주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술 연구개발사업의 최종보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.

국토교통과학기술진흥원
국 토 교 통 부
2014.04

고연성 시멘트복합재료 개발 및 바닥구조시스템 구축기술
최 종 보 고 서

R&D 11첨단도시 C01

첨단도시개발사업

R&D-11첨단도시 C01

고연성 시멘트복합재료 개발 및 바닥구조시스템 구축기술

최종보고서

2014.04.30.

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 호서대학교 산학협력단
공동연구기관 / 충남대학교 산학협력단
공동연구기관 / 조선대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 "고연성 시멘트복합재료 개발 및 바닥구조시스템에 관한 연구"의 과제 보고서로 제출합니다.

2014 . 04 . 30

주관연구기관명 : 호서대학교 산학협력단
주관연구책임자 : 권영진
공동연구기관명 : 충남대학교 산학협력단
공동연구책임자 : 김윤용
공동연구기관명 : 조선대학교 산학협력단
공동연구책임자 : 조창근
연구원 : 이주희
연구원 : 김일중
연구원 : 서동구
연구원 : 김동은
연구원 : 구인혁
연구원 : 강승구
연구원 : 한병찬
연구원 : 배준영
연구원 : 이병재
연구원 : 방진욱
연구원 : 현정환
연구원 : 서지석
연구원 : 이의성
연구원 : 김광석
연구원 : 문형주
연구원 : 임현진
연구원 : 김호연
연구원 : 송기덕
연구원 : 채희창
연구원 : 김주호
연구원 : 최선규
연구원 : 김지덕
연구원 : 심해진
연구원 : 김재환
연구원 : 노형남
연구원 : 서정환
연구원 : 이숭천
연구원 : 윤영채

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>13CHUD-C058739-03</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2011.07.08.~
2014.04.30</td><td>단계구분</td><td>최종보고서
(3년과제)</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="5">첨단도시개발사업</td></tr>
<tr><td>연 구 과 제 명</td><td>최 상 위
과 제 명</td><td colspan="4">고연성 시멘트복합재료 개발 및 바닥구조시스템 구축기술</td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>권 영 진</td><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 :
31명
내부 :
21명
외부 :
10명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 864,000천원
기업 : 310,000천원
계 : 1,174,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">호서대학교 산학협력단</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">㈜B&SE건설 3명
㈜AMS ENG 2명
㈜동일구조 3명
㈜유신건축 2명</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 : -</td><td colspan="2">상대국연구기관명 : -</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>561page</td></tr>
<tr><td colspan="6">본 연구는 고연성 시멘트계 패널을 이용한 지하 대공간의 복합 바닥구조 및 그 시공 방법에 관한 것으로 더욱 상세하게는 장스팬 및 화재하중이 현저히 큰 지하 대공간의 철근콘크리트 바닥구조에 대하여, 우수한 내구성 및 내화성능을 확보하며 미세 분산균열 특성을 갖는 고연성 시멘트계 패널을 바닥판 구조의 일부에 사용하여 복합바닥 구조를 구성하는 기술이다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">고연성 시멘트 복합재료, 바닥구조시스템,
내화성능, 내구성능, 지하대공간</td></tr>
<tr><td>영
어</td><td colspan="4">Ductile cement composite, Slab system, Fire-resistance, durability, Large basement floor</td></tr>
</table>

요 약 문

요 약 서								
사 업 명	첨단도시개발사업			과제번호				
연구(기술)분야	국가과학기술 표준분류체계	대분류	F	중분류	F03	소분류	F0301	
	전문분야분류	※연구(기술)분야는 코드번호만 기재						
과 제 명	고연성 시멘트복합재료 개발 및 바닥구조시스템 구축기술							
연구기관	호서대학교 산학협력단		연구책임자		권 영 진			

연도별 연구개발비 소요 예상액 (단위 : 천원)

연 도	정부 출연금	기업부담금			정부외 출연금	상대국 부담금	합계
		현금	현물	소계			
1차년도	180,000	6,000	54,000	60,000			240,000
2차년도	360,000	12,000	108,000	120,000			480,000
3차년도	324,000	22,000	108,000	120,000			574,000
4차년도							
5차년도							
총계	864,000	40,000	270,000	300,000			1,174,000

요약서 (연구개발목표 및 내용)	
연구개발 개요	- 대상기술 : 고연성 시멘트복합재료 개발 및 바닥구조시스템 구축기술 - 대상개술의 핵심제품 : 고연성 시멘트 복합재료를 이용한 패널 및 이를 이용한 지하 대공간 대응 복합바닥구조시스템 - 요구성능(수요조사) : 1) 내화성능 확보(ISO 834 3hr 및 성능기반(PBD) 화재 안전성 확보) 2) 지하대공간에 적합한 강도성능 확보(압축강도 50MPa 이상 휨강도 20MPa 이상 인장강도 7MPa 이상 인장변형률 2% 이상 능동 균열제어특성(균열폭 100㎛ 이하) - 특 징 : 폭렬방지 및 철근사용량 감소/공법 적용에 따른 단면증가 없음 - 대상구조물 : 건축구조물 - 공 법 : 건식 또는 반 건식 구법 - 대상 시장 : 건축물 바닥(슬래브) 구조, 지하층 건식공법 - 경쟁기술(제품) : 기존 무지주 공법 및 제품(내화성능 미확보) - 개발 가능성 : 1) 패널개발 가능성 : 고연성시멘트복합재료(SHCC)에 대한 원천기술(기 보유)을 바탕으로 패널 개발 가능 2) 바닥구조시스템 개발 가능성 : 재료/구조/방재(학) 및 산업체 협력(산)으로 실질적인 공법 개발 가능

최종목표	- 내화성을 갖는 친환경 고연성시멘트복합재료(Green SHCC) 개발 1) 친환경 고연성시멘트복합재료를 이용한 패널 소재 개발 2) 내화성능 : ISO 834 3hr 및 성능기반(PBD) 화재 안전성 확보 3) 강도성능 : 압축강도 50MPa 이상, 휨강도 20MPa 이상, 인장강도 7MPa 이상, 인장변형률 2% 이상 4) 내구성능 : 능동 균열제어특성(균열폭 100um 이하) ※ 시멘트 40% 이상을 친환경 소재로 대체 - Green SHCC를 이용한 복합바닥구조시스템 구축 1) 구조시스템 : 복합바닥구조시스템(Green SHCC+RC) 2) 시공성능 : Half Precast 방식(기계화 시공) - 구조시스템 전용 구조설계 Software 개발(고연성 바닥슬래브 비선형 해석 및 설계 기법 개발) - 국내 전용 PBD 기반 내화설계용 Software 개발 1) 실험결과 분석 및 열전도모델 해석데이터를 Software에 적용 2) 개발 구조시스템의 성능기반 내화설계기술 및 Software 구축 및 개발
연구내용 및 범위	1차년도 1) 1차년도 최종목표 - 지하주차장 및 판매공간 및 초고층건축물의 가연물 조사 - 자동차 연소실험 및 슬래브내화실험 - 초고층건축물 및 지하공간의 화재성상 예측 기법 구축 - 친환경 고연성시멘트 복합재료(Green SHCC)의 개발 - Green SHCC 소재내 섬유분포특성 평가기법(Image Process) 및 이를 이용한 성능 구현 Simulation 기술 - 고연성 복합바닥 구조원리/공법 제시 2) 1차년도 연구내용 및 범위 - 지하주차장 및 판매공간 및 초고층건축물의 가연물 조사 - 자동차 연소 화재 실물화재실험 및 슬래브 내화실험 - 친환경 고연성시멘트 복합재료(Green SHCC)의 개발 - Green SHCC 소재내 섬유분포특성 평가기법(Image Process) 및 이를 이용한 성능 구현 Simulation 기술 - 고연성 복합바닥 구조원리/공법 제시 2차년도 1) 2차년도 최종목표 - 구조내화설계를 위한 열 입력 조건 및 열전도 모델구축 - 폭렬 메카니즘/열이동/열전달을 고려한 해석 - 폭렬에 기인한 압력측정 및 폭렬해석 모델 개발 - 개발된 고연성 시멘트 복합재료 패널에 관한 내화실험 및 열전도 모델

- 친환경 고연성 시멘트 복합재료를 이용한 패널 소재 개발
- 고연성 복합바닥 구조 성능평가

2) 2차년도 연구내용 및 범위
- 열전도 모델 구축을 위한 바닥체 내화실험
- 바닥구조시스템의 내화성능(ISO 834)검증
- 구조내화설계를 위한 열 입력 조건 및 열전도 모델 구축
- 폭렬에 기인한 압력측정 및 폭렬해석 모델 개발
- 친환경 고연성시멘트복합재료를 이용한 패널 소재 개발
- 고연성 복합바닥 구조 성능평가
- 복합바닥구조시스템 목표성능 결정
- 패널 양산화 방안 강구

3차년도
1) 3차년도 최종목표
- 바닥체 내화실험을 통한 내화성능 검증(ISO 834 기준 3시간 만족) 및 구조거동의 모델화 구축
- 개발 구조시스템의 성능기반(PBD) 내화설계기술 및 S/W구축(2,3차원설계가능) 및 검증
- 친환경 고연성시멘트복합합재료 패널의 제 성능 평가 및 검증
- 고연성 복합바닥공법 실용화 기술개발
- 국토해양부 신기술 신청

2) 3차년도 연구내용 및 범위
- 재료 및 구조거동의 모델화
- 개발 구조시스템의 성능기반(PBD) 내화설계기술 및 S/W 구축(2,3차원 설계가능)
- 폭렬 메커니즘, 열이동, 열전달을 고려한 해석(2차년도 연구내용)의 S/W개발 모델의 학회를 통한 검증
- 건설기술연구원을 통한 인증실험(ISO 3시간 만족) 및 검증
- 친환경 고연성시멘트복합합재료 패널의 제 성능 평가 및 검증
- 고연성 복합바닥공법 실용화 기술개발
- 복합바닥구조시스템 적용
- 시공성능 분석
- 매뉴얼 및 설계 S/W 실무참여
- 신기술 신청을 위한 제반 연구보고서 구축
  1) 현장적용실적
  2) 원가계산서
  3) 선행기술조사 보고서
  4) 특기시방서
  5) 유지관리 지침서

SUMMARY

Due to high-rise and enlargement of building these days, following ferroconcrete basement structure also gets deepen, enlarges and being multiplexed. In order to build these large basement structure, it requires long span, and for floor structure also being diversified with change condition of construction site in site placement method including existing forms construction, development of construction technology, development of various new technology and introduction of new method. Floor structures that are recently used are; in-site floor structure using forms that is mostly used, hollow-core, thebuilty, half slab floor structure, inner mount shaft rejection, light synthetic slab fore structure, and floor structure using regular tech.

On the other hand, although required certification time of fireproof structure for current floor construction is 2 hours, however, the request that reinforced fireproof function is required with multiplexed, enlarged basement structure is increasing. For example, as cars` use of high molecule material is increased, population of basement parking lot is increased, thus scale of caloric value is increased, and also, as it is shown in COEX, caloric value is remarkably increased with concentration and increase of inflammable material, the need to reinforce fireproof structure from existing 2 hours to 3 hours is also being required.

Also, due to high rise of building, increase of personnel expense, lawful restriction regarding construction, development of technology on above floor structure is being more and more accelerated, and especially effort to shorten construction period and precise construction is being required and related patent also being applied a lot.

For example, Korea public patent bulletin 2005-65510 is technology about constructing concrete slab of construction structure. This suggests the method that construct concrete by making half slab by synthesizing with nonstructural light weight material such as ALC (Autoclaved Lightweight Concrete) or Lightweight air-entertained concrete. Fireproof performance of steel truss is

improved from above method, and applying weight that is applied after upper concrete is hardened is becoming continuous state, thus it has effect that stress is equally spread.

However, since above technology uses existing regular cement, it is difficult to use long span, and even if it is possible, use of rebar increases. Also, there are many construction troubles such as crack of floor structural member, leakage, and it is impossible to realize fireproof over 2 hours in the same condition.

Therefore, technology on construction method that secures economic feasibility by innovatively reducing amount of rebar that increase by expanding long span, realizes 3 hours of fireproof structure and actively control troubles such as crack and leakage is urgently needed.

CONTENTS

Chapter 1 Development research project outline ····· 1
Paragraph 1 Purpose and need of R & D ····· 1
1. R & D outline ····· 1
2. Need of research ····· 8
A. Technical aspect ····· 8
B. Social· economic and industrial aspect ····· 9
Paragraph 2 Characteristic of R & D ····· 10
Paragraph 3 Current domestic and international technology development condition of related area ····· 11
Paragraph 4 Differentiation of R & D ····· 20

Chapter 2 R & D performance contents and result ····· 21
Paragraph 1 R & D strategy and methodology ····· 21
1. Research range and research method ····· 21
Paragraph 2 R & D contents and result ····· 24
1. Current domestic and international technology development condition ····· 24
A. Mechanical characteristic of existing high ductility synthetic cement material ····· 24
B. Research trend ····· 25
C. Current condition of high toughness concrete development ····· 26
D. Composition and mix characteristic of high toughness concrete ····· 38
E. Hydration of high toughness concrete and fine structure characteristic 42
F. Mechanical characteristic of high toughness concrete ····· 44
G. Durability property of high toughness concrete ····· 46
2. Characteristic of basement space (parking lot) fire behavior and trend of research on concrete fireproof ····· 48
A. Research trend of fire behavior in basement space (parking lot) ····· 48
3. Domestic and international fire proof research trend ····· 56
A. Explosion mechanism of concrete ····· 56
B. Domestic and international research trend on explosion ····· 58
C. Thermal analysis trend about function based fireproof design ····· 62
4. Basic research to develop Green SHCC applied floor structure system development ····· 70
A. Analysis of current condition by investigating existing domestic and international floor structure system ····· 70

B. Domestic and international patent analysis on synthesized floor structure system ····· 77
5. Result of domestic and international technology tendency analysis ····· 78
A. Mechanical characteristic of existing high ductility cement synthesized material ····· 78
B. Characteristic of basement space (parking lot) fire behavior and trend of research on concrete fireproof ····· 78
C. Research trend analysis to develop green SHCC applied floor structure system ····· 79
6. Establish basement parking lot fire behavior forecasting method ····· 80
A. Investigate inflammables in basement parking lot ····· 81
B. Car burning experiment ····· 98
C. Modeling heat release rate of car fire and establish DB ····· 148
D. Review fireproof standard of parking lot structure ····· 154
7. Establish performance based fireproof design method ····· 164
A. Double side heating experiment using high strength concrete column member ····· 165
B. Double side heating experiment using high strength concrete wall member ····· 198
8. Performance evaluation on existing slab structure ····· 206
A. Slab fireproof performance evaluation test ····· 206
B. Slab residual strength performance evaluation test ····· 217
C. Thermal conduction analysis from slab fireproof heating test ····· 222
D. Thermal inertia test of concrete for thermal analysis ····· 237
E. Explosion analysis considering thermal stress ····· 244
9. Green SHCC Material development ····· 247
A. Material development ····· 247
B. Green SHCC cement matrix material ····· 269
C. Green SHCC cement matrix basic mix ····· 275
D. Mechanical characteristic evaluation on Green SHCC ····· 288
10. Green SHCC Panel development ····· 320
A. Panel development ····· 320
B. Panel manufacturing process ····· 323
C. Panel material development using Green SHCC ····· 326
11. Green SHCC test production panel quality and performance test ····· 361
A. Green SHCC panel trial product production and test method ····· 361
B. Green SHCC panel trial product test result and analysis ····· 364

12. Green SHCC floor structure and fireproof performance evaluation ····· 367
A. Green SHCC slab production ····· 367
B. Green SHCC slab production and structural test ····· 369
C. Design strength of concrete slab to develop SHCC synthetic floor structure system ····· 391
D. Design strength of SHCC synthetic floor structure applied slab specimen 397
E. Fireproof performance test of SHCC synthetic floor ····· 398
F. Structural test on residual strength of SHCC synthetic floor after fireproof test ····· 412
13. Establish Green SHCC panel mass production method ····· 422
A. Establish Precast method from steam curing ····· 422

Chapter 3 Final research result and application result ····· 426
Paragraph 1 Name of individual research result ····· 426
1. Individual research result ····· 426
2. Main research result ····· 427
A. Scientific result ····· 428
B. Domestic and international market prospect of research development result ····· 436

Chapter 4 research goal achievement and effect ····· 438
Paragraph 1 Research development final goal achievement ····· 438
1. Individual research result ····· 438
2. Descriptive effectiveness analysis on research development result ····· 446
A. Securing fireproof performance of floor structure system and technology diffusion effect ····· 446
B. Importance of new technology development ····· 447
C. Diffusion method of performance based (PBD) design technology ····· 447
D. Secure permanent forms high density concrete fireproof performance improvement technology ····· 447
E. Comparative analysis of technical aspect on current technology and this research development result ····· 448
3. Economic effect analysis on research development performance ····· 451
A. Design and construction reduction effect ····· 451
B. Parking lot parking fee ····· 461
C. Make labor for each construction process of this research development

result ····· 461
D. Reduce maintenance fee ····· 464
4. Political effect analysis on research development result ····· 465

Chapter 5 Utilization of research result and need for additional research ····· 466
Paragraph 1 Research and future application plan ····· 466
1. Use of this research development result ····· 466
A. Technology execution plan for research development result ····· 466
B. New technology request on research development result ····· 466
Paragraph 2 Need for additional research ····· 471

[Reference] ····· 477
[Supplement] ····· 490
1. Quantitative result and Qualitative result ····· 490
2. Oversea scientific technology information collected from research development process ····· 532
3. Others ····· 560

목 차

제 1 장 연구개발과제 개요 ····· 1
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 1
1. 연구개발 개요 ····· 1
2. 연구의 필요성 ····· 8
가. 기술적 측면 ····· 8
나. 사회·경제 산업적측면 ····· 9
제 2 절 연구개발의 특징 ····· 10
제 3 절 관련분야의 국내외 기술개발 현황 ····· 11
제 4 절 연구개발의 차별성 ····· 20

제 2 장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 21
제 1 절 연구수행 전략 및 방법론 ····· 21
1. 연구범위 및 연구수행방법 ····· 21
제 2 절 연구수행 내용 및 결과 ····· 24
1. 국내·외 기술개발 현황 ····· 24
가. 기존 고연성 시멘트 복합재료에 대한 역학적 특성 ····· 24
나. 연구 동향 ····· 25
다. 고인성 콘크리트 개발 현황 ····· 26
라. 고인성 콘크리트의 구성 재료 및 배합 특성 ····· 38
마. 고인성 콘크리트의 수화 및 미세구조 특성 ····· 42
바. 고인성 콘크리트의 역학적 특성 ····· 44
사. 고인성 콘크리트의 내구 특성 ····· 46
2. 지하공간(주차장) 화재성상 특성 및 콘크리트의 내화연구 동향 ····· 48
가. 지하공간(주차장) 화재성상 특성에 대한 연구동향 ····· 48
3. 국내외 내화 연구 동향 ····· 56
가. 콘크리트의 폭렬 매커니즘 ····· 56
나. 국내외 폭렬에 대한 연구동향 ····· 58
다. 성능기반 내화설계에 관한 열 해석 연구동향 ····· 62
4. Green SHCC 적용 바닥구조시스템 개발을 위한 기초연구 ····· 70
가. 기존 국내외 바닥구조시스템을 조사하여 현황 분석 ····· 70
나. 복합바닥 구조시스템 국내외 특허 분석 ····· 77
5. 국내외 기술동향 분석 결론 ····· 78
가. 기존 고연성 시멘트 복합재료에 대한 역학적 특성 ····· 78
나. 지하공간(주차장)화재성상 특성 및 콘크리트의 내화 연구 동향 ····· 78
다. Green SHCC 적용 바닥구조시스템 개발을 위한 연구동향 분석 ····· 79

6. 지하주차장의 화재성상 예측 기법 구축 ·····80
가. 지하주차장의 가연물조사 ·····81
나. 차량 연소 실험 ·····98
다. 차량화재의 열방출율 모델화 및 DB구축 ·····148
라. 주차장 구조물의 내화기준 재검토 ·····154
7. 성능기반 내화설계 기법 구축 ·····164
가. 고강도 콘크리트 기둥부재를 이용한 2면 가열 실험 ·····165
나. 고강도 콘크리트 벽체부재를 이용한 2면 가열 실험 ·····198
8. 기존 슬래브 구조물의 성능 평가 ·····206
가. 슬래브 내화 성능평가 시험 ·····206
나. 슬래브 잔존내력 성능평가 실험 ·····217
다. 슬래브 내화 가열실험을 통한 열전도 해석 ·····222
라. 열해석을 위한 콘크리트의 열관성 실험 ·····237
마. 열응력을 고려한 폭렬해석 ·····244
9. Green SHCC 재료 개발 ·····247
가. 재료 개발 ·····247
나. Green SHCC 시멘트 매트릭스 사용재료 ·····269
다. Green SHCC 시멘트 매트릭스 기본 배합 ·····275
라. Green SHCC 역학적 특성 평가 ·····288
10. Green SHCC 패널 개발 ·····320
가. 패널 개발 ·····320
나. 패널 제조 공정 ·····323
다. Green SHCC를 이용한 패널 소재 개발 ·····326
11. Green SHCC 시험 생산 패널 품질 및 성능 시험 ·····361
가. Green SHCC 패널 시작품 제작 및 시험 방법 ·····361
나. Green SHCC 패널 시작품 시험결과 및 분석 ·····364
12. Green SHCC 바닥체의 구조 및 내화성능 평가 ·····367
가. Green SHCC 슬래브 제작 ·····367
나. Green SHCC 슬래브 제작 및 구조실험 ·····369
다. SHCC 복합바닥구조 시스템 개발을 위한 콘크리트 슬래브의 설계강도 391
라. SHCC 복합바닥구조 적용 슬래브 실험체의 설계강도 ·····397
마. SHCC 복합바닥체의 내화성능 실험 ·····398
바 SHCC 복합바닥체의 내화실험 이후 잔존내력 구조 실험 ·····412
13. Green SHCC 패널 양산화 방법 구축 ·····422
가. 증기 양생을 통한 Precast 공법 구축 ·····422

제 3 장 최종 연구성과 및 적용실적 ····426
제 1 절 개별 연구성과명 ····426
1. 개별 연구성과 ····426
2. 주요 연구성과 ····427
가 학술적 성과 ····428
나 기술개발 성과의 국내외 시장 전망 ····436

제 4 장 연구목표 달성 및 효과 ····438
제 1 절 연구개발 최종목표 달성도 ····438
1. 개별 연구성과 ····438
2. 연구개발 성과의 기술적 효과분석 ····446
가. 바닥구조시스템의 내화성능 확보 및 기술확산 효과 ····446
나. 시공 신구법(New technology) 개발의 중요성 ····446
다. 성능기반(PBD) 내화 설계 기술의 확산효과 ····447
라. 영구거푸집 겸용 고강도콘크리트 내화성능 향상기술 확보 ····447
마. 현행 기술과 본 연구개발 성과의 기술적 측면 비교 분석 ····448
3. 연구개발 성과의 경제적 효과분석 ····451
가. 설계·시공비 절감 효과 ····451
나. 본 연구개발 성과물의 시공절차별 품 작성 ····461
다. 유지관리비용 절감 ····464
4. 연구개발 성과의 정책적 효과분석 ····465

제 5 장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성 ····466
제 1 절 연구성과 향후 활용방안 ····466
1. 본 연구개발 성과의 활용 ····466
가. 연구개발 성과물의 기술실시계획 ····466
나. 연구개발 성과물의 신기술 신청 ····466
제 2 절 추가연구 필요성 ····471

[참고 문헌] ····477
[부록] ····490
1. 정량적 성과 및 정성적 성과 ····490
2. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····532
3. 기타 사항 ····560

제 1 장 연구개발과제 개요

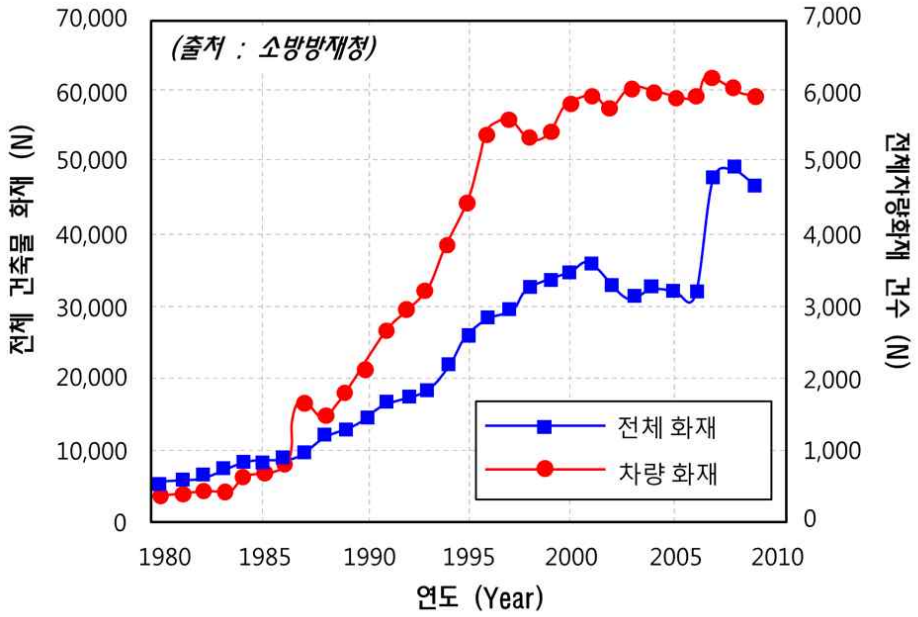
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발 개요

현대사회는 고도한 경제성장에 따라 초고층화, 대형화, 첨단화되고 있으며, 국내의 비좁은 국토의 문제 해결방안으로써 지하공간 개발에 대한 지하심층화, 지하대공간화에 대한 활용도가 높아지고 있는 실정이다. 하지만, 사회의 발달에 따라 지하공간의 대공간화·멀티플랙스화는 화재 등과 같은 재난에 대하여 위험인자의 증가를 초래하고 있으며, 다음 <그림 1.1.1>과 같이 언론보도를 통하여 사회적 문제로 대두되고 있다. 이와 더불어 국내 주차장의 수는 지속적으로 준공되고 있으나, 국내 전체화재에 대한 차량화재 건수는 다음 <그림 1.1.2>와 같이 급격하게 증가하고 있으며, 그 피해는 막대할 것으로 예상된다. 특히, 지하주차장의 경우 일반건축물과 다른 차량이 밀집되어 있는 구조형태와 특수가연물인 차량으로 인해 화재시 높은 열방출율과 고온의 화염으로 천정부에 직접적으로 장시간 노출될 수 있으며, 이러한 경우 콘크리트 구조물의 폭렬발생 및 주철근의 노출로 인해 구조 내력이 저하되고 최악의 경우 붕괴에 도달하여 막대한 재산피해와 인명피해가 발생할 것으로 사료된다. 이러한 지하주차장의 위험성은 다음 <그림 1.1.3>과 같은 피해 사례를 통해서 확인할 수 있다.



<그림 1.1.1> 지하주차장 구조물의 화재안전 및 위험성 관련 보도자료



<그림 1.1.2> 연도별 화재발생 비율 (전체화재와 차량화재)



(a) 프랑스 Valence 주차장 화재 (2011)



(b) 스웨덴 othenburg 주차장 화재 (2011)



(c) 미국 WTC 테러 주차장 화재 (1993)



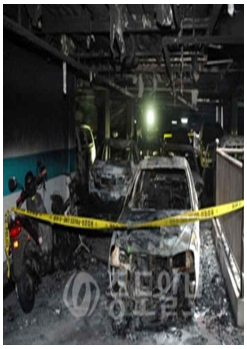
(d) 베트남 Hochiminh 주차장 화재 (2004)



(e) 경기도 의왕 L아파트 주차장 화재 (2013)



(f) 인천시 인스파월드 주차장 화재 (2011)



(g) 대전시 중구 B아파트 주차장 화재 (2008)



(h) 부산시 진구 M교회 주차장 화재 (2012)

<그림 1.1.3> 국내외 주차장 구조물의 피해 사례

한편, 최근 환경규제와 차량연비의 효율성을 높이기 위해 전 세계적으로 차량이 경량화 되어가고 있으며, 이는 기존 금속재료에서 플라스틱 및 알루미늄의 소재로 차량 구성품을 변화시키고 있다. 하지만 이러한 소재는 화재에 취약하며 화재발생 시 기존 차량보다 더욱 높은 열 방출율이 발생한다.

또한, 다음 <그림 1.1.4>와 같이 2012년 KBS 언론보도 내용을 통해 국내 차량은 2000년부터 2011년까지 소형차의 비율이 60%에서 18%로 감소하는 반면 중·대형차는 40%에서 82%로 급격하게 증가하여 차량이 대형화되는 것을 알 수 있으며, 화재 시 기존차량보다 높은 열 방출율과 차량의 이격거리에서도 비좁은 공간으로 인해 화재 확대가 빠를 것으로 사료된다.

이에 대한 방안으로 2012년 『주차장법 시행규칙』이 개정되어 신설되는 부설주차장과 노외주차장의 주차대수의 30%이상에 대해 주차너비의 최소기준을 2.3m에서 2.5m로 넓히도록 개정되었으나, 화재를 고려한 것이 아닌 주차의 편리성만을 고려한 것으로 차량화재에 대한 대책이 미비하다. 더불어 차량의 종류도 LPG 차량, 하이브리드 차량과 같이 다양해지고 있기 때문에 시급히 차량화재에 대한 대책방안과 안전 불감증을 인지하는 것이 필요하다.



<그림 1.1.4> 차량의 대형화와 주차장법 개정

또한, 국내의 건축물 및 구조물의 내화성능 확보 기준은 2010년 신설된 『건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙』에 의거하여 다음 <표 1.1.1>과 같이 용도, 층수, 면적, 부재에 대한 내화 성능을 제시하고 있다. 일반적으로 주차장 구조물은 주거시설에 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 저층부에 많이 시공되고 있다. 이에 따라 내화성능 기준에 대한 표준가열곡선(ISO 834 및 KS F-2257)에 의거하여 1시간 및 2시간에 대한 내화성능 확보를 만족해야 한다. 하지만, 앞서 언급한 내용과 같이 주차장 내에 있는 차량은 특수한 가연물로 취급되며, 일반건축물 화재와 다를 것으로 사료된다.

이러한 초고층 및 지하대공간에 대하여『초고층 및 지하연계 복합건축물 재난관리에 관한 특별법』이 2011년 3월 제정되어 초고층 건축물 및 지하 대공간에 대한 안전성을 확보하는 방안이 제시되었으나, 구체적인 항목이 제시되어 있지 않으며 주차공간 구조물의 내화성능 확보의 검토와 대책방안이 시급하다.

<표 1.1.1> 내화구조의 성능 기준

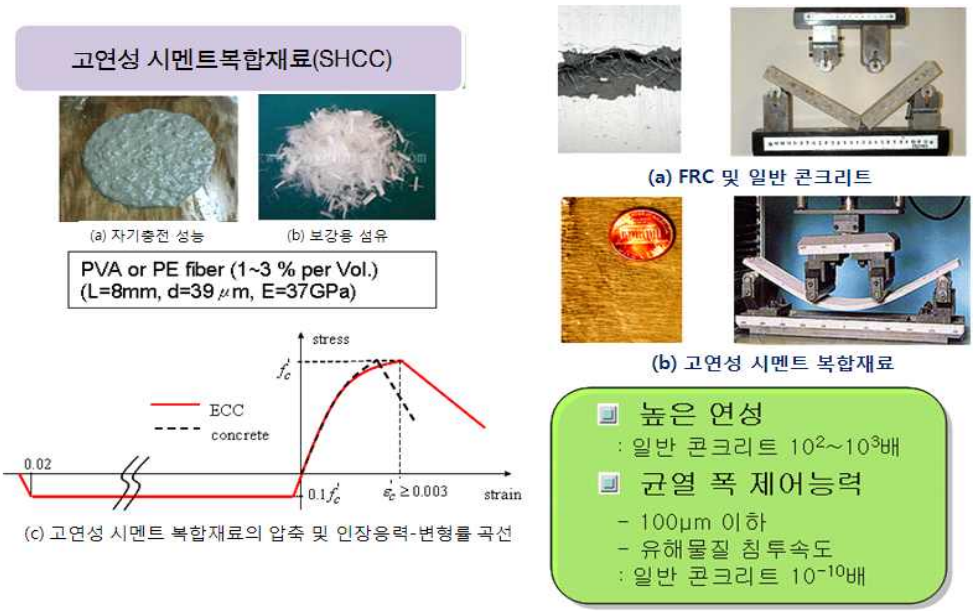
(단위 : 시간)

구성 부재 / 용 도	용도규모(2) 층수／최고높이(m)		벽						보·기둥	바닥	지붕틀
			외벽			내벽					
			내력벽	비내력		내력벽	비내력				
용도구분(1)				연소 우려가 있는부분 (가)	연소 우려가 없는부분 (나)		간막이벽 (다)	샤프트실 구획벽 (라)			
일반시설	12/50	초과	3	1	0.5	3	2	2	3	2	1
		이하	2	1	0.5	2	1.5	1.5	2	2	0.5
	4／20 이하		1	1	0.5	1	1	1	1	1	0.5
주거시설	12/50	초과	2	1	0.5	2	2	2	3	2	1
		이하	2	1	0.5	2	1	1	2	2	0.5
	4／20 이하		1	1	0.5	1	1	1	1	1	0.5
산업시설	12/50	초과	2	1.5	0.5	2	1.5	1.5	3	2	1
		이하	2	1	0.5	2	1	1	2	2	0.5
	4／20 이하		1	1	0.5	1	1	1	1	1	0.5

한편, 앞서 언급한 건축 구조물이 초고층·지하대공간화로 변모되는 것과 주차장법의 주차공간 폭(너비) 증가에 따른 법 개정으로 인해 주차장의 규모는 더욱더 증대되며, 이에 따라 고강도 콘크리트는 많은 부분에서 사용될 것으로 사료된다. 이러한 고강도 콘크리트는 높은 하중을 지탱하고, 부재의 단면 저감으로 인해 경제적으로도 좋은 이점이 있어 현재까지 많이 사용하고 있다. 반면, 콘크리트 구조물은 지금까지 열전도율 및 열확산계수가 현저히 낮아 우수한 내화구조(Fire Resistance Structures)로 인식되어 왔으나, 고강도 콘크리트의 경우 치밀한 내부 조직으로 인해 화재시 발생되는 수증기를 배출시키기 못함으로써 부재 표면에서 폭렬현상(Explosive Spalling)이 발생한다.

이러한 고강도 콘크리트의 내화성능에 대한 문제 및 취성적인 성능 한계를 극복하기 위한 새로운 고성능 재료에 대한 요구가 증대되고 있으며, 대표적인 신소재 중 하나가 고연성 시멘트 복합재료(Strain Hardening Cement Composite; 이하 SHCC)이다. SHCC의 가장 큰 특징은 콘크리트 구조물에 발생되는 국부적인 매크로

균열을 미세한 마이크로 균열(Multiple Cracks)로 분산시킴으로써 100㎛ 이하로 균열 폭을 제어할 수 있으며, 이로 인해 투수저항성 및 외부환경으로 유입되는 유해물질 침투저항성이 우수하며 콘크리트 구조물의 내구성 향상에 크게 기여할 수 있다. 또한, 고연성 SHCC의 변형률 경화거동(Strain Hardening)의 특징으로 일반 콘크리트의 균열 이후 내력손실 및 취성의 단점을 개선하여 균열 이후에도 구조단면의 내력을 확보 할 수 있다. 이에 따라, SHCC에 내화성능을 갖는 패널을 지하 대공간(주차장) 등의 구조체에 적용할 경우 누수방지 및 내구성능 확보와 더불어 화재에 대한 내화성능을 만족할 수 있는 건설신 구법을 구축할 가능성이 있다<그림 1.1.5>.



<그림 1.1.5> 고연성 시멘트 복합재료(SHCC)의 우수한 성능

본 기술 개발의 또 다른 필요성 중 하나로써 국내 시공기술의 발달 및 현장 여건 변화를 들 수 있다. 국내 건설시장에 있어서 바닥구조시스템(Floor System)은 건설현장의 여건 변화와 시공기술의 발달 및 각종 신기술/신공법의 도입으로 다양화되고 있다.

현재 국내 건설사의 기술력 확보 노력은 고속시공, 정밀시공 분야에 집중되고 있으며, 이는 초고층화, 지하대공간화, 인건비 상승, 기술 인력 감소 등의 대안으로 가장 중요한 항목으로 대두되고 있다. 특히, 바닥구조시스템에서 지하에 신설되는 구조물의 슬래브는 프리캐스트 또는 하프프리캐스트 공법을 적용하여 전술한 기술에 대응하고 있는 실정이다. 또한 지상의 경우에도 대부분 철재 데크플레이트 등을 도입하여 현장거푸집 공정을 축소하고 있다.

또한, 현재 국내의 건축 분야 상황은 건설사와 유사한 인건비 상승, 기술 인력 감소 등에 대한 대안으로써 고속시공, 정밀시공 분야에 집중되고 있다. 특히, 지하구조물의 경우는 건식공법의 개발이 시급히 요구되고 있으며, 이러한 기술 개발의 목

표로써 복합바닥구조시스템의 SHCC 내화패널은 지하 대공간 구조물에 대한 내화대책의 일환으로 사용이 가능하고, 더 나아가 패널을 공장화 하여 사용하는 경우, 고내구성, 마감 성을 동시에 만족시킬 것으로 기대된다. 또한 지하구조물의 복합화 공법에 있어서 다기능성을 갖는 우수한 구조시스템이 될 것으로 사료된다.

2. 연구의 필요성

가. 기술적 측면

바닥구조시스템의 내화성능 확보 및 기술 확산 효과를 들 수 있다. 본 기술 개발을 통해 초고층 건축물 및 지하대공간의 내화성능을 대폭 향상시킬 수 있는 새로운 공법으로써 세계 건설시장에서 기술적 우위를 확보할 수 있다고 판단된다.

또한, 본 기술은 국내외의 섬유혼입을 통한 폭렬방지 기술 및 내화보드 등에 의한 단면 증가를 수반하는 고강도 콘크리트의 폭렬 방지기술에 대한 여러 가지 문제점을 개선한 것으로써, 향후 화재시 고강도 콘크리트의 폭렬방지 및 내화성능 향상에 기술적 우위를 점유하게 될 기술이다. 더불어 현재 국내의 경우에는 내화대책에 대한 구체적인 대안이 없거나 초기 연구단계에 있는 실정이며, 내화구조의 선진국인 일본의 경우에도 PP섬유를 혼입하여 폭렬의 방지 및 억제하는 공법이 연구의 주를 이루며 보급하고 있는 실정으로 국내뿐만 아니라 세계에서도 기술적 우위를 점할 수 있는 신기술이라 할 수 있다.

한편, 국내 건설시장에 있어서 바닥구조시스템(Floor System)은 건설현장의 여건변화와 시공기술의 발달 및 각종 신기술/신공법의 도입으로 다양화되고 있다. 전술한 바와 같이 지하에 신설되는 바닥구조시스템은 프리캐스트 또는 하프프리캐스트 공법을 적용한 기술에 대응하고 있는 점과 지상의 경우에도 대부분 철재 데크플레이트 등을 도입하여 현장거푸집 공정을 축소하고 있는 실정이다. 특히, 시공 중 기계화로 인한 시공하중의 증가는 필연적으로 바닥구조부재의 균열, 누수 등의 시공트러블에 대한 원인이 되고 있기 때문에, 이러한 균열에 대한 제어가 구조체의 품질안정 및 고급화를 위해 시급히 해결해야 될 과제라 할 수 있다. 그러나 지금까지 다양한 형식의 바닥구조시스템이 개발되어 왔으나 현실적으로 신공법의 적용은 현장여건이나 최적의 공법을 선택하는 것과는 다르게, 현재 일반적으로 사용되는 재래식 공법에 대한 의존도가 높고, 각 신공법의 장점이나 특징을 적극적으로 활용하지 못하고 있는 실정이다.

또한, 공기 단축 등을 위한 부분 복합화 공법이나, 공법 간편화를 위한 데크플레이트 등과 같은 바닥구조시스템의 적용은 상기와 같은 사용편의성이나 시공트러블 개선, 구조물의 고급화를 위한 제 조건을 충분히 만족시키지 못한다. 이에 현재 공사비에서 점차적으로 비중이 높아지고 있는 노무비 및 공기를 줄일 수 있고 균열제어 등 고품질의 바닥구조를 얻을 수 있는 고연성 시멘트 복합재료(SHCC) 패널을 이용한 복합바닥구조시스템 공법을 개발하여 이를 실용화시키고자 한다.

연구개발 성과물인 복합바닥구조시스템은 경량화가 가능하기 때문에, 층간소음, 바닥 충격 제어를 위해 증가된 바닥두께(고정하중 증가)를 효율적으로 제어할 수 있으며, 특수 콘크리트 분야에서 최근 이슈화 되고 있는 고연성 소재를 개선하여 제품화를 이루고 이에 대한 적용성을 확보한다.

고연성 시멘트 복합재료(SHCC)의 패널화 기술은 국내 최초로 도입되는 기술이며, 이를 구조부재에 적용하는 기술은 세계최초 신기술/신공법으로서 신규성이 충분하고 특허 및 건설 신기술 등 지적재산권 확보가 가능하다고 사료된다. 더욱이 본 연구개발 성과는 신규성 및 바닥구조시스템 중 가격경제성을 가질 것으로 기대되기 때문에 본 연구개발 완료 이후 현장적용실적 확보가 충분히 이루어지는 경우 건설신기술 추진/획득이 가능하며, 이를 통하여 독자적인 브랜드를 창출할 것으로 기대된다.

또한, 초고층건축물 및 지하대공간에서 내화설계 기술의 성능을 확보할 수 있는 성능적인 내화설계 방법론을 구축함으로써, 건설시장의 새로운 내화설계 방법의 도입으로 건축물의 리스크 절감을 할 수 있으며, 초고층건축물 및 지하대공간에서 내화설계기술의 실질적인 방법론으로도 이용이 가능하여 실 내화설계의 기술적 확산이 가능하다고 할 수 있다.

나. 사회・경제 산업적측면

실용화 할 수 있는 응용기술의 개발을 통해 세계 건설시장에서 기술적 경쟁력 확보가 가능하다. 또한, 산업부산물을 활용하여 경제적이며 경량의 친환경 내화소재를 개발함으로써 건식 비구조벽체 뿐 아니라, 습식 내화 뿜칠재, 내화벽돌, 내화패널 등 타산업의 내화기술에 확산효과가 우수할 것으로 기대된다. 또한, 산업부산물의 경화시스템 및 친환경 생산시스템을 개발함으로써 각종 콘크리트 2차 제품 산업에 본 기술의 확산이 크게 기대된다고 할 수 있다.

제 2 절 연구개발의 특징

본 연구는 내화성을 갖는 친환경 고연성 시멘트 개발과 이를 통한 Green SHCC를 이용한 복합바닥구조시스템 구축의 목표로 수행되었다. 연구개발의 특징으로써 다음 <표 1.2.1>과 같이 1) Green SHCC의 재료 개발, 2) Green SHCC 패널 개발, 3) Green SHCC 복합바닥체의 구조성능 평가, 4) Green SHCC 복합바닥체의 내화성능 평가를 통해 보합바닥구조시스템을 구축하고자 하였다.

<표 1.2.1> 연구개발의 특징

- 내화성을 갖는 친환경 고연성시멘트복합재료(Green SHCC) 개발

1) 친환경 고연성시멘트복합재료를 이용한 패널 소재 개발

2) 내화성능 : ISO 834 3hr 및 성능기반(PBD) 화재 안전성 확보

3) 강도성능 : 압축강도 50MPa 이상, 휨강도 20MPa 이상, 인장강도 7MPa 이상, 인장변형률 2% 이상

4) 내구성능 : 능동 균열제어특성(균열폭 100um 이하)

※ 시멘트 40% 이상을 친환경 소재로 대체

- Green SHCC를 이용한 복합바닥구조시스템 구축

1) 구조시스템 : 복합바닥구조시스템(Green SHCC+RC)

2) 시공성능 : Half Precast 방식(기계화 시공)

- 구조시스템 전용 구조설계 Software 개발(고연성 바닥슬래브 비선형 해석 및 설계 기법 개발)

- 국내 전용 PBD 기반 내화설계용 Software 개발

1) 실험결과 분석 및 열전도모델 해석데이터를 Software에 적용

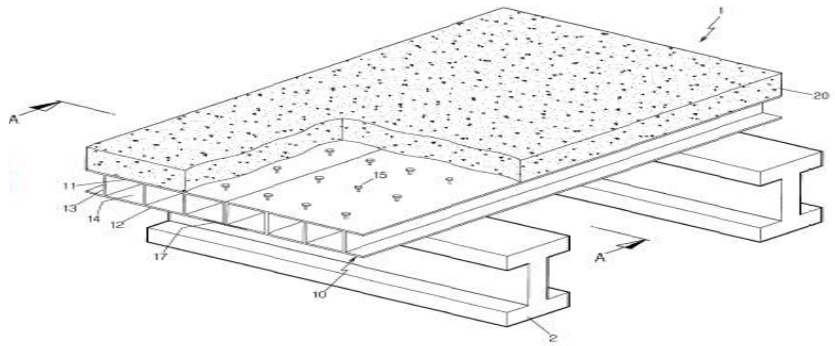
2) 개발 구조시스템의 성능기반 내화설계기술 및 Software 구축 및 개발

제 3 절 관련분야의 국내외 기술개발 현황

구조물의 건설기술 중 바닥 슬래브 시스템공법은 시공환경개선, 공정단축 및 공사비저감, 고품질의 재품을 얻기 위해 꾸준히 발전해 왔으며 최근에는 자동화 장비의 개발, 새로운 구조 개념 및 시스템의 창출, 유지관리와 구조물 해체를 위한 공법 등의 개선을 위한 기술개발이 이루어지고 있다.

특히 경제성을 고려하여 구조물의 설계단계부터 가치공학과 생애주기비용 개념을 도입하여 적절한 사용수명을 정하고 결과적으로 장수명화를 도모하는 내구설계를 시도하고 있다. 이에 따라 바닥 슬래브 시스템공법에 관한 국내 특허출원 사례를 살펴보면 다음 <표 1.3.1>과 같다. 구조물의 건설기술 중 바닥 슬래브 시스템공법은 시공환경개선, 공정단축 및 공사비저감, 고품질의 재품을 얻기 위해 꾸준히 발전해 왔으며 최근에는 자동화 장비의 개발, 새로운 구조 개념 및 시스템의 창출, 유지관리와 구조물 해체를 위한 공법 등의 개선을 위한 기술개발이 이루어지고 있다. 특히 경제성을 고려하여 구조물의 설계단계부터 가치공학과 생애주기비용 개념을 도입하여 적절한 사용수명을 정하고 결과적으로 장수명화를 도모하는 내구설계를 시도하고 있다. 이에 따라 바닥 슬래브 시스템공법에 관한 국내 특허출원 사례를 살펴보면 다음 <표 1.3.2>, <표 1.3.3>과 같다.

<표 1.3.1> 연구개발의 특징

㉮ 바닥판 골조와 콘크리트가 합성된 복합형 바닥판 [12] 문헌종류 : 공개특허 [11] 공개번호 : 10-2004.0006564 [19] 특허발행국 : 대한민국 [43] 공개일자 : 2004년 01월 24일 [21] 출원번호 : 10-2002-0040869 [51] Int Cl : E01D 19/12 [22] 출원일자 : 2002년 07월 12일 [72] 발명자 : 김병석 외 2인 [71] 출원인 : 한국건설기술연구원 [54] 발명의 명칭 : 바닥판 골조와 콘크리트가 합성된 복합형 바닥판 [대표도면] 

- [57]특허발명요약

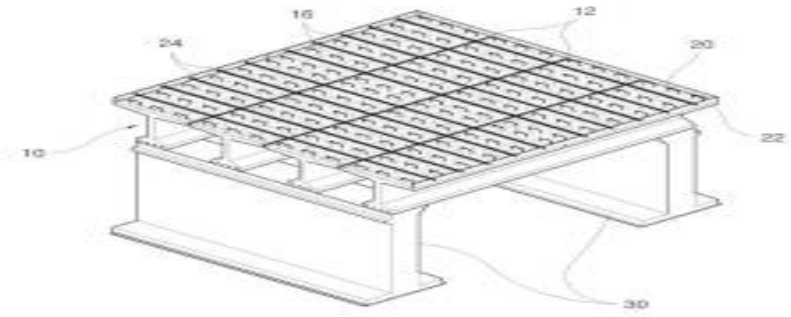
이 발명은 철근 콘크리트 바닥판과 골조형식의 바닥판이 가지는 장점을 모두 발휘할 수 있어 구조적인 안정성이 제고되고 시공성이 용이하며 공기와 공사비를 현저하게 절감할 수 있는 새로운 구조의 복합형 바닥판에 관한 것으로 소정 높이로 이격되어 있는 상부판 및 하부판과 상기 상부판 및 하부판의 사이에 형성되어 있는 격벽으로 구성되어 상부판과 하부판 사이에 격벽에 의하여 형성된 공동부가 횡방향으로 길게 형성되어 튜브형태를 이루게 되는 구조를 가진 하부골조와 상기 하부골조의 상부에 일체로 결합되어 있는 소정의 두께의 콘크리트 슬래브로 구성되는 것을 특징으로 하는 복합형 바닥판이 제공된다. 이 발명에 따른 복합형 바닥판은 경량 고강도 재료로 이루어진 하부골조와 콘크리트 슬래브가 합성되어 있는 구조를 가지고 있으므로 종래에 단순히 철근 콘크리트만으로 구성된 바닥판에 비하여 콘크리트의 다면 두께를 현저하게 줄일 수 있으며 그에 따라 바닥판의 자중이 줄어들게 되어 이를 지지하는 하부 구조의 단면 확대를 예방할 수 있게 된다. 또한 바닥판의 취성 파괴가 방지되어 구조물의 파괴를 예측하는 것이 가능하게 되고 그에 따라 구조물 파괴에 적절히 대비하는 것이 가능하게 된다.

㉮ 하프 프리캐스트 슬래브 유닛 거더 구조 및 이를 이용한 교량상부 시공방법

[12] 문헌종류 : 등록특허 [11] 등록번호 : 10-0836079
[19] 특허발행국 : 대한민국 [24] 등록일자 : 2008년 06월 02일
[21] 출원번호 : 10-2008-0002340 [51] Int Cl : E01D 2/00 E01D 21/00
[22] 출원일자 : 2008년 01월 08일 [72] 발명자 : 김태현
[73] 특허권자 : 주식회사 지구코퍼레이션

[54] 발명의 명칭 : 하프 프리캐스트 슬래브 유닛 거더 구조 및 이를 이용한 교량상부 시공방법

[대표도면]



- [57]특허발명요약

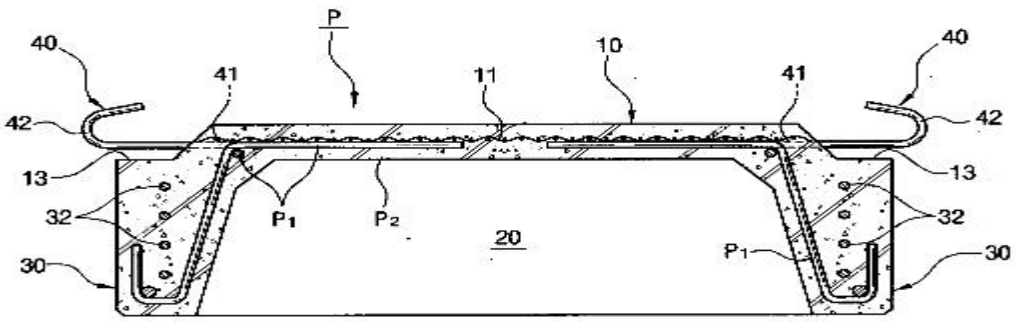
이 발명은 하프 프리캐스트 슬래브 유닛 거더 구조 및 이를 이용한 교량상부 시공방법에 관한 것으로 프리캐스트로 제작된 하프 슬래브(거더 상부플랜지)를 포함하는 거더를 횡방향으로 서로 연결하여 교축방향에 대하여 직각방향의 교량 슬래브 폭을 형성하면서 하프 프리캐스트 슬래브위의 상부공간에 PC강선을 교축 직각방향으로 설치하고 현장타설 하프 바닥판을 형성하여 바닥판에 횡방향의 프리스트레스를 도입하는 것을 특징으로 함과 동시에 프리캐스트가 갖는 공기단축의 장점과 현장타설이 갖는 유연성의 장점 즉 PC강선이 삽입된 쉬스관 설치의 용이성과 종·횡단면 구배가 현장 타설과 동시에 이루어지는 장점을 조화시킨 공법이다.

㈐ 프리캐스트 콘크리트패널 및 그를 이용한 슬래브의 시공방법

[12] 문헌종류 : 등록특허
[11] 등록번호 : 10-0760393
[19] 특허발행국 : 대한민국
[24] 등록일자 : 2007년 9월 13일
[21] 출원번호 : 10-2006-0095620
[51] Int Cl : E04B 5/02 E04B 5/04 E04B 5/32
[22] 출원일자 : 2006년 09월 29일
[72] 발명자 : 이경우, 박성순
[73] 특허권자 : 주식회사삼환까뮤

[54] 발명의 명칭 : 프리캐스트 콘크리트패널 및 그를 이용한 슬래브의 시공방법

[대표도면]



- [57]특허발명요약

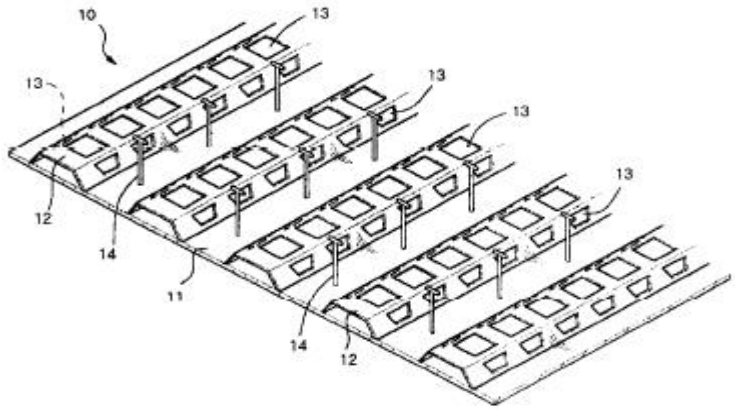
이 발명은 슬래브의 시공시 구조적 안정성 및 시공품질을 향상시키는 동시에 연속성을 지속적으로 유지할 수 있도록 한 프리캐스트 콘크리트패널 및 그를 이용한 슬래브의 시공방법을 제공하기 위한 것이며 판체부 하부의 둘레에 분할형 작은 보가 배치되도록 하고 판체부의 양측 코너부에는 연결철물들이 배열되도록 프리캐스트 콘크리트패널을 구성하여 거치상태를 개선시키고 접합부 강성을 증대시켜 주는 동시에 습식구조로 견고히 연결 접속되도록 시공할 수 있게 함으로써 프리캐스트 콘크리트패널이나 큰 보가 압축력에 의해 손상되는 현상이 발생됨을 방지하면서도 프리캐스트 콘크리트패널과 큰 보 사이의 상부에 덮여진 토핑콘크리트가 들떠서 균열이 발생됨을 방지하고 프리캐스트 콘크리트패널 간의 접합부에 균열이 발생됨을 방지하며 조립 설치된 프리캐스트 콘크리트패널들의 접합부가 이완되는 일이 없이 연속성을 유지할 수 있게 한 것이다.

㉱ 골판형 데크플레이트

[12] 문헌종류 : 공개특허
[11] 공개번호 : 10-2004.0006564
[19] 특허발행국 : 대한민국
[43] 공개일자 : 2004년 01월 24일
[21] 출원번호 : 10-2002-0034182
[51] Int Cl : E01D 19/12
[22] 출원일자 : 2002년 07월 12일
[72] 발명자 : 김병석 외 2인
[71] 출원인 : 한국건설기술연구원

[54] 발명의 명칭 : 바닥판 골조와 콘크리트가 합성된 복합형 바닥판

[대표도면]



- [57]특허발명요약

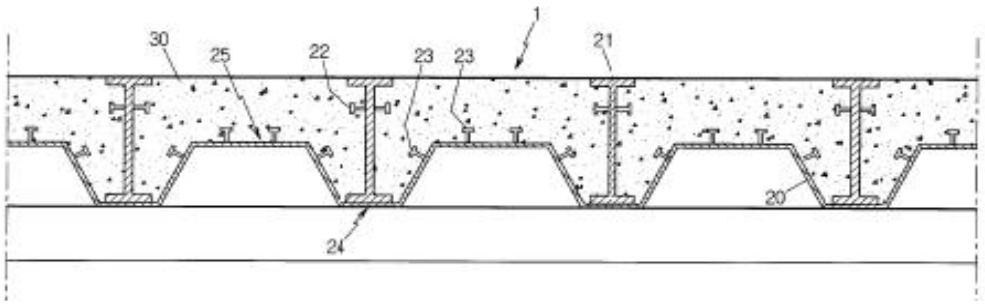
이 발명의 목적은 데크플레이트를 고판형으로 함으로써 시공이 용이하고 콘크리트와의 부착력이 우수하여 미관을 해치지 않도록 하기 위한 것이며 이와 같은 목적을 달성하기 위하여 교량의 상판이나 건축물의 각 층 바닥에 설치되는 공지의 데크플레이트에 있어서 평판상에 다수의 통공을 갖는 골판과 스터드를 일정 간격으로 형성함을 특징으로 하며 구조물을 시공할 때 데크플레이트의 하측에 가 시설물을 설치하지 않아도 되어 공사가 용이하고 비용이 절감되며 안전사고 등의 우려가 감소되고 휨모멘트의 보상력이 크며 데크플레이트와 콘크리트의 부착력이 우수하여 장시간이 경과하더라도 상기 데크플레이트와 콘크리트가 서로 분리되지 않아 상판의 안전도와 내구연한이 증대됨과 아울러 외부로 노출되는 데크플레이트의 미관이 양호하고, 경량구조물인 경우 철근을 배근하지 않아도 되어 상판의 두께도 줄일 수 있는 공법이다.

㉮ 요철형 데크플레이트와 I형 빔의 복합형 합성 바닥판 및 그 시공방법

[12] 문헌종류 : 공개특허
[19] 특허발행국 : 대한민국
[21] 출원번호 : 10-2002-0041239
[22] 출원일자 : 2002년 07월 15일
[71] 출원인 : 한국건설기술연구원
[11] 공개번호 : 10-2004-0007956
[43] 공개일자 : 2004년 01월 28일
[51] Int CI : E04B 5/40
[72] 발명자 : 정연주

[54] 발명의 명칭 : 요철형 데크 플래이트와 I형 빔의 복합형 합성 바닥판 및 그 시공방법

[대표도면]



- [57]특허발명요약

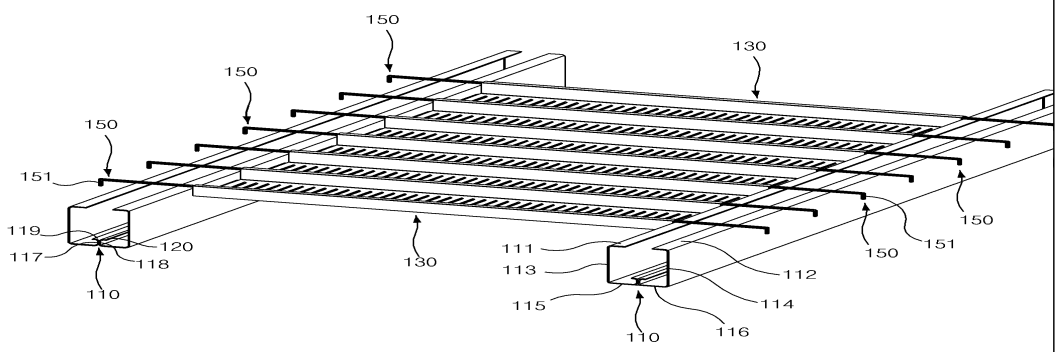
이 발명은 데크플레이트에 I형강을 설치하여 콘크리트에 매립함으로써 구조적인 성능이 더욱 향상되어 교량 등의 토목 구조물에도 사용할 수 있는 새로운 구조의 복합형 합성 바닥판에 관한 것으로 오목부와 볼록부로 이루어진 요철이 형성되어 있으며 표면에는 콘크리트와의 전단합성을 위한 전단 연결재가 구비되어 있는 데크플레이트와 상기 데크플레이트의 상기 오목부에서 상기 데크플레이트와 일체로 결합되어 설치되며 그 외면에는 콘크리트와의 전단합성을 위한 전단 연결재가 구비되어 있는 I형 빔과 상기 데크플레이트의 상부에서 상기 I형 빔이 내부에 매립되도록 소정 높이로 타설되어 상기 데크플레이트 및 I형 빔과 일체로 결합되는 콘크리트로 이루어지는 구성을 가지고 있는 것을 특징으로 하는 복합형 합성 바닥판 및 그 시공방법이다.

㉯ 층고 절감형 합성 슬래브 거더

[12] 문헌종류 : 등록특허
[11] 등록번호 : 10-0887389
[19] 특허발행국 : 대한민국
[24] 등록일자 : 2009년 2월 27일
[21] 출원번호 : 10-2008-0091659
[51] Int CI : E04B 5/40 E04B 5/16 E04C 3/293
[22] 출원일자 : 2008년 09월 18일
[72] 발명자 : 황광호 외 2인
[73] 특허권자 : 주식회사 성림피에스

[54] 발명의 명칭 : 층고 절감형 합성 슬래브 거더

[대표도면]



- [57]특허발명요약

이 발명은 보의 상면에 용접 고정한 철근에 데크를 거치하여 층고 절감뿐만 아니라 보강철근, 불연속 구간을 연속구간으로 형성하여 전단력 보강, 스터드 철근 역할을 할 수 있는 합성 슬래브 거더에 관한 것으로 보의 상면에 데크거치 철근을 용접고정하기 때문에 작업 공간을 충분히 확보하여 시공이 편리하면서 층고 절감을 구현하고 보와 데크 사이의 불연속 구간(전단력 취약구간)을 환봉의 데크거치 철근이 연속 구간으로 형성하여 전단력을 보강하여 휨 강성을 증가시킨다. 또한 이형 철근과 달리 환봉으로 용접하기 때문에 보와 환봉간의 용접면적을 충분히 확보하여 우수한 용접성과 결합성을 확보하며, 데크거치 철근의 끝단이 스터드 역할을 하여 콘크리트의 접합면에서 슬라이딩이 발생하지 않도록 하여 완전한 합성 구조체를 이루는 것이 특징이다.

② 내화기술 관련 특허 동향

㉮ 내화 내진 모르타르 조성물 및 이를 활용한 고강도 내화,내진 패널의 제조방법 [10-2008-0070852]

㉯ 다량의 단섬유가 함유된 고인성 내화보수 모르타르의 시공장치 [10-2007-0083235]

㉰ 프리컬럼을 사용한 폭렬방지형 고강도 철근콘크리트기둥부재의 제작 방법 [10-2007-0073286]

㉱ 자기 충전성을 갖는 내화충전모르타르를 사용한 고강도 콘크리트의 폭렬방지공법 [10-2006-0026737]

㉲ 영구 거푸집 및 내화패널 겸용의 고강도 고인성 패널을 사용한 고강도 콘크리트 부재의 내화공법 [10-2006-0025215]

<표 1.3.2> 판넬 관련 국내 특허 분석(관련기술)

특허권자	특허명	출원일	주요사항	사용재료									문제점	향후전망
삼성물산(주)	합성펄프 시멘트복합체 및 그 제조방법	1996.9.5	●무석면 ●석면대신 합성펄프 대체	OPC	규사	$AL_2(SO_4)_3$	충전제[1]	Fiber 합성펄프[2]		계면 결착제[3]			●내화성능 미확보 ●제품 생산되고 있지 않음	●사업화 가능성 없음
				60-100		0.1-0.2	25	2.0-10.0		0.1-0.5				
(주)벽산	아파트 및 오피스텔의 건식내벽	2000.3.21	●공사비 절감/공기단축/시공성/내화성능 향상 ●고강도/저비중(1.4) ●내화성능 확보	OPC	규석분[4]	Sand	질석[5]	W 공업용수	Fiber 무기[7]	Fiber 펄프[8]	보습제[6]		●건축용 내화성능 확보(ISO 834) ●토목내화성능 없음(RABT, RWS)	●성능개량을 통한 토목사업진출가능성 없음
				42	20	20	4	35	7	6	1			
한국건설기술연구원	진공압출성형 시멘트 건축자재 및 그 성형방법	2000.8.14	●석면대신 Sepiolite 섬유 대체	OPC	규사	W	Fiber				가소제[9]		●내화성능 미확보 ●제품 생산되고 있지 않음	●사업화 가능성 없음
							Sepiolite	Cellulose	PP					
				50-65	30-40	23-30	0-3	1.5-3	0.1-0.5		0.5-1			
(주)KCC	내화용 무석면 압출성형 시멘트 복합체	2003.12.31	●내화성능 향상세, 강화제, 경장레, 증점제 사용 ●석면대신 PEN 섬유 사용	OPC	W	이수석고	SF	Sand[10]	Perlite	Fiber Cellulose	Fiber PEN	증점제[11]	●건축용 내화성능 확보(ISO 834) ●토목내화성능 없음(RABT, RWS)	●성능개량을 통한 토목사업진출가능성 없음
				25-60	15-45	5-40	5-40	3-40	1-10	1-10	0.1-2.0	0.5-1.5		
(주)코엠이엔지	무석면 압출성형식 건축자재조성물 및 이를 이용한 건축성형품	2003.2.4	●2mm이상의 세피오라이트 사용	OPC	규사		Fiber				가소제		●내화성능 미확보 ●단순 건축물 칸막이용 판넬로써 이용	●내화성능 확보를 위한 새로운 제품 개발 필요
							Sepiolite							
				45-65	20.3-45		9-13				0.7-1.7			
(주)익성텍	건축용 내벽체 및 이 내벽체의 시공방법	2005.10.6	●상기 압출성형 시멘트 판넬이용 ●내화성능 확보 2시간	공법 특허									공법특허임	없음

1) 충전재: 카올린, 플라이애쉬, 마이카 및 탈크로 구성된 그룹 중에서 선택
2) 합성펄프 : PVA 펄프, PP 펄프, PE 펄프, 폴리에스트르 펄프, 아라미드 펄프 및 아크릴 펄프로 구성된 그룹 중에서 선택
3) 계면결착제 : 폴리아크릴아미트계 수지
4) 규석분 : SiO2의 공공급원 및 제품의 강도 발현 작용/ SiO2가 90% 이상인 분말 원료를 사용
5) 질석 : 경량, 단열, 내화효과의 작용/ KS F 3702에 합격한 제품 사용
6) 무기섬유 : 인장, 강도보강과 원료손실의 방지작용/ Chrysotile, Sepiolite, Mica, Recm, Envirofil, Glass Fiber 중에서 선택
7) 펄프 : Deinked Pulp, Surface Pulp, Alkaline Pulp, Nadel Bleached Drapt Pulp, Old News Paper 중에서 선택
8) 보습제 : 제품 생산시 보습, 윤활작용/ Methly Celluloas 사용
9) 가소제 : 에터펄자이트플레이와 MC계열 가소재의 혼합물로써, 전체중량을 기준으로 0.2 내지 1.0:0.5내지 0.7의 배율로 배합
10) 모래 : 규사를 자력선별한 자선태일+퍼라이트 원석(열적 안정성/흡열성)
11) 증점제 : Meto-cellulose(내화제)

<표 1.3.3> 판넬 관련 국외 특허 분석(관련기술)

특허권자	특허명	출원일	주요사항	사용재료									문제점	향후전망
(주)쿠보타	내화성, 고강도 무기질 판재의 압출성형 방법	1993	•무기질 판재의 내열성/내폭렬성 향상 •피목재료-AL 시멘트, FA, 수산화마그네슘 분체 혼합	C	Binder	Sand	$Mg(OH)_2$	Fiber		펄프[12]	보습제[13]		•건축용 내화성능 확보(ISO 834) •토목내화성능 없음(RABT, RWS)	•국내 진출가능성 없음
				40	35-40	15	10			5	1			
(주)쿠보타	섬유보강 시멘트 판의 압출성형 방법	1993	•섬유(PEN)가 열화 하는 것을 방지하여 보강효과 향상	C[14]	Binder	규사	W	Fiber		펄프	보습제		•내화성능 미확보	•국내 진출가능성 없음
								PEN						
				50		45	18	2		3	1			
(주)카지마 건설	외벽 횡인장 용 중공 압출성형판	1993	•단면 접합부의 지수성 확보 •중공압출성형한 FRP 경화판	정보공개 없음									•건축용 내화성능 확보(ISO 834)	•공법특허
(주)플라스틱 공학 연구소	섬유보강 압출성형 시멘트 판의 제조방법 및 이러한 시멘트 판의 용도	1995.6.13	•유기섬유(PP/Carbon) 보강시멘트계 압출성형 재료 •휨강도 30MPa 이상 •비닐 단량체(VMA)	C	Binder	Sand	W	Fiber		유화제[15]	보습제		•유기계 재료(무기계 재료인 콘크리트와 일체성 문제)	•국내시장에 적용가능성 없음
								PP	Carbon					
				100			20-60	0.3-0.6	1.0-6.0	3-50				
				100			20-60			5				
공업기술원장	시멘트 압출성형품의 제조방법	1995.7.25	•PVA시멘트계압출성형재료 •Autoclave 양생온도의 변화에 따른 필요성능 만족	C	Binder[16]	Sand[17]	W	Fiber		펄프	보습제	기타[18]	•본 연구개발 기술과 유사	•가격경쟁력 없음
								PVA[19]	광물					
				100	8-20	0.7-1.0		2-10			0.5-3.0	●		
				47.8	4.78-9.56	47.8	19.1	1.44		1.92	0.96	×		
쿠라시키 방적(주)	단섬유 보강 시멘트계 압출성형 재료	2002.11.27	•PP 보강 시멘트계 압출성형 재료 •인장/휨거동시 다수균열 특성	C	Binder[20]	Sand	W	Fiber		펄프	보습제	기타	•본 연구개발 기술과 유사	•가격경쟁력 없음
								PP[21]	광물[22]					
				100	50-80			3-10	3-25	2-30	2-7	●		
				100	63.5		42	7.7	5.0	1.925	6	×		
쿠라시키 방적(주)	단섬유 보강 시멘트계 압출성형 재료	2003.05.08	•인장/휨 거동시 다수균열 •증기양생(습도 98%/70° C 5hr)	C	Binder	Sand[23]	W	Fiber		펄프	보습제	기타	•본 연구개발 기술과 유사	•가격경쟁력 없음
								PVA	광물					
				100	50-80	1-100		2-10	3-25	2-30	2-7	●		
				100	63.5	6-60	77.5-118.8	5.1-8.0	5	5	6	×		

12) 펄프: 성형체의 표면 평활재료(천연펄프, Virgin 펄프, 재생펄프, 목재펄프, 화학펄프, 기계펄프)
13) 보습제: 혼합물에 점성을 부여해 성형성을 향상시키는 재료(수용성 셀룰로오스-메틸/에틸/알킬/히드록시 에틸/히드록시 이시르메치르세르로서히드록시 프로필 메틸/히드록시 에틸)
14) Cement : 포틀랜드시멘트, 용광로 시멘트, 플라이에쉬시멘트, 알루미나 시멘트, 실리카시멘트, 마그네시아 시멘트, 유산염 시멘트를 모두 포함
15) 역유화제 : 아미노기 함유 축합반응 생성물/유기 설폰산/유기산성 인산 에스테르의 중화물(단독 또는 2종이상 혼합사용)
16) Binder(고강도 부가재) : 가소묘우반석, 비정질 실리카, 알루민산 나트륨, 수산화마그네슘
17) Sand : 천연모래(천연사, 쇄석), 재생모래, 합성모레
18) PVA : (주) 쿠라레 제품(길이 3-15mm, 직경 5-200um, Aspect Ratio : 150-1000인 단섬유)
19) 기타 첨가제 : 필요에 따라 실리카 이외의 무기질 재료/유기섬유/감수제/계면 활성제/ 증점제 등을 배합
20) Binder : 성형체의 강도향상 및 치수 안정성에 기여(비표면적이 3,000-15,000 cm2/g의 규석가루, 규사)
21) PP : 길이 3-15mm, 직경 50200um, Aspect Ratio 150-100의 폴리프로필렌 단섬유
22) 광물섬유 : 성형체의 유동성/강도향상(세피오라이트/워라스트나이트/탈크/.아타파르쟈이트/암면)
23) Sand : 경량골재(비중 0.06-0.5로 설정할 수 있는 진주암펄라이트, 흑요석 펄라이트, 버미큐라이트)

제 4 절 연구개발의 차별성

국내의 바닥구조시스템은 크게 재래식공법, 철근일체형데크공법, 무지주합판거푸집공법 3가지가 일반적으로 사용된다. 이러한 공법에 대하여 다음 <표 1.4.1>에 비교하분석 하였다.

<표 1.4.1> 현행기술과 SHCC 복합바닥구조공법 비교

항 목		본 연구개발 공법	재래식	철근일체형데크	무지주합판거푸집
시스템 모식도					
안전성	안전사고	안전한 시공 가능	대처미흡	강판 용접부위 다소미흡	볼트형식/육안확인 가능
	현장정리	양호	미흡	양호	양호
시공성	공장제작	SHCC PCa_철근트러스+배력근	없음	아연도금강판+철근트러스	합판+철근트러스+(배력근)
	제작규격	폭 600㎜, 길이 4000㎜(무지주)	현장제작설치	폭: 600㎜ 길이:3900㎜(무지주)	폭:슬래브폭, 길이:3900㎜(무지주)
	하부노출면	SHCC	콘크리트면	아연도금 강판	콘크리트면
	서포트설치	미설치	설치	미설치 (4m 이하)	미설치 (4m 이하)
	가설재해체	불필요	거푸집, 장선, 멍에, 동바리	불필요	슬래브 하부 합판
	공사기간	6일	9일 (해체기간포함)	6.2일	6일 (해체기간포함)
시공트러블 대처	균 열	무 발생하여도 미세균열	발생시 구조균열-에폭시 비구조균열-페이스트마감	무	발생시 구조균열-에폭시 비구조균열-페이스트마감
	누수	발생하지 않음(미세균열)	발생시 방수작업 병행	용접부 누수 가능성	발생시 방수작업 병행
	백화현상	발생하지 않음(공장제작)	발생가능성	무	발생가능성
	표면상태	공장제작면 노출 (미관 수려)	타설불량 발생 가능성 (스페이서 및 세퍼레이터 노출 가능성)	아연도금 강판	타설불량 발생 가능성 (볼트 노출-부식가능성)
장 점		-SHCC의 복합바닥구조 시스템(브랜드) 적용 -시공트러블(하부균열) 무 -배근간격 및 피복유지 (품질향상) -동바리 필요없음 -우수한 내구성(SHCC의 특징)	-친숙한 공법 -변경이 용이함 -기존자재 활용 -자재수급 및 현장 대체 가능 -형상에 제한이 없음. -설비 전기 작업이 비교적 용이	-공기단축 -현장인력감소 -탈형작업없음 -경량임 -배근간격 및 피복을 유지하여 품질향상. -소형으로 판개용이 -동바리 없음	-공기단축 -현장인력감소 -현장가공이 용이함 -쉽고간편한 탈형 -배근간격 및 피복을 유지하여 품질향상. -볼트 구멍을 이용 설비 달대공사 용이 -동바리 없음
단 점		-새로운 공법에 대한 기술력 확보 문제 -장비사용 증가	-층고 영향을 받음 -폐자재 다량 발생 -안전사고위험 -공정이 많음 -배근간격 및 피복의 균일한 확보가 어려움. (하자발생)	-균열, 누수등의 하자발견 어려움 -강판의 녹발생 -현장가공 어려움 -하부강판의 일회적 사용으로 경제성 결여	-중량이므로 장비 사용 증가 -도면 변경시 시간필요 -천정이 없을 경우 볼트구멍에 별도 작업이 필요함.

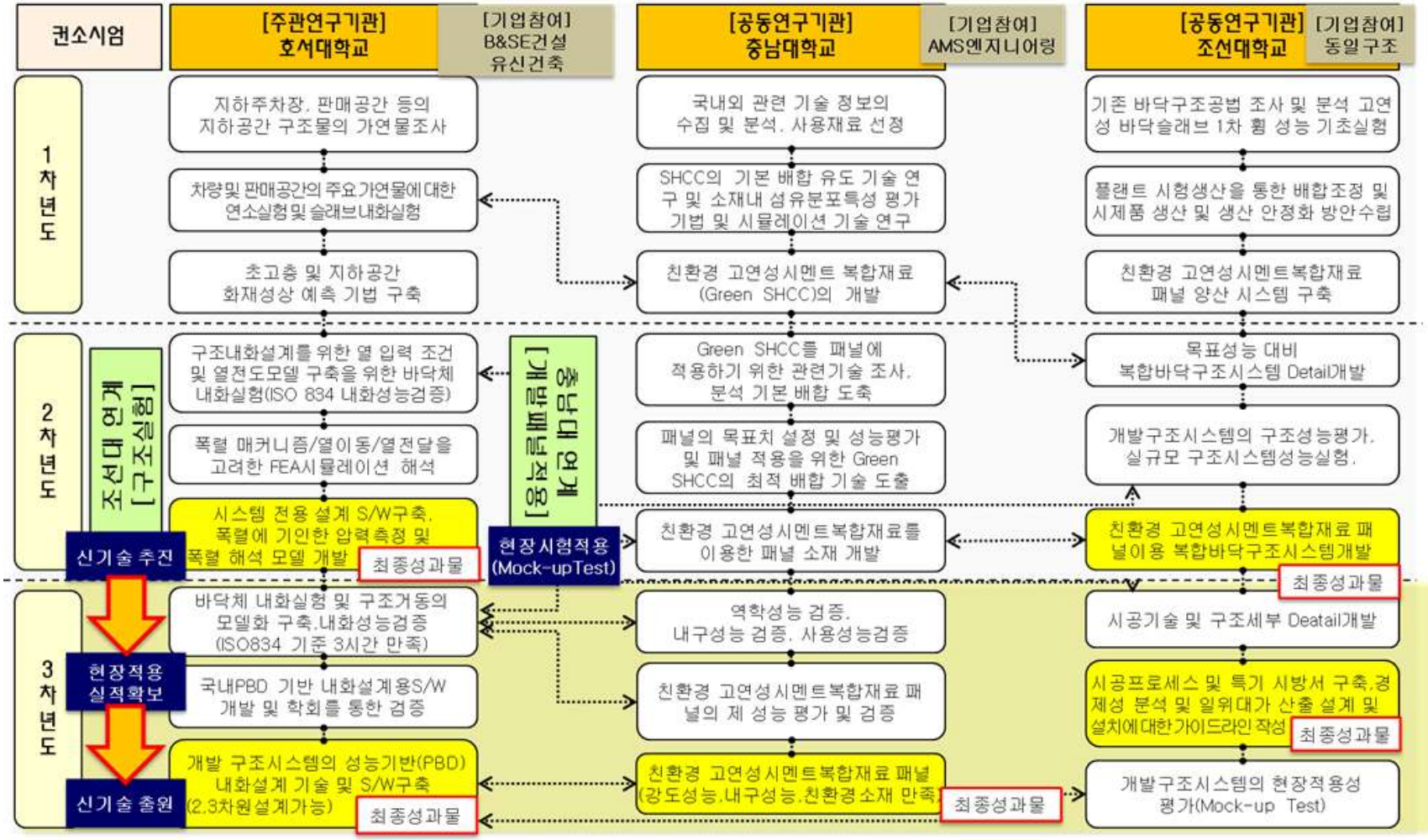
제 2 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 연구수행 전략 및 방법론

1. 연구범위 및 연구수행방법

<표 2.1.1> 본 연구의 범위 및 연차별 연구수행방법

구분	주관연구기관 (호서대)	공동연구기관 (충남대)	공동연구기관 (조선대)	참여기업
1차년도	▪ 초고층건축물 및 지하공간의 화재성상 예측 기법 구축	▪ 친환경 고연성시멘트 복합소재(Green SHCC)의 개발	▪Green SHCC 적용 바닥구조시스템 개발을 위한 기초연구	▪연구지원
	-초고층건축물, 판매공간의 지하주차장 가연물 조사(지역별, 시간대) -자동차 연소 실물화재 및 슬래브 내화실험계획구성 -퍼니처 연소 화재 실물화재실험 및 슬래브 내화실험 -연소화재 실험 및 내화실험후 결과 DATA 정리 및 확보	-기존자료 수집 및 비교・분석 -Green SHCC 시멘트 매트릭스 사용재료 결정(친환경 대체결합재 선정) -보강섬유 선정 및 혼입률 결정 -Green SHCC 배합결정 -Green SHCC 복합재료 내 섬유 이미지 검출 기법 제시 -섬유 이미지 검출을 통한 분산성 평가 -Green SHCC의 1축 인장거동실험 -최적배합 도출 및 이를 이용한 활용기술 특허출원(공법)	-기존 국내외 최신 바닥구조시스템 자료 수집 및 분석 -고연성 바닥슬래브 1차 휨 성능 기초 실험 -Green SHCC 적용바닥구조시스템 기본(안)개발 -바닥슬래브의 설계식 개발 및 설계강도 평가 -특허출원(구조시스템)	-바닥구조시스템 기본설계안 작성 -기존 ECC 기술 지원
2차년도	▪ 개발구조시스템의 해석/ 설계 기법 구축	▪ 친환경 고연성시멘트복합재료를 이용한 패널 소재 개발	▪고연성 복합바닥 구조 성능평가	▪연구지원
	-구조내화설계를 위한 열 입력 조건 DATA 조사 -Green SHCC바닥구조 내화 실험 -Green SHCC바닥구조 잔존내력 실험 -Green SHCC의 열전도모델해석 -구조내화설계를 위한 열 입력조건 및 열전도모델 구축 -폭렬에 기인한 압력측정 DATA 분석 및 해석	-패널 소재 관련기술 조사분석 -장지간(long-span)화가 가능한 Green SHCC 패널 제조방법 도출 -패널 성형을 위한 재료배합기술 개발 -개발 패널의 역학적 성능 평가및 공인시험 검증(Lab. scale, 압축강도, 휨강도, 인장강도, 인장변형률 등) -개발 패널의 내구성능 평가(능동 균열제어특성(100㎛이하)) -Green SHCC 패널의 플랜트 시험생산(실험용) 및 양산화 방안 도출	-고연성 복합바닥 시공세부 Detail 개발(패널 접합부 및 단부) -접합부 전단 실험 -실대형 바닥구조시스템 구조성능 실험 및 기존기술 대비 평가 -바닥구조시스템의 시공하중에 관한 실험적 검토 -고연성 바닥슬래브 비선형 해석기법 개발	-시공Detail 설계 및 지원 -패널 양산화 방안 -패널 경제성 방보 방안
3차년도	▪ 개발 구조시스템의 성능기반(PBD) 내화설계기술 및 S/W구축(2,3차원설계가능)	▪ 친환경 고연성시멘트복합재료 패널 양산 시스템 구축	▪고연성 복합바닥공법 실용화 기술개발	▪실용화 기술 개발 지원
	-바닥체 내화실험 및 구조거동의 모델화 -폭렬메커니즘, 열이동, 열전달을 고려한 해석 및 검증 -친환경 고연성시멘트복합재료 패널의 (ISO834기준 3시간만족) 건설기술연구원에 검증 의뢰 -한국형 PBD기반 내화설계 S/W 개발 프로그램을 관련학회를 통한 검증 의뢰 -전용 PBD 기반 내화설계용 S/W(2,3차원 설계가능) 구축 및 프로그램 등록 -개발된 신기술 건설신기술 신청	-균질한 패널 확보를 위한 Green SHCC 품질관리 평가 지침 개발 -무균열 상태 개발패널의 내구성능 검증(탄산화, 염화물 침투저항성, 동결융해 저항성 평가) -사용성능 검증(내 휨 피로특성, 균열상태의 내구성능 검토) -Mock-up 시험시 패널의 현장적용성 평가(접합부 충진재, 타설시 밀실성 등) -외부 폭로실험 및 평가 -현장적용시 품질관리 및 모니터링(현장적용 시험성적서 확보) -LCC 분석 -유지관리 지침서 개발 -특허 등록	-구조설계지침(안) 및 전용 구조설계 S/W개발(메뉴얼 및 등록) -지침 및 S/W의 학회 검증 -현장적용성 검토(Mock-up 시험) -시공단계 별 문제점 해결방안 강구(시공효율성 개선 및 평가) -경제성 분석 -선행기술 조사(평가) -특기시방서 개발 -일위대가 및 원가계산서 작성 및 검증 -설계 Sharp Drawing(도면) -특허 등록	-현장시험시공 -특기시방서 -유지관리 지침서 -구조설계 매뉴얼 -일위대가 및 원가계산서 -Sharp Drawing



<그림 2.1.1> 본 연구의 연구수행 컨소시엄

본 연구는 고연성 시멘트복합재료 개발 및 바닥구조시스템 구축기술의 명칭으로 진행하는 과제이며, 지하 대공간 및 지하주차장을 대상으로 연구가 수행되었다. 이에 따라 다음 <그림 2.1.1>, <표 2.1.1>과 같이 주관기관 호서대의 방재기술, 공동기관의 충남대는 재료기술, 조선대의 구조기술을 이용하여 본 연구의 목표인 내화성능을 확보한 재료개발과 복합바닥구조시스템의 개발을 위해 연구를 수행하고자 하였다.

연구수행의 전략 및 방법으로써 국내외 고연성시멘트 복합재료와 관련된 기존 문헌조사 및 재료 특성을 조사하고, 현재 사용되고 있는 바닥구조시스템 및 공법에 대한 현황조사 및 분석을 수행하였다. 이를 바탕으로 친환경 고연성 시멘트복합재료 및 패널을 개발하여 재료성능의 확보를 위해 다음 <표 2.1.2>와 같이 국내 전문 시험인증기관에서 시험의뢰를 통해 성능을 검증하고자 하였다.

<표 2.1.2> 국내 시험인증기관 및 시험항목

시험 기관	시험 항목		검증 기준
한국건설생활 환경시험연구원 (이하, KCL)	압축강도	수증양생	KS F 2405
		증기양생	
	휨 강도	수증양생	KS F 2408
		증기양생	
	동경융해		KS F 2456
	염소이온침투저항성		KS F 2711
	중성화		KS F 2596
방재시험연구원 (이하, FILK)	바닥 가열로 1시간 (α =510) (비재하)		-
	바닥 가열로 2시간 (α =510) (비재하)		
	바닥 가열로 2시간 (비재하)		KS F 2257-5
	바닥 가열로 3시간 (비재하)		
	바닥 가열로 3시간 (재하)		
한국건설 기술연구원 (이하, KICT)	Furniture Scale Calorimeter		ISO 9075
	Large Scale Calorimeter		-

제 2 절 연구수행 내용 및 결과

1. 국내・외 기술개발 현황

가. 기존 고연성 시멘트 복합재료에 대한 역학적 특성

그 동안 주요 건설재료로서 널리 사용되어 온 콘크리트는 성질이 취성적이며, 인장 및 휨성능이 낮은 본질적인 결함이 있다. 또한 압국내・축강도의 증가로 콘크리트의 취성파괴(brittle failure)가 더욱 문제되고 있다. 이러한 결함과 문제점을 개선하기 위하여 최근 국내·외에서 활발히 연구되고 있는 연성 재료로서 섬유보강 콘크리트(Ductile Fiber Reinforced Concrete)가 있다.

이 재료는 단섬유상의 보강용 섬유를 시멘트 매트릭스 중에 랜덤(random)하고 균등하게 분산시킨 복합재료이다. 역학적 특성으로서 휨, 인장, 압축 파괴가 일어날 때 인성이 대폭적으로 향상됨은 물론, 휨응력을 받을 때 다수의 균열이 분포되는 특성을 갖고 있으며, 다수균열이 발생하는 것과 동시에 겉보기 변형이 증가하면서 응력도 증가하는 변형경화(strain hardening) 특성을 나타낸다. 그리고 재료적인 측면에서도 강도가 증가함에 따라 시멘트 경화체의 밀실화로 각종 열화인자의 침투 및 확산계수가 낮은 고내구성을 지니고 있다.

국내에서도 최근 고인성 콘크리트 일종인 고인성 섬유보강시멘트 복합체로 선유도 보도교에 적용된 사례가 있어 관심이 높아지고 있으나, 이에 대한 실질적인 연구는 매우 미미한 실정이다. 기존의 콘크리트로도 배합기술과 콘크리트 생산 품질관리 및 현장 콘크리트 공사 품질관리의 향상을 통하여 구조물의 장수명화를 달성할 수 있겠지만, 수명증가에는 어느 정도 한계가 있을 것으로 판단된다. 이를 극복하기 위해서는 역학적 성능뿐만 아니라 재료적인 내구성능도 기존의 콘크리트보다 훨씬 우수한 고인성/고내구성 콘크리트를 개발하고 이를 실용화하는 시도가 더욱 확대될 전망이다.

한편 종래의 섬유보강 콘크리트는 기존의 콘크리트의 역학적 특성을 향상시킨 재료로서 국내에서도 교량, 터널 등에 많이 적용되고 있다. 이 중에서도 강섬유로 보강한 콘크리트(SFRC)가 많이 사용되고 있으며, 역학적 특성 및 내구성 측면에서도 다른 섬유를 사용한 콘크리트에 비해 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나 염해 및 중성화에 의한 부식에 취약한 것으로 알려져 있으므로, 이에 대한 대책이 마련되어야 하는 실정이다.

나. 연구 동향

고인성 콘크리트 중 대표적인 ECC는 모르타르에 2% 이내의 섬유를 혼입함으로써 금속과 같은 인장변형률 경화거동을 나타내는 고인성 섬유 복합재료로서 Li 등이 제안한 마이크로역학(micromechanics)과 Marshall 등이 제안한 안정상태 균열이론(steady-state cracking theory)을 이론적인 배경으로 미국의 미시간 대학에서 1990년대 개발하였고, 이후 현재까지 국내 및 해외에서 많은 연구가 진행되고 있다.

ECC 설계의 기초자료 수집을 위한 실험이 진행되고 있으며, 김은 역학적 이론을 근거로 ECC 매트릭스 배합을 설계하고 그에 따른 시공 성능에 관하여 연구하였으며, 인장변형률 경화거동을 만족하기 위한 최적의 ECC 재료를 선정 및 재료의 최적 배합 비율을 실험을 통하여 검증하였다. 또한 레올로지 실험을 통하여 뿜칠과 자기충전 시공이 가능한 ECC를 개발하였다. Wang과 Wu는 마이크로역학에 근거한 ECC 매트릭스 설계하고 구조물 적용을 목표로 하는 PVA-ECC를 설계하는 논문을 발표하였다.

개발된 ECC를 활용하는 방안으로 압출성형 기법을 적용하여 안정적인 제품 생산화에 대한 연구가 수행되어왔다. 김은 혼화재료를 혼입하여 기존의 압출성형 경량콘크리트 패널의 성능을 개선에 관한 연구를 수행하였으며, 플라이애시 및 실리카퓸의 치환율 10%에서 밀도, 흡수율, 충격강성이 가장 우수한 것으로 연구결과를 발표하였다. 정은 압출성형 패널의 보강섬유로 사용하고 있는 석면의 대체재로 세피올라이트를 이용할 경우의 경화체의 특성과 압출성형 패널의 품질 향상을 위한 재료조건 및 양생조건을 검토하였다. 그 결과 재료조건으로 석면 대체재로서 세피올라이트 C를 사용하고 C/S mole ratio가 0.67, 혼화재료로써 실리카퓸, 고로슬래그, 탄산칼슘 등을 20％ 대체, 규사미분을 규사 6호사로 20% 대체하는 것이 패널의 품질향상 측면에서 우수하다고 발표하였다. 양생조건으로는 건식과 습식이 혼합된 양생조건이 가장 우수하다고 제시하였다. 공은 인공경량골재 및 플라이애시를 압출성형 방식에 의한 공장생산 2차 제품에 적용할 수 있는 성형성 확보하는 적정배합을 도출하기 위하여 콘크리트의 유동성, 강도특성을 분석하였고, 그 결과 플라이애시, 실리카퓸 10% 치환과 증점제를 최소량 첨가할 것을 제시하였다. 김은 석면을 대신하여 천연재료로서 황마를 혼입한 압출성형 시멘트 복합체를 제작하고 이에 대한 물리적 성능을 검토하고 배합조건을 제시하는 연구수행을 통해 안정적인 배합조건을 만족하는 황마의 혼입량을 제시하였다. Shao와 Stang등이 ECC 압출성형을 구현하여 제품 제조에 관한 기초적 연구를 수행하였으며 타카시마와 야마모토는 ECC 압출성형 제품을 개발하여 휨 거동 특성 등을 보고한 바 있다. 최근 건설기술의 발달로 인해 구조물이 고층화, 고기능화 되면서 재료에 요구되는 성질도 복잡 다양하게 되어가고 있으므로, 각종 소재를 조합하여 각 소재의 장점을 살리고 단점을 보

완하여 고도의 성능을 부여한 건설 복합재료의 연구개발이 활성화되고 있으며 그 중에서도 섬유보강 시멘트 복합재료를 활용한 구조실험 연구가 활발하게 진행되고 있다. 정은 황토 콘크리트의 초기 건조수축에 의한 균열 저감 및 구조물의 연성을 높이기 위해 섬유의 종류 및 치환율이 부재의 거동에 미치는 영향을 파악하고 이를 토대로 각종 섬유로 보강된 황토콘크리트의 슬래브의 휨 거동을 파악하는 연구를 수행하였다. 김과 이 등은 ECC를 활용하여 고강도 콘크리트의 폭렬을 억제 및 저감에 관한 연구를 수행하였다. 김 등은 PVA-ECC를 활용한 Half PC 복합체의 역학적 특성을 파악하기 위하여 KS F 2408에 근거한 휨 실험을 수행하고 PVA-ECC의 타설 두께가 증가함에 따라 연성능력, 항복하중 및 최대 휨 하중이 크게 향상하는 것으로 보고하였다.

이상으로 고인성 콘크리트의 연구동향을 살펴본 결과, ECC의 개발 및 2차 제품으로의 제작에 많은 연구가 진행되어 왔으나 2차 제품을 이용한 복합재료의 물리적, 구조적 특성에 대한 연구가 미비한 것으로 나타났다.

다. 고인성 콘크리트 개발 현황

(1) 고인성 콘크리트의 종류 및 특징

고인성 콘크리트에는 ECC(Engineered Cementitious Composite), RPC(Reactive Powder Concrete), CRC(Compact Reinforced Composite), SIFCON(Slurry Infiltrated Fiber Concrete), SIMCON(Slurry Infiltrated Mat Concrete) 등이 있으며, 그 특징을 정리하면 다음과 같다.

(가) ECC(Engineered Cementitious Composite)

ECC20)는 Michigan대학 V. C. Li 교수팀이 마이크로역학의 메카니즘과 파괴역학의 개념을 도입하여 폴리에틸렌섬유, 비닐섬유 등의 유기섬유와 강섬유를 체적비로 1~2% 정도 혼입하여 개발한 것으로서 직접인장 응력을 받을 때도 변형경화를 나타내고, 미세한 고밀도의 다중균열을 형성함으로서 최대 인장변형률이 5%에 달하는 고인성 재료이다. 이 재료는 내진 부재, 보수・보강용 재료, 충격완화 재료 및 강재 피복 재료 등으로서 적용되고 있으며, 향후 그 적용범위가 크게 확대될 것으로 판단된다.

(나) RPC(Reactive Powder Concrete)

RPC21)는 1994년 Bouygues 사의 R. Richard 등에 의해 반응성 분체 콘크리트의 개념으로 개발된 무기계 복합재료이다. RPC는 최밀충전 이론에 기초하여 개발된 반

응성 분체를 이용한 시멘트계 매트릭스에 금속섬유를 혼입한 초고강도와 고인성이 혼합된 개념이 도입되었다. 그리고 타설 후 분체의 반응성을 높이기 위해 3일 동안 90℃～150℃ 정도의 높은 온도로 양생하는 특징이 있다. RPC는 초고강도(압축강도 180-230MPa, 휨강도 30-60MPa), 고내구성(동결융해 저항성 100), 고유동성(플로우치 250㎜)을 가지며, 그 적용 예로는 보도교, 박판경흡음판넬, 기계 고정용 앵커플레이트 등이 있으며 특히 국내에서도 선유교 보도교에 적용된 바 있다.

(다) CRC(Compact Reinforced Composite)

CRC22)는 1986년 덴마크 Aalborg Portland사에서 개발한 시멘트 복합체 재료로서 압축강도 400MPa까지 얻을 수 있으며, Great Belt 터널 상판에 적용된 적이 있으며, 현재 프리캐스트 부재 및 보수재료로 적용되고 있다.

CRC에 사용된 결합재는 백색시멘트(밀도 : 3.15), 마이크로 실리카(밀도 : 2.25) 및 나프탈레인계 분체형 고성능감수제로 구성되어 있다. 이 결합재는 0.5-100㎛인 백색시멘트와 50Å～0.5㎛인 마이크로 실리카로 구성되어 있으며, 마이크로 실리카는 결합재량의 20～25%(중량비)를 차지한다. 그리고 결합재 입자의 분산성을 높이기 위해 분체형 고성능감수제가 프리믹싱 되어 있다. 이러한 결합재를 사용함으로써 매우 치밀한 시멘트 경화체가 되며, 압축강도 130～400MPa의 초고강도 모르타르 및 콘크리트를 제조할 수 있다. 압축강도 400MPa 정도의 초고강도용 모르타르를 제조할 경우에는 Bauxite를 소성한 것을 잔골재로 사용하며, 130MPa 정도의 고강도용 모르타르를 제조할 경우에는 입도가 다른 3종류의 골재(입도 0～0.05㎜, 0.25～1㎜, 1～4㎜)를 입도 조절하여 사용하고 있다. 섬유는 직선 강섬유를 최대 12%로 사용하며, 길이 6㎜×직경 0.15㎜, 길이 13㎜×직경 0.15㎜, 길이 12㎜×직경 0.40㎜의 3종류를 사용하고 있다.

(라) SIFCON, SIMCON

SIFCON23)(Slurry Infiltrated Fiber Concrete), SIMCON24)(Slurry Infiltrated Mat Concrete)는 단섬유를 다량으로 사용할 경우 배합 중에 fiber ball 현상이 발생하여 유동성 및 시공성이 저하되어 섬유 혼입량이 한정되는 문제를 극복하기 위해 강섬유 또는 섬유매트를 먼저 거푸집에 배치한 후 시멘트 슬러리를 침투시켜 제조하는 방법으로서 섬유를 체적으로 최대 20%까지 혼입할 수 있다. 다량의 섬유에 의한 구속효과에 의해 압축강도는 210MPa에 달하고, 가교효과에 의해 인장응력을 받을 때 변형경화 거동을 한다. 적용 예로서 내진・내폭 구조물, 보수・보강용 재료, 프리캐스트 구조물 등이 있다.

이상과 같이 고인성 콘크리트는 각각 개발에 적용된 개념과 사용된 구성재료 및 제조 공정은 조금씩 다르지만 압축강도를 높이며, 동시에 인장 및 휨인장 거동을

향상시킴으로써 변형에너지의 흡수능력과 균열저감 효과를 거둘 수 있는 특징은 유사하다.

(2) 자기충전용 고연성 모르타르

자기충전용 고연성 모르타르란 소요 타설시간 동안 재료분리 없이 높은 유동성을 유지할 수 있는 고유동 모르타르로서, 굳은 후에는 고인성, 고내구성 신섬유복합 모르타르의 고유 특성인 고인성 특성, 즉 1축 인장변형률 경화특성과 미세균열(micro-crack)의 분포를 나타내는 시멘트 복합 재료이다. 자기충전용 고연성 모르타르는 잔골재, 물, 섬유, 보통 포틀랜드 시멘트, 혼화재료 등을 포함하고 있다. 고연성 모르타르의 배합비는 높은 연성을 만들기 위하여 마이크로역학에 의하여 최적화되기 때문에 구성 재료의 조합을 변화시켜 유동성을 조절하는 방법은 바람직하지 않다. 따라서 혼화재료를 적절히 이용하여 시멘트풀의 레올로지를 조절하고 이를 통하여 고연성 모르타르의 유동성을 제어하는 방법이 가장 합리적이다. 즉 굳지 않은 고연성 모르타르의 유동 특성을 혼화재료로 정교하게 제어함으로써 자기충전성을 부여하게 되는 것이다.

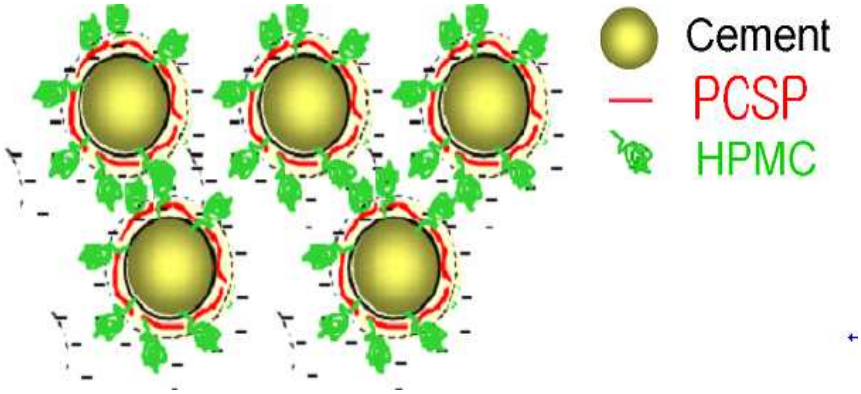
(가) 시멘트풀의 레올로지 제어

포틀랜드 시멘트의 광범위한 이용에도 불구하고, 시멘트계 혼합물의 유동 특성은 잔골재, 굵은골재, 혼화재료 등의 영향이 다양하게 작용함으로써 그 특성이 명확히 밝혀지지 않고 있다. 따라서 기존의 많은 연구에서는 콘크리트 또는 모르타르의 유동 특성을 시행착오에 의존하여 제어하여 왔다. 최근의 연구에 따르면, 시멘트풀의 유동 메커니즘이 입자 주변에 형성되는 정전기력과 더불어 수화반응 또는 혼화제에 의하여 형성된 반데르발스 인력에 크게 좌우된다는 사실이 밝혀진 바 있다. 따라서 정전기력, 반데르발스 힘 등에 의한 시멘트 입자 간 상호 작용을 조절함으로써 시멘트풀의 유동 특성을 보다 합리적으로 제어할 수 있을 것으로 사료된다.

현재 가장 일반적인 시멘트풀 모델은 양으로 대전된 알루미나(Al2O3) 입자를 주요소로 하는 서스펜션 모델이다. 따라서 음이온을 갖는 반응성 고분자를 첨가함으로써 시멘트 서스펜션의 점성이 효과적으로 감소된다고 보는 것이 일반적인 견해이며, 실제로 그 효과가 우수하기 때문에 고분자 성분을 갖고 있는 고성능 감수제 또는 유동화제가 널리 사용되고 있는 실정이다. 이 연구에서도 유동성과 섬유 분산성을 향상시키기 위하여 강력하게 대전된 음이온 유동화제(PCSP)를 사용한다. PCSP를 사용함으로써 응집된 시멘트 입자를 분산시키는 효과를 얻게 되는데, 이 연구에서는 이와 더불어 비이온성 고분자(non-ionic polymer) 분리저감제의 일종인 HPMC를 사용하여 반데르발스 인력의 효과도 적절히 이용하고자 한다.

HPMC를 사용하면 <그림 2.2.1>에 나타난 바와 같이 입자간의 정전기층 뿐만 아니라 반데르발스 힘에 의한 안정층을 형성하게 되어 시간이 지나면서 시멘트 입자가 재응집하는 현상을 방지할 수 있게 된다. 이러한 서스펜션은 자기충전을 하기

에 적합한 유동성을 신섬유복합 모르타르에 부여할 것으로 기대된다. 이와 같이 혼화제의 효과를 상이하게 만드는 것은 서스펜션에 투여하는 양과 순서를 달리함으로써 구현할 수 있는데, 기존의 연구에 의하여 그 방법론의 타당성이 입증된 바 있다.



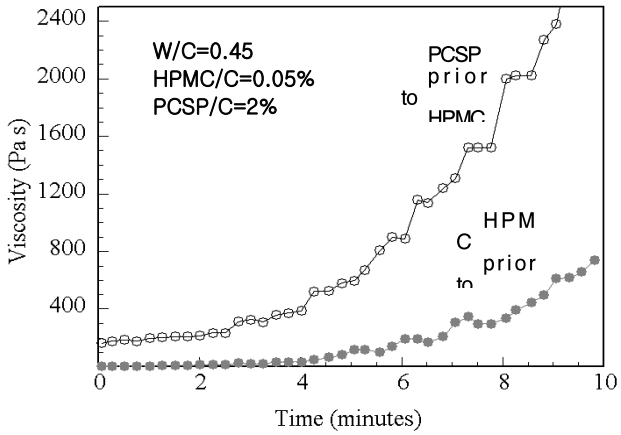
<그림 2.2.1> 시멘트입자와 혼화제의 작용(Stabilized micro-structure by absorbed HPMC and PCSP)

(나) 시멘트풀과 고인성, 고내구성 신섬유 복합모르타르의 레올로지 제어

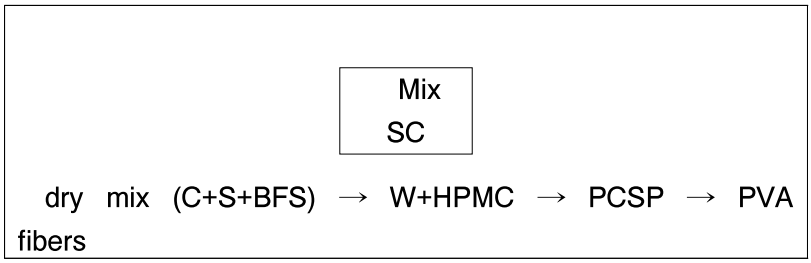
혼화재료를 이용하여 레올로지를 제어하기 위해서는 우선 사용할 재료를 선정한 후, 투여순서와 투여량을 결정하는 것이 바람직하다. (나)절에서 언급한 바와 같이 이 연구에서는 고로슬래그 미분말, 음이온 혼화제 PCSP, 증점제 HPMC 등을 고인성, 고내구성 신섬유복합 모르타르의 레올로지 제어를 위한 혼화재료로 사용하였다. 따라서 혼화재료의 사용순서 및 양을 최적화하기 위하여 2가지의 시멘트풀 실험을 수행하였다. 우선 고로슬래그 미분말과 같이 산화피막에 의한 코팅효과로 물을 구속하지 않는 혼화재료를 시멘트와 함께 결합재로 사용함으로써 섬유의 분산성을 증진시킬 수 있기 때문에, 이 연구에서는 소량의 고로슬래그 미분말입자를 보조 결합재로 사용하였으며 최적 사용량은 예비 비빔을 통하여 시멘트량의 15~30% 범위로 결정하였다.

한편, 혼화제 PCSP와 HPMC의 투여순서를 결정하기 위하여 동일한 투여량을 갖고서 투여순서와 시간에 따른 점성의 변화를 측정하였다. <그림 2.2.2>에 나타난 바와 같이 HPMC를 먼저 투여하고 PCSP를 투여한 경우에 시멘트풀이 상대적으로 천천히 점성을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 현상이 나타난 이유는 HPMC를 먼저 투여함으로써 반데르발스 힘에 의한 안정층이 우선 형성되고, 이후에 투여된 PCSP는 강력한 대전층을 형성하면서 HPMC층과 공조하여 시간에 따른 재응집 현상을 효과적으로 방지하였기 때문이다. 이러한 투여순서(HPMC 다음에 PCSP)는 오랜 시간동안 낮은 점성을 유지하여야 하는 자기충전 신섬유복합 모르타르에 적합한 것으로 판단된

다. 이와 유사한 실험 결과는 기존의 PE(polyethylene)섬유 복합재료에서도 관찰된 바 있다.



<그림 2.2.2> 투입순서에 따른 시간에 따른 시멘트 페이스트 점성의 변화



<그림 2.2.3> 자기충전용(Mix SC) 고인성, 고내구성 신섬유복합 모르타르의 배합순서

시멘트풀에 대한 연구 결과를 바탕으로 예비 비빔을 수행한 후 최적의 신섬유복합 모르타르 배합을 결정하였으며. 재료의 배합을 위하여 100리터 용량의 드럼 믹서를 사용하여, <그림 2.2.3>에 나타낸 배합 순서에 따라 재료를 제작하였다. PCSP와 HPMC의 투여량은 자기충전 실험을 병행하면서 최적화한 결과는 <표 2.2.1>에 나타낸 바와 같다. Mix SC는 자기충전용 고인성, 고내구성 신섬유복합 모르타르로서 PCSP와 HPMC의 투여량은 유동성 10.0을 목표로 하여 <표 2.2.1>에 나타낸 바와 같이 최적화하였다. <그림 2.2.4>는 고인성, 고내구성 신섬유복합 모르타르에 대한 유동성 실험 과정을 보여 주고 있다.



<그림 2.2.4> 고인성, 고내구성 신섬유복합 모르타르의 유동성 실험 장면

<표 2.2.1> 신섬유복합 모르타르 배합설계와 유동성, 자기충전성

Mix	W/C	S/C	Vf (체적비)	BFS/C	PCSP/C	HPMC/C	Γ	L
SC (자기충전)	55 %	80 %	2 %	25 %	3 %	0.5 %	9.2	0.83

* 여기서 W, S, C는 각각 물, 잔골재, 시멘트이다. 그리고 V_f를 제외한 모든 비율은 중량비이다.

(3) 숏크리트용 모르타르

그 동안 주요 건설재료로서 널리 사용되어 온 콘크리트는 성질이 취성적이며, 인장 및 휨성능이 낮은 본질적인 결함이 있다. 또한 압축강도의 증가로 콘크리트의 취성파괴(brittle failure)가 더욱 문제되고 있다. 이러한 결함과 문제점을 개선하기 위하여 최근 국내·외에서 활발히 연구되고 있는 연성 재료로서 섬유보강 콘크리트(Ductile Fiber Reinforced Concrete)가 있다.

기존의 콘크리트로도 배합기술과 콘크리트 생산 품질관리 및 현장 콘크리트 공사 품질관리의 향상을 통하여 구조물의 장수명화를 달성할 수 있겠지만, 수명증가에는 어느 정도 한계가 있을 것으로 판단된다. 이를 극복하기 위해서는 역학적 성능뿐만 아니라 재료적인 내구성능도 기존의 콘크리트보다 훨씬 우수한 고인성/고내구성 콘크리트를 개발하고 이를 실용화하는 시도가 더욱 확대될 전망이다.

한편 종래의 섬유보강 콘크리트는 기존의 콘크리트의 역학적 특성을 향상시킨 재료로서 국내에서도 교량, 터널 등에 많이 적용되고 있다.

(가) 숏크리트 배합

배합설계는 보통 시방에서 제시된 설계기준강도을 기준으로 한다. 숏크리트의 강도는 뿜어붙이기 방법(건식, 습식), 시공방법, 뿜어붙이기 위치, 뿜어붙이기두께에 따라 상당한 차이가 있다. 또한 노즐맨의 숙련도가 숏크리트 품질에 큰 영향을 미

치기 때문에 배합의 확인과 함께 시공상의 주의를 엄밀하게 할 필요가 있다. 숏크리트의 배합의 기본은 강도를 무리하게 크게 하는 것보다 리바운드가 적고 치밀한 모르타르를 얻는데 주력하는 것이 바람직하다.

숏크리트의 품질은 뿜어붙이는 면의 상태나 노즐맨의 숙련도에 따라 크게 달라지므로 지금까지의 연구로는 숏크리트의 배합과 품질과의 관계가 명확히 규명되었다고 말할 수 없다. 그래서 숏크리트의 배합을 정할 때에는 지금까지의 예를 참고하여 숏크리트의 품질, 경제성, 작업성 등을 고려하지 않으면 안 된다. 숏크리트의 작업성을 특히 고려해야 할 사항은 다음과 같다.

- 압송중의 폐쇄, 맥동이 생기지 않게 할 것
- 리바운드량이 적을 것
- 뿜어붙여진 모르타르의 박리, 유출이 생기지 않을 것

① 재료선정

숏크리트의 재료로는 시멘트, 골재, 배합수, 급결제 및 각종 혼화재가 있으며 그 외 분진저감제 및 혼화제 등이 이용되고 있다.

② 배합강도 결정

숏크리트의 강도는 보통 모르타르와 달라서 시공조건에 따라 상당히 영향을 받으며 변동이 많은 실정이다. 그래서 숏크리트의 배합강도를 정할 때에는 구조물이 요구하는 강도나 설계기준강도를 만족하도록 지금까지의 경험에서 얻어진 값이나 사전에 실험을 해서 구한 값에 의하여 현장에서 모르타르의 품질의 변동을 고려하여 정하는 것이 좋으며 보통 18MPa 이상을 목표로 한다. 또 이제까지의 경험에 의하면 콘크리트 구조물의 보수에 쓰일 때 20 ~ 40MPa이다. 그러나 이 값도 시공조건 외에 배합재료의 품질에 의해서 상당한 변동이 있으므로 배합강도를 정할 때에는 이러한 변동을 고려할 필요가 있다.

③ 배합비 결정

숏크리트의 배합비를 결정할 때에는 숏크리트가 소요의 성질을 나타내는 범위내에서 양호한 작업성을 가지도록 다음 항목에 대하여 선정해야 한다.

- 물-시멘트비
- 단위 시멘트량
- 단위수량
- 골재의 입도분포

- 공기량
- 급결제량
- 혼화재료의 종류 및 단위량

또한 숏크리트의 배합은 노즐에서 토출되는 토출배합, 뿜어붙여지는 면에 부착된 부착배합에 있어 각각 다르다. 목적으로 하는 구조물의 콘크리트의 품질을 관리하기 위해서는 부착배합에 대하여 규정하는 것이 가장 바람직한데, 일정한 품질의 숏크리트를 유지하기 위하여 재료의 계량이 가능한 한 정확히 이루어져야 한다. 따라서 일반적으로 관리에 곤란이 있어 부착배합과 관련성을 가진 가장 관리하기 쉬운 토출배합에 대하여 중량계량으로 하는 것이 이상적이다.

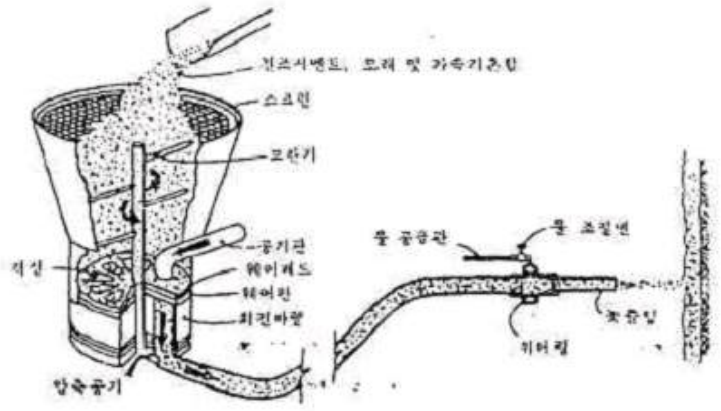
(나) 숏크리트 시공방법

콘크리트 구조물 보수에 이용되는 숏크리트 시공방식에는 건식공법(dry-mix type)과 습식공법(wet-mix type)의 2가지 종류가 있으며 습식공법은 다시 air 압송식과 screw pump 압송식으로 나눌 수 있다.

① 건식공법

건식공법은 시멘트와 기건상태의 골재를 잘 혼합(건식혼합)한 후, 급결제를 가하여 분사장치에 공급하고 이것을 압축공기로 호스를 통하여 압축하여 노즐에서 분사하는 공법이다. 이때 배합수는 노즐내에서 골재와 혼합되어 시공면에 고속으로 뿜어붙여진다. 이 공법은 다음과 같은 단계의 작업을 거쳐 시공된다<그림 2.2.5>.

- 시멘트 또는 혼합재와 골재를 완전하게 혼합한다.
- 시멘트 골재 혼합물을 특수한 기계식 공급기 또는 운반장비라고 불리는 Gun 속으로 공급한다.
- 혼합물은 보통 feel wheel, Rotor 또는 feed bowl과 같은 측정장치에 의해 공급호스 속으로 투입된다. 어떤 장비는 재료를 호스 속으로 이송하는데 공기압만을 이용한다. (orifice 공급식)
- 재료는 압축공기에 의해 공급호스를 통해 노즐 본체로 이동된다. 노즐 본체는 내부에 water ring과 결합되어 있으며 이 water ring을 통하여 배합수가 주입되어 다른 재료와 혼합된다.
- 이 재료가 노즐에서 숏크리트 시공면에서 고속으로 분사된다.

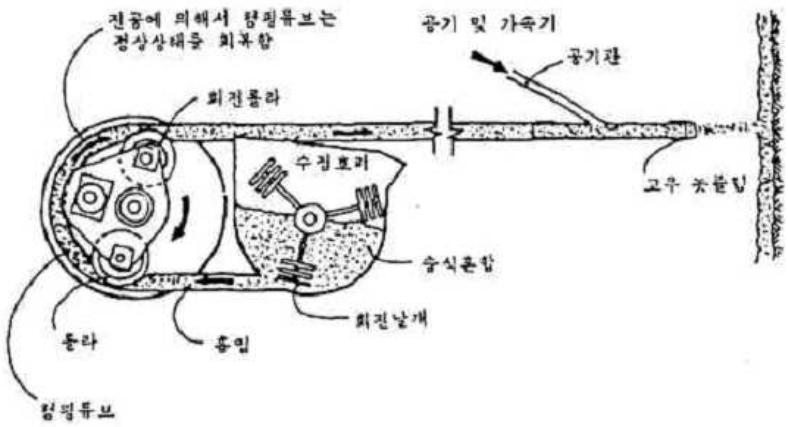


<그림 2.2.5> 건식공법의 개략도(Figure of Dry-mixed Method)

한편, 최근 압력수를 노즐의 몇 미터 앞에서 공급함으로써 다량으로 발생하는 분진을 감소시키는 공법이 선보였는데 이것을 반습식공법이라고 부르고 있다.

② 습식 공법

Air 압송식 및 screw pump 압송식 공법으로 대별되는 습식공법은 물을 첨가하여 모든 재료를 잘 혼합한 후 분사장치에 공급하고 노즐에서 공기를 더 가하여 분사속도를 증가시켜 확실하게 뿜어붙인다. 특히, Air 압송식 습식공법은 wet-mixed 덩어리 또는 모르타르를 압축공기로 압송하여 노즐부에서 급결제를 가하여 뿜어붙이는 방식으로 습식 chamber형과 습식 screw형 등이 있다. 또한, screw pump 압송식 공법은 wet-mix 덩어리를 screw식 pump에서 배관 혹은 호스내로 압송시켜 노즐부근에서 압축공기를 보조적으로 이용하고, 급결제를 압축공기에 혼입하여 뿜어 붙이는 방식이다. 이 공법은 다음과 <그림 2.2.6>과 같은 단계의 작업을 거쳐 시공된다.



<그림 2.2.6> 습식공법의 개략도(Figure of Wet-mixed Method)

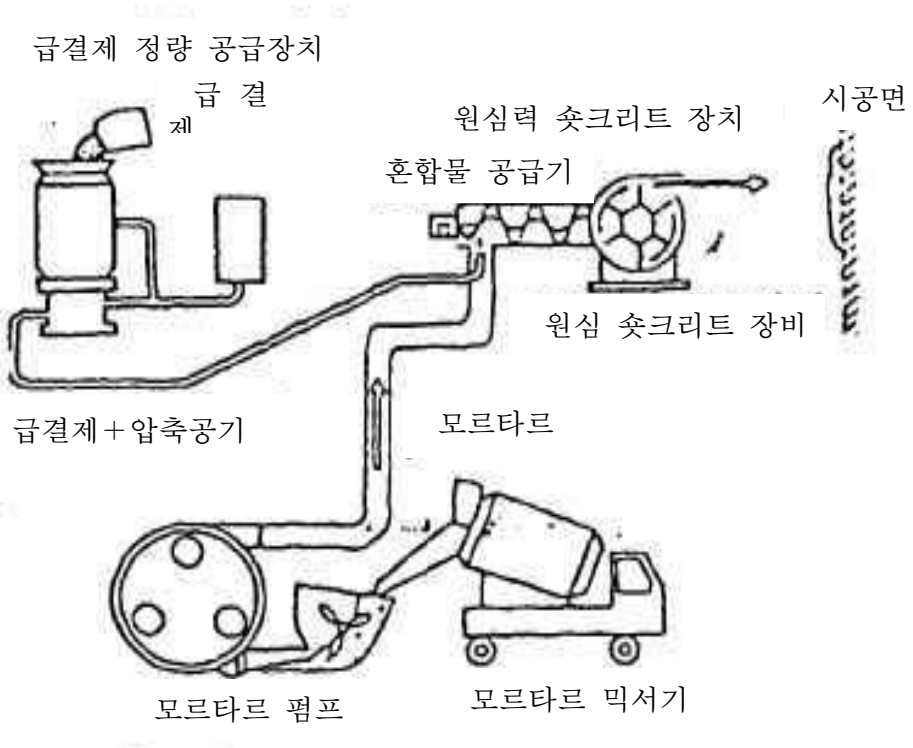
③ 원심력을 이용한 공법

- 통상 급결제를 제외하고 모든 재료를 완전하게 혼합한다.
- 모르타르를 공급장치의 chamber내로 넣는다.
- 혼합물을 공급호스 속으로 측정하면서 주입하고, 기계식으로 이동시키거나 압축공기에 의해 노즐로 운반한다.
- 급결제는 보통 노즐로 첨가된다.
- 속도를 증가시키고 gun 작업을 용이하게 하기 위해 노즐에서 공기를 추가로 주입한다.
- 노즐을 통해 모르타르를 숏크리트 시공면에 고속 분사한다.

보통의 숏크리트는 이미 설명했듯이 각종 기계를 이용하여 시공되고 있지만 모두가 압축공기에 의해 재료를 뿜어붙이는 공통의 process를 갖고 있다. 그러나 최근들어 원심력을 이용한 숏크리트 방식이 새로운 관심의 대상이 되고 있다.

이 공법은 펌프를 이용하여 노즐 위치까지 재료를 운반한 후, 급결제를 혼입하고 rotary로 원심력을 가하여 벽면에 숏크리팅하는 방식으로 그 개략도는 <그림 2.2.7>과 같다. 이 방식에 의하면 분진의 발생을 종래의 습식공법에 비해 1/2～1/3로 감소시키는 것이 가능하며 시공능력 또한 종래의 공법과 유사하다.

또한 품질 면에서도 특별히 문제시되는 것이 없으며, 위에서 설명한 각 숏크리트 공법들의 특징을 항목별로 정리하면 <표 2.2.2>와 같다.



<그림 2.2.7> 원심력을 이용한 공법
(Method used centrifugal force)

[표 2.2.2] 건 · 습식 공법의 비교

구분	건식공법	반습식공법	습식공법
압송거리	- 비교적 길게 할 수 있지만 100m 내외가 적당하다.	건식과 동일	- 공기압송의 경우 50m 정도 - Pump압송의 경우 장거리 압송가능(100 m)
시공능력	- 시간당 토출량이 적다. (6 ~ 8 m3/hr)	건식과 동일	- 시간당 토출량이 많다. (8 ~ 10 m3/hr)
분진 및 리바운드	- 시공조건 및 작업원 숙련도에 따라 다르지만 대체로 분진과 리바운드 발생량이 많다. - 리바운드율 ⇒20 ~ 40%	분진의 발생은 비교적 적으나 리바운드는 비교적 많이 발생한다.	- 건식에 비해 적지만 압력에 따라 Mist를 포함한 분진이 많아진다. - 리바운드율 ⇒10 ~ 20%
작업성	-청소 등 기타작업이 불필요 -기계가 작아 작업공간이 작다.	건식과 동일	- 건식에 비해 약간 복잡 - 사용재료 성상에 따라 시공성에 영향을 줌. - 기계가 커서 작업공간이 큼.
재료공급	- 공급작업의 제한이 작다.	건식과 동일	- 재료의 재한이 크다.
품질관리	- 작업원의 숙련도에 영향을 받는다. - 마무리면은 습식에 비해 평탄하다. - 잔골재의 표면수 관리가 중요하다.	건식과 동일	- 재료의 개량이 정확하고 혼합이 용이하므로 품질관리가 쉽다. - 슬럼프 및 굵은골재의 입도관리가 중요하다.

(다) 각 공법 적용시의 문제점

① 건식공법의 문제점

- 노즐부에서의 분진의 대량 발생 및 큰 리바운드
- 배합수 첨가는 노즐부에서 밸브 조작으로 되기 때문에 노즐맨의 경험적 판단에 의해 크게 좌우된다.

② 습식(Air 압송식)의 문제점

- W/C비가 일반적으로 높다. (동일 시멘트량에 대해 강도저하)
- 압송거리가 길면 응결현상으로 호스의 막힘 등이 발생하기 쉽다.
- 액상급결제를 이용하는 경우 노즐부에서 급결제의 정량 첨가가 정확치 않기 때문에 모르타르의 박리 및 낙하가 발생하기 쉽다.

③ 습식(Screw Pump 압송식)의 문제점

- W/C비가 일반적으로 높다. (동일 시멘트량에 대해 강도저하, 박리, 낙하가 발생하기 쉽다.)
- 최대골재치수의 4배 정도 크기의 지름을 갖는 압송호스가 필요하다.
- 이 방식에 적합한 급결제의 가격이 고가이다.
- 기계 본체가 대형이다.
- 기계가격이 고가이다.
- 일반적으로 압송거리가 짧다.
- 노즐부에서 토출되는 모르타르의 속도가 약간 느리다.

④ 습식방식의 공통 문제점

- 숏크리트 작업중 가장 큰 단점은 숏크리트 작업이 일시 중단되면 관내의 모르타르는 재료분리가 일어나고, 호스의 막힘을 야기시키기도 하기 때문에 이러한 막힘 현상이 발생했을 경우, 전체 시스템의 작동을 중단하고 청소를 한 후 재작업 직전에 새로운 재료(wet-mixed material)를 공급해야만 한다.
- 숏크리트 작업 종료시 물청소가 동반되어야 하므로 번거롭다.

라. 고인성 콘크리트의 구성 재료 및 배합 특성

(4) 섬유의 종류 및 특성

섬유는 오래 전부터 콘크리트 또는 모르타르의 보강재로 많이 사용되고 있으며, 그 종류 및 특성도 다양하다. <표 2.2.3>에 콘크리트 및 모르타르에 많이 사용되는 섬유의 종류 및 특성에 대해 정리하였다. 현재 고인성 섬유보강 시멘트 복합체에는 강섬유, PVA섬유, 고강도폴리에틸렌섬유 등이 주로 사용되고 있으며, 이런 섬유에 대한 특성은 다음과 같다.

(가) PVA섬유

PVA 섬유는 원료 폴리머인 폴리비닐알콜(PVA)을 물과 DMSO(Dimethyl Sulfoxide)의 용매로 용해시켜 용액으로 만든 다음 이 용액을 고화시키는 방법에 따라 습식과 건식으로 분류된다. PVA 섬유는 시멘트와의 부착성 및 내구성 등이 우수하여 고인성 시멘트 복합체에 많이 사용되고 있다.

(나) 고강도 폴리에틸렌섬유

고강도 폴리에틸렌섬유는 PVA섬유와 유사하게 제조되지만, 중합도가 매우 높은 굴곡성 폴리머를 적당한 용제에서 용해하여 고배율로 연신 가능한 겔 형태로 제조한다. 고강도 폴리에틸렌섬유는 카본섬유 및 아라미드섬유에 비해 강도, 내피로성, 내충격성이 우수하고, 내약품성, 내수성 등도 높은 성능을 가지고 있다.

<표 2.2.3> 섬유의 특성

종류		인장강도 (MPa)	인장탄성계수 (GPA)	파단탄성률 (%)	비중
강섬유		490～980	200	-	7.85
PVA섬유		690～1500	11～36	3～13	1.30
폴리에틸렌섬유		250～700	1.4～2.2	10～15	0.95
폴리프로필렌섬유		300～750	1.4～2.2	10～15	0.91
아크릴섬유		200～390	2～11	25～45	1.18
아라미드섬유		2000～2900	62～130	2～4	1.45
탄소섬유	PAN	2500～3600	230～350	1～2	1.9
	Pitch	760～2900	39～98	1～2	2.0
고성능 폴리에틸렌섬유		2200～4800	70～175	3～6	0.98
고성능 PVA섬유		2000～2600	39～41	5～6	1.30

(다) 강섬유

강섬유는 제조방법에 따라 절단강선, 절단섬유, 절삭섬유 및 ME섬유(Melt Extraction Fiber)로 분류된다. 절단강선은 강선을 절단기로 소정의 길이로 절단하여 제조된 것으로 형상치수가 안정되어 있고 인장강도도 비교적 높다. 고인성 섬유보강 시멘트 복합체에 사용되는 것은 고강도 재질로 만들어지며, 직경 0.2-0.3㎜, 길이는 10-20㎜ 정도, 인장강도는 2GPa 이상이다. 절단섬유는 냉간압연강판을 절단기로 섬유형태로 절단가공하여 제조된 것으로 단면이 정방형인 것이 많이 사용된다. 절삭섬유는 블록 형태의 강판을 이용하여 절삭한 것으로 제조되며, 고강도, 요철이 있어 매트릭스와의 부착력이 높다. ME섬유는 스테인레스 용강에서 직접 섬유를 급냉응고하여 추출함으로써 제조되는 것이다.

(라) 매트릭스 구성재료 및 특성

고인성 콘크리트는 매트릭스의 양호한 워커빌리티의 확보, 재료분리 저항성 및 양호한 섬유의 분산성 등이 요구된다. 또한 경화 후에는 강도 및 강성 등의 역학적 특성, 치수의 안정성 및 내구성뿐만 아니라 보강용 섬유와의 부착이 요구된다. 일반적으로 고인성 콘크리트는 보강용 섬유의 혼입량이 비교적 많고, 보다 균질한 섬유분산, 워커빌리티의 확보를 목적으로 매트릭스가 시멘트와 물로 구성되는 시멘트 페이스트 또는 시멘트, 물 및 모래로 구성되는 시멘트 모르타르의 경우가 많다. <표 2.2.4>는 섬유보강 시멘트 복합체에 사용되는 대표적인 매트릭스의 특성을 나타내었다.

매트릭스의 구성재료로는 일반적으로 콘크리트용 재료와 동일한 구성 재료를 사용하고 있다. 즉 시멘트는 주로 보통포틀랜드 시멘트, 잔골재로서는 쇄석 및 규사 등이 사용되고 있으며, 또한 필요에 따라서 실리카퓸, 고로슬래그 및 플라이애쉬 등의 혼화재 및 고성능감수제, 증점제 등의 혼화제가 사용되고 있다.

시멘트는 일반적으로 포틀랜드 시멘트를 사용하지만, 매트릭스의 물-시멘트비가 낮고 고강도인 경우에는 워커빌리티의 관점에서 높은 규산염율 (SiO_2 /($A1_2O_3$ +Fe_2O_3) 및 낮은 C3A 함량의 시멘트가 유리하다. 그리고 잔골재는 쇄석 및 천연사가 사용되고 있지만, 워커빌리티 관점에서 쇄석보다 천연사가 유리하고, 특히 강도 및 강성의 관점에서 석영사 및 Bauxite를 사용하는 경우도 있다.

혼화재는 일반적으로 실리카퓸, 플라이애쉬 등의 포졸란재료와 고로슬래그와 같은 잠재수경성 재료가 사용된다. 이러한 혼화재를 사용하면 시멘트 수화반응에 의해 생성되는 수산화칼슘을 포졸란 반응에 의해 소비하므로 매트릭스가 치밀화되어 역학적 특성이 향상되고, 섬유와의 부착특성도 향상된다. 감수제는 매트릭스의 유동성 향상을 위해 폴리카르복실계 및 나프탈렌계 고성능감수제 등이 사용되고 있으며, 섬유의 분리를 방지할 목적으로 셀로오스계 등의 증점제가 사용되고 있다.

<표 2.2.4> 고인성 콘크리트의 매트릭스 특성

매트릭스 종류	밀도(kg/m^3)	탄성계수 (GPa)	인장강도 (MPa)	파괴시 변형률 ($\times 10^6$)
보통포틀랜드 시멘토페이스트	2000～2200	10～25	3～6	100～500
고알루미늄포틀랜드 시멘토페이스트	2100～2300	10～25	3～7	100～500
보통포틀랜드 시멘트·모르타르	2200～2300	25～35	2～4	50～150
보통포틀랜드 시멘트·콘크리트	2300～2400	30～40	1～4	50～150

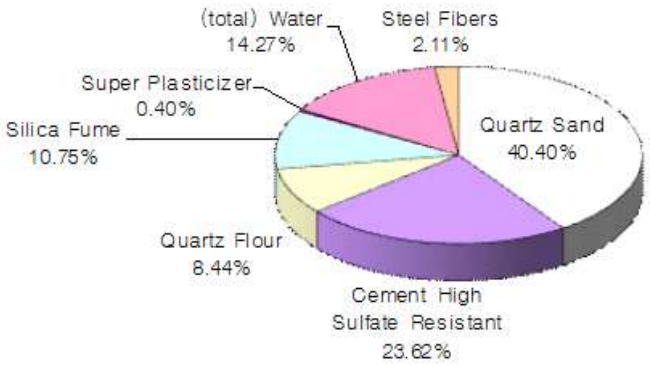
(마) 배합 특성

보통콘크리트 및 상용화된 고강도콘크리트는 시멘트, 굵은골재, 잔골재, 혼화재료 및 배합수로 구성되어 있다. 보통콘크리트에서 균열이 발생하고 파괴되는 것은 크게 두 가지 현상으로 구분할 수 있다. 즉, 골재와 시멘트 수화물 사이의 계면 박리와 수화물 결정 사이의 층간 박리를 들 수 있다. 적정한 시멘트량을 사용하고 수화구조가 정상적인 콘크리트의 경우 주로 골재와 수화물간의 계면 박리가 콘크리트 균열 및 파괴의 주된 원인이 된다.

고인성 콘크리트의 경우 골재와 시멘트 수화물 사이의 계면 확장의 영향을 최소화하고 섬유의 분리저항성을 향상시키기 위하여 굵은골재를 사용하지 않거나 골재의 최대치수를 작게 하고 분체량이 많은 부배합을 사용한다. <표 2.2.5>는 고인성 섬유보강시멘트 복합체의 재료 구성 예를 보여주며, <그림 2.2.8>은 고인성 섬유보강시멘트 복합체의 구성 체적비의 분포를 보여 준다.

<표 2.2.5> 전형적인 고인성 섬유보강시멘트 복합체 재료구성 예

Components	Fiber	Sand	Cement	Quartz	Silica	Super	Water
	Steel	Quarts	HSR	Flour	Fume	Plasticizer	(total)
Length(mm)	13						
Diameter(㎛)	200.0	310.0	10.0	2.0	0.2		
Density	7.79	2.65	3.17	2.65	2.27	1.21	
Mass ratio	0.216	1.430	1.000	0.300	0.325	0.012	0.200
Vol.Fraction	0.021	0.402	0.235	0.084	0.107	0.004	0.142
kg/m^3	16	1066	746	224	9	142	



<그림 2.2.8> 전형적인 고인성 섬유보강시멘트 복합체의 체적 구성비

마. 고인성 콘크리트의 수화 및 미세구조 특성

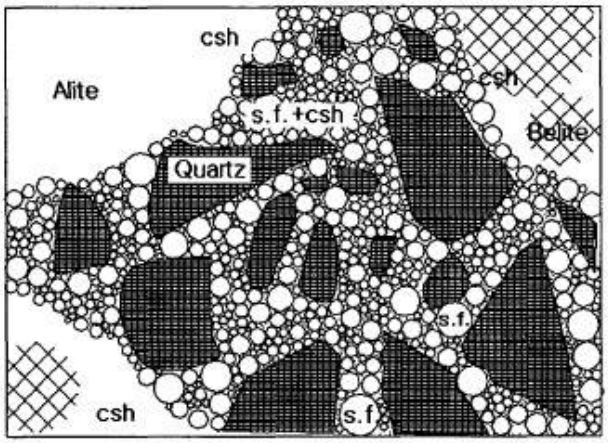
보통콘크리트의 경우 약 20℃로 양생하여, 48시간 후에는 시멘트의 전체 수화도가 약 50% 정도에 이르게 되고, 이 때 굳은 페이스트 매트릭스 내의 모세관 공극률은 약 40%(empty capillary 3.7%, capillary water 33.5%) 정도에 이르게 된다.

그러나 같은 시기에 고인성 섬유보강시멘트 복합체인 경우에는 극히 낮은 물-결합재비로 인하여 전체 수화도는 약 20-26%정도에 이르고, 이 때 모세관 공극률은 전체의 7% 정도로 낮은 수준을 유지하게 된다. 즉, 고인성 콘크리트는 보통콘크리트보다 훨씬 낮은 모세관 공극률로 인해 치밀한 조직을 갖고 출발하게 되는 셈이다.

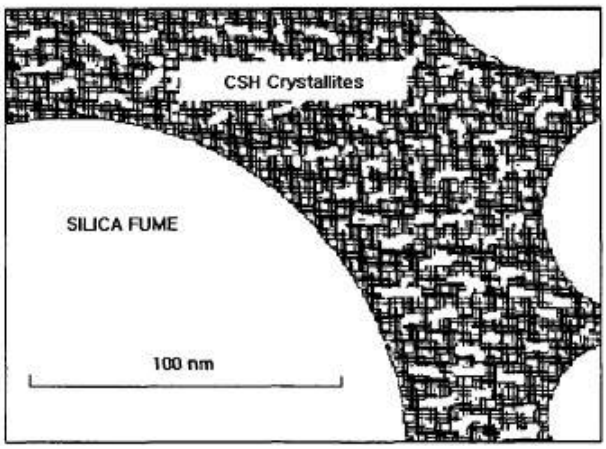
이후 고인성 섬유보강시멘트 복합체의 공정과정에서 재령 24.48시간에 90℃의 가열 양생과정을 거치므로 고인성 섬유보강시멘트 복합체는 약 1%의 모세관 공극률을 지니게 된다. 이것은 수화과정에서 모세관수와 수화물 층간수(interlayer water)가 고온의 영향으로 증발하여 미수화된 시멘트입자와 반응하게 되고, 실리카퓸 등의 고분말 혼화재료의 포졸란 반응이 활성화되어, 모세관 공극에 있던 수분이 제거됨과 동시에 고탄성의 포졸란 수화물질인 실리케이트가 공극을 채우기 때문으로 판단된다.

고인성 섬유보강시멘트 복합체의 경우는 재료구성에서 굵은골재가 배제되고 결합재에 첨가된 실리카퓸이 높은 분말도를 지니기 때문에 배합과정에서 보통콘크리트보다 닫힌공기(entrapped air)양이 기본적으로 적고, 여기에 앞의 수화 과정과 가열공정에서 모세관 공극을 극히 줄임으로써 고강도, 고내구성을 지니게 된다.

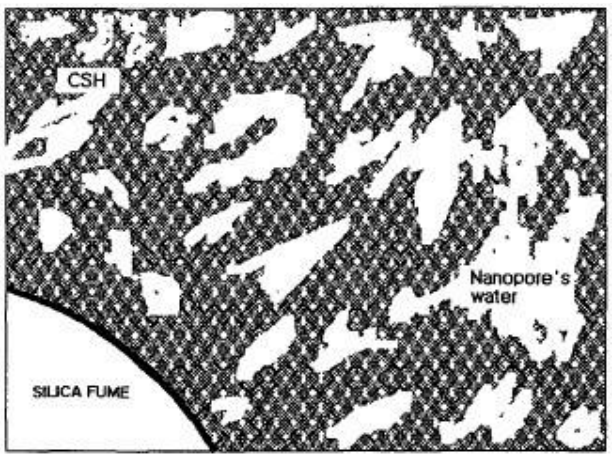
한편 이러한 고인성 섬유보강시멘트 복합체의 미세구조를 분석단계로 구분하여 도식화하면 <그림 2.2.9>, <그림 2.2.10>, <그림 2.2.11>과 같다. <그림 2.2.9>는 모세관 공극수와 층간수가 가열작용에 의해 삼출되기 전 단계로서 전체 수화도는 약 20% 정도에 도달했을 때이며, 이 때까지는 포졸란 반응에 의한 수화 결정물(CSH crystallites)은 생성되기 전 단계이다. 여기서는 수화반응 초기에 형성되는 C3S(Alite)와 C2S(Belite) 수화물 결정을 볼 수 있으며, 충전재인 잔골재와 Qurtz flour가 아직 완전한 포졸란 수화 반응체를 형성하지 못하고 있는 상태의 실리카퓸들 사이에 자리하고 있는 것을 볼 수 있다.



<그림 2.2.9> Micrometer Scale에서의 UHPC 미세구조 모식도



<그림 2.2.10> 100 Nanometer Scale에서의 UHPC 미세구조 모식도



<그림 2.2.11> CSH 결정질과 나노 공극의 미세구조 모식도

<그림 2.2.10>은 부분적으로 포졸란 반응을 한 실리카퓸이 약 6×18×54㎚ 크기의 CSH 결정질과 연결되고, 이 결정질은 약한 결합력을 갖는 분자형의 구조를 하고 있다. 그리고 CSH 결정질 사이에 희게 보이는 부분은 나노 공극으로서 결정간수(intercrystallite water)로 차있다.

<그림 2.2.11>은 나노 스케일에서 CSH 결정질의 분자구조가 선명히 나타나기 시작하는 단계이며, 실리카퓸과 CSH 결정질의 결합이 확고해지는 단계로서 이들 결정체간의 연결력이 극대화되면서 역학적인 성능이 충분히 발휘될 수 있는 높은 압축강도와 인장강도 특성을 나타낼 수 있는 단계이다.

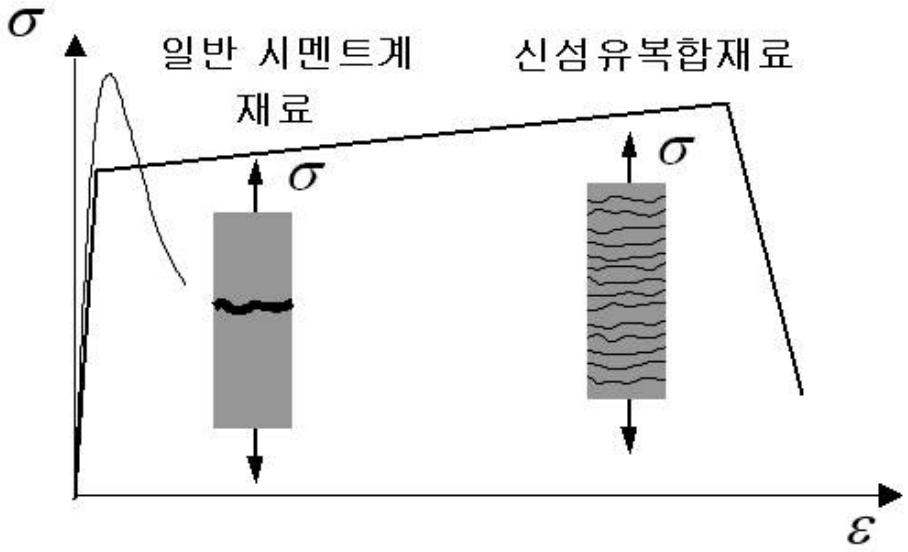
바. 고인성 콘크리트의 역학적 특성

고인성 콘크리트의 역학적 특성을 보통콘크리트 및 섬유보강 콘크리트와 비교하여 <표 2.2.6>에 개략적으로 나타내었다. <표 2.2.6>에 나타낸 바와 같이 고인성 콘크리트의 압축강도, 휨강도 등은 보통콘크리트와는 비교가 되지 않을 정도로 높은 역학적 물성을 지니며, 보통콘크리트가 취성이 강한 반면, 고인성 콘크리트는 높은 강도를 지니면서 동시에 연성이 우수한 것을 알 수 있다.

<그림 2.2.12>는 고인성 콘크리트의 인장특성을 나타낸 개념도이다. 그림에서 A점은 FRC와 마찬가지로 선형 응력변형 한계 상태의 정점이며, 이후 FRC는 페이스트 매트릭스의 급격한 파괴로 단지 섬유만으로 파괴에너지를 감당하게 되어 응력-변형률 곡선이 급격히 감소하는 것을 보여주는 반면, 고인성 콘크리트는 폭이 좁고 많은 다분산 균열(multiple cracking)을 형성하면서 B점의 응력 상태까지는 응력-변형률 곡선이 계속 된다. 이것은 고인성 콘크리트의 페이스트 매트릭스 내에 있는 포졸란 효과로 발생된 고탄성 실리케이트의 작용과 섬유의 가교작용이 함께 기여하여 균열응력에 저항하면서 변형에너지를 상당량 흡수하기 때문이다. B점 이후에는 균열의 부분집중 성장으로 고인성 콘크리트의 페이스트 매트릭스가 응력 전달 작용만 하게 되고 결국 균열에 대한 저항은 섬유가 견딤으로써 응력은 감소되고 변형률은 커지게 되는 단계이다.

<표 2.2.6> 고인성 콘크리트의 역학적 특성

Properties	Plain Concrete	Fiber Reinforced Concrete	High Toughness Concrete
Commpresive Strength (MPa)	21～27	30～50	50～400
Bending Strength (MPa)	1～3	5～15	15～60
E-modulus (MPa)	21,000～35,000	30,000～40,000	< 50,000
Characteristics of Behavior	Brittle	Quasi-Brittle	Ductility
Characteristics of Crack	Partial	Partial + Multiple	Multiple



<그림 2.2.12> 고인성 콘크리트의 인장특성 개념도

이와 같이 고인성 콘크리트의 균열저항성능과 변형에너지 흡수 능력은 보통콘크리트는 말할 것도 없고 FRC와도 비교가 되지 않을 정도의 높은 값을 나타낸다. 그리고 고인성 콘크리트의 변형경화(strain hardening)와 다수의 균열특성(multiple cracking)을 실현하기 위한 필수조건은 균열 면에서 섬유에 의해 가교작용에 의해 발생되는 힘이 매트릭스에서 균열이 일어날 때 발생하는 인장력을 상회할 수 있어야 하고, 그 비가 클수록 많은 균열이 발생하기 쉽고 인성능력이 향상된다. 이러한 가교작용은 섬유의 강도, 매트릭스의 강도 및 섬유와 매트릭스의 부착강도, 섬유의 혼입률, 매트릭스의 공기량 등의 영향을 주로 받지만, 섬유의 분산성 및 고인성 콘크리트의 시공성의 영향도 받는다.

이외에도 고인성 콘크리트에 있어서 콘크리트 장기 특성값의 하나인 크리프(creep)의 경우 콘크리트를 타설하고 열처리를 하지 않은 경우는 크리프계수가 1.2 정도이고, 만약 열처리를 할 경우 0.3 정도로, 보통콘크리트가 2 ~ 3인 것에 비교하면 매우 낮은 값을 지닌다. 그리고 고인성 콘크리트의 건조수축량은 보통콘크리트보다 훨씬 낮으며, 고인성 콘크리트를 구성하는 재료성분에 따라 달라지지만 건조수축량은 대략 아래 식 2.2.1로 산정할 수 있다. 여기서, A_0는 재료구성에 따른 실험고유값(일반적으로 550×10-6)이다.

$$\epsilon_{shrikage}(t) = A_o \exp\left[\frac{-2.5}{\sqrt{t-0.5}}\right] \qquad 2.2.1$$

사. 고인성 콘크리트의 내구 특성

콘크리트의 내구 특성은 각종 열화인자에 대한 저항성으로 평가할 수 있다. 대부분의 열화인자에 대한 저항성은 콘크리트의 미세구조내의 공극구조로 설명이 가능하며, 이것은 미세구조 내의 투과성(permeability)과 밀접한 관계를 가진다.

<표 2.2.7>은 고인성 섬유보강시멘트 복합체에 대한 질소를 이용한 투기성 시험, 염소이온의 확산계수시험, 동결융해시험 및 중성화 깊이를 측정한 시험결과의 예이다. 표에서 보는 바와 같이 고인성 섬유보강시멘트 복합체의 질소가스 투기성은 보통콘크리트에 비해 10-4 정도로 작고, 염소이온의 확산계수는 10-4 정도, 기타 동결융해 및 중성화 깊이 등도 보통콘크리트와 비교해 월등히 내구성능이 우수한 것을 알 수 있다. 이것은 모세관 공극이 고인성 섬유보강 시멘트 복합체의 경우 매우 단락되어 있기 때문이며, 침투한 물분자의 이동이 자유롭지 못하여 열화인자가 동반된 이온의 이동이 극히 제한되기 때문이다. 또한 고인성 섬유보강시멘트 복합체에서는 유체나 확산 이온 등이 나노스케일의 CSH 결정을 통과하여야 하며, 이 CSH 결정은 비틀려 연결되어 있어서 이동 통로가 상당히 길어져, 결정체의 층을 돌아가야 하기 때문에 결국 통과 능력이 저하된다.

이상과 같이 고인성 콘크리트의 경우 매트릭스와 골재 사이의 천이영역을 최대한 밀실하게 하고 모세관 공극의 연결을 최대한 단락시킬 수 있게 되어 각종 열화인자가 동반된 유체나 가스의 확산과 침투를 방해하기 때문에 우수한 내구성을 지닐 수 있다.

<표 2.2.7> 고인성 콘크리트의 내구성 시험결과 예

Concrete type	UHPC		HPC	NC
Curing mode	20℃ (28d)	20℃(2d) +90℃(2d)	20℃ (28d)	20℃ (28d)
W/C	0.2	0.2	0.35	0.5
Permeability no drying severe drying	1.0E-22 <1.0E-20	1.0E-22 <1.0E-20	1.0E-19 5.0E-18	2.0E-18 3.5E-17
Diffusivity Cl-(m^2/s)		2.0E-14	1.5E-12	1.8E-11
Freeze-thaw scaling (g/mm^2)	0.07	0.07	9	>10
Carbonation depth(mm)	0.05	0.04	2	10

그 동안 주요 건설재료로서 널리 사용되어 온 콘크리트는 취성적 성질을 가지며, 인장 및 휨성능이 떨어지는 본질적인 결함을 가지고 있다. 또한 고강도콘크리트의 실용화에 따른 압축강도의 증가로 콘크리트의 취성파괴(brittle failure)가 더욱 문제되고 있는 실정이다. 이러한 결함과 문제점을 개선하기 위하여 최근 국내·외에서 활발히 연구되고 있는 연성 재료로서 섬유보강 콘크리트(Ductile Fiber Reinforced Concrete)가 주목을 받고 있으며, 섬유보강 콘크리트에 대해 조사한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 고인성 콘크리트 개발 현황, 고인성 콘크리트의 구성 재료 및 배합 특성, 수화 및 미세구조 특성, 역학적 특성, 내구 특성 등에 대하여 조사·분석함으로써 신섬유복합 모르타르의 개발 방향을 설정하였다.

(2) 건설재료의 주종을 이루는 콘크리트는 취성적 성질, 인장 및 휨에 취약한 본질적 결함을 갖고 있어 이를 개선할 수 있는 새로운 대체재로서 고성능(고인성, 고내구성) 섬유복합재료가 각광을 받고 있다. 이러한 국제적인 추세와는 달리 국내에서는 섬유복합재료의 실용화를 위한 개발 연구 및 응용 실적이 매우 미진한 실정이다. 따라서 선진국 수준의 “섬유복합 재료”를 개발하고 이를 “구조물에 적용”할 수 있는 구체적인 기술 실용화가 시급히 요구되고 있는 실정이며, 본 연구에서는 고연성 시멘트복합재료를 개발하여 이러한 요구를 충족시키려고 한다.

2. 지하공간(주차장) 화재성상 특성 및 콘크리트의 내화연구 동향

최근 전 세계적으로 사회의 급격한 발전과 함께 건축물이 초고층화・지하심층화・대형화로 변화 되고 있으며, 이와 더불어 지하공간의 활용도가 높아지고 있는 추이를 보이고 있다. 한편, 국내 화재 발생 비율 또한 점차 증대되고 있으며(약 46,000건/년 2013년 기준) 건축물 화재가 발생할 경우 대형화재로 이어져 그 피해는 막대할 것으로 예상된다.

특히, 지하 대공간(주차시설공간 또는 판매공간)의 경우 화재시 특수한 가연물(차량, 케이블 덕트 등) 과 밀폐・폐쇄적 공간에서의 고온화열로 인해 구조물 피해는 일반화재보다 더욱 큰 피해를 입을 것으로 판단된다.

지하층 화재는 초기에 진압하지 못할 경우 최상층부까지 화재가 확대될 수 있으며, 지하공간내 화재 진압의 어려움으로 인하여 구조물의 피해도 장기적으로 지속될 수 있다. 또한 수직으로 공간을 쌓아올린 고층 건축물은 상부와 하부를 연결시키는 수단이 필수적으로 계단을 비롯하여 엘리베이터, 닥트스페이스, 파이프샤프트 등이 사람, 물건 및 에너지 정보를 연결시키는 수직 동선으로서 대동맥이라고 할 수 있지만 완벽하게 구획이 안된 상태에서 화재가 발생할 경우 화염 및 연기 전파의 통도로 작용하여 화재시 잠재적 위험성을 내포하고 있다.

또한, 현재까지 콘크리트 구조물은 내화구조로 알려져 왔으나, 구조물의 대형화・첨단화로 인하여 고강도 콘크리트의 사용이 필요하며 이러한 고강도 콘크리트에서 화재발생시 급격한 온도 상승으로 인한 콘크리트내 수증기가 팽창하고 화재의 화력으로 인한 콘크리트의 열팽창으로 폭렬이 발생하게 된다. 이로 인해 심각한 단면 결손 및 급격한 건축 구조물의 구조내력이 저하되며 최악의 경우 건축 구조물의 붕괴까지 일어날 수 있다.

따라서 지하 공간의 화재성상 예측을 위해 높은 화재하중으로 판단되는 가연물의 체계적인 조사(종류별, 배치별, 재질별)가 필요할 것으로 사료된다.

가. 지하공간(주차장) 화재성상 특성에 대한 연구동향

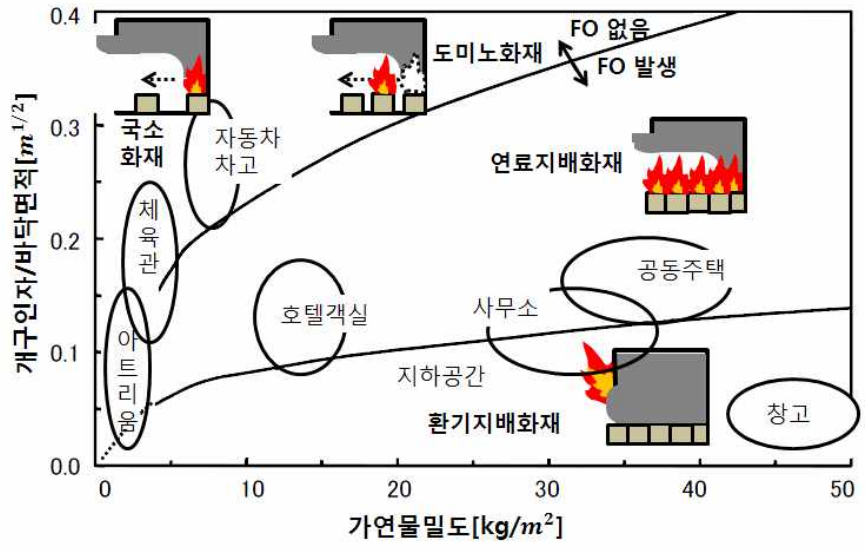
(5) 초고층 및 지하공간의 화재성상 특성

(가) 환기지배형

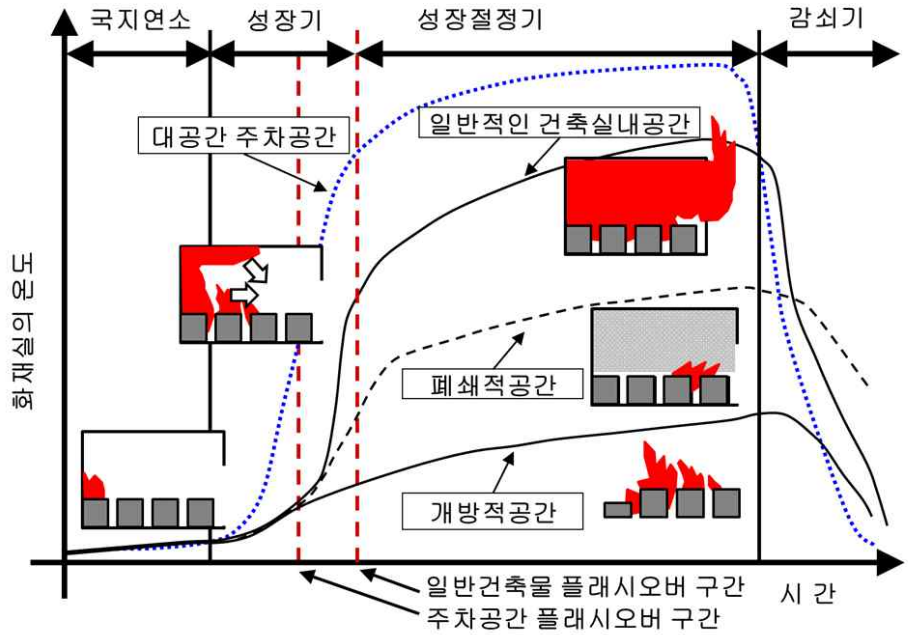
화재는 구획별, 공간별 화재의 성상이 다르다. 아래 보이는 <그림 2.2.13>과 같이 지하 공간내 화재는 밀폐・폐쇄적 화재로 인해 환기지배화재의 형태를 띄고 있다. 환기지배화재의 경우, 도미노 화재, 연료지배화재와 다르게 구획내 다량의 연기가 발생하여 화재진압이 어렵다. 또한 화재구획내에서 화재를 진압할 수 없기 때문에 구획내 구조물이 화력에 대하여 지속적으로 피해를 받으며, 이로 인해 구조물의 내

화성이 저하될 수 있다.

특히, 지금까지 주차공간은 다음 <그림 2.2.14>와 같이 화재실의 온도가 낮고, 많은 연기·유독가스로 인해 화재전파가 용이하지 않으며 밀폐·폐쇄적 공간으로 인식되어 왔으나, 최근 주차공간은 대공간 개방형 주차공간으로 구성되어 있으며, 이에 따라 빠른 화재성장과 높은 온도로 인해 기존의 주차공간 화재성상과 전혀 다른 양생을 나타낸다.



<그림 2.2.13> 공간에 따른 지배화재



<그림 2.2.14> 구획화재의 진전과정

(나) 플래쉬오버 (Flash Over)

화재의 특성 중 화재의 확대가 급속도로 빠르게 진행되는 경우가 있다. 이는 공간내에서 화재가 발생하였을 때 발화로부터 화재가 서서히 진행하다가 가연물의 일정량이 연소된 후에 열전달에 의해 가연성가스가 축적되고 발화온도에 도달하여 구획내에서 순식간에 폭발적으로 화염에 휩싸이는 화재현상을 말한다. 지하공간내에서 환기지배화재의 영향으로 인해 플래시오버가 발생되지 않을 수도 있지만, 다량의 연기발생이 되며 연기에 온도가 축적되어 플래시오버를 발생시킬 수 있으며, 이때 플래쉬오버로 인한 화재가 급격히 성상할 수 있다.

(6) 국내외 주차장 화재 사례

(가) 프랑스 파리 Vendome 주차장 화재

2012년 3월 9일 프랑스 파리 Vendome 호텔의 지하 주차장에서 스쿠터와 대형승용차가 충돌하여 화재가 발생 <그림 2.2.15>하였다. Vendome 호텔은 1699년에 설립되어 외관의 대부분이 국립 역사 기념물로 분류되며 지하 5층의 주차장에는 고급 세단차량이 진열 되어있었다. 하지만 약 5시간동안 지속된 화재로 인해 차량 40대가 전소 및 15대가 반소되어 약 87억 원의 막대한 재산적 피해와 수 십명의 부상자가 발생하였다.



<그림 2.2.15> Parking fire (Vendome Hotel)

(나) 스웨덴 Gothenburg 주차장 화재

2011년 3월 스웨덴 Gothenburg의 주차장에서 원인미상의 화재가 발생하여 차량 20대가 전소되었다. 화재발생 후 경보장치 등을 통해 소방관이 출동을 하였지만, 출동하는 10분 동안 급격하게 화재가 전파되어 대형화재로 성장하였으며, 약 4시간동안 지속되어 콘크리트 구조물에 심각한 손상을 입혀 벽체부분과 슬래브부분의 철근이 대부분 노출되었다.



<그림 2.2.16> Parking fire (Gothenburg building)

(다) 미국 WTC 주차장 테러 화재

1993년 2월 26일 미국 WTC의 지하2층에서 테러 <그림 2.2.17>로 인한 화재가 발생하였다. 뉴욕 로워 맨하튼에 606kg짜리 폭탄을 실은 노란색 승합차로 세계 무역 센터 지하 2층 주차장에 승합차을 주차한 이후 담배 라이터로 폭탄을 점화하여 테러를 실시하였다. 이 테러로 인해 주차장에 폭발을 동반한 화재가 발생하였으며, 이로 인해 6명이 사망하였고 1040여명이 부상을 당하였다. 또한 폭발을 동반한 화재로 인해 콘크리트 벽을 뚫고 4개 층에 걸쳐 폭 30m의 구멍이 생겼으며, 테러와 화재의 연쇄적인 피해로 인해 구조물의 피해가 컸던 사례이다.



<그림 2.2.17> Parking fire (WTC)

(라) 베트남 Ho chi minh 도시 주차장 화재

2004년 3월 3일 베트남 Ho chi minh 도시 지역에서 17층짜리 빌딩에서 화재가 발생하여 내부 지하주차장의 차량까지 연소되는 화재<그림 2.2.18>이 발생하였다. 이 화재로 인해 자동차가 3대 전소되고 약 50대의 차량이 반소되었으며, 이 차량화재로 인해 천정부의 철근이 노출되는 현상을 확인할 수 있었다. 또한, 지하주차장 인접한 장소에 가솔린 탱크가 있어서 소방대원의 진압이 늦어졌다면, 200L의 가솔린 탱크에 화재가 전파되어 건물 전체가 붕괴될 수 있는 사례였다.



<그림 2.2.18> Parking fire (Ho chi minh city)

(마) 경기도 의왕 주차장화재

2013년 8월 20일 경기도 의왕시 L 아파트 지하주차장에서 원인 미상의 화재<그림 2.2.19>가 발생하였다. L 아파트는 2013년 2월부터 입주가 시작된 신식 아파트였으나, 소화설비가 미작동 되어 대형화재로 성장하였다. 이 화재로 인하여 차량 15대가 전소되고 41대가 반소되었으며, 주차장 구조물의 전체 5017m2 중 1500m2 의 면적이 피해와 천정부의 철근이 다량 노출되는 피해를 입었다. 또한 차량화재 시 다량의 유독가스가 발생되어 39명이 부상을 당하였으며, 2시간 동안 지속된 화재로 인해 2억 5천만원의 재산피해가 발생하였다.



<그림 2.2.19> Parking fire (Uiwang-si Apartment)

(바) 인천시 인스파월드 주차장 화재

2011년 7월 3일 인천시 중구 인스파월드 주차장에서 원인미상의 화재<그림 2.2.20>으로 인해 이용객 400여명이 긴급 대피하고 화재가 급격히 성장하여 40여분간 차량이 48대가 소실되는 사례가 있었다. 화재가 발생한 인스파월드는 2010년 소방점검에서 스프링클러 등 소방시설 불량으로 적발된 적이 있었으며, 이번 화재도 소방시설들이 전혀 작동하지 않았고, 주차공간에 소방시설의 작동 및 점검에서 취약한 부분이 나타나는 사례였다.



<그림 2.2.20> Parking fire (Incheon)

(사) 대전시 중구 아파트 주차장 화재

2008년 8월 18일 B 아파트 지하주차장에서 전기합선으로 인한 화재<그림 2.2.21>가 발생하였다. 이 화재로 인해 4명의 인명 피해와 지하주차장에 주차되어 있던 차량 26대가 전소되고 15대가 반소 및 부분 소실되었다.

또한, 주차장 지하 1층 320여대, 지하 2층 122대가 차량화재로 발생된 유독가스와 연기의 피해를 입었으며, 이로 인해 3억 3000여만원의 재산피해가 발생하였다.



<그림 2.2.21> Parking fire (Deajeon Apartment)

(아) 부산시 진구 M 교회 주차장 화재

2012년 11월 14일 부산시 진구 M 교회 1층 주차장에서 원인미상의 화재가 발생<그림 2.2.22>하여 10명이 화상 및 연기를 흡입하여 부상당하였으며, 1시간 만에 차량14대가 전소, 1대가 반소되어 5천만원의 재산피해가 발생하였다. 또한, 화재의 시작점은 지하 1층 주차장에서 시작하였으나, 화재가 성장하면서 4층 건물의 내부까지 화재가 전파되어 교회 건물 전체에 피해를 발생시켰다.



<그림 2.2.22> Parking fire (Busan-si church)

(자) 국내・외 주차장 화재사례 고찰

주차장화재의 경우 사고원인을 알 수 없는 경우가 많으며, 발화 이후 화재전파로 인하여 대형화재로 급격하게 성장하는 것을 알 수 있었다. 국내의 주차장의 경우 소화설비가 미작동 되는 경우가 많으며, 주차 공간 특성상 초기소화가 되지 않는 경우 다량의 유독가스 및 연기의 발생으로 인해 소화진압의 어려움이 따르며, 이로 인해 화재가 지속되는 경향을 알 수 있었다. 또한 화재가 장시간 지속됨에 따라 주차공간의 구조물 피해로 인해 철근이 노출되거나 좌굴현상이 발생하는 것도 확인할 수 있었다. 다음 <표 2.2.8>은 국내 주차장 화재에 대하여 10년간 화재사례를 분석한 것이다

<표 2.2.8> Analysis of domestic parking lot fire case

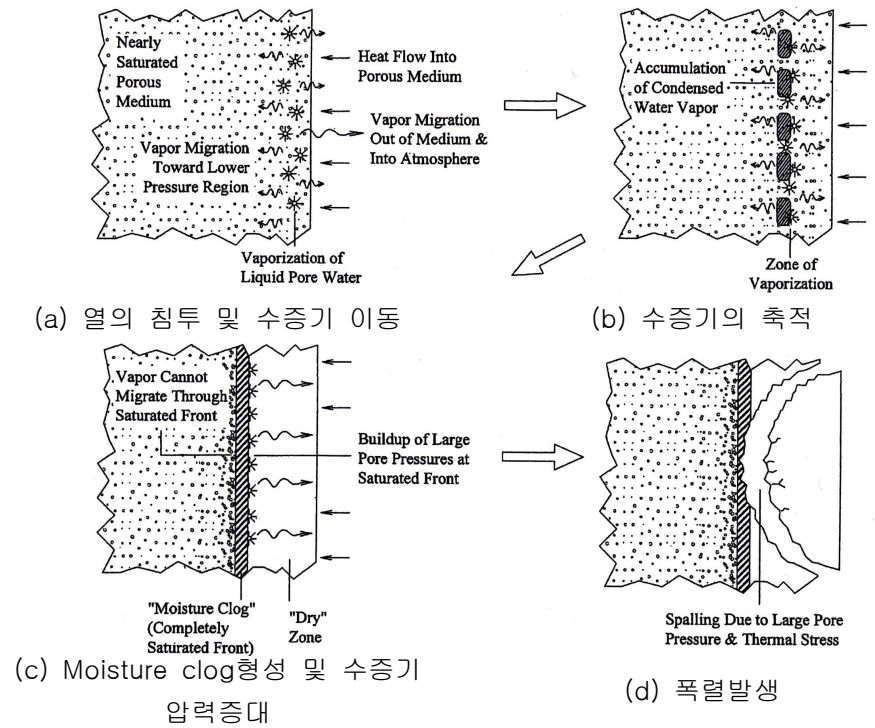
년도	사고장소	사고 원인	피해 상황
2004	경기도 광명동 철산3동 상업지구 지하주차장	용접작업 중 발화	◆ 차량 7대 전소, 1명 부상
	서울시 종암동 아파트 지하주차장	원인 미상	◆ 차량 10대 전소
	서울시 동대문구 전농동 다세대주택 지하주차장	원인 미상	◆ 차량 2대 전소 200여만원 재산피해
2005	제주도 서귀포시 하예동 빌라 지하주차장	담뱃불로 인한 발화	◆ 차량 1대 전소
2006	경기도 구리시 안창동 학원 지하주차장	방화 추정	◆ 학생 15명 부상 2천만원 재산피해
2007	경기도 용인 빌라 지하주차장	원인 미상	◆ 차량1대, 오토바이1대전소 1000만원 재산피해
2008	부산시 시청 지하주차장	원인 미상	◆ 2천만원 재산피해
	경기도 용인 아파트 지하주차장	원인 미상	◆ 차량 10대 반소
	서울시 서대문구 창천동 빌라 지하주차장	방화 추정	◆ 차량 3대 전소
	대전시 중구 태평동 아파트 지하주차장	전기 합선	◆ 차량 22대 전소, 12대 반소 5억 8천만원 재산피해
2009	광주시 방림동 아파트 지하주차장	지하주차장에 있던 페인트통에서 발화	◆ 1층부터 5층사이의 아파트 발코니 소실
	강원도 원주시 무실동 아파트 지하주차장	원인 미상	◆ 차량 10대 전소
	서울시 신림동 아파트 지하주차장	원인 미상	◆ 차량5대, 오토바이10대전소 300여 세대 정전
2010	울산시 중구 성남동 음식점 지하주차장	담뱃불로 인한 화재	◆ 1명 부상 870만원 재산피해
	경기도 안산시 단원구 고잔동 아파트 지하주차장	엔진 과열	◆ 차량 2대, 오토바이 2대전소
	부산시 동구 범일동 아파트 지하주차장	전기 누전	◆ 300만원 재산피해
2011	서울시 은평구 구산동 아파트 지하주차장	원인 미상	◆ 5790만원 재산피해
	강원도 평창군 대관령면 아파트 주차장	원인 미상	◆ 1명 사망
	서울시 아현동 아파트 지하주차장	원인 미상	◆ 경찰관 1명 사망
	충북 청주시 상당구 금천동 지하주차장	원인 미상	◆ 차량6대,오토바이2대전소
2012	대구 북구 관음동 아파트 지하주차장	방화	◆ 차량1대, 오토바이3대전소 천만원 재산피해
	인천시 인스파월드 주차장화재	자동차 엔진룸 발화 추정	◆ 차량 50대 전소 400명 대피
	부산시 진구 전포2동 교회 주차장	원인 미상	◆ 차량 14대 전소 10명 부상
2013	경기도 용인시 아파트 지하주차장	방화	◆ 차량 30대 전소 100명 대피, 240세대 정전
	경기도 수원시 세류동 산부인과 주차장	전기 합선	◆ 차량 6대 전소 산모와 신생아 20명 부상
	경기도 의왕 아파트 주차장	전기 합선 추정	◆ 차량 15대 전소, 41대 반소 1500m^2 소실, 2억5천만원 재산피해

3. 국내외 내화 연구 동향

가. 콘크리트의 폭렬 매커니즘

(1) 수증기압설

Gary R Consolazio는 1990년대 많은 학자들에 의해 보고된 문헌들의 고찰을 통해 폭렬발생 메커니즘을 모델화 하였다. 본 모델은 현재까지 지배적으로 많은 학자들에 의해 보편화 되고, 인식되어온 폭렬발생의 기본 메커니즘으로 그 내용은 다음과 같으며, 수증기압에 대한 모델 <그림 2.2.23>과 같이 크게 4단계로서 1단계 콘크리트가 고열·고온의 환경에 노출되어 내부 공극 속에 존재하는 물(liquid pore water)이 증기화(vaporization) 되어 일부는 밖으로 그리고 대부분은 압력이 낮은 내부로 이동, 2단계 밖으로 이동한 수증기는 증발되며, 내부로 이동한 수증기는 가열 면으로부터 일정한 거리에 쌓임(accumulation). 3단계 시간경과에 따라 내부의 수증기는 포화상태가 되며, 연속적으로 쌓인 수증기는 축적 층을 형성. 4단계 수증기 축적층 영역의 압력이 계속적으로 상승하여, 결국 콘크리트의 인장력을 상회하면서 부재 표면이 박리 및 탈락되는 폭렬현상이 발생하게 된다.



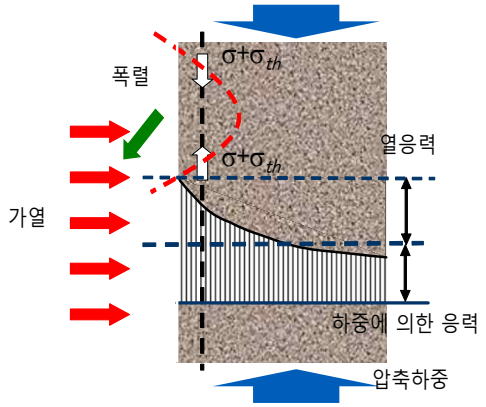
(a) 열의 침투 및 수증기 이동 (b) 수증기의 축적

(c) Moisture clog형성 및 수증기 압력증대 (d) 폭렬발생

<그림 2.2.23> 폭렬매커니즘 수증기압설

(2) 열응력설

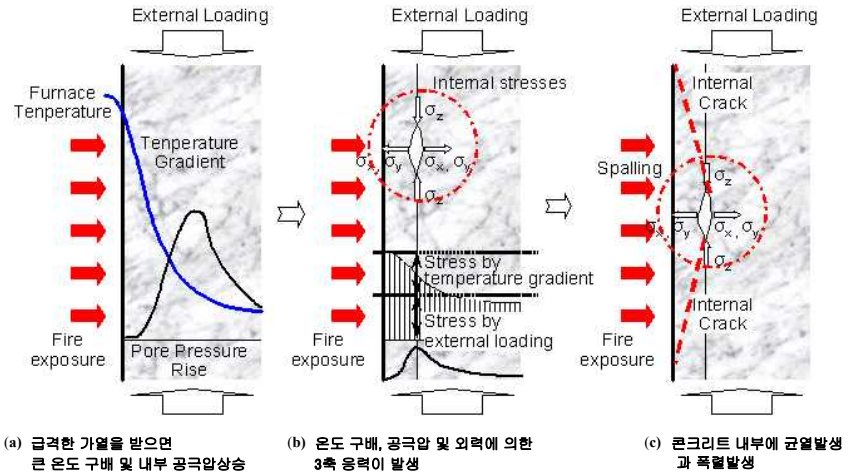
열응력에 의한 폭렬발생 이론은 다음 <그림 2.2.24>와 같이 콘크리트 표층부가 고온에 노출됨으로서 발생하는 과잉 압축열응력과 표층부에 발생하는 급격한 온도 상승에 의한 제한된 열팽창에 의하여 폭렬이 발생하는 이론이다.



<그림 2.2.24> 열응력설에 의한 폭렬

(3) 열응력과 수증기압 등의 복합원인에 의한 폭렬발생

복합원인에 의한 폭렬발생이론은 <그림 2.2.25>와 같이 (a) 수증기압에 의한 폭렬발생(Anderberg, 1997) (b) 표면에 발생하는 열응력(Bazant, 1997) (c) 외력에 의해 발생한 압축응력과 내부 균열 등이 복합되어 폭렬이 발생한다는 이론이다.



<그림 2.2.25> 열응력과 수증기압의 복합폭렬형태

나. 국내외 폭렬에 대한 연구동향

국내의 경우 화재성상에 대하여 화재조사에 접속을 하고 있다. 실무적으로 소방기관과 경찰 전문수사반에서 주된 연구를 수행하고 있으며, 보험사 연구소, 국가 연구소에서 소규모, 중규모, 대규모 연소실험을 통한 화재성상을 구축하는 것과 더불어 여러 대학에서의 실물화재 실험, 연소 실험을 통하여 화재성상에 대한 연구를 수행하고 있다.

하지만, 화재성상을 파악하기 위한 가장 기초적인 가연물 조사는 필수 항목이다. 특히, 가연물 조사를 통한 화재성상을 구축하는 사례는 부족한 실정이며, 국내외적으로 기초적인 가연물 조사를 통한 DB구축을 수행함으로써 화재성상을 파악해 나가는 것이 필요하다.

고강도 콘크리트에서 폭렬의 문제점으로 인한 내화성능의 저하에 문제점을 해결하기 위해 다음 <표 2.2.9>와 같이 섬유혼입을 통한 수분의 이동을 확보함으로써 폭렬방지 방안 및 표층부의 내화재료의 도포를 통한 온도구배를 저감하는 방법으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 국내 주요 건설사에서도 <표 2.2.10>에 나타난 바와 같이 내화대책에 관한 연구가 활발히 이루어 지고 있으며, 일본의 경우 설계기준강도 60MPa이상의 고강도 콘크리트에 대하여 폭렬 및 내화성능을 검증하도록 규정하고 있다. 이에 따라, 주요 건설사를 중심으로 60MPa~100MPa급에 대하여 내화대책에 관한 연구가 이루어지고 있다. 더 나아가 2003년도 이후부터 150MPa이상의 초고강도 콘크리트를 대상으로 한 폭렬 대책공법에 대한 연구 및 실용화가 주류를 이루고 있으며, 다음 <표 2.2.11>에 나타난 바와 같다.

또한, 일본 콘크리트 공학협회를 중심으로 하여 일본건축학회, 토목학회 및 화재학회 등이 중심이 되어 폭렬 현상해석에 대한 연구가 체계적으로 이루어지고 있다.

한편, 영국의 경우 1666년의 런던 대화재 등의 많은 화재로 인하여 인명피해가 다수 발생하였으며, 이로 인해 방화관련 연구의 중요성이 부각되어 많은 연구가 진행되고 있다. 더 나아가 영국 카딩톤(Cardington)에 있는 BRE에서는 2001년 7층의 철근콘크리트 구조물을 대상으로 내화성능에 대하여 풀스케일(Full Scale) 화재실험을 진행하였다.

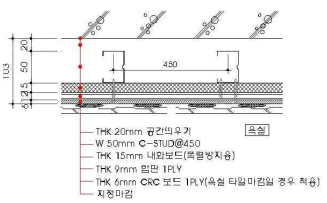
<표 2.2.9> 고강도 콘크리트의 폭렬 연구 동향

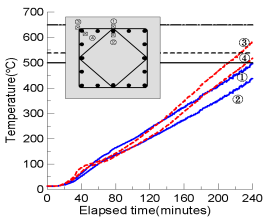
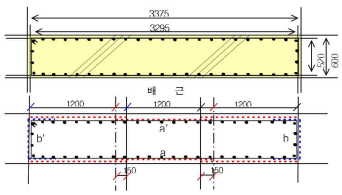
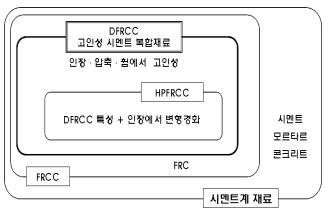
이름	년도	제목(주제)	내 용
권영진 김재환 한병찬	2007	화재 온도를 받는 고인성·고내화성 시멘트 복합체의 거동	고인성·고내화성 시멘트복합체에 의한 고강도콘크리트를 피복하여 화재시 수열온도의 저감 및 폭렬억제. 일본 제2의 장대터널인 히다터널 신축공사에 내화재료로서 적용(일본내 내화성능비교실험을 통한 검증)
송용원 한천구	2007	나일론 섬유의 형상비 및 혼입율 변화에 따른 고강도 콘크리트의 폭렬특성	폭렬방지에 미치는 유기질 섬유의 영향요인을 분석하기 위해 섬유의 종류. 특히 나일론섬유의 형상비 및 혼입율 변화에 따른 고강도 콘크리트의 내화특성에 대하여 검토함으로써, 최적인 NY섬유의 형상비 및 혼입율을 제안
배장춘 한천구	2006	60 MPa급 고강도 콘크리트의 폭렬방지	60 MPa급 고강도 콘크리트의 화재시 폭렬방지를 목적으로, 폴리프로필렌섬유의 혼입율 변화에 따른 콘크리트의 기초적 특성과 내화실험 후 폭렬성상 및 잔존압축강도 특성 등을 검토
허영선 한천구	2006	80～100 MPa급 고강도 콘크리트의 폭렬방지	80～100 MPa급 초고강도 콘크리트의 화재시 폭렬방지를 목적으로 PP섬유 혼입율 변화에 따른 콘크리트의 공학적 특성 검토, 1시간 비가력 내화시험을 통하여 고강도 콘크리트의 폭렬방지공법을 위한 기초적 자료로 제시
송영찬	2006	고강도 콘크리트의 폭렬방지를 위한 피복부착공법의 기초적 연구	고강도 콘크리트의 화재시 폭렬 방지 대책으로서 피복재에 의한 구조체로의 온도전달을 억제하는 방법에 대하여 검토하고 피복부착공법에 의한 고강도 콘크리트 폭렬 방지 대책으로서의 활용 가능성을 제시
원종필	2006	내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르의 화재저항성 평가	내화용 습식 고강도 폴리머 스프레이 모르타트의 화재로부터 기존 구조체를 보존할 수 있는 두께를 결정하고자 피복 두께에 따른 내부온도의 변화 평가
송용원 한천구	2006	섬유복합모르터의 뿜칠마감에 의한 고강도콘크리트 기둥부재의 폭렬방지	콘크리트구조체의 표면을 섬유복합모르터로 뿜칠마감한 부재를 내화실험한 후 폭렬성상을 검토. 고성능 콘크리트를 사용한 기존 건축물의 내화성 보강공법의 한 방법으로 제안
박찬규	2005	섬유 혼입량에 따른 고강도 콘크리트 폭렬 특성	폭렬방지성능이 있다고 알려져 있는 유기 섬유 2종을 선택하여, 물/결합채비가 30～16 %인 고강도 콘크리트의 폭렬특성 파악
김경민	2004	셀롤로오스 섬유를 사용하는 고성능 콘크리트의 내화 특성	최근 균열저감 목적으로 보급이 확대되고 있는 CL 섬유의 혼입량 변화에 따른 콘크리트의 기초적 특성과 내화시험을 실시한 후 폭렬성상 및 잔존 압축강도 특성 등을 검토

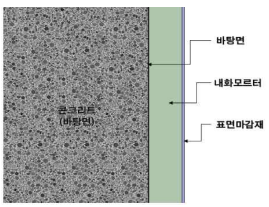
<표 2.2.10> 국외 폭렬 방지 방법

건설사	설계강도	공법 개요
카지마건설	150～180 MPa	- 실기둥부재에 대한 내화성능 평가 완료 - 폭렬방지를 위한 PP섬유의 적정 혼입율은 W/B 0.15에서 1.5～2.0kg/m3, W/B 0.18～0.20에서는 1.0kg/m3로 나타남 - 단면 1,000mm×1,000mm 기둥시험체의 내화실험실시, 주근의 최고온도를 500℃ 이하로 제어
다이세이건설	130 ～150 MPa	- 에틸렌비닐알콜(EVA)공중합체 유기섬유를 콘크리트에 일정량 혼입한 기술 - 물시공실험 결과, 기존의 PP섬유에 비하여 EVA공중합체 유기섬유를 사용함으로서 고강도콘크리트의 시공성이 개선됨
다케나카 공무점 및 시미즈건설	80 MPa 이상	- 유기섬유 혼입량을 증가시키기 위한 전용의 초고성능 감수제를 개발하고, 유기섬유와 강섬유를 동시에 혼입하여 고강도콘크리트의 폭렬저항성 및 인성능을 확보 - 다케니카공무점 및 시미즈건설은 AFR(Advanced Fire Resistant) 콘크리트에 대하여 공동연구 개발하여 건축기술성능증명(제60-01호)을 일본건축총합시험으로부터 취득
구마가이건설 외 6개사 공동컨소시엄	60 ～100 MPa	- 대상으로 한 피복공법은 1)섬유혼입 규산칼슘판, 2)세라믹계 경질내화피복재, 3)모르타르, 4)셀룰로스 섬유혼입 모르타르의 4종류 - 철근콘크리트조 기둥부재의 외주면에 각종 피복을 설치하여 내화성능을 향상시킨 공법으로, 건축기술성능증명 (제02-17호)을 일본건축총합시험으로부터 취득
FPC공법 공동개발연구회	60 ～120 MPa	- FPC(Fire Performance Concrete)공법이란 설계기준강도 60～120MPa의 고강도콘크리트에 폴리프로필렌 수지분말을 1.0～3.0kg/m3 혼입하여 부재의 내화성능을 향상시킨 공법 - 일본건축총합시험소로부터 건축기술성능증명(제03-15호)을 취득

<표 2.2.11> 국내 폭렬 방지 방법

건설사	공법개요	
(주) 포스코건설	- PFB 공법은 외부에서 열을 차단하는 공법으로 신축 및 기존 건축물에 적용가능 - PFR 보드는 알루미노실리케이트계 내화보드를 내화접착제로 구조체에 부착 - 건축부재의 내화시험 (KS F 2257-1) 실시 ⇒ 주근온도를 300℃이하로 제어	

<table>
<tr><td></td><td colspan="2">FFR 내화보드 부착공법 (설계기준강도 40～100 MPa)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">삼성물산(주)건설부문</td><td>- 콘크리트에 PP섬유를 혼입하여 폭렬을 방지
- 사전에 섬유혼입 고강도의 콘크리트의 폭렬시험을 실시함
- 서초 프로젝트 현장 적용</td><td>
</td></tr>
<tr><td colspan="2">PP섬유 혼입공법 (설계기준강도 80 MPa)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">두산산업개발(주)</td><td>- 콘크리트에 PP섬유를 혼입하여 폭렬저감 및 메탈라스 구속 횡변형 제어
- 건설교통부 신기술 제454호 획득
- 부산 수영만 주상복합 건축물에 현장 적용</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">PP섬유혼입 및 메탈라스 구속공법 (설계기준강도 40 MPa)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">GS 건설</td><td>- 강섬유와 폴리프로필렌섬유를 혼입하여 사용하는 섬유혼입공법(Fiber Cocktail)
- 60 MPa 보 부재 및 80 MPa 기둥부재 내화시험을 통한 폭렬저감 및 내화성능 확인</td><td>
</td></tr>
<tr><td colspan="2">Fiber Cocktail 혼입공법 (설계기준강도 50～100 MPa)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">대림산업(주)건설부문</td><td>- ECC 시멘트 복합체를 영구거푸집으로 활용한 고강도 콘크리트의 내화공법
- 내화시험을 통한 내화성능 확인</td><td>

</td></tr>
<tr><td colspan="2">ECC 영구거푸집 공법 (설계기준강도 60～80 MPa)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">PNR 건설</td><td>- 고인성내화모르타르의 내화피복공법(신설 및 보수공법)
- 일본 공개내화실험을 통하여 우수한 내화성능확인
- 일본 HIDA 터널(일본 제2장대터널) 내화재료로 선정</td><td>

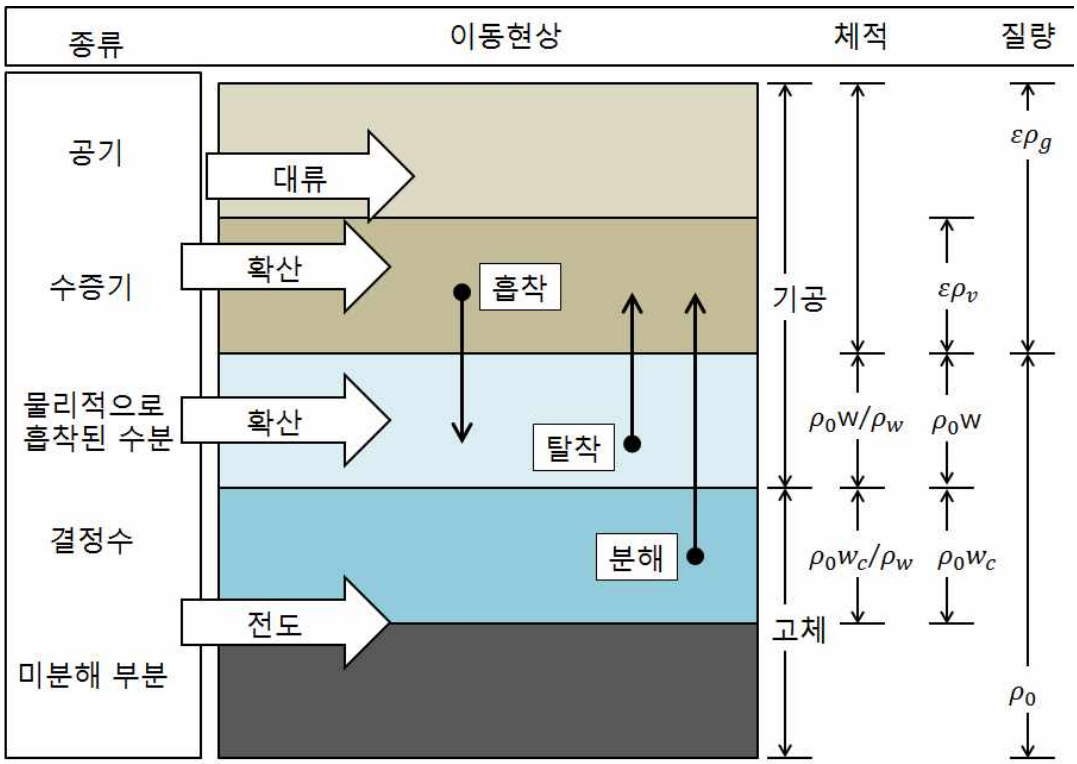
</td></tr>
<tr><td colspan="2">ECC내화모르타르의 내화피복공법 (설계기준강도 60～80 MPa)</td></tr>
</table>

다. 성능기반 내화설계에 관한 열 해석 연구동향

(1) 화재시 콘크리트의 온도상승 예측

일본의 Harada.K55)는 콘크리트 부재의 내화설계를 합리적으로 실시하기 위하여 방법을 제안하였다. 화재시의 콘크리트 내부의 열과 수분의 이동에 나타낸 모델 다음 <그림 2.2.26>과 같이 제안하였다. 모델은 열전도, 공극 내부 혼합가스의 대류, 공극 내부 수증기의 확산 및 대류, 물리흡착수의 확산 및 탈착, 결정수의 열분해의 현상을 모두 기술한 모델이다. 다음 <표 2.2.12>와 같이 기존의 다른 연구자에 의해 진행된 연구와 다른 특징은 결정수가 열분해를 양에 포함하고 있는 점이다.

또한, 이를 통해 열수지식, 혼합가스의 수지식, 수증기의 수지식, 물리흡착수의 수지식, 액상수의 수지식은 다음 식 2.2.2～식 2.2.6 과 같이 추산하여 얻을 수 있다.



<그림 2.2.26> The concrete moisture transport model

$$\rho c\frac{\partial\theta}{\partial t}=\nabla(\lambda\nabla\theta)-L_sR_{sorp}-L_dR_{dcmp} \quad 2.2.2$$

$$\frac{\partial(\epsilon\rho_g)}{\partial t}+\nabla(\rho_g u)=R_{sorp}+R_{dcmp} \quad 2.2.3$$

$$\frac{\partial(\epsilon\rho_v)}{\partial t}+\nabla(\rho_v u)=\nabla(D_v\nabla\rho_v)+R_{sorp}+R_{dcmp} \quad 2.2.4$$

$$\rho_0\frac{\partial w}{\partial t}=\nabla(\rho_0 D_w\nabla w)-R_{sorp} \quad 2.2.5$$

$$\rho_0\frac{\partial w_c}{\partial t}=-R_{dcmp} \quad 2.2.6$$

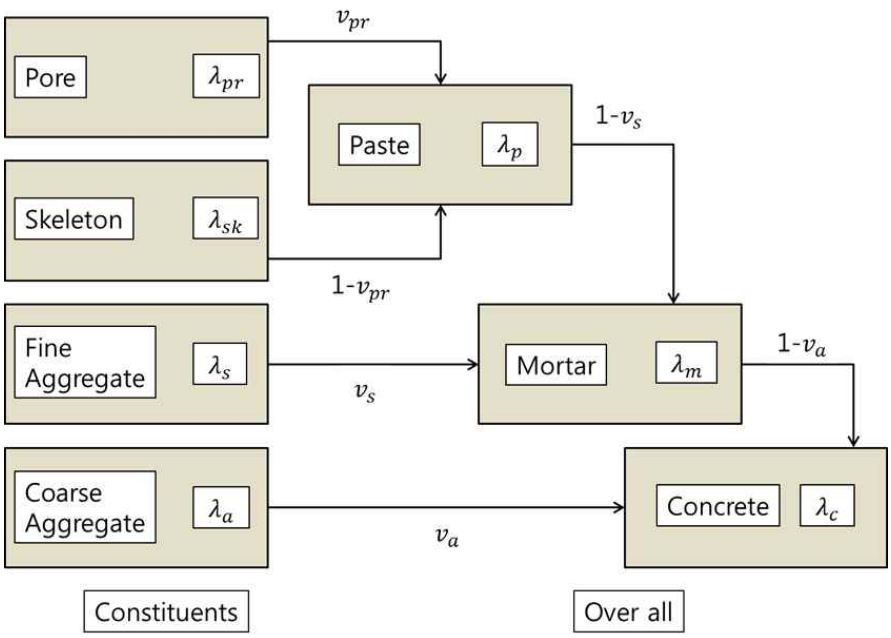
<표 2.2.12> Research trend of moisture transport model

연구자	열 이동	가스대류	수증기 확산	수분이동	물리흡착 수의탈착	결정수의 열분해
Huji	○	X	X	X	X	X
Pettersson	○	X	X	X	X	X
Kawagoe	○	X	X	X	X	X
Matumoto	◎	○	○	○	○	○
Sugiyam	○	X	○	○	◎	X
Harmathy	◎	○	○	X	○	X
Harada	○	○	○	○	◎	○

◎ 상세히 고려, ○ 고려, X 무시

실제 사용되는 콘크리트의 배합은 넓은 범위로 사용되고 있는 것을 고려하고, 모델에 나타내는 물성 값 (열전도율, 투기율, 확산계수 등)를 다음 <그림 2.2.27>과 같이 콘크리트의 배합과 직접 연결하여 추산하는 방법에 대한 연구를 진행하였다. 또한 제안한 모델을 통해 열전도 수치해석을 수행하기 위해 연립방정식을 이용하였다. 수치적으로 안정적인 해를 얻기 위해 2차원 정상 확산방정식에 대한 기초 해를 적분방정식으로 변환하여 룬게쿠타법에서 시간을 적분하는 방법을 이용하였으며, 해석결과를 실제 가열실험결과와 비교하여 유효성을 확인하였다.

모델에 나타난 물성 값 (열전도율, 비열, 공극률, 밀도, 투기율, 수증기 확산계수, 액상수 확산계수, 흡착등가선, 열분해속도정수, 열분해잠열 등)을 측정 또는 추산에 의해 정의하였다. 나아가 필요한 물성 값의 전체를 콘크리트 배합에서 직접 추산하는 방법을 나타내었다.



<그림 2.2.27> The thermal conductivity of the concrete model

(2) 화재시 콘크리트의 열응력 예측

일본 Arita.H는 고강도 콘크리트의 폭렬에 관한 이론적 연구로서 내부의 온도분포 및 압력분포를 산출하는 모델을 작성하고, 열응력・압축강도에 의한 부가응력・전응력을 산출하였다. 또한, 그 결과에 따라 열응력과 압축강도에 의한 부가응력의 영향을 비교하고 가열전의 압축강도・함수율과 내부발생 응력과의 관계성에 대한 연구를 실시하였으며, 내부응력 해석을 위해 다음 <그림 2.2.28>과 같은 온도 및 압력 상승 예측 프로그램 프로세스를 통하여 열응력 해석을 수행하였다.

$$\frac{\partial(\rho_c cT)}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) - Lm_\nu \qquad 2.2.7$$

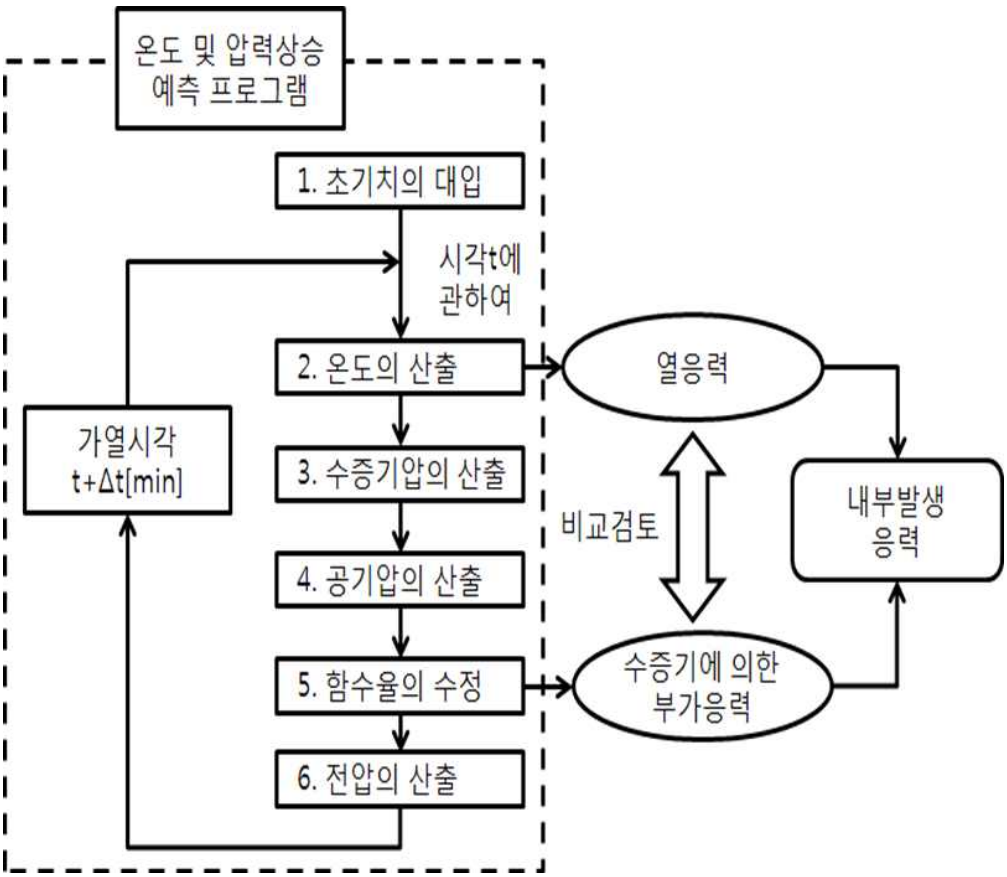
$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_\nu)}{\partial t} = \nabla(\kappa \rho_\nu \nabla P) + m_\nu \qquad 2.2.8$$

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_a)}{\partial t} = \nabla(\kappa \rho_a \nabla P) \qquad 2.2.9$$

$$\rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} = -m_\nu \qquad 2.2.10$$

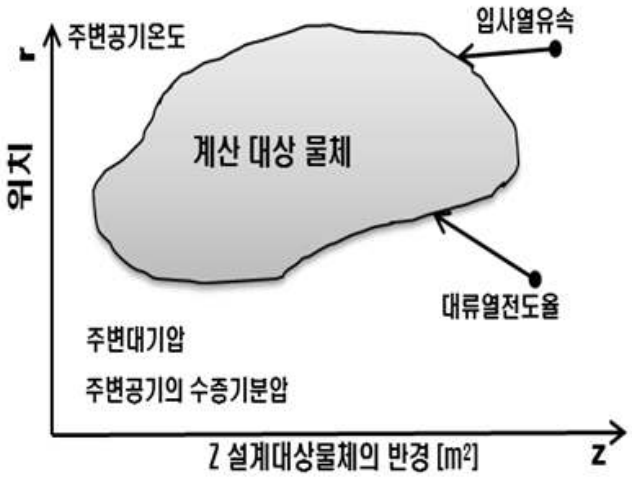
$$P = P_v + P_a = \frac{M_v \rho_v}{RT_{abs}} + \frac{M_a \rho_a}{RT_{abs}} \qquad 2.2.11$$

열 수분 이동 모델 해석을 위해 열, 수증기, 공기, 액상수에 대한 기초식은 다음 식 2.2.7 ~ 2.2.11 과 같다.



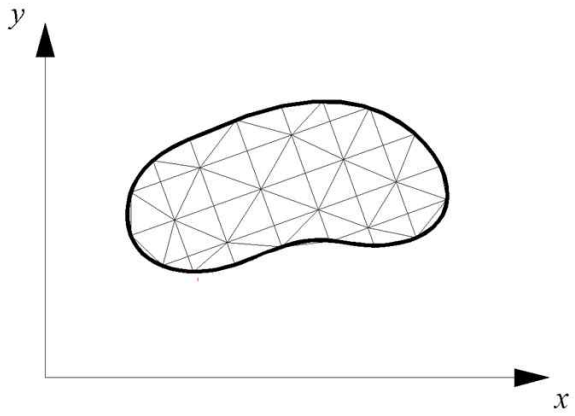
<그림 2.2.28> The thermal stress analysis process

위의 기초식을 이용하여 열전도율, 밀도, 비열 등의 각 물성 값은 다음 <그림 2.2.29>와 같이 계산대상 물체 내부의 위치에 의해 입력조건을 설정한다.

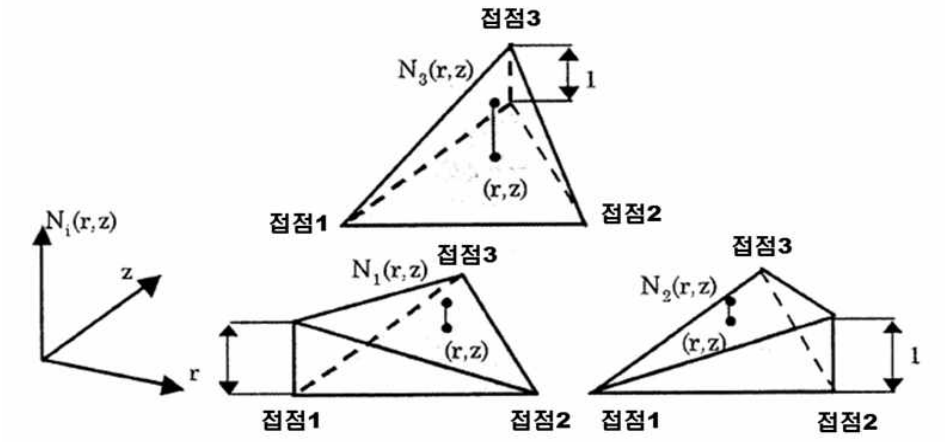


<그림 2.2.29> The calculate the shape

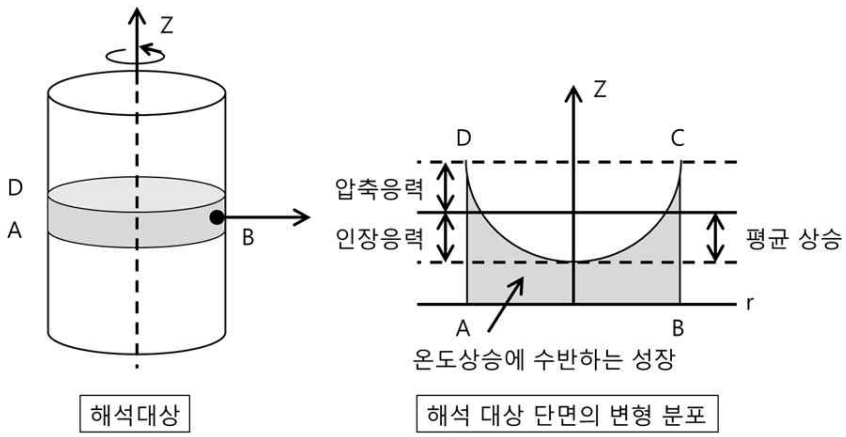
계산대상 설정 이후 이산화 방정식은 삼각형 요소로 분할하여 Gelerkin법에 의해 정식화를 행하여 다음 <그림 2.2.30>과 같이 나타낸다.



(a) 전체 방정식 요소 분할



(b) 요소 분할 계수



<그림 2.2.30> Creting modeling

해석대상은 공시체로서 1) 압축강도가 높고, 함수율이 높은 경우, 2) 압축강도가 낮고, 함수율이 높은 경우, 3) 압축강도가 높고, 함수율이 낮은 경우, 3가지의 초기 조건이 다른 콘크리트 해석을 실시하였다.

열응력의 산출에서는 평면보유의 가정 및 축을 대칭하는 성질을 이용해서 평균변형을 산출하고, 평균변형을 이용한 열응력의 산출법에 의해서 나타냈다.

나아가 응력의 산출에 이용하는 고온의 콘크리트의 성질에 관해서도 기존의 연구를 이용하여 나타냈다. 콘크리트의 내부발생응력의 산출법에서는 기존의 연구를 이용하고, 열응력에 공극압력을 더하여 방법을 나타냈다.

해석 결과 파괴조건의 경우, 최대압축응력은 압축강도보다 훨씬 작았으며, 중심부의 인장균열이 가장 먼저 발생한 것을 확인하였다.

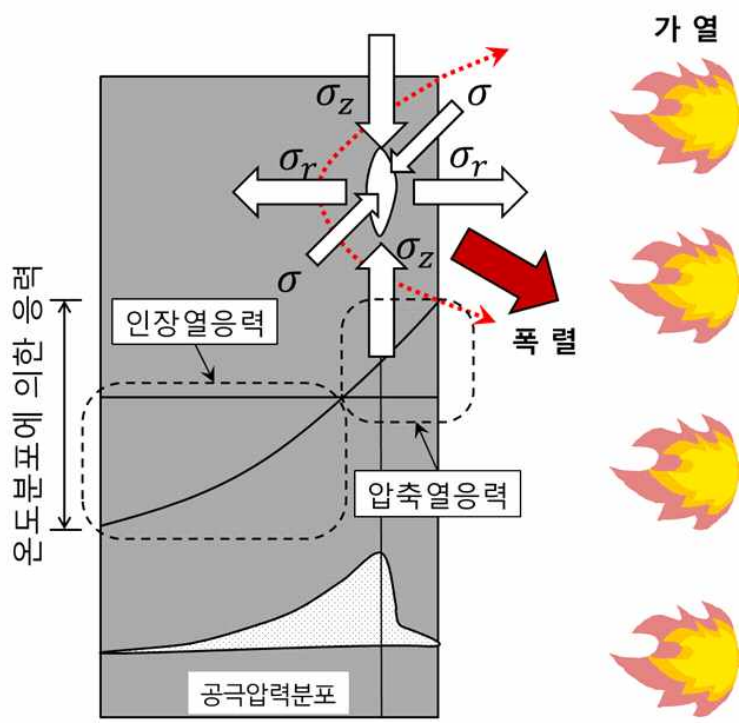
함수율이 높은 대상의 경우, 가열의 초기 온도구배는 오히려 낮게 되었으며, 내부의 인장균열발생은 다소 늦게 발생하였다. 또한 인장균열발생시간이 늦었으며, 가열에 의해 표층면이 열화한 후 균열이 발생하며 응력의 재구배가 요인이 된다고 판단하였다.

압축강도가 높은 경우는 인장균열 발생 시의 응력 및 응력구배가 큰 것으로 나타냈다. 발생하는 응력이 크면, 균열발생 후의 응력 재 구분의 과정이 불안정 되기 쉬운 일로 판단하였다. 특히, 압축강도・함수율과 같이 큰 경우는 증발잠열의 영향에 의한 온도정류의 영향에 중심부의 응력분포가 완만하게 되기 위해 큰 범위에서 균열이 발생하기 쉽고, 이로 인해 불안정하기 쉽다고 판단하였다.

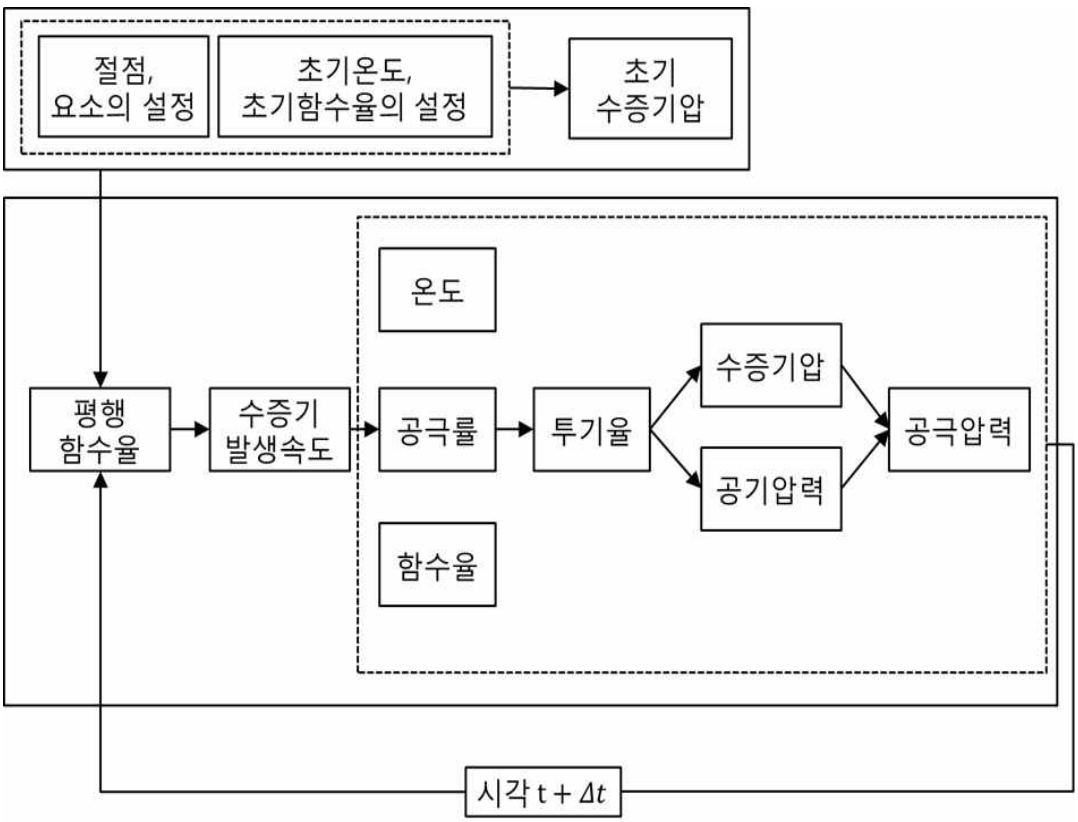
(3) 화재시 콘크리트의 열응력 및 수증기압 예측

일본 Debata.Y57) 의 경우 화재를 받는 고강도 콘크리트의 폭렬 매커니즘에 관한 연구를 진행하였으며, 폭렬을 발생시키는 요인 중에서도 재료내의 열 수분 이동 및 재료내의 응력분포를 해석함으로써 콘크리트의 내부 상태를 연구하였다. 또한, 내부상태를 이용하여 폭렬에 미치는 수증기압과 열응력의 영향을 해명하였다.

다음은 <그림 2.2.31>은 Debata 가 제안하는 폭렬 매커니즘이며, <그림 2.2.32>는 열 수분이동 해석을 위한 프로세스이다.



<그림 2.2.31> The explosion spalling mechanism Debata



<그림 2.2.32> The analysis process

열 수분이동해석에 이용한 기초식을 식 2.2.12 ~ 2.2.16에 나타내었으며, 이 식은 수증기와 건조공기의 상태방정식이다. 온도의 해석에는 비정상열전도 방정식을 이용하고, 액상수의 잠열에 의한 증발잠열의 영향을 고려하였다. 수증기 및 공기의 수지식은 재료내의 공극에 포함된 기체의 이동이 주로 압력구배에 의한 대류에 의해 생기는 것으로 생각하고, 확산은 무시하였다. 중량함수율의 산출에 이용한 액상수의 수지식에서는 폭렬현상은 가열초기에서 생기기 때문에, 액상수의 이동은 무시하였으며, 잠열 및 응축의 영향만 고려하였다. 또한, 갤러킨 법에 의한 요소방정식의 정식화를 실시하였다.

$$\frac{\partial(\rho_c cT)}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) - Lm_\nu \qquad 2.2.12$$

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_\nu)}{\partial t} + \nabla(\rho_\nu \cdot \nu) = m_\nu \qquad 2.2.13$$

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_\alpha)}{\partial t} + \nabla(\rho_\alpha \cdot \nu) = 0 \qquad 2.2.14$$

$$\rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} = -m_\nu \qquad 2.2.15$$

$$m_v = \gamma(w - w_{eq}) \qquad 2.2.16$$

열 수분 이동해석을 하는 것으로 공극압력의 인장강도비와 폭렬발생의 유무를 실시하였다. 공극압력을 고려한 열응력해석을 실시함으로서 축방향의 좌굴응력비와 폭렬발생의 유무를 확인하였다.

공극압력상승은 인장강도와 같은 순서이지만, 압력상승의 크고 작은 것과 폭렬발생의 유무와는 반드시 일치하지 않고 수증기에 의한 공극압력상승이 폭렬의 주요원인이라고 하는 가설은 변론할 수 없다고 기술하였다. 또한, 내부의 반경방향의 인장응력에 의한 표층부가 박리되고, 그 이후 축방향의 압축응력에 의한 좌굴하는 매커니즘을 생각하면, 기존의 실험결과의 경향과 일치한다고 기술하였다.

(4) 열 해석 연구동향 고찰

열 수분 해석 연구동향에 대하여 일본 Kyoto대학에서 수행되고 있는 연구를 분석하였다. 그 결과, 기존 범용소프트웨어에서 고려되고 있지 않은 열수분모델에 대한 부분을 적용하고 있었다. 또한, 각각의 기초 물성 값을 이용한 해석툴을 사용하고 있으며, 기존 프로그램보다 정밀한 해석기법으로 판단되어 국내에서도 내화설계에 대한 해석기법이 필요하다고 사료된다.

2. Green SHCC 적용 바닥구조시스템 개발을 위한 기초연구

가. 기존 국내외 바닥구조시스템을 조사하여 현황 분석

(1) 국내 관련기술 현황

현재 국내건설 시장에 있어 바닥구조공법은 건설현장의 여건 변화와 시공기술의 발달 및 각종 신기술·신공법의 도입으로 다양화 되고 있다. 이 절에서는 현재 국내에서 개발 및 활용되고 있는 바닥구조공법에 대한 현황과 최근에 개발된 신기술 및 특허에 관하여 검토하였다.

(차) 현행 바닥구조시스템 신기술 분석

① 목재 합판 거푸집 공법 (기존 기술)

본 공법은 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 현장타설용 슬래브 거푸집 공법이다. 본 공법은 오랫동안 시공 경험이 축적되어 있기 때문에, 장스팬, 1방향, 2방향 슬래브 등 구조형식이나, 시공성에 관계없이 공사가 가능하다는 장점이 있으며, 자유로운 형상시공이 가능하고, 설비, 전기 작업이 비교적 용이하다고 할 수 있다. 그러나 본 공법이 최근 문제화 되고 있는 부분은 다음과 같다. 먼저 시공성 측면에서

㉮ 여러 단계의 공정으로 후속 공정의 동시 작업이 불가능하다.
㉯ 자재 손실이 다량으로 발생한다.
㉰ 배근 간격 및 피복두께의 확보가 어려워 슬래브 하부 크랙발생 가능성이 많다.
㉱ 청결한 현장관리가 어렵다.
㉲ 거푸집, 가설재등의 폐자재 다량 발생한다.
㉳ 가설재가 다량으로 투입된다.

목재 합판 거푸집 공법은 일반적으로 각재설치(2) → 거푸집 깔기(2) → 철근배근(2) → Con'c타설(1) → 양생→ 각재 및 거푸집해체(2) → 자재정리의 공정 순서로 이루어진다. 이러한 일련의 복잡한 공정은 공기 증가가 필연적이기 때문에 최근의 노무비 증가와 더불어 새로운 대안의 신공법에 관한 수요가 점차 증가하고 있는 추세이다.

기존 재래공법의 다른 문제점은 안전성이다. 본 공법은 기본적으로 현장에서 인력에 의해 진행된다. 그러므로 고소 작업에 따른 안전성 문제나, 거푸집 해체시 안전사고의 위험요소가 상존하는 문제점을 지니고 있다.

② 상 · 하현 철근 와렌트러스형 Deck Slab 공법(명화엔지니어링(주), 1997년)

본 공법은 거푸집 대용인 절곡 아연도강판과 입체형 이형철근 트러스를 철선 간격 점용접(Spot Welding)을 이용하여 일체화 시켜, 공장에서 일괄 생산하여 건설현장에서 조립하는 공법이다.

와렌트러스형 페로데크는 입체형 슬래브용 철근과 절곡 아연도강판인 플레이트를 공장에서 일체화시킨 바닥 구성재로써, 건설 현장에서 사용하고 있는 거푸집 제작에 따른 시공 과정을 거치지 않고 콘크리트를 직접 타설할 수 있도록 하여 현장 타설 콘크리트 구조 바닥 슬라브의 설계, 제조, 시공성을 향상시킬 수 있다. 다음은 본 공법의 특징 및 기능이다.

㉮ 철근의 배근이 공장에서 거의 다 이루어지고, 현장에서는 일부 철근 배근만을 하게되고, 현재 사용하고 있는 거푸집의 공정이 제외되므로 공사기간을 크게 단축 시킬 수 있다.
㉯ 공장제품으로 되어 있으므로 배근간격이 일정하고, 콘크리트의 피복두께가 일정하게 유지되어 높은 정밀도의 시공을 할 수 있다.
㉰ 시공하중에 의한 휨을 고려하여 제품의 캠버(Camber)를 임의로 설정할 수 있어, 콘크리트의 손실이 적다.
㉱ 가설 지지대의 설치기간 및 설치 비용이 줄어든다.
㉲ 본 공법은 트러스형 철근선조립 데크플레이트의 무게가 가벼워(약17kg/㎡) 인력으로 간편하게 다룰 수 있다.
㉳ 피복두께를 유지하기 위한 간격재(Spacer)가 불필요하다.
㉴ 철근 콘크리트조, 철골조, SRC조 등 모든 구조 시스템에 적용할 수 있다.

(나) 선조립철선트러스를 이용한 데크 슬래브공법(해동금속(주), 1999년)

본 공법은 고강도 하현 이형 철선에 래티스 철선을 길이 방향 삼각 트러스 형태로 절곡하여 연결하고 하부에 0.5㎜ 아연도강판을 점용접하여 거푸집 대용으로 사용하게 한 슬래브 공법이다. 본 공법의 원리는 고강도 하현 이형 철선에 삼각 트러스 형태로 절곡된 래티스 철선을 아연도강판인 플레이트에 용접하여 일체화시키고, 이를 이용해 바닥 구성재를 일체화 시킨다는 것이다. 다음은 본 공법의 기술적 문제에 대한 해결 시사점이다.

① 상,하단근 및 래티스근을 철선 Roll을 사용함으로써 일괄 연속 자동 생산할 수 있는 자동화 공정을 도입하였다.
② 상,하단근의 소재를 저탄소 냉간압연 이형 철선을 사용하여 래티스 철선과의

용접점 취성파괴를 방지하였다.

③ 래티스 철선을 효과적으로 절곡하여 상,하단근 및 하부 강판과의 용접점을 확대하는 기술을 확보하였다.

④ 별도의 보조재 없이 자립할 수 있도록 고안한 래티스 철선의 FOOT 절곡 기술이다.

특징은 삼각 트러스형, 일자 트러스형, Cell형 등 수요자의 주문에 따라 다양한 형태 및 다양한 배근 조합, 다양한 두께(슬래브두께: 120㎜ ~ 300㎜)가 가능한 데크 슬래브 공법이다.

(다) 공장 제작된 철근트러스와 합판에 스냅타이와 웨지핀을 이용한 거푸집 공법(HI-FORM DECK 공법)((주)일호, 2006)

본 공법은 콘크리트 합벽부와 슬래브에 적용하는 현장타설 콘크리트 타설공법에 관한 것으로 거푸집 시스템과 최소 동바리를 이용한 슬래브 공법이다. 특히 철근트러스를 거푸집내에 설치하여 콘크리트 타설중에는 가설 하중의 일부를 지지하도록 하고 콘크리트가 양생되고 거푸집이 제거된 후에는 이 트러스가 콘크리트와 합성되어 영구 구조부재로 거동하도록 한 신기술이다. 다음은 본 공법의 내용이다.

① 철근트러스 하부에 스냅타이와 긴 결철물을 이용하여 거푸집을 매달아 설치하고 콘크리트 타설 중에는 가설 하중을 지지하고, 타설 후에는 구조부재로 거동하는 거푸집 공법이다

② 철근트러스를 이용하여 하부 거푸집을 재활용하고 하부 동바리를 최소화 할 수 있는 무지보 공법이다.

③ 철근트러스와 합판을 공장제작하고 현장에서 슬래브를 선조립해 놓고 시공시 차례로 인양 및 설치하여 공기단축 및 품질을 개선시키는 공법이라 할 수 있다.

본 공법의 장점은, 현장 조립을 별도 작업공간에서 독립적으로 진행하기 때문에, 공사기간이 빠르고, 배근간격 및 피복두께를 일정하게 유지할 수 있어 정밀 시공이 가능하며, 트러스 구조로 인해 하부 가설 부재를 최소화 할 수 있다는 것이다. 또한, 19㎜ 코팅합판으로 슬래브 하부 콘크리트면의 평활도를 유지할 수 있고, 형틀의 해체/조립 횟수가 증가하여, 자재의 전용성을 최대화 및 경제적 시공이 가능하다는 점을 들 수 있다. 그러나 설비 작업시 주근 절단에 대한 보강 작업이 필요하며, 타이 볼드 구멍으로 인해 슬래브 하부면이 견출, 페인트마감 시 별도 작업이 필요하다는 단점도 있다.

(라) 공장조립 일체형 탈부착 거푸집을 사용한 콘크리트 타설공법(극동건설(주), 2007)

본 공법은 합판, 철근트러스, 세파볼트, 3/8 “ 볼트 및 너트를 공장에서 조립한 일체형 탈부착 거푸집을 가설구조물에 사용하지 않고, 1방향 또는 보가 있는 2방향 슬래브 및 암거에 적용하는 콘크리트 타설공법이다.

본 기술의 특징은 거푸집과 철근이 결합된 형태의 완성품을 공장에서 만들고 이를 바로 현장에서 조립하는 기술이라는 것과, 무지주 동바리 공법이라 할 수 있다. 특히, 콘크리트 거푸집 내에 설치하는 철근 트러스는 콘크리트 타설중 가설하중의 일부를 지지하도록 하고, 콘크리트가 양생되고 거푸집이 제거된 후 트러스가 콘크리트와 합성되어 영구구조부재로 거동하는 것이다. 다음은 본 공법의 장점이다.

① 선조립 완제품을 이용하여 공정을 단축한다.
② 최대 3.9m 경간까지 무지주로 시공이 가능하다는 점이다.
③ 주근 및 배력근이 선조립 완제품이기 때문에 철근공 및 작업자의 안전이 향상된다는 점이다.

단점으로는,
① 경간이 증가할수록 슬래브의 운반 물류비용이 증가하는 것이다.
② 별도의 하판 탈형작업이 필요하다는 점이다.

기존 바닥구조공법은 건축물 상부 구조나 지하층 바닥슬래브 등의 바닥구조공법으로 가장 일반화된 공법이면서 시공기술 경험이 다량 축적된 거푸집을 사용하는 현장타설 바닥판공법과 값 싼 콘크리트와 연성이 뛰어난 강재의 사용으로 강성과 연성을 동시에 만족시킬 수 있는 강-콘크리트 합성 바닥판공법, 교량 구조에서 채용되고 있는 I형강 매입 합성 바닥판공법 등 매우 다양하다. 이러한 공법들은 현장의 조건과 경제성 및 안전성을 확보하기 위해 지속적으로 발전・개량되어 적용되고 있다.

(2) 국내외 관련 기술 및 산업 동향

(가) 국내 기술 및 산업 동향

① 복합 바닥구조시스템 관련 국내 기술 및 산업 동향

복합 바닥구조시스템에 대한 국내 시장현황에 대해 다음 <표 2.2.13>에 나타내었으며, 국내 시장의 건설 수주현황에 대해 다음 <그림 2.2.33>에 나타내었다.

아래의 자료를 바탕으로 건설 분야의 연평균 성장률인 5%를 이 분야의 평균 성장률이라 가정하면 국내의 시장규모는 아래 <표 2.2.14>, <표 2.2.15>와 같으며, 현행 바닥구조 시스템에 대한 분석을 다음 <표 2.2.16>에 나타내었다.

<표 2.2.13> 국내 시장 현황 및 예측

년도	시장규모	고연성 바닥구조시스템	
	건설수주액[건축] (통계청, 대한건설협회)	복합바닥구조/ 신규건설비 (%)	복합바닥구조
2009	64,600,000	0.15	96,900



<그림 2.2.33> 국내 시장 현황 및 예측

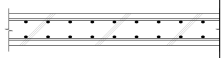
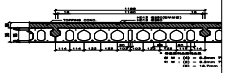
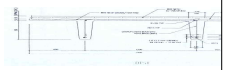
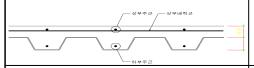
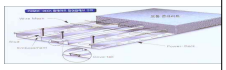
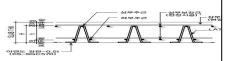
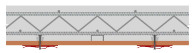
<표 2.2.14> 국내의 시장규모

시점	현재	5년후	10년후	15년후
시장 규모	96,900	123,672	157,840	201,448

<표 2.2.15> 국내 주요 관련 업체

업체명	업체별 능력	비 고
AMS엔지니어링	고연성 섬유복합재 패널 생산 기술 보유	
(주)일호	Hi-Form Deck 공법기술 보유	
삼성중공업(주)	JF-Deck (합성 데크플레이트) 공법기술 보유	
삼성물산(주)	내화용 KEM Deck 공법 기술 보유	

<표 2.2.16> 현행 바닥구조시스템 현황 분석

슬래브 모양	종 류	구조형식	슬래브 두께(mm)	적용 경간	하부철근	받침기둥 (support)	공사비교	장 점	단 점	기 타
	기존거푸집 사용슬래브	거푸집+ 철근배근+Con'C 치기	100 이상	다양	설계에 따라 배근	필요	100%	-모든평면에적용가능 -일반화된공법 -시공경험많음	- 거푸집 공사로 인력 과다소요 및 폐자재 발생	*거푸집공사 (1,2-way)
	할로우코아 슬래브	하부PC판 +상부철근 +Con'C치기	PC:70~300 top:50이상	3.0 ~ 9.0	하부 PC에 포함	불필요	114%	-종공으로차음단열에유리함. -작업바닥조기확보 -공기단축및인력절감	-현장제작 불가능 -슬래브두께 커짐	*걸침길이:40mm이상 (1-way)
	더블티 슬래브	하부PC판 +상부철근 +Con'C치기	PC:150,180 top:80이상	3.0 ~ 9.0	하부 PC에 포함	불필요	-	-거푸집동바라불필요 -작업바닥확보 -공기단축및인력절감	-현장제작 불가능 -슬래브두께 커짐	*걸침길이:40mm이상 (1-way)
	Half 슬래브	HalfPC+ 철근배근+ Con'C치기	PC:40~80 top:70이상	1.0 ~ 8.5	하부 PC에 포함	일부필요	103%	-거푸집동바리불필요 -작업바닥확보 -공기단축및인력절감	-트러스근의 제작 및 취급 어려움 -탈형, 운반 및 양중에 주의	*걸침길이:30mm이상 (1-way)
	일반 데크	데크판+ 철근배근+ Con'C치기	데크:50~75 top:50이상	1.0 ~ 8.0	일방향 배근	일부필요	90.7%	-거푸집동바리불필요 -작업바닥확보 -공기단축	-하부배근에 주의 -자재의 낭비	*철골조용 *단부용접 (1-way)
	Jif, Kem, Power, Hi 데크 등	구조용데크+ 철근배근+ Con'C치기	데크:50~75 top:60이상	1.0 ~ 4.0	필요없음 (데크가 구조재 역할)	불필요	85%	-거푸집동바리및하부근불필요 -작업바닥확보 -공기단축및인력절감	-스터드볼트 작업 -제크 자체가 구조재이므로 개구에주의	*내화구조 *단부용접 (1-way)
	F/D, S/D	철근트러스 데크 +철근배근+ Con'C치기	100 ~ 300	1.5 ~ 6.0	일방향 배근 (데크에 선조립)	불필요 (3.9m초과 시일부필요)	99.7%	-거푸집동바리불필요. -공기단축및인력절감	-운반양중에 어려움 -철근의 연속성 확보에 어려움 -설비배관 어려움	*걸침길이:50mm이상 (1-way)
	Hi-Form Deck, PF/R	철근트러스 합판 +철근배근+ Con'C치기	100 ~ 300	1.5 ~ 6.0	일방향 배근 (2방향도가능, 하부합판은 양생후 탈형)	불필요 (3.9m초과 시일부필요)	96%	-동바리불필요(탈형용거푸집사용) -공기단축및인력절감	-운반양중에 어려움 -철근의 연속성 확보에 어려움 -장비사용 증가	* 추후 마감공사시 볼트구멍 처리문제

나. 복합바닥 구조시스템 국내외 특허 분석

(1) 특허 동향

(가) 국내 기술 및 산업 동향

- 구조물의 건설기술 중 바닥 슬래브 시스템공법은 시공환경개선, 공정단축 및 공사비저감, 고품질의 재품을 얻기 위해 꾸준히 발전해 왔으며 최근에는 자동화 장비의 개발, 새로운 구조 개념 및 시스템의 창출, 유지관리와 구조물 해체를 위한 공법 등의 개선을 위한 기술개발이 이루어지고 있음.

- 특히 경제성을 고려하여 구조물의 설계단계부터 가치공학과 생애주기비용 개념을 도입하여 적절한 사용수명을 정하고 결과적으로 장수명화를 도모하는 내구설계를 시도하고 있음.

- 이에 따라 바닥 슬래브 시스템공법에 관한 국내 특허출원 사례를 살펴보면 다음의 최근 국내 특허분석과 같음.

(나) 최근 국내 특허분석

구조물의 건설기술 중 바닥 슬래브 시스템공법은 시공환경개선, 공정단축 및 공사비저감, 고품질의 재품을 얻기 위해 꾸준히 발전해 왔으며 최근에는 자동화 장비의 개발, 새로운 구조 개념 및 시스템의 창출, 유지관리와 구조물 해체를 위한 공법 등의 개선을 위한 기술개발이 이루어지고 있다. 특히 경제성을 고려하여 구조물의 설계단계부터 가치공학과 생애주기비용 개념을 도입하여 적절한 사용수명을 정하고 결과적으로 장수명화를 도모하는 내구설계를 시도하고 있다.

5. 국내외 기술동향 분석 결론

가. 기존 고연성 시멘트 복합재료에 대한 역학적 특성

그 동안 주요 건설재료로서 널리 사용되어 온 콘크리트는 취성적 성질을 가지며, 인장 및 휨성능이 떨어지는 본질적인 결함을 가지고 있다. 또한 고강도콘크리트의 실용화에 따른 압축강도의 증가로 콘크리트의 취성파괴(brittle failure)가 더욱 문제되고 있는 실정이다. 이러한 결함과 문제점을 개선하기 위하여 최근 국내·외에서 활발히 연구되고 있는 연성 재료로서 섬유보강 콘크리트(Ductile Fiber Reinforced Concrete)가 주목을 받고 있으며, 섬유보강 콘크리트에 대해 조사한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 고인성 콘크리트 개발 현황, 고인성 콘크리트의 구성 재료 및 배합 특성, 수화 및 미세구조 특성, 역학적 특성, 내구 특성 등에 대하여 조사·분석함으로써 신섬유복합 모르타르의 개발 방향을 설정하였다.

(2) 건설재료의 주종을 이루는 콘크리트는 취성적 성질, 인장 및 휨에 취약한 본질적 결함을 갖고 있어 이를 개선할 수 있는 새로운 대체재로서 고성능(고인성, 고내구성) 섬유복합재료가 각광을 받고 있다. 이러한 국제적인 추세와는 달리 국내에서는 섬유복합재료의 실용화를 위한 개발 연구 및 응용 실적이 매우 미진한 실정이다. 따라서 선진국 수준의 “섬유복합 재료”를 개발하고 이를 “구조물에 적용”할 수 있는 구체적인 기술 실용화가 시급히 요구되고 있는 실정이며, 본 연구에서는 고연성 시멘트복합재료를 개발하여 이러한 요구를 충족시키려고 한다.

나. 지하공간(주차장)화재성상 특성 및 콘크리트의 내화 연구 동향

지금까지 콘크리트는 내화재료로 인식되어 왔으며, 화재에 대한 안전불감증을 지니고 있다. 한편, 국내외적으로 지하공간(주차장)의 활용도는 지속적으로 증가하고 있으며, 일반건축물 화재와 달리 지하 주차장에서 화재발생시 특수한 가연물로 분류되는 차량에서 발생되는 열방출율과 화재전파에 대해 일반건축물 화재보다 더 많은 재산적·인명피해는 막대하게 발생한다. 특히, 주차장에서의 내화기준은 일반건축물과 동일하게 적용되고 있으며, 차량화재시 구조물의 피해가 우려된다. 이에 따라, 국내외적으로 차량화재사례와 차량화재성상에 관한 연구를 조사·분석하여 국내 지하주차장의 화재위험성을 인지하고, 지하 주차장의 내화 확보시간 및 내화성능 기준에 대하여 재정립을 수행하고자 한다.

또한, 최근 대형화·심층화로 변모됨에 따라 고강도 콘크리트의 사용이 많아지고 있다. 이러한 고강도 콘크리트는 많은 장점을 지니고 있지만, 내화측면에서 폭렬

(Explosive Spalling)이라는 문제를 내포하고 있다. 이에 따라, 국내외적으로 콘크리트 내화 및 폭렬에 대한 연구동향을 조사・분석하여 국내 지하주차장에 사용되는 구조물 부재에 대하여, 내화성능의 검토가 필요하며 더 나아가 고내구성 및 내화성이 확보된 재료의 개발이 필요하다고 사료된다.

다. Green SHCC 적용 바닥구조시스템 개발을 위한 연구동향 분석

기존 사용되고 있는 바닥구조시스템에 대한 기술 및 현황을 조사・분석하였다. 현재 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 현장타설용 슬래브거푸집(목재 합판 거푸집 공법)은 장스팬, 1방향, 2방향 슬래브 등 구조형식이나 시공성에 관계없이 공사가 가능하다는 장점이 있으나, 안전성의 큰 문제점을 지니고 있다. 또한, 여러 Deck Slab 공법은 콘크리트르 직접타설 할 수 있는 강점과 공기가 빠른 장점을 지니고 있으나, 내화성능에 대한 검증이 이루어지고 있지 않고 있다. 이에 따라, 고내구성 및 내화성이 확보된 SHCC 소재에 대한 패널을 제작하고, 이를 제품화하여 구조부재에 적용하는 신기술/신공법의 개발이 필요하다고 판단된다.

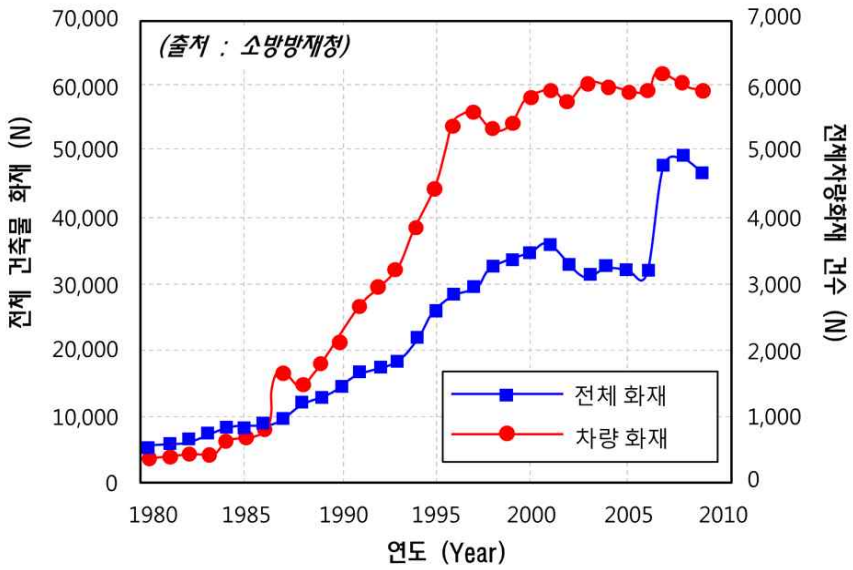
6. 지하주차장의 화재성상 예측 기법 구축

국내의 차량화재에 대한 연구는 미비하며 이에 따라 기초적인 Data가 부족한 실정이다. 차량의 경우 생산되는 제품에 따라 구성품이 다르며 화재 시 열방출율, 발생되는 온도, 발생 가스 등의 차이도 각각 다를 것으로 판단된다.

특히, 국내 차량화재는 다음 <그림 2.2.34>와 같이 전체 화재의 약 12%를 차지하고 있으며, 최근 차량의 대형화 및 경량화로 변화됨에 따라 화재 시 대형화재로 변화될 가능성이 높다고 판단된다.

또한, 주차 공간 특성으로서 차량의 밀집된 공간과 좁은 이격거리로 인해 화재발생시 전파가 빠르고, 초기소화가 불가능할 경우 소화진압의 많은 어려움이 있다. 이러한 차량화재는 높은 열 방출율 및 온도로 인해가 주차 공간 구조물에 대해 막대한 피해를 발생하게 한다.

따라서 본 장에서는 주차공간의 특성을 조사하고, 이를 고려한 차량 연소실험을 실시하여 차량 종류별 열방출율, 차량의 인접거리온도 및 차량내부온도, 연소 전·후의 중량을 측정하여 차량연소특성 Data를 확보하였다. 또한, 이를 통해 차량종류별 화재강도를 설정하여 차량화재곡선을 도출하여, 주차 공간 구조물의 내화성능 검토를 수행하고자 하였으며, 측정된 열 방출율을 바탕으로 일본건축학회에서 제시하고 있는 모델화 방법을 이용하여 국내 차량화재의 모델화 및 DB구축의 기초자료로 제시하고자 한다.



<그림 2.2.34> 연도별 화재발생 비율 (국내)

가. 지하주차장의 가연물조사

(1) 조사의 목적

국내의 도심지 주차공간은 가장 많은 개소의 비중을 차지하는 공동주택 주차장과 하루 평균 5~6천대의 유동이 있는 대형마트 주차장, 대형쇼핑몰 주차장으로 크게 3가지의 용도로 분류할 수 있다. 이에 대한 주차장 개소 현황을 다음 <표 2.2.17> ~<표 2.2.18> 에 나타내었다.

<표 2.2.17> A current state of ground and underground parking lots at domestic collective housing facilities

공동시설의 부설주차장	합계	서울	경기	충남	충북	전남	전북	강원	제주
공동주택 (단위: 천개소)	1,183	316	258	33	40	24	33	35	27
		부산	대구	인천	광주	대전	울산	경남	경북
		47	64	39	27	30	35	74	95

<표 2.2.18> A current state of ground and underground parking lots at domestic stores

공동시설의 부설주차장		합계	서울	경기	충남	충북	전남	전북	경남	경북	강원	제주	기타
대형마트	H 마트[58)]	122	15	31	5	4	6	4	9	5	4	1	38
	L 마트[59)]	103	10	29	6	5	8	7	9	2	3	1	23
	E 마트[60)]	170	31	69	7	3	8	4	6	9	6	3	24
대형쇼핑몰	S[61)] 백화점	11	3	3	2	-	1	-	2	-	-	-	-
	L[62)] 백화점	31	10	9	-	1	2	-	6	3	-	-	-
	H[63)] 백화점	13	6	2	-	1	-	-	-	-	-	-	4

2. * 기타 지역은 대구, 부산, 인천, 대전, 울산

이러한 주차공간에서 화재가 발생할 경우 공간특성, 가연물의 양, 차량의 배치, 환기조건에 따라 화재성상이 달라질 수 있다. 이에 본 연구에서는 국내 주차 공간 중 가장 많은 비중의 주차장개소를 차지하고 있는 공동주택의 아파트 주차장 2곳과 대형 판매시설 주차장 1곳을 선정하여 주차공간특성과 주차 차량에 대하여 조사를 실시하였다.

(2) 조사대상물의 개요

본 조사는 서울위치의 대형 판매시설 C몰 1곳에 대하여 선정하였고, 공동주택 아파트 중 주차장 화재가 발생하였던 안산위치의 K아파트와 아파트 선호도 5위권 안에 포함되는 수원위치의 P아파트에 대하여 조사하였으며, 조사대상물의 전경 및 건축물의 개요는 다음 <표 2.2.19> 같다.

(3) 주차공간 조사방법

조사항목으로서 주차 공간 구조물의 공간특성과 차량 대수, 주차공간의 면적을 조사하였다. 조사방법은 구조물의 공간특성은 차량과 구조물의 거리를 기둥, 벽 부재에 대하여 50m까지 측정이 가능한 레이저 줄자를 이용하여 각각 5대씩 측정하였다.

차량의 종류는 경차, 소형승용차, 중형승용차, 대형승용차, SUV차량, 승합차, 특수차량(청소차, 화물차 등), LPG차량으로 8가지 형태로 분류하여 조사하였으며, LPG차량의 경우 장애인 주차공간에 주차가 가능한 차량을 LPG 차량으로 조사하였다.

또한, 조사시간은 주차가 많을 것으로 판단되는 시간으로 선정하여 공동주택의 경우 주말 00:00～06:00경에 조사하였으며, 판매시설의 경우 판매시설 관리자에게 협조하여 이용객의 유동인구가 많은 시점인 13:00～16:00경에 조사를 실시하였다.

<표 2.2.19> Foreground and summary of parking lot research subject

건축물 전경	건축물 개요		조사 시기
	위치	서울시 강남구 삼성1동	2012.10.7. 13:00 ~ 16:00
	연면적	429,752m^2	
	구조	철골 철근콘크리트	
	준공년도	2009년	
	층수	지상 4층, 지하 4층	
	주차대수	5,000대	
	위치	경기 안산시 단원구 원곡동	2013.7.27. 00:00 ~ 06:00
	연면적	141,801m^2	
	구조	철근 콘크리트	
	준공년도	2005년	
	층수	지상 23층, 지하 3층	
	주차대수	1,394대	
	위치	경기 수원시 장안구 천천동	2013.7.28. 00:00 ~ 06:00
	연면적	451,414m^2	
	구조	철근 콘크리트	
	준공년도	2009년	
	층수	지상 30층, 지하 2층	
	주차대수	4,018대	

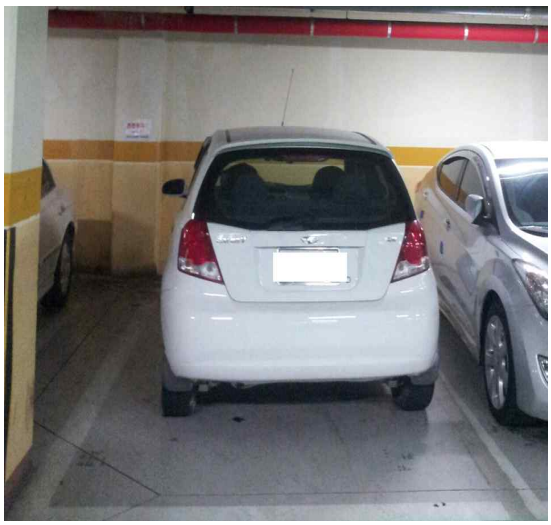
(4) 주차공간 조사결과

(가) 주차장 구조물의 공간특성 조사결과

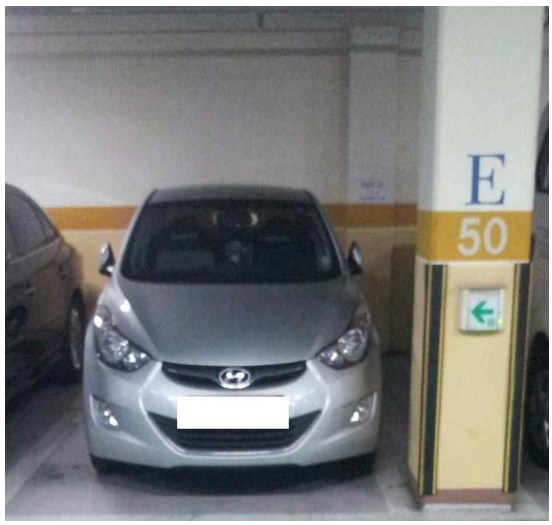
주차장 구조물은 2012년 7월 2일에 개정된 주차장법 시행규칙에 의거하여 50대 이상 주차대수 규모의 경우 너비 2.5m, 길이 5.1m, 높이 2.3m 이상으로 시공된다. 하지만, 현재 대부분의 주차장은 기존 시행되었던 시행규칙으로 인해 제시되는 너비 2.3m, 길이 5m, 높이 2.3m 이상으로 시공되어져 있는 것을 확인할 수 있었으며, 조사를 실시한 C몰, K 아파트, P 아파트는 2012년 이전에 준공이 된 건물로서 너비 2.3m, 길이 5m, 높이 2.3m 이상의 시행규칙에 맞게 설계되어졌다.

조사대상은 기존 준공된 주차장 구조물에 대하여 다음 <그림 2.2.35>와 같은 차량종류별로 최단거리를 측정하였으며, 이에 대한 조사결과 값을 다음 <표 2.2.20>에 나타내었으며 <그림 2.2.36>에 분포도를 나타내었다. 각 차량의 종류에 따른 기둥과 벽 부재에 대한 평균거리는 경차 81.6cm, 57.2cm, 소형승용차 29cm, 44.6cm, 중형승용차 29cm, 44.6cm, 대형승용차 30cm, 42.2cm, 승합차 17.6cm, 42.2cm, 화물차 35.6cm, 29.2cm 로 나타났다. 차량종류별 비교결과 경차의 경우가 가장 구조물 부재에서 멀리 떨어진 것을 확인할 수 있었으며, 소형승용차, 중형승용차, 대형승용차의 3종류의 차량은 부재와의 거리가 비슷한 것을 알 수 있었다. 또한, 승합차와 화물차의 경우도 승용차보다 상대적으로 부재와 가까운 것을 확인할 수 있었다.

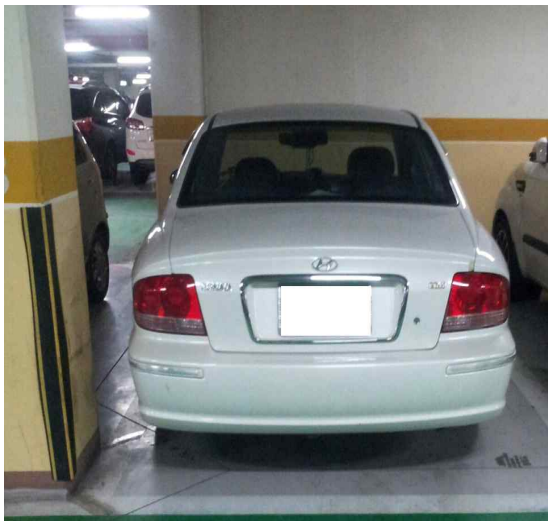
한편, 슬래브 위치는 바닥면에서 2.3m로 측정되었으며, 본 조사를 통해 동일한 제원의 차량에서도 주차장 구조물과의 거리에 대한 차이가 있다는 것을 알 수 있었으며, 이는 개개인의 주차방법에 의한 차이로 판단된다.



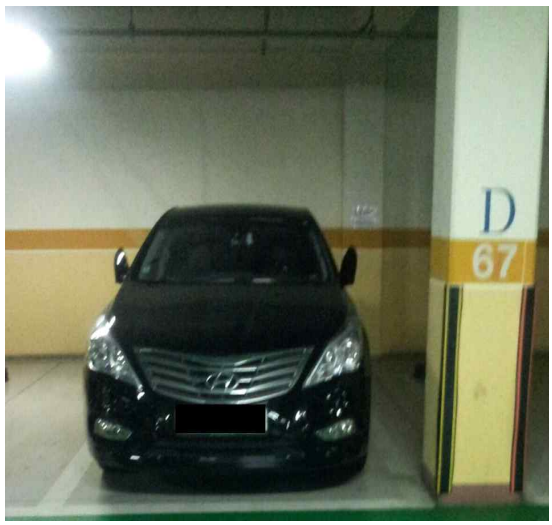
(a) 경차



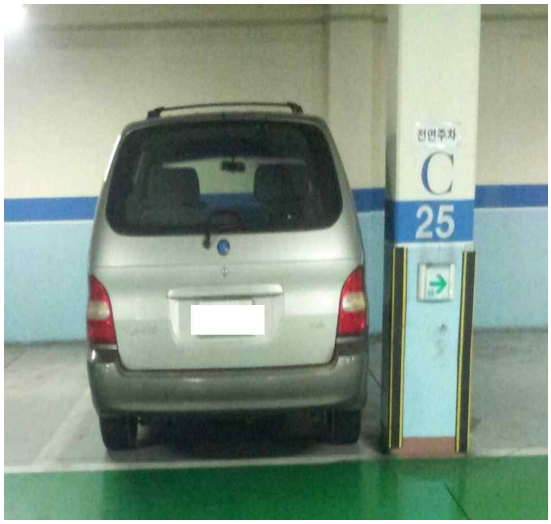
(b) 소형승용차



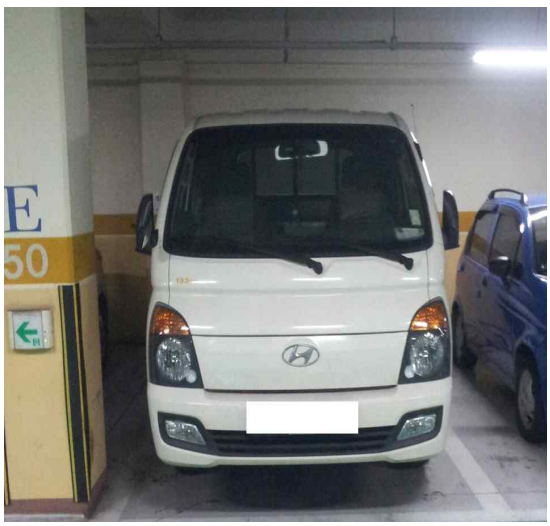
(c) 중형승용차



(d) 대형승용차



(e) 승합차

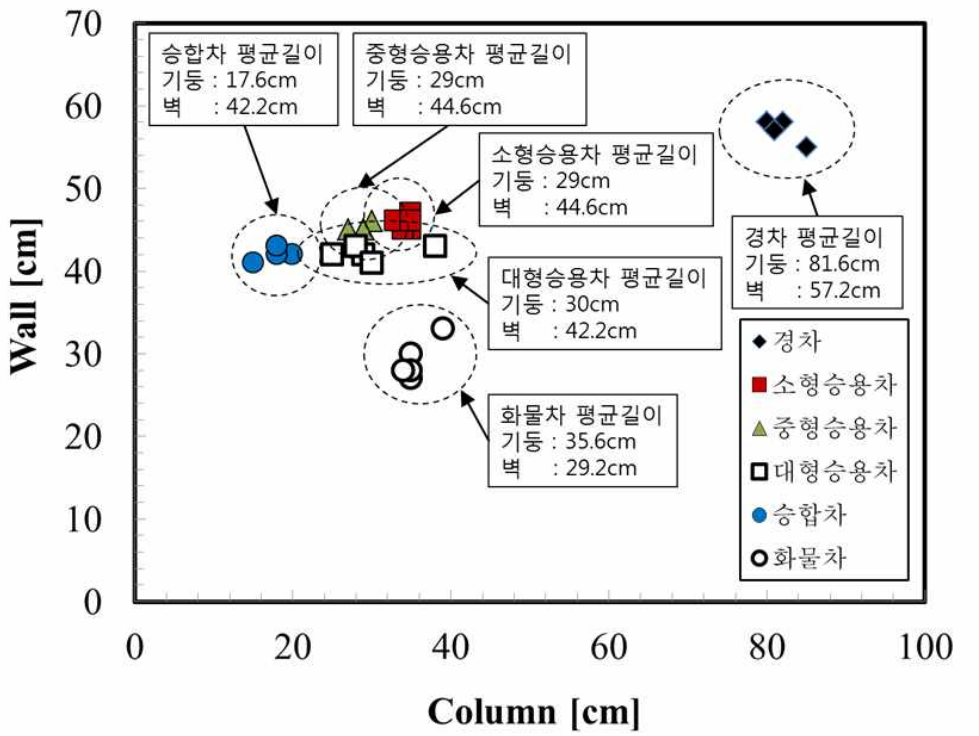


(f) 화물차

<그림 2.2.35> Distance measurement from material by vehicle type

<표 2.2.20> Distance between parking lot structure and vehicle [cm]

부재 \ 차종		경차	소형승용차	중형승용차	대형승용차	승합차	화물차
기둥	1	80	35	29	38	18	35
	2	85	35	27	29	15	35
	3	82	34	30	28	20	39
	4	80	33	29	30	18	35
	5	81	35	30	25	18	34
평균		81.6	34.4	29	30	17.8	35.6
벽	1	58	45	45	43	43	27
	2	55	47	45	42	41	30
	3	58	45	46	43	42	33
	4	58	46	45	41	42	28
	5	57	46	42	42	43	28
평균		57.2	45.8	44.6	42.2	42.2	29.2



<그림 2.2.36> Distance distribution chart about structure material in vehicle

(나) 주차차량 조사결과

① C 몰 판매시설

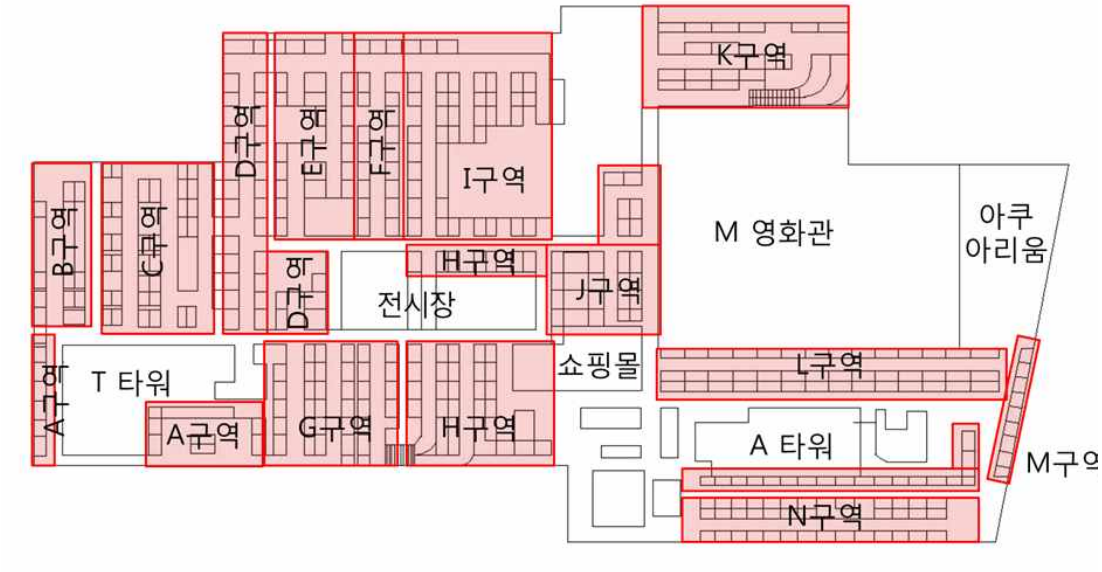
C몰 주차장의 형태를 다음 <그림 2.2.37>에 나타내었다. 또한 C몰의 주차장은 지하 2층~지하 4층까지 3개의 층으로 구성되어 있으며, 주차장과 연결된 각 층에는 전시시설, 식당, 편의시설 등의 이용이 가능하도록 되어 있다. <표 2.2.21>은 총 5개의 출입이 가능한 개구부 면적에 대해 측정한 값을 나타낸 것이며, <표 2.2.22>는 일반차량과 장애인차량에 대한 주차공간의 면적과 기둥과 기둥사이의 거리를 측정한 값이다. C몰의 주차공간은 일반적으로 기둥과 기둥사이에 3대씩 주차가 가능한 공간이 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 장애인 주차공간의 경우 1대, 2대, 3대씩 주차할 수 있도록 되어있다. 판매시설의 차량조사는 이용객들의 편의를 위해 승용차, 승합차, 특수차, LPG 4가지로 분류하여 조사하였다.

<표 2.2.21> Opening size of C mall parking lot

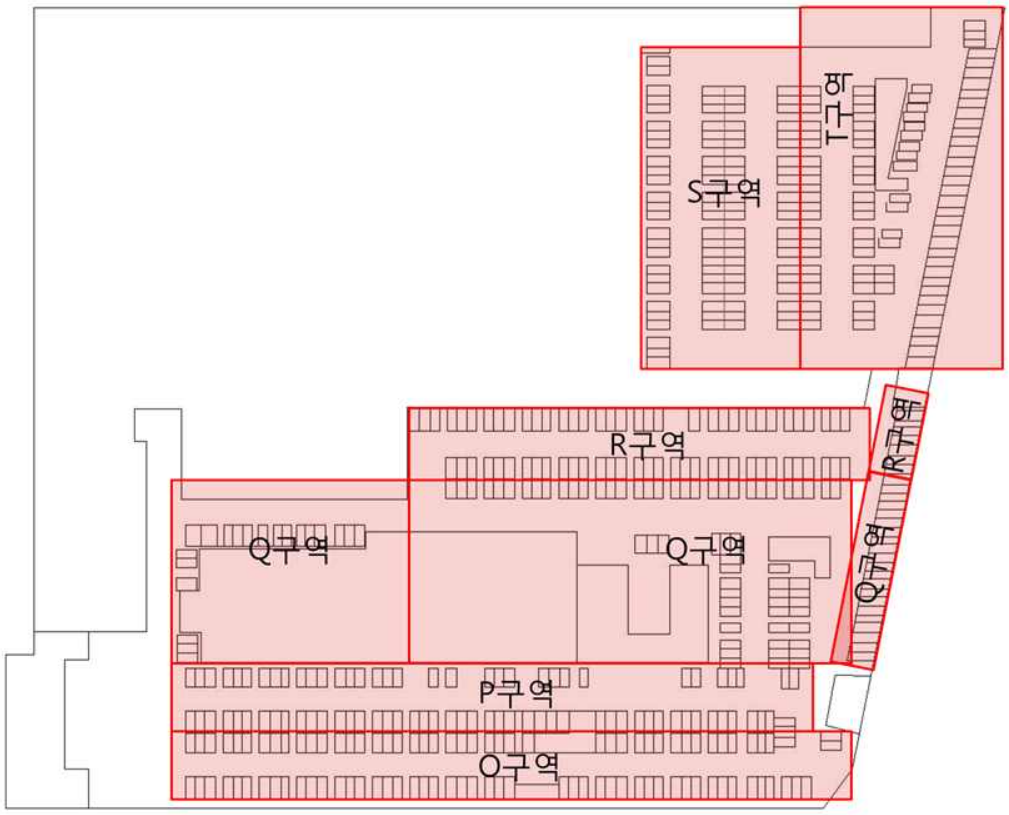
위치	치수
서쪽 출입구 1개소	Width : 5.5m , Height : 4.4m
북쪽 출입구 1개소	Width : 5.5m , Height : 2.4m
남쪽 출입구 3개소	Width : 5.5m , Height : 2.4m

<표 2.2.22> Parking space size of C mall

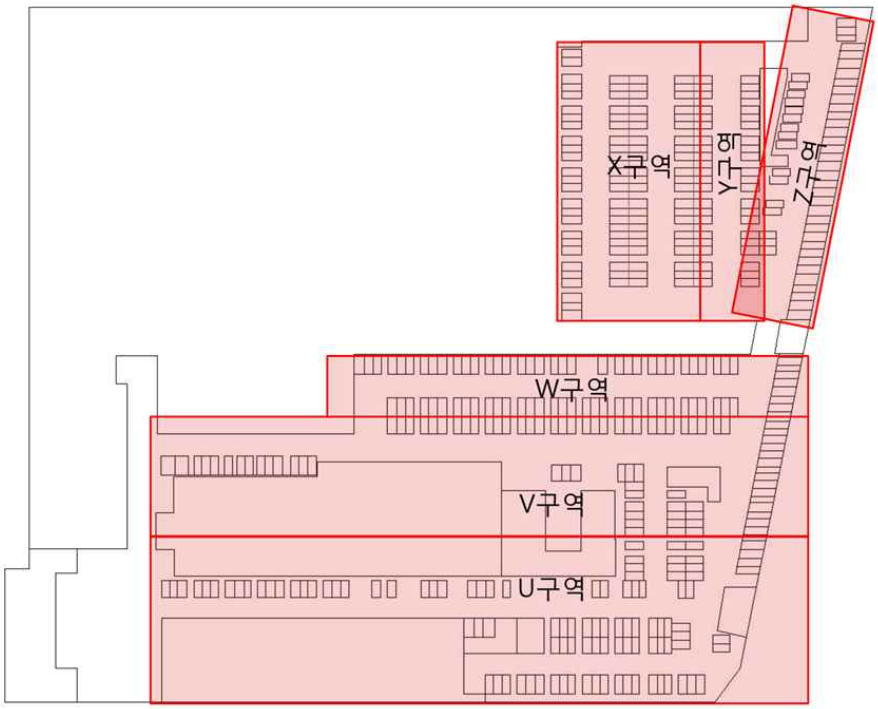
위치			치수
일반 차량	주차공간 바닥면적		Width : 2.3m , Length : 5m, Height : 3.8m
	기둥과 기둥 사이 거리	2대	Width : 5.2m
		3대	Width : 7.8m
장애인 차량	주차공간 바닥면적		Width : 3.3m , Length : 5m, Height : 3.8m
	기둥과 기둥 사이 거리	2대	Width : 7.2m
		3대	Width : 10.8m



(a) 지하 주차장 2층



(b) 지하 주차장 3층



(c) 지하 주차장 4층

<그림 2.2.37> Parking space size of C mall

또한, 다음 <표 2.2.23>에 차량 대수에 대한 조사 결과를 나타내었으며, 차량 대수 조사시간은 입출차량이 많은 시간이었으며, 이에 주차되지 않은 이동차량은 제외하였다. 주차차량은 지하 2층의 경우 911대, 지하 3층은 362대, 지하 4층은 116대 총 1,389대가 주차되어 있었으며, 전체 주차차량에서 각 차량의 비율은 승용차 69.1%, 승합차 28.6%, 특수차 16%, LPG 차량 0.5% 로 승용차가 가장 높게 나타났다.

<표 2.2.23> vehicle investigation result of C mall parking lot

구 역	승용차	승합차	특수차	LPG	구 역	승용차	승합차	특수차	LPG
	지하 2층								
A	30	6	-	-	H	30	15	2	-
B	6	2	-	-	I	57	20	3	-
C	69	23	-	-	J	32	16	1	-
D	43	20	2	1	K	34	25	2	-
E	22	14	4	-	L	75	62	-	-
F	31	16	1	-	M	55	43	2	-
G	60	10	-	-	N	55	21	1	-
합계	261	91	7	1	합계	338	202	11	-
	지하 3층								
O	18	4	2	-	R	66	19	1	-
P	34	13	-	-	S	49	21	1	-
Q	40	16	-	2	T	61	14	1	-
합계	92	33	2	2	합계	176	54	3	-
	지하 4층								
U	17	3	-	-	X	6	2	-	-
V	27	-	-	3	Y	15	1	-	1
W	26	12	-	-	Z	3	-	-	-
합계	70	15	0	3	합계	24	3	-	1
총합	961	398	23	7	총 차량	1,389	총 입차량		8,318
							총 출차량		7,926

② K 아파트

K 아파트는 지상 1층, 지하 1층의 주차공간으로 구성되어 있으며, 형태는 다음 <그림 2.2.38>과 같다. 주차장의 조사 위치는 101~112동까지 조사하였으며, 주차장 출입이 가능한 4개의 개구부와 아파트 단지 전체에 연결된 구조를 나타내고 있다. 특이사항으로써, 공간의 활용도를 높이기 위해 차량 1대가 주차할 수 있는 다수의 주차공간을 확인할 수 있었으며, 104동에서 2013년 10월 화재가 발생한 사례[64]가 있다.

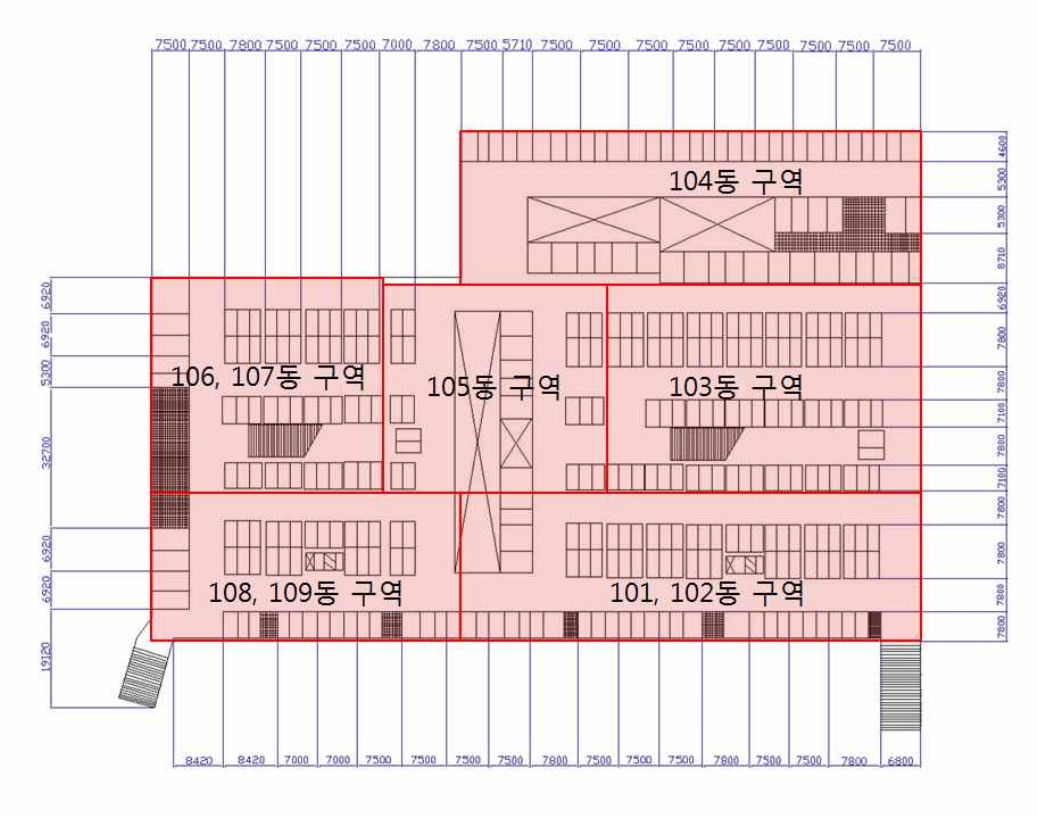
다음 <표 2.2.24>는 개구부 면적에 대해 측정한 값을 나타내었으며, <표 2.2.25>에 주차장의 개구부 면적과 일반차량과 장애인 차량에 대한 주차공간의 면적, 기둥과 기둥사이의 거리를 나타내었다.

<표 2.2.24> Opening size of K Apt

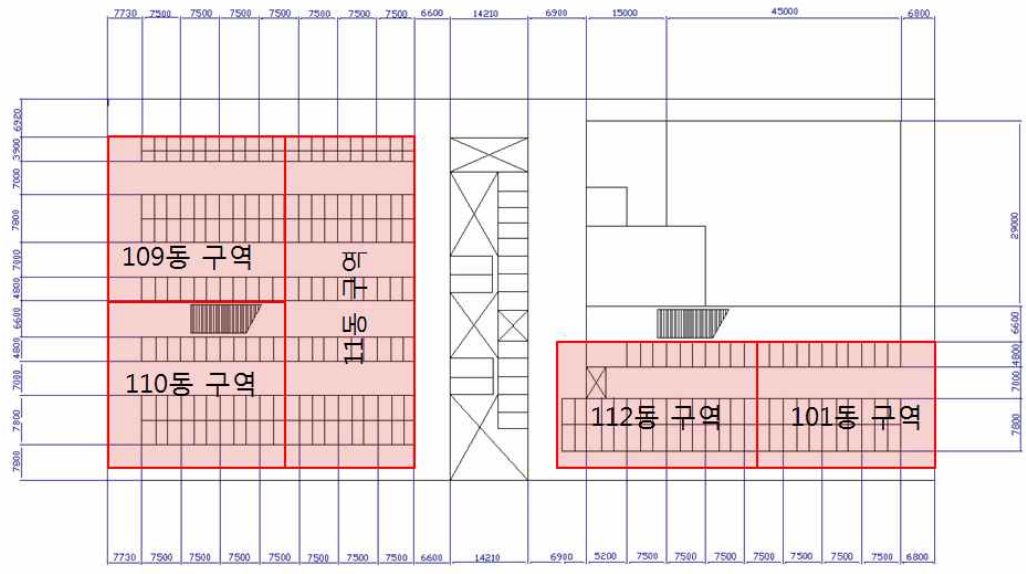
위치	치수
101동 앞 지하 출입 개구부	Width : 6.2m , Height : 3.3m
103동 앞 지하 출입 개구부	
107동 앞 지하 출입 개구부	
109동 앞 지하 출입 개구부	
정문 지상 출입 개구부	Width : 5,9m , Height : 3.3m
후문 지상 출입 개구부	

<표 2.2.25> Parking space size of K Apt

위치			치수
일반 차량	주차공간 바닥면적		Width : 2.3m , Length : 5m, Height : 3.8m
	기둥과 기둥 사이 거리	1대	Width : 2.3m
		2대	Width : 5.2m
		3대	Width : 7.8m
장애인 차량	주차공간 바닥면적		Width : 3.7m , Length : 5m, Height : 3.8m
	기둥과 기둥 사이 거리	1대	Width : 3.7m
		2대	Width : 7.2m
		3대	Width : 10.8m



(a) 지하 2층 주차장 101～108동



(b) 지하 2층 주차장 109～112동

<그림 2.2.38> Shape of K Apt parking lot

K 아파트의 주차차량 조사결과를 <표 2.2.26>에 나타내었다. 조사는 지상 1층(A~B구역)과 지하 1층(C~F구역)으로 분류하여 조사를 실시하였으며, 기타 구역의 항목은 주차공간이 아닌 공간에 불법으로 평행주차 된 차량을 나타낸 것이다. 조사 결과, 총 주차차량 990대가 조사되었으며, 지상 1층의 주차차량은 420대, 지하 1층은 524대, 기타 구역의 차량은 46대가 조사되었다. 지상 1층은 기타구역을 포함한 430대가 주차되어 있었으며, 지하 1층은 기타구역을 포함한 560대가 조사되어, 지상 1층과 지하 1층의 비율은 각각 43.4%, 56.6%로서 지하 1층이 상대적으로 높았다.

<표 2.2.26> Vehicle investigation result of K Apt parking lot

구역 \ 차량종류		가솔린				경유		
		경차	소형 승용차	중형 승용차	대형 승용차	SUV	승합차	화물차
지상1층	A	18	3	66	17	35	21	2
	B	17	7	125	14	58	25	-
지하1층	C	6	3	30	12	21	12	3
	D	7	7	41	14	33	6	3
	E	16	3	79	18	55	9	8
	F	10	21	52	8	25	12	1
기타		3	-	17	3	14	7	2
합계		77	44	410	86	241	92	19

구역 \ 차량종류		LPG			
		중형승용차	대형승용차	SUV	승합차
지상1층	A	4	-	-	-
	B	5	1	1	1
지하1층	C	-	-	-	-
	D	1	-	1	-
	E	1	1	1	-
	F	1	2	-	1
기타		-	-	-	-
합계		12	4	3	2

<표 2.2.27> Rate of parked vehicle model in K Apt [%]

차량 종류	경차	소형승용차	중형승용차	대형승용차	SUV	승합차	화물차
비율	7.8	4.4	41.4	8.7	24.3	9.3	1.9

차량 종류	LPG 중형승용차	LPG 대형승용차	LPG SUV	LPG 승합차
비율	1.2	0.4	0.3	0.2

또한, 다음 <표 2.2.27>과 같이 전체 주차차량 종류의 비율은, 중형승용차가 41.4%로 가장 많았으며, LPG 차량은 1% 이내로 가장 적은 것을 확인하였다.

③ P 아파트

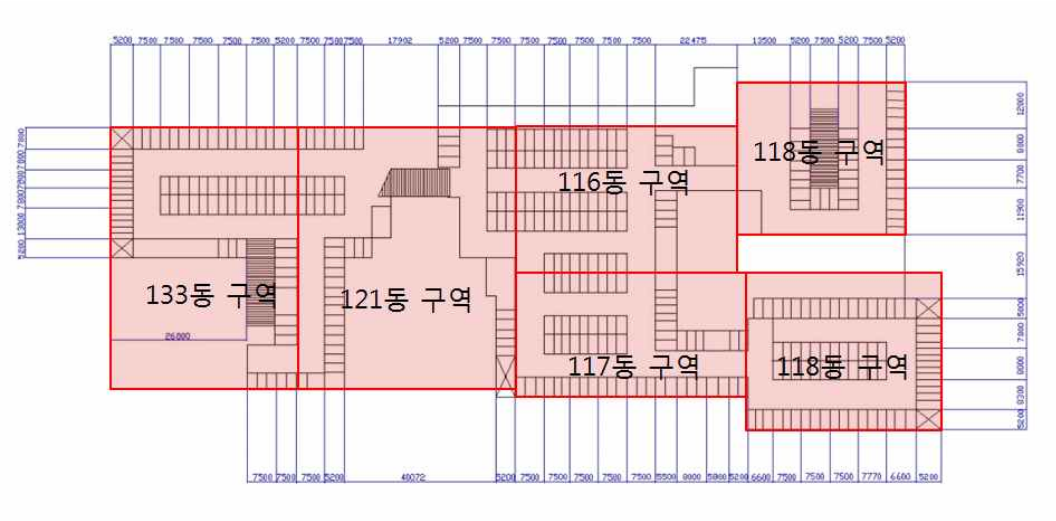
P 아파트는 지하 1층, 지하 2층의 주차공간으로 구성되어 있으며, 형태는 다음 <그림 2.2.39>와 같다. 주차장 조사 위치는 116동~118동까지 조사하였으며, 3개의 연결된 아파트 동으로서 1개의 출입이 가능한 개구부가 있다. 다음 <표 2.2.28>은 P 아파트의 개구부 면적을 측정한 값이며, <표 2.2.29>에 P 아파트 주차 공간 치수를 나타내었다.

<표 2.2.28> Opening size of P Apt

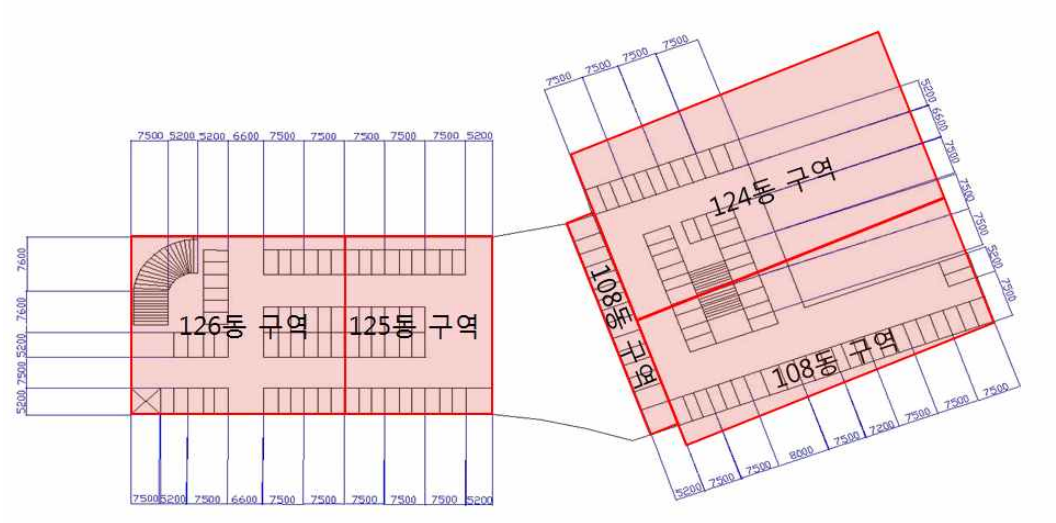
위치	치수
아파트 2동 단위 출입 개구부	Width : 6.9m , Height : 3m

<표 2.2.29> Parking space size of P Apt

위치			치수
일반 차량	주차 공간 바닥면적		Width : 2.3m , Length : 5m, Height : 3.8m
	기둥과 기둥 사이 거리	2대	Width : 4.7m
		3대	Width : 7.1m
장애인 차량	주차 공간 바닥면적		Width : 3.3m , Length : 5m, Height : 3.8m
	기둥과 기둥 사이 거리	2대	Width : 7.2m
		3대	Width : 10.8m



(a) 지하 1층 주차장 101～108동



(b) 지하 2층 주차장 109～112동

<그림 2.2.39> Shape of P Apt parking lot

<표 2.2.30> Rate of parked vehicle model in P Apt [%]

차량 종류	경차	소형승용차	중형승용차	대형승용차	SUV	승합차	화물차
비율	9.3	2.8	38.4	12.9	26.5	6.7	0.8

차량 종류	LPG 중형승용차	LPG 대형승용차	LPG SUV	LPG 승합차
비율	0.8	0.8	0.8	0.3

P 아파트의 주차차량 조사결과를 <표 2.2.29>에 나타내었다. 조사는 지하 1층과 지하 2층(A～J구역)을 대상으로 조사하였다. 조사결과, 총 주차차량 645대가 조사되었으며, 기타구역에 주차된 차량 7대를 포함한 지하 1층의 주차차량은 538대, 지하 2층은 107대, 기타 구역의 차량은 7대가 조사되었다. 지하 1층과 지하 2층에 주차된 차량의 비율은 각각 83.4%, 16.6%로서 지하 1층이 66.8% 더 높게 활용되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 전체 주차차량 종류의 비율은 다음 <표 2.2.30>과 같고, 중형승용차가 38.4%로 가장 많았으며, LPG 차량이 1% 이내로 가장 적은 것을 확인하였다.

<표 2.2.31> Vehicle investigation result of P Apt parking lot

차량 종류 / 구역	가솔린								경유					
	경차		소형 승용차		중형 승용차		대형 승용차		SUV		승합차		화물차	
B1(지하1층) B2(지하2층)	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2
A	11		6		89	6	19	3	45	7	10	1		
B	8	1	3		33	9	4		21	4	5	1		
C	11	1	2	1	14	4	14	3	11	10	4	2		
D	6	2	2	1	14		7		12	2	2			
E	3	2	2		13	7	4		7	4	1			
F	4				13	4	1		7	5	4		2	
G	6	1	1		15	9	9	1	10	8	5	1		
H	1				9		2		4					
I	2				4		10		12		6		2	
J						2	4		1	1	1			
기타	1				3		2						1	
합계	60		18		248		83		171		43		5	

차량 종류 / 구역	LPG							
	중형승용차		대형승용차		SUV		승합차	
B1(지하1층) B2(지하2층)	B1	B2	B1	B2	B1	B2	B1	B2
A	1		3					
B	1				2	1		1
C								
D	1	1			1			1
E	1		2		1			
F								
G								
H								
I								
J								
기타								
합계	5		5		5		2	

나. 차량 연소 실험

(1) 실험의 목적 및 방법

주차장공간에서 차량화재 시 구조물에 미치는 영향을 검토하기 위하여 차량 연소실험을 실시하고자 하였다. 차량 연소실험 시 주차장 공간특성 조사를 통하여 부재(기둥,벽,천정)위치에서의 온도측정을 실시하였고, 열방출율(Heat Release Rate)과 가열 전후의 중량을 측정하여 차량 연소 특성에 대한 차량 화재성상과 주차장구조물의 안전성을 검토하고자 하였다.

차량연소실험은 다음 <그림 2.2.40>과 같이 한국건설기술연구원의 10MW급 Large Scale Calorimeter65)를 이용하여 실험을 실시하였으며, 중형승용차(2000cc이상～3000cc미만) 1대, 대형승용차(3000cc이상), 승합차, 사고를 가정한 중형승용차(2000cc이상～3000cc미만) 2대에 대한 연소실험을 실시하였다. 연소실험 시 연료의 폭발의 위험성으로 인해 차량의 연료는 전부 제거하였고, 타이어의 공기압도 제거를 하였다. 또한 화재는 사고를 가정한 차량 이외에는 차량의 뒷좌석 시트에서 발생한 것으로 가정하여 실험을 설정하였으며, 전체 창문을 약 30% 개방하여 연소실험을 진행하였다. 차량에 대한 구체적인 제원을 다음 <표 2.2.32>에 나타내었다.

<표 2.2.32> A specification of test vehicle

모델명	차량 크기(mm)			배기량 (cc)	중량 (kg)	연료	탑승 인원
	전장	전폭	전고				
중형승용차 1대	4,700	1,770	1,405	1,997	1,320	가솔린	5인
중형승용차 2대	4,700	1,770	1,405	1,997	1,320	가솔린	5인
대형승용차	4,980	1,810	1,445	3,496	1,760	가솔린	5인
승합차	4,695	1,840	2,080	2,476	1,916	디젤	9인

<표 2.2.33> A conditions of measurement and vehicle combustion

실험체	연소전	연소중							연소후	
	초기 중량	부재별 위치의 온도						열 방출율	총 발열량	잔존 중량
		기둥	벽	슬래브	바닥	차량 내부	차량 외부			
연료	O	해당사항 없음						O	O	O
승용차1대	O	O	O	X	X	O	O	O	O	O
승용차2대	O	O	O	X	X	O	O	O	O	O
대형 승용차	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
승합차	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O



<그림 2.2.40> Large Scale Calorimeter Test

차량연소실험을 실시하기 위하여 다음 <표 2.2.33>과 같이 항목을 나누어 연소전, 연소중, 연소후 3단계로 측정항목을 분류하여 설정하였다.

(2) Pool Fire 헵탄 연소실험

차량연소실험을 실시하기 위하여 Large Scale Calorimeter 장비의 유효성 검증을 위해 측정 기준 값(Benchmark) 및 정밀한 측정(Calibration)을 위해 초기실험의 일환으로 헵탄 10L의 Pool Fire 초기 연소실험을 실시하였다. Large Scale Calorimeter 실험장소의 크기는 W 15m × D 15m 이며, 장비 후드의 크기는 W 10m × W 10m의 개구크기로써 10m 높이에서 측정을 한다. Pool Fire 연소실험 시 실험장소는 상온 18℃, 습도 50%였으며 W 1m × D 1m의 용기에 10L의 헵탄을 담아서 다음 <그림 2.2.41>과 같이 연소실험을 실시하였다. 실험결과 장비의 계측 시간은 착화 이후 122초부터 계측이 시작되었으며, 연속화염높이는 육안으로 관찰한 결과 약 2m정도로 측정되었다. 열방출율(HRR)과 총발열량을 다음 <그림 2.2.42>에 나타내었다. 연소시간은 5분 23초간 진행되었으며 최대 열 방출율은 3분 50초경 최대 1733kW가 측정되었으며 총발열량은 350MJ이 측정되었다. 헵탄의 1lL에 대한 총발열량 계산은 다음 식 2.2.17과 같이 요구된다.

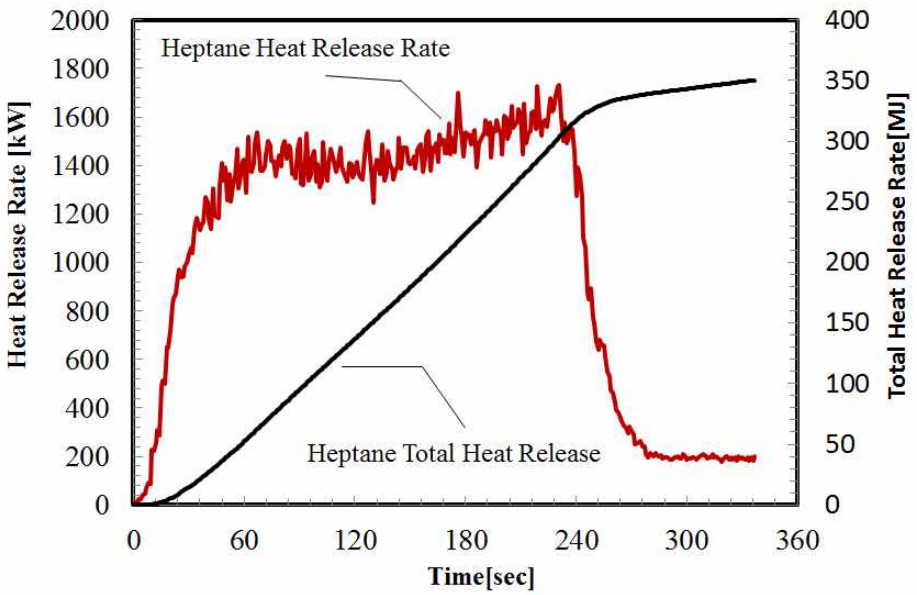
$$THR = V \times \rho q \qquad 2.2.17$$

THR	:	총발열량 (MJ)	Total Heat Release	
V	:	연료의 용량 (L)	Heptane Volume	[10 L]
ρ	:	헵탄의 밀도 (kg/m^3)	Heptane Density	[0.68 kg/m^3]
q	:	연소열 (KJ/kg)	Heating of Combustion	[48.58 KJ/kg]

헵탄에 대한 총발열량을 계산하면 363MJ이 되며 실험값과 계산 값을 비교하면 3.7%로써 작은 값의 차가 나타나며, Large Scale Calorimeter 장비의 산소 소비법에 대한 유효성을 확인하였다.



<그림 2.2.41> Pool Fire combustion test (Heptane)



<그림 2.2.42> Heat release rate and total caloric value of Heptane

(3) 중형승용차 1대

(가) 실험 개요

Pool Fire 연소실험을 통하여 Large Scale Calorimeter 장비의 유효성 검증하였으며, 이에 중형승용차(2000cc이상～3000cc미만)에 대한 차량연소실험을 실시하였다. 다음 <그림 2.2.43>은 연소 전 중형승용차의 형상을 나타내었다. 중형승용차 연소 시 내부의 온도에 따른 화재전파를 확인하기 위하여 K-Type 열전대(Thermo Couple)를 4개 설치하고 차량의 외부천장 중심부에 좌·우 각각 2개를 설치하였다. 또한 주차장구조물의 차량에 인접한 주요 부재인 기둥·벽 위치에 따른 온도를 고려하여 50cm 간격으로 전면, 후면, 좌측에 1m, 1.5m 높이에 열전대를 6개 설치하였으며, 인접한 주차차량을 고려하여 우측에 50cm 간격의 1m, 1.5m 높이의 열전대를 2개 설치하였다. 착화위치는 차량내부 뒤편의 시트로 설정하였으며 착화원은 헵탄 25ml를 사용하여 점화시켰다. 다음 <그림 2.2.44>에 중형승용차의 형상 및 열전대 위치를 나타내었으며, 열전대의 번호 및 위치를 <표 2.2.34>에 나타내었다.

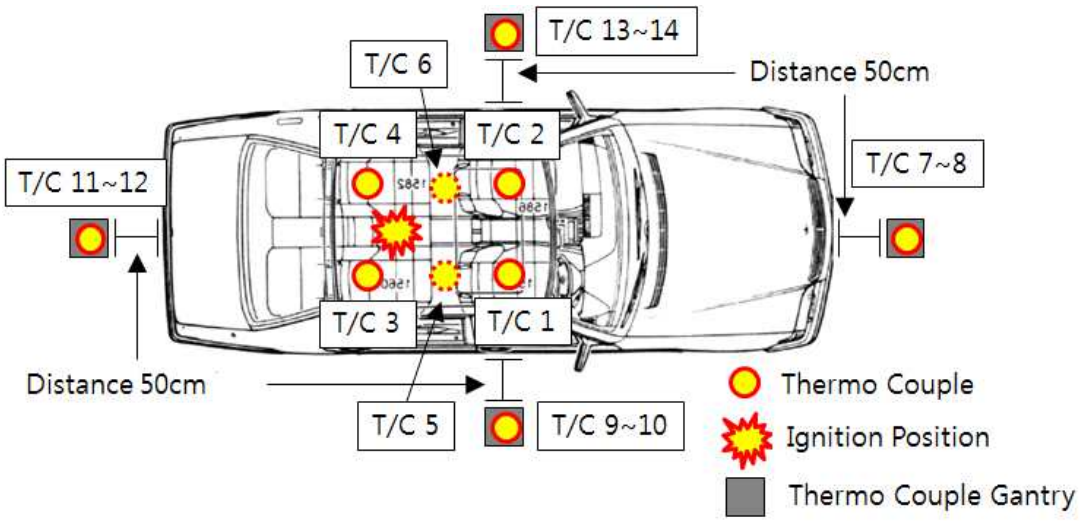


(a) 전면 (b) 좌측 (c) 우측 (d) 후면

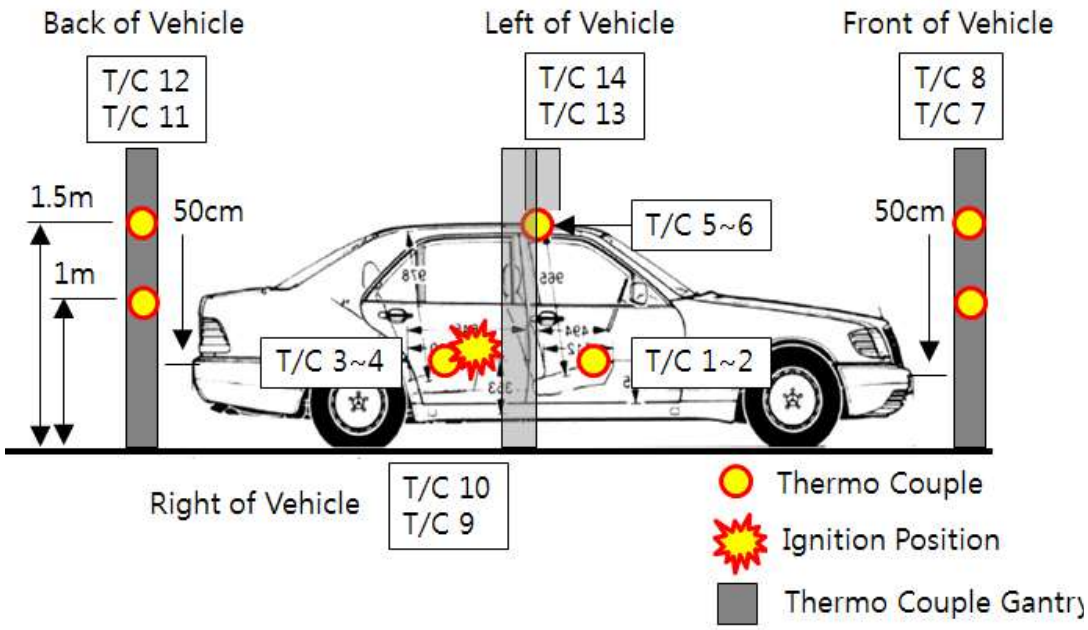
<그림 2.2.43> Pictures of mid-size vehicle before combustion

<표 2.2.34> Form and thermocouple number and position of mid-size vehicle

No.	Position	No.	Position
T/C-1	Right of Front Seat	T/C-2	Left of Front Seat
T/C-3	Right of Back Seat	T/C-4	Left of Back Seat
T/C-5	Right of Ceiling	T/C-6	Left of Ceiling
T/C-7	Front of Vehicle 1m	T/C-8	Front of Vehicle 1.5m
T/C-9	Right of Vehicle 1m	T/C-10	Right of Vehicle 1.5m
T/C-11	Back of Vehicle 1m	T/C-12	Back of Vehicle 1.5m
T/C-13	Left of Vehicle 1m	T/C-14	Left of Vehicle 1.5m



(a) 중형승용차 열전대위치 평면도



(b) 중형승용차 열전대위치 측면도

<그림 2.2.44> Form and thermocouple position of mid-size vehicles

(나) 실험결과 및 분석

① 시간 경과에 따른 차량화재 특성

중형승용차의 연소 실험 시 화재성장과 화재전파를 다음 <그림 2.2.45>에 나타내었다. 차량 내부 뒤편 시트에 점화 이후 1분경과 후, 다량의 연기가 발생하였으며, 계속하여 약 2분 후 후면 유리가 깨지면서 화염이 차량의 상층부로 전파되는 시점부터 화재가 성장하기 시작하였다. 그 이후, 약 10분 후 차량 전체의 유리가 전부 파손되어 화재가 최성기에 도달하였으며, 약 12분경에는 1차 폭발음이 들렸다. 지속적으로 성장하던 화염은 약 18분경 뒤편 타이어에 착화되면서 차량 후면부에서 화염이 증가하는 것과 동시에 폭발음이 들렸다.

이후 약 20분경 후면부에서 화염이 감쇠하는 듯 하였으나, 약 28분 경 내부의 화염이 차량 앞쪽의 엔진부분에 화염이 전파되어 폭발음과 함께 화염이 급격하게 상승하였다.

점화 33분 후 다시 한 번 폭발음이 들렸으나, 이후 약 35분경부터 화재가 감소하기 시작하여 약 49분경 자연 진화되는 현상을 보여 강제 소화를 실시하였다.

차량연소 시 49분간 육안으로 관찰한 화염의 높이는 평균 2.5m이상과 최대 화염 높이는 약 25분경 3m 이상으로 확인 되어졌다.

또한, 중형승용차의 연소 전 중량은 1254kg이었으나 연소 후 중량은 1095kg으로 159kg의 중량이 감소하였다.



(a) 1min



(b) 2min



(c) 10min



(d) 18min



(e) 28min



(f) 35min



(g) 49min



(h) 51min End

<그림 2.2.45> A test of combustion of mid-size vehicle

② 중형승용차 연소 시 온도 특성

차량연소 시 시간에 따른 온도변화를 다음 <그림 2.2.46>에 나타내었다. 차량내부 뒤편 중앙부 시트에 점화가 시작되어 내부의 온도 및 차량 천정부의 온도 변화를 <그림 2.2.46>(a) 과<그림 2.2.46>(b) 에 나타내었다. 뒤편 시트위치의 T/C 3의 경우 약 4분경 494℃까지 온도가 상승하였으며, 이와 더불어 T/C 4의 경우도 337℃까지 온도가 상승하였다. 뒤편 시트에서 점화이후 약 2분경부터 화재가 외부로 분출함과 동시에 화염이 앞쪽으로 전파가 되어 약 7분경 T/C 1의 경우 330℃로 상승하였고, T/C 2의 경우도 134℃로 상승하기 시작하여 온도변화가 증가하기 시작하였다.

반면, 점화이후부터의 화염온도와 약 2분경부터 분출되는 화염으로 인해 차량 외부 천정부위치의 T/C 5와 T/C 6은 약 3분경 580℃, 513℃로 급격히 온도가 상승되었으며, 5분경 T/C 6은 1078℃까지 상승하였다. 약 10분경부터는 차량의 유리가 전부 파손되어 개방된 창문으로부터 분출되는 화염의 영향으로 약 3분부터 20분까지 800℃ 이상의 고온영역을 유지하는 것을 확인할 수 있었다.

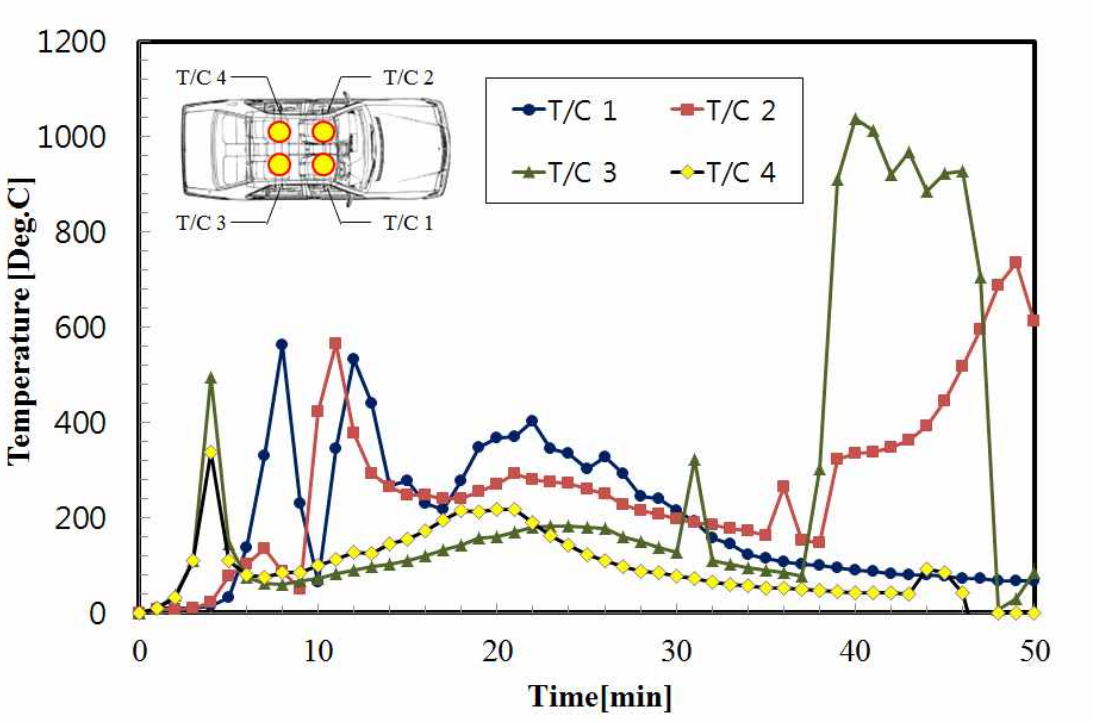
또한, 인접거리에서의 온도변화를 다음 <그림 2.2.46>(c)에 나타내었다.

뒤편 시트의 점화로 인하여 초기 5분까지는 후면부의 T/C 12에서 최대 120℃까지 상승하였으며, 그 외의 열전대에서는 100℃이하의 낮은 온도 변화가 측정되었다. 그러나 약 28분경 차량 엔진부분에서 화염이 급격히 거세지는 시점에서 T/C 14의 온도가 411℃까지 급격히 상승하였으며, T/C 11의 경우도 32분부터 2분간 200℃가 넘는 온도가 측정되는 것을 확인할 수 있었다.

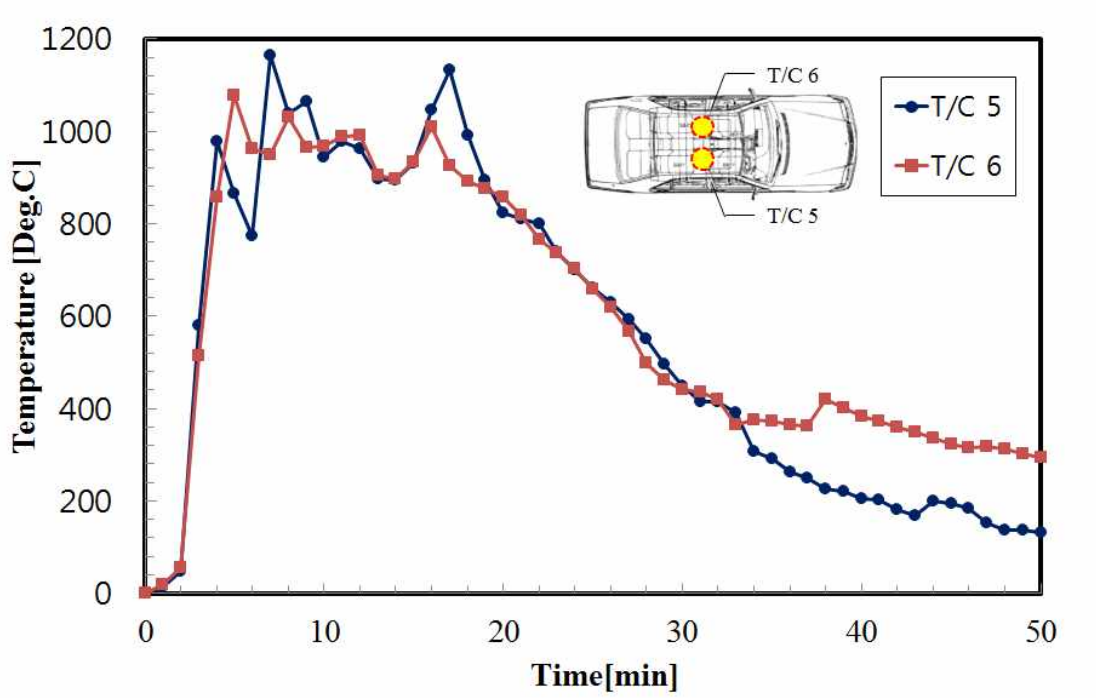
하지만 차량 인접부근의 50cm의 온도분포는 약 28분경 구간의 최대 411℃외에는 높지 않은 것을 확인할 수 있었다.

차량 연소실험 시 내부시트의 재질이 가죽이었으며, 초기에 가죽이 연소되면서 시트내부의 스펀지·솜 등에 의해 화염이 전파되는 순간부터 내부의 온도가 급격히 상승하였다.

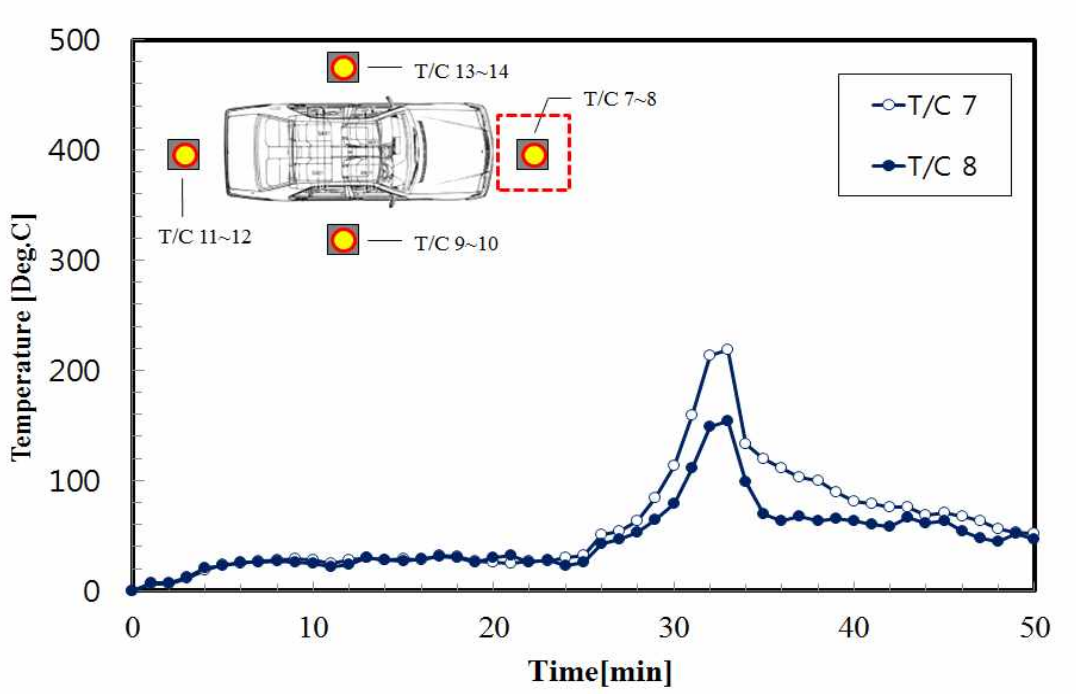
또한, 그 시점부터 화염이 거세지며 유리가 파손되고 차량 내부에 산소가 유입되면서 화염이 성장하는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 차량연소 실험 도중 21분, 33분에서는 폭발음이 발생한 이후부터 순간적인 온도 상승을 확인 할 수 있었다.



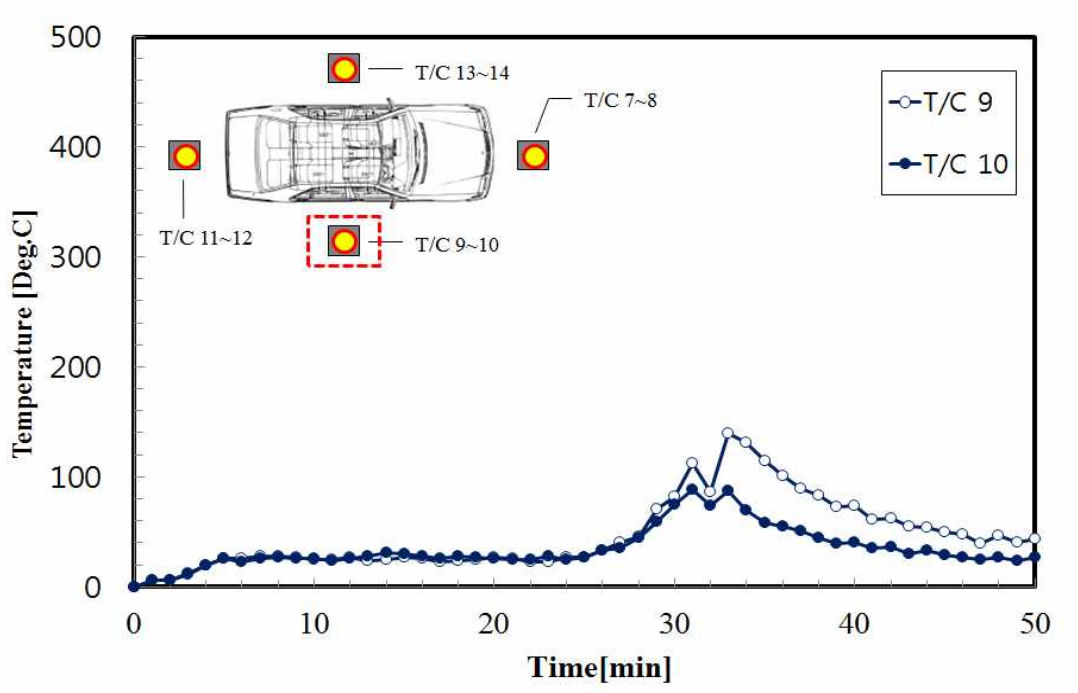
(a) 중형승용차 내부 온도 측정결과



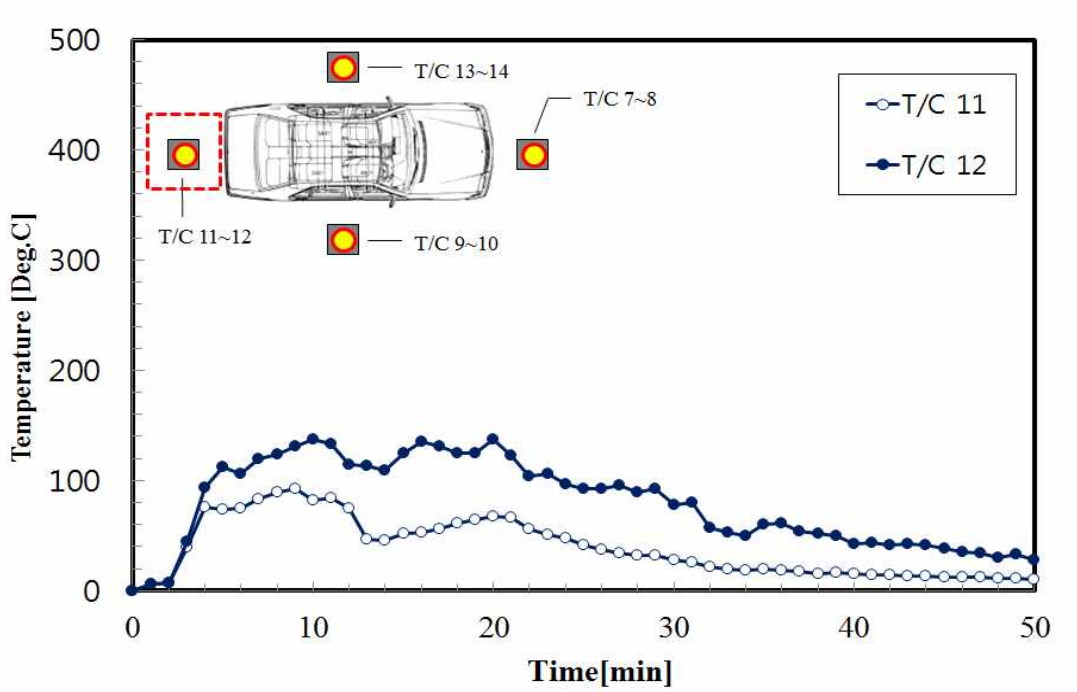
(b) 중형승용차 천장부 온도 측정결과



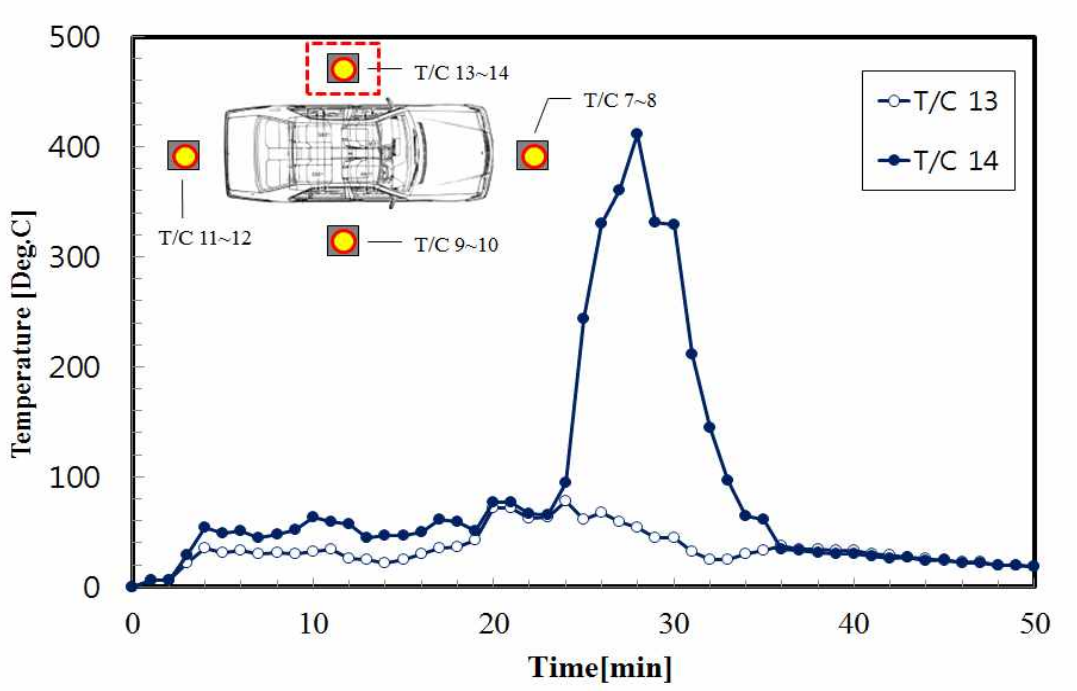
(c) 중형승용차 전면부 높이별 온도 측정결과



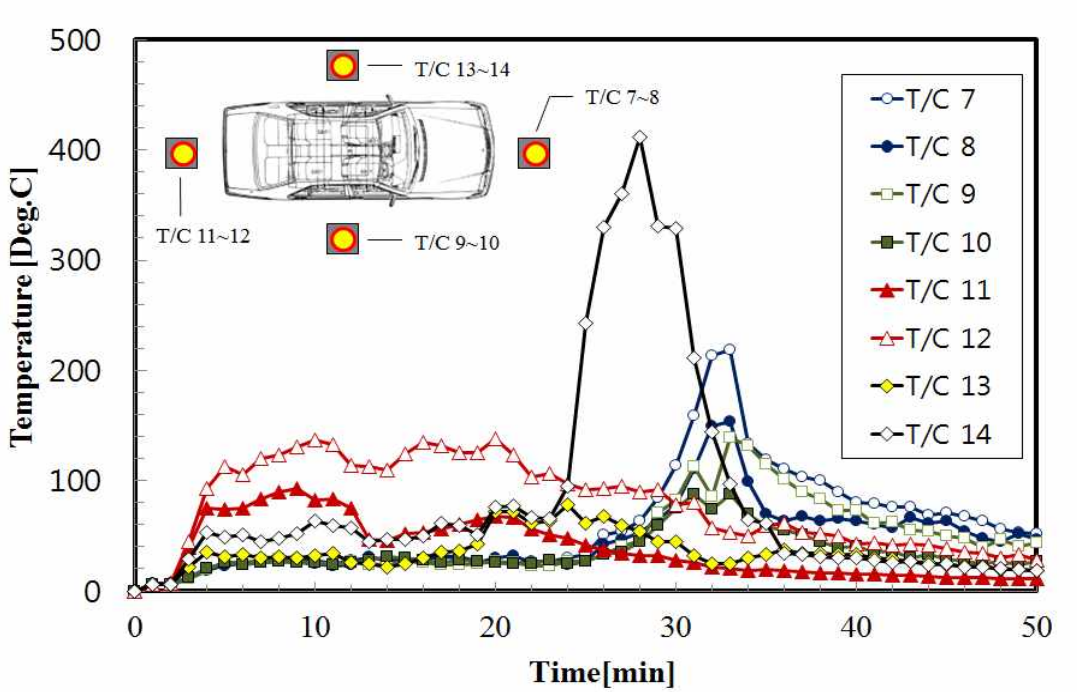
(d) 중형승용차 우측면부 높이별 온도 측정결과



(e) 중형승용차 후면부 높이별 온도 측정결과



(f) 중형승용차 좌측면부 높이별 온도 측정결과



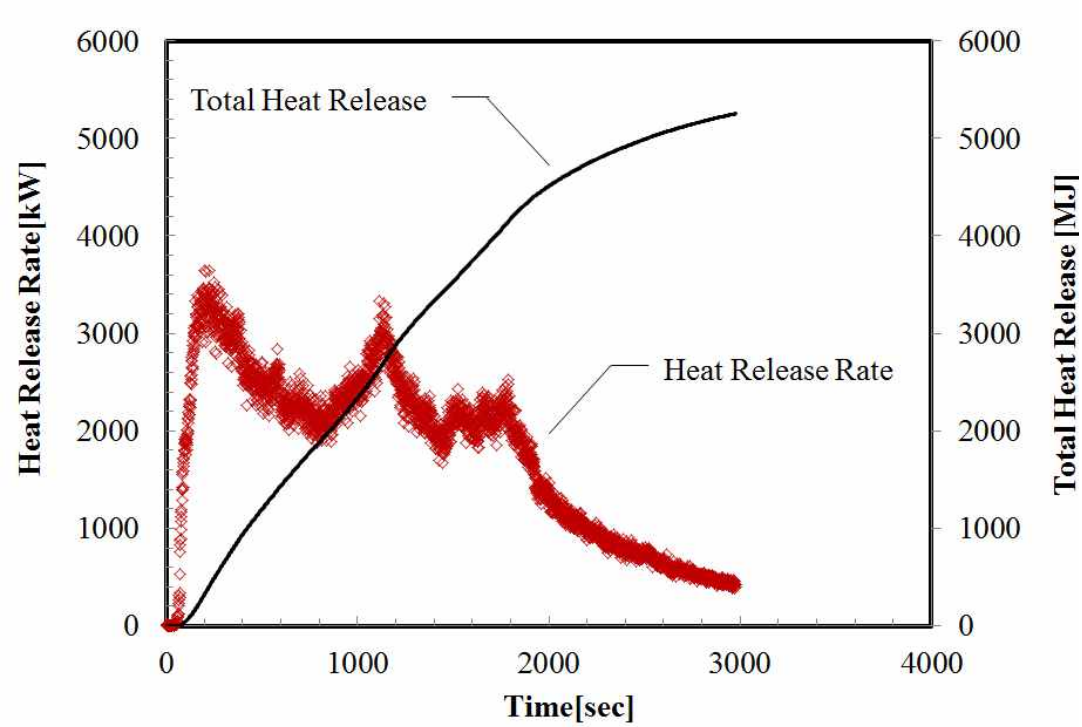
(g) 중형승용차 인접부근 온도 측정결과

<그림 2.2.46> Temperature measurement result of mid-size vehicle burning experiment

③ 중형승용차 연소시 열 방출율 특성

열 방출율(Heat Release Rate) 은 초기실험을 실시한 Pool Fire에서 측정된 장비의 계측시간 122초를 고려하여 다음 <그림 2.2.47>과 같이 나타내었다. HRR의 Peak값은 점화 이후 4분경 이었으며 3374kW가 계측되었다. 점화 이후 창문이 파손되거나 엔진에 화염이 전파되어 폭발음을 동반한 강한 화염으로 변화될 때 HRR 값이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

총 발열량 (Total Heat Release) 은 위 식 2.2.17을 이용한 결과 4668MJ 로 나타났다.



<그림 2.2.47> Heat release rate and total calorific value of mid-size vehicle burning experiment

(4) 대형승용차

(가) 실험 개요

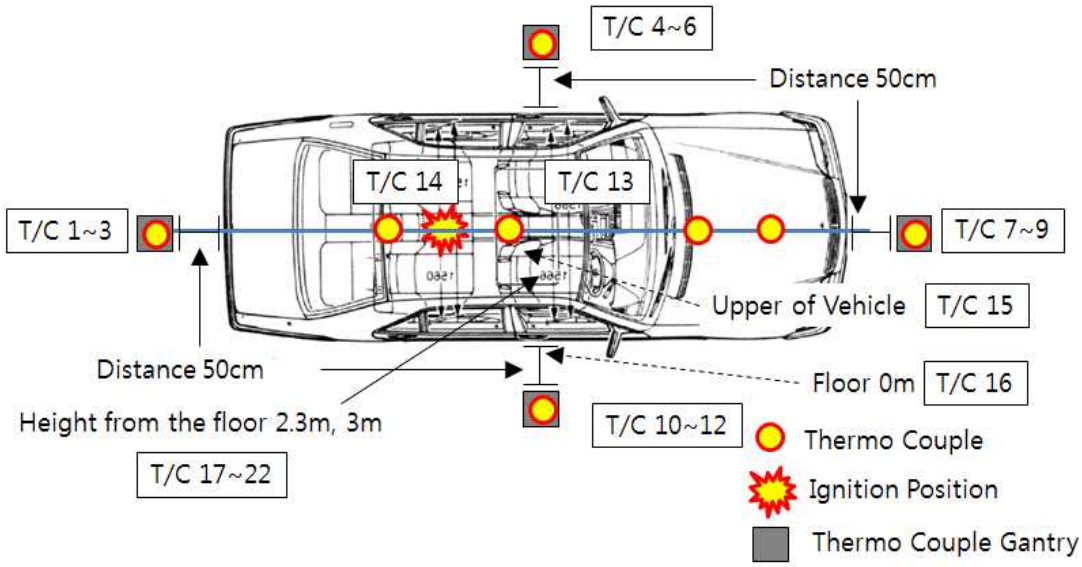
대형승용차(3000cc이상)에 대한 형상을 <그림 2.2.48>에 나타내었다. 차량 연소실험 시 온도변화를 확인하기 위하여 다음 <그림 2.2.49>와 같이 총 22개의 열전대(K-Type)를 설치하였으며, 세부사항을 <표 2.2.35>에 나타내었다. 차량 내부의 온도변화 확인을 위해 앞 시트 1개, 뒤 시트 1개만 설치하였으며, 차량의 외부 천장부에도 1개를 설치하였다. 또한 차량의 인접온도를 확인하기 위하여 전면, 우측면, 좌측면, 후면 총 4면에 대하여 각각 1m, 2m, 2.3m 3개씩 설치하였으며 중형승용차 연소실험을 통하여 차량에서 발생되는 화염이 주요부재인 기둥・보・벽만이 아닌 슬래브에 가장 크게 영향을 미칠 것으로 사료되어 주차장에서의 슬래브 높이를 고려하고자 하였다.

이에 따라 차량의 전면 후면의 열전대 지지대를 이용하여 지면에서 2.3m, 3m 지점에 Wire를 고정하였다. 차량 상부의 지지대를 Wire로 고정하여 2.3m, 3m부분에 각각 3개씩 열전대를 설치하였다. 중형승용차의 연소실험에서 확인한 바와 같이 앞 유리창, 뒤 유리창의 파손에 따라 화재가 급격하게 성장한 것을 고려하여 앞 유리창의 상부 2.3m 지점과 3m 지점에 각각 1개씩, 뒤 유리창의 상부 2.3m 지점과 3m 지점에 각각 1개씩 열전대를 설치하였으며, 바닥면의 온도변화도 확인하기 위하여 차량 중심부 하부에 열전대를 1개 설치하였다. 또한, 착화위치와 착화원은 중형승용차와 동일하게 뒤편의 시트에 헵탄 25ml를 사용하여 점화시켰으며 전체 창문을 약 30% 정도 개방하였다.

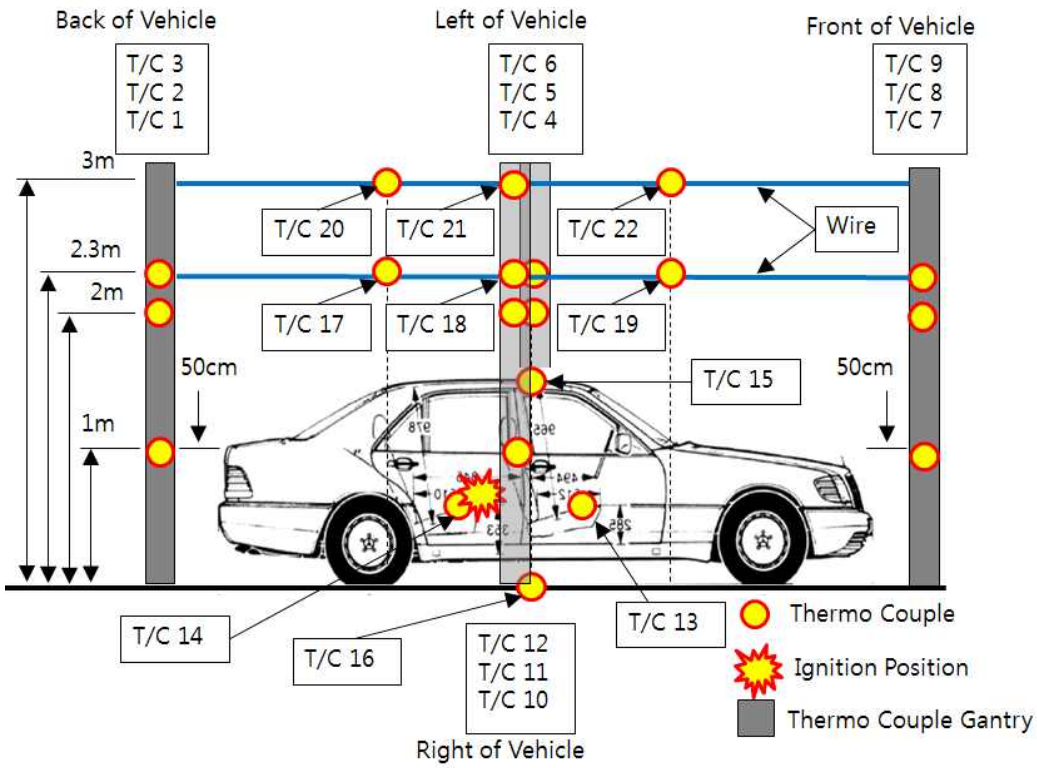


(a) 전면 (b) 좌측 (c) 우측 (d) 후면

<그림 2.2.48> Picture of large vehicle before the combustion



(a) 대형승용차 열전대위치 평면도



(b) 대형승용차 열전대위치 측면도

<그림 2.2.49> Shape and thermocouple location of large vehicle

<표 2.2.35> Thermocouple number and location in burning experiment of large vehicle

No.	Position	No.	Position
T/C-1	Back of Vehicle 1m	T/C-2	Back of Vehicle 2m
T/C-3	Back of Vehicle 2.3m	T/C-4	Left of Vehicle 1m
T/C-5	Left of Vehicle 2m	T/C-6	Left of Vehicle 2.3m
T/C-7	Front of Vehicle 1m	T/C-8	Front of Vehicle 2m
T/C-9	Front of Vehicle 2.3m	T/C-10	Right of Vehicle 1m
T/C-11	Right of Vehicle 2m	T/C-12	Right of Vehicle 2.3m
T/C-13	Seat of Front	T/C-14	Seat of Back
T/C-15	Ceiling of Vehicle	T/C-16	Floor of Vehicle
T/C-17	Back of Upper 2.3m	T/C-18	Middle of Upper 2.3m
T/C-19	Front of Upper 2.3m	T/C-20	Back of Upper 3m
T/C-21	Middle of Upper 3m	T/C-22	Front of Upper 3m

(나) 실험결과 및 분석

① 시간 경과에 따른 차량화재 특성

대형승용차의 연소실험 시 화재성장과 화재전파를 다음 <그림 2.2.50>에 나타내었다. 점화시작 후 1분 뒤 화염이 외부로 분출되는 것을 확인하였다.

그러나, 점화 후 약 9분까지 차량 내부에서 화재가 천천히 성장 한 후 약 10분경 후면 유리가 파손되면서 화재가 급격하게 성장하였다. 그 이후 약 13분경 후면 측면부의 유리가 파손되었으며, 약 15분경 후면부에서의 화재가 차량 천장부와 차량 전면부로 화재가 확대되었다. 이후 약 17분경 앞 유리가 파괴되면서 원인을 알 수 없는 폭발음이 들렸으며, 계속하여 3~4회 가량 폭발음이 추가로 들렸다.

연소가 계속 진행되던 중 약 26분경 후면과 앞면의 타이어에 불길이 치솟으면서 차량의 엔진부분에서 화염이 급격하게 커졌다. 계속하여 연소가 진행되었으며 엔진부분과 차량의 표면부가 거의 전소되어 화재가 감소하기 시작하였으며, 약 47분경 자연 진화되는 현상을 보여 강제 소화를 실시하였으며, 차량연소 시 육안으로 관찰한 화염의 높이는 평균 3m 이상으로 확인되었다. 또한 대형승용차의 연소 전 중량은 1760kg 이었으나 연소 후 1470kg으로 290kg의 중량이 감소하였다.

대형승용차 연소실험 시 후면의 좌석시트에서 중형승용차와 다른 재질로 인해 초기 연소성장에서 많은 부분이 차이가 발생하였다. 동일한 위치에서 동일한 화원설정으로 착화를 실시하였으나, 초기 연소성장 시간이 중형승용차보다 약 9배가량 늦게 연소가 진행되는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 1min



(b) 10min



(c) 13min



(d) 15min



(e) 17min



(f) 26min



(g) 35min



(h) 47min End

<그림 2.2.50> A test of combustion of large-size vehicle

② 대형승용차 연소 시 온도 특성

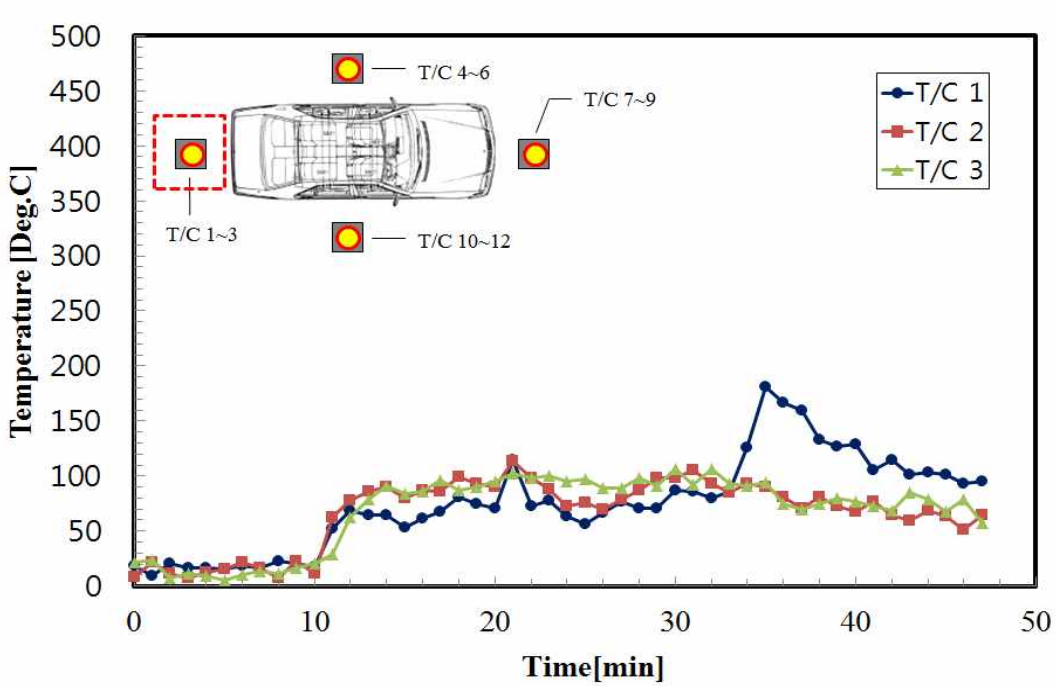
차량연소 시 시간에 따른 온도변화를 다음 <그림2.2.51>(a)~(h) 에 나타내었다. 차량의 주위의 온도는 화재성장 이후 약 200℃정도로 확인할 수 있었으며, 차량 내부의 온도는 뒤편 시트에서 연소가 시작되어 약 30분경 1137℃까지 온도가 상승되었다.

앞 시트에서도 약 40분경 892℃의 온도가 상승한 것을 확인하였다. 또한, 차량의 천정부와 바닥면에서는 10분경 화재가 성장하면서부터 약 15분경까지 온도가 급격하게 변하며 681℃와 약 24분경 492℃까지 상승하였다.

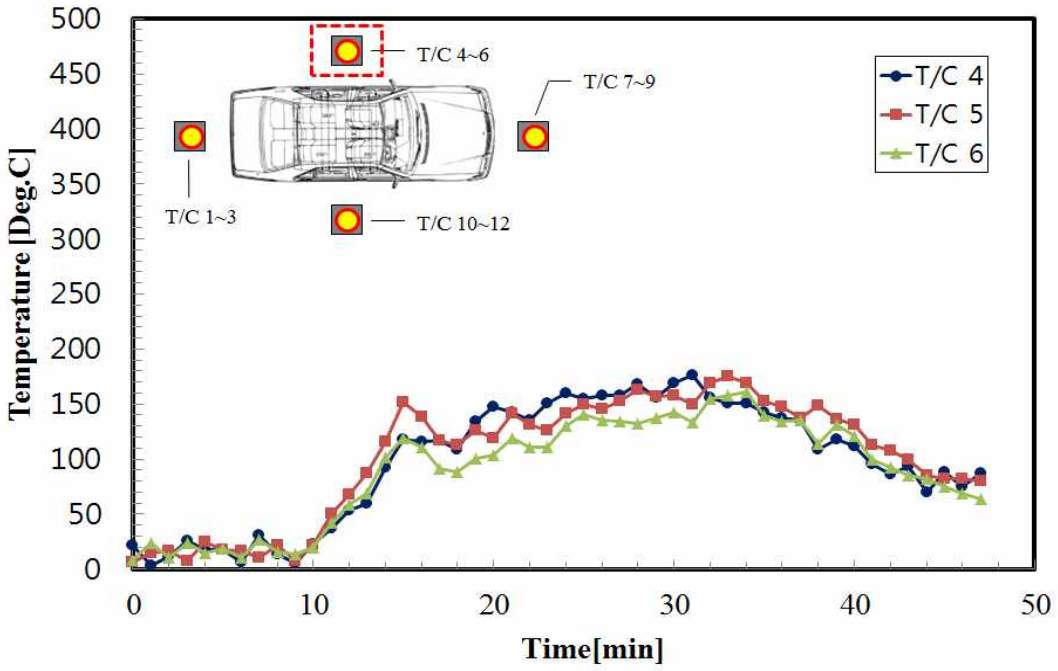
한편, 차량의 상부 2.3m 높이의 온도변화는 중앙부 T/C 18에서 약 14분경 최대 629℃까지 상승하였으며, 상부의 전면의 경우 약 15분경 온도의 상승 이후 온도가 하락하는 경향을 보였지만, 약 25분경부터 엔진부로 화재가 확대되면서 약 33분경 최대 642℃까지 온도가 상승하였다. 차량 상부 중앙부의 3m 높이에서는 약 13분경 T/C 21에서 최대온도 467℃까지 상승하였다.

대형승용차의 연소실험 시 착화이후 약 10분까지 화재가 천천히 성장하였고, 유리창의 파손이후 외부의 공기의 유입으로 화재가 급격히 확대되어 약 12분경을 플래시오버 시점으로 판단하였다.

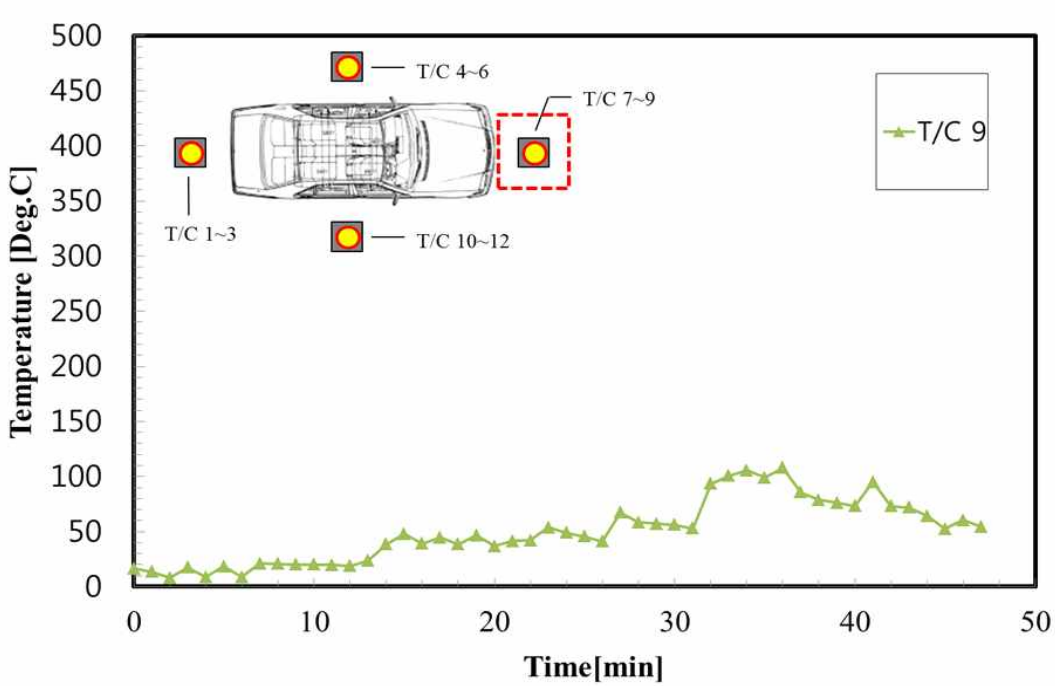
또한 차량의 외형적인 요인으로 전면부(엔진부)와 후면부(트렁크)의 길이가 길었으며, 이로 인해 온도변화가 전체적으로 상승한 것이 아닌 부분적으로 온도가 상승·하락하는 경향을 확인하였다.



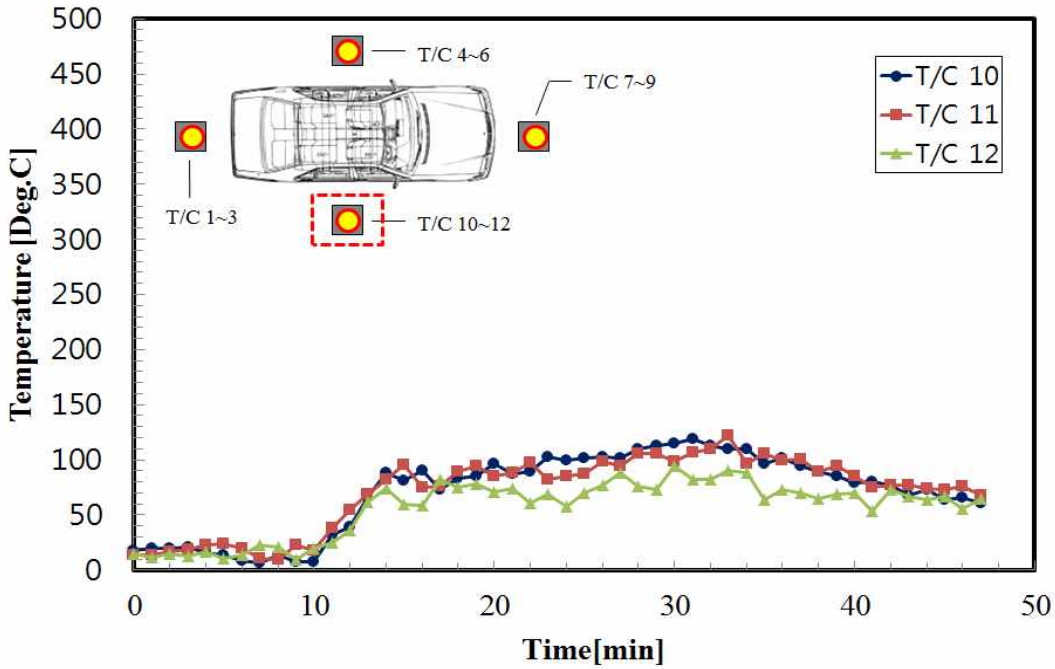
(a) 대형승용차 후면부 높이별 온도 측정결과



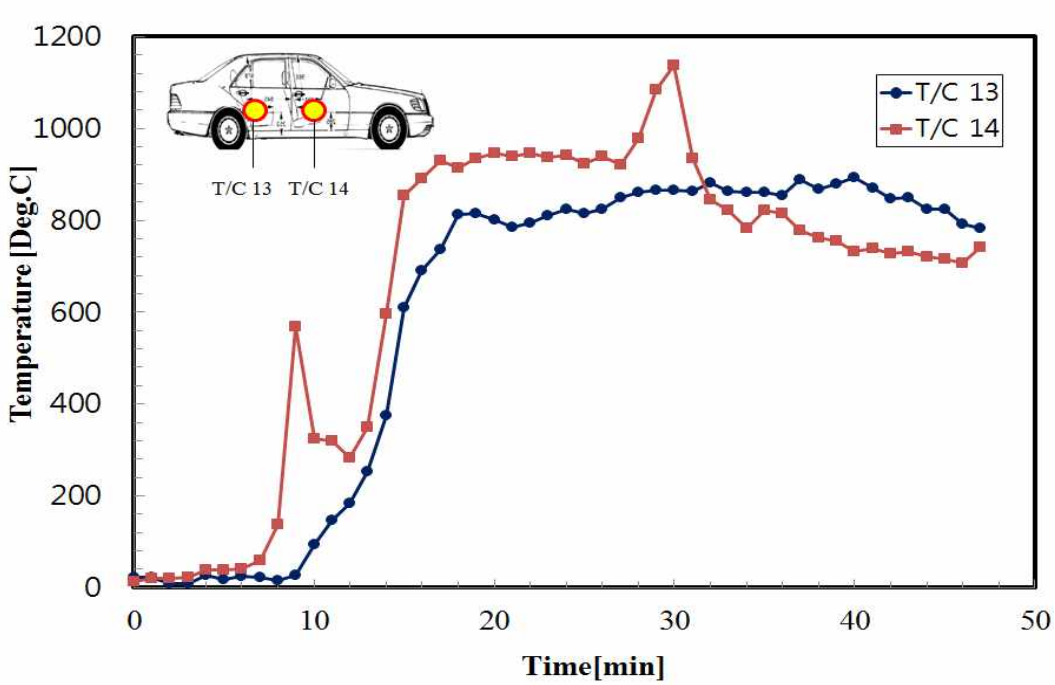
(b) 대형승용차 좌측면부 높이별 온도 측정결과



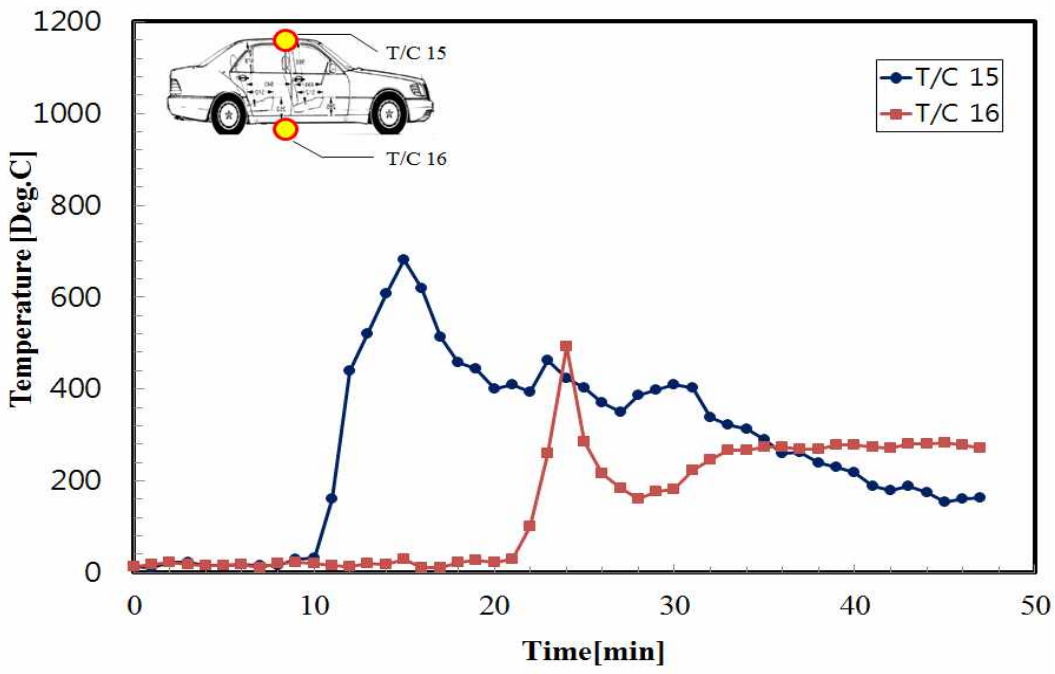
(c) 대형승용차 전면부 높이별 온도 측정결과



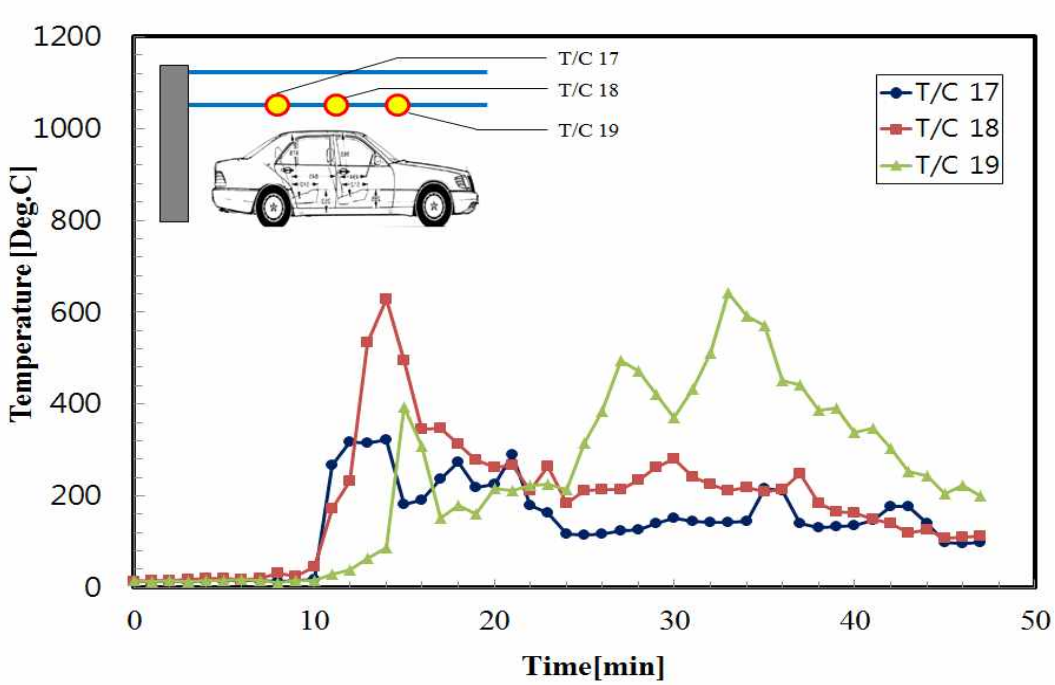
(d) 대형승용차 우측면부 높이별 온도 측정결과



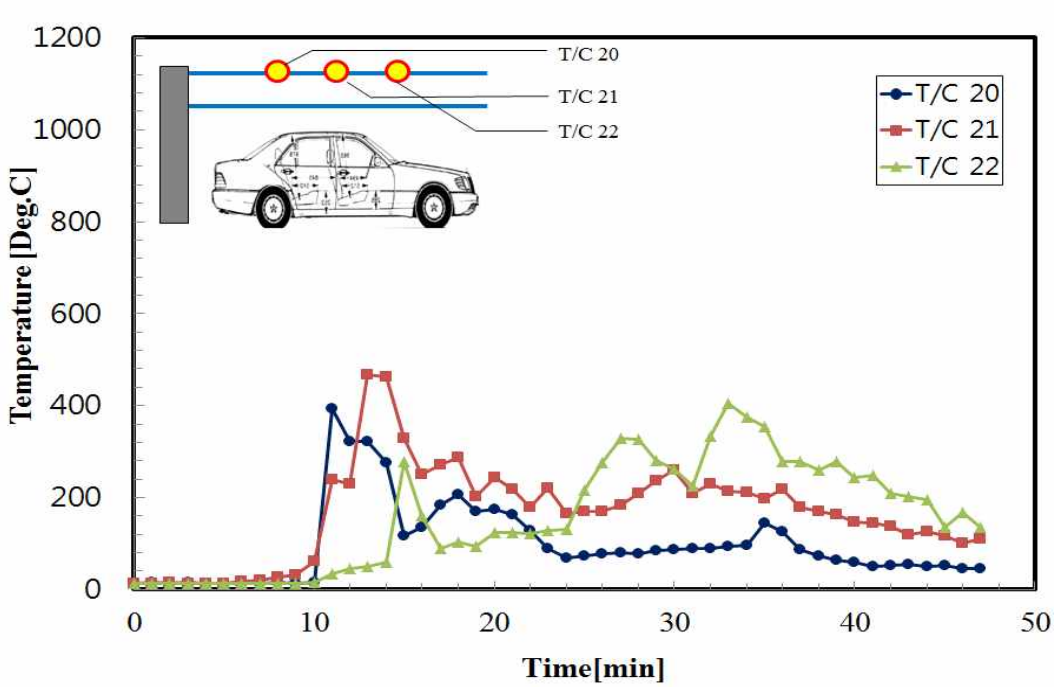
(e) 대형승용차 내부 온도 측정결과



(f) 대형승용차 천정 · 바닥 높이별 온도 측정결과



(g) 대형승용차 2.3m 상부 거리별 온도 측정결과

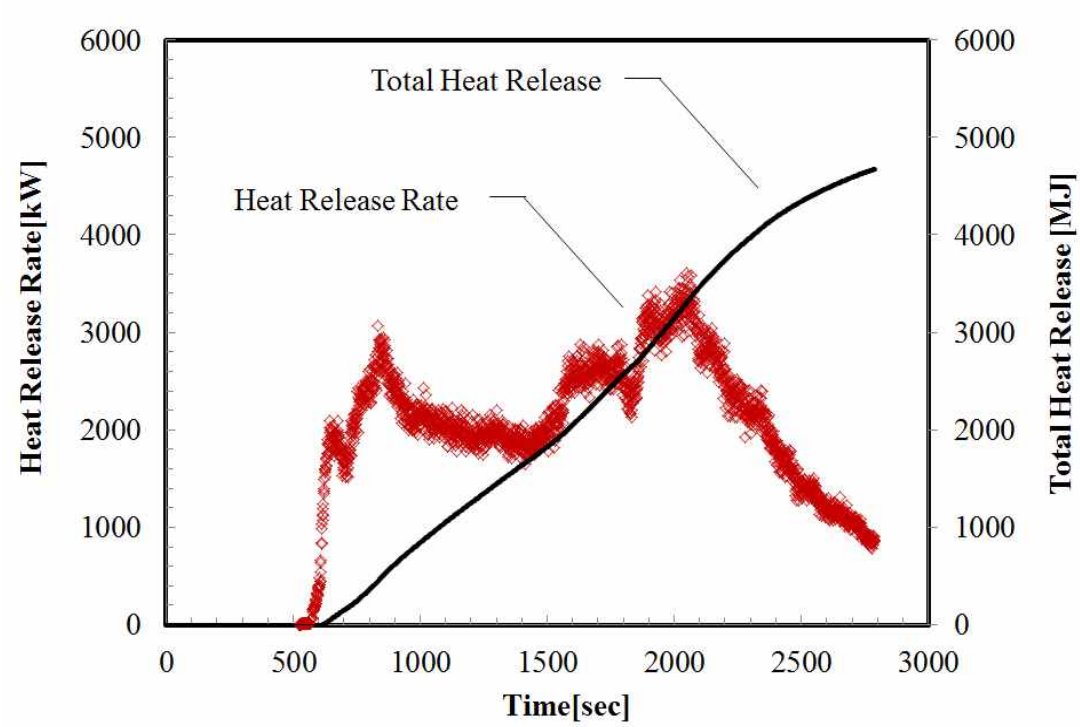


(h) 대형승용차 3m 상부 거리별 온도 측정결과

<그림 2.2.51> Thermocouple number and location in burning experiment of large vehicle

③ 대형승용차 연소 시 열 방출율 특성

대형승용차의 열 방출율 변화를 다음 <그림 2.2.52>에 나타내었다. 착화 이후 10분간 차량 내부에서 화재가 천천히 성장하였으며, 유리의 파손과 함께 화재가 급격히 성장하여 약 13분경 3066kW가 계측되었다. 그 이후 서서히 감소하는 경향을 보였으며, 약 34분경 HRR의 최대 Peak값 3612kW가 계측되었다. 최대 열 방출율이 계측된 시점은 엔진부분과 앞쪽 타이어에서 연소가 진행되는 시점이었으며, 중형승용차와 동일하게 폭발음의 발생 이후 HRR값이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한 총 발열량은 위 식 2.2.17을 이용한 결과 4789MJ로 나타났으며, 4668MJ의 중형승용차보다 121MJ 높게 나타났다. 하지만, 대형승용차의 경우는 착화 이후 약10분간 연소하였음에도 열 방출율이 측정되지 않았기 때문에 측정값보다 실제 총 열 방출율이 더 높을 것으로 판단된다.



<그림 2.2.52> Heat release rate and total calorific value of large-size vehicle burning experiment

(5) 승합차

(가) 실험 개요

승합차에 대한 형상을 <그림 2.2.53>에 나타내었다. 차량연소 실험 시 온도변화를 확인하기 위하여 다음 <그림 2.2.54>와 같이 총 19개의 열전대(K-Type)를 설치하였으며, 세부사항은 <표 2.2.36>과 같다.

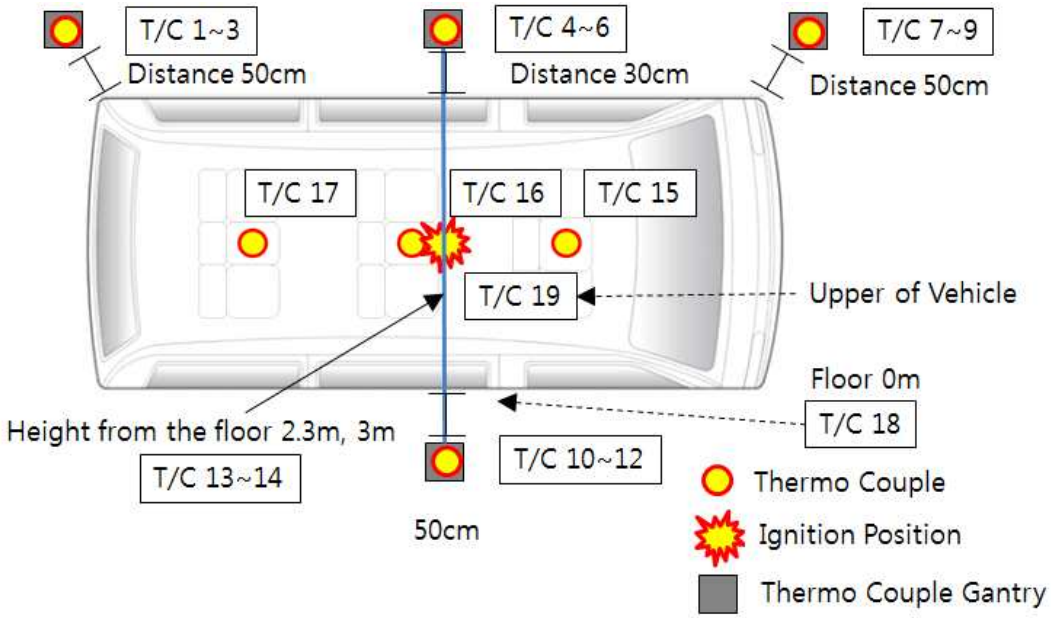


(a) 전면 (b) 좌측 (c) 우측 (d) 후면

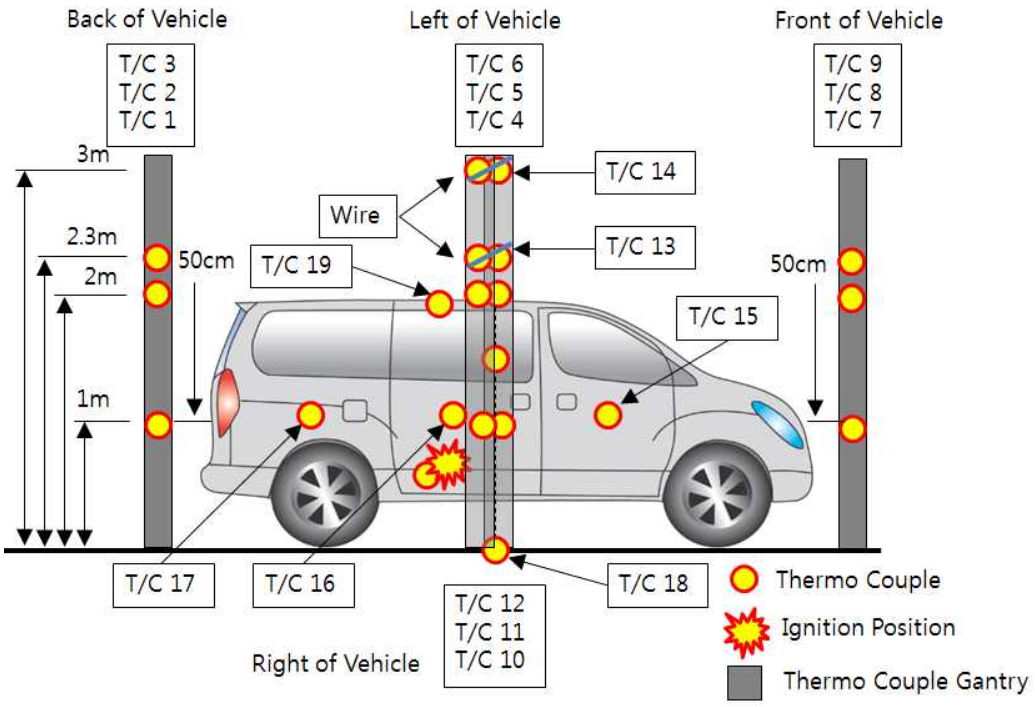
<그림 2.2.53> Shape and thermocouple location of van

<표 2.2.36> Thermocouple number and location in burning experiment of van

No.	Position	No.	Position
T/C-1	Back of Vehicle 1m	T/C-2	Back of Vehicle 2m
T/C-3	Back of Vehicle 2.3m	T/C-4	Left of Vehicle 1m
T/C-5	Left of Vehicle 2m	T/C-6	Left of Vehicle 2.3m
T/C-7	Front of Vehicle 1m	T/C-8	Front of Vehicle 2m
T/C-9	Front of Vehicle 2.3m	T/C-10	Right of Vehicle 1m
T/C-11	Right of Vehicle 2m	T/C-12	Right of Vehicle 2.3m
T/C-13	Middle of Upper 2.3m	T/C-14	Middle of Upper 3m
T/C-15	Seat of Front	T/C-16	Seat of Middle
T/C-17	Seat of Back	T/C-18	Floor of Vehicle
T/C-19	Ceiling of Vehicle		



(a) 승합차 열전대위치 평면도



(b) 승합차 열전대위치 측면도

<그림 2.2.54> Temperature measurement result of van

(나) 실험결과 및 분석

① 시간 경과에 따른 차량화재 특성

승합차의 연소실험 시 화재성장과 화재전파를 다음 <그림 2.2.55>에 나타내었다. 점화시작 후 약 1분 30초 뒤 우측 창문에서 화염이 분출된 것을 확인하였다.

약 3분 14초 뒤 폭발음이 들렸으며, 약 4분 53초 경 왼쪽 창문에서도 화염이 분출되는 것을 확인하였다. 약 8분 30초경부터 약 9분 16초까지 3차례의 폭발음을 들을 수 있었으며, 폭발음과 화염이 확대되는 경향을 확인하였다.

약 10분 25초경에는 화염이 천정부로 확대되어 전체적인 연소가 진행되었으며, 11분 8초경에는 유리창이 깨지는 소리를 들을 수 있었다. 이후 약 16분 14초경 2차례의 큰 폭발음이 연속적으로 들렸다. 후면부에서 차량이 전소될 무렵, 약 19분경 전면부(엔진룸)에서 강한 화염이 분출되었으며, 그 이후 약 47분까지 화재가 진행되었으나 자연 진화라 판단되어 강제 소화를 실시하였다.

승합차 연소실험 시 착화 이후 화재가 빠르게 성장하였다. 착화지점과 내부 시트와의 이격거리가 좁은 것과 초기에 좌측면의 유리창이 빠른 시기에 파괴됨에 따라 산소의 유입에 따른 화재가 성장하였으며, 이에 따라 연쇄적인 유리창의 파괴와 더불어 전체적인 화재로 전개되는 시점이 빠르게 진행되는 것을 확인할 수 있었다. 본 실험을 통하여 차량연소 시 창문의 파괴시점에 따라 화재성장 속도가 결정된다고 판단된다.



(a) 1min 30sec



(b) 6min



(c) 10min 25sec



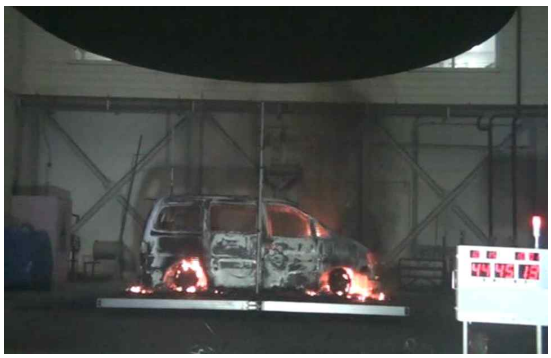
(d) 16min 14sec



(e) 19min



(f) 25min



(g) 44min 45sec



(h) 47min End

<그림 2.2.55> Burning experiment of van

② 승합차 연소 시 온도 특성

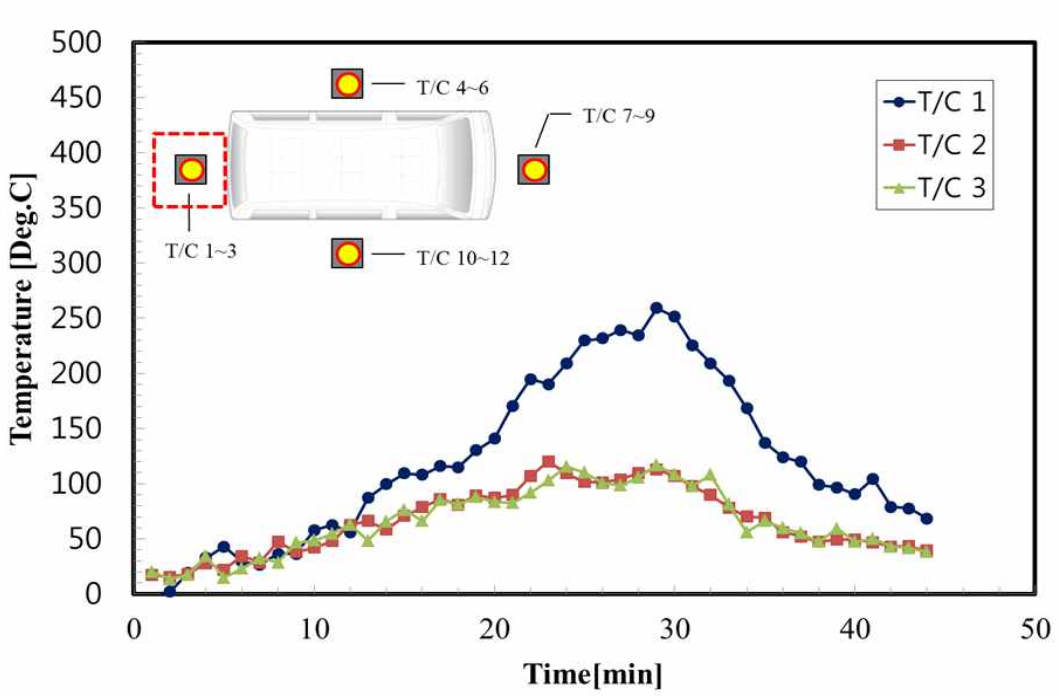
차량연소 시 시간에 따른 온도변화를 다음 <그림 2.2.56>(a)~(g)에 나타내었다. 차량의 주위의 온도는 전면부의 T/C 7, T/C 8에서 온도가 측정되지 않았다. 하지만 4면의 위치에서 화재성장 이후 200℃~300℃ 범위의 온도를 확인할 수 있었다. 또한, 차량 상부 중앙의 2.3m와 3m 위치에서 약 11분경 최고온도 428℃, 350℃를 확인할 수 있었다.

차량의 내부 온도변화는 엔진룸과 인접한 앞 시트에서 화재가 성장하는 시점인 약 13분경 최고온도 1064℃까지 상승하였으며, 중간시트와 후면시트에서도 각각 964℃, 1010℃ 까지 상승하였다.

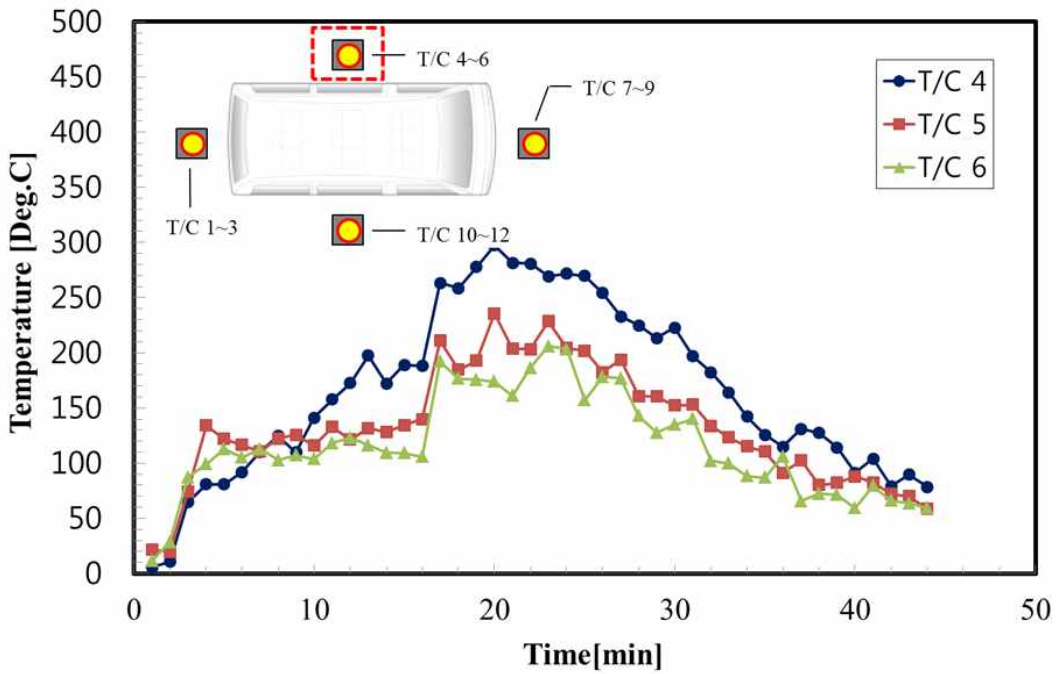
차량 천정부와 바닥면에서는 T/C 18이 측정되지 않았으며, 천장부의 온도는 약 24분경 최고온도 485℃까지 상승한 것을 확인하였다.

차량의 상부 2.3m와 3m에서 온도분포가 대형승용차보다 낮은 것을 확인하였지만, 전면부의 유리창과 후면부의 유리창에서 화염이 분출되는 지점에서의 온도를 측정하지 못하여 상대적으로 온도가 낮게 측정된 것으로 판단된다.

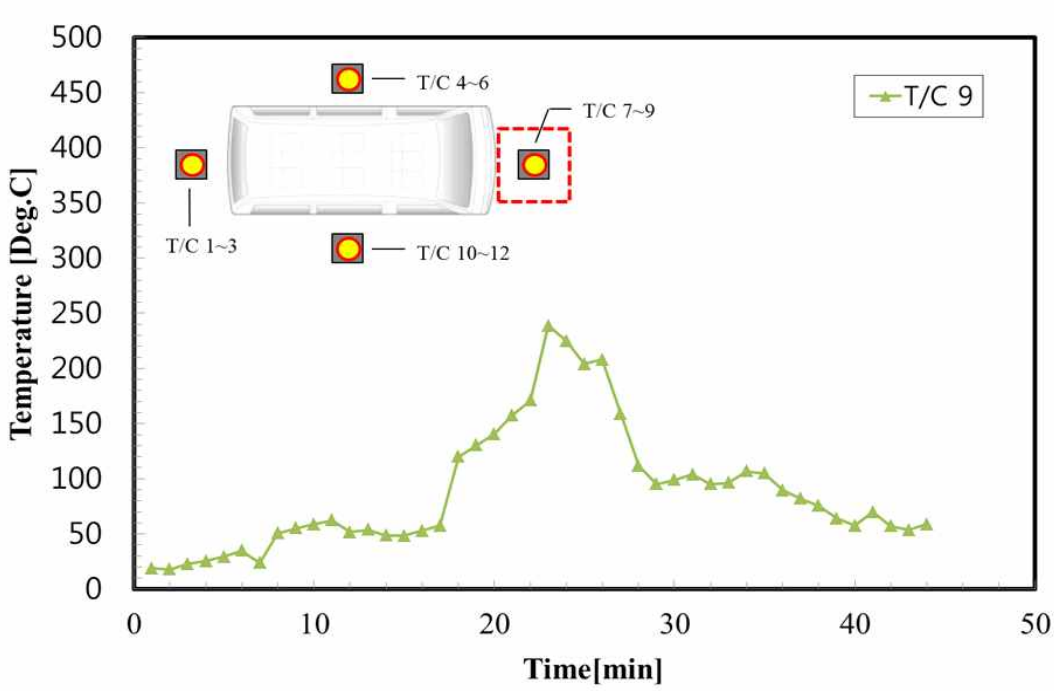
승합차 화재 시 화염 높이는 최대 약 4m까지 상승하였다. 승합차에서 화염높이가 높게 측정된 이유로서 상대적으로 높은 가연물 밀도와 차체의 크기로 인하여 승용차보다 약 50cm 높기 때문에 화염높이가 높게 측정되었다고 판단되며, 이러한 화염의 높이로 인하여 구조물에 직접적으로 미치는 화염의 영향이 더욱 클 것으로 사료된다.



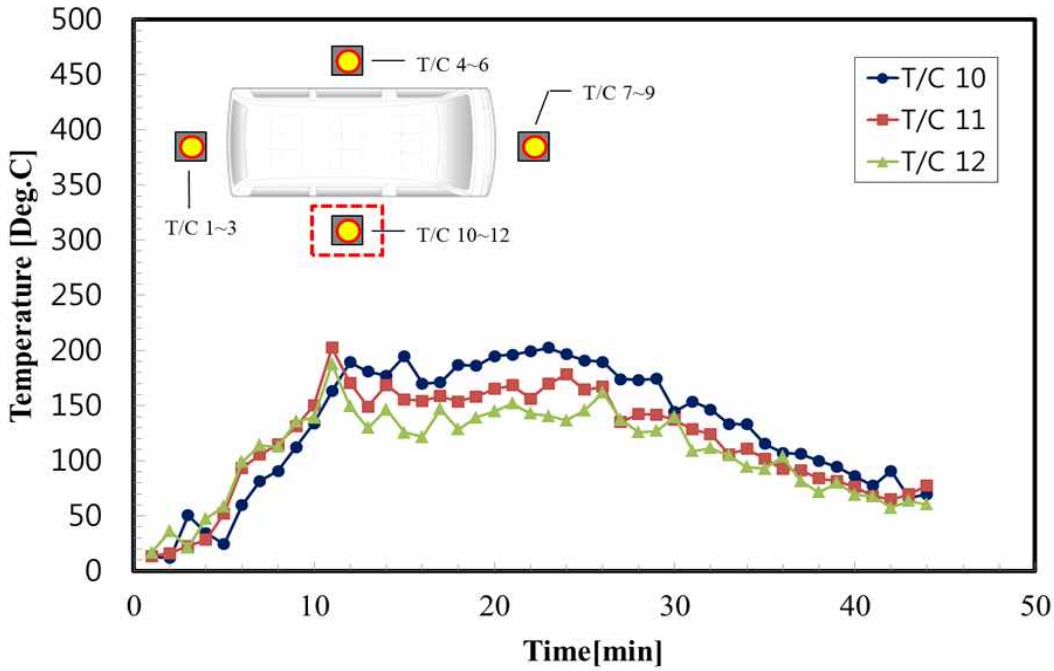
(a) 승합차 전면부 높이별 온도 측정결과



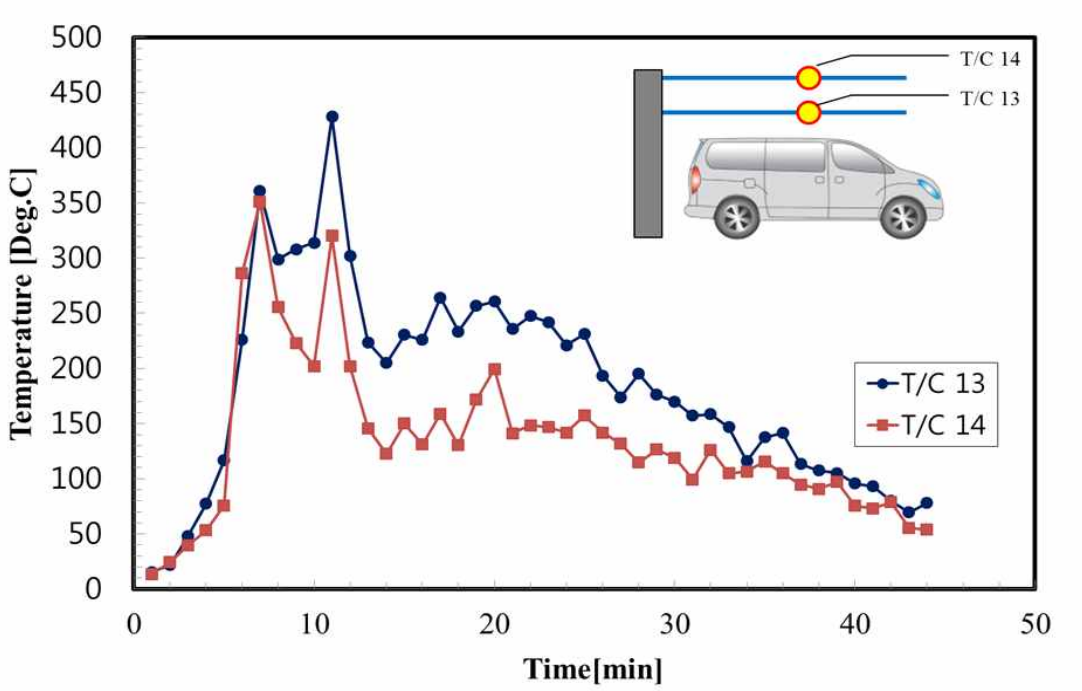
(b) 승합차 우측면부 높이별 온도 측정결과



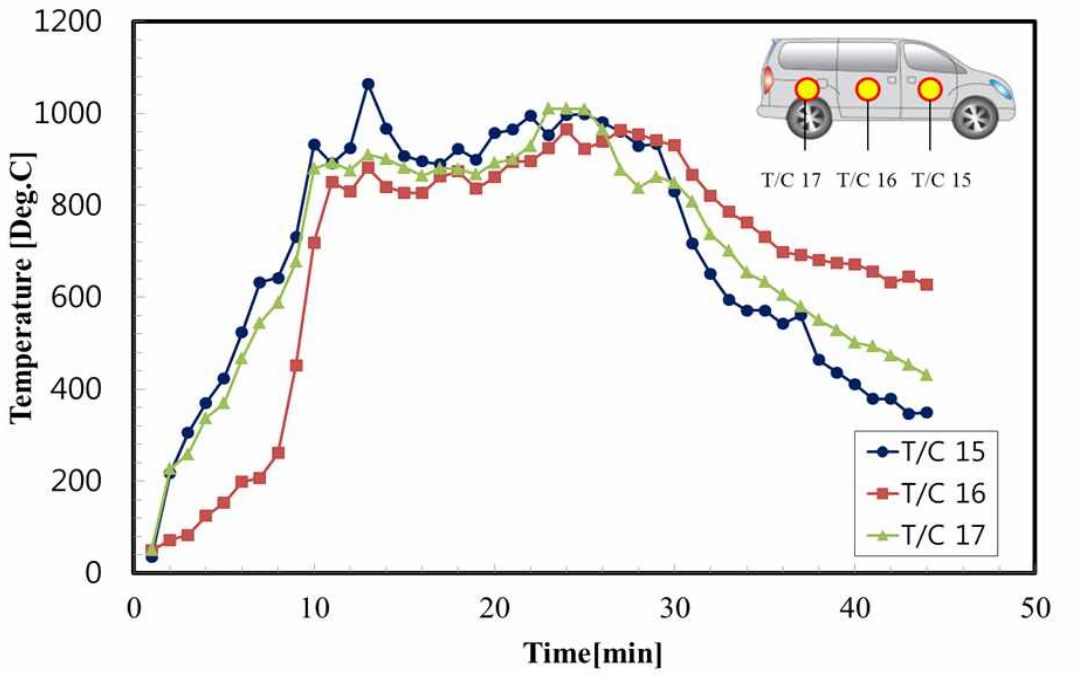
(c) 승합차 전면부 높이별 온도 측정결과



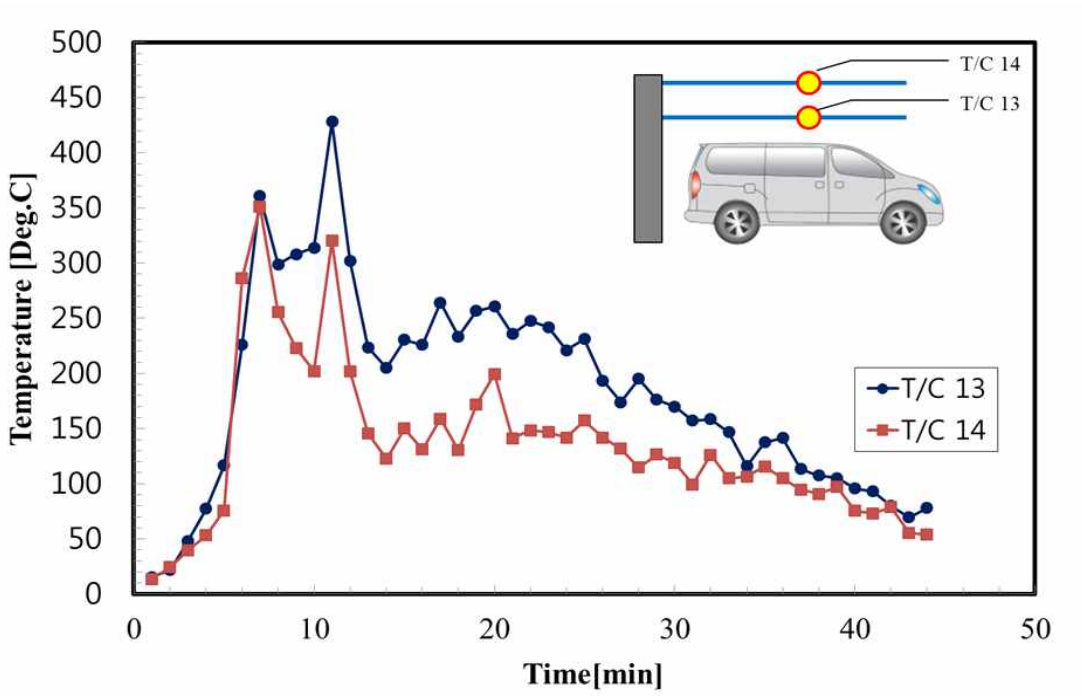
(d) 승합차 우측면부 높이별 온도 측정결과



(e) 승합차 전면부 높이별 온도 측정결과



(f) 승합차 우측면부 높이별 온도 측정결과



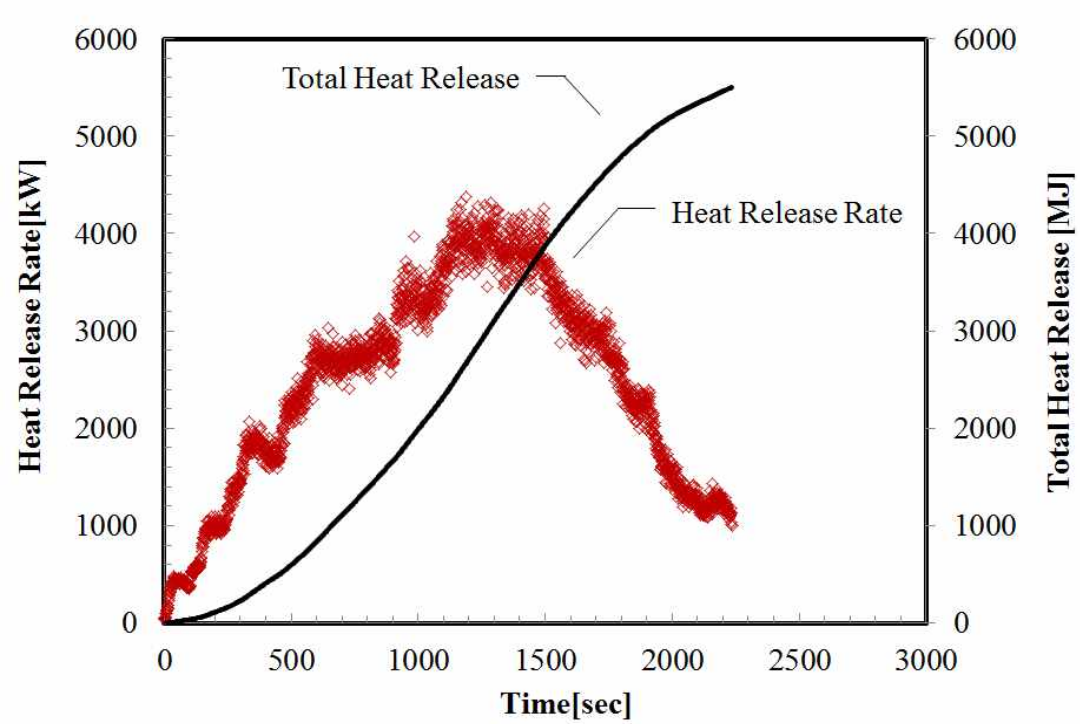
(g) 승합차 전면부 높이별 온도 측정결과

<그림 2.2.56> Temperature measurement result of van

③ 승합차 연소 시 열 방출율 특성

승합차의 열방출율 변화를 다음 <그림 2.2.57>에 나타내었다. 착화 이후 약 1분여 만에 화염이 분출되면서부터 약 19분까지 지속적으로 화재가 확대되었다. 특히, 약 19분경 HRR의 최대 값 4379kW가 계측되었으며, 승합차의 경우도 다른 차량연소실험과 동일하게 엔진룸의 연소가 진행되는 시점부터 열 방출율이 가장 높게 측정된 것을 확인할 수 있었다. 20분경부터 화재가 서서히 감소하는 경향을 보였으며, 총 발열량은 앞서 언급한 식 2.2.17을 이용한 결과 5860MJ로 나타났다.

이를 통해 중형승용차와 대형승용차보다 승합차의 열 방출율이 약 1.2배 높은 것을 확인할 수 있었다.



<그림 2.2.57> Heat release rate and total calorific value of van burning experiment

(6) 인접된 중형승용차 2대

(가) 실험 개요

주차장에서 인접된 중형승용차 2대에 대한 연소실험을 실시하였다. 형상은 다음 <그림 2.2.58>에 나타내었으며, 차량연소 실험 시 차량 사이에 10cm, 30cm, 50cm에 열전대를 설치하여 이격거리의 온도 분포를 확인하고자 하였으며, 차량의 내·외부 온도변화를 확인하기 위하여 다음 <그림 2.2.59>와 같이 총 28개의 열전대(K-Type)를 설치하였다. 세부사항은 <표 2.2.37>과 같다.

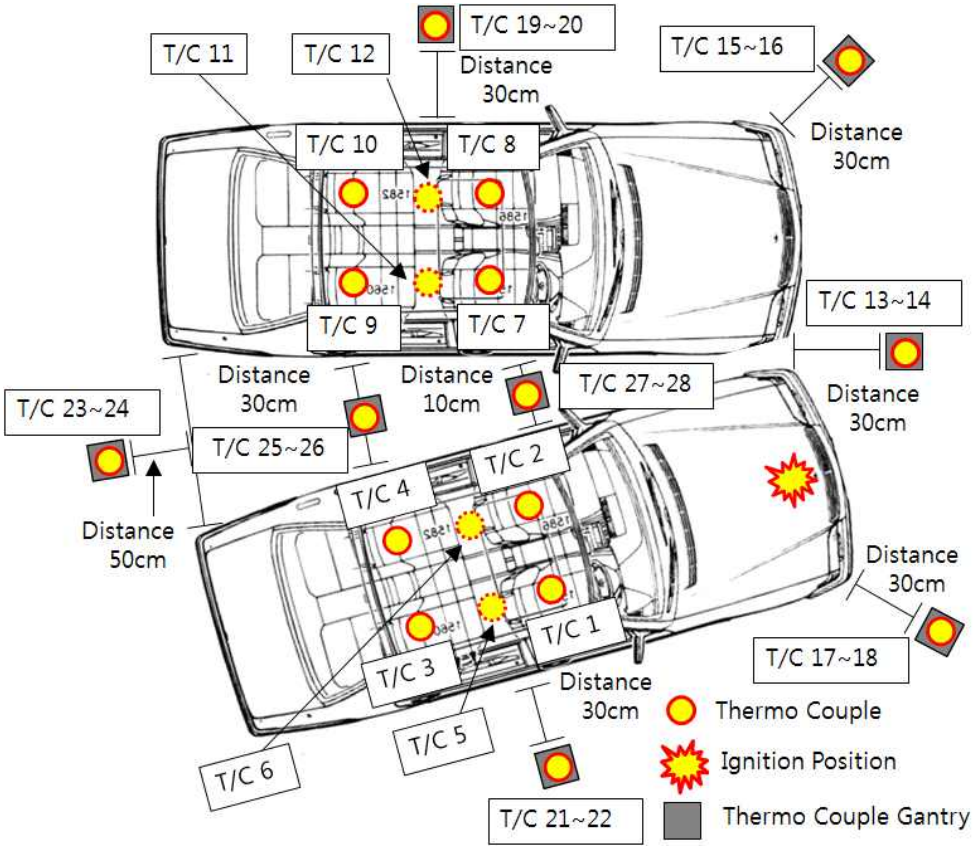


(a) 전면 (b) 좌측 (c) 우측 (d) 후면

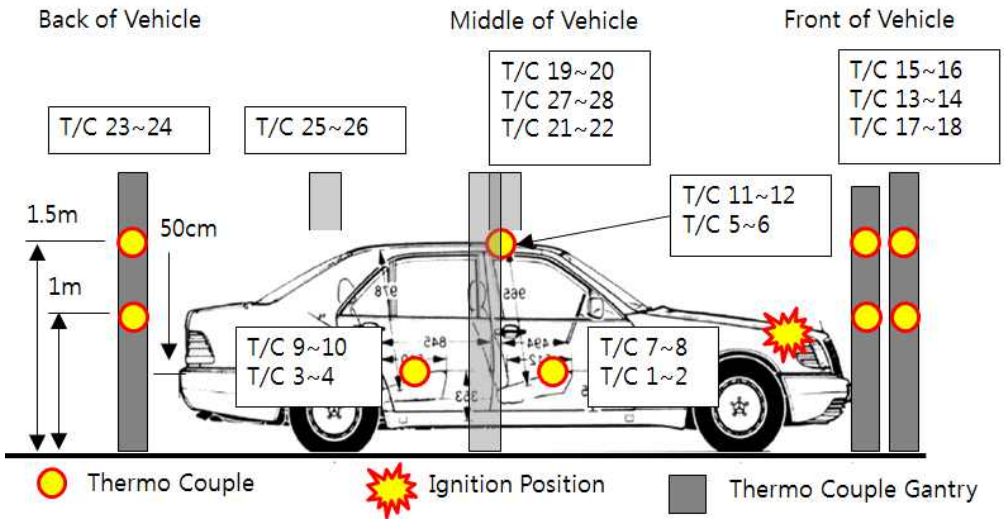
<그림 2.2.58> Picture of medium vehicles before the combustion

<표 2.2.37> Thermocouple number and location in burning experiment of 2 close vehicles

No.	Position	No.	Position
T/C-1	Right of Front Seat [1]	T/C-2	Left of Front Seat [1]
T/C-3	Right of Back Seat [1]	T/C-4	Left of Back Seat [1]
T/C-5	Right of Ceiling [1]	T/C-6	Left of Ceiling [1]
T/C-7	Front of Vehicle 1m [1]	T/C-8	Front of Vehicle 1.5m [1]
T/C-9	Right of Vehicle 1m [1]	T/C-10	Right of Vehicle 1.5m [1]
T/C-11	Back of Vehicle 1m [1]	T/C-12	Back of Vehicle 1.5m [1]
T/C-13	Left of Vehicle 1m [1]	T/C-14	Left of Vehicle 1.5m [1]
T/C-15	Right of Front Seat [2]	T/C-16	Left of Front Seat [2]
T/C-17	Right of Back Seat [2]	T/C-18	Left of Back Seat [2]
T/C-19	Right of Ceiling [2]	T/C-20	Left of Ceiling [2]
T/C-21	Front of Vehicle 1m [2]	T/C-22	Front of Vehicle 1.5m [2]
T/C-23	Right of Vehicle 1m [2]	T/C-24	Right of Vehicle 1.5m [2]
T/C-25	Back of Vehicle 1m [2]	T/C-26	Back of Vehicle 1.5m [2]
T/C-27	Left of Vehicle 1m [2]	T/C-28	Left of Vehicle 1.5m [2]



(a) 인접차량 2대의 열전대위치 평면도



(b) 인접차량 2대의 열전대위치 측면도

<그림 2.2.59> Shape and thermocouple location of 2 close medium vehicles

(나) 실험결과 및 분석

① 시간 경과에 따른 차량화재 특성

사고를 가정한 차량화재특성을 다음 <그림 2.2.60>에 나타내었다. 점화 시작 이후 약 3분경 보닛(Bonnet) 상부로 화염이 전파되었다. 이후 약 5분 40초 경 보닛 상부의 약 50%가 연소되었으며 타이어의 연소와 함께 인접차량으로 화재가 전파되었다. 약 12분경 점화차량의 전면부 유리가 파괴되면서, 동시에 차량의 천장부로 화재가 빠르게 전파되었다. 약 14분경 차량내부에서 폭발음이 들렸으며, 약 15분경 점화 차량의 후면부 유리가 파괴됨에 따라 다량의 유해가스 배출과 화재가 급격히 성장하였다. 이후 약 18분경 차량 2대에서 화재가 성장이 진행하는 것을 확인하였으며, 육안으로 관찰하기 어려울 정도로 유해가스가 배출되었다. 약 28분경 시험장소의 산소부족으로 계측의 어려움으로 강제소화를 실시하였다.

② 중형승용차 2대의 연소 시 온도 특성

차량연소 시 시간에 따른 온도변화를 다음 <그림 2.2.61>(a)~(l)에 나타내었다. 점화차량에서 인접차량으로 화재가 전파되는 온도는 약 662℃로 확인되었으며, 점화차량의 천장부 위치에서 최고온도 912℃가 확인되었다. 본 실험의 온도특성은 차량 2대가 전소되지 않았기 때문에 온도변화에 많은 차이가 발생할 것으로 판단된다.



(a) 5min 40sec



(b) 12min



(c) 14min



(d) 15min



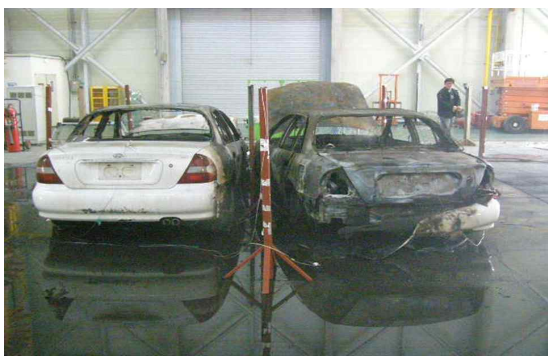
(e) 18min



(f) 28min 15sec

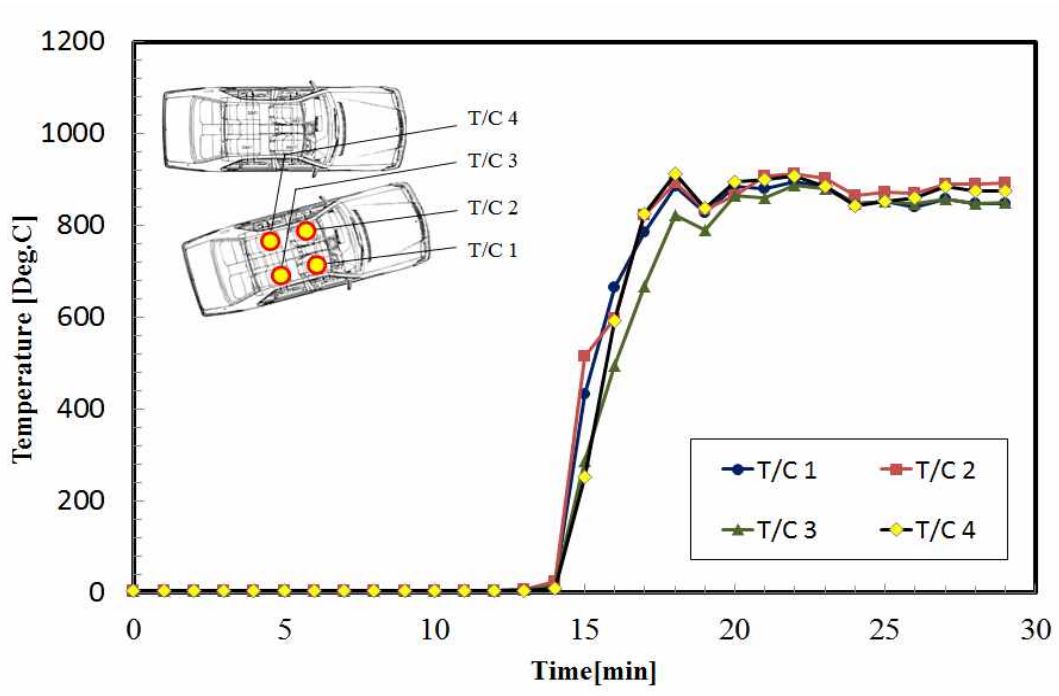


(g) 29min END

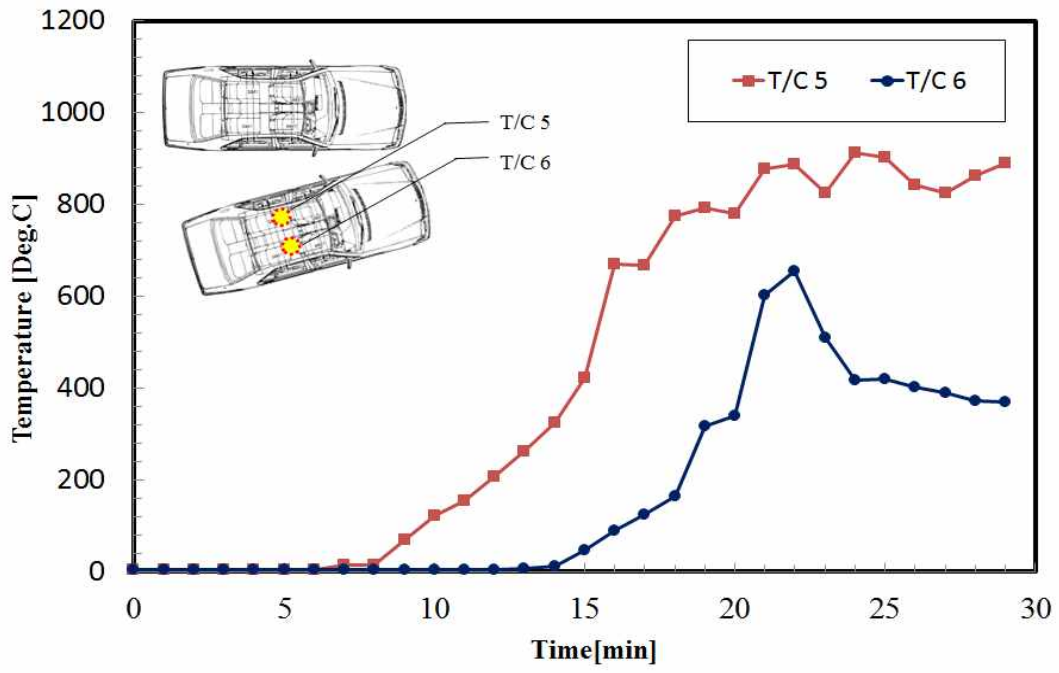


(h) 29min END

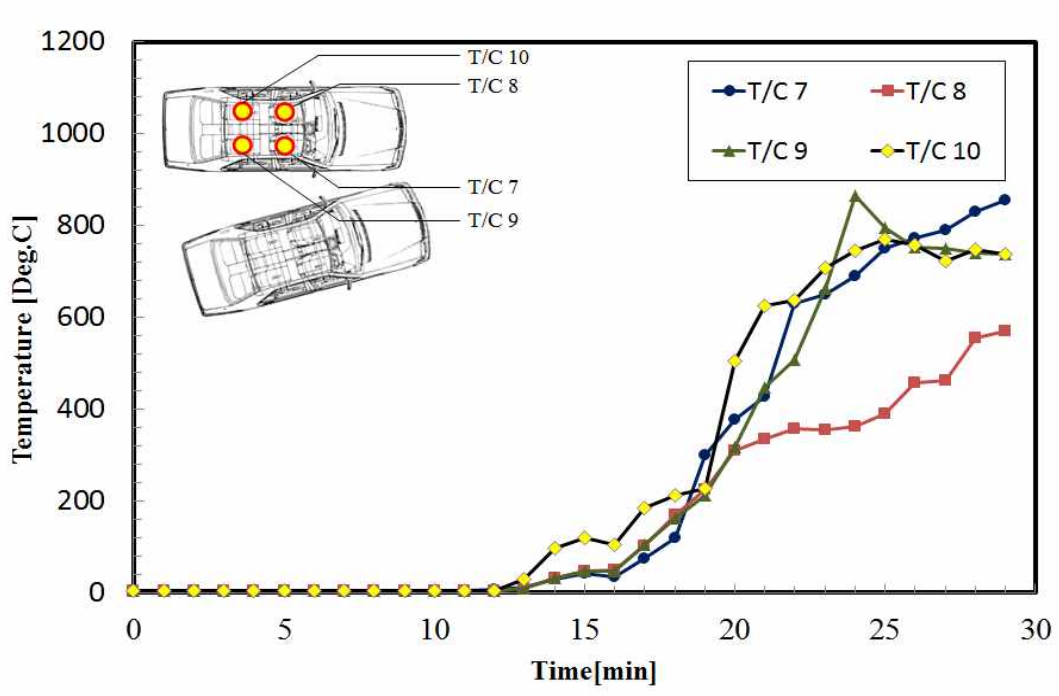
<그림 2.2.60> Burning experiment of 2 close vehicles



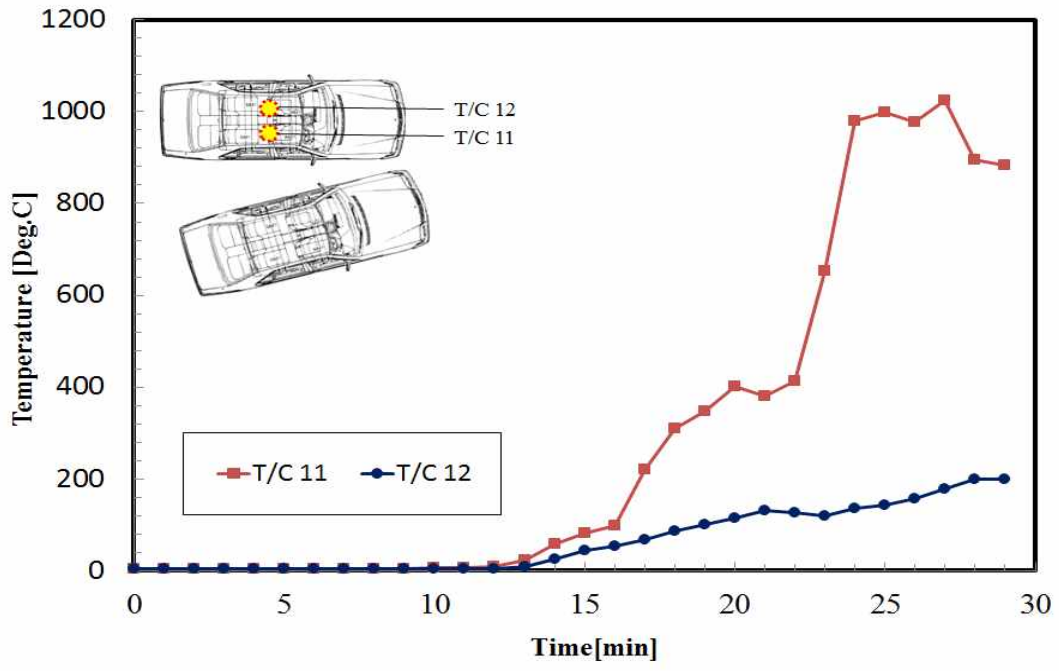
(a) 주차 차량 내부온도 측정결과



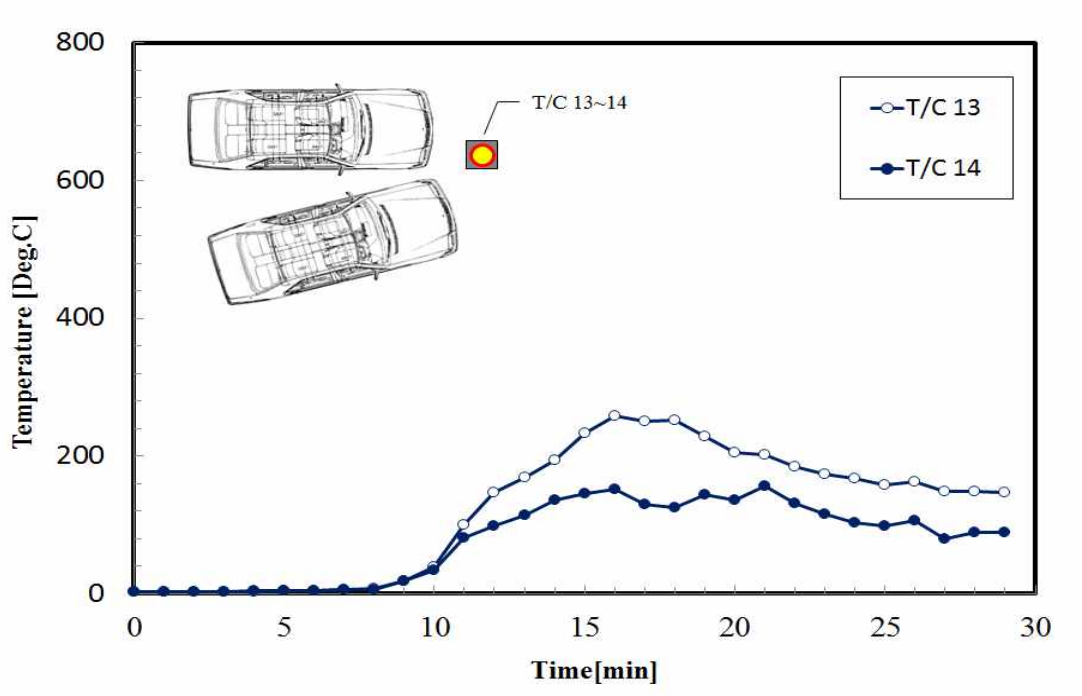
(b) 주차 차량 천정부 온도 측정결과



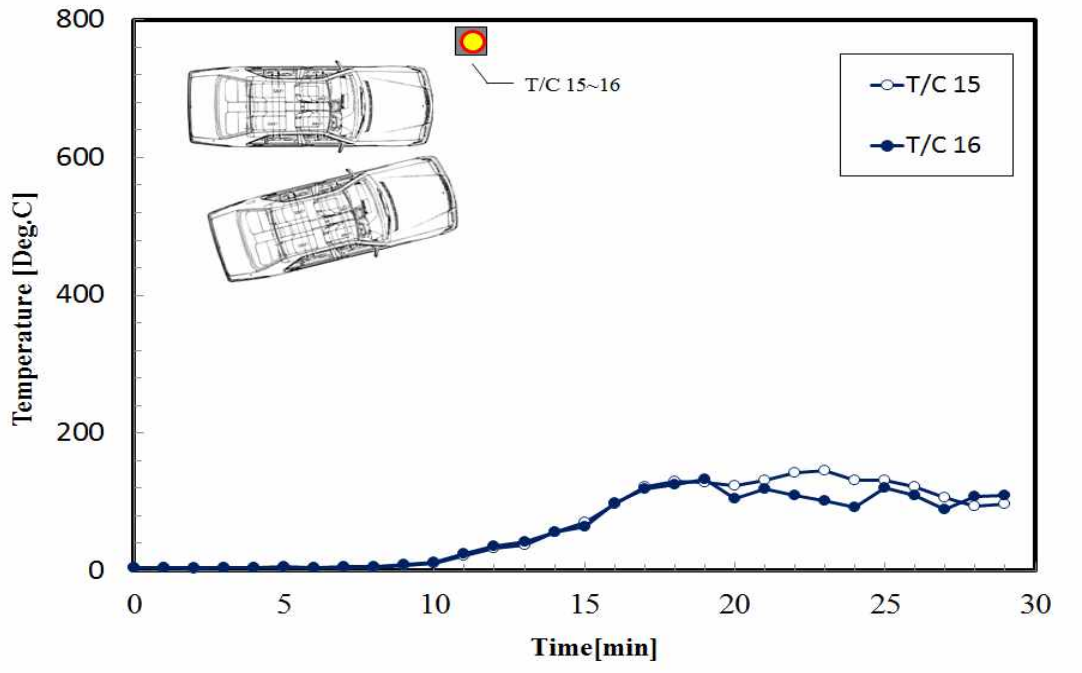
(c) 주차 차량 내부온도 측정결과



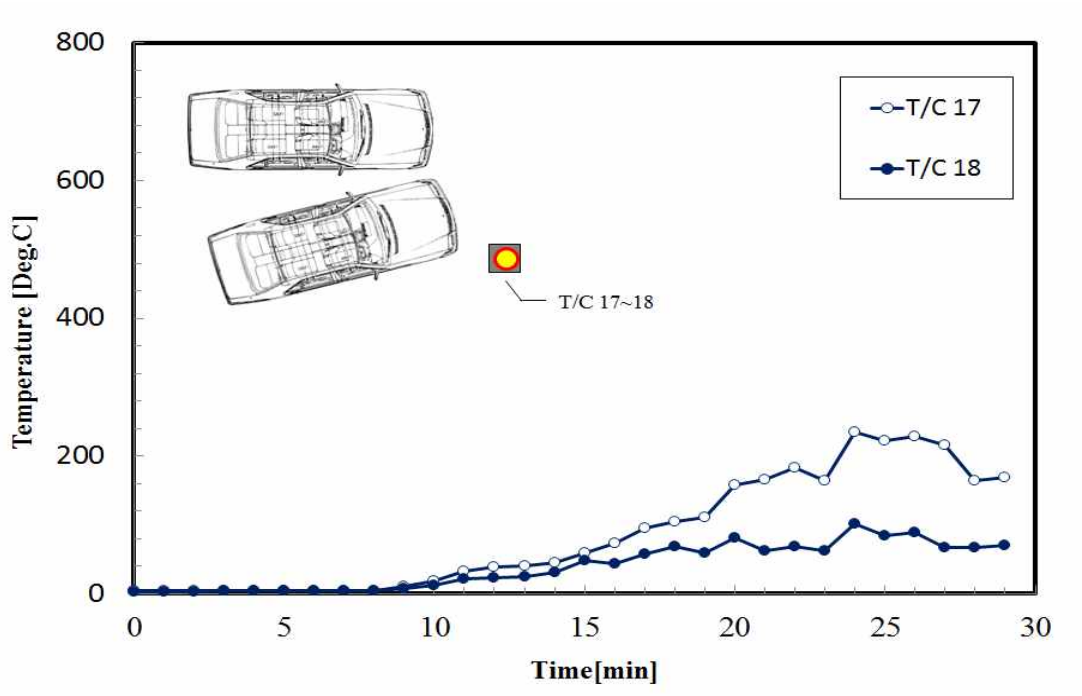
(d) 주차 차량 천정부 온도 측정결과



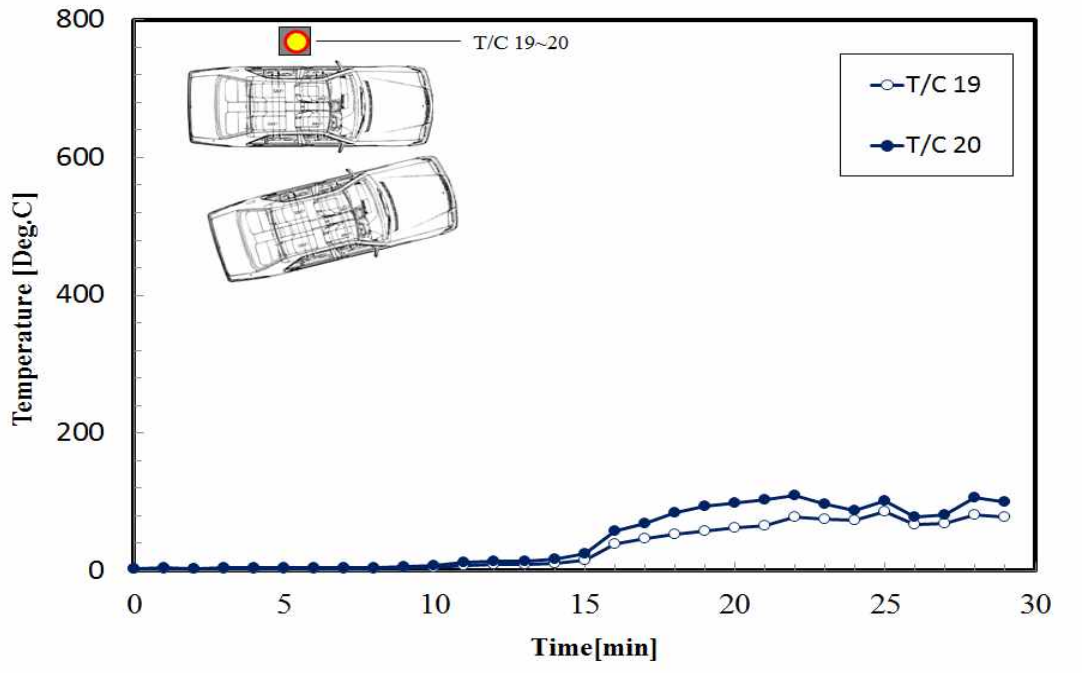
(e) 차량 전면부-1 높이별 온도 측정결과



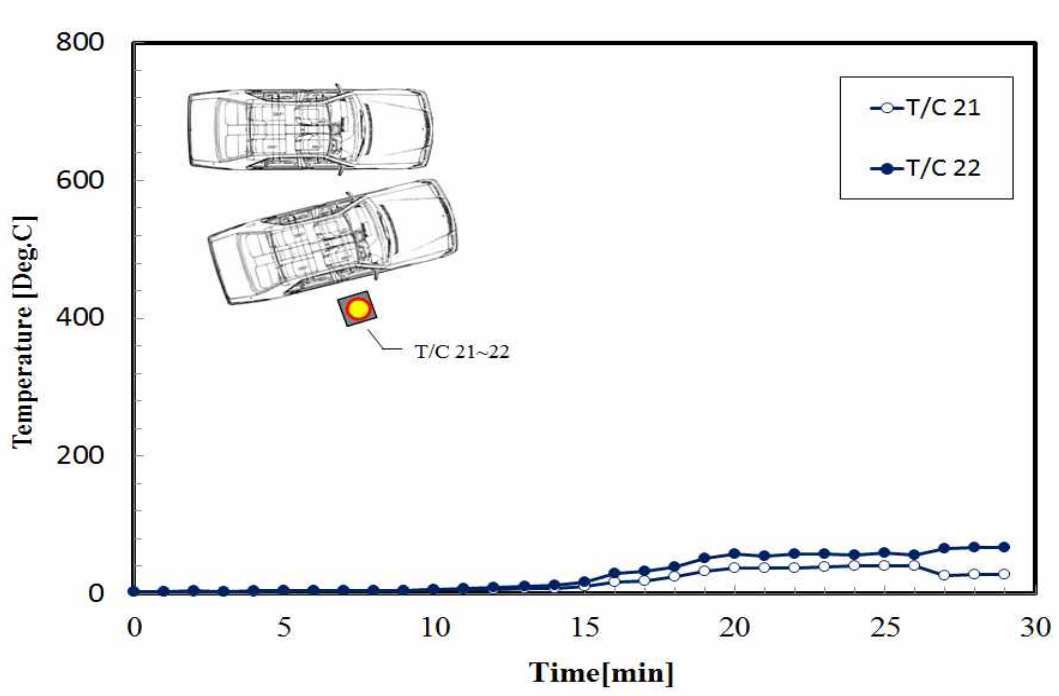
(f) 차량 좌측면부-2 높이별 온도 측정결과



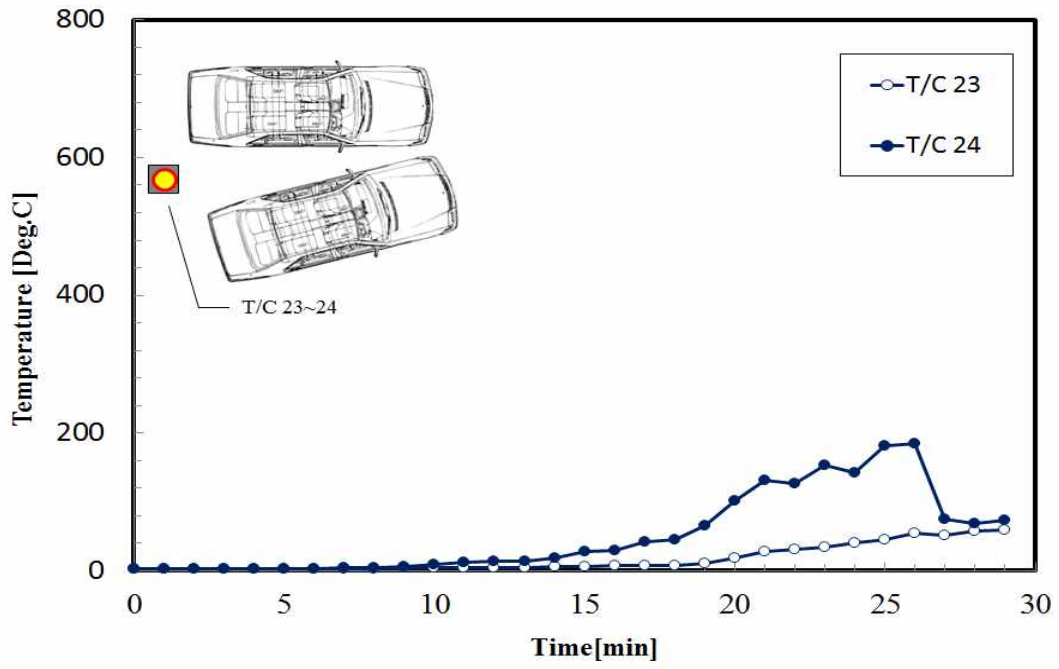
(g) 차량 우측면부-3 높이별 온도 측정결과



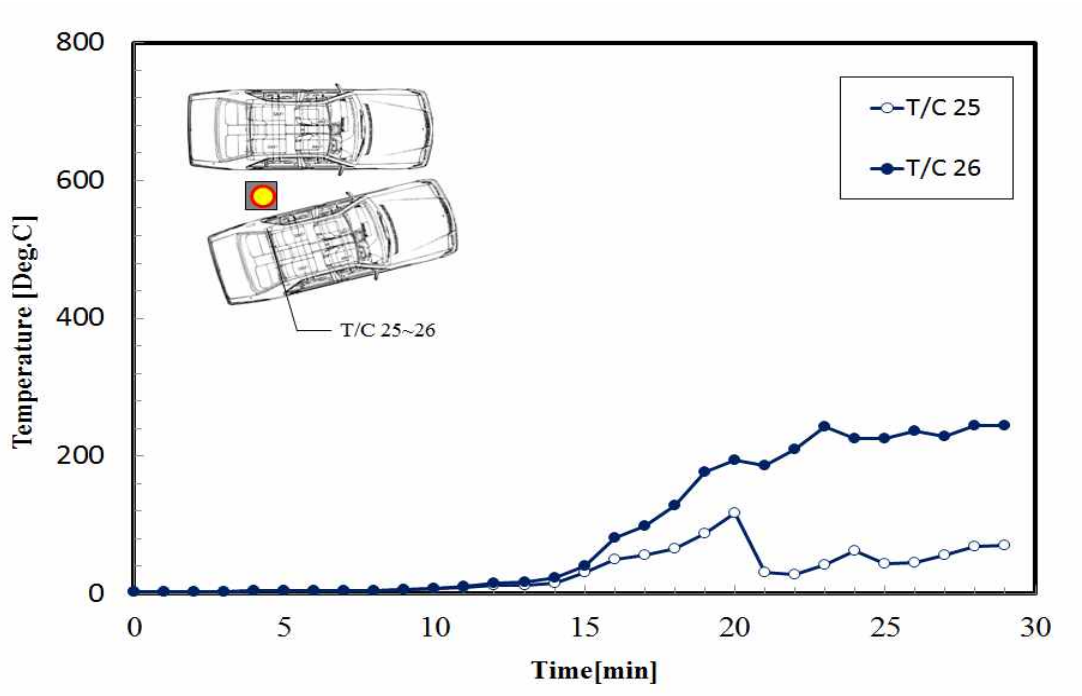
(h) 차량 좌측면부 높이별 온도 측정결과



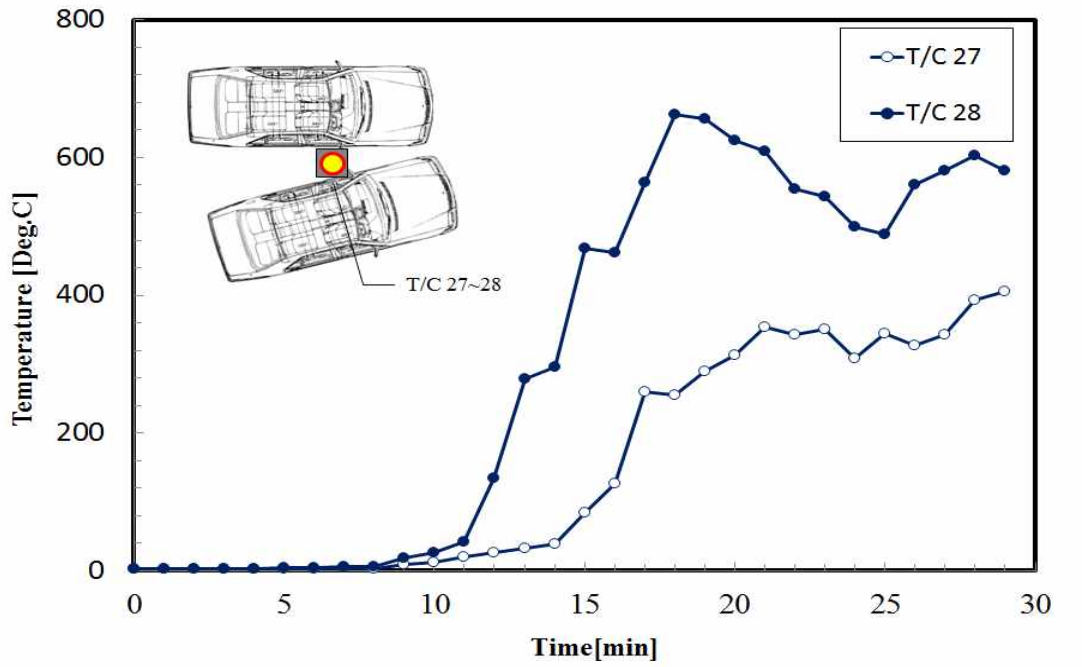
(i) 차량 우측면부 높이별 온도 측정결과



(j) 차량 후면부 높이별 온도 측정결과



(k) 차량 중앙부-1 높이별 온도 측정결과

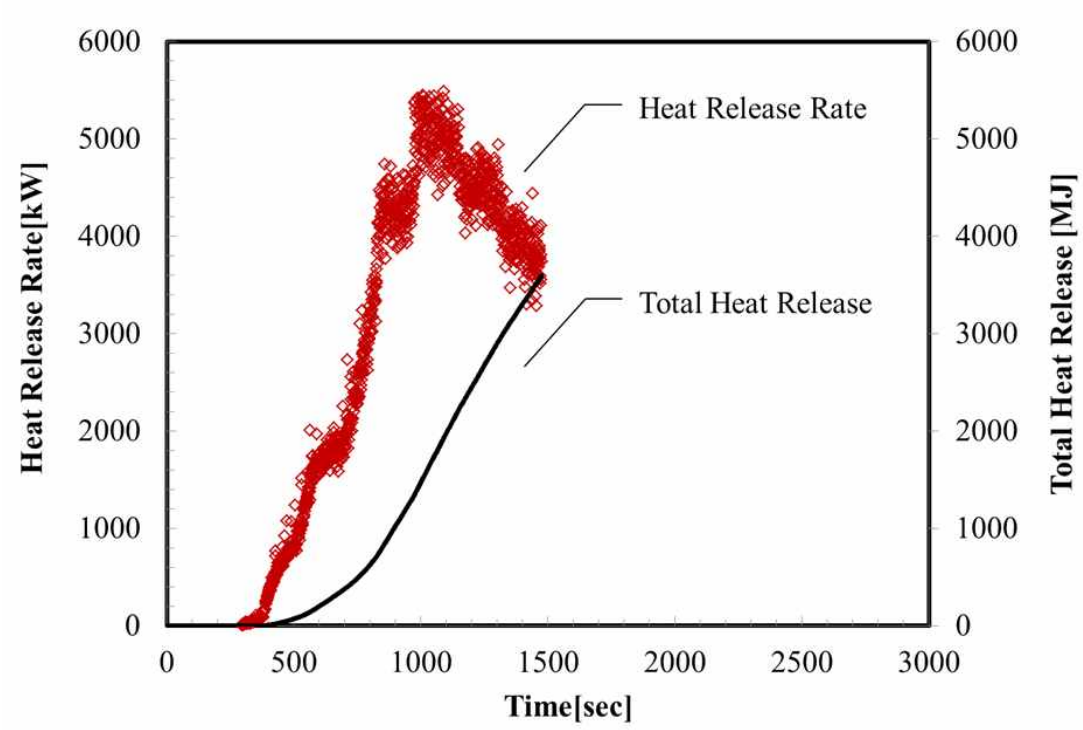


(l) 차량 중앙부-2 높이별 온도 측정결과

<그림 2.2.61> Temperature measurement result of 2 close vehicles

③ 인접된 중형승용차 2대의 연소 특성

인접된 중형승용차 2대의 열방출율 변화를 다음 <그림 2.2.62>에 나타내었다. 착화 이후 약 3분후부터 엔진부에서 화염이 분출되어 약 5분경 인접 차량에 화재가 전파되었다. 이 시점부터 HRR이 증가하기 시작하였으며 약 18분경 최대 값 5484kW가 계측되었다. 또한 총 발열량은 앞의 식 2.2.17을 이용한 결과 3592MJ이 나타났다. 중형승용차 1대보다 총 발열량이 낮은 이유로서 차량 2대에 대하여 연소시간이 29분으로 상대적으로 짧았으며, 2대의 차량 모두 전소하지 않았기 때문이다. 하지만 최대 Peak 값은 1.8MJ로 높게 측정되었다.



<그림 2.2.62> Heat release rate and total calorific value of mid-size vehicles burning experiment

(7) 차량 연소실험에 관한 고찰

주차장 공간에서 차량화재에 대한 안전성 확보를 위해 차량 연소실험의 Data Base 확보는 필수적이다. 이에 차량 종류별로 실물연소실험을 실시하였으며, 주차장 구조물의 주요 부재위치에서의 온도를 측정하였다. 연소실험 시 실제 주차장 구획을 설정할 수 없었으며, 이에 부재위치에서의 온도차가 있을 것으로 판단된다. 그러나 국내차량에 대한 연소실험 Data가 매우 미흡한 실정이며, 이에 따라 차량 연소실험 결과를 활용하여 주차장 구조물에 대한 내화성능 검토를 수행하고자 한다.

차량 연소실험에 대한 고찰로서 다음 4가지를 도출하였다.

첫째, 차량화재 시 화재성상(Fire Behavior)은 중요한 요소이다. 4종류의 차량연소실험에 대한 연소특성은 화원으로부터 착화이후 10분이내 차량의 유리창이 파손되며, 천정부로 화재가 확대되며 이 시점부터 온도가 급격히 상승하는 경향을 확인할 수 있었다.

또한, 화염높이(Flame Height)는 구조물 화재피해에 있어서 중요요소 중 하나이다. 차량 천정부에서 화재 발화시 주차장 구조물의 주요부재인 슬래브에 직접적인 화염에 노출이 된다고 판단된다. 주차장 슬래브 높이는 일반적으로 2.3m로 설계・시공되며, 연소실험 시 화염의 높이는 차량 천정부로부터 각각 2.5m 이상의 연속적인 화염높이가 측정되었다. 승용차, 승합차의 경우 전고가 각각 1.4m, 2m를 감안하면 총 화염의 높이는 각각 3.9m, 4.5m로 추산할 수 있다.

따라서, 주차장 슬래브의 높이 2.3m에 직접적인 화염의 노출로 인해 고온의 수열온도・박리 및 심각할 경우 폭렬피해 발생으로 주차장 구조물의 심각한 피해가 발생할 것으로 사료된다.

둘째, 차량화재 시 연소속도(Burning Rate)는 인접차량의 화재전파에 있어서 중요한 요소이다. 특히, 주차장 공간에서는 차량이 밀집된 구조를 형성하고 있으며, 이에 따라 차량에 대한 연소속도를 산정하는 것이 필요하다고 판단된다. 연소속도를 산정하기 위해 차량 연소후의 감소량이 필요하며, 연소 전 초기무게(Initial Weight)와 연소 후 무게(Post Weight Loss)를 통해 계산한다. 다음 차량연소에 대한 결과를 바탕으로 화재지속시간을 설정한다. 여기서 연소된 비율(Combustible Ratio)은 다음 식 2.2.18에 의해 계산이 가능하다. 또한, 연소속도는 다음 식 2.2.19에 의해 계산이 가능하며, 차량 종류에 따른 연소속도를 도출할 수 있다.

본 연구에서 진행된 차량과 1999년 프랑스 Schleich 등 과 2005년 일본 Masuda.H17) 등에 수행되었던 차량연소실험을 인용하여 다음 <표 2.2.38>에 국내・외의 차량연소실험에 대한 연소된 비율과 연소속도를 나타내었으며, 실험방법 및 조건에서 차이가 있을 것으로 판단된다. Table 에 표기된 (1～4)는 본 연구에 수행된 차량연소 결과이며, (5～9) 은 1990년식 유럽차량, 2000년식 (10～18)은 일본 차량이다. 국내・외의 차량의 연소속도 비교결과, 유럽차량의 연소속도가 가장 빠른 것을 확인하였으며, 차량의 크기가 클수록 연소속도가 빠르다는 것을 확인 할 수 있었다.

$$C_R = \frac{M_L}{T_M} \times 100 \qquad 2.2.18$$

C_R	:	연소된 비율 (%)	Combustible Ratio
M_L	:	감소량 (kg)	Mass Loss
T_M	:	총 중량 (kg)	Total Mass

$$B_R = \frac{M_L}{F_D} \qquad 2.2.19$$

B_R	:	연소속도 (kg/min)	Burning Rate
M_L	:	감소량 (kg)	Mass Loss
F_D	:	화재 지속시간 (min)	Fire Duration

셋째, 차량화재 시 발생되는 열 방출율은 화재피해에 있어서 중요한 요소이다. 화재강도와 비례되며, 화재규모 산정에 있어서 중요한 요소이다. 열 방출율은 질량에 따라 많은 차이를 나타내며, 차량의 경우 구성재료·재질에 따라 열 방출율이 다르기 때문에 국내 차량에 대한 열 방출율의 확보가 필요하다.

특히, 차량 구성품 중 내·외장재의 연소된 중량과 연소열을 도출하면 차량 종류에 관계없이 총 열 방출율을 추산할 수 있다. 연소열은 다음 식 2.2.20 로 계산이 가능하며, 이상의 도출된 연소열을 <표 2.2.38>에 나타내었다. 그 결과 한국차량의 경우 평균 25.22MJ/kg, 유럽차량의 경우 29.93MJ/kg, 일본차량의 경우 30.18MJ/kg로 도출되었으며, 국내·외 차량의 연소열은 25.22MJ/kg～30.18MJ/kg 범위에 있다는 것을 확인하였다.

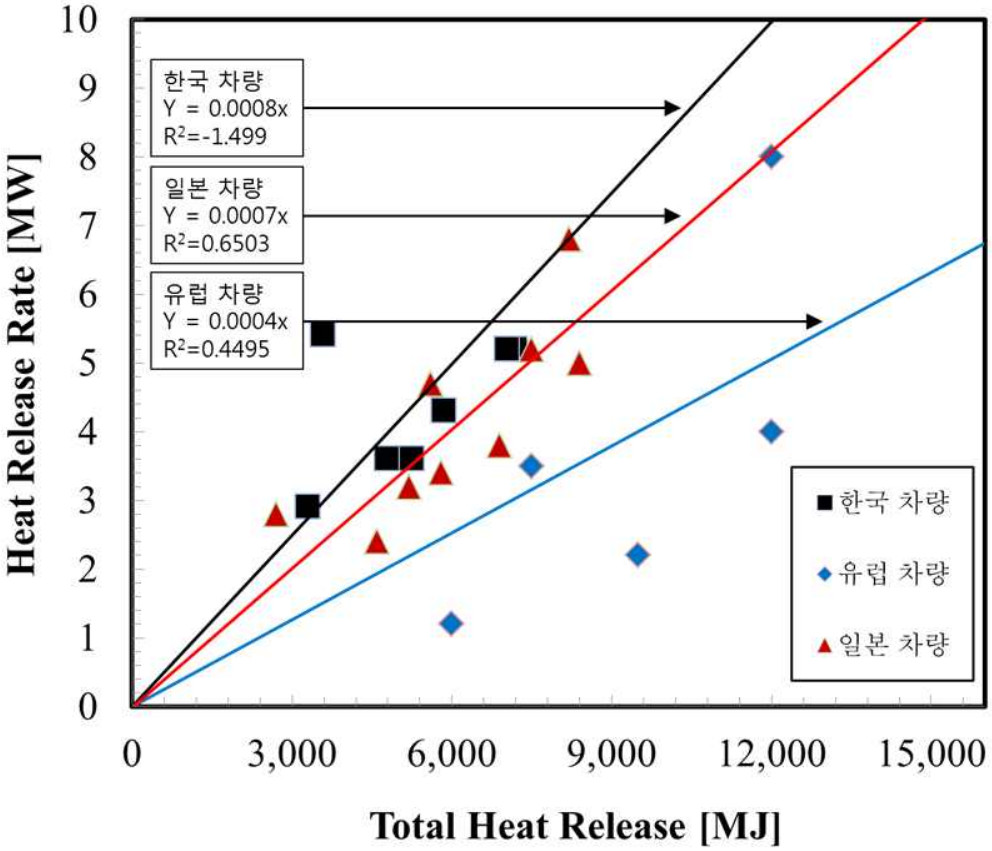
$$Hu = \frac{THR}{C} \qquad 2.2.20$$

Hu	:	연소열 (MJ/kg)	Heating of Combustion
THR	:	총 발열량 (MJ)	Total Heat Release
C	:	연소물량 (kg)	Combustibles

<표 2.2.38> Burning speed in domestic and foreign vehicle burning experiment

실험차량			가열전 중량 (kg)	가열후 중량 (kg)	감소량 (kg)	화재 지속 시간 (min)	연소된 비율 (%)	연소속도 (kg/min)
1	한국 차량1(2000cc)		1,254	1095	159	약 35	12.7	4.54
2	사고 가정 승용차	한국차량2	1,253	1100	153	약 25	12.2	6.12
		한국차량3	1,256	1150	106	약 25	8.4	4.24
3	한국 차량4(3000cc)		1,760	1470	290	약 47	16.5	6.17
4	한국 차량(승합차)		1,916	1610	306	약 37	16	8.27
5	유럽 차량1(경차)		850	650	200	약 30	23.5	6.66
6	유럽 차량2(1800cc)		1,000	750	250	약 25	25.0	10.00
7	유럽 차량3(2000cc)		1,250	930	320	약 35	25.6	9.14
8	유럽 차량4(3000cc)		1,400	1,000	400	약 35	28.57	11.42
9	유럽 차량5(승합차)		1,400	1,000	400	약 35	28.57	11.42
10	일본차량1(경차)		573	488	85	약 35	14.8	2.43
11	일본차량2(1800cc)		1,162	997	165	약 55	14.2	3.00
12	일본차량3(2000cc)		1,470	1,284	186	약 55	12.6	3.38
13	일본차량4(3000cc)		1,660	1,426	234	약 60	14.1	3.90
14	일본차량5(3000cc)		1,728	1,490	238	약 60	13.8	3.97
15	일본차량6(5600cc)		1,716	1,434	282	약 70	16.4	4.03
16	일본차량7(4WD)		1,742	1,542	200	약 50	11.5	4.00
17	일본차량8(4WD)		1,704	1,471	233	약 65	13.7	3.58
18	일본차량9(승합차)		1,428	1,234	194	약 50	13.6	3.58

또한, 본 연구에 진행된 차량연소 데이터 및 유럽, 일본의 차량 연소 데이터와 한국건설기술연구원에서 수행되었던 승용차 1대, 승합차 2대(표 2.2.38에서 5~7)를 추가하여 다음 <그림 2.2.63>과 같이 열 방출율과 총 발열량의 회귀분석을 나타내었다. 그 결과, 한국차량 Y=0.008x, 유럽차량 Y=0.007x, 일본차량 Y=0.004x 으로 도출되었다.



<그림 2.2.63> Relations of heat release rate and total calorific value of domestic and foreign vehicle

넷째, 차량화재 시 화재강도에 따라 화재규모와 구조물의 피해가 결정된다. 화재강도는 화재온도 상승계수를 고려하여 가열곡선으로 나타내며, 국내 내화기준에 적용되는 표준가열곡선 (ISO 834 및 KS F-2257)은 다음 식 2.2.21로 작성되고 있다.

$$T_{f.ISO} - T_{\infty} = 345\log_{10}(8t/60+1) \approx 460t^{1/6} \qquad 2.2.21$$

식 3.5에서 460이 의미하는 내용은 화재온도 상승계수를 뜻하며, 시간 t1/6 에 의해 화재강도가 설정된다. 여기서 구획내부의 화재온도는 다음 식 2.2.22와 같다.

$$T_f - T_{\infty} = \alpha t^{1/6} \qquad 2.2.22$$

또한, 위 식 2.2.22는 다음 식 2.2.23과 같이 변환할 수 있으며, 이는 화재온도 상승계수의 기울기 값을 도출할 수 있다.

$$\alpha = \frac{T_f - T_\infty}{t^{1/6}} \qquad 2.2.23$$

T_∞ 외기온도(20℃)

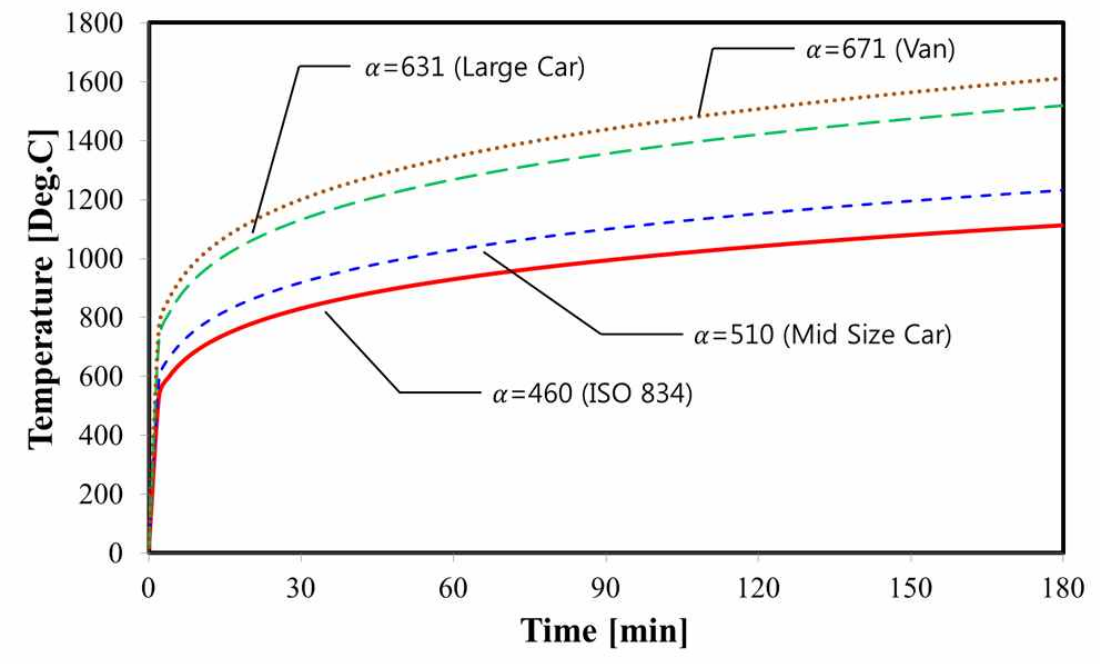
T_f 화재 시 최고온도 (℃)

t 화재 개시시간 (sec)

이러한 화재온도 상승계수를 도출하여 주차장 구조물의 내화성능 검토를 수행하고자 하였으며, 다음의 식 2.2.23을 이용하여 다음 <표 2.2.39>와 같이 도출할 수 있었다. 최고온도는 차량 전체에서 1200℃ 이상의 온도가 측정되었으나, 측정 장비인 K-Type 의 신뢰할 수 있는 온도인 1200℃로 일괄적으로 설정하였다. 또한, 시간설정은 일본건축학회 『耐火設計のための局所火源を考える에서 제시하고 있는 화재개시시간 (50kW이상)으로 설정하였다. 그 결과, 다음 <표 2.2.38>과 같이 각각 차량에서의 중형승용차 511, 대형승용차 631, 승합차 671의 화재온도 상승계수가 도출되었으며, 이를 차량화재 가열곡선 ($T_f - T_\infty = \alpha t^{1/6}$)으로 나타내면 다음 <그림 2.2.64>와 같이 나타낼 수 있다.

<표 2.2.39> Result value and fire temperature rise coefficient in combustion of vehicle

항목	50kW이상 측정시간 (sec)	최고온도 (℃)	화재온도 상승계수 (α)
중형승용차	150	1200	511
대형승용차	45	1200	631
승합차	27	1200	671



<그림 2.2.64> Vehicle fire curve by using fire temperature rise coefficient

각 차량에 대한 차량화재 곡선을 작성한 결과, 국내에서 적용되고 있는 표준화재 가열곡선보다 높은 화재규모로 나타났다. 본 연구의 차량연소실험은 실험장비의 안전성을 고려하여 연료제거, 공기압제거를 하였다. 또한, 차량의 제원은 2000년에 제조된 차량으로서 최근 제조되고 있는 경량화 재료로 구성된 차량이 아니다. 하지만 본 실험의 결과만으로도 차량화재의 경우 일반 건축물화재보다 열 방출율이 높은 것으로 확인되었으며, 실제 주차장에서 화재발생시 인접차량으로 화재가 전파되어 화재규모는 더욱더 높을 것으로 사료되며, 이에 따라 국내에 적용되고 있는 내화성능에 대하여 차량화재에 대한 주차 공간 구조물의 내화성능 재검토가 필요할 것으로 판단된다.

다. 차량화재의 열방출율 모델화 및 DB구축

(1) 열 방출율의 모델화 방법

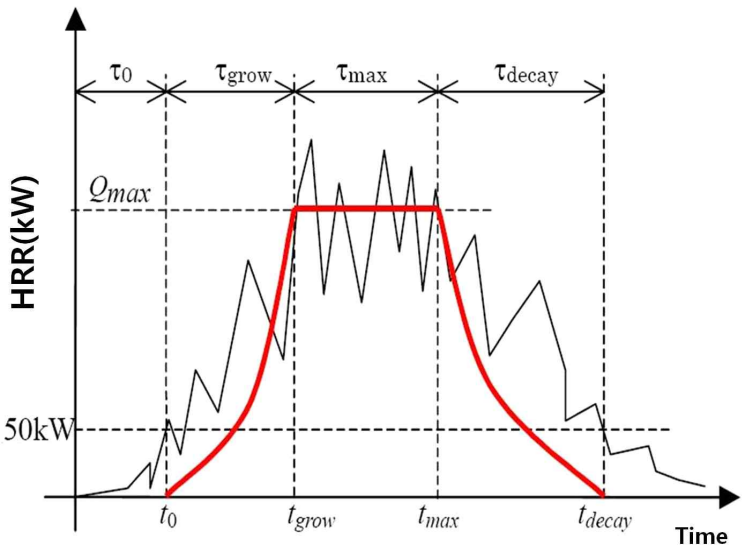
국내의 차량화재에 대한 연구는 미비하기 때문에 기초적인 Data 확보와 국내 차량화재에 대한 DB 구축이 필요하다. 이에 본 장에서는 2005년 일본건축학회에서 내화설계를 위해 제시하고 있는 열 방출율의 모델화 방법을 이용하여 국내 차량화재에 대한 모델화를 제시하고자 한다.

일반건축물에서 화재는 점화 이후, 훈소 기간, 성장 기간, 정상 기간, 감쇠 기간으로 4단계로 구분할 수 있으며, 주차공간도 일반건축물 공간에 포함된 공간으로서 일반건축물과 동일하다고 판단한다.

화재의 4단계는 다음 <표 2.2.40>과 같이 나타낼 수 있으며, 다음 <그림 2.2.65>의 형상과 같이 열방출율 곡선의 모델화가 가능하다.

<표 2.2.40> Changing pattern of fire

구분	화재시점	내용
1단계	훈소기간 (τ_0)	발화 후, 연소가 성장하기 시작할 때까지의 훈소상태의 기간 ($0 \sim t_0$)
2단계	성장기간 (τ_{grow})	연소가 성장하기 시작하여 최대 연소에 도달할 때까지의 기간 ($t_0 \sim t_{grow}$)
3단계	정상기간 (τ_{max})	최대 발열 속도 상태로 정상 연소하는 기간 ($t_{grow} \sim t_{max}$)
4단계	감쇠기간 (τ_{decay})	연소가 감쇠하기 시작하고 화염이 소멸 될 때까지의 기간 ($t_{max} \sim t_{decay}$)



<그림 2.2.65> Modeling of heat release rate curve

또한, 모델화된 열 방출율에서 화재성장율 (Fire growth rate)은 α는 다음 식 2.2.24와 같이 도출할 수 있으며, <그림 2.2.64>의 τ decay 와 같이 화재가 감쇠하는 기간에서의 감쇠율 α d(최대 열 방출율으로부터 화염이 소멸될 때까지의 2차 곡선은 다음 식 2.2.25와 같이 도출할 수 있다.

$$a = Q_{\max}/(t_{grow} - t_0) = Q_{\max}/\tau_{grow}^2 \quad 2.2.24$$

$$a_d = Q_{\max}/(t_{decat} - t_{\max}) = Q_{\max}/\tau_{decay} \quad 2.2.25$$

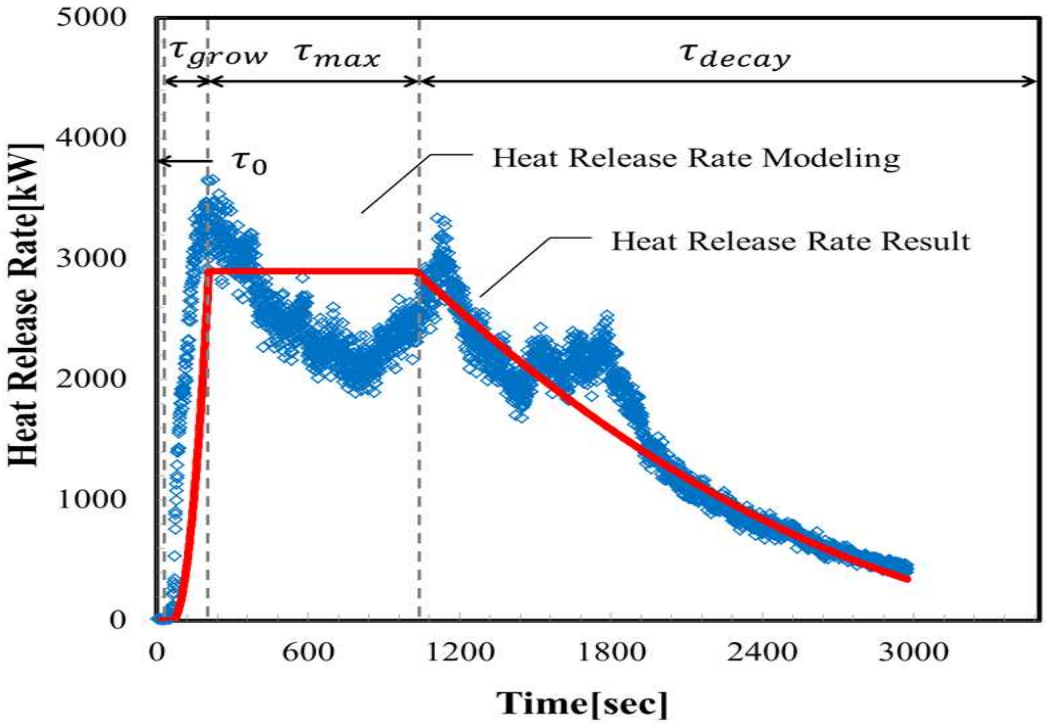
(2) 차량연소실험을 이용한 열 방출율의 모델화

차량화재의 성상은 열 방출율이 크게 상승하는 시점이 2부분(전면부, 후면부)으로 분류되며, Qmax의 시점을 선정하는데 어렵다. 이에 따라 본 연구는 15분 이내 화재가 급격히 성장하는 것을 고려하여 화재성장율 α 를 15분 이내 Qmax 로 선정하였으며, 차량연소 실험결과를 모델화하기 위하여 차량 연소 결과를 이용하여 화재의 변화 패턴의 시점과 화재성장율 α를 다음 <표 2.2.41>에 나타내었다.

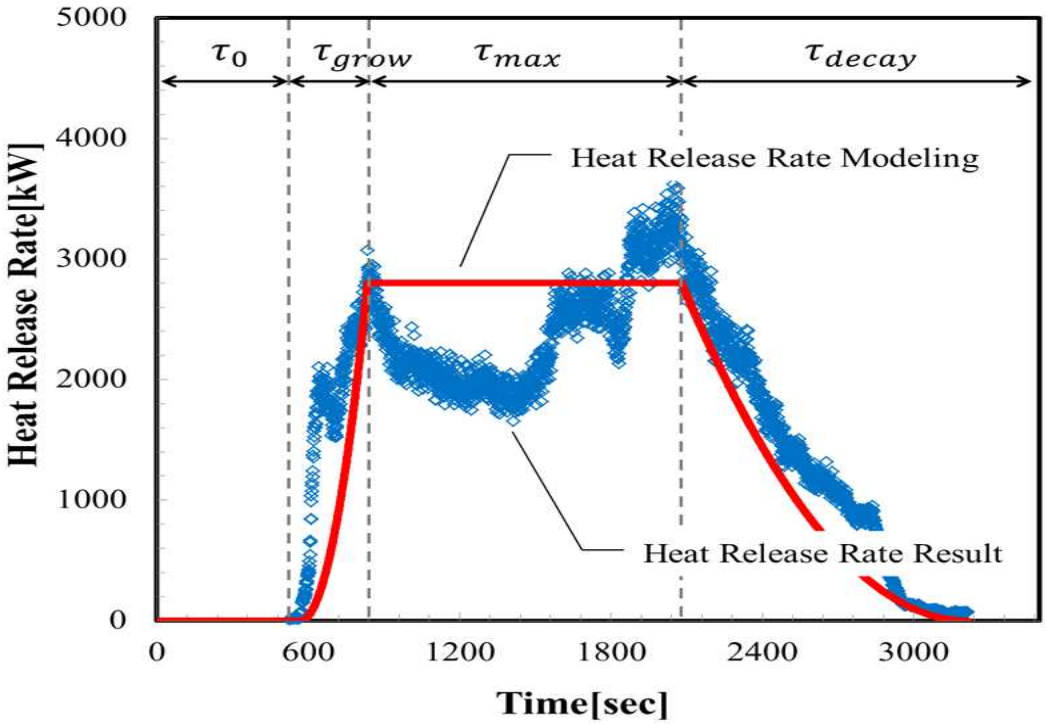
<표 2.2.41> Conbustion reults

구분	중형 승용차	대형 승용차	승합차
τ_0 [s]	60	568	10
τ_{grow} [s]	146	835	850
τ_{max} [s]	820	2,080	1,495
τ_{decay} [s]	2,975	3,214	2,919
Q_{max} [kW]	2,900	3,200	4,379
THR [MJ]	5,277	4,793	5,859
α [kW/sec^2]	0.153453	0.004589	0.003087

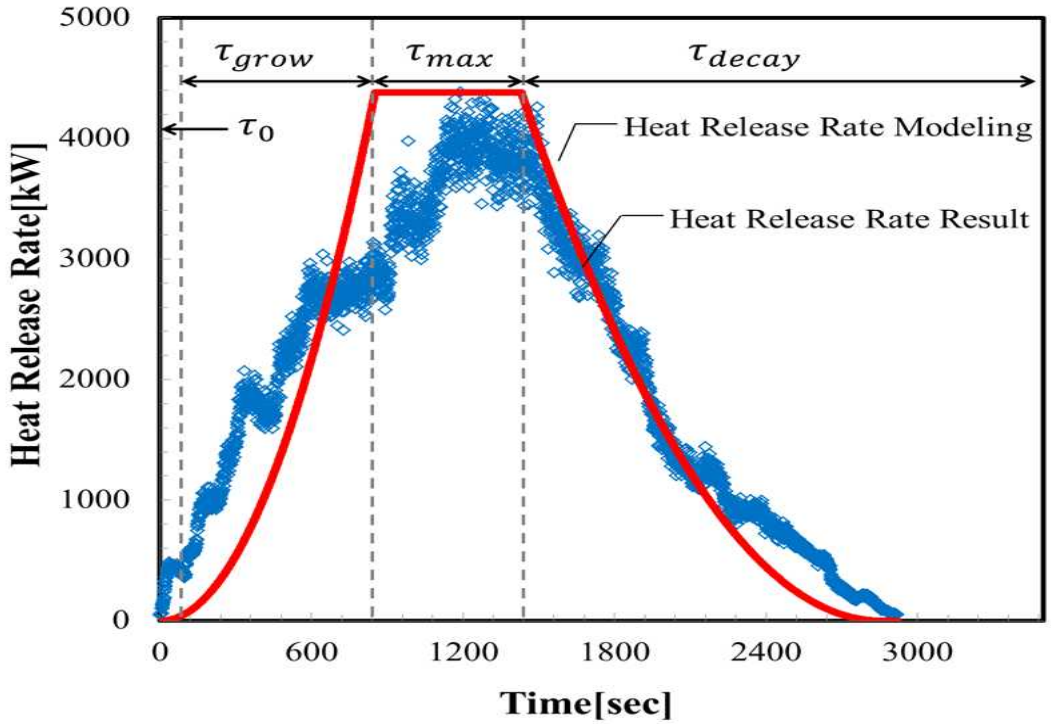
이러한, 차량화재의 열방출율 모델화는 실험값과 모델 값의 총 발열량을 계산하여 열방출율 면적의 오차 값이 10%내 범위에 있도록 설정하였으며, 이에 대한 각 차량별 모델화를 다음 <그림 2.2.66>에 나타내었다.



(a) 중형승용차 모델링



(b) 대형승용차 모델링



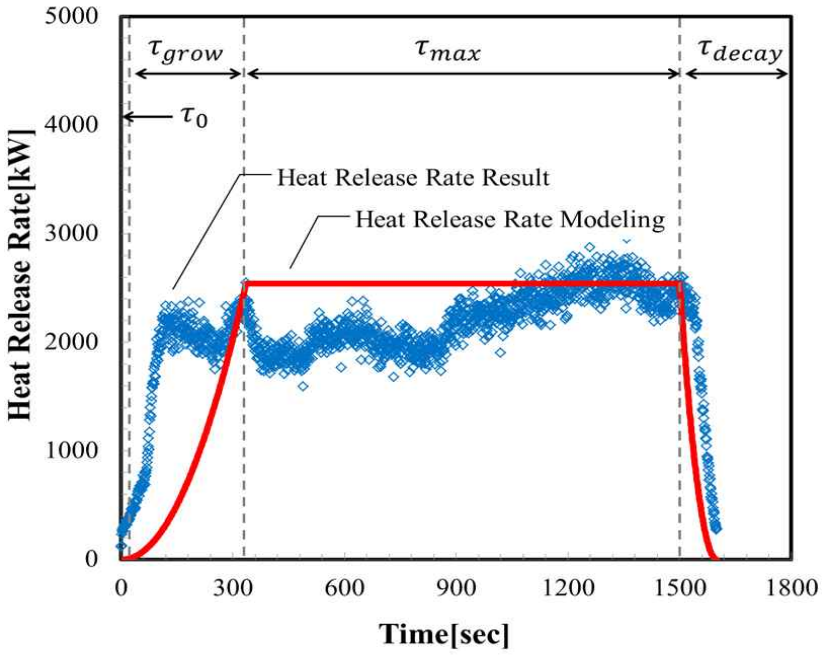
(c) 승합차 모델링

<그림 2.2.66> Fire modeling for each vehicle

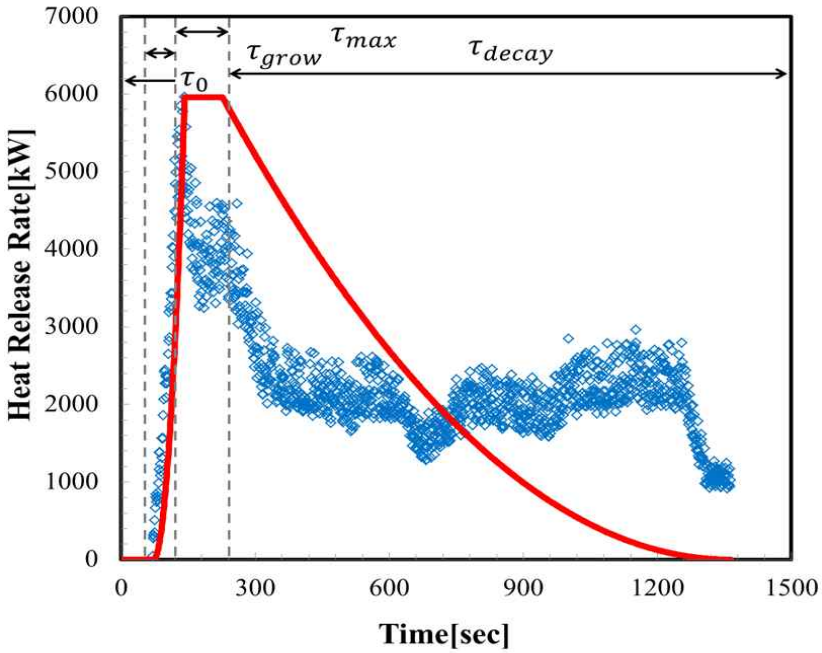
또한, 전술한 바와 같이 한국건설기술연구원의 차량연소실험 데이터를 인용하여 다음 <표 2.2.42>와 같이 도출하였으며, 차량별 화재 모델링의 그래프를 다음 <그림 2.2.67>에 나타내었으며, 국내 차량의 열방출율 대한 기초적인 자료로써 제시한다.

<표 2.2.42> Data base for vehicle fire modeling of Korea Institute of Construction Technology

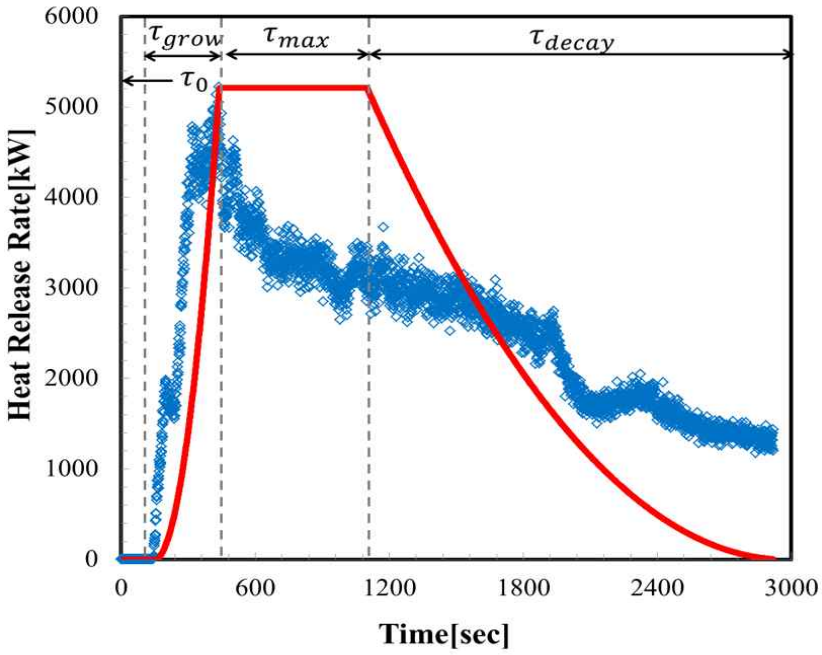
구분	중형승용차	승합차	승합차
τ_0 [s]	1	72	148
τ_{grow} [s]	334	70	291
τ_{max} [s]	1,165	85	661
τ_{decay} [s]	100	1,137	1,880
Q_{max} [kW]	2,541	5,956	5,213
THR [MJ]	3,327	2,902	7,218
α [kW/sec^2]	0.022642	0.295399	0.027049



(a) 중형승용차 모델링



(b) 승합차 모델링



(c) 승합차 모델링

<그림 2.2.67> Fire modeling for each vehicle of Korea Institute of onstruction Technology

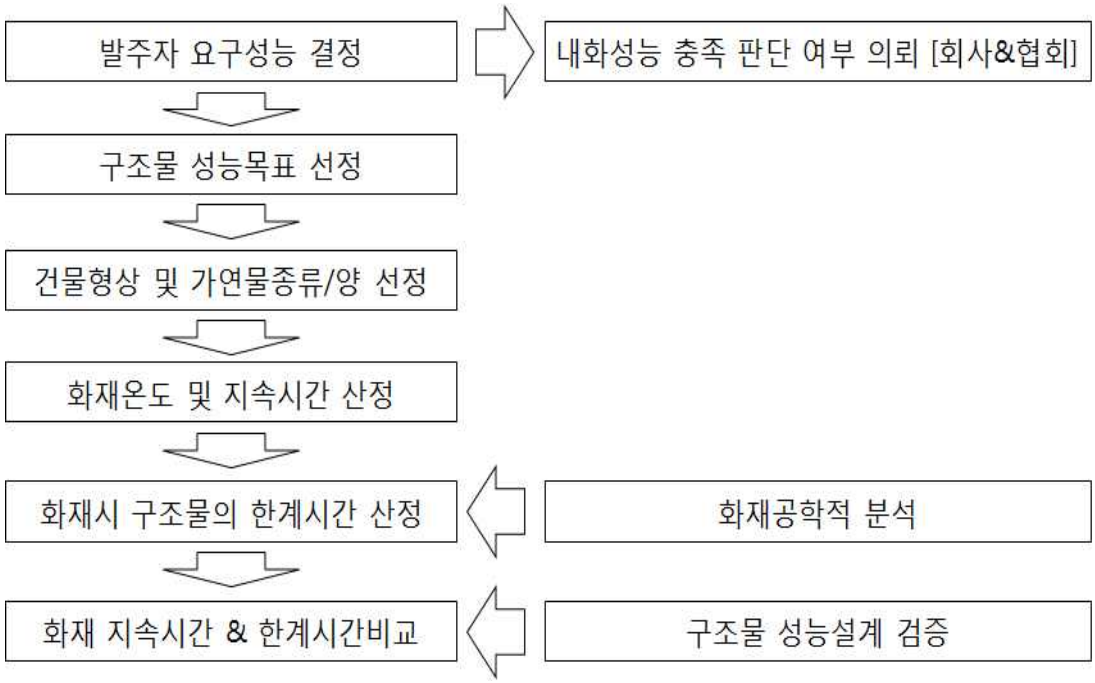
라. 주차장 구조물의 내화기준 재검토

(1) 국외 주차장 구조물의 내화설계 규정 현황

(가) 일본

일본의 경우 다음 <그림 2.2.68>과 같이 2000년 개정된 건설성고시 1433호의 『내화성능검증법』의 이론적 근거를 통하여 구조물의 성능내화설계를 실시하고 있다.

성능설계를 위해 발주자의 요구 성능에 따라 시행되며, RC 콘크리트 부재는 고온에 노출시 폭렬 및 열응력으로 인한 문제가 발생하기 때문에 이를 성능설계에 대하여 대체하고 있는 경우가 있다. 한편, 제시된 내화설계를 위한 수식은 실험과 이론을 고찰한 결과로 제시하고 있으며, 국내에서도 면밀한 검토를 통해 국내의 성능설계 프로세스가 필요하다고 판단된다.

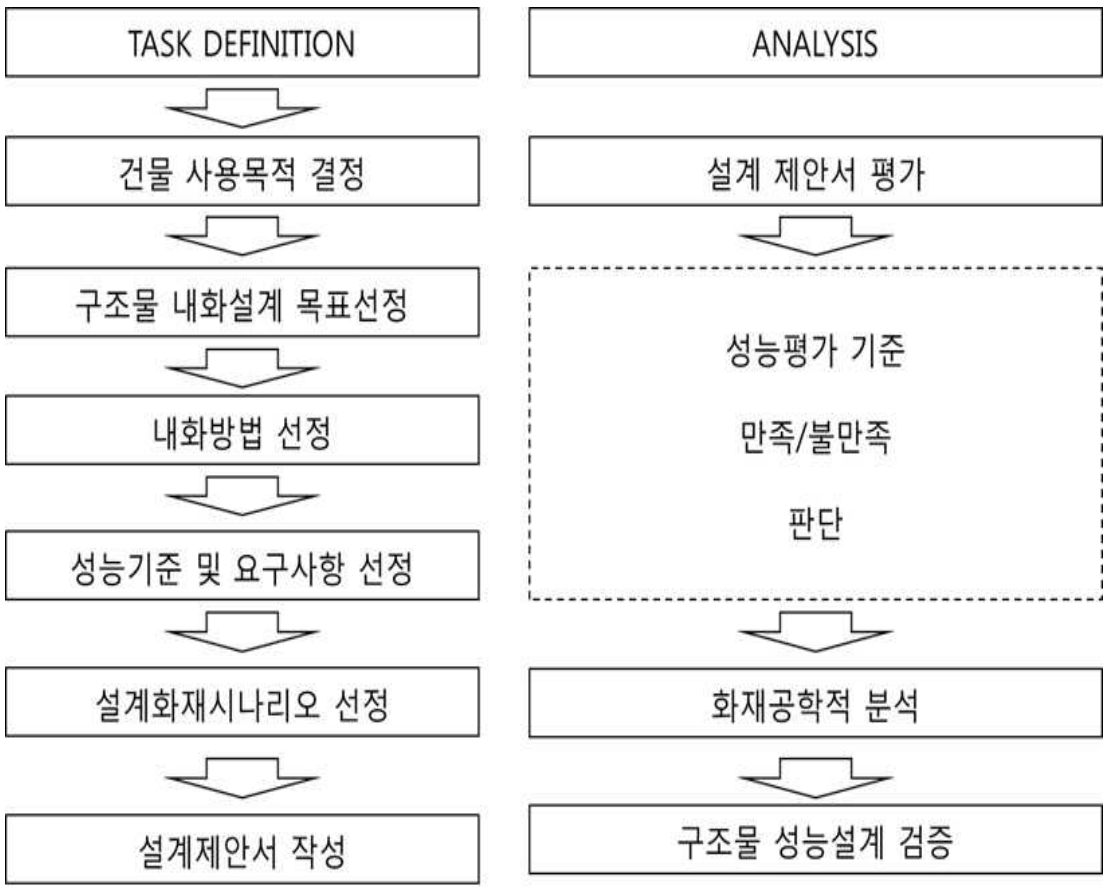


<그림 2.2.68> Performance design process of Japan

(나) 영국

영국의 성능설계 프로세스는 The Building Regulations 200025)에서 <그림 2.2.69>와 같이 제시하고 있다. 주요 내용은 실험을 통한 회귀분석을 수행하여 내화성능 예측식을 도출하였다. 이러한 예측식은 BS 5950과 BS 7974에서 활용되고 있으며, 영국에서 시행하고 있는 성능설계에 대한 기준은 건물높이에 대한 조건, 일반 건축물의 환기계수 및 개구부 조건을 고려하지 않아서, 이에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

또한, BS 7974에서는 특수한 대상의 건축물 공간에서 차별화된 설계법으로써, 대책 방안을 제시하고 있다. 국내의 경우, 고강도콘크리트에 대한 설계법이 제안되고 있으나, 국내 건물에 맞는 기초적인 DB가 부족하다. 이에 따라 기초적인 DB 구축을 통해 성능설계 프로세스를 구축하는 것이 필요하다고 사료된다.

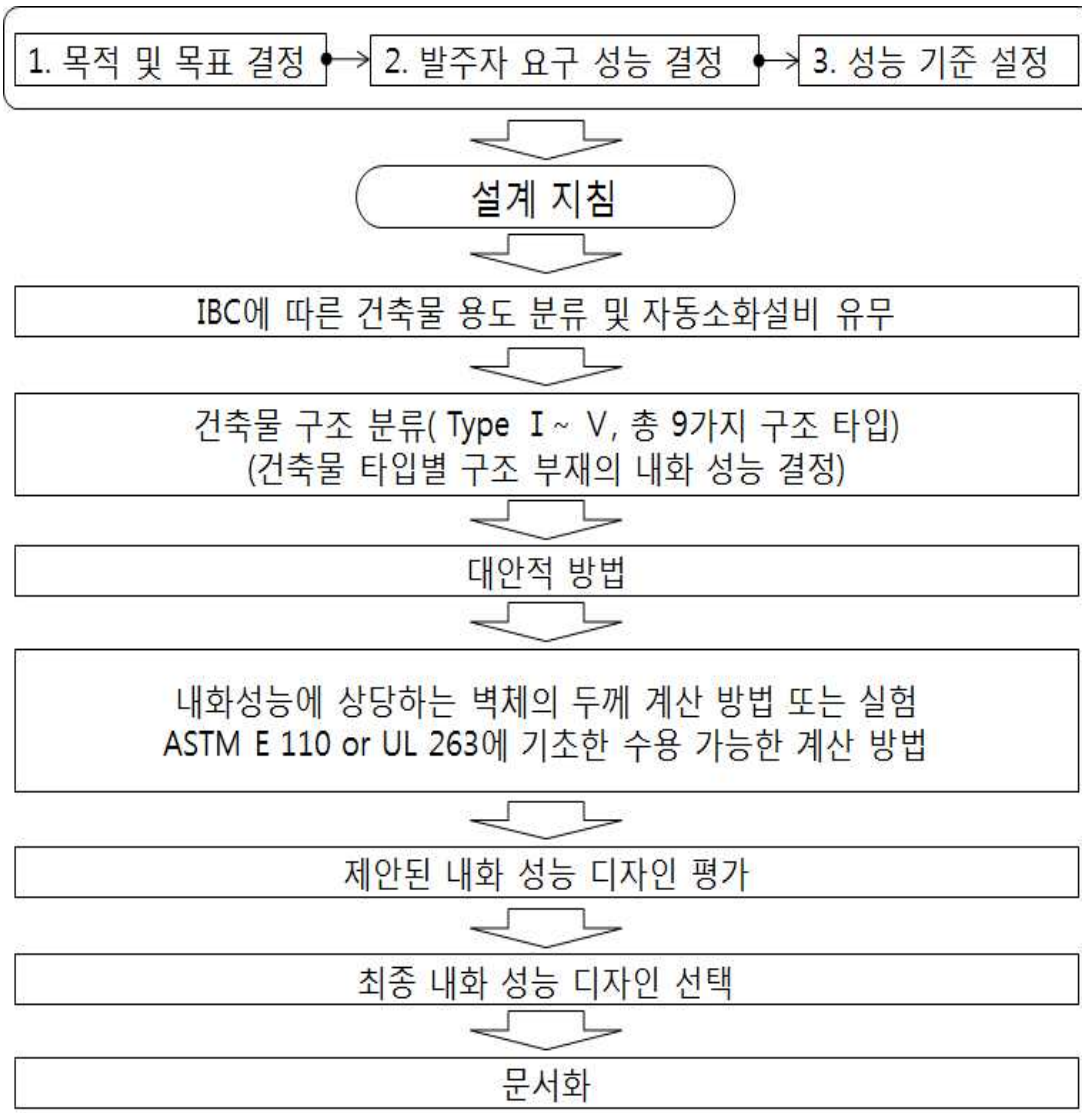


<그림 2.2.69> Performance design process of UK

(다) 미국

미국의 성능설계 프로세스는 <그림 2.2.70>, <그림 2.2.71>과 같다. 미국에서는 일반적으로 IBC 2012와 NFPA 5000을 사용하며, 미국 각각의 주에서 필요한 코드를 사용하고 있다. 코드는 일반적으로 사양적 설계기준으로 기초적인 구조물 부재에 대한 실험을 통해 설계법을 구축하였다.

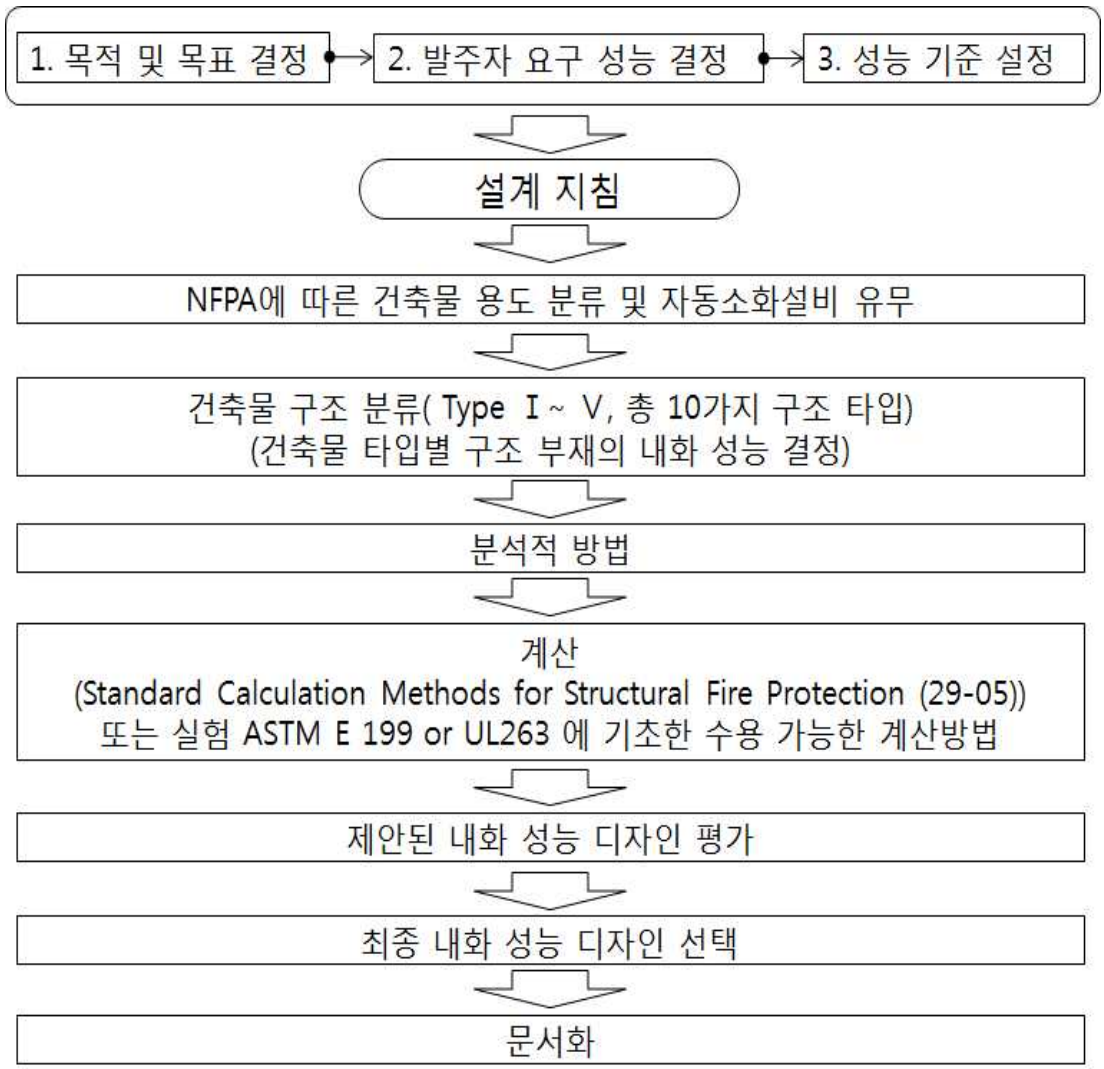
반면, 건축물의 층수 및 개구부 조건에 대한 부분은 검토되지 않고 있으며, 용도별 특성에 따른 면밀한 검토가 필요하다고 판단된다.



<그림 2.2.70> IBC Performance design process of US

또한, IBC 2012와 NFPA 5000는 평가에 대한 기준이 동일하게 사용하고 있다. 그 항목으로서는 건축물 용도와 구조부재에 대한 특성을 고려하고 있으며, 설계지침에 따라 수행하고 있다.

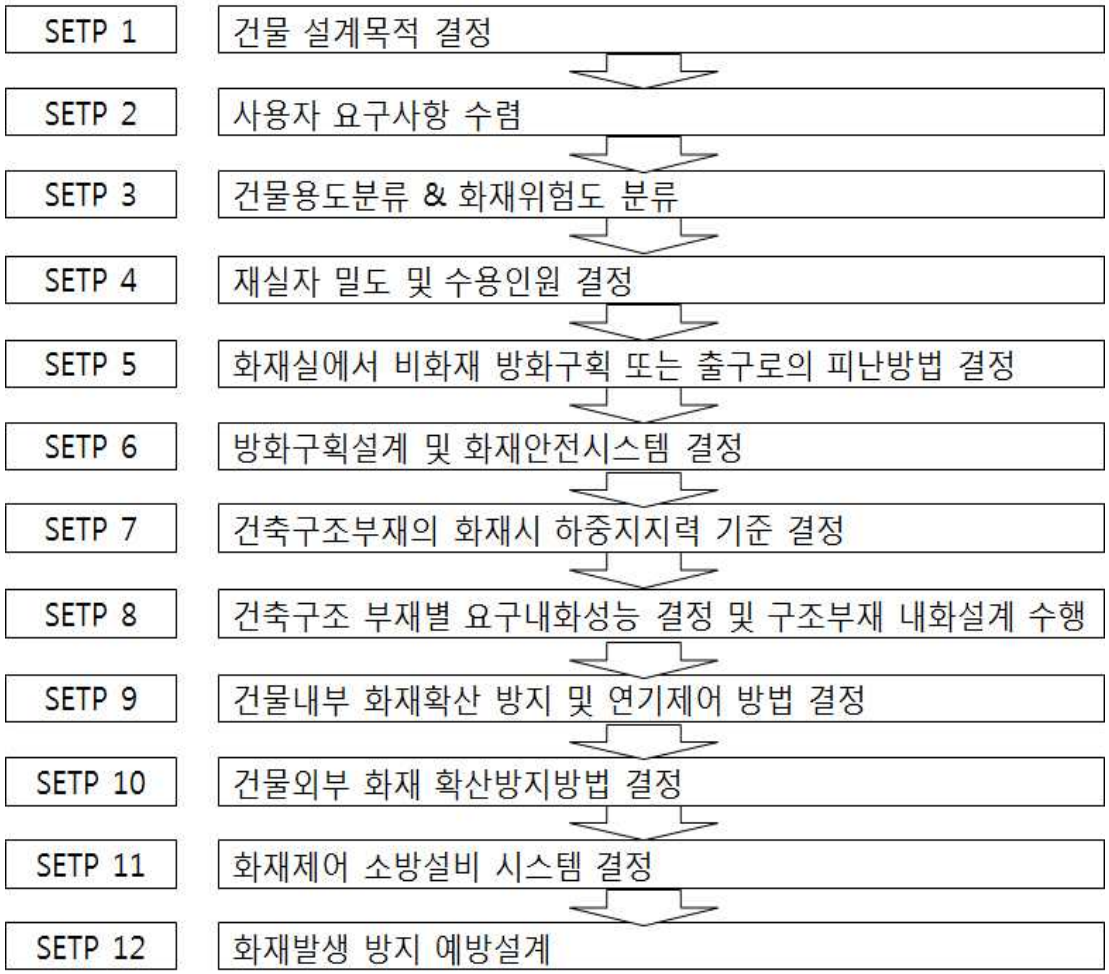
한편, 국내에서 적용되고 있는 내화성능은 용도, 층수, 면적, 부재에 대하여 내화성능 확보시간을 요구하고 있으나, 미국과 같은 구조 분류를 통하여 세분화된 내화성능 평가가 필요하다고 판단된다.



<그림 2.2.71> NFPA Performance design process of US

(라) 뉴질랜드

뉴질랜드의 성능설계 프로세스는 <그림 2.2.72>와 같다. 뉴질랜드의 성능설계는 스탭 1~12까지로 분류되며, 화재에 대한 전반적인 내용을 다루고 있다. 이러한 체계로 인해 내화설계와 인간안전 설계가 동시에 진행되고 있으며, 설계를 위한 기초 Data 및 수식 등은 유로코드를 바탕으로 수행하고 있다. 뉴질랜드의 경우 건축물의 안전과 인간 안전에 대한 부분을 동시에 적용하여 성능설계가 진행되고 있으며, 국내에서는 건축 구조물과 인간안전의 부분에 대한 차별화에 대한 부분을 고려해야할 것으로 판단된다.



<그림 2.2.72> Performance design process of New Zealand

(2) 국내 주차장 구조물의 내화설계 규정 현황

국내 주차장의 경우 다음 <표 2.2.43>과 같이 2010년 신설된『건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙에 의거하여 일반건축물과 동일하게 내화성능을 확보하고 있다. 또한, 실제 구조물은 일반시설, 주거시설, 산업시설에 대한 용도분류와 층수·높이로만 설정하여 내화성능을 요구하고 있다. 반면, 일본, 영국, 캐나다의 경우 다음 <표 2.2.44>와 같이 국내의 규정과 유사하지만, 미국의 NFC Type 1에서만 슬래브에 대한 3시간 기준이 마련되어 있으며, 국내에서도 이에 대한 내화설계의 재정립이 필요하다.

<표 2.2.43> Korea fire resistance efficiency standard

(단위 : 시간)

구성 부재 / 용 도			벽						보·기둥	바닥	지붕틀
			외벽			내벽					
			내력벽	비내력		내력벽	비내력				
용도 구분 (1)	용도규모(2) 층수／최고높이(m)			연소 우려가 있는부분 (가)	연소 우려가 없는부분 (나)		간막이 벽 (다)	샤프트실 구획벽 (라)			
일반 시설	12/50	초과	3	1	0.5	3	2	2	3	2	1
		이하	2	1	0.5	2	1.5	1.5	2	2	0.5
	4／20 이하		1	1	0.5	1	1	1	1	1	0.5
주거 시설	12/50	초과	2	1	0.5	2	2	2	3	2	1
		이하	2	1	0.5	2	1	1	2	2	0.5
	4／20 이하		1	1	0.5	1	1	1	1	1	0.5
산업 시설	12/50	초과	2	1.5	0.5	2	1.5	1.5	3	2	1
		이하	2	1	0.5	2	1	1	2	2	0.5
	4／20 이하		1	1	0.5	1	1	1	1	1	0.5

〈표 2.2.44〉 Performance standard of domestic and foreign fireproof structure

국가		주요 내용
한국 (건축물의 피난・방화구조 등의 기준에 관한 규칙)		• 용도구분(일반시설, 주거시설, 산업시설)에 따라 용도규모 (층수/최고높이(m))의 각 주요구조별 내화성능시간을 규정함. • 슬래브의 경우, 4층이하 및 20m이하의 경우(1시간)를 제외하고, 모두 2시간 내화성능시간을 규정함. • 보・기둥는 12층/50m 이상의 경우는 3시간, 12층/50m이하는 2시간, 4층/20m 이하는 1시간으로 규정함. • 50Mpa 이상의 고강도콘크리트의 보・기둥은 “고강도 콘크리트 기둥・보의 내화성능 관리기준”으로 별도로 규정함.
일본 (국토교통성 고시 1399호)		• 건축물의 층으로 구분하여, 구조부(벽, 기둥, 바닥, 보, 지붕, 계단)에 대해 별도로 규정함. • 슬래브(바닥)은 최상층으로 부터 2~4층은 1시간, 최상층으로부터 5층이상은 2시간 내화시간을 규정함.(루트A 사양설계) • 이외의 성능기준으로 평가법 B(내화성능 검증법), 평가법 C(고도의 평가법)가 있음.
미국	UBC (Uniform Building Code)	• 건물구조별(불연구조, 가연구조)에 따라 Ⅰ~Ⅴ의 타입으로 형식(내화, 1시간, H.T.)로 구분하여, 내화시간을 규정함. • 슬래브(바닥 및 바닥널)의 경우, 불연구조 Ⅰ, Ⅱ(내화)는 2시간, 이외의 Ⅱ(1시간)과 가연구조(Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ)의 경우는 1시간 내화성능을 갖도록 되어있으며, Ⅳ(Heavy Timber)의 경우는 H.T.의 성능을 갖도록 되어있음.
	NFC (National Fire Code)	• NFPA의 자체규정으로, Type Ⅰ~Ⅴ의 5개 그룹으로 세분화하여 내화성능을 차등화하고 있으며, 주요구조부재(벽, 기둥, 보, 아치, 바닥, 지붕)는 불연성 또는 준불연성재료로 내화성능을 요구함. • 슬래브(바닥)의 Type Ⅰ(443)의 경우 3시간을 제외한 이외의 성능은 0~2 시간 내화성능이 요구됨.
영국 (Eurocode 2,3,4-Structural fire design)		• 건물높이(지하층, 자상층 높이)별 Ⅰ~Ⅶ의 7가지 그룹으로서, S.P. 설치유무, 주차장(개방/기타)에 대해 30~120분을 세분화하여 규정함. • 슬래브의 경우, 2층이상의 바닥 및 방화구획용 바닥으로 구분하여 비손상성, 차염성, 차열성에 따라 내화성능을 차등 규정함.
캐나다 (NBC, NFC)		• 내화구조 대상건축물은 용도에 따라 8개로 대분류되며, 12개로 세분화하여 층수, 스프링클러 설치유무, 건물구조형태 등에 따라 성능기준을 요구함. • 특정구조 및 재료를 사용한 벽, 바닥 및 지붕은 국내기준과 유사하며, 콘크리트의 구성재료에 따라 내화성능을 규정함.

지하주차장의 화재성상 예측 기법을 구축하기 위하여 지하주차장 3곳을 선정하여 지하주차장의 공간특성, 가연물(차량)조사를 실시한 결과,
다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 도심지 주차공간에서 대형 판매시설 C몰과 공동주택 K 아파트, P 아파트의 주차 공간 특성을 조사하였다. 그 결과, 각 차량종류별 5대에 따른 기둥과 벽 부재에 대한 평균거리는 경차 81.6cm, 57.2cm, 소형승용차 29cm, 44.6cm, 중형승용차 29cm, 44.6cm, 대형승용차 30cm, 42.2cm, 승합차 17.6cm, 42.2cm, 화물차 35.6cm, 29.2cm로 나타났으며, 주차 공간 조사를 통하여 차량화재 발생 시, 구조물 부재에 미치는 영향에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

2) 차량화재 시 화재성상으로서 착화 이후 10분 이내에 차량의 유리창파손과 함께 화재가 차량의 천정부로 확대되어 온도가 급격히 상승하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한, 차량연소 시 차량 상부에서 2.5m 이상의 연속적인 화염높이가 측정되어 주차장 구조물의 슬래브에 화염노출로 인해 심각한 피해가 발생할 것으로 사료된다.

3) 차량 연소실험 이후 열 방출율과 중량감소를 통해 고찰한 결과, 한국과 유럽, 일본 차량의 경우 연소열은 평균 25.22MJ/kg, 유럽차량의 경우 29.93MJ/kg, 일본차량의 경우 30.18MJ/kg로 도출되었으며, 국내·외 차량의 연소열은 25.22MJ/kg~30.18MJ/kg 범위에 있다는 것을 확인하였다. 또한, 국내·외 차량의 열방출율과 총 발열량의 회귀분석을 수행한 결과, 한국차량 Y=0.008x, 유럽차량 Y=0.007x, 일본차량 Y=0.004x 으로 도출되었다. 국내의 차량은 유럽차량과 일본차량보다 높은 열방출율이 발생할 것으로 사료되며, 차량의 내열성에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4) 차량 연소실험 온도분포 결과를 통해, 최고온도 값과 최고온도 시점을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 각 차량별 화재상승온도계수는 중형승용차 511, 대형승용차 631, 승합차 671의 화재온도 상승계수가 도출되었다. 또한, 각 차량에 대한 화재가 열곡선 $T_{f.ISO}-T_{\infty}\approx 511t^{1/6}, 631t^{1/6}, 671t^{1/6}$을 이용하여, 기존 내화성능 확보에 사용되는 표준가열곡선과 비교하여 주차공간 구조물의 내화성능에 대한 재검토가 필요하다고 사료된다.

5) 차량 연소실험을 통하여 열 방출율을 측정하였으며, 다음 수식 $a=Q_{\max}/(t_{grow}-t_0)=Q_{\max}/\tau_{grow}^2$ 을 이용하여 중형승용차, 대형승용차, 승합차의 화재성장율 0.153453kW/sec^2, 0.004589kW/sec^2, 0.003087kW/sec^{2}을 도출하였다. 또한, 화재 성상 패턴의 4단계를 훈소기간, 성장기간, 정상기간, 감쇠기간으로 분류하여 중형승용차, 대형승용차, 승합차의 모델화를 작성하여 제시하였다. 주차장공간에서 차량화재특성과 구조물에 미치는 영향을 검토하기 위하여 주차 공간 조사 및 차량 연소실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

6) 도심지 주차공간에서 대형 판매시설 C몰과 공동주택 K 아파트, P 아파트의 주

차 공간 특성을 조사하였다. 그 결과, 각 차량종류별 5대에 따른 기둥과 벽 부재에 대한 평균거리는 경차 81.6cm, 57.2cm, 소형승용차 29cm, 44.6cm, 중형승용차 29cm, 44.6cm, 대형승용차 30cm, 42.2cm, 승합차 17.6cm, 42.2cm, 화물차 35.6cm, 29.2cm 로 나타났으며, 주차 공간 조사를 통하여 차량화재 발생 시, 구조물 부재에 미치는 영향에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

7) 차량화재 시 화재성상으로서 착화 이후 10분 이내에 차량의 유리창파손과 함께 화재가 차량의 천정부로 확대되어 온도가 급격히 상승하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한, 차량연소 시 차량 상부에서 2.5m 이상의 연속적인 화염높이가 측정되어 주차장 구조물의 슬래브에 화염노출로 인해 심각한 피해가 발생할 것으로 사료된다.

8) 차량 연소실험 이후 열 방출율과 중량감소를 통해 고찰한 결과, 한국과 유럽, 일본 차량의 경우 연소열은 평균 25.22MJ/kg, 유럽차량의 경우 29.93MJ/kg, 일본차량의 경우 30.18MJ/kg로 도출되었으며, 국내・외 차량의 연소열은 25.22MJ/kg～30.18MJ/kg 범위에 있다는 것을 확인하였다. 또한, 국내・외 차량의 열방출율과 총 발열량의 회귀분석을 수행한 결과, 한국차량 Y=0.008x, 유럽차량 Y=0.007x, 일본차량 Y=0.004x 으로 도출되었다. 국내의 차량은 유럽차량과 일본차량보다 높은 열방출율이 발생할 것으로 사료되며, 차량의 내열성에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

9) 차량 연소실험 온도분포 결과를 통해, 최고온도 값과 최고온도 시점을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 각 차량별 화재상승온도계수는 중형승용차 511, 대형승용차 631, 승합차 671의 화재온도 상승계수가 도출되었다. 또한, 각 차량에 대한 화재가열곡선 $T_{f.ISO}-T_{\infty}\approx 511t^{1/6}, 631t^{1/6}, 671t^{1/6}$을 이용하여, 기존 내화성능 확보에 사용되는 표준가열곡선과 비교하여 주차공간 구조물의 내화성능에 대한 재검토가 필요하다고 사료된다.

10) 차량 연소실험을 통하여 열 방출율을 측정하였으며, 다음 수식 $a=Q_{\max}/(t_{grow}-t_0)=Q_{\max}/\tau_{grow}^2$ 을 이용하여 중형승용차, 대형승용차, 승합차의 화재성장율 0.153453kW/sec^2, 0.004589kW/sec^2, 0.003087kW/sec^{2}을 도출하였다. 또한, 화재 성상 패턴의 4단계를 훈소기간, 성장기간, 정상기간, 감쇠기간으로 분류하여 중형승용차, 대형승용차, 승합차의 모델화를 작성하여 제시하였다. 주차장공간에서 차량화재특성과 구조물에 미치는 영향을 검토하기 위하여 주차 공간 조사 및 차량 연소실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

11) 도심지 주차공간에서 대형 판매시설 C몰과 공동주택 K 아파트, P 아파트의 주차 공간 특성을 조사하였다. 그 결과, 각 차량종류별 5대에 따른 기둥과 벽 부재에 대한 평균거리는 경차 81.6cm, 57.2cm, 소형승용차 29cm, 44.6cm, 중형승용차 29cm, 44.6cm, 대형승용차 30cm, 42.2cm, 승합차 17.6cm, 42.2cm, 화물차 35.6cm, 29.2cm 로 나타났으며, 주차 공간 조사를 통하여 차량화재 발생 시, 구조물 부재에 미치는 영향에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

12) 차량화재 시 화재성상으로서 착화 이후 10분 이내에 차량의 유리창파손과 함께 화재가 차량의 천정부로 확대되어 온도가 급격히 상승하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한, 차량연소 시 차량 상부에서 2.5m 이상의 연속적인 화염높이가 측정되어 주차장 구조물의 슬래브에 화염노출로 인해 심각한 피해가 발생할 것으로 사료된다.

13) 차량 연소실험 이후 열 방출율과 중량감소를 통해 고찰한 결과, 한국과 유럽, 일본 차량의 경우 연소열은 평균 25.22MJ/kg, 유럽차량의 경우 29.93MJ/kg, 일본차량의 경우 30.18MJ/kg로 도출되었으며, 국내·외 차량의 연소열은 25.22MJ/kg~30.18MJ/kg 범위에 있다는 것을 확인하였다. 또한, 국내·외 차량의 열방출율과 총 발열량의 회귀분석을 수행한 결과, 한국차량 Y=0.008x, 유럽차량 Y=0.007x, 일본차량 Y=0.004x 으로 도출되었다. 국내의 차량은 유럽차량과 일본차량보다 높은 열방출율이 발생할 것으로 사료되며, 차량의 내열성에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

14) 차량 연소실험 온도분포 결과를 통해, 최고온도 값과 최고온도 시점을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 각 차량별 화재상승온도계수는 중형승용차 511, 대형승용차 631, 승합차 671의 화재온도 상승계수가 도출되었다. 또한, 각 차량에 대한 화재가열곡선 $T_{f.ISO} - T_{\infty} \approx 511t^{1/6}, 631t^{1/6}, 671t^{1/6}$을 이용하여, 기존 내화성능 확보에 사용되는 표준가열곡선과 비교하여 주차공간 구조물의 내화성능에 대한 재검토가 필요하다고 사료된다.

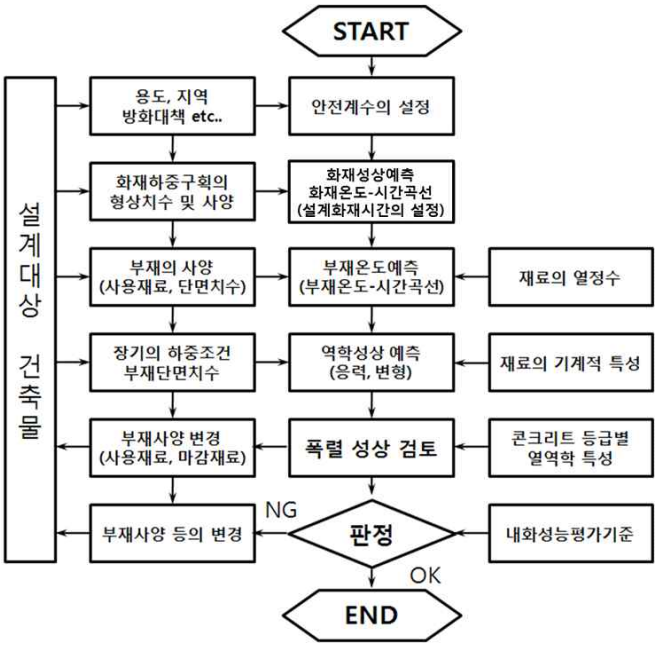
15) 차량 연소실험을 통하여 열 방출율을 측정하였으며, 다음 수식 $a = Q_{\max}/(t_{grow} - t_0) = Q_{\max}/\tau_{grow}^2$ 을 이용하여 중형승용차, 대형승용차, 승합차의 화재성장율 0.153453kW/sec^2, 0.004589kW/sec^2, 0.003087kW/sec^{2}을 도출하였다. 또한, 화재 성상 패턴의 4단계를 훈소기간, 성장기간, 정상기간, 감쇠기간으로 분류하여 중형승용차, 대형승용차, 승합차의 모델화를 작성하여 제시하였다.

7. 성능기반 내화설계 기법 구축

폭렬(Explosive Spalling) 매커니즘은 아직 규명되지 않고 있으며, 이러한 폭렬현상은 고온시 고강도 콘크리트에서 자주 발생한다. 이에 대한 방안으로 국내외에서는 폭렬저감에 대한 연구를 주체로 수행되고 있다. 하지만 폭렬저감에 대한 연구는 섬유(PVA, PP 등)을 첨가하여 폭렬을 억제하는 방법이며, 근본적인 폭렬 매커니즘의 원인규명 및 해석에 대한 연구는 부족한 실정이다.

국내의 성능기반 내화설계는 다음 <그림 2.2.73>과 같이 대한건축학회에서 제시하고 있는 프로세스와 같이 수행되고 있으나, 화재성상예측, 부재온도예측, 역학성상 예측은 일반적으로 사용되는 범용소프트에 의존하여 수행되고 있다. 이러한 범용소프트는 Euro Code에 제시되어 있는 물성 값으로 설정되어 있기 때문에, 국내 실정에 맞는 물성 값에 대한 DB확보와 내화설계를 구축하는 것이 필요하다고 사료된다.

이에 따라, 화재와 같은 급격히 온도가 상승하는 환경에서의 고강도 및 초고강도 콘크리트의 폭렬의 원인규명을 위한 연구로서 콘크리트의 함수율과 열응력이 폭렬현상에 미치는 영향을 가열실험을 통하여 비교하고자 하였으며, 또한 벽체부재 2개를 제작하여 부분가열과 전면가열을 실시하여 기존에 알려진 열응력설, 수증기압설의 폭렬 발생에 대한 영향을 검토하고자 한다.



<그림 2.2.73> 대한건축학회에서 제시하고 있는 내화설계 프로세스

가. 고강도 콘크리트 기둥부재를 이용한 2면 가열 실험

(1) 실험 개요

열응력과 함수율이 폭렬현상에 미치는 영향을 분석하고자 <표 2.2.45>에 나타낸 바와 같이 실험계획을 세웠다. 여기서 설계강도 100MPa의 초고강도 콘크리트 빔부재(Beam)를 사용하여, 열응력이 큰 조건이라 판단되는 2면가열과 비교적 열응력이 작은 조건이라 판단되는 4면가열로 나누어 가열실험을 세웠다. 또한, 함수율이 폭렬에 미치는 영향을 확인하기 위하여 함수율이 높은 수중양생조건과 비교적 함수율이 낮은 기중양생(24° C로 설정된 건조기 내부에서 양생)의 2가지 조건으로 하였다. 더 나아가 섬유의 혼입에 따른 폭렬저감특성을 확인하고자 섬유혼인율0(kg/m^3)과 1.5(kg/m^3)로 나누어 실험계획을 세웠다. 여기서 가열시험은 내화시험 방법인 KS F 2257-1 및 ISO 834 표준가열곡선에 준하여 30분 가열로 실시 하였다.

열응력과 함수율이 폭렬에 미치는 영향을 검토하기 위한 실험에서의 측정항목은 <표 2.2.46>에 나타내었다. 여기서 가열실험 전 측정항목으로는 열응력에 미치는 영향을 분석하기 위한 재료의 기초특성으로 압축강도, 탄성계수, 포아송비의 측정하고자한다. 또한 시험체의 함수율을 측정하기 위하여 표면함수율과 중량감소법에 의한 함수율을 측정하고자 하였다.

가열실험 중에는 시험체의 내부온도, 2면 가열의 경우 시험체와 내화세라믹보드 사이의 위치에서의 온도 또한 측정하고자하였다. 또한 가열실험 후에는 레이져 변위계를 이용하여 시험체의 폭렬형상의 측정과 가열전후의 시험체의 중량변화 및 시험체의 크기를 측정하고자 하였다.

<표 2.2.45> 실험 계획

설계강도 (MPa)	섬유혼입율 (kg/m^3)	양생조건	가열조건	가열온도조건
100	0	수중양생	2면가열	ISO834 건축화재 표준가열곡선 (30분 가열)
			4면가열	
		기중양생	2면가열	
			4면가열	
	1.5	수중양생	2면가열	
			4면가열	
		기중양생	2면가열	
			4면가열	

<표 2.2.46> 측정 항목

구분	탄성계수 및 포아송비	표면 함수율	함수율	시험체 내부온도	중량 변화	시험체의 크기	폭렬 형상 측정
가열전	○	○	○		○	○	
가열중				○			
가열후					○	○	○

(2) 실험 재료 및 배합

본 실험에 사용된 재료의 준비과정을 <그림 2.2.74>에 나타내었으며 실험에 사용된 모래는 체를 친후 건조시켜 적정 수분 량이 되도록 조절하였고, 자갈은 세척 및 건조 후 사용하였다. 본 실험에 사용된 콘크리트의 배합은 <표 2.2.47>과<표 2.2.48>에 나타내었다.

콘크리트의 비빔시에는 폴리카르본산계 고성능감수제(SP: superplasticizer)를 383g 첨가하였다. 또한, PP섬유(Polypropylene fiber)를 혼입조건을 0kg/m^3와 1.5kg/m^3로 하였다. 실험에 사용된 각 재료의 성질과 물성치는<표 2.2.49>~<표 2.2.52>에 나타내었다.



체친 후 건조시킨 모래



세척 후 건조시킨 자갈



시멘트



고성능 감수제(SP)

<그림 2.2.74> 콘크리트의 재료준비 과정

<표 2.2.47> 콘크리트 배합(체적배합)

W/B (wt%)	slump flow (mm)	Air (%)	S/a (vol%)	Unit W	Unit Weight(kg/m3)			
					B	C	S	G
20	650±50	4	43	170	850	340	569	770

<표 2.2.48> 콘크리트의 배합 질량(중량배합)

MPa	구분 (L)	물 (kg)	시멘트 (kg)	모래 (kg)	자갈 (kg)	SP (g)	PP섬유
100	20	3.4	17	11.4	15.3	225	0
							1.5
	30	5.1	25.5	17.1	23	383	0
							1.5

<표 2.2.49> 시멘트 화학적 성질

Si02	Al203	Mg0	Ca0	S03	Fe203	Loss on ignition	Insol.	Blaine (㎠/g)
21.6	6	3.4	61.4	2.5	3.1	-	0.21	3539

<표 2.2.50> 골재 일반모래 물성치

구분	입도 (㎜)	조립율	절건 밀도 (g/㎤)	흡수율 (%)	0.08㎜체 통과량 (%)	점토 덩어리량 (%)	유기이물 질함유량 (%)
해사	5.0	2.72	2.56	0.6	0.04	0.35	0.64

<표 2.2.51> 골재 쇄석 자갈 물성치

구분	입도 (㎜)	조립율	절건밀도 (g/㎤)	흡수율 (%)	0.08㎜ 체통과량 (%)	안정성 (%)
자갈	19.0	6.64	2.61	1.0	0.1	2.9

<표 2.2.52> 고성능 감수제 물성치

성상	비중	PH
마색 또는 연갈색 액체	1.06=0.05	6.5=2.0
계열	폴리카르본산계	
용도	초고강도, 고유동 콘크리트 및 조기 강도를 요하는 구조물	

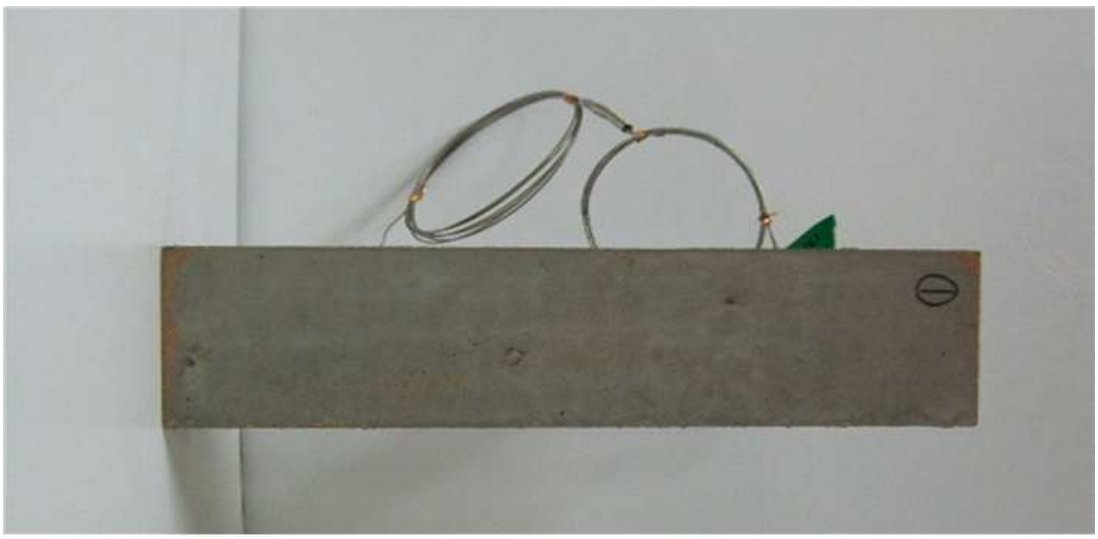
본 실험에 사용된 시험체는 크게 3종류의 시험체로 나누어 진행하였으며, 시험체는 탄성계수측정용 시험체(Cylinder: ø100×200mm), 가열실험용 시험체 (Beam: 100×100×400mm), 함수율 측정용 시험체(Cube: 100×100×400mm)로 분류되며 시험체는 <그림 2.2.75>에 나타내었다. 가열실험용 시험체의 제작방법 및 열전대 위치를 <그림 2.2.76>에 나타내었으며, 계측 장비로써 K Type 열전대 (Thermocouple)를 사용하였으며, 각 시험체의 기호를 <표 2.2.53>에 나타내었다.



(a) 탄성계수측정용 시험체

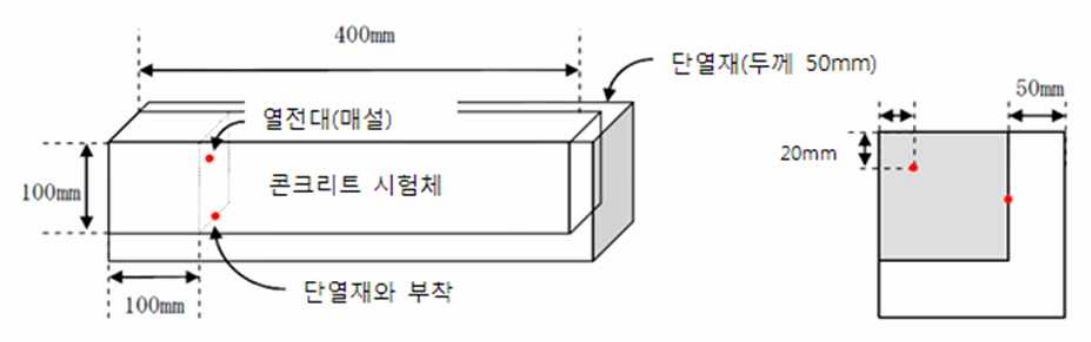


(b) 함수율측정용 시험체



(c) 가열실험용 시험체

<그림 2.2.75> 시험체의 사진



<그림 2.2.76> 가열 시험체의 제작 방법 및 열전대 위치

본 실험에서는 실험에 사용된 고강도 콘크리트의 재료특성에 관한 실험, 가열실험에 대한 실험, 함수율에 관한 실험으로 진행되었으며, 각각의 실험에서의 시험체 기호를 <표 2.2.53>에 나타내었다.

각각의 실험에서의 시험체에는 각각의 기호를 주기함으로서 실험을 진행하였으며 시험체 기호의 의미를 시험체명 P-NSF0W(1)를 일례로서 기호의 의미를 설명하고자 한다.

P-NSF0W(1): 첫 영문기호는 P, F, W로 3가지로 구분하였으며, 여기서 P는 압축실험(Pressure), F는 가열실험(Fire test), W는 함수율(Water content rate)을 의미한다.

P-NSF0W(1): 두 번째 자리 NSF 영문기호의 의미는 실리카흄이 포함되지 않은 콘크리트(None Silica-fume)을 의미한다. 여기서, 가열실험의 경우 F2와 F4로 구분하였으며, 이는 가열조건에 따른 구분으로서 2면가열과 4면가열을 의미한다.

P-NSF0W(1): 세 번째 자리 0 또는 1.5는 섬유혼입율(kg/m3)을 의미한다.

P-NSF0W(1): 네 번째 자리 W 또는 A의 의미는 수중양생(Water curing)과 기중양생(Air curing)을 의미한다.

P-NSF0W(1): 다섯번째 자리 (1)~(3)은 같은 콘크리트 배합과 같은 양생조건에 대한 시험체를 각각 3개씩 제작하였기에 시험체의 번호를 의미한다.

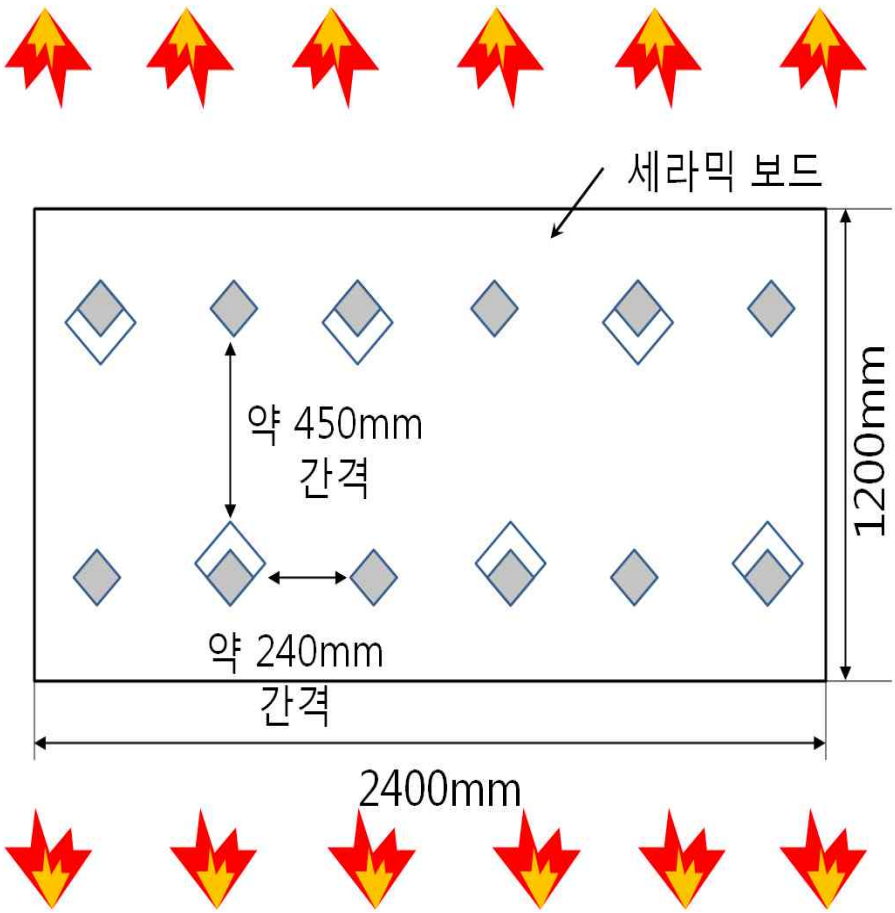
<표 2.2.53> 시험체의 기호 분류

시험체의 구분	크기 (mm)	기호	섬유 유무	양생 조건	가열 조건	수량	합계
1. 압축강도 및 탄성계수측정용 (Cylinder) 기호-P	φ100 ×200	P-NSF0W(1) P-NSF0W(2) P-NSF0W(3)	0%	수중	-	3	12개
		P-NSF0A(1) P-NSF0A(2) P-NSF0A(3)		기중	-	3	
		P-NSF1.5W(1) P-NSF1.5W(2) P-NSF1.5W(3)	1.5%	수중	-	3	
		P-NSF1.5A(1) P-NSF1.5A(2) P-NSF1.5A(3)		기중	-	3	
2. 가열용 시험체 (Beam) 기호-F	100 ×100 ×400	F2-NSF0W(1) F2-NSF0W(2) F2-NSF0W(3)	0%	수중	2면 가열	3	24개
		F4-NSF0W(1) F4-NSF0W(2) F4-NSF0W(3)			전면 가열	3	
		F2-NSF0A(1) F2-NSF0A(2) F2-NSF0A(3)		기중	2면 가열	3	
		F4-NSF0A(1) F4-NSF0A(2) F4-NSF0A(3)			전면 가열	3	
		F2-NSF1.5W (1) F2-NSF1.5W (2) F2-NSF1.5W (3)	1.5%	수중	2면 가열	3	
		F4-NSF1.5W (1) F4-NSF1.5W (2) F4-NSF1.5W (3)			전면 가열	3	
		F2-NSF1.5A (1) F2-NSF1.5A (2) F2-NSF1.5A (3)		기중	2면 가열	3	
		F4-NSF1.5A (1) F4-NSF1.5A (2) F4-NSF1.5A (3)			전면 가열	3	
3. 함수율 측정용 (Cube) 기호-W	100 ×100 ×100	W-NSF0W(1) W-NSF0W(2) W-NSF0W(3)	0%	수중	-	3	12개
		W-NSF0A(1) W-NSF0A(2) W-NSF0A(3)		기중	-	3	
		W-NSF1.5W(1) W-NSF1.5W(2) W-NSF1.5W(3)	1.5%	수중	-	3	
		W-NSF1.5A(1) W-NSF1.5A(2) W-NSF1.5A(3)		기중	-	3	

(3) 가열실험방법

가열시험체는 전면가열 시험체와 2면가열 시험체로 구분되며, 전면가열 시험체의 경우 상부면이 가열되지 않게 하기 위하여 두께50mm의 내화용 세라믹보드를 설치하여 가열실험을 진행하였으며, 2면가열 시험체의 경우 시험체의 상부 및 측면 2곳에 두께 50mm의 내화용 세라믹 보드를 피복하여 가열실험을 진행하였다.

가열실험은 섬유가 혼입되지 않은 시험체 12개, 섬유가 1.5(kg/m^3) 혼입되어있는 시험체 12개씩 2회로 나누어 진행하였으며, 가열실험을 여주방재시험연구소에서 진행하였으며,<그림 2.2.77>에는 시험체 배치에 대한 개요도, <그림 2.2.78>에는 시험체를 배치한 가열로의 전경을 나타내었다.



<그림 2.2.77> 가열로 시험체 배치에 관한 개요도



<그림 2.2.78> 가열로 시험체 전경

(4) 실험결과

(가) 표면함수율

본 실험에 있어서 가열실험의 조건으로 함수율의 높고 낮음을 조건으로 하여 함수율이 폭렬에 미치는 영향을 확인하고자 한다. 위의 실험조건에서 함수율이 높은 조건으로 수중야생, 함수율이 낮은 조건으로는 기중양생을 조건으로 하였다.

그러나 각각의 시험체의 함수율은 측정하기 위해서는 절건법(Absolute dry weight)에 의한 함수율을 측정할 필요가 있어 측정을 진행하고 있지만, 절건법에 의한 함수율의 측정은 3~4개월의 시간이 소요됨으로서 현재로서 정확한 함수율을 얻기에 어려움이 있다. 따라서 가열직전 시험체 표면의 함수율을 측정함으로서 양생조건에 따른 함수율의 높고 낮음을 개략적으로 확인하고자 한다. 여기서, 절건법(Absolute dry weight)에 의한 함수율 측정법에 대하여 간략히 말하면, 콘크리트의 내부에 존재하고 있는 수분까지 완전히 건조 될 수 있도록 약 100℃의 온도조건은 100℃로 설정된 건조로에 설치된 함수율 측정용 시험체이며, 장시간 존치함으로서 중량변화가 없을 때까지 주기적으로 중량을 측정함으로서 시험체의 전체중량 대비

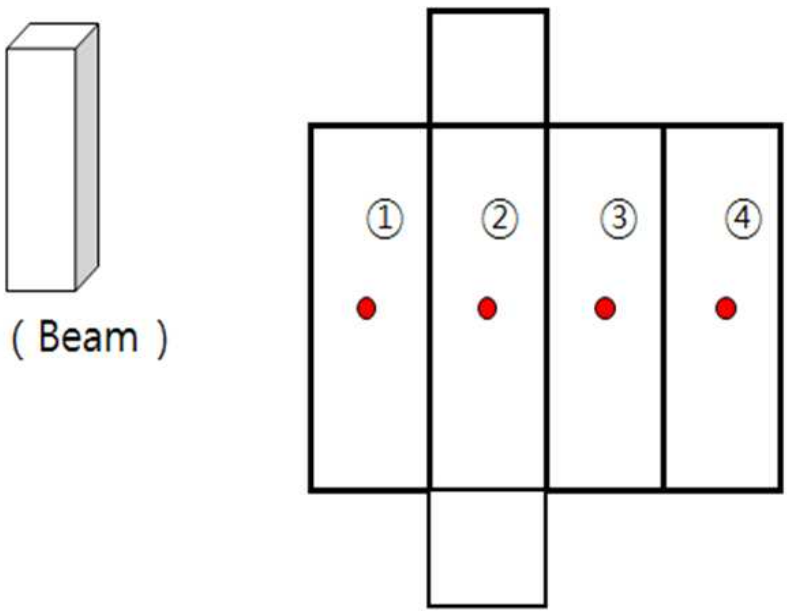
콘크리트의 내부에 포함하고 있는 수분의 양을 측정하는 방법이며, 식 2.2.26에 의해 구하여진다.

$$\frac{W_i - W_0}{W_i} \times 100 = \text{함수율}(kg/kg) \qquad 2.2.26$$

W_i : 양생후 콘크리트의 초기중량(kg)

W_0 : 절대건조 상태에서의 중량(kg)

표면함수율 측정방법은 표면의 함수상태를 측정할 수 있는 계측기를 이용하여 계측하는 방법이다. 표면함수율을 측정은 가열실험을 진행하기 직전에 측정하였으며, 각각의 시험체에 대한 측정위치 및 측정의 일례를 <그림 2.2.79>~<그림 2.2.81>에 나타내었다.



<그림 2.2.79> 시험체에서의 표면함수율 측정위치



<그림 2.2.80> 절건법에 의한 중량함수율 측정



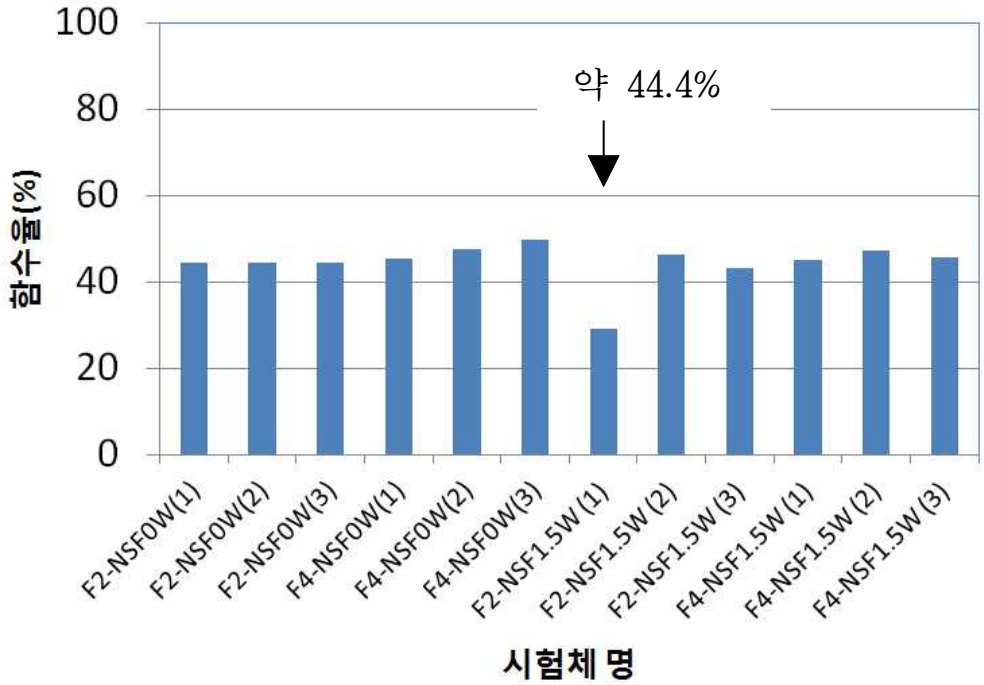
<그림 2.2.81> 가열시험체의 함수율 측정방법의 일례

각각의 시험체에 대한 표면함수율의 측정결과를 <표 2.2.54>에 나타내었으며, 각각의 함수율 측정값을 수중양생조건과 기중양생조건에 대한 함수율 측정값을 그래프로서 <그림 2.2.82>와 <그림 2.2.83>에 나타내었다. 측정결과 섬유가 혼입되지 않은 시험체의 수중양생의 경우 44.35~49.68%, 기중양생의 경우 33.1~33.98%의 함수율을 나타냄으로서 수중양생의 조건이 높은 함수율을 나타내었다. 섬유가 1.5kg/m^3혼입된 시험체에서 수중양생의 경우 29.18~46.25%. 기중양생의 경우 31.55~44.4%로서 시험체의 전반적으로는 수중양생의 시험체가 함수율이 비교적 높은 것으로 나타났다.

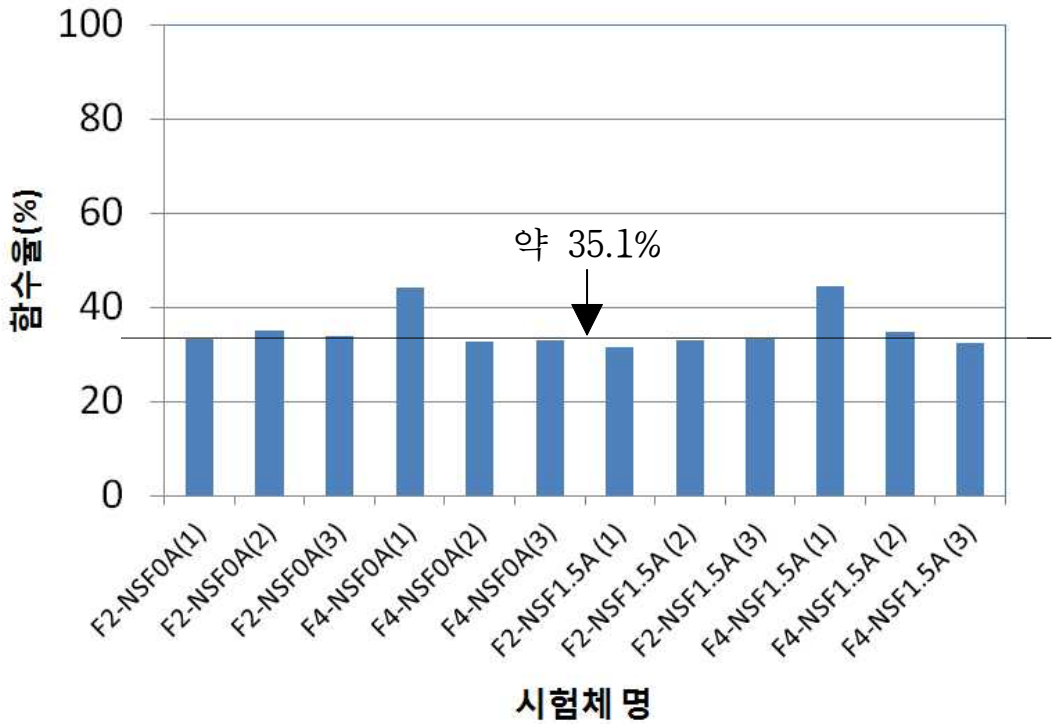
따라서 본 연구에서 함수율에 폭렬에 미치는 영향을 판단하기 위한 조건을 만족하는 것으로 판단된다.

<표 2.2.54> 각각의 시험체에 대한 표면함수율 측정값

시험체명	시험체의 면 번호 (단위 : %)				평균
	①	②	③	④	
F2-NSFOW(1)	48.9	41.7	33.6	53.8	44.5
F2-NSFOW(2)	49.1	41.5	40.5	46.3	44.35
F2-NSFOW(3)	48.9	41.7	33.6	53.8	44.5
F4-NSFOW(1)	49.1	43	42.2	47.1	45.35
F4-NSFOW(2)	45.3	48.6	48.8	48.1	47.7
F4-NSFOW(3)	44.9	50.2	47.6	56	49.68
F2-NSFOA(1)	37.5	30.7	25.5	39.6	33.33
F2-NSFOA(2)	39.1	39.2	28.5	33.1	34.98
F2-NSFOA(3)	36.1	38	29.4	32.4	33.98
F4-NSFOA(1)	50.9	50	36.6	39.1	44.15
F4-NSFOA(2)	34.7	30.2	27.4	38.6	32.73
F4-NSFOA(3)	37.7	27.9	27.4	39.4	33.1
F2-NSF1.5W (1)	27.4	28.7	28.5	32.1	29.18
F2-NSF1.5W (2)	48.9	44.6	44.1	47.4	46.25
F2-NSF1.5W (3)	43.6	47.9	30.4	50.6	43.16
F4-NSF1.5W (1)	49.4	46.6	39.3	44.7	45
F4-NSF1.5W (2)	47.7	49.5	45.2	46.8	47.3
F4-NSF1.5W (3)	46.7	39.8	43.1	53.8	45.85
F2-NSF1.5A (1)	36.9	28.4	25.7	35.2	31.55
F2-NSF1.5A (2)	37	34.3	26.6	34	32.98
F2-NSF1.5A (3)	37.9	36.8	31.2	27.2	33.28
F4-NSF1.5A (1)	46.3	47.4	36.8	47.1	44.4
F4-NSF1.5A (2)	35.6	37.1	29.8	36.5	34.75
F4-NSF1.5A (3)	33.7	34.9	30.7	30.8	32.53



<그림 2.2.82> 수중양생 시험체에 대한 표면함수율(%) 측정값



<그림 2.2.83> 기중양생 시험체에 대한 표면함수율(%) 측정값

(나) 가열실험에 따른 폭렬특성

섬유가 혼입되지 않은 시험체의 경우 전면가열의 시험체 보다 2면가열조건의 시험체가 더욱 심각한 폭렬현상이 발생한 결과를 보였으며, 양생조건이 수중양생으로 함수율이 높은 것으로 나타난 시험체에서 더욱 심각한 폭렬이 발생하였다.

반면, PP섬유1.5kg/m^3 혼입된 시험체의 경우, 폭렬이 발생하지 않은 시험체가 다수를 차지하고 있으며, 일부의 시험체에서는 직경 20～30mm, 폭렬깊이 2～3mm의 경미한 폭렬이 발생하였다. 다음 <그림 2.2.84>는 섬유가 혼입되지 않은 시험체이며 <그림 2.2.85>는 섬유가 혼입된 시험체이다.



<그림 2.2.84> 가열실험 후 시험체의 모습(섬유0kg/m^3)



<그림 2.2.85> 가열실험 후 시험체의 모습(섬유1.5kg/m^3)

가열로 내부에서의 시험체의 폭렬특성은 섬유 혼입율 0kg/m^3 시험체의 경우 전반적으로 심각한 폭렬이 발생하였으며, 4면가열조건의 시험체 보다 2면가열시험체가 더욱 심각한 폭렬이 발생한 것으로 나타났다. 이러한 폭렬형상을 좀 더 구체적으로 비교하기 위하여 각각의 시험체에 대하여 각 면의 폭렬현상을 정리하여 비교하고자 한다. 단, 2면가열조건의 시험체에서 화염에 노출된 면은 시험체의 1번과 2번 면이며, 3번과 4번 면의 경우 피복된 50mm의 내화세라믹보드에 의하여 직접적 화염의 노출되지 않은 면이다.

아래의 사진 가운데 2면가열 조건에서의 시험체에 3번과 4번면에 발생한 검은 탄화자국은 시험체와 내화세라믹보드 사이에서 열전대를 고정하기 위하여 부착한 절연테이프에 의한 것으로 보인다.

<그림 2.2.86>~<그림 2.2.88>은 함수율 높음, 섬유혼입 없음, 2면가열조건에서의 시험체의 폭렬현상을 나타낸 것이다. 폭렬현상은 가열면인 1번과 2번에서 심각한 폭렬이 발생하였으며, 폭렬의 범위는 시험체의 전면에 걸쳐 발생한 것이 확인되었다.

<그림 2.2.89>~<그림 2.2.91>은 함수율 높음, 섬유혼입 없음, 4면가열조건의 시험체에 대한 폭렬현상을 나타낸 것이다. 여기서, <그림 2.2.89>의 시험체명 F4-NSF0W(1)는 폭렬이 발생하지 않았다. <그림 2.2.87>의 시험체명 F4-NSF0W(2)의 경우 2면가열조건에 비하여 폭렬의 깊이가 얕은 것으로 보인다. 반면, <그림 2.2.88>의 시험체명 F4-NSF0W(3)의 경우 상부면에 심각한 폭렬이 발생하였다. 그 원인으로는 가열초기 상부면에 폭렬이 발생함으로서 가열전 상부면에 설치한 내화세라믹보드가 낙하함으로서, 시험체의 상부면도 화염에 노출되었기에 때문이라 판단된다.



1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.86> 시험체명 F2-NSF0W(1)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.87> 시험체명 F2-NSF0W(2)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



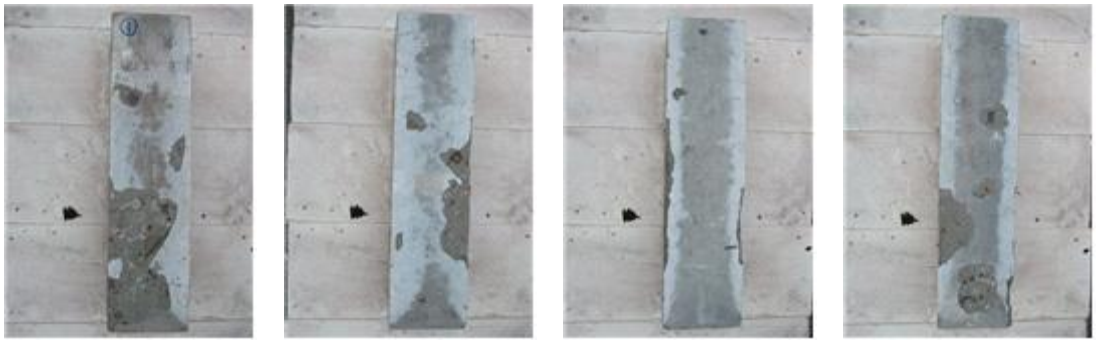
1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.88> 시험체명 F2-NSF0W(3)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.89> 시험체명 F4-NSF0W(1)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.90> 시험체명 F4-NSF0W(2)에 대한 각 면에서의 폭렬형상

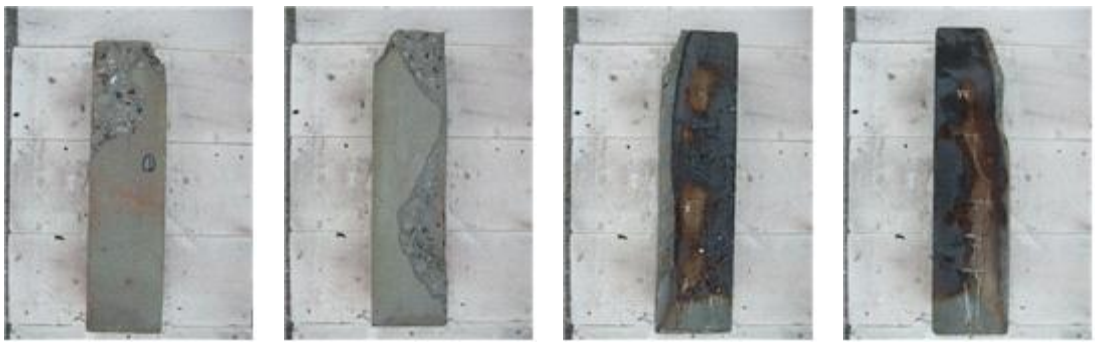


1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.91> 시험체명 F4-NSF0W(3)에 대한 각 면에서의 폭렬형상

<그림 2.2.92>~<그림 2.2.94>는 함수율 낮음, 섬유혼입 없음, 2면가열조건에서의 시험체의 폭렬현상을 나타낸 것이다. 폭렬현상은 가열면인 1번과 2번면에서 심각한 폭렬이 발생하였으며, 폭렬의 범위는 시험체의 전면에 걸쳐 발생한 것이 확인되었다. 특히 15번 시험체의 경우 가열시험에 의해 시험체의 상부가 절단되는 현상까지 발생하였다.

<그림 2.2.95>~<그림 2.2.97>은 함수율 낮음, 섬유혼입 없음, 4면가열조건에서의 시험체의 폭렬현상을 나타낸 것이다. 여기서, 사진 18과 사진 19의 시험체명 F4-NSF0A(2)과 F4-NSF0A(3)의 시험체에서는 폭렬이 발생하지 않았으며, 시험체명 F4-NSF0A(1)의 경우 시험체의 바닥면부터 중앙부에 걸쳐 폭렬이 발생하였다. 이는 갖은 배합 및 양생조건의 2면가열조건에 비하여 폭렬의 정도가 적은 것으로 보인다.



1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.92> 시험체명 F2-NSF0A(1)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



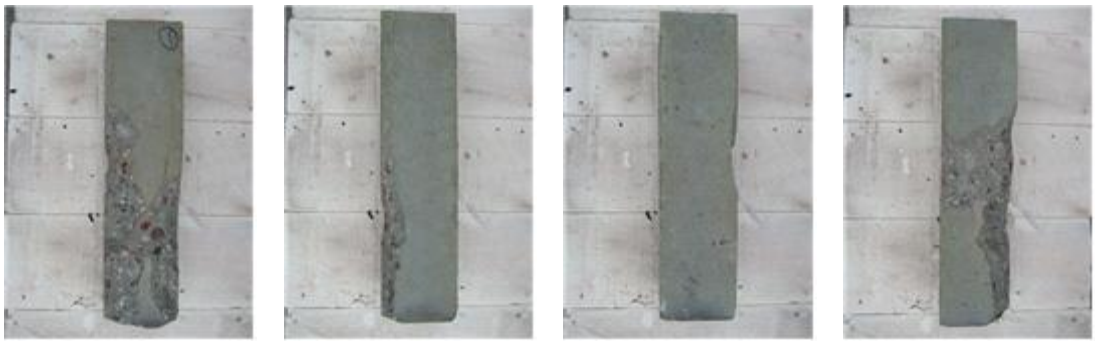
1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.93> 시험체명 F2-NSF0A(2)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.94> 시험체명 F2-NSF0A(3)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



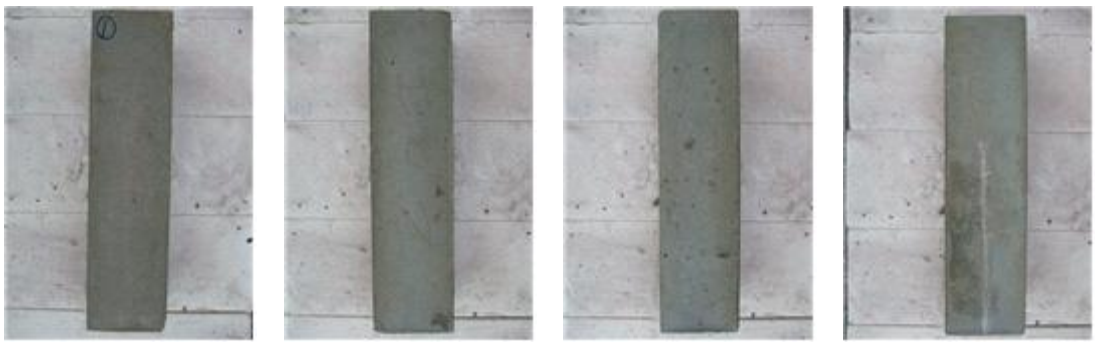
1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.95> 시험체명 F4-NSF0A(1)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.96> 시험체명 F4-NSF0A(2)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.97> 시험체명 F4-NSF0A(3)에 대한 각 면에서의 폭렬형상

다음의 <그림 2.2.98>~<그림 2.2.107>에 나타낸 시험체는 PP섬유가 1.5kg/m^3 혼입된 시험체에 대한 가열후 폭렬형상을 나타낸 것이다. 섬유가 혼입된 실험에서는 함수율조건, 가열면 조건과 관계없이 폭렬의 정도는 직경 20～30mm, 폭렬깊이 2～3mm 정도의 경미한 폭렬이 발생하였다.



1번 면　　2번 면　　3번 면　　4번 면

<그림 2.2.98> 시험체명 F2-NSF1.5W(1)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



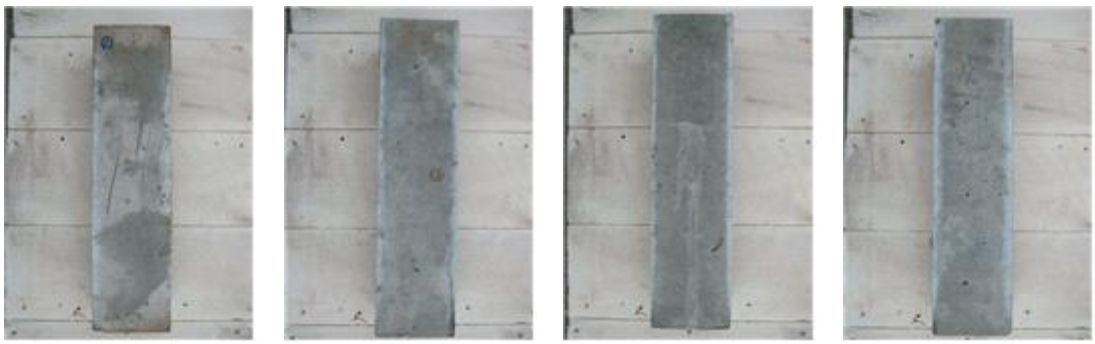
1번 면　　2번 면　　3번 면　　4번 면

<그림 2.2.99> 시험체명 F2-NSF1.5W(2)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



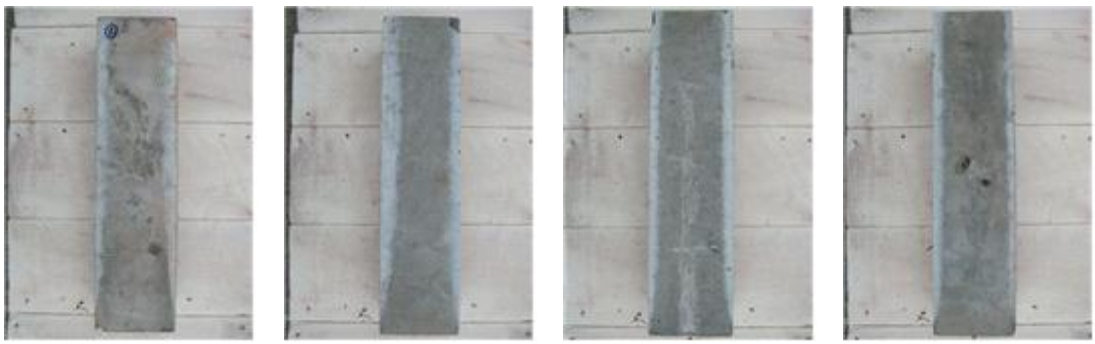
1번 면　　2번 면　　3번 면　　4번 면

<그림 2.2.100> 시험체명 F2-NSF1.5W(3)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.101> 시험체명 F4-NSF1.5W(1)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.102> 시험체명 F4-NSF1.5W(2)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.103> 시험체명 F4-NSF1.5W(3)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.104> 시험체명 F2-NSF1.5A(1)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.105> 시험체명 F2-NSF1.5A(2)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.106> 시험체명 F2-NSF1.5A(3)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



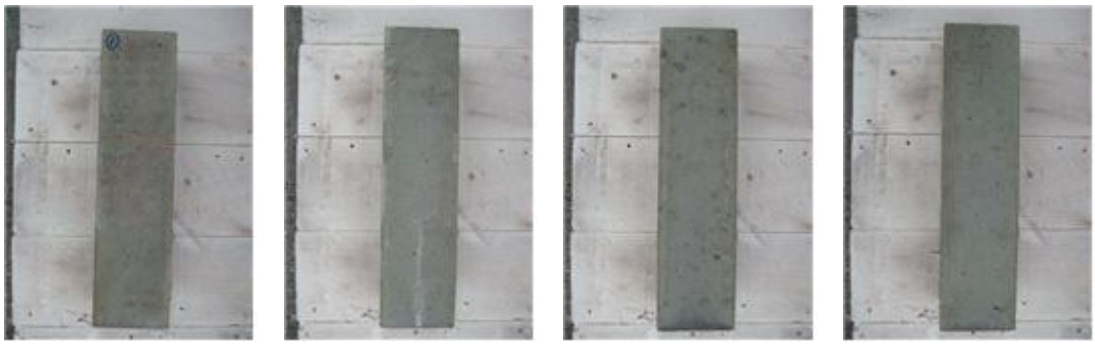
1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.107> 시험체명 F4-NSF1.5A(1)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.108> 시험체명 F4-NSF1.5A(2)에 대한 각 면에서의 폭렬형상



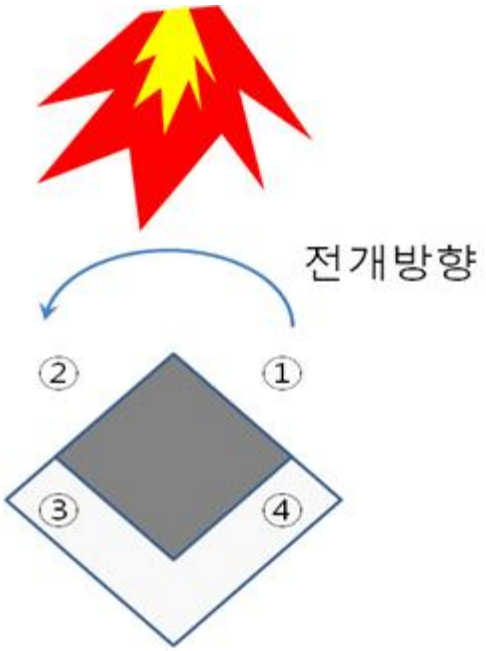
1번 면 2번 면 3번 면 4번 면

<그림 2.2.109> 시험체명 F4-NSF1.5A(3)에 대한 각 면에서의 폭렬형상

각각의 시험체에 대하여 가열조건에 따른 균열특성을 정리하고자 한다. 먼저, 4면가열의 경우 표면에서의 다수의 미세균열이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 2면가열한 시험체에서는 4면가열한 시험체와는 다른 균열특성을 나타내기에 폭렬 및 균열에 관한 전개도를 통하여 구체적으로 나타내고자 한다.

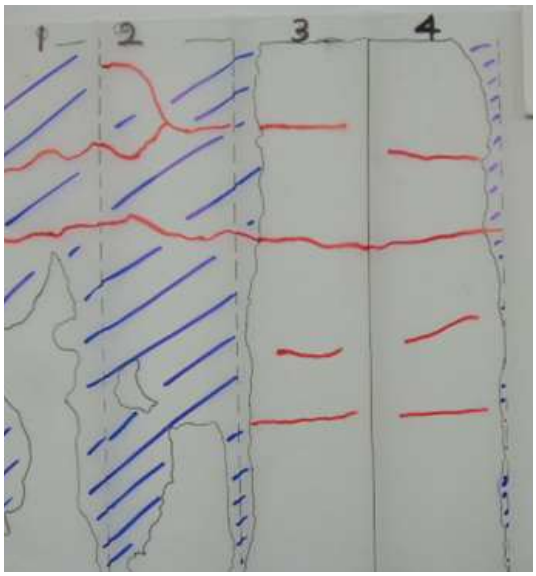
폭렬 및 균열 특성에 관한 전개도의 개요를 <그림 2.2.110>에 나타내었다. <그림 2.2.110>의 그림에서 가열면의 방향으로 우측상부를 가열면 ①로 하여 시계반대방향으로 회전하며 펼지 그림이다. 전개도에서 수평방향으로 선으로 나타낸 것은 균열을 의미하며, 빗금으로 나타낸 부분은 폭렬이 발생한 부분을 의미한다.

섬유가 혼입되지 않은 2면가열실험 조건에서 심각한 폭렬이 발생한 것에 대해서는 앞서 폭렬형상에서 설명하였다. 이와 더불어 시험체에는 심각한 균열 형상이 발생하였다. 아래 균열 및 폭렬에 전개도에 나타낸바와 같이 균열의 진전은 가열면 ①과②에서부터 비가열면에 ③과 ④의 방향으로 진전된 것을 알 수 있다. 일부의 실험체에서는 가열 직후 균열로 인하여 실험체가 상하로 절단된 경우도 있으며, 일부의 실험체에서는 측정과정에서 작은 힘에 의해서 절단된 경우도 있다. 이를 통하여 수평방향으로 발생한 균열은 표면부 뿐만 아니라 실험체의 내부까지 진전되어 있음을 예상할 수 있다. 이는 <그림 2.2.111>~<그림 2.2.115>에 나타내었다.

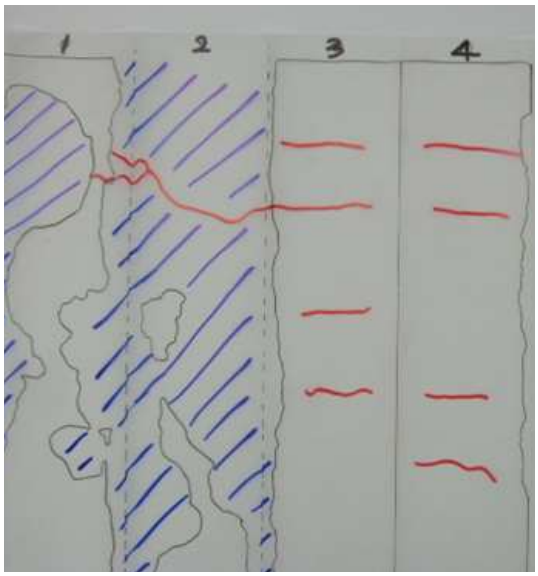


<그림 2.2.110> 전개도의 개요

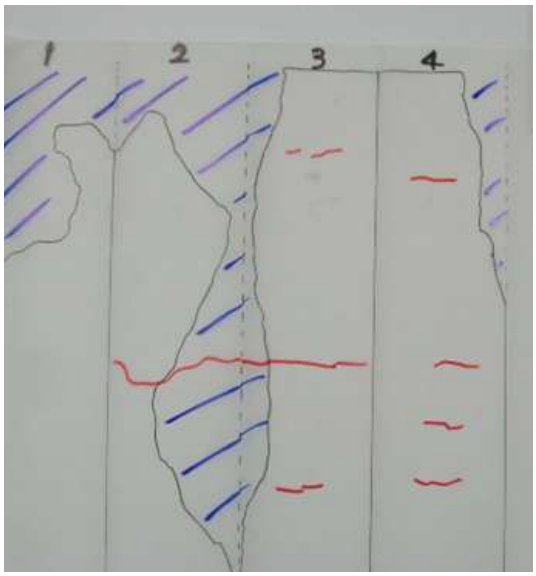
① 섬유가 혼입되지 않은 시험체의 균열형상



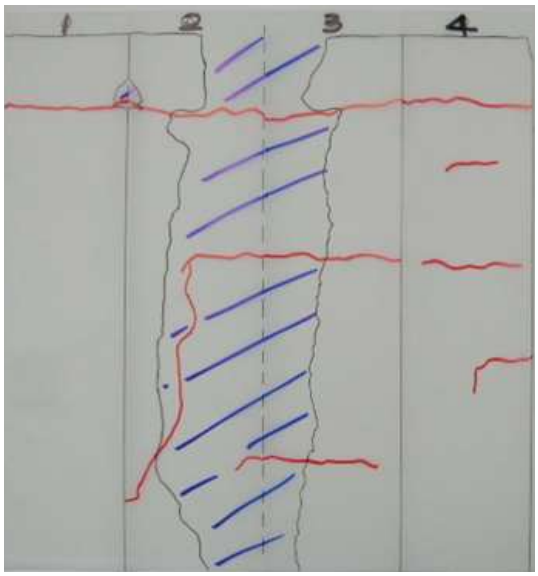
<그림 2.2.111> 시험체명
F2-NSF0W(1)의 폭렬 및 균열현상



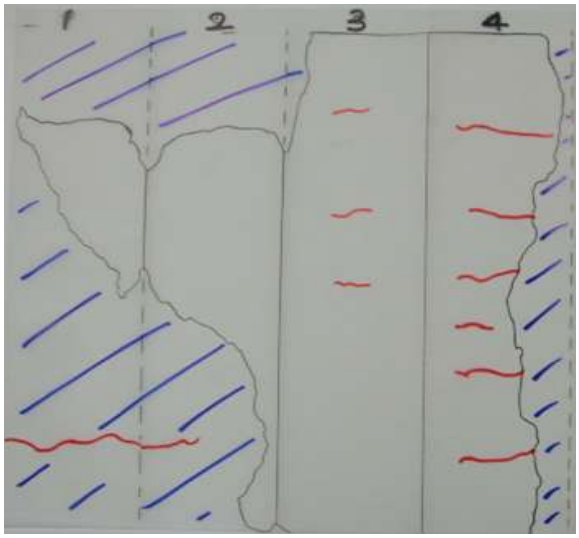
<그림 2.2.112> 시험체명
F2-NSF0W(3)의 폭렬 및 균열현상



<그림 2.2.113> 시험체명
F2-NSF0A(1)의 폭렬 및 균열현상



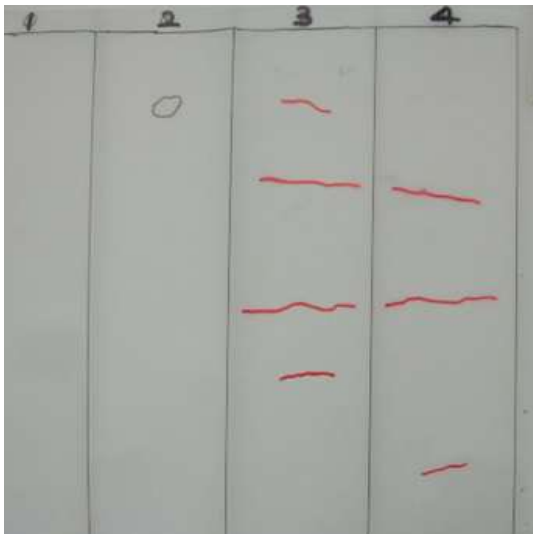
<그림 2.2.114> 시험체명
F2-NSF0A(2)의 폭렬 및 균열현상



<그림 2.2.115> 시험체명
F2-NSF0A(3)의 폭렬 및 균열현상

② 섬유가 1.5kg/m3혼입된 시험체의 균열형상

섬유가 혼입되어 있는 실험체에는 앞서 말한바와 같이 폭렬은 발생하지 않거나, 경미한 수준에 불과하다. 그러나 2면가열조건의 시험체에는 4면가열에서 발생한 표면부에의 균열이 아닌 비가열면까지 균열이 진전되어 있는 것을 알 수 있다.



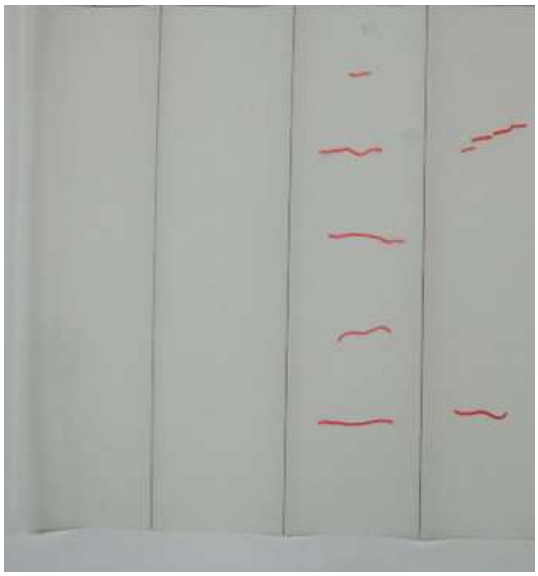
<그림 2.2.116> 시험체명
F2-NSF1.5W(1)의 폭렬 및 균열현상



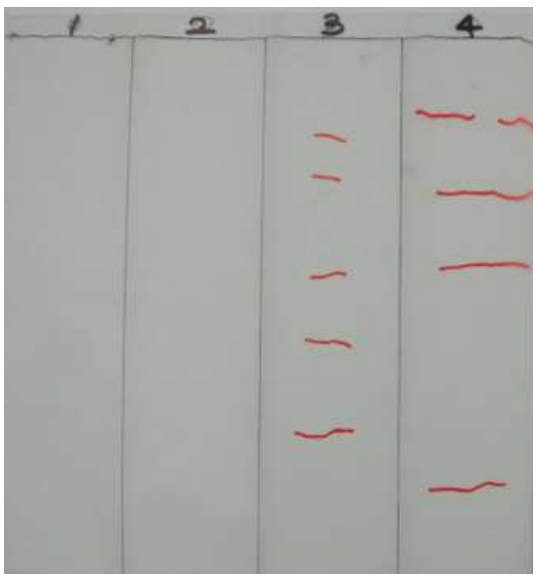
<그림 2.2.117> 시험체명
F2-NSF1.5W(2)의 폭렬 및 균열현상



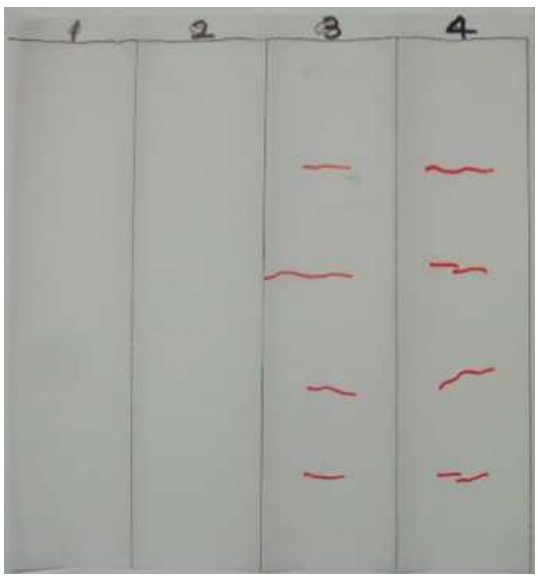
<그림 2.2.118> 시험체명
F2-NSF1.5W(3)의 폭렬 및 균열현상



<그림 2.2.119> 시험체명
F2-NSF1.5A(1)의 폭렬 및 균열현상



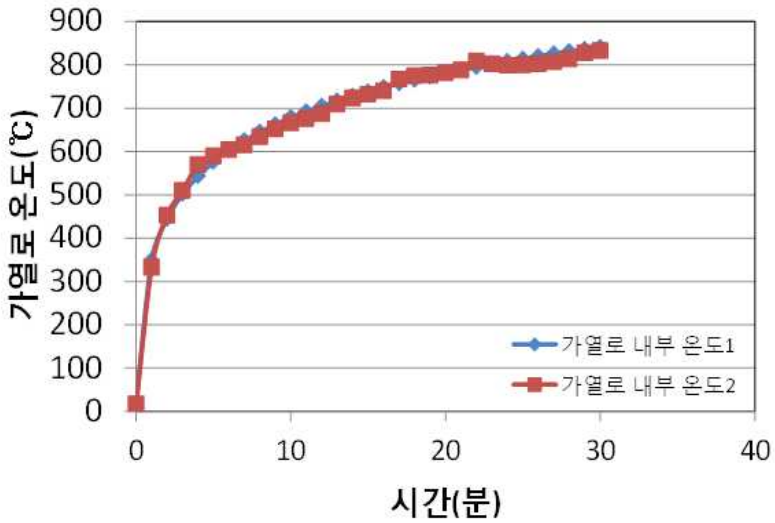
<그림 2.2.120> 시험체명
F2-NSF1.5A(2)의 폭렬 및 균열현상



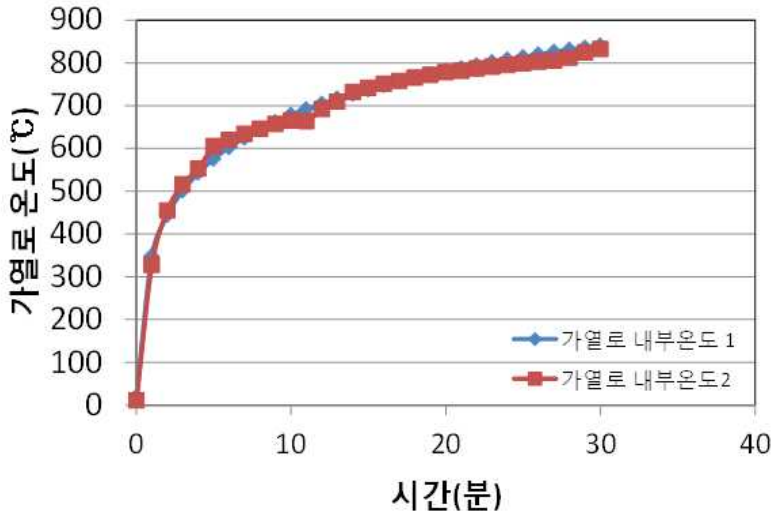
<그림 2.2.121> 시험체명
F2-NSF1.5A(3)의 폭렬 및 균열현상

(다) 가열 실험시 가열로 내부 온도 및 시험체 내부온도

가열실험은 시험체의 개수를 고려하여 2회로 나누어 가열실험을 실시하였으며, 가열실험시에 있어서 가열로 내부의 시간-온도 곡선을 각각 <그림 2.2.122>와 <그림 2.2.123>에 나타내었다. 가열조건은 건축물의 표준가열곡선(ISO834)준하여 30분 가열하는 조건이다.



<그림 2.2.122> 섬유 혼입율 0kg/m^3 시험체에 대한 가열시험 시 가열로 내부온도



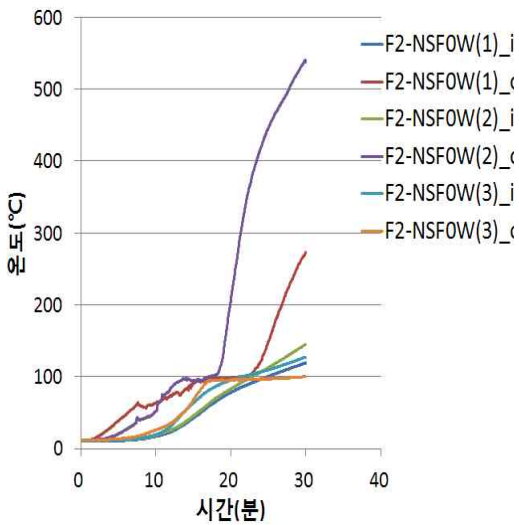
<그림 2.2.123> 섬유 혼입율 1.5kg/m^3 시험체에 대한 가열시험 시 가열로 내부온도

2면가열조건에서의 실험체 측정된 시간-온도의 경우 ①실험체 내부와 ②실험체와 내화세라믹보드 사이에 열전대를 설치하였다. 따라서 이를 구분하기 위하여 실험체명 마지막에 실험체 내부에 설치대 열전대의 경우(in), 실험체와 내화세라믹보드 사이에 설치된 열전대의 경우 out으로 표기하여 나타내었다.

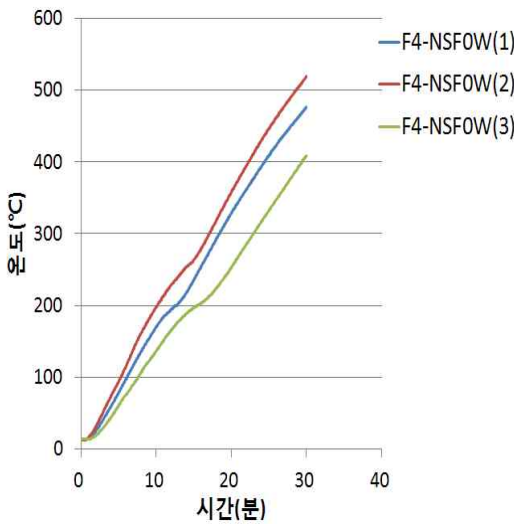
① 섬유0kg/m^3 시험체의 시간-온도곡선

각각의 시험체 내부에서의 시험체의 시간-온도곡선을 <그림 2.2.124>~<그림 2.2.131>에 나타내었다. 여기서 <그림 2.2.124>와 <그림 2.2.125>는 함수율이 높은 시험체 내부의 온도-시간 그래프로서, 2면가열시험체의 내부온도 보다 4면가열시험체의 내부온도가 크게 상승한 것으로 나타났다.

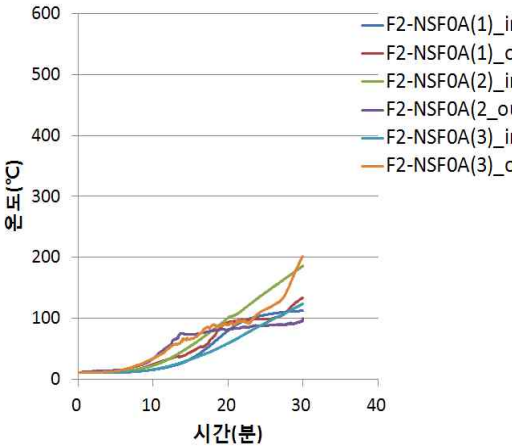
또한, <그림 2.2.126>와 <그림 2.2.127>은 함수율이 낮은 시험체 내부의 온도-시간 그래프를 나타낸 것으로, 함수율이 높은 시험체와 동일하게 2면가열시험체의 내부온도 보다 4면가열시험체의 내부온도가 크게 상승한 것으로 나타났다. 50mm의 내화세라믹보드로 피복된 시험체의 표면에서의 온도는 F2-NSF0W(3)_out의 시간-온도곡선의 결과로부터 120℃로 제어된 것으로 판단되어지며, F2-NSF0W(1)_out과 F2-NSF0W(2)_out의 경우 18분경 및 23분경 폭렬현상으로 인하여 급격히 상승한 것으로 판단된다.



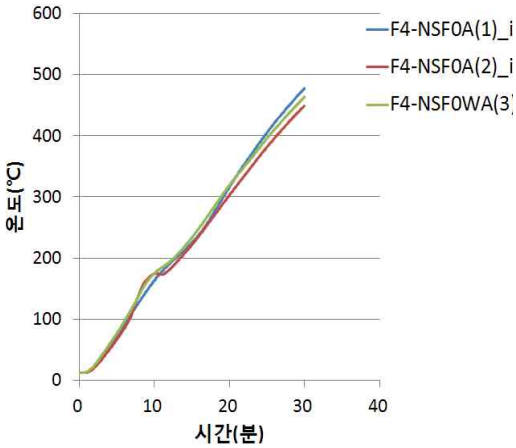
<그림 2.2.124> 2면가열 시험체의 시간-온도곡선(함수율 높음)



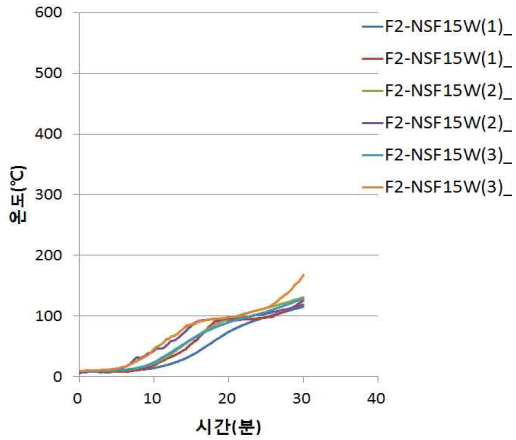
<그림 2.2.125> 4면가열 시험체의 시간-온도곡선(함수율 낮음)



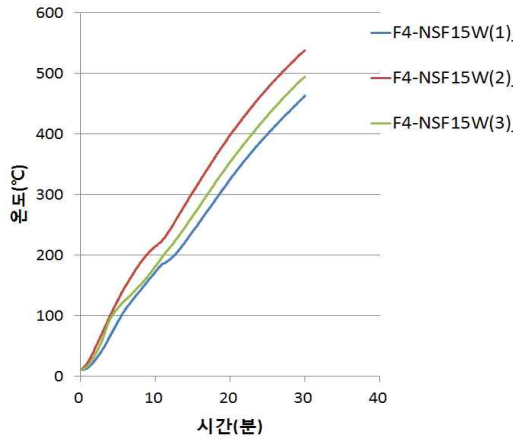
<그림 2.2.126> 2면가열 시험체의 시간-온도곡선(함수율 낮음)



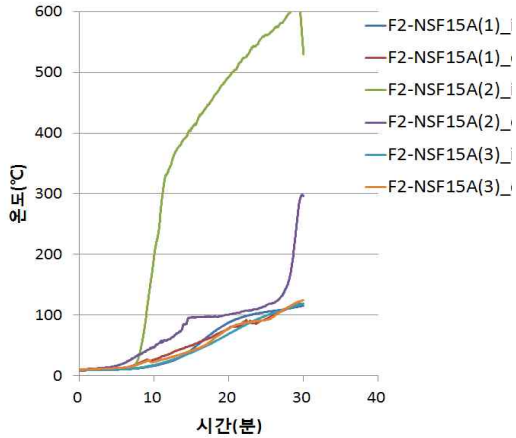
<그림 2.2.127> 2면가열 시험체의 시간-온도곡선(함수율 낮음)



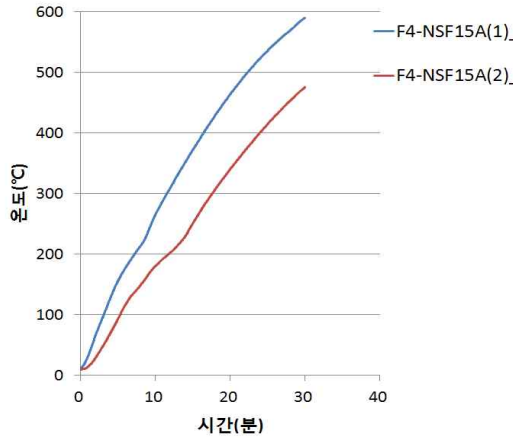
<그림 2.2.128> 2면가열 시험체의 시간-온도곡선(함수율 높음)



<그림 2.2.129> 4면가열 시험체의 시간-온도곡선(함수율 높음)



<그림 2.2.130> 2면가열 시험체의 시간-온도곡선(함수율 낮음)



<그림 2.2.131> 4면가열 시험체의 시간-온도곡선(함수율 낮음)

② 섬유1.5kg/m^3 시험체의 시간-온도곡선

각각의 시험체 내부에서의 시험체의 시간-온도곡선을 <그림 2.2.128>~<그림 2.2.131>에 나타내었다. 여기서 <그림 2.2.128>과 <그림 2.2.129>은 함수율이 높은 시험체 내부의 온도-시간 그래프로서, 2면가열시험체의 내부온도 보다 4면가열시험체의 내부온도가 크게 상승한 것으로 나타났다. 또한, <그림 2.2.130>과 <그림 2.2.131>은 함수율이 낮은 시험체 내부의 온도-시간 그래프를 나타낸 것으로, 함수율이 높은 시험체와 동일하게 2면가열시험체의 내부온도 보다 4면가열시험체의 내부온도가 크게 상승한 것으로 나타났다.

③ 가열전후 시험체의 중량변화

각각의 시험체에 대하여 가열전후 중량을 측정하였으며, 측정값을 <표 2.2.55>에 나타내었다. 또한, 가열전후 중량변화율을 섬유혼입량 0kg/m^3과 1.5kg/m^3로 나누어 <그림 2.2.132>와 <그림 2.2.133>에 나타내었다.

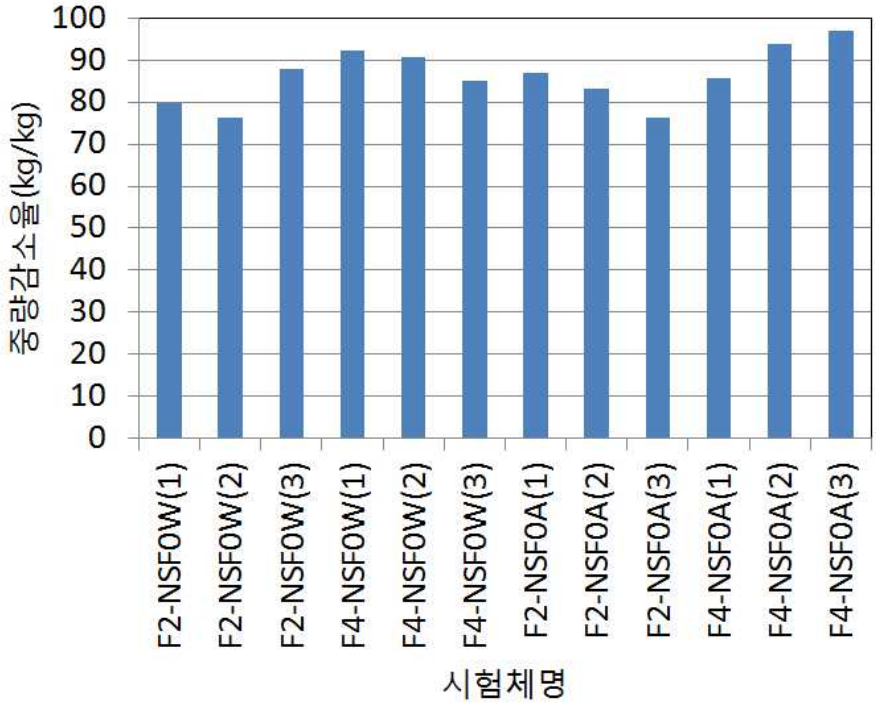
먼저 섬유혼입량 0kg/m^3의 시험체의 경우 심각한 폭렬이 발생하였으며 가열 전 중량을 기준으로 하여 76.2~94.0%의 중량변화율을 나타내었다. 반면, 폭렬이 발생하지 않은 시험체 F4-NSF0W(1), F4-NSF0A(2), F4-NSF0A(3)의 경우 92.3%, 93.7%, 96.9%의 중량변화율을 나타냈다.

섬유혼입량 1.5kg/m^3의 시험체에서 함수율이 높은 시험체의 경우 매우 경미한 폭렬이 발생하였으며, 중량변화율은 92.3~94.0%를 나타내었다. 또한, 함수율이 낮은 시험체의 경우 폭렬이 전혀 발생하지 않았으며, 중량변화율은 93.0~95.1%를 나타났다.

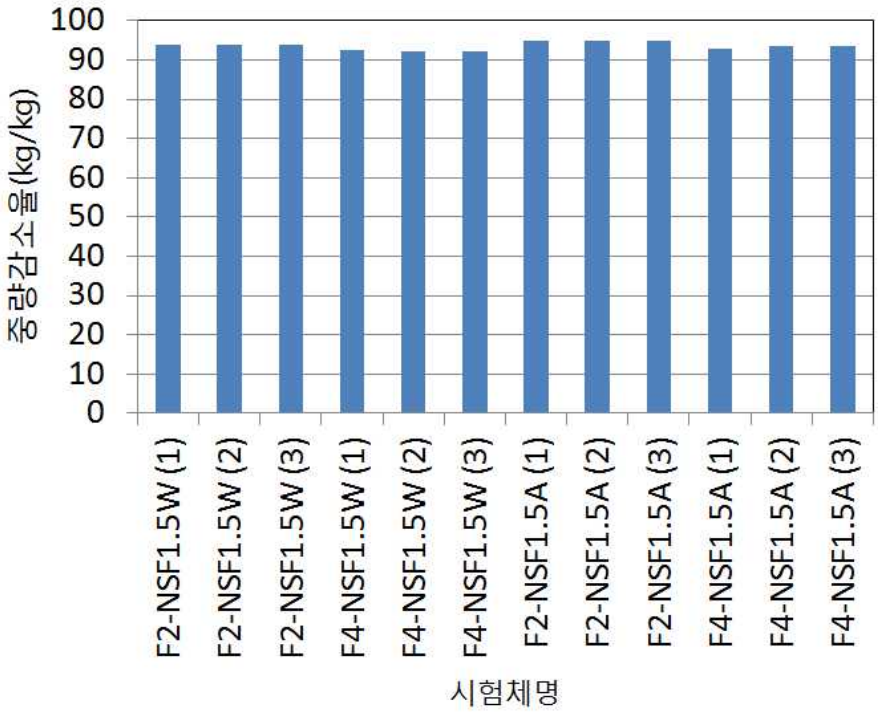
폭렬이 발생안함에도 불구하고 중량변화가 발생한 이유는 고온에 노출된 콘크리트 내부에서의 화학적 변화 및 콘크리트 내부에 존재하고 있는 잉여수의 증발로 인한 중량감소가 주된 원인으로 판단된다.

<표 2.2.55> 가열전후 시험체의 중량변화

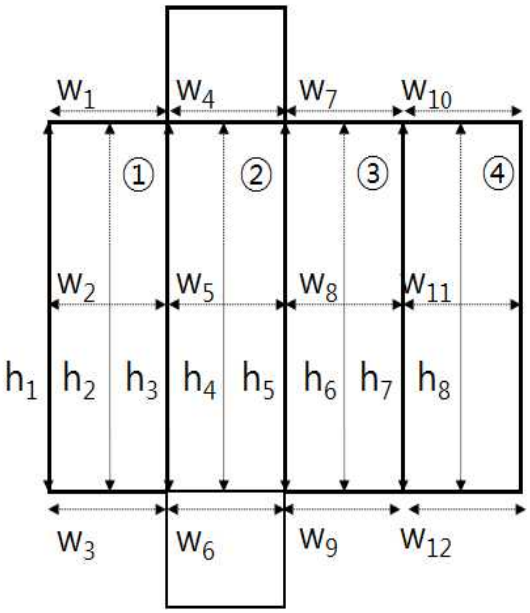
시험체명	가열전 중량 (g)	가열후 중량 (g)	비고
F2-NSF0W(1)	9962	7953	-
F2-NSF0W(2)	10063	7670	-
F2-NSF0W(3)	9550	8401	-
F4-NSF0W(1)	9746	8995	폭렬발생안함
F4-NSF0W(2)	9728	8832	-
F4-NSF0W(3)	9870	8396	-
F2-NSF0A(1)	9513	8276	-
F2-NSF0A(2)	9620	8012	-
F2-NSF0A(3)	9656	7370	-
F4-NSF0A(1)	9552	8181	-
F4-NSF0A(2)	9786	9172	폭렬발생 안함
F4-NSF0A(3)	9225	8938	폭렬발생 안함
F2-NSF1.5W (1)	9941	9348	표면의 경미한폭렬
F2-NSF1.5W (2)	9676	9070	표면의 경미한폭렬
F2-NSF1.5W (3)	9788	9196	표면의 경미한폭렬
F4-NSF1.5W (1)	9663	8926	표면의 경미한폭렬
F4-NSF1.5W (2)	9782	9030	표면의 경미한폭렬
F4-NSF1.5W (3)	9835	9082	표면의 경미한폭렬
F2-NSF1.5A (1)	9741	9259	폭렬발생 안함
F2-NSF1.5A (2)	9575	9081	폭렬발생 안함
F2-NSF1.5A (3)	9581	9099	폭렬발생 안함
F4-NSF1.5A (1)	9810	9119	폭렬발생 안함
F4-NSF1.5A (2)	9915	9282	폭렬발생 안함
F4-NSF1.5A (3)	9688	9061	폭렬발생 안함



<그림 2.2.132> 섬유혼입량 0kg/m^{3}의 가열전후 중량감소율(%)



<그림 2.2.133> 섬유혼입량 0kg/m^{3}의 가열전후 중량감소율(%)



<그림 2.2.134> 시험체의 크기 측정 위치에 관한 개요

④ 가열전후 시험체의 크기변화

콘크리트의 경우 고온에 가열에 의하여 표면부의 팽창이 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 실험에서는 가열에 따른 시험체의 크기 변화를 측정하고자 한다.

시험체의 크기측정은 가열전과 가열후 동일한 위치에서 시험체의 크기를 측정하였으며, 측정위치는<그림 2.2.134>에 나타내었다.

(라) 실험고찰

고온에 노출된 고강도 콘크리트의 경우 함수율이 높을수록 폭렬발생의 범위 및 깊이가 커지는 것을 확인할 수 있었다.

2면가열실험의 경우, 4면가열실험보다 폭렬발생의 범위 및 깊이가 커지는 것을 확인할 수 있었다.

2면가열실험의 균열특성을 보면, 균열은 고온에 노출된 면으로부터 비가열면으로 진전되는 것을 확인 할 수 있다. 이는 화재에 노출된 면에서 열팽창이 발생함으로서 균열이 내부로 진전되는 것으로 예상된다. 또한, 이 열팽창에 의한 팽창력에 의해서 시험체의 절단이 발생한 것으로 판단된다.

나. 고강도 콘크리트 벽체부재를 이용한 2면 가열 실험

(1) 실험 개요

폭렬에 대한 가설 중 열응력설과 수증기압설에 대한 원인 규명을 위한 기초실험으로써 고강도 콘크리트(100MPa) 벽체부재(600×600mm) 2개를 제작하여 전면가열(600×600mm)과 부분가열(300×300mm)에 대하여 가열실험을 수행하여 구속조건에 따른 폭렬의 영향을 비교 분석하고자 한다.

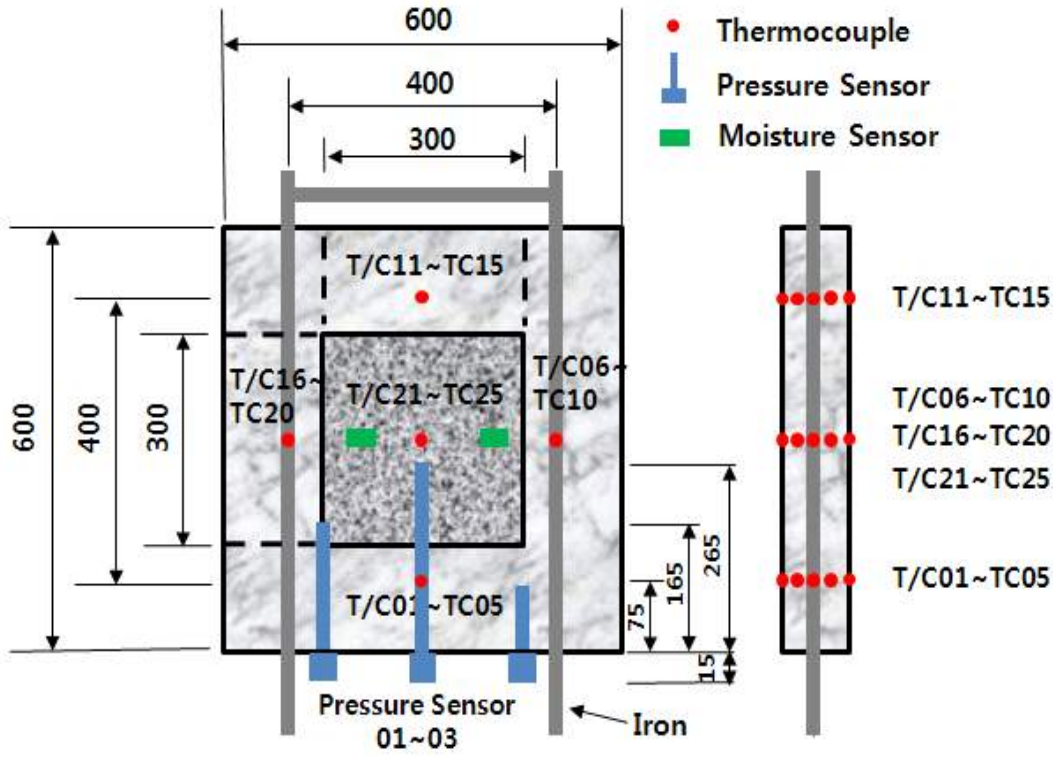
(2) 계획 및 방법

콘크리트의 배합 및 실험 방법을 다음 <표 2.2.56>에 나타내었으며, 콘크리트의 설계강도는 100MPa, 양생조건은 봉함양생 28일을 실시하였다. 다음 <그림 2.2.135>와 같이 실험체 size는 600×600mm로 제작하였으며, 실험 변수로는 전면가열 600×600mm과 부분가열 300×300mm로 변수를 설정하였다. 또한, 실험체의 함수율을 고려한 함수율센서 2개와 온도분포를 확인하기 위해 열전대를 0, 25, 75, 100mm에 설치하였으며 내화가열 시험 형상은 <그림 2.2.136>과 같고, 가열조건은 ISO 834 30분 가열을 실시하였다.

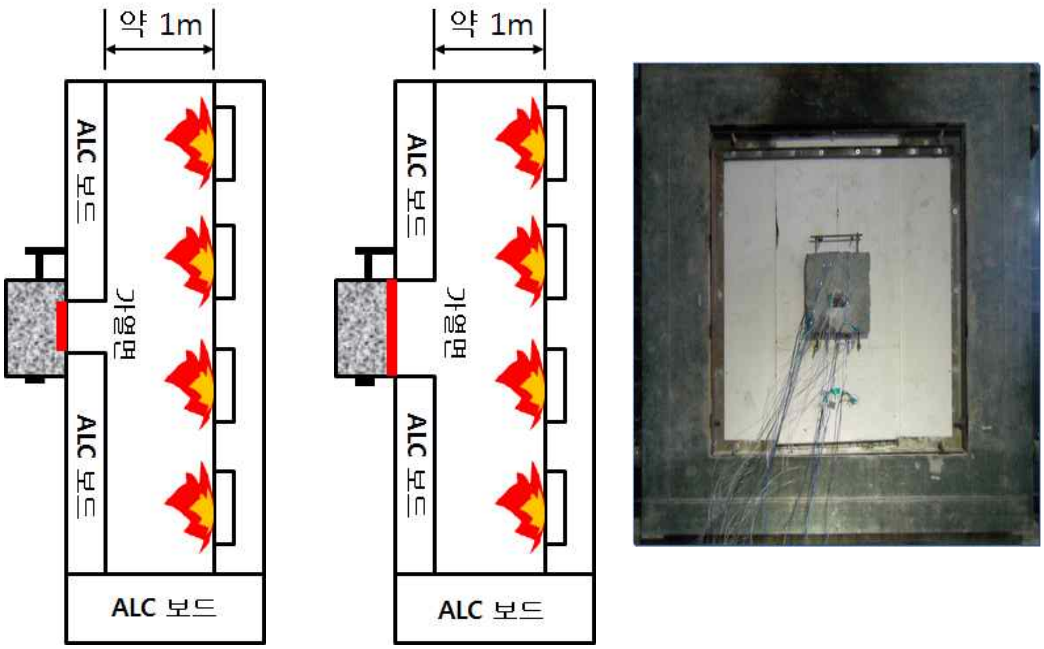
<표 2.2.56> 실험 배합

Fck (MPa)	W/B (wt.)	Slump	Air	S/a	SF	Unit weight (Kg/m^3)			
						W	OPC	S	G
100	0.2	650±50	4	0.43	0.10	170	765	555	751

양생 조건	벽체 크기	실험변수		실험 측정항목		열전대 위치	가열조건 (ISO 834)
				가열전	가열후		
봉함 양생 (28일)	600×600×100	전면 가열	600×600	- 공기량 - 슬럼프 - 압축강도	- 폭렬깊이 - 파괴면 형상 - 온도분포	0mm 25mm 50mm 75mm 100mm	30 min
		부분 가열	300×300				



<그림 2.2.135> 벽체 실험체 개요

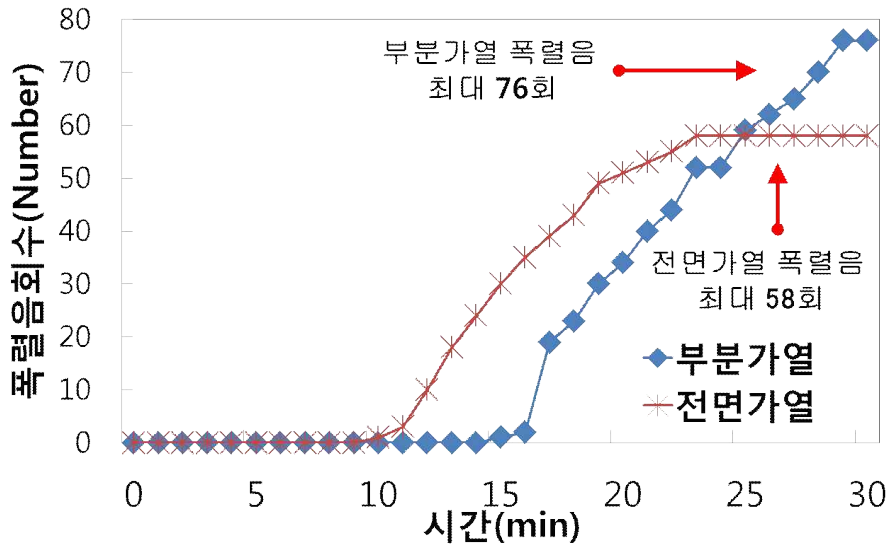


<그림 2.2.136> 벽체 내화 가열 형상

(3) 가열 실험결과

(가) 가열에 의한 폭렬 영향

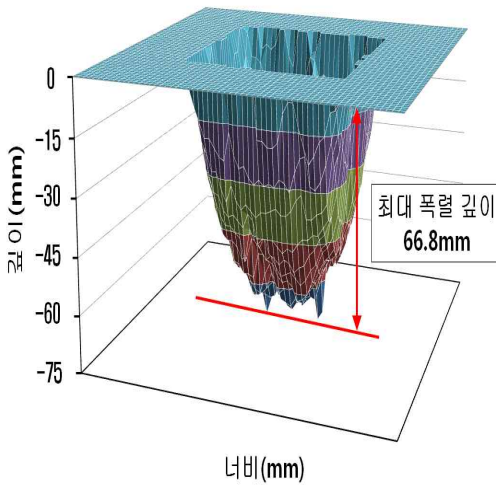
가열 실험 후 실험체의 사진과 가열 실험시 발생되었던 폭렬음을 <그림 2.2.137>에 나타내었다. 폭렬의 형상은 부분가열의 실험체가 면적은 작지만, 전면가열 실험체보다 더 깊이 폭렬이 발생하였다. 또한 폭렬음은 전면가열의 실험체에서 먼저 시작음이 들렸지만, 17분 이후부터 부분가열의 실험체에서 많은 폭렬음이 들렸다. 다음 <그림 2.2.138>은 폭렬의 형상을 측정한 결과이며, 부분가열과 전면가열에서 최대 47.5mm, 36mm의 폭렬이 발생하였다.



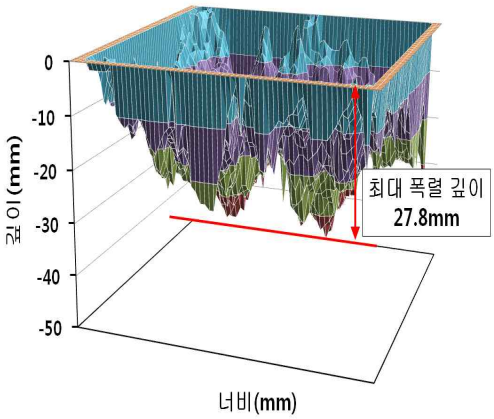
<그림 2.2.137> 폭렬음 누계수



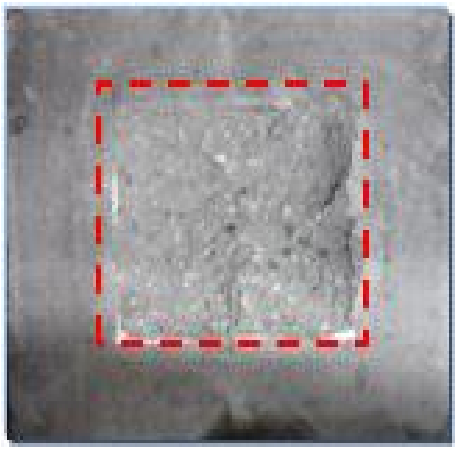
(a) 부분가열 시험체 폭렬 두께　　(b) 전면가열 시험체 폭렬 두께



(c) 부분가열 시험체 폭렬 형상



(d) 전면가열 시험체 폭렬 형상



(e) 부분가열 시험체 폭렬 사진



(f) 전면가열 시험체 폭렬 사진

<그림 2.2.138> 가열 후 폭렬 형상

(나) 가열시 온도 분포

부분 가열 실험체의 가열 부분과 비가열 부분의 온도를 <그림 2.2.139>에 나타내었으며, 전면 가열 실험체의 온도를 <그림 2.2.140>에 나타내었다.

부분 가열시 폭렬은 0mm에서 5 분, 25mm에서 22 분, 50mm에서 25 분 발생되었다. 반면, 비가열 부분은 가열을 받지 않았기 때문에 온도는 100℃ 이하로 유지되었다. 전면가열 실험체의 경우, 깊이 0mm에서 3 분에 폭렬이 발생하였으며, 열전대 설치 위치에서의 위치에서는 폭렬이 발생하지 않았다. <그림 2.2.141>은 부분가열과 전면가열의 관계를 나타내었다.

(다) 가열에 의한 내부 압력값

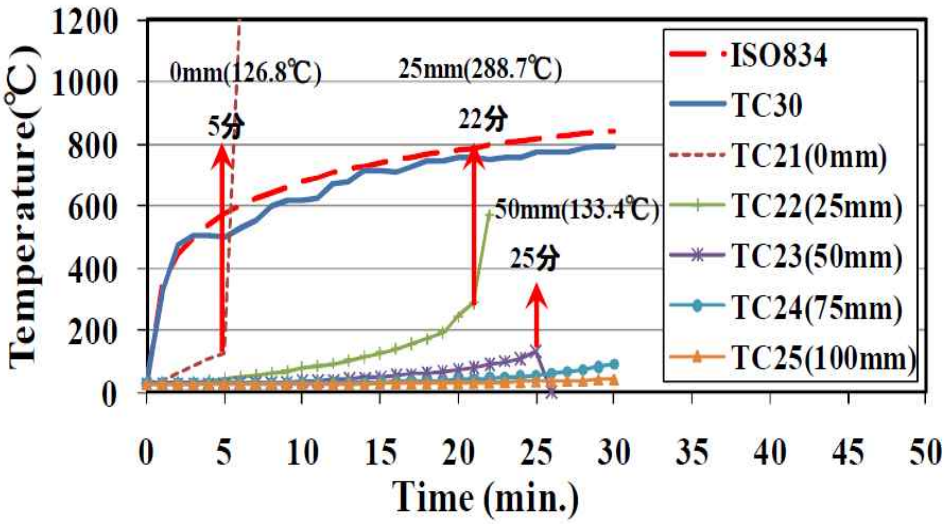
2개의 실험체에서 측정된 내부 압력값을 <그림 2.2.142>에 비교하였다. 비교결과, 2가지 실험체의 압력지그 길이가 가장 긴 PS-02의 내부 압력이 가장 높았으며 부분가열과 전면가열 실험체의 경우 최대 15.1kpa, 291.5kpa이 측정되었다. 또한, 압력지그 길이가 짧은 PS-03의 경우 부분가열, 전면가열 두 실험체에서 변화가 거의 없었다. 특히, 부분가열과 전면가열의 내부 압력값은 전면가열의 압력이 더 높은 경향을 나타났다.

(라) 실험체의 함수율(전극법)

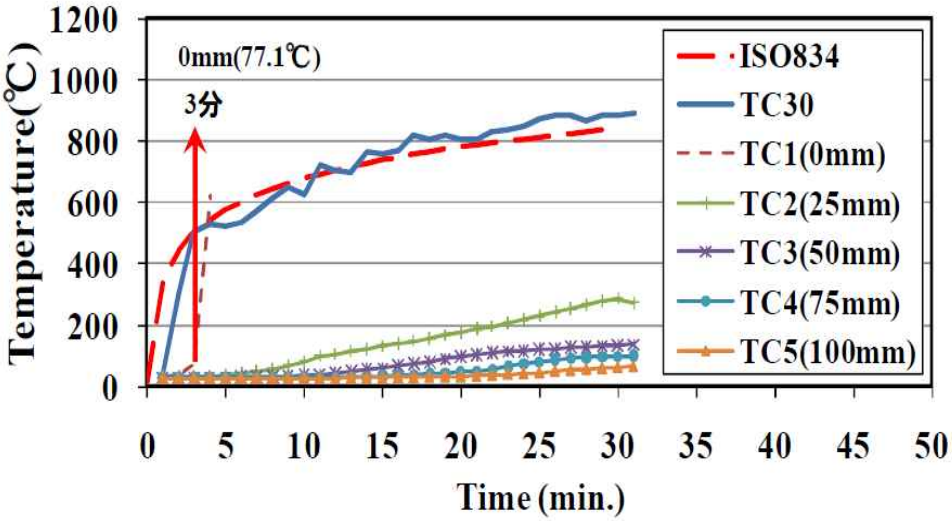
가열 실험중의 함수율 센서의 저항값의 변화를 <그림 2.2.143>에 나타내었다. 센서는 함수율이 증가하면 전기 저항값이 작아지는 특성이 있으므로, 수치가 작을 정도 함수율이 큰 것을 의미한다.

부분 가열의 깊이 25mm 에서는 22 분, 깊이 50 mm에서는 25 분에 폭렬이 발생 했다. <그림 2.2.143>(1)에 나타난 바와 같이, 25mm 에서는 22 분 시에는 함수가 감소하기 시작하는 상태였으며, <그림 2.2.143>(2)에 나타난 바와 같이, 깊이 50mm 에서는 함수율이 증가한 상황으로 폭렬이 일어났다.

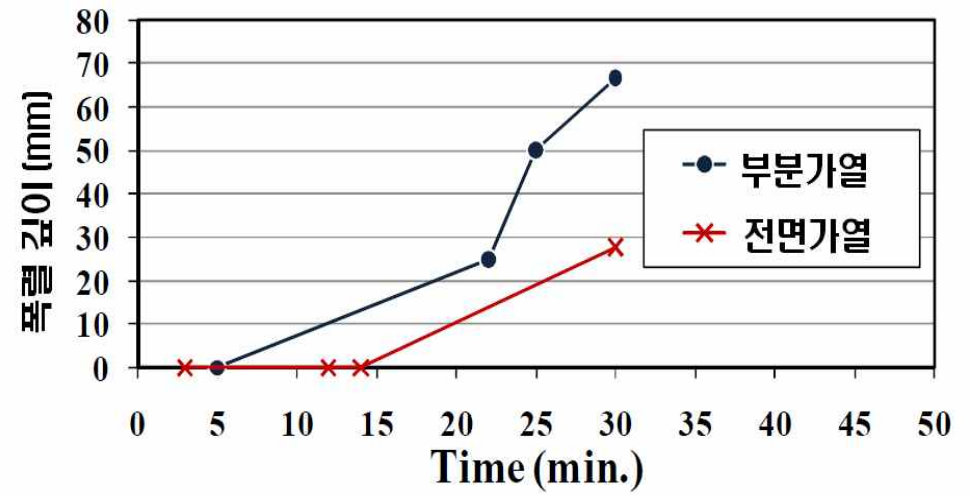
전면 가열 조건으로의 함수율 변화를 <그림 2.2.143>(3), <그림 2.2.143>(4), 에 나타내었다. 전면 가열 조건은 수분이 증가해도 깊이 25mm 까지는 폭렬이 생기지 않았다. 또한, 부분 가열과 전면 가열을 비교하면, 25mm 에서는 유사하였으며, 50mm 에서는 전면 가열의 경우가 조금 빨리 변화가 생기고 있었다.



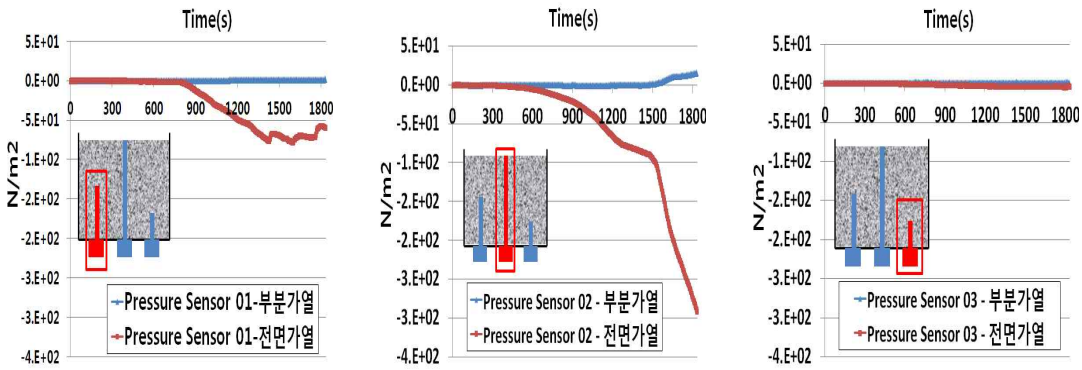
<그림 2.2.139> 부분가열면에서의 깊이별 온도값



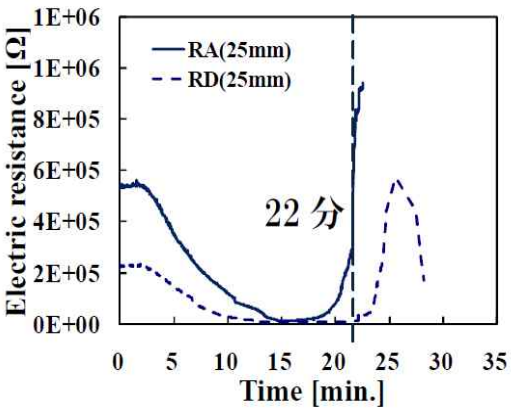
<그림 2.2.140> 전면가열면에서의 깊이별 온도값



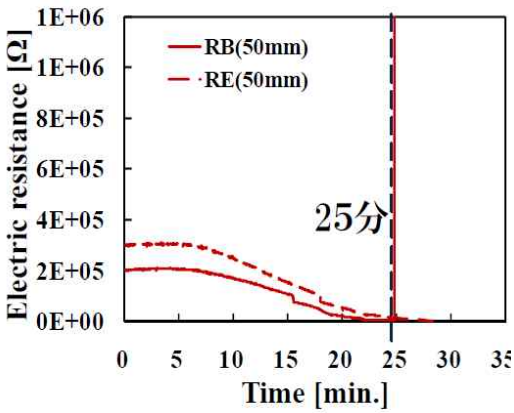
<그림 2.2.141> 가열면에서의 깊이별 온도값



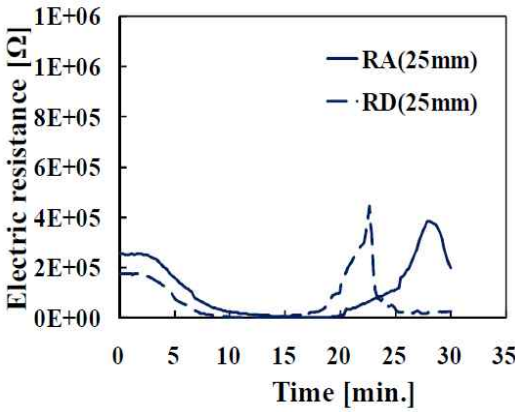
<그림 2.2.142> 가열면에서의 깊이별 내부 압력값



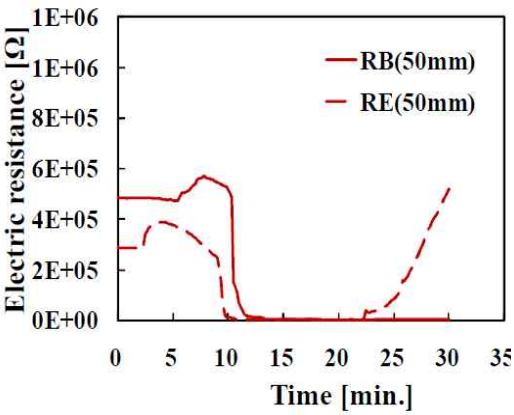
1. 부분가열 (깊이 25mm)



2. 부분가열 (깊이 50mm)



3. 전면가열 (깊이 25mm)



4. 전면가열 (깊이 50mm)

<그림 2.2.143> 가열면에서의 깊이별 전기 저항값

(4) 벽체를 이용한 2면 가열실험 결론

벽체부재 2개를 제작하여 부분가열과 전면가열을 실시하여 기존에 알려진 열응력설, 수증기압설의 폭렬발생에 대한 영향을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(가) 부분 가열은 최대 폭렬 깊이 66.8mm가 측정되었고, 전면 가열은27.8mm가 측정되어 부분 가열의 경우가 전면가열의 경우보다 약 3배 가량 폭렬 깊이가 깊었음을 알 수 있었다.

(나) 부분 가열에 있어서 가열부분은 주변으로부터의 구속에 영향을 받아 열응력이 큰 것을 알 수 있으며, 이로 인한 폭렬 발생에 영향을 미쳤다고 판단된다.

(다) 전면 가열에서는 내부의 함수율 변화가 크고, 공극 압력도 크다고 추정되지만, 공극 압력의 영향은 상대적으로 작다고 판단되며, 향후, 콘크리트 부재내의 내부 압력값을 면밀한 분석을 통하여 입력값을 도출하는 것이 필요하다.

8. 기존 슬래브 구조물의 성능 평가

지하주차장의 가연물조사와 차량 연소실험을 통하여 발열량과 화재시 온도분포 데이터를 확보 할 수 있었다. 확보된 데이터를 기반으로 차량화재에 대한 기초적인 가열곡선을 도출할 수 있었으며, 기존 내화성능 기준과 차량화재에 대한 가열곡선에 대한 비교가 필요하다고 사료된다. 이에 따라, 지하주차장 구조물의 슬래브·바닥 구조 부재에 대하여 기존 내화성능 기준인 ISO 834 및 KS F-2257과 차량화재를 고려한 가열곡선에 대한 내화 실험을 실시하고, 화재 실험 이후 구조물의 안전성 검토를 위해 잔존내력 시험을 수행하여 구조물의 안전성을 검토하고자 하였다.

가. 슬래브 내화 성능평가 시험

(1) 실험 개요

내화 거동실험을 위해 다음 <표 2.2.57>과 같은 30MPa의 일반강도 배합으로 4000×600×180mm의 실대형 슬래브 부재를 4개 다음 <그림 2.2.144>와 같이 제작하였다. 또한, 다음 <표 2.2.58>과 같이 실험계획을 작성하였으며, 내화거동 실험을 위해 3가지 조건을 설정하였다. 내화실험에 대한 조건은 1)비가열(화재피해가 없는 경우), 2) 기존 적용되고 있는 ISO 834 및 KS F-2257에 의거한 가열 실험 3) 차량화재를 고려한 가열 실험으로 설정하였다.

내화실험시 측정항목은 가열시 온도분포를 확보하기 위해 시험체 중앙부분(2000mm구간)에 0mm, 20mm, 40mm, 60mm, 100mm 총 5 곳에 K-Type 열전대를 설치하였으며, 가열 후 시험체 바닥면의 폭렬성상 및 바닥면 하부와 측면의 균열성상을 확인하고자 하였다.

또한, 내화 실험 이후 구조물의 안전성 검토를 위해 잔존내력 시험을 수행하고자 하였다. 재하 실험시 휨 철근의 변형률을 얻기 위해 주방향 하부 철근 2개의 중앙부에 변형률 게이지(WSG)를 설치하였다.

<표 2.2.57> 슬래브 시험체 배합표

Fck (MPa)	W/B (wt.)	Slump (mm)	Air (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m^3]						
					W	B	OPC	S	G	FA	F
30	40	150±50	4.5	47.5	166	414	331	802	900	83	4.97

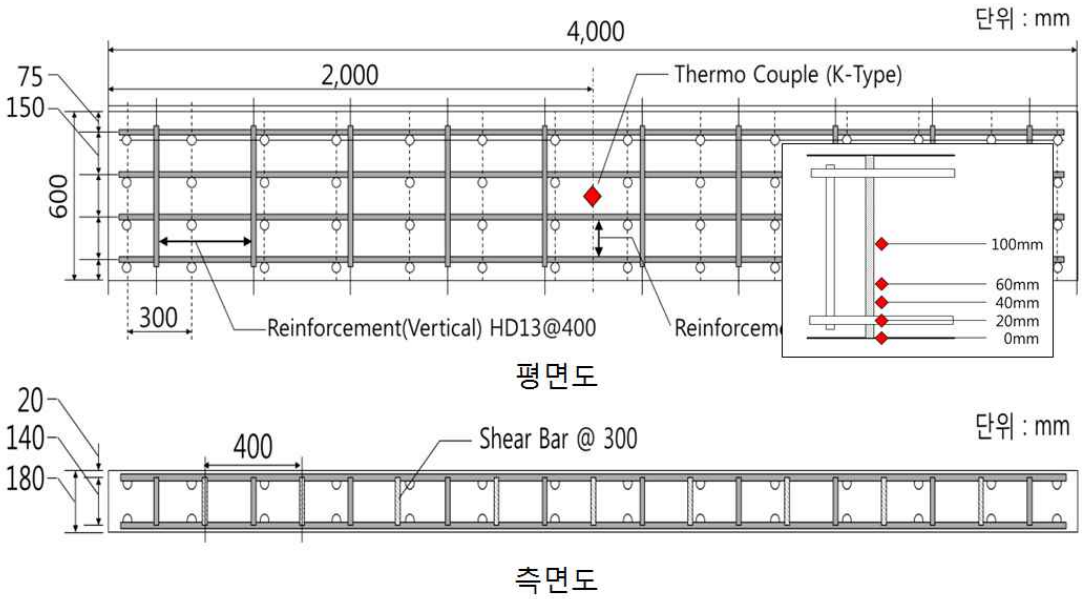
<표 2.2.58> 기존 슬래브 내화 가열 실험 계획

Specimen	fck (MPa)	fy (MPa)	Cover Depth (mm)	Water content (wt.%)	Heating Rate*	Heating time (min)
RC-F1	31	410	20	3.5	Ⅱ	60
RC-F2	31	410	20	3.5	Ⅰ	120
RC-F3	31	410	20	3.5	Ⅱ	120

* Ⅰ = $T_\infty = 345\log(8t+1)+20$, Ⅱ = $T_\infty = 510t^{1/6}+20$ (지하공간 화재 가정)







(a) 열전대 설치 형상 및 위치

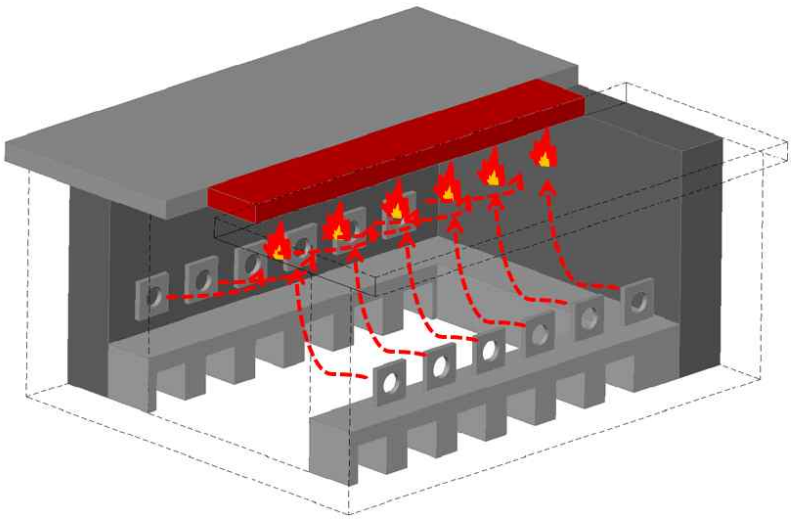


(b) 거푸집 및 타설



(c) 기중 양생 및 탈영

<그림 2.2.144> 시험체 제작 형상



<그림 2.2.145> 수평 가열로 내화 가열 실험 형상도

가열 실험은 여주 방재시험연구원에서 실시하였으며, 가열로의 형상은 다음 <그림 2.2.145>와 같다. 또한, 본 실험은 1면 가열의 무재하 실험이며 가로 4m, 세로 3m, 높이 1.6m의 크기에 하단의 좌·우측 각각 6개의 화구에서 화염이 분출되어 슬래브 시험체 하부에 가열이 가력되는 수평가열로에서 실시하였다.

(2) 실험 결과

(가) RC-F1 가열 결과

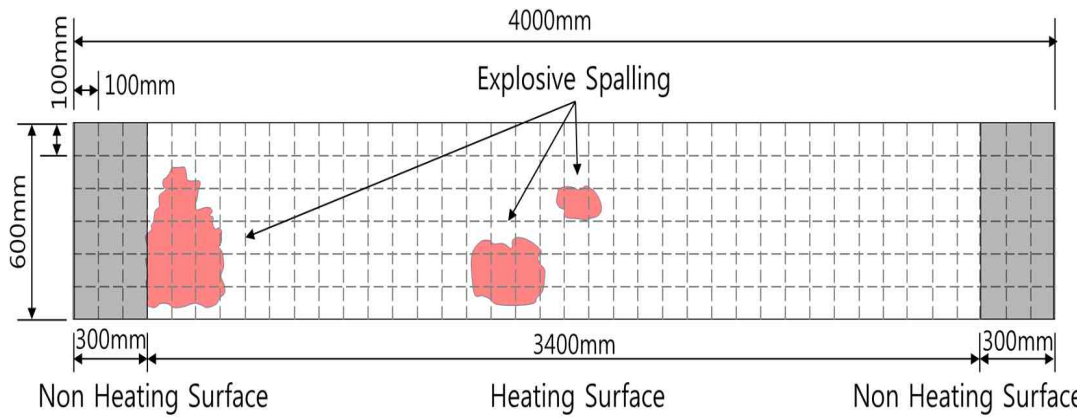
RC-F1의 가열 전 사진은 <그림 2.2.146>과 같으며, 차량화재곡선의 그래프를 이용하여 1시간 내화가열 실험을 실시한 결과 <그림 2.2.147>과 같이 가열 후 일부분 폭렬이 발생하였으며, 최대 폭렬 너비는 가로 460mm × 310mm의 크기로 발생하였다. 시험체 내 폭렬의 위치를 표기한 것과 폭렬 형상을 나타낸 것은 <그림 2.2.148>과 같다. 또한, 가열 온도분포 결과는 <표 2.2.59>에 나타난 바와 같으며, 가열면 표면부(0mm)의 최대 온도는 953.5℃로 나타났다. 화재에 대한 위험성을 보기 위한 RC-F1 실험체의 경우 철근위치 (20mm)에서의 최대 온도는 555.9℃로 나타났기 때문에 1시간 가열이었지만 RC-F3의 ISO 834 표준가열곡선 화재피해보다 큰 폭렬이 발생했다.



<그림 2.2.146> RC-F1 가열 전 사진



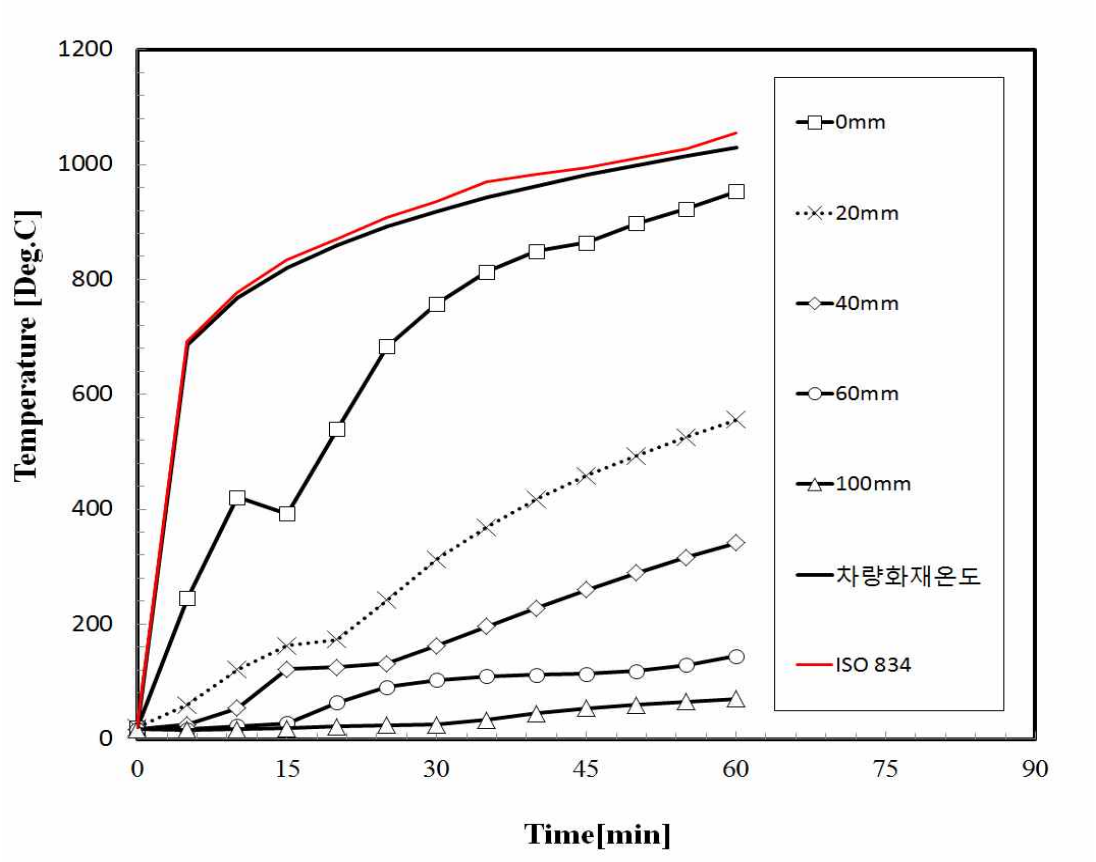
<그림 2.2.147> RC-F1 가열 후 사진



<그림 2.2.148> RC-F1 바닥면 형상

<표 2.2.59> RC-F1의 온도분포 결과

Specimen	Ambient Temp.	Temperature distribution					
		mm	0	30	60	90	120
RC-F1	II 60min	0	20.0	757.5	953.5	-	-
		20	20.0	313.3	555.9		
		40	17.2	162.8	341.7		
		60	16.7	102.6	144.7		
		100	16.8	25.6	70.6		



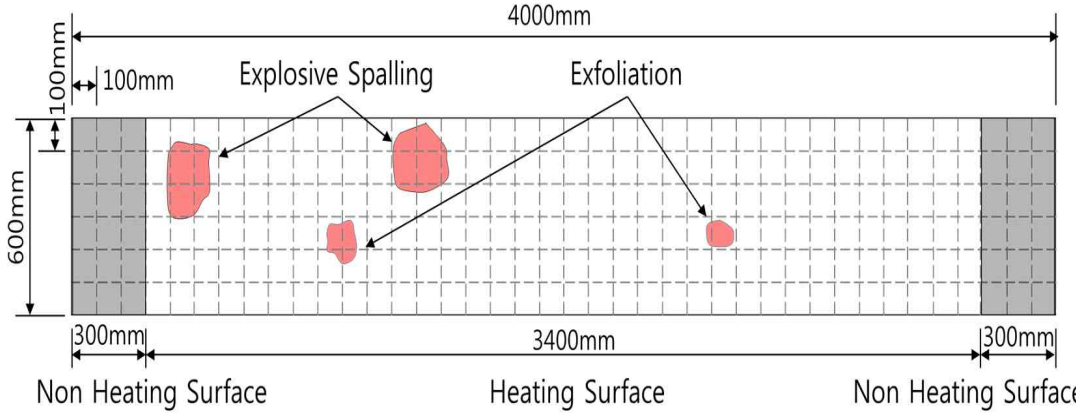
<그림 2.2.149> RC-F1 온도분포 그래프

(나) RC-F2 가열 결과

RC-F2의 가열 전 사진은 <그림 2.2.150>이며, ISO 834 표준가열곡선에 의거한 2시간 가열실험을 실시한 결과이다. 실험 결과 <그림 2.2.151>은 시험체 내 폭렬의 위치를 표기한 것과 폭렬과 균열 형상을 스케치한 것이며, <그림 2.2.152>와 같이 가열 후 폭렬이 부분적으로 발생한 것을 확인 할 수 있었으며, 최대 폭렬 너비는 가로 160mm×230mm의 크기로 발생하였다. 또한 <표 2.2.60>과 같이 내부 온도분포는 RC-F2 실험체의 경우 표면부분 (0mm)에서 1011.4℃의 최고온도가 측정되었으며 철근위치 (20mm)에서의 최고 온도는 730.5℃로 나타났다.



<그림 2.2.150> RC-F2 가열 전 사진



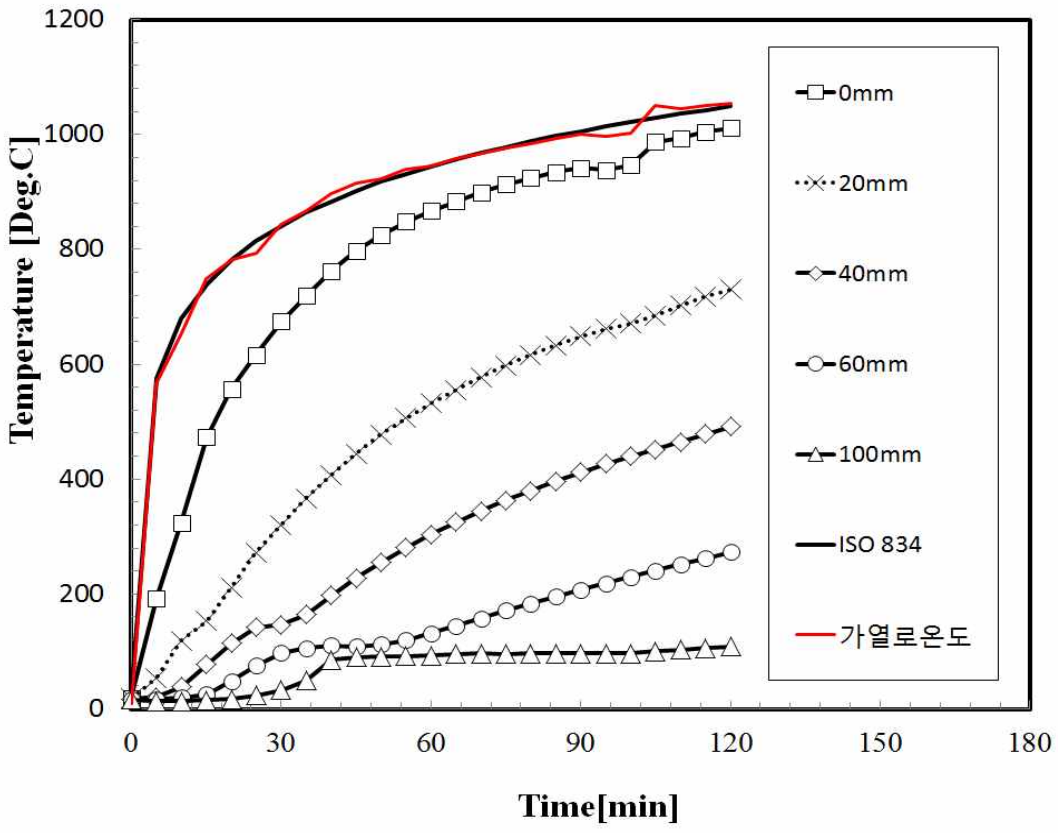
<그림 2.2.151> RC-F2 바닥면 형상



<그림 2.2.152> RC-F2 가열 후 사진

<표 2.2.60> RC-F2의 온도분포 결과

Specimen	Ambient Temp.	Temperature distribution					
		mm	0	30	60	90	120
RC-F2	II 120min	0	18.7	674.3	867.0	941.9	1011.4
		20	17.9	320.1	532.3	648.6	730.5
		40	16.9	146.7	303.6	411.8	491.9
		60	16.3	97.2	131.6	207.5	273.1
		100	16.4	32.9	93.4	96.7	109.0



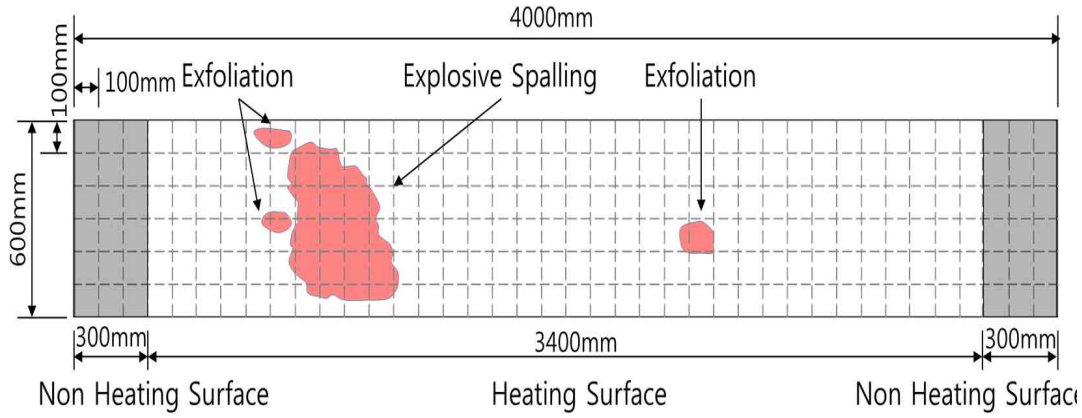
<그림 2.2.153> RC-F2 온도분포 그래프

(다) RC-F3 가열 결과

RC-F3의 가열 전 사진은 <그림 2.2.154>이며, 가열 후 폭렬 형상을 다음 <그림 2.2.155>와 같이 나타 내었다. 또한, 가열 후 폭렬은 <그림 2.2.156>과 같이 일부분 발생한 것을 보이고 있으며, 3개의 실험체중 최대 폭렬 너비가 가로 500mm × 360mm으로 가장 크게 발생하였다. RC-F3의 온도 분포는 표면에서 1091.4℃로 가장 높은 온도가 측정되었으며, 철근위치 20mm 부근에서 785.2℃가 측정되었고 <표 2.2.61>과 같다.



<그림 2.2.154> RC-F3 가열 전 사진



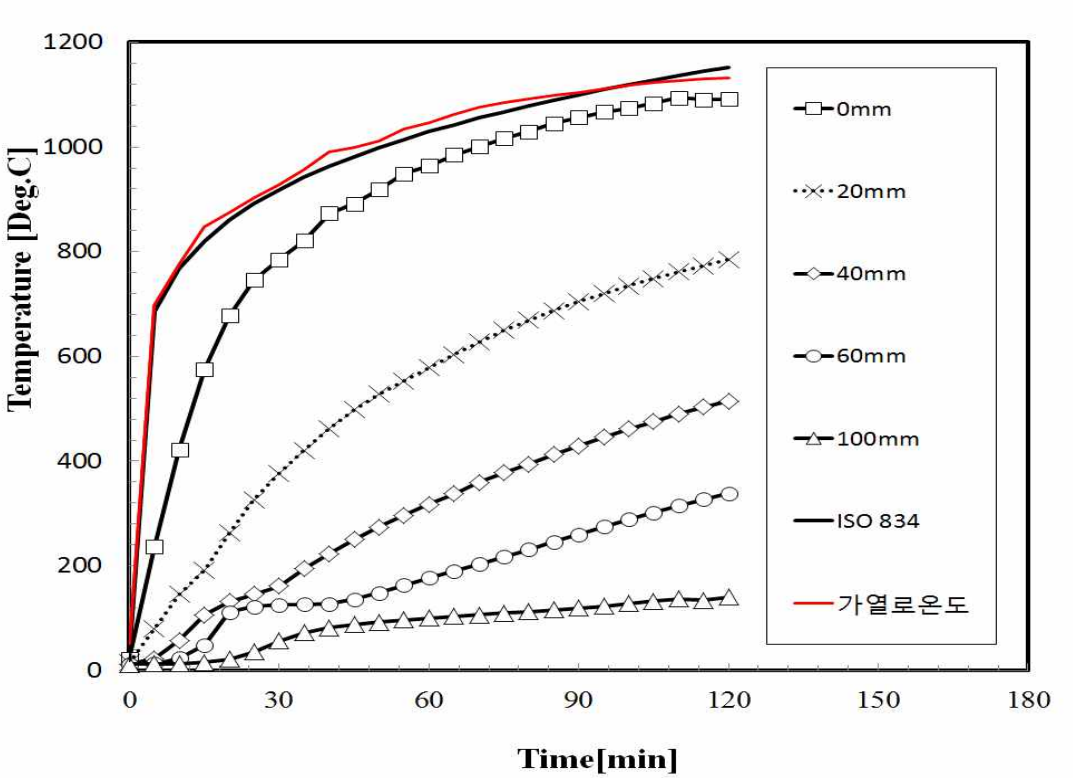
<그림 2.2.155> RC-F3 바닥면 형상



<그림 2.2.156> RC-F3 가열 후 사진

<표 2.2.61> RC-F3의 온도분포 결과

Specimen	Ambient Temp.	Temperature distribution					
		mm	0	30	60	90	120
RC-F3	Ⅱ 120min	0	22.0	785.4	964.4	1056.8	1091.4
		20	15.1	377.1	578.2	704.7	785.2
		40	12.6	161.1	317.6	429.3	515.0
		60	12.0	125.9	176.8	260.1	338.4
		100	12.5	57.0	100.7	119.3	140.1



<그림 2.2.157> RC-F3 온도분포 그래프

(라) 슬래브 시험체 가열 실험 분석 및 고찰

실대형 30MPa의 슬래브 3개를 제작하여 기존 법제화되어 있는 내화구조 성능기준(제3조 제8호관련)을 이용한 표준가열곡선과 차량화재곡선에 대한 내화실험을 실시하였다. 실험결과 철근의 변형이 생기는 649℃에 도달하는 시간은 ISO834 표준가열곡선의 2시간을 가열된 시험체는 91분에 650℃가 측정되었고 차량화재곡선의 2시간을 가열된 시험체는 75분에 649.5℃가 측정되어 표준가열곡선 보다 차량화재곡선에서 650℃에 도달하는 시간이 16분 빨리 나타났으며, 이는 구조물이 16분 빠르게 변형되어 붕괴에 이르는 시간이 빠르다는 것을 알 수 있다. 또한 일반강도 30MPa의 설계강도로써 폭렬이 발생하지 않는다고 인식되어 있지만, 자동차화재로 인한 발열량의 증가에 따른 일부분 폭렬이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 차량화재 2시간과 ISO834 3시간의 철근온도는 유사한 결과가 나타났다. 이상의 결과로부터 2시간 동안 차량화재를 입은 α가 510인 경우에는 α가 460인 표준 ISO곡선과 대비하여 약 3시간의 결과와 유사한 것으로 나타나 차량화재의 2시간은 일반 ISO834 곡선의 3시간에 해당되는 등가화재시간으로 고려된다.

나. 슬래브 잔존내력 성능평가 실험

(1) 실험 개요

표준가열곡선과 차량화재곡선에 의해 화재피해를 입은 슬래브에 대하여 재하실험을 실시하여 구조물 안전성을 검토하고자 하였다. 구조 실험계획을 다음 <표 2.2.62>에 나타내었으며, 화재피해를 입지 않은 슬래브 시험체와 화재피해를 입은 슬래브에 대한 잔존내력을 비교하였다.

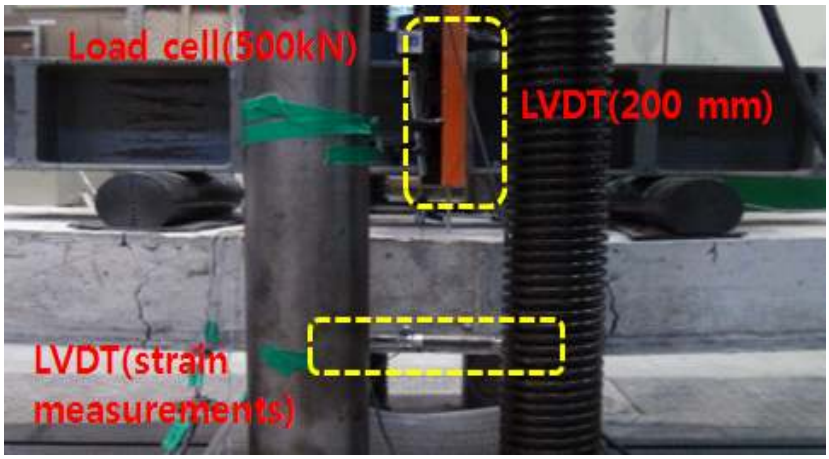
재하실험을 위해 다음 <그림 2.2.158>과 같이 슬래브 시험체 4분점 재하실험을 통하여 3400mm 구간 중 700mm부근에 재하를 가하였다. 또한 시험체 상부에 하중-길이변화를 확인하기 위하여 200mm 변위까지 측정할 수 있는 LVDT를 설치하였다.

<표 2.2.62> 가열 후 재하 실험 계획

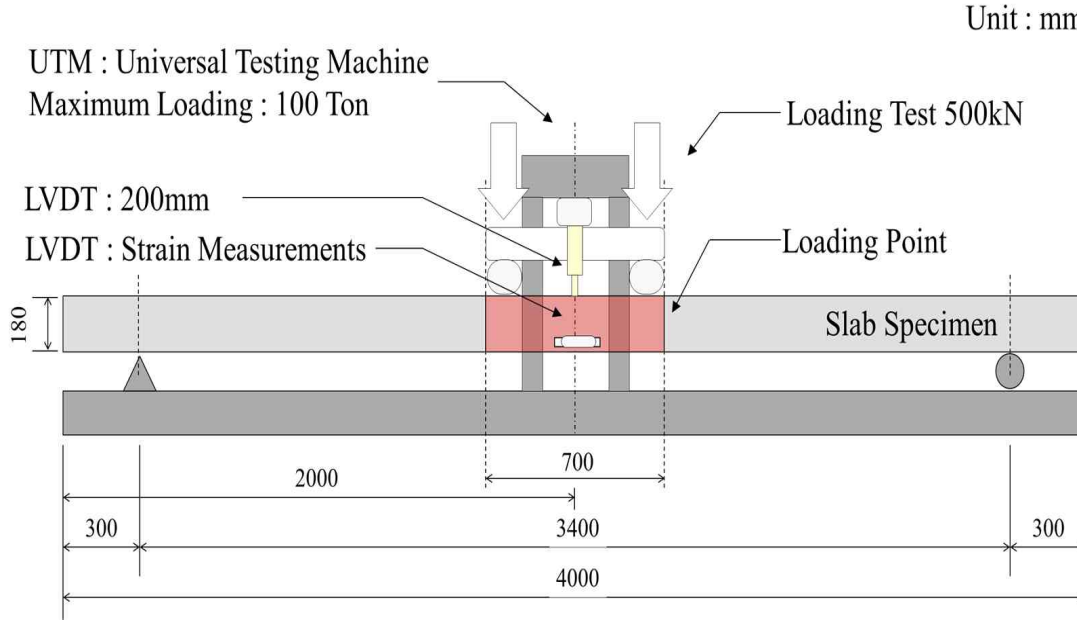
Specimen	fck (MPa)	fy (MPa)	Cover Depth (mm)	Transverse Reinforcements	Heating Rate*	Heating time (min)
RC-OA	30	400	20	D13@150(D13-4ea)	-	-
RC-F1	30	400	20	D13@150(D13-4ea)	II*	60
RC-F2	30	400	20	D13@150(D13-4ea)	I*	120
RC-F3	30	400	20	D13@150(D13-4ea)	II*	120

I* : $460t^{1/6}+20 \quad (t=\min)$ 표준가열곡선 (ISO 834)

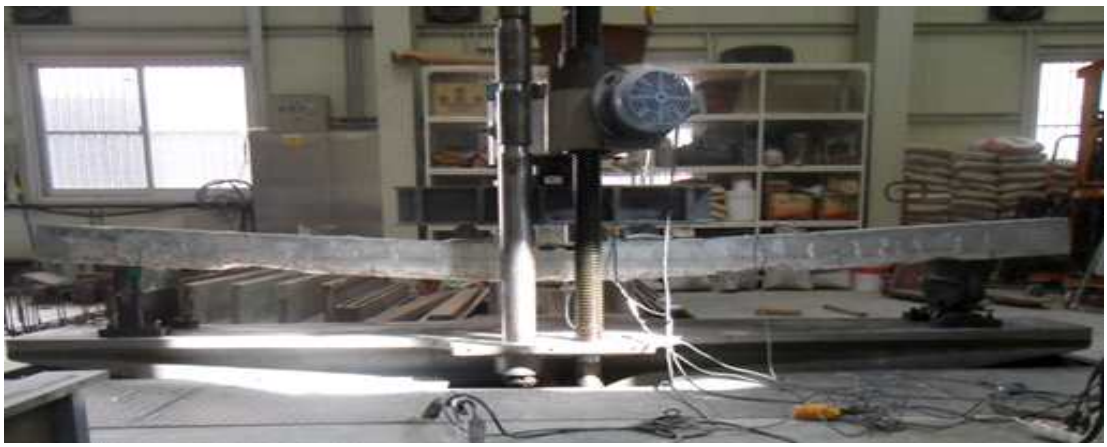
II* : $510t^{1/6}+20 \quad (t=\min)$



(a) 재하실험시 측정센서의 위치 형상



(b) 재하실험 상세 도면



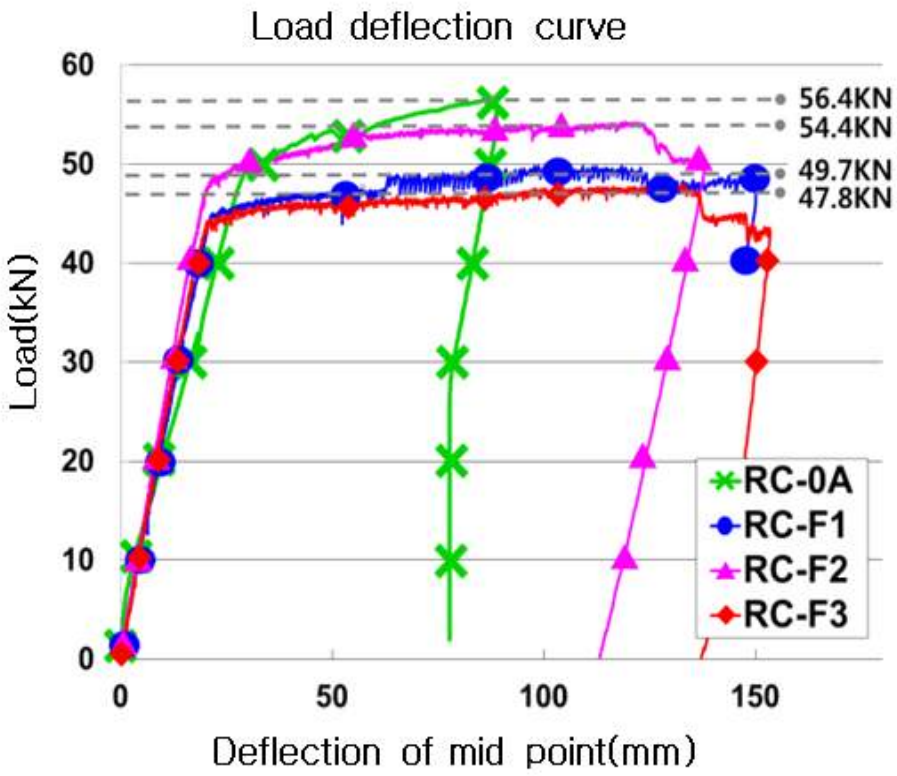
(c) 재하실험 형상 사진

<그림 2.2.158> 잔존내력 실험을 위한 재하실험 형상

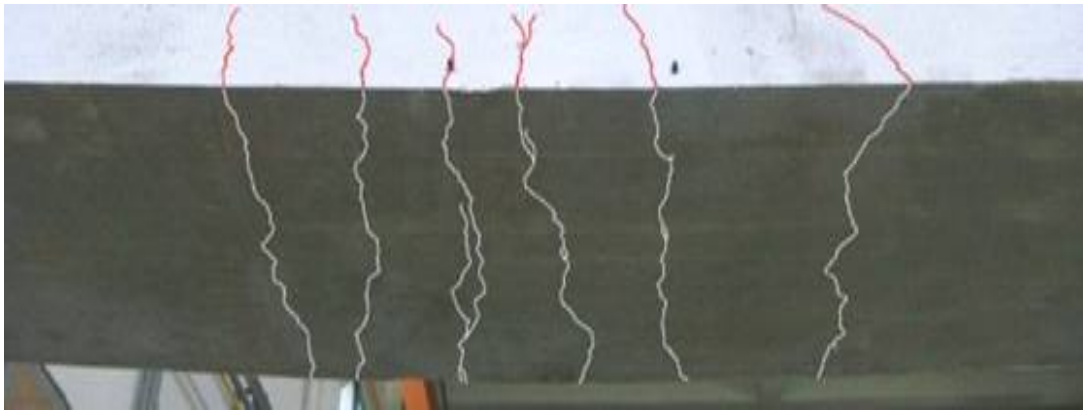
(2) 재하실험 결과 및 고찰

화재를 입은 슬래브 시험체 3개와 비가열 슬래브 1개의 슬래브 재하실험을 실시하였다. RC-OA의 재하실험으로 인한 변위-하중에 대한 값은 56.4kN이 측정되었으며, RC-F1의 차량화재 1시간 내화시험체의 경우 49.7kN, RC-F2의 표준가열곡선 2시간 내화시험체의 경우 54.4kN, RC-F3의 차량화재 2시간 내화시험체의 경우 47.8kN로 내하력이 감소하였다.

특히, RC-OA(비가열), RC-F2(표준가열곡선 2시간), RC-F3(차량화재곡선 2시간)의 재하실험의 비교 결과를 다음 <그림 2.2.159>에 나타내었으며, 비가열 슬래브보다 표준가열실험을 실시한 시험체에서 내하력이 4% 감소하였으며, 차량화재가열실험을 실시한 시험체에서 내하력이 17% 크게 감소한 것을 확인할 수 있었다. 또한, 재하실험으로 인한 하부의 균열도 형상은 <그림 2.2.160>과 같이 RC-OA의 매크로적 크랙수 6개와 RC-F1에서 8개가 발생하였으며, RC-F2에서 9개와 RC-F3에서 7개가 발생하여 RC-F2와 RC-F3에서 많은 차이가 발생하진 않았지만, RC-F3에서 취성적 파괴로 변화되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 측면 균열도인 <그림 2.2.161>과 같이 RC-F1, RC-F2, RC-F3에서 각각 화재로 인한 크랙이 9, 11, 19개씩 발생하여 차량화재곡선 2시간에 의한 피해가 많이 발생하였다. 화재 이후 재하가력으로 RC-F1, RC-F2, RC-F3에서 각각 13, 21, 30개로 크랙수가 증가하였으며, RC-OA(비가열 시험체)의 경우 측면에서 크랙수가 5개 발생한 것에 비하여 RC-F2(표준가열곡선 2시간)과 RC-F3(차량화재곡선 2시간)에서 각각 4배, 6배 더 많은 크랙이 발생하였다.



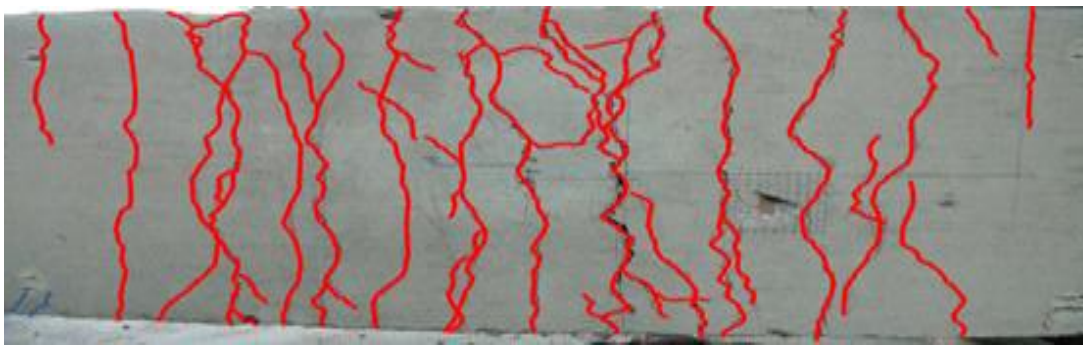
<그림 2.2.159> 잔존내력 실험 결과 비교 그래프



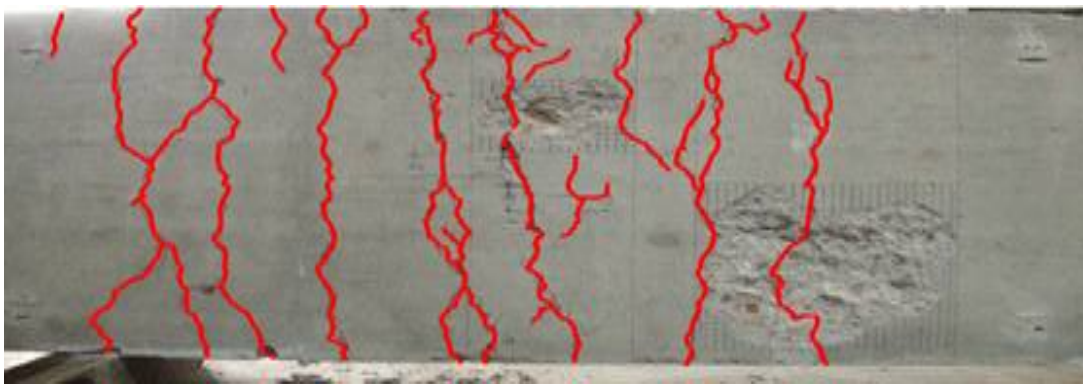
(a) RC-0A 재하실험 결과(하부 균열도)



(b) RC-F1 재하실험 결과(하부 균열도)

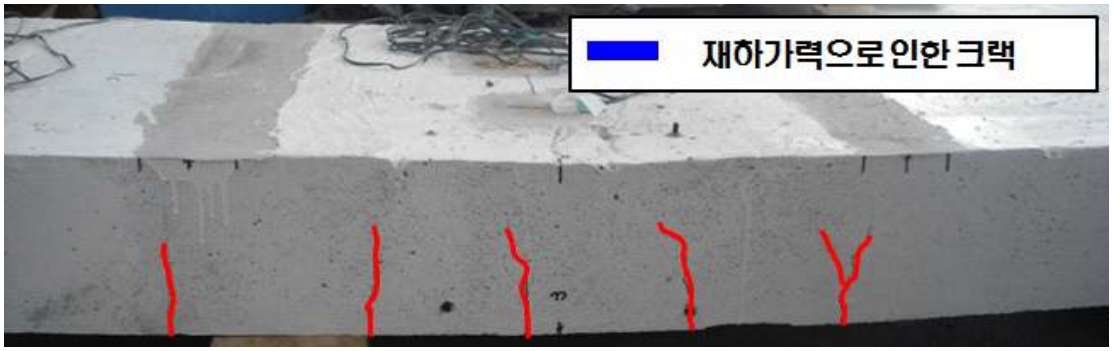


(c) RC-F2 재하실험 결과(하부 균열도)

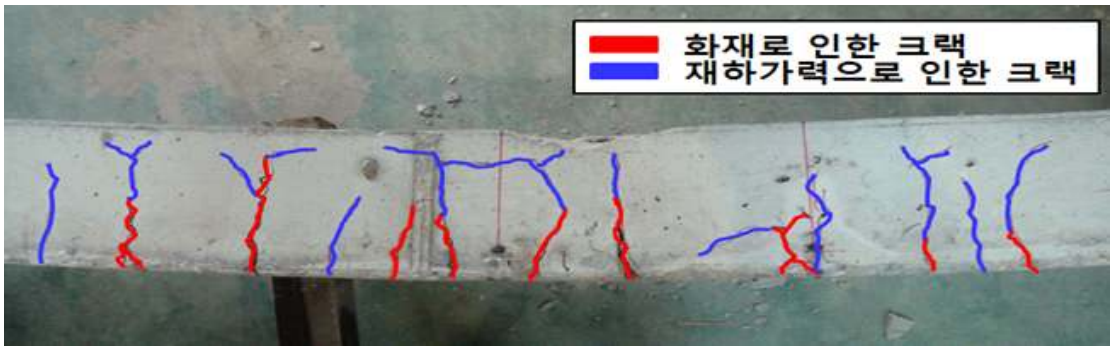


(d) RC-F3 재하실험 결과(하부 균열도)

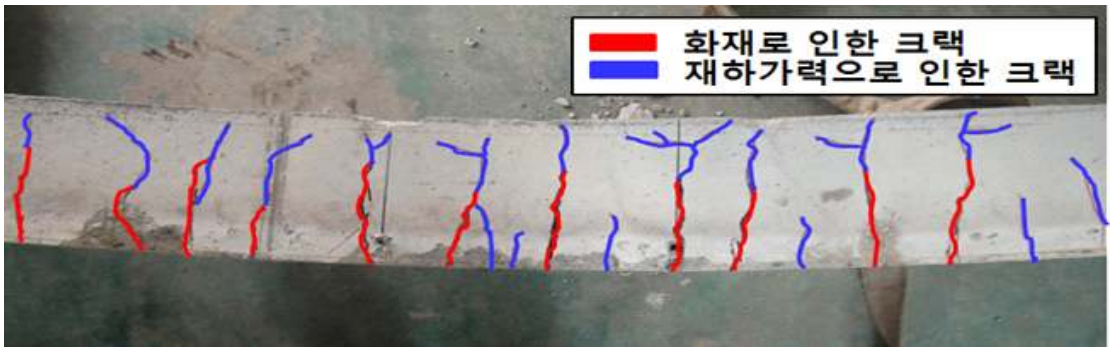
<그림 2.2.160> 잔존내력 실험 후 균열 형상 (하부 균열도)



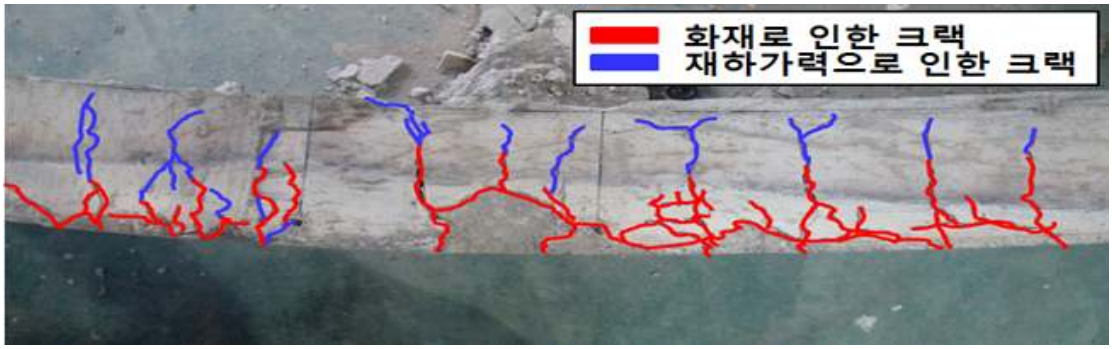
(a) RC-OA 재하실험 결과(측면 균열도)



(b) RC-F1 재하실험 결과(측면 균열도)



(c) RC-F2 재하실험 결과(측면 균열도)



(d) RC-F3 재하실험 결과(측면 균열도)

<그림 2.2.161> 잔존내력 실험 후 균열 형상 (측면 균열도)

다. 슬래브 내화 가열실험을 통한 열전도 해석

(1) 연구개요

콘크리트 구조물에 있어서 화재에 의한 고온 환경 및 이로 인한 높은 수열온도는 극한하중의 하나이다. 지금까지 콘크리트는 열전도율 및 열확산계수가 현저히 낮아 우수한 내화구조로 인식되었기 때문에, 간편 해석방법이나 내화시간 규정 확인 등을 통해 내화성능을 확보하여 왔으며 화재 이후에도 간단한 보수보강을 통해 구조물이 재사용 되어왔다. 그러나 철근콘크리트가 장시간 고온에 노출되는 경우 심각한 성능저하, 부재 유효단면의 감소, 폭렬에 의한 철근의 고온 직접 노출, 이로 인한 붕괴의 가능성 등이 여러 사고사례 및 연구를 통해 알려지면서 이에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 화재 이후 구조물의 재사용 여부를 결정하기 위한 잔존성능의 결정, 필요시 보수·보강에 대한 방법론 측면에서도 실험·해석적 연구가 필요하다고 할 수 있다.

한편, 국내의 기존연구는 구조물의 단위 부재별 내화성능에 관한 실험연구나 거시적 관점의 해석 연구가 주를 이루었다. 그러나 재료의 열적 특성 및 단위 부재해석에 관한 기존 연구만으로는 부재내의 시간별 온도 변화나 국부적인 열응력의 변화 등을 파악하기 힘들다. 실제로 콘크리트 구조물의 내화성능을 실험적으로 규명하는 것은 그 규모 및 경제적 측면에서 한계가 있어, 이에 대한 해석적 연구의 필요성이 제기되었으며, 특히 유한차분법이나 유한요소법과 같은 근사해석기법을 이용한 콘크리트 부재의 내화성능 평가방법이 제시되었다. 유한차분법에 의한 콘크리트의 열전달모델은 차분법이 갖는 시간증분 수렴 조건의 한계로 화재 등과 같이 급격한 온도변화를 경험하는 부재의 해석에 대해서는 안정성에 문제가 있다. 또한 DIANA등과 같은 범용유한요소해석 프로그램을 이용한 연구 또한 프로그램이 갖는 여러 제한조건으로, 다양한 형태의 경계조건이나, 재료의 온도의존성 열적특성 값을 적용하는데 한계가 있다.

국외의 경우 T.T Lie, Harada, Kodur 등을 중심으로 콘크리트의 내화성능에 관한 해석적 연구가 활발히 진행되었다. 그러나 콘크리트의 열전달을 포함한 내화성능의 해석 문제는 지배방정식을 구성하는 편미분방정식의 수치해석 방법, 화재하중, 경계조건, 재료의 열적 특성값, 시간-온도 의존성 관계 등 많은 가정과 재료 실험결과를 요구하기 때문에 각국의 자체 내화실험 결과에 의해 검증되고 있는 것이 현실이다.

그러므로 이 연구는 화재 등과 같은 고온 환경을 경험하는 철근콘크리트 구조물의 내화성능에 관한 해석적 연구의 일환으로 갤러킨 유한요소해석 방법을 응용한 비선형, 비정상 온도분포해석(Nonlinear transient heat flow analysis) 기법을 제시하였다.

또한 실규모 슬래브의 1면 내화실험을 실시하여 수치해석 모델의 검증과 유효성을 확인하였다. 이를 통해 각종 화재 규모 및 열적특성 값이 콘크리트의 내화성능

에 미치는 영향을 분석하였다. 해석 기법의 구축은 FORTRAN 90을 이용하였으며, 콘크리트 구조물의 내화성능 평가방법 정립 및 화재에 대한 안전성 검토를 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

(2) 비정상 온도분포 해석

2차원 열전도 지배방정식은, 식 2.2.27과 같이

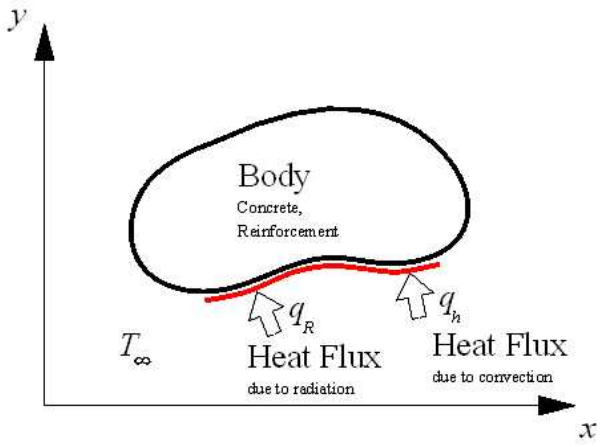
$$\rho(T)\,C(T)\,\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) \qquad 2.2.27$$

여기서, ρ=밀도(kg/m3), λ=열전도율(W/m·K), C=비열(J/kg·K)로 해석대상 재료의 온도의존성 식 2.2.28과 같이 열적특성 값이며, T=온도(℃)이다. 화재 등의 주변온도 T_∞에 대한 전체 경계조건은 <그림 2.2.162>에서,

$$-\lambda(T)\,\frac{\partial T}{\partial n}=q_R+q_h=q_e \qquad 2.2.28$$

여기서 q_R=복사에 의한 수열량(W/m2) q_h=대류에 의한 수열량, q_e=등가의 수열량이다. 또한 초기조건 다음 식 2.2.29와 같이

$$T(x,0)=f(x) \qquad 2.2.29$$



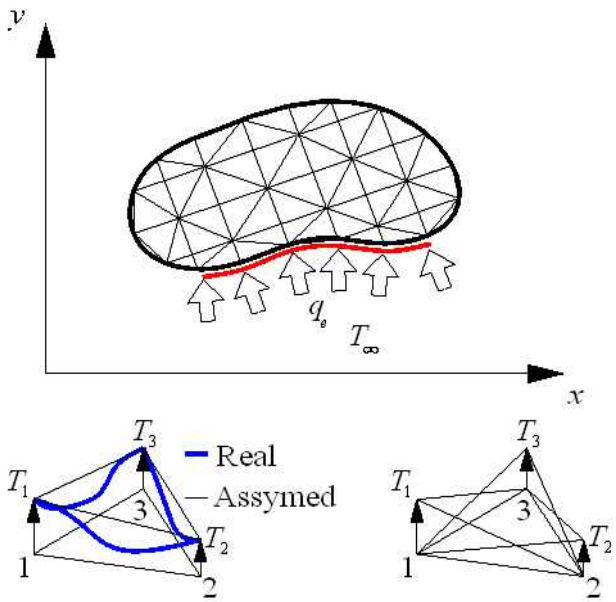
<그림 2.2.162> 계산 조건

대상물체는 <그림 2.2.163>과 같이 3절점 삼각형 요소로 분할하고 갤러킨 유한요소법(Galerkin finite element method)으로 정식화 하였다. 각 절점 온도를 $T_i^e(i=1,2,3)$라 하면, 다음 식 2.2.30과 같이

$$\{T^e\}=\begin{pmatrix}T_1^e\\T_2^e\\T_3^e\end{pmatrix} \qquad 2.2.30$$

형상함수 N으로 단순화시키면, 식 2.2.31과 같이

$$T^e(x,y) = N_1 T_1^e + N_2 T_2^e + N_3 T_3^e = \sum_{i=1}^{3} N_i T_i^e \qquad 2.2.31$$



<그림 2.2.163> 삼각 요소와 실제 온도의 이상적인 온도(형상 함수)

식 2.2.28 로부터, 식 2.2.32

$$R = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) - \rho(T)\,C(T)\,\frac{\partial T}{\partial t} \qquad 2.2.32$$

요소내의 임의 온도에서 $\rho(T)$, $\lambda(T)$, $C(T)$는 일정하다고 가정하면, 다음 식 2.2.33과 같이

$$R = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) - \rho C\frac{\partial T}{\partial t} \qquad 2.2.33$$

이다. N_1을 중량함수로 이용하면, 다음 식 2.2.34

$$\iint_\Omega N_1 R\,d\Omega = \iint_\Omega N_1\left[\lambda\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}\right) - \rho C\frac{\partial\theta}{\partial t}\right]d\Omega = 0 \qquad 2.2.34$$

이고, 식 2.2.32를 대입하여 정리하면, 다음 식 2.2.35와 같이

$$\sum_{i=1}^{3}\left[\lambda\iint_\Omega N_1\left\{N_1\frac{\partial^2 N_i}{\partial x^2} + N_1\frac{\partial^2 N_i}{\partial y^2}\right\}d\Omega\; T_i^e\right] - \sum_{i=1}^{3}\left[\rho C\iint_\Omega N_1 N_i\,d\Omega\frac{\partial T_i^e}{\partial t}\right] = 0 \qquad 2.2.35$$

식 2.2.34의 첫 번째 항에서 2계 미분을 포함한 적분은 그린 -가우스 부분적분으로 전개하면, 다음 식 2.2.36과 같이

$$\iint_{\Omega}\left\{N_1\frac{\partial^2 N_i}{\partial x^2}+N_1\frac{\partial^2 N_i}{\partial y^2}\right\}d\Omega \qquad 2.2.36$$
$$=-\iint_{\Omega}\left\{\frac{\partial N_1}{\partial x}\frac{\partial N_i}{\partial x}+\frac{\partial N_1}{\partial y}\frac{\partial N_i}{\partial y}\right\}d\Omega-\int_{\Gamma}N_1\frac{\partial N_i}{\partial n}d\Gamma$$

여기서 $\int_{\Gamma}N_1\frac{\partial N_i}{\partial n}d\Gamma$는 요소 경계에 대한 선적분이다. 식 2.2.34에 대입하면, 다음 식 식 2.2.37과 같이

$$\sum_{i=1}^{3}\left[\lambda\iint_{\Omega}\left\{\frac{\partial N_1}{\partial x}\frac{\partial N_i}{\partial x}+\frac{\partial N_1}{\partial y}\frac{\partial N_i}{\partial y}\right\}d\Omega\,T_i^e\right] \qquad 2.2.37$$
$$+\sum_{i=1}^{3}\left[h\int_{\Gamma}N_1N_i d\Gamma\,T_i^e\right]$$
$$+\sum_{i=1}^{3}\left[\rho C\iint_{\Omega}N_1N_i d\Omega\frac{\partial T_i^e}{\partial t}\right]=0$$

여기서 두 번째 항은 요소경계에서 열유속의 적분이므로 변형하면, 다음 식 2.2.38과 같이

$$\sum_{i=1}^{3}\left[\lambda\int_{\Gamma}N_1\frac{\partial N_i}{\partial n}d\Gamma\,T_i^e\right]=\int_{\Gamma}N_1\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial n}\right)d\Gamma \qquad 2.2.38$$

온도구배는 요소경계가 외부경계인 경우 경계조건 식 2.2.27을 대입하면 되므로,

$$\sum_{i=1}^{3}\left[\lambda\int_{\Gamma}N_1\frac{\partial N_i}{\partial n}d\Gamma\,T_i^e\right] \qquad 2.2.39$$
$$=-\int_{\Gamma}N_1(q_e T_\infty)d\Gamma+\int_{\Gamma}N_1T_0d\Gamma$$
$$=-\int_{\Gamma}N_1(q_e T_\infty)d\Gamma+\sum_{i=1}^{3}\int_{\Gamma}N_1N_i d\Gamma\,T_i$$

이므로, 식 2.2.37에 대입하면, 다음 식 2.2.40과 같이 되며

$$\sum_{i=1}^{3}\left[\lambda\iint_{\Omega}\left\{\frac{\partial N_1}{\partial x}\frac{\partial N_i}{\partial x}+\frac{\partial N_1}{\partial y}\frac{\partial N_i}{\partial y}\right\}d\Omega\,T_i^e\right] \qquad 2.2.40$$
$$+\sum_{i=1}^{3}\left[h\int_{\Gamma}N_1N_i d\Gamma\,T_i^e\right]+\sum_{i=1}^{3}\left[\rho C\iint_{\Omega}N_1N_i d\Omega\frac{\partial T_i^e}{\partial t}\right]$$
$$=\int_{\Gamma}N_1q_eT_\infty d\Gamma$$

마찬가지 방법으로 N_2, N_3를 유도하면 1요소에 대하여, 다음 식 2.2.41로

$$[\mathtt{C}_\mathtt{T}^\mathtt{e}]\left\{\frac{\partial T^e}{\partial t}\right\}+[\mathtt{B}_\mathtt{T}^\mathtt{e}+\mathtt{B}_\mathtt{T}^{\mathtt{e}\prime}]\{T^e\}=\{f_T^e\} \qquad 2.2.41$$

여기서 다음 식 2.2.42~식 2.2.46과 같다면

$$\{T^e\}=\begin{pmatrix}T_1\\T_2\\T_3\end{pmatrix} \qquad 2.2.42$$

$$\left\{\frac{\partial T^e}{\partial t}\right\}=\begin{pmatrix}\partial T_1^e/\partial t\\ \partial T_2^e/\partial t\\ \partial T_3^e/\partial t\end{pmatrix} \quad 2.2.43$$

$$\mathbf{C}_{\mathbf{T}}^{\mathbf{e}}=\rho C\iint_{\Omega}N_iN_jd\Omega \quad 2.2.44$$

$$\mathbf{B}_{\mathbf{T}_{\mathbf{ij}}}^{\mathbf{e}}=\lambda\iint_{\Omega}\left\{\frac{\partial N_i}{\partial x}\frac{\partial N_j}{\partial x}+\frac{\partial N_i}{\partial y}\frac{\partial N_j}{\partial y}\right\}d\Omega \quad 2.2.45$$

$$\mathbf{B}_{\mathbf{T}_{\mathbf{ij}}}^{\mathbf{e}}{}'=h\int_{\Gamma}N_iN_jd\Gamma \quad 2.2.46$$

$$f_{T_i}^e=\int_{\Gamma}N_1\{q_e\,T_\infty\}d\Gamma \quad 2.2.47$$

삼각형 요소의 기하학적 조건을 이용하면, 다음 식 2.2.48, 식 2.2.49가 되며

$$\left[C_{T_{ij}}^e\right]=\frac{\rho CA^e}{12}\begin{bmatrix}2&1&1\\1&2&1\\1&1&2\end{bmatrix} \quad 2.2.48$$

$$\left[B_{T_{ij}}^e\right]=\frac{\lambda}{4A^e}\begin{bmatrix}b_1b_1+c_1c_1 & b_1b_2+c_1c_2 & b_1b_3+c_1c_3\\ b_2b_1+c_2c_1 & b_2b_2+c_2c_2 & b_2b_3+c_2c_3\\ b_3b_1+c_3c_1 & b_3b_2+c_3c_2 & b_3b_3+c_3c_3\end{bmatrix} \quad 2.2.49$$

이고, $[B'_e]$와 $\{f_e\}$는 외부경계 부에서 아래 식 2.2.50~식 2.2.52와 같이 변화시킨다.

$$\left[B_T^{e\prime}\right]=\frac{h}{6}\begin{bmatrix}2&1&0\\1&2&0\\0&0&0\end{bmatrix},\ \left\{f_T^e\right\}=\frac{q_eT_\infty L}{2}\begin{pmatrix}1\\1\\0\end{pmatrix}\text{(1,2절점 경계)} \quad 2.2.50$$

$$\left[B_T^{e\prime}\right]=\frac{h}{6}\begin{bmatrix}0&0&0\\0&2&1\\0&1&2\end{bmatrix},\ \left\{f_T^e\right\}=\frac{q_eT_\infty L}{2}\begin{pmatrix}0\\1\\1\end{pmatrix}\text{(2,3절점 경계)} \quad 2.2.51$$

$$\left[B_T^{e\prime}\right]=\frac{h}{6}\begin{bmatrix}2&0&1\\0&0&0\\1&0&2\end{bmatrix},\ \left\{f_T^e\right\}=\frac{q_eT_\infty L}{2}\begin{pmatrix}1\\0\\1\end{pmatrix}\text{(3,1절점 경계)} \quad 2.2.52$$

(5) 전체방정식 구축 및 시간적분

- 각 요소방정식 식 2.2.53를 각 요소에 대하여 구한 후 전제 방정식을 구축하면,

$$[\mathbf{C}]\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\}+[\mathbf{B}+\mathbf{B}']\{T\}=\{f\} \quad 2.2.53$$

식 2.2.53의 시간(t)에 대한 미분은 차분법을 차용한다. 즉,

$$\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\}=\frac{1}{\Delta t}\left[\{T^{n+1}\}-\{T^n\}\right] \quad 2.2.54$$

여기서 n=시간 단계를 나타낸다. 그러므로

$$\{T\}^n = \{T_{(t=n\Delta T}\}, \quad \{T\} = \{T^{n+1}\} \qquad 2.2.55$$

이므로, 식 2.2.56은,

$$\left[\frac{[C]}{\Delta t} + [B + B']\right]\{T^{n+1}\} = \frac{[C]}{\Delta t}\{T^n\} + \{f\} \qquad 2.2.56$$

이고, 이를 이용하여 각 절점의 온도를 구할 수 있다.

(3) 화재성상을 고려한 경계조건의 검토

콘크리트 구조물에 화재가 발생한 경우 대부분 연기를 동반한다. 또한 택스 등과 같은 쉴드에 의해 보호된 경우에는 열원에 직접 노출되지 않을 수도 있고, 단일 구획내에서 화재가 발생한 후 열이 다른 구획으로 전달될 때 방화셔터에 의해 차단될 수도 있다. 경계조건 식 2.2.30에서 등가의 열유속 q_e는 다음 식 2.2.57과 같이 되며

$$q_e = q_R + q_h \qquad 2.2.57$$

복사에 의한 수열량(W/m^2) q_R은 다음 식 2.2.58과 같다.

$$q_R = \epsilon\sigma(T_\infty^4 - T_0^4) \qquad 2.2.58$$

여기서, σ=슈테판-볼츠만 상수, 5.6697×108(W/m^{2}K), ϵ=표면 복사율, T_∞, T_0= 각각 주변공기와 표면온도이다.

표면복사율 ϵ은 란베르토-벨 법칙을 이용하였다. 즉, 식 2.2.59와 같으며

$$\epsilon = \frac{i_0 - i}{i_0} = 1 - e^{-k\bar{L}} \qquad 2.2.59$$

여기서 i=복사 투과성 기체(매체) 둥의 복사강도, k=흡수계수, $\bar{L}$= 복사 투과 기체의 평균거리를 나타낸다.

연기를 동반하는 경우 단일 구획내의 q_R은 식 2.2.60과 같다

$$q_R = \frac{\epsilon_1\epsilon_G\sigma A_G}{1-(1-\epsilon_1)\left(1-\epsilon_G\frac{A_G}{A_1}\right)}(T_\infty^4 - T_0^4) \qquad 2.2.60$$

여기서 첨자 1, G는 각각 연기기 없는 부분과 있는 부분을 나타낸다. 만약 전체 공간이 연기로 가득찬 경우($A_G = A_1$)는, 식 2.2.61과 같이 되며

$$q_R = \frac{\epsilon_1\epsilon_G\sigma}{1-(1-\epsilon_1)(1-\epsilon_G)}(T_\infty^4 - T_0^4) \qquad 2.2.61$$

택스 등과 같은 천장재에 의해 쉴드가 있는 경우, $q_{R,L} \gg q_{R,U}$이므로, 식 2.2.62와 같다.

$$q_R = \frac{q_{R,L} + q_{R,U}}{2} \approx \frac{q_{R,L}}{2} \qquad 2.2.62$$

여기서 첨자 L, U는 각각 천장 아래와 위를 나타낸다.

대류에 의한 수열량 q_h는 뉴턴의 냉각법칙에 의해, 식 2.2.63로 변화되며

$$q_h = h(T_\infty - T_0) \qquad 2.2.63$$

여기서 h=대류계수 (W/m^2℃)이다. 화재는 강제 대류 열전달이고, 난류이므로 평균 너셀트 수 N_u를 이용한다.

$$h = \frac{\lambda}{L} N_u \qquad 2.2.64$$

여기서, 식 2.2.65와 같이

$$N_u = 0.037 Pr^{1/3} Re_x^{4/5} \text{ (난류)} \qquad 2.2.65$$

이고, 공기에 대한 계수는 비열(c_p)=1.0 (kJ/kg・K), 점성계수 $\mu = 2.5 \times 10^{-7} T^{3/4}$ (Pa・s), 동적 점성계수$\nu = \mu/\rho$= $7.2 \times 10^{-10} T^{7/4}$ (m^2・s), 열전도율 $\lambda = 3.7 \times 10^{-7} T^{3/4}$ (kW/m・K),열확산계수$\alpha = 1.0 \times 10^{-9} T^{7/4}$(m^2/s),Prandtl수 $Pr = \nu/\alpha = 0.72$

, $Re_x = qL/\nu$, q=공기의 열유속을 나타낸다. 물론 택스 등의 쉴드가 있는 경우 $q_h = 0$ 이다. 그러므로 식 2.2.66은

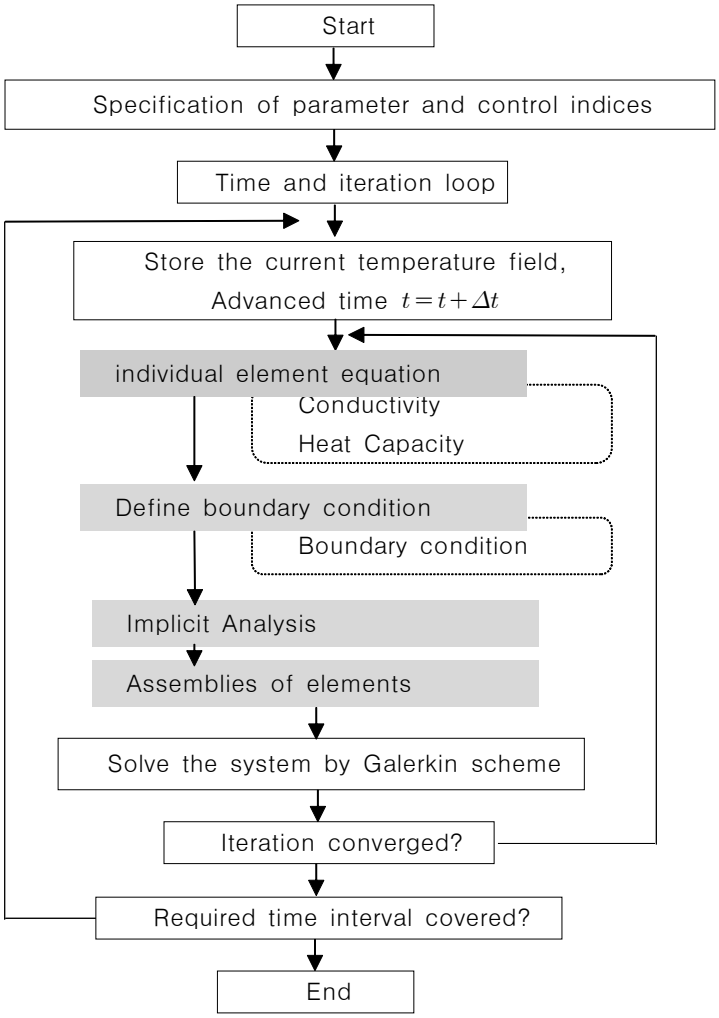
$$q_e = \epsilon\sigma(T_\infty^4 - T_0^4) + h(T_\infty - T_0) \qquad 2.2.66$$
$$= (h + \alpha_R)(T_\infty - T_0)$$

이다. 여기서 $\alpha_R = \epsilon\sigma(T_\infty^2 + T_0^2)(T_\infty + T_0)$, T_0는 시간 t_n에서 계산된 표면온도이다.

(4) 온도의존성 열적 특성 값 검토

콘크리트 및 철근의 온도 의존 열적 특성값은 기존문헌 및 규준 이용하였다. 또한 실험결과를 통한 열적 특성값을 직접 입력(User subroutine)할 수 있도록 하였다.

앞에서 정식화한 갤러킨 유한요소해석기법을 <그림 2.2.164>와 같은 알고리즘으로 FORTRAN 90을 이용하여 프로그램을 작성하였다. 해석 프로세스는 강성행렬이 변하지 않는 장점이 있는 양해법(Explicit scheme)을 이용하였다. 적용한 알고리즘은 각 단계의 계산이 독립적으로 수행되고, 온도와 시간의 계산이 단계별로 처리되기 때문에 필요한 경우 여러 컴퓨터를 이용하는 병렬처리(Parallel processing)환경에도 적합하다. 또한 유한요소법이 가지고 있는 기하학적 유연성으로 인하여 수열온도를 고려한 응력계산의 결합성 면에서도 유리하다고 할 수 있다.



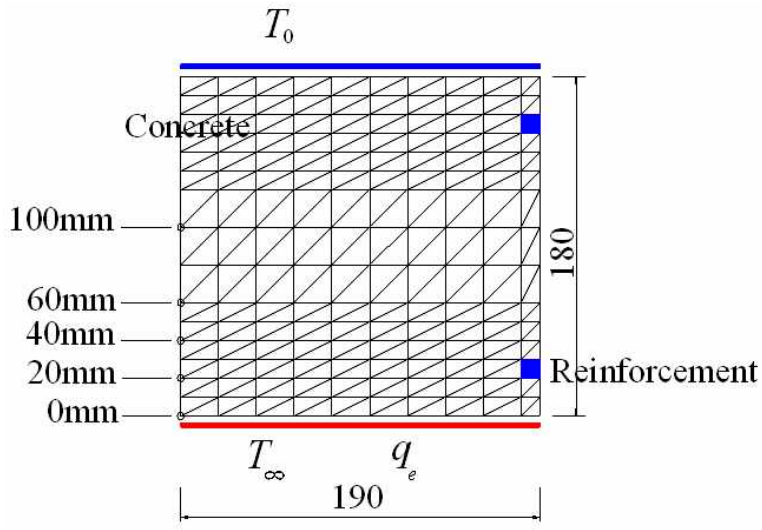
<그림 2.2.164> 열전도 해석 프로세스 알고리즘

(5) 수치해석 검증

① 해석 개요

슬래브 가열실험 결과를 이용하여 비정상 유한요소 온도분포 해석 기법의 적합성을 검증하였다. 모델링 및 해석은 <그림 2.2.165>와 같이 실험체의 대칭성을 고려하여 190×180mm를 대상으로, 2절에서 유도한 3절점 삼각형 요소를 이용하였다. 요소분할은 20×20mm를 기준으로 경계부에 급격한 온도구배를 고려하여 1/2로 세분하였다.

우선 경계조건을 검토하기위해 내화 실험시 경계조건 q_e를 검토하였다. 먼저 q_R에 대하여, 가열로의 크기는 4×3×1.6m(하면 배연구 무시), 체적 V=19.2m^3, 표면적 A=46.4 m^2, 평균 복사 길이 $\overline{L}=3.6(V/A)=1.49\,\mathrm{m}$ 이고, 사용연료는 경유($k=0.43\,\mathrm{m}^{-1}$)이므



<그림 2.2.165> 해석 모델링

로 식 2.2.59에서, 다음 식 2.2.67과 같이

$$\epsilon = 1 - e^{-k\bar{L}} = 0.4731 \qquad 2.2.67$$

다음으로 q_h에 대해서는, 강제대류, 가열면에 열 유속이 평행하게 작용하는 난류, 유속 $u_\infty = 8\,\mathrm{m/s}$로 가정하면, 식 2.2.63 및 식 2.2.64으로부터 $3\times10^5 < Re_x < 3\times10^6$, $13.4 < h < 33.3$범위에 존재한다. 그러므로 평균값 h=23을 이용하였다. 그러므로 경계조건은 식 2.2.66으로부터, 식 2.2.68과 같이 나타난다.

$$q_e = (23+\alpha_R)(T_\infty - T_0) \qquad 2.2.68$$
$$\alpha_R = 0.4731(5.6667\times10^{-8})(T_\infty^2 + T_0^2)(T_\infty + T_0)$$

또한 재료 열적 특성값은 콘크리트(λ_C, $\rho_C C_C(t)$)와 철근(λ_S, $\rho_S C_S$)에 대한 온도·시간 의존 열적특성을 온도함수로 치환하여 이를 고려하였다. 즉, 다음 식 2.2.69~식 2.2.72와 같으며,

$$\lambda_C(t) = \begin{cases} \xi[1.5-(0.5/800)T] & (\lambda > 1.0) \\ \xi & (\lambda < 1.0) \end{cases} \qquad 2.2.69$$

$$\lambda_S = 40 \qquad 2.2.70$$

$$\rho_C C_C(t) = \begin{cases} \rho_C(930) & (T < 90) \\ \rho_C(930) + \rho_C w_t \dfrac{(590\times4{,}190)}{20} & (90 \leq T < 110) \\ \rho_C(930) & (T \geq 110) \end{cases} \qquad 2.2.71$$

$$\rho_S C_S = 7{,}850(482) \qquad 2.2.72$$

여기서 $\xi = 0.8$, w_t=함수율(4.9%, 단면내 일정 가정)이다.

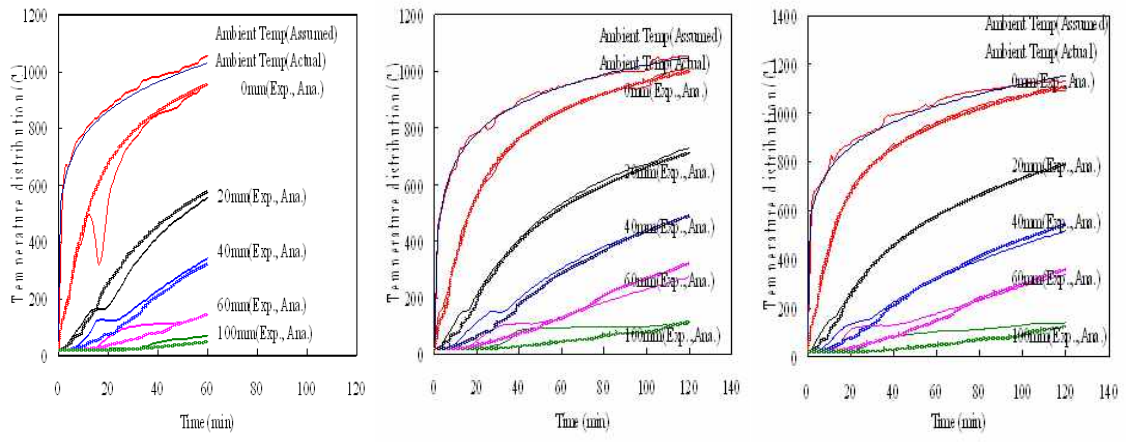
② 해석 결과

<그림 2.2.166>, <그림 2.2.167> 및 <표 2.2.63>은 해석 및 실험결과를 비교한 것으로, 시험체의 온도이력 곡선과 해석곡선으로 부터 해석기법은 온도이력을 매우 유사하게 추정하고 있음을 알 수 있다. 특히 철근위치(20mm)에서 해석결과를 가열시간별(30분, 60분, 90분, 120분)로 분석해보면, 실험결과에 대한 해석결과의 비(Exp./Ana.)는 RC-1 30분(=0.84)를 제외한 모든 실험체에서 0.96 ~ 1.03로써 오차는 10%내에 있음을 알 수 있다.

다만, 가열면에서 측정위치가 깊어질수록 해석결과의 오차는 점점 커지는 경향을 보였다. 예를 들어 가열면으로부터 100mm 부분의 가열시간별 해석결과의 비(Exp./Ana.)는 최대 2.33으로 나타났으며, 이러한 원인은 해석결과가 수분이동이나 잠열에 의한 온도구배의 완화를 고려하지 않고 있으며, 실험 오차 및 작은 온도값에 대한 오차의 확대 때문으로 판단되었다. 그러나 온도이력의 추세선은 실제 실험값을 근사하게 추정하고 있으며, 특히 철근 위치에서의 온도 분포를 매우 유사하게 모사하는 것으로 볼 때 해석기법의 유효성을 확인 할 수 있었다.

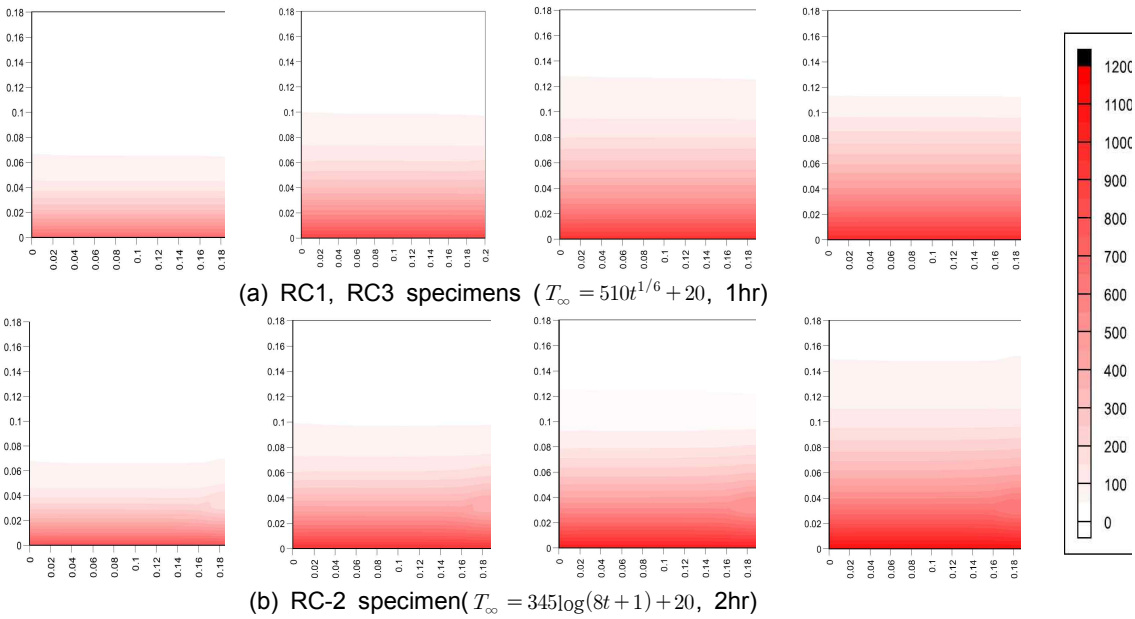
<표 2.2.63> 시험체의 내부 온도 분포

Specimen	Ambient Temp.	Temperature distribution											
		mm	30min		Exp/ Ana.	60min		Exp/ Ana.	90min		Exp/ Ana.	120min		Exp/ Ana.
			Exp.	Ana.		Exp.	Ana.		Exp.	Ana.		Exp.	Ana.	
RC-F3	II 120min	0	785.4	787.6	1.00	964.4	956.1	1.01	1056.8	1046.5	1.01	1091.4	1110.3	0.98
		20	377.1	373.0	1.01	578.2	579.3	1.00	704.7	703.2	1.00	785.2	793.7	0.99
		40	161.1	132.9	1.21	317.6	324.7	0.98	429.3	451.5	0.95	515.0	544.6	0.95
		60	125.9	59.9	2.10	176.8	150.0	1.18	260.1	270.6	0.96	338.4	361.5	0.94
		100	57.0	24.5	2.33	100.7	48.9	2.06	119.3	77.1	1.55	140.1	124.5	1.13
RC-F1	II 60min	0	757.5	787.6	0.96	953.5	956.1	1.00						
		20	313.3	373.0	0.84	555.9	579.3	0.96						
		40	162.8	132.9	1.22	341.7	324.7	1.05		-			-	
		60	102.6	59.9	1.71	144.7	150.0	0.96						
		100	25.6	24.5	1.05	70.6	48.9	1.44						
RC-F2	I 120min	0	674.3	686.4	0.98	867.0	861.2	1.01	941.9	945.5	1.00	1011.4	1000.9	1.01
		20	320.1	310.3	1.03	532.3	519.3	1.03	648.6	632.8	1.03	730.5	713.4	1.02
		40	146.7	110.7	1.33	303.6	288.6	1.05	411.8	406.0	1.01	491.9	490.6	1.00
		60	97.2	52.4	1.85	131.6	129.9	1.01	207.5	243.2	0.85	273.1	324.2	0.84
		100	32.9	23.5	1.40	93.4	46.3	2.02	96.7	75.9	1.27	109.0	114.7	0.95



(a) RC-1($T_\infty = 510t^{1/6} + 20$, 1hr) (b) RC-2($T_\infty = 345\log(8t+1) + 20$, 2hr) (c) RC-3($T_\infty = 510t^{1/6} + 20$, 2hr)

<그림 2.2.166> 시험체의 내부 온도 그래프



<그림 2.2.167> 시간별 시험체 내부의 온도 분포

③ 변수 분석

이 연구에서 구축된 비선형, 비정상 온도분포해석기법을 이용하여 화재규모, 콘크리트의 열적 특성값, 그리고 함수율에 대한 변수분석을 실시하였다. 해석 대상 모델은 <그림 2.2.165>를 이용하였으며, 슬래브(20mm)와 기둥(40mm)에서 철근의 수열온도를 분석대상으로 설정하였다.

◎ 화재 규모의 영향

표준화재 가열곡선(ISO 834)의 시간별(1, 2, 3, 4시간) 온도분포 해석결과를 <그림 2.2.168>에 나타냈다(함수율 = 3%, 콘크리트의 열적특성 값 = 식 2.2.68~식 2.2.72, q_e=식 2.2.68 일정). 그림에서 가열이후 냉각은,

$$T_\infty = [345\log(8t+1)+20] - \eta[\{345\log 8(t-t_{\max})+1\}+20] \qquad 2.2.73$$

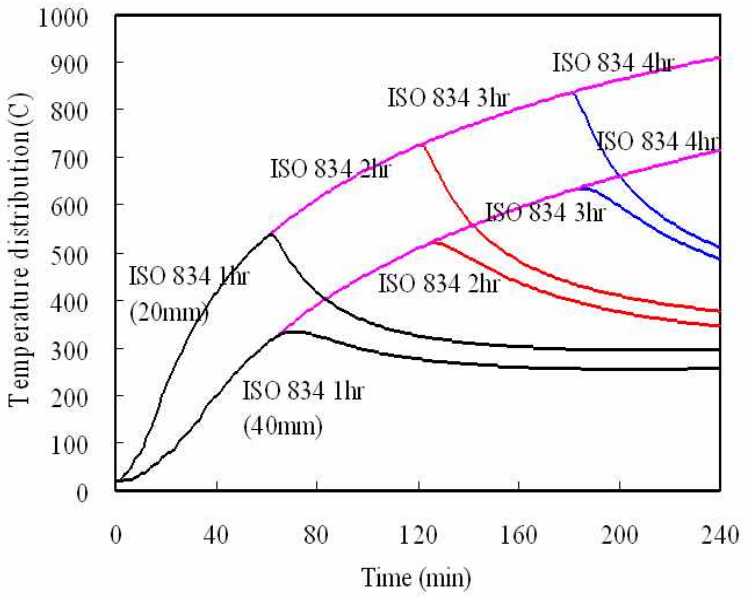
여기서 $t_{\max}$=가열기준시간, η=4.5/3.2를 이용하였다. 해석결과 슬래브(철근위치 20mm)의 화재규모(ISO 834 2시간)에 의한 온도는 729℃, 기둥(철근위치 40mm)의 경우(ISO 834 3시간)는 641℃ 나타나, 내화성능 규준(547℃)를 만족하지 못했다. 물론 실제 구조물에서는 연기의 유동(기체 복사 흡수율)이나, 대류계수의 영향에 의해 수열온도의 감소가 예상되지만, 기존의 내화규준을 만족시킬 필요가 있는 경우에는 내화대책(예를 들어 피복두께의 증가 등)이 추가적으로 필요하다.

◎ 콘크리트 열적 특성값의 영향

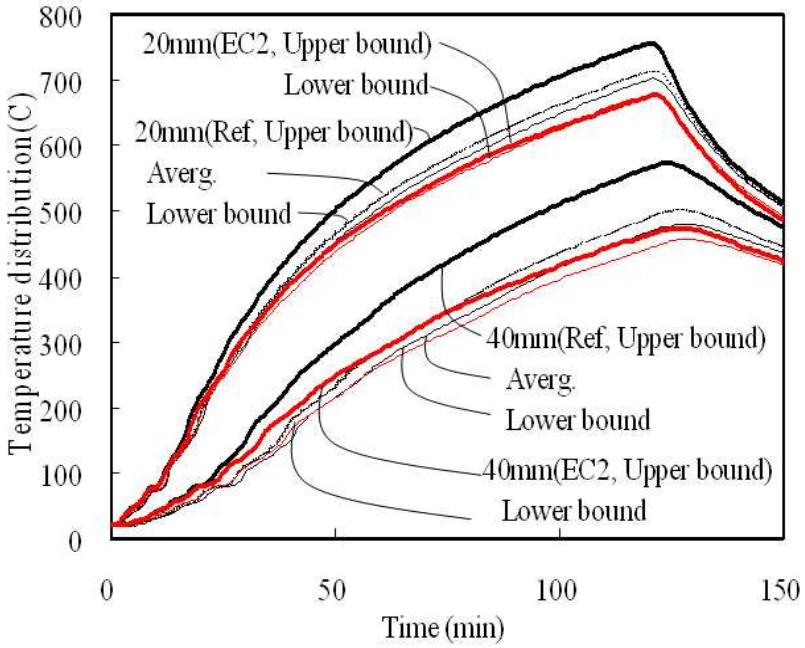
<그림 2.2.169>는 콘크리트 열전도율의 영향을 나타낸 것이다(함수율 = 3%, ISO 834 2hr, q_e=(식 2.2.68 일정). 분석 결과규준(EC)의 열적 특성값을 적용하는 경우가 제안식에 의한 결과보다 9~10% 낮게 나타났다. 이러한 결과는 기본적으로 제안식의 열적특성 값이 크기 때문으로, 실험결과가 충분하지 않거나, 국내에서 사용되는 콘크리트의 조성비율 차에 기인할 것으로 판단된다. 그러므로 향후 콘크리트의 열적특성값에 대한 실험자료의 축적이 필요하다.

◎ 콘크리트 내부 함수율의 영향

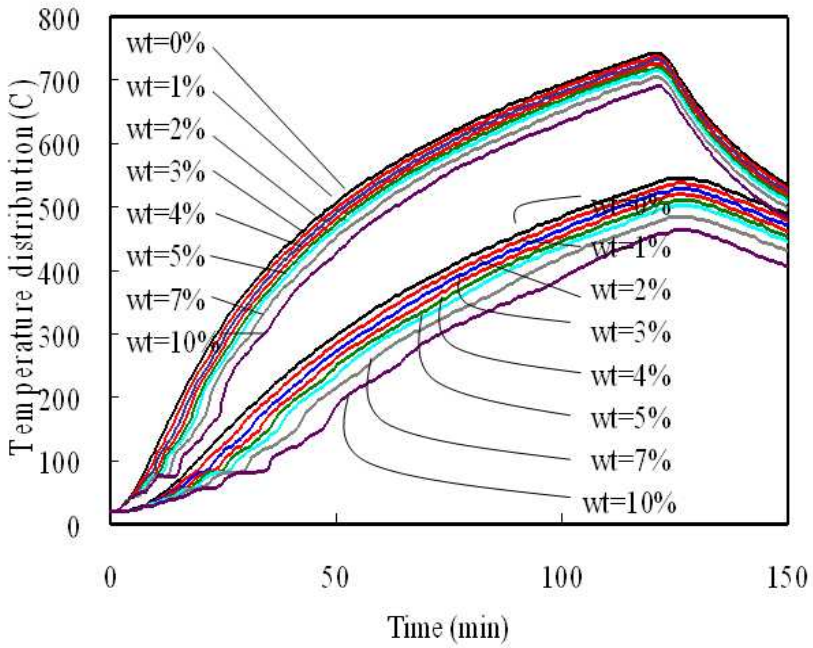
<그림 2.2.170>은 콘크리트 내 함수율의 영향을 나타낸 것이다(ISO 834 2hr, q_e=식 식 2.2.68 일정, 열전도율 식 2.2.69 일정. 분석 결과 콘크리트 내 함수율이 증가할수록 내부 수열온도는 감소하는 것으로 나타났다. 특히 해석결과는 90~110℃ 구간에서 잉여수의 위상변화(액체→기체)에 따른 잠열의 영향으로 수열온도의 구배가 작아지는 특성을 잘 나타내고 있다. 물론 이 논문에서는 콘크리트 내부로의 수분이동 및 이를 통해 추가되는 증발속도를 고려하고 있지 않기 때문에 실제 실험결과와 차이가 있지만, 아직까지 열·수분이동을 고려한 해석기법은 소규모의 단일 부재해석에만 가능하기 때문에, 이 효용성이 클 것으로 판단된다.



<그림 2.2.168> Case Study 콘크리트에 미치는 ISO 834 가열 곡선



<그림 2.2.169> Case Study 콘크리트의 열 특성의 영향



<그림 2.2.170> Case Study 콘크리트의 함수율 영향

④ 고찰

화재 등과 같은 고온 환경을 경험하는 철근콘크리트 구조물의 내화성능에 관한 해석적 연구의 일환으로 수행된, 갤러킨 유한요소해석 방법을 응용한 비선형·비정상 온도분포해석(Nonlinear transient heat flow analysis) 기법 구축 및 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

이 연구에서 수행된 고온 환경하의 철근콘크리트 구조물에 대한 갤러킨 유한요소해석 방법을 응용한 비선형·비정상 온도분포해석(Nonlinear transient heat flow analysis) 기법의 검증을 통해, 온도이력 추세선은 실제 실험값을 근사하게 추정하고 있으며, 특히 철근 위치에서의 온도 분포를 매우 유사하게 모사하는 것으로 볼 때 해석기법의 유효성을 확인 할 수 있었다.

이 연구에서 구축된 해석기법은 다양한 화재규모와 대류, 복사 경계조건, 재료의 온도 의존성 열적특성 값 을 자유롭게 고려할 수 있으며, 추후 관련해석에 용이하게 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.

변수분석을 통하여 콘크리트 내에 포함된 수분이 온도 상승 구배를 완화시키는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통하여 구조물의 열해석 시 함수율에 대한 적절한 평가를 통하여 보다 정확한 화해의 구현이 가능할 것으로 판단되었다.

이 연구에서 열의 대류, 복사특성 및 온도의존성을 고려한 경계조건은, 화재에 의한 철근콘크리트 구조부재의 열전달 특성을 보다 실제 상황에 근접하게 구현할 수 있을 것으로 판단되었으며, 검증을 위한 실험을 통해 방재시험연구원이 보유하고 있는 가열로의 제원 및 연료 등에 대한 등가 대류계수에서 대류계수 h=23, 가열로 내부 흡수율 ϵ=0.4731로 나타났다.

이 연구에서 구축된 콘크리트의 비선형·비정상 온도분포해석 기법은 수분이동 및 이를 통해 추가되는 증발속도를 고려하고 있지 않으며, 향후 다음과 같은 추가 연구가 필요하다.

- 수분 이동 및 공극압력에 의한 폭렬해석
- 수열온도 응력으로 인해 균열이 발생한 경우의 물질 이동 및 응력분배의 해명
- 시간 증분(Δt)에 대한 유한요소의 형상함수 도입 및 가우스 적분 방법
- 콘크리트의 열적특성 값에 대한 충분한 실험자료의 축적

라. 열해석을 위한 콘크리트의 열관성 실험

(1) 연구개요

콘크리트의 열·폭렬 해석을 위해서는 재료별, 강도별, 배합별, 온도별, 열적특성의 연구가 필요하다. 특히, 폭렬 해석을 위해서는 고온시 콘크리트 재료의 탄성계수, 열팽창율, 열전도율, 비열, 투기계수 등 역학적 특성이 필요하다. 이에 본 연구는 기존 열적 특성, 열관성 실험에 대한 기초 조사를 통해 열전도 실험을 위한 기초 자료로 확보하고자 한다.

(2) 실험 계획 및 방법

콘크리트의 열적 특성을 검토하기 위한 실험방법을 다음 <표 2.2.64>에 나타내었다. 실험 방법은 ISO 8894-2에 의거하여 평행열선법을 이용하였으며, 설계강도 21, 50, 80, 100 MPa를 200℃, 400℃, 600℃, 800℃의 온도 포인트에서 측정하였고,<그림 2.2.171>은 실험을 위한 실험체와 장비이다.

<표 2.2.64> 실험 계획

f_{ck} (MPa)	Curing conditions	Heating Condition(℃)	Hardened State
21 50 80 100 ECC	Air curing condition	30 ~ 800	-thermal conductivity(W/mK) - thermal expansion rare (㎡/s) - specific heat(J/gK) -Pore size distribution(mL/g)

Materials	Density	Size	Note
Water	1.00	-	
Cement	3.15		O.P.C
Fly-ash	2.23		4000Glass
Silica-fume	2.20		200000Glass
Sand	2.54	5mm	Sea sand
Grave	2.59	19mm	Crushed stone-granite

f_{ck} (Mpa)	W/B (wt.)	Air (%)	Unit weight (kg/m^3)					
			Binder	C	FA	SF	S	G
21	0.60	4	287	249	29	9	756	1022
50	0.32	4	516	413	77	26	722	864
80	0.22	4	705	543	106	56	640	797
100	0.18	4	833	625	125	83	552	778



(1) 실험체



(2) 열관성 측정 장비



(3) 공극률 측정 장비

<그림 2.2.171> 실험 관련 사진

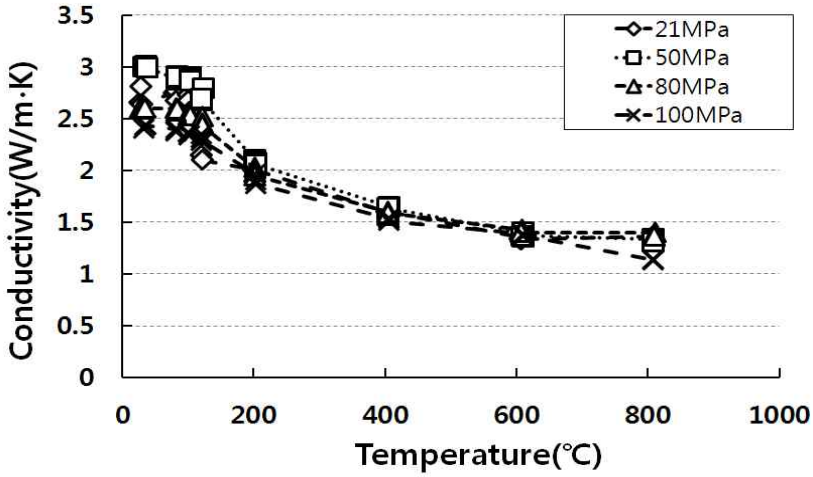
(3) 실험 결과

(가) 열전도율 실험결과

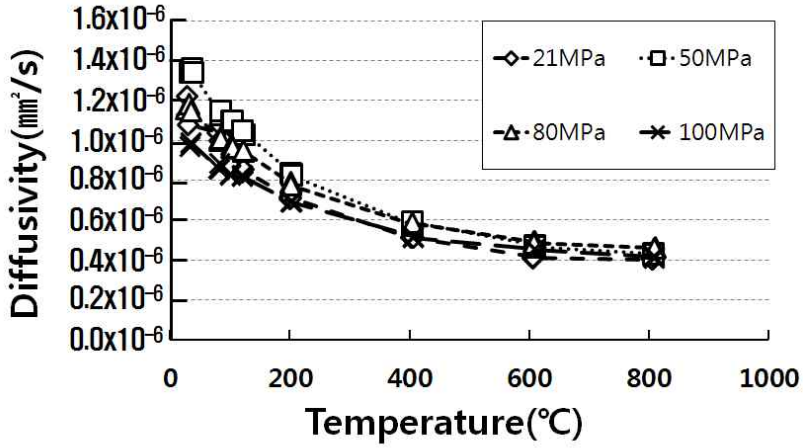
<그림 2.2.172>(1)에서 나타난 바와 같이 100~200℃ 구간에서 급격한 열전도율 값이 하강하였으며, 21MPa 실험체는 110℃에서 가장 변화를 보이며 하락하였다. 이후 200~400℃구간에서는 실험체들이 약 0.5(W/m·K) 하락하였고, 400~600℃구간에서는 약 0.2(W/m·K) 정도 하락하였으며 800℃에 이르러는 열전도율 변화가 거의 없었다.

(나) 열팽창율 실험결과

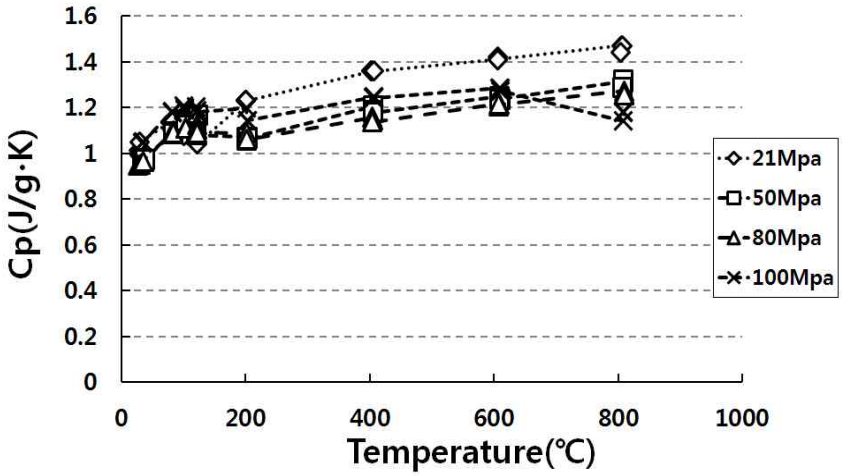
<그림 2.2.172>(2)에 나타난 바와 같이 21MPa와 50MPa의 콘크리트의 경우 50 %의 하락율을 나타냈으며, 80MPa와 100MPa도 이에 근사한 하락율을 나타내며 400~800℃구간에 실험체 NSC와 HSC 모두가 유사하게 하락하는 경향을 나타냈다.



(1) 강도별 실험체의 열전도율



(2) 강도별 실험체의 열확산율



(3) 강도별 실험체의 비열

<그림 2.2.172> 실험 관련 사진

(다) 비열 실험결과

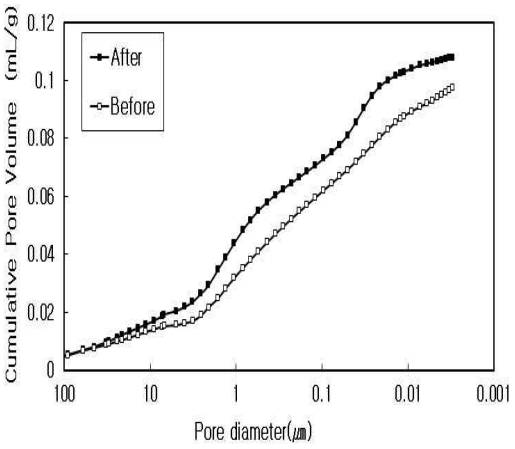
<그림 2.2.172>(3)에 나타난 바와 같이 최초 100℃에 이르며 21~100MPa 실험체 모두가 20%정도의 상승을 보이며 200℃구간까지 소폭 상승하였다. 이후로 800℃에 이르기까지 대체로 균일하게 비열 수치가 상승하면서 21MPa콘크리트에서 100MPa 콘크리트 순으로 압축강도의 수치가 낮은 콘크리트에 비열이 높게 나타났다. 또한, 100MPa 콘크리트의 경우 다른 콘크리트의 성향과 달리 600~800℃구간에서 비열수치가 하락하면서 200℃구간에서의 비열수치와 근사한 값을 나타냈다.

(라) 강도별 누적세공량 실험결과

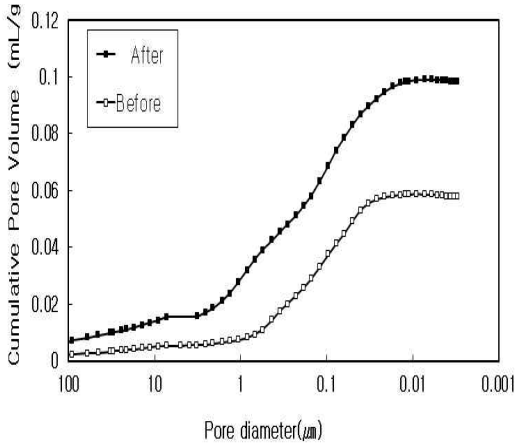
<그림 2.2.173>(1)에서 나타난 바와 같이 21MPa이 공극률이 가장 크게 나타났으며, NSC에 비하여 HSC의 경우가 공극률이 작게 나타났다. 그러므로 공극이 작을수록 강도가 크다는 것을 알 수 있다. 또한 NSC에 비하여 HSC의 경우가 가열 전후의 차이가 큰 것을 알 수 있으며, 가열전 보다는 가열 후에 공극량이 증가하였다. 21MPa과 50MPa의 경우에는 1μm에서 공극량이 급속이 증가하는 경향을 보였으며, 80MPa과 100MPa의 경우에는 0.1μm부근의 공극량이 급속히 증가함을 보였다. 이러한 경향은 pp섬유에 의한 영향으로 보인다. 밀폐된 구조에 의한 수화에 필요한 수분 증발이 억제되어서 <그림 2.2.171>(2)에서와 같이 일반강도에 비해 고강도로 갈수록 누적세공량은 작아지는 경향을 나타내었다.

(마) 콘크리트 강도에 의한 열적 특성치 비교

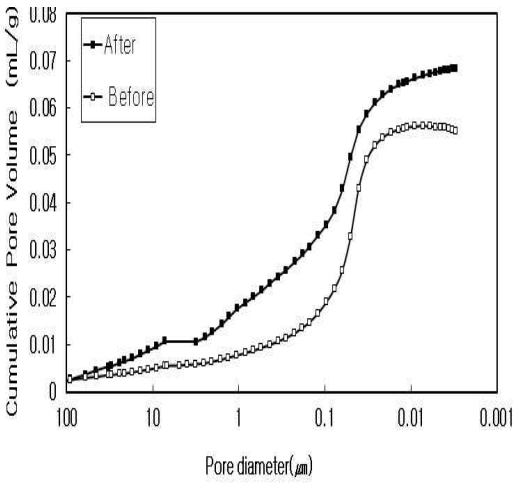
<그림 2.2.174>에서 나타난 바와 같이 콘크리트 강도에 의한 열적 특성치를 상온 및 200℃로 비교 분석한 결과이다. <그림 2.2.175>(1)~(3)을 보듯이 콘크리트의 강도 증가에 의한 열적 특성치는 상온 경우와 200℃의 경우가 다르며 상온의 경우 고강도화가 되는 것으로 열특성치는 감소하는 경향이지만, 200℃로 가열한 경우 고강도화가 되는 것으로 열특성치의 변화가 검증되었다.



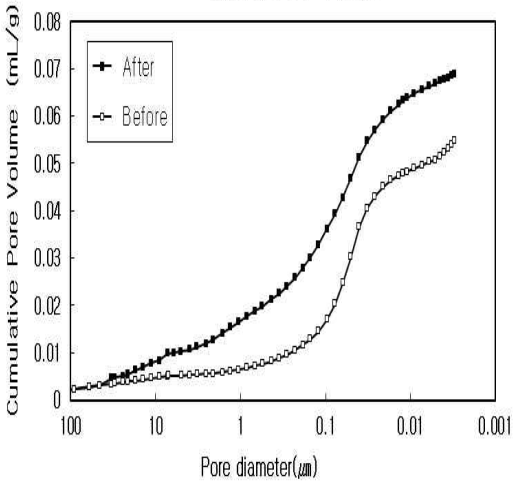
21MPa



50MPa

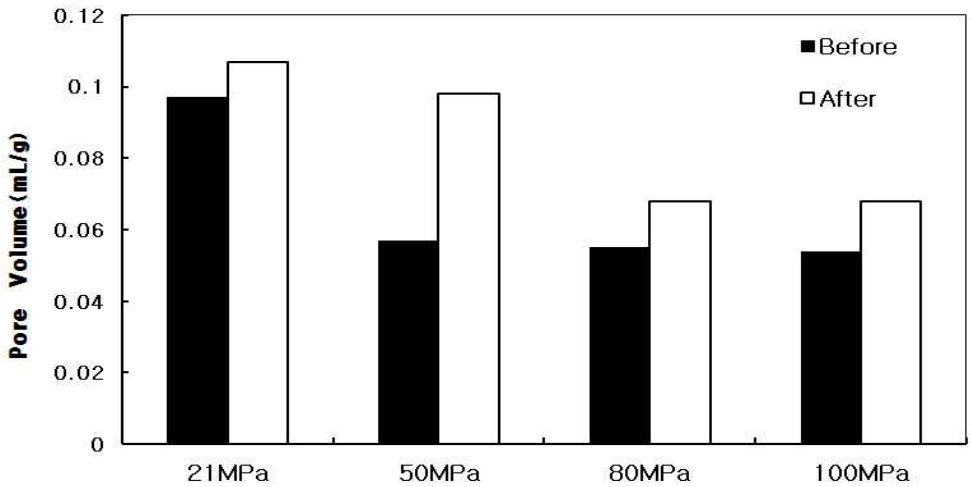


80MPa

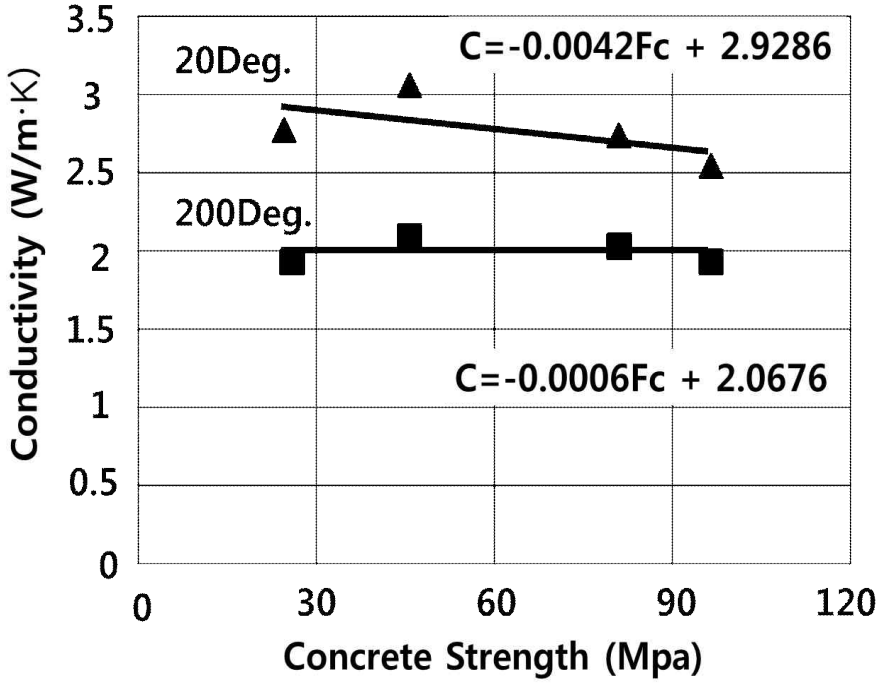


100MPa

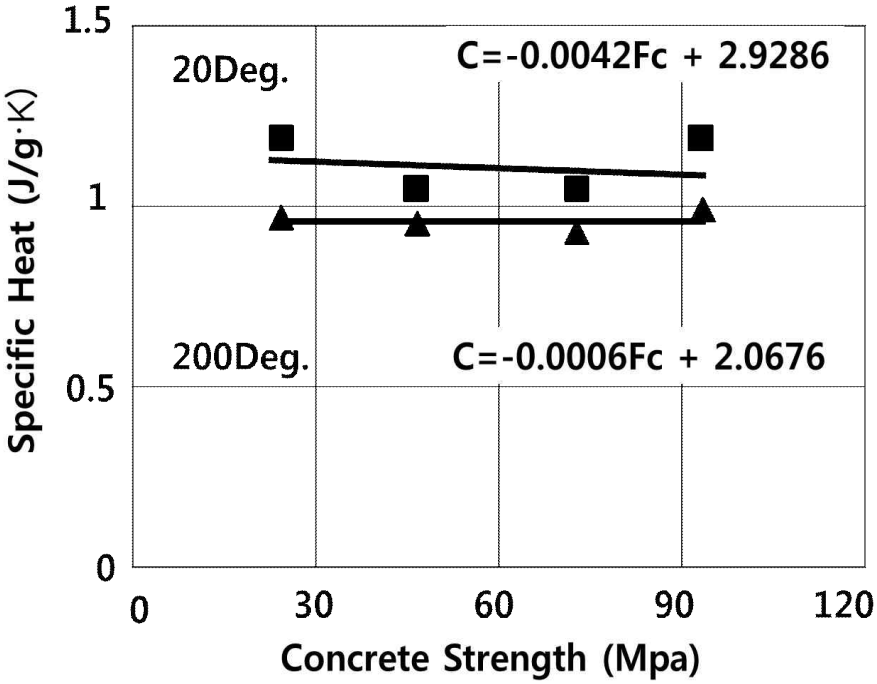
<그림 2.2.173> (1) 화재 전후 콘크리트의 강도별 기공 크기 분포



<그림 2.2.174> (2) 화재 전후 콘크리트의 강도별 누적 기공 체적



(1) 열전도율



(2) 비열

<그림 2.2.175> 열적 특성치 비교

(4) 열해석을 위한 콘크리트의 열관성 실험 결론

NSC와 HSC의 콘크리트 열적 특성을 연구를 위해 크게 비열, 열전도율, 열팽창율 등과 같은 물리적 특성연구와 공극률등과 같은 역학적 특성 연구를 수행함으로서 다음과 같은 결과를 얻었다.

(가) 콘크리트의 열적특성(열전도, 열팽창, 비열)은 강도가 고강도화 될수록 일정한 경향을 나타내지 않았으나, 열전도율과 열확산율의 경우는 200 ℃까지의 변화가 크고, 비열의 경우는, 200 ℃이후의 변화가 상대적으로 크게 나타났다.

(나) 21MPa이 공극률이 가장 크게 나타났으며, NSC에 비하여 HSC의 경우가 공극률이 작게 나타났다. 그러므로 공극이 작을수록 강도가 크다는 것을 알 수 있었고, NSC에 비하여 HSC의 경우가 가열 전후 의 차이가 큰 것을 알 수 있었다.

(다) 21 Mpa과 50 Mpa의 경우에는 1μm에서 공극량이 급속이 증가하는 경향을 보였으며, 80 Mpa과 100 Mpa의 경우에는 0.1μm부근의 공극량이 급속히 증가함을 보였다.

(라) 가열 후에는 공극압력 상승과 더불어 공극량이 증가하여서 폭렬에 미치는 것으로 판단이 되며, 콘크리트의 강도 증가에 의한 열적 특성치는 상온 경우와 200℃의 경우가 다르며 상온의 경우 고강도화가 되는 것으로 열특성치는 감소하는 경향이지만, 200℃로 가열한 경우 고강도화가 되는 것으로 열특성치의 변화가 검증되었고, 200도 전후의 온도에서는 충분한 안전성이 확보 될 수 있을 것으로 판단된다.

마. 열응력을 고려한 폭렬해석

(1) 연구개요

본 절에서는 폭렬해석을 위한 중요인자인 열수분이동, 열응력에 대하여 콘크리트 내부의 온도분포와 공극압, 수증기압에 대한 해석을 실시하여 폭렬의 요인을 고찰하였다.

(2) 해석을 위한 기초식 및 방법

콘크리트는 일반적으로 고체와 액체, 기체가 합쳐진 혼합제이다. 이 때문에 열수분이동해석을 위해서는 다음 <표 2.2.65>와 기본식이 필요하다. 이러한 기본식을 고려하여 다음 <그림 2.2.176>과 같이 해석 모델링을 설정하였다. 원형 실험체이며, size는 $\Phi 10 \times 20$이며 일반콘크리트로 가정하고 가열조건은 ISO 834로 설정하였다.

(3) 해석결과

공시체 일반콘크리트를 해석한 결과, 온도의 경우 다음 그림 <그림 2.2.177>(1)과 같은 그래프가 나타났다. 표면부부터 열이 전도되어 실험체 내부로 열이 전도되는 것을 알 수 있었으며, <그림 2.2.177>(2)에서 나타난 함수율의 변화는 내부의 함수율이 증발과 흡착이 동시에 일어나는 것을 알 수 있었다. 마지막으로 공극압력은 실험체에 열이 가해지고부터 내부의 공극응력이 크게 발생하였다.

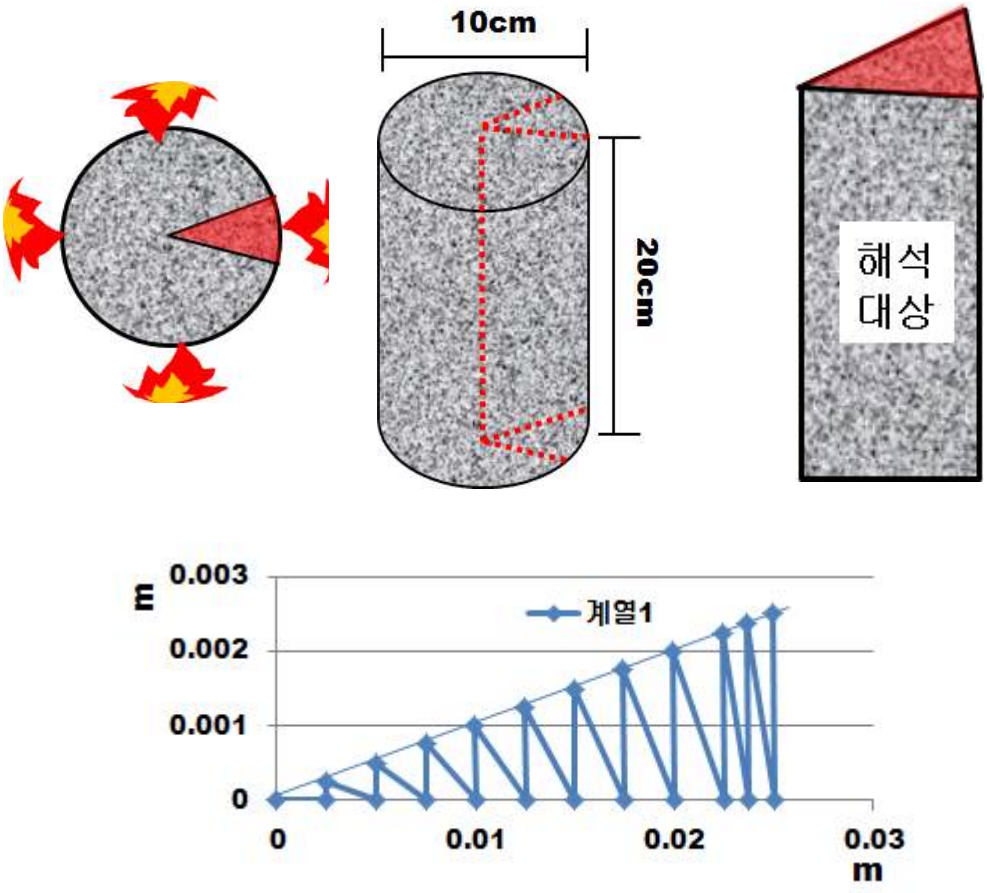
(4) 결 론

폭렬해석을 위한 열수분이동, 열응력에 대한 해석을 통해 공극 압력의 인장 강도비와 폭렬 발생에 대하여 비교하였고, 그 결과

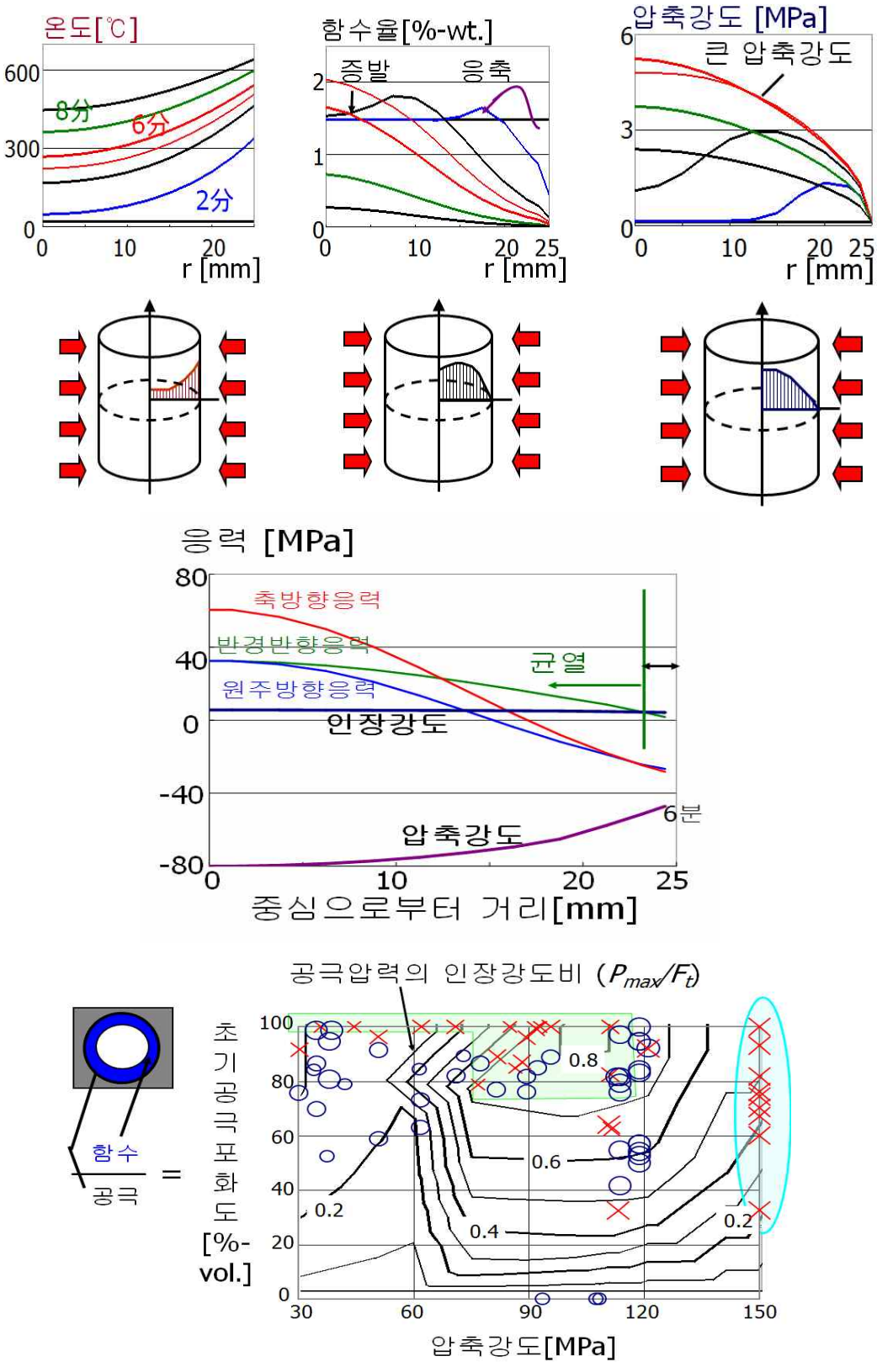
1) 대부분의 범위에서 공극 압력은 인장 강도의 0.8배 이하였다. 또한 폭렬 발생과의 관계성은 적은 걸 알 수 있었다.
2) 공극 압력(수증기 압력)이 원인이 되는 수증기설보다 열응력설이 폭렬 발생 원인에 가깝다.

<표 2.2.65> 열수분이동해석의 기본식

■ 열전도방정식	$\frac{\partial(\rho_0 cT)}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) - Lm_v$
■ 수증기 수지식	$\frac{\partial(\varepsilon\rho_v)}{\partial t} + \nabla(\rho_v \cdot v) = m_v$
■ 공기 수지식	$\frac{\partial(\varepsilon\rho_a)}{\partial t} + \nabla(\rho_a \cdot v) = 0$
■ 액상수의 수지식	$\rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} = -m_v$
■ 수증기 발생 속도식	$m_v = \gamma(w - w_{eq})$
- 돌튼의 분압 법칙	$P_g = P_v + P_a$
- 공극내 대류 속도식	$v = -K_D \nabla P_g$



<그림 2.2.176> 해석 모델링



<그림 2.2.177> 해석 결과

9. Green SHCC 재료 개발

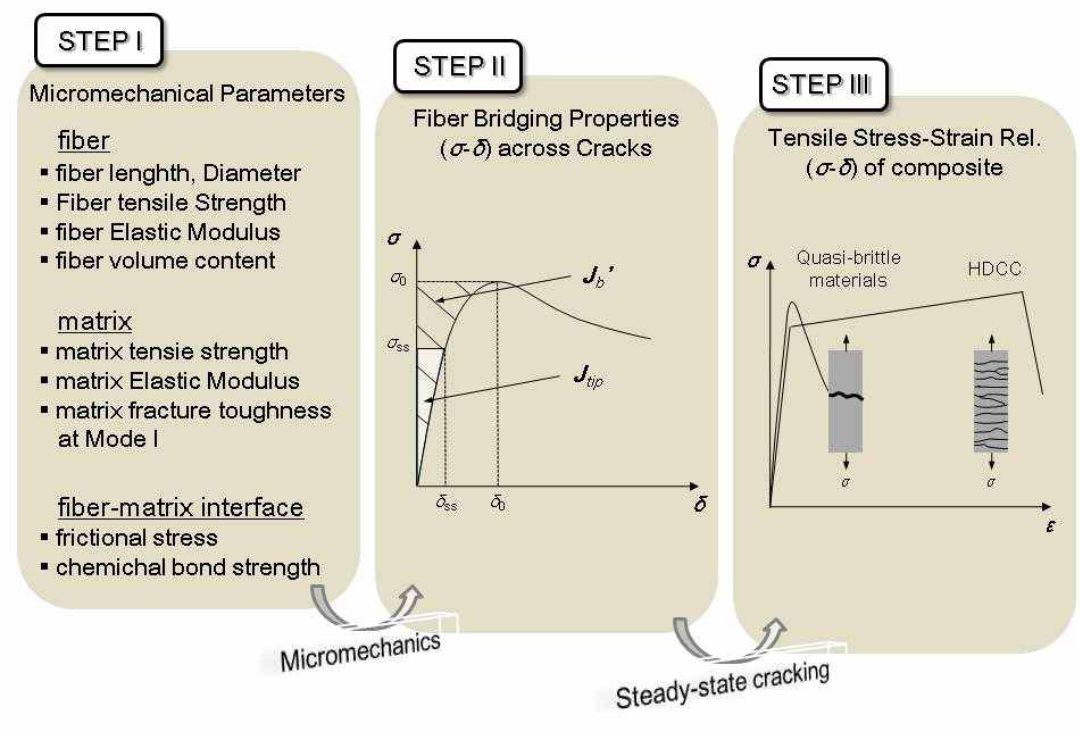
가. 재료 개발

(1) 마이크로역학 및 안정상태 균열이론

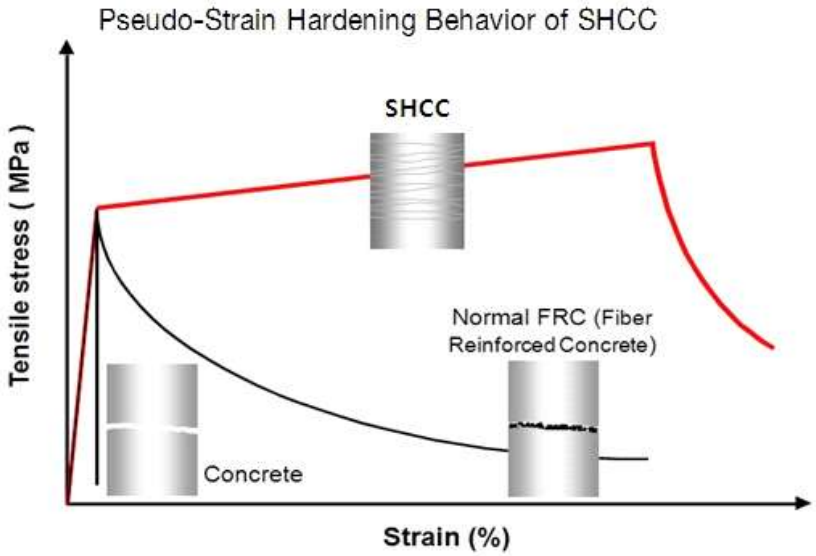
본 연구에서는 마이크로역학(micromechanics)과 안정상태 균열이론(steady-state cracking theory)에 근거하여 고연성 시멘트복합재료를 개발하기 위한 연구를 실시하였다. 이 때 고려되는 기본적인 역학적 구성요소는 섬유(fiber), 시멘트 매트릭스(cement matrix), 시멘트 매트릭스-섬유 경계면(cement matrix-fiber interface)이며, 이 역학적 구성요소의 특징을 파악하고 균열면 거동분석을 통하여 안정적인 변형률 경화거동의 특징과 다수의 미세균열을 나타내는 고연성 시멘트복합재료를 설계할 수 있다. 이를 위하여 이 연구에서 실시한 연구내용에 대한 전체적인 개요 및 설계 과정을 개념적으로 표현하면<그림 2.2.178>에 나타난 바와 같다. <그림 2.2.178>에 나타난 바와 같이 먼저 실험을 통하여 고연성 시멘트복합재료를 구성하는 요소인 섬유와 시멘트 매트릭스의 역학적 특성을 파악하기 위하여 섬유인발 실험과 시멘트 매트릭스 파괴인성 실험을 실시하였다. 섬유인발 실험을 실시하여 시멘트 매트릭스-섬유 경계면의 부착 특성(화학적 부착, 마찰 부착)을 도출하였으며, 시멘트 매트릭스의 파괴에너지 실험을 통하여 균열이 존재하는 시멘트 매트릭스가 외부하중에 의해 발생되는 파괴역학적 변수 값인 파괴인성을 도출하였다. 실험을 통하여 구해진 마이크로역학 변수와 실험에 사용된 재료의 특성을 이용하고 형광 현미경을 이용하여 실제 단면에서의 섬유 분포를 촬영하여 섬유의 분산성을 나타내는 확률밀도함수를 직접 구함으로써 기존의 임의의 3차원으로 가정하여 구한 균열면 응력(σ)-균열개구변위(δ)와의 관계를 수정하여 실제 균열면 응력(σ)-균열개구변위(δ)와의 관계를 도출하였다. 수정된 균열면 응력(σ)-균열개구변위(δ)와의 관계를 통해 실제 균열면의 거동의 특징을 파악하였다,

(2) 마이크로역학

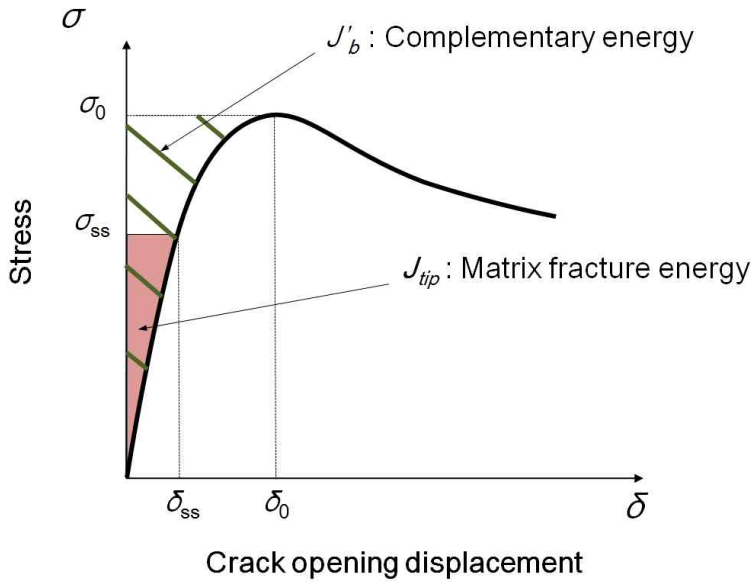
콘크리트, 모르타르 등의 유사취성적인 시멘트계 재료(quasi-brittle material)와는 달리 고연성 시멘트복합재료의 경우 <그림 2.2.179>와 같이 1축 인장 조건에서 금속과 같은 변형률 경화거동을 나타낸다. 이러한 변형률 경화거동과 더불어 일반적으로 100㎛이하로 제어되는 균열폭 등의 특징은 고연성 시멘트복합재료 고유의 재료 특성으로 마이크로역학에 근거하여 시멘트 매트릭스, 섬유, 시멘트 매트릭스-섬유의 경계면 등의 3가지 역학적 요소에 해당되는 변수들을 조절하는 설계를 통해 구현할 수 있다.



<그림 2.2.178> 고연성 시멘트 복합재료 설계 개념도



<그림 2.2.179> 고연성 시멘트복합재료의 변형률 경화거동

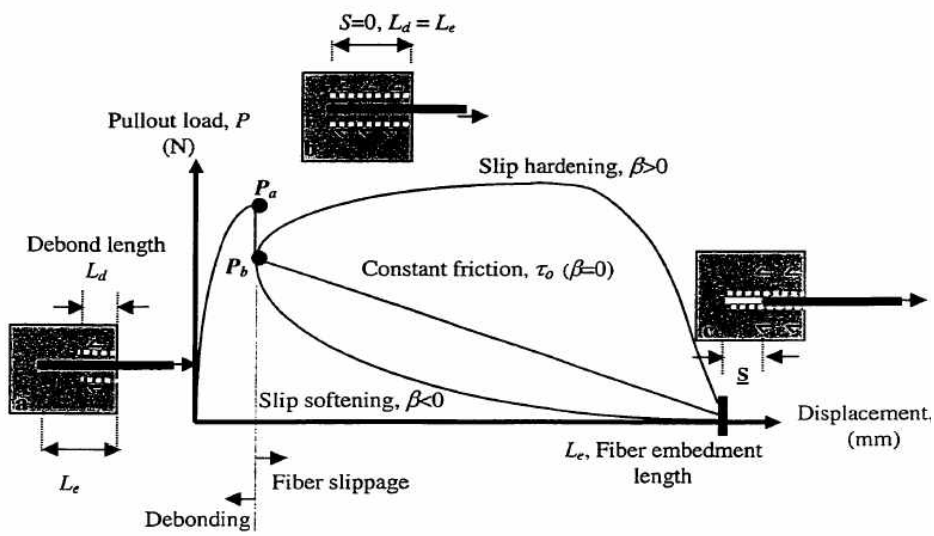


<그림 2.2.180> 고연성 시멘트복합재료의 일반적인 균열면 응력 - 개구변위관계 곡선

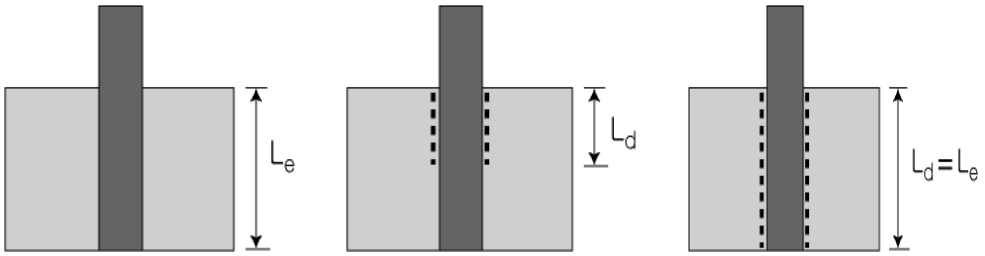
특히, 변형률 경화거동의 특징을 나타내기 위해서는 섬유와 시멘트 매트릭스의 물리적 및 역학적 특성과 시멘트 매트릭스와 섬유 경계면에서의 마찰 부착과 화학적 부착을 파악하여 안정상태 균열이론의 기본 요구조건을 만족하여야 한다. 이를 만족할 경우 1축 인장 하에서 다수의 미세 균열이 발생하게 된다. 섬유와 매트릭스, 섬유-매트릭스 경계면의 마이크로역학적 특성들을 이용하여 일반적인 균열면 응력(bridging stress, σ)과 균열개구변위(crack opening displacement, δ)와의 관계를 나타내면 <그림 2.2.180>과 같다.

(가) 섬유인발거동 및 부착특성

섬유-매트릭스의 경계면 특성은 섬유인발 실험을 통해 섬유 인발하중과 섬유 인발량 사이의 관계 곡선을 해석함으로써 구할 수 있다. 일반적인 섬유인발 실험 결과는 <그림 2.2.181>에 도시한 바와 같으며, 섬유의 종류 및 특성에 따라 각각 다른 형상을 보인다. 섬유 인발과정에서 섬유가 인발되는 초기에는 섬유-매트릭스 경계면을 따라 둘 사이의 계면 부착이 떨어지게 된다. 섬유와 매트릭스 사이에서 부착이 떨어진 길이를 Ld 라고 하면 인발 하중이 증가할수록 Ld는 섬유가 매트릭스에 묻힌 길이(Le)에 근접하게 된다. 인발 하중이 점차 증가하여 Ld = Le 가 되면 섬유와 매트릭스 사이의 부착이 완전히 떨어지게 되고 섬유가 매트릭스에서 빠져나오는 인발과정을 거치게 된다(<그림 2.2.182>).



〈그림 2.2.181〉 일반적인 섬유인발 실험 결과



〈그림 2.2.182〉 섬유와 매트릭스 사이의 부착이 떨어지는 과정

매트릭스와 섬유 사이의 부착은 섬유 종류에 따라 다르지만 크게 화학적 부착과 마찰 부착 두 가지로 분류할 수 있다. 화학적 부착은 매트릭스와 섬유 사이의 정전기적 인력에 의하여 부착이 되는 것이며 마찰 부착은 매트릭스와 섬유 사이의 역학적 부착으로서 매트릭스와 섬유 사이의 화학적 부착이 파괴되고 난 후 매트릭스에서 섬유가 인발될 때 섬유의 인발에 저항하는 부착이다. 즉, 섬유와 매트릭스간의 부착이 떨어지기 전, 섬유와 매트릭스 사이에 작용하는 힘은 둘 사이의 정전기적 인력에 의한 화학적인 부착이며 화학적 부착이 떨어지고 나면 섬유와 매트릭스간의 마찰에 의한 마찰 부착이 작용하게 된다. 인발 하중이 점차 증가하다가 최고하중(Pa)에 도달하게 되면 섬유와 매트릭스 사이의 부착이 떨어지게 되고 급격하게 인발 하중이 감소하게 된다. 이는 경계면을 따라 섬유와 매트릭스 사이의 화학적 부착이 더 이상 존재하지 않음을 나타내며 PVA(Poly Vinyl Alcohol) 합성 섬유와 같이 친수성 합성 섬유는 매트릭스와 매우 강한 화학적 부착을 갖는 섬유이기 때문에 인발 과정에서 화학적 부착이 떨어지게 되면 매우 급격한 하중 강하를 보인다(〈그림 2.2.181〉).

화학적 부착이 떨어진 후의 인발거동은 매트릭스의 재령, 강도, 탄성계수, 실험에 사용한 섬유의 종류나 인장강도 등에 따라 슬립경화 거동 또는 슬립연화 거동을 나타내는데 섬유와 매트릭스 사이의 마찰력이 커져 매트릭스가 섬유의 인발에 저항할

수록 슬립경화 거동을 나타내게 된다.

매트릭스와 섬유 사이의 화학적 부착(Gd)은 인발실험을 통해 얻은 인발하중-인발량 관계 곡선 상에서 하중 강하가 일어나기 전 최고하중인 Pa와 하중 강하가 일어난 직후의 하중(Pb)을 이용하여 식 2.2.74로 구할 수 있다. 식 2.2.74에서 Ef는 섬유의 탄성계수이며 df는 섬유의 직경이다.

$$G_d = \frac{2\,(P_a - P_b)^2}{\pi^2 E_f\, d_f^3} \qquad 2.2.74$$

합성섬유는 크게 친수성 섬유와 소수성 섬유로 구분할 수 있는데 PVA 섬유와 같은 친수성 합성 섬유는 모르타르나 콘크리트 내부에 존재하는 수분으로 인해 매트릭스와의 정전기적 인력이 강해 반데르발스 힘에 의한 매트릭스와의 부착능력이 크다. 즉 친수성 섬유는 Gd 값이 크다. 소수성 섬유는 물과의 정전기적 인력이 약하여 매트릭스와 반데르발스 힘에 의한 인력이 작기 때문에 Gd 값이 크지 않으며 섬유인발 실험 결과에서도 Pa 값과 Pb 값이 큰 차이를 나타내지 않는다. 또한 강섬유의 경우에는 물과의 정전기적 인력이 거의 작용하지 않아 매트릭스와 인력이 매우 작으므로 Gd값이 0 에 가깝게 된다.

화학적 부착이 떨어지고 나면 Pb 점 이후의 섬유인발 거동에서 섬유는 화학적 부착보다는 역학적 마찰 부착에 의해 거동하게 된다. 부착이 떨어진 직후의 섬유-매트릭스 사이의 마찰 부착 강도(τ_0)는 다음 식 2.2.75에 의하여 구할 수 있다. 단, 식 2.2.75에서 le는 섬유의 묻힘길이이다.

$$\tau_0 = \frac{P_b}{\pi\, d_f\, l_e} \qquad 2.2.75$$

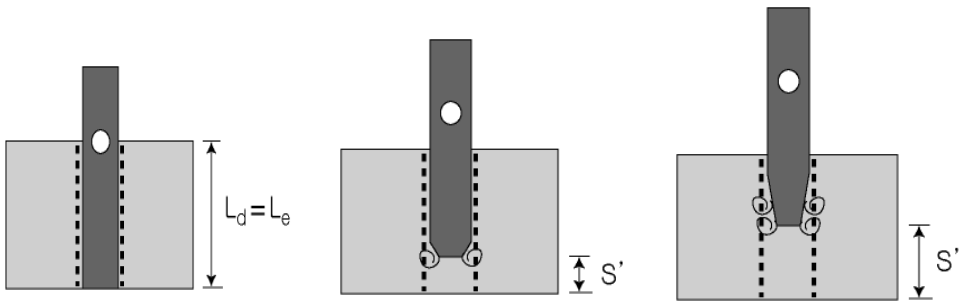
섬유와 매트릭스 사이의 화학적 부착이 떨어진 후 매트릭스에서 섬유의 인발이 일어날 때 슬립경화 거동을 하기도 하고 슬립연화 거동을 하기도 하는데 이러한 특성은 슬립경화 계수(slip-hardening coefficient ; β)값에 의하여 결정 된다(<그림 2.2.181>). 주로 합성 섬유에서는 하중이 증가하는 경화 거동이 나타나게 되는데 이러한 이유는 섬유가 주위의 시멘트 매트릭스 보다 더 약하기 때문에 인발 과정에서 시멘트 매트릭스에 의해 표면이 손상을 입게 되고 손상을 입은 부분이 시멘트 매트릭스와의 저항을 크게하여 섬유의 인발을 방해하기 때문에 인발 하중이 증가하는 것이다.

반면 슬립경화 거동이 발생되는 합성 섬유와는 반대로 강섬유와 같이 시멘트 매트릭스보다 섬유의 강도가 크고 표면의 손상어 인발 하중에 저항이 거의 없는 강섬유는 슬립연화 거동을 보이게 된다. 슬립경화 거동이 일어날 때의 인발 하중이 섬유의 인장 강도를 초과하지 않는다면 섬유는 파단이 일어나지 않고 인발이 계속적으로 일어나게 된다. 이러한 경우 시멘트 매트릭스 내의 섬유가 인발 과정에서 많은 에너지를 소비하게 되므로 섬유보강 경량 시멘트 복합체를 설계하는데 있어 성능향상에 유리하다. 슬립경화 계수 값은 다음 (식 2.2.76)으로 구할 수 있다.

$$\beta = (\frac{d_f}{l_e})\,[\frac{1}{\tau_0\,\pi\,d_f}\lim_{\Delta S' \to 0}\frac{\Delta P}{\Delta S'} + 1] \qquad 2.2.76$$

슬립경화 계수는 크게 세 가지의 값을 갖게 되는데 양일 경우에는 슬립경화 거동을, 음일 경우에는 슬립연화 거동을 나타내며 0 일 경우에는 인발이 일어나는 동안 섬유와 매트릭스 사이의 마찰력이 일정하다는 것을 의미한다.합성 섬유에서는 주로 인발이 일어날수록 인발하중이 증가하는 슬립경화 거동이 나타나게 되는데 이는 섬유의 강도가 주위의 매트릭스보다 상대적으로 약하기 때문에 인발 과정에서 섬유는 매트릭스에 의해 손상을 입게 되고 손상을 입은 부분이 섬유의 인발에 마찰로 저항하기 때문에 인발 저항 능력이 커져 인발 하중이 증가하는 것이다(<그림 2.2.183>).

반면 강섬유와 같이 매트릭스 보다 섬유의 강도가 큰 경우에는 슬립연화 거동을 보이게 된다. 슬립경화 거동이 일어나는 경우와는 반대로 강섬유의 강도가 매트릭스보다 훨씬 크므로 섬유의 인발이 일어나는 경우 섬유는 손상을 입지 않고 그대로 슬립이 발생하면서 인발이 일어나게 되므로 슬립연화 거동이 일어나게 된다. 매트릭스에서 섬유의 인발 과정에서 슬립경화 거동이 일어날 때 섬유에 작용하는 인발하중이 섬유의 인장강도를 초과하지 않는다면 인발 과정에서 섬유는 파단이 일어나지 않고 인발이 계속적으로 일어나게 된다. 이러한 경우 매트릭스내의 섬유가 인발과정에서 많은 에너지를 소비하는 역할을 하는데 그 과정을 살펴보면 고연성 시멘트복합재료의 균열면에서 섬유가 균열면의 법선방향으로 배열되어 있다면 균열면의 양단에 걸쳐있게 되고 균열폭이 증가하면서 섬유의 인발이 일어남에 따라 인발 과정에서 섬유가 많은 에너지를 소비하게 되는 것이므로 고연성 시멘트복합재료의 에너지 흡수 능력을 크게 증가시키며, 이는 인성을 높이는데 많은 이점을 주는 것을 의미한다.



<그림 2.2.183> 섬유와 매트릭스 사이의 부착이 떨어지는 과정

(나) 균열면 응력-균열개구변위 관계

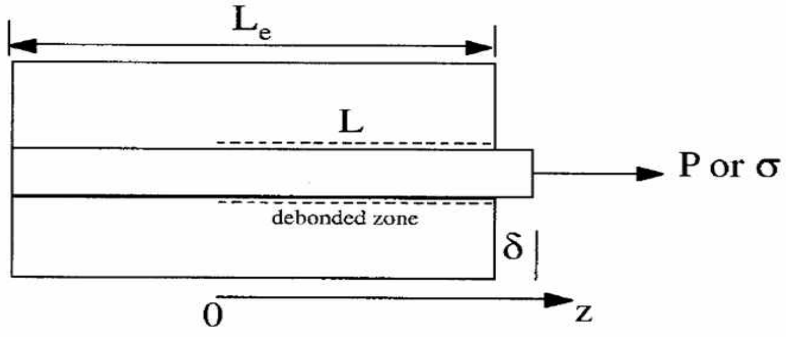
균열면 응력-균열개구변위 관계 곡선은 직접 실험에 의하여 구할 수도 있으나,

실험의 신뢰성을 확보하기 어렵기 때문에 일반적으로 수치해석에 의하여 구하게 된다. 이때 사용하는 기법이 마이크로역학이며, 수치적분을 하기 위해서는 섬유, 매트릭스, 섬유-매트릭스 경계면 특성 등이 필요하다. 이를 이용하여 균열면에 작용하는 단일 섬유들의 가교 힘을 모두 적분하면 σ_B-δ 관계 곡선을 이론적으로 구할 수 있다. 이 곡선을 이론적으로 구하기 위해서는 다음과 같은 사항이 가정되어야 한다.

1. 매트릭스의 균열은 일직선인 평면이다.
2. 섬유인발이 일어나는 동안 매트릭스의 변형은 무시한다.
3. 섬유는 매트릭스 내에서 3차원으로 무작위하게 배열되어 있다.
4. 섬유는 원통형 단면을 가지며 매트릭스 내에서 직선 형태이다.
5. 섬유는 선형 탄성 거동을 한다.
6. 섬유인발이 일어나는 동안 섬유의 포아송비는 무시한다.

① 단일 섬유의 가교거동

단일 섬유의 가교거동은 매트릭스의 균열면에서 단일 섬유에 작용하는 인발하중(P)과 균열개구변위(δ)의 관계를 해석함으로서 구할 수 있다. <그림 2.2.184>는 단일 섬유의 인발거동을 개념적으로 도식화한 것으로 임의의 균열개구변위에 대하여 섬유는 부착파괴(Debonding) 되거나 마찰 부착에 의하여 뽑히게 된다. L_e는 섬유가 매트릭스에 묻힌 길이, L은 섬유와 매트릭스 사이에서 화학적 부착이 떨어진 길이를 의미하며, Lin 등은 힘의 평형조건과 에너지 평형 조건을 바탕으로 P-δ 관계를 다음과 같이 유도하였다



<그림 2.2.184> 단일섬유 인발 과정

단일 섬유의 가교거동은 부착파괴가 완료되는 섬유 뽑힘 길이(δ_0)을 기준으로 해서 부착파괴 영역($0 < \delta < \delta_0$)과 부착파괴가 완료된 후, 뽑힘(Pulled out) 영역($\delta_0 < \delta < \delta_0 + L_e$)으로 나누어 구할 수 있다. 여기서 부착파괴가 완료되는 섬유 뽑힘 길이 δ_0는 인발하중이 점차 증가하여 L이 L_e에 이르게 될 때의 균열개구변위로 다

음의 식 2.2.77과 같다.

$$\delta_0 = \frac{4\tau_0 L_e^2(1+\eta)}{E_f d_f} + 4\sqrt{\frac{2G_D L_e^2(1+\eta)}{E_f d_f}} \qquad 2.2.77$$

여기서, E_f는 섬유의 탄성계수, d_f는 섬유의 직경, τ_0는 마찰 부착, G_D는 화학적 부착을 의미하며, $\eta = \frac{V_f E_f}{V_m E_m}$이다. 부착파괴 영역에서 단일 섬유의 가교거동은 화학적 부착과 마찰 부착이 동시에 작용하여 인발하중에 저항하게 된다. 따라서 실험을 통하여 구한 섬유와 매트릭스의 역학적 특성과 섬유-매트릭스 경계면의 역학적 특성을 식 2.2.78에 대입함으로서 단일 섬유가 균열면에서 작용하는 힘을 이론적으로 구할 수 있다.

$$P(\delta) = \sqrt{\frac{\pi^2 E_f d_f^3 \tau_0(1+\eta)}{4}\delta + \frac{\pi^2 E_f d_f^3 G_D(1+\eta)}{2}} \qquad 2.2.78$$

부착파괴가 완료되면 섬유와 매트릭스의 경계면에서는 더 이상 화학적 부착이 존재하지 않게 되며 오직 마찰 부착만으로 인발하중에 저항하게 된다. 즉, 뽑힘 영역에서의 단일 섬유의 가교거동은 다음의 식 2.2.79와 같이 나타낼 수 있다.

$$P(\delta) = \pi d_f \tau_0 \left[1 + \frac{\delta - \delta_0}{d_f}\beta\right]\left[L_e - (\delta - \delta_0)\right] \qquad 2.2.79$$

여기서, β는 슬립경화 계수이다. 매트릭스의 균열면에서 단일 섬유가 θ의 기울기를 갖고 기울어져 있는 경우, 섬유에 작용하는 힘은 휨에 의하여 증가한다. 이러한 현상을 스너빙 효과(Snubbing Effect)라고 한다. 스너빙 효과에 의하여 증가되는 힘은 다음의 식 2.2.80로 계산할 수 있다.

$$P(\theta) = P(0)e^{f\theta} \qquad 2.2.80$$

또한, 섬유의 강도(σ_{fu})는 기울기 θ에 따라 강도가 감소하는데, 이를 강도 감소 효과(Strength Reduction Effect)라고 하며 다음의 식 2.2.81과 같다.

$$\sigma_{fu}(\theta) = \sigma_{fu}(0)e^{-f'\theta} \qquad 2.2.81$$

여기서, f와 f'은 각각 스너빙 효과 계수와 섬유 강도감소 계수이다. 이 계수들은

실험을 통해 구할 수 있다. Wu의 실험결과로부터 0.5% 오일 코팅이 된 PVA 섬유가 사용된 경우 f의 값은 0.2에서 0.8의 값을 갖는 것으로 나타났다. Kanda 등은 f'의 값이 대략 0.3을 나타낸다고 보고하였다.

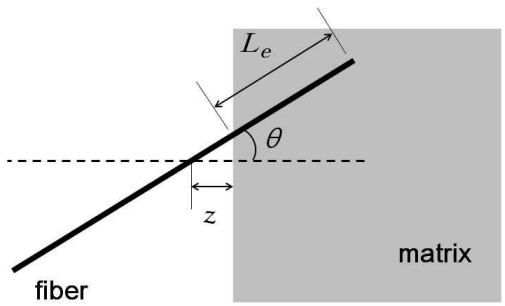
② 다중 섬유의 가교거동

다중 섬유의 가교거동은 균열면에서 가교거동을 하는 단일 섬유들이 무작위하게 분포되어 있다는 가정 하에 단면에서의 이론적인 섬유 개수와 기울어진 각도, 매입길이에 대한 확률밀도함수를 이용하여 구할 수 있다. 섬유의 배향각을 1차원으로 가정하면 단위 면적당 섬유의 개수는 식 2.2.82와 같다.

$$N_{1D} = \frac{V_f}{A_f} \qquad 2.2.82$$

여기서, V_f와 A_f는 각각 섬유 혼입률과 섬유 단면적이다. <그림 2.2.185>는 기울어진 섬유에 대한 매입길이를 나타내며, 여기서 L_e는 매트릭스에 묻혀 있는 섬유의 길이, z는 섬유의 도심이 매트릭스 균열면으로부터 떨어진 거리, θ는 섬유와 매트릭스 사이의 각도를 의미한다. 매트릭스의 균열면에서 가교 역할을 하는 섬유의 수는 θ와 z의 분포에 의존하는데, 만약 $P(\theta)$와 $P(z)$가 각각 θ와 z에 대한 확률밀도함수라면, 단위 면적당 섬유 개수는 식 2.2.83과 같다.

$$N_B = N_{1D} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{z_1}^{z_2} p(z)\,dz\,p(\theta)\,d\theta \qquad 2.2.83$$



<그림 2.2.185> 기울어진 섬유의 묻힘 길이

섬유의 분포가 3차원으로 무작위하게 배열되어 있다고 가정하면 $P(\theta)$와 $P(z)$는 다음과 같다.

$$p(\theta) = \frac{1}{A}\frac{dA}{d\theta} = \sin\theta \quad \text{for} \quad 0 \le \phi \le \pi/2 \tag{2.2.84}$$

$$p(z) = \frac{2}{L_f} \quad \text{for} \quad 0 \le z \le L_f/2 \tag{2.2.85}$$

만약 θ_1이 0이고 θ_2가 $\pi/2$이면, 매트릭스에 묻혀 있는 섬유의 길이(L_e, 식 2.2.86)는 0보다 커야하기 때문에 z_1은 0이 되어야 하며 z_2는 $(L_f/2)\cos\theta$가 되어야 한다.

$$L_e = L_f/2 - z/\cos\theta \tag{2.2.86}$$

z를 L_e로 치환하면 식 2.2.86은 식 2.2.87과 같이 바뀌게 된다.

$$N_B = N_{1D}\int_0^{\frac{\pi}{2}}\int_0^1 p(L_e)p(\theta)\cos(\theta)\,dL_e\,d\theta \tag{2.2.87}$$

만약 균열면에서 단일 섬유의 가교거동이 $P(\theta, L_e, \delta)$라면, 다중 섬유의 가교거동은 Li 등이 제안한 식 2.2.88에 의해 구할 수 있다.

$$\sigma_B(\delta) = \frac{4V_f}{\pi {d_f}^2}\int_0^{\pi/2}\int_0^{L_f/2} P(\theta, L_{e,}\delta)p(\theta)\cos(\theta)\,dL_e\,d\theta \tag{2.2.88}$$

③ 섬유 분산성을 고려한 섬유 가교거동

기존의 Li 등이 제안한 식 2.2.88에서는 균열면에 섬유가 균일하게 무작위로 분포되어 있다고 가정하였으나 실제 섬유의 분포는 균일할 수 없으며 고연성 시멘트복합재료의 인장파괴는 섬유의 수가 가장 적은 부분에서 발생하게 된다. 따라서 균열면에서의 섬유 가교거동은 섬유의 분산성에 따라 큰 차이가 있으며 이를 고려하기 위하여 이 등은 섬유의 분산성을 고려한 섬유 가교거동을 다음의 식 2.2.89와 같이 제안하였다.

$$\sigma_B(\delta) = \alpha_{nf}\frac{4V_f}{\pi {d_f}^2}\int_0^{\pi/2}\int_0^{L_f/2} P(\theta, L_{e,}\delta)p(\theta)\cos(\theta)\,dL_e\,d\theta \tag{2.2.89}$$

여기서, α_{nf}는 이론적으로 계산한 섬유 개수와 측정된 섬유의 비율을 나타내는 계수로 다음 식 2.2.90을 통해 구할 수 있다. 여기서 N_m은 이미지 분석을 통하여 균

열면에서 계측한 섬유 개수이고 A_m은 측정 면적이다.

$$\alpha_{nf} = \frac{\pi d_f^2 N_m}{4 V_f A_m \int_0^{\pi/2} \int_0^{L_f/2} p(\theta)\cos(\theta) dL_e d\theta} \quad \text{식 2.2.90}$$

또한, 식 2.2.90은 섬유가 매트릭스 내에서 3차원으로 무작위하게 배열되어 있다고 가정함으로써 섬유의 방향성에 대한 확률밀도함수 $p(\theta)$는 $\sin(\theta)$ 값을 가졌으나, 섬유 가교거동의 정확한 분석을 위해서는 실제 이미지 분석을 통하여 섬유 분산성이 고려된 확률밀도함수를 구할 필요가 있다. 이를 위해 Xia 등은 두 개의 매개변수를 이용한 지수함수 형태로 $P(\phi)$를 제안하였으며, 이는 섬유의 방향성 분포를 다양한 형상함수 형태로 나타낼 수 있는 최적화한 확률밀도함수로 다음의 식 2.2.91과 같다.

$$P(\theta) = \frac{\sin\theta^{2p-1}\cos\theta^{2q-1}}{\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \sin\theta^{2p-1}\cos\theta^{2q-1} d\theta} \quad 2.2.91$$

여기서, p와 q는 확률밀도함수의 형태를 결정하는 변수로서 이미지 분석을 통하여 0° 부터 90° 까지 1° 간격으로 구해진 히스토그램을 바탕으로 회귀분석을 통하여 구할 수 있다.

(3) 고연성 시멘트복합재료의 섬유 분산성 평가

고연성 시멘트복합재료의 섬유 분산성은 형광기술을 활용하여 매트릭스의 단면으로부터 섬유를 정확히 검출하고, 단면에서 각 섬유의 위치와 형상에 따라 분산성을 나타낼 수 있는 값을 계산함으로써 정량적으로 나타낼 수 있다. 따라서 이 절에서는 시멘트 매트릭스에서 섬유를 검출하는 기법과 검출된 섬유를 이용하여 분산성을 평가하는 기법 등에 대한 이론적 배경을 기술하였다.

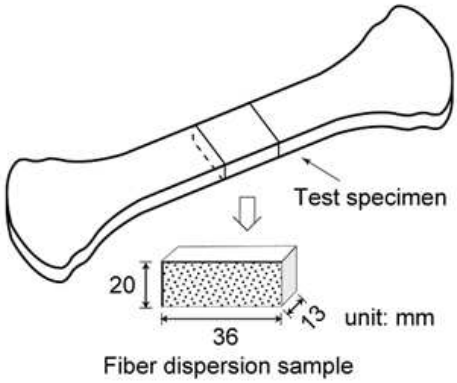
(가) 섬유 분산성 평가

고연성 시멘트복합재료 내에 분포하는 섬유의 분산성을 평가하는 방법은 섬유의 종류와 섬유의 검출 방법에 따라 다양하며, 이미지 분석 방법, X-ray 투과 방법 등을 통하여 강섬유, 탄소섬유, 유리섬유 등과 같은 다양한 섬유의 분산성을 평가할 수 있는 기법들이 많이 연구되고 있다. 이러한 방법 중에서 이미지 분석 방법은 섬유의 분산성을 평가하는데 가장 일반적으로 적용되고 있는 방법으로서 절단된 단면을 관찰하여 섬유의 분산정도를 평가하는 방법이다. 최근에 Ozyurt 등은

AC-Impedance 분광기법(Spectroscopy)을 사용하여 기존의 방법에 비하여 신속하게 섬유의 분산성을 평가하는 방법을 제안한 바 있다. 그러나 이 방법은 강섬유 또는 탄소섬유와 같이 전도성을 갖고 있는 섬유에만 적용할 수 있는 단점이 있다. 고연성 시멘트복합재료에 사용되는 대부분의 섬유는 매트릭스와의 명암비가 낮으며 비전도성 특징으로 인하여 기존의 이미지 분석 방법에서 사용되는 광학현미경으로는 서로를 구별하기는 쉽지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Torigoe 등은 형광현미경을 이용하여 섬유와 매트릭스를 구별할 수 있는 이미지를 취득하여 섬유의 분산성 평가를 시도한 바 있다. 이는 임의의 재료에 특정 파장의 빛을 다시 반사하는 특성인 형광원리를 적용할 경우 낮은 명암비를 갖는 재료에서도 높은 분해능을 얻을 수 있는 기술을 활용한 것이다. 그러나 이들의 연구는 형광원리에 의하여 얻은 이미지를 일정한 크기의 블록으로 나누고, 각 블록에 있는 섬유의 개수를 수작업에 의하여 파악한 후, 이 자료를 바탕으로 섬유 분산성을 파악한 초보적인 단계였다. 따라서 이 방법은 블록의 크기에 따라 섬유 분산성 계수가 다르게 평가되는 등 정량적인 평가를 하기에는 뚜렷한 한계를 갖고 있다. 한편, 김 등은 이러한 한계를 극복하기 위하여 이미지 프로세싱 기법과 통계적인 방법을 응용하여 자동으로 분산성을 평가할 수 있는 기법을 제안한 바 있다. 제안된 이미지 프로세싱 기법은 형광 디지털 이미지를 우선 이진화한 후, 이를 통하여 획득된 1차 검출 이미지에서 섬유 이미지의 유형을 4가지로 분류하여, 그 유형에 따라 분수령 알고리즘과 형태학적 재구성을 적용함으로써 섬유 검출의 정확도를 증진시키는 기법으로 그 세부내용은 다음과 같다.

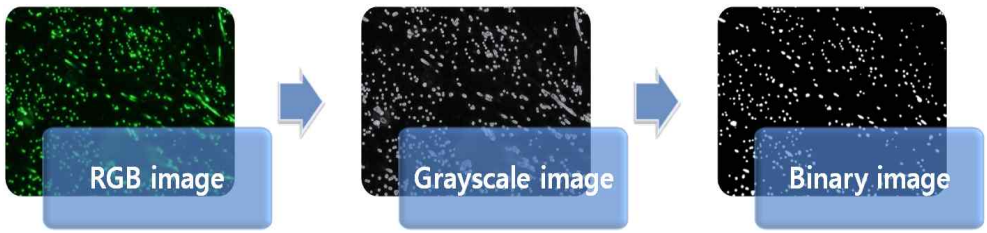
① 이진화 기법을 이용한 섬유 이미지 검출

고연성 시멘트복합재료의 단면 이미지에서 섬유만을 검출하기 위해서는 먼저 고연성 시멘트복합재료 실험체의 양 단면을 다이아몬드 커터기로 두께 13mm, 폭 36mm, 높이 20mm로 재단하여 섬유 분산성 평가를 위한 시편을 제작하여야 한다 <그림 2.2.186>.



<그림 2.2.186> 시험체 제작

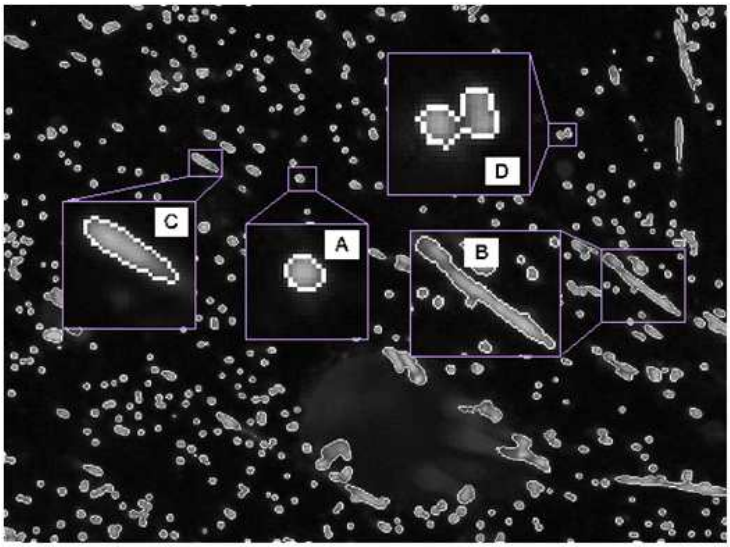
형광현미경으로부터 선명한 이미지를 얻기 위하여 시편의 표면을 폴리싱 작업을 한 후, 형광현미경(Olympus, BX51)을 통하여 시편을 형광 이미지를 관찰할 수 있다. CCD가 탑재된 형광현미경을 통하여 40배로 확대하여 촬영된 이미지에는 섬유의 형광특성으로 인해 섬유만 발광하게 된다.
촬영된 단면 이미지에서 섬유만을 검출하기 위해서는 먼저 칼라 이미지(RGB Image)를 회색 이미지(Grayscale Image)로 변환한 후, 회색 이미지를 이진 이미지(Binary Image)로 변환함으로써 검은 배경에 해당하는 매트릭스로부터 섬유를 검출할 수 있게 된다(<그림 2.2.187>).



<그림 2.2.187> 형광 이미지 변환과정

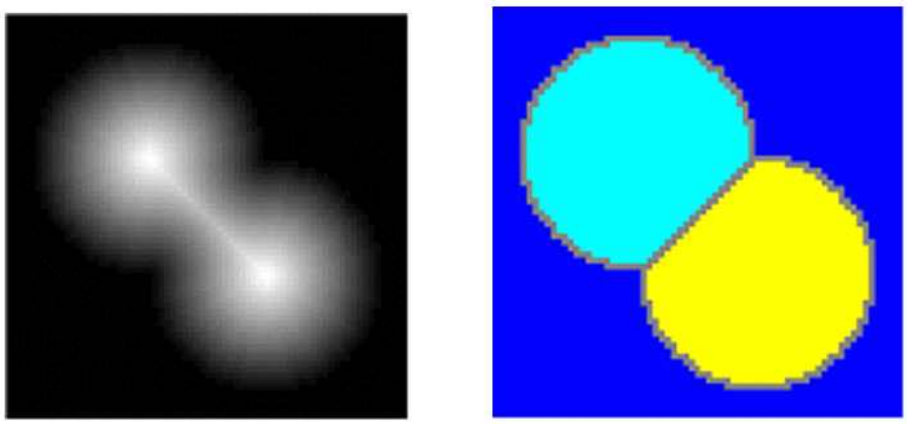
② 잘못 검출된 섬유 이미지의 추가 검출

이진화 기법만으로는 <그림 2.2.188>의 B, D와 같이 고연성 시멘트복합재료의 단면 이미지에서 모든 섬유를 정확히 검출하기 어렵다. 즉, 인접한 여러 개의 섬유들이 하나의 섬유로 뭉쳐 하나의 이미지로 잘못 검출되는 오류가 빈번히 발생하게 된다. 이러한 오류는 이진화 기법으로 검출된 섬유 이미지 중에서 정확히 검출된 이미지와 여러 개의 섬유가 하나로 잘못 검출된 이미지를 인공신경회로망(ANN: Artificial Neural Network)을 사용하여 유형별로 분류한 후, 잘못 검출된 섬유 이미지에서 분수령 알고리즘(Watershed Algorithm)과 형태학적 재구성(Morphological Reconstruction)을 적용하여 정확히 섬유를 재검출함으로써 해결할 수 있다.



<그림 2.2.188> 이미지 변환을 위한 이진화 이미지

섬유 이미지를 분류하기 위한 첫 번째 과정은 정확히 검출된 섬유 이미지와 인접한 여러 개의 섬유들이 하나의 섬유로 잘못 검출된 섬유 이미지를 유형별로 구분하는 것이다. 이를 위하여 이미지 밝기의 정점(peak)을 분석하여 물체를 구분하는 분수령 알고리즘을 적용할 수 있다. 분수령 알고리즘이란 Digabel and Lantuejoul에 의해 처음 제시되었으며, Beucher and Lantuejoul에 의해 회색 이미지에 적용할 수 있는 일반적인 알고리즘으로 확대되었다48).

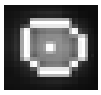
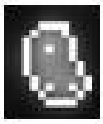
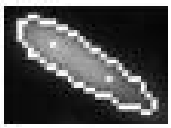


(a) Original image (b) Segmented image

<그림 2.2.189> 분수령 알고리즘을 통한 물체의 구분방법

분수령 알고리즘은 <그림 2.2.189>에 나타낸 바와 같이 이미지에서 밝기값의 차이로 구분되는 물체들을 분리하는데 널리 사용되는 기법으로, 본 연구에서 사용하는 이미지 프로세싱 기법에는 Vincent 등에 의해 제안된 침수 분석 방법(Immersion Analysis)을 적용하였으며, 이를 통하여 1차 검출된 섬유 이미지는 이미지 밝기 값에 따른 정점의 개수를 물체의 개수로 인식하게 된다.

<표 2.2.66> 섬유 이미지 종류

구분		섬유 갯수 (이진화 알고리즘)	분리된 섬유의 갯수 (분수령 알고리즘)	최대 가능한 섬유의 개수*	예 시
단일섬유	Type S1	1	1	1	
단일섬유일 가능성이 있는 섬유들	Type N1	1	2개 이상	1	
	Type N2	1	2개 이상	1	
	Type N3	1	2개 이상	2개 이상	
	Type N4	1	2개 이상	2개 이상	

* 형광 이미지 관찰로 획득한 섬유 갯수

<표 2.2.66>은 이진화 기법에 의하여 1차 검출된 섬유의 개수, 분수령 알고리즘에 의해 구분된 물체의 개수 그리고 원본 이미지로 직접 판단한 섬유의 개수를 각각 비교한 것이다. Type S1은 3가지의 경우 모두가 1개의 섬유 이미지이므로 1차 검출 결과가 정확하다고 판단할 수 있다. 따라서 추가적인 검출 과정이 필요하지 않다. 다른 유형의 섬유 이미지는 분수령 알고리즘에 의해 구분된 물체의 수가 2개 이상에 해당하는 것으로서 검출된 섬유 이미지의 형상과 구분된 섬유 이미지의 개수를 기반으로 4가지로 분류하였다. Type N1과 Type N2는 원본 이미지를 보고 판단하면 하나의 섬유에 해당하지만 분수령 알고리즘에 의해서는 여러 개의 섬유로 과도하게 인식되는 섬유 이미지이다. 이는 분수령 알고리즘이 개별 물체를 구분하는데 있어서는 유용한 방법이지만 이미지에서 노이즈나 국부적인 밝기의 요철(Irregularity)이 있게 되면 과도하게 물체를 분할하는 과도 분할(Over-Segmentation)이란 인식 오류를 범하게 된다. 따라서 이 경우에는 1차 검출 이외의 추가적인 검출과정은 필요하지 않다. 이미지 형상 측면에서 Type N1은 섬유의 방향이 촬영 방향과 평행하여 절단면에서 보이는 섬유 이미지 형상이 원에 가까우며, Type N2는 섬유의 방향이 촬영 방향과 수직에 가까워 섬유 이미지의 변장비가 큰 형상을 나타낸다. Type N3은 주로 Type S1의 섬유들이 군집되어 있어 단일 섬유로 잘못 검출된 경우이며, Type N4는 Type N1과 Type N2의 섬유들이 군

집되어 잘못 검출된 유형이다. 따라서 Type N3은 분수령 알고리즘에 의해 섬유를 정확히 검출하는 과정이 추가 수행되어진다. Type N4는 긴 섬유 이미지의 밝기값 요철에 의하여 과도 분할의 문제가 발생하기 쉬우므로, 이를 최소화하기 위하여 이미지 확장(Diliation)을 바탕으로 이미지를 재구성하여 국소 최소나 최고값들을 제거하는 형태학적 재구성 과정이 먼저 수행된 후, 분수령 알고리즘이 적용되어 섬유를 보다 정확히 검출하게 된다.

(나)섬유 분산성 평가기법

① 섬유 분산성 계수

검출된 섬유의 분산성은 식 2.2.92와 같은 분산계수를 통하여 정량적으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha_f = \exp\left[-\sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - 1)^2}{n}}\right] \qquad 2.2.92$$

여기서, x_i는 섬유가 균일하게 분포하였을 때 하나의 섬유가 차지하게 되는 i번째 영역 안에 있는 섬유의 개수이며, n은 섬유의 총 개수이다. 이를 자동화하기 위한 이미지 프로세싱 절차로는 우선 최종 검출된 섬유 이미지를 섬유의 총 개수에 해당하는 n개의 정사각형 영역으로 분할한 후, 각 영역 안에 있는 섬유 개수(x_i)를 계산하는 것으로 이루어진다. 이 분산계수는 섬유가 이상적인 균일 분포를 하였을 때 1의 값을 갖게 되며 섬유가 비균일 분포를 할수록 0에 가까운 값을 갖게 된다.

두 번째 계수는 식 2.2.93과 같이 단위 면적당 섬유의 개수(F_n)이다.

$$F_n = \frac{n_f}{A} \qquad 2.2.93$$

여기서, A는 섬유 이미지의 면적을 나타내고, n_f는 A내에 존재하는 섬유의 개수를 나타낸다. 세 번째 계수는 단면에서 섬유가 기울어진 각도의 분포이다. 단면에서 섬유의 기울어진 각도는 F_c(Packing Density)로 표현할 수 있는데 F_c는 물체의 면적을 물체의 외접원에 해당하는 면적으로 나눈 값으로 다음 식 2.2.94를 통해 구할 수 있다.

$$F_c = \frac{A_{ob}}{A_{cc}} \qquad 2.2.94$$

여기서, A_{ob}는 물체의 면적을 나타내고, A_{cc}는 물체의 외접원 면적을 나타낸다. F_c는 <그림 2.2.190>(a)과 같이 폭에 비하여 길이가 긴 물체의 경우 0에 가까운 값을 나타내고, <그림 2.2.190>(b)과 같이 원에 가까운 물체의 경우 1에 가까운 값을 나타낸다.

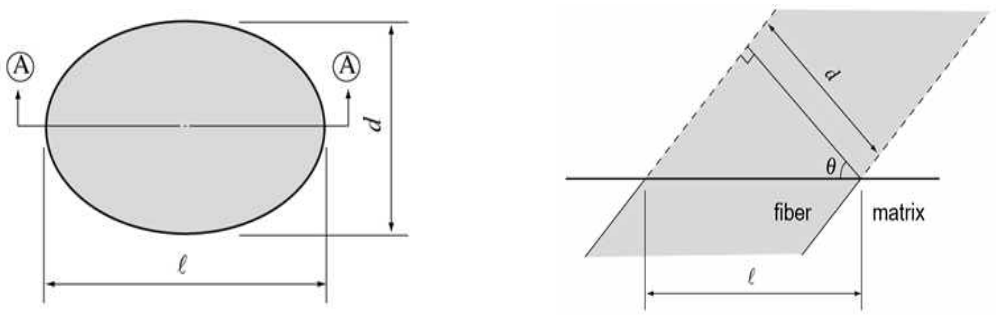


(a) 종류 1　　(b) 종류 2

<그림 2.2.190> 2 종류의 외접원 면적

또한, F_c는 다음의 식 2.2.95와 같이 단면에서 섬유의 기울어진 각도를 정량적인 값으로 나타낼 수 있다(<그림 2.2.191>).

$$F_c = \frac{\pi dl/4}{\pi l^2/4} = \frac{d}{l} = \frac{d}{d/\cos\theta} = \cos\theta \qquad 2.2.95$$



<그림 2.2.191> 섬유가 기울어진 각도와 섬유의 패킹 밀도와의 관계

여기서, θ는 섬유가 단면에서 기울어진 각도이며, d는 섬유의 지름이다. l은 단면에서 섬유가 나타내는 타원의 장변 길이이다. 따라서 F_c는 섬유의 기울어진 각도, θ에 대하여 $\cos\theta$와 같다.

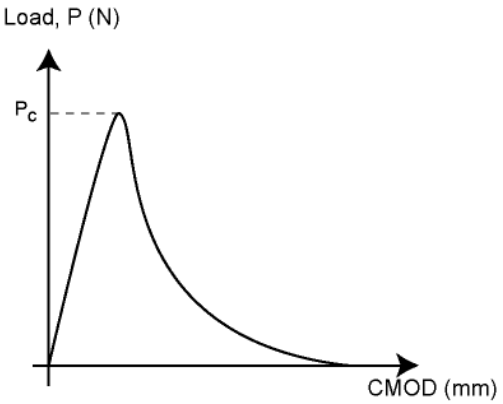
(다)매트릭스 파괴역학적 특성

고연성 시멘트복합재료를 설계하기 위해서는 섬유, 섬유-매트릭스 경계면의 역학

적 특성뿐만 아니라 시멘트 매트릭스의 역학적 특성인 인장강도, 탄성계수와 파괴역학적 특성인 파괴인성(KIc)이 요구된다. 파괴인성은 노치를 가진 3점재하(three - point) 휨실험을 통해 구할 수 있지만 본 연구에서는 3점재하 휨실험보다 더 간단한 방법인 파괴에너지 실험을 통하여 파괴인성 실험을 수행하고 유효탄성균열모델을 이용하여 시멘트 매트릭스의 파괴인성을 구하였다. 유효탄성균열모델은 변형연화현상을 보이는 재료의 복잡한 파괴거동을 예측하기 위한 모델로서 균열선단을 가정함으로써 선형탄성 파괴역학을 적용하여 파괴거동을 밝힐 수 있는 모델이다52). 유효탄성균열모델에서 제시하고 있는 파괴특성인 임계응력확대 계수와 임계균열개구변위(CMODc)를 구하기 위해서는 먼저 유효탄성 균열길이(ae)를 구해야 한다. Jenq 와 Shah의 기존 연구에 의하면52), 최대하중 상태에서의 탄성변형을 유발하는 유효탄성균열길이를 구하기 위하여 반드시 제하 과정(unloading process)을 거쳐야 하지만 실험상에서 제하 시점의 선택과 이에 따른 제하 기울기의 측정은 매우 난해하므로, 본 연구에서는 제하 과정을 거치지 않고 유효탄성균열길이를 추정하기 위하여, 선형탄성 파괴역학으로부터 유도된 균열개구형상(crack opening profile)을 사용하였으며 이는 다음 식 2.2.96과 같다.

$$COD(x,a) = CMOD \times g(\frac{a}{d}, \frac{x}{a}) \qquad 2.2.96$$

식 2.2.95에서 a는 균열길이, d는 실험체의 깊이, x는 균열선단으로부터의 거리이며 함수 g는 균열의 형태, 실험체의 기하학적인 형상에 따라 달라지는 함수이지만 하나의 모서리 균열이 일반적인 실험체의 경우 함수 g의 형상은 큰 차이가 없다. 즉, 식 2.2.95는 x에 따른 균열개구변위(COD)를 균열입구에서의 개구변위(CMOD)로 나타낸 것이다. <그림 2.2.192>는 파괴에너지 실험을 통해 얻을 수 있는 일반적인 하중-균열개구변위 곡선이다. 실험 결과로부터 얻은 하중-균열개구변위 관계곡선에서 균열개구변위, 최대 수직하중 등을 이용하여 시멘트 매트릭스의 파괴인성(KIc)을 Murakami 에 의해 도출된 방법에 의해 구할 수 있다.



<그림 2.2.192> 일반적인 하중-균열개구변위 곡선

식 2.2.96을 이용하여 임계유효탄성균열길이 aec를 구할 수 있고 임계유효탄성균열길이를 이용하여 식 2.2.96의 x에 초기균열길이를 대입함으로써 임계균열단 개구변위 CTODc 를 구할 수 있으며 이렇게 구한 CTODc 와 최대하중(Pc)을 식 2.2.97에 대입하여 KIc 를 구할 수 있다.

$$K_{Ic} = \frac{P_c}{B\sqrt{D}} F(\alpha) \qquad 2.2.97$$

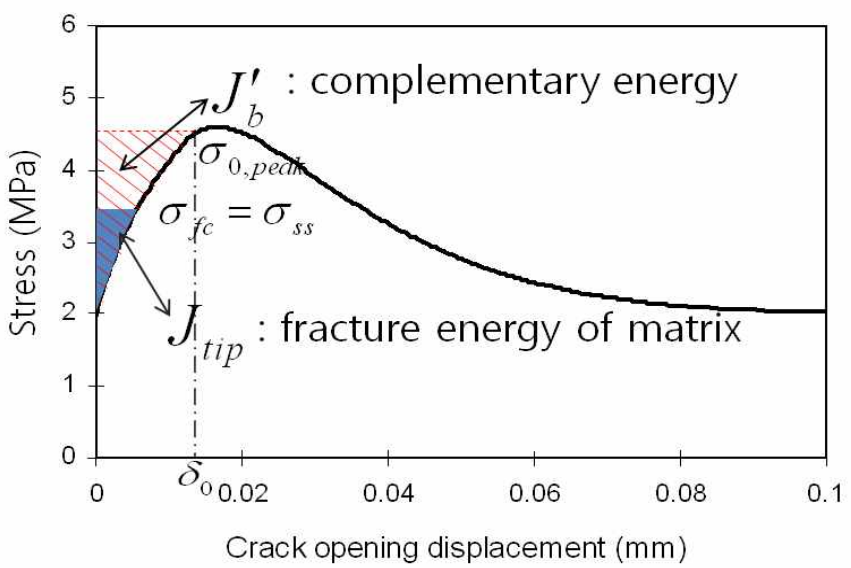
식 2.2.98에서 F(α)는 Zhao 등에 의하여 제안된 초기균열에 따라 주어지는 기하학적인 함수이며, B와 D는 각각 실험체의 폭과 깊이이다.

$$F(\alpha) = 29.6\alpha^{0.5} - 185.5\alpha^{1.5} + 665.7\alpha^{2.5} - 1017.0\alpha^{3.5} + 638.9\alpha^{4.5} \qquad 2.2.98$$

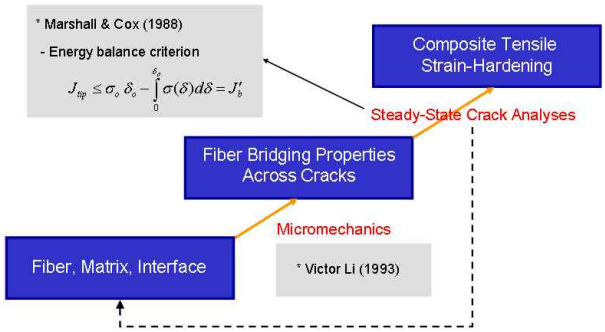
여기서, α는 a/d이고 a는 롤러 중심으로부터 최고하중일 때의 균열길이이며, d는 끝단에서 롤러 중심까지의 높이다.

(4) 고연성 시멘트복합재료의 이론적 설계

고연성 시멘트복합재료가 인장변형 경화거동을 나타내기 위해서는 안정상태 균열발생의 필요조건을 만족함으로써 1축 인장 및 휨 응력을 받을 때 다수의 미세균열이 발생하여야 한다. 이러한 필요조건이 안정상태 균열이론이며 이를 적용하기 위해서는 우선 고연성 시멘트복합재료 미세구조의 역학적 특성을 이용하여 균열면 거동을 해석적으로 구하여야 한다. 섬유와 시멘트 매트릭스, 섬유-시멘트 매트릭스 경계면의 마이크로역학적 특성들을 이용하여 균열면 응력(bridging stress, σ) - 균열개구변위(crack opening displacement, δ) 관계를 이론적으로 <그림 2.2.193>과 같이 나타낼 수 있다. <그림 2.2.194>에 나타난 바와 같이 고연성 시멘트복합재료의 인장변형 거동을 설계하는데 σ - δ 곡선의 역할은 매우 중요하다. σ - δ 곡선은 시멘트 매트릭스에 대한 섬유의 부피비(V_f), 섬유의 직경(d_f), 길이(l) 그리고 탄성계수(E_f), 섬유 - 시멘트 매트릭스의 화학적 부착(G_d), 마찰 부착(τ_0) 강도에 영향을 받는다. 이 곡선은 1축 인장 시험체의 균열면에서 발생하는 균열개구변위와 이 균열을 가로지르며 전달되는 평균인장응력의 관계로 표현된다. σ - δ 곡선은 복합재료의 기본 구성 요소인 섬유, 시멘트 매트릭스, 경계면의 특성과 연성으로 대표되는 복합체의 성능을 평가할 수 있는 도구로 활용할 수 있다(<그림 2.2.193>). 또한 σ - δ 곡선은 고인성 섬유복합체가 하중을 받을 때 균열 면에 존재하는 섬유에 작용하는 가교응력(bridging stress)을 묘사한다. 섬유가 두 균열면에 걸쳐 있을 때 이는 균열면에서 스프링이 거동하는 개념으로 생각할 수 있다(<그림 2.2.194>).



<그림 2.2.193> 변형률 경화거동을 위한 하중-균열개구변위 그래프

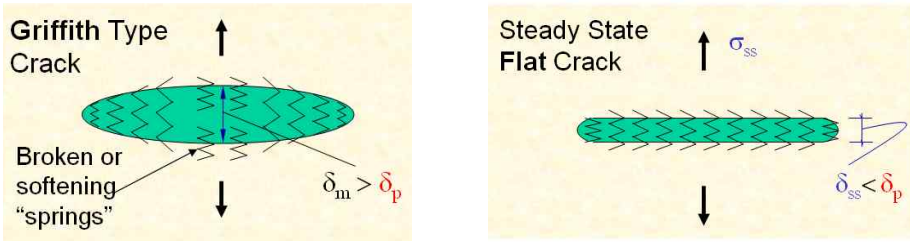


<그림 2.2.194> 섬유복합체의 변형률 경화거동을 위한 설계 과정

섬유-시멘트 매트릭스의 경계면의 부착이 약한 경우 섬유는 시멘트 매트릭스에서 인발이 일어나며 σ - δ 곡선의 최대 균열면 응력 σ_0 값이 낮아지게 된다. 또한 경계면에서 부착이 큰 경우에는 섬유인발이 충분히 일어나지 않아 균열폭이 증가하게 되면 균열 중앙 부분의 변위 δ_m 이 임계균열 개구변위 δ_0 를 초과하게 되어 스프링이 끊어지게 되고 σ - δ 곡선의 δ_0 의 값이 작아지게 된다. 이러한 경우 <그림 2.2.193>에서 붉은색 빗금 부분에 해당하는 σ - δ 곡선에서 보상에너지 값이 작아지게 되며, 일반적인 griffith 균열이 발생하게 된다(<그림 2.2.195>(a)). 이와 반대로 보상에너지 값이 커지게 되면 안정상태 균열을 따르게 된다. 안정상태 균열이란 균열 발생 후 균열이 더 이상 진전하여 파괴가 일어나지 않고 균열면에서 응력을 전달하여 다른 부분에서 균열을 유발하는 균열형태이다. 이러한 과정이 고연성 시멘트복합재료 내부에서 반복되어 일어나게 되면 안정상태의 다수의 미세균열이 발생하게 되고 이로 인하여 인성이 증가하게 된다(<그림 2.2.195>(b)). Li56) 등은 안정상태의 균열이 발생하기 위해서는 두 가지 조건을 만족해야 한다고 언급한 바 있다. 그 첫

번째 조건은 식 2.2.99의 보상 에너지(complimentary energy, J_b')가 시멘트 매트릭스 파괴 에너지(J_{tip})보다 커야한다는 에너지 조건이다(식 2.2.100). 여기서 E_c는 시멘트 매트릭스 탄성계수이며, K_m은 시멘트 매트릭스의 파괴인성이다. 이 조건이 만족 될 경우 고연성 시멘트복합재료는 응력하에서 균열 선단에서 균열이 더 이상 진전하지 않게 되어 일정한 균열폭을 가진 안정상태의 다수의 미세균열이 발생하게 된다.

또한 에너지 조건과 함께 반드시 충족되어야 하는 두 번째 조건은 최대 균열면 가교응력(σ_0)이 인장 균열응력(σ_{fc})보다 커야 한다는 인장강도 조건이다(식 2.2.101). 이 조건을 만족할 경우 인장력에 의해 초기균열이 발생한 이후 균열 선단에서 전달되는 응력에 의해 재료의 다른 부분의 균열이 발생해야다수의 균열이 발생하는 변형경화 거동을 나타낼 수가 있다. 반면 이 조건을 만족하지 못하면 초기균열 후 섬유의 뽑힘이나 파괴에 의한 즉각적인 응력 저하가 발생하며 다중 균열이 발생하지 못하고 국부파괴가 발생하게 된다.



(a) griffith 균열 (b) 안정상태 균열

<그림 2.2.195> 안정상태 균열 개념도55)

$$J_{tip} \leqq \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta_0)\, d\delta \equiv J_b' \qquad 2.2.99$$

$$J_{tip} = \frac{K_m^2}{E_c} \qquad 2.2.100$$

$$\sigma_{fc} < \sigma_0 \qquad 2.2.101$$

여기서 σ_{fc}는 최대초기결함의 크기와 K_m에 의하여 결정되는 것으로 알려져 있다7). 결과적으로 식 2.2.99와 식 2.2.101을 만족시킴으로써 기존의 콘크리트(또는 모르타르)가 갖고 있는 유사취성적인 특성을 높은 연성의 특징을 나타내는 고연성 시멘트복합재료로 변화시킬 수 있다. 따라서 고연성 시멘트복합재료의 설계를 위한 에너지 조건과 강도 조건을 평가하기 위해서는 J_b'와 σ_0를 구하는 것이 필수적이며, 이러한 값들은 Lin등이 제안한 섬유의 뽑힘길이(δ)와 저항하중($P(\delta)$)의 관계를 나타내

는 식 2.2.102와 섬유의 함유량(V_f), 섬유의 방향성에 대한 확률($p(\phi)$)과 매입길이에 대한 확률($p(z)$) 등을 고려한 섬유 뽑힘으로 인하여 발생된 균열폭(δ)과 균열면에서의 응력(σ)과의 관계인 식 2.2.103 등을 통하여 이론적으로 예측할 수 있다.

$$P(\delta) = \sqrt{\frac{\pi^2 E_f d_f^3 \tau_0 (1+\eta)}{2}\delta + \frac{\pi^2 E_f d_f^3 G_d (1+\eta)}{2}} \qquad 2.2.102$$

$$\sigma_0(\delta) = \frac{4\,V_f}{\pi d_f^2}\int_{\phi=0}^{\phi=\pi/2}[\int_{z=0}^{z=(L_f/2)\cos\phi} P(\delta)p(\phi)p(z)dz]d\phi \qquad 2.2.103$$

J_b'를 구하기 위해 우선 섬유인발 실험과 시멘트 매트릭스의 파괴역학적 변수를 이용하여 단일섬유가 균열면에서 뽑히게 될 때의 δ와 그 때의 $P(\delta)$와의 관계를 구해야 한다. 여기서, $\eta = V_f E_f / V_m E_m$이며, $P(\delta)$를 구한 후 균열면에서의 σ_0를 구하기 위해 식 2.2.103)에 나타낸 바와 같이 $P(\delta)$를 모두 적분하여 최종적으로 <그림 2.2.195>의 σ - δ와의 관계를 통하여 J_b'와 σ_0를 구할 수 있다. 이러한 방법을 이용하면 섬유, 시멘트 매트릭스, 섬유 - 시멘트 매트릭스 경계면에서의 마이크로역학적인 변수를 최소의 실험을 통해 최적의 특징을 나타낼 수 있도록 결정할 수 있고 결정된 변수들을 이용하여 균열면 σ - δ 곡선을 그린 다음 두 가지 요구조건을 비교함으로써 고연성 시멘트복합재료를 설계할 수 있으며, 보강재로 사용하는 섬유의 효율을 극대화하는 방법과 섬유 혼입량을 최소화 하는 방법을 찾을 수 있다.

나. Green SHCC 시멘트 매트릭스 사용재료

(1) 기본 결합재

이 연구에서 사용한 기본 결합재로서 재료의 획득이 용이하고 가격면에서 저렴한 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. KS L 5201의 규정에 적합한 국내 S사 제품을 사용하였으며, 그 화학적 조성 및 물리적 특성을 <표 2.2.67>과 <표 2.2.68>에 나타내었다.

<표 2.2.67> 시멘트의 화학적 조성

화학적 조성 (%)									
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	Ig.loss	Tatal
21.24	5.97	3.34	62.72	2.36	0.13	0.81	1.97	1.46	100.0

<표 2.2.68> 시멘트의 물리적 특성

물리적 특성							
Density (g/cm^3)	Blaine (cm^2/g)	44㎛ on Residue (%)	Setting Time (min)		Compressive Strength (MPa)		
			Initial Set.	Final Set.	3days	7days	28days
3.14	3,200	12.5	240	370	22.5	30.0	39.5

(2) 골재

이 연구에서는 고연성 시멘트복합재료를 개발하기 위해 굵은 골재를 사용하지 않고 평균입경이 약 130㎛인 국내 S사의 규사<그림 2.2.196>를 잔골재로 사용하였으며, 물리적 성질은 <표 2.2.69>에 나타낸 바와 같다. 굵은 골재를 사용하지 않은 가장 큰 이유로는 굵은 골재 사용시 시멘트 모르타르의 불균일성을 증대시켜 응력집중이 발생될 확률이 높아지게 되며, 시멘트 모르타르의 파괴인성을 증가시켜 다수의 균열이 발생할 수 있는 가능성이 저하되어 인성을 감소시키기 때문이다. 또한 시멘트 모르타르 내부의 공극이 증대됨으로써 섬유 - 매트릭스 사이의 부착력이 감소하여 최대 균열면 응력을 저하시켜 다수의 미세균열과 변형률 경화거동의 발생에 큰 악영향을 끼치기 때문이다. 따라서 평균입경 130㎛인 규사는 Lepech 등의 연구에서 밝혀진 고인성 섬유복합체의 유동성을 저하시키지 않는 골재 최대 크기 200㎛를 초과하지 않기 때문에 우수한 섬유 분산성을 확보할 수 있을 것이라 판단된다.



<그림 2.2.196> 본 연구에서 사용한 규사

<표 2.2.69> 규사의 물리적 특성

	규사
밀도 (g/㎤)	2.60
평균입경(㎛)	130

한편, 기존 연구결과에 따르면 최적의 잔골재 혼합비는 규사의 경우 시멘트 질량의 80%～100% 인 것으로 밝혀진바 있으므로 이로 결정하였다.

(3) 시멘트 대체재료

이 연구에서 개발하고자 하는 고연성 시멘트복합재료는 균일한 섬유분산과 섬유의 물리적 특성을 극대화하기 위하여 굵은 골재를 사용하지 않고 시멘트, 물, 잔골재를 구성되는 시멘트 모르타르의 형태를 나타내기 때문에 일반 콘크리트에 비해 사용되는 단위용적당 시멘트가 비교적 많은 단점이 있다. 따라서 사용되는 시멘트량을 저감시키고 친환경 재료를 제조하기 위해 이 연구에서는 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 시멘트 대체결합재로 선정하였다. 이 두 재료를 사용함으로 인해 시멘트 사용량을 저감시킬 수 있을 뿐만 아니라 포졸란 및 잠재수경성의 특징을 나타내기 때문에 대체 결합재로 사용시 시멘트 수화반응에 의해 생성되는 수산화칼슘을 포졸란 반응에 의해 소비하므로 매트릭스가 치밀화되어 역학적 특성이 향상되고, 섬유와의 부착성도 향상에도 크게 기여 할 것으로 판단된다. 또한 입자의 형태가 원형을 나타내기 때문에 첨가 시 우수한 유동성을 확보할 수 있어 시멘트 매트릭스 내에서 섬유의 분산성 향상 및 원활한 작업성을 확보할 수 있는 장점이 있다. 이 연구에서 사용된 플라이애시와 고로슬래그 미분말의 특성을<표 2.2.70>, <표 2.2.71>에 나타내었으며, 사용된 두 재료 모두 국내 사용기준을 만족함을 알 수 있다.

<표 2.2.70> 플라이애시 특성

품 질 \ 종 류		KS L 5405 규정		측정값
		1종	2종	
이산화 규소(%)		45이상	45이상	50.5
수분(%)		1.0이하	1.0이하	0.3
강열감량(%)		3.0이하	5.0이하	3.04
밀도(g/㎤)		1.95이상	1.95이상	2.16
분말도	45㎛체 체잔분	10이하	40이하	-
	비표면적(㎠/g)	4,500이상	3,000이상	3,645
플로값비(%)		105이상	95이상	101
활성도지수(%)	재령 28일	90이상	80이상	92
	재령 91일	100이상	90이상	102

<표 2.2.71> 고로슬래그 미분말의 특성

품 질 \ 종 류		KS L 5405 규정			측정값
		1종	2종	3종	
밀도(g/㎤)		2.80이상	2.80이상	2.80이상	2.94
비표면적(㎠/g)		8,000～10,000	6,000～8,000	4,000～6,000	4,310
활성도지수(%)	재령 7일	95이상	75이상	55이상	88
	재령 28일	105이상	95이상	75이상	109
	재령 91일	105이상	105이상	95이상	112
플로값 비(%)		95이상	95이상	95이상	106
산화마그네슘(MgO)(%)		10.0이하	10.0이하	10.0이하	5.62
삼산화황(SO_3)(%)		4.0이하	4.0이하	4.0이하	0.23
강열 감량(%)		3.0이하	3.0이하	3.0이하	0.64
염화물 이온(%)		0.02이하	0.02이하	0.02이하	0.002

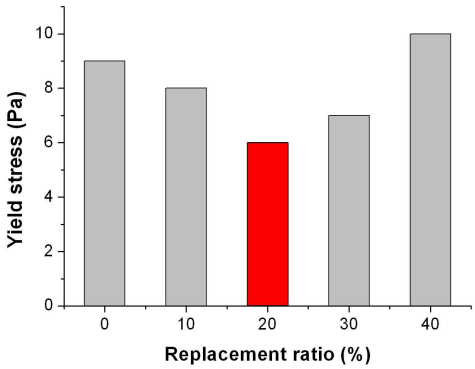
(가) 레올로지 실험

이 연구에서는 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 사용한 고연성 시멘트복합재료의 유동특성을 최적화하기 위한 혼입량 결정을 위하여 섬유를 혼입하지 않은 시멘트 모르타르에 대한 레올로지 실험을 실시하였다. 이 실험을 통하여 최적의 유동성능을 나타낼 수 있는 시멘트 모르타르의 배합을 도출함으로써 고연성 시멘트복합

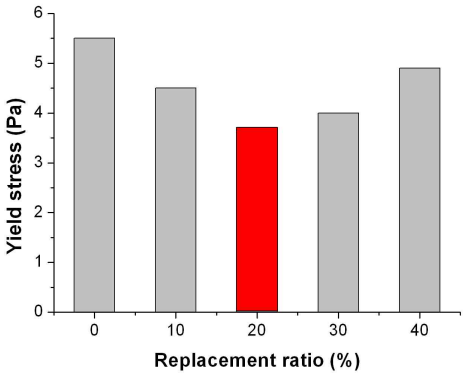
재료 성능에 가장 큰 영향을 미치는 섬유 분산성을 향상 시킬 수 있을 것이라 판단된다. 고연성 시멘트복합재료의 레올로지 실험에는 <그림 2.2.197>에 나타낸 바와 같이 Brookfield사의 DV-II+Pro를 사용하였다. 플라이애시와 고로슬래그 미분말의 대체에 따른 레올로지 특성분석을 위해 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 시멘트 질량비의 10%, 20%, 30%, 40%를 대체하는 것으로 설정하였으며, 그 특성분석 결과는 <그림 2.2.198> 및 <그림 2.2.199>에 나타낸 바와 같다.



<그림 2.2.197> 레올로지 실험 전경



<그림 2.2.198> 플라이애시에 대한 레올로지 실험 결과



<그림 2.2.199> 고로슬래그에 대한 유동성 실험결과

실험결과를 살펴보면, 고로슬래그 미분말과 플라이애시 모두 시멘트 질량의 20%로 대체할 경우 시멘트 모르타르의 항복응력이 시멘트를 대체하지 않은 경우에 비하여 각각 약 25%, 31% 정도 감소하여 가장 우수한 유동성을 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 플라이애시와 고로슬래그 미분말의 혼입률을 시멘트 질량의 20% 대체하는 것이 시멘트 모르타르의 유동성이 가장 우수하여 고연성 시멘트복합재료의 섬유분산성을 가장 효과적으로 증진시킬 수 있을 것이라 판단된다.

(4) 혼화제

이 연구에서 사용된 혼화제로서 시멘트 매트릭스 유동성을 증가시키고 배합시 섬유의 분산성을 향상시키기 위하여 카르복실계 고성능 감수제(PCSP)를 사용하였고, 배합시 규사, 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 섬유 등 재료의 분리를 방지하기 위하여 셀룰로즈계 분리저감제(HPMC)를 사용하였으며, 표면 마무리 및 공기량 조절을 위한 소포제를 사용하였다. 이 연구에서 사용한 혼화제의 품질 특성은 다음 <표 2.2.72>에 나타낸 바와 같으며, 그 기본 특성은 제조회사에서 제시한 자료를 그대로 이용하였다. 혼화제의 최적 혼입률은 예비비빔 시험을 통해 결정하였으며, 그 사용량은 결합재(시멘트, 플라이애시, 고로슬래그 미분말)에 대한 중량비로 혼입하였다. 한편, 고연성 시멘트복합재료의 유동특성은 골재와 혼화재료 등의 영향이 다양하게 작용하기 때문에 그 특성이 명확히 밝혀지지 않고 있다. 이에 기존의 많은 연구에서는 콘크리트 또는 시멘트 페이스트의 유동특성을 시행착오에 의존하여 분석되어 왔다. 그러나 최근의 연구에 의하면 시멘트 페이스트의 유동 메커니즘이 입자 주변에 형성되는 정전기력과 더불어 수화반응 또는 혼화제에 의하여 형성된 반데르발스 인력에 의해 크게 좌우된다는 사실이 밝혀진 바 있다. 이러한 정전기력, 반데르발스 힘 등에 의한 입자 간 상호작용을 혼화제의 사용으로 조절함으로써 고연성 시멘트복합재료의 유동특성을 보다 합리적으로 향상 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

<표 2.2.72> 혼화제의 물리적 특성

	PCSP	HPMC	Defoamer(소포제)
밀도 (g/㎤)	0.37	0.60	0.26
형태	brownish powder	white powder	white powder

(5) 보강용 섬유

섬유는 오래 전부터 콘크리트 또는 모르타르의 취성적인 성질을 개선하기 위해 보강재로 많이 사용되고 있으며, 그 종류 및 특성도 다양하다. 일반적으로 보강용으로 많이 사용되는 대표적인 섬유와 물리적 특성을 <표 2.2.73>에 나타내었다. 현재 고연성 시멘트복합재료에 주로 사용되는 섬유로서 강섬유, PVA섬유, PE섬유 등이 있다. 한편, 콘크리트 또는 모르타르의 보강재로 사용하기 위한 최적의 섬유 선정 조건은 다음과 같다.

<표 2.2.73> 보강용 섬유의 종류 및 특성

Types		인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	연신율 (%)	밀도 (g/cm^3)
Steel fiber		490～980	200	-	7.85
PVA fiber		690～1500	11～36	3～13	1.30
PE fiber		250～700	1.4～2.2	10～15	0.95
PP fiber		300～750	1.4～2.2	10～15	0.91
Acrylics fiber		200～390	2～11	25～45	1.18
Aramid fiber		2,000～2,900	62～130	2～4	1.45
Carbon fiber	PAN	2,500～3,600	230～350	1～2	1.90
	Pitch	760～2,900	39～98	1～2	2.0
High performance PE fiber		2,200～4,800	70～175	3～6	0.98
High performance PVA fiber		2,000～2,600	39～41	5～6	1.30

① 매트릭스와의 부착 측면에서 물과 시멘트로 이루어진 매트릭스에 대한 부착성이 있는 친수성(hydrophilic) 섬유가 유리하고, ② 매트릭스의 균열 가교 측면에서 인장강도와 탄성계수가 큰 섬유가 효율적이며, ③ 매트릭스와의 배합 측면에서 형상계수(aspect ratio, l/d)가 100～400이어야 섬유 뭉침을 방지하기에 적합하다. 이 연구에서는 앞서 기술한 조건을 만족하고 가격 및 성능면에서 우수하며 제품의 다양성을 비교 · 검토한 후 최적의 섬유로 PVA섬유를 보강용 섬유로 결정하였다. PVA섬유 사용은 친수성 특징과 알칼리에 대한 저항성이 높은 특징으로 인하여 배합시 분산의 용이성과 부식에 대한 저항성을 향상시킬 수 있으므로 섬유의 가교 성능을 극대화 할 수 있을 것이라 판단된다. 따라서 고연성 시멘트복합재료 개발을 위한 적합한 보강용 섬유로 PVA섬유를 선정하였으며, 선정된 PVA섬유의 물리적 특징은 <표 2.2.74>에 나타낸 바와 같다.

<표 2.2.74> PVA섬유의 물리적 특성

종류	밀도 (g/cm^3)	길이 (mm)	직경 (μm)	형상비	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
PVA섬유	1.30	12	39	307	1,600	40

다. Green SHCC 시멘트 매트릭스 기본 배합

(1) 시멘트 매트릭스의 배합 결정

(가) 예비비빔 실험

설계기준압축강도 30MPa급과 50MPa급 고연성 시멘트복합재료를 개발하기 위한 첫 배합설계 과정으로 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 대체할 경우 시멘트 매트릭스의 압축강도 및 유동성을 평가하여 목표성능을 확보할 수 있는 각각의 W/B와 단위수량을 도출하였다. 시멘트 대체결합재인 플라이애시 및 고로슬래그 미분말의 시멘트 대체율은 레올로지 실험을 통하여 시멘트 매트릭스가 최고의 유동특성을 나타낼 수 있는 범위인 시멘트 질량의 20%로 각각 결정하였으므로 압축강도 확보를 위해 W/B에 따른 예비배합 설계를 실시하였다. 30MPa급과 50MPa급 예비비빔 실험의 배합표는 <표 2.2.75> 및 <표 2.2.76>에 각각 나타낸 바와 같으며, 최대용량 12ℓ인 강제식 믹서를 이용하여 ϕ100×200mm 압축공시체를 제작하여 재령 7일 및 28일의 압축강도를「KS F 2405 콘크리트의 압축 강도 시험 방법」규정에 근거하여 압축강도를 평가하였다.

<표 2.2.75> 예비비빔 실험 배합표(30MPa급)

배합 종류	W/B (%)	FA/B (%)	Slag/B (%)	단위량(kg/㎥)								
				W	B	C	FA	Slag	S	PC SP	HP MC	Defo amer
예비-1	40	20	20	362	905	543	181	181	648	5	-	-
예비-2	45	20	20	389	864	519	173	173	615	3	-	-
예비-3	50	20	20	413	826	496	165	165	588	1	-	-

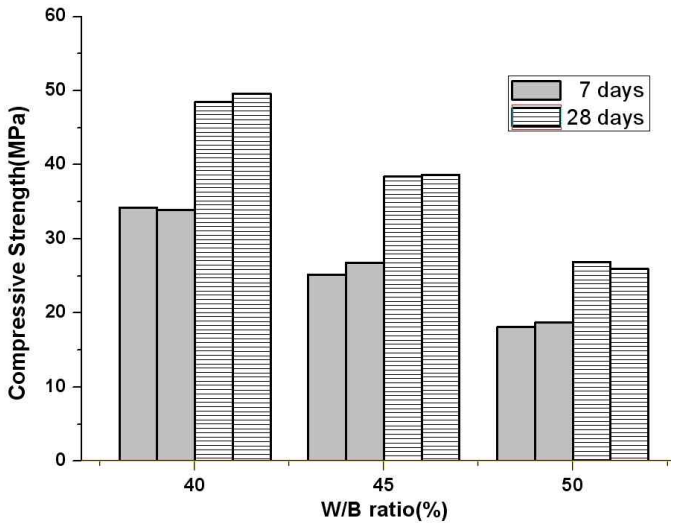
* 여기서, B는 결합재(C+FA+Slag), W/B는 물-결합재비, W는 물, C는 시멘트, S는 잔골재, FA는 플라이애시, Slag는 고로슬래그 미분말을 나타냄.

<표 2.2.76> 예비비빔 실험 배합표(50MPa급)

배합 종류	W/B (%)	FA/B (%)	Slag/B (%)	단위량(kg/㎥)								
				W	B	C	FA	Slag	S	PC SP	HP MC	Defo amer
예비-1	30	20	20	300	1067	640	213	213	662	10	-	-
예비-2	32	20	20	310	969	581	194	194	777	6	-	-
예비-3	35	20	20	320	914	549	183	183	801	4	-	-

* 여기서, B는 결합재(C+FA+Slag), W/B는 물-결합재비, W는 물, C는 시멘트, S는 잔골재, FA는 플라이애시, Slag는 고로슬래그 미분말을 나타냄.

30MPa급 시멘트 매트릭스의 압축강도 시험 결과는 <그림 2.2.200> 및 <표 2.2.77>에서 볼 수 있듯이 특히 W/B 50%인 예비-3인 배합의 경우에는 시멘트를 플라이애시와 고로슬래그 미분말로 대체할 경우 재령 7일 및 28일의 압축강도가 18.4MPa 및 27.6MPa 것으로 측정되어 이 연구의 목표강도를 확보할 수 없는 것으로 나타났다. 이는 플라이애시와 고로슬래그 미분말의 대체로 시멘트의 사용량이 현저히 줄어들어 강도의 발현이 저하되었기 때문이라 사료된다. 하지만 예비-1, 예비-2의 배합은 재령 28일 목표강도 30MPa 이상을 확보할 수 있었다. 따라서 예비비빔 실험을 실시한 결과 30MPa급 시멘트 매트릭스의 W/B는 40%이상~45% 미만의 범위가 소요 설계기준 압축강도를 만족할 것이라 예상되며, 특히 W/B 45%가 안전율을 확보할 수 있는 배합강도로서 적합하다고 판단되어 30MPa급 고연성 시멘트복합재료 시멘트 매트릭스의 기본배합으로 결정하였다.

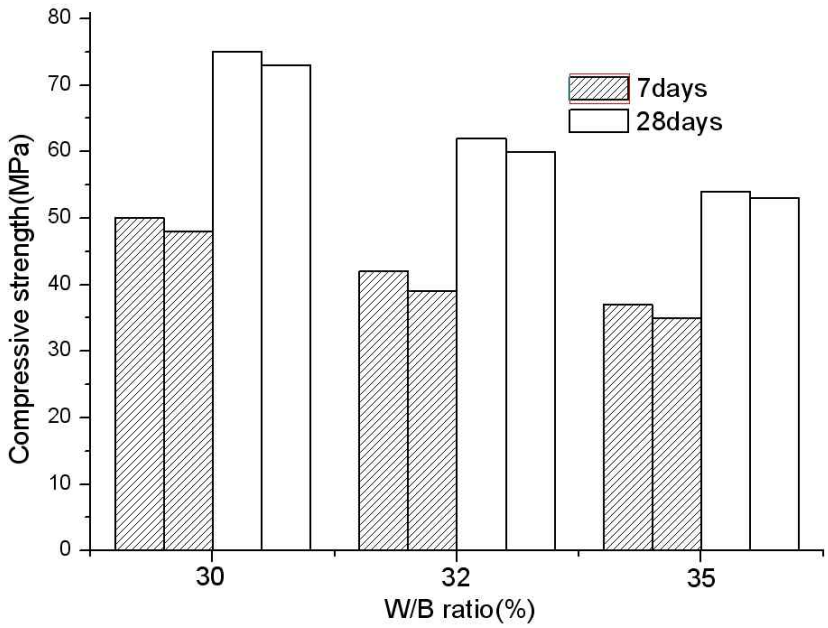


<그림 2.2.200> 예비비빔 실험의 압축강도 시험 결과(30MPa급)

<표 2.2.77> 예비비빔 실험 압축강도 및 유동특성 결과(30MPa급)

배합 종류	압축강도 (MPa)		비빔성능
	7일	28일	유동특성
예비-1	34.5	48.8	○
예비-2	26.9	38.5	◎
예비-3	18.4	27.6	◎

유동특성◎ : 시멘트 매트릭스의 유동성 아주 좋음
유동특성○ : 시멘트 매트릭스의 유동성 좋음



<그림 2.2.201> 예비비빔 실험의 압축강도 시험 결과(50MPa급)

<표 2.2.78> 예비비빔 실험 압축강도 및 유동특성 결과(50MPa급)

배합 종류	압축강도 (MPa)		비빔성능
	7일	28일	유동특성
예비-1	49	74	○
예비-2	40	61	◎
예비-3	36	54	◎

유동특성◎ : 시멘트 매트릭스의 유동성 아주 좋음
유동특성○ : 시멘트 매트릭스의 유동성 좋음

(나) 섬유 혼입률에 따른 유동성 평가

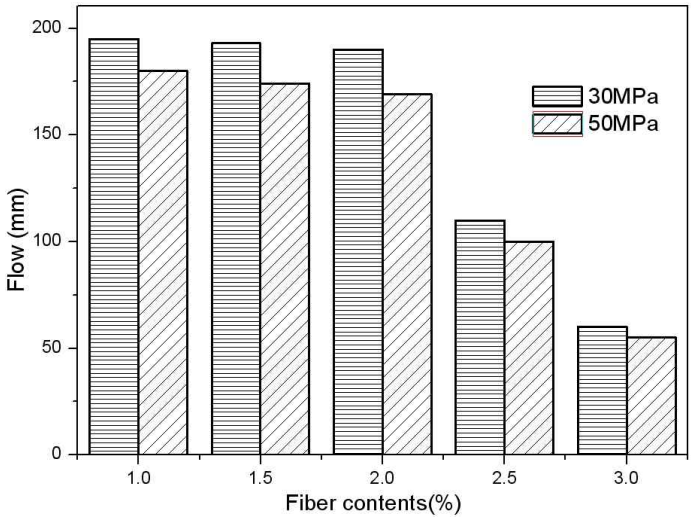
이 절에서는 앞 절에서 수행하여 도출한 30MPa급 및 50MPa급 시멘트 매트릭스의 기본배합에 PVA 섬유의 혼입량을 결정하기 위한 연구를 수행하였다. 섬유의 혼입비율을 시멘트 매트릭스 전체 부피의 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%, 3.0%로 변화시켜 혼입률에 따른 고연성 시멘트복합재료의 플로우 시험을 수행하였으며, 플로우 시험 중 섬유뭉침 현상 및 재료분리 등을 육안관찰을 통하여 <그림 2.2.202>에 나타낸 바와 같이 3가지의 등급으로 각각의 매트릭스 배합에 따라 구분하여 평가하였다. 등급 1(우수)의 경우 섬유의 뭉침이나 분리 없이 시멘트 매트릭스에 균일하게 분산되어 있는 상태이며, 등급 2(보통)의 경우 섬유의 뭉침현상이 관찰되고 유동성이 저하된 상태이며, 등급 3(불량)의 경우 시멘트 매트릭스와 섬유의 재료분리와 뭉침현상이 심하게 발생한 것으로서 동일 시간 내에 도달하는 플로우 값을 측정하여 복합체의 유동성을 평가 및 구분하였다.



(a) 등급 1 (1.0~2.0%) (b) 등급 2 (2.5%) (c) 등급 3 (3.0%)

<그림 2.2.202> 플로우 시험으로 구분한 고연성 시멘트복합재료의 유동특성

<그림 2.2.203>에 나타난 바와 같이 30MPa급과 50MPa급 고연성 시멘트복합재료에서 PVA섬유의 혼입률이 증가할수록 유동성이 저하되고 퍼지는 직경 즉, 플로우 값이 감소됨을 알 수 있다. 또한 섬유뭉침 등급이 3등급으로 저하되는 것을 알 수 있다. 특히 섬유의 혼입률이 2.5%~3.0%로 혼입할 경우 그 저하가 더욱 크게 발생함을 알 수 있었으며, 50MPa급 저하가 30MPa급 보다 현저히 크게 나타났다. 따라서 플로우 실험결과 섬유의 혼입률은 섬유의 뭉침현상 및 유동성을 고려해 볼 때 1.0%～2.0% 범위 내에서 결정하는 것으로 고려하였고, 다음절에서는 섬유의 혼입률에 따른 균열면에서의 응력 - 균열개구변위 관계의 역학적 거동을 모사할 수 있는 섬유 가교 곡선을 구하기 위한 연구를 수행하였고, 섬유인발 실험과 시멘트 매트릭스 파괴에너지 실험을 실시하여 고연성 시멘트복합재료의 최적의 섬유 혼입률을 결정하였다.



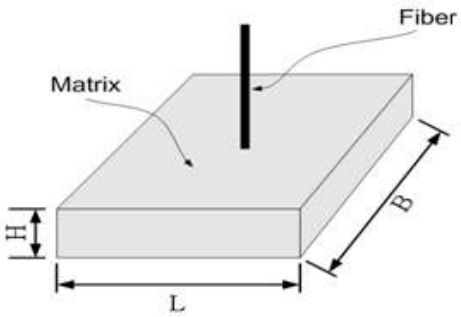
<그림 2.2.203> 섬유 혼입에 따른 시멘트 매트릭스 유동성 실험 결과

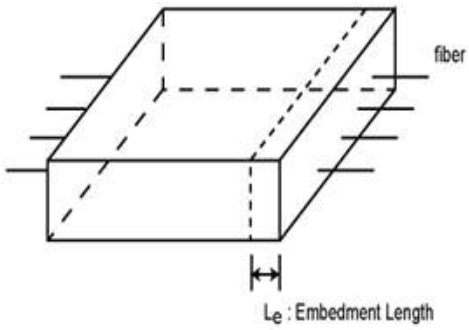
(다) Green SHCC의 설계

① 섬유인발 실험

PVA 섬유 - 매트릭스의 경계면에서 발생하는 화학적 부착 및 마찰 부착의 특성을 도출하기 위하여 섬유인발 실험을 실시하였다. 섬유인발 실험에 사용한 배합은 앞 절에서 예비비빔으로 도출한 시멘트 매트릭스 기본배합을 이용하였다. 실험체 형상은 <그림 2.2.204>에 나타내었으며, 커팅되지 않은 PVA 섬유 1가닥을 아크릴 몰드에 통과시킨 후 모르타르를 몰드에 부어서 실험체를 제작하였다(<그림 2.2.205>). 실험체는 재령 2일에 탈형한 뒤 실험 시까지 20±3° C의 물에서 수중양생하였으며, 인발실험 하루 전에 다이아몬드 커터를 이용하여 절단한 후에 1.0 mm 정도의 두께로 연마하는 방법으로 실험체를 제작하였다. 섬유인발 실험을 위하

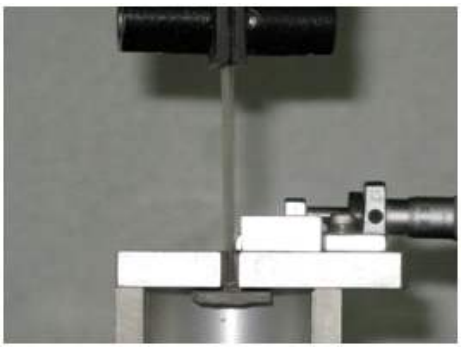
여 실험체의 밑면을 정착장치에 부착하였으며 돌출된 섬유는 연신율로 인한 하중저하를 방지하기 위하여 아크릴 필름으로 감싼 후 만능실험 장치의 로드셀에 부착된 고정장치에 부착하였다. 분당 0.2 mm의 속도로 변위제 어 방식으로 인발실험을 수행하였으며, 섬유 인발 실험에 작용되는 하중은 10N용량의 로드셀로 측정하였다. 실험 장치의 상세는 <그림 2.2.206>에 나타낸 바와 같다.





<그림 2.2.204> 섬유인발 실험체 형상 <그림 2.2.205> 섬유인발 실험체 형상



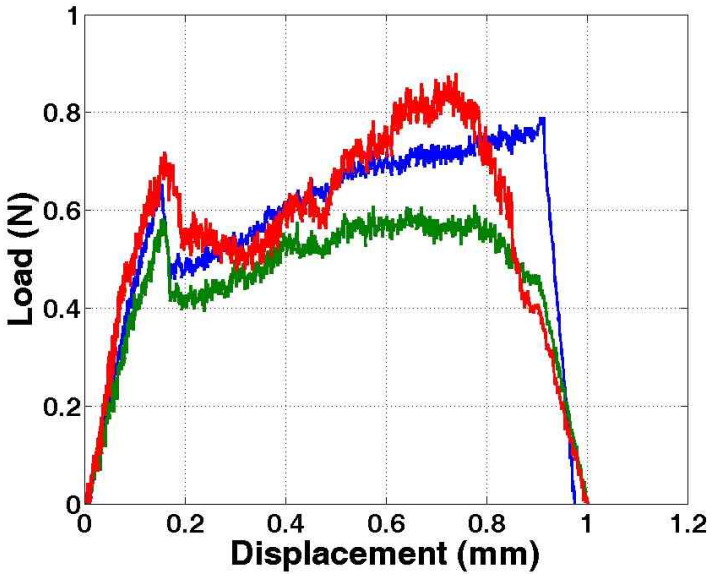


<그림 2.2.206> 섬유인발 실험 장치 및 방법

PVA 섬유를 사용하여 섬유인발 실험을 실시한 결과 <그림 2.2.207>에서 볼 수 있듯이 화학적 부착이 떨어지고 난 뒤 급격한 하중저하가 발생하였으며, 마찰 부착으로 다시 인발하중이 증가하는 경화거동을 보이다가 섬유가 뽑혀 하중이 0에 도달하는 전형적인 친수성 섬유의 특징을 나타내었다. 각 실험체의 평균 최고하중을 바탕으로 화학적 부착력 및 마찰 부착력, 슬립경화계수를 구한 결과를 다음 <표 2.2.79>에 나타내었으며, 이 3가지 마이크로역학 변수는 추후 이론적으로 계산할 수 있는 섬유가교 곡선을 도출하는데 주요변수로 사용하였다.

<표 2.2.79> 섬유인발 실험으로 도출한 화학적 부착력 및 마찰 부착력, 슬립경화계수

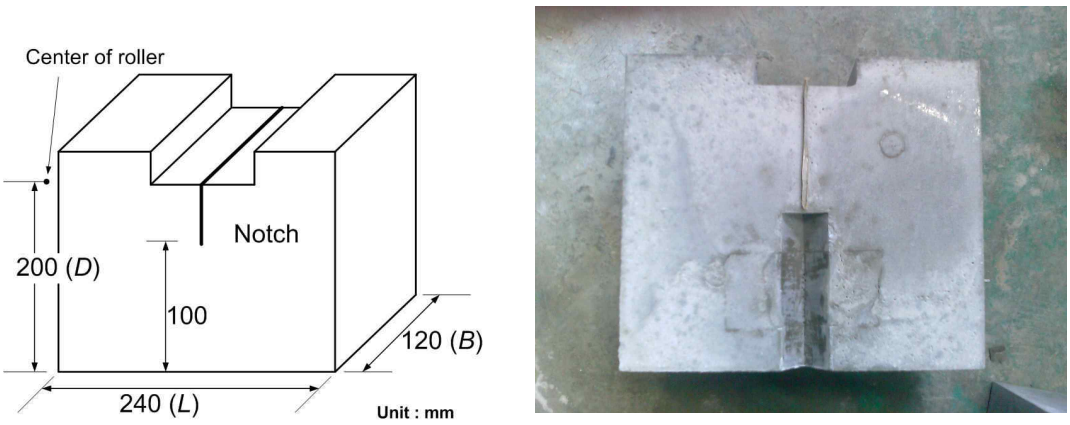
화학적 부착(G_d) (J/m^2)		마찰부착(τ_0) (MPa)		슬립 경화계수(β)	
30MPa급	50MPa급	30MPa급	50MPa급	30MPa급	50MPa급
1.86	2.11	1.71	2.24	0.0872	0.0872



<그림 2.2.207> 섬유인발 실험 결과

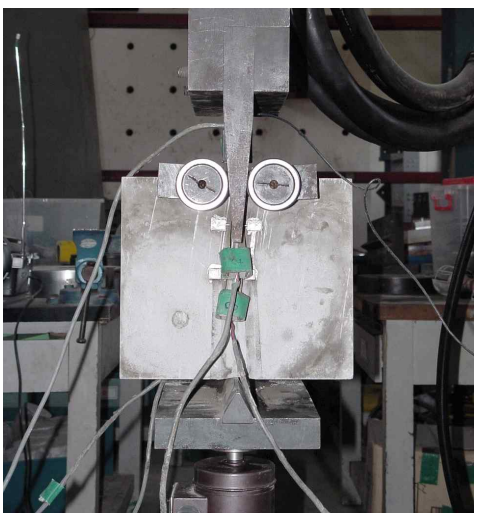
② 시멘트 매트릭스 파괴에너지 실험

다중 균열이 발생하기 위해서는 균열이 있는 상태에서 섬유와 시멘트 매트릭스 사이의 화학적 부착 및 마찰부착을 통해 전달되는 응력이 시멘트 매트릭스의 균열이 발생하기 위한 에너지 보다 더 커야한다. 만약 그렇지 않을 경우 균열이 발생하기 전에 섬유의 파단이나 인발로 인하여 하나의 균열에 응력이 집중되어 다중 균열이 발생하지 못해 고인성의 능력을 나타내지 못하게 된다. 따라서 이 절에서는 앞 절에서 결정한 시멘트 매트릭스 배합을 바탕으로 시멘트 매트릭스가 균열 진전시 필요한 에너지(J_{tip})를 구하기 위하여 파괴에너지 실험을 실시하였다. 파괴에너지 실험체의 기하학적인 형상은 <그림 2.2.208>과 같으며, 타설전 거푸집에 강성이 큰 판을 삽입하고 탈형 후 제거하여 실험체에 인위적인 초기균열을 만들었다.



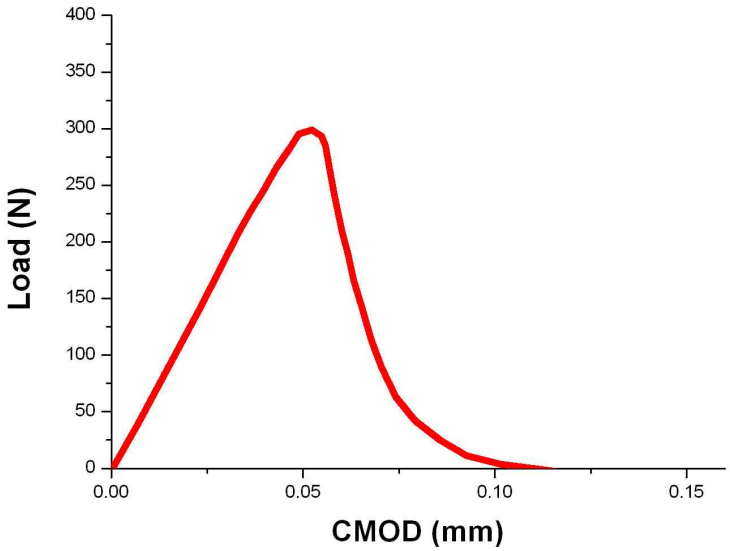
<그림 2.2.208> 쐐기쪼갬 실험체의 기하학적 형상

탈형 후 20±3℃의 물속에서 수중양생을 실시하여 재령 28일이 되는 시기에 실험을 실시하였다. 실험체는 롤러 하중장치를 고정시키고, 균열 개구 변위(Crack Mouth Opening Displacement, CMOD)를 측정용 클립게이지 설치를 위하여 실험체 윗부분에 홈을 만들었다. 실험체 제작 후 파괴에너지 실험 방법은 <그림 2.2.209>에 나타난 바와 같으며, CMOD를 변위제어 방식으로 0.001mm/s의 속도로 컨트롤함에 따라 발생되는 수직하중을 롤러와 쐐기가 접하는 위치에서 수평하중으로 변환시켜 초기 균열사이에 부착되어 있는 클립게이지가 하중의 증가에 따른 CMOD를 측정하였다. 또한 하부에 거치된 50kN의 로드셀을 통하여 실험이 진행되는 동안 하중을 측정하여 하중 - CMOD와의 관계를 도출하였다.



<그림 2.2.209> 쐐기쪼갬 실험 방법

CMOD 관계곡선을 나타낸 것이다. 이 곡선을 통해 최대 수직하중 및 최대 CMOD, 곡선의 탄성계수 등을 도출할 수 있으며, 이 변수를 이용하여 파괴인성(fracture toughness, K_{Ic})를 구할 수 있다. 또한 압축강도 실험을 실시하여 구할 수 있는 시멘트 매트릭스의 탄성계수와 파괴인성을 이용하여 추가적인 균열이 발생하기 위해 필요한 파괴에너지를 구할 수 있다. 다음 <표 2.2.80>에 파괴에너지 실험을 통해 도출된 변수를 나타내었으며, 다음절에 실시하는 인성비 검토를 위한 변수로 사용하였다.



<그림 2.2.210> 하중 - CMOD 관계곡선

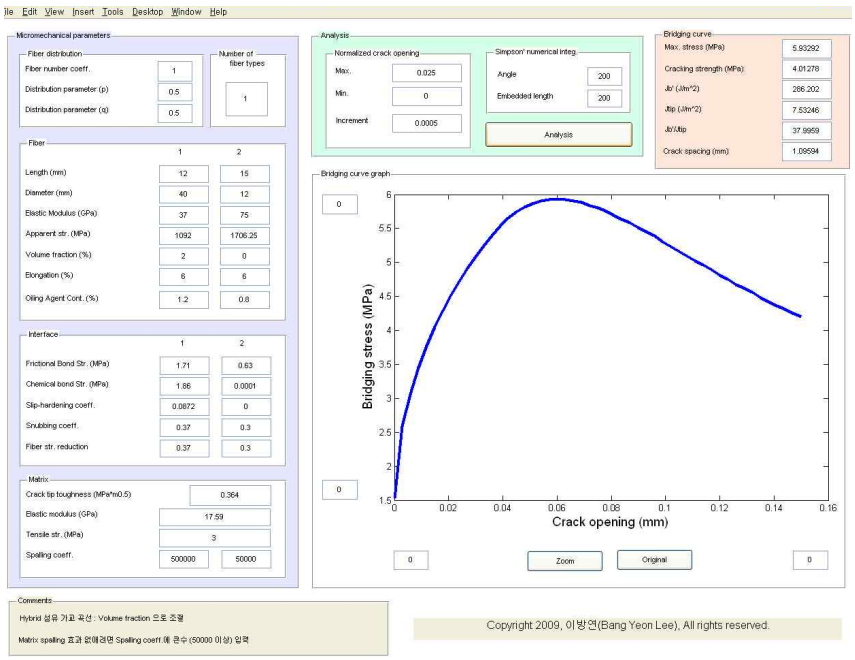
<표 2.2.80> 쐐기쪼갬 실험 결과

변수	CMODmax (mm)	최고하중 (N)	탄성계수 (GPa)	K_{Ic} (MPa·m1/2)	J_{tip}
30MPa급	0.0634	335.78	17.59	0.364	7.537
50MPa급	0.0712	458.8	22.48	0.487	10.55

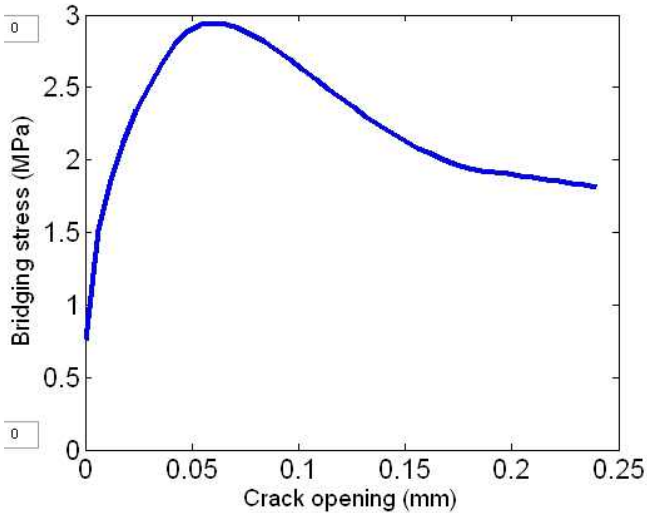
변형율 경화거동과 다수의 미세균열이 발생할 수 있도록 고연성 시멘트복합재료를 설계하기 위해 이 절에서는 기존의 연구를 바탕으로 식 2.2.104를 이용하여 인성비(toughness ratio, R_T) 검토를 실시하였다. 인성비가 최소한 3.0 이상이어야 변형률 경화거동이 발생할 수 있는 것으로 알려져 있으므로 앞서 결정한 조건을 적용하여 최대한 높은 인성비를 확보할 수 있는 고인성 섬유복합체를 설계하고자 계획하였다.

$$R_T = \frac{J_b'}{J_{tip}} \qquad 2.2.104$$

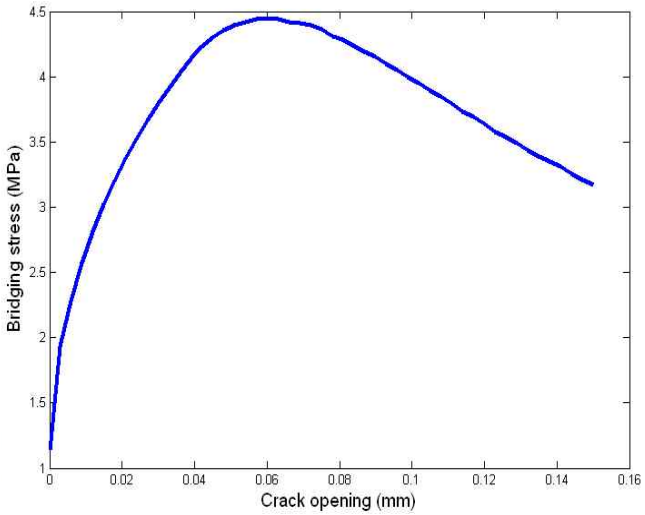
인성비 검토를 위해 필요한 변수(τ_0, G_d)인 섬유를 통해 전달되는 보상에너지(J_b')는 섬유인발 실험을 통해 도출한 마이크로역학 변수를 이용하여 섬유가교곡선 분석을 통해 이론적으로 구할 수 있으며, 시멘트 매트릭스가 균열진전시 필요한 파괴에너지(J_{tip})는 쐐기쪼갬 실험을 통해 구한 값을 적용하였다. <그림 2.2.211>은 이 등의 연구에서 개발한 섬유가교 곡선을 도출할 수 있도록 구현한 해석 프로그램이며, 마이크로역학 변수를 대입하여 실행하면 섬유가교 곡선 및 결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서도 이 프로그램을 이용하여 PVA 섬유 혼입률 1.0%~2.0%에 따른 섬유가교 곡선 분석을 실시하였다, <그림 2.2.212>는 30MPa급 고연성 시멘트복합재료의 섬유 혼입률에 따른 섬유가교곡선을 나타낸 것이다.



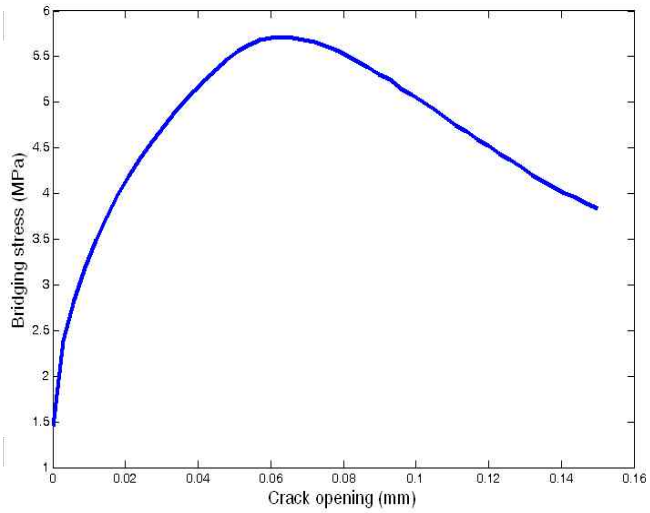
<그림 2.2.211> 본 연구에서 이용한 섬유가교곡선 해석 프로그램



(a) 섬유 혼입률 1.0%일 때 섬유가교 곡선



(b) 섬유 혼입률 1.5%일 때 섬유가교 곡선

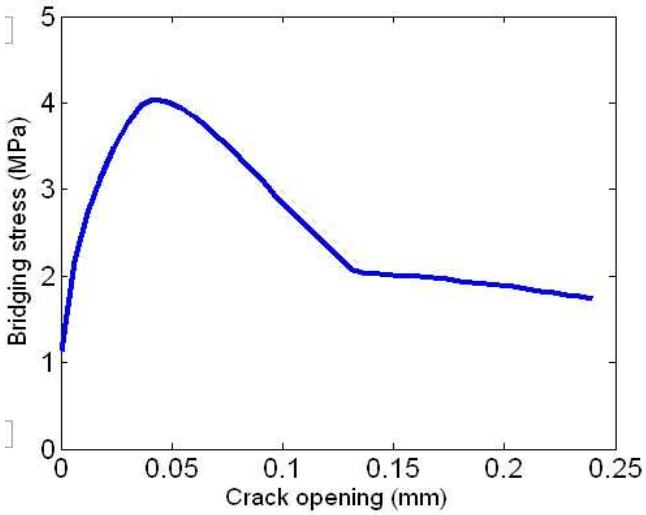


(c) 섬유 혼입률 2.0%일 때 섬유가교 곡선

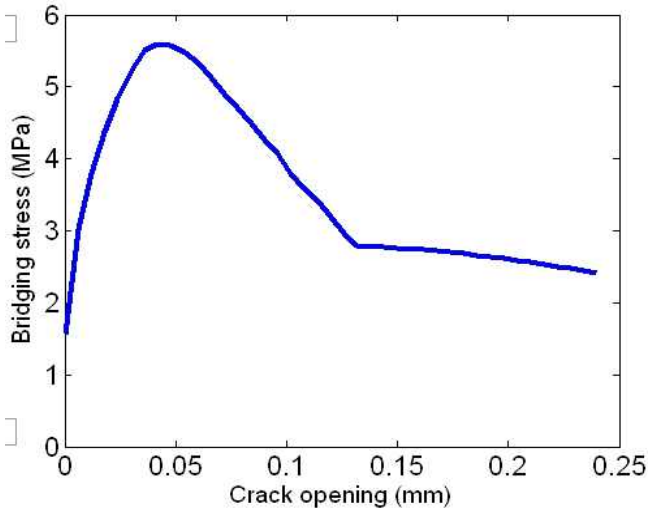
<그림 2.2.212> 섬유 혼입률에 따른 섬유가교곡선(30MPa급)

<표 2.2.81> 섬유가교곡선 해석 결과(30MPa급)

	보상에너지(J_b') (J/㎡)	최대 균열면 가교응력(σ_0) (MPa)	파괴에너지(J_{tip}) (J/m^2)	인성비($\frac{J_b'}{J_{tip}}$)
PVA 1.0%	141.54	2.95	7.537	18.79
PVA 1.5%	213.88	4.52	7.537	28.40
PVA 2.0%	288.34	5.93	7.537	38.29

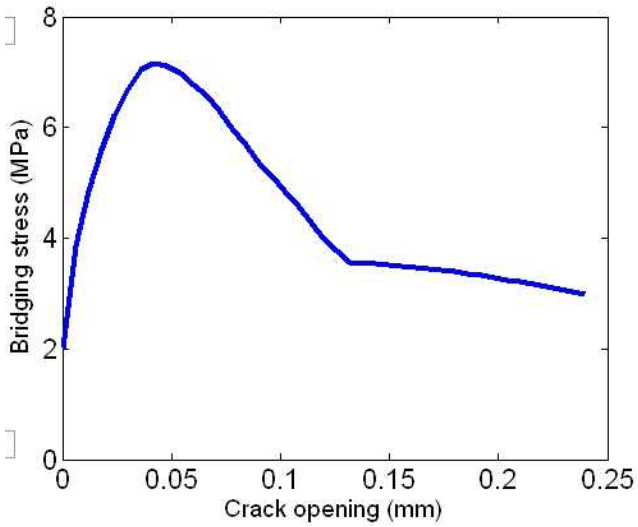


(a) 섬유 혼입률 1.0%일 때 섬유가교 곡선



(b) 섬유 혼입률 1.5%일 때 섬유가교 곡선

<그림 2.2.213> 섬유 혼입률에 따른 섬유가교곡선(50MPa급)



<그림 2.2.214> 섬유 혼입률에 따른 섬유가교곡선(50MPa급)

<표 2.2.82> 섬유가교곡선 해석 결과(50MPa급)

	보상에너지(J_b') (J/㎡)	최대 균열면 가교응력(σ_0) (MPa)	파괴에너지(J_{tip}) (J/m^2)	인성비($\frac{J_b'}{J_{tip}}$)
PVA 1.0%	131.7	4.05	10.55	9.53
PVA 1.5%	182.93	5.94	10.55	17.34
PVA 2.0%	234.47	7.15	10.55	22.22

30MPa급과 50MPa급 섬유 혼입율에 따른 각각의 섬유가교 곡선 해석을 통해 도출된 보상에너지와 파괴에너지 실험을 통해 구한 시멘트 매트릭스 파괴에너지와의 비율인 인성비를 구한 결과를 <표 2.2.81>과 <표 2.2.82>에 각각 나타내었다. 인성비를 평가한 결과 섬유 혼입률 1.0%~2.0% 모두 3.0 이상의 인성비를 확보하는 것으로 나타나 균열 선단에서 균열이 더 이상 진전하지 않게 되어 일정한 균열폭을 가진 안정상태 균열이 발생할 것이라 판단된다. 또한 최대 균열면 가교응력이 인장균열 보다 크게 해석되어 인장 강도조건도 만족함을 알 수 있어 섬유로 전달되는 응력을 통해 시멘트 매트릭스의 균열이 발생하여 다수의 미세균열의 발생과 함께 변형률 경화거동을 할 것으로 예상된다.

하지만 최대 균열면 가교응력을 검토한 결과 30MPa급 및 50MPa급 고연성 시멘트 복합재료 목표 인장강도를 만족시키는 혼입량이 모두 2.0%일 경우이므로 이 연구에서 고연성 시멘트복합재료를 개발하기 위한 최적의 섬유 혼입률을 PVA 2.0%로 최종 결정하였다.

라. Green SHCC 역학적 특성 평가

(1) 실험 개요

앞서 기술한 절에서 고연성 시멘트복합재료를 개발하기 위하여 시멘트 매트릭스의 기본배합 및 PVA 섬유의 혼입률을 실험 및 이론적 설계를 통하여 결정하였다. 이 절에서는 고연성 시멘트복합재료의 최적배합을 도출하기 위한 연구를 수행하였으며, 최적배합을 바탕으로 제작된 고연성 시멘트복합재료를 이용하여 압축강도시험, 직접인장실험, 휨강도시험을 실시하여 역학적 특성을 파악하였다. 또한 30MPa급 고연성 시멘트복합재료는 2차년도 Precast 및 현장시공에 적용할 계획이므로 우수한 시공성(유동성)이 요구되는 현장 타설이 가능하도록 고유동 특성을 나타낼 수 있는 고인성 섬유복합체의 배합을 도출하였다. 이를 위하여 앞서 마이크로역적 설계를 통하여 결정한 시멘트 매트릭스의 배합비를 변화시켜 유동성을 부여하는 방법은 바람직하지 않다고 판단되므로 혼화제(PCSP, HPMC)의 사용량을 최적화시켜 고인성 섬유복합체에 고유동 특성을 부여하고자 한다. 고유동 특성을 검증하기 위하여 slump-flow 실험과 U-형 챔버 실험을 실시하였다.

(2) 실험방법

(가) slump-flow 시험 및 U 형 챔버 실험

Slump-flow 실험을 위하여 PVA 섬유 혼입률을 2.0% 혼입한 배합을 이용하는 타설방법을 계획하였다. 사용재료는 <그림 2.2.215>에 나타낸 바와 같으며, <그림 2.2.216>과 같이 최대용량 15ℓ인 믹서를 이용하여 타설하였다. 사전 예비비빔 실험을 통하여 사용재료의 재료분리가 발생하지 않는 범위에서 PCSP와 HPMC 등의 혼화제의 사용량을 결정하였으며, 그 배합표는 <표 2.2.83>에 나타낸 바와 같다. Slump-flow 실험을 위해 일반적으로 사용되는 직경 200mm의 슬럼프 콘을 이용하였으며, 동일 조건에 대하여 2회 실험을 실시한 후 그 평균값을 취하였다. 다짐 또는 진동 등의 방법을 사용하지 않으면서 재료를 콘에 채워 넣은 후, 콘을 수직으로 들어 올려 붕괴된 재료의 퍼진 직경을 측정하였다.



<그림 2.2.215> 고연성 시멘트복합재료 타설을 위한 사용재료

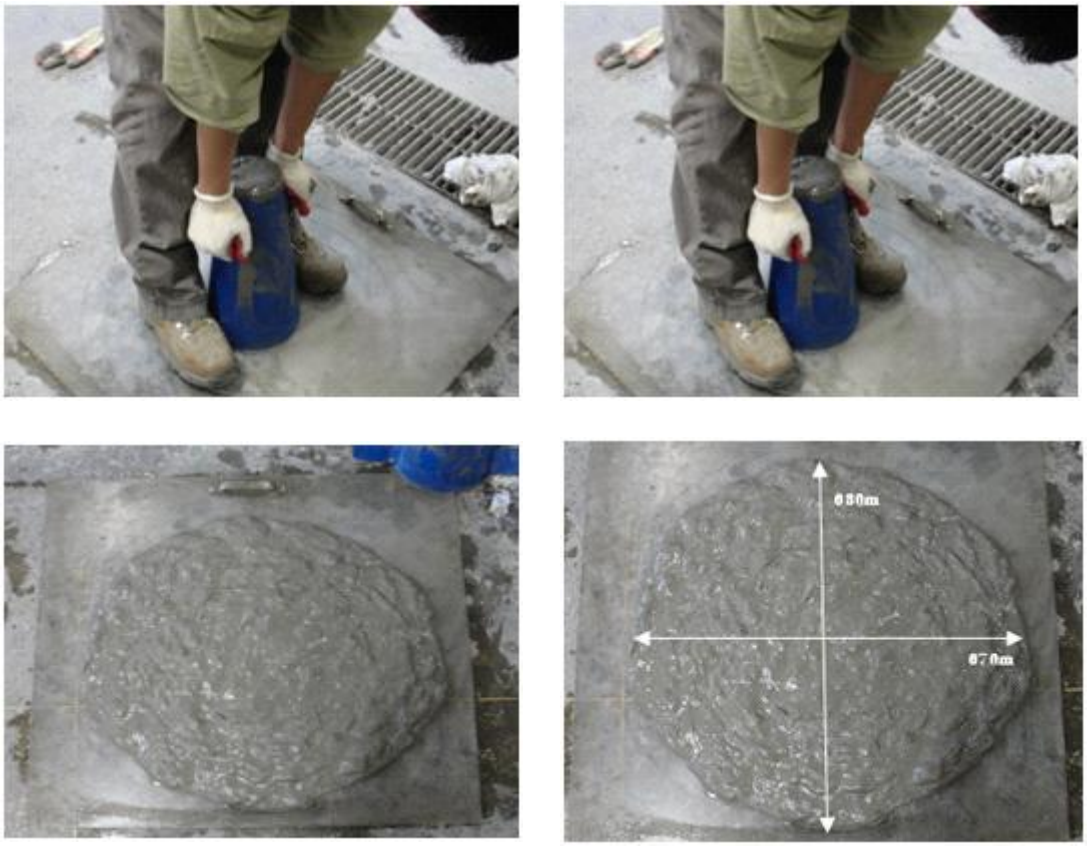


<그림 2.2.216> 고연성 시멘트복합재료 slump-flow 실험 과정

<표 2.2.83> 고연성 시멘트복합재료 배합표(30MPa급)

W/B (%)	S/C (%)	FA/B (%)	Slag/B (%)	단위량(kg/m³)									
				W	B	C	FA	Slag	S	PC SP	HP MC	Defoamer	PVA
45	83	20	20	375	833	500	167	167	692	1.25	3.33	0.8	26

* 여기서, B는 결합재(C+FA+Slag), W/B는 물-결합재비, W는 물, C는 시멘트, S는 잔골재, FA는 플라이애시, Slag는 고로슬래그 미분말을 나타냄.



<그림 2.2.217> 고연성 시멘트복합재료 slump-flow 실험 결과

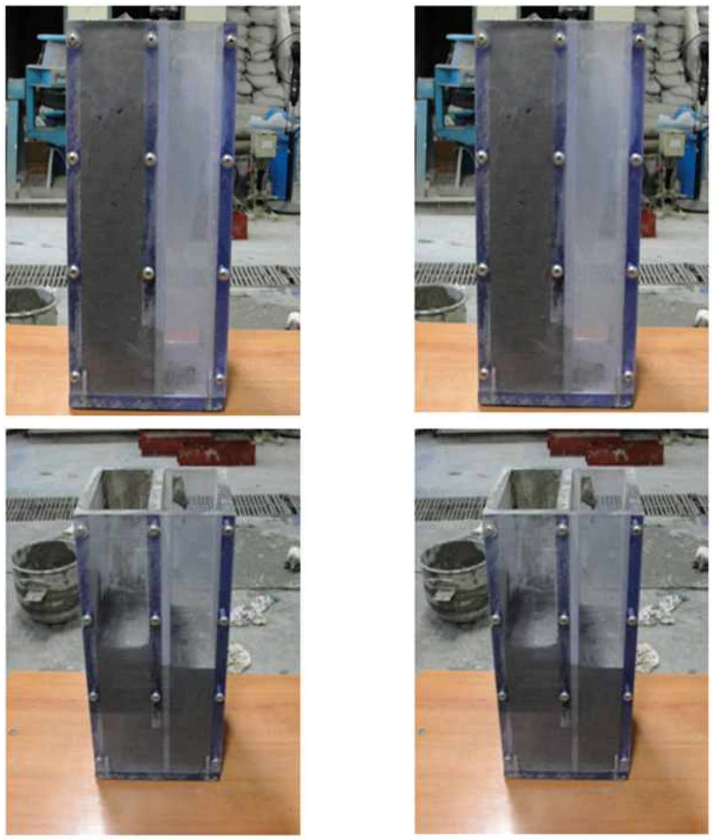
<그림 2.2.217>의 실험 결과 고연성 시멘트복합재료는 다짐 없이 고유동 특성을 나타내었다.퍼진 직경은 680mm, 670mm이며, 식 2.2.105를 통하여 유동성 값(Γ)을 구한 결과 10.39를 나타내었다. 일반적으로 자기충전용 콘크리트의 유동성 값의 범위가 8~12임을 고려해 볼 때, 본 연구의 고연성 시멘트복합재료의 유동성 값 10.39와 비교할 경우 자기충전용 조건을 충분히 만족함을 알 수 있다.(<표 2.2.83>)

$$\Gamma = \frac{(D_1 \times D_2) - {D_0}^2}{{D_0}^2} \qquad 2.2.105$$

<표 2.2.84> slump-flow 실험 결과

퍼진직경 (mm)	670	680
슬럼프 콘 직경 (mm)	200	-
유동성 값(Γ)	10.39	-

또한 slump-flow 실험과 같은 배합을 이용하여 U-형 챔버 실험을 실시하였다. <그림 2.2.218>에 나타난 바와 같이 U-형 챔버 실험에는 직사각형 통의 중앙에 칸막이가 있어서 두 사각형으로 구분되어진 실험 장치를 사용하였다. 두 사각형을 연결하는 중앙통로에는 30mm의 간격으로 3개의 D13철근을 수직방향으로 배근되어 있으며, 실험은 중앙통로를 막은 후에 사각형의 한쪽을 400mm까지 채우고 중앙통로를 여는 방법으로 수행하였다.



<그림 2.2.218> U-형 챔버 장비 및 실험과정

중앙통로를 열게 되면 고연성 시멘트복합재료는 통로를 통하여 다른 사각형으로 흘러들어가게 되며, 이때 중앙에 위치한 철근에 의하여 섬유가 뭉치거나, 재료의 분리

가 발생하지 않아야 한다. U-형 챔버 실험에서는 첫 번째 사각형에 채운 재료의 높이(h0)와 두 번째 사각형에 흘러들어간 재료의 도달높이(h)를 측정하여 자기충전성(L)을 정량화할 수 있다(식 2.2.105). 자기충전성이 1.0일 때에 고인성 섬유복합체가 완전히 자기충전 되었다고 볼 수 있다.

$$L = \frac{2h}{h_0} \qquad 2.2.106$$

U-형 쳄버 실험결과 고연성 시멘트복합재료가 두 번째 사각형 통에 도달한 높이는 180 mm이다.<표 2.2.85>에 나타난 바와 같이 식 2.2.105를 이용하여 구한 유동성(L)은 0.9이며, 이 값은 자기충전용 콘크리트의 범위 0.73 ~ 1.0의 범위를 충분히 만족함을 알 수 있다. 이상으로 slump-flow 및 U-형 챔버 실험을 통해 고연성 시멘트복합재료의 고유동 특성을 살펴본 결과 유동성 값 10.39, 유동성 0.9를 나타내어 자기충전용으로서의 특징을 충분히 나타내므로 <표 2.2.83>의 배합은 고연성 시멘트복합재료에 충분히 고유동의 특성을 부여할 수 있을 것이라 판단된다.

<표 2.2.85> U-형 쳄버 실험 결과

H(㎜)	180
H_0(㎜)	400
U형 자기충전성 ($L=2H/H_0$)	0.9

(나) 직접인장 실험

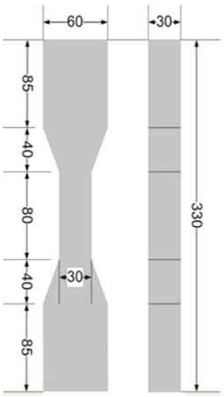
고연성 시멘트복합재료의 1축인장 성능을 평가하기 위하여 직접인장 실험을 실시하였다. 30MPa급 실험체는 고유동 특성을 확보하는 <표 2.2.83>의 최적 배합표를 이용하였으며, 50MPa급 실험체는 <표 2.2.86>의 배합표를 이용하여 <그림 2.2.219>와 같이 단부의 파괴를 방지하면서 직접인장 실험체에 균일한 1축 인장하중이 가해지도록 설계한 아령형상으로 제작하였다. 실험체는 타설 후 재령 28일 동안 수중양생을 실시하여 꺼낸 뒤 24시간 건조를 마친 후 <그림 2.2.220>(a)의 실험 장치를 이용하여 1축 인장을 가력하였다

.

<표 2.2.86> 고연성 시멘트복합재료 배합표(50MPa급)

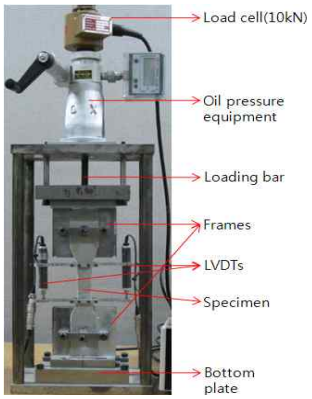
W/B (%)	S/C (%)	FA/B (%)	Slag/B (%)	단위량(kg/㎥)									
				W	B	C	FA	Slag	S	PC SP	HP MC	Defo amer	PV A
33	72	20	20	320	940	582	194	194	750	4.8	0.9	0.9	26

* 여기서, B는 결합재(C+FA+Slag), W/B는 물-결합재비, W는 물, C는 시멘트, S는 잔골재, FA는 플라이애시, Slag는 고로슬래그 미분말을 나타냄.





<그림 2.2.219> 직접인장 실험체



(a) 직접인장 실험 장비



(b)직접인장 실험 과정

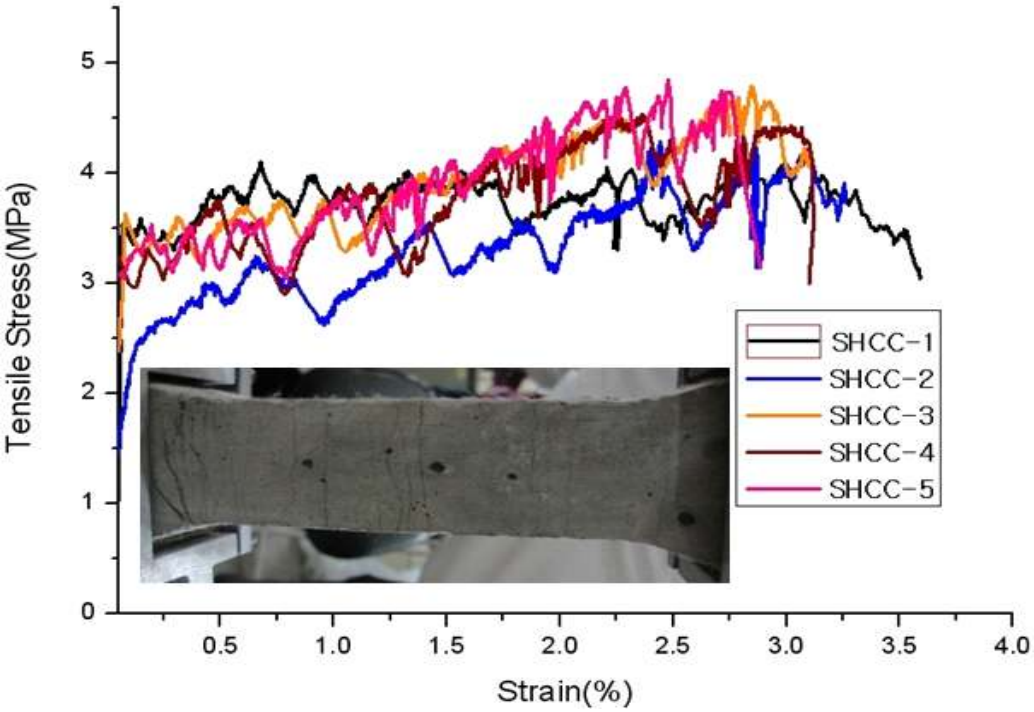
<그림 2.2.220> 직접인장 실험 장치 및 실험 과정

최대 용량 10kN의 로드셀을 이용하여 인장강도를 측정하였으며, 실험체 중앙부 80mm 좌 · 우 대칭인 구간에 10mm 변위계(LVDT)를 설치하여 인장강도 도입에 따른 실험체에 발생하는 실시간의 변위를 측정하였다. 인장강도와 변위는 인장응력과 변형률로 각각 환산하였으며, 인장응력(σ) - 변형률(ϵ) 관계를 그래프로 나타내어 변형률 경화거동을 평가하였다. 또한 초기 균열강도, 최대 인장강도, 최대 인장 변형률을 측정하였으며, 실험체에 발생되는 균열 형태를 파악하였다.

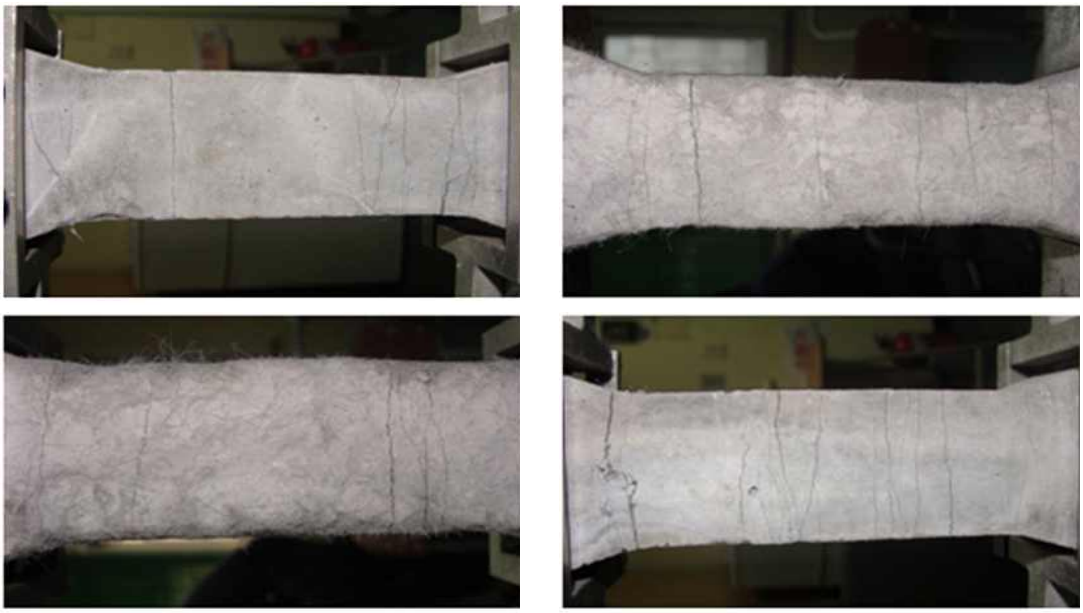
① 30MPa급 Green SHCC 실험결과

<그림 2.2.221>은 직접인장 실험을 실시하여 도출된 30MPa급 고연성 시멘트복합재료의 (σ)-(ϵ) 관계 그래프를 나타낸 것이다. 최적 배합을 바탕으로 제작된 고연성 시멘트복합재료는 1축 인장 하에서 뚜렷한 변형률 경화거동이 발생하였으며, 균열폭이 아주 작은 다수의 미세균열이 발생하였다. 실험체의 파괴형태는 1축 인장강도가 증가하여 시험체의 균열강도에 도달하여 첫 균열이 발생하고 인장강도가 증가하는 변형구간에서는 안정상태의 미세균열의 발생이 점차적으로 확대되면서 변형률 경화거동이 관찰되었다. 그 후 1축 인장 강도가 시험체의 최대 인장강도를 초과될 때 실험체의 한 부분의 균열에 응력이 집중되어 균열의 폭이 커지면서 파괴되는 거동을 나타내었다. 동일한 조건의 여러 개의 실험체 중 대표적으로 5개 실험체의 직접인장 실험 결과를 정리하여 <표 2.2.85>에 나타내었다. 직접인장 실험체의 최대 변형률은 최소 2.3%, 최대 3.2%를 나타내었으며, 5개의 시험체 평균 2.8%로 측정되었다. 이는 일반 콘크리트의 인장 변형률 0.01%에 비해 약 300배 이상의 인장 변형성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 <그림 2.2.222>와 같이 초기균열 이후 미세한 다수 균열이 발생함과 동시에 뚜렷한 변형률 경화거동을 나타내므로 일반 콘크리트에 비해 인장 조건하에서 균열이 발생하더라도 저항할 수 있는 능력이 향상되어 고인성의 특징을 충분히 발휘할 것으로 판단된다.

한편, 직접인장 실험을 통하여 초기균열 강도는 약 1.7～3.3 MPa로 측정되었으며 변형률 경화거동 구간에서의 최대 인장강도는 약 3.7～4.7MPa로 측정되었다. 실험결과 최대 인장강도가 초기균열 강도 보다 큰 값을 나타내므로 섬유가교곡선 분석을 통하여 예측한 결과와 직접인장 실험을 통하여 평가한 결과 모두 강도조건을 만족함을 알 수 있다.



<그림 2.2.221> 30MPa급 Green SHCC의 인장응력-변형률 관계 곡선



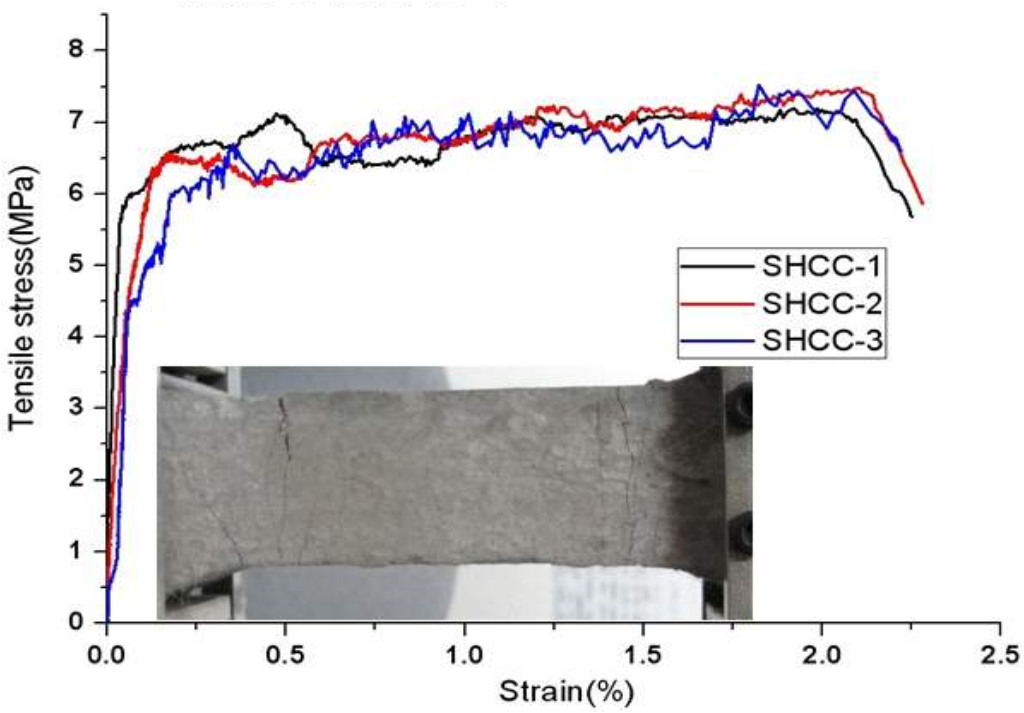
<그림 2.2.222> 직접인장 실험 종료 후 실험체 미세균열

<표 2.2.87> 30MPa급 Green SHCC 직접인장 실험 결과

	초기균열 강도 (MPa)	최대인장 강도 (MPa)	최대 변형률 (%)
specimen-1	3.6	4.1	3.2
specimen-2	2.7	3.7	3.1
specimen-3	3.7	4.2	4.5
specimen-4	2.6	4.4	2.3
specimen-5	1.7	4.3	3.0
평균값	2.8	4.1	3.1

② 50MPa급 Green SHCC 실험결과

50MPa급 고연성 시멘트복합재료의 직접인장 실험결과를 통해 도출된 (σ) - (ϵ) 관계 그래프를 <그림 2.2.223>에 나타내었다.



<그림 2.2.223> 50MPa급 Green SHCC의 인장응력-변형률 관계 곡선

50MPa급 고연성 시멘트복합재료도 30MPa급 고연성 시멘트복합재료와 동일하게 1축 인장 하에서 뚜렷한 변형률 경화거동이 발생하였으며, 균열폭이 아주 작은 다수의 미세균열이 발생하였다. 실험체의 파괴형태 역시 30MPa와 동일한 거동을 나타내었으며, 1축 인장 강도가 증가하여 시험체의 균열강도에 도달하여 첫 균열이 발생하고 인장강도가 증가하는 변형구간에서는 안정상태의 미세균열의 발생이 점차적으로 확대되면서 변형률 경화거동이 관찰되었다. 그 후 1축 인장 강도가 시험체의 최대 인장강도를 초과될 때 실험체의 한 부분의 균열에 응력이 집중되어 균열의 폭이 커지면서 파괴되는 거동을 나타내었다. 동일한 조건의 여러 개의 실험체 중 대표적으로 3개 실험체의 직접인장 실험 결과를 정리하여 <표 2.2.88>에 나타내었다. 직접인장 실험체의 최대 변형률은 최소 2.0%, 최대 2.3%를 나타내었으며, 3개의 시험체 평균 2.2%로 측정되었다.

한편, 직접인장 실험을 통하여 초기균열 강도는 약 4.5～5.5 MPa로 측정되었으며 변형률 경화거동 구간에서의 최대 인장강도는 약 6.9～7.2 MPa로 측정되었다. 실험결과 최대 인장강도가 초기균열 강도 보다 큰 값을 나타내므로 섬유가교곡선 분석을 통하여 예측한 결과와 직접인장 실험을 통하여 평가한 결과 모두 강도조건을 만족함을 알 수 있다.

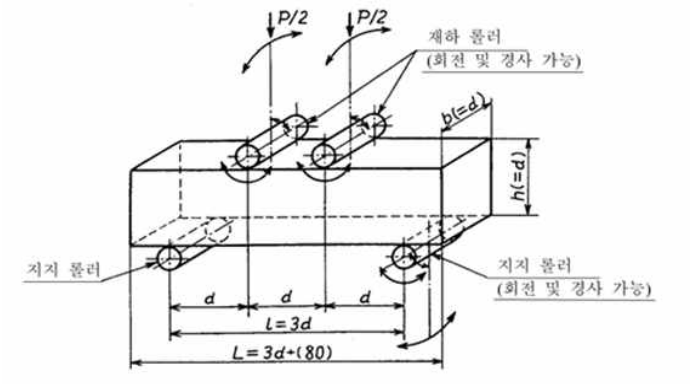
따라서 이 연구에서 고연성 시멘트복합재료를 개발하기 위한 마이크로역학 설계의 타당성이 직접인장 실험 결과와 비교해 볼 때 충분히 검증되었다고 판단되며, 특히 30MPa급 고연성 시멘트복합재료는 우수한 고유동 특성을 나타냄과 동시에 1축인장 하에서 고인성의 특성을 확보하는 것으로 나타나 이 연구에서 설정한 목표 인장성능을 충분히 만족시킴을 알 수 있으며, 2차년도 Precast 패널 제작시에도 충분한 성능을 나타낼 것으로 사료된다.

<표 2.2.88> 50MPa급 Green SHCC 직접인장 실험 결과

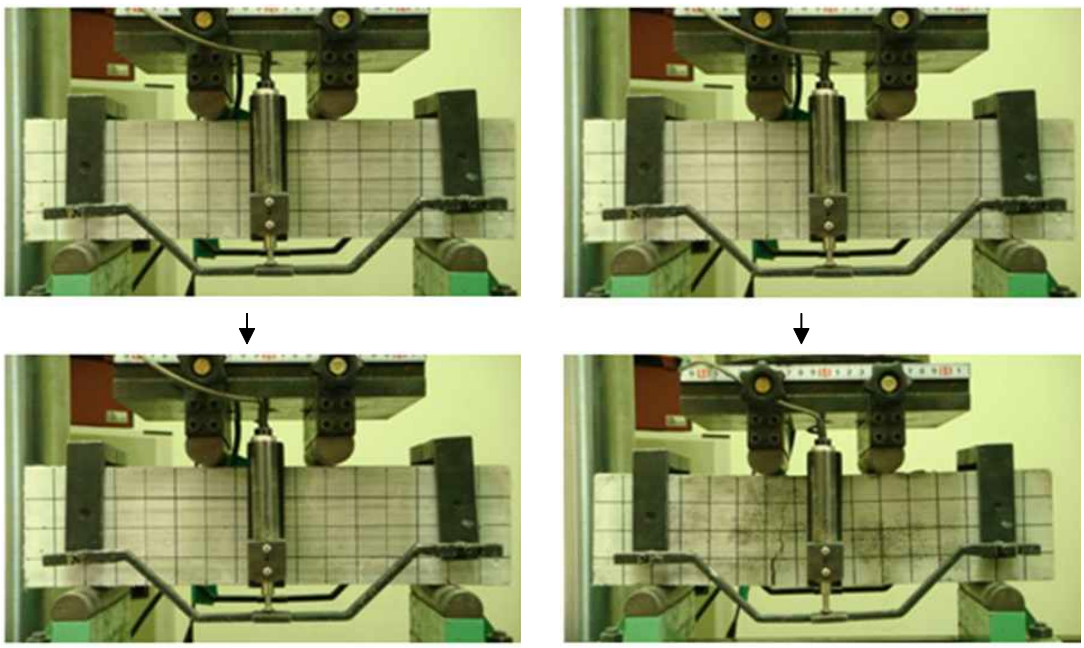
	초기균열 강도 (MPa)	최대인장 강도 (MPa)	최대 변형률 (%)
specimen-1	4.5	7.2	2.3
specimen-2	5.2	6.9	2.1
specimen-3	5.5	7.1	2.0
평균값	5.1	7.1	2.1

③ 휨강도 시험

고연성 시멘트복합재료의 휨 실험은 100×100×40mm 실험체를 제작하여 수중양생을 실시한 다음 재령 28일에 「KS F 2408 콘크리트의 휨 강도 시험 방법」 중 3등분점 재하에 준하여 실시하였다. 만능재료시험기를 사용하여 하중 가력을 실시하였으며 하중재하 속도는 0.8mm/min으로 휨강도와 중앙부 처짐을 측정하였다. <그림 2.2.224>은 휨 실험장치 상세를 나타낸 것이며, 앞 뒤 2개의 LVDT를 시험체에 부착하여 중앙부 처짐을 측정하였으며 휨 강도(f_b)는 식 2.2.107을 이용하여 구하였다. <그림 2.2.225>에 30MPa급 및 50MPa급 실험체의 휨 강도 시험 전경을 나타내었다.



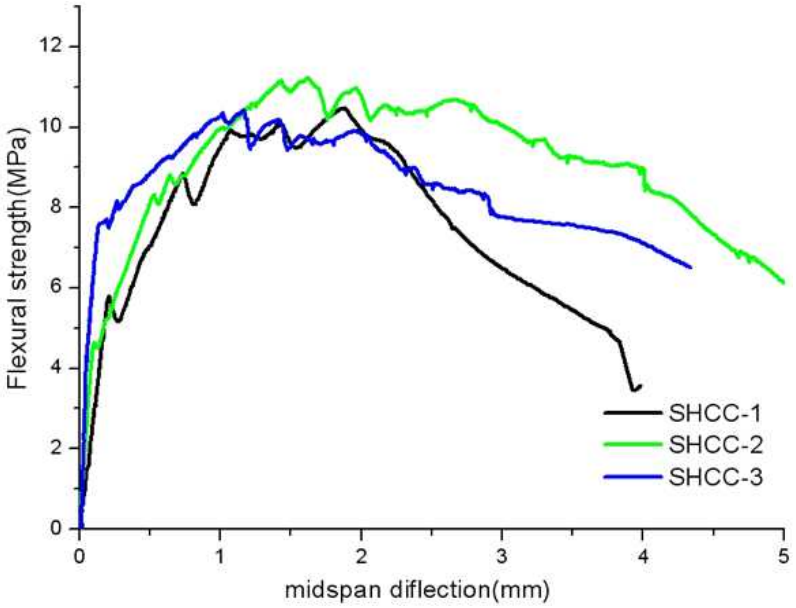
<그림 2.2.224> 휨 강도 실험장치 상세



<그림 2.2.225> 고인성 섬유복합체의 휨 강도 실험 과정

$$f_b = \frac{Pl}{bh^2} \qquad 2.2.107$$

◎ 30MPa급 Green SHCC 휨 강도 시험 결과



<그림 2.2.226> 고인성 섬유복합체의 휨 강도와
중앙처짐 관계 (30MPa급)

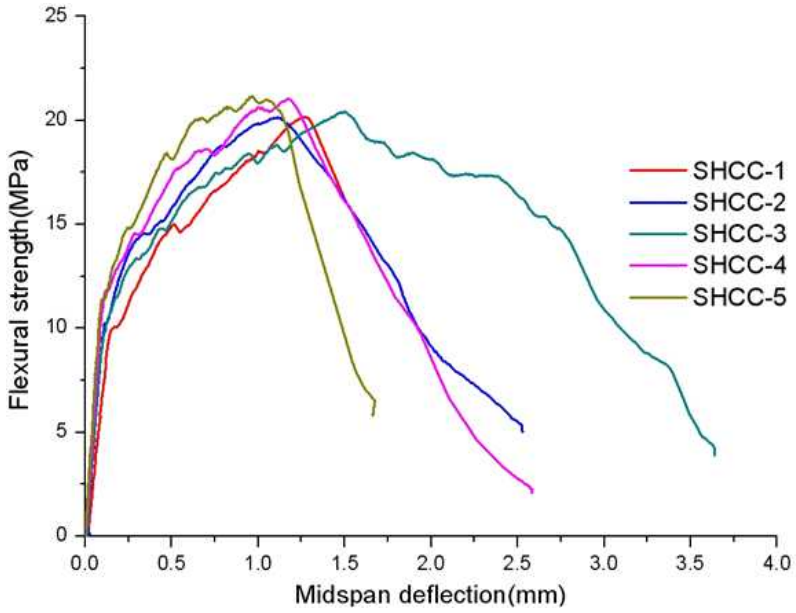
<그림 2.2.226>은 휨 강도와 중앙부 처짐과의 관계 그래프로 초기균열 이후 처짐이 증가하고 하중도 증가하는 인장변형 경화거동을 일으키다가 최대 휨 응력 이후 연화거동을 나타내었다. 또한 휨 실험 과정에서 다수의 마이크로 균열이 발생하였으며, 이후 응력이 일부의 균열에 집중되어 마이크로 균열이 매크로 균열로 진전되어 PVA 섬유의 파단과 함께 응력이 감소하면서 휨 파괴에 도달하였다. <표 2.2.89>에 휨 실험 결과를 나타내었으며, 중앙부 처짐량에서 차이가 발생하였지만, 최대 휨 강도는 3개의 실험체 모두 유사하게 측정되었고, 파괴에 도달하기까지 연성적인 거동을 나타냄을 알 수 있어 직접 인장 실험을 통해 나타난 결과와 동일하게 고연성 시멘트복합재료는 인장변형 성능이 우수하게 평가되었다.

<표 2.2.89> 휨 실험 결과(30MPa급)

	최대 휨 강도 (MPa)	중앙부 처짐량 (mm)
specimen-1	10.5	2.5
specimen-2	10.1	2.1
specimen-3	10.2	2.0

◎ 50MPa급 Green SHCC 휨 강도 시험 결과

50MPa급 고연성 시멘트복합재료의 휨 강도 시험 후 휨 강도와 중앙부 처짐과의 관계를 <그림 2.2.227>에 나타내었다. 30MPa급 시험체와 동일하게 약 10MPa 범위에서 초기균열이 발생하였고, 이후 처짐이 증가하고 하중도 증가하는 인장변형 경화거동을 일으키다가 최대 휨 응력 이후 급작스런 취성파괴 없이 연화거동을 나타내었다. 또한 휨 실험이 진행되는 과정에서 인장부에서 다수의 마이크로 균열이 발생하였으며, 이후 응력이 일부의 균열에 집중되어 마이크로 균열이 매크로 균열로 진전되어 PVA 섬유의 끊어짐과 함께 응력이 감소하면서 휨 파괴에 도달하였다. <표 2.2.90>에 휨 강도 실험 결과를 나타내었으며, 이 연구에서 목표로 하는 휨 강도, 변형률 경화거동 및 다수의 미세균열 등의 역학적 특성을 모두 만족시킴을 알 수 있어 직접인장 실험을 통해 나타난 결과와 동일하게 고연성 시멘트복합재료는 인장변형 성능이 우수하게 평가되었다.



<그림 2.2.227> 고인성 섬유복합체의 휨 강도와
중앙처짐 관계 (50MPa급)

<표 2.2.90> 휨 실험 결과 (50MPa급)

	최대 휨 강도 (MPa)	중앙부 처짐량 (mm)
specimen-1	19.5	1.2
specimen-2	19.6	1.3
specimen-3	20.2	1.5
specimen-4	21.2	1.2
specimen-5	22.1	1.1

④ 압축강도 시험

고연성 시멘트복합재료의 최적 배합의 압축강도 평가를 위하여「KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법」으로 압축강도 시험을 실시하였으며, ϕ100×200 mm의 원주형 압축 공시체를 28일 수중양생 후 만능재료 시험기를 사용하여 압축강도를 측정하였다. 0.005 mm/sec의 속도로 변위제어를 하여 만능재료 시험기의 재하속도를 조절하였으며, 하부에 시험체의 편심을 최소화 할 수 있도록 강성이 큰 힌지 플래이트를 장착하였으며, 하중은 2,500kN 용량의 로드셀을 시험체의 축방향 변위는 0.001mm까지 측정할 수 있는 LVDT를 이용하였다. 시험에 장착한 게이지 위치 상세 및 실험전경을 다음 <그림 2.2.228>에 나타내었다.

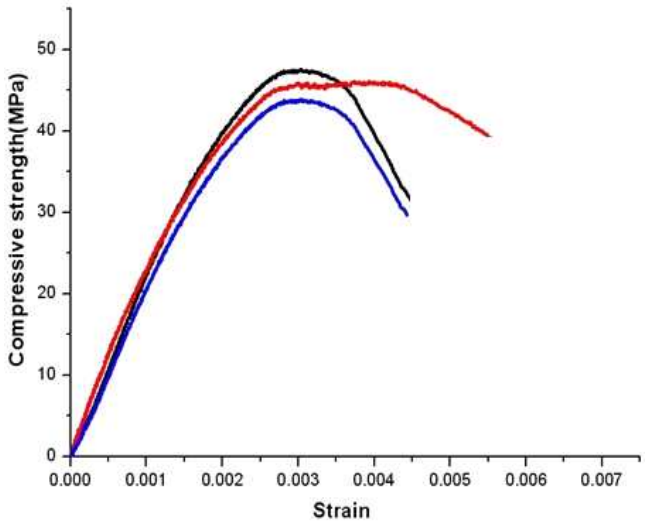


<그림 2.2.228> 압축강도 시험 상세

◎ Green SHCC 압축강도 시험 결과

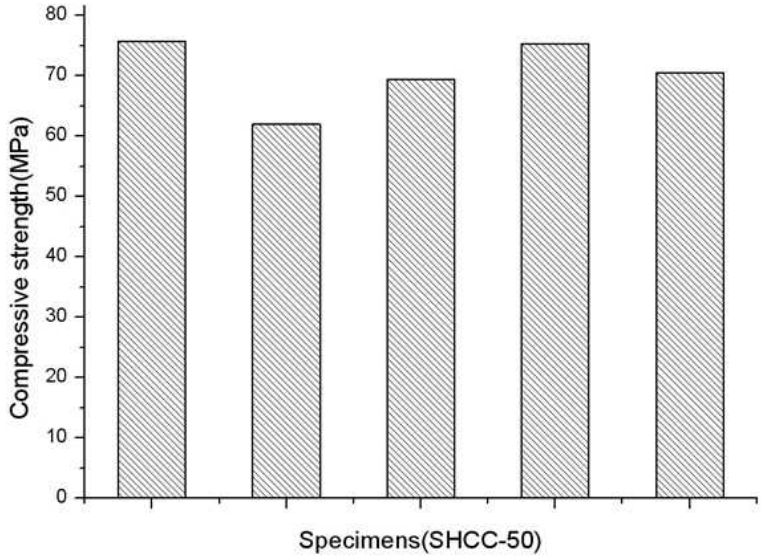
30MPa급 압축강도 시험 결과 3개의 실험체는 평균 45MPa의 압축강도를 나타내었다. 또한 <그림 2.2.229>에 나타난 바와 같이 최고하중 이후 연성적인 파괴거동을 보이는 것으로 나타나 1축 인장거동과 함께 1축 압축거동에서도 충분한 연성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 압축강도 시험을 통해 고연성 시멘트복합재료의 탄성계수를 구한 결과를 다음 <표 2.2.91>에 나타내었다. 이 연구에서의 탄성계수는 일반적으로 콘크리트에 사용되는 할선 탄성계수(chord modulus)이며, 압축강도-변형률 곡선 상에서 두 점을 잇는 기울기이다. 할선 탄성계수를 구하기 위해 식 2.2.108를 이용하였으며, S1은 극한하중의 40%에 해당하는 압축강도이며, S2는 축방향 변형률(ε 1)이 50×10-6일 때의 압축강도, ε 2는 S2 에 의해 발생되는 축방향 변형률이다.

또한 50MPa급 압축강도 시험결과 <그림 2.2.230>에 나타난 바와 같이 평균 압축강도가 약 70.2MPa를 나타내었고, 연성적인 파괴거동을 나타냄을 알 수 있었다. 따라서 이 연구에서의 30MPa급 및 50MPa급 고연성 시멘트복합재료는 목표 강도를 모두 만족시키는 것으로 나타났다.



<그림 2.2.229> 압축강도 시험 결과
(30MPa급)

$$\frac{s_2 - s_1}{\epsilon_2 - 0.00005} \qquad 2.2.108$$



<그림 2.2.230> 압축강도 시험 결과 (50MPa급)

<표 2.2.91> 압축강도 시험 결과 (30MPa급)

	S1 (MPa)	S2 (MPa)	ε_1	ε_2	압축강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
specimen-1	0.08	18.4	0.00005	0.000945	47.2	19.5
specimen-2	0.094	18.4	0.00005	0.000921	45.4	19.9
specimen-3	0.077	17.4	0.00005	0.000915	43.6	19.4

마. Green SHCC의 섬유 분산성 평가

(1) 섬유의 형광특성 분석

(가) 개요

고연성 시멘트복합재료의 우수한 인장거동 특성은 매트릭스의 균열면에 존재하는 다수의 섬유가 가교역할을 함으로써 발현되기 때문에 섬유의 분산성이 고연성 시멘트복합재료의 인장거동에 결정적인 영향을 미치게 된다. 따라서 고연성 시멘트복합재료의 인장거동을 보다 정확히 예측하기 위해서는 섬유의 분산성을 정량적으로 평가한 후, 이를 고려하여 섬유 가교거동을 분석하여야 한다. 섬유의 분산성을 정량적으로 평가하기 위해서는 고연성 시멘트복합재료의 단면 이미지에서 섬유를 정확히 검출할 수 있어야 한다. 그러나 고연성 시멘트복합재료에 사용되는 대부분의 섬유는 매트릭스와의 명암비가 낮기 때문에 육안으로는 매트릭스 내의 섬유를 식별하기가 어렵다.

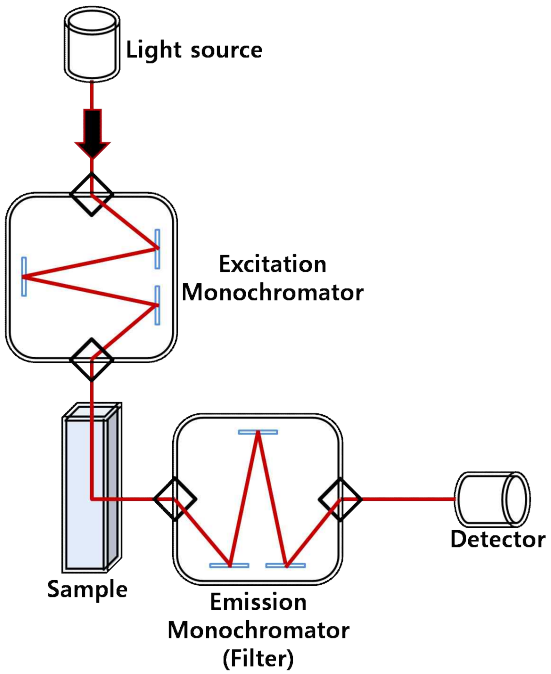
최근 연구에 따르면 PVA 섬유는 형광특성을 가지며, 형광현미경(Fluorescence Microscope)을 통해 매트릭스로부터 섬유 검출이 가능한 것으로 나타났다. 이러한 형광기술은 특정 파장대에서만 발광하는 형광물질의 고유 특성을 활용한 것으로 바이오시스템을 다루는 타 분야에서 활발히 다루어져 왔으며, Kim 등과 조 등은 이물질에 존재하는 유기물을 검출하기 위하여 관련 유기물에 대한 형광특성을 분석하여 최적의 파장대를 조사한 바 있다.

따라서 이 절에서는 형광 광도계를 사용하여 고연성 시멘트복합재료에 일반적으로 혼입되는 섬유인 PVA 섬유, PET 섬유, PE 섬유 그리고 PP 섬유의 형광특성을 분석한 후, 이를 통해 형광현미경으로 고연성 시멘트복합재료의 단면 이미지에서 각 섬유를 정확히 검출할 수 있는 최적의 조사광 및 방사 파장대를 구하였다.

(나) 형광 원리 및 장치

형광 광도계는 시료에 특정 파장대의 빛을 조사하여 시료의 형광특성에 따라 특정 파장대의 빛이 방출되는 원리를 이용하여 물질의 형광특성을 파악하는 장비이다. 이는 물질이 빛을 흡수하면 진동과 회전전위의 변화를 수반하는 전자전위의 변화 즉, 원자나 분자의 전자배열이 기저상태(Ground State)에서 들뜬상태(Excited State)로 바뀌게 되어, 불안정하게 된 원자나 분자가 흡수한 빛에너지를 열의 형태로 방출하거나 또는 다른 파장대의 빛으로써 재방출하여 원래의 기저상태로 되돌아가는 현상을 이용하는 것이다. 이와 같이 빛을 흡수한 어떤 물질이 기저상태로 되돌아가면서 재방출하는 빛을 형광이라 하며, 이와 같은 성질을 지니는 물질을 형광물질이라고 한다. <그림 2.2.231>은 형광 광도계의 개념도를 나타낸다. 빛을 조사

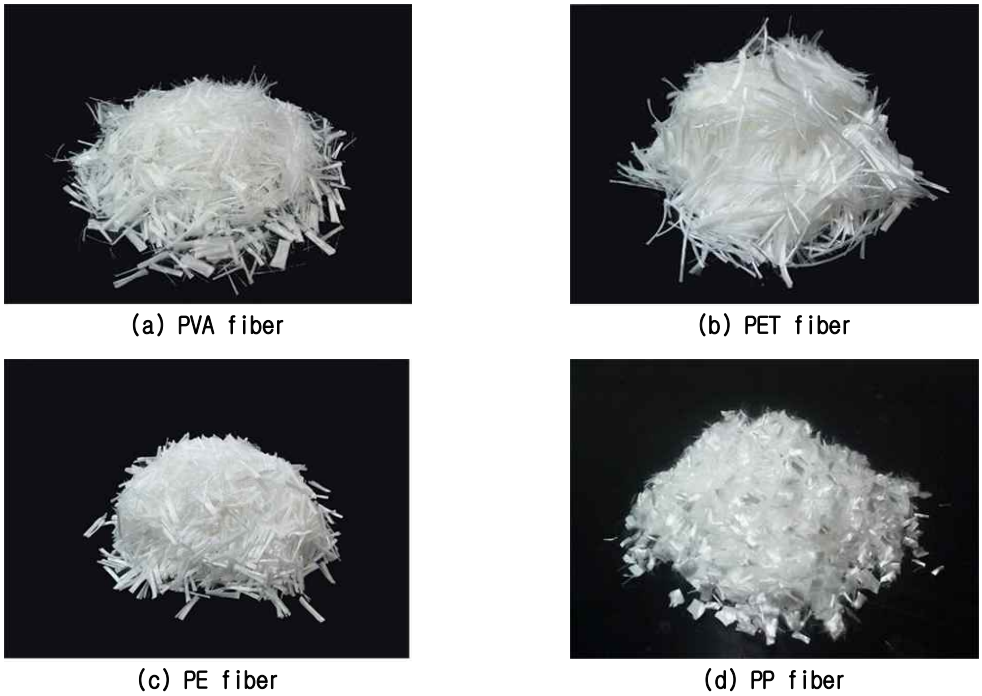
하게 되면 조사용 단색기(Excitation Monochromator)를 통해 특정 파장대의 빛이 샘플로 조사된다. 특정 파장대의 빛이 샘플에 조사되면 샘플의 형광특성에 따라 특정 파장대의 빛이 방출된다. 방출된 빛은 다시 방사용 단색기(Emission Monochromator) 또는 필터(Filter)를 통해 특정 파장대의 빛만 통과된다. 통과된 빛은 PMT(Photo Multiplier Tube)에 의해 형광 광도값을 얻을 수 있다.



<그림 2.2.231> 형광 광도계의 원리

(다) 실험재료 및 방법

최근 활발히 연구되고 있는 ECC에 사용되는 대표적인 섬유들의 형광특성을 분석하기 위하여 <그림 2.2.232>에 나타난 바와 같이 일본 K사에서 제작된 PVA 섬유, 국내 C사의 PET 섬유, 일본 K사의 PE 섬유 그리고 국내 S사의 PP 섬유의 적당량을 형광특성 조사용 큐벳(Fisher Scientific, Fluorescence



(a) PVA fiber (b) PET fiber

(c) PE fiber (d) PP fiber

<그림 2.2.232> 합성섬유의 형상

<표 2.2.92> 섬유의 물리적 특성

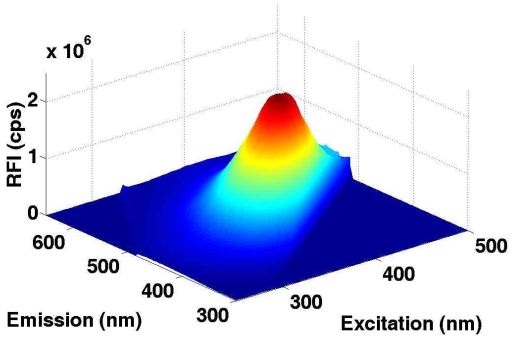
	밀도 (g/cm^3)	직경 (mm)	길이 (mm)	인장응력 (MPa)	탄성계수 (GPa)
PVA 섬유	1.30	0.039	12	1600	40
PET 섬유	1.37	0.033	10	900~1000	10~12
PE 섬유	0.97	0.012	15	2500	75
PP 섬유	0.91	0.042	12	300~600	3~5

Cells)에 넣어 형광특성을 측정하였다. 각 섬유의 특성은 <표 2.2.92>에 나타난 바와 같다.

섬유의 형광특성 측정은 Horiba사의 형광 광도계(FluoroMax-4, Horiba Industries, Edison, N.J., USA)를 사용하였으며<그림 2.2.233>, 광원은 250nm에서 500nm까지 5nm 간격으로 시료에 조사를 한 후, 발광된 형광은 300nm에서 650nm까지 1nm 간격으로 측정하였다. 측정된 조사광 및 방사 파장대는 형광 광도값과 함께 3차원 그래프로 나타낼 수 있으며, 이 연구에서 측정한 형광 광도값은 PMT로 유입된 광자의 수를 측정한 절대 형광 광도값이 아니라 PMT를 통해 증폭된 후, 검출된 광자의 수를 측정한 상대 형광 광도값(Relative Fluorescence Intensity, RFI)이다. <그림 2.2.234>는 PVA 섬유의 형광특성을 나타내는 3차원 그래프이다.



<그림 2.2.233>
Fluorophotometer



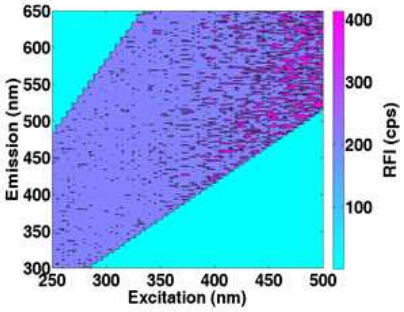
<그림 2.2.234> PVA 섬유의 형광특성

(라) 섬유의 형광특성 분석

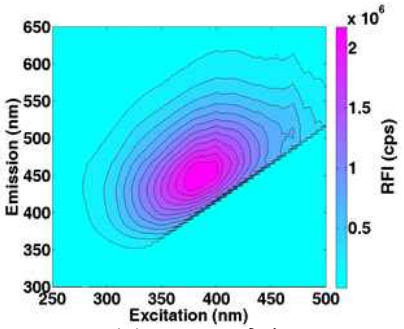
<표 2.2.93>은 매트릭스 및 각각의 섬유에서 가장 높은 상대 형광 광도값을 보이는 조사광과 방사 파장대를 정리한 것으로 매트릭스로부터 섬유를 검출하는데 있어서 최적의 파장대에 해당한다. <그림 2.2.235>는 매트릭스 및 고연성 시멘트복합재료의 제조에 사용되는 PVA 섬유, PET 섬유, PE 섬유 그리고 PP 섬유에 대하여 조사광에 따른 형광특성을 등고선 형태인 2차원 그래프로 나타낸 것이다. <그림 2.2.235>에서 알 수 있듯이 매트릭스는 섬유에 비해 형광특성이 거의 나타나지 않는 것을 발견할 수 있었다. 반면 고연성 시멘트복합재료에서 일반적으로 사용되는 섬유인 PVA 섬유, PET 섬유, PE 섬유 및 PP 섬유의 형광특성을 측정한 결과, 뚜렷한 특징을 가지는 것으로 나타났다.

<표 2.2.93> 섬유 종류에 따른 파장대 및 형광 광도값 측정 결과

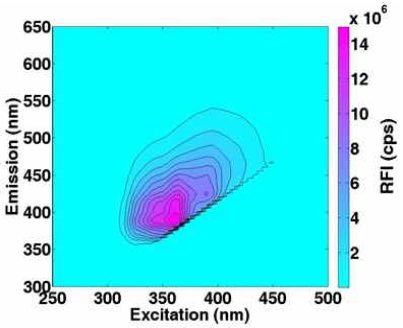
	조사 파장대(nm)	측정 파장대(nm)	광도값 (cps)
Matrix	-	-	620
PVA fiber	380	447	2,350,970
PET fiber	360	390	16,235,400
PE fiber	385	449	519,930
PP fiber	285	305	3,478,830



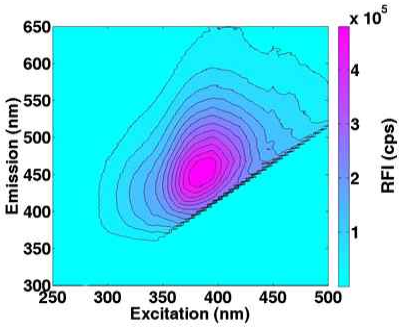
(a) 시멘트 매트릭스



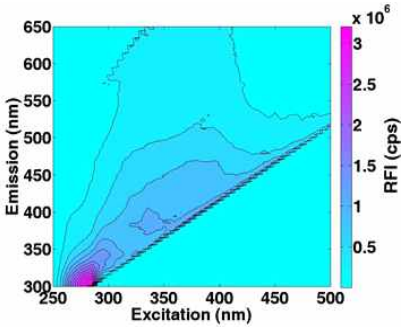
(b) PVA 섬유



(c) PET 섬유



(d) PE 섬유



(e) PP 섬유

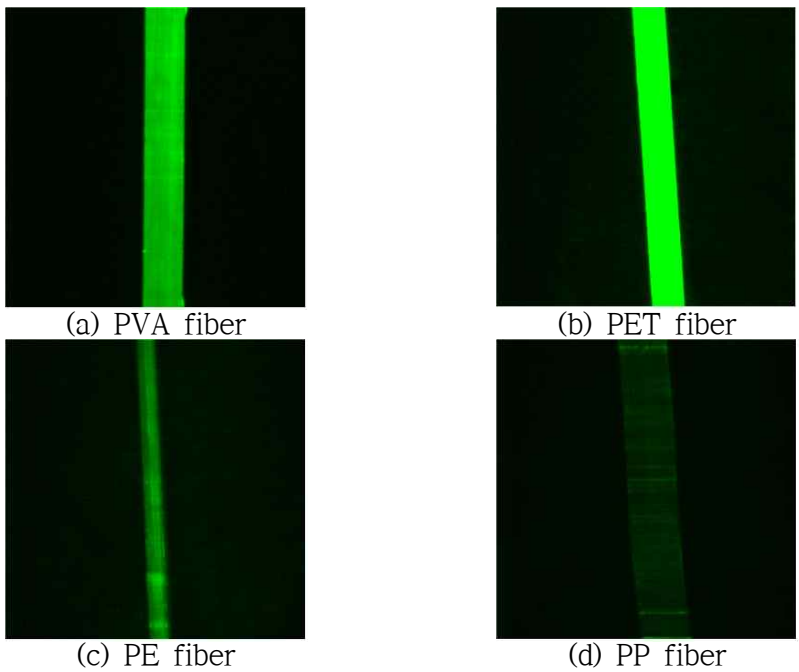
<그림 2.2.235> 각각의 섬유에 대한 조사광에 따른 형광특성

시멘트 매트릭스를 제외한 섬유들 간의 형광특성을 비교해 보면 PVA 섬유는 조사광 380nm일 때 방사 파장대 447nm 부근에서 가장 높은 상대 형광 광도값을 나타내었으며, 이는 조사광 385nm일 때 449nm의 방사 파장대에서 가장 높은 상대 형광 광도값을 가지는 PE 섬유와 상당히 유사한 형태의 형광특성을 보이며, 이는 <그림 2.2.235>을 통해서도 알 수 있다. 섬유들 중에서 가장 높은 상대 형광 광도값을 나타내는 PET 섬유는 다른 섬유들에 비해서 상대 형광 광도값이 약 5배에서 30배 정도 높음을 알 수 있었다. 또한 360nm의 광을 조사하였을 때 390nm 파장대 부근에서 가장 높은 상대 형광 광도값을 보이며, 이와 유사한 형태의 형광특성을 보이는 섬유는 없는 것으로 측정되었다. 또한 PE 섬유는 섬유들 중에서 가장 낮은 상대 형광 광도값을 나타내며 형광특성의 형태는 PVA 섬유와 유사하다는 것을 알 수 있었다.시멘트 매트릭스를 제외할 경우 가장 낮은 상대 형광 광도값을 나타내며, PET

섬유와의 상대 형광 광도값의 차이는 약 40배 정도인 것으로 나타났다. PP 섬유의 형광특성은 다른 섬유의 형광특성과 상당히 다른 형태를 나타내고 있으며 가장 높은 상대 형광 광도값을 보이는 조사광과 방사 파장대도 다른 섬유와는 확연한 차이를 보였다.

(마) 섬유의 형광특성 검증

일반적으로 PVA 섬유 같은 경우 조사광이 수은등(Mercury Lamp, 파장대: 395nm)이며, GFP(Green Fluorescent Protein, 파장대: 510nm) 필터가 장착된 형광현미경을 통해 검출이 가능하며, 섬유의 형광특성에 맞는 조사광과 필터를 사용할 경우 섬유의 검출이 용이하다. 그러나 실질적으로 형광현미경을 통해 최적의 파장대를 구현하기란 어려운 실정이며, 따라서 이 연구에서는 형광 현미경보다 다양한 파장대를 구현하여 형광물질을 관찰할 수 있는 공초점 레이저 현미경(Confocal Laser Scan Microscope)을 통해 실제 섬유

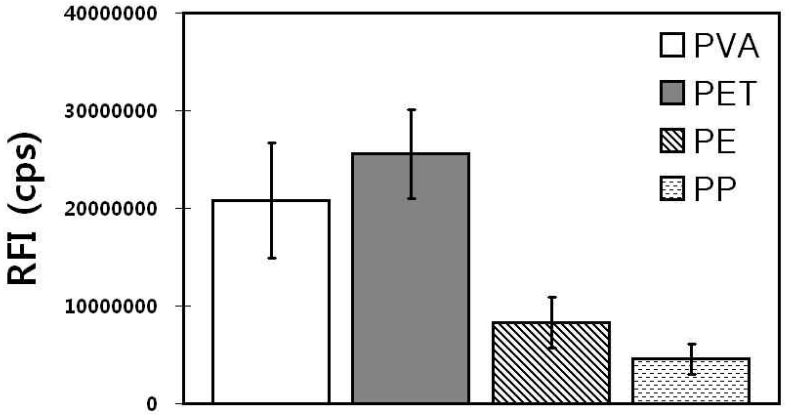


(a) PVA fiber (b) PET fiber

(c) PE fiber (d) PP fiber

<그림 2.2.236> 공초점 레이저 현미경으로 촬영한 각 섬유의 형광 이미지 결과

의 형광 이미지를 관찰하였다. 상대적인 밝기값을 비교하기 위해 동일한 조건인 405nm의 광원을 조사하였을 때 방사 파장대 500~525nm 구간의 형광 광도값을 측정할 수 있는 필터를 통해 각 섬유의 형광 이미지를 촬영하였다. <그림 2.2.236>은 공초점 레이저 현미경으로 촬영한 PVA 섬유, PET 섬유, PE 섬유 그리고 PP 섬유의 형광이미지를 나타내며, <그림 2.2.237>는 405nm의 조사광과 500~525nm 필터에 해당되는 상대 형광 광도값을 나타낸다. <그림 2.2.236>과 <그림 2.2.237>에서 확인할 수 있듯이 공초점 레이저 현미경으로 촬영한 섬유의 상대적인 밝기 순서는 이 연구에서 형광 현미경으로 조사한 섬유의 형광특성 결과와 일치하는 것으로 나타나 고연성 시멘트복합재료 시멘트 매트릭스 내의 PVA섬유보다 효과적으로 검출가능 할 것으로 사료된다. 따라서 다음 절에서는 이러한 섬유의 형광특성을 바탕으로 실제 고연성 시멘트복합재료 시멘트 매트릭스 내에 분포하는 PVA섬유의 형광 이미지를 형광 현미경으로 촬영하였으며, 전체 형광 단면 이미지를 바탕으로 고연성 심켄트복합재료의 섬유 분산성을 평가하였다. 또한 이러한 섬유 분산성의 평가를 바탕으로 섬유의 분포에 대한 확률밀도함수를 가정하여 이론적으로 계산되었던 균열면 응력 - 개구변위관계를 실제 촬영에 의해 도출된 확률밀도함수를 이론적인 계산에 적용하여 기존 방법에 비해 정확한 수정 균열면 응력 - 개구변위관계를 도출하였다.

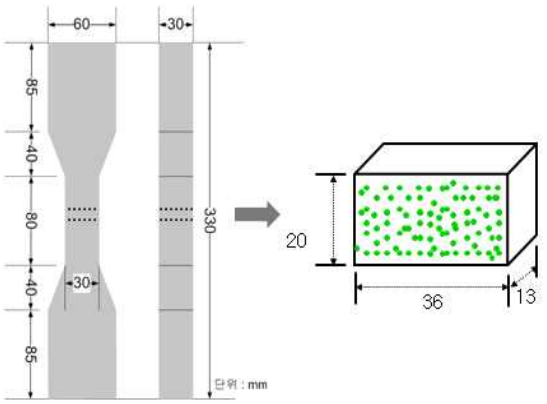


<그림 2.2.237> 각 섬유에 대한 평균 RFI 값

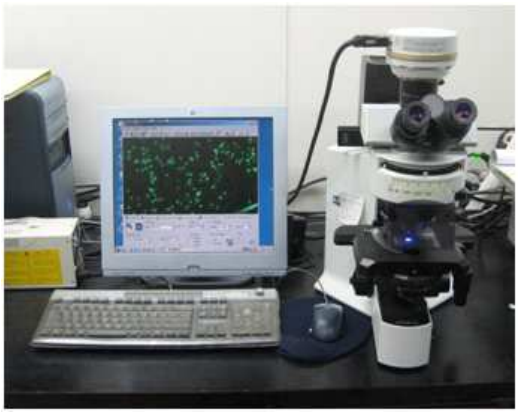
(바) 고연성 시멘트복합재료의 섬유 분산성 평가

이 절에서는 PVA 섬유의 형광 특징을 적용하고 이미지 프로세싱 기법을 이용하여 30MPa급 및 50MPa급 고연성 시멘트복합재료 배합에 대한 섬유 분산성을 분석하였다. 사용된 배합은 이 연구에서 최종적으로 도출한 각각의 배합을 사용하였으며, <그림 2.2.238>에 나타난 바와 같이 시멘트복합재료 실험체의 양 단면을 다이아몬드 커터기로 두께 13mm, 폭 36mm, 높이 20mm로 재단하여 섬유 분산성 평가를 위한 시편을 제작하였다. <그림 2.2.239>에 나타낸 바와 같이 형광 현미경을

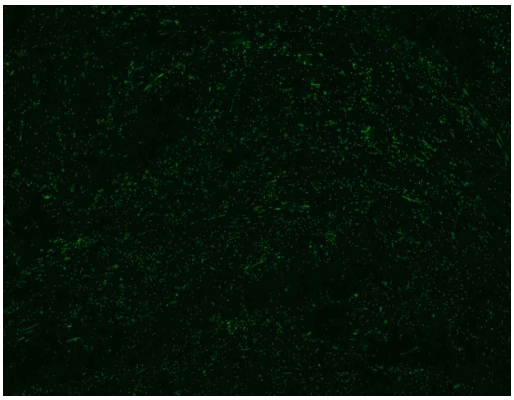
통해 촬영된 단면 이미지를 분석하기 위하여 섬유 분산성을 정량적으로 평가할 수 있는 분산계수(α_f)와 Xia 등이 제시한 섬유의 방향성 분포 함수를 나타내는데 있어서 최적화한 확률밀도함수의 형상을 결정하는 매개변수 p와 q를 구하였다. <그림 2.2.240>에 이 연구에서 개발한 30MPa급 및 50MPa급 고연성 시멘트복합재료를 촬영한 형광 이미지를 나타내었다. 전체 이미지는 각각의 촬영위치에 따른 개별 이미지를 취합하여 하나의 단면에 대한 전체 이미지로 구성하였다.
섬유 분산성 및 개수의 파악을 위해 <그림 2.2.241>에 나타난 바와 같이 형광 현미경으로 촬영된 칼라 이미지(RGB image)를 회색(Gray image)로 변환한



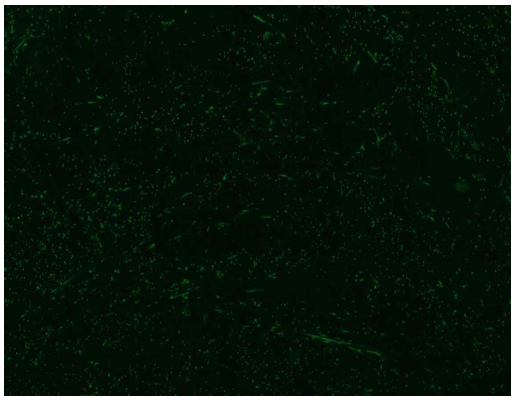
<그림 2.2.238> 실험체 제작



<그림 2.2.239> 형광현미경



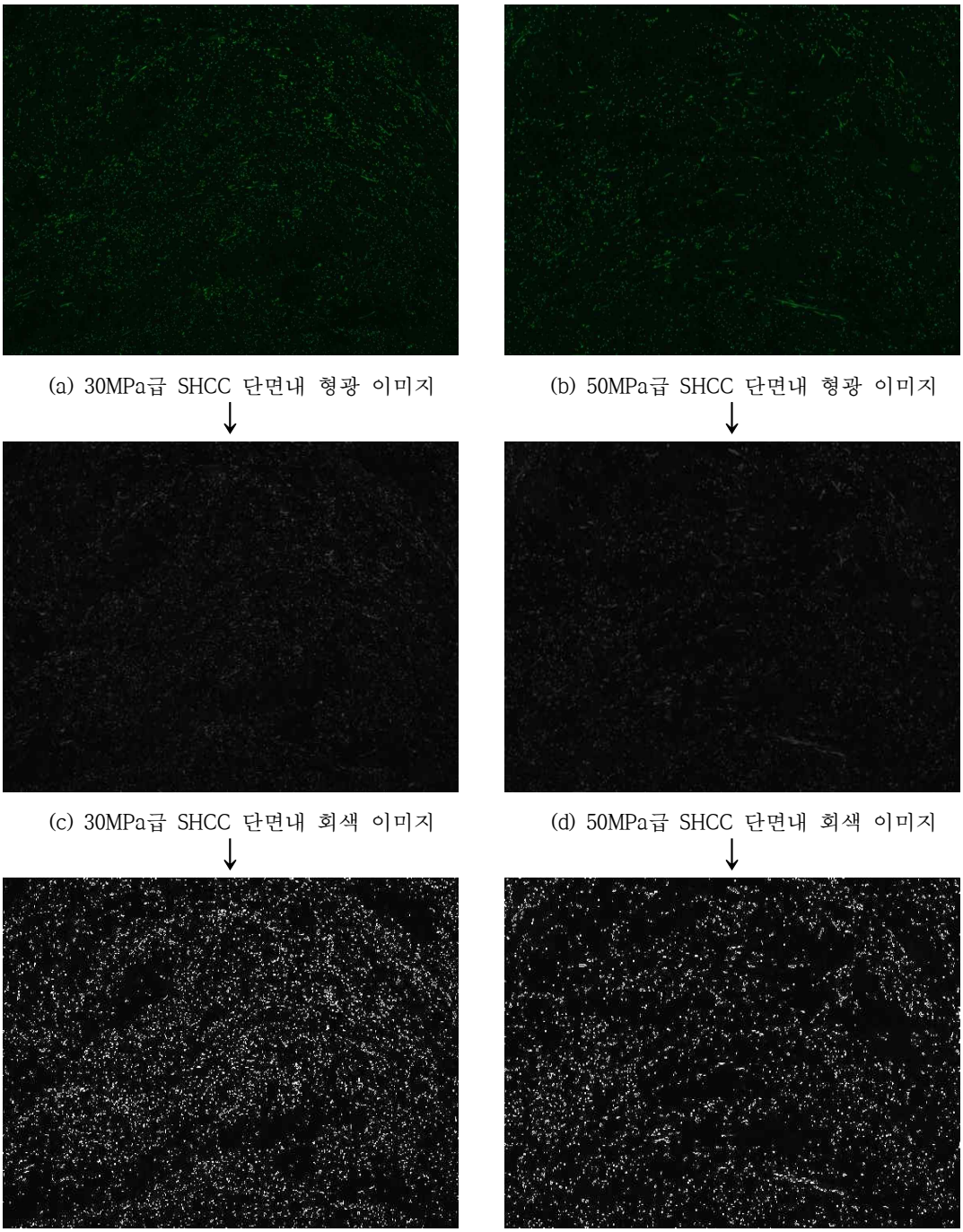
(a) 30MPa급 SHCC 단면내 형광 섬유 이미지



(b) 50MPa급 SHCC 단면내 형광 섬유 이미지

<그림 2.2.240> 고연성 시멘트복합재료 단면내 형광 섬유 이미지 촬영 결과

후, 회색 이미지를 다시 흰색과 검은색의 이진화 이미지(Binary image)로 변환하였다. 이러한 일련의 과정을 통해 최종적으로 섬유는 흰색으로, 시멘트 매트릭스는 검은색 배경으로 각각 나누어지게 되고 시멘트 매트릭스에서 섬유를 검출할 수 있게 된다.



(a) 30MPa급 SHCC 단면내 형광 이미지 (b) 50MPa급 SHCC 단면내 형광 이미지

(c) 30MPa급 SHCC 단면내 회색 이미지 (d) 50MPa급 SHCC 단면내 회색 이미지

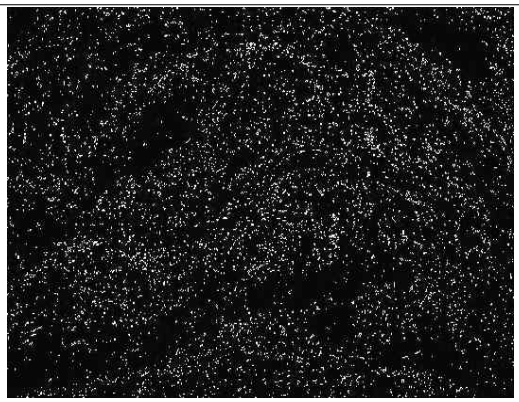
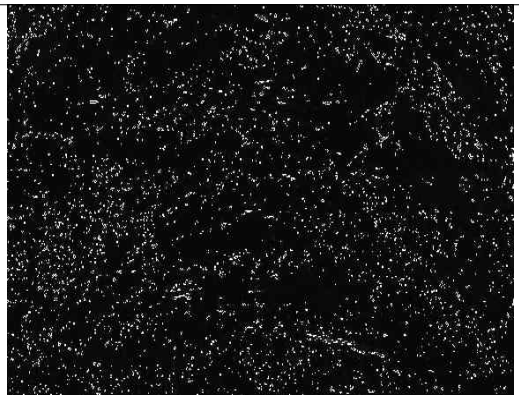
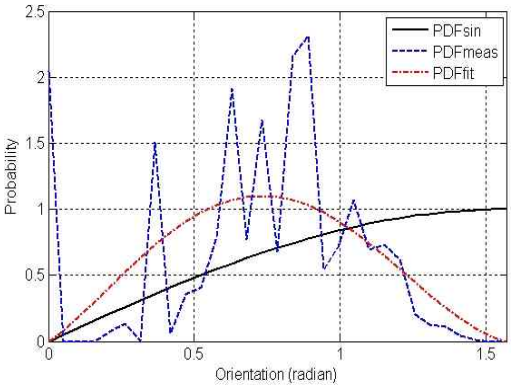
(e) 30MPa급 SHCC 단면내 이진 이미지 (f) 50MPa급 SHCC 단면내 이진 이미지

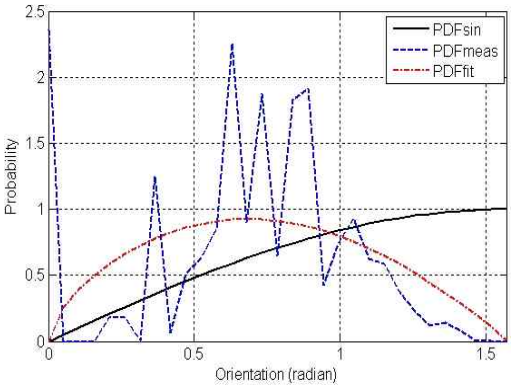
<그림 2.2.241> 시멘트 매트릭스내의 PVA섬유 검출 과정

그 후 인접한 여러 개의 섬유들이 하나의 섬유로 잘못 검출되는 오류를 방지하고 섬유의 검출 성능을 향상시키기 위하여 인공신경회로망(ANN : Artificial Neural Network) 분류기를 이용하는 1차 검출 단계와 1차 검출 단계를 통해 검출된 섬유 이미지를 정확히 재검출할 수 있도록 이미지 밝기의 정점을 분석하여 물체를 구분하는 분수령 알고리즘과 섬유의 이미지에서 노이즈나 국부적인 밝기의 요철이 있게

되면 과도하게 물체를 분할하는 분수령 알고리즘의 오류를 최소화하기 위하여 이미지 확장을 바탕으로 이미지를재구성하여 국소 최소나 최고값들을 제거하는 형태학적 재구성 기법을 이용하였다. 형태학적 재구성 과정을 먼저 수행한 후 분수령 알고리즘을 적용하여 섬유를 보다 정확하게 검출하였다. 그 후 섬유의 분산성을 정량적으로

<표 2.2.94> Green SHCC 이미지 분석 결과

<table>
<tr><th colspan="2">30MPa 급 Green SHCC</th><th colspan="2">50MPa 급 Green SHCC</th></tr>
<tr><td colspan="2">
(a) 이진 이미지</td><td colspan="2">
(b) 이진 이미지</td></tr>
<tr><td>p</td><td>q</td><td>p</td><td>q</td></tr>
<tr><td>1.1</td><td>1.25</td><td>0.8</td><td>0.95</td></tr>
<tr><td colspan="2">

(c) 확률밀도함수</td><td colspan="2">

(d) 확률밀도함수</td></tr>
</table>

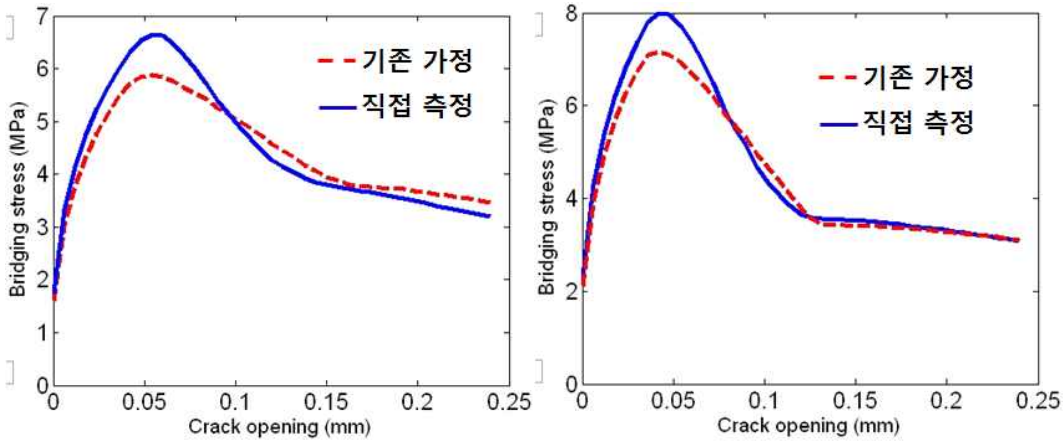
평가할 수 있는 분산계수(α_f)와 섬유의 방향성 분포를 함수로서 나타내는데 있어서 최적화한 확률밀도함수(PDF : Probability Density Function)의 형상을 결정하는 매개변수 p와 q를 구하였으며, 이러한 이미지 분석 결과를 <표 2.2.94>에 정리하여 나타내었다.

이미지 분석 결과 섬유의 분산성은 30MPa급 Green SHCC가 50MPa급 Green SHCC 경우보다 상대적으로 우수한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 50MPa급 Green SHCC의 W/B가 상대적으로 30MPa급 Green SHCC 보다 낮아 유동성이 저하되어 섬유의 분산이 저하된 것으로 판단되며, <그림 2.2.241>의 동일 단면내의 섬유 이미지를 분포 형태를 살펴보봄으로서 확인할 수 있다. 또한, <표 2.2.94>에 제시한 확률밀도함수를 나타내는 그래프로부터 알 수 있듯이 섬유의 분포를 임의의 3차원이라고 가정할 경우 섬유의 방향성에 대한 확률밀도함수는 일정한 값($\sin(\phi)$-검은색 실선)을 갖는 반면 실제 이미지 분석을 통해 구한 확률밀도함수(붉은색 점선)는 이와는 매우 다른 양상을 보인다는 사실을 확인할 수 있다. 이를 통해 이론적인 섬유 가교거동과 실제 균열면에서의 섬유 가교거동은 많은 차이를 보이며 보다 정확한 인장거동을 예측하기 위해서는 섬유의 분산성을 고려할 필요가 있다.

따라서 확률밀도함수를 $\sin(\phi)$로 가정하여 도출한 균열면 응력 - 개구변위와의 관계를 이 절에서 직접 도출한 확률밀도함수로 수정하여 균열면 응력 - 개구변위와의 관계를 재도출하였으며, 이 결과를 이용하여 Green SHCC의 1축인장 거동을 보다 정확하게 예측할 수 있는 기법을 구현하였다.

(사) 수정 균열면 응력 - 개구변위와의 관계 및 1축인장 거동 예측

<그림 2.2.242>는 앞절에서 도출한 확률밀도함수 형상을 결정하는 매개변수 p와 q를 이용하여 PVA 섬유 2.0%를 혼입한 30MPa급 및 50MPa급 Green SHCC의 균열면 응력 - 개구변위 관계를 재도출하여 나타낸 것이다. 그 결과 확률밀도함수를 $\sin(\phi)$로 가정하여 도출한 보상에너지, 최대 균열면 가교응력이 수정전의 변수에 비해 향상되었음을 확인할 수 있었고, 보상에너지 증가에 따라 인성비가 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 이 결과를 Green SHCC의 1축인장 거동을 예측할 수 있는 기법에 적용하여 인장응력-변형률 관계를 구현하였으며, 직접 실험을 통해 도출된 결과와의 비교를 통하여 구현 기법의 정확성 및 타당성을 검증하였다.

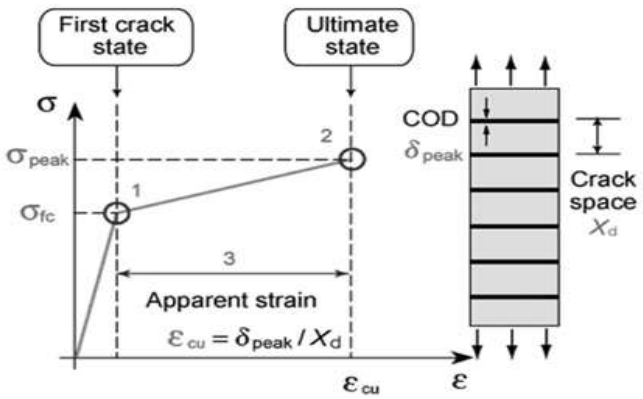


(a) 30MPa급 수정 균열면 응력 - 개구변위곡선

(b) 50MPa급 수정 균열면 응력 - 개구변위곡선

<그림 2.2.242> 수정 균열면 응력 - 개구변위곡선 도출 결과

직접 도출한 확률밀도함수를 적용하여 균열면 응력 - 개구변위곡선 관계를 도출한 결과를 이용하여 Green SHCC의 1축인장 거동을 모사하기 위한 연구를 수행하였다. 우선 Green SHCC의 변형 경화거동 및 연화거동의 인장거동 특성을 파악하기 위해 <그림 2.2.243>에 나타난 바와 같이 초기 균열 상태(σ_{fc})와 극한 상태(σ_{peak})인 2개의 직선으로 모사될 수 있다. 다수의 균열이 시작되는 시작점인 초기 균열 상태는 <그림 2.2.243>에서 처음으로 꺾이는 1번 점이며, 극한 상태는 균열면에 유발된 응력이 증가하여 안정상태 균열 조건이 만족되지 못하게 됨으로써 균열의 폭이 증가하고 섬유의 가교작용이 발휘되지 못해 국부적인 파괴가 발생하는 2번 점으로 나타낼 수 있다. 따라서 Green SHCC의 1축인장 거동을 모사하기 위해서는 2가지 상태의 조건을 반영할 수 있는 함수식이 필요하며, 식 2.2.109에 나타낸 바와 같이 초기균열강도, 최대 인장강도(σ_{peak}) 및 인장변형률(ϵ_{cu}) 그리고 탄성계수(E_c) 등의 재료의 특성을 나타낼 수 있는 변수들이 필요하다.



<그림 2.2.243> 1축 인장 거동 예측을 위한 모델링

$$\sigma(\epsilon) = \left\{ \begin{array}{cc} E_c\epsilon & \epsilon \leq \frac{\sigma_{fc}}{E_c} \\ \sigma_{fc} + (\frac{\sigma_{peak} - \sigma_{fc}}{\epsilon_{cu}}) & \epsilon_{cu} \geq \epsilon \geq \frac{\sigma_{fc}}{E_c} \end{array} \right\} \quad 2.2.109$$

초기균열 강도는 예측 모델식을 이용하여 구할 수 있고, 인장강도는 균열면 응력 - 개구변위곡선으로, 인장 변형률은 균열면 응력 - 개구변위곡선과 균열간격으로 이론적으로 구할 수 있다.

① 초기균열 강도 모델식

초기균열 강도에 대한 예측은 일반적으로 파괴역학에 기반을 두고 다수의 연구자들에게 많은 연구가 수행되었으며, 이 연구에서는 초기균열 강도를 다음 식 2.2.110의 예측식을 사용하였다.

$$\sigma_{fc}^{analysis} = 0.8 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sqrt{\pi}}{2\overline{c_m}} \left[\frac{K_{tip}}{\delta_{peak}} \right] + \int_0^{R_u} \sigma_{c2}(\delta) \frac{RdR}{\sqrt{1-R^2}} \\ + \int_{R_u}^{1} \sigma_{c1}(\delta) \frac{RdR}{\sqrt{1-R^2}} \end{array} \right\} \quad 2.2.110$$

여기서, K_{tip}은 시멘트 매트릭스 파괴인성, c_m은 초기결함의 크기, R_u는 균열의 지름, σ_{c1}, σ_{c2}는 섬유의 가교응력, R은 균열의 장반경대 단반경의 비이다.

② 인장 변형률

인장 변형률은<그림 2.2.240>에 나타난 바와 같이 다음 식 2.2.111에 의해 이론적으로 계산할 수 있다.

$$\epsilon_{cu} = \frac{\delta_{peak}}{x_d} \quad 2.2.111$$

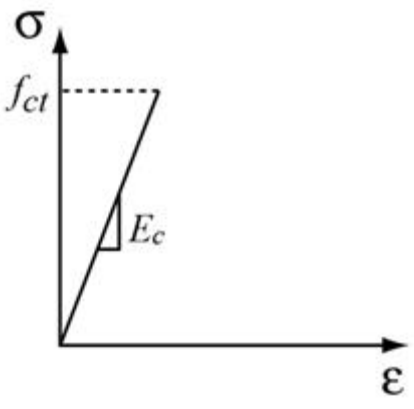
여기서, δ_{peak}는 균열면 응력 - 개구변위곡선에서 최대 응력일 때의 변위를 나타내고, x_d는 평균 균열 간격을 나타낸다. 30MPa급 및 50MPa급 δ_{peak}는 <그림 2.2.242>에서 수정된 응력 - 개구변위곡선을 통해 구하였으며, x_d는 Wu 등이 제안한 식 2.2.112를 이용하여 이론적으로 계산하였다.

$$x_d = \frac{L_f - \sqrt{L_f - 2\pi\phi L_f x'}}{2} \qquad 2.2.112$$

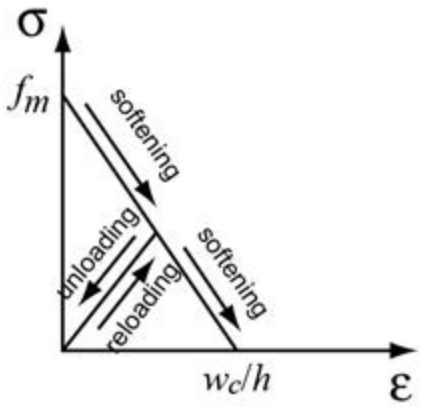
여기서, $\phi = \frac{4}{\pi g}$, $x' = \frac{V_f \sigma_{mu} d_f}{4 V_f \tau}$, $g = 2\frac{e^{\pi f/2}+1}{4+f^2}$, L_f는 섬유의 길이, V_m은 시멘트 매트릭스의 부피비, σ_{mu}는 시멘트 매트릭스의 인장강도, d_f는 섬유의 직경, V_f는 섬유의 혼입 부피비, τ는 마찰부착, f는 스너빙 마찰계수를 나타낸다.

③ 1축 인장 거동 예측 절차

Green SHCC의 1축 인장 거동을 예측하기 위해서 이 연구에서는 <그림 2.2.244>에 나타낸 바와 같이 2가지 모델식을 이용하였다, 그 첫 번째로 시멘트 매트릭스의 탄성 거동을 모사할 수 있는 linear elastic 모델과, 두 번째로 균열면에서 섬유의 가교응력을 모사할 수 있는 tri-linear 모델을 각각 사용하였다. 또한 시험체의 불균질성을 고려하기 위해 각 해석 요소의 신뢰도를 랜덤하게 95%±2s로 분포한다고 가정하였다. 이러한 모델을 사용하여 변위제어 하에서 Green SHCC 1축 인장 거동은 다음과 같은 과정으로 해석된다. 우선 균열이 발생되기 전에는 <그림 2.2.244>(a)에 나타난 바와 같이 실험체는 선형 탄성 거동을 보이다가 인장응력이 증가하여 실험체 단면에서 가장 취약한 부분에 초기균열이 발생하면, 균열면에서의 섬유와 시멘트 매트릭스 사이의 연화거동을 모사하는 <그림 2.2.244>(b)의 모델로 대체되어 해석된다.



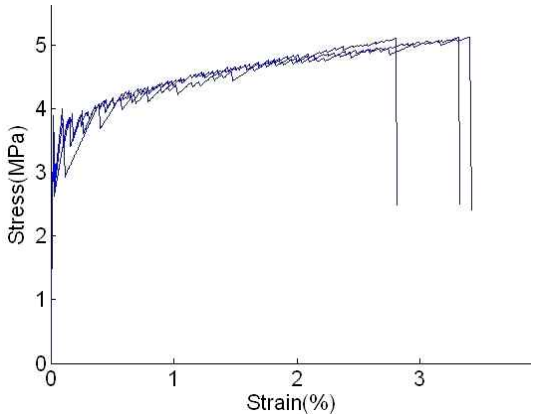
(a) 균열전 linear elastic 모델



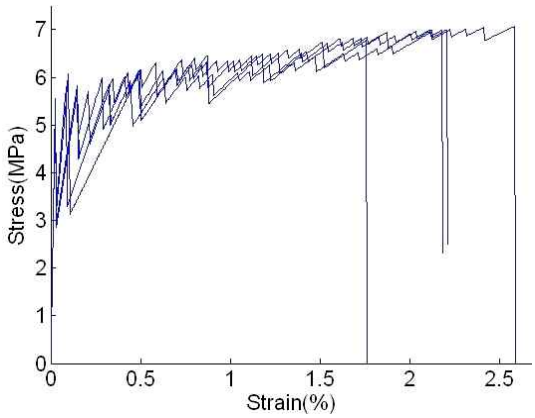
(a) 균열후 tri-linear 모델

<그림 2.2.244> Green SHCC 1축 인장 거동의 모사를 위한 사용한 2가지 모델

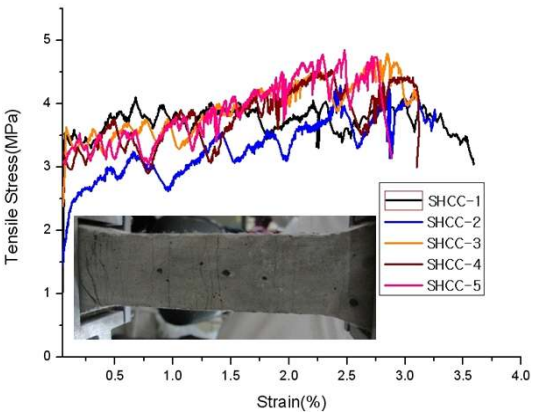
이와 더불어 균열면과 균열이 발생하지 않은 면의 힘의 평형 방정식에 의해 하중이 감소하며, 힘의 평형을 만족한 뒤 다시 인장하중 및 변위가 서서히 증가하는 선형 탄성거동을 보이다가 추가의 균열이 발생할 수 있는 인장응력에 도달되면 다시 연화거동을 모사하는 모델로 대체된다. 이러한 일련의 과정이 <그림 2.2.242>에서 도출한 균열면 응력 - 개구변위곡선의 최고 응력까지 계속 진행이되며 최고 응력을 초과하게 되면 해석이 종료된다. 이러한 과정을 거쳐 다음 <그림 2.2.245>에 30MPa급 및 50MPa급 Green SHCC 실험체에 대한 1축 인장 거동을 예측한 결과와 실제 직접 인장 실험을 통해 도출된 인장응력-변형률 관계를 나타내었고, <표 2.2.93>에 예측 결과를 정리하였다. 예측값과 실험결과를 비교한 결과 측정변수들이 대체로 잘 일치함을 알 수 있어 이 연구의 1축 인장 거동 모사 방법은 Green SHCC 1축 인장거동을 예측할 수 있는 우수한 방법이라 판단된다.



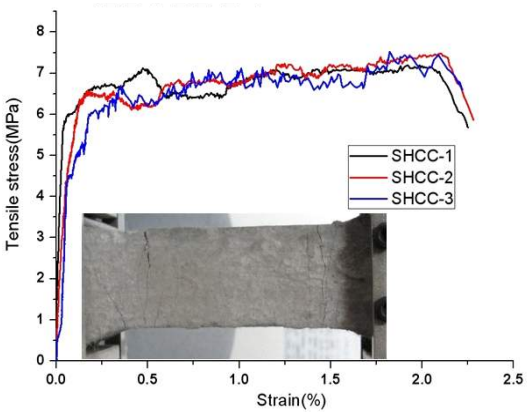
(a) 1축 인장 거동 예측 결과(30MPa급)



(b) 1축 인장 거동 예측 결과(50MPa급)



(c) Green SHCC의 인장응력-변형률 관계 곡선(30MPa급)



(d) Green SHCC의 인장응력-변형률 관계 곡선(50MPa급)

<그림 2.2.245> Green SHCC 1축 인장 거동 예측결과 및 실제 실험결과 비교

<표 2.2.95> Green SHCC 예측결과와 실험결과 비교

		초기균열 강도 (MPa)	최대인장 강도 (MPa)	최대 변형률 (%)
예측 결과	30 MPa급	2.9	4.8	3.2
	50 MPa급	4.7	6.8	2.2
실험 결과	30 MPa급	2.8	4.1	3.1
	50 MPa급	5.1	7.1	2.1

10. Green SHCC 패널 개발

가. 패널 개발

(1) 기존 패널제조 공법

프리캐스트로 제조되는 토목, 건축구조물은 패널뿐만 아니라 블록, 옹벽제품 등 다양하게 제조되고 있다. 이 절에서는 기존 패널 제조 공법과 사용재료, 시공방법 등에 대해 조사하여 Green SHCC 패널 개발의 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

(2) 패널 제조 방법

(가) 사용재료

시멘트는 보통포틀랜드 시멘트가 주로 이용되고 있으며, 제품의 생산성 향상과 함께 증기양생을 줄이기 위해 조강포틀랜드시멘트를 사용하는 공장도 있다. 최근에는 CO2저감 및 콘크리트의 내구성능과 강도향상을 위하여 다성분계 혼합시멘트를 사용하기도 한다. 또한 골재는 주로 하천골재를 사용하고 있으나, 국내 하천골재의 채취규제 및 골재 고갈로 인하여 부순자갈, 부순모래 및 바닷모래 등이 사용되고 있다. 이외에도 슬래그골재, 경량골재, 석탄재 등이 있으며, 건설산업 부산물인 재생골재 등의 다양한 리사이클링 골재도 사용되고 있다. 프리캐스트 패널 제품은 비용절감, 고성능화, 리사이클, 에너지 절약 등의 목적 및 제조방법에 의해 고로슬래그 미분말, 플라이애시, 실리카퓸, 규산질미분말, 석회석 미분말, 팽창재, 고강도용 혼화재, 조기강도 혼화재, 폴리머 등의 다양한 혼화재가 사용되고 있다. 혼화제는 콘크리트의 작업성, 수밀성, 내구성 등의 개선이나 생산성을 향상시키기 위해 사용되며, 소포제나, 경화촉진제, 증점제, 유동화제 등 다양한 혼화제가 이용되고 있다. 프리캐스트 패널의 보강재는 철근, PC강선, 보강용 섬유 등이 사용되고 있고, 최근에는 PVA섬유, 아리미드섬유, 탄소섬유 등의 연속섬유를 수지에 경화시킨 보강재도 사용되고 있다.

(나) 콘크리트 배합

프리캐스트 패널 제품공장에서 상용하고 있는 배합은 콘크리트 강도가 높은 배합도 있어 일반 현장타설 콘크리트에 비해 물-결합재비가 적고, 결합재량이 비교적 많아 점성이 높은 경향이 있다. 워커빌리티는 슬럼프 20~100mm 정도의 것이 많고, 패널의 사용처에 따라 즉시 탈형을 요하는 제품에는 초조강 콘크리트가 이용되고 있다. 반면, 생산성 향상 및 소음/ 진동대책을 목적으로 고유동 콘크리트 및 약간의 진동을 가하는 중유동 콘크리트가 증가하고 있는 경향이다.

(다) 거푸집

거푸집은 패널 제품의 제조방법, 정밀도, 전용횟수, 작업성, 미관 등에 따라 달리 사용되지만, 제품의 완성형태가 비용에 큰 영향을 주는 중용한 요소이다. KS 등의 규격품 및 표준부품에서는 비용 측면에서 점유하는 거푸집 비용이 비교적 작아지면서 저렴한 가격의 제품도 나오고 있지만, 크기나 형상이 다양할수록 거푸집 비용이 큰 비율을 점유하기 때문에 프리캐스트 패널 제품 가격인상의 원인이 된다. 따라서, 패널의 제조비용을 낮추기 위해서는 규격화 및 표준화가 반드시 필요하다.

(라) 혼합

패널 제조공장에서의 콘크리트 믹서는 콘크리트의 점성이 비교적 높은 것도 있어 팬형, 2축형의 강제 혼합믹서가 주로 이용되고 있으며, 이외에는 1축형, 경동식, 듀얼형, 등 여러 가지 믹서가 사용되고 있다. 또한, 최근의 플랜트는 코늘리트의 배합 및 비빔량을 설정하면, 자동으로 골재가 보유한 수량 등을 보정하여, 동일한 유동성의 콘크리트가 자동적으로 제조되는 시스템이 실용화되어 이용되고 있다.

(마) 성형 및 다짐

프리캐스트 패널의 다짐은 콘크리트의 품질, 비용을 좌우하는 공정으로서 다짐방법에 따라 진동다짐, 가압다짐이 있고, 각각의 목적에 따라 사용하고 있으며 최근에는 고유동 콘크리트의 제조 공장이 증가하고 있다. 가장 많이 사용되는 다짐방법은 진동다짐으로서 봉상의 진동기를 콘크리트의 내부에 삽입하여 실시하는 내부진동기와 거푸집 또는 거푸집을 설치한 대를 진동시키는 외부진동기가 있다. 내부진동기 및 외부진동기는 제품의 형상에 맞추어 단독 또는 병용되고 있다.

가압다짐은 패널제품을 진동다짐한 후에 압력(0.05~0.1MPa)을 가하여 성형하는 방법으로 가압 콘크리트 널말뚝 등에 이용되고 있다. 콘크리트의 잉여수가 제거되기 때문에 콘크리트가 치밀하게 되며 강도 및 내구성이 증가한다. 고유동 콘크리트는 작업자와 인접한 주택지 등으로의 소음·진동대책으로써 검토되었으나, 현재에는 비용저감을 목적으로 실용화되고 있다. 재료단가가 높은 고유동 콘크리트에 의해 비용이 저감되기 우해서는 단지 타설작업 및 다짐작업의 인력절감 뿐만 아니라 공장 전체의 시스템화가 필요하다. 즉, 고유동 콘크리트를 사용함에 따라 생산 라인의 자동화·기계화가 가능하고, 향후 규격화된 패널 제품의 무인공장의 출현으로 인한 제조단가의 저감 등이 기대된다.

(바) 양생

콘크리트 패널 제품은 거푸집의 회전율을 높이고 출하를 빨리할 수 있게 하기 위해 목표강도를 조기에 달성하는 것이 필요하므로, 많은 공장에서 촉진양생을 실시하고 있다. 또, 촉진양생은 콘크리트의 강도뿐만 아니라 내구성을 좌우하기 때문에 제품의 품질에 미치는 영향이 큰 공정이다. 콘크리트 제품의 촉진양생에는 증기양생 및 오토클래이브 양생이 일반적으로 활용되고 있다.

증기양생은 패널 제조공장에서 가장 많이 이용되는 양생방법으로 보일러에서 발생한 증기를 피트식이나 선반식의 양생조에 통기하여 보통 압력의 상태로 양생하는 방법이다. 또 일부에서는 거푸집의 회전을 높이기 위해 조강 시멘트나 조강성 혼화제를 사용하여 효과적인 증기양생 시간을 단축하기도 한다.

오토클래이브 양생(고온고압양생)은 증기양생 등의 1차 양생을 실시한 콘크리트 패널을<그림 2.2.246>과 같이 대형 압력용기에 넣어 고온고압(10기압, 180℃)의 포화 증기를 통해 양생하는 방법이다. 오토클래이브 양생의 특징은 양생 후에 소정강도가 얻어지기 때문에 출하재령이 단축되는 것과 치수 안정성이 뛰어난 점 그리고 고강도가 얻어지는 점 등이다. 오토클래이브 양생의 에너지 저감 대책으로서 양생 후의 배출 증기의 열에너지를 회수하여 재이용하는 시스템이 구축되어 있어, 이전의 방법에 비해 중유의 사용량이 60%정도로 줄어들게 된다. 또한 오토클래이브 양생은 초기투자 및 유지비가 높기 때문에 고강도용 혼화재를 사용하는 것에 의해 오토클래이브 양생을 이용하지 않고 고강도 콘크리트를 제조하는 공장이 증가하고 있다.

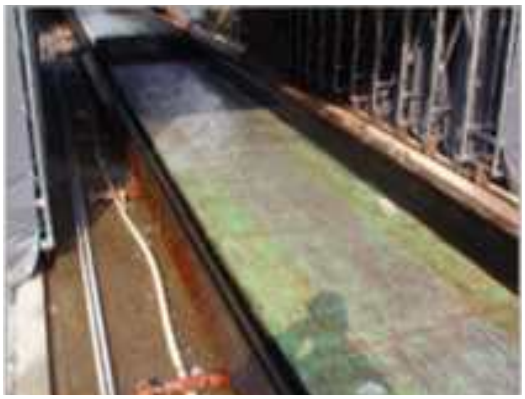


<그림 2.2.246> 오토클래이브 양생장치

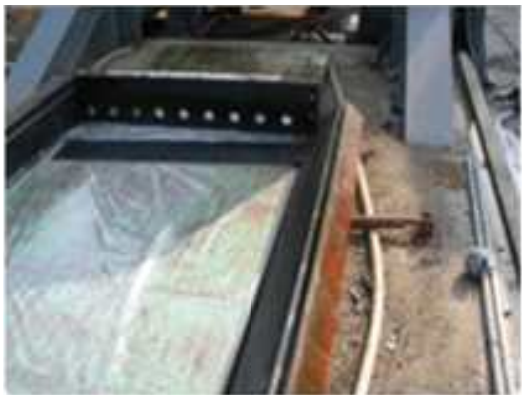
나. 패널 제조 공정

(1) PSC 프리캐스트 패널 제조 공정

PSC 프리캐스트 패널을 제조하는 공정을 다음 <그림 2.2.247>에 나타내었다.



① 배드 설치



② 마감판 설치



③ 거푸집 조립



④ 강연선 조립



⑤ 철근 및 리프트앵커 설치



⑥ 긴장력 도입

<그림 2.2.247> PSC 프리캐스트 패널 제조 공정



⑦ 콘크리트 타설



⑧ 증기양생



⑨ 단부 마감 및 제작완료

<그림 2.2.248> PSC 프리캐스트 패널 제조 공정(계속)

(2) 바닥판용 프리캐스트 패널 제조 공정

바닥판용 프리캐스트 패널을 제조하는 공정을 다음 <그림 2.2.249>에 나타내었다.



① PC거푸집 제작



② 철근 조립



③ 콘크리트 타설



④ 양생 (증기양생 60℃)



⑤ 거푸집 탈형

<그림 2.2.249> PSC 프리캐스트 패널 제조 공정

다. Green SHCC를 이용한 패널 소재 개발

(1) 개요

이 연구에서 계획한 재령 28일 습윤양생 기준 30 MPa급 Green SHCC 패널의 목표 성능은 다음에 나타낸 바와 같다.

① 압축강도 : 30 MPa 이상
② 휨강도 : 8 ~ 9 MPa
③ 인장강도 : 4 MPa 이상
④ 인장 변형률 : 2% 이상

따라서 이 연구에서는 Green SHCC 패널의 목표성능을 만족시키기 위한 연구를 수행하였으며, 사용재료와 양생방법 및 양생 재령에 따른 압축강도 시험, 휨 강도 시험, 직접인장 실험 등의 역학적 실험을 수행하여 이 연구에서 Green SHCC 패널 개발을 위해 설정한 배합을 검증하였다. 특히 휨 강도 시험과 직접인장 실험을 통하여 Green SHCC 패널의 연성능력을 평가하였으며, 패널 시험체 파괴시 발생되는 균열 패턴을 검토하여 균열폭 및 균열 제어 성능을 검증하였다.

또한 Green SHCC 패널의 precast화 공법을 적용하기 위해 현재 precast공법으로 콘크리트 2차 제품을 생산하는 기업 및 이 연구의 참여기업의 협조를 통해 실규모의 precast Green SHCC 패널 시작품을 제작하였고, precast Green SHCC 패널에 대한 압축강도 시험, 휨 강도시험을 수행하여 그 역학적 성능과 균열제어 성능을 검토하였다. 시작품 제작공정을 바탕으로 precast Green SHCC 패널 제작을 위한 공정 방법 및 양산화 등의 세부 관련 사항을 정립하는 기본 방안을 수립하였다.

다음 절에서는 Green SHCC 패널 개발을 위한 배합설계 수행과 배합설계를 바탕으로 제작된 Green SHCC 패널 공시체에 대한 역학적 특성을 검토하였다.

(2) Green SHCC 패널 개발을 위한 재료 배합기술

(가) Green SHCC 패널의 사용재료

① 시멘트

Green SHCC 패널을 제조하기 위해 이 연구에서 사용한 시멘트로는 재료의 획득이 용이하고 가격면에서 저렴한 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. KS L 5201의 규정에 적합한 국내 S사 제품을 사용하였으며, 그 화학적 조성 및 물리적 특성을 <표 2.2.96>과 <표 2.2.97>에 나타내었다.

<표 2.2.96> 시멘트의 화학적 조성

화학적 조성 (%)									
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	Ig.loss	Tatal
21.24	5.97	3.34	62.72	2.36	0.13	0.81	1.97	1.46	100.0

<표 2.2.97> 시멘트의 물리적 특성

물리적 특성							
Density (g/cm^3)	Blaine (cm^2/g)	44㎛ on Residue (%)	Setting Time (min)		Compressive Strength (MPa)		
			Initial Set.	Final Set.	3days	7days	28days
3.14	3,200	12.5	240	370	22.5	30.0	39.5

② 골재

이 연구에서는 Green SHCC 패널을 개발하기 위해 규사 두 종류를 사용하였으며, 섬유의 분산성 확보를 위해 평균입경이 약 130㎛를 확보할 수 있도록 입도를 조정하여 사용하였다. 그 물리적 성질은 <표 2.2.98>에 나타낸 바와 같다.

<표 2.2.98> 규사의 물리적 특성

	규사 7호	규사 8호
밀도 (g/cm^3)	2.60	2.6
평균입경(㎛)	100	150

③ 시멘트 대체재료

이 연구에서 개발하고자 하는 Green SHCC 패널은 균일한 섬유분산과 섬유의 물리적 특성을 극대화하기 위하여 굵은 골재를 사용하지 않고 시멘트, 물, 잔골재로 구성되는 시멘트 모르타르의 형태를 나타내기 때문에 일반 콘크리트에 비해 사용되는 단위용적당 시멘트가 비교적 많은 단점이 있다. 따라서 Green SHCC 패널 개발 시 사용되는 시멘트량을 저감시킴으로써 친환경 재료를 제조하기 위해 이 연구에서는 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 시멘트 대체결합재로 선정하였다.

특히 플라이애시는 Green SHCC 패널을 개발하기 위한 재료로 사용된 고연성 시멘트 복합재료에는 국내 F급 플라이애시를 사용하였지만, Green SHCC 패널의 precast공법 적용을 위해 CaO 성분이 F급 보다 구성비가 높은 고칼슘 플라이애시(C급)를 사용하였다. CaO 성분의 구성비율이 높음으로 인하여 빠른 수화반응을 유도할 수 있고 초기강도 확보 시간을 단축시킬 수 있어 precast공법에 적절한 재료라 판단된다.

따라서 이 두 재료를 사용함으로 인해 시멘트 사용량을 저감시킬 수 있을 뿐만 아니라 포졸란 및 잠재수경성의 특징을 나타내기 때문에 대체 결합재로 사용시 시멘트 수화반응에 의해 생성되는 수산화칼슘을 포졸란 반응에 의해 소비하므로 매트릭스가 치밀화되어 역학적 특성이 향상되고, 섬유와의 부착성도 향상에도 크게 기여 할 것으로 판단된다.

또한 입자의 형태가 원형을 나타내기 때문에 첨가 시 우수한 유동성을 확보할 수 있어 시멘트 매트릭스내에서 섬유의 분산성 향상 및 원활한 작업성을 확보할 수 있는 장점이 있다.

이 연구에서 사용된 고칼슘 플라이애시(C급) 및 F급 플라이애시, 고로슬래그 미분말의 특성을 <표 2.2.99>, <표 2.2.100>, <표 2.2.101>에 나타내었으며, 사용된 두 재료 모두 국내 사용기준을 만족함을 알 수 있다.

<표 2.2.99> 고칼슘 플라이애시(C급) 특성

성분 / 함유량(%)	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	P_2O_5	TiO_2	Na_2O	MnO	밀도	분말도
구성비	15.0	10.0	9.0	48.6	0.1	0.7	0.2	0.6	0.4	0.1	2.89	4,460

<표 2.2.100> 사용된 플라이애시의 물리 · 화학적 특성

품질 \ 종류		KS L 5405 규정 1종	KS L 5405 규정 2종	측정값
SiO2(%)		45이상	45이상	50.5
수분(%)		1.0이하	1.0이하	0.3
강열감량(%)		3.0이하	5.0이하	3.04
밀도(g/㎤)		1.95이상	1.95이상	2.16
분말도	45㎛체 체잔분	10이하	40이하	-
	비표면적(㎠/g)	4,500이상	3,000이상	3,645
플로값비(%)		105이상	95이상	101
활성도지수(%)	재령 28일	90이상	80이상	92
	재령 91일	100이상	90이상	102

구성성분	측정값
SiO2	50.72
Fe2O3	6.37
Al2O3	20.73
CaO	3.61
MgO	1.08
SO4	0.54
강열감량	3.04

<표 2.2.101> 고로슬래그 미분말의 특성

품 질 \ 종 류		KS L 5405 규정 1종	KS L 5405 규정 2종	KS L 5405 규정 3종	측정값
밀도(g/㎤)		2.80이상	2.80이상	2.80이상	2.94
비표면적(㎠/g)		8,000～10,000	6,000～8,000	4,000～6,000	4,310
활성도지수(%)	재령 7일	95이상	75이상	55이상	88
	재령 28일	105이상	95이상	75이상	109
	재령 91일	105이상	105이상	95이상	112
플로값 비(%)		95이상	95이상	95이상	106
산화마그네슘(MgO)(%)		10.0이하	10.0이하	10.0이하	5.62
삼산화황(SO_3)(%)		4.0이하	4.0이하	4.0이하	0.23
강열 감량(%)		3.0이하	3.0이하	3.0이하	0.64
염화물 이온(%)		0.02이하	0.02이하	0.02이하	0.002

④ 섬유

현재 시멘트계 복합재료용 섬유로써 생산되어 이용되고 있는 섬유에는 크게 무기계섬유와 유기계섬유로 대별된다. 무기계섬유로는 강섬유, 유리섬유, 탄소섬유 등이 있으며 유기계섬유에는 아라미드섬유, 폴리프로필렌섬유, 폴리비닐알콜계섬유, 폴리아미섬유, 폴리아크릴로 섬유, 폴리에스테르섬유 및 셀룰로즈계 등이 있으며, 이들 섬유의 물리적 성질을 <표 2.2.102>에 나타내었다. 폴리비닐알콜계섬유(PVA)는 다른 종류의 섬유에 비하여 가격면이나 시공면에서 우수하며 다양한 종류의 섬유가 있어서 선택에 있어서도 유용하다. 또한 물리적 측면에서 살펴보면 다른 섬유에 비해서 비중이 작아 구조물의 경량화에 도움을 준다. 화학적 측면에서는 시멘트와의 친화성이 우수하여 배합 시 분산이 용이하며 알칼리에 대한 저항성이 높아 내구성에 유리하다. 따라서 위에서 언급한 바와 같이 다른 보강용 섬유에 비하여 많은 장점을 가지는 폴리비닐알콜계섬유(PVA)를 고연성 시멘트 복합재료 개발과 동일하게 Green SHCC 패널 개발을 위한 최적의 섬유로 선정하였다.

<표 2.2.102> 고성능 섬유의 물리적 성질

	인장강도 (MPa)	연신율 (%)	탄성계수 (GPa)	밀도 (g/㎤)
PVA	880-1,600	6-10	25-41	1.3
PP	600	25	5	0.95
HCPE	2,700	5	120	0.98
Steel	1,200	3-4	200	7-8

⑤ 혼화제

이 연구에서 사용된 혼화제로서 시멘트 매트릭스 유동성을 증가시키고 배합시 섬유의 분산성을 향상시키기 위하여 카르복실계 고성능 감수제(PCSP)를 사용하였고, 배합시 규사, 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 섬유 등 재료의 분리를 방지하기 위하여 셀룰로즈계 분리저감제(HPMC)를 사용하였으며, 표면 마무리 및 공기량 조절을 위한 소포제를 사용하였다. 이 연구에서 사용한 혼화제의 품질 특성은 다음 <표 2.2.103>에 나타낸 바와 같으며, 그 기본 특성은 제조회사에서 제시한 자료를 그대로 이용하였다. 혼화제의 최적 혼입률은 예비비빔 시험을 통해 결정하였으며, 그 사용량은 결합재(시멘트, 플라이애시, 고로슬래그 미분말)에 대한 중량비로 혼입하였다. 한편, 고연성 시멘트복합재료의 유동특성은 골재와 혼화재료 등의 영향이 다양하게 작용하기 때문에 그 특성이 명확히 밝혀지지 않고 있다. 이에 기존의 많은 연구에서는 콘크리트 또는 시멘트 페이스트의 유동특성을 시행착오에 의존하여 분석되어 왔다. 그러나 최근의 연구에 의하면 시멘트 페이스트의 유동 메커니즘이 입자 주변에 형성되는 정전기력과 더불어 수화반응 또는 혼화제에 의하여 형성된 반데르발스 인력에 의해 크게 좌우된다는 사실이 밝혀진 바 있다. 이러한 정전기력, 반데르발스 힘 등에 의한 입자 간 상호작용을 혼화제의 사용으로 조절함으로써 고연성 시멘트복합재료의 유동특성을 보다 합리적으로 향상 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

<표 2.2.103> 혼화제의 물리적 특성

	PCSP	HPMC	Defoamer(소포제)
밀도 (g/㎤)	0.37	0.60	0.26
형태	brownish powder	white powder	white powder

(나) Green SHCC 패널의 기본배합

설계기준 압축강도 30MPa급 SHCC 패널을 제조하기 위해 첫 배합설계과정으로 앞서 연구 수행하여 도출한 고연성 시멘트복합재료의 최적배합을 이용하였다. 그러나 Green SHCC 패널 개발에 기존 F급 플라이애시와 물성의 차이가 있는 C급 플라이애시를 사용하였기 때문에 이 절에서는 C급 플라이애시의 최적 혼입률을 결정하기 위한 예비비빔을 수행하였다. 플라이애시는 시멘트 질량의 각각 10%, 20%, 30%, 40%를 치환하여 사용하였으며, 동일한 유동특성을 확보할 수 있도록 사용되는 혼화제량을 결정하였다. 또한 F급 플라이애시와의 비교를 통해 C급 플라이애시의 사용으로 인한 강도증진 효과를 검토하였다. 다음 <표 2.2.104> 및 <표 2.2.105>에 기본비빔 배합을 나타내었다. 최대용량 12ℓ인 강제식 믹서를 이용하여 ϕ 100×200mm 압축공시체를 제작하여 재령 1일, 3일, 7일 및 28일의 압축강도를 「KS F 2405 콘크리트의 압축 강도 시험 방법」 규정에 근거하여 평가하였다.

<표 2.2.104> 예비비빔 실험 배합표(F급 플라이애시 사용)

배합 종류	W/B (%)	FA/B (%)	Slag/B (%)	단위량(kg/㎥)								
				W	B	C	FA	Slag	S	PC SP	HP MC	Defo amer
F.10	45	10	25	375	833	542	83	208	813	0.75	0.75	0.75
F.20	45	10	25	375	833	458	167	208	781	1.13	0.75	0.75
F.30	45	10	25	375	833	375	250	208	750	1.88	0.75	0.75
F.40	45	10	25	375	833	333	292	208	718	5.3	0.75	0.75

* 여기서, B는 결합재(C+FA+Slag), W/B는 물-결합재비, W는 물, C는 시멘트, S는 잔골재, FA는 F급 플라이애시, Slag는 고로슬래그 미분말을 나타냄.

<표 2.2.105> 예비비빔 실험 배합표(C급 플라이애시 사용)

배합 종류	W/B (%)	FA/B (%)	Slag/B (%)	단위량(kg/㎥)								
				W	B	C	FA	Slag	S	PC SP	HP MC	Defoa mer
C.10	45	10	20	375	833	542	83	208	813	0.8	0.75	0.75
C.20	45	10	20	375	833	458	167	208	781	1.2	0.75	0.75
C.30	45	10	20	375	833	375	250	208	750	1.9	0.75	0.75
C.40	45	10	20	375	833	333	292	208	718	5.5	0.75	0.75

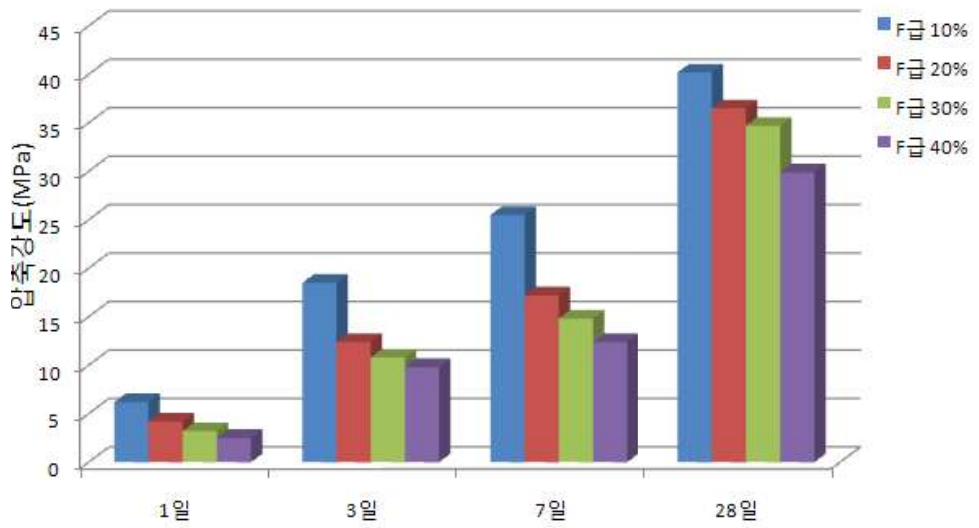
* 여기서, B는 결합재(C+FA+Slag), W/B는 물-결합재비, W는 물, C는 시멘트, S는 잔골재, FA는 C급 플라이애시, Slag는 고로슬래그 미분말을 나타냄.

플라이애시 종류에 따른 3개의 시험체에 대한 평균 압축강도 결과를 다음 <표 2.2.106>에 나타내었다. 또한 재령에 따른 F급 플라이애시 사용 시험체의 압축강도 결과를 <그림 2.2.250>에 나타내었으며, C급 플라이애시 사용 시험체의 압축강도 결과를 <그림 2.2.251>에 나타내었다.

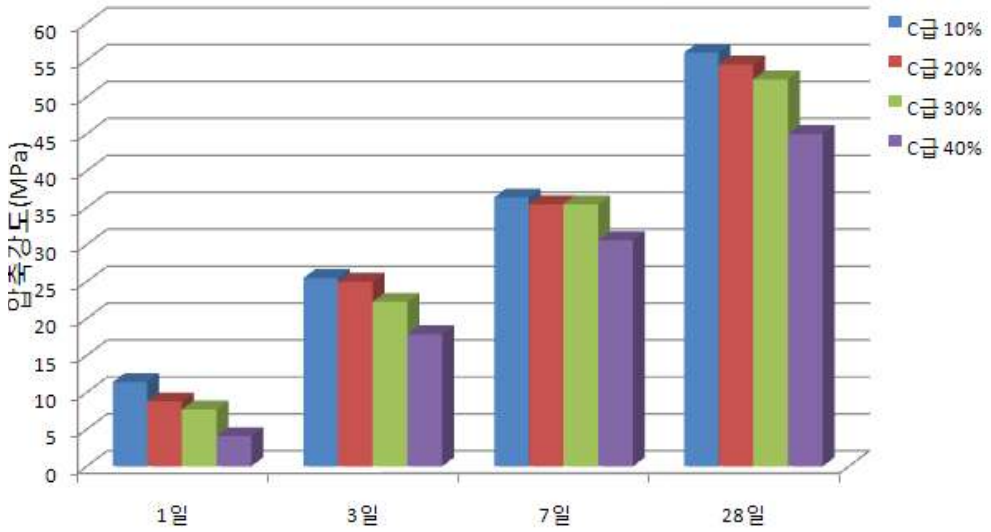
플라이애시 종류 및 혼입률에 따른 압축강도 시험결과 C급 플라이애시 사용은 F급 플라이애시 사용에 비해 초기강도뿐만 아니라 재령에 따른 전반적인 강도를 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

<표 2.2.106> 예비비빔 실험 압축강도 및 유동특성 결과 (30MPa급)

배합 종류	F급 시험체 압축강도 (MPa)				C급 시험체 압축강도 (MPa)			
	1일	3일	7일	28일	1일	3일	7일	28일
10%	6.2	18.5	25.5	40.2	11.4	25.5	36.4	56.0
20%	4.2	12.4	17.2	36.5	8.8	25.0	35.5	54.4
30%	3.2	10.8	14.8	34.7	7.7	22.3	35.5	52.4
40%	2.5	9.8	12.4	29.9	4.1	17.9	30.6	45.0



<그림 2.2.250> 재령에 따른 F급 플라이애시 압축강도 결과



<그림 2.2.251> 재령에 따른 C급 플라이애시 압축강도 결과

C급 플라이애시 혼입률 10%, 20%, 30%, 40%의 경우 재령 1일의 초기강도는 F급 플라이애시 시험체에 비해 최대 약 1.84배, 2.1배, 2.4배, 1.64배의 강도향상 효과가 있는 것으로 나타났으며, 3일 강도는 최대 약 1.37배, 2.0배, 2.1배, 1.82배의 강도의 증진이 있는 것으로 나타나 C급 플라이애시의 사용은 플라이애시의 사용으로 인한 초기강도 저하를 우수하게 증진시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 플라이애시를 구성하는 CaO 성분이 F급 플라이애시에 비해 C급 플라이애시에 다량 함유되어 있어 수화반응으로 인한 조기강도 향상에 크게 기여한 것으로 판단된다.

한편, C급 플라이애시 혼입률에 따른 압축강도 결과를 분석해 보면 그 혼입률이 증가할수록 모든 재령에서 강도저하가 발생하는 것으로 나타났다. 특히 1일, 3일에 해당하는 조기강도의 저하가 28일 재령의 강도보다 저하되는 현상이 크게 발생됨을 알 수 있으며, C급 플라이애시에 비해 F급 플라이애시를 사용한 시험체에서 더욱 뚜렷한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 조기강도를 확보해야 하는 precast 공법을 고려해 볼 때 C급 플라이애시 사용은 SHCC 패널의 강도를 효과적으로 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

C급 플라이애시 혼입률에 따른 압축강도 결과를 고려해 볼 때 10%~30%까지 대체해도 재령에 따른 강도 저하가 미미한 것으로 나타났다. 그러나 플라이애시 대체율 40%일 경우 재령에 따른 강도가 확연하게 저하되는 것으로 나타나고 유동성 확보를 위해 사용되는 유동화제의 양이 급격히 증가하는 결과를 미루어 볼 때 강도의 확보도 가능하면서 경제적으로 SHCC 패널을 제조하기 위한 C급 고칼슘 플라이애시 사용량은 최대 30%인 것으로 나타났다. 따라서 위 결과를 종합해 볼 때 Green SHCC 패널 제조에 C급 플라이애시 대체율은 30%가 가장 적합한 배합으로 판단되므로 다음절에서는 C급 고칼슘 플라이애시 대체률을 30%로 결정하고 압축강도, 휨강도, 인장강도 및 유동성 등의 특성을 확보하기 위한 기초배합 연구를 수행하였다

(3) Green SHCC 패널의 수정배합

(가) 개요

앞 절에서는 고칼슘 플라이애시의 혼입률을 결정하기 위한 연구를 수행하였고, 시멘트 대체재료로 활용하여 성능저하가 최소로 발생되는 최적 혼입률 30%를 도출하였다. 앞 절에서 수행한 연구 결과를 바탕으로 이 절에서는 본 연구의 Green SHCC 패널의 목표성능을 만족시킬 수 있는 배합을 도출하기 위한 연구를 수행하였다. 고칼슘 플라이애시 30% 대체 시험체의 압축강도가 50MPa를 상회하는 것으로 나타났다. 이 연구의 Green SHCC 패널의 압축강도와 비교할 경우 성능을 훨씬 뛰어 넘는 압축강도를 나타내는 배합이므로 이를 수정할 필요가 있을 것으로 사료된다. 따라서 이 절에서는 Green SHCC 패널의 압축강도를 단위수량 및 물/결합재비를 조절함으로써 목표성능과 유사한 성능을 나타낼 수 있는 Green SHCC 패널의 배합을 도출하기 위한 연구를 수행하였다.

(나) Green SHCC 패널 수정배합 I

① 사용재료

Green SHCC 패널을 제조하기 위한 사용재료는 다음과 같다. 주 결합재로는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 골재로는 평균입경 150㎛의 규사를 사용하였으며. 시멘트 대체재로 C급 고칼슘 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 또한 Green SHCC 패널의 유동특성을 확보하기 위해 고성능 감수제를 사용하였고, 보강용 PVA 섬유의 분산성 확보를 위해 셀룰로스계 분리저감제를 사용하였다. 또한 의도하지 않은 기포의 발생을 저감하여 Green SHCC 패널 표면 기포 발생 및 표면을 개선하기 위해 소포제를 사용하였다. 이 연구에서 사용한 재료의 물리/화학적 특성은 다음 <표 2.2.95> ~ <표 2.2.102>에 나타낸 바와 같다.

따라서 이 절에서는 Green SHCC 패널의 유동성 및 섬유분산성 시멘트 사용량을 최소로 할 수 있고, 목표강도에 부합할 수 있는 수정배합을 결정하기 위한 연구를 수행하였다. 다음 <표 2.2.107>은 물/결합재비를 증가시켜 Green SHCC 패널의 강도를 저하시킨 배합을 나타낸다.

<표 2.2.107> Green SHCC 패널 수정 배합표

배합 종류	W/B (%)	FA/B (%)	Slag/B (%)	단위량(kg/㎥)								
				W	B	C	FA	Slag	S	PC SP	HP MC	Defoamer
No.1	48	30	25	375	781	352	234	195	800	0.6	0.75	0.75
No.2	50	30	25	375	750	338	225	188	829	1.0	0.75	0.75
No.3	55	30	25	375	682	307	205	170	895	1.5	0.75	0.75

* 여기서, B는 결합재(C+FA+Slag), W/B는 물-결합재비, W는 물, C는 시멘트, S는 잔골재, FA는 C급 플라이애시, Slag는 고로슬래그 미분말을 나타냄.

② 압축강도 시험

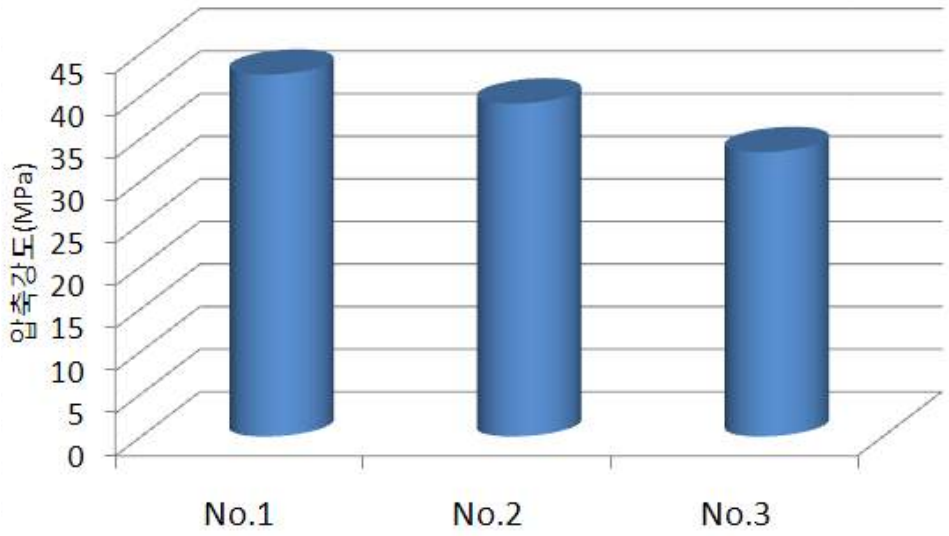
Green SHCC 패널의 1차 수정배합에 대한 역학적 성능을 검증하기 위하여 압축강도 실험을 수행하였다. 먼저 실험체 제작은「KS F 2403 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법」규정에 근거하였으며, Φ100 mm × 200 mm의 원주형 공시체를 제작하였다. 실험 방법은「KS F 2405 콘크리트의 압축 강도 시험 방법」규정에 근거하여 재령 28일에 Φ100 mm × 200 mm의 원주형 공시체에 대하여 압축강도 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 기기는 만능재료시험기이며<그림 2.2.252> 실험시 하중은 0.005mm/sec의 속도로 변위제어를 하였으며, 하중은 2450kN 용량의 로드셀을 통하여 측정하였다.



<그림 2.2.252> 압축강도 시험 전경

③ 압축강도 시험 결과

물/결합재비 변화에 따른 Green SHCC 패널의 재령 28일 압축강도 시험 결과를 다음 <표 2.2.108>, 및 <그림 2.2.253>에 나타내었다. 물/결합재비가 증가될수록 압축강도의 저하가 발생되는 것을 알 수 있으며, 3가지 배합 모두 연구목표 강도인 30MPa를 상회하는 것으로 나타났다. 목표 강도에 가장 적절한 배합은 No.3인 것으로 나타났으나, 사용되는 고성능 감수제양이 급격히 증가하기 때문에 적절하지 않은 것으로 판단된다. 따라서 NO.2의 배합에서 단위수량을 증가시켜 본 연구의 목표 강도에 부합하는 배합을 결정하기 위한 연구를 수행하였다.



<그림 2.2.253> 수정배합 I 의 압축강도 시험 결과

<표 2.2.108> 수정배합 I 의 압축강도 시험 결과

배합 종류	수정배합 시험체 압축강도 (MPa)
	28일
No.1	42.5
No.2	39.1
No.3	33.4

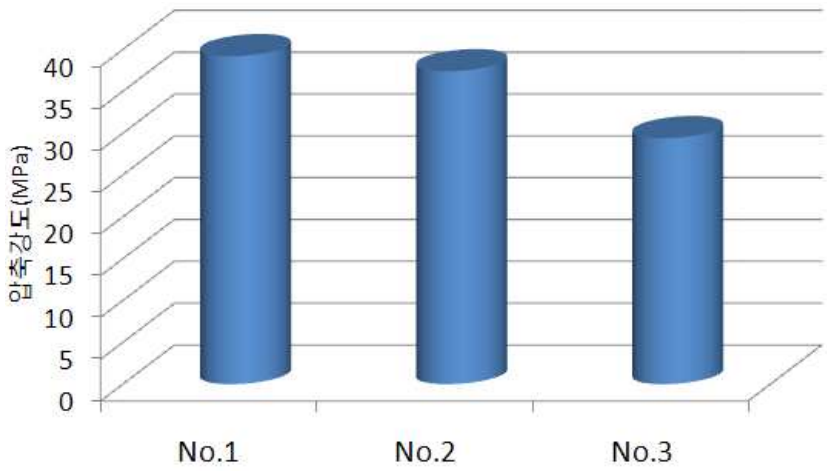
(다) Green SHCC 패널 수정배합 II

물/결합재비 변화에 따른 Green SHCC 패널의 수정배합을 바탕으로 이 절에서는 단위수량의 조절을 통해 Green SHCC 패널 제조에 적합한 최적 배합을 결정하기 위한 연구를 수행하였다. 물/결합재비을 50%로 고정하여 단위수량을 10kg/m^{3}씩 증가시켜 목표강도를 만족하고 사용되는 고성능 감수제양을 최적화 하도록 계획하였다. 다음 <표 2.2.109>에 수정배합 II의 배합표를 나타내었다. 압축강도 시험은 앞서 수행한 방법과 동일하게 수행하였으며, 다음 <그림 2.2.254> 및 <표 2.2.110>에 압축강도 시험 결과를 나타내었다.

<표 2.2.109> Green SHCC 패널 수정 배합표

배합 종류	W/B (%)	FA/B (%)	Slag/B (%)	단위량(kg/㎥)								
				W	B	C	FA	Slag	S	PC SP	HP MC	Defo amer
No.1	50	30	25	385	770	347	231	193	784	0.8	0.75	0.75
No.2	50	30	25	395	790	356	237	198	739	0.6	0.75	0.75
No.3	50	30	25	405	810	365	243	203	694	0.5	0.75	0.75

* 여기서, B는 결합재(C+FA+Slag), W/B는 물-결합재비, W는 물, C는 시멘트, S는 잔골재, FA는 C급 플라이애시, Slag는 고로슬래그 미분말을 나타냄.



<그림 2.2.254> 수정배합 II의 압축강도 시험 결과

<표 2.2.110> 수정배합 II 의 압축강도 시험 결과

배합 종류	수정배합 시험체 압축강도 (MPa)
	28일
No.1	39.2
No.2	35.5
No.3	29.7

압축강도 시험결과 단위수량이 증가할수록 강도의 저하가 관찰되었다. No.1 및 No.2 배합이 이 연구의 목표강도를 만족시키는 것으로 나타났으나 No.3배합은 30MPa 이하의 특성을 나타내 Green SHCC 패널을 제조하기 위한 적절하지 않은 배합이라고 판단된다. 또한 No.2 배합에서 사용되는 고성능 감수제의 양이 No.1의 그것보다 작기 때문에 최종적으로 Green SHCC 패널 제조에 No.2 배합이 가장 적절한 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 No.2 배합을 Green SHCC 패널을 제조하기 위한 최적배합으로 결정하였고, 이 배합을 precast화 공법에 적용하기 위해 다양한 양생방법에 적용하여 그 역학적 특성을 검토하기 위한 연구를 수행하였다.

(4) Precast Green SHCC 패널 성형을 위한 양생기법 도출

(가) 개요

시멘트, 골재, 물 등의 복합적인 재료의 조합인 콘크리트 및 시멘트 복합체는 수경성인 시멘트와 물의 수화반응으로 경화된다. 수화반응은 충분한 수분과 열이 존재하는 조건하에서 시간에 경과에 따라 진행되므로 주변 환경에 의한 수분 손실과 열 손실을 제한하지 않으면 콘크리트의 수화반응이 적절하게 이루어지지 않아 강도에 영향을 끼친다. 포괄적인 의미에서의 양생이란 적절한 온도와 수분을 유지하여 타설한 콘크리트 내부의 혼합물 사이에서 수화반응을 일으키도록 하는 것으로 수화반응 뿐만 포졸란 반응 등 콘크리트 혼합물의 잠재적 물성이 발현되도록 취하는 조치를 의미한다. 양생의 목적은 콘크리트의 수분 손실과 온도 손실을 방지하는 것으로 필요한 경우 충분한 수분을 주기적으로 공급하고 온도를 유지하도록 하는 것이다. 양생을 거친 콘크리트는 표면의 균열과 같은 외부에서 보이는 유관상의 물성뿐 아니라 투수성, 내마모성, 동결융해, 화학 저항성과 같은 내구성 및 강도와 같은 굳은 콘크리트의 물성이 양생을 거치지 아니한 콘크리트 보다 유리하다. 만일, 낮은

물-결합재비 0.4이하인 배합에서 양생을 충분히 하지 않는다면 시멘트와 물의 수화반응이 진행됨에 따라 내부에서부터 수분이 손실되어 장기강도의 증진에 부정적인 영향을 끼치게 된다.

(나) 양생 방법

① 일반적인 양생

콘크리트 타설 직후부터 양생 기간 동안, 급격한 건조 및 극단적인 온도 조건, 심한 온도 변화, 기계적 손상, 강우 및 유수로 인한 손상으로부터 콘크리트를 보호하여야 하며, 콘크리트의 물성은 양생재료나 방법에 관계없이, 충분한 수분의 공급과 적당한 온도의 유지되어야만 나타난다. 콘크리트 타설 후 수분과 온도를 제어하기 위한 여러 가지 방법이 있으나, 이러한 방법들은 모두 경제성, 효용성이 같지 않으며, 콘크리트의 배합, 사용되는 양생재료, 작업방법, 기후조건 등 여러 가지 환경조건에 따라 달라진다. 양생 시스템에서는 침수 및 분무, 스팀, 방수포와 부직포, 모래, 지푸라기 등의 피복재료를 사용하거나, 불투수시트나 액상 피막 형성제와 같이 콘크리트 표면의 수분 유지를 위한 양생재료 등이 있다. 이러한 콘크리트의 적절한 양생 및 보호를 위한 양생재료들은 콘크리트 타설 이전에 현장에 준비해 두어야 하며, 어떠한 경우에도 콘크리트는 용접을 포함한 불과 지나는 열에 직접 접촉하지 않도록 해야 한다.

② 초기양생

초기양생이란 콘크리트 타설 직후부터 최종 마감 사이에 이루어지는 양생절차를 의미하며, 콘크리트 표면에서의 수분 손실을 감소시키기 위하여 실시한다.

◎ 분무

외기온도가 동결온도보다 높을 때 사용하는 양생방법으로 콘크리트 표면건조를 방지하는 매우 효과가 있다. 분무는 노즐이 물을 안개 형태로 방출하도록 설계하여 비용을 적게 하는 것이 좋으며, 공기 중 습도를 높이고 증발 속도를 낮추기 위한 양생방법 이므로 콘크리트 표면에 직접 살포하지 않고 콘크리트 표면의 직상부에서 물의 분사가 이루어져야 한다. 분무의 효과는 콘크리트 상부의 공기에 안개가 형성되어 있을 동안만 지속되므로, 분무를 지속적으로 할 필요가 있다. 이외에도 분무는 물이 타설된 콘크리트 표면에서의 응집을 감소시키는 효과도 있으며, 표면에 직접적으로 뿌리는 방법이 아니기 때문에 분무기에서 나오는 물에 의해 콘크리트 표면이 손상되는 문제를 방지 할 수 있다. 분무로 인하여 생기는 물은 후속 마감작업 시 표면에 남아있지 않아야 하며, 마감 전에 제거하거나 증발되도록 한다.

◎ 액상 증발억제제

증발억제제는 아직 굳지 않은 콘크리트 표면위로 물이 올라오는 블리딩 위에 단분자 구조의 막을 형성할 수 있는 유기화학물이다. 이러한 화학물이 충분하면 콘크리트 표면의 블리딩의 증발속도를 늦추는 효과적인 막이 형성된다. 증발억제제를 타설된 콘크리트 위에 살포하게 되면 증발속도가 블리딩 속도와 같거나 클 때의 수축의 위험을 감소시킬 수 있다. 이러한 증발억제제를 콘크리트 표면 마감을 쉽게 하기 위한 목적으로 사용할 수 없으며, 제조자의 사용설명에 의해 사용되야 한다.

◎ 최종양생방법 (습윤양생)

최종양생은 콘크리트가 최종응결에 도달한 다음 콘크리트의 원하는 물성을 얻을 때 까지 시행되는 양생을 의미한다. 이때, 연속적인 습윤상태를 유지하여야 하며, 그 방법으로는 콘크리트에 수분을 공급하는 방법(살수양생, 수중양생, 습표양생 등)과 수분이 증발하는 것을 방지하는 방법(피막양생 등)이 있다. 콘크리트가 최종응결에 이르기 전에 콘크리트 표면을 마감작업 할 경우에는 최종양생을 너무 일찍 시행하게 되어 타설된 콘크리트에 손상을 줄 수 있다.

③ 최종 양생

최종양생은 콘크리트가 최종응결에 도달한 다음 콘크리트의 원하는 물성을 얻을 때 까지 시행되는 양생을 의미한다. 이때, 연속적인 습윤상태를 유지하여야 하며, 그 방법으로는 콘크리트에 수분을 공급하는 방법(살수양생, 수중양생, 습표양생 등)과 수분이 증발하는 것을 방지하는 방법(피막양생 등)이 있다. 콘크리트가 최종응결에 이르기 전에 콘크리트 표면을 마감작업 할 경우에는 최종양생을 너무 일찍 시행하게 되어 타설된 콘크리트에 손상을 줄 수 있다.

④ 촉진 양생

콘크리트의 수화반응은 열과 수분을 필요로 하는 반응이다. 이때, 열과 수분을 공급하여 수화반응을 촉진시켜 보다 짧은 시간동안 콘크리트의 물성을 얻을 수 있는 양생방법을 촉진양생이라고 한다. 이러한 촉진양생은 수화반응의 촉진에 의하여 콘크리트의 물성을 조기발현 하지만, 실제 구조물을 촉진양생 시키는 것은 불가능 하여 콘크리트 2차 제품들을 생산할 때 주로 이용되는 방법이다. 이러한 촉진양생에는 대기압을 유지하면서 콘크리트 주변을 증기로 감싸는 상압증기양생과 증기와 동시에 높은 압력을 가하는 고압증기양생이 있다.

◎ 상압 증기양생

콘크리트 주변에 증기를 내보내어 습윤 상태로 가열하여 콘크리트의 경화를 촉진시키는 양생 방법으로 대기압을 유지하기 때문에 상압증기양생이라 하며, 콘크리트 제품의 제조 및 한중콘크리트 시공에서 이용된다. 콘크리트의 양생온도를 높이면 수화반응의 촉진으로 강도 증진의 속도가 증가하여 콘크리트의 강도가 급속하게 증진한다. 증기양생은 각종의 포틀랜드시멘트에 이용하면 좋은 결과를 나타내지만 알루미나시멘트에서는 고온습윤 조건은 시멘트의 강도에 불리한 영향을 주기 때문에 이용해서는 안 된다. 물-시멘트비가 낮은 콘크리트는 빈배합보다 증기양생에 대한 효과가 크다. 증기양생의 첫 번째 목적은 콘크리트 타설 후 빠른시간에 제품을 취급할 수 있도록 충분히 높은 강도를 조기에 얻는데 있다. 즉 보통의 습윤양생보다 조기에 우수한 강도를 얻을 수 있어 거푸집의 탈형이나 프리스트레싱용 제작대로부터의 철거 등의 여러 경우에 보다 짧은 시간에 작업 할 수 있는 장점이 있다. 따라서 양생과 보관의 공간을 작게 할 수 있는 등의 부가적인 이유까지 가지고 있어 경제적으로 유리하다. 이러한 증기양생은 대부분 장기강도를 그다지 응요시하지 않으며, 주로 프리캐스트 제품에 이용된다. 하지만 양생에서 경화의 조기단계에서의 온도는 후기 재령에서의 강도에 영향을 미치므로 조기의 강도는 물론 장기강도도 고강도로 얻을 수 있는 적합한 온도를 선정할 필요가 있다.

◎ 고압증기양생

이 방법은 증기를 주는 방법이나 만들어진 제품의 성질도 상압증기양생과는 전혀 다르다. 대기압을 초과하는 압력이 필요하기 때문에 양생실은 수증기를 공급할 수 있는 압력용기형식으로 할 필요가 있다. 즉 과열증기가 콘크리트에 접촉해서는 안되므로 여분의 물이 필요하다. 이와 같은 용기를 오토클레이브(Autoclave)라 하며, 고압증기를 이용하여 양생하는 고압증기양생을 오토클레이브 양생이라고도 한다. 고압증기양생은 최초의 규산석회벽돌을 만들 때 이용된 것으로 현재에도 같은 용도에 널리 이용되고 있다. 콘크리트 분야에서의 고압증기양생은 보통 다음과 같은 성질이 요구되는 프리캐스트 콘크리트(Precast concrete)에 이용된다.

- 높은 조기강도 : 고압증기양생은 표준양생의 28일 강도를 약 24시간 만에 달성할 수 있다.
- 좋은 내구성 : 고압증기양생은 황산염이나 기타 화학적 침식성 화합물 및 동결융해에 대한 콘크리트의 저항력과 백화현상을 감소시킬 수 있다.
- 건조수축과 수분이동의 감소

(다) Precast Green SHCC 패널 양생기법

이 절에서는 앞서 조사한 양생기법을 바탕으로 Green SHCC 제조에 있어 가장 효과적이고 우수한 성능을 나타낼 수 있는 양생기법을 도출하고자 한다. precast 공법에 있어 적용 대상물의 초기강도 확보가 가장 필요한 요구사항이다. Green SHCC 패널 역시 2차 제품으로 사용하기 위해서는 조기강도 확보가 필수적이며, 고연성 및 우수한 인장변형성능을 나타내는 그 특징을 확보해야 한다. 이는 시멘트 매트릭스와 보강용 합성섬유 경계면의 특징이 일반적으로 물속에서 양생하는 수중양생의 특성과 비교해 볼 때 성능저하가 발생하지 않도록 하는 것이 무엇보다 중요한 사항이 된다. 따라서 이 절에서는 앞서 조사한 기건양생, 습윤양생, 증기양생 3가지 양생법을 precast Green SHCC 패널에 적용하여 그 특성을 평가하고자 하였다. 가장 일반적으로 사용하는 습윤양생을 기본 양생조건으로 설정하고 기건양생 및 증기양생을 통해 제작된 Green SHCC 패널의 강도 및 인장특성을 비교/평가하였다. 동일한 배합조건으로 압축강도 시험체, 휨 강도, 직접인장 시험체를 제작하였고, 양생방법 및 재령에 따른 시험체의 특성을 실험을 통해 비교하여 precast Green SHCC 패널에 가장 적합한 양생조건을 도출하고자 한다. Green SHCC 패널을 제조하기 위한 사용재료는 다음과 같다. 주 결합재로는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 골재로는 평균입경 150㎛의 규사를 사용하였으며. 시멘트 대체재로 C급 고칼슘 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 또한 Green SHCC 패널의 유동특성을 확보하기 위해 고성능 감수제를 사용하였고, 보강용 PVA 섬유의 분산성 확보를 위해 셀룰로스계 분리저감제를 사용하였다. 또한 의도하지 않은 기포의 발생을 저감하여 Green SHCC 패널 표면 기포 발생 및 표면을 개선하기 위해 소포제를 사용하였다. 이 연구에서 사용한 재료의 물리/화학적 특성은 전술 한 바와 같다. 앞서 수행한 연구를 통하여 Green SHCC 패널을 제조하기 위한 최적배합을 도출하였고, 그 배합표를 다음 <표 2.2.111>에 나타내었다.

<표 2.2.111> Green SHCC 패널 수정 배합표

최적 배합	W/B (%)	FA/B (%)	Slag/ B (%)	단위량(kg/㎥)								
				W	B	C	FA	Slag	S	PC SP	HP MC	Defo amer
Mix.	50	30	25	395	790	356	237	198	739	0.6	0.75	0.75

* 여기서, B는 결합재(C+FA+Slag), W/B는 물-결합재비, W는 물, C는 시멘트, S는 잔골재, FA는 C급 플라이애시, Slag는 고로슬래그 미분말을 나타냄.

precast Green SHCC 패널 개발을 위해 이 연구에서는 다음과 같이 최적배합을 도출하였다. 위 배합은 고로슬래그 미분말 및 고칼슘 플라이애시를 시멘트 사용량의 25%, 35%로 각각 치환한 배합이다. 플라이애시 치환률이 증가할수록 Green SHCC 패널의 압축강도가 저하되는 것을 앞서 수행한 연구를 통해 관찰할 수 있었으며, 고칼슘 플라이애시 30%를 혼입한 배합이 이 연구에서 설정한 목표강도 30MPa를 상회하는 것으로 나타났다. 그러나 위 연구결과는 Green SHCC 패널 배합이 습윤양생을 통해 도출된 결과이므로 기건양생 및 증기양생 등 양생기법을 변화할 경우 그 역학적 특성이 변화될 수 있기때문에 <표 2.2.111>배합표를 기반으로 플라이애시 치환률을 10% ~ 40%까지 변화시켜 각 배합에 해당하는 압축강도, 휨강도, 직접인장강도 및 균열폭 등 역학적 특성을 평가하고자 한다. 또한 조기강도확보를 위해 사용된 고칼슘 플라이애시와의 비교를 위해 F급 플라이애시를 사용한 배합에 대해서도 동일한 실험체를 제작하여 그 역학적 특성을 비교/분석하였다.

(5) 양생조건에 따른 Precast Green SHCC 패널 성능평가

(가) 양생조건

① 기건양생

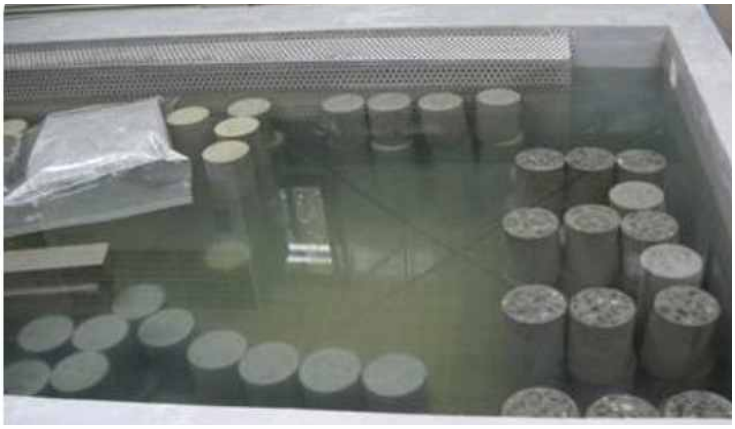
Green SHCC 패널 시험체의 역학적 특성을 평가하기 위해 이 연구에서 적용한 기건양생 방법으로 KS 등 가장 일반적으로 사용되고 있는 방법을 적용하였다. 시험체 타설 후 재령 1일에 탈형하여 항온/항습 챔버를 이용하여 온도를 20±1℃로 조절하고 습도 90%를 유지하였다. 각 시험에 해당하는 재령까지 항온/항습 챔버에 시험체를 보관하였다. 다음 <그림 2.2.255>는 이 연구에서 사용한 항온/항습 챔버이다.



<그림 2.2.255> 기건양생 전경

② 습윤양생

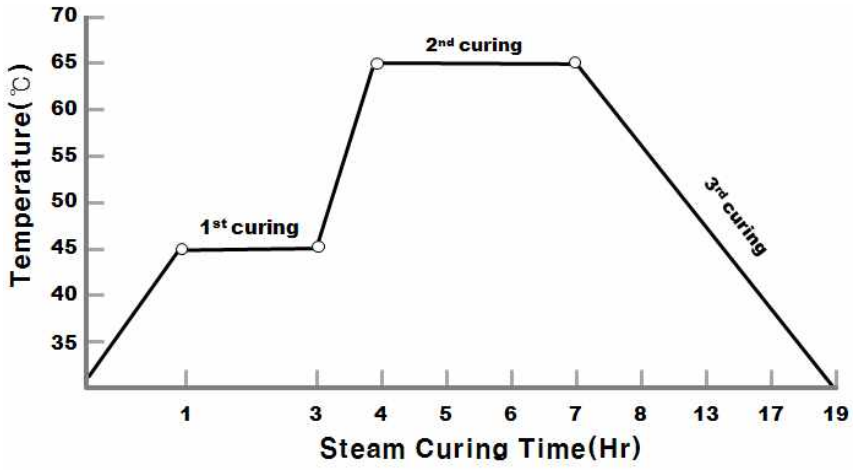
수중양생을 위해 이 연구에서는 급격한 수온변화로 인하여 온도충격이나 온도구배로 인한 응력발생을 최소화하기 위해 양생수의 온도를 항상 20±2℃로 유지할 수 있는 수중양생 챔버를 이용하였다. 또한 양생수를 펌프를 이용하여 순환시켜 수중양생 되는 시험체의 온도편차가 최소화 되도록 하였다. 또한 사용된 양생수는 일반적으로 먹을 수 있는 물을 사용하였으며, 콘크리트 잔분으로 오염되는 것을 방지하기 위해 2주에 한번씩 양생수를 교체하였다. 습윤양생 시험체는 재령에 따른 역학시험시 표면의 물기를 제거하기 위해 3시간 건조후 시험을 실시하였다. 다음 <그림 2.2.256>에 이 연구에서 사용한 수중양생 챔버를 나타내었다.



<그림 2.2.256> 습윤양생 전경

③ 증기양생

Green SHCC 패널 시험체의 증기양생을 위해 사용된 챔버는 기건양생을 위해 사용된 항온/항습 챔버를 사용하였다. 다음 <그림 2.2.257>에 나타낸 바와 같이 증기양생을 위해 온도를 45℃ 2시간으로 먼저 유지시키는 1차양생과 그 후 온도를 상승시켜 3시간을 65℃로 양생하는 2차양생과 2차양생 후 약 12시간 자연온도 하강하는 3차양생을 통해 시험체 제작을 완료하였다. 이때의 습도는 99%가 되도록 유지하였다. 증기양생 시험체는 타설과 동시에 챔버로 운반하여 양생을 시작하였으며, 이러한 양생과정을 거쳐 재령 1일이 되는 시점에서 역학 시험을 수행하였다.



<그림 2.2.257> 증기양생 온도 및 시간

(나) Green SHCC 패널 역학 시험

① 시험개요

이 절에서는 앞 절에서 연구 수행하여 도출한 최적배합을 바탕으로 제작된 Green SHCC 패널을 이용하여 양생방법과 양생 재령 등의 변수에 따른 압축강도시험, 직접인장실험, 휨강도시험을 실시하여 역학적 특성을 평가하였다. 또한 Green SHCC 패널에 있어 균열제어 특성을 평가하기 위해 각 시험에 대하여 시험중 시험체에 발생하는 균열 발생 패턴을 평가하였다. 고칼슘 플라이애시(C급)과 F급 플라이애시를 시멘트 중량의 10% ~ 40% 치환한 배합을 이용하였고, 양생방법에 따른 역학적 특성을 비교/평가하였다.

다음 <표 2.2.112>~<표 2.2.113>에 양생기법에 따른 Green SHCC 패널의 특성을 평가하기 위한 배합을 제시하였고, 역학적 특성을 평가하기 위한 연구를 수행하였다.

<표 2.2.112> 플라이애시 치환률에 따른 배합표 (C급 플라이애시 사용)

배합 종류	W/B (%)	FA/B (%)	Slag/B (%)	단위량(kg/㎥)								
				W	B	C	FA	Slag	S	PC SP	HP MC	Defoamer
C.10	50	10	25	405	810	427	81	203	755	0.5	0.75	0.75
C.20	50	20	25	405	810	446	162	203	725	0.5	0.75	0.75
C.30	50	30	25	405	810	365	243	203	694	0.6	0.75	0.75
C.40	50	40	25	405	810	284	324	203	663	1.5	0.75	0.75

* 여기서, B는 결합재(C+FA+Slag), W/B는 물-결합재비, W는 물, C는 시멘트, S는 잔골재, FA는 C급 플라이애시, Slag는 고로슬래그 미분말을 나타냄.

<표 2.2.113> 플라이애시 치환률에 따른 배합표 (F급 플라이애시 사용)

배합 종류	W/B (%)	FA/B (%)	Slag/B (%)	단위량(kg/㎥)								
				W	B	C	FA	Slag	S	PC SP	HP MC	Defoamer
C.10	50	10	25	405	810	427	81	203	755	0.5	0.75	0.75
C.20	50	20	25	405	810	446	162	203	725	0.5	0.75	0.75
C.30	50	30	25	405	810	365	243	203	694	0.6	0.75	0.75
C.40	50	40	25	405	810	284	324	203	663	1.5	0.75	0.75

* 여기서, B는 결합재(C+FA+Slag), W/B는 물-결합재비, W는 물, C는 시멘트, S는 잔골재, FA는 C급 플라이애시, Slag는 고로슬래그 미분말을 나타냄.

② 압축강도 시험

압축강도 시험용 공시체를 제작하기 위해 <그림 2.2.258>과 같이 최대용량 100 l 인 강제식 믹서를 이용하여 “KS F 2403 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법” 규정에 근거하여 ϕ100×200mm 압축공시체를 제작하였다. 각 원주형 공시체는 3개층으로 나누어 각 층을 25회씩 봉다짐 하였고, 제작 후 즉시 유리 덮개를 덮어 수분 증발을 방지하였다. 각 배합, 양생조건 및 재령에 대하여 각각 3개의 공시체를 제작하였으며, 표면을 연마하여 시험을 수행하였다. 압축시험에 사용된 기기는 <그림 2.2.259>에 나타낸 바와 같이 Instron 사의 만능재료시험기이며, 0.005mm/sec의 속도로 변위제어 방식으로 하중을 가력하였다. 하중은 2,450 kN 용량의 로드셀을 이용하여 측정하였다.



<그림 2.2.258> Green SHCC 믹싱 전경

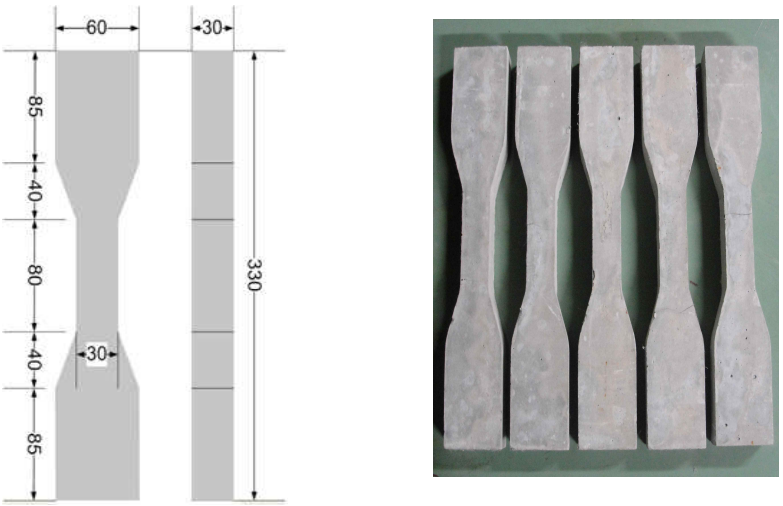


<그림 2.2.259> 압축강도 시험 전경

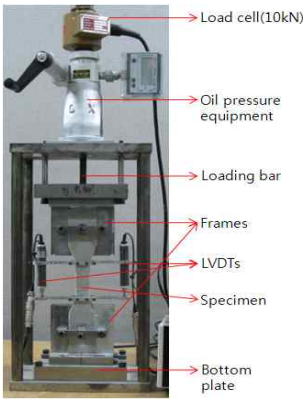
③ 직접인장 실험

Green SHCC 패널의 1축 인장 성능을 평가하기 위하여 직접인장 실험을 실시하였다. 실험체는 <그림 2.2.260>과 같이 단부의 파괴를 방지하면서 직접인장 실험체에 균일한 1축 인장 하중이 가해지도록 설계한 아령형상으로 제작하였다. 실험체는 양생 후 <그림 2.2.261>의 실험 장치를 이용하여 1축 인장을 가력하였다.

최대 용량 10kN의 로드셀을 이용하여 인장강도를 측정하였으며, 실험체 중앙부 80mm 좌 · 우 대칭인 구간에 10mm 변위계(LVDT)를 설치하여 인장강도 도입에 따른 실험체에 발생하는 실시간의 변위를 측정하였다. 인장강도와 변위는 인장응력과 변형률로 각각 환산하였으며, 인장응력(σ) - 변형률(ϵ) 관계를 그래프로 나타내어 변형률 경화거동을 평가하였다. 또한 초기 균열강도, 최대 인장강도, 최대 인장 변형률을 측정하였으며, 실험체에 발생되는 균열 형태를 파악하였다.



<그림 2.2.260> 직접인장 실험체



(a) 직접인장 실험 장비



(b)직접인장 실험 과정

<그림 2.2.261> 직접인장 실험 장치 및 실험 과정

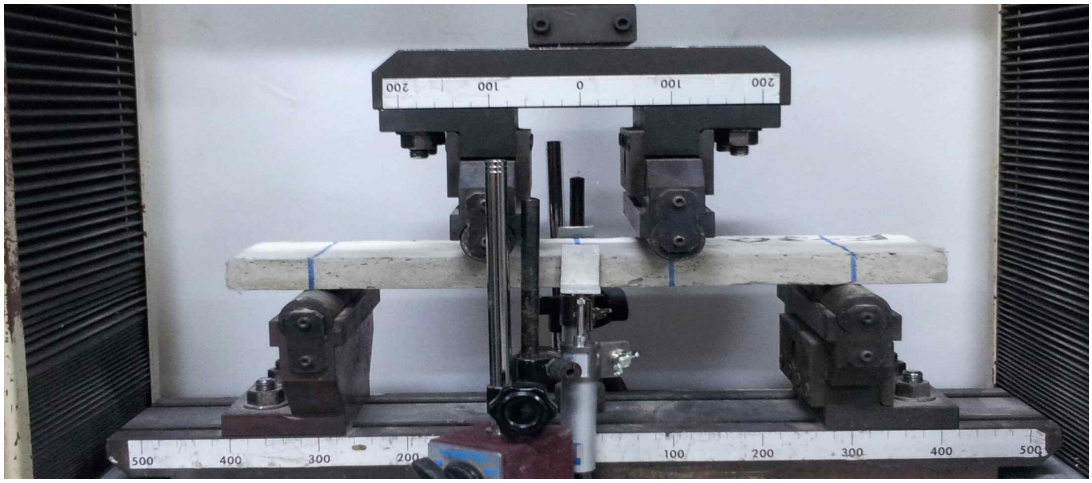
④ 휨 강도 시험

Green SHCC 패널의 처짐 및 연성의 특성을 보다 명확히 파악하기 위해 이 연구에서는 Green SHCC 패널의 형상을 <그림 2.2.262>와 같이 100×100×10 mm로 제작하여 양생을 실시한 다음 각 시험 재령일에 「KS F 2408 콘크리트의 휨 강도 시험 방법」 중 3등분점 재하에 준하여 실시하였다. 만능재료시험기를 사용하여 하중 가력을 실시하였으며 하중재하 속도는 0.8 mm/min으로 휨강도와 중앙부 처짐을 측정하였다. <그림 2.2.263>은 휨 실험장치 상세를 나타낸 것이며, 앞 뒤 2개의 10 mm 용량의 LVDT를 시험체에 부착하여 중앙부 처짐을 측정하였다.





<그림 2.2.262> 휨 강도 공시체 제작 과정

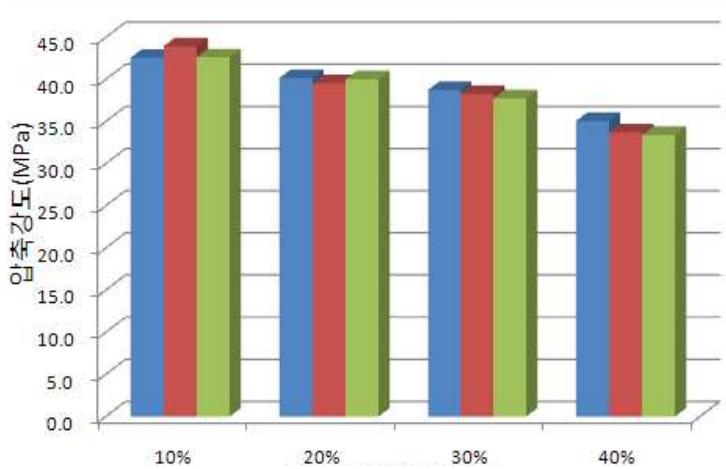


<그림 2.2.263> Green SHCC 패널의 휨 강도 실험장치 상세 (100×100×10 mm)

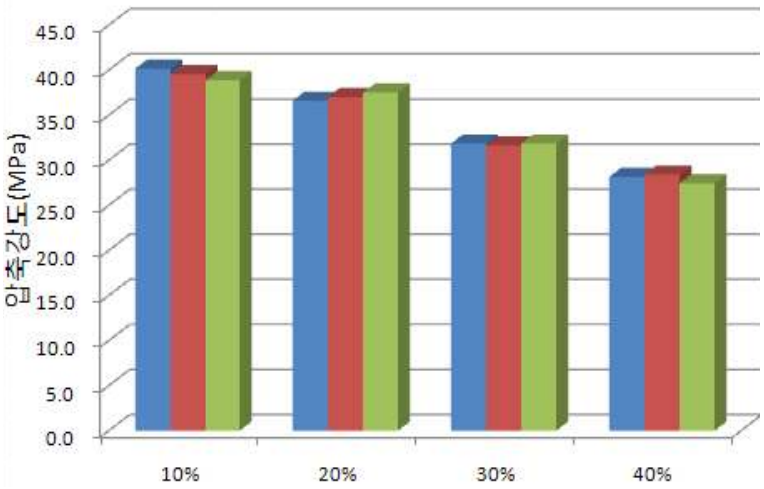
(다) Green SHCC 패널 역학 시험 결과 분석

① 압축강도 시험 결과 분석

고칼슘 플라이애시(C급) 및 F급 플라이애시 시멘트 치환율과 양생조건에 따른 Green SHCC 패널의 재령에 따른 압축강도 시험을 수행하였다. <그림 2.2.264> 및 <그림 2.2.265>는 습윤양생의 조건에서 C급 플라이애시와 F급 플라이애시 치환률에 따른 1축 압축 하에서 측정된 Green SHCC 패널 압축강도 시험체의 재령 28일의 압축강도 시험결과를 나타낸다. 또한 <표 2.2.114>에 시험결과를 나타내었다.



<그림 2.2.264> C급 플라이애시 혼입률에 따른 압축강도 결과



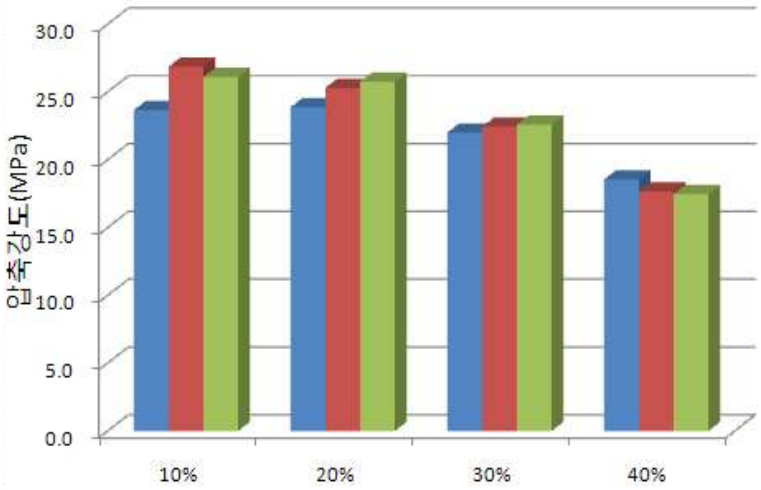
<그림 2.2.265> F급 플라이애시 혼입률에 따른
압축강도 결과

<표 2.2.114> 플라이애시 치환률에 따른 배합표 (C급 플라이애시 사용)

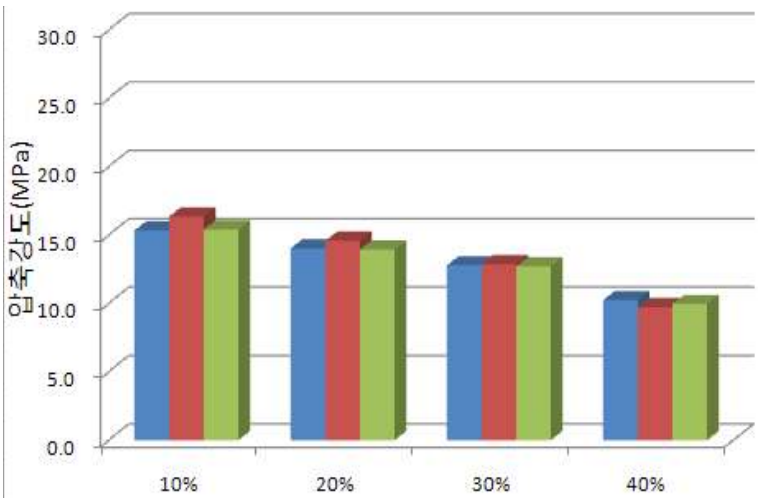
시험체명	specimen 1 (MPa)		specimen 2 (MPa)		specimen 3 (MPa)	
	C급	F급	C급	F급	C급	F급
10%	42.6	40.2	43.9	39.5	42.6	38.9
20%	40.2	36.6	39.5	37.0	40.0	37.5
30%	38.8	31.8	38.3	31.6	37.7	31.8
40%	35.1	28.2	33.7	28.4	33.4	27.4

시험결과를 통해 C급 플라이애시와 F급 플라이애시 치환률이 증가될수록 Green SHCC 패널의 압축강도가 저하되는 것을 알 수 있다. C급 플라이애시 치환률 10% ~ 40%의 경우 모두 이 연구에서 설정한 목표강도를 만족하는 것으로 나타났지만, F급 플라이애시의 경우 40%까지 치환할 경우 목표강도를 만족시키지 못하는 것으로 나타났다. 한편, C급 플라이애시와 F급 플라이애시의 치환률에 따른 각각의 강도차이가 크게 나타나지 않는 것으로 나타났는데 이러한 원인은 플라이애시의 포졸란 작용으로 인해 장기강도 측면에서는 강도발현 차이가 크게 나타나지 않은 것으로 판단된다.

그러나 재령 7일의 초기 강도를 살펴보면 <그림 2.2.266> 및 <그림 2.2.267>에 나타난 바와 같이 C급 플라이애시를 사용한 배합이 F급 플라이애시를 사용한 배합에 비해 10% 치환에서는 약 1.62배, 20% 치환에서는 약 1.76배, 30% 치환에서는 약 1.75배, 40% 치환에서는 약 1.79배의 강도증진 효과가 나타남을 알 수 있으므로 C급 플라이애시의 사용은 Green SHCC 패널의 조기강도 확보에 유용한 것으로 나타났다.

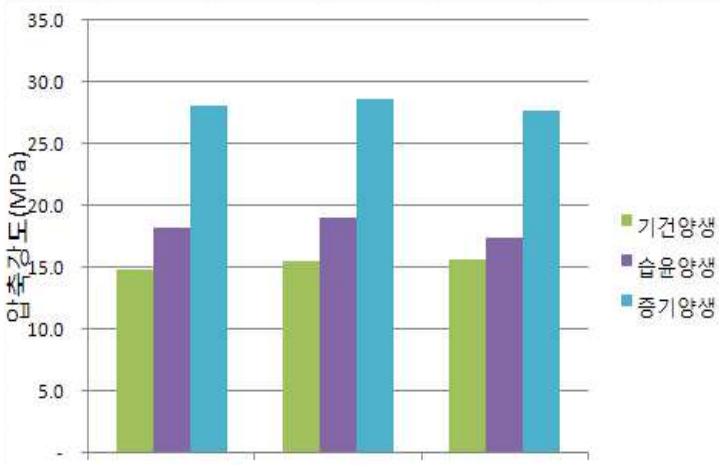


<그림 2.2.266> C급 플라이애시 혼입률에 따른
압축강도 결과(7일)



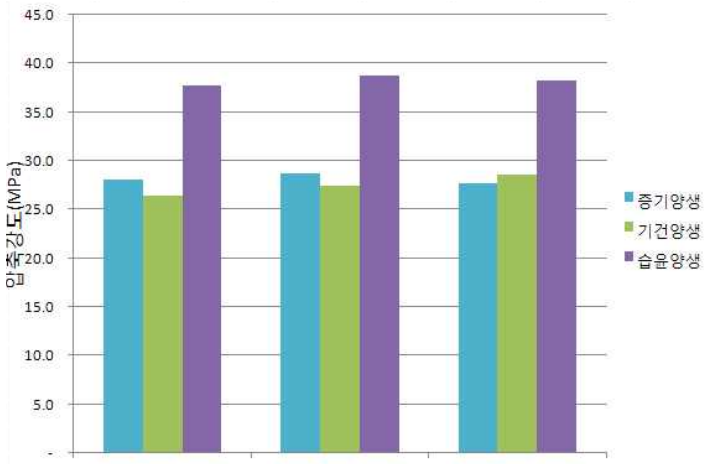
<그림 2.2.267> F급 플라이애시 혼입률에 따른
압축강도 결과(7일)

또한, C급 플라이애시의 치환률 30%에 따른 양생방법별 압축강도 시험결과를 <그림 2.2.266>에 나타내었다. 증기양생 후 바로 압축강도 시험을 수행하였고, 기건양생 및 습윤양생은 재령 3일의 시험체에 대하여 압축강도 시험을 수행하였다. 기건양생인 경우 재령 3일의 압축강도 평균은 약 15.7MPa이며, 습윤양생의 경우 평균 약 17.4MPa, 증기양생일 경우 27.7MPa를 나타내었다. 습윤양생의 경우 기건양생에 비해 약 1.22배 압축강도가 증가하였으며, 증기양생은 기건양생에 비해 1.83배 증가하였다.



<그림 2.2.268> 양생기법에 따른 Green SHCC 패널 압축강도 결과(재령 3일)

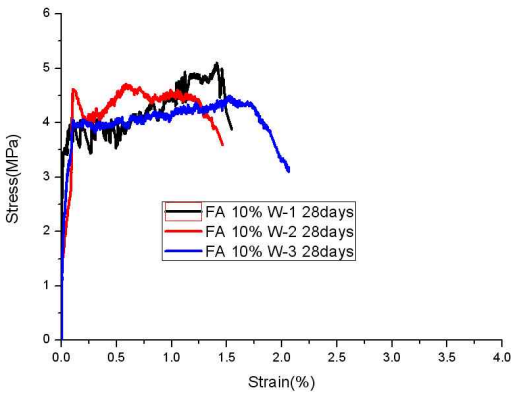
또한 증기양생은 습윤양생에 비해 1.51배 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 초기 강도 확보를 위해 증기양생이 가장 효과적인 것으로 나타났으며, 습윤양생, 기건양생 순서로 압축강도의 발현이 빠른 것으로 나타났다. 이러한 결과는 증기양생을 통해 지속적인 수분의 공급과 높은 초기 양생온도를 유지시킨 결과로 판단된다. 한편, 1일의 증기양생 공시체와 재령 28일의 습윤양생 공시체의 압축강도를 비교한 결과를 다음 <그림 2.2.269>에 나타내었다. 1일의 증기양생을 통해 재령 28일의 습윤양생을 통해 확보할 수 있는 강도의 약 73% 까지 확보할 수 있는 것으로 나타났다.



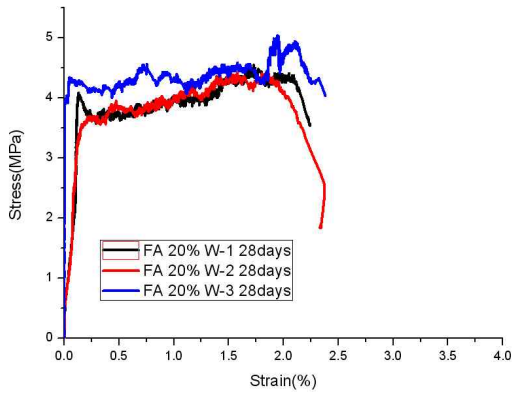
<그림 2.2.269 양생기법에 따른 Green SHCC 패널 압축강도 결과(재령 28일)

② 직접인장 실험 결과 분석

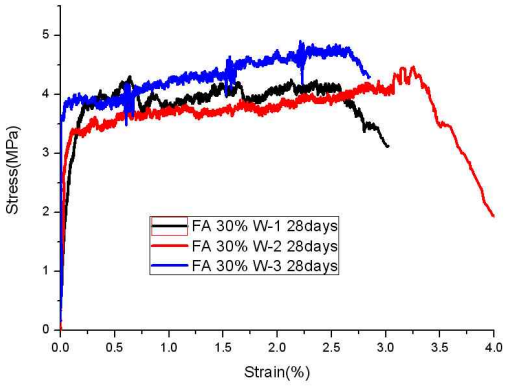
고칼슘 플라이애시(C급) 시멘트 치환율과 양생조건에 따른 Green SHCC 패널의 직접인장 실험을 수행하였다. <그림 2.2.270>~ <그림 2.2.273>은 습윤양생 조건에서 재령 28일의 C급 플라이애시 치환률에 따른 Green SHCC 패널의 직접인장과 변형률과의 관계를 나타내는 그래프이다. 모든 배합이 1축인장 하에서 뚜렷한 변형률 경화거동이 발생하였으며, 균열폭이 아주 작은 다수의 미세균열이 발생하였다. 실험체의 파괴형태는 1축인장 강도가 증가하여 시험체의 균열강도에 도달하여 첫 균열이 발생하고 인장강도가 증가하는 변형구간에서는 안정상태의 미세균열의 발생이 점차적으로 확대되면서 변형률 경화거동이 관찰되었다. 그 후 1축인장 강도가 시험체의 최대 인장강도를 초과될 때 실험체의 한 부분의 균열에 응력이 집중되어 균열의 폭이 커지면서 파괴되는 거동을 나타내었다. 플라이애시 치환률이 증가할수록 압축강도 시험결과와 동일하게 인장강도가 감소하는 것을 알 수 있으며, 최대 변형률은 증가하는 것으로 나타났다. 플라이애시의 혼입률이 증가할수록 인장강도가 줄어드는 경향은 시멘트의 사용량이 줄어들어 강도가 저하되었기 때문이며, 변형률이 증가할수록 변형률이 증가하는 이유는 시멘트 매트릭스의 파괴인성이 감소하여 보다 균열이 발생하기 위한 쉬운 조건이기 때문이라 판단된다. 플라이애시 치환률 10% ~ 30% 배합에서는 이 연구의 목표 인장강도 4MPa 이상을 만족하는 것을 알 수 있으며, 40%일 경우 4MPa를 충족시키지 못하는 것으로 나타났다. 또한 플라이애시 치환률 20%, 30%인 경우 이 연구 목표 변형률 2%이상을 만족하는 것으로 나타났다.



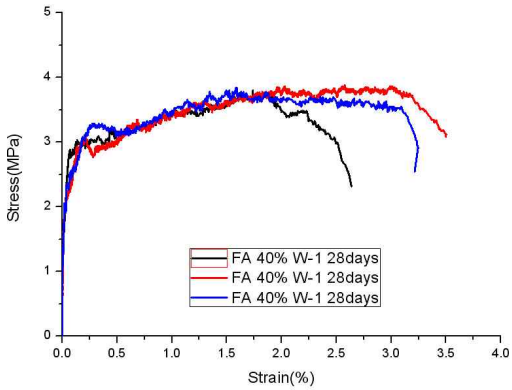
<그림 2.2.270> Green SHCC 패널 직접인장 실험 결과(10%)



<그림 2.2.271> Green SHCC 패널 직접인장 실험 결과(20%)



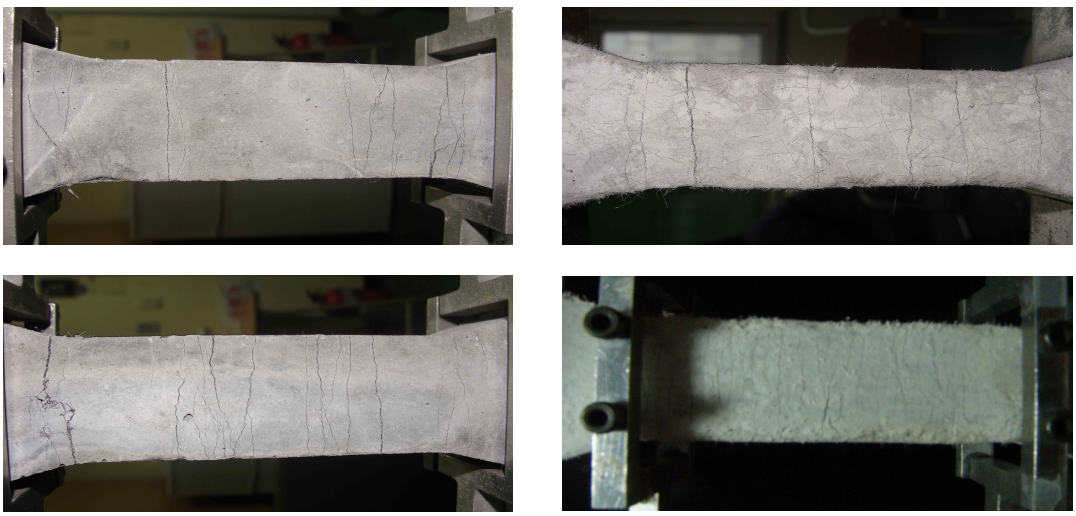
<그림 2.2.272> Green SHCC 패널 직접인장 실험 결과(30%)



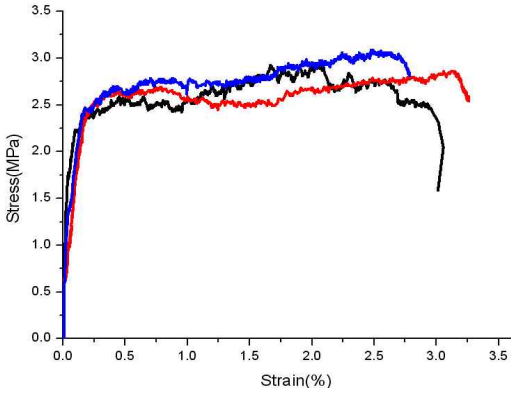
<그림 2.2.273> Green SHCC 패널 직접인장 실험 결과(40%)

<그림 2.2.274>에 플라이애시 치환률에 따른 직접인장 시험체의 균열 패턴을 나타내었다. 변형률이 증가할수록 균열의 발생이 증가하는 것을 알 수 있으며, 그 균열폭은 아주 미세한 것을 관찰할 수 있다.

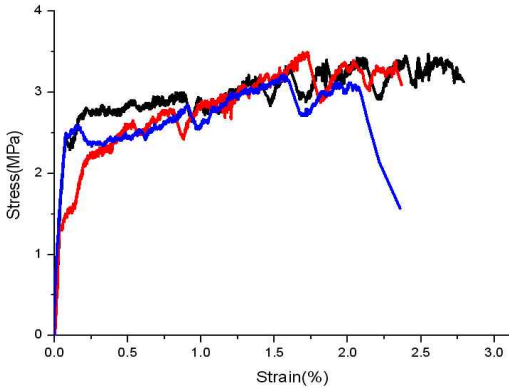
증기양생으로 제작된 직접인장 실험체의 직접인장 실험 결과와 재령 28일 기건양생 및 습윤양생으로 제작된 실험체의 직접인장 실험결과를 다음 <그림 2.2.275> ~ <그림 2.2.277>에 나타내었다.



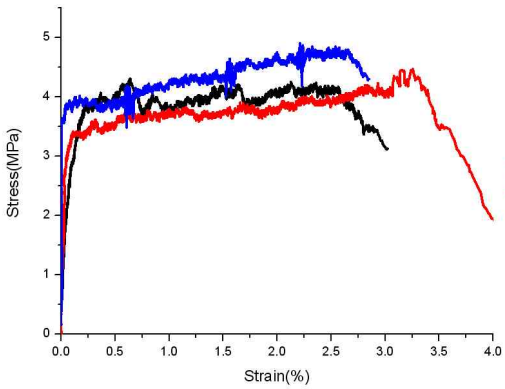
<그림 2.2.274> Green SHCC 패널 직접인장 실험체 균열 발생 패턴



<그림 2.2.275> Green SHCC 패널 직접인장 실험 결과(기건 양생 재령 1일)



<그림 2.2.276> Green SHCC 패널 직접인장 실험 결과(기건 양생 재령 28일)

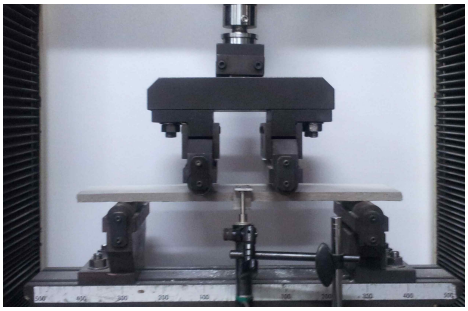


<그림 2.2.277> Green SHCC 패널 직접인장 실험 결과(증기양생 재령 28일)

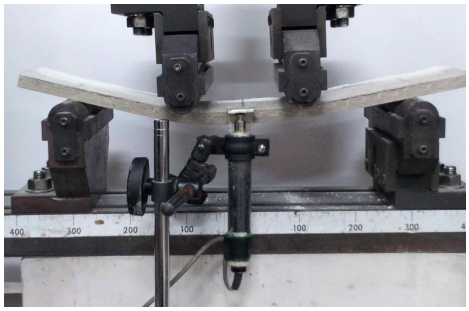
증기양생으로 제작된 시험체의 인장강도가 가장 낮게 측정되었고, 기건양생, 증기양생 순서로 인장강도가 높게 나타났다. 증기양생으로 제작된 직접인장 실험체의 최대 인장강도는 약 2.7MPa로 나타났으며, 기건양생을 통해 제작된 인장실험체는 약 3.4MPa, 습윤양생을 통해 제작된 실험체는 약 4.2MPa를 나타내었다. 이러한 결과는 압축강도의 발현 정도와 동일한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 재령 1일의 증기양생으로 제작된 실험체는 재령 28일의 습윤양생 및 기건양생으로 제작된 실험체의 인장강도의 약 64%, 79% 정도를 각각 발현할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 모든 양생조건의 직접인장 실험체는 변형률 경화거동과 목표 변형률 2%를 상회하는 것으로 나타나 모든 양생조건이 이 연구의 목표 변형률을 만족하는 것을 알 수 있어 고연성의 특징을 나타내었다.

③ 휨 실험 결과 분석

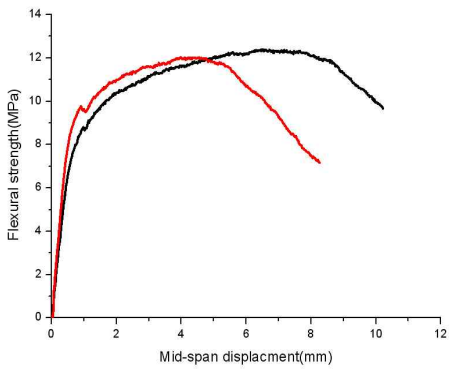
다음 <그림 2.2.278> 및 <그림 2.2.279>은 Green SHCC 패널의 휨 시험 전경을 나타내는 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 하중의 증가에 따른 Green SHCC 패널은 연성능력을 나타내기에 충분한 곡률을 나타내면서 휘는 것을 알 수 있다. 다음 <그림 2.2.280> ~ <그림 2.2.283>은 C급 플라이애시 치환률에 따른 Green SHCC 패널의 휨 강도와 중앙부 처짐과의 관계를 나타낸 곡선이다.



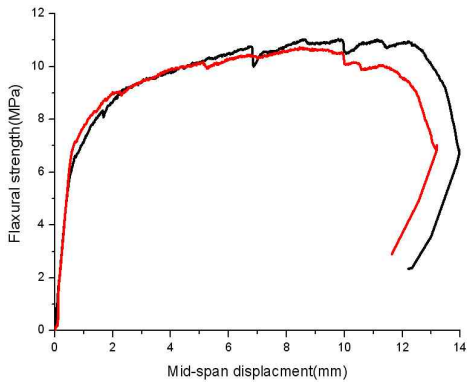
<그림 2.2.278> Green SHCC 패널 휨 시험 전경(시험전)



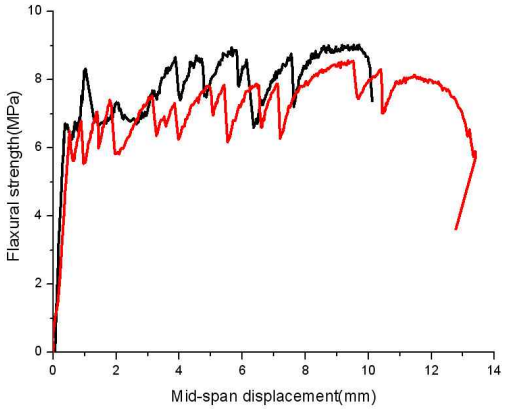
<그림 2.2.279> Green SHCC 패널 휨 시험 전경(시험중)



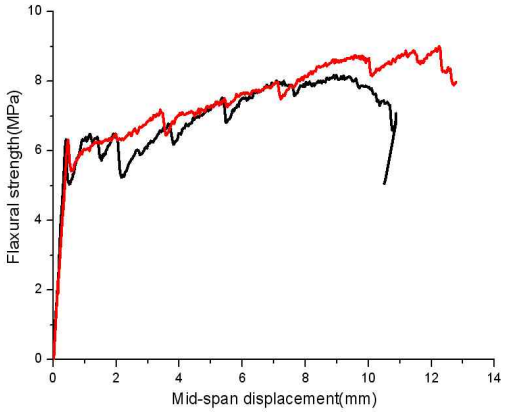
<그림 2.2.280> Green SHCC 패널 휨 시험 결과(10%)



<그림 2.2.281> Green SHCC 패널 휨 시험 결과(20%)



<그림 2.2.282> Green SHCC 패널 휨 시험 결과(30%)

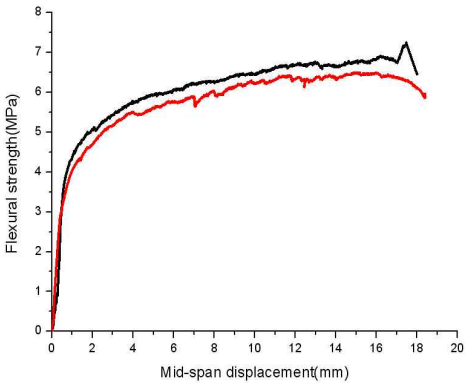


<그림 2.2.283> Green SHCC 패널 휨 시험 결과(40%)

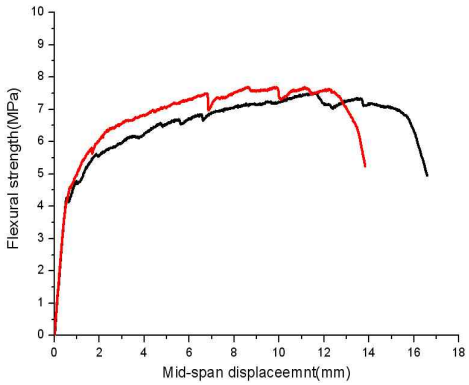
Green SHCC 패널의 3등분점 휨 시험결과 모든 시험체는 변형률 경화거동이 나타났고, 플라이애시의 치환률이 증가할수록 인장강도가 저하되는 것을 알 수 있으며, 10%, 20%, 30% 및 40% 대체일 경우 평균 최대 인장강도가 11.8 MPa, 10.3 MPa, 8.5 MPa 및 8.1 MPa로 각각 측정되었다. 인장강도가 증가할수록 중앙부 변위량이 감소됨을 알 수 있으며, 20% ~ 30%의 치환률에서는 거의 동등한 수준의 변위량을 나타내었다. 따라서 C급 플라이애시를 사용하여 제조한 Green SHCC 패널은 충분한 연성능력을 나타냄을 알 수 있고, <그림 2.2.284>에 나타낸 바와 같이 순수 휨 모멘트 구간에 다수의 미세균열이 발생함을 알 수 있다. 한편, 증기양생, 기건양생 및 습윤양생 조건에 따른 Green SHCC 패널의 휨 강도 시험결과를 다음 <그림 2.2.285>~<그림 2.2.287>에 나타내었다. 증기양생은 재령 1일에 시험을 수행하였고, 기건양생 및 습윤양생은 재령 28일에 휨 강도 시험이 수행되었다. 양생방법에 따른 Green SHCC 패널의 휨 강도 시험결과 증기양생, 기건양생, 습윤양생의 경우 평균 최대 휨 강도가 각각 6.8 MPa, 7.3 MPa, 8.5 MPa를 나타냄을 알 수 있다. 모든 시험체는 변형률 경화거동과 함께 다수의 미세균열이 발생되었고, 휨 강도가 낮을수록 중앙부 변위가 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 증기양생을 제작된 시험체의 휨 강도는 재령 28일의 기건양생 및 습윤양생으로 제작된 시험체의 약 86.3%, 74.1%의 휨 강도를 확보할 수 있는 것으로 나타나 증기양생으로 Green SHCC 패널의 조기 휨 강도를 우수하게 확보할 수 있는 것으로 나타나 증기양생을 통한 precast 공법에 충분히 적용할 수 있을 것으로 사료된다.



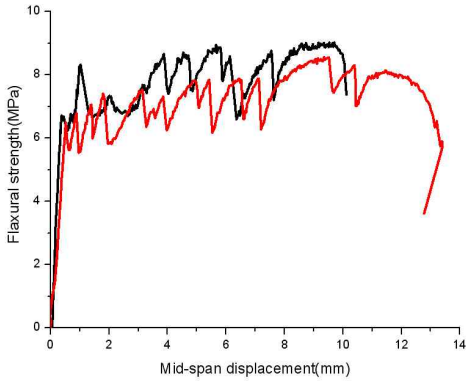
<그림 2.2.284> Green SHCC 패널 균열 패턴



<그림 2.2.285> Green SHCC 패널 휨 시험 결과(증기양생)



<그림 2.2.286> Green SHCC 패널 휨 시험 결과(기건양생)



<그림 2.2.287> Green SHCC 패널 휨 시험 결과(습윤양생)

④ 소결

이 절에서는 고칼슘 플라이애시의 치환률과 양생조건에 따라 제작된 Green SHCC 패널에 대하여 압축강도시험, 휨 강도시험 및 직접인장실험을 수행하였다. 먼저 C급 고칼슘 프라이애시의 치환률이 증가할수록 압축강도, 휨강도 및 직접인장 강도가 저하되었으나 최대 30%까지 치환할 경우에 그 저하수준이 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 치환률 40%일 경우에는 압축강도, 휨 강도, 인장강도가 이 연구에서 목표로 하는 강도를 만족시키지 못하는 것으로 나타나 Green SHCC 패널 제조시 C급 플라이애시를 30%까지 치환하는 것이 가장 효과적일 것으로 판단된다. 또한 Green SHCC 패널에 대한 압축강도 시험 결과를 바탕으로 C급 플라이애시의 사용은 F급 플라이애시 사용에 비해 조기강도를 우수하게 증진시킬 수 있는 것으로 나타났고, 인장변형 및 휨 변형 성능에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타나 Green SHCC 패널 제조에 적합한 재료라 판단된다.

증기양생을 통해 제작된 Green SHCC 패널 공시체 1일 강도는 습윤양생을 통해 제작된 공시체 재령 28일 강도의 60% ~ 75% 까지 확보할 수 있는 것으로 나타나 조기강도 확보가 필요한 precast Green SHCC 패널 제조에 증기양생을 충분히 적용시킬 수 있는 것으로 판단된다.

11. Green SHCC 시험 생산 패널 품질 및 성능 시험

가. Green SHCC 패널 시작품 제작 및 시험 방법

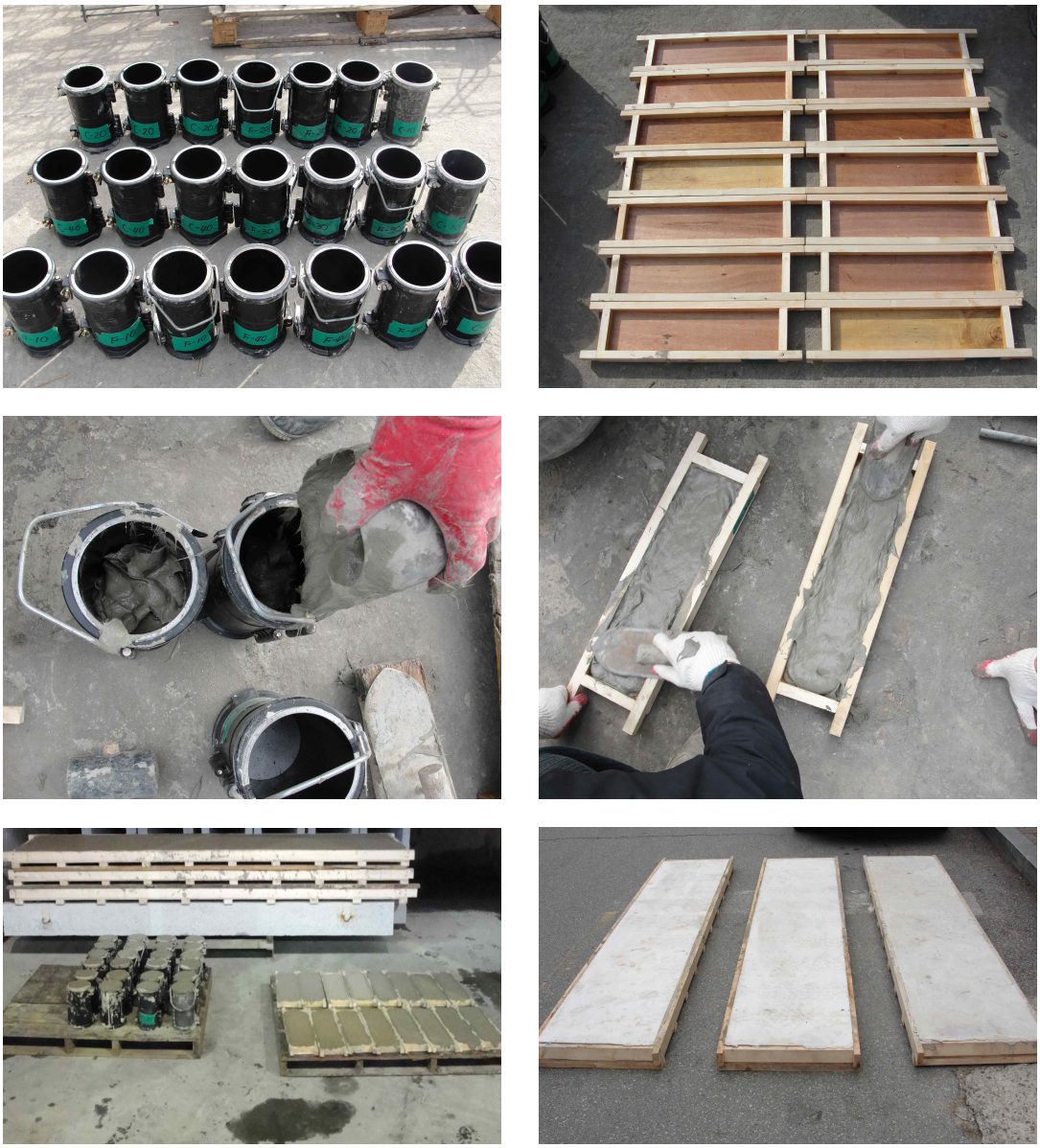
(1) Green SHCC 패널 시작품 제작

Green SHCC 패널 시작품 제작을 위해 폭 × 높이 × 길이를 600 mm × 60 mm × 2,700 mm의 크기로 계획하였다. 다음 <그림 2.2.288>에 Green SHCC 패널 시작품 제작 순서를 나타내었으며, 100 L 강제식 믹서를 이용하여 SHCC를 믹싱한 후 총 타설하여 총 시작품 3개를 제작하였다.

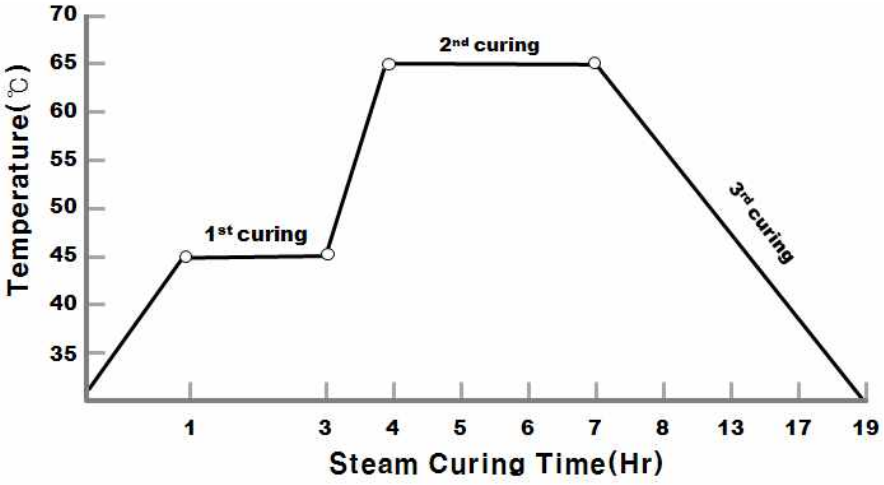


<그림 2.2.288> Green SHCC 패널 시작품 제작 과정

또한 Green SHCC 패널 시작품은 증기양생의 방법으로 양생을 실시하였으며, 양생 온도 및 시간의 조건은 다음 <그림 2.2.289>에 나타낸 바와 같다. Green SHCC 패널 시작품의 압축강도 및 휨 강도의 역학적 특성을 검토하기 위해 <그림 2.2.290>에 나타낸 바와 같이 ϕ100 × 200mm의 실린더 공시체와 100mm × 10 mm × 400mm의 직사각형 공시체를 제작하였고, Green SHCC 패널 시작품과 동일한 증기양생 조건으로 양생을 실시하였다. 증기양생을 실시한 후 거푸집을 탈형하여 Green SHCC 패널 시작품 제작을 완료하였다.



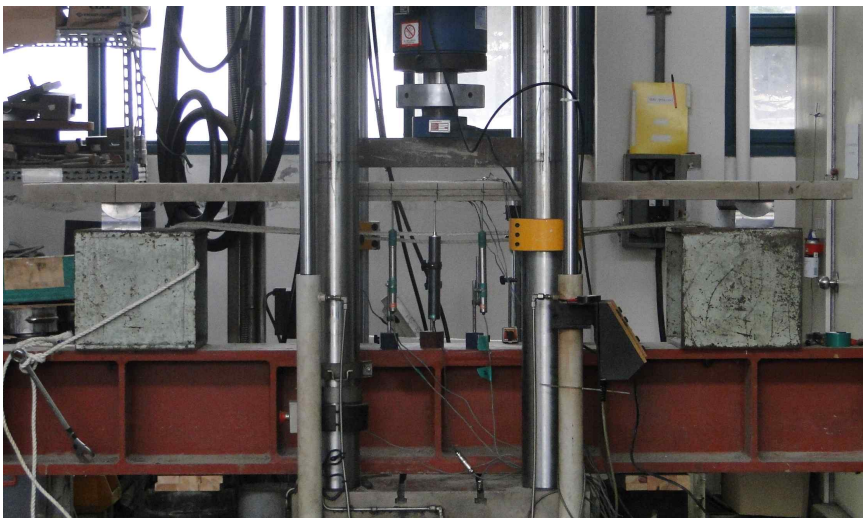
<그림 2.2.289> Green SHCC 패널 시작품 제작 과정(계속)



<그림 2.2.290> Green SHCC 패널 시작품 증기양생 조건

(2) Green SHCC 패널 시작품 휨 시험

Green SHCC 패널 시작품 휨 성능 평가를 위해 Instron사에서 제작한 3,000 kN 용량의 UTM을 이용하여 <그림 2.2.291>과 같이 4점 재하방식으로 재하 실험을 수행하였다. 실험체의 양 단부로부터 300 mm위치에 회전단을 설치하여 순지간이 2,100 mm가 되도록 단순지지 하였다. 2점 하중 가력점 사이의 거리는 700 mm로서, 이 구간에서 순수 휨 모멘트가 작용하도록 하였다. 휨 시험은 만능재료시험기를 이용하여 0.03 mm/s의 변위제어 방식으로 하중을 제하하였고, 20ton 용량의 로드셀 및 중앙부에 50 mm ~ 100 mm 변위계를 설치하여 하중 및 휨 구간에서 발생되는 처짐량을 측정하였다.



<그림 2.2.291> Green SHCC 패널 시작품 휨 시험 전경

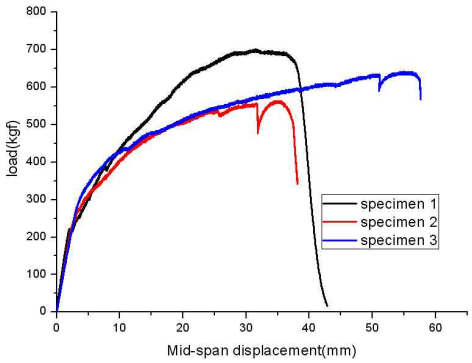
(3) Green SHCC 패널 압축강도 및 휨 강도 시험

현장에서 증기양생으로 제작된 Green SHCC 패널의 압축강도 평가를 위해 Instron 사의 만능재료시험기를 이용하여 압축강도 시험을 실시하였으며, 0.005 mm/sec의 속도로 변위제어 방식으로 하중을 가력하였다. 하중은 2,450 kN 용량의 로드셀을 이용하여 측정하였다. 또한 휨 강도 시험은 100×100×10 mm로 제작된 시험체에 대하여 「KS F 2408 콘크리트의 휨 강도 시험 방법」 중 3등분점 재하에 준하여 실시하였다. 만능재료시험기를 사용하여 하중 가력을 실시하였으며 하중재하 속도는 0.8 mm/min으로 재하하였으며, 20 mm 변위계 2개를 이용하여 중앙부 처짐을 측정하였다.

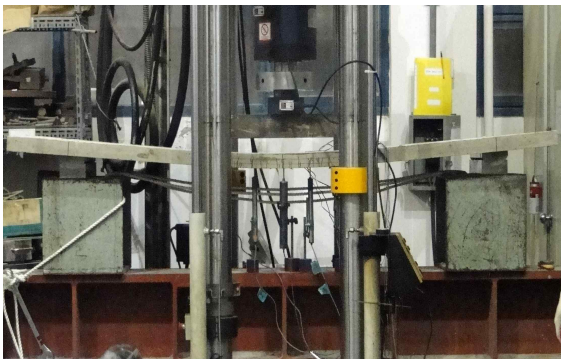
나. Green SHCC 패널 시작품 시험결과 및 분석

(1) Green SHCC 패널 시작품 휨 시험 결과

증기양생을 제작된 Green SHCC 패널 시작품의 휨 시험결과 하중의 증가에 따라 순수 휨 모멘트 구간내에서 패널 시작품은 하중이 증가할수록 변형률도 같이 증가하는 변형률 경화거동을 나타내었다. <그림 2.2.292>는 휨 시험시 3개의 시험체의 하중과 변형률과의 관계 곡선을 나타낸다. Green SHCC패널 시작품 시험체는 하중이 증가할수록 중앙부 변위가 증가하다가 초기균열이 발생하였고, 그 후 변형률 경화거동을 나타내다가 한 개의 균열에 응력이 집중되어 최종 파괴되었다. Green SHCC패널 시작품 시험체 평균 최고 휨 하중은 약 633.7 kgf(6.2kN)으로 측정되었고, 파괴시 최종 중앙부 평균 변위량이 약 44.2 mm로 측정되었다.
한편, <그림 2.2.293>은 대표적인(3번) 시작품 패널의 최종파괴 전의 형태를 나타내고 있다. 우수한 변형성능을 나타내는 것을 확인할 수 있고, 충분한 곡률이 발생됨을 알 수 있다.



<그림 2.2.292> Green SHCC 패널 시작품 하중-중앙부 변위 곡선

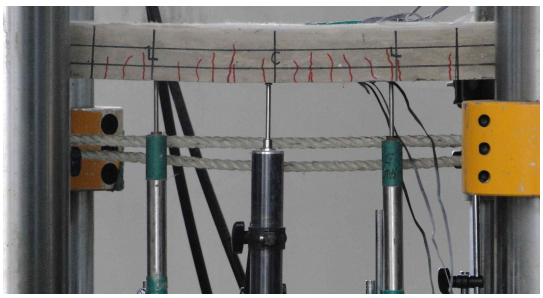


<그림 2.2.293> Green SHCC 패널 시작품 휨 성능 전경

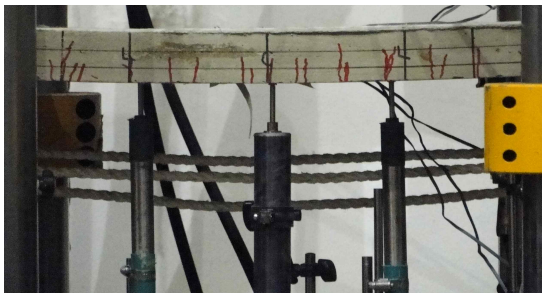
또한 <그림 2.2.294> ~ <그림 2.2.297>은 3개의 시험체 순수 휨 모멘트 구간에 발생되는 미세균열을 나타낸 것이다. 3개의 시험체 모두 순수 휨 모멘트 구간에서 충분한 곡률이 발생되는 것을 알 수 있으며, 다수의 균열이 발생하였다.



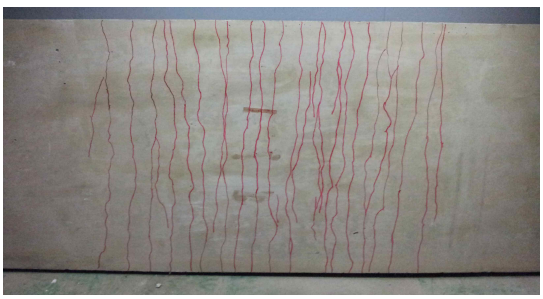
<그림 2.2.294> Green SHCC 순수 휨 구간 균열 발생 패턴(시험체 1)



<그림 2.2.295> Green SHCC 순수 휨 구간 균열 발생 패턴(시험체 2)



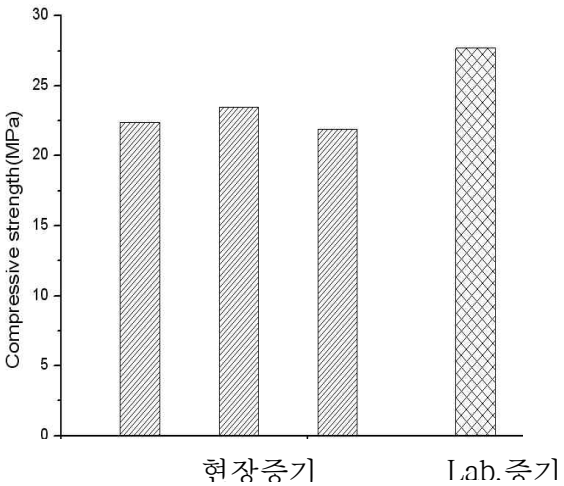
<그림 2.2.296> Green SHCC 순수 휨 구간 균열 발생 패턴(시험체 3)



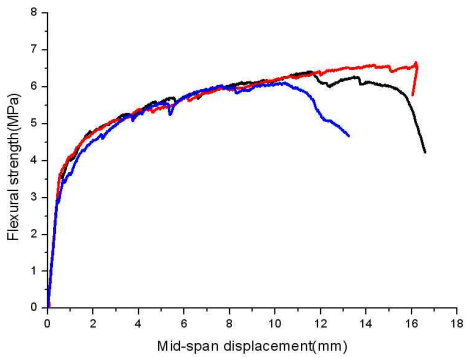
<그림 2.2.297> Green SHCC 순수 휨 구간 균열 발생 패턴

(2) Green SHCC 패널 압축강도 및 휨 강도 시험

Green SHCC 패널 시작품 제작 현장에서 시작품과 동일한 증기양생 조건으로 제작한 Green SHCC 패널의 압축강도 및 휨 강도 시험 결과를 다음 <그림 2.2.298> ~ <그림 2.2.299>에 나타내었다. 압축강도 및 휨 강도 시험은 증기양생을 실시한 뒤 탈형하여 1일 후 만능재료 시험기를 이용하여 실시하였다. 시험결과를 <표 2.2.115>에 정리하여 나타내었다. 시험결과 현장에서 제작한 압축강도 공시체의 압축강도의 평균은 약 22.6 MPa로 나타났다. 이 강도값은 앞서 증기양생 방법으로 제작된 공시체 압축강도 27.7 MPa의 약 82% 수준 정도만 발현 되는 것으로 나타났다. 또한 휨 강도 역시 평균 6.0 MPa로 88% 수준 정도만 발현됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 현장 증기양생 챔버의 크기와 Lab 스케일 증기양생 챔버와의 크기로 인하여 현장 증기양생의 효과가 다소 저하된 것으로 판단된다. 따라서 현장에서 Green SHCC 패널 제조시 패널의 크기에 부합하는 증기양생 챔버의 크기를 선정하는 것과 열손실 및 내부 증기 순환장치 등의 설비가 중요할 것으로 사료된다.



<그림 2.2.298> 현장 vs. Lab. 압축강도 시험 결과 비교



<그림 2.2.299> 현장 증기양생 휨 패널 시험체 휨 시험 결과

<표 2.2.115> Green SHCC 패널 압축강도 및 휨 강도 시험 결과

	시험체 1	시험체 2	시험체 3	평균
압축강도 (MPa)	22.4	23.5	21.9	22.6
휨 강도 (MPa)	6.2	6.0	5.8	6.0

12. Green SHCC 바닥체의 구조 및 내화성능 평가

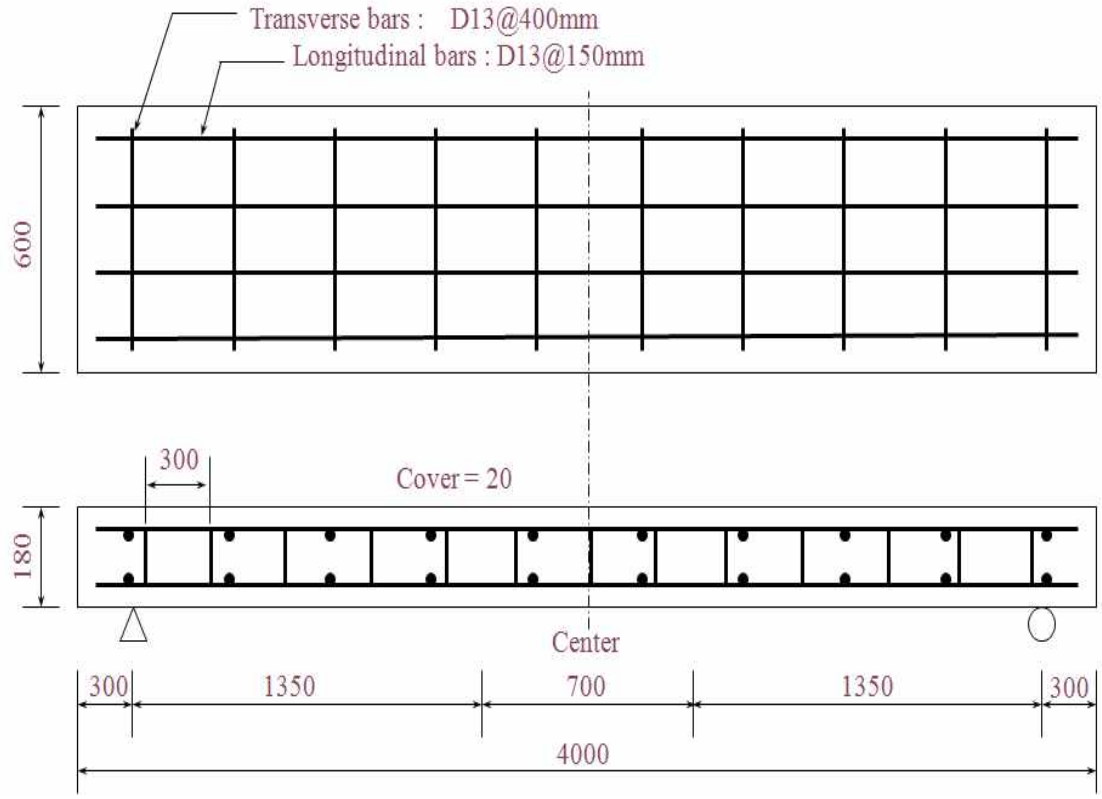
가. Green SHCC 슬래브 제작

(1) 개요

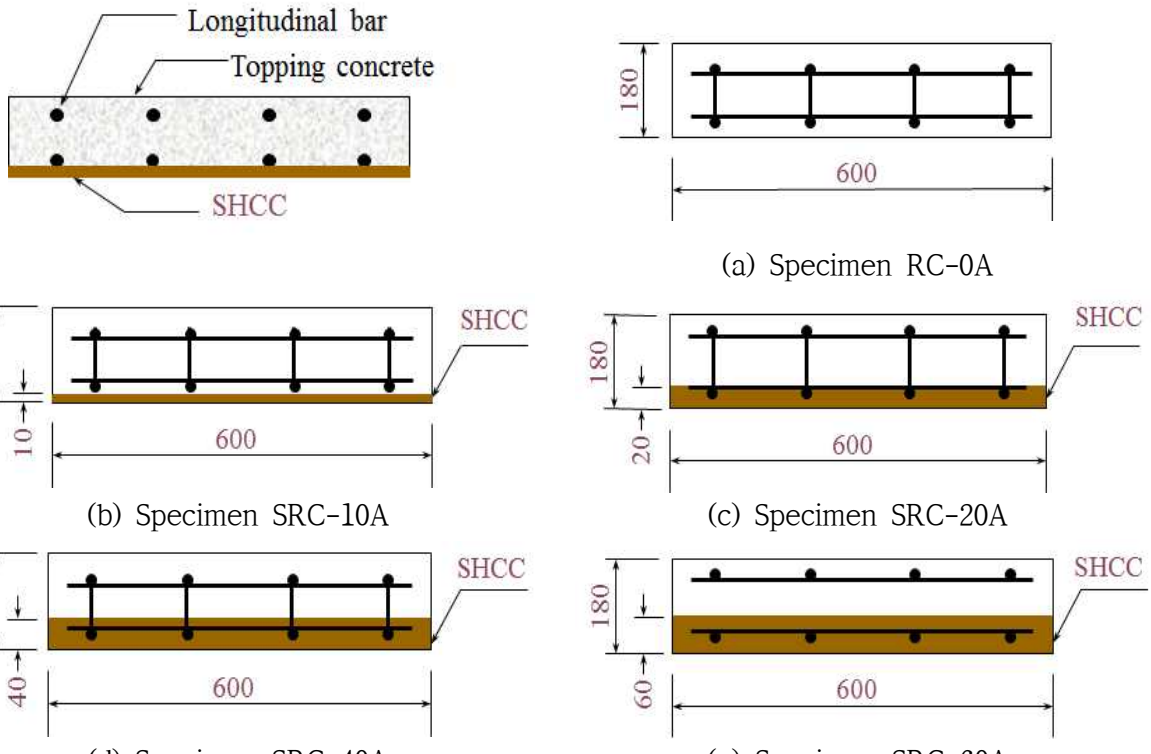
SHCC 복합 바닥구조시스템의 성능 검증을 위하여 <표 2.2.116>과 같은 실험을 계획하였다. 실험체는 일방향 슬래브 형식으로 SHCC의 사용여부와 휨철근비를 주요 변수로 설정하였다. 실험체의 형상 및 크기는 <그림 2.2.300>과 같다. RC-0A 실험체는 동일 조건의 철근콘크리트 슬래브로써 기준실험체로 이용하였으며, 나머지 실험체는 <그림 2.2.301>과 같은 SHCC를 바닥 피복콘크리트에 대체하였다. 표에서 SHCC를 바다 피복콘크리트로 사용한 실험체는 RC-0A와 동일한 철근비(ρs= 0.47 %)를 갖게 제작하였다.

<표 2.2.116> 실험체 상세

Specimen	Details (Thickness of SHCC, ㎜)	Cross-Section of Slab (㎜)	f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)	Cross Section of SHCC (㎜)	Longitudinal / Transverse Reinforcements
RC-0A	Prototype	600×180	30	400	-	D13@150㎜ (ρs= 0.47 %) / D13@400㎜
SRC-10A	10				600×10	
SRC-20A	20				600×20	
SRC-40A	40				600×40	
SRC-60A	60				600×60	



<그림 2.2.300> 실험체 상세(평면도, 단면도)

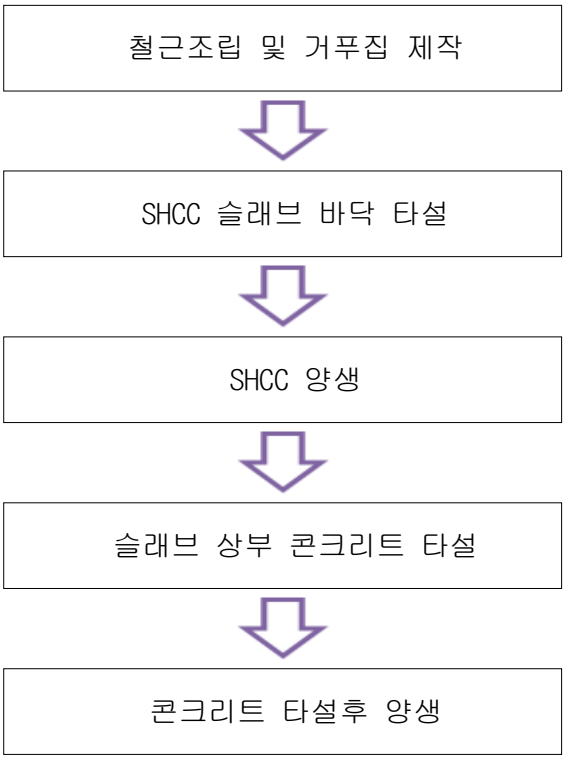


<그림 2.2.301> 실험체별 상세(단면도)

나. Green SHCC 슬래브 제작 및 구조실험

(1) 슬래브 실험체 제작

실험체의 제작은 내측 크기가 600 ㎜ × 180 ㎜ × 4,000 ㎜ 가 되도록 먼저 거푸집을 제작하였으며, 동시에 철근을 현장조립 하였다. 제작순서는 동일하며, 철근 배근을 한 이후 휨 철근의 변형률을 얻기 위하여 주방향 하부 철근 2개의 중앙부에 변형률 게이지(WSG)를 부착한 이후 철근을 거푸집에 넣고, 실험 변수별로 SHCC를 타설하여 양생하였다. SHCC 양생 4주후 콘크리트의 설계기준압축강도 30MPa의 일반콘크리트를 사용하여 현장 타설하였으며, 콘크리트 경화 이후 습윤 양생 조건을 충족하기 위하여 양생포를 씌우고 물을 뿌려 4주간 양생을 실시하였다. 실험체 제작순서는 철근조립 및 거푸집 제작, SHCC 배합 및 타설, 슬래브 상부 콘크리트 타설 순이며, 그 순서는 <그림 2.2.302>~<그림 2.2.306>과 같다.



<그림 2.2.302> 실험체 제작 순서



a. 실험체 철근 조립



b. 실험체 거푸집 조립



c. 실험체 철근 조립후 거푸집 삽입

<그림 2.2.303> 실험체 제작과정(철근조립 및 거푸집제작) 1



d. 철근 용접



e. 실험체 게이지 부착



f. 거푸집에 조립된 철근 장착



g. 거푸집 철근 삽입 전경

〈그림 2.2.304〉 실험체 제작과정(철근조립 및 거푸집제작) 2



a. 상부 콘크리트 타설



b. 콘크리트 타설 후 마감



c. 슬래브 양생

〈그림 2.2.305〉 실험체 제작과정(상부 콘크리트 타설)



a. SHCC 배합



b. SHCC 슬래브 하부 타설



c. SHCC 양생



d. SHCC-20A



e. SHCC-40A

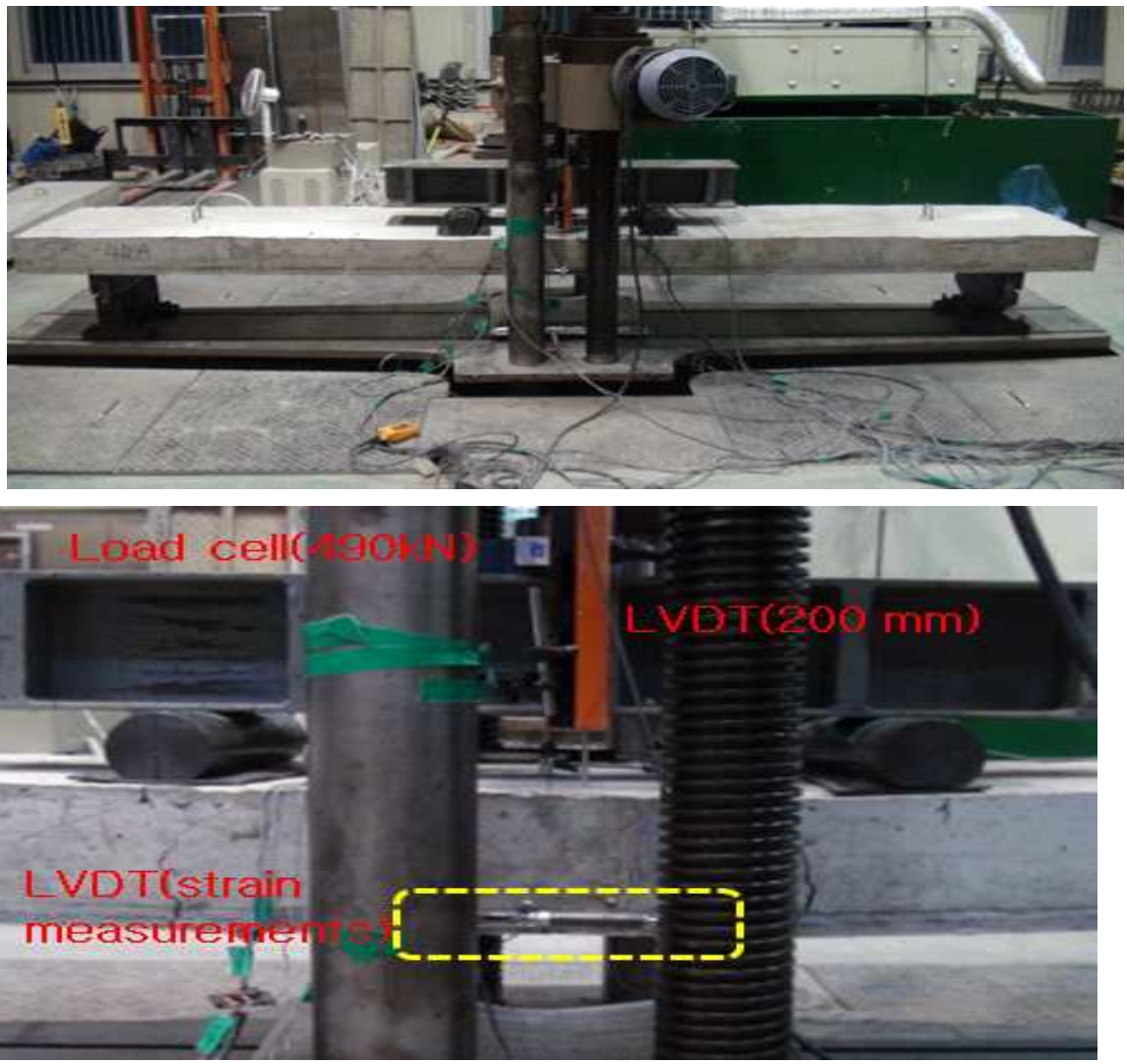


f. SHCC-60A

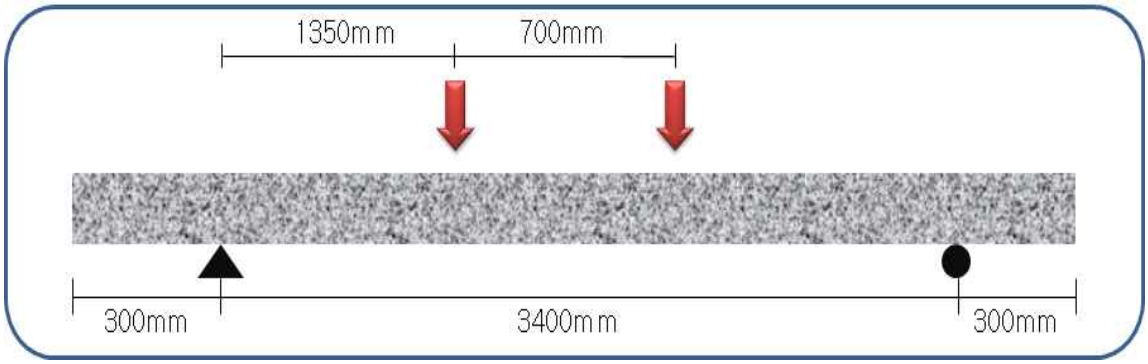
<그림 2.2.306> 실험체 제작과정(SHCC 타설)

(2) 실험 방법

실험은 1,000kN 용량의 UTM(Universal Testing Machine)을 이용하여 <그림 2.2.307>과 같이 4점 재하방식으로 실시하였다. 실험체의 양 단부로부터 300 ㎜ 위치에 회전단을 설치하여 단순지지 되도록 하였으며, 순경간(Net span)은 3,400 ㎜로 하였다. 2점 하중 가력점 사이의 거리는 700 ㎜로서, 이 영역에서 순수 휨이 작용하도록 하였다. 하중은 변위제어 방식으로 압축부 콘크리트가 파쇄 될 때까지 가력하였다. 또한 보다 정확한 하중값을 얻기 위하여 50kN 용량의 로드셀을 설치하여 측정하였다. 실험체의 처짐 및 변형, 변형률은 <그림 2.2.308>~<그림 2.2.309>와 같이 각각의 위치에 변위계(LVDT), 콘크리트 변형률 게이지, 철근 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다.



<그림 2.2.307> 실험장치 및 Set-up



<그림 2.2.308> 실험체 하중재하 방법



a. 실험체 Set-up



b. Load-cell 설치

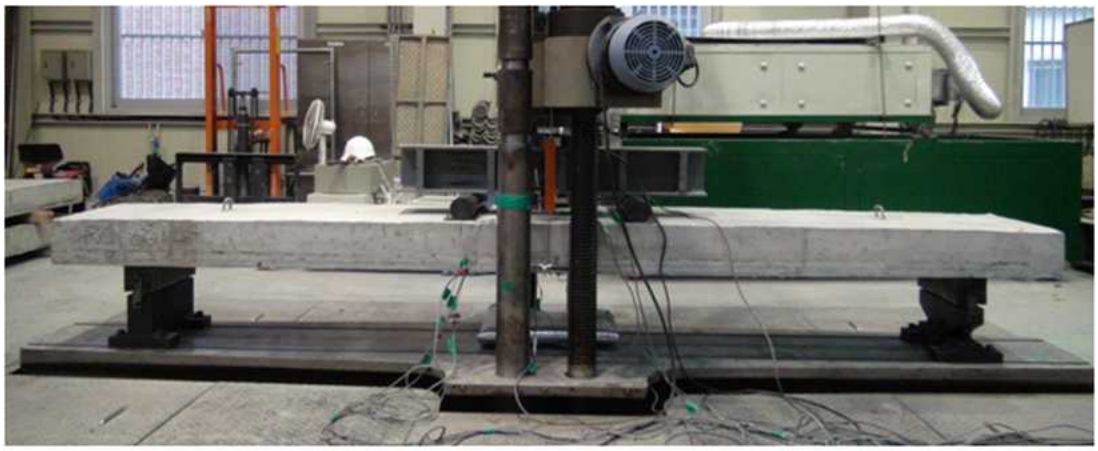


c. LVDT 설치(2개소)

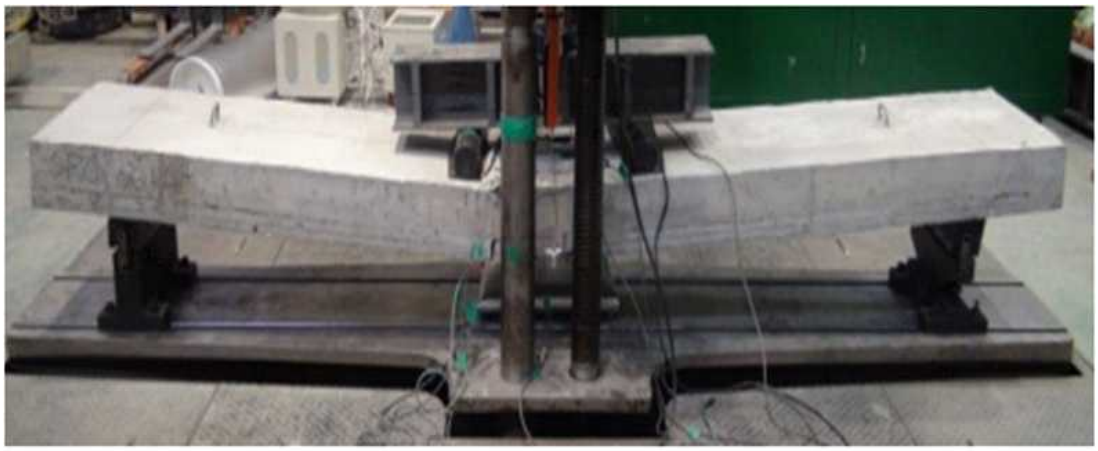
<그림 2.2.309> 측정장치 부착 상세 2

(3) 실험 결과 및 분석

(가) 균열 및 파괴 양상



(a) 실험체 재하



(b) 실험체 재하 후

<그림 2.2.310> 슬래브 실험체 재하 실험

슬래브 재하실험은 기준실험체부터 실험체 변수별로 SRC-60A 실험체까지 <그림 2.2.310>과 같이 실험체를 재하 하였다.

(나) RC-0A 실험체

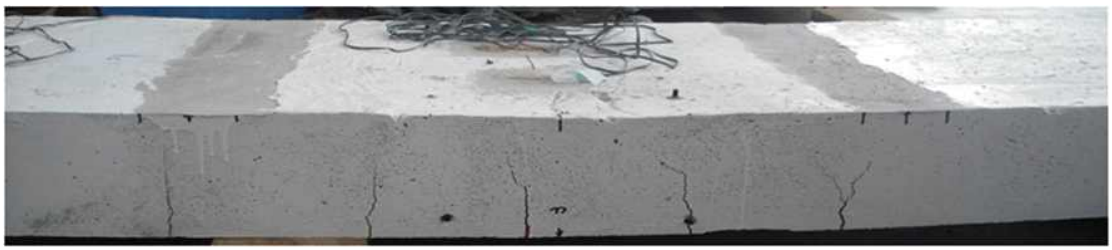
기준실험체로 순수 철근콘크리트로 이루어진 RC-0A 실험체는 재하 시작 이후 6.6kN에서 중앙부 인장연단에 초기균열이 발생하였다. 이후 균열의 상부 진전과 함께 100 ㎜ ~ 150 ㎜ 간격으로 균열이 발생하였으며, 하중이 커짐에 따라 균열이 상부로 진전되면서 동시에 균열폭이 점차 커졌다. 또한 부재 항복 이후 급격한 균열폭 증가가 있었으나 하중의 저하는 없었으며, 처짐 90 ㎜ 까지 안정적인 거동을 보였다. 최종 파괴는 가력점 중앙부의 콘크리트가 압축 파괴되는 휨 압축 파괴의 형태를 나타냈다.



(a) 슬래브 재하실험 후 전경



(b) 슬래브 측면 균열

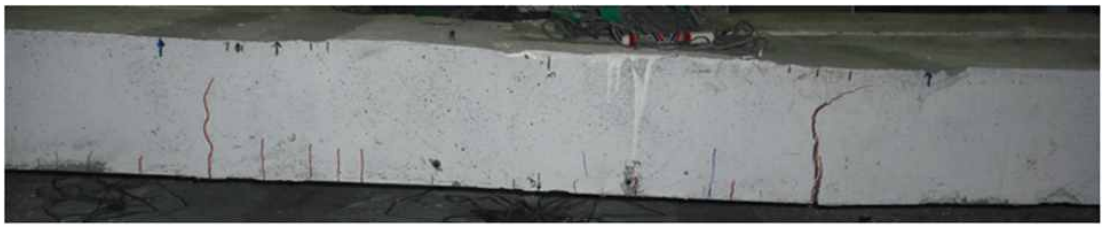


(c) 슬래브 균열상태

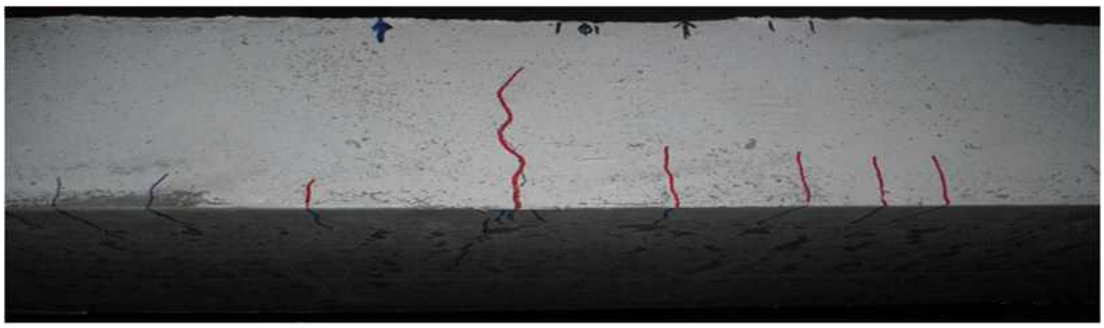
<그림 2.2.311> 슬래브 RC-0A실험체 재하 실험 후 균열상태

(다) SRC-10A 실험체

SRC-10A 실험체는 기준실험체와 유사하게 초기균열이 7.1kN에서 발생하였으며, 하중이 증가함에 따라 슬래브 하부의 SHCC부분에 미세균열이 발생하는 파괴의 형태를 나타냈다. 재하 실험후 균열상태는 <그림 2.2.312>와 같다.



(a) 슬래브 측면 균열



(b) 슬래브 측면 및 하부 균열

<그림 2.2.312> 슬래브 SRC-10A실험체 재하 실험 후 균열상태

(라) SRC-20A 실험체

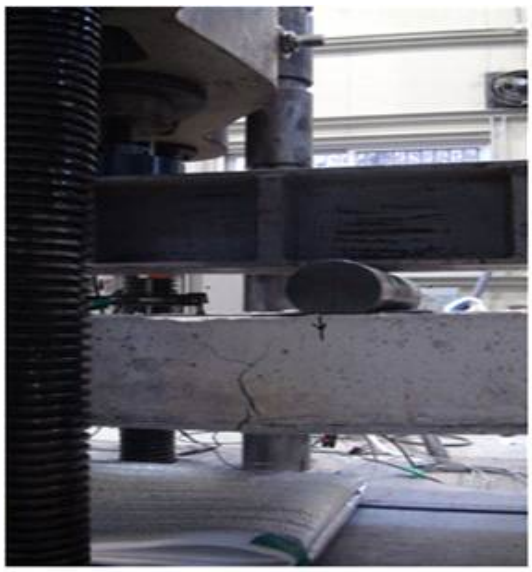
SRC-20A 실험체는 초기균열이후 13.4 kN 부근에서 하중이 증가함에 따라 미세하게 변위량이 늘어났으며, SRC-10A실험체와 유사한 파괴양상을 나타냈다. 재하 실험후 균열상태는 <그림 2.2.313>, <그림 2.2.314>와 같다.





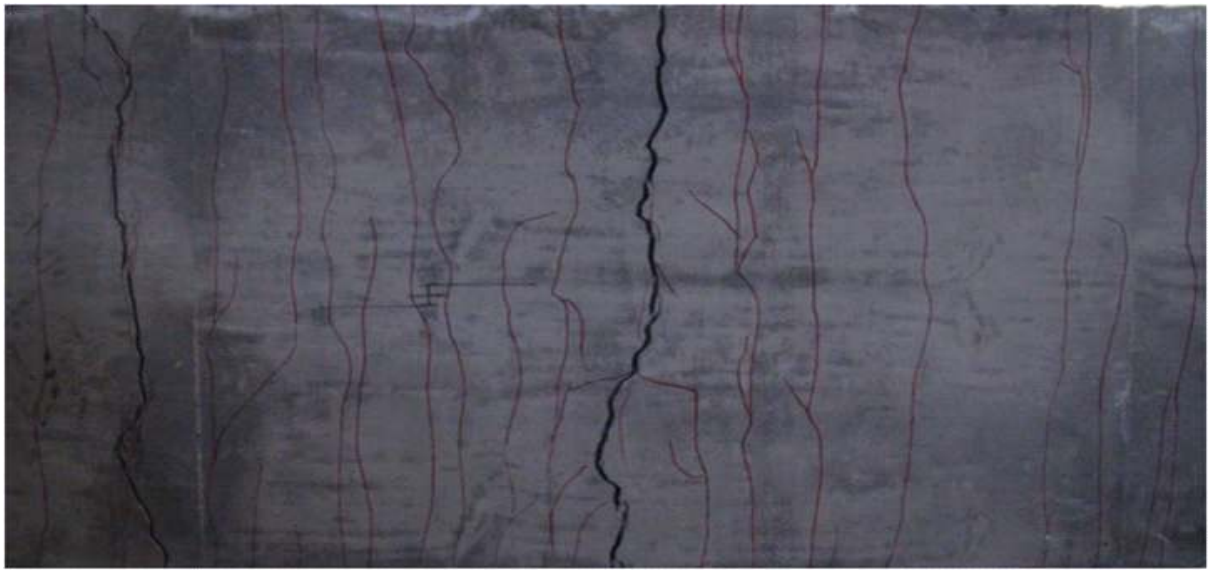
(a) 슬래브 재하실험 후 전경



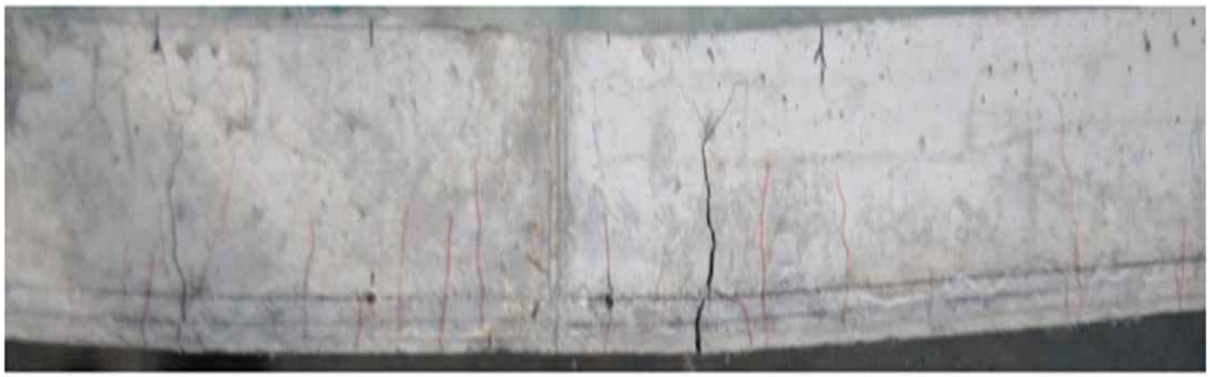


(b) 슬래브 재하실험 후 전경

<그림 2.2.313> 슬래브 SRC-20A실험체 재하 실험 후 균열상태 1



(c) 슬래브 하부 균열



(d) 슬래브 측면 균열

<그림 2.2.314> 슬래브 SRC-20A실험체 재하 실험 후 균열상태 2

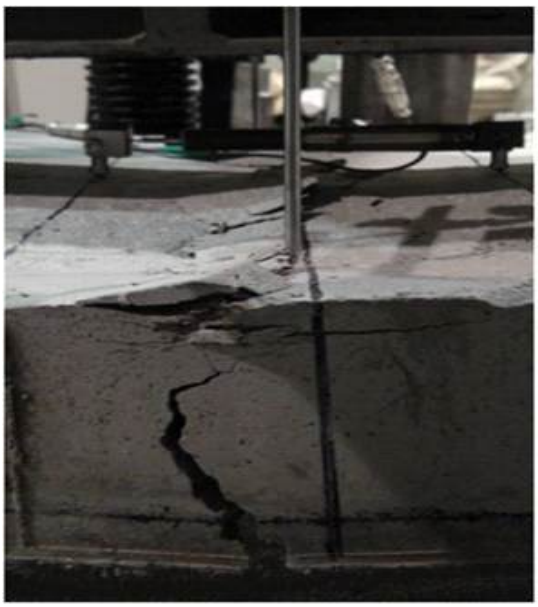
(마) SRC-40A 실험체

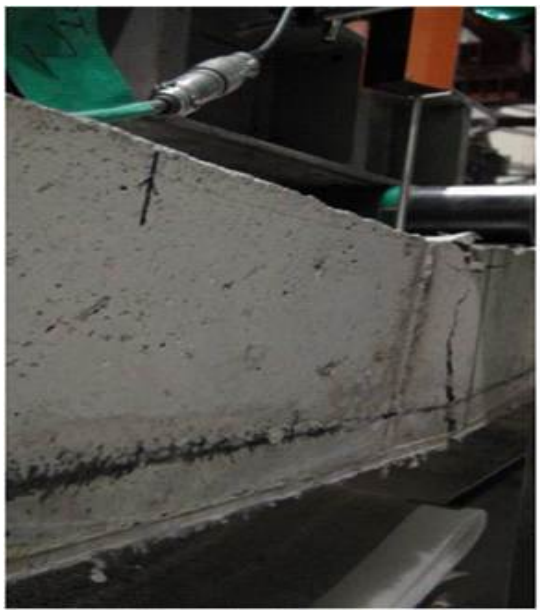
SRC-40A 실험체는 초기균열이후 21 kN 부근에서 하중이 증가함에 따라 미세하게 변위량이 늘어났으며, SRC-10, 20A 실험체에 비해 높은 처짐 제어 효과를 보였으며, 하중 증가와 함께 다중미세 휨 균열이 무수히 발생하였다. 인장철근의 항복 이후에도 하중은 안정적으로 증가하였으며, 다중 미세균열 거동으로 처짐 122㎜까지 안정적인 연성 거동을 보였다. 재하 실험후 균열상태는 <그림 2.2.315>~<그림 2.2.316>과 같다.





(a) 슬래브 재하실험 후 전경





(b) 슬래브 재하실험 후 전경

<그림 2.2.315> 슬래브 SRC-40A실험체 재하 실험 후 균열상태 1



(c) 슬래브 하부 균열



(d) 슬래브 측면 균열

<그림 2.2.316> 슬래브 SRC-40A실험체 재하 실험 후 균열상태 2

(바) SRC-60A 실험체

SRC-60A 실험체의 파괴형태는 SRC-40A 실험체와 유사하며, 항중 증가와 함께 다중미세 휨 균열이 무수히 발생하면서 균열 수가 증가하였으나, 균열 폭의 증가는 육안으로 관찰되지 않았다. 인장철근의 항복 이후에도 하중은 안정적으로 증가하였으며, 다중 미세균열 거동으로 처짐 119㎜까지 안정적인 연성 거동을 보였다.
재하 실험후 균열상태는 <그림 2.2.317>, <그림 2.2.318>과 같다.





(a) 슬래브 재하실험 후 전경





(a) 슬래브 재하실험 후 전경

<그림 2.2.317> 슬래브 SRC-60A실험체 재하 실험 후 균열상태 1



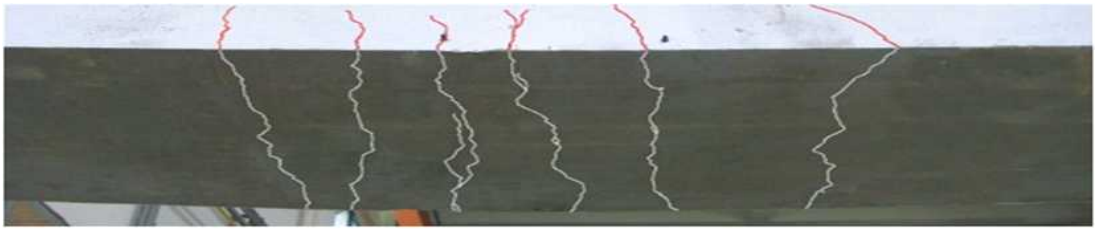
(c) 슬래브 하부 균열



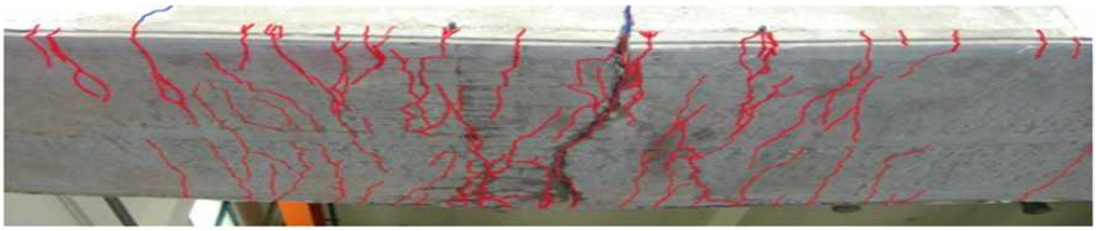
(d) 슬래브 측면 균열

<그림 2.2.318> 슬래브 SRC-60A실험체 재하 실험 후 균열상태 2

기준실험체인 RC-0A부터 SRC-60A 실험체의 슬래브 하부 균열 및 다중 미세균열 상태는 다음 <그림 2.2.319>와 같다.



(a) RC-0A



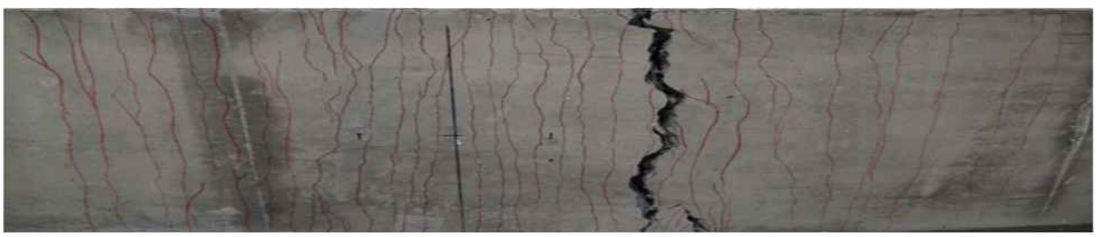
(b) SRC-10A



(c) SRC-20A



(d) SRC-40A



(e) SRC-60A

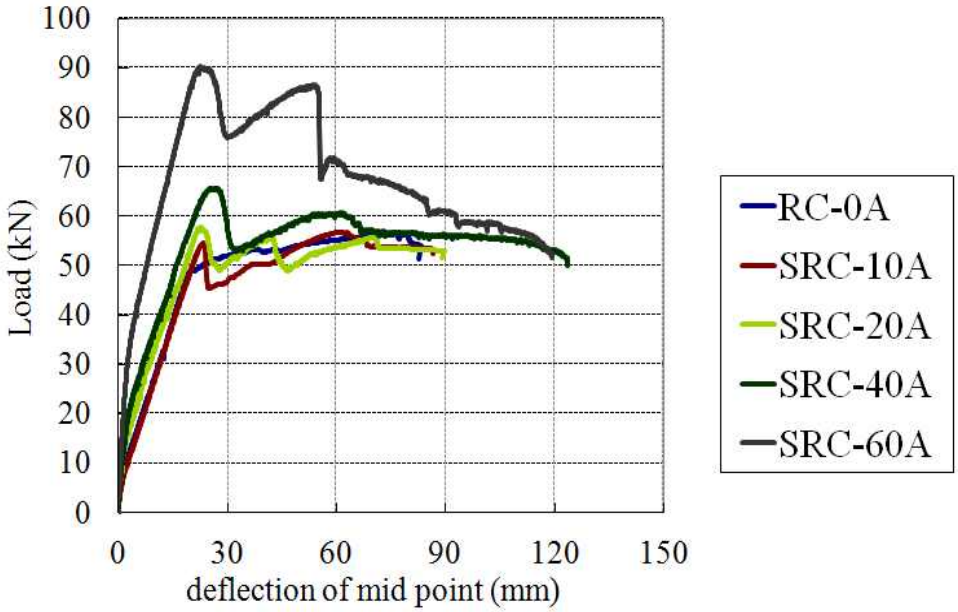
<그림 2.2.319> 실험체별 재하 실험 후 슬래브 하부 균열상태

(사) 실험체 재하실험 결과

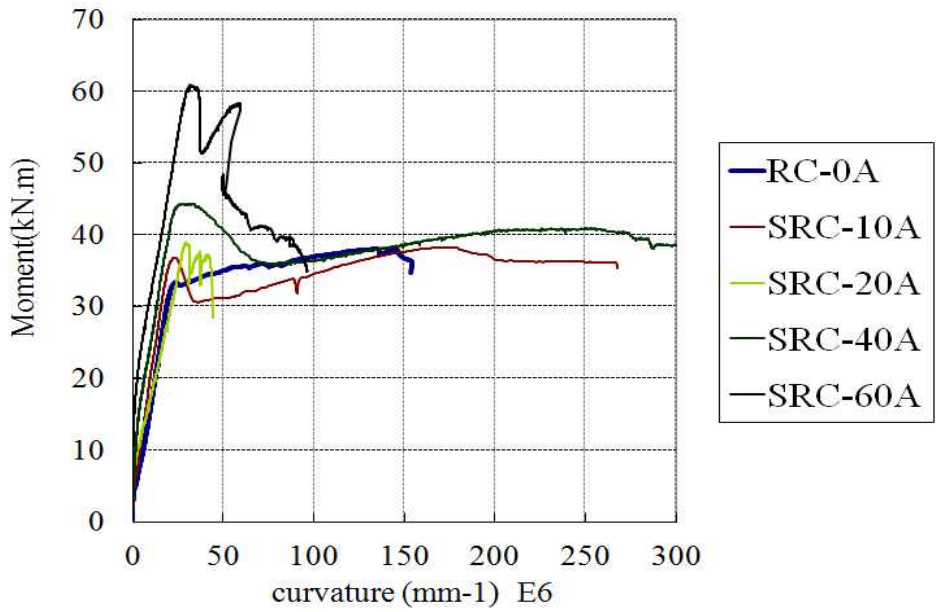
실험체의 재하실험에서 <표 2.2.117>과 같은 결과를 나타냈다. 기준 실험체 대비 실험체의 항복하중은 SRC-10A에서 1.1%, SRC-20A에서 1.2%, SRC-40A에서 1.3%, SRC-40A에서 1.3%, SRC-60A에서 1.8% 증가한 것을 알 수 있다. 실험체의 최대하중은 SRC-10, 20A 실험체에서 낮은 증가를 보였으며, SRC-40A가 16.4%, SRC-60A 실험체에서 60%의 가장 높은 증가율을 보였다. SRC-10A와 SRC-20A 실험체에서는 강도와 강성은 기준실험체와 유사하여 하중제어 및 다중미세균열로 인해 균열제어에 효과가 있는 것으로 나타났다. SRC-40, 60A 실험체의 경우 강도와 강성이 높게 나타나 다중미세균열로 인해 처짐제어 효과 뿐 아니라 높은 강도와 강성 기여 효과는 크다는 것을 알 수 있다.

<표 2.2.117> 실험체 실험 결과

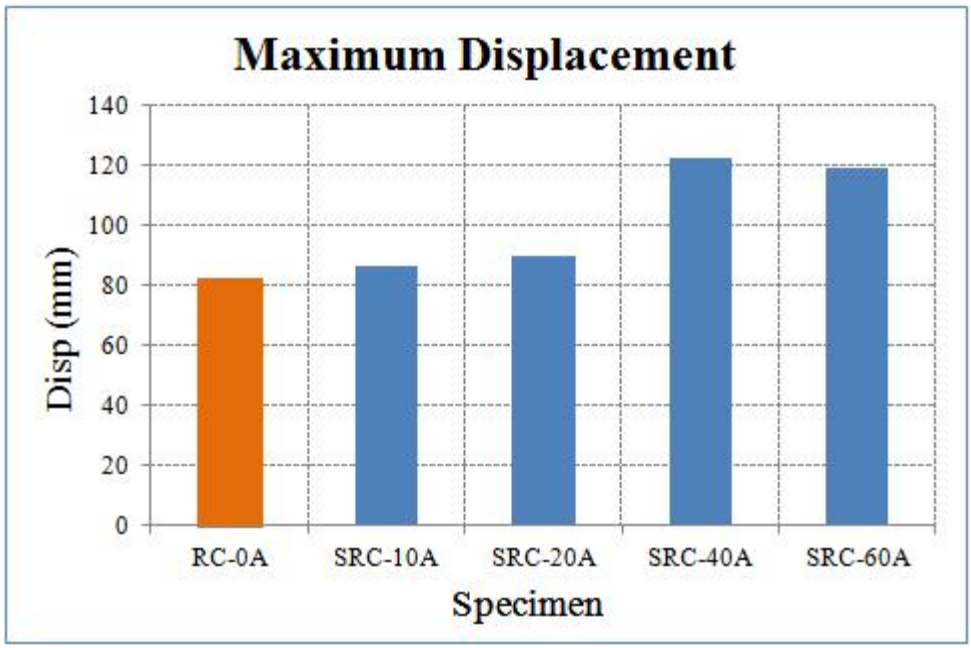
Specimen name	Second slope after cracks		Initial yielding of bar		Max. values		Variation of load (%)	Ductility ratio	Secant stiffness at yielding (kN/㎜)
	Disp. (㎜)	Load (kN)	Disp. (㎜)	Load (kN)	Disp. (㎜)	Load (kN)			
RC-0A	0.9	6.6	21.1	49.0	82.5	56.4	-	3.91	2.3
SRC-10A	1.4	7.1	22.7	54.1	86.3	56.7	0.4	3.80	2.4
SRC-20A	1.8	13.4	21.7	56.9	89.5	57.8	2.4	4.12	2.6
SRC-40A	3.1	21.0	24.0	64.8	122.4	65.7	16.4	5.10	2.7
SRC-60A	3.0	32.8	21.5	89.3	118.9	90.3	60.1	5.53	4.2



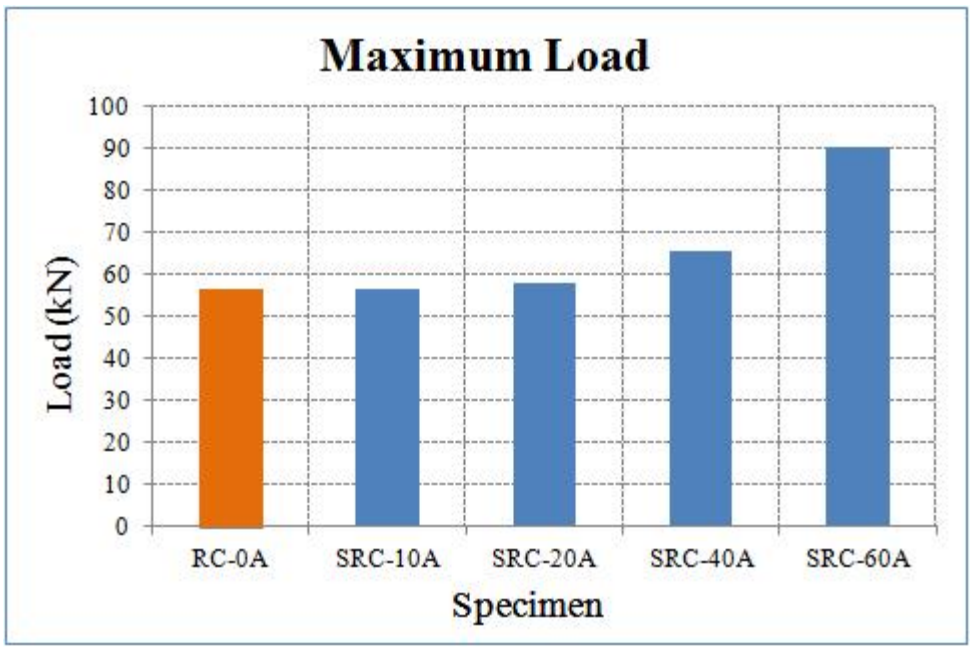
<그림 2.2.320> Load deflection curve



<그림 2.2.321> Moment curvature curve



<그림 2.2.322> 실험체별 최대 변위 비교



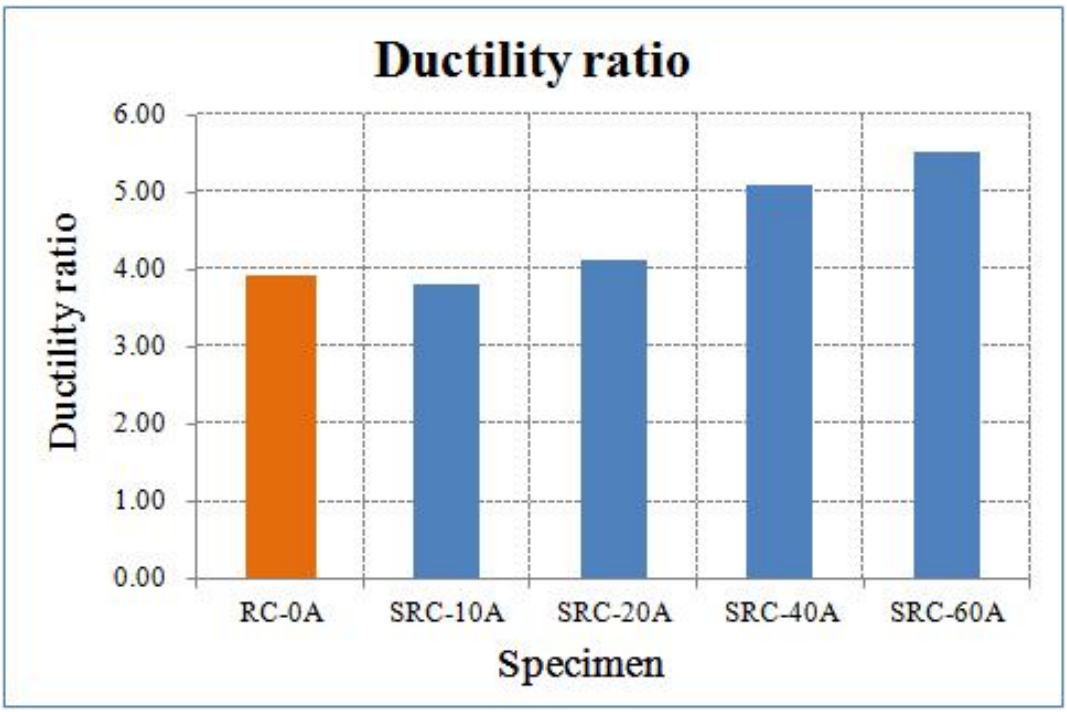
<그림 2.2.323> 실험체별 최대 하중 비교

(아) 연성비 특성

SHCC 복합 슬래브 실험체의 연성비는 곡률연성비로 평가하였고, 식 2.2.113과 같다.

$$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y} \qquad 2.2.113$$

여기서, μ는 곡률 연성비, ϕ_u는 극한 곡률, ϕ_y는 항복곡률을 나타낸다. 한편 극한 곡률(ϕ_u)은 압축연단 콘크리트의 변형률이 0.003일때의 곡률로 정의하였다. 연성비를 비교해 보면, SHCC를 이용한 SRC-10, 20, 40, 60A 실험체의 연성비는 각각 3.80, 4.12, 5.10, 5.53으로써 동일조건의 기준 실험체인 3.91보다 각각 0.97배, 1.05배, 1.30배, 1.41배 증가한 것을 알 수 있다. 이는 SHCC가 목표 한계 인장 변형률을 2.0%를 초과하여 더 이상 내력에 기여를 하지 못해도 부재의 연성능력을 향상 시키는데 기여한다는 것을 의미하며, SHCC의 목표 한계 인장변형률 2.0%를 증가시키는 경우에는 보다 큰 연성비 증가효과를 기대할 수 있음을 의미한다고 할 수 있다. 한편 SRC-10A 와 SRC-20A 실험체의 경우 기준실험체와 유사한 연성을 나타내 균열제어 효과만 있는 것으로 판단되었다.



<그림 2.2.324> 실험체별 연성비 비교

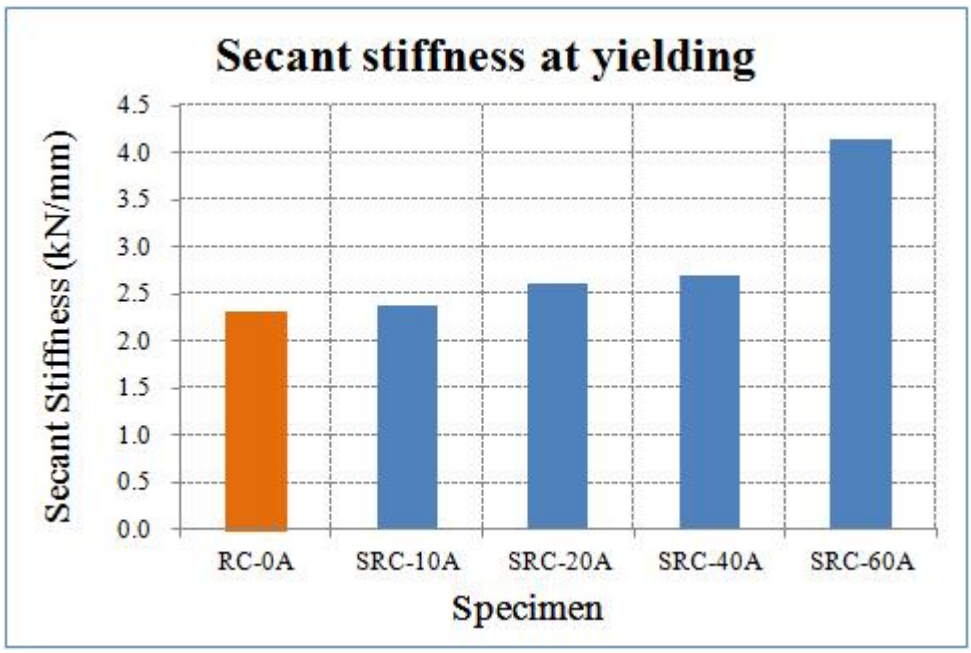
(자) 강성비 특성

SHCC 복합 슬래브 실험체의 강성비는 Secant Stiffness at yielding으로 평가하였으며, 식 2.2.114와 같다.

$$K_E = \frac{M_y}{\phi_y} \qquad 2.2.114$$

여기서 K_E는 초기강성비로서, M_y는 항복하중을, ϕ_y는 항복곡률을 나타낸다. <그림 2.2.325>로부터 강성비를 비교해 보면, 기준실험체는 2.3 kN/㎜, SRC-10A 실험체는 2.4 kN/㎜, SRC-20A 실험체는 2.6 kN/㎜, SRC-40A 실험체는 2.7 kN/㎜, SRC-60A 실험체는 4.2 kN/㎜으로 나타났다.

각 실험체별로 기준실험체에 비해 1.04배에서 1.83배까지 증가하였으며, SRC-60A 실험체가 1.83배의 높은 강성비를 나타냈다.



<그림 2.2.325> 실험체별 강성 비교

(4) 실험 결론

SHCC 복합구조 바닥슬래브의 성능을 휨 재하실험을 통해 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

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

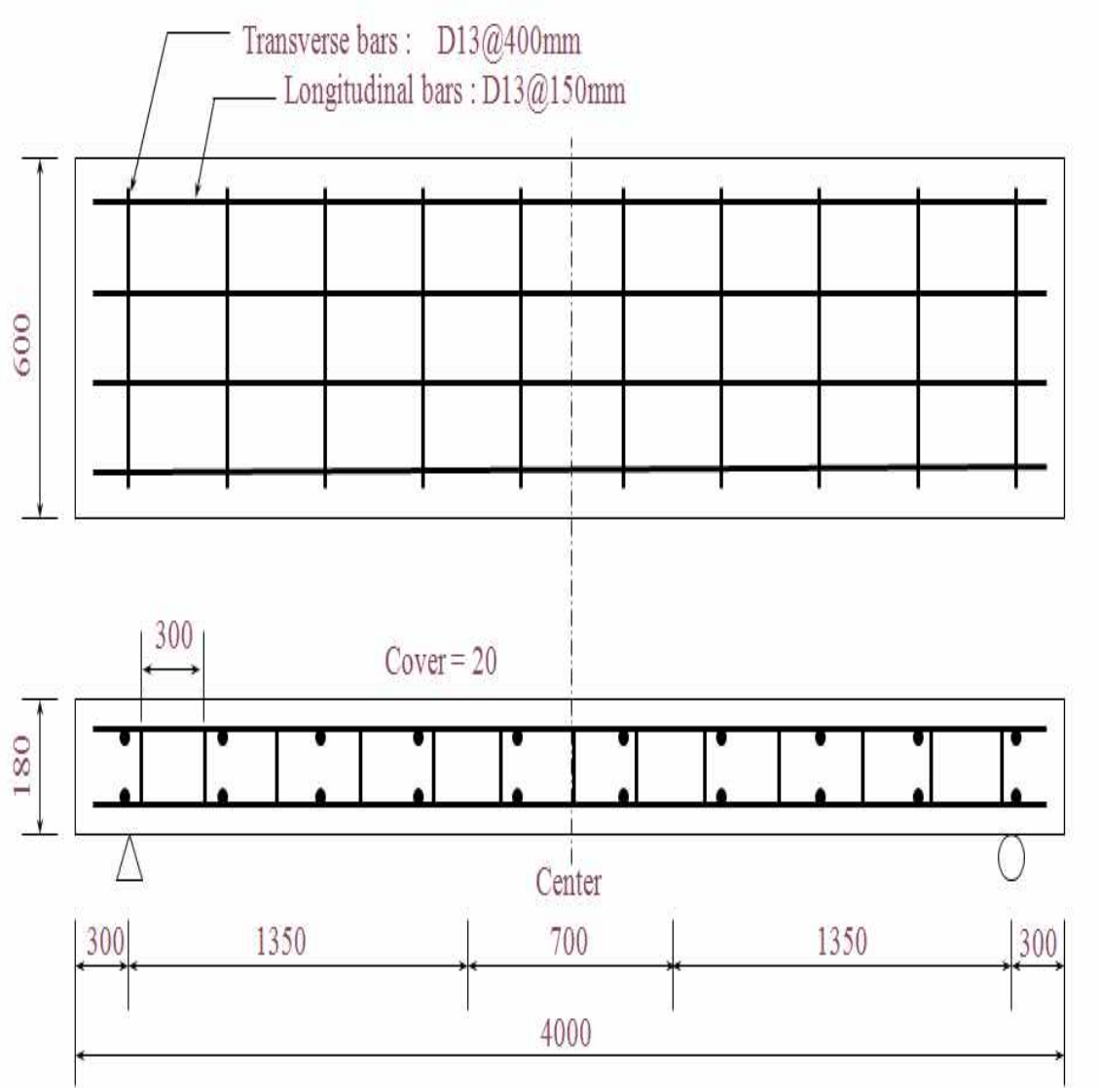
2) 개발된 복합바닥구조시스템의 4점 휨 실험에 의한 성능평가에서 기존 철근콘크리트 슬래브 구조에 비해 다중미세균열 유발에 의한 국부균열 및 휨 균열 제어 효과로 인해 높은 휨 내력을 발휘하였다.

3) 시공공정 및 구조상세 개발과 함께 SHCC패널의 현장적용에 관한 구체적인 추가 연구를 통해서 실용화공법으로의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

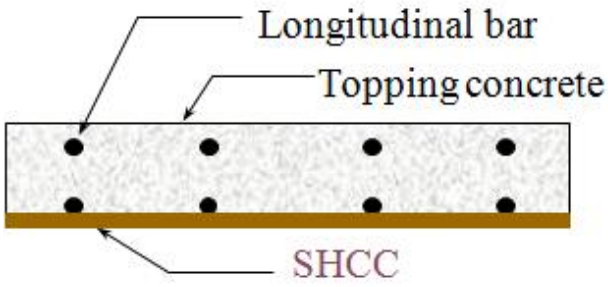
다. SHCC 복합바닥구조 시스템 개발을 위한 콘크리트 슬래브의 설계강도

(1) SHCC 복합바닥구조 적용 슬래브의 설계 휨강도

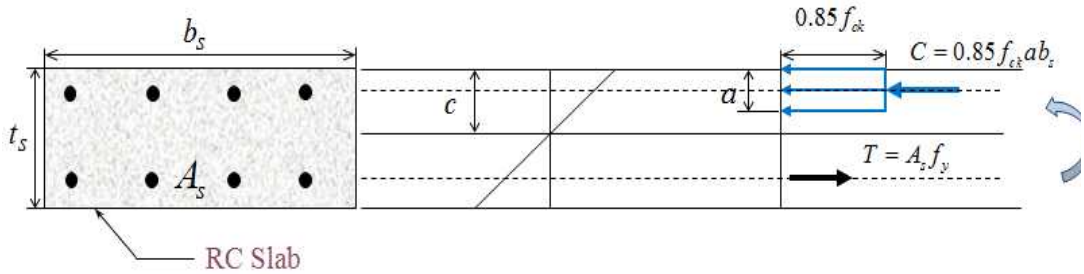
고연성 시멘트복합재료 개발하여 복합바닥구조시스템 개발을 위한 슬래브 설계 휨강도는 다음 <그림 2.2.326>과 같이 휨모멘트 조합에 따라서 다음과 같이 산정할 수 있다.



<그림 2.2.326> 실험체 상세 및 휨모멘트 작용 평형 관계 1



(a) SHCC 슬래브 실험체 상세 (평면도, 단면도)



(b) 휨모멘트 작용 일반 RC슬래브단면에서의 평형 관계

<그림 2.2.327> 실험체 상세 및 휨모멘트 작용 평형 관계 2

(2) 일반 RC 슬래브 설계 휨강도

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

내적으로 압축영역에 발달하는 압축합력, C

$$C = 0.85 f_{ck} a b_s \qquad 2.2.115$$

인장영역에 생기는 인장합력, T

$$T = A_s f_y \qquad 2.2.116$$

외적으로 작용하는 합력 N 은 0 이므로 수평력들의 합 ($\sum F = 0$) 은

$$C - T = 0$$
$$C = T \qquad 2.2.117$$

콘크리트의 실제 비선형 응력분포에서 얻어지는 압축합력의 크기와 작용위치가 같도록 하는 등가의 직사각형 응력블럭의 깊이 a 는 아래와 같이 표현된다.
식 2.2.117에서, $C = T$ 이므로

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

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_{ck} b_s} \qquad 2.2.118$$

실험결과에 따라 직사각형의 응력블럭의 깊이 a 는 압축연단에서 중립축 c 와 관계되어 있다.

$$c = \frac{a}{\beta_1} \qquad 2.2.119$$

여기서,

b_s, t_s, d : 슬래브단면의 폭, 높이, 유효깊이
A_s : 인장철근의 단면적
f_{ck}, f_y : 일반 콘크리트의 압축강도, 인장철근의 응력
jd : 팔길이, $d - \frac{a}{2}$
β_1 : (ACI)에서 제시, 0.85

인장영역, T 가 작용하는 점에서 휨모멘트 M_{n1} 을 구하면,

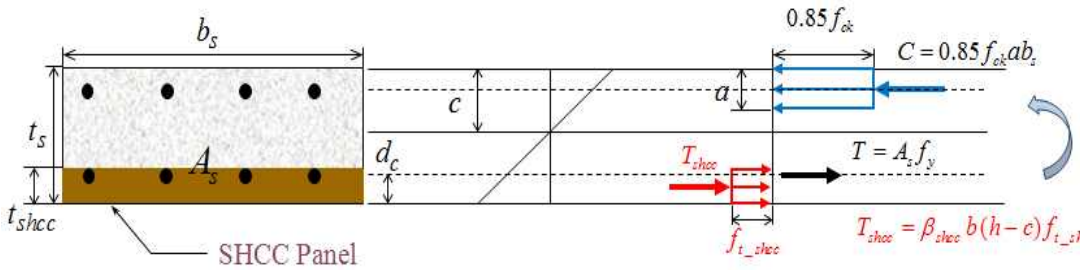
$$M_{n1} = Cjd = 0.85 f_{ck} a b (d - \frac{a}{2}) \qquad 2.2.120$$

압축영역, C 가 작용하는 점에서 휨모멘트 M_{n2} 를 구하면,

$$M_{n2} = Tjd = A_s f_y (d - \frac{a}{2}) \qquad 2.2.121$$

가 된다. 내부 저항력은 수평방향(축방향) 평형방정식을 만족하기 위하여 동일한 팔거리를 가지므로 크기가 같아야 한다. 따라서, $M_{n1} = M_{n2} = M_n$ 이 되어 단면의 공칭 휨모멘트 강도 M_n 은 다음과 같다.

$$M_n = (C \text{ or } T)(d - \frac{a}{2}) \\ = 0.85 f_{ck} ab(d - \frac{a}{2}) = A_s f_y (d - \frac{a}{2}) \qquad 2.2.122$$



(c) 휨모멘트 작용 SHCC-Panel 슬래브단면에서의 평형 관계

〈그림 2.2.328〉 슬래브 단면에서의 평형 관계

(3) SHCC-Panel 슬래브 설계 휨강도

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

내적으로 압축영역에 발달하는 압축합력, C_{shcc}

$$C_{shcc} = 0.85 f_{ck} a b_s \qquad 2.2.123$$

인장영역에 생기는 인장합력, T_{shcc}

$$T_{shcc} = A_s f_y + f_{t_shcc} t_{shcc} b_s \qquad 2.2.124$$

외적으로 작용하는 합력 N_{shcc} 은 0 이므로 수평력들의 합 ($\sum F = 0$) 은,

$C - T = 0$

$$C = T \qquad 2.2.125$$

고연성 콘크리트의 실제 비선형 응력분포에서 얻어지는 압축합력의 크기와 작용위치가 같도록 하는 등가의 직사각형 응력블럭의 깊이 a_{shcc} 는 아래와 같이 표현된다. 식 2.2.126을 참고 하여 다시 식을 유도한다. 식 2.2.123에서, $C = T$ 이므로

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

$$a_{shcc} = \frac{A_s f_y + f_{t_shcc} t_{shcc} b_s}{0.85 f_{ck} b_s} \qquad 2.2.126$$

실험결과에 따라 직사각형의 응력블럭의 깊이 a_{shcc} 는 압축연단에서 중립축 c_{shcc} 와 관계되어 있다.

$$c_{shcc} = \frac{a_{shcc}}{\beta_1} \qquad 2.2.127$$

여기서,

b_s, h, d : 슬래브단면의 폭, 높이, 유효깊이
t_{shcc} : SHCC의 두께
A_s : 인장철근의 단면적
f_{ck}, f_{t_shcc}, f_y : 일반 콘크리트의 압축강도, SHCC의 인장강도, 인장철근의 응력
β_1 : (ACI)에서 제시, 0.85

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

중립축 위치 c_{shcc} 에서 압축영역에 작용하는 휨모멘트 M_{n_shcc1} 을 구하면,

$$M_{n_shcc1} = 0.85 f_{ck} a_{shcc} b_s (c_{shcc} - \frac{a_{shcc}}{2}) \qquad 2.2.128$$

중립축 위치 c_{shcc} 에서 인장영역에 작용하는 휨모멘트 M_{n_shc2} 를 구하면,

$$M_{n_shc2} = \beta_{shcc} f_{t_shc} b_s t_{shcc} (t_s - c_{shcc} - \frac{t_{shcc}}{2}) + A_s f_y (t_s - c_{shcc} - d_c)$$

2.2.129

가 된다. 여기서, β_{shcc} = 1 이다. 내부저항력은 중립축 위치 c_{shcc} 를 기준으로 압축영역과 인장역역 발생한 휨모멘트는의 합력에 의하여 유도할 수 있다. 따라서, $M_{n_shcc} = M_{n_shcc1} + M_{n_shc2}$ 이 되어 단면의 공칭 휨모멘트 강도 M_{n_shcc} 은 다음과 같다.

$$M_{n_shc2} = \beta_{shcc} f_{t_shc} b_s t_{shcc} (t_s - c_{shcc} - \frac{t_{shcc}}{2}) + A_s f_y (t_s - c_{shcc} - d_c)$$

2.2.130

라. SHCC 복합바닥구조 적용 슬래브 실험체의 설계강도

본 장의 앞 절들에서 소개된 고연성 시멘트 복합재료를 이용한 SHCC 복합 바닥구조를 적용한 철근콘크리트 슬래브에 대한 설계 강도 산정을 이용하여, 앞 장에서 소개된 SHCC-Panel 슬래브를 적용한 시험체에 대한 설계 강도를 추정하였다. 대상 시험체의 실험 결과에 의한 극한 내력과 설계 강도 추정 결과를 비교하여 다음의 <표 2.2.118>에 나타났다.

<표 2.2.118> 대상 시험체의 실험에 의한 극한 내력 및 설계강도 추정결과 비교

Specimen Name	Second slope after cracks		Initial yielding of bar		Max. values (Test)		Design values (Predicted)	
	Disp. (㎜)	Load (kN)	Disp. (㎜)	Load (kN)	disp. (㎜)	Load (kN)	Mn (kN-m)	Load (kN)
RC-0A	0.9	6.6	21.1	49.0	82.5	56.4	31.1	46.1
SHCC-10A	1.4	7.1	22.7	54.1	86.3	56.7	34.5	51.1
SHCC-20A	1.8	13.4	21.7	56.9	89.5	57.8	37.6	55.7
SHCC-40A	3.1	21.0	24.0	64.8	122.4	65.7	43.2	64.0
SHCC-60A	3.0	32.8	21.5	89.3	118.9	90.3	47.8	70.8

마. SHCC 복합바닥체의 내화성능 실험

(1) SHCC 복합바닥체의 내화성능 평가를 위한 가열 실험

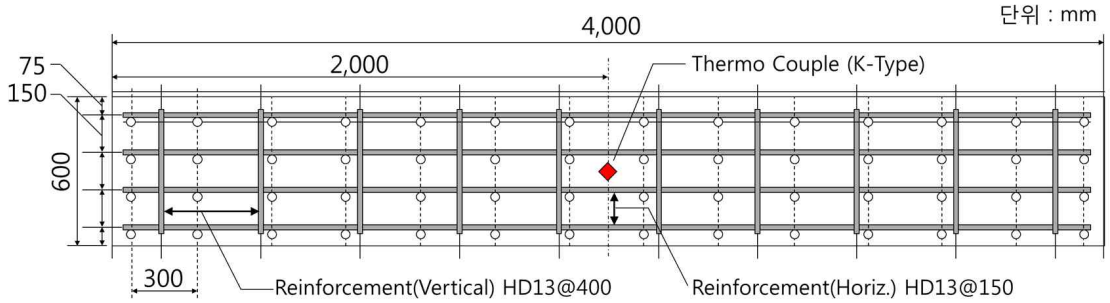
지하공간내 가연물의 연소실험을 통하여 발열량과 최고온도를 파악할 수 있었다. 이에 따라 기존 슬래브는 ISO 834 2시간(α=460)으로 내화성능을 규정하고 있지만, 지하공간내 지하주차장의 차량화재를 고려한 화재가혹도 α=510을 도출하였으며, 이를 이용하여 기존 ISO 834(α=460) 와 다른 α=510의 가열곡선을 설정하였다. α=510의 값은 기존 ISO 834(α=460) 표준가열곡선보다 높은 화재를 가력하기 때문에 기존 슬래브에 적용되었던 내화성능을 2시간보다 더 높은 3시간의 내화성능이 필요하다고 판단 되어진다. SHCC는 높은 변형률과 더불어 내화성능이 좋기 때문에 기존에 사용되던 보수보강재들보다 경제성과 시공성이 뛰어나다.
이에 본 연구는 슬래브 부재를 강도별, SHCC 피복두께별 변수를 설정하여 10개 제작하고, 지하주차장의 차량화재를 고려한 내화실험을 실시하여 슬래브 부재의 구조적 안전성을 확인하고자 한다.

(2) 내화 가열 실험 계획

주차장공간에서 차량화재 발생 시 구조물의 내화성능을 검토하기 위해 부재온도, 역학성상, 폭렬성상을 검토하고자 하였다.
시험체는 기존 시험체와 동일하게 제작하였으며(기존 시험체 포함), 다음 <그림 2.2.329>와 같이 4000×600×180mm Size의 실대형 슬래브로 총 10개를 제작하였으며, 1방향 슬래브 형태로 상하부에 SD40급 HD13 4본을 배근하였다. 또한, 가열시 시험체의 내부 온도측정을 위해 시험체 중앙에 K-Type 열전대를 0mm, 20mm, 40mm, 60mm, 100mm 5개를 설치하였으며, 시험체의 배합은 <표 2.2.119>와 같이 일반강도(30MPa)와 고강도(50MPa)로 설계하였다. 또한, 각각의 시험체에 대한 구별의 편의성을 위해 다음 <그림 2.2.330>과 같이 나타내었다.

<표 2.2.119> 시험체 배합

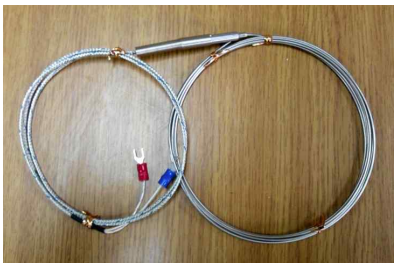
f_{ck} (MPa)	W/B (wt.)	Slump (mm)	Air (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m^3)						
					W	B	OPC	S	G	FA	A
30	40	150±50	4.5±1.5	47.5	166	414	331	802	900	83	4.97
50	27.5	150±50	3.5±1.5	44.1	164	596	477	674	868	119	7.15



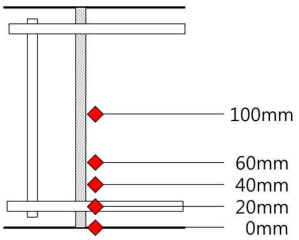
(a) 슬래브 시험체 상세도면 (평면도)



(b) 슬래브 시험체 상세도면 (입면도)

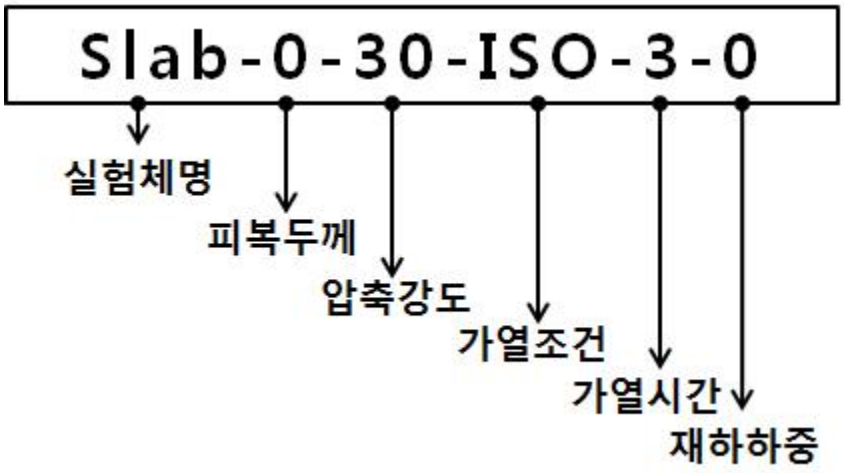


(c) K-Type 열전대



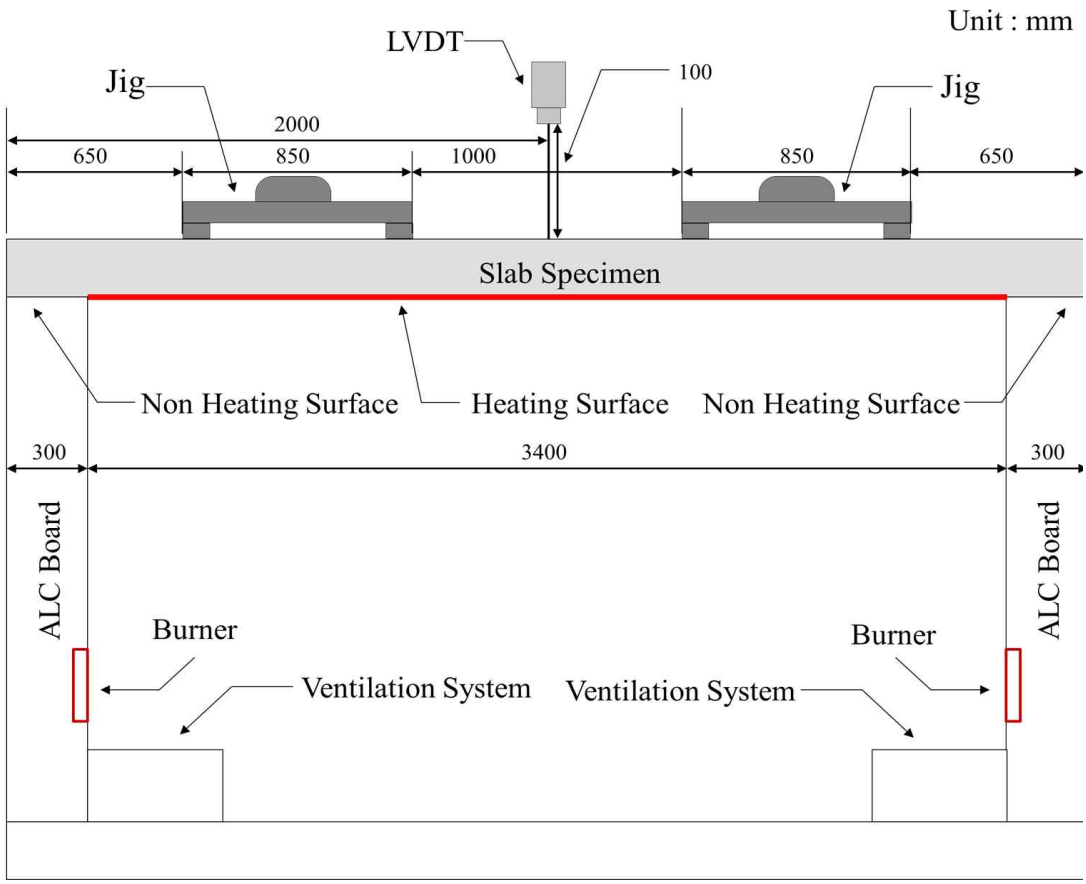
(d) 깊이별 열전대 매립위치

<그림 2.2.329> 시험체 도면 및 열전대 설치위치

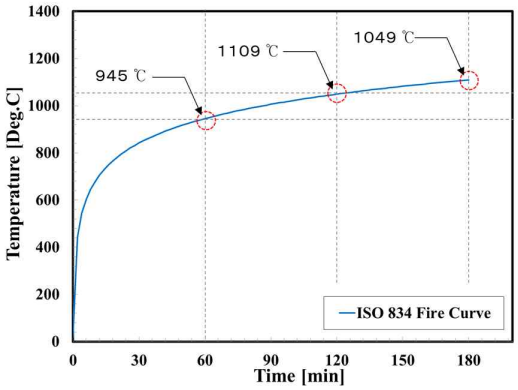


<그림 2.2.330> 시험체 주기표

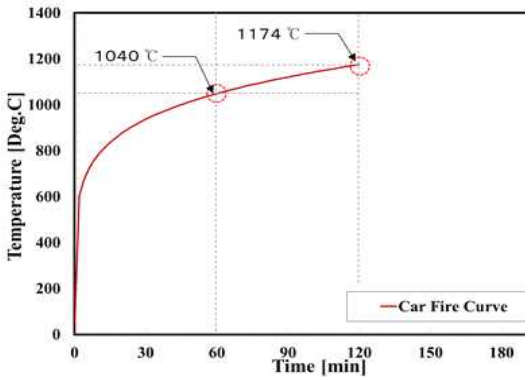
가열실험 방법은 다음 <그림 2.2.331>과 같이 슬래브 하부 1면 가열실험을 실시하였으며, 가열시 재하조건을 설정하기 위하여 Jig 2개를 설치하였다. Jig의 무게는 콘크리트 구조설계기준89)에 의거하여 파괴모드 검토를 통해, 4.4kN의 하중을 도출하였으며, 4분점 재하방식을 이용하여 가열면 3400mm에서 850mm 지점에 Jig 2개 700kg의 하중을 가하도록 설정하였다. 가열시 처짐량을 확인하기 위해 중심부에 LVDT를 설치하였으며, 화재규모는 다음 <그림 2.2.332>와 같이 차량연소실험을 통해 도출된 차량화재곡선(중형승용차; 안전측, 즉 ISO 834에서 가까운 곡선)과 기존 내화성능기준에 이용되는 ISO834 및 KS F-2257에 의거하였으며, 가열조건에 따라 1시간, 2시간, 3시간으로 가열을 실시하였다.
내화 가열시 세부조건과 측정항목에 대하여, <표 2.2.120>과 <표 2.2.121>에 정리하여 나타낸 것이며, 다음 <그림 2.2.333>은 가열실험 전 슬래브 시험체에 대한 사진이다.



<그림 2.2.331> 수평 가열로 도면 및 가열시험 형상



(a) ISO 834 및 KS F-2256 화재가열곡선



(b) 차량화재를 가정한 화재가열곡선

<그림 2.2.332> 내화 실험 가열 조건

<표 2.2.120> 내화 시험 조건

시험체 명		피복두께 (mm)	압축강도 (MPa)	가열조건 (Curve)	가열시간 (Hour)	하중 (kN)
1	Slab-0-30-Vehicle-1-0	0	30	차량화재	1	0
2	Slab-0-30-Vehicle-2-0	0	30	차량화재	2	0
3	Slab-0-30-ISO-2-0	0	30	ISO 834	2	0
4	Slab-0-30-ISO-3-0	0	30	ISO 834	3	0
5	Slab-0-30-ISO-3-700	0	30	ISO 834	3	700
6	Slab-0-50-ISO-3-700	0	50	ISO 834	3	700
7	Slab-40-30-ISO-3-700	40	30	ISO 834	3	700
8	Slab-40-50-ISO-3-700	40	50	ISO 834	3	700
9	Slab-60-30-ISO-3-700	60	30	ISO 834	3	700
10	Slab-60-50-ISO-3-700	60	50	ISO 834	3	700

<표 2.2.121> 내화 시험 측정항목

시험체 명		측정항목			
		가열중		가열후	
		내부 온도	시간-변형	폭렬 형태	균열 특성
1	Slab-0-30-Vehicle-1-0	O	X	O	O
2	Slab-0-30-Vehicle-2-0	O	X	O	O
3	Slab-0-30-ISO-2-0	O	X	O	O
4	Slab-0-30-ISO-3-0	O	O	O	O
5	Slab-0-30-ISO-3-700	O	O	O	O
6	Slab-0-50-ISO-3-700	O	O	O	O
6	Slab-0-50-ISO-3-700	O	O	O	O
7	Slab-40-30-ISO-3-700	O	O	O	O
8	Slab-40-50-ISO-3-700	O	O	O	O
9	Slab-60-30-ISO-3-700	O	O	O	O
10	Slab-60-50-ISO-3-700	O	O	O	O



(a) 열전대 매립 형상



(b) 바닥면 마감처리



(c) LVDT 장비



(d) Jig 형상



(e) 실험체 형상<평면>



(f) 실험체 형상<정면>



(g) 실험체 형상<측면>



(h) 가열전 형상

<그림 2.2.333> 내화 시험 전 형상

(3) 내화 가열 실험 결과 및 분석

(가) 가열시 수열온도 특성

슬래브 내화 가열실험 결과, 각각의 슬래브 내부 온도분포 그래프를 다음 <그림 2.2.334>에 나타내었으며, 세부 사항을 <표 2.2.122>에 나타내었다.

총 10개의 시험체에서 표면(0mm)의 온도는 각각 953.5℃, 996.9℃, 991.4℃, 978.6℃, 695.6℃, 910℃로 측정되었으며, 표면의 온도에서는 차량화재를 고려한 2시간 가열의 온도가 가장 높게 나타났다. 반면, 시험체 5에서 가장 낮은 온도가 측정된 원인으로서 타설시 열전대가 표면부보다 높게 설치되어 전체적인 온도가 낮게 측정되었다고 판단된다.

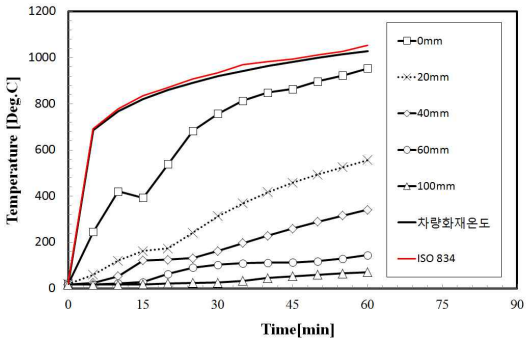
또한, RC 구조물 화재 피해시 가장 중요한 요소 중 하나인 철근의 온도특성으로서, 일반적으로 철근의 허용온도는 550℃～600℃의 범위이며, 허용온도 범위를 초과하면 철근은 휘어지는 현상이 나타나고, 기둥과 같은 주요부재에서는 좌굴이 발생하여 구조물이 붕괴되는 현상까지 초래한다. 이에 따라 철근위치(20mm)의 온도특성을 비교하고자 하였다. 온도특성 비교는 가열시 가열로온도, 표면의 온도가 각각 다른 것을 고려하였으며, 시험체 3의 표면에서의 초기온도를 기준 값으로 설정하여 철근위치의 온도를 비교하였다.

시험체 1～3의 철근위치의 온도 비교결과, 차량화재를 입은 시험체 2가 표준화재를 입은 시험체 3보다 약 25℃ 높게 나타났다. 또한, 시험체 4～6의 철근위치의 온도 비교결과, 일반강도(30MPa)와 고강도(50MPa)의 온도차이는 약 4℃로서 극히 미비하였다. 하지만 하중 재하를 가한 경우 비재하 시험체보다 약 93℃ 높게 측정되었다.

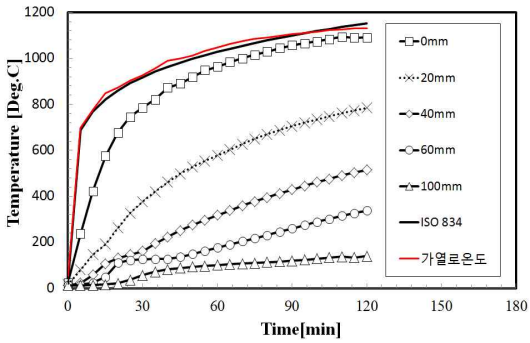
또한 SHCC가 적용된 시험체 7~10에서는 SHCC가 적용되지 않은 시험체보다 온도저감 효과가 우수하다는 것을 확인할 수 있었다. 표면부에서는 폭렬 및 균열에 의한 고온이 침투되어 온도변화의 차이는 크지 않았으나, 20mm부터 100mm까지 약 30℃~80℃까지 온도저감이 되는 것을 확인할 수 있었다.

<표 2.2.122> 시험체의 온도분포 결과

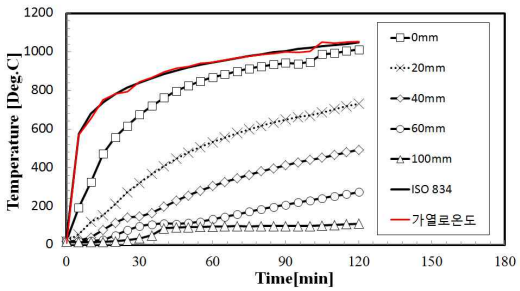
시험체 명		온도 분포 [℃]							
		mm	0min	30min	60min	90min	120min	150min	180min
1	Slab-0-30-Vehicle-1-0	0	20	757.5	953.5	가열 종료			
		20	20	313.3	555.9				
		40	17.2	162.8	341.7				
		60	16.7	102.6	144.7				
		100	16.8	25.6	70.6				
2	Slab-0-30-Vehicle-2-0	0	22.0	785.4	964.4	1056.8	1091.4	가열 종료	
		20	15.1	377.1	578.2	704.7	785.2		
		40	12.6	161.1	317.6	429.3	515.0		
		60	12.0	125.9	176.8	260.1	338.4		
		100	12.5	57.0	100.7	119.3	140.1		
3	Slab-0-30-ISO-2-0	0	18.7	674.3	867.0	941.9	1011.4	가열 종료	
		20	17.9	320.1	532.3	648.6	930.5		
		40	16.9	146.7	303.6	411.8	491.9		
		60	16.3	97.2	131.6	207.5	273.1		
		100	16.4	32.9	93.4	96.7	109.0		
4	Slab-0-30-ISO-3-0	0	11.9	472.3	698.2	813.4	893.8	941.9	978.6
		20	11.0	157.1	379.2	508.3	603.3	671.4	722.2
		40	10.5	116.6	214.2	332.3	420.3	488.5	540.9
		60	10.2	114.5	104.1	188.1	263.0	321.6	372.1
		100	9.8	30.7	90.7	101.1	102.8	130.2	165.1
5	Slab-0-30-ISO-3-700	0	17.8	218.7	395.5	513.5	589.2	646.6	695.6
		20	17.0	125.7	239.4	346.4	424.4	483.1	533.0
		40	16.4	108.6	123	177.7	241.3	294.1	340.2
		60	16.2	75.5	105.3	113.7	143.0	185.4	223.8
		100	15.4	20.2	60.7	76.1	91.2	99.2	105.7
6	Slab-0-50-ISO-3-700	0	26.3	363.3	604.3	711.3	783.5	851.1	910.6
		20	23.4	158.8	328.2	443.6	529.0	596.2	658.6
		40	21.2	111.2	197.4	296.5	378.9	442.9	499.6
		60	19.6	105.7	121.6	169.4	233.2	286.6	332.4
		100	17.5	29.8	80.4	91.6	106.6	127.8	152.8
7	Slab-40-30-ISO-3-700	0	18.8	471.6	672.6	794.7	873.0	928.9	966.9
		20	16.0	162.7	317.6	467.8	574.0	642.8	694.0
		40	14.4	101.1	114.5	257.5	347.1	412.1	464.2
		60	13.7	59.8	94.1	121.0	174.1	225.6	270.2
		100	13.3	20.2	58.3	74.0	95.6	110.7	127.6
8	Slab-40-50-ISO-3-700	0	24.8	584.4	75.4	856.6	914.4	955.9	990.5
		20	20.9	198.8	367.5	495.0	588.4	649.0	693.9
		40	13.7	100.4	164.4	256.9	345.5	405.0	453.1
		60	15.6	67.4	94.2	123.1	177.0	227.0	270.7
		100	10.5	19.6	41.7	76.8	93.2	107.1	126.5
9	Slab-60-30-ISO-3-700	0	15.6	396.8	624.5	744.9	829.5	895.5	953.7
		20	15.0	152.3	320.3	437.2	533.6	625.2	696.3
		40	15.1	99.8	155.5	235.8	316.4	409.9	481.2
		60	14.7	57.8	105.9	106.7	128.0	235.6	287.8
		100	14.5	19.2	51.4	80.6	86.4	90.7	99.8
10	Slab-60-50-ISO-3-700	0	27.0	622.7	814.7	902.0	956.8	1012.9	1050.6
		20	23.2	251.4	467.4	588.8	666.6	742.8	802.1
		40	20.3	113.0	217.7	318.6	403.8	491.7	561.4
		60	16.5	102.8	121.2	161.2	233.4	306.4	362.0
		100	13.7	16.6	40.6	59.1	69.0	80.2	96.2



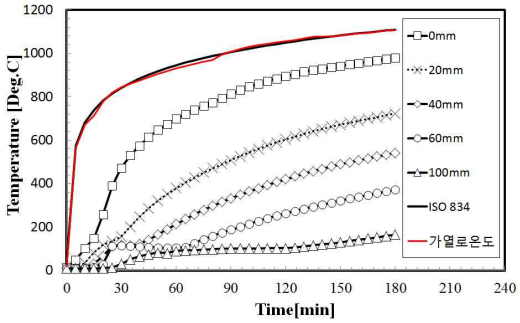
(a) 시험체 1 온도분포 그래프



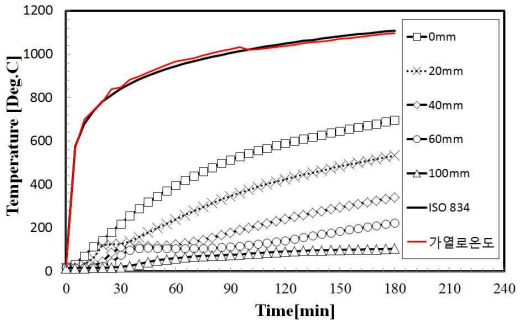
(b) 시험체 2 온도분포 그래프



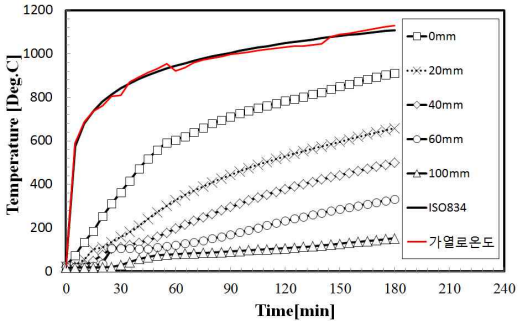
(c) 시험체 3 온도분포 그래프



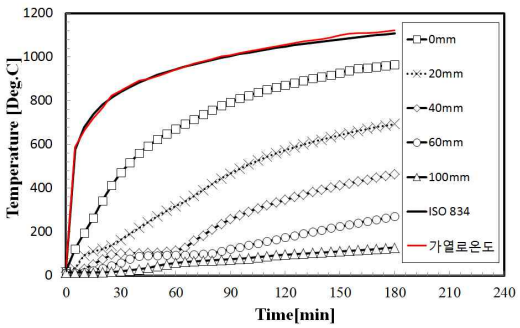
(d) 시험체 4 온도분포 그래프



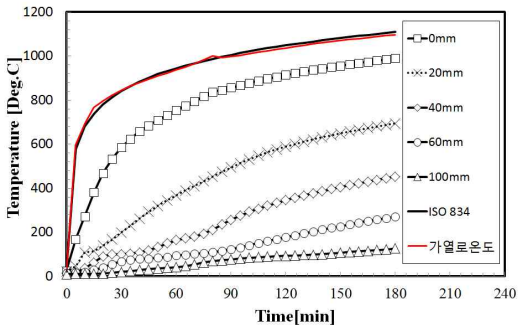
(e) 시험체 5 온도분포 그래프



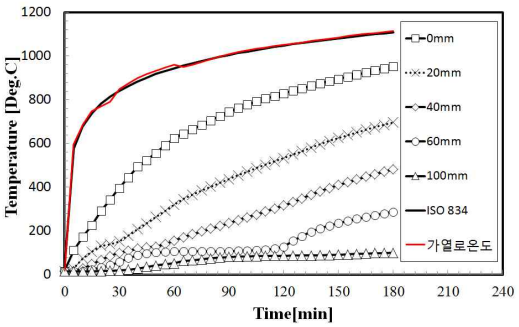
(f) 시험체 6 온도분포 그래프



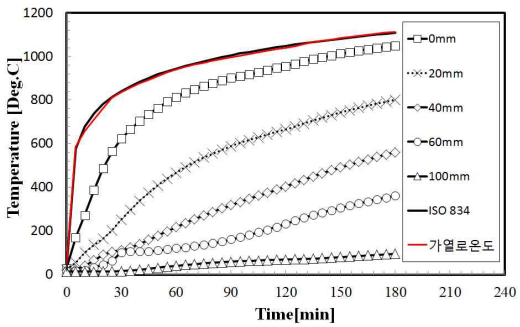
(g) 시험체 7 온도분포 그래프



(h) 시험체 8 온도분포 그래프



(i) 시험체 9 온도분포 그래프



(j) 시험체 10 온도분포 그래프

<그림 2.2.334> 내화 가열 시험 온도 결과 그래프

(나) 가열시 시간-변형(처짐) 특성

화재피해를 입는 RC 구조물의 경우 가열에 의한 변형은 중요요소의 항목이다. 특히 RC 구조물은 취성재료(Brittle Material)인 콘크리트와 연성재료(Ductile Material)인 철근의 혼합구조물이며, 가열시 변형량에 따라 구조물의 위험성을 확인할 수 있다. 일반적으로 콘크리트 설계기준에 의거하여 다음 <표 2.2.123>과 같이 처짐에 대해 제시되고 있으며, 본 연구는 1방향 슬래브의 단순지지 형태이므로 가열면 3400mm에 대한 1/20인 170mm의 처짐 변형량을 제한하고 있다.

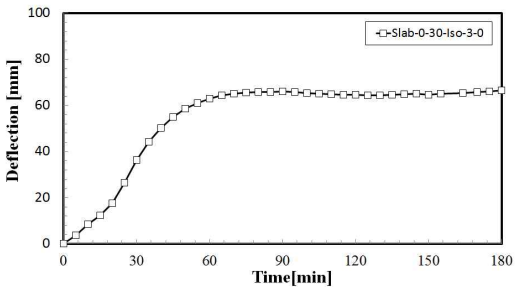
내화가열 실험 결과, 처짐의 데이터를 다음 <표 2.2.124>에 나타냈으며, 각각의 슬래브의 시간-변형을 다음 <그림 2.2.335>에 나타내었다. 또한, 시험체 4의 비재하 가열의 경우 최대 66.6mm의 변형현상이 나타났다. 동일 조건에서 시험체 5의 700kg 사용하중 재하가열의 경우는 109.1mm를 확인할 수 있었으며, 재하가열시 약 42.5mm가 계측되었고, 약 38%의 변형이 높게 나타났다. 시험체 6의 경우 온도분포와 같이 변형 값이 107mm가 계측되었으며 시험체 5의 변형과의 차이가 미비하였다.

<표 2.2.123> 콘크리트 설계기준

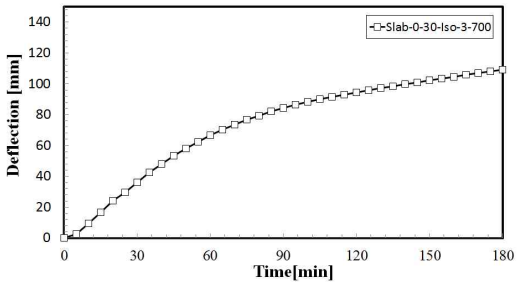
구조물 부재	최소 두께 [h]			
	단순 지지	1단 연속	양단 연속	캔틸레버
	큰 처짐에 의해 손상되기 쉬운 칸막이 벽이나 기타 구조물을지지 또는 부착하지 않은 부재			
1방향 슬래브	l/20	l/24	l/28	l/10
보	l/16	l/18.5	l/21	l/8
리브가 있는 1방향 슬래브				

<표 2.2.124> 시험체의 처짐량 결과

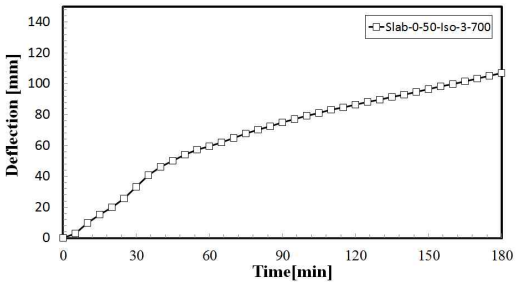
시험체 명		시간-변형(처짐) [mm]						
		0min	30min	60min	90min	120min	150min	180min
1	Slab-0-30-Vehicle-1-0	측정 하지 못함 (x)						
2	Slab-0-30-Vehicle-2-0							
3	Slab-0-30-ISO-2-0							
4	Slab-0-30-ISO-3-0	0	36.3	62.9	66	64.5	64.6	66.6
5	Slab-0-30-ISO-3-700	0	36.0	66.6	84.4	94.4	102.2	109.1
6	Slab-0-50-ISO-3-700	0	33.2	59.5	74.8	86.5	96.6	107.0
7	Slab-40-30-ISO-3-700	0	24.1	50.5	69.4	79.0	84.2	87.5
8	Slab-40-50-ISO-3-700	0	20.5	36.6	61.1	94.9	82.8	87.8
9	Slab-60-30-ISO-3-700	0	21.4	41.0	60.3	77.7	92.4	99.3
10	Slab-60-50-ISO-3-700	0	20.3	39.6	59.0	76.0	87.9	90.4



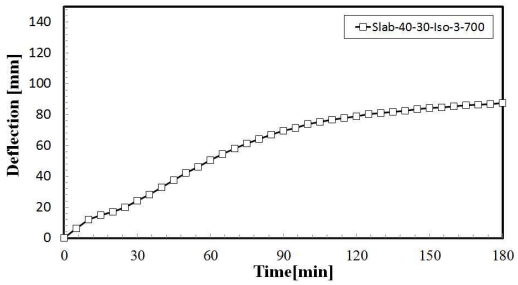
(a) 시험체 4 처짐량 그래프



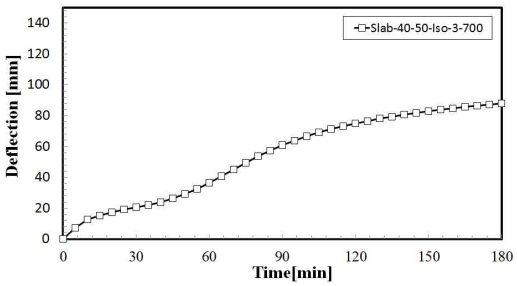
(b) 시험체 5 처짐량 그래프



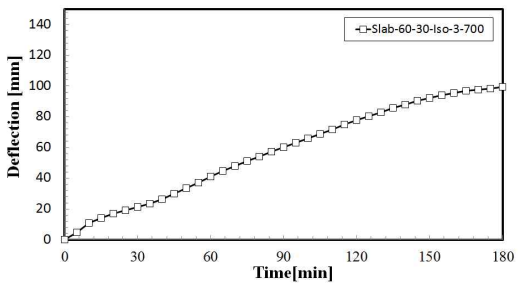
(c) 시험체 6 처짐량 그래프



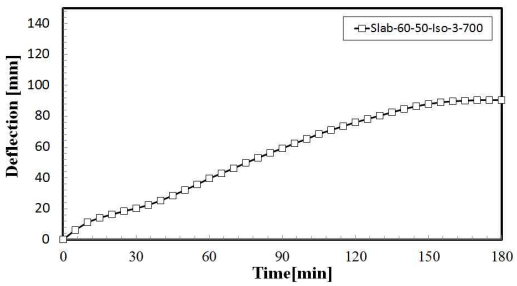
(d) 시험체 7 처짐량 그래프



(e) 시험체 8 처짐량 그래프



(f) 시험체 9 처짐량 그래프



(g) 시험체 10 처짐량 그래프

<그림 2.2.335> 내화 가열 시험 시간-변형 결과 그래프

(다) 가열 후 폭렬형상 및 하부균열

콘크리트의 내부온도 상승의 원인은 일반적으로 화재강도・가열시 폭렬(Explosive Spalling)에 의한 온도변화가 크게 발생함에 기인한다. 이에 따라, 본 연구는 가열 후 폭렬 및 균열의 특성에 대하여 조사를 실시하였다.

폭렬형상과 균열은 다음 <그림 2.2.336>과 같이 가로×세로 1cm씩 격자를 설정하여 바닥부분의 폭렬형상과 폭렬면적의 측정을 실시하였으며, 이에 대한 조사결과를 다음 <그림 2.2.337>에 나타내었다.

구조물의 안전성 평가를 위해 철근의 온도와 변형은 중요한 항목이다. 가열시간에 의해 폭렬・박락의 비율을 다음 <표 2.2.125>과 같이 도출할 수 있었다.
가열시간 1～2시간의 영향을 받은 시험체(1～3)은 각각 1.7m^2, 1.8m^2, 1.0m^2의 폭렬면적이 측정되었으며, 폭렬 면적 비율은 각각 8.33%, 8.82%, 4.90% 로 도출되어 전체 면적의 10% 내의 폭렬이 발생하였다.

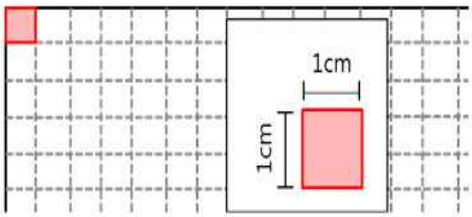
반면, 일반강도 시험체(4, 5)는 각각 폭렬 발생 면적 9.4m^2, 9.3m^2 가 측정되었으며, 전체의 바닥면적비율에 대해 46.07%, 45.58% 의 폭렬이 발생하였다.

한편, 고강도 시험체 (6)의 경우 폭렬면적이 13.7m^2로 가장 높은 범위가 측정되었으며, 전체의 바닥면적에 대해 최대 67%의 폭렬발생으로서 가장 높게 나타났다. 특히, 가열시간 3시간의 영향을 받은 시험체 (4～6)의 경우 부분적으로 철근이 노출되어 구조물의 위험성에 대한 문제가 확인되었으며, 주차 공간 구조물의 안전성에 대한 재검토가 필요하다고 판단된다.

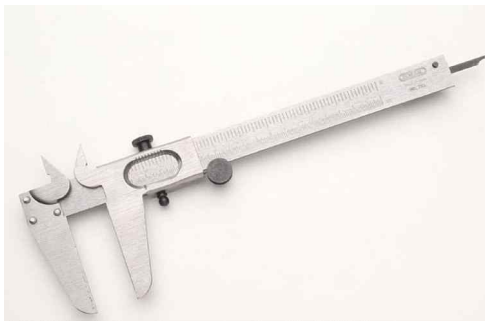
SHCC 패널이 사용된 시험체 (7~10)의 경우 가열면(하부)에서 다수의 균열 및 박리된 부분이 있었지만, 시험체 전체에서 폭렬이 발생하지 않았다. 이러한 원인은 일반 콘크리트의 경우 고온의 열이 콘크리트에 피해를 입히면, 내부의 수증기 팽창 및 내부 열응력으로 인해 폭렬이 발생하지만, SHCC 패널의 경우 섬유가 함유되어, 수증기가 배출되어 수증기 팽창을 해결하고 내부 공극 발생으로 인해 열응력을 억제시키기 때문에 고온에서도 폭렬이 발생하지 않는 것으로 사료된다.

<표 2.2.125> 가열 실험 후 폭렬발생 비율

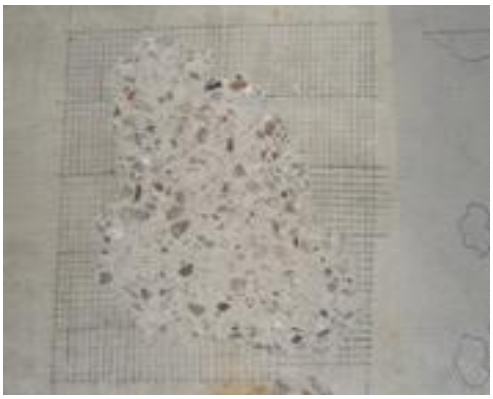
시험체 명		가열면적 (m^2)	폭렬 발생 면적 (m^2)	폭렬발생 면적비율(%)
1	Slab-0-30-Vehicle-1-0	1) 전체면적(m^2) 4×0.6 = 2.4m^2 2) 비가열면적(m^2) 0.3×0.6×2 =0.36m^2 3) 가열면적 =전체면적-비가열면적 2.04m^2	1.7	8.33
2	Slab-0-30-Vehicle-2-0		1.8	8.82
3	Slab-0-30-ISO-2-0		1.0	4.90
4	Slab-0-30-ISO-3-0		9.4	46.07
5	Slab-0-30-ISO-3-700		9.3	45.58
6	Slab-0-50-ISO-3-700		13.7	67.15
7	Slab-40-30-ISO-3-700		폭렬 발생 없음	
8	Slab-40-50-ISO-3-700			
9	Slab-60-30-ISO-3-700			
10	Slab-60-50-ISO-3-700			



(a) 폭렬 형상 측정 방법



(b) 폭렬 면적 및 깊이 측정 장비

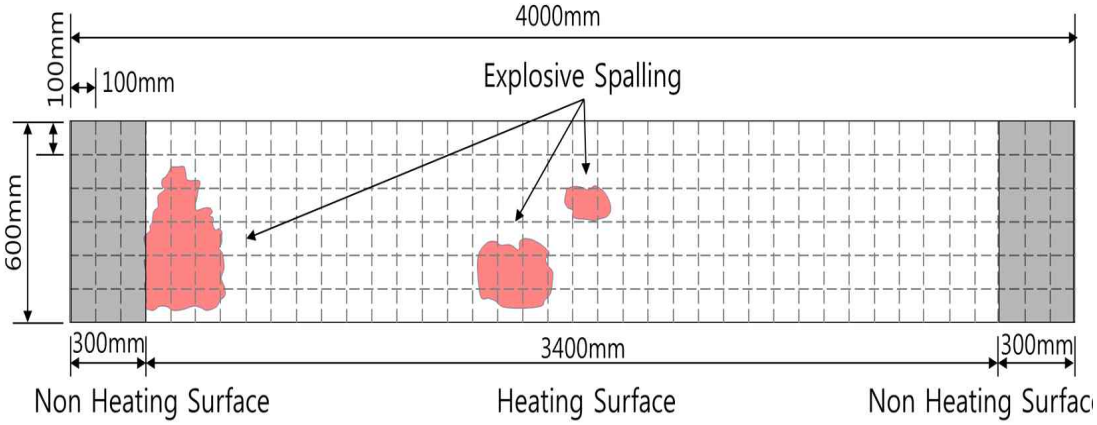


(c) 폭렬 너비 격자화

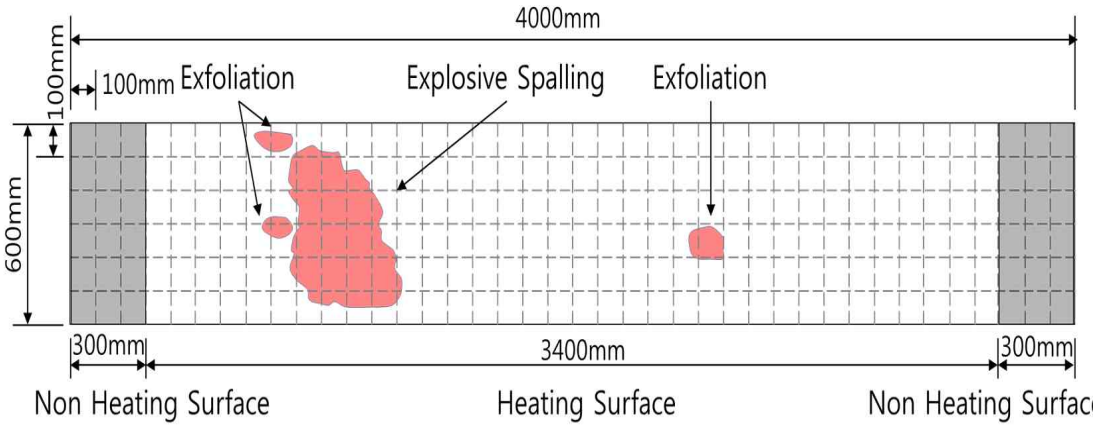


(d) 폭렬 형상 측정 사진

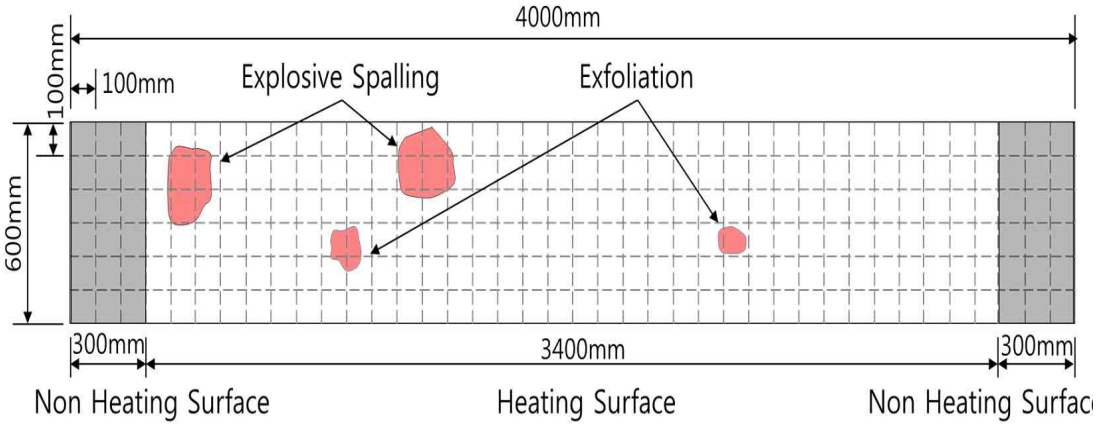
<그림 2.2.336> 폭렬 형상 측정 방법



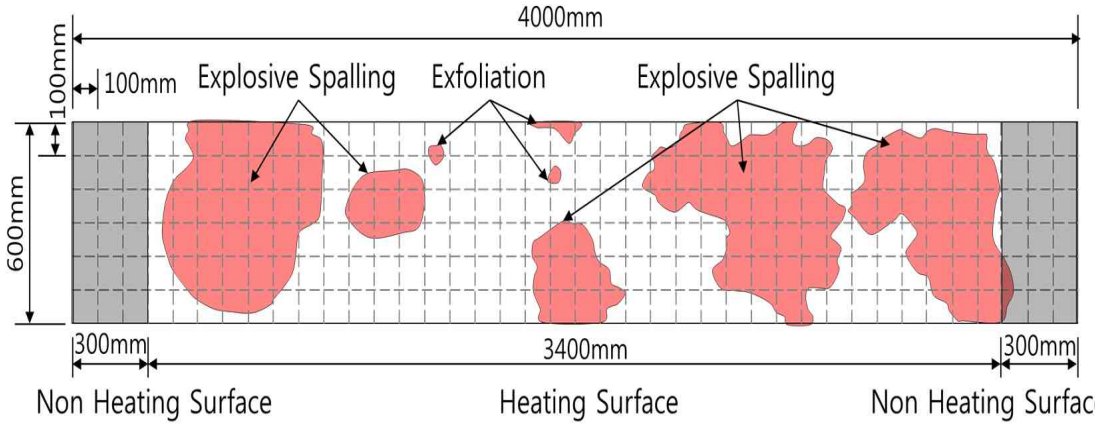
(a) Slab-0-30-Vehicle-1-0 폭렬형상 및 균열



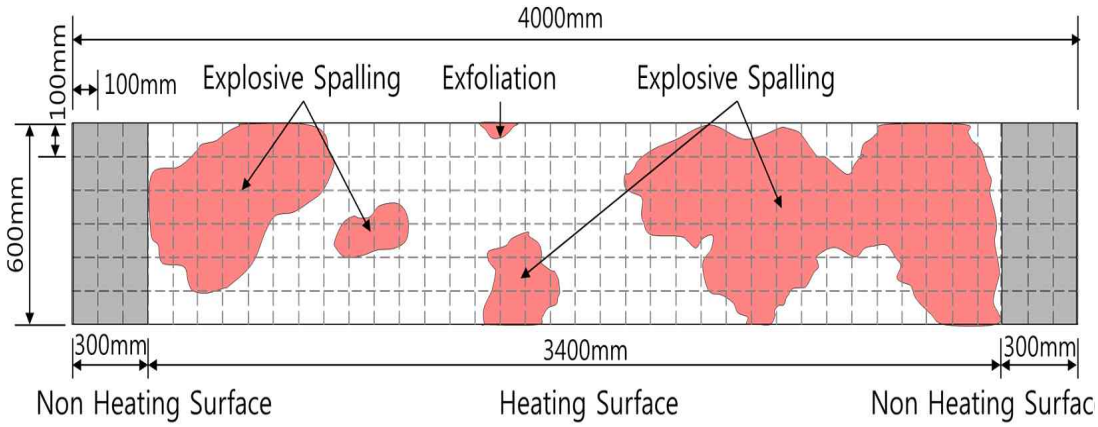
(b) Slab-0-30-Vehicle-2-0 폭렬형상 및 균열



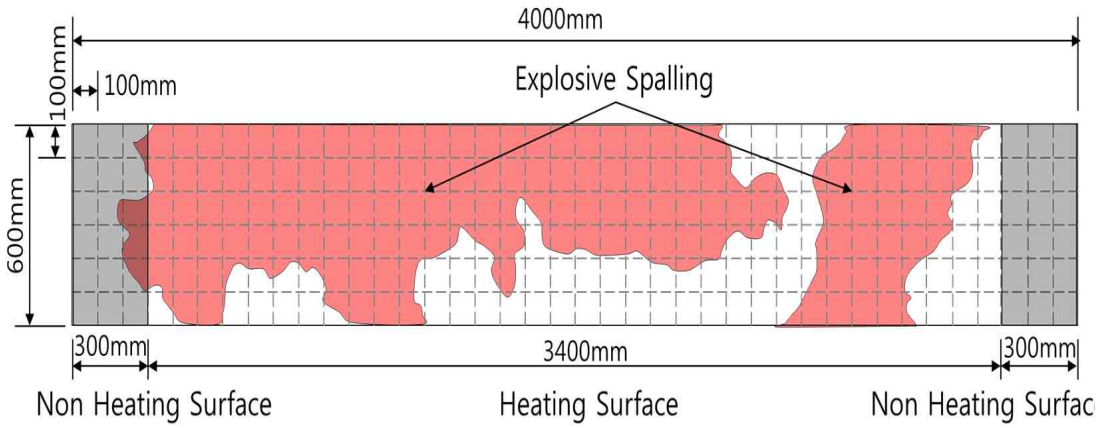
(c) Slab-0-30-ISO-2-0 폭렬형상 및 균열



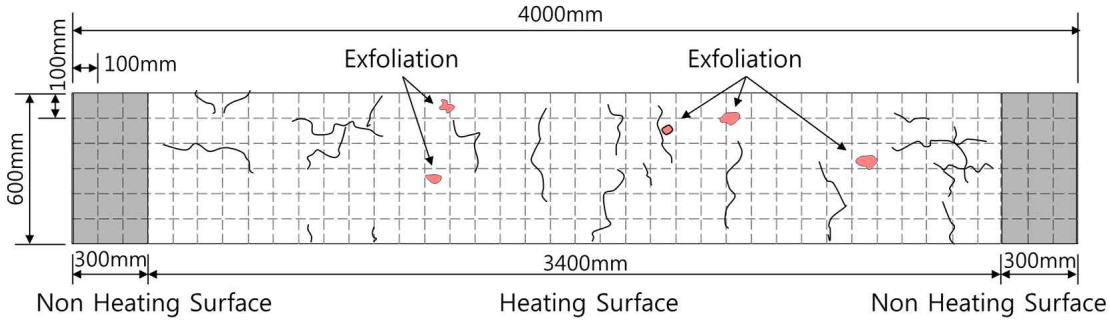
(d) Slab-0-30-ISO-3-0 폭렬형상 및 균열



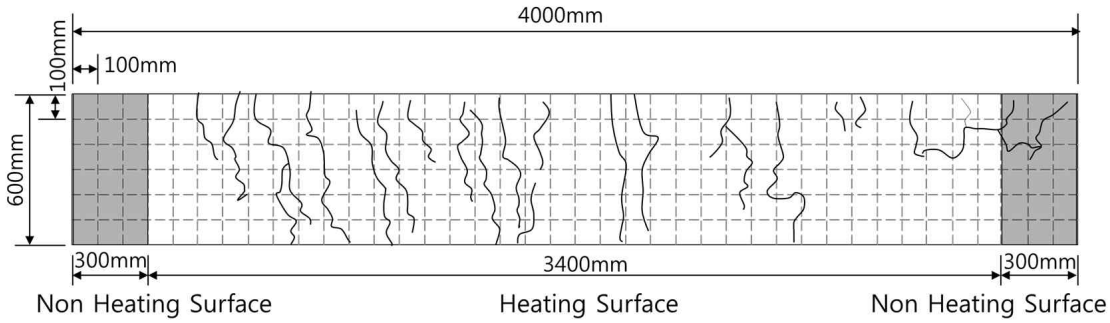
(e) Slab-0-30-ISO-3-700 폭렬형상 및 균열



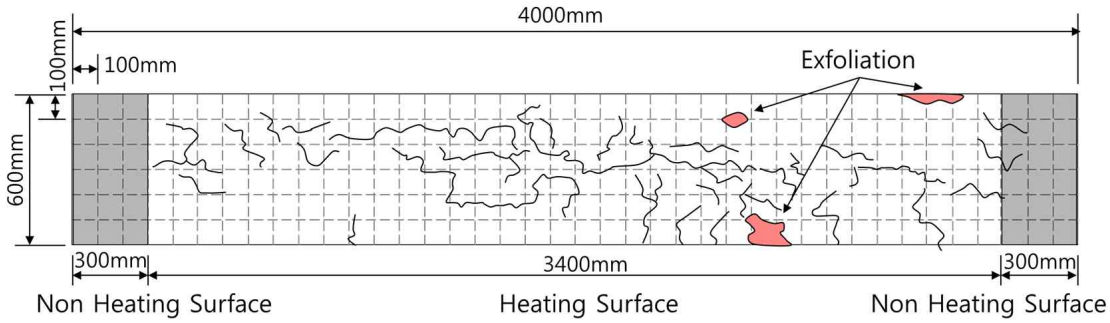
(f) Slab-0-50-ISO-3-700 폭렬형상 및 균열



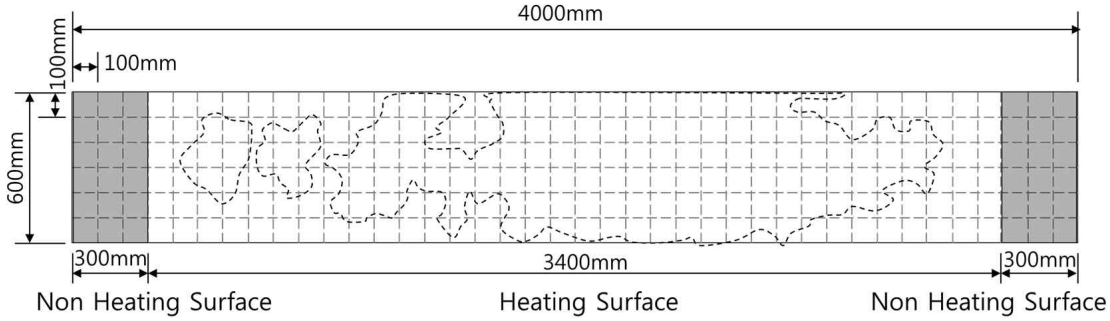
(g) Slab-40-30-ISO-3-700 폭렬형상 및 균열



(h) Slab-40-50-ISO-3-700 폭렬형상 및 균열



(i) Slab-60-30-ISO-3-700 폭렬형상 및 균열



(j) Slab-60-50-ISO-3-700 폭렬형상 및 균열

<그림 2.2.337> 폭렬 형상 측정 결과

바. SHCC 복합바닥체의 내화실험 이후 잔존내력 구조 실험

(1) 실험개요

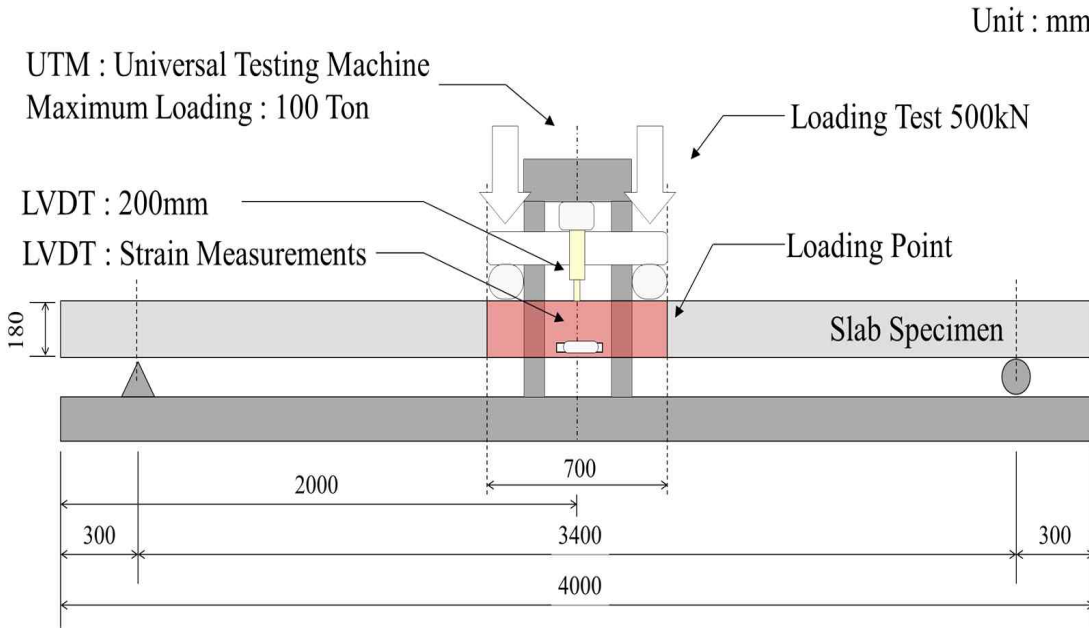
앞서 차량화재에 의한 주차장 구조물에 대한 검토를 위해 안전성검토를 수행하였으며, SHCC 패널에 추가된 부분에 대하여 추가적인 연구를 수행하였다. 전술한 내화성능평가 이후, 구조성능의 검토를 위해 냉각 후 구조물의 사용하중(Working Load)과 극한하중(Ultimate Load)을 검토하고자 하였다.

잔존내력 시험방법은 4분점 재하로써 다음 <그림 2.2.338>에 나타내었으며, <그림 2.2.339>은 구조실험에 대한 형상을 나타내었다.

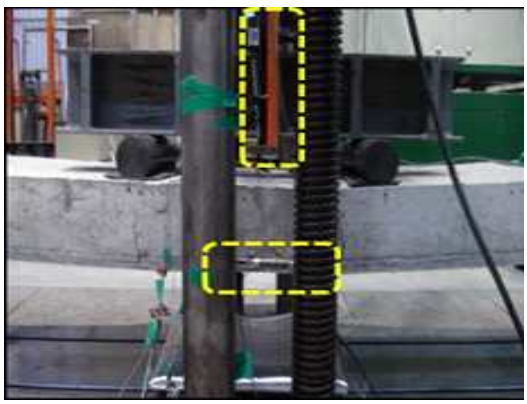
측정장비는 LVDT(Strain Measurements) 와 LVDT(200mm)를 수직과 수평으로 설치하여, 재하시 시험체의 변형량을 측정하였다. 또한, 시험체의 구조성능 검토를 위해 다음 <표 2.2.126>과 같이 하중-변형과 균열형상을 측정항목으로 설정하였으며, 재하 시 하중-변형의 특성을 사용하중과 극한하중으로 분류하였고, 재하 시 발생되는 균열형상은 측면균열과 하부균열로 분류하여 구조물의 성능을 검토하고자 하였다.

<표 2.2.126> 구조실험 측정항목

시험체 명		측정 항목	
		하중-변형	균열형상
0	Slab-30 <비가열>	O	O
1	Slab-0-30-Vehicle-1-0	O	O
2	Slab-0-30-Vehicle-2-0	O	O
3	Slab-0-30-ISO-2-0	O	O
4	Slab-0-30-ISO-3-0	O	O
5	Slab-0-30-ISO-3-700	O	O
6	Slab-0-50-ISO-3-700	O	O
7	Slab-40-30-ISO-3-700	O	O
8	Slab-40-50-ISO-3-700	O	O
9	Slab-60-30-ISO-3-700	O	O
10	Slab-60-50-ISO-3-700	O	O



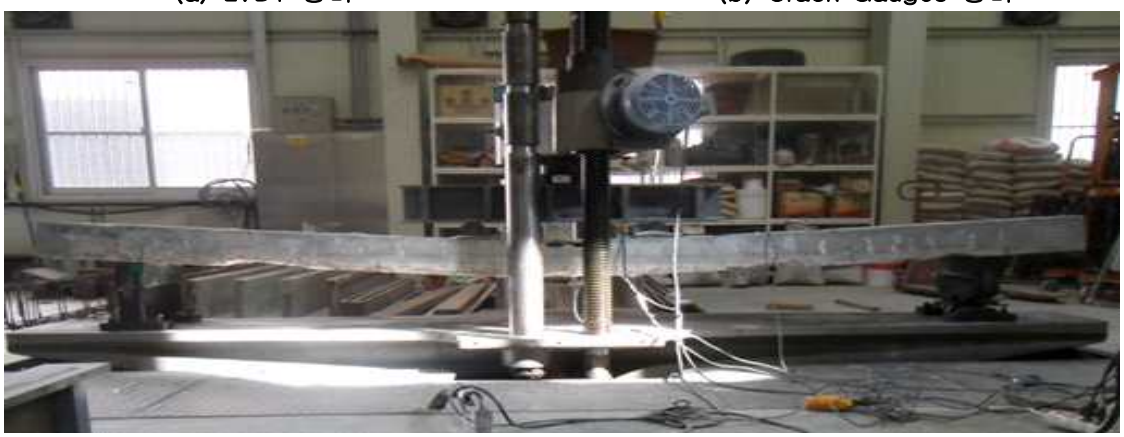
<그림 2.2.338> 구조실험 형상



(a) LVDT 장비



(b) Crack Gauges 장비



(c) 슬래브 재하실험 형상

<그림 2.2.339> 재하실험 형상 및 측정장비

(2) 실험결과 및 분석

(가) 가열 후 하중-변형 결과

가열 후 잔존 내력실험을 실시한 결과 그래프를 다음 <표 2.2.127>에 나타내었다. 잔존내력실험은 조선대학교에서 실시하였던 화재피해가 없는 비가열 시험체 Slab-30를 인용하였으며, 화재피해가 없는 시험체 (0) 의 극한 하중은 최대 56kN의 값이 측정되었으며, 항복 지점은 48kN으로 추정되어졌다. 또한, 변형량에서는 28mm지점에서부터 최대 85mm까지 변형이 발생하였다.

차량화재 1시간 피해를 입은 시험체 (1) 의 경우 45kN의 지점에서 항복을 시작하여 최대 140mm의 변형이 나타났으며, 극한하중 값은 49kN으로 측정되었다. 시험체 (2)의 경우도 45kN에서 항복을 시작하여 최대 145mm의 변형과 극한하중 47kN이 측정되었으며, ISO 834 2시간 피해를 입은 시험체 (3)의 경우, 48kN의 지점에서 항복을 시작하여 최대 118mm의 변형이 발생하였으며 극한하중 48kN으로 확인되었다.

또한, ISO 834 3시간 가열의 시험체 (4～6) 의 경우 시험체 4는 약 30kN의 지점에서 항복을 시작하여 최대 135mm의 변형을 보였으며, 시험체 (5) 의 경우 시험체 하부의 심각한 폭렬로 인해 재하실험시 측정장비가 탈락하여 측정이 되지 않았다. 또한, 시험체 (6)의 경우 23kN의 지점에서 항복을 시작하여 최대 105mm의 변형이 발생하는 것을 확인하였다. 또한, 다음 <표 2.2.128>은 재하시험에 대한 각국의 규정이며, 국내 규정이 마련되어 있지 않는 실정이기 때문에 국내 실정에 맞는 재하 시험에 대한 규정이 필요하다고 판단된다.

반면, SHCC 패널이 적용된 시험체 (7~10)의 경우 SHCC 60mm가 적용된 시험체 (9)의 경우 최고 값인 63kN이 나타났으며, SHCC의 우수한 성능을 확인할 수 있었다.

<표 2.2.127> 가열 후 잔존내력 실험 결과

시험체 명		극한하중 (kN)	최대 변형량 (mm)
0	Slab-0-30 (비가열)	56	85
1	Slab-0-30-Vehicle-1-0	49	140
2	Slab-0-30-Vehicle-2-0	47	145
3	Slab-0-30-ISO-2-0	54	118
4	Slab-0-30-ISO-3-0	53	135
5	Slab-0-30-ISO-3-700	측정 불가	측정 불가
6	Slab-0-50-ISO-3-700	52	105
7	Slab-40-30-ISO-3-700	41	139
8	Slab-40-50-ISO-3-700	측정 불가	측정 불가
9	Slab-60-30-ISO-3-700	63	137
10	Slab-60-50-ISO-3-700	53	147

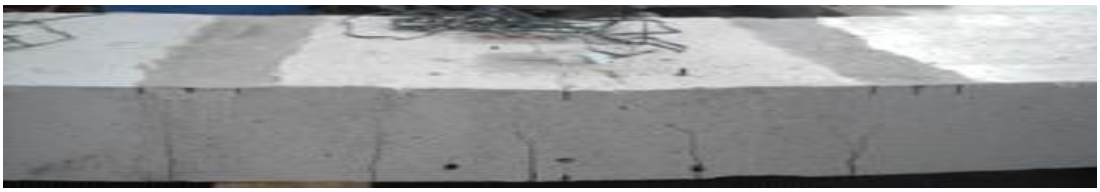
<표 2.2.128> 재하시험의 각국 규정

규 정	재하 하중값	재하 지속시간	잔류처짐 변형 / 최대처짐 변형	잔류처짐 변형측정시간 (재하 후)	처짐변형 제한
미국 ACI 318.48	1.5L+0.5 D	24	25% 이하	24	$\delta = \frac{0.001 l^2}{12t}$ 이하 잔류변형률 검토 불필요
ACI 318.52					$\delta = \frac{l^2}{12000}$
ACI 318.63	2.0D	24	25% 이하	24	$\delta = \frac{l^2}{20000}$
ACI 318.63	1.7+0.3D	24	25% 이하	24	$\delta = \frac{l^2}{20000}$
ACI 437	1.7+0.3D 또는 0.6D	24	25% 이하	24	$\delta = \frac{l^2}{20000}$
독일 DIN 1045 일본토목학회	1.5L 1.0L	6 24	25% 이하 20% 이하	12 24	$\delta = \frac{l^2}{20000}$
일본건축학회 A법 B법	1.0L 2.0L 집중하중	4 -	15% 이하 10% 이하	1 직후	l : 스팬 t : 전체 보의 높이

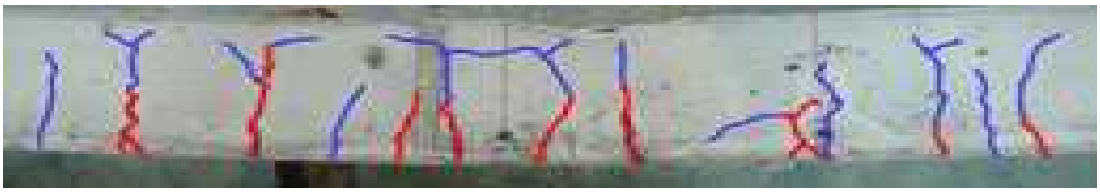
(나) 가열 후 균열특성 결과

가열 후 잔존내력실험을 실시한 결과를 다음 <그림 2.2.340>에 나타내었다. 차량화재와 ISO 834 2시간 화재피해를 입은 시험체 (1～3) 의 경우 측면에서 가열로 인한 균열을 확인하였다. 반면, ISO 834 3시간 화재피해를 입은 시험체 (4～6)의 경우 대부분 바닥면의 폭렬이 발생하여 측면에서의 균열은 확인하는 것이 불가능하였다. 또한, SHCC를 적용한 시험체 (7~10)의 경우 폭렬은 없었으며, 미세한 균열이 다량 발생하였다.

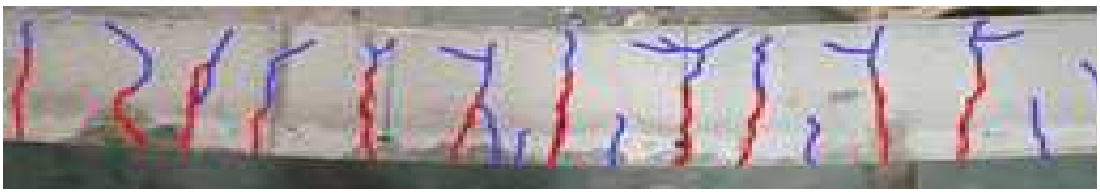
반면, 하부의 균열특성은 전체의 실험체 모두 재하 시 측면에서의 균열이 증가되어 취성적 파괴까지 도달하는 것을 확인하였다.



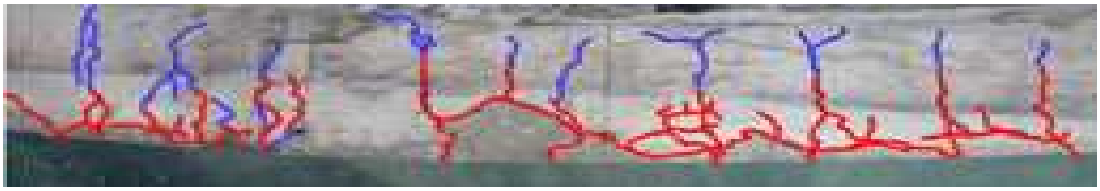
(a) Slab-0-30 재하실험 후 측면 균열 형상



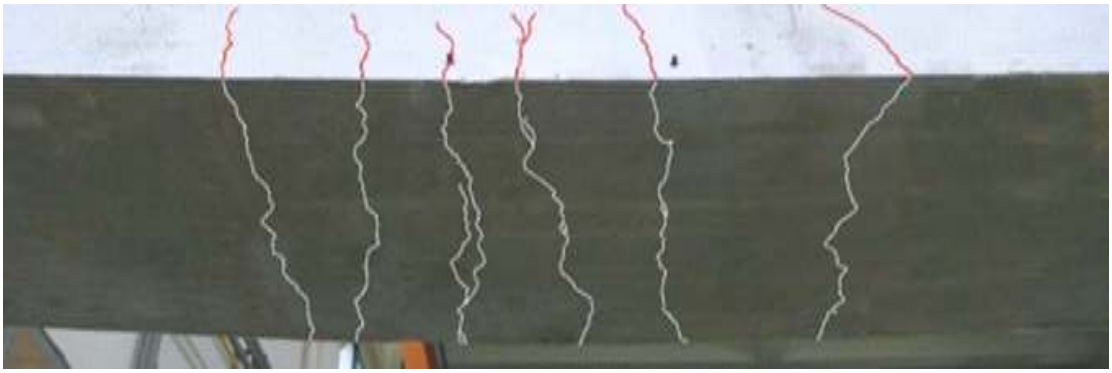
(b) Slab-0-30-Vehicle-1-0 재하실험 후 측면 균열 형상



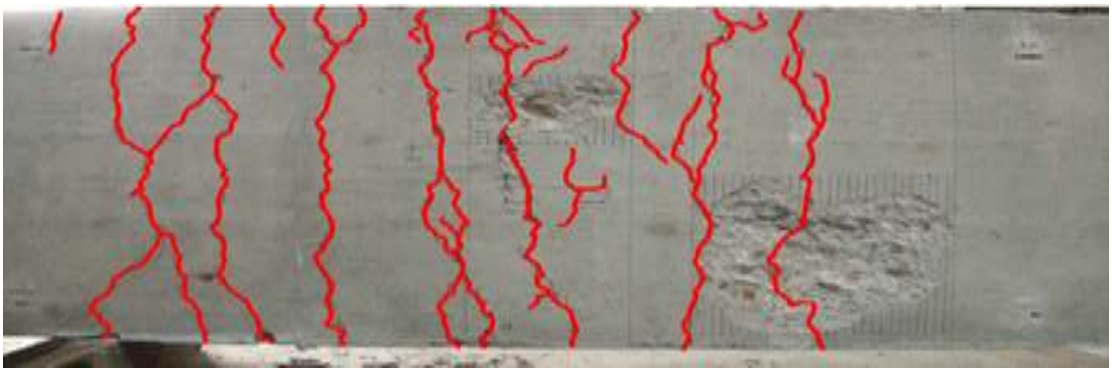
(c) Slab-0-30-Vehicle-2-0 재하실험 후 측면 균열 형상



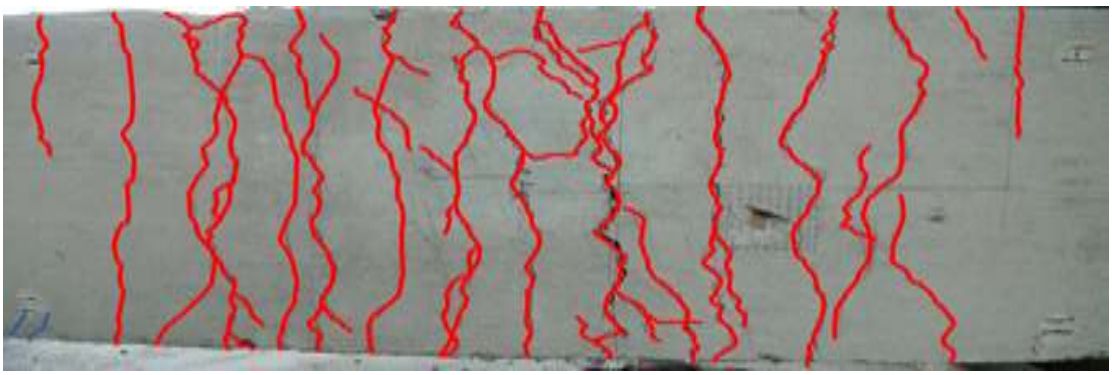
(d) Slab-0-30-ISO-2-0 재하실험 후 측면 균열 형상



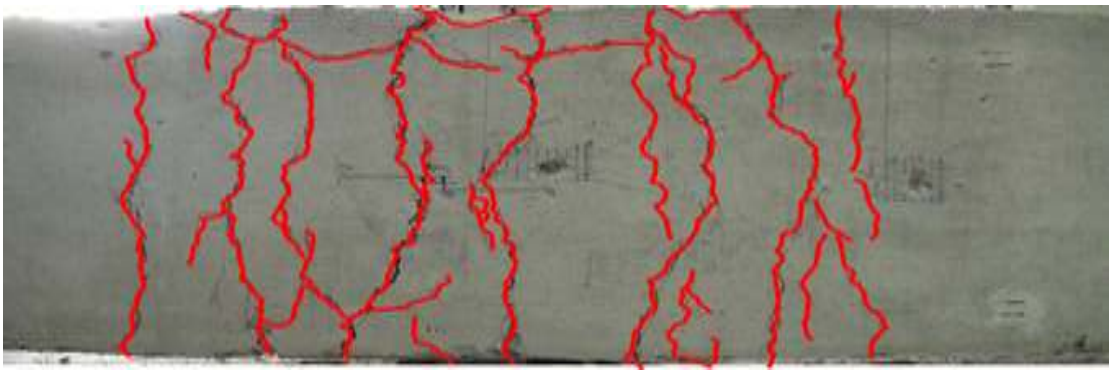
(e) Slab-0-30 재하실험 후 하부면 균열 형상



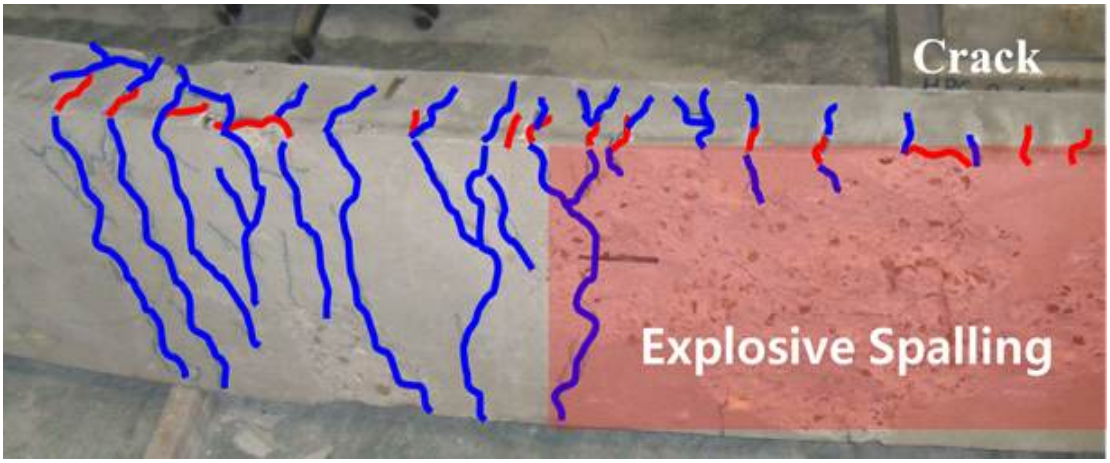
(f) Slab-0-30-Vehicle-1-0 재하실험 후 하부면 균열 형상



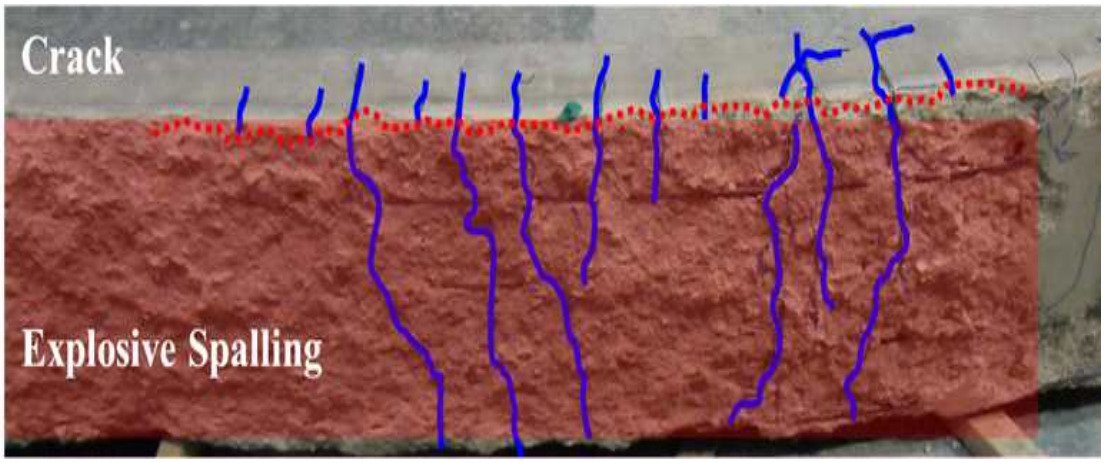
(g) Slab-0-30-Vehicle-2-0 재하실험 후 하부면 균열 형상



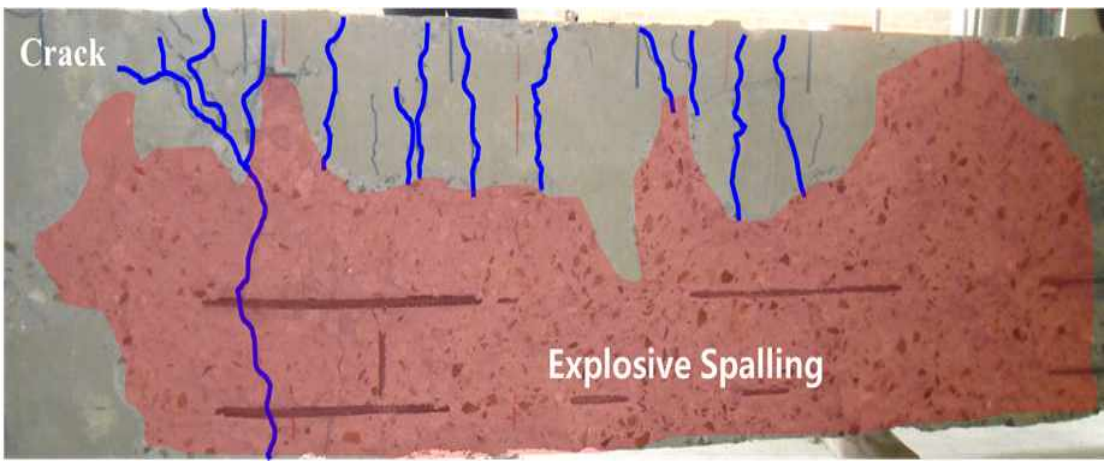
(h) Slab-0-30-ISO-2-0 재하실험 후 하부면 균열 형상



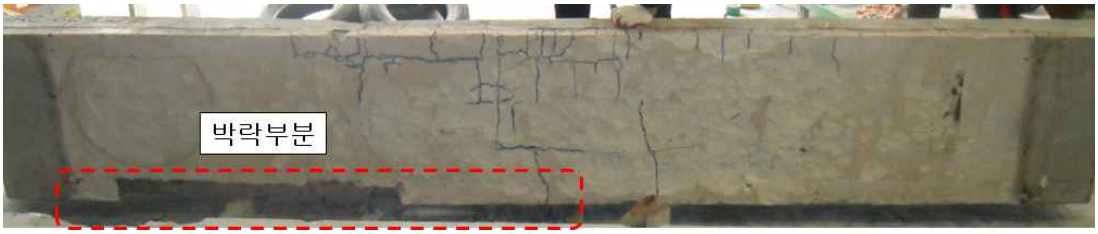
(i) Slab-0-30-ISO-3-0 재하실험 후 측면·하부면 균열 형상



(j) Slab-0-30-ISO-3-700 재하실험 후 측면·하부면 균열 형상



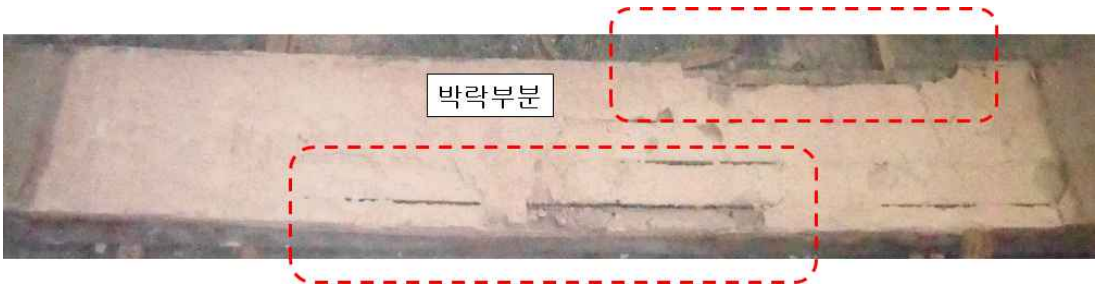
(k) Slab-0-50-ISO-3-700 재하실험 후 측면·하부면 균열 형상



(l) Slab-40-30-ISO-3-700 재하실험 후 측면·하부면 균열 형상



(m) Slab-40-50-ISO-3-700 재하실험 후 측면·하부면 균열 형상



(n) Slab-60-30-ISO-3-700 재하실험 후 측면·하부면 균열 형상



(o) Slab-60-50-ISO-3-700 재하실험 후 측면·하부면 균열 형상

<그림 2.2.340> 구조실험 이후 균열 형상

13. Green SHCC 패널 양산화 방법 구축

가. 증기 양생을 통한 Precast 공법 구축

(1) 개요

Green SHCC 패널 precast화 공법을 위해 1차년도에서는 Green SHCC 복합재료를 개발하였고, 역학적 특성을 검토한 후 이 배합을 이용하여 Green SHCC 패널 제품을 개발하기 위해 시작품을 제작하여 시작품의 역학적 특성을 검토하였다. 또한 시작품을 이용한 복합바닥 Green SHCC 패널의 현장시험시공을 완료하여 현장적용성도 평가하였다. 이러한 일련의 연구수행 결과를 바탕으로 Green SHCC 패널의 precast화 즉, 2차제품 생산의 효율을 향상시키기 위해 이 절에서는 precast Green SHCC 패널 양산화 방법을 다음 <그림 2.2.341>과 같이 제시하였다.

(2) 공장 생산 공정

신 precast Green SHCC 패널 제작공정은 크게 Green SHCC 패널의 모듈화 및 주문생산을 위한 공장생산 공정과 공장출하를 통한 현장반입과 이에 따른 설치 및 표면피복 등의 현장시공공정으로 나눌 수 있고 총 00공정으로 이루어져 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

(가) 공장생산 공정

공장생산 공정은 몰드가공과 몰드세팅 및 부속물 매입, Green SHCC 타설, 증기양생, 탈형 및 야적의 순서로 이루어져있으며, Green SHCC 패널은 공장 대량생산공정을 거쳐 생산 가능하도록 한다. Green SHCC 타설시 가장 주의해야 할 점은 재료의 정확한 배합을 통한 품질의 균일성 확보를 위해 거푸집의 정확한 시공 및 현장여건(평균온도, 사용수, 거푸집 존치기간, 등)에 따라서 시공을 하여야 하며, 타설후에도 사후관리를 시공품질을 유지 시킨다. 이는 표준화 및 모듈화를 통한 Green SHCC 패널의 제작을 용이하게 하여 경제성을 높이고, 생산된 Green SHCC 패널의 품질을 균일하게 하기 위함이다. 이를 위하여 분체화된 각각의 재료를 이용하여 Green SHCC를 타설하고 Green SHCC 패널을 제작한다.
상세한 내용은 다음과 같다.

① 거푸집 설치

설계도서에 따라 철재거푸집을 설치한다. 거푸집 설치시에는 Green SHCC의 타설을 위한 타설용 주입구와 공기배출구를 설치하여 Green SHCC가 밀실하게 타설되도록 한다.

② 거푸집 바탕정리

Green SHCC 타설을 위하여 거푸집 표면을 정리한 뒤 거푸집의 용이한 탈형을 위해 기름이나 구리스를 이용하여 거푸집 표면에 도포한다.

③ 분체형 Green SHCC의 배합

Green SHCC 패널의 요구성능에 따른 배합표를 통하여 제작된 분체형 Green SHCC를 반입한 후, 전동믹서 등을 이용하여 교반한 후 1시간 내에 타설한다. Green SHCC의 배합시에는 배합 Green SHCC에 이물질이 들어가지 않도록 하고 사용수는 청정하고 유기물 및 불순물이 들어가지 않아야 한다.

④ Green SHCC 타설

배합된 Green SHCC를 철재 거푸집에 충진하여 시공한다. Green SHCC의 충진시에는 할증률을 계산하여 Green SHCC의 타설시 콜드 조인트 등의 이유로 분리타설 되지 않도록 해야 하며, Green SHCC반죽의 상태를 검사하여 품질이 균일하게 시공되도록 한다.

⑤ 증기양생

Green SHCC를 타설한 후 경화중에는 유해한 충격이나 진동 및 과다한 하중이 가해지지 않도록 주의한다. Green SHCC가 타설된 거푸집을 증기양생 챔버로 운반하뒤 약 1시간 동안 챔버의 온도가 45℃까지 상승하도록 조절한다. 그 후 45℃로 2시간동안의 1차 증기양생을 실시한 뒤 1시간 동안 65℃로 증기양생 챔버의 온도를 상싱시킨다. 65℃의 온도로 3시간 동안 2차양생을 실히시며, 자연적으로 증기양생 챔버의 온도가 하강하도록하여 약 12시간의 3차 증기양생을 수행한 뒤 Green SHCC 패널 증기양생을 종료한다. 이때 급작스럽게 증기양생 챔버의 온도상승이 되지 않도록 주의해야하며, 양생 챔버의 습도를 항상 99% 이상이 되도록 해야한다.

⑥ 거푸집제거

거푸집 해체는 증기양생 후 Green SHCC 패널 경화 후에 구조체에 충격 및 손상을 주지 않도록 하여 제거한다.

⑦ 표면마무리 및 경계부 마무리

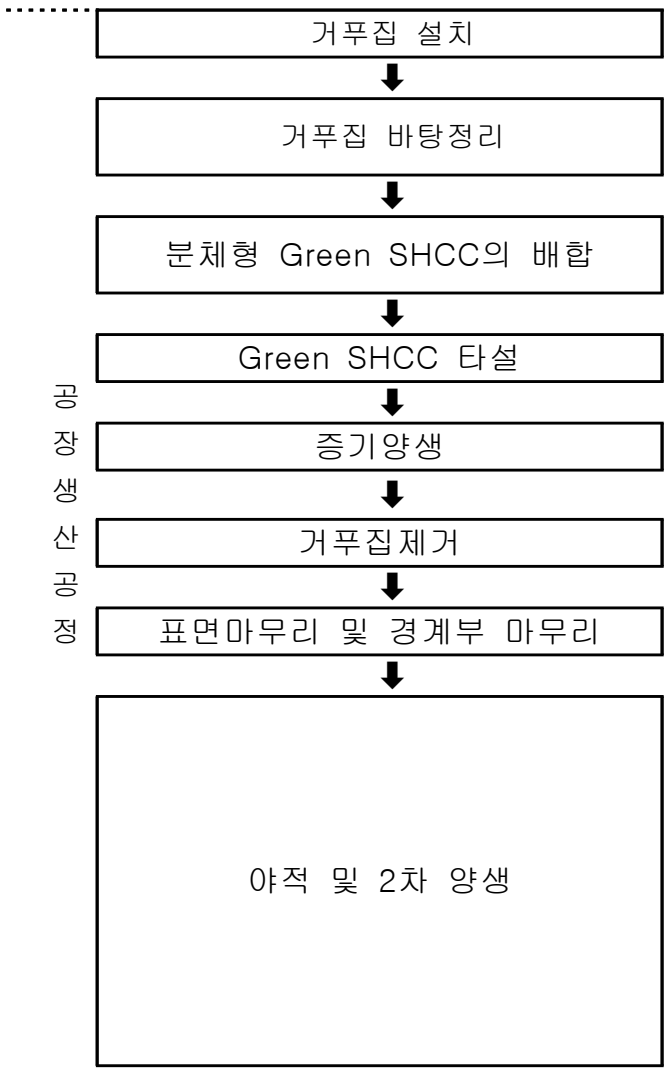
거푸집을 제거한 즉시 Green SHCC 패널면을 검사하여, 곰보자국, 공동부위, 균열, 레이턴스 발생 등의 결함부위를 육안 검사한다. 육안 검사상 이상이 있다고 판단될 때에는 표면 및 경계부 보수후 표면 피복제를 도포하여 Green SHCC 패널의 내구성을 증진시킨다. 표면피복제 도포 후에는 시공면 및 경계부 등의 표면 도포상태를 검사하여 도포상태를 확인하고 결함이 발생될 경우에는 하자부위를 재도포하여 마무리 한다.

⑧ 야적 및 2차 양생

Green SHCC 패널을 야적하고 표면 및 마무리면에 살수하여 충분한 양생이 되도록 한다. 이 때 여름철에는 충분한 살수를 실시하여 수축으로 인한 Green SHCC 패널의 변형을 방지하고, 겨울철일 경우 동경융해의 피해가 입지 않도록 양생포를 이용하여 보온한다.

precast
Green SHCC 패널
생산공정

Green SHCC 패널 바닥구조시스템 구축기술



<그림 2.2.341> Green SHCC 패널 생산공정

제 3 장 최종 연구성과 및 적용실적

제 1 절 개별 연구성과명

1. 개별 연구성과

본 연구는 호서대학교(내화 전문 기관), 충남대학교(콘크리트 재료 전문기관), 조선대학교(건축 구조 전문기관) 의 3대학의 [고연성 시멘트복합재료 개발 및 바닥구조시스템 구축기술]의 과제명으로 수행된 연구이다. 이에 따라, RFP 상 제시된 최종 성과물 5개 항목에 대하여 만족하였으며. 주요 연구성과 내용은 다음 <그림 3.1.1> 에 나타내었으며, 구체적인 세부사항은 전술한 <그림 2.1.1>의 컨소시엄과 같다.

1. 친환경 고연성 시멘트복합재료 패널
2. 친환경 고연성 시멘트복합재료 패널을 응용한 복합바닥구조시스템
3. 전용 구조설계 Software
4. 전용 PBD 기반 내화설계 Software
5. 특기시방서 및 시공매뉴얼

구분	주관연구기관 (호서대)	공동연구기관 (충남대)	공동연구기관 (조선대)	참여기업
1차년도	초고층건축물 및 지하공간의 화재성상 예측 기법 구축	친환경 고연성시멘트 복합소재(Green SHCC)의 개발	Green SHCC적용 바닥구조시스템 개발을 위한 기초연구	연구지원
2차년도	개발구조시스템의 해석/설계 기법 구축	친환경 고연성시멘트 복합재료를 이용한 패널 소재 개발	고연성 복합바닥 구조성능평가	연구지원
3차년도	개발 구조시스템의 성능기반(PDB)내화설계 기술 및 S/W구축 (2,3차원설계가능)	친환경 고연성시멘트 복합재료 패널 양산 시스템 구축	고연성 복합바닥공법 실용화 기술개발	실용화 기술개발 지원
연구성과	1. 차량화재 특성에 관련한 데이터베이스 2. 차량화재성상 온도 예측기술 3. 슬래브 온도해석 시스템	1. 친환경 Green SHCC 재료 및 패널 개발 2. 유지관리지침서 3. 특허등록	1. 장스팬 구축을 위한 구조해석 2. 슬래브 전용 구조설계 시스템 3. 시공매뉴얼 4. 현장적용 5. 특허등록	

<그림 3.1.1> 최종 연구성과 및 적용실적

2. 주요 연구성과

본 연구의 주요 연구성과를 학술적 성과 및 기술적 성과로 분류하였다. 이러한 내용을 다음 <표 3.1.1>과 <표 3.1.2>에 나타내었다.

<표 3.1.1> 본 과제의 주요연구 성과표

단위 : 건

차년도	기술실시계약	사업화 제품화 (현장적용)	학술지 논문				특허출원 및 등록		
			SCI	비SCI	발표논문	계	출원	등록	계
1				3	5	8	2		2
2		1	1	5	24	30			
3	1			1	7	8		2	2

<표 3.1.2> 본 과제의 세부 성과표

단위 : 건

구 분	세부 항목		차년도	호서대학교	충남대학교	조선대학교	합계
학술적 성과	논문 등재	SCI	1				
			2			1	1
			3				
		비 SCI	1	1	1	1	3
			2	2	2	1	5
			3	1			1
	학술발표대회		1	2	2	1	5
			2	16	3	5	24
			3	7			7
기술적 성과	특허 출원		1		1	1	2
			2				
			3				
	특허 등록		1				
			2				
			3		1	1	2
	현장 적용		1				
			2			1	1
			3				
	기술실시계약		1				
			2				
			3	1			1
	신기술 출원		1				
			2				
			3	1			1

가. 학술적 성과

(1) 등재 논문

등재연도	논문명	저자			학술지명	Vol.(No.)	국내외 구분
		주저자	교신저자	공동저자			
2012.03	고인성 내화보수모르터(FR-ECC)를 활용한 RC 구조물 보수공법의 내구성능 및 내하력에 관한 실험적 연구	김정희	권영진	임승찬 김재환 권영진	한국구조물진단유지관리공학회	vol.16 (No.2)	국내
2012.02	고로슬래그와 무수석고과 숏크리트의 강도에 미치는 영향	유성희	김윤용	신경준 김윤용	한국콘크리트학회	vol.24 (No.1)	국내
2012.03	압출성형 ECC 패널 RC 복합 슬래브의 해석모델	조창근	조창근	김윤용 서정환 이승중	한국공간구조학회	vol.12 (No.1)	국내
2012.05	Flexural Behavior of Extruded DFRCC Panel and Reinforced Concrete Composite Slab	조창근	김윤용	이방연 한병찬 이승중	Advances in Materials Science and Engineering	-	국외 (SCI)
2012.03	압출성형 ECC 패널 RC 복합 슬래브의 해석모델	조창근	조창근	김윤용 서정환 이승중	한국공간구조학회	vol.12 (No.1)	국내
2012.12	고온에 노출된 고강도콘크리트의 열적특성에 관한 실험적 연구	김동준	권영진	강승구 이재영 原田和典	한국방재학회	vol.12 (No.6)	국내
2012.10	Galerkin 유한요소법을 이용한 철근콘크리트 슬래브의 열전달해석 및 실험	한병찬	권영진	김윤용 조창근	한국콘크리트학회	vol.24 (No.5)	국내
2013.01	Comparison between Manufacturing Processes of Fiber-Reinforced Cement-Based Panels (FRCBPs)	이방연	김윤용	방진욱 정우정 정동수 이환우	Applied Mechanics and Materials	253-255	국외
2012.08	Flexural Performance and Fiber Distribution of an Extruded DFRCC Panel	이방연	김윤용	한병찬 조창근	Computers and Concrete	10(2)	국외
2014.02	주차공간의 차량종류별 연소특성 DB구축을 위한 실험적 연구	강승구	권영진	김동은 서동구 김동준	한국방재학회	vol.14 (No.1)	국내

				김정희 권영진			
2014.01	Flexural Strength of SHCC Panels Dependent on Fly Ash Type and Curing Condition, Advanced Materials Research	방진욱	김윤용	현정환 이병재 정동수	Advanced Materials Research	vol.831	국외

(2) 학술 발표 논문

발표일	발표명	저자	학술대회명	국내외 구분
2011.11	고강도 콘크리트의 폭렬현상 해석 모델에 관한 연구	강승구, 김동준, 권영진, 이재영, 原田和典	한국화재소방학회 2011년 추계 학술논문발표회	국내
2011.11	지하대공간 화재성상 예측을 위한 주요가연물조사	강승구, 서동구, 김동준, 권영진	한국화재소방학회 2011년 추계 학술논문발표회	국내
2011.11	SHCC로 보강된 RC보의 휨 거동	방진욱, 조현우, 조창근, 이병재, 김윤용	한국구조물진단유지관리공학회 2011년 추계 학술발표회	국내
2011.11	고강도 고연성 시멘트 복합재료의 역학적 거동 평가	방진욱, 현정환, 이병재, 김윤용	한국콘크리트학회 2011년 추계학술발표회	국내
2011.11	SHCC 및 RC 복합슬래브의 비선형 휨 성능평가	조창근, 임현진, 이승중	한국구조물진단유지관리학회 2011년 추계학술발표회	국내
2012.05	변형경화형 시멘트복합체 패널 RC 복합슬래브의 비선형 거동 평가	김호연, 조창근	한국콘크리트학회 2012년 봄 학술발표회	국내
2012.05	SHCC 및 철근콘크리트 복합 슬래브의 휨 성능실험	문형주, 조창근, 이승중	한국콘크리트학회 2012년 봄 학술발표회	국내
2012.10	고연성시멘트복합체 복합슬래브의 구조 및 시공특성	이승중, 조창근, 문형주,	대한건축학회 2012년 추계학술발표대회	국내

		임현진		
2013.10	Flexural Performance Experiments of SHCC and Reinforced Concrete Composite Slabs	문형주, 조창근, 이승중	9TH International Symposium on Architectural Interchanges In Asia	국외
2013.10	Nonlinear Evaluation of Extruded SHCC and RC Composite Slabs	김호연, 조창근	9TH International Symposium on Architectural Interchanges In Asia	국외
2012.09	地下空間の火災荷重を考慮したスラブ耐火加熱實驗及び熱傳導解析(1)	金鍊俊, 姜昇具, 韓炳燦, 李在永, 原田和典, 權寧璡	日本建築学会	국외
2012.09	地下空間の火災荷重を考慮したスラブ耐火加熱實驗及び熱傳導解析(2)	姜昇具, 金鍊俊, 韓炳燦, 李在永, 原田和典, 權寧璡	日本建築学会	국외
2012.09	自動車燃燒實驗通じる道路トンネルの火災性狀豫測	韓正哲, 姜昇具, 金炯摠, 朴宣圭, 權寧璡	日本建築学会	국외
2012.09	高強度コンクリートの熱水分移動モデルの構築のための統計分析	權寧璡, 姜昇具, 金鍊俊, 韓炳燦, 李在永, 原田和典,	日本建築学会	국외
2012.10	Fire Resistance Performance Analysis of Reinforced Concrete Members using Galerkin Finite Element Method	권영진, 김동준, 강승구, 김봉찬, 한병찬, 이재영, 原田和典	The9th Asia-OceaniaSymposiumon FireScienceandTechnology	국외
2012.08	地下駐車場車輛火災を考慮したスラブ耐火加熱實驗及び分析に関する研究	姜昇具, 金鍊俊, 韓炳燦,	한·일 건축재료 심포지엄	국내

		李在永, 原田和典, 權寧璡		
2012.05	지하대공간 구조물의 내화성능 확보를 위한 슬래브가열실험 및 열전도해석검토에 관한 연구	강승구, 김동준, 이재영, 原田和典, 한병찬, 권영진	한국화재소방학회	국내
2012.05	지하대공간의 주차장 차량화재를 고려한 연소 실험	강승구, 김동준, 한정철, 김동은, 권영진	한국화재소방학회	국내
2012.05	갤러킨 유한요소해석 방법을 이용한 열전도 해석 모델 구축에 관한 연구	강승구, 김동준, 이재영, 原田和典, 한병찬, 권영진	한국화재소방학회	국내
2012.05	고온에 노출된 고강도콘크리트 휨부재의 2면가열에 관한 실험적 연구	김동준, 강승구, 이재영, Harada Kazunori, 권영진	한국화재소방학회	국내
2012.05	지하주차장의 화재성상예측을 위한 자동차 연소실험에 관한 연구	강승구, 한정철, 김동은, 김동준, 권영진	터널지하공간학회	국내
2012.05	차량 연소실험을 통한 도로터널의 화재예측	한정철, 강승구, 권영진	터널지하공간학회	국내
2012.11	지하공간의 화재하중을 고려한 슬래브 내화 가열 실험	강승구, 김동준, 이재영, 原田和典, 한병찬, 권영진	한국건축시공학회	국내
2012.11	고강도 콘크리트의 폭렬 현상에 관한 벽체 가열실험	강승구, 김동준,	한국화재소방학회	국내

		이재영, 原田和典, 권영진		
2012.11	화재를 입은 RC 슬래브의 재하실험에 관한 연구	강승구, 김동준, 이재영, 原田和典, 권영진	한국화재소방학회	국내
2012.11	차량화재에 의한 지하주차공간 및 터널화재위험성에 대한 문헌조사	권영진, 한정철, 강승구, 김동준	한국화재소방학회	국내
2012.11	양생기법에 따른 Green SHCC 패널의 휨강도 평가	방진욱, 현정환 서지석, 이병재 배준영, 김윤용	한국콘크리트학회 2012년도 가을학술발표회	국내
2012.05	고연성 시멘트계 재료의 연신율 측정방법	방진욱, 현정환 신경준, 장영일 조광연, 김윤용	한국콘크리트학회 2012년도 봄학술발표회	국내
2013.04	증기양생을 통해 제작된 Green SHCC 패널의 성능 평가	방진욱, 이병재 현정환, 서지석 김윤용	한국구조물진단유지 관리공학회의 2013년 봄 학술발표회	국내
2013.05	SHCC 철근콘크리트 복합바닥구조의 휨 성능 비교	조창근, 문형주	한국구조공간학회 2013년도 봄학술대회	국내
2013.05	하프프리캐스트 SHCC 철근콘크리트 복합바닥구조의 구조성능	조창근, 문형주, 이승중	한국콘크리트학회 2013년도 봄학술발표회	국내
2013.11	플라이애시 종류에 따른 Green SHCC의 직접인장 특성 평가	방진욱, 현정환, 서지석, 이의성, 이병재, 김윤용	한국콘크리트학회 2013년도 가을학술발표회	국내
2013.11	SHCC 하프프리캐스트 철근콘크리트 복합슬래브의 구조성능	조창근, 문형주, 임현진	한국콘크리트학회 2013년도 가을학술발표회	국내

(3) 특허 출원

출원 연도	발명 명칭	발명자	출원 번호
2012.04.17	시멘트 혼합물과 이를 이용한 패널 및 이를 이용한 바닥구조 시공방법	조창근, 한병찬, 서정환, 김윤용, 권영진	10-2012-0039609
2012.03.27	고연성 시멘트계 재료의 연신율 측정장치 및 측정방법	김윤용, 신경준, 방진욱	10-2012-0030869

(4) 특허 등록

등록 연도	발명 명칭	발명자	등록 번호
2012.04.17	시멘트 혼합물과 이를 이용한 패널 및 이를 이용한 바닥구조 시공방법	조창근, 한병찬, 서정환, 김윤용, 권영진	제 10-1359210 호
2012.09.05	고연성 시멘트계 재료의 연신율 측정장치 및 측정방법	김윤용, 신경준, 방진욱	제 10-1182054 호

(5) 기술실시 계약

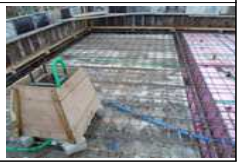
연구개발 결과물 소유기관	기술실시 기업	계약기간	기술료
호서대학교 산학협력단 조선대학교 산학협력단	(주) B&SE건설, (주) 유신건축	2014.05.23.~ 2017.05.23.(3년)	2,200천원

(6) 현장 적용

공사명	발주자	시공자	공사기간	공사규모	총공사 금액	비고
광주가정 법원청사 신축공사	법원 행정처	행림종합건축사 사무소	2011.09.26.~ 2013.05.25	지하1층 지상5층	123억	준공

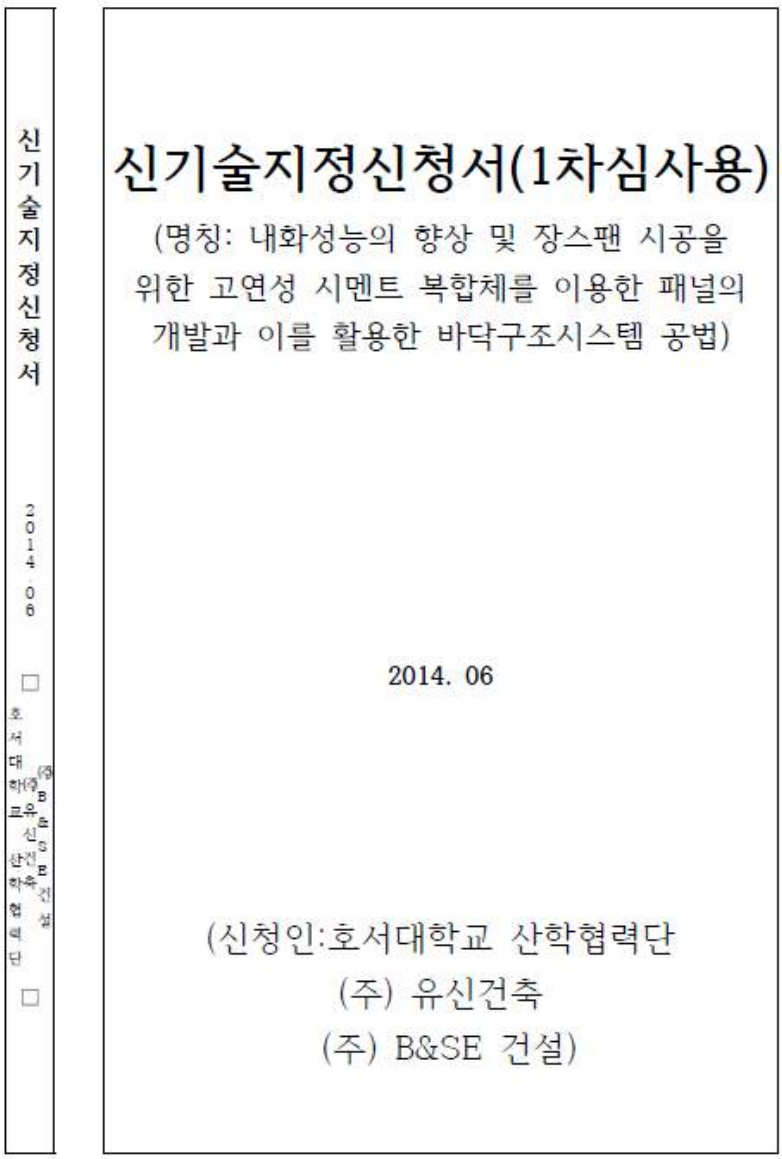
실사현장 현황자료

실사장소 우선순위	1

신청기술 적용현장 개요	공 사 명	광주가정법원청사 신축공사	
	발 주 처 (감 리 자)	법원행정처((주)행림종합건축사사무소)	
	계약형태	○수의계약 ○제한경쟁입찰 ◉공개경쟁입찰○기타	
	전체공사금액 (신기술공사금액)	123억 관급포함(1백만원)	
	시공규모	지하1층 지상5층 6,610㎡,2000py	
	현장위치 (주 소)	광주광역시 서구 치평동 1205	
	공사 기간	(2011.09.26 ~ 2013.05.25) 총 608 일	○시공예정 ○시공중 ◉준 공
	투입인원및 장 비	<인원> •기술공 : 2 인 •보통인부 : 2 인	<장비> 50ton 크레인
현장설명	현장특징	- 포스코건설과 기업과제의 연구결과로 개발한 “고인성 콘크리트를 이용한 내진 기둥공법의 개발”과 국토해양부와의 첨단도시개발사업에서 연구결과로 개발한 “고인성 시멘트복합재료 개발 및 바닥구조시스템 구축기술” 등 2가지 공법을 동시에 적용한 현장임.	
	하자발생	- 없음	
	실사 가능 시기		
	실사 가능 공정	① 공정1 / 현장실사 가능  ② 공정2 / 현장실사 가능  ③ 공정3 / 현장실사 불가능 	

(7) 신기술 출원

신기술 명칭	신청인
내화성능의 향상 및 장스팬 시공을 위한 고연성 시멘트 복합체를 이용한 패널의 개발과 이를 활용한 바닥구조시스템 공법	호서대학교 산학협력단, (주) 유신건축 (주) B&SE 건설


신기술지정신청서

2014. 06

□ 호서대학교 산학협력단 (주)유신건축 (주)B&SE건설 □

신기술지정신청서(1차심사용)

(명칭: 내화성능의 향상 및 장스팬 시공을 위한 고연성 시멘트 복합체를 이용한 패널의 개발과 이를 활용한 바닥구조시스템 공법)

2014. 06

(신청인:호서대학교 산학협력단
(주) 유신건축
(주) B&SE 건설)

<그림 3.1.2> 신기술 지정 신청서

나. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

현재 국내 재정되어 있는 내화관련 규준으로써, 철근콘크리트조 기둥의 경우는 그 작은 지름이 25 cm이상이면 내화구조로 인정하고 있어 별도의 내화성능 실험을 실시하지 않고도 현장시공이 가능한 것으로 규정되어 있고, 이러한 건축법이 제정될 당시 콘크리트 구조물의 대부분은 일반강도의 보통 콘크리트로써, 화재시 콘크리트 구조체의 심각한 피해가 발생하지 않아 이에 대한 검토가 거의 이루어지지 않았다.

그러나 최근 건축 구조물의 화재로 인한 붕괴 가능성과 고층화 및 초고층화와 함께 고강도 콘크리트(HSC) 및 고성능 콘크리트(HPC)의 사용량이 증대되면서 현재 시공되어진 초고층 건축물의 안전이 이슈화되고 있으며, 또한 정부에서도 2008년 7월 21일 「고강도 콘크리트 기둥•보의 내화성능 관리기준」성능을 기준으로 제정하고 있다.

CTBUH자료에 의하면 우리나라 서울은 초고층 건물이 2,871개로, 홍콩(7,660개), 뉴욕(5,566개), 상파울로(4,690개), 싱가폴(3,761개)에 이어 5번째로 많으며, 앞으로의 수요도 계속해서 증가추세에 있어 시장성이 클 것으로 판단된다. 또한 국내의 내화성능 확보기술에 대한 시장동향을 다음 <표 3.1.3>에 나타내었다.

<표 3.1.3> 지능형 유지관리 및 안전기술 시장동향

세부기술	시장규모 (단위: 억원)	국내 시장 현황 및 추이
내화성능 확보기술 (구조부재)	1조44억	•전체 레미콘 시장중 40MPa 급 이상 고강도콘크리트의 비중이 2003년 0.3%에서 2007년 1.1%로 크게 상승 •대형건설사 중심으로 고강도콘크리트 내화인증 건수 폭발적 증가 •향후 이러한 추세는 더욱 증가할 것으로 판단됨

특히, 본 기술에 대해 선진국 대비 인프라 수준은 다음 <표 3.1.4>와 같으며, 국내 기술의 내화 측면 인프라 수준이 부족한 부분이 많다. 이러한 선진국 대비 낮은 인프라는 화재 안전성을 확보하지 않고 있기 때문이다. 이에 따라, 본 기술의 화재 안전을 확보한 고연성 시멘트 복합재료 및 바닥구조 시스템의 실용화가 시급한 실정이다.

또한, 국내 내화성능 확보기술의 수준은 다음 <표 3.1.5>와 같으며, 본 기술에 대한 기술완료시 국내 기술수준은 높게 향상될 것으로 사료된다.

<표 3.1.4> 선진국 대비 인프라 수준

세부기술	인프라 항목	선진국 대비 인프라 수준				
		부족	다소부족	동등	우월	보다우월
PBD기반 내화설계 기술	연구시설 및 설비		○			
	기초인력			○		
	산업기술인력		○			
	산학연공동연구기반		○			
	정보화		○			
	표준화기반		○			
	기술이전 및 거래		○			
	국제기술협력기반		○			
구획화재 해석기술	연구시설 및 설비			○		
	기초인력		○			
	산업기술인력		○			
	산학연공동연구기반			○		
	정보화				○	
	표준화기반			○		
	기술이전 및 거래			○		
	국제기술협력기반			○		
내화성능 확보기술(구조부재)	전문인력 보유정도		○			
	연구시설 및 설비		○			
	산업기술인력	○				
	정보화		○			
	표준화 기반		○			

<표 3.1.5> 내화성능 관련 국내 기술개발 수준

세부기술	현재 기술수준			기술개발 완료시 국내 기술수준		
	기술수준 (%)	기술격차 (년)	비고	기술수준 (%)	기술격차 (년)	비고
PBD기반 내화설계 기술	10	10	도입단계	90	3	성숙단계
구획화재 해석기술	20	10	도입단계	90	3	성숙단계
내화성능(비폭렬 콘크리트 개발)	80	3	성숙단계	100	0	경쟁관계
화재 후 콘크리트 잔존강도 확보	40	2	성숙단계	70	0	경쟁관계
섬유혼입 고성능 콘크리트의 실용화	80	1	성숙단계	100	0	경쟁관계
내화성능 확보기술	90	5년 이내	성숙단계	100	0	경쟁단계

제 4 장 연구목표 달성 및 효과

제 1 절 연구개발 최종목표 달성도

1. 개별 연구성과

본 연구는 다음 <표 4.1.1>과 같은 일정으로 3년간 연구가 수행되었으며, RFP 내용에 기술되어 있는 연구개발 내용을 100% 만족하였다. 또한 <표 4.1.2>에 본 연구개발 목표의 달성도 및 연구 내용에 대하여 나타내었다.

<표 4.1.1> 연구목표의 추진일정

일련번호	연구내용	추 진 일 정 (연도별)											
		1차년도				2차년도				3차년도			
		1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
1	지하주차장, 판매시설, 초고층건축물 가연물조사를 위한 장소 선정	···· ——											
2	지하주차장, 판매시설, 초고층 건축물 가연물조사 (지역별, 시간대별)	····· ———											
3	가연물조사를 통한 기초자료 확보 및 데이터 정리	····· ———											
4	자동차 연소 실물화재 및 슬래브 내화 실험계획 및 실험자재 확보		····· ———										
5	자동차 연소 실물화재 및 슬래브 내화 실험 실시			···· ——									
6	연소화재 실험 및 내화실험 후 결과 DATA 정리 및 확보			·· —									
7	내화실험결과를 통한 기존 시중에 사용되는 제품 비교분석			···· ——									
8	실험결과 DATA 정리 및 확보			·· —									
9	고연성 특성(인장강도, 인장변형률) 평가 및 문제점 도출	·· —											

10	Green SHCC 시멘트 매트릭스 사용재료 결정	
11	보강용 섬유 및 혼입률 결정	
12	섬유분포특성 평가기법 및 성능 구현 Simulation 기술 개발	
13	섬유 이미지 검출을 통한 분산성 평가	
14	역학적 특성 평가	
15	수축특성평가	
16	소재 및 공법 특허 출원	
17	바닥구조시스템 기초자료 조사	
18	국내외 시스템 비교 분석	
19	슬래브 휨성능 평가실험(Component Test, 기존기술 대비 평가)	
20	바닥구조시스템 기본(안)개발	
21	바닥슬래브의 설계식 개발 및 설계강도 평가	
22	소재 및 공법 특허 출원	
23	1차년도 내화실험 압력측정 DATA 분석 및 폭렬 특성 규명	
24	수분이동 및 열전도해석에 따른 폭렬해석 모델 개발	

25	패널 소재 열적특성값 실험(전도, 비열, 열용량) 및 DATA 구축	
26	슬래브 내화실험체 제작 및 시험 준비	
27	내화실험 및 내화성능(ISO 834) 확보여부 검토, Detail 개발	
28	화재시 개발 바닥구조시스템의 구조거동 실험	
29	내화 실험 결과를 위탁기관과 공유 및 열전도 모델 구축	
30	열이동/열전달 FRA해석 및 실험결과와의 검증	
31	기존 패널제조 공법 조사	
32	목표설정 및 기존 기술과의 성능 비교·분석	
33	장지간(long-span)화가 가능한 Green SHCC 패널 제조방법 도출	
34	패널 성형을 위한 재료 배합 기술 개발	
35	패널 성형을 위한 유동특성 평가	
36	패널 폭로 시험체 제작 및 외기환경 노출 실험	
37	압축강도, 휨강도 등 역학성능 공인시험 검증	
38	Lab. scale, 인장강도, 인장변형률 검토	
39	개발 패널의 균열상태 내구성능 평가(능동 균열제어특성(100㎛이하))	

40	개발패널의 내구성능 공인시험 검증	
41	패널 양산 시스템 구축(참여기업)에 따른 기술 지원	
42	최적 양생방법 및 공정 효율화 기술 도출	
43	시험생산품 품질 및 성능 실험	
44	패널 접합부 및 단부 Detail 개발	
45	접합부 단위부재 전단실험	
46	실대형 실험체 제작(기존기술 실험체 포함)	
47	시공 하중에 관한 검토 실험	
48	실대형 실험체 구조성능 실험 및 평가	
49	고연성 패널을 고려한 바닥슬래브 비선형 해석기법 개발(FEA)	
50	실험결과와의 비교분석 및 검증	
51	바닥구조시스템 실험체 제작 및 내화실험 준비	
52	내화성능 검증(ISO834기준 3시간만족, 건설기술연구원)	
53	폭렬메커니즘, 열이동, 열전달을 고려한 해석 및 검증	
54	PBD 기반 내화설계 기법 구축	

55	PBD 기반 내화설계용 S/W 개발	
56	실험결과를 이용한 개발 S/W의 검증 및 보완	
57	설계기법 및 S/W의 관련 학회를 통한 검증(프로그램 등록)	
58	건설 신기술 신청	
59	개발패널 생산	
60	균질한 패널 확보를 위한 Green SHCC 품질관리 평가 지침 개발	
61	무균열 상태 개발패널의 내구성능 검증(탄산화 염화물, 동결융해)	
62	변형률 성능 검증	
63	휨 피로특성 평가	
64	균열 상태 사용성능 검증	
65	외부 폭로실험 및 평가	
66	Mock-up 실험시 패널 시공 및 설치	
67	접합부 충진제, 타설 밀실도 평가 및 개선방안 도출	
68	현장적용 시 품질관리 지원	
69	현장적용 시험성적서 확보	

70	유지관리 지침서 작성	
71	LCC 분석	
72	특허 등록	
73	Mock-up 시험체 제작 및 실험준비	
74	현장적용성 검토(시공성, 품셈)	
75	현장적용 시 기술 지원(구조설계 및 안전성 평가)	
76	시공단계별 문제점 해결 및 시공효율성 개선(평가)	
77	시공성을 고려한 경제성 분석	
78	시공성을 고려한 Sharp Drawing(도면) 작성(구조종별)	
79	특기시방서 구축	
80	고연성 복합바닥 구조설계지침(안) 개발	
81	전용 구조설계 S/W 개발	
82	실험결과와 비교분석을 통한 S/W 검증	
83	관련 학회 검증 및 S/W 등록	
84	선행기술 조사(평가)	

85	일위대가 및 원가계산서 작성(검증)	
86	구조설계 매뉴얼 구축	
87	특허 등록	
88	종합보고서 작성	

추진 계획 ——————추진 일정

<표 4.1.2> 연구개발 목표의 달성도

목 표	달 성 도(%)	내 용
■ 친환경 고연성시멘트복합재료 개발	100%	○ 안정상태 균열이론 및 파괴역학적 검토에 의한 SHCC의 시멘트 분체 및 섬유기본 배합 유도 기술 ○ 소재내 섬유분포특성 평가기법(Image Process) 및 이를 이용한 성능구현 Simulation 기술 ○ 친환경성 확보(시멘트 분체 대체율 최대 40% 성과 확보) ○ 자기수축/건조수축/구속수축 특성 평가 *Micromechanics에 의한 최적 배합조건 도출 및 실험을 통한 구현
■ 친환경 고연성 시멘트 복합재료를 이용한 패널 소재 개발	100%	○ 패널 성형을 위한 재료 배합 기술 ○ 내화성능 : ISO 834 3hr 및 성능기반(PBD)화재 안전성 확보 ○ 강도성능 : 압축강도 50MPa이상, 휨강도 20MPa 이상, 인장강도 7MPa이상, 인장변형률 2%이상 ○ 내구성능 : 능동 균열제어특성(균열폭 100㎛이하) *역학성능/내화성능/내구성능을 동시에 만족하는 다기능성 소재 구현
■ 친환경 고연성시멘트복합재료 패널의 제 성능 평가 및 검증	100%	○ 역학성능 검증(압축/직접인장/휨) ○ 내화성능 검증(ISO 834 기준 3시간 만족) ○ 내구성능 검증(무균열상태에서 중성화/염화물 침투저항성/동결융해 저항성 평가) ○ 사용성능 검증(내 피로 특성/균열상태에서 내구성능 검토)
■ 친환경 고연성시멘트복합재료 패널 양산 시스템 구축	100%	○ 플랜트 시험생산을 통한 배합 조정 ○ 시제품 생산 및 생산 안정화 방안 수립
■ 친환경 고연성시멘트복합재료 패널이용 복합바닥구조시스템 개발	100%	○ 목표성능 대비 복합바닥구조시스템 Detail개발 ○ 개발구조시스템의 구조성능 평가(Component Test) ○ 실규모 구조시스템 성능 실험(Large Scale Test) ○ 바닥구조시스템의 내화성능(ISO 834)검증
■ 개발 구조시스템의 현장적용성 평가(Mock-up Test)	100%	○ 시공기술 및 구조세부 Detail 개발 ○ 시공프로세스 및 특기시방서 구축 ○ 경제성 분석 및 일위대가 산출 ○ 설계 및 설치에 대한 가이드라인 작성 *현장 적용실적 확보 필요
■ 개발구조시스템의 해석/설계 기법 구축	100%	○ FEA 시뮬레이션(해석) 및 검증 연구 ○ 시스템 전용 설계 S/W 구축 (2,3차원 설계가능, 개발 설계기술 이식 및 관련 학회 검증)
■ 개발구조시스템의 성능기반 내화설계 기법 구축	100%	○ 초고층의 화재 성상 예측 기법 구축 ○ 폭렬 메카니즘/열이동/열전달을 고려한 해석 및 검증 ○ 개발 구조시스템의 성능기반(PBD) 내화설계 기술 및 S/W 구축(2,3차원 설계가능, 개발 설계기술 이식 및 관련 학회 검증)

2. 연구개발 성과의 기술적 효과분석

가. 바닥구조시스템의 내화성능 확보 및 기술확산 효과

• 초고층 건축물 및 지하공간의 내화성능을 대폭 향상시킬 수 있는 새로운 공법으로써 세계 건설시장에서 기술적 우위 확보

• 기술적 경쟁력 향상 효과

- 본 기술은 국내외의 섬유혼입을 통한 폭렬방지 기술 및 내화보드 등에 의한 단면 증가를 수반하는 고강도콘크리트의 폭렬방지기술에 대한 여러가지 문제점을 개선한 것으로서 향후 화재시 고강도콘크리트의 폭렬방지 및 내화성능 향상에 기술적 우위를 점유하게 될 기술이다.

- 또한 현재 국내의 경우에는 내화대책에 대한 대안이 없거나 연구단계에 있는 실정이고, 내화구조의 선진국인 일본의 경우에도 PP 섬유를 혼입하여 폭렬을 방지하는 공법이 연구의 주를 이루며 보급되고 있는 실정이어서 국내뿐만 아니라 세계에서도 기술적 우위를 점할 수 있는 신기술이라 할 수 있다.

나. 시공 신구법(New technology) 개발의 중요성

국내 건설시장에 있어 바닥구조시스템(Floor system)은 건설현장의 여건 변화와 시공기술의 발달 및 각종 신기술/신공법의 도입으로 다양화되고 있다.

이와 관련하여, 바닥구조시스템, 특히 지하에 신설되는 구조물의 슬래브는 프리캐스트 또는 하프프리캐스트 공법을 적용하여 전술한 기술니즈에 대응하고 있는 실정이다. 또한 지상의 경우에도 대부분 철재 데크플레이트 등을 도입하여 현장거푸집 공정을 축소하고 있다.

한편 시공 중 기계화로 인한 시공하중의 증가는 필연적으로 바닥구조부재의 균열, 누수 등의 시공트러블 원인이 되고 있어, 이러한 균열에 대한 제어가 구조체의 품질안정 및 고급화를 위해 시급히 해결해야 될 과제이다.

그러나 지금까지 다양한 형식의 바닥구조시스템이 개발되어 왔으나, 현실적으로 신공법의 적용은 현장여건이나 최적의 공법을 선택하기 보다는, 현재 일반적으로 사용되는 재래식 공법에 대한 의존도가 높은 편으로, 각 신공법의 장점이나 특징을 적극적으로 활용하지 못하고 있는 실정이다.

공기 단축 등을 위한 부분 복합화 공법이나, 공법 간편화를 위한 데크플레이트 등과 같은 바닥구조시스템 적용은 상기와 같은 사용편의성이나, 시공트러블 개선, 구조물의 고급화를 위한 제 조건을 충분히 만족시켜주지 못한다. 이에 현재 공사비에서 점차적으로 비중이 높아지고 있는 노무비 및 공기를 줄일 수 있고, 균열제어

등 고품질의 바닥구조를 얻을 수 있는 고연성 시멘트 복합재료 패널을 이용한 복합바닥구조시스템 공법을 개발하여 이를 실용화시키고자 한다.

연구개발 성과물인 복합바닥구조시스템은 경량화가 가능하기 때문에, 층간소음, 바닥충격 제어를 위해 증가된 바닥 두께(고정하중 증가)를 효율적으로 제어할 수 있다. 본 연구개발은 특수콘크리트 분야에서 최근 이슈화 되고 있는 고연성 소재를 보다 개선하여 제품화를 이루고, 이에 대한 적용성을 확보하는 것으로서, 고연성시멘트복합 재료의 패널화 기술은 국내 최초로 도입되는 기술이고, 이를 구조부재에 적용하는 기술은 세계최초 신기술/신공법으로서 신규성 충분하여 특허 및 건설 신기술 등 지적재산권 확보가 가능하다.

더욱이 본 연구개발 성과는 신규성 및 바닥구조시스템 중 가격경제성을 가질 것으로 기대되기 때문에 본 연구개발 완료 이후 현장적용실적 확보가 충분이 이루어지는 경우 건설신기술 추진/획득이 가능하며, 이를 통하여 독자적인 브랜드를 창출할 것으로 기대된다.

다. 성능기반(PBD) 내화 설계 기술의 확산효과

초고층건축물 및 지하공간에서 내화설계 기술의 성능을 확보할 수 있는 성능적인 내화설계 방법론의 구축

- 건설시장의 새로운 내화설계 방법의 도입으로 건축물의 리스크가 절감된다
- 초고층건축물 및 지하공간에서 내화설계기술의 실질적인 방법론으로, 실 내화설계의 기술적 확산이 가능하다.
- 기술적 경쟁력 향상 효과

- 초고층건축물 및 지하공간의 내화설계를 세계적 동등이상 수준달성으로 기준정립의 기반이 확립된다.
- 국내만의 특징의 도입으로 인한 내화설계의 확충이 예상된다.
- 건설시장의 확충과 리스크절감을 위한 내화성능기술을 확보한다.

라. 영구거푸집 겸용 고강도콘크리트 내화성능 향상기술 확보

건설 신소재인 영구거푸집용 시멘트 복합체의 제조·시공기술에 관한 자체 재료 및 기술력(특허) 확보가 가능하며, 개발소재는 콘크리트 재료로써 고강도이면서도 폭력이 발생하지 않는 기술과 콘크리트 제품이면서도 변형능력 및 균열추종성이 우수한 재료 기술을 접목한 것으로써 다음과 같은 기술적 파급효과가 클 것으로 기대된다.

한편, 고강도 시멘트계 재료이면서도 폭렬이 발생하지 않아 고강도콘크리트의 내화성능을 확보할 수 있도록 하며, 고강도 재료이므로 고강도콘크리트와 동시에 구조부재의 일부로 사용됨으로써 추가적인 단면증가가 수반되지 않으며, 프리캐스트 제품 형태를 가지며, 변형능력 및 균열추종성이 우수하여 보다 경량의 제품생산 및

작업여건이 개선되고, 동시에 마감성이 우수하여 추가적인 공정이 필요치 않은 우수한 건설재료가 될 것으로 판단된다. 또한, 기존 구조물의 바닥시스템에 있어 내충격성, 차음성능, 및 내구성을 대폭 향상시킬 수 있는 새로운 공법 및 기술 확보가 가능하다.

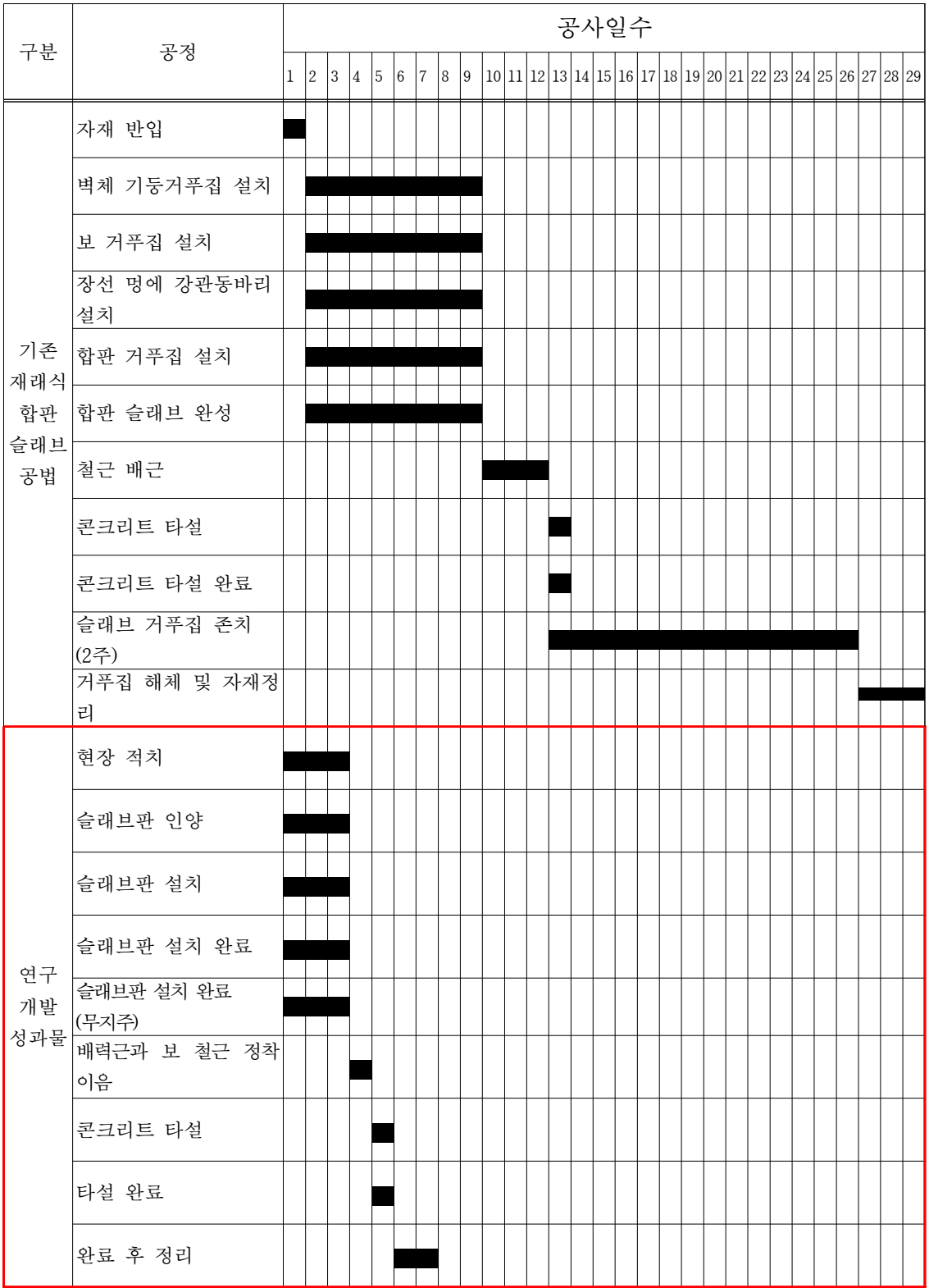
마. 현행 기술과 본 연구개발 성과의 기술적 측면 비교 분석

본 연구 개발 성과물의 성능에 대한 결과표를 다음 <표 4.1.3>에 나타내었다. 또한, 본 연구개발 성과의 기술적 측면을 비교하기 위해 바닥시스템 중 가장 많이 사용되는 재래식 공법에 대하여 공사기간에 대해 <표 4.1.4>와 같이 비교하였다. 또한, 현재 적용되고 있는 바닥시스템과 본 연구개발 성과물에 대한 비교를 다음 <표 4.1.5>에 나타내었다.

<표 4.1.3> 본 연구개발 성과물의 성능 결과

성능 시험항목		검증기준	검증결과		분석 내용
역학 성능	압축강도	KS F 2405	52MPa		압축강도 측정 시험성적서
	휨 강도	KS F 2408	10.6MPa		휨강도 측정 시험성적서
	인장강도	JSCE-HPFRCC	4.1MPa		인장강도 측정 평가 결과
	인장 변형률		2.9%		
역학 성능	압축강도	KS F 2405	수중양생	41.1MPa	압축강도 측정 시험성적서
			증기양생	28.2MPa	
	휨 강도	KS F 2408	수중양생	11.2MPa	휨강도 측정 시험성적서
			증기양생	6.6MPa	
	인장강도	JSCE-HPFRCC	수중양생	4.5MPa	인장강도 측정 평가 결과
			증기양생	2.8MPa	
	인장 변형률		수중양생	2.7%	
			증기양생	2.9%	
구조 성능	Initial crack	100Ton급 UTM	Disp	1.7mm	Initial crack 평가 결과
			Load	25.9kN	
	Yielding of bar		Disp	16.6mm	Yielding of bar 평가 결과
			Load	80.1kN	
	Max values		Disp	45.8mm	Max values 평가 결과
			Load	90.5kN	
	Variation of load		1.329		Variation of load 평가 결과
	Secant stiffness at yielding		4.8		Secant stiffness at yielding 평가 결과
	Ductility ratio		2.76		Ductility ratio 평가 결과
	※PCSH-60-150을 대상으로 설정				
내화 성능	내화성능 (내・외부의 수열온도)	ISO 834 3H	0mm	953℃	내화 가열 시험성적서
			20mm	696.3℃	
			40mm	481.2℃	
			60mm	287.8℃	
			100mm	99.8℃	
	※3시간 내화가열 시험으로 설정				

<표 4.1.4> 재래식 공법과 본 연구개발 성과물과의 공사기간 비교표



※ 광주 ㅇㅇ법원 청사 신축 공사 현장 분석에 한함. (층고 4.5M, 1000m^2 기준)

<표 4.1.5> 현행기술과 SHCC 복합바닥구조공법 비교

항 목		본 연구개발 공법	재래식	철근일체형데크	무지주합판거푸집
시스템 모식도					
안전성	안전사고	안전한 시공 가능	대처미흡	강판 용접부위 다소미흡	볼트형식/육안확인 가능
	현장정리	양호	미흡	양호	양호
시공성	공장제작	SHCC PCa_철근트러스+배력근	없음	아연도금강판+철근트러스	합판+철근트러스+(배력근)
	제작규격	폭 600㎜, 길이 4000㎜(무지주)	현장제작설치	폭: 600㎜ 길이:3900㎜(무지주)	폭:슬래브폭, 길이:3900㎜(무지주)
	하부노출면	SHCC	콘크리트면	아연도금 강판	콘크리트면
	서포트설치	미설치	설치	미설치 (4m 이하)	미설치 (4m 이하)
	가설재해체	불필요	거푸집, 장선, 멍에, 동바리	불필요	슬래브 하부 합판
	공사기간	6일	9일 (해체기간포함)	6.2일	6일 (해체기간포함)
시공 트러블 대처	균 열	무 발생하여도 미세균열	발생시 구조균열-에폭시 비구조균열-페이스트마감	무	발생시 구조균열-에폭시 비구조균열-페이스트마감
	누수	발생하지 않음(미세균열)	발생시 방수작업 병행	용접부 누수 가능성	발생시 방수작업 병행
	백화현상	발생하지 않음(공장제작)	발생가능성	무	발생가능성
	표면상태	공장제작면 노출 (미관 수려)	타설불량 발생 가능성 (스페이서 및 세퍼레이터 노출 가능성)	아연도금 강판	타설불량 발생 가능성 (볼트 노출-부식가능성)
장 점		-SHCC의 복합바닥구조 시스템(브랜드) 적용 -시공트러블(하부균열) 무 -배근간격 및 피복유지(품질향상) -동바리 필요없음 -우수한 내구성(SHCC의 특징)	-친숙한 공법 -변경이 용이함 -기존자재 활용 -자재수급 및 현장 대체 가능 -형상에 제한이 없음. -설비 전기 작업이 비교적 용이	-공기단축 -현장인력감소 -탈형작업없음 -경량임 -배근간격 및 피복을 유지하여 품질향상. -소형으로 판개용이 -동바리 없음	-공기단축 -현장인력감소 -현장가공이 용이함 -쉽고간편한 탈형 -배근간격 및 피복을 유지하여 품질향상. -볼트 구멍을 이용 설비 달대공사 용이 -동바리 없음
단 점		-새로운 공법에 대한 기술력 확보 문제 -장비사용 증가	-층고 영향을 받음 -폐자재 다량 발생 -안전사고위험 -공정이 많음 -배근간격 및 피복의 균일한 확보가 어려움. (하자발생)	-균열, 누수등의 하자발견 어려움 -강판의 녹발생 -현장가공 어려움 -하부강판의 일회적 사용으로 경제성 결여	-중량이므로 장비 사용 증가 -도면 변경시 시간필요 -천정이 없을 경우 볼트 구멍에 별도 작업이 필요함.

3. 연구개발 성과의 경제적 효과분석

바닥구조시스템의 독자 브랜드에 의한 구조물의 고급화 전략 및 홍보로 활용 가능(연구개시 이후 빠른 시간이내에 국내 구조물 시험적용 및 홍보 활용 추진)하다. 또한, 미래원천 기술에 대한 확보로써 향후 국내의 초고층건축물 및 지하공간에서의 내화설계기술의 S/W 시장확보 및 세계수준과의 동등이상 구축될 것으로 예상된다.

건설 신소재인 SHCC의 제조·시공기술에 관한 자체 재료 및 기술력(특허) 확보가 가능하다. 또한, 건설신소재 개발 및 적용 분야에 파급효과가 상당하며, 섬유산업분야에서의 건축/토목 적용성 확대에도 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

- 공법 적용 시 하자발생(균열 및 누수)의 최소화로 인한 보수비용 및 추가적인 유지관리 비용의 절감이 가능.
- 건설 신소재·신공법인 고인성·고내화성 시멘트 복합체의 제조·시공기술에 관한 자체 기술력 확보에 의해 선진 건설기술의 국산화로 고가의 선진외국기술에 대한 수입대체 및 해외 수주가 가능.
- 기계화 시공법의 개발에 의해 인력절감 및 공기단축에 의한 직접공사비의 절감이 가능할 뿐만 아니라 건설생산현장에서의 실용화 기술을 개발하여 기술적 우위를 확보함으로서 외국으로 국산기술 수출 가능
- 바닥구조시스템의 프리캐스트화를 통하여 인력절감 및 공기단축에 의한 직접공사비의 절감이 가능.
- 동일 공법대비 가격경쟁력을 갖춤으로써 공사원가 절감이 가능(바닥 구체공사 10% 절감 목표).
- 동일 공법대비 차음성능 및 내진동 성능을 향상시킴으로써 추가적인 하중 증가 억제가 가능하여 보다 경제적인 구조물 생산이 가능.
- 기존 건축·토목구조물의 보수 또는 보수보강공법으로 적용함으로서 내구 및 내화성능뿐만 아니라 균열제어성능, 연성, 에너지흡수능력이 크게 향상된 구조물의 구축이 가능하여 사회간접자본시설 및 민간자본시설의 장수명화 및 생애주기비용(LCC)의 저감이 가능.

가. 설계・시공비 절감 효과

(1) 경제성 비교 개요

본 연구개발 성과물에 대해 원가전문 조사기관인 (주)한국통계조사연구소에서 검토결과 기존 사용되고 있는 데크공법과 비교하여 우수한 경제성을 갖는 기술이다.

이러한 연구개발물과 데크공법에 대하여 주차장에 사용될 슬래브 및 기둥에 대해 검토를 수행하여 보았다. 주차장의 크기는 30m×30m에 슬래브 지붕을 설치하는 구조물로 기둥간격을 CTC-7.0m로 설정하였으며, 설치의 개요도는 기존 데크 공법과 본 연구개발 성과물의 Green SHCC로써 다음 <그림 4.1.1>, <그림 4.1.2>와 같다.

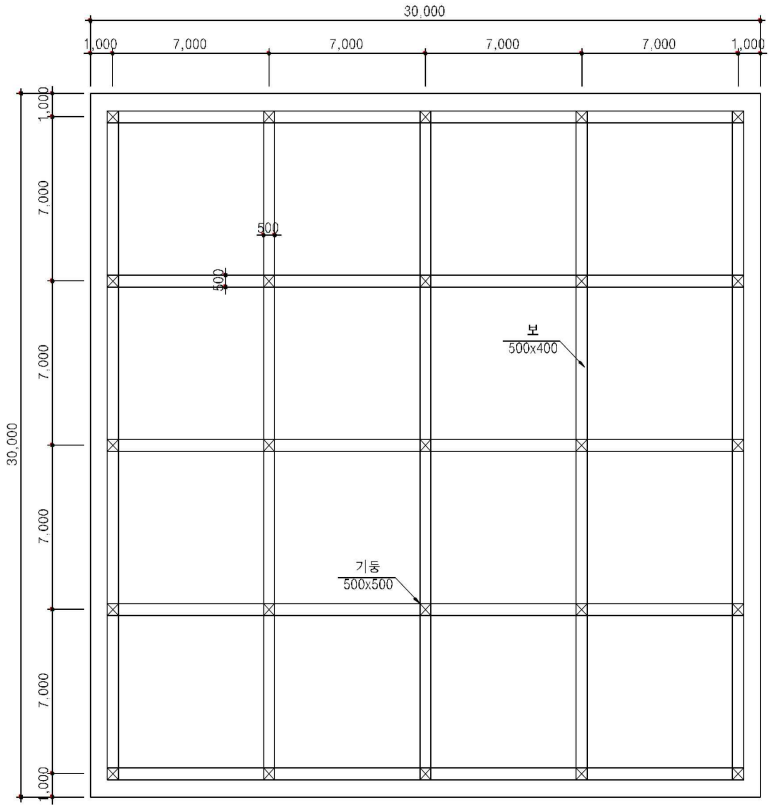
주차장 슬래브 및 기둥검토-1안

1. 개 요

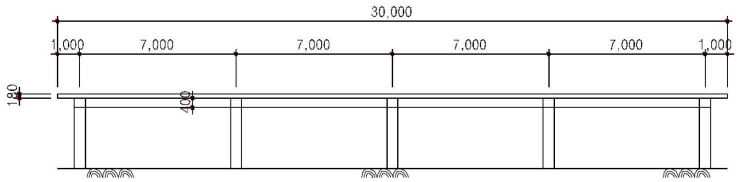
주차장 30m x 30m에 슬래브 지붕을 설치하는 구조물로 기둥간격을 CTC-7.0m

2. 설치개요도

평 면 도



단 면 도

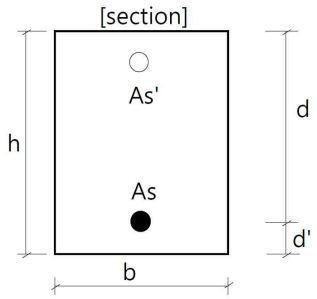


<그림 4.1.1> 기존 데크 공법의 주차장 개요도

《 상부슬래브(T:180) 》

1) Input Data

- CON'C 설계기준강도 : f_{ck} = 24 MPa
- 철근 항복강도 : fy = 300 MPa
- 단면 폭 : b = 1,000 mm
- 단면 높이 : H = 180 mm
- 헌치 길이 : H' = mm
- 유효 높이 : d = 130 mm
- 콘크리트 덮개 : d' = 50 mm
- 극한모멘트 : M_u = 4.82 KN·m
- 극한전단력 : V_u = - KN



- 강도감소계수(휨) : φ_f = 0.85
- 강도감소계수(전단) : φ_v = 0.75

2) 모멘트에 대한 단면검토

① 필요 철근량 계산

$a = (A_s \times f_y) / (0.85 \times f_{ck} \times b)$ => $A_s \times 0.01471$ -> 아래식에 대입.

$M_d = \varphi \times A_s \times f_y \times (d - a / 2)$

$1.876\ A_s^2 - 33150\ A_s + 4823000 = 0$

$A_{s,req}$ = 146.7 mm^2

$\varepsilon t = 0.003 \cdot (H - a/\beta 1 - Dc_min) / (a/\beta 1)$ = 0.0326 ≥ 0.0050 => ∴ φ_f = 0.85

$A_{smin} = 0.25 \times \sqrt{f_{ck}} \times b \times d / f_y$ = 530.7 mm^2

$A_{smin} = 1.4 \times b \times d / f_y$ = 606.7 mm^2

$4/3A_{s,req}$ = 195.6 mm^2

∴ A_{smin} = 195.6 mm^2

A_{smin} > $A_{s,req}$ => ∴ $A_{s,req}$ = 195.6 mm^2

사용 철근량 A_s = D 13 @ 5.0 EA = 633.5 mm^2

D @ = 0.0 mm^2 ▷ TOTAL As = 633.5 mm²

사용 철근량 A_s = 633.5 > $A_{s,req}$ = 195.6 - - - - - - - - - - - -> O.K

$$A_{smax} = 0.714 \times 0.85 \times 0.850 \times \frac{24}{300} \times \frac{600}{600 + 300} \times 1000.0 \times 130.0$$

= 3576.7 mm^2 > 사용 철근량 A_s = 633.5 mm^2 - - - - - - - - - - - -> O.K

② 단면력 검토

$a = (A_s \times f_y) / (0.85 \times f_{ck} \times b)$

$= (633.5 \times 300.0) / (0.85 \times 24.0 \times 1000.0)$ = 9.316

$M_d = \varphi \times A_s \times f_y \times (d - a / 2)$

$= 0.850 \times 633.5 \times 300.0 \times (130.0 - 9.316 / 2)$

= 20.248 KN·m > M_u = 4.823 KN·m - - - - - - - - - - -> O.K

3) 전단에 대한 검토

전단 검토에 사용되는 단면의 유효높이 d ; 130.0 mm

$V_c = 1/6 \times \sqrt{f_{ck}} \times b \times d$ = 106.145 KN

$V_{cmax} = 0.29 \times \sqrt{f_{ck}} \times b \times d$ = 184.692 KN

V_c < V_{cmax} ∴ V_c = 106.145 KN

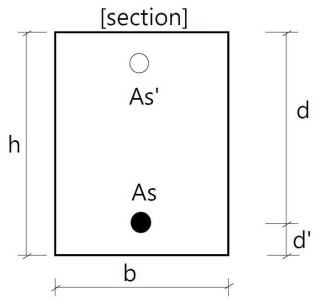
φV_c = 79.609 KN > V_u = 0.000 KN

∴ Vu < φVc 이므로 전단철근 필요 없음 !

《 상부보브(H:400) 》

1) Input Data

- CON'C 설계기준강도 : f_{ck} = 24 MPa
- 철근 항복강도 : fy = 300 MPa
- 단면 폭 : b = 500 mm
- 단면 높이 : H = 400 mm
- 헌치 길이 : H' = mm
- 유효 높이 : d = 350 mm
- 콘크리트 덮개 : d' = 50 mm
- 극한모멘트 : M_u = 37.40 KN·m
- 극한전단력 : V_u = 193.55 KN



- 강도감소계수(휨) : φ_f = 0.85
- 강도감소계수(전단) : φ_v = 0.75

2) 모멘트에 대한 단면검토

① 필요 철근량 계산

a = (A_s × f_y) / (0.85 × f_{ck} × b) => A_s × 0.02941 -> 아래식에 대입.

$M_d = \varphi \times A_s \times f_y \times (d - a / 2)$

$3.75\ A_s^2 - 89250\ A_s + 37401000 = 0$

$A_{s,req}$ = 426.7 mm^2

$\varepsilon t = 0.003 \cdot (H - a/\beta 1 - Dc_min) / (a/\beta 1)$ = 0.0449 ≥ 0.0050 => ∴ φ_f = 0.85

$A_{smin} = 0.25 \times \sqrt{f_{ck}} \times b \times d / f_y$ = 714.4 mm^2

$A_{smin} = 1.4 \times b \times d / f_y$ = 816.7 mm^2

$4/3A_{s,req}$ = 568.9 mm^2

∴ A_{smin} = 568.9 mm^2

A_{smin} > $A_{s,req}$ => ∴ $A_{s,req}$ = 568.9 mm^2

사용 철근량 A_s = D 13 @ 5.0 EA = 633.5 mm^2

D @ = 0.0 mm^2 ▷ TOTAL As = 633.5 mm²

사용 철근량 A_s = 633.5 > $A_{s,reg}$ = 568.9 - - - - - - - - - - -> O.K

$$A_{smax} = 0.714 \times 0.85 \times 0.850 \times \frac{24}{300} \times \frac{600}{600 + 300} \times 500.0 \times 350.0$$

= 4814.7 mm^2 > 사용 철근량 A_s = 633.5 mm^2 - - - - - - - - - - -> O.K

② 단면력 검토

a = (A_s × f_y) / (0.85 × f_{ck} × b)

= (633.5 × 300.0)/ (0.85 × 24.0 × 500.0) = 18.632

$M_d = \varphi \times A_s \times f_y \times (d - a / 2)$

= 0.850 × 633.5 × 300.0 ×(350.0 - 18.632 / 2)

= 55.035 KN·m > M_u = 37.401 KN·m - - - - - - - - - -> O.K

3) 전단에 대한 검토

전단 검토에 사용되는 단면의 유효높이 d ; 350.0 mm

V_c = 1/6 × $\sqrt{f_{ck}}$ × b × d = 142.887 KN

V_{cmax} = 0.29 × $\sqrt{f_{ck}}$ × b × d = 248.623 KN

V_c < V_{cmax} ∴ V_c = 142.887 KN

φV_c = 107.165 KN < V_u = 193.550 KN

∴ Vu > φVc 이므로 전단철근 필요 !

《 기둥단면(500x500) 》

1) 검토 제목 : 기존 데크

2) 설계조건

콘크리트 설계기준 강도 (fck) : 24 MPa
철 근 항 복 강 도 (fy) : 300 MPa
강 재 항 복 강 도 (fsy) : 0 MPa
콘크리트 탄성계수 (Ec) : 26900 MPa
철근 설계피복두께 (d') : 50.0 mm
횡방향 철근 형태 : 띠 철근

3) 사각형단면 검토조건

단 면 폭 (B) : 500.00 mm
단 면 높 이 (H) : 500.00 mm
비지지 길이 (Lu) : 3000.00 mm
유효길이계수 (Kx) : 0.50
유효길이계수 (Ky) : 0.50

4) 사용 강재량

(1) 사용 철근량

-. 1단 철근 : D13 × 16ea = 2027.2 ㎟ (dc = 50.0 mm)
-. 총 사용 철근량 : Ast = 2027.2 ㎟

5) 공칭 강도 검토

(1) Load Case 1

① 작용하중

계수축하중 : Pu = 71.490 KN

계수모멘트(X) : Mux = 7.370 KN·m
Mux.ns= 7.370 KN·m
Mux.s = 0.000 KN·m

X축 세장비 : λx = 10.4
Y축 세장비 : λy = 10.4

지속 계수하중비 : βdx = 0.000
: βdy = 0.000

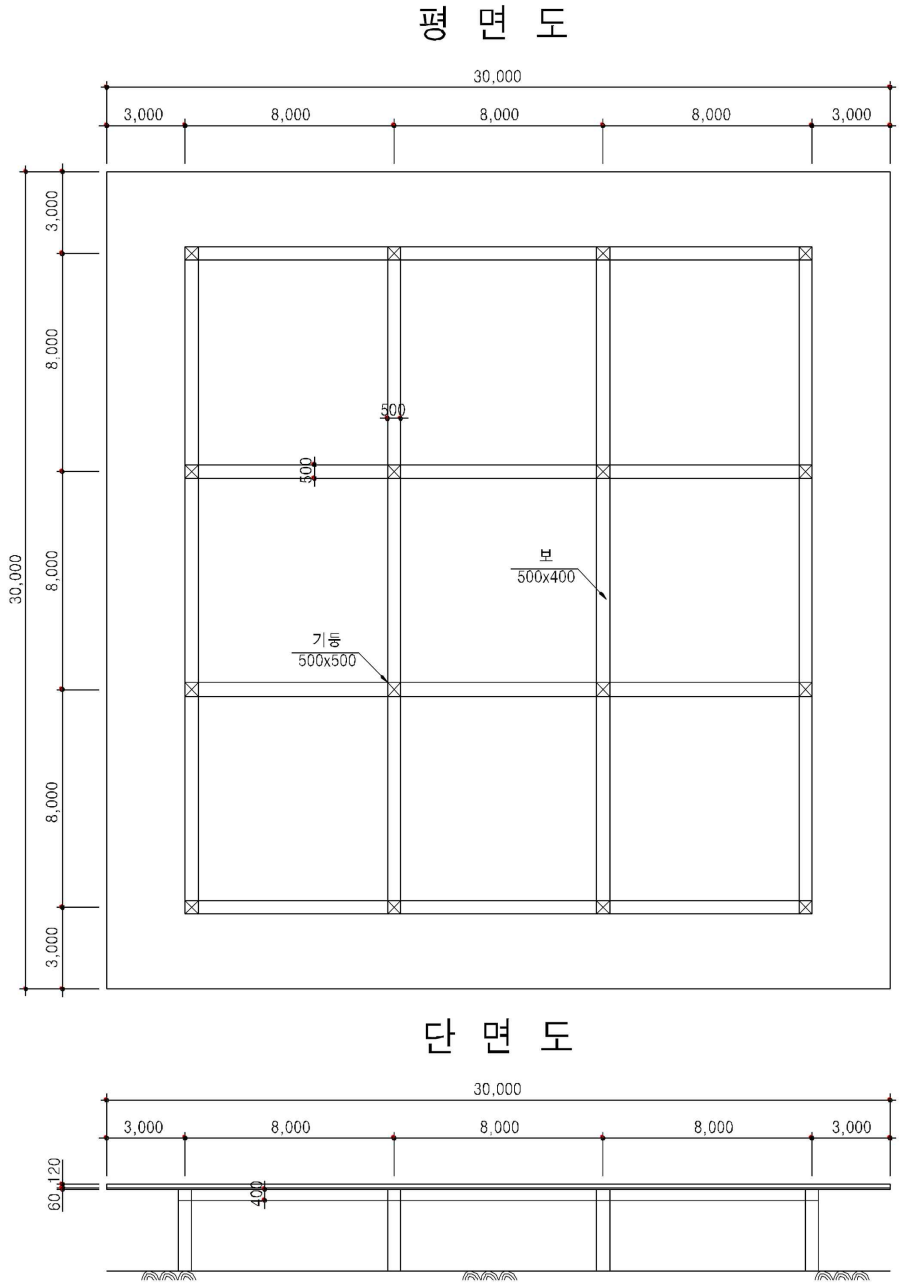
X축 확대계수 : δx.ns = 1.000
: δx.s = 1.000

주차장 슬래브 및 기둥검토-2안

1. 개 요

주차장 30m x 30m에 슬래브 지붕을 설치하는 구조물로 기둥간격을 CTC-8.0m로 적·

2. 설치개요도

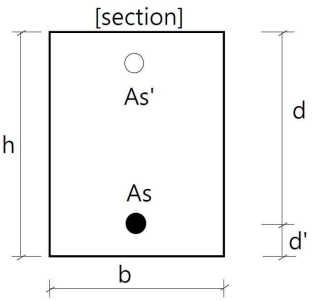


<그림 4.1.2> Green SHCC 공법의 주차장 개요도

《 상부슬래브(T:120) 》

1) Input Data

- CON'C 설계기준강도 : f_{ck} = 24 MPa
- 철근 항복강도 : fy = 300 MPa
- 단면 폭 : b = 1,000 mm
- 단면 높이 : H = 120 mm
- 헌치 길이 : H' = mm
- 유효 높이 : d = 70 mm
- 콘크리트 덮개 : d' = 50 mm
- 극한모멘트 : M_u = 5.23 KN·m
- 극한전단력 : V_u = - KN



- 강도감소계수(휨) : φ_f = 0.85
- 강도감소계수(전단) : φ_v = 0.75

2) 모멘트에 대한 단면검토

① 필요 철근량 계산

$a = (A_s \times f_y) / (0.85 \times f_{ck} \times b)$ => $A_s \times 0.01471$ -> 아래식에 대입.

$M_d = \varphi \times A_s \times f_y \times (d - a / 2)$

$1.876\ A_s^2 - 17850\ A_s + 5234667 = 0$

$A_{s,req}$ = 302.9 mm^2

$\varepsilon t = 0.003 \cdot (H - a/\beta 1 - Dc_min) / (a/\beta 1)$ = 0.0162 ≥ 0.0050 => ∴ φ_f = 0.85

$A_{smin} = 0.25 \times \sqrt{f_{ck}} \times b \times d / f_y$ = 285.8 mm^2

$A_{smin} = 1.4 \times b \times d / f_y$ = 326.7 mm^2

$4/3A_{s,req}$ = 403.9 mm^2

∴ A_{smin} = 326.7 mm^2

A_{smin} > $A_{s,req}$ => ∴ $A_{s,req}$ = 326.7 mm^2

사용 철근량 A_s = D 13 @ 5.0 EA = 633.5 mm^2

D @ = 0.0 mm^2 ▷ TOTAL As = 633.5 mm^2

사용 철근량 A_s = 633.5 > $A_{s,req}$ = 326.7 - - - - - - - - - - -> O.K

$$A_{smax} = 0.714 \times 0.85 \times 0.850 \times \frac{24}{300} \times \frac{600}{600 + 300} \times 1000.0 \times 70.0$$

= 1925.9 mm^2 > 사용 철근량 A_s = 633.5 mm^2 - - - - - - - - - - -> O.K

② 단면력 검토

$a = (A_s \times f_y) / (0.85 \times f_{ck} \times b)$

$= (633.5 \times 300.0) / (0.85 \times 24.0 \times 1000.0) = 9.316$

$M_d = \varphi \times A_s \times f_y \times (d - a / 2)$

$= 0.850 \times 633.5 \times 300.0 \times (70.0 - 9.316 / 2)$

= 10.556 KN·m > M_u = 5.235 KN·m - - - - - - - - - -> O.K

3) 전단에 대한 검토

전단 검토에 사용되는 단면의 유효높이 d ; 70.0 mm

$V_c = 1/6 \times \sqrt{f_{ck}} \times b \times d$ = 57.155 KN

$V_{cmax} = 0.29 \times \sqrt{f_{ck}} \times b \times d$ = 99.449 KN

V_c < V_{cmax} ∴ V_c = 57.155 KN

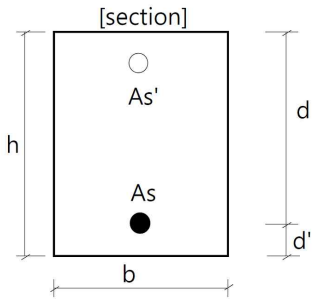
φV_c = 42.866 KN > V_u = 0.000 KN

∴ Vu < φVc 이므로 전단철근 필요 없음 !

《 상부보브(H:400) 》

1) Input Data

- CON'C 설계기준강도 : f_{ck} = 24 MPa
- 철근 항복강도 : fy = 300 MPa
- 단면 폭 : b = 500 mm
- 단면 높이 : H = 400 mm
- 헌치 길이 : H' = mm
- 유효 높이 : d = 350 mm
- 콘크리트 덮개 : d' = 50 mm
- 극한모멘트 : M_u = 46.04 KN·m
- 극한전단력 : V_u = 238.24 KN



- 강도감소계수(휨) : φ_f = 0.85
- 강도감소계수(전단) : φ_v = 0.75

2) 모멘트에 대한 단면검토

① 필요 철근량 계산

$a = (A_s \times f_y) / (0.85 \times f_{ck} \times b)$ => $A_s \times 0.02941$ -> 아래식에 대입.

$M_d = \varphi \times A_s \times f_y \times (d - a / 2)$

$3.75\ A_s^2 - 89250\ A_s + 46037333 = 0$

$A_{s,req}$ = 527.5 mm^2

$\varepsilon t = 0.003 \cdot (H - a/\beta 1 - Dc_min) / (a/\beta 1)$ = 0.0449 ≥ 0.0050 => ∴ φ_f = 0.85

$A_{smin} = 0.25 \times \sqrt{f_{ck}} \times b \times d / f_y$ = 714.4 mm^2

$A_{smin} = 1.4 \times b \times d / f_y$ = 816.7 mm^2

$4/3A_{s,req}$ = 703.4 mm^2

} ∴ A_{smin} = 703.4 mm^2

A_{smin} > $A_{s,req}$ => ∴ $A_{s,req}$ = 703.4 mm^2

사용 철근량 A_s = D 13 @ 5.0 EA = 633.5 mm^2

D @ = 0.0 mm^2 ▷ TOTAL As = 633.5 mm^2

사용 철근량 A_s = 633.5 < $A_{s,req}$ = 703.4 - - - - - - - - - - -> N.G

$$A_{smax} = 0.714 \times 0.85 \times 0.850 \times \frac{24}{300} \times \frac{600}{600 + 300} \times 500.0 \times 350.0$$

= 4814.7 mm^2 > 사용 철근량 A_s = 633.5 mm^2 - - - - - - - - - - -> O.K

② 단면력 검토

$a = (A_s \times f_y) / (0.85 \times f_{ck} \times b)$

= (633.5 × 300.0)/ (0.85 × 24.0 × 500.0) = 18.632

$M_d = \varphi \times A_s \times f_y \times (d - a / 2)$

= 0.850 × 633.5 × 300.0 ×(350.0 - 18.632 / 2)

= 55.035 KN·m > M_u = 46.037 KN·m - - - - - - - - - -> O.K

3) 전단에 대한 검토

전단 검토에 사용되는 단면의 유효높이 d ; 350.0 mm

$V_c = 1/6 \times \sqrt{f_{ck}} \times b \times d$ = 142.887 KN

$V_{cmax} = 0.29 \times \sqrt{f_{ck}} \times b \times d$ = 248.623 KN

V_c < V_{cmax} ∴ V_c = 142.887 KN

φV_c = 107.165 KN < V_u = 238.243 KN

∴ Vu > φVc 이므로 전단철근 필요 !

《 기둥단면(500x500) 》

1) 검토 제목 : Green SHCC

2) 설계조건

콘크리트 설계기준 강도 (fck) : 24 MPa
철 근 항 복 강 도 (fy) : 300 MPa
강 재 항 복 강 도 (fsy) : 0 MPa
콘크리트 탄성계수 (Ec) : 26900 MPa
철근 설계피복두께 (d') : 50.0 mm
횡방향 철근 형태 : 띠 철근

3) 사각형단면 검토조건

단 면 폭 (B) : 500.00 mm
단 면 높 이 (H) : 500.00 mm
비지지 길이 (Lu) : 3000.00 mm
유효길이계수 (Kx) : 0.50
유효길이계수 (Ky) : 0.50

4) 사용 강재량

(1) 사용 철근량

-. 1단 철근 : D13 × 16ea = 2027.2 ㎟ (dc = 50.0 mm)
-. 총 사용 철근량 : Ast = 2027.2 ㎟

5) 공칭 강도 검토

(1) Load Case 1

① 작용하중

계수축하중 : Pu = 75.190 KN

계수모멘트(X) : Mux = 8.420 KN·m
Mux.ns= 8.420 KN·m
Mux.s = 0.000 KN·m

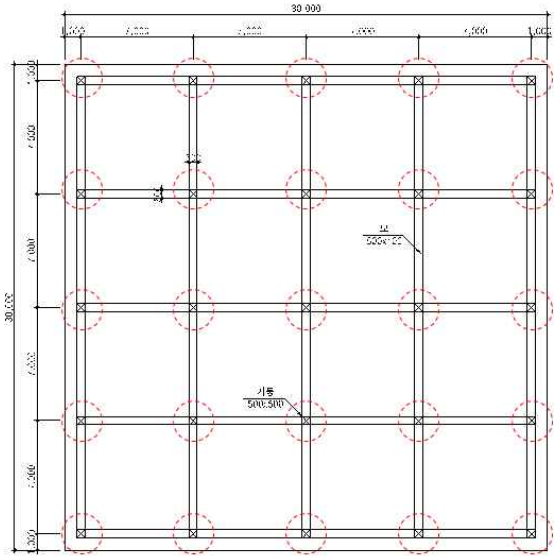
X축 세장비 : λx = 10.4
Y축 세장비 : λy = 10.4

지속 계수하중비 : βdx = 0.000
: βdy = 0.000

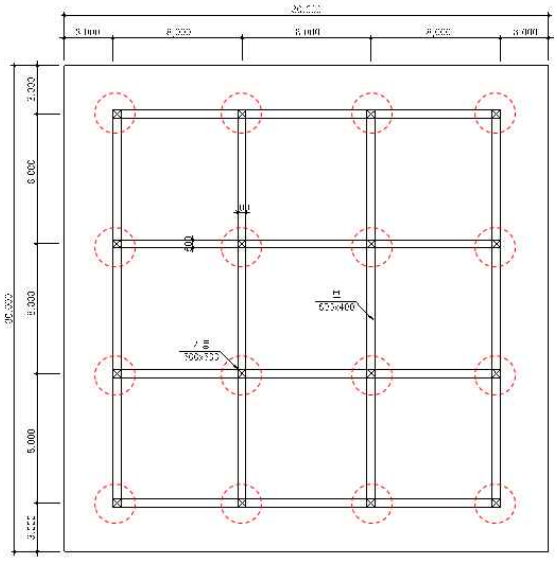
X축 확대계수 : δx.ns = 1.000
: δx.s = 1.000

(2) 경제성 비교 분석 결과

기존 데크 공법에 대한 30m×30m 주차장의 구조계산 결과, 1층당 25EA의 기둥-보가 사용되는 것을 확인 할 수 있었으며, 본 연구개발 성과물인 Green SHCC 공법에 대한 30m×30m 주차장의 구조계산 결과, 1층당 16EA의 기둥-보가 사용되는 것을 확인 할 수 있었다<그림 4.1.3>. 이는 기존 데크 공법보다 9EA의 기둥-보가 저감되는 것으로 나타났으며, 30mx30m 와 같이 정사각형 공간의 구획에서는 0.01 EA/m^2 의 기둥·보가 저감되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 경제성에서도 우수하다는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 기존 데크공법 주차장



(b) Green SHCC 공법 주차장

<그림 4.1.3> 기존 데크 공법과 본 기술 적용에 따른 주차장 설계도면

산 출 내 역 서

순 번		품 명	규 격	단위	수 량	직접재료비		직접노무비		기계경비		합 계	
						단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액
1		SHCC 패널											
	1	철근	D13	톤	14.246	695,000	9,900,970		-		-	695,000	9,900,970
	2	철근가공조립	보통	톤	14.246	17,393	247,780	496,013	7,066,201	-	-	513,406	7,313,981
	3	합판거푸집	3회	㎡	1,260.000	9,225	11,623,500	18,473	23,275,980	-	-	27,698	34,899,480
	4	레미콘	25-240-12	㎥	164.800	61,710	10,169,808		-		-	61,710	10,169,808
	5	레미콘 타설		㎥	164.800	1,560	257,088	9,150	1,507,920	2,419	398,651	13,129	2,163,659
	6	SHCC 패널		㎡	900.000	30,000	27,000,000		-		-	30,000	27,000,000
	7						-		-		-	-	-
												-	-
		소 계					59,199,146		31,850,101		398,651	-	91,447,898
2		기존 데크											
	1	철근	D13	톤	17.256	695,000	11,992,920		-		-	695,000	11,992,920
	2	철근가공조립	보통	톤	17.256	17,393	300,133	496,013	8,559,200	-	-	513,406	8,859,333
	3	합판거푸집	3회	㎡	1,435.600	9,225	13,243,410	18,473	26,519,838	-	-	27,698	39,763,248
	4	레미콘	25-240-12	㎥	236.750	61,710	14,609,842		-		-	61,710	14,609,842
	5	레미콘 타설		㎥	236.750	1,560	369,330	9,150	2,166,262	2,419	572,698	13,129	3,108,290
	6	데크플레이트	G.I 75*600*1.2t	㎡	900.000	24,400	21,960,000		-		-	24,400	21,960,000
	7						-		-		-	-	-
												-	-
		소 계					62,475,635		37,245,300		572,698	-	100,293,633

<그림 4.1.5> 산출 내역서

일위대가 산출표

호 표	품 명	규 격	단위	수 량	합 계		재료비		노무비		경 비		비 고
					단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	
제1호표	합판거푸집	1회	㎡		-	59,233		20,012		39,221		-	
	합판거푸집	1회재료비	㎡	1	20,012	20,012	20,012	20,012	-	-	-	-	제4호표
	합판거푸집	1회노무비	㎡	1	39,221	39,221	-	-	39,221	39,221	-	-	제5호표
					-	-							
제2호표	합판거푸집	2회	㎡		-	34,938		11,406		23,532		-	
	합판거푸집	1회재료비	㎡	0.57	20,012	11,406	20,012	11,406	-	-	-	-	제4호표
	합판거푸집	1회노무비	㎡	0.6	39,221	23,532	-	-	39,221	23,532	-	-	제5호표
					-	-							
제3호표	합판거푸집	3회	㎡		-	27,698		9,225		18,473		-	
	합판거푸집	1회재료비	㎡	0.461	20,012	9,225	20,012	9,225	-	-	-	-	제4호표
	합판거푸집	1회노무비	㎡	0.471	39,221	18,473	-	-	39,221	18,473	-	-	제5호표
					-	-							
제4호표	합판거푸집	1회재료비	㎡		-	20,012		20,012		-		-	
	합판(내수)	12t×1220×2440mm	㎡	1.03	8,801	9,065	8,801	9,065		-		-	
	외송각재	30×30×3600mm	㎥	0.038	419,161	15,928	419,161	15,928		-		-	
	사용고재	주자재의	%	-23	24,993	- 5,748	24,993	- 5,748		-		-	
	보통철선	#8, 4.0mm	kg	0.29	1,250	362	1,250	362		-		-	
	철못	N 75	kg	0.2	1,100	220	1,100	220		-		-	
	박 리 제(중유)	저유황(목재,합판용)	ℓ	0.19	977	185	977	185		-		-	
					-	-							
제5호표	합판거푸집	1회노무비	㎡		-	39,221		-		39,221		-	
	형 틀 목 공		인	0.22	132,373	29,122		-	132,373	29,122		-	

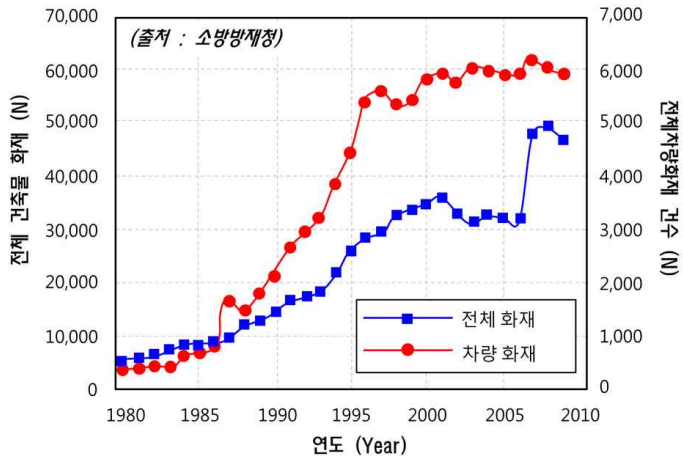
<그림 4.1.5> 일위대가 산출표-1

호 표	품 명	규 격	단위	수 량	합 계		재료비		노무비		경 비		비 고
					단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	
	보 통 인 부		인	0.12	84,166	10,099		-	84,166	10,099		-	
					-	-							
제8호표	철근가공및조립	보 통	Ton		-	513,406		17,393		496,013		-	
	철 근	별도계산		1.03	-	-		-		-		-	
	아연도철선(결속선)	#20, 0.9mm	kg	6.5	2,070	13,455	2,070	13,455		-		-	
	철 근 공		인	1.24	128,252	159,032		-	128,252	159,032		-	가공
	보통인부		인	0.45	84,166	37,874		-	84,166	37,874		-	가공
	기구손료	가공노무비의	%	2	196,906	3,938	196,906	3,938		-		-	
	철 근 공		인	1.84	128,252	235,983		-	128,252	235,983		-	조립
	보통인부		인	0.75	84,166	63,124		-	84,166	63,124		-	조립
					-	-							
제9호표	철근가공및조립	복 잡	Ton		-	570,592		21,274		549,318		-	
	철 근	별도계산		1.03	-	-		-		-		-	
	아연도철선(결속선)	#20, 0.9mm	kg	8	2,070	16,560	2,070	16,560		-		-	
	철 근 공		인	1.51	128,252	193,660		-	128,252	193,660		-	가공
	보통인부		인	0.5	84,166	42,083		-	84,166	42,083		-	가공
	기구손료	가공노무비의	%	2	235,743	4,714	235,743	4,714		-		-	
	철 근 공		인	1.92	128,252	246,243		-	128,252	246,243		-	조립
	보통인부		인	0.8	84,166	67,332		-	84,166	67,332		-	조립
					-	-		-		-		-	

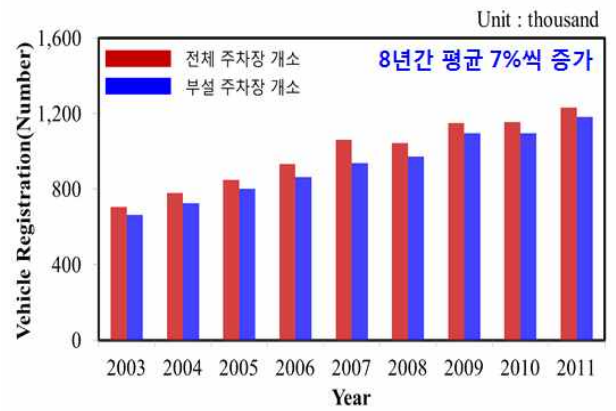
<그림 4.1.5> 일위대가 산출표-2

다. 유지관리비용 절감

본 연구개발 성과물은 고내화성·고내구성 제품으로써 기존 재래식 및 데크 공법보다 유지관리 비용 절감에 뛰어난 기술이다. 본 신청기술은 고내화성 제품이며, 국내 전체화재건수(2013년 기준, 소방방재청) 40,932건에 대하여 차량화재(도로 제외) 4,828건, 약 10%이상이 발생하는 것을 확인 할 수 있으며<그림 4.1.6>, 이러한 차량화재로 건축물·구조물(지하주차장)<그림 4.1.7>의 피해에 대한 보수비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 기술은 모체콘크리트에 균열(일반적으로 0.3mm, 이를 무해한 마이크로크랙(약 100㎛ 이하)으로 분산시켜 장기 내구성을 유지할 수 있다. 특히 본 연구개발된 성과물은 우수한 폭렬저항성과 차열성능으로 인해 모체 콘크리트 및 보강재를 화염으로 보호하고, 외부열화인자(Cl-, H2O 등)의 침입을 억제함으로써 열화를 방지가 가능하여 유지관리 비용에 우수한 절감이 가능하다. 이에 따라, 기존 주거시설 및 판매공간 시설에서 적용되는 일반강도 (24MPa)와 더불어 고강도 (50MPa)의 공법도 가능하며, 고강도 SHCC를 사용할 경우 보다 높은 유지관리 비용 저감이 될 것으로 판단된다.



<그림 4.1.6> 국내의 연도별 화재발생 비율



<그림 4.1.7> 국내의 연도별 주차장 증가 비율

4. 연구개발 성과의 정책적 효과분석

본 연구개발 성과물은 친환경이라는 정책의 테마로 수행되었다. 이에 따라, 콘크리트 강도와 피복두께를 장수명화 하고 프리캐스트를 통해 자원 절약형, 에너지 절약형, 유해물질 저하에 우수한 내화성, 내구성을 갖는 친환경적 첨단기술이다.

또한, 초기 콘크리트 및 경화 콘크리트의 품질을 확보하며, 유해물질의 배출이 증가하지 않는 범위에서 설계기준 강도를 향상하는 것으로서, 고강도, 균열폭 제어와 더불어 내화성능 내구성을 만족시키는 피복두께로 장수명화 하는 형태를 지니고 있으며, 현장타설 콘크리트 대신 프리캐스트를 이용하여 부재 및 구조체의 설계에 대한 친환경적 첨단기술로써 다음 <표 4.1.7>과 같이 본 연구개발에 사용되는 재료는 [콘크리트와 환경, 2010, 한국콘크리트학회]의 친환경적 환경배려 형태로서 국가 에너지 절감정책에 기여와 내화성능을 보유한 최첨단 기술이다.

<그림 4.1.7> 본 기술의 친환경 형태

항목	환경 배려 형태	배려 방안	본 기술 연관성
시멘트	자원 절약형	고로시멘트 또는 플라이애시 시멘트 사용 및 에코 시멘트 사용 검토	혼합 시멘트
	에너지 절약형 친환경형	고로시멘트 또는 플라이애시 시멘트 사용	혼합 시멘트
골재	자원 절약형	콘크리트 품질에 유의하며 재생골재, 각종 슬래브 골재 및 산업 부산물을 사용	산업 부산물 사용
혼화재료	자원 절약형	AE 감수제, 고성능 감수제, 고성능 AE 감수제 또는 유동화제를 이용하여 단위 시멘트량의 저감 도모	단위 시멘트량 감소
	장수명형	콘크리트 품질 확보에 유의하며 팽창제 또는 수축저감제를 이용하여 균열발생 저감. 해수의 영향을 받는 경우, 고로슬래그 미분말 또는 실리카흄 사용, 철근 부식 환경의 경우 방청제 사용	고로슬래그 미분말, 균열폭 제어로 철근 부식환경 발생 저감
	자원 절약형 에너지 절약형 친환경형	콘크리트 품질 확보에 유의하며 고로슬래브 미분말 또는 플라이애시 사용	시멘트 대체재료로 고로슬래그 미분말 및 플라이애시 사용

제 5 장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

제 1 절 연구성과 향후 활용방안

1. 본 연구개발 성과의 활용

가. 연구개발 성과물의 기술실시계획

본 연구는 [고연성 시멘트 복합재료 개발 및 바닥구조시스템 구축기술]의 테마로 수행된 연구이며, 고연성 시멘트 복합재료 개발과 더불어 바닥구조시스템을 구축하여 특허 출원 및 등록을 완료하였으며 이에 대한 기술을 현장적용까지 실시하였다.

이에 따라, 본 연구의 성과를 활용하기 위해 참여기업과의 기술실시를 수행하여 기업에서 판매, 사업화를 수행 가능토록 추진하고자 한다. 다음 <그림 5.1.1>과 <그림 5.1.2>는 본 참여기업의 (주) B&SE건설과 (주) 유신건축의 [명칭 : 시멘트 혼합물과 이를 이용한 패널 및 이를 이용한 바닥구조 시공방법] 통상실시 기술이전 계약서를 나타내었다.

나. 연구개발 성과물의 신기술 신청

본 연구의 성과물에 대한 활용을 높이기 위해, 신기술 신청을 수행하고자 한다. 이에 따라, 다음 <그림 5.1.3>과 같이 (안)으로서 [명칭 : 내화성능의 향상 및 장스팬 시공을 위한 고연성 시멘트 복합체를 이용한 패널의 개발과 이를 활용한 바닥구조 시스템 공법]으로 설정하였으며, 신청자는 호서대학교 산학협력단와 기술실시계약을 실시한 (주)B&SE건설과 (주)유신건축 3기관으로 신기술 신청을 제출하고자 한다.

통상실시 기술이전 계약서

■ 실시 기술명: 시멘트 혼합물과 이를 이용한 패널 및 이를 이용한 바닥 구조 시공방법

2014 년 05 월 23 일

〔계약당사자〕

'갑'

주 소 : 충남 아산시 배방읍 호서로 79번길 20

기 관 : 호서대학교 산학협력단

사업자등록번호 : 312-82-10256

인 장 : 강 연 구 (직인)

주 소 : 광주광역시 동구 필문대로 309 (서석동)

기 관 : 조선대학교 산학협력단

사업자등록번호 : 408-82-13119

인 장 : 차 용 호 (직인)

연구책임자(발명자) : 권 [illegible] (인)

'을'

주 소 : 경기도 안양시 동안구 귀인대로 227번길 48(호계동)

회사명 : (주)유신건축종합건축사사무소

사업자등록번호 : 213-81-09226

대 표 : 김 지 [illegible] (인)

<그림 5.1.1> 통상실시 기술이전 계약서 ((주)유신건축)

통상실시 기술이전 계약서

■ 실시 기술명: 시멘트 혼합물과 이를 이용한 패널 및 이를 이용한 바닥 구조 시공방법

2014 년 05 월 23 일

〔계약당사자〕

'갑'

주 소 : 충남 아산시 배방읍 호서로 79번길 20

기 관 : 호서대학교 산학협력단

사업자등록번호 : 312-82-10256

단 장 : 강 영 구 (서명)

주 소 : 광주광역시 동구 필문대로 309(서석동)

기 관 : 조선대학교 산학협력단

사업자등록번호 : 408-82-13119

단 장 : 차 용 준 (직인)

연구책임자(발명자) : 권 영 진 (서명)

'을'

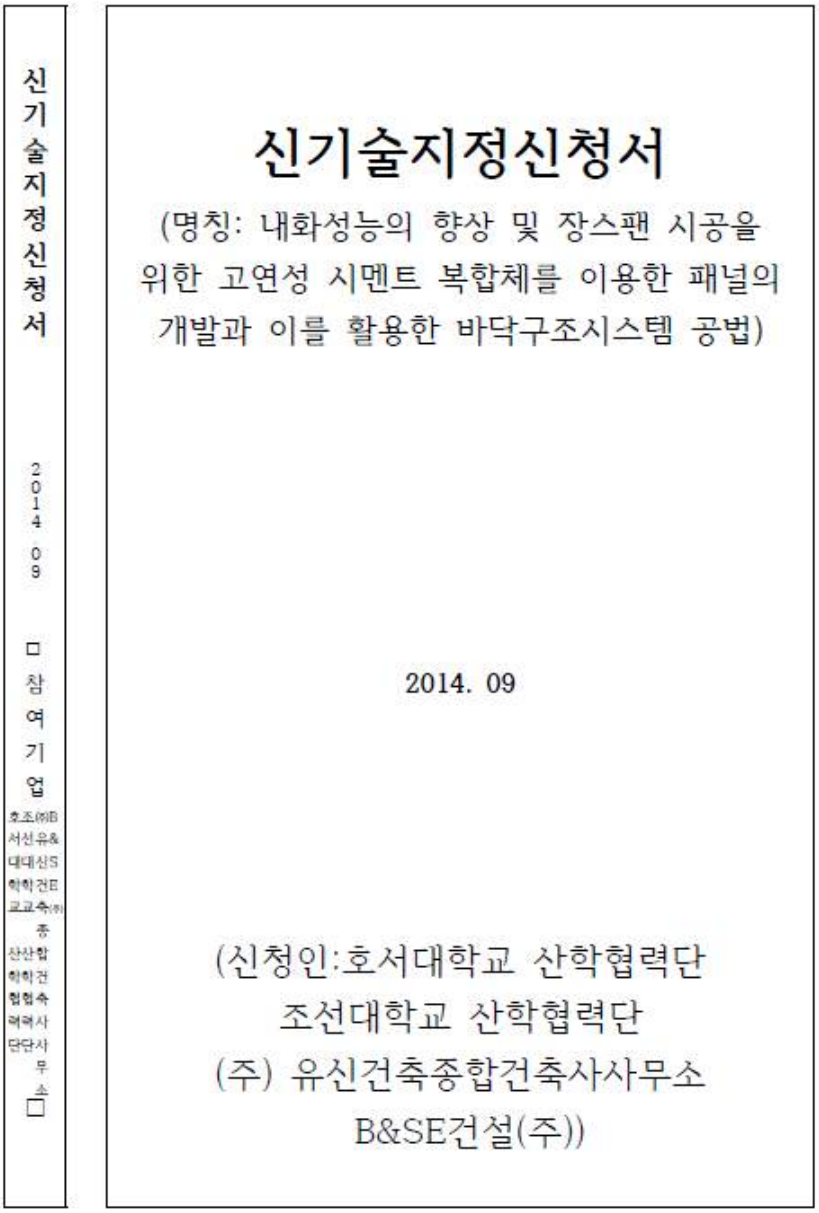
주 소 : 서울 강동구 양재대로1377 산 원빌딩 407-2호

회사명 : B&SE건설(주)

사업자등록번호 : 206-86-17758

대 표 : 성 대 민 (서명)

<그림 5.1.2> 통상실시 기술이전 계약서 ((주)B&SE건설)



<그림 5.1.3> 신기술 신청서 (안)-1

■ 건설기술 진흥법 시행규칙 [별지 제1호서식]

신기술 지정신청서

접수번호	접수일	심명확인	처리기간 120일

신기술 명칭	내화성능의 향상 및 장스팬 시공을 위한 고연성 시멘트 복합체를 이용한 패널의 개발과 이를 활용한 바닥구조시스템 공법			
기술을 개발 또는 개량한 자	상호 또는 법인명	호서대학교 산학협력단	사업자등록번호 (법인등록번호)	312-82-10256 (164871-0004513)
	성명(대표자) 임 대 우	전화번호 041-540-5497	생년월일	1950년 10월 3일
	주소	충청남도 아산시 배방읍 호서로 79번길 20 (호서대학교내)		
	상호 또는 법인명	조선대학교 산학협력단	사업자등록번호 (법인등록번호)	408-82-13419 (200171-0008803)
	성명(대표자) 차 용 훈	전화번호 062-230-6276	생년월일	1954년 9월 4일
	주소	광주광역시 동구 필문대로 309번지 (서석동)		
	상호 또는 법인명	㈜ 유신건축종합건축사사무소	사업자등록번호 (법인등록번호)	213-81-00226 (110111-0301971)
	성명(대표자) 김 지 억	전화번호 031-381-2182	생년월일	1942년 3월 30일
	주소	경기도 안양시 동안구 평촌대로227번길 48 (호계동)		
	상호 또는 법인명	비엔에스이건설 ㈜	사업자등록번호 (법인등록번호)	206-86-17758 (110111-3724922)
	성명(대표자) 장 태 민	전화번호 02-402-3613	생년월일	1969년 8월 28일
	주소	서울특별시 강동구 양재대로 1377 (성내동,삼월빌딩407-2호)		
신기술 내용	본 기술은 고연성 시멘트계 패널을 이용한 지하 대공간의 복합 바닥구조 및 그 시공 방법에 관한 것으로 더욱 상세하게는 장스팬 및 화재하중이 높은 지하 대공간의 철근콘크리트 바닥구조에 대하여, 미세 분산균열 특성을 갖는 고연성 시멘트계 패널을 바닥판 구조의 일부에 사용하여 복합바닥 구조를 구성하는 기술이다.			
신기술의 범위	본 기술은 압축강도 30~60MPa, 휨강도 150~300MPa, 인장변형률 10~20%, 3시간 내화구조성능, 능동균열제어특성(균열폭 100㎛ 이하)를 만족하는 고연성 시멘트 복합재료 바닥구조공법이다.			

「건설기술 진흥법」 제14조, 같은 법 시행령 제31조 및 같은 법 시행규칙 제7조에 따라 신기술 지정을 신청합니다.

2014년 9월 4 일

신청인 호서대학교 산학협력단 임 대 우 (서명 또는 인)

신청인 조선대학교 산학협력단 차 용 훈 (서명 또는 인)

신청인 ㈜ 유신건축종합건축사사무소 김 지 억 (서명 또는 인)

신청인 비엔에스이건설 ㈜ 장 태 민 (서명 또는 인)

국토교통부장관 귀하

첨부서류	1. 신기술의 내용(신기술의 요지와 지정요건인 신규성·진보성·현장적용성에 대한 구체적인 내용을 포함합니다)에 관한 서류 2. 국내외 건설공사에서의 활용 전망에 관한 서류 3. 시방서 및 유지관리지침서 4. 「건설기술 진흥법」 제60조제1항에 따른 국립·공립 시험기관 또는 건설기술용역업자가 발행한 각종 시험성적서 및 시험시공 결과에 관한 서류(다만, 다른 법령에 따라 동일한 시험을 거쳐 기술인증 등을 받은 경우에는 해당 시험항목에 대한 시험성적서 및 시험시공 결과로 이를 갈음할 수 있습니다) 5. 그 밖에 신기술 평가에 필요하다고 인정되는 사항으로서 국토교통부장관이 고시하는 서류	수수료 10,000원 (수입인지)

처리절차

신청서 작성	→ 접수	→ 첨부서류 확인 및 검토(보완요청) 관보공고	→ 의견조회 및 전문기관 심사	→ 신기술 등록 및 지정	→ 통보 및 사후관리
신청인	전문기관	국토교통부 전문기관	전문기관	국토교통부 전문기관	국토교통부 전문기관

<그림 5.1.3> 신기술 신청서 (안)-2

제 2 절 추가연구 필요성

1. 재료적 측면

섬유를 보강하여 콘크리트 또는 모르타르의 성능을 증진시키는 시도가 오래전부터 있어 왔다. 그러나 SHCC가 새로운 건설 혁신 재료로 인식하는 이유는 기존의 섬유보강 콘크리트(또는 모르타르)가 갖고 있는 원천적인 결함(취성, 균열) 요인을 극복하기 위하여 파괴역학/마이크로역학을 기반으로 재료를 정량 설계함으로써 금속에 가까운 높은 연성과 균열 폭을 스스로 제어하는 높은 성능을 갖게 되었기 때문이다. 아울러 스프레이, 경량, 조강, 자기치유, 무시멘트, 고강도 등 다양한 기능성을 부여하는 기술 개발이 끊임없이 이루어지고 있어, 향후 기존의 시멘트계 재료가 갖고 있는 해묵은 난제를 해결하는 혁신 재료로서 보다 발전할 것을 기대한다. 다만, 국•내외적으로 SHCC와 같은 큰 변형성능을 갖고 있는 건설재료에 대한 설계기준은 제정되어 있지 않고 기존 건설재료에 비하여 고가라는 점은 실제 건설현장에 적용하는데 한계로 작용하고 있다. 또한 제조 방법 및 시공 방법에 따라 섬유 분포 특성에 대한 예측 및 제어 기술이 개발되지 않아 재료 특성의 품질관리가 기존 건설재료에 비하여 떨어지는 점은 높은 안전성을 요하는 사회기반 시설물에 적극 적용하기에는 부정적 요인으로 작용하고 있지만, 학계의 많은 연구자들과 관련업계의 노력을 통해 향후 극복될 것으로 예상되며, 재료 성능이 안정화되고 설계기준이 제정될 경우 사회•경제적으 파급효과가 매우 높다는 측면에서 SHCC 관련 기술의 미래는 매우 밝다고 할 수 있다.
다음은 SHCC와 관련하여 향후 이슈화가 되고 연구•개발되어야 할 사항이다.

- 시공 조건 및 방법에 따른 SHCC의 성능 예측
- SHCC의 장기거동 평가
- 극한 환경 및 시공 조건에 적합한 SHCC 개발
- 다기능(Multi-function) SHCC 개발
- ECCSHCC의 재료 특성에 관한 품질관리 기술
- 재료 성능 및 제조 기준 제정

2. 내화적 측면

현재 국내의 내화성능확보를 위해 섬유를 혼입하여 폭렬을 억제 및 보수하는 방법이 많이 사용되고 있다. 반면, 내화성능 확보시간은 건축법에 의거하여 용도, 층수, 규모에 따라 산정된다. 하지만 이러한 내화성능 확보시간에 대한 산정근거는 명확히 제시되어 있지 않으며, 본 과제에서는 지하공간에 대한 내화성능 확보시간을 검토하고 검증 수행을 실시함으로써 지하공간 주차장의 화재성상을 고려한 내화성

능 확보시간을 기초적이나마 제안하였다. 그러나 본 과제에서는 국내의 장비의 실정(KICT)에 따라 지하공간 주차장을 실모형으로 실현할 수 없었으며, 이에 대한 환기조건 및 많은 국내차량에 대한 DB를 수집할 수 없었다. 따라서, 향후 지하공간과 더불어 성능기반 내화설계를 위해 기초적인 가연물조사 및 화재하중 산정이 필요하다고 판단된다.

또한, 국내의 화재성상예측 및 구조물의 내화거동에 대한 수법은 국내외에서 많이 사용되는 범용 소프트웨어가 주를 이루고 있다. 하지만 이러한 범용소프트웨어는 EURO CODE를 기반으로 한 해석수법이며, Detail하게 모델화시키기 어려운 단점이 있다. 이에 따라, 본 과제에서는 국내에서 사용되는 콘크리트 재료의 물성값을 확보하기 위해 열전도, 비열, 열확산율 등을 측정하였으며, Fortran을 이용하여 FEM 해석 수법으로 열전도해석 및 열 수분이동해석을 수행하였다. 하지만, 국내에 사용되는 재료의 특성에 대한 DB는 많이 부족한 실정이며, 본 과제에서는 내폭렬 해석을 위해 기존의 열전도해석 및 내부의 공극압, 수증기압, 수분의 이동까지 연구를 진행할 수 있었다. 하지만 고강도 콘크리트에서의 폭렬에 대한 문제점은 아직 해결되지 않았으며, 국내에서 연구되고 있는 폭렬억제에 대한 연구도 중요하지만 근본적인 폭렬 매커니즘에 대한 연구가 더욱더 진행되어야 한다고 사료된다.

3. 구조적 측면

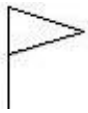
가. SHCC 및 RC 복합바닥슬래브 생산성 분석 계획

1) 사이클론 시뮬레이션 방법론

사이클론(CYCLONE) 시뮬레이션 기법은 현장에서의 작업을 이산 사건 기반의 네트워크 프레임워크 모델링 형태로 개발된 것이며, Halpin 교수에 의해 개발되었다. 이 기법은 반복적인 건설 프로세스의 시뮬레이션과 모델링을 위하여 시험되었고, 이후 Micro CYCLONE이 개발되었다. 사이클론 모델링 요소들은 다음 <표 5.2.1>과 같다.

사이클론은 자원(resources) 및 작업시간(work task durations), 작업간의 논리적인(logic) 상호관계를 적용시켜 생산성을 측정하는 관리도구로 알려져 있다. 또한 작업간의 상호관계를 단순화하여 도표 및 그래프를 통하여 모델의 결과물을 제시하는 장점을 갖고 있다. 본 연구의 사이클론 시뮬레이션은 공개 웹사이클론 사이트를 이용하여 실시하였다.

<표 5.2.1> 사이클론의 기본 요소

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

시뮬레이션을 활용한 생산성에 관한 기존 연구에 대한 내용은 다음과 같다.

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

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

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

2) 슬래브 공법별 시뮬레이션 모델

슬래브 공법별 작업프로세스의 시뮬레이션 모델링을 위하여, 1) 작업프로세스, 2) 작업별 투입자원 및 작업시간을 조사하였으며, 이를 바탕으로 <표 5.2.1> 에서 제시한 모델링 요소를 이용하여 시뮬레이션 모델을 완성하였다.

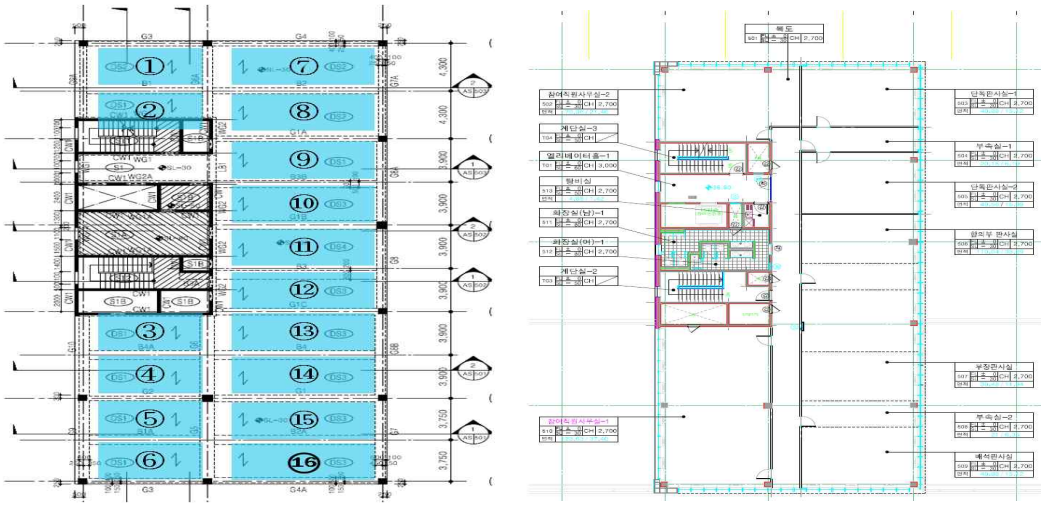
(1) 작업프로세스

작업프로세스 분석을 위한 SHCC 슬래브가 적용된 현장은 광주가정법원청사 신축공사이다. 광주광역시 서구 치평동에 위치하며, 기존의 등기국(대지면적 3,510.00㎡) 옆에 가정법원청사(대지면적 7,020.40㎡)를 신축한 것이다. 해당 건물은 연면적 6,610.98㎡, 지상 5층, 지하 1층의 총 6층 규모의 건물이며, 특히 5층 슬래브 공사에 SHCC 슬래브가 시범 적용되었다. <표 5.2.2> 는 현장의 개요를 요약한 것이다.

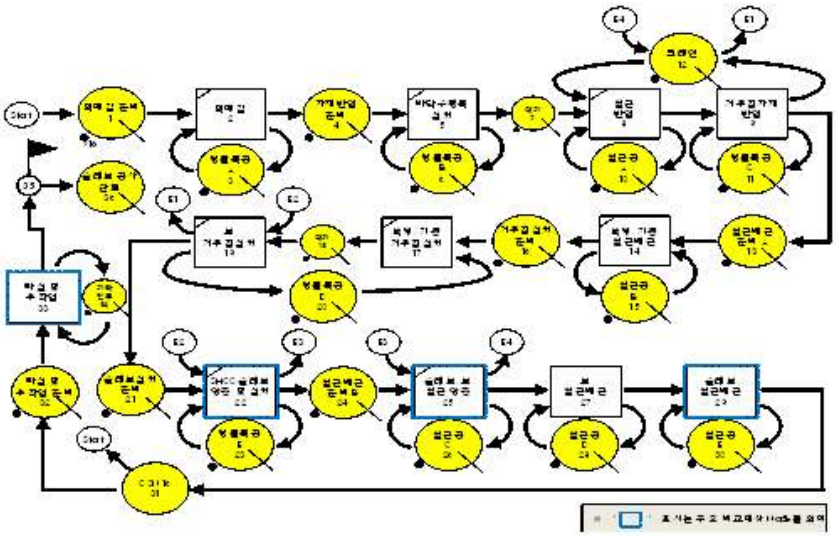
<표 5.2.2> 사례 현장 개요

사 업 명	광주가정법원청사 신축공사
대지위치	광주광역시 서구 치평동 1205
지역지구	도시지역, 중심상업지역, 지구단위계획구역
용 도	업무시설(공공청사)
구조 형식	철골철근콘크리트조(SRC조)
규모	지하 1층, 지상 5층
대지면적	10,530.40㎡
건축면적	2,138.56㎡
연면적	6,610.98㎡
SHCC 슬래브 적용 층	5층
SHCC 슬래브 면적	564.2㎡
층고	4.5m

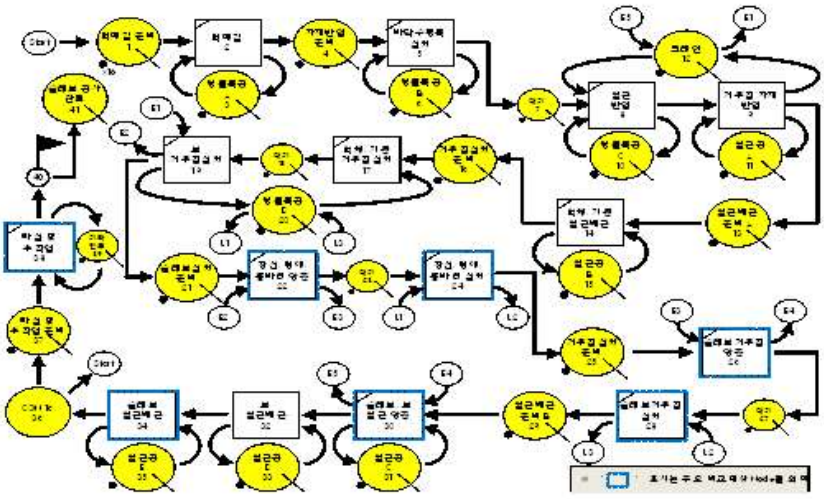
SHCC 슬래브가 적용된 5층의 면적은 약 564.2㎡로서 이는 코어(core)벽체로 이루어진 부분은 제외한 면적이다. 일반적으로 슬래브 시공은 벽체와 보 거푸집이 설치된 후 벽체와 보 거푸집에 슬래브 거푸집을 연결함으로서 시작된다. 가정법원청사 5층에서는 이러한 과정의 슬래브 시공이 16번 반복되었다. 상세 도면은 다음 <그림 5.2.1>과 같다.



<그림 5.2.1> 광주가정법원 지상 5층 구조바닥평면도 및 지상 5층 평면도



<그림 5.2.2> SHCC 슬래브 공법 시뮬레이션 모델



<그림 5.2.3> 기존 재래식 슬래브 공법 시뮬레이션 모델

건설시뮬레이션을 이용하여 기존슬래브 공법과 SHCC 슬래브 공법간이 생산성을 비교 분석함으로써 신기술인 SHCC 슬래브 공법의 현장 적용성에 대하여 검토 분석한다.

(1) 공법별 프로세스 정리 : 두 공법의 생산성 비교를 위한 시뮬레이션을 위해 공법별 프로세스를 정리하는 방법

(2) 데이터 수집 및 시뮬레이션 범위 결정 : 두 공법의 작업 수행 실제 사례(광주가정법원)를 통해 데이터를 획득하고, 특히 두 공법 프로세스는 슬래브 거푸집 시공부분에서 차이가 있으나 그 외 부분은 동일한 프로세스를 가지므로 슬래브를 제외한 부분은 동일한 데이터를 사용하는 것으로 한다.
따라서 작업데이터의 작업조 작업에 따른 시간과, 콘크리트 양생기간에 소요되는 데이터 얻을수 있다.

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

(4) 생산성 분석 및 비교 : 시뮬레이션 수행 결과에 따른 SHCC 슬래브 공법에 소요되는 시간과, 기존 재래식 슬래브 공법에 소요되는 시간을 알수 있으며, 여기에서 생산성 cycle/hr을 도출할 수 있다.
이렇게 하여 분석된 자료를 토대로 두 공법의 분석결과를 비교하면, 공기절감 측면과 법정근로시간을 반영하여 얼마만큼의 공기단축이 가능한지 확인할 수 있는 생산성 분석을 할 수 있다.

[참고 문헌]

[1] Li. V.C., Wang, Y. and Backer, S. (1991), A Micromechanical Model of Tension-Softening and Bridging Toughening of Short Random Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites, Journal of Mechanics and Physics of Solid, Vol.39 No.5, pp.607-625.

[2] Marshall, D. B., Cox, B. N. (1988), A J-integral Method for Calculating Steady-state Matrix Cracking Stresses in Composites, Mechanics of Materials, No8., pp.127-133.

[3] 이방연, 한병찬, 조창근, 권영진, 김윤용, 압출성형 ECC 패널의 섬유분산 특성과 그에 따른 휨 성능, 콘크리트학회 논문집, Vol. 21, No. 5, pp.573-580, 2009

[4] 조창근, 한병찬, 이정한, 김윤용, 압출성형 ECC 패널을 이용하여 제작된 복합바닥슬래브의 휨 거동, 콘크리트학회 논문집, Vol. 22, No. 5, pp.695-702, 2010

[4] 김윤용, 김정수, 김광련 (2004), 고인성 섬유 복합재료 SHCC의 특성과 적용 - On Engineered Cementitious Composites (SHCC), A Review of the Material and Its Applications, 한국콘크리트학회지, Vol.16 No.5, pp.64-72.

[5] 김윤용 (2007), 시멘트계 모르타르 매트릭스를 활용한 섬유복합재료 SHCC (Engineered Cementitious Composite)의 설계와 시공 성능, 한국복합재료학회지, Vol.20 No.2, pp.21-26.

[6] 조창근, FRP 콘크리트 복합구조 부재시스템의 휨 및 전단 거동예측, 대한건축학회 구조계논문집, 20권, 8호, pp.35-42, 2004

[7] Cho, C.G., Kwon, M., Development and Modeling of Frictional Wall Damper and Its Application in R/C Frame Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 33, No. 7, pp.821-838, 2004

[8] Cho, C.G., Kwon, M., Prediction of Nonlinear Bending Behavior for FRP Concrete Beams based on Multi-axial Constitutive Laws. Engineering Structures, Vol. 30, pp.2311-2320, 2008

[9] Cho, C.G., Kwon, M., Nonlinear Failure Prediction of Concrete Composite Columns by a Mixed Finite Element Formulation, Engineering Faillure Analysis, Vol. 18, pp.1723-1734, 2011

[10] 김윤용, 하기주, 신종학 (2007), 마이크로역학과 안정상태 균열이론에 의한 SHCC (Engineered Cementitious Composite) 매트릭스 배합의 설계, 대한건축학회논문집 - 구조계, Vol.23 No.5, pp.11-19.

[11] Wang, Shuxin (2003), Micromechanics based matrix design for engineered cementitious composites, Thesis (Ph.D.) University of Michigan.

[12] Wu, Cynthia (2001), Micromechanical tailoring of PVA-SHCC for structural applications, Thesis (Ph.D.) University of Michigan.

[13] 김영진 (2004), 혼화재료를 혼입한 압출성형 경량 콘크리트 패널에 관한 실험적 연구, 단국대학교 석사학위논문.

[14] 정은혜 (2007), 시멘트 압출성형 패널의 품질 향상에 관항 연구, 공주대학교 석사학위 논문.

[15] 공민호 (2003), 혼화재를 사용한 경량콘크리트 2차 제품의 배합에 관한 실험적 연구, 단국대학교 석사학위논문.

[16] 김세운 (2007), 황마를 혼입한 압출성형 시멘트복합패널의 물리적 특성에 관한 실험적 연구, 건국대학교 박사학위논문.

[17] Y. Shao and S.P. Shah, (1997) Mechanical Properties of PVA Fiber Reinforced Cement Composites Fabricated by Extrusion Processing, ACI Material Journal, Vol.94 No.6, pp.555-564.

[18] H. Stang and V.C. Li, (1999) Extrusion of SHCC-Material, in Proc. of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 3(HPFRCC 3), Ed. Reinhardt and A. Naaman, Chapman & Hull, pp.203-212

[19] 高島博之, 宮外淸貴, 橋田凌之, Li, V. C., (2002) 壓出成形にするポリプロポレン短纖維補强セメント系複合材料のマルチプルクラック發生條件に関する破壞力學的硏究, コンクリ一ト工學論文集, Vol.13 No.1, pp. 1~11.

[20] 山本基由, 山田寬次, (2002) オ一トクレ一ブ養生溫度を変えた PP短纖維補强セメント材料の曲け擧動," コンクリ一ト工學年次論文集, Vol.24 No.1, pp. 231~236.

[21] 정연백 (2006), 각종 섬유가 혼입된 황토콘크리트 슬래브의 휨거동에 관한 실험적 연구, 중앙대학교 석사학위논문.

[22] 김광윤 (2009), SHCC를 활용한 고강도콘크리트 기둥의 폭렬 저감 방안에 대한 실험적 연구, 한양대학교 석사학위논문.

[23] 이재영, 김재환, 한병찬, 박선규, 권영진 (2008), SHCC로 피복된 고강도콘크리트 부재의 폭렬억제성능에 관한 연구, 한국화재소방학회논문지, Vol.22 No.4, pp.85-94.

[24] 김재환. 김영덕, 김갑수, 조봉석, 장종호, 김무한 (2003), PVA-SHCC를 활용한 Half PC 복합체의 역학적 특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 - 계획계/구조계, Vol.23 No.2, pp.419-422.

[25] Li., V.C. , "From Micromechanics to Structural Engineering - The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications", Journal of Structural Mechanics and Earthquake, Vol.1-24, No.417, JSCE, 1993

[26] Richard, P., Cheyrezy, M.H., "Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800MPa Compressive Strength", ACI Spring Convention, 1994

[27] Bache, H.H., "Introduction to Compact Reinforced Composites", Nordic Concrete Research Publication N6, 1987

[28] Lankard, D.R., "Slurry Infiltrated Fiber Concrete(SIFCON)", Concrete

International Vol. 6, No. 12, pp. 44-47, 1984. 12.

[29] Hackman, L.E., Farrell, M.B., Dunham, O.O., “Slurry Infiltrated Mat Concrete (SIMCON)”, Concrete International Vol. 14, No. 12, pp. 53-56, 1992

[30] 1.2.4 Yoshioka, K., et al., 1997, Role of steric hindrance in the performance of superplasticizers for concrete, J. Am. Ceram. Soc., Vol.80, pp.2667-2671

[31] 1.2.5 Kong, H.J., et al., 2003, Development of a Self-Consolidating Engineered Cementitious Composite Employing Electrosteric Dispersion/ Stabilization, J. Cement and Concrete Composites, Vol.25, No.3, pp.301-309

[32] Kim, Y.Y., et al., 2003, Design of Engineered Cementitious Composite Suitable for Wet-mixture Shotcreting, ACI Materials Journal, Vol.100, No.6, pp.511-518

[33] 강철호, 환경친화형 고인성 시멘트 복합체의 역학적 특성 및 환경유해성에 관한 연구, 충남대학교 박사학위논문, 2010

[34] Li, V. C., Hashida, T. (1993), Engineering ductile fracture in brittle matrix composites, J. of Materials Science Letters, 12, pp. 898～901.

[35] Li, V.C. (1997), Damage tolerance of engineered cementitious composites, in: Advances in Fracture Research, Proc. 9th ICF Conference on Fracture, Sydney, Australia, Ed. B.L. Karihaloo, Y.W. Mai, M.I. Ripley and R.O. Ritchie, Pub. Pergamon, UK, pp. 619～630, 1997

[36] Kanda, T., Li, V.C. (1998), Interface Property and Apparent Strength of a High Strength Hydrophilic Fiber in Cement Matrix, ASCE J. Materials in Civil Engineering, Vol.10, No.1, pp. 5-13.

[37] Redon, C., Li, V.C., Wu, C., Hoshiro, H., T, Saito., and A, Ogawa. (2001), Measuring and Modifying Interface Properties of PVA Fibers in SHCC Matrix, ASCE J. Materials in Civil Engineering, Vol.13 No.6, pp.399-406.

[38] Li, V. C., C. Wu, S. Wang , A. Ogawa and T. Saito (2002), Interface Tailoring for Strain-hardening PVA-SHCC, ACI Materials Journal, Vol.99 No.5, pp.463-472.

[39] Lin, Z. and Li, V.C. (1997), Crack Bridging in Fiber Reinforced Cementitious Composites with Slip-hardening Interfaces, J. Mechanics and Physics of Solids, Vol.45 No.5, pp.763-787.

[40] Lin, Z., Kanda, T., and Li, V.C. (1999), On interface property characterization and performance of fiber reinforced cementitious composites, Concrete Science and Engineering (RILEM), Vol.1, pp.173-184.

[41] Guild, F.J, Summerscales, J. (1993), Microstructural image analysis applied to fibre composites materials: A review, Composites, Vol.24, No.5, pp.383-393.

[42] Yang, Y. (2002), Methods study on dispersion of fibers in CFRC, Cement

and Concrete Research, Vol.32, pp.747-750.

[43] Chermant, J.L., Chermant, L., Coster, M., Dequiedt, A.S., and Redon, C. (2001), Some Fields of Applications of Automatic Image Analysis in Civil Engineering, Cement and Concrete composites, Vol.23, pp.157-169.

[44] Benson, S.D.P., Karihaloo, B.L. (2003), CARDIFRC - Manufacture and Constitutive Behavior, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4), Ann Arbor, pp.65-79.

[45] Akkaya, Y., Shah, S.P., and Ankenman, B. (2001), Effect of Fiber Dispersion on Multiple Cracking of Cement Composites, J. Eng. Mat. Civil Eng., Vol.127, No.4, pp.311-316.

[46] Ozyurt, N., Woo, L.Y., Mason, T.O., and Shah, S.P. (2006), Monitoring Fiber Dispersion in Fiber-Reinforced Cementitious Materials: Comparison of AC-Impedance Spectroscopy and Image Analysis, ACI Mater. J., Vol.103, No.5, pp.340-347.

[47] Torigoe, S., Horikoshi, T., and Ogawa, A. (2003), Study on evaluation method for PVA fiber distribution in engineered cementitious composite, J. Adv. Concr. Technol., Vol.1, No.3, pp.265-268.

[48] 김윤용, 이방연, 김정수, 김진근 (2007), 이미지 프로세싱 기법을 이용한 섬유 복합재료의 정량적인 섬유분산성 평가, 비파괴검사학회지, Vol.27, No.2, pp.148-156.

[49] Otsu, N.A. (1979), Threshold Selection Method from Gray Level Histogram, IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics, SMS, Vol.9, No.1, pp.62-66.

[50] Vincent, L., Soille, P. (1991), Watesheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations, IEEE Trans. Patt. Anal. Machine. Intell., Vol.13, No.6, pp.583-589.

[51] 이방연 (2009), 이미지 프로세싱 기반 섬유 분포 특성 평가 및 섬유 분포 특성이 시멘트 복합체의 인장거동에 미치는 영향, KAIST 박사학위논문.

[52] Digabel, H., Lantuéjoul, C. (1978), Iterative algorithms, in Proc. 2nd European Symp. Quantitative Analysis of Microstructures in Material Science, Biology and Medicine, Caen, France, Oct. 1977, Chermant J.L.(Ed.) Stuttgart, West Germany, Riederer Verlag, pp.85-99.

[53] Beucher, S., Lantuéjoul, C. (1979), Use of watershed in contour detection, In International Workshop on Image Processing: Real-time edge and motion detection/estimation, Rennes, France, pp.17-21.

[54] Feng, J., Lu, H. (2006), Peak analysis of grayscale image: algorithm and application, Int. J. Info. Technol., Vol.12, No.5, pp.11-18.

[55] Beucher, S. (1991), The watershed transformation applied to image segmentation, Conference on Signal and Image processing in Microscopy and

Microanalysis, pp.299-314.

[56] Kobayashi, K. (1981), Fiber reinforced concrete, Tokyo: Ohm-sha.

[57] Y.S. Jenq, S.P. Shah (1985), A Fracture toughness criterion for concrete, Engineering Fracture Mechanics, Vol.21 No.5, pp.1005-1069.

[58] Xu, S., and Reinhardt, H.W. (1999), Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part III: Compact tension specimens and wedge splitting specimens, International Journal of Fracture, No.98, pp.179-193.

[59] Li, V.C., Shuxin, Wang., Cynthia Wu (2001), Tensile Strain-Hardening Behavior of PolyvinylAlcohol Engineered Cementitious Composite (PVA-SHCC), ACI Material Journal, Vol. 98, No.6, pp. 483-492.

[60] 방진욱,(2010) 마이크로역학을 이용한 Hybrid 섬유보강 경량 시멘트 복합체의 개발, 충남대학교 석사학위논문.

[61] Lin, Z., Kanda, T., Li, V.C. (1999), On interface property characterization and performance of fiber-reinforced cementitious composites Concrete Science and Engineering, 1, pp. 173-184.

[62] Michael D. Lepech, Li, V.C. (2008), Design of Green Engineered Cementitious Composites for Improved Sustainability, ACI Material Journal, Vol. 105, No.6, pp. 567-575.

[63] 신경준, 장규현 (2007), 잔골재의 배합비에 따른 고성능 섬유 보강 시멘트 복합체의 휨 거동 및 균열 특성, 대한토목학회 논문집, Vol.27 No.5A, pp.735-743.

[64] Lewis, J. A. (2000), Polyelectrolyte Effects on the Rheological Properties of Concentrated Cement Suspensions, Journal of the American Ceramic Society, Vol.83, pp.1905-1913.

[65] Yoshioka, K., Sakai, E., Daimon, M., and Kitahara, A. (1997), role of steric Hindrance in the Performance of concentrated Cementitious Suspensions for concrete, Journal of the American Ceramic Society, Vol.80 No.10, pp.2667-2671.

[66] KS F 2408 (2000), 콘크리트의 휨 강도 시험 방법.

[67] KS F 2405 (2002), 콘크리트 압축강도 시험 방법.

[68] 김윤용, 이방연, 김진근 (2008), PVA-SHCC 단면 이미지의 섬유 분류 및 검출 기법, 한국콘크리트학회 논문집, Vol.20, No.4, pp. 513-522.

[69] Kim M.S., Chen, Y.R., and Mehl P.M. (2001), Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging system for food quality and safety, Transactions of the ASAE, Vol.44, No.3, pp. 721-729.

[70] 조병관, 김문성 (2008), 도계육 표면 내장 잔유물 오염 검사를 위한 형광 조사 및 방사 파장대 선정에 관한 연구, 바이오시스템공학, Vol.33, No.2, pp.136-141.

[71] Xia, M., Hamada, H., Maekawa, Z. (1995), Flexural Stiffness of Injection Molded Glass Fiber Reinforced Thermoplastics, International Polymer Processing,

Vol.10, No.1, pp.74-81.

[72] 김정수, 이방연, 김진근, 김윤용, (2009), “수정된 섬유 가교 특성을 고려한 SHCC의 인장변형특성,” Vol. 21, No. 5, pp. 541-548, October

[73] Li, V. C. and Leung, C. K. Y., (1992), “teady State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites,” ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 188, No. 11, pp. 2246-2264.

[74] Kanda, T. and Li, V. C., (1998), “ultiple Cracking Sequence and Saturation in Fiber Reinforced Cementitious Composites,” Concrete Research and Technology JCI, Vol. 9, No. 2, pp. 19-33.

[75] Wu, H. C. and Li, V. C., (1992), “nubbing and Bundling Effects on Multiple Crack Spacing of Discontinuous Randon Fiber-Reinforced Brittle Matrix Composites,” Journal of American Ceramic Society, Vol. 75, No. 12, pp. 3487-3479.

[76] 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 기문당, 2008, 523pp.

[77] 신성우, “분당 삼성 초고층 APT에 500㎏/㎠이상의 고강도 콘크리트 시공 및 구조적 연구”,콘크리트학회지, Vol.2, No.4, pp.8 ~ 21

[78] 김동석, 박상준, 원철, 이상수, “[공사기사]초고층 주상복합구조물에 적용한 고강도 콘크리트의 사례” 콘크리트학회지, Vol.14 No.5, pp.54 ~ 58

[79] 권영진, “내화재료 및 구조로서 콘크리트의 한계성능과 초고층주거시대를 맞이하여”, 한국화재소방학회 하계세미나발표자료, 2005.8.

[80] 권영진, “내화재료 및 구조로서 콘크리트의 한계성능과 초고층 주거시설의 화재안전성”, 콘크리트학회지, Vol.17, No.5, 2005. 9, pp.8 ~ 13

[81] 권영진, 조명래, 이승일 “초고층(주상복합)아파트, 시대적 대안인가 재앙인가? 그 쟁점과 과제”, 경실련 도시개혁센터의 창립 10주년 토론회, 20070919, pp. 5 ~ 62

[82] 권영진, “국내 초고층 주거시설의 화재안전상의 과제”, 한국초고층건축포럼 2007.04.10

[83] KOREAN FIRE PROTECTION ASSOCIATION, “2007 KOREA FIRE DATA“, 2008.03

[84] 국토해양부, “공동주택 현황(면적별/층별/사용년수별)”, 2008.05.15

[85] 대통령령 제19163호, 건축법시행령 제2조 제1항 제15호 발코니의 규조변경, 2008.02.29

[86] 건설교통부고시 제 2006-14호, “주택성능등급 인정 및 관리기준”, 2006.01.09

[87] 황은경 “건축물 화재안전 규정간 문제점 도출에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집, Vol.23 NO.12, pp.171 ~ 178

[88] 원전화전(HARADA Kazumori);경도대학 공학연구과 건축학전공, “성능설계(PBD) & 고강도콘크리트의 폭렬메커니즘에 관한 연구”, 호서대학교 초청세미나 강

연, 2008.05.17

[89] 권영진 외, “고성능 콘크리트의 폭렬 현상”, 콘크리트학회지 특집기사, Vol.17, No.3, 2005. 5, pp.19 ~ 44.

[90] 신영수 외, “고성능 콘크리트의 폭렬현상과 구조적 성능”, 콘크리트학회지, Vol.17, No.3, 2005. 5, pp.26 ~ 32

[91] 국토해양부고시 제2008-334호, “건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙”, 고강도 콘크리트 내화성능 관리기준 근거 규정(안 제3조 제3호 및 제4호), 2008.07.21

[92] 한국콘크리트학회, “철근콘크리트구조물의 내화특성”, KCI SP4, 2005.01.03

[93] 대한건축학회, “고강도콘크리트 구조내화설계”, 2008.02, pp. 27-36

[94] Gabriel Alexander Khoury, Yngve Anderberg, “CONCRETE SPALLING REVIEW“, Report submitted to the Swedish National Road Administration, June 2000

[95] ACI, 1997. Report No. ACI 216.1-97: Standard Method for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

[96] Beitel, J. J., Iwankiw, N. R., “Historical Survey of Multi-Story Building Collapses Due to Fire”, Hughes Associates, Inc

[97] Kodur, V.K.R., “Fire resistance design guidelines for high strength concrete columns“, National Research Council Canada, 2003

[98] William Grosshandler, “Fire Resistance Determination and Performance Prediction Research Needs Workshop: Proceedings”, National Institute of Standards and Technology(NISTIR) 6890

[99] 남부 정자, 서전 붕자, 도촌 성, 수야 아지, 산구 순일, 송산 현, 원전 화전, 약송 효왕, “화재안전검증법における안전수준の분석 : その2 내화성능검증법を분석 대상として(화재안전검증법,방화)”, 사단법인일본건축학회, Vol.2001, pp. 173-174 ,2001.07.31

[100] 송산 현, 서전 붕자, 도촌 성, 남부 정자, 수야 아지, 산구 순일, 원전 화전, 약송 효왕, “신뢰성공학に기づく화재안전검증법の안전수준の분석 : 각검증법を사무소빌に적용した장합の일고찰(リスクを고려した성능설계のアプローチ,방화)“, 사단법인일본건축학회, Vol.2001, pp. 135-138 ,2001.07.31

[101] 국토교통성주댁국건축지도과, 국토교통성건축연구소,일본건축주사회의,재단법인일본건축センター, “내화성능증정법の해설급び계산예とその해설” 제1판 제1쇄 발행, 2001.03.15

[102] International Building Code , International Code Council , 2000.

[103] International Building Code, “North Carolina State Building Code: Building Code“, 2006

[104] International Fire Code , International Code Council , 2006.

[105] ACI Committee 318, 1999, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete,“ ACI 318-99 and “Commentary - ACI 318R-1999,“ American Concrete Institute, Detroit, MI, 1999.

[106] An American National Standard, “Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials1“, Designation: E119-05a

[107] EC2, 2002. Eurocode 2: Design of concrete structures. ENV 1992, Part1-2: General rules-Structural fire design, European Committee for Standardization, Brussels.

[108] Canadian Standards Association, 1994, “Code for the Design of Concrete Structures for Buildings“, CAN3-A23.3-M94, Rexdale, ON, Canada.

[109] National Building Code of Canada 2005 Volune 1-2, Canadian Commission on Building and Fire Codes Natonal Research Council of Canada

[110] 김세종, 이재영, 권영진, “한국 건축법 방화관련 규정의 변천과정에 관한 문헌적 고찰”, 한국화재소방학회, 춘계학술논문발표회 논문집, pp.353 ~ 356, 2008.04

[111] 민병렬, “내화구조기준 개선 연구”, 건설교통부(1999)

[112] 이세현, “건축물 내화설계 데이터베이스 구축”, 한국건설기술연구원(2001), pp. 46-71

[113] 건설교통부, “건축물 내화설계기술 개발 Volume II“ 2004. 8. 29

[114] 소양섭, “고성능 콘크리트의 내화성능(고강도 및 섬유보강 콘크리트),Fire Resistance of High Permance Concrete(High Strength Concrete & Fiber Reinforced Concrete)” 한국콘크리트학회, Vol.14 No.2, 2002.03, pp. 37-44

[115] 정희진, 이재영, 김재환, 한병찬, 권영진, “고강도 콘크리트의 폭렬발생 및 폭렬저감 메커니즘에 관한 문헌적 고찰”, 2008년도 한국화재소방학회 춘계학술논문발표회, pp. 313-316

[116] 한민철, 허영선, 한천구, “고강도콘크리트의 폭렬발생 및 방지 메커니즘”, 콘크리트학회지 제19권1호, 2007.01, pp94-100

[117] ACI Committee on Fireproofing, Report of committee on fireproofing(1919), pp. 335-338.

[118] Hamarthy, T.A., “Effect of moisture on the fire endurance of building elements, ASTM publication STP 385”, America Society of Testing and Materials(1965), pp. 179-203.

[119] Hamarthy, T.A., “Design of Concrete Masonry Walls For Fire Endurance”, ACI Materials Journal, Vol. 39(1973), pp. 179-203.

[120] W.J. Copier, “The Spalling of Normal Weight and Lightweight Concrete Exposed to Fire”, ACI Materials Journal, Vol.80(1983) pp. 219 -236.

[121] S.Y.N. Chan, G.F. Peng, M. Anson, “Fire tests on ribbed concrete slabs”, ACI Materials Journal(1992), pp. 345-347.

[122] G. Sanjayan, L. J. Stocks, “Spalling of High-Strength Silica Fume Concrete in Fire”, ACI Materials Journal, Vol.90(1993), pp. 170-173.

[123] A. N. Noumowe, P. Clastres, G. Debicki, and M. Bolvin, “High Temperature Effect on High Performance Concrete (70-600° C) strength and porosity”, ACI Materials Journal, Vol. 145(1994), pp. 157-172.

[124] N. Khoylou, G.L. England, “The effect of moisture on spalling of normal and high strength concretes”, Proceedings of the CCMS symposium, Chicago Illinois(1996)

[125] George C. Hoff, “Fire Resistance of High-Strength Concretes for Offshore Concrete Platforms”, ACI Materials Journal, Vol.163 (1996), pp. 53-88.

[126] 한천구, 양성환, 이병렬, 황인성 “골재종류 및 폴리프로필렌 섬유 혼입률 변화에 따른 고성능 콘크리트의 폭렬 특성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 제11권5호, pp.69-77

[127] F.A. Ali, D.O. Connor, A. Abu-Tair, “Explosive spalling of high-strength concrete columns in fire, Magazine of concrete research”, 2001, pp. 197 ~ 204.

[128] Pierre Kalifa, Gregoire Chene, Christophe Galle, “High - temperature behaviour of HPC with polypropylene fiber From spalling to microstructure”, Cement & Concrete Research 31, 2001, pp. 1487 -1499.

[129] A. Meda, P.G. Gambarova, M. Bonomi, “High - performance concrete in fire exposed reinforced concrete sections”, ACI Structural Journal, Vol.99, 2002, pp. 277-287.

[130] Long T. Phan, “High-Strength concrete at high temperature - an overview”, 2002, NIST report

[131] K.D. Hertz, “Limits of spalling of fire-exposed concrete”, Fire Safety Journal 38, 2003, pp. 103-116.

[132] 유전 사회, 원전 화전, 산기 아홍, “화재가열を수けるコンクリート재료내の열수분응력전달のモデル화”, 일본건축학회대회학술강연경개집(동해), 2003년9월, pp. 167-168

[133] 권영진, 김용로, 장재봉, 김무한, “고온을 받은 콘크리트의 공학적 특성”, 한국화재소방학회논문지, 제18권1호, 2004, pp.31-36

[134] Gai-Fei Peng, Wen-Wu Yang, Jie Zhao, Ye-Feng Liu, Song - Hua Bian, Li-Hong Zhao, “Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures”, Cement & Concrete Research 36, 2006, pp. 723-727.

[135] Jianzhuang Xiao, H. Falkner, “On residual strength of high- performance

concrete with and without polypropylene fibers at elevated temperatures”, Fire Safety Journal 41, 2006, pp. 115-121.

[136] Y.F. Fu, Y.L. Wong, C.S. Poon, C.A. Tang, “Numerical tests of thermal cracking induced by temperature gradient in cement-based composites under thermal loads“, Cement & Concrete Research(article in press).

[137] 고정원, “화재가열환경하에서 콘크리트 내부의 열-수분이동 및 폭렬에 관한 연구”, 동경대학교 박사학위논문, 20060930

[138] 고정원, “고강도콘크리트의 폭렬에 메커니즘 및 폭렬방지 대책에 관한 연구”, 호서대학교 초청세미나 강연, 2008.05.8.

[139] Bazant외 2인, “The Chunnel fire. I: Chemoplastic softening in rapidly heated concrete“, Journal of engineering mechanics/March, 1999: pp. 272-282.

[140] 유전 사회, 원전 화전, 산기 아홍, “화재가열を수けるコンクリート재료내の열수분응력전달のモデル화”, 일본건축학회대회학술강연경개집(동해), 2003년9월, pp. 167-168

[141] 권영진, “고강도콘크리트의 폭렬대책 공법에 대한 국내외 현황과 성능적 구조내화설계를 위한 과제“ 대한콘크리트학회 추계학술발표대회 내화위원회, 2008.11.07, pp. 935-940

[142] BRE 프로젝트, http://www.mace.manchester.ac.uk

[143] 한병찬, 권영진, 김재환, “화재 온도를 받는 고인성・고내화성 시멘트 복합체의 거동”, 콘크리트학회지, Vol.19, No.2, 2007, pp.197-205

[144] 송용원, 허영선, 이성연, 한창평, 양성환, 한천구, “나일론 섬유의 형상비 및 혼입률 변화에 따른 고강도 콘크리트의 폭렬특성”, 한국건축시공학회 2007년 학술발표논문집, 제 7권 1호, pp. 55-58

[145] 배장춘, 유승엽, 지석원, 한창평, 양성환, 한천구, “60MPa급 고강도 콘크리트의 폭렬방지”, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 제26권 제1호(통권 제50집), 2006. 10, pp. 361-364

[146] 허영선, 배장춘, 이재삼, 한창평, 양성환, 한천구, “80~100MPa급 고강도 콘크리트의 폭렬방지”, 한국콘크리트학회 2006년 가을학술발표논문집, pp. 481-484

[147] 송영찬, 이세현, 양완희, 김우재, 백병훈 “고강도 콘크리트의 폭렬방지를 위한 피복부착공법의 기초적 연구”, 대한건축학회 학술 발표 대회 논문집. 제26권 제1호(통권 제50집) 2006. 10, pp. 365-368

[148] 원종필, 최석원, 박찬기, 박해균, “내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르의 화재저항성 평가”, 한국콘크리트학회 논문집 제 18권 제4호 2006년, pp. 559-568

[149] 송용원, 한동엽, 이건철, 고경택, 김진수, 한천구, “섬유복합모르터의 뿜칠마감에 의한 고강도콘크리트 기둥부재의 폭렬방지”, 한국건축시공학회 2006년 학술발표 논문집, 제6권 제1호, pp. 5-8

[150] 박찬규, 이승훈, “섬유 혼입량에 따른 고강도 콘크리트 폭렬 특성”, 한국콘크리트학회 2005년 가을학술발표논문집, pp.387-390
[151] 김경민, “셀룰로오스 섬유를 사용하는 고성능 콘크리트의 내화 특성”, 한국콘크리트학회 2004년 추계학술발표논문집 제16권 제2호, pp. 557-560
[152] 김태연, “유한요소법을 이용한 SC구조 벽체의 전열특성에 관한 해석적 연구”, 한양대 대학원 석사학위논문, 2007년
[153] 서지민, “화재 피해를 입은 고강도 콘크리트 합성기둥의 구조 성능에 관한 연구”, 이화여대 과학기술대학원 석사학위논문, 2006년
[154] 강지연, “화재 피해 후 보수한 철근 콘크리트 보의 구조 거동에 관한 해석적 연구 ”, 이화여대 과학기술대학원 석사학위논문, 2005년
[155] 이은주, “화재 피해를 입은 철근 콘크리트 휨부재의 구조 거동에 관한 해석적 연구”, 이화여대 과학기술대학원 석사학위논문, 2004년
[156] 송종진, “화재에 노출된 철근콘크리트 구조물의 성능 저하에 대한 연구”, 대진대학교 석사학위 논문, 2003년
[157] 허은진, “철근콘크리트 휨부재의 내화성능에 관한 해석적 연구”, 부산대학교 석사학위논문, 2001년
[158] 박원준, 이한승, 강인석, 경제운, “화재에 의해 손상된 철근콘크리트 보의 잔존내력”, 한국콘크리트학회 2007년 가을 학술발표회 논문집, pp. 559-560
[159] 김성수, 박광필, 남바름, 유주환, “화재입은 콘크리트의 기기분석을 통한 화재온도 추정”, 2006년도 가을학술발표회 논문집, pp. 914-916
[160] 이차돈, 신영수, 이승환, 이창은, “화재에 노출된 철근콘트리트 기둥의 수치해석적 열전달 모델”, 한국콘크리트학회 논문집 제 17권 6호 (2005), pp. 871-878
[161] 서연주, 홍성걸, “고온에 노출된 고강도 콘크리트 기둥의 수치해석”, 2005년도 봄 학술발표회 논문집, pp. 21-24
[162] 송훈, 이세현, 문경주, 도정윤, 소양섭, “표준화재곡선에 의한 고강도 콘크리트 부재의 내부온도 예측”, 2005년도 봄 학술발표회 논문집, pp. 469-472
[163] 이은주, 신미경, 강지영, 신영수, “화재시 철근 콘크리트 보 내부 온도의 해석적 추정”, 2004년도 봄 학술발표회 논문집, pp. 548-551
[164] 최은규, 서지민, 신영수, 이차돈, 권영진, “화재 피해를 고강도 SRC 압축부재의 해석적 연구”, 2006년도 봄 학술발표회 논문집 (18권 1호), pp. 434-437
[165] 홍성걸, “화재와 철근콘크리트 구조부재의 구조거동(특집)“, 콘크리트학회지 제 14권 2호 2002.3, pp. 24-29
[166] 김문한, 철현, “화재시 내화피복철골기둥의 온도분포에 관한 연구”, 한국화재학회지 5권 1호 1991년 1월, pp. 23-28
[167] G. Sanjayan, L. J. Stocks, “Spalling of High-Strength Silica Fume Concrete in Fire”, ACI Materials Journal, Vol.90(1993), pp. 170-173.
[168] Eurocode2, “Design of Concrete Structures Part 1, 2 General

Rules-Structural Fire Design“, DO ENV 1992, 1996

[169] Eurocode4, “Design of composite steel and concrete structures Part 1,2 “, Structural Fire Design, CEN/TC250/SC4, N39, prENV 1994-1-2, 2nd Draft, 1992

[170] Kodur, V.R, Cheng, F.P., Wang, T.C., Sultan, M.A., 2002, “Effect of strength and fiber reinforcement on the fire resistance of high strength concrete columns,“ (in press): Journal of Structural Engineering, pp. 1-19.

[171] Matthias Zeiml ∗U, David Leithner, Roman Lackner, Herbert A. Mang, “How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?” , Cement and Concrete Research 36 (2006) pp 929–.942

[172] Bilodeau, A., Malhotra, V.M. and Hoff, G.C., ‘ ‘Hydrocarbon Fire Resistance of High Strength Normal Weight and Light Weight Concrete Incorporating Polypropylene Fibres,’ ’ International Symposium on High Performance and Reactive Powder Concrete, Sherbrooke, QC, 1998, pp. 271-96

[173] Kodur, V.K.R. and Baingo, D., 1998, “Fire Resistance of FRP-reinforced Concrete Slabs“, IR758, Institute for Research in Construction, National Research Council Ottawa, Canada.

[174] Kodur, V.K.R., “Fire performance of high-strength concrete structural members“, Construction Technology Update No.31, Institute for Research in Concstrcution, National Research Council of Camada, 1999

[175] Yun, H. D., “Manufacture/Construction/Structural Applications of High performance Fiber Reinforced Cementitious Composites“, 2nd Korea-Japan International Joint Symposium, KOREA, 2005

[176] Kim, Y.Y, Kong, H-J, and Li, V.C., “Design of Engineered Cementitious Composite Suitable for Wet-mixture Shotcreting“, ACI Material Journal, Vol. 100, No.6, 2003, pp.511-518

[177] 권영진, 김무한, 김용로, 장재봉, “화재피해를 입은 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구” , 대한건축학회논문집 구조계 21권 1호, 2005.01, pp. 107-114

[178] 권영진, 이동혁, 장재봉, 김영덕, 김재환, 김무환, “섬유 종류 및 혼입율에 따른 고강도 콘크리트의 폭열저감에 관한 실험적 연구” 2005년 한국화재소박학회 춘계학술논문발표대회, pp. 299-303

[179] T.Z. Harmathy, “Fire Safety Design and Concrete“, Lingman Scientific & Technical, 1993

[180] CEB Bulletin D’ Information No. 208(RILEM-Committee 44-PHT), “Fire Designing of Concrete Structures“, 1991

[181] Khan, A. A., Cook, W. D. and Mitchell, D.(1998), “Thermal properties ans transient thermal analysis of structural members during hydration“, ACI Materials Journal, pp. 293-302, 1998

[182] U. Schneider. et al, “Concrete at High Temperatures- A General Review“, Fire Safety Journal, pp 55-68, 1987

[183] 원전화전, “내화시험에 관한 콘크리트 온도상승의 예측에 관한 연구”, 경도대학박사논문, 1992

[184] 기술표준원 고시 제99-401호 건축 구조 부재의 내화 시험 방법 - 일반 요구사항 KS F 2257-1(1999)

[185] Wickström, U., “A very simple method for estimating temperatures“, In fire Exposed structures , in New Technology to resuce Fire Losses and Costs(eds S.J. Grayson and D.A. Smith), Elseview Applied Science, London, UK, pp 186-194, (1986)

[186] 송창엽, 이환철, 박소현, 조규만, 현창택 (2010), 알루미늄 폼을 이용한 골조공사의 생산성 분석에 관한 연구, 한국건설관리학회, 26호, 4권 113-121쪽

[187] Halpin, D. W. and Riggs, L. S. (1992), Planning and analysis of construction operations., Wiley Interscience. New York.

[188] 박동근 (2008), 건설 시뮬레이션을 활용한 커튼월 적층공법의 생산성 분석방안, 인하대학교 석사학위논문

[189] Web-Cyclone, http://cyclone.ecn.purdue.edu:8080/WebCYCLONE/Cyclone.jsp, (2014.04.12.일 접속)

[190] 강석길 (2010), 철골세우기 공사의 작업조 구성에 따른 생산성 분석에 관한 연구, 서울시립대학교 석사학위논문

[부 록]

1. 정량적 성과 및 정성적 성과
   가. 등재 논문
   나. 학술 발표 논문
   다. 특허 출원
   라. 특허 등록
   마. 기술실시계약
   바. 현장 적용

2. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

3. 기타 사항

1. 정량적 성과 및 정성적 성과

본 과제의 주요연구 성과표

단위 : 건

차년도	기술실시계약	사업화 제품화 (현장적용)	학술지 논문				특허출원 및 등록		
			SCI	비SCI	발표논문	계	출원	등록	계
1				3	5	8	2		2
2		1	1	5	24	30			
3	1			1	7	8		2	2

본 과제의 세부 성과표

단위 : 건

구 분	세부 항목		차년도	호서대학교	충남대학교	조선대학교	합계
학술적 성과	논문 등재	SCI	1				
			2			1	1
			3				
		비 SCI	1	1	1	1	3
			2	2	2	1	5
			3	1			1
	학술발표대회		1	2	2	1	5
			2	16	3	5	24
			3	7			7
기술적 성과	특허 출원		1		1	1	2
			2				
			3				
	특허 등록		1				
			2				
			3		1	1	2
	현장 적용		1				
			2			1	1
			3				
	기술실시계약		1				
			2				
			3	1			1
	신기술 출원		1				
			2				
			3	1			1

가. 등재 논문

등재연도	논문명	저자			학술지명	Vol. (No.)	국내외 구분
		주저자	교신 저자	공동저자			
2012.03	고인성 내화보수모르터(FR-ECC)를 활용한 RC 구조물 보수공법의 내구성능 및 내하력에 관한 실험적 연구	김정희	권영진	임승찬 김재환 권영진	한국구조물 진단유지 관리공학회	vol.16 (No.2)	국내
2012.02	고로슬래그와 무수석고과 숏크리트의 강도에 미치는 영향	유성희	김윤용	신경준 김윤용	한국 콘크리트 학회	vol.24 (No.1)	국내
2012.05	Flexural Behavior of Extruded DFRCC Panel and Reinforced Concrete Composite Slab	조창근	김윤용	이방연 한병찬 이승중	Advances in Materials Science and Engineering	-	국외 (SCI)
2012.03	압출성형 ECC 패널 RC 복합 슬래브의 해석모델	조창근	조창근	김윤용 서정환 이승중	한국공간 구조학회	vol.12 (No.1)	국내
2012.12	고온에 노출된 고강도콘크리트의 열적특성에 관한 실험적 연구	김동준	권영진	강승구 이재영 原田和典	한국 방재학회	vol.12 (No.6)	국내
2012.10	Galerkin 유한요소법을 이용한 철근콘크리트 슬래브의 열전달해석 및 실험	한병찬	권영진	김윤용 조창근	한국 콘크리트 학회	vol.24 (No.5)	국내
2013.01	Comparison between Manufacturing Processes of Fiber-Reinforced Cement-Based Panels (FRCBPs)	이방연	김윤용	방진욱 정우정 정동수 이환우	Applied Mechanics and Materials	253-255	국외
2012.08	Flexural Performance and Fiber Distribution of an Extruded DFRCC Panel	이방연	김윤용	한병찬 조창근	Computers and Concrete	10(2)	국외
2014.02	주차공간의 차량종류별 연소특성 DB구축을 위한 실험적 연구	강승구	권영진	김동은 서동구 김동준 김정희 권영진	한국 방재학회	vol.14 (No.1)	국내
2014.01	Flexural Strength of SHCC Panels Dependent on Fly Ash Type and Curing Condition, Advanced Materials Research	방진욱	김윤용	현정환 이병재 정동수	Advanced Materials Research	vol.831	국외

나. 학술 발표 논문

발표일	발표명	저자	학술대회명	국내외 구분
2011.11	고강도 콘크리트의 폭렬현상 해석 모델에 관한 연구	강승구, 김동준, 권영진, 이재영, 原田和典	한국화재소방학회 2011년 추계 학술논문발표회	국내
2011.11	지하대공간 화재성상 예측을 위한 주요가연물조사	강승구, 서동구, 김동준, 권영진	한국화재소방학회 2011년 추계 학술논문발표회	국내
2011.11	SHCC로 보강된 RC보의 휨 거동	방진욱, 조현우, 조창근, 이병재, 김윤용	한국구조물진단유지관리공학회 2011년 추계 학술발표회	국내
2011.11	고강도 고연성 시멘트 복합재료의 역학적 거동 평가	방진욱, 현정환, 이병재, 김윤용	한국콘크리트학회 2011년 추계학술발표회	국내
2011.11	SHCC 및 RC 복합슬래브의 비선형 휨 성능평가	조창근, 임현진, 이승중	한국구조물진단유지관리학회 2011년 추계학술발표회	국내
2012.05	변형경화형 시멘트복합체 패널 RC 복합슬래브의 비선형 거동 평가	김호연, 조창근	한국콘크리트학회 2012년 봄 학술발표회	국내
2012.05	SHCC 및 철근콘크리트 복합 슬래브의 휨 성능실험	문형주, 조창근, 이승중	한국콘크리트학회 2012년 봄 학술발표회	국내
2012.10	고연성시멘트복합체 복합슬래브의 구조 및 시공특성	이승중, 조창근, 문형주, 임현진	대한건축학회 2012년 추계학술발표대회	국내
2013.10	Flexural Performance Experiments of SHCC and Reinforced Concrete Composite Slabs	문형주, 조창근, 이승중	9TH International Symposium on Architectural Interchanges In Asia	국외
2013.10	Nonlinear Evaluation of Extruded SHCC and RC Composite Slabs	김호연, 조창근	9TH International Symposium on Architectural Interchanges	국외

			In Asia	
2012.09	地下空間の火災荷重を考慮したスラブ耐火加熱實驗及び熱傳導解析(1)	金鍊俊, 姜昇具, 韓炳燦, 李在永, 原田和典, 權寧璡	日本建築学会	국외
2012.09	地下空間の火災荷重を考慮したスラブ耐火加熱實驗及び熱傳導解析(2)	姜昇具, 金鍊俊, 韓炳燦, 李在永, 原田和典, 權寧璡	日本建築学会	국외
2012.09	自動車燃燒實驗通じる道路トンネルの火災性狀豫測	韓正哲, 姜昇具, 金炯摠, 朴宣圭, 權寧璡	日本建築学会	국외
2012.09	高強度コンクリートの熱水分移動モデルの構築のための統計分析	權寧璡, 姜昇具, 金鍊俊, 韓炳燦, 李在永, 原田和典,	日本建築学会	국외
2012.10	Fire Resistance Performance Analysis of Reinforced Concrete Members using Galerkin Finite Element Method	권영진, 김동준, 강승구, 김봉찬, 한병찬, 이재영, 原田和典	The9th Asia-OceaniaSymposiumon FireScienceandTechnology	국외
2012.08	地下駐車場車輛火災を考慮したスラブ耐火加熱實驗及び分析に関する研究	姜昇具, 金鍊俊, 韓炳燦, 李在永, 原田和典, 權寧璡	한·일 건축재료 심포지엄	국내
2012.05	지하대공간 구조물의 내화성능 확보를 위한 슬래브가열실험 및 열전도해석검토에 관한 연구	강승구, 김동준, 이재영, 原田和典,	한국화재소방학회	국내

		한병찬, 권영진		
2012.05	지하대공간의 주차장 차량화재를 고려한 연소 실험	강승구, 김동준, 한정철, 김동은, 권영진	한국화재소방학회	국내
2012.05	갤러킨 유한요소해석 방법을 이용한 열전도 해석 모델 구축에 관한 연구	강승구, 김동준, 이재영, 原田和典, 한병찬, 권영진	한국화재소방학회	국내
2012.05	고온에 노출된 고강도콘크리트 휨부재의 2면가열에 관한 실험적 연구	김동준, 강승구, 이재영, Harada Kazunori, 권영진	한국화재소방학회	국내
2012.05	지하주차장의 화재성상예측을 위한 자동차 연소실험에 관한 연구	강승구, 한정철, 김동은, 김동준, 권영진	터널지하공간학회	국내
2012.05	차량 연소실험을 통한 도로터널의 화재예측	한정철, 강승구, 권영진	터널지하공간학회	국내
2012.11	지하공간의 화재하중을 고려한 슬래브 내화 가열 실험	강승구, 김동준, 이재영, 原田和典, 한병찬, 권영진	한국건축시공학회	국내
2012.11	고강도 콘크리트의 폭렬 현상에 관한 벽체 가열실험	강승구, 김동준, 이재영, 原田和典, 권영진	한국화재소방학회	국내
2012.11	화재를 입은 RC 슬래브의 재하실험에 관한 연구	강승구, 김동준, 이재영,	한국화재소방학회	국내

		原田和典, 권영진		
2012.11	차량화재에 의한 지하주차공간 및 터널화재위험성에 대한 문헌조사	권영진, 한정철, 강승구, 김동준	한국화재소방학회	국내
2012.11	양생기법에 따른 Green SHCC 패널의 휨강도 평가	방진욱, 현정환 서지석, 이병재 배준영, 김윤용	한국콘크리트학회 2012년도 가을학술발표회	국내
2012.05	고연성 시멘트계 재료의 연신율 측정방법	방진욱, 현정환 신경준, 장영일 조광연, 김윤용	한국콘크리트학회 2012년도 봄학술발표회	국내
2013.04	증기양생을 통해 제작된 Green SHCC 패널의 성능 평가	방진욱, 이병재 현정환, 서지석 김윤용	한국구조물진단유지 관리공학회의 2013년 봄 학술발표회	국내
2013.05	SHCC 철근콘크리트 복합바닥구조의 휨 성능 비교	조창근, 문형주	한국구조공간학회 2013년도 봄학술대회	국내
2013.05	하프프리캐스트 SHCC 철근콘크리트 복합바닥구조의 구조성능	조창근, 문형주, 이승중	한국콘크리트학회 2013년도 봄학술발표회	국내
2013.11	플라이애시 종류에 따른 Green SHCC의 직접인장 특성 평가	방진욱, 현정환, 서지석, 이의성, 이병재, 김윤용	한국콘크리트학회 2013년도 가을학술발표회	국내
2013.11	SHCC 하프프리캐스트 철근콘크리트 복합슬래브의 구조성능	조창근, 문형주, 임현진	한국콘크리트학회 2013년도 가을학술발표회	국내

다. 특허 출원

출원 연도	발명 명칭	발명자	출원 번호
2012.04.17	시멘트 혼합물과 이를 이용한 패널 및 이를 이용한 바닥구조 시공방법	조창근, 한병찬, 서정환, 김윤용, 권영진	10-2012-0039609
2012.03.27	고연성 시멘트계 재료의 연신율 측정장치 및 측정방법	김윤용, 신경준, 방진욱	10-2012-0030869

라. 특허 등록

등록 연도	발명 명칭	발명자	등록 번호
2012.04.17	시멘트 혼합물과 이를 이용한 패널 및 이를 이용한 바닥구조 시공방법	조창근, 한병찬, 서정환, 김윤용, 권영진	제 10-1359210 호
2012.09.05	고연성 시멘트계 재료의 연신율 측정장치 및 측정방법	김윤용, 신경준, 방진욱	제 10-1182054 호

마. 기술실시계약

연구개발 결과물 소유기관	기술실시 기업	계약기간	기술료
호서대학교 산학협력단 조선대학교 산학협력단	(주) B&SE건설, (주) 유신건축	2014.05.23.~ 2017.05.23.(3년)	2,200천원

바. 현장 적용

공사명	발주자	시공자	공사기간	공사규모	총공사 금액	비고
광주가정 법원청사 신축공사	법원 행정처	행림종합건 축사 사무소	2011.09.26.~ 2013.05.25	지하1층 지상5층	123억	준공

실사현장 현황자료

실사장소 우선순위	1

신청기술 적용현장 개 요	공 사 명	광주가정법원청사 신축공사		
	발 주 처 (감 리 자)	법원행정처((주)행림종합건축사사무소)		
	계약형태	○수의계약 ○제한경쟁입찰 ◉공개경쟁입찰○기타		
	전체공사금액 (신기술공사금액)	123억 관급포함(1백만원)		
	시공규모	지하1층 지상5층 6,610㎡,2000py		
	현장위치 (주 소)	광주광역시 서구 치평동 1205		
	공사 기간	(2011.09.26 ~ 2013.05.25) 총 608 일		○시공예정 ○시공중 ◉준 공
	투입인원및 장 비	<인원> •기술공 : 2 인 •보통인부 : 2 인	<장비> 50ton 크레인	
현장설명	현장특징	- 포스코건설과 기업과제의 연구결과로 개발한 “고인성 콘크리트를 이용한 내진 기둥공법의 개발”과 국토해양부와의 첨단도시개발사업에서 연구결과로 개발한 “고인성 시멘트복합재료 개발 및 바닥구조 시스템 구축기술” 등 2가지 공법을 동시에 적용한 현장임.		
	하자발생	- 없음		
	실사 가능 시기			
	실사 가능 공정	① 공정1 / 현장실사 가능  ② 공정2 / 현장실사 가능  ③ 공정3 / 현장실사 불가능 		

주관 - 호서대학교 시험 증빙서류 (퍼니처 연소실험)



시험성적서

KICT 한국건설기술연구원
KOREA INSTITUTE of CONSTRUCTION TECHNOLOGY

경기도 고양시 일산서구 고양대로 283번지
Tel: 031-369-0516 Fax: 031-369-0540

성적서 번호:12KICT00283-1

쪽 (1) / 총 (5)

시험성적서 KICT TEST CERTIFICATE

1. 의뢰자
 ◦ 기 관 명 : 호서대학교 산학협력단
 ◦ 주 소 : [336-795]충남 아산시 배방면 호서대학교1공학관 224-1호 초고층 장대터널방재연구실
 ◦ 의뢰일자 : 2012년 03월 06일
2. 시험성적서의 용도 : DB확보
3. 시험대상품목(또는 시료명) : 책장 및 기타
4. 시험일자 : 2012년 03월 13일 ~ 14일
5. 시험방법 : ISO 9705:1996(Fire tests - Full-scale room test for surface products)
6. 시험환경
 ◦ 온도 : (20 ± 2) ℃, 상대습도 : (43 ± 2) % R.H. ◦ 장소 : SBI & RCT 실험실
7. 시험결과
 : 뒷면참조

- 이 하 여 백 -

확인	작성자	승인자
	성 명 : 유 용 호 (서명)	직 위 : 기술책임자 성 명 : 여 인 환 (서명)

2012년 03월 26 일

한국건설기술연구원장

※ 위 성적서는 2항 시험성적서의 용도 이외에는 사용을 금지합니다.
※ 상기 내용은 의뢰자가 제시한 시료의 시험결과이며, 본 시험결과는 전체 제품의 품질을 대표하지 않습니다.

<F-QP-05-11-1/2> 한국건설기술연구원

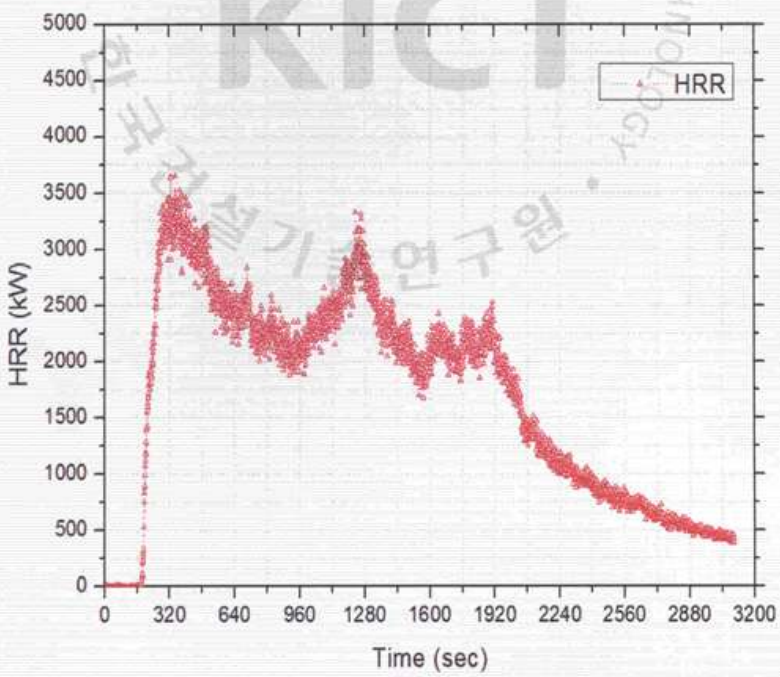
주관 - 호서대학교 시험 증빙서류 (퍼니처 연소실험)

성적서 번호 : 12KICT00283-2

7.3 실험결과 - 자동차

가연물명	자동차			
가연물 사양	사진			
		점화	전성기	쇠퇴기
점화	점화원	거즈 뭉치(휘발유 100 ml)		
	점화 위치	차량 내부 시트		

7.4 실험결과 그래프 - 자동차



<HRR - 자동차>

주관 - 호서대학교 시험 증빙서류 (라지 연소실험)

시험성적서

KICT 한국건설기술연구원
KOREA INSTITUTE of CONSTRUCTION TECHNOLOGY

경기도 고양시 일산서구 고양대로 283번지
Tel: 031-369-0516 Fax: 031-369-0540

성적서 번호:12KICT00283-2

쪽 (1) / 총 (5)

시험성적서 TEST CERTIFICATE KICT

1. 의뢰자
 ◦ 기 관 명 : 호서대학교 산학협력단
 ◦ 주 소 : [336-795]충남 아산시 배방면 호서대학교1공학관 224-1호 초고층 장대터널방재연구실
 ◦ 의뢰일자 : 2012년 03월 06일
2. 시험성적서의 용도 : DB확보
3. 시험대상품목(또는 시료명) : 책장 및 기타
4. 시험일자 : 2012년 03월 15일 ~ 16일
5. 시험방법 : NFPA 13:2002(Installation of sprinkler systems)
6. 시험환경
 ◦ 온도 : (18 ± 2) ℃, 상대습도 : (40 ± 2) % R.H. ◦ 장소 : 실물화재실험실
7. 시험결과
 : 뒷면참조

- 이 하 여 백 -

확인	작성자	승인자
	성 명 : 유 용 호 (서명)	직 위 : 기술책임자 성 명 : 여 인 환 (서명)

2012년 03월 26 일

한국건설기술연구원장

※ 위 성적서는 2항 시험성적서의 용도 이외에는 사용을 금지합니다.
※ 상기 내용은 의뢰자가 제시한 시료의 시험결과이며, 본 시험결과는 전체 제품의 품질을 대표하지 않습니다.

<F-QP-05-11-1/2> KICT 한국건설기술연구원

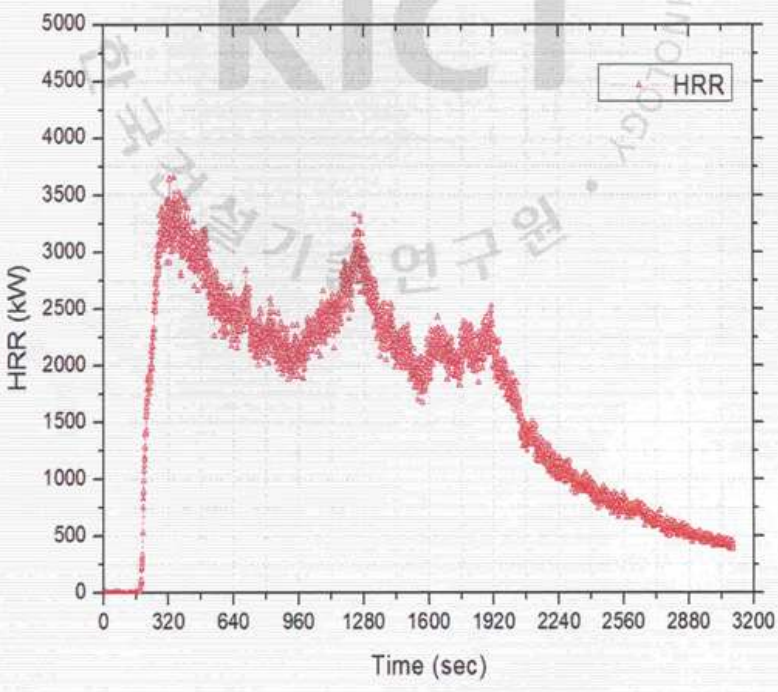
주관 - 호서대학교 시험 증빙서류 (라지 연소실험)

성적서 번호 : 12KICT00283-2

7.3 실험결과 - 자동차

가연물명	자동차			
가연물 사양	사진			
		점화	진성기	쇠퇴기
점화	점화원	거즈 뭉치(휘발유 100 ml)		
	점화 위치	차량 내부 시트		

7.4 실험결과 그래프 - 자동차



<HRR - 자동차>

주관 - 호서대학교 시험 증빙서류 (내화성능 시험접수증)

별지1호(의뢰자용) 3매1조

시 험 접 수 증

2012 년 01 월 31 일

분 류 번 호 : 내화/수탁 회 사 명 : 호서대학교 산학협력단

접 수 번 호 : 수탁 주 소 : 충남 아산시 배방면 호서대학교 세출리 165

2011-1219-00 전 화 : 041-540-5497 의 뢰 자 : 강성구 (인)

아래와 같이 시험을 접수하였습니다. 우편접수

1. 시 험 목 적 : 성능시험

2. 시 험 품 명 : 철근콘크리트 슬래브

3. 시 험 내 용

시 험 항 목	시험품수량 및 규격	시험기준(방법)	비 고
1시간 가열시험	슬래브 1개 4,000*600*180	KS F 2257-1 준	입회 수탁 2010-1182 변경 추가접수분임. 담당자 : 호서대학교 김동준 (010-2494-3707)
시험비용 : 375,600 원	부가세 : 37,560 원	합계 : 413,160 원	

4. 예상처리소요기간 : 30 일 5. 시험품반환여부 : 요( ) 불요(●)

6. 불확도표기여부 : 요( ) 불요(●) 7. 시 험 흔 의 자 : 김대회 (인)

한국화재보험협회 부설

방 재 시 험 연 구 원 장

담 당

주관 - 호서대학교 시험 증빙서류 (내화성능 시험접수증)

별지1호(의뢰자용) 3매1조

시 험 접 수 증

2012 년 01 월 31 일

분 류 번 호 : 내화/수탁 회 사 명 : 호서대학교 산학협력단

접 수 번 호 : 수탁 주 소 : 충남 아산시 배방면 호서대학교 세출리 165

2011-1221-00 전 화 : 041-540-5497 의 뢰 자 : 강성구 (인)

아래와 같이 시험을 접수하였습니다. 우편접수

1. 시 험 목 적 : 성능시험

2. 시 험 품 명 : 철근콘크리트 슬래브

3. 시 험 내 용

시 험 항 목	시험품수량 및 규격	시험기준(방법)	비 고
2시간 가열시험	슬래브 1개 4,000*600*180	KS F 2257-1 준	입회 수탁 2010-1184 변경 추가접수분임. 담당자 : 호서대학교 김동준 (010-2494-3707)

시험비용 : 1,035,600 원 부가세 : 103,560 원 합계 : 1,139,160 원

4. 예상처리소요기간 : 30 일 5. 시험품반환여부 : 요( ) 불요(●)

6. 불확도표기여부 : 요( ) 불요(●) 7. 시 험 흩 의 자 : 김대회 (인)

담 당

한국화재보험협회 부설

방 재 시 험 연 구 원 장

주관 - 호서대학교 시험 증빙서류 (내화성능 시험접수증)

별지1호(의뢰자용) 3매1조

시 험 접 수 증

2012 년 01 월 31 일

분 류 번 호 : 내화/수탁 회 사 명 : 호서대학교 산학협력단

접 수 번 호 : 수탁 주 소 : 충남 아산시 배방면 호서대학교 세출리 165

2011-1222-00 전 화 : 041-540-5497 의 뢰 자 : 강성구 (인)

아래와 같이 시험을 접수하였습니다. 우편접수

1. 시 험 목 적 : 성능시험

2. 시 험 품 명 : 철근콘크리트 슬래브

3. 시 험 내 용

시 험 항 목	시험품수량 및 규격	시험기준(방법)	비 고
2시간 가열시험	슬래브 1개 4,000*600*180	의뢰자제시기준	입회 수탁 2010-1185 변경 추가접수분임. 담당자 : 호서대학교 김동준 (010-2494-3707)

시험비용 : 1,035,600 원 부가세 : 103,560 원 합계 : 1,139,160 원

4. 예상처리소요기간 : 30 일 5. 시험품반환여부 : 요( ) 불요(●)

6. 불확도표기여부 : 요( ) 불요(●) 7. 시 험 책 임 자 : 김대회 (인)

한국화재보험협회 부설

방재시험연구원장

담 당

B-1

고강도콘크리트의 폭렬현상 해석 모델에 관한 연구

- 화재 시 고강도콘크리트의 폭렬에 관한 이론적 연구의 고찰-

강승구 · 김동준 · 권영진* · 이재영** · 原田和典**
호서대학교 소방방재학과 · 교토대학**

Studies on Model interpretation of high-strength concrete Explosive Spalling phenomena

Kang Seung-Goo · Kim Dong-Jun · Kwon Young-Jin · Lee Jae-Young · HARADA KUZUNORI
Dept. Fire & Disaster Prevention of Hoseo Univ · Kyoto University

요 약

본 연구는 일본 교토대학의 有田史綸의(2000年) "火災時における高強度コンクリートの爆裂に關する理論的研究"를 고찰 한 결과 콘크리트 압축강도 Fc[kgf/cm^2]와 밀도[kg/m^3]가 분리되면, 열과 수분의 이동에 관련된 물성치가 예측되며, 해석 모델을 통해 해석된다.

이에 대하여 내부응력과 더불어 열특성, 콘크리트의 역학특성, 강재의 역학특성을 파악하여 내화설계를 구축을 위한 기초자료로 제시하였다.

1. 서 론

최근 전세계적으로 사회발전으로 인해 고도의 인구밀집과 대형화, 초고층화, 지하심층화로 변화 되고 있으며, 이에 실용적, 내화성능, 내구성능이 동시에 만족되는 고강도콘크리트(High Strength Concrete이하 HSC)에 관한 연구가 빠르게 진행되고 있으며, 향후 경제성장으로 인한 건축물의 상징성과 편리성을 위하여 고강도콘크리트(HSC)의 활용도는 높아질 것으로 전망된다.

하지만 고강도 콘크리트는 화재 시 그림 1-(A)와 같이 작은 공극, 세밀한 조직으로 수증기를 배출시키지 못하여 폭렬현상이 발생하는 것과 1-(B)와 같이 콘크리트의 표층부가 고온에 노출됨으로써 열팽창에 의해 폭렬이 발생하는 것이 있다. 이러한 관계는 1-(C)에 나타낸 바와 같이 상호간 밀접한 관계가 있으며 폭렬메커니즘의 주요요소이다. 이에 대하여 국내 연구동향은 섬유혼입과 혼입량의 변수 조건을 통한 폭렬방지방안으로 연구가 이루어지고 있으나, 국외의 경우 섬유, 내화피복, 내화도료와 모델링을 통한 프로그램 해석을 사용하여 연구가 진행되고 있으나, 특히 화재 시 고온에 노출된 고강도콘크리트의 열적특성에 대한 연구는 폭렬현상에 대한 중요요소임에도 연구가 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구는 일본 교토대학의 "화재 시 고강도콘크리트의 폭렬에 관한 이론적 연구"를 고찰한 후, 이에 대한 폭렬현상 해석 모델과 열적특성에 관한 연구에 기초자료로 제시하는데 목적이 있다.

A-18

지하대공간 화재성상 예측을 위한 주요가연물조사

강승구 · 서동구 · 김동준 · 권영진*
호서대학교 소방방재학과

Investigation of main Combustibles for fire behavior prediction at Underground Spaces

Kang Seung Goo · Seo Dong Goo · Kim Dong Jun · Kwon Young Jin
Dept. Fire & Disaster Prevention of Hoseo Univ

요 약

본 연구는 지하대공간의 화재 하중 및 성상을 예측하기 위하여 주요가연물조사를 실시하였다. 조사한 결과 대형서점의 가연물의 종류, 크기, 재질과 지하주차장의 가연물의 종류, 주차대수를 도출할 수 있었다.

이에 대하여 지하공간내 발열량이 높은 곳과 위험성이 높을 것으로 판단되는 곳을 선정하여 가연물조사를 통해 유형을 분석하고, 이에 대한 표준 모델을 모듈화를 제안하여 지하대공간의 화재성상예측을 위한 기초자료로 제시한다.

1. 서 론

최근 전 세계적으로 도시지역의 인구밀집화, 초고층화, 지하심층화, 복잡화되면서 이에 대한 활용도가 높아지고 있는 실정이며, 국내의 경우 국토가 70% 이상 산악지역으로 인해 지하대공간을 대체방안의 일환으로 지하개발의 가속화가 진행되고 있다. 또한 향후에도 인간의 편리성과 인간의 영리를 위하여 발전될 것으로 전망된다.

하지만 지하대공간에서 화재 발생시 일반 화재인 연료지배형 화재가 아닌 개구인자와 가연물밀도에 영향을 미치는 환기지배형 화재로 커다란 잠재적 위험성을 지니고 있으며, 특히 지하공간에서의 화재는 일반적인 화재성상과 다르기 때문에 화재성상예측을 위한 화재하중 DB의 확보가 필요하다고 판단된다. 이에 대하여 국내는 초고층 및 지하연계 복합건축물 재난관리에 관한 특별법을 2012년 3월 9일부터 시행예정에 있으나, 피난시설 및 연소 확대 방지계획만 내세울 뿐, 연소확대방지를 위한 국내의 지하대공간에 대한 화재하중 및 가장 기초적인 가연물량, 개구부조건에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 지하대공간의 높은 화재하중이 잠재될 것으로 예상되는 대형서점과 특수한 가연물과 높은 발열량이 밀집된 대형주차장을 선정하여 가연물량, 개구부를 조사하고, 이에 대한 유형을 분석하여 표준 모델을 모듈화하는 것을 제안하고, 지하대공간 화재성상 예측을 위한 기초자료로 제시하는데 목적이 있다.

출원번호통지서 페이지 1/3

관인생략

출원번호통지서

출 원 일 자 2012.03.27

특 기 사 항 심사청구(유) 공개신청(무)

출 원 번 호 10-2012-0030869 (접수번호 1-1-2012-0242461-40)

출원인 명칭 충남대학교산학협력단(2-2004-008410-4)

대리인 성명 이준서(9-1998-000463-0)

발명자 성명 김윤용 신경준 방진욱

발명의 명칭 고연성 시멘트계 재료의 연신율 측정장치 및 측정방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.

2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.

※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호

3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.

※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식

4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.

5. 국내출원 건을 외국에도 출원하고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정 받을 수 있습니다.

※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12월, 상표·디자인은 6월 이내

※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.

※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000

7.기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.



특허출원서

【출원구분】 특허출원

【출원인】

【명칭】 충남대학교산학협력단

【출원인코드】 2-2004-008410-4

【대리인】

【성명】 이준서

【대리인코드】 9-1998-000463-0

【발명의 국문명칭】 고연성 시멘트계 재료의 연신률 측정장치 및 측정방법

【발명의 영문명칭】 Method and Apparatus for Measuring Ductility of High Ductile Cementitious Composite Material

【발명자】

【성명의 국문표기】 김윤용

【성명의 영문표기】 KIM, Yun Yong

【주민등록번호】 690106-1024321

【우편번호】 305-764

【주소】 대전광역시 유성구 대학로 99 충남대학교 토목공학과

【국적】 KR

【발명자】

【성명의 국문표기】 신경준

【성명의 영문표기】 SHIN, Kyung Joon

【주민등록번호】 741222-1228316

【우편번호】 305-764

【주소】 대전광역시 유성구 대학로 99 충남대학교 토목공학과

【국적】 KR



the way to trust KCL

시험성적서

1. 성적서번호 : CCR2206001
2. 의뢰자
   - o 업 체 명 : 충남대학교산학협력단 김윤용
   - o 주소 : 대전 유성구 대학로 99 (궁동)
   - o 의뢰일자 : 2012년 02월 06일
   - o 시험발급일 : 2012년 02월 08일
3. 시험성적서의 용도 : 품질관리
4. 시료명 : SHCC 30
5. 시험결과

시험항목	단위	구분	시험결과	시험방법
압축강도	MPa	1	52.5	KS F 2405 : 2010
압축강도	MPa	2	52.6	KS F 2405 : 2010
압축강도	MPa	3	52.3	KS F 2405 : 2010

※ 공시체의 크기는 (Φ10×20)cm.
※ 시험일 : 2012 년 02 월 07 일.

- - - - 이 하 여 백 - - - -

확 인	시험자 김종식	승인자 조구영

비고: 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료 명으로 시험한 결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

한국건설생활환경시험연구원장

한국건설생활환경시험연구원장인 업무전용19

대전충남지원 : 305-343 대전 유성구 장동 60-4
결과문의 : 대전충남지원 ☎042-360-3000

총 1 페이지 중 1 페이지 양식QP-20-01-05(0)

공동 - 충남대학교 시험 증빙서류 (성능검증)

the way to trust KCL

시험성적서

1. 성적서번호 : CCR2206003
2. 의뢰자
   - o 업 체 명 : 충남대학교산학협력단 김윤용
   - o 주소 : 대전 유성구 대학로 99 (궁동)
   - o 의뢰일자 : 2012년 02월 06일
   - o 시험발급일 : 2012년 02월 08일
3. 시험성적서의 용도 : 품질관리
4. 시료명 : SHCC 30
5. 시험결과

시험항목	단위	구분	시험결과	시험방법
휨강도	MPa	1	12.8	KS F 2408 : 2000 (확인 2010)
휨강도	MPa	2	11.8	KS F 2408 : 2000 (확인 2010)
휨강도	MPa	3	12.7	KS F 2408 : 2000 (확인 2010)

※ 시험일 : 2012 년 02 월 07 일.

- - - - 이 하 여 백 - - - -

확 인	시험자 김종식	승인자 조구영

비고: 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료 명으로 시험한 결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

한국건설생활환경시험연구원장

대전충남지원 : 305-343 대전 유성구 장동 60-4
결과문의 : 대전충남지원 ☎042-360-3000

총 1 페이지 중 1 페이지 양식QP-20-01-05(0)

공동 - 충남대학교 시험 증빙서류 (성능검증)

the way to trust KCL

시험성적서

1. 성적서번호 : CCR2206004
2. 의뢰자
   - o 업 체 명 : 충남대학교산학협력단 김윤용
   - o 주소 : 대전 유성구 대학로 99 (궁동)
   - o 의뢰일자 : 2012년 02월 06일
   - o 시험발급일 : 2012년 02월 08일
3. 시험성적서의 용도 : 품질관리
4. 시료명 : SHCC 50
5. 시험결과

시험항목	단위	구분	시험결과	시험방법
휨강도	MPa	1	20.5	KS F 2408 : 2000 (확인 2010)
휨강도	MPa	2	21.6	KS F 2408 : 2000 (확인 2010)
휨강도	MPa	3	20.9	KS F 2408 : 2000 (확인 2010)

- - - - 이 하 여 백 - - - -

확 인	시험자 김종식	승인자 조구영

비고: 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료 명으로 시험한 결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

한국건설생활환경시험연구원장

한국건설생활환경시험연구원장인 업무전용 19

대전충남지원 : 305-343 대전 유성구 장동 60-4
결과문의 : 대전충남지원 ☎042-360-3000

총 1 페이지 중 1 페이지 양식QP-20-01-05(0)

공동 - 충남대학교 시험 증빙서류 (성능검증)

the way to trust KCL

시험성적서

1. 성적서번호 : CCR2206002
2. 의뢰자
   - o 업 체 명 : 충남대학교산학협력단 김윤용
   - o 주소 : 대전 유성구 대학로 99 (궁동)
   - o 의뢰일자 : 2012년 02월 06일
   - o 시험발급일 : 2012년 02월 08일
3. 시험성적서의 용도 : 품질관리
4. 시료명 : SHCC 50
5. 시험결과

시험항목	단위	구분	시험결과	시험방법
압축강도	MPa	1	82.7	KS F 2405 : 2010
압축강도	MPa	2	85.6	KS F 2405 : 2010
압축강도	MPa	3	83.7	KS F 2405 : 2010

※ 공시체의 크기는 (Φ10×20)cm.
※ 시험일 : 2012 년 02 월 07 일.

- - - - 이 하 여 백 - - - -

확 인	시험자 김종식	승인자 조구영

비고: 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료 명으로 시험한 결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

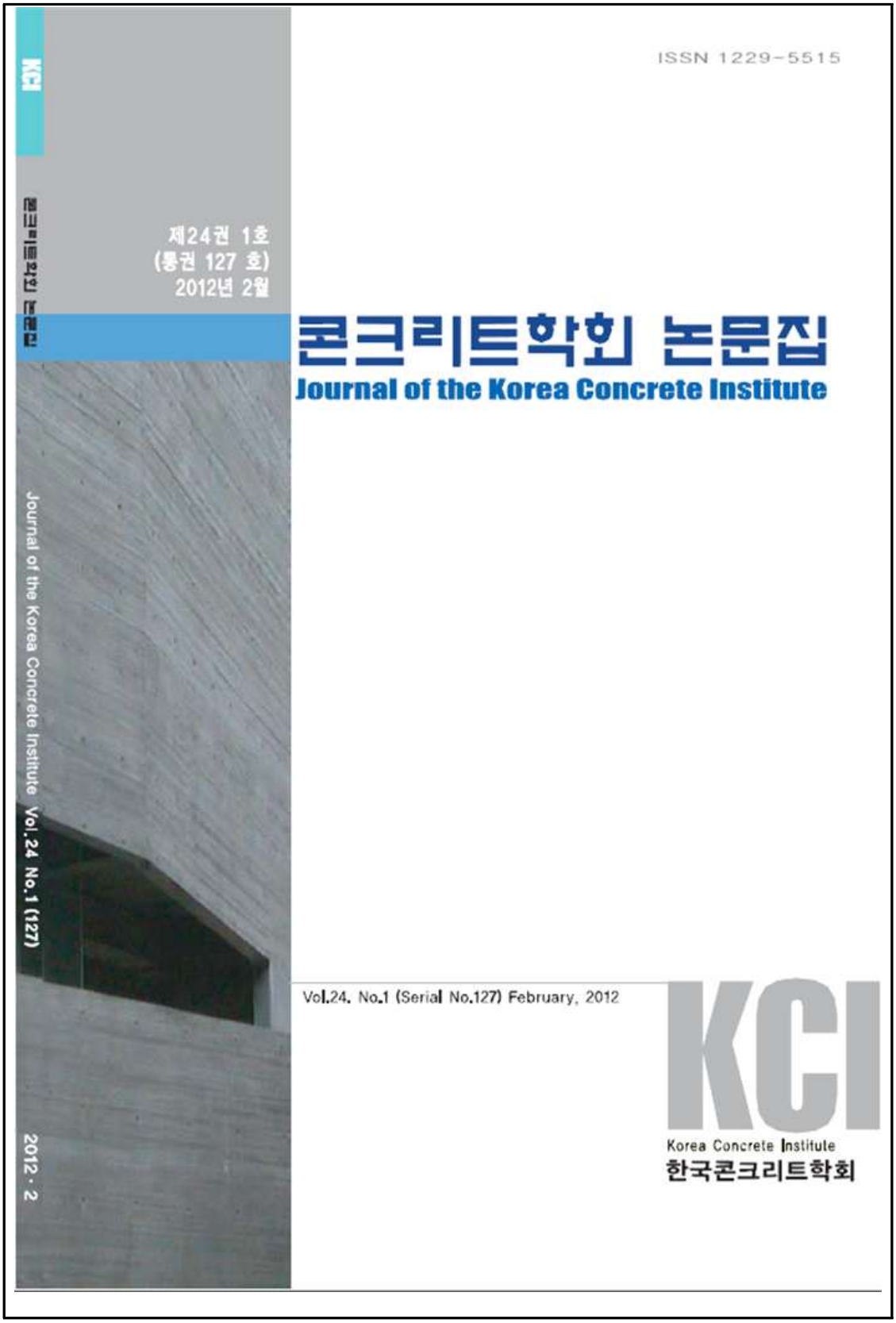
한국건설생활환경시험연구원장

한국건설생활환경시험연구원장인 업무전용 19

대전충남지원 : 305-343 대전 유성구 장동 60-4
결과문의 : 대전충남지원 ☎042-360-3000

총 1 페이지 중 1 페이지 양식QP-20-01-05(0)

공동 - 충남대학교 성과 증빙서류 (콘크리트학회 논문집)



Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 24 No. 1 pp. 087~095 February 2012
http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2012.24.1.087

고로슬래그와 무수석고가 숏크리트의 강도에 미치는 영향

유성희[1] · 신경준[2] · 김윤용[2]*
[1]㈜유니온 연구소 [2]충남대학교 토목공학과

Influence of Blast Furnace Slag and Anhydrite on Strength of Shotcrete

Sung Hee Ryu,[1] Kyung-Joon Shin,[2] and Yun-Yong Kim[2]*
[1]Researcher, R&D Department, Union Corporation, Cheongwon 863-852, Korea
[2]Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

ABSTRACT This study investigated the compressive strength, flexural strength, setting time, and rebound when blast furnace slag and anhydrite, which are widely used mineral admixtures for concrete, are applied to shotcrete. When Ordinary Portland Cement (OPC) was replaced at a rate of 10% with blast furnace slag and anhydrite, the initial and final setting time requirements were all satisfied. However, when OPC was replaced at a rate of 20%, final setting was delayed, revealing that this mixture was not suitable for shotcrete. Compressive strength test results showed that the mixture with 10% OPC replacement rate met the target strength at 1 day and 28 days for permanent tunnel support usage. Particularly, the mixture designed with OPC replacement by blast furnace slag and anhydrite at rates of 5% showed the highest compressive strength. Rebound measurements revealed that this mixture exhibited excellent performance with 23% reduction in the rebound compared to the shotcrete that was produced with only OPC binder.

Keywords : blast furnace slag, anhydrite, strength, setting time, rebound

1. 서 론

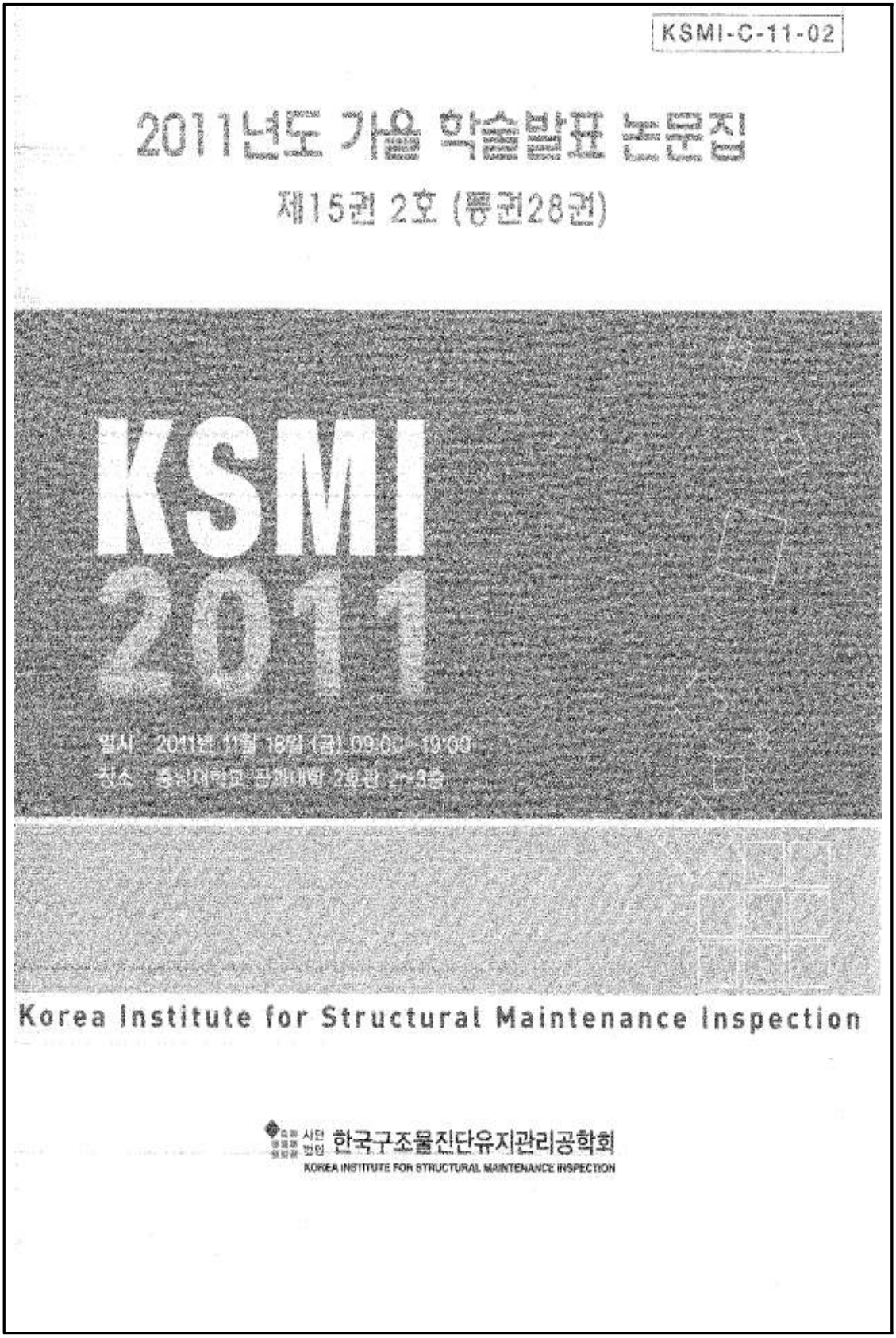
최근 산업의 발전으로 인구이동 및 물류운송, 교통흐름 속도향상을 위해 대단면, 초장대 터널 및 GTX(great train express), 서울시 지하도로(U-smartway)등 사회기반시설공사를 진행함에 있어 터널의 중요성이 강조되고 있다. 터널공법중에서 NATM(new austrian tunneling method) 공법은 가장 많이 사용되는 방법이다. 굴착 후 지하 공간 및 터널에 특수 장비를 사용한 콘크리트 뿜어붙이기(sprayed concerte)작업을 숏크리트라 하며, 1차 지보재로 암반에 밀착하여 이완방지 및 터널에 작용하는 지압을 외력으로 전달하는 효과가 있다. 기존 터널공법에서는 숏크리트 후에 주로 2차 라이닝을 진행하는데, 국외의 경우 영구지보 개념의 싱글쉘 공법(permanent single shell)을 적용한 현장을 많이 볼 수 있다. 싱글쉘 공법의 이점은 굴착크기의 감소, 전체 라이닝 두께의 감소, 2차 라이닝 생략, 레일쓰레기와 설치의 감소로 인한 공사기간 단축 등 여러 가지 장점이 있다.[1] 싱글쉘 공법을 적용하기 위해서 고강도의 숏크리트가 필요한데, 유럽동합규격(EFNARC)은 28일 압축강도 30 MPa 이상, 일본은 28일 압축강도 36 MPa이상 기준을 충하고 있다. 1990년대 이후 보통포틀랜드시멘트(OPC)를 대체하여 숏크리트의 성능을 향상시키는 혼화제로서 실리카퓸 15% 이내(권장 사용량 5-10%), 플라이 애쉬와 고로슬래그는 각각 30% 이내를 사용하고 있는 실정이다.[2,3]

국내의 고강도 숏크리트 혼화재 연구는 국외 연구사례에 비하여 활발하지는 않으나, 실리카퓸의 사용량에 따라 고강도 숏크리트의 최적배합을 연구한 사례가 있다.[4-6] 실리카퓸을 사용하면 포졸란 반응으로 조직이 치밀해져 장기내구성 및 장기강도가 증가한다. 그러나 OPC에 비하여 높은 분말도를 갖고 있어 단위수량 및 고성능 감수제의 사용이 증가하는 단점이 있다. 또한 국내 수급이 부족하여 해외 수입에 의존하기 때문에 실리카퓸은 OPC에 비하여 15-20배 고가이다. 또한 메타카올린을 숏크리트 배합설계에 적용하여 실리카퓸과 유사하게 장기강도를 증진한 연구사례가 있다.[7] 메타카올린은 실리카퓸과 같이 포졸란 반응을 하지만, 슬럼프 확보를 위해 고성능 감수제의 사용이 증가하며, 초기강도 증진이 미약한 단점이 있다.[7] 또한, 메타카올린의 가격은 실리카퓸의 70-80% 정도로 형성되어 있어 경제성이 크게 떨어진다.

한편, 고로슬래그를 사용하여 숏크리트 강도증진을 연

*Corresponding author E-mail : yunkim@cnu.ac.kr
Received November 22, 2011, Revised January 9, 2012,
Accepted January 25, 2012
©2012 by Korea Concrete Institute

공동 - 충남대학교 성과 증빙서류 (학술발표 논문)



SHCC로 보강된 RC보의 휨 거동

Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with SHCC

방진욱* 조현우** 조창근*** 이병재**** 김윤용*****
Bang Jin-Wook Cho Hyun-Woo Cho Chang Geun Lee, Byung Jae Kim Yun-Yong

Abstract

This paper presents the moment-curvature behavior of RC beams strengthened with high strength rebar and SHCC. By strengthening with high strength rebar and SHCC, RC beams exhibited enhanced flexural performance.

1. 서 론

이 연구에서는 마이크로역학 및 안정상태 균열이론의 역학적 설계[1]를 바탕으로 뛰어난 연성과 균열제어 성능을 나타내는 SHCC와 항복강도 1,600 MPa 이상의 고강도 철근을 이용하여 휨 보강한 철근콘크리트 보의 모멘트-곡률 특성을 평가하고자 한다.

2. 사용재료 및 실험방법

SHCC 시멘트 매트릭스 제조를 위해 물-결합재비 45%를 바탕으로 1종 보통 포틀랜드 시멘트, 플라이애시, 고로슬래그 미분말을 결합재로 사용하였으며, 잔골재로 평균입경 150 μm의 규사를 사용하였다. 또한 보강용 섬유로 길이 12 mm 일본 K사의 PVA 섬유를 사용하였다. SHCC의 성능을 평가하기 위해 직접인장 및 압축강도 시험을 수행하였으며, Fig. 1에 나타난 바와 같이 변형경화 구간에서 최대 인장응력 4.5MPa, 변형률 1.8%의 인장성능을 발휘하였고, 압축강도는 약 30 MPa를 나타내었다. 실험체의 형상은 폭, 두께 300×500 mm 단면에 길이 4,000 mm이며, 보의상부 압축부로부터 440 mm 떨어진 곳에 D19 이형철근을 4개씩 배근한 후 일반 콘크리트만을 사용하여 기본실험체 B-1을 3개 제작하였고, B-1 실험체를 인장부에서부터 60 mm를 치핑한 후 고강도 철근을 치핑면에서 30 mm 떨어진 위치에 3개, 5개를 배근하여 SHCC-3, SHCC-5 실험체 2개를 각각 제작하였다. 실험방법은 순지간 3,400 mm 사이에 2점 하중 가력점 거리를 800 mm로 설정하고, 3,000 kN 용량의 만능재료 시험기를 이용하여 변위제어 방식으로 실험체를 가력하였다. 보 실험체의 모멘트-곡률관계를 도출하기 위해 LVDT를 보의 중앙 압축 및 인장부에 설치하였다.

* 충남대학교 토목공학과 박사과정
** 한국건설기술연구원 구조교량연구실 연구원
*** 조선대학교 건축학부 교수
**** 충남대학교 건설방재연구소 연구원
***** 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수


사단법인 한국콘크리트학회
Korea Concrete Institute
http://www.kci.or.kr
Information
Table of Contents
Search this CD-ROM
Exit
2011년 가을 학술대회
KCI Fall 2011 Convention
■ 일시 : 2011년 11월 9일(수)~11일(금)
■ 장소 : 알펜시아(평창)

고강도 고연성 시멘트 복합재료의 역학적 거동 평가

An Experimental Evaluation of High-strength and Ductility Cementitious Composite

방진욱* 현정환* 이병재* 김윤용*
Bang, Jin Wook Huyn, Jung Hwan Lee, Byung Jae Kim, Yun Yong

ABSTRACT

In this study, a proper mix proportion of SHCC was investigated in order to achieve high-ductility, which is a unique characteristic of SHCC, and high compressive strength more than 50 MPa. The mechanical performances were verified by conducting direct tensile test and compressive strength test.

요 약

본 연구에서는 50 MPa 이상의 고강도 조건에서 시멘트 복합재료(Strain Hardening Cementitious Composites, 이하 SHCC) 고유의 특징인 고연성을 확보할 수 있도록 사용재료의 배합비를 도출하였으며, 직접인장 실험과 압축강도 실험을 실시하여 그 성능을 검증하였다.

1. 서 론

시멘트 복합재료(Strain Hardening Cementitious Composites, 이하 SHCC)는 1축 인장하에서 변형률 경화거동과 100 ㎛이하로 제어되는 다수의 미세균열이 발생하는 것이 가장 큰 특징이다. 하지만 시멘트 매트릭스의 조건이 바뀌게 될 경우 특징을 발휘하기 위해 섬유의 혼입률 및 배합비의 수정이 필수적으로 필요한 재료이다. 따라서 본 연구에서는 고강도 SHCC가 변형률 경화거동을 발휘하여 고연성의 특징을 나타낼 수 있도록 배합비를 도출하였으며, 직접인장 실험과 압축강도 실험을 바탕으로 배합비를 실험을 통해 검증하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 주 결합재로 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 플라이애시, 고로슬래그 미분말을 혼화재료로, 잔골재로는 실리카질의 규사를 사용하였다. 또한 PVA섬유와 Steel 섬유를 보강용 섬유로 혼합하여 사용하였다.

2.2 실험 방법

* 정회원, 충남대학교, 토목공학과

고강도 고연성 시멘트 복합재료의 역학적 거동 평가

An Experimental Evaluation of High-strength and Ductility Cementitious Composite

방진욱* 현정환* 이병재* 김윤용*
Bang, Jin Wook Huyn, Jung Hwan Lee, Byung Jae Kim, Yun Yong

ABSTRACT

In this study, a proper mix proportion of SHCC was investigated in order to achieve high-ductility, which is a unique characteristic of SHCC, and high compressive strength more than 50 MPa. The mechanical performances were verified by conducting direct tensile test and compressive strength test.

요 약

본 연구에서는 50 MPa 이상의 고강도 조건에서 시멘트 복합재료(Strain Hardening Cementitious Composites, 이하 SHCC) 고유의 특징인 고연성을 확보할 수 있도록 사용재료의 배합비를 도출하였으며, 직접인장 실험과 압축강도 실험을 실시하여 그 성능을 검증하였다.

1. 서 론

시멘트 복합재료(Strain Hardening Cementitious Composites, 이하 SHCC)는 1축 인장하에서 변형률 경화거동과 100 ㎛이하로 제어되는 다수의 미세균열이 발생하는 것이 가장 큰 특징이다. 하지만 시멘트 매트릭스의 조건이 바뀌게 될 경우 특징을 발휘하기 위해 섬유의 혼입률 및 배합비의 수정이 필수적으로 필요한 재료이다. 따라서 본 연구에서는 고강도 SHCC가 변형률 경화거동을 발휘하여 고연성의 특징을 나타낼 수 있도록 배합비를 도출하였으며, 직접인장 실험과 압축강도 실험을 바탕으로 배합비를 실험을 통해 검증하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 주 결합재로 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 플라이애시, 고로슬래그 미분말을 혼화재료로, 잔골재로는 실리카질의 규사를 사용하였다. 또한 PVA섬유와 Steel 섬유를 보강용 섬유로 혼합하여 사용하였다.

2.2 실험 방법

* 정회원, 충남대학교, 토목공학과

한국구조물진단유지관리학회 2011년 가을학술대회

SHCC 및 RC 복합슬래브의 비선형 휨 성능평가

Nonlinear Flexural Evaluation of SHCC and RC Composite Slabs

조 창 근* 임 현 진** 이 승 중***
Cho, Chang-Geun Lim, Hyun-Jin Lee Seung-Jung

Abstract

A nonlinear flexural model of SHCC and reinforced concrete (RC) composite slab is formulated by a fiber cross-sectional approach. The high-ductile tensile behavior of SHCC has been applied with nonlinear constitutive laws of concrete and steel bars. The prediction of the transverse nonlinear load-displacement relationship of the slab was derived by the moment-area method. The predicted responses were compared with the test results of four point bending slab test.

1. 서 론

주로 시멘트 모르타에 PVA 합성 단섬유를 혼입한 고연성 변형경화형 시멘트 복합체 (Strain-Hardening Cementitious Composites; 이하 SHCC)는 균열 이후에도 섬유가 균열부에서 가교작용에 의해 인장력과 파괴에너지를 부담하여 즉시 파괴에 도달하지 않고, 고인성 인장변형들을 발휘한다. 기존 콘크리트와 같이 취성적인 파괴가 아니라 다중미세균열 거동을 하여 높은 휨 변형 특성을 발휘하게 된다. 본 연구에서는 SHCC를 적용한 RC 복합바닥슬래브의 휨거동 예측에 관한 간편 해석모델을 소개하였다.

2. SHCC 및 RC 복합슬래브의 비선형 휨 해석법

SHCC 및 RC 복합슬래브 시스템에가을학술대회형 휨 해석을 위한 정식화는 다음과 같다. Fig. 1과 같이, 인장 측 하단부에 인장균열제어효과를 발휘하도록 일정 두께의 SHCC 패널을 놓고, 상부에 일반콘크리트를 적용한 RC 복합 슬래브 단면에 대해 층상화 휨 해석법에 의한

* 조선대학교 건축학부 건축공학전공 교수, 공학박사
** 조선대학교 건축학부 건축공학전공 석박사연계과정
*** 조선대학교 건축학부 건축공학전공 박사과정

Journal of the Korean Association for Spatial Structures
Vol. 12, No. 1 (통권 47호), pp.51~58, March, 2012

압출성형 ECC 패널 RC 복합 슬래브의 해석모델

Analysis Model of Extruded ECC Panel RC Composite Slabs

조 창 근* 김 윤 용** 서 정 환*** 이 승 정****
Cho, Chang-Geun Kim, Yun-Yong Seo, Jeong-Hwan Lee, Seung-Jung

요 약

압출성형 ECC 패널을 활용한 철근콘크리트 복합 슬래브 구조에 대한 비선형 휨 해석 모델을 새롭게 제시하였다. ECC 패널은 직접인장시험 결과로부터 균열 이후에 고인성 인장거동을 하는 재료로 모델링하였다. 개발 모델을 기존 철근콘크리트 슬래브 및 ECC 패널 철근콘크리트 복합슬래브 실험체의 휨 실험결과와 비교하였다. 예측결과는 실험결과와 잘 일치하였으며, ECC 패널 적용 철근콘크리트 복합슬래브는 균열제어, 휨내력 및 휨변형능력 개선에 장점이 있는 것으로 판단되었다.

Abstract

A model for the nonlinear flexural analysis of extruded Engineered Cementitious Composite (ECC) panel reinforced concrete (RC) composite slab has been newly presented. From direct tensile test, ECC panel has been modeled to have the high-ductile tensile behavior after cracking. The developed model was compared with bending test results of two specimens, a conventional RC slab and a ECC panel RC composite slab. The predicted results were well patched with the experimental results, and the ECC panel RC composite slab system had advantages in crack control and improving flexural load-carrying capacity and deformation-capacity.

키워드 : 고인성시멘트복합체, 복합슬래브, 층상화휨해석, 장스팬바닥
Keywords : Engineered Cementitious Composite, Composite slab, Fiber flexural analysis, long-span slab

1. 서 론[1]

최근 첨단재료공학 기술의 발전과 더불어 개발되는 섬유들은 인장강도 및 내구성이 우수하여 콘크리트 배합시 혼입할 경우 콘크리트의 단점인 취성 및 인장균열, 내구성 및 고성능 콘크리트 제조에 기여할 수 있다. 합성섬유를 혼입한 고인성 시멘트 복합체 (Engineered Cementitious Composite; 이하 ECC)는 시멘트 복합체에 균열 발생시 혼입된 합성단섬유가 균열에서 가교작용을 하여 응력과 파괴에너지를 부담하므로서 최초의 균열 발생 후에도 즉시 파괴에 도달하지 않고, 2차 균열이 유도한다. 이로 인해 ECC는 <그림 1>과 같이 기존 콘크리트와 같이 취성적으로 부러지는 파괴가 아니라 다중미세균열(multiple micro cracks)의 거동을 하여 높은 휨변형능력을 발휘하게 된다. <그림 2>는 변형경화형 시멘트 복합체 두 시험체의 직접인장실험에 의한 인장응력과 인장변형률 관계를 나타낸 것이다. 기존 콘크리트와 달리 본 재료는 2.6~2.8MPa 내외의 최초 인장균열강도에 도달한 후 곧바로 인장응력이 0이 되지 않고 인장변형률이 증가하여도 인장균열강도 내외의 인장응력을 유지하고 있는 변형률 경화거동을 한 후 2% 이상의 인장변형률을 초과한 이후에 점차 인장응력 부담을 상실하고 있다[1,2,3].

ECC의 높은 휨 및 인장 거동능력은 기존 철근콘

* 교신저자, 조선대학교 건축학부 교수
Tel: 062-230-7023 Fax: 062-230-7155
E-mai : chocg@chosun.ac.kr
** 충남대학교 토목공학 교수
*** (주)동일구조 대표이사
**** 조선대학교 건축학부 박사과정

Advances in Materials Science and Engineering (in Press, 2012)

Flexural Behavior of Extruded DFRCC Panel and Reinforced Concrete Composite Slab

Chang-Geun Cho [a], Bang Yeon Lee [b], Yun Yong Kim [c,*], Byung-Chan Han [d], and Seung-Jung Lee [e]

[a] Professor, School of Architecture, Chosun University, Seosuk-Dong 375, Dong-Gu, Gwangju, 501-759, Republic of Korea

[b] Full Time Lecturer, School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea

[c,*] Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea (corresponding author; yunkim@cnu.ac.kr)

[d] Researcher, AMS Engineering Co., Daejeon, Republic of Korea

[e] Graduate Student, School of Architecture, Chosun University, Seosuk-Dong 375, Dong-Gu, Gwangju, 501-759, Republic of Korea

[*] Corresponding author: Yun Yong Kim, Phone: +82-42-821-7004, Fax: +82-42-821-0318,

SHCC 하프프리캐스트 철근콘크리트 복합슬래브의 구조성능

Structural Performance of Half PCa SHCC and RC Composite Slab

조 창 근* 문 형 주** 임 현 진**
Cho, Chang Geun Moon, Hyung Joo Lim, Hyun-Jin

ABSTRACT

This paper presents a half-precast composite concrete slab using a strain-hardening cementitious composites(SHCC). This slab system can be with minimizing reinforcements and improving crack control by reason of SHCC characteristic comparing with reinforced concrete slab. Also, In the application of the field construction, the reason of half-precast system to minimize the formwork of concrete.

요 약

본 연구에서는 SHCC를 적용하여 하프프리캐스트 철근콘크리트 복합슬래브를 개발하였다. 본 슬래브 구조는 기존 철근콘크리트 슬래브 보다 고연성 시멘트복합재료 특성으로 인해 균열억제 및 인장부분의 철근량 절감에 효과가 있다. 또한, 현장 시공시 하프프리캐스트 방식으로 인해 거푸집 공정의 축소화가 가능하다.

1. 서 론

고연성 시멘트복합재료는 인장측에서 다중미세균열로 인해 균열폭 증대를 억제하고 취성적인 거동이 아닌 연성적인 거동을 보인다. 또한 높은 휨 및 인장 변형능력을 발휘하는 특징이 있다.

본 연구에서는, 이러한 특징을 갖는 고연성시멘트복합체(이하 SHCC)를 복합바닥구조시스템 활용에 기존 철근콘크리트 슬래브의 인장측을 SHCC로 대체하는 하프프리캐스트 SHCC-RC 복합슬래브를 개발하고 구조성능을 파악하고자 한다. 합성섬유를 혼입한 변형경화형의 고연성 시멘트복합체의 연구에 따르면 고연성 시멘트복합체를 기존 철근콘크리트와 합성한 복합슬래브는 실제 현장에 적용할 경우 대공간 구조로서 적용 가능하고, 철근량 절감, 균열 제어 효과 및 내구성에도 효과가 있다.

2. SHCC 하프프리캐스트 철근콘크리트 복합슬래브 제작 및 실험

본 실험은 1방향 슬래브 실험체, 두께 590 ㎜ × 180 ㎜, 길이 2,700 ㎜로 순경간 2,200 ㎜로 SHCC-RC슬래브 실험체를 제작하였다. 실험체의 일람 및 변수는 [표 2.1]과 같다.

실험은 <그림 2.1>과 같이 실험체를 단순지간의 4점 재하방식으로 재하 실험을 하였다. 실험체의 양 단부로부터 250 ㎜ 위치에 회전단을 설치하여 순지간이 2,200 ㎜가 되도록 단순지지하여, 2점 하중

* 정회원, 조선대학교, 건축학부, 교수
** 정회원, 조선대학교, 건축공학과(건축공학전공), 철근콘크리트 및 복합구조 실험실, 박사과정

Proceedings of KASS Symposium - Spring 2013
Vol. 9, No. 1 (통권 제9호), May, 24, 2013

SHCC 철근콘크리트 복합바닥구조의 휨 성능 비교

Flexural Performance Comparison of SHCC and RC Composite Deck

조 창 근* 문 형 주**
Cho, Chang-Geun Moon, Hyung-Joo

요 약

본 연구에서는 현장타설 변형경화형 시멘트복합체(SHCC)를 적용한 철근콘크리트 복합슬래브에 대한 휨 성능 실험을 수행하였다. 본 슬래브 구조는 기존 철근콘크리트 슬래브에 비해 바닥의 장지간화 철근량 절감, 및 균열제어에 유리한 장점이 있다. SHCC의 적용 두께에 따른 슬래브의 휨 성능에 관해서 실험적으로 조사하였다.

Abstract

This paper presents a series of flexural performance test of reinforced concrete composite slab using cast-in-place strain-hardening cementitious composites (SHCC). This slab system has some advantages in the application of longer-span deck, minimizing reinforcements, and improving crack control to compare with reinforced concrete slab. The flexural performance of the slabs was experimentally investigated varying with the thickness of SHCC.

키워드 : 복합슬래브, 고연성 시멘트 복합체, 균열제어
***Keywords :** Composite slab, Strain Hardening Cementitious Composites, crack control*

1. 서론

현재 건축물은 초고층화, 장지간화 및 대공간화의 요구증대에 따라 고내구성과 높은 연성 균열제어를 필요로 한다(Cho 등, 2012). 본 연구에서는 함성섬유를 혼입한 변형경화형의 고연성시멘트복합체(이하 SHCC)를 슬래브 구조에 제작 및 활용하였다(조창근 2009, 2010). SHCC는 최초 균열 발생 후에도 즉시 파괴되지 아니하고2차 균열을 유도하도록 설계한 재료이며, 다중미세균열의 거동으로 높은 휨 변형능력과 균열억제를 나타낸다(Cho 등, 2012). SHCC를 기존 철근콘크리트와 합성한 복합슬래브는 철근량 절감, 균열 제어 효과 및 내구성 또한 향상될 것으로 사료되며, 실용화를 위한 기초자료를 확보하고자 한다.

2. 복합슬래브 제작 및 실험계획

본 연구의 복합슬래브는 1방향 슬래브이며 실험체상세는 아래 그림 1과 같으며, SHCC의 두께를 변수로 설정하였다. 복합슬래브의 휨 및 균열성능 실험은 그림 2와 같으며, 실험체의 양 단부로부터 300mm 위치에 회전단을 설치하여 순지간이 3,400mm가 되도록 단순지지하여 2점 하중 가력점 사이의 거리는 700mm로서, 이영역에서 순수 휨이 작용하도록 하였다 연구는 하중 재하단계에 따른 실험체의 내력, 파괴양상, 균열거동 특성 등에 관해 비교 분석토록 하였다.

* 정회원, 조선대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Tel: (062)230-7023 Fax: (062)230-7155
E-mail : choog@chosun.ac.kr
** 학생회원, 조선대학교 대학원 박사과정

하프프리캐스트 SHCC 철근콘크리트 복합바닥구조의 구조성능

Structural Performance of Half PCa SHCC and RC Composite Deck

조 창 근* 문 형 주** 이 승 중**
Cho, Chang Geun Moon, Hyung Joo Lee, Seung-Jung

ABSTRACT

This paper presents a half-precast composite concrete slab using a strain-hardening cementitious composites (SHCC). This slab system can be apply in longer-span deck with minimizing reinforcements and improving crack control to compare with reinforced concrete slab. In the application of the field construction, the developed half precast slab is suitable to minimize the formwork of concrete and to apply the non-supporting formwork method. The proposed method can improve the efficiency of the construction process and easy to apply in practice.

요 약

본 연구에서는 SHCC를 적용한 하프 프리캐스트 복합슬래브를 개발하였다. 본 슬래브 구조는 기존 철근콘크리트 슬래브에 비해 장지간화가 가능하며 균열억제 및 철근량 절감에 효과가 있다. 현장시공에서, 개발된 하프프리캐스트 슬래브는 거푸집 공정의 축소화 및 무지주 방식으로 시공이 가능하다. 건축공사의 시공효율성 개선 및 실용화에 적합하다.

1. 서 론

현재 건축물은 장지간화 및 대공간의 확보가 필요함에 따라 건축물 바닥 슬래브의 장경간화를 위한 고내구성과 높은 연성, 균열제어를 필요로 한다. 이에 본 연구에서는 최근 활발히 연구가 진행되고 있는 합성섬유를 혼입한 변형경화형의 고연성시멘트복합체(이하 SHCC)를 슬래브 구조에 제작 및 활용하였다 (조창근 2009, 2010). SHCC는 최초 균열 발생 후에도 즉시 파괴되지 아니하고 2차 균열을 유도하도록 설계한 재료이며, 다중미세균열의 거동으로 높은 휨 변형능력과 균열억제를 나타낸다(Cho 등, 2012; Kim 등, 2004). 이러한 고연성 시멘트복합체를 기존 철근콘크리트와 합성한 복합슬래브는 실제 현장에 적용할 경우 대공간 구조로서 적용 가능하고, 철근량 절감, 균열 제어 효과 및 내구성에도 효과가 있다.

2. Half PCa SHCC-RC 복합바닥구조의 제작 및 실험

* 정회원, 조선대학교, 건축학부, 교수
** 정회원, 조선대학교, 건축공학과(건축공학전공), 철근콘크리트 및 복합구조 실험실, 박사과정

Advanced Materials Research Vol. 831 (2014) pp 14-17
© (2014) Trans Tech Publications, Switzerland
doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.831.14

Flexural Strength of SHCC Panels Dependent on Fly Ash Type and Curing Condition

Jin Wook Bang[1,a], Jung Hwan Hyun[1,b], Byung Jae Lee[1,c]
Dong Su Joung[2,d] and Yun Yong Kim[1,e]

[1]Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Republic of Korea

[2]JNTINC Co., LTD, #204, Jogang B/D 715-9, E-dong, Sangrok-Gu, Ansan-City, Gyunggi-Do 426-160, Republic of Korea

[a]best6516@naver.com, [b]mildface@naver.com, [c]lbjae80@hanmail.net, [d]deanjoung@jntinc.co.kr
[e]yunkim@cnu.ac.kr (Corresponding author)

Keywords: SHCC panel, High ductility, Fly ash, Steam curing, Flexural strength.

Abstract. A basic study is performed on the application of highly ductile SHCC(Strain Hardening Cementitious Composites) to precast method. A special focus was placed on applying class C fly ash with a high *CaO* content to secure early-age strength of the steam cured SHCC. The flexural strength of the SHCC panels dependent on fly ash type and varied curing methods were evaluated. The results showed that class C fly ash could enhance the flexural strength of 1 day-old steam cured SHCC panels. Additionally, 1 day-old steam cured specimens produced with class C fly ash exhibited up to 58% of the flexural strength of 28 day-old wet cured specimens produced with class F fly ash.

Introduction

SHCC (Strain Hardening Cementitious Composites) is a high performance cement-based composite that exhibits extreme tensile strain capacity while using a moderate amount of fiber, typically less than 2% in terms of fiber volume fraction. The SHCC significantly enhance the ductility of cement-based materials by exhibiting tensile strain hardening behavior and widely distributed micro cracks[1]. Upon the background of recent increases in earthquake risk, coupled with more stringent requirements of seismic performance, using highly ductile SHCC in structural components to enhance structural strength and ductility has been researched [2,3]. However, these methods are mostly for use on-site, and SHCC's quality thus depends on external factors such as the proficiency and skill of the workers creating the SHCC, making consistent material procurement difficult.

This paper has studied application of the precast method to SHCC to improve its application on-site. Class C fly ash, possessing high *CaO* content, can directly affect the hydration reaction of the cement, allowing for early-age strength; hence steam curing was selected as the desired curing method. To investigate the effect of steam curing condition, results of wet curing condition were compared based on the flexural test results.

Materials and Mix Proportions

Materials

Ordinary Portland Cement (OPC) with a density of 3.14 g/cm^3 and a particle fineness of 3,200 cm^2/g, blast furnace slag(BFS) of 2.93 g/cm^3 density, class C fly ash of 2.89 g/cm^3 density, and class F fly ash of 2.16g/cm^3 density were used as the binders. The physical and chemical properties of fly ash are shown in Table 1. Two types of fine silica sand with densities of 2.60 g/cm^3 were used, and an average grain size of 150 μm was maintained. A high performance polycarboxylate superplasticizer (PCSP), a viscosity agent (hydroxypropyl methylcellulose, HPMC), and an antifoaming agent (AFA) were used as chemical admixture. And polyvinylalcohol (PVA) fibers with a diameter of 39 μm and a length of 12 mm were used as reinforcing fibers.

All rights reserved. No part of contents of this paper may be reproduced or transmitted in any form or by any means without the written permission of TTP, www.ttp.net. (ID: 168.188.141.48, Chungnam National University, Korea, South-07/10/13,13:27:02)

증기양생을 통해 제작된 Green SHCC 패널의 성능 평가

A study on the mechanical property of the Green SHCC panel manufactured by steam curing method

방진욱* 이병재** 현정환* 서지석*** 김윤용****
Bang, Jin Wook Lee, Byung Jae Hyun, Jung Hwan Seo, Ji Seok Kim, Yun Yong

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the flexural performance of a SHCC (Strain Hardening Cementitious Composites) panel which was manufactured by steam curing method for precast slab system. From the bending test result, it was found that the SHCC panel showed approximately 7.32 MPa of maximum flexural strength, 58 mm of mid-span deflection appearing excellent strain hardening behavior and multiple micro cracks between bending moment section of the specimen.

1. 서 론

이 연구에서는 프리캐스트공법으로 제작된 고연성 시멘트 복합재료 패널(SHCC panel)을 바닥 구조시스템 슬래브에 적용하기 위해 요구되는 휨 성능을 평가하기 위한 연구를 수행하였다. 증기양생을 통해 실스케일 규모의 시험체를 제작하였고, 4점 재하 방식을 이용하여 휨 시험을 실시하였으며, 휨 강도-중앙부 처짐 및 파괴양상, 균열패턴 등의 특성을 평가하였다.

2. 실 험

SHCC panel을 제작하기 위한 사용재료 및 배합[1]은 다음 Table 1과 같으며, PVA 섬유의 분산성 향상을 위해 3성분계 결합재 및 두 종류의 실리카질 규사를 혼입하여 사용하였다.

Table 1. Mixing proportion of SHCC panel (kg/m^3)

W/B (%)	W	Bider (C + FA + Slag)	Sand	HPMC	SP	PVA
50	375	750	780	3	0.75	26

100 L 용량의 강제식 믹서를 이용하여 폭 × 길이 × 높이가 600 mm × 2,700 mm × 60mm의 SHCC 패널 시험체를 제작하였고, 12시간의 증기양생을 통해 시험체 제작을 완료하였다. 그 후 7일의 기건양생을 실시한 후 휨 시험을 수행하였다. 휨 시험시 시험체의 양 끝단으로부터 300

* 충남대학교 토목공학과, 박사과정
** 충남대학교 토목공학과, 공학박사
*** 충남대학교 토목공학과, 석사과정
**** 충남대학교 토목공학과 교수, 공학박사, 교신저자(yunkim@cnu.ac.kr)

플라이애시 종류에 따른 Green SHCC의 직접인장 특성 평가

The axial tensile properties of the Green SHCC in accordance with types of fly ash

방 진 욱* 현 정 환* 서 지 석* 이 의 성* 이 병 재** 김 윤 용**
Bang Jin Wook Hyun Jung Hwan Seo, Ji Seok Lee, Eue Sung Lee Byung Jae Kim Yun Yong

ABSTRACT

The purpose of this current study is to evaluate the axial tensile properties of the Green SHCC according to the two types of fly ash(class F and class C). From the test result, tensile strength of the early-age of Green SHCC can be improved by using the class C of fly ash. And the SHCC shows strain hardening and micro-multiple cracking behaviors.

요 약

이 논문에서는 두 종류의 플라이애시를 사용하여 제작된 섬유보강 고연성 시멘트 복합재료(Green SHCC)의 1축 인장 특성을 직접인장 실험을 통하여 평가하였다. 동일한 양생조건에서 C급 플라이애시의 사용은 Green SHCC의 초기 인장강도를 우수하게 증가시킬 수 있고, 재료의 고유 특징인 변형률 경화거동 및 다수의 미세균열을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

1. 서 론

SHCC는 단위 시멘트량이 일반 콘크리트에 비해 다량 사용되는 문제점이 있어 플라이애시 및 고로슬래그 미분말 등의 혼화재료를 시멘트 대체재로 사용하기 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다[1]. 특히, 플라이애시를 다량 치환한 배합에서는 조기강도 확보에 어려움이 따르는 문제점이 발생된다. 따라서 본 연구에서는 조기강도를 확보하기 위한 방안으로 증기양생 및 CaO 성분비율이 높은 C급 플라이애시를 사용하였고, 이를 평가하기 위해 직접인장 실험을 수행하였다.

2. 실험 방법 및 사용재료

2.1 사용재료 및 실험방법

SHCC 제조를 위해 제1종 보통포틀랜드 시멘트(C), F급 및 C급 플라이애시(FA), 고로슬래그 미분말(Slag), 규사(S), 고성능감수제(PCSP), 분리저감제(HPMC), PVA 섬유를 사용하였다. 표 1에 배합표를 나타내었다. 최고온도 65℃로 설정하고 3단계의 절차를 통해 증기양생을 실시하였다.

* 정회원, 충남대학교 토목공학과 대학원
** 정회원, 충남대학교 토목공학과 박사 후 연구원
*** 정회원, 충남대학교 토목공학과 부교수

특 허 증

CERTIFICATE OF PATENT

특 허 제 10-1359210 호
(PATENT NUMBER)

출원번호 (APPLICATION NUMBER) 제 2012-0039609 호
출 원 일 (FILING DATE:YY/MM/DD) 2012년 04월 17일
등 록 일 (REGISTRATION DATE:YY/MM/DD) 2014년 01월 28일

발명의명칭 (TITLE OF THE INVENTION)
시멘트 혼합물과 이를 이용한 패널 및 이를 이용한 바닥구조 시공방법

특허권자 (PATENTEE)
등록사항란에 기재

발명자 (INVENTOR)
등록사항란에 기재

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.

(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE.)

2014년 01월 28일

특허청장 김 영 필
COMMISSIONER, THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

연차등록료 납부일은 설정등록일 이후 4년차부터 매년 01월 28일까지이며 등록원부로 권리관계를 확인바랍니다.

특 허 증

CERTIFICATE OF PATENT

특 허 제 10-1182054 호
(PATENT NUMBER)

출원번호 (APPLICATION NUMBER) 제 2012-0030869 호
출 원 일 (FILING DATE:YY/MM/DD) 2012년 03월 27일
등 록 일 (REGISTRATION DATE:YY/MM/DD) 2012년 09월 05일

발명의명칭 (TITLE OF THE INVENTION)
고연성 시멘트계 재료의 연신율 측정장치 및 측정방법

특허권자 (PATENTEE)
충남대학교산학협력단(160171-0******)
대전광역시 유성구 대학로 99 (궁동, 충남대학교)

발명자 (INVENTOR)
등록사항란에 기재

위의 발명은 「특허법」에 의하여 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.

(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE.)

2012년 09월 05일

특 허 청 장
COMMISSIONER, THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

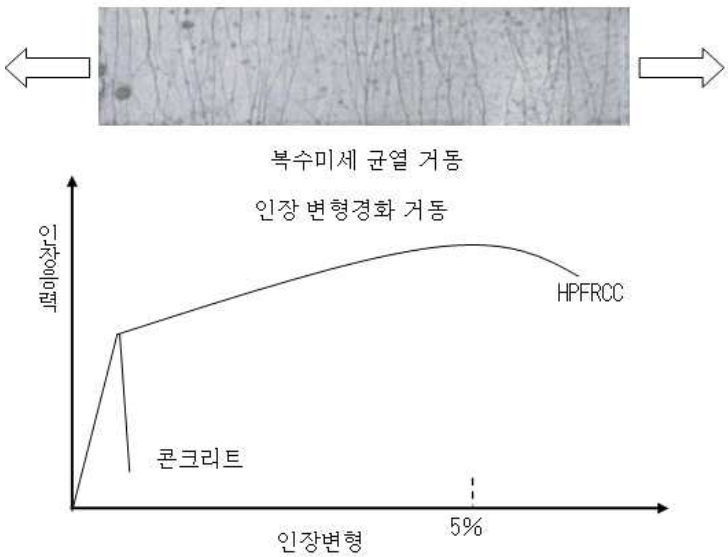
연차등록료 납부일은 설정등록일 이후 4년차부터 매년 09월 05일까지이며 등록원부로 권리관계를 확인바랍니다.

2. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

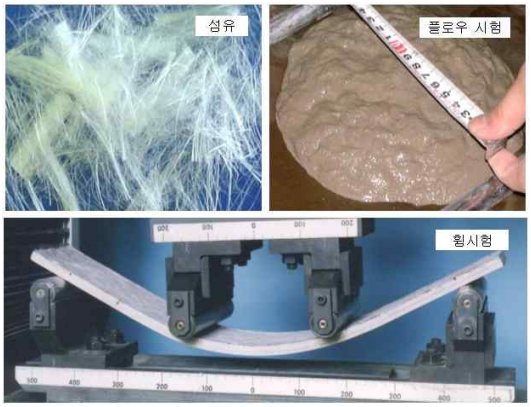
1절 고연성 시멘트 복합재료에 대한 일본의 활용 현황

1. 개요

일본에 있어서, 시멘트 기반 콘크리트/모르타르에 합성 단섬유를 혼입하는 목적은 인장 강도 또는 휨강도 향상이 주된 관심이었다. 그러나 최근에는 균열폭의 제어를 목적으로 한 것이 주목받고 있다. 작용하는 인장력의 증가에 수반해, 폭의 작은 균열이 차례차례로 생겨 큰 인장변형능력을 발현하는 고연성 시멘트복합재료가 개발되고 있다(<그림 6.1.1>, <그림 6.1.2>). 이러한 고연성 시멘트복합재료는 합성 단섬유에 의해, 균열폭은 0.1 mm전후, 최대 0.2 mm이하에서 제어되고 있으며, 인장 변형의 증가에 수반해, 균열 폭이 증가하는 것이 아니라 균열 개수가 증가한다고 하는 점이, 이 재료의 가장 큰 특징 중의 하나이다.



<그림 6.1.1> 인장변형경화 및 복수미세균열 거동



<그림 6.1.2> 복수미세 균열형 고연성 시멘트복합재료

고연성 시멘트복합재료는, 뛰어난 인장 성능을 갖는 HPFRCC (High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites), 혹은 성능 중에서 인장변형 경화특성을 강조하는 SHCC (Strain Hardening Cement-based Composites)등으로 통칭되고 있으며, 그 중의 대표적인 재료가 Li 교수에 의해 개발된 ECC (Engineered Cementitious Composites)이다.

일본에서는 실구조물에의 이러한 재료의 적용이 이미 시작되었으며, 일본 토목 학회 콘크리트 위원회에서는, 이 재료를 이용한 구조물의 설계 시공 지침(안)을 작성 중이다. 이 설계 시공 지침(안)에서는, 미세한 균열이 분산해 발생한다는 점을 강조하여 「복수 미세 균열형 섬유 보강 시멘트 복합재료」라고 이 재료를 부르고 있다. 여기에서는, 일본 토목 학회의 위원회가 현재 검토·작성하고 있는, 미세한 균열 폭 형성과 인장력을 분담할 수 있는 이러한 재료(이하 HPFRCC)를 소개하는 것을 목적으로 하고, 이 재료의 특징과 성능, 일본에서의 시험 시공 예, 합성 부재의 성능과 적용의 가능성에 대해 살펴보고자 한다.

2. 재료의 특징과 성능

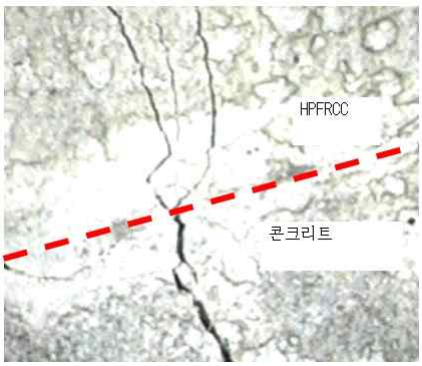
가. 사용 재료와 시공

HPFRCC는, 시멘트 등의 결합재, 잔골재, 단섬유, 고성능 AE감수제, 증점제, 물 등으로 구성된다. 인장력 하에서의 성능을 높이기 위해서, 일반적으로 굵은 골재는 포함되지 않는다. 이 때문에, 경화 시에 큰 수축이 일어나기 쉽기 때문에, 적당량의 팽창제나 수축 저감제를 이용하는 경우가 많다. 또한 시멘트의 사용량이 많아 두꺼운 부재에서는 수화열이 커질 가능성이 많기 때문에, 시멘트의 일부를 플라이에시 등의 분체 재료로 대체하는 등, 수화열을 억제하려는 여러 가지 방안이 검토되고 있다. 단섬유는, 비닐론 섬유나 폴리에틸렌 섬유이며, 섬유의 직경은 0.01~0.04 mm정도, 길이는 10 mm 전후, 체적으로 1.0~2.0%가 이용된다. 매트릭스의 배합에 있어서

는 섬유의 분산성을 좋게 하기 위해에 적당량의 분리저감제가 이용되며, 통상적으로 미장 또는 뿜칠에 의해 시공된다.

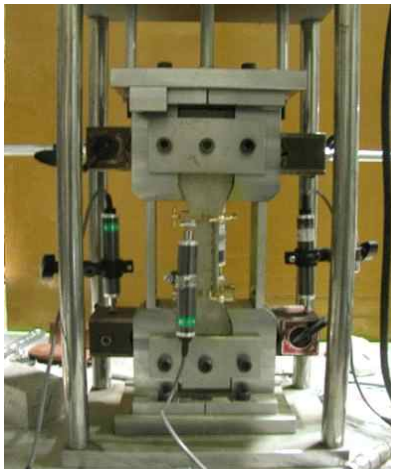
나. 역학 성능과 균열 성능

HPFRCC의 압축 강도는 30~60 MPa 정도, 인장 강도는 5 MPa 전후, 휨강도는 5~10 MPa 정도, 탄성계수는 15~20 GPa 정도이다. 얇은 판형 공시체의 휨시험을 실시하면, 사진 1에 나타내듯이 큰 처짐이 발생하는 것도 있다. HPFRCC를 일반적인 콘크리트에 거듭해 이용했을 경우, 콘크리트에 생긴 균열은 HPFRCC에서는 미세하게 분산한다. <그림 6.1.3>



<그림 6.1.3> HPFRCC에 의해 미세하게 분산하는 균열패턴

1축인장 응력 상태에서 초기 균열 후에 인장 응력과 인장 변형이 함께 증가하는 유사「인장 변형 경화 거동」의 과정에서는, 인장력에 직각 방향의 균열이 증가하는「복수 균열 거동」이 나타난다. 복수의 균열이 고밀도에 형성되면, 재료의 인장 변형 분포는 단일화한다. 덧붙여 최대 하중점 후의 변형연화의 과정에서는, 특정의 균열 폭이 확대해, 변형의 국소화가 발생하게 된다.
HPFRCC의 인장 성능을 유효하게 활용하기 위해서는, 인장 응력 변형 관계, 균열 성질과 상태의 평가방법을 확립하는 것이 중요하다. HPFRCC의 인장 시험에서는, 양단을 크게 해 중앙부를 가늘게 한 덤벨형(dog-bone)의 시험체가 이용되는 경우가 많다. 양단부의 잡는 방법으로서는, 공기압 등을 이용하여 마찰력으로 잡는 방법이나, 양단부의 어깨의 부분을 잡는 방법(<그림 6.1.4>)이 이용되고 있다.



<그림 6.1.4> 덤벨형 공시체의 간편한 인장시험장치

균열의 성질과 상태의 평가로는, 인장 응력-변형 관계와 동시에, 균열 폭(평균, 최대)이나 균열 밀도(혹은 계측 구간내의 갯수)를, 재하의 초기부터 연속적으로 평가하는 것이 좋다.

다. 내구성능

HPFRCC를 이용하면 철근 콘크리트 구조물의 내구성능 향상을 기대할 수 있다. 그 이유로서는, 균열의 미세화를 통해 균열부에 있어서의 물질 투과성이 억제되는 것과 더불어, 균열이 분산되어 철근의 부식 형태가 미크로 셀 형이 되므로 부식 속도가 억제되기 때문이다.
일반적으로 콘크리트에서는, 균열폭이 0.1 mm정도 이하이면, 자기 수복(Self-healing)을 기대할 수 있다고 알려져 있다. 배합 및 재료에에 따라 차이는 있지만, HPFRCC의 균열 폭은 0.05~0.1 mm정도, 최대값도 0.2 mm보다 작다. 그러므로 HPFRCC의 높은 연성적 성질(Ductility)은, 높은 내구성(Durability)을 가져올 가능성이 크다고 할 수 있다.
이러한 여러가지 역학적, 내구적 관점으로 부터 일본에서는 HPFRCC가 각종의 열화나 시간의존성 거동에 의하여 미세한 균열이 발생하고, 이러한 미세균열이 발생한 상태로 이용된다는 가정 하에 HPFRCC가 갖는 여러가지 장점을 근거로 하여 다양한 분야에의 응용에 대한 정량적인 검토 및 시공이 이루어지고 있다.

라. 적용의 아이디어

콘크리트는 여러 가지의 재료를 조합한 복합재료이다. HPFRCC에 대해서도, 여러 가지 재료의 조합에 따라, 그 유용성이 높아진다. 예를 들면, 기포를 체적의 반 정

도 혼입하면 경량으로 변형 성능이 풍부한 재료를 얻을 수 있다. 강재는 아닌 매쉬 형태의 섬유와 HPFRCC의 조합도, 내력과 인성으로 효과적이다. 표면 함침재인 발수제를 표면에 도포하면, 균열폭이 세세한 경우에는 지수 효과가 높아지는 특징이 있다. 일반적으로, 기존의 건설공법으로 부터 역발상의 관점에 의한 HPFRCC와의 조합은 그 결과의 유용성이 높아질 경우 뛰어난 아이디어가 된다. 또한 새로운 아이디어를 실현시키는 경우에는, 단기적인 성능뿐만이 아니라, 장기에 걸치는 성능과 비용을 억제할 수 있는 배려가 특히 중요하다고 할 수 있다.

3. 일본에서의 시험 시공 예

가. 시험 시공의 종류와 분류

HPFRCC는, 인장력 하에서 복수의 미세 균열 발생, 고인성 특성을 나타내는 것부터, 방식재, 지수재, 강재 피복재, 에너지 흡수재, 완충재 등에 이용이 기대되고 있다. 국외의 다른 나라에 비해, 일본에서는 실구조물에 HPFRCC의 시험적인 적용이 활발하다고 할 수 있다. 구체적인 적용 예로서 다음과 같은 것이 있다.

- 수밀성의 향상을 기대한 콘크리트 댐의 표면 보수
(2003년 히로시마 현)
- 균열이 생긴 옹벽의 미관 향상을 기대한 표면 보수
(2003년 기후 현)
- 인장력을 분담시켜 피로 내구성의 향상을 기대한 교량상판)
(2004년 홋카이도)
- 부식성 물질 침입을 억제하는 것을 기대한 철도 고가다리의 표면피복)
(2005년 시즈오카 현)
- 보강 단면 후를 억제하는 것을 기대한 터널의 재해 응급 공사)
(2005년 니가타 현)
- 지진 작용시의 에너지 흡수의 증가와 제진을 기대한 건축물용 댐퍼 (2005년 도쿄 도, 2006년 카나가와 현)
- 누수의 저감을 기대한 농업용수로의 표면 보수
(2005년 시가 현 토야마 현, 2006년 와카야마 현)
- 가설시의 변형 추종 성능을 기대한 교량상판의 덧침 모르타르
(2006년 효고 현)

교량상판이나 건축물용 댐퍼는 HPFRCC의 역학적 성능을 이용한 것이며, 표면 보수는 균열이 미세하게 분산하는 성능을 이용한 것이다. 현재로서는, HPFRCC의 이용 형태를, 다음과 같이 크게 나눌 수 있다.

(1) HPFRCC만의 부재（HPFRCC）

HPFRCC만을 부재에 적용하는 경우, 인성과 결함이 발생하기 어렵기 때문에 받침부와 같은 압축력을 받는 부재로서의 이용은 생각할 수 있지만, 인장 부재에는 적합하지 않다.

(2) 보강근을 배치한 HPFRCC 부재(R/HPFRCC)

보강용으로 철근을 배치했을 경우, HPFRCC는 균열영역을 분산시키는 것으로 부터, 철근의 항복영역이 확산되어, 에너지 흡수능력이 증대한다. 보강근으로서는, 철근이나 확장 메탈, PC강재의 외에도, 섬유매쉬나 연속 섬유 보강재도 유효하다. 보강근에는, 하중 분담의 기능 외에, HPFRCC의 균열을 한층 더 분산시키는 기능도 있다. 시험 시공 예는, 연결 슬라브나 건축물용 뎀퍼, 철근 보강 HPFRCC 등이 있다.

(3) HPFRCC와 콘크리트를 합성시킨 부재(HPFRCC/C)

모체 콘크리트에 균열이 발생할 때, HPFRCC를 시공(보수)하는 경우에는, 표면의 균열폭을 작게 해, 지수성이나 미관을 향상시키는 것이 기대된다. 이때, HPFRCC와 콘크리트와의 일체성을 확보해야 하기 때문에, 콘크리트 면에 엥커 등의 배치가 필요하다. HPFRCC 부분에 보강근을 배치하는 것도 생각할 수 있으며(R/HPFRCC/C), 구체적인 예로서는, 수로나 옹벽 콘크리트면의 보수를 들 수 있다.

(4) HPFRCC와 강판(혹은 강관)을 합성시킨 부재(HPFRCC/S)

HPFRCC는 인장 변형성능이 뛰어나 균열 폭이 작으며, 또한 방식성이 뛰어나 강판의 피복재에 적절하다고 할 수 있다. HPFRCC를 강판에 피복 하게 되면, 부재의 강성과 내력 향상을 기대할 수 있다. HPFRCC와 강판과의 일체성을 확보해야 하기 때문에, 충분한 플레이트 지벨을 배치할 필요가 있다. 구체적으로는, 교량 강상판과의 합성 예가 있다.

HPFRCC를 사용하는 경우 유의점으로서 다음과 같은 것이 있다.

- 시공에 임해서는, 섬유 보강의 연속성을 확실히 확보한다.
- 강판이나 강관 등과 같은 판형태의 강재와 HPFRCC를 합성해 이용하는 경우에는, 일체로 거동 하도록 충분한 부착성능을 확보한다.
- 미세한 균열이 생기고 있는 것을 전제로 하고, HPFRCC를 이용한 부재나 구조

물의 전체의 성능을 확인한다.

- HPFRCC가 수중에 잠긴 상태로 큰 반복 작용을 받으면, 미세한 균열부에 침수한 물이 HPFRCC의 열화를 촉진하는8)하므로, 이러한 상태가 되지 않게 설계 시공에 대해 배려한다.
- 섬유가 인장력을 장기에 걸쳐 분담하므로, 사용하는 섬유의 내구성 및 피로나 인장 크리프에 관한 성능의 확인이 중요하다.

나. 교량상판에의 적용

HPFRCC는 인장력을 부담할 수 있기 때문에, 강판과 조합해 합성 부재로 사용하면, 통상의 합성콘크리트 부재에 비해, 얇은 단면 치수로 큰 휨내력을 얻을 수 있다. 2004년에 홋카이도에서 건설된 미하라 대교 (교장 972 m, 중앙지간 340 m)에서는, 강 상판 위 아스콘의 1/2 (두께 40 mm)을 HPFRCC로 대체함으로써 상판의 내력과 강성을 높여 발생 응력을 저하시키고, 강상판 보강부의 피로 내구성을 향상시켰다 (<그림 6.1.5>). 여기서는 시방서의 개정에 수반해 강상판 보강부의 피로 내구성을 향상시킬 필요가 생겼기 때문에, HPFRCC가 채용되었다.



<그림 6.1.5> 강 HPFRCC 합성 교량 상판

HPFRCC와 강상판과의 부착을 높이기 위해서 FRP제 프레이트 지벨이 채용되었다. HPFRCC는 레미콘 공장에서 1차 비빔을 한 후 일반적인 아지테이터 차로 현장까지 운반한 후, 섬유의 분산을 확실히 하기 위해, 현장에서 2차 비빔을 실시하였다. 1일에 약 30 ㎥의 HPFRCC가 타설 되었으며, HPFRCC의 총량은 약 800 ㎥였다. HPFRCC를 레미콘 공장에서 제조해 대량으로 안정되게 공급할 수 있던 점은 매우 획기적이다. 빗물의 배수를 하지 못하고 HPFRCC가 수중에 잠긴 상태로 큰 주행 하중을 받는 곳은, 조기에 변형이 발생하였다. 그 원인과 대책에 대해서는, 검토가 진행되고 있다.

다. RC건축물용 뎀퍼

철근으로 보강한 HPFRCC 부재는, 정부 반복하중을 받는 경우 에너지 흡수 능력이 크다. <그림 6.1.6>에 나타냈듯이, 2005에서 2006년에 걸쳐 도쿄나 요코하마의 RC 건축물에 HPFRCC 부재가 뎀퍼로서 사용되어 건물 전체의 내진 성능 향상을 도모할 수 있었다. HPFRCC 부재는, 고층 RC건축물의 코어벽을 연결하는 커플링 보(Coupled beam, 또는 Linked beam)로서 이용되고 있다.

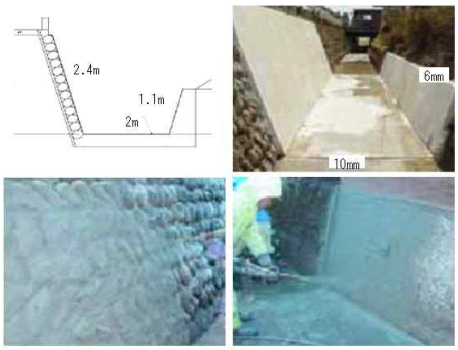


<그림 6.1.6> RC 건축물의 뎀퍼(Damper)

라. 농업용수로의 표면 보수

일본의 농업용수로는, 건설 후 수십년이 경과하고 열화가 진행된 것이 많다. 수지계 라이닝 재료는 자외선 열화가 발생하기 쉽고, 시공시 표면이 습윤이어서 박리가 생기기 쉬운 문제가 있기 때문에, 시멘트계 라이닝 재료로서 HPFRCC가 기대되고 있다.

토야마 현의 농업용수로(측벽 약 1.1 m, 석축 측벽 약 2.4 m, 저판 약 2 m)는, 표면에 굵은골재가 노출되고, 저판의 일부에 단면 결손이 나타나 석축 측벽의 하부에서는 일부에 골재 사이의 모르타르가 결손되어 있었다. 열화 부분을 제거하기 위한 바탕 처리에는 워터 제트 공법이 이용되었다. 석축 측벽의 요철부는 모르타르로 사이 채우기를 했다. HPFRCC의 두께는, 측벽에서는 6 mm, 저판에서는 10 mm로 설정하여, 뿜칠에 의한 시공이 2005년에 행해졌다([그림 9.7]). 농수로의 줄눈부나 접합부로부터의 누수는 많지만, 콘크리트 몸체가 비교적 견고한 농업용수로에 대해서는, 기존의 공법에 비해, HPFRCC를 이용한 지수와 표면 보수가 뛰어난 비용대비 효과로 인하여 큰 시장으로 성장하고 있다.



<그림 6.1.7> 농업 용수로의 표면보수

마. 옹벽의 표면 보수

HPFRCC는, 발생하는 균열의 폭이 작기 때문에, 균열이 기 발생된 콘크리트 구조물 표면의 보수에 적절하게 이용될 수 있다.

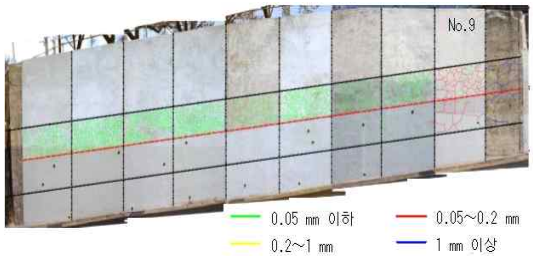
기후 현에 있는 중력식 콘크리트 옹벽(폭 약 18 m, 높이 약 5 m)은, 1970년경 건설되어 알칼리 골재반응에 의한 균열이 발생하였기 때문에, 1994년 균열에 수지 주입과 표면 피복이 행해졌다. 그러나 표면 피복에 재 균열이 보고되어, 2003년에 HPFRCC 뿜칠에 의한 표면 보수가 실시되었다. 3 종류의 보수재 (2 종류의 HPFRCC, 1 종류의 보수 모르타르), 3 종류의 보강근 (용접 철근망, 확장 메탈, 무보강), 2 종류의 균열부 처리(부착이 없는 영역을 늘리기 위한 씰이 있는 경우와 없는 경우)를 변수화 하여 총 9 구역을 나누어 시공을 실시하였다(<그림 6.1.8>). 뿜칠 전에, 워터 제트에 의해 표면을 바탕처리하였다. 옹벽의 하부 2 m에는, 보수재의 표면에 아크릴계 도료가 도포되었다. 코어 채취를 통해 확인한 콘크리트의 잔존 팽창량은 0.005~0.011으로써 적었으며, 뿜칠 두께는, 50~70 mm이었다.

HPFRCC에 의한 보수 부분에는, 시공 후 7개월까지는 균열이 관찰되지 않았으며, 균열폭은 시공 후 10개월 0.05 mm이하, 시공 후 24개월 0.12 mm이하였다. 24개월의 균열 발생 상황을 <그림 6.1.9>에 나타내었다. HPFRCC로 시공한 부분은 미세한 균열이 망상으로 발생하고 있음을 알 수 있었다.



<그림 6.1.8> 옹벽의 표면보수

한편, 일반적인 보수 모르타르에 의한 보수 부분([그림 9.9] 우측 No. 9)에는, 시공 후 1개월부터 균열이 육안으로 관찰되었으며, 균열폭은, 시공 후 3개월 약 0.03 mm, 10개월 약 0.2 mm, 24개월 약 0.3 mm였다. 38개월 (약 3년) 시점에서의 균열 관찰 결과도, HPFRCC의 균열폭은, 약 0.1 mm 이하 최대 0.2 mm를 넘지 않는 상태로 안정되어 있었으며, 일반 보수 모르타르의 표면에 비해, HPFRCC의 표면은, 표면의 먼지만으로도 균열이 관찰되지 않는 미세 균열특성을 보이고 있었다.



<그림 6.1.9> 균열발생 현황

바. 고가교의 표면 피복

HPFRCC는 균열폭이 작고, 기체나 액체가 투과 하기 어렵기 때문에, 콘크리트 구조물의 표면을 HPFRCC로 피복함으로써, 콘크리트 구조물의 중성화 방지가 기대된다. 장기적인 내구성이 요구되는 철도 고가교는, 중성화에 대한 예방 및 방지를 목적으로, 도막계 라이닝재에 의한 표면 보호공이 시공되어지는 경우가 있지만, 열차 주행에 의한 균열의 개폐 때문에, 도막계 라이닝재는 조기에 균열이 발생하기 쉽다. 이러한 문제를 극복하기 위하여, 휨 균열이 발행한 고가교의 보 부재에 대해서, 뿜칠에 의한 두께 10 mm의 HPFRCC가, 표면 보호공으로서 2005년에 시험 시공되었다 (<그림 6.1.10>). 또한 HPFRCC와 모체 콘크리트와의 부착성능을 확보하기 위해서, 앵커가 이용되었다.



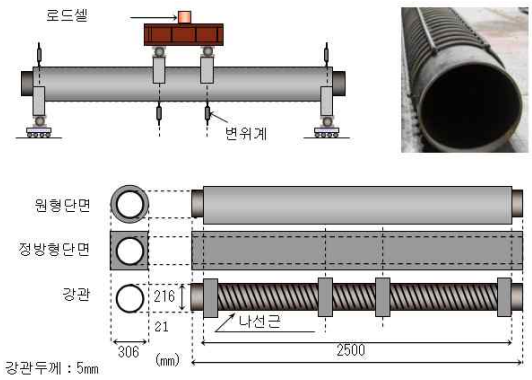
<그림 6.1.10> 철도고가교의 표면피복

2. HPFRCC와 강재와의 합성 부재의 성능과 적용의 가능성

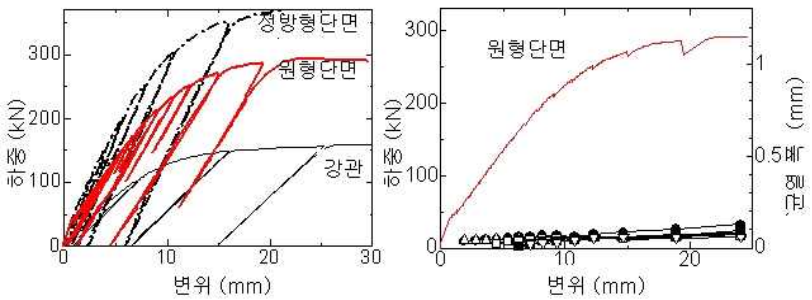
가. HPFRCC로 피복 한 강관의 휨성능

일본에서는 강관(두께 5 mm, 내경 206 mm, 길이 2,500 mm, 일반 구조용 탄소강)의 주위를 HPFRCC로 피복한 시험체 (원형 단면, 정방형 단면)와 강관만의 시험체를 제작해, 휨 재하시험을 실시하였다(<그림 6.1.11>). 피복 시험체에서 강관과 HPFRCC의 사이에는 75 mm간격 나선근(D10)을 용접하였으며, 축방향으로 철근(D10)을 6개 용접하였다. 시험체의 하중-변위 곡선과 원형단면 시험체의 하중-변위-균열폭 관계를 <그림 6.1.12>에 나타내었다.

균열폭은 현미경에 의해 관찰하였다. 이러한 결과로부터 알 수 있듯이, 강관을 HPFRCC로 피복함으로써, 초기 강성 및 최대 하중이 증가함을 알 수 있었다. HPFRCC의 균열폭은 최대 하중점 부근에서도 0.1 mm정도로 매우 작았다. 또한 강관이 항복하는 부분까지 재하 한 후에 다시 재하 하여도(Repeated Loading), 변형에 의한 균열폭이 작았다. 한편 충분한 부착성능 확보를 위한 철근 배치를 통하여, 강관과 HPFRCC는 파괴의 최종 단계까지 일체 거동을 나타냈다.



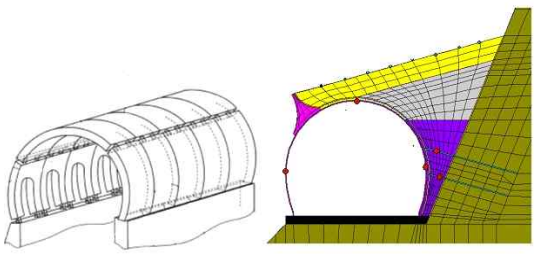
<그림 6.1.11> HPFRCC 강관피복



<그림 6.1.12> HPFRCC피복강관 시험체의 하중-변위곡선, 균열폭

나. 합성 부재 적용의 가능성

앞 절에서의 미하라 대교는, 강상판 위에 HPFRCC를 타설하고, FRP 프레이트 지벨로 양자의 일체화를 도모한 합성 부재이다. HPFRCC와 강판과의 합성 부재는, 터널 단면의 보강 부재나 기존 교각의 보강 부재에 적용을 생각할 수 있다.
HPFRCC로 피복 한 강관을 봉부재, 혹은 길이방향 면부재로서 이용했을 경우, 큰 충격 하중이나 지진력을 받아 강재가 항복하는 정도까지 부재가 변형해도, 내하력을 가지고 있을 뿐만 아니라, 균열폭 및 잔류 변위도 작고, 보수를 거의 필요로 하지 않는 구조물이 될 가능성이 있다. HPFRCC로 피복 한 강관은, 교각, 상판 구조부재, 복합 트러스(truss) 구조 부재 등에의 적용도 생각할 수 있다. 또한 <그림 6.1.13>에 나타냈듯이, 합성 부재를 PC강재로 연결한 낙석 방호 터널도 생각할 수 있다.



<그림 6.1.13> HPFRCC피복강관을 이용한 낙석방호터널

3. 소결

일본에서는, HPFRCC가 갖는 뛰어난 역학적 성능을 이용하여 교량상판이나 건축물용 뎀퍼에 적용이 이루어지고 있으며, 균열이 미세하게 분산하는 성능을 이용해 콘크리트 댐, 수로, 옹벽의 표면 보수가 행해지고 있다. 향후, HPFRCC의 지수성과 역학 특성을 활용한 터널복공에게의 적용, 큰 에너지 흡수능력을 이용한 낙석 방호 터널에의 적용, 강성 증가를 기대한 교량 부재에의 적용, 줄눈을 줄인 혹은 없엔 연속판이나 벽에의 적용, HPFRCC 표면에 발수제나 도료를 도포해 지수성이나 내구성을 높인 부재에의 적용 등, 새로운 적용의 확대가 기대된다. HPFRCC에 기포를 적극적으로 혼입하거나, HPFRCC를 섬유메쉬로 보강하는 것, 또는 HPFRCC로 목재나 H형강을 피복 하는 등의 여러가지 아이디어를 생각할 수 있다.
한편, HPFRCC의 이용을 확대하기 위해서는, 다음과 같은 과제가 있다.
・ 인장 시험 방법을 표준화 해, 인장 성능 및 균열 성능의 평가방법을 확립한다.
・ 인장 성능 및 균열 성능의 특징을 반영한 설계 방법을 확립한다.
・ 제조 및 시공성을 간편하게 함으로써, 저 비용화를 도모한다.
HPFRCC는 특수한 재료는 아니지만, 종래부터 사용되었던 섬유 보강 모르타르가 가

졌던 여러 역학적, 내구적 성능의 발상을 수동적 관점에서 능동적 관점으로 전환시킴으로써 시멘트복합체가 갖는 결함요인을 완화에서 억제로 변화시킨 재료이며, 균열폭을 작게 함으로써 인장력 또한 분담할 수 있도록 인성을 개량한 신소재라 할 수 있다. 그러므로 이러한 특징을 잘 이용한 적용 및 건설구조물에의 응용이 바람직하다.

2절 HPFRCC를 이용한 구조물 보수/보강공법에 대한 일본토목학회의 구조안전성 평가방법

1. 개요

최근 국내외적으로 휨 또는 인장력 작용 하에서 초기균열이 발생한 후에도 응력이 저하하지 않고, 변형 증가와 함께 응력이 지속적으로 증가하는 유사변형경화거동(pseudo-strain hardening behavior)을 보이면서 이 과정에서 균열폭이 일정하게 제어되는 복수의 미세균열인 멀티플크랙(multiple crack) 특성을 발휘하는 섬유보강 시멘트복합재료가 개발되어 적용이 추진되고 있다. 외국에서는 이러한 재료를, HPFRCC (High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites)라는 학술용어로 부르고 있고, 국내에서는 대표적 HPFRCC 재료의 일종인 ECC (Engineered Cementitious Composites)로 널리 알려져 있으며, 보다 구체적으로 재료의 특성을 표현하여 DFRCC (Ductile FRCC, 고인성시멘트복합재료)라는 용어가 쓰이기도 한다. 특히, RILEM에서는 HPFRCC 위원회 (TC HFC, 위원장; Victor C. Li 교수)를 두어 재료/부재의 성능 평가 지침을 제작하고 있는 상황이다. 이와 더불어 일본토목학회(이하 JSCE)에서는 이 재료를 복수미세균열형 섬유보강 모르타르라는 용어로 정의하여 복수미세균열형 섬유보강 모르타르 (HPFRCC)의 평가와 이용 연구소위원회(기간 : 2004.9~2006.9)를 구성하여, 학회 차원에서 설계시공·구조설계 규준(안)을 작성하는 작업을 추진하였다.

국내에서도 최근 3년 사이에 HPFRCC에 대한 개발 및 활용기술에 관한 연구가 본격적으로 추진되어 ECC 보수모르타르의 개발과 더불어 이 재료를 이용하는 구조물의 보수보강 특허공법이 등록된 바 있다. 이외에도 재료의 높은 연성을 활용하여 구조 부재에 적용하고자 하는 다양한 연구가 진행되고 있다. 그러나 HPFRCC의 설계·시공·성능 평가에 대한 기준(지침)을 정립하고자 하는 학회 차원의 논의는 이제 겨우 걸음마를 내디딘 단계에 있는 실정이다.

따라서 본 절에서는 현재 JSCE가 추진하고 있는 HPFRCC 재료의 구조설계 지침(안)에 있어, 본 재료가 보수·보강재료로서 사용되는 경우의 설계지침 및 간단한 설계식을 소개하고, 기존 실험결과와의 비교분석을 통하여 이를 검증하고자 한다. 이를 위하여 JSCE가 제시하고 있는 HPFRCC의 재료 특성값 (역학적 특성에 대한 설계값) 규정과 휨보강 및 전단보강에 대한 설계식을 살펴보고 향후 국내의 설계지침 제정을 위한 기초 자료로써 이를 활용하고자 한다.

2. JSCE에서 규정한 HPFRCC 재료 특성값

HPFRCC는 시멘트매트릭스와 보강용 섬유의 조합에 의하여 강도특성과 변형특성이

기존의 콘크리트 및 시멘트모르타르(폴리머시멘트 모르타르 포함)와 큰 차이를 보인다. 따라서 구조물이나 부재에 적용되는 경우 기존의 재료 특성값을 사용할 수 없다. 일반적으로 재료의 특성값은 식 (1)에 의해 평가될 수 있다.

$$C_v \leqq C_{vm} - k\sigma \quad (1)$$

여기서, C_v : 특성치
C_{vm} : 설계치의 평균치
σ : 설계치의 표준편차
k : 계수

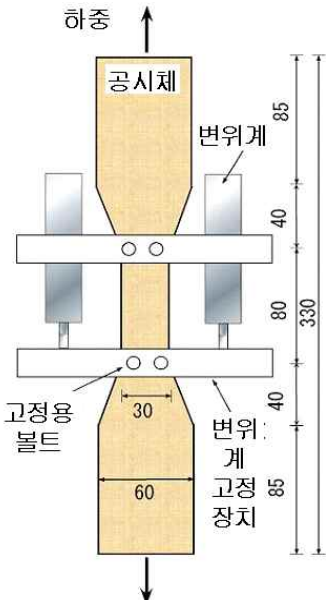
계수 k는 특성값보다 작은 값의 실험값을 얻을 확률로써 정규분포 하에서 5%인 경우에 계수 k는 1.64가 된다. 일반적으로 시멘트 복합체의 재료 특성값은 28일 재령 강도를 기준으로 하고 있으며, JSCE는 HPFRCC에 대하여도 이를 따르고 있다. JSCE에서 제안하고 있는 재료계수, 인장항복강도, 인장강도, 인장 극한변형률, 압축강도, 인장 응력-변형률 관계, 압축 응력-변형률 관계, 탄성계수, 포아송비 등을 살펴보면 다음과 같다.

1) 재료계수, γ_c

재료계수(γ_c) 는 주로 시공에 기인하는 것으로, 공시체와 구조물 사이의 재료의 오차, 경시변화 및 지속하중 영향 등을 고려한 계수로써, 극한한계상태의 검토에 있어서는 1.3 (fck ≤ 80 MPa)이며, 사용한계상태 검토에 있어서는 1.0으로 하고 있다.

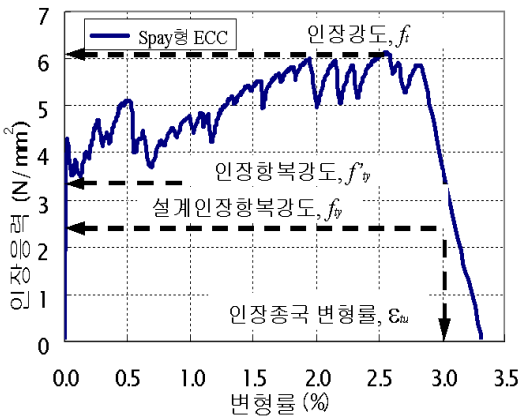
2) 설계인장항복강도, f_{ty}

기존의 시멘트복합체는 매우 취성적이어서 직접인장 시험방법이 특별히 규정되어 있지 않아 왔다. 따라서 HPFRCC의 1축 인장강도 평가 방법은 많은 연구자들에 의하여 제시되어 왔는데 일반적으로 섬유의 방향성, 시편의 크기, 시험 방법 등에 따라 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다.



<그림 6.1.14> 직접인장시험방법

JSCE는 인장강도 f_t를 구하기 위하여 <그림 6.1.14>와 같은 1축 직접인장 시험방법을 이용하도록 하고 있으며 이 시험에 의하여 결정된 응력-변형률 관계 곡선에서 응력의 최대값을 인장강도로 정의하고 있다 (<그림 6.1.15>). 또한 인장항복강도 f'_{ty}는 응력-변형률 관계에서 균열발생 직후의 값을 특성값으로 정하고 있고, 설계인장항복강도 f_{ty}는 인장항복강도를 재료계수로 나눈 값(f'_{ty}/γ_c)으로 정하고 있다. 또한 인장극한변형률 ϵ_{tu}는<그림 6.1.15>에 보인 바와 같이 응력-변형률 곡선의 하강 부분에서 f'_{ty}에 해당되는 변형률로 정의하고 있다.



<그림 6.1.15> 인장항복강도 및 인장극한 변형률의 정의

3.

3) 압축강도

HPFRCC의 압축시험은 콘크리트의 압축시험방법과 동일한 방법을 이용할 수 있다. 즉, 직경 100 mm, 높이 200 mm의 원통형공시체의 28일 재령강도를 압축강도로 한다. 다만 굵은 골재가 포함되어 있지 않은 경우에는 직경 50 mm, 높이 100 mm의 원통형 공시체를 이용할 수도 있다.

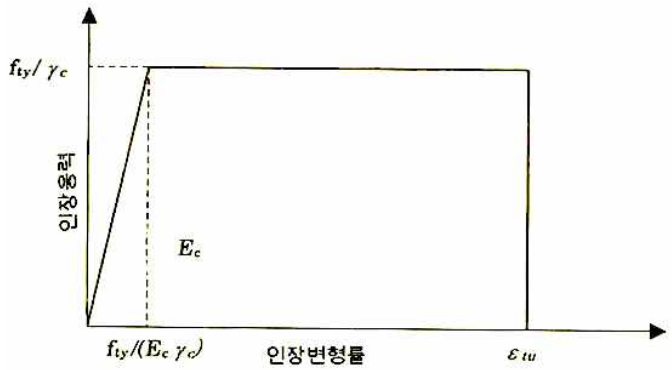
4) 인장 응력-변형률 관계

전술한 바와 같이, 1축 인장 하에서의 응력-변형률 관계는 콘크리트를 포함한 취성적인 시멘트복합체가 갖지 못하는 HPFRCC만의 고유한 특징 중 하나이다. 기존연구에 의하면, HPFRCC의 인장 응력-변형률 관계를 f'_{ty}를 항복 기준으로 하는 완전 탄소성 구성방정식으로 가정해도 부재 설계에는 무방하다. 그러나 안전성 측면에서, 설계인장항복강도 f_{ty}를 항복의 기준으로 하는 완전 탄소성 구성방정식을 이용하도록 하고 있다(<그림 6.1.16>).

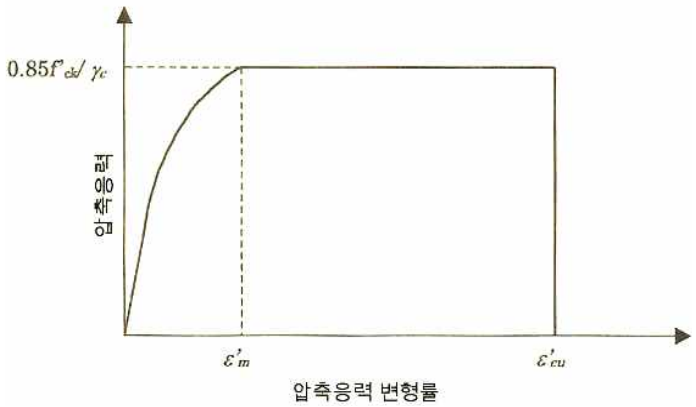
5) 압축 응력-변형률 관계

휨 부재 또는 휨과 축압축을 받는 부재에서 HPFRCC의 압축 응력-변형률 관계는 일반적으로 [그림 9.17]과 같이 나타낼 수 있으며 이 때 곡선부의 응력-변형률 관계는 식 (2)와 같다.

$$\sigma'_c = \frac{0.85f'_{ck}}{\gamma_c}\frac{\epsilon'_c}{\epsilon'_m}\left(2-\frac{\epsilon'_c}{\epsilon'_m}\right) \qquad (2)$$

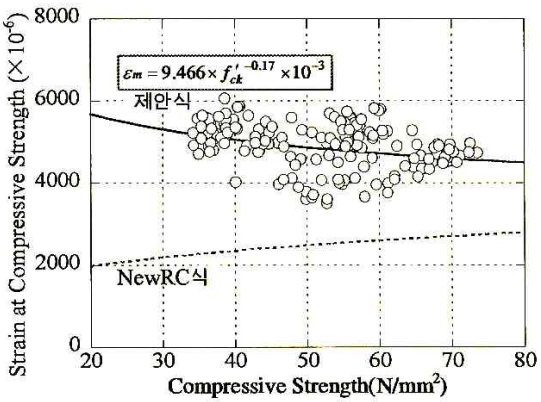


<그림 6.1.16> 인장 응력-변형률 관계



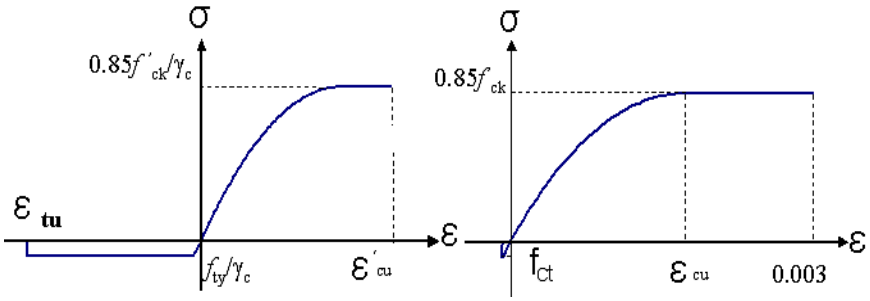
<그림 6.1.17> 압축 응력-변형률 관계

<그림 6.1.17> 에서 ϵ'_m과 ϵ_{cu}는 일반적인 콘크리트와 큰 차이를 보인다. 즉, 응력증가 곡선부의 최종점에 대한 변형률인 ϵ'_m의 경우, 일반적인 콘크리트의 값이 0.2% (0.002) 정도인데 반하여 HPFRCC의 경우는 [그림 9.18]과 같이 0.4% (0.004) 값을 초과하는 것이 일반적이다.



<그림 6.1.18> ϵ'_m의 실험 데이터

<그림 6.1.19>는 인장 및 압축 하에서의 HPFRCC와 보통콘크리트의 응력-변형률 관계를 비교하여 나타내었다. 그림에 보인 바와 같이 HPFRCC는 인장부에서 소정의 인장강도와 변형능력을 보유하고 있으며, 압축부의 최대 변형률이 서로 큰 차이를 보인다.

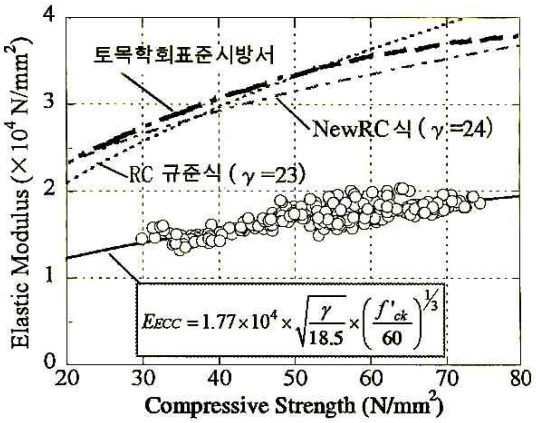


(a) HPFRCC (b) 보통 콘크리트

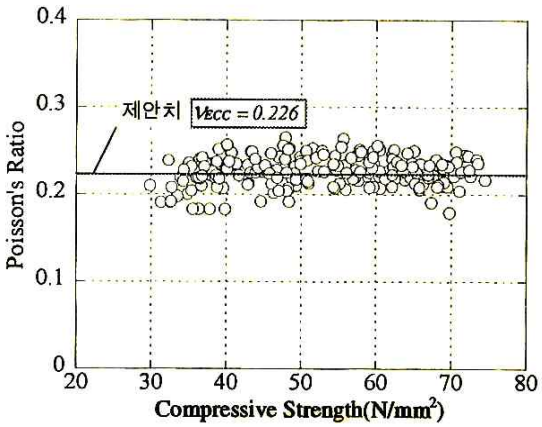
<그림 6.1.19> 1축 응력-변형률 곡선의 비교

6) 탄성계수, E_{ECC}

HPFRCC의 탄성계수는 콘크리트와 동일한 시험방법에 의해 얻을 수 있으며, 얻어진 탄성계수는 일반 콘크리트에 비하여 대략 1/2~2/3 정도의 값을 갖는다. <그림 6.1.20>은 탄성계수에 관한 실험값과 각종 기준에서 제시하는 규준값을 비교하여 나타내었다.



<그림 6.1.20> 탄성계수의 실험 데이터



<그림 6.1.21> 포아송비의 실험 데이터

7) 포아송비, ν_{ECC}

HPFRCC의 포아송비에 대한 실험값을 <그림 6.1.21>에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 HPFRCC의 포아송비는 일반 콘크리트가 갖는 값을 약간 상회하는 평균 0.226이다.

3. JSCE에서 규정한 HPFRCC의 구조안전성 평가방법

현재 HPFRCC의 활용은 크게, 토목구조물의 보수보강재, 건축구조물의 내진보강을 목적으로 한 끼움 벽 또는 내진디바이스, 내피로성을 갖는 교량 상판 보호재, 내화성능을 필요로 하는 구조물의 보수 또는 보수·보강재 등으로, 향후 재료의 고성능을 고려한 폭넓은 구조부재의 적용이 기대된다. 여기서는 이러한 재료가 구조부재에 적용되는 경우 부재의 구조설계시 재료특성을 반영할 수 있는 설계방법 및 구조안전성 평가 방법을 소개하였다. 이를 위하여 압축부재, 휨부재, 철근콘크리트부재에의 휨보강, 전단보강 등에 관하여 살펴보고자 하였다.

가. 축력에 대한 안전성 검토방법

축압축을 받는 부재의 축압축 내력 상한값 N'oud는 식 (3)에 의하여 산정한다.

$$N'_{oud} = (k_1 f'_{cd} A_c + f'_{yd})/\gamma_b \qquad (3)$$

여기서, A_c : HPFRCC의 단면적
f'_{cd} : HPFRCC의 설계압축강도
A_{st} : 축방향 철근의 전단면적
f'_{yd} : 축방향 철근의 설계압축 항복강도
k_1 : 강도의 저감계수 $(1-0.003f'_{ck} \leq 0.85)$,
여기서, f'_{ck}는 콘크리트의 설계기준강도(MPa)
γ_b : 부재계수, 일반적으로 1.3

축방향력을 받는 부재의 Md/N'd가 작은 경우에도 부재 축선 양단의 휨모멘트차가 일부 발생하면 내하력이 상당히 저감될 수 있다. 이러한 영역에 대한 안전성을 고려하기 위하여 설계 축방향 압축내력의 상한값에 부재계수 1.3을 적용한다.

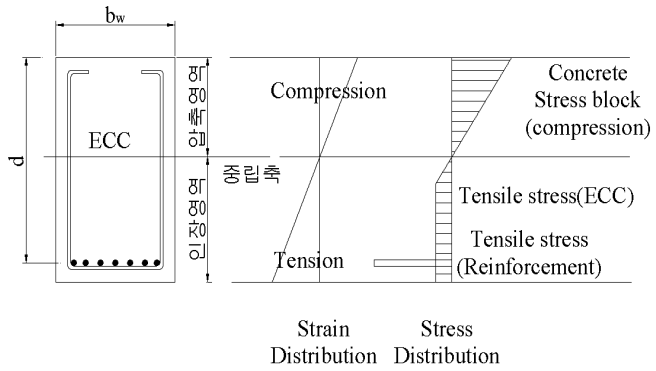
나. 휨 부재 또는 휨과 축력을 받는 부재에 HPFRCC를 적용하는 경우의 안전성 검토 방법

휨 부재 또는 휨과 축력을 받는 부재의 설계단면력, 또는 1방향 슬래브의 단위 폭 공칭휨내력은 다음 (i)~(iii)의 가정에 근거하여 계산한다. 이러한 경우, 부재 계수

γ_b는 1.1로 한다. 여기서는 부재 내에 HPFRCC가 전면적으로 사용된 경우를 대상으로 한다.

(i) 변형률은 단면의 중립축으로 부터 거리에 비례한다.
(ii) HPFRCC의 응력-변형률 곡선은 HPFRCC의 설계값을 근거로 결정한다.
(iii) 강재의 응력-변형률곡선은 일반적인 콘크리트 구조설계기준에 따른다.

HPFRCC는 1축 인장 변형률 경화 거동(Pseudo strain hardening) 특성을 나타내는 고인성 재료로써 안정적으로 인장응력을 전달할 수 있다. 따라서 일반 철근콘크리트 휨 부재에서 인장 영역의 콘크리트와 달리 인장 영역에 놓인 HPFRCC에서 발생하는 인장응력을 고려하여 부재의 극한한계상태를 검토한다. HPFRCC 휨 부재 단면의 변형률 및 응력의 분포를 개념적으로 나타내면 <그림 6.1.22>와 같다.



<그림 6.1.22> 변형률 및 응력 분포의 개념도

다. 축력이 없는 휨 부재의 인장 측에 HPFRCC를 보강한 경우의 안전성 검토 방법

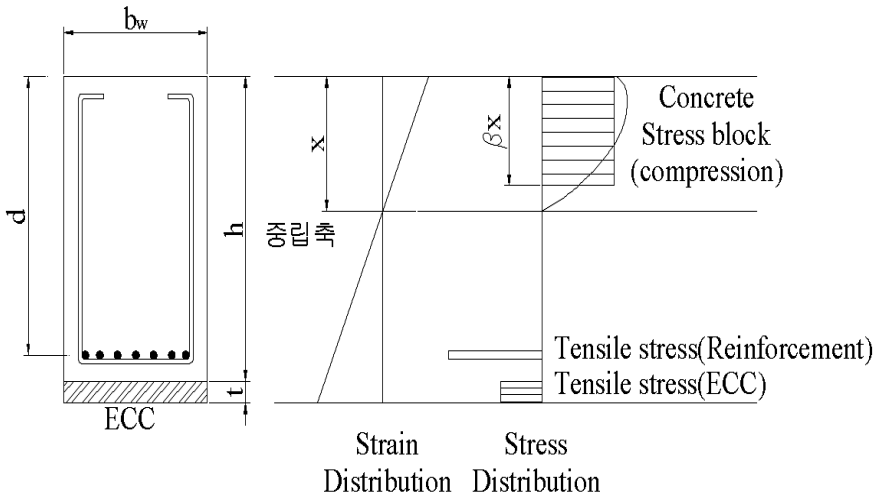
이 절에서는 HPFRCC를 이용하여 기존 철근콘크리트 휨 부재의 단면을 보강한 경우에 대한 안전성 검토 방법을 소개하고자 한다. 축방향력이 작용하지 않는 철근콘크리트 부재(단순보 등)의 인장 측에 HPFRCC를 타설(보강)하여, HPFRCC 전체가 인장을 부담하는 경우에는 콘크리트의 압축응력의 분포 및 HPFRCC의 인장응력의 분포를 <그림 6.1.23>에 나타난 직사각형 응력분포(등가응력블록)로 가정하고, 식 (4) 및 식 (5)에 의하여 휨 내력을 계산할 수 있다. 단, HPFRCC와 콘크리트는 적절한 방법으로 일체성이 확보되어 있어야 한다.

$$x = \frac{p_w d f_{yd} + t f_{ty}}{k_1 \beta f'_{cd}} \qquad (.4)$$

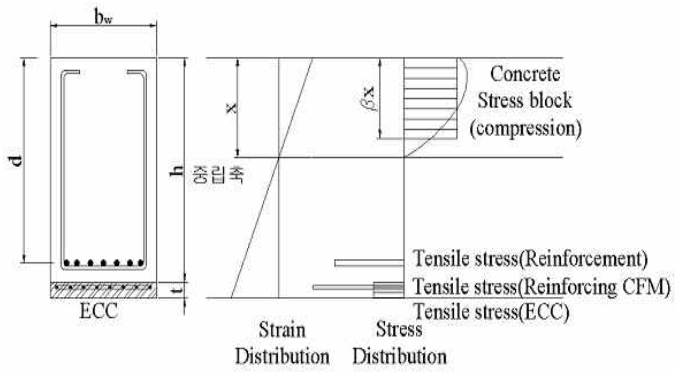
$$M_u = k_1\beta\left(1-\frac{\beta}{2}\right)b_w f'_{cd}x^2 + A_s f_{yd}(d-x) + f_{ty}b_w t\left(h-x+\frac{t}{2}\right) \quad (5)$$

여기서,

ρ_w : $A_s/(b_w d)$
A_s : 인장측 철근의 단면적
f_{yd} : 인장측 철근의 설계항복강도
f_{ty} : HPFRCC의 설계인장항복강도
k_1 : 강도저감계수 일반적으로 0.85
β : $0.52+80\epsilon'_{cu}$
ϵ'_{cu} : $\frac{155-f'_{ck}}{30000} \leqq 0.0035$
f'_{ck} : 콘크리트의 설계기준강도 ($f'_{ck} \leqq 80MPa$)



<그림 6.1.23> 등가응력블록



<그림 6.1.24> HPFRCC와 탄소섬유 메쉬(CFM)로 보강한 경우의 등가응력블록

또한, <그림 6.1.24>와 같이 기존의 단면보강공법과 조합을 하는 경우 (예를 들어 휨 부재의 하부 인장 측에 탄소섬유 봉, 아라미드섬유 봉, 탄소섬유 메쉬, 아라미드섬유 메쉬, 보강철근, 또는 기타 보강물을 배치하고, HPFRCC를 타설 (보강하여 보강재료 전체가 인장을 부담하는 경우)에는 <그림 6.1.24>와 같은 기존 철근콘크리트 응력분포에 인장측 하부의 HPFRCC와 보강물의 응력분포를 고려하고, 각각의 변형률 및 응력요소에 대한 적합조건(compatability)과 평형조건(equilibrium)을 만족하는 휨 내력 산정식을 유도하여 이를 이용할 수 있다. 한편, HPFRCC를 단순히 구콘크리트에 보강물을 일체시키기 위한 수단으로 간주하여 내력의 계산에는 포함하지 않더라도 사용성과 내구성 측면에서 기존의 보강방법에 비하여 보다 우수한 성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단한다.

라. 전단력에 대한 안전성 검토 방법

이 절에서는 HPFRCC와 보강물로 구성되는 부재 또는 철근콘크리트 부재의 일부분을 HPFRCC로 보강한 경우의 전단력에 대한 안전성 검토 방법을 소개하고자 한다. HPFRCC의 전단력 부담이 비교적 큰 경우에는 실험 등과 같은 합리적인 방법을 근거로 평가할 수 있다.

HPFRCC와 보강물로 구성되는 부재의 설계전단력 Vyd는 식 (6)에 의해 구할 수 있다. 설계전단력 Vyd는 HPFRCC의 매트릭스가 부담하는 전단력 Vcd, HPFRCC의 보강용 섬유가 부담하는 전단력 Vfd, 전단철근이 부담하는 전단력 Vsd의 합으로 표현할 수 있다. HPFRCC의 보강용 섬유가 저항하는 전단력이 크기 때문에 이러한 효과를 고려함으로써 합리적으로 전단 설계를 할 수 있다.

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{fd} + V_{ped} \qquad (6)$$

여기서, Vcd는 보강용 섬유가 부담하는 전단력을 제외한 HPFRCC 매트릭스의 설계전단력으로 식 (7)과 같다.

$$V_{cd} = \beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b_w d/\gamma_b \qquad (7)$$

여기서,

f_{vcd} : $0.7 \times 0.20 \sqrt[3]{f'_{cd}}$ (MPa)

여기서, $f_{vcd} \leqq 0.50$ (MPa)

β_d : $\sqrt[4]{1/d}$ (m)

단 $\beta_d > 1.5$의 경우는 1.5로 한다

β_p : $\sqrt[3]{100\rho_w}$
단 $\beta_p > 1.5$의 경우는 1.5로 한다
β_n : $1 + M_0/M_d$ ($n'_d \geq 0$의 경우)
단 $\beta_n > 2$의 경우는 2로 한다
β_n : $1 + 2M_0/M_d$ ($n'_d < 0$의 경우)
단 $\beta_n < 2$의 경우는 0로 한다
N'_d : 설계축방향압축력
M_d : 설계휨모멘트
M_0 : 설계휨모멘트 M_d에 대한 인장연단에 있어, 축방향력에 의해 발생하는 응력을 소거하는데 필요한 휨모멘트
b_w : 부재의 폭
d : 유효깊이
ρ_w : $A_s/(b_w d)$
A_s : 인장철근의 단면적
f'_{cd} : 콘크리트의 설계압축강도(MPa)

Vsd는 전단철근이 부담하는 설계전단력으로 식 (8)과 같다.

$$V_{sd} = [A_w f_{wyd}(\sin\alpha_s + \cos\alpha_s)/s_s]z/\gamma_b \quad (8)$$

여기서,

A_w : 구간 s_s에 있어 전단보강철근의 총단면적
f_{wyd} : 전단철근의 설계항복강도(400MPa이하)
α_s : 전단철근이 부재의 축과 이루는 각도
s_s : 전단철근의 배치간격
z : 압축응력 합력의 작용위치에서 인장철근 도심까지의 거리, 일반적으로 $d/1.15$
γ_b : 일반적으로 1.1

Vfd는 보강용 섬유가 부담하는 설계전단력으로 식 (9)와 같다.

$$V_{fd} = (f_{ty}/\tan\beta_u)\, b_w z/\gamma_b \quad (9)$$

여기서,

f_{ty} : HPFRCC의 경사균열에 직각방향의 설계인장항복강도
β_u : 축방향과 경사균열면의 각도, 단 β_u는 45°
γ_b : 일반적으로 1.3

Vped는 축방향 긴장재에 발생한 유효 인장력의 수평분력으로 식 (10)과 같다.

$$V_{ped} = P_{ed}\sin\alpha_p/\gamma_b \quad (10)$$

여기서,

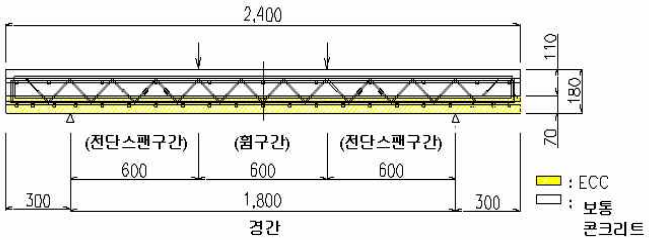
P_{ed} : 축방향 긴장재의 유효인장력
α_P : 축방향 긴장재가 부재축과 이루는 각도
γ_b : 일반적으로 1.1

보강용 섬유의 효과를 설계식에 반영하는 방법은 「초고강도 섬유보강 콘크리트의 설계·시공지침(안)」의 방법에 준한다. 매트릭스가 부담하는 전단력은 JSCE가 제정한 콘크리트 표준시방서[구조성능 조사편]에 준할 수 있다. 단 HPFRCC는 골재가 매우 작으므로, 경량 골재 콘크리트와 동등하게 사용하도록 한다.

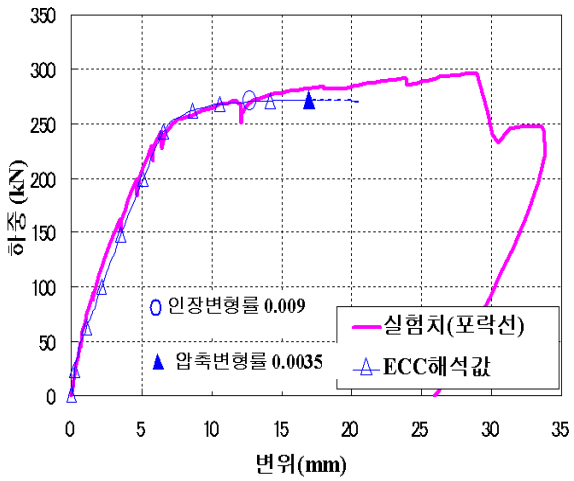
4. JSCE에서 제안한 설계방법의 검증

가. 휨 보강하였을 때 구조안전성 검증

앞단락과 같이 축력이 없는 휨 부재의 인장 측에 HPFRCC를 보강하는 경우, 휨 내력 산정방법의 타당성을 검증하기 위한 실험 개요는 [그림 9.25]와 같다.

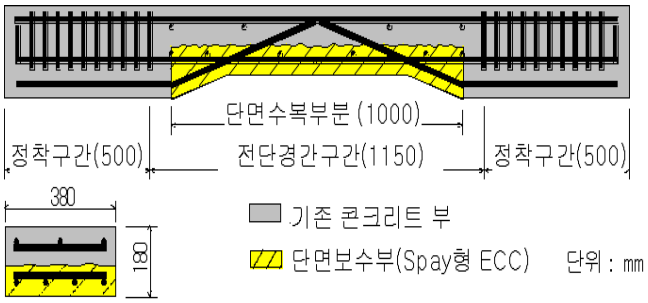


<그림 6.1.25> 휨시험체 개요

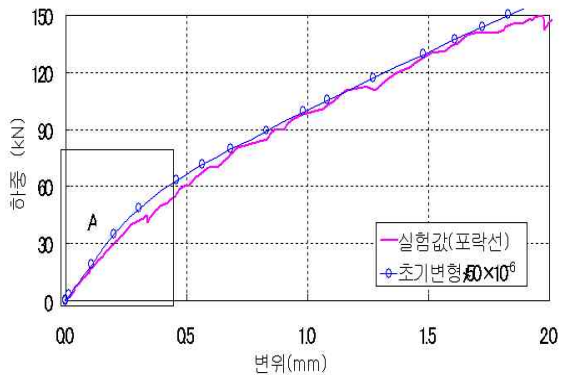


<그림 6.1.26> 실험값과 해석값의 비교

실험체는 높이 180 mm의 인장측 70 mm를 HPFRCC로 타설하여 트러스 철근과 일체시켰고 실험 결과와 해석 결과를 [그림 9.26]과 같이 비교하였다. [그림 9.26]에 나타난 바와 같이 해석값과 실험값이 매우 근사하게 나타나 JSCE 설계 방법의 타당성을 입증할 수 있었다. [그림 9.27]은 기존의 콘크리트를 제거하고 HPFRCC로 단면을 수복한 실험체로서 실험 결과([그림 9.28])에서 알 수 있듯이 JSCE 설계 방법에 근거한 해석값이 실험값을 매우 근사하게 예측하고 있어 이 방법의 타당성을 검증한 또 다른 사례이다.



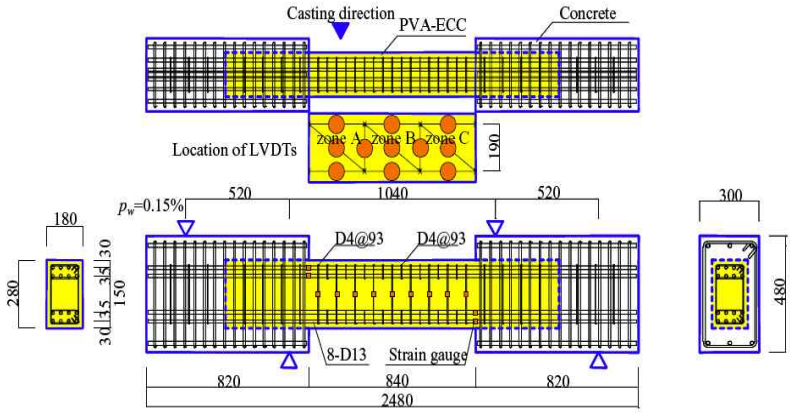
<그림 6.1.27> HPFRCC로 일부 단면을 수복한 실험체



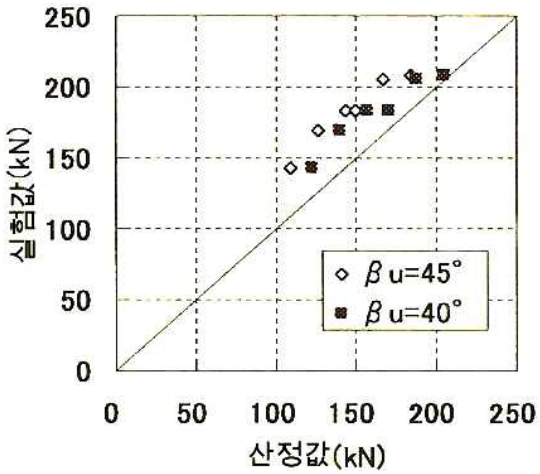
<그림 6.1.28> 실험값과 해석값의 비교

나. 전단 보강하였을 때 구조안전성 검증

<그림 6.1.29>에 나타나 있는 실험체를 이용하여 전단력 설계 방법에 대한 검증을 수행하였다. 실험체의 HPFRCC는 섬유혼입량을 1.5~2.0%, 전단철근비를 0, 0.05 및 0.3%로 하였다. <그림 6.1.30>에 나타난 바와 같이 앞단락의 전단력 산정식 (6)을 이용하여 예측한 값이 실험값을 안전 측으로 평가하는 것을 알 수 있다. 그러나 매우 제한적인 실험 데이터를 갖고 검증하였기 때문에 보다 단면이 크거나 철근비가 높은 경우 등과 같이 다양한 조건에 대한 검증이 필요하다.



<그림 6.1.29> 전단시험체 개요



<그림 6.1.31> 실험값과 해석값의 비교

5. 소결

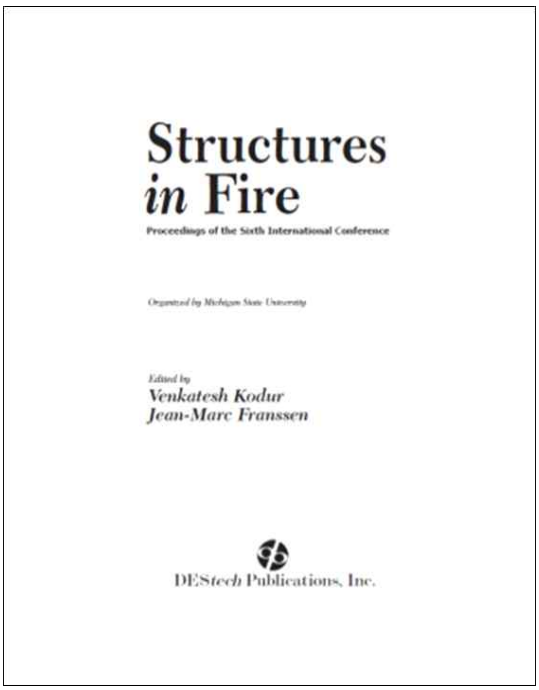
본 절에서는 현재 JSCE가 추진하고 있는 HPFRCC재료의 구조설계 지침(안) 중에서 보수·보강재로 사용되는 경우의 설계지침 및 간단한 설계식을 소개하였다. 본문에서 언급한 바와 같이 미국, 유럽, 일본 등지에서는 HPFRCC를 구조 부재에 적용하기 위한 작업으로서 학회 차원의 설계기준(안)을 제정하기 위하여 노력하고 있다. 이러한 국제적인 추세에 발맞추어 국내의 HPFRCC 연구 범위도 현재의 산발적 연구 단계를 넘어서 하루 빨리 현장 적용을 위한 준비 단계로 확대되기를 기대한다.

3절 슬래브 내화성능 위험성에 관한 국내외 연구 동향 현황

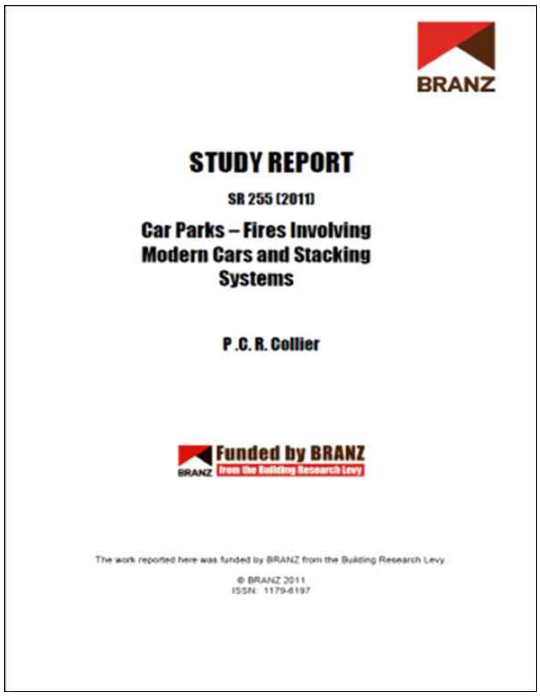
1. 개요

미국 미시간대학 Venkatech Kodur 등은 지하주차장에서 화재시 슬래브에 대한 내화대책을 위해 실험적인 측면과 해석적인 측면에서 연구를 수행하여 주차장 구조물의 화재안전을 구축하고자 하였다.

뉴질랜드 BRANZ에서 차량화재시 주차장 구조물의 화재 영향에 대한 보고서를 발간하였다. 보고서의 내용으로써 각국의 주차장화재에 대한 위험성과 차량 연소실험, 주차장 구조물을 대상으로 내화시험을 수행하여 안전성을 검토하여 내화성능에 대한 대책을 강구하였다.



(a) 미시간 대학의 주차장 화재로 인한 구조물의 영향에 대한 연구보고서



(b) 뉴질랜드 BRANZ의 주차장 구조물의 화재위험성에 대한 연구보고서

3. 기타사항

-해당사항 없음