

사회기반시설 내충격 성능평가를 위한 실험기법 개발 최종보고서

2019. 03. 27.

주관연구기관 / 서울대학교 산학협력단

2019

국토교통과학기술진흥원

국토교통부

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

‘사회기반시설 내충격 성능평가를 위한 실험기법 개발’(연구개발 기간 : 2017. 04. 01 ~ 2018. 12. 31) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2019. 03. 27.

주관연구기관명 :

서울대학교 산학협력단 (대표자) 윤 의 춘



주관연구기관책임자: 조 재 열

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C129 906-02	해당 단계 연구 기간	2017.04.01. ~ 2018.12.31	단계구분	2차년도/2차년도
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	사회기반시설 내충격 성능평가를 위한 실험기법 개발			
	세부과제명				
연구책임자	조 재 열	해당단계 참여연구원 수	총: 9 명 내부: 9 명 외부: 0 명	해당단계 연구비	정부:212,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:212,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 10 명 내부: 10 명 외부: 10 명	총 연구비	정부:370,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:370,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	서울대학교 산학협력단			참여기업명 : -	
국제공동연구	상대국명: -			상대국 연구기관명: -	
위탁연구	연구기관명: -			연구책임자: -	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	보안등급: 일반, 사유: 본 연구는 제품개발에 관한 연구가 아니며 기본적으로 학술적 연구성과를 목표로 하고 있기 때문에 「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의4 제1항의 내용 중 어느 것과도 연관사항이 없으므로 보안과제로 분류되지 않음에 따라 제2항에 의해 일반과제로 분류함
-------------------------	---

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
성과 달성 건수	2										

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

본 연구는 사회기반시설 내충격 성능평가 실험기법을 개발하여 극한하중에 대한 사회기반시설의 안전성 검증 시스템 구축의 토대 마련을 목표로 함. 연구목표의 달성을 위해 관련 기존연구를 분석하여 사회기반시설 내충격 성능평가를 위한 실험기법을 제안하고 서울대학교 극한성능실험센터에 구축된 내충격 실험장비를 활용하여 대형 부재의 충돌실험 및 해석 시뮬레이션 수행을 통해 충격거동의 예측기법의 타당성을 검증하여 사회기반시설 내충격 성능평가를 위한 실험기법을 개발함.

보고서 면수: 135

〈 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	■ 2001년 9.11 테러, 최근 브라질 항공기 추락사고 등 인적 재난과 쓰나미, 지진, 산사태 등의 자연 재난으로 인한 피해가 증가하고 있다. 이러한 극한상황은 매우 큰 인명 및 재산 피해를 발생시킬 수 있으므로 극한하중에 대한 사회기반시설의 안전성 확보가 필요하다. 이를 위하여 구조물 내충격 성능평가의 수행이 가능한 연구인프라 및 실험기법의 개발이 필요하다. ■ 최근 국토교통부는 거액의 예산을 투입하여 구조물 내충격 성능평가를 위한 연구인프라 구축을 위해 세계적 수준의 내충격 실험장비를 보유한 극한성능실험센터를 구축하였다. 하지만 실험장비만 도입되었을 뿐 이를 활용한 내충격 성능평가 실험기법은 현재 개발되지 않아 실험장비의 활용이 제한적인 실정이다. ■ 따라서 본 연구에서는 사회기반시설 내충격 성능평가를 위한 실험기법을 개발하여 극한성능실험센터의 내충격 실험장비에 적용함으로써 해당 장비를 활용한 사회기반시설의 안전성 검증 시스템 구축의 토대를 마련하는 것을 목표로 한다.
연구개발성과	■ 본 연구의 핵심성과 첫 번째는 ‘구조물 내충격 성능평가 해석 시뮬레이션 툴의 구축’이다. 본 연구에서는 개발된 충돌실험기법의 타당성을 평가하기 위해서 구조물 내충격 성능평가 해석 시뮬레이션 툴을 구축하였다. 충돌실험에 대해 충돌해석 시뮬레이션 모델을 구축하고 해석을 수행하였으며, 이를 실험결과와 비교·분석하여 해석 모델을 개선하였다. 이를 기반으로 극한성능실험센터 장비를 이용한 실험을 해석하기 위한 충돌해석 시뮬레이션 매뉴얼을 개발하였다. ■ 핵심성과 두 번째는 ‘구조물 내충격 성능평가 실험 데이터베이스 구축’이다. 본 연구에서 개발한 충돌실험기법을 적용하여 재료 충돌실험 및 부재 충돌실험을 수행하였으며 실험 변수, 수행과정 및 절차, 실험결과 및 분석을 정리하였다. 이를 통해 다양한 충돌변수에 대한 구조물 내충격 성능평가 실험 데이터베이스를 구축하였다. ■ 핵심성과 세 번째는 본 연구의 최종목표인 ‘구조물 내충격 성능평가 실험기법의 수립’이다. 선행 구조물 내충격 성능평가 실험 및 해석연구와 현행 충돌설계법에 대한 한계점을 극복하기 위한 충돌실험기법을 정립하였다. 개발된 충돌실험기법에 대한 검증실험 및 타당성 평가 해석을 수행하였고 재료 및 부재 단위 내충격 성능평가 실험기법을 최종적으로 제안하였다. 또한 개발된 실험기법이 널리 활용될 수 있도록 충돌실험기법 매뉴얼을 개발하였다.
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	■ 연구에서 개발한 재료 및 부재 내충격 성능평가 실험기법은 추후 내충격 성능평가 실험연구를 수행할 연구자들에게 가이드라인이 되어 관련 연구에 활용될 수 있다. 이에 따라 충돌의 실험을 수행하는 추후 연구들의 실험 실패 확률을 최소화하여 연구효율을 증대시킬 수 있으며 뛰어난 연구성과를 내는 데에 이바지할 수 있다. ■ 본 연구에서 제안한 SHPB 실험 및 중속가스건 충돌실험의 Know-How를 극한성능실험센터의 유사 장비(급속재하실험시설, 고속가스건, 초고속가스건, 자유낙하실험시설, 팬들럼 충격실험시설)의 실험기법 개발 시 적용 및 응용할 수 있으며, 이를 통해 극한성능실험센터의 실험 수행 역량을 향상시킬 수 있다. ■ 개발된 충돌실험기법을 통해 극한하중에 대한 사회기반시설의 안전성 검증이 가능하며 안전하지 못한 구조물에 대한 보수·보강기법에 대한 연구에도 활용될 수 있다. 이를 통해 안전한 사회를 만들기 위한 시스템 구축의 기반이 된다.
핵심어 (5개 이내)	극한상황 내충격 성능평가 실험기법개발 내충격 설계 해석 시뮬레이션

< SUMMARY >

Purpose & Contents	■ Infrastructures have been experienced critical damage under natural disasters like earthquake, tsunami, etc. and man-made disasters like September 11 attack, Brazilian aircraft falling down, etc. These extreme events on the structure lead to tremendous human casualties. Therefore, it is necessary to develop the related research and test techniques which can conduct impact resistance performance evaluation in order to secure the safety of the infrastructure. ■ Although recently Ministry of Land, Infrastructure and Transport has made a huge amount of investment to found Extreme Performance Testing Center (EPTC), a world-class research facility for evaluation of impact resistance performance of social infrastructures, a shortage of experimental techniques brings a limited application to the equipment. ■ Therefore, the main purpose of this research is to establish an impact test techniques that can be applied to test facilities. Accordingly, it is intended to build a safety framework of social infrastructure by using the developed test techniques.				
Results	■ The 1st critical technology element (CTE) of the research is building a simulation tool for the evaluation of impact resistance performance of structures. In this study, The analytical simulation tool has been developed for the verification of feasibility of the developed impact test technique. In order to establish the simulation tool, the impact test for large-scale member was conducted and the analytical model was modified by comparing and analyzing results of the test results and simulation each other. Based on the results, the manual about analytical simulation to evaluate impact resistance performance of structure was developed. ■ The 2nd CTE is generating test database for impact resistance evaluate of structures. Impact tests in material-level and member-level were conducted by using the developed impact test techniques, and the test variables, procedure, results and analysis were reported. Based on the results, test database for various impact variables was established. ■ The 3rd CTE is the impact test technique to evaluate impact resistance performance of structure. The test technique has been developed to overcome the limitations of previous empirical and analytical studies about impact resistance of structures and the related design codes. Impact tests and analytical simulation to validate the test technique were performed, so the impact test technique was improved and suggested. The manual for impact test technique was developed for other researchers to use widely the test technique.				
Expected Contribution	■ The impact test technique developed in this study will not only rule a guideline, but also bring an outstanding research efficiency for the future impact researches by minimizing failure probability. ■ By know-how obtained from split Hopkinson pressure bar test and middle velocity propulsion impact test, it will be able to approve an ability of similar test apparatus in EPTC such as High Velocity Propulsion Impact Machine, Hypervelocity Propulsion Impact Machine, Drop Weight Impact Tester, High Rate Testing Machine, and Pendulum Impact Tester. ■ The developed impact resistance test method can find out any risk of social infrastructure under extreme situation. This also can be an instruction for research about maintenance and reinforcement on unsafe structure later, which makes society more safe.				
Keywords	Extreme situation	Impact resistance performance evaluation	Development of test technique	Impact resistance design	Analytical simulation

< 목 차 >

제1장. 연구개발과제의 개요	1
제2장. 국내외 기술 개발 현황	4
제3장. 연구수행 내용 및 성과	5
제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	123
제5장. 연구개발성과의 활용 계획	126
제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	127
제7장. 연구개발성과의 보안등급	127
제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황	127
제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	128
제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	129
제11장. 기타 사항	129
제12장. 참고 문헌	130

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

가. 연구개발의 최종목표

- 이 연구의 최종목표는 **사회기반시설 내충격 성능평가 실험기법을 개발**하여 극한하중에 대한 사회기반시설의 안전성 검증 시스템 구축의 토대를 마련하는 것이다.
- 연구기간 동안 최종목표를 원활히 달성하기 위하여 2가지의 세부목표를 설정하였다.
 - ① 극한하중 재하 시 구조물의 내충격 성능을 평가할 수 있는 실험기법을 제안한다.
 - ② 대형 부재에 대한 실험 및 해석 시뮬레이션 수행을 통해 제안된 실험기법의 타당성을 검증한다.

나. 연차별 연구개발 목표 및 내용

(1) 1차년도

- 연구목표는 구조물의 내충격 성능평가 실험기법의 1차 제안이며 다음과 같은 연구수행과정을 통해 목표를 달성한다.
- 기존연구 분석을 통해 기존 연구들의 한계점 및 문제점을 확인하고 이를 극복할 수 있는 구조물 내충격 성능평가 실험기법을 제안한다. 제안된 실험기법을 검증하기 위해 예비실험을 수행하고 실험결과를 해석 시뮬레이션 결과와 비교하여 실험기법의 안전성, 실현성, 적용성 등에 대한 검증을 수행하고 이를 반영해 실험기법을 보완한다.

(2) 2차년도

- 연구목표는 본 실험 수행을 통한 실험기법 검증 및 최종수립이며 다음과 같은 연구수행과정을 통해 목표를 달성한다.
- 1차년도 연구결과를 통해 제안된 실험기법을 검토 및 활용하여 본 실험계획을 수립하고 수행한다. 해석 시뮬레이션을 통해 실험기법의 타당성을 검증하고 이를 반영하여 실험기법을 보완하여 최종 수립한다. 이때, 최종 제안하는 실험기법은 필요 실험장비 및 악세서리 구성과 시험세팅, 계측방법 등 실험수행 제반사항에 대해 제안하도록 한다.

2. 연구개발의 필요성

- 2001년 9.11 테러, 최근 브라질 항공기 추락사고 등 항공기, 선박, 차량 충돌 및 폭발과 같은 인적 재해와 낙석, 쓰나미, 지진과 같은 자연 재해 등 일상적 범주를 벗어난 극한하중에 대한 사회기반시설의 노출 위험이 증가하고 있다. 이러한 극한하중은 위험발생 시 매우 큰 인명 및 재산 피해를 발생시키므로 극한하중에 저항할 수 있도록 사회기반시설의 안전성 확보가 필요하다.
- 선진국들은 이런 상황을 고려해 재난안전관련 산업 및 연구의 육성을 적극적으로 지원하여, 미국의 재난·안전관련 시장규모는 2004년 85억달러에서 2010년 130억달러로 계속해서 증가(국민안전처 신설에 따른 재난안전R&D 추진체계 개선방향, 2014, KISTEP)하고 있으며, 일본의 재난안전 분야 R&D예산도 2014년도에 전년대비 49.7% 증가하고 있다(재난 및 안전관리기술개발 시행계획(안), 2015, 국과심).
- 국내 경우도 이러한 국제적 추세를 따라 건설교통 R&D 중장기계획(2013~2017, 국토해양부)을 통해 재해 및 재난에 대비한 건설 시스템 구축을 투자전략으로 삼고 있으며 관련 예산도 2012년 기준 계획예산의 20%에서 2017년에는 41%로 2배 넘게 책정할 것으로 계획하고 있어 사회기반시설의 안전성 확보 수요가 국가적 차원에서 증대되었다.
- 또한 국토교통부는 사회기반시설의 안전성 확보를 가능케 하는 건설연구인프라를 구축하고자 총예산(현금) 176.5억을 투입하여 2013년 12월부터 2018년 10월까지 약 5년의 기간 동안 극한상태구조특성실험시설의 구축과제수행을 통해 구조재료 및 부재의 내충격 성능을 평가할 수 있는 세계적 수준의 실험장비를 다수 보유한 극한성능실험센터를 구축하였다.
- 그러나 거액의 예산을 투입하여 극한성능실험센터를 구축하였음에도 해당 과제를 통해서는 실험장비만 도입되었을 뿐, 이 세계적 수준의 장비를 활용하여 구조물 내충격 성능을 평가할 수 있는 실험기법은 현재 개발되지 않아 실험장비의 활용이 제한적인 실정이다. 또한 극한성능실험센터의 다수의 장비들이 외국에서 일체 제작된 장비이기 때문에 장비 활용의 극대화를 위한 장비 악세사리의 설계, 제작 및 장비운용 노하우 등과 관련 기법 역시 전무한 실정이다. 따라서 극한성능실험센터에 구축된 장비를 활용하여 구조물 내충격 성능평가를 위한 실험기법 등 관련 기술의 개발이 시급하다.
- 현재 구조물 내충격 성능평가와 관련한 국내연구들은 극한성능실험센터의 구축 이전에는 대규모 구조부재의 충격실험이 가능한 장비가 존재하지 않아 대부분 해석적 연구나 재료수준의 소규모 실험연구수준에 머물러 있다. 따라서 극한성능실험센터의 장비를 활용한 구조물 내충격 성능평가를 위한 실험기법의 개발을 통해 수준 높은 내충격 성능평가 실험이 가능해짐에 따라 국내의 내충격 관련 연구 및 기술수준 향상에 기여할 수 있다.

3. 연구개발범위

가. 구조물 내충격 성능평가 실험기법 수립

- 본 연구과제에서는 극한성능실험센터에서 보유하고 있는 세계적 수준의 장비들 중, 구조물 내충격 성능평가에 필요한 구조재료의 동적 특성을 획득할 수 있는 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) 장비와 대규모 구조부재에 대하여 충돌실험이 가능한 중속가스건 장비의 실험기법을 개발한다. 개발하는 실험기법은 해당 장비의 실험 수행 시 필요한 소모품 및 악세서리, 장비운용방법, 응답 계측기법을 포함한 실험 수행의 제반사항을 모두 다룬다.

나. 구조물 내충격 성능평가 실험 데이터베이스 구축

- 개발한 충돌실험기법을 적용한 실험을 수행하여 해당 실험기법을 검증한다. 또한 수행한 실험의 변수 및 결과를 정리하여 실험 데이터베이스 구축한다. 이를 제안된 충돌실험기법을 사용하는 추후 관련 연구에 활용할 수 있는 연구 확장의 토대를 마련한다.

다. 구조물 내충격 성능평가 해석 시뮬레이션 구축

- 충돌해석 시뮬레이션 툴을 구축하고 해석을 수행하여 실험결과의 타당성을 평가한다. 이를 통해 최종적으로 타당성이 검증된 충돌실험기법을 제안한다. 구축된 해석 시뮬레이션 툴은 추후 해당 장비를 활용한 후속연구의 기반으로 활용가능하다.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내외 관련 설계기준

- 원자력발전소 등 에너지 발전소 관련 사회기반시설은 설계 시 항공기 등의 충돌로 인해 발생하는 충격하중을 고려하도록 하고 있으며 DOE-STD-3014-2006(미국 에너지부), ACI 349-13(미국 콘크리트학회), 2010 ASME Boiler & Pressure Vessel Code(미국 기계학회), NEI 07-13(미국 원자력에너지연구소) 등 여러 관련 설계기준이 있다.
- 이러한 설계기준들에서는 충격하중으로 인해 구조물에 발생하는 주요 충격거동을 평가하여 구조물을 설계하도록 제시하고 있으나 설계기준들에서 제시하고 있는 충격거동 평가방법은 구체적인 산정방법 없이 정성적 방법 위주로 제시되어있어 설계자에 따라 평가정확도가 달라 그 결과를 신뢰하기 어렵다는 한계점이 있다. 또한 여러 충격거동 중 일부는 이를 평가하기 위한 구체적인 실험식이 제시되어 있으나 실험식의 이론적 기반이 매우 부족하고, 검증된 실험기법 없이 연구자 별로 상이하게 수행된 실험결과를 바탕으로 개발되어 실험식을 통한 평가결과를 신뢰하기 어렵다.

2. 국내외 관련 연구동향

- 현재 설계기준에서 충격거동의 평가방법으로 제시하고 있는 실험식은 근본적으로 이론적 기반이 부족하다는 한계가 있다. 이를 개선하기 위하여 해외에서는 충격거동을 잘 설명할 수 있는 이론적 모델을 개발(Forrestal et al. (1997))하고 실제 실험을 통해 검증하는 연구(Forrestal et al. (2003))가 수행된 바 있다. 하지만 해당 연구들은 구조물 수준으로 보기 힘든 비구조물의 재료수준에서 수행된 연구이기 때문에 이를 구조물 내충격 성능평가에 적용하기 어렵다.
- 또한 해외에서는 대형 구조부재에 대하여 충돌실험을 수행하여 여러 충돌상황에 대한 충격거동을 파악한 일부 실험적 연구(Fiquet et al. (1977) 등)가 수행된 사례가 있으나 충격거동 관련 계측결과의 타당성 검증여부를 알 수 없어 해당 연구들이 활용한 실험기법의 타당성 및 실험결과를 신뢰하기 어렵다. 게다가 대부분 대형부재 시험체의 모사대상이 명확하지 않고 임의대로 설계되어 이 실험결과를 구조물 내충격 평가를 위한 데이터로 활용하기도 어렵다.

제3장. 연구수행 내용 및 성과

1. 연구개발 추진 전략

가. 연구개발 추진 방법

(1) 사회기반시설에 대한 충돌상황을 모사한 부재 및 발사체의 설계 및 충돌실험기법 제안

- 충격하중 재하 시 구조물 파괴로 인한 피해가 극심할 것으로 예상되어 내충격 성능평가가 요구되는 대표적 사회기반시설인 원전구조물에 대하여, 이를 모사한 대형 부재를 설계한다. 그리고 위험성이 높은 항공기 충돌을 모사할 수 있는 여러 변수에 대한 발사체를 설계하고 충격거동을 평가할 수 있는 실험기법을 제안한다.
- 이때, 제안하는 실험기법은 필요한 실험장비 및 악세서리 구성과 시험세팅, 계측방법 등에 실험수행의 제반사항에 대해 제안하도록 한다.

(2) 극한성능실험센터와의 연계를 통한 내충격 성능평가 실험수행

- 세계 최고 수준의 극한성능실험센터 연구 인프라 및 전문인력을 활용하여 내충격 성능평가 실험기법 개발 및 신뢰성 있는 실험을 수행한다.
- 비균질재료 내충격 성능평가에 특화된 76 mm SHPB 장비를 활용하여 사회기반시설에 사용되는 재료의 동적 거동 관측 및 내충격 성능평가를 수행한다. 이를 구조물 내충격 성능평가 실험기법 제안과 더불어 연구결과를 해석 시뮬레이션 수행에 활용한다.
- 부재의 거치 및 실험, 항공기 충격하중의 모사가 가능한 특화 실험장비인 중속가스건 실험시설을 활용하여 실제 벽체를 모사한 시험체에 대해 하중 조건 등 여러 충돌변수에 대하여 충돌실험을 수행한다. 이를 통해 모사한 구조부재의 거동 관측 및 계측기법의 타당성 검증을 통해 내충격 성능평가 실험기법 개발에 활용한다.
- 최대 1 MHz로 데이터 획득 가능한 고속 DAQ system 및 최대 50,000 FPS로 촬영 가능한 고속카메라, 가변저항 변위계, 레이저 속도계 등 고사양 계측기기를 활용하여 안정적이고 정확도 높은 계측을 실시한다.

(3) 구조물 내충격 성능평가 해석 시뮬레이션 툴 구축

- 제안한 실험기법의 타당성을 검증하기 위하여 충돌상황을 구현함으로써 충격거동을 시뮬레이션 할 수 있는 구조물 내충격 성능평가를 위한 해석 시뮬레이션 툴을 구축한다.
- 해석 시뮬레이션 툴을 구축하기 위하여 구조재료의 동적재료특성을 평가할 수 있는 SHPB실험결과를 반영하여 해석 시뮬레이션의 인풋데이터인 재료모델을 개선하고,

대형 부재에 대한 충돌실험 계측결과와 비교하여 해석 시뮬레이션 결과의 분석, 평가한다.

(4) 제안한 구조물 내충격 성능평가 실험기법의 타당성 검증

(가) 기존 내충격 실험방법 및 결과에 대한 비교검토

- 내충격 성능평가 관련 기존 연구들을 분석하여 이들이 활용한 내충격 성능평가 실험방법에 대하여 조사한다. 그리고 기존연구의 실험방법 및 결과를 본 과제에서 수행한 실험결과와 비교검토를 통해 본 연구에서 개발하는 실험기법의 타당성을 검증할 것이다.

(나) 대형 부재에 대한 충돌실험결과 및 해석 시뮬레이션 결과와의 비교

- 본 연구에서 제안한 계측기법의 타당성을 검토하기 위하여 실험수행을 통해 계측한 충격거동응답과 동일한 충돌상황을 모사한 해석 시뮬레이션 결과를 비교, 검토함으로써 구조물 내충격 성능평가를 위한 계측기법의 타당성을 검증한다.

나. 연구개발 추진 체계

- 본 연구과제의 추진 체계는 주관연구기관인 서울대학교 산학협력단 1개 기관에 대하여 주관연구책임자 포함 10명의 서울대학교 내부 연구진으로 수행되었다.
- 주관연구책임자는 본 연구과제에서 수행할 충돌실험의 장비를 보유한 서울대학교 극한성능실험센터의 장으로서, 본 연구과제의 필요성 및 추진전략을 누구보다도 잘 이해하고 있으며 본 연구과제 수행을 통해 얻은 성과를 관련 후속연구에 효율적으로 연계, 활용할 수 있어 본 연구과제의 추진체계가 매우 적절하다고 볼 수 있다.
- 또한, 전체 연구수행기간 동안 주관연구책임자 이외에 9명의 연구원이 연구과제에 참여하여 연구수행에 기여하였다. 연구경험이 풍부한 박사후연구원을 포함한 다수의 박사과정, 석사과정 연구원들이 과제를 수행하여 추진체계가 적절하다고 판단된다.

다. 연구개발 추진 일정

- 연구과제의 효율적인 수행을 위하여 표 3.1과 같이 추진 일정을 계획하고 추진하였다.

표 3.1 연구과제 추진 일정

구분	연구과제명 (연구 수행기관)	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물	1차년도				2차년도			
		핵심성과	단위성과	질적 성과지표			1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
총괄														
주관	사회기반시설 내충격 성능평가를 위한 실험기법 개발 (서울대학교)	A	A-1	A-1-①	기존연구 분석 및 한계점 분석									
					기존연구 해석 시뮬레이션 수행	해석 시뮬레이션 수행 보고서								
				A-1-②	예비실험 해석 시뮬레이션 수행	해석 시뮬레이션 수행 보고서								
		B	B-1	B-1-①	예비실험 계획 수립									
					예비실험 수행	실험결과 보고서								
		C	C-1	C-1-①	실험기법 사전연구	연구보고서								
				C-1-②	실험기법 수정 제안									
		A	A-2	A-2-①	본 실험 해석 시뮬레이션 수행	해석 시뮬레이션 수행 보고서								
				A-2-②	본 실험 해석 시뮬레이션 톨 구축	해석 시뮬레이션 매뉴얼								
		B	B-2	B-2-①	본 실험 계획수립									
					본 실험 수행	실험결과 보고서								
		C	C-2	C-2-①	수정 제안된 실험기법 연구	연구보고서								
					실험기법 수정 제안									
				C-2-②	실험기법 최종수립	실험기법 매뉴얼								

2. 연구개발 수행내용

가. 구조물의 내충격 성능평가에 대한 선행연구

(1) 충돌로 인한 구조물의 충격거동

(가) 충격하중의 특성

- 항공기 등 발사체가 구조물에 충돌하게 되면 구조물에는 그림 3.1과 같이 매우 짧은 재하시간 동안 큰 힘을 갖는 충격하중이 발생하게 된다. 이러한 충격하중의 특성으로 인해 구조물은 충격하중에 의해 다음과 같이 정적하중에 의한 구조물 거동과 다른 세 가지 거동특성을 보이게 된다.

- ① 구조물의 재료특성 변화 (변형률 속도 의존특성, rate-dependency)
- ② 구조물 동적거동의 발생 (전반거동, global behavior)
- ③ 응력과 전파효과의 발생 (국부거동, local behavior)

(나) 구조물의 응답특성

① 구조물의 재료특성 변화 (재료의 변형률 속도 의존특성)

- 충격하중에 의해 구조물은 매우 짧은 시간 동안 대변형이 발생하여 높은 변형률 속도를 갖게 된다. 따라서 콘크리트와 같은 변형률 속도 의존특성을 보이는 구조재료는 변형률 속도가 증가할수록 강도가 증진되는 특성을 갖는다. 그림 3.2는 정적하중 및 충격하중을 받는 콘크리트의 응력-변형률 선도를 비교한 실제 실험결과를 나타내며 충격하중 재하 시 강도와 강성이 증가하는 특성을 확인할 수 있다.

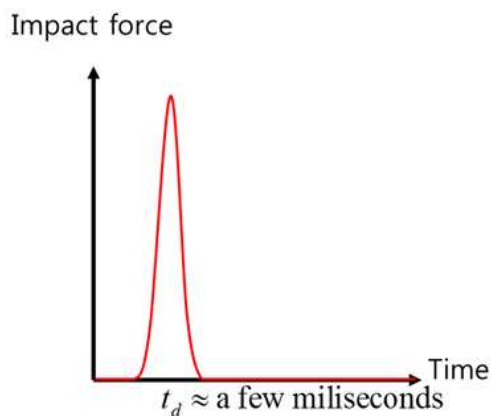


그림 3.1 전형적인 충격하중

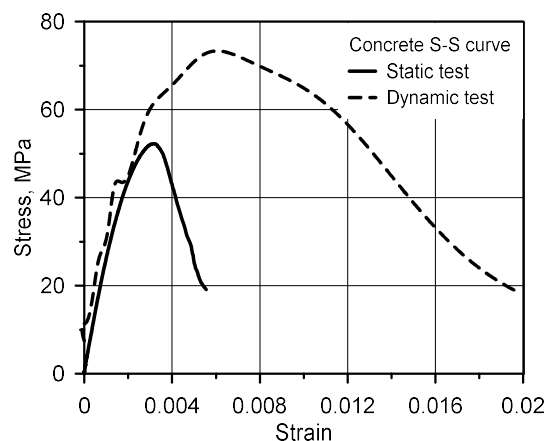


그림 3.2 콘크리트 응력-변형률 관계

② 구조물의 동적거동의 발생 (전반거동)

- 충격하중의 재하시간이 매우 짧기 때문에 재하시간 동안 구조물의 발생하는 변형량 및 구조물 변형에 의한 저항력은 제한적이게 되며 그림 3.3과 같이 충격력의 많은

부분에 대해 관성력이 저항하게 된다. 이로 인해 충격력 재하가 종료된 뒤에 그림 3.3과 같이 관성력에 의한 자유진동을 보이게 된다. 이러한 거동을 구조물의 전반거동이라 부른다. 전반거동의 주요 응답으로는 구조물의 처짐 및 회전을 사용하여 내충격 성능을 평가할 수 있다.

③ 응력과 전파효과의 발생 (국부거동)

- 충격하중이 재하될 경우, 응력파가 구조물 내에 전파되며 구조물이 변형되기 시작한다. 이때 구조물 내부에는 응력파의 반사에 의한 위상변화 및 중첩으로 인해 매우 복잡한 응력분포가 형성이 된다. 또한 과도한 응력파가 발생할 경우, 그림 3.4와 같이 전체 구조계의 붕괴와는 무관하게 국부영역에서 파괴가 발생할 수 있다.
- 주요 국부거동으로는 발사체의 관입(Penetration), 배면파쇄(Scabbing), 관통(Perforation)이 있다. 관입의 경우 발사체가 구조물에 충돌하여 구조물의 충돌면에 관입되는 국부영역 파괴모드를 뜻한다. 이때 발생하는 충격하중에 의한 압축응력파가 자유경계면에 도달하게 되면 인장응력파로 반사가 되며 충돌면의 배면에서 인장파괴가 발생하게 된다. 이를 배면파쇄라 한다. 관통은 발사체가 구조물을 관통하여 구조물에 구멍이 생기는 경우를 이른다.
- 일반적인 국부거동의 발생순서는 발사체 충돌 후 관입이 가장 먼저 발생하고, 이후 관입 도중 구조물에 가해지는 충격하중으로 인한 응력파가 구조물의 충돌부 반대편 자유경계면에 도달하였을 때 배면파쇄가 발생하며, 그 이후 발사체가 배면파쇄로 인해 손실된 구조부재의 두께를 모두 뚫고 관통이 발생한다.

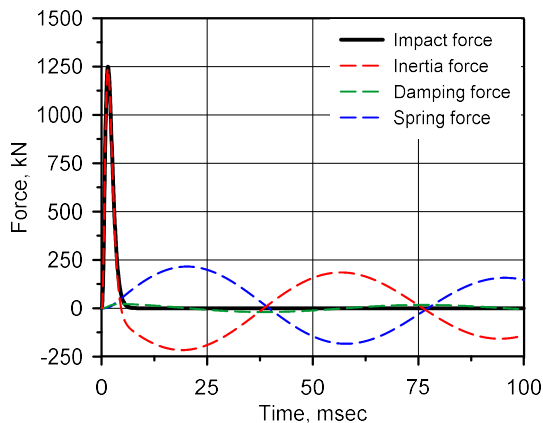


그림 3.3 전형적인 충격하중 하 구조물 저항력



그림 3.4 충돌하중에 의한 콘크리트 벽체의 배면파쇄

- 이와 같이 충격하중을 받는 구조물은 정적상태와는 매우 상이한 거동을 보이기 때문에 기존 정적상태의 성능을 평가하기 위한 전통적인 구조실험 및 구조해석 연구로는 구조물의 충격하중 하 거동을 평가할 수 없다. 따라서 구조물의 내충격 성능을 평가하기 위해서는 충격하중의 특성을 반영할 수 있는 새로운 실험 및 해석기법이 필요하다.

(다) 충돌체 종류에 따른 충격하중

- 일반적으로 충돌체는 강체 미사일(Hard missile; rigid missile)과 비강체 미사일(Soft missile; deformable missile)로 분류된다. 강체 미사일이란 충돌과정에서 충돌체에 발생하는 변형이 구조물에 발생하는 변형보다 미미하여 강체 미사일에 발생하는 변형을 무시할 수 있는 충돌체이다. 이 경우 충격력은 식 (3.1)과 같이 나타낼 수 있다. a, m, x, t, F 는 각각 충돌체의 가속도, 질량, 충돌체 평균 변위, 시간, 충격력을 나타낸다.

$$F = ma = m\ddot{x} \quad (3.1)$$

- 이에 비해 비강체 미사일의 경우 발사체의 변형이 충돌체의 변형을 무시할 수 없기 때문에 충돌체의 각 점에서의 가속도가 달라지게 되고, 충격력은 식 (3.2)와 같이 표현된다. F_k, μ 는 각각 충돌체의 crushing force 및 충돌체의 선밀도를 나타낸다.

$$F = \int_m adm = F_k + \mu \dot{x}^2 \quad (3.2)$$

(2) 충돌 관련 설계기준

- 원자력발전소 등 에너지 발전소 관련 사회기반시설은 항공기 등 충돌로 인해 발생하는 충격하중을 설계에 고려하도록 하고 있으며 DOE-STD-3014-2006(미국 에너지부), ACI 349-13(미국 콘크리트학회), 2010 ASME Boiler & Pressure Vessel Code(미국 기계학회), NEI 07-13(미국 원자력에너지연구소) 등 여러 관련 설계기준이 있다.

(가) DOE-STD-3014-2006 (U.S. Department of Energy)

- 미국 에너지부에서 제시한 DOE-STD-3014-2006(Accident analysis for aircraft crash into hazardous facilities)은 위험시설에 대한 항공기 충돌에 대한 기준으로 내충격 설계를 전반거동 및 국부거동으로 나누어 수행하도록 하고 있다. 또한 각 설계를 수행하기 위해 해당 기준은 발사체를 강체 미사일(Hard missile)과 비강체 미사일(Soft missile) 두 종류로 나누어 내충격 설계를 수행하도록 하였다. 국부거동의 경우, 항공기 터보팬 엔진의 샤프트, 랜딩 기어 등을 강체 미사일을 대상 미사일로 선정하여 설계를 수행하도록 하였으며 항공기 동체 등을 모사하여 전반거동을 평가하도록 하였다.

① 동적증가계수(Dynamic increase factor, DIF) 평가방법

- 콘크리트의 동적증가계수의 평가방법을 별도로 제안하지 않았으며 편칭전단에 대한 성능평가 시 AIC 349의 동적증가계수를 사용할 것을 제안하였다.

② 전반거동 평가방법

- 전반거동을 평가하기 위한 방법으로 해당 기준에서는 에너지 균형법(Energy balance method)과 단자유도 시스템에 대한 시간이력해석(Time history analysis method), 두 가지를 제시하고 있다.
- 에너지 균형법은 에너지 보존 법칙과 운동량 보존 법칙을 기반으로 제안된 방법이다. 에너지 균형법에서는 허용가능한 정적상태의 연성도를 기준으로 시험체가 흡수할 수 있는 에너지 양이 발사체로부터 전달되는 에너지 양 보다 크도록 하는 설계 방법이다. 이 때, 비강체 미사일인 발사체가 변형으로 인해 자기 자신이 흡수하는 에너지 양 만큼을 발사체의 운동 에너지로부터 감해주기 위해서 운동 에너지를 평가할 시 유효질량을 사용하여 발사체의 무게를 낮게 평가하도록 하고 있다. 그러나, 유효질량을 설정하는 방법이 개략적으로만 다뤄지고 있고 구조물이 흡수 가능한 에너지 양을 평가할 시 구조물의 연성도 및 강도를 정적성능에 준해서 결정하고 있다는 한계점이 있다.
- 단자유도 시스템에 대한 시간이력해석의 경우 구조계를 적절히 단자유도 시스템으로 모사한 후 이를 해석하여 구조물의 응답을 얻어내도록 하고 있다. 이 때 충격력은 항공기 동체 충돌 시 충격력 공식인 Riera formulation을 근거로 설정하도록 하고 있다. 그러나 Riera formulation의 경우 충격력을 얻기 위해 항공기 동체의 좌굴하중 및 선밀도 정보가 필요하나 해당 정보는 쉽게 얻을 수 없으며, 좌굴, 혹은 일정한 소성변형이 발생하지 않는 충돌체에 의한 충격력은 계산해낼 수 없다는 한계점이 있다.

③ 국부거동 평가방법

- 국부거동의 평가는 강체 미사일의 충돌실험결과를 피팅하여 개발된 실험식들을 사용하도록 제시하고 있다. 해당 기준에서 국부거동 평가에 사용하도록 권고하고 있는 실험식은 표 3.2과 같으며 강체 미사일에 대해서는 실험식을 그대로 사용하고, 비강체 미사일에 대해서는 실험식에 대해 특정 비율만큼 감소하여 평가하도록 하고 있다. 이 비율은 Sugano et al. (1993)의 연구에서 제안한 값이며, 이는 동일한 질량의 강체와 비강체 미사일의 충돌실험을 통해 국부거동 발생량 비교를 통해 산정되었다.

표 3.2 DOE-STD-3014-2006의 국부손상 평가식

파괴모드	강체 미사일	비강체 미사일
관입	- Modified NDRC	- 50% of Rigid
배면파쇄	- Modified NDRC - Bechtel - Chang - CRIEPI	- 60% of Rigid - Stone & Webster
관통	- Modified NDRC - CEA-EDF - Degen - Chang - CRIEPI	- 70% of Rigid
편칭전단	-	- ACI - Long

(나) ACI 349-13 (American Concrete Institute)

- 미국 콘크리트 학회에서 발행한 ACI 349-13(Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures & Commentary)은 원전 관련 콘크리트 구조물에 대한 설계기준이다. DOE-STD-3014-2006과 마찬가지로 구조물의 내충격 성능을 전 반거동과 국부거동으로 나누어 평가 및 설계하도록 하고 있다. 대표적인 설계 대상 충돌로는 토네이도 미사일 충돌, 파이프 충돌, 항공기충돌, 연료탱크 낙하 등을 제시 하고 있다.

① 동적증가계수 평가방법

- ACI 349-13에서는 콘크리트의 동적증가계수를 선행된 실험결과들을 바탕으로 식 (3.3)과 같이 변형률 속도에 대한 함수로 정의하였다.

$$DIF = \min[0.9 + 0.1\{\log_{10} \dot{\epsilon}_c + 5\}, 1.25] \geq 1 \quad (3.3)$$

② 전반거동 평가방법

- 전반거동의 평가는 동적하중계수(Dynamic load factor, DLF)를 이용한 방법과, DOE-STD-3014-2006와 동일한 에너지 균형법, 단자유도 시스템에 대한 시간이력해 석을 이용하도록 제시하고 있다.
- 동적하중계수법의 경우 충격하중의 동적효과를 고려할 수 있는 동적하중계수를 이 용하여 등가정적하중을 계산해내고 이를 통하여 정적해석을 수행하여 설계를 하는 방법이다. 그러나 어떤 동적하중계수를 사용을 하여야 하는지에 대해 제시된 바가 없다는 한계점이 있다.

- 에너지 균형법과 단자유도 시스템의 시간이력 해석법은 방법론 자체는 DOE-STD-3014-2006에서 제시한 바와 동일하나 에너지 균형법에서 구조물이 흡수가 능한 충격 에너지의 산정방법을 제시하고 있지 않으며 시간이력 해석법에서는 충격 하중의 산정방법을 제시하고 않아 실질적으로 전반거동 평가를 수행할 수 없다는 한계점이 있다.

③ 국부거동 평가방법

- 국부거동은 강체 미사일의 충돌상황에 대해서 평가하도록 제시하고 있다. 이 때 국부거동의 평가는 실험식인 Modified NDRC식, Bechtel식, Stone & Webster식을 이용하도록 권고하고 있다.

(다) 2010 ASME Boiler & Pressure Vessel Code (American Society of Mechanical Engineers)

- 미국 기계학회에서 발행한 ASME 2010 Boiler & Pressure Vessel Code, Section III, Division 2(Code for Concrete Containments, Rules for Construction of Nuclear Facility Components)은 원자력시설의 철근콘크리트 격납고에 대한 설계기준이다. 이 또한 설계구조물의 내충격 성능을 전반거동과 국부거동으로 나누어 평가 및 설계하도록 하고 있다. 이 설계기준의 대표적인 설계 충돌은 토네이도 미사일에 의한 충돌, 격납고 주변 시설의 높은 압력을 받는 파이프의 파단으로 발생한 미사일 충돌을 제시하고 있다.

① 동적증가계수 평가방법

- 콘크리트 동적증가계수의 평가방법을 별도로 제안하지 않았다.

② 전반거동 평가방법

- 전반거동에 대한 설계의 경우 DOE-STD-3014-2006나 ACI 349-13와 다르게 방법론 조차 제시되어 있지 않아 해당 기준만으론 실질적으로 전반거동 평가가 불가능하다. 다만, 이 기준에서는 다른 기준과는 달리 전반거동 평가 시 고려해야할 두 가지의 가정사항을 제시하고 있을 뿐이다. 첫 번째는 발사체 관입에 따라 손상된 유효영역의 직경을 발사체 직경의 10배나 부재 두께의 제곱근 값에 2.76배한 값 중 작은 값으로 설정하여 이를 구조물의 전반거동 평가에 고려하도록 제시하고 있다. 두 번째는 충돌과정에서 발사체의 운동에너지가 전파되는 구조물의 유효 직경은 미사일의 직경과 구조부재의 두께를 합한 값으로 계산하여 전반거동 평가 시 고려하도록 하고 있다.
- 충돌로 인한 전반거동의 한계상태는 예상되는 파괴 시의 연성비의 2/3로 제시하고 있다.

③ 국부거동 평가방법

- 국부거동의 경우는 오직 관입깊이에 대해서만 다루고 있으며 경험식을 통해 예측되는 관입깊이가 구조부재 두께의 75% 이내가 되도록 설계기준을 제시하고 있다. 그러나 관입깊이 평가 시 어떤 실험식을 사용하면 되는지 제시하는 바가 없는 한계점이 있다.

(라) NEI 07-13 (The Nuclear Energy Institute)

- 미국 원자력에너지연구소에서 발행한 NEI 07-13(Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs)은 에너지관련 발전소 격납구조물의 항공기 충돌영향평가에 대한 설계기준이다. 이 설계기준은 다른 관련 설계기준들과 마찬가지로 내충격 성능을 전반거동과 국부거동으로 나누어 평가 및 설계하도록 하고 있다. 그리고 이 설계기준에서 고려하고 있는 충돌은 항공기 엔진의 충돌이다.

① 동적증가계수 평가방법

- DOE-STD-3014-2006과 마찬가지로 콘크리트의 동적증가계수의 평가방법을 별도로 제안하지 않았으며 편칭전단에 대한 성능평가 시 ACI 349의 동적증가계수를 사용할 것을 제안하였다.

② 전반거동 평가방법

- 전반거동의 경우 단자유도 시스템에 대한 시간이력해석과 발사체-타겟 해석법을 이용하여 평가하도록 하고 있다.
- 단자유도 시스템의 시간이력해석기법은 DOE-STD-3014-2006이 제시하고 있는 바와 동일하며 발사체-타겟 해석법은 발사체를 하나의 자유도로 간주하여 발사체와 타겟, 2자유도 시스템에 대한 시간이력해석을 수행하는 것이다. 그러나 발사체-타겟 해석법은 충돌상황을 적절히 모사할 수 있는 두 자유도 간의 강성 및 감쇠 계수가 주어저야 하지만 해당 설계기준에서는 이러한 구체적인 산정방법을 제시하고 있지 않아 실질적으로 국부거동을 평가할 수 없다는 한계점이 있다.

③ 국부거동 평가방법

- 국부거동은 설계 대상으로 간주하고 있는 항공기 엔진을 비강체 미사일로 간주하여 DOE-STD-3014-2006과 동일하게 Sugano et al. (1993)에서 제안한 강체 미사일의 국부거동 실험식에 대한 감소계수(표 2.2.1 참조)를 적용하여 평가하도록 제시하고 있다. 관입평가 시에는 Modified NDRC식을 사용하고, 배면파쇄 평가 시에는 Chang식을 사용하고, 관통평가 시에는 Degen식을 사용하도록 하고 있다.

(마) 요약 및 소결

- 충돌 관련 설계기준 중 각 충격거동을 평가할 시 재료의 동적증가계수를 고려하도록 하는 기준은 ACI 349-13이 유일하였다. 그러나 ACI 349-13의 동적증가계수는 동적재료실험 표준안의 부재로 서로 상이한 방법으로 수행되었던 선행연구들의 실험 결과를 바탕으로 제시되었기 때문에 신뢰도가 낮다. 또한, 동적재료실험 시 결과에 영향을 줄 수 있는 콘크리트의 강도, 형상 및 크기 등 다른 요인들을 배제하고 변형률 속도에 대한 함수로만 정의하였다는 한계점이 있다.
- 국부거동에 대해서는 각 설계기준 모두 20세기에 강체 미사일 실험으로부터 개발된 실험식을 사용하여 평가하도록 하고 있으며 이때 사용하도록 권고하고 있는 실험식 종류는 각 기준 별로 서로 상이하다. 이러한 실험식은 이론적 근거가 부족하고 각 실험결과를 단순 피팅하여 개발되었기 때문에 실험수행범위 밖의 충돌상황에 대해서는 실험식의 적용성을 신뢰하기 어렵다. 이에 따라 그림 3.5에서 볼 수 있듯이 동일한 충돌상황에서도 각 실험식이 예측하는 관입깊이가 100 m/s에서 2배 이상으로 매우 큰 변동성을 보인다. 따라서 어떠한 실험식을 사용하냐에 따라 국부거동 평가 결과가 달라지므로 기존 설계기준에서 사용하고 있는 실험식은 내충격 성능평가 기법으로 활용하기 어렵다.

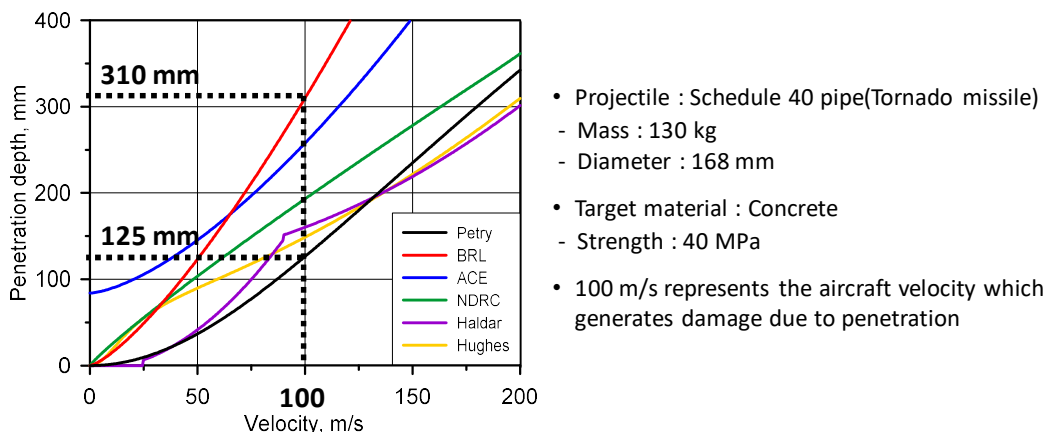


그림 3.5 동일한 충돌상황에 대한 각 실험식의 관입깊이 평가비교

- 전반거동에 대해서는 전반거동 평가방법을 제시하고 있지 않은 2010 ASME Boiler & Pressure Vessel Code를 제외하고는 모두 단자유도 시스템에 대한 시간이력해석 (Time history analysis method)을 평가방법으로 제시하고 있으며 이외 각 기준에서는 추가적으로 에너지 균형법(Energy balance method)이나 발사체-타겟 해석법을 제시하고 있다. 하지만 각 기준 모두 단순히 평가방법만을 제시할 뿐 충격하중이나 구조물의 강성 등 해석에 필요한 인풋 데이터에 구체적인 산정방법을 제시하고 있지 않은 한계점이 있다. 이는 설계자가 인풋 데이터를 어떻게 산정하여 해석하느냐에 평가결과가 달라질 수 있어 신뢰할 수 있는 평가방법으로 보기는 어렵다. 또한 전반거동과 국부거동이 발사체 충돌 시 구조물에 동시에 나타나는 충격거동의 복잡한 매커니즘에 비해 각 기준에서 제시하고 있는 평가방법은 매우 단순화된 이상화 기법

으로 충격거동을 정확히 구현할 수 있을 것으로 보기는 어렵다.

- 따라서 구조물 내충격 성능평가 실험기법 개발을 위해서는 본 연구에서 수행한 충돌실험결과에 대하여 검증된 이론기반 충격거동 평가방법이나 현재 충격거동을 구현하는데 용이한 해석 시뮬레이션을 통해 정확히 평가하여야 한다.

(3) 충돌 관련 선행연구

(가) 재료 충격거동 연구

- 건축 및 토목구조물에 가장 널리 사용되는 콘크리트의 동적재료특성을 파악하기 위한 가장 대표적인 방법은 split Hopkinson pressure bar(SHPB) 실험이다. SHPB 실험은 정적재료실험과 달리 표준 시편이 정해져 있지 않기 때문에 실험 장비 크기에 맞추어 제각기 다른 크기의 시편과 굽은골재를 사용하여 수행되어왔다. 이에 따라 골재 크기가 동적재료특성에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구와 실험적 연구들이 선행되어왔다.
- Hao and Hao (2011)은 mesoscale 모델을 사용하여 굽은골재 최대치수가 12 mm이고 굽은골재 함유량이 0, 20, 30 그리고 40%인 콘크리트의 SHPB 실험을 수치해석적으로 확인하였다. 이를 통해 골재 함유량이 높을수록 더 큰 동적증가계수를 나타내는 것을 확인하였다.
- Chen et al. (2013)은 시멘트풀, 모르타르, 그리고 굽은골재 최대치수가 9 mm인 콘크리트에 대해 SHPB 실험을 수행하여 굽은골재의 유무에 따라 동적압축강도가 달라지는 것을 확인하였다.
- 또한 Hao et al. (2013)의 연구에서는 모르타르와 굽은골재 최대치수가 4 mm, 8 mm인 시편의 SHPB 실험을 통해 굽은골재 최대치수에 따라 동적증가계수가 다르게 나타나는 것을 확인하였다.
- 그러나 실제 구조물에 사용되는 20 mm 이상의 굽은골재를 사용하여 수행한 실험적, 수치해석적 연구가 없고 12 mm와 같은 작은 최대치수의 굽은골재를 사용하여 얻은 동적재료특성을 실제로 큰 골재를 사용하는 구조물에 적용할 수 있는지에 대한 검증은 현재까지 이루어진 바가 없다.

(나) 구조물 충격거동 연구

- 발사체의 충돌과 관련한 선행연구들은 여러 충격거동 중 국부거동이 가장 지배적인 거동이기 때문에 대부분 국부거동의 평가연구가 수행되었다. 이때, 발사체는 항공기 엔진 샤프트와 같이 충돌과정에서 발사체의 변형이 거의 발생하지 않는 강체 미사일, 항공기 본체나 엔진과 같이 얇은 금속재질로 이루어져 있어 충돌과정에서 좌굴로 인해 발사체의 변형이 크게 발생하는 비강체 미사일 두 종류로 구분되고 있다.
- 이에 대해 해외의 몇몇 선행연구에서는 강체 미사일의 충돌에 의해 구조물에 발생하는 국부거동을 정확히 평가하기 위하여 국부거동 발생매커니즘의 규명을 위한 이

론적 연구를 수행하였다. 비강체 미사일의 경우에는 충돌과정에서 발사체에 소성변형이 발생함에 따라 매우 복잡한 거동을 보여 이를 이론적 모델로 제안하기 어렵다. 실제로 비강체 미사일 충돌에 대하여 시험체에 발생하는 국부거동을 이론적으로 연구한 사례는 없다.

- 실험적 연구의 경우 대형부재에 대한 충돌실험을 수행할 수 있는 대규모 실험시설이 전 세계적으로 매우 적어 대부분 소규모 충돌실험장비를 통해 부재수준으로 볼 수 없는 소규모 실험이 수행되었다. 몇몇 연구만이 대규모 충돌실험시설을 활용하여 구조물 수준의 대형부재에 대하여 여러 충돌변수로 국부거동을 실험적으로 평가하는 실험적 연구를 수행하였다. 그리고 대형부재에 대한 실험적 연구에서는 강체 미사일뿐만 아니라 비강체 미사일에 대한 실험연구도 수행되었다. 따라서 본 연구에서는 이러한 일부 대형 부재에 대하여 충돌실험을 수행한 선행연구에 대해 조사하고 해당 연구에서 활용한 실험기법(계측방법 및 결과)에 대하여 분석하였다.

① 강체 발사체 충돌 시 국부거동에 대한 이론적 연구

- 국부거동 중 관입거동은 배면파쇄와 관통이 발생할 때 가장 먼저 발생하는 기초적인 거동이다. 관입거동의 예측은 앞서 충돌 관련 설계기준에서 실험결과의 단순피팅을 통해 개발된 실험식을 활용할 수도 있지만 적용성의 한계로 내충격 성능평가 기법으로 활용하기는 어렵다.
- 따라서 실험식이 개발된 이후 관입거동 매커니즘을 이론적으로 규명함으로써 관입깊이를 정확하게 평가하고자 Forrestal et al. (1997)의 연구 등은 발사체가 타겟에 관입하면서 발생시키는 공동(Cavity)의 확장과정을 설명하는 Dynamic cavity expansion theory를 개발하여 이론적 기반을 갖춘 관입깊이 예측식을 제안하였으며 이 식의 유도과정을 간략하게 설명하면 다음과 같다.
- 먼저, 제안된 이론기반 관입깊이 예측식은 콘크리트 타겟은 무한한 두께를 가지고 발사체는 관입 도중 변형이 발생하지 않는 강체 미사일을 가정사항으로 제시하고 있다. 발사체가 콘크리트 타겟에 관입할 때 타겟은 발사체의 진행에 대해 저항하게 되며 이로 인해 타겟의 공동표면에는 표면에 수직인 방향으로 응력(σ_r)이 발생하게 된다. Forrestal et al. (1997)의 연구는 개발한 Dynamic cavity expansion theory를 통해 σ_r 이 공동표면 입자가 표면에 수직인 방향으로 확장되는 속도(V_c)에 대한 이차다항식의 형태로 잘 예측된다는 것을 검증하였고 이는 일반적으로 식 3.4과 같이 표현된다. 식 3.4에서 f_c 는 Uniaxial compressive strength of concrete, ρ_0 는 Density of undeformed concrete이며, S , B 는 타겟 재료의 성질 및 관성에 의해 결정되는 무차원 상수이다.

$$\frac{\sigma_r}{f_c} = S + B \left(\frac{V_c}{\sqrt{f_c / \rho_0}} \right)^2 \quad (3.4)$$

- 그리고 타겟에 작용하는 σ_r 은 작용반작용 원리에 의해 발사체 두부표면에 작용하며 σ_r 의 발사체 진행방향 합력(F_r)은 식 3.5와 같이 계산되며 이는 발사체 진행방향의 반대방향으로 작용하여 발사체를 감속시킨다. 식 3.5에서 d 는 발사체의 직경, V 는 발사체의 속도이며, N 은 무차원의 두부형상 계수로 탄환(Ogive)형상은 식 (3.6), 뿔뿔한 형상은 식 (3.7)로 계산되며 Chen et al. (2002)의 연구를 통해 일반적인 두부형상에 대하여 제안되었다. 여기서, ψ 는 발사체 직경에 대한 발사체 두부의 곡률반경 (R) 의 비이다.

$$F_r = \frac{\pi d^2}{4} (S + N \rho_0 V^2) \quad (3.5)$$

$$N = \frac{1}{3\psi} - \frac{1}{24\psi^2} \quad (3.6)$$

$$N = 1 - \frac{1}{8\psi^2} \quad (3.7)$$

- F_r 은 발사체가 타겟에 충돌한 직후 0에서부터 증가하기 시작하여 발사체가 특정깊이까지 관입한 이후에 식 3.5의 값을 따르게 된다. 이 특정깊이는 관련연구들에서는 구멍깊이(Crater depth)로 명명되고 있으며 일반적으로 발사체 직경(d)에 비례하여 이에 관련계수(k)를 곱하여 표현된다. Forrestal et al. (1994)의 실험연구에서는 실험 후 스폴링에 의한 구멍깊이의 관측을 통해 탄환형상의 발사체에 대하여 k 를 2로 가정하였으며, Li et al. (2003)의 연구에서는 평평한 두부형상에 대한 k 값을 뜻하는 k_{flat} 을 Slip line field theory를 기반으로 하여 0.707로 제안하고 식 3.8와 같이 발사체 두부의 길이(l_{nose})와 합하여 일반적인 두부형상에 대한 k 값을 제안하였다.

$$k = k_{\text{flat}} + \frac{l_{\text{nose}}}{d} \quad (3.8)$$

- 발사체의 관입깊이는 충돌 직후부터 F_r 로 인해 감속되는 발사체의 변위와 같으며 이는 식 3.5와 3.8를 뉴턴 제2법칙인 식 3.9에 대입하여 계산할 수 있으며 이를 통해 발사체가 감속하여 정지하였을 때의 최종 관입깊이를 예측하는 이론기반 식은 식 3.10과 같이 유도된다. 여기서, t 는 시간, x 는 발사체의 진행방향 좌표, m 은 발사체의 질량, V_1 은 관입깊이가 kd 인 순간의 발사체 속도이다.

$$m \frac{dV}{dt} = m \frac{dV}{dx} \frac{dx}{dt} = mV \frac{dV}{dx} = -F_r \quad (3.9)$$

$$P = \frac{2m}{B\pi d^2 \rho_0 N} \ln \left(1 + \frac{N \rho_0 V_1^2}{S f_c} \right) + kd, \quad P > kd \quad (3.10)$$

- 이 이론적으로 제안된 관입깊이 예측식을 활용하여 Chen et al. (2008)의 연구에서는 관통을 방지하기 위해 필요한 철근콘크리트 부재의 최소 두께(e)를 식 3.11과 같이

이론기반 예측식을 통해 산정된 최종 관입깊이(P)와 발사체 충돌 시 발생하는 편칭 전단으로 손실되는 구조물의 배면부 두께(H_{BL}^*)의 합으로 이론적 관통예측 모델을 제안하였다.

$$e = P + H_{BL}^* \quad (3.11)$$

- 하지만 Chen et al. (2008)의 연구에서 제시한 H_{BL}^* 은 배면파쇄의 발생에 따른 영향을 무시하고 제안되어, 실제 배면파쇄와 함께 발생하는 관통 매커니즘을 명확히 설명할 수 있다고 보기는 어렵다. 그리고 배면파쇄에 대해서는 현재 이론적 연구가 전무한 상황이기 때문에 현재 국부거동에 대한 이론적 연구는 관입거동에 대해서만 발생 매커니즘 및 예측방법이 구체적으로 제안되어 있다.

② 국부거동에 대한 실험적 연구

- Forrestal et al. (2003)의 연구는 동일 연구자가 개발한 이론기반 관입깊이 예측식을 검증하고자 강체 미사일과 콘크리트 타겟의 충돌간에 발생하는 합력(F_r)을 계측하기 위하여 발사체 내부에 자체 개발한 무선 가속도계를 설치하였다. 강체 미사일은 충돌과정에서 변형이 발생하지 않기 때문에 무선 가속도계를 통해 계측한 가속도에 발사체의 질량을 곱함으로써 F_r 을 계측할 수 있다. 계측한 F_r 이 식 3.5의 이론적 모델로 잘 예측되는 것을 확인하여 식 3.10이 이론기반 관입깊이 예측식이 타당하는 것을 검증하였다.
- 하지만 Forrestal et al. (2003)의 검증연구는 구조부재가 아닌 76 mm 직경의 발사체에 대하여 1.83 m 직경, 1.83 m 길이의 원통형 무근콘크리트 시험체에 대하여 수행하였기 때문에 구조물 수준에 대해서는 이 식을 내충격 성능평가에 곧바로 활용하기는 어렵다. 따라서 구조물 수준에서의 내충격 성능평가에 이를 활용하기 위해서는 이론기반 관입깊이 예측식을 구성하는 결정계수 k , S , B 를 대형 철근콘크리트 구조부재에 대한 충돌실험결과로 평가하여 이를 계측한 방법 및 결과의 타당성을 검증하여야 한다.
- 현재 Forrestal et al. (2003)의 실험적 연구를 포함해 기존에 수행된 대부분의 충돌실험은 구조부재로 볼 수 없는 원통, 블록형태의 무근콘크리트 시험체에 대하여 수행되었으며 또한 고성능장비의 활용이 어려워 대부분 재료수준의 소규모 실험이 수행되었다.
- 표 3.3과 같이 일부 구조물 수준의 대형 부재에 대한 충돌실험연구 사례가 있으나 국부거동 평가를 위해 계측이 필요한 주요 응답의 측정방법이 타당하게 검증되었는지 확인하기 어려웠다. 이 대형 부재에 대한 실험연구들에서는 발사체의 충돌속도 및 관통 후 속도를 고속카메라를 통해 수행하였으나 구체적인 계측방법이 제시되어 있지 못하고 계측결과가 타당한지에 관해 검증내용이 연구논문상에 제시되어 있지 않아 실험기법의 타당성을 선행연구를 통해 논하기 어렵다.
- 관입깊이의 경우는 많은 실험연구들이 실험수행 이후 최종 관입깊이만을 실측하여

비교하는 수준에 머무르고 있어 이러한 계측기법으로는 여러 변수에 의해 영향을 받는 관입거동의 정확한 평가가 어렵다. Fiquet et al. (1977)와 Stephenson et al. (1978)의 실험연구에서는 관입거동을 보다 정확히 평가하기 위해 고속카메라로 촬영한 발사체 변위의 시간이력을 수치미분하여 관입거동의 분석을 시도하였지만, 표 3.3에서 확인할 수 있듯이 대부분 10,000fps 이하에서 촬영되어 데이터 개수가 일반적인 충격거동 재하시간인 5 msec에 대하여 10~50개 정도로 매우 적어 이를 통해 수치미분을 수행한 결과를 신뢰하기 어렵다.

- 발사체 충돌로 인해 구조부재에 발생하는 충격거동은 국부거동이외에도 부재가 유한한 두께를 가지므로 전반거동 역시 발생할 수 있다. 물론 국부거동이 주로 발생하는 충격거동이나 선행연구에서는 시험체 변위 계측을 통해 전반거동에 대하여 연구한 사례가 거의 없어 발사체 충돌에 의해 전반거동이 실제로 어떻게 나타나는지, 고속변형 하에서 변위는 어떠한 장비로 계측하여야 하는지 연구된 사례가 없다.
- 한편, Sugano et al. (1993)의 연구에서는 항공기 본체나 엔진과 같이 충돌과정에서 충돌체 대변형이 발생하는 충돌상황을 실험하기 위하여 실물엔진과 이를 축소모사한 비강체 미사일을 설계하여 충돌실험을 수행하였고 또한 비강체 미사일과 동일한 직경과 질량을 갖는 강체 미사일을 설계하여 충격거동을 비교하였다. 이때, 비강체 미사일은 그림 3.6과 같이 1 mm, 2.7 mm의 얇은 두께를 갖는 파이프 형태로 설계하여 충돌과정에서 얇은 두께 부분이 좌굴하여 발사체에 대변형이 발생하도록 하였다. 그리고 두 미사일에 대한 실험결과를 통해 강체 미사일에 대한 비강체 미사일의 국부손상 발생량을 비교, 평가하였다.

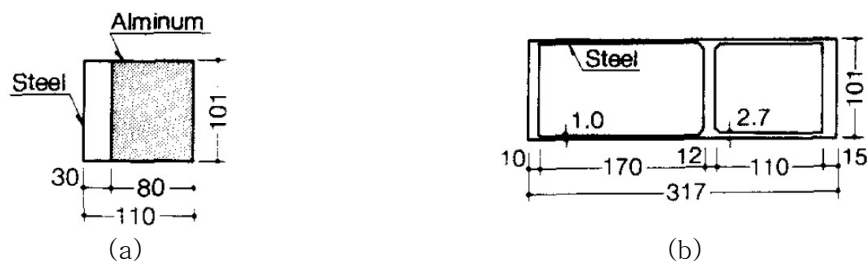


그림 3.6 Sugano et al. (2003)의 설계 발사체;
(a) 강체 미사일; (b) 비강체 미사일

표 3.3 철근콘크리트 부재의 충돌실험을 수행한 선행연구

연구내용	Fiquet et al. (1977)	Stephenson et al. (1978)	Goldstein et al. (1977)	Romander et al. (1984)	Kojima (1991)	Sugano et al. (1993)
시험체 종류	RC	SC	RC	RC, SC	RC, SC	RC, SC
시험체 크기 [$W \times L \times H$], mm	$5,000 \times 5,000 \times 400 \sim 500$	$1450 \times 1450 \times 260$	$4570 \times 4570 \times 305 \sim 610$	$570 \times 570 \times 55 \sim 125$	$1200 \times 1200 \times 120 \sim 240$	$1500 \times 1500 \times 60 \sim 350$
발사체 직경, mm	305	200 ~ 300	305	48 ~ 105	60	100
발사체 종류	강체 미사일	강체 미사일	철근, 전신주, 파이프	Turbin fan	강체 및 비강체 미사일	강체 및 비강체 미사일
두부형상	Cone or flat	Flat	-	-	Hemispherical	Flat
발생 국부거동	관입, 배면파쇄, 관통	관입, 배면파쇄, 관통	관입, 배면파쇄, 관통	관입, 배면파쇄, 관통	관입, 배면파쇄, 관통	관입, 배면파쇄, 관통
주요 계측항목	- 관입깊이 - 충돌속도 - 관통 후 속도 - 강체미사일 가속도	- 관입깊이 - 충돌속도 - 관통 후 속도 - 강체미사일 가속도	- 관입깊이 - 충돌속도 - 관통 후 속도 - 비강체미사일 가속도	- 관입깊이 - 충돌속도 - 관통 후 속도	- 관입깊이 - 충돌속도	- 관입깊이 - 충돌속도 - 관통 후 속도 - 비강체미사일 가속도
고속카메라 촬영속도, fps	10,000	18,000	3,000	9,000	2,000	정보없음

(다) 선행연구 요약 및 한계점

① 재료 충격거동 연구

- 재료의 동적특성을 파악하기 위한 대표적인 방법은 SHPB 실험이다. 그러나 실험 표준안의 부재로 인해 SHPB 장비에 맞추어 정적강도실험보다 작고, 제각기 다른 크기의 시편과 골재를 사용해왔다. 이에 따라, 골재 크기가 동적증가계수에 미치는 영향을 확인하기 위하여 수치해석적, 실험적 연구들이 수행되어 왔으나 이 역시 실제 구조물에 사용되는 굵은골재보다 작은 골재를 사용했으며 작은 골재를 사용한 콘크리트의 동적재료특성 연구 결과를 실제 콘크리트에 적용할 수 있는지에 대한 검증이 이루어지지 않았다.
- 따라서 본 연구에서는 다양한 크기의 굵은골재를 사용하여 콘크리트 SHPB 실험을 수행하고, 그 결과로부터 굵은골재 최대치수가 콘크리트의 동적증가계수에 미치는 영향을 확인하고, SHPB 실험의 시편 제작 및 실험기법을 제안한다.

② 구조물 충격거동 연구

- 충돌 관련 선행연구는 강체 미사일의 충돌에서 관입, 배면파쇄, 관통의 국부거동 중 관입에 대해서만 검증된 이론적 예측식이 개발되었다. 그러나 이 식은 비구조부재인 원통형 무근콘크리트 시험체에 대하여 검증되어 구조물 수준에서의 관입거동 평가 시 적용하기 어렵다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 대형 구조부재 수준에 대해 강체 미사일의 충돌실험을 수행하여 관입거동을 평가하고 이를 위한 계측기법이 마련되어야 한다. 이와 관련하여 대형 구조부재인 철근콘크리트 패널에 대하여 관입을 포함한 충격거동 평가를 위해 충돌실험을 수행한 표 2.3.1의 몇몇 선행연구사례가 있으나 충격거동의 평가를 위해 계측한 최종 관입깊이, 발사체의 충돌속도, 관통 후 속도 등 주요 응답에 대하여 계측방법 및 결과가 타당한지 검증여부를 확인할 수 없었다. 그리고 대형 구조부재에 대한 실험연구사례 중 일부 연구에서는 비강체 미사일에 대하여 충돌실험을 수행하였고, 이때 비강체 미사일은 파이프와 같이 얇은 두께를 갖도록 설계하여 좌굴에 의해 비강체 미사일에 대한 충격하중 특성을 모사하였다.
- 따라서 본 연구에서는 구조물을 모사한 대형 부재 수준에 대하여 충돌실험을 수행하여 충격거동을 평가하고 이로부터 응답 계측방법 및 결과가 타당한지 검증함으로써 신뢰할 수 있는 구조물 내충격 성능평가 실험기법을 제안한다. 이때, 충돌실험수행은 먼저 충격거동의 상세한 평가가 가능한 검증된 이론적 모델이 구축된 관입거동에 대하여 강체 미사일에 대한 예비실험을 수행하고, 이를 기반으로 본 실험에서는 관입거동 이외의 충격거동에 대해 평가하기 위하여 강체 미사일 및 비강체 미사일에 대하여 충돌실험을 수행한다.

나. 사회기반시설 내충격 성능평가를 위한 충돌실험기법 개발

(1) 실험기법개발 대상 충돌실험 장비

(가) Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB)

○ 서울대학교 극한성능실험센터 SHPB

- 서울대학교 극한성능실험센터의 SHPB(76 mm 직경)는 고압의 압축공기를 사용하여 최대 수백 s^{-1} 의 변형률 속도까지 비균질 재료의 충돌실험이 가능한 장비이다.
- 그림 3.8에서 볼 수 있듯이 SHPB는 고압의 공기를 저장하여 striker를 발사시킬 수 있는 공기 실린더, 고압의 공기로 발사되는 striker, striker의 충돌로 발생한 압축응력과 전달시키는 incident bar, 시편을 통과해 응력파가 전달되는 transmitted bar로 이루어져 있다. 장비의 제원은 표 3.4과 같다.



그림 3.7 서울대학교 극한성능실험센터 SHPB



그림 3.8 SHPB 구성도

표 3.4 극한성능실험센터 SHPB 장비 제원

		Incident & transmitted bars
치수	직경, mm	76.2
	길이, m	5.5
장비 특성	밀도, kg/m^3	7,850
	탄성계수, GPa	205
	항복강도, MPa	485
	푸아송비	0.29

○ SHPB 실험 원리 및 절차

- SHPB 실험은 그림 3.9과 같이 시편을 incident bar와 transmitted bar 사이에 거치시킨 후 고압의 공기를 실린더에 채우고 순간적으로 내보내며 striker를 발사시켜 재료의 충돌실험을 수행한다. 이때, 충돌속도는 레이저 간섭계를 통해 계측된다. 목표충돌속도에 맞는 압력의 공기를 실린더에 채운 후 발사시키면 striker가 incident bar에 충돌하여 압축응력파가 incident bar에 도입되고 incident bar와 시편의 경계면에서 임피던스의 차이로 인해 압축응력파가 시편에 전달된다. 시편에 전달된 압축응력파의 일부는 다시 incident bar에 인장응력파로 되돌아 오고 일부는 transmitted bar로 전달된다. 이 과정에서 시편에 급격하게 응력파가 전달되면 응력이 시편의 앞면에서 뒷면으로 전달되고 다시 반사되어 되돌아오는 시간이 상대적으로 커지게 되며 취성적인 재료특성에 따라 평형에 도달하기 전에 파괴가 되어 동적 비평형상태가 발생한다. 따라서 incident bar에 부과되는 응력파를 점진적으로 증가시켜 시편의 동적 평형상태를 만족시키기 위해 펄스쉐이퍼를 사용한다. 펄스쉐이퍼는 구리로 제작하며 그림 3.10와 같이 incident bar의 충돌면에 부착한다. 실험 과정에서 마찰효과를 최소화 시키기 위해 펄스쉐이퍼와 시편의 양 단면에 petroleum jelly를 도포하여 윤활한다. 실험 중 incident bar와 transmitted bar에 각각 변형률 게이지를 부착하여 응력파를 측정하고, 측정된 응력파 데이터를 바탕으로 시편의 동적 응력-변형률 관계를 얻어낸다.



그림 3.9 SHPB 시편 거치 형상

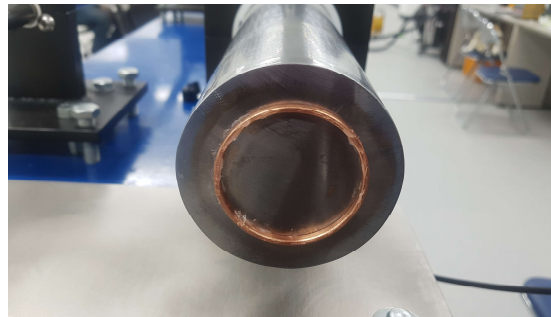
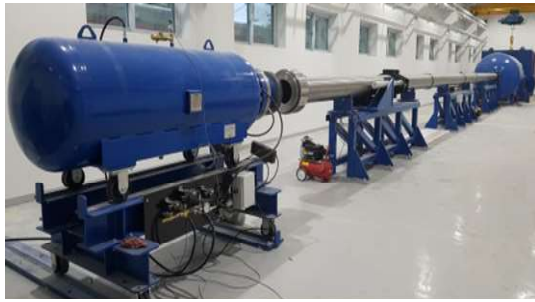


그림 3.10 펄스쉐이퍼 부착

(나) 중속가스건

○ 서울대학교 극한성능실험센터 중속가스건

- 서울대학교 극한성능실험센터의 중속가스건(254 mm single stage gas gun)은 고압의 압축공기를 추진제로 사용하여 10~100 kg의 발사체를 최대 500 m/s까지 가속시킬 수 있는 충돌실험 장비로 최대크기 2.1×2.1 m 크기의 벽체에 대해 충돌실험을 수행할 수 있다.
- 그림 3.12에서 볼 수 있듯이 중속가스건은 고압의 공기를 저장하는 가스 레저버, 발사체가 가속되는 런치튜브, 공기압의 해소 및 사뭇 분리가 일어나는 블라스트 탱크, 시험체가 거치되고 충돌과정이 일어나는 타겟탱크로 이루어져 있다.



(a)



(b)

그림 3.11 서울대학교 극한성능실험센터 중속가스건;

(a) 가스레저버 측; (b) 타겟탱크 측

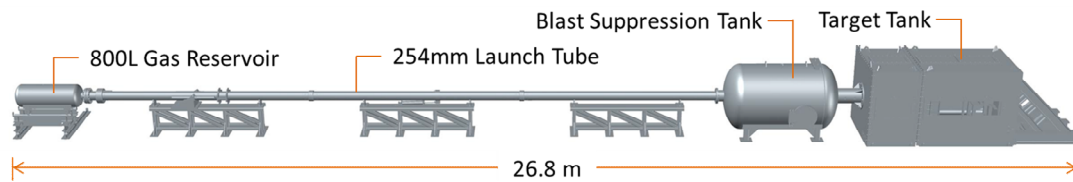


그림 3.12 중속가스건의 구성도

○ 중속가스건 충돌실험 원리 및 절차

- 발사체는 일반적으로 런치튜브의 내경 보다 작은 직경을 가지기 때문에 발사체를 직접적으로 가압하여 가속시킬 수는 없고 그림 3.13과 같이 사봇(Sabot)을 사용하게 된다. 사봇은 외경이 런치 튜브와 같고 내경이 발사체의 직경과 같아 압축공기의 압을 발사체에 전달하고 발사체를 직진성을 유지시켜 주는 기능의 소모품이다. 사봇-발사체 결합체는 그림 3.14와 같이 가스 레저버 쪽 런치튜브에 삽입이 된다. 이후 가스 레저버와 런치튜브 사이에는 그림 3.15와 같이 다이어프램(Diaphragm)이 거치된다. 다이어프램은 사봇-발사체 결합체를 목표속도까지 가속시키기 위해 요구되는 압력의 압축공기를 레저버에 안전하게 저장하는 역할을 하는 소모품이다. 가스 레저버 압축공기의 압력이 목표압력에 도달하게 되면 그림 3.16의 이니시에이터를 돌출시켜 다이어프램을 찢고 사봇-발사체 결합체를 가속시킨다.
- 사봇-발사체 결합체가 런치튜브를 빠져나와 블라스트 탱크로 진입하게 되면 압축공기는 순간적으로 매우 빠르게 단열팽창하며 대부분의 압력을 상실하게 된다. 이로 인해 사봇 발사체 결합체는 블라스트 탱크에서 등속으로 자유비행하게 된다.



그림 3.13 사봇-발사체 결합체

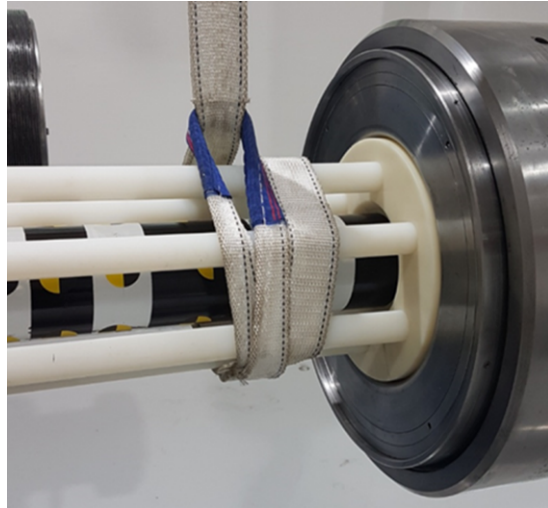


그림 3.14 사봇-발사체 결합체 삽입

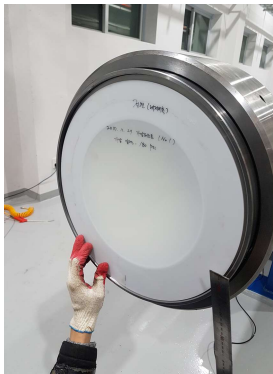


그림 3.15 다이어프램



그림 3.16 이니시에이터

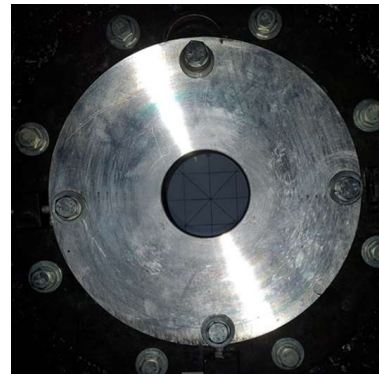


그림 3.17 사봇 분리기

- 블라스트 탱크의 타겟탱크 쪽 출구에는 사봇 분리기(Sabot separator)가 위치하고 있다. 사봇 분리기는 그림 3.17과 같이 내경이 사봇의 외경보다는 작고 발사체의 직경보다 큰 환형 부재이다. 사봇-발사체 결합체가 사봇 세퍼레이터를 지나며 사봇은 사봇 분리기에 충돌하여 멈추고 발사체는 지속적으로 비행하여 사봇이 발사체로부터 분리가 된다. 분리된 발사체는 그림 3.18의 드리프트 튜브를 지나게 되고 이곳에서 발사체의 충돌속도를 레이저 간섭계를 통해 측정한다. 타겟탱크에는 시험체가 그림 3.19와 같이 양쪽 시험체 고정 프레임 사이에 거치되며 시험체는 고정 프레임 내면에 부착된 40 mm 직경의 원형 지점에 의해 지지된다. 그리고 충돌과정에서 시험체의 리바운드가 발생하지 않도록 양쪽 시험체 고정 프레임은 많은 강봉에 의해 체결된다.

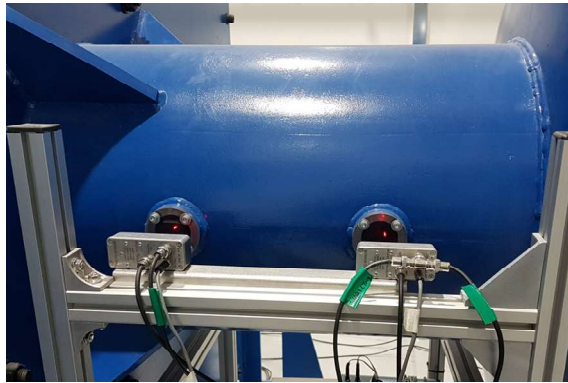


그림 3.18 드리프트 튜브 및 레이저 간섭계



그림 3.19 타겟탱크 내 시험체

(2) 연구과제 수행 이전 실험기법 개발을 위한 장비활용 현황

(가) SHPB를 활용한 재료 충돌실험

- 본 실험장비의 구축 이후로부터 본 연구과제 수행 이전까지는 본 장비성능의 평가를 위한 검수시험만이 수행되었다.
- 따라서 본 연구과제 수행을 통해 콘크리트 재료에 대한 동적특성평가 및 이를 위한 실험기법 연구를 최초로 수행하였다.

(나) 중속가스건을 활용한 부재 충돌실험

- 극한성능실험센터에서는 본 실험장비의 구축 직후부터 표 3.21과 같이 본 연구과제를 포함한 여러 연구기관들의 실험을 수행하면서 충돌실험기법 개발을 위한 노력을 본 연구과제 수행 이전부터 기울여 왔다.
- 본 장비 활용한 실험 초기에는 충돌속도 계측을 위한 레이저 간섭계의 계측오류발생으로 이를 수정, 개선하였으며, 충돌속도 계측에 대한 실험기법을 확립하기 위하여 레이저 간섭계 이외에도 Wire breaking system을 도입하고 및 고속카메라 촬영영상을 활용하여 여러 방법으로 충돌속도계측을 시도하였다.
- 그리고 충돌과정에서 시험체의 전반거동을 평가하기 위하여 시험체의 변위를 계측하기 위한 기기를 선정하여 변위 계측을 시도하였으며, 시험체 가속도계를 부착하여 시험체의 관성거동을 평가하고자 하였다.
- 또한, 이전 충돌실험 수행 도중 다이아프램의 결함으로 목표속도 도달 전에 다이아프램이 파열되어 발사체가 조기에 충돌함에 따라 실험이 실패한 사례를 통해 이러한 문제점을 개선하기 위하여 발사체 삽입 후 실험수행 전 다이아프램을 필요압력보다 조금 높게 사전가압을 수행하여 다이아프램의 조기파열 문제를 해결하였다.
- 하지만, 본 연구과제 수행 이전까지 충돌실험을 수행해오면서 충격거동의 계측기법에 대하여 미처 생각하지 못했던 다음과 같은 몇몇 사항들을 발견하였다. 먼저, 시험체의 전반거동 평가에 활용될 수 있는 시험체 반력의 계측을 위한 기법과 그의

타당성 검증연구를 시도해보지 못하였다는 점이다. 그리고 무엇보다도 충격거동 파악을 위한 필수 계측장비인 고속카메라를 충격거동 평가에 효율적으로 활용하지 못하였다는 점이다. 이전까지의 실험에서는 별도의 계측기법 없이 단순히 충돌장면만을 촬영하였기 때문에 고속카메라로 계측한 충돌속도가 실제 속도를 잘 예측하지 못하였으며 촬영 영상은 이 이외의 다른 용도로 활용되지 못하였다.

- 따라서 본 연구과제의 지원을 받아 계측기법을 고안하고, 충돌실험 수행을 통해 기법의 타당성을 검증하여 계측기법에 대한 기존 미비점들을 개선하고자 하였다.

(3) 충돌실험기법 개발

(가) 재료 충돌실험기법 개발

○ 재료 충돌실험기법 개요

- 구조물의 내충격 성능평가를 위해서는 대표적 구조재료인 콘크리트의 동적특성이 실험을 통해 정확히 평가 되어야 하며 재료 실험결과의 신뢰도 확보를 위해서는 정적압축강도실험 시편 제작 표준안인 ASTM C192(Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens)와 같이 통일된 실험방법의 개발이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 신뢰도 있는 콘크리트의 동적강도 평가를 위한 콘크리트 시편의 제작기법을 충돌실험기법으로 개발하였다.

○ 시편 제작기법

- 콘크리트의 정적압축강도실험을 위한 공시체 제작 기준인 ASTM C192에서는 정적강도에 대한 굽은골재 최대치수의 영향을 고려하여 시편 직경이 굽은골재 최대치수의 최소 3배가 되도록 시편의 제작기법을 제시하고 있다. 따라서 콘크리트의 동적강도를 평가하기 위한 재료 충돌실험에 대해서도 시편 크기와 굽은골재 최대치수의 관계가 실험결과에 미치는 영향을 확인하기 위해 모르타르와 굽은골재 최대치수 13, 19, 그리고 25 mm를 사용한 콘크리트를 제작하였다. 시편은 ASTM C192을 따라 직경 75 mm와 직경 50 mm의 실린더 공시체로 제작하였다(D75 × H150, D50 × H100). ASTM C192에서 제시한 조건을 만족시키기 위해 시편의 길이는 직경과 동일하게 사용하였다.
- 공시체 제작 후 ASTM C192에 따라 양생하였으며 양생 후 그림 3.20의 고강도 건설재료 정밀 절단기를 사용하여 양 단면을 잘라내 가운데 부분을 채취하였다(D75 × H75, D50 × H50). 이때 시편 절단 후 수직도는 ASTM C39에 명시된 공차인 0.5° 이내에 들어오도록 제작하였다.



그림 3.20 고강도 건설재료 정밀 절단기



그림 3.21 D75×H75 mm 시편

(나) 부재 충돌실험기법 개발

○ 부재 충돌실험기법 개요

- 구조물의 내충격 성능평가 시 시험체의 종류, 발사체의 형상, 충돌속도 등의 실험조건은 실험자가 모사하고자 하는 구조물 및 충돌상황에 따라 결정된다. 이에 대하여 충돌실험은 실험자가 목표한대로 성공적으로 수행되어야 하며 이를 위해서는 발사체의 충돌속도가 목표속도만큼 적절히 확보되어야하고 충돌속도, 관입깊이 등 주요 충격거동이 정확히 계측되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 성공적인 충돌실험수행을 위한 장비 악세서리 및 소모품의 설계방법과 내충격 성능을 평가할 수 있는 계측기법을 개발하였다.

○ 충돌실험 장비 소모품 설계기법

㉔ 다이어프램(Diaphragm)

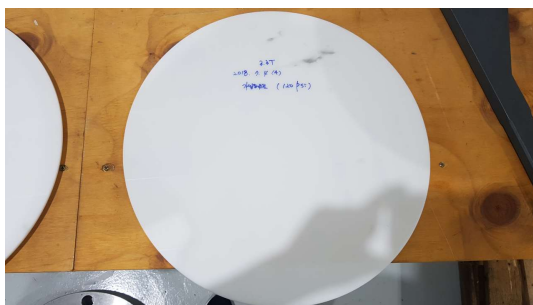
- 다이어프램은 압축공기가 목표압력에 도달하도록 가스 레저버의 압축공기가 런치튜브로 흘러들어가는 것을 방지하는 역할을 한다. 만약 다이어프램이 두께가 너무 얇아 파열강도가 낮다면 목표압력에 도달하기 전에 다이어프램이 파열되고 조기발사가 발생

할 수 있으며, 반대로 다이아프램의 파열강도가 너무 높다면 파열에 의하여 발생한 구멍의 내경이 런치튜브의 내정보다 작아 발사체가 목표속도에 도달하지 못하여 실험이 실패할 수 있다. 따라서 다이아프램 성능을 확보하기 위해서는 발사압력에 따른 다이아프램의 적절한 두께를 결정해야 한다.

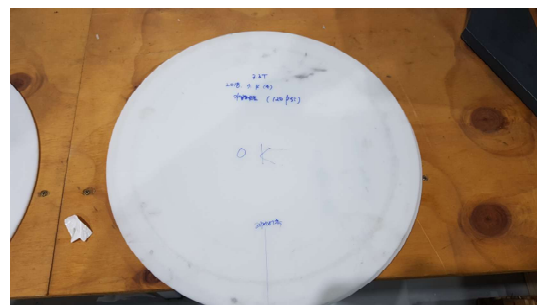
- 본 연구에서 다이아프램의 재료는 sheet 형태로 원자재가 생산이 되고 기계가공이 용이한 폴리아세탈 코폴리머(Poly oxy methylene copolymer, POM-C)를 사용하였다. 해당 재료를 대상으로 3.3T 및 5.3T의 다이아프램을 선반가공하여 제작을 하였으며 해당 다이아프램에 대한 가압실험을 수행하였다.
- 표 3.5은 가압실험 결과 및 충돌실험 수행 후 다이아프램의 파열 압력을 나타내며 그림 3.22 및 3.23는 가압실험 전후 3.3T 다이아프램의 모습과 충돌실험 후 파열된 3.3T 다이아프램 모습을 보여준다. 두 다이아프램 모두 발사압력보다 높은 압력에서 파열이 발생하지 않았으며 충돌실험 후 파열내경이 런치튜브의 내경과 같은 250 mm로 관측되었다. 이에 따라 해당 발사압력에 대해서 다이아프램이 적합하게 설계되었음을 확인하였다.

표 3.5 다이아프램 가압실험결과 및 충돌 실험 후 파열내경

두께, mm	가압압력, psi	가압실험 결과	충돌실험 발사압력, psi	충돌실험 후 파열내경, mm
3.3	120	미파열	103	250
5.3	220	미파열	205	250



(a)



(b)

그림 3.22 3.3T 다이아프램 가압실험; (a) 실험 전; (b) 실험 후



그림 3.23 충돌실험 후 3.3T 다이어프램

㉠ 사봇(Sabot)

- 사봇은 발사체 후면으로부터 발사체 전면으로의 추진공기의 누출을 막아 발사체를 적절히 가압시키고 발사체의 직진성을 유지시키는 역할을 한다. 이에 따라 사봇 설계 시 고려해야 할 사항은 다음 3가지가 존재한다.
 - 사봇 외경의 치수가 적절하여 추진가스의 누출이나 과도한 마찰 등의 문제를 방지하여야 한다.
 - 발사체 직진성을 유지하기 위해 사봇이 발사체를 감싸는 길이가 적정해야 한다.
 - 추진압력에 보다 사봇의 강도가 높아 사봇이 구조적으로 안전해야 한다.
- 먼저 사봇의 외경이 런치튜브의 내경인 254 mm보다 크게 제작될 경우 사봇과 런치튜브 간의 과도한 마찰로 인해 목표속도를 보장할 수 없다. 따라서 사봇은 254 mm 이내로 제작해야 하며 사봇과 런치튜브 사이의 공간은 O-ring을 사봇 베이스에 삽입하여 막아주는 것이 바람직하다. 또한 기온에 따라 사봇이 열팽창 혹은 열수축을 하기 때문에 제작 시의 기온과 사봇을 보관하는 장소의 기온을 고려하여 사봇의 치수를 결정하여야 한다. 실험 수행 시 적절한 사봇의 외경은 253.92 mm이다.
- 또한 발사체의 직진성을 유지하기 위해서는 발사체의 내민길이가 사봇 결합 후 전체길이의 약 1/3이 되어야 한다. 만약 이보다 내민길이가 길어지면 발사체에 처짐이 생기고 충돌 시 발사체가 기울어질 위험이 증가하며, 반대로 이보다 내민길이가 짧을 경우 사봇 분리 시 교란이 크게 발생할 수 있다. 또한 발사체가 사봇에 삽입되는 깊이는 8~10 mm로 제작하여 사봇-발사체 결합체의 가속 과정에서 발사체가 사봇으로부터 이탈하는 것을 방지해야 한다.

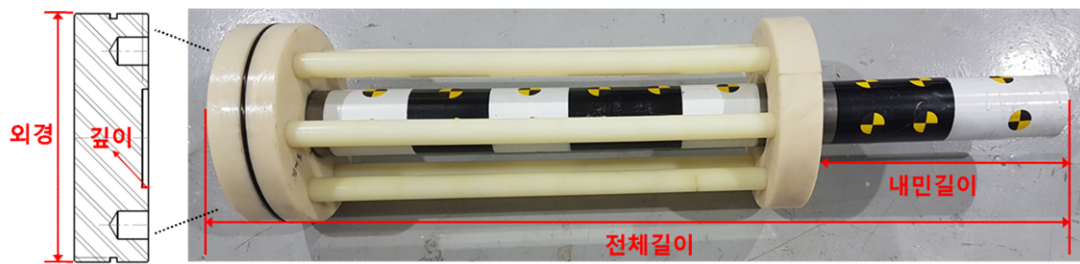


그림 3.24 사봇-발사체 결합체

- 그림 3.25는 허용응력설계법에 의한 사봇의 설계절차를 보여준다. 먼저 사봇의 외경은 런치튜브의 내경으로부터, 사봇의 내경 및 길이는 발사체의 형상으로부터 결정할 수 있다. 이를 통해 사봇의 형상 및 재질을 결정하게 되면 사봇의 예상 질량을 얻을 수 있다. 그리고 사봇-발사체 결합체의 질량과 목표 충돌속도로부터 목표 발사압력을 설정할 수 있다. 목표 발사압력이 사봇 베이스에 가하는 힘을 발사체의 단면적으로 나누어 줌으로써 사봇에 발생하는 응력을 평가할 수 있으며 해당 응력이 사봇 재료의 강도보다 낮은지 체크한다. 만약 해당 응력이 사봇 재료의 강도보다 높을 경우 사봇의 재료를 수정하거나 사봇 베이스를 보강하여 재설계를 수행한다. 이 과정을 통해 사봇의 재료 및 형상을 결정할 수 있다. 본 연구에서는 MC Nylon을 사봇의 재료로 선정하여 사봇 설계를 수행하였다.

Sabot design procedure

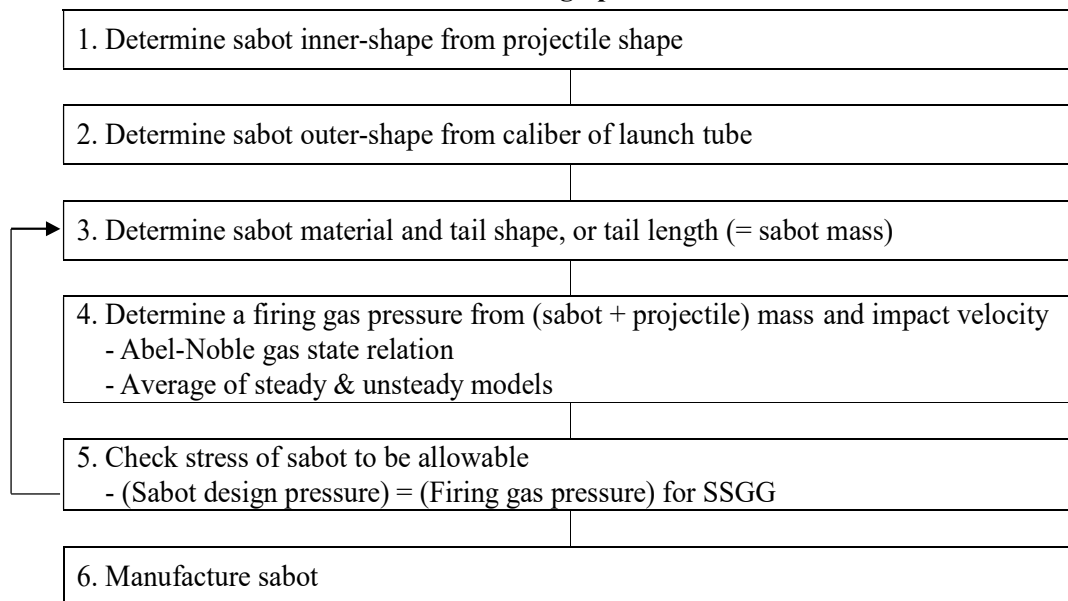


그림 3.25 사봇의 설계절차

㉔ 사봇 분리기(Sabot separator)

- 사봇 분리기의 내경은 발사체의 직경을 고려하여 설계되어야만 한다. 사봇 분리기의 내경이 발사체의 직경과 유사하면 사봇 분리 시 발사체가 사봇 분리기에 충돌할 위험이 있다. 반대로 사봇 분리기의 내경이 발사체의 직경에 비해 매우 크다면 사봇 분리 시 사봇에 불균일한 충격력이 발생하게 되고 이로 인해 발사체가 기울어질 위험이 있다.

다. 또한 넓은 내경으로 인해 많은 양의 사봇 파편이 타겟탱크 내로 유입이 되고 초고속카메라를 이용한 계측이 어려울 수 있다. 그림 3.26는 190 mm 내경의 사봇 분리기로 100 mm 직경의 발사체에 대해 사봇을 분리한 경우의 타겟탱크 고속 카메라 촬영 영상이고 그림 3.27은 동일 직경 발사체에 대해 130 mm의 사봇 분리기를 적용한 충돌실험 영상이다. 190 mm 내경 사봇 분리기를 적용한 경우보다 130 mm 내경 사봇 분리기를 사용한 경우가 발사체의 직진성 및 사봇 파편양에 대해 개선된 것을 알 수 있다. 따라서 사봇 분리기의 내경은 발사체 직경의 보다 약 30 mm 정도 크게 만드는 것이 적절하다.

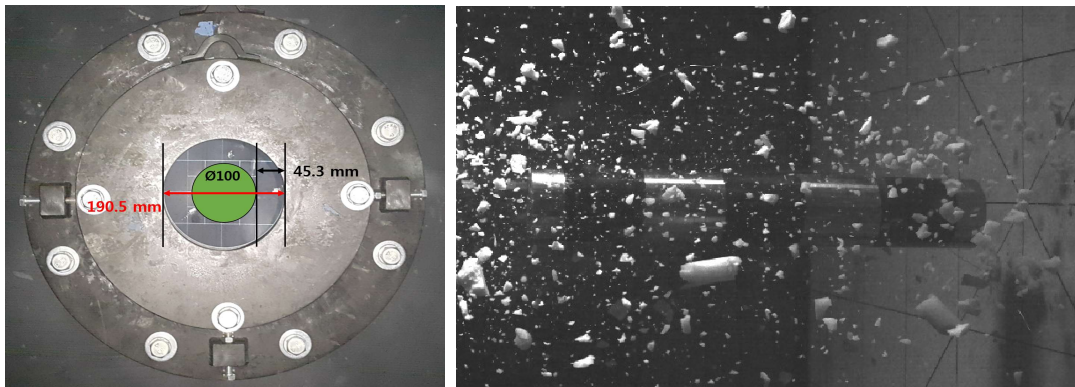


그림 3.26 190 mm 내경 사봇 분리기 적용한 충돌실험

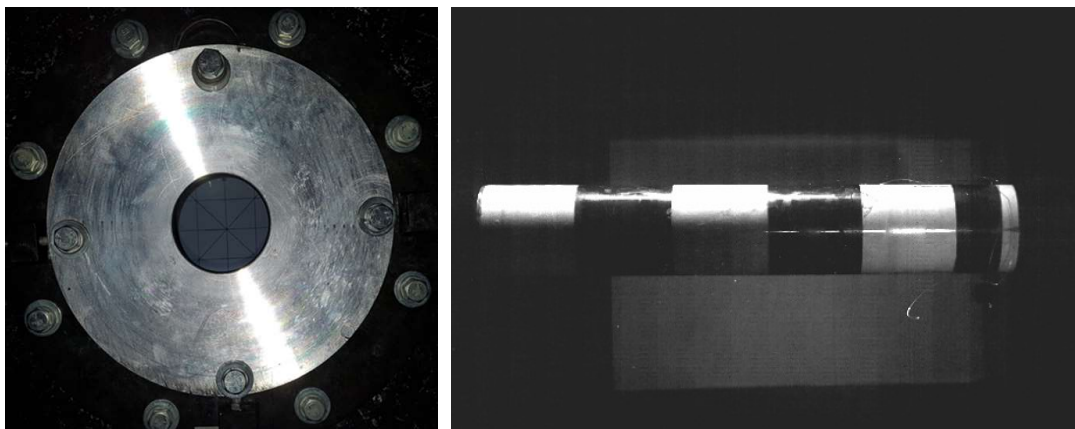


그림 3.27 130 mm 내경 사봇 분리기 적용한 충돌실험

○ 응답 계측기법

㉓ 고속카메라 촬영기법

- 본 연구에서 활용하는 중속가스건 장비는 발사체 충돌속도를 최대 500 m/s까지 실험 가능하며 충돌 이후 발사체는 일반적으로 5 msec의 매우 짧은 시간동안에만 구조물에 영향을 미친다. 따라서 충돌실험 시 발사체의 거동은 육안이나 일반적인 촬영장비로는 자세히 계측이 불가능하다. 따라서 충격거동을 정확히 평가하기 위해서는 발사체의 거동을 자세히 계측하기 위해 고속카메라의 활용이 요구된다.
- 고속카메라는 매우 짧은시간동안 많은 사진을 촬영할 수 있기 때문에 충돌 직전부터

충돌 도중의 발사체의 움직임, 발사체 충돌 과정에서 보이는 타겟의 파괴모드 등 충돌 과정을 자세히 확인할 수 있는 장점을 가지고 있다.

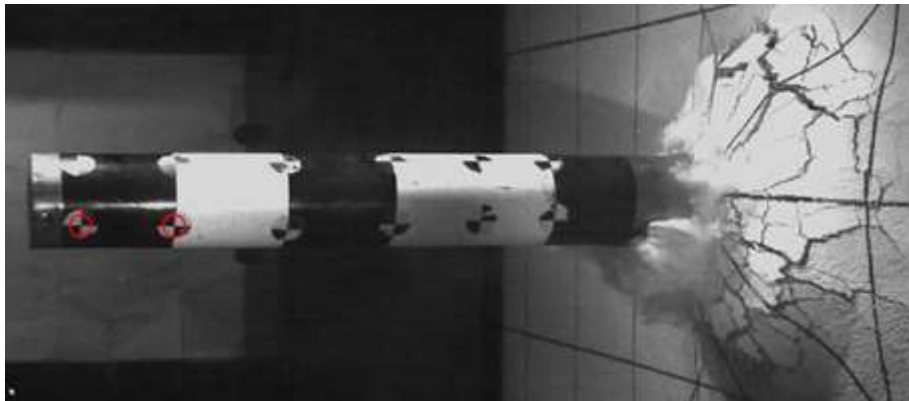
- 또한 고속카메라는 단순한 충돌과정의 촬영뿐만 아니라 발사체의 변위에 대한 시간이력을 계측가능하도록 함으로써 관입거동을 평가할 수 있는 발사체의 관입깊이에 대한 시간이력 응답을 계측할 수 있다. 그리고 발사체 변위의 시간이력은 수치미분을 통해 발사체 속도를 계산할 수 있어 충돌실험 수행 시 발사체의 충돌속도 평가에 활용할 수 있다.
- 강제 발사체 충돌실험의 경우, 앞서 국부거동의 이론적 선행연구에서 설명한 바와 같이 강제 발사체의 관입거동은 식 3.5의 충격하중을 통해 평가할 수가 있으며 이는 강제 발사체의 시간에 따른 가속도에 발사체 질량을 곱함으로써 계측할 수 있다. 따라서 관입과정에서의 충격거동은 고속카메라를 통해 계측한 강제 발사체 변위의 시간이력을 활용하여 이계미분값을 계산함으로써 평가할 수 있다. 하지만 수치미분을 통해 유의미한 가속도 응답을 얻으려면 계측한 발사체의 변위가 정확해야하고 Sampling rate가 충분히 커야한다. 현재 상용화된 고속카메라 중 고성능의 카메라는 노출시간을 고려하여 양호한 촬영품질을 얻고자 할 때 1024×512 의 해상도에 대하여 40,000fps 이내의 속도로 촬영이 가능하다. 촬영속도는 해상도를 낮출수록 증가시킬 수 있으나 해상도를 낮출 경우, 촬영사진의 분해능이 감소함에 따라 계측한 발사체 변위의 오차가 증가하게 된다. 따라서 촬영사진의 분해능을 최대한 확보하기 위하여 충돌실험 수행 시 해상도는 1024×512 의 최대 해상도로 설정하여 발사체 변위의 시간이력을 계측한다. 하지만 40,000fps로 촬영하게 되면 계측데이터 간의 시간간격은 0.025 msec로 일반적인 응답길이 5 msec에 대하여 200개의 밖에 되지 않아 이계미분을 수행하기에 적합하지 못하다. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위하여 식 3.12을 이용한 이계미분에 대한 데이터 Smoothing기법을 통해 이계수치미분을 수행하여 발사체의 가속도 응답을 계산한다. 식 3.12에서 x 는 발사체 변위, t 는 시간이다.

$$x_i'' = \frac{4x_{i-4} + 4x_{i-3} + x_{i-2} - 4x_{i-1} - 10x_i - 4x_{i+1} + x_{i+2} + 4x_{i+3} + 4x_{i+4}}{25(t_{i+1} - t_{i-1})^2} \quad (3.12)$$

- 충돌과정에서의 발사체 변위 계측 시, 변위를 정확히 계측하기 위해서는 카메라의 촬영각도에 따른 길이의 왜곡을 막기 위해 고속카메라를 시험체 표면에 수직으로 설치하는 것이 일반적이다. 하지만 수직으로 설치할 경우 그림 3.19의 시험체 앞쪽 고정 프레임에 의해 시험체 표면이 가려져 충돌시점을 정확히 파악할 수 없어 계측에 어려움이 발생한다. 따라서 발사체 충돌 순간 및 관입되는 상황을 명확히 촬영하기 위해 카메라를 시험체 표면 앞쪽에 사선으로 배치하고, 이로 인한 길이의 왜곡을 방지하기 위해 그림 3.28과 같이 충돌부에 눈금자를 수직으로 배치하여 발사체 길이방향 좌표를 설정하고 발사체에 표시한 퀴드로 마크를 추적하여 좌표에 대응되는 발사체 변위를 각 프레임마다 계측하여 발사체 변위의 시간이력을 계측한다.



(a)



(b)

그림 3.28 발사체 변위 시간이력 측정; (a) 눈금자 촬영; (b) 발사체 변위추적

㉠ 발사체 충돌속도 계측기법

- 발사체의 충돌속도 계측을 위해서 아래와 같은 4가지 방법을 적용하였다.
 - 레이저 간섭계의 TTL 신호를 통한 계측
 - 레이저 간섭계의 아날로그 신호를 통한 계측
 - Wire breaking system을 이용한 계측
 - 고속카메라 촬영 영상을 통한 계측
- 레이저 간섭계는 그림 3.29과 같이 레이저 발생장치 및 레이저 리시버로 구성되어 있다. 레이저 발생장치에서 나오는 레이저는 레이저 투과창을 통해 레이저 리시버로 전달되며 레이저 리시버가 수신하게 되면 레이저 리시버에는 1.8 V의 전압신호가 발생하며 계속해서 유지된다. 발사체가 드리프트 튜브를 통과하면서 레이저를 가리게 되면, 레이저 리시버에서는 레이저 신호가 전달되지 못함에 따라 1.8 V로 유지되던 전압이 0으로 일정 전압이하로 감소함에 따라 레이저 리시버에서는 이를 감지하여 5 V의 TTL 신호를 발생시킨다.
- 따라서 신호타이머에 측정된 숫자는 각 레이저 리시버에서 TTL신호가 발생한 시간간격을 리시버 사이의 거리(300 mm)에 대하여 나누어 주면 발사체의 충돌속도를 계측할 수 있다. 이 시간간격은 그림 3.30와 같이 TTL 신호 타이머를 통해 확인할 수 있다. 또

한 TTL 신호는 아날로그 신호의 급격한 감소에 따라 발생하는 신호이므로 아날로그 신호가 급격하게 감소하는 순간의 시간간격을 계측하여 동일한 방법으로 충돌시간을 계측할 수 있다.

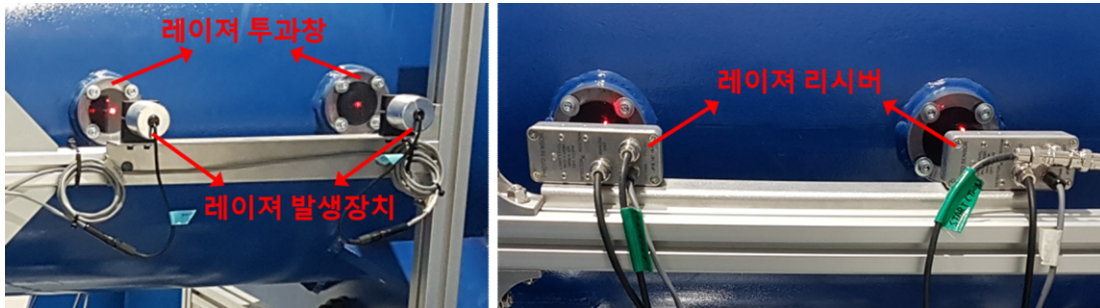


그림 3.29 레이저 간섭계



그림 3.30 TTL 신호 타이머

- 충돌속도 계측을 위한 wire breaking system은 그림 3.31과 같이 드리프트 튜브의 출구에 2가닥의 와이어를 설치한 후 각 wire에 전압을 걸어주어 닫힌 회로를 구성하여 준다. 그리고 발사체가 wire breaking system을 지나가면서 와이어를 끊게 되면 와이어에 흐르는 전류는 순간 0 A로 떨어지게 되는 원리를 통해 각 와이어가 끊어져 전류가 0 A로 떨어지는 시간간격을 계측하여 와이어 간 거리(142 mm)에 대해 나누어 주면 발사체의 충돌속도를 얻어 낼 수 있다.



그림 3.31 Wire breaking system

㉔ 시험체 변위 계측기법

- 시험체의 변위는 그림 3.32과 같은 LVP(Linear Variable Potentiometer)를 통해 계측한다. LVP는 가변저항을 통해 변위를 계측하며 약 300 Hz정도의 주파수 응답을 가지고 있어 충격거동과 같이 시험체의 순간적인 변형을 계측하는데 유효하다. LVP는 일반적인 LVDT와 같은 내장 스프링이 없어 계측침이 복원되지 않기 때문에, 그림 3.33와 같이 시험체 변위계측 부위에 베어링지그를 부착하여 LVP를 고정하여야 한다. LVP 부착 지그에 베어링을 활용한 이유는 시험체의 변위가 발생하면서 부착된 LVP 지그 역시 벽체 표면을 따라 회전하게 되는데, 이로 인한 LVP 계측침이 휘는 것을 방지하기 위함이다. 그리고 LVP의 몸통은 그림 3.34과 같이 시험체 고정지그 및 지지기둥으로부터 독립된 LVP 고정 프레임에 설치하여 고정한다.
- 계측한 데이터의 후처리는 노이즈가 심할 경우 Ideal filter를 사용하여 데이터 필터링을 수행한다. 이때, Cut off frequency는 LVP의 최대 주파수 응답인 300 Hz 이내에서 진폭이 10% 이내로 크게 감소하지 않도록 설정한다. 일반적으로 본 실험장비를 통한 충돌실험 수행 시 100 Hz의 Cut off frequency가 권장된다.



그림 3.32 LVP(Linear Variable Potentiometer)



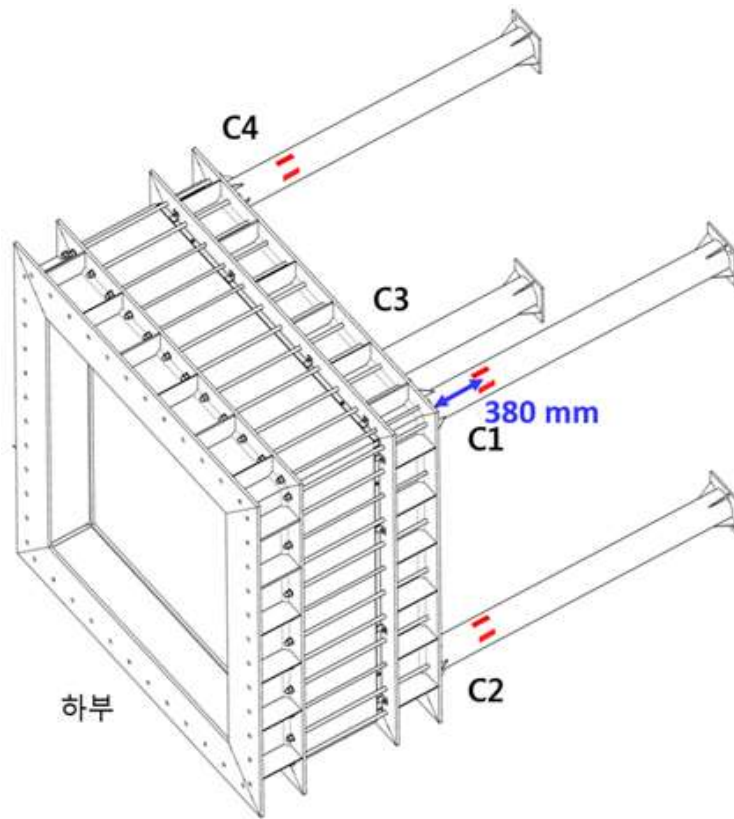
그림 3.33 LVP부착용 베어링 지그



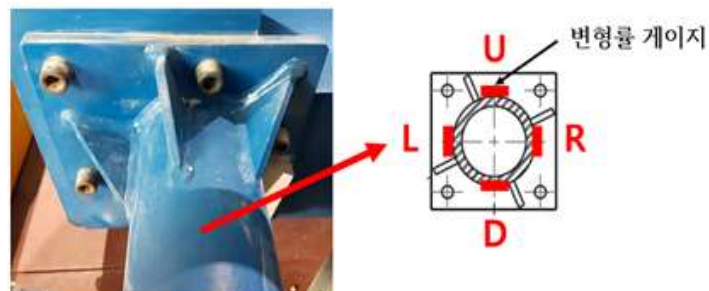
그림 3.34 LVP고정 프레임

㉔ 반력 계측기법

- 발사체의 충돌에 따라 발생하는 시험체의 거동을 평가하기 위하여 LVP를 이용한 시험체 변위의 계측 이외에도 반력 계측방법을 제안하였다. 반력은 그림 3.35와 같이 시험체를 지지하고 있는 4개의 지지 파이프에 각각 4개의 변형률 게이지를 서로 대칭시켜 부착하여 계측한다. 백파이프는 소성변형이 발생하지 않도록 설계되어 탄성구간 내에서만 변형이 발생하므로 계측한 변형률을 평균하고 탄성계수와 단면적을 곱하여 각 지지 파이프에 작용하는 힘을 계산하고 모두 합하여 4개 지지 파이프에 대한 반력을 계산한다.
- 계측한 게이지의 변형률 데이터의 후처리는 노이즈가 심할 경우 Ideal filter를 사용하여 데이터 필터링을 수행한다. 이때, Cut off frequency는 진폭이 10% 이내로 크게 감소하지 않도록 설정하며 일반적으로 10 kHz의 Cut off frequency가 권장된다.



(a)



(b)

그림 3.35 지지 파이프 변형률 게이지 부착; (a) 지지 파이프 도면; (b) 게이지 위치

○ 비강체 미사일 설계기법

- 대표적 비강체 미사일 충돌실험연구사례인 Sugano et al. (2003)의 연구에서는 항공기의 본체나 엔진과 같이 충돌과정에서 큰 변형이 발생하는 충돌체의 모사를 얇은 두께를 갖는 강판 형태로 비강체 미사일을 설계하여 충돌 시 좌굴에 의해 발사체에 대변형이 발생하도록 하였다.
- 하지만 이러한 방식의 비강체 미사일 설계는 큰 규모의 실험을 수행하기 위하여 발사체의 질량을 높게 설정할수록 발사체의 길이가 지나치게 길어져 충돌과정에서 발사체가 전도되는 등 여러 불안정한 요소에 의해 실험수행이 어렵다. Sugano et al. (2003)의 연구에서 설계한 그림 3.6 (b)의 비강체 미사일은 약 3.6 kg의 매우 낮은 질량이므로 발사체 길이가 317 mm에 불과하나, 가령 대규모 실험을 위해 발사체의 질량을 중속가스건의 최대성능인 100 kg으로 설정할 시 5 mm 두께, 강재재질에 대하여 발사체의 길이는 약 8 m에 육박하게 된다.
- 따라서 비강체 미사일에 대한 대규모 충돌실험 수행 시 얇은 두께로 인해 발사체가 지나치게 커지는 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 형상을 통해 발사체의 변형을 유도하는 것이 아닌 낮은 항복계수와 탄성계수를 갖는 재질로 발사체의 변형을 유도하는 방법으로 비강체 미사일을 설계하였다. 이때 재질은 탄성계수와 인장강도가 일반 강재의 절반수준인 타프피치동(C1100-BD-O)으로 제작하였다.
- 설계한 비강체 발사체에 대한 충격거동평가는 Sugano et al. (2003)의 연구방법과 동일하게 같은 직경 및 질량의 강체 미사일에 대한 충돌실험결과와 비교하여 발사체 재질을 변경함으로써 기존 연구에서 수행한 비강체 미사일의 충격거동이 잘 나타나는지 평가하였다.

(4) 충돌실험기법 검증실험

(가) 검증실험 개요

○ 재료 충돌실험기법

- 본 연구에서는 개발한 동적재료 실험용 시편 제작기법을 검증하기 위해 SHPB 실험을 수행하였다. ASTM C192에서 명시한 것과 같이 시편의 크기와 굽은골재 최대치수의 관계를 확인하기 위해 같은 크기의 시편에 대해 여러 최대치수의 굽은골재를 사용하여 실험을 수행하였다.

○ 부재 충돌실험기법

- 본 연구에서는 개발한 부재 충돌실험기법을 검증하기 위해 충돌실험을 수행하였다. 시험체 및 발사체는 다양한 충돌상황 중 가장 위험성이 높은 사건인 원전 구조물에 대한 항공기 충돌을 상정하여 설계하였다.
- 예비실험에서는 국부거동의 가장 기초거동인 관입거동 평가를 위한 실험을 수행하여 제안된 실험기법을 수행하였다. 이후 본 실험에서는 개발된 실험기법이 관입거동 뿐 아니라 다양한 충돌상황에서도 유효한지를 검증하기 위해 다양한 충돌속도 및 발사체

종류를 적용하여 내충격 성능평가 실험을 수행하였다.

(나) 재료 충돌실험

○ 시편 제작

- 본 검증실험에서는 굽은골재 최대치수(G_{max})와 시편 크기의 관계를 확인하기 위해 모르타르와 굽은골재 최대치수 13, 19, 그리고 25 mm를 사용한 콘크리트를 제작하였다. 콘크리트는 동일한 배합비를 사용하고 굽은골재 최대치수만 치환하여 ASTM C192/C192M을 따라 직경 75 mm와 직경 50 mm의 실린더 공시체를 제작하였다(D75 × H150, D50 × H100). 또한, 모르타르는 콘크리트와 동일한 배합비에서 굽은골재만 제외하여 제작하였다.
- 공시체 제작 후 ASTM C192에 따라 양생하였으며 양생 후 시편의 직경과 길이비가 1이 되도록 고강도 건설재료 정밀 절단기를 사용하여 양 단면을 잘라내 가운데 부분을 채취하였다. 시편 절단 후 수직도는 최대 0.34°로 ASTM C39에 명시한 공차인 0.5°를 만족하도록 제작하였다.



그림 3.36 굽은골재 최대치수 13 mm 실험

○ 충돌속도 선정

- 충돌속도는 항공기 충돌을 모사한 30~200 /s의 변형률 속도에서의 SHPB 실험 데이터를 얻기 위해 10~20 m/s로 결정하였다.

○ 펄스웨이퍼 제작

- 급격하게 증가하며 부과되는 압축응력파에 의해 발생하는 시편의 동적 비평형상태를 해결하기 위해 그림 3.36과 같이 구리 C10200으로 환형 펄스웨이퍼를 제작하였다. 펄스웨이퍼의 크기는 유한요소해석을 통해 목표충돌속도에서 시편의 동적 평형을 만족시키는 크기로 결정하였다.



그림 3.37 C10200 환형 펄스웨이퍼

표 3.6 충돌속도에 따른 펄스웨이퍼 크기

펄스웨이퍼 크기, mm (외경)×(내경)×(두께)	충돌속도, m/s
52 × 48 × 3	10, 15
51 × 47 × 3	18, 20

○ 재료 충돌실험 변수 요약

- 재료 충돌실험기법 검증실험 변수는 표 3.7와 같다. 시편 크기와 굽은골재 최대치수의 관계를 확인하기 위해 모르타르, 굽은골재 최대치수 13, 19, 그리고 25 mm 인 콘크리트에 대해 실험을 수행하였다. 시편 크기는 직경-길이비를 1로 하여 D75 × H75 mm, D50 × H50 mm 두 가지를 사용하였다. 정적압축강도실험은 모르타르와 세 가지 골재를 사용한 콘크리트에 대해 표준공시체 D150 × H300으로 수행하였으며 SHPB 실험 시편 크기에 대해 각각 평균압축강도는 66.4 MPa과 53.2 MPa이다. 충돌속도는 30~200 /s 의 변형률 속도에서의 데이터를 얻기 위해 10, 15, 18(D50 시편), 그리고 20(D75 시편) m/s 로 설정하였다. 그리고 목표충돌속도에서 시편이 충분히 파괴에 도달할 수 있도록 striker 길이를 설정하였다. 또한, 시편 크기와 굽은골재 최대치수의 관계가 실험결과의 분산성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 같은 실험 조건에 대해 총 10번씩 반복실험을 수행하였다.

표 3.7 재료 충돌실험기법 검증실험 변수

Gmax, mm	Strength, MPa	Striker 길이, mm	충돌속도, m/s
모르타르, 13, 19, 25	66.4(D75)	600	10
	53.2(D50)	300	15, 18(D50), 20(D75)

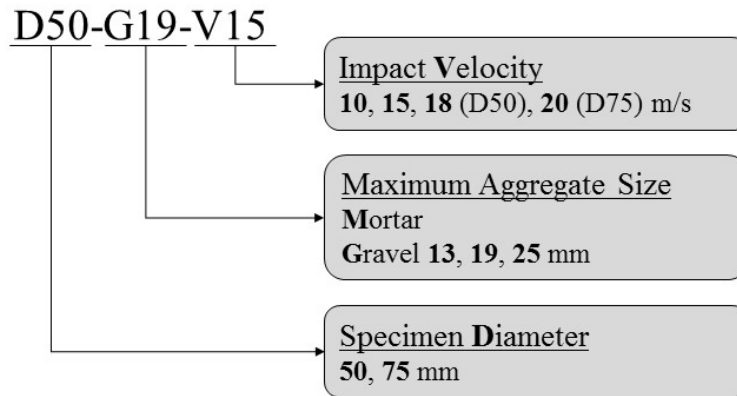


그림 3.38 실험 케이스

○ 실험결과와 유효성 검증

- 콘크리트 SHPB 실험을 통해 동적재료특성을 얻기 위해서는 시편 양 단면의 응력이 같은 동적평형상태를 만족해야 한다. 이에 따라, 실험 수행 후 동적 응력-변형률 관계로부터 Flores-Johnson and Li (2017)에서 제시한 방법을 통해 동적평형 여부를 확인하였다. 동적비평형상태의 실험결과는 분석에서 제외하였다. 분석에 사용된 유효한 실험결과 수는 표 3.8과 같다.

표 3.8 동적평형 실험데이터 개수

D75					D50				
	M	G13	G19	G25		M	G13	G19	G25
V10	10	10	10	9	V10	10	10	10	10
V15	9	10	9	7	V15	10	9	10	10
V20	10	9	8	10	V18	4	9	6	7

○ 실험 재현성 검증

- 굵은골재와 시편 크기의 관계가 실험결과의 분산성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 같은조건 하에서 반복실험을 수행하였기 때문에 실험의 재현성을 시편 길이의 영향과 압축응력파의 영향, 총 두 가지 측면으로 검증하였다.

㉠ 시편 길이의 영향

- 시편 그룹 내에서의 시편 길이의 상대적인 차이가 크면 변형률 속도가 달라진다. 각 시편 그룹에서 시편 길이의 상대적인 차이를 확인하기 위해 대해 시편 길이의 변동계수(coefficient of variation, C.O.V.)를 나타낸 그래프는 아래의 그림 3.39와 같다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 시편 그룹 내에서의 시편 길이의 C.O.V.는 최대 약 1%로 매우 작은 값을 보인다. 따라서 시편 길이의 상대적인 차이는 실험의 재현성에 큰 영향을 주지 않았다고 판단하였다.

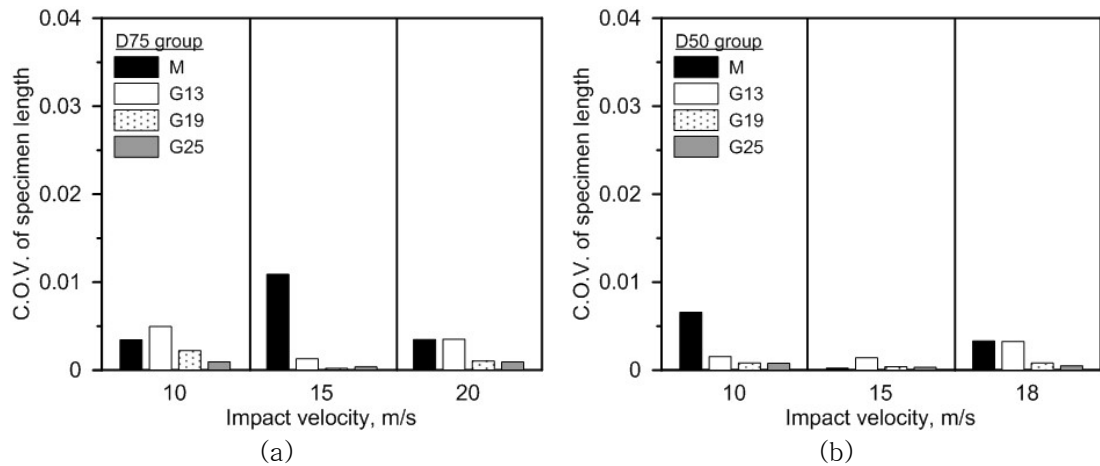


그림 3.39 시편 길이의 변동계수; (a) D75 실험 케이스; (b) D50 실험 케이스

㉠ 압축응력과의 영향

- 시편에 부과되는 압축응력과의 최대값이 달라지면 변형률 속도 및 동적증가계수가 달라지게 된다. 각 시편 그룹에 대해 압축응력과 최대값의 변동계수를 나타낸 그래프는 아래의 그림 3.40과 같다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 시편 그룹 내에서의 압축응력과 최대값의 상대적인 차이는 최대 약 3%로 매우 작은 값을 보인다. 따라서 압축응력과 역시 반복적으로 잘 부과되었으며 실험의 재현성에 큰 영향을 주지 않았다고 판단하였다.

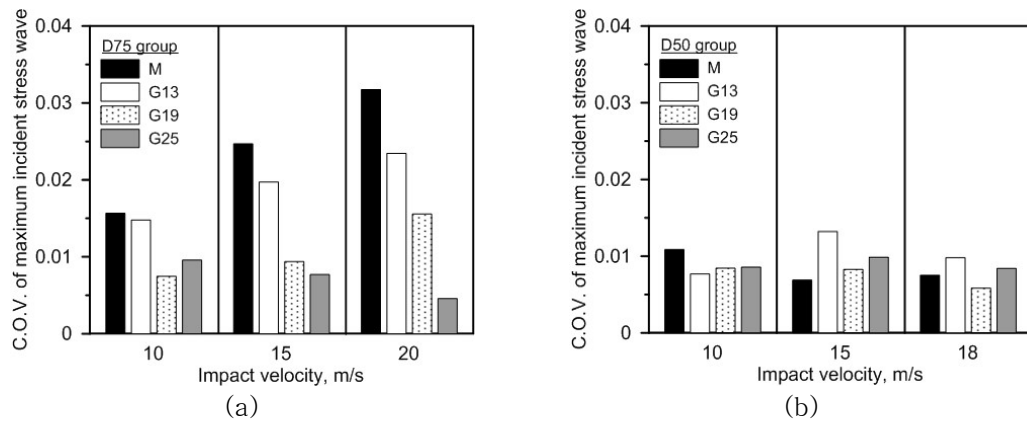


그림 3.40 압축응력과 최대값의 변동계수;
(a) D75 실험 케이스; (b) D50 실험 케이스

(다) 부재 충돌실험

○ 시험체 설계

- 모사 구조물로는 대표적 방호목적 철근 콘크리트 구조물인 원전 구조물로 선정하였으며, 이중 신고리 3호기 및 4호기의 원자로 모델인 APR(Advanced Power Reactor) 1400 원자로를 선정하였다. 충돌실험의 시험체는 APR 1400 원전벽체에 Replica 상사법칙을 적용하고 2.4:1의 길이 상사비로 축소하여 설계하였다. 대상 구조물 및 시험체의 특성은 표 3.9와 같고, 시험체 도면은 그림 3.41과 같다.
- 충돌실험 중 시험체의 지점부에서는 반력으로 인하여 매우 큰 응력이 발생하게 된다. 이에 따라 시험체 지점부에서 원치 않는 파단이 발생할 수 있고, 이 경우 벽체의 내충격 성능은 부적절하게 평가될 수 있다. 이를 방지하기 위해 지점부가 존재하는 시험체 외곽부에는 7 mm 두께의 L형강 프레임을 사용하여 보강하였다.

표 3.9 모사 대상 구조물 및 시험체 특성

		APR 1400	시험체
재료특성	콘크리트 강도, MPa	42	42
	철근 항복강도, MPa	400	400
치수	벽체 두께, m	1.2	0.5
	철근호칭	D57	D25
	철근 간격, mm	305	130
	철근비, %	0.92	0.86
	(철근비) × (항복강도), MPa	3.65	3.45

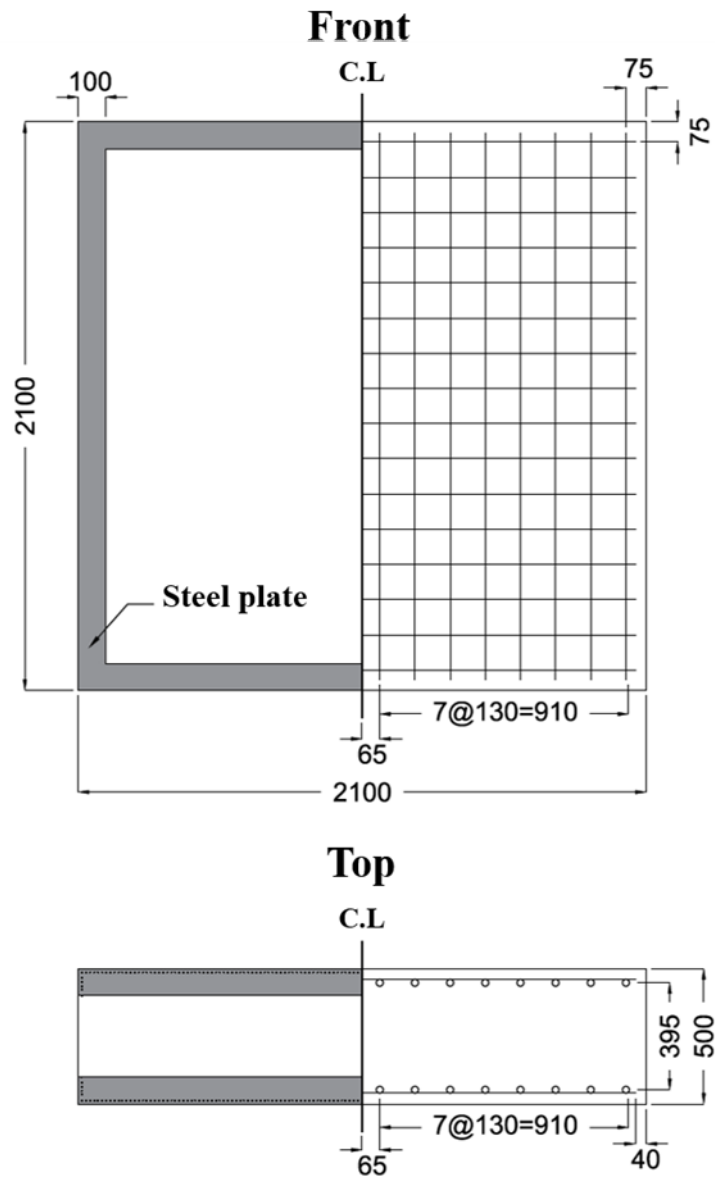


그림 3.41 시험체 도면

○ 예비실험

㉠ 발사체 설계

- 관입거동은 발사체 두부형상에 의해 크게 영향을 받으므로 정확한 충격거동평가를 위해서는 이를 변수로 한 실험수행이 필요하다. 따라서 이를 고려하여 발사체의 두부형상을 그림 3.42과 같이 3종류로 설정하여 실험을 수행하였다. 두부형상만을 발사체 변수로 설정하기 위하여 발사체 직경 및 공칭질량은 동일하게 설계하였고 발사체 재질은 SS275강재로 제작하였다. 특히, Sharp missile의 경우는 날카로운 형상으로 인해 시험체 내부로 관입하는 도중 두부의 손상이 심하게 발생할 수 있어 두부 표면에 열처리를 하였다.

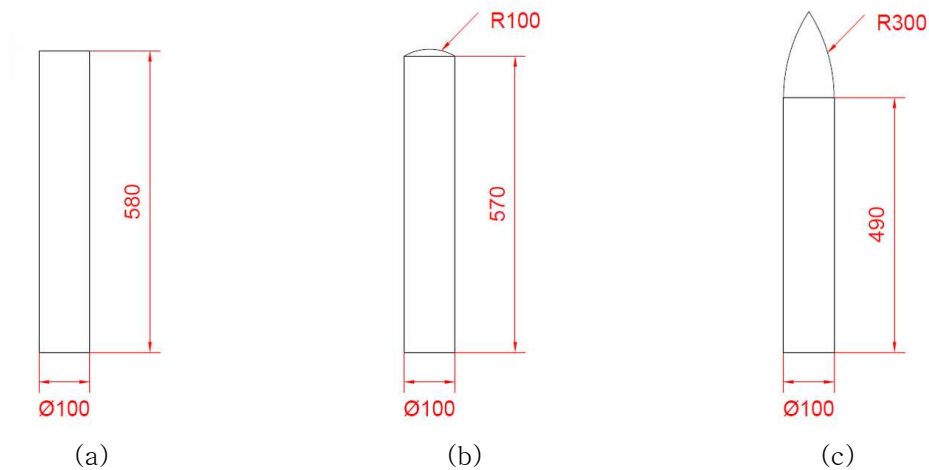


그림 3.42 관입거동 평가실험에서의 발사체 형상;

(a) Flat missile; (b) Blunt missile; (c) Sharp missile

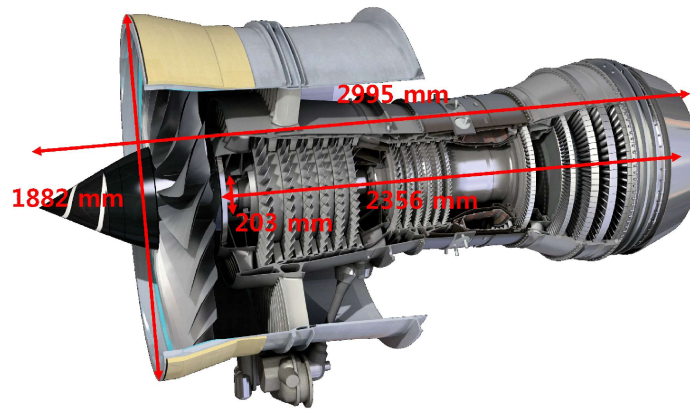
㉠ 충돌속도 선정

- 1962년 미국 민항기 추락사고, 2001년 9.11 테러 당시 펜타곤 및 세계무역센터에 충돌한 항공기의 속도는 각각 103, 150, 210 m/s로 조사되었으며, 일반적으로 항공기가 충돌할 시 충돌속도는 100~250 m/s로 알려져 있다. 관입거동 평가실험에서는 관입 이외의 거동으로 인한 영향을 배제하기 위하여 배면파쇄 및 관통이 발생하지 않도록 충돌속도를 제한하여 90~120 m/s의 범위에서 실험을 수행하였다.

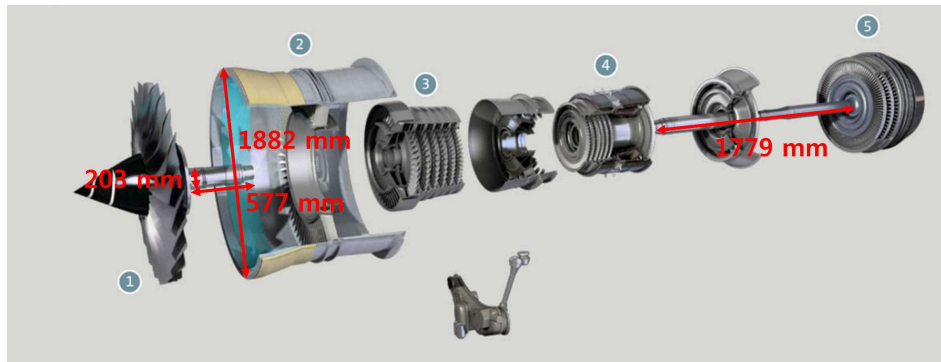
○ 본 실험

㉡ 발사체 설계

- 발사체 종류에 따른 충격거동 평가를 위해 강체 미사일과 비강체 미사일을 사용하여 충돌실험을 수행하였다. 강체 미사일은 DOE-STD-3014-2006에 제시된 설계 대상 발사체인 항공기 엔진샤프트로 결정하였으며, 모사 대상 발사체는 보잉 757에 사용되는 터보팬 엔진인 롤스로이스사 RC211-535E4의 엔진샤프트로 선정하였다. 그림 3.43은 해당 터보팬 엔진의 모식도를 보여준다. 엔진샤프트를 중실 원기둥으로 상정하고 이에 Replica 상사법칙을 길이 상사비 2.4:1로 적용하여 발사체를 설계하였으며 SS275를 사용하여 제작하였다. 비강체 미사일은 타프피치동(C1100-BD-O)을 재질로 하여 강체 미사일과 동일한 직경 및 질량을 갖도록 표 3.10와 같은 치수로 설계하였다.



(a)



(b)

그림 3.43 모사 대상 발사체; (a) 롤스로이스 RB211-535E4 터보팬 엔진 모식도;
(b) 롤스로이스 RB211-535E4 터보팬 엔진 분해도

표 3.10 강체 미사일 및 비강체 미사일의 특성

모사 대상	발사체 종류	형상	재료	질량, kg	치수, mm
엔진 샤프트	강체	중실 원기둥	SS275	43.65	D85 × L980
	비강체		C1100-BD-O	43.63	D85 × L860

㉠ 충돌속도 선정

- 내충격 성능평가 평가실험에서는 국부거동 및 전반거동 등 다양한 파괴모드에 대해 충돌실험기법을 검증하기 위해 100, 150, 200 m/s의 충돌속도에 대하여 실험을 수행하였다.

○ 부재 충돌실험변수 요약 및 각 실험별 검증 충돌실험기법 항목

- 본 연구에서는 충격거동의 기초거동인 관입거동에 대한 평가실험을 수행하였으며 이를 참고하여 다양한 충돌상황에 대한 내충격 성능평가 실험을 수행하였다. 관입거동 평가실험에서는 발사체의 두부형상 및 충돌속도를 변수로 설정하였다. 내충격 성능평

가 실험에서는 발사체의 종류 및 충돌속도를 변수로 실험을 수행하였다. 표 3.11은 각 충돌실험의 실험변수에 대해 나타내고 있으며 각 충돌실험에서의 검증한 충돌실험기법 항목을 보여준다. 모든 실험에서는 사봇 및 다이아프램, 사봇 분리기의 성능을 검증하였으며 충돌속도 및 반력 계측기법을 검증하였다. 또한 관입거동이 예상되었던 실험에서는 시험체 배면의 변위를 측정하여 시험체 변위 계측기법에 대한 검증을 수행하였다. 고속카메라 촬영기법의 경우 강체 미사일을 사용한 실험을 수행하여 검증하였다.

표 3.11 부재 충돌실험 변수

구분	실험명칭	시험체	발사체 재료	발사체 형상	발사체 공칭질량, kg	충돌속도, m/s	검증 실험기법 항목				
							실험소모품 설계	고속카메라 촬영	충돌속도 계측	시험체변위 계측	반력 계측
예비 실험	S36-Flat-V123	RC panel	SS275	D100×L580 Flat cylinder	35.5	120	○	○	○	-	○
	S41-Flat-V103			100		○	○	○	○	○	
	S41-Blunt-V124			120		○	○	○	-	○	
	S41-Blunt-V114			110		○	○	○	○	○	
	S39-Sharp-V124			120		○	○	○	○	○	
	S39-Sharp-V115			110		○	○	○	○	○	
	S39-Sharp-V88			90		○	○	○	○	○	
본 실험	H-V100*	RC panel	SS275	D85×L980 Flat cylinder	43.65	100	○	○	○	○	○
	H-V150					150	○	○	○	-	○
	H-V200					200	○	○	○	-	○
	S-V100		C1100-B D-O	D85×L860 Flat cylinder	43.63	100	○	○	○	○	○
	S-V150					150	○	○	○	-	○
	S-V200					200	○	○	○	-	○

* 목표속도 도달 실패로 재실험을 수행하여 총 2회 실험수행

다. 내충격 성능평가 실험기법의 타당성 평가

(1) 재료 충돌실험기법 타당성 평가

(가) 재료 충돌실험결과

- 각 실험 케이스들의 정적압축강도와 SHPB 실험을 통해 얻은 동적압축강도의 비로 나타내는 동적증가계수(dynamic increase factor, DIF)는 그림 3.44과 같다.

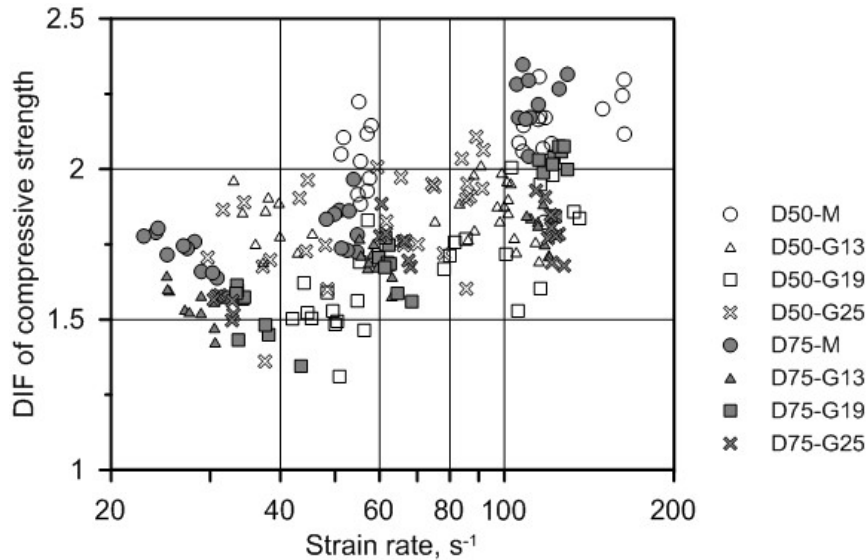


그림 3.44 충돌실험기법 검증실험결과 동적증가계수

(나) 재료 충돌실험기법 타당성 평가

- 시편 크기와 굽은골재 최대치수의 관계에 의한 영향을 확인하기 위해 같은 조건 하에서 반복실험을 수행하였기 때문에 실험결과의 분산성을 통해 그 영향을 확인할 수 있다. 실험결과는 변형률 속도와 동적증가계수의 두 가지를 변수를 가지고 분산성을 나타내므로 이를 확인하기 위해 식 3.13과 같이 Albert and Zhang (2010)이 제안한 다변수 변동계수(multivariate coefficient of variation, multivariate C.O.V.)를 계산하면 그림 3.45와 같다.

$$\text{Multivariate C.O.V.} = \sqrt{\frac{\boldsymbol{\mu}^T \boldsymbol{\Sigma} \boldsymbol{\mu}}{(\boldsymbol{\mu}^T \boldsymbol{\mu})^2}} \quad (3.13)$$

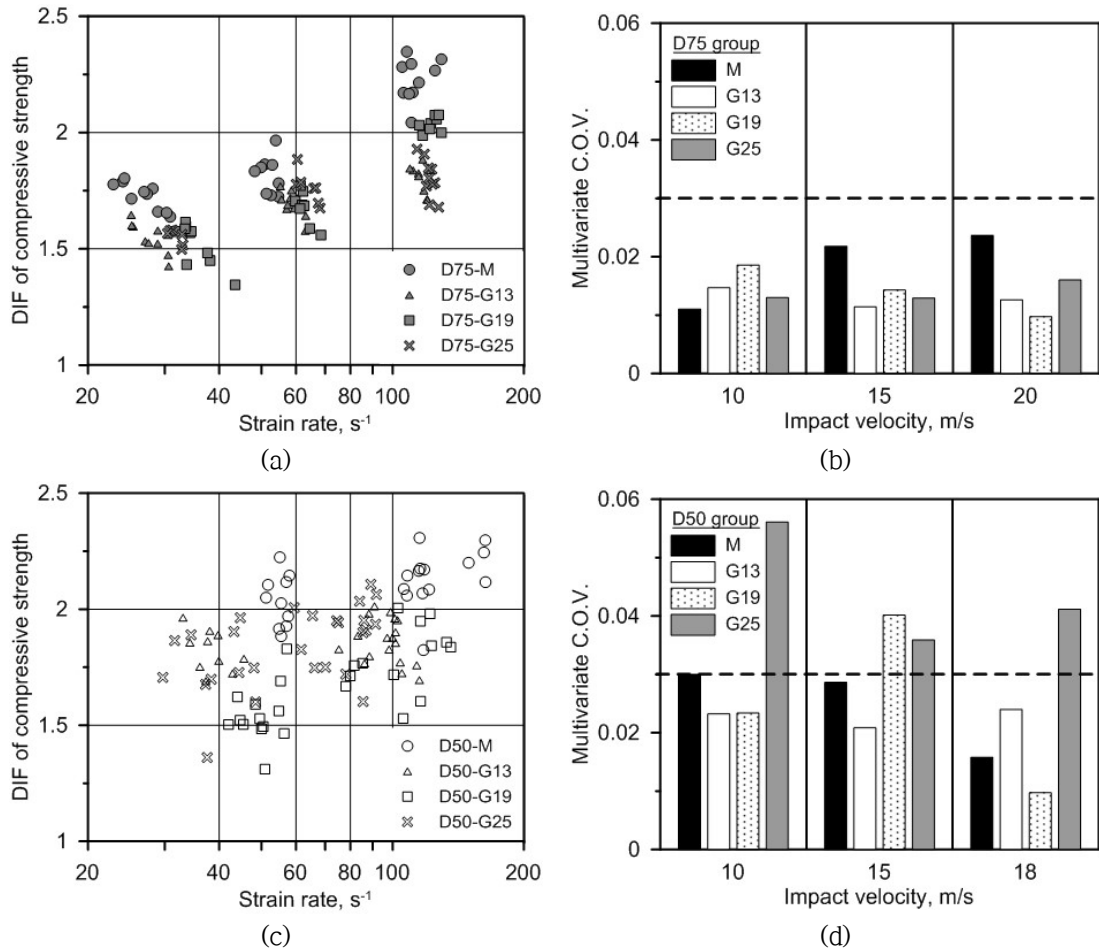


그림 3.45 실험결과의 분산성; (a) D75 실험 케이스의 동적증가계수;
 (b) D75 실험 케이스의 다변수 변동계수;
 (c) D50 실험 케이스의 동적증가계수; (d) D50 실험 케이스의 다변수 변동계수

○ 그림 3.45에서 확인할 수 있듯이 같은 굵은골재 최대치수에 비해 시편의 크기가 작은 경우 데이터의 분산이 확연히 증가한다. 이때, 모르타르의 경우 굵은골재를 사용하지 않기 때문에 굵은골재와 시편크기의 관계를 확인하기 위한 기준값으로 사용할 수 있다. 모르타르의 다변수 변동계수의 최댓값인 0.03을 기준으로 보면 시편의 크기가 굵은골재 최대치수의 최소 3배가 되는 경우 모르타르보다 다변수 변동계수가 작은 것을 알 수 있다. 즉, 시편이 굵은골재 최대치수의 3배보다 작은 D50-G19와 D50-G25의 경우 데이터의 분산성이 크게 나타난다. 따라서, 시편의 크기가 굵은골재 최대치수의 최소 3배가 되는 경우 실험결과의 분산성이 작으므로 실험결과의 신뢰도가 확보된다. 이는 정적압축강도실험 시편 제작 기준인 ASTM C192/C192M에 명시되어 있는 내용과 동일한 기준을 재료 충돌실험에 적용할 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 시편 수직도 공차 역시 정적압축강도실험 표준 방법인 ASTM C39/C39M에서 명시한 것과 같이 0.5° 이내로 확보하면 실험결과에 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

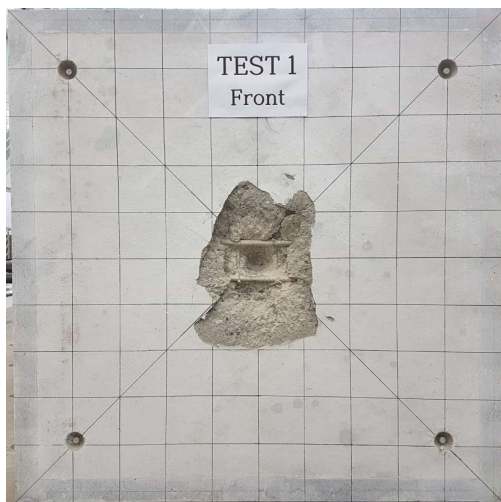
- 그림 3.45에서 보면 굵은골재 최대치수에 따라 서로 다른 동적증가계수를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 따라서 기존 재료충돌실험과 같이 임의로 실 구조물보다 작은 굵은골재를 사용하여 얻은 재료의 동적특성을 실 구조물에 직접적으로 적용할 수 없다. 즉, 실 구조물에 사용되는 굵은골재를 사용하여 실험을 수행하는 것이 보다 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- 결과적으로, 본 연구에서 제시한 기법대로 실 구조물에 사용할 최대치수의 굵은골재를 사용하고 그 굵은골재 최대치수의 최소 3배가 되는 시편크기를 사용하면 신뢰도 있는 실험결과를 얻을 수 있다.

(2) 부재 충돌실험기법 타당성 평가

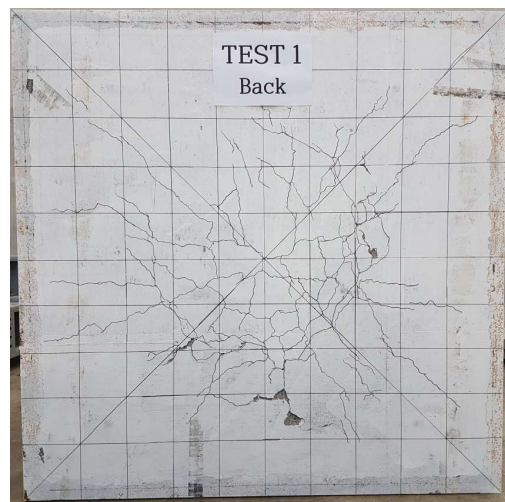
(가) 부재 충돌실험결과

① 예비실험 결과

- 각 실험의 충돌속도 계측결과, 시험체 콘크리트강도, 관입깊이 발생량 등 주요 실험 결과는 표 3.12에 요약하였다. Wire breaking system 계측기법을 제외한 다른 계측기법들은 충돌속도를 서로 비슷하게 계측하였으며 S39-Sharp-V88의 실험을 제외하고는 목표속도 대로 실제 발사체의 속도가 발사되어 실험이 대체적으로 잘 수행되었다. Wire breaking system 계측기법의 경우는 측정오류가 빈번하였고 계측되었더라도 실제 속도보다 다소 차이가 발생하다. 표 3.12에서 콘크리트 압축강도는 150×300 mm 공시체에 대하여 1축 압축강도를 수행하여 측정하였고 독립적으로 배합된 레미콘 그룹을 분류하여 그룹별로 압축강도 실험결과를 평균하여 사용하였다.
- 관입거동 평가를 위해 수행한 실험 모두 스캐빙이나 관통이 발생하지 않아 당초 계획하였던 대로 관입에 의한 국부거동만이 발생하여 실험이 잘 수행되었으며 그림 3.46 ~ 그림 3.52과 같이 시험체 전면부는 충돌 주변부 콘크리트의 파쇄현상을 동반한 관입에 의한 공동이 발생하였고, 후면부는 시험체 중심으로부터 방사형 균열(Radial crack)이 발생하여 전형적인 관입에 의한 파괴모드를 보이는 것을 확인하였다.

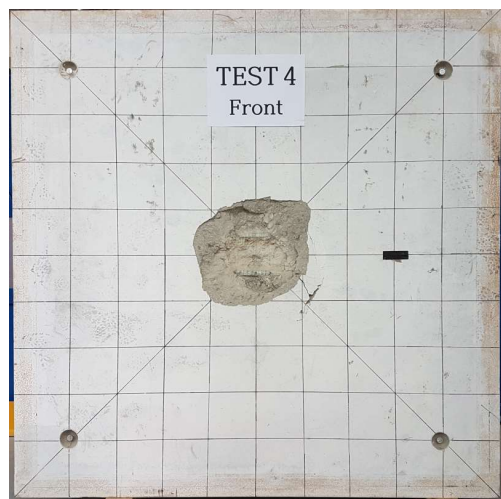


(a)

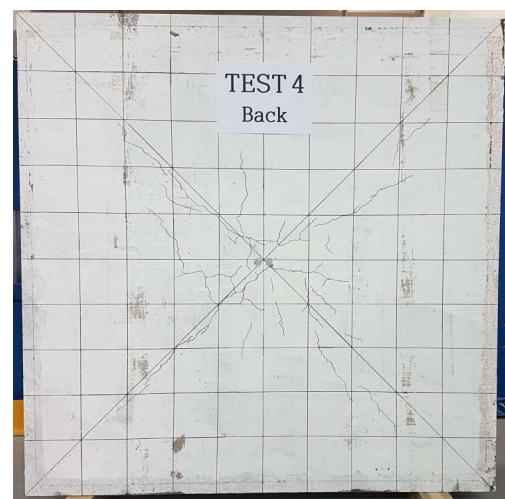


(b)

그림 3.46 S36-Flat-V123 실험 후 시험체 상태; (a) 전면부; (b) 후면부

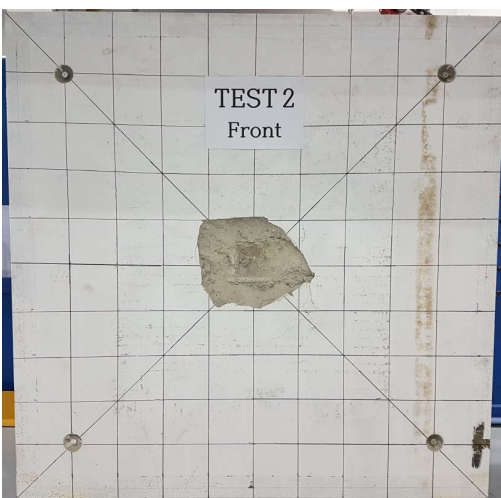


(a)

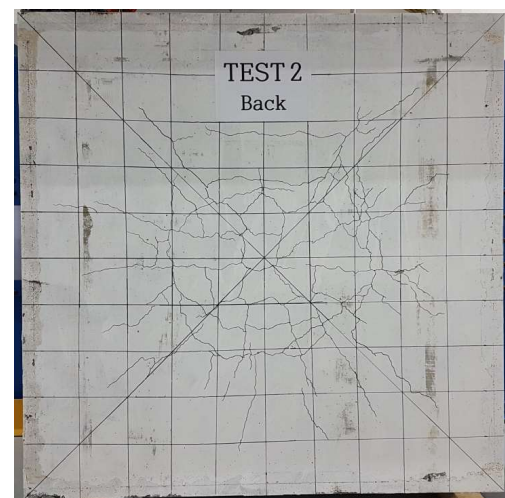


(b)

그림 3.47 S41-Flat-V103 실험 후 시험체 상태; (a) 전면부; (b) 후면부

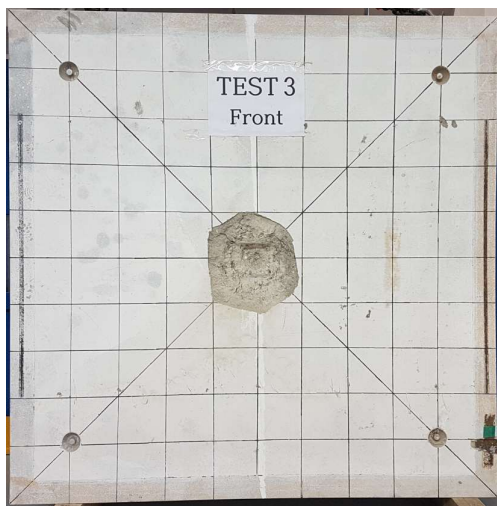


(a)

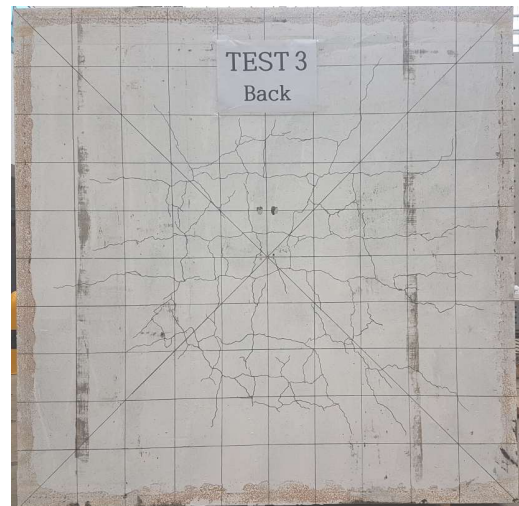


(b)

그림 3.48 S41-Blunt-V124 실험 후 시험체 상태; (a) 전면부; (b) 후면부

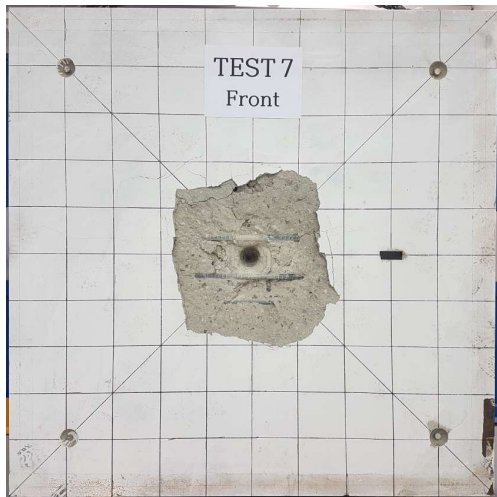


(a)

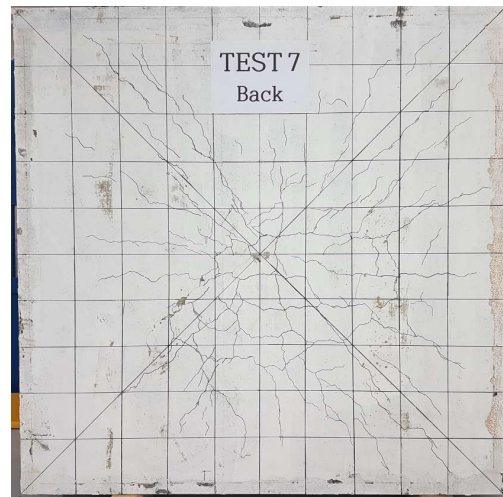


(b)

그림 3.49 S41-Blunt-V114 실험 후 시험체 상태; (a) 전면부; (b) 후면부



(a)

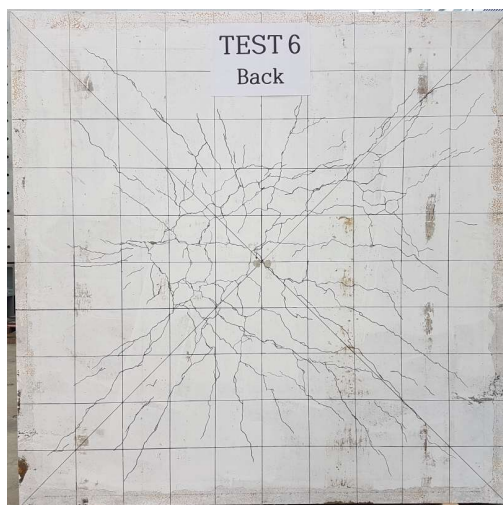


(b)

그림 3.50 S39-Sharp-V124 실험 후 시험체 상태; (a) 전면부; (b) 후면부

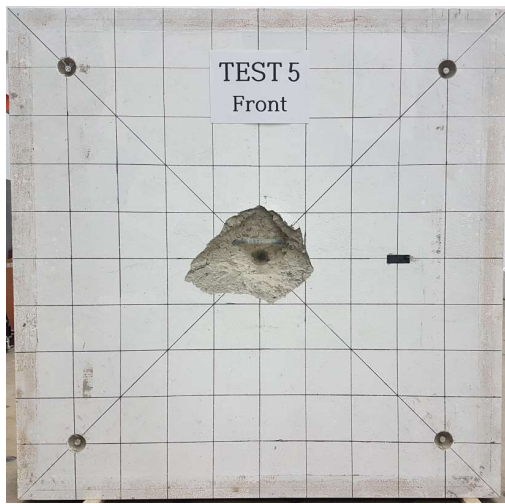


(a)

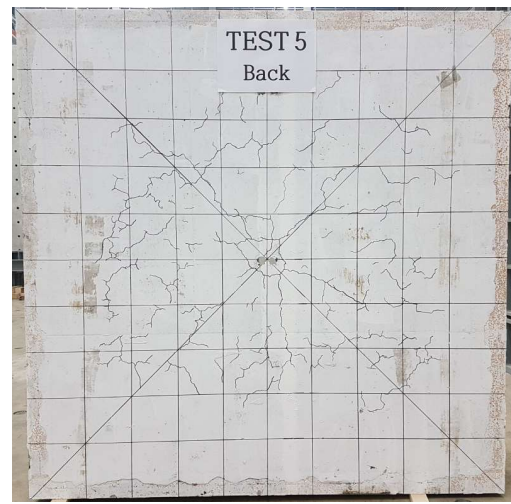


(b)

그림 3.51 S39-Sharp-V115 실험 후 시험체 상태; (a) 전면부; (b) 후면부



(a)



(b)

그림 3.52 S39-Sharp-V88 실험 후 시험체 상태; (a) 전면부; (b) 후면부

표 3.12 예비실험 결과 요약

실험명칭	콘크리트 압축강도, MPa	충돌속도 ^{*)} , m/s					최종 관입깊이, mm	최대 반력, kN	시험체 중앙부 변위, mm		비고
		목표	TTL	Analog	Camera	Wire			관입종료 시	최대값	
S36-Flat-V123	35.80	120	136.7	123.1	125	측정오류	126.9	310.9	-	-	배면파쇄 발생가능성 으로 미계측
S41-Flat-V103	40.53	100	102.8	102.4	106	196.1	94.1	377.8	0.4	3.3	
S41-Blunt-V124		120	123.9	123.8	121	135.7	129.5	267.9	-	-	배면파쇄 발생가능성 으로 미계측
S41-Blunt-V114		110	113.5	113.5	116	측정오류	115.1	340.6	2.5	5.2	
S39-Sharp-V124	38.05	120	123.5	123.6	127	8.1	267.9	295.8	5.6	9.8	
S39-Sharp-V115		110	114.6	115.0	119	측정오류	252.5	162.6	5.9	-	충돌과정에서 시험체 에 부착된 LVP 베어 링지그가 떨어져나감
S39-Sharp-V88		100	87.6	87.9	89	측정오류	183.0	268.9	0.5	2.8	

*) 목표 : 목표 속도

TTL : 레이저 간섭계의 TTL 신호 타이머를 통한 계측

Analog : 레이저 간섭계의 아날로그 신호를 통한 계측

Camera : 고속카메라 촬영 영상을 통한 계측

Wire : Wire breaking system을 이용한 계측

- 시험체 중앙부 변위 확인을 위한 LVP 변위와 반력 산정을 위한 게이지 변형률은 Sampling rate가 1 MHz에 달하는 고성능 데이터로거를 통해 계측하였다. 매우 높은 Sampling rate로 인해 계측응답의 노이즈가 다소 발생하여 Ideal filter를 통해 데이터를 필터링을 수행하였다. 이때 Ideal filter의 Cut off frequency는 반력 산정을 위한 게이지 변형률은 10 kHz, LVP 변위는 100 Hz로 설정하였다. 필터링을 수행하여 얻은 각 실험별 LVP 계측결과는 그림 3.53과 같고, 지지 파이프의 총 합력의 계측결과는 그림 3.54와 같다. LVP 계측의 경우, 최초 실험인 S36-Flat-V123과 S41-Blunt-V124의 실험 수행 시 배면파쇄 발생에 따른 LVP의 파손이 발생할 수 있어 배면파쇄 발생여부를 확인하기 위해 LVP를 시험체 배면에 부착하지 않았다. 그리고 S39-Sharp-V115의 경우 4 msec까지만 계측데이터가 도시되어 있는데, 이는 시험체에 부착된 베어링 지그가 4 msec 이후부터 시험체로부터 떨어져 나갔기 때문에 계측된 데이터의 의미가 없어 삭제한 것이다.

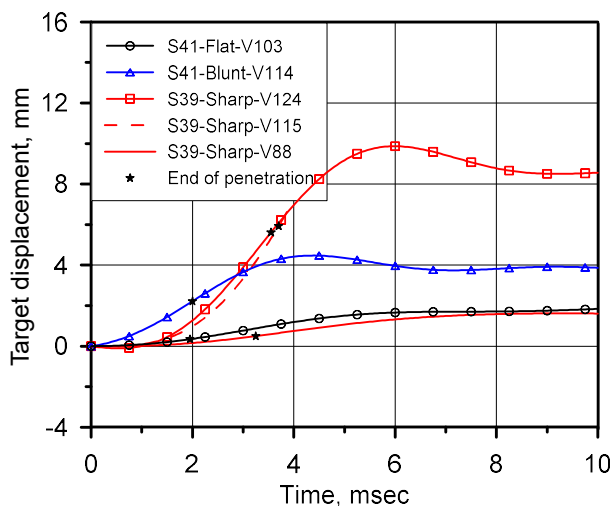


그림 3.53 각 실험별 시험체 중앙부 변위

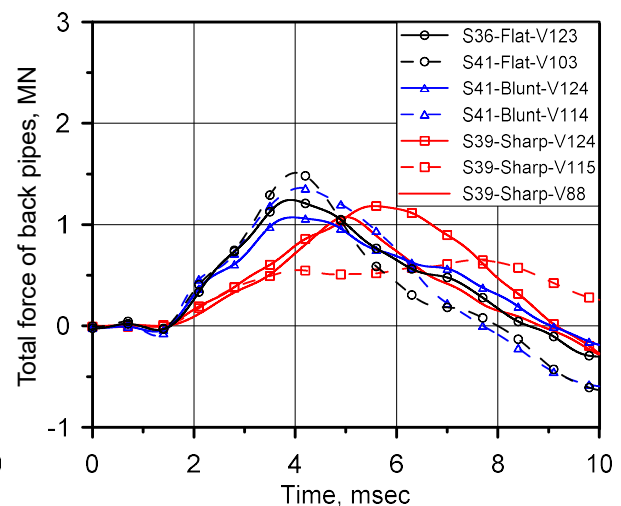


그림 3.54 각 실험별 지지 파이프의 총 합력

- 그림 3.53의 시험체 후면 중앙부 변위를 보면 각 실험 모두 최대변위가 관입이 종료되어 발사체가 정지한 이후에 발생하는 것을 볼 수 있다. 이로부터 전반거동은 충격 하중의 재하가 종료된 이후에 최대응답에 도달하는 관성력에 의한 자유진동거동을 보인다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 발사체 두부형상이 Flat에서 Sharp로 갈수록 최대변위가 증가하며 Sharp missile에 대하여 속도가 증가할 수록 최대변위가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 발생한 관입깊이가 클수록 변위 계측 위치의 시험체 두께가 얇아짐에 따라 충돌주변 국부영역에서 국부영역에서 변형이 크게 발생하기 때문으로 보인다.
- 그림 3.54의 반력 산정을 위한 지지 파이프의 총 합력은 계측데이터의 경향을 보면, 1 msec 근처에서 매우 작은 크기의 인장력(음수)이 발생하게 되는데 이는 충돌 직후 시험체 고정 프레임이 관성력에 의해 발사체 진행방향의 반대로 작용하여 발생한 것으로 판단된다. 그 후에는 압축력이 발생하고 대략 8 msec 이후에 인장력이 발생하는데, 이는 초기의 충격거동 이후 자유진동에 의해 보이는 거동일 것으로 판단된다.

다. 그리고 Sharp missile의 최대 합력은 Flat 및 Blunt missile의 경우보다 이후에 발생하게 되는데 이는 시험체에 가해지는 충격하중이 Sharp missile의 경우 두부 전체가 시험체 접촉하여 최대 충격하중을 발생시키는데 Flat이나 Blunt missile보다 소요시간이 길기 때문으로 판단된다.

- 고속카메라 계측기법을 통해 얻은 발사체 변위의 시간이력은 그림 3.55과 같으며, 발사체 충돌 직후부터 발사체가 정지하여 변위가 더 이상 증가하지 않는 관입 종료시점까지 나타내었다. 그리고 발사체 변위의 시간이력을 식 3.1의 데이터 Smoothing 기법을 통해 발사체의 가속도 시간이력을 계산하고, 이에 발사체의 질량을 곱하여 관입도중 발생하는 충격하중의 시간이력을 계산하였다. 이때 가속도 시간이력을 계산하기 위한 발사체 변위의 시간이력 데이터의 간격은 0.05 msec이다. 그리고 계산한 충격하중 시간이력의 타당성을 확인하기 위하여 가속도 시간이력을 수치적분하여 그림 3.55의 발사체 변위의 시간이력 데이터와 잘 일치하는지 재현성을 비교하였다. 충격하중의 시간이력은 그림 3.56 ~ 3.62의 (a)와 나타내었으며 이를 다시 적분하여 재현성을 비교한 그래프는 그림 3.56 ~ 3.62의 (b)와 같고 각 실험별로 두 그래프가 서로 매우 비슷하여 충격하중 시간이력이 적절하게 계산되었다고 볼 수 있다.

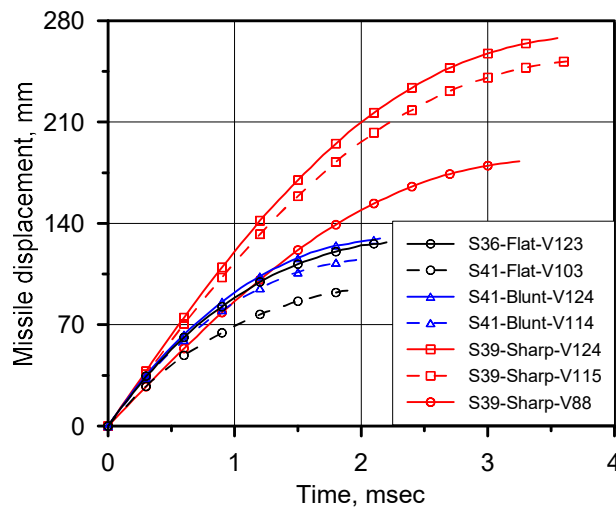


그림 3.55 고속카메라 계측기법을 통한 발사체 변위 시간이력

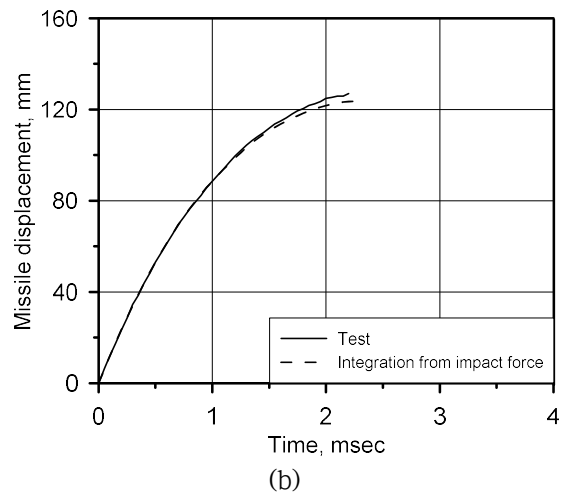
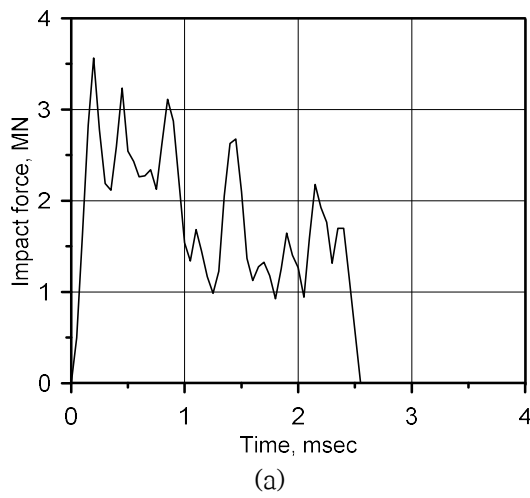


그림 3.56 S36-Flat-V123 발사체 시간이력; (a) 충격하중; (b) 발사체 변위

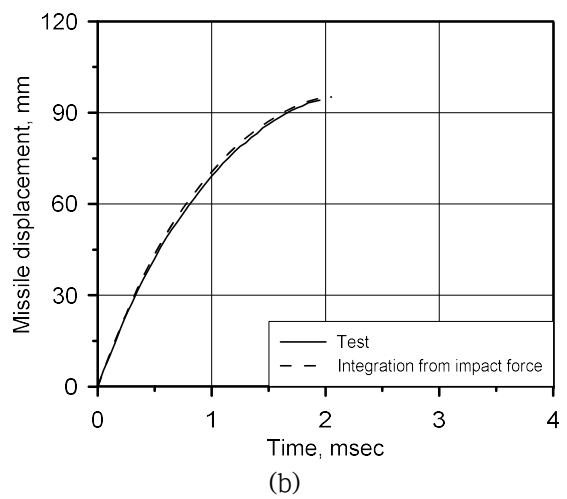
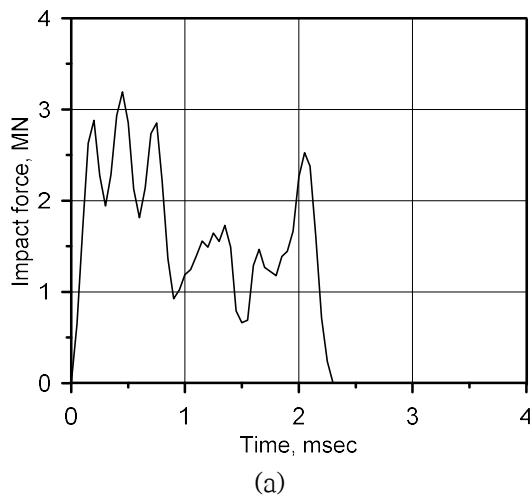


그림 3.57 S41-Flat-V103 발사체 시간이력; (a) 충격하중; (b) 발사체 변위

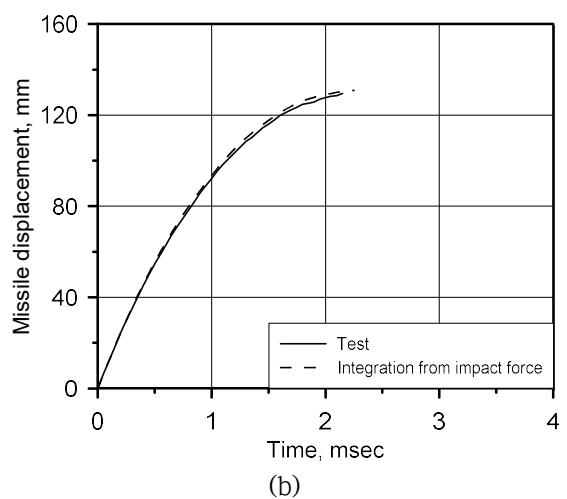
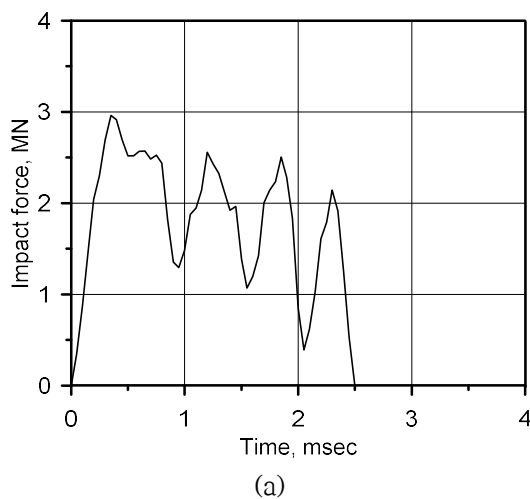
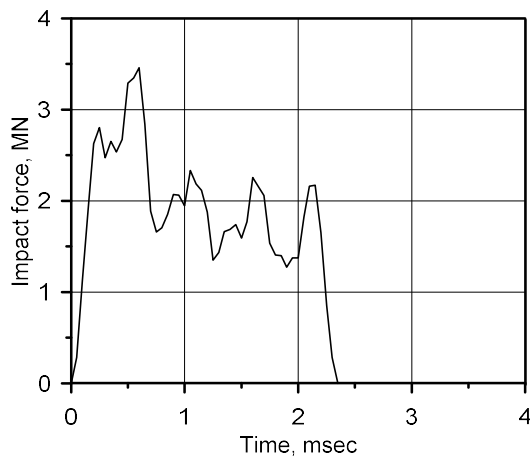
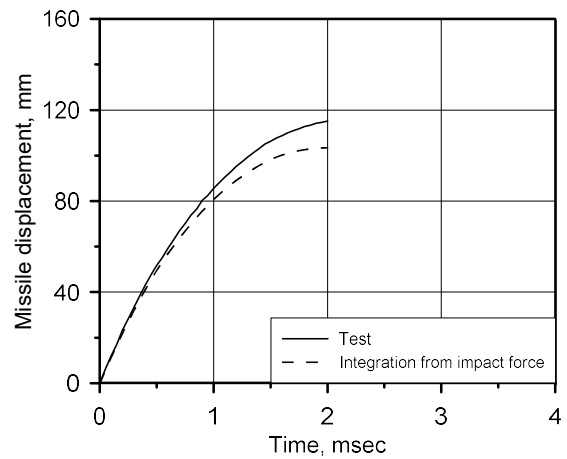


그림 3.58 S41-Blunt-V124 발사체 시간이력; (a) 충격하중; (b) 발사체 변위

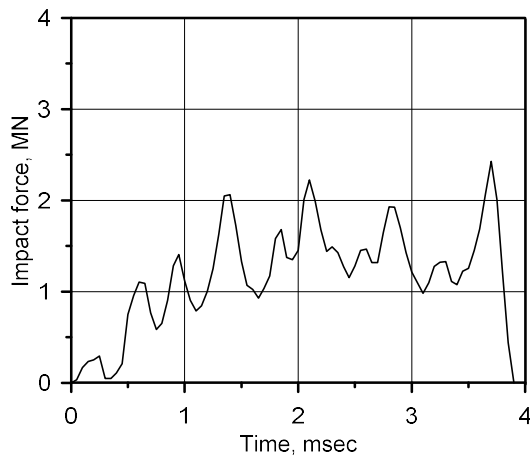


(a)

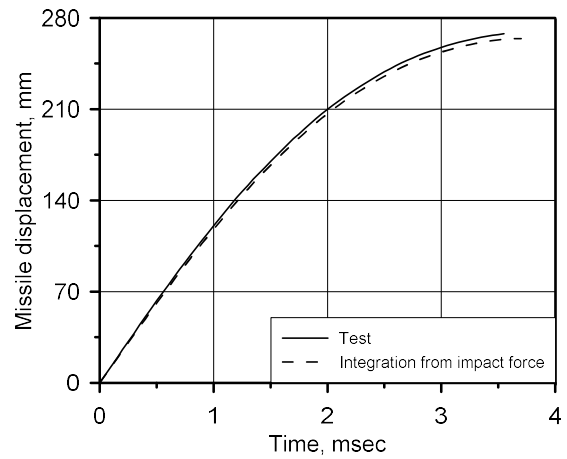


(b)

그림 3.59 Blunt-V114 발사체 시간이력; (a) 충격하중; (b) 발사체 변위

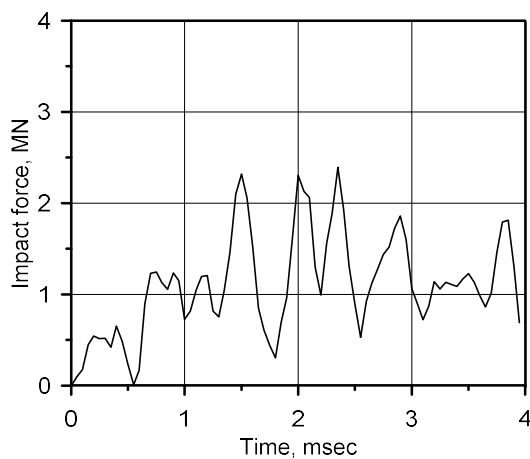


(a)

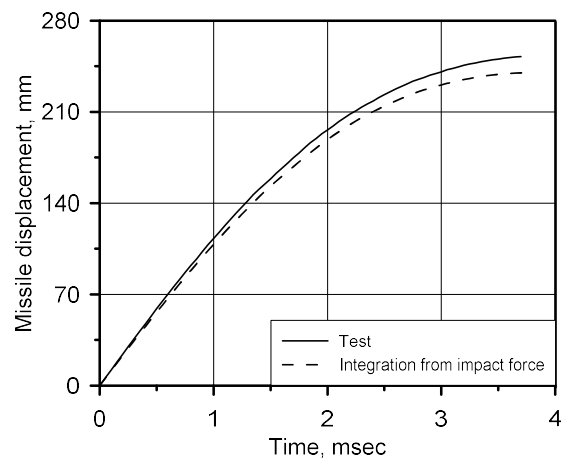


(b)

그림 3.60 S39-Sharp-V124 발사체 시간이력; (a) 충격하중; (b) 발사체 변위



(a)



(b)

그림 3.61 S39-Sharp-V115 발사체 시간이력; (a) 충격하중; (b) 발사체 변위

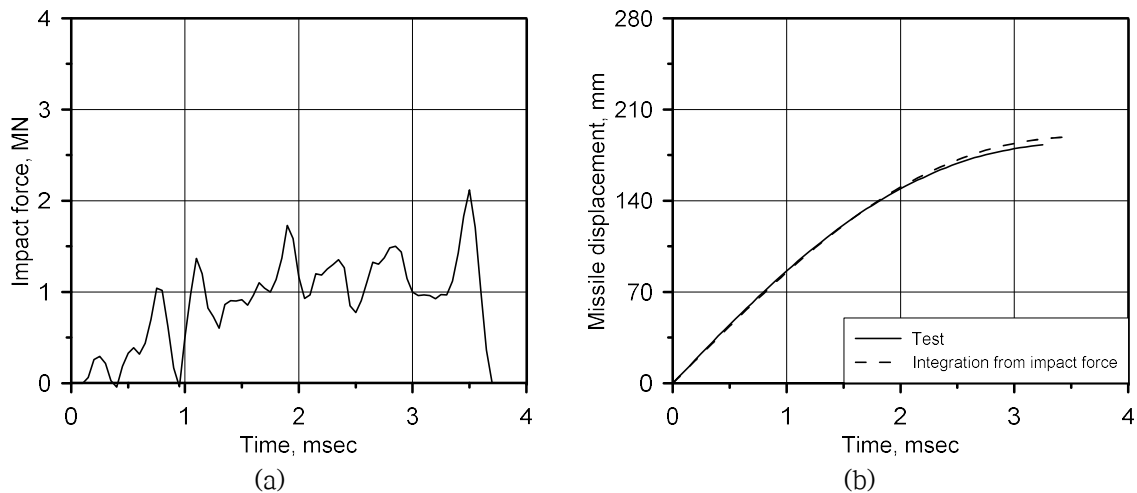


그림 3.62 S39-Sharp-V88 발사체 시간이력; (a) 충격하중; (b) 발사체 변위

- 그림 3.55의 시간에 따른 관입깊이 계측결과를 보면 각 두부형상에 대하여 속도가 증가할수록 최종 관입깊이가 증가하며, Flat에서 Sharp로 두부형상이 날카로워질수록 최종 관입깊이가 증가하고 관입이 끝나는 시간이 길어진다. 이러한 경향은 충격하중 시간이력으로 그 이유를 설명할 수 있는데, Flat missile의 최대 충격하중(그림 3.56, 그림 3.57)이 Sharp missile의 최대 충격하중(그림 3.60 ~ 그림 3.62) 보다 크게 발생하기 때문에 발사체가 더 빠르게 감속하여 Flat missile의 관입깊이가 Sharp missile의 관입깊이 보다 더 적게 발생한다. 그리고 충격하중의 경향을 보면, Flat 및 Blunt missile의 경우 초기에 가파르게 증가한 후 서서히 감소한다. 그 반면, Sharp missile의 경우 충격하중이 서서히 증가함을 확인할 수 있다. 이는 충돌 직후는 Sharp missile의 경우 발사체 두부 표면의 일부만이 시험체 접촉하여 충격하중을 온전히 받지 못하는 상태였다가 어느 정도 시간 이후에 충분히 관입하여 두부 표면 전체가 시험체에 접촉하여 충격하중이 최대로 발생하는 것으로 판단할 수 있다.

② 본 실험 결과

- 각 실험의 충돌속도 계측결과, 시험체 콘크리트강도, 국부거동에 의한 파괴모드 및 그에 따른 주요 충격거동 계측결과를 표 3.13에 요약하였다. 본 실험 모두 목표속도 대로 실험이 잘 수행되었고 Wire breaking system을 제외한 충돌속도 계측기법은 서로 비슷하게 충돌속도를 잘 예측하였다. 그러나 Wire breaking system 계측기법의 경우는 예비실험 때와 동일하게 측정오류가 빈번하였고 계측되었다하더라도 실제 속도와 큰 차이를 보였다. 콘크리트 압축강도의 경우는 예비실험과 동일하게 150×300 mm 공시체에 대하여 1축 압축강도를 수행하여 측정하였고 독립적으로 배합된 레미콘 사이에서 압축강도의 큰 차이 없이 거의 유사함을 확인하여 모든 시험체의 콘크리트 압축강도는 이를 모두 평균한 49.43 MPa로 설정하였다.
- 파괴모드는 Hard missile의 경우 속도 100 m/s, 150 m/s, 200 m/s에 대하여 각각 관입거동, 배면파쇄, 관통이 발생하여 모든 종류의 국부손상이 발생하였다. 반면, Soft

missile의 경우는 속도 100 m/s, 150 m/s, 200 m/s에 대하여 각각 관입거동, 배면파쇄, 배면파쇄가 발생하여 관통은 발생하지 않았으며 동일한 질량, 속도의 Hard missile과 비교하였을 때, Hard missile보다 국부거동이 덜 발생하는 기존 Sugano et al. (1993)의 연구와 동일한 경향이 나타남을 확인하였다. 이는 발사체의 변형이 크게 발생함에 따라 에너지를 일부 흡수하기 때문이라고 볼 수 있다. 그리고 Soft missile의 변형정도를 판단할 수 있는 충돌 후 발사체의 길이 축소량은 속도 100 m/s, 150 m/s, 200 m/s에 대하여 각각 55 mm, 83 mm, 163 mm로 계측되었다. 이는 전체 860 mm 길이에 대하여 6%, 10%, 20%로 속도가 50 m/s씩 증가할수록 약 2배씩 증가하는 것을 확인하였다. 국부거동 발생량 차이를 비교해보면, 100 m/s의 속도에서 Hard missile 대비 Soft missile 실험에서 발생한 최종 관입깊이량 비는 61%, 150 m/s에서는 50%로 약 절반정도 국부거동이 감소함을 확인하였다.

- Hard missile의 200 m/s 속도 실험에 대해서는 관통이 발생하여 관입깊이가 존재하지 않기 때문에 관통거동을 평가하기 위하여 관통 후 발사체의 속도를 계측하였다. 이때 발사체의 관통 후 속도는 예비실험에서 검증된 고속카메라 계측기법을 활용하여 촬영영상으로부터 계측하였다.
- LVP 변위와 반력 산정을 위한 게이지 변형률은 예비실험과 동일하게 계측되었고 데이터 필터링도 동일하게 Ideal filter에 대하여 Cut off frequency를 게이지 변형률은 10 kHz, LVP 변위는 100 Hz로 설정하였다. 필터링을 수행하여 얻은 시험체 중앙부 변위는 그림 3.63과 같고, 반력 산정을 위한 지지 파이프의 총 합력의 계산결과는 그림 3.64와 같다. 이때 시험체 중앙부 변위는 예비실험 때 미처 고려하지 못했던 시험체 고정 프레임 자체의 변위영향을 고려하는 방법으로 개선하여, 시험체 고정 프레임 후면에도 LVP를 추가 도입하여 변위를 계측하고 이를 시험체 중앙부 LVP 계측 데이터로부터 제하여 유효 시험체 중앙부 변위를 계측하였다.

표 3.13 본 실험 결과 요약

실험명칭	콘크리트 압축강도, MPa	충돌속도 ^{*)} , m/s					최대 반력, MN	충격거동 계측					비고
		목표	TTL	Analog	Camera	Wire		파괴모드	발사체 길이 축소량, mm	최종 관입깊이, mm	최대변위, mm	관통 후 속도, m/s	
H-V100 ^{**)}	49.43	100	104.1	104.1	107.9	측정오류	1.033	관입	-	137	10.0	-	
H-V150		150	150.2	151.6	145.5	122.7	0.615	배면파쇄	-	391	-	-	배면부 손상위 험으로 LVP 미 계측
H-V200		200	199.2	199.1	194.1	측정오류	1.959	관통	-	-	-	97	배면부 손상위 험으로 LVP 미 계측
S-V100		100	104.3	104.3	107.6	측정오류	1.658	관입	55	84	0.7	-	
S-V150		150	151.0	151.0	154.4	18.8	1.128	배면파쇄	83	197	-	-	배면부 손상위 험으로 LVP 미 계측
S-V200		200	198.2	198.3	194.8	측정오류	1.075	배면파쇄	163	240	-	-	배면부 손상위 험으로 LVP 미 계측

*) 목표 : 목표 속도

TTL : 레이저 간섭계의 TTL 신호 타이머를 통한 계측

Analog : 레이저 간섭계의 아날로그 신호를 통한 계측

Camera : 고속카메라 촬영 영상을 통한 계측

Wire : Wire breaking system을 이용한 계측

**) 목표속도 도달 실패로 재실험을 수행하여 총 2회 실험수행

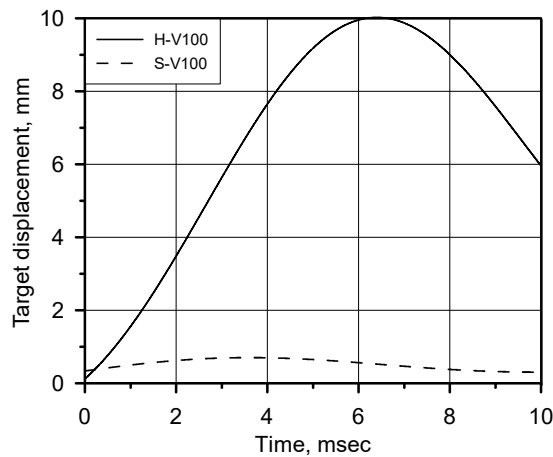


그림 3.63 H-V100 및 S-V100의 시험체 중앙부 변위 계측

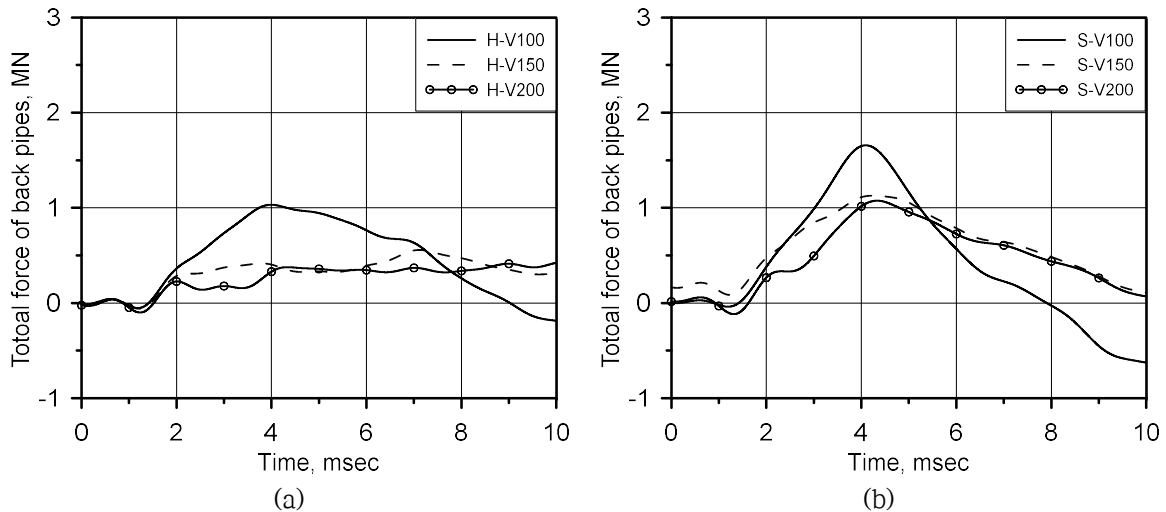
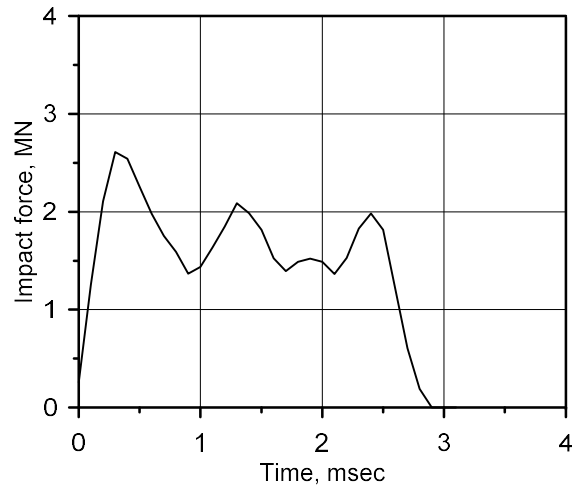
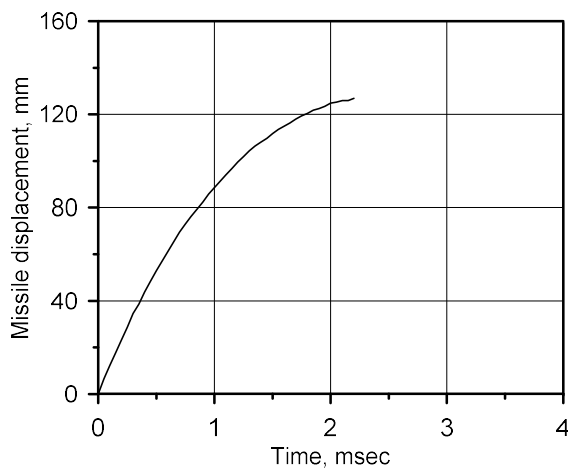
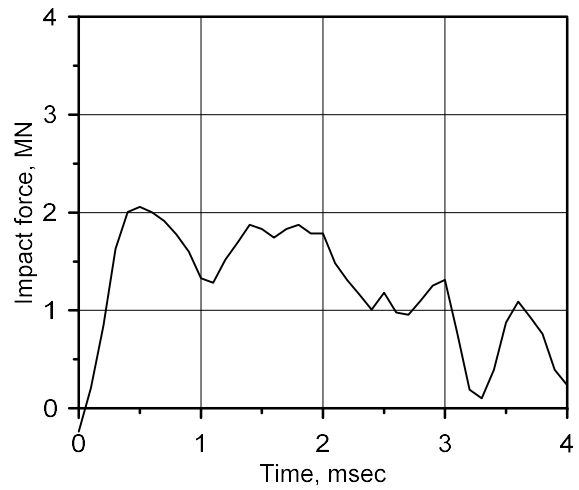
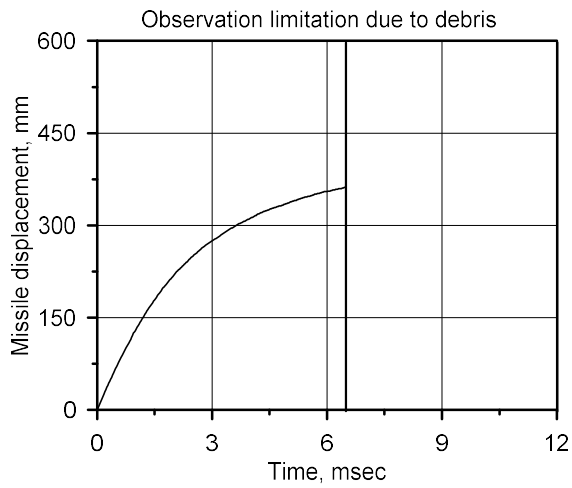


그림 3.64 발사체 종류 별 지지 파이프 합력; (a) Hard missile; (b) Soft missile

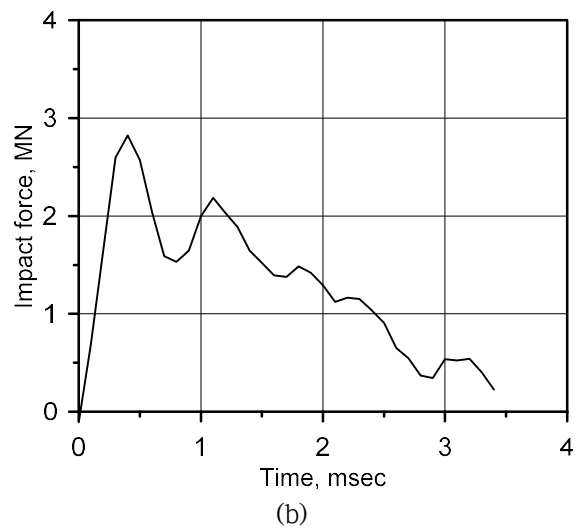
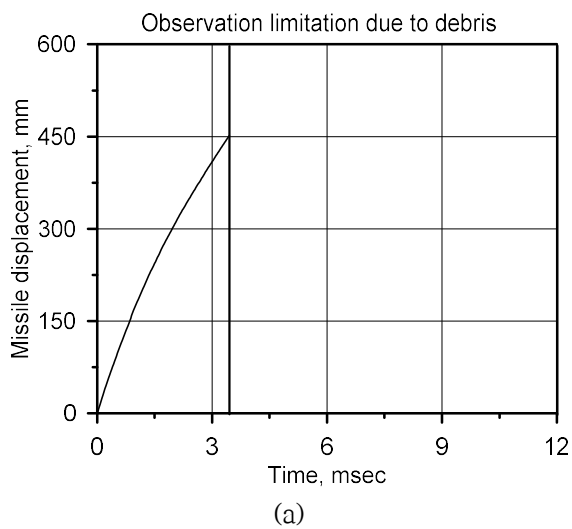
- 그림 3.63의 시험체 중앙부 변위의 경우 Hard missile이 최대 10 mm 정도로 크게 발생한 반면, Soft missile의 경우에는 0.7 mm 정도로 상대적으로 매우 작게 발생하였다.
- 그림 3.64의 지지 파이프 합력은 동일한 발사체 질량 및 충돌속도에 대하여 Hard missile이 Soft missile보다 초기 최대 압축력(양수)이 적게 발생하였다. 그리고 각 발사체에서 충돌속도가 증가할수록 최대 압축력 값이 감소하는 경향을 보였다.
- Hard missile 실험에 대하여 그림 3.65 ~ 그림 3.67과 같이 예비실험에서 활용한 고속카메라 촬영을 통해 발사체 변위의 시간이력 및 충격하중의 시간이력 그래프를 계산하였다. H-V150과 H-V200은 발사체가 정지하기 전에 비산물이 발사체를 가려 식별이 가능한 시간까지 발사체 변위를 계측하였다. 참고로, Soft missile의 경우는 발사체가 충돌과정에서 변형이 발생하므로 발사체 길이별로 발생하는 가속도가 모두 달라 충격하중의 계산이 어려워 따로 계산하지는 않았다.



(a) (b)
그림 3.65 H-V100 시간이력 계측; (a) 발사체 변위; (b) 충격하중

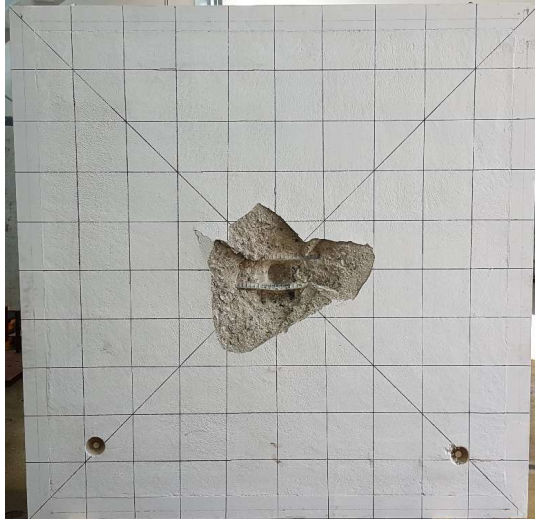


(a) (b)
그림 3.66 H-V150 시간이력 계측; (a) 발사체 변위; (b) 충격하중

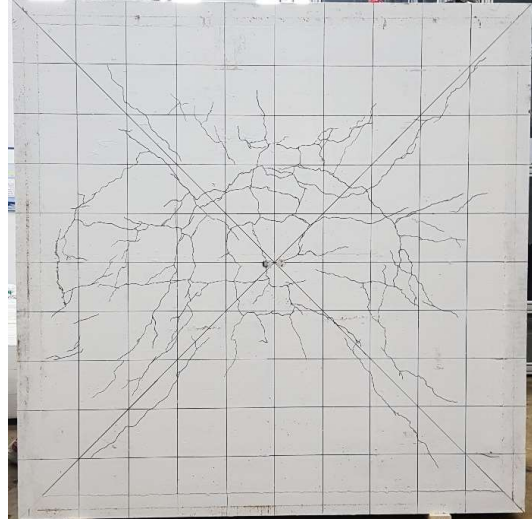


(a) (b)
그림 3.67 H-V200 시간이력 계측; (a) 발사체 변위; (b) 충격하중

- 두 종류의 발사체에 대하여 각 실험의 시험체 전, 후면부의 파괴형상은 그림 3.68 ~ 그림 3.73과 같다. 그리고 후면부가 과도하게 파괴된 H-V150 및 H-V200 실험에 대해서는 본 실험의 해석결과 부분에서 해석 시뮬레이션 결과와 함께 비교하여 시험체 후면부의 파괴형상에 대해 자세히 기술하였다.



(a)



(b)

그림 3.68 H-V100 실험 후 시험체 상태; (a) 전면부; (b) 후면부

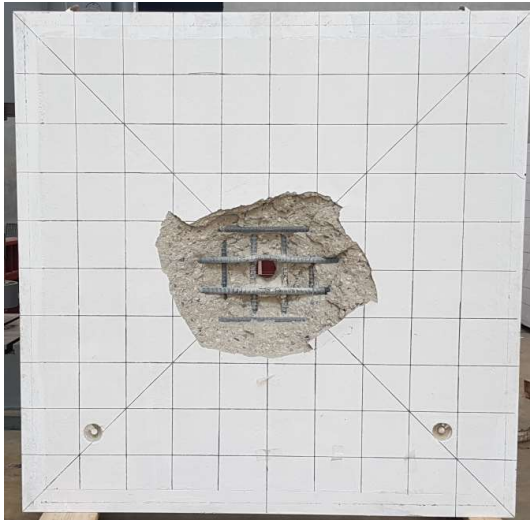


(a)



(b)

그림 3.69 H-V150 실험 후 시험체 상태; (a) 전면부; (b) 후면부

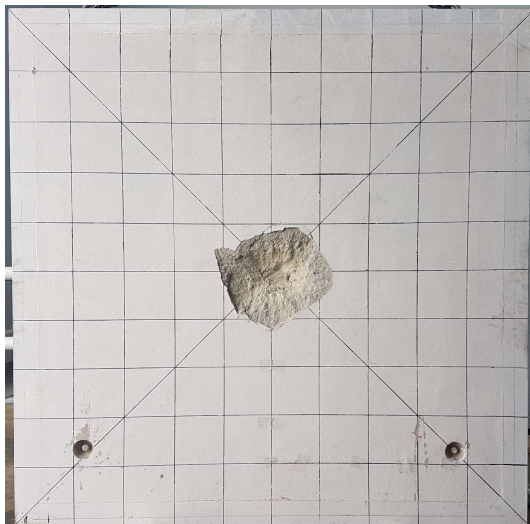


(a)

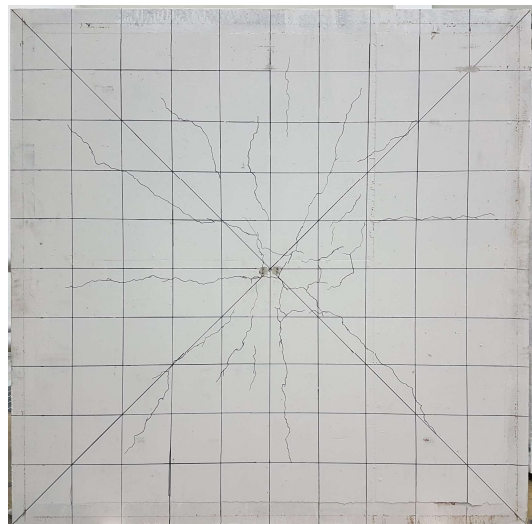


(b)

그림 3.70 H-V200 실험 후 시험체 상태; (a) 전면부; (b) 후면부

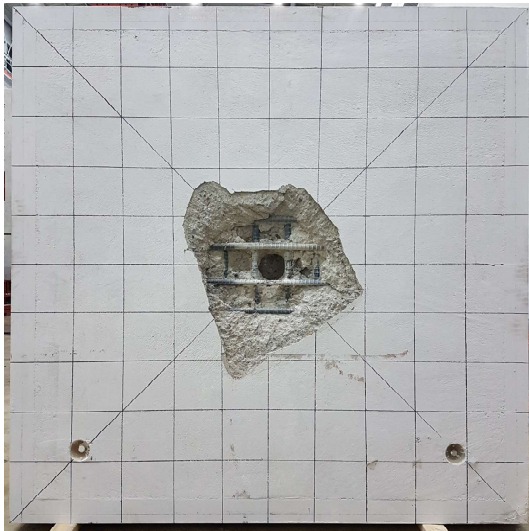


(a)

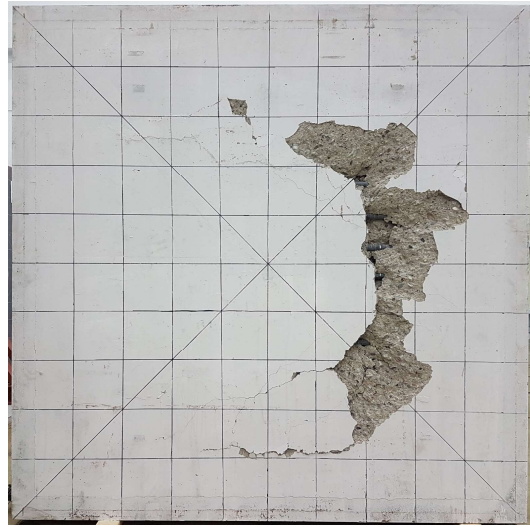


(b)

그림 3.71 S-V100 실험 후 시험체 상태; (a) 전면부; (b) 후면부

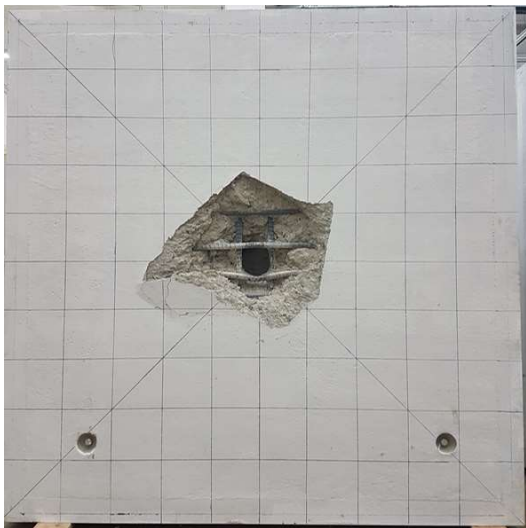


(a)



(b)

그림 3.72 S-V150 실험 후 시험체 상태; (a) 전면부; (b) 후면부



(a)



(b)

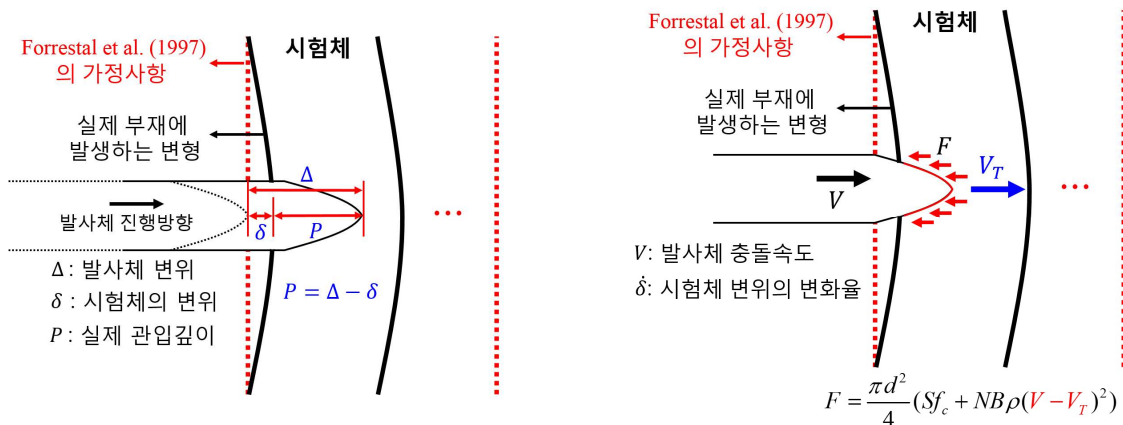
그림 3.73 S-V200 실험 후 시험체 상태; (a) 전면부; (b) 후면부

(나) 충돌해석 시뮬레이션 수행 및 결과

① 예비실험 해석 시뮬레이션 수행 및 결과

㉠ 이론적 관입거동 예측 모델

- 실험결과와 해석 시뮬레이션 결과를 비교하기에 앞서, 강체 미사일의 충돌에 대한 관입거동은 Forrestal et al. (1997) 등의 연구로 이론적 모델이 제안되어있다. 따라서 이론적 모델이 제안되어 있으므로 실험, 해석결과와 더불어 이론적 모델과의 비교를 통해 관입거동에 대한 타당성 검증을 더욱 명확히 수행할 수 있다.
- 관입깊이의 이론적 예측식인 식 3.10은 타겟의 두께를 무한대로 가정한 Forrestal et al. (1997)의 연구를 통해 유도되어 이 식은 실제 부재에서 발생하는 전반거동 등의 영향을 고려하고 있지 않아 부재에서 발생하는 관입깊이 예측에 바로 활용될 수 없다. 타겟에 변위가 발생하는 경우, 그림 3.74과 같이 시험체 변위는 최종 관입깊이, 시험체 변위의 시간에 따른 변화율은 충격하중에 영향을 미치게 된다. 따라서 식 3.10을 부재에 대한 관입거동평가에 적용이 가능하려면 변위 및 변위 변화율의 전반거동 영향을 먼저 평가하여야한다.



(a) 시험체 변위의 영향

(a) 시험체 변위 변화율의 영향

그림 3.74 관입거동에 대한 전반거동의 영향

- 표 3.14은 각 예비실험 별 관입 종료 시점에 발생한 시험체 변위 및 변위의 변화율의 최종 관입깊이 및 충돌직전속도에 대한 비율을 정리한 표이다. 실험결과로부터 시험체 변위는 최종 관입깊이의 2.4%이내, 시험체 변화율은 충돌속도의 1.4% 이내로 매우 적은 비율을 차지하여 전반거동은 관입거동에 큰 영향을 미치지 못함을 확인하였다. 따라서 이 식 3.10은 부재에 대한 관입거동평가에 활용될 수 있다.

표 3.14 시험체 변위, 변위의 변화율의 관입거동에 대한 영향

실험명	관입종료 시				비고
	시험체 변위		시험체 변위의 변화율		
	mm	%	m/s	%	
S36-Flat-V123	-	-	-	-	$\% = \frac{\delta}{P} \text{ and } \frac{V_T}{V_s},$ P: 최종관입깊이 V_s: 발사체의 충돌속도
S41-Flat-V103	0.4	0.4	0.2	0.2	
S41-Blunt-V124	-	-	-	-	
S41-Blunt-V114	2.5	2.4	1.3	1.1	
S39-Sharp-V124	5.6	2.1	1.6	1.3	
S39-Sharp-V115	5.9	2.3	1.6	1.4	
S39-Sharp-V88	0.5	0.3	0.2	0.2	

- 식 3.10은 앞서 선행연구에서 설명한 것과 같이 발사체의 두부형상, 시험체 재료의 특성과 관련된 계수 k , S , B 에 의해 결정된다. Forrestal et al. (2003)의 연구에서는 충돌실험을 수행하고 그 결과로부터 이 결정계들을 제안하였으나, 이 실험은 비구조부재인 무근콘크리트 시험체로부터 얻은 값이므로 본 연구의 대형 철근콘크리트 시험체에 대해 바로 적용하기 어렵다. 따라서 예비 실험결과를 통해 이론적 예측식의 결정계수를 평가하여 대형 철근콘크리트 부재에 적용가능한 이론적 식을 제안하고 이를 실험 및 해석결과와 함께 비교한다.
- 가장 먼저 두부형상에 대한 결정계수 k 를 결정한다. 이때 k 는 Li et al. (2003)의 연구에서 제안한 식 3.8의 형태로 가정하여 k_{flat} 에 대해서만 예비실험의 충격하중 실험결과로부터 결정하였으며, 그림 3.75과 같이 S36-Flat-V123과 S41-Flat-V103의 충격하중의 시간이력에 대하여 식 3.5의 충격하중의 이론적 산정식의 초기 증가구간의 비교를 하여 0.15로 평가되었다. 평가된 k_{flat} 에 대하여 Blunt missile에 대해서도 적용성을 확인해 본 결과, 그림 3.76과 같이 초기 충격하중 증가구간을 잘 예측하는 것을 확인하였다.

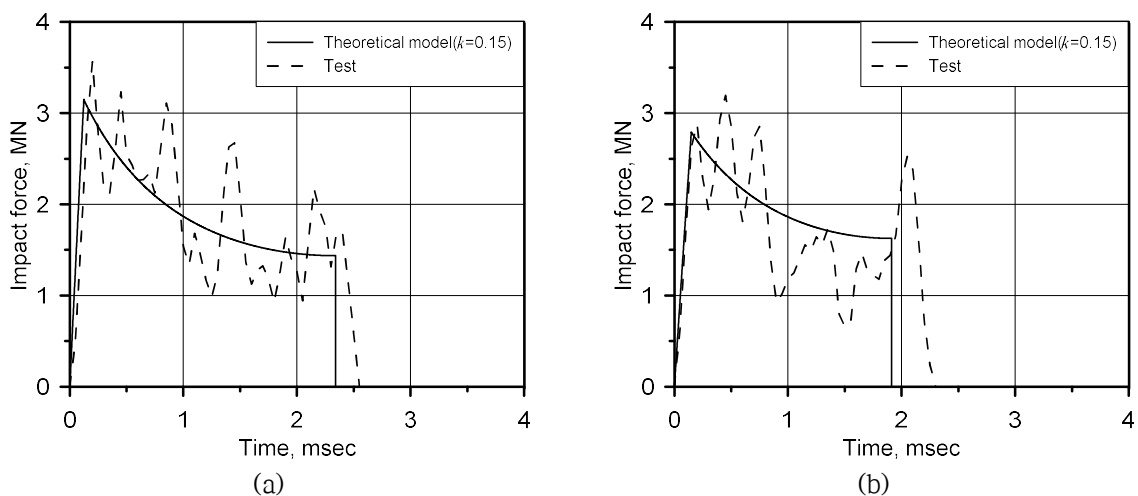


그림 3.75 $k_{\text{flat}} = 0.15$ 에 대한 충격하중 시간이력 비교 ; (a) S36-Flat-V123; (b) S41-Flat-V103

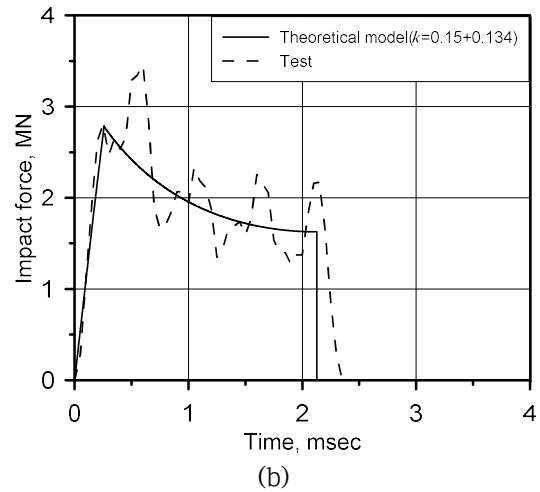
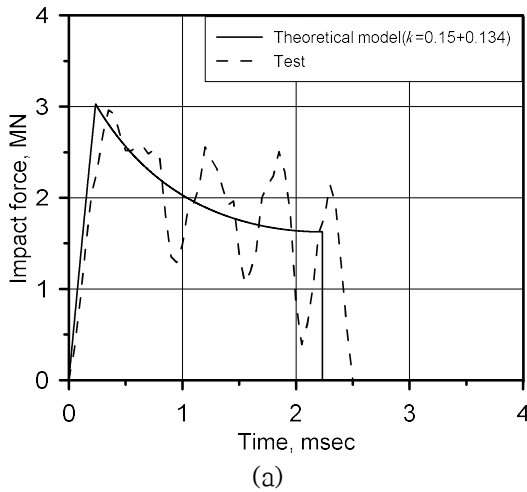


그림 3.76 $k_{\text{flat}} = 0.15$ 에 대한 Blunt missile 실험결과의 적용성 평가; (a) S41-Blunt-V124; (b) S41-Blunt-V114

- 만약 발사체가 구멍깊이(Crater depth), kd 만큼 최종관입이 되었다면 발사체가 정지할 때까지 받는 충격하중은 충돌 직후부터 최대값에 도달하는 초기 증가구간에 해당한다. 따라서 초기 증가구간의 충격하중에 의해 발사체가 감속되어 정지할 때까지의 발사체 변위와 구멍깊이(kd)는 식 3.14과 같은 관계를 갖는다.

$$P(=kd) = V_s \sqrt{\frac{4km}{\pi d S f_c}} \quad (3.14)$$

- 예비실험 중 S39-Sharp-V88의 관입깊이는 183 mm로 식 4.4.2와 같이 계산되는 Sharp missile에 대한 k 값과 거의 비슷하다. 따라서 식 3.14의 관계를 적용할 수 있게되고 이로부터 식 3.10의 관입깊이 이론식의 결정계수 S 를 평가할 수 있다. 그리고 평가된 결정계수 S 는 5.11이며 이를 적용하여 발사체 변위의 시간이력에 대해 실험결과와 이론식을 비교하여보면 그림 3.77과 같이 잘 예측함을 확인할 수 있다.

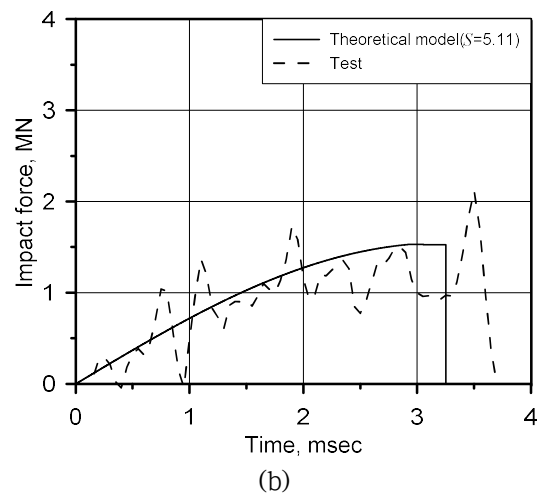
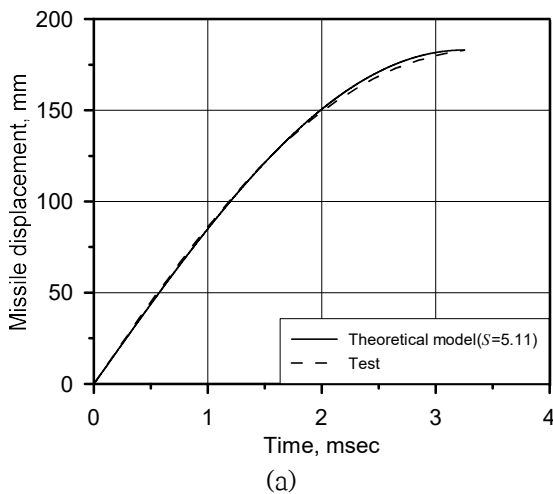


그림 3.77 $S = 5.11$ 에 대한 V39-Sharp-V88의 예측성 비교; (a) 변위 시간이력; (b) 충격하중

- 식 3.10의 결정계수 중 아직 결정되지 못한 계수 B 는 시험체 재료의 관성거동과 관련된 계수이다. 이를 Sharp missile에 대한 실험결과와 비교하면, 그림 3.78에서 볼 수 있듯이 Sharp missile의 관입거동에는 계수 B 가 큰 영향을 미치지 못한다. 이는 B 의 영향이 식 3.6의 Sharp missile에 대한 무차원의 두부형상 계수(N) 값이 0.106의 작은 값으로 인해 감소하기 때문이다.

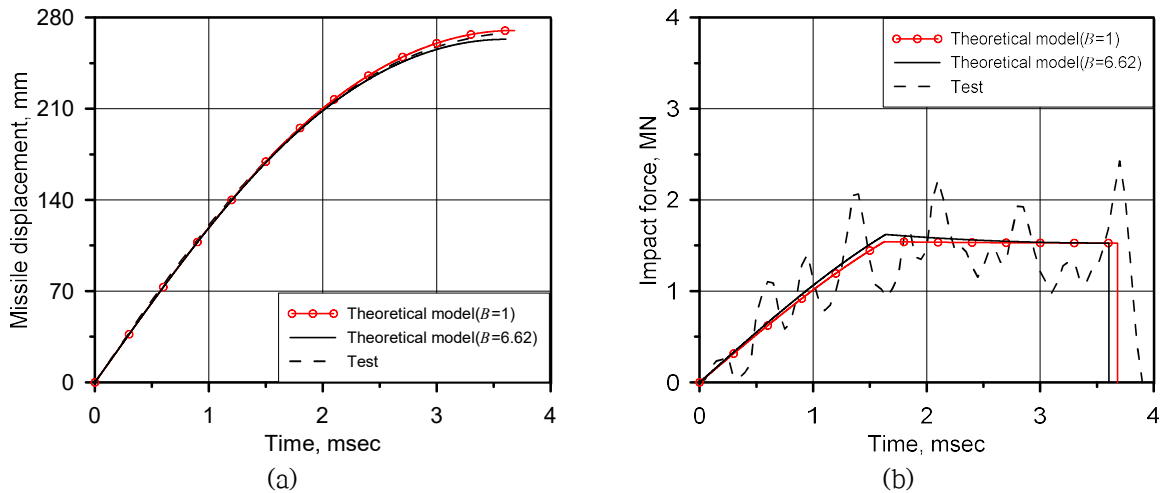


그림 3.78 V39-Sharp-V124에 대한 B 의 영향; (a) 변위 시간이력; (b) 충격하중

- 따라서 B 를 정확히 평가하기 위하여 N 값이 큰 Flat 및 Blunt missile에 대한 실험결과로부터 6.62로 평가되었고 그림 3.79 및 그림 3.80과 같이 각각 Flat missile, Blunt missile에 대하여 발사체 변위의 시간이력을 잘 예측됨을 알 수 있다.

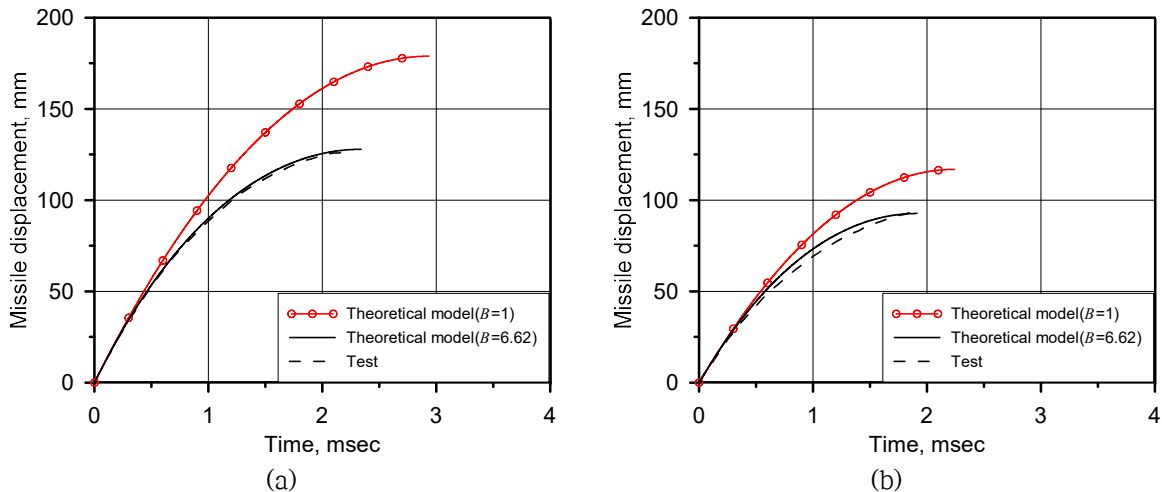


그림 3.79 $B = 6.62$ 에 대한 Flat missile 실험결과의 예측성 평가; (a) S36-Flat-V123; (b) S41-Flat-V103

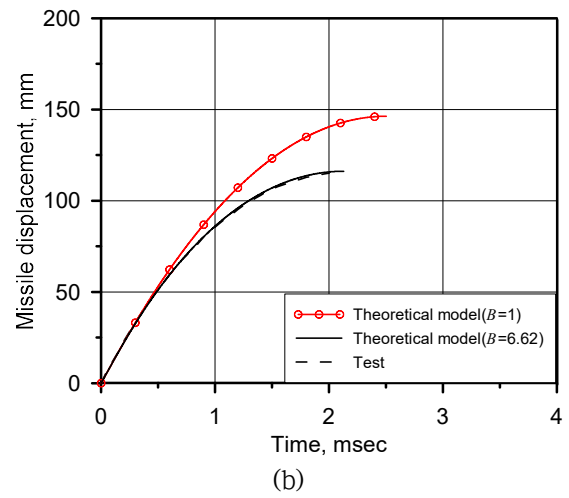
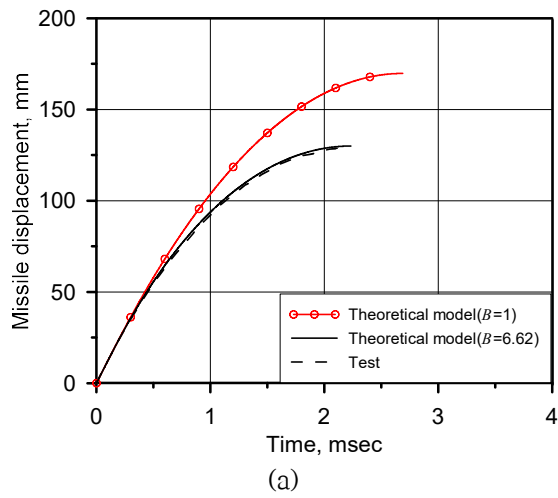


그림 3.80 $B = 6.62$ 에 대한 Blunt missile 실험결과의 예측성 평가; (a) S41-Flat-V124; (b) S39-Blunt-V114

- 따라서 철근콘크리트 패널 시험체에 대하여 관입거동을 예측할 수 있는 이론적 예측식의 결정계수 $k_{\text{flat}} = 0.15$, $S = 5.11$, $B = 6.62$ 는 실험 및 해석결과와의 비교를 통해 관입거동에 대한 실험기법의 타당성을 평가한다.

㉔ 예비해석 시뮬레이션 수행 및 결과

㉕ 모델링 범위

- 충돌실험 시 반력계측을 위해 지지 파이프에 변형률 게이지를 설치하여 반력을 획득하였다. 따라서 모델링 범위에 시험체 뿐만 아니라 시험체 고정 프레임 및 지지 파이프까지 포함하였다.
- 또한, 1/2 및 1/4 모델링 시 대칭면에서의 설정하는 경계조건으로 인한 constraint 효과가 해석결과를 왜곡하는 경우가 있을 수 있으므로 그림 3.81과 같이 full modeling을 수행하였다.

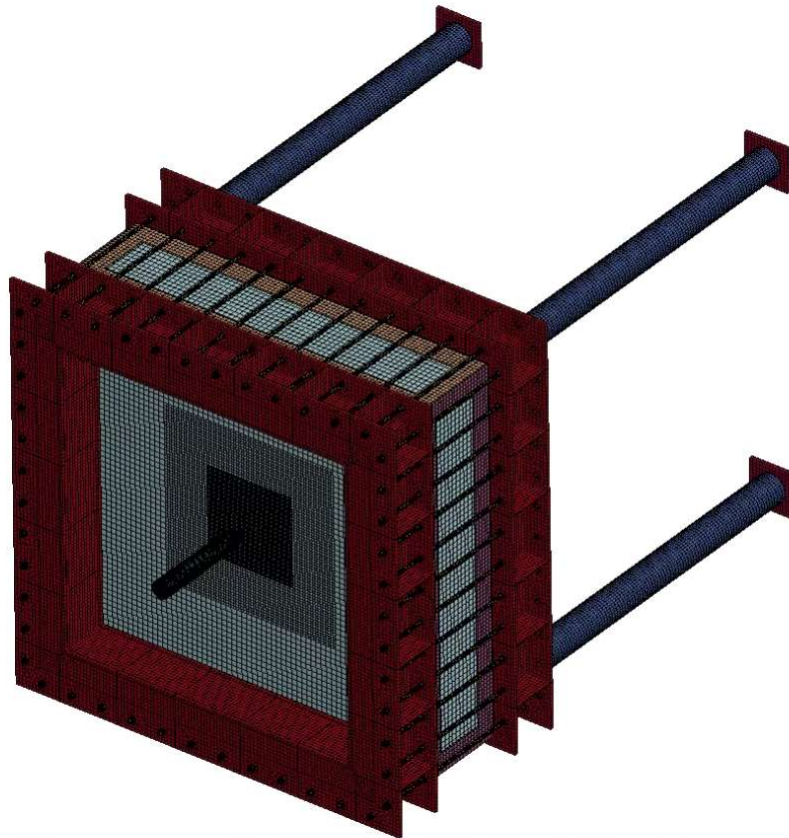


그림 3.81 충돌해석 모델링

㉠ 강체 발사체 모델링

- 요 소

- 요소는 예비실험 Sharp missile의 날카로운 곡면을 적절히 모델링하기 위하여 너무 크지 않도록 5 mm 크기의 8절점 solid를 사용하였다.



그림 3.82 강체 미사일 모델링

- 재료모델

- 발사체의 재료모델은 강체 발사체의 경우 소성변형이 거의 발생하지 않는다는 가정하에 MAT1 Elastic 모델을 사용하였다. 이때 탄성계수는 일반적인 강재의 탄성계수인 200 GPa을 입력하였다.

㉡ 시험체 모델링 - 콘크리트

- 요 소

- 시험체의 콘크리트 부의 요소는 모델은 Lagrangian solid 요소를 사용하였고, 발사체의 관입과정에서 요소의 왜곡에 의해 해석의 에러가 발생하기 이전에 요소의 주응력이나 주변형률 등이 일정 값에 도달하면 요소를 삭제하는 erosion 기법을 적용하였다. erosion criteria는 기존 해석연구를 참고하여 여러 번의 해석수행을 통해 경험적으로 압축, 인장 주변형률 0.3으로 설정하였다.
- 발사체가 충돌하는 부분의 요소 크기가 클수록, 발사체의 관입 도중 erosion에 의해 요소가 삭제된 후 그 뒤에 존재하는 요소에 다시 접촉하는 데에 더 긴 시간이 소요됨에 따라 발사체의 관입에 대하여 콘크리트 요소가 연속적으로 저항하지 못하게 된다. 이러한 문제로 인해 관입거동이 잘 묘사되지 않을 수 있어 Lagrangian solid 요소를 사용할 시 발사체의 충돌부는 요소의 크기가 적절히 작게 모델링 되어야 한다. 따라서 요소 크기 30 mm에 대하여 그림 3.83과 같이 중앙부로 갈수록 요소 크기를 줄여 15 mm, 7.5 mm로 모델링하였다.

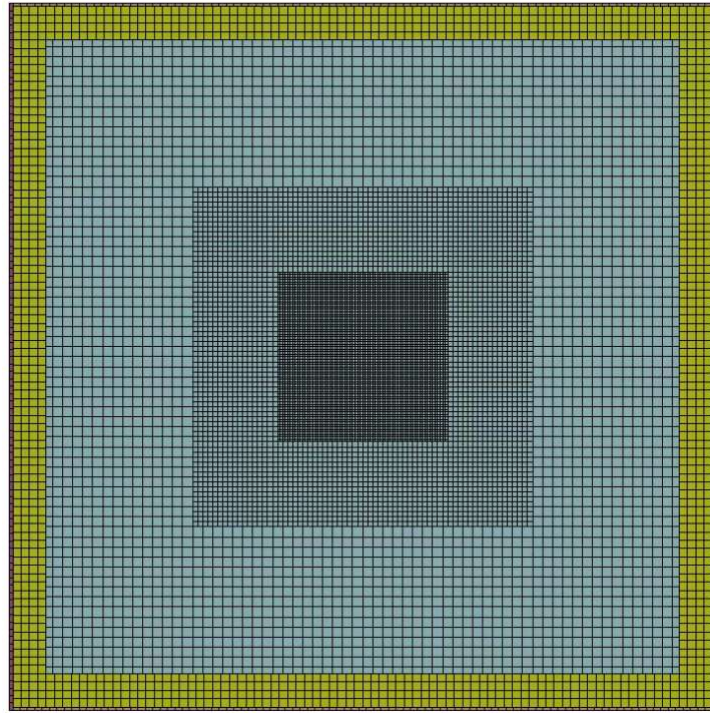


그림 3.83 시험체 모델링

- 재료모델

- 콘크리트의 재료모델은 MAT159 Continuous smoothed cap model을 사용하였으며 표 3.12의 압축강도 실험결과를 인풋데이터로 입력하였다. 그 외 콘크리트의 3축 응력상태에서의 거동을 모사하는 여러 파라미터들은 해당 모델 자체에서 자동으로 생성하는 값을 사용하였다.

㉞ 시험체 모델링 - 철근

- 요 소

- 철근은 충돌부 영역에 대해 20 mm 크기의 beam element를 사용하여 모델링하였으며 단면에 대해 4 points 가우스 적분점을 적용하여 적분하였다.
- 콘크리트 요소와 철근 요소간의 적합조건은 Lagrangian in Solid 옵션을 사용하여 완전합성거동을 모사하였다.

- 재료모델

- 철근의 재료모델은 MAT24 Piecewise linear plasticity 모델을 사용하였고 bi-linear 형태로 철근의 응력-변형을 관계를 입력하였다. 항복강도는 400 MPa로 입력하였으며 Hardening 구간의 접선계수는 2 GPa로 설정하였다.

㉔ 시험체 고정 프레임 및 지지 파이프 모델링

- 요 소

- 요소는 10~20 mm 크기의 8절점 Lagrangian solid를 사용하였다.

- 재료모델

- 재료모델은 선형탄성모델을 사용하였으며 탄성계수는 200 GPa, 밀도는 $7,850 \text{ kg/m}^3$ 로 설정하였다.

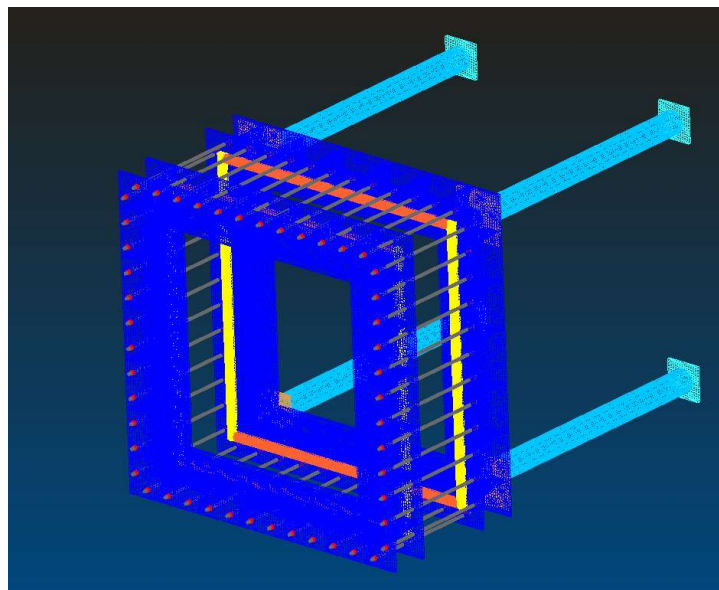


그림 3.84 시험체 고정 프레임 및 지지 파이프 모델링

㉕ 초기조건 및 경계조건

- 초기조건으로는 발사체에 초기속도를 실측 값을 사용하여 입력해주었으며 발사체를 시험체로부터 50 mm 이격하여 위치시켰다.
- 경계조건은 반력벽 방향 지지 파이프 플레이트면의 x, y, z방향 변위를 구속하였으며 반사응력파를 없애기 위해 Non-reflecting boundary condition 옵션을 사용하였다.

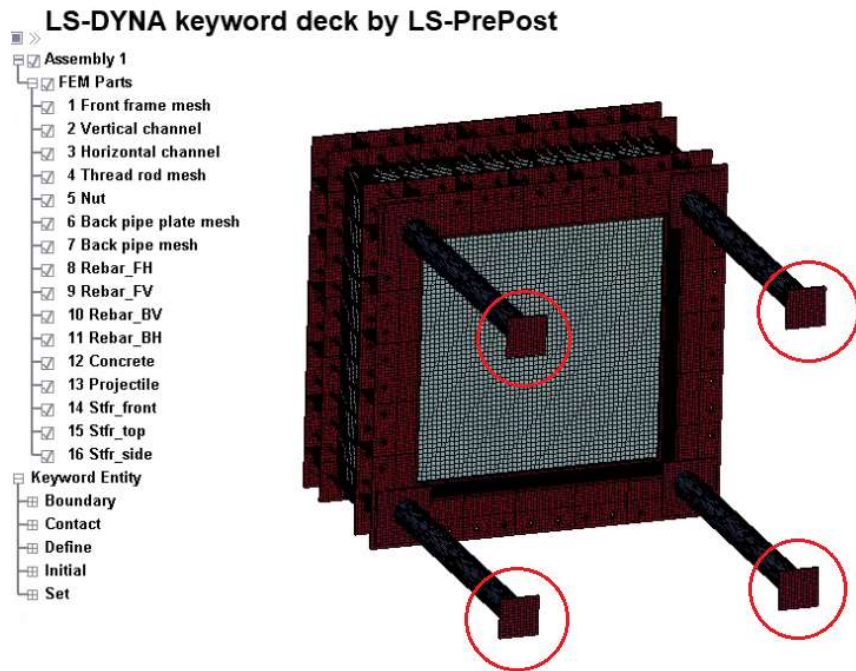
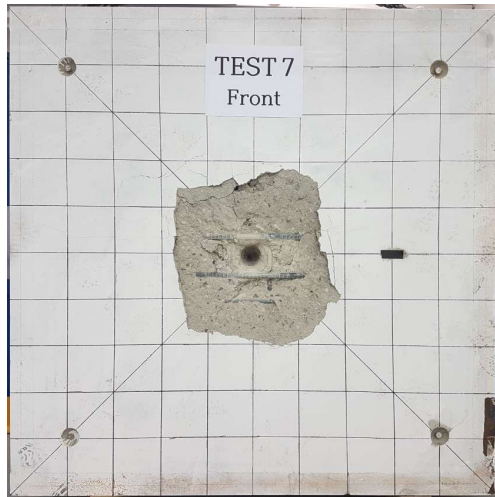


그림 3.85 모델 경계조건

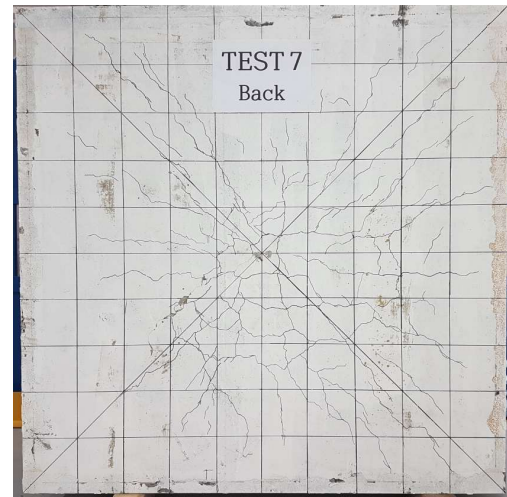
㊤ 강제 미사일 충돌실험 해석결과

- 시험체 변형

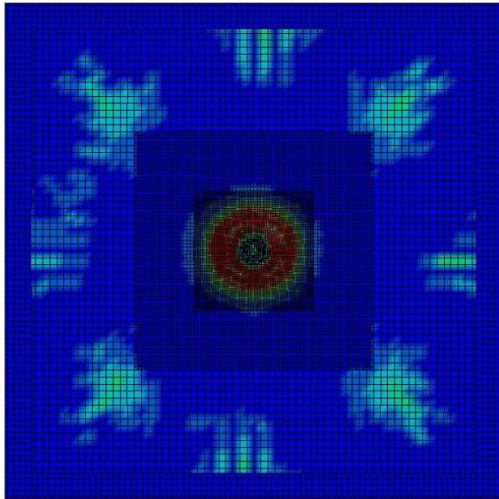
- 각 예비실험에 대한 해석결과, 배면파쇄나 관통이 발생하지 않고 실험결과와 같이 오직 관입거동만이 발생하는 것을 확인하였다.
- 그림 3.86은 S39-Sharp-V124 실험에서의 시험체 파괴형상과 해석으로부터 얻은 시험체의 유효소성변형률을 나타낸다. 해석결과에서 파란색으로 표현되는 요소는 소성변형이 없는 것을 나타내고 붉은색으로 갈수록 소성 데미지가 심각하게 발생한 것을 나타낸다. 실험 후 시험체 파괴형상을 보면 spalling과 배면에 균열이 발생하였으며 해석의 경우도 이와 유사하게 전면의 spalling 및 후면의 일부 소성 데미지가 발생하였다. 해석의 spalling 면적이 실험보다 조금 작게 발생하였으나 전반적으로 전면의 Spalling 및 후면의 균열양상이 실험과 해석이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.



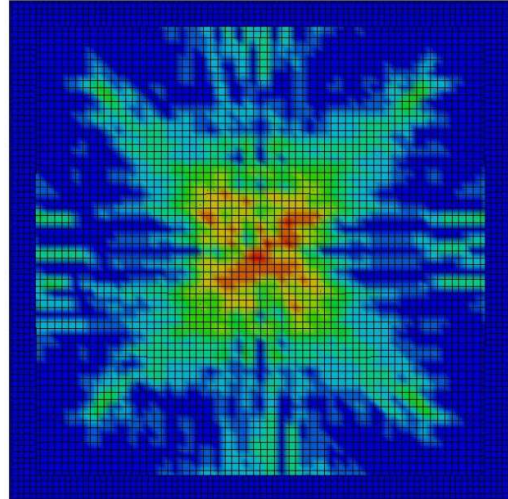
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3.86 S39-Sharp-V124 파괴형상; (a) 시험체 전면 실험결과; (b) 시험체 후면 실험결과; (c) 시험체 전면 해석결과; (d) 시험체 후면 해석결과

- 시험체 변위의 영향

- 관입깊이 및 발사체에 작용하는 충격하중에 대한 비교에 앞서 이론적 모델 제안 시와 동일하게 시험체 변위가 관입거동에 미치는 영향에 대하여 평가가 먼저 수행되어야 한다.
- 이를 위해, 수행한 예비실험 중 S41-Blunt-V114 실험에 대하여 시험체 변위의 실험 및 해석결과를 그림 3.87과 같이 비교하였다. 두 결과를 비교하여 보면 해석의 변위가 실험에서 측정한 변위보다 초기에 빠르게 증가하고 발생 변위량이 다소 더 크다. 그러나 해석결과 역시 관입종료 시의 변위가 4.65 mm 정도로 최종 관입깊이 115.1 mm에 비하면 4% 정도로 매우 작은 수준이기 때문에 관입거동에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

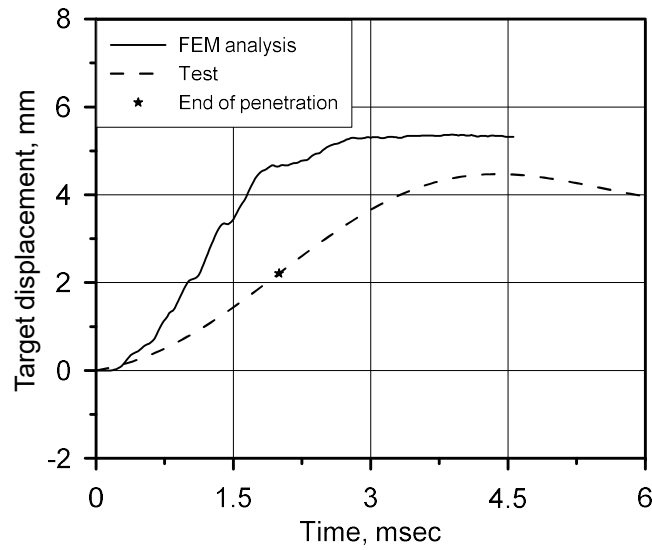


그림 3.87 S41-Blunt-V114 실험 변위이력 비교

- 관입거동

- 각 실험별로 관입깊이를 나타내는 발사체 변위의 시간이력과 충격하중의 시간이력을 비교하여 부재 충돌실험에 대한 타당성을 검증하고자 한다. 이때 발사체 변위 및 충격하중의 비교는 실험결과 및 해석결과에 더하여, 앞서 제안하였던 관입거동의 이론적 모델과 함께 그림 3.88 ~ 그림 3.94와 같이 비교하였다. 실험 및 이론적 모델에 대하여 해석결과도 관입거동을 적절히 예측하는 것을 확인하였다.

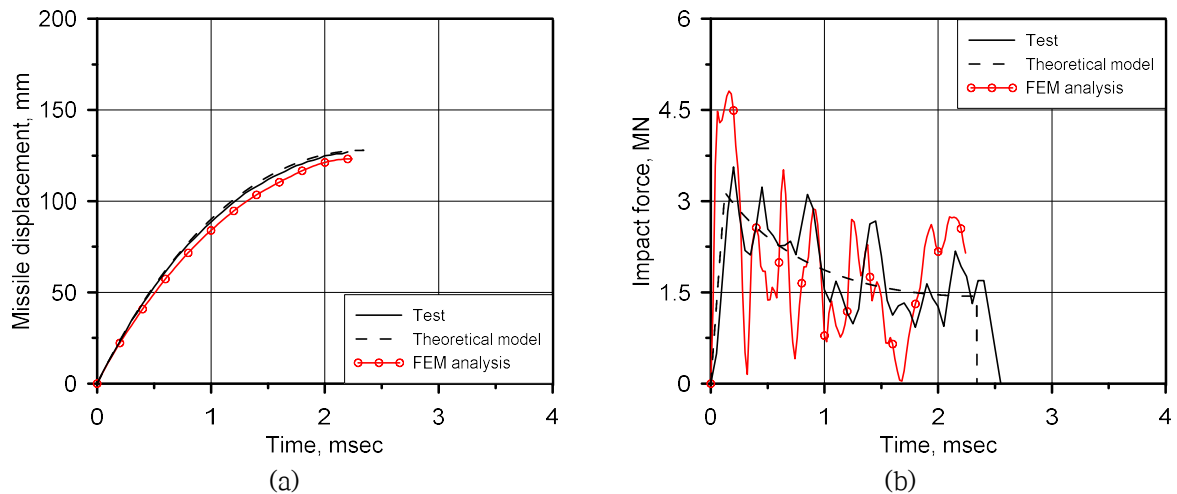


그림 3.88 S36-Flat-V123 관입거동 비교; (a) 발사체 변위; (b) 충격하중

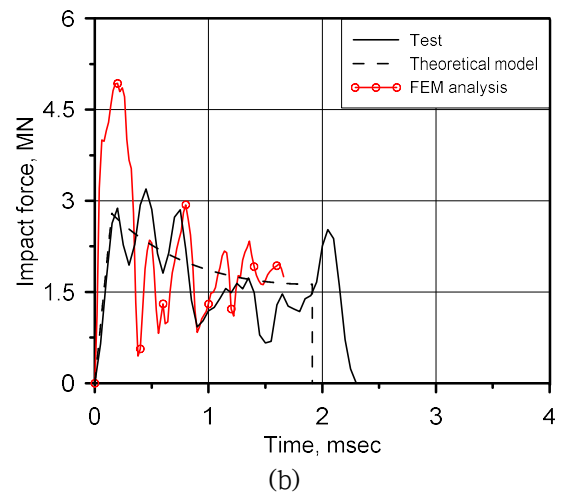
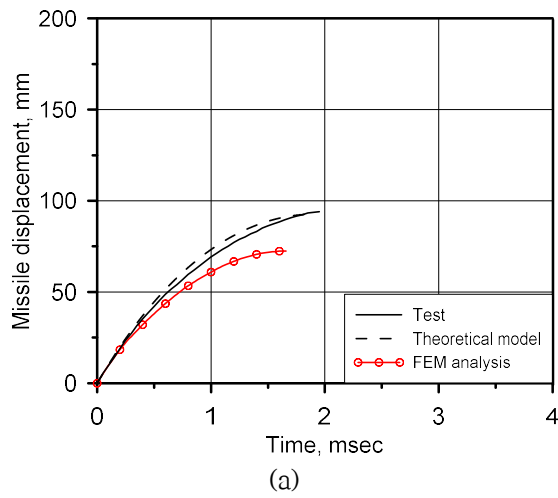


그림 3.89 S41-Flat-V103 관입거동 비교; (a) 발사체 변위; (b) 충격하중

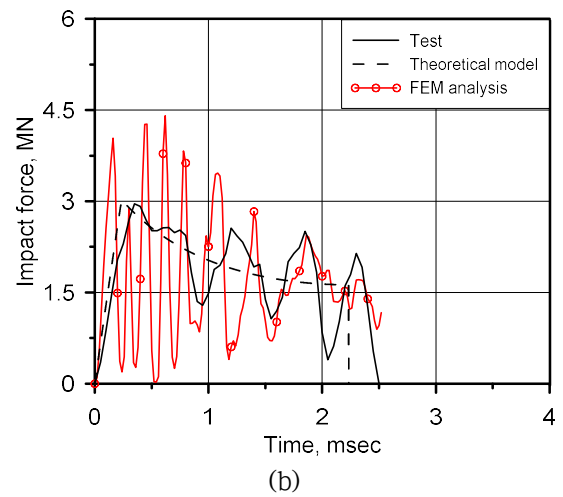
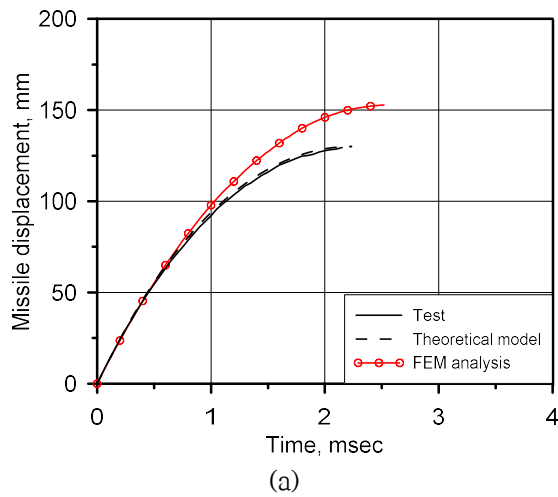


그림 3.90 S41-Blunt-V124 관입거동 비교; (a) 발사체 변위; (b) 충격하중

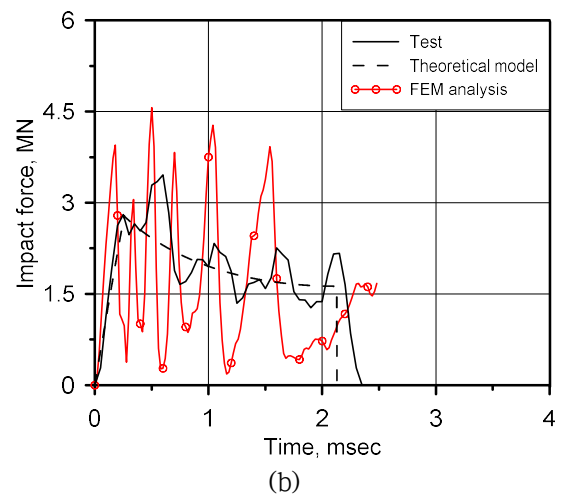
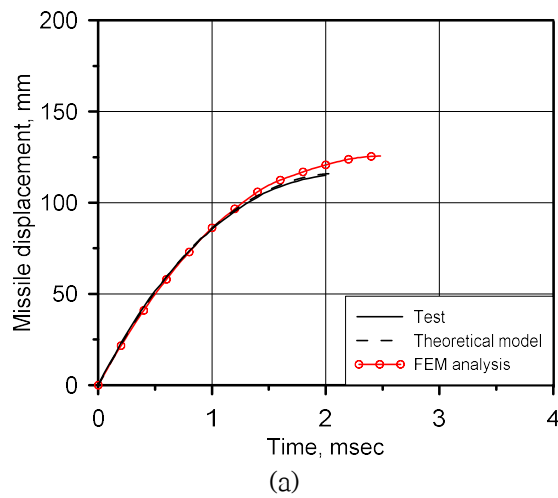


그림 3.91 S41-Blunt-V114 관입거동 비교; (a) 발사체 변위; (b) 충격하중

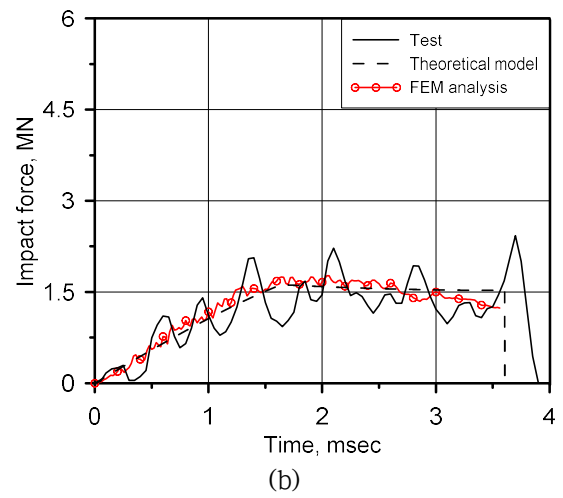
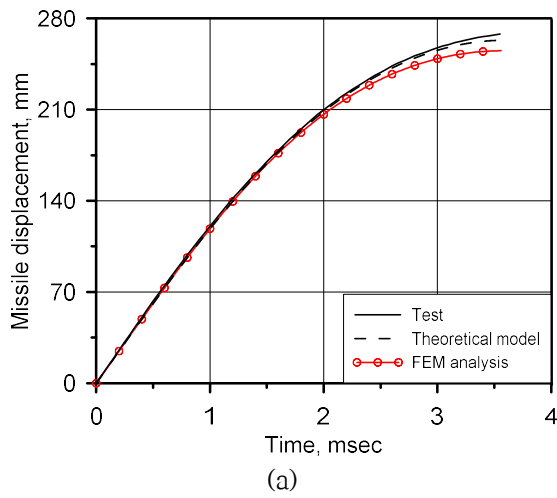


그림 3.92 S39-Sharp-V124 관입거동 비교; (a) 발사체 변위; (b) 충격하중

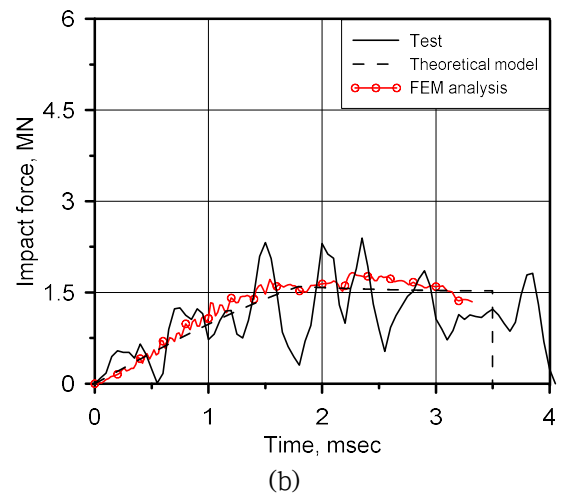
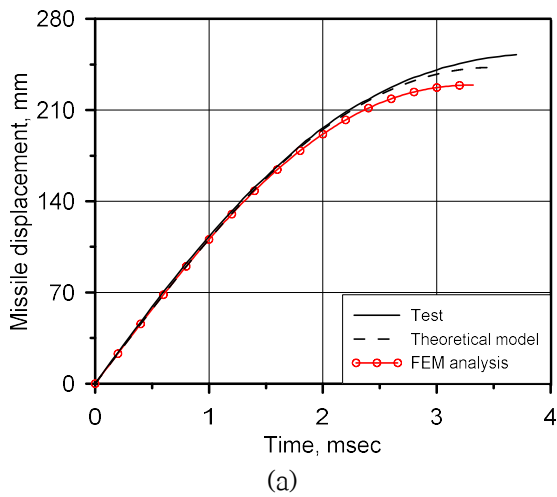


그림 3.93 S39-Sharp-V115 관입거동 비교; (a) 발사체 변위; (b) 충격하중

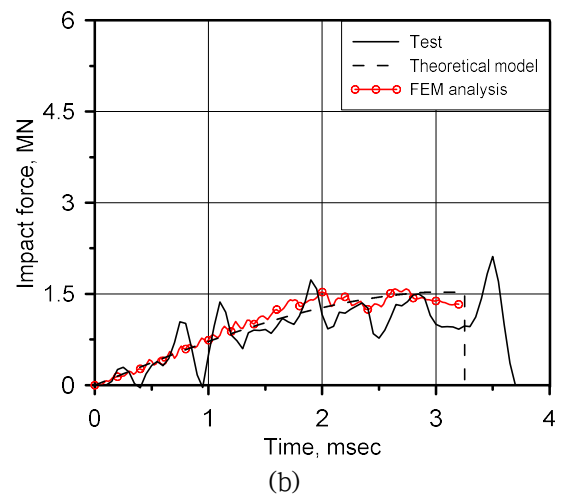
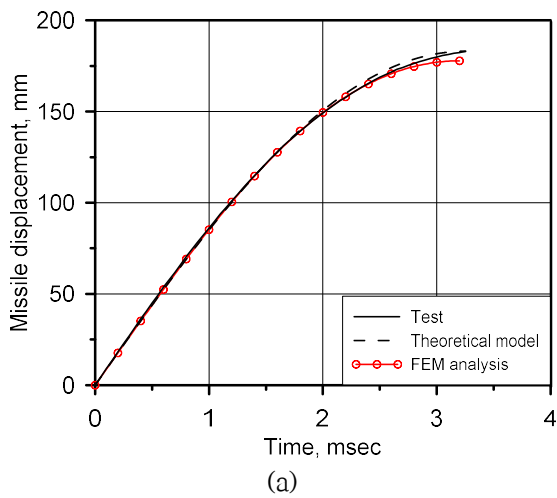


그림 3.94 S39-Sharp-V88 관입거동 비교; (a) 발사체 변위; (b) 충격하중

㉟ 해석결과 요약

- 관입거동에 대한 정확한 평가를 위하여, 실험결과를 기반으로 이론적 관입깊이 예측식의 결정계수를 제안하여 이론적 모델을 구축하였고, 실험상황을 모델링하여 해석 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 실험결과에 대하여 제안한 이론적 모델과 해석 결과를 서로 비교하여 관입거동을 평가하였다.
- 철근콘크리트 시험체에 대하여 관입거동을 평가한 결과, 시험체의 변위로 인한 전반 거동의 관입거동에 대한 영향은 미미하며 시간에 따른 발사체 변위(관입깊이) 및 충격하중이력이 실험결과, 이론적 모델, 해석 결과가 비교적 비슷하여 관입거동이 잘 예측됨을 확인하였다.
- 반면, 시험체 변위의 경우에는 해석결과가 실험결과보다 크게 평가되어 잘 예측하지 못하는 것을 확인하였다. 이는 3축응력을 받는 콘크리트의 변형을 3축 응력하에서의 콘크리트 재료거동 데이터의 부재로 해석 시뮬레이션이 정확히 모사하지 못하기 때문으로 생각된다.

㉠ 본 실험 해석 시뮬레이션 수행 및 결과

㉡ 해석 시뮬레이션 모델 업데이트

- 본 실험에 대한 해석 시뮬레이션은 예비실험에서 수행한 관입거동 이외의 국부거동을 모사할 수 있는 해석 시뮬레이션을 수행하기 위해 예비실험 충돌해석 시뮬레이션 모델의 미비점을 파악하고 이를 개선하였다.
- 본래의 예비실험 충돌해석 시뮬레이션 모델에서 사용한 Lagrangian solid 요소는 관입거동 모사 시 요소가 특정 응력상태, 혹은 특정 변형률 상태에 도달한 이후 요소가 삭제되는 erosion 기능을 통해 구현할 수 있으나 요소가 삭제되는 기준인 erosion criteria의 설정방법에 대하여 가이드라인은 전무한 실정이다. 따라서 비교할 실험결과가 없는 경우, 연구자마다 erosion criteria가 상이하게 설정될 수 있어 해석결과의 일관성을 보장하기 힘들다는 한계점이 있다.
- 따라서 Lagrangian solid 요소 및 erosion 기능의 한계점을 극복할 수 있고, 배면파쇄 및 관통을 포함한 전체 국부거동을 모사할 수 있는 smoothed particle hydrodynamics (SPH) 요소를 국부거동이 발생하는 영역에 도입하였다.

㉢ 모델링 범위

- 예비실험과 동일하게 시험체를 포함하여 시험체 고정 프레임 및 지지 파이프 모두 모델링하였다. 이를 통해 실험수행 시 계측한 지지 파이프의 합력을 평가하기 위한 게이지 부착위치와 동일한 위치의 합력의 시간이력을 획득하였다.

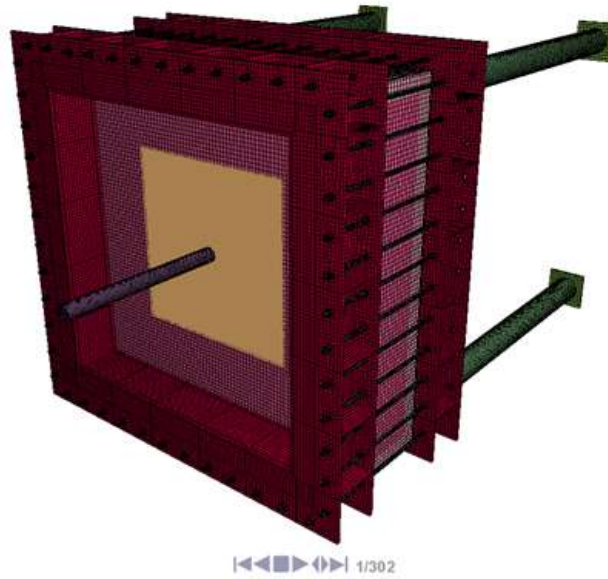


그림 3.95 충돌해석 모델링

㉔ 강체 발사체 모델링

○ 요 소

- 요소는 10 mm 크기의 8절점 solid를 사용하였으며 spurious zero energy mode를 방지하기 위해 full integration을 수행하였다.

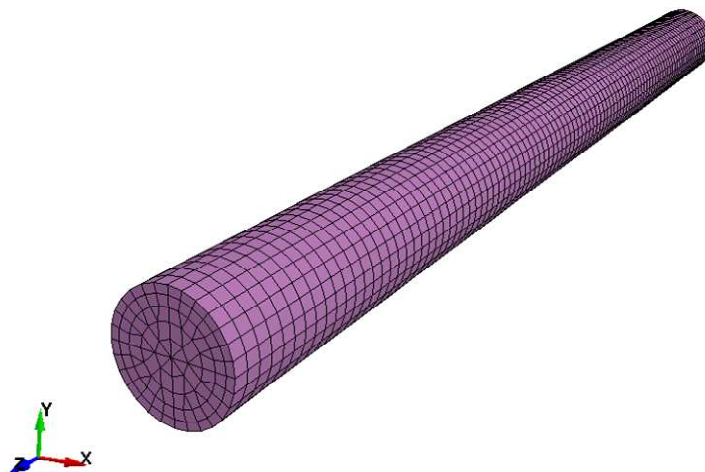


그림 3.96 강체 미사일 모델링

○ 재료모델

- 발사체의 재료모델은 MAT24 Piecewise linear plasticity 모델을 사용하였다. 발사체의 재료물성은 그림 3.97와 같이 KS B 0802를 따라 정적 인장강도시험을 수행하여 확보하였다. 그림 3.98은 얻어진 응력-변형률 관계를 보여준다. 이로부터 그림 3.99와 같이 발

사체의 응력-변형률 관계 모델을 설정하였으며, 이를 소성 진응력-진변형률로 변환하여 테이블로 입력해주었다.

- 강재의 변형률 속도 의존특성을 고려하기 위해 Cowper-Symonds model을 사용하였으며 C 및 P 계수는 mild steel에 대한 값인 40과 5로 각각 설정하였다.



그림 3.97 발사체 재료 인장강도실험

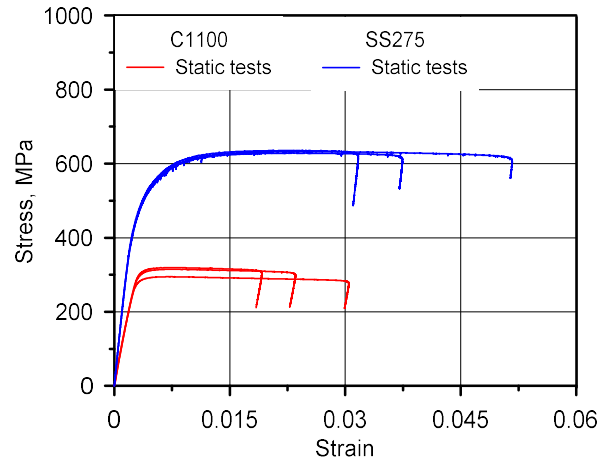


그림 3.98 발사체 응력-변형률 관계

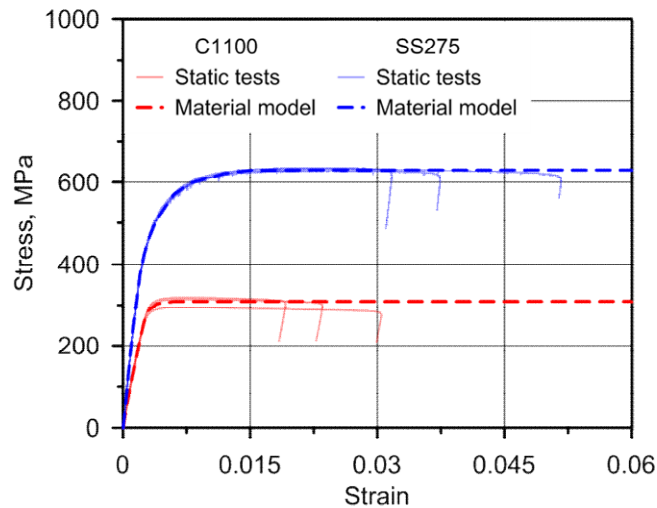


그림 3.99 발사체 응력-변형률 모델

㉠ 비강체 미사일

○ 요 소

- 비강체 발사체의 경우 충돌과정에서 대변형이 생기기 때문에 Lagrangian 요소를 적용할 시 요소 왜곡이 심각하게 발생한다. 이를 방지하기 위해 mesh-free element인 smoothed particle hydrodynamics(SPH)를 사용하여 10 mm 간격으로 모델링하였다.

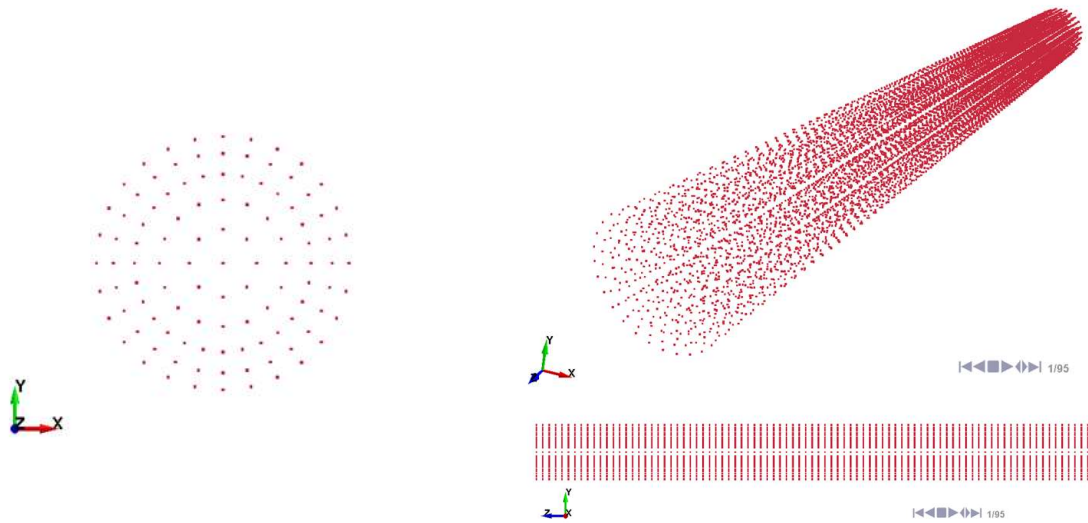


그림 3.100 비강체 미사일 모델링

○ 재료모델

- 강체 미사일과 마찬가지로 발사체의 재료모델은 MAT24 Piecewise linear plasticity 모델을 사용하였으며 발사체의 재료물성은 정적 인장강도시험을 수행하여 확보하였다. 이로부터 그림 3.99와 같이 발사체의 응력-변형률 관계 모델을 설정하였으며, 이를 소성 진응력-진변형률로 변환하여 테이블로 입력해주었다. 변형률 속도 의존특성을 고려하지 않았다.

㉮ 시험체 모델링 - 콘크리트

○ 요 소

- 콘크리트 충돌부에서는 대변형은 물론 관통까지 발생하게 된다. 따라서 일반적인 Lagrangian solid 요소로는 해당 현상을 모사할 수 없다. 따라서 요소의 대변형 및 관통을 모사할 수 있는 arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 요소나 discrete element, 혹은 SPH 요소를 사용하여 모델링을 수행해야만 한다. 본 연구에서는 SPH를 사용하여 12.5 mm 간격으로 모델링을 수행하였다.
- 콘크리트 외곽부는 상대적으로 변형이 작기 때문에 25 mm 크기의 8절점 Lagrangian solid로 모델링하였다. Spurious zero energy mode를 방지하기 위해 full integration을 수행하였다.

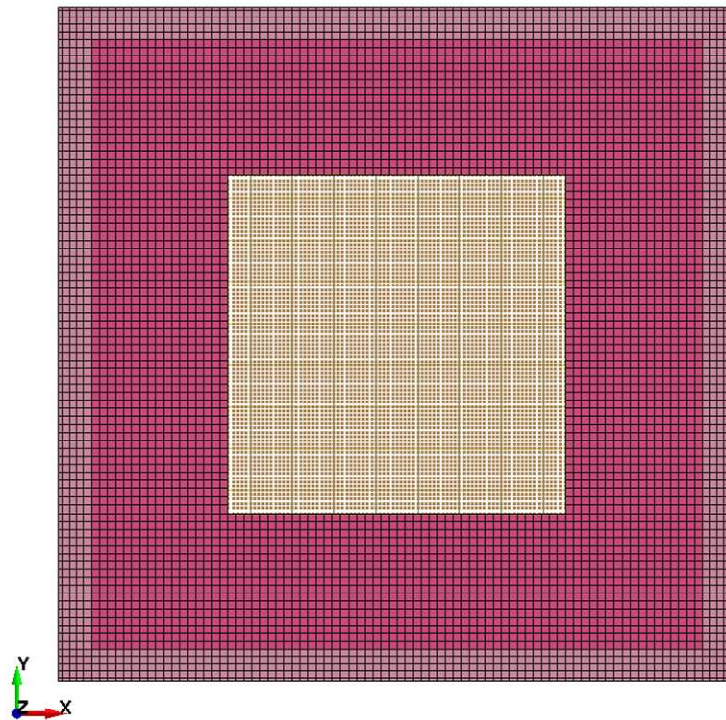


그림 3.101 시험체 모델링

○ 재료모델

- 콘크리트의 재료모델은 MAT159 Continuous smoothed cap model을 사용하였으며 콘크리트의 재료물성은 ASTM C39 및 C469를 따라 압축강도실험을 수행하여 얻은 값을 사용하였다. 표 3.15은 콘크리트 정적재료특성을 보여준다.

표 3.15 콘크리트 정적재료특성

압축강도, MPa	밀도, kg/m ³	탄성계수, MPa	전단탄성계수, MPa	체적탄성계수, MPa
49.4	2,623	21,052	9,288	9,619

㉢ 시험체 모델링 - 철근

○ 요 소

- 철근은 충돌부 영역에 대해 12.5 mm, 외곽부 영역에 대해 25 mm 크기의 beam element를 사용하여 모델링하였으며 단면에 대해 4 points 가우스 적분점을 적용하여 적분하였다.
- 적합조건의 경우 콘크리트 SPH 요소와는 절점공유를 하여 완전합성거동을 모사하였으며 콘크리트 solid 요소와는 Lagrangian in Solid 옵션을 사용하여 완전합성거동을 모사하였다.

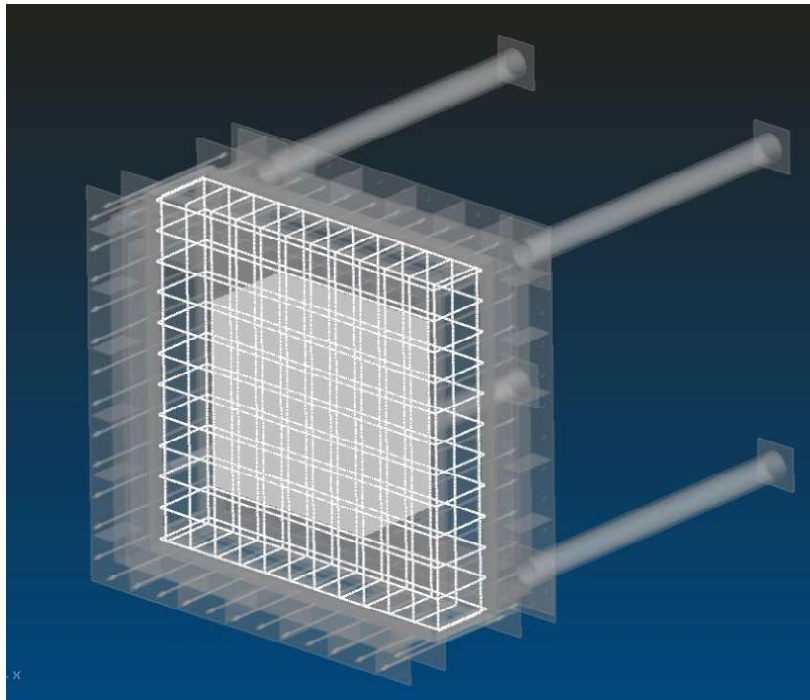


그림 3.102 철근 모델링

○ 재료모델

- 철근 재료모델은 MAT24 Piecewise linear plasticity 모델을 사용하였다. 철근의 응력-변형률 관계는 KS B 0802를 따라 정적 인장강도시험을 수행하여 확보하였다. 이로부터 그림 3.103과 같이 철근의 응력-변형률 관계 모델을 설정하였으며, 이를 소성 진응력-진변형률로 변환하여 테이블로 입력해주었다.
- 철근의 변형률 속도 의존특성을 고려하기 위해서 ACI 370R-14에 제시된 DIF 값을 테이블로 입력하여 사용하였다.

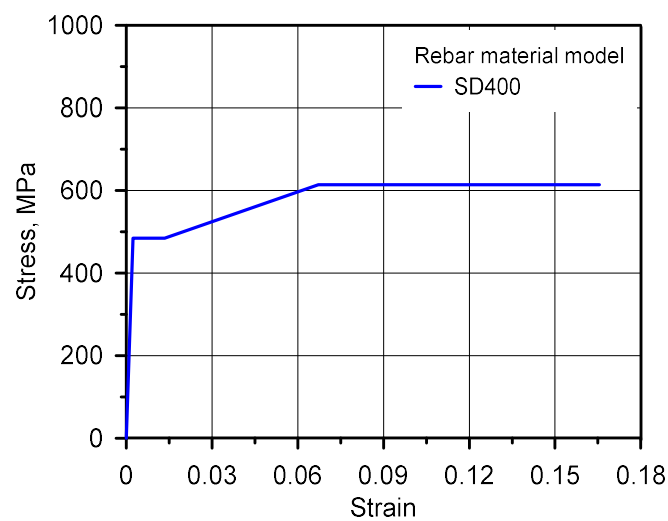


그림 3.103 철근 응력-변형률 관계

㉔ 시험체 고정 프레임 및 지지 파이프 모델링

○ 요 소

- 요소는 10~20 mm 크기의 8절점 Lagrangian solid를 사용하였으며 spurious zero energy mode가 발생하는 파트에 대해서는 full integration을, 그 외 파트에 대해서는 reduced integration을 수행하였다.

○ 재료모델

- 재료모델은 예비실험 해석과 동일하게 선형탄성모델을 사용하였으며 탄성계수는 200 GPa, 밀도는 7,850 kg/m³로 설정하였다.

㉠ 초기조건 및 경계조건

- 초기조건으로는 발사체에 초기속도를 실측 값을 사용하여 입력해주었으며 발사체를 시험체로부터 10 mm 이격하여 위치시켰다.
- 경계조건은 예비실험에 대한 해석과 동일하게 Non-reflecting boundary condition 옵션을 사용하였다.

㉡ 강체 미사일 충돌실험 해석결과

○ 시험체 변형

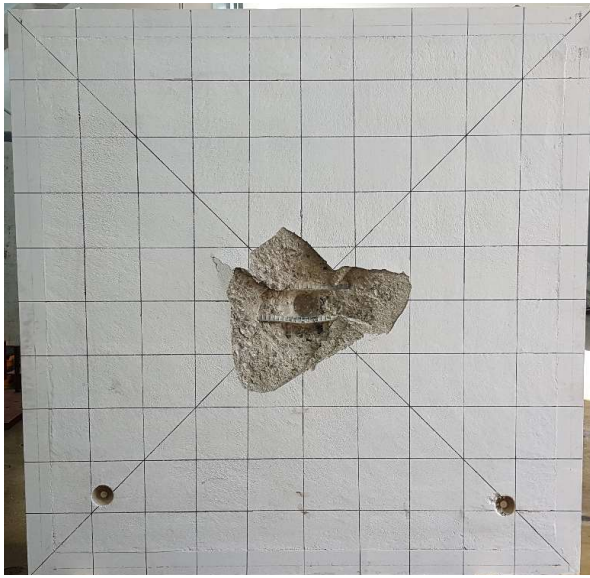
- 표 3.16은 실험 및 해석에서의 시험체 파괴모드이다. 각 충돌조건에 대하여 실험결과 및 해석결과의 파괴모드가 일치하는 것을 확인하였다.
- 관입 및 배면파쇄가 발생한 H-V100 및 H-V150의 경우는 관입깊이를 해석결과가 14% 높게 평가하여 벽체의 내충격 성능을 과소평가하였다.
- 관통이 발생한 H-V200의 경우 해석결과가 잔류속도를 3% 오차로 평가하여 철근 콘크리트 벽체의 내충격 성능을 정확히 예측하였다.

표 3.16 시험체 파괴모드

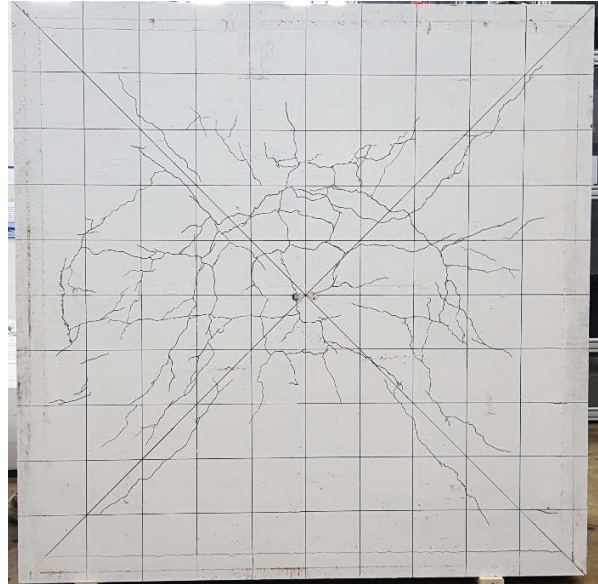
		H-V100	H-V150	H-V200
실험결과	파괴모드	관입	배면파쇄	관통
	관입깊이 or 잔류속도	137 mm	391 mm	97 m/s
해석결과	파괴모드	관입	배면파쇄	관통
	관입깊이 or 잔류속도	156 mm	444 mm	94 m/s
정확도	(해석결과)/(실험결과)	114%	114%	97%

- 그림 3.104, 3.105 및 3.109은 실험에서의 시험체 파괴형상과 해석으로부터 얻은 시험체 유효소성변형률을 나타낸다. 해석결과에서 파란색은 소성변형이 없는 것을 나타내고 빨간색이 소성 데미지가 심각하게 발생한 것을 나타낸다.
- 실험에서 H-V100은 전면의 spalling과 배면에 균열이 발생하였으며, 해석의 경우 이와 유사하게 전면의 spalling 및 후면의 일부 소성 데미지가 발생하였다. 그러나 해석이

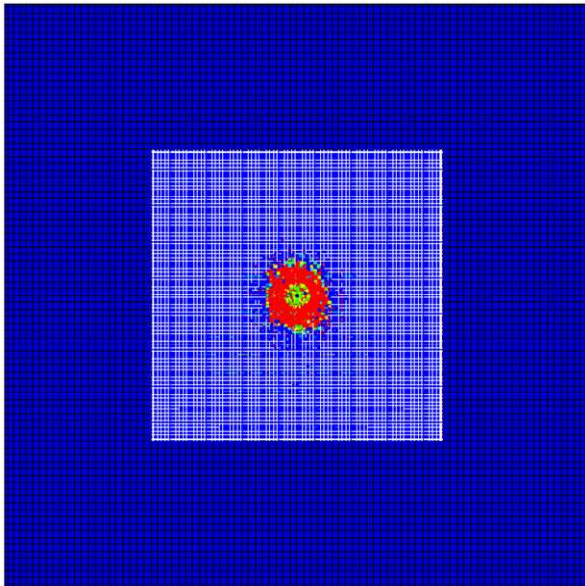
spalling 면적 및 균열영역을 다소 작게 평가하였다.



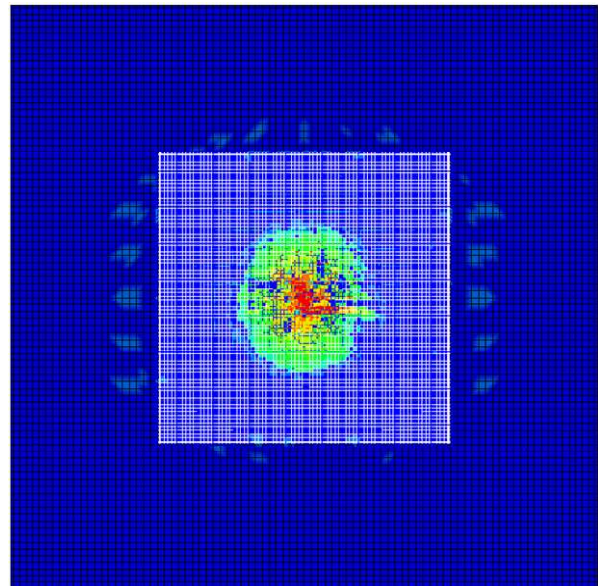
(a)



(b)



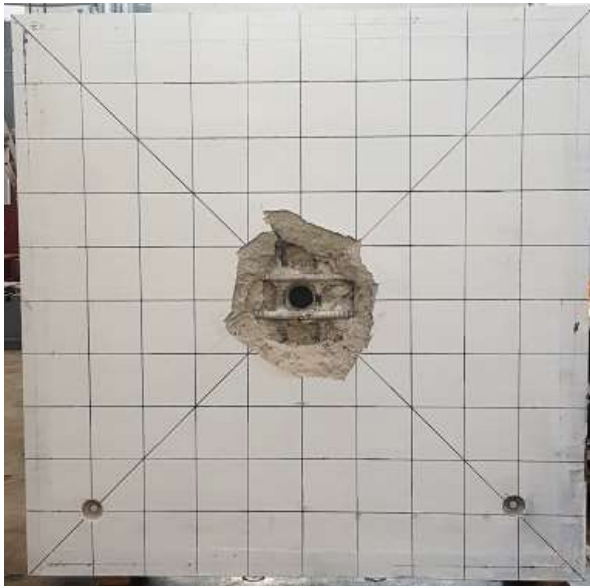
(c)



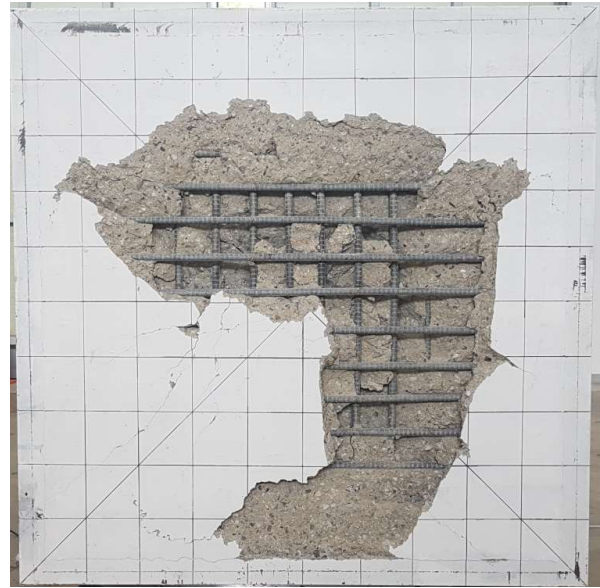
(d)

그림 3.104 H-V100 파괴형상; (a) 시험체 전면 실험결과; (b) 시험체 후면 실험결과;
(c) 시험체 전면 해석결과; (d) 시험체 후면 해석결과

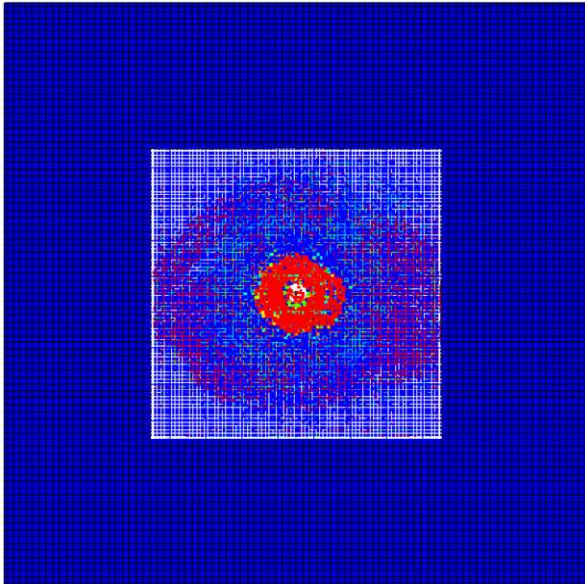
- H-V150에 대해서 실험에서는 전면에 spalling 및 배면에 상당량의 배면파쇄가 발생하였으며 철근이 노출되었다. 해석의 경우도 마찬가지로 전면에 spalling이 발생하였으며 배면에서 상당량의 콘크리트가 터져 나오며 철근이 노출되었다.
- 실험의 경우는 그림 3.104 (b)와 같이 배면파쇄의 형상이 비대칭적으로 발생하였으나 해석에서는 수평방향 및 수직방향에 대해 각각 대칭형태로 발생하였다.
- Spalling 면적은 유사하게 평가되었으나 배면파쇄의 영역이 해석의 경우가 더 작게 평가되었다.



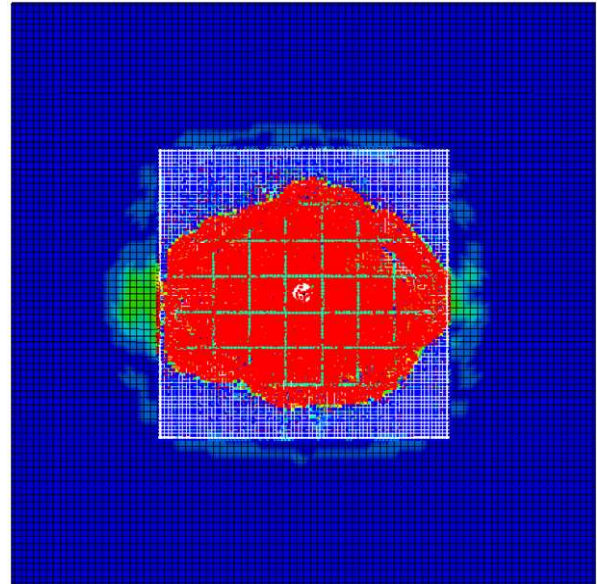
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3.105 H-V150 파괴형상; (a) 시험체 전면 실험결과; (b) 시험체 후면 실험결과;

(c) 시험체 전면 해석결과; (d) 시험체 후면 해석결과

- 그림 3.105는 H-V150의 배면에 대한 상세를 보여준다. 그림 3.106 (a)는 실험 직후의 배면상세를 보여주고 그림 3.106(b)는 철근에 갇힌 콘크리트 파편들을 제거한 뒤의 사진을 보여준다. H-V150의 경우 충돌부 근처 철근 사이에 위치한 콘크리트는 원뿔모양의 파괴면을 형성하며 모두 조각나 파편형태로 파괴되었으며, 이때 파편의 크기가 철근간격에 비해 커서 철근 사이에 갇혀 있었다. 또한 그림 3.107에서 볼 수 있듯이 배면 철근이 콘크리트 파편에 의해 밀리며 잔류변형이 발생한 것을 확인할 수 있다.
- 그림 3.108에서 볼 수 있듯이 해석에서도 이와 마찬가지로 콘크리트 파편들이 철근에 갇혀 저항하였으며 원뿔모양의 파괴면이 형성되었다. 또한 철근이 빠져나가려는 콘크리트 파편을 가두며 저항하게 되고 그 결과로 철근을 따라 유효 소성변형률이 발생하

는 것을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)

그림 3.106 H-V150 배면파쇄 상세사진; (a) 실험 직후 배면 상세;
(b) 파편 제거 후 배면 상세



그림 3.107 H-V150에서의 배면철근 변형

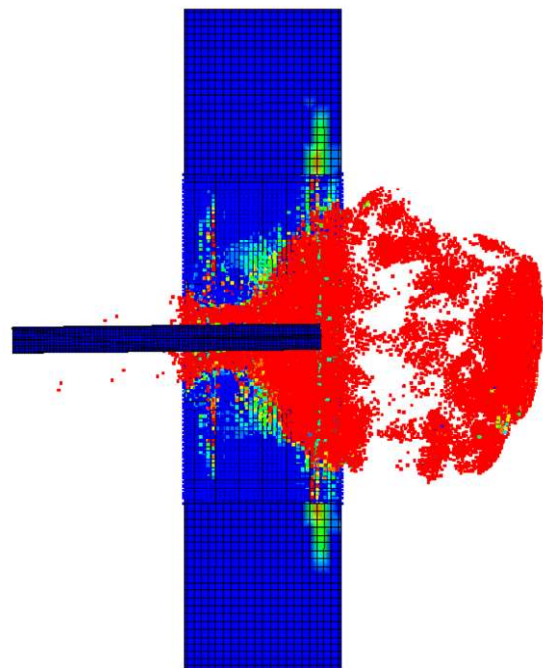
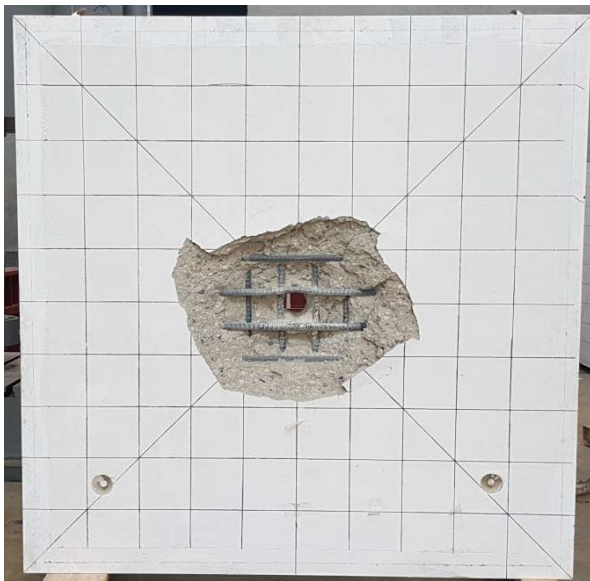


그림 3.108 H-V150 해석 단면도

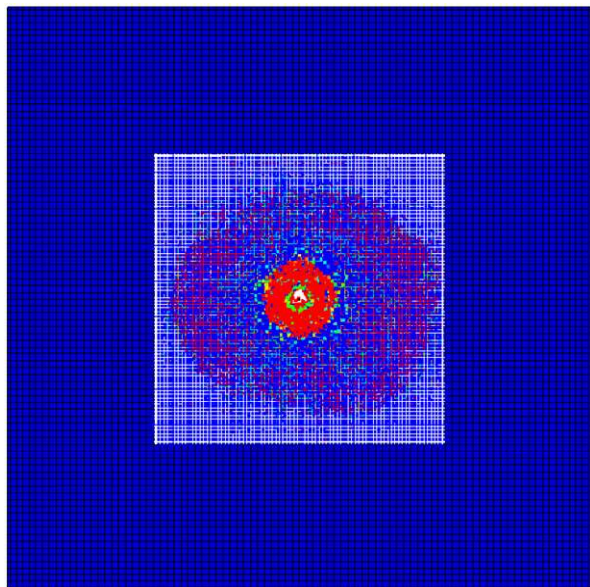
- H-V200에 대해서 실험에서도 전면에 spalling이 발생하였고, 관통이 발생하여 배면파쇄 및 철근 노출이 발생하였다. 해석의 경우도 마찬가지로 전면에 spalling이 발생하였으며 배면에서 상당량의 콘크리트가 터져 나오며 철근이 노출되었다.
- Spalling 면적 및 배면파쇄의 영역이 해석의 경우가 더 작게 평가되었다.



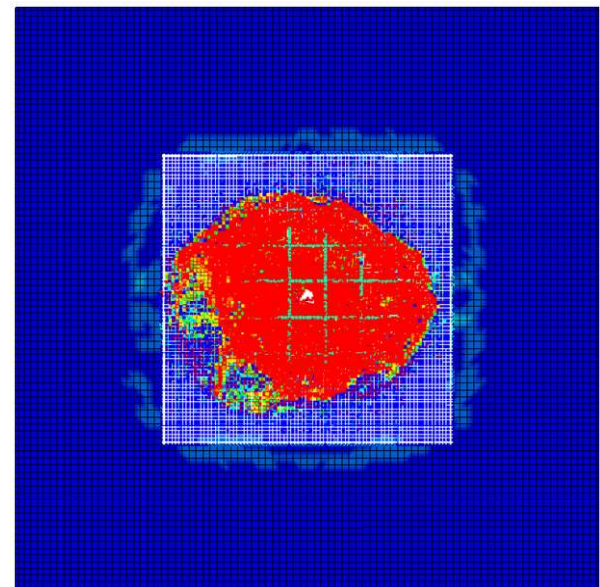
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3.109 H-V200 파괴형상; (a) 시험체 전면 실험결과; (b) 시험체 후면 실험결과;
(c) 시험체 전면 해석결과; (d) 시험체 후면 해석결과

- 그림 3.110은 H-V200의 배면에 대한 상세를 보여준다. H-V150의 경우와 마찬가지로 원뿔모양의 파괴면 및 철근에 갇힌 많은 양의 콘크리트 파편을 관찰할 수 있었다. 콘크리트 파편에 의한 배면 철근의 잔류변형 또한 그림 3.111과 같이 확인할 수 있었다.
- 그림 3.112에서 볼 수 있듯이 해석에서도 원뿔모양 파괴면, 철근의 콘크리트 파편 구속, 철근을 따라 발생하는 유효소성변형률을 관측할 수 있었다.



(a)



(b)

그림 3.110 H-V200 배면파쇄 상세사진; (a) 실험 직후 배면 상세;
(b) 파편 제거 후 배면 상세



그림 3.111 H-V200에서의 배면철근 변형

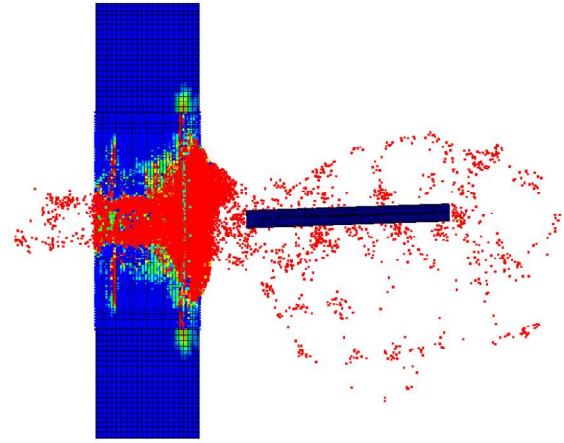


그림 3.112 H-V200 해석 단면도

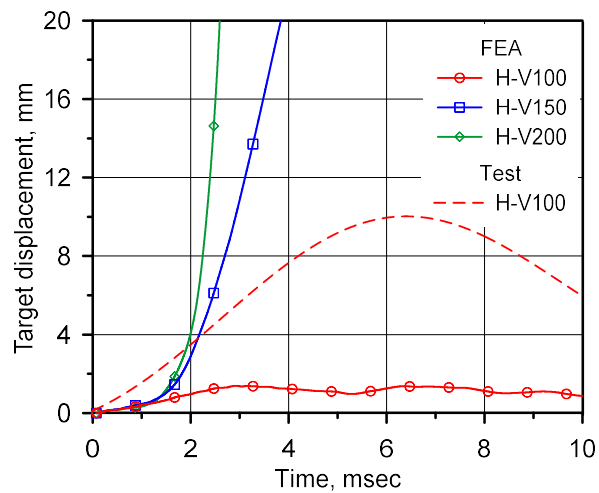


그림 3.113 시험체 변위이력

- 시험체 변위의 경우 배면파쇄 및 관통이 발생하지 않은 H-V100에 대해서만 계측하였

으며 그림 3.113은 실험 및 해석에서 얻은 시험체 배면 중앙에서의 시험체 변위를 보여준다. 실험결과는 최대 10 mm의 변위를 보였으나 해석결과는 1.4 mm로 실험결과에 비해 시험체 변위를 상당히 과소평가하였다.

○ 발사체 거동

- 그림 3.114 및 그림 3.115는 발사체의 시간에 따른 변위 및 속도를 보여준다. 실험결과는 고속카메라 촬영영상으로부터 계측하였으며 분진에 의해 발사체가 가려지기 전까지 측정되었다.
- 관측가능한 시간범위 내에서 발사체 변위이력 및 속도이력의 경우 해석결과와 유사하였으나, H-V100에 경우에는 실험결과보다 해석이 관입깊이가 다소 작게, H-V150의 경우는 실험결과보다 해석이 다소 크게 평가하였다. 그러나 H-V150에 경우 그림 3.116과 같이 10 msec 이후에도 변형이 지속적으로 발생하여 최종적인 관입깊이는 실험에 비해 과대평가하였다.
- 해석에서 최종적인 발사체 속도 감소량은 H-V100, H-V150, H-V200 각 경우에 대해 113.4, 151.0, 105.9 m/s로 나타났다.

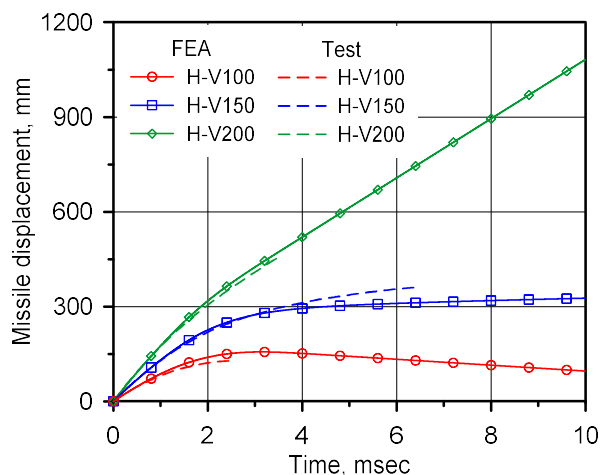


그림 3.114 발사체 변위이력 (10 msec)

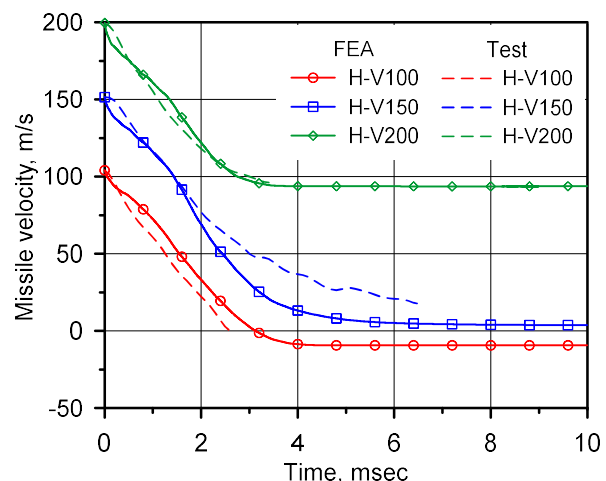


그림 3.115 발사체 속도이력 (10 msec)

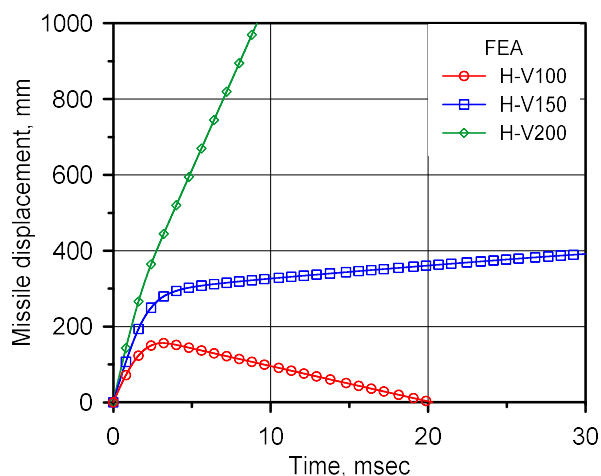


그림 3.116 발사체 변위이력 (30 msec)

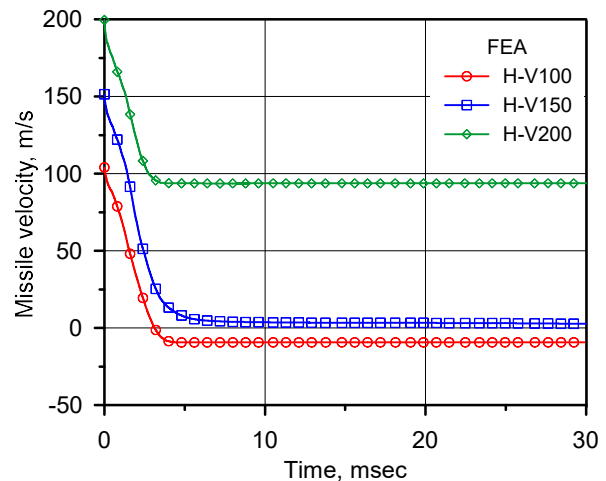


그림 3.117 발사체 속도이력 (30 msec)

○ 충격력

- 충격력의 크기 경우 해석 및 실험결과 모두 H-V100, H-V150, H-200이 약 2 MN으로 유사하게 발생하였다. 그러나 하중재하시간이 H-V150이 다른 두 경우보다 약 2 msec가 길어 발사체 속도감소량이 다른 두 경우보다 더 크게 나타난 원인을 보여준다.
- 해석에서는 충돌 직후 급격한 충격력이 발생했다가 감소한 후 다시 철근이 저항을 시작하며 증가하는 형태로 충격력이 나타나는 반면에, 실험에서는 충격 직후 급격한 충격력의 증가를 계측해내지 못하였다. 그러나 발사체의 속도 감소량이 실험 및 해석결과에서 유사한 점을 고려하였을 때 실험 및 해석에서 충격력-시간 그래프의 면적은 유사할 것으로 판단된다.

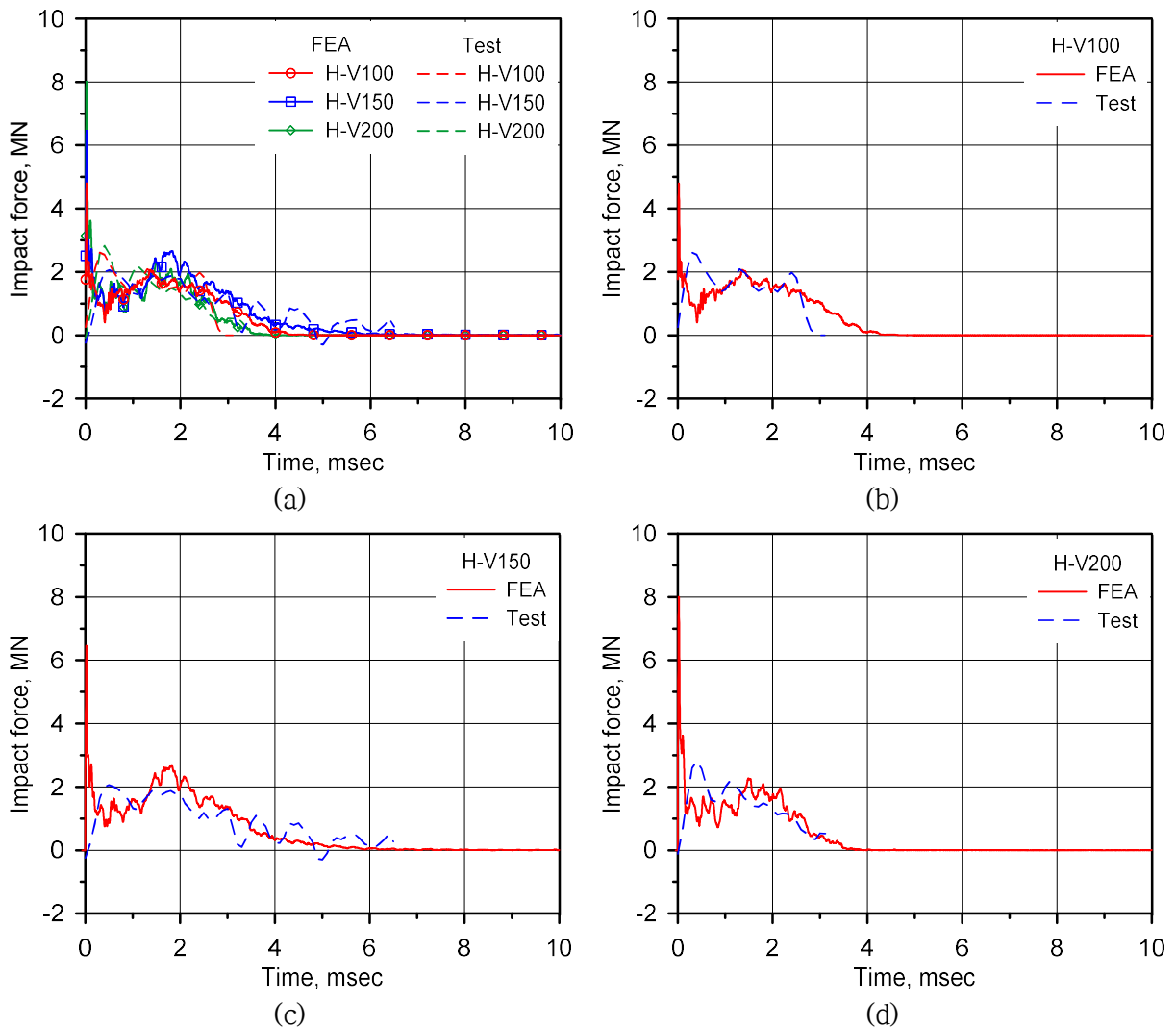


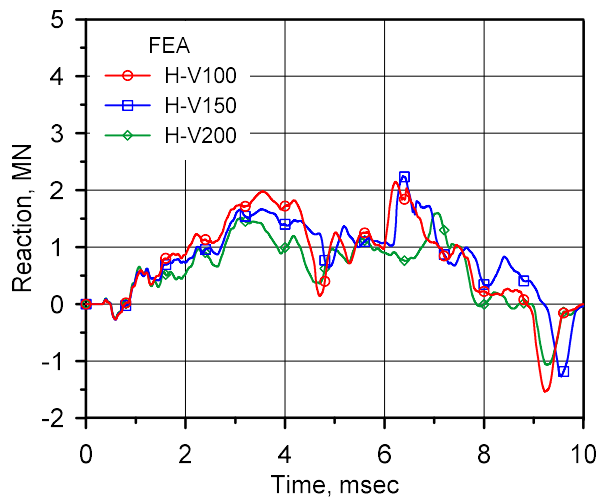
그림 3.118 충격력 이력; (a) 전체 해석 및 실험결과; (b) H-V100 실험 및 해석; (c) H-V150 실험 및 해석; (d) H-V200 실험 및 해석

○ 반력

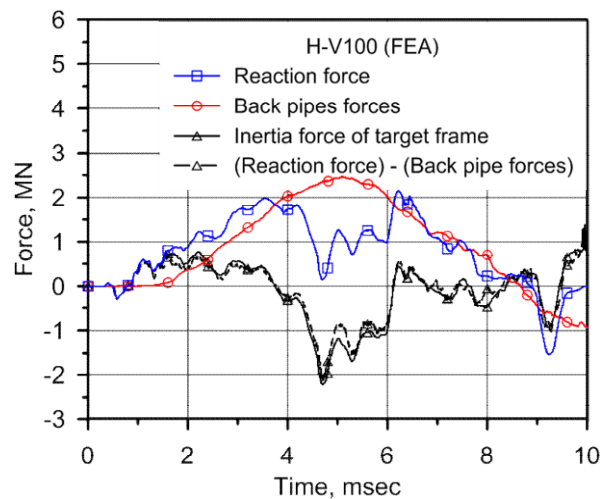
- 그림 3.119 (a)는 해석으로부터 얻은 시험체와 시험체 고정 프레임 간에 발생하는 반력을 보여주며 (b), (c), (d)는 시험조건과 동일하게 지지 파이프의 응력으로부터 얻어낸

반력과 시험체 고정 프레임의 관성력을 보여준다.

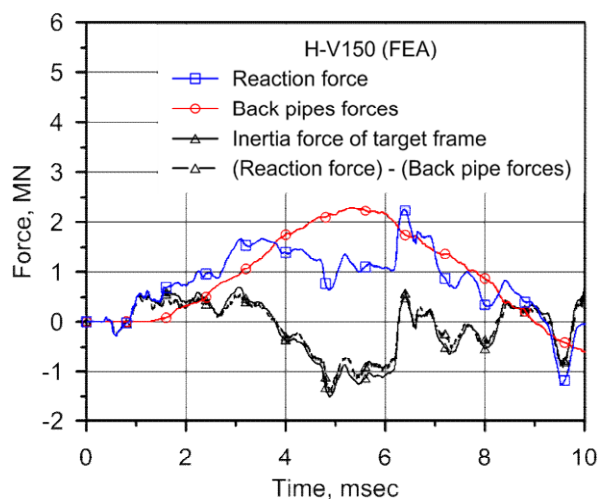
- 그림 3.119 (a)에서 볼 수 있듯이 충돌속도에 상관없이 반력은 유사한 크기 및 재하시간을 보이는 것으로 나타났다.
- 그림 3.119 (b), (c), (d)의 back pipes forces로부터 알 수 있듯이 해석에서는 그림 3.64 (a)의 계측된 값에 비해 back pipes forces가 2~4배 높게 평가되었다.
- 그림 3.119 (b), (c), (d)에서는 back pipes forces와 실제 반력에서 time lag 및 크기의 차이가 존재하는 것을 알 수 있었다. 이는 지지 파이프가 시험체 고정 프레임 뒤쪽에 연결되어 있어서 시험체 고정 프레임의 관성력의 영향을 받기 때문이다. 각 경우 모두 시험체 고정 프레임의 관성력이 반력에서 back pipes forces를 빼준 값과 동일한 것을 확인할 수 있다. 따라서 지지 프레임에 변형률을 측정하여 반력을 추정해내기 위해서는 시험체 고정 프레임의 가속도를 함께 측정해서 이에 대한 영향을 보정해주어야만 정확한 반력을 계측해낼 수 있다.



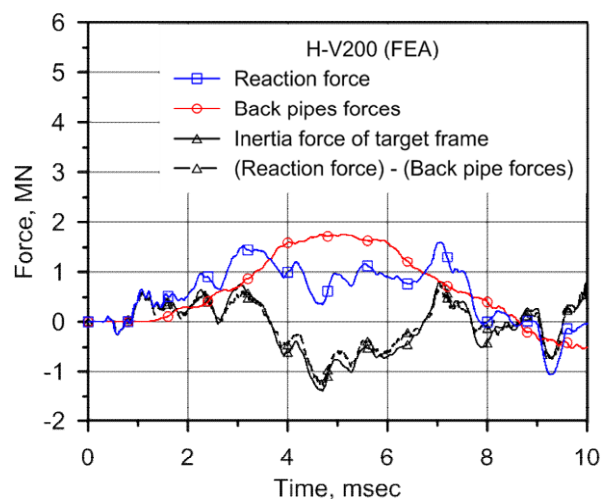
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3.119 반력 이력; (a) 전체 해석결과; (b) H-V100 해석결과;
(c) H-V150 해석결과; (d) H-V200 해석결과

㉔ 비강체 미사일 충돌실험 해석결과

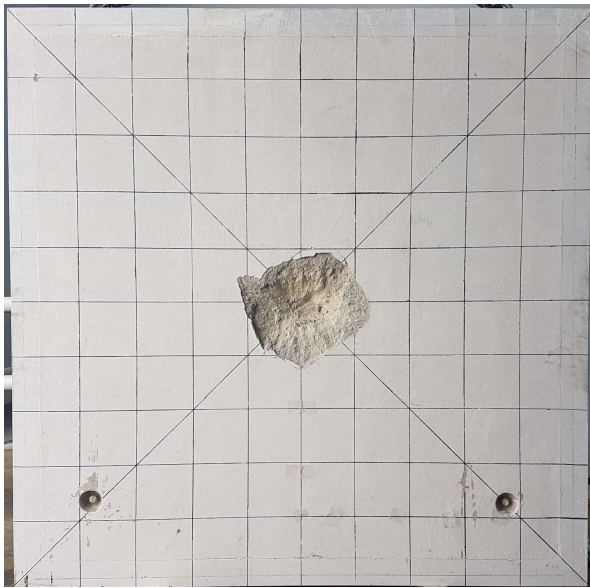
○ 시험체 변형

- 표 3.17는 실험 및 해석에서의 시험체 파괴모드이다. S-V100에 대해서는 파괴모드가 일치하고 관입깊이 또한 10%의 오차로 예측함을 확인하였으나, S-V150 및 S-V200에 대해서는 파괴모드를 예측하지 못하였고 관입깊이 또한 오차가 50%를 초과하였다.

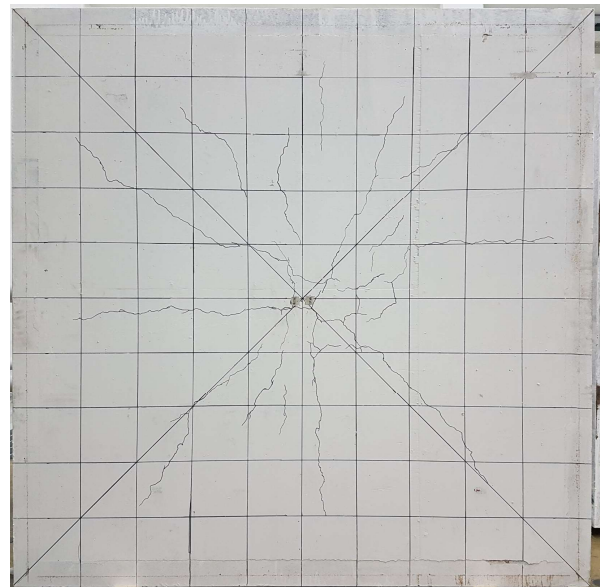
표 3.17 시험체 파괴모드

구분		S-V100	S-V150	S-V200
실험결과	파괴모드	관입	배면파쇄	배면파쇄
	관입깊이	84 mm	197 mm	240 mm
해석결과	파괴모드	관입	관입	관입
	관입깊이	76 mm	90 mm	103 mm
정확도	(해석결과)/(실험결과)	90%	46%	43%

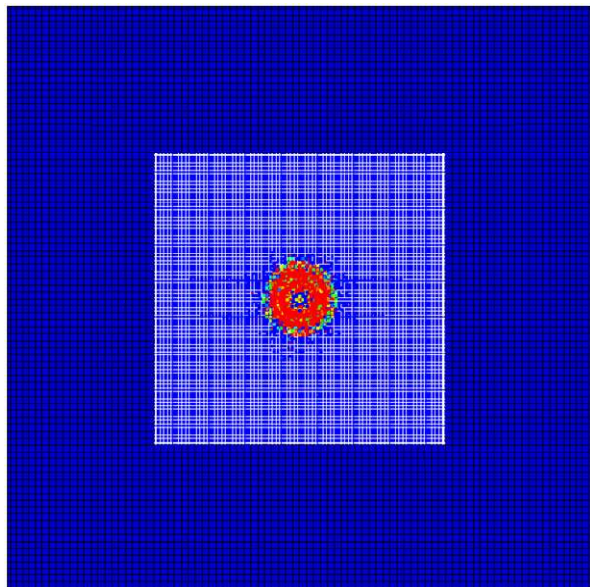
- 그림 3.120, 3.121 및 3.122은 실험에서의 시험체 파괴형상과 해석으로부터 얻은 시험체 유효소성변형률을 나타낸다. 해석결과에서 파란색은 소성변형이 없는 것을 나타내고 빨간색이 소성 데미지가 심각하게 발생한 것을 나타낸다.
- 실험에서 S-V100은 전면의 spalling과 배면에 균열이 발생하였으며, 해석의 경우 이와 유사하게 전면의 spalling 및 후면의 일부 소성 데미지가 발생하였다. 그러나 해석이 spalling 면적 및 균열영역을 다소 작게 평가하였다.



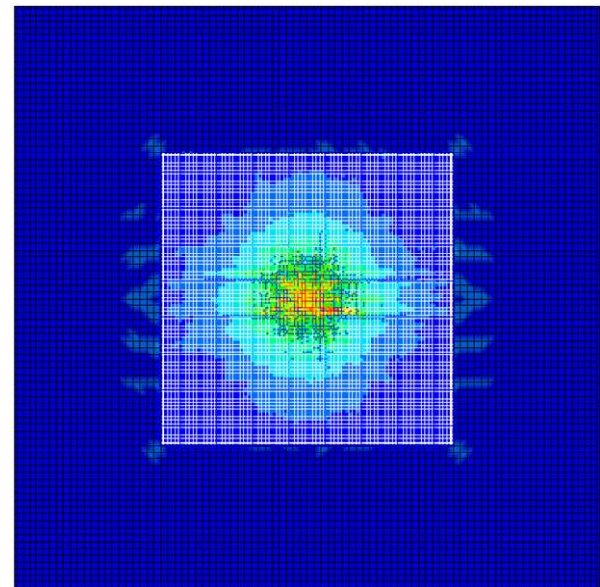
(a)



(b)



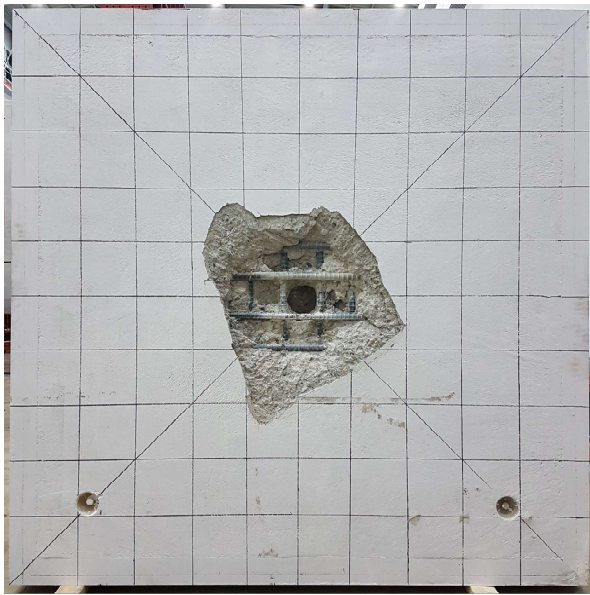
(c)



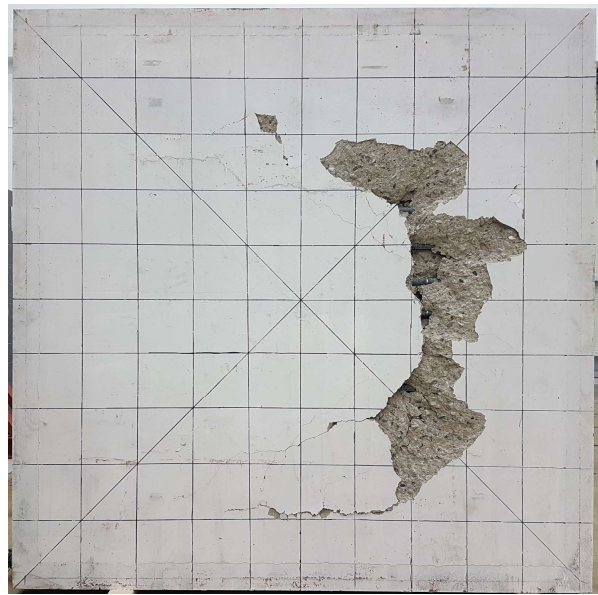
(d)

그림 3.120 S-V100 파괴형상; (a) 시험체 전면 실험결과; (b) 시험체 후면 실험결과;
(c) 시험체 전면 해석결과; (d) 시험체 후면 해석결과

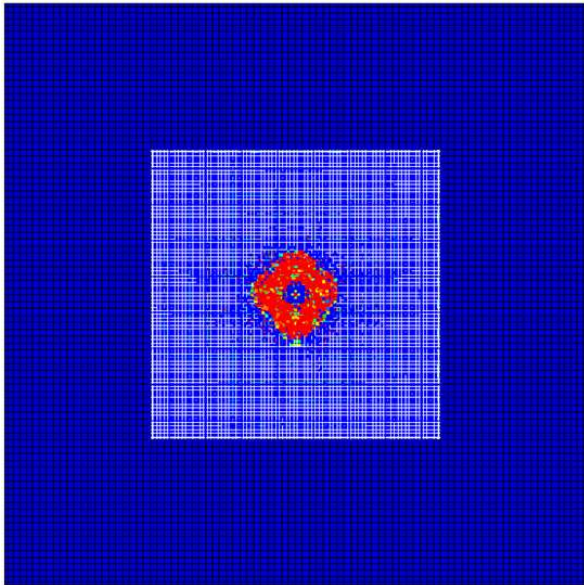
- S-V150에 대해서 실험에서는 전면에 spalling 및 배면에 적은 양의 배면파쇄가 비대칭적으로 발생하였다. 그러나 해석의 경우는 오직 전면에 spalling만 발생하였으며 배면 파쇄가 발생하지 않고 충돌부로부터 방사상의 소성변형만이 발생하였다.
- 또한 해석이 spalling 면적을 다소 작게 평가하였다.



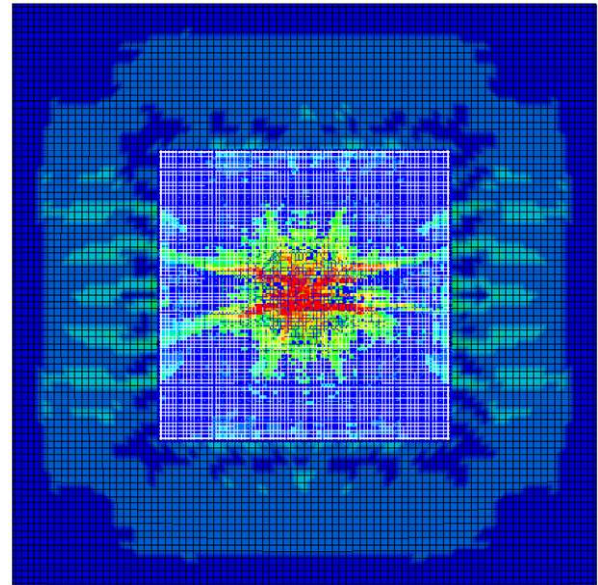
(a)



(b)



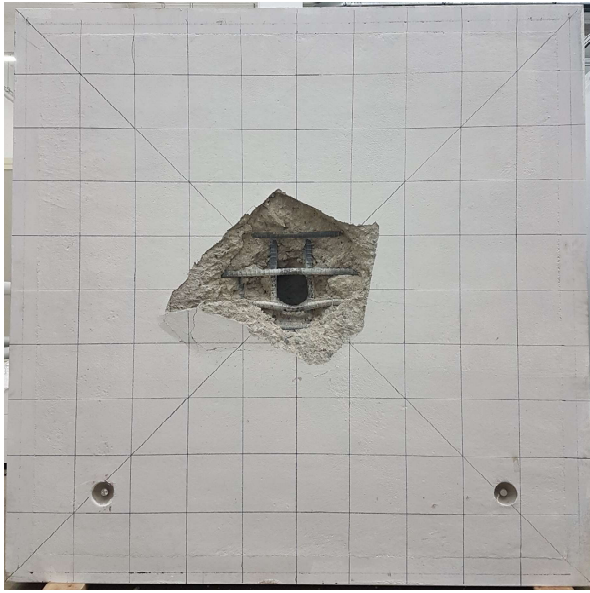
(c)



(d)

그림 3.121 S-V150 파괴형상; (a) 시험체 전면 실험결과; (b) 시험체 후면 실험결과;
(c) 시험체 전면 해석결과; (d) 시험체 후면 해석결과

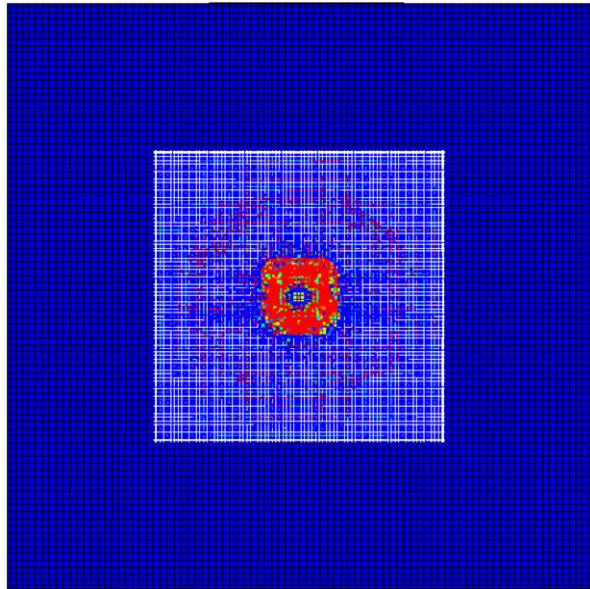
- S-V200에 대해서 실험에서는 전면에 spalling 및 배면에 배면파쇄가 비대칭적으로 발생하였으며 철근이 노출되었다. 그러나 해석의 경우는 오직 전면에 spalling만 발생하였으며 배면파쇄가 발생하지 않고 배면 전영역에 방사상의 소성변형만이 발생하였다.
- 또한 해석이 spalling 면적을 다소 작게 평가하였다.



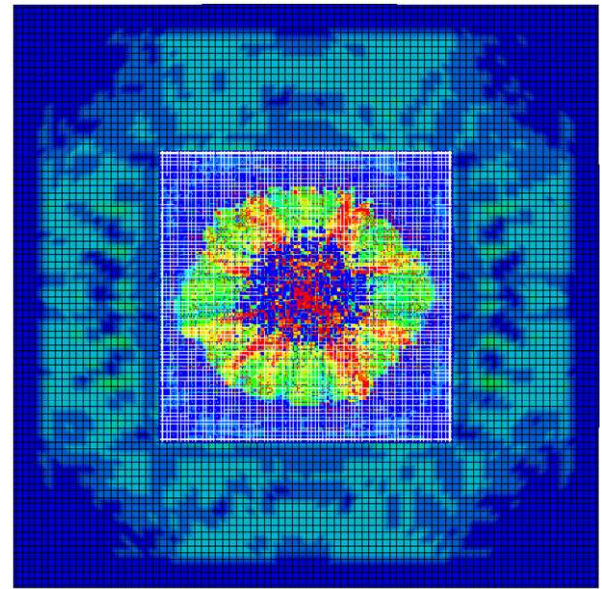
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3.122 S-V200 파괴형상: (a) 시험체 전면 실험결과; (b) 시험체 후면 실험결과;
(c) 시험체 전면 해석결과; (d) 시험체 후면 해석결과

- 시험체 변위의 경우 배면파쇄가 발생하지 않은 S-V100에 대해서만 계측하였으며 그림 3.123은 실험 및 해석에서 얻은 시험체 배면 중앙에서의 시험체 변위를 보여준다. 해석 결과는 실험결과에 비해 시험체 변위를 유사하게 평가하였다.
- 실험에서 얻은 S-V100의 최대변위는 1 mm로 H-V100의 10% 수준이었다.

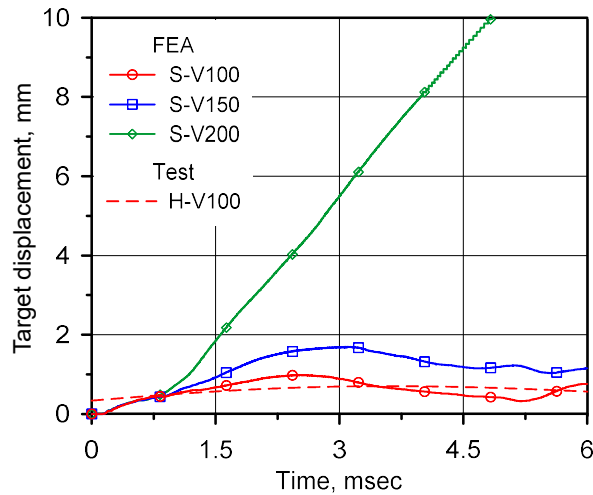


그림 3.123 시험체 변위이력

○ 발사체 거동

- 그림 3.124는 발사체 충돌면 및 후면의 시간에 따른 변위를 보여주며 그림 3.125은 시간에 따른 발사체의 압축 변형량을 보여준다. 표 3.18은 실험 후 실측한 발사체 길이로부터 얻은 변형량을 보여준다.
- S-V100의 경우 발사체 변형량이 오차 14%로 유사하였으나 S-V150 및 S-V200에 대해서는 발사체 변형량이 매우 과대평가되었다.

표 3.18 발사체 변형량

구분		S-V100	S-V150	S-V200
발사체 변형량	실험결과	55 mm	83 mm	163 mm
	해석결과	63 mm	161 mm	272 mm
정확도	(해석결과)/(실험결과)	114%	194%	167%

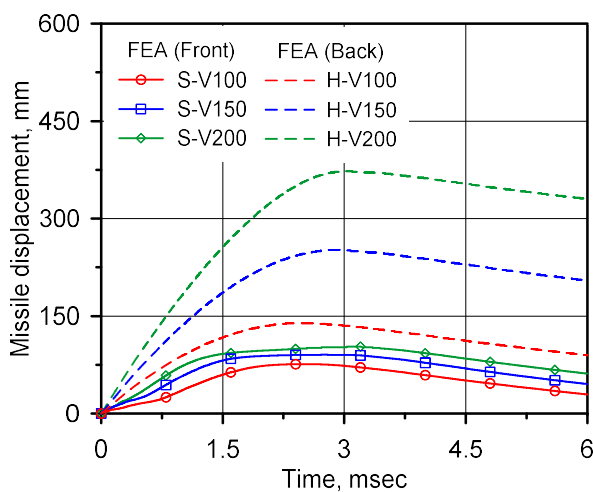


그림 3.124 발사체 변위이력

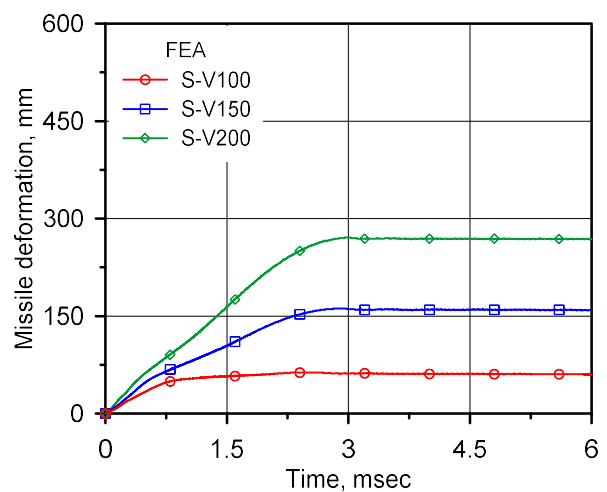


그림 3.125 발사체 변형이력

○ 충격력

- 발사체가 충돌과정에서 지속적으로 변형하기 때문에 발사체의 평균 가속도는 고속카메라 촬영영상으로부터 획득하기가 어렵다. 따라서 비강체 미사일에 대한 충격력은 별도의 방법으로 측정되어야만 한다.
- 충격력 크기 경우 충돌속도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 그러나 하중 재하시간은 모두 약 4.5 msec로 유사하였다. 따라서 발사체 속도감소량 또한 충돌속도가 클 경우가 더 큰 값을 보였다. 실험에서도 발사체 충돌속도와 관계없이 관통이 발생하지 못하였으므로 충돌속도 감소량은 충돌속도가 클수록 더 크다.
- 강체 미사일 해석의 경우와 마찬가지로 충돌 직후 급격한 충격력이 발생했다가 감소한 후 다시 철근이 저항을 시작하며 증가하는 형태로 충격력이 나타났다.
- 충격력의 크기는 충돌속도 100 m/s에 대해 유사하게 발생하였으며 150 및 200 m/s에 경우는 강체 미사일에 비해 크게 발생하였다.

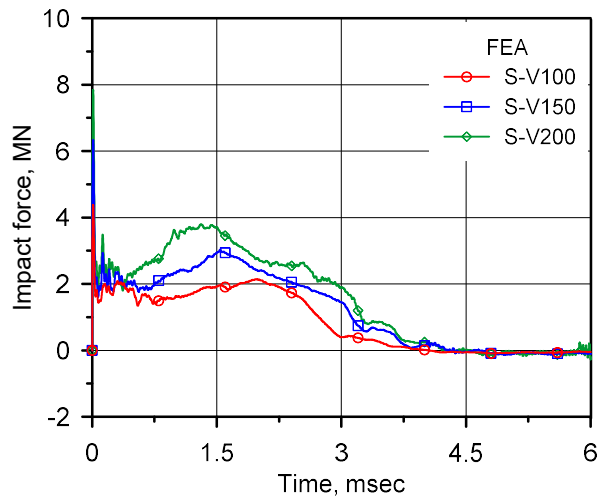
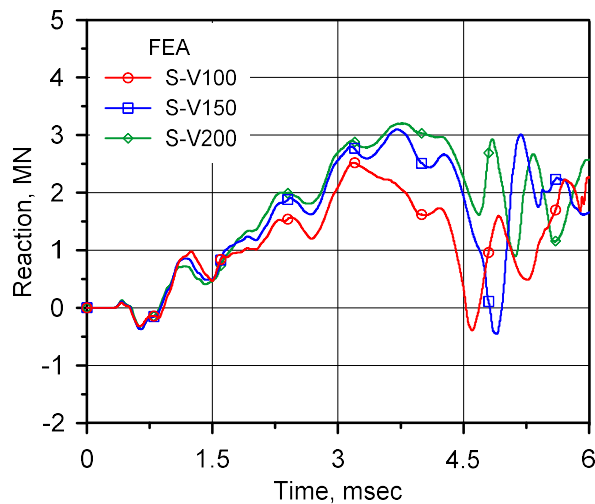


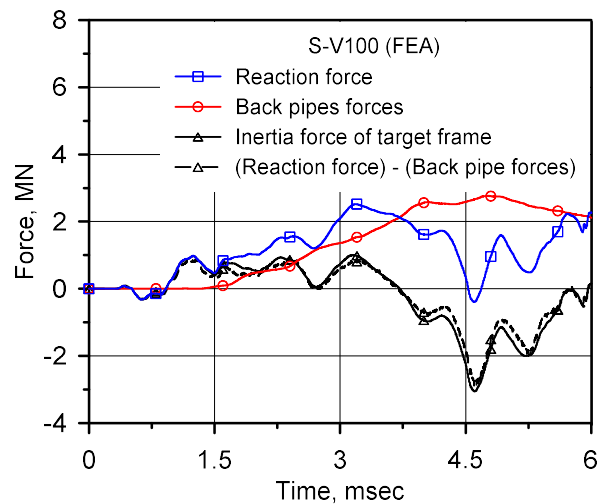
그림 3.126 충격력 이력

○ 반력

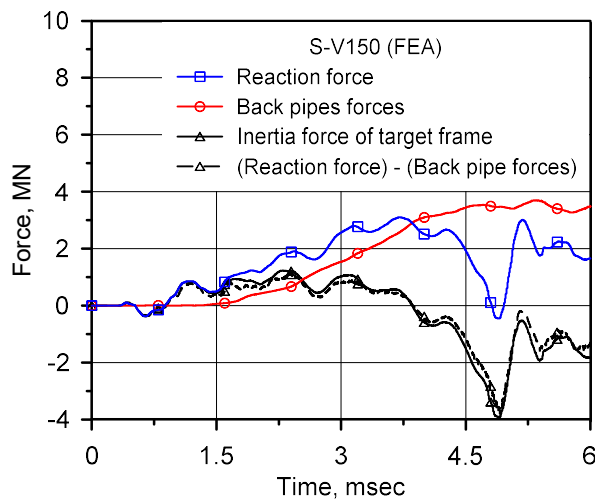
- 그림 3.127 (a)는 해석으로부터 얻은 시험체와 시험체 고정 프레임 간에 발생하는 반력을 보여주며 (b), (c), (d)는 시험조건과 동일하게 지지 파이프의 응력으로부터 얻어낸 반력과 시험체 고정 프레임의 관성력을 보여준다.
- 그림 3.127 (a)에서 볼수 있듯이 충돌속도에 상관없이 반력은 유사하였다.
- 강체 미사일 충돌과 마찬가지로 해석에서는 그림 3.64 (b)의 예측된 값에 비해 back pipes forces가 2~4배 높게 평가되었다.
- 강체 미사일 충돌과 마찬가지로 back pipes forces와 실제 반력에서 time lag가 존재하고 크기 차이가 존재하는 것을 알 수 있었다. 이는 강체 미사일 충돌과 같은 원인인 시험체 고정 프레임의 관성력에 의한 영향이다.



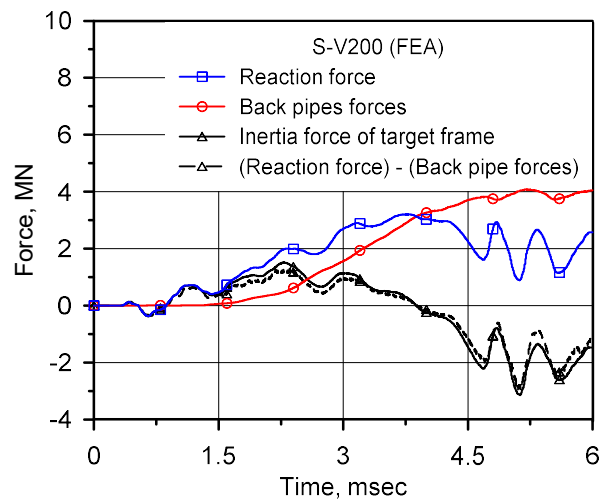
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3.127 반력 이력; (a) 전체 해석결과; (b) S-V100 해석결과;
(c) S-V150 해석결과; (d) S-V200 해석결과

㉓ 해석결과 요약

○ 강체 미사일

- 충돌해석 시뮬레이션 모델이 발사체 거동 및 시험체 파괴모드, 충격력에 대해 실험결과를 적절히 예측하였다. 그러나 파괴영역을 다소 좁게 예측하고 시험체 변위를 정확히 예측하지 못 하는 한계를 보여주었다.
- 지지 프레임의 응력으로부터 얻어낸 지지 프레임의 내력은 시험체 고정 프레임의 관성력의 영향을 받아 실제 시험체에 작용하는 반력을 나타내지 못한다는 것을 확인하였다.

○ 비강체 미사일

- S-V100의 충돌해석 시뮬레이션 모델은 발사체 거동 및 시험체 거동을 적절히 예측하였다. 그러나 S-V150 및 S-V200의 경우는 실험결과를 예측하지 못하였다. 이는 다음

두 가지에 기인한 것으로 파악된다.

- 첫째로 발사체는 충돌과정에서 압축을 받기 때문에 압축물성으로 모델링 되어야 하나 해당 해석모델에서는 인장실험으로부터 얻어진 재료특성을 사용하였다. 구리와 같은 연성재료는 항복 이후 변형률이 크게 증가함에 따라 강성이 증가하게 된다. 그러나 인장 재료실험에서는 이 같은 효과가 반영된 응력-변형률 관계를 얻지 못한다.
- 두 번째로는 타프피치동의 변형률 속도 의존특성을 고려하지 않은 것이다. 현재 가용한 타프피치동의 변형률 속도효과 모델이 존재하지 않으며 실험 데이터의 부재로 인하여 해당 모델을 고려할 수 없었다. 만약 이를 고려하게 발사체에 더 높은 강도가 발현이 되어 발사체의 변형량이 줄고 관입깊이가 증가하게 된다.
- 이에 따라 변형량과 변형속도가 상대적으로 작은 S-V100 해석모델에서는 상대적으로 예측정확도가 높았던 반면에 S-V150 및 S-V200에서는 실제 실험에서 변형량 및 변형속도가 매우 커서 대변형이 발생하는 압축상태에서의 강성증가 및 변형률 속도효과에 의한 강도증가가 크게 영향을 주었다. 결과적으로 이를 반영하지 못한 해석모델은 발사체 관입깊이를 작게 평가하고 변형량을 크게 평가하였다.
- 따라서 SHPB 실험을 통해 타프피치동의 동적재료물성을 확보하고 이를 해석에 반영할 시 해당 충돌해석 시뮬레이션 모델을 개선할 수 있을 것으로 판단한다.
- 강체 미사일과 마찬가지로 지지 프레임의 내력은 시험체 고정 프레임의 관성력의 영향을 받아 실제 시험체에 작용하는 반력을 나타내지 못한다는 것을 확인하였다.

(다) 부재 충돌실험기법의 타당성 평가

① 응답계측기법

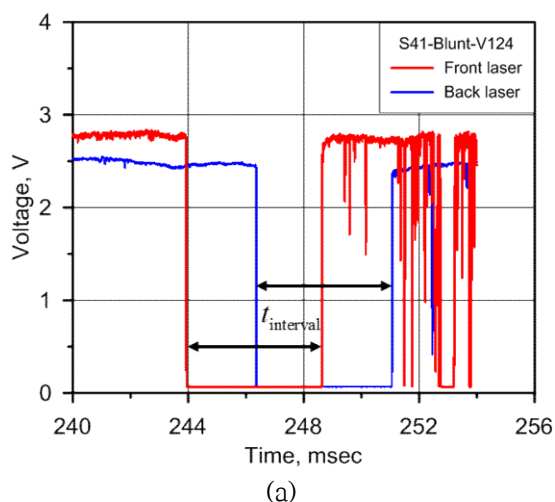
○ 고속카메라 촬영기법

- 본 연구에서는 고속카메라를 활용하여 충돌상황을 단순히 촬영하는 수준이었던 기존의 고속카메라 계측기법의 한계를 극복하여 내충격 성능평가를 위한 충격거동 계측에 활용할 수 있도록 그림 3.28과 같이 눈금자를 활용한 고속카메라 계측기법 및 식 3.12와 같이 데이터 Smoothing 처리기법을 제안하였다.
- 제안한 기법을 통해 획득한 발사체의 시간에 따른 변위 데이터는 먼저, 발사체의 속도를 계산에 활용될 수 있다. 발사체의 속도는 계측한 발사체 변위의 시간이력을 단순 수치미분하여 계산할 수 있으며 표 3.12의 예비실험 결과 및 표 3.13의 본 실험결과에서 볼 수 있듯이 레이저 간섭계를 통해 계측한 속도와 비슷하게 예측하고 있으므로 충돌속도 계측에 대한 본 계측기법은 타당하다고 볼 수 있다. 따라서 이 계측기법을 활용하여 발사체의 충돌직전속도 뿐만 아니라 관통 후 잔류속도를 계측하는데도 활용할 수 있다.
- 또한 계측한 발사체 변위의 시간이력 데이터는 주요 충격거동인 발사체의 관입거동을 평가하는데 활용될 수 있다. 예비실험에서는 강체 미사일이 시험체에 관입할 때의 관입깊이, 발사체가 받는 충격력을 계측 데이터로부터 계산하고 이를 해석결과 및 기존

연구에서 제안한 이론적 모델과 비교하여 그림 3.88 ~ 그림 3.94와 같이 관입거동이 잘 예측됨을 확인함으로써 본 계측기법의 타당성을 검증하였다. 마찬가지로 본 실험에 대해서도 그림 3.114와 같이 계측 데이터와 해석결과가 유사하여 계측기법이 적절하다는 것을 확인할 수 있다.

○ 충돌속도 계측기법 검증

- 본 연구에서는 충돌속도 계측기법 개발을 위하여 레이저 간섭계의 TTL 신호 및 아날로그 신호를 이용한 방법, 고속카메라 촬영을 통한 방법, Wire breaking system을 통한 방법 총 4가지 방법을 적용하여 충돌실험을 수행하였다.
- 여러 계측기법 중 레이저 간섭계를 이용한 기법의 경우 실험을 수행하여 계측한 TTL 신호와 아날로그 신호를 분석하여 타당성을 검증하였다. 실험수행 시 실제로 계측되는 아날로그 신호는 그림 3.128의 (a)와 같다. 발사체가 레이저 간섭계를 지나면서 레이저를 가리게 되면 그림 3.128의 (a)와 같이 아날로그 신호의 전압이 거의 0 V로 감소하게 되고 발사체가 지나간 이후 다시 아날로그 신호의 전압이 상승한다. 따라서 그림 3.128의 (a)에 표시된 t_{interval} 은 발사체가 레이저를 통과하는데 소요된 시간을 의미하며 레이저 간섭계로부터 계측된 충돌속도에 해당 시간을 곱하면 그림 3.128의 (b)와 같이 발사체의 길이가 계산된다. 이는 해당 실험에 사용된 예비실험 Blunt missile의 약 580 mm의 실제길이와 거의 일치함을 확인하여 레이저 간섭계의 충돌속도 계측기법의 타당성을 검증하였다.



발사체 길이 :

$$\begin{aligned}
 & V_{\text{projectile}} \times t_{\text{interval}} \\
 &= 124 \times 4.689 = 580.780 \text{ mm (Front laser)} \\
 &= 124 \times 4.685 = 580.284 \text{ mm (Back laser)}
 \end{aligned}$$

그림 3.128 레이저 간섭계 계측기법 검증; (a) 아날로그 신호 계측; (b) 발사체 길이 계산

- 레이저 간섭계의 TTL 신호는 아날로그 신호가 감소할 때 발생하므로 아날로그 신호가 감소하는 순간에 발생하는 TTL 신호는 아날로그 신호와 거의 동일한 충돌속도를 계측한다. 그러나 주의할 점은 그림 3.30의 TTL 신호 타이머에서 표시해주는 TTL 신호의 t_{interval} 을 충돌속도계측에 활용할 때이다. 표 3.12의 예비실험 중 S36-Flat-V123의 실험에서는 타이머에 표시되는 TTL 신호로 계산한 충돌속도가 아날로그 신호보다 더 크게

계측되었는데, 이는 그림 3.26과 같이 사봇 분리기의 직경이 발사체 직경에 비해 매우 커 그 사이의 공간으로 발사체보다 빠르게 지나가는 사봇 파편이 발사체보다 먼저 레이저 간섭계에 계측되어 비정상적인 t_{interval} 이 계측된 것이 원인이다. 따라서 충돌속도 계측 시 TTL 신호는 아날로그 신호와 비교하여 활용하여야 한다.

- 고속카메라를 활용한 기법은 앞서 설명하였듯이 타당성이 검증된 레이저 간섭계와 비슷하게 충돌속도를 계측하여 해당 기법의 타당성을 확인할 수 있다.
- Wire breaking system을 활용한 기법은 몇몇 기존 연구에서도 활용된 사례가 있는 기법이지만 표 3.12 및 표 3.13에서 확인할 수 있듯이 대부분 계측오류가 발생하며 t_{interval} 이 계측이 되었다고 하더라도 이를 통해 계산한 충돌속도는 검증된 충돌속도와 매우 큰 차이를 보인다. 이에 대한 원인 중 한가지는 Wire의 연성에 의해 발사체가 충돌한 순간 직후가 아닌 연성에 의해 늘어난 이후에 끊어지면서 t_{interval} 이 정확히 계측되지 않기 때문이다. 따라서 이로부터 Wire breaking system을 활용한 충돌속도 계측기법은 신뢰하기 어렵다고 판단된다.

○ 변위 계측기법

- 본 연구에서는 충격하중에 의해 매우 빠른속도로 발생하는 시험체의 변위를 계측하기 위하여 그림 3.32와 같은 300 Hz의 진동수 응답을 갖는 LVP를 활용하여 계측하였다. 그러나 그림 3.113과 같이 해석 시뮬레이션에서 계산한 시험체의 변위 응답과 다소 큰 차이를 보여, 300 Hz의 진동수 응답이 발사체 충돌로 인해 발생하는 시험체 변위를 계측하는데 충분한지 타당성 확인이 어렵다.

○ 반력 계측기법

- 반력의 계측을 위해 본 연구에서는 시험체를 지지하는 기둥에 변형률 게이지를 부착하여 계측한 변형률에 기둥의 강성을 곱하여 반력을 계산하는 기법을 제안하였다. 그러나 그림 3.119와 같이 지지 프레임에서 계측한 내력은 시험체 고정 프레임의 관성력의 영향을 받아 실제 시험체에 작용하는 반력을 나타내지 못한다는 해석결과로부터 해당 기법은 타당하지 못함을 확인하였다.

② 충돌실험 소모품 설계기법

○ 사봇

- 본 연구과제의 수행 이전까지는 중속가스건을 활용한 충돌실험 수행 시 본 장비를 제작한 외국업체로부터 사봇을 주문제작하였다. 하지만 장비업체로부터 사봇을 주문제작하는 경우, 제작에 상당한 시간 및 비용이 소요되어 본 장비를 활용한 충돌실험이 효율적으로 수행되지 못한다는 문제점이 있다.
- 따라서 본 연구과제에서는 국내에서 쉽게 수급가능한 MC Nylon재질로 사봇을 국내에서 제작하여 예비 실험 및 본 실험을 수행하였다. 이때, 표 3.12의 예비실험 및 표 3.13

의 본 실험결과에서 볼 수 있듯이 S39-Sharp-V88의 예비실험 및 H-V100의 1차 실험은 목표속도 도달에 실패하였는데, 이는 사봇 제작 후 실험수행 시점까지 기온이 상승함에 따라 사봇의 외경이 열팽창에 의해 중속가스건의 런치튜브의 직경보다 증가하여 실험도중 사봇과 런치튜브간에 발생한 과도한 마찰력이 발사체 진행방향에 반대로 작용하면서 목표속도보다 낮은 속도로 실험이 수행된 것이다.

- 이러한 원인을 인지한 후 사봇을 저온 보관하여 외경을 축소시킨 후 여러 충돌실험을 수행하였고 표 3.13에서 볼 수 있듯이 H-V100을 제외한 모든 실험은 목표속도 대로 실험이 잘 수행되었다. 그리고 이를 통해 사봇 제작 시 실험수행 시의 기온을 고려하여 외경을 253.92 mm로 제작하도록 추가적인 사봇 설계 가이드라인을 확립하였다. 이에 더하여 사봇의 국산화에 따라 표 3.19와 같이 사봇의 제작 소요기간 및 비용을 획기적으로 단축하였다.

○ 다이아프램

- 다이아프램 역시 사봇과 동일하게 기존까지는 외국의 장비제작업체로부터 다이아프램을 구입하여 사용하였고 긴 제작기간과 높은 비용이 소요된다는 문제점이 있었다.
- 따라서 본 연구과제에서는 국내에서 제작되어 빠르고 저렴하게 구입할 수 있는 폴리아세탈 코폴리머(Poly oxy methylene copolymer, POM-C)재질로 다이아프램을 제작하고 본 실험을 수행하여 다이아프램의 설계기법을 확립하고 사봇과 같이 이를 국산화하고자 하였다.
- 표 3.13의 본 실험 수행결과에서 볼 수 있듯이 사봇의 마찰문제로 인해 목표속도에 도달하지 못하였던 H-V100실험을 제외하고는 목표한 속도대로 실험이 성공적으로 수행되었다. 이를 통해 다이아프램 설계기법의 타당성을 확인하였으며 국산화에 성공해 표 3.19와 같이 제작 소요기간 및 비용을 대폭 단축하였다.

표 3.19 중속가스건 실험 소모품 국내외제작비교

항목	개당 제작비용(단위: 천원)		제작 소요기간		비고
	국 외	국 내	국 외	국 내	
사봇	1,350	394	6주	2주	71% 비용절감, 1개월 단축
다이아프램	248	51	6주	2주	79% 비용절감, 1개월 단축

○ 사봇 분리기

- 표 3.12의 예비실험 중 1차 수행실험인 S36-Flat-V123 실험은 본 연구과제 수행 이전에 제작된 190 mm 직경의 사봇 분리기를 그대로 활용하여 실험을 수행하였고, 앞서 언급한 대로 표 3.26과 같이 발사체와 사봇 분리기 사이의 큰 직경 차이로 인해 다수의 사봇과편이 유입됨에 따라 레이저 간섭계에 발사체 보다 먼저 도달하여 TTL신호가 비정상적으로 계측되는 문제를 확인하였다.
- 이러한 다수의 사봇 파편 유입은 TTL신호의 비정상적인 계측문제뿐만 아니라 고속카

메라 촬영 시 발사체의 시야를 가림으로써 발사체 변위의 시간이력 데이터를 획득하는데 어려움을 발생시킨다. 따라서 사봇 분리기의 직경은 임의대로 설계하면 안되며 발사체 직경에 대해 적정 수준 이내로 증가시켜 설계하여야 한다.

- 따라서 본 연구에서는 100 mm 직경의 예비실험 발사체에 대하여 30 mm를 증가시킨 130 mm의 직경으로 사봇 분리기를 제작하여 이후 실험을 수행하였다. 그림 3.27에서 볼 수 있듯이 S36-Flat-V123의 실험을 제외하고는 사봇 분리기 교체 후 사봇 파편의 유입이 거의 사라져 TTL신호를 통한 충돌속도 측정이 정확해졌다. 이로부터 사봇 분리기의 직경 설계방법의 타당성을 확인하였다.

③ 비강체 미사일 설계기법

- Sugano et al. (1993)의 연구 등 일부 비강체 미사일에 대한 실험연구에서는 그림 3.6과 같이 얇은 두께를 갖는 강관형태로 만들어 좌굴에 의해 발사체의 대변형을 유도하였다. 하지만 서울대학교 극한성능실험센터의 중속가스건과 같은 대규모 실험을 수행할 경우 높은 발사체 질량을 사용함에 따라 발사체의 길이가 지나치게 길어져 충돌과정에서 발사체가 전도 되는 등 실험수행이 어려워질 수 있다.
- 따라서 비강체 미사일에 대한 대규모 실험을 가능토록 하기위해 항복강도와 탄성계수가 일반강재의 절반수준인 타프피치동(C1100-BD-O)을 발사체 재질로 하여 충돌실험을 수행하였다.
- Sugano et al. (1993)에서 수행한 실험에 따르면 강관형태의 비강체 미사일에 대하여, 동일한 질량과 충돌속도 하에서 강체 미사일 대비 비강체 미사일의 최종 관입깊이 비율은 29 ~ 64%으로 수준으로 평가되었다. 이에 대하여 본 실험의 경우는 H-V100과 S-V100을 비교하면 H-V100에서 발생한 관입깊이 137 mm 대비 S-V100의 관입깊이는 84 mm로 61%의 감소비율을 보여 Sugano et al. (1993)의 연구에서 평가된 범위에 속하므로 기존 연구와 비슷한 수준의 비강체 미사일 실험을 수행할 수 있음을 확인하였다.

(3) 실험기법 개발결과 요약

- 제3장 2. 나에서는 재료 충돌실험기법으로 시편 제작기법을 제안하였으며 부재 충돌실험기법으로 응답계측기법, 소모품 설계기법, 비강체 미사일 설계기법을 제안하였다. 제3장 2. 다에서는 제안된 실험기법을 적용한 검증실험 및 충돌해석 시뮬레이션을 통해 실험기법의 타당성을 평가하였고 그 결과는 표 3.20과 같다.

표 3.20 내충격 성능평가 실험기법 개발결과 요약

	충돌실험기법	항목	기법 상세	개발결과
재료	시편 제작기법	시편 최소치수	• 굽은골재 최대치수 3배 이상	적합
		시편 제작 정밀도	• 수직 정밀도 0.5	적합
부재	응답계측기법	고속카메라 촬영기법	• 이미지 분석을 통한 발사체 변위 및 속도계측기법 • Smoothing기법을 통한 가속도 획득방법	적합
		충돌속도계측기법	• 레이저 간섭계 아날로그 전압신호 분석	적합
			• 고속카메라 촬영	부적합
			• 레이저 간섭계 TTL 신호 분석 • Wire breaking system	
		변위 계측기법	• 300 Hz sampling rate의 LVP	부적합
		반력 계측기법	• 지지 프레임 변형률 데이터로 내력계산	부적합
	소모품 설계기법	사봇 설계	• 사봇 설계절차 및 MC Nylon 사봇 설계안	적합
		다이아프램 설계	• Poly-oxy-methylene copolymer 다이아프램 설계안	적합
		사봇 분리기 설계	• (발사체 직경 + 30 mm)로 내경설계	적합
	비강체 미사일 설계기법	비강체 미사일 설계	• 연성 재료를 적용한 비강체 미사일	적합

라. 결 론

○ 본 연구에서는 사회기반시설의 내충격 성능평가를 위한 재료 및 부재에 대한 충돌 실험기법을 개발하기 위해 선행연구 및 현행충돌설계 기준을 분석하여 한계점을 파악하였으며, 이후 이를 극복하기 위한 새로운 충돌실험기법을 제안하였다. 제안된 재료 및 부재 충돌실험기법을 검증하기 위하여 해당 실험기법을 적용하여 콘크리트 SHPB 실험 및 철근 콘크리트 벽체 충돌실험을 수행하여 실험이 성공적으로 수행됨을 확인하였다. 또한 수행한 충돌실험에 대해 충돌해석 시뮬레이션을 수행하여 적용하였던 실험기법의 타당성을 평가하였고 이를 기반으로 최종적인 재료 및 부재 내충격 성능평가 실험기법을 개발하였다. 본 연구를 수행하며 개발한 성과 및 내려진 결론은 다음과 같다.

① 구조물 내충격 성능평가해석을 위한 시뮬레이션 톨 구축

○ 충돌해석 모델에 콘크리트 SHPB 실험을 통해 얻은 동적 재료실험결과를 반영하여 콘크리트의 동적강도증진을 적절히 반영할 수 있었으며, 그 결과로 구축한 해석 시뮬레이션 모델은 구조물 관입거동을 적절히 예측하였다.

○ 또한 구축한 해석모델을 배면파쇄 및 관통거동이 발생하는 경우에도 활용할 수 있

도록 SPH 요소를 도입하여 해석모델을 개선하였다. 개선된 해석모델은 강체 미사일 충돌실험에 대해 우수한 예측 정확도를 보였다.

- 그러나 비강체 미사일 충돌실험에 대해서는 예측 정확도가 다소 떨어짐을 확인하였다. 이는 비강체 미사일 충돌실험에 대한 발사체 모델링 시 발사체 동적압축특성을 고려하지 않았기 때문이며 이를 반영할 시 해석모델이 개선될 수 있음을 확인하였다.
- 수행된 해석결과를 기반으로 충돌해석 시뮬레이션 모델을 구축하기 위한 충돌해석 매뉴얼을 개발하였다. 충돌해석 매뉴얼은 충돌해석을 위한 요소 선정, 재료모델 선정, 적합조건 설정, 접촉조건 설정 등 충돌해석방법에 대한 가이드라인을 제시하였다.
- 개발된 충돌해석 시뮬레이션 모델 및 매뉴얼은 추후 중속가스건을 활용한 실험 수행 시 실험결과에 대한 사전검토를 위해 활용될 수 있으며 해석연구에도 활용될 수 있다.
- 이 연구에서는 철근콘크리트 패널부재의 중속 충돌에 대한 실험 및 해석시뮬레이션 기법을 구축했다. 추후 진행되는 후속 연구과제 및 타기관 의뢰실험 등을 통해 다양한 극한 상황을 모사할 수 있도록 해석시뮬레이션을 업데이트할 것이며 이를 기반으로 다양한 충격해석 관련 소프트웨어 개발이 가능할 것으로 기대한다.

② 구조물 내충격 성능평가 실험 데이터베이스 구축

- 본 연구에서는 다양한 최대골재치수 및 다양한 충돌속도를 변수로 콘크리트 SHPB 실험을 수행하였으며 예비실험 및 본 실험을 통해 총 245개의 콘크리트 재료실험 데이터베이스를 구축하였다. 특히 이 실험 데이터베이스는 지금까지 수행된 적이 매우 적은 굵은골재 최대치수 19 mm 및 25 mm의 콘크리트 실험결과까지 포함하여 그 중요성이 매우 높다.
- 또한 원전 벽체를 모사한 철근 콘크리트 벽체에 대해 발사체의 두부형상, 질량, 직경, 재질, 충돌속도를 변수로 하여 실험을 수행하였고 총 14개의 철근 콘크리트 벽체 충돌실험 데이터베이스를 확보하였다.
- 실험 데이터베이스는 실험변수 및 실험결과뿐 아니라 계측기법, 실험절차, 분석결과 등에 대해서도 상세히 담고 있기 때문에 그 신뢰도가 매우 높다. 따라서 구축된 재료 및 부재 충돌실험 데이터베이스는 추후 내충격 성능평가 연구를 위한 기초자료 및 검증자료로 활용될 수 있다.
- 이 연구에서는 극한성능실험센터 장비 중 일부인 SHPB와 중속가스건 장비를 활용한 실험 데이터베이스를 확보했다. 이 연구에서 활용하지 못한 타장비들 역시 실험 데이터베이스를 확보하기 위해 타장비를 활용한 실험방법 및 절차들을 제시하는 후속 연구과제를 수행할 것이다. 또한, 타기관의 의뢰실험수행을 통해 장비별 실험 데이터베이스를 추가적으로 확보할 수 있다.

③ 구조물 내충격 성능평가 실험기법 수립

- 본 연구에서는 재료 충돌실험을 위한 콘크리트 시편 제작기법에 대해 제안하였으며, 총 240회의 콘크리트 SHPB 실험을 수행하고 실험결과를 면밀히 분석하여 실험기법의 타당성을 검증하였다. 본 연구에서는 콘크리트 시편을 제작할 시 시편의 치수가 최대골재치수의 3배 이상이 되면 분산성이 크게 감소하고, 만약 그보다 작은 치수의 시편을 사용할 시 실험의 분산성이 증가함을 확인하였다. 이를 통해 19 mm 및 25 mm 등 실제 크기의 굵은골재를 포함하는 콘크리트에 대해 신뢰성 있는 실험결과를 확보하기 위한 실험지침을 제시하였다.
- 그리고 본 연구에서는 사회기반시설 내충격 성능평가 시스템의 구축을 위하여 대형 구조부재에 대하여 충돌실험이 가능한 서울대학교 극한성능실험센터 중속가스건 장비의 실험기법개발 연구를 수행하였다. 그리고 이 중속가스건 장비의 실험기법의 개발을 위하여 주관연구기관에서는 본 연구과제 이전부터 현재에 이르기까지 표 3.21과 같이 수많은 실험을 수행해왔다. 따라서 중속가스건에 대한 이전 연구경험을 바탕으로 본 연구에서는 선행연구의 한계점을 극복하기 위한 실험기법의 개발뿐만 아니라, 현재까지 중속가스건 장비를 운용해오면서 겪은 애로사항을 해결하기 위한 현실적인 실험기법 개발도 함께 수행하였다. 그러므로 본 연구에서는 선행연구에서 미비하였던 충격거동평가를 위한 고속카메라 촬영, 충돌속도 계측 등의 응답계측기법과 세계적 수준의 중속가스건 장비의 성능을 100% 발휘하기 위한 사봇, 다이아프램 등 실험 소모품의 설계기법을 실험기법으로써 제안하였다.
- 본 연구에서 개발한 재료 및 부재 내충격 성능평가 실험기법은 추후 내충격 성능평가 실험연구를 수행할 연구자들에게 실험지침으로 활용될 수 있으며, 이에 따라 추후 충돌실험연구들의 실험 실패 확률을 최소화하여 연구효율을 증대시킬 수 있으며 뛰어난 연구성과를 내는 데에 이바지할 수 있다. 특히, 중속가스건의 경우에는 이미 본 연구과제수행 도중에 개발한 실험기법을 타기관 의뢰실험 수행 시 반영하여 실험결과와 품질을 향상시키는 등 본 연구과제의 성과를 현재 활용 중에 있다.
- 극한 상황을 모사하여 구조물 내충격성평가를 수행하기 위해서는 재료/부재 실험 및 해석시뮬레이션 연구가 모두 연계되어 수행되어야 한다. 이를 위해 이 연구에서는 철근콘크리트 패널부재에 대한 내충격성능평가 및 이를 위한 실험기법개발을 위해 SHPB장비를 활용한 재료실험과 중속가스건을 활용한 부재실험을 수행하였다. 극한성능실험센터에는 이 2가지 장비 이외에도 다양한 충돌상황에서의 재료 및 부재단위 실험이 가능한 장비들이 구축되어 있으며 이 모든 장비들을 그림 3.129의 로드맵에 따라 연계활용함으로써 다양한 극한상황을 모사할 수 있으며 이를 통해 극한성능실험센터 구축장비들의 활용성을 극대화할 수 있다.



그림 3.129 극한상황에 대한 구조물 성능평가 로드맵

표 3.21 극한성능실험센터 중속가스건 실험수행이력

#	시험명	다이아프램 두께, inch	Payload, kg	실험압력, psi	목표속도, m/s	충돌속도 계측결과*, m/s				의뢰기관
						TTL	Analog	Wire	Camera	
1	1차 검수실험	1/4	86.56	400	160	170.5	-	-	-	-
2	단국대 1차 실험	1/4	86.56	375	160	166.5	-	-	-	한국수력원자력
3	2차 검수실험	1/4	86.56	375	165	측정오류	-	-	-	-
4	단국대 2차 실험	3/16	86.45	240	130	75.3	-	-	측정실패	한국수력원자력
5	공압 실험	1/2	-	600	-	336.5	-	-	-	-
6	단국대 2차 (속도검중)	3/16	86.45	240	130	133.1	-	측정실패	142.9	-
7	단국대 3차 실험	1/4	68.15	359	180	158.7	180.1	180.5	179.2	한국수력원자력
8	단국대 4차 실험	1/4	68.16	359	180	178.1	178.1	측정실패	165.4	한국수력원자력
9	단국대 5차 실험	1/4	47.13	291	190	75.6	190.6	172	180.9	한국수력원자력
10	단국대 6차 실험	5/16	68.3	302	165	217.8	165.3	측정실패	165.4	한국수력원자력
11	단국대 7차 실험	5/16	68.35	302	165	73.8	165.2	163.1	165.4	한국수력원자력
12	단국대 8차 실험	5/16 (조기파괴)	68.3	360	180	240.1	측정실패	139.3	측정실패	한국수력원자력
13	다이어프램 검증실험	1/4	-	-	-	-	-	-	-	-
14	단국대 9차 실험	1/4	68.32	360	180	179.7	180	175	179.2	한국수력원자력
15	단국대 10차 실험	3/8 (조기파괴)	47.1	322	200	-	-	-	-	한국수력원자력
16	다이어프램 검증실험	3/8 3/16 1/2	-	-	-	-	-	-	-	-
17	단국대 10차 실험	1/2	68.25	448	200	7544.3	198.5	182	200	한국수력원자력
18	단국대 11차 실험	3/16	47.14	247	175	208.6	178.5	149.9	177	한국수력원자력
19	다이어프램 검증실험	3/16	-	-	-	-	-	-	-	-
20	단국대 12차 실험	3/16	68.35	220	140	181	142.6	측정실패	143	한국수력원자력
21	다이어프램 검증실험	1/8	-	-	-	-	-	-	-	-
22	단국대 13차 실험	1/8	68.35	122	100	0.165	105.1	121.8	분석 필요	한국수력원자력

#	시험명	다이아프램 두께, inch	Payload, kg	실험압력, psi	목표속도, m/s	충돌속도 계측결과*, m/s				의뢰기관
						TTL	Analog	Wire	Camera	
23	단국대 14차 실험	1/2	89.55	575	200	197.5	197.5	측정실패	분석 필요	한국수력원자력
24	단국대 15차 실험	1/2	89.5	780	230	223.7	224.2	206.5	분석 필요	한국수력원자력
25	다이아프램 검증실험	1/8	-	-	-	-	-	-	-	-
26	내충격성능 1차년 1차실험	1/8	44.7	120	120	136.7	123.1	측정실패	125	국토교통부
27	내충격성능 1차년 2차실험	1/8	44.5	120	120	123.9	123.8	135.7	119.3	국토교통부
28	내충격성능 1차년 3차실험	1/8	44.5	100	107.2	113.5	113.5	측정실패	113.6	국토교통부
29	내충격성능 1차년 4차실험	1/8	44.7	90	100	102.1	102.1	200.3	103.6	국토교통부
30	내충격성능 1차년 5차실험	1/8	45.2	90	100	87.6	87.9	측정실패	92	국토교통부
31	내충격성능 1차년 6차실험	1/8	45.1	105	110	114.6	114.6	측정실패	118	국토교통부
32	내충격성능 1차년 7차실험	1/8	45	120	120	123.5	123.3	8.12	127	국토교통부
33	내충격성능 2차년 1차실험	1/8	53.54	105	100	55.5	55.5	22.42	56.6	국토교통부
34	고강도철근평가 1차 실험	1/5	53.58	205	150	151.6	151.7	122.7	156	한국수력원자력
35	내충격성능 2차년 2차실험	1/4	53.6	361	200	199.19	199.07	측정실패	199	국토교통부
36	고강도철근평가 2차 실험	1/5	53.56	205	150	152.51	152.35	143.15	153	한국수력원자력
37	내충격성능 2차년 3차실험	1/8	53	103	100	104.3	104.27	측정실패	108	국토교통부
38	내충격성능 2차년 4차실험	1/5	52.92	201	150	151.01	150.89	18.82	154	국토교통부
39	내충격성능 2차년 5차실험	1/4	53.02	355	200	198.19	198.27	측정실패	195	국토교통부

#	시험명	다이아프램 두께, inch	Payload, kg	실험압력, psi	목표속도, m/s	충돌속도 계측결과*, m/s				의뢰기관
						TTL	Analog	Wire	Camera	
41	내충격성능 2차년 6차실험	1/8	53.54	102	100	104.09	104.12	측정실패	108	국토교통부
42	고강도철근평가 3차 실험	1/8	52.96	102	100	측정실패	104.81	측정실패	107	한국수력원자력
43	SCP충돌실험용 다이아프램가압테스트	1/13	-	60	-	-	-	-	-	-
44	SCP충돌실험 예비테스트 1차	1/13	56.92	41	45	59.6	41.1	측정실패	42.6	현대중공업
45	SCP충돌실험 예비테스트 2차	1/13	56.92	45	45	69.6	51.2	측정실패	-	현대중공업
46	SCP충돌실험 1차	1/13	56.92	42	45	41.9	53.6	측정실패	분석 중	현대중공업
47	SCP충돌실험 2차	1/13	56.92	42	53.6	55.7	55.7	측정실패	분석 중	현대중공업
48	SCP충돌실험 3차	1/13	56.92	42	53.6	23.91	52.1	100.35	분석 중	현대중공업
49	SCP충돌실험 4차	1/13	56.9	42	53.6	87	56	측정실패	분석 중	현대중공업
50	SCP충돌실험 5차	1/9	56.9	106	100	88.2	104	미측정	분석 중	현대중공업
51	SCP충돌실험 6차	1/9	56.9	105	104	88.2	104.2	미측정	분석 중	현대중공업

*) 목표 : 목표 속도

TTL : 레이저 간섭계의 TTL 신호 타이머를 통한 계측

Analog : 레이저 간섭계의 아날로그 신호를 통한 계측

Camera : 고속카메라 촬영 영상을 통한 계측

Wire : Wire breaking system을 이용한 계측

3. 연구개발 성과

가. 핵심성과 1: 구조물 내충격 성능평가 해석 시뮬레이션 툴 구축

- 본 연구에서는 개발된 충돌실험기법의 타당성을 평가하기 위해서 구조물 내충격 성능평가 해석 시뮬레이션 툴을 구축하였다. 이를 구축하기 위해 (1) 예비실험 충돌해석 시뮬레이션 모델을 구축하고 해석을 수행하였다. 해당 해석결과를 실험결과와 비교분석하고 해석모델을 개선하여 (2) 본 실험 충돌해석 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 기반으로 (3) 충돌해석 시뮬레이션 매뉴얼을 개발하였다.
- 뿐만 아니라 해당 시뮬레이션 툴을 구축하며 SCI 논문 게재 1건의 양적 성과를 달성하였다(표 3.22).

(1) 예비실험 충돌해석 시뮬레이션 보고서 (성과증빙 자료집 p.1 ~ p.20)

- SHPB 실험을 통해 얻은 결과를 활용하여 콘크리트의 동적강도를 적절히 반영할 수 있는 해석 시뮬레이션 툴을 구축하였다. 구축한 해석 시뮬레이션 모델을 활용하여 기존 연구결과를 예측하였을 때 유사한 결과를 나타냄을 확인하여 해석 시뮬레이션 툴의 타당성을 검증하였다.

사회기반시설 내충격 성능평가를 위한 실험기법 개발 -해석시뮬레이션 수행보고서- 2017.11 서울대학교 산학협력단	<목 차> 1. 동적하중을 받는 콘크리트재료 거동의 해석시뮬레이션 1 1.1 콘크리트의 동적강도 획득을 위한 SHPB 실험 요약 1 1.2 SHPB 실험의 해석시뮬레이션 2 1.2.1 요소모델 및 Mesh 크기 설정 2 1.2.2 재료모델 설정 2 1.2.3 경계조건 및 접촉조건 설정 3 1.2.4 Striker의 충돌속도 4 1.3 SHPB 실험의 해석시뮬레이션 4 1.4 결론 6 2. 기존 연구의 해석시뮬레이션 수행 및 결과 6 2.1 해석 대상 기존 연구내용 요약 6 2.2 해석 모델링 6 2.2.1 요소모델 및 Mesh 크기 설정 7 2.2.2 재료모델 설정 8 2.2.3 경계조건 및 접촉조건 설정 8 2.2.4 발사체의 충돌직전 속도 9 2.3 해석 수행결과 9 2.3.1 Mesh 크기에 따른 영향 9 2.3.2 Erosion criteria 값에 따른 영향 10 2.4 결론 10 3. 예비실험 대상의 해석시뮬레이션 수행 11 3.1 해석 대상 예비실험사항 요약 11 3.1.1 시험체 11 3.1.2 발사체 12
--	---

그림 3.130 예비실험 충돌해석 시뮬레이션 보고서

(2) 본 실험 충돌해석 시뮬레이션 보고서 (최종보고서 p.70 ~ p.106)

- 예비실험 및 본 실험에 대한 충돌해석 시뮬레이션을 구축하고 해석결과를 분석하였다. 이를 통해 개발된 부재 충돌실험기법의 타당성을 평가하였다.

(3) 충돌해석 시뮬레이션 매뉴얼 (성과증빙 자료집 p.21 ~ p.38)

- 서울대학교 극한성능실험센터의 중속가스건을 활용한 충돌실험에 대해 해석 시뮬레이션을 수행하기 위한 해석 매뉴얼을 개발하였다. 충돌해석을 위한 요소 선정, 재료모델 선정, 적합조건 설정, 접촉조건 설정 등 해석방법에 대한 가이드라인을 제시하였다.

충돌해석 시뮬레이션 매뉴얼 사회기반시설 내충격 성능평가를 위한 실험기법 개발 2019.01 서울대학교 산학협력단	목 차 I. 개 요 1 II. 충돌실험 해석 모델링 매뉴얼 2 1. 모델링 범위 2 2. 요소 선정 3 2.1. 시험체 3 2.2. 발사체 6 3. 철근-콘크리트 적합조건 설정 7 4. 재료모델 선정 8 4.1. 콘크리트 8 4.2. 금속 (철근 및 발사체) 9 5. 접촉조건 설정 10 6. 초기조건 및 경계조건 설정 12 7. 데이터베이스 설정 13 8. 충돌해석결과 14 8.1. 발사체 거동 14 8.2. 충격력 15 8.3. 시험체 변형 15 - i -
---	--

그림 3.131 충돌해석 시뮬레이션 매뉴얼

나. 핵심성과 2: 구조물 내충격 성능평가 실험 데이터베이스 구축

- 본 연구에서 개발한 충돌실험기법을 적용하여 (1) 예비실험 및 (2) 본 실험을 수행하였다. 예비실험 및 본 실험 보고서에서는 실험 변수, 수행과정 및 절차, 실험결과 및 분석을 정리하였다. 이를 통해 개발된 충돌실험기법을 적용하여 실험이 정상적으로 수행되는가를 검증하였고, 수행된 실험결과는 추후 내충격 성능평가 연구를 위한 데이터베이스로서 활용될 수 있다.

(1) 예비실험 충돌실험 수행 보고서 (성과증빙 자료집 p.39 ~ p.52)

- 해석 시뮬레이션의 재료모델 개선을 위한 예비 SHPB 실험의 시편 제작, 수행절차 및 실험결과 분석을 기술하였다. 또한 중속가스건을 활용한 철근 콘크리트 벽체 예비 충돌실험의 시편 제작 및 실험수행 절차, 실험결과 및 분석에 대해 기술하였다.

사회기반시설 내충격 성능평가를 위한 실험기법 개발 -예비실험 수행보고서- 2017.11 서울대학교 산학협력단	<목 차> <table> <tr> <td>1. Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB)실험</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1.1 실험수행목표</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1.2 시편재 제작</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1.2.1 SHPB 실험 시편 제작</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1.2.2 Pulse Shaper 제작</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>1.3 SHPB 실험 수행과정</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>1.3.1 실험변수</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>1.3.2 실험수행과정</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>1.4 실험수행결과</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>2. 250 mm Single-Stage Gas Gun(SSGG) 예비충돌실험</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>2.1 실험수행목표</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>2.2 시편재 제작</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>2.2.1 RC 벽체 제작</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>2.2.2 충돌재 제작</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>2.2.3 실험소요 소모품 제작</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>2.3 250 mm SSGG 충돌실험 수행과정</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>2.3.1 실험변수</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>2.3.2 실험수행과정</td> <td>11</td> </tr> <tr> <td>2.4 실험수행결과</td> <td>12</td> </tr> </table>	1. Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB)실험	1	1.1 실험수행목표	1	1.2 시편재 제작	1	1.2.1 SHPB 실험 시편 제작	1	1.2.2 Pulse Shaper 제작	2	1.3 SHPB 실험 수행과정	3	1.3.1 실험변수	3	1.3.2 실험수행과정	3	1.4 실험수행결과	4	2. 250 mm Single-Stage Gas Gun(SSGG) 예비충돌실험	5	2.1 실험수행목표	5	2.2 시편재 제작	5	2.2.1 RC 벽체 제작	5	2.2.2 충돌재 제작	10	2.2.3 실험소요 소모품 제작	10	2.3 250 mm SSGG 충돌실험 수행과정	10	2.3.1 실험변수	10	2.3.2 실험수행과정	11	2.4 실험수행결과	12
1. Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB)실험	1																																						
1.1 실험수행목표	1																																						
1.2 시편재 제작	1																																						
1.2.1 SHPB 실험 시편 제작	1																																						
1.2.2 Pulse Shaper 제작	2																																						
1.3 SHPB 실험 수행과정	3																																						
1.3.1 실험변수	3																																						
1.3.2 실험수행과정	3																																						
1.4 실험수행결과	4																																						
2. 250 mm Single-Stage Gas Gun(SSGG) 예비충돌실험	5																																						
2.1 실험수행목표	5																																						
2.2 시편재 제작	5																																						
2.2.1 RC 벽체 제작	5																																						
2.2.2 충돌재 제작	10																																						
2.2.3 실험소요 소모품 제작	10																																						
2.3 250 mm SSGG 충돌실험 수행과정	10																																						
2.3.1 실험변수	10																																						
2.3.2 실험수행과정	11																																						
2.4 실험수행결과	12																																						

그림 3.132 예비 충돌실험 수행 보고서

(2) 본 충돌실험 수행 보고서 (최종보고서 p.40 ~ p.69)

- 개발된 재료 충돌실험기법 검증을 위한 SHPB 실험의 시편 제작 및 실험 수행절차, 실험결과 및 분석을 기술하였다. 또한 부재 충돌실험기법 검증을 위한 중속가스건 충돌실험 수행절차, 실험결과 및 분석을 기술하였다.

다. 핵심성과 3: 구조물 내충격 성능평가 실험기법 수립

- (1) 및 (2) 선행 구조물 내충격 성능평가 실험 및 해석연구와 현행 충돌설계법에 대한 한계점을 극복하기 위한 충돌실험기법을 정립하였다. 개발된 충돌실험기법에 대한 검증실험 및 타당성 평가 해석을 수행하였고 (3) 재료 및 부재 단위 내충격 성능평가 실험기법을 최종적으로 제안하였다.
- 뿐만 아니라 해당 충돌실험기법을 구축하며 SCI 논문 게재 1건 및 특허출원 1건의 양적 성과를 달성하였다(표 3.22).

(1) 1차년도 연구수행 보고서 (성과증빙 자료집 p.53 ~ p.95)

- 구조물의 내충격 성능평가에 관한 선행연구 및 현행 충돌 관련 설계기준을 분석하여 한계점을 파악하였고, 이를 바탕으로 내충격 성능평가 실험기법을 제안하였다.

사회기반시설 내충격 성능평가를 위한 실험기법 개발 -연구보고서- 2017.11 서울대학교 산학협력단	<목 차> 1. 연구개발과제 개요 1 1.1 연구목표 1 1.2 연구수행방법 1 2. 관련분야의 기존 수행연구 현황 및 분석 1 2.1 내충격 성능평가에 대한 기존연구 1 2.2 기존연구 분석내용 2 2.2.1 국부손상 평가에 대한 주요변수 2 2.2.1.1 충돌체 두부형상 2 2.2.1.2 벽체의 종류 2 2.2.1.3 벽체 크기(길이) 3 2.2.2 내충격 성능평가 실험 시 주요 측정항목 3 2.2.2.1 충돌체의 충돌 직진속도(충돌속도) 3 2.2.2.2 벽체의 변위 및 변형률 3 2.2.2.3 충돌체의 시간에 따른 관입량 4 2.2.2.4 벽체의 반력 4 2.3 원전벽체 등 위험시설의 설계기준에서 고려하는 충돌체(Projectile)의 기준 4 2.3.1 Protection against Extreme Wind Events and Missiles for Nuclear Power Plants 4 2.3.2 Accident Analysis for Aircraft Crash into Hazardous Facilities 5 2.3.3 ACI 349-13, ASME 2010의 원전벽체 설계기준 5 2.4 기존연구의 한계점 6 3. 사회기반시설 내충격 성능평가 실험기법 제안 6 3.1 시험체의 설계기법 6 3.2 충돌체의 설계기법 7
--	--

그림 3.133 1차년도 연구수행 보고서

(2) 최종 연구수행 보고서 (최종보고서 p.8 ~ p.116)

- 재료 및 부재 단위의 내충격 성능평가 실험에 대한 선행 연구 및 현행 충돌 관련 설계기준을 분석하고 선행 연구의 한계점을 파악하였다. 이를 바탕으로 재료 및 부재의 내충격 성능을 평가하기 위한 충돌실험기법을 제안하였다. 개발된 충돌실험기법을 적용하여 실험을 수행하고 결과를 분석하여 개발된 실험기법을 검증하였다. 이후 실험결과 및 해석결과를 비교·분석하여 충돌실험기법 세부항목들의 타당성을

평가하였고 최종적으로 충돌실험기법을 수정제안하였다.

(3) 충돌실험기법 매뉴얼 (성과증빙 자료집 p.96 ~ p.126)

- 재료 충돌실험기법은 SHPB 실험 수행을 위한 시편의 제작과정 및 시편 최대골재치수에 대한 제한을 제시하였다. 부재 충돌실험기법은 중속가스건을 활용한 철근 콘크리트 벽체의 충돌실험 수행 시 소모품의 설계 및 제작에 대한 방법과 고속카메라촬영기법 및 충돌속도 계측기법 등 충돌실험 계측기법을 제시하였다.

충돌실험기법 매뉴얼 사회기반시설 내충격 성능평가를 위한 실험기법 개발 2019.01 서울대학교 산학협력단	목 차 I. 개 요 1 II. 재료 충돌실험기법 매뉴얼 3 1. 실험 조건 및 실험 계획 수립 3 2. 시편 제작 계획 수립 3 3. 시편 배합 및 정적압축강도실험 4 4. 유한요소해석 수행 4 5. 펄스웨이퍼 제작 및 시편 절단 5 6. 실험 수행 5 6.1. 실험데이터 계속 준비 5 6.2. 속도 및 장비 정렬 상태 검증용 위한 예비 실험 수행 6 6.3. 본 실험 준비 7 6.4. 본 실험 수행 7 6.5. 데이터 획득 7 7. 데이터 후처리 8 8. 재료 충돌실험(SHPB 실험)기법 흐름도 9 III. 부재 충돌실험기법 매뉴얼 10 1. 실험 조건 및 실험 계획 수립 10
---	--

그림 3.134 충돌실험기법 매뉴얼

표 3.22 양적성과 달성 목록

번호	구분 (논문/특허)	논문명/특허명	소속 기관명	저자/ 발명인	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	특기 사항 (SCI 여부)
1	논문	Pure Rate Effect on the Concrete Compressive Strength in the Split Hopkinson Pressure Bar Test	서울대학교	이상호, 김경민, 박자민, 조재열	International Journal of Impact Engineering	3.344	2018.03	SCI
2	논문	Effect of maximum coarse aggregate size on dynamic compressive strength of high-strength concrete	서울대학교	김경민, 이상호, 조재열	International Journal of Impact Engineering	3.344	2019.03	SCI

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 질적 성과지표

○ 본 연구에서 수행하기로 계획한 질적 성과지표를 모두 달성하였다.

표 4.1 질적 성과지표 목표치 및 달성치

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		질적 성과점검기준							
					질적 성과지표		목표치	달성치	검증방법		가중치	달성도
주관	A	구조물 내충격 성능평가 해석 시뮬레이션 툴 구축	A-1 (1yr)	구조물 해석 시뮬레이션 수행	①	기존 연구 대상 해석 시뮬레이션 수행	1건	1건	해석 시뮬레이션 수행 보고서	성과증빙 자료집 p.1 ~ p.20	15	15
					②	예비 실험 대상 해석 시뮬레이션 수행						
			A-2 (2yr)	구조물 내충격 성능평가 해석 시뮬레이션 툴 구축	①	본 실험 해석 시뮬레이션 수행	1건	1건	해석 시뮬레이션 수행 보고서	최종보고서 p.70 ~ p.106	5	5
					②	해석 시뮬레이션 툴 제안	1건	1건	해석 시뮬레이션 매뉴얼	성과증빙 자료집 p.21 ~ p.33	5	5
	B	구조물 내충격 성능평가 실험 데이터베이스 구축	B-1 (1yr)	구조물 내충격 성능 예비 실험 수행	①	예비 실험 수행	1건	1건	예비실험 수행 보고서	성과증빙 자료집 p.39 ~ p.52	25	25
			B-2 (2yr)	구조물 내충격 성능평가 실험 결과 정리 보고서 및 관련 학술논문 제공	①	본 실험 수행	1건	1건	본 실험수행 보고서	최종보고서 p.40 ~ p.69	20	20
	C	구조물 내충격 성능평가 실험기법 수립	C-1 (1yr)	실험기법 사전연구	①	실험기법 연구	1건	1건	연구보고서	성과증빙 자료집 p.53 ~ p.95	10	10
					②	실험기법 제안						
			C-2 (2yr)	구조물 내충격 성능평가 실험에 대한 절차 및 매뉴얼	①	실험기법 연구	1건	1건	연구보고서	최종보고서 p.8 ~ p.116	10	10
					②	실험기법 제안	1건	1건	실험기법 매뉴얼	성과증빙 자료집 p.96 ~ p.126	10	10
계					-	8건	8건	-	-	100	100	

나. 양적 성과지표

- 본 연구에서 수행하기로 한 양적 성과지표 중 비SCI 논문 1건, SCI 논문 1건에 대해 SCI 논문 2건을 달성하여 계획대비 상향 달성하였다.
- 또한, 당초 계획에 없었던 국제학술대회 발표 9건, 국내학술대회 발표 11건, 인력양성 2건(석사학위)의 성과를 추가적으로 달성하였다.
- 그 외, 특허출원 1건은 현재 특허출원을 진행하고 있어 2월 중에 달성할 예정이며, 비SCI 논문 1건은 SCI 논문 1건으로 투고하여 계획대비 상향달성할 예정이다.

표 4.2 양적 성과지표 목표치 및 달성치

구분	핵심성과 (CIE)		단위성과		양적 성과점검기준					
					양적 성과지표		목표치	달성치	검증방법	비고
주관	A	구조물 내충격 성능평가 해석 시뮬레이션 툴 구축	A-1	구조물 내충격 성능평가 해석 시뮬레이션 툴 구축	①	논문	비SCI 1건	SCI 1건	성과증빙 자료집 p.127 ~ p.128	SCI 논문 1건으로 상향 달성
	B	구조물 내충격 성능평가 실험 데이터베이 스 구축	B-2	구조물 내충격 성능평가 실험 결과 정리 보고서 및 관련 학술논문 제공	①	논문	비SCI 1건	SCI 1건 투고예정		SCI 논문 1건 투고 예정 (상향 달성 예정)
	C	구조물 내충격 성능평가 실험기법 수립	구조물 내충격 성능평가 실험에 대한 절차 및 매뉴얼	①	특허	출원 1건	출원 1건	성과증빙 자료집 p.131 ~ p.133	특허출원 진행중 (2월 중 달성예정)	
				②	논문	SCI 1건	SCI 1건	성과증빙 자료집 p.129 ~ p.130		
	계					-	비SCI 논문 2건 SCI 논문 1건 특허출원 1건	SCI 논문 2건	-	-

2. 관련 분야 기여도

- 본 연구에서 개발한 재료 충돌실험기법은 추후 SHPB 실험 수행을 위한 가이드라인이 될 수 있으며 또한 동적재료압축강도 평가를 위한 실험 표준안 개발 시 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 연구의 실험결과를 추후 부재의 충격거동 연구의 인풋 데이터로 활용할 수 있어 구조물 내충격 성능평가의 정확도 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.
- 본 연구에서 개발한 부재 충돌실험기법은 추후 가스건을 활용한 내충격 성능평가의 기반이 됨으로써 관련된 후속연구의 효율적 수행이 가능할 것으로 기대한다. 또한 본 연구에서 구축한 실험데이터 및 해석 시뮬레이션 툴은 추후 후속연구의 데이터베이스로 활용되어 구조물 내충격 성능평가에 대한 국가의 기술수준 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

- ‘핵심성과 B 구조물 내충격 성능평가 실험 데이터베이스 구축’의 양적 성과지표인 특허출원 1건은 현재 특허출원 진행 중에 있으며, ‘핵심성과 B 구조물 내충격 성능평가 실험 데이터베이스 구축’의 양적 성과지표인 비SCI 논문 1건은 투고 예정 중에 있다. 이는 본 과제의 특성상 총 14회라는 많은 횟수의 실험을 수행하여야 했으며, 실험 수행 시 소모품의 설계 및 제작, 실험 실패 시 원인 파악 및 실험기법 개선 등을 1년 9개월의 길지 않은 시간 동안 완료하여야 했기 때문이다. 특히 2차년도 본 실험 중 H-V100 실험에서는 전혀 예상치 못했던 사봇의 열팽창을 원인으로 발사체가 목표속도에 도달하지 못해 실험에 실패하여 그 원인 분석을 위해 실험 스케줄이 다소 늦어지게 되었으며 실험종료가 지연되었다. 이에 따라 결과적으로 특허출원 1건 및 논문 1건 게재가 과제 종료일까지 완료되지 못하였다. 그러나 현재 특허출원은 2월 중에 달성이 될 예정이며, 논문작성은 완료한 상태로 투고를 준비 중에 있다. 또한, 투고를 준비 중인 논문은 SCI급 논문 게재지에 투고되어 당초 계획이었던 비SCI 논문 게재에 대해 성과를 상향 달성할 예정이다.

제5장. 연구개발성과의 활용 계획

1. 연구결과의 활용방안

- 본 연구에서 개발한 재료 및 부재 내충격 성능평가 실험기법은 추후 내충격 성능평가 실험연구를 수행할 연구자들에게 가이드라인이 되어 관련 연구에 활용될 수 있다. 이에 따라 충돌의 실험을 수행하는 추후 연구들의 실험 실패 확률을 최소화하여 연구효율을 증대시킬 수 있으며 뛰어난 연구성과를 내는 데에 이바지할 수 있다.
- 개발된 충돌실험기법을 활용하여 수행하는 충돌실험 연구 데이터의 신뢰성과 일관성을 확보할 수 있다. 이를 통해 추후 내충격 설계분야 실험연구들의 실험 데이터들을 통합적 관리할 수 있으며 일관성 있는 실험 데이터베이스를 구축할 수 있다. 이에 따라 관련 분야 연구의 발전에 기여할 수 있다.
- 본 연구에서 제안한 SHPB 실험 및 중속가스건 충돌실험의 Know-How를 극한성능실험센터의 유사 장비(급속재하시험기, 고속가스건, 초고속가스건, 자유낙하시험기, 팬들럼충격시험기)의 실험기법 개발 시 적용 및 응용할 수 있으며, 이를 통해 극한성능실험센터의 실험 수행 역량을 향상시킬 수 있다.
- 개발된 충돌실험기법을 통해 극한하중에 대한 사회기반시설의 안전성 검증이 가능하며 안전하지 못한 구조물에 대한 보수·보강기법에 대한 연구에도 활용될 수 있다. 이를 통해 안전한 사회를 만들기 위한 시스템 구축의 기반이 될 수 있다.

2. 기대효과

가. 기술적 측면

- 본 연구를 통해 수립된 실험기법을 활용하여 신뢰성 있고 의미 있는 실험결과 도출이 가능하며 일관성 있는 구조물 내충격 성능실험 데이터베이스를 구축할 수 있다. 이런 실험 데이터베이스를 기반으로 내충격 성능평가 및 설계분야에 대한 양질의 연구가 지속적으로 수행될 수 있으며 이를 통해 구조물 내충격 성능평가 기술의 진일보가 가능하다.

나. 경제·산업적 측면

- 현재 선진국들은 재난안전관련 산업 및 연구의 육성을 적극적으로 지원하여 재난·안전관련 시장규모를 계속해서 증가시키고 있으며 국내 역시 관련 분야 예산을 증가시키면서 이러한 세계시장의 추세를 따라가고 있다. 세계시장을 선도하기 위해서는 관련 기술의 확보 및 선점이 요구된다. 개발된 충돌실험기법을 활용한 지속적 연구 수행을 통해 내충격 설계기술의 확보 및 선점이 가능하며 우리나라가 세계의 재난안전관련 산업분야를 선도할 수 있다.

다. 사회적 측면

- 본 연구에서 개발한 충돌실험기법을 활용한 원전구조물, 대규모 가스 및 유류 저장 시설, 초장대 교량 및 초고층 빌딩 등 사회기반시설의 내충격 성능평가를 통해 극한 하중에서의 안전성을 검증할 수 있으며, 안전하지 못한 구조물에 대해서는 안전성 확보 방안을 수립할 수 있다. 이에 따라 궁극적으로 안전한 사회를 구축함에 기여할 수 있고 국민의 삶의 질 향상에 기여할 수 있다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- 본 연구는 사회기반시설 내충격 성능평가를 위한 실험기법을 개발을 초점으로 연구를 진행하였다. 연구수행 시 생소했던 충격거동의 이해와 동종의 활용장비에 대한 정보가 필요하였으나 동종의 장비는 세계적으로도 매우 적기 때문에 연구논문 이외에는 관련 정보를 얻기 어려웠다. 따라서 본 연구를 수행하는데 필요한 정보들은 관련 연구논문을 통해 수집하였으며 이를 모두 참고문헌에 기술하였다.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

- 본 연구과제의 보안등급은 ‘일반’으로 분류된다.
- 본 연구는 제품개발에 관한 연구가 아니며 기본적으로 학술적 연구성과를 목표로 하고 있기 때문에 「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의4 제1항의 내용 중 어느 것과도 연관사항이 없으므로 보안과제로 분류되지 않음에 따라 제2항에 의해 일반과제로 분류하였다.

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 대학 차원의 심도 깊은 안전교육을 통한 안전사고 예방

- 서울대학교의 자연과학대학 및 공과대학 대학원 신입생 전원은 입학 시 각 전공 별로 3가지 내용으로 구성된 환경안전원에서 실시하는 환경안전교육을 3일 동안 의무적으로 수강하며 수강 후 소정의 관련 시험을 통과하여야 한다. 만약 시험을 통과하지 못하여 안전교육 수료증을 발급받지 못할 경우 실험실 출입을 금지하여 안전사고를 예방할 수 있도록 하고 있다.
- 이에 대하여 본 연구과제에 참여한 연구원 전원은 서울대학교 소속으로 모두 교내 환경안전교육을 이수하여 안전사고를 예방할 수 있도록 조치하였다.
- 각 실험시설 별 안전수칙이 명시된 표어를 제작하여 시설 곳곳에 부착하여 실험 수행 시 안전에 대한 경각심을 고조시키고 있다.

표 9.1 서울대학교 환경안전교육 내용

구분	A과정	B과정	C과정
공통 과목	• 환경안전관리, 전기의 안전취급, 실험실장비 및 기구의 취급요령 • 사고의 심리학, 소방안전, 응급처치, 연구윤리		
선택 과목	• 독성화학물질 • 방사선 안전 • 인화성액체, 반응성 및 폭발성 • 서울대학교 실험실 안전 실태 • 실험동물취급 • 실험연구용 LMO 안전관리	• 독성화학물질 • 방사선안전관리 • 인화성액체, 반응성 및 폭발성 • 서울대학교 실험실 안전실태 • 실험실 안전 보건과 직업병 • 인간공학	• 실험실 안전 보건과 직업병 • 인간공학 • 공작실안전 • 가스안전 • 캠퍼스 내 생활환경

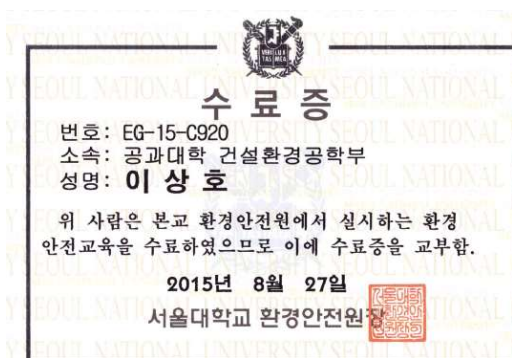


그림 9.1 환경안전교육 이수 수료증

2. 극한성능실험센터의 안전교육 이수 및 센터 장비 전담인력을 통한 실험 수행

- 본 연구과제에서 활용하는 장비를 운영 및 관리하고 있는 극한성능실험센터에서는 센터 내에서 이루어지는 모든 실험의 경우 학생 참여자들에 대하여 사전에 센터로부터 안전교육 이수를 통해 시험 과정 중에 발생할 수 있는 안전사고를 미연에 방지할 수 있도록 하고 있다.
- 또한, 센터 내 장비의 작동 및 운영은 센터 내 장비 전담인력이 담당함으로써 안전 사고 발생을 방지하고 있다.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	저자/ 발명인	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	특기 사항 (SCI 여부)
1	논문	Pure Rate Effect on the Concrete Compressive Strength in the Split Hopkinson Pressure Bar Test	서울대학교	이상호, 김경민, 박자민, 조재열	International Journal of Impact Engineering	3.344	2018.03	SCI
2	논문	Effect of maximum coarse aggregate size on dynamic compressive strength of high-strength concrete	서울대학교	김경민, 이상호, 조재열	International Journal of Impact Engineering	3.344	2019.03	SCI
3	기타	학술대회 발표 (국제 9건, 국내 11건)	-	-	-	-	-	-
4	기타	인력 양성 (석사학위 2인)	서울대학교	-	-	-	-	-

제11장. 기타 사항

제12장 . 참고 문헌

1. Richard A. Beth. (1946). Final Report on Concrete Penetration. Division 2, National Defense Research Committee of the Office of Scientific Research and Development.
2. Fiquet, G., & Dacquet, S. (1977). Study of the perforation of reinforced concrete slabs by rigid missiles—experimental study, part II. Nuclear Engineering and Design, 41(1), 103-120.
3. Goldstein, S., Berriaud, C., & Labrot, R. (1977). Study of the perforation of reinforced concrete slabs by rigid missiles—experimental study, part III. Nuclear Engineering and Design, 41(1), 121-128.
4. Stephenson, A. E., Sliter, G. E., & Burdette, E. G. (1978). Full-scale tornado-missile impact tests. Nuclear Engineering and Design, 46(1), 123-143.
5. Romander, C. M., & Sliter, G. E. (1984). Model tests of turbine missile impact on reinforced concrete. Nuclear Engineering and Design, 77(3), 331-342.
6. Kojima, Isao. “An experimental study on local behavior of reinforced concrete slabs to missile impact.” Nuclear Engineering and Design 130.2 (1991): 121-132.
7. Sugano, T., Tsubota, H., Kasai, Y., Koshika, N., Ohnuma, H., Von Riesemann, W. A. & Parks, M. B. (1993). Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles Part 1. Test program, method and results. Nuclear Engineering and Design, 140(3), 387-405.
8. Zhang, M. H., et al. “Resistance of high-strength concrete to projectile impact.” International Journal of Impact Engineering 31.7 (2005): 825-841.
9. Tai, Y. S. (2009). Flat ended projectile penetrating ultra-high strength concrete plate target. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 51(2), 117-128.
10. Unosson, M., & Nilsson, L. (2006). Projectile penetration and perforation of high performance concrete: experimental results and macroscopic modelling. International journal of impact engineering, 32(7), 1068-1085.
11. Dancygier, A. N., Yankelevsky, D. Z., & Jaegermann, C. (2007). Response of high performance concrete plates to impact of non-deforming projectiles. International Journal of Impact Engineering, 34(11), 1768-1779.
12. 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.
13. Beppu, M., Kataoka, S., Takahashi, J., & Krauthammer, T. (2013). Aramid Fiber Sheet

- Reinforcing Effects on the Local Damage in Concrete Plates Subjected to High Velocity Impact. *International Journal of Protective Structures*, 4(3), 433-449.
14. Jinzhu, L., Zhongjie, L., Hongsong, Z., & Fenglei, H. (2013). Perforation experiments of concrete targets with residual velocity measurements. *International Journal of Impact Engineering*, 57, 1-6.
 15. Abdel-Kader, M., & Fouda, A. (2014). Effect of reinforcement on the response of concrete panels to impact of hard projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 63, 1-17.
 16. Wu, H., Fang, Q., Peng, Y., Gong, Z. M., & Kong, X. Z. (2015). Hard projectile perforation on the monolithic and segmented RC panels with a rear steel liner. *International Journal of Impact Engineering*, 76, 232-250.
 17. Peng, Y., Wu, H., Fang, Q., Liu, J. Z., & Gong, Z. M. (2016). Flat nosed projectile penetrating into UHP-SFRC target: experiment and analysis. *International Journal of Impact Engineering*, 93, 88-98.
 18. Beppu, M., Kataoka, S., Ichino, H., Matsuzawa, & R., Itoh, M. (2017). Numerical simulation of failure behavior of RC slabs subjected to low-velocity impact. 12th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures, 141-149.
 19. Kim, J. M., Bruhl, J., Seo, J., & Varma, A. An Overview of Missile Impact Tests on Steel-Plate Composite (SC) Walls. In *Structures Congress 2017*, 245-255.
 20. Kim, K. S., Moon, I. H., Choi, H. J., & Nam, D. W. (2017). A preliminary study on the local impact behavior of Steel-plate Concrete walls. *Annals of Nuclear Energy*, 102, 210-219.
 21. U.S. Nuclear Regulatory Commission. (2015). Regulatory Guide 1.117, Protection against Extreme Wind Events and Missiles for Nuclear Power Plants(DG-1313), Washington, DC.
 22. U.S. Department of Energy. (2006). DOE Standard, Accident Analysis for Aircraft Crash into Hazardous Facilities(DOE-STD-3014-2006), Washington, DC.
 23. ACI Committee 349. (2014). Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures (ACI 349-13) & Commentary” , Farmington Hills, MI, American Concrete Institute.
 24. Nuclear Energy Institute (NEI). (2011). Methodology for performing aircraft impact assessment for new plant designs.
 25. ASME. (2010). ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Rules for Construction of Nuclear Facility Components, Division 2, American Society of Mechanical Engineers, New York.

26. Riera, J. D. (1968). On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces. *Nuclear Engineering and Design*, 8(4), 415-426.
27. Kennedy, R. P. (1976). A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects. *Nuclear Engineering and Design*, 37(2), 183-203.
28. Haldar, A., & Miller, F. J. (1982). Penetration depth in concrete for nondeformable missiles. *Nuclear Engineering and design*, 71(1), 79-88.
29. Forrestal, M. J., Altman, B. S., Cargile, J. D., & Hanchak, S. J. (1994). An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets. *International Journal of Impact Engineering*, 15(4), 395-405.
30. Forrestal, M. J., Frew, D. J., Hanchak, S. J., & Brar, N. S. (1996). Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 18(5), 465-476.
31. Forrestal, M. J., & Tzou, D. Y. (1997). A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets. *International Journal of Solids and Structures*, 34(31-32), 4127-4146.
32. Warren, T. L., Fossum, A. F., & Frew, D. J. (2004). Penetration into low-strength (23 MPa) concrete: target characterization and simulations. *International Journal of Impact Engineering*, 30(5), 477-503.
33. Forrestal, M. J., Frew, D. J., Hickerson, J. P., & Rohwer, T. A. (2003). Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements. *International Journal of Impact Engineering*, 28(5), 479-497.
34. Chen, X. W., & Li, Q. M. (2002). Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics. *International Journal of Impact Engineering*, 27(6), 619-637.
35. Li, Q. M., & Chen, X. W. (2003). Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 28(1), 93-116.
36. Li, Q. M., Reid, S. R., Wen, H. M., & Telford, A. R. (2005). Local impact effects of hard missiles on concrete targets. *International Journal of impact engineering*, 32(1-4), 224-284.
37. Li, Q. M., & Tong, D. J. (2003). Perforation thickness and ballistic limit of concrete target subjected to rigid projectile impact. *Journal of Engineering Mechanics*, 129(9), 1083-1091.
38. Chen, X. W., Li, X. L., Huang, F. L., Wu, H. J., & Chen, Y. Z. (2008). Normal

- perforation of reinforced concrete target by rigid projectile. *International journal of impact engineering*, 35(10), 1119-1129.
39. Fang, Q., & Wu, H. (2017). Concrete structures under projectile impact. In *Concrete Structures Under Projectile Impact* (pp. 497-558). Springer, Singapore.
 40. Murray, Y. D. (2007). Users manual for LS-DYNA concrete material model 159 (No. FHWA-HRT-05-062).
 41. Hallquist, J. O. (2007). LS-DYNA keyword user's manual. Livermore Software Technology Corporation, 970, 299-800.
 42. Hallquist, J. O. (2006). LS-DYNA theory manual. Livermore software Technology corporation, 3, 25-31.
 43. Lanczos, C. (1956). *Applied analysis*.
 44. Hao, Y., & Hao, H. (2011). Numerical evaluation of the influence of aggregates on concrete compressive strength at high strain rate. *International Journal of Protective Structures*, 2(2), 177-206.
 45. Chen, X., Wu, S., Zhou, J. (2013). Experimental and modeling study of dynamic mechanical properties of cement paste, mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 419-30.
 46. Hao, Y., Hao, H., Jiang, G.P., Zhou, Y. (2013). Experimental confirmation of some factors influencing dynamic concrete compressive strengths in high-speed impact tests. *Cement and Concret Research*, 52, 63-70.
 47. Albert, A., & Zhang, L. (2010). A novel definition of the multivariate coefficient of variation. *Biometrical Journal*, 52(5), 667-675.
 48. ASTM C39/C39M-17b. (2017). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. West Conshohocken, ASTM International.
 49. ASTM C192/C192-16a. (2016). Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. West Conshohocken, ASTM International.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

