

20CTAP
-C15188
2-02

보안 과제(), 일반 과제(☒) / 공개(☒), 비공개()발간등록번호()
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 20CTAP-C151882-02

2
0
0
m/s
급

고속충돌

저항형
카고메

트러스

내충격

구조기술개발

최종보고서

2020

국
토
사
업
본
부

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

200m/s급 고속충돌 저항형 카고메 트러스 내충격 구조기술 개발 최종보고서

2021 . 01 . 11 .

주관연구기관 / 전남대학교
공동연구기관 / 대전대학교

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제출문

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘200m/s급 고속충돌 저항형 카고메 트러스 내충격 구조기술 개발’(연구개발 기간 : 2019.04.15.~2020.12.31) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2021 . 01 . 11

주관연구기관명 :	전남대학교 산학협력단	(대표자)	김 재 국
공동연구기관명 :	대전대학교 산학협력단	(대표자)	황 석 연
참여기관명 :	(주)진영코리아	(대표자)	박 규 현

주관연구기관책임자:	황 재 승
공동연구기관책임자:	이 윤
참여기관책임자:	임 세 성

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

보고서 요약서

과제 고유 번호	20CTAP - C151882 - 02	해당 단계 연구 기간	2020.01.01. ~ 2020.12.31	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	200m/s급 고속충돌 저항형 카고메 트러스 내충격 구조기술 개발			
연구책임자	황재승	해당단계 참여연구원 수	총: 11 명 내부: 8 명 외부: 3 명	해당단계 연구비	정부: 206,000 천원 민간: 70,000 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 276,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 11 명 내부: 8 명 외부: 3 명	총 연구비	정부: 370,000 천원 민간: 130,000 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 500,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	전남대학교 산학협력단			공동연구기관:대전대학교 산학협력 참여기업명 : (주)인영코리아	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	
-------------------------	--

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)

보고서 면수

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 본 연구는 카고메 트러스 구조의 다형성에 기반한 200m/s급 고속충돌 저항형 (기존 RC 대비 관입깊이, 손상면적 20% 저감) 내충격 구조기술 개발을 목표로 하며, 궁극적으로 인적, 자연 재난재해에 대한 사회안전망 구축의 비전과 목적을 가지고, 다음과 같은 세부목표를 통하여 이를 실현하고자함. - 카고메 트러스 고속 충돌(200m/s 급) 저항 구조 시스템 개발 - 카고메 트러스 보강 부재 고속 변형(변형률속도: 0.001 이상) 해석 기술 개발 ○ 연구개발 내용은 상기 세부 목표를 세부 과제로 범주화하고 이를 달성하기 위한 내용으로 구성되어 있음. 개발하고자 하는 내충격 구조기술은, 고속 비상체 충돌과 같은 고속 충격하중에 대해 저항성이 향상된 카고메 트러스 보강 콘크리트 구조 시스템 개발과 초고속 구조거동을 수치적으로 효율적이며, 정밀하게 분석할 수 있는 해석기술 개발로 이루어져 있음. 1) 카고메 트러스 고속 충돌(200m/s 급) 저항 구조 시스템 개발 - 고속 충돌저항 카고메 트러스 형상 및 최적 매트릭스 재료 개발 - 변형 속도에 따른 충돌 저항성능 향상을 위한 부재 시스템 개발 2) 카고메 트러스 보강 부재 고속 변형(strain rate 0.001 이상) 해석 기술 개발 - 카고메 트러스 및 콘크리트 고속 변형 해석을 위한 재료 모델 개발 - 카고메 트러스 보강 부재의 고속 충돌 정밀 해석기법 개발				
연구개발성과	○ 카고메 트러스 보강 UHPC 내충격 시스템 시제품 ○ 카고메 트러스 보강 콘크리트 내충격 시스템 시제품 ○ 평균 오차율 8.6%인 카고메 트러스 보강 부재의 고속 충돌 정밀 해석기법 ○ 국내·외 논문 게재 총 14편 중 SCI급 논문 3편 게재, 학술발표 총 7편, 특허 출원 2건, 시제품 2건, S/W 2건				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 카고메 트러스 내충격 구조 원천기술 개발하고, 이를 재난재해 취약 중요 사회기반시설물의 내충격 실용화기술, 사업화와 후속 연계하여 건설 신산업 창출에 활용 ○ 고속 충격하중에 대한 구조물의 안전성 해석 및 설계기술을 국내 고유의 건설 엔지니어링 기술로 확보하여 국내 건설업체 기술력 향상과 해외 건설시장 경쟁력 제고에 활용				
국문핵심어 (5개 이내)	카고메 트러스	내충격 실험	재난재해	내충격구조	고속변형해석
영문핵심어 (5개 이내)	Kagome truss	Impact resistance test	Disaster	Structural protection	High strain rate analysis

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	5
가. 연구 개발의 필요성	5
나. 연구 개발의 목적 및 범위	6
2. 연구수행내용 및 성과	10
가. 연차별 연구 목표 및 내용	10
나. 연구 개발 성과	115
다. 연구 결과	120
라. 연구 추진 체계	121
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	125
가. 연구 개발의 최종 목표	125
나. 연차별 연구목표 및 주요 연구 내용 달성여부	125
다. 목표 달성여부	127
라. 목표 미달성 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)	128
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	130
가. 연구 개발 성과의 활용 방안	130
붙임. 참고 문헌	132

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구 개발의 필요성

1950년대를 기점으로 지구는 새로운 지질시대인 ‘인류세’로 접어들었다는 논의가 지질학분야에 활발히 진행되고 있음. 인류가 전체 지구시스템을 바꾸기 시작함에 따라 지구환경을 전에 없는 방식으로 바꾸어 놓았기 때문에 현세(충적세, Holocene) 대신 새로운 지질학적 연대기인 인류세(Anthropocene)를 사용해야한다는 것임. 미래 문명이 퇴적층에서 인류세를 알아볼 ‘지표화석’은 금속, 폴리머, 무기재료(콘크리트)와 같은 ‘기술화석(technofossils)’이며, 이러한 새로운 물질들이 전 지구적으로 퍼져나가면서 인류의 흔적을 퇴적층에 남기고 있음.

기술화석 중에서 콘크리트는 지구상에서 어떠한 합성 재료보다도 많은 양이 생산/소비되고 있으며, 나무, 철, 플라스틱 그리고 알루미늄을 포함한 모든 산업용 건설재료보다 약 2배 정도 건설에 사용됨. 또한 그 사용량의 증가 속도는 가속화되고 있음. 이는 20세기 중반 인구폭발, 급속한 산업화, 대량생산 및 소비로 인해 급격한 환경변화가 시작된 거대가속(Great Acceleration)의 시기의 도시거주, 상업시설, 도로, 항만 및 인공 댐 등 사회인프라의 주요 재료로 사용되었기 때문임.

지난 100여년간, 철근 콘크리트 구조물의 등장과 함께 콘크리트의 제조법, 기둥, 보 등 주요 구조요소의 철근배근 법은 각 부재의 물리적 통찰과 제조기술의 역사적 발달과정을 통해 축적된 전통기술임. 콘크리트 철근배근은 역학적 거동과 시공 경험의 집단적 최적화과정을 통해, 통칭할 수는 없지만, 주철근과 띠철근의 형태로 발달하였으며, 주로 일방향 배근만으로도 구조물의 설계가 가능한 보편기술로 확립, 적용되어왔음.

최근, 사회가 다분화되면서 인종, 종교, 정치 경제적 갈등에 의한 테러가능성이 커지고 있으며, 의도적 계획에 의한 폭발성 충격이나 우발적 사고에 의한 충격에 구조물이 노출되면서 손상 빈도가 높아질 것으로 예상됨. 전래 없는 테러, 폭발, 충돌 등에 의해 구조물에 가해지는 충격하중에 대해 구조물의 성능, 안전성을 확보하고자 하는 내충격(방호방폭)기술에 대한 다각적인 노력이 경주되어 왔음.

기존 내충격 구조는 철근의 배근 방법 향상, 구조물 주위에 방호벽 설치, 부재 치수 증가, 부재 외부에 FRP 시트 또는 FRC 벽으로 보강하는 방법을 사용함. 그러나 이러한 방법은 콘크리트의 취성적 성질과 낮은 에너지 흡수능력의 한계로 인하여 표면에 스폐링(Spalling)과 스캐빙(Scabbing)이 발생하는 문제점이 있음.

최근 콘크리트의 취성적인 성질을 개선하기 위하여 UHPFRC나 HDFRC와 같은 고강도/고연성 재료에 대한 연구가 있으나 여전히 내충격 구조물의 설계-시공 프로세스, 구체적인 배근상세는 기존의 일반 철근 콘크리트 설계 프레임에 준하여 이루어지고 있음. 또한 방호방폭의 해석적 측면의 연구로는 콘크리트의 초고속 변형률을 고려한 해석모델의 개발에 중점을 두고 이루어져 왔음.

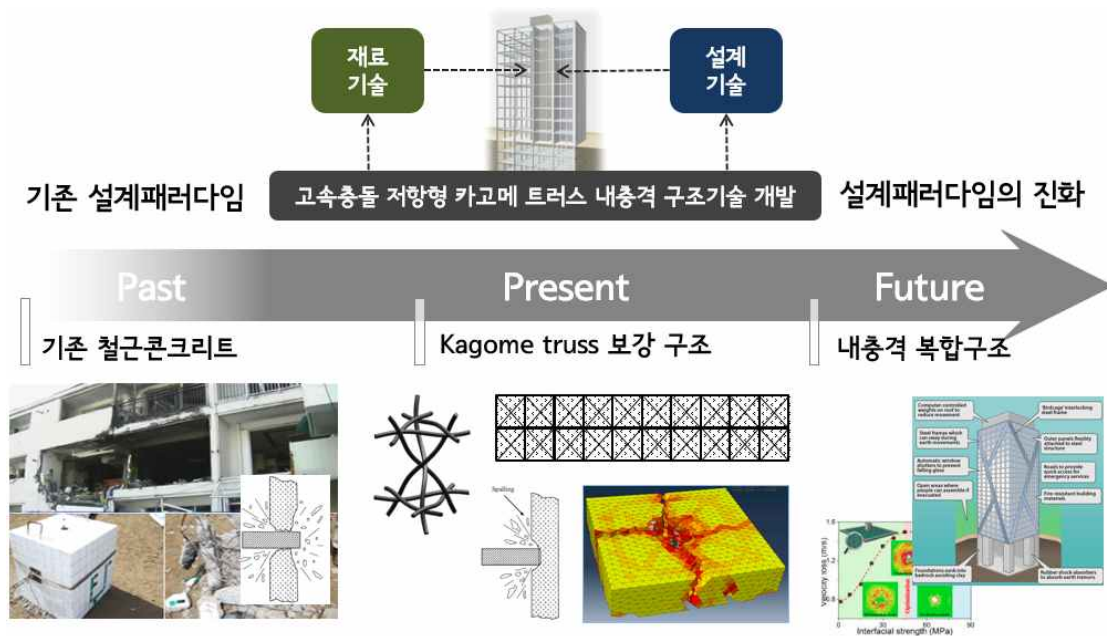


그림 1.1 카고메 트러스 구조의 다형성 기반 내충격 구조기술 개발을 통한 설계패러다임의 진화

전통적인 설계하중에 대한 기존 일반 구조물의 힘의 흐름과 분배와 달리, 폭발하중, 충격하중을 받는 방호방폭 구조물의 힘의 흐름을 보면, 인장과 압축을 포함한 다축의 힘이 형성되어 등방적으로 확산되고, 인장과 압축이 미소한 시간차로 동일지점에서 발생함.

기존 철근콘크리트 구조의 배근만으로는 하중의 분산이 등방적으로 이루어지지 않고, 파괴 패턴에 따른 취약부의 국부 파손에 의해 성능저하가 급격히 이루어지는 등 효율적인 대응이 어려운 실정임. 따라서 충격 속도에 따른 파괴 패턴과 구조물에 작용하는 하중특성을 고려하여, 충격 성능에 취약성을 가지는 기존 설계 프레임을 혁신하고 이를 대체할 새로운 형태의 내충격 구조기술이 필요한 상황임.

또한, 인적 자연 재난재해로터 인명과 재산을 보호하기 위한 국가차원의 적극적 정책을 통하여 재난재해 대비 내충격 구조물에 대한 국내 원천기술을 개발하고 엔지니어링 산업으로 확대, 국가 기간 산업으로 육성하여 반복되는 재해 재난의 악순환 구조를 끊고 새로운 선순환 구조를 구축하는 것이 시급이 요구됨.

이를 위해 본 연구에서는 내충격 구조물에서 충격 에너지를 효율적으로 분산, 상쇄할 수 있는 카고메 트러스 기반 내충격 구조시스템을 개발하고, 이들의 역학적 특성과 거동을 정밀하게 해석할 수 있는 기술을 개발하고자 함.

나. 연구개발의 목적 및 범위

카고메 트러스 구조는 경량, 고강도, 고강성의 다기능, 다형성을 가지며, 힘의 흐름, 변화에

적극적으로 대처할 수 있는, 현재까지 개발 생산된 최적의 등방 구조를 가지는 PCM(periodic cell metal) 구조임. 따라서 카고메 트러스 구조를 이용하여 내충격 구조물의 피폭 표면의 하중을 등방적으로 분산시킴으로써 기존 콘크리트의 방폭 취약성을 획기적으로 개선하는 새로운 형태의 콘크리트 결합 복합 구조체를 개발하여 충격하중에 대한 내충격 성능을 개선하는 건축 기술을 개발하고자함.

또한, 구조물의 혁신적인 내충격 성능향상을 위하여 카고메 트러스 구조에 기반한 새로운 배근법, 전단연결법을 개발하여 100년 동안 지속되었던 철근 콘크리트 구조물 설계의 프레임을 넘어선 차세대 내충격 설계법을 건인한다는 목적을 가지고 연구를 수행할 계획이며, 궁극적으로 인적, 자연 재난재해에 대한 사회안전망 구축의 비전을 견지하면서 연구를 수행해 나가고자 함.

카고메 트러스는 1951년 일본의 물리학자에 의하여 처음으로 명명된 것으로 대바구니를 엮어 짠 패턴에서 유래된 것임. 그림 1-2(a)와 같이 트러스 부재가 한 개의 절점에서 만나지 않고 어긋나면서 눈을 형성하는 형태를 말함. 2000년대 초반 카고메 트러스 구조를 갖는 새로운 다공질 금속의 성능 및 활용에 관한 연구가 시작되었으나 대량생산을 위한 제조법이 지연되다가 2000년대 중반 본 연구 주관기관에 의해 국내고유기술로 제조법이 개발되었으며 현재 국내 업체에 기술이전 되어 세계최초로 대량생산이 가능하게 되었음.

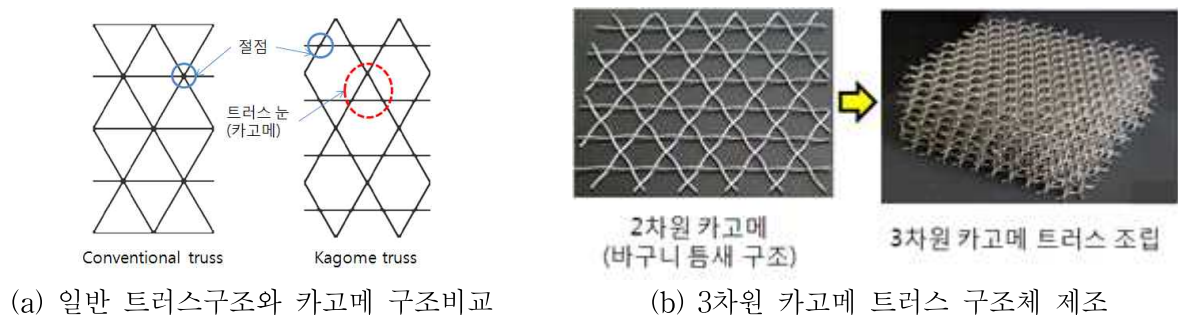
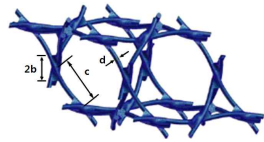


그림 1.2 카고메 트러스 구조 및 3차원 형태

카고메 트러스 구조는 절점에 접합되는 부재수가 작아 접합이 용이하고, 트러스 부재의 길이를 줄일 수 있어 좌굴에 안정적임. 압축 전단 변형능력이 크고, 소성단계에서 에너지 흡수능력이 높아 반복하중이나 피로에 대한 내구성을 보유하고 있음. 와이어의 직경, 피치 등을 조절하여 요구강도 및 강성, 변형을 설계가 가능하고, 단면크기, 체적 조절이 가능하여 슬래브, 기둥, 보, 벽체 두께에 따라 모듈화가 가능함.

최근 생산 설비가 구축되어 대량생산이 가능하게 되었으며, 제조기술에 대한 신기술 인증과 함께 한국과 일본에서 Hexino로 상표등록 되었음(그림 1.3).



(a) 3차원 카고메 단위셀
(직경d, 피치c 조절)



(b) 제조 설비 라인



(c) 대량 생산



(d) 상표등록
(일본)

그림 1.3 카고메 트러스 구조 대량 생산 설비 구축

내부공간이 대부분 비어있는 다공질 구조로써 부피에 비하여 경량이며, 다공질의 개방형 공간에 콘크리트 등 타 재료를 혼입하여 요구성능에 따라 다양한 제품군을 제조할 수 있는 매개 역할을 할 수 있음. 또한 등방성을 가진 고강도, 고강성의 PCM 구조로써 하중의 분산능력이 우수한 것으로 알려져 있음. 이러한 장점을 갖는 카고메 트러스는 특히 하중전달에 효율적인 구조 부재, 방호방폭 재료 뿐만 아니라 구조물 내진 보강재, 차음 방음재 등으로 사용할 수 있는 다기능, 다형성(polymorphism)을 보유하고 있음(그림 1.4).¹⁾



그림 1.4 카고메 구조의 다형성

카고메 트러스 제조기술과 재료의 역학적 우수성이 입증되었으나, 다양한 건설 엔지니어링 적용기술에 대한 연구가 미흡한 실정임. 카고메 트러스 기초기술을 건설기술과 융합하면 건설 엔지니어링 원천기술 확보뿐만 아니라, 향후 기술 실용화와 사업화를 통해 국내건설업체의 해외시장 개척과 시장진입의 활로가 점진적으로 확장 가능하고, 내충격 구조물 관련 건설 분야에서 세계시장을 선도할 수 있을 것으로 판단됨.

1) 폴리모피즘 (다형성, 多形性, polymorphism)이란 컴퓨터 IT용어로서 하나의 명령으로 여러가지 일을 수행할 수 있는 특성이라고 할 수 있음. 여러 가지 형태를 가지고 있다는 것으로서 하나의 메소드로 여러 형태의 메시지를 받아 동작할 수 있는 것을 뜻함. 카고메 트러스가 가지는 고유한 특성이 다양한 건설기술로 분화 가능한 것을 상징적으로 표현한 것임.

특히, 카고메 트러스 제조기술은 세계최초로 순수 국내기술에 의하여 개발된 것으로, 이에 기반한 고부가가치 건설 엔지니어링 원천기술을 국가지원을 통해 육성 발전시키면, 전방가치사슬(Forward Value Chain)로써 건설 엔지니어링 산업의 순이익을 증가시켜 새로운 국가 성장 동력 기반을 마련할 수 있을 것으로 기대됨.

경량성, 등방성, 전단저항력이 우수한 카고메 트러스를 적용하여 재료 및 구조물의 내충격성을 향상시키기 위한 기술 개발에 관한 국내 및 국외 연구현황은 전무한 상태이며, 국내외 최초로 연구가 진행되는 것임.

본 연구는 100년 동안 지속된 철근콘크리트의 설계프레임을 카고메 트러스 기반 구조물 설계기술로의 패러다임 전환을 통해 안정적인 거동과 효율적인 시공이 가능한 새로운 카고메 트러스 내충격 구조시스템을 개발하는 것으로서 Reinforce concrete(RC)에서 Kagome Concrete(KC)로의 패러다임 전환을 추구함.

본 연구에서는 카고메 트러스 구조로 기존 철근콘크리트의 내충격 취약성을 획기적으로 개선하는 새로운 형태의 콘크리트 결합 복합 구조체를 개발하여 충격하중에 대한 구조성능을 개선함으로써 구조물의 안전성을 혁신적으로 증진시키고자 하는 것임.

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연차별 연구 목표 및 내용

(1) 1차 년도 연구 목표 및 내용

(가) 주관연구기관 (전남대학교)

표 2.1 1차년도 주관연구기관 주요 연구활동 및 연구내용

주요 연구활동	세부 연구내용
■ 고속 충돌저항 시스템 분석	- 충돌속도, 접촉면적 등에 따른 충격하중 분석 - 충격흡수 메커니즘 분석
■ 카고메 트러스 형상 최적화	- 내부의 충전 물질에 따라 방호재의 강도, 에너지 흡수능력 등 충격저항성능 분석 - 내충격 시스템 형상 최적화
■ 내충격 구조 프로토타입 도출	- 사용목적등 적용환경, 용도에 적합한 내충격 시스템 분석 - 충돌저항 구조 프로토타입 도출
■ 축소 모형 제작	축소모형실험에 의한 충돌 성능 탐색

① 고속 충돌저항 시스템 분석

㉠ 충돌속도, 접촉면적 등에 따른 충격하중 분석

충격하중은 구조물에 부하되는 하중의 작용시간이 짧고 작용크기가 크다는 특징이 있다. 충격하중은 폭발하중과 충돌하중으로 구분할 수 있고, 폭발하중은 높은 온도와 압력으로 작용하는 하중을 의미하며, 충돌하중은 고속으로 발사되는 비상체가 충돌하여 발생하는 하중을 의미한다. 폭발에 의해 구조물에 작용하는 하중은 정압력과 부압력의 단계로 구분하며, 구조물 설계에 있어서 부압력은 고려하지 않는다.[Jo et al. 2014, Kim et al. 2007]] 그림 2.1은 폭발하중의 시간에 따른 성상을 나타낸다. 충격 하중에 의한 구조물의 응답은 최대하중 또는 압력보다는 하중 지속시간이 고려된 충격량에 의해 영향을 받는다. 그림 2.2는 정·부압에 대해 등가 치환된 압력 및 충격량을 나타낸다.

폭발효과는 폭발물의 효과를 상대적으로 비교하기 위하여 군용 표준 폭약 TNT를 기준(동일 무게)으로 하여 상대적 충격력을 나타내는 표준 곡선을 이용하며, 이를 통하여 다른 폭발물의 경우에 대하여 활용이 가능하다.

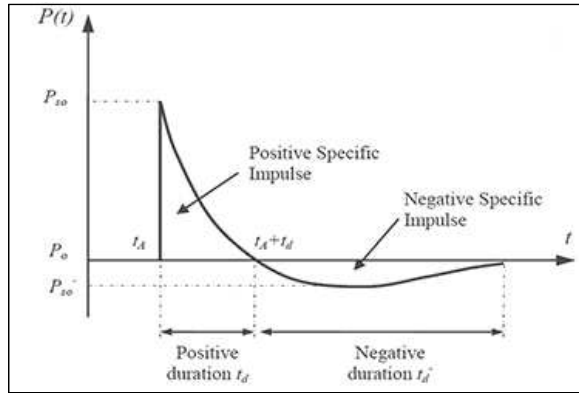


그림 2.1 폭발하중의 시간에 따른 성상

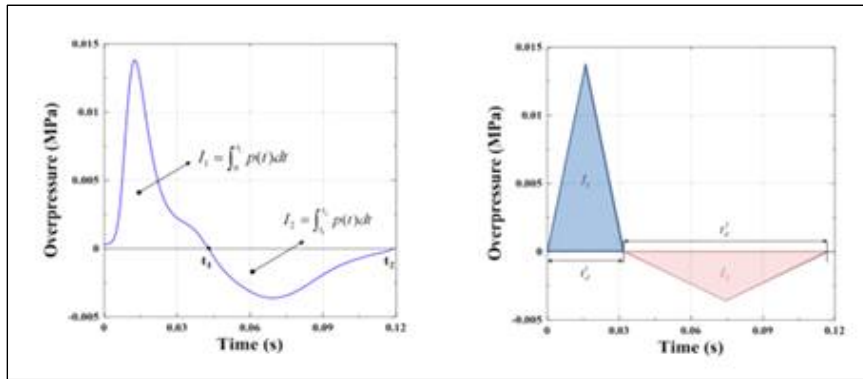


그림 2.2 정·부압에 대해 등가 치환된 압력 및 충격량

현재 폭발 하중에 대한 구조물의 안전성 평가는 비용과 시간, 폭약관리 위험과 제약이 따르기 때문에 수치해석을 통하여 수행하고 있는 실정이다. 유한 요소해석을 위한 폭발하중은 ConWep을 사용하여 산정하고 있다. ConWep이란 미공병단에 의해서 개발된 폭발하중 산정 프로그램으로써 폭풍파, 파편, 지표면 충격, 탄공 등의 효과를 고려한 전형적인 무기효과에 대한 폭발하중을 제공하고 있다. Conwep에서 제공하는 폭발하중의 압력-시간이력 곡선은 환산거리(Z)를 이용하여 나타낼 수 있고, 이를 이용하여 정압의 도달시간과 지속시간, 폭발압력의 최대값 및 총 충격량을 계산 할 수 있다. 환산거리(Z)를 이용하여 정압의 도달시간(T_a) 등 폭발 하중의 압력-시간이력 곡선의 주요 변수를 계산할 수 있고 식 2.1은 환산거리(Z)의 계산식을 나타낸다.

$$Z = \frac{R}{\frac{1}{W^3}} \quad (2.1)$$

여기서, R 은 폭발물로부터 대상까지의 거리(f_t), W 는 폭발물의 양($1b$)를 의미한다.

정압의 도달시간, 정압의 지속시간은 식 2.2와 식 2.3을 통하여 구할 수 있다.

$$\text{정압의 도달시간} = 10^{(C1 + C2 U + C3 U^2 + \dots + C8 U^7)} W^{1/3} \quad (2.2)$$

$$\text{정압의 지속시간} = 10^{(C1 + C2 U + C3 U^2 + \dots + C9 U^8)} W^{1/3} \quad (2.3)$$

또한, 정압의 최대값은 식 2.4를 통하여 구할 수 있다.

$$\text{정압의 최대값} = P_{inc} (1 + \cos\theta - 2\cos^2\theta) + P_{ref} \cos^2\theta \quad (2.4)$$

여기서, θ 는 입사각을 의미하며 입사각에 따른 입사압과 반사압은 식 2.5와 식 2.6을 통하여 계산할 수 있다.

$$\text{입사압} = 10^{(C1 + C2 U + C3 U^2 + \dots + C9 U^8)} \quad (2.5)$$

$$\text{반사압} = 10^{(C1 + C2 U + C3 U^2 + \dots + C10 U^9)} \quad (2.6)$$

또한, 최대 충격량은 식 2.7을 이용하여 구할 수 있으며, 입사각에 따른 입사충격량 및 반사충격량은 식 2.8, 식 2.9를 통하여 구할 수 있다.

$$\text{최대충격량} = I_{inc} (1 + \cos\theta - 2\cos^2\theta) + I_{ref} \cos^2\theta \quad (2.7)$$

$$\text{입사충격량} = 10^{(C1 + C2 U + C3 U^2 + \dots + C9 U^8)} W^{1/3} \quad (2.8)$$

$$\text{반사충격량} = 10^{(C1 + C2 U + C3 U^2 + C4 U^3)} W^{1/3} \quad (2.9)$$

여기서, I_{inc} 는 입사충격량, I_{ref} 는 반사충격량을 의미한다. 각 식의 계수 C 와 U 는 환산거리에 따라 각기 다르게 정의되며, 각 계수값은 Conwep에서 주어짐으로써 주요 변수가 계산된다.

폭발에 대한 해석은 앞서 전술한 환산거리를 이용한 일련의 계산과정을 통하여 압력-시간 이력곡선을 이용하여 이루어진다.

㉔ 충격 흡수 메커니즘

기존의 구조물에 대한 충격 보강 시스템은 섬유 보강재가 주로 사용되었다. 섬유 보강 복합 재료에서 탄소섬유, 유리섬유 등을 구조물 충격 보강재로 사용하는 경우, 구조물의 강성 증가는 이루어지나 취성적인 파괴모드를 유발하기 때문에 내충격 소요 저항 성능을 확보하기 어려운 상황이 발생할 수 있다.

섬유 보강재의 파괴기준은 인장강도에 도달하기 전, 선형탄성 거동을 가정하는 것이 대부분이며, 섬유 보강재와 콘크리트의 부착거동을 중심으로 기존에 연구가 이루어진 적이 있다.[Kim et al. 2007] 그러나 고속 충격 내지 폭발 거동 영역에서 섬유 보강재와 콘크리트의 점탄소성 부착거동을 정확하게 반영하기 어렵고, 부착효과에 대한 민감도가 낮아 대부분 이를 무시하고 폭발 거동 해석을 수행하고 있는 실정이다. UHSC(Ultra High Strength Concrete), PRC(Reactive Powder Concrete) 보강 콘크리트의 경우에는 고강도, 고강성에 의한 취성적인 형태의 파괴가 발생하나, 전반적 손상 정도는 일반 강도 콘크리트에 비해 작게 발생한다. 또한 RPC는 강섬유에 의해 균열 억제 및 박락 등이 방지된다.[Yi et al. 2009]

콘크리트 재료모델은 1-3축 압축과 인장거동을 신뢰성 있게 예측할 수 있는 재료모델(Concrete damage model)을 사용하고 있다. 1축 응력-변형률 특성을 사용한 모델은 거동을 정확히 예측할 수 없다는 단점이 있기 때문에 주로 3축 응력 상태를 고려하는 모델이 이용되고 있다. 콘크리트의 파괴한계는 3차원 주응력 공간에서의 면으로 표현하며 독립된 3개의 파괴면과 함께 충격하중에 대한 콘크리트 재료강도 증강이 추가된 파괴면과 변형률속도(strain rate)가 고려된다.

충격하중에 대한 철근의 거동은 동적 증가계수 및 강도 증진계수를 도입한 재료모델을 통해 예측하고 있다. 여기에 변형률속도 효과를 효율적으로 고려할 수 있는 Piecewise linear plasticity model을 적용하고 있으며, 철근의 변형률속도 효과는 철근의 실험자료에 근거한 유효소성 변형률과 항복강도와와의 관계를 이용하여 고려되기도 한다.

폭발하중에 대한 해석적 연구로써, 콘크리트 구조물의 보강을 위해 프리스트레스트 기법을 적용하여 저항성능을 향상시키는 방안도 고려되고 있다. 매우 높은 변형률 속도에 의해 콘크리트, 철근의 역학적 성질을 반영하고 프리스트레스트된 구조물과 비보강 구조물의 내충격 성능을 해석적으로 비교하여 프리스트레스 오입이 폭발하중 시 균열 제어에 효과적이라는 기존 연구가 있다.

폭발하중에 대한 철근 콘크리트 구조물의 거동은 해석적인 방법뿐 아니라 실험적 접근 방법을 통하여 이루어지고 있다. 기존 연구에서는 일방향 철근 콘크리트 슬래브를 대상으로 실제 화약 기폭 실험으로 데이터를 획득하여 구조 부재의 손상정도에 따른 피해기준산정을 압력-충격량 곡선(P-I Curve)적용하여 검증하였다.[Lee et al. 2017] 따라서 폭발압력과 충격량의 관계에 따라 일방향 슬래브의 피해기준을 산정하는 것을 실험을 통해 검증함으로써 일방향 슬래브의 파괴모드에 대한 P-I곡선의 적용가능성과 신뢰성을 평가하여 향후 유사 실험에 활용할 수

있을 것으로 판단된다.



그림 2.3 일방향 슬래브 피폭실험

㉔ 요약 및 결론

이 연구에서는 고속 충돌저항 시스템을 분석하였다. 세부적으로는 충돌속도, 접촉면적 등에 따른 충격하중을 분석하고 충격 흡수 메커니즘을 분석하였다. 이를 통하여 연구 초반 충격하중의 특성 및 충격 저항 메커니즘을 분석하여 충격하중에 대한 이해도를 높이고 충격해석을 위한 기초자료로 활용할 수 있도록 하였다. 또한, 충격 저항 시스템으로 사용되고 있는 재료의 충격 모델 및 검증실험에 대한 조사 분석을 통하여 카고메 트러스 구조에 의한 충격저항 모델 및 거동예측에 활용이 가능하도록 하였다.

② 카고메 트러스 형상 최적화

㉔ 충격저항성능 분석 및 내충격 시스템 형상 최적화

카고메 트러스는 1951년 일본의 물리학자에 의하여 처음으로 명명된 것으로 대바구니를 엮어짠 패턴에서 유래되었다. 그림 2.4와 같이 트러스 부재가 한 개의 절점에서 만나지 않고 어긋나면서 눈을 형성하는 형태를 나타낸다. 카고메 트러스는 2000년대 초반 카고메 트러스 구조를 갖는 새로운 다공질 금속의 성능 및 활용에 관한 연구가 시작되었으나 대량생산을 위한 제조법이 지연되다가 2000년대 중반 본 연구 주관기관에 의해 국내고유기술로 제조법이 개발되었으며 현재 국내업체에 기술이전 되어 세계최초로 대량생산이 가능하게 되었다.

카고메 트러스는 규칙적인 배열을 가지는 PCM(periodic cellular metals) 계열의 재료형성 구조로서 단위질량당 강도와 강성이 우수한 등방의 개방 구조체이다. 와이어를 직조(Woven)하여 제조하는 과정이 수반되므로 WBK(wire-woven bulk Kagome)라고 불리기도 하며, 그림 2.4는 카고메 트러스 구조성상을 나타낸다.

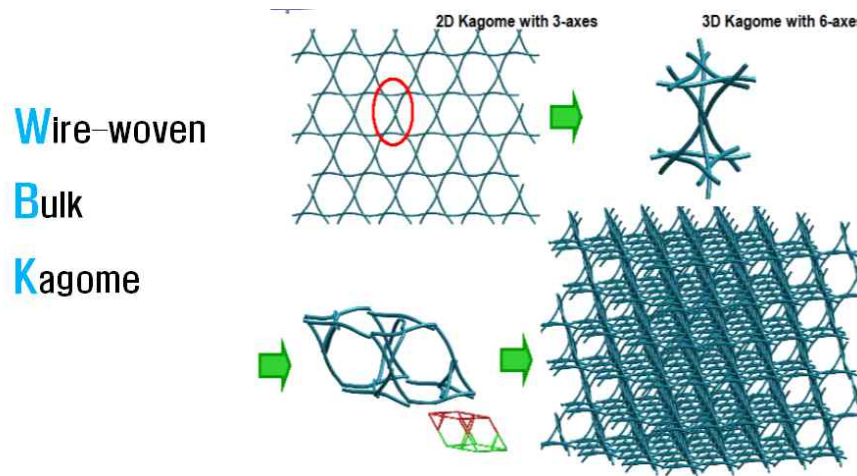
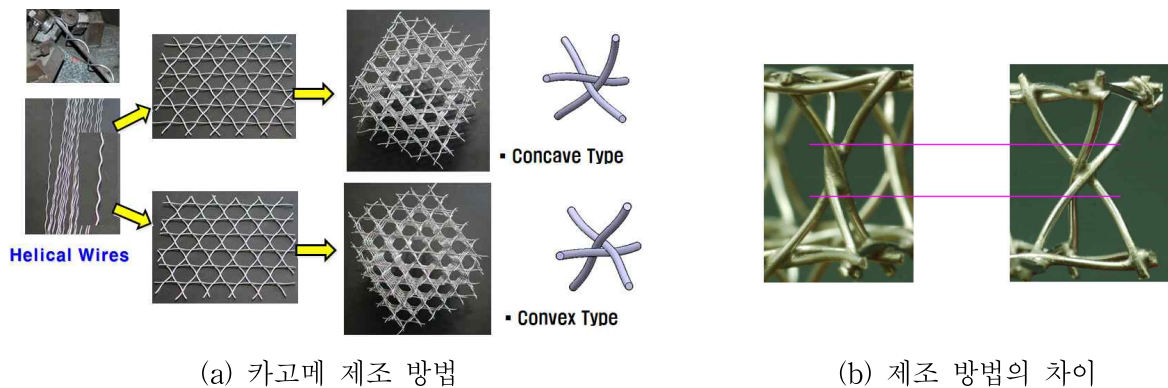


그림 2.4 카고메 트러스 구조성상

카고메 트러스는 제조 방법에 따라 Concave type과 convex type 두가지 타입으로 제조가 가능하며 강도, 강성에서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 제조 방법은 나선형의 와이어로 평면 카고메 구조를 제조하고 적층함으로써 3차원 구조체를 형성한다. 그림 2.5는 형상에 따른 카고메 종류를 나타낸다.

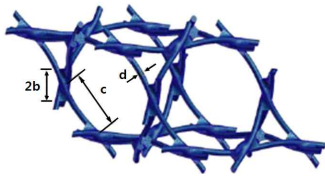


(a) 카고메 제조 방법

(b) 제조 방법의 차이

그림 2.5 형상에 따른 카고메 종류

카고메 트러스는 기존 Octet나 피라미드 트러스 구조에 비하여 절점의 개수가 작고 강도와 연성률이 크다는 장점이 있다. 카고메 트러스의 역학적 성질은 와이어의 재료물성(항복강도 σ_o , 탄성계수 E), 두께(d), 절점간 거리인 피치(c)에 의해서 결정되며, 그림 2.6(a)는 카고메 트러스의 이론적 압축강도 및 전단강도 구하는 방법을 나타낸다. 카고메 트러스 구조는 적층되면서 layer층을 구성하며 layer의 개수를 증가시키면서 크기를 결정하게 된다. 이론적 압축강도는 적층 layer의 개수에 따른 압축응력이 순차적으로 저항하면서 하중에 대한 저항성능을 가지고 있다.



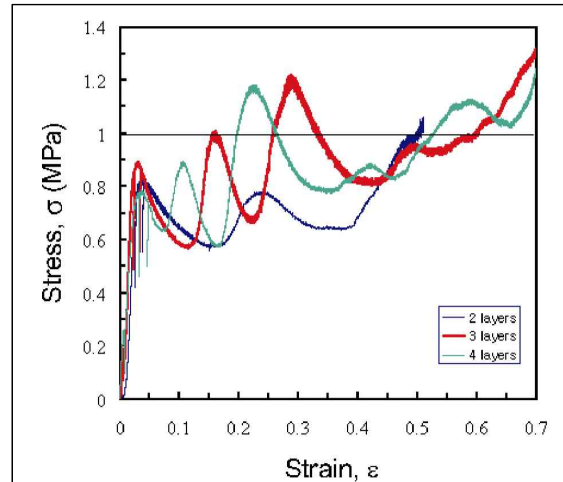
-압축강도

$$P_y = \frac{\sqrt{2}}{8} \pi \sigma_o \left(\frac{d}{c} \right)^2$$

- 전단강도

$$S_y = \frac{1}{16} \pi \sigma_o \left(\frac{d}{c} \right)^2$$

(a) 이론적 강도

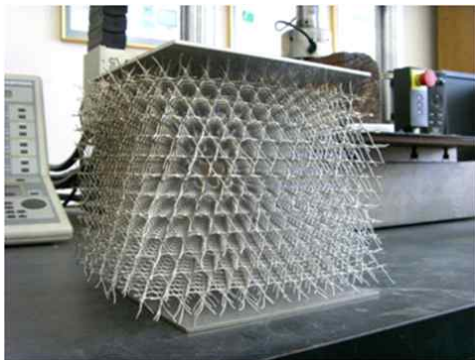


(b) Layer 개수에 따른 응력-변형률 특성

그림 2.6 카고메 트러스의 역학적 특성

카고메 구조의 내충격성은 보유하고 있는 전단, 압축강도를 이용하여 구현할 수 있으며, 카고메 구조를 부재 연결재나 전단연결재로 사용하여 내충격성을 향상시킬 수 있다.

그림 2.7과 같이 카고메 구조에 상하판을 연결하여 카고메 구조가 외부로 노출되는 것을 방지하고 충돌하중이 판재에 입사각으로 작용한 후 순차적으로 카고메 구조에 의한 에너지 흡수를 기대하는 방식을 가질 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 그림 2.8과 같이 카고메 트러스 사이에 충격하중을 흡수하거나 보강할 수 있는 재료를 삽입하여 보유 전단, 압축강도를 향상시키고 충격성능을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

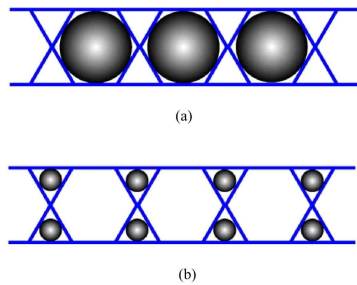


(a) 고층 layer 내충격시편



(b) 저층 layer 내충격 시편

그림 2.7 카고메 트러스 구조 상하부에 판재를 설치한 내충격 구조 시스템



(a), (b) 에너지 소산 물질 충전 방식

(c) 기존 자동차 충돌 방지 시스템 카고메 대체

그림 2.8 하이브리드 카고메 구조에 의한 내충격 성능 향상 시스템

카고메 트러스 구조는 대부분의 공간이 비어있고, 큰 전단강도와 압축강도를 가지고 있기 때문에 이질 재료와의 연결재로 사용이 가능하며, 카고메 빈공간 전체를 콘크리트로 충전하여 카고메 트러스의 강한 구속력으로 내충격 성능을 증진하는데 활용될 수 있다. 또한, 카고메 트러스 상하부를 철판 대신 콘크리트를 판재로 설치하여 내충격재로 사용하는 것이 가능하다. 콘크리트의 종류로는 일반 콘크리트에서부터 고강도, 고인성 콘크리트를 사용함으로써 사용목적 및 용도에 따라서 조정이 가능하다는 장점이 있다.

그림 2.9와 그림 2.10과 같이 일면 충전된 카고메 내충격 구조는 바닥판에 설치하여 카고메 빈공간은 단열과 충격분석으로 사용하고 일면 충전된 면은 바닥구조를 형성하여 충격음을 줄이는 것으로도 활용이 가능하다.



(a) 일면 충전된 카고메 내충격 구조



(b) 양면 충전된 카고메 내충격 구조

그림 2.9 카고메 연결재



그림 2.10 일면 카고메 연결재의 바닥구조재 활용

㉠ 요약 및 결론

이 연구에서는 카고메 트리스 형상 최적화를 목표로 내부의 충질 물질에 따라 방호재의 강도, 에너지 흡수능력 등 충격저항성능을 분석하였고 내충격 시스템 형상 최적화 방안을 모색하였다. 카고메 PCM 구조의 특성을 분석하고, 트리스 구조를 구성하는 나선형 와이어의 연결, 접합방법에 따른 형상특성을 분석하였고, 카고메 구조를 구성하는 와이어의 직경 및 피치에 의한 이론적 압축, 전단강도, 적층수(layers)에 따른 거동을 분석하여 충격저항 시스템으로써의 적용가능성을 정립하였다. 또한, 카고메 구조의 충격저항성능을 개선하기 위한 하이브리드 시스템(카고메 빈공간에 충격흡수물질 충진)을 도입·제안하여 카고메 구조의 내충격 활용성을 높였다. 마지막으로 카고메 구조와 고강도, 고인성 콘크리트와의 접합을 통해 새로운 형상을 제시하여 충격저항시스템으로써의 적용가능성을 탐색하였다.

③ 내충격 구조 프로토타입 도출

㉡ 기존의 내충격 시스템 분석

충격하중은 그림 2.11과 같이 허리케인에 의한 나무, 자동차 등의 충격, 교량 난간이나 교각에 가해지는 트럭이나 차량에 의한 충격, 테러(폭탄, 비행기 등)에 의한 건물 폭파, 공장의 다양한 원인에 의한 폭발 등 매우 다양하다. 전통적으로 충격하중 저항 성능을 향상시키는 방법으로는 철근콘크리트(RC) 구조에서 철근의 배근 방법을 향상, 구조물 주요부위 주위에 방호벽 설치, 부재 치수 증가, 부재 외부에 섬유보강 폴리머(FRP) 시트 또는 섬유보강 콘크리트(FRC) 벽으로 보강 등의 방법이 있다. 이러한 방법은 RC 구조물의 충격하중에 의한 피해를 저감시키는데 효과적이다. 그러나 콘크리트의 취성적 성질과 낮은 에너지 흡수능력의 한계로 인하여 표면에 스폐링(Spalling)과 스캐빙(Scabbing)이 발생하는 문제가 있다.



그림 2.11 충격하중의 종류

기존 연구에 의하면 비상체의 고속충돌에 의한 콘크리트 복합재료의 파괴형태는 관입 (penetration), 원뿔형 균열(cone cracking), 표면박리(spalling), 균열(cracks), 배면박리 (scabbing), 관통(perforation) 등으로 정의되고 있다.[Li et al. 2005] 그림 2.12는 일반적인 고속 비상체에 의한 고속충돌시, 실험체의 파괴형태를 나타내고 있다. 이러한 파괴형태는 단독적인 형태로 발생하지 않고 대부분 조합된 형태로 나타난다.[Li et al. 2006, Li and Tong 2003] 예를 들어, 고속비상체에 의하여 실험체가 파괴되었을 경우, 관통 및 배면박리가 함께 발생하거나, 고속 비상체가 관통되지 않고 관입되었을 경우, 관입 및 균열이 함께 발생하는 등의 경우이다.

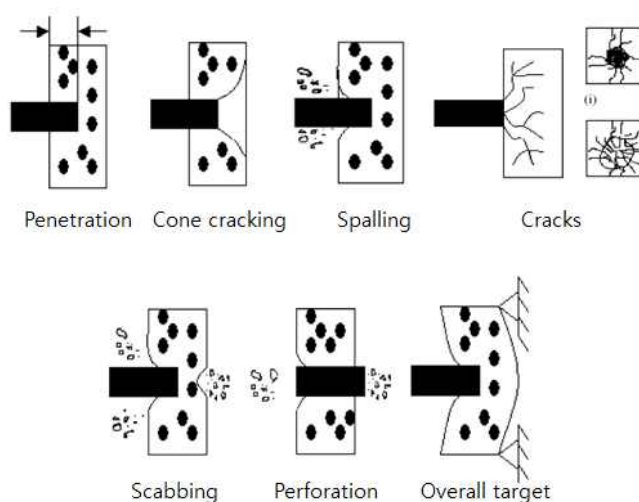


그림 2.12 일반적인 고속 비상체 충격에 의한 파괴형태

미국국방연구위원회인 NDRC(national defense research committee)는 비상체에 의한 고속충돌을 받는 구조물의 내충격성을 이론적으로 계산할 수 있도록 계산식을 제안하고 있다.[Kennedy 1976, Rahman et al. 2010] 제안된 계산식을 통하여 구조물이 비상체에 의한 충격하중을 받았을 경우, 구조물의 관입 깊이, 관통 한계 두께, 배면박리 한계 두께 등을 해석적으

로 파악할 수 있다. 식 2.10과 식 2.11은 관입 깊이에 대한 제안식을 나타낸다.

$$\frac{x}{d} = 2 G^{0.5} \text{ for } G \leq 1 \quad (2.10)$$

$$\frac{x}{d} = G + 1 \text{ for } G \leq 1$$

$$G = 3.8 \times 1.0^{-5} \frac{NM}{d_p \sqrt{f_c}} \left(\frac{V_0}{d_p} \right)^{1.8} \quad (2.11)$$

여기서, N 은 비상체 형상계수(flat :0.72, hemispherical : 0.84, blunt : 1.0, sharp : 1.14), M 은 비상체 질량, f_c 는 복합재료의 압축강도, V_0 는 비상체 속도, d_p 는 비상체 직경, x 는 관입깊이를 의미한다.

관통 한계 두께에 대한 제안식은 식 2.12, 식 2.13과 같다.

$$\frac{h_e}{d} = 3.19 \left(\frac{x}{d} \right) - 0.718 \left(\frac{x}{d} \right)^2 \text{ for } \frac{x}{d} \leq 1.35 \quad (2.12)$$

$$\frac{h_e}{d} = 1.32 + 1.24 \left(\frac{x}{d} \right) \text{ for } 1.35 \leq \frac{x}{d} \leq 13.5 \quad (2.13)$$

여기서, h_e 는 관통한계 두께를 의미한다.

또한, 배면박리 한계 두께에 대한 제안식은 식 2.14, 식 2.15와 같다.

$$\frac{h_s}{d} = 7.91 \left(\frac{x}{d} \right) - 5.06 \left(\frac{x}{d} \right)^2 \text{ for } \frac{x}{d} \leq 0.65 \quad (2.14)$$

$$\frac{h_s}{d} = 2.12 + 1.36 \left(\frac{x}{d} \right) \text{ for } 0.65 \leq \frac{x}{d} \leq 11.75 \quad (2.15)$$

여기서, h_s 는 배면박리 한계 두께를 의미한다.

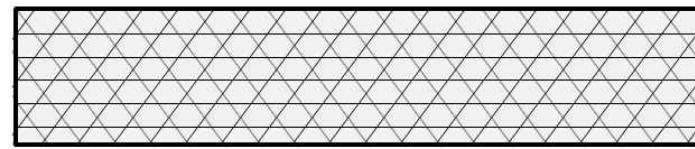
㉡ 충돌저항 구조 프로토타입 도출

내충격 저항성을 높이는 방법은 크게 재료 자체의 에너지 흡수 능력을 키우는 것이고, 충격

하중의 특징을 이해하고 그에 적합한 구조를 개발하는 것이다. UHPC(Ultra-high performance concrete)는 높은 압축강도(150 MPa 이상), 고유동 성능(Slump flow 650 mm 이상), 섬유혼입을 통한 취성파괴의 방지를 통한 고에너지 흡수 성능을 갖고 있다. 기존 연구에서 콘크리트의 내충격성을 향상시키기 위해서는 매트릭스 강도를 높이고 강섬유를 혼입하는 것이 효과적이며, 이에 따라 UHPC가 우수한 내충격성을 나타낸다고 보고하였다. 또한 Yoo 등(2017)은 UHPC의 섬유특성, 섬유방향, 실험체 크기 등이 내충격성에 미치는 영향에 대하여 보고하였으며, Maalej 등(2005)은 섬유보강 콘크리트가 고속 비상체 충격하중 하에서 일반적인 콘크리트보다 충격 저항성능이 향상된다고 보고하였다. 다만, HDFRC는 Spalling, Scabbing, 손상영역 감소에는 효과적이지만 관입 깊이 감소에는 크게 효과가 없는 것으로 나타났다. 따라서 강도가 높으면서 연성이 있고 유동성이 좋아 시공성이 우수한 UHPC를 매트릭스로 사용하고 카고메 트러스로 보강한 구조가 내충격 구조로 최적임을 도출하다. 따라서 이 연구에서는 관입깊이와 손상면적을 감소시킬 수 있는 고속충돌 저항 카고메 트러스 콘크리트 복합재료의 제조 방법을 2종류의 방법으로 제안하였다.

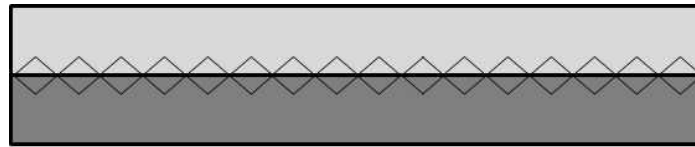
첫 번째 방법은 기존 강섬유 보강 UHPC(Ultra-high-performance concrete)에 카고메 트러스 보강을 실시하여 충격 저항 성능을 향상시키고자 하였다. 충격하중을 받게 되는 구조물은 관통되는 경우 전단파괴가 발생하며, 충격지점에서 압축과 인장이 동시에 나타나는 특성이 있다. 카고메 트러스는 앞서 진술한 바와 같이 등방성, 경량성 및 높은 전단강도를 가지고 있기 때문에 기존 방식과 비교하여 충격하중에 대한 저항성을 높일 수 있다. 또한, 카고메 트러스 구조가 다공질 셀을 가지고 있기 때문에 기존 철근배근과 동일한 방법으로 카고메 트러스를 보강한 뒤 콘크리트를 타설하는 방식으로 제작이 가능하다. 그림 2.13(a)는 기존 강섬유 보강 UHPC에 카고메 트러스를 보강하는 제조 과정을 나타낸다.

두 번째 방법은 종류가 다른 2가지 매트릭스를 각각 전면과 배면에 배치하여 실험체를 구성하는 방법이다. 그림 2.14와 같이 충격하중을 받게 되는 구조물은 비상체가 충돌하면 충돌지점에서 압축파가 발생하고 실험체 전체에 압축변형을 일으킨다. 이후 배면에서 자유표면을 만나 반사 인장파가 발생한다. 따라서 비상체가 충돌하는 전면은 강도가 높은 매트릭스를 구성하고, 인장파가 발생하는 배면은 연성이 높은 매트릭스를 구성함으로써 충격 저항성능을 향상시킬 수 있다. 그러나 전면과 배면을 구성하는 매트릭스가 다르기 때문에 비상체가 충돌하였을 때, 일체화 거동을 나타내지 않고 매트릭스의 계면에서 접착이 파괴될 우려가 있다. 따라서 카고메를 연결재로 사용하여 각각의 매트릭스가 일체화 거동을 할 수 있도록 하였다. 그림 2.13(b)는 결합재를 조합하는 방법 및 카고메 연결재를 사용하여 실험체를 제조하는 과정을 나타낸다.



□ 콘크리트  카고메 트러스

(a) 카고메 트러스 보강 콘크리트 복합재료



□ 매트릭스1 □ 매트릭스2  카고메 연결재

(b) 카고메 연결재를 사용하고 결합재 구성방법을 달리한 콘크리트 복합재료

그림 2.13 고속충돌 저항 카고메 트러스 콘크리트 복합재료의 제조 방법

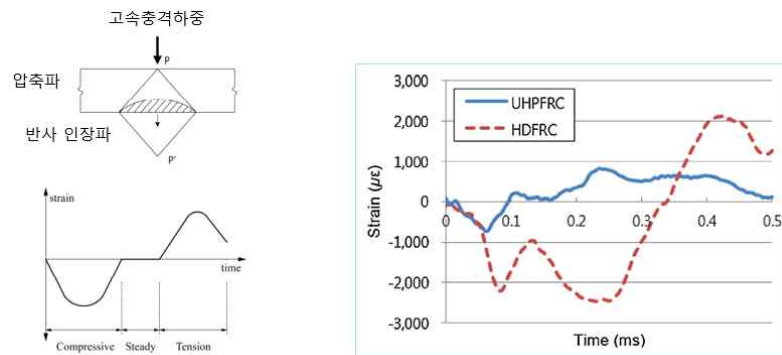


그림 2.14 충격하중의 특징과 그에 따른 부재의 거동 특성

㉔ 요약 및 결론

이 연구에서는 내충격 구조 프로토타입을 도출하고자 하였다. 이를 위하여 사용목적 등 적용 환경, 용도에 적합한 내충격 시스템을 분석하고 충돌저항 구조 시스템 프로토타입을 도출하였다. 먼저 내충격 구조 프로토타입을 도출하기 위한 문헌 조사 결과, 내충격성을 향상시키기 위해서는 매트릭스 강도를 높이고 강섬유를 혼입하는 것이 효과적이며, 이에 따라 UHPC가 우수한 내충격성을 나타내는 것을 확인하였다. 또한 섬유보강 콘크리트가 고속 비상체 충격하중 하에서 일반적인 콘크리트보다 충격 저항성능이 높은 것으로 나타났다. 고연성 복합재료의 경우 관입 깊이에는 효과가 거의 없는 것으로 나타났으며, 스폐링, 스캐빙, 손상영역 감소에는 효과적인 것으로 나타났다. 기존의 충격하중 저항 성능 향상방법은 철근콘크리트(RC) 구조에서 철근의 배근 방법 향상, 구조물 주요부위 주위에 방호벽 설치, 부재 치수 증가, 부재 외부에 섬유

보강 폴리머(FRP) 시트 또는 섬유보강 콘크리트(FRC) 벽으로 보강 등이 있으나 콘크리트 자체의 취성적 성질과 낮은 에너지 흡수능력의 한계로 인하여 표면에 스폐링과 스캐빙이 발생하는 것을 막기가 쉽지 않았다. 따라서 내충격 구조 시스템은 UHPC를 매트릭스로 사용하고 카고메 트러스로 보강하는 방법이 최적임을 확인하였다. 또한 전면 압축과 발생 후 배면에서 인장파가 발생하는 충격파의 특성을 고려하여 전면과 배면에 UHPC와 고연성 복합재료를 배치하는 방법도 고려하였다.

④ 축소 모형 제작

㉠ 축소모형실험에 의한 충돌 성능 탐색

충돌저항 구조 프로토타입을 도출한 것을 바탕으로 매트릭스의 강도가 높고 강섬유를 혼입한 UHPC와 섬유를 보강하여 변형성능을 높인 섬유보강 복합재료의 축소 모형을 제작하고, 비상체 고속 충돌 실험을 실시하여 충돌 성능을 조사하였다. 매트릭스의 강도가 매우 높고 강섬유를 혼입한 강도지향성 복합재료를 UHPFRC(ultra-high-performance fiber-reinforced composite)라 명명하였고, 합성섬유를 혼입하여 변형성능이 매우 높은 섬유보강 복합재료를 HDFRC(high-ductile fiber-reinforced composite)라 명명하였다. 축소 모형의 크기는 가로 × 세로가 20 cm × 20 cm이며 두께는 4 cm와 6 cm로 달리하여 제작하였다.

복합재료의 강도 및 연성에 따른 충돌 성능을 탐색하기 위하여 축소모형실험을 실시하였다. 이를 위하여 2종류의 재료구성을 통하여 실험체를 제작하였고, UHPFRC의 사용 재료 및 배합은 표 2.2 (a)와 같고 HDFRC의 사용 재료 및 배합은 표 2.2 (b)와 같다. 고강도 복합재료인 UHPFRC 배합의 결합재는 1종 보통포틀랜드시멘트와 지르코니아 실리카흙이며, 시멘트와 지르코니아 실리카흙의 비율은 중량비로 1대 0.2이다. 이 연구에서 사용한 지르코니아 실리카흙은 산화규소가 96 % 이상이며 실리카흙과 화학성분은 유사하지만, 분말도 80,000 cm²/g 정도이다. 지르코니아 실리카흙은 공극 충전 효과와 포졸란 반응을 통하여 재료의 밀도를 향상시켜 강도를 증진시키고, 입자 충전밀도를 증가시키면서 유동성을 향상시키기 위해 사용되었다. 충전재는 산화규소 성분이 99% 이상인 재료로서 밀도는 2.60 g/cm³이며, 크기는 시멘트와 지르코늄 실리카의 중간 정도인 평균 입경이 2.2 μm의 크기를 갖고 있다. 충전재는 시멘트와 지르코늄 실리카 사이를 채우는 역할을 통해 충전밀도를 증가시켜 유동성을 향상시키고, 경화 후에는 초고성능 콘크리트를 밀실하게 함으로써 강도 증진 및 내구성을 향상시키기 위해 사용되었다. 규사는 밀도 2.62 g/cm³이고 평균 입경이 0.5 mm인 것을 사용하였다. 혼화제로는 팽창제, 수축저감제, 고성능감수제, 소포제를 사용하였다. 시멘트 및 사용한 재료의 화학성분과 입도분포곡선은 표 2.3 에 제시되어 있다.

고연성 섬유보강 복합재료인 HDFRC를 제조하기 위해 사용한 결합재는 알칼리 활성 고로슬래그로서 모재료인 고로슬래그는 3종 분말도(4,030 cm²/g)이며, 비중은 2.91이다. 활성화제로는 분말형의 수산화칼슘(Ca(OH)₂)과 황산나트륨(Na₂SO₄)이 사용되었고, 각각 고로슬래그의 중량 대비 7 % 및 3 %를 대체하여 혼입되었다. UHPFRC와 마찬가지로 섬유의 분산성이 최적화 될 수 있는 매트릭스의 유동상태를 만들기 위하여 고성능감수제와 증점제를 혼입하였으며, 혼합과

정에서 의도치 않은 기포 생성을 억제하기 위하여 소포제를 사용하였다.

표 2.2 (a) UHPFRC의 배합

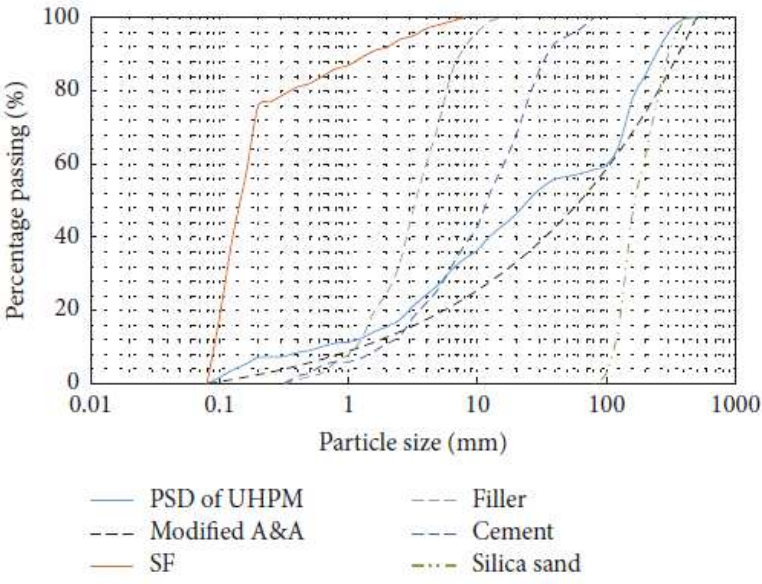
Binder		W/B	충전재	잔골재	팽창제	수축 저감제	소포제	고성능 감수제	강섬유 (Vol. %)
시멘트	지르코니아 실리카흙								
0.8	0.2	0.19	0.24	0.88	0.06	0.008	0.0006	0.023	1.50

표 2.2(b) HDFRC의 배합

Binder			W/B	소포제	고성능 감수제	PE 섬유 (Vol. %)
GGBFS ¹⁾	Ca(OH) ₂	Na ₂ SO ₄				
0.895	0.075	0.030	0.32	0.001	0.004	1.75

1) GGBFS : ground-granulated blast furnace slag

표 2.3 화학성분

재료	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	MnO	etc.
시멘트	65.8	18.5	4.5	3.3	3.4	2.2	0.3	1.1	-	0.9
GGBFS	40.4	30.6	13.8	0.5	8.0	4.0	0.9	0.5	0.5	0.8
원재료 의 입도분포 곡선										

보강섬유는 고강도재료인 UHPFRC에는 직경 200 μm , 길이 19.5 mm 및 인장강도 2,500 MPa을 갖는 강섬유가 사용되었고, 고연성재료인 HDFRC에는 직경, 길이 및 인장강도가 각각 12 μm ,

18 mm 및 2,700 MPa을 갖는 PE(polyethylene) 섬유가 사용되었다. 강섬유와 PE 섬유의 물리적 특성은 표 2.4와 같다.

표 2.4 보강섬유의 물성

종류	길이 (mm)	직경 (μm)	인장강도 (MPa)	밀도 (g/cm^3)	탄성계수 (GPa)
Steel	19.5	200	2,500	7.8	200
PE	12	18	2,700	0.97	88

UHPFRC의 혼합은 분말형 재료인 시멘트, 지르코니아 실리카흙, 충전재, 잔골재, 수축저감제 및 팽창제를 넣고 약 10분간 혼합하였다. 건비빔이 종료된 후, 액상형 재료인 혼합수, 고성능감수제, 소포제를 혼합하고, 최적의 유변학적 특성을 확보할 때까지 혼합하였다. 유변학적 특성이 최적화되면, 섬유를 혼입하여 5분 동안 고속으로 혼합하여 섬유 분산성을 확보하였다. 섬유 분산성이 최적화되면 마지막으로 소포제를 넣고 저속으로 1분 동안 혼합하여 기포제거 및 안정화를 실시하였다.

HDFRC의 혼합은 분말형 재료인 고로슬래그와 알칼리 활성화제를 넣고 약 1분 동안 건비빔을 실시하였다. 건비빔이 종료되면 배합수를 혼입한 후, 약 1분 동안 혼합하면서 고성능감수제와 증점제를 넣고 섬유가 분산될 수 있는 유동상태를 확보하였다. 최적의 유동상태를 확보한 이후, PE 섬유를 혼입하고 약 4분 동안 혼합하였다. 마지막으로 소포제를 넣고 저속으로 1분 동안 혼합하여 기포제거 및 안정화를 실시하였다.

혼합이 완료된 후 충돌 성능을 탐색하기 위한 축소 모형을 제작하였다. 축소 모형의 크기는 가로 $\times$ 세로가 20 cm $\times$ 20 cm이며 두께는 4 cm와 6 cm로 달리하였다. 축소 모형 제작 후, 23 ± 3 °C와 상대습도 60 ± 10 %의 양생실에서 48시간 동안 기건양생을 실시하였다. 이 후 재령 28일까지 양생온도 23 ± 3 °C의 양생수조에서 수중양생을 실시하였다.

충돌 성능은 고속 비상체 충돌 실험을 통하여 평가하였으며, 표 2.5는 고속 비상체 충돌 실험의 실험 조건 및 변수를 나타낸다. 고속 비상체 충돌 실험에 사용된 비상체는 금속 재질이며, 전면 형상이 반구형인 비상체를 사용하였다. 비상체의 무게와 직경은 각각 66.8 g, 25 mm이며, 발사체의 속도는 225 m/s로 비상체를 발사하였다. 발사체의 속도는 가속 관의 끝부분에 설치되어 있는 속도 측정 장비를 이용하여 측정하였다. 발사체의 무게와 속도로부터 계산된 충격 에너지는 1,691 J이다. 고속 비상체 충돌 실험에 있어서, 실험체의 구속 조건은 실제 구조물과 동일하게 완전히 구속될 수 있도록 축소 모형 실험체 각각의 모서리 4개 부위를 고정하였으며 그림 2.15(a)는 고속 비상체 충돌 실험에 사용한 실험체의 형상 및 설치 방법을 나타낸다. 또한 그림 2.15(b)는 고속 비상체 충격실험의 실험 방법을 나타낸다.

표 2.5 고속 비상체 충돌 실험 조건 및 변수

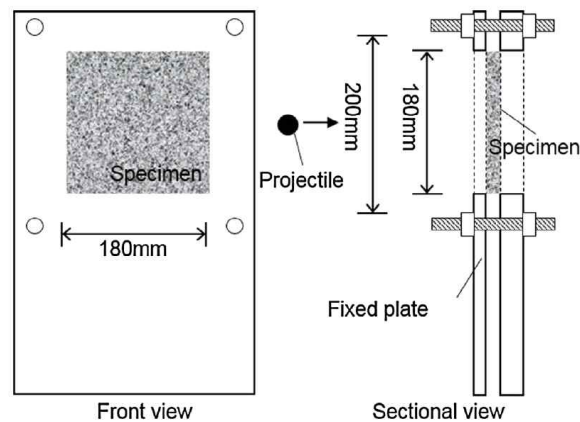
비상체 질량	66.8 g
비상체 속도	225 m/s
비상체 직경	25 mm
충돌 에너지	1,691 J
실험체 크기	200 mm × 200 mm
실험체 두께	40 mm, 60 mm

UHPFRC와 HDFRC 배합의 파괴성상은 비상체 충돌 직후의 실험체 형상을 육안으로 관찰한 후 전면 박리, 배면 박리, 균열, 관입 및 관통 등의 여부를 판단하였다.

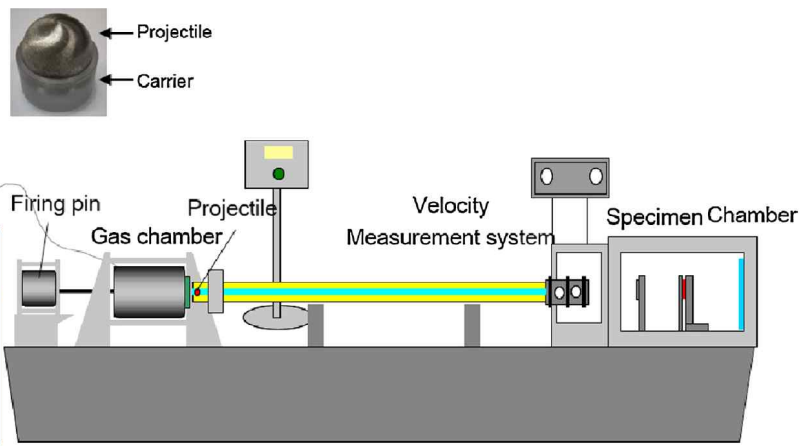
고속 비상체 충돌에 의한 중량 손실률은 고속 비상체 충돌실험 전·후의 실험체 중량을 측정하여 계산하였다.

고속 비상체 충격에 의한 실험체의 파괴면적은 영상처리 기법을 통하여 계산하였다.[Otsu 1979] 충돌 하중을 받은 실험체의 전면과 배면의 표면을 디지털 카메라로 촬영한 후, 파괴부위와 비파괴 부위의 경계선을 확인하였다. 경계선에 따라 파괴부위와 비파괴부위를 보색으로 표현하고 이진화 영상처리 기법을 통하여 파괴면적을 계산하였다.

비상체 관입깊이는 비상체가 관입한 부분의 중심부를 절단하여 측정하였다.



(a) 실험체 형상 및 설치 방법

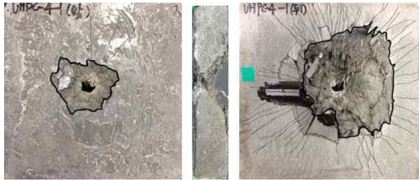
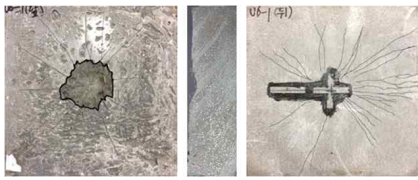
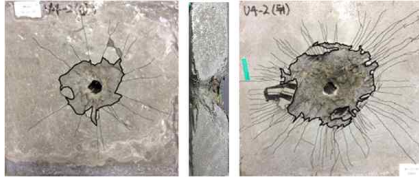
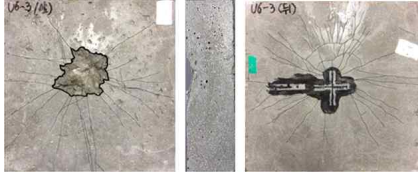
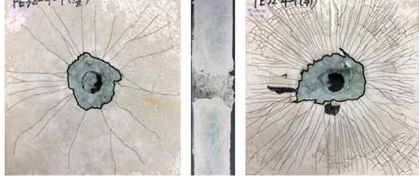
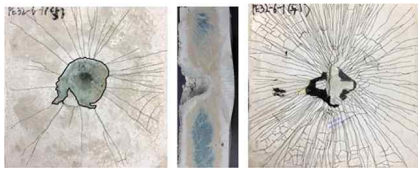
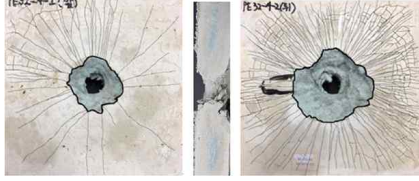
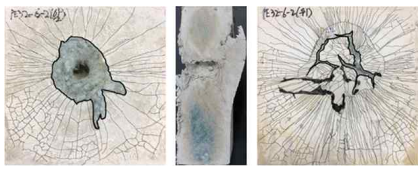
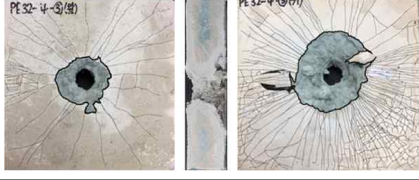
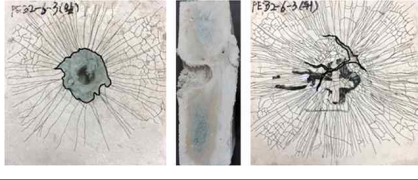


(b) 고속 비상체 충돌 실험 장치

그림 2.15 고속 비상체 충돌실험 방법

고속 비상체 충돌 실험에 따른 UHPFRC와 HDFRC의 파괴 형태는 표 2.6과 같다. 두께가 40 mm인 HDFRC와 UHPFRC는 비상체가 관통하였고, 실험체의 전면과 배면이 박리되는 현상이 나타났다. 두께가 60 mm인 HDFRC와 UHPFRC는 관통은 발생하지 않고, 비상체 관입과 전면 박리 및 배면 균열만 발생하는 것으로 나타났다. NDRC에서 제안한 식에 의하여 계산된 HDFRC의 배면박리 한계 두께는 83.1 mm이지만, HDFRC는 두께 60 mm에서 배면박리가 발생하지 않았다. 이러한 결과는 섬유 혼입에 따른 섬유가교거동이 배면박리에 대한 저항 성능을 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다. NDRC에서 제안한 식에 의하여 계산된 UHPFRC의 배면박리 한계 두께는 73.4 mm이나, 60 mm 두께에서 균열만 발생하였다. 이러한 결과 역시 앞서 전술한 바와 같이, 강섬유 혼입에 의한 섬유가교거동 때문으로 판단된다. 따라서 강도를 기준으로 내충격성을 평가하는 기존의 제안식들은 HDFRC와 같은 고연성 복합재료의 내충격성을 평가하는데 한계가 있는 것으로 판단되며, 연성이 뛰어난 복합재료에 대한 새로운 제안식이 필요할 것으로 판단된다.

표 2.6 고속 비상체 충격실험에 따른 UHPFRC와 HDFRC의 파괴 형태

Specimen	실험체 두께 : 40 mm	실험체 두께 : 60 mm
	전면	배면
UHPFRC 1	관통, 전면 및 배면 박리	관입, 전면박리 및 균열
		
UHPFRC 2	관통, 전면 및 배면박리	관입, 전면박리 및 균열
		
UHPFRC 3	관통, 전면박리 및 균열	관입, 전면박리 및 균열
		
HDFRC 1	관통, 전면 및 배면박리	관입, 전면박리 및 균열
		
HDFRC 2	관통, 전면 및 배면박리	관입, 전면박리 및 균열
		
HDFRC 3	관통, 전면 및 배면박리	관입, 전면박리 및 균열
		

관통은 비상체의 관통력이 구조물 두께의 전단 저항력보다 클 때 발생한다. 파괴 형태 분석 결과, UHPFRC와 HDFRC의 관통 한계 두께는 40 mm에서 60 mm 사이인 것으로 나타났다. 두께

40 mm에서는 비상체 관통이 발생하였지만, 두께 60 mm에서는 관통이 발생하지 않았기 때문이다. 비상체가 관입만 발생하였다는 것은 모든 충격 에너지가 실험체의 손상에 의하여 소산되었다는 것을 의미하고, 소산은 관입, 전면박리, 배면균열 등과 같은 형태로 소산되었다.

두께 60 mm를 갖는 UHPFRC의 관입깊이는 12.6 mm로 나타났다. NDRC에서 제안한 식에 의하여 계산된 관입깊이는 14.9 mm로서, UHPFRC의 관입깊이는 제안식보다 15.4 % 낮은 것으로 나타났다. 이는 UHPFRC의 내충격성이 동일한 강도를 갖는 일반콘크리트보다 우수하다는 것을 의미한다. 그러나 60 mm 두께를 갖는 HDFRC의 관입깊이는 41.5 mm로서, NDRC에서 제안한 식에 의하여 계산된 관입깊이보다 87.8 % 높은 것으로 나타났다. 표 2.7은 NDRC에서 제안한 식에 의하여 계산된 각 배합의 관입깊이, 관통한계 두께, 배면박리 한계 두께를 나타낸다.

표 2.7 NDRC에서 제안한 식에 의한 계산값과 실험값 비교

Mixture	실험값	NDRC 계산값		
	관입깊이 (mm)	관입깊이 (mm)	관통 한계 두께 (mm)	배면박리 한계 두께 (mm)
UHPFRC	12.6	14.9	41.2	73.4
HDFRC	41.5	22.1	56.4	83.1

균열 패턴을 관찰한 결과, HDFRC는 UHPFRC보다 균열개수 및 균열길이가 더 증가하는 것으로 나타났다. 이는 HDFRC가 UHPFRC보다 충격 하중에 의한 변형이 더 크다는 것을 의미한다. 그림 2.16은 고속 비상체 충격실험에 따른 UHPFRC와 HDFRC의 시간에 따른 변형률을 나타낸다. HDFRC의 변형률은 UHPFRC보다 높은 것으로 나타났고, 이는 균열패턴 분석결과와 일치한다. 시간에 따른 HDFRC와 UHPFRC의 배면 변형률은 압축변형이 발생한 후, 인장변형으로 바뀌는 것으로 나타났다. 이는 비상체 충격에 의하여 발생한 압축파가 압축변형을 유도하고, 압축파가 배면에서 자유표면을 만나 다시 인장파로 반사되어 인장변형이 발생하기 때문이다.[Beppu et al. 2008, Hazell 2015]

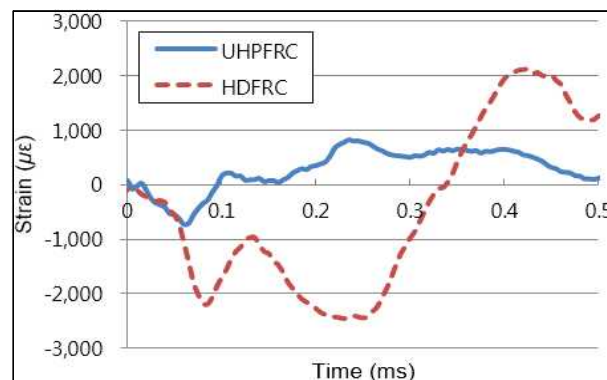


그림 2.16 고속 비상체 충격실험에 UHPFRC와 HDFRC의 배면 변형률

그림 2.17은 UHPFRC와 HDFRC의 중량 손실률을 나타내고 그림 2.18은 UHPFRC와

HDFRC의 파괴 면적을 나타낸다. 40 mm 두께를 갖는 HDFRC의 중량 손실률은 동일한 두께를 갖는 UHPFRC보다 12.2 % 낮은 것으로 나타났고, 전면 및 배면의 파괴 면적은 UHPFRC보다 7.81 % 작은 것으로 나타났다. 파괴 면적 결과는 HDFRC가 UHPFRC보다 충격 하중에 의해 직접적인 영향을 받는 유효면적이 작다는 것을 의미한다. 그러나 중량 손실률은 실험체의 두께에 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 그 이유는 중량 손실률은 전면 및 배면의 박리에 의하여 결정되기 때문이다. 두께가 60 mm인 HDFRC는 동일한 두께를 갖는 UHPFRC보다 관입깊이가 3.3배 높지만, 중량 손실률은 44.4 % 낮은 것으로 나타났다. 이는 비상체가 관입되는 동안 HDFRC는 UHPFRC보다 전면 및 배면에서 박리가 발생하는 양이 작기 때문이다.

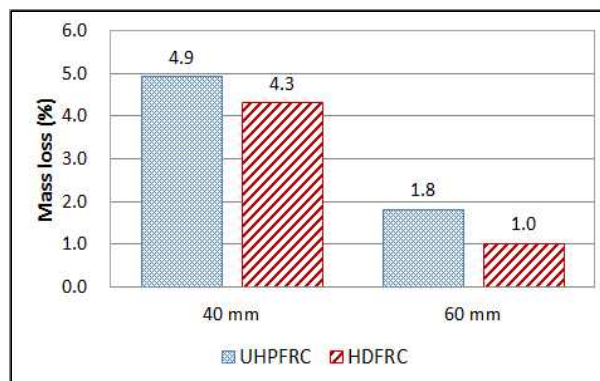


그림 2.17 고속 비상체 충격실험에 따른 UHPFRC와 HDFRC의 중량 손실률

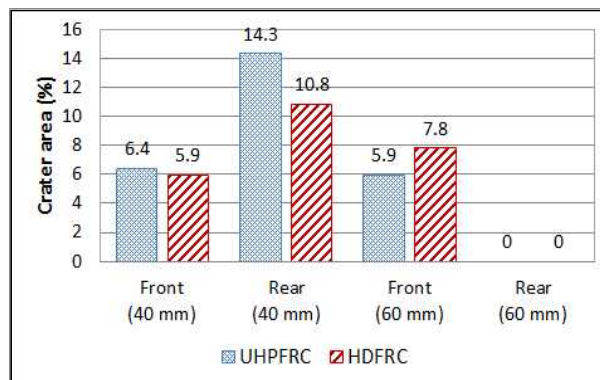


그림 2.18 고속 비상체 충격실험에 따른 UHPFRC와 HDFRC의 파괴 면적

㉔ 요약 및 결론

이 연구에서는 충돌저항 구조 프로토타입을 도출한 것을 바탕으로 매트릭스의 강도가 높은 UHPFRC와 변형성능이 우수한 HDFRC의 축소 모형을 제작하고, 비상체 고속 충돌 실험을 실시하여 고속 비상체 하중 하에서의 충돌 성능을 조사하였다. 축소 모형의 크기는 가로 × 세로가 20 cm × 20 cm이며 두께는 4 cm와 6 cm로 달리하여 제작하였다. 실험 결과, 고속 비상체 충

돌 하중 하에서 UHPFRC와 HDFRC의 충돌 성능은 유사한 것으로 나타났다. UHPFRC가 HDFRC보다 관입깊이 및 파괴 형태 측면에서 다소 우수한 것으로 나타났으나, 파괴면적 측면에서는 HDFRC가 더 우수한 것으로 나타났다. 균열 패턴은 HDFRC가 UHPFRC보다 균열 발생 및 균열 길이가 더 긴 것으로 나타났다. 이는 HDFRC가 UHPFRC보다 충격 하중 하에서 실험체의 변형이 더 크다는 것을 의미하며, 충격 하중에 의한 배면의 변형률이 HDFRC가 UHPFRC보다 약 2배 이상 크다는 실험 결과를 통하여 검증할 수 있다. 또한, UHPFRC와 HDFRC의 충돌 저항 성능은 NDRC에서 제안한 계산식에 따른 충돌 저항 성능보다 우수한 성능을 갖는 것으로 나타났다. NDRC 제안식에 따른 UHPFRC와 HDFRC의 배면박리 한계 두께는 각각 73.4 mm와 83.1 mm이지만, 두께 60 mm의 실험체에서 모두 배면 박리가 발생하지 않았기 때문이다. 종합적으로 UHPFRC와 HDFRC는 모두 충돌 저항 성능을 향상시킬 수 있는 건축재료인 것을 확인하였고, 강도가 높지 않은 HDFRC도 높은 변형성능에 따른 에너지 흡수 능력으로 인하여 UHPFRC와 유사할 정도의 충격 저항 성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 섬유 보강을 통하여 향상된 충격 저항 성능은 기존에 보고되고 있는 충돌 저항 성능 예측식보다 우수한 충돌 저항 성능을 확보 할 수 있는 것으로 나타났다.

(나) 공동연구기관 (대전대학교)

표 2.8 1차년도 공동연구기관 주요 연구활동 및 연구내용

주요 연구활동	세부 연구내용
■ 기존 재료 모델분석	• 기존 정밀해석 기법 문제점 분석
■ 카고메 트러스 해석 모델 분석	• 고속변형을 받는 카고메 트러스 해석 모델링기법
■ 내충격 구조 프로토 타입 해석	• 충격속도, 접촉면적 등에 따른 카고메 트러스 내충격 모델 해석
■ 카고메 트러스 내충격 모델 개발	• 고속변형을 받는 콘크리트의 분쇄효과를 고려한 마이크로 플레인 모델 개발

① 기존 재료 모델 분석

㉔ 기존 정밀해석 기법 문제점 분석

기존 재료 모델 분석은 충돌 해석시 주로 사용되는 상용 Hydrocode인 ANSYS LS-DYNA를 이용하여 LS-DYNA에서 제공하는 K&C 모델(KCM), Winfrith Concrete Mode, CSCM의 세 가지 콘크리트 재료모델을 이용한 충돌해석을 수행하였다. 또한, 해석결과별 차이점을 분석하고 충돌 실험결과와 비교하여 기존 정밀해석 기법의 문제점을 분석하였다.

충돌해석에서는 충돌체 관통실험을 모사하기 위하여 실제 수행된 700mm × 700mm × 70mm의 무근 콘크리트 슬래브에 대한 해석을 수행하였다. 콘크리트의 강도는 48.3MPa(7000 psi)이며, 충돌체의 충돌속도는 276m/s로 결정하고, 상용 hydrocode ANSYS LS-DYNA를 사용하여 충돌체와 콘크리트 슬래브를 8절점 솔리드요소로 모델링하였다. 또한, 콘크리트 재료모델은

LS-DYNA에서 제공하는 72R3(*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3), 84/85(*MAT_WINFRITH_CONCRETE), 159(*MAT_CSCM_CONCRETE)을 사용하였다.

㉠ 기존 정밀해석 기법 분석 결과

그림 2.19는 콘크리트 재료모델 159CSCM_CONCRETE의 충돌해석 결과를 나타낸다.

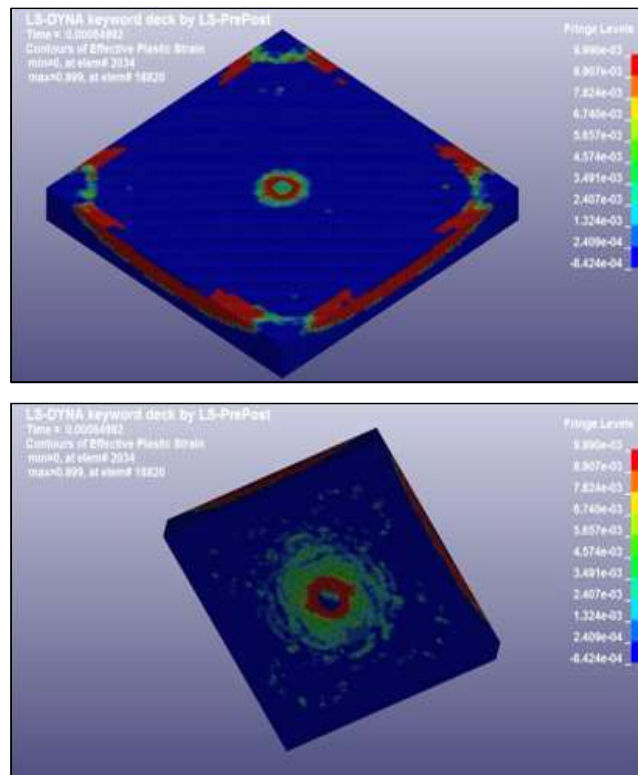


그림 2.19 콘크리트 재료모델 159CSCM_CONCRETE의 충돌해석 결과

그림 2.20은 콘크리트 재료모델 72R3_CONCRETE_DAMAGE_REL3의 충돌해석 결과를 나타내고 그림 2.21은 콘크리트 재료모델 84/85_WINFRITH_CONCRETE의 충돌해석 결과를 나타낸다.

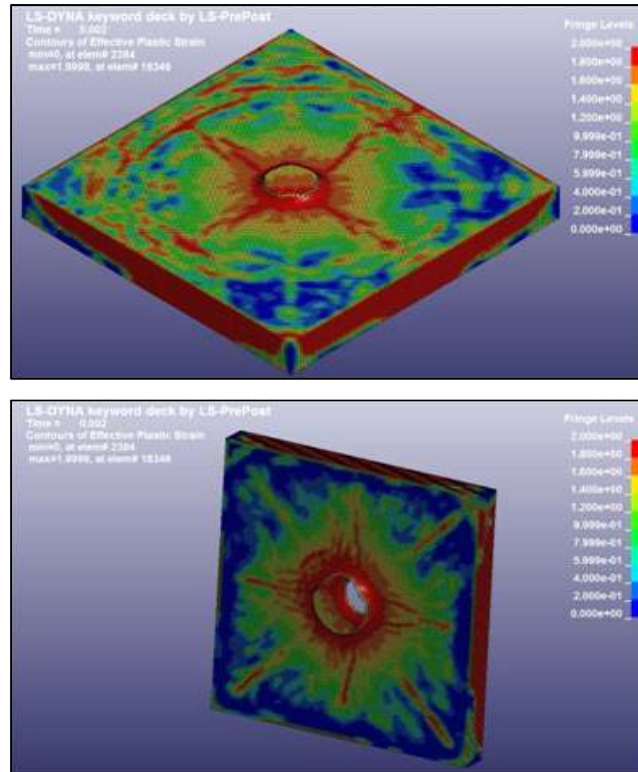


그림 2.20 콘크리트 재료모델 72R3_CONCRETE_DAMAGE_REL3의 충돌해석 결과

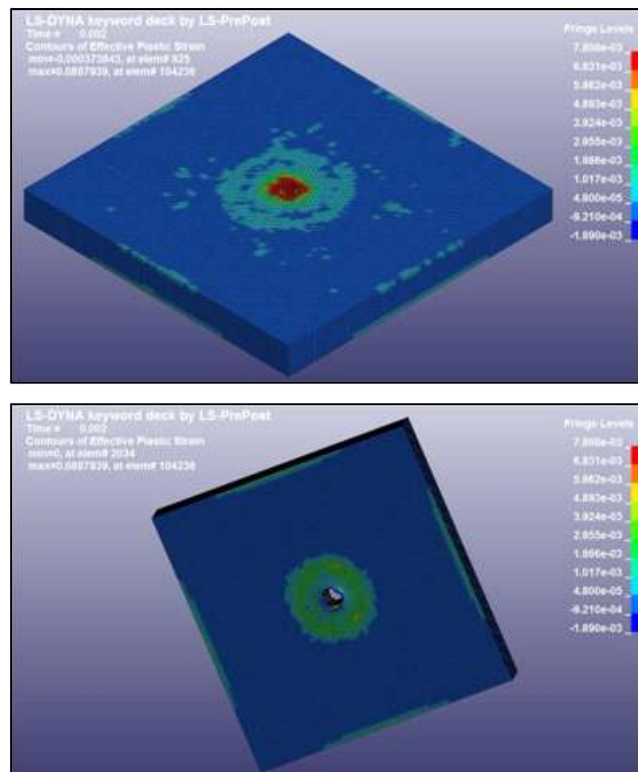


그림 2.21 콘크리트 재료모델 84/85_WINFRITH_CONCRETE의 충돌해석 결과

세가지 모델을 적용한 충돌해석 결과, 콘크리트 재료 모델에 따라 관통후 crater 양상은 매우 다른 경향을 나타내었다. 모델 중 균열 양상은 Winfrith 모델이 적절히 모사하는 것으로 나타났다. 표 2.9는 충돌 해석시 재료 모델별 crater 크기 비교를 나타낸다.

표 2.9 충돌 해석시 재료 모델별 crater 크기 비교

Model	159 CSCM Concrete	72 CD REL3 Concrete	84/85 Winfrith Concrete	실험결과
1) Size	48.40 mm	157.37 mm	67.38 mm	81.05 mm
2) Size	42.59 mm	101.15 mm	42.79 mm	32.31 mm
3) Size	219.04 mm	252.27 mm	159.60 mm	170.05 mm

관통 후 비상체 탈출 속도는 세가지 모델 모두 실험값에 비해 크게 나타났다. 변형률 속도 효과를 고려한 세가지 모델 모두 발사체 관통에 대한 저항성을 작게 예측하는 것으로 나타났다. 표 2.10은 충돌 해석시 비상체 탈출속도 결과를 나타낸다.

표 2.10 충돌 해석시 비상체 탈출속도

Model	159 CSCM Concrete	72 CD REL3 Concrete	84/85 Winfrith Concrete	실험결과
충돌속도	276 m/s	276 m/s	276 m/s	276 m/s
잔류속도	192.7 m/s	186.8 m/s	161.2 m/s	133 m/s

종합적으로 정밀 충돌해석시 콘크리트 파괴거동을 모사할 수 있는 콘크리트 재료모델이 필요할 것으로 판단된다.

㉔ 요약 및 결론

이 연구에서는 기존 재료를 분석하여 기존 정밀해석 기법의 문제점을 분석하였다. 이를 위하여 상용 hydrocode에서 제공하는 세가지 콘크리트 재료모델을 이용한 충돌해석을 수행하였다. 또한, 해석결과별 차이점을 분석하고 충돌 실험결과와 비교하여 기존 정밀해석 기법의 문제점을 분석하였다. 그 결과, 콘크리트 재료 모델에 따라 관통 후 crater 양상은 매우 다른 경향을 나타내었고, 모델 중 균열 양상은 Winfrith 모델이 적절히 모사하는 것으로 나타났다. 또한 발사체 관통에 대한 저항성은 모두 작게 예측하는 것으로 나타났다.

② 카고메 트러스 해석 모델 분석

㉔ 고속변형을 받는 카고메 트러스 해석 모델링 기법

카고메 트러스 구조를 일부 또는 전체를 충전하는 내충격 시스템을 해석하기 위해서는 카고메 트러스 구조에 대한 모델링이 우선적으로 수행되어야 한다. 구조해석 모델은 캐드 프로그램으로 작성되어 호환이 되는 구조해석 프로그램이나 충격해석 프로그램으로 변환하여 사용한다.

카고메 트러스 구조에 대한 해석은 일차적으로 충전되지 않은 순수한 카고메 트러스 구조의 강도를 해석적으로 설정하는데 사용하며, 지지조건에 따라 전단강도, 휨강도를 추정하는데 활용이 가능하다.

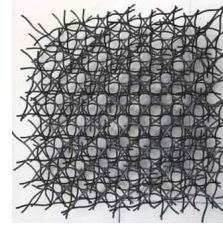
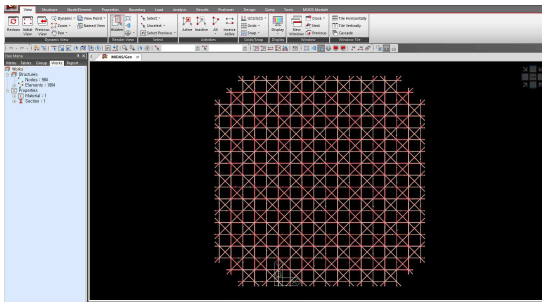
카고메 트러스 구조에 대한 해석은 일차적으로 충전되지 않은 순수한 카고메 트러스 구조의 강도를 해석적으로 설정하는데 사용하며, 지지조건에 따라 전단강도, 휨강도를 추정하는데 활용이 가능하다.

콘크리트 등에 의하여 부분 또는 전체가 충전된 카고메 구조는 일방향 슬래브로써의 휨거동 및 충격에 의한 파괴모드를 규명하고자 할 때 사용된다.

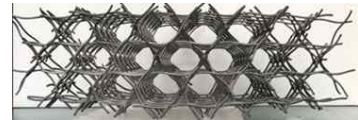
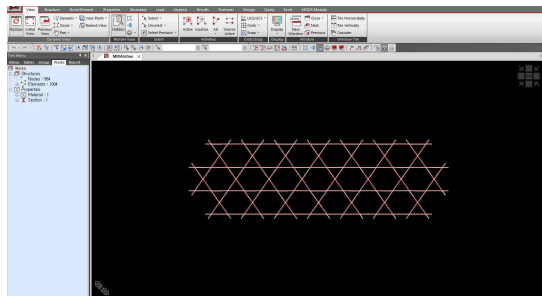
카고메 트러스 해석모델은 구조해석 프로그램인 마이다스에서 구현하였으며, 그림 2.22는 해석 모델링 성상과 제조된 카고메 트러스 구조를 나타낸다.

㉠ 요약 및 결론

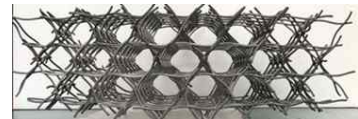
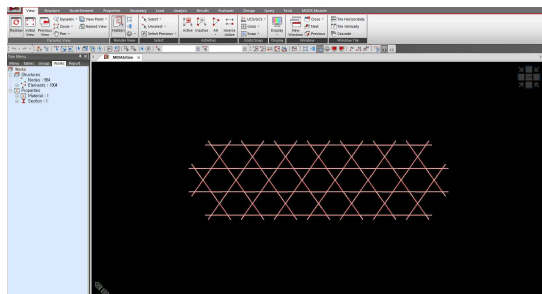
이 연구에서는 카고메 트러스 해석 모델을 분석하기 위하여 고속 변형을 받는 카고메 트러스 해석 모델링 기법을 개발하였다. 이를 위하여 카고메 트러스 구조를 일부, 또는 전체를 충전하는 내충격 시스템을 해석하기 위한 카고메 트러스 구조 해석 모델링을 수행하였다. 또한, 카고메 구조의 지지조건에 따른 전단강도, 휨강도를 추정하는데 활용이 가능하며, 콘크리트 등에 의하여 부분 또는 전체가 충전된 카고메 구조는 일방향 슬래브로써의 휨거동 및 충격에 의한 파괴모드를 규명하는 원천자료로 사용가능하도록 하였다.



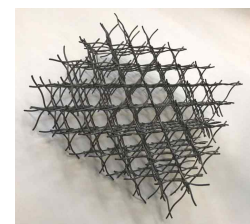
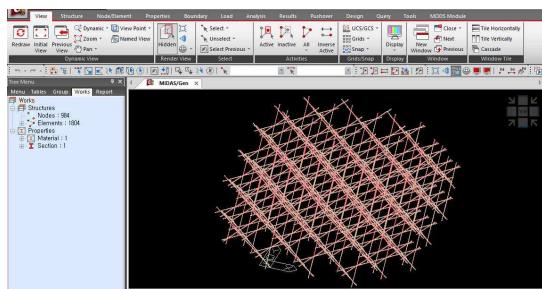
(a) 평면의 해석모델 및 제조모델



(b) 단면의 해석모델 및 제조모델



(c) 조감도1의 해석모델 및 제조모델



(c) 조감도1의 해석모델 및 제조모델

그림 2.22 카고메 트러스의 해석 모델링 및 제조모델

③ 내충격 구조 프로토타입 해석

㉔ 충격속도, 접촉면적 등에 따른 카고메 트러스 내충격 모델 해석

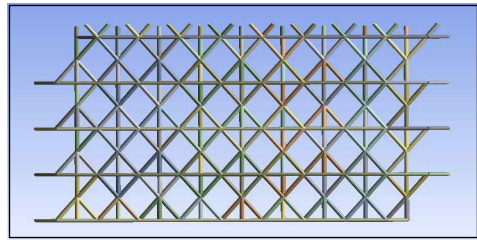
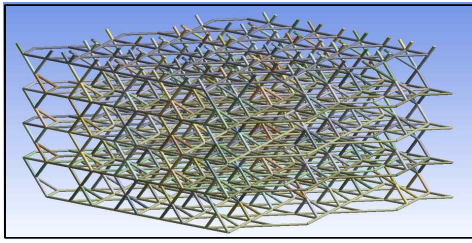
내충격 구조 프로토타입 해석을 위하여 충돌 해석시 주로 사용되는 상용 Hydrocode인 ANSYS LS-DYNA를 이용하여 카고메 트러스 적용 콘크리트 구조물의 내충격 저항성을 검증하고자 축소 실험과 유사한 콘크리트 슬래브에 대한 충돌해석을 수행하였다.

표 2.11은 고속 비상체 충돌해석 조건을 나타낸다. 충돌해석에서는 비상체 관통실험을 모사하기 위하여 200 mm × 200 mm × 40 mm의 무근 콘크리트 슬래브와 카고메 트러스 콘크리트 슬래브에 대한 해석을 수행하였다. 콘크리트의 강도는 40 MPa로 가정하였으며, 비상체의 충돌속도는 112.5 m/s, 225 m/s 두가지와 충돌체 직경은 25 mm, 50 mm 두 종류로 설정하여 충돌속도와 충돌면적의 영향을 파악하고자 하였다.

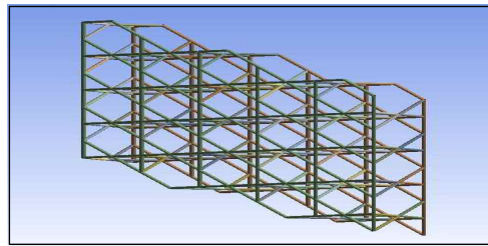
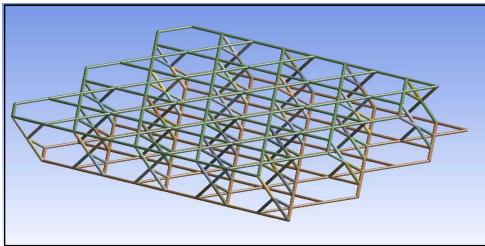
표 2.11 고속 비상체 충돌해석 조건

비상체 질량	66.8 g
비상체 속도	112.5 m/s, 225 m/s
비상체 직경	25 mm, 50 mm
실험체 크기	200 mm × 200 mm
실험체 두께	40 mm
해석 조건	무근콘크리트, 카고메 트러스 콘크리트
콘크리트 강도	40 MPa

상용 hydrocode ANSYS LS-DYNA를 사용하여 충돌체와 콘크리트 슬래브를 솔리드요소로 모델링하였으며, 콘크리트 재료모델은 LS-DYNA에서 제공하는 72R3 (*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3)을 사용하였다. 카고메 트러스는 동일한 방법으로 여러 층 모델링이 가능하며, 충돌해석시 콘크리트 두께와 1층 카고메 트러스의 영향을 파악하고자 1층 모델링을 적용하였다. 그림 2.23은 카고메 트러스 모델링을 나타내고, 그림 2.24는 충돌해석 대상 카고메 트러스 콘크리트 모델링을 나타낸다. 또한 그림 2.25는 충돌해석 대상 카고메 트러스 콘크리트 메쉬모델링을 나타낸다.



(a) 카고메 트러스 모델링(4층)



(b) 카고메 트러스 모델링(1층, 충돌해석 모델)

그림 2.23 카고메 트러스 모델링

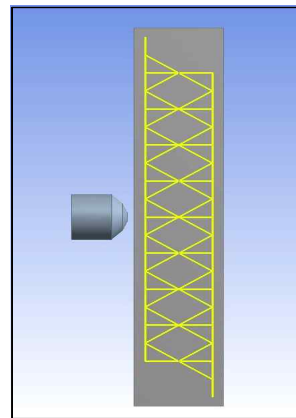
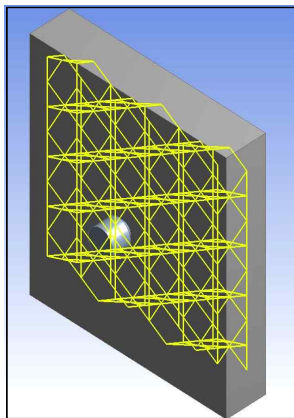


그림 2.24 충돌해석 대상 카고메 트러스 콘크리트 모델링

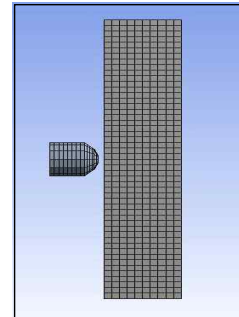
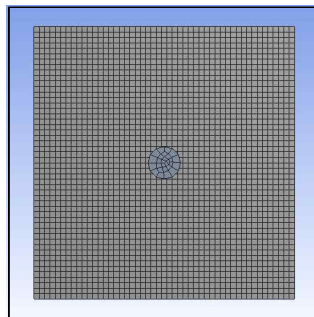
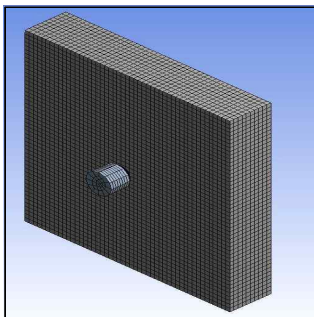


그림 2.25 충돌해석 대상 카고메 트러스 콘크리트 메쉬모델링

세가지 해석 조건별 충돌해석 결과, 카고메 트러스 유무, 충돌속도 및 충돌면적에 따라 관통 후 crater 크기 및 탈출속도가 크게 차이나는 것으로 나타났다. 그림 2.26은 무근 콘크리트의 해석 조건별 관통 후 파괴형상을 나타낸다. 또한, 그림 2.27은 카고메 트러스 콘크리트의 해석 조건별 관통 후 파괴형상을 나타낸다.

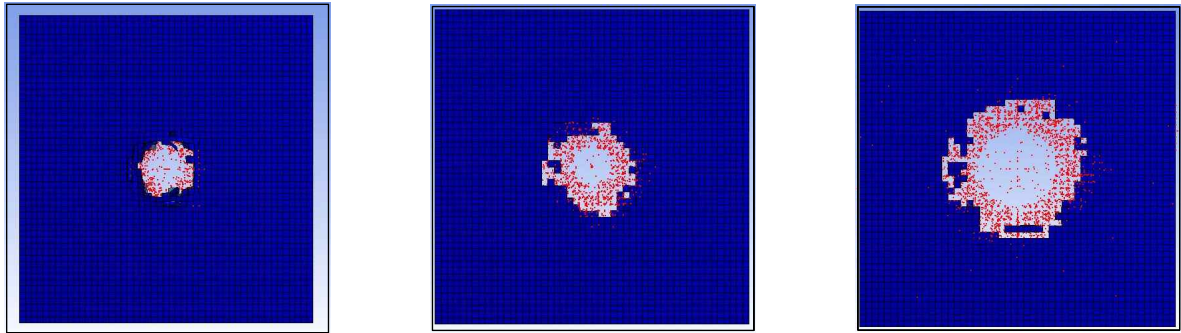


그림 2.26 무근 콘크리트의 해석 조건별 관통 후 파괴형상

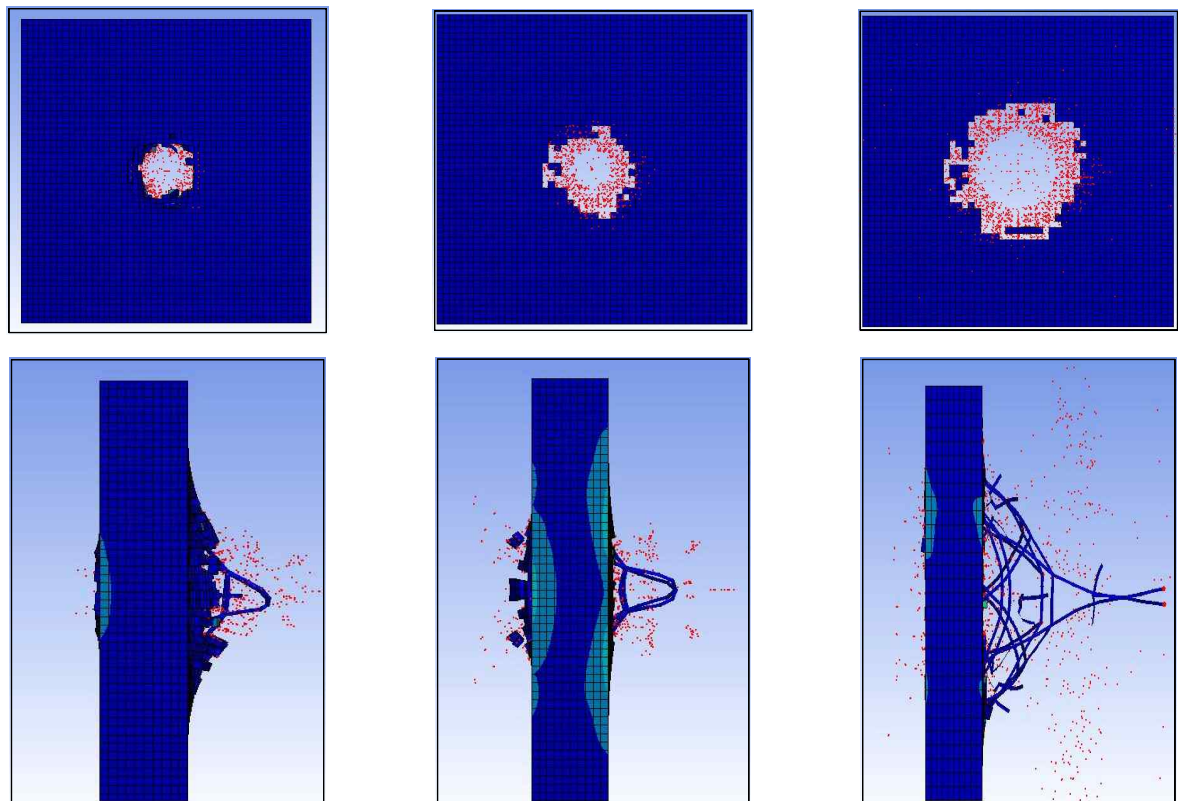


그림 2.27 카고메 트러스 콘크리트의 해석 조건별 관통 후 파괴형상

표 2.12는 무근 콘크리트 충돌 해석시 비상체 탈출속도를 나타내고, 표 2.13은 카고메 트러스 콘크리트 충돌 해석시 비상체 탈출속도를 나타낸다. 카고메 트러스 적용 콘크리트 슬래브의 경우 무근 콘크리트에 비해 탈출속도가 50~75% 정도 현저히 떨어지는 것으로 나타났으며, 카고

메 트러스를 적용한 경우 세가지 해석조건에 대하여 내충격 저항성이 크게 향상되는 것으로 나타났다. 충돌면적이 큰 경우 접촉면 증가에 따른 콘크리트와 카고메 트러스의 내충격 저항성이 가장 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 본 해석을 통해 카고메 트러스 적용 콘크리트 구조물의 내충격 저항성 향상을 검증하였다.

표 2.12 무근 콘크리트 충돌 해석시 비상체 탈출속도

해석 조건	직경 25 mm	직경 25 mm	직경 50 mm
충돌속도	112.5 m/s	225 m/s	225 m/s
탈출속도	62.7 m/s	152.8 m/s	124.2 m/s

표 2.13 카고메 트러스 콘크리트 충돌 해석시 비상체 탈출속도

해석 조건	직경 25 mm	직경 25 mm	직경 50 mm
충돌속도	112.5 m/s	225 m/s	225 m/s
탈출속도	42.3 m/s	112.8 m/s	67.2 m/s
무근 대비 탈출속도 비율	67 %	74 %	54 %

㉔ 요약 및 결론

이 연구에서는 내충격 구조 프로토타입 해석을 실시하기 위하여 상용 hydrocode에서 제공하는 콘크리트 재료모델을 이용하여 충격속도, 접촉면적 등에 따른 카고메 트러스 내충격 모델을 해석하였다. 이를 위하여 카고메 트러스의 메쉬 모델링 및 메쉬 모델을 적용한 콘크리트 슬래브와 무근 콘크리트의 내충격성을 충격속도 및 접촉면적에 따라 비교하였다. 해석 결과, 카고메 트러스 적용 콘크리트 슬래브의 경우 무근 콘크리트에 비해 탈출속도가 떨어지고, 내충격 저항성이 우수한 것으로 나타났다.

④ 카고메 트러스 내충격 모델 개발

㉔ 고속변형을 받는 콘크리트의 분쇄효과를 고려한 마이크로 플레인 모델 개발

정밀 충격해석시 우수성이 검증된 Microplane model M7을 카고메 트러스 내충격 모델에 적용함으로써 기존 콘크리트 재료모델이 가지고 있는 단점을 개선하였다. 기존 콘크리트 재료모델 Microplane model M1 ~ M6에서 사용한 Volumetric-Deviatoric split을 배제하여 압축응력 고려시만 분리함으로써 기존 모델들이 내포하고 있던 여러 가지 수치적 문제점들을 해결하였다. 그림 2.28은 Microplane model의 기본 개념을 나타낸다.

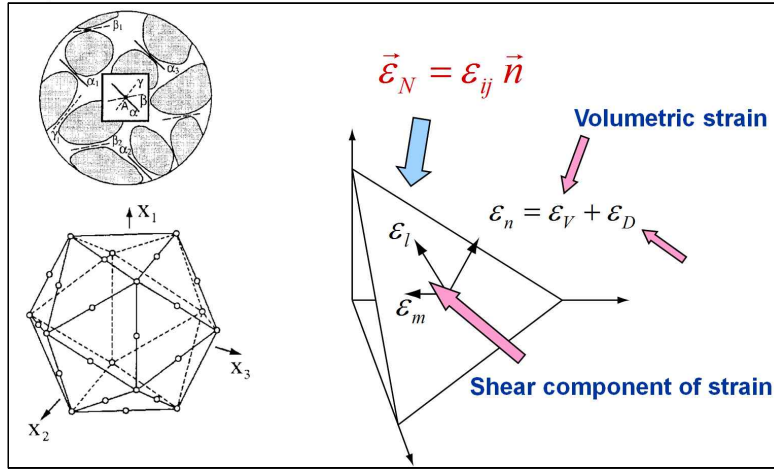


그림 2.28 Microplane model의 기본 개념

또한, 충돌해석시 강도증진효과 고려를 위한 재료모델을 개선하였다. 충돌해석시 발생하는 초고속 변형률 속도 효과의 모사를 위해 콘크리트 재료모델 M7에 기존의 준정적 변형률 속도 효과 (Quasi-static rate effect, <103/s)를 적용하였다.

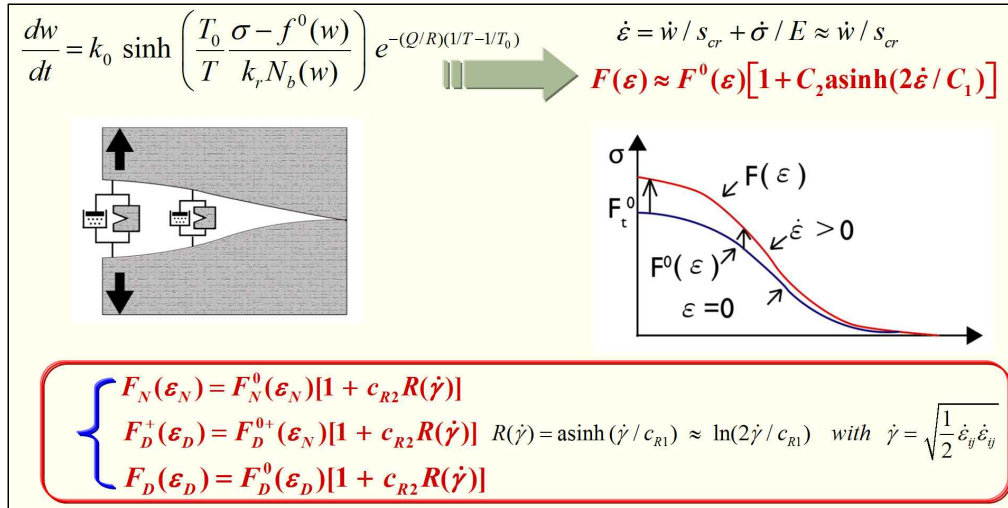


그림 2.29 재료모델 개선(초고속 변형률 속도 효과 모사)

마지막으로, 충격하중에 따른 매우 큰 전단변형 발생 후 콘크리트 분쇄(comminution)에 의한 에너지 소산에 따른 저항성능 증가효과를 우수한 성능의 콘크리트 재료모델인 Microplane model M7에 적용하였다. 그림 2.30은 콘크리트 분쇄 및 분쇄에 의한 저항성능 증가 메커니즘을 나타낸다.

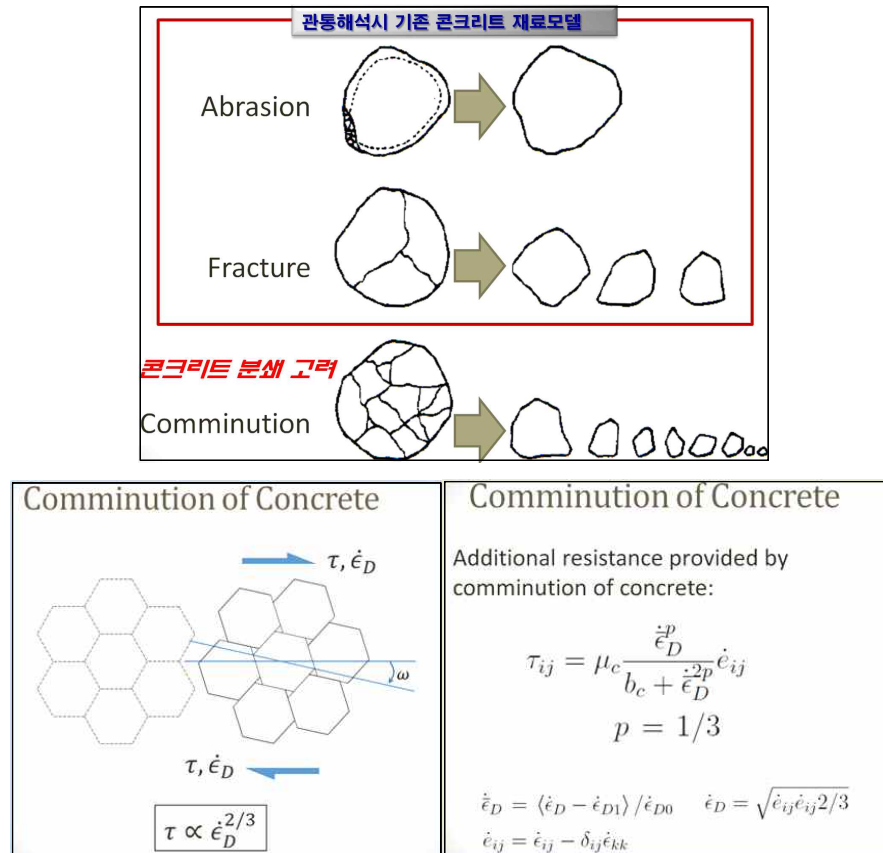


그림 2.30 콘크리트 분쇄 및 분쇄에 의한 저항성능 증가 메커니즘

㉠ 요약 및 결론

이 연구에서는 카고메 트러스 내충격 모델 개발을 목표로 고속변형을 받는 콘크리트의 분쇄 효과를 고려한 마이크로 플레인 콘크리트 재료 모델을 개발하였다. 충격하중에 의해 매우 큰 전단변형이 발생하고 이 후, 콘크리트 분쇄(comminution)에 의한 에너지 소산에 따른 저항성능 증가효과를 Microplane model M7에 적용하였다. 또한, 개발된 재료모델을 정밀 충돌해석시 콘크리트 재료모델로 사용할 수 있도록 충돌해석 시 사용하는 상용 hydrocode에 탑재 가능한 사용자 정의모듈을 개발하였다.

(2) 2차년도 연구 목표 및 내용

(가) 주관연구기관 (전남대학교)

표 2.14 2차년도 주관연구기관 주요 연구활동 및 연구내용

주요 연구 활동	세부 연구내용
■ 기존 매트릭스 분석	- 기존 매트릭스 배합특성 분석 - 카고메 트러스와 매트릭스 혼합 제조기술
■ 최적 매트릭스 재료 개발	내충격 저항성능을 향상시키기 위한 재료의 최적 배합도출
■ 실험실성능평가	- 충돌저항 프로토타입 구조물 해석 - 축소모형실험에 대한 충돌성능 검증 - 사용목적 등 적용환경, 용도에 적합한 내충격 시스템의 형상 개선

① 기존 매트릭스 분석

㉔ 기존 매트릭스 배합특성 분석 1(UHPFRC 및 HDFRC)

1차년도에 축소모형 제작 및 고속 비상체 충돌 실험을 통하여 강도 지향성 재료인 UHPFRC와 연성 지향성 재료인 HDFRC의 충돌 성능을 탐색하였다. 이를 통하여 UHPFRC와 HDFRC 모두 충돌 저항 성능이 우수한 것을 확인하였고, 이를 이용하여 내충격성이 향상된 고속 충돌 저항성 건축구조 기술 개발이 가능한 것을 확인하였다. 특히, 200 m/s 이상의 발사속도를 갖는 고속 비상체 충돌 하중 하에서 축소모형 실험을 통하여 기존의 강도 위주의 내충격성 향상 기술 뿐만 아니라 연성 측면, 즉 에너지 흡수 능력이 우수한 건축재료 역시 충돌 저항 성능이 향상된다는 것을 확인하였다. 이에 따라 강도가 매우 우수한 강도 지향성 재료인 UHPFRC와 인장 변형성능이 매우 우수한 연성 지향성 재료인 HDFRC의 배합특성과 압축강도 및 일축인장 실험을 실시하여 매트릭스의 역학특성을 분석하였다.

UHPFRC와 HDFRC의 사용재료 및 배합은 앞서 전술한 축소모형 제작 배합과 동일하다. UHPFRC 배합의 결합재는 1종 보통포틀랜드시멘트와 지르코니아 실리카흙을 중량비로 1대 0.2로 구성하여 사용하였다. 지르코니아 실리카흙은 산화규소가 96 % 이상이며 실리카흙과 화학성분은 유사하지만 분말도가 80,000 cm²/g 정도이다. 지르코니아 실리카흙은 공극 충전 효과와 포졸란 반응을 통하여 재료의 밀도를 향상시켜 강도를 증진시키고, 입자 충전밀도를 증가시키면서 유동성을 향상시키기 위해 사용되었다. 충전재는 산화규소 성분이 99% 이상인 재료로서 밀도는 2.60 g/cm³이며, 시멘트와 지르코늄 실리카의 중간 정도인 평균 입경이 2.2 μm의 크기를 갖고 있다. 충전재는 시멘트와 지르코늄 실리카 사이를 채우는 역할을 통해 충전밀도를 증가시켜 유동성을 향상시키고, 경화 후에는 초고성능 콘크리트를 밀실하게 함으로써 강도 증진 및 내구성을 향상시키기 위해 사용되었다. 규사는 밀도 2.62 g/cm³이고 평균 입경이 0.5 mm인 것을 사용하였다. 혼화제로는 팽창제, 수축저감제, 고성능감수제, 소포제를 사용하였다.

고연성 섬유보강 복합재료인 HDFRC를 제조하기 위해 사용한 결합제는 알칼리 활성 고로슬래그로서 모재료인 고로슬래그는 3중 분말도($4,030 \text{ cm}^2/\text{g}$)이며, 비중은 2.91이다. 활성화제로는 분말형의 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)과 황산나트륨(Na_2SO_4)이 사용되었고, 각각 고로슬래그의 중량 대비 7 % 및 3 %를 대체하여 혼입되었다. UHPFRC와 마찬가지로 섬유의 분산성이 최적화 될 수 있는 매트릭스의 유동상태를 만들기 위하여 고성능감수제와 증점제를 혼입하였으며, 혼합과정에서 의도치 않은 기포 생성을 억제하기 위하여 소포제를 사용하였다.

보강섬유는 고강도재료인 UHPFRC에는 직경 $200 \mu\text{m}$, 길이 19.5 mm 및 인장강도 $2,500 \text{ MPa}$ 을 갖는 강섬유가 사용되었고, 고연성재료인 HDFRC에는 직경, 길이 및 인장강도가 각각 $12 \mu\text{m}$, 18 mm 및 $2,700 \text{ MPa}$ 을 갖는 PE(polyethylene) 섬유가 사용되었다.

UHPFRC의 혼합은 분말형 재료인 시멘트, 지르코니아 실리카흙, 충전재, 잔골재, 수축저감제 및 팽창제를 넣고 약 10분간 혼합하였다. 건비빔이 종료된 후, 액상형 재료인 혼합수, 고성능감수제, 소포제를 혼합하고, 최적의 유변학적 특성을 확보할 때까지 혼합하였다. 유변학적 특성이 최적화되면, 섬유를 혼입하여 5분 동안 고속으로 혼합하여 섬유 분산성을 확보하였다. 섬유 분산성이 최적화되면 마지막으로 소포제를 넣고 저속으로 1분 동안 혼합하여 기포제거 및 안정화를 실시하였다.

HDFRC의 혼합은 분말형 재료인 고로슬래그와 알칼리 활성화제를 넣고 약 1분 동안 건비빔을 실시하였다. 건비빔이 종료되면 배합수를 혼입한 후, 약 1분 동안 혼합하면서 고성능감수제와 증점제를 넣고 섬유가 분산될 수 있는 유동상태를 확보하였다. 최적의 유동상태를 확보한 이후, PE 섬유를 혼입하고 약 4분 동안 혼합하였다. 마지막으로 소포제를 넣고 저속으로 1분 동안 혼합하여 기포제거 및 안정화를 실시하였다.

혼합이 완료된 후 배합 특성에 따른 역학특성을 조사하기 위하여 실험체를 제작하였다. 실험체 제작 후, $23 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 와 상대습도 $60 \pm 10 \%$ 의 양생실에서 48시간 동안 기건양생을 실시하였다. 이 후 재령 28일까지 양생온도 $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 양생수조에서 수중양생을 실시하였다.

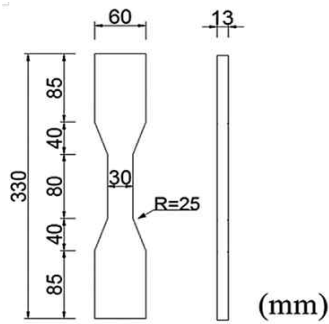
실험은 밀도 실험과 압축강도 실험을 실시하여 밀도와 압축강도를 조사하였고, 일축인장 실험을 실시하여 균열강도, 인장강도, 변형성능 및 균열패턴을 조사하였다. 밀도 실험은 실험체를 제조할 때, 제조 과정에서 의도치 않은 기포가 생성되어 역학성능에 영향을 주었는지를 파악하기 위하여 실시하였다. 50 mm 의 입방 실험체를 제작하여 공기 중 무게와 수중 무게를 측정하였으며, 식 2.16을 이용하여 계산하였다.

$$p = \frac{W_{air}}{W_{air} - W_{water}} \times p_w \quad (2.16)$$

여기에서, W_{air} 는 공기중 무게, W_{water} 는 수중 무게, p_w 는 물의 밀도를 나타낸다.

압축강도는 밀도를 측정한 실험체를 이용하여 KS L 5105에 따라 측정하였다.

일축인장 실험은 매트릭스의 인장 특성을 파악하기 위하여 일본 토목학회에서 제안한 방법에 따라 실시하였다.[JSCE 2008] 그림 2.31(a)는 일축인장 실험체의 형상과 실험 모습을 나타낸다. 일축인장 실험은 최대용량 2톤을 갖는 인장강도 시험기를 이용하여 0.1 mm/min 속도의 변위 제어 방식으로 수행하였다. 실험체의 변위는 실험체의 좌우 측면에 25 mm 용량을 갖는 변위계를 부착하여 변형량을 측정하였다. 측정구간내의 단면 크기는 HDFRC의 경우 폭 30 mm, 두께 30 mm이며, HDFRC는 폭 30 mm, 두께 13 mm이다.



(a) 일축인장 실험체 형상



(b) 일축인장 실험 모습

그림 2.31 일축인장 실험체의 형상 및 실험 방법

그림 2.32는 밀도 실험 결과를 나타낸다. 이론적 밀도값은 배합에 사용되는 모든 재료에 대하여 각각의 혼입량과 밀도를 이용하여 계산하였다. 각 배합의 측정된 밀도와 이론적 밀도의 차이는 0.6 % 이하로 나타났다. 이는 두 배합 모두 실험체를 제조하는 과정에서 의도치 않은 기포가 생성되지 않았다는 것을 의미하며, 이에 따른 성능 저하 역시 없을 것으로 판단된다.

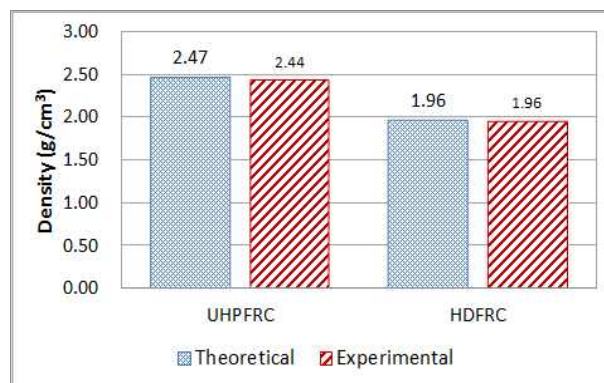
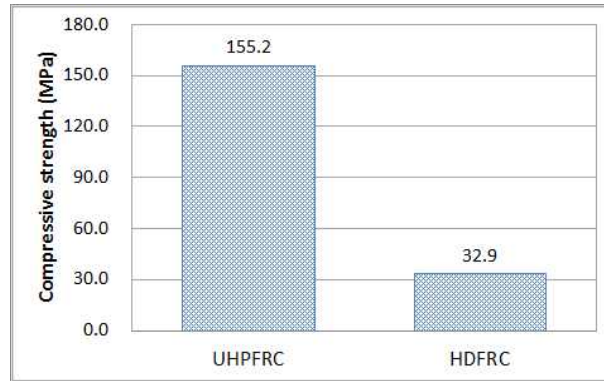


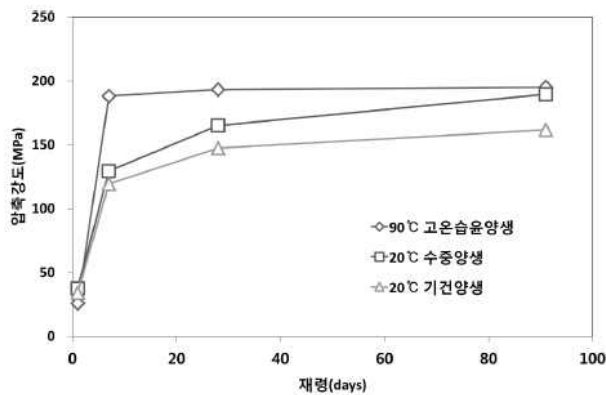
그림 2.32 역학특성 분석을 위한 UHPFRC와 HDFRC의 밀도 실험 결과

그림 2.33은 UHPFRC와 HDFRC의 압축강도 실험 결과를 나타낸다. UHPFRC의 압축강도는 155 MPa로 나타났고, HDFRC의 압축강도 32.9 MPa보다 4.7배 높은 것으로 나타났다. 이는 UHPFRC가 고강도를 나타내는 강도 지향성 재료라는 것을 의미한다. 그림 2.33 (b), (c)는 각각 UHPFRC와 HDFRC의 재령별 강도변화를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 재령 28일 이후에 강도변화는 약 10% 정도임을 알 수 있다. 이를 통해 두 재료 모두 일반 콘크리트와 같

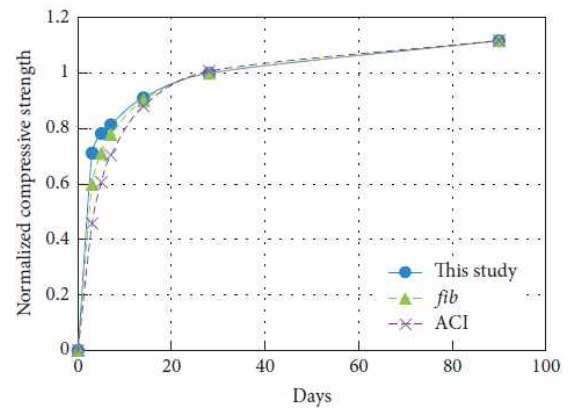
이 재령 28일을 기준으로 실험하는 것이 합리적임을 알 수 있다.



(a) 28일 재령 강도



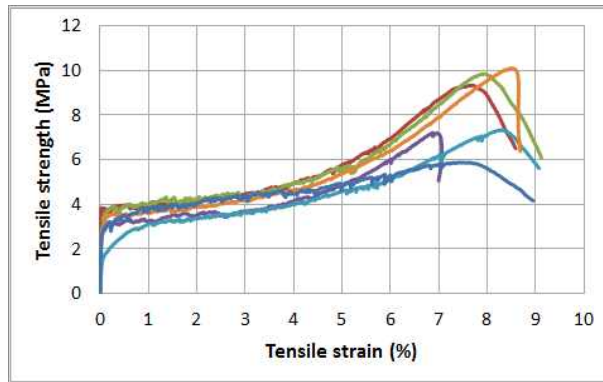
(b) UHPFRC 재령별 강도



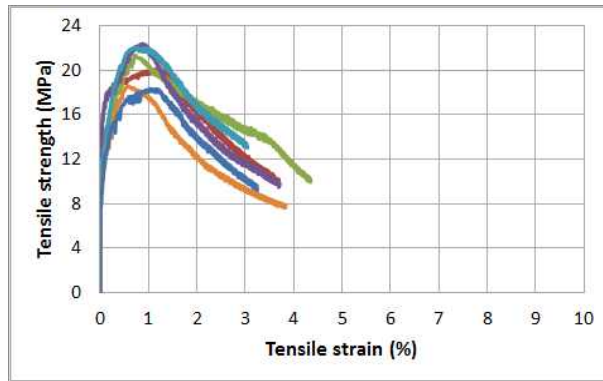
(c) HDFRC 재령별강도

그림 2.33 역학특성 분석을 위한 UHPFRC와 HDFRC의 압축강도 실험 결과

그림 2.34는 UHPFRC와 HDFRC의 인장응력과 변형률의 관계를 나타낸다. 초기균열강도 후, 두 배합 모두 변형률 경화거동이 나타났지만, 인장강도와 인장변형성능 측면에서 두 배의 인장 거동은 매우 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. HDFRC는 매우 높은 인장변형성능 나타내었고, UHPFRC는 HDFRC보다 인장변형성능은 낮지만, 인장강도가 매우 높게 나타났



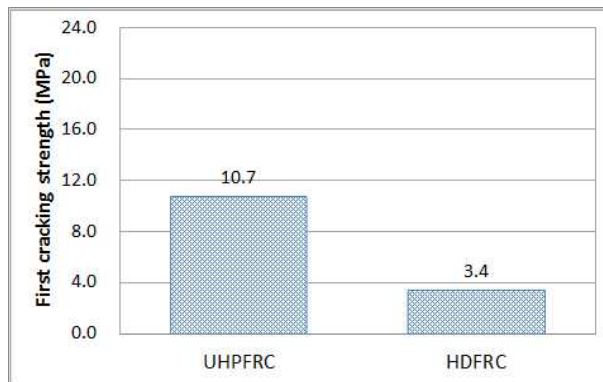
(a) HDFRC



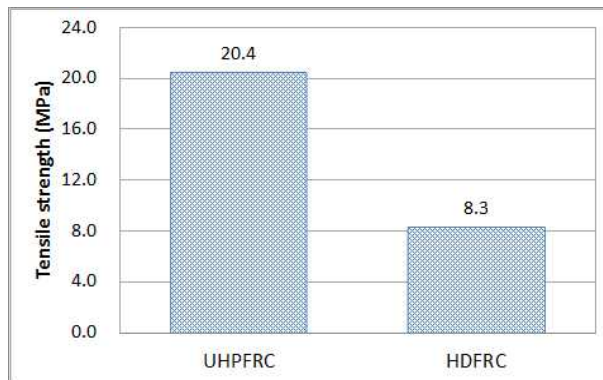
(b) UHPFRC

그림 2.34 역학특성 분석을 위한 UHPFRC와 HDFRC의 응력-변형률 곡선

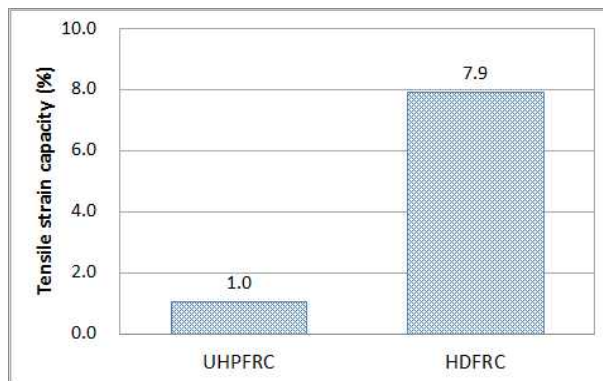
그림 2.35(a)는 UHPFRC와 HDFRC의 초기균열강도를 나타낸다. UHPFRC의 초기균열강도는 10.7 MPa로 나타났다. HDFRC의 초기균열강도는 3.36 MPa로 나타났고, UHPFRC 배합의 초기균열 강도의 31.4 % 수준으로 나타났다. 이러한 결과는 압축강도 실험 결과와 유사한 결과이다.



(a) 초기균열강도



(b) 인장강도



(c) 인장변형성능

그림 2.35 역학특성 분석을 위한 UHPFRC와 HDFRC의 일축인장 실험 결과

그림 2.35(b)는 UHPFRC와 HDFRC의 인장강도를 나타낸다. HDFRC의 인장강도는 8.27 MPa로 나타났고, UHPFRC 배합의 인장강도보다 59.6 % 낮은 것으로 나타났다. 압축강도 대비 인장강도는 HDFRC가 UHPFRC보다 1.91배 높은 것으로 나타났고, HDFRC가 UHPFRC보다 섬유 보강을 통한 인장성능향상에 효과적인 것으로 나타났다.

그림 2.35(c)는 UHPFRC와 HDFRC의 인장변형성능을 나타낸다. UHPFRC의 인장변형성능은 1.04 %로 나타났고, 이러한 결과는 기존에 보고되었던 UHPFRC의 인장변형성능과 유사한 결과이다.[Kang et al. 2016] HDFRC의 인장변형성능은 7.89 %로 나타났고, UHPFRC보다 7.62배

높은 것으로 나타났다. 이는 HDFRC가 UHPFRC보다 강도는 낮지만 인장변형능이 매우 우수한 연성 지향성 재료라는 것을 의미한다.

그림 2.36은 UHPFRC와 HDFRC의 인성을 나타낸다. 인성은 재료가 파괴될 때까지 흡수하는 에너지 용량으로 정의하며, 응력-변형률 곡선의 아래 영역을 계산하여 평가한다. HDFRC는 인장강도 도달 후, 급격한 응력저하를 나타냈기 때문에 인장강도 도달까지의 강도 및 인장변형능을 통하여 인성을 계산하였다. 그러나 UHPFRC는 인장강도 도달 후, 응력이 서서히 감소하는 연화 거동을 나타냈기 때문에 연화 거동 중에 인장강도가 초기균열강도와 동일해지는 지점을 실험체의 파괴 지점으로 판단하고 계산하였다. 계산 결과, UHPFRC의 인성은 0.498 MPa·mm/mm으로 나타났고, HDFRC의 인성보다 1.1배 높은 것으로 나타났다. 앞서 축소 모형 실험에 따른 충돌 성능을 평가한 결과 UHPFRC의 충돌 저항 성능은 HDFRC보다 약간 우수하며, 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 결과는 충돌 저항 성능이 재료의 인성, 즉 에너지 흡수 능력에 매우 큰 영향을 받는다는 것을 의미한다.

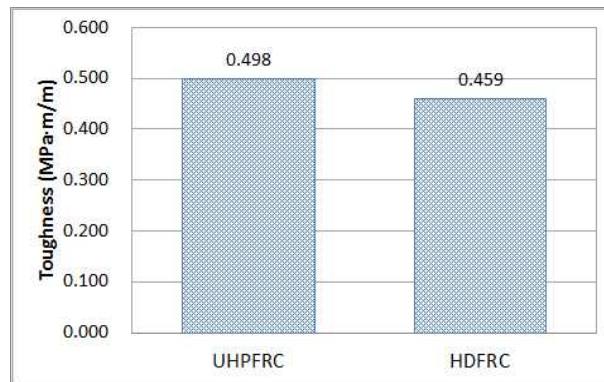


그림 2.36 역학특성 분석을 위한 UHPFRC와 HDFRC의 인성

그림 2.37은 UHPFRC와 HDFRC의 강도성능지수를 나타낸다. 강도성능지수란 다중 균열에 의한 변형률 경화 거동이 나타나기 위한 두 가지 조건(강도 조건, 에너지 조건) 중 강도 조건에 해당하는 값으로서 매트릭스의 균열강도 대비 최대 섬유가교응력의 비로 구할 수 있다.[Kanda and Li 2006] 강도성능지수가 클수록 다중 균열에 의한 변형률 경화 거동이 나타날 확률이 높아지며, 최소 1보다 커야 한다. HDFRC의 강도성능지수는 2.46으로 나타났고, UHPFRC의 강도성능지수보다 28.9 % 높은 것으로 나타났다. 이는 HDFRC가 UHPFRC보다 다중균열 발생에 의한 변형률 경화거동이 나타날 확률이 높다는 것을 의미하며, HDFRC의 인장변형능이 UHPFRC보다 더 높게 나타난 이유이다.

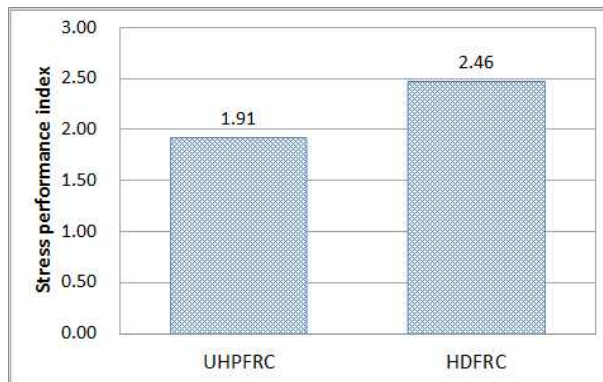
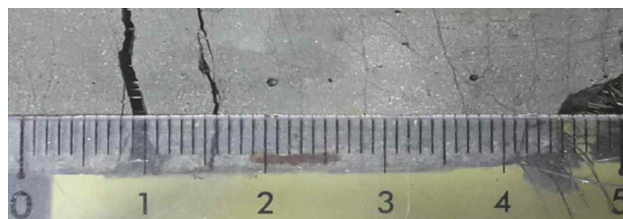


그림 2.37 역학특성 분석을 위한 UHPFRC와 HDFRC의 강도성능지수

그림 2.38은 UHPFRC와 HDFRC의 균열패턴을 나타낸다. 균열패턴 관찰 결과, HDFRC는 UHPFRC보다 우수한 다중균열 발생 및 균열폭 제어 현상이 나타났다.



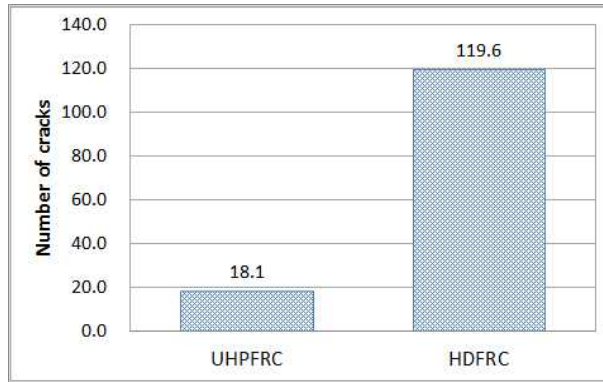
(a) UHPFRC



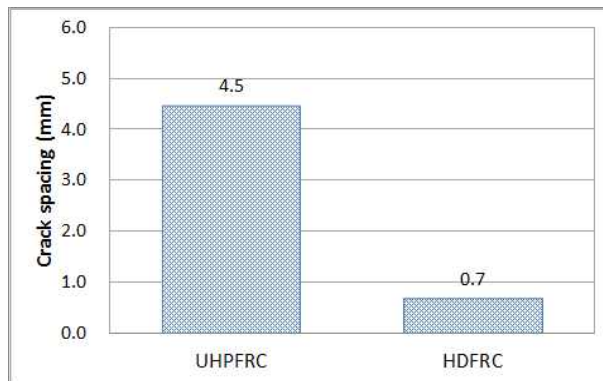
(b) HDFRC

그림 2.38 역학특성 분석을 위한 UHPFRC와 HDFRC의 균열패턴 (단위 : cm)

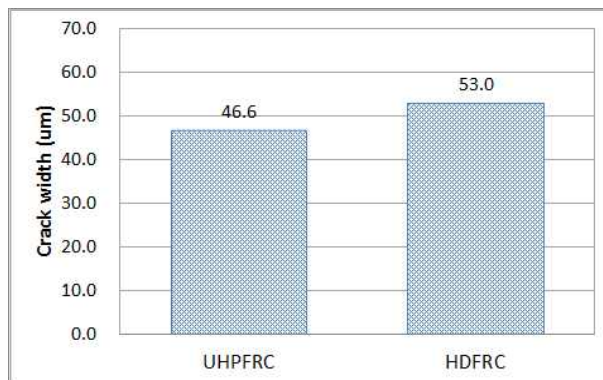
그림 2.39는 UHPFRC와 HDFRC의 균열개수, 균열간격, 균열폭을 나타낸다. 평균 균열개수는 HDFRC가 119개로 나타났고, UHPFRC보다 6.61배 높은 것으로 나타났다. 평균 균열간격은 UHPFRC가 4.47 mm로 나타났고, HDFRC의 0.67 mm보다 6.67배 높은 것으로 나타났다. 평균 균열폭은 HDFRC가 53.0 μm 로 나타났고, UHPFRC의 46.6 μm 보다 13.7 % 높은 것으로 나타났다.



(a) Number of cracks



(b) Crack spacing



(c) Crack width

그림 2.39 역학특성 분석을 위한 UHPFRC와 HDFRC의 균열패턴 분석 결과

㉠ 기존 매트릭스 배합특성 분석 2(일반 콘크리트)

또한, 일반적인 구조물에 적용되는 압축강도(약 30 MPa)를 갖는 일반적인 콘크리트 배합을 구성하여, 역학특성을 분석하였다. UHPFRC나 HDFRC는 일반적인 콘크리트의 특정 성능(강도 또는 연성)을 향상시킨 고성능 건축재료로서, 일반적인 콘크리트가 갖는 단점을 향상시켰다는 장점이 있다. 그러나 제조를 위한 비용이 올라가거나, 품질관리가 어렵다는 점 등의 단점을 가지고 있다. 따라서 일반적인 구조물에 보편적으로 적용하기 위해서는 일반적인 콘크리트 배합

의 배합특성 및 역학특성 등을 분석하고, 이를 이용하여 내충격성이 향상된 건축재료를 개발할 필요성이 있다. 또한, 철근보강 콘크리트의 내충격성을 향상시키는 방법으로 일반적인 콘크리트에 카고메 트러스를 적용하는 방안에 대한 기초 연구로서 일반적인 콘크리트의 배합 특성을 분석할 필요성이 있다. 따라서 일반적인 콘크리트 배합을 구성하고 역학특성을 평가함으로써 내충격성이 향상된 건축재료 개발을 위한 기초자료로서 활용하고자 하였다.

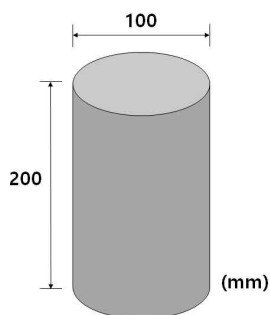
표 2.15는 일반적인 콘크리트의 사용재료 및 배합을 나타낸다. 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다. 잔골재는 전라북도 순창지역에서 채취된 천연골재(개답사)를 사용하였으며, 표면건조포화상태에서의 밀도는 2.57 g/cm^3 이다. 굵은골재는 전라남도 화순지역에서 채취된 쇠석골재를 사용하였으며, 골재의 최대치수는 13 mm이고, 표면건조포화상태에서의 밀도는 2.57 g/cm^3 이다. 잔골재율은 45.9 %이며, 물-결합재비는 42.7 %이다. 고성능감수제는 시멘트의 중량대비 0.6 % 혼입하였다.

표 2.15 일반적인 콘크리트의 배합

시멘트	혼합수	잔골재	굵은골재	고성능감수제	W/B	잔골재율
1	0.427	1.32	1.56	0.006	42.7	45.9

일반적인 콘크리트의 혼합은 분말형 재료인 시멘트, 잔골재 및 굵은 골재를 넣고 약 10분간 건비빔하였다. 건비빔이 종료된 후, 혼합수와 고성능감수제를 넣고 충분한 유동상태를 가질 때까지 약 10분간 혼합하였다.

혼합이 완료된 후 배합 특성에 따른 역학특성을 조사하기 위하여 실험체를 제작하였다. 실험체는 KS F 2425에 따라 제작하였으며, 지름 10 cm 및 높이 20 cm인 원주형 공시체로 제작하였다. 실험체 제작 후, $23 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 와 상대습도 $60 \pm 10 \text{ \%}$ 의 양생실에서 48시간 동안 기건양생을 실시하고 몰드를 제거하였다. 몰드 제거 후 다시 $23 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 와 상대습도 $60 \pm 10 \text{ \%}$ 의 양생실에서 재령 28일까지 기건양생을 실시하였다.



(a) 압축강도 실험체 형상



(b) 압축강도 실험 모습

그림 2.40 압축강도 실험체의 형상 및 실험 방법

압축강도는 KS F 2405에 따라 측정하였다. 지름이 10 cm이고 높이가 20 cm인 원주형 공시체

3개를 이용하여 측정하고, 평균값을 계산하였다. 그림 2.40은 압축강도 실험체의 형상 및 압축강도 실험 모습을 나타낸다. 압축강도 실험 결과 콘크리트의 평균 압축강도는 36.2 MPa로 나타났다, 오차는 1.06 MPa로서 나타났다.

㉔ 카고메 트러스와 매트릭스 혼합 제조기술

앞서 전술한 바와 같이 내충격 저항성을 높이는 방법은 크게 재료 자체의 에너지 흡수 능력을 키우는 것이고, 충격하중의 특징을 이해하고 그에 적합한 구조를 개발하는 것이다. 재료 자체의 에너지 흡수 능력을 키우는 방법은 강도를 높이거나 인장변형성능을 높이는 등의 역학성능을 향상시키는 것이다. 이러한 방법으로 개발된 가장 대표적인 배합인 UHPFRC와 HDFRC 배합은 앞서 축소 모형 실험 및 배합 특성 분석 등을 통하여 그 가능성을 충분히 검증하였다. UHPFRC는 높은 압축강도를 나타내고 강섬유 혼입을 통하여 콘크리트의 취성적인 단점의 개선한 것 뿐만 아니라, 혼합 재료의 입도 분포를 최적화하였기 때문에 높은 유동 성능도 가지고 있다. 따라서 보강재료로서 카고메 트러스를 적용하는 것이 충분히 가능할 것으로 판단된다.

카고메 트러스는 등방성, 경량성 및 높은 전단강도를 가지고 있어 충격하중에 대한 저항성을 높일 수 있다. 또한, 카고메 트러스 구조가 다공질 셀을 가지고 있기 때문에 기존 철근배근과 동일한 방법으로 카고메 트러스를 보강한 뒤 콘크리트를 타설하는 방식으로 제작이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 UHPFRC를 매트릭스로 사용하고 카고메 트러스를 보강재료로 사용하여 혼합하는 제조기술을 조사하였다. 또한 합성섬유 혼입을 통하여 인장변형성능을 비약적으로 향상시킨 HDFRC는 강도적인 측면에서는 높지 않지만 매우 우수한 인장변형성능을 기반으로 높은 에너지 흡수 능력을 가지고 있는 것으로 나타났다. 따라서 HDFRC 역시 카고메 트러스를 적용하면 더욱 향상된 내충격성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 따라 HDFRC를 매트릭스로 사용하고 카고메 트러스를 보강재료로 사용하여 혼합하는 제조기술도 조사하였다. 마지막으로 일반 철근보강 콘크리트의 배합 특성과 역학 특성도 분석하여 일반 콘크리트의 충돌 저항 성능을 향상시킬 수 있는 방법도 모색하였다. 일반 콘크리트에 카고메 트러스를 보강하여, 철근이 보강된 콘크리트와 충돌 저항 성능을 비교하고자 하였다. 이를 위하여 재료의 최대 치수가 큰 굵은 골재가 포함된 일반 콘크리트 배합과 카고메 트러스를 혼합하는 제조기술을 조사하였다.

먼저 UHPFRC를 매트릭스로 사용하고 카고메 트러스를 보강재료로 적용하기 위하여 카고메 트러스를 거푸집 내에 혼입하고, UHPFRC 배합을 혼합하여 거푸집 내에 위치한 카고메 트러스 다공질 셀 사이로 타설하는 방법을 진행하였다. UHPFRC의 사용재료 및 배합은 앞서 축소 모형 실험과 배합 분석을 실시하였던 배합과 사용재료를 사용하였고 강섬유의 혼입량을 달리 하였다. 강섬유의 혼입량은 전체 부피비의 1.5 %와 0.3 %로 달리하였고, 표 2.16은 UHPFRC와 카고메 트러스의 혼합 제조기술을 위한 배합을 나타낸다. 보강재료로 사용된 카고메 트러스는 크기가 20 cm × 20 cm × 4 cm(가로 × 세로 × 높이)이며, 와이어 인장강도가 3,600 MPa, 와이어 두께가 1 mm 및 피치가 10 mm인 카고메 트러스를 사용하였다.

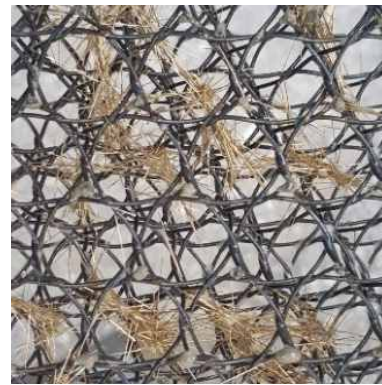
표 2.16 UHPFRC와 카고메 트러스의 혼합 제조기술을 위한 배합

Mixture	Binder	W/B	충전재	잔골재	팽창제	수축 저감제	소포제	고성능 감수제	강섬유 (Vol. %)
UHPFRC-1.5	1	0.19	0.24	0.88	0.06	0.008	0.0006	0.023	1.50
UHPFRC-0.3									0.30

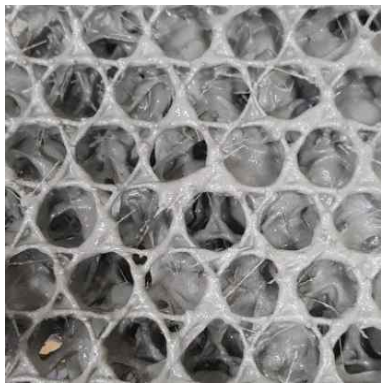
혼합 방법은 앞서 전술한 바와 같이 UHPFRC 배합의 혼합방법과 동일하게 진행하였다. 혼합이 끝난 후, 거꾸집 내에 혼입한 카고메 트러스 다공질 셀 사이로 UHPFRC 매트릭스를 타설하였다. 이때 매트릭스가 다공질 셀을 통과하여 타설됨으로써 카고메트러스와 일체화되어 경화될 수 있는지를 육안으로 평가하였다.

평가 결과, 강섬유가 1.5 % 혼입된 UHPFRC-1.5 배합은 다량의 강섬유가 카고메 트러스와 이어 사이에 걸려 카고메 트러스의 다공질 셀 사이를 통과하지 못하는 것으로 나타났다. 그림 2.41(a)와 같이 점성이 높은 매트릭스만 다공질 셀 사이를 통과하고, 다량의 강섬유는 다공질 셀을 통과하지 못하는 재료분리 현상이 발생하였고, 매트릭스를 제거하고 카고메 트러스를 살펴본 결과, 카고메 트러스 상단에서 다량의 강섬유가 발견되었다. 이러한 이유는 크게 두 가지로 설명할 수 있다. 먼저 타설과정에서 투입되는 매트릭스의 양이 다공질 셀에 통과가 가능한 매트릭스 양보다 높고, 타설속도가 빠르기 때문이다. 이로 인하여 카고메 트러스 상단에서 매트릭스가 거꾸집 내부로 들어가지 못하고 정체되며, 시간이 흐름에 따라 점성이 높은 매트릭스만 다공질 셀을 통과하고, 강섬유는 카고메 트러스 상단에 남는 것이라 판단된다. 두 번째는 강섬유의 길이가 길어 카고메 트러스의 다공질 셀을 통과하기에 한계가 있기 때문이다. 이 실험에서 사용한 카고메 트러스의 피치는 10 mm이며, 강섬유의 길이는 19.5 mm이다. 이로 인하여 강섬유가 다공질 셀을 통과하기에 어려움이 있었을 것으로 판단된다.

이를 해결하기 위한 방법은 배합 설계적인 측면에서 해결하는 방법과 재료의 물리적 성질 측면에서 해결하는 방법이 있다. 배합 설계적인 측면에서 해결하는 방법은 강섬유의 혼입량을 감소함으로써 동일한 매트릭스 내에 분포한 강섬유의 개수를 줄여 다공질 셀을 통과하는 것이 원활하게 만들어 주는 것이다. 강섬유를 0.3 % 혼입한 UHPFRC-0.3 배합은 UHPFRC-1.5 배합과 달리 강섬유와 매트릭스의 재료분리 현상이 발생하지 않고, 일체화 되어 타설이 진행되는 것으로 나타났다. 그림 2.41(b)와 같이 매트릭스와 강섬유가 일체화되어 카고메 트러스의 다공질 셀을 통과하였으며, 카고메 트러스 상단에 남아있는 강섬유도 현저히 줄어든 것이 확인되었다. 이를 통하여 UHPFRC에 카고메 트러스를 혼합하는 제조 방안은 강섬유의 혼입량을 0.3 % 수준으로 혼입하면 타설이 가능한 것으로 나타났다. 물리적 성질 측면에서 해결하는 방법은 카고메 트러스의 피치를 길게 하여 다공질 셀의 크기를 늘리는 방법과 길이가 짧은 강섬유를 사용하여 다공질 셀을 통과하기 용이하게 하는 방법 등이 있다.



(a) UHPFRC-1.5



(b) UHPFRC-0.3

그림 2.41 UHPFRC-1.5와 UHPFRC-0.3 배합의 카고메 트러스 통과 모습

HDFRC는 카고메 트러스를 적용하는 것이 쉽지 않은 것으로 나타났다. HDFRC는 합성섬유를 혼입하여 다중균열 발생 및 변형률 경화 거동을 통하여 높은 인장변형성능을 나타낸다. HDFRC의 다중균열 발생 및 변형률 경화 거동은 섬유가교거동을 기반으로 하고 있으며, 섬유의 매트릭스 내에서의 분산성은 섬유가교거동에 영향을 미치는 중요한 요인중 하나이다. 기존 연구에서는 섬유보강 복합재료의 높은 인장변형성능을 확보하기 위해서는 매트릭스의 점성이 일정수준 이상이어야 하며 매트릭스의 점성이 높아질수록 섬유의 분산성이 우수해지고, 인장변형성능이 향상된다고 보고하였다.[Li and Li 2013] HDFRC 배합은 보강섬유인 PE 섬유의 분산성을 최적화하고 높은 인장변형성능을 획득하기 위하여 매트릭스의 점성이 높아지고 유동성이 낮아지기 때문에 카고메 트러스의 다공질 셀 사이로 섬유가 보강된 매트릭스를 부어넣기가 쉽지 않은 것으로 나타났다. 또한, 보강섬유로 사용한 합성섬유가 매우 유연하기 때문에 카고메 트러스의 셀사이로 통과하지 못하고 와이어에 모두 걸리는 것으로 나타났다. 카고메 트러스가 보강된 거푸집 내에서 매트릭스는 거푸집의 바닥으로 흐르고, 보강섬유는 카고메 트러스 와이어 사이사이에 걸려 보강섬유와 매트릭스의 재료분리가 발생하는 것으로 나타났고, 일체화가 되지 않은 것으로 나타났다. 이에 따라 카고메 트러스와 HDFRC의 혼합은 쉽지 않은 것으로 판단된다.

일반 콘크리트 역시 카고메 트러스의 다공질 셀 안으로 매트릭스가 잘 들어가서 타설이 가

능한지를 평가하였다. 일반 콘크리트의 사용 재료 및 배합은 앞서 전술한 바와 같다. 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였고, 잔골재는 천연골재(개답사)를 사용하였으며, 굵은골재는 최대치수는 13 mm인 쇠석골재를 사용하다. 잔골재율은 45.9 %이며, 물-결합재비는 42.7 %이며, 고성능감수제는 시멘트의 중량대비 0.6 %를 혼입하였다. 실험 결과 일반 콘크리트의 슬럼프 플로우가 500 mm 이상이면 카고메 트러스의 다공질 셀 안으로 굵은 골재를 포함한 매트릭스가 잘 흘러들어가는 것으로 나타났고, 충분히 타설이 가능한 것으로 나타났다. 압축강도는 36.2 MPa로 나타났다. 따라서 최대치수가 13 mm인 굵은 골재를 사용하고, 압축강도가 35 MPa 수준인 일반 콘크리트 배합을 사용할 때, 슬럼프 플로우를 500 mm 이상으로 유동 성능을 확보하면 카고메 트러스를 보강재료로서 적용하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 그림 2.42는 일반 콘크리트의 보강재료로서 카고메 트러스가 매립된 타설 직후의 모습을 나타낸다.



(a) 일반 콘크리트 타설 전



(b) 일반 콘크리트 타설 후

그림 2.42 일반콘크리트와 카고메 트러스 혼합 모습

㉔ 요약 및 결론

이 연구에서는 기존 매트릭스의 배합 특성을 분석하고 그에 따른 역학 특성을 분석하였다. 또한 매트릭스에 카고메 트러스를 보강재료로서 적용할 수 있는 제조기술을 개발하였다. 먼저 기존 매트릭스는 1차년도에 축소모형 제작 및 고속 비상체 충돌실험을 하였던 UHPFRC와 HDFRC의 배합특성에 따른 역학 특성을 분석하였다. 밀도 실험 결과 이론적 밀도값과 실험값은 매우 유사하게 나타났으며, 이에 따라 두 배합 모두 제조과정에서 의도치 않은 기포 생성에 따른 성능저하는 없는 것으로 나타났다. 또한 압축강도는 UHPFRC가 155MPa로 나타났고, HDFRC의 압축강도 32.9 MPa보다 4.7배 높은 것으로 나타났다. 초기균열강도 및 인장강도 역시 UHPFRC가 각각 10.7 MPa 및 20.4 MPa로서 HDFRC보다 높게 나타났다. 이를 통하여 UHPFRC는 강도 지향성 재료라는 것이 확인되었다. 인장변형성능은 HDFRC가 7.89 %로 나타났고, UHPFRC보다 약 7.62배 우수한 것으로 나타났다. 이를 통하여 HDFRC는 연성 지향성 재료라는 것이 확인되었다. 인성은 UHPFRC가 HDFRC보다 1.1배 높은 것으로 나타났고, 앞서 실험한 축소 모형 실험에 따른 충돌 성능 결과와 유사한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 충돌 저항 성능이 재료의 인성, 즉 에너지 흡수 능력에 매우 큰 영향을 받는다는 것을 의미한다. 또한

일반적인 구조물에 적용되는 압축강도(약 30 MPa)를 갖는 일반적인 콘크리트 배합을 구성하여, 역학특성을 분석하였다. 배합 구성은 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였고, 잔골재는 천연골재(개답사)를 사용하였으며, 굵은골재는 최대치수가 13 mm인 쇄석 골재를 사용하였다. 잔골재율은 45.9 %이며, 물-결합재비는 42.7 %로 구성하였다. 고성능감수제는 시멘트의 중량대비 0.6 % 혼입하였다. 실험체 제작 후 28일 재령 압축강도를 평가한 결과 압축강도는 36.2 MPa로 나타났다. 마지막으로 매트릭스와 카고메를 혼합하는 제조기술은 개발하였고, UHPFRC와 일반 콘크리트에 보강재료로서 카고메 트러스를 혼합하는 것이 가능한 것으로 나타났다. UHPFRC의 경우 강섬유 혼입량이 1.5 %이면 강섬유가 카고메 트러스의 와이어에 걸려 재료 분리 현상이 나타났지만, 혼입량을 0.3 %로 감소시키면 카고메 트러스의 다공질 셀 안으로 온전히 타설이 가능한 것으로 나타났다. 일반 콘크리트의 경우 최대치수가 13 mm인 굵은 골재를 사용하고, 압축강도가 35 MPa 수준인 일반 콘크리트 배합을 사용할 때, 슬럼프 플로우를 500 mm 이상으로 유동 성능을 확보하면 카고메 트러스를 보강재료로서 적용하는 것이 가능한 것으로 나타났다. 그러나 HDFRC는 카고메 트러스를 적용하는 것이 쉽지 않은 것으로 나타났다. 이러한 이유는 합성섬유의 분산성이 최적화될 수 있는 유동상태를 가져야하는 HDFRC 매트릭스의 특성상 점성이 높고 유동성이 낮기 때문이며, 합성섬유가 매우 유연하기 때문인 것으로 판단된다.

② 최적 매트릭스 재료 개발

㉠ 최적 배합도출 1(UHPC 매트릭스에 카고메 트러스 보강)

앞서 고강도를 나타내는 콘크리트 복합재료는 충돌 저항 성능에 효과가 있는 것을 확인하였고, 고강도를 나타낼 수 있는 배합 특성 및 역학특성을 조사하였다. 또한 카고메 트러스를 적용할 수 있는 제조 기술도 개발하였다. 이를 통하여 이 연구에서는 내충격 저항성능을 향상시키기 위하여 카고메 트러스를 보강재료로 사용한 고강도 콘크리트 복합재료의 최적 배합을 도출하였다.

총 3종류로 재료의 구성방법을 달리하였으며, 표 2.17은 각 배합의 재료구성을 나타낸다. 매트릭스는 압축강도 100MPa 급 이상을 나타내는 UHPC 배합을 사용하였고, 표 2.18은 매트릭스의 배합을 나타낸다. 결합재는 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 실리카흙을 사용하였으며, 실리카흙은 시멘트의 질량 대비 20 %만큼 대체 혼입하였다. 실리카흙은 분말형 재료의 충전 밀도를 증가시켜 유동성을 개선하고, 포졸란 반응을 통한 강도 증진을 목적으로 사용되었다. BET(Brunauer-Emmett-Teller) 방법으로 측정한 비표면적은 7.05 m²/g이고, 96 % 이상의 SiO₂로 구성되어 있다. 물/결합재비는 19 %이며, 충전재는 평균 입경 2.2 μm의 순수 실리카를 결합재 대비 24 % 혼입하였다. 잔골재는 평균 입경 0.5 mm인 규사 7호를 결합재 대비 88 % 혼입하였으며, 굵은 골재는 사용하지 않았다. 혼화제로는 수축량을 저감시키기 위하여 팽창제 및 수축 저감제를 사용하였으며, 섬유 분산성을 최적화할 수 있는 유동상태를 만들기 위하여 고성능감수제를 사용하였다. 보강 섬유는 길이 19.5 mm, 직경 200 μm, 인장강도 2,500 MPa의 강섬유를 사용하였고, 표 2.19는 보강섬유의 물성을 나타낸다. 보강재료로 사용한 카고메 트러스는 와이어의 인장강도가 360 MPa, 직경이 1 mm이며, 피치가 10 mm인 카고메 트러스를 사용하였다.

M-SF는 100 MPa급의 압축강도를 나타내는 매트릭스에 강섬유를 전체 부피비의 0.3 % 혼입하였고, 카고메 트러스는 보강하지 않았다. M-SF-KT는 강섬유를 전체 부피비의 0.3 % 혼입하고, 카고메 트러스도 보강하였다. M-KT는 카고메 트러스를 보강하고, 강섬유는 혼입하지 않았다. M-SF-KT와 M-SF의 비교를 통하여 카고메 트러스 보강을 통한 충돌 저항 효과를 확인할 수 있다. M-SF-KT와 M-KT의 비교를 통하여 강섬유 혼입에 대한 충돌 저항 효과를 확인할 수 있다. 또한, M-SF와 M-KT의 비교를 통하여 강섬유 혼입과 카고메 트러스 보강 방법에 대한 차이를 확인할 수 있다.

매트릭스의 혼합은 호BAT 믹서기를 이용하여 분말형 재료인 시멘트, 지르코니아 실리카 흙, 충전재, 잔골재, 수축저감제 및 팽창제를 넣고 10분간 혼합하였다. 건비빔이 종료된 후, 액상형 재료인 혼합수, 고성능감수제, 소포제를 혼합하고, 최적의 유변학적 특성을 확보할 때까지 혼합하였다. 유변학적 특성이 최적화되면, 섬유를 혼입하여 5분동안 고속으로 혼합하였으며, 마지막으로 소포제를 넣고 저속으로 1분동안 혼합하여 기포제거 및 안정화를 실시하였다.

혼합이 완료된 후, 압축강도 실험체, 일축인장 실험체 및 내충격성 실험을 위한 실험체를 제작하고, 48시간동안 기건양생을 실시한 후, 실험체를 탈형하였다. 기건양생은 양생온도 23 ℃ ± 3 ℃, 상대습도 60 % ± 5 %의 양생실에서 실시하였다. 실험체 탈형 후, 재령 28일까지 양생온도 23 ℃ ± 3 ℃의 양생수조에서 수중양생을 실시하였다.

표 2.17 재료 구성(UHPC에 카고메 트러스 보강)

구분	재료 구성		
	매트릭스	강섬유 (Vol. %)	카고메 트러스
M-SF	UHPC	0.3	미혼입
M-SF-KT	UHPC	0.3	혼입
M-KT	UHPM	미혼입	혼입

표 2.18 매트릭스 배합(UHPC에 카고메 트러스 보강)

Binder		W/B	충전재	잔골재	팽창제	수축저감제	소포제	고성능감수제
시멘트	실리카흙							
0.8	0.2	0.19	0.24	0.88	0.06	0.008	0.0006	0.023

표 2.19 보강섬유 물성(UHPC에 카고메 트러스 보강)

길이 (mm)	직경 (μm)	인장강도 (MPa)	밀도 (g/cm³)	탄성계수 (GPa)
19.5	200	2,500	7.8	200

㉔ 최적 배합도출 2(일반 콘크리트에 카고메 트러스 보강)

앞서 철근보강 콘크리트의 내충격성을 향상시키는 방법으로서 일반적인 콘크리트에 카고메 트러스를 적용하기 위하여 30 MPa 수준의 압축강도를 갖는 콘크리트 배합을 구성하여, 역학특성을 분석하였다. 또한 카고메 트러스를 적용할 수 있는 콘크리트 배합 특성 및 역학특성도 분석하였다. 이를 통하여 이 연구에서는 일반 철근보강 콘크리트의 내충격 저항성능을 향상시키기 위하여 카고메 트러스를 보강재료로 사용한 일반 콘크리트 복합재료의 최적 배합을 도출하였다.

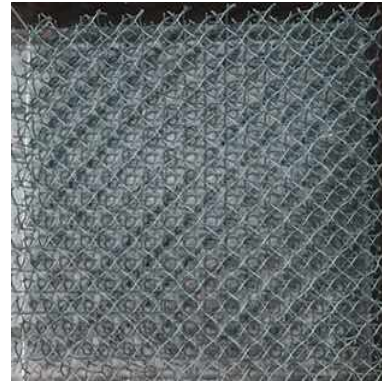
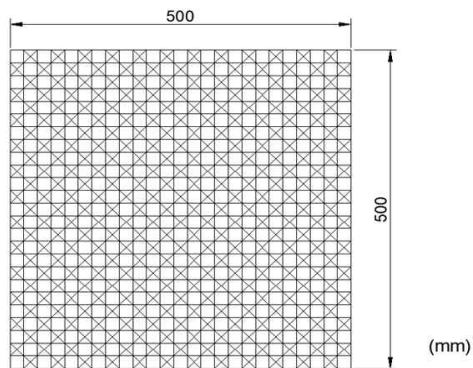
총 3종류로 보강방법을 달리하였으며, 표 2.20은 보강 방법을 나타낸다. 먼저 NC-K 배합은 일반 콘크리트에 카고메 트러스를 보강재료로서 사용하는 배합이다. NC-2 배합은 일반 콘크리트에 수직 철근과 수평 철근을 2 × 2 형태로 보강한 배합이다. 마지막으로 NC-3 배합은 일반 콘크리트에 수직 철근과 수평 철근을 4 × 4 형태로 보강한 배합이다. 건축구조기준의 콘크리트 벽체 설계기준을 살펴보면 벽체의 전체 단면적에 대한 최소 수직 철근비는 설계기준항복강도 400 MPa 이상으로서 D16 이하의 이형철근은 1.2 % 이상으로 규정하고 있다. 또한 벽체의 전체 단면적에 대한 최소 수평 철근비는 설계기준항복강도 400 MPa 이상으로서 D16 이하의 이형철근은 2.0 % 이상으로 규정하고 있다.[KDS 14 20 72] NC-2 배합과 NC-4 배합의 철근비를 계산한 결과 각각 0.57 % 및 1.14 %로 나타났다. NC-4 배합의 수직 철근과 수평 철근은 동일하기 때문에 수직 철근비와 수평 철근비는 모두 동일하다. 카고메 트러스는 일반적인 철근과 달리 나선형의 강선이 교차되는 형태로 제작되어 있기 때문에 철근의 면적을 계산하는 것이 매우 어렵다. 따라서 실험체 전체 무게와 카고메 트러스의 무게를 각각 측정한 이후, 이에 대한 중량비를 계산하여 중량에 따른 철근비를 계산하였다. 카고메 트러스를 보강재료로 사용한 NC-K 배합의 중량에 대한 철근비는 5.49 %로 나타났다. NC-2 배합과 NC-4 배합 역시 이와 동일한 방법으로 중량에 대한 철근비를 계산하였으며, 각각 3.91 % 및 7.81 %로 나타났다. 카고메 트러스의 철근비는 NC-2 배합보다는 철근비가 40.5 % 높고 NC-4 배합보다는 철근비가 29.7 % 낮다. 따라서 NC-K 배합과 NC-2 배합 및 NC-4 배합의 충돌 저항 성능을 비교하여 일반 콘크리트를 카고메 트러스로 보강하면 일반 철근 보강 콘크리트와 비교하여 충돌 저항 향상 정도를 직접적으로 비교할 수 있다.

표 2.20 재료 구성(일반 콘크리트에 카고메 트러스 보강)

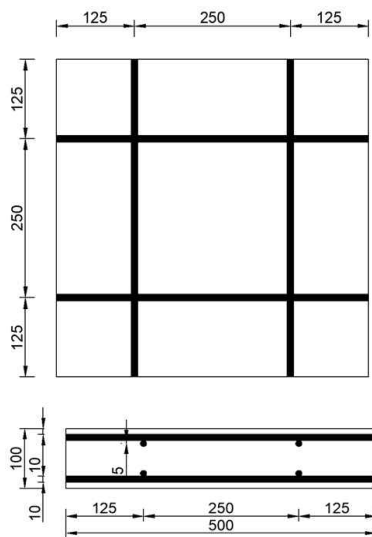
구분	재료 구성		
	보강 종류	보강 재료의 물리적 특성	철근비(중량) (%)
NC-K	카고메 트러스	직경 : 2 mm, 피치 : 20 mm	5.49
NC-2	2 × 2 철근 보강	D10 철근, 항복강도 : 400 MPa	3.91
NC-4	4 × 4 철근 보강	D10 철근, 항복강도 : 400 MPa	7.81

그림 2.43은 각 배합의 카고메 트러스 보강 및 철근 보강 상세를 나타낸다. 모든 배합의 가로 × 세로 × 높이는 50 cm × 50 cm × 10 cm이다. 카고메 트러스의 와이어 직경은 2 mm이고, 피치는 20 mm이다. 보강재료로서 사용한 철근은 항복강도가 400 MPa인 D10 철근을 사용하였으

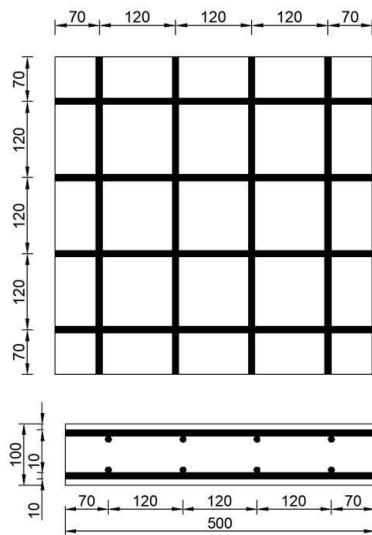
며, NC-2 배합의 철근 간격은 250 mm이고, NC-4 배합의 철근간격은 120 mm이다.



(a) NC-K



(b) NC-2



(b) NC-4

그림 2.43 카고메 및 철근 보강 상세(일반 콘크리트에 카고메 트러스 보강)

표 2.21은 일반 콘크리트의 사용재료 및 배합을 나타낸다. 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였고, 잔골재와 굵은 골재를 혼입하였다. 잔골재는 전라북도 순창지역에서 채취된 천연골재(개답사)를 사용하였으며, 표면건조포화상태에서의 밀도는 2.57 g/cm^3 이다. 굵은골재는 전라남도 화순지역에서 채취된 쇄석골재를 사용하였으며, 골재의 최대치수는 13 mm이고, 표면건조포화상태에서의 밀도는 2.57 g/cm^3 이다. 잔골재율은 45.9 %이며, 물-결합재비는 42.7 %이다. 고성능감수제는 시멘트의 중량대비 0.6 % 혼입하였다.

표 2.21 일반 콘크리트의 배합

시멘트	혼합수	잔골재	굵은골재	고성능감수제	W/B	잔골재율
1	0.427	1.32	1.56	0.006	42.7	45.9

일반 콘크리트의 혼합은 분말형 재료인 시멘트, 잔골재 및 굵은 골재를 넣고 약 10분간 건비빔하였다. 건비빔이 종료된 후, 혼합수와 고성능감수제를 넣고 충분한 유동상태를 가질때까지 약 10분간 혼합하였다. 혼합이 완료된 후 배합 특성에 따른 역학특성을 조사하기 위하여 실험체를 제작하였다. 실험체는 KS F 2425에 따라 제작하였으며, 지름 10 cm 및 높이 20 cm인 원주형 공시체로 제작하였다. 실험체 제작 후, $23 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 와 상대습도 $60 \pm 10 \%$ 의 양생실에서 48시간동안 기건양생을 실시하고 몰드를 제거하였다. 몰드 제거 후 다시 $23 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 와 상대습도 $60 \pm 10 \%$ 의 양생실에서 재령 28일까지 기건양생을 실시하였다.

㉔ 최적 배합도출 3(카고메 연결재 사용 및 결합재 구성 방법에 따른 영향)

충격하중을 받게 되는 구조물은 비상체가 충돌하면 충돌지점에서 압축파가 발생하고 실험체 전체에 압축변형을 일으킨다. 이후 배면에서 자유표면을 만나 반사 인장파가 발생한다. 따라서 비상체가 충돌하는 전면은 강도가 높은 매트릭스를 구성하고, 인장파가 발생하는 배면은 연성이 높은 매트릭스를 구성할 경우, 충격하중의 특성과 그에 따라 요구되는 재료특성을 고려할 수 있을 것으로 판단된다. 앞서 축소모형 실험과 배합 특성 및 제조기술 개발을 통하여 고강도 재료인 UHPC와 고연성 재료인 HDFRC의 충격 저항성 재료로서의 가능성을 확인하였으며, 역학 특성이 다른 두 재료의 구성방법을 달리하여 제조할 경우 내충격 저항성능을 향상시킬 수 있는 새로운 건축재료가 될 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 전면과 배면을 구성하는 매트릭스가 서로 다르기 때문에 고속 충격 하중 하에서 비상체가 충돌하였을 때, 매트릭스의 계면에서 접착이 파괴되어 일체화 거동을 하지 못할 우려가 있다. 따라서 카고메 트러스를 연결재로 사용하면 매트릭스의 계면에서 접착력을 증가시킬 수 있을 것으로 판단되며, 일체화 거동이 가능할 것으로 판단된다. 이에 따라 이 연구에서는 결합재의 구성방법을 달리하고, 카고메 연결재를 사용하여 내충격 저항성능을 향상시킬 수 있는 방안을 도출하였다.

이 연구에서 제안한 카고메 연결재 사용 및 결합재 구성방법을 달리한 콘크리트 복합재료의 성능을 평가하기 위하여 총 5종류의 재료구성을 통하여 실험체를 제작하였다. 표 2.22는 각 배합의 재료구성을 나타낸다. 실험체 전면 및 배면에 각각 사용될 매트릭스는 강도 지향성 매트

릭스와 연성 지향성 매트릭스로 구성하였다. 강도 지향성 매트릭스는 압축강도 100 MPa급 이상을 나타내는 UHPC 배합을 사용하였다. 결합재는 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 실리카흙을 사용하였으며, 실리카흙은 시멘트의 질량 대비 20 %만큼 대체 혼입하였다. 실리카흙은 비표면적 7.05 m²/g, 96 % 이상의 SiO₂로 구성되어 있는 실리카흙을 사용하였다. 물/결합재비는 19 %이며, 충전재는 평균 입경 2.2 μm의 순수 실리카를 결합재 대비 24 % 혼입하였다. 잔골재는 평균 입경 0.5 mm인 규사 7호를 결합재 대비 88 % 혼입하였으며, 굵은 골재는 사용하지 않았다. 혼화제로는 수축량을 저감시키기 위하여 팽창제 및 수축 저감제를 사용하였으며, 섬유 분산성을 최적화할 수 있는 유동상태를 만들기 위하여 고성능감수제를 사용하였다. 보강 섬유는 길이 19.5 mm, 직경 200 μm, 인장강도 2 500 MPa의 강섬유를 사용하였다. 연성 지향성 재료인 HDFRC는 KS F 2563에서 규정한 고로슬래그 미분말 3종 분말도(4,320 cm²/g)를 갖는 고로슬래그를 모재료로 사용하고 수산화칼슘을 중량대비 10 % 대체 혼입하여 결합재를 구성하였다. 또한, 섬유의 분산성이 최적화 될 수 있는 유동상태 및 점성을 확보하기 위하여 고성능감수제와 증점제를 혼입하고, 혼합과정에서 발생할 수 있는 기포를 제거하기 위하여 소포제를 혼입하였다. 보강 섬유는 길이 18 mm, 직경 12 μm, 인장강도 2,700 MPa의 PE 섬유를 사용하였다.

표 2.22 재료 구성(카고메 연결재 및 결합재 구성 방법)

구분	재료 구성				카고메 연결재
	매트릭스 구성		보강 섬유 (Vol. %)		
UHPC	UHPC		Steel	0.3	미사용
Hybrid	전면	HDFRC	PE	1.75	미사용
	배면	UHPC	Steel	0.3	
Hybrid-R	전면	UHPC	Steel	0.3	미사용
	배면	HDFRC	PE	1.75	
Hybrid-K	전면	HDFRC	PE	1.75	사용
	배면	UHPC	Steel	0.3	
Hybrid-K-R	전면	UHPC	Steel	0.3	사용
	배면	HDFRC	PE	1.75	

Hybrid 배합은 실험체 전면은 UHPC, 배면을 HDFRC로 구성하였고, Hybrid-R 배합은 실험체 전면은 HDFRC, 배면을 UHPC로 구성하였다. Hybrid-K 배합도 Hybrid 배합과 동일하게 실험체 전면은 UHPC, 배면을 HDFRC로 구성하였고, Hybrid-K-R 배합도 Hybrid-R 배합과 동일하게 실험체 전면은 HDFRC, 배면을 UHPC로 구성하였다. 이를 통하여 매트릭스의 구성 방법에 따른 충돌 저항 성능을 비교할 수 있다. Hybrid-K 배합과 Hybrid-K-R 배합은 각각의 매트릭스가 접하는 계면에 카고메 연결재를 혼입하였다. 따라서 Hybrid 배합과 Hybrid-K배합, Hybrid-R 배합과 Hybrid-K-R 배합의 비교를 통하여 카고메 연결재 혼입에 따른 충돌 저항 성능을 평가할 수 있다.

표 2.23 매트릭스 배합(카고메 연결재 및 결합재 구성 방법)

Matrix		UHPC	HDFRC
Binder	시멘트	0.8	-
	실리카흙	0.2	-
	고로슬래그	-	0.9
	Ca(OH) ₂	-	0.1
W/B		0.19	0.28
충전재		0.24	-
잔골재		0.88	-
팽창제		0.06	-
수축저감제		0.008	-
소포제		0.0006	0.001
고성능감수제		0.023	0.002
Fiber (Vol. %)	Steel fiber	0.3	-
	PE fiber	-	1.75

표 2.24 보강섬유 물성(카고메 연결재 및 결합재 구성 방법)

Type	길이 (mm)	직경 (μ m)	인장강도 (MPa)	밀도 (g/cm ³)	탄성계수 (GPa)
Steel	19.5	200	2,500	7.8	200
PE	18	12	2,700	0.97	88

UHPC 혼합은 호BAT 믹서기를 이용하여 분말형 재료인 시멘트, 지르코니아 실리카 흙, 충전재, 잔골재, 수축저감제 및 팽창제를 넣고 10분간 혼합하였다. 건비빔이 종료된 후, 액상형 재료인 혼합수, 고성능감수제, 소포제를 혼합하고, 최적의 유변학적 특성을 확보할 때까지 혼합하였다. 유변학적 특성이 최적화되면, 섬유를 혼입하여 5분동안 고속으로 혼합하였으며, 마지막으로 소포제를 넣고 저속으로 1분동안 혼합하여 기포제거 및 안정화를 실시하였다. HDFRC 혼합은 호BAT 믹서기를 이용하여 고로슬래그와 알칼리 활성화제, 즉 분말형 재료를 넣고 3분동안 건비빔 하였다. 건비빔이 종료된 후, 배합수를 혼입하였으며, 섬유 분산성이 최적화 될 수 있는 유동성과 점성을 확보하기 위하여 고성능감수제와 증점제를 혼입하였다. 최적의 유동상태가 확보되면 섬유를 혼입하여 고속으로 5분동안 혼합하였으며, 최적의 섬유 분산성이 확보된 이후에는 소포제를 혼입하고 1분동안 저속으로 혼입함으로써 기포 제거 및 안정화를 실시하였다.

혼합이 완료된 후, 압축강도 실험체, 일축인장 실험체 및 내충격성 실험을 위한 실험체를 제작하고, 48시간동안 기건양생을 실시한 후, 실험체를 탈형하였다. 기건양생은 양생온도 23 ℃ ± 3 ℃, 상대습도 60 % ± 5 %의 양생실에서 실시하였다. 실험체 탈형 후, 재령 28일까지 양생

온도 $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 양생수조에서 수중양생을 실시하였다.

㉔ 요약 및 결론

이 연구에서는 내충격 저항성능을 향상시키기 위한 최적 배합을 도출하였다. 이를 위하여 카고메 트러스를 보강재료로 사용한 고강도 콘크리트 복합재료의 최적 배합을 도출하였고, 카고메 트러스를 보강재료로 사용한 일반 콘크리트 복합재료의 최적 배합을 도출하였다. 또한, 결합재의 구성방법을 달리하고, 카고메 연결재를 사용하여 내충격 저항성능을 향상시킬 수 있는 방안을 도출하였다. 먼저 카고메 트러스를 보강재료로 사용한 고강도 콘크리트 복합재료는 압축강도 100MPa 급 이상을 나타내는 UHPC 배합에 강섬유와 카고메 트러스를 모두 보강한 배합, UHPC 배합에 강섬유만 혼입하고 카고메 트러스를 보강하지 않은 배합 및 카고메 트러스만 보강하고 강섬유를 혼입하지 않은 배합으로 구성하여 카고메 트러스 보강을 통한 내충격성 향상 여부를 확인할 수 있도록 하였다. 또한, 강섬유 보강과 카고메 트러스 보강 방법에 대한 내충격성 차이도 확인할 수 있도록 하였다. 카고메 트러스를 보강재료로 사용한 일반 콘크리트는 30 MPa 수준의 압축강도를 갖는 콘크리트 배합을 구성하여, 일반적인 철근보강 콘크리트와 카고메 트러스로 보강한 콘크리트의 내충격 저항성능을 비교할 수 있도록 하였다. 이를 통하여 카고메 트러스로 보강한 콘크리트의 내충격성 향상 정도를 직접적으로 확인할 수 있다. 마지막으로 고강도 복합재료와 고연성 복합재료의 구성방법을 달리하여 충격 하중의 특성과 그에 따라 요구되는 재료 특성을 만족할 수 있는 새로운 형태의 내충격 저항 구조를 개발하였다. 또한, 새로운 내충격 저항 구조의 취약점이 될 것으로 판단되는 매트릭스 계면의 접착 문제를 카고메 연결재를 이용하여 일체화 거동이 될 수 있도록 하는 방안을 도출하였다.

③ 실험실 성능평가

㉔ 충돌저항 프로토타입 구조물 해석

충돌저항 프로토타입 구조물 해석을 위해 충돌해석에서는 충돌 직전의 상태를 가정하여 에너지 보존법칙에 의해 초기속도와 질량을 갖는 System을 고려하여 동적해석을 수행하였다. 이때 비산물과 시험체간의 접촉조건은 마찰 및 ADD_Erosion을 고려한 접촉조건(Eroding_Contact_Surface_to_Surface)으로 가정하여 충돌 해석을 수행하였다. 시험체 경계조건은 그림 2.44와 같은 시험체 고정장치를 모델에 포함시키는 대신 구속된 4면을 고정 경계조건으로 모델링했으며, 철근 모델은 Truss로 고려하여 콘크리트 요소 내부에 매립된(embeded) 형태로 정의할 수 있는 LS-DYNA에서 제공하는 *Constrained_Lagrange_in_Solid 옵션을 사용하여 모델링 하였다.

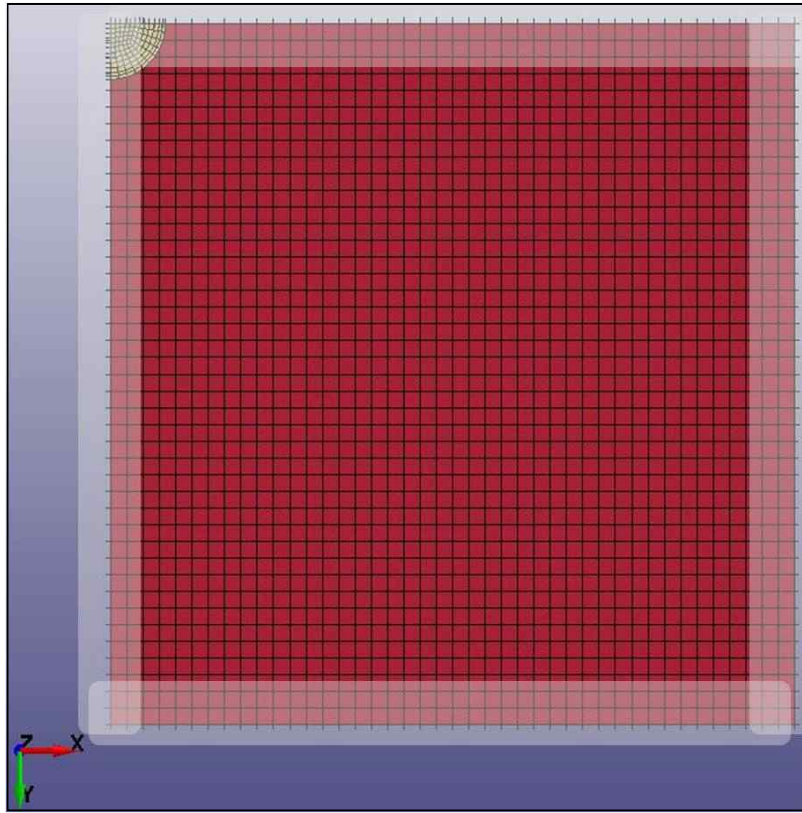


그림 2.44 시험체 경계조건 위치

충돌해석시 비산물의 재료모델은 LS-DYNA 해석코드에서 제공하는 *PLASTIC_KINEMATIC 카드를 이용하여 모델링했으며, 이 재료모델은 변형률속도 효과 및 요소제거기능도 함께 고려 할 수 있으며, 표 2.25와 같은 값으로 적용하였다.

표 2.25 재료의 기계적 성질

Part	Density (ton/mm3)	Elastic Modulus (MPa)	Possion's Ratio	Yield Strength (MPa)	Tangent Modulus (MPa)	Failure strain
Reinforcement	7.80E-09	210,000	0.3	598	1004	0.08
Missile-plat	8.66E-09	205,000	0.3	355	2555	-
Missile-pipe	7.80E-09	205,000	0.3	355	2555	-
Missile-dome	7.80E-09	205,000	0.3	355	2555	-
Slab concrete	7.80E-09		0.18	48.9		
Missile concrete	1.52E-09		0.18	48.9		

시험체의 비산물 충돌해석을 위해 작성된 해석모델은 그림 2.45에서 2.47과 같고, 각 부위별 유한요소모델의 종류 및 특성은 표 2.26과 같다.

표 2.26 시험체 유한요소해석모델 특성

구성 부위	사용요소	절점수	요소수
비산물	3D-SOLID	9153	7600
벽체-콘크리트	3D-SOLID	20339	17640
벽체-철근	1D-BEAM	2064	2016
합 계		31556	27256

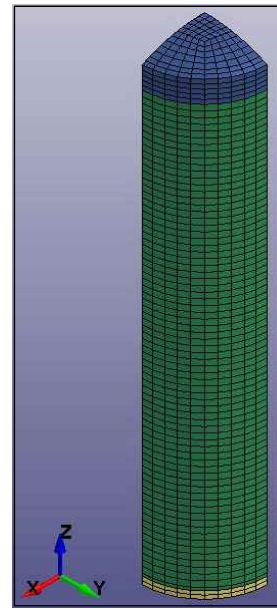
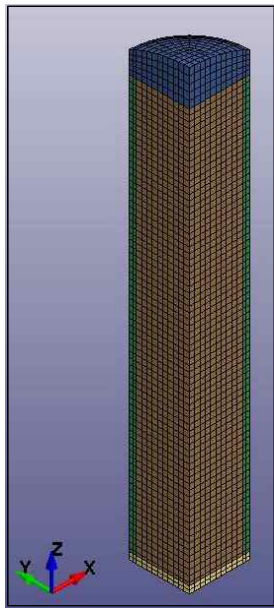


그림 2.45 비산물 해석 모델링

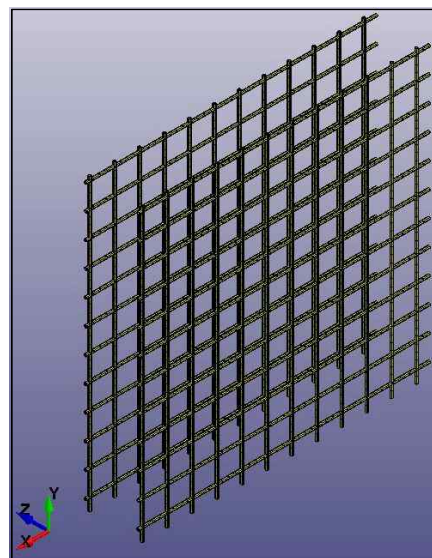
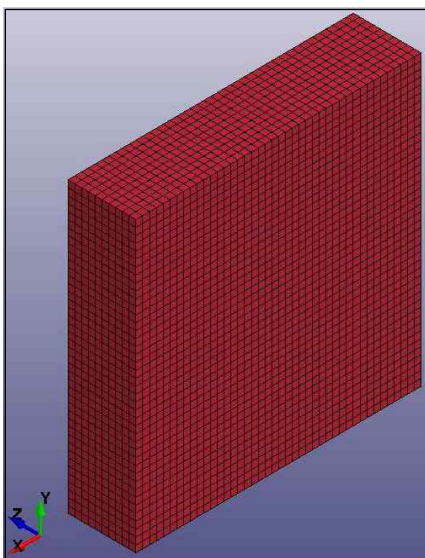


그림 2.46 시험체 해석 모델링

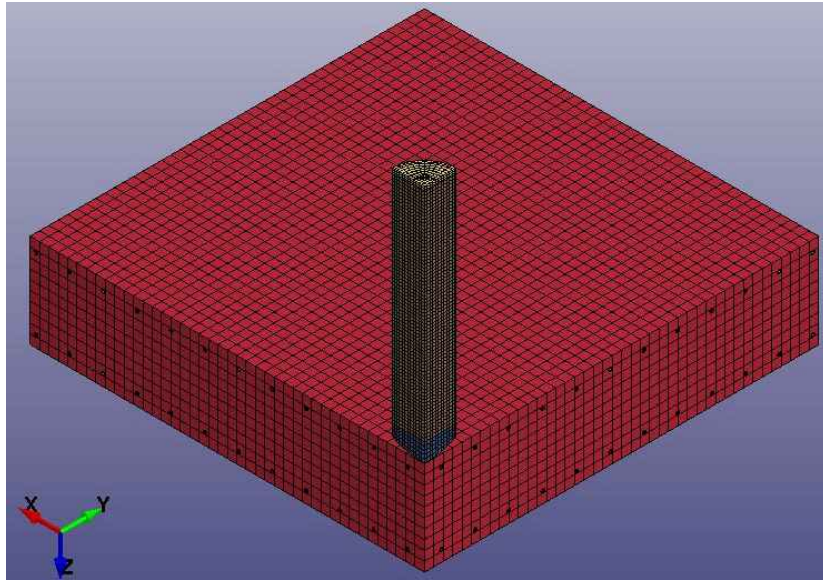


그림 2.47 전체 해석 모델링

본 해석은 충돌저항 프로토타입 해석을 위해 1차년도에서 개발된 분쇄효과를 고려한 Microplane model인 M7RC 재료모델을 적용하여 충돌해석을 수행하였으며, 다음 그림 2.48에서 그림 2.50까지는 충돌시 RC슬래브에 작용하는 하중과 분쇄효과에 의한 비산물 속도 그래프를 나타내고 있다. 그림 2.50의 철근 축력에서는 철근 단면적으로 계산시 적용한 항복응력 값에 가까워지는 것으로 보이며, 충돌 면적으로부터 점진적으로 하중이 전달되는 것으로 보인다. 그림 2.51에서 그림 2.54은 충돌 및 관통시 콘크리트와 철근의 파괴형상을 나타내고 있으며, 이런 결과로 미루어보아 1차년도에서 개발된 재료모델과 상용 하이드로코드인 LS-DYNA를 사용한 충돌해석이 충돌 및 관통현상을 효과적으로 모사할 수 있음을 확인하였다.

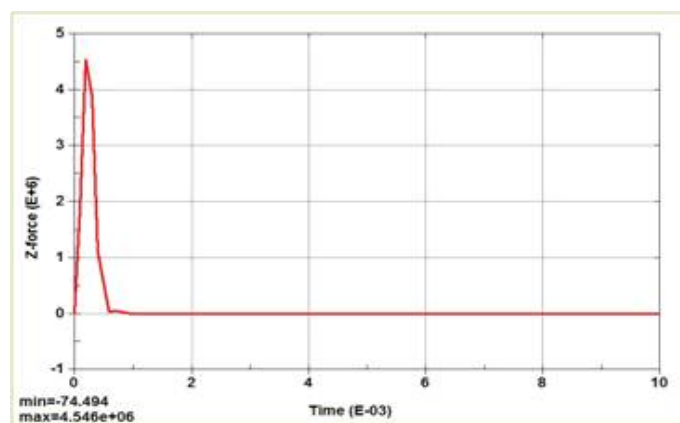


그림 2.48 M7RC Impact force

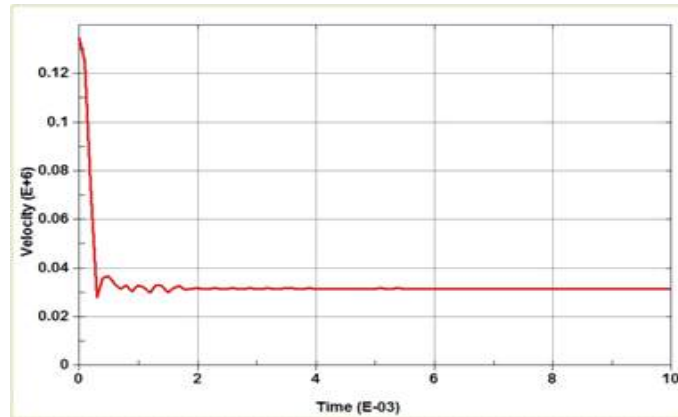


그림 2.49 M7RC 비산물 속도

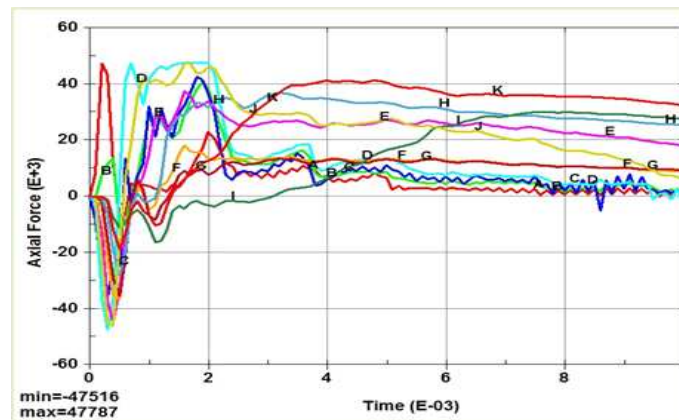


그림 2.50 M7RC 철근 축력

Time = 0.0101

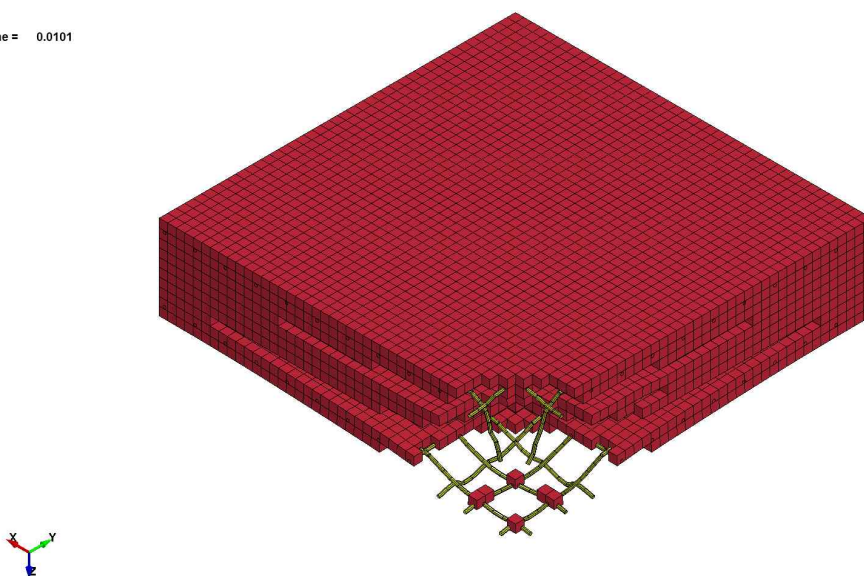


그림 2.51 ISO view M7RC 0.01s 파괴형상

Time = 0.0101

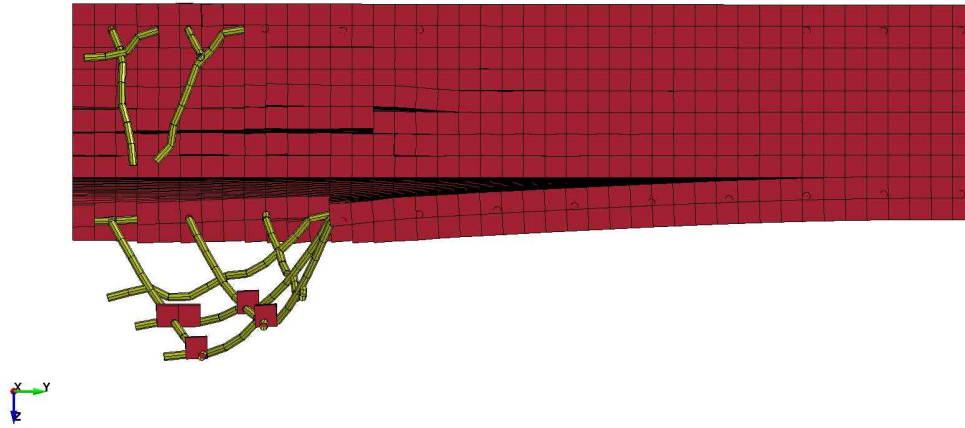


그림 2.52 Front view M7RC 0.01s 파괴형상

Time = 0.0101
Contours of Axial Force
min=-12505.4, at elem# 134844
max=33013.6, at elem# 134582

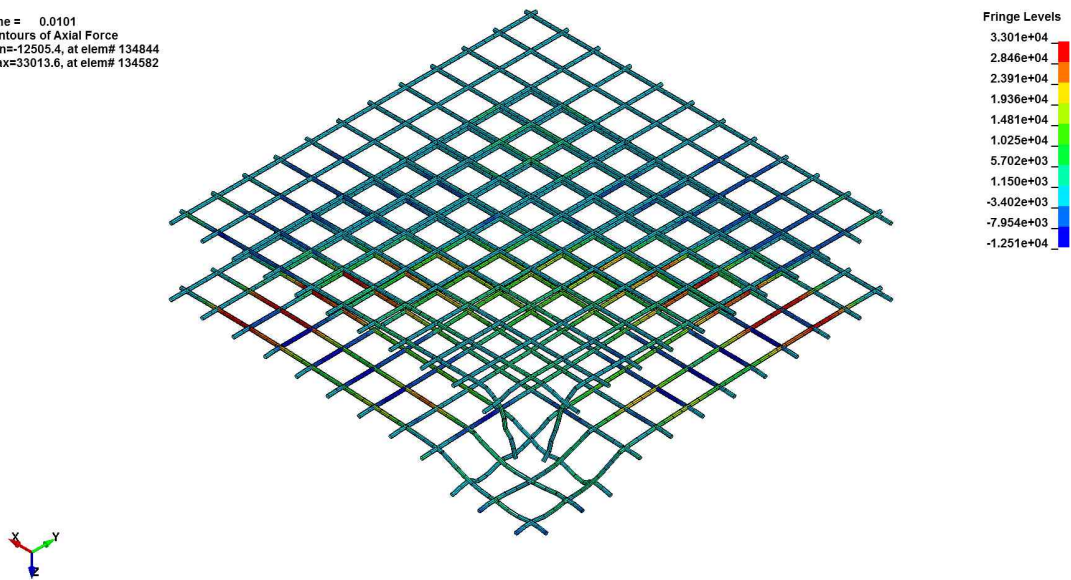


그림 2.53 ISO view M7RC 0.01s 철근 파괴형상

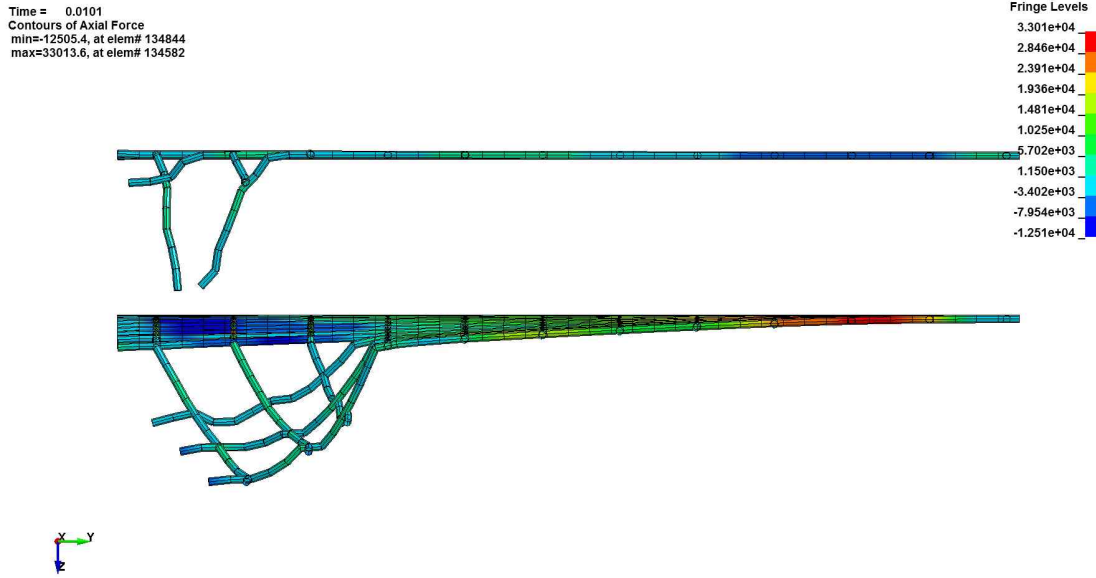


그림 2.54 Front view M7RC 0.01s 철근 파괴형상

㉠ 충돌성능 검증 및 내충격 시스템의 형상 개선 1(UHPC 매트릭스에 카고메 트러스 보강)

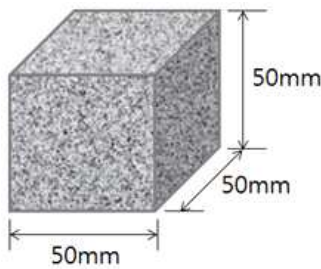
앞서 내충격 저항성능을 향상시키기 위하여 카고메 트러스를 보강재료로 사용한 고강도 콘크리트 복합재료의 최적 배합을 도출하였다. 이 배합을 이용하여 실험실 성능평가를 실시하였다. 실험은 밀도 실험, 압축강도 실험, 일축인장 실험 및 고속 비상체 충돌 실험을 실시하였으며, 이를 토대로 역학성능 및 내충격 저항 성능을 검증하였다.

밀도 실험은 모르타르에 강섬유를 혼입하여 실험체를 제조하였을 경우, 의도치 않은 기포 생성에 따른 성능 저하가 발생하였는지를 판단하기 위하여 실시하였다. 50 mm의 입방 실험체를 제작하여 공기 중 무게와 수중 무게를 측정하였으며, 식 2.17을 이용하여 계산하였다.

$$p = \frac{W_{air}}{W_{air} - W_{water}} \times p_w \quad (2.17)$$

여기에서, W_{air} 는 공기중 무게, W_{water} 는 수중 무게, p_w 는 물의 밀도를 나타낸다.

압축강도 실험은 매트릭스의 압축강도를 평가하기 위하여 KS L 5105에 따라 실시하였다. 그림 2.28과 같이 50 mm 입방 실험체를 제작하여 28일 재령 압축강도를 측정하였으며, 실험체가 받은 최대 하중을 실험체의 단면적으로 나누어 계산하였다. 실험체 단면의 길이는 버니어 캘리퍼스를 이용하여 각각 3회씩 측정한 후, 평균값을 이용하여 단면적을 계산함으로써 측정값에 대한 오차를 최소화하였다.



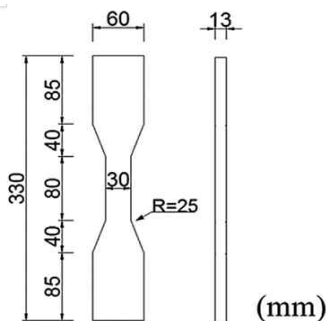
(a) 압축강도 실험체 형상



(b) 압축강도 실험 모습

그림 2.55 압축강도 실험체의 형상 및 실험 방법(UHPC 매트릭스에 카고메 트러스 보강)

일축인장 실험은 매트릭스의 인장 특성을 파악하기 위하여 일본 토목학회에서 제안한 방법에 따라 실시하였다. 실험체는 그림 2.56(a)와 같은 형태로 제작하여 28일 재령 후, 일축인장 실험을 실시하였으며, 인장성능 및 균열패턴을 측정하였다. 일축인장 실험은 국내 D사의 최대 용량 2톤을 갖는 인장강도 시험기를 사용하였고, 0.1 mm/min 속도의 변위 제어 방식으로 수행하였다. 실험체의 변위는 실험체의 좌우 측면에 25 mm 용량을 갖는 변위계를 부착하여 변형량을 측정하였으며, 실험체의 중간 부분에 위치한 80 mm 구간의 변형량을 측정하여 변형률로 환산하였다. UHPC의 측정구간 내 실험체 단면 크기는 폭 30 mm, 두께 30 mm이다.



(a) 일축인장 실험체 형상



(b) 일축인장 실험 모습

그림 2.56 일축인장 실험체의 형상 및 실험 방법(UHPC 매트릭스에 카고메 트러스 보강)

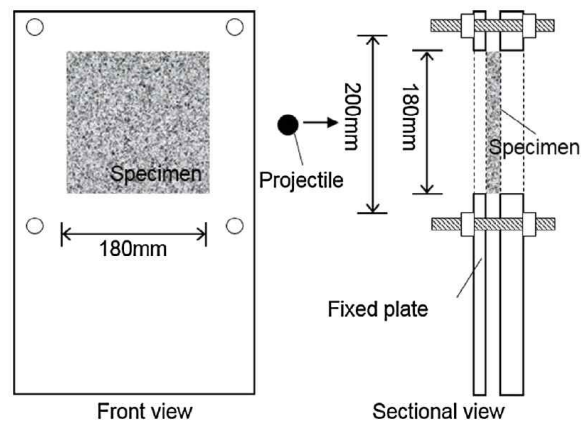
고속 비상체 충돌실험은 카고메 트러스 보강 고강도 콘크리트 복합재료의 충돌 저항 성능을 평가하기 위하여 실시하였다. 표 2.27은 고속 비상체 충격실험의 실험 조건 및 변수를 나타낸다. 충격실험에 사용된 실험체의 크기는 너비와 높이가 200 mm × 200 mm이고, 실험체의 두께는 40 mm이다. 또한, 고속 비상체 충격실험에 있어서, 실험체의 구속 여부는 실제 구조물과 동일한 조건이어야 한다. 따라서 충격 하중하에서 실험체가 완전 구속될 수 있도록 실험체 각각의 모서리 4개 부위를 고정하였다. 그림 2.57(a)는 고속 비상체 충격실험에 사용한 실험체의 형상 및 설치방법을 나타낸다. 고속 비상체 충격실험에 사용된 비상체는 금속 재질이며, 전면 형상이 반구형인 비상체를 사용하였다. 비상체의 무게와 직경은 각각 66.1 g, 25 mm이며, 발사체의 속도는 216.9 m/s로 비상체를 발사하였다. 발사체의 속도는 가속 관의 끝부분에 설치되어 있는

속도 측정 장비를 이용하여 측정하였다. 발사체의 무게와 속도로부터 계산된 충격에너지는 1,556 J이며, 그림 2.57(b)는 고속 비상체 충격실험의 실험 방법을 나타낸다.

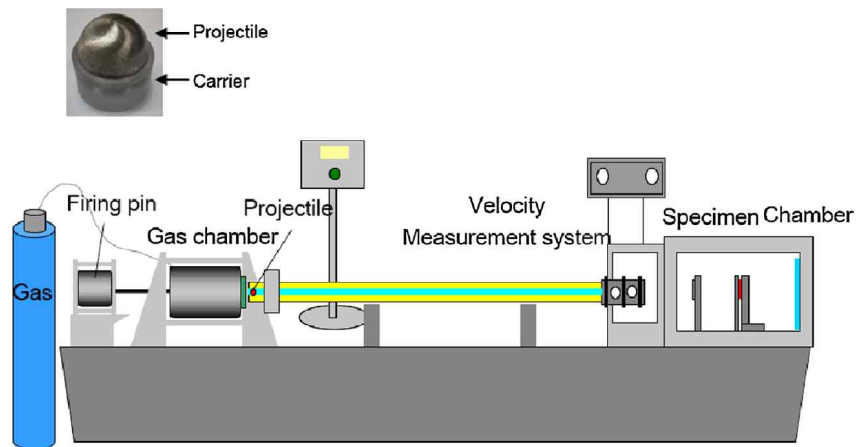
표 2.27 고속 비상체 충돌 실험 조건 및 변수(UHPC 매트릭스에 카고메 트러스 보강)

비상체 질량	66.1 g
비상체 속도	216.9 m/s
비상체 직경	25 mm
충돌 에너지	1,556 J
실험체 크기	200 mm × 200 mm
실험체 두께	40 mm

카고메 트러스 보강 콘크리트 복합재료의 고속 비상체 충돌에 의한 중량 손실률은 고속 비상체 충돌실험 전·후의 실험체 중량을 측정하여 계산하였다. 고속 비상체 충격에 의한 실험체의 파괴면적은 영상처리 기법을 통하여 계산하였다.[Otsu 1979] 충돌 하중을 받은 실험체의 전면과 배면의 표면을 촬영한 후, 파괴부위와 비파괴 부위의 경계선을 확인하였다. 경계선에 따라 파괴부위와 비파괴부위를 보색으로 표현하고 이진화 영상처리 기법을 통하여 파괴면적을 계산하였다. 비상체 관입깊이는 비상체가 관입한 부분의 중심부를 절단하여 측정하였다.



(a) 실험체 형상 및 설치 방법



(b) 고속 비상체 충돌실험 장치

그림 2.57 고속 비상체 충돌실험 방법(UHPC 매트릭스에 카고메 트러스 보강)

그림 2.58은 밀도 실험 결과를 나타낸다. 이론적 밀도값은 배합에 사용되는 모든 재료의 혼입량과 밀도값을 이용하여 계산하였다. UHPC의 밀도는 UHPM의 밀도보다 2.11 % 높은 것으로 나타났다. 이러한 이유는 밀도가 높은 강섬유가 전체 부피비의 0.3 % 혼입되었기 때문이다. UHPC와 UHPM의 밀도 실험값은 이론적 밀도값보다 낮게 나타나지 않았다. 따라서 실험체에 사용된 매트릭스는 모두 제조 시 의도치 않은 기포 생성에 따른 강도 저하는 없을 것으로 판단된다.

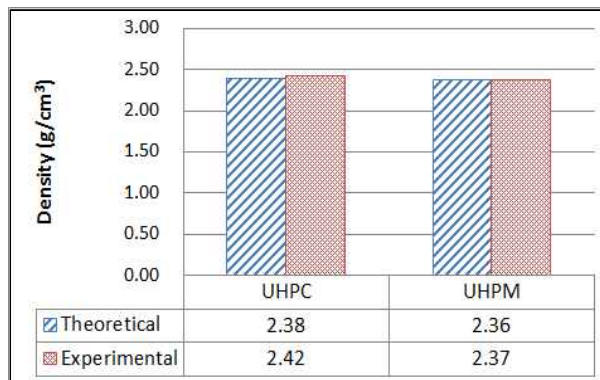


그림 2.58 밀도 실험 결과(UHPC 매트릭스에 카고메 트러스 보강)

그림 2.59는 압축강도 실험 결과를 나타낸다. 강섬유를 혼입한 UHPC와 강섬유를 혼입하지 않은 UHPM의 압축강도는 각각 147 MPa 및 122 MPa로 나타났다.

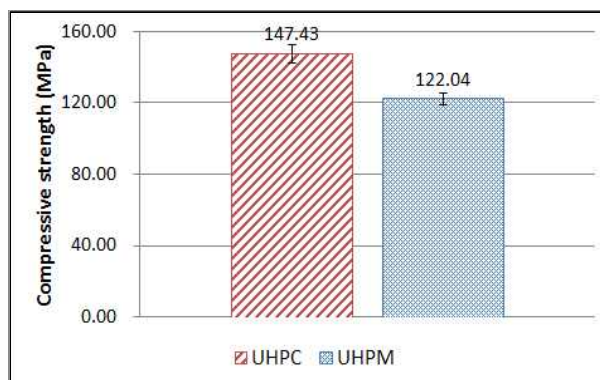
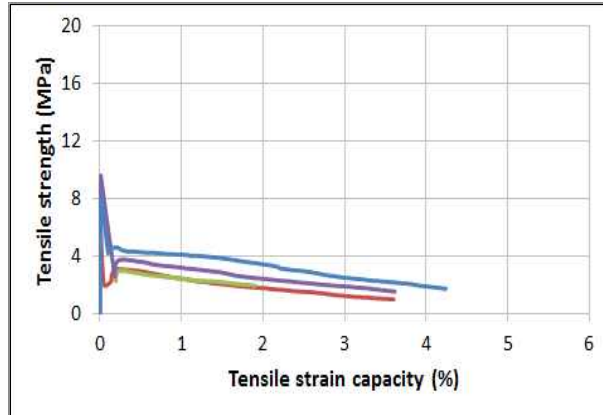
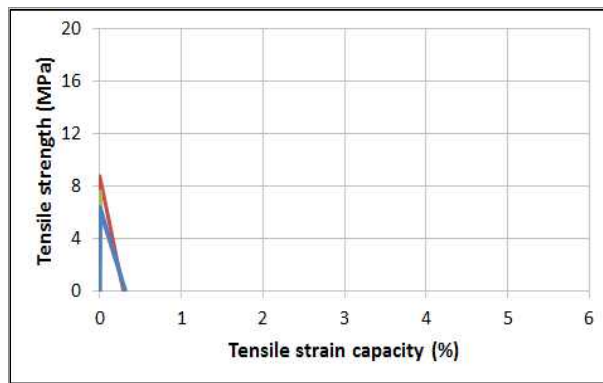


그림 2.59 압축강도 실험 결과(UHPC 매트릭스에 카고메 트러스 보강)

그림 2.60는 UHPC와 UHPM의 인장응력과 변형률의 관계를 나타낸다. 강섬유가 전체 부피비의 0.3 % 혼입된 UHPC는 첫 번째 균열이 발생한 후, 급격하게 응력이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 급격하게 응력이 감소한 이후에는 변형률이 증가함에 따라 응력이 서서히 감소하는 변형률 연화 거동을 나타내었다. 강섬유가 보강되지 않은 UHPM은 첫 번째 균열이 발생한 이후 급격한 응력감소와 함께 실험체가 파괴되는 것으로 나타났다.



(a) UHPC



(b) UHPM

그림 2.60 응력-변형률 곡선(UHPC 매트릭스에 카고메 트러스 보강)

그림 2.61은 각 매트릭스의 균열강도 및 인장강도를 나타낸다. UHPC와 UHPM은 첫 번째 균열 발생 이후, 모두 응력이 감소하는 것으로 나타났기 때문에 균열강도와 인장강도는 동일하게 나타났다. UHPC와 UHPM의 균열강도 및 인장강도는 각각 8.69 MPa, 7.20 MPa로 나타났다. 균열강도는 압축강도의 실험 결과와 유사한 경향을 나타냈고, 이러한 결과는 균열강도가 매트릭스의 강도에 의하여 결정된다는 것을 의미한다.

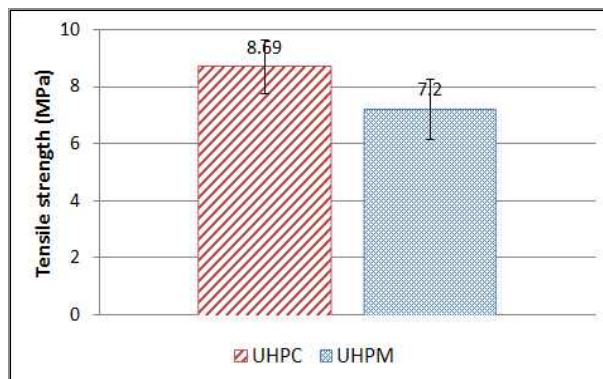


그림 2.61 인장강도(UHPC 매트릭스에 카고메 트러스 보강)

표 2.28은 고속 비상체 충돌 실험에 따른 각 배합의 파괴 형태를 나타낸다. 카고메 트러스 보강을 실시하지 않고 강섬유 혼입을 통한 섬유보강을 실시한 M-SF 배합은 고속 충돌 하중 하에서 비상체가 관통하는 파괴 형태가 나타났다. 또한 비상체가 관통하면서 실험체의 전면 및 배면이 박리되는 현상이 발생하였다. 카고메 트러스 보강을 실시하고, 강섬유를 혼입한 M-SF-KT 배합은 비상체의 관입, 전면 박리 및 배면 박리가 발생하고 관통은 발생하지 않은 것으로 나타났다. 강섬유를 혼입하지 않고 카고메 트러스만 보강한 M-KT 배합도 비상체의 관입, 전면 박리 및 배면 박리가 발생하고 관통은 발생하지 않은 것으로 나타났다. 관통은 비상체의 관통력이 구조물 두께의 전단 저항력보다 클 때 발생한다. 실험체가 관통되지 않고 관입이 발생하였다는 것은 모든 충격 에너지가 실험체의 손상에 의하여 소산되었다는 것을 의미하고, 소산은 관입, 전면박리, 배면균열 등과 같은 형태로 소산되었다. 비상체가 관통되지 않은 M-SF-KT 배합 및 M-KT 배합의 배면을 비교하면 M-SF-KT 배합의 배면이 박리된 양 및 면적이 더 작은 것으로 나타났다. 이는 카고메 트러스 및 강섬유를 보강하면 충돌 저항 성능이 가장 높다는 것을 의미한다. 또한 일반적인 카고메 트러스를 보강하는 방법이 강섬유 혼입을 통한 섬유보강보다 충돌 저항 성능이 더 향상되는 것으로 나타났다.

표 2.28 각 배합의 파괴 형태(UHPC 매트릭스에 카고메 트러스 보강)

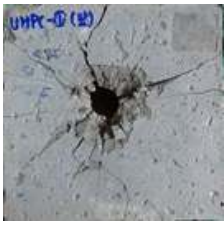
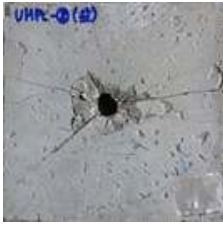
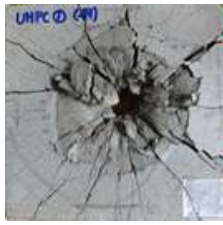
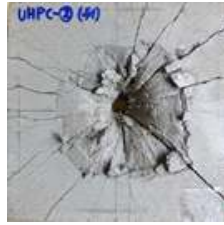
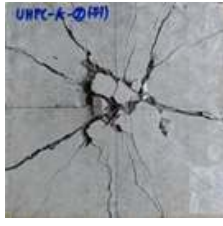
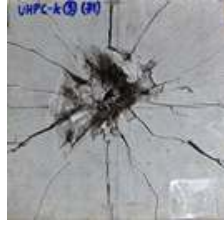
	전면		배면	
M-SF				
	Perforation with spalling		Perforation with scabbing	
M-SF-KT				
	Penetration with spalling		Cracks with scabbing	
M-KT				
	Penetration with spalling		Cracks with scabbing	

표 2.29는 각 배합의 관입 깊이 및 NDRC에서 제안한 이론식을 통해 계산한 값과 실제 실험 값을 비교한 것이다. 관입 깊이 분석 결과, 카고메 트러스 및 강섬유 보강을 실시한

M-SF-KT 배합의 관입 깊이는 9.91 mm로 가장 얇게 나타났다. 카고메 트러스만 보강한 M-KT 배합의 관입 깊이는 11.3 mm로 나타났고, 강섬유를 혼입한 M-SF 배합은 관통되는 것으로 나타났다. NDRC에서 제안한 식에 의하여 계산된 M-SF-KT 배합 및 M-SF 배합의 관통 한계 두께는 40.53 mm이고, M-KT 배합의 관통 한계 두께는 42.18 mm이다. 그러나 M-SF-KT 배합 및 M-KT 배합은 관통이 발생하지 않았고, M-SF 배합만 관통이 발생하였다. 이러한 결과는 카고메 트러스를 보강하면 NDRC에서 제안한 충돌 저항 성능보다 우수한 성능을 확보할 수 있다는 것을 의미한다. NDRC에서 제안한 식에 의하여 계산된 M-SF-KT 배합의 관입 깊이는 14.63 mm이고, M-KT 배합의 관입 깊이는 15.34 mm이다. 그러나 M-SF-KT 배합 및 M-KT 배합의 관입 깊이는 각각 9.91 mm, 11.3 mm로서, NDRC에서 제안한 식에 의하여 계산된 값보다 각각 32.3 %, 26.3 % 향상되는 것으로 나타났다. 또한, 강섬유를 보강한 M-SF 배합의 관입깊이와 비교해도 32.3 %, 22.6 % 향상되는 것으로 나타났다.

표 2.29 각 배합의 관입 깊이 및 NDRC값 비교(UHPC 매트릭스에 카고메 트러스 보강)

	실험값		NDRC 계산값	
	관입 깊이(mm)	M-SF 대비 향상률	관입 깊이(mm)	관통 한계 두께(mm)
M-SF	관통	-	14.63	40.53
M-SF-KT	9.91	32.3 % 향상	14.63	40.53
M-KT	11.30	22.8 % 향상	15.34	42.18

표 2.30은 고속 비상체 충돌 실험에 따른 각 배합의 배면 손상 면적을 나타내고, 표 2.31은 배면 손상 면적 측정 결과 및 중량 손실률 측정 결과를 나타낸다. M-SF-KT 배합의 배면 손상 면적 비율은 11.6 %로서, M-SF 배합의 배면 손상 면적 비율 14.6 %보다 59.7 % 향상된 것으로 나타났다. M-KT 배합의 배면 손상 면적 비율은 M-SF 배합의 배면 손상 면적 비율보다 12.9 % 향상된 것으로 나타났다. 카고메 트러스 보강이 강섬유 보강보다 배면 손상 면적 측면에서 효과가 있는 것으로 나타났고, 카고메 트러스 보강과 강섬유 보강을 함께 할 경우 매우 우수한 성능 향상이 있는 것으로 나타났다. 이는 충격 하중을 받는 구조물의 배면, 즉 구조물 내부에서 비산되는 구조물 파편으로부터의 안전성이 카고메 트러스 보강을 실시할 경우 증가한다는 것을 의미한다. 중량 손실률 측정 결과, M-SF-KT 배합의 중량 손실률은 1.52 %로서, M-SF 배합의 중량 손실률 5.26 %보다 71.2 % 향상되는 것으로 나타났다. M-KT 배합의 중량 손실률은 2.50 %로서, M-SF 배합의 중량 손실률보다 52.7 % 향상된 것으로 나타났다. 배면 손상 면적 실험 결과와 마찬가지로 카고메 트러스로 보강하면 강섬유 혼입을 통한 섬유 보강보다 중량 손실률 측면에서 매우 우수한 성능 향상이 나타났다. 또한 중량 손실률 측정 결과는 배면 손상 면적 측정 결과와 유사한 경향이 나타났다. 이러한 이유는 중량 손실률이 전면 및 배면의 박리에 의하여 결정되기 때문이다.

표 2.30 각 배합의 배면 손상 면적(카고메 트러스 보강)

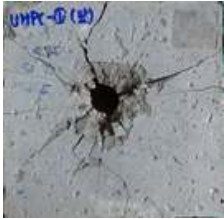
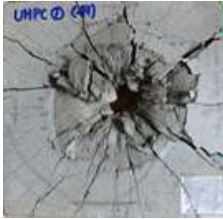
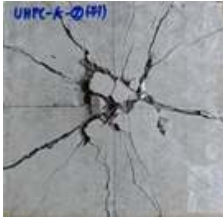
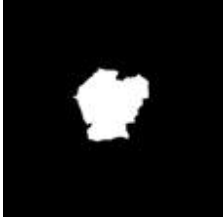
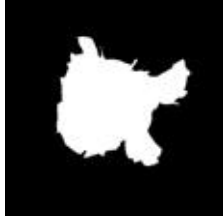
	전면		배면	
M-SF				
M-SF-KT				
M-KT				

표 2.31 각 배합의 배면 손상 면적 비율 및 중량 손실률 측정 결과

	배면 손상 면적		중량 손실률	
	배면 손상 면적 비율 (%)	M-SF 대비 향상률	중량 손실률 (%)	M-SF 대비 향상률
M-SF	28.8	-	5.28	-
M-SF-KT	11.6	59.7 % 향상	1.52	71.2 % 향상
M-KT	25.1	12.9 % 향상	2.50	52.7 % 향상

㉔ 충돌성능 검증 및 내충격 시스템의 형상 개선 2(카고메 연결재 사용 및 결합재 구성 방법에 따른 영향)

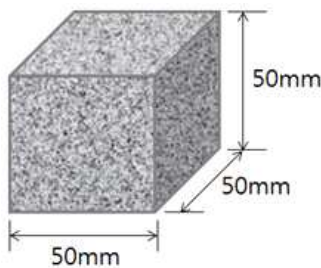
앞서 고강도 복합재료와 고연성 복합재료를 적층 구조 방식으로 구성함으로써 충격 하중의 특성과 그에 따라 요구되는 재료 특성을 만족할 수 있는 새로운 형태의 내충격 저항 구조를 개발하였다. 또한, 새로운 내충격 저항 구조의 취약점이 될 것으로 판단되는 매트릭스 계면의 접착 문제를 카고메 연결재를 이용하여 일체화 거동이 될 수 있도록 하는 방안을 도출하였다. 이를 이용하여 밀도 실험, 압축강도 실험, 일축인장 실험 및 고속 비상체 충돌 실험을 실시하였으며, 이를 토대로 역학성능 및 내충격 저항 성능을 평가하였다.

밀도 실험은 모르타르에 강섬유나 PE섬유를 혼입하여 실험체를 제조하였을 경우, 의도치 않은 기포 생성에 따른 성능 저하가 발생하였는지를 판단하기 위하여 실시하였다. 50 mm의 입방 실험체를 제작하여 공기 중 무게와 수중 무게를 측정하였으며, 식 2.18을 이용하여 계산하였다.

$$p = \frac{W_{air}}{W_{air} - W_{water}} \times p_w \quad (2.18)$$

여기에서, W_{air} 는 공기중 무게, W_{water} 는 수중 무게, p_w 는 물의 밀도를 나타낸다.

압축강도 실험은 UHPC와 HDFRC의 압축강도를 평가하기 위하여 KS L 5105에 따라 실시하였다. 그림 2.62과 같이 50 mm 입방 실험체를 제작하여 28일 재령 압축강도를 측정하였으며, 실험체가 받은 최대 하중을 실험체의 단면적으로 나누어 계산하였다. 실험체 단면의 길이는 버니어 캘리퍼스를 이용하여 각각 3회씩 측정한 후, 평균값을 이용하여 단면적을 계산함으로써 측정값에 대한 오차를 최소화하였다.



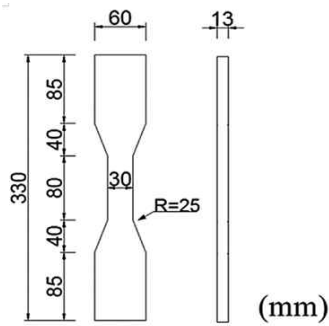
(a) 압축강도 실험체 형상



(b) 압축강도 실험 모습

그림 2.62 압축강도 실험체의 형상 및 실험 방법(카고메 연결재 및 결합재 구성 방법에 따른 영향)

일축인장 실험은 UHPC와 HDFRC의 인장 특성을 파악하기 위하여 일본 토목학회에서 제안한 방법에 따라 실시하였다. 실험체는 그림 2.63(a)와 같은 형태로 제작하여 28일 재령 후, 일축인장 실험을 실시하였으며, 인장성능 및 균열패턴을 측정하였다. 일축인장 실험은 국내 D사의 최대용량 2톤을 갖는 인장강도 시험기를 사용하였고, 0.1 mm/min 속도의 변위 제어 방식으로 수행하였다. 실험체의 변위는 실험체의 좌우 측면에 25 mm 용량을 갖는 변위계를 부착하여 변형량을 측정하였으며, 실험체의 중간 부분에 위치한 80 mm 구간의 변형량을 측정하여 변형률로 환산하였다. UHPC의 측정구간 내 실험체 단면 크기는 폭 30 mm, 두께 30 mm이고, HDFRC의 측정구간 내 실험체 단면 크기는 폭 30 mm, 두께 13 mm이다.



(a) 일축인장 실험체 형상



(b) 일축인장 실험 모습

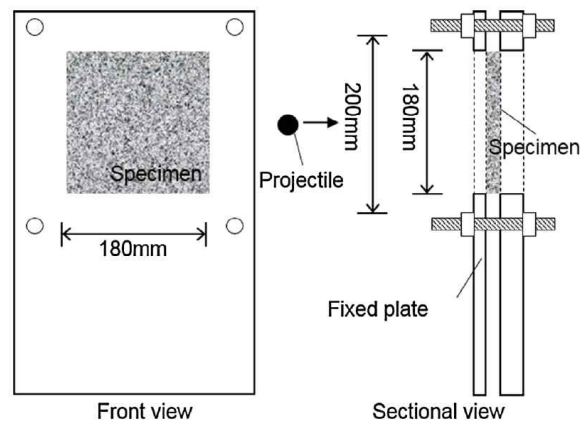
그림 2.63 일축인장 실험체의 형상 및 실험 방법(카고메 연결재 및 결합재 구성 방법에 따른 영향)

고속 비상체 충돌실험은 고강도 복합재료와 고연성 복합재료의 구성 방법에 따른 충돌 저항 성능 평가 및 카고메 연결재 보강을 통한 매트릭스의 계면 접착력 강화에 따른 충돌 저항 성능을 평가하기 위하여 실시하였다. 표 2.32는 고속 비상체 충격실험의 실험 조건 및 변수를 나타낸다. 충격실험에 사용된 실험체의 크기는 너비와 높이가 200 mm × 200 mm이고, 실험체의 두께는 40 mm이다. 그림 2.64(a)는 고속 비상체 충격실험에 사용한 실험체의 형상 및 설치방법을 나타낸다. 고속 비상체 충격실험에 사용된 비상체는 금속 재질이며, 전면 형상이 반구형인 비상체를 사용하였다. 비상체의 무게와 직경은 각각 66.1 g, 25 mm이며, 발사체의 속도는 216.9 m/s로 비상체를 발사하였다. 발사체의 속도는 가속 관의 끝부분에 설치되어 있는 속도 측정 장비를 이용하여 측정하였다. 발사체의 무게와 속도로부터 계산된 충격에너지는 1,556 J이며, 그림 2.64(b)는 고속 비상체 충격실험의 실험 방법을 나타낸다.

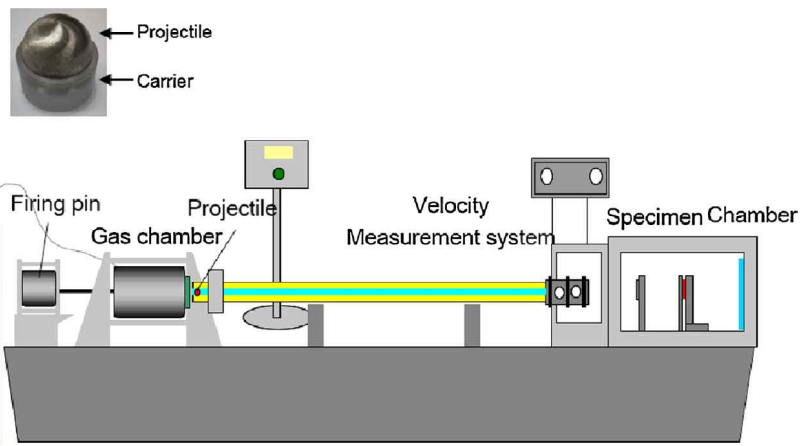
표 2.32 고속 비상체 충돌 실험 조건 및 변수(카고메 연결재 및 결합재 구성 방법에 따른 영향)

비상체 질량	66.1 g
비상체 속도	216.9 m/s
비상체 직경	25 mm
충돌 에너지	1,556 J
실험체 크기	200 mm × 200 mm
실험체 두께	40 mm

중량 손실률은 고속 비상체 충돌실험 전·후의 실험체 중량을 측정하여 계산하였다. 고속 비상체 충격에 의한 실험체의 파괴면적은 충돌 하중을 받은 실험체의 전면과 배면의 표면을 촬영한 후, 파괴부위와 비파괴 부위의 경계선을 확인하였다. 경계선에 따라 파괴부위와 비파괴부위를 보색으로 표현하고 이진화 영상처리 기법을 통하여 파괴면적을 계산하였다. 비상체 관입 깊이는 비상체가 관입한 부분의 중심부를 절단하여 측정하였다.



(a) 실험체 형상 및 설치 방법



(b) 고속 비상체 충돌실험 장치

그림 2.64 고속 비상체 충돌실험 방법(카고메 연결재 및 결합재 구성 방법에 따른 영향)

그림 2.65는 UHPC와 HDFRC의 밀도 실험 결과를 나타낸다. 이론적 밀도값은 배합에 사용되는 모든 재료의 혼입량과 밀도값을 이용하여 계산하였다. UHPC의 밀도는 HDFRC의 밀도보다 17.2 % 높은 것으로 나타났다. 이러한 이유는 UHPC의 결합재인 시멘트와 보강섬유로 사용된 강섬유가 HDFRC의 결합재인 고로슬래그와 보강섬유인 PE 섬유보다 밀도가 높고, 물-결합재비가 낮기 때문이다. UHPC와 HDFRC의 밀도 실험값은 이론적 밀도값보다 낮지 않게 나타났다. 따라서 두 배합 모두 실험체 제조 시 의도치 않은 기포 생성에 따른 강도 저하는 없을 것으로 판단된다.

그림 2.66는 압축강도 실험 결과를 나타낸다. UHPC의 압축강도는 147 MPa로 나타났고, HDFRC의 압축강도는 44.8 MPa로 나타났다. UHPC의 압축강도는 HDFRC보다 3.3배 높은 것으로 나타났다. 이는 UHPC가 고강도를 나타내는 강도 지향성 매트릭스라는 것을 의미하며, 충격 하중을 직접적으로 받는 적층 구조의 전면에 충분히 사용할 수 있는 수준의 압축강도를 확보한 것으로 판단된다.

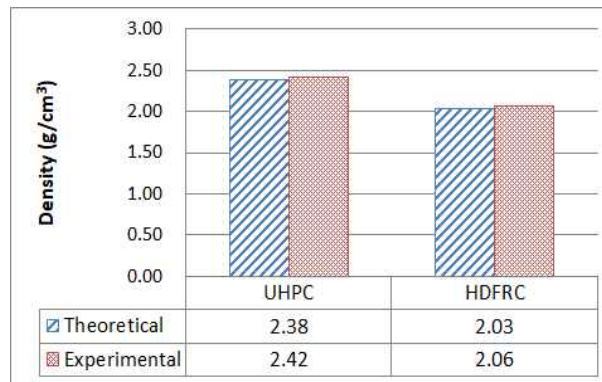


그림 2.65 밀도 실험 결과(카고메 연결재 및 결합재 구성 방법에 따른 영향)

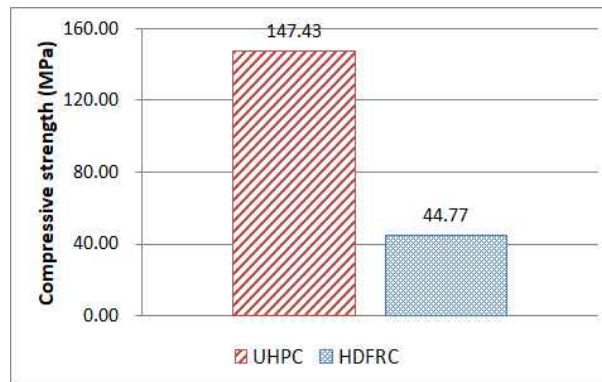
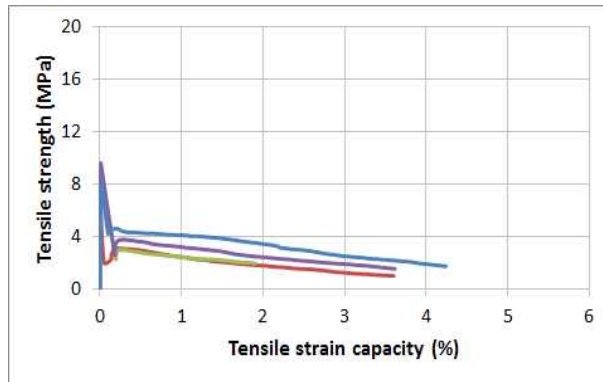
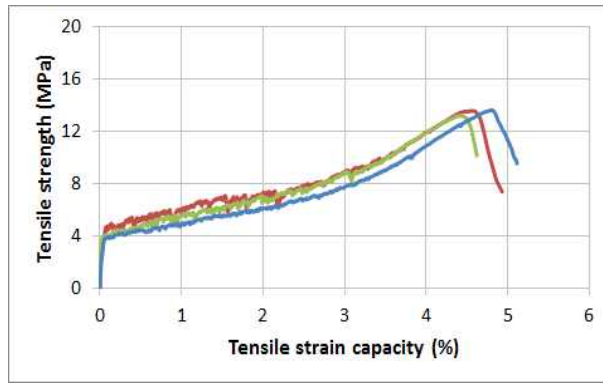


그림 2.66 압축강도 실험 결과(카고메 연결재 및 결합재 구성 방법에 따른 영향)

그림 2.67은 UHPC와 HDFRC의 인장응력과 변형률의 관계를 나타낸다. UHPC는 첫 번째 균열이 발생한 후, 급격하게 응력이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 급격하게 응력이 감소한 이후에는 변형률이 증가함에 따라 응력이 서서히 감소하는 변형률 연화 거동을 나타내었다. HDFRC는 다중균열 및 변형률 경화거동이 명확하게 나타났고, 매우 높은 인장변형성능을 나타내었다. UHPC와 HDFRC는 균열강도 이후 인장 거동의 차이가 명확히 나타났고, HDFRC의 인장변형성능이 UHPC보다 매우 우수하며, HDFRC는 매우 높은 인장변형성능을 나타내는 연성 지향성 재료라는 것이 확인되었다.



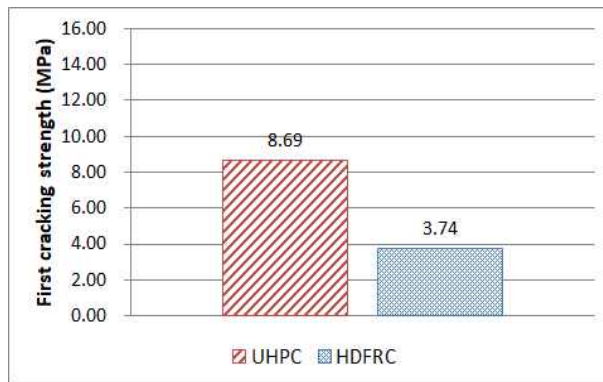
(a) UHPC



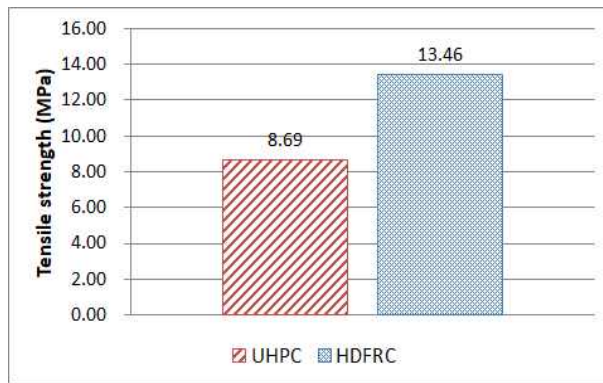
(b) HDFRC

그림 2.67 응력-변형률 곡선(카고메 연결재 및 결합재 구성 방법에 따른 영향)

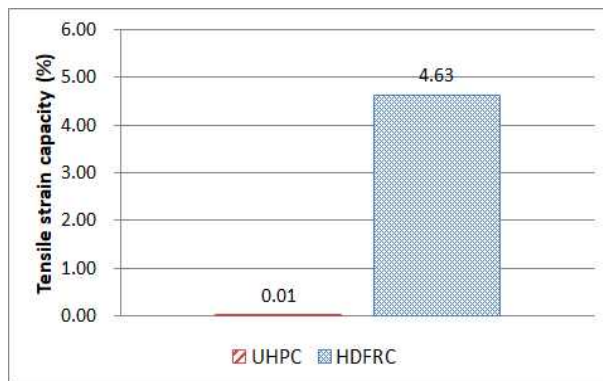
그림 2.68은 UHPC와 HDFRC의 균열강도, 인장강도 및 인장변형성능을 나타낸다. UHPC는 첫 번째 균열 발생 이후, 모두 응력이 감소하는 것으로 나타났기 때문에 균열강도와 인장강도는 8.69 MPa로 동일하게 나타났다. HDFRC의 균열강도 및 인장강도는 각각 3.74 MPa, 13.46 MPa로 나타났다. 균열강도는 UHPC가 HDFRC보다 2.3배 높은 것으로 나타났고, 압축강도와 유사한 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 균열강도가 매트릭스의 강도에 의하여 결정된다는 것을 의미한다. 인장강도는 HDFRC가 UHPC보다 54.9 % 높게 나타났다. 압축강도 대비 인장강도는 HDFRC가 30.1 %로 UHPC의 5.89 %보다 5.1배 높게 나타났다. 강도성능지수는 HDFRC가 3.60.으로 나타났고, UHPC의 강도지표보다 3.6배 높게 나타났다. 강도성능지수란 다중균열 및 변형률 경화 거동을 위한 이론적 조건 중 하나로서, 균열강도 대비 인장강도의 값으로 나타내며, 값이 클수록 다중균열 발생 및 변형률 경화 거동 발생이 나타날 확률이 높아진다. 인장변형성능은 HDFRC가 4.63 %로 나타났고, UHPC는 0.01 %로 나타났고, 강도성능지수 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 종합적으로 HDFRC가 UHPC보다 압축강도는 낮지만 인장변형성능이 매우 우수한 연성 지향성 재료로 나타났고, UHPC는 강도가 매우 높은 강도지향성 재료로 나타났다.



(a) 균열강도



(b) 인장강도



(c) 인장변형성능

그림 2.68 일축인장 실험 결과(카고메 연결재 및 결합재 구성 방법에 따른 영향)

표 2.33은 고속 비상체 충돌 실험에 따른 각 배합의 파괴 형태를 나타낸다. 강섬유를 보강한 UHPC 배합은 고속 충돌 하중하에서 비상체가 관통하는 파괴 형태가 나타났다. 또한 비상체가 관통하면서 실험체의 전면 및 배면이 박리되는 현상이 발생하였다. 실험체의 전면은 HDFRC, 배면은 UHPC로 구성한 Hybrid 배합은 비상체 관통 및, 실험체의 전면 및 배면이 박리되는 현상이 발생하였다. 그러나 실험체의 전면을 UHPC, 배면을 HDFRC로 구성한 Hybrid-R 배합은 비상체 관입과 배면의 균열 및 매우 작은 배면 박리가 발생하였고, 관통은 발생하지 않았다. 마찬가지로 실험체의 전면은 HDFRC, 배면은 UHPC로 구성한 Hybrid-K 배합은 비상체 관통

및, 실험체의 전면 및 배면이 박리되는 현상이 발생하였다. 그러나 실험체의 전면을 UHPC, 배면을 HDFRC로 구성한 Hybrid-R-K 배합은 비상체 관입과 배면의 박리가 발생하였고, 관통은 발생하지 않았다. 이는 매트릭스의 구성방법을 최적화함에 따라 충돌 저항 성능이 향상되었다는 것을 의미한다. 앞서 전술한 바와 같이 비상체가 구조물에 충돌할 때, 비상체의 충돌에 의한 압축과가 발생하며, 구조물의 배면에서 자유 표면을 만나 인장과가 발생한다. 이에 따라 비상체가 충돌하는 구조물의 전면은 압축 성능이 우수한 UHPC 매트릭스를 배치하고, 인장과가 발생하는 구조물의 배면은 변형 성능이 우수한 HDFRC 매트릭스를 배치함으로써 내충격 성능 향상이 된 것으로 판단된다. 카고메 연결재를 매트릭스 사이에 혼입하여 전면과 배면을 구성한 각각의 매트릭스의 일체화 거동을 높임으로써 내충격 성능을 향상시키기 위한 방안은 효과적이지 않은 것으로 나타났다. 카고메 연결재를 혼입하지 않은 Hybrid 배합과 카고메 연결재를 혼입한 Hybrid-K 배합 모두 비상체의 관통이 발생하였다. 마찬가지로 카고메 연결재를 혼입하지 않은 Hybrid-R 배합과 카고메 연결재를 혼입한 Hybrid-K-R 배합도 유사한 파괴 형태를 나타내었다. 이는 각각의 매트릭스가 일체화 거동을 위하여 매트릭스 계면간에 추가 보강을 하지 않아도 이 연구에서 사용한 제조 방법을 따를 경우 충분한 일체화 거동을 한다는 것을 의미한다.

표 2.34는 각 배합의 관입 깊이 및 실험값과 NDRC 제안식에 따른 계산값을 비교한 결과를 나타낸다. 관입 깊이 분석 결과, 전면 UHPC, 배면 HDFRC를 배치한 Hybrid-R 배합의 관입 깊이는 8.39 mm로 가장 얇게 나타났다. 전면 HDFRC, 배면 UHPC를 배치한 Hybrid 배합은 비상체가 관통되는 것으로 나타났다. 마찬가지로 전면 UHPC, 배면 HDFRC를 배치한 Hybrid-K-R 배합의 관입 깊이는 19.83 mm로 나타났고, 전면 HDFRC, 배면 UHPC를 배치한 Hybrid-K-R 배합은 비상체가 관통되는 것으로 나타났다. 또한 강섬유를 혼입한 섬유보강 UHPC 배합도 비상체가 관통되는 것으로 나타났다. NDRC에서 제안한 식에 의하여 계산된 모든 배합의 관통 한계 두께는 40.53 mm이다. 그러나 Hybrid-R 배합과 Hybrid-K-R 배합은 관통이 발생하지 않았다. 이러한 결과는 앞서 전술한 바와 같이 압축과가 발생하는 구조물의 전면은 강도 지향성 매트릭스, 인장과가 발생하는 구조물의 배면은 연성 지향성 매트릭스로 구조물을 구성하면 NDRC에서 제안한 충돌 저항 성능보다 우수한 성능을 확보할 수 있고, 충돌 저항 성능이 매우 향상된다는 것을 의미한다. NDRC에서 제안한 식에 의하여 계산된 모든 배합의 관입 깊이는 14.63 mm이다. Hybrid-R 배합의 관입 깊이는 8.39 mm로서, NDRC에서 제안한 식에 의하여 계산된 값보다 42.7 % 향상되는 것으로 나타났다. 또한, 강섬유를 보강한 UHPC 배합이 관통되었기 때문에 NDRC에서 제안한 UHPC 배합의 관입 깊이와 비교해도 동일하게 향상된 결과이다. 그러나 Hybrid-K-R 배합의 관입 깊이는 19.83 mm로서, NDRC에서 제안한 식에 의하여 계산된 값보다는 35.5 % 깊은 것으로 나타났다.

표 2.33 각 배합의 파괴 형태(카고메 연결재 및 결합재 구성 방법에 따른 영향)

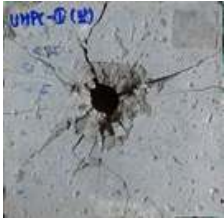
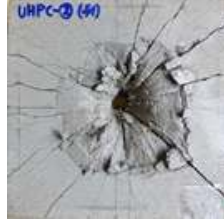
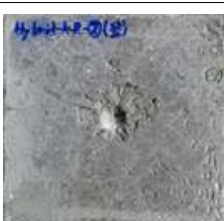
	전면		배면	
UHPC				
	Perforation with spalling		Perforation with scabbing	
Hybrid				
	Perforation with spalling		Perforation with scabbing	
Hybrid-R				
	Penetration with spalling		Cracks with scabbing	
Hybrid-K				
	Perforation with spalling		Perforation with scabbing	
Hybrid-K-R				
	Penetration with spalling		Cracks with scabbing	

표 2.34 각 배합의 관입 깊이 및 NDRC값 비교(카고메 연결재 및 결합재 구성 방법에 따른 영향)

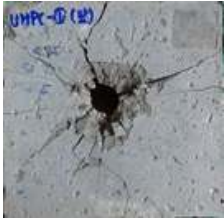
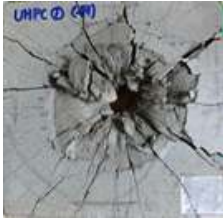
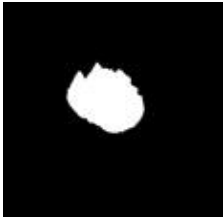
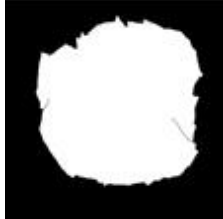
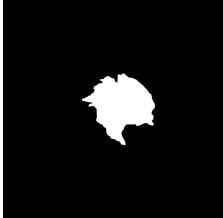
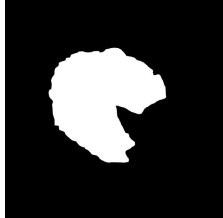
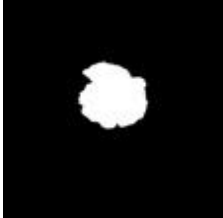
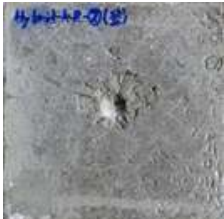
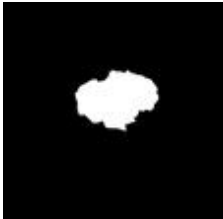
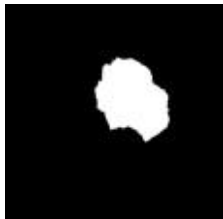
	실험값		NDRC 계산값	
	관입 깊이(mm)	UHPC 대비 향상률	관입 깊이(mm)	관통 한계 두께(mm)
UHPC	관통	-	14.63	40.53
Hybrid	관통	-	14.63	40.53
Hybrid-R	8.39	42.7 % 향상	14.63	40.53
Hybrid-K	관통	-	14.63	40.53
Hybrid-K-R	19.83	-	14.63	40.53

표 2.35는 배면 손상 면적 측정 결과 및 중량 손실률 측정 결과를 나타내고, 표 2.36은 고속 비상체 충돌 실험에 따른 각 배합의 배면 손상 면적을 나타낸다. Hybrid-R 배합과 Hybrid-K-R 배합의 배면 손상 면적 비율은 각각 12.8 %, 12.3 %로서, Hybrid 배합 및 Hybrid-K 배합과 비교하여 각각 67.9 %, 71.5 % 향상되는 것으로 나타났다. 또한 UHPC 배합과 비교해서도 각각 55.6 %, 57.3 % 향상되는 것으로 나타났다. 구조물의 전면에 강도 지향성 매트릭스를 배치하고 배면에 연성 지향성 매트릭스를 배치하는 것이 배면 손상 면적 측면에서 효과가 있는 것으로 나타났고, 이는 충격 하중을 받는 구조물 내부의 사용자가 충격 하중에 의해 비산되는 구조물 파편으로부터의 안전성이 향상되는 것으로 나타났다. 중량 손실률 측정 결과 Hybrid-R 배합과 Hybrid-K-R 배합의 배면 손상 면적 비율은 각각 3.51 %, 2.79 %로 나타났다. 매트릭스의 구성 방법을 반대로 한 Hybrid 배합 및 Hybrid-K 배합과 비교하여 각각 62.4 %, 65.6 % 향상되는 것으로 나타났고, UHPC 배합과 비교해서도 각각 33.5 %, 47.2 % 향상되는 것으로 나타났다. 중량 손실률 측정 결과는 배면 손상 면적 실험 결과와 유사하게 나타났고, 전면을 강도 지향성 매트릭스인 UHPC, 배면을 연성 지향성 매트릭스인 HDFRC로 구성하는 방법이 충돌 저항 성능에 가장 효과적인 것으로 나타났다.

표 2.35 각 배합의 배면 손상 면적 비율 및 중량 손실률 측정 결과(카고메 연결재 및 결합재 구성 방법에 따른 영향)

	배면 손상 면적		중량 손실률	
	배면 손상 면적 비율 (%)	UHPC 대비 향상률	중량 손실률 (%)	UHPC 대비 향상률
UHPC	28.8	-	5.28	-
Hybrid	39.9	-	9.34	-
Hybrid-R	12.8	55.6 % 향상	3.51	33.5 % 향상
Hybrid-K	43.1	-	8.11	-
Hybrid-K-R	12.3	57.3 % 향상	2.79	47.2 % 향상

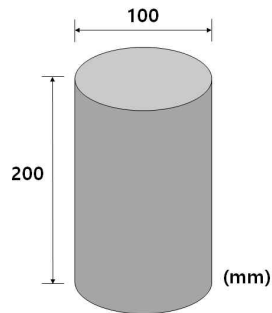
표 2.36 각 배합의 배면 손상 면적(카고메 연결재 및 결합재 구성 방법에 따른 영향)

	전면		배면	
UHPC				
Hybrid				
Hybrid-R				
Hybrid-K				
Hybrid-K-R				

㉔ 충돌성능 검증 및 내충격 시스템의 형상 개선 3(일반 콘크리트에 카고메 트러스 보강)

앞서 30 MPa 수준을 갖는 일반 콘크리트 배합에 카고메 트러스를 보강재료로서 사용하는 배합과 제조 기술을 개발하였다. 또한 카고메 트러스 보강 콘크리트보다 철근비가 높은 철근보강 콘크리트 배합과 철근비가 낮은 철근보강 콘크리트 배합을 구성하여, 카고메 트러스로 보강한 콘크리트와 일반적인 철근보강 콘크리트의 내충격 저항성능을 직접적으로 비교할 수 있도록 하였다. 이를 위하여 압축강도 실험 및 고속 비상체 충돌 실험을 실시하였으며, 이를 토대로 내충격 저항 성능을 평가하였다.

압축강도는 KS F 2405에 따라 측정하였다. 지름이 10 cm이고 높이가 20 cm인 원주형 공시체 3개를 이용하여 28일 재령 압축강도를 측정하고, 평균값을 계산하였다. 그림 2.69은 압축강도 실험체의 형상 및 압축강도 실험 모습을 나타낸다.



(a) 압축강도 실험체 형상



(b) 압축강도 실험 모습

그림 2.69 압축강도 실험체의 형상 및 실험 방법(일반콘크리트에 카고메 트러스 보강)

고속 비상체 충돌실험은 카고메 트러스로 보강한 콘크리트와 일반적인 철근보강 콘크리트의 보강 재료에 따른 충돌 저항 성능을 평가하기 위하여 실시하였다. 표 2.37은 고속 비상체 충격 실험의 실험 조건 및 변수를 나타낸다. 충격실험에 사용된 실험체의 크기는 너비와 높이가 500 mm × 500 mm이고, 실험체의 두께는 100 mm이다. 그림 2.70(a)는 고속 비상체 충격실험에 사용한 실험체 및 비상체의 형상을 나타낸다. 고속 비상체 충격실험에 사용된 비상체는 금속 재질이며, 전면 형상이 반구형인 비상체를 사용하였다. 비상체의 무게와 직경은 각각 66.8 g, 25 mm이며, 발사체의 속도는 306.6 m/s로 비상체를 발사하였다. 발사체의 속도는 가속 관의 끝부분에 설치되어 있는 속도 측정 장비를 이용하여 측정하였다. 발사체의 무게와 속도로부터 계산된 충격에너지는 3,139 J이며, 그림 2.70(b)는 고속 비상체 충격실험의 실험 방법을 나타낸다. 충돌 실험 장비의 최대 발사 속도는 300 m/s 수준이며, 최대 가할 수 있는 충격에너지는 3,000 J 수준이다. 실험체의 크기가 크고 두께가 두꺼워 단일 타격으로 고속 비상체를 관통시키는 것이 어렵다고 판단하였으며, 이러한 이유로 실험실 조건상 가할 수 있는 최대 속도 및 충격 에너지로 비상체를 반복 타격하는 방식으로 실험을 실시하였다.

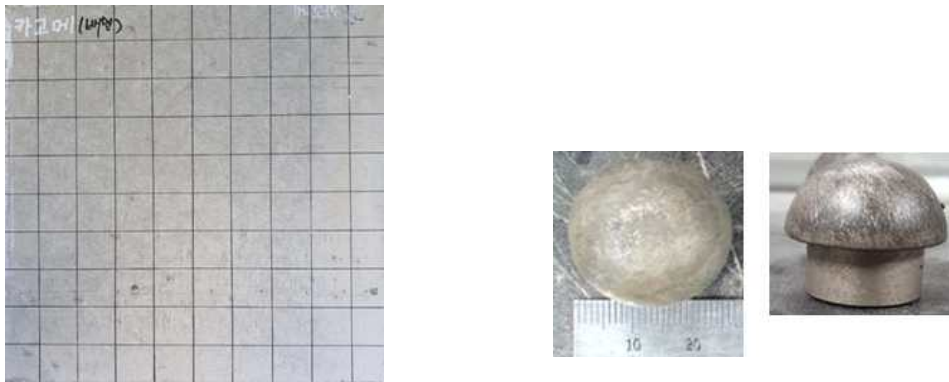
표 2.37 고속 비상체 충돌 실험 조건 및 변수(일반콘크리트에 카고메 트러스 보강)

비상체 질량	66.8 g
비상체 속도	306.6 m/s
비상체 직경	25 mm
충돌 에너지	3,139 J
실험체 크기	500 mm × 500 mm
실험체 두께	10 mm

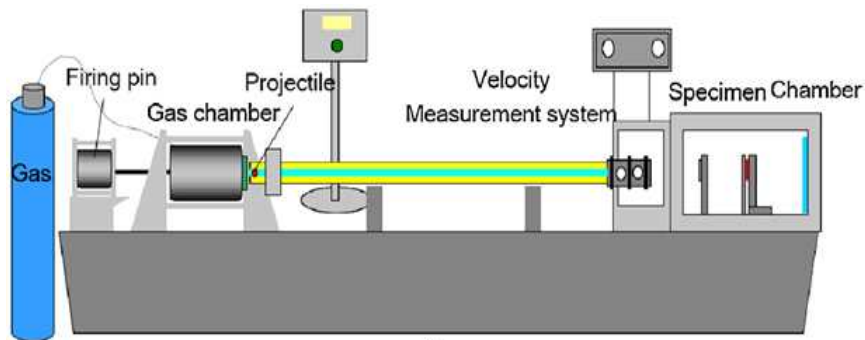
중량 손실률은 고속 비상체 충돌실험 전·후의 실험체 중량을 측정하여 계산하였다.

고속 비상체 충격에 의한 실험체의 파괴면적은 비상체의 반복 타격에 따른 타격 횟수별 파괴면적을 각각 측정하였다. 파괴면적 계산 방법은 먼저 충돌 하중을 받은 실험체의 전면과 배면의 표면을 촬영한 후, 파괴부위와 비파괴 부위의 경계선을 확인하였다. 이 후, 경계선에 따라 파괴부위와 비파괴부위를 보색으로 표현하고 이진화 영상처리 기법을 통하여 파괴면적을 계산하였다. 그러나 실험체의 배면은 관통이 발생한 마지막 타격 이후의 배면만 파괴면적을 계산하였다. 고속 비상체 충돌실험에 있어서, 실험체의 구속 여부는 실제 구조물과 동일한 조건이 될 수 있도록 완전 구속을 실시한다. 그러나 이 연구와 같이 비상체로 동일한 지점을 반복 타격하는 경우, 각각의 타격이 끝날때마다 배면을 촬영하기 위하여 구속을 해하게 되면 이 후 발사된 비상체가 동일한 지점을 타격하는 것이 어려울 수 있기 때문이다.

비상체 관입깊이는 비상체가 관입한 부분의 중심부를 절단하여 측정하였다.



(a) 실험체 및 비상체 형상



(b) 고속 비상체 충돌실험 장치

그림 2.70 고속 비상체 충돌실험 방법(일반콘크리트에 카고메 트러스 보강)

압축강도 실험 결과 콘크리트의 평균 압축강도는 36.2 MPa로 나타났고, 오차는 1.06 MPa로서 나타났다. 모든 배합의 콘크리트가 동일한 배합이기 때문에 압축강도 역시 동일한 것으로 판단하였다.

표 2.38은 고속 비상체의 첫 번째 타격에 따른 각 배합의 파괴 형태를 나타낸다. 모든 배합은 고속 비상체의 첫 번째 타격에서 비상체가 관통하지 않은 것으로 나타났다. 또한, 모든 배합의 전면은 관입 및 박리 현상이 발생하였다. 배면은 카고메 트러스를 보강한 NC-K 배합과

철근비가 가장 높은 NC-4 배합은 손상이 없는 것으로 나타났다. 그러나 철근비가 가장 낮은 NC-2 배합은 배면에 미세균열이 발생하였다.

표 2.38 비상체의 첫 번째 타격에 따른 각 배합의 파괴 형태(일반콘크리트에 카고메 트러스 보강)

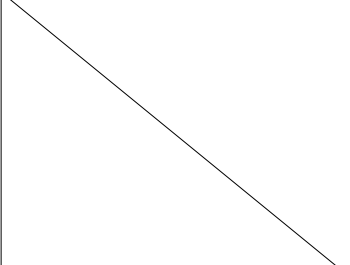
	전면		배면
NC-K			
	Penetration with spalling		Not damage
NC-2			
	Penetration with spalling		Cracks
NC-4			
	Penetration with spalling		Not damage

표 2.39는 고속 비상체의 두 번째 타격에 따른 각 배합의 파괴 형태를 나타낸다. 비상체의 두 번째 타격에서도 모든 배합은 비상체가 관통하지 않은 것으로 나타났다. 또한 모든 배합의 전면에서 관입 및 박리 현상이 발생하였고 첫 번째 타격보다 박리 현상이 더 커진 것으로 나타났다. 특히 철근을 보강한 NC-2 배합과 NC-4 배합은 철근이 표면에 노출되는 현상이 나타났다. 배면은 카고메 트러스를 보강한 NC-K 배합은 손상이 없는 것으로 나타났다. 그러나 철근비가 가장 높은 NC-4 배합은 균열이 발생하였으며, 철근비가 가장 낮은 NC-2 배합은 배면 박리 및 균열이 발생하였다. 비상체의 두 번째 반복 타격을 통하여 카고메 트러스를 보강재료로서 사용한 콘크리트가 철근비가 상대적으로 높은 일반 철근보강 콘크리트 배합보다 파괴 성상 면에서 우수한 것으로 나타났다.

표 2.39 비상체의 두 번째 타격에 따른 각 배합의 파괴 형태(일반콘크리트에 카고메 트러스 보강)

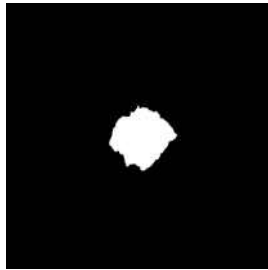
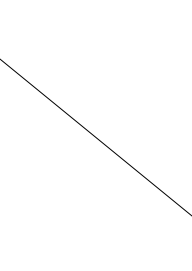
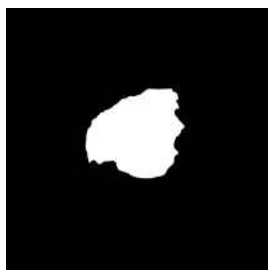
	전면		배면
NC-K			
	Penetration with spalling		Not damage
NC-2			
	Penetration with spalling		Cracks with scabbing
NC-4			
	Penetration with spalling		Cracks

표 2.40은 고속 비상체의 세 번째 타격에 따른 각 배합의 파괴 형태를 나타낸다. 비상체의 세 번째 타격에서 철근비가 가장 낮은 NC-2 배합은 비상체가 관통되는 파괴 형태가 나타났다. 또한 비상체가 관통하면서 실험체의 전면 및 배면이 박리되는 현상이 나타났다. 철근비가 가장 높은 NC-4 배합은 세 번째 타격에서도 비상체의 관입이 발생하였지만 배면의 균열이 더 커지고 박리되는 현상이 나타났다. 카고메 트러스로 보강한 NC-K 배합도 세 번째 타격에서 관입만 발생하였고, 배면에 균열이 발생하였다. 세 번째 비상체 반복 타격을 통하여 철근비가 상대적으로 낮은 NC-K 배합은 배면의 균열만 발생하였으나 철근비가 가장 높은 NC-4 배합은 배면의 박리가 발생하여 카고메 트러스를 보강재료로서 사용한 콘크리트가 고속 비상체 충돌 하중하에서 파괴 성상이 더 우수한 것으로 나타났다. 특히 배면의 박리는 구조물 내부에 비산되는 구조물의 파편으로 인한 2차 피해를 유발할 수 있기 때문에 이에 따른 충격 저항 성능 효과는 더욱 클 것으로 판단된다.

표 2.40 비상체의 세 번째 타격에 따른 각 배합의 파괴 형태(일반콘크리트에 카고메 트러스 보강)

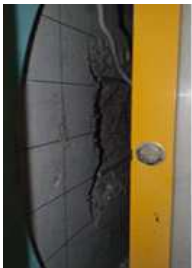
	전면		배면
NC-K			
	Penetration with spalling		Cracks
NC-2			
	Perforation with spalling		Perforation with scabbing
NC-4			
	Penetration with spalling		Cracks with scabbing

표 2.41은 고속 비상체의 네 번째 타격에 따른 각 배합의 파괴 형태를 나타낸다. 철근비가 가장 낮은 NC-2 배합의 실험체는 세 번째 타격에서 비상체가 관통되었기 때문에 반복 타격을 중단하였으며, NC-K 배합과 NC-4 배합만 네 번째 반복 타격을 진행하였다. 카고메 트러스를 보강재료로 사용한 NC-K 배합은 비상체의 관입만 발생하였고, 전면 및 배면에 박리 현상이 발생하였다. 반면에 철근비가 가장 높은 NC-4 배합은 비상체의 관통이 발생하였다.

표 2.41 비상체의 네 번째 타격에 따른 각 배합의 파괴 형태(일반콘크리트에 카고메 트러스 보강)

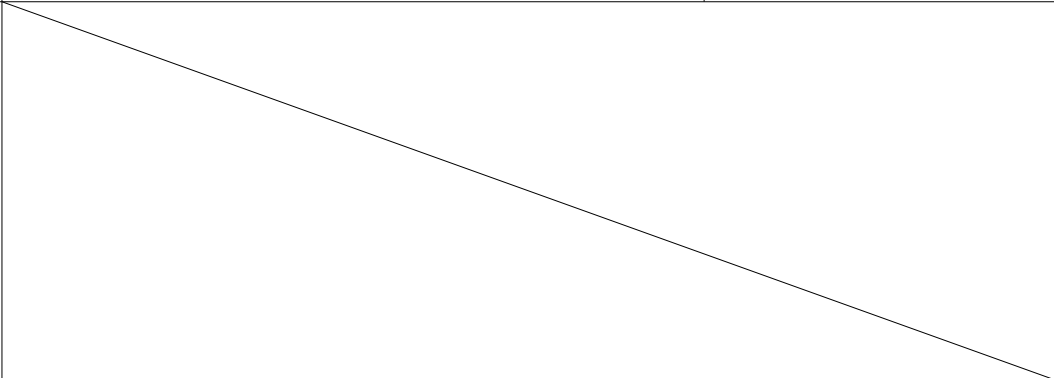
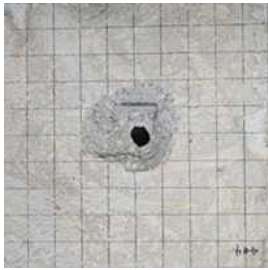
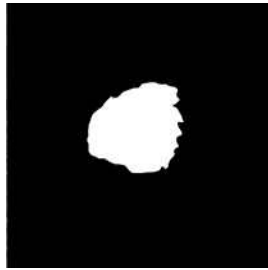
	전면		배면
NC-K			
	Penetration with spalling		Cracks with scabbing
NC-2			
NC-4			
	Perforation with spalling		Perforation with scabbing

표 2.42는 고속 비상체의 다섯 번째 타격에 따른 각 배합의 파괴 형태를 나타낸다. NC-2 배합과 NC-4 배합은 비상체가 관통되었기 때문에 반복 타격을 중단하였으며, 카고메 트러스를 보강한 NC-K 배합만 다섯 번째 반복 타격을 진행하였다. 다섯 번째 반복 타격 결과, NC-K 배합은 비상체가 관통되는 파괴 형태가 발생하였다. 카고메 트러스를 보강재료로서 사용하면 철근비가 상대적으로 높은 NC-4 배합보다 배면박리가 발생하는 타격횟수가 더 높고, 비상체의 관통이 발생하는 타격 횟수 역시 더 높게 나타났다. 이러한 결과는 철근비가 상대적으로 낮은 카고메 트러스를 보강재료로서 사용하는 것이 일반적인 철근보강 콘크리트보다 내충격 저항 성능을 향상시킨다는 것을 의미한다. 특히, 철근비적인 측면에서 카고메 트러스를 보강재료로 사용할 경우, 일반적인 철근보강 콘크리트보다 철근비가 작더라도 내충격 저항 성능 효과는 더욱 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

표 2.42 비상체의 다섯 번째 타격에 따른 각 배합의 파괴 형태(일반콘크리트에 카고메 트러스 보강)

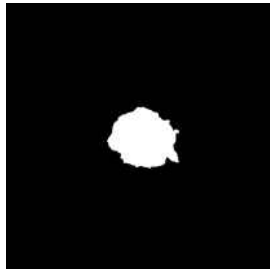
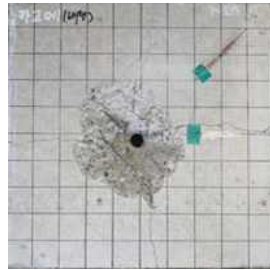
	전면		배면
NC-K			
	Perforation with spalling		Perforation with scabbing
NC-2			
NC-4			

표 2.43은 각 배합의 비상체 타격 횟수에 따른 관입 깊이를 나타낸다. 카고메 트러스를 보강 재료로 사용한 NC-K 배합의 관입깊이는 가장 낮게 나타났다. 비상체의 첫 번째 타격에서는 23 mm로 나타났고, NC-2 배합과 NC-4 배합과 비교하여 8.0 % 낮게 나타났다. 두 번째 타격에서는 39 mm로 나타났고, NC-2 배합과 NC-4 배합과 비교하여 각각 20.4 % 및 11.4 % 낮게 나타났다. 또한 세 번째 타격에서는 54 mm로 나타났고, NC-4 배합과 비교하여 1.82 % 낮게 나타났다. 타격 횟수에 따른 관입 깊이는 NC-K 배합의 경우 첫 번째 타격부터 타격 횟수가 1회씩 증가할 때마다 관입 깊이가 각각 69.6 %, 38.5 % 및 13.9 % 증가하는 것으로 나타났다. NC-4 배합은 각각 76.0 % 및 25 % 증가하는 것으로 나타났고, NC-2 배합은 96.0 % 증가하는 것으로 나타났다. 타격 횟수가 증가함에 따라 관입 깊이는 증가하였으나, 관입깊이가 증가하는 비율은 감소하는 것으로 나타났다.

표 2.43 각 배합의 비상체 타격 횟수에 따른 관입 깊이(일반콘크리트에 카고메 트러스 보강)

	비상체 타격 횟수에 따른 관입 깊이(mm)				
	1회	2회	3회	4회	5회
NC-K	23	39	54	62	관통
NC-2	25	49	관통		
NC-4	25	44	55	관통	

표 2.44는 각 배합의 첫 번째 타격에 따른 관입깊이와 NDRC에서 제안한 식을 이용하여 구한 계산값을 비교한 결과를 나타낸다. NDRC에서 제안한 식을 이용하여 계산한 관입깊이는 28.5 mm로 나타났다. 그러나 NC-K 배합의 실제 관입깊이는 23.0 mm로서, NCRC 제안식을 이용한 계산값보다 19.4 % 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 카고메 트러스를 보강재료로 사용하면 NDRC에서 제안한 충돌 저항 성능보다 우수한 성능을 나타내는 내충격성 건축재료를 제조할 수 있다는 것을 의미한다. NDRC 제안식을 이용하여 계산한 관통 한계 두께는 67.6 mm이다. 실제 실험에서도 두께가 100 mm인 모든 실험체는 비상체의 첫 번째 타격에서 관통이 발생하지 않고 관입만 발생하였다. 또한 NDRC 제안식을 이용하여 계산한 배면박리 한계 두께는 91.8 mm이며, 실제 실험에서도 모든 실험체는 비상체의 첫 번째 타격에서 배면 박리가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

표 2.44 각 배합의 첫 번째 타격에 따른 관입 깊이 및 NDRC값 비교(일반콘크리트에 카고메 트러스 보강)

	실험값		NDRC 계산값	
	관입 깊이(mm)	NDRC 계산값 대비 향상률	관입 깊이 (mm)	관통 한계 두께 (mm)
NC-K	23	19.4 % 향상	28.52	67.63
NC-2	25	12.4 % 향상	28.52	67.63
NC-4	25	12.4 % 향상	28.52	67.63

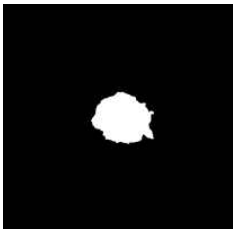
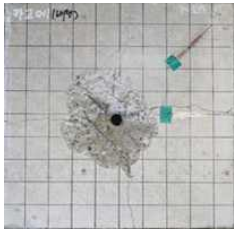
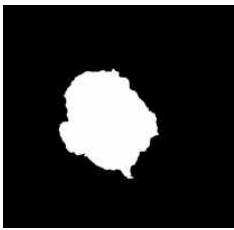
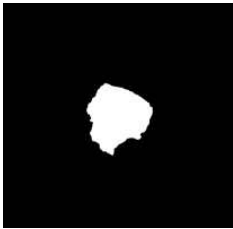
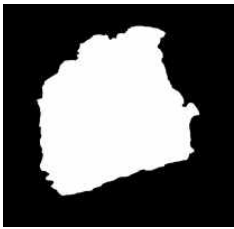
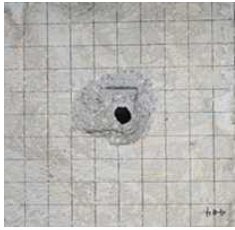
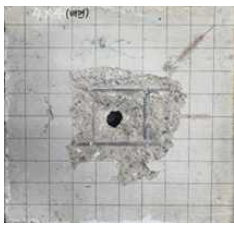
표 2.45은 배면 손상 면적 측정 결과 및 중량 손실률 측정 결과를 나타내고, 표 2.46은 고속 비상체 충돌 실험에 따른 각 배합의 배면 손상 면적을 나타낸다. NC-K 배합의 배면 손상 면적 비율은 13.9 %로 가장 낮게 나타났고, NC-2 배합 및 NC-4 배합과 비교하면 각각 62.1 % 및 31.3 % 감소한 것으로 나타났다. NC-K 배합의 배면 손상 면적은 비상체의 타격을 5회 실시하고 측정한 결과로서, NC-2 배합의 3회 타격시 측정한 결과와 NC-4 배합의 4회 타격시 측정한 결과보다 타격 횟수가 더 많다. 그러나 배면 손상 면적은 더 낮은 것으로 나타났고, 이를 통하여 카고메 트러스를 보강재료로 사용하면 배면 손상 면적 측면에서 일반 철근 보강 콘크리트보다 우수하다는 것을 알 수 있다. 특히 철근비가 상대적으로 높은 NC-4 배합보다 우수한 배면 손상 면적 결과는 앞서 전술한 바와 같이 구조물 내부에 비산되는 구조물 파편으로 인한

피해를 감소할 수 있다는 측면에서 철근량 감소 및 실내 거주자의 안정성까지 향상시킬 수 있는 충격 저항성 재료로서 더욱 우수한 효과가 있을 것으로 기대된다. 중량 손실률 측정 결과 카고메 트러스를 보강재료로 사용한 NC-K 배합의 중량 손실률은 3.08 %로 나타났고, NC-2 배합과 NC-4 배합보다 각각 62.0 % 및 25.7 % 감소한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 배면 손상 면적과 유사한 실험 결과이다. 중량 손실률을 결정하는 주요 요인은 전면과 배면에서 발생하는 실험체의 탈락이며, 중량 손실률과 배면 손상 면적 비율이 유사한 이유이다.

표 2.45 각 배합의 배면 손상 면적 비율 및 중량 손실률 측정 결과(일반콘크리트에 카고메 트러스 보강)

	배면 손상 면적		중량 손실률	
	배면 손상 면적 비율 (%)	향상율	중량 손실률 (%)	향상율
NC-K	13.9 (5회 타격)	NC-2 대비 62.1 % 향상 NC-4 대비 31.3 % 향상	3.08	NC-2 대비 62.0 % 향상 NC-4 대비 25.7 % 향상
NC-2	36.6 (3회 타격)	-	8.10	-
NC-4	20.2 (4회 타격)	-	4.14	-

표 2.46 각 배합의 배면 손상 면적(일반콘크리트에 카고메 트러스 보강)

	전면		배면	
NC-K (5회 타격)				
NC-2 (3회 타격)				
NC-4 (4회 타격)				

㉔ 요약 및 결론

이 연구에서는 내충격 저항성능을 향상시키기 위하여 개발된 연구 성과물을 이용하여 실험실 성능평가를 실시하고, 충돌 저항 성능을 검증하였다. 이를 위하여 카고메 트러스를 보강재료로 사용한 고강도 콘크리트 복합재료의 충돌 저항 성능을 검증하였다. 또한 충격 하중의 특성과 그에 따라 요구되는 재료 특성을 만족할 수 있는 새로운 형태의 내충격 저항 구조에 대한 충돌 저항 성능을 검증하였다. 마지막으로 30 MPa 수준을 갖는 일반 콘크리트 배합에 카고메 트러스를 보강재료로서 사용하고 일반적인 철근보강 콘크리트와 비교하여 충돌 저항 성능을 검증하였다. 카고메 트러스 보강 콘크리트 복합재료는 고속 충돌 하중 하에서 강섬유 보강 UHPC보다 매우 우수한 내충격성을 확보하는 것으로 나타났다. 카고메 트러스와 강섬유 보강을 함께 실시하면 강섬유 보강 UHPC보다 관입 깊이 32.3 %, 배면 손상 면적 비율 59.7 %, 중량 손실률 71.2 %가 향상되는 것으로 나타났고, 카고메 트러스만 보강하더라도 관입 깊이, 배면 손상 면적 비율, 중량 손실률이 각각 22.8 %, 12.9 %, 52.7 % 향상 되는 것으로 나타났다. 이는 카고메 트러스가 갖는 등방성, 경량성 및 높은 전단강도 등의 재료적 특성이 내충격성 향상에 크게 영향을 준 것으로 판단된다. 또한 강도 지향성 매트릭스를 전면에 배치하고, 연성 지향성 매트릭스를 배면에 배치하여 실험체를 제조할 경우, 고속 충돌 하중 하에서 강섬유 보강 UHPC보다 매우 우수한 내충격성을 확보하는 것으로 나타났다. 전면은 강도 지향성 매트릭스, 배면은 연성 지향성 매트릭스로 실험체를 구성하면 강섬유 보강 UHPC보다 관입 깊이 42.7 %, 배면 손상 면적 비율 55.6 %, 중량 손실률 33.5 % 이상의 성능이 향상되는 것으로 나타났다. 이는 비상체가 충돌하여 압축파가 발생하는 구조물의 전면은 압축 성능이 우수한 UHPC 매트릭스를 배치하고, 인장파가 발생하는 구조물의 배면은 변형 성능이 우수한 HDFRC 매트릭스를 배치함으로써 충격 하중의 특성과 그에 요구되는 재료 특성을 모두 만족하였기 때문으로 판단된다. 적층 형태의 구조상 취약점이라 할 수 있는 매트릭스 계면의 접착에 대한 문제를 해결하고자 카고메 연결재를 이용하였는데, 카고메 연결재로 보강한 배합과 카고메 연결재를 보강하지 않은 배합의 파괴 형태 및 전체적인 실험결과는 유사하게 나타났다. 이는 이 연구에서 개발한 하이브리드 형태의 적층 구조는 매트릭스 계면에 추가 보강을 하지 않아도 이 연구에서 사용한 제조 방법을 따를 경우 충분한 일체화 거동이 가능하다는 것을 의미한다. 마지막으로 일반 콘크리트에 카고메 트러스를 보강하면 일반적인 철근보강 콘크리트보다 내충격 저항 성능이 우수한 것으로 나타났다. 특히, 카고메 트러스를 보강하면 철근비가 42.3 % 높은 철근보강 콘크리트보다 관입 깊이 8.0 %, 배면 손상 면적 비율 31.3 % 및 중량 손실률 25.7 %가 향상되는 것으로 나타났고, 철근비가 28.9 % 낮은 철근보강 콘크리트와 비교하면 관입 깊이 8.0 %, 배면 손상 면적 비율 62.1 % 및 중량 손실률 62.0 %가 향상되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 30 MPa 수준의 일반 콘크리트 보강재료로서 카고메 트러스를 사용하면 일반적인 철근보강 콘크리트와 비교하여 충격 저항 성능의 향상 뿐만 아니라 동일한 충격 저항 성능을 확보함에 있어서 요구되는 철근량도 감소시킬 수 있다는 것을 의미한다.

(나) 공동연구기관 (대전대학교)

표 2.47 2차년도 공동연구기관 주요 연구활동 및 연구내용

주요 연구활동	세부 연구내용
■ 매트릭스 재료모델 구축	• 텐서 기반 콘크리트 재료모델과 분쇄효과 통합기법 개발
■ 하이드로코드를 이용한 카고메 트러스 보강 부재의 정밀 해석	• 카고메 트러스 보강 콘크리트 부재의 분쇄효과를 고려한 하이드로코드 정밀 해석 • 분쇄효과와 텐서 기반 콘크리트 재료모델을 통합한 하이드로코드 정밀 해석 • 카고메 트러스 보강 부재의 고속 충격 정밀 해석기법 검증 및 보완

① 매트릭스 재료모델 구축

㉔ 텐서 기반 콘크리트 재료모델과 분쇄효과 통합기법 개발

텐서의 관점이 아닌 재료의 임의의 방향의 일반 평면에 작용하는 응력과 변형률의 벡터로 표현되는 소성 모델 새로운 유형이 제안되었으며 이 모델을 테일러 모델이라 한다. 이러한 생각을 바탕으로 소성 슬립 이론의 주요 기능은 다음과 같이 개발되었다.

i) 응력 벡터들은 소성 슬립면들에서 정적 연속체 즉, 응력 텐서를 강제로 슬립면 텐서에서 얻을 수 있다.

ii) 소성 변형률 벡터는 소성 구성적인 법칙에 따른 응력 벡터로부터 모든 슬립 평면에서 얻어진 연속체 소성 변형률 텐서를 얻기 위해 적용한다.

iii) 얻어진 소성 변형률 텐서는 응력 텐서의 탄성 상수에 따라 계산, 탄성 변형률 텐서에 추가된다.

이 방법은 다결정 금속의 가소성 강화를 위한 가장 강력한 구상적 모델로 인정받고 있는 테일러 모델을 의미한다. 소성 슬립과 같은 미세 균열 이외의 현상은 재료 내의 임의의 방향의 일반 평면에 비탄성 현상이 슬립 평면에 무관하게 관찰되었으며, 응력과 긴장 벡터 사이의 관계의 일반적인 용어는 Microplane model은 1984년에 개발되었다. Microplane에 비탄성 변형 벡터의 법선 및 접선 성분과 이러한 미세균열 등의 미세 현상의 표현과 마찰을 허용한다는 것이다. 텐서 모델에서 J_2 및 I_1 의 비율은 내부 마찰로 간주되지만, 실제로는 미끄럼마찰 벡터 모델링을 잡을 수 있는 특정면에서 발생한다.

정적 제약 조건에 대안하는 듀얼 Microplane의 변형률 벡터가 변형 텐서의 투영된 것으로 간주되며, 정적 및 운동학적 제약 조건은 동시에 실현될 수 없다. 탄성 변형 텐서 수준으로 단일 Microplane 및 첨가제에서 비탄성 변형 전지화의 연화로 인해 불안정한 모델로 인식되었다. 이 문제는 아래와 같이 Microplane 손상 재료 및 구성적인 모델의 본질적 특성을 알 수 있는

모델의 개발로 해결될 수 있다.

i) 정적 제약학적 제약으로 교체되어야 한다.

ii) 중첩 연속체의 응력 텐서는 가상일의 원리에 의해 모든 Microplanes 응력 벡터로부터 계산되어야 한다.

iii) 탄성 변형은 매크로 레벨(즉, 연속체 텐서적 수준)에 적용할 수는 없지만, Microplane에 관한 법칙의 일부를 새로 수립해야 한다.

삼축 비선형 거동과 복합 재료 손상의 수학적 모델링은 점진적인 진행에 있어 오랫동안 걸쳐 이루어져 왔다. 벡터가 아닌 텐서 형태로 구성 방정식을 사용하여 다른 방향의 현상 사이의 상호작용의 힘을 포획한 Microplane Model은 이러한 목적을 효과적으로 제공할 수 있다.

Microplane model의 기본적인 수학 구조는 논리적인 탄성 체제, 인장 및 손상의 압축 모드, 슬라이딩 마찰 모드와 관련된 열역학적 전위와 관계가 있다. 체적과 비체적 (V-D) 분리가 변형이 높고 낮은 구속에서 압축에 실패를 구분하기 위한 것이 불가피하다는 점을 감안하고, 압축응력-변형률 경계(또는 스트레인 종속 항복 한계)에서 microplane 구성 관계에 전체 수직 응력과 비교, sumpf에 V-D 분할을 적용하는 것이 중요하다. 이것은 탄성 변형률의 volumetric and deviatoric V-D split와 인장응력-변형 경계의 사용을 배제하고 있다.

본 연구에서 다루고자 하는 콘크리트의 분쇄(comminution)효과는 파괴시 변형에너지가 방출되는 정적파괴와 달리, 고압축 상태에서 분쇄시 구동력이 전단변형 속도의 국소 운동에너지의 형태로 방출된다는 점이다.

에너지 밀도는 변형에너지와는 무관하게 크기 순서에 의해 가능한 최대 변형 에너지 밀도를 초과하는 것으로 나타난다. 입자 크기는 전단 변형 속도의 $-2/3$ 승과 계면 파괴 에너지 및 계면 전단 응력의 3 분의 2 승에 비례하여 나타나고 있으며, 분쇄 공정은 겉보기 전단 점도와 동일하다는 것이 속도의 $-1/3$ 승 상수 계면 응력에 비례하고 있다. 분쇄 강도의 무차원 지표는 공식화되었다. 이론적 전개에서 전단 변형 속도의 로컬 운동 에너지가 난류의 소용돌이에 국소적 운동 에너지와 유사한 역할을 하는 것을 주목해야 한다. 암반, 콘크리트, 세라믹, 복합 재료 및 금속의 높은 비율의 동적파괴의 예전 연구는 핵분리와 같은 균열 전파를 주로 취급하고 동적으로 전파하는 균열의 분기 탄성 충격의 파도와 방해 및 개발 메커니즘이 있고 조밀하게 분포된 분쇄의 영역은 Mescall 영역으로 불린다. 구조물의 전반적인 응답을 위한 큰 동적 유한요소 프로그램에서 사용할 수 있는 구성 방정식의 형태로 분쇄 모델은 아직 적용하기 어려운 실정이다. 이러한 구성 모델을 찾고, 고체가 동일한 입자로 분쇄된다는 이상화 된 프로세스에 대한 분석은 그림 2.71에 나타나고 있다.

이들은 최소의 표면적대 부피비를 형성하는 최소의 에너지를 필요로 하기 때문에, 최대 전단면에서 간단한 공간 충전 정규 분할 중, 정육각형이 가장 가능성이 높다. 육각형의 법선 방향에서는, 입자가 프리즘인 것으로 가정한다. 어떤 순간에, 그림 2.71(b)에 표시된 바와 같이 변위 무한한 것으로 간주 될 때 변형 속도가 미지의 크기의 입자를 분리 골절 및 계면을 생성하는 전단 변형 속도의 높은 운동 에너지가 되도록 고려할 수 있다.

이것이 발생하는 입자의 중심이 하나의 동일한 속도 필드 그림 2.60(c)에 대응하는 반면, 입자가 서로에 국부적 운동 에너지 슬립에 대하여 기존 변형되지 않은 형상을 회복하게 된다. 단순성과 명확성을 위해, 우리는 먼저 ϵ_D 로 표시되는 최대 전단 변형 속도의 평면에 2차원 해석을 간주하고, 3D 스케일로 일반화할 수 있다.

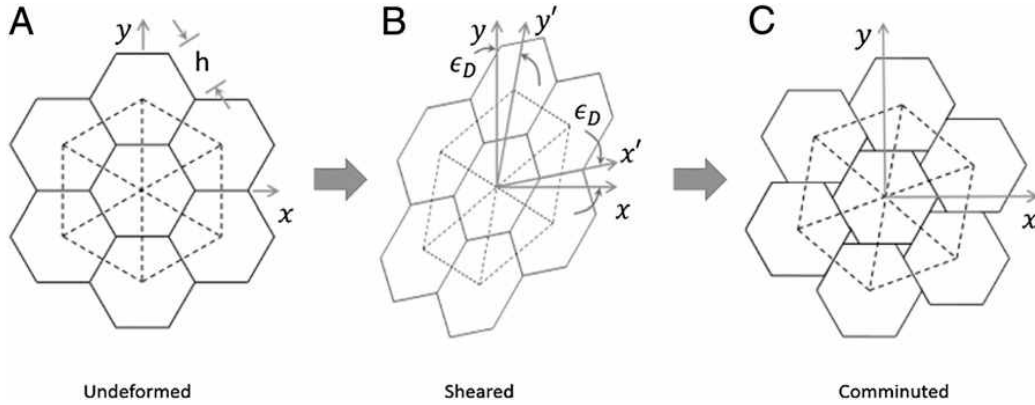


그림 2.71 프리즘 육각 입자물질의 분쇄 예시

분쇄 또는 슬립현상의 발생 전에 현재의 방향으로 변위속도는 X 및 Y좌표, 그 원점은 입자에 부착되는 중심은 $u = u_0 - \omega y + e_D y$ 그리고 $v = v_0 + \omega x + e_D x$ 최상의 점은 시간 미분을 나타낸다. 분쇄 또는 슬립 한 후, 이 속도는 $u^+ = u_0 - \omega y$ 그리고 $v^+ = v_0 + \omega x$ 구할 수 있다.

X 및 Y축에 대하여 입자의 대칭을 가정, $\int_A x dA = \int_A y dA = \int_A xy dA = 0$ 은 우리가 얻을 수 있는 단위 부피당 각형 프리즘 저하에 대한 운동에너지이다.

$$\Delta k = -\frac{h}{V_p} \int_A \frac{\rho}{2} (u^2 + v^2 - (u^+)^2 - (v^+)^2) dx dy = -c_k \rho h^2 \epsilon_D^2. \quad (2.19)$$

여기서 A = 입자 면적, ρ = 질량 밀도, $c_k = I_p / (2h v_p)$, $V_p = (3\sqrt{3}/8)h^3$ = 입자 부피, $I_p = (3\sqrt{3}/32)h^4$ = 측면 높이 길이 (H)의 각 육각형 프리즘 극 관성 모멘트이고 재료 회전 ω 및 변위 U_0 과 V_0 의 속도가 로컬 운동 에너지 밀도는 입자 무게 중심의 속도에 의해 정의 차원 운동의 운동 에너지 밀도로부터 분리 가능한 것을 의미 K에 영향을 미치지 않는다.

이것은 속도 순수 전단에 의한 입자 변형의 운동 에너지가 ϵ_D 는 $\omega = \epsilon_D$ 각속도에 동일한 크기의 강체로 회전 운동 에너지와 동일하게 발생한다는 가정이다. 난류와 부분적인 비유를 참조하여 분쇄 및 난류 모두에서 micro level 운동 에너지는 운동 에너지를 증대시킨다. micro level 운동 에너지는 난류 와류 유체 점도에 의해 손실 또는 인터페이스 골절 또는 후속의 미

끄럼마찰 에너지이다. 그러나 소용돌이와 달리 로컬 전단 변형 운동은 무한정 계속할 수 있다. 실제로, 입자 크기 h 를 일정애 따라 이는 다음과 같은 누적 분포에 대한 변화 분포식을 따른다.

$$F(s) = \frac{s^k - h^k}{H^k - h^k} [s \in (h, H), F(s) \in (0, 1)]. \quad (2.20)$$

여기서 K = 경험적 상수, 변수 S = 입경과 H 및 H = 최소 및 최대 입자 크기 (일반적으로 H 의 높이 = 10-100). 지역화 되지 않은 변형 연화와 준정적 구성은 콘크리트의 최대 골재 크기로 최대 재료의 불균일성의 크기 입자로 분쇄하는 재료에 해당하는 에너지 손실을 포함하기 때문에, H 는 작은 크기의 한 자리로 간주 되어야한다. (즉, 약 0 : 1DA). 평균입자 크기는 $\bar{s} = \int_h^H s dF(s) = \bar{c}h$,이며, 단위 부피당 결합 접점 영역은 $S = C_s/h$ 이다. 그리고 모든 크기의 입자의 전단 변형 속도의 운동에너지의 손실 단위 체적 마다 $\Delta k = - \int_{s=h}^H c_k \rho s^2 \epsilon_D^2 dF(s) = - C_k \rho h^2 \epsilon_D^2$, 이다. CK , CS 는 차원상수이다. $H=h=100$ 및 육각형 또는 입방체 입자, $CS = 0.331$ or 0.300 , and $CK = 92.60$.

운동 에너지 감소 ΔK 가 모두 계면 파괴 에너지 증가 $\Gamma \Delta S$ 의해 손실된다고 가정하면, 에너지 균형 상태는 전단 파괴 에너지 또는 의존도 때문에 상수로 간주하고 유닛 계면 면적당 마찰에너지 또는 계면파괴시에 발생할 수 있다.

$$\frac{\partial(\Delta k)}{\partial S} = \frac{\partial(\Delta k)/\partial h}{dS/dh} = \Gamma \quad (2.21)$$

$$h = \left(\frac{C_a \Gamma}{\rho \epsilon_D^2} \right)^{1/3}, \quad (2.22)$$

여기서 CA 는 무차원 상수이다. 만약 $H = h = 100$, 다음 $Ca = 0$: 육각형 프리즘에 대한 032 및 입방체 입자 0.019. 식 (21) 및 식 (22)는 유사하게 도출하고 실험적으로 중공 공중폭발에 의해 체적변형률에 의한 인장 분쇄를 위해 향후 검증될 수 있다.

또한, 구체적으로는 2차원으로 단일 동적으로 전파하는 균열을 위해 탄성 변형 에너지 U 와 관성 효과를 가진 운동 에너지가 모두 포함된 동적 에너지 방출율은 정확하게 가정되어 있다. 식 (23)와 같이 그들의 결합 면 S 에 의해 많은 균열이 확산되고 균열의 연속적 표현에 일반화와 무시할 수 있는 U 의 경우 이러한 식을 단순화할 수 있다.

$$\Delta k = -(C_0 I^2 \rho)^{1/3} \epsilon_D^{2/3} \quad (2.23)$$

여기서 C_0 는 특정한 무차원 상수이고 $C_0=822$, 육각형프리즘에 대한 입방체의 입자는 1,013이다. 3D의 일반화를 얻기 위해서 동등한 점도는 점성 응력 변형 관계는 같은 에너지 낭비 밀도를 줄 수 있는 η_D 를 도입하면 편리하다. 식 (24)의 편차 변형 속도 텐서는 여기에 발생하는 추가 편차 응력이다. 또한 에너지 밀도는 응력과 동일함을 유의하고, 그 s_{12}^A 은 다른 모든 수학적 구성 요소가 사라질 때 ΔK 와 동일해야하고, 그 ΔK 는 텐서적으로 불변해야 한다. 이 세 가지 조건에 대해 만족하기 위해서는 $-\Delta k = \sqrt{s_{ij}^A s_{ij}^A / 2}$ 가 필요하다. 왜냐하면 $s_{ij}^A = \eta_D \epsilon_{D_{ij}}$ 는 $\sqrt{s_{ij}^A s_{ij}^A / 2} = \eta_D \sqrt{\epsilon_{D_{ij}} \epsilon_{D_{ij}} / 2} = \eta_D \epsilon_D$ 로 쓸 수 있고, $\epsilon_D = \sqrt{\epsilon_{D_{ij}} \epsilon_{D_{ij}} / 2}$, 이는 $\epsilon_{D_{12}}$ 가 아닌 유일한 성분이 0일 때 순수 전단 ϵ_D 로 단순화할 수 있다. 따라서 분쇄 과정으로 인하여 에너지 싱크가 동등한 점성에 의해 모델링될 수 있다.

$$\eta_D = (c_0 I^2 \rho)^{1/3} \epsilon^{-1/3} \quad (2.24)$$

② 하이드로코드를 이용한 카고메 트러스 보강 부재의 정밀 해석

㉠ 카고메 트러스 보강 콘크리트 부재의 분쇄효과를 고려한 하이드로코드 정밀 해석

카고메 트러스 보강 콘크리트 부재의 하이드로코드 정밀 해석을 위하여 충돌 해석시 주로 사용되는 상용 하이드로코드인 ANSYS LS-DYNA를 이용하여 카고메 트러스 보강 콘크리트 부재의 내충격 저항성을 검증하고자 표 2.37과 표 2.38에 보이는 일반콘크리트에 카고메 트러스 보강 실험과 유사한 콘크리트 슬래브에 대하여 두가지 충돌속도에 대한 충돌해석을 수행하였다.

표 2.48 고속 비상체 충돌해석 조건

비상체 질량	66.8 g
비상체 속도	150, 306.6 m/s
비상체 직경	25 mm
실험체 크기	500 mm × 500 mm
실험체 두께	100 mm
해석 조건	카고메 트러스 보강 콘크리트
충돌 에너지	3,139 J

상용 hydrocode ANSYS LS-DYNA를 사용하여 충돌체와 콘크리트 슬래브를 솔리드요소로 모델링하였으며, 콘크리트 재료모델은 앞절에서 개발된 분쇄효과를 고려한 콘크리트 재료모델을 사용자 정의모델로 LS-DYNA에 도입하여 해석에 적용하였다. 그림 2.72은 카고메 트러스 모델링을 나타내고, 그림 2.73은 충돌해석 대상 카고메 트러스 보강 콘크리트 부재의 메쉬모델링을 나타낸다.

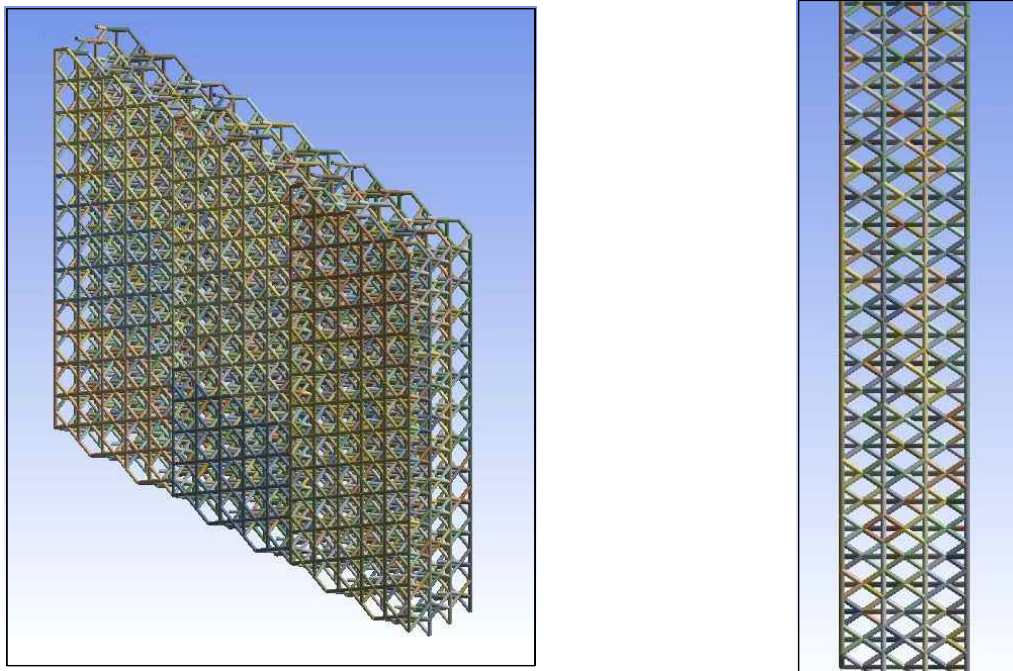


그림 2.72 카고메 트러스 모델링

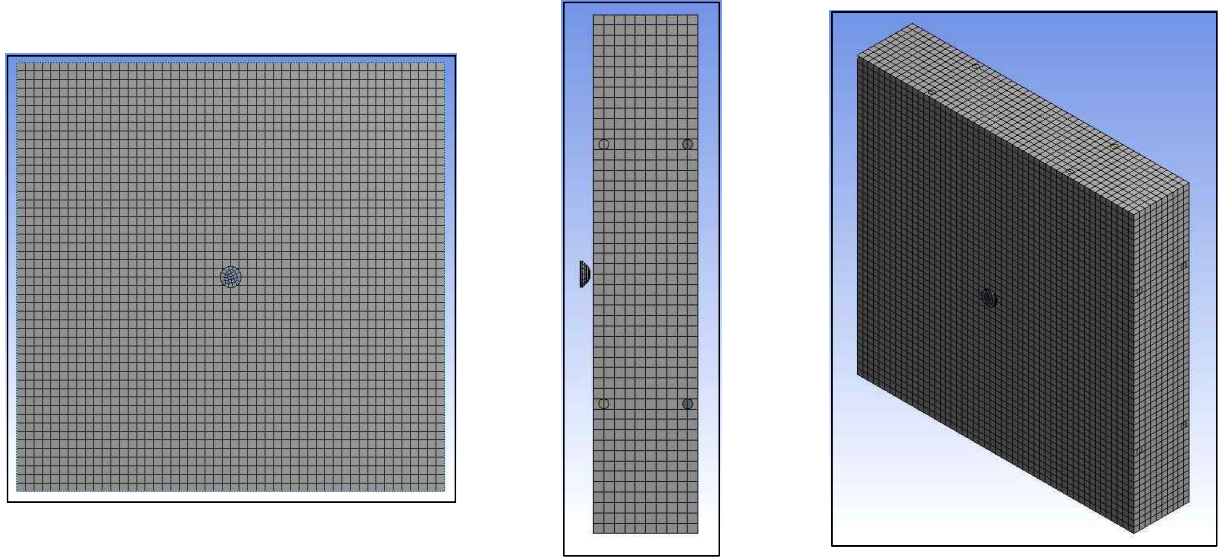
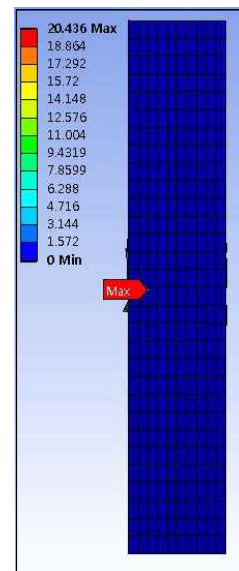
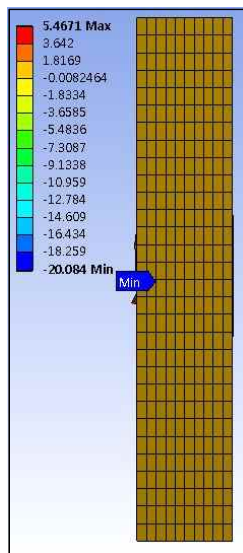
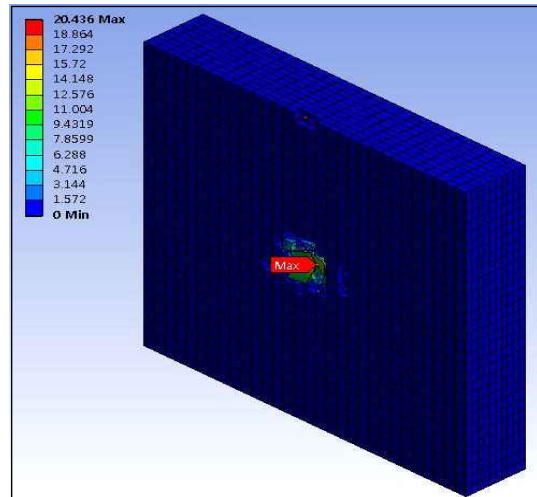
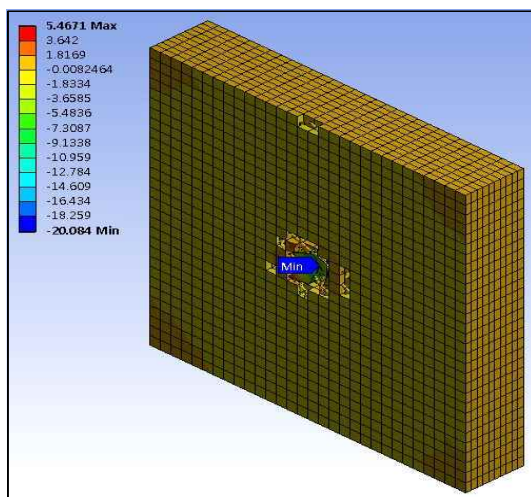
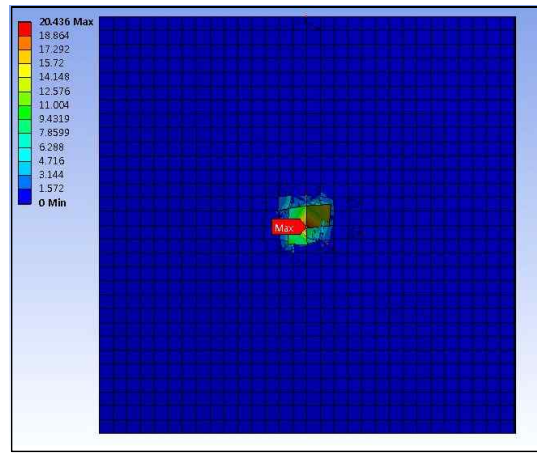
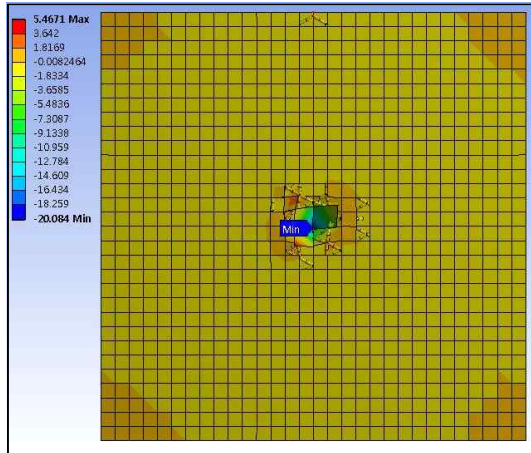


그림 2.73 충돌해석 대상 카고메 트러스 콘크리트 메쉬모델링

그림 2.74는 두 가지 충돌속도에 따른 충돌 후 변위 분포를 나타내고 있다. 두 가지 충돌속도 150, 306.6 m/s에 대하여 모두 충돌 후 관통하지 않는 것으로 나타났으며, 이는 카고메의 보강효과에 의해 내충격 저항성이 현저히 향상되는 것으로 판단된다. 이 해석결과에 대한 실험 및 이론적 검증에 대해서는 뒷 절에 기술하고자 한다.



비상체 속도 : 150 m/s

비상체 속도 : 306.6 m/s

그림 2.74 충돌해석 후 카고메 트러스 보강 콘크리트의 파괴 형상(변위 분포)

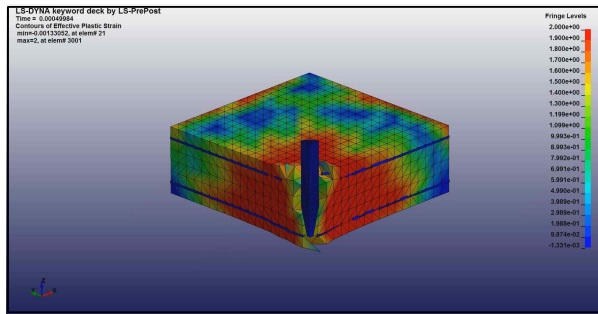
㉠ 분쇄효과와 텐서 기반 콘크리트 재료모델을 통합한 하이드로코드 정밀 해석

이 절에서는 LS-DYNA에서 제공하는 72R3(*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3) 기존 모델과 분쇄효과와 통합한 관통해석을 수행했으며, 두 결과를 비교 분석하였다. 대상구조물로 가로, 세로 700mm 두께별 콘크리트 슬래브를 1/4 모델링 하여, 4절점 Tetra Solid 요소로 모델링하였고, 콘크리트 강도는 48.6MPa로 가정하였다. 충돌체는 직경 40mm, 길이 120mm 인 스틸 비상체로 솔리드 요소로 모델링 하였다. 콘크리트 재료모델은 분쇄효과와 텐서 기반 콘크리트 재료모델을 통합한 재료모델을 사용했으며, 충돌 속도는 310m/s로 가정하고 eroding surface to surface로 접촉조건 부여하고, 재료모델 상에서 numerical eroding (effective strain = 0.3)을 고려하였다. 그림 2.75와 그림 2.76는 LS-DYNA를 사용하여 세가지 두께의 콘크리트 슬래브의 관통해석 결과이다. 각 두께별로 충돌면의 crater 길이보다 후면의 crater 길이가 넓은 것으로 나타났다. 또한 두께 260mm 철근콘크리트 관통해석은 비상체가 관통되지 못하고 다시 되돌아오는 현상이 나타나 본 모델은 내충격 저항성의 효과도 효과적으로 고려하고 있음을 확인 할 수 있었다.

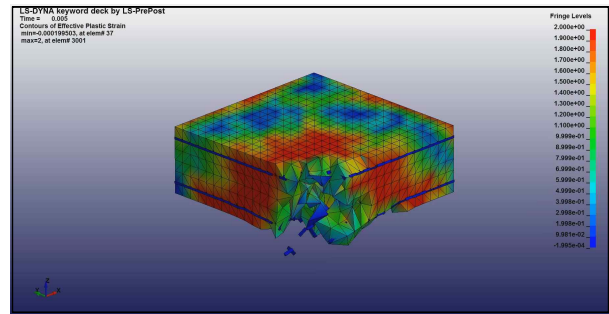
표 2.49는 관통해석 결과표이며, 텐서기반 재료모델에 분쇄효과를 통합한 관통해석 결과, 상용 하이드로코드인 LS-DYNA가 세가지 두께의 콘크리트 슬래브의 관통 후 잔류속도를 실험 결과와 매우 근접하게 예측하며, 콘크리트 슬래브의 저항성능을 합리적으로 모사하는 것으로 나타났다. 또한 발사체 관통시 초고속 변형에 의해 발생하는 물리적 현상인 콘크리트 분쇄(Comminution)를 기존 재료모델에 반영하여 변형률 속도 효과와 파괴변형을 효과적으로 모사할 수 있는 것으로 나타났다.

표 2.49 콘크리트 슬래브 관통해석 결과

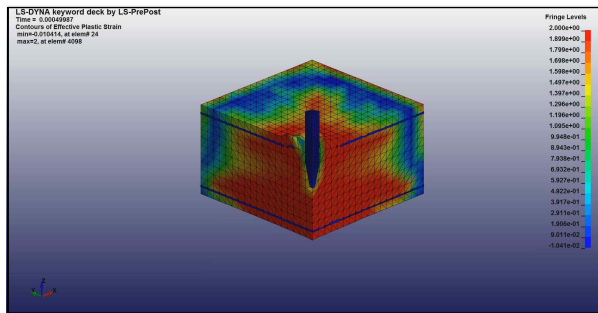
Slab Thickness (mm)	Velocity in Perforations (m/s)					
	충돌 속도 (m/s)	출구 속도				
		LS-Dyna_재료모델 + 분쇄효과				
		실험결과	무근콘크리트	RC 1	RC 2	RC 3
120	310	225	203	86 (1.94)	4.5 (3.88)	X (5.88)
210		115	106	17 (1.14)	2.1 (2.28)	X (3.42)
260		45		X (0.97)	X (1.94)	X (2.91)



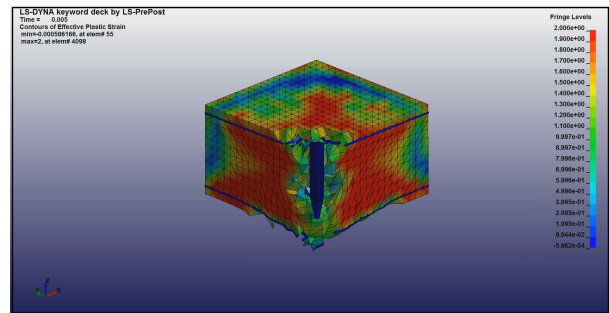
두께 120mm 관입중 파괴형상



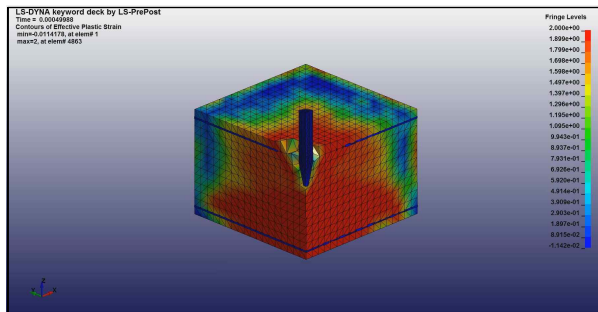
두께 120mm 관통후 파괴형상



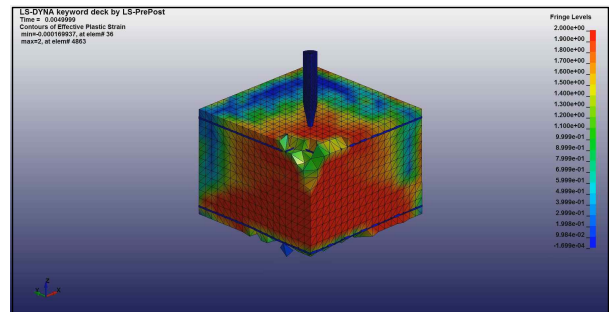
두께 210mm 관입중 파괴형상



두께 210mm 관통후 파괴형상

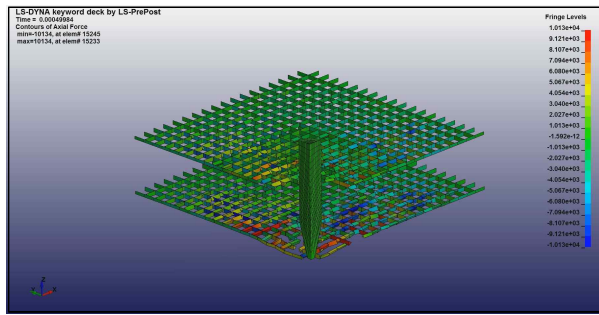


두께 260mm 관입중 파괴형상

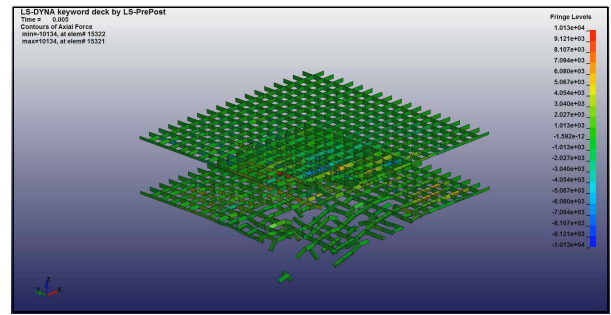


두께 260mm 관통후 파괴형상

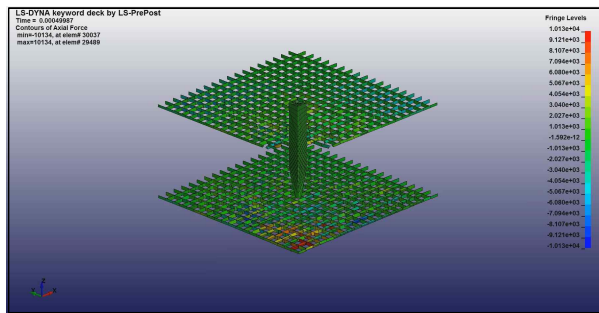
그림 2.75 두께별 철근콘크리트 관통해석 결과(전체 파괴형상)



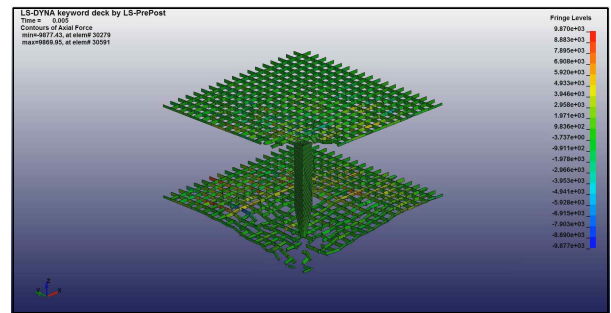
두께 120mm 관입중 파괴형상



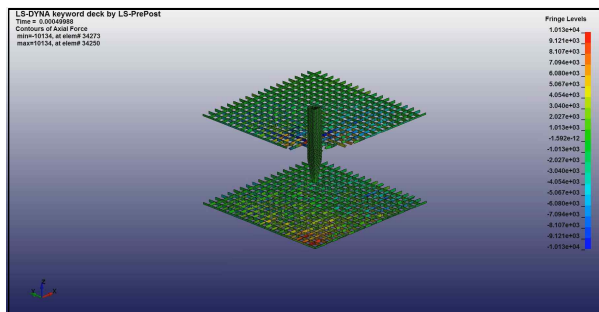
두께 120mm 관통후 파괴형상



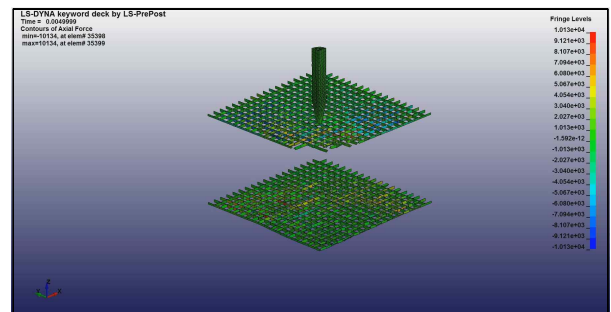
두께 210mm 관입중 파괴형상



두께 210mm 관통후 파괴형상



두께 260mm 관입중 파괴형상



두께 260mm 관통후 파괴형상

그림 2.76 두께별 철근콘크리트 관통해석 결과(철근 파괴형상)

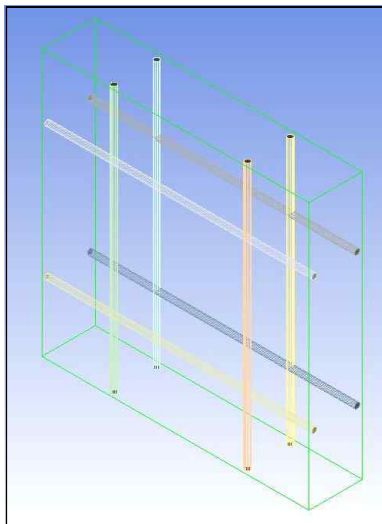
㉔ 카고메 트러스 보강 부재의 고속 충격 정밀 해석기법 검증 및 보완

카고메 트러스 보강 콘크리트 부재의 하이드로코드 정밀 해석을 위하여 충돌 해석시 주로 사용되는 상용 하이드로코드인 ANSYS LS-DYNA를 이용하여 카고메 트러스 보강 콘크리트 부재 및 철근콘크리트의 고속 충격 정밀 해석기법의 신뢰성을 검증하고자 표 2.37과 표 2.38에 보이는 일반콘크리트에 철근 및 카고메 트러스 보강 실험과 유사한 콘크리트 슬래브에 대하여 충돌해석을 수행하였다.

표 2.50 고속 비상체 충돌해석 조건

비상체 질량	66.8 g
비상체 속도	150, 306.6 m/s
비상체 직경	25 mm
실험체 크기	500 mm × 500 mm
실험체 두께	100 mm
해석 조건	철근 및 카고메 트러스 보강 콘크리트 (NC-2, NC-4, NC-K)
충돌 에너지	3,139 J

상용 hydrocode ANSYS LS-DYNA를 사용하여 충돌체와 콘크리트 슬래브를 솔리드요소로 모델링하였으며, 콘크리트 재료모델은 앞절에서 개발된 분쇄효과를 고려한 콘크리트 재료모델을 사용자 정의모듈로 LS-DYNA에 도입하여 해석에 적용하였다. 그림 2.77은 철근 및 카고메 트러스 모델링을 나타내고, 그림 2.78은 충돌해석 대상 철근 및 카고메 트러스 보강 콘크리트 부재의 메쉬모델링을 나타낸다.



NC-2 철근 모델링

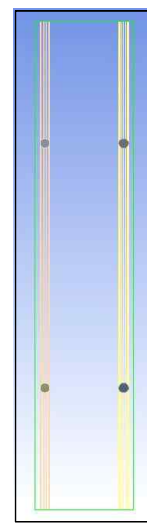
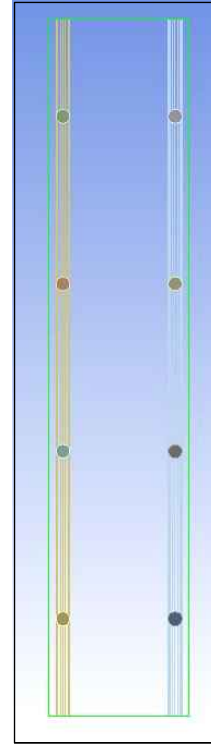
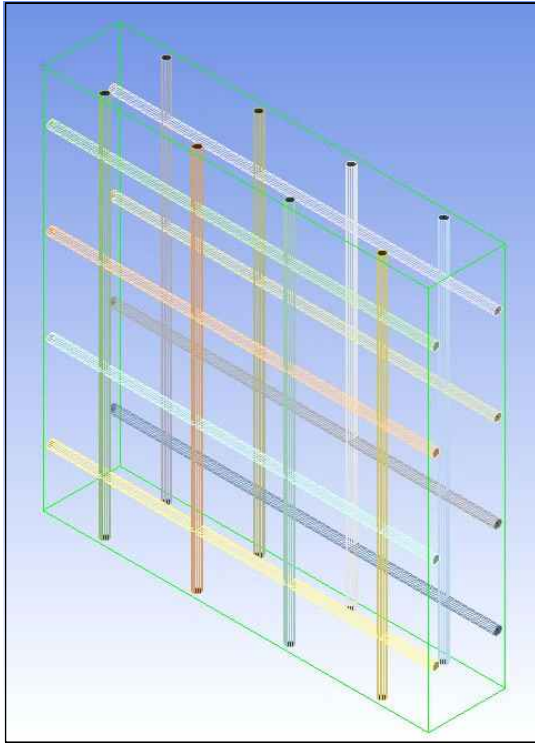
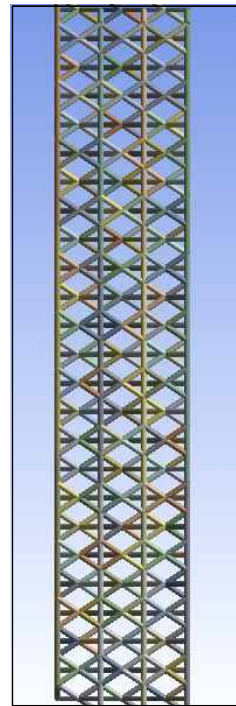
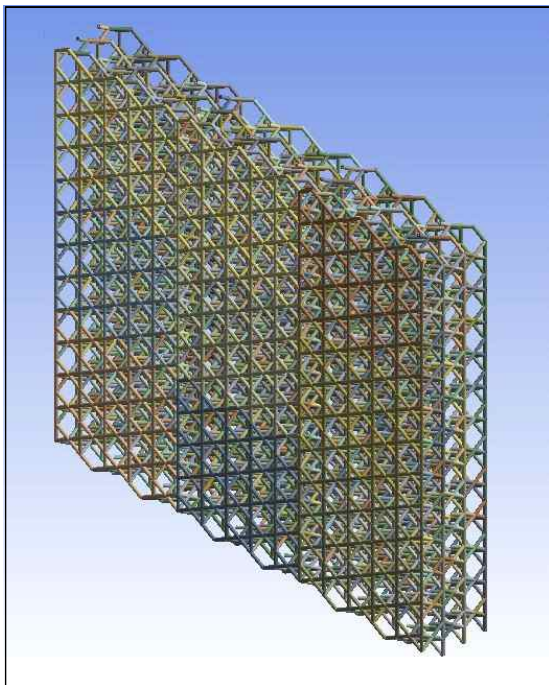


그림 2.77 철근 및 카고메 트러스 모델링(계속)



NC-4 철근 모델링



NC-K 카고메 모델링

그림 2.78 철근 및 카고메 트러스 모델링

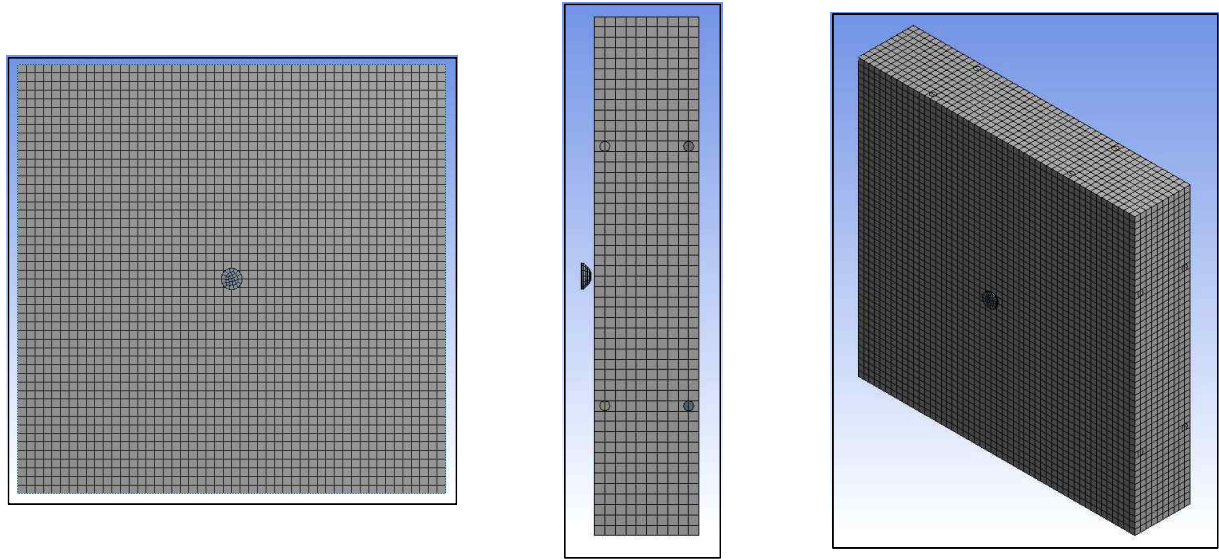


그림 2.79 충돌해석 대상 철근 및 카고메 트러스 보강 콘크리트 메쉬모델링

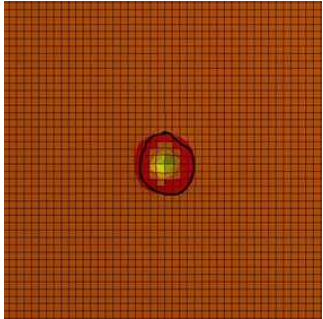
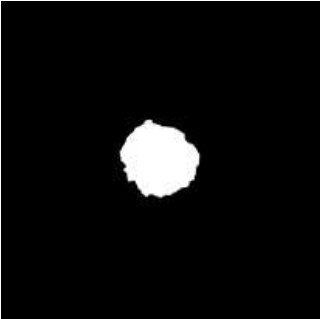
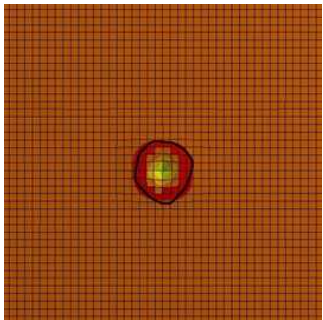
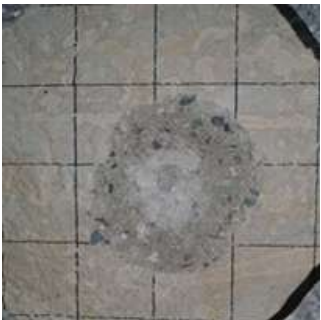
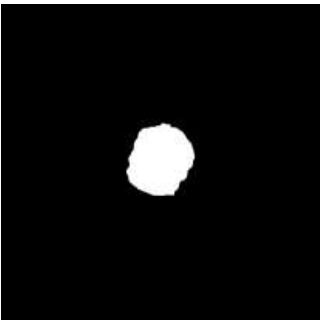
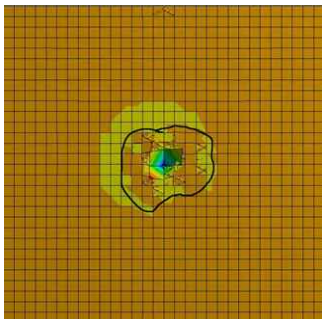
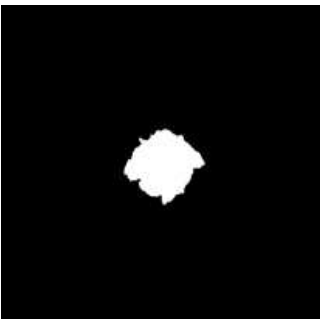
그림 2.79에서 그림 2.80은 두 가지 충돌속도에 따른 충돌 후 변위 분포를 나타내고 있다. 두 가지 충돌속도 150, 306.6 m/s에 대하여 모두 충돌 후 관통하지 못하는 것으로 나타났으며, 이는 철근 및 카고메의 보강효과에 의해 내충격 저항성이 현저히 향상되는 것으로 판단된다.

표 2.51과 표 2.52는 철근 및 카고메 보강 콘크리트 부재의 충돌 정밀해석 결과와 실험결과를 나타내고 있다. 표 2.51을 보면 세가지 보강 케이스에 대하여 관입 깊이와 손상 면적을 정밀 수치해석이 실험결과를 효과적으로 모사하고 있는 것으로 나타났다. 비상체의 관입깊이는 콘크리트 부재의 깊이 방향으로 부재 표면에서 최대 변형이 발생하는 요소까지의 거리로 산정하였으며, 손상 면적은 부재 전면의 중심부에서 콘크리트 요소가 박리(erosion)가 발생하는 변형률이 발생하는 요소들의 contour를 표 2.52와 같이 표시하여 산정하였다. 세 가지 철근 및 카고메 보강 케이스에 대하여 충돌 해석결과가 실험결과를 관입 깊이와 손상 면적에서 10% 오차 이내로 예측하고 있는 것으로 나타나, 개발된 정밀 해석기법의 신뢰성이 검증된 것으로 판단된다.

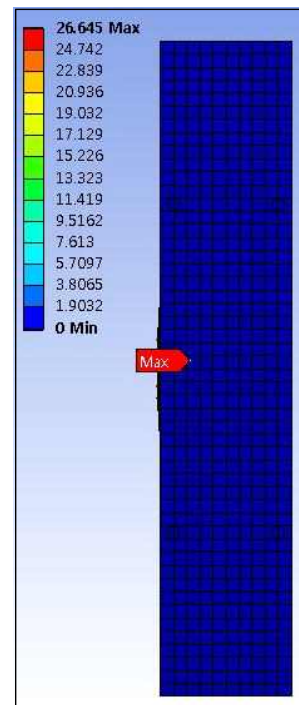
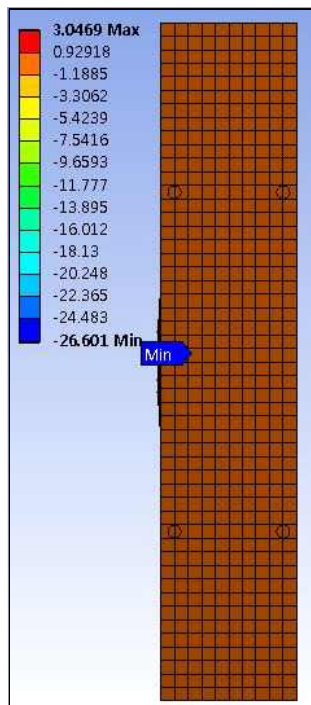
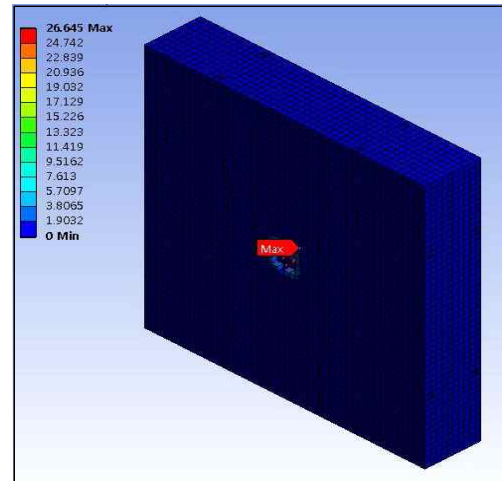
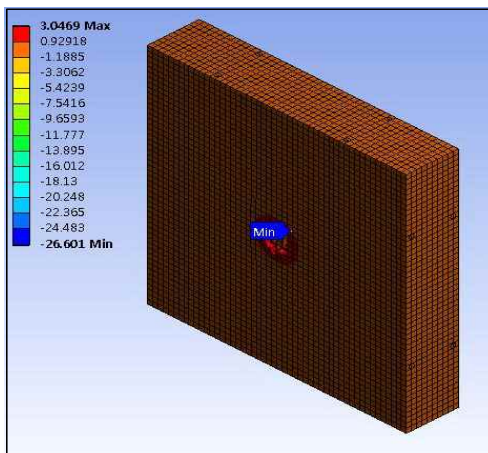
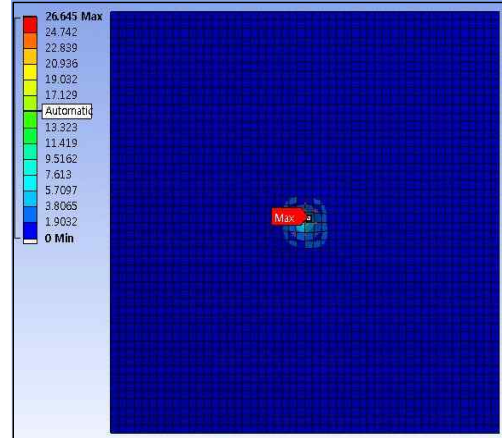
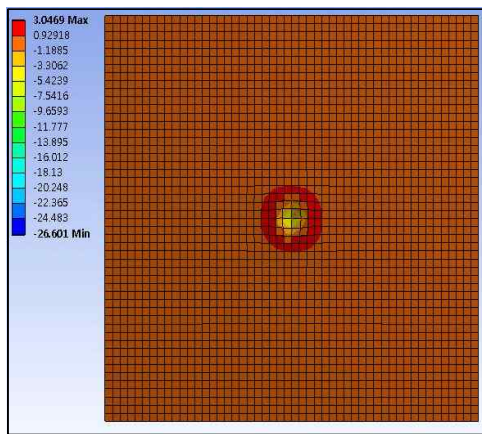
표 2.51 실험 및 해석 결과 비교

해석 케이스	관입 깊이(mm)			손상 면적(%)		
	실험	해석	오차율(%)	실험	해석	오차율(%)
2x2철근, NC-2	25.00	26.64	6.56	4.25	4.6	8.24
4x4철근, NC-4	25.00	26.61	6.44	3.60	3.9	8.33
카고메, NC-K	23.00	21.84	5.04	3.59	4.2	16.99
평균 오차율 (%)	6.01			11.19		
	8.60					

표 2.52 해석 및 실험 결과 비교

해석결과(전면 파괴형상) ²⁾	실험결과(전면확대사진)	실험결과(전면파괴형태)
		
steel 2x2, NC-2		
		
steel 4x4, NC-4		
		
kagome, NC-K		

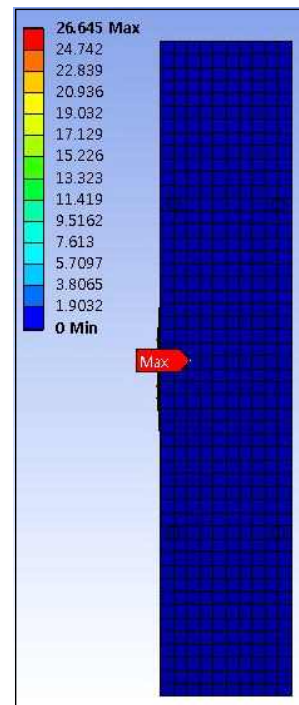
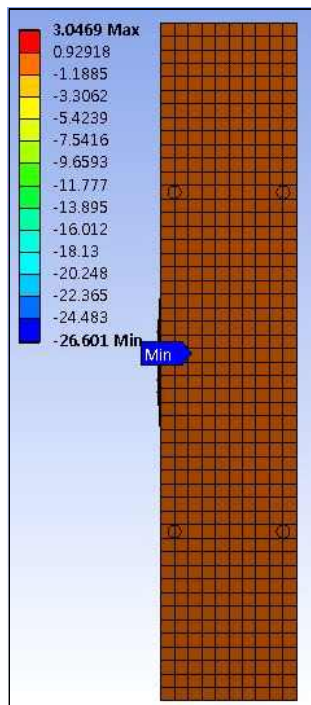
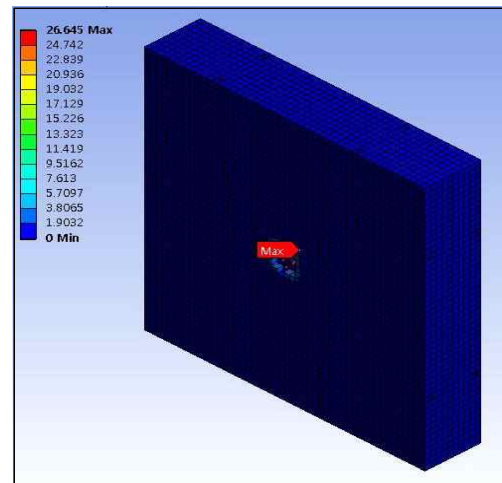
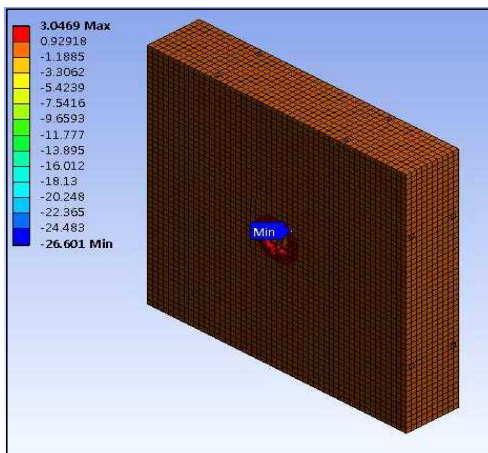
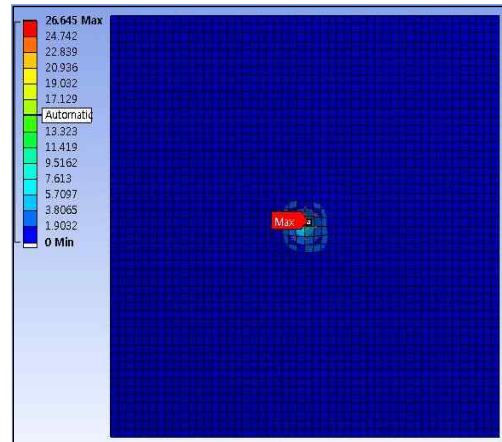
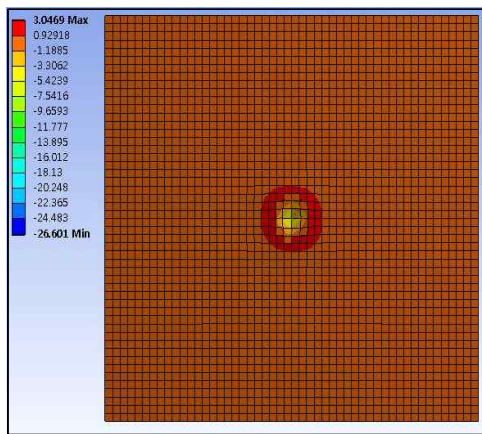
2) 해석결과에서 검정색 선은 콘크리트 요소가 박리(erosion)가 발생하는 변형률을 의미하는 것으로 손상면적을 의미함.



비상체 속도 : 150 m/s

비상체 속도 : 306.6 m/s

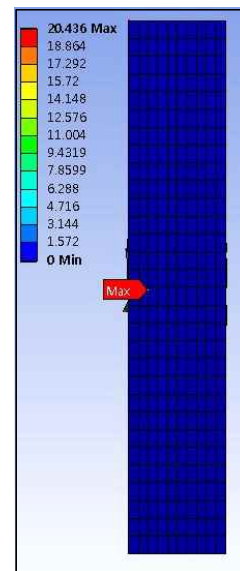
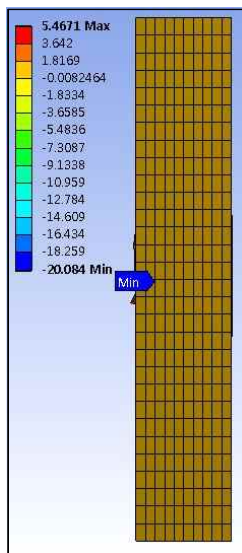
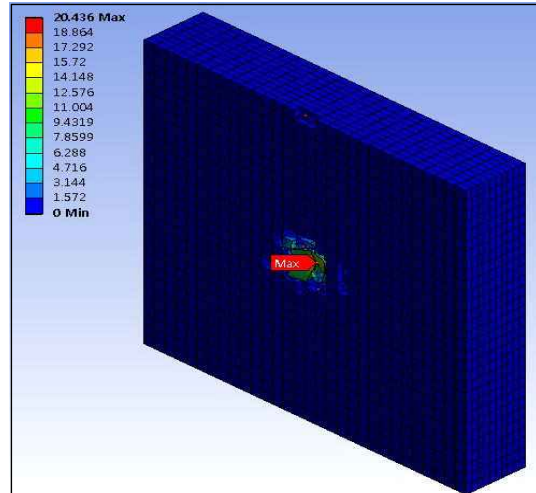
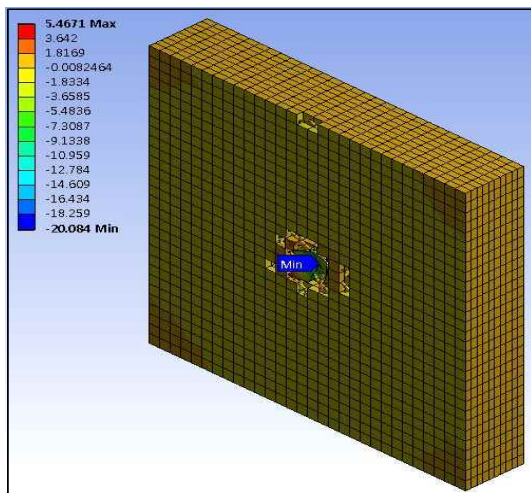
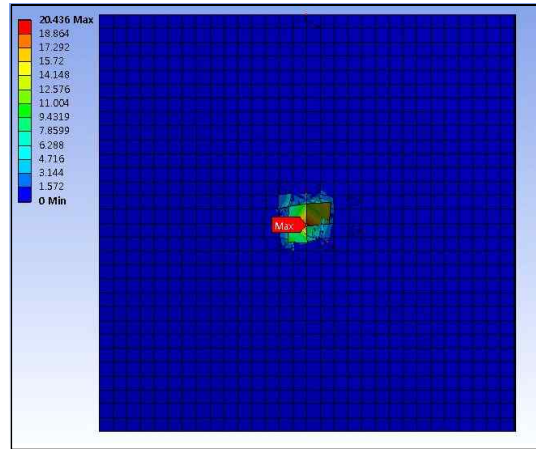
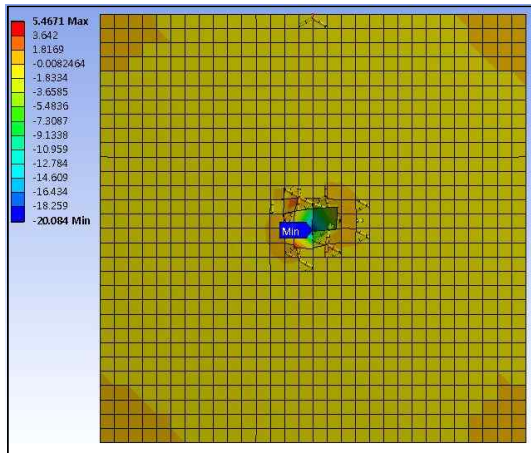
그림 2.79 충돌해석 후 철근 보강 콘크리트의 파괴 형상 (NC-2, 변위 분포)



비상체 속도 : 150 m/s

비상체 속도 : 306.6 m/s

그림 2.80 충돌해석 후 철근 보강 콘크리트의 파괴 형상 (NC-2, 변위 분포)



비상체 속도 : 150 m/s

비상체 속도 : 306.6 m/s

그림 2.81충돌해석 후 카고메 트리스 보강 콘크리트의 파괴 형상 (NC-K, 변위 분포)

나. 연구 개발성과

본 연구 개발의 양적 성과 목표는 다음과 같이 설정였으며, 각 항목에 따라 표로 정리하였다.

(1) 국내외 논문 게재 (목표 SCI 3편, 국내 논문 5편 : 목표달성)

표 2.53 국내외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록번호*
1	Damping estimation using enhanced virtual dynamic shaker: A web-enabled framework	Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering	황재승	35	USA	Wiley & Sons	SCI	2020.01	
2	Strain-Hardening and High-Ductile Behavior of Alkali-Activated Slag-Based Composites with Added Zirconia Silica Fume	Materials	이방연	12	Switzerland	MDPI	SCI	2019.10	
3	Effects of Aging on the Tensile Properties of Polyethylene Fiber-Reinforced Alkali-Activated Slag-Based Composite	Advances in Materials Science and Engineering	이방연	2019	United Kingdom	Hindawi	SCI	2019.09	

4	알칼리활성 슬래그 기반 초고연성 복합재료의 휨거동해석	한국건설순 환자원학회 논문집	이방연	7(2)	한국	한국건설 순환자원 학회	비SCI	2019.06	
5	LMI 기법에 의한 H2/H ∞ 혼합 구조물 진동제어	한국풍공학 회논문집	황재승	23(3)	한국	한국풍공 학회	비SCI	2019.09	
6	합성섬유 종류가 무시멘트 복합재료의 재료 거동에 미치는 영향	한국건설순 환자원학회 논문집	이방연	7(3)	한국	한국건설 순환자원 학회	비SCI	2019.09	
7	높은 연성을 갖는 고강도 시멘트계 복합체의 재료강도 및 변형성능	한국구조물 진단유지관 리공학회논 문집	최정일	24(1)	한국	한국구조 물진단유 지관리공 학회	비SCI	2020.02	
8	폴리프로필렌 섬유 혼입량에 따른 초고성능 콘크리트의 내화 특성	한국건설순 환자원학회 논문집	이방연	8(2)	한국	한국건설 순환자원 학회	비SCI	2020.06	
9	페타이어 고무분말과 골재를 혼입한 폴리우레탄 복합재료의 감쇠 특성	한국건설순 환자원학회 논문집	이방연	8(3)	한국	한국건설 순환자원 학회	비SCI	2020.09	
10	섬유 종류 및 혼입량에 따른 고강도 섬유보강 복합재료의 충돌 저항 성능	한국건설순 환자원학회 논문집	이방연	8(3)	한국	한국건설 순환자원 학회	비SCI	2020.09	

11	LMI 기법을 이용한 수동형 댐퍼 최적 설계	대한건축학 회연합논문 집	황재승	22(1)	한국	대한건축 학회	비SCI	2020.02	
12	원형 실린더 구조물의 풍방향 공력감쇠비 산정	한국풍공학 회논문집	황재승	24(2)	한국	한국풍공 학회	비SCI	2020.06	
13	LMI 기법에 의한 제진 시스템 최적 설계	한국풍공학 회논문집	황재승	23(4)	한국	한국풍공 학회	비SCI	2019.12	
14	와류하중 구성성분에 따른 풍직각방향 진동 기여 특성 분석	대한건축학 회논문집	황재승	36(7)	한국	대한건축 학회	비SCI	2020.07	

(2) 국내 및 국제학술 발표 (양적 목표에는 없었으나 연구성과를 국내외적으로 알림)

표 2.54 국내 및 국제학술 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	SBE19SEOUL Sustainable Built Environment	이방연	2019년 12월	서울	대한민국
2	한국구조물진단유지관리공학회 2019년 가을 학술발표회	이방연	2019년 10월	부산	대한민국
3	2019 한국건설순환자원학회 가을 학술발표	이방연	2019년 11월	제주	대한민국
4	한국콘크리트학회 2020 봄 온라인 학술대회	이방연	2020년 06월	온라인	대한민국
5	한국구조물진단유지관리공학회 2020년 여름 학술발표회	이방연	2020년 07월	제주도	대한민국
6	2020 한국건설순환자원학회 여름 e-컨퍼런스	이방연	2020년 08월	온라인	대한민국
7	한국콘크리트학회 2020 가을 학술대회	이방연	2020년 11월	대구	대한민국

(3) 지식재산권(목표 특허출원 2개, 등록 1개, 등록은 시간이 다소 소요될것으로 예상됨)

표 2.55 지식재산권

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기여 율
			출원인	출원일	출원번호	등록 번호*	등록인	등록일	등록번 호	등록 번호*	
1	카고메 트러스부재를 포함하는 방호방폭 고강도 복합체 및 제조방법	대한 민국	전남대 학교산 학협력 단	2020.1 2.17	10-2020 -0177739	DAS접 근코드88 AA					100
2	내충격성 방호방폭 콘크리트 복합체, 그 제조방법 및 응용제품	대한 민국	전남대 학교산 학협력 단	2020.1 2.17	10-2020 -0177770	DAS접 근코드B EE4					100

(4) 저작권(목표 소프트웨어 2건, 목표달성)

표 2.56 저작권

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호*	저작권자명	기여율
1	내충격 고성능 복합재료 상보에너지 계산 프로그램	2019.10.07	전남대학교 산학협력단	2019.10.21	C-2019-02 9672	전남대학교 산학협력단	100
2	내충격 적층 복합구조 적층두께 계산 프로그램	2019.10.07	전남대학교 산학협력단	2019.10.21	C-2019-02 9673	전남대학교 산학협력단	100

(5) 시제품

표 2.57 시제품

번호	시제품명	크기	구성
1	카고메트러스 보강 UHPC 내충격 구조재료	200 mm x 200 mm x 40 mm	카고메트러스 + UHPM + 강섬유
2	카고메트러스 보강 콘크리트 내충격 구조재료	500 mm x 500 mm x 100 mm	카고메트러스 + 콘크리트

(가) 시제품 1: 카고메트러스 보강 UHPC 내충격 구조재료

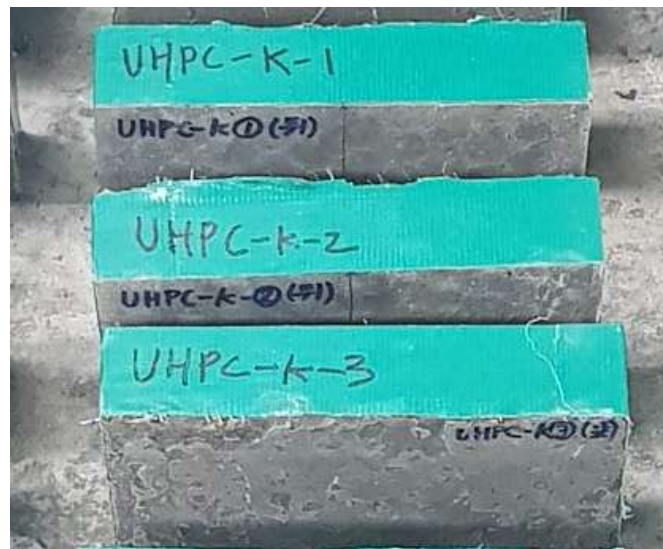


그림 2.82 시제품 1 형상

(나) 시제품 2: 카고메트러스 보강 콘크리트 내충격 구조재료



그림 2.83 시제품 2 형상

다. 연구결과

(1) 기술적 성과

첫 번째 기술적 성과는 내충격 저항성능을 향상시키기 위한 최적 배합을 도출이라 할 수 있음. 카고메 트러스를 보강재료로 사용한 고강도 콘크리트 복합재료의 최적 배합을 도출하였고, 카고메 트러스를 보강재료로 사용한 일반 콘크리트 복합재료의 최적 배합을 도출하였음.

두 번째는 강섬유 보강과 카고메 트러스 보강 방법에 대한 내충격성 향상기술이라고 할 수 있음. 카고메 트러스를 보강재료로 사용한 100 MPa 급의 UHPC와 일반적인 건설 공사에 사용되는 30 MPa 수준의 일반 콘크리트 배합을 구성하여, 일반적인 철근보강 콘크리트와 카고메 트러스로 보강한 콘크리트의 내충격 저항성능을 비교함으로써, 카고메 트러스로 보강한 콘크리트의 내충격성 향상 유도할 수 있었음.

세 번째는 고강도 복합재료와 고연성 복합재료의 구성방법을 달리하여 충격 하중의 특성과 그에 따라 요구되는 재료 특성을 만족할 수 있는 새로운 형태의 내충격 저항 구조를 개발한 것임. 새로운 내충격 저항 구조의 취약점이 될 것으로 판단되는 매트릭스 계면의 접착 문제를 카고메 연결재를 이용하여 일체화 거동이 될 수 있도록 하는 방안을 도출한 것은 중요한 연구 성과로 판단됨.

마지막으로 본 연구를 통해 새롭게 개발된 충격해석 기법에 의해 기존 철근보강 구조와 카고메 보강 케이스에 대하여 충돌 해석결과가 실험결과와 관입 깊이와 손상 면적에서 10% 오차 이내로 예측하고 있는 것으로 나타나, 개발된 정밀 해석기법의 기술적 성과가 매우 우수한 것으로 사료됨

(2) 경제적 성과

본 연구에서는 내충격 저항성능을 향상시키기 위한 실험실 성능평가를 실시하여, 카고메 트러스 구조가 기존 콘크리트 구조에 비하여 충돌 저항 성능이 우수하고, 기존 콘크리트의 단면 증설 없이도 우수한 내충격성 확보가 가능한 것을 확인하였기 때문에 간접적인 경제적 효과를 입증하였음.

30 MPa 수준을 갖는 일반 콘크리트 배합에 카고메 트러스를 보강재료로서 사용하고 일반적인 철근보강 콘크리트와 비교하여 우수한 충돌 저항 성능을 검증하였고, 100 MPa 급의 UHPC에 카고메 트러스를 보강하여 고속 충돌 하중 하에서 강섬유 보강 UHPC보다 매우 우수한 내충격성을 확보하는 것을 검증함으로써 내충격 건설재료 시장 진입 가능성을 높였음.

즉, 카고메 트러스와 강섬유 보강을 함께 실시하면 강섬유 보강 UHPC보다 관입 깊이 32.3 %, 배면 손상 면적 비율 59.7 %, 중량 손실률 71.2 %가 향상되는 것으로 나타났고, 카고메 트러스만 보강하더라도 관입 깊이, 배면 손상 면적 비율, 중량 손실률이 각각 22.8 %, 12.9 %, 12.9 %가 향상되는 것으로 나타났다.

52.7 % 향상되어 본 연구의 정성적 목표를 충분히 달성하는 것은 물론 관련 산업의 기여도를 높일 것으로 예상됨.

또한, 일반 콘크리트에 카고메 트러스를 보강하면 일반적인 철근보강 콘크리트보다 내충격 저항 성능이 우수한 것으로 나타나 30 MPa 수준의 일반 콘크리트 보강재료로서 카고메 트러스를 사용하면 일반적인 철근보강 콘크리트와 비교하여 충격 저항 성능의 향상 뿐만 아니라 동일한 충격 저항 성능을 확보함에 있어서 요구되는 철근량도 감소시킬 수 있다는 것으로 나타나 충분한 경제성을 가지는 것임을 검증하였음.

카고메 트러스가 갖는 등방성, 경량성 및 높은 전단강도 등의 재료적 특성이 내충격성 향상에 크게 영향을 준 것으로 나타나면서 기존 철근 배근을 대체할수 있는 새로운 배근의 가능성을 제시함으로써, 내충격 건설시장의 시장점유율 향상을 기할 것으로 판단됨.

특히, 전면은 강도 지향성 매트릭스, 배면은 연성 지향성 매트릭스로 실험체를 구성하면 강섬유 보강 UHPC보다 관입 깊이 42.7 %, 배면 손상 면적 비율 55.6 %, 중량 손실률 33.5 % 이상의 성능이 향상되는 것으로 나타남으로써, 다양한 내충격시스템을 제공할수 있어 시장 다변화에 적응할 수 있는 것으로 사료됨.

라. 연구 추진 체계

(1) 추진전략

연구목표를 효율적으로 달성하기 위해 2단계의 연구추진 방향을 설정하였음. 1단계(1차년도)에는 카고메 트러스 방폭 구조물의 기반 기술로서 카고메 트러스 적용 내충격(방호방폭)의 개념 도출과 축소모형 실험 등을 통해 프로토 타입을 설정함. 2단계(2차년도)에는 고도화 기술로써 카고메 트러스 내충격 구조물의 해석파라미터 선정 및 최적화 과정을 통해 내충격 구조물의 해석, 설계핵심기술 도출을 중점적으로 수행하며, 동시에 문제점 분석 및 보완하는 단계로 설정하였음.

국내외 내충격(방포방폭) 전문가의 자문을 통해 연구의 방향성을 주기적으로 점검하고, 각 연구내용에 대한 전문가 자문을 통하여 프로토 타입 내충격 구조물의 도출, 효율적인 해석 툴 개발 및 실험실평가단계(TRL4) 시편실험 진행을 유기적으로 수행하였음.

카고메 시편의 원활한 공급과 새로운 카고메 구조의 제조 등을 위하여 카고메 제조 업체와 산학협력을 진행하였음. 1차년도 축소실험, 2차년도 해석 파라미터 고도화를 위한 실험을 위하여 하이브리드구조실험센터(명지대)와 극한환경실험센터(서울대)과 협력을 통해 연구를 진행한 바 있음. 다만, 실험비 제원 확보가 어려워 실스케일 실험은 수행하지 못하였음. 그러나 고속비상체 충돌 실험을 보유하고 있는 충남대학교와의 협력을 통해 내충격 저항성능을 검증하였음. 또한, 향후 카고메 트러스 구조 실용화를 위한 연구의 성과달성을 위해 앞서 기술한 각 기

관과 협조하기로 하였음.

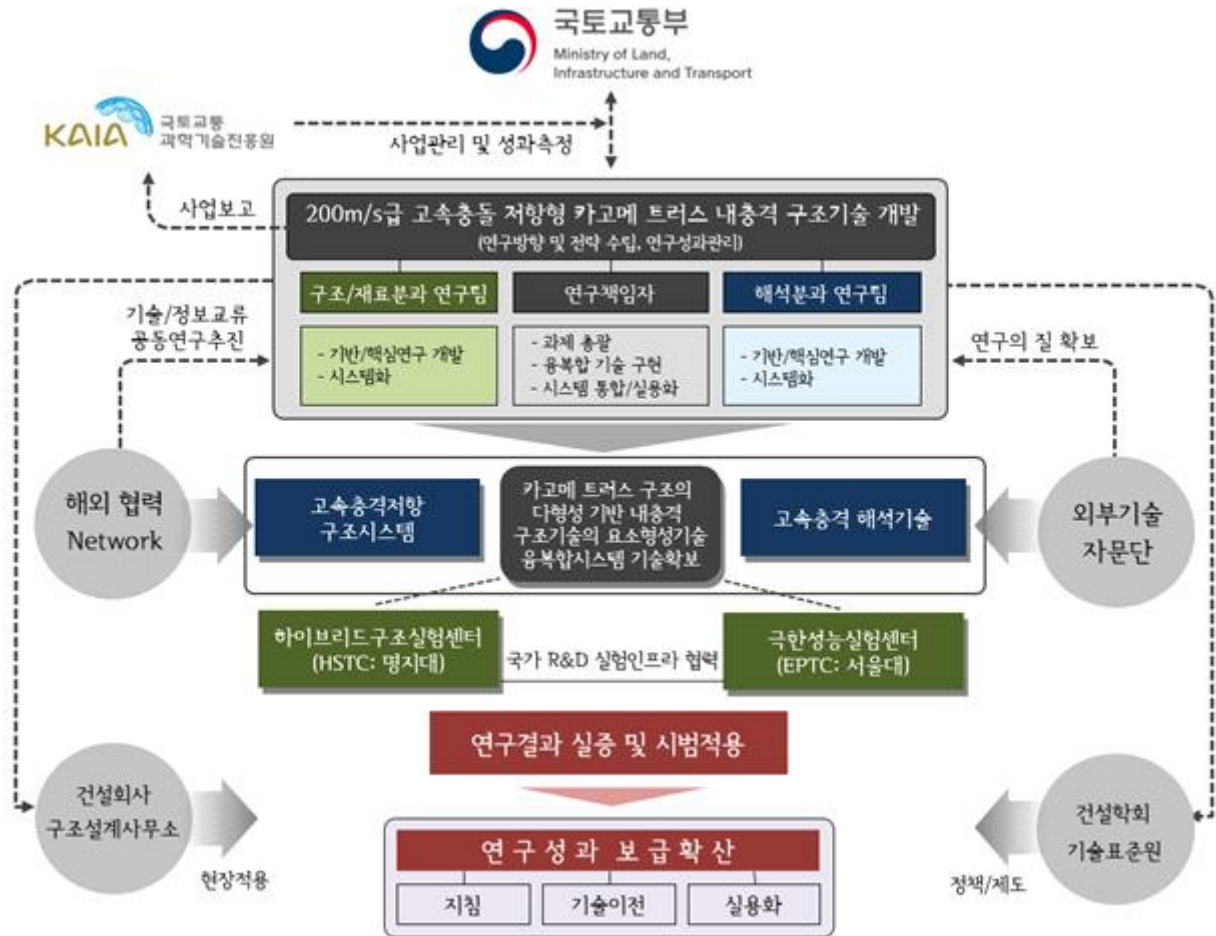


그림 2.84 연구 추진 전략 및 방법

(2) 연구추진 체계

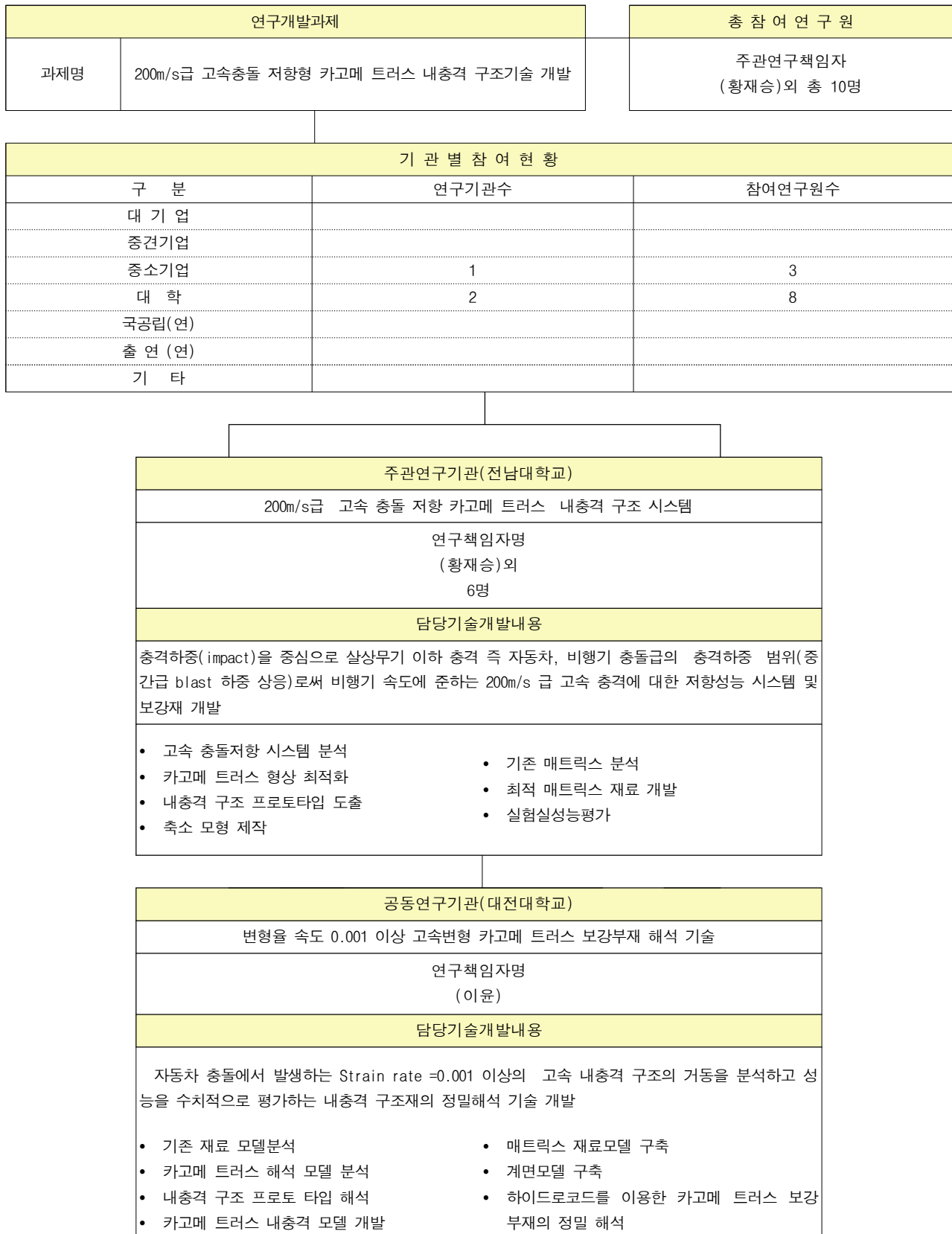


그림 2.85 연구 추진 체계

(3) 추진일정

표 2.58 추진일정

1차년도															
일련 번호	연구내용	추진 일정												연구 개발비 (단위: 천원)	책 임 자 (소속 기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	고속 충돌저항 시스템 분석													20,000	황재승 (전남대)
2	카고메 트러스 형상 최적화													40,000	황재승 (전남대)
3	내충격 구조 프로토타입 도출													60,000	황재승 (전남대)
4	축소 모형 제작													30,000	황재승 (전남대)
5	기존 재료 모델분석													10,000	이윤 (대전대)
6	카고메 트러스 해석 모델 분석													15,000	이윤 (대전대)
7	내충격 구조 프로토 타입 해석													15,000	이윤 (대전대)
8	카고메 트러스 내충격 모델 개발													20,000	이윤 (대전대)
9	보고서 작성													14,000	황재승 (전남대)
2차년도															
1	기존 매트릭스 분석													40,000	황재승 (전남대)
2	최적 매트릭스 재료 개발													80,000	황재승 (전남대)
3	실험실성능평가													70,000	황재승 (전남대)
4	매트릭스 재료모델 구축													30,000	이윤 (대전대)
5	하이드로코드를 이용한 카고메 트러스 보강 부재의 정밀 해석													20,000	이윤 (대전대)
6	하이드로코드를 이용한 카고메 트러스 보강 부재의 정밀 해석													20,000	이윤 (대전대)
7	보고서 작성													16,000	황재승 (전남대)

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 연구 개발의 최종 목표

표 3.1 연구 개발 최종 목표

구분	내용
최종 목표	인적, 자연 재난재해에 대한 사회안전망 구축의 장기적인 비전과 목적을 실현하기 위한 건설기술로써, 카고메 트러스 구조의 다형성에 기반한 200m/s급 고속충돌 저항형 (기존 RC 대비 관입깊이, 손상면적 20% 저감) 내충격 구조의 원천 건설기술 개발
세부 목표	- 내충격 구조의 저항능력을 피폭속도 Strain rate 범위에 따라 구분하는 점, 대변형-대 변형률에 따른 해석의 정밀도를 고려하여 다음과 같이 최종 성과물을 설정하였음. - 최종 성과물 1: 200m/s급 고속 충돌 저항 카고메 트러스 내충격 구조 시스템 - 최종 성과물 2: 변형률 속도 0.001 이상 고속변형 카고메 트러스 보강부재 해석 기술

나. 연차별 연구목표 및 주요 연구 내용 달성여부

(1) 1차 연도

(가) 개발 목표

① 주관연구기관(전남대학교)

고속 충돌저항 카고메 트러스 형상 및 매트릭스 재료 최적화 기술 개발

②공동연구기관(대전대학교)

카고메 트러스 및 콘크리트 고속 변형 해석을 위한 콘크리트 재료 모델(분쇄효과를 고려한 마이크로플레인 모델) 개발

(나) 개발 내용 및 범위

① 주관연구기관(전남대)

표 3.2 1차년도 주관연구기관(전남대) 개발 내용 및 범위

주요 연구활동	세부 연구내용	달성여부
■ 고속 충돌저항 시스템 분석	- 충돌속도, 접촉면적 등에 따른 충격하중 분석 - 충격흡수 메커니즘 분석	100% 달성
■ 카고메 트러스 형상 최적화	- 내부의 충전 물질에 따라 방호재의 강도, 에너지 흡수능력 등 충격저항성능 분석 - 내충격 시스템 형상최적화	100% 달성
■ 내충격 구조 프로토타입 도출	- 사용목적등 적용환경, 용도에 적합한 내충격 시스템 분석 - 충돌저항 구조 프로토타입 도출	100% 달성
■ 축소 모형 제작	축소모형실험에 의한 충돌 성능 탐색	100% 달성

② 공동연구기관(대전대)

표 3.3 1차년도 공동연구기관(대전대) 개발 내용 및 범위

주요 연구활동	세부 연구내용	달성여부
■ 기존 재료 모델분석	기존 정밀해석 기법 문제점 분석	100% 달성
■ 카고메 트러스 해석 모델 분석	고속변형을 받는 카고메 트러스 해석 모델링 기법 개발	100% 달성
■ 내충격 구조 프로토타입 해석	충격속도, 접촉면적 등에 따른 카고메 트러스 내충격 모델 해석	100% 달성
■ 카고메 트러스 내충격 모델 개발	고속변형을 받는 콘크리트의 분쇄효과를 고려한 마이크로 플레인 콘크리트 재료 모델 개발	100% 달성

(2) 2차 연도

(가) 개발 목표

① 주관연구기관(전남대학교)

변형 속도에 따른 충돌 저항성능 향상을 위한 부재 시스템 개발

② 공동연구기관(대전대학교)

상용 하이드로코드(LS-DYNA)를 이용한 카고메 트러스 보강 부재의 고속 충돌 정밀 해석기

법 개발

(나) 개발 내용 및 범위

① 주관연구기관(전남대)

표 3.4 2차년도 주관연구기관(전남대) 개발 내용 및 범위

주요 연구활동	세부 연구내용	달성여부
■ 기존 매트릭스 분석	- 기존 매트릭스 배합특성 분석 - 카고메 트러스와 매트릭스 혼합 제조기술	100% 달성
■ 최적 매트릭스 재료 개발	내충격 저항성능을 향상시키기 위한 재료의 최적 배합도출	100% 달성
■ 실험실성능평가	- 충돌저항 프로토타입 구조물 해석 - 축소모형실험에 대한 충돌성능 검증 - 사용목적 등 적용환경, 용도에 적합한 내충격 시스템의 형상 개선	100% 달성

② 공동연구기관(대전대)

표 3.5 2차년도 공동연구기관(대전대) 개발 내용 및 범위

주요 연구활동	세부 연구내용	달성여부
■ 매트릭스 재료모델 구축	텐서 기반 콘크리트 재료모델과 분쇄효과 통합기법 개발	100% 달성
■ 하이드로코드 (LS-DYNA)를 이용한 카고메 트러스 보강 부재의 정밀 해석	- 분쇄효과와 텐서 기반 콘크리트 재료모델을 통합한 하이드로코드 정밀 해석(개발 모델의 LS-DYNA 탑재 및 해석) - 개발 모델에 기반한 카고메 트러스 보강 콘크리트 부재의 하이드로코드(LS-DYNA) 정밀 해석 - 카고메 트러스 보강 부재의 고속 충격 정밀 해석기법 검증 및 보완	100% 달성

다. 목표 달성여부

(1) 질적 목표 달성

표 3.6 질적 목표 달성 여부

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준							
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	해당 기관
주관	A	카고메 트러스 고속 충돌 저항 구조 시스템	A-1	카고메 트러스 내충격 시스템	①	관입깊이	20% 향상	32.3% 향상	축소실험	관입 깊이추정법	30	전남대
					②	손상면적	20% 향상	59.7% 향상	축소실험	손상 면적추정법	30	전남대
공동	B	카고메 트러스 보강 부재 고속 변형 해석 기술	B-1	고속변형 해석 기법	①	오차율	10% 이내	8.60%	축소실험과 비교	형상분석	40	대전대
계											100	

(2) 양적 목표 달성

표 3.7 양적 목표 달성 여부

구분	양적 성과지표	목표치	달성치	비고
국내외 논문 게재	SCI논문	3	3	100% 달성
	국내 논문	8	11	138% 달성
국내외 학술 발표	국외 학술 발표	0	1	1편 초과 달성
	국내 학술 발표	0	6	6편 초과 달성
지식 재산권	특허출원	2	2	100% 달성
	특허등록	1	0	미달성
저작권	소프트웨어	2	2	100% 달성
시제품	시제품	2	2	100% 달성

라. 목표 미달성 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

(1) 목표 미달성 원인

양적 목표 중에서 특허등록 1편이 달성되지 않았으나 이것은 등록 시간이 다소 소요되기 때

문이며, 현재까지 출원된 2편의 특허가 향후 등록될 것으로 예상하고 있음.

(2) 후속 연구의 필요성

본 연구에서 미달성된 연구를 위한 후속 연구는 없음. 다만, 카고메 구조의 우수한 내충격성을 현실화하고 실용화하기 위한 추가연구가 필요할 것으로 사료되며 이에 대한 사유를 다음 장(연구개발 성과활용방안)에 기술함.

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 연구 개발 성과의 활용 방안

(1) 실용화 사업화를 위한 추가 연구의 필요성

본 연구는 카고메 트러스 구조의 내충격 저항성을 규명하기 위한 기초연구임. 실험에 의한 연구결과를 보면 카고메 구조의 등방적 배열에 의하여 충격에너지가 분산되면서, 충격에 의한 실험체의 관입깊이 및 입사면과 후면에서의 파손이 기존 철근 콘크리트 배근 기법에 비하여 저감되어 연구목표를 만족한 것으로 나타남.

또한, 충격원으로 사용된 비상체(고속탄환)의 충격량을 증가시키기 위하여 실시한 비상체 다발 충격에 대해서도 카고메 구조로 보강된 실험체가 더욱 견고하게 내충격성을 보유한 것으로 나타남. 다만, 본 연구에서 사용된 충격원은 실 스케일 실험체에 사용되는 충격원에 비하여 작기 때문에 실규모 실험체에 대한 내충격성을 테스트하는데는 한계가 있었음. 실 규모 실험체의 내충격성 실험을 위해 현재 유용한 충격원 가진비용은 비상체 1회 가진에 15,000~20,000천원의 비용이 요구되고 실험체 제작 등의 경비가 현재 연구비로써는 충당하기 매우 어려운 실정임.

향후 카고메 트러스 구조의 내충격성에 대한 실용화를 위하여 현재보다 긴 연구기간(현재 2년)과 연구비(현재 3억/2년)가 후속으로 이루어진다면, 내충격구조의 새로운 패러다임, 신기원을 창출할 것으로 기대하고 있음.

본 연구는 기초원천기술 개발이 목표이지만, 달성성과를 통해서 실용화, 사업화기술로 전개가 가능함. 실용화를 위하여 카고메 트러스 구조의 연결 및 접합, 카고메 트러스 구조의 단면 특성(와이어 두께, 피치, 단면 높이) 개선과 더불어 실제 유형의 충격하중(비사체의 현실적 크기질량 및 유입속도), 폭발 하중(국방부 TNT화약 표준폭파하중)에 대한 검증 연구가 추가적으로 이루어져야 하며, 이를 위한 과제 제안을 지속적으로 수행하고자함.

사업화 기술을 위해서 기술이전을 우선적으로 수행할 예정임. 본 연구 참여기업은 카고메 트러스구조를 제조하는 중소기업으로써 카고메 트러스 구조를 이용한 사업화에 관심이 매우 큰 상황. 이를 고려하여 카고메 트러스 구조물에 의한 방호방폭 특허 등록 후 기술이전하여 사업화에 적극적으로 대응하여 나가고자 함. 최종적으로는 카고메 트러스 구조에 대한 방호방폭 설계기준을 제시하여 현장실무에 적용함.

다음은 카고메 방호방폭 기술의 실용화 사업화를 위한 본 연구진이 고려하는 향후 로드맵을 나타낸 것임.

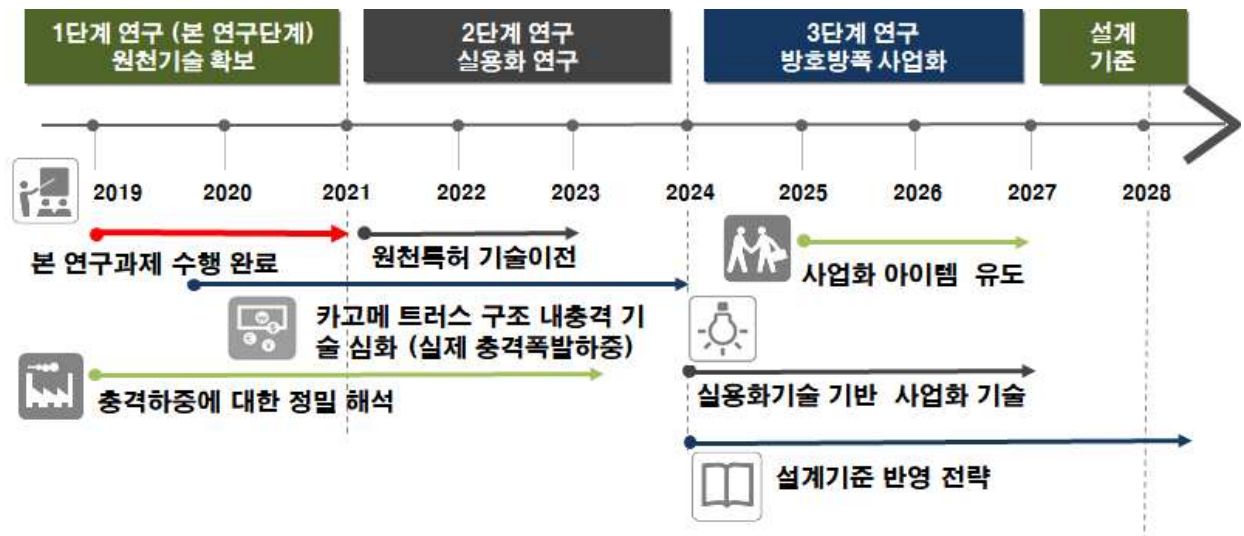


그림 4.1 카고메 트러스 구조 방호방폭 기술 개발 로드맵

(2) 활용방안

- 고도의 내충격 구조기술을 적용한 해석/설계/제조 등에 활용

본 연구에서 개발된 해석모델은 기존 충격해석모델에 비해 정확도가 높음. 이러한 해석기술을 이용하여 다양한 환경에서 내충격 기술을 검증, 확보할 수 있고 이를 카고메 트러스 구조물의 내충격 시험체에 대한 설계 및 제조에 활용 가능함.

- 재난재해에 취약한 다양한 중요 사회기반시설물의 내충격 기술에 활용

충격하중이 발생하는 환경으로부터 인명과 재산을 보호하기 위한 기법으로 활용가능함. 고속도로의 중앙분리대, 폭파위험요소가 상존하는 산업시설등에 적용하여 사회안전망을 더욱 공고히 하는데 활용

- 내충격 대상 구조물의 외부 충돌에 의한 구조 및 안정성 평가에 활용

구조물에는 다양한 외부충돌하중이 작용할 수 있음. 선박에 의한 교량 교각충격, 도로시설물의 자동차 충격등에 대해 구조물의 안전성을 향상시키기 위한 기법으로 활용

- 카고메 트러스와 콘크리트의 복합구조체 원천기술을 재료 및 기계 등 타 기술분야에 적용

카고메 트러스 구조는 방호방폭뿐만아니라 내진보강, 기초 보강, 항만 파랑하중 저항성 개선 등 다양한 활용분야가 있음. 본 연구에서 개발된 카고메 복합구조체를 위하여 더욱 안전하고 경제적인 구조물 설계 보강기술을 통해 기계, 항만 등 다양한 공학분야에 활용가능

(3) 기대효과 및 타분야 응용

(가) 사회경제적 기대효과

- 고도의 내충격 구조물 제조기술에 의한 재난재해 등으로부터 안전한 사회 구축
- 고부가가치 내충격 건설 엔지니어링 기술을 확보함으로써 국내외 건설시장에서의 경쟁력을 확보
- 기존의 수익구조가 낮은 철근배근 기술, 전단연결구조를 카고메 트러스 구조와 같은 새로운 공정으로 대체하여 국내 건설업체의 기술력을 향상시키고, 고부가가치 건설 엔지니어링 기술을 확보함으로써 국내외 건설시장에서의 경쟁력을 기대

(나) 학문발전

- 카고메 트러스 내충격 구조의 고속상태의 역학적 특성의 규명으로 과학기술 발전에 기여
- 카고메 트러스 구조의 내충격 메커니즘 규명을 통한 학문적 성과에 기여
- 외부 충격에 대한 카고메 트러스 내충격 구조물 설계법 제안
- 건축재료공학, 건축구조공학, 토목 구조공학을 기반으로 한 융합형 건설신재료 개발

(다) 연구인력 양성

- 건설재료, 구조, 내충격 기술에 대한 융합적인 지식 및 활용능력을 겸비한 연구인력 양성
- 카고메 구조와 고성능 콘크리트 등 고성능 건설재료 및 부재의 설계 및 엔지니어링 전문가 양성
- 내충격 구조물의 해석/설계/제조를 통한 구조물 안전성을 평가할 수 있는 엔지니어의 양성

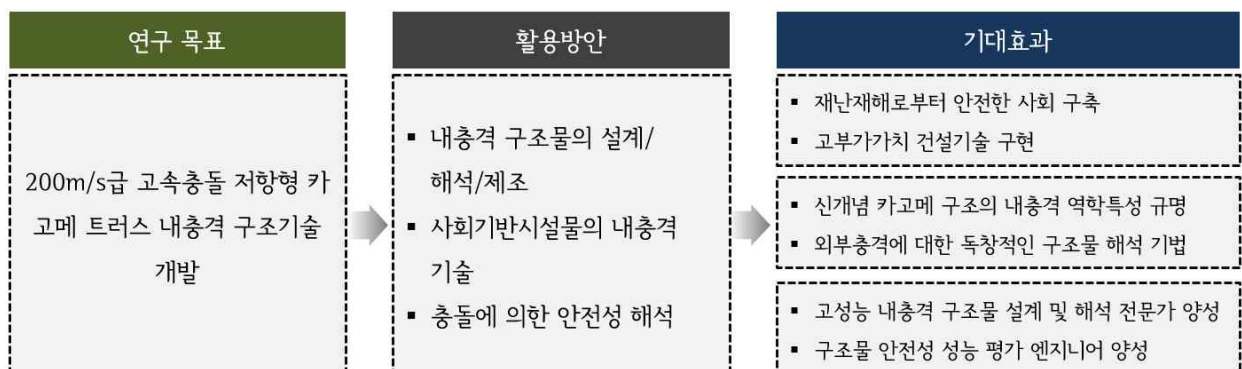


그림 4.2 활용방안 및 기대효과

붙임. 참고문헌

- Beppu, M., Miwa, K., Itoh, M., Katayama, M., & Ohno, T. (2008). Damage evaluation of concrete plates by high-velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, 35(12), 1419-1426.
- Hazell, P. J. (2015). *Armour: materials, theory, and design*. CRC press.
- I.A. Rahman, A.M.A. Zaidi, Q. Bux, I. Latif, Review on empirical studies of local impact effects of hard missile on concrete structures, *Int. J. Sustain. Constr. Eng. Technol.* 1(1) (2010) 73-98.
- Jo, E. S., Kim, M. S., Park, J. Y., & Lee, Y. H. (2014). Behavior of Prestressed Concrete Panels under Blast Load. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 27(2), pp. 113-120.
- JSCE. (2008). *Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)*. Concrete Engineering Series.
- Kanda, T., & Li, V. C. (2006). Practical design criteria for saturated pseudo strain hardening behavior in ECC. *Journal of advanced concrete technology*, 4(1), 59-72.
- Kang, S. T., Choi, J. I., Koh, K. T., Lee, K. S., & Lee, B. Y. (2016). Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete. *Composite Structures*, 145, 37-42.
- KDS 14 20 72, 콘크리트 벽체 설계기준
- Kim, H. J., Nam, J. W., Kim, S. B., Kim, J. H., & Byun, K. J. (2007). Analytical Evaluations of the Retrofit Performances of Concrete Wall Structures Subjected to Blast Load. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 19(2), pp. 241-250.
- KS F 2405, 콘크리트의 압축 강도 시험 방법
- KS L 5105, 수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험 방법
- Lee, S. J., Park, J. Y., Lee, Y. H., & Kim, H. S. (2017). Experimental Analysis on the Criteria of the Explosion Damage for One-way RC Slabs. *Journal of the Korean Society of Safety*, 32(6), pp. 68-74.
- Li, M., & Li, V. C. (2013). Rheology, fiber dispersion, and robust properties of engineered cementitious composites. *Materials and structures*, 46(3), 405-420.

- Li, Q., & Tong, D. (2003). Perforation thickness and ballistic limit of concrete target subjected to rigid projectile impact. *Journal of Engineering Mechanics*, 129(9), pp. 1083–1091.
- Li, Q., Reid, S., & Ahmad-Zaidi, A. (2006). Critical impact energies for scabbing and perforation of concrete target. *Nuclear Engineering and Design*, 236(11), pp. 1140–1148.
- Li, Q., Reid, S., Wen, H., & Telford, A. (2005). Local impact effects of hard missiles on concrete targets. *International Journal of Impact Engineering*, 32(1–4), pp. 224–284.
- Maalej, M., Quek, S. T., & Zhang, J. (2005). Behavior of hybrid-fiber engineered cementitious composites subjected to dynamic tensile loading and projectile impact. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(2), pp. 143–152.
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 9(1), pp. 62–66.
- R. Kennedy, A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, *Nucl. Eng. Des.* 37(2) (1976) 183–203.
- Yi, N. H., Kim, S. B., Kim, J. H., & Cho, Y. G. (2009). Behavior Analysis of Concrete Structure under Blast Loading : (II) Blast Loading Response of Ultra High Strength Concrete and Reactive Powder Concrete Slabs. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 29(5A), pp. 565–575.
- Yoo, D. Y., & Banthia, N. (2017). Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast. *Construction and building materials*, 149, pp. 416–431.