내화성능에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

(1) 강재(H형강)

강재의 온도에 따른 내화성능을 분석하기 위하여 H형강의 상·하부 플랜지 및 웨브의 온도를 측정한 결과 표 3.6과 같이 나타났다. 29 ㎜(3시간 내화)의 피복재를 도포한 S-1(일반합성보)의 경우 180분에서 하부 플랜지 온도가 469.7 ℃, 웨브의 온도가 199.5 ℃, 상부 플랜지 온도가 112.1 ℃로 나타났다. 하부 철골에 29 ㎜의 피복재를 도포한 S-2(PS파형웨브 합성보)의 경우 180분에서 하부 플랜지의 온도가 277.6 ℃, 웨브의 온도가 135.3 ℃, 상부 플랜지의 온도가 113.9로 나타났다. 19 ㎜의 피복재를 도포한 S-3(파형웨브 합성보-2layer)의 경우 하부 플랜지 온도가 291.4, 웨브의 온도가 144.7 ℃, 상부 플랜지 온도가 113.7 ℃로 나타났다. 9 ㎜의 피복재를 도포한 S-4(파형웨브 합성보-1layer)의 경우 하부 플랜지 온도가 418.3 ℃로 나타났다.

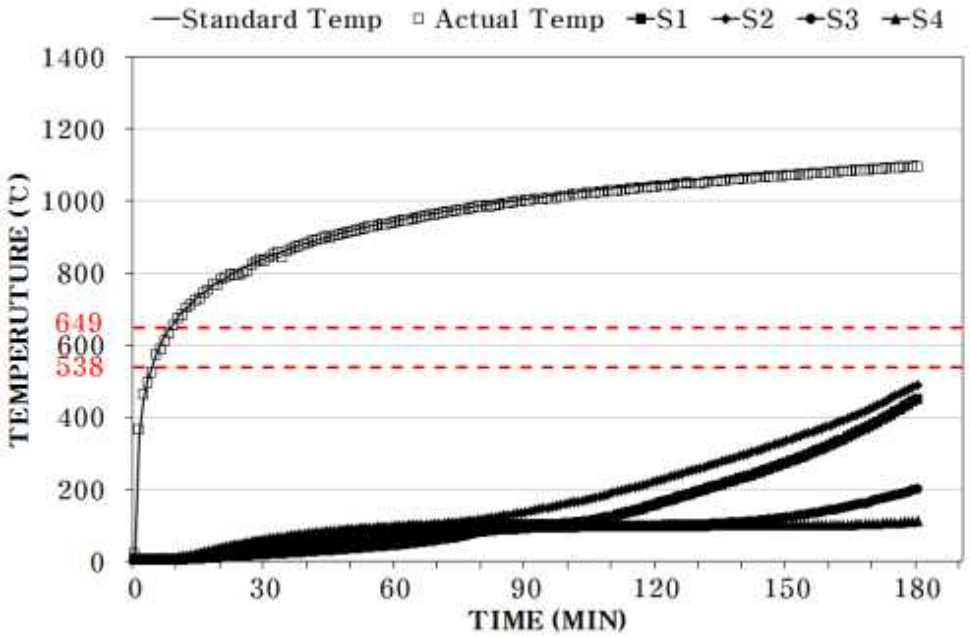
<표 3.6> 장스팬 합성보의 철골온도

Thermo couple location	Time (min)	S-1 (℃)	S-2 (℃)	S-3 (℃)	S-4 (℃)
Top Flange	60	48.1	40.6	29.9	35.0
	120	100.2	89.2	105.9	70.3
	180	112.1	113.9	113.7	105.8
Web	60	62.0	47.3	46.1	61.5
	120	100.0	108.7	108.1	103.8
	180	199.5	135.3	144.7	148.6
Bottom Flange	60	91.9	93.9	106.5	163.2
	120	190.3	182.9	201.4	287.0
	180	469.7	277.6	291.4	418.3

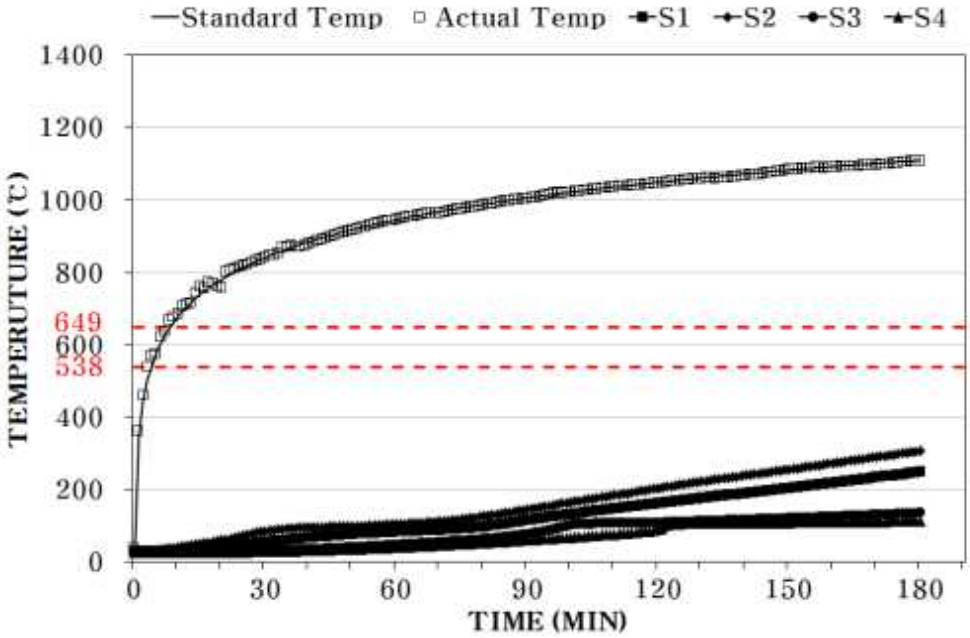
LSC* : Long Span Composite

실험결과, S-1(일반합성보)의 경우 피복두께가 가장 두꺼웠음에도 불구하고 부재의 큰 변형으로 인하여 피복재의 균열 및 탈락 발생으로 인하여 하부플랜지와 웨브 부분이 가장 높은 온도 상승이 일어났다. 또한 피복두께가 가장 두꺼운 S-2(PS파형웨브 합성보)가 가장 낮았어야 함에도 S-2과 S-3는 거의 차이가 발생하지 않았으며, 피복두께가 가장 얇은 S-4(파형웨브 합성보-1layer)가 S-2, 3에 비해 약 8 ℃ 낮은 것으로 나타났다. 이는 deep-deck을 적용함으로써 상부 플랜지와

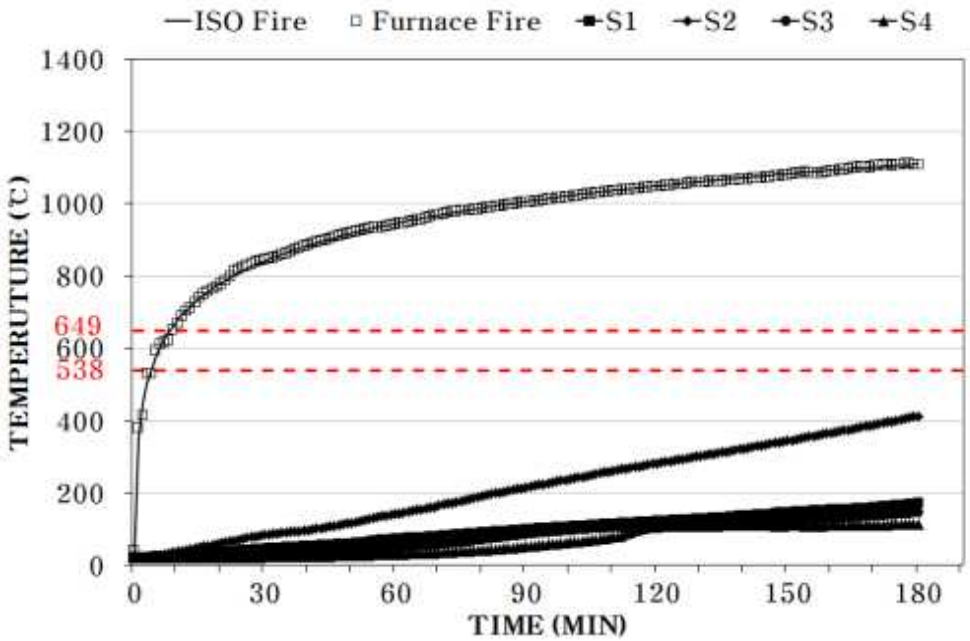
웨브가 콘크리트에 매립되어 있어 하부 플랜지를 통해서 흡수된 열이 상부 플랜지에 전달되는 열의 주요인자인 조건에서 S-2의 경우 S-3와 S-4에 비해 웨브의 단면적이 작아 콘크리트와 접촉되는 면적이 작아지기 때문으로 판단된다. 또한 파형웨브의 형태에 따라 S-3의 경우 이중웨브를 적용함으로써 웨브 사이에 중공이 발생하는 구조로써 S-4에 비해 콘크리트에 의한 열흡수가 적게 발생하고 하부 플랜지에서 흡수된 열이 웨브와 콘크리트를 통한 전도뿐만 아니라 복사에 의해서 전달되기 때문으로 판단된다. 또한 파형웨브에 deep-deck을 적용함으로써 철골의 하부를 제외하고 모두 콘크리트에 매립되고 파형웨블 적용함으로써 콘크리트에 의한 열흡수가 효율적으로 일어났기 때문으로 판단된다. 따라서 슬림플로어 합성보에 비해 파형웨브 합성보가 흡수되는 열을 효과적으로 제어는 것으로 나타났으며 단일 파형웨브 합성보가 동일 피복두께를 적용할 경우 내화성능이 가장 우수한 것으로 사료된다.



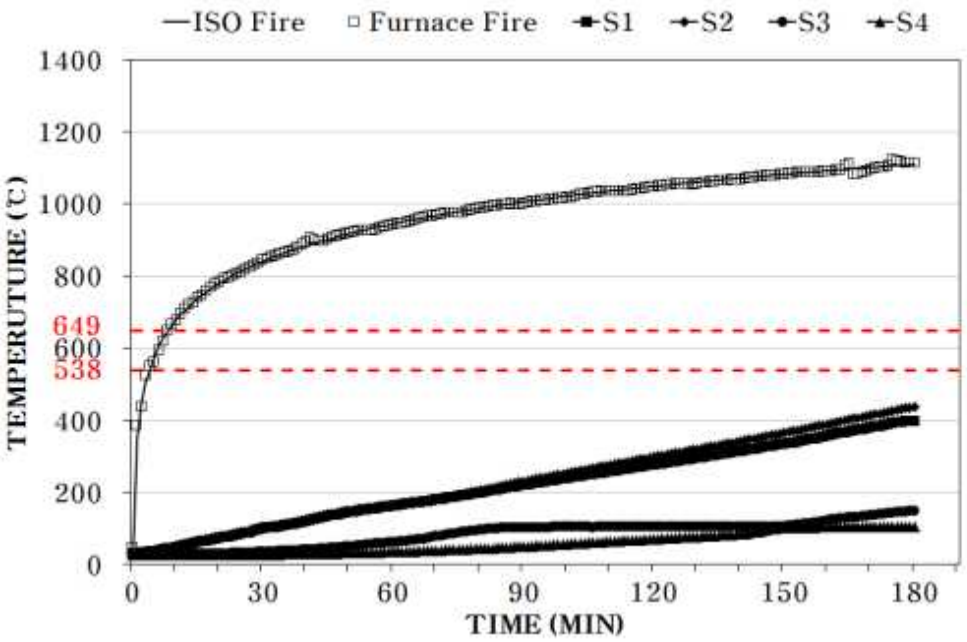
[그림 3.23] 장스팬 합성보의 시간에 따른 철골 온도분포[S-1]



[그림 3.24] 장스팬 합성보의 시간에 따른 철골 온도분포[S-2]



[그림 3.25] 장스팬 합성보의 시간에 따른 철골 온도분포[S-3]



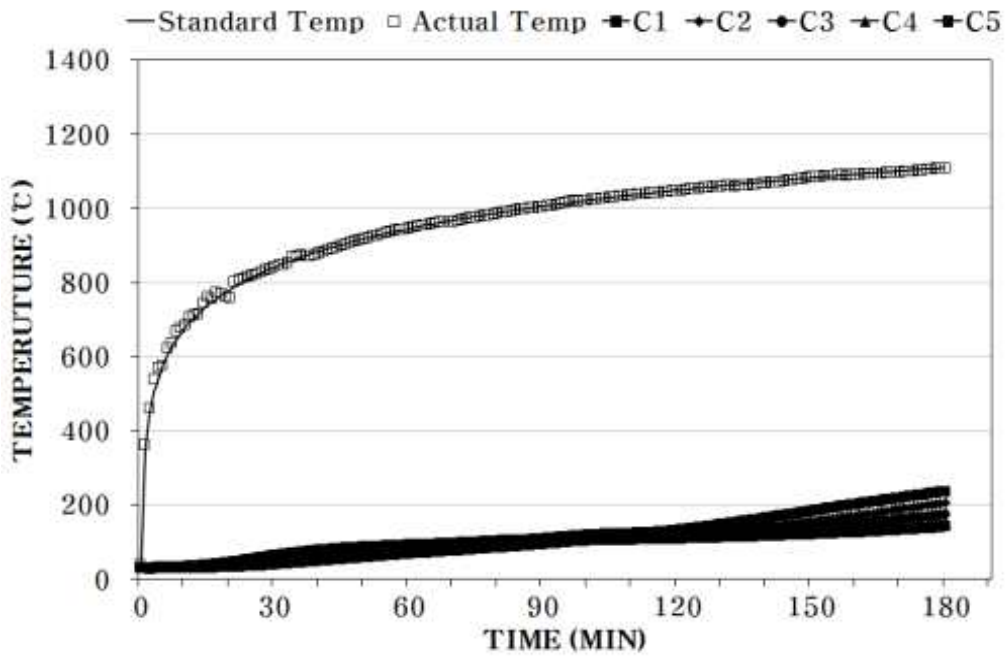
[그림 3.26] 장스팬 합성보의 시간에 따른 철골 온도분포[S-4]

(2) 콘크리트

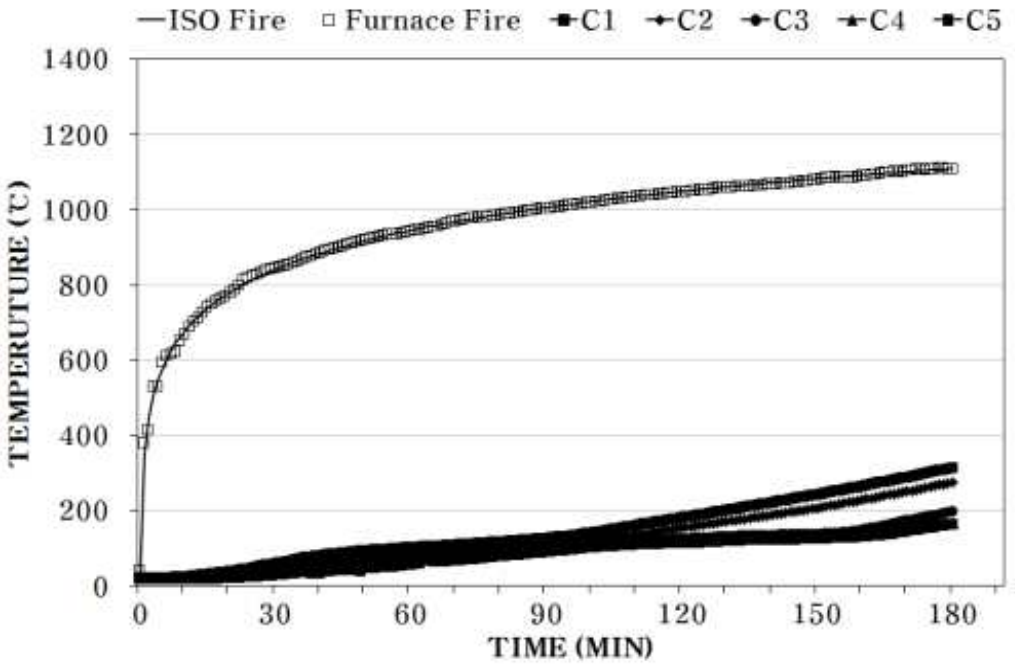
콘크리트의 온도에 따른 내화성능을 분석하기 위하여 가열면에서 깊이별로 콘크리트 내부 온도를 측정한 결과 표 3.7와 같이 나타났다. 가열면으로부터 콘크리트 내부 10 ㎜ 위치의 온도는 180분에서 S-2은 236.1 ℃, S-3는 313.0 ℃, S-4는 384.8 ℃로 S-2에 비해 S-3는 1.3배, S-4는 1.6배 높게 나타났다. 가열면으로부터 콘크리트 내부 50 ㎜ 위치의 온도는 180분에서 S-2은 141.1 ℃, S-3는 163.3 ℃, S-4는 176.9 ℃로 S-2에 비해 S-3는 1.2배, S-4는 1.3배 높게 나타났다. 이처럼 콘크리트 내부온도는 가열면에서 가까울수록 피복재의 영향을 크게 받는 것으로 나타났고, 가열면으로부터 거리가 멀어질수록 온도편차는 줄어드는 경향이 나타났다. 그림 3.27은 시간에 따른 콘크리트 내부 위치별 온도변화이다.

<표 3.7> 장스팬 합성보의 콘크리트 내부온도

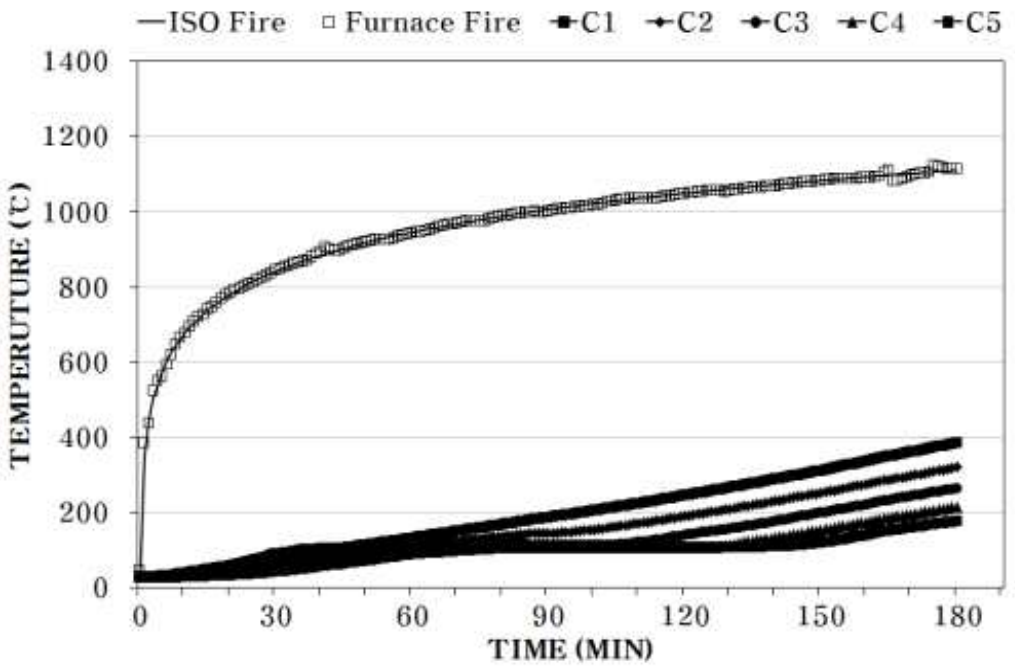
Thermo couple location (㎜)	Time (min)	S-1 (℃)	S-2 (℃)	S-3 (℃)	S-4 (℃)
10	60	-	91.8	102.2	131.8
	120	-	131.6	180.0	245.2
	180	-	236.1	313.0	384.8
20	60	-	87.4	96.2	115.5
	120	-	121.9	154.2	190.7
	180	-	205.8	275.7	320.5
30	60	-	80.1	80.1	106.3
	120	-	115.8	124.8	139.7
	180	-	173.1	195.9	264.3
40	60	-	74.0	73.9	103.1
	120	-	112.4	119.4	107.0
	180	-	152.6	167.6	215.4
50	60	-	67.6	55.7	89.3
	120	-	108.7	113.1	106.5
	180	-	141.1	163.3	176.9



[그림 3.27] 장스팬 합성보의 시간에 따른 콘크리트 내부온도 분포[S-2]



[그림 3.28] 장스팬 합성보의 시간에 따른 콘크리트 내부온도 분포[S-3]



[그림 3.29] 장스팬 합성보의 시간에 따른 콘크리트 내부온도 분포[S-4]

마. 일반합성보 및 PS파형웨브 합성보 대비 효과적인 변형제어[내화성능 확보]

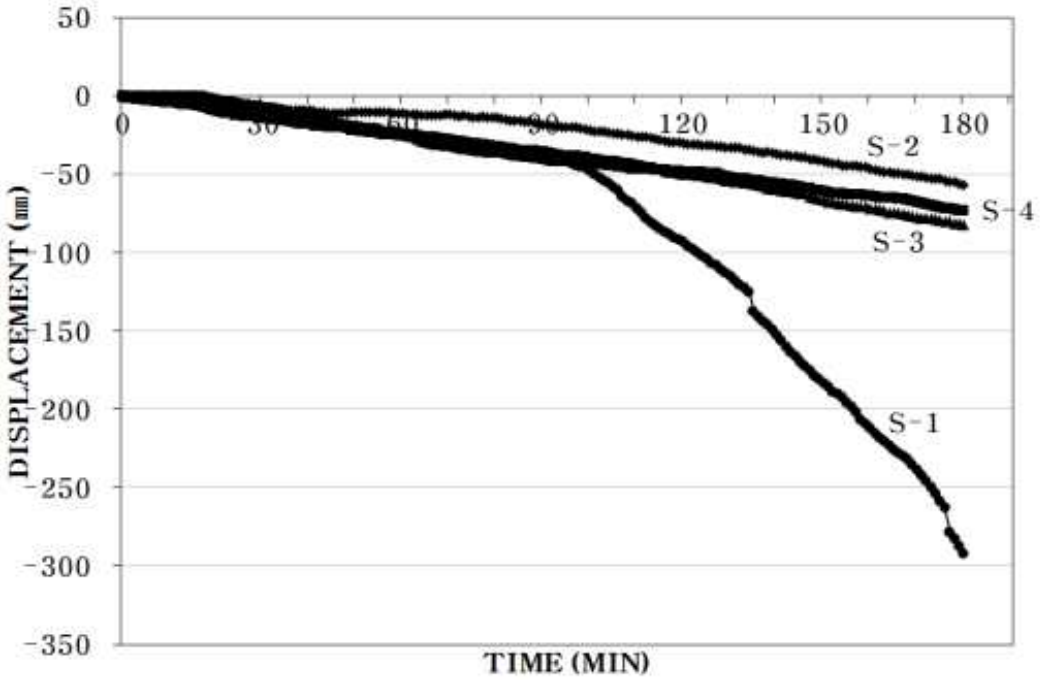
PS도입 유무 및 웨브 형태, 피복두께에 따른 내화실험을 실시한 결과 표 3.8과 같이 S-1, S-2, S-3, S-4 모두 180분 이상의 내화성을 확보 할 수 있는 것으로 나타났다. 내화실험을 종료한 180분에서 S-1의 경우 -291.9 ㎜, 변형률이 -4.8 ㎜/min로 나타났고, S-2의 경우 변형량이 -56.98 ㎜, 변형률이 -1.04 ㎜/min로 나타났고, S-3의 경우 변형량 -82.2 ㎜, 변형률이 -0.70 ㎜/min로 나타났으며, S-4의 경우 변형량이 -73.6 ㎜, 변형률이 -0.28 ㎜/min로 나타났다. KS F 2257-1의 내화성능 판정기준에 따르면 S-1의 변형량 기준은 341.5 ㎜, 변형률 기준은 15.2 ㎜/min이고, S-2, S-3, S-4의 변형량 기준은 325.1 ㎜, 변형률 기준은 14.4 ㎜/min 이다.

<표 3.8> 장스팬 합성보의 내화성능

Specimen	Time (min)	Displacement (㎜)	Rate of displacement (㎜/min)	Fire resistance (min)
S-1	60	-24.2	-0.6	180
	120	-93.5	-1.4	
	180	-291.9	-4.8	
S-2	60	-11.22	-0.18	180
	120	-30.14	-0.28	
	180	-56.98	-1.04	
S-3	60	-24.9	-0.08	180
	120	-50.0	-0.66	
	180	-82.2	-0.70	
S-4	60	-25.4	-0.04	180
	120	-48.5	-0.16	
	180	-73.6	-0.28	

변형량 허용 한계치를 기준으로 S-1은 89.8%로 한계치에 근접한 수준이였으며, S-2은 17.5%, S-3는 25.3%, S-4는 22.6%의 변형이 발생하였다. 변형량이 가장 적게 발생한 S-4 실험체의 경우 내화피복재의 두께가 9 ㎜로 가장 적은 양을 도포하였음에도 불구하고 3배 이상의 내화피복재를 도포한 S-2과 내화성능 측면에서 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 PS도입으로 인하여 휨변형에 대한 구조적 성능이 향상되었기 때문으로 판단된다. 또한 S-3, S-4의 내화성능이 유사한 수준으로

나타났다. 하지만 S-3의 경우 S-4 보다 내화피복재를 2배 이상 도포한 것을 감안하면 이중 파형 웨브에 비해 단일 파형웨브가 아코디언 효과로 인하여 상하부 플랜지의 응력집중 현상이 완화에 효과적인 것으로 판단된다. 그림 3.30은 실험체 별 시간에 따른 변형량이다.



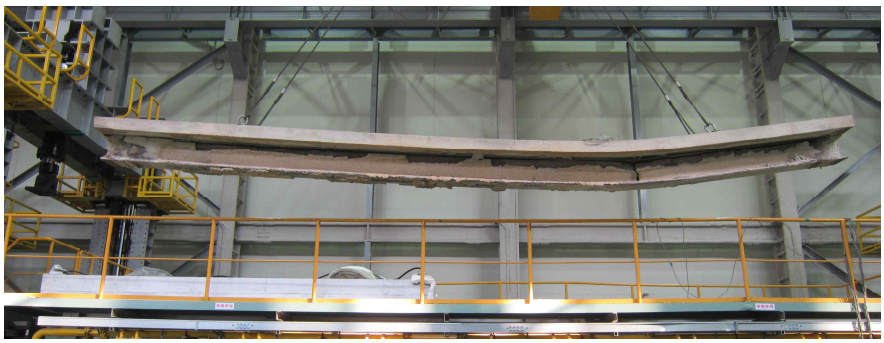
[그림 3.30] 장스팬 합성보의 시간에 따른 변형

(a) 일반 합성 보 [내화피복 29㎜, 3시간 피복]

시험 전



시험 후



내화성능[180분]

(b) 슬림플로어 합성 보 [내화피복 29㎜, 3시간 피복]

시험 전



시험 후



내화성능[180분]

[그림 3.31] 시험 전, 후 시험체 형상

(c) PS파형웨브 합성보(2-Leg) [내화피복 19㎜, 2시간 피복]	
시험 전	
시험 후	
내화성능[180분]	

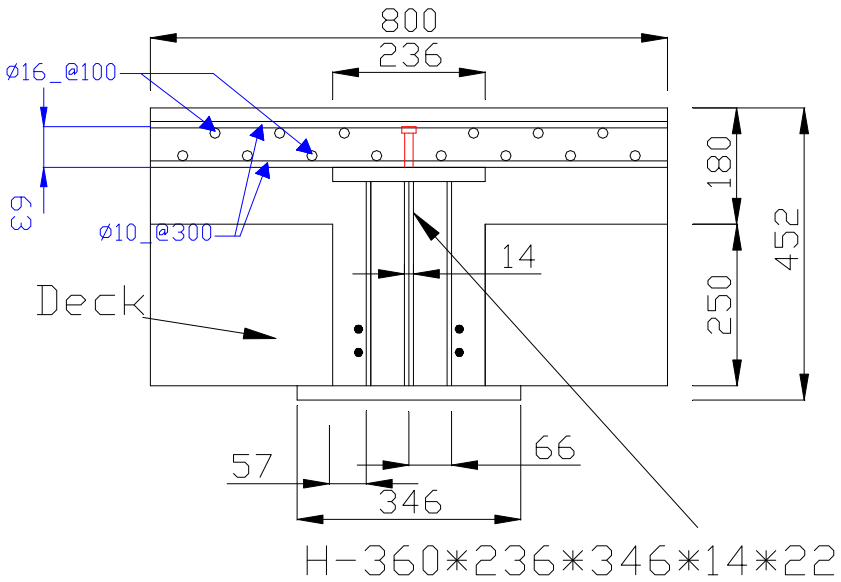
(d) PS파형웨브 합성보(1-Leg) [내화피복 9㎜, 1시간 피복]	
시험 전	
시험 후	
내화성능[180분]	

[그림 3.32] 시험 전, 후 시험체 형상

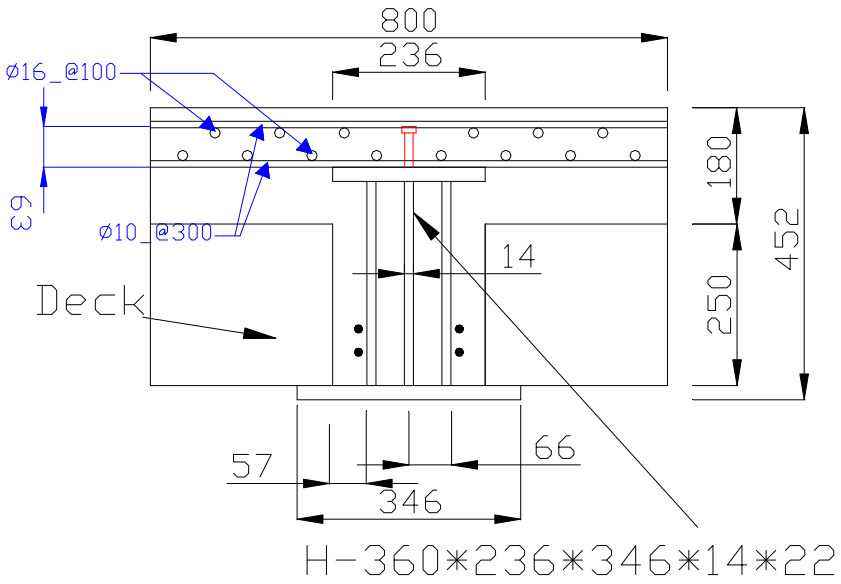
2. PS파형웨브 합성보의 고온성능평가결과 검증

가. 내화보강 변수에 따르는 화재거동 해석결과 검증

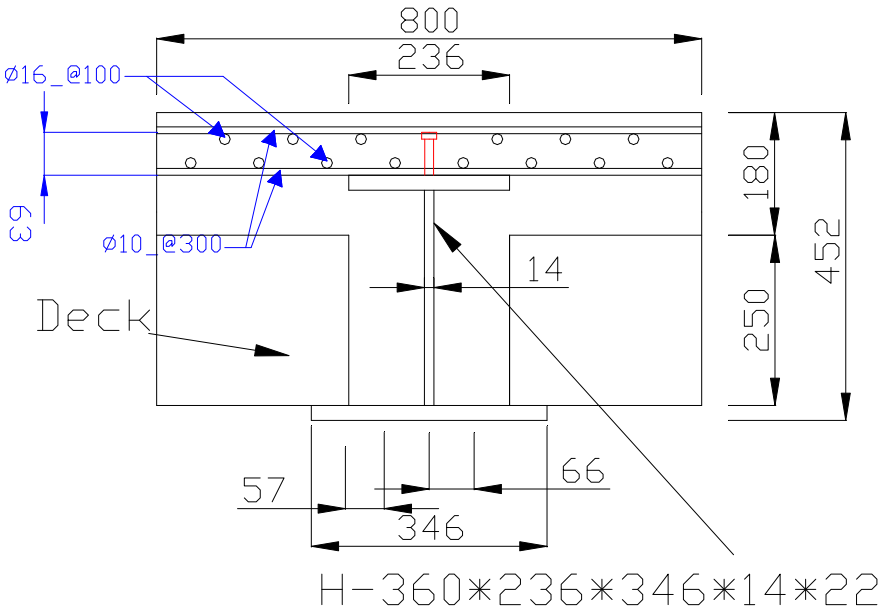
그림 3.33에는 내화보강 변수 및 PS파형웨브 합성보 내부 중공부 유무를 변수로 한 실험체를 나타내고 있다. 내화보강은 유일하게 노출되어있는 철골보의 하부플랜지에만 국한적으로 적용을 하였으며, 해당 실험체에 적용된 내화보강재료는 한국건설기술연구원의 내화성능평가를 통해 단열성능을 인증 받은 퍼라이트계 습식피복재료이며, 내화성능시간 1~3시간을 확보 할 수 있는 두께로 각각 적용하였다. 각 변수는 앞서 소개된 해석을 통한 PS파형웨브 합성보의 내화성능 평가 결과를 통해 부재 내부의 중공부 유무변수를 설정하였으며, 내화보강변수의 경우 일반적으로 사용되고 있는 내화보강을 적용했을 경우 대상부재의 내화성능 평가를 실물실험을 통해 명확히 하기 위해 설정하였다. 다만, 이와 함께 무피복 실험군을 별도로 설정하여 무피복 실험체의 내화성능평가 역시 진행을 하였다.



(1) PS2leg(중공O),보강2h



(2) PS1leg(중공X),보강1h



(3) Slimflor,보강3h

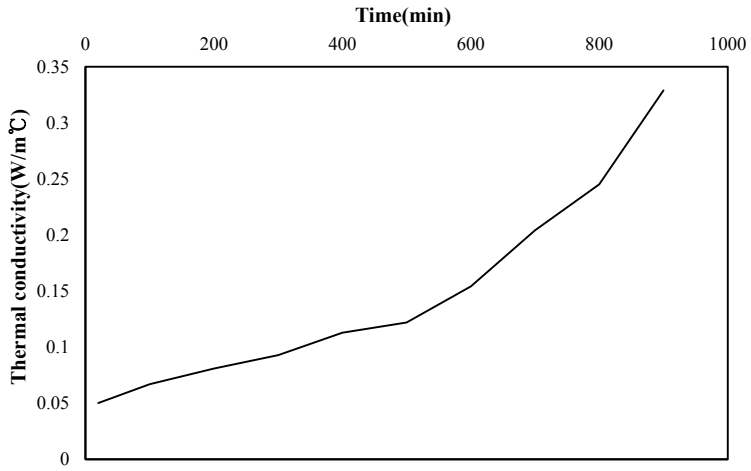
[그림 3.33] 내화보강실험체 일람

앞서 소개된 해석적 연구와 같이 비선형 유한요소 해석 프로그램은 SAFIR를 사용하여 PS파형 웨브 합성보의 내화성능평가를 진행하였으며, 먼저 부재 단면의 과도열전달 해석을 통해 시간에 따르는 부재 단면의 온도분포를 파악하였고 해당 결과를 근거로 부재의 구조성능평가를 진행하였다.

해석평가 진행 시 각 재료의 비선형재료모델은 유로코드에서 제시하고 있는 사항을 반영하였으며, 특히 내화보강재료의 경우 재료의 압축강도 및 인장강도가 매우 미비하여 구조성능평가에는

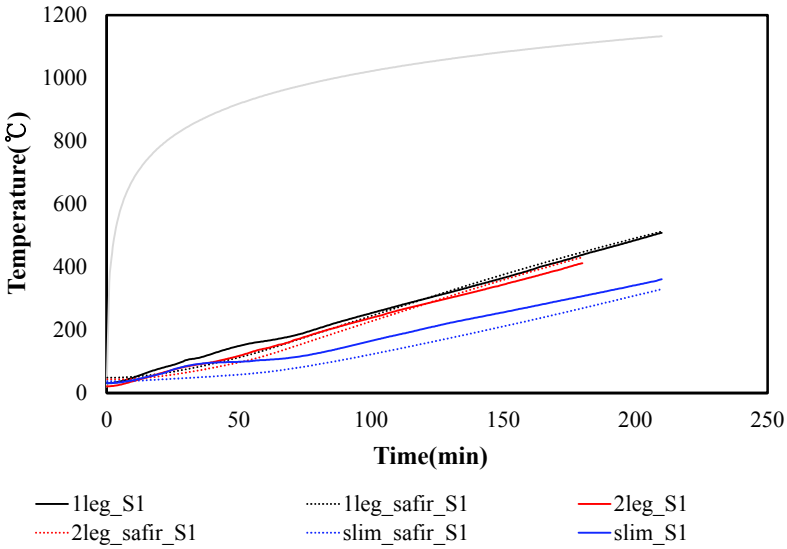
반영하지 않았으나, 단열특성에 대한 사항은 실제 실험체에 적용한 보강재료의 재료실험을 통하여 반영하였다. 그림 3.34은 보강재료의 재료실험을 통해 확보한 노출온도에 따르는 열 전도율을 나타낸 것이며, 해당 사항을 실험체 검증과정에서 적용하여 진행하였다.

그림 3.35은 비선형 유한요소해석을 통해 도출한 철골보의 온도이력을 실물 실험결과와 비교한 것이다. 해석결과 콘크리트에 매립되지 않은 부분의 온도이력은 매우 정확히 예측을 하고 있으나 콘크리트 내부에 매립된 철골보의 웨브 및 상부 플랜지의 경우 내부온도 100℃이후에 실험결과와 다소 상이한 예측결과를 보이고 있다. 이는 주변 콘크리트의 자유수 및 혼합수의 탈수현상에 의한 영향으로 내부 수분 증발에 의한 잠열현상에 기인한 것이다. 그럼에도 불구하고 전체적인 부재의 온도해석결과는 비교적 정확한 예측을 하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 내화보강은 철골보의 하부플랜지에 국한적으로 적용하였기 때문에 실험체의 온도해석결과는 그림 3.35에서 나타낸 것과 같이 철골보의 온도해석결과 검증을 통해 내화보강 재료의 단열 특성이 매우 잘 반영된 것을 확인 할 수 있다. 이와 함께 단열성능에 큰 영향을 미치는 내화보강 두께의 영향 또한 해석적으로 매우 잘 반영하여 실험결과를 정확히 유추하고 있음을 확인 할 수 있었다.

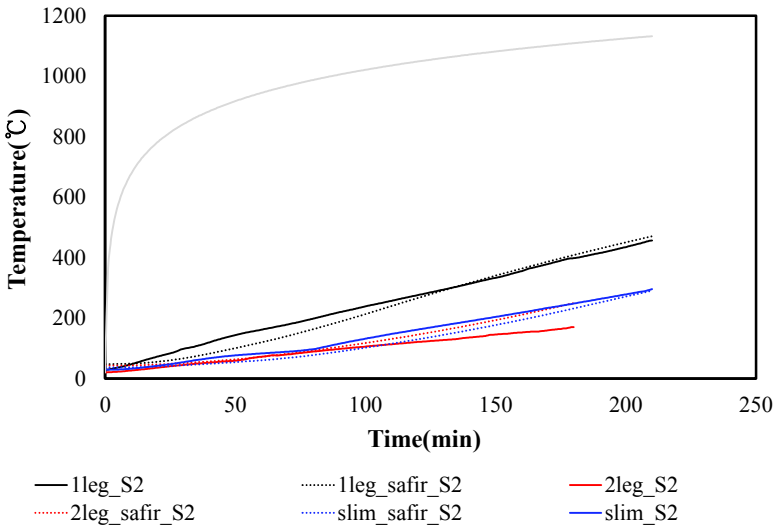


[그림 3.34] 내화보강재료의 화재노출 시간에 따르는 열전도율

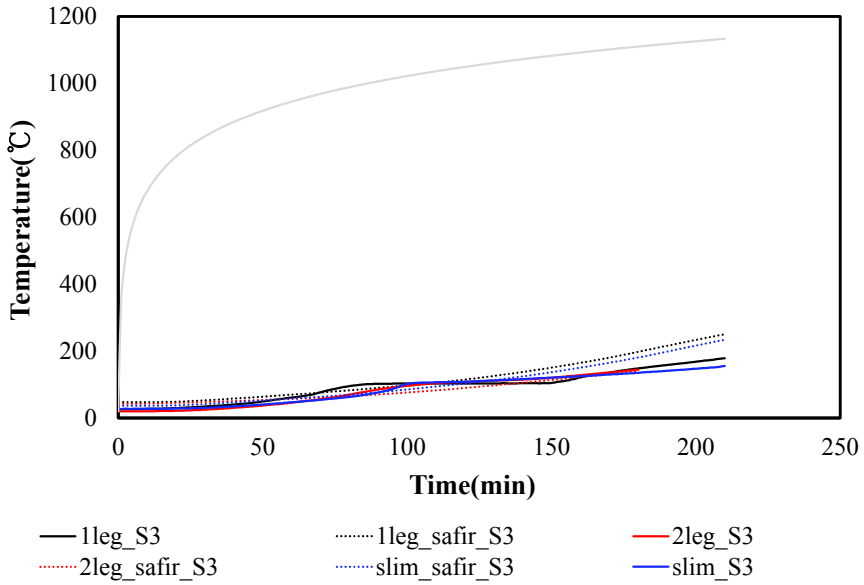
그림 3.35은 실험을 통해 얻은 각 내화보강실험체의 화재노출시간에 따르는 수직처짐거동과 이에 대한 해석결과를 비교한 것이다. 실험결과의 경향과 마찬가지로 해석결과에서도 가장 두꺼운 내화보강두께가(3h, 29mm)) 적용된 슬림플로어실험체의 화재거동이 가장 우수하게 나타났다. 또한 PS파형웨브 합성보의 단면 중공부 유무에 따라 화재거동 차이를 볼 수 있는데, 해당 실험체는 내화보강 두께를 각각 19mm, 9mm를 적용하였으며 이는 내화성능시간 2시간, 1시간에 해당하는 두께이다. 해석 및 실험 결과를 통해 내화보강정도의 차이가 존재함에도 불구하고 중공부가 없는 실험체의 화재거동이 중공부가 존재하는 실험체의 화재거동보다 우수하게 나타났다. 또한 내화보강재료의 단열특성 및 보강 두께를 해석과정에서 적절히 반영하였으며 해석결과는 실험결과에 대해 정확히 예측하고 있음을 재차 확인 할 수 있었다.



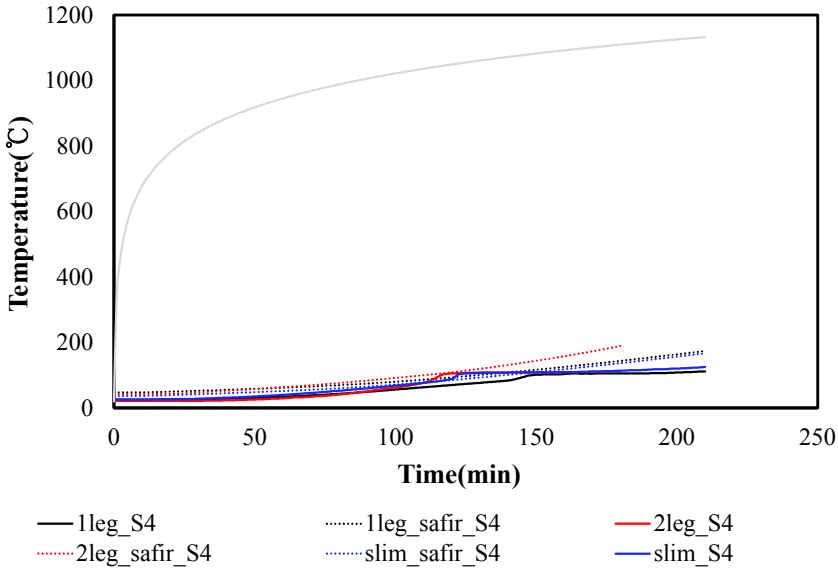
(1) 하부플랜지 코너부



(2) 하부플랜지 중앙부



(3) 웨브 중앙부



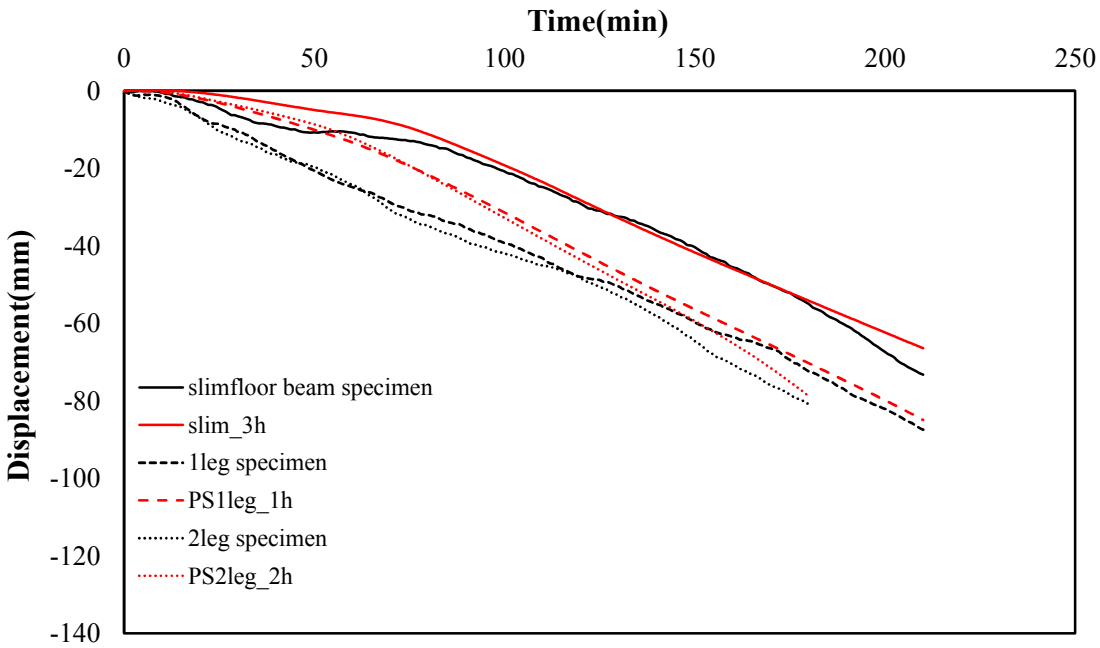
(4) 상부플랜지 코너부

[그림 3.35] 내화보강실험체 철골보 온도해석 결과 검증

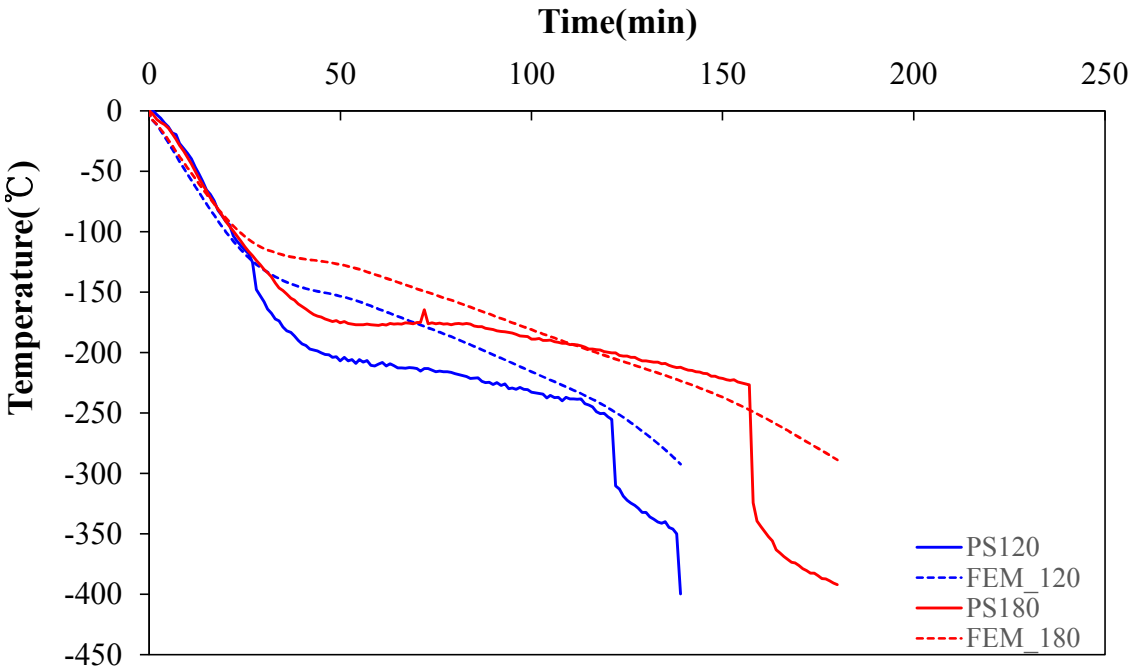
나. 슬래브 두께 및 무피복 실험체의 화재거동 해석결과 검증

그림 3.36는 무피복 PS파형웨브 합성보의 화재거동 해석결과를 실험결과와 비교한 것으로서 해당 실험체는 그림 3.37와 동일한 디테일을 갖는 PS180과 슬래브 두께가 120mm인 PS120 실험체의 해석결과를 나타내고 있다. 해당 실험체의 경우 변형률 완화구간과 급격한 처짐거동을 갖는 구간이 공통적으로 나타나고 있는 것을 확인 할 수가 있다. 부재의 하부플랜지(외부노출)의 측정온도가 가열실험과 동시에 급격히 증가함에 따라 실험 초반에 급격한 변형거동을 보이고 있다. 이 후에 철골보 하부플랜지의 휨저항성능을 모두 잃고 부재 내부에 4개의 텐던에 의한 처짐제어구간에서 변형량이 급격히 감소하는 구간이 나타나고 있으며, 실험 후반부에서 텐던의 온도가 Critical temperature에 도달하거나, 단면내부에서 텐던이 존재하는 layer에 작용하는 인장응력 및 부재 상부의 압축분담영역의 interaction에 따르는 급격한 처짐이 발생하는 거동을 나타내고 있다. 그림 3.37에서 명확히 확인 할 수 있는 급격한 처짐발생 구간의 원인에 대해 추가적으로 압축분담영역의 콘크리트 폭렬현상에 의한 부재의 강성저하를 고려할 수 있을 것이다.

해석결과 해당 실험체의 처짐거동에 대하여 전반적인 거동의 양상은 잘 유추하고 있으나 실험 후반부의 급격한 처짐 발생구간과 같은 사항에 대해서는 다소 상이한 결과를 나타내고 있다. 이는 해석 프로그램인 SAFIR의 한계로 인한 사항이라 판단되며, 이를 보완하기 위해서는 텐던의 프로파일 및 변단면 부재의 연속성을 반영할 수 있는 고등해석 프로그램을 추가적으로 활용해야 할 필요성이 있다.



[그림 3.36] 내화보강 실험체의 화재거동해석결과 검증



[그림 3.37] 실험체 슬래브두께에 따르는 화재거동해석결과 검증(무보강 실험체)

3. 슬래브 두께 및 강연선 피복 유무에 따른 내화성능 평가

가. 실험개요

3차년도에는 PS파형웨브 합성보의 무피복 3시간 내화성능 확보를 위하여 슬래브 두께 및 강연선 피복 유무에 따라 내화실험을 진행하였다.

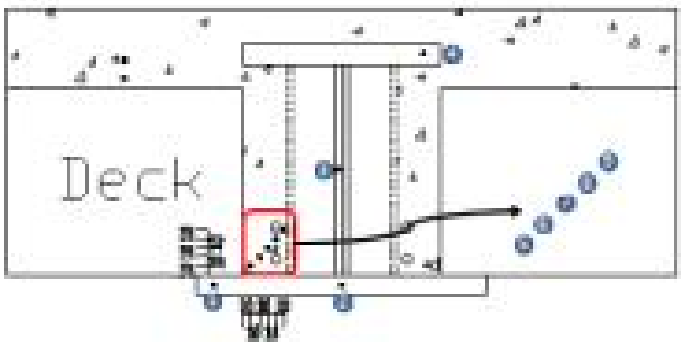
기존 실험결과를 근거로 웨브의 파형형태를 좀 더 완만하게 변경하였으며, 콘크리트의 강도를 45MPa로 상향 조정하였다. 여기에 슬래브의 두께를 120 ㎜, 150 ㎜, 180 ㎜로 구분하였으며, 슬래브 두께 150 ㎜의 경우 긴장재인 강연선을 내화피복재로 추가 보강하여 내화성능을 분석하였다.

나. 실험체 제작 상세

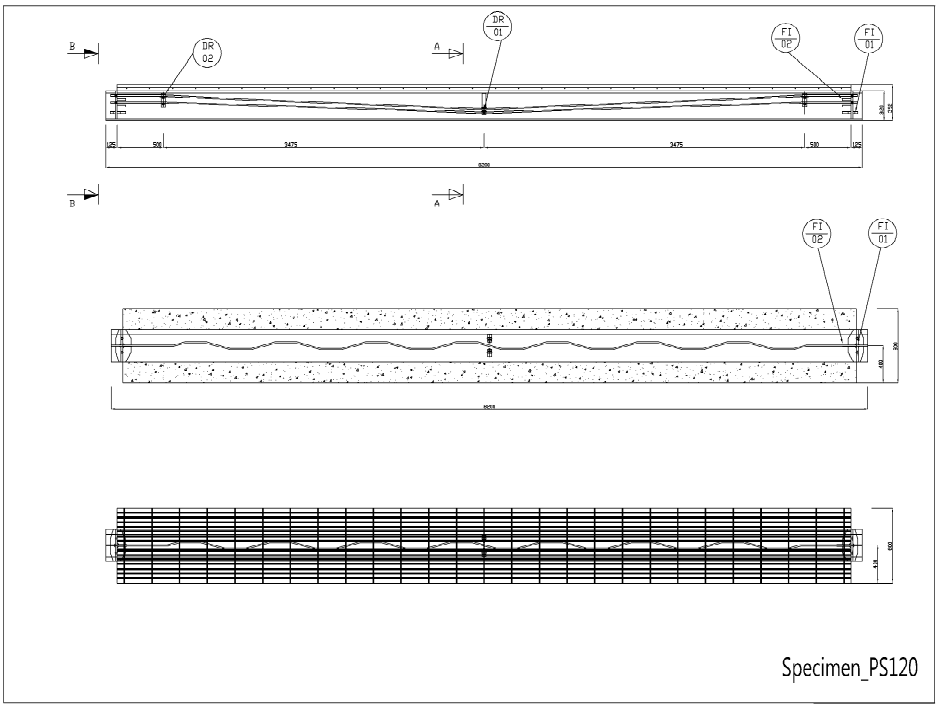
표준화재 재하조건에서 PS파형웨브 합성보의 내화성능 평가를 위하여 표 3.9과 같이 실험체 구성하였다. S-1, S-2, S-4 실험체는 슬래브 두께 120 ㎜, 150 ㎜, 180 ㎜를 적용하였고, S-3의 경우 슬래브 두께 150 ㎜를 적용하고 프리스트레스 도입을 위한 긴장재인 강연선에 세라크울로 추가 내화보강을 하였다. 내화실험체는 상세는 그림 3.39에서 그림 3.42와 같다. 내화실험 시 강재와 콘크리트 내부의 온도변화를 관찰하기 위하여 그림 2.38과 같이 K-Type 1 ㎜ 열전대를 설치하여 실험체 내부 온도를 측정하였다.

<표 3.9> 실험체 구성

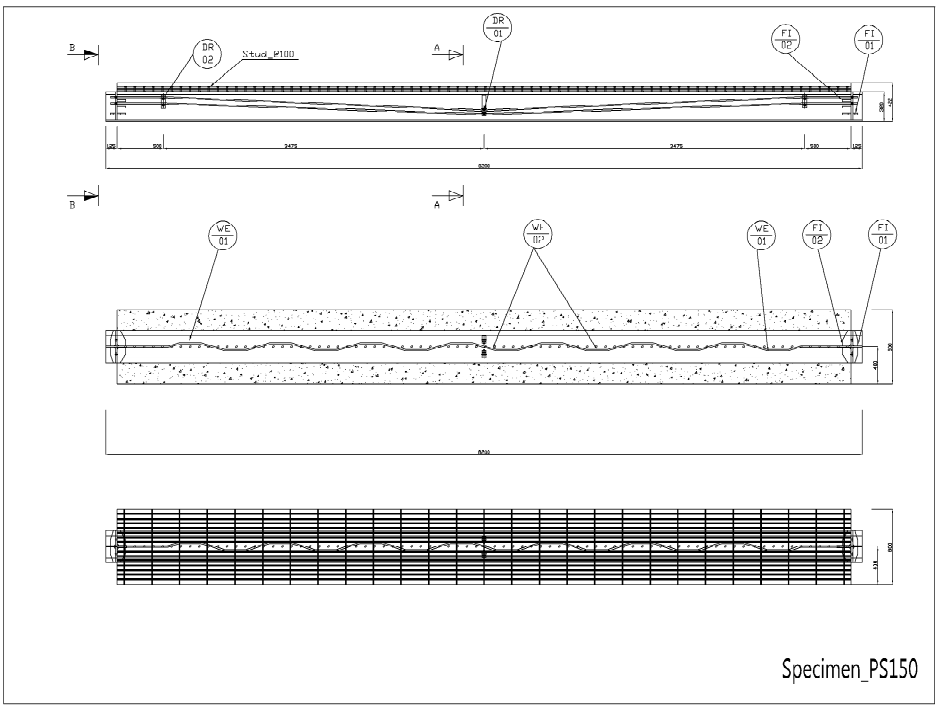
Specimen	Thickness of slab' topping (㎜)	corrugated web type	Concrete's strength	Tendon' wrapping (㎜)	Deck type	H-beam Size (㎜)
S-1	120	1 layer	45 MPa	-	Deep -Deck	320×236×346 ×14×22
S-2	150			-		
S-3	150			25		
S-4	180			-		



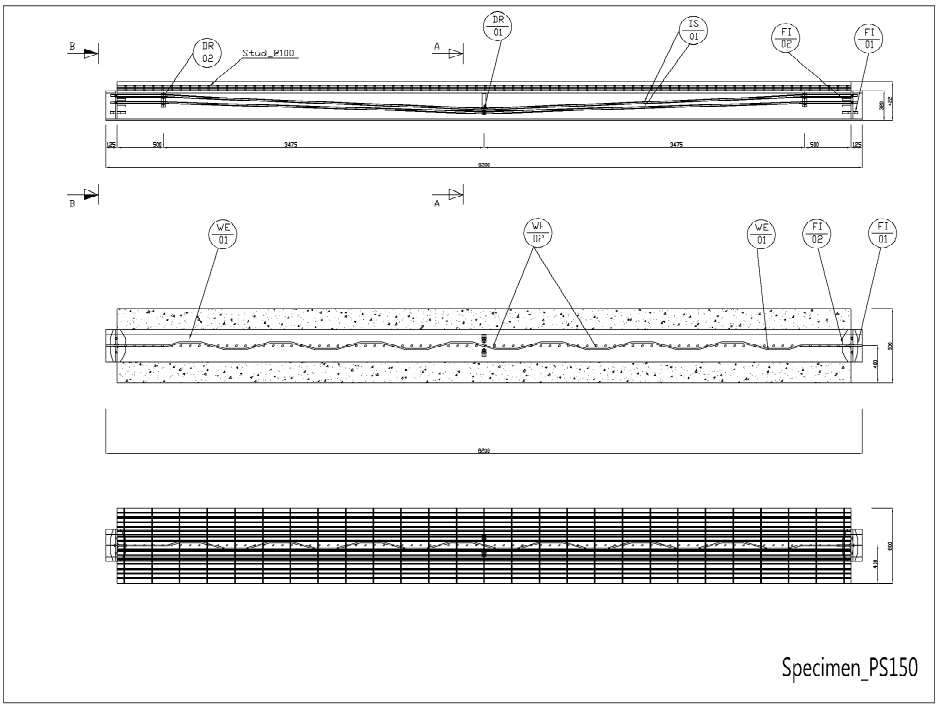
[그림 3.38] 열전대 설치위치

	Specimen
S-1	

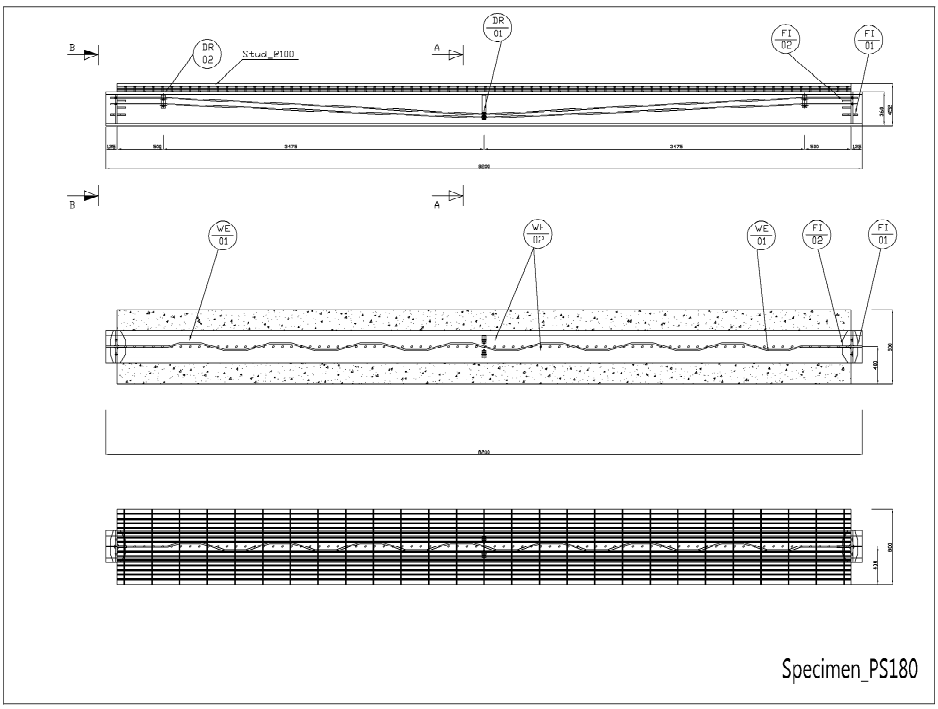
[그림 3.39]실험체 상세도[S-1]

	Specimen
S-2	

[그림 3.40] 실험체 상세도[S-2]

	Specimen
S-3	

[그림 3.41] 실험체 상세도[S-3]

	Specimen
S-4	

[그림 3.42] 실험체 상세도[S-4]

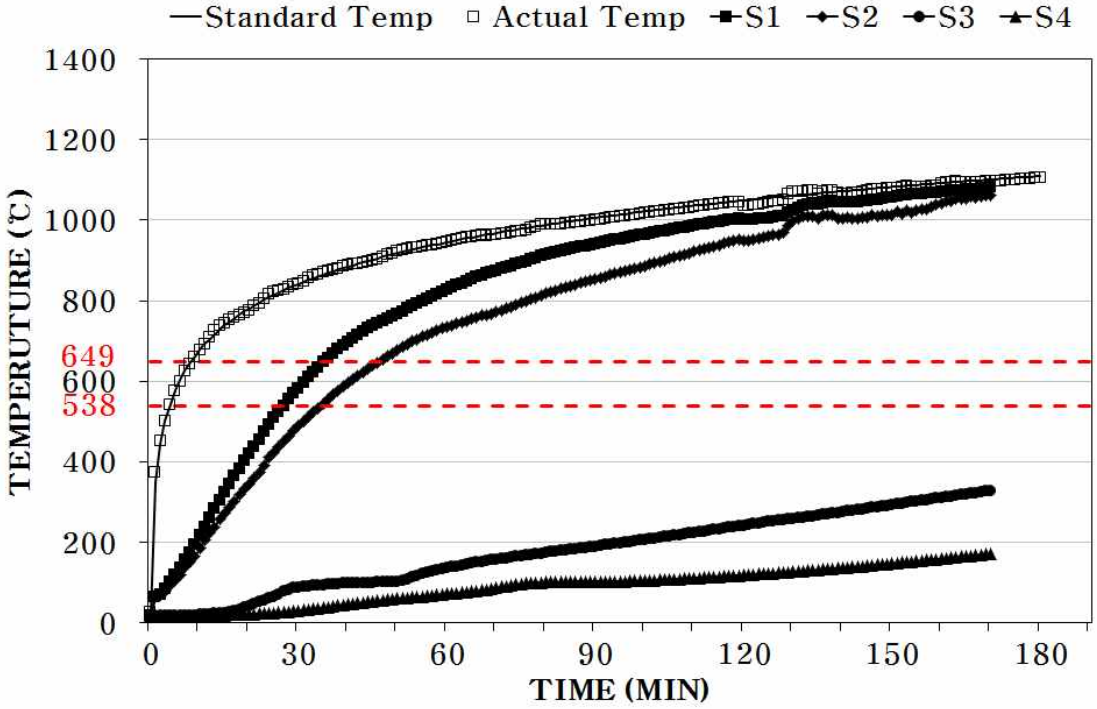
다. 슬래브 두께에 따른 내부 온도변화

- 기존의 실험 및 해석 결과를 근거로 파형웨브의 형태를 최적화 하고 콘크리트의 강도를 45MPa로 적용하여 슬래브 두께 및 강연선의 내화보강 유무에 따른 실험체 내부 강재 및 콘크리트의 온도변화를 분석하였다.

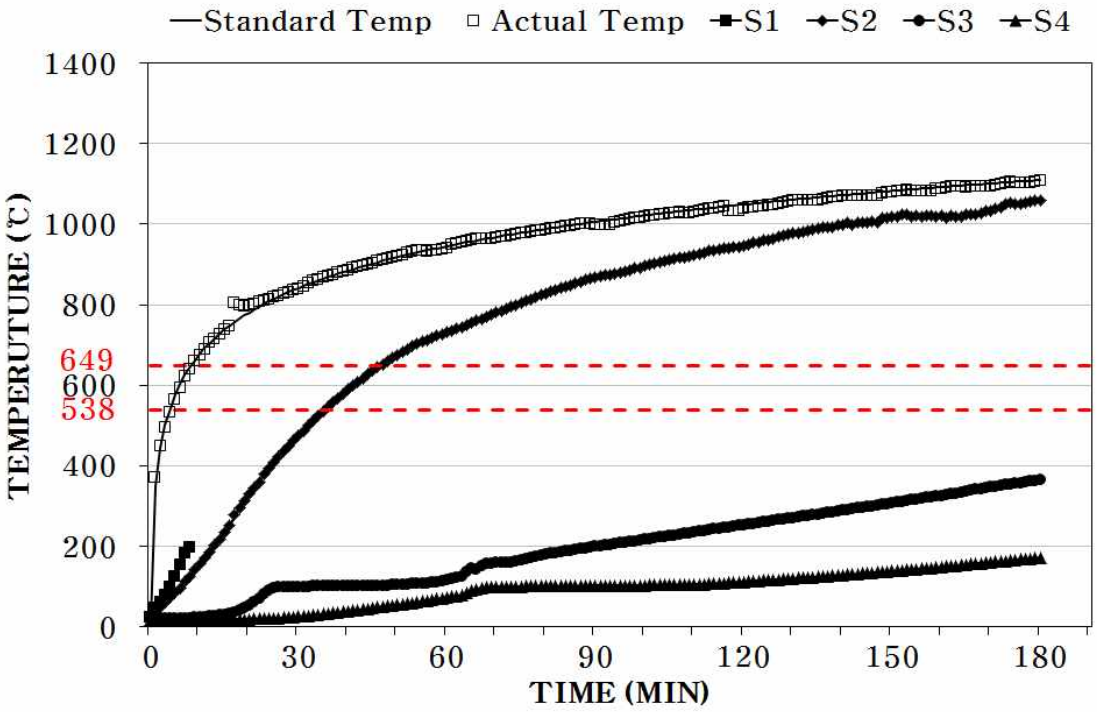
강재의 온도에 따른 내화성능을 분석하기 위하여 H형강의 상·하부 플랜지 및 웨브의 온도를 측정한 결과 표 3.10과 같이 나타났다. 슬래브 두께 120 ㎜를 적용한 S-1의 경우 내화성능은 169분을 확보하는 것으로 나타났으며 이때 하부플랜지 온도가 1070.9 ℃, 웨브의 온도가 326.4 ℃, 상부 플랜지 온도가 170.2 ℃로 나타났다. 슬래브 두께 150 ㎜를 적용한 S-2의 경우 180분에서 하부 플랜지의 온도가 1060.1 ℃, 웨브의 온도가 365.1 ℃, 상부 플랜지의 온도가 171.7 ℃로 나타났다. 슬래브 두께 150 ㎜를 적용하고 강연선에 내화피복을 보강한 S-3의 경우 하부 플랜지 온도가 1121.7 ℃, 웨브의 온도가 41.8 ℃, 상부 플랜지 온도가 157.0 ℃로 나타났다. 슬래브 두께 180 ㎜를 적용한 S-4의 경우 하부 플랜지 온도가 1074.1 ℃, 웨브의 온도가 295.1 ℃, 상부 플랜지 온도가 114.0 ℃로 나타났다. 또한 콘크리트의 온도에 따른 내화성능을 분석하기 위하여 가열면에서 깊이별로 콘크리트 내부 온도를 측정한 결과 표 3.10과 같이 나타났으며, 슬래브 두께에 따른 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

<표 3.10> 장스팬 합성보의 철골온도

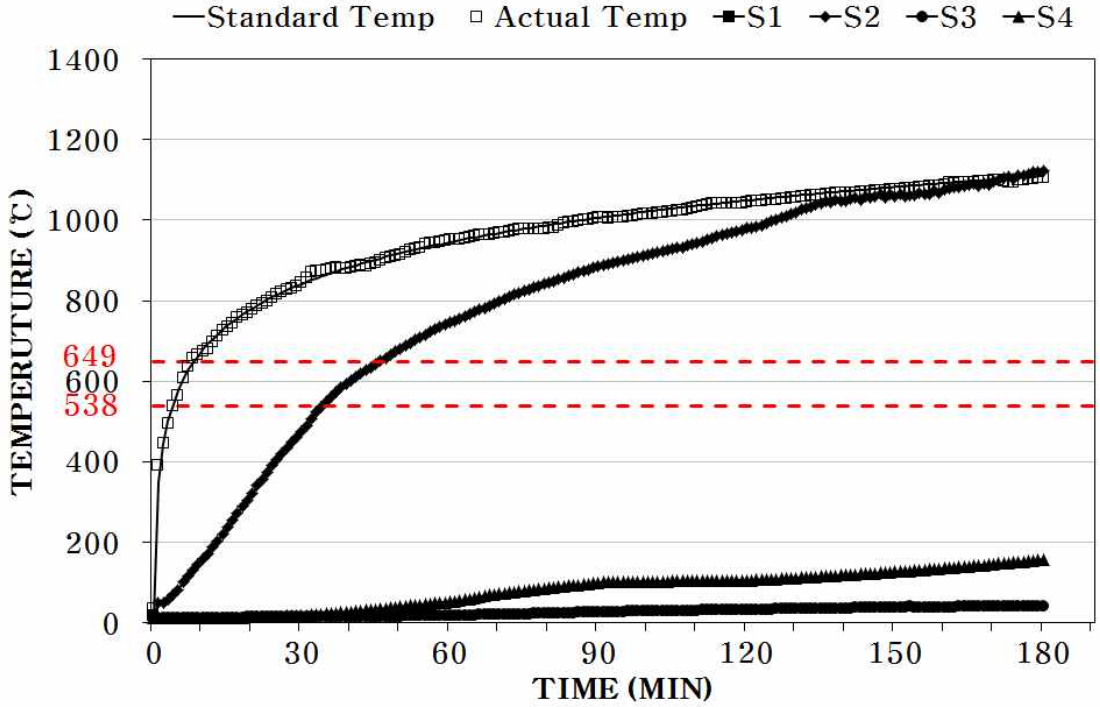
Thermo couple location		S-1 (℃)	S-2 (℃)	S-3 (℃)	S-4 (℃)
Steel	Top Flange	170.2	171.7	157.0	114.0
	Web	326.4	365.1	41.8	295.1
	Bottom Flange	1070.9	1060.1	1121.7	1074.1
Concrete	10	890.7	926.8	974.5	996.0
	20	758.9	843.8	895.8	925.6
	30	648.8	800.3	812.0	884.2
	40	564.5	830.3	730.2	744.6
	50	470.0	858.0	652.5	666.6
Fire resistance (min)		169	180	180	180


Standard Temp
Actual Temp
S1
S2
S3
S4
TEMPERUTURE (℃)
TIME (MIN)
1400
1200
1000
800
649
600
538
400
200
0
0
30
60
90
120
150
180

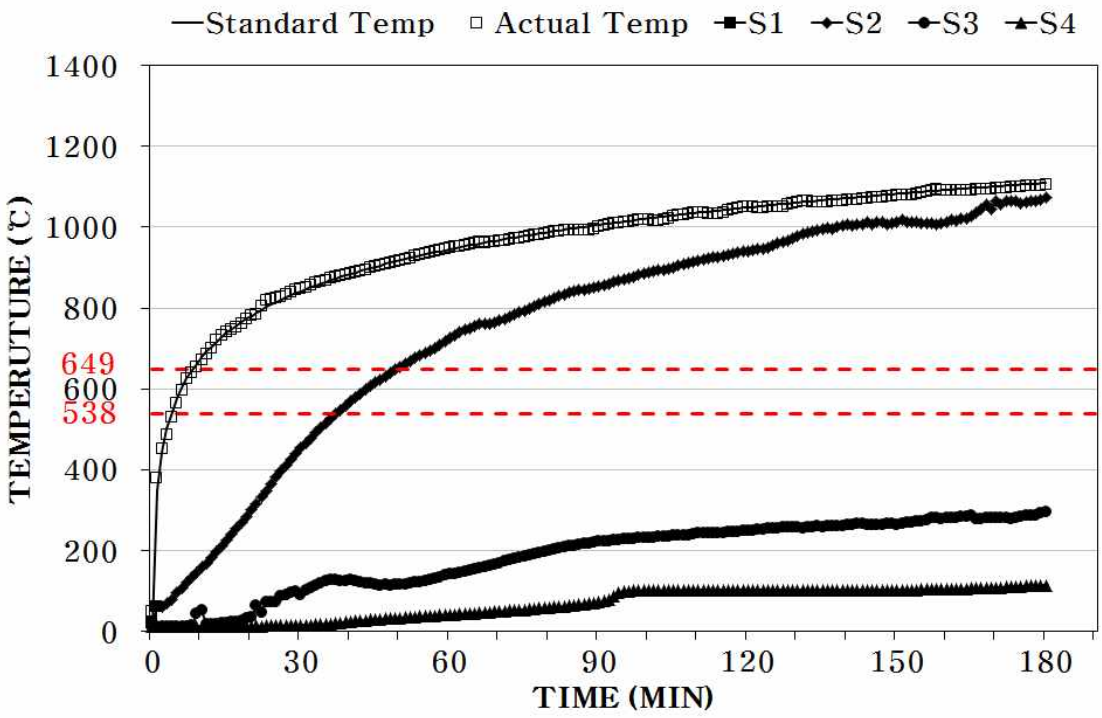
(a) S-1


Standard Temp
Actual Temp
S1
S2
S3
S4
TEMPERUTURE (℃)
TIME (MIN)
1400
1200
1000
800
649
600
538
400
200
0
0
30
60
90
120
150
180

(b) S-2

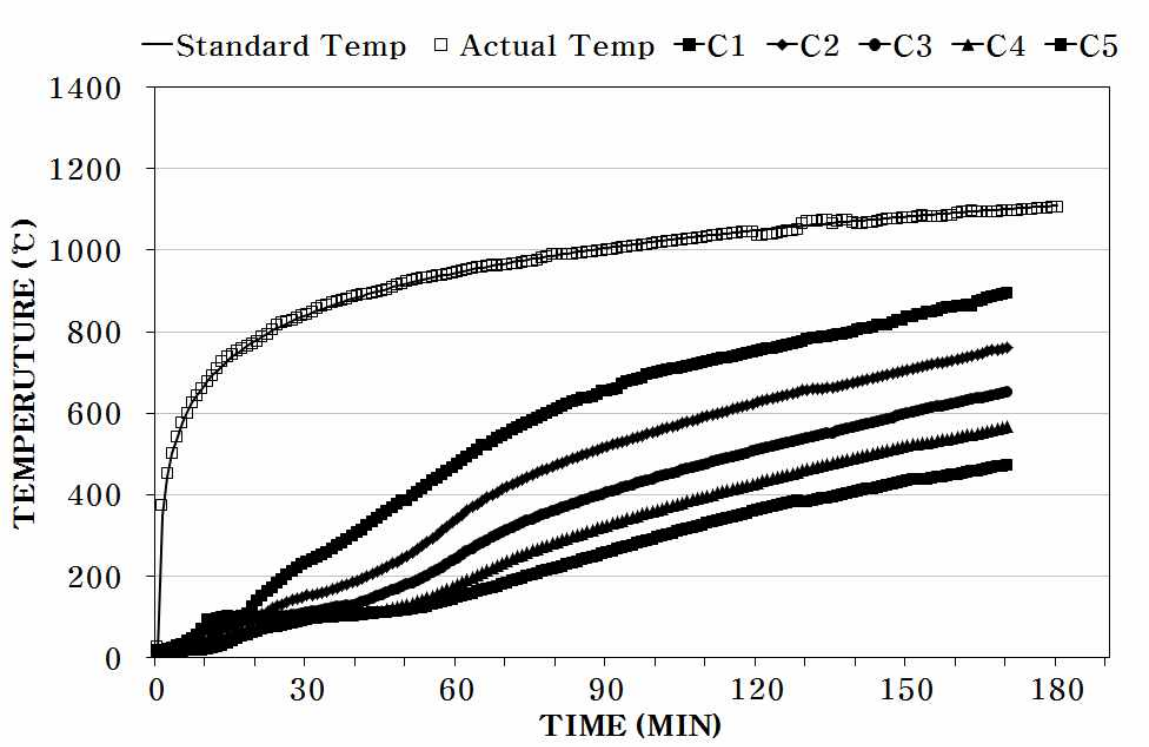


(c) S-3

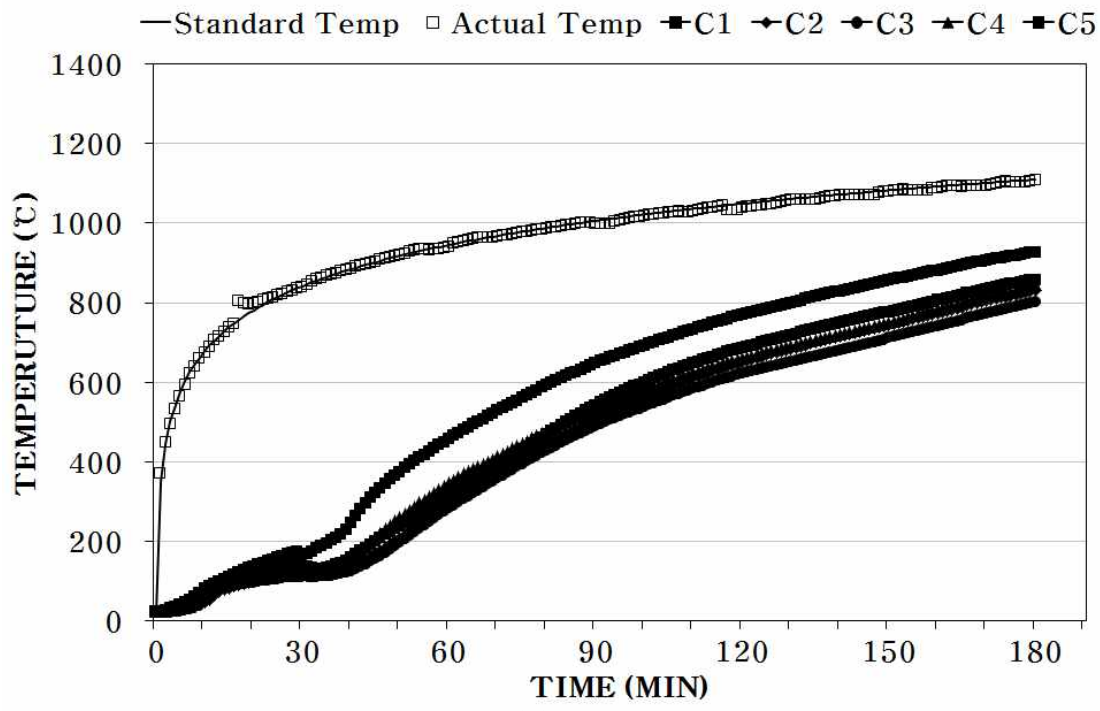


(d) S-4

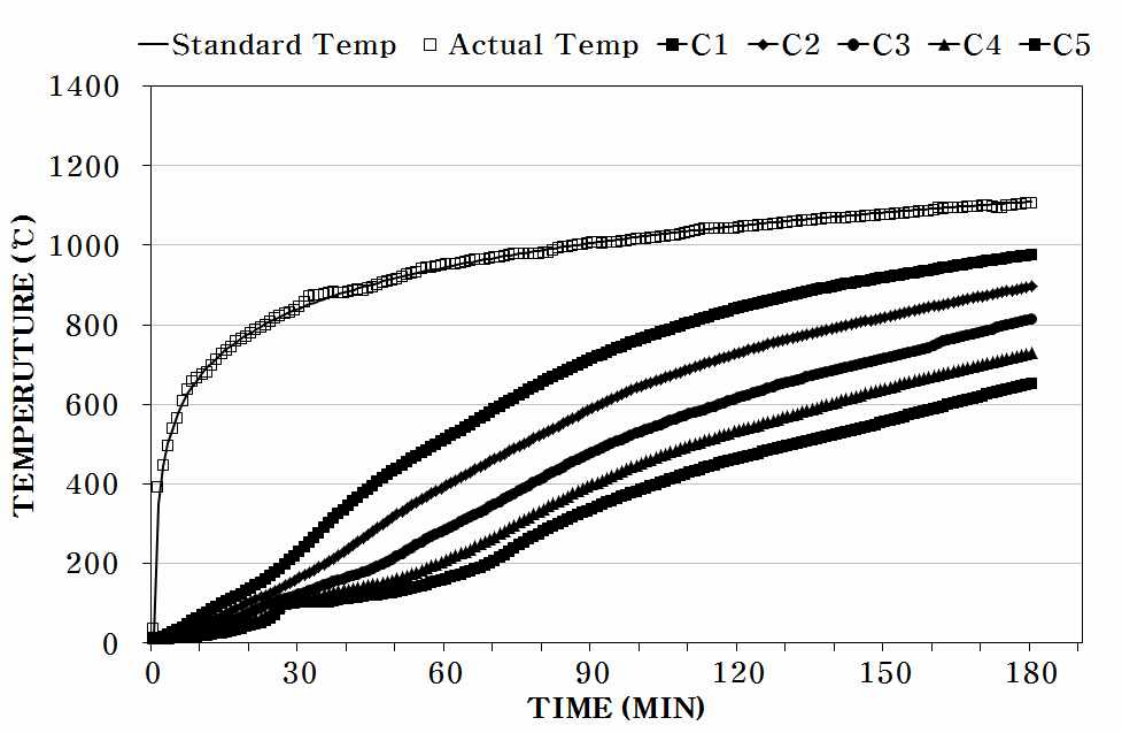
[그림 3.43] 장스팬 합성보의 시간에 따른 철골 온도분포


Standard Temp
Actual Temp
C1
C2
C3
C4
C5
TEMPERUTURE (℃)
TIME (MIN)
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
0
30
60
90
120
150
180

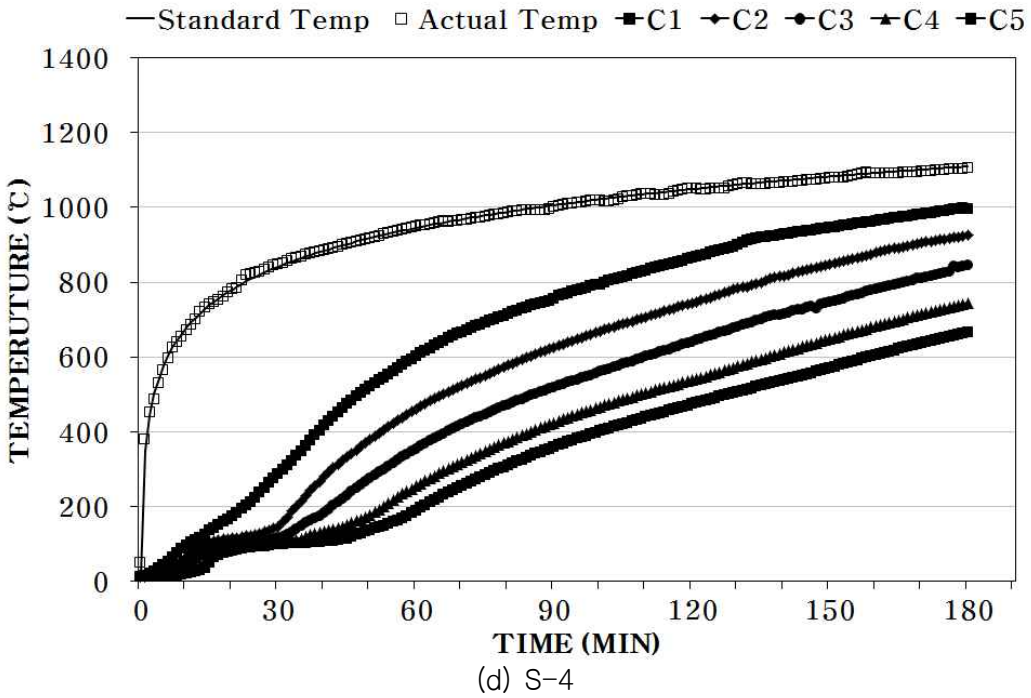
(a) S-1


Standard Temp
Actual Temp
C1
C2
C3
C4
C5
TEMPERUTURE (℃)
TIME (MIN)
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
0
30
60
90
120
150
180

(b) S-2



(c) S-3



(d) S-4

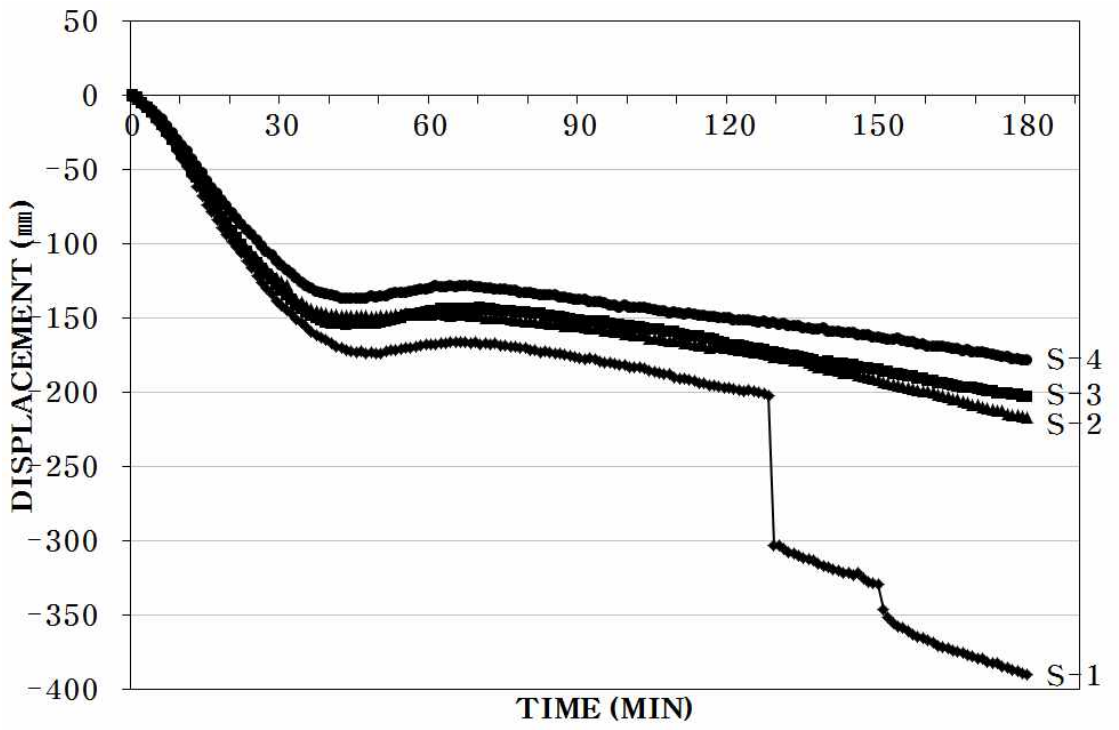
[그림 3.44] 장스팬 합성보의 시간에 따른 콘크리트 내부온도 분포

라. 슬래브 두께에 따른 내부 변위특성[내화성능]

슬래브 두께 및 강연선의 내화보강 유무에 따른 내화실험을 실시한 결과 표 3.11과 같이 S-1은 169분의 내화성능을 확보하는 것으로 나타났으며, S-2, S-3, S-4는 모두 180분 이상의 내화성을 확보 할 수 있는 것으로 나타났다. 내화실험을 종료한 180분에서 S-1의 경우 -390.0 ㎜, 변형률이 -0.5 ㎜/min로 나타났고, S-2의 경우 변형량이 -216.9 ㎜, 변형률이 -0.5 ㎜/min로 나타났고, S-3의 경우 변형량 -203.7 ㎜, 변형률이 -0.1 ㎜/min로 나타났으며, S-4의 경우 변형량이 -179.1 ㎜, 변형률이 -0.3 ㎜/min로 나타났다.

<표 3.11> 장스팬 합성보의 내화성능

Specimen	Time (min)	Displacement (㎜)	Rate of displacement (㎜/min)	Fire resistance (min)
S-1	60	-167.8	0.1	169
	120	-197.3	-0.2	
	169	-390.0	-0.5	
S-2	60	-147.7	0.5	180
	120	-169.9	-0.4	
	180	-216.9	-0.5	
S-3	60	-145.6	1.0	180
	120	-168.5	-1.4	
	180	-203.7	-0.1	
S-4	60	-130.0	1.2	180
	120	-150.5	0.0	
	180	-179.1	-0.3	



[그림 3.45] 장스팬 합성보의 시간에 따른 변형

제4절 녹색기술 인증

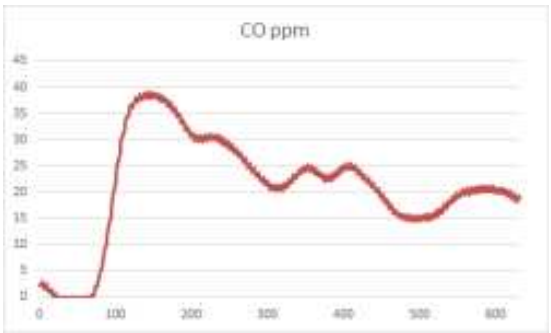
1. 유사공법대비 대상공법의 유해가스(CO/CO2) 절감 분석: 부재단위 분석

유해가스 발생 저감율 53% 이상 달성 : 유해가스(CO/CO_2) 배출양은 신청기술의 경우 2,033/7,280 ppm으로 평가되었는데, 이는 일반합성보 (27,761/99,400 ppm)의 7%, 슬림플로어 합성보 (6,412/22,960 ppm)의 31%, PS파형웨브 합성보(2-Layer) (4,223/15,120 ppm)의 47% 수준으로서 유해가스 발생 저감율이 53% 이상임.<표 3.12>

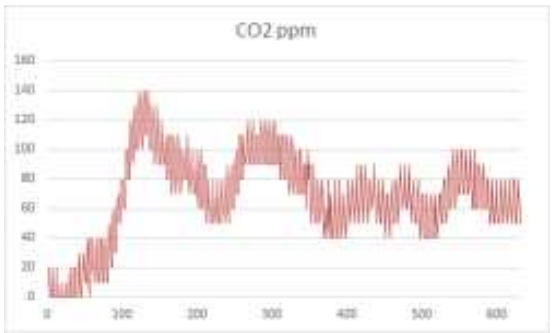
<표 3.12> 고강도 콘크리트 기둥 내화공법[녹색기술 검증결과]

구분		일반합성보	슬림플로어 합성보	PS파형웨브 합성보(2-Layer)	PS파형웨브 합성보(1-Layer)
피복 두께 (㎜)		29	29	19	9
내화성능 (분)		180	180	180	180
피복물량 (㎥)		0.394	0.095	0.062	0.029
유해 가스량 (ppm)	CO[2)]	30,811	7,429	4,848	2,268
	CO_2[2)]	110,320	26,600	17,360	8,120
유해가스 발생비율		**100%**	**23%**	**16%**	**7%**

1) 연소가스 발생량 시험[한국건설기술연구원 공인 시험성적서 첨부]
시편크기: 0.1(L)×0.1(W)×0.05(H) m
시험결과: 최대 CO 발생량 → 39.1 ppm, 최대 CO2 발생량 → 140 ppm
2) 시편크기 대비 피복물량에 따른 유해가스 최대 발생량 추론
3) 시험 규격 : ISO 19702:2006(Toxicity testing of effluent-Analysis of gases and vapours in fire effluents using FTIP technology)
KS F ISO 5660-1:2008(연소 성능 시험-열 방출, 연기발생, 질량감소율-제1부 열방출률 <콘칼로리미터법>)



(a) CO

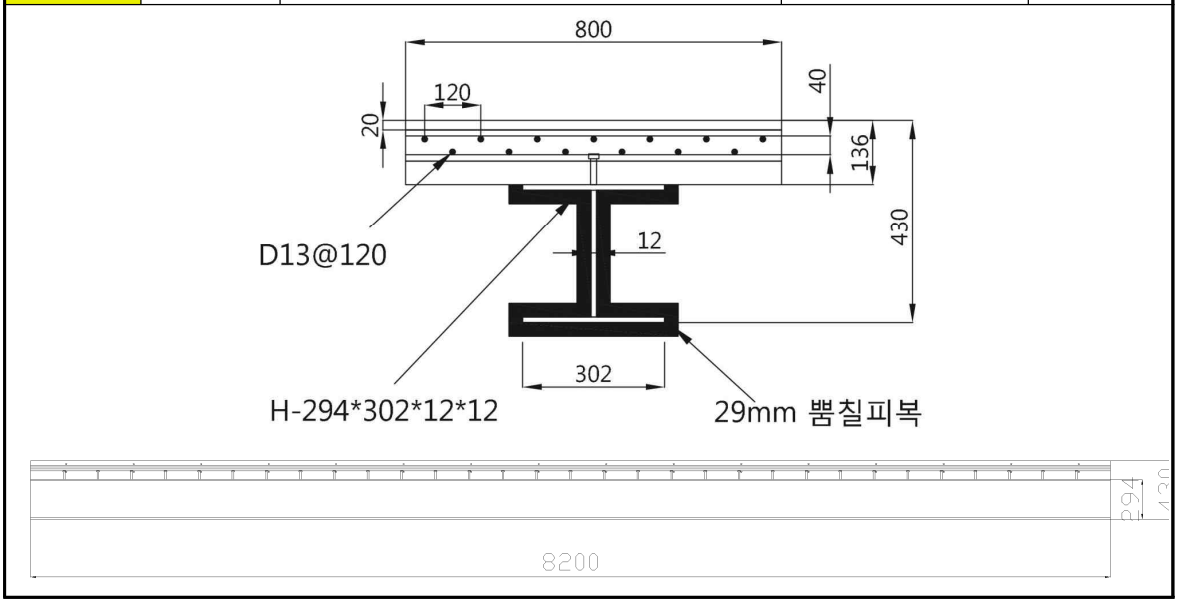


(b) CO_2

[그림 3.46] 유해가스 발생량 분석

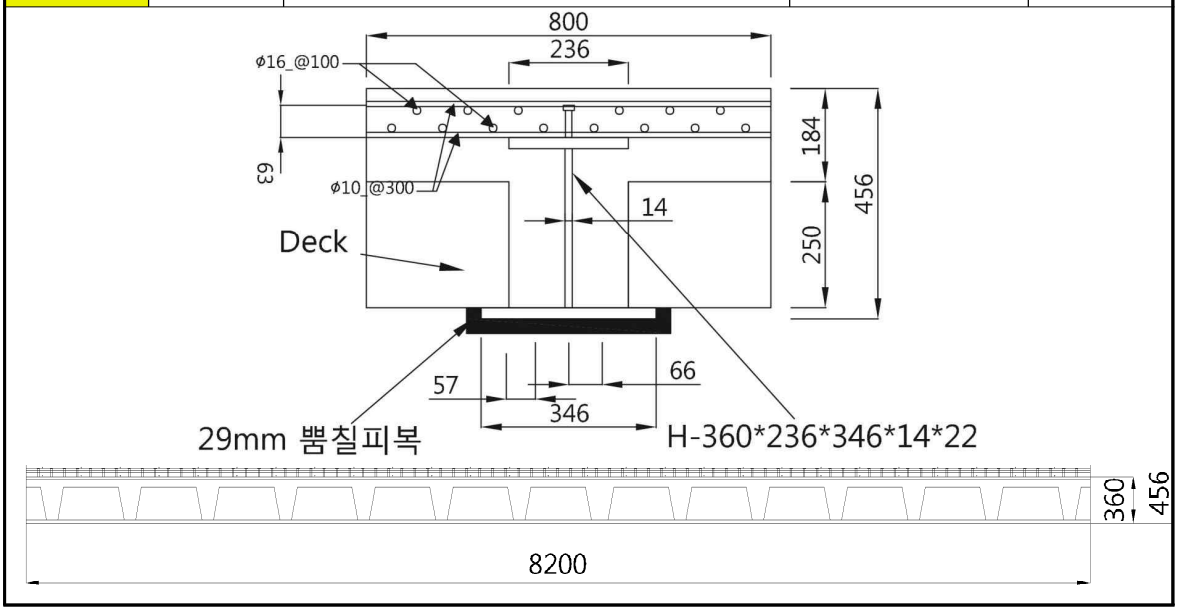
<표 3.13> 일반합성보의 유해가스 산출근거 (보 1개소 기준)

공정	피복두께 (㎜)	강재 노출면적(㎟)	단위면적당 유해가스 발생량 (ppm/㎡)	유해가스 발생량 (ppm)
CO	29	플랜지: (302+27×2)×8200×3=8,757,600 웨브: 294×8200×2=4,821,600	78,200	30,811
CO_2			280,000	110,320



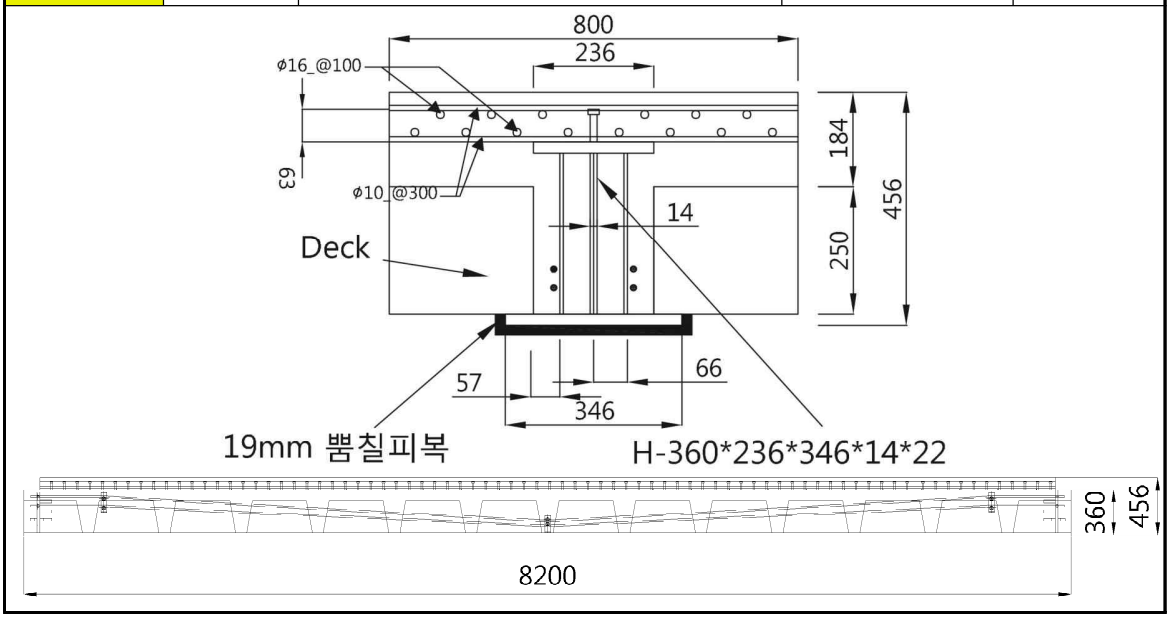
<표 3.14> 슬림플로어 합성보의 유해가스 산출근거 (보 1개소 기준)

공정	피복두께 (㎜)	강재 노출면적(㎟)	단위면적당 유해가스 발생량 (ppm/㎡)	유해가스 발생량 (ppm)
CO	29	플랜지: (346+27×2)×8200=3,280,000	78,200	7,429
CO_2			280,000	26,600



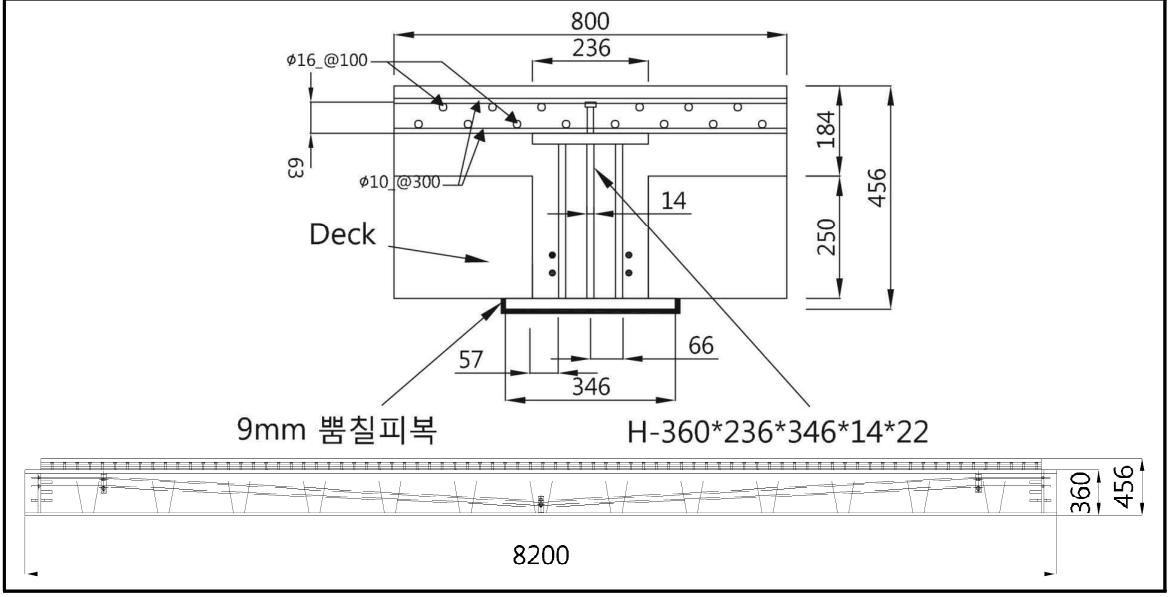
<표 3.15> PS파형웨브 합성보(2-Layer)의 유해가스 산출근거 (보 1개소 기준)

공정	피복두께 (㎜)	강재 노출면적(㎡)	단위면적당 유해가스 발생량 (ppm/㎥)	유해가스 발생량 (ppm)
CO	19	플랜지: (346+27×2)×8200=3,280,000	78,200	4,848
CO_2			280,000	17,360



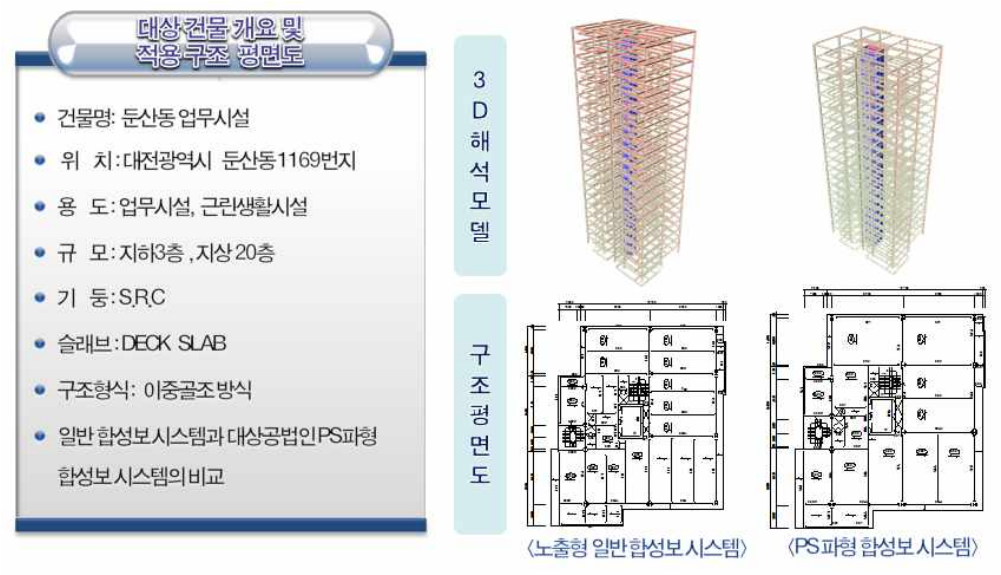
<표 3.16> 본 신청기술[PS파형웨브 합성보(1-Layer)의 유해가스 산출근거 (보 1개소 기준)

공정	피복두께 (㎜)	강재 노출면적(㎡)	단위면적당 유해가스 발생량 (ppm/㎥)	유해가스 발생량 (ppm)
CO	9	플랜지: (346+27×2)×8200=3,280,000	78,200	2,268
CO_2			280,000	8,120



2. 유사공법대비 대상공법의 유해가스(CO/CO_2) 절감 분석: 건축물단위 분석

개발공법을 부재단위가 아닌 20층 규모의 업무시설에 적용하였을 경우 기존 공법 대비 유해가스 절감량을 분석하였다.



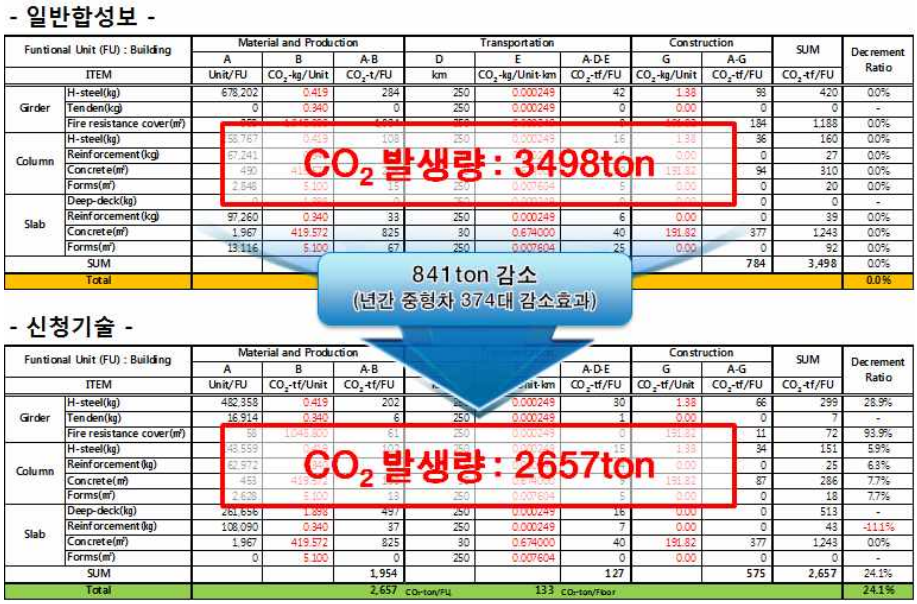
[그림 3.47] 대산건축물 개요 및 구조 평면도

제품이 아닌 건설기술에 대한 CO_2 배출양의 평가에 대한 공인기관 및 제 3의 기관의 부재로 인하여 국가 LCI (life-cycle inventory) 데이터베이스 그림 3.48에 기반하여 각 공법의 CO_2 배출량을 평가하였다.



[그림 3.48] 국가 LCI 데이터베이스 정보망

- 일반합성보와 대상공법을 20층 규모의 업무시설에 적용하여 CO_2 발생량은 분석한 결과 대상공법의 CO_2 배출양은 3498 CO_2-Ton/FU로 평가되었는데, 이는 일반합성보의 배출량 2657 CO_2-Ton/FU으로 나타났으며 24%의 CO_2 저감이 가능한 것으로 나타났다.
- CO_2 평가에서는 공사에 이용되는 각 재료 (Material and Production), 각 재료들의 현장까지의 운송 (Transportation) 그리고 공사 (Construction)의 단계를 고려하였음.
- 분석결과 대상기술을 적용할 경우 전 생애에 걸친 CO_2 발생량은 약 841Ton(절감 효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 년간 중형장 374대 감소효과와 같은 결과이다.
- 신청기술과 기존공법에서의 CO_2 배출양의 비교를 그림 3.49 및 그림 3.50에 나타내었음.



[그림 3.49] 각 공법에서 CO_2 배출양의 비교 (국가 LCI 데이터베이스 기반)



[그림 3.50] 분야별 CO_2 배출양의 비교 (국가 LCI 데이터베이스 기반)

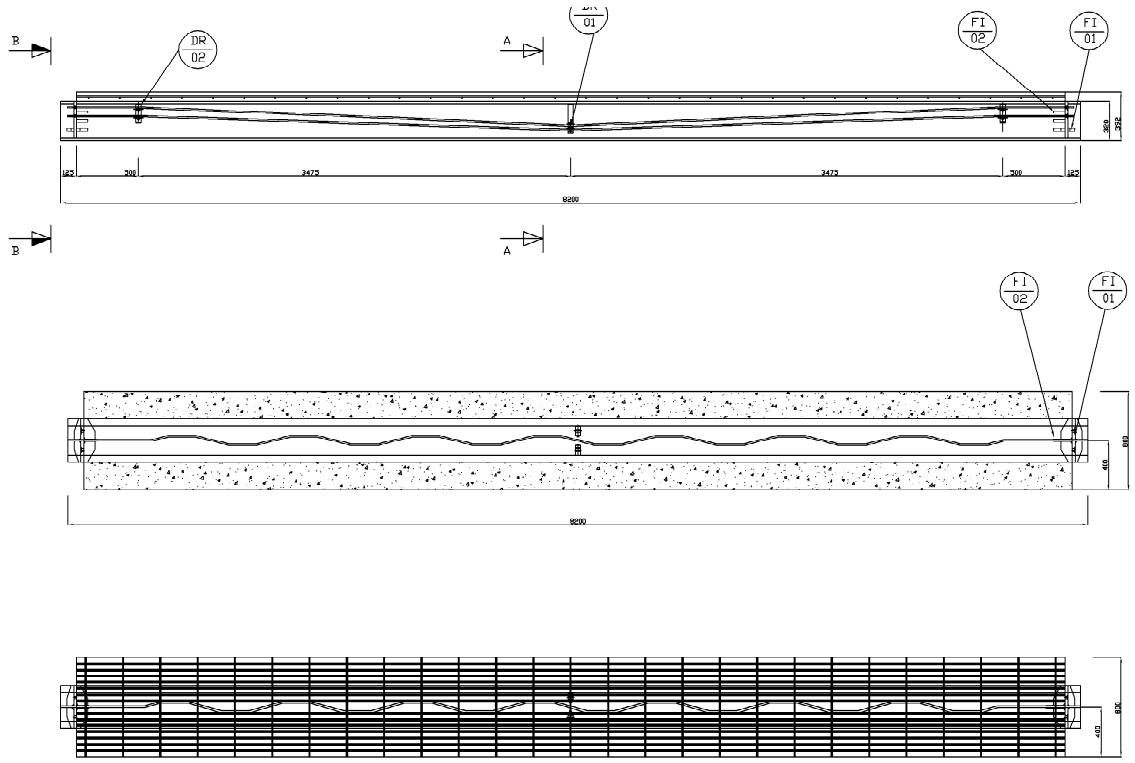
제5절 내화구조 인정

3개년에 걸친 연구결과 무피복 합성보에 대한 3시간 내화성능을 확보하고 시장진입이 가능할 것으로 분석된 최적 단면에 대하여 내화구조 인정을 받기 위해 신청해 놓은 상태이며 인정받을 부재의 구성은 아래와 같다.

1. 내화구조 인정 실험체 개요

실험체명	형상	콘크리트 강도	강재 (SS400)	강연선	슬래브 두께	데크
Specimen_ PS120	스팬:7.5 보폭:0.8m, 보춤:0.392m	45MPa	비대칭 H-320*236*346 *14*22	Ø12.7 -4EA	120 ㎜	deep-deck (Cap-deck Type)

2. 실험체 상세



제6절 현장적용

1. 현장적용 목적 및 범위

본 연구에서는 층고절감형 장경간 PS파형웨브 합성보의 상용화 방안을 모색하고 개선사항을 도출하며 설계 및 시공단계에서의 애로사항과 시공 시 문제점 등을 확인할 수 있도록 실제 시공현장에 부분 적용하였다. 설계변경을 통해 창고시설, 업무시설 등 총 2개 현장에 적용하였으며, 이에 따른 구조검토를 통해 건물의 안전성을 확보하였다. 각 건물의 개요 및 사용재료 강도는 다음과 같다.

2. 현장 개요 및 사용재료

가. ㈜뉴신팜 김포물류센터

본 건물은 경기도 김포시에 신축되는 지상4층 규모의 창고시설로 주요 구조시스템은 철골·철근콘크리트 기둥과 철골보로 이루어졌고, 슬래브는 데크플레이트 슬래브가 적용되었으며, 건물개요와 사용재료 강도는 각각 표 3.17 및 표 3.18와 같다.

<표 3.17> 건물 개요

구 분		내 용
건축물 명		㈜뉴신팜 김포물류센터 1단계 신축공사
위 치		경기도 김포시 고촌읍 전호리 김포물류단지 744번지
용 도		창고시설
규 모		지상 4층
구조형식	횡력저항 시스템	철골·철근콘크리트
	기 둥	S.R.C
	슬 래 브	데크플레이트

<표 3.18> 사용재료 강도

구 분	내 용
콘크리트	f_{ck} = 24 ㎫
철 근	f_y = 400 ㎫ (HD22 이하) f_y = 500 ㎫ (HD25 이상)
철 골	KS D 3515 F_y = 325 ㎫ (SM490A) KS D 3503 F_y = 235 ㎫ (SS400)
BOLT	CONNECTION BOLT - KS B 1010 고력볼트 (F10T) ABCHOR BOLT - KS B 1002 앵커볼트 (SS400)

나. 현성테크노 광주공장 기숙사동

본 건물은 광주광역시에 신축되는 지상4층 규모의 업무시설로 주요 구조시스템은 철골조로 이루어졌고, 슬래브는 데크플레이트 슬래브가 적용되었으며, 건물개요와 사용재료 강도는 각각<표 3.15> 및 <표 3.16>과 같다.

<표 3.19> 건물 개요

구 분		내 용
건축물 명		현성테크노 광주공장 신축공사(기숙사동)
위 치		광주광역시 북구 연제동 1054-1번지
용 도		업무시설(기숙사)
규 모		지상 4층
구조형식	횡력저항 시스템	철골조
	슬 래 브	데크플레이트

<표 3.20> 사용재료 강도

구 분	내 용
콘크리트	f_{ck} = 24 MPa
철 근	f_y = 400 MPa
철 골	KS D 3515 F_y = 325 MPa (SM490A) KS D 3503 F_y = 235 MPa (SS400)
BOLT	CONNECTION BOLT - KS B 1010 고력볼트 (F10T) ABCHOR BOLT - KS B 1002 앵커볼트 (SS400)

다. ㈜이맥스아이엔시 율촌공장 사무동

본 건물은 전라남도 장성군에 신축되는 지상3층 규모의 업무시설로 주요 구조시스템은 철골조로 이루어졌고, 슬래브는 데크플레이트 슬래브가 적용되었다. 건물개요와 사용재료 강도는 각각 <표 3.17> 및 <표 3.18>과 같다.

<표 3.21> 건물 개요

구 분		내 용
건축물 명		㈜이맥스아이엔시 율촌공장 사무동
위 치		전라남도 장성군 황룡면 강변로 452-12
용 도		업무시설
규 모		지상 3층
구조형식	횡력저항시스템	철골구조
	기 둥	철골구조
	슬 래 브	데크플레이트

<표 3.22> 사용재료 강도

구 분	내 용
콘크리트	f_{ck} = 24 MPa
철 근	f_y = 400 MPa (HD22 이하) f_y = 500 MPa (HD25 이상)
철 골	KS D 3515 F_y = 325 MPa (SM490A) KS D 3503 F_y = 235 MPa (SS400)
BOLT	CONNECTION BOLT - KS B 1010 고력볼트 (F10T) ANCHOR BOLT - KS B 1002 앵커볼트 (SS400)

3. 현장적용 프로세스

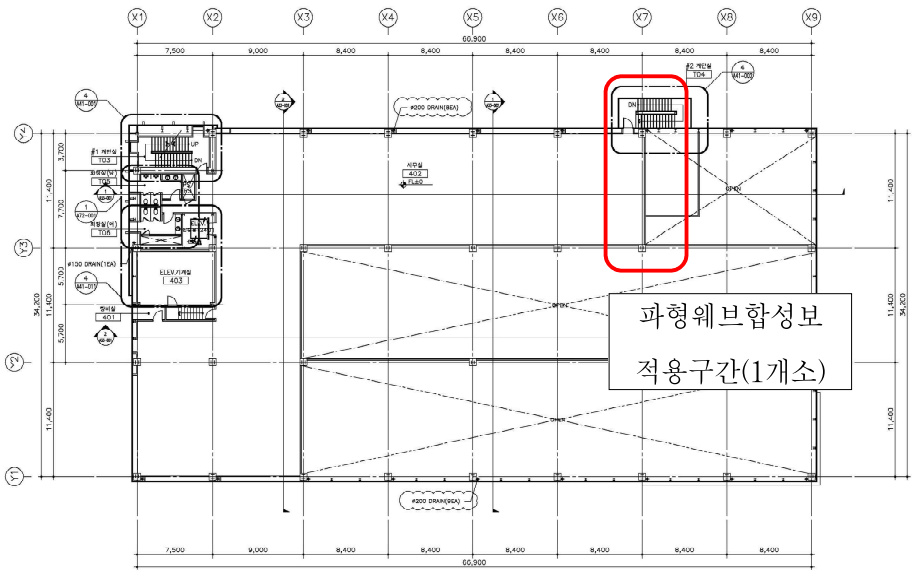
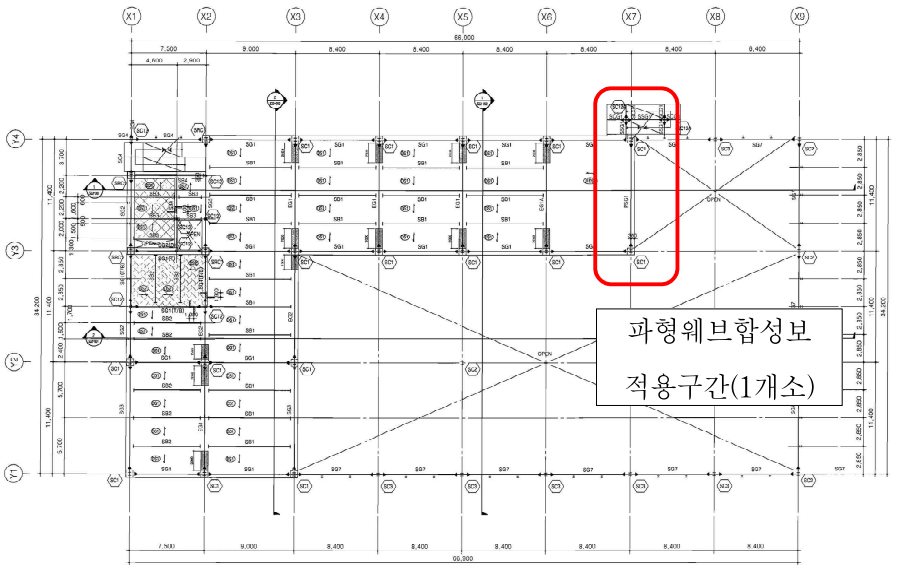
개발기술의 현장적용을 위한 프로세스는 다음과 같이 요약할 수 있으며, 이에 따라 각 공사의 공사기간, 공정 간섭 및 자재수급 등의 문제발생을 최소화할 수 있도록 계획 수립 후 각 현장에 적용하였다.



가. 적용 현장-1 (㈜뉴신팜 김포물류센터)

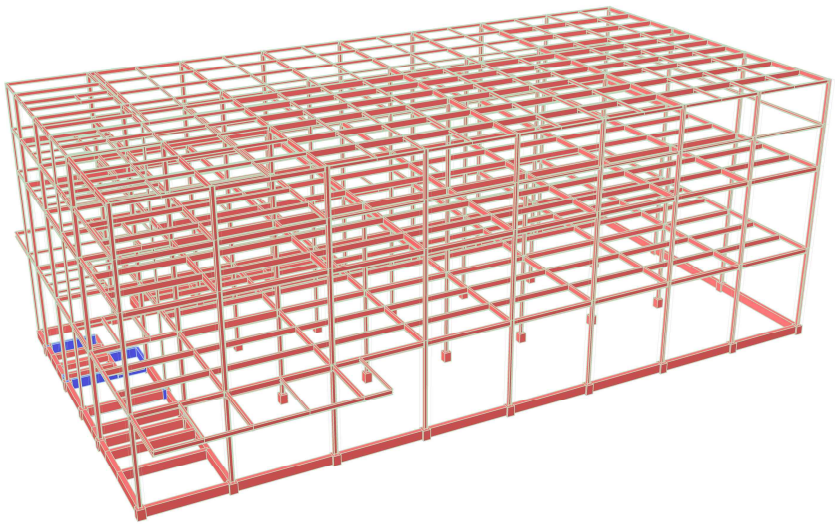
(1) 현장적용 계획

대상건물의 지상4층 X7열,Y3~4열 구간에 층고절감형 장경간 프리스트레스트 매입형 합성보를 적용하였으며, 개발기술이 적용된 건축 및 구조평면도는 그림 3.51과 같다.

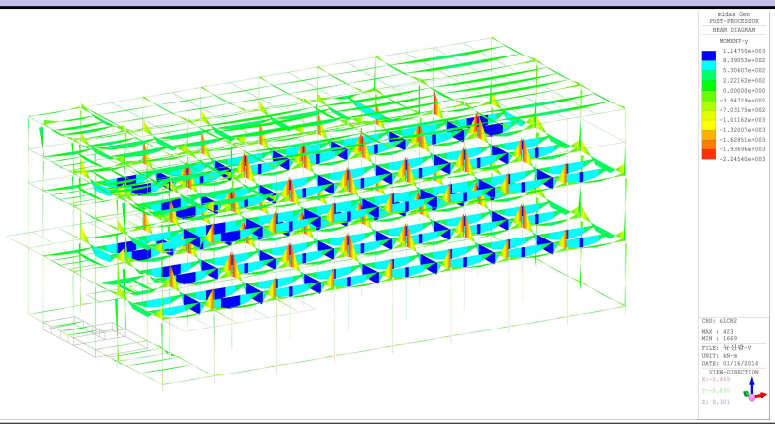
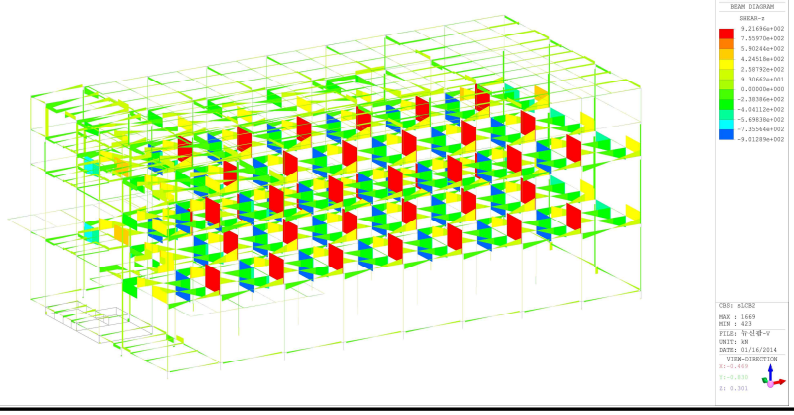
구 분	설계도면
지상4층 건축 평면도	
지상4층 구조 평면도	

[그림 3.51] ㈜뉴신팜 김포물류센터 설계도면

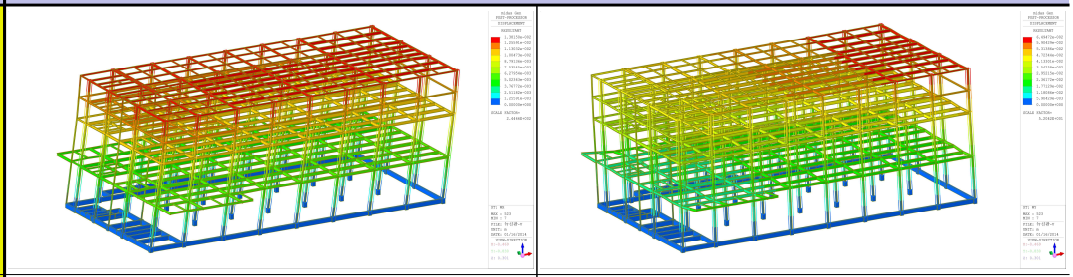
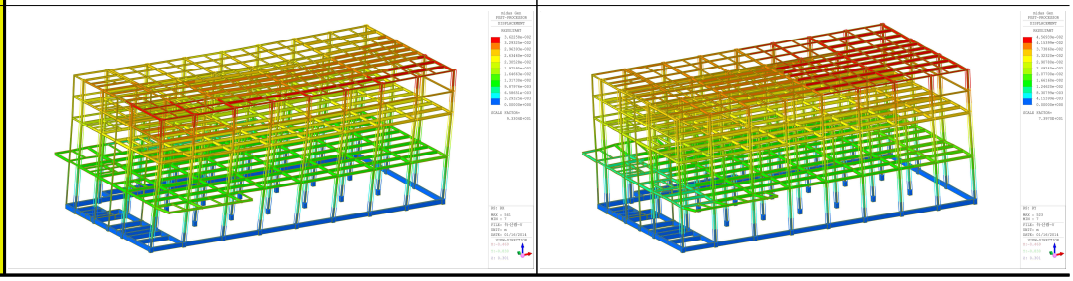
층고절감형 장경간 프리스트레스트 매입형 합성보를 적용에 따른 전체 구조물의 거동을 확인하고, 구조안전성을 확보하기 위하여 3차원 구조해석을 수행하였으며 그 결과를 정리하면 그림 3.52 및 그림 3.53~3.54와 같다.

3D 해석모델


[그림 3.52] ㈜뉴신팜 김포물류센터 3D 해석모델

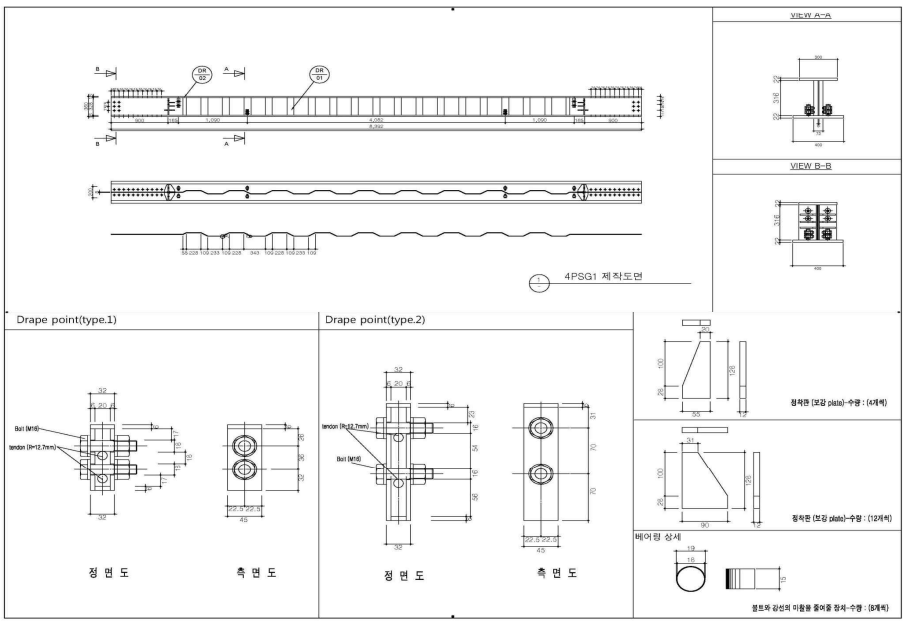
구 분	구조해석 결과
전체골조 휨 모멘트도	
전체골조 전단력도	

[그림 3.53] ㈜뉴신팜 김포물류센터 구조해석 결과

구 분	구조안전성 검토
풍하중	
지진하중	

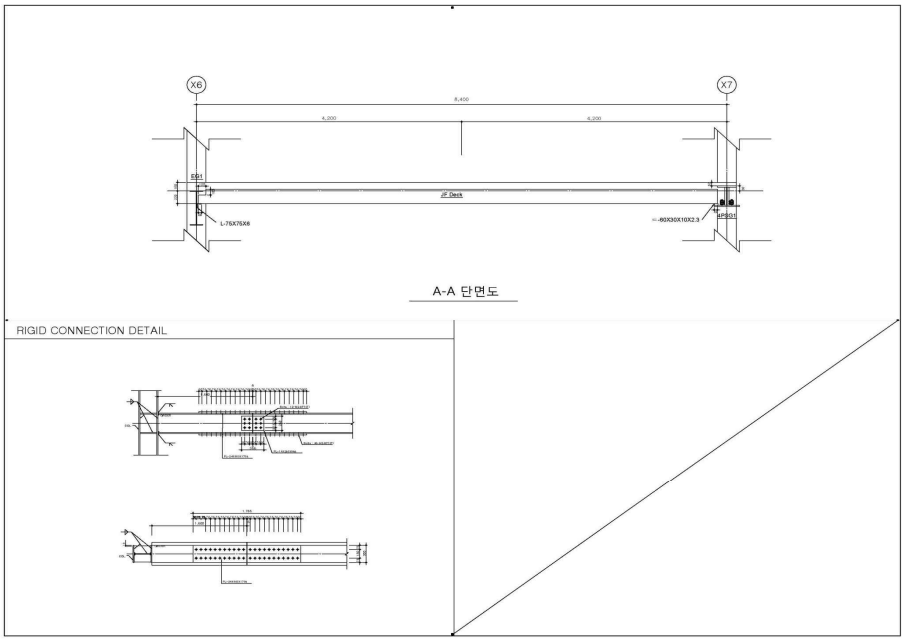
[그림 3.54] ㈜뉴신팜 김포물류센터 구조안전성 검토

층고절감형 장경간 프리스트레스트 매입형 합성보를 상기와 같이 설계에 반영하고 구조해석을 통해 안전성을 확보하였으며, 그림 3.55 및 그림 3.56과 같이 실제 현장에 적용이 가능한 상세도를 작성하였다. 파형웨브합성보는 BH-360×400×300×8×22 (SM490)로 계획되었으며, 내화 및 구조성능을 유지하면서 제작이 용이하고 내화성능 저하요인의 제거를 위한 대안으로 제시된 형상인 1-Leg Web의 형상으로 제작되었다.

제작 상세도


[그림 3.55] 제작 상세도

접합부 상세



[그림 3.56] 접합부 상세

(2) 현장적용 결과

현장적용 계획에 따라 설계, 제작된 층고절감형 장경간 프리스트레스트 매입형 합성보의 현장적용 결과를 현장적용 프로세스에 따라 정리하면 다음과 같다.

적용현장 전경



[그림 3.57] 현장 전경

구 분	현장적용 사진
보 제작 및 PS도입	
현장반입	

[그림 3.58] 현장적용 사진(계속)

구 분	현장적용 사진
보 설치	
데크 플레이트 설치	

[그림 3.59] 현장적용 사진(계속)

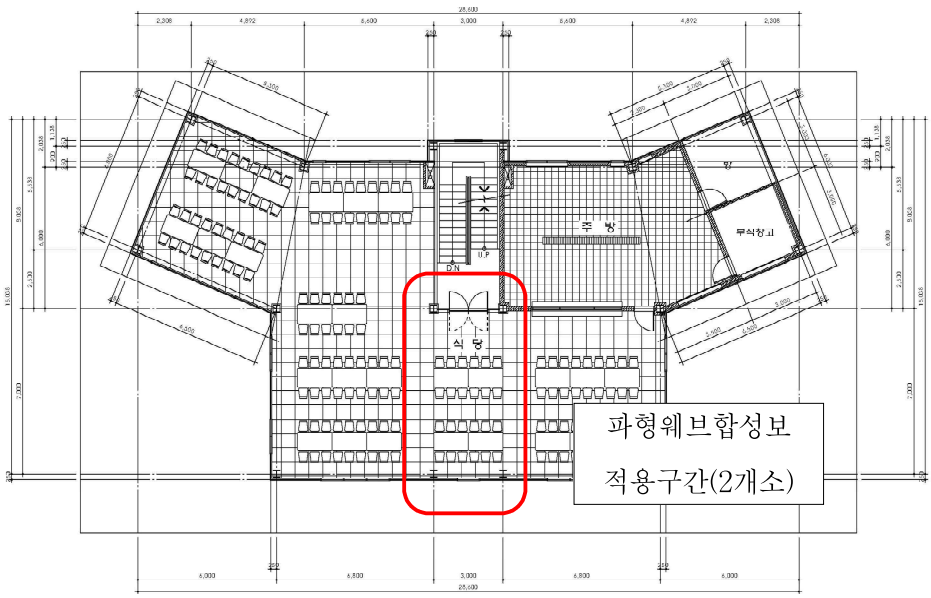
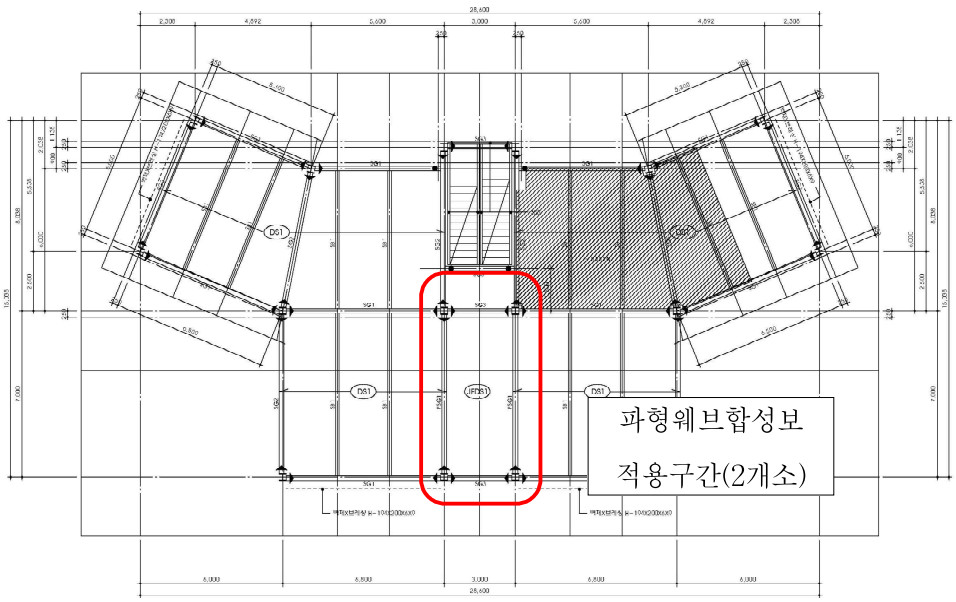
구 분	현장적용 사진
철근배근	
현장적용 완료	

[그림 3.60] 현장적용 사진(계속)

나. 적용 현장-2 (현성테크노 광주공장 기숙사동)

(1) 현장적용 계획

대상건물의 지상2층 계단실 전면 구간에 층고절감형 장경간 프리스트레스트 매입형 합성보를 적용하였으며, 개발기술이 적용된 건축 및 구조평면도는 다음과 같다.

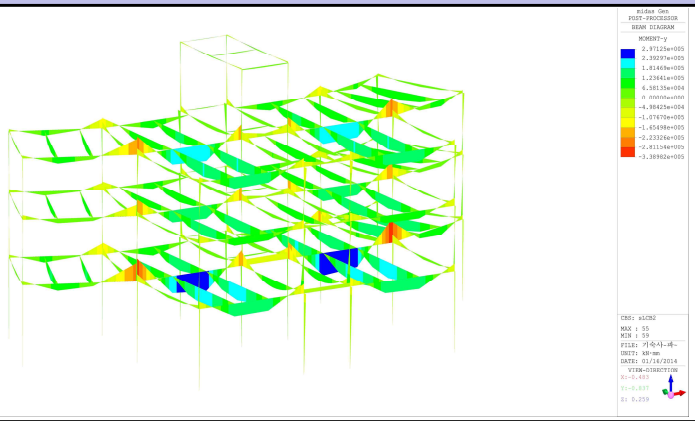
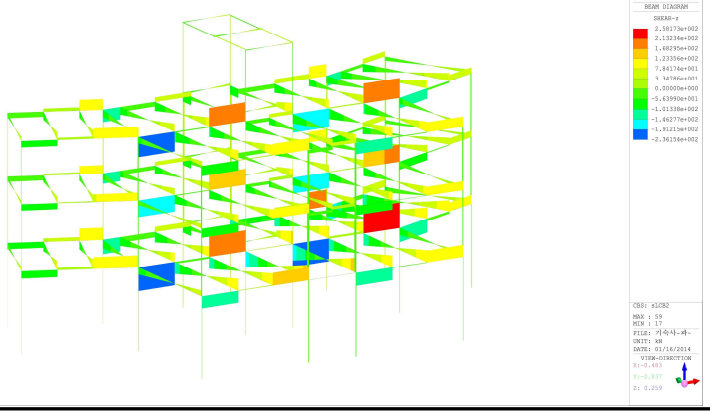
구 분	설계도면
지상2층 건축 평면도	
지상2층 구조 평면도	

[그림 3.61] 현성테크노 광주공장 기숙사동 설계도면

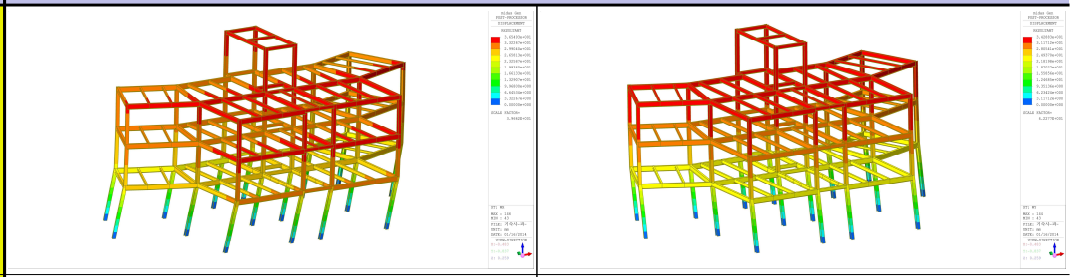
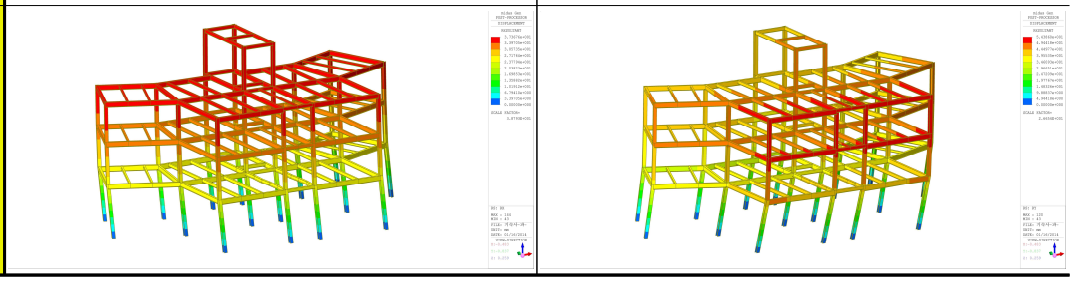
층고절감형 장경간 프리스트레스트 매입형 합성보를 적용에 따른 전체 구조물의 거동을 확인하고, 구조안전성을 확보하기 위하여 3차원 구조해석을 수행하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

3D 해석모델


[그림 3.62] 현성테크노 광주공장 기숙사동 3D 해석모델

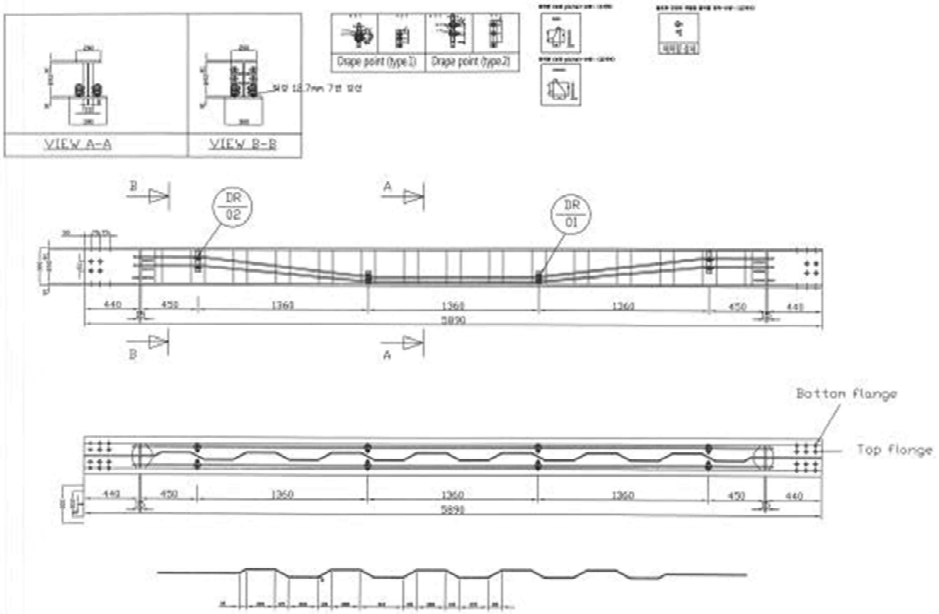
구 분	구조해석 결과
전체골조 휨 모멘트도	
전체골조 전단력도	

[그림 3.63] 현성테크노 광주공장 기숙사동 구조해석 결과

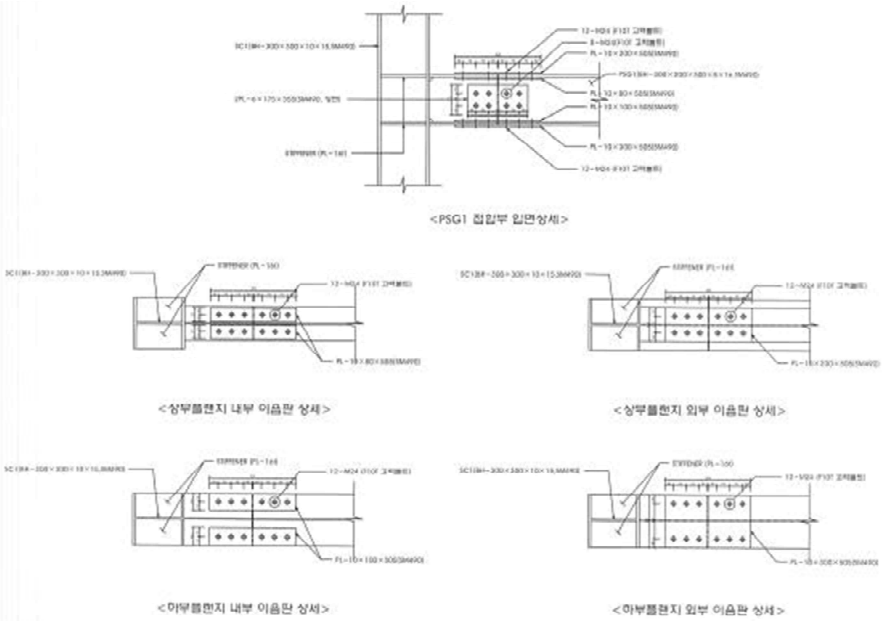
구 분	구조안전성 검토
풍하중	
지진하중	

[그림 3.64] 현성테크노 광주공장 기숙사동 구조안전성 검토

층고절감형 장경간 프리스트레스트 매입형 합성보를 상기와 같이 설계에 반영하고 구조해석을 통해 안전성을 확보하였으며, 그림 3.65 및 그림 3.66와 같이 실제 현장에 적용이 가능한 상세도를 작성하였다. 파형웨브합성보는 BH-300×300×200×8×16 (SM490)로 계획되었으며, 내화 및 구조성능을 유지하면서 제작이 용이하고 내화성능 저하요인의 제거를 위한 대안으로 제시된 형상인 1-Leg Web의 형상으로 제작되었다.

제작 상세도


[그림 3.65] 제작 상세도

접합부 상세


[그림 3.66] 접합부 상세

(2) 현장적용 결과

현장적용 계획에 따라 설계, 제작된 층고절감형 장경간 프리스트레스트 매입형 합성보의 현장적용 결과를 현장적용 프로세스에 따라 정리하면 다음과 같다.

적용현장 전경

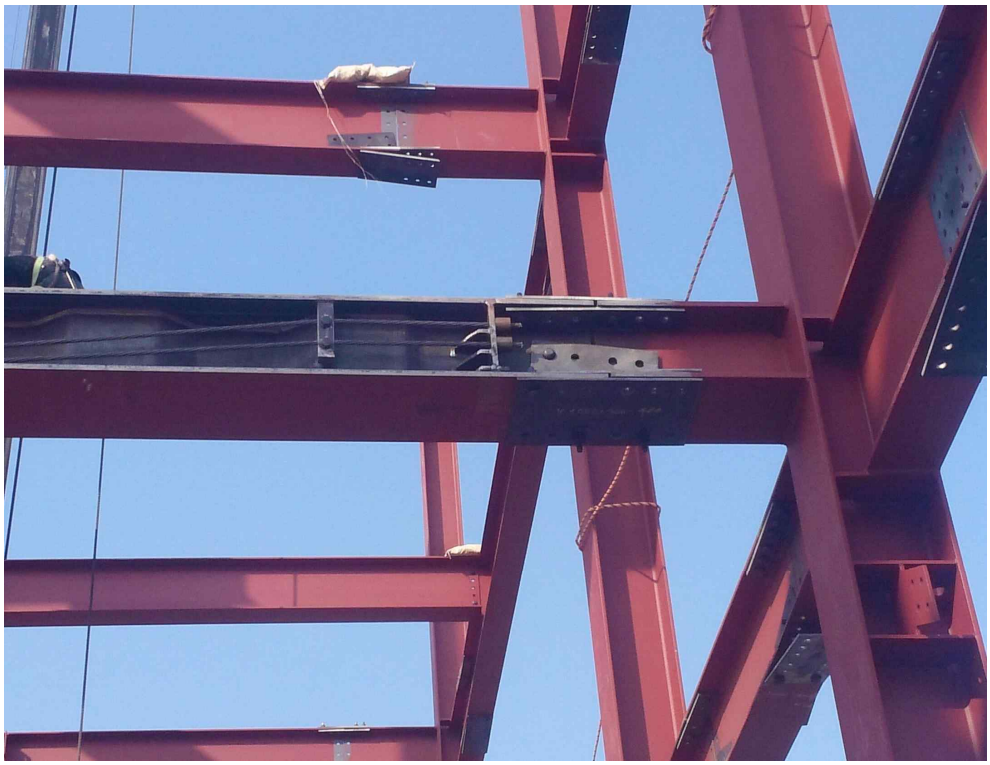

[그림 3.67] 현장 전경

구 분	현장적용 사진
보 제작	
PS도입	

[그림 3.68] 현장적용 사진(계속)

구 분	현장적용 사진
현장반입	
철골기둥 세우기	

[그림 3.69] 현장적용 사진(계속)

구 분	현장적용 사진
보 설치	
데크 플레이트 설치	

[그림 3.70] 현장적용 사진(계속)

구 분	현장적용 사진
철근배근	
콘크리트 타설	

[그림 3.71] 현장적용 사진(계속)

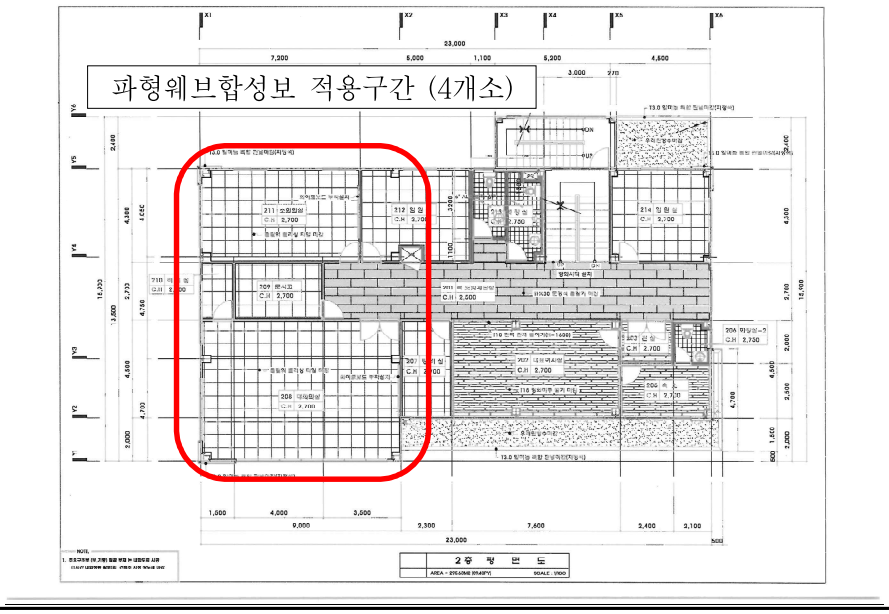
구 분	현장적용 사진
현장적용 완료 (상부)	
현장적용 완료 (하부)	

[그림 3.72] 현장적용 사진(계속)

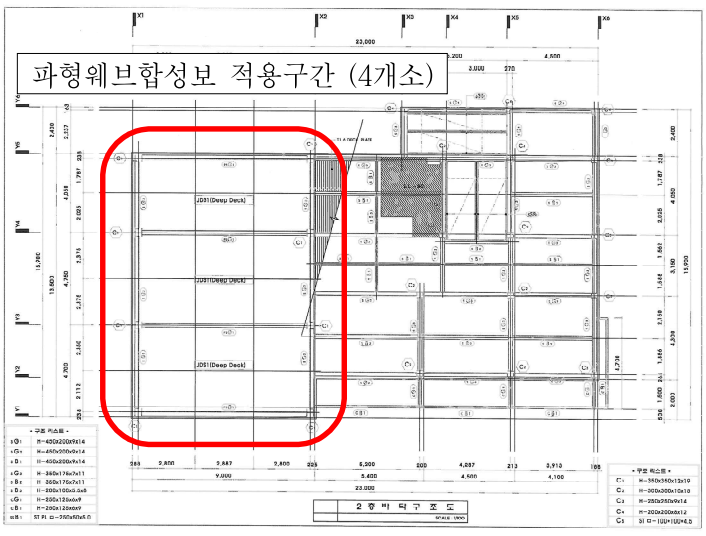
다. 적용 현장-3 (㈜이맥스아이엔시 율촌공장 사무동)

(1) 현장적용 계획

대상건물의 지상2층 X1~2열,Y1~5열 구간에 층고절감형 PS파형웨브 합성보 를 적용하였으며, 개발기술이 적용된 건축 및 구조평면도를 그림 3.73과 그림 3.74에 나타내었다.

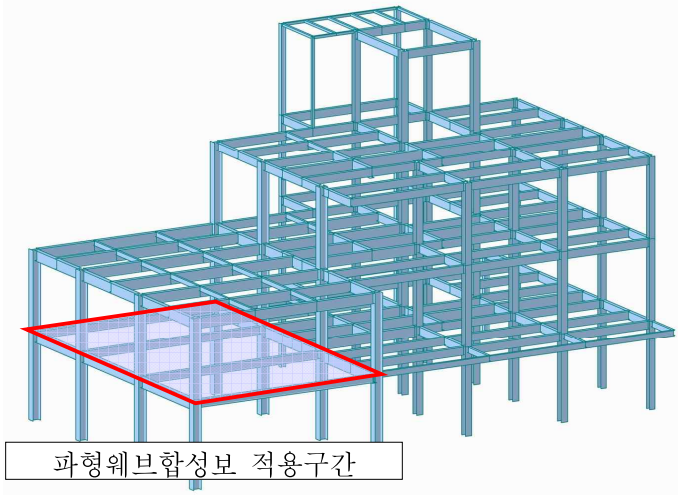
구 분	건축평면도
지상2층 건축 평면도	

[그림 3.73] ㈜이맥스아이엔시 율촌공장 사무동 지상2층 건축평면도

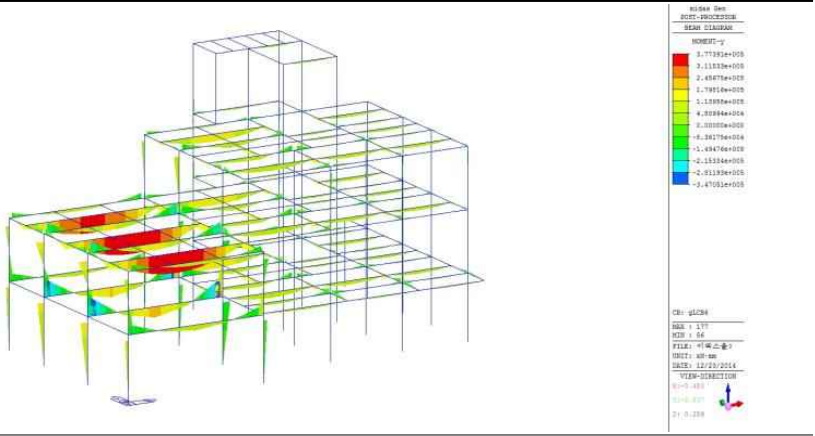
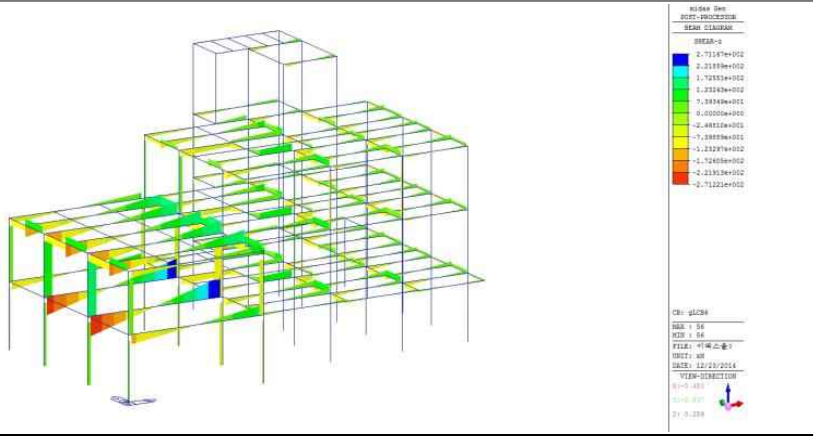
구 분	바닥구조평면도
지상2층 구조 평면도	

[그림 3.74] ㈜이맥스아이엔시 율촌공장 사무동 지상2층 바닥구조평면도

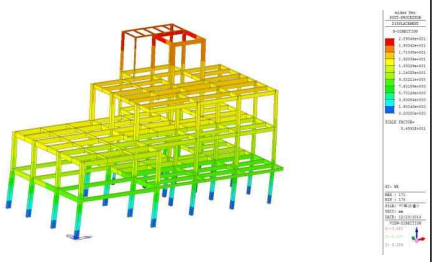
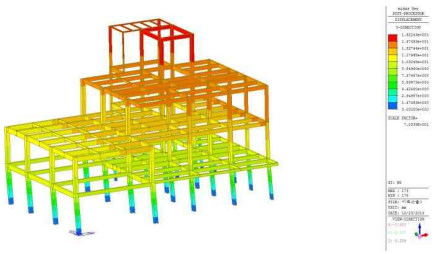
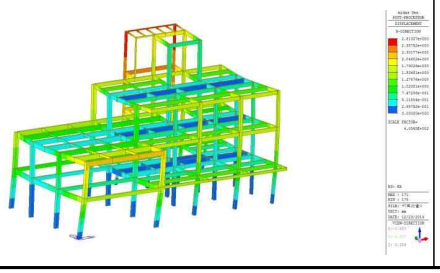
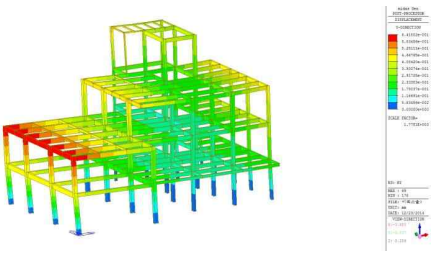
층고절감형 PS파형웨브 합성보 를 적용에 따른 전체 구조물의 거동을 확인하고, 구조안전성을 확보하기 위하여 3차원 구조해석을 수행하였으며 그 결과를 정리하면 그림 3.76~3.77과 같다.

3D 해석모델


[그림 3.75] ㈜이맥스아이엔시 사무동 3D 해석모델

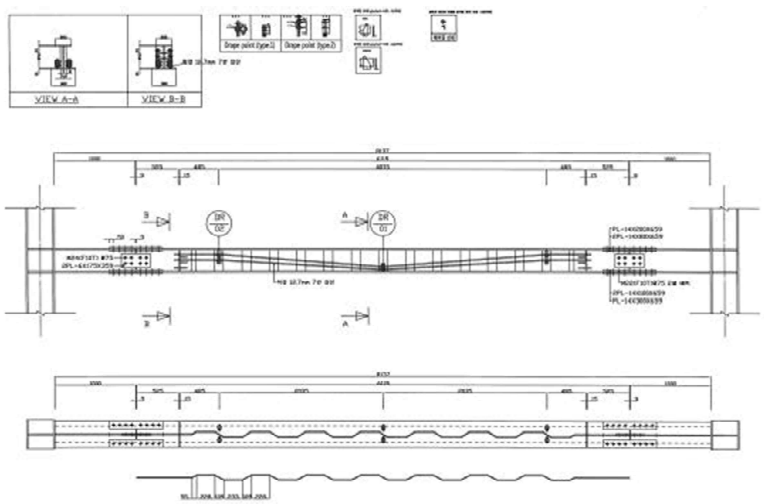
구 분	구조해석 결과
전체골조 휨 모멘트도	
전체골조 전단력도	

[그림 3.76] ㈜이맥스아이엔시 사무동 구조해석 결과

구 분	구조안전성 검토	
	X-방향	Y-방향
풍하중		
지진하중		

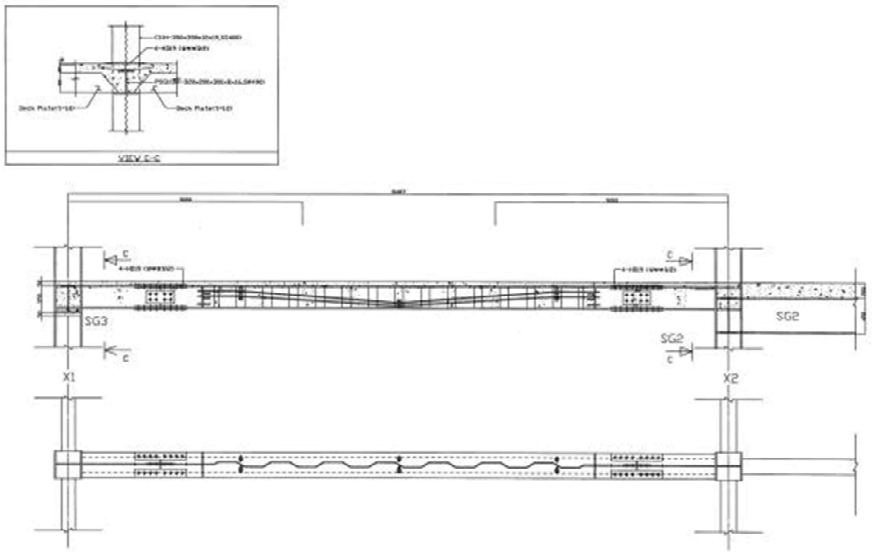
[그림 3.77] ㈜이맥스아이엔시 사무동 구조안전성 검토

층고절감형 PS파형웨브 합성보 를 상기와 같이 설계에 반영하고 구조해석을 통해 안전성을 확보하였으며, 파형웨브합성보는 BH-320×200×300×8×16(SM490)로 계획되다. 내화 및 구조성능을 유지하면서 제작이 용이하고 내화성능 저하요인의 제거를 위한 대안으로 제시된 형상인 1-Leg Web의 형상으로 제작되었으며, 그림 3.78와 같이 실제 현장에 적용이 가능한 제작 상세도를 작성하였다. 또한 그림 3.79에서는 매입형 합성보인 층고절감형 PS파형웨브 합성보 와 인접한 일반 노출형 합성보와의 단차를 극복하기 위한 설치 상세도를 작성하여 제작 및 시공에 오류를 최소화하기 위해 조치하였다.

제작 상세도


[그림 3.78] 제작 상세도

설치 상세도

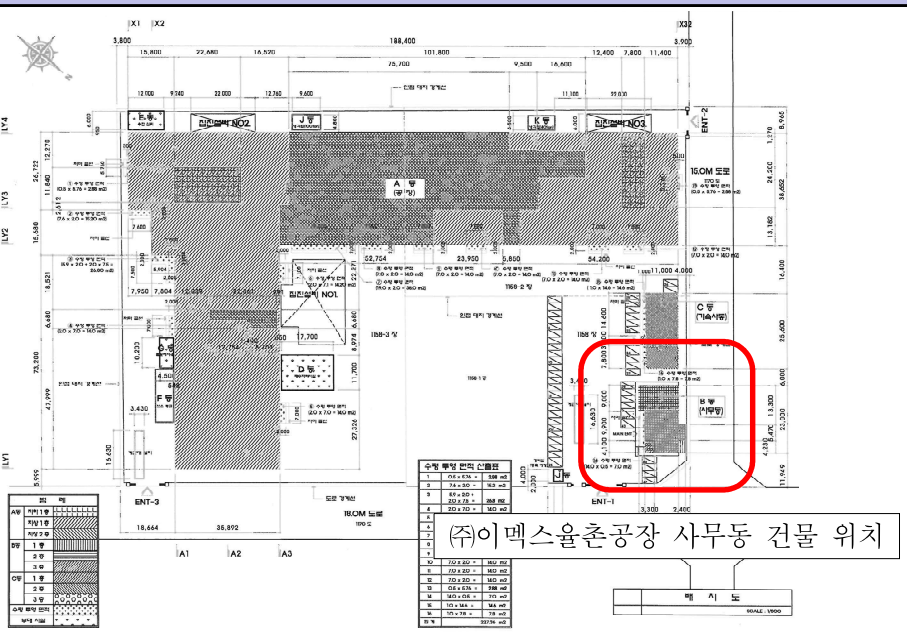


[그림 3.79] 설치 상세도

(2) 현장적용 결과(1월 중 완료예정)

현장적용 계획에 따라 설계, 제작된 층고절감형 PS파형웨브 합성보 의 현장적용 결과를 현장적용 프로세스에 따라 정리하면 그림 3.80과 같다.

건물 배치도



[그림 3.80] 배치도 및 건물 위치

제4장 연구목표 달성 및 효과

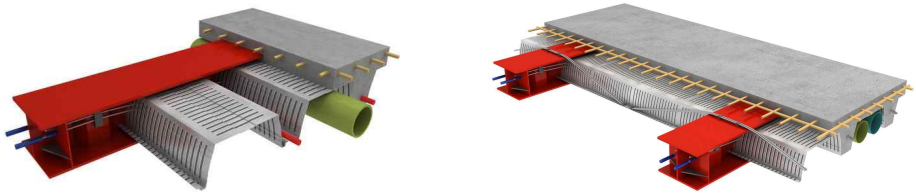
제1절 연구개발 최종목표 달성도

1. 연구개발 핵심성과 리스트

연번	핵심성과명	핵심성과 설명	성과유형	성과달성 책임	해당연차
1	무피복 층고절감형 합성보 내화공법 [7.5M/3시간]	PS와 파형웨브 기술을 도입하여 자체 내력 향상을 통한 무피복 내화공법	공법·기법	김흥열 (한국건설기술연구원 화재안전연구센터)	'12.04 ~'15.02 (2년10개월)

2. 핵심성과별 세부설명

가. 무피복 층고절감형 합성보 내화공법 [7.5M/3시간]

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="6">  </td></tr>
<tr><td colspan="2">정 의</td><td colspan="6">■ PS와 파형웨브 기술을 도입하여 자체 내력 향상을 통한 무피복 내화공법</td></tr>
<tr><td colspan="2">설정사유</td><td colspan="6">■ 본 과제는 내화피복이 없는 층고절감형 7.5m 보의 3시간 내화성능 확보 공법개발 및 현장적용 실용화 기술개발을 목적으로 하는 연구이므로 위와 같이 핵심성과를 설정함.
■ 녹색기술, 건설신기술, 내화구조 인정, 현장적용 등은 성과로드맵의 연차별 세부 액티비티로 설정.</td></tr>
<tr><td colspan="2">목 적</td><td colspan="6">■ PS 및 파형웨브의 도입으로 구조적 성능을 향상시켜, 현장 시공이 불가피한 합성보의 내화피복 공정을 제거함으로써 내화피복 현장시공의 불균질성 문제 해결 및 공기 단축
■ 층고 절감으로 인하여 건축물에 투입되는 건축자재의 물량 감소로 경제성 확보 및 폐기물 절감 가능.
■ 화재발생 시 피복재에서 발생하는 유해가스를 전량 제거.</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="6">(기존기술 수준) 국내·외에서 무피복 합성보 시스템의 개발은 전무하며, 장스팬(7.5m) 합성보의 재하조건에서 내화성능 검증 또한 사례가 없음.
(개발기술 수준) 3시간 이상의 내화성능을 확보한 층고절감형 무피복 합성보 시스템을 개발하여 녹색기술, 건설신기술, 내화구조 인정을 획득 후, 즉시 사업화 가능하게 하고자 함.
(개발기술 수준 설정근거) 대상공법은 민간 애로기술(합성보의 무피복화) 해결하기 위해 연구·개발이 시급하며, 특히 층고절감이 요구되는 고층 건축물에 적용하기 위하여 3시간 이상의 내화성능 확보가 필수적임.</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자(소속기관)</td><td colspan="6">김흥열 (한국건설기술연구원 화재안전연구센터)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="6">'12.04 ~'15.02 (2년10개월)</td></tr>
<tr><td rowspan="11">핵심성과</td><td rowspan="3">달성 확인방법</td><td>1차년도</td><td colspan="5">■ 내화성능 향상 방안 및 상세 설계안과 현장적용안 제시</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="5">■ 2시간 내화성능 확보[공인성적서] 및 설계·시공 매뉴얼과 현장적용 사례 제시</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="5">■ 3시간 내화구조 인정[공인인정서] 및 녹색·건설신기술 획득[공인인증서]</td></tr>
<tr><td rowspan="8">양적성과</td><td rowspan="2">1차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td>출원 1</td><td>-</td><td>국내 2</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td>-</td><td>국외 1</td><td>국내 3</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td rowspan="2">3차년도</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td>등록 1</td><td>국외 1</td><td>국내 4</td><td>-</td><td>녹색기술 1건, 건설신기술 1건, 내화구조 인정 1건</td></tr>
<tr><td rowspan="2">계</td><td>특허</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td>출원 1, 등록 1</td><td>국외 2</td><td>국내 9</td><td>-</td><td>녹색기술 1건, 건설신기술 1건, 내화구조 인정 1건</td></tr>
</table>

3. 목표 달성정도

- **7.5M 무피복 합성보의 3시간 내화성능 확보 완료!**
- **국내외 논문게재를 통한 학술적 검증 완료!**
- **녹색기술인증을 통한 기술의 우수성 및 녹색성 검증 완료!**
- **현장적용을 통한 시공성 검증 완료!**
- **원가분석을 통한 경제성 검증 완료!**
- **기술 사업화를 위한 내화구조 인정 및 건설신기술 추진 중!!!**

연차	연차별 성과목표	연구수행결과		검증방법	달성 수준
1차년도	층고절감형 PS파형웨브 합성보의 내화성능 확보방안 [90분]	질적목표	개발공법 무피복 90분 내화성능 확보	시험성적서	100%
			연속화 시공법 개발	보고서	100%
			보-기동 접합상세 제시	보고서	100%
			현장적용 방안 마련	설계도면	100%
		양적지표	특허 출원 1건	특허 출원증	100%
			국내 학술지 게재 2건	논문집	100%
			국내 학술대회 발표 2건	학술발표집	50%
2차년도	층고절감형 PS파형웨브 합성보의 7.5m 무피복 내화공법 개발 [120분]	질적목표	개발공법 무피복 120분 내화성능 확보	시험성적서	100%
			연속화 시공법 해석모델 개발	보고서	100%
			보-기둥 접합부 거동해석	보고서	100%
		양적지표	SCI급 논문게재 1건	논문집	100%
			국내 학술지 게재 3건	논문집	100%
			국내 학술대회 발표 2건	학술발표집	150%
			공동장비 활용 1건	공문	2900%
			현장적용 1건	보고서	200%
3차년도	층고절감형 PS파형웨브 합성보의 현장적용 실용화 기술개발 [180분]	질적목표	개발공법 무피복 180분 내화성능 확보	시험성적서	100%
			접합부/시공 디테일 제시	설계·시공 매뉴얼	100%
		양적지표	SCI급 논문게재 1편	논문집	100%
			국내 학술지게재 2편	논문집	100%
			국내 학술대회 발표 2편	학술발표집	100%
			특허 등록 1건	특허등록증	80%
			현장적용 1건	보고서	100%
			녹색기술 인증 1건	인증서	100%
			내화구조 인정(무피복 3시간) 1건	인정서	40%
			건설신기술 인증 1건	인증서	20%

제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석

- PS파형웨브 합성보의 화재안전성 확보를 기반으로 적합한 화재 안전성 검증을 통해 기술·경제적인 경쟁력 향상기대.
- 보유기술 및 추가기술의 개발을 통해 실구조물에 적용된 파형 합성보의 재하 하중 비에 따른 강도성능 저하의 면밀한 분석을 토대로 적용 구조물에 적합한 파형 합성보의 내화성능 FE해석기술 확보를 통해 고도의 내화성능 품질을 확보하여 건축 구조물의 내화 안정성 기술력 확보.
- 최적 내화성능 확보조건에서의 구조물 내화성능향상 분석기반의 유지보수, 품질관리 및 원가상승 등에 대한 다양한 문제점을 내포하고 있는 내화피복제의 사용량을 절감 할 수 있는 설계기술을 제시하여 경쟁력 있는 고품질의 내화성능 유지가 가능한 구조 시스템 개발.
- 피복제 사용량 절감 및 품질향상의 고도화를 기반으로 법정 요구내화성능을 최적화하여 경제성 확보.
- 제반요소들의 기회비용 분석을 통한 실구조물에 적용할 수 있는 실용성 기반의 화재안전 최적화 내화설계 기술확립 추진.
- 적정한 장스팬 합성구조의 내화성능을 확보하여 경쟁력 있는 신공법 및 기술의 건설분야에서 활발한 기술적 적용능력을 구축하고, 이를 기반으로 국가기술·경제적 기반의 국가적 위상 제고 및 경쟁력 확보능력 배양.



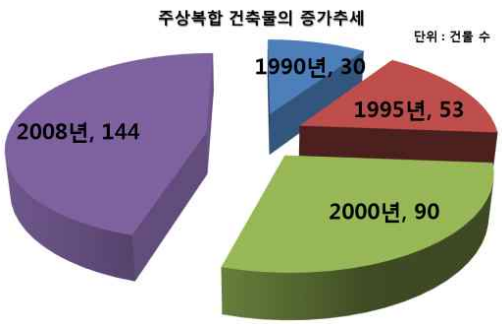
[그림 4.1] 시스템 개발시 기술적 측면의 파급효과

제3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석

1. 국내의 시장규모

가. 주상복합 시장규모

- 그림 4.2에 나타낸 바와 같이 국내에서 대형 주상복합건물이 늘어나고 있는데, 주거용 건물의 평면에 대한 가변성이 요구됨에 따라 벽식구조가 줄고 층고절감형 장경간 라멘구조의 수요가 증가될 것으로 예상됨.
- 공장, 창고 및 기타 특수 건물의 경우에도 그림 4.3에 나타낸 것과 같이 기존에 많이 적용된 PEB시스템의 처짐 및 안정성의 문제가 대두되고 있기 때문에 합리적인 대안으로써 합성부재의 적용이 늘어날 것으로 전망됨.



[그림 4.2] 국내의 주상복합 건축물의 현황



[그림 4.3] PEB구조 건축물의 붕괴

나. 초고층 건물 시장규모

- 국내의 초고층 건설은 1970년대의 경제성장기부터 지속적으로 대도시로의 인구집중이 가속화되어 주거용 건축물을 중심으로 전개되어 왔음.
- 1970년대 여의도시범아파트, 남산외인아파트, 압구정현대아파트 등 주거건축을 필두로 1997년 외환위기 이후 대림산업의 도곡동 46층의 주상 복합 건물, 삼성물산과 삼성중공업의 도곡동 타워 팰리스 1, 2, 3차(세계 60위), 현대건설의 목동 하이페리온(78위) 등으로 국내에서도 초고층 건축의 붐이 일어나게 되는 등 주상복합아파트의 초고층화가 1970년대 이후 국내 초고층 건축을 선도하고 있음.

<표 4.1> 국내 초고층복합빌딩의 개념 및 발전 동향

단계	1단계	2단계	3단계	4단계
년도	1970년대	1980년대	1990년대 초	2000년대 초
층수	5~12층	12~15층	16~25층	30~60층
구조형식	(라멘조) 	(내력벽+슬래브) 	(타워형 중심의 다양한 구조형식) 	(코아월구조) 
비고	여의도 시범아파트 남산 외인아파트 압구정 현대아파트	전국 확산	분당 등 신도시	주상복합아파트 (1997년 외환위기 이후)

- 그 결과 국내 40층 이상의 주거건축물은 세계 4위의 수준에 있으며, 100대 주거용 건축물 중 9동이 국내에 있어 세계 3위 수준의 초고층 주거건물을 보유하고 있고, 이중에서 대부분의 초고층복합빌딩은 400m 이하로 2000년 초에 집중적으로 건설되었으며, 2020년까지 완공 예정인 초고층복합빌딩에 대한 수요가 급증하고 있음.

<표 4.2> 주요 초고층복합빌딩 현황

프로젝트명	소재지	높이(m)	층수	완공시기
세운상가 재개발(중구)	서울	960	220	미정
용산 드림타워	서울	620	150	2012
상암 DMC Seoul Lite	서울	640(첨탑100)	133	2014
잠실 제2 롯데월드	서울	555	112	미정
Global Business Center	서울	450	110	미정
여의도 Parc1	서울	332	72층, 59층	미정
151 인천 타워	인천	610	151	2012
인천 시티타워	인천	450	110	2015
부산 수영만 두산주상복합	부산	300	80여층	2010
부산 중앙동 롯데월드 타워	부산	510	120	2013
부산 월드비즈니스 센터	부산	432	126	2013
부산 해운대 관광리조트 트리플스퀘어	부산	511	117	2014

- 국내의 초고층 시공 현황은 매해 증가하고 있으나, 초고층 건물에 적용되는 합성구조의 성능기반 설계를 통한 내화설계는 현실적으로 해외업체(SOM, Arup 등)에 100% 의존하고 있음.
- 내화성능 확보는 초고층복합빌딩의 필수 요건이며, 국내의 고층 건축물의 현황은 [표 2.17]과 같이 2003년을 기준으로 5년동안 약 16배의 증가율을 나타내고 있음.
- 그러므로 본 대상기술의 개발을 통해 무피복이 가능한 장스팬 합성보에 대한 실용화 기술개발이 성공적으로 진행될 경우, 초고층 건물에의 합성구조의 활용도가 급격하게 증가할 수 있을 것으로 예측됨.

다. 철골건물적용 시장규모

- 국내에서 소비되는 H형강은 양은 2006년 2,950,000톤으로 그 사용량은 꾸준하게 증가하고 있고 이런 경향은 한동안 계속 이어질 것으로 예상됨.
- 기술개발후 1년[2011]: PS파형웨브 합성보의 철골 대체물량은 약 326톤 정도로 예측됨.

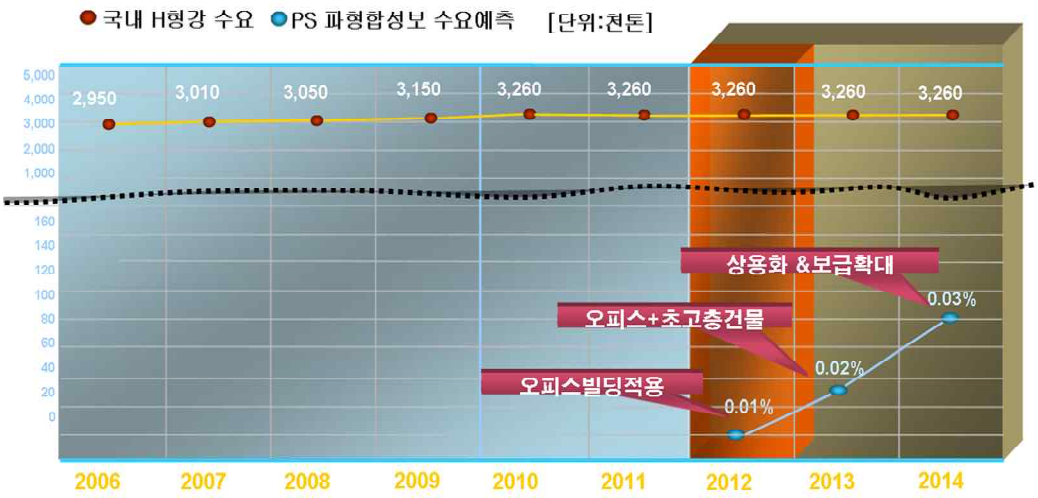
※ 가정조건: 2011년의 H형강 수요량이 2010년과 비슷한 수준으로 유지한다고 가정하고, PS파형웨브 합성보가 H형강을 대체하는 물량은 0.01%[오피스 빌딩에만 적용]로가정.

- 기술개발후 2년[2012]: PS파형웨브 합성보의 철골 대체물량은 약 652톤 정도로 예측됨.

※ 가정조건: 2011년의 H형강 수요량이 2010년과 비슷한 수준으로 유지한다고 가정하고, PS파형웨브 합성보가 H형강을 대체하는 물량은 0.02%[오피스 빌딩 & 초고층 건물에 적용]로 가정.

- 기술개발후 3년[2013]: PS파형웨브 합성보의 철골 대체물량은 약 978톤 정도로 예측됨.

※ 가정조건: 2011년의 H형강 수요량이 2010년과 비슷한 수준으로 유지한다고 가정하고, PS파형웨브 합성보가 H형강을 대체하는 물량은 0.03%[상용화 보급확대]로 가정.



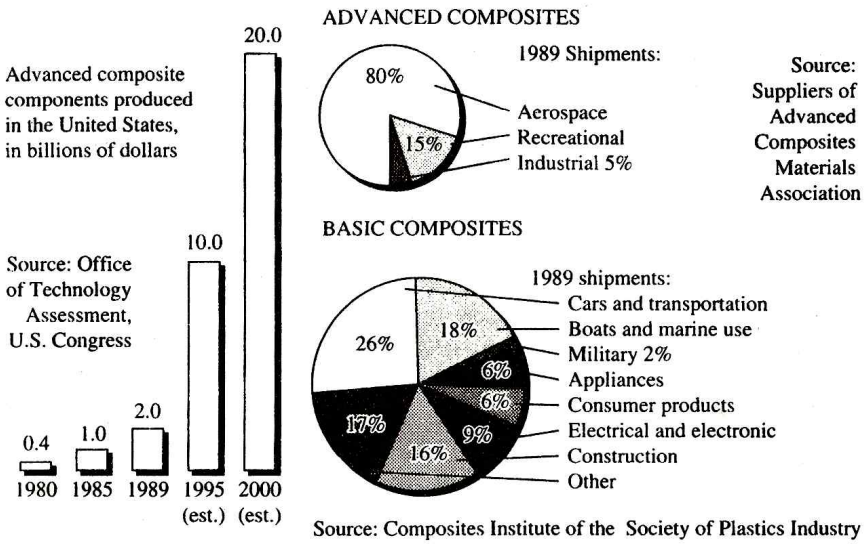
[그림 4.4] PS파형웨브 합성보의 예상적용 연면적

2. 국외의 시장규모

국외의 경우, 합성구조의 발달은 1960년대 유럽을 중심으로 시작되어 현재까지 활발한 연구가 이뤄지고 있으며, 합성부재의 현장적용이 이미 활발한 상황이다. 유럽 및 북미의 경우 개발된 대부분의 합성보 및 합성부재를 기업에서 시스템화하여 설계에서 시공까지 일괄적으로 적용하고 있으며, 토목분야에서 중·소규모의 교량에서 초고층건물에 이르기까지 다양하게 적용되고 있다. 영국의 경우에는 ABS단면(비대칭단면)을 가진 강재생산이 활발하게 이뤄지기 때문에 비대칭 합성보의 원가가 일반 철골구조와 대등할 수 있어 현장적용이 증가하고 있다.

가. 합성구조공법 적용 시장규모

- 미국의 경우 포스트텐션 및 프리캐스트 공법의 적용이 매우 일반화 되어있기 때문에 프리스트레스트 및 프리캐스트 부재를 이용한 합성구조 시스템이 매우 발달되어 있다.
- 그림 4.5는 미국 CISP(Composite Institute of the Society of Plastics Industry)의 합성부재 및 재료의 적용추세와 범위의 조사결과)를 나타낸 것으로서, 1995년을 기점으로 합성부재의 적용이 급격한 증가추세에 있음을 알 수 있다.



[그림 4.5] CISP에서 제시한 합성부재 및 재료의 적용추세와 적용범위의 조사결과

나. 국외 철강산업 시장규모

- 국외의 합성구조적용을 위한 시장규모를 분석한 결과는 [표 2.11]와 같으며, 철골구조부재의 현장적용시 가장 취약점인 피복재 도포 추가공법을 구조적 성능확보를 통해 생략할 수 있는 장스팬 무피복공법이 도입될 경우, 국외시장에의 국내기술 진출가능성은 상당히 높을 것으로 예측된다.

<표 4.3> 국외의 시장규모

국가명	철강산업 규모 및 현황
네덜란드	· 세계 최대 철강생산업체인 네덜란드의 미탈스틸이 2위 아르셀로를 인수합병 · 전 세계 철강재 생산량의 10%를 생산하며 두 회사의 조강 생산량을 합쳐 1억 3000만톤에 이를 것으로 전망 · 3위 업체인 일본 신일본제철의 3200만 톤의 4배에 이름
영국	· 2004년 영국의 철강산업의 경우, 60% 정도의 철강 가격 상승에도 불구하고 산업 내의성과 및 시장 점유율은 증가하는 추세 · 영국에서의 철강 수요의 경우 1988년/1989년의 최고 기록치만큼 2004년 역시 높게 나타났으며, 2003년보다 성과에 있어서도 7.4% 증가를 기록 · 세계 각지의 철강과 관련한 네트워크를 구축하고 이와 관련한 조직들을 구성하려는 노력을 시도 · 영국 CORUS 최근 동향 -대형 제철소 설비를 쇄신하여 고부가가치 제품의 증산을 서두르는 한편 뒤쳐진 신흥국에서의 사업전개 -1999년의 대형합병으로 세계 3위로 부상했지만 지금은 최대기업의 3분의 1 규모 -1999년 영국 브리티시 스틸과 네덜란드 후고벤스의 합병으로 탄생한 코러스의 최초 4년간은 합계에서 22억 파운드에 달하는 거액의 적자발생 -최근 2년간은 인원삭감 등의 리스트럭처링 효과가 나타나고, 철강제품의 시세 급상승으로 연간 4억 5,000만 파운드의 최종이익을 확보
일본	· 일본 최대 철강 4개사 최고이익 갱신 ('06.3월 결산기), 재편에 대비하여 현체제 강화 · 수익 확대에 따른 투자여력의 상승으로 해외 대기업과 대등하게 세계 철강업계 재편에 대비할 수 있는 체제를 갖춤
미국	· 06.03월 미국 철강업계의 가동률은 97.2%으로 호황기 수준 · 2월 철강출하량은 893만 7천t으로 전년 동월대비 3.2%, 전월대비 0.2% 증가하였고 철강수입량은 351만1천1t으로 전년 동월대비 48.7%, 전월대비 11.6% 증가

제4절 연구결과의 기업 활용방안

1. 참여기업의 현황분석

참여기업	업 종	매출액 [2011]	고용현황 [인]	생산성현황 [억원/인]
(주)목양 엔지니어링 건축사사무소	설계/감리업	59억원	135인	0.48
(주) 픽슨	제조업, 철구조	259억원	35인	7.4

○ (주)목양 엔지니어링에서 공동기관으로 연구과제 종료 후 확보한 무피복 장스팬 합성구조의 실용화 기술을 토대로 현재 당사에서 보유한 건설 설계/감리 현장에 개발기술을 적용함으로써 우수기술의 현장전파 및 기술 컨설팅 수행을 통한 개발개술의 건설 현장적용 활성화 및 기술전파를 체계적으로 추진할 계획임.

○ (주) 픽슨의 경우, 현재 토목분야에서 건축분야로의 사업분야 진출을 확대하고자 대상공법을 개발할 경우 이 분야에 대한 투자를 위해 공장부지 매입완료 및 설비시스템과 제조공장을 설립[부지면적: 약 2만6천m2]할 계획에 있고 본 연구과제가 성공적으로 달성될 경우, 건축구조분야로의 사업진출을 추진할 계획임. 향후 건축구조부재로서의 건설현장 적용 활성화를 위하여 내화구조 인정을 추진함으로써 국가공인 법적 인정자격을 획득을 기반으로 개발기술의 시장적용 활성화를 효율적으로 추진할 전략을 수립함.

1. 참여기업별 연계방안 및 추진전략

○ 본 연구과제 수행을 기반으로 PS파형웨브 합성보의 내화성능을 확보하여 사용성 및 안전성을 증대시킬 수 있으며, 국내에서 PS파형웨브 합성보의 설계기술을 가진 기업이 거의 없으므로, 참여기업인 목양엔지니어링의 경쟁력확보에 크게 기여할 것으로 기대됨.

○ PS파형웨브 합성보의 설계 기술은 물론 화재안전성 확립을 전제로 선진외국의 관련업체에 비해 기술적 우위를 확보하는데 기여할 것으로 사료됨.

○ PS파형웨브 합성보의 내화성능 검증 및 평가를 통해 PS파형웨브 합성보의 장점을 적절히 활용할 수 있으므로, PS파형웨브 합성보의 기술경쟁력 상승으로 인한 프리스트레스 부재 및 합성보의 수요가 더욱 증대될 것으로 전망되며, 현장시공 적용성 향상 및 활용성 극대화, 보수 · 보강 공사비의 대폭적인 절감,국가예산의 낭비억제 및 효율성 제고로 인한 국가 기술경쟁력 확립에도 기여할 수 있을 것으로 사료됨.

○ 최적 화재안전 내화성능확보 방안의 제시를 통한 내화구조 설계기술력이 구축되어 구조설계관련 업무의 질적향상 및 안전성기반 요소기술설계가 가능하게 되고, 국가적 방재능력의 향상과 선진외국의 화재관련 내화설계 의존성을 제어할 수 있으며, 실구조물 적용설계를 수행함으로서 구조물 내화설계 기술경쟁력 향상으로 선진국에의 기술종속을 방지할 수 있음.

번호	기업명	과제에 대한 기업의 관심영역	연계방안								
			기업 활용	장비 활용	교육 연계	기술 상담	정보 제공	기술 지도	기술 이전	공동 연구	창업 지원
1	(주)목양엔지니어링 건축사사무소	PS파형웨브 합성보의 설계기법	V			V	V	V		V	
2	(주)픽슨	파형웨브의 제원	V			V	V	V			
합계		9	2			2	2	2		1	

2. 타 산업에 미치는 효과

○ 본 연구개발을 통해 층고절감형 PS파형웨브 합성보의 화재 안전성 확보를 기반으로 하여, 관련 프리스트레스트 부재 및 프리스트레스트 합성보에 관한 신개발 공법들에 화재안전성 확보관련 연구의 기본 DATA를 적용할 수 있음.

○ 화재안전 성능기반 내화성능 평가 기술의 개발을 기반으로 타 구조물(CFT구조,TSC보, 하이브리드 구조 등)에 관한 내화성능 평가관련 기본 DATA및 평가 기술을 제공 할 수 있으며, 관련 철강산업의 활성화를 통한 건설 기술 현장 적용성의 확대로 인해 제반 건설 관련산업들의 기술경쟁력 향상이 가능할 것으로 기대됨.

3. 관련 연구개발의 전망

○ 장스팬 합성구조의 내화성능 확보 기술이 본 연구과제로 달성될 경우, 유사 합성구조인 TSC·I Tech Beam·Tu 보 등의 관련 공법 등의 장스팬 조건에서의 내화성능 확보에 관한 선도적인 연구로서 기준이 확보 될 것으로 판단되며, 이로 인해 유사 합성구조 공법의 내화성능 확보와 관련된 연구개발이 활성화 될 것으로 판단됨.

○ 이러한 연구개발을 통해 합성 구조보의 현장적용이 가시화 될 것으로 판단되며, 내화로 인해 사장될 수 있는 기존 신공법 등의 건설 실무 현장 적용의 활용성이 증대될 것으로 판단됨.

4. 기술 수요 및 현장적용 가능성

가. H형강 수요에 따른 현장적용 가능성분석

(1) 기술 수요증가

○ 철골구조물의 수요증가

건물이 고층화, 대형화 되어감에 따라서 강도는 강하면서 자중이 가벼운 철골구조의 수요가 증가하고 있음.

공기가 공사비에 미치는 영향이 증가하면서 공기가 상대적으로 빠른 철골구조의 수요가 점차 증가함.

○ 철골구조의 수평부재를 PS파형웨브 합성보로 대체 예상

- 강재의 가격증가로 강재량을 줄이면서 고강도, 고강성의 부재를 구현할 수 있는 합성수평부재의 필요성이 대두됨
- 철골부재는 강도는 강하지만 세장하기 때문에 진동이나 처짐에 취약하기 때문에 합성부재로의 대체의 필요성이 부각되고 있음.
- 현행 법규상 철골부재는 내화시간을 확보하기 위해서 반드시 내화피복을 해야하는 단점을 안고 있음.

- **기술개발후 1년[2011]:** 철골구조물의 연면적을 대체할 PS파형웨브 합성보의 예상적용 연면적은 약 21,700m^2 정도로 예측됨.

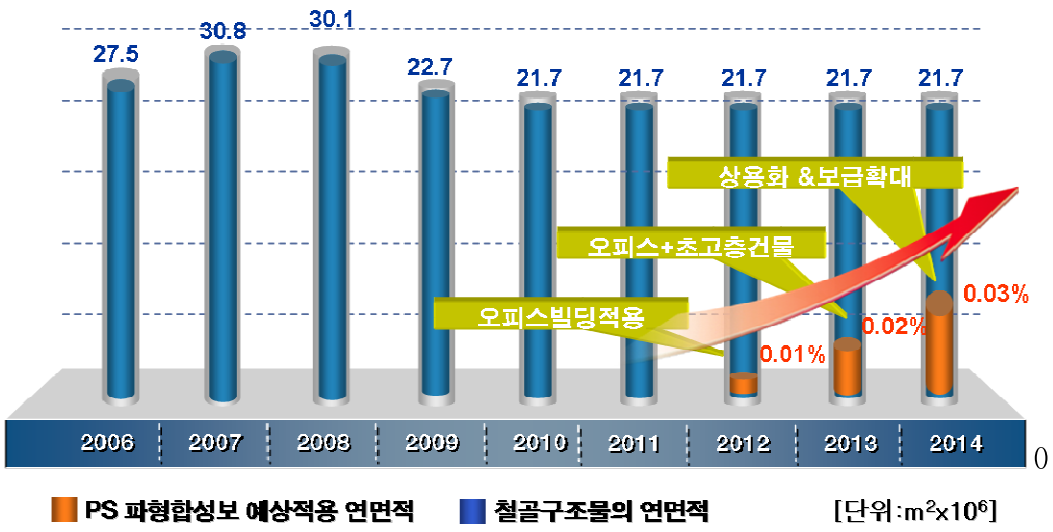
  ※ 가정조건: 2011년의 철골구조물의 연면적이 2009년과 비슷한 수준으로 유지한다고 가정하고, PS파형웨브 합성보가 H형강을 대체하는 건축 연면적은 0.01%[오피스 빌딩에만 적용]로 가정.

- **기술개발후 2년[2012]:** 철골구조물의 연면적을 대체할 PS파형웨브 합성보의 예상적용 연면적은 약 43,400m^2 정도로 예측됨.

  ※ 가정조건: 2011년의 철골구조물의 연면적이 2009년과 비슷한 수준으로 유지한다고 가정하고, PS파형웨브 합성보가 H형강을 대체하는 건축 연면적은 0.02%[오피스 빌딩과 초고층건물에 적용]로가정.

- **기술개발후 3년[2013]:** 철골구조물의 연면적을 대체할 PS파형웨브 합성보의 예상적용 연면적은 약 65,100m^2 정도로 예측됨.

  ※ 가정조건: 2011년의 철골구조물의 연면적이 2009년과 비슷한 수준으로 유지한다고 가정하고, PS파형웨브 합성보가 H형강을 대체하는 건축 연면적은 0.03%[상용화 보급확대]로가정.



[그림 4.6] PS파형웨브 합성보의 예상적용 연면적

(2) 현장적용 가능성

○ 접합부에 대한 중요성 증대

- 전세계적으로 지진이 빈번하게 일어남에 따라서 내진성을 확보하는 내진설계가 중요시되고 있는 시점에서 내진성능에 중요한 영향을 주는 접합부에 대한 구조성능의 확보가 필요함.
- 철근만으로 일체성을 확보하는 기존의 접합부와는 강선을 통해서 일체성을 확보하는 등의 여러 가지 대안을 통해서 요구되는 내진성능의 확보가 가능함.

○ 민간 애로기술 해결

- 기존의 합성구조의 경우 하부 플렌지에의 내화피복을 하려야 법정요구내화시간인 3시간을 만족할 수 있었으나, 피복재 도포공법의 경우 화재시 유독가스 발생 및 피복 도포시 추가적인 공정·비용발생과 품질확보 등의 문제점이 발생함.
- 이로 인해 민간 시공사에서는 철골구조부재를 건물에 적용할 경우 피복설계시의 문제점 및 내화구조 인정 등의 문제점 때문에 기술적 애로사항이 다수 발생함.
- 이를 해결하기 위해 화재시 내력저하 및 구조적 휨강성 확보를 위해 횡비틂좌굴제어를 위한 파형웨브도입과 중앙부 처짐제어를 위한 프리스트레스 도입을 통해 장스팬 합성구조의 무피복 조건에서 법정내화 요구시간인 180분 내화성능의 확보가 가능함.
- 이러한 기술적 해결을 기반으로 층고절감·공기단축·물량절감·내화성능확보 등의 장점을 보유한 당해 구조공법 기술의 건축 구조물 시공적용성 향상 및 활용을 확보할 수 있음.

나. PS파형웨브 합성보 공법 현장적용 가능성분석

- 기존 슬림플로어 시스템은 장지간에 적용되는 구조체이나 현행 인증체계는 최대 4M 정도의 지간거리에서만 내화인증을 제시하고 있으므로, 이에 대한 성능기반 내화설계기술의 개발을 기반으로 장지간에의 적용이 늘어날 수 있을 것으로 전망됨.
- 기존 슬림플로어 보와 일반철골구조물의 시공에 따른 경제성 분석을 수행한 결과 표 4.4에 나타낸 것과 같이 22층 건물 기준 공사비 및 층고 절감효과(층고절감−0.25m/층, 사용면적 9%증가, 골조공사비 평당−18%감소/전체공사비−10%감소)가 발생하였음.
- 이를 기반으로 철골공사에 약 10%정도에 화재안전 내화설계기술이 적용되어 내화성능이 확립된 PS파형웨브 합성보를 적용한다면, 국내 최근 5년간 공사비용 분석(통계청 조사결과, '01 ~ '05)을 기준으로 할 경우 약 177억원의 공사비 절감 효과가 나타날 것이며, 10년 후에는 약 354억원의 공사비용 절감으로 인한 경제적 상승효과가 유발될 것으로 예측됨.
- PS파형웨브 합성보와 같은 슬림플로어가 적용된 국내의 삼성화재 청량리 사옥은 일반 철골구조물로 신축한 것에 비해 층고는 약 4.35 m정도 절감하였으며, 용적률은 23.55%가 증가하는 효과가 발생하였고, 연면적은 약 123평이 증가한 것으로 분석되었음.
- 죽전 신세계 백화점에 적용된 슬림플로어의 층별 층고 절감 효과는 1~2층에서는 발생하지 않으나, 3층부터 발생하여 약 0.4m의 총 층고 절감 효과가 발생하였으며, 장지간 건물에서도 층고절감 효과가 나타날 수 있다는 적용사례를 보여주었음.
- 이러한 국내 적용사례로 인한 장점에도 불구하고, 슬림플로어 시스템이 광범위 하게 사용

되지 못하는 이유는 현행 인증체계에서는 내화인정을 받지 못하기 때문에, 피복도포로 인한 경제성 상실로 인한 타 구조형식과의 경쟁력 저하에 있음.

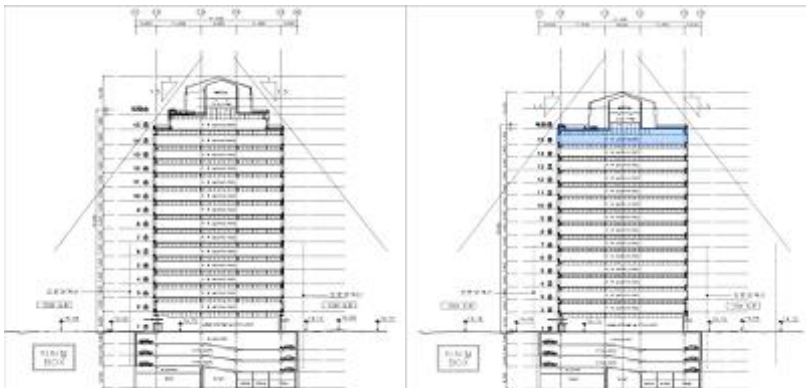
- 따라서 더욱 향상된 내화성능확보를 위하여 지난 3년의 연구기간동안 PS파형웨브 합성보의 무피복 장스팬 내화공법에 대하여 연구하였으며, 웨브의 형상, 텐던의 편심 등 다양한 변수를 고려한 실험적 연구와 해석적 연구를 수행하였음.
- 그 결과 어떠한 내화보강없이도 3시간 내화성능시간을 확보할 수 있었으며, 이 연구결과를 근거로 현재 PS파형웨브 합성보의 무피복 3시간 내화구조인정(7.5m)을 추진중에 있음.
- 내화구조인정이 완료되면, 건설신기술을 추진할 예정이며, 이를 통해 참여기업의 기술경쟁력을 제고할 수 있을 것이라 판단됨.

<표 4.4> 합성플로어 & 일반 철골구조물 경제성 분석

구분		일반철골	합성플로어	대비	비고
건축가능 지상층수		22층	24층		· 상업용[사무실건축] · 층고절감 0.25m/층 · 774평 증가[▲9%] · 141천원 감소[△18%]
바닥면적(평)		387	387		
연면적(평)		8,514[1.00]	9,288[1.09]		
층고(m)		3.90	3.65	[0.94]	
최고높이(m)		95.2	96.9	[1.02]	
사용면적(m)		8,514	9,288	[1.09]	
골조공사비	평당(천원)	790	649	[0.82]	
	전체(백만원)	6,726	6,026	[0.90]	



(a) 삼성화재 청량리사옥 (b) 변경 전 단위 평면 (c) 변경 후 평면도



(d) 변경 전 층고 현황 (e) 변경 후 층고 현황

[그림 4.7] 청량리 삼성화재 합성플로어 적용사례



(a) 건물 현황 (b) 장지간 건물평면도

[그림 4.8] 죽전 신세계 백화점

<표 4.5> 삼성화재 청량리 사옥공사와 신세계 백화점 신축공사 비교

	구분	적용전	적용후	비고
삼성화재 청량리 사옥 신축공사	대지면적	1,719.5㎡	좌동	
	용도	업무시설, 근린생활시설	좌동	
	층수	지하4층, 지상15층	좌동	
	건물높이	67.25m	62.9㎡	4.35m 감소
	건축면적	1,022.61㎡[309.34평]	좌동	
	연면적	18,706.51㎡ [5,658.69평]	19,111.54㎡ [5,781.24평]	약 123평 증가
	건폐율	59.47%	좌동	
	용적율	817.39%	840.94%	23.55% 증가
	주차대수	88대	좌동	
신세계 백화점 신축공사	구분	층고(m)		비고
		변경전	변경후	
	1층	6.4	6.4	
	2층	5.4	5.4	
	3층	4.2	4	
	4층	4.2	4	

(1) 경쟁기술 대비 가격경쟁력

(가) 실 구조물 적용 구조설계를 통한 구조공법별 경제성 평가

○ 비교대상 공법: 일반철골합성보, 콘크리트 RC보, PS파형웨브 합성보

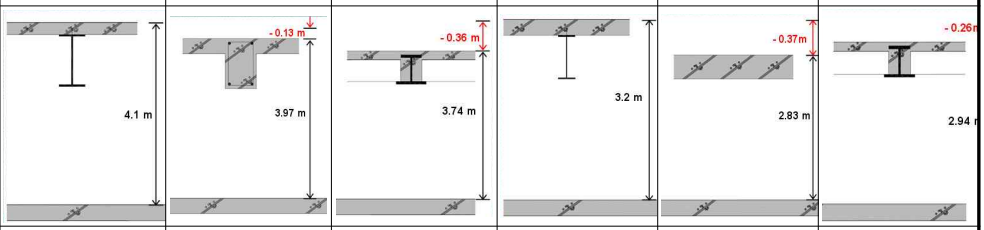
○ 대상건물: 역삼동 D벤처센터[23층], 센텀시티 C주상복합[60층]

각각의 시스템별로 구조 설계한 대상건물에 대해 기준층 층고 및 건물높이를 비교하였으며, STEEL, 콘크리트, 철근, 거푸집, 내화피복, 마감에 대해 물량검토를 파악하여 비교하였다. 최종적으로 각각의 시스템별 골조와 외부마감의 총공사비를 계산하여 PS파형웨브 합성보 시스템을 적용하였을 경우에 대한 경제성 평가를 수행하였다.

① 건물높이[층고절감효과]

층고에 영향을 미치는 대표적인 거더의 크기와 슬래브 두께를 앞장에서 살펴보았다. 이 부재들을 적용한 각 시스템별 기준층 층고는 다음과 같으며, 전체 건물높이 또한 표 2-26에서 비교할 수 있다.

<표 4.6> 각 시스템별 기준층 층고 비교

구 분	역삼동 D 벤처센터			센텀시티 C 주상복합		
	ALT1	ALT2	ALT3	ALT1	ALT2	ALT3
천 정 고	3.368 m	3.368 m	3.368 m	2.55 m	2.55 m	2.55 m
기 준 층 층 고						
	4.1 m	3.97 m	3.74 m	3.2 m	2.83 m	2.94 m
전체높이	98.00 m	94.92 m	89.63 m	200.60 m	178.77 m	185.26 m

먼저, 23층 오피스 건물인 역삼동 D 벤처센터의 기준층 층고를 보면 STEEL 합성보 시스템의 기준층 층고는 4.1m이다. 같은 건물에 RC 보 거더 시스템을 적용하였을 경우 기준층 층고가 0.13m 감소된 3.97m이며, PS파형웨브 합성보 시스템을 적용하였을 경우는 층고가 0.36m 감소된 3.74m로 가장 적은 기준층 층고를 갖는다. 결과적으로 STEEL 합성보 시스템을 적용하였을 경우 98m인 건물 전체높이는 RC 보 거더 시스템의 경우 94.92m, PS파형웨브 합성보 시스템의 경우 89.63m로 PS파형웨브 합성보 시스템을 적용하였을 경우 건물 전체높이가 8.37m가 감소되는 효과를 기대할 수 있다.

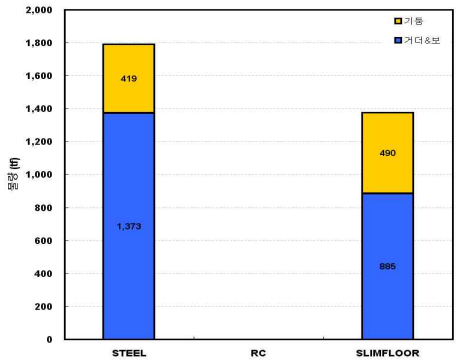
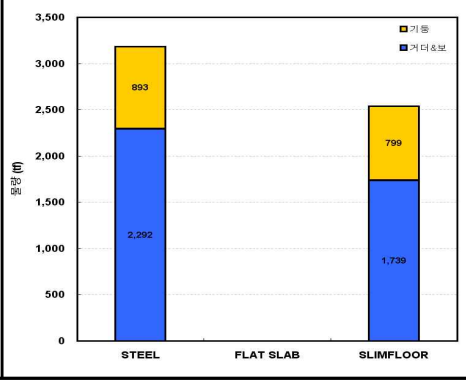
같은 방식으로 60층 주상복합 건물인 센텀시티 C 주상복합의 기준층 층고를 보면 STEEL 합성보 시스템의 기준층 층고는 3.2m이다. 같은 건물에 RC 플랫 슬래브 시스템을 적용하였을 경우 기준층 층고가 0.37m감소된 2.87m이며, PS파형웨브 합성보 시스템을 적용하였을 경우 층고가 0.26m 감소된 2.94m임을 알 수 있다. 이러한 결과로 STEEL 합성보 시스템을 적용하였을 경우 200.6m인 건물 전체높이는 RC 플랫 슬래브 시스템을 적용하였을 경우 178.77m로 21.83m의 높이가 감소되는 것을 알 수 있으며, PS파형웨브 합성보 시스템을 적용하였을 경우 또한 185.26m까지 전체높이를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

② 물량비교[공사비 절감효과]

○ STEEL

STEEL 시스템과 PS파형웨브 합성보 시스템이 적용된 건물에 대해 철골물량을 다음과 같이 비교하였다.

<표 4.7> 철골 물량 비교 (tf)

구 분	역삼동 D 벤처센터			센텀시티 C 주상복합		
	ALT1	ALT2	ALT3	ALT1	ALT2	ALT3
거더, 보	1,373	-	885	2,292	-	1,739
기 둥	419	-	490	893	-	799
전체 철골 물량						

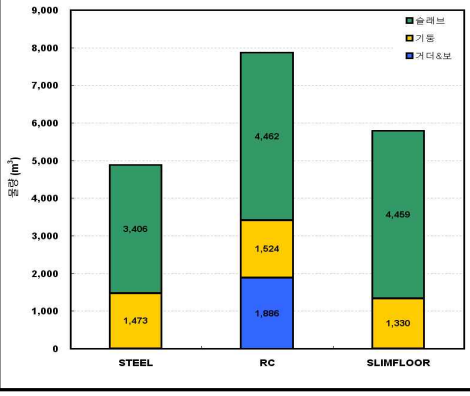
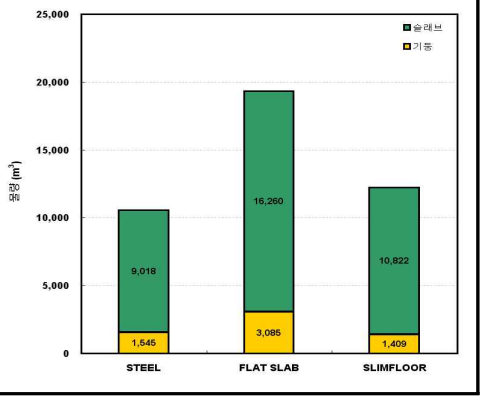
거더와 보의 강재물량을 살펴보면 STEEL 시스템을 적용하였을 때보다 PS파형웨브 합성보 시스템을 적용한 경우 역삼동 D 벤처센터는 488 ton의 철골물량이 감소되었으며, 센텀시티 C 주상복합은 553 tf의 철골물량이 감소되었다. 이는 PS파형웨브 합성보 시스템을 적용하면서 서브보를 생략할 수 있기 때문으로 사료된다.

철골기둥을 살펴보면 역삼동 D 벤처센터는 STEEL 기둥보다 PS파형웨브 합성보 시스템의 SRC 기둥의 단면이 다소 커졌고, 센텀시티 C 주상복합은 STEEL 기둥과 PS파형웨브 합성보 시스템의 SRC기둥의 단면이 동일하다. 그러나 앞서 살펴본 층고의 영향으로부터 PS파형웨브 합성보를 적용한 시스템의 기둥 강재물량이 절감되어 전체 강재물량은 PS파형웨브 합성보를 적용한 시스템이 STEEL 시스템보다 역삼동 D 벤처센터와 센텀시티 C 주상복합건물에 대해 각각 417 ton, 647 ton의 절감효과가 있는 것을 알 수 있다.

○ 콘크리트

STEEL 시스템, RC 시스템 그리고 PS파형웨브 합성보 시스템이 적용된 건물에 대해 콘크리트 물량을 다음과 같이 비교하였다.

<표 4.8> 콘크리트 물량 비교 (m^3)

구 분	역삼동 D 벤처센터			센텀시티 C 주상복합		
	ALT1	ALT2	ALT3	ALT1	ALT2	ALT3
거더, 보	-	4,886	-	-	-	-
기 둥	1,473	1,524	1,330	1,545	3,085	1,409
슬 래 브	3,406	4,462	4,459	9,018	16,260	10,822
전 체 콘크리트 물 량						

기둥의 콘크리트 물량을 살펴보면, 먼저 역삼동 D 벤처센터의 경우 철골 시스템과 PS파형웨브 합성보를 적용한 시스템의 SRC 기둥은 크기는 같지만, 층고감소와 H형강의 크기 증가로 PS파형웨브 합성보를 적용한 시스템의 기둥의 콘크리트 물량은 STEEL보다 143 m^3 절감되며, RC 보 거더 시스템보다도 194 m^3 이 절감된다. 마찬가지로 센텀시티 C 주상복합도 PS파형웨브 합성보 시스템의 기둥 콘크리트 물량이 STEEL 보다 136 m^3 절감되며, RC 플랫 슬래브 시스템보다도 1,676 m^3 절감된다.

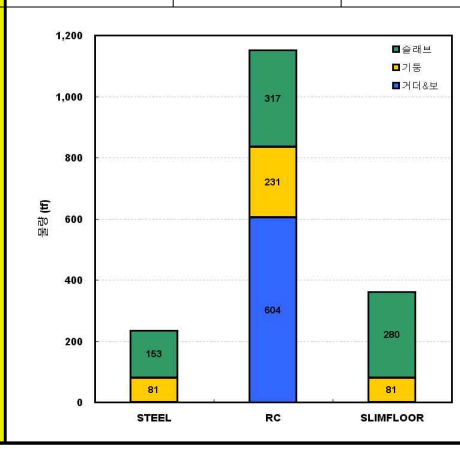
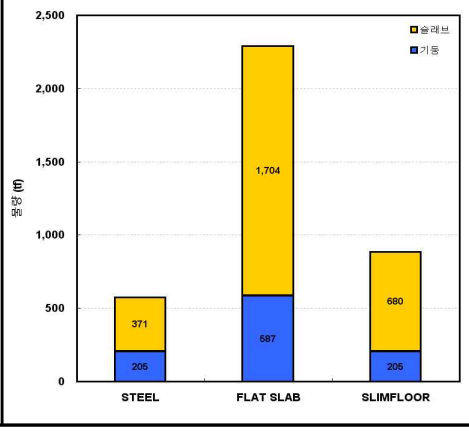
슬래브의 콘크리트 물량을 살펴보면, 각 시스템 중 PS파형웨브 합성보 시스템을 적용한 슬래브 두께가 얇아 콘크리트 물량 또한 가장 적게 나타났다.

○ PS파형웨브 합성보 시스템을 적용하였을 경우 전체 콘크리트 물량을 비교해 보면 역삼동 D 벤처센터는 STEEL 시스템보다 910 m^3 이 증가하지만 RC 보 거더 시스템보다 2,083 m^3 절감된다. 센텀시티 C 주상복합은 STEEL 시스템보다 1,168 m^3 증가하지만 RC 플랫슬래브 시스템 보다는 7,114 m^3 만큼 절감되는 것을 알 수 있다.

○ 철근

STEEL 시스템, RC 시스템 그리고 PS파형웨브 합성보 시스템이 적용된 건물에 대해 철근 물량을 다음과 같이 비교하였다.

<표 4.9> 철근 물량 비교 (ton)

구 분	역삼동 D 벤처센터			센텀시티 C 주상복합		
	ALT1	ALT2	ALT3	ALT1	ALT2	ALT3
거더, 보	-	604	-	-	-	-
기 둥	81	231	81	205	587	205
슬 래 브	153	317	280	371	1,704	680
전 체 철 근 물 량						

기둥의 철근 물량을 살펴보면, STEEL과 PS파형웨브 합성보를 적용한 시스템은 SRC기둥을 사용하고, RC 보 거더 시스템과 플랫슬래브 시스템은 순수 RC기둥을 사용한다. 따라서 RC를 적용한 시스템의 철근 물량은 다른 시스템에 비해 많다.

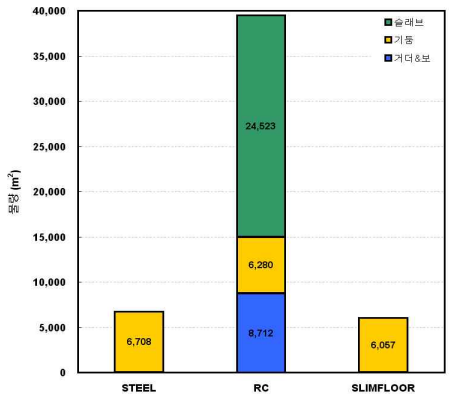
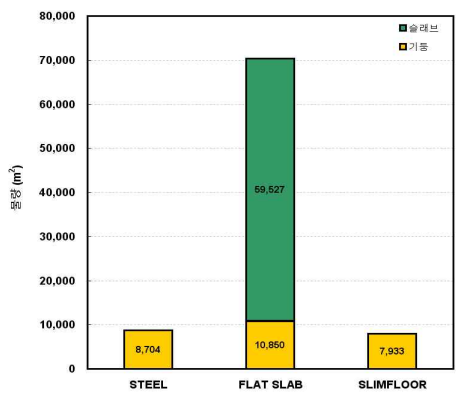
슬래브 철근 물량을 살펴보면, PS파형웨브 합성보 시스템이 STEEL 시스템보다 역삼동 D 벤처센터와 센텀시티 C 주상복합 각각 127 ton와 309 ton 만큼 증가하지만 RC를 적용한 시스템 보다는 각각 37 ton 와 1,024 ton 만큼 절감된다.

결과적으로 전체 철근물량을 살펴보면, PS파형웨브 합성보를 적용한 시스템은 STEEL 시스템보다는 다소 증가하지만, RC를 적용한 시스템보다는 절감됨을 알 수 있다.

○ 거푸집

- STEEL 시스템, RC 시스템 그리고 PS파형웨브 합성보 시스템이 적용된 건물에 대해 거푸집 물량을 다음과 같이 비교하였다.

<표 4.10> 거푸집 물량 비교 (m^2)

구 분	역삼동 D 벤처센터			센텀시티 C 주상복합		
	ALT1	ALT2	ALT3	ALT1	ALT2	ALT3
거더, 보	-	8,712	-	-	-	-
기 둥	6,708,	6,280	6,057	8,704	10,850	7,933
슬 래 브	-	24,523	-	-	59,527	-
전 체 거 푸 집 물 량						

기둥의 거푸집 물량을 살펴보면, STEEL과 PS파형웨브 합성보를 적용한 시스템은 동일한 크기의 기둥을 사용하지만, 층고의 영향으로 인해 PS파형웨브 합성보를 적용한 시스템의 거푸집 물량은 STEEL 시스템보다 절감되고 RC를 적용한 보 거더 시스템과 플랫슬래브 시스템보다도 절감되는 것을 알 수 있다.

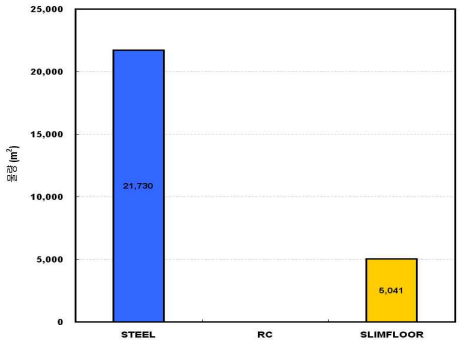
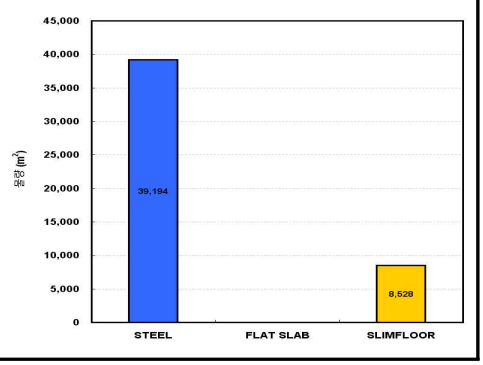
전체 거푸집 물량을 살펴보면, STEEL과 PS파형웨브 합성보를 적용한 시스템은 각각 트러스 데크와 춤이 깊은 데크를 사용하기 때문에 슬래브 거푸집을 사용하지 않아 RC가 적용된 시스템과 많은 차이가 남을 알 수 있다.

따라서 전체 거푸집 물량은 역삼동 D 벤처센터의 경우 STEEL 시스템은 6,708 m^2, RC 보 거더 시스템은 39,515 m^2 그리고 PS파형웨브 합성보를 적용한 시스템은 6,057 m^2이며, 센텀시티 C 주상복합의 경우 STEEL 시스템은 8,704 m^2, RC 플랫슬래브 시스템은 70,377 m^2 그리고 PS파형웨브 합성보를 적용한 시스템은 7,933 m^2임을 알 수 있다. 결론적으로 PS파형웨브 합성보 시스템을 적용한 경우 RC를 적용한 시스템보다 거푸집 물량이 현저히 적은 것을 알 수 있다.

○ 내화피복

STEEL 시스템과 PS파형웨브 합성보 시스템이 적용된 건물에 대해 내화피복 물량을 다음과 같이 비교하였다.

<표 4.11> 내화피복 물량 비교 (m^2)

구 분	역삼동 D 벤처센터			센텀시티 C 주상복합		
	ALT1	ALT2	ALT3	ALT1	ALT2	ALT3
거더, 보	21,730	-	5,041	39,194	-	8,528
전 체 내화피복 물 량						

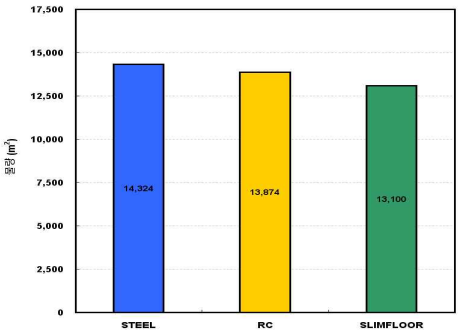
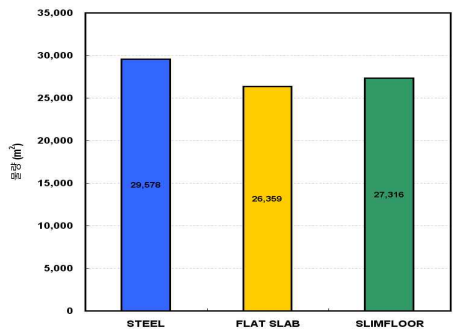
STEEL 시스템과 PS파형웨브 합성보 시스템은 거더와 보로써 철골을 사용하기 때문에 내화피복이 필수적이다.

일반 H형강을 사용하는 STEEL 시스템에 비해서 비대칭 H형강과 춤이 깊은 데크플레이트로 구성된 PS파형웨브 합성보 시스템의 경우는 강재의 하부 플랜지를 제외한 부분이 콘크리트로 둘러싸여있기 때문에 내화피복 면적이 감소되어 내화피복 물량이 현저히 적음을 알 수 있다.

○ 외부마감

STEEL 시스템, RC 시스템 그리고 PS파형웨브 합성보 시스템이 적용된 건물에 대해 외부마감 물량을 다음과 같이 비교하였다.

<표 4.12> 외부마감 물량 비교 (m^2)

구 분	역삼동 D 벤처센터			센텀시티 C 주상복합		
	ALT1	ALT2	ALT3	ALT1	ALT2	ALT3
	14,324	13,874	13,100	29,578	26,359	27,316
전체 외부마감 물량						

외부마감의 물량은 건물의 전체 높이에 따른다. 앞서 비교한 각 시스템별 건물 전체높이로부터 알 수 있듯이 역삼동 D 벤처센터의 경우 가장 층고저감에 효과적인 PS파형웨브 합성보 시스템이 외부마감 물량 또한 가장 적은 것을 알 수 있다.

센텀시티 C 주상복합의 경우는 RC 플랫슬래브 시스템보다는 외부마감 물량이 957 m^2 만큼 다소 증가하지만, STEEL 시스템보다는 2,262 m^2 의 외부마감 절감이 있음을 알 수 있다.

○ 총공사비

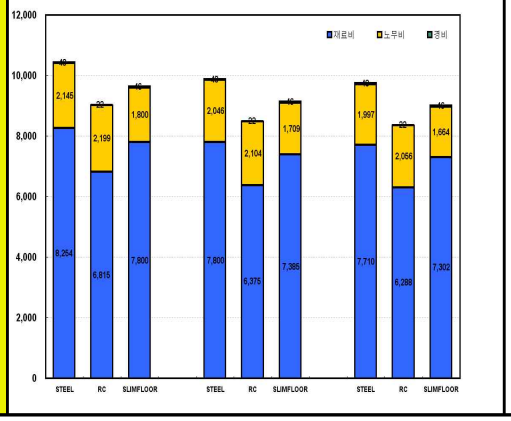
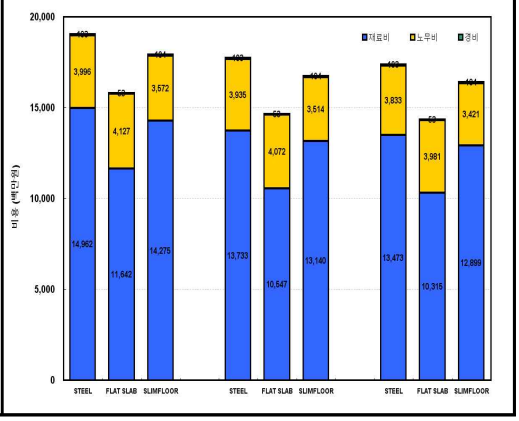
총공사비는 골조와 외부마감의 총공사비의 합으로 계산한다. 골조의 총공사비는 재료비, 직접노무비, 직접 경비의 합으로 계산한다. 외부마감재의 상 중 하를 적용하였을 때 각각의 총공사비는 다음과 같다.

<표 4.13> 외부마감재 적용에 따른 총공사비 (천원)

구 분			역삼동 D 벤처센터			센팀시티 C 주상복합		
			ALT1	ALT2	ALT3	ALT1	ALT2	ALT3
마감상	골조	재료비	2,636,574	1,373,588	2,662,218	5,897,262	3,564,201	5,903,037
		노무비	1,541,767	1,614,869	1,247,784	2,935,668	3,181,564	2,592,090
		경 비	47,921	21,864	46,150	103,451	53,136	103,514
	마감	재료비	5,617,830	5,441,341	5,137,781	9,065,391	8,078,796	8,372,108
		노무비	603,284	584,331	551,733	1,060,992	945,524	979,852
		경 비	0	0	0	0	0	0
	합 계		104,473,686	9,035,993	9,645,666	19,062,765	15,823,223	17,950,604
마감중	골조	재료비	2,636,584	1,373,588	2,662,218	5,897,262	3,564,201	5,903,037
		노무비	1,541,767	1,614,869	1,247,784	2,935,668	3,181,564	2,592,090
		경 비	47,921	21,864	46,150	103,451	53,136	103,514
	마감	재료비	5,163,759	5,001,535	4,722,511	7,835,774	6,983,000	7,236,527
		노무비	504,706	488,850	461,579	999,115	890,381	922,707
		경 비	0	0	0	0	0	0
	합 계		9,894,737	8,500,706	9,140,242	17,771,270	14,672,282	16,757,875
마감하	골조	재료비	2,636,584	1,373,588	2,662,218	5,897,262	3,564,201	5,903,037
		노무비	1,541,767	1,614,869	1,247,784	2,935,668	3,181,564	2,592,090
		경 비	47,921	21,864	46,150	103,451	53,136	103,514
	마감	재료비	5,093,519	4,914,129	4,639,981	7,575,488	6,751,041	6,996,147
		노무비	455,403	441,096	416,488	897,308	799,653	828,685
		경 비	0	0	0	0	0	0
	합 계		9,775,194	8,365,546	9,012,621	17,409,177	14,349,595	16,423,473

위의 표에서 알 수 있듯이 PS파형웨브 합성보 시스템을 적용하였을 경우 총공사비는 RC 시스템을 적용하였을 때 보다 다소 증가되지만 STEEL 시스템을 적용하였을 때보다는 절감된다. 다음은 외부마감재의 상 중 하를 적용하였을 때 각 시스템별 총공사비의 비교를 나타낸다.

<표 4.14> 각 시스템별 총공사비 비교

구 분	역삼동 D 벤처센터	센텀시티 C 주상복합
총공사비 비 교		

③ 구조공법별 경제성분석 소결

본 연구는 PS파형웨브 합성보를 적용한 시스템의 경제성을 평가하기 위해 규모와 용도가 다른 두 건물을 선정하여 시스템별 구조해석을 수행하였다. 이를 바탕으로 건물 높이, 물량, 총공사비에 대한 경제성 평가를 하였으며, 각 시스템별로 비교하여 그 결과는 다음과 같다.

○ 23층 오피스 건물 (역삼동 D 벤처센터)

○ PS파형웨브 합성보 시스템 적용 시 층고절감으로 인해 건물 높이가 STEEL 시스템보다 8.37m, RC 보 거더 시스템보다 5.29m 감소하여 높이에 대한 경쟁력을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

또한 층고절감과 동시에 PS파형웨브 합성보를 적용한 시스템의 총공사비는 RC 보 거더 시스템보다는 약 6.7% 증가하지만, STEEL 시스템보다 약 7.6% 감소한다.

○ 60층 주상복합 건물 (센텀시티 C 주상복합)

○ PS파형웨브 합성보 시스템 적용 시 건물 높이가 RC 플랫슬래브보다 6.49m가 증가하지만, 층고절감으로 인해 STEEL 시스템보다 15.34m 감소하여 층고절감에 대해서는 RC 플랫슬래브 보다는 경쟁력이 다소 떨어지지만 STEEL 시스템보다는 유리함을 알 수 있다.

또한 PS파형웨브 합성보를 적용한 시스템의 총공사비는 RC 플랫슬래브보다는 약 13.4% 증가하지만, STEEL 시스템 보다는 약 5.8% 감소한다.

○ PS파형웨브 합성보 시스템과 STEEL 시스템

PS파형웨브 합성보 시스템은 춤이 깊은 데크 또는 Hollow core slab 철골 하부플렌지에 설치하는 슬림플로어 시스템이기 때문에 층고절감 효과를 가질 수 있다. 일반 STEEL 시스템의 경우 약 8~10m 내외의 사무용 또는 주거용 평면을 지지하기 위해서는 약 600 mm 정도의 보 춤에 슬래브 두께가 추가적으로 요구되는데 반해 PS파형웨브 합성보 시스템은 350mm 내외의 보춤과 춤이 깊은 데크를 활용하여 총 구조체 높이가 450 mm 이내로 해결 가능하다. 그 결과 일반 STEEL 시스템에 비해 각 층 당 약 300~350 mm의 층고절감효과가 나타난다. 또한 비대칭 H형강의 웨브에 설비 오프닝을 계획함으로써 일반 철골보와 마찬가지로 설비공간의 절감효과도 얻을 수 있다. 또한, PS파형웨브 합성보 보의 상당부분이 콘크리트에 매립되어있기 때문에 내화피복 절감효과 또한 있다. 비대칭 H형강 하나의 중량은 일반 철골보에 비해 크지만 작은 보를 모두 없앨 수 있기 때문에 전체적인 건물의 중량은 감소하게 된다. 이러한 이유들로 일반 STEEL 시스템에 비해 PS파형웨브 합성보 시스템은 약 6 ~ 7 %의 시공비 절감 효과를 예상할 수 있다.

○ PS파형웨브 합성보 시스템과 RC 보 거더 시스템

8m에서 10m 내외경간길이를 갖는 사무용 또는 주거용 평면을 지지하기 위해서 일반 RC 라멘 구조의 경우, 약 600 mm 정도의 보춤이 요구되는데 반해 PS파형웨브 합성보 시스템은 350 mm 내외의 보와 춤이 깊은 데크를 활용하여 총 구조체 높이가 450 mm 이내로 해결 가능하다. 그 결과 일반 철골 구조에 비해 층당 약 150~200 mm 정도의 층고절감효과가 나타난다. 그러나 공사비 면에서 노무비가 PS파형웨브 합성보 시스템이 더 작다하더라도, RC 보 거더 시스템은 내화피복에 대한 비용 절감 등으로 PS파형웨브 합성보 시스템보다 재료비가 거의 50% 수준으로, 총공사비에서는 RC 보 거더 시스템이 약 6~10% 정도 경제적일 수 있다..

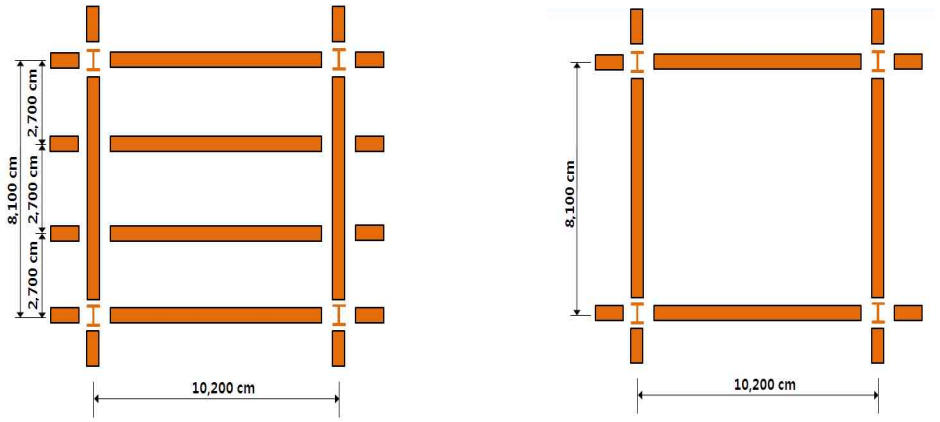
○ PS파형웨브 합성보 시스템과 RC 플랫슬래브 시스템

RC 플랫슬래브 시스템의 경우, 슬래브 두께는 보통 250~300 mm를 사용하기 때문에 PS파형웨브 합성보 시스템보다 약 150~200 mm정도 층고절감의 효과를 나타낸다. 층고절감으로 인해 건물 전체높이가 감소하고 RC 보 거더 시스템과 마찬가지로 내화피복에 대한 비용 절감으로 RC 플랫슬래브 시스템 역시 PS파형웨브 합성보 시스템보다는 총공사비는 약 13~15% 더 경제적이다. 층고절감이 가능한 PS파형웨브 합성보 시스템은 기존 STEEL 시스템 방식에 비해 춤의 높이 감소로 층고를 절감할 수 있어 결과적으로 두 사례를 살펴봤을 때 층고절감 및 작은보를 절감시키는 효과가 있다. 또한, PS파형웨브 합성보 보의 상당부분이 콘크리트에 매립되어있기 때문에 일반 STEEL 시스템에 비해 내화피복 절감에 효과적일 수 있으며, RC를 적용한 시스템에 비해 비대칭 H형강의 웨브에 설비 오프닝을 계획함으로써 일반 철골보와 마찬가지로 설비공간의 절감효과도 얻을 수 있을 것이다. 건식공법의 특성상 RC를 적용한 시스템보다 공기단축이 예상되며, 전체 건

물높이가 감소되어 사선제한, 고도제한 등의 건축법 및 허가조건으로 불이익을 피할 수 있고, 건물의 층수가 높은 건물일수록 RC를 적용한 시스템보다 공사기간을 크게 단축시킬 수 있을 것이다.

○ 내화성능 확보기반 경제성 분석

일반적인 완전 노출형 합성보 공법, 기존의 슬림플로어 공법 및 PS파형웨브 합성보 공법을 적용했을 때 발생되는 내화보강비용에 대하여 분석하였다. 그림 4.13에 나타낸 사무실 용도의 평면을 대상으로 검토하였으며, 표 4.16에는 사용된 골조의 재원을 나타내었다.



(a) 일반 합성보 (b) 슬림플로어 및 PS파형웨브 합성보

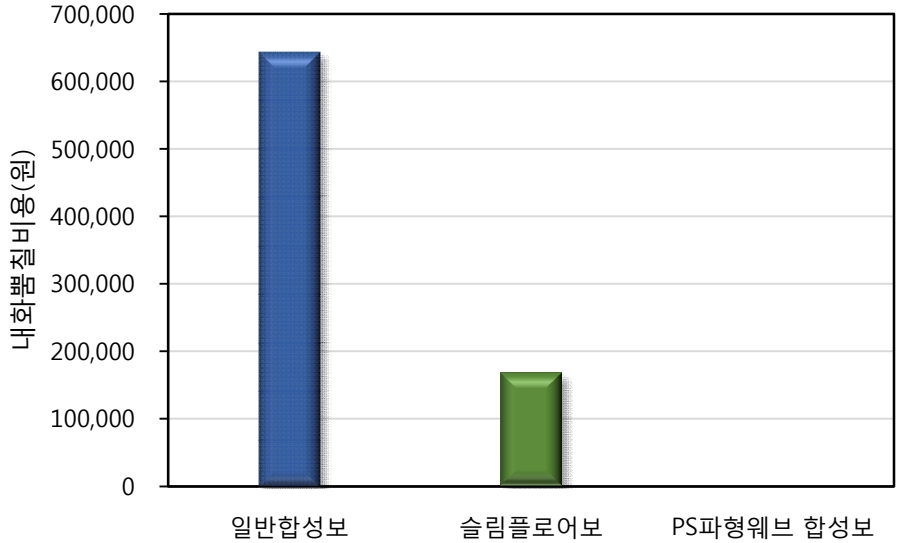
[그림 4.13] 기본모듈 평면도

<표 4.16> 부재 리스트

거 더	일반 합성보	H-500×200×10×16	(SM490A)
	슬림플로어 보	SB-336×240/350×18×30	(SM490A)
	PS 파형웨브 합성보	SB-328×238/348×16×26	(SM490A)
슬래브	일반 합성보	137.5mm	(데크슬래브)
	슬림플로어 보	100mm	(DEEP 데크슬래브)
	PS 파형웨브 합성보	100mm	(DEEP 데크슬래브)

일반 합성보 공법을 사용할 경우 그림 4.13에 나타낸 평면에 대하여 골조가 3시간의 요구내화성능시간을 만족하기 위해서는 일반 합성보의 경우 철골보의 상부플렌지를 제외한 모든 면에 29mm의 두께로 내화뿜칠이 필요하고, 기존의 슬림플로어의 경우에는 하부플렌지에만 내화뿜칠이 필요한 것으로 평가되었다. 반면에 PS파형웨브 합성보 공법을 사용할 경우 내화뿜칠과 같은 별도의 내화

보강은 요구되지 않으며, 이를 약 10 m x 8 m 평면에 대하여 금액으로 환산하여 비교하면, 일반 합성보 공법대비 643,992원, 기존의 슬림플로어 공법대비 168,067원의 절감효과를 확보할 수 있는 것으로 나타났다.



[그림 4.14] 기본모듈 당 사양적 내화설계에 따른 내화비용 비교

제5절 연구개발 성과의 정책적 효과분석

- 초고층·및 장경간 건축물에 대형 화재가 발생하게 되면 무엇보다 수많은 인명피해가 발생하며, 경제적 손실 또한 상당히 크게 발생하게 됨. 내화성능에 관한 기술력 및 신뢰성을 확보한 층고절감형 PS파형웨브 합성보는 초고층·및 장경간 건물에 적용되어 기본적으로 화재로 인한 국가적 재난 참사를 방지할 수 있음.
- 장스팬 합성구조 내화성능확보 구조공법이 마련되면 이와 관련된 내화피복 절감등의 경제성이 확보되므로, 현장적용 활성화를 통해 국내의 건설산업시장에의 비용절감을 통한 경제성 확보가 기대됨.
- 층고절감형 PS파형웨브 합성보의 내화성능 확보기술의 개발을 통해 현장시공이 보다 용이해져 공기단축을 통한 추가적인 경제적 성과를 얻을 수 있으며 이러한 이점을 바탕으로 합성보의 활용성이 극대화할 수 있음.
- 층고절감형 PS파형웨브 합성보의 내화성능 설계지침의 개발 및 관련 연구를 통해 국가적인 기술경쟁력을 확보하여 기존의 해외 기술을 도입하지 않고 자체기술력을 활용한 내화성능 확보.
- 관련 산업시장의 지속적인 발전을 계기로 삼아 해외시장 진출을 도모 할 수 있어 국가적 경제성장 기대.

○ 민간 애로기술 해결[무피복화 → 친환경 건설구조공법 구현가능]

기존의 합성구조의 경우 하부 플랜지에 내화피복을 해야 하는 법정요구내화시간인 3시간을 만족할 수 있었으나, 피복재 도포공법의 경우 화재시 유독가스 발생 및 피복 도포시 추가적인 공정·비용발생과 품질확보 등의 문제점 발생.

이로 인해 민간 시공사에서는 철골구조부재를 건물에 적용할 경우 피복설계시의 문제점 및 내화구조 인정 등의 문제점 때문에 기술적 애로사항 발생.

이를 해결하기 위해 화재시 내력저하 및 횡 비틂 좌굴 제어를 위한 파형웨브도입과 중앙부 처짐제어를 위한 프리스트레스 도입을 통해 장스팬 합성구조의 무피복 조건에서 법정내화 요구시간인 180분 내화성능의 확보가 가능함.

이러한 기술적 해결을 기반으로 층고절감·공기단축·물량절감·내화성능확보 등의 장점을 보유한 당해 구조공법 기술의 현장적용 활성화가 가능함.

기술명	기술현황	기술분야	문제점
뿜칠 피복	특허등록	뿜칠재 도포 내화공법	건물 내부에 사용하기에는 미관상 문제점 뿜칠재 두께에 따른 내화성능 인정체계로 인한 시공품질[뿜칠두께 미확보] 하자 발생 추가적인 공사비 및 공정발생에 따른 비용상승 발생
도료 피복	특허등록	내화도료 도포내화공법	2시간 내화성능 인정자재만이 존재 급격한 화재노출시 도료 융해로 구조체 붕괴요인상존 자재비가 고가이며, 시공시 기술력에 따른 구조체 품질확보 불리
보드 피복	특허등록	내화보드 내화공법	보드자체의 자재비가 고가임. 내화보드 적용시 변형에 따른 보드 파손을 통한 열 침투 가능성[급격한 붕괴요인]

1. 수입기술 대체가능성

가. 합성플로어 관련 외국기술 동향

세계 제일의 합성플로어 관련 기술을 가진 영국은 1990년대 초부터 Corus(British Steel)의 전폭적인 지원과 SCI의 우수한 연구 인력의 산-연 협력 관계를 지속시켜 관련 기술력을 향상시켰다.

세부 기술력 확보를 위해 네덜란드의 화재관련 전문기관인 TNO, 영국의 WFRC에서 합성플로어의 내화성능 분석 연구를 수행하였으며, 합성슬래브는 Salford Univ., 합성보 실험은 City Univ.에서 수행하여 최적 합성플로어 시스템 기술력 확보를 달성하였다.

캠브리지 대학에서는 ASB 상현재를 사용한 12 m span Proto-Type Sturb Girder System의 성능실험이 수행되었으며, 4-Bay slim deck System 내화실험이 BRE Cardington에서 수행되었으며, 독일에서는 기존의 합성플로어의 단순 접합 방식보다 진보된 접합 디테일에 관한 연구를 수행하고 있으며, Kaiserslautern 대학에서 SlimDeck에 관한 8개의 슬래브 실험을 실시하였고, 3개의 ASB 관련 실험을 진행하여 SD 255를 적용한 합성슬래브 실험을 Eurocode 4 설계에 접목시켰다.

핀란드는 스웨덴과 함께 1980년 초에 슬림플로어 개념을 최초로 도입하여 개발한 나라로서 합성보의 모멘트 접합부에 관한 연구를 수행하여 Top Hat 형상을 개발하였으며, 최근 델타 빔을 사용한 합성플로어 시스템을 개발하여 접합부를 포함한 부재들의 일괄된 시스템에 의한 부품화·규격화를 추진하여 광범위하게 사용될 기반을 마련하였다.



(a) Major residential project, Bristol | (b) Office building, Perth

(c) Innovation Centre. Berlin | (d) ASB 골조공사

[그림 4.14] 비대칭H형강 합성플로어 선진외국 적용사례

나. 합성구조 공법유형에 따른 장·단점 분석

(1) 국내합성구조 개발공법

그림 4.15에 나타낸 바와 같이 국내에서 연구 개발된 대표적인 합성보에는 iTECH 합성보, TSC 합성보, 강판 성형 합성보 및 토목 분야의 교량에 주로 사용되고 있는 다양한 형태의 합성보들이 있다. 그림 4.15-(a)에 보이는 iTECH 합성보는 기존에 개발된 TEC-BEAM과 A-TEC 합성보를 발전시켜 완성된 형태로, 층고절감, 모멘트 접합 가능, 철골 물량 절감, 일체성 및 연속성 확보, 웨브 개구부의 설비공간 활용 등의 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 웨브 개구부를 가진 철골보의 제작 과정이 다소 복잡하고 일체성 확보를 위한 철근 배근이 용이하지 않으며, 국내의 시공 여건상 실제 현장에서 웨브의 개구부를 설비공간으로 활용하는 것이 매우 어렵기 때문에 본래의 개발 목적과는 다르게 실질적인 층고절감의 효과를 보기가 쉽지 않다.

그림 4.15-(b)에 나타낸 TSC 합성보는 기둥이나 보의 외곽 구석에 ㄱ형강이나 ㄷ형강을 배치하고 그 사이를 철근 래티스로 조립한 후 외곽 면에 내화피복을 겸하는 영구 거푸집을 설치하여 콘크리트를 타설하는 강합성 콘크리트 구조에서 시작된 후 수정 발전되어 현장에 적용된 합성보이다. 그러나, 실제 시공 현장에서는 아직 내화재로 인정받지 못하고 있으며, 국내에서 주로 사용되는 철골모멘트 접합 상세가 일반 철골보에 비해 복잡한 측면이 있다.

강판성형 합성보는 그림 4.15-(c)에서 보는바와 같이 비대칭 절곡 강판을 서로 맞대어 용접된 형태로서 높이 조절 및 모멘트 접합 용이한 장점이 있으나, 제작공정이 까다로워 비용이 다소 증가되는 단점이 있다.

이 외에도 철골보에 미리 설계하중을 재하시킨 후 철골보의 하부 플랜지에 고강도 콘크리트를 타설하여 콘크리트에 압축 프리스트레스를 도입하는 프리플렉스 합성보(그림 4.15-(d) 참조), I-Girder의 둘레 형상으로 제작된 강재 내에 PS텐던을 배치하고 콘크리트를 타설한 SCP합성 공법, Steel Box Girder 및 파형강판 웨브 등의 토목구조용 합성보 들이 있으나, 주로 대형 교량에 적합하게 개발되어 층고절감에 비효율적이며, 모멘트 접합에 대한 고려가 없어서 건축물에 적용하는 데에는 많은 한계들이 있다.

(2) 국외 합성구조 개발공법

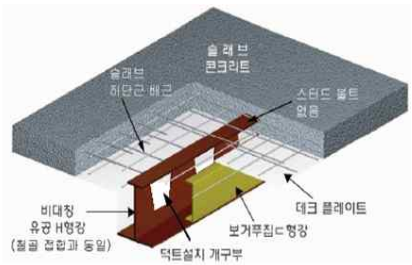
국외에서는 주로 유럽 및 북미를 중심으로 합성보에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 대표적인 예로는 그림 4.16에 나타낸 슬림플로어 시스템, Delta Beam 및 Flex Frame System 등이 있다.

슬림플로어 시스템은 그림 4.16(a)에 보이는 바와 같이 개구부를 가진 철골보와 데크플레이트 슬래브로 이루어진 층고절감형 합성구조 시스템으로 국내의 iTECH 합성보와 성격이 유사함.

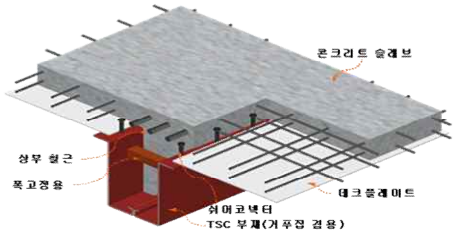
Delta Beam은12) 1989년 핀란드의 Deltatek사가 개발하여 현재 북유럽에서 주로 사용중인 합성보이다. 그림 4.16(b)에 나타낸 Delta Beam은 박스형태의 중공형 강재와 중공형 콘크리트 슬래브가

결합된 시스템으로, 비틀림 저항 및 내화성능이 우수하고 8m까지 무지주 시공이 가능하지만, 장경간을 실현하는 것은 매우 어려운 시스템이다.

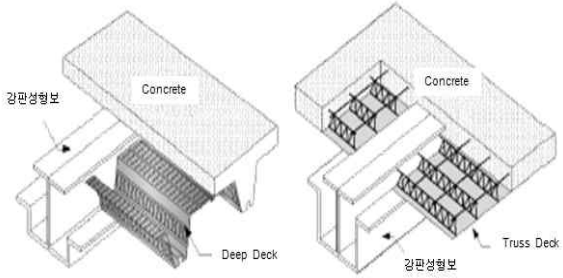
그림 4.16(c)에 보이는 Flex Frame System13)은 비대칭단면 철골보와 중공형 프리캐스트 슬래브를 사용하는 시스템으로 철골보의 형태는 다르지만 Delta Beam시스템과 유사한 장단점을 가지고 있다.



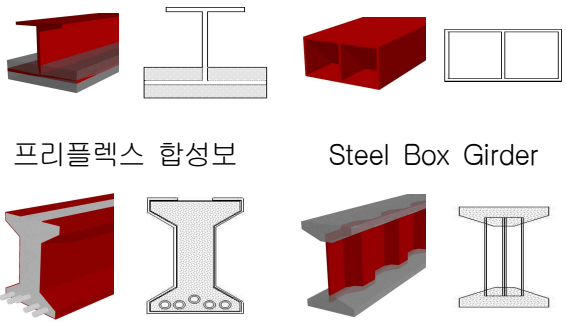
(a) iTECH 합성보



(b) TSC 합성보



(c) 강판성형 합성보

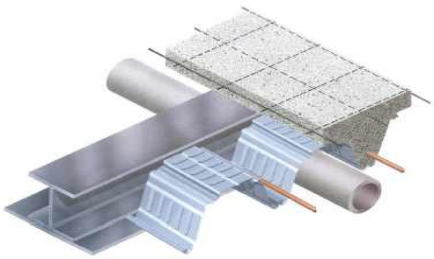


프리플렉스 합성보 Steel Box Girder

SCP 합성 공법 파형강판 웨브

(d) 토목분야의 합성보

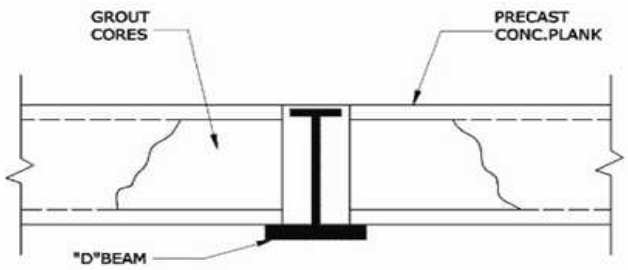
[그림 4.15] 국내의 합성보



(a) 슬림플로어 시스템



(b) Delta Beam

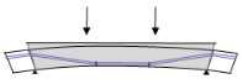
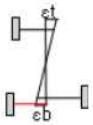
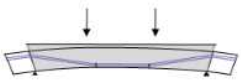
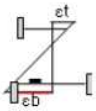
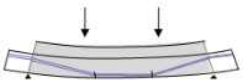
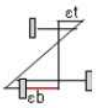
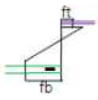
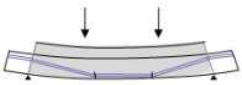


(c) Flex Frame System

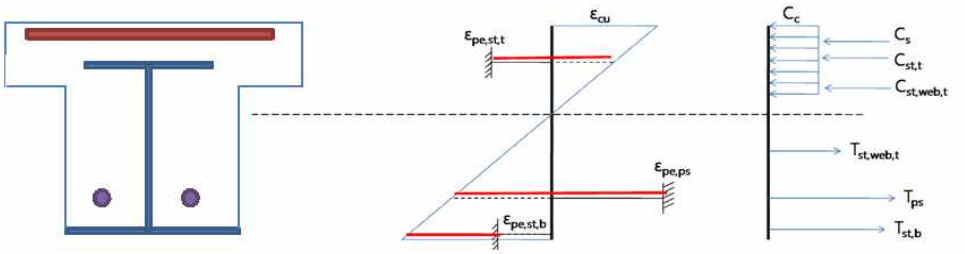
[그림 4.16] 국외의 합성보

다. 본 대상구조공법과 기존 합성구조 공법과의 차별성

- 앞서 언급된 기존 건축용 합성보들은 대부분 공기절감 및 층고절감에 그 개발 목적이 있으며, 장경간에 적합한 일부 토목 교량용 합성보들은 층고절감에 비효율적이며 긴장작업 공간의 제약에 대한 고려가 부족하며, 모멘트 접합이 매우 어려운 형태를 가지고 있음.
- 또한 많은 합성보 들이 시공하중에 대한 고려나 해석방법이 대체적으로 미흡하여 실제 거동과 상이한 경우가 많다. 따라서, 본 연구에서는 즉시 적용 가능한 층고절감형 장경간 합성보의 개발과 시공성능이 개선된 정착 및 긴장장치 개발 및 구조성능에 대한 해석방법의 제시 및 검증까지 포함하고자 하므로 기존 기술보다 향상시킬수 있는 연구를 수행하고자 함.
- 이를 위해 다음과 같은 특화된 기술을 개발함으로써 수입기술의 대체가능성을 사전에 차단할 연구계획을 수립하였음.
  - Point-1: 그림 4.17에 나타낸 바와 같이 철골보에 프리스트레스트를 도입한 후 콘크리트와의 합성을 통하여 철골구조 및 철근콘크리트구조의 단점이였던 처짐문제를 효과적으로 개선하여 단면의 증가없이 장경간 및 층고절감을 실현할 수 있는 구조성능을 확보한 시스템을 개발함
  - Point-2: 긴장장치 및 긴장방식에 대한 획기적인 개선을 통하여 프리스트레스트 도입시 현장적용의 어려움을 개선하여 시공성을 향상시키고, 무지주 공법을 사용하여 거푸집 및 가설재량을 현저히 줄임으로써 공기단축을 통하여 경제성도 아울러 향상시키고자 함
  - Point-3: 기존의 해석방법은 유한요소해석(Finite element analysis)이나, 완전합성을 가정한 단면해석에 의존하였다. 본 연구에서는 그림 4.17에 나타낸 바와 같이 부재의 설치부터 시공하중상태, 사용하중상태 및 극한상태까지 해석할 수 있는 단계적인 해석법을 도입하고자 하며, 간략하면서도 정확한 휨강도 및 휨거동 예측 모델을 개발하고자 함.
  - Point-4: 기존의 합성구조의 경우, 국내에서는 스팬길이가 7.5m이상인 합성구조의 경우 내화구조에 대한 성능검증이 이루어진 대상공법이 없으며, 무피복 상태로 3시간 내화성능을 확보한 구조공법이 없다. 이러한 문제점을 파형웨브와 프리스트레스 도입기술을 통해 해결함으로써 기존 합성구조 공법의 장스팬화를 구현하여 현장시공을 가능하게 할 수 있음.

단 계	실험체	변형률		응 력	
		철골보	콘크리트합성	철골보	콘크리트합성
철골긴장			-		-
콘크리트타설			-		-
시공하중		-		-	
사용하중		-		-	
초기항복하중		-		-	
극한강도		-		-	

(a) 하중단계별 해석



(b) 단면에서의 강도 및 휨거동 예측

[그림 4.17] 개발 합성보의 해석 개념도

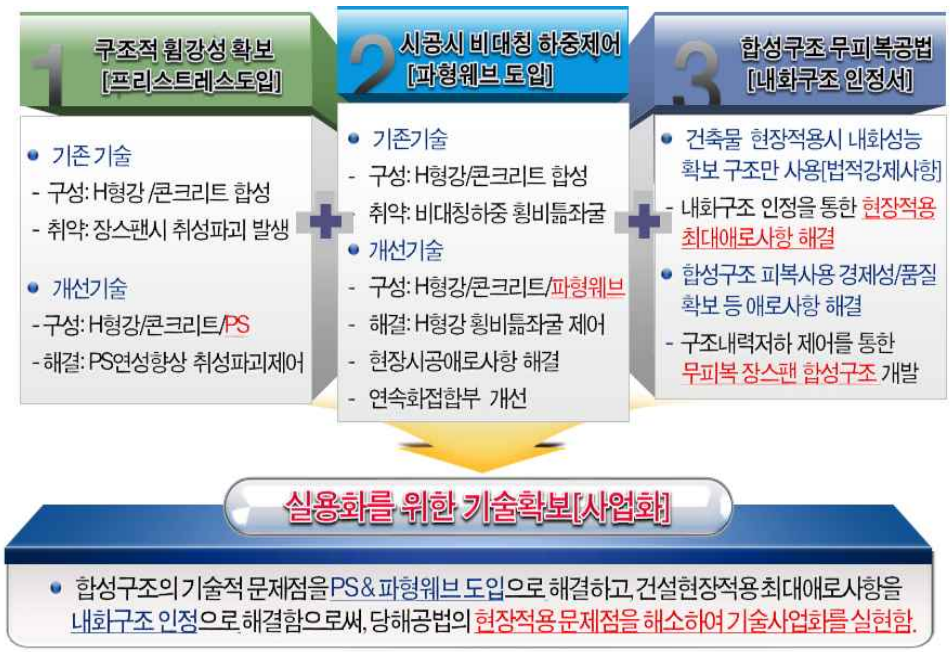
제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

제 1절 연구성과 향후 활용방안

1. 기술의 활용방안

가. 기술이전 및 건설신기술 추진가능

- 우수기술의 특허이전 및 내화실험을 통해 신규성·우수성·경제성을 검증하여, 민간으로의 기술이전을 효율적으로 달성할 수 있는 건설 신기술로의 추진을 통한 우수 내화구조공법 민간기업으로의 기술이전 및 연구성과 확산이 가능함.



[그림 5.1] 기술이전 및 건설신기술 추진방안

나. 민간 애로기술 해결

- 기존의 합성구조의 경우 하부 플렌지에의 내화피복을 하여야 법정요구내화시간인 3시간을 만족할 수 있었으나, 피복재 도포공법의 경우 화재시 유독가스 발생 및 피복 도포시 추가적인 공정·비용발생과 품질확보 등의 문제점이 발생함.
- 이로 인해 민간 시공사에서는 철골구조부재를 건물에 적용할 경우 피복설계시의 문제점 및 내화구조 인정 등의 문제점 때문에 기술적 애로사항이 다수 발생함.
- 이를 해결하기 위해 화재시 내력저하 및 구조적 휨강성 확보를 위해 횡 비틂 좌굴제어를 위한 파형웨브도입과 중앙부 처짐제어를 위한 프리스트레스 도입을 통해 장스팬 합성구조의 무피복 조건에서 법정내화 요구시간인 180분 내화성능의 확보가 가능함.

2. 사업화 계획

가. 건설신기술 추진을 통한 기술검증

- 연구 컨소시엄 구성기관이 건설신기술을 추진하고, 각 기관별로 사업화 계획을 수립하여 우수기술의 민간기술 전파에 주체적인 역할을 수행함.

나. 장스팬 합성보 사업화 계획

(1) 기술 컨설팅 사업

- 주관사인 (주) 목양종합건축사사무소 기술연구소[구조물 실 설계방안]와 공동연구기관인 한국건설기술연구원[내화자문], 서울시립대[접합부 설계방안]의 연구수행을 통한 기관별 보유기술 및 축적된 기술지식을 활용하여, 해당기술의 건설현장시 발생할 수 있는 기술적 문제점을 해결할 수 있는 컨설팅 사업을 추진함.

(2) 합성구조 자동화 제조 및 현장적용 시공사업계획

- 본 연구 컨소시엄의 참여기업인 (주)픽슨에서 장스팬 합성보의 파형웨브 자동화 용접설비를 구축함으로써 현장적용을 위한 공장생산기반을 확보하여, 당해 구조공법의 제조사업을 주체적을 수행함.
- 건축 구조물 적용: 당해공법인 무피복 장스팬 공법의 법정요구시간별로 프리스트레스 양을 조정한 상세설계방안을 토대로 층고절감이 가능한 건축구조물에의 현장시공을 수행함으로써 기술사업화를 성공적으로 달성함.
- 소규모 교량구조물 적용: 장스팬 구조가 필요한 교량에서의 파형웨브 도입기술과 프리스트레스 적용을 토대로 소규모 교량에 적용할 수 있는 기술을 확보함으로써 교량사업으로의 사업화를 추진함.



[그림 5.2] 신청기술 사업화 계획

(3) 자체 사업화 계획(전제조건 : 정부사업(건설교통평가관리원) 시행 및 사업 성공)

○ 건설 신기술 인증(컨소시엄으로 인증) : 2014년

○ 기술 사업화 신청 : 2015년

- 토지를 제외한 건물 및 설비 사업화 자금 융자 : 최대 45억원

○ 공장 준공 및 설비 시운전 : 2015년

○ 양산체제 수립 : 2016년

○ 기타사항

- 사업화는 정부사업과 건설 신기술을 추진하면서 시장성을 확보 후 시행

(4) 예상 소요 자금(사업화 시)

건 축 물			설 비			합 계
대 지	건 물	소 계	절 곡 기	용접기 및 기타	소 계	
2,000평/ 6억원	600평/ 12억원	18억원	8억원	6억원	14억원	32억원

○ 건축물 : 대지 300,000원/평, 건물 2,000,000원/평 기준

○ 설비 : 절곡기 600톤 기준, 용접기 : 로봇 3대/1조*2조 각 2억원씩 4억원, 기타 : 주변장치 등

○ 특기사항

- 용접기는 로봇을 이용한 시스템 적용으로 7.5M를 빠른 시간에 변형없이 용접하기 위하여 3대/1조 * 2조(용접시스템 포함)로 상하부를 동시에 용접하는 방법으로 검토 하였으나 이는 사업화 진행하면서 능동적으로 적용하면 될 것임

(5) 영업화 전략

○ 컨소시엄 영업 전략

- 종합건설시공 분야로 사업확대(목양엔지니어링)

  무피복 장스팬 합성구조의 기술확보를 통해 주관사인 (주) 목양엔지니어링 건축사 사무소의 기술 컨설팅 수행을 통한 현장적용 시공기술을 축적하고, 이를 기반으로 현재 설계 및 감리, 엔지니어링 사업분야를 건설 시공 사업분야로 확대가 가능함.

  [종합건설 시공면허를 신청할 계획에 있음, 2015년]

- 엔지니어링 사업분야에서의 기술보유 인정(컨소시엄 업체)

  설계/감리를 수행하는 엔지니어링 사업분야에서 국내 최초로 무피복 장스팬 합성구조와 관련된 기술을 확보함으로써, 유사 업종에서의 우수기술을 선점하고 이를 확산하기 위한 노력을 기반으로 관련 엔지니어링 기업에의 기술전파를 통한 해당 분야에서의 합성구조 설계/시공/감리 업무의 선도적 역할수행 가능.

- 참여기업으로의 기술이전 및 컨설팅 활성화

  본 연구 컨소시엄의 참여기업인 (주)픽슨과의 유기적 관계를 통한 무피복 장스팬 합성구조의 제조기술을 지도하고, 자동화 제품생산 기술확보 유도를 통한 주관사의 시공 수주금액 향상가능.

(6) 자체 영업 전략

○ 1차적으로는 목양엔지니어링의 설계/감리 영업을 통한 납품처 확보

○ 당사 대리점을 통한 건축물 적용 확대방안 수립

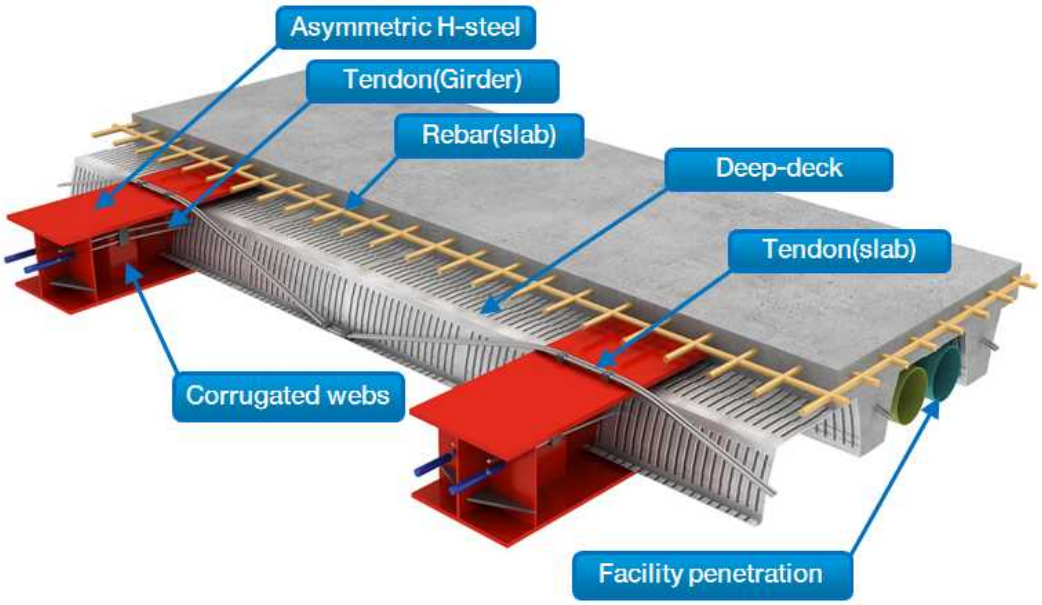
○ 국내 50대 건설회사에 대한 시공공법의 적극적인 영업

○ 국내 건축물 전시회를 통한 시공공법의 소개

○ 당사의 외국 관련 기업 및 전시회를 통한 시공공법의 소개

제2절 추가연구 필요성 등

- 본 연구과제의 목표인 내화피복이 없는 층고절감형 7.5m 보의 3시간 내화성능 확보는 완료하였지만, 기술사업화를 위한 내화구조 인정 및 건설신기술 추진을 위한 추가 연구가 필요함.
- 본 개발공법의 경우 철골 보와 Deep-Deck의 합성으로 이루어진 구조이다. 하지만 본 연구에서는 Deck의 일부만 적용하여 성능을 평가하였다. 이에 보와 슬래브 전체 시스템을 대상으로 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단됨. 아래 그림 5.3은 파형웨브 합성보와 Deep-Deck가 일체화된 시스템 도식이다.



[그림 5.3] PS파형웨브 합성보를 적용한 장스팬 합성슬래브

- 또한 개발공법의 보급화 및 실제 건축물에서 경제성을 확보하기 위한 추가방안으로 설비 관통부 등의 적용방안 모색을 위한 추가연구가 요구됨.
- 무피복 합성보의 3시간 이상의 내화성능을 확보한 본 개발공법의 경우 우수한 상온 구조성능과 경제성을 갖춘 기술로 국내외에서 아직까지 선례를 찾아볼 수 없는 첨단 기술임. 이에 따라 본 개발공법의 해외시장 개척을 위한 해외규격과의 적합성 여부 및 시장분석등의 추가적인 연구가 반드시 수행되어야 할 것으로 판단됨.

참고문헌

1) 건설 교통부, “건축법(2005.5.26) 제5장 - 제40 41조, 건축법 시행령(2005.7.18) 제1장-2조, 제5장-56조, 건설교통부령 제461호 - 제3조, 주택건설기준 등에 관한 규정 제3장 - 제14조, 건교부 고시(제2005-122호)- 건축법 제40 56조″

2) 건설교통부, 한국건설기술연구원, 국내 내화구조기준 개선연구 (Ⅰ),(Ⅱ), 2000,3.

3) 한국건설기술연구원, 건축물 화재안전시스템 구축-건축물 화재안전규정 개선 연구, 2000.1) 대한건축학회 : 강구조 건축물 내화설계 기준 및 기법에 관한 연구, 1995.3

4) 김해전외 13人 : 강구조 내화설계 기준 및 기법에 관한 연구, 대한건축학회, 1995.03

5) 建築生産研究室 : 내화구조기준 개선 연구-1차자문회의자료부록(상)(하), 한국건설기술연구원, 1998年 8月

6) 岡部 猛 :鋼構造物の高溫時の彈塑性クリープ變形擧動解析に關する研究、平成2年3月

7) 吳昌熙 : 鐵筋コンクリート造火災建物の火害とその補修に關する研究, 東京工業大學工業材料研究所, 昭和60年7月

8) 高木任之 : 徹底解說 大改正 建築基準法, 1998. 10.

9) 光和堂 : 建築基準法關係法令集, 2000. 2.

10) 新日本法規 : 改正建築基準法, 2000. 6.

11) 日本建築學會 : 鋼構造耐火設計指針, 1999.

12) 原田 有 : 建築耐火構法, 工業調査會, 1973.

13) (財)國土開發技術研究センター : 建築物の總合防火設計法(全4卷), (財)日本建築センタ, 1988.

14) 汁本誠 : 防・耐火性能の評價技術-性能評價手法の體系, 建設省建築研究所, 1998. 10.

15) 遊佐秀逸 : 鐵骨造耐火性能とその評價”, 建設省建築研究所, 1998. 10.

16) 齊藤春重 外 : セメント系濕式吹付けモルタル被覆鐵骨はりの 耐火性能試驗, 建材試驗情報, 1994. 3.

17) 張福貴,靑木博文 :“金屬材料の繰返し應力-變形關係への Menegotto-Pintoモテルの適用性 ”, 日本建築學會大會學術講演概要集,1991年9月

18) 金和中 : 高溫度における コンクリートの力學的擧動に關する實驗的研究, 東京工業大學校 博士學位論文, 1988.3

19) 新・建築防災計劃指針, 日本建築 センター、1993

20) 建設省建築研究所 : 防・耐火性能評價技術の開發, 1996.

21) 作本好文 : 現行の耐火規準と新しい耐火設計法の概要, 鐵構技術, 1995.

22) 作本好文 : 火災性狀および鐵骨溫度豫測(1,2),鐵構技術, 1995.

23) Dong-Il Chang, Hyo-Nam Cho, Chung-Bang Yun, Sang-Dae Kim : Structural

Steel PSSC′ 98 VOLUME 1, Korean Society of Steel Construction, 1998
24) T.Z.Harmathy : Fire Safety Design and Concrete, Longman Scientific & Technical,1993
25) International Code Council : International Building Code, 2000.
26) International Code Council : International Fire Code, 2000.
27) IISI, International Fire Engineering Design for Steel Structures : State of the Art, 1993
28) ASFPCM : Fire Protection for Structural Steel in Buildings(2nd Edition-Revised), 1992
29) Philip J. Dinenno, P.E. et al : SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association and Society of Fire Protection Engineers, 1988. 5.
30) Department of the Environment, Transport and the Regions : The Building Regulations - APPROVED DOCCUMENT B(Fire Safety), 2000.
31) John A. Purkiss : Fire Safety Engineering Design of Structures, Butterworth-Heinemann, 1996.
32) AISI,"Fire protection Through Modern Building Codes", pp 131-149, 1981.
33) Anders Randy, Timo Inha and Hukka Myllymaki, "Structural Steel Fire Design", pp 11-99, 2000.
34) Anon., Fire behaviour of steel and composite construction, Verlag, TUV, Rheinland.
35) Bailey, C.G., Simulation of the Structural Behaviour of Steel-Framed Buildings in Fire, PhD Thesis, University of Sheffield, 1995.
36) BIA, Approved Document for New Zealand Building Code Fire Safety Clauses,2004
37) British Standards Institution, BS.5950: Part 8: Code of Practice for the Fire
38) Abbas, H. H., Sause, R., and Driver, R. G., "Analysis of flange Transverse Bending of Corrugated Web I Girders under In-Plane Loads," ASCE, Journal of Structural Division, Vol. 133, No. 3, 2007, pp. 347~355.
39) ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (318R-05)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005, 430 pp.
40) AISC, "Manual of steel construction-load and resistance factor design," 3rd ed, Chicago, IL, American Institute of Steel Construction, 2001.
41) Azizinamini, A., Barth, K., Dexter, R. and Rubeiz, C., "High Performance Steel: Research Front-Historical Account of Research Activities," ASCE, Journal of

Bridge Engineering, Vol. 9, No. 3, 2004, pp. 212~217.

42) Belleti, B. and Gasperi, A., "Beahavior of Prestressed Steel Beams," ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 136, No.94, 2010, pp. 1131~1139.

43) Bentz, E. C., "Sectional Analysis of Reinforced Concrete Members," PhD thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada, 2000, 198 pp.

44) Bergfelt, A., and Leiva-Aravena, J., "Buckling of Trapezoidally Corrugated Web and Panels," IASBE Colloquium, 1986, pp. 67-74.

45) Collins, M. P., and Mitchell, D., Prestressed Concrete Structure, Prentice Hill, 1991, 766 pp.

46) Driver, R. G., Abbas, H. H., and Sause, R., "Shear Behavior of Corrugated Web Bridge Girders," ASCE, Journal of Structural Division, Vol. 132, No. 2, 2006, pp. 195~203.

47) Drury, J. C., Ultrasonic Flaw Detection for Technicians, 3rd ed., Silverwing Ltd., 2004, pp. 250.

48) Easley, J. T., "Buckling Formulas for Corrugated Metal Shear Diaphragms," ASCE, Journal of Structural Division, Vol. 101, No. ST7, 1975, pp. 1403-1417.

49) Moon, J. H., Yi, J. W., Choi, B. H. and Lee, H. E., "Shear strength and design of trapezoidally corrugated steel webs," Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, No. 5, 2009, pp. 1198-1205.

[별첨1] 연구개발결과 활용계획서

[별첨2] 설계 · 시공 매뉴얼

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토건설교통기술촉진사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.