

15CTAP-
C098048
-02

방폭 두께 100mm 콘크리트를 대체하는
두께 20mm급 PROTECT 방폭 패널 개발

최종 보고서

2017

국토교통부

국토교통과학기술진흥원

Infrastructure R&D Report

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()

국토교통기술촉진연구사업 최종보고서

R&D /
15CTAP-C098048-02

방폭 두께 100mm 콘크리트를 대체하는 두께 20mm급 PROTECT 방폭 패널 개발 최종보고서

2017. 07. 23.

주관연구기관 / 고려대학교 산학협력단

공동연구기관 / (주)캠트로스

동부제철(주)

(주)한구조엔지니어링

국토교통부

(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘방폭 두께 100mm 콘크리트를 대체하는 두께 20mm급 PROTECT(Poly Resilience-Oriented hybrid TEChnology plaTe) 방폭 패널개발’(연구개발 기간 : 2015. 06. 24 ~ 2017. 06. 23) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2017 . 07. 23.

주관연구기관명 : 고려대학교 산학협력단	(대표자) 고 제 상 (인)
공동연구기관명 : (주)캠트로스	(대표자) 조 용 균 (인)
동부제철(주)	(대표자) 도 병 호 (인)
(주)한구조엔지니어링	(대표자) 김 지 상 (인)

주관연구기관책임자: 주 영 규
공동연구기관책임자: 조 용 균
도 병 호
김 지 상

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	15CTAP -C098048-02	해당 단계 연구 기간	2016.06.24. ~ 2017.06.23.	단계구분	1/2~2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	방폭 두께 100mm 콘크리트를 대체하는 두께 20mm급 PROTECT(Poly Resilience - Oriented hybrid TEChnology plaTe) 방폭 패널 개발			
연구책임자	주 영 규	해당단계 참여 연구원 수	총: 25명 내부: 25명 외부: 0명	해당단계 연구개발비	정부:200,000천원 기업:250,000천원 계:450,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 25명 내부: 25명 외부: 0명	총 연구개발비	정부:400,000천원 기업:500,000천원 계:900,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	고려대학교 산학협력단		참여기업명	(주)켄트로스, 동부제철(주), (주)한구조엔지니어링	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
요약				보고서 면수	90

본 연구는 강판 사이에 특수나노소재를 충전한 샌드위치 형태의 합성패널인 PROTECT 방폭 패널을 개발하기 위한 연구로서, 가스 및 화재에 의한 폭발 사고 발생 시 구조적 안전성을 확보하고 건물의 붕괴 위험을 미연에 차단할 수 있는 경제적이고 실용적인 보강용 방폭 패널을 개발하는데 그 목표가 있다. 강판과 특수나노소재 사이의 부착력은 패널의 일체거동이 가능하도록 하여 더욱 높은 에너지 흡수능력을 가질 수 있게 하며, 특수나노소재의 뛰어난 충격 흡수 능력을 바탕으로 높은 성능의 에너지 완충효과를 가지는 방폭재를 형성할 수 있다. 또한 두 강판 사이에 경량의 특수나노소재를 주입함으로써, 기존 철근콘크리트 보강 대비 60~70%의 자중 감소 효과를 가질 수 있다. 기존 기둥에 부착하는 방식으로 보강되기 때문에 설치가 용이하고 공기를 단축시킬 수 있으며, 재사용이 가능한 특수나노소재를 사용하여 이산화탄소 발생 및 건설폐기물을 감소시킬 수 있는 친환경적인 보강재이다. 연구의 최종 목표는 PROTECT 방폭 패널의 시작품을 개발하는 것으로, 이를 정리하면 다음과 같다.

- ① PROTECT 방폭 패널의 요구 성능을 만족하는 특수나노소재 개발
- ② 개발된 특수나노소재를 적용하여 PROTECT 방폭 패널의 시작품 개발
- ③ 기존 구조물에 PROTECT 방폭 패널을 보강하는 방법 및 기준 제시

〈 국문요약문 〉

연구의 목적 및 내용	■ PROTECT 방폭 패널의 시작품 개발 - PROTECT 방폭 패널의 요구 성능을 만족하는 특수나노소재 개발 미 국방부(D.O.D)에서 제정한 UFC-4-023-02(Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions)를 기준으로 하여 그것을 만족하는 방폭 재료의 성능을 연구하고, 그에 상응하는 특수나노소재의 물성치를 해석 및 재료 실험을 통하여 확보하는 것을 목표로 함 - 개발된 특수 나노소재를 적용하여 PROTECT 방폭 패널의 시작품 개발 유한요소해석 및 내충격 실험을 통하여, 요구되는 성능을 만족하는 PROTECT 방폭 패널의 시작품 제작을 목표로 함 - 기존 구조물에 PROTECT 방폭 패널을 보강하는 방법 및 기준 제시 개발된 PROTECT 방폭 패널을 기존 구조물에 적용하는 방법과 건물의 안전진단 결과에 따라 보강하는 기준 제시를 목표로 함 ■ 기존 방폭 구조물에 대한 설계 기준 및 사례 조사 국내 · 외 설계 기준 조사 및 방폭 보강 사례 조사 Intelligent Engineering Ltd. 의 SPS 사례 연구 ■ 특수나노소재의 소요 물성치 도출 폭발하중에 대한 패널의 유한요소해석을 수행, 소요 물성치 도출 (탄성계수, 밀도, 푸아송비 등) ■ 특수나노소재 개발 기존에 사용되고 있는 여러 소재들을 조사하고, 방폭용으로 사용되기에 적합한 소재를 선정, PROTECT 방폭 패널이 요구하는 성능에 부합하도록 기존의 소재를 개량 또는 새로이 개발 ■ 시작품 형상 최적화 ‘UFC-4-023-02’ 을 기준으로 하여 성능을 만족하는 방폭 패널의 세부 형상 제안 (강판 두께, 강판 재질, 필요한 경우 전단보강재 배치) 유한요소 해석을 Try & Error 방식으로 수행하며 방폭 패널의 최적화된 형상을 도출 ■ 시작품 제작 및 내충격 실험 수행 도출된 최적화 형상을 바탕으로 시작품을 제작하고, 내충격 실험을 통하여 그 성능을 검증 ■ 보강 적용 기준 제시 선행 연구단계에서 얻어진 연구내용을 기반으로 실제 구조물에 방폭 패널을 적용하는 방법과 구조물 건강 진단 결과에 따라 보강하는 기준을 제시					
	연구개발성과	■ 기술 실용화 성과 PROTECT 방폭 패널의 시작품 제작 1건 ■ 연구성과 특수나노소재와 관련된 국내 논문 게재 1건 시작품 제작 및 내충격 실험에 대한 국내 논문 게재 1건				
		연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	■ 새로운 방폭 보강재료에 대한 원천기술 확보 ■ 충격흡수에 유리한 신소재 개발 ■ 수지 충전형 패널의 국산화 및 시장개척 ■ 폭발 및 테러 가능성이 있는 시설에 대한 안전성 확보 가능 ■ 화재 및 폭발 사고 발생 시 막대한 인명피해가 예상되는 장소의 안전성 확보			
	핵심어 (5개 이내)		방폭	내충격	나노소재	유한요소해석

< SUMMARY >

Purpose & Contents	■ Developing the prototype of the PROTECT panel – Developing the nano-composite satisfying the performance criteria for the blast resistance (UFC-4-023-02,“Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions”, US Department of Defense) – Developing the prototype of the PROTECT panel using the nano- composite – Presenting criterion and method of reinforcing PROTECT panel to existing structure ■ Investigate the design criteria and case about existing blast resistance structures Research domestic and foreign design standards Case study of blast resistance reinforcement SPS case study of Intelligent Engineering Ltd. ■ Derive the material properties of nano-composite Performing finite element analysis of panel for blast loading and deriving the properties(modulus of elasticity, density and Poisson's ratio, etc.) ■ Nano-composite development 1. Investigating various materials used in conventional 2. Selecting a material suitable to be used for the blast resistance 3. Improving existing materials or developing new material to meet the demanding performance of PROTECT panels ■ Optimizing prototype shape Propose the shape details of the PROTECT panel to meet the performance based on 'UFC-4-023-02' (Sheet thickness, sheet materials, shear reinforcement arranged if necessary) Derive the optimizing shape of PROTECT panel by performing FEA under trial and error method ■ Manufacturing the prototype and performing the impact test Produce the prototype based on the derived optimized shape Verify the performance through the impact resistance test ■ Presenting criterion for reinforcement application Propose the application method of PROTECT panel to structure and the reinforcement standard depending on the structural safety diagnosis based on the previous research study				
Results	■ Achievement of technology practical Manufacturing prototype of the PROTECT panel ■ Research achivement Publishing a domestic paper related to the nano-composite Publishing a domestic paper related to the impact tests and manufacturing of prototype				
Expected Contribution	■ Secure source technology for the new blast resistance reinforcement material ■ Development of new material favorable for shock absorption ■ Localization and penetrating the domestic market of polymer-filled panel ■ Ensure safety of the facility that are likely to explosion and terror ■ Ensure safety of the place that expected huge losses of life in the event of fire and explosion.				
Keywords	blast resistance	impact resistance	nano-composite	finite element analysis	impact test

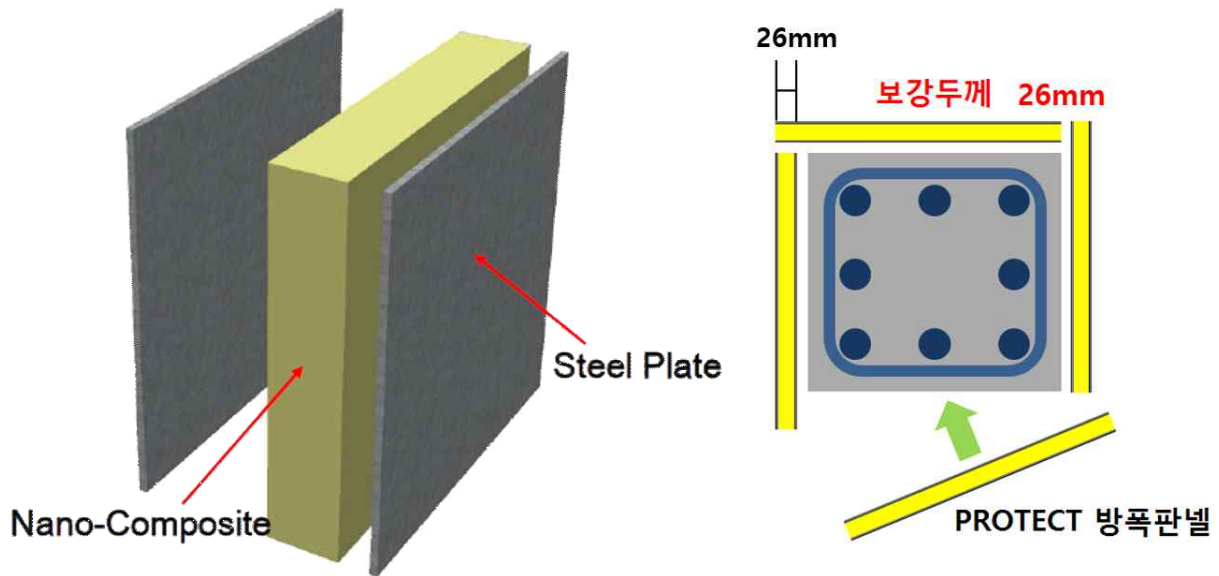
< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	10
3. 연구 수행 내용 및 성과	17
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	82
5. 연구개발성과의 활용 계획	85
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	86
7. 연구개발성과의 보안등급	86
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	86
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	86
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	87
11. 기타 사항	87
12. 참고 문헌	88

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

1) 최종목표



PROTECT : Poly Resilience-Oriented hybrid **TE**chnology pla**TE**

- 가스 및 화재에 의한 폭발 사고 발생 시, 구조적 안전성을 확보하고 건물의 붕괴 위험을 미연에 차단할 수 있는 경제적이고 실용적인 방폭 패널

① 방폭 패널의 성능에 상응하는 특수 나노소재의 개발

미국방부(D.O.D)에서 제정한 UFC-4-023-02 (Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions) 를 기준으로 하여 그것을 만족하는 방폭재료의 성능을 연구하고, 그에 상응하는 특수나노 소재를 개발하는 것을 목표로 함

② PROTECT 방폭 패널의 시제품 제작

유한요소해석 및 내충격 실험을 통하여, 요구되는 성능을 만족하는 PROTECT 방폭 패널의 시제품 제작을 목표로 함

③ PROTECT 방폭 패널을 이용하여 보강하는 방법 및 기준 제시

개발된 PROTECT 방폭 패널을 기존구조물에 적용하는 방법과 건물의 안전진단 결과에 따라 보강하는 기준 제시를 목표로 함

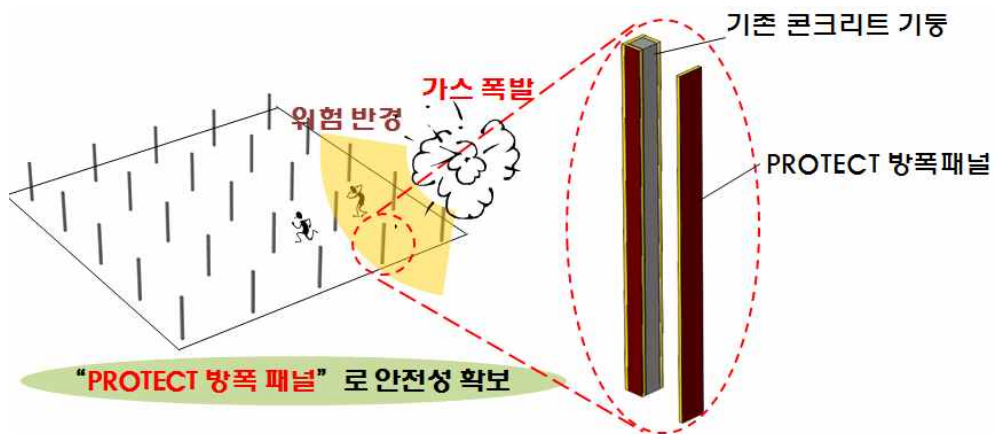
2) 최종목표의 성격 및 설정근거

① 최종목표의 성격

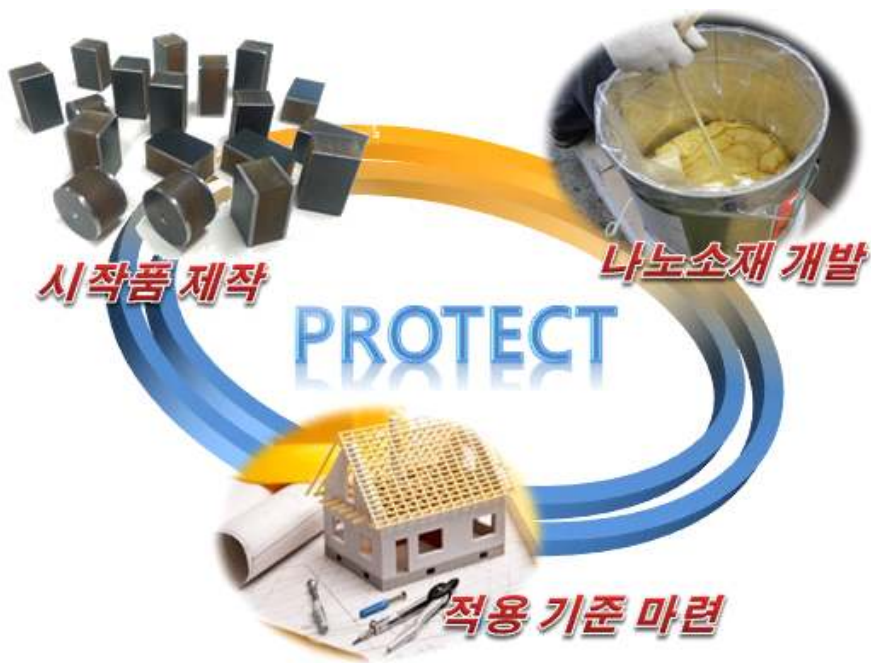
특수나노소재 개발 및 PROTECT 방폭 패널의 시작품 제작

② 목표 설정 근거

현재 국내 방폭 보강 설계는 일반적으로 콘크리트가 적용되며 부재의 두께를 증가시키는 방법(두께 100mm 이상)을 채택하는 경우가 많다. 섬유보강 콘크리트 또한 적용되고 있으나 아직 그 활용도가 높지 않으며, 일정한 성능을 확보하기에 어려움이 있다. 따라서 세장하고(두께 26mm) 방폭 성능이 우수하며 설치가 용이한 PROTECT 방폭 패널의 시작품 제작이 필요하다고 판단됨.



[PROTECT 방폭 패널의 적용개념]



[PROTECT 방폭 패널의 연구개발 목표]

2. 연구개발의 필요성

■ 국내·외 폭발 및 붕괴사고 사례

- 폭발사고 발생 시 폭발로 인한 주요 구조체의 파괴는 내실자의 피난로를 차단하거나 낙하물을 발생시켜 인명피해를 극대화하는 주요 원인이 됨

① 1993년 세계무역센터 폭탄테러 사건

- 1993년 2월 26일 세계무역센터(110층)가 테러리스트의 공격을 받아 북쪽 타워의 지하주차장 2층 남쪽에서 폭발물이 폭발하여 여러 층에 걸친 큰 구멍이 생기고 지하층에 심각한 구조적 손상 발생



[세계무역센터 폭탄테러(1993)]

② 2014년 맨해튼 빌딩 폭발사고

- 2014년 3월 12일 가스누출에 의한 폭발로 인해 아파트 건물 두 동이 한꺼번에 붕괴되는 사고가 발생(2명 사망, 24명 중경상)
- 붕괴된 두 건물은 1900년대에 지어진 노후한 조적조 건물로 현대의 발전된 건축구조기준이 적용되지 않았음



[맨해튼 가스폭발사고(2014)]

③ 1994년 아현동 도시가스 폭발사고

- 1994년 12월 7일 마포구 아현1동 한국가스공사 아현밸브스테이션 지하실에서 계량기 점검 시 전동 밸브 틈새로 다량 방출된 가스가 환기통 주변 모닥불 불씨에 점화되어 폭발한 사고
- 이 사고로 **사망자 12명, 부상자 101명** 등의 인명피해와 **건물 145동**(전파 75, 부분파손 70), 동산 431건, 영업손실 47점, 차량손실 92대 등의 물적 피해 및 이재민 210세대 555명 등 엄청난 손실을 초래



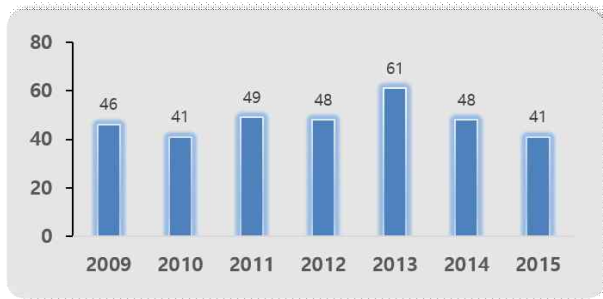
[아현동 가스폭발사고(1994)]

■ 증가하는 국내 폭발사고

- 폭발 및 붕괴사고는 한번 발생하면 많은 재산 및 인명피해가 발생하기 때문에, 구조안전에 대한 불감증은 국가 안팎으로 관심을 기울여야 할 부분임
- 2016년 국민안전처 재난연감에 따르면 국내 폭발사고 발생건수는 최근 7년 간(2009년 ~ 2015년) **매년 40건 이상 발생**하였음
- 최근 4년 간(2012년 ~ 2015년)의 폭발사고로 인한 피해액은 2012년 458백만원에서 2015년 1,100백만원으로 꾸준히 증가하고 있음

2009년	2010년	2011년	2012년	2013년	2014년	2015년
46	41	49	48	61	48	41

[2009년 ~ 2015년 폭발사고 발생현황]



[2009년 ~ 2015년 폭발사고 발생현황]



[2012년 ~ 2015년 폭발사고 피해액]

- 증가하는 폭발 및 테러 위협에 따라 일부 건물이 방폭에 대한 보강이 실시되고 있으나, 철근의 직경 및 피복두께를 고려하면 100mm 이상의 보강 두께가 요구되므로 실용적이지 못한 경우가 많음
- 따라서 손쉽게 적용할 수 있는 **효율적이고 경제적인 방폭 보강 기술개발**이 필요함

■ 폭발에 의한 기존 구조시스템의 위험성

구분	장점	단점
철근콘크리트조	- 폭발로 인한 내부온도 상승 시 구조재의 강도 저하가 미미 (콘크리트의 내화성능 발휘)	- 대부분의 벽, 슬래브들이 충격하중을 받을 시 취성적 거동을 보이며, 이때 발생한 파편에 의한 2차적인 인명 혹은 재산피해가 발생할 수 있음 - 콘크리트 표면의 탈락과 코어의 붕괴가 일어나지 않도록 추가적인 철근이 보강되어야 함
조적조	- 압축력에 대해 효율적인 구조	- 지진, 폭발 등 횡력에 대해 매우 취약 - 구조물의 일부분 붕괴 시 연쇄적인 붕괴로 이어질 가능성이 높음
철골조	- 부재의 연성적 설계가 수월	- 내화처리가 미흡할 경우 내부온도가 상승했을 때, 구조재의 하중저항성능이 급격하게 저하 - 연성파괴를 유도하기 위해서 접합부에서 전강도 접합이 실시되어야 함

[폭발사고 발생 시 구조시스템의 비교]

- 가스 등에 의한 폭발사고 발생 시, 건물 내 기둥과 같은 주요 부재의 파괴는 건축물의 **연쇄적인 붕괴현상**으로 이어져 파국적인 인명손실의 주원인이 되고 있음

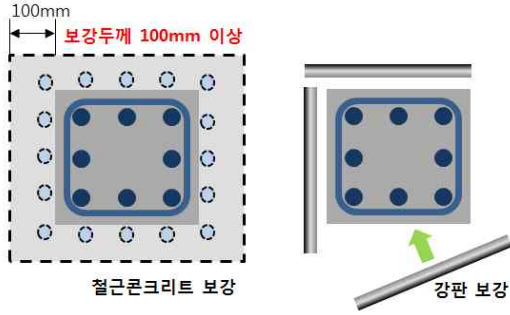
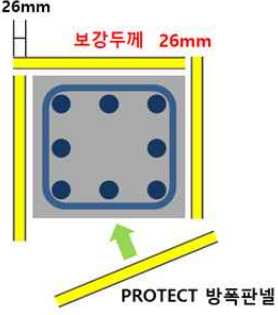
- 대부분의 근린상가 시설의 경우, 1층은 벽체가 없이 보와 기둥으로만 이루어져 있고 2층 이상의 층에는 내부에 벽체가 존재하는 경우가 많음. 이 경우 1층 기둥 붕괴 시 **대체 하중전달경로의 확보가 불가능**하여 구조물 전체의 붕괴로 이어질 수 있음
- 조적조 건물의 경우 횡력에 매우 취약한 구조적 시스템을 가지고 있으며 구조체 일부의 손상이 구조물 전체의 붕괴로 이어질 가능성이 높으므로, 폭발사고 발생 시 큰 피해가 발생할 가능성이 있음

■ 방폭 보강 적용 대상

- **철근콘크리트조** : 라멘구조의 경우, 조립식 철물 등을 이용하여 구조체 표면에 보강 패널을 부착하여 손쉽게 보강 가능. 벽식 구조의 경우, 폭발가능성이 높은 구역의 벽체 전면을 보강하여 구조안전성 확보
- **조적조** : 폭발사고 발생 시 연쇄붕괴 방지를 위하여 1층 기둥을 주로 보강. 벽식 구조인 경우, 폭발가능성이 높은 구역의 벽체 전면을 보강하여 구조안전성 확보
- **철골조** : 폭발하중 작용 시 연성적 거동이 예상되나 세장하여 쉽게 좌굴할 가능성이 있으므로 에너지 흡수능력이 우수한 소재로 보강이 필요

■ 기존 방폭 보강 기술의 한계 및 기존 기술의 개선방안

- 주요 시설물 구조체에 대한 국내 기존 보강 기술은 크게 철근콘크리트 보강, 강판 및 유리섬유 보강 방법 등이 있음
- **철근콘크리트 보강법**의 경우, 콘크리트의 양생기간이 필요하기 때문에 공기가 길어지고 철근 피복두께 확보를 위해 구조체를 비대하게 보강할 수밖에 없음(철근 직경 및 피복 고려 100mm 이상 보강 두께 필요). 또한 폭발사고 발생 시 **파손된 콘크리트가 비산**하여 내실자의 안전을 위협할 수 있다는 문제가 있음
- **강판 부착법**은 철근콘크리트 보강법에 비해 효율적이고 비산물에 대한 위험이 적으나, 비중이 크기 때문에 보강 설치가 어렵고 단가가 높아 경제성이 떨어진다는 단점이 있음
- 따라서 기존 공법의 단점을 극복할 수 있으며 높은 에너지흡수 능력을 갖춘 새로운 보강 기술에 대한 개발이 필요함

구분	기존 방폭보강기술	PROTECT 방폭 패널
방폭보강 기술 단면		
문제점 및 개발목표	철근콘크리트 보강 · 양생이 필요한 습식 공법 · 비효율적인 단면 사이즈 · 취성적 파괴에 의한 2차 피해 강판 보강 · 세장하나 비경제적(30만원/m²) · 단위면적당 큰 중량	· 공법의 건식화 · 간소한 부재 사이즈 · 뛰어난 연성 및 인성능력 확보 · 가격경쟁력 확보(25만원/m² 이하) · 보강재의 경량화 · 친환경적

[기존 방폭 보강 기술과 PROTECT 방폭 패널 비교]

3. 연구개발 범위

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	방폭 패널의 요구 성능을 만족시킬 수 있는 특수나노소재 개발	■ 폭발하중에 대한 설계 기준 및 보강 사례조사 - 국내·외 설계 기준 조사 및 방폭 보강 사례 조사 - Intelligent Engineering Ltd.의 SPS 사례 연구 ■ 특수나노소재 개발 - 방폭용으로 적용하기 위한 소재의 물성치 도출 - 방폭용으로 적용 가능한 소재 조사 및 개발 - 특수나노소재의 재료실험 ■ 시작품의 해석적 성능 평가 - 관련 설계코드에 대한 조사 - 시작품의 유한요소해석 수행
2차년도	시작품 제작 및 내충격 실험을 통한 성능 검증	■ PROTECT 방폭 패널의 시작품 설계 - 유한요소해석을 통한 최적화 과정 수반 - 전단연결재 등의 보강재 적용 검토 - 1차년도 해석결과를 통한 Feed-back ■ 시작품의 내충격 실험 수행 - ‘ASTM D5265-09’에 근거한 내충격 실험을 통하여 내충격 성능 검증 ■ 보강 적용 기준 제시 - 선행 연구 결과를 바탕으로 개발될 방폭 패널을 구조물에 적용하는 방법 및 기준 제시

[연차별 연구목표 및 내용]

■ 핵심 연구성과

정의	PROTECT 방폭 패널의 시작품 개발
목적	PROTECT 방폭 패널의 시작품 제작 및 해석적·실험적 성능 평가
성능목표	(기존기술 수준) 폭발하중 10 psi for 20 μs에 견디도록 설계 (산업안전기준법) (개발기술 수준) ① $\mu_{\max} = 20$, $\theta_{\max} = 12^\circ$의 기준을 만족하도록 설계 (2014, UFC 3-340-02) ② ASTM D7136M-15에서 규정하는 충격량(16.3J)에 의하여 파괴되지 않음

성과달성 책임자 (소속기관)	주영규(고려대학교), 이상신((주)캠트로스), 도병호(동부제철(주))
소요기간	'16.09 ~ '17.04
성과달성 확인방법	① 유한요소 해석 수행 ‘UFC 3-340-02’ 에서 제시하는 폭발하중 및 설계기준을 적용하여 유한요소 해석을 수행하고, 요구되는 연성비 및 변형각을 나타내는지 검토한다. [폭발 하중에 대한 유한 요소 해석의 사례] ② 내충격 실험 수행 ASTM D7136M-15에서 규정하는 내충격 실험을 수행하여 충격저항성능을 검증 - 충격체 제원 - 형상: 강판을 절곡한 V 형 앵글 - 중량: 22.68kg±0.2kg - 실험방법: 충격속도가 1.2m/s 가 되도록 충격체를 실험체 중앙에 낙하시킴 [Impact Device with Double Column Impactor Guide Mechanism]

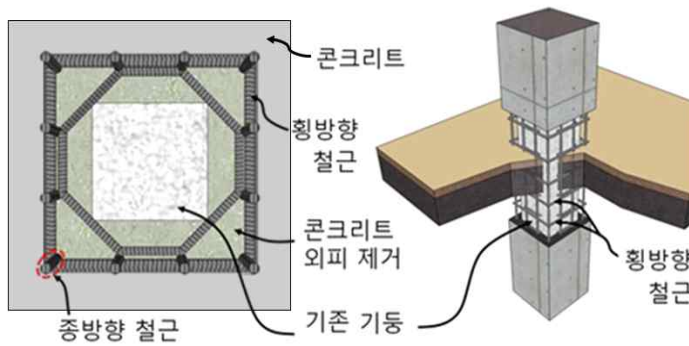
제2장. 국내외 기술 개발 현황

■ 국내 방폭 관련 정책 동향

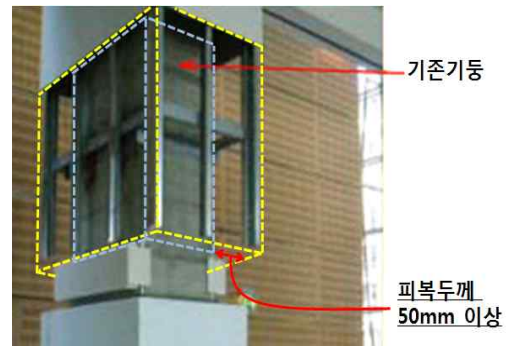
- 국내의 경우 폭발하중과 관련된 기준은 국방 분야 이외에 석유·가스·화학 및 플랜트 시설물에 국한되어 적용되고 있고, 그 기준은 외국의 20여 년 전에 마련된 기준(미국 교범자료, 1986)을 따르고 있음(**산업안전기준법, 1997**)
- 국방부는 국방 2020 계획에 의한 증·창설요소에 따라 새로이 설치될 **화생방 방호시설에 대해 설계 및 시공 지침(2008.12)**을 제시
- 화생방 방호시설의 설계에 있어서 고려되는 하중은 포탄에 의한 충격, 폭발에 의한 폭풍 등이 있고, 이러한 하중에 대해 콘크리트 구조물의 설계 및 시공지침을 제시(충격하중의 종류에 따라 **최고 4.5m의 벽체두께를 제시**)
- 서울특별시는 **초고층 건축물 가이드라인(2009.8)**을 제정, 2009년도부터 서울 시내에 들어서는 **50층 이상, 200m 이상의 초고층 건물에 대해서는 대 테러 대책**을 세워야 건축이 가능하도록 함
- 방폭 기준 마련에 대한 필요성을 인지하여 국가안보기관, 국토교통부, 지자체를 중심으로 방폭 관련 법제정 및 제도화를 추진하였음
 - 행정안전부 : 정부청사 소산시설 설계지침 (방폭 고려, 대외비)
 - 국토교통부 : 건축물 테러예방 설계가이드라인 2010년 4월부터 시행

■ 국내 방폭 보강 기술 적용 동향

- 국내의 건축 구조물 보강 기술은 주로 **철근콘크리트 보강법**과 **강판 부착 보강법**이 가장 널리 이용되고 있음
- **철근콘크리트 보강법**은 추가 타설되는 콘크리트와의 부착력 확보를 위하여 기존 기둥의 표면을 벗겨내고, 그 위에 철근을 배근 후 콘크리트를 타설하여 기존의 구조체를 증설하는 방식으로 보강함
- 방폭용 섬유보강콘크리트를 사용하는 경우 철근 없이 원기둥에 콘크리트만 덧씌워 보강하여 보강두께를 줄인 사례가 있으나 충분한 방폭 성능 확보를 위해서는 최소 50mm 이상의 보강두께가 요구됨

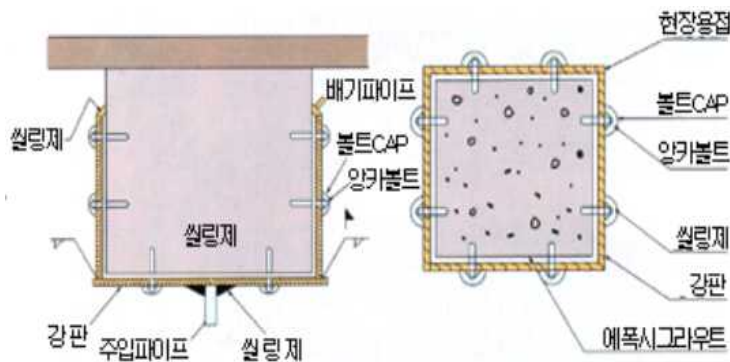


[철근콘크리트 보강 방법]



[섬유보강콘크리트 보강사례]

- **강판 보강법**은 앵커를 이용하여 강판을 기둥에 결착한 후 에폭시를 주입하여 보강하는 방법으로서, 보강하고자 하는 부재의 전면을 강판으로 둘러싸므로 강재 소모량이 많음(비용 상승)



[(좌)보의 강판 보강, (우)기둥의 강판 보강]

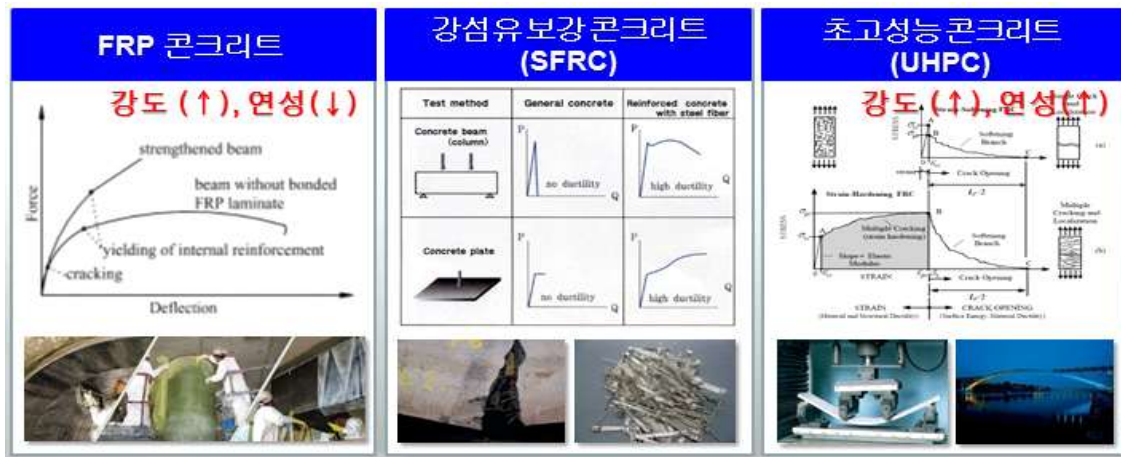


[기둥의 강판 보강 사례]

■ 국내 방폭용 복합재료 개발 동향

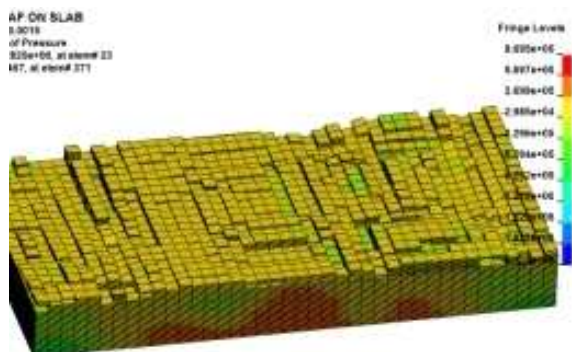
건축 구조물 방폭 보강 특허 기술 동향				
섬유보강콘크리트	특수층의 적용	알루미늄 폼 부착	수지 분사형 보강	패널 부착형 보강
• 일반 콘크리트에 비해 고인성, 고성능 • 철근 배근 불필요 • 섬유의 분산성, 부착력 슬럼프 저하 문제가 있음 • 품질의 편차가 상대적으로 크고, 품질관리가 어려움	• 다양한 방폭재의 장점을 결합하여 응용 가능 • 이종 재료간의 충분한 결합력 확보를 위하여 전단연결재의 적절한 설치가 필수 • 국내 연구사례가 많지 않음	• 알루미늄 폼 내부의 중공이 충격완화, 소성변형으로 에너지 흡수 • 방폭성능을 기대하기 위해서는 최소 50mm 이상의 두께 필요 • 집중하중 작용시 쉽게 관통되므로 덮개 필요	• 폴리우레아 등의 수지를 구조체 표면에 분사하여 보강 • 얇은 도막을 형성하여 보강하므로 충분한 방폭성능을 기대하기 어려움 • 방수, 마모에 대한 보강으로 적용되는 사례가 많음	• 강판 등의 판재를 구조체 표면에 결착시켜 보강 • 강판 보강 사례가 대부분임 • 구조체 표면 전면에서 결착 보강하므로 강재 소모량이 높음 (보강공사 비용 ↑)

- 섬유보강콘크리트의 경우, 균열에 대한 저항성이 좋으며, 인장강도, 휨강도, 균열, 인성, 전단강도 및 내충격성이 개선되어 우수한 방폭성능을 가지나 **섬유의 분산성 및 부착력 불량 문제, 슬럼프 저하 문제**는 한계점으로서 더욱 연구가 필요



[섬유보강콘크리트의 종류]

- 방폭용 복합재료의 다른 연구로 '희생부재를 이용한 근거리 폭발압력 저감 효과(중앙대, 2009)'가 있음
- 이것은 **알루미늄 폼을 희생부재로 사용하여** 구조물에 도달하는 폭발압력을 저감시키는 것으로 알루미늄 폼이 폭발하중을 받으면 폼 내부의 공극이 압축되고 낮은 응력상태에서 항복에 도달하게 된다. 그리고 항복 이후 폼의 **소성변형과정에서 에너지를 소산하여** 폭발력을 흡수하는 원리
- **알루미늄 폼**은 구조체에 부착하여 보강하는 방식을 택하므로 설치가 비교적 간편하나, 두께가 얇은 경우 방폭재로서의 성능이 월등히 떨어지므로, 일반 건축 구조물에 적용할 경우 부재의 크기를 비대하게 하여 공간효율을 떨어뜨릴 수 있는 단점이 있음



[희생부재의 FEM 해석]



[알루미늄 폼 희생부재]

구분	특허명	발명자	국적	등록번호
섬유보강 콘크리트	복합섬유를 이용한 초고인성 방폭 시멘트 복합체	(주)삼표	한국	1009452040000
	고속충격에 대하여 내충격 성능을 가지는 콘크리트 조성물	포항산업과학 연구원	한국	1013411790000
복합물질 적층구성	우수한 방폭 성능을 갖는 콘크리 트 구조물 및 이의 제조방법	(주)케이씨씨 조동하 세경건설(주)	한국	1011349930000
	복합 물질 및 그의 용도	피피지 인더스 트리즈 오하이 오 인코포레이 티드	미국	1020120014194
알루미늄 폼 보강	충격흡수구조에 의하여 방폭 및 관통 방지 성능을 향상시킨 알루 미늄 폼 패넌을 이용한 콘크리트 합성 방폭벽체, 그 시공방법 및 방 호구조물	박종영	한국	1011810050000
	알루미늄 폼 패넌과 콘크리트판의 합성 방폭벽체, 그 시공방법 및 이 를 이용한 방폭구조물	박종영	한국	1012509030000
	충격흡수구조에 의하여 방폭 및 관통 방지 성능을 향상시킨 알루 미늄 폼 패넌 및 그 연결구조	박종영	한국	1010454320000
수지 표면분사	방수, 방폭, 내진 시공 방법	(주)참우엔씨	한국	1009298630000
	내화확성, 내구성을 갖는 코팅재의 시공 방법	동양특수콘크 리트(주)	한국	1020110119711
	고탄성 폴리우레아 도료 조성물 및 이를 이용한 시공방법	(주)새론테크	한국	1011415110000
패널부착	콘크리트 구조물 보강용 패널 및 이를 이용한 콘크리트 구조물	(주)엠텍 (주)포스코건설 (주)엠프로 피지피기술(주)	한국	1004563780000

[건축 구조물 방폭 관련 국내 특허 등록 현황]

■ 국외 방폭 관련 정책 동향

- 충격, 폭발과 같은 극한하중과 관련된 기준수립 및 정책수립은 주로 2차 세계대전 이후부터 국방산업을 중심으로 활발히 진행되어져 왔으며, 미국의 경우 Army, Navy 및 Air force가 함께 공동으로 방폭구조물에 대한 기준을 적용하고 있음 (UFC-Unified Facilities Criteria)



[WTC 911 테러]



[오kl라호마 연방청사 폭탄테러]

UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC)

STRUCTURES TO RESIST THE EFFECTS OF ACCIDENTAL EXPLOSIONS



APPROVED FOR PUBLIC RELEASE; DISTRIBUTION UNLIMITED

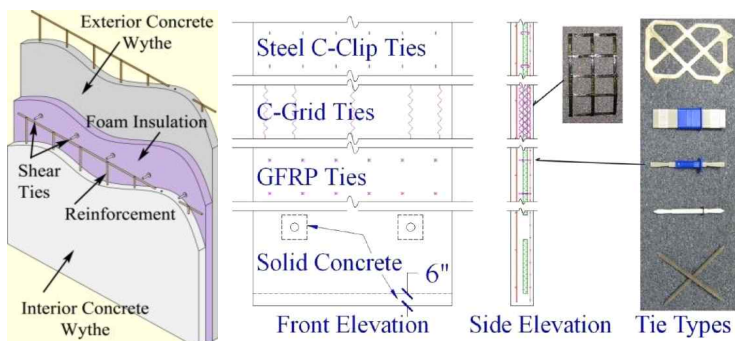
[UFC-미국 방폭관련 규정]

- 유로코드에서도 폭발 같은 우발하중을 고려하도록 개정되고 있음. 현재는 Prestandard, ENV 1991-2-7 에서만 우발 상황에 대한 설계적 접근을 언급

■ 국외 방폭용 복합재료 개발 동향

• Concrete Sandwich Panel :

NSF(미국 국립과학 재단), 미국 Lehigh 대학교, 이탈리아 Sapienza 대학교에서 공동 개발한 Concrete Sandwich Panel 은 내외부 보강 콘크리트 벽체 사이에 단열재를 두고 편 또는 그물 형태의 부속물로 전단보강하여, Sandwich 형태의 벽을 구성 (단열재: XPS, EPS, PIMA)



[Concrete Sandwich Panel 의 구조]



[Concrete Sandwich Panel 방폭성능 실험 장면]

- **CMI Inc.- Blast-Resistant Walls :**

미국 CMI Inc.가 개발, 생산하는 방폭 패널 두겹의 강판 사이에 Corrugated Steel Panel 을 두 겹으로 맞대어 용접한 형태. 폭발 시 강판 사이에 용접된 두 겹의 Corrugated Steel Panel이 연성적으로 변형하면서 폭발에너지를 흡수하고, 폭발파의 전달을 지연시키는 원리를 이용



[Blast-Resistant Wall의 모습]



[폭발전]



[폭발후]

[Blast-Resistant Wall의 폭발 전,후]

- **Intelligent Engineering Ltd - SPS(Sandwich Plate System) :**

SPS(Sandwich Plate System)는 영국의 Intelligent Engineering Ltd. 에서 연구하여 생산 하고 있는 제품으로 두 개의 강판 사이에 폴리우레탄이 충전된 합성패널 형태를 띄고 있음. SPS는 원래 선박의 외피에 사용되기 위해 개발된 재료로서 건 축물의 슬래브에 적용 된 사례도 있음. 해외에서는 SPS의 구조성능(휨 및 전단성능, 사용성, 내화성능)에 대하여 검증을 완료하였고, 국내에서는 고려대학교, (한)구조엔지니어링이 공동으로 진행한 4L Parking Building System 개발 프로젝트에서 그 구조적 성능이 검증된 바 있으나, 주문 제작 방식을 통해 맞춤 생산되므로 가격이 고가임



[SPS (Intelligent Engineering Ltd.)]



[SPS의 방폭성능 실험]



[PROTECT 방폭 패널의 SWOT 분석]

• Strength & Weakness

PROTECT 방폭 패널은 **공장생산 방식**이므로 **가격경쟁력 확보** 및 **품질관리에 유리함**. 또한 건식 공법이므로 **공기 단축**이 가능하다는 장점이 있음. 관련 분야의 국내 선행연구 및 특수나노소재에 대한 연구가 미흡하나, 해외 사례 조사와 유사소재 연구를 통해 노후 부족에 대한 약점을 극복할 수 있음

• Opportunity & Threat

Intelligent Engineering Ltd.가 선행특허를 다수 보유하고 있으나, 방폭 패널에 대한 특허는 없음. 또한 아직 국내 시장에 진출하지 않았으므로 경쟁업체로서 큰 위협이 되지 않을 것으로 예상됨. 오히려 정부 및 국민의 안전에 대한 관심이 증가하면서 **방폭재에 대한 수요가 증가**할 것으로 기대

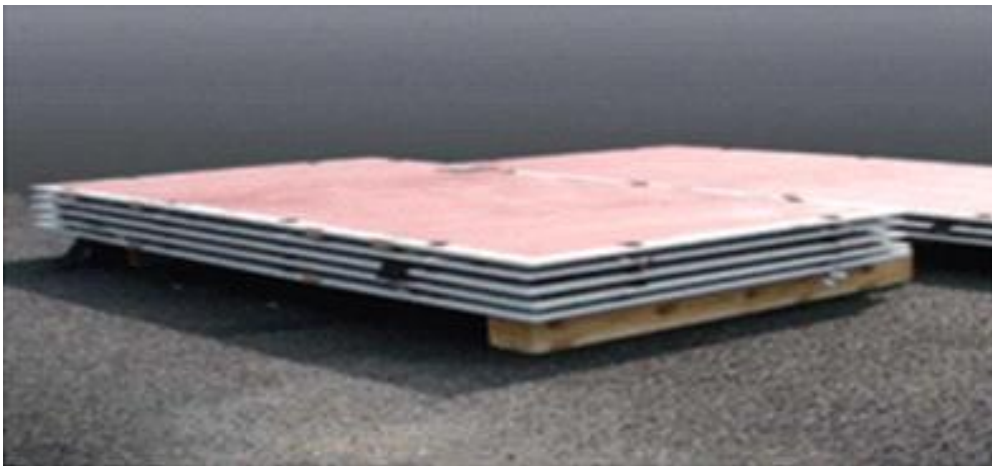
- 현재 국제적으로 테러에 대한 불안감이 증가하면서 방폭 보강에 대한 관심이 늘고 있다. 이에 따라 방폭 보강에 대한 수요가 늘고 있으나, 중요도가 높은 건물에 한정적으로 적용되고 있는 경우가 많은 실정임. 따라서 **폭넓게 적용 가능한 신개념 방폭 보강 패널인 PROTECT의 개발이 필요함**

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

■ 특수나노소재로 사용 가능한 기존 소재 조사

- SPS(Sandwich Plate System)

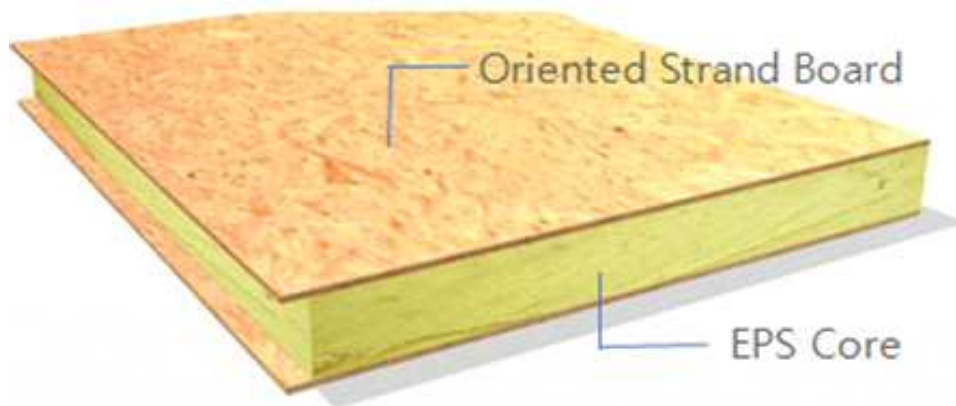
SPS는 영국의 Intelligent Engineering Ltd.사에서 건축구조용으로 개발하여 생산하고 있는 제품으로, 두 개의 강판과 그 사이에 충진되는 신소재인 폴리우레탄으로 구성된다. SPS는 선박의 상판과 측면에 사용되는 보강재인 폴리우레탄을 건축물의 슬래브에 적용한 것으로 공장제작하여 운반한 후 빠른 양중 및 현장조립 효과로 최대 80%까지 공기를 단축시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 신소재인 폴리우레탄을 적용하여 현장타설 단계가 생략되기 때문에 시공 중에 발생하는 이산화탄소의 발생량을 크게 줄일 수 있으며, 건설폐기물의 재사용이 가능한 친환경적인 구조시스템이다. 해외에서는 SPS의 구조성능(휨 및 전단성능, 사용성, 내화성능)에 대하여 검증을 완료하였고, 국내에서는 고려대학교, (주)한구조엔지니어링이 공동으로 진행한 4L Parking Building System 개발 프로젝트에서 그 구조적 성능이 검증된 바 있으나, 주문 제작 방식을 통해 맞춤 생산되므로 가격이 고가라는 단점을 가지고 있다.



[SPS 제품 모습]

- SIP(Structural Insulated Panels)

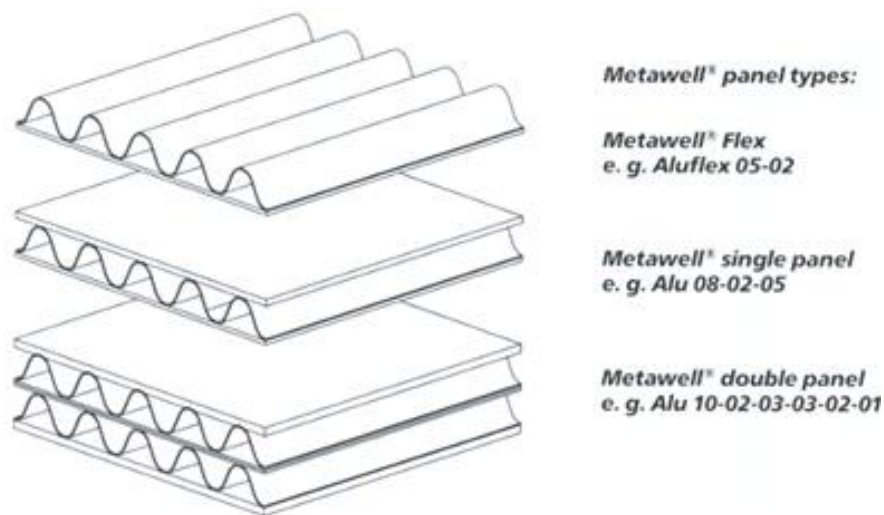
SIP는 미국과 유럽에서 개발되어 사용 중인 제품으로 두 장의 OSB(Oriented Strand Board)와 그 사이에 충진되는 EPS(Expanded Polystyrene Foam), XPS(Extruded polystyrene Foam), 또는 Polyurethane foam으로 구성되는 샌드위치 판넬이다. 유지비용 측면에서 경제적인 시공이 가능하고 매끄러운 표면처리로 인해 별도의 마감이 필요 없다는 장점을 가지고 있다.



[SIP 제품 개념도]

- Metawell

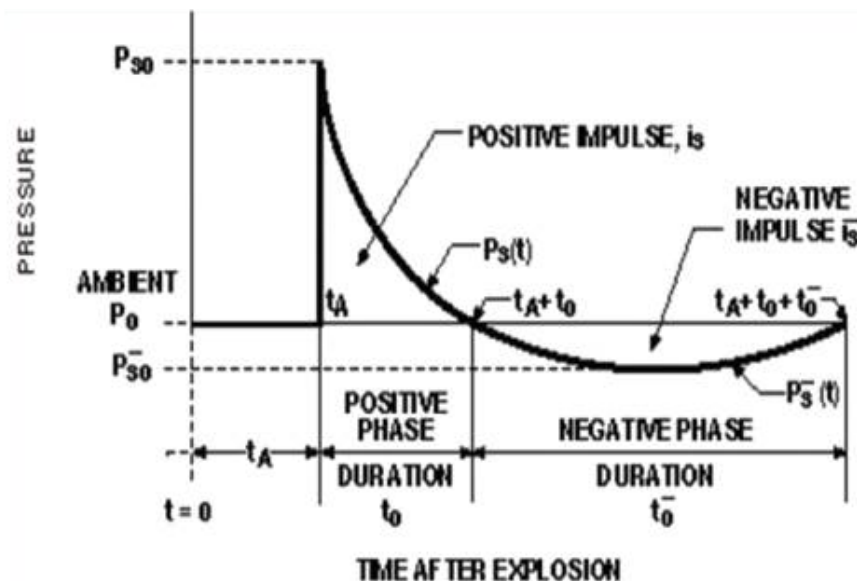
Metawell은 독일 메타웰사가 개발한 골판지 구조의 알루미늄 샌드위치판넬로 양면의 알루미늄판 사이에 성형 가공한 알루미늄 심재를 넣어 연속으로 특수접합한 골판지형 구조이다. Metawell은 경량이며 고강도로 기존 건축용 시트판넬의 평활성, 강도, 내화성에서의 단점을 개선시킨 제품이다. 90도 절곡 후에 균열이 없고 대형판넬화 (1300mm×6000mm)가 가능하며 습도, 온도변화, 적외선 등의 외부환경에 강하다는 장점이 있다.



[Metawell 판넬 개념도]

• 폭발하중 특성

폭발물질의 양, 폭발물질과 구조물과의 이격거리 등의 요소로 폭발하중을 산정한다. 폭발에 의한 압력은 발생원으로부터 거리에 따라 급격하게 감소한다. 또한, 폭발하중의 지속시간은 수천분의 1초 정도로 매우 짧아서, 구조물의 고차모드에 의한 피해가 발생할 수 있다. 아래 그림은 폭발에 의해 구조물에 작용하게 되는 전형적인 압력하중의 형태를 나타낸 것이다. 시간에 따른 압력하중의 곡선은 정압력 단계와 부압력 단계로 나뉘게 되는데, 일반적으로 폭발하중에 대한 설계에서 부압력은 고려하지 않는다. 한편 압력-시간 이력 곡선의 적분은 충격량을 나타낸다.

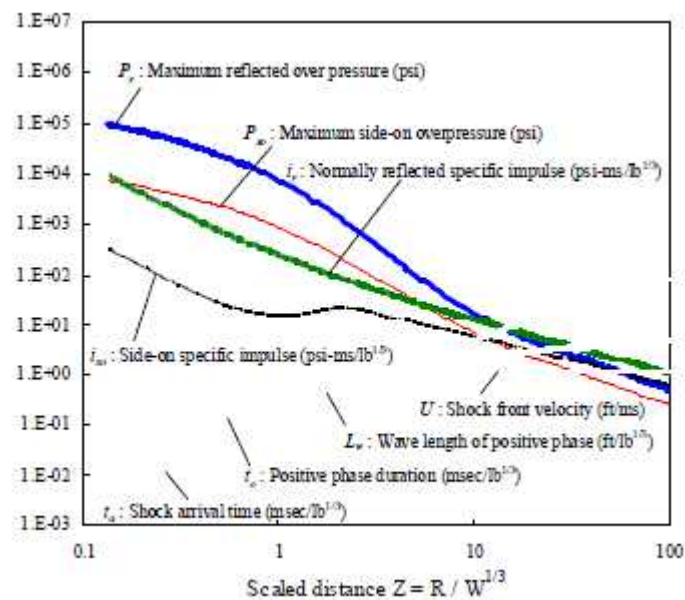


[폭발압력의 시간이력 특성]

구조물에 미치는 폭발하중의 효과는 폭발위치에 따라 자유공간 폭발, 지표면 근접 폭발 및 지표면 폭발과 같이 구분할 수 있으며, 폭발위치에 따라 모두 상이한 압력전파 형태를 갖는다. 또한 폭발하중의 특성은 폭발물의 형상, 구조물과의 위치조건 등에도 영향을 받는다. 폭발하중의 크기를 산정하는 기법은 대부분 폭발실험 결과를 기반으로 하고 있기 때문에 이를 정식화하는 것에는 한계가 존재한다. 특히, 폭발하중은 국가방위와 밀접한 관계로 대부분의 자료에 접근이 극히 제한되어 폭발하중의 크기와 폭발하중이 구조물에 미치는 연구는 미국을 비롯한 일부 국가에 국한되어 진행되어 왔다. 현재는 폭발하중과 관련된 일부 실험 자료들을 UFC3-340-01, TM5-1300 및 DOE/TIC-11268에서 제한적으로 제공하고 있으며, 최근 UFC3-340-01에 기초하여 전형적인 무기효과를 계산할 수 있는 프로그램인 ConWEP이 제한적으로 개방되었다. ConWEP은 압력과, 파편, 지표면 충격, 탄공

등의 효과를 고려한 폭발하중의 계산이 가능하며, 그 중 압력과외의 경우 폭발각도를 고려하여 자유공간, 지표면 근접 및 지표면 폭발 시의 폭발하중을 산정할 수 있다.

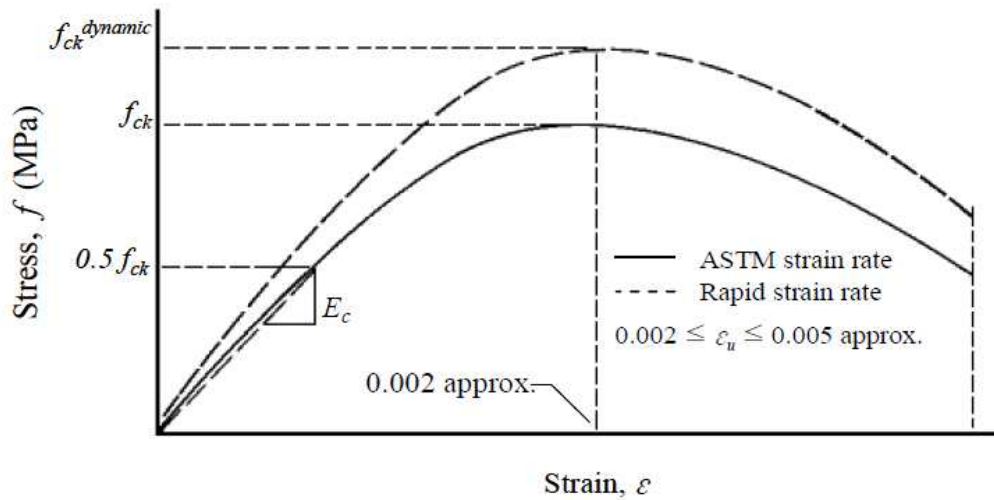
한편, 폭발물의 종류, 장약량 및 구조물에서 떨어진 거리가 결정되면, 압력과 특성을 평가하기 위해서 Hopkinson-Cranz에 의한 삼승근 환산법칙을 사용한 환산거리를 사용하게 된다. x축에 해당하는 환산거리(Z)는 폭발물로부터 구조물까지의 거리(R)와 TNT의 양으로 된 폭발물의 총중량(W)로 표현된다. <그림 2>는 지표면 폭발과 같이 반구형 폭발형태를 띄는 경우에 있어 환산거리를 이용하여 압력과외의 특성을 나타내는 각종 변수를 제공하며, 구조물에 작용하는 압력하중 형태로 시간에 따른 폭발하중을 결정하게 된다.



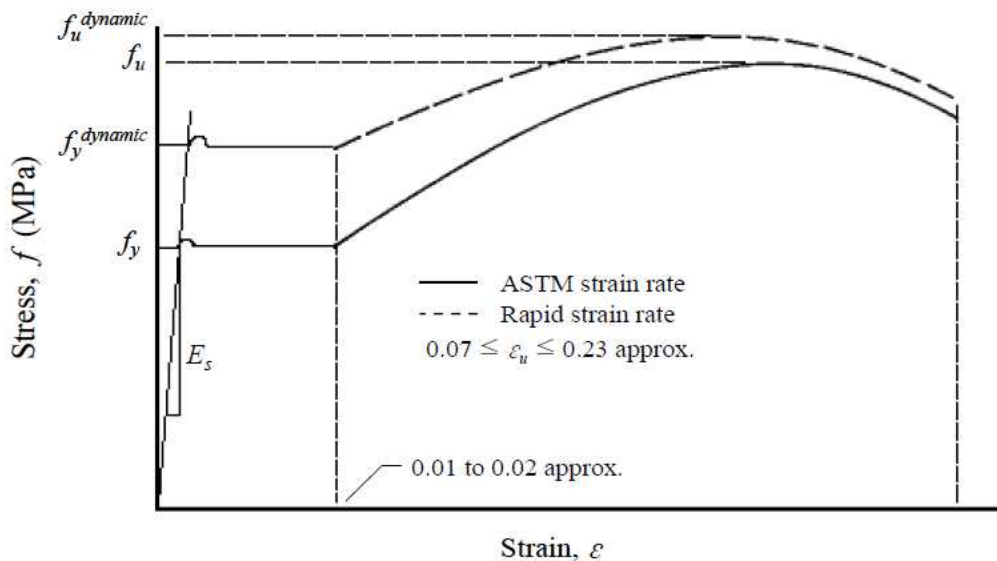
[반구형 폭발형태의 지표면 폭발시 압력과 특성]

폭발하중에 의한 구조물의 거동은 재료적 거동과 구조적 거동으로 구분하여 고려할 수 있다. 먼저 재료적 거동을 살펴보면, 동적하중에 대한 재료의 응답은 정적하중에 대한 응답과 매우 상이한 것으로 일반적으로 알려져 있다. 즉 하중의 재하 속도가 증가할수록 재료의 강도는 증가하는 경향이 있으며, 이러한 강도증가 효과는 변형률 속도 및 강도의 증가에 관한 연구와 실험을 통해 확인되고 있다.

특히 폭발하중의 경우에는 매우 짧은 시간동안 큰 변형률을 야기시키기 때문에 폭발하중에 의한 높은 변형률 속도는 재료의 강도를 증가시켜 국부적인 파쇄와 동적 전단파괴에 대한 저항을 증가시키는 것으로 알려져 있다. 이러한 변형률 속도의 증가에 따른 콘크리트와 강재의 강도증진효과는 아래의 그래프를 통해 나타내었으며, 이를 반영하여 동적해석에 사용되는 저항함수를 유도해야 한다. 따라서 폭발하중에 대한 재료의 강도는 동적증가계수와 그에 따른 강도증가계수를 고려하여 평가하도록 하고 있으며, 콘크리트의 경우에는 방호설계 요구조건에 부합될 수 있도록 최소 27 MPa 이상의 강도를 적용하는 것이 바람직하다고 제안된 바 있다.



[콘크리트의 동적증가 효과]



[강재의 동적증가 효과]

폭발하중의 모델링은 대표적인 방폭설계지침서인 미국방문서 UFC 3-340-02에서 제시하는 폭발하중의 시간이력이 주로 사용된다. 이 지침서에서는 폭발하중을 산정하기 위한 폭발변수들을 경험적인 차트의 형태로 나타낸다. 이 차트에서 제공되는 폭발하중의 중요 변수로는 입사압(P_s), 입사충격량(I_s), 반사압(P_r), 반사충격량(I_r), 충격파속도(U), 충격파 도달시간(t_a), 정압지속기간(t_o) 등이 있으며 변수들의 값들은 환산거리(scaled distance, Z)에 의한 함수로써 정의된다. 여기서 $Z = R/W^{1/3}$ 이며, R 은 폭발의 중심으로부터의 거리이고 W 는 폭발물의 질량이다. 폭발물의 질량은 TNT 등가질량을 통하여 설정하게 되며, FEMA-453에서는 폭발위협인자들의 TNT 등가질량을 제시하고 있다.

폭발하중은 언급된 UFC 3-340-02 차트를 사용하여 산정할 수 있으며, 이 차트의 폭발변수 및 폭발압력 시간이력은 다양한 조건에 대하여 수치적으로 구할 수 있는 프로그램인 ConWep으로 전산화 되어 방폭 설계에 활용된다. 폭발해석의 경우 Coupled analysis와

Uncoupled analysis를 필요에 따라 선택하여 수행할 수 있다. LS-DYNA의 옵션인 LOAD_BLAST와 같은 내장 하중함수를 사용하는 경우는 Uncoupled analysis가 되며, ALE(Arbitrary-Lagrangian-Eulerian)와 같은 기능을 활용하여 유체-구조물 상호해석을 수행하는 경우는 Coupled analysis가 된다. Uncoupled analysis는 구조물을 강체로 가정하여 얻어진 폭발압력을 구조물에 하중으로 재하하여 구조물의 응답을 계산하는 방법으로 구조물과 폭발압력 사이의 상호작용을 고려하지 않고 구조물을 강체로 가정하기 때문에 실제보다 폭발하중을 과대평가하게 되는 경향을 갖는다. Coupled analysis는 폭발압력을 전달하는 매개체인 대기 또는 지반을 함께 모델링하고 유체-구조물 상호작용해석을 통한 폭발압력하중과 이에 대한 구조물의 응답을 함께 계산하는 방법으로 보다 정확한 구조물의 응답을 얻을 수 있지만, 해석 시간에 있어서는 불리한 점을 갖는다. 일반적으로 폭발물과 구조물 사이에 장애물이 존재하지 않으며 대기 중에서 폭발이 발생하는 경우에는 Uncoupled analysis를 통하여 필요한 구조물의 응답을 계산할 수 있으며, 그 이외의 경우에는 Coupled analysis의 적용을 고려할 필요가 있다.

• 방폭 설계의 구조설계측면의 접근법

방폭 설계의 요구사항은 다음과 같다.

- 구조물은 실제 발생가능한 크기의 폭발에 대해 인명과 시설을 보호할 수 있도록 한다.
- 설계 폭발하중을 상회하는 폭발사건에 대해서는 큰 내하력의 손상없이 변형해서 파국적 붕괴에 저항할 수 있는 적절한 안전도 마진을 확보해야 한다.
- 구조물은 폭발 후에도 경미한 보수를 통해 통상의 설계하중을 지탱할 수 있어야 한다.

폭발에 대해 건물을 보호하기 위한 제어기준은 일반적으로 부재의 처짐이나 변형에 대해 제한이다. 이 방식을 통해 부재에 허용할 수 있는 손상정도를 제어할 수 있다. 특정 경우에 용인될 수 있는 손상 수준은 무엇을 보호해야 하는가에 따라 다르다. 변형한계는 다양한 방식으로 정의할 수 있지만 일반적으로 설계 기준에서 가장 많이 사용되는 방식은 소성비와 지점 회전각이다.



[구조물 응답특성 평가]

소성비 μ 와 지점 회전각 θ 은 다음 식으로 정의한다.

$$\mu = \frac{\text{총 처짐값}}{\text{탄성 한계의 처짐값}} = \frac{X_m}{X_y}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{2X_m}{L_{\min}} \right)$$

여기서, $L_{\min}$ = 지점과 최대 변위점 사이의 최소 거리

- UFC 3-340-02(미국방부)

UFC 3-340-02에서는 건축물의 중요성, 폭발하중에 대한 민감도 등을 평가하여 Level of protection을 판단 후, Level of protection에 따라 지점 회전각과 소성율의 기준을 제시하고 있다.

Category 1	Protect personnel against the uncontrolled release of hazardous materials, including toxic chemicals, active radiological and/or biological materials
Category 2	Protect equipment, supplies and stored explosives from fragment impact, blast pressures and structural response

[Level of protection]

Element	Level of protection	Deformation type	Max. Deformation
beams	1	θ	2°
		μ	10
	2	θ	12°
		μ	20
frame structures	1	θ	H/25
		μ	2°
walls	1	θ	4°
		μ	6
plates	1	θ	2°
		μ	10
	2	θ	12°
		μ	20

[구조물 응답 한계 설계값]

- ASCE 41088

ASCE 41088에서는 석유화학 산업에서 사용되는 시설물에 대한 방호설계 및 시공방법을 제안하고 있다. 구조물의 손상 정도를 3가지로 구분하여 각각에 대한 설계 한계값을 다음과 같이 제안한다.

부재형태	응력형태		μ	θ		
				하	중	상
보	휨		N/A	1	2	4
	전단	콘크리트	1.3			
		콘크리트+스터럽	1.6			
		스터럽	3.0			
	압축		1.3	2	4	8
슬래브	휨		N/A			
	전단	콘크리트	1.3			
		콘크리트+스터럽	1.6			
		스터럽	3.0			
	압축		1.3			

[구조물 응답 한계 설계값]

- PDC TR-06-08

미육군공병단에서 테리에 대비한 구조물 설계에 사용된다. 구조물의 응답을 Low, Medium, High로 구분하여 이에 대한 설계 한계값을 제시하였으며 강구조물에 대한 그 한계값은 아래와 같다.

Component	Low		Medium		High	
	μ	θ	μ	θ	μ	θ
Hot-rolled steel compact secondary members (beams, girts, purlins)	3	2	10	6	20	12
Steel primary frame members (with significant compression)	1.5	1	2	1.5	3	2
Steel primary frame members (without significant compression)	1.5	1	3	2	6	4
Steel plates	5	3	10	6	20	12
Open-web steel joists	1	1	2	3	4	6

[구조물 응답 한계 설계값]

- FEMA 453

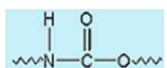
FEMA 453에서는 폭발 위협인자에 대한 TNT 환산량을 제시하고 있다. 이를 통해 폭발 압력의 크기를 산정할 수 있으며, 해당 폭발 위협인자에 대한 안전거리를 제시하여 이 안전거리를 확보하는 설계가 되도록 제시하고 있다.

Threat Description		Explosives Mass* (TNT equivalent)	Building Evacuation Distance**	Outdoor Evacuation Distance***	
High Explosives (TNT Equivalent)		Pipe Bomb	5 lbs 2.3 kg	70 ft 21 m	850 ft 259 m
		Suicide Belt	10 lbs 4.5 kg	90 ft 27 m	1,080 ft 330 m
		Suicide Vest	20 lbs 9 kg	110 ft 34 m	1,360 ft 415 m
		Briefcase/ Suitcase Bomb	50 lbs 23 kg	150 ft 46 m	1,850 ft 564 m
		Compact Sedan	500 lbs 227 kg	320 ft 98 m	1,500 ft 457 m
		Sedan	1,000 lbs 454 kg	400 ft 122 m	1,750 ft 534 m
		Passenger/ Cargo Van	4,000 lbs 1,814 kg	640 ft 195 m	2,750 ft 838 m
		Small Moving Van/ Delivery Truck	10,000 lbs 4,536 kg	860 ft 263 m	3,750 ft 1,143 m
		Moving Van/ Water Truck	30,000 lbs 13,608 kg	1,240 ft 375 m	6,500 ft 1,982 m
		Semi-trailer	60,000 lbs 27,216 kg	1,570 ft 475 m	7,000 ft 2,134 m

[폭발위협인자에 대한 TNT 환산량 및 안전거리]

특수나노소재 개발

특수나노소재는 고밀도 폴리우레탄으로 제작된 소재이며, 경화제(Isocyanate)와 주제(Polyol)의 반응을 통해 얻어진다. 이때, 소량의 소포제와 반응촉매를 첨가하여 고밀도의 폴리우레탄을 만든다. 특수나노소재는 새로운 방폭 패널을 생산하는데 재사용될 수 있으며, 강판은 재활용이 가능하다. 따라서 이산화탄소 발생 및 건설폐기물을 감소시킬 수 있는 친환경적인 보강 재료라 할 수 있다.

			
Chemical Role	경화제 (흑갈색 점성질 액체)	주제 (투명한 점성질 액체)	특수나노소재
Chemical Name	 isocyanate	 Polyol	 폴리우레탄(Polyurethane)
Mixing ratio	45% 4	55% 5	100% 9
features	경화속도 및 접착력 강화를 위하여 첨가제 추가 가능		

[특수나노소재의 제작과정]

강판과 특수나노소재 사이의 높은 부착력은 외력 작용 시 패널의 일체거동을 유도하여 강판의 국부좌굴을 방지하고, 국부좌굴에 대한 저항성 증가는 강판의 소요 두께를 감소시킨다. 이를 통해 강재 물량의 절감이 가능하며 더욱 경제적인 재료로 사용이 가능하다. 또한 두 강판 사이에 경량의 소재를 주입함으로써, 기존 철근콘크리트 보강 대비 60~70%의 자중을 감소시킬 수 있다.

특수나노소재 재료실험

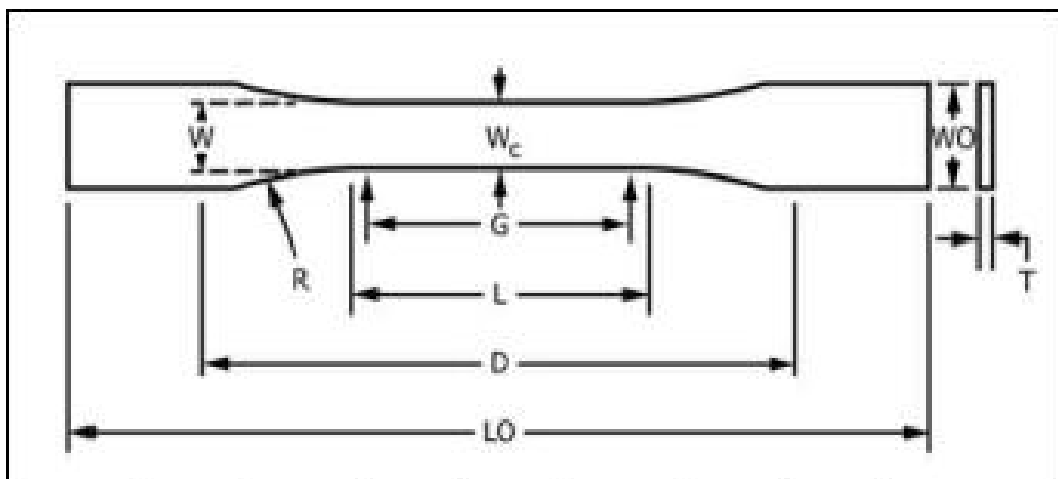
특수나노소재의 기계적 성능(인장, 압축, 탄성계수, 포아송비, 밀도)을 알아보고자 재료실험을 계획하였다. 실험은 ‘ASTM D 638-Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics’, ‘ASTM D 695-Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics’ 및 ‘ASTM D 792-Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics’ 에서 제시하는 방법을 따라 계획하였으며, 실험항목 및 결과 값을 아래에 요약하여 나타내었다.

실험 항목	실험 방법	실험결과	단위
인장강도실험	ASTM D638-14	31.4	MPa
인장탄성계수	ASTM D638-14	1,280	MPa
푸아송비	ASTM D638-14 using strain gauge	0.39	-
압축강도 실험	ASTM D695	23.1	MPa
밀도 실험	ASTM D792	1.18	g/cm ³
부착강도 실험	전용 기기를 이용한 실험	6.7	MPa

[재료실험 항목 및 실험결과]

• 인장 강도 실험

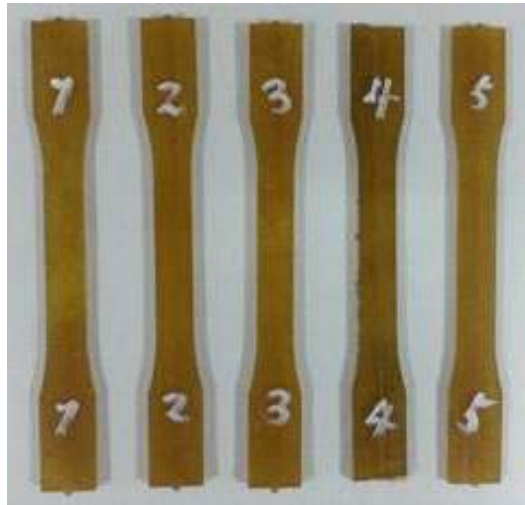
인장강도 시편은 1호 시편에 대하여 제작되었으며 그 규격은 아래와 같다. 시편은 특수나노소재를 판상형으로 경화시킨 베드(bed)의 표면을 연마하여 매끄럽게 만든 후 워터젯(water jet)으로 재단하여 제작하였으며, 제작된 시편은 아래 그림과 같다.



[인장 시편 규격]

Type	LO (mm)	D (mm)	L (mm)	G (mm)	R (mm)	W (mm)	WO (mm)	T (mm)
1호	165	115	57	50	76	13	19	3.2±0.4

[인장 시편 규격 상세]



[특수나노소재 인장 시편]



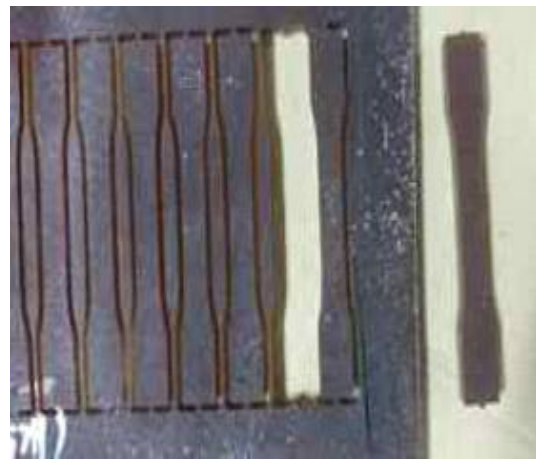
(1) 판상형으로 소재 경화



(2) 표면 연마



(3) 시편 가공



(4) 완성된 시편

[인장 시편 제작 과정]

실험은 3,000N의 UTM(Universal Testing Machine)을 사용하였으며, 가력속도는 5mm/min, 지간거리는 115mm로 하여 인장실험을 수행하였다. 실험실 온도 및 습도는 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$, $(45 \pm 5)\% \text{ RH}$ 로 하였다. 실험은 UTM에 설치된 2개의 고정 장치에 실험편을

붙여서 힘의 작용점이 실험편의 중심 축선과 일치하도록 한 후, 그 실험편에 하중을 가하여 실험편의 거의 중앙 부분에서 부러졌을 때의 하중을 측정한다. 실험은 총 5회를 수행하고, 최대 및 최소값을 제외한 세 값의 평균을 내어 결과값으로 한다.



[3,000N UTM(Universal Testing Machine)]

항복 강도는 시편에서 측정된 응력-변형률 곡선에서 초기강성곡선을 0.2% 오프셋하여 구하였으며, 인장 강도는 시편이 파단된 시점의 하중을 이용하여 다음 식에 따라 계산한다.

$$\sigma_{tB} = \frac{P}{A} = \frac{P}{t \times W}$$

여기서, σ_{tB} = 인장강도(MPa)

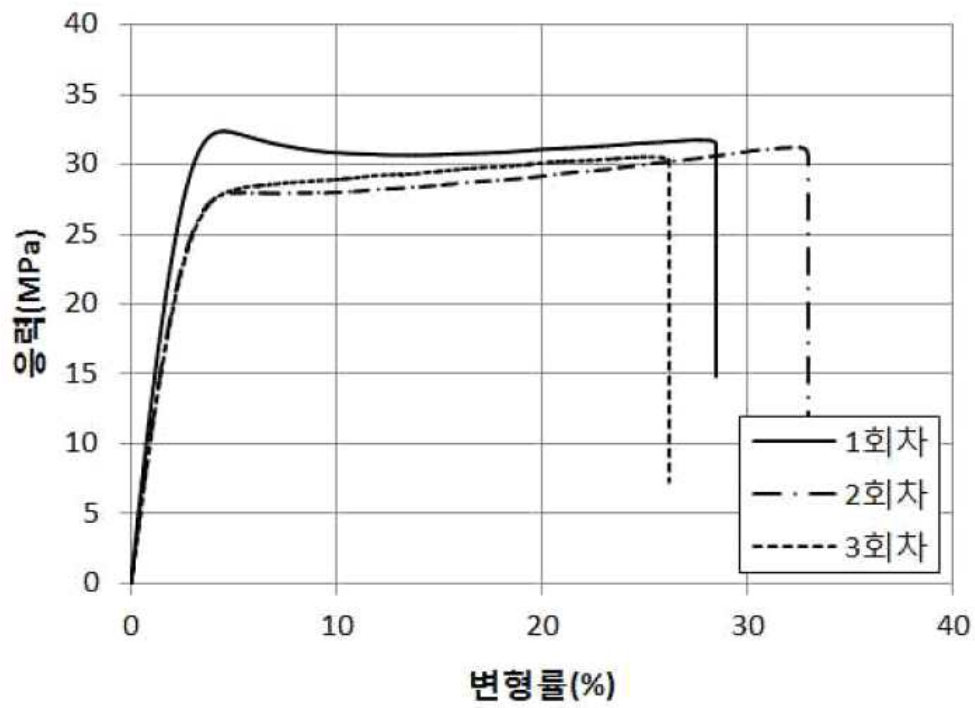
P = 실험편이 절단되었을 때의 하중(N)

A = 실험편의 최소 단면적(mm²)

T = 실험편의 두께(mm)

W = 실험편의 중앙 부분의 너비(mm)

실험 결과 응력 최대, 최소 인장 강도를 나타낸 시편을 제외한 세 시편의 응력-변형률 곡선을 아래 그림과 같이 나타내었으며, 결과 값을 요약하여 나타내었다.



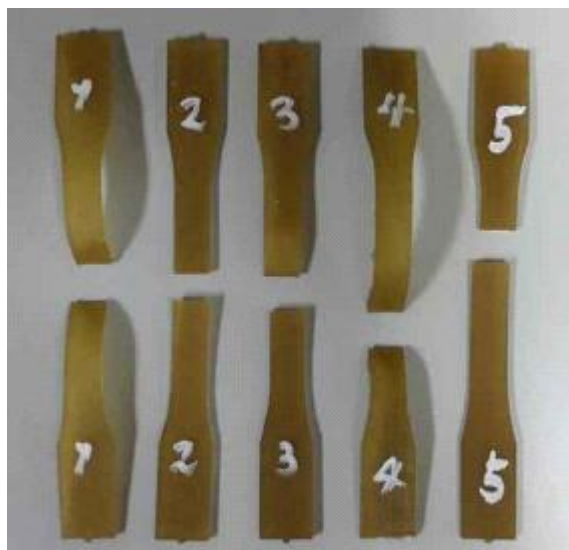
[특수나노소재의 응력-변형률 곡선]

실험 회차	1	2	3	SD	평균
항복강도(MPa)	28.8	24.8	24.1	2.07	25.9
인장강도(MPa)	32.4	31.3	30.6	0.92	31.4

[항복강도 및 인장강도]



[인장실험 장면]



[파괴된 인장시편]

실험을 통해 얻어진 응력-변형률 곡선에서 변형 $\epsilon_1 = 0.0005$ 에서 측정된 인장 응력과, $\epsilon_2 = 0.0025$ 에서 측정된 인장 응력을 각각 측정하여 현의 기울기를 구하여 이것을 탄성계수로 할 수 있으며, 측정된 결과 값을 아래와 같이 나타내었다.

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}$$

여기서, E_t = 인장 탄성계수(MPa)

σ_1 = 변형률 0.05%에서 측정된 인장 응력(MPa)

σ_2 = 변형률 0.25%에서 측정된 인장 응력(MPa)

실험 회차	1	2	3	SD	평균
탄성계수(MPa)	1,472	1,248	1,109	183	1,277

[탄성계수 측정 결과]

포아송비는 스트레인 게이지를 설치하여 인장실험을 통해 얻어진 측정값을 이용하여 산정하였으며, 그 결과는 아래와 같다.

$$\mu = \frac{d\epsilon_t}{d\epsilon_a} = \frac{-\Delta W}{\Delta L}$$

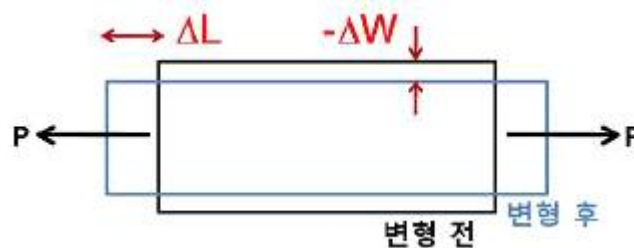
여기서, μ = 포아송비

$d\epsilon_t$ = 횡방향의 변형률 변화

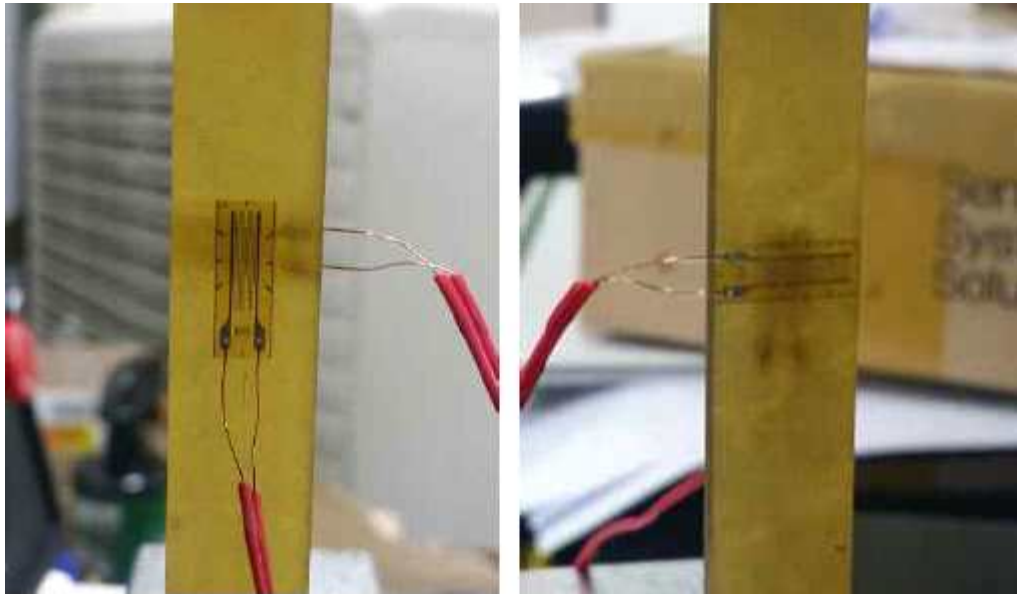
$d\epsilon_a$ = 종방향의 변형률 변화

ΔW = 횡방향 변형

ΔL = 종방향 변형



[포아송비의 개념도]



[스트레인게이지 설치 모습]

실험 회차	1	2	3	SD	평균
포아송비	0.40	0.39	0.39	0.01	0.39

[포아송비 측정 결과]

• 압축 강도 실험

ASTM D695 에서 제시하는 압축실험편의 형상은 원형 및 각형 두 가지를 제시하고 있으나, 본 실험에서는 제작의 편의성을 고려하여 각형으로 제작하였다. 시편의 형상과 규격을 나타내었으며 제작된 실험편의 형상은 아래 그림과 같다. 실험체의 규격은 길이 $25.4\pm0.3\text{mm}$ 이상, 너비 $12.7\pm0.3\text{mm}$, 두께 $12.7\pm0.3\text{mm}$ 이다.

	A(mm)	B(mm)	C(mm)
	12.7	25.4	12.7

[압축 시편 규격]



[제작된 압축 시편]

실험은 압축실험장치를 사용하였으며, 1.3mm/min 으로 가력하였다. 실험편을 압축실험 장치의 기관 위에 올려놓고, 실험편과 실험 장치 중심선이 같은 수직선 위에 있도록 하여

실험편의 아래 윗면이 축실험 장치의 가압면과 완전히 평행이 되도록 한다. 압축 실험 장치의 실험편에 크로스헤드로 하중을 가하고, 실험편이 파괴되었을 때의 하중을 변형률 0.1 까지 읽는다.

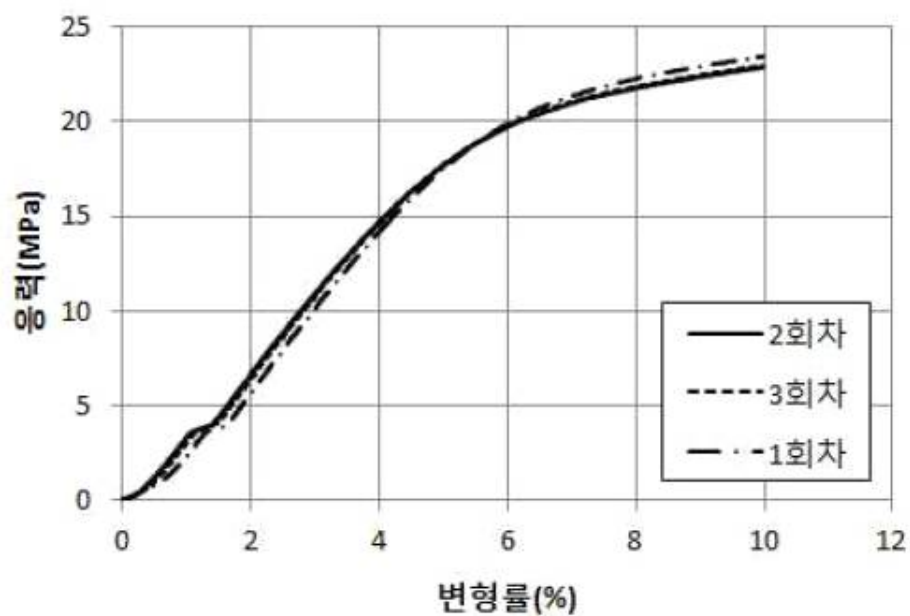


[압축실험장치]



[압축실험 장면]

압축강도 실험을 통해 얻어진 실험결과 및 응력-변형률 곡선은 아래와 같으며 압축실험 결과 측정한계치인 변형률 10%에서 파괴가 발생하지 않아 그 때의 값을 압축강도로 설정하였다.



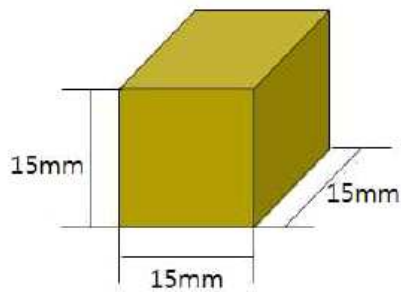
[특수나노소재의 압축실험 결과]

실험 회차	1	2	3	SD	평균
압축강도(MPa)	22.86	22.97	23.46	0.32	23.10

[압축실험 결과]

• 밀도 측정 실험

실험편의 부피는 1cm^3 이상, 두께는 1mm 이상, 중량은 1~5g 인 크기인 것이 권장된다. 따라서 실험편의 크기는 한 변의 길이 15mm인 정육면체의 형상으로 하였으며 중량은 약 4g 이다. 실험은 비중측정장비를 이용하여 비중을 측정하였으며 밀도로 환산하였다.



[시편 규격 및 형상]



[비중측정장치]

비중은 아래 식을 통하여 산정할 수 있다.

$$spgr_{23/23^{\circ}\text{C}} = \frac{a}{(a+w-b)}$$

여기서, $spgr_{23/23^{\circ}\text{C}} = 23^{\circ}\text{C}$ 에서의 비중(specific gravity)

a = 공기 중에서 실험편의 질량

b = 실험편을 액체에 담갔을 때의 질량

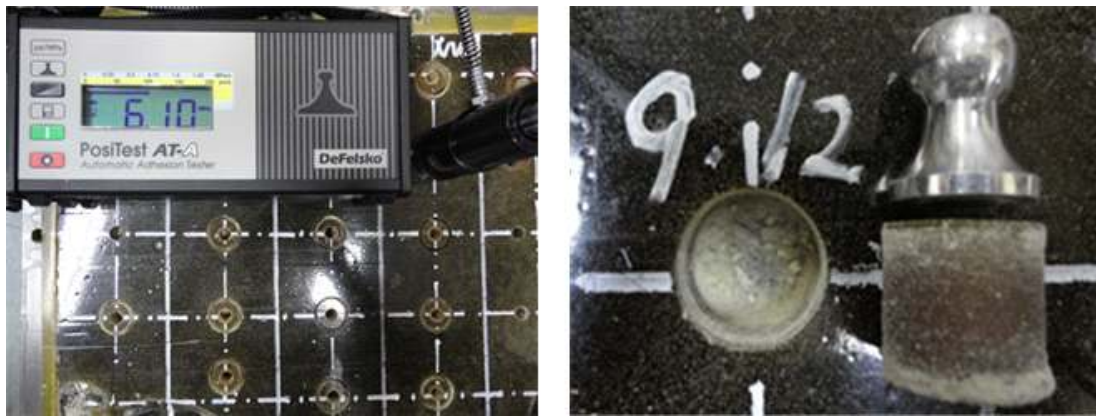
w = Sinkers를 액체에 담갔을 때의 질량

실험 회차	1	2	3	SD	평균
밀도(g/cm^3)	1.177	1.178	1.178	0.001	1.178

[밀도 측정 결과]

■ 부착 강도 실험

PROTECT 방폭 패널의 구성요소인 강재와 충진재로 사용된 특수나노소재 사이에는 부착력이 작용하여 패널의 일체거동이 가능하게 한다. 따라서 본 패널의 강판과 특수나노소재 사이의 부착성능을 확인하기 위하여 부착강도 실험을 실시하였다. 부착강도 실험에 사용된 장비는 PosiTest 사의 Pull-off Adhesion Tester AT-A이며, 실험은 아래 그림과 같이 강판과 특수나노소재 사이의 계면에 가이드 볼트로 액츄에이터를 삽입하여 떨어질 때까지 인발하는 방식으로 실시한다. 실험을 통해 얻어진 결과는 아래 표에 정리하였다.



[부착강도 실험과정]

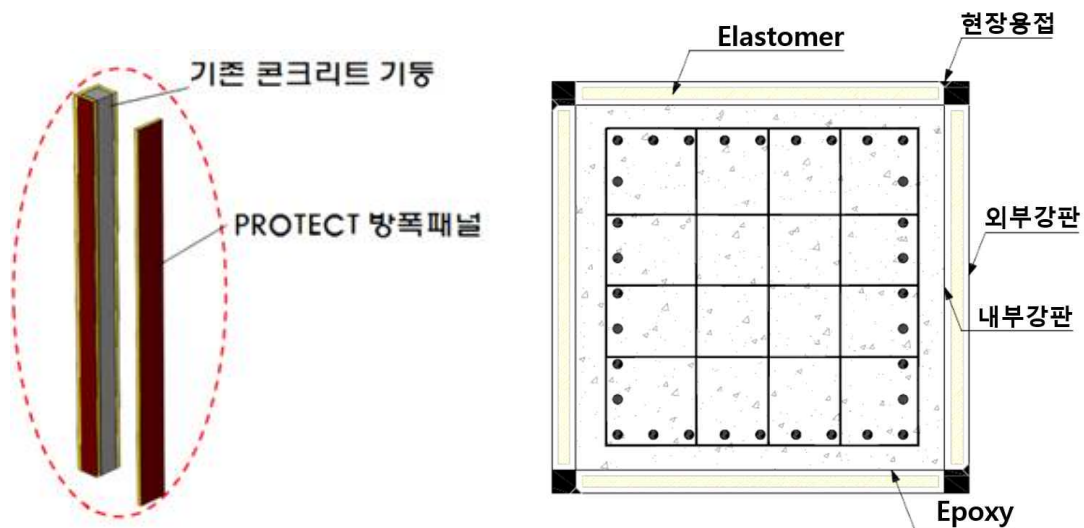
실험 회차	1	2	3	4	5	SD	평균
부착강도(MPa)	8.24	6.69	6.17	6.15	6.08	0.82	6.67

[부착강도 실험 결과]

■ PROTECT 패널 보강법 상세

PROTECT 방폭 패널은 4장의 단일 패널을 조립하여 기둥을 보강하는 형식으로 시공된다. 패널의 시공방법을 정리하면 다음과 같다.

- ① 기존 콘크리트 기둥에 에폭시로 패널 부착
- ② 4면의 접합부는 현장용접을 통해 접합
- ③ 필요 시, 앵커볼트나 케미컬 앵커를 통하여 기둥과의 일체성 증진



[PROTECT 방폭 패널의 시공방법]

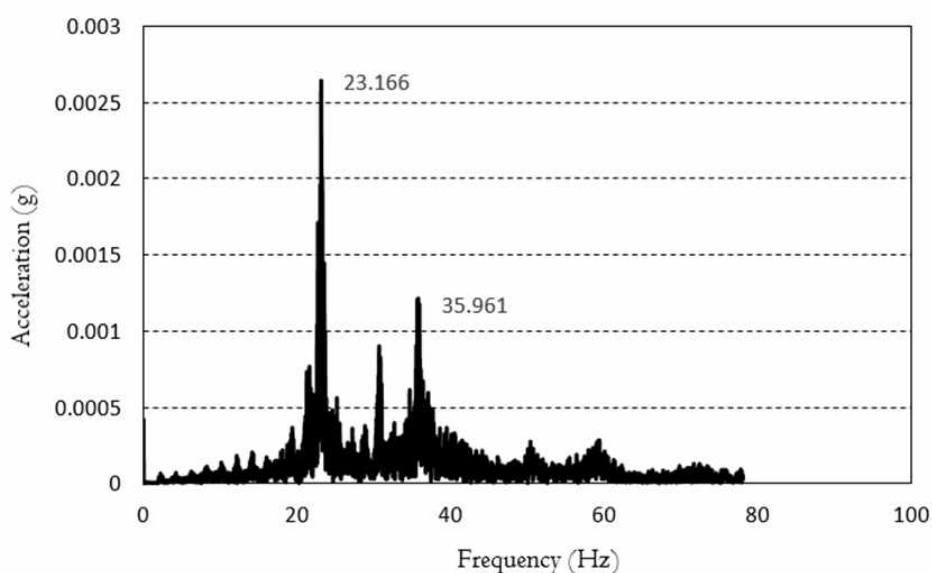
접합부에 현장용접을 통해서 접합이 실시되기 때문에 PROTECT 방폭 패널의 제작 시, 양 끝단에 5mm 이상의 두께를 가지는 각판을 삽입하여 용접의 시공성을 확보한다.

■ 현장 충격 실험

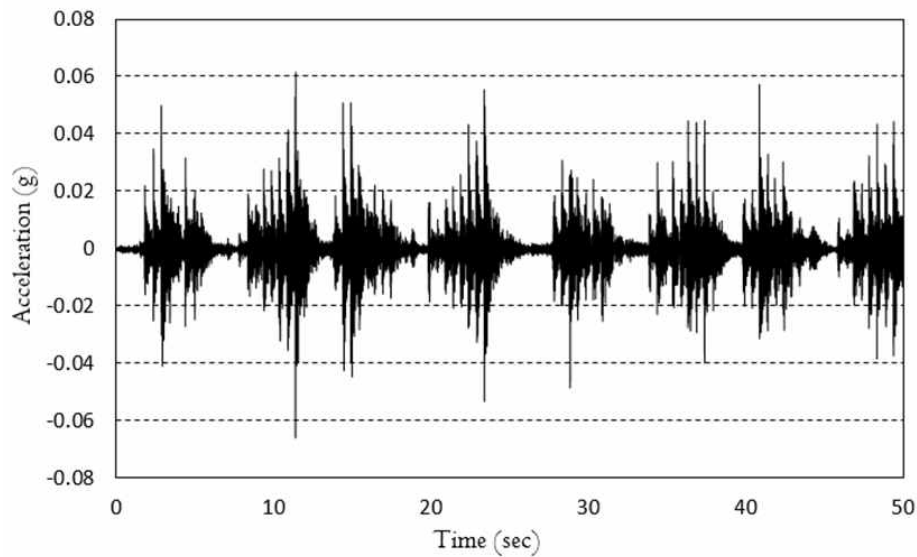
PROTECT 패널이 시범 적용된 건물에서 1리터 물통을 수직자유낙하하여 PROTECT 패널의 고유진동수 및 최대 가속도를 확인하였다. 물통의 높이는 50cm로 고정하였으며, 패널의 중앙부에 타격한 후 가속도계를 통하여 진동수 및 가속도를 측정하였다. 실험의 정확도를 확보하기 위하여 가속도계는 가력지점에서 30cm 떨어진 지점으로 설정하였다. 실험을 통하여 진동수-가속도 그래프 및 시간-가속도 그래프를 도출하였으며, 진동수-가속도 그래프에서 PROTECT 패널의 고유진동수를 확인하였고 시간-가속도 그래프에서 패널의 최대 가속도를 확인하였다.



[현장 충격 실험 개요]



[진동수-가속도 그래프]



[시간-가속도 그래프]

PROTECT 패널의 충격 하중 재하 시 진동 거동을 확인한 결과, 다차 모드의 진동 거동을 보인다는 것을 확인하였다. 1차 모드의 고유 진동수는 약 23Hz이며, 2차 모드의 고유 진동수는 약 35Hz인 것으로 나타났다. 충격 하중 재하 시, 최대 가속도는 최소 0.037g에서 최대 0.061g로 나타났다.

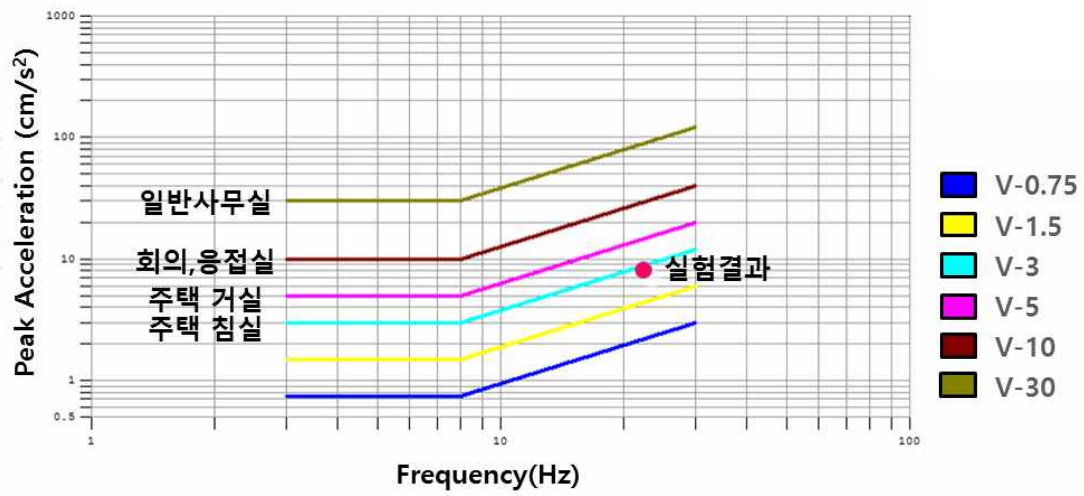
PROTECT 패널의 진동 성능 평가는 일본건축학회의 진동성능평가기준을 사용하였다. 일본건축학회(AIJ)에서는 진동종류를 3가지로 분류하였으며, 건물의 용도별로 허용진동의 등급을 V-0.75에서 V-30으로 나누고 있다.

진동종별	내 용
1	연속진동 및 간헐적으로 반복하여 발생하는 진동을 받는 바닥
2	충격진동을 받는 감쇠성이 낮은 바닥, 감쇠 3% 이하
3	충격진동을 받는 감쇠성이 높은 바닥, 감쇠 3~6% 정도

[일본건축학회 진동성능평가기준의 진동분류]

건축물종별등급		진동종별 1			진동종별 2	진동종별 3
건축물 실용도		등급 I	등급 II	등급 III	등급 III	등급 III
주택	거실, 침실	V-0.75	V-1.5	V-3	V-5	V-10
	회의, 응접실	V-1.5	V-3	V-5	V-10	V-30
	일반사무소	V-3	V-5	V-5정도	V-10정도	V-30정도

[일본건축학회 진동성능평가기준 등급]



[현장 진동 평가 결과(일본건축학회)]

본 현장의 진동 평가 결과, 진동 성능 기준 V-3을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 생활하중에 대하여 주택 등급 III, 사무실 등급 I의 기준을 확보하였음을 확인할 수 있다.

• 해석 모델

충격 및 폭발하중에 의한 구조물의 거동은 매우 짧은 시간에 급격한 변형이 발생하며, 이로 인해 높은 변형률 속도를 가지게 된다. 따라서 외연적(Explicit) 시간 적분법을 통하여 구조해석을 진행하였으며, 유한요소해석을 위한 프로그램은 LS-DYNA v.971을 사용하였다.

본 연구에서는 PROTECT 방폭 패널의 재료인 강판과 특수나노소재의 동적 특성을 반영하여 충격하중 재하 시 패널의 거동을 유한요소해석을 통해 분석하였다. 해석에 사용된 PROTECT 방폭 패널의 기본 형상은 Figure 3과 같이 가로·세로 길이가 300mm × 100mm인 면적을 갖는 플레이트로 모델링하였으며, 강판과 특수나노소재의 두께를 변수로 하여 총 5개를 모델링하였다. 또한 PROTECT 방폭 패널의 충격성능을 기존 보강재로 많이 사용되었던 강판과 비교 평가하기 위하여 각기 다른 두께를 갖는 4개의 순수 강판에 대해서도 충격 해석을 진행하였다.

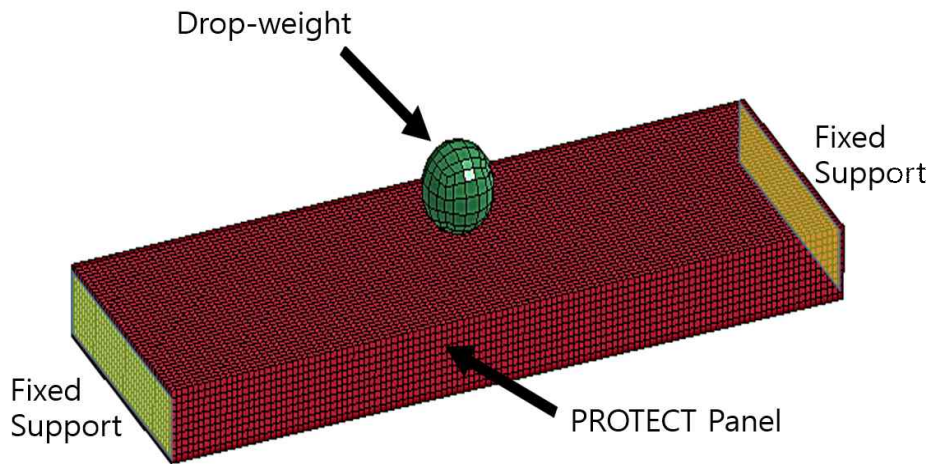
PROTECT 방폭 패널의 해석에 사용된 변수는 강판과 특수나노소재의 두께, 충격에너지의 크기이며 PROTECT 방폭 패널의 성능을 평가하기 위하여 일반 강판에 대한 해석을 진행하였다. 변수에 대한 일람은 아래 표와 같다.

Material	Variables	Details
Steel plate	SP-10	Steel plate : 10mm
	SP-15	Steel plate : 15mm
	SP-20	Steel plate : 20mm
	SP-25	Steel plate : 25mm
PROTECT panel	PP-2.5-20	Steel plate : 2.5mm(2EA) Nano-composite : 20mm
	PP-4-20	Steel plate : 4mm(2EA) Nano-composite : 20mm
	PP-5-20	Steel plate : 5mm(2EA) Nano-composite : 20mm
	PP-2.5-25	Steel plate : 2.5mm(2EA) Nano-composite : 25mm
	PP-2.5-30	Steel plate : 2.5mm(2EA) Nano-composite : 30mm

[해석 변수 일람]

패널에 가해지는 충격하중은 지름 30mm, 무게 20kg의 낙하 추(Drop-weight)를 통하여 전달되도록 하였으며, 솔리드 요소(Solid element)가 적용되었다.

해석 모델에는 유한요소로 8절점 육면체를 적용하였으며, 한 개의 요소는 2.5mm × 2.5mm × 2.5mm 크기로 나누었다.



[PROTECT 패널의 해석 모델]

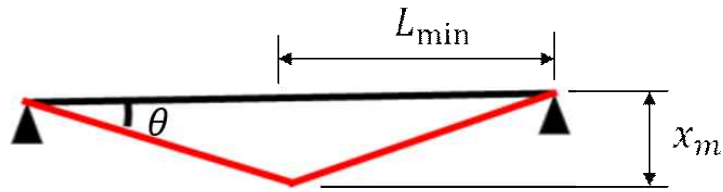
PROTECT 방폭패널의 양 지점부는 x, y, z 방향으로 변위와 모멘트에 대하여 구속하였으며, 낙하 추(Drop-weight)와 PROTECT 방폭 패널 사이에는 LS-DYNA의 AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 옵션을 사용하여 충돌을 정의하였다.

충격에너지는 낙하 추를 통하여 강판 또는 PROTECT 방폭 패널에 전달되며, 해석에 사용된 충격에너지는 150J, 500J, 800J, 1500J이다. 낙하 추의 중량은 20kg으로 고정하였기 때문에, 추의 초기속도에 따라 충격에너지가 결정된다. 각 충격에너지에 대한 낙하 추의 초기속도는 아래와 같다.

Impact energy	150J	500J	800J	1500J
Initial velocity	3.87m/s	7.07m/s	8.94m/s	12.25m/s

[낙하 추의 초기속도]

PROTECT 방폭 패널의 성능을 평가하기 위하여 최대 처짐, 지점 회전각을 이용하였다. 최대 처짐은 낙하 추가 충돌하게 되는 부재의 중앙부 하단에서 최대 처짐을 도출하였으며, 지점 회전각은 SDOF 해석에서 사용되는 값으로 아래와 같이 계산하였다.



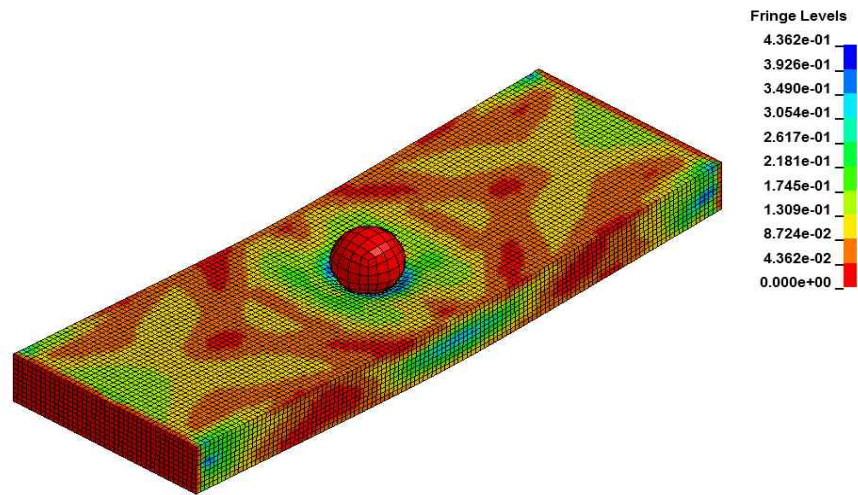
[SDOF 해석 개요]

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{x_m}{L_{\min}} \right)$$

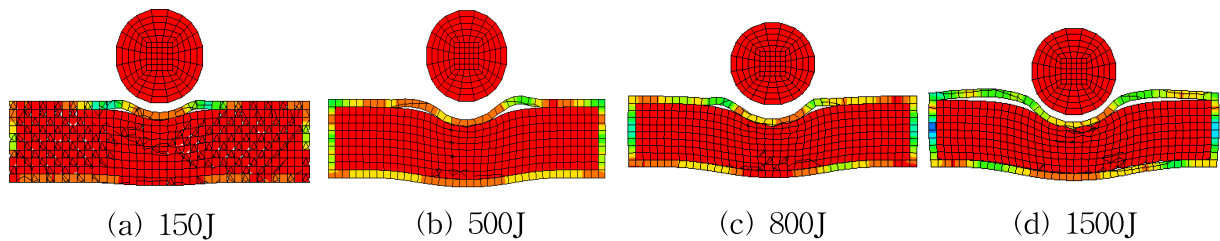
여기서, x_m 은 최대 처짐이며 $L_{\min}$ 은 지점과 최대 처짐 발생 위치까지의 최소거리이다.

- 충격에너지 변화에 따른 PROTECT 패널의 거동

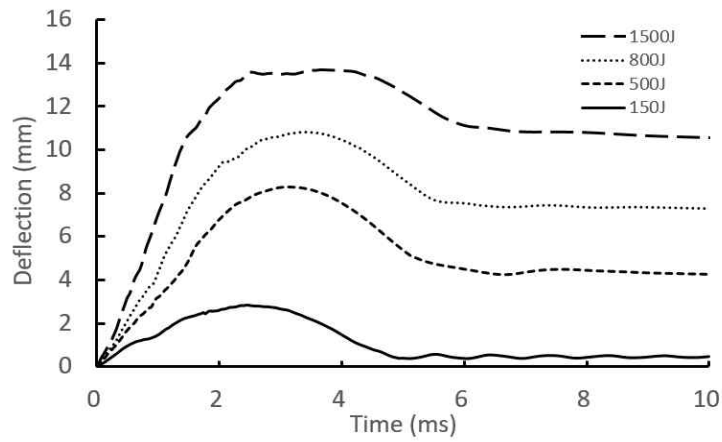
충격에너지 변화에 따른 PROTECT 방폭 패널의 거동을 확인하기 위하여 기본 모델인 PP-2.5-20로 해석을 수행하였다. 해석 수행 모델에 대한 결과는 아래와 같이 나타났다.



[PROTECT 패널 해석 결과]



[충격에너지에 따른 해석 결과 비교]

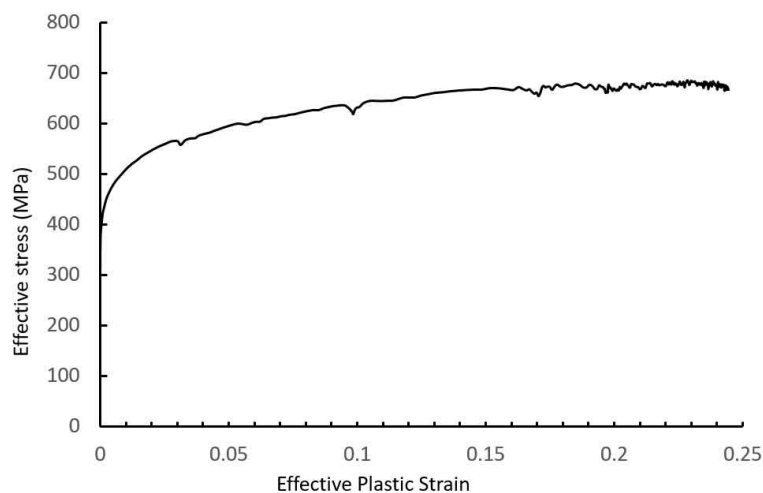


[충격에너지에 따른 시간-변형 그래프]

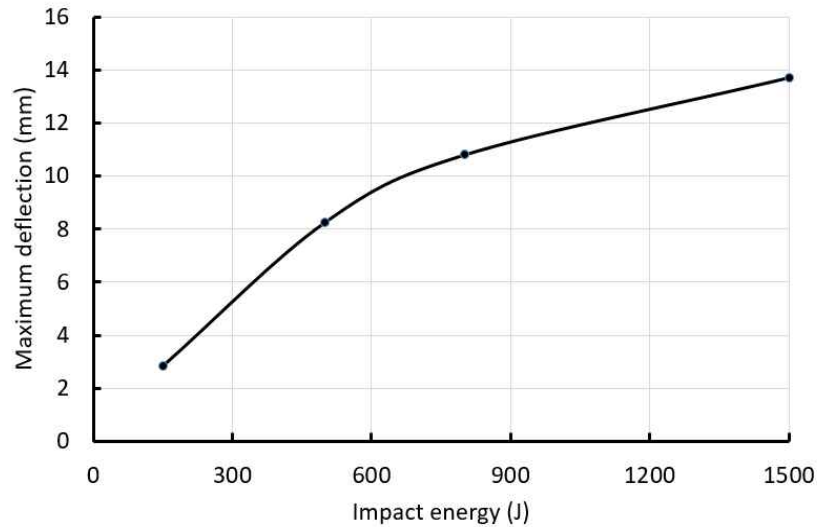
	150J	500J	800J	1500J
Plastic deformation (mm)	0.5	4.4	7.3	10.6

[충격에너지에 따른 PROTECT 패널의 소성 변형]

PROTECT 방폭 패널의 시간-변형 관계를 도출하였다. 해석 결과에서 나타난 강재의 응력-변형률 곡선은 아래의 그림과 같다. 강재는 약 0.7의 Effective plastic strain에서 파괴가 발생하며, 본 해석에서는 최대 0.25의 변형률을 보여 모든 충격하중 조건에서 강재 파괴로 인한 관통현상은 발생하지 않았으며, 낙하 추의 충격에너지를 PROTECT 방폭 패널이 모두 흡수하는 것으로 확인되었다. 패널에 충격하중을 가했을 때, 낙하 추가 충돌하는 부분에서 강판과 특수나노소재 사이의 부착이 떨어지면서 재료의 탄성한계를 벗어난 변형률이 발생하여 국부적인 소성변형이 크게 발생하였으며, 최종적으로 패널에 발생한 소성 변형을 정리한 내용은 위의 표와 같다. 또한, 충돌이 끝난 이후에도 패널에 진동현상이 크게 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.



[해석에서 나타난 강재의 응력-변형률 곡선]



[충격에너지-최대변형 그래프]

	150J → 500J	500J → 800J	800J → 1500J
Slope (mm/J)	0.01545	0.00844	0.00416

[충격에너지-최대변형 그래프의 기울기]

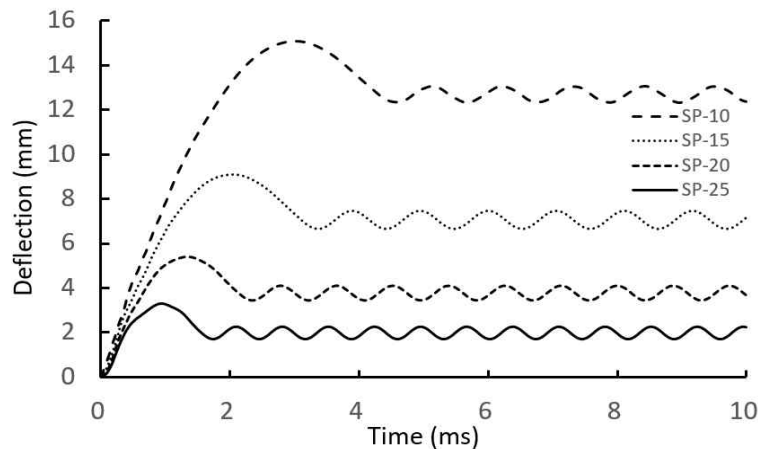
충격에너지의 크기에 따른 최대 처짐의 관계는 위의 그림과 같다. 충격에너지가 커질수록 최대 처짐에 대한 그래프의 기울기가 작아지는 현상을 확인할 수 있었다. 이는 큰 충격에너지에서는 높은 변형률 속도로 인하여 재료의 강도증가 효과가 발생하였기 때문으로 판단된다.

• 충격에너지 변화에 따른 PROTECT 패널의 거동

PROTECT 방폭 패널의 충격저항성능을 확인하기 위하여 현재 일반적으로 방폭 보강에 사용되는 강판 보강법과의 비교를 실시하였다. PROTECT 방폭 패널은 강판 2.5t와 특수 나노소재 20mm의 단면을 가지는 25mm 두께의 PP-2.5-20을 기본 모델로 해석을 수행하였다. 동일한 충격에너지인 800J에 대하여 PROTECT 방폭 패널과 강판 보강법에 사용되는 일반 강판의 거동을 비교하여 충격저항성능을 평가하는데 기준이 될 수 있도록 하였다. 충격에너지 800J에 대한 각 변수의 최대 처짐과 지점 회전각은 아래와 같다.

Variables	Maximum deflection	Support rotation
SP-10	15.1mm	5.75°
SP-15	9.1mm	3.47°
SP-20	5.4mm	2.06°
SP-25	3.2mm	1.22°
PP-2.5-20	10.8mm	4.12°

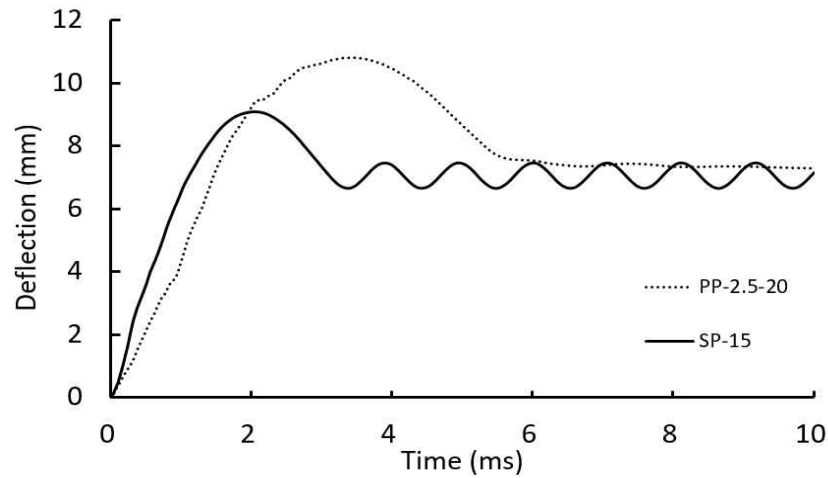
[변수에 대한 최대 처짐과 지점 회전각]



[800J의 충격에너지에서 강판의 시간-변형 그래프]

일반 강판은 두께가 5mm씩 증가할 때마다 최대 처짐은 약 40%씩 일정하게 감소하는 경향을 나타냈으며, 지점 회전각 또한 약 40%씩 일정하게 감소하는 경향을 나타내었다. 해석 결과 모든 두께의 강판에 대하여 관통현상이 발생하지 않았으나, 충돌이 끝난 이후 진동현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. SP-15의 최대 처짐은 9.1mm로 PP-2.5-20의 거동과 가장 흡사한 거동을 나타냈다. 그러나 PP-2.5-20이 약 4ms에 최대 변위가 발생한 것에 비하여 약 2ms의 이른 시간에 최대 변위에 도달하여 변형률의 속도가 강판이 더욱 빠르다는 것을 확인할 수 있었다.

PP-2.5-20은 단위면적당 질량이 62.8kg/m^2 이며, SP-15의 경우에는 117.8kg/m^2 이다. 이는 특수나노소재의 낮은 밀도로 인한 효과로, PROTECT 방폭 패널이 일반 강판의 무게에 비하여 약 50% 낮은 무게로 동등 또는 이상의 충격저항성능을 발휘함을 확인할 수 있었다. 따라서 구조물의 경량화 및 시공성 측면에서 PROTECT 방폭 패널이 강판 보강법에 비하여 더욱 유리한 구조를 가진다고 할 수 있다.



[강판과 PROTECT 패널의 비교]

- 재료의 두께에 따른 PROTECT 패널의 거동

방폭 보강은 목표하는 하중에 따라 보강재의 성능 요구조건이 가변적이다. 따라서 PROTECT 방폭 패널의 기본 모델인 PP-2.5-20에서 재료의 두께를 변수로 하여 충격저항성능을 평가하였으며, 이를 통해 목표로 하는 하중에서 PROTECT 방폭 패널의 재원을 결정할 수 있는 바탕이 될 수 있도록 하였다.

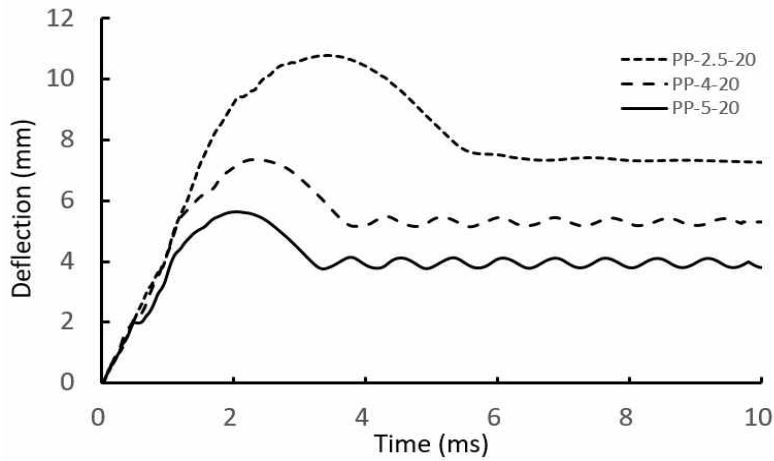
PROTECT 방폭 패널의 재료인 강판과 특수나노소재의 두께에 따라 충격저항성능이 어떤 관계를 가지는지 확인하고자, 충격에너지는 800J로 고정된 상태로 재료의 두께를 변화시키면서 거동을 확인하였다.

강판은 2.5mm, 4mm, 5mm로, 특수나노소재는 20mm, 25mm, 30mm로 증가시키면서 PROTECT 방폭 패널의 충격저항성능을 평가한 결과는 아래와 같다.

Variables	Maximum deflection	Support rotation
PP-2.5-20	10.8mm	4.12°
PP-4-20	7.3mm	2.79°
PP-5-20	5.6mm	2.14°
PP-2.5-25	8.8mm	3.36°
PP-2.5-30	6.8mm	2.60°

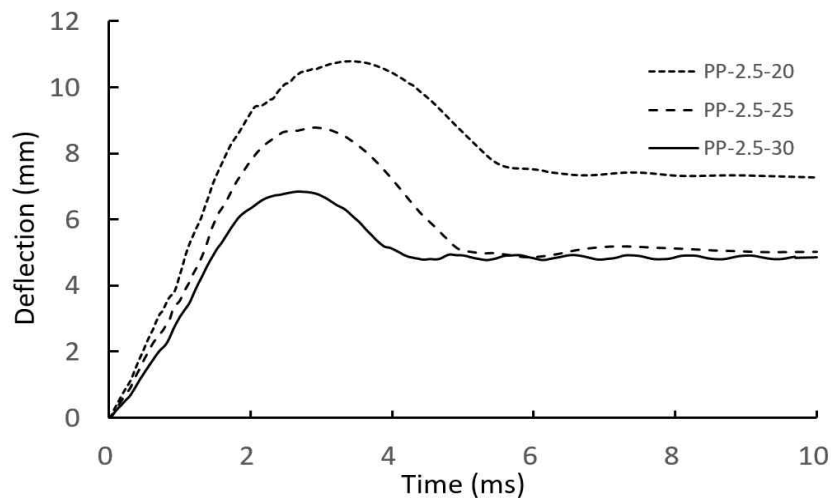
[재료 두께에 따른 PROTECT 패널의 변형과 지점 회전각]

강판의 두께를 변수로 한 PROTECT 방폭 패널의 시간-변형 곡선은 아래 그림과 같다. PROTECT 방폭 패널에 사용된 강판의 두께가 2.5mm에서 4mm로 증가했을 때 최대 처짐은 약 33% 감소하였으며, 4mm에서 5mm로 증가했을 때에는 최대 처짐이 약 23% 감소하였다.



[강판 두께 변수 PROTECT 패널의 시간-변형 곡선]

특수나노소재의 두께를 변수로 한 PROTECT 방폭 패널의 시간-변형 곡선은 아래 그림과 같다. 특수나노소재의 두께가 20mm에서 25mm로 증가했을 때 최대 처짐은 약 19% 감소하였으며, 25mm에서 30mm로 증가했을 때에는 최대 처짐이 약 23% 감소하였다.



[특수나노소재 두께 변수 PROTECT 패널의 시간-변형 곡선]

PROTECT 방폭 패널은 강판 사이에 특수나노소재가 주입된 특수한 구조이기 때문에 강판과 특수나노소재의 두께를 동시에 고려하여 충격저항성능의 경향성을 파악하기 위해서 휨 강성을 도입하였다. PROTECT 방폭 패널의 휨 강성을 계산하기 위한 식은 아래와 같다.

$$k = E_s I_s + E_n I_n$$

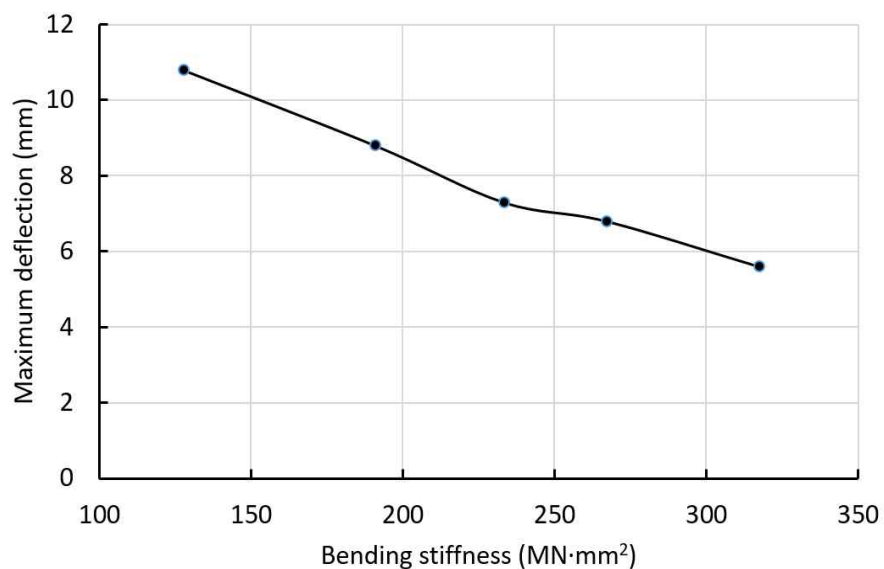
여기서, E_s 와 I_s 은 강관의 탄성 계수와 단면 2차 모멘트를 뜻하며, E_n 와 I_n 은 특수나노소재의 탄성 계수와 단면 2차 모멘트를 뜻한다.

단위 길이의 폭에 대해 각 변수의 휨 강성을 계산한 결과를 아래 표에 정리하였다.

PROTECT 방폭 패널의 휨 강성에 대한 최대 처짐의 관계는 아래 그림과 같이 나타나며 휨 강성이 증가함에 따라 최대 처짐이 감소하는 경향성을 확인할 수 있다. 따라서 PROTECT 방폭 패널의 강관과 특수나노소재의 두께에 대한 충격저항성능의 예측 또는 평가를 위해 휨 강성을 주요한 요인으로 고려할 수 있는 것으로 판단된다.

Variables	$k(\text{MN}\cdot\text{mm}^2)$	Ratio
PP-2.5-20	127.8	1.00
PP-4-20	233.3	1.83
PP-5-20	317.4	2.48
PP-2.5-25	191.0	1.49
PP-2.5-30	267.1	2.09

[PROTECT 패널의 휨 강성]



[휨 강성-최대 변형 그래프]

■ 충격 하중 실험

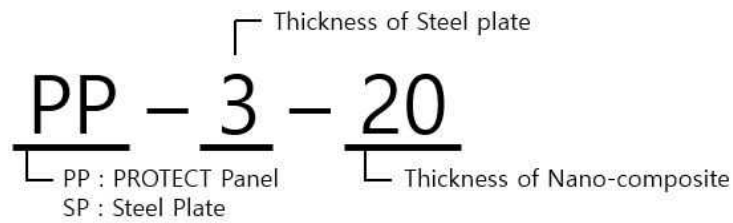
• 실험체 종류 및 형상

PROTECT 방폭 패널에 충격에너지 재하 시, 패널의 관통여부를 확인하고 발생하는 변위 및 변위각을 시간에 따라 확인하기 위하여 충격 실험을 실시한다. 기본 실험체의 가로·세로 규격은 350mm×100mm로 하였으며, 먼저 강판 성형을 완료한 후 내부에 특수나노소재를 충진하여 실험체를 제작하였다. 실험체는 총 3개의 실험군에 대하여 총 10개를 제작하였으며, 각 실험군은 대조군으로 설정한 강판, 강판의 두께를 변수로 한 PROTECT 패널, 특수나노소재의 두께를 변수로 한 PROTECT 패널로 설정하였다. 대조군으로 설정한 강판은 PROTECT 패널의 충격저항성능을 기존 보강재로 많이 사용되었던 강판과 비교 평가하기 위함으로, 각기 다른 두께를 갖는 3개의 변수로 설정하였다.

방폭 보강의 경우 목표로 하는 하중에 따라 보강재의 성능 요구조건이 가변적이다. 이에 따라 PROTECT 방폭 패널의 각 재료별 두께를 변수로 한 충격저항성능을 확인하여 목표로 하는 하중에서 PROTECT 방폭 패널의 제원을 결정할 수 있는 바탕이 될 수 있도록 하였다.

Material	Variables	Type	Details
Steel plate	SP-5	강판(대조군)	Steel plate : 5mm
	SP-10		Steel plate : 10mm
	SP-15		Steel plate : 15mm
PROTECT panel	PP-3-20	PROTECT 패널(기본)	Steel plate : 3mm(2EA) Nano-composite : 20mm
	PP-4-20	PROTECT 패널 (강판 두께 변수)	Steel plate : 4mm(2EA) Nano-composite : 20mm
	PP-5-20		Steel plate : 5mm(2EA) Nano-composite : 20mm
	PP-6-20		Steel plate : 6mm(2EA) Nano-composite : 20mm
	PP-3-15	PROTECT 패널 (특수나노소재 두께 변수)	Steel plate : 3mm(2EA) Nano-composite : 15mm
	PP-3-25		Steel plate : 3mm(2EA) Nano-composite : 25mm
	PP-3-30		Steel plate : 3mm(2EA) Nano-composite : 30mm

[실험체 일람]



[실험체 호칭 정의]

실험체의 순 경간을 300mm로 설정함에 따라 실험체의 사이즈는 양 지점부의 고정을 고려하여 350mm의 길이로 제작하였다.

Width	Length	Clear Span	Depth	Steel Grade
100mm	350mm	300mm	VAR	SS400

[실험체 상세 부재 사이즈]

• 실험체 제작 과정

실험체는 먼저 일정한 크기로 재단된 강판을 U자 형상으로 절곡한 후, 마주 닿은 부분에 용접을 실시하여 내부가 빈 강판 형상으로 제작한다. 제작이 완료된 강판은 특수나노소재 주입 시 압력으로 인하여 배부름 현상이 발생하는 것을 방지하기 위하여 지그에 고정 한 후, 특수나노소재를 주입하여 실험체를 완성한다.

특수나노소재는 주입 시에 액체로 존재하지만, 주입 후 양생 과정을 거치면 고체형상을 가지게 된다. 이 양생 과정에서 온도와 습도가 일정하지 않으면 강도가 저하되는 등의 문제점이 발생할 가능성이 있으므로, 양생은 실내에서 15~20℃의 온도로 유지하여 실시하였다.

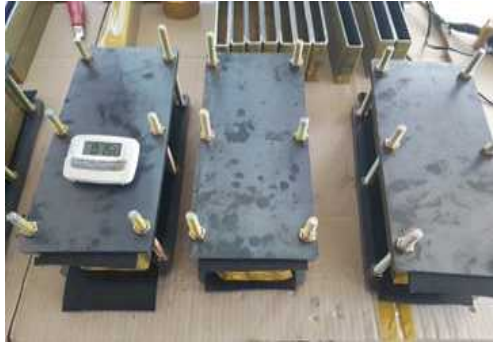


(1) 강판 성형



(2) 특수나노소재 주입

[실험체 제작 과정]



(3) 지그양생 실시



(4) 실험체 제작 완료

[실험체 제작 과정(계속)]

• 실험 장비

PROTECT 방폭 패널의 충격저항성능을 확인하기 위하여 낙하식 충격시험기를 사용하였다. 본 충격시험기의 상세 제원은 아래 표와 같다.



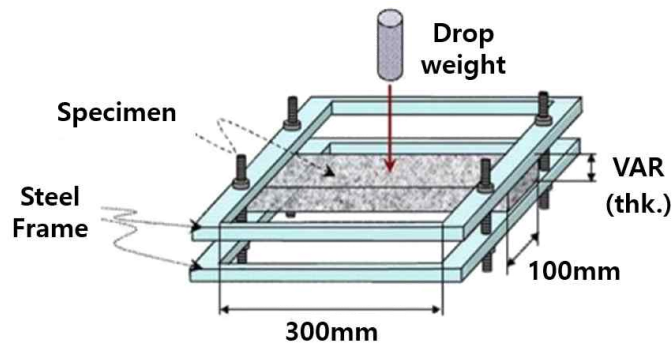
[낙하식 충격 시험기(Instron Dynatup 8250)]

Device name	Universal Impact Testing Machine (Instron Dynatup 8250)
Test Method	Drop-weight impact test
Maximum Energy	Gravity driven : 0.6 ~ 303J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$) Pneumatically assisted : 16.2 ~ 840J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$)
Cross head Weight	1.2 ~ 45.62kg

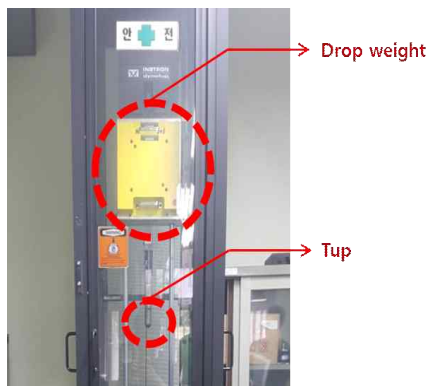
[낙하식 충격시험기 제원]

- 가력 및 계측 계획

낙하식 충격시험기에 지그를 설치하여 실험체 중앙부에 충격에너지가 전달되도록 하였다. 가력은 20mm 텡을 사용하여 45.62kg의 질량을 가지는 낙하 추로 실시하였으며, 실험에 사용된 충격에너지는 600J이다.



[실험체 지그 설치 상세]



[실험체 가력 조건]

Impact Energy	600 Joule
Mass of Drop weight	45.62 kg
Impact Velocity	5.077 m/s
Diameter of Tup	20 mm

[가력 조건]

또한 실험체의 시간에 따른 변형을 계측하기 위하여 실험체 하부 중앙부에 100mm 용량의 레이저 변위계를 설치하였으며, 레이저 변위계의 제원은 아래 표와 같다.



[레이저 변위계 형상]

Device name	OWLE 5013 AA S1
Measure range	30 mm ~ 130 mm
Resolution	6 ~ 60 μ m
Measure frequency	1,100 Hz

[레이저 변위계 제원]

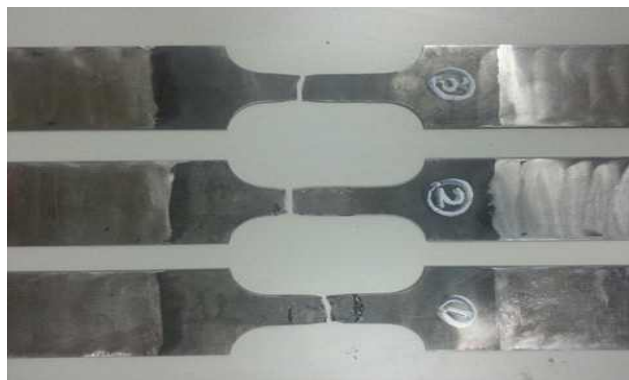
실험체의 지그로 Steel Frame을 설치하여 세팅하였으며, 실험체 중앙부에 낙하 추로 충격 에너지를 가력하였다. 실험체 아래 중앙부에 레이저 변위계를 통하여 시간에 따라 변위를 계측하였으며, 충격으로 인한 흔들림을 방지하기 위하여 레이저 변위계는 실험 장비 외부에 고정하였다.



[실험체 Set up]

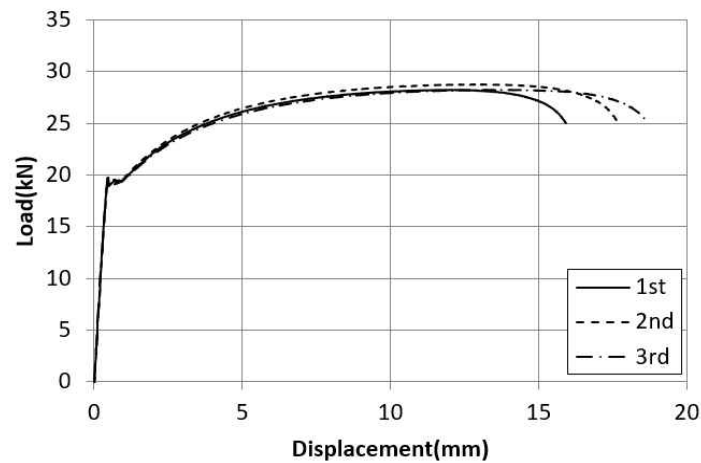
- 강재 재료 실험

실험체에 사용된 강판의 강종은 SS400 이며, 충격저항성능 실험에 사용된 강판의 재료 특성을 확인하기 위하여 KS B 0801 및 0802에 의거한 강재 시편을 제작하여 인장강도 실험을 실시하였다. 강판의 두께는 PROTECT 방폭 패널에 사용된 3mm로 일반적으로 사용되는 강판에 비하여 그 두께가 얇기 때문에 5호 시편을 사용하여 인장강도를 평가하였다. 실험체의 규격은 평행부 길이 60mm, 너비 25mm, 표점거리 50mm, 두께는 원두께를 사용하며, 어깨부 반지름이 15mm 이상 되도록 기준에 의거 제작하였다. 실험결과, 사용된 강재의 평균 항복강도는 304.4MPa, 극한강도는 454.7MPa, 탄성계수는 205,866MPa를 나타내었다.



[강재 인장 시편]

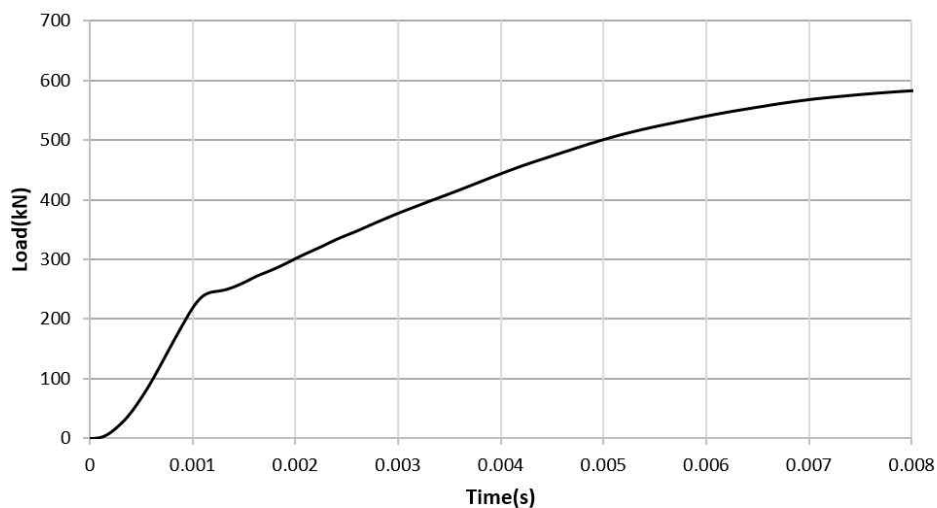
No.	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Elastic Modulus (MPa)
1	320.5	478.6	205,637
2	298.9	448.1	205,761
3	293.9	437.5	206,199
Avg	304.4	454.7	205,866



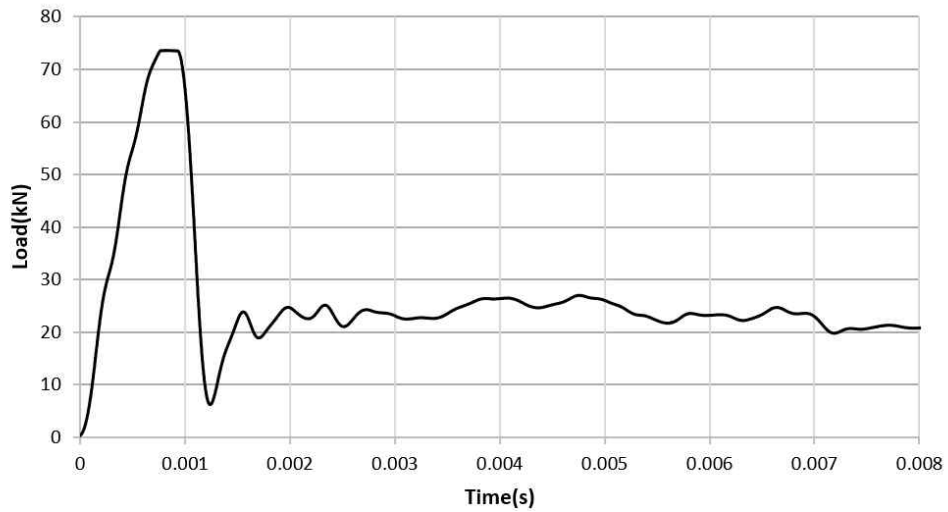
[강재 인장 실험 결과]

• 하중 계측 결과

낙하 추의 Tup에 설치된 로드셀을 통하여 실험체에 가해진 하중과 에너지를 계측하였으며, 낙하 추가 실험체에 타격된 순간의 속도를 계측하였다. 계측 결과 목표 충격 에너지인 600J과 근접한 588J이 가력됨을 확인하였으며, 발생한 최대 하중은 73.6kN이며 충돌 속도는 5.04m/s이다.



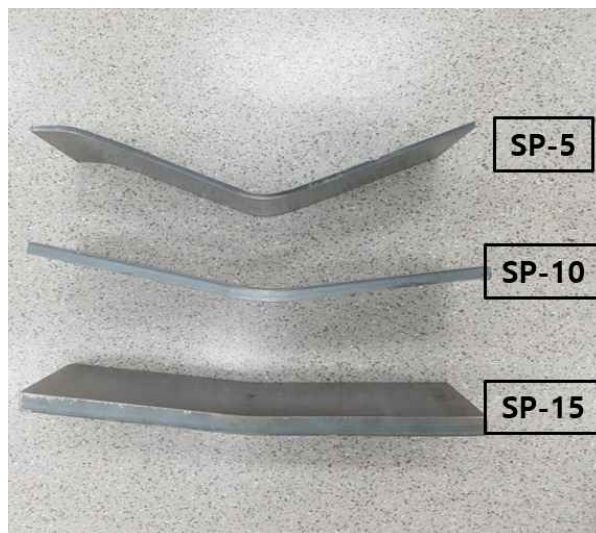
[시간-에너지 그래프]



[시간-하중 그래프]

- 순수 강판의 거동

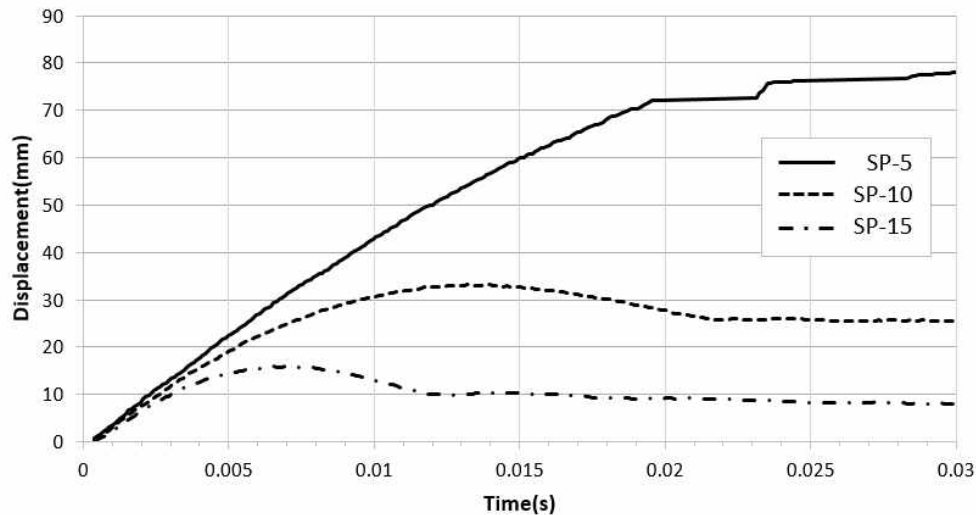
강판에 대한 충격실험 결과, 타격이 일어나는 가운데 부분에서 국부적으로 좌굴이 심하게 발생하였으며, 충격 후에 영구적인 소성변형이 발생하는 것을 확인하였다. 실험에서 발생한 최대 변위와 잔류 변형은 아래 표와 같다. 레이저 변위계를 통하여 측정한 시간-변위에 대한 그래프를 아래에 나타내었다. SP-5 실험체의 경우, 실험 과정에서 과도한 변형으로 인해 지그에서 이탈하여 변위 측정이 불가능하였다.



[충격실험 결과(순수 강판)]

Specimen	Maximum Displacement (mm)	Residual Displacement (mm)
SP-5	-	-
SP-10	32.5	25.9 (80%)
SP-15	15.2	9.6 (63%)

[최대 변위 및 잔류 변형(순수 강판)]



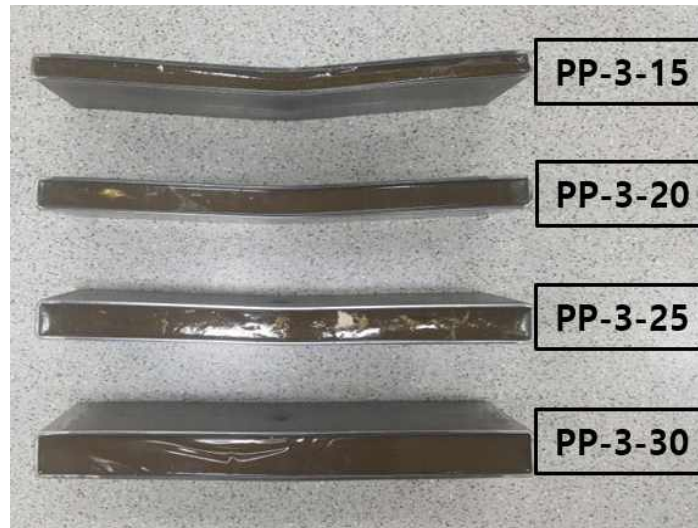
[시간-변위 그래프(순수 강판)]

실험 결과 강판의 두께가 10mm에서 15mm로 증가하였을 때, 최대 변위가 약 52% 감소하였다. SP-10의 경우 잔류 변형이 최대 변위에 비하여 80%로 나타난 반면, SP-15의 경우 잔류 변형이 최대 변위의 63%로 나타나 강판의 두께가 증가함에 따라 잔류 변형이 크게 감소함을 확인하였다.

- 특수나노소재 두께에 따른 PROTECT 패넌 거동

특수나노소재의 두께를 변수로 한 실험을 실시한 결과, 영구적인 변형이 발생하였다. 실험에서 발생한 최대 변위와 잔류 변형은 아래 표와 같으며, 각 실험체에 대한 시간-변위 그래프를 아래에 나타내었다.

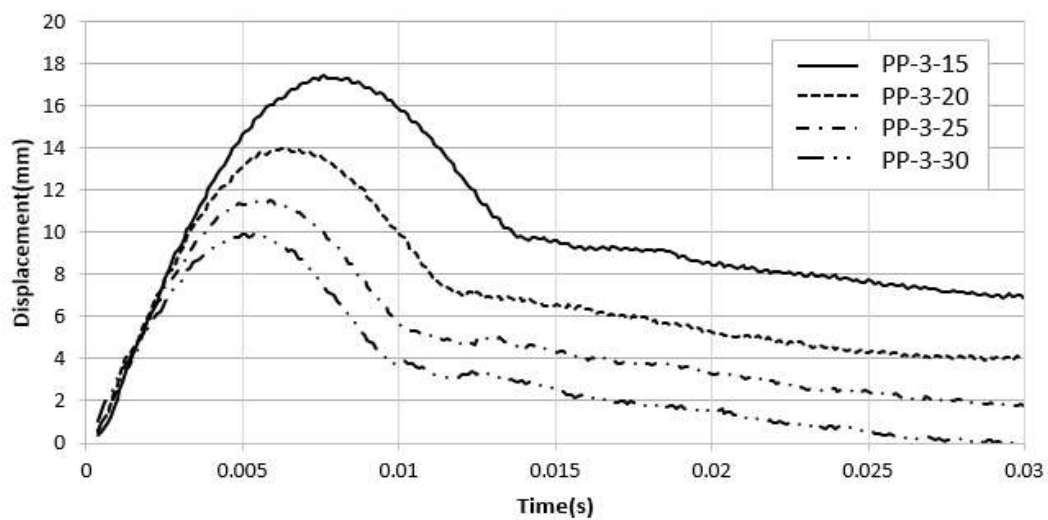
충격실험에서 도출한 시간-변위 그래프를 분석한 결과, 실험체 별로 5~7.5ms에서 최대 변위가 발생함을 확인하였다. 충격이 발생한 시점부터 최대 변위가 발생하기 직전까지 각 실험체의 변위는 일정하게 증가하였으며, 이에 따라 특수나노소재의 두께가 클수록 짧은 시간에서 최대 변위가 발생하였다. 또한, 특수나노소재의 두께가 5mm 씩 증가할 때마다 최대 변위가 약 20% 씩 일정하게 감소하는 경향을 보였으며, 잔류 변형이 급격하게 감소함을 확인하였다.



[충격실험 결과(특수나노소재 두께 변수)]

Specimen	Maximum Displacement (mm)	Residual Displacement (mm)
PP-3-15	17.3	8.7 (50%)
PP-3-20	14.0	6.4 (46%)
PP-3-25	11.4	3.6 (32%)
PP-3-30	9.9	1.6 (16%)

[최대 변위 및 잔류 변형(특수나노소재 두께 변수)]

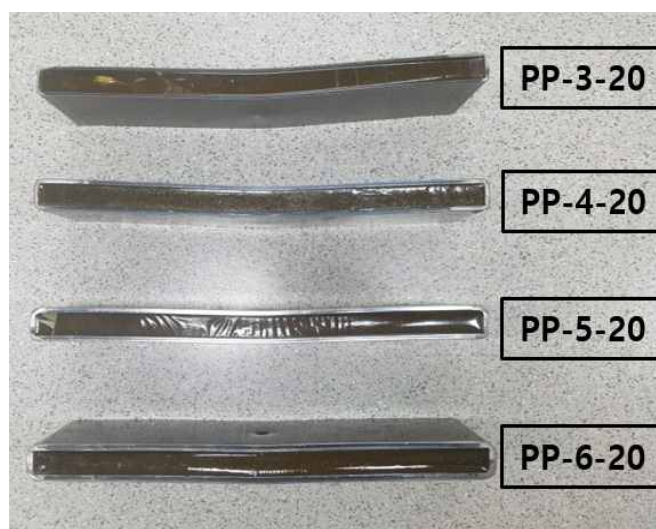


[시간-변위 그래프(특수나노소재 두께 변수)]

- 강판 두께에 따른 PROTECT 패널 거동

강판의 두께를 변수로 한 PROTECT 패널의 충격실험 결과는 아래 그림과 같다. 이때 발생한 최대 변위와 잔류 변형은 아래 표와 같으며, 각 실험체에 대한 시간-변위 그래프를 나타내었다.

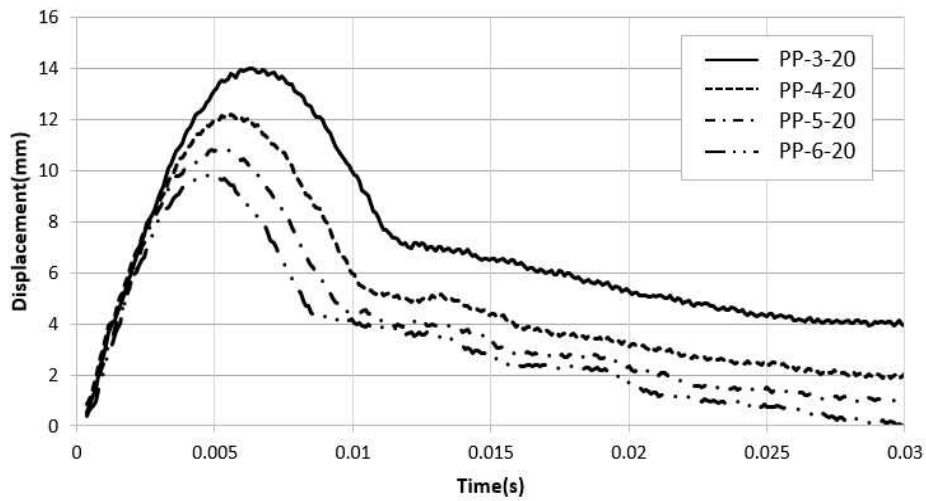
강판의 두께를 변수로 한 실험에서 도출한 시간-변위 그래프를 분석한 결과, 실험체 별로 5~7ms에서 최대 변위가 발생함을 확인하였으며, 강판의 두께가 1mm 증가할 때마다 최대 변위가 10~15% 씩 감소하는 경향을 보였다. 잔류 변형의 경우에도 강판의 두께가 증가할수록 급격하게 감소하는 것을 확인하였다.



[충격실험 결과(강판 두께 변수)]

Specimen	Maximum Displacement (mm)	Residual Displacement (mm)
PP-3-20	14.0	6.4 (46%)
PP-4-20	12.1	4.4 (36%)
PP-5-20	10.8	2.8 (26%)
PP-6-20	9.8	1.4 (14%)

[최대 변위 및 잔류 변형(강판 두께 변수)]



[시간-변위 그래프(강판 두께 변수)]

- PROTECT 패넬의 충격저항성능 평가

PROTECT 방폭 패넬은 강판 사이에 특수나노소재가 주입된 특수한 구조이기 때문에 강판과 특수나노소재의 두께를 동시에 고려하여 충격저항성능의 경향성을 파악하기 위하여 휨 강성을 도입하였다. PROTECT 방폭 패넬의 휨 강성은 아래 식과 같이 계산하였다.

$$k = E_s I_s + E_n I_n$$

여기서, E_s = 강판의 탄성계수

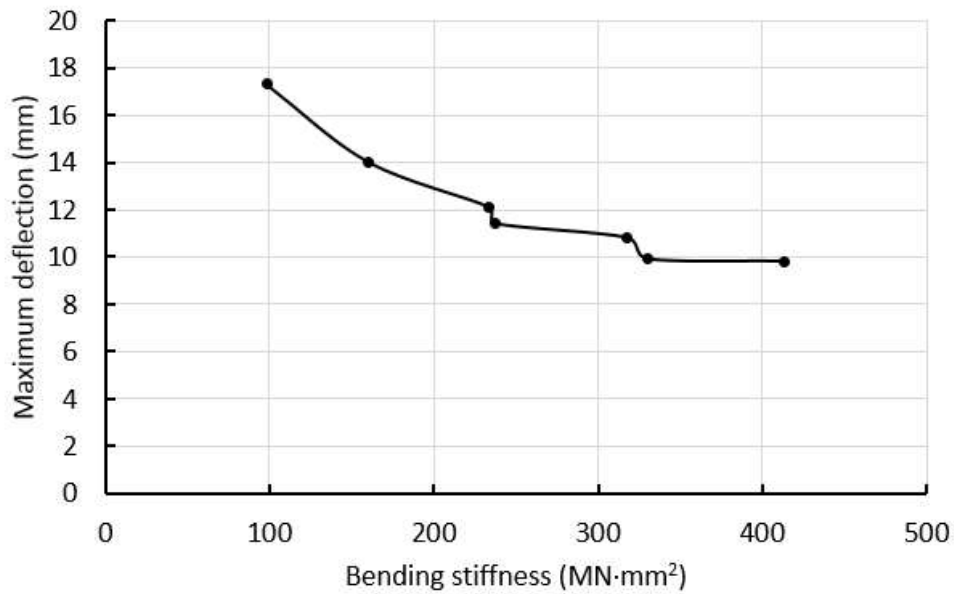
I_s = 강판의 단면 2차 모멘트

E_n = 특수나노소재의 탄성계수

I_n = 특수나노소재의 단면 2차 모멘트

Variables	$k(\text{MN} \cdot \text{mm}^2)$	Ratio	Maximum displacement (mm)
PP-3-20	160.34	1.00	14.0
PP-4-20	233.27	1.45	12.1
PP-5-20	317.41	1.98	10.8
PP-6-20	413.54	2.58	9.8
PP-3-15	98.41	0.61	17.3
PP-3-25	237.54	1.48	11.4
PP-3-30	330.10	2.06	9.9

[PROTECT 패넬의 휨 강성 비교]



[휨 강성-최대 변위 그래프]

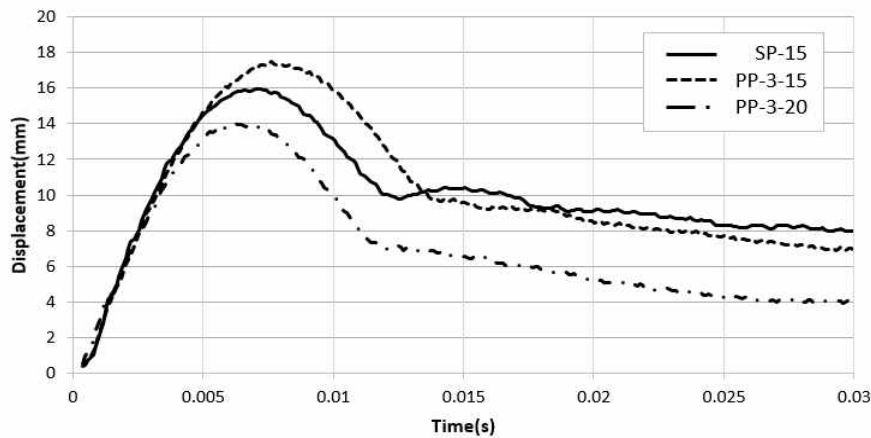
PROTECT 방폭 패널의 휨 강성에 대한 최대 변위의 관계는 위의 그림과 같이 나타나며 휨 강성이 증가함에 따라 최대 변위가 감소하는 경향성을 확인할 수 있다. 따라서 PROTECT 방폭 패널의 강판과 특수나노소재의 두께에 대한 충격저항성능의 예측 또는 평가를 위해 휨 강성을 주요한 요인으로 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

• PROTECT 패널의 충격저항성능 평가

강판 보강법에서 사용되는 15mm 강판과 PROTECT 방폭 패널의 충격저항성능을 비교한 결과는 아래 그림과 같으며, 강판 15mm와 PROTECT 방폭 패널의 최대 변위와 잔류 변형을 비교하여 정리하였다.

Specimen	Maximum Displacement (mm)	Residual Displacement (mm)
SP-15	15.2	9.6 (63%)
PP-3-15	17.3	8.7 (50%)
PP-3-20	14.0	6.4 (46%)

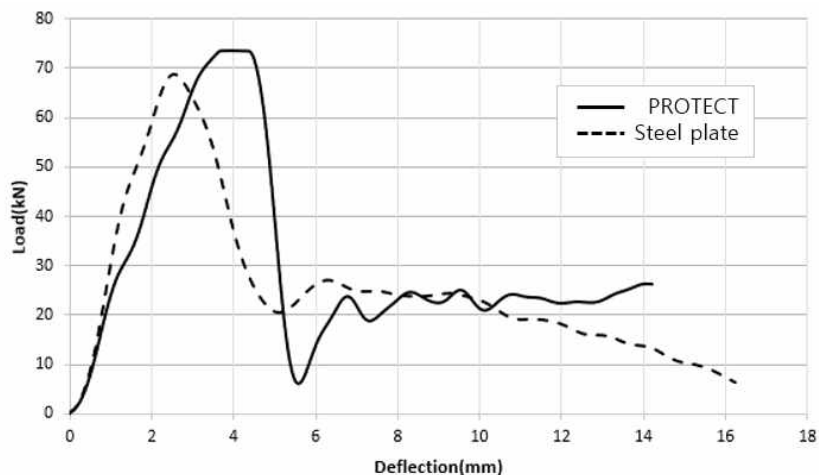
[강판과 PROTECT 패널 비교]



[시간-변위 그래프(강판과 PROTECT 패널 비교)]

강판 3mm와 특수나노소재 15mm로 구성된 PP-3-15의 경우, 강판 15mm에 비하여 낮은 충격저항성능을 보이며, 강판 3mm와 특수나노소재 20mm로 구성된 PP-3-20은 강판 15mm에 비하여 더욱 높은 충격저항성능을 보이는 것을 확인하였다. 특히 잔류 변형을 비교하였을 때, 강판이 약 63%의 잔류 변형을 가지는 것에 비하여 PROTECT 방폭 패널은 46%의 잔류 변형을 가져 PROTECT 패널이 더욱 효과적인 재료임을 확인하였다.

강판과 PROTECT 패널의 에너지 흡수능력을 비교하기 위하여 하중-변위 곡선을 도입하였다. 에너지 흡수능력은 하중-변위 곡선에서 그래프로 둘러싸여 있는 아래 면적으로 정의할 수 있다. 15mm 강판의 경우 약 417.8J(71%)의 에너지를 흡수한 것으로 나타났으며, PROTECT 패널은 약 438.4J(75%)의 에너지를 흡수한 것으로 확인되었다. 이때, 강판에서는 변위가 증가할수록 하중이 급격하게 떨어지는 현상이 발생하였으며 PROTECT 패널이 강판보다 변위가 증가할수록 강성이 천천히 감소하는 것을 확인하였다. 이 결과는 앞선 변형에 대한 결과와 함께 PROTECT 방폭 패널이 샌드위치 형상의 패널임에 따라 충격흡수에 더욱 유리한 구조이며, 특수나노소재가 연성적인 거동을 통해서 충격 에너지를 흡수하는 효과를 가지기 때문으로 판단된다.



[하중-변위 그래프(강판과 PROTECT 패널 비교)]

또한, 강판과 PROTECT 패널의 단위면적당 무게를 비교하면 강판의 경우 117.75kg/m^2 의 단위면적당 무게를 가지는 것에 비하여 PROTECT 패널의 경우 70.66kg/m^2 의 단위면적당 무게를 가지게 되어 약 40%의 자중감소 효과를 얻을 수 있다. 이는 시공성 측면에서 PROTECT 패널이 더욱 유리하다고 할 수 있다.

이에 따라 강판 3mm와 특수나노소재 20mm로 구성된 PP-3-20을 PROTECT 방폭 패널의 프로토타입으로 결정하였으며, 이를 바탕으로 유한요소해석을 통해 방폭 성능을 확인하고자 한다.

• 유한요소해석 개요

충격 및 폭발하중에 의한 구조물의 거동은 매우 짧은 시간에 급격한 변형이 발생하며, 이로 인해 높은 변형률 속도를 가지게 된다. 따라서 Stiffness Matrix를 사용하는 강성법으로 해석을 진행하기에는 어려움이 있기 때문에 외연적(Explicit) 시간 적분법을 통하여 구조해석을 진행하였으며, 유한요소해석을 위한 프로그램은 LS-DYNA v.971을 사용하였다.

본 연구에서는 PROTECT 방폭 패널의 재료인 강판과 특수나노소재의 동적 특성을 반영하여 충격하중 재하 시 패널의 거동을 유한요소해석을 통해 분석하였으며, 낙하 충격 실험 결과값과 비교하여 해석의 신뢰성을 확인하였다. 여기에서 도출한 해석기법을 바탕으로 실제 기둥에 PROTECT 방폭 패널이 설치되었을 때 폭발하중에 대한 저항성능을 확인하고자 하였다.

• 재료 특성

충격 및 폭발하중이 구조물에 작용할 경우, 짧은 시간에 급격한 변형이 발생하기 때문에 높은 변형률 속도를 가지게 된다. 일반적으로 재료는 높은 변형률 속도에서 강도가 증진되는 효과가 발생한다. 이에 따라 재료의 동적 특성을 반영한 모델링이 필요하며, Ludwik(1909), Hollomon(1945), Ramberg and Osgood(1943) 등의 연구자에 의해 구성방정식이 제안되어 있다. 각 구성방정식들은 높은 변형률 속도에서의 재료 실험 결과를 바탕으로 각 식에 적용되는 계수를 제안하고 있다.

• 강판 재료 모델

충격하중이 작용할 때 강재의 정확한 거동을 예측하기 위해서는 높은 변형률, 변형률 속도에서의 재료 특성을 반영하여야 한다. 강재의 동적 거동을 반영하기 위한 방법으로는 Johnson-Cook constitutive model, Huh-Kang rate form, Cowper-Symonds rate form 등이 사용된다. 본 연구에서는 LS-DYNA 프로그램에서 강재의 충격 및 폭발 해석에 높은 정확도를 보인다는 것이 실험적으로 입증된 Johnson-Cook constitutive relationship을 사용하여 강판에 대한 모델링을 진행하였다. 이 모델은 아래 식과 같이 실험적으로 결정된 매개변수들을 바탕으로 재료의 응력을 계산하게 된다.

$$\bar{\sigma} = \left[A + B(\bar{\epsilon}^p)^n \right] \left[1 + C \ln \dot{\bar{\epsilon}}^* \right] \left[1 - (T^*)^m \right]$$

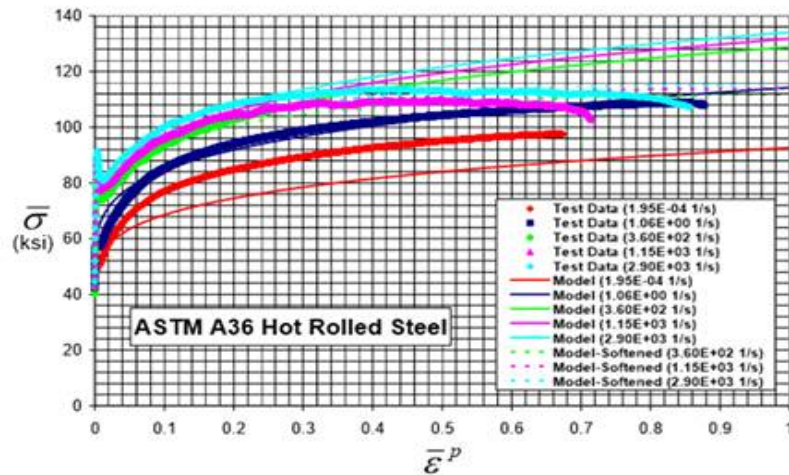
여기서, $\bar{\sigma}$ 은 von Mises 등가응력, $\bar{\epsilon}^p$ 은 재료의 등가 소성 변형률을 나타내며 A , B , n 은 변형률 증가계수, C 은 변형률 속도 증가계수이다. $\dot{\epsilon}^*$ 은 재료의 정규화된 변형률로, $\dot{\epsilon}_0 = 1.0s^{-1}$ 일 때 $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ 로 나타낼 수 있다.

재료의 파괴 모드를 결정하기 위하여 응력 상태, 변형률에 따라 등가 소성 파괴 변형률을 계산하게 되며 Johnson-Cook failure model을 사용하였다.

$$\bar{\epsilon}_f^p = \left[D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*} \right] \left[1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^* \right] \left[1 + D_5 T^* \right]$$

여기서, $\bar{\epsilon}_f^p$ 은 재료의 등가 소성 파괴 변형률이며 D_1 , D_2 , D_3 , D_4 , D_5 은 재료 고유의 상수이다. σ^* 은 3축 응력 상수로 σ_m 을 세 방향 주응력의 평균이라고 했을 때, $\sigma^* = \sigma_m / \bar{\sigma}$ 로 표현할 수 있다.

구성 방정식을 이루는 상수를 결정하기 위해서는 다양한 변형률 속도에 따른 재료의 유효응력과 등가 소성 변형률 사이의 관계를 파악해야 하며, 이를 위해서 재하 속도를 달리 하며 재료에 대한 실험을 수행하여야 한다.



[ASTM A36의 변형률 속도에 따른 실험 결과와 모델링]

PROTECT 방폭 패널에 사용된 강판은 ASTM A36 (SS400) 강재료, Seidt et al.(2007)과 Schwer(2007)는 ASTM A36 강재에 대해 실험을 통하여 변형률 속도를 달리하면서 유효응력과 유효 소성 변형률 사이의 관계를 파악하였으며, 실험결과와 Johnson-Cook constitutive model을 통해 도출한 응력-변형률을 그림 5.1과 같이 비교하여 그 신뢰성을 확보하였다.

이를 통해 Johnson-Cook constitutive model에 사용된 매개변수들을 정의하였고 그 값은 아래와 같다.

A (MPa)	B (MPa)	n	C	$\dot{\epsilon}_0$ (sec ⁻¹)	m
285.9	499.8	0.2280	0.0171	1.0	0.917

[ASTM A36의 Johnson-Cook 강도 매개변수]

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
0.4025	1.107	-1.899	9.607×10^{-3}	0.3000

[ASTM A36의 Johnson-Cook 파괴 매개변수]

• 특수나노소재 재료 모델

특수나노소재는 재료 실험을 통해 얻어진 응력-변형률 곡선과 밀도를 바탕으로 아래 표와 같이 재료 물성을 결정하였다. 이때 사용된 특수나노소재의 물성은 실험 결과에서 보수적인 값으로 설정하였다.

Mechanical Property	Testing Method	Test Result
Density	ASTM D792	1.178 g/cm ³
Yield Strength	ASTM D638-14	24.10 MPa
Elastic Modulus	ASTM D638-14	1,109 MPa
Shear Modulus	-	398.9 MPa
Poisson's Ratio	ASTM D638-14	0.39

[특수나노소재의 재료 물성]

전단 탄성 계수는 아래 식과 같이 탄성 계수와 전단 탄성 계수와의 관계를 통하여 계산하였다.

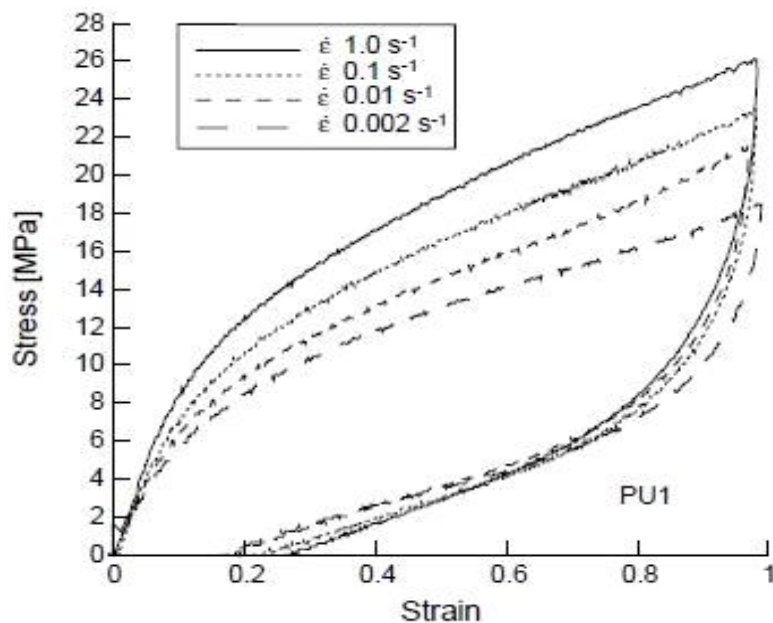
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

특수나노소재의 동적 특성을 평가하기 위해서는 높은 변형률 속도를 갖는 상태에서의 물성치를 파악해야 한다. 이를 위하여 동적 증가 계수(Dynamic Increase Factor, DIF)를 통하여 재료의 높은 변형률 속도 상태에서의 강도 증가를 고려하는 Cowper-Symonds model을 사용하였다. 동적 증가 계수는 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$DIF = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{q}}$$

여기서, $\dot{\epsilon}$ 은 변형률 속도이며, D 와 q 는 Cowper-Symonds relation의 매개변수이다.

특수나노소재는 폴리우레탄 계열의 탄성중합체로, Qi & Boyce(2004)은 특수나노소재와 동일한 재료인 폴리우레탄에 대해 변형률 속도에 따른 응력-변형률 실험 결과를 제시하였다. 여기에서 제시한 실험결과를 바탕으로 특수나노소재에 대한 동적 특성을 고려한 Cowper-Symonds relation의 매개변수를 결정하였으며, 그 값은 아래 표와 같다.



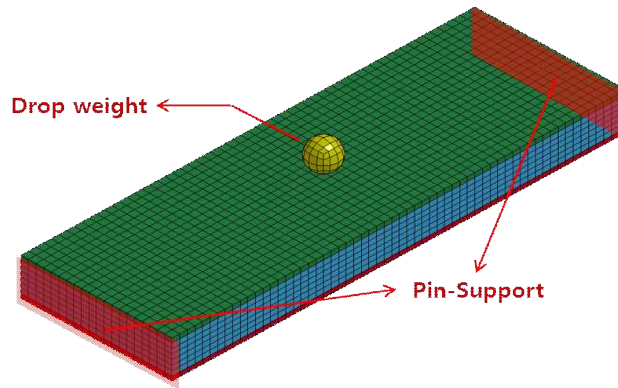
[다른 변형률 속도에서 폴리우레탄의 응력-변형률 곡선]

D	q	failure strain
60	5	0.27

[특수나노소재의 Cowper-Symonds 매개변수]

■ 충격하중에 대한 유한요소해석

충격하중에 대한 유한요소해석은 PROTECT 방폭 패널의 충격 실험을 모사하여 수행하였으며, 본 해석결과와 실험결과를 비교·분석하여 해석의 신뢰성을 확보하고자 한다. 해석에 사용된 PROTECT 방폭 패널의 기본 형상은 가로·세로 길이가 300mm × 100mm인 면적을 갖는 플레이트로 모델링하였으며, 특수나노소재의 두께를 변수로 하여 총 4개를 모델링하였다.



[PROTECT 방폭 패널의 유한요소해석 모델]

Material	Variables	Details
PROTECT panel	PP-3-15	Steel plate : 3mm(2EA) Nano-composite : 20mm
	PP-3-20	Steel plate : 4mm(2EA) Nano-composite : 20mm
	PP-3-25	Steel plate : 5mm(2EA) Nano-composite : 20mm
	PP-3-30	Steel plate : 2.5mm(2EA) Nano-composite : 25mm

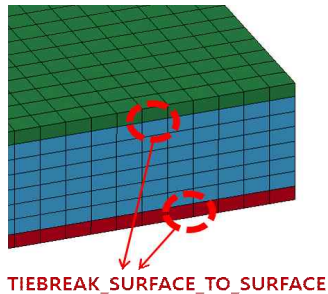
패널에 가해지는 충격하중은 낙하충격 실험과 동일한 크기인 지름 20mm, 질량 45.62kg의 낙하 추(Drop-weight)를 통하여 전달되도록 하였으며, 솔리드 요소(Solid element)가 적용되었다.

해석 모델에는 유한요소로 8절점 육면체를 적용하였으며, 한 개의 요소는 5mm×5mm×3mm 크기로 나누었다. PROTECT 방폭패널의 양 지점부는 x, y, z 방향으로 변위에 대하여 구속하였으며, 낙하 추(Drop-weight)와 PROTECT 방폭 패널 사이에는 LS-DYNA의 AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 옵션을 사용하여 충돌을 정의하였다. 충격 에너지는 낙하 추를 통하여 PROTECT 방폭 패널에 전달되며, 실험과 같은 조건인 낙하 추의 초기속도 5.04m/s, 충격에너지 588J를 적용하였다.

• 경계 조건

PROTECT 방폭 패널은 강판 사이에 특수나노소재를 주입하는 방식으로 제작하게 되며, 강판과 특수나노소재 사이에는 부착력이 발생한다. 두 재료 사이의 부착 파괴는 인장 및 전단 부착파괴강도에 의하여 결정된다. 계면의 인장 및 전단응력이 파괴강도에 도달하지

않았을 때에는 강판과 특수나노소재가 완전 일체거동을 한다. 따라서 강판과 특수나노소재 간의 부착 파괴를 고려하기 위하여 부착강도 실험결과를 바탕으로 두 재료 사이의 계면에 LS-DYNA의 TIEBREAK_SURFACE_TO_SURFACE 옵션을 사용하여 부착력을 정의하였다.



[부착강도 모델링]

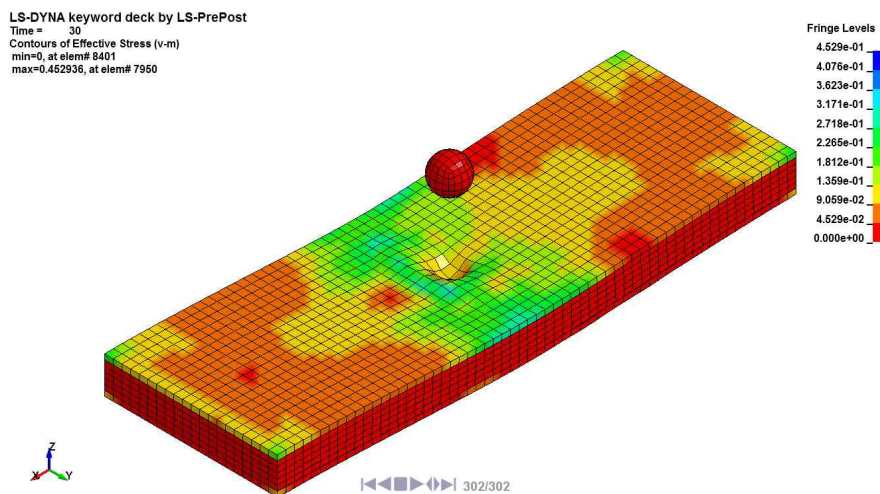
Category	Value
Tensile Failure Stress (MPa)	6.67
Shear Failure Stress (MPa)	10.47

[부착강도 계수]

• 해석 결과

PROTECT 방폭 패널의 충격하중에 대한 유한요소해석 결과는 아래 그림과 같다. 실험 결과와 유사한 국부적인 소성 변형이 발생함을 확인하였으며, 낙하 추의 충돌이 발생한 부분에서 특히 큰 변형을 보였다.

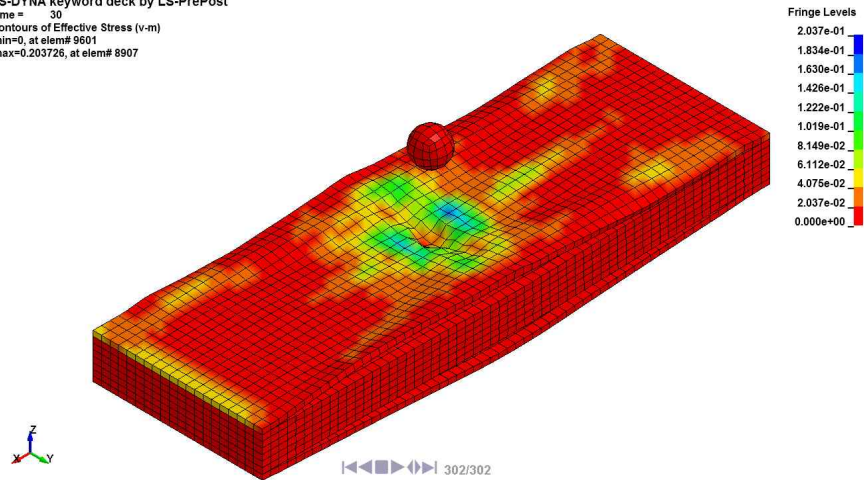
충격 시 발생한 하중에 대한 실험 결과와 해석 결과를 비교하였다. 실험보다 해석에서 약 14% 높은 최대하중이 발생하였으며 이른 시간에 최대하중에 도달하는 것으로 나타났는데, 이는 실험에서 발생하는 지점 조건의 변화와 타격면의 표면상태 등의 영향으로 판단된다.



(1) PP-3-15

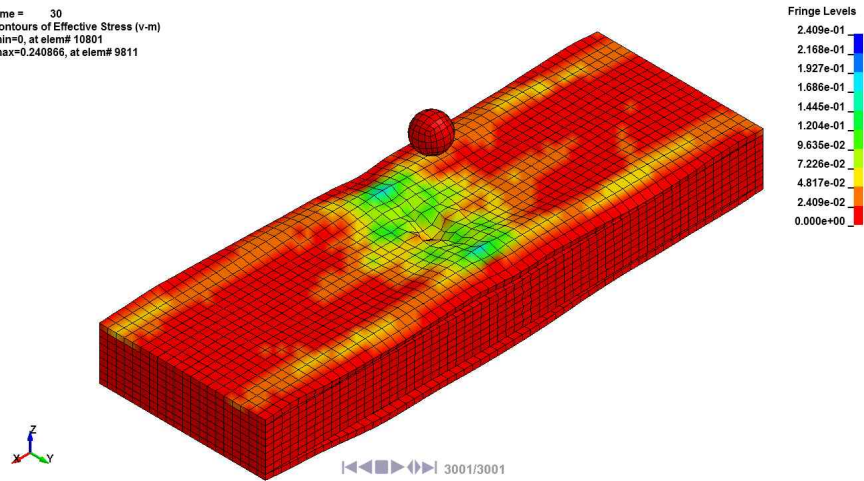
충격하중에 대한 PROTECT 방폭 패널의 해석 결과

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
 Time = 30
 Contours of Effective Stress (v-m)
 min=0, at elem# 9601
 max=0.203726, at elem# 8907



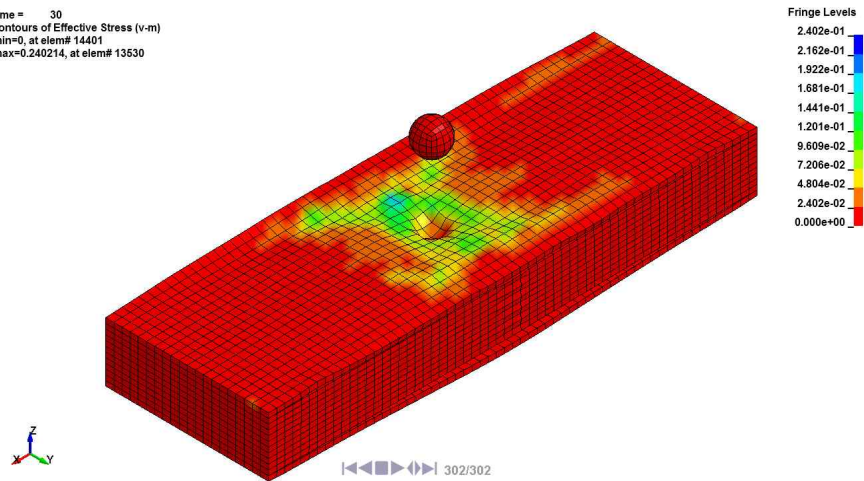
(2) PP-3-20

Time = 30
 Contours of Effective Stress (v-m)
 min=0, at elem# 10801
 max=0.240866, at elem# 9811



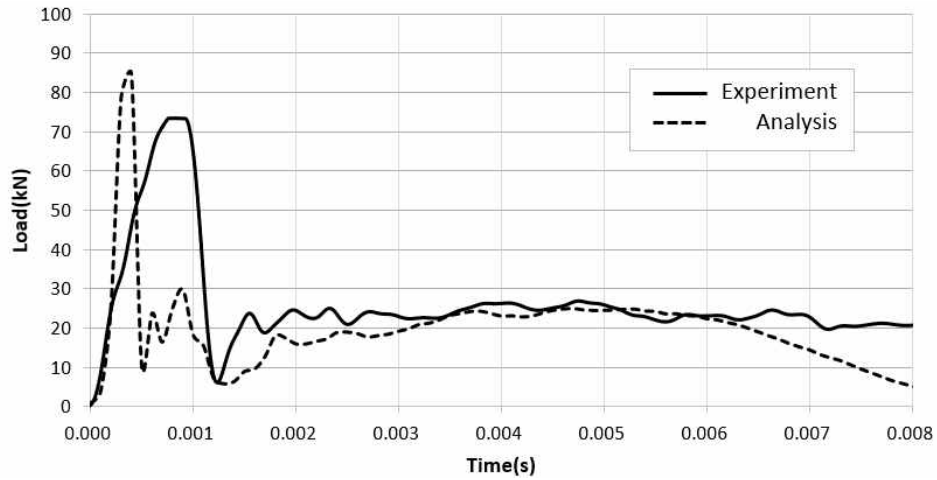
(3) PP-3-25

Time = 30
 Contours of Effective Stress (v-m)
 min=0, at elem# 14401
 max=0.240214, at elem# 13530



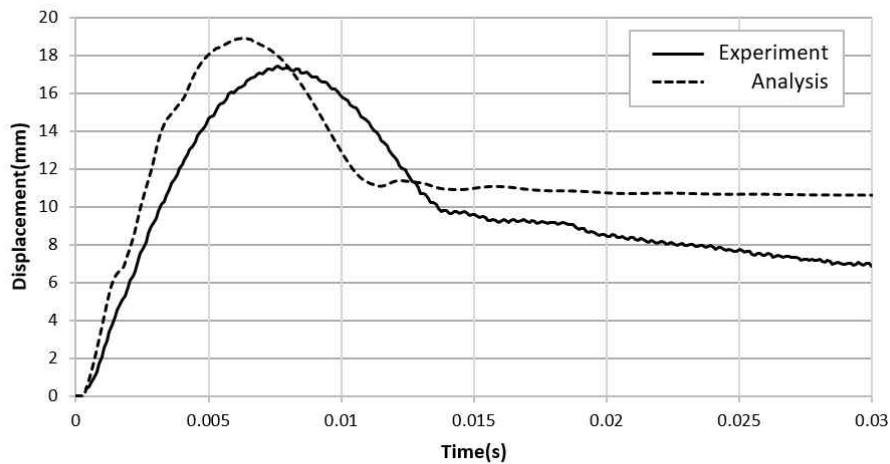
(4) PP-3-30

[충격하중에 대한 PROTECT 방폭 패널의 해석 결과(계속)]

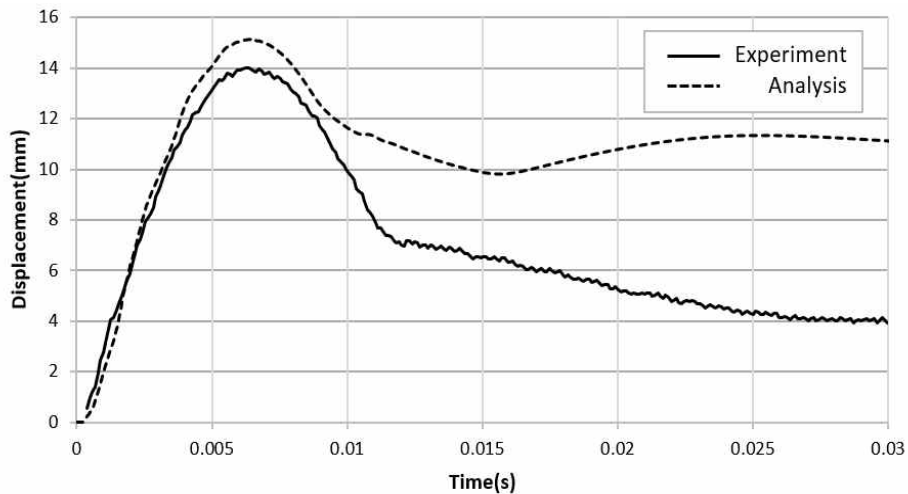


[시간-하중 그래프 비교]

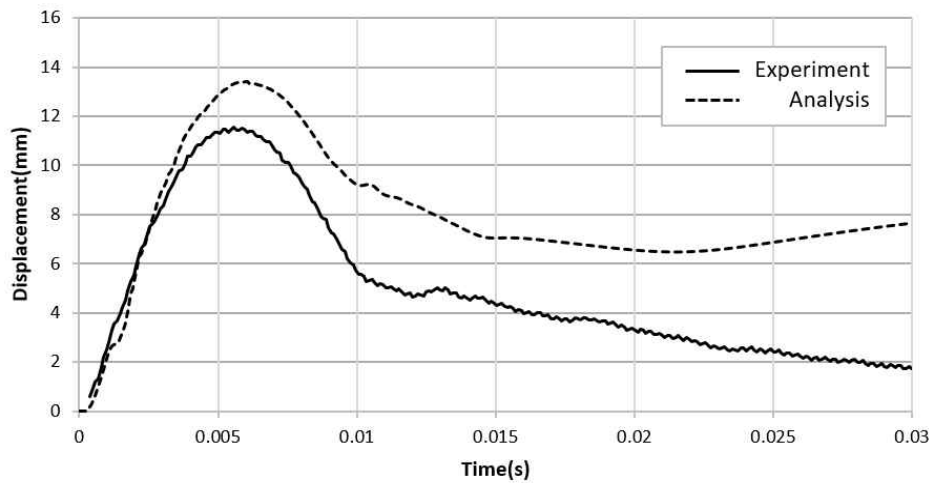
PROTECT 방폭 패널의 충격 실험과 유한요소해석 결과를 비교하였다. 모든 조건에서 실험과 해석이 비교적 유사한 결과를 나타내었으며, 특히 PP-3-20의 경우 실험과 해석에서 최대 변위의 오차가 6% 미만으로 나타났다.



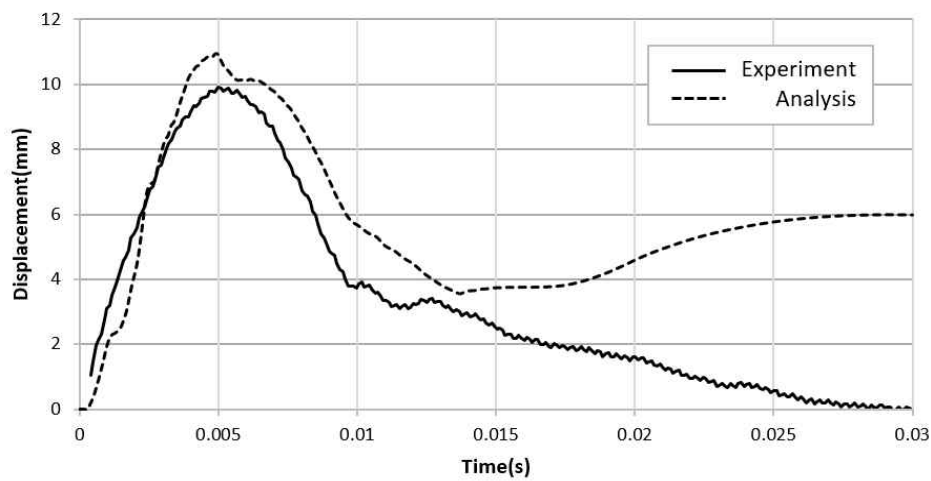
[시간-변위 그래프 비교(PP-3-15)]



[시간-변위 그래프 비교(PP-3-20)]



[시간-변위 그래프 비교(PP-3-25)]



[시간-변위 그래프 비교(PP-3-30)]

PROTECT 방폭 패널의 충격 실험과 유한요소해석 결과의 최대 변위를 비교하였다. 실험보다 해석에서 다소 높은 최대 변형이 발생하였는데 이는 재료 강도 모델링의 과소평가로 인한 것으로 판단된다. 또한 해석과 실험 결과에서 잔류 변형에 대한 비교가 어려운데 이는 타격 시 발생하는 레이저 변위계의 측정오차로 인한 영향으로 판단된다.

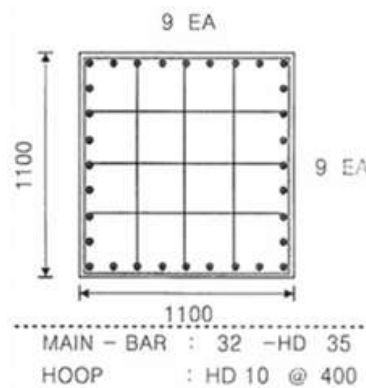
Variables	Category	Maximum Displacement (mm)	Error
PP-3-15	Experiment	17.3	8%
	Analysis	18.9	
PP-3-20	Experiment	14.0	6%
	Analysis	14.9	
PP-3-25	Experiment	11.4	14%
	Analysis	13.3	
PP-3-30	Experiment	9.9	9%
	Analysis	10.9	

[실험과 해석의 최대 변위 비교]

■ 폭발하중에 대한 유한요소해석

PROTECT 방폭 패넌의 충격 실험과 해석 결과를 통해 실험과 해석이 비교적 유사한 거동을 나타냄을 확인하였다. 여기에서 도출한 해석기법을 바탕으로 실제 기둥에 PROTECT 방폭 패넌이 설치되었을 때 보강 효과를 예측하고자 폭발하중에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 대상구조물은 실제 방폭 보강이 실시된 건물의 기둥을 채택하였으며 기존 기둥, 100mm 철근콘크리트 보강이 실시된 기둥, 15mm 강판 보강이 실시된 기둥, PROTECT 방폭 패넌 보강이 실시된 기둥을 모델링하여 방폭 성능을 비교하고자 하였다.

해석에 사용된 기둥은 1,100mm × 1,100mm의 단면을 가지는 길이 3m의 철근콘크리트 기둥이며, 콘크리트의 강도는 45MPa이다.

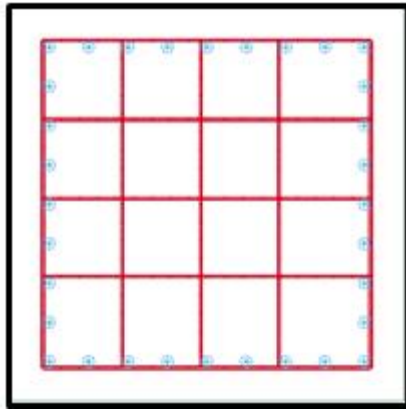


[기둥 단면도]

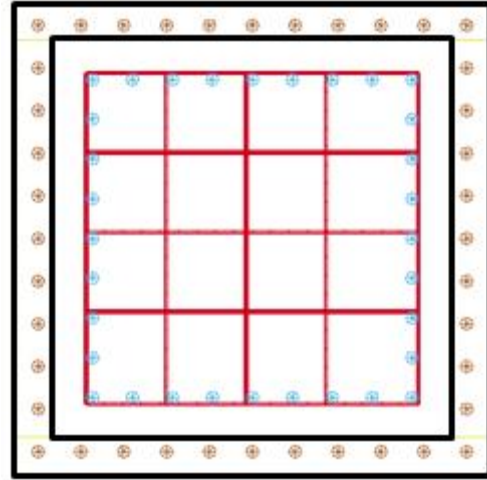
해석에 사용된 변수는 표 5.8과 같으며, 각 변수에 대한 단면은 아래 그림과 같다. 기존 기둥과 각기 다른 방식으로 보강된 기둥 사이의 방폭 성능을 비교하고자 하였다. PROTECT 방폭 패넌의 제원은 강판 3mm와 특수나노소재 20mm로 구성된 PP-3-20을 채택하였다.

Variables	Reinforcement	Remarks
Non-R	Non- Reinforced	-
RC-R	100mm RC	Concrete : 45MPa, 100mm Rebar : 40-HD35
SP-R	15mm Steel Plate	Steel Plate : 15mm
PROTECT-R	PROTECT Panel	Steel Plate : 3mm (2EA) Nano-composite : 20mm

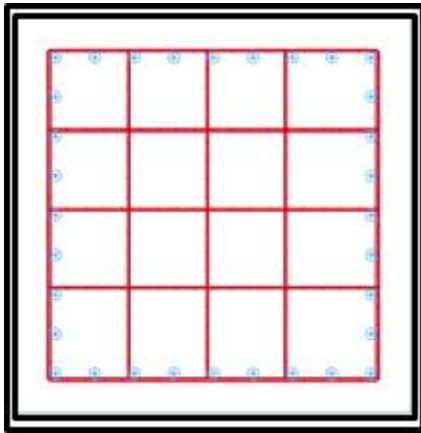
[폭발하중 기둥 해석 변수]



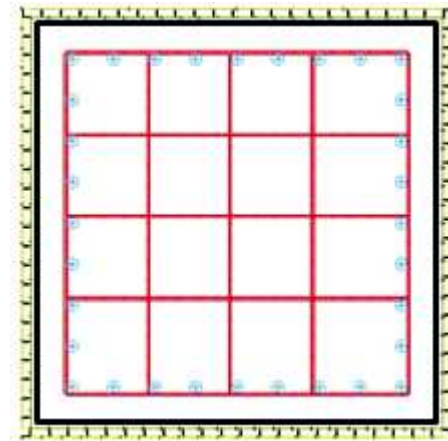
(a) Non-R



(b) RC-R



(c) SP-R

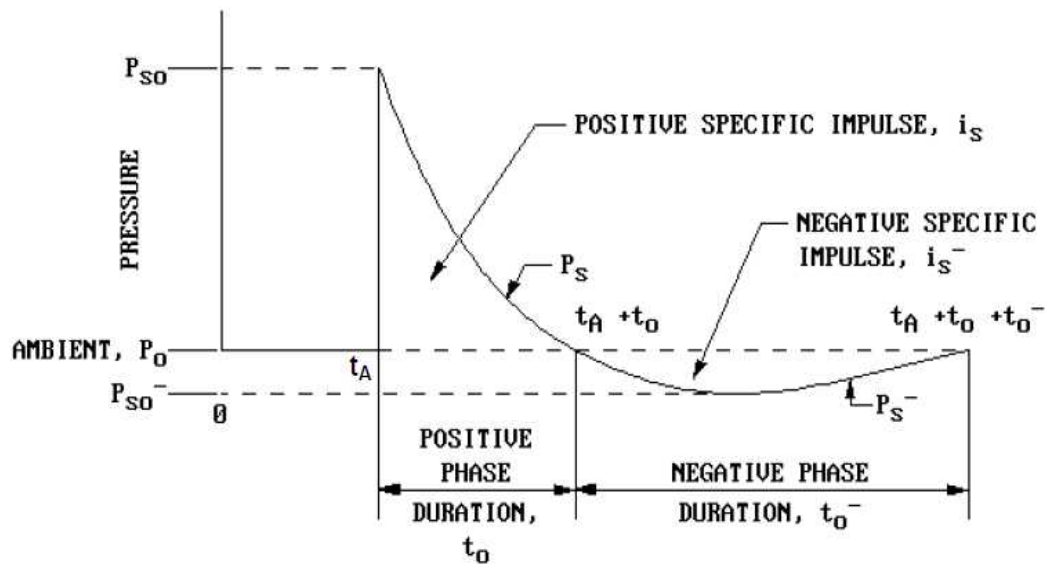


(d) PROTECT-R

[변수에 따른 기둥 단면도]

• 폭발하중 모델

폭발하중의 모델링은 그림 5.13과 같이 대표적인 방폭설계지침서인 미국방문서 UFC 3-340-02에서 제시하는 폭발하중의 시간이력을 사용하였다. 이 지침서에서는 폭발하중을 산정하기 위한 폭발변수들을 경험적인 차트의 형태로 나타낸다. 이 차트에서 제공되는 폭발하중의 중요 변수로는 입사압(P_s), 입사충격량(I_s), 반사압(P_r), 반사충격량(I_r), 충격파속도(U), 충격파 도달시간(t_a), 정압지속기간(t_o) 등이 있으며 변수들의 값들은 환산거리 (scaled distance, Z)에 의한 함수로써 정의된다. 여기서 $Z = R/W^{1/3}$ 이며, R 은 폭발의 중심으로부터의 거리이고 W 는 폭발물의 질량이다. 폭발물의 질량은 TNT 등가질량을 통하여 설정하게 되며, FEMA-453에서는 폭발위협인자들의 TNT 등가질량을 제시하고 있다.



[폭발하중의 시간이력]

	Pipe Bomb	5 lbs 2.3 kg
	Suicide Belt	10 lbs 4.5 kg
	Suicide Vest	20 lbs 9 kg
	Briefcase/ Suitcase Bomb	50 lbs 23 kg

[폭발인자 TNT 등가질량]

폭발하중은 언급된 UFC 3-340-02 차트를 사용하여 산정할 수 있으며, 이 차트의 폭발변수 및 폭발압력 시간이력은 다양한 조건에 대하여 수치적으로 구할 수 있는 프로그램인 ConWep으로 전산화 되어 방폭 설계에 활용된다. 폭발해석의 경우 Coupled analysis와 Uncoupled analysis를 필요에 따라 선택하여 수행할 수 있다. LS-DYNA의 옵션인 LOAD_BLAST와 같은 내장 하중함수를 사용하는 경우는 Uncoupled analysis가 되며, ALE(Arbitrary-Lagrangian-Eulerian)와 같은 기능을 활용하여 유체-구조물 상호해석을 수행하는 경우는 Coupled analysis가 된다. Uncoupled analysis는 구조물을 강체로 가정하여 얻어진 폭발압력을 구조물에 하중으로 재하하여 구조물의 응답을 계산하는 방법으로 구조물과 폭발압력 사이의 상호작용을 고려하지 않고 구조물을 강체로 가정하기 때문에 실제보다 폭발하중을 과대평가하게 되는 경향을 갖는다. Coupled analysis는 폭발압력을

전달하는 매개체인 대기 또는 지반을 함께 모델링하고 유체-구조물 상호작용해석을 통한 폭발압력하중과 이에 대한 구조물의 응답을 함께 계산하는 방법으로 보다 정확한 구조물의 응답을 얻을 수 있지만, 해석 시간에 있어서는 불리한 점을 갖는다. 일반적으로 폭발물과 구조물 사이에 장애물이 존재하지 않으며 대기 중에서 폭발이 발생하는 경우에는 Uncoupled analysis를 통하여 필요한 구조물의 응답을 계산할 수 있으며, 그 이외의 경우에는 Coupled analysis의 적용을 고려할 필요가 있다.

본 해석에서는 폭발물과 구조물 사이에 장애물이 존재하지 않는 조건을 채택하여 Uncoupled analysis로 수행하였으며, LS-DYNA의 ConWep Air-Blast Loading Model을 사용하였다. 설계하중은 해당 건물의 방폭 설계 시에 반영된 하중인 25kg TNT, 폭발이격 거리 2m로 설정하였다. 보강재를 제외한 구조부재(원 기둥 1,100mm × 1,100mm)의 응답을 확인하여 구조물의 방폭 성능을 평가하고자 한다.

• 콘크리트 재료 모델

본 해석에서 사용된 콘크리트의 재료 모델링은 LS-DYNA에서 가장 많이 사용되고 있는 모델 중 하나인 MAT_CSCM_CONCRETE를 사용하였다. CSCM (Continuous Surface Cap Model)은 스트레스 텐서를 이용하여 재료 강도를 구현하며 아래 식과 같이 Stress invariant를 산정한다.

$$Y(I_1, J_2, J_3) = J_2 - R(J_3)^2 F_f^2(I_1) F_c(I_1, \kappa)$$

여기서, R = Rubin three - invariant reduction factor

F_f = Shear failure surface

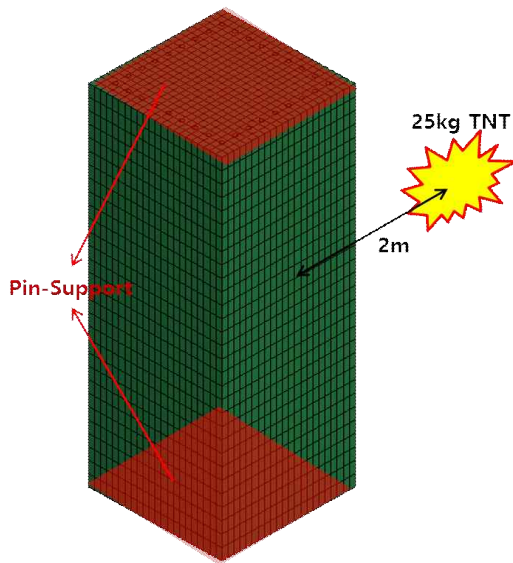
F_c = Cap hardening surface

κ = Cap hardening parameter

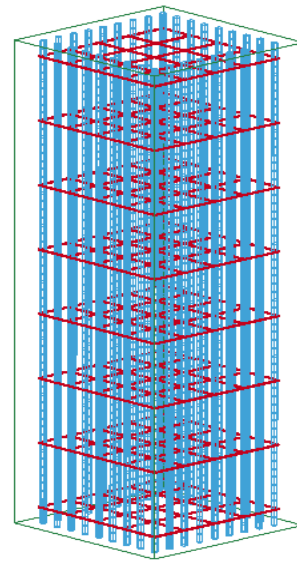
• 경계 조건

해석에서 사용된 지점 및 하중조건은 3m의 기둥 양 끝단에 Pin-support 조건을 입력하였으며, 25kg의 TNT가 2m 이격된 폭발하중을 설정하였다.

콘크리트와 철근 사이의 Coupling 효과를 고려하기 위하여 LS-DYNA의 LAGRANGE_IN_SOLID 옵션을 사용하여 철근 배근을 모델링하였다. 또한 PROTECT 패널과 기존 기둥 사이의 에폭시 부착을 모델링하기 위하여 TIEBREAK_SURFACE_TO_SURFACE 옵션을 사용하여 콘크리트와 PROTECT 패널 강판 사이의 계면에 부착력을 정의하였다.



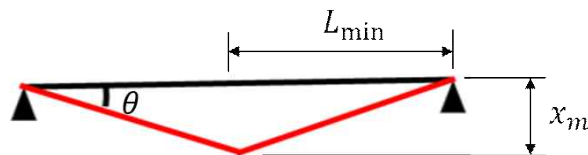
[지점 및 하중조건]



[철근 배근 모델링]

• 결과 분석 기준

기둥의 방폭 성능을 평가하기 위하여 최대 변형, 잔류 변형 및 지점 회전각을 이용하였다. 지점 회전각은 SDOF 해석에서 사용되는 값으로 아래 식을 통하여 계산하였다.



[SDOF 해석 개요]

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{x_m}{L_{\min}} \right)$$

여기서, x_m 은 최대 변위이며 $L_{\min}$ 은 지점과 최대 변위 발생 위치까지의 최소거리이다.

기둥의 성능을 평가하기 위한 기준으로는 ASCE 59-11 ‘Blast protection of buildings’에서 규정하는 철근콘크리트의 부재 응답기준을 사용하였으며, 여기에서는 지점 회전각을 통하여 부재의 응답기준을 설정하고 있다.

ASCE 59-11에서는 부재의 응답기준을 3가지의 Level of protection으로 제시하고 있으며, 각 Level of protection에 해당하는 철근콘크리트의 지점 회전각은 아래 표와 같다.

Level of Protection	Remarks
Low Response	Localized building/component damage. Building can be used; however repairs are required to restore integrity of structural envelope.
Medium Response	Widespread building/component damage. Building cannot be used until repaired. Total cost of repairs is significant.
High Response	Building/component has lost structural integrity and may collapse due to environmental conditions (i.e. wind, snow, rain). Total cost of repairs approach replacement cost of buildings

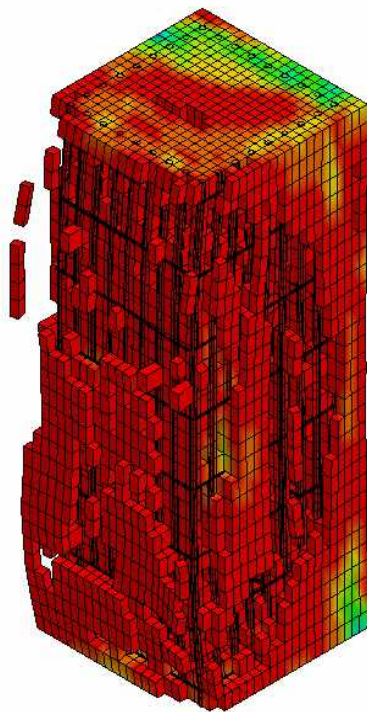
[Level of protection에 따른 부재 손상 정도]

Element Type	Support Rotation(°)		
	Low	Medium	High
Beams	1	2	4
Slabs	2	4	8
Beam-Columns	1	2	4
Shear Walls	1	1.5	2

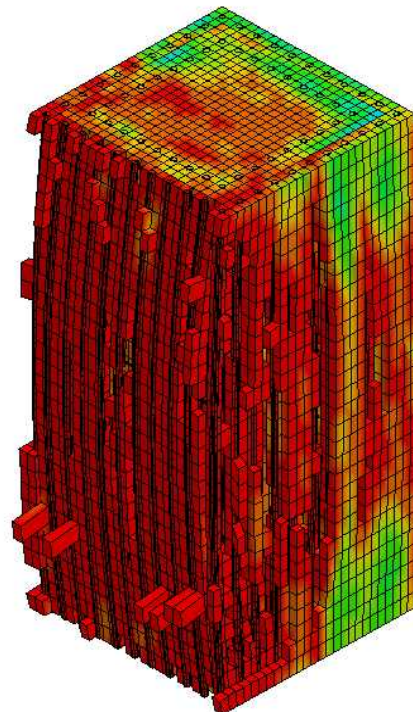
[철근콘크리트 부재 응답기준]

• 해석 결과

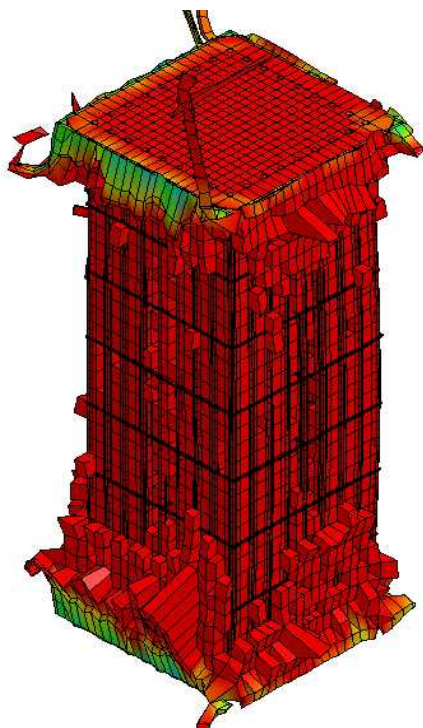
각 변수별로 폭발하중에 대하여 유한요소해석을 수행한 결과는 아래 그림과 같으며, 보강재를 제외한 구조부재의 형상을 나타내었다. 모든 해석에서 폭발하중을 받는 면의 반대쪽 면의 변형 및 파괴가 가장 크게 나타났으며, 폭발의 높이로 설정한 기둥의 중앙부(1.5m 지점)에서의 최대 변위가 발생하였다.



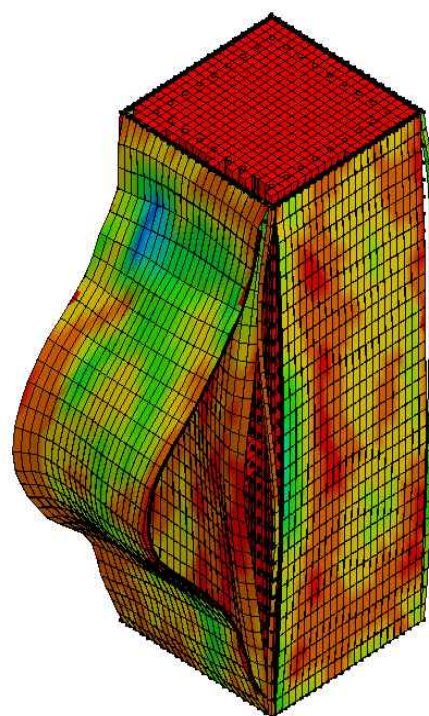
(a) Non-R



(b) RC-R

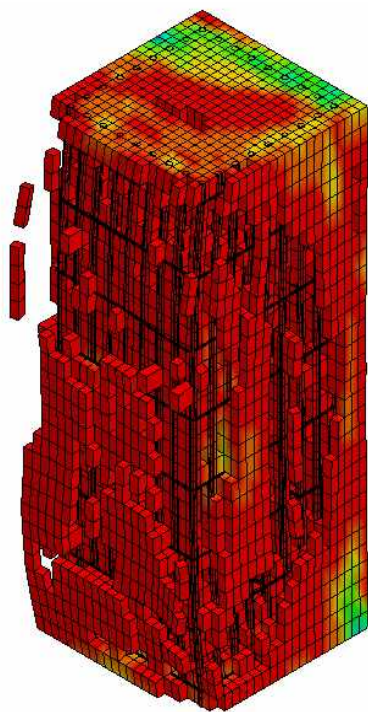


(c) SP-R

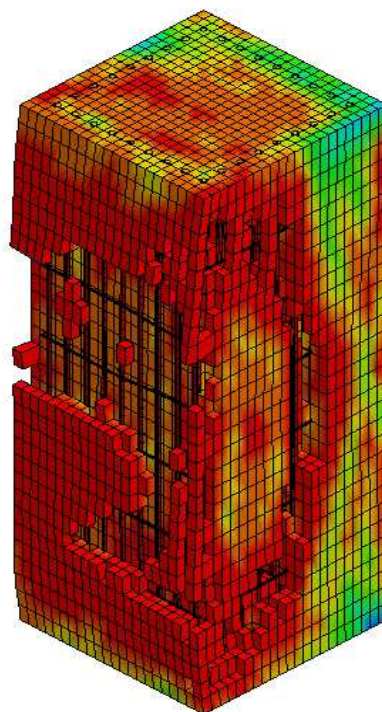


(d) PROTECT-R

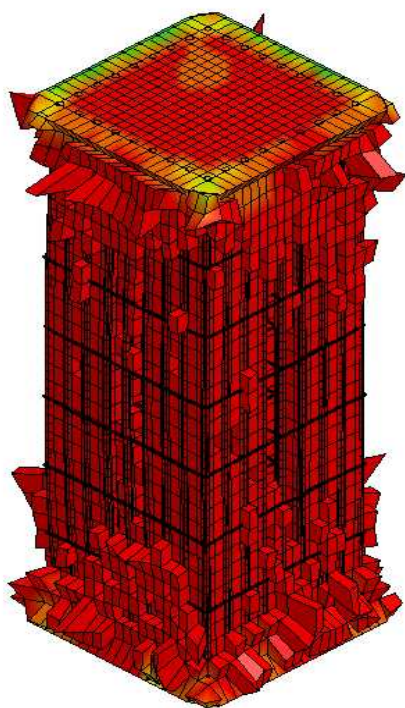
[폭발하중 해석 결과]



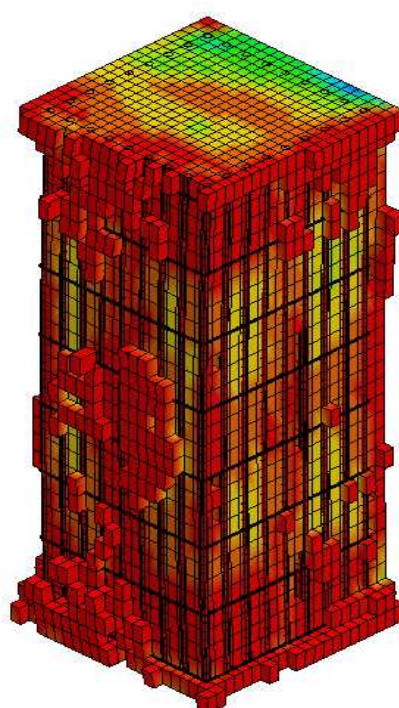
(a) Non-R



(b) RC-R



(c) SP-R

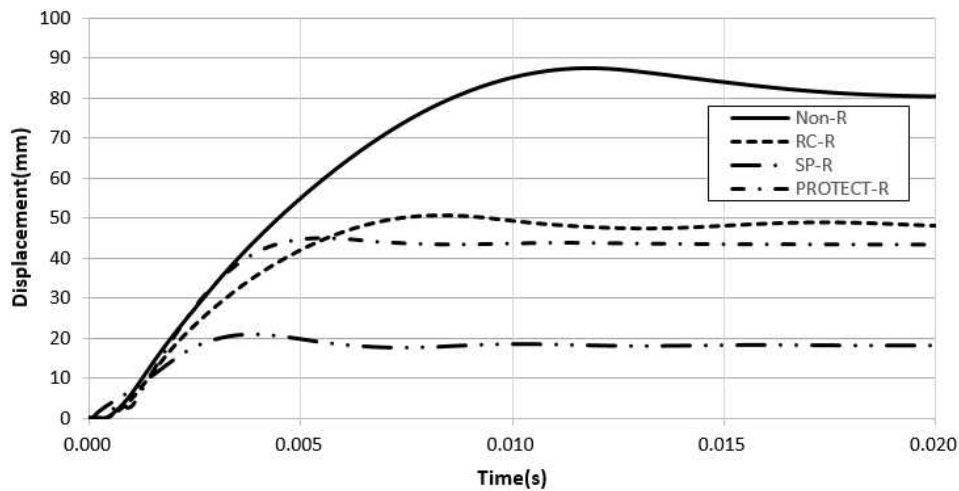


(d) PROTECT-R

[폭발하중 해석 결과(보강재 제외)]

보강을 실시하지 않은 기존 기둥의 경우, 콘크리트 외피가 파손되면서 내부의 철근이 노출되는 현상이 발생하였다. 100mm 철근콘크리트로 보강한 기둥은 원 기둥(구조부재)의 손상은 변위가 가장 크게 발생하는 기둥의 중앙부 외에는 거의 발생하지 않았으며, 보강재에서만 콘크리트 피복이 파손되면서 보강철근이 노출되었다. 15mm 강판으로 보강한 기둥의 경우, 보강재가 완전히 파손되면서 이로 인한 콘크리트 피복의 손상이 크게 발생함을 확인할 수 있었다. PROTECT 방폭 패널로 보강한 기둥은 구조부재의 손상이 강판 보강을 실시한 기둥에 비하여 적게 발생하는 것으로 나타났으며, 패널 자체의 소성변형이 크게 발생하여 폭발압력에 대한 구조부재의 변형을 저감시키는 것으로 나타났다.

각 변수에 대한 해석에서 발생한 시간-변위 그래프는 아래 그림과 같다. 이때의 변위는 기둥의 중앙부(1.5m)의 최대 변형량을 기준으로 하였다.



[폭발하중에 대한 시간-변위 그래프]

각 변수에 대한 해석에서 발생한 잔류 변형을 기준으로 지점 회전각을 계산하여 ASCE 59-11에서 규정하는 Level of protection을 확인한 결과는 아래와 같다.

Variables	Displacement (mm)	Support Rotation	Level of Protection
Non-R	80.4	3.07° (>2°)	High Response
RC-R	48.1	1.84° (<2°)	Medium Response
SP-R	43.4	1.66° (<2°)	Medium Response
PROTECT-R	18.2	0.70° (<1°)	Low Response

[지점 회전각 계산 결과]

기존 기둥은 Level of protection에서 Medium response를 불만족하는 것으로 나타났다. 그러나 100mm 철근콘크리트로 보강한 기둥과 15mm 강판으로 보강한 기둥의 경우 거의 비슷한 변형을 보이며 Medium response를 만족하는 것으로 나타났다. PROTECT 방폭 패널로 보강한 경우에는 0.70°의 지점 회전각을 가져 Low response에 해당하는 1°보다 작은 값을 나타내 Low response를 만족하는 것으로 확인되었다.

즉, PROTECT 방폭 패널로 기둥을 보강할 경우 100mm 철근콘크리트로 보강하는 방법에 비하여 보강 단면을 약 75% 줄일 수 있으며, 콘크리트의 취성적 파괴로 인한 2차 피해를 최소화할 수 있다. 또한 15mm 강판으로 보강하는 방법에 비하여 40%의 자중 감소 효과를 얻을 수 있으며, 에너지 흡수 능력에서 더욱 우수한 성능을 가진다고 할 수 있다.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

연차	연구목표	세부연구목표	연구개발 수행 내용
1차년도	방폭 패널의 요구 성능을 만족시킬 수 있는 특수나노소재 개발	FEM 해석을 통한 특수나노소재의 소요 충격 흡수 능력 도출	- 소요 충격에너지 산정 - 특수나노소재 물성치 도출 - 강판의 재료 특성 파악 - 충격하중 재하 시 PROTECT 패널의 응답 특성 파악
		FEM 해석을 통하여 방폭 성능에 주요한 영향을 주는 물성치 도출	- 충격에너지의 변화에 따른 PROTECT 패널의 최대 변위 및 회전각 분석 - PROTECT 패널의 시간에 대한 응답 특성 파악
		특수나노소재로 사용 가능한 기존 소재 조사	- 기존 방폭 보강 구조물로 사용되고 있는 소재 조사(Concrete Sandwich Panel, Blast-Resistant Walls, SPS)
		사용가능한 소재의 물성치 파악	- 기존 수지충전형 패널의 충전재에 대한 조사(SIP, Metawell Panel, Green Floor)
		기존의 소재를 개량한 특수나노소재의 적정 배합 연구	- 고밀도의 특수나노소재 개발을 위한 적정 배합비 연구 - 강판과의 부착성능 확보를 위한 양생조건 확인(최소 6MPa 이상)
		개발된 소재의 성능검증을 위한 재료실험 수행	- 특수나노소재에 대한 재료실험 수행(밀도, 탄성계수, 포아송비, 인장강도 등)
		국내외 방폭 설계 기준 조사 및 비교검토	- 국내 방폭 설계 기준 조사(산업안전기준법, 건축물 테러예방 설계가이드라인) - 국외 방폭 설계 기준 조사(UFC-3-340-02, FEMA 453, PDC TR-06-08)
		국내외 방폭 보강 기법 및 그 효과에 대한 조사	- 철근콘크리트 보강법, 강판 보강법 등
		폭발하중 및 구조물 응답특성에 대한 조사	- 폭발하중 특성(TNT 등가계수 및 환산거리) - 연성률과 회전각을 통한 구조물 응답 확인

2차년도	시작품 제작 및 내충격 실험을 통한 성능 검증	FEM 해석을 통 하여 특수나노소 재와 강판의 최 적 두께비율 도 출	- PROTECT 패널의 각 두께별 FEM 해석 수행 - 3mm의 강판과 20mm의 특수나노소재를 사용
		재료실험을 위한 시편 제작	- 강판 및 특수나노소재의 시편 제작 - 강판 및 특수나노소재에 대한 재료실험 수행
		방폭성능 확보를 위한 강판의 제 원 확보	- ASTM A36(SS400) 강판 제원 확보
		시작품 도면 작 성	- 제작 편의성을 고려한 시작품 설계 - 시작품 도면 작성
		시작품의 내충격 실험을 통한 에 너지 흡수능력 확인	- 충격에너지에 대한 PROTECT 패널의 시간-변형 그래프 도출 - 충격력-시간 그래프를 통한 에너지 흡수능력 확인
		내충격 실험 결 과를 바탕으로 100mm 콘크리 트 보강의 내충 격 성능과 비교	- 콘크리트 100mm의 실험결과와 PROTECT 패널의 실험결과 비교 - 26mm의 PROTECT 패널로 콘크리트 100mm 이상의 내충격 성능 확보 가능
		실험 및 해석을 통해 얻어진 PROTECT 패널 의 방폭 성능을 고려하여 적절한 설계 방법 도출	- PROTECT 패널의 두께 별 성능을 고려한 적절한 설계 방법 도출
		PROTECT 패널 의 조립 및 부착 을 위한 보강 상 세 고안	- PROTECT 패널의 조립 및 부착 보강 상세

■ 성과목표 및 성과지표

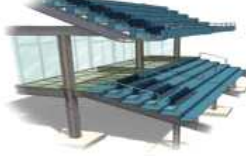
성과목표	성과지표	측정방법	목표치	달성치	가중치
자료조사	관련 문헌 조사 10편	관련 문헌 제시	10편	115편	0.5
소요물성치 도출	해석결과를 통한 소요치 도출	해석결과 제시	1건	3건	2.5
신소재 개발	선행 해석 결과를 통한 목표치	신소재 제시	1건	1건	3
부착강도	선행 해석 결과를 통한 목표치	실험 결과 제시	1건	1건	3
강판과 나노소재의 최적 두께비 도출	$\mu_{\max} = 20$, $\theta_{\max} = 12^\circ$ 기준 만족	해석결과 제시	1건	1건	2
적정 진단보강물 형상 및 배치 도출	$\mu_{\max} = 20$, $\theta_{\max} = 12^\circ$ 기준 만족	해석결과 제시	1건	1건	2
시작품 제작	시작품 제작 3개 이상	시작품 제작	3개	85개	4.5
시작품의 내충격 실험	충격량 16.3J에 저항	실험결과 제시	1건	1건	2
실제 구조물 보강에 적용하기 위한 기준 제시	보강 기준안 제시	보강 설계법 제시	1건	1건	0.5

2. 관련 분야 기여도

구 분	내 용
기술적 측면	• 새로운 방폭 보강재료에 대한 원천기술 확보 -국내에 방폭용 보강재료를 생산하는 업체 및 기술이 없는 실정 -개발된 제품을 개량하여 보강하는 건물의 상황 및 조건에 맞도록 제품의 다양성 추구 • 충격흡수에 유리한 신소재 개발 -개발한 신소재를 본 방폭재 개발 사업 외에 다른 제품에도 응용하여 그 사용범위를 확대 가능 -친환경적인 신소재 개발로서 건설폐기물의 재사용 개념 도입
경제· 산업적 측면	• 수지 충전형 패널의 국산화 및 시장개척 -기술 및 공정 국산화로 단가를 절감하여, 국내에 합리적인 가격으로 제품 공급 가능 -건물의 보수 보강 시장의 개척을 통해 잠재적인 경제효과 기대 (리모델링에 대한 정부의 규제 완화로 보수 보강시장에 대한 관심이 높아질 것으로 기대됨)

제5장. 연구개발성과의 활용계획

다중이용시설물



폭발사고위험시설



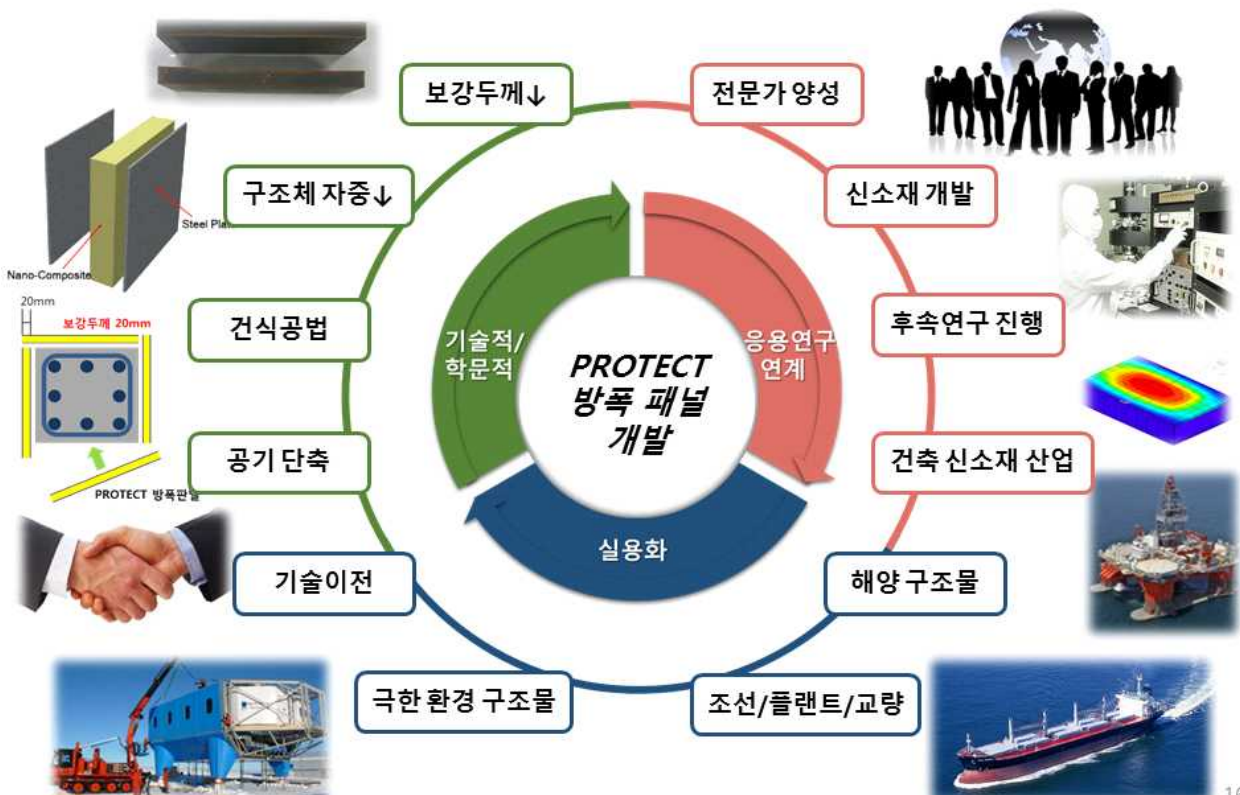
테러위험시설



낙하물위험시설



- 화재 또는 폭발 사고 발생 시 막대한 인명피해가 예상되는 장소의 안전성 확보
(예) 경기장, 대형마트 등 인파가 몰리는 건물 또는 시설)
- 폭발가능성이 있는 시설에 대한 안전성 확보
(예) 발전소, 변전소, 정유시설, 가스시설 등)
- 테러가능성이 있는 시설에 대한 안전성 확보
(예) 정부청사 및 관공서, 경찰서 등)
- 건설현장에서 시공 중인 고층부로부터 낙하물에 의한 위험에 노출되어 있는 시설에 대한 안전성 확보
- 군수용으로 응용가능
(예) 탱크, 장갑차, 병커)



제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

해당사항 없음.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 : 일반

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

해당사항 없음.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	기동 보강용 PROTECT 방폭 패널의 충격저항성능	고려 대학교	-	대한건축 학회논문집 -구조계	-	2017.02.01	단독	-
2	논문	고온에 노출된 PCM 충전형 바닥 시스템의 거동 특성	고려 대학교	-	한국공간 구조학회	-	2017.06.01	중복	-
3	기타	Blast resistance on a composite panel with infilled nano-composite	고려 대학교	-	Constructi on and Steel Structure	-	2016.09.22	단독	-
4	기타	iFLASH 시스템의 남북교회 현장 적용	고려 대학교	-	대한건축 학회 학술발표 대회논문집	-	2015.10.29	단독	-
5	기타	PHC파일과 철골기둥을 연결하는 반구형 접합부의 서울 M지구 적용기술	고려 대학교	-	대한건축 학회 학술발표 대회논문집	-	2015.10.29	단독	-
6	기타	기동 방폭 보강용 PROTECT 패널의 충격저항성능 해석	고려 대학교	-	한국복합 신소재구조 학회	-	2016.04.21	단독	-
7	기타	PROTECT 방폭 패널로 보강된 기둥의 충격저항성능	고려 대학교	-	한국복합 신소재구조 학회	-	2017.04.20	단독	-

제11장. 기타 사항

해당사항 없음.

제12장. 참고 문헌

- LSTC. (2012). “LS-DYNA keyword user’s manual(version 971)”. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA.
- UFC 3-340-02. (2008). “Structures to resist the effects of accidental explosions”. Department of the Army and Defense Special Weapons Agency, Washington, DC, USA.
- ASCE 59-11. (2011). “Blast protection of buildings”. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.
- Dusenberry, D. O. (2010). “Handbook for blast resistant design of buildings”. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Canada.
- Smith, P. D., et al. (1994). “Blast and ballistic loading of structures”. Butterworth-Heinemann Ltd., Jordan Hill, Oxford, UK.
- Johnson, G. R., et al. (1983). “A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures”.
- Schwer, L. (2007). “Optional strain-rate forms for the Johnson Cook constitutive model and the role of the parameter ϵ_0 ”. 6th European LS-DYNA Users Conference.
- Seidt, J., et al. (2007). “High strain rate, high temperature constitutive and failure models for EOD impact scenarios”. SEM Annual Conference.
- Qi, H. J., et al. (2005). “Stress-strain behavior of thermoplastic polyurethane”. *Mechanics of Materials* 37(8): 817-839.
- Nguyen, M., et al. (2005). “Simulation of impact on sandwich structures”. *Composite Structures* 67(2): 217-227.
- Hosseinzadeh, R., et al. (2006). “Damage behavior of fiber reinforced composite plates subjected to drop weight impacts”. *Composites Science and Technology* 66(1): 61-68.
- Gonzalez, E., et al. (2012). “Simulation of drop-weight impact and compression after impact tests on composite laminates”. *Composite Structures* 94(11): 3364-3378.
- Chakradhara Rao, M., et al. (2011). “Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load”. *Construction and Building Materials* 25: 69-80.
- Sevkat, E., et al. (2009). “Drop-weight impact of plain-woven hybrid glass-graphite/toughened epoxy composites”. *Composites: Part A* 40: 1090-1110.
- Schubel, P. M., et al. (2007). “Impact and post impact behavior of composite sandwich panels”. *Composites: Part A* 38: 1051-1057.
- ASTM Standard D7136. (2015). “Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event”. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard D7766. (2011). “Standard practice for damage resistance testing of sandwich constructions”. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Yi, J., et al. (2006). “Large deformation rate-dependent stress-strain behavior of polyurea and

-
- polyurethanes". Polymer 47: 319-329.
- Sarva, S. S., et al. (2007). "Stress-strain behavior of a polyurea and a polyurethane from low to high strain rates". Polymer 48: 2208-2213.
- Raman, S. N., et al. (2013). "Experimental investigation on the tensile behavior of polyurea at high strain rates". Materials and Design 50: 124-129.
- Choung, J., et al. (2010). "Impact test simulations of stiffened plates using the micromechanical porous plasticity model". Ocean Engineering 37: 749-756.
- Mohotti, D., et al. (2014). "Strain rate dependent constitutive model for predicting the material behaviour of polyurea under high strain rate tensile loading". Materials and Design 53: 830-837.
- Amini, M. R., et al. (2010). "Numerical modeling of effect of polyurea on response of steel plates to impulsive loads in direct pressure-pulse experiments". Mechanics of Materials 42: 615-627.
- Edgren, F., et al. (2005). "Compressive failure of impacted NCF composite sandwich panels – characterisation of the failure process". Journal of Composite Materials 38(6): 495-514.
- Davies, G., et al. (2004). "Compression after impact strength of composite sandwich panels". Composite Structures 63: 1-9.
- Atas, C., et al. (2010). "On the impact response of sandwich composites with cores of balsa wood and PVC foam". Composite Structures 93: 40-48.
- Jung, A., et al. (2016). "Strain-rate effects in Ni/Al composite metal foams from quasi-static to low-velocity impact behaviour". Composites: Part A 85: 1-11.
- Akatay, A., et al. (2015). "The influence of low velocity repeated impacts on residual compressive properties of honeycomb sandwich structures". Composite Structures 125: 425-433.
- Ackland, K., et al. (2013). "Deformation of polyurea-coated steel plates under localised blast loading". International Journal of Impact Engineering 51: 13-22.
- Xue, L., et al. (2010). "Penetration of Dh-36 steel plates with and without polyurea coating". Mechanics of Materials 42(11): 981-1003.
- Grujicic, M., et al. (2010). "Blast-wave impact-mitigation capability of polyurea when used as helmet suspension-pad material". Material and Design 31(9): 4050-4065.
- Hosur, M., et al. (2005). "Manufacturing and low-velocity impact characterization of foam filled 3-D integrated core sandwich composites with hybrid facesheets". Composite Structures 69(2): 167-181.
- 이진영, et al. (2011). "저속 충격하중에서의 FRP Sheet 및 강섬유 보강 콘크리트의 거동 해석". 구조물진단학회지 15(4): 155-164.
- 류두열, et al. (2012). "섬유 보강재로 외부 보강된 강섬유 보강 콘크리트 슬래브의 충격저항 성능 평가". 한국콘크리트학회 논문집 24(3): 293-303.
- 김영우, et al. (2009). "하이브리드 PVA 섬유를 이용한 HPFRCCs의 휨 및 충격 성능 평가". 한국콘크리트학회 논문집 21(6): 705-712.
-

-
- 손성곤, et al. (2017). “기둥 보강용 PROTECT 방폭 패널의 충격저항성능”. 대한건축학회 논문집 - 구조계 33(2): 3-10.
- 정창균, et al. (2006). “트러스형 내부구조를 가지는 샌드위치 판재의 저속 충격 특성 연구”. 한국정밀공학회지 23(10): 80-87.
- 신광복, et al. (2007). “초저상 버스 차체 적용을 위한 샌드위치 패널들의 저속충격 특성 연구”. 대한기계학회 논문집 A권 31(4): 506-516.
- 정성우, et al. (2015). “크리깅 근사모델기반 복합충격 저항 샌드위치 패널 최적설계”. 한국CDE학회 논문집 20(4): 367-374.
- 백운경, et al. (2014). “폴리우레아 및 폴리우레탄 중간층이 샌드위치 패널의 충격에너지 흡수력에 미치는 영향”. 2014 한국CDE학회 동계학술대회 논문집: 1145-1147.
- 공경일, et al. (2011). “금속/폴리머 샌드위치 복합재의 기계적 특성 및 범퍼 응용 연구”. 한국자동차공학회 지회 학술대회 논문집: 57-64.
- 박정, et al. (2002). “가정변형률 솔리드 요소를 이용한 복합재 샌드위치 평판의 저속충격 해석”. 한국항공우주학회지 30(7): 44-50.
- 윤웅섭, et al. (2011). “폭발 및 충격하중을 받는 콘크리트 구조물의 거동”. 한국콘크리트학회지 23(2): 23-29.
- 조상래 (2014). “충격하중을 받는 강재구조물의 재료 특성”. 대한조선학회지 51(3): 13-18.
-

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.