

나노 전기방사기술을 융합한 등가감쇠 10%급 다기능 건축재료 및 구조시스템 개발 최종보고서

2018. 09. 03.

주관연구기관 / 전남대학교

나
노
전기방사기술을
응용한
등가감쇠
10%급
다기능
건축재료
및
구조시스템
개발
최종보고서

2018

국토사업본부

국토교통과학기술진흥원

2. 제출문

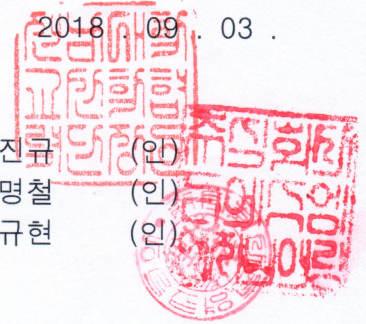
제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘나노 전기방사기술을 융합한 등가감쇠 10%급 다기능 건축재료 및 구조시스템 개발’(연구개발 기간 : 2015. 06. 19. ~ 2018. 06. 18. 과제)의 최종보고서 10부를 제출합니다.

주관연구기관명 : 전남대학교 산학협력단
참여기관명 : 에이엠지그룹 건축사사무소
참여기관명 : (주)진영코리아

(대표자) 송진규 (인)
(대표자) 정명철 (인)
(대표자) 박규현 (인)



주관연구기관책임자: 송진규
참여기관책임자: 정명철
박세훈

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

3. 보고서 요약서

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C0974 91-03	해당 단계 연구 기간	2017.06.19 ~ 2018.06.18	단계구분	3/3
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	나노 전기방사기술을 융합한 등가감쇠 10%급 다기능 건축재료 및 구조시스템 개발			
연구책임자	황재승	해당단계 참여 연구원 수	총: 29명 내부: 20명 외부: 9명	해당단계 연구개발비	정부:300,000천원 기업:100,000천원 정부 외: 천원 계:400,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 37명 내부: 27명 외부: 10명	총 연구개발비	정부:900,000천원 기업:300,000천원 정부 외: 천원 계:1,200,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	전남대학교 산학협력단			참여기업명 (주)에이엠지그룹 건축사사무소 (주) 진영코리아	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
요약				보고서 면수	

4. 국문 요약문

연구의 목적 및 내용	본 연구는 건축구조물의 내풍, 내진, 소음(충간)에 대한 사용성능 개선을 위하여 폴리우레탄(Polyurethane) 등 플라스틱 기반 Nano-Electrospinning 기술을 활용한 등가감쇠 10%급 고감쇠·저비용의 다기능 콘크리트 복합 신소재를 개발하는 것으로서, 그 유효성을 재료 및 구조실험을 실시하여 검증함과 동시에 이를 활용한 구조물 전체의 진동·소음 저감 및 내진성능 개선을 위한 구조시스템을 제안하여 성능개선효과를 해석적 연구를 통하여 검증하며, 최종적으로 파일럿 테스트를 실시하며 현장적용을 위한 시공 매뉴얼·기술지침서를 개발함. 1차년도(TRL 5단계) : 기반기술 도출 및 구축 ▪ Nano-Electrospinning 장비, 공정시스템 구축 및 폴리우레탄 기반 고감쇠 신재료 개발 ▪ 폴리우레탄 기반 고감쇠 신재료와 콘크리트 복합체의 분산성 평가 및 향상기술 개발 ▪ 폴리우레탄 기반 고감쇠 신재료의 전단시편시험에 의한 감쇠성능 검증 2차년도(TRL 5단계) : 핵심기술 개발 ▪ 성능기반 고감쇠 신재료의 확장 개발 및 비교 평가에 의한 최적화 ▪ 확장 개발된 고감쇠 신재료와 콘크리트 복합체의 분산성 평가 및 향상기술 최적화 ▪ 고감쇠 콘크리트 복합 신소재를 이용한 진동·소음성능 개선을 위한 구조부재·보강재·바닥판 개발 및 재료시험을 통한 감쇠성능의 검증 ▪ 고감쇠 콘크리트 복합 신소재를 이용한 내진성능 개선을 위한 구조재 개발 및 재료시험을 통한 감쇠성능의 검증 3차년도(TRL 6단계) : 파일럿 테스트 실시 및 실용화 기술 개발 ▪ 진동·소음성능 평가를 위한 구조실험·해석 실시 및 결과 분석·검증 ▪ 구조부재의 내진성능 평가를 위한 구조실험·해석 실시 및 결과 분석·검증 ▪ 파일럿 테스트 실시 및 실용화를 위한 시공매뉴얼·기술지침서 개발				
연구개발성과	▪ 국내·외 논문 게재 : 총 29편 중 SCI급 논문 12편 게재 ▪ 학술발표 : 총 40편 발표 ▪ 특허 출원·등록 : 출원 9건, 등록 3건 ▪ 기술이전 : 3건 ▪ 시제품 : 11건 ▪ 인력양성 : 4 ▪ S/W : 5건				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	▪ 본 연구에서 개발될 새로운 건축재료 가공 전기방사 시스템과 나노 가공기술을 활용함으로써 다양한 미래건축 융합신소재의 연구·개발에 효과적으로 적용될 수 있는 나노소재·구조를 개발할 수 있음. ▪ 기존 재료를 이용하여 구현하기 어렵거나 혹은 불가능했던 우수한 성능을 가지는 새로운 건축재료를 높은 생산성으로 가공할 수 있는 건축용 나노재료 가공의 원천기술을 확보하여, 향후 여러 고부가가치 응용제품군의 발굴 및 이들의 효과적인 구현을 위한 기반을 마련할 수 있음. ▪ 재료 자체가 가지는 감쇠성능 제어에 의한 자가감쇠 구조시스템에 의해서 사용성능 (내풍, 내진, 소음성능)을 개선 할 수 있는 건축기술의 혁신을 창출할 수가 있기 때문에 고부가가치 산업으로 연계가 가능함. ▪ 이상기후에 대비한 성능기반 콘크리트 건물의 내풍 및 내진설계 기술에 활용. ▪ 콘크리트 구조물의 내구성능 기술 활용 및 리모델링·리노베이션 전문기업, 구조설계사무소에 연계 기술 활용. ▪ 높은 내진성능이 요구되는 콘크리트 건물 등에 활용. ▪ 신개념 내풍 및 내진설계 기준 및 지침 제안서 활용. ▪ 고효율·저비용 기술로 인한 해외 기술 수출 활용. ▪ 지진위험도와 기대 성능수준에 따른 정확한 내진설계가 가능하여 건물의 고효율 내진성능 확보에 활용. ▪ 건축 분야에 국한되지 않고 도시 전반의 기반시설물 계획 및 국가 정책 등의 계획 기술 및 실용기술로 활용가능.				
핵심어 (5개 이내)	나노 전기방사	고감쇠	콘크리트 복합재료	진동/소음 제어	내진성능

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	This research aims at developing a high damping and cost-effective multi-functional concrete composite material with an equivalent damping of 10% level, which can efficiently enhance the wind-resistant, seismic, and sound-absorption performances. The novel concrete composite material is developed by employing a plastic nano-electrospinning process. Its characteristics are verified via mechanical and structural experiments. In addition, structural systems for reducing vibration-noise and improving seismic capacity are proposed and verified together with a pilot-test. As a final outcome, construction and technical manuals for field applications are provided. 1st FY (TRL 5): Establishment of fundamental technologies - Development of nano-electrospinning system and novel concrete composite material based on polyurethane - Development of evaluation technique of polyurethane-based high damping concrete composite material - Evaluation of damping performance of polyurethane-based high damping concrete composite material 2nd FY (TRL 5): Development of core technologies - Development and optimization of high damping concrete composite materials - Development and optimization for enhancing dispersion of high damping concrete composite materials - Development and verification of structural elements for improving vibration-noise performance - Development and verification of structural elements for improving seismic capacity 3rd FY (TRL 6): Pilot-test and practical applications - Experiment and analysis of vibration-noise performance - Experiment and analysis of seismic capacity - Pilot-test and preparation of construction and technical manuals for field applications				
Results	- Publication of journal papers: 29 including 12 SCI(E) papers - Conference presentations: 40 - Patents: 9 applications, 3 registration(s) - Product prototypes: 11 - Student involvement: 4 - S/W: 5 registrations				
Expected Contribution	- Development of novel nano-materials and structures for building applications - Development of novel building and construction materials with high performances and their practical applications, including wind-resistant, seismic, sound-absorption building materials and structures - Establishment of fundamental design technologies for wind-resistant and seismic applications - Construction and technical manuals and/or design guides for practical applications				
Keywords	Nano Electrospinning	High Damping	Concrete Composite Materials	Vibration/Noise Control	Seismic Capacity

6. 영문 목차

< Contents >

1. Outline of Research Project	1
2. Development Status of Domestic and Overseas	15
3. Research performance	25
4. Target probability and Contribution to the field	144
5. Plan to utilize R&D achievements	155
6. Information on Overseas Science Technology from Research Process	158
7. Security Level of R&D Performance	163
8. Research facility and equipment status	164
9. Implementation of safety measures in laboratories based on R&D tasks	165
10. Representative research achievements of R&D tasks	168
11. ETC	169
12. References	170

7. 본문 목차

< 목 차 >

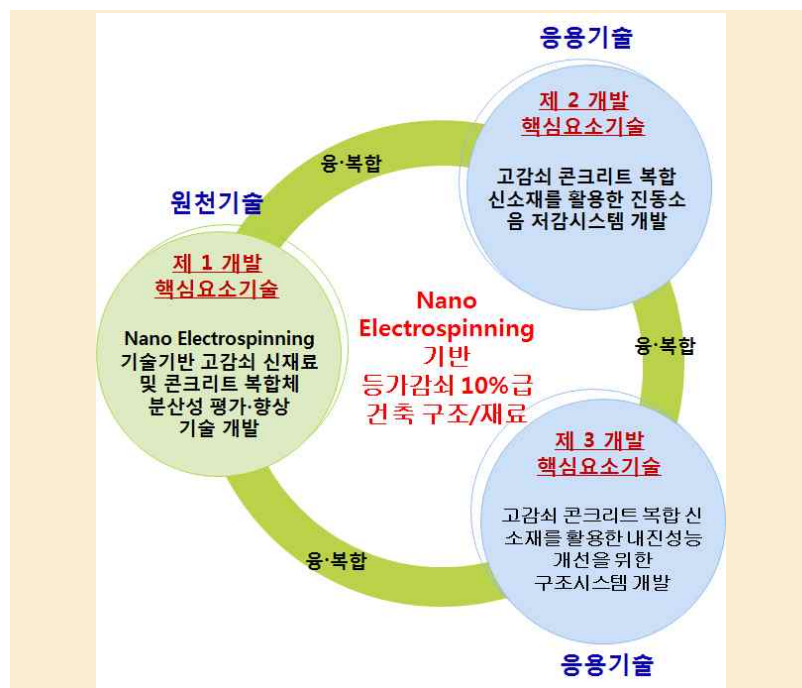
1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	15
3. 연구 수행 내용 및 성과	25
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	144
5. 연구개발성과의 활용 계획	155
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	158
7. 연구개발성과의 보안등급	163
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	164
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	165
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	168
11. 기타 사항	169
12. 참고 문헌	170

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목적

(1) 최종목표

- 본 연구의 최종목표는 건축구조물의 내풍, 내진, 소음(충간)에 대한 사용성능 개선을 위하여 폴리우레탄(Polyurethane) 등 플라스틱 기반 Nano Electro-spinning 기술을 활용한 등가감쇠 10%급 고감쇠·저비용 다기능 콘크리트 복합 신소재를 개발하는 것으로서, 그 유효성을 재료 및 구조실험을 실시하여 검증함과 동시에 이를 활용한 구조물 전체의 진동·소음 저감시스템 및 내진성능 개선을 위한 구조시스템을 제안하여 성능 개선효과를 해석적 연구를 통하여 검증하며, 최종적으로 파일럿 테스트를 실시하며 현장적용을 위한 시공매뉴얼·기술지침서를 개발함.
- 본 연구에서는 최종목표를 달성하기 위해서 다음과 같은 3개의 개발 핵심요소기술을 설정하였음.
 - 제1개발 핵심요소기술: Nano Electrospinning 기술기반 등가감쇠 10%급 신재료 및 콘크리트 복합체의 분산성 평가·향상기술 개발
 - 제2개발 핵심요소기술: 고감쇠 콘크리트 복합 신소재를 활용한 진동·소음 저감시스템 개발
 - 제3개발 핵심요소기술: 고감쇠 콘크리트 복합 신소재를 활용한 내진성능 개선을 위한 구조시스템 개발



■ 연구 개발 핵심요소기술 ■

- 상기 최종목표를 성취하기 위한 3개의 개발 핵심요소기술의 연차별 세부 연구로드맵을 아래의 그림에 나타낸다.

Nano Electrospinning System을 활용한 등가감쇠 10%급 다기능 건축재료/구조시스템 개발		1차년도 (2015)	2차년도 (2016)	3차년도 (2017)
		기반기술 도출 및 구축	핵심 기술 개발	파일럿 테스트 실시 및 실용화 기술 개발
제1 개발 핵심 요소 기술	전기방사기술 기반 고감쇠 신재료 및 콘크리트 복합체의 분산성 평가·향상 기술개발	Nano Electrospinning 장비, 공정시스템의 구축, 폴리우레탄 기반 고감쇠 신재료 및 콘크리트 복합체의 분산성 평가·향상기술 개발	Nano Electrospinning을 이용한 성능기반 고감쇠 신재료의 확장 개발 및 분산성 향상기술 최적화	바닥판·보·기둥 시제품 평가, 파일럿 테스트 실시 및 실용화를 위한 시공매뉴얼·지침서 개발
제2 개발 핵심 요소 기술	고감쇠 콘크리트 복합 신소재 기반 진동소음 저감시스템 개발	폴리우레탄 기반 고감쇠 신재료 진동소음용 시편시험에 의한 감쇠성능 검증	고감쇠 콘크리트 복합 신소재를 이용한 진동소음성능 개선을 위한 구조부재, 보강재·바닥판 개발 및 재료시험을 통한 감쇠성능의 검증	구조부재·보강재·바닥판의 진동성능 평가를 위한 구조실험·해석 실시 및 결과 분석
제3 개발 핵심 요소 기술	고감쇠 콘크리트 복합 신소재 기반 내진성능 개선을 위한 구조시스템 개발	폴리우레탄 기반 고감쇠 신재료 내진성능 개선용 시편시험에 의한 감쇠성능 검증	고감쇠 콘크리트 복합 신소재를 이용한 내진성능 개선을 위한 구조재 개발 및 재료시험을 통한 감쇠성능의 검증	구조부재의 내진성능 평가를 위한 구조실험·해석 실시 및 결과 분석

■ 최종목표 달성을 위한 3개 개발 핵심요소기술의 연차별 추진방법 ■

(2) 최종목표의 성격 및 설정근거

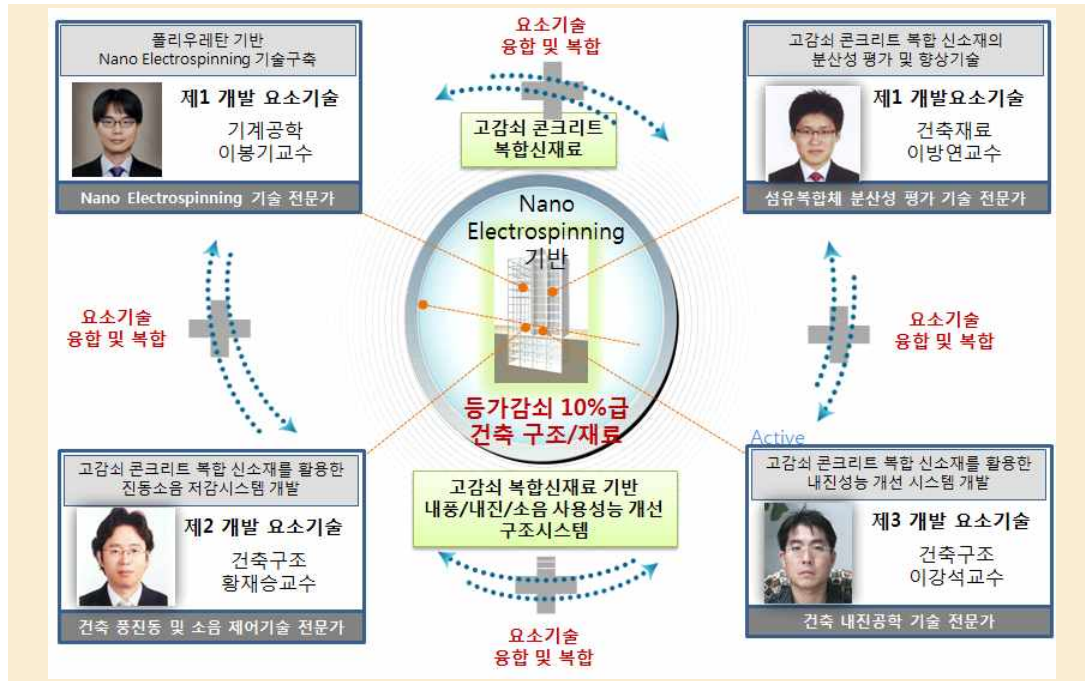
- 최근 들어 고강도, 고연성, 경량재료 등의 개발에 의해서 다기능·고성능 건축물이 가능하여졌으나, 강도, 연성, 질량대비 감쇠량이 급격히 저하되면서 시스템의 구조감쇠가 작아져 풍진동, 지진동, 소음진동 등에 관한 사용성능이 매우 취약한 형태로 나타나게 됨.
- 특히, 다세대 주택이나 아파트와 같은 집단 주거용 구조물 중에 많은 경우가 철근콘크리트 구조물이며, 이러한 구조물을 시공할 때는 설계기준이나 주택법 등에 의해 규정된 기준을 만족하도록 안전성과 사용성 등을 고려하여 시공함. 안전성이나 사용성은 설계기준에 따라 충분한 안전율을 고려하여 구조물을 설계하고 시공하기 때문에 사용자나 거주자의 불편이 거의 발생하지 않지만, 최근 사회적으로 많은 문제가 되고 있는 층간소음은 사용자나 거주자의 주위 여건에 따라 발생 정도 및 횟수 등이 달라지고 피해자의 신체적 상태나 심리적 상태에 따라 받아들이는 정도가 달라지는 문제가 있음.
- 소음·진동관리법 제21조의2(층간소음기준 등) 제3항에서는 층간소음의 범위와 기준을 환경부와 국토교통부의 공동부령으로 정하도록 되어있으며, “공동주택 층간소음의 범위와 기준에 관한 규칙” 제2조에서 층간소음의 범위를 입주자 또는 사용자의 활동으로 인하여 발생하는 소음으로 정의하고 있음. 동 규칙 제2조제1호에서는 직접충격 소음은 뛰거나 걷는 동작 등으로 인하여 발생하는 소음으로 규정하고 있으며, 제3조에서 층간소음 기준을 1분간 등가소음도를 기준으로 주간 43 dB, 야간 38 dB으로 규정하고 있음. 또한 주택건설기준 등에 관한 규정에서도 바닥 충격음 차단성능 기준이 강화되고 있는 실정임.
- 풍진동에 대한 사용성 개선을 위하여 별도의 제진장치가 사용되고 있으며, 사회적으로

큰 이슈를 불러일으킨 층간소음에 대한 개선을 위하여 각종 고가의 마감재를 사용할 뿐만 아니라 슬래브 두께도 증가시키고 있음. 또한, 내진성능 향상을 위해서 브레이싱 시스템, 탄소섬유 등 복합재료를 이용한 공법, 특수 전단벽체, 특수 모멘트 골조시스템 등 내진시스템을 도입하고 있지만, 비용이 추가적으로 필요하여 경제성 측면에서 단점을 내포하고 있음.

- 따라서, 재료 자체가 가지는 감쇠성능 제어에 의한 자가감쇠 구조시스템에 의해서 사용성능 (내풍, 내진, 소음성능)을 개선 할 수 있는 새로운 저비용 고감쇠 재료의 개발과 신개념 구조체 적용기술이 절실히 필요함 시점임.
- 본 연구에서는 건축구조물의 내풍, 내진, 소음(층간)에 대한 사용성능 개선을 위하여 폴리우레탄(Polyurethane) 등 플라스틱 기반 Nano Electrospinning (나노 전기방사) 기술을 활용한 등가감쇠 10%급 고감쇠·저비용 콘크리트 복합 신소재를 개발(TRL 5: 시작품 제작)하여, 그 유효성을 재료 및 구조실험을 실시하여 검증하며, 구조물 전체의 사용성능 개선효과를 해석적으로 검증함과 동시에 최종적으로 파일럿 테스트를 실시하며 현장적용을 위한 시공매뉴얼 및 지침서를 개발(TRL 6: 시작품 성능평가)하는 신개념 첨단융합기술임.
- 폴리우레탄 등 플라스틱 기반 Nano Electrospinning 기술을 활용한 고감쇠 콘크리트 복합 신소재 개발과 이를 활용한 감쇠성능 제어에 의한 자가감쇠 구조시스템에 의해서 사용성능 (내풍, 내진, 소음성능)을 개선 할 수 있는 건축기술에 관한 국내 및 국외 연구현황은 전무함.
- 본 연구에서는 상기 최종목표를 달성하기 위해서 관련분야 최고의 연구진으로 구성을 하였으며, 신개념 Nano Electrospinning 기반 등가감쇠 10%급 고감쇠 건축구조·재료 기술 개발 및 실용화를 위한 공동연구원간 역할분담 및 각 개발 요소 기술의 융·복합을 위한 유기적 연계성을 그림 아래에 나타내었음.

(3) 최종목표 달성을 위한 융합기술의 타당성

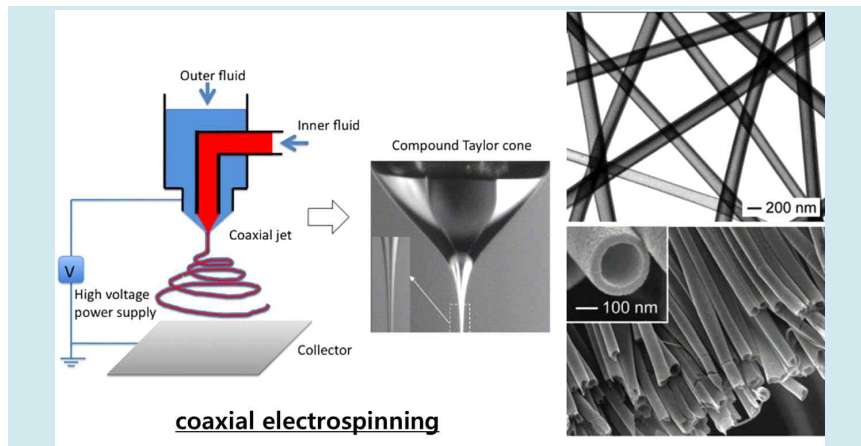
- 기존 탄소 나노튜브(Carbon nanotube, CNT)기술은 주로 강도증진, 전도성 위주 등의 기능성 개선이며, 비교적 고가임. 본 연구에서는 폴리우레탄 등 플라스틱 기반 Nano Electrospinning 기술을 활용한 고감쇠 콘크리트 복합 신소재를 개발하는 것으로서, 재료자체의 다양성으로 인한 선택의 폭이 넓고 기능성 부과의 확장이 용이하게 확보 가능함. 또한, 플라스틱 종류를 사용하기 때문에 가격 경쟁이 탁월하여 경제성 확보가 가능함.
- 폴리우레탄의 외력의 진동수에 따른 전달률 (Transmissiblity)은 천연고무 (Natural Rubble), 합성고무(Neoprene) 대비 4-10배정도 낮아 진동 저감성능이 우수하며, 감쇠비(Damping Ratio)는 2.34 Hz에서 0.344로 상용 재료 중에 가장 높음. 따라서, Nano Electrospinning 기술을 적용하여 내부 및 표면 형상을 제어하여 콘크리트와의 부착 성능을 높이고 분산성을 높이는 기술이 개발될 경우 콘크리트의 감쇠비를 획기적으로 높일 수 있을 것으로 기대됨.



■ 공동연구원간 역할분담 및 각 개발 핵심요소기술의 융·복합을 위한 유기적 연계성 ■

- 재료 감쇠능력 증진을 위하여 페타이어를 재활용하는 기존 기술이 있음. 건설 분야에서 페타이어의 활용을 살펴보면 고무분말을 가공하여 건축용 자재로 이용하는 방법, 콘크리트에 골재대용으로 페타이어 조각을 이용하는 방법 등으로 실험결과에 의하면 약 3%의 감쇠비를 가지는 것으로 나타났으나, 페타이어에 의한 단면손실, 콘크리트 결합재와 분리 등으로 재료 간 부착능력이 떨어져 그 결과 요구 재료강도를 발휘하지 못할 뿐만 아니라 감쇠비 증진효과도 미미한 것으로 나타났음.
- 나노 전기방사기술을 활용하게 되면, 감쇠 재료의 표면적 증가에 따라 기존 콘크리트 재료와 부착능력이 증가될 뿐만 아니라 일체성 확보가 가능하며, 부재의 단면손실을 최소화 할 수 있어 재료강도 저하 없이 감쇠비를 증진시킬 수 있는 획기적인 방안이 될 수 있음.
- 콘크리트는 수 마이크로미터 크기의 결합재에 의해 골재가 연결된 결정구조로 인하여 인장작용 시 균열이 발생하며 그에 따른 단면손실에 의한 강도저하가 곧바로 일어나는 성질이 있음. 인장 감쇠능력이 우수한 나노크기의 섬유를 이용하여 결합재와 골재사이, 또는 결합재내부의 공극을 충전하거나 공극사이로 나노 섬유의 네트워크를 형성하게 되면 재료의 부착능력 향상과 더불어 감쇠능력을 확보하여 고감쇠 재료가 가능하며, 나노섬유의 고유성능에 따라 고인성, 고강도 재료로도 확대 발전가능성이 큼.
- 특히, 나노 전기 방사기술은 섬유의 직경, 길이 및 형상 조절이 가능하여 재료 혼합과정에서 콘크리트 내부 공극형태에 따라 유연하게 충전이 가능하므로 부착능력을 향상시킬 수 있으며, 그 결과 고감쇠 섬유에 의하여 재료의 구조감쇠를 효과적으로 증진시킬 수 있음.
- 나노 전기방사(Nano Electrospinning) 기술은 전기적으로 하전된 플라스틱 용액 혹은 용융물의 젯(jet)을 통하여 나노섬유를 제조할 수 있는 공정으로, 마이크로미터에서 나노미터 스케일의 직경을 가지는 연속상의 플라스틱 섬유를 구현하는 방법임.

- 나노 섬유를 제작하는 대표적인 기술인 자기조립(Self Assembly), 상분리(Phase Separation), 주형합성(Template Synthesis) 등에 비하여 간단하고 재료의 선택에 제한이 없을 뿐 아니라 형상에 기인한 높은 비표면적, 공극률(porosity) 및 구조크기의 조절이 용이하다는 장점을 가짐.
- 특히 전기방사로 제작된 섬유 및 이들의 상호연결로 구성되는 3차원 네트워크 매트(Mat)는 기존의 다른 나노 섬유기술로는 얻을 수 없는 매우 가는 직경과 높은 단위의 부피당 표면적을 가질 수 있어, 우수한 경제성을 가지는 나노가공 기반기술임.



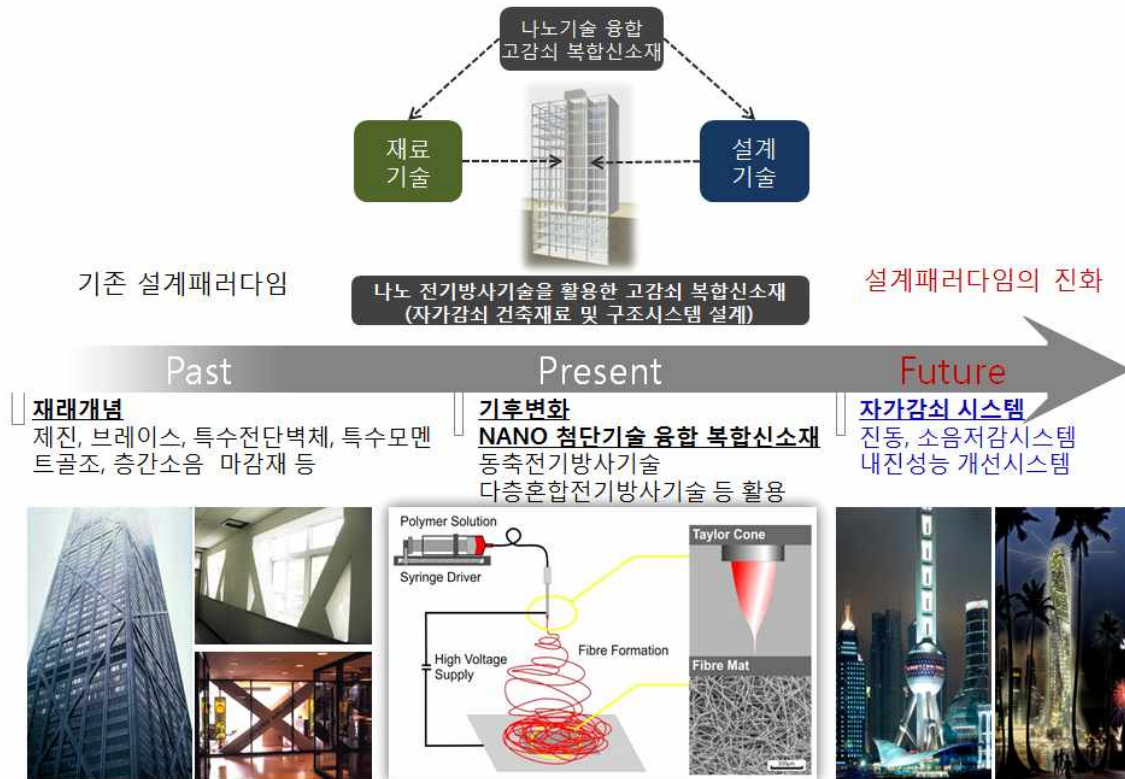
■ 나노 전기방사(coaxial electrospinning) ■

나. 연구개발의 필요성

(1) 연구개발의 개요 및 창의성

- 본 연구는 건축구조물의 내풍, 내진, 소음(충간)에 대한 사용성능 개선을 위하여 폴리우레탄(Polyurethane) 등 플라스틱 기반 전기방사(Nano Electro-spinning) 기술을 융합한 등가감쇠 10%급 고감쇠·저비용의 다기능 콘크리트 복합신소재를 개발하여 나노기술을 건축기술에 융합한 신개념 설계패러다임 진화를 창조하는 첨단융합기술임.
- 최종적으로는 개발된 복합신소재의 유효성을 재료 및 구조실험을 실시하여 검증함과 동시에 이를 활용한 구조물 전체의 진동·소음 저감시스템 및 내진성능 개선을 위한 구조시스템을 제안하고 성능 개선효과를 해석적 연구와 파일럿 테스트를 병행하여 검증하며, 현장 실무적용을 위한 시공매뉴얼·기술지침서를 제안하는 기술임.
- 폴리우레탄 등 플라스틱 기반 Nano Electrospinning 기술을 활용한 고감쇠 콘크리트 복합 신소재를 개발에 관한 국내 및 해외 연구현황은 전무한 상태로 세계 최초로 연구가 진행 되는 것임.
- 최근 들어 전 세계적으로 기후변화에 따른 자연재해 특히 태풍, 지진 발생 빈도가 증가하고 있으며, 그 규모도 대형화되는 추세로 이로 인한 인명 피해 및 경제적 손실도 급증하고 있음.
- 국내에서도 2002년 태풍 루사, 2003년 태풍 매미, 2012년 태풍 볼라벤 등으로 인하

여 수많은 인명 및 건축 구조물에 방대한 피해를 주었으며, 국회 예산정책처에 따르면 지난 2002년부터 지난 10년동안 태풍에 따른 전국 피해액은 모두 13조 8,158억원에 달함.



■ 나노 전기방사기술 융합 복합신소재 기반 설계패러다임의 진화 프로세스 ■

- 재료 자체가 가지는 감쇠성능 제어에 의한 자가감쇠 구조시스템에 의해서 사용성능(진동, 소음, 내진성능)을 개선할 수 있는 새로운 건축재료 및 구조시스템 설계 패러다임을 바탕으로 한 다변화된 요구성능을 충족할 수 있는 원천기술 연구임.
- 본 연구에서는 최종목표를 달성하기 위해서 3개의 개발 핵심요소기술, 즉 제1개발 핵심요소기술(Nano Electrospinning 기술기반 등가감쇠 10%급 신재료 및 콘크리트 복합체의 분산성 평가·향상기술 개발), 제2개발 핵심요소기술(고감쇠 콘크리트 복합 신소재를 활용한 진동·소음 저감시스템 개발), 제3개발 핵심요소기술(고감쇠 콘크리트 복합 신소재를 활용한 내진성능 개선을 위한 구조시스템 개발)을 설정하였음.

(2) 연구개발의 배경 및 필요성

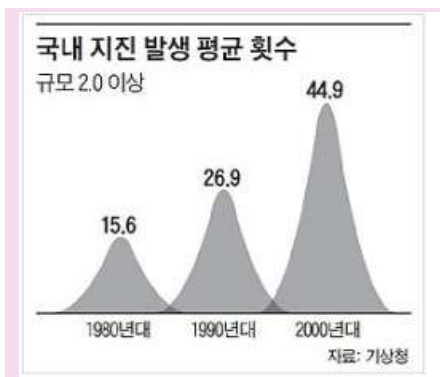
- 최근 들어 전 세계적으로 기후변화에 따른 자연재해 특히 태풍, 지진 발생 빈도가 증가하고 있으며, 그 규모도 대형화되는 추세로 이로 인한 인명 피해 및 경제적 손실도 급증하고 있음.
- 국내에서도 2002년 태풍 루사, 2003년 태풍 매미, 2012년 태풍 볼라벤 등으로 인하여 수많은 인명 및 건축 구조물에 방대한 피해를 주었으며, 국회 예산정책처에 따르면 지난 2002년부터 지난 10년동안 태풍에 따른 전국 피해액은 모두 13조 8,158억원에

달함.

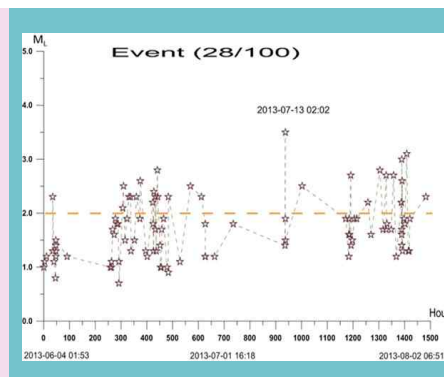


■ 태풍(매미, 2003)에 의한 구조물 피해 상황 ■

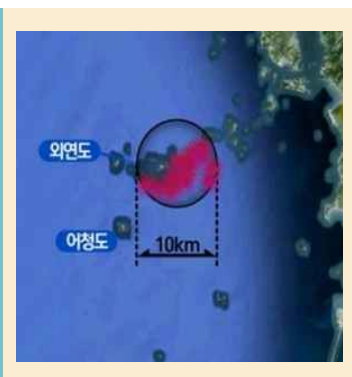
- 또한, 국내 지진발생 현황도 지난 31년간 총 816회의 지진이 관측되었으며, 그 중에서 규모 2이상의 지진은 1980년대에는 평균 15.6회 발생을 하였지만, 2000년대에는 평균 44.9로서 20년 사이 약 3배 이상 발생하고 있음. 2013년 보령지역에서 발생한 군발지진(3개월간 약 140회)은 대지진의 가능성을 시사하고 있음. 인접 국가인 일본, 중국 등에서도 대규모 지진 발생 빈도가 증가하고 있으며, 이에 따라 우리나라도 지진의 직간접적인 영향권에 있음.



(a) 한반도 지진발생 현황



(b) 보령지역 군발지진 발생 현황 (2013)

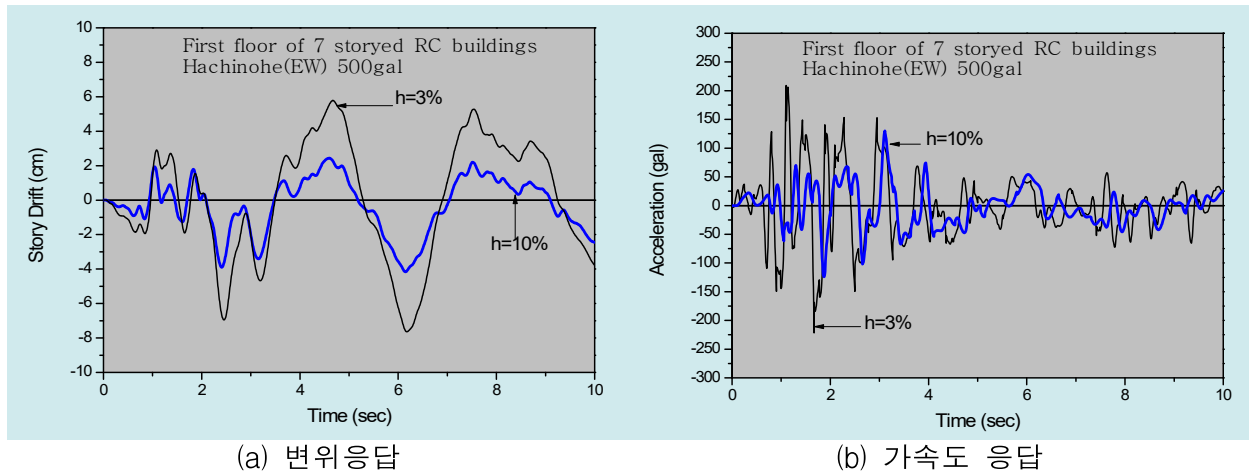


■ 한반도 지진발생 현황 및 보령지역 군발지진 현황 ■

- 이와 같이 최근 기후변화로 인하여 태풍, 지진 등의 자연재해 횟수 및 크기가 증가하고 있기 때문에 인류가 자연에 적응하며 생존을 이어왔듯이 인류와 함께 했던 건축물도 기후 변화에 적응하게 함으로써 현세대 및 후세대의 지속가능한 발전을 도모할 수 있으며, 이를 위하여 건축구조물의 내풍 및 내진기술의 성능개선 신개념 설계 패러다임을 바탕으로 다변화된 요구성능을 충족하기 위한 관련 신재료의 개발과 신개념 구조체 적용기술이 절실히 필요한 시점임.
- 한편, 최근 들어 고강도, 고연성, 경량재료 등의 개발에 의해서 다기능·고성능 건축물이 가능하여졌으나, 강도, 연성, 질량대비 감쇠량이 급격히 저하되면서 시스템의 구조감쇠가 작아져 풍진동, 지진동, 소음진동 등에 관한 사용성능이 매우 취약한 형태로 나타나게 됨.
- 풍진동에 대한 사용성 개선을 위하여 별도의 제진장치가 사용되고 있으며, 사회적으로

큰 이슈를 불러일으킨 층간소음에 대한 개선을 위하여 각종 고가의 마감재를 사용할 뿐만 아니라 슬래브 두께도 증가시키고 있음. 또한, 내진성능 향상을 위해서 브레이싱 시스템, 탄소섬유 등 복합재료를 이용한 공법, 특수 전단벽체, 특수 모멘트 골조시스템 등 내진시스템을 도입하고 있지만, 비용이 추가적으로 필요하여 경제성 측면에서 단점을 내포하고 있음.

- 따라서, 재료 자체가 가지는 감쇠성능 제어에 의한 자가감쇠 구조시스템에 의해서 사용성능(내풍, 내진, 소음성능)을 개선 할 수 있는 새로운 신개념 고감쇠 재료를 개발하여 구조체에 적용가능하다면 경제성을 포함한 건축기술의 혁신을 창출할 수가 있음.
- 콘크리트 건축물의 감쇠율은 일반적으로 약 3~5%로 보고되고 있으며, 등가감쇠 10%의 감쇠를 가지는 콘크리트 복합 신재료로 구성된 구조시스템이 개발된다면 지진응답(변위, 가속도) 약 30~40% 저감효과를 발휘하여 특수 전단벽체, 특수 모멘트 골조시스템 등 기존 내진구조시스템과 동등한 내진효과를 기대할 수 있음.



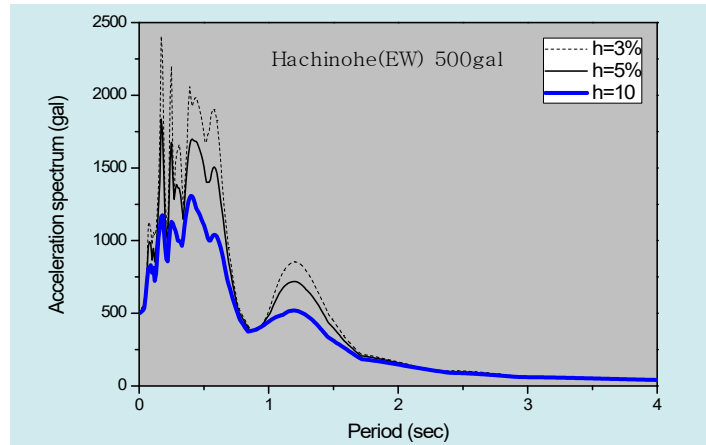
(a) 변위응답

(b) 가속도 응답

■ 건물 감쇠율에 따른 지진응답 비교 ■

(본 연구팀에서 수행 한 비선형 지진응답해석에 의한 결과)

- 바람에 의한 진동량은 감쇠비의 제곱근에 반비례 하기 때문에, 고감쇠 구조재료로 구성된 자가감쇠 구조시스템에 의해 기존의 탄성상태 구조 감쇠율(1~2% 상당)을 2~4 배로 증진시킨다면 약 30~50%의 제어효과를 발휘하게 되어 기존의 제진장치와 유사한 제어성능을 보유하게 되며 따라서 구조시스템만으로도 풍동진동을 저감하는 효과를 가지게 됨.
- 현행 내진성능평가법에서 구조물이 보유하고 있는 등가감쇠비는 요구성능 스펙트럼을 저감시키는 효과를 반영하는 수단으로 적용하고 있음. 등가감쇠비 10%를 가지는 구조물은 요구성능을 크게 저감시킴으로써 보유성능에 대한 마진율을 크게 하여 상대적으로 내진성능을 향상시키는 효과를 가지게 됨. 또한, 별도의 비용을 부담하여 설치하고 있는 내진보강시스템과 거의 유사한 내진성능을 기대할 수 있음. 특히, 부분 층 사용이 가능(key element)하여 효율적으로 내진성능개선이 가능하여 제진장치와 유사한 효과 창출 가능함.



■ 건물 감쇠율에 따른 가속도 지진응답스펙트럼 비교 ■

(본 연구팀에서 수행 한 지진응답해석에 의한 탄성요구성능 스펙트럼 결과)

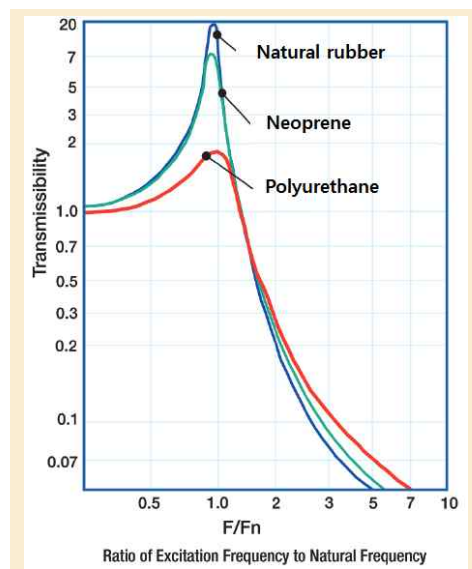
- 결과적으로 건축 재료, 구조시스템이 가지고 있는 고유의 자가감쇠만으로도 구조물의 내진 및 내풍성능을 크게 향상시킴으로써, 구조설계기술의 혁신이 가능해지며, 기존의 면진·제진 시스템을 대체하는 등 새로운 설계 패러다임의 창출이 가능하게 됨.
- 또한, 사회 이슈화된 층간소음은 슬래브의 가청영역이상 진동(30 Hz이상)이 인접 공간에 파동을 유발하여 발생하는 메커니즘을 가짐. 따라서 슬래브 자체의 감쇠를 증가시키거나, 슬래브에 고감쇠 시스템을 부착, 보강하는 방식에 의하여 슬래브 진동을 저감함으로써 진동으로 배출되는 소음을 효과적으로 차단할 수 있음.
- 본 연구에서는 건축구조물의 내풍, 내진, 소음(층간)에 대한 사용성능 개선을 위하여 폴리우레탄(Polyurethane) 등 플라스틱 기반 Nano Electrospinning(나노 전기방사) 기술을 활용한 등가감쇠 10%급 고감쇠·저비용 콘크리트 복합 신소재를 개발하여, 그 유효성을 재료 및 구조실험을 실시하여 검증하며, 구조물 전체의 사용성능 개선효과를 해석적으로 검증함과 동시에 최종적으로 파일럿 테스트를 실시하며 현장적용을 위한 시공매뉴얼 및 지침서를 개발하는 신개념 첨단융합기술임.

기존 표준바닥구조 시스템 : 일반구조용 콘크리트의 감쇠가 작아 소음저감에 비효과적임	고감쇠 슬래브 구조 : 나노기술로 보강된 고감쇠 경량기포, 마감모르터를 구조용 전단 연결재로 슬래브와 연결함으로써 슬래브의 휨진동을 효과적으로 줄이고 이를 통해 소음을 저감하는 바닥 시스템

■ 층간소음 개선을 위한 고감쇠 슬래브 구조 예시 ■

(3) 융합연구의 필요성

- 기존 탄소 나노튜브(Carbon nanotube, CNT)기술은 주로 강도증진, 전도성 위주 등의 기능성 개선이며, 비교적 고가임. 본 연구에서는 폴리우레탄 등 플라스틱 기반 Nano Electrospinning 기술을 활용한 고감쇠 콘크리트 복합 신소재를 개발하는 것으로서, 재료자체의 다양성으로 인한 선택의 폭이 넓고 기능성 부과의 확장이 용이하게 확보 가능함. 또한, 플라스틱 종류를 사용하기 때문에 가격 경쟁이 탁월하여 경제성 확보가 가능함.
- 폴리우레탄의 외력의 진동수에 따른 전달률(Transmissiblity)은 천연고무(Natural Rubble), 합성고무(Neoprene) 대비 4-10배정도 낮아 진동 저감성능이 우수하며, 감쇠비(Damping Ratio)는 2.34 Hz에서 0.344로 상용 재료 중에 가장 높음(그림 1-7). 따라서, Nano Electrospinning 기술을 적용하여 내부 및 표면 형상을 제어하여 콘크리트와의 부착 성능을 높이고 분산성을 높이는 기술이 개발될 경우 콘크리트의 감쇠비를 획기적으로 높일 수 있을 것으로 기대됨.
- 재료 감쇠능력 증진을 위하여 페타이어를 재활용하는 기존 기술이 있음. 건설 분야에서 페타이어의 활용을 살펴보면 고무분말을 가공하여 건축용 자재로 이용하는 방법, 콘크리트에 골재대용으로 페타이어 조각을 이용하는 방법 등으로 실험결과에 의하면 약 3%의 감쇠비를 가지는 것으로 나타났으나, 페타이어에 의한 단면손실, 콘크리트 결합재와 분리 등으로 재료 간 부착능력이 떨어져 그 결과 요구 재료강도를 발휘하지 못할 뿐만 아니라 감쇠비 증진효과도 미미한 것으로 나타났음.

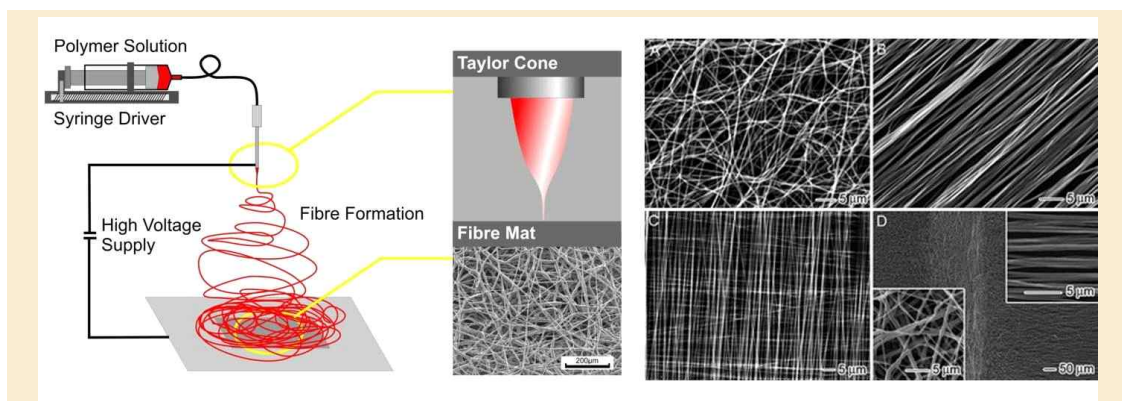


■ 재료의 외력의 진동수에 따른 전달률(진동특성) ■

- 나노 전기방사기술을 활용하게 되면, 감쇠 재료의 표면적 증가에 따라 기존 콘크리트 재료와 부착능력이 증가될 뿐만 아니라 일체성 확보가 가능하며, 부재의 단면손실을 최소화 할 수 있어 재료강도 저하 없이 감쇠비를 증진시킬 수 있는 획기적인 방안이 될 수 있음.
- 콘크리트는 수 마이크로 미터 크기의 결합재에 의해 골재가 연결된 결정구조로 인하여

인장작용 시 균열이 발생하며 그에 따른 단면손실에 의한 강도저하가 곧바로 일어나는 성질이 있음. 인장 감쇠능력이 우수한 나노크기의 섬유를 이용하여 결합재와 골재사이, 또는 결합재내부의 공극을 충전하거나 공극사이로 나노 섬유의 네트워크를 형성하게 되면 재료의 부착능력 향상과 더불어 감쇠능력을 확보하여 고감쇠 재료가 가능하며, 나노섬유의 고유성능에 따라 고인성, 고강도 재료로도 확대 발전가능성이 큼.

- 특히, 나노 전기 방사기술은 섬유의 직경, 길이 및 형상 조절이 가능하여 재료 혼합과정에서 콘크리트 내부 공극형태에 따라 유연하게 충전이 가능하므로 부착능력을 향상시킬 수 있으며, 그 결과 고감쇠 섬유에 의하여 재료의 구조감쇠를 효과적으로 증진시킬 수 있음.
- 나노 전기방사(Nano Electrospinning) 기술은 전기적으로 하전된 플라스틱 용액 혹은 용융물의 젯(jet)을 통하여 나노섬유를 제조할 수 있는 공정으로, 마이크로미터에서 나노미터 스케일의 직경을 가지는 연속상의 플라스틱 섬유를 구현하는 방법임(그림 1-8).
- 나노 섬유를 제작하는 대표적인 기술인 자기조립(Self Assembly), 상분리(Phase Separation), 주형합성(Template Synthesis) 등에 비하여 간단하고 재료의 선택에 제한이 없을 뿐 아니라 형상에 기인한 높은 비표면적, 공극률(porosity) 및 구조크기의 조절이 용이하다는 장점을 가짐.
- 특히 전기방사로 제작된 섬유 및 이들의 상호연결로 구성되는 3차원 네트워크 매트(Mat)는 기존의 다른 나노 섬유기술로는 얻을 수 없는 매우 가는 직경과 높은 단위의 부피당 표면적을 가질 수 있어, 우수한 경제성을 가지는 나노가공 기반기술임.



■ 나노 전기방사(Electrospinning) 기술의 개념 ■

- 현재 전기방사 기술을 바탕으로 보다 다양한 형태의 나노섬유를 가공하기 위한 연구개발이 진행되고 있으며, 대표적으로 (1)코어-셸(Core-shell) 형태의 나노섬유 제작을 위한 동축 전기방사(Coaxial Electrospinning) 및 (2)두 가지 이상의 다른 플라스틱 용액을 적용하여 융합 나노섬유를 구현하는 다층-혼합 전기방사(Multilayer and Mixed Electrospinning) 등이 있어, 향후 새로운 형태의 나노기반 융합재료의 개발을 기대할 수 있음.

다. 연구개발 범위

(1) 연차별 연구내용

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	Nano Electrospinning 기술구축 및 고감쇠 신재료 개발	Nano Electrospinning 장비, 공정시스템의 구축 및 최적화
		Nano Electrospinning을 이용한 폴리우레탄 기반 고감쇠 신재료 개발
	복합신소재의 분산성 평가 및 향상기술 개발	폴리우레탄 기반 고감쇠 신재료와 콘크리트 복합체의 분산성 평가 기술 개발
		폴리우레탄 기반 고감쇠 신재료와 콘크리트 복합체의 분산성 향상기술 개발
2차년도	성능기반 고감쇠 신재료의 확장 개발 및 비교평가에 의한 최적화	폴리우레탄 기반 고감쇠 신재료의 전단시편시험에 의한 감쇠성능 검증
		기존 고감쇠 재료의 분석 및 최적재료선별 (폴리우레탄 이외)
	확장 개발된 고감쇠 복합 신소재의 분산성 평가 및 향상기술 개발	Nano Electrospinning을 이용한 성능기반 고감쇠 신재료의 확장 개발 및 비교평
		확장 개발된 고감쇠 신재료와 콘크리트 복합체의 분산성 평가 기술 최적화
	고감쇠 복합 신소재를 활용한 진동·소음성능 개선을 위한 구조부재·보강재 및 바닥판 개발	확장 개발된 기반 고감쇠 신재료와 콘크리트 복합체의 분산성 향상기술 최적화
		고감쇠 콘크리트 복합 신소재를 이용한 진동·소음성능 개선을 위한 구조부재·마감재·바닥판 개발 및 재료시험을 통한 감쇠성능의 검증
3차년도	파일럿 테스트 실시 및 실용화 기반 기술 개발	기존 재료와의 비교 및 검토
		고감쇠 콘크리트 복합 신소재를 이용한 내진성능 개선을 위한 구조재 개발 및 재료시험을 통한 감쇠성능의 검증
	구조실험 및 해석에 의한 구조물 전체의 진동 성능 개선효과 검증	기존 재료와의 비교 및 검토
		바닥판, 기둥 보 시제품 평가
	구조실험 및 해석에 의한 구조물 전체의 내진성능 개선효과 검증	파일럿 테스트 실시
		현장적용을 위한 시공매뉴얼 및 지침서 개발

(2) 핵심성과물별 세부 설명

- 성과명-1: 전기방사기술 기반 등가감쇠 10%급 신재료 및 콘크리트 복합체의 분산성 평가·향상기술

정의	Nano Electrospinning(전기방사) 장비 및 공정시스템을 포함한 등가감쇠 10%급 콘크리트 복합신재료 및 배합기술, 분산성 평가·향상기술
목적	Nano Electrospinning(전기방사) 장비 및 공정시스템 및 폴리우레탄 기반 나노 섬유를 콘크리트에 혼입하여 기존 일반 콘크리트 대비 2배 이상의 감쇠 성능을 갖는 콘크리트 복합재료 개발

성능목표	(기존기술 수준) - 철근콘크리트의 viscous damping ratio는 균열 유무와 철근의 항복여부에 따라 다르지만 0.007에서 0.04를 나타냄 - 낮은 감쇠비로 인하여 진동, 소음, 내진 성능에 한계가 있음 (개발기술 수준) - 기존 대비 철근콘크리트의 viscous damping ratio이 2배 이상을 나타내는 콘크리트 기반 복합재료 개발 - 이러한 신소재를 구조부재에 적용하여 구조시스템의 등가감쇠가 10 % 급으로 향상됨
성과달성 책임자 (소속기관)	이방연 (전남대)
소요기간	2015.06 - 2018.05 (3년, 3년차)
성과달성 확인방법	- 감쇠 성능 평가 결과 - 분산성 평가 결과

■ 성과명-2: 고감쇠 콘크리트 복합체기반 진동소음 저감시스템

정의	고감쇠 콘크리트 복합체를 이용한 진동 소음성능 개선을 위한 보강재 및 바닥 판시스템, 내풍성능 개선을 위한 자가감쇠 구조시스템
목적	- 공동주택 층간소음 저감을 위해 슬래브의 두께증가, 완충재나 마감재료를 사용하지 않고 고감쇠 바닥시스템에 의한 슬래브 자체의 진동소음 저감능력에 의해 중량충격음을 법정기준(1분 등가소음도(L_{eq})는 주간 43dB, 야간 38dB, 최고소음도(L_{max}) 주간 57dB, 야간 52dB) 이하로 저감. - 고감쇠 콘크리트 구조체가 가지는 자가 감쇠만으로 바람에 의해 야기되는 수평진동을 사용성기준(ISO 6897) 이하로 저감하여 내풍성능을 획기적으로 개선
성능목표	(기존기술 수준) - 현 공동주택의 중량충격음 저감방식은 대부분 슬래브의 두께증가, 표준바닥구조(튼바닥 구조)의 완충재 사용에 의존하여 전개되어 왔으며 그 저감효과 또한 법적기준 충족시키지 못하는 수준으로 나타나고 있음. - 콘크리트 구조물의 (탄성상태)감쇠비는 2% 내외로 작아 풍하중에 의한 수평진동에 취약한 구조를 가지고 있으며, 별도의 댐퍼, 제진장치에 의해 등가감쇠비를 4-7% 수준으로 높여 사용성 개선이 가능하지만 추가적인 비용이 소요되고 있는 상태임. (개발기술 수준) - 등가감쇠비 10% 급의 고감쇠 콘크리트 바닥구조시스템에 의해 슬래브의 진동을 1/2-1/3 수준으로 줄이는 것이 가능하며, 그에 따라 진동에 의해 유발되는 중량충격음 또한 6dB 이상 저감 가능하여 최소 법정기준을 만족하며, 중량충격음 차단성능 등급을 상향시키는 수준. 동등한 중량충격음 차단등급 내에서 슬래브의 두께를 줄여 소요물량을 저감하는 수준 (현재 콘크리트 슬래브 두께 210mm는 슬래브 구조적 안전보다 층간소음 저감을 기대하는 것임) - 별도의 댐퍼나 제진장치 없이 등가감쇠비 10% 급의 콘크리트 구조체의 자가감쇠에 의해 풍진동을 1/2 -1/3 수준으로 저감하여 사용성기준을 만족할 뿐만아니라 수평변위 저감에 소요되는 물량을 줄여 경제적인 설계가 가능한 수준
성과달성 책임자 (소속기관)	황재승(전남대)
소요기간	2015.06 - 2018.05 (3년, 3년차)

성과달성 확인방법	- 파일럿 테스트 및 공동주택모사 음향실험동에 고감쇠 콘크리트 슬래브 바닥시스템을 적용하고 표준 소음측정법(KS F2810-2 등)에 따라 법정기준 만족여부를 확인 (실험적방법) - 고감쇠 구조체로 모델링된 고층구조물 해석모형에 풍동실험으로부터 구한 동적 풍하중을 적용하여 수평진동이 사용성 평가기준이하로 저감되는지 확인 (수치시뮬레이션 방법)
--------------	---

■ 성과명-3: 내진성능 개선을 위한 고감쇠 구조시스템

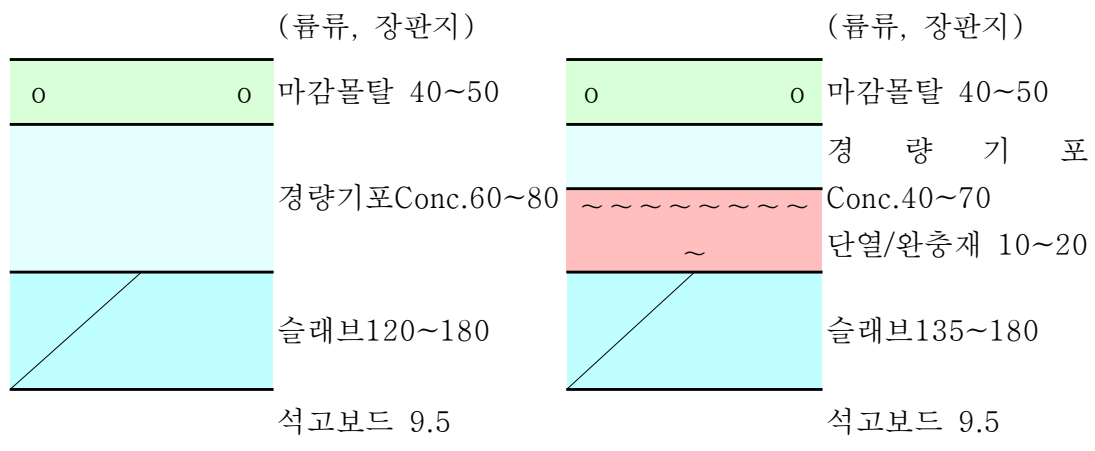
정의	고감쇠 콘크리트 복합체를 이용한 내진성능 개선을 위한 고감쇠 내진구조시스템
목적	- 현행 내진설계에서 내진성능 향상을 위해서 브레이싱 시스템, 제진시스템, 면진구조시스템, 특수 전단벽체, 특수 모멘트 골조시스템 등을 사용하지 않고, 콘크리트 건물 자체의 고감쇠 성능에 의해서 지진응답(변위, 가속도)을 상기 기존 내진구조시스템과 동등한 내진효과를 창출하여 내진성능을 획기적으로 개선 - 기존 콘크리트건물의 내진보강을 위하여 고가의 부가적인 내진보강 장치를 사용하지 않고 자가감쇠시스템 골조 등의 사용으로 내진보강 효과를 혁신적으로 개선
성능목표	(기존기술 수준) - 콘크리트 구조물의 감쇠비는 2% 내외로 작아 지진하중에 의한 수평진동에 취약한 구조를 가지고 있으며, 별도의 브레이싱 장치, 면진시스템, 특수전단벽, 특수골조시스템, 댐퍼, 제진장치에 의해서 내진성능의 향상을 취하고 있지만 추가적인 비용이 소요되고 있는 상태임. - 기존 비내진상세를 가지는 건물의 내진성능 향상을 위한 방법으로 기존의 골조에 부가적인 철골프레임, 내진벽체 신설, 또는 FRP 등 복합신소재, 철판 등을 이용하여 기둥 등을 내진보강하고 있지만, 보강에 따른 건물 중량을 부가적으로 증가시켜, 기초의 보강이 필요 하는 등 경제적인 측면에서 비효율적임. (개발기술 수준) - 콘크리트 건물 자체의 등가감쇠 10%급 고감쇠 성능에 의해서 지진응답(변위, 가속도)을 약 30-40% 저감하여 기존 내진구조시스템과 동등한 내진효과를 창출하는 수준 - 기존 콘크리트건물의 등가감쇠 10%급 자가감쇠시스템 골조 등의 사용으로 내진보강 효과를 2400년 2/3 재현주기 지진대비 LS(Life Safety)수준을 효과적으로 확보 가능 개선 수준 - 등가감쇠비 10%를 가지는 구조물은 요구성능(요구성능 스펙트럼 개념)을크게 저감시킴으로써 보유성능에 대한 마진율을 기존 3% 감쇠대비 약 30% 정도 크게 가능하여 상대적으로 내진성능을 향상시키는 수준 - 별도의 비용을 부담하여 설치하고 있는 내진보강시스템과 거의 유사한 내진성능을 기대할 수 있는 수준. 특히, 부분층 사용이 가능(key element)하여 효율적으로 내진성능개선이 가능하여 제진장치와 유사한 효과 창출 가능수준.
성과달성 책임자 (소속기관)	이강석(전남대)
소요기간	2015.06 - 2018.05 (3년, 3년차)
성과달성 확인방법	- 파일럿 테스트에 의해서 고감쇠 콘크리트 내진구조시스템의 지진에 대한 응답목표량(KBC-2009 등) 만족여부를 확인 (실험적방법). - 고감쇠 내진구조시스템이 적용된 콘크리트구조물의 부재수분의 비선형 지진응답해석에 의해서 목표성능이 만족되는지 확인 (수치해석법)

2. 국내외 기술 개발 현황

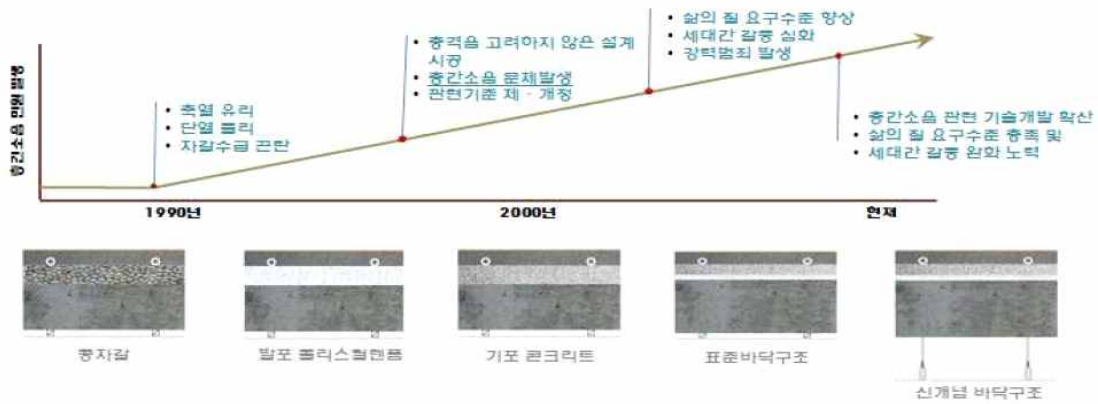
가. 국내 일반 공동주택 바닥(온돌) 구조설계

- 바닥마감재는 두께 2mm 전후의 발포염화비닐계장판지와 종이장판을 주로 사용. 최근 내장재의 고급화 추세로 중대형 공동주택에서 두께 5~10mm 정도의 목재마루판 사용. 마감물탈은 단열, 완충층에서 바닥표면까지 구성층으로 시멘트몰탈로서 40~50mm 정도의 두께로 시공
- 단열 및 완충재는 온돌구조에서 바닥하부의 열 손실과 바닥충격을 막기 위해 경량기포콘크리트, 발포폴리스티렌폼(스티로폼), 자갈 등을 사용하여 통상 50~90mm 두께로 시공. 슬래브는 건물구체를 형성하고 있는 부위로서 보통 120~180mm의 두께의 철근콘크리트로 이루어짐

■ 일반적인 바닥구조 ■



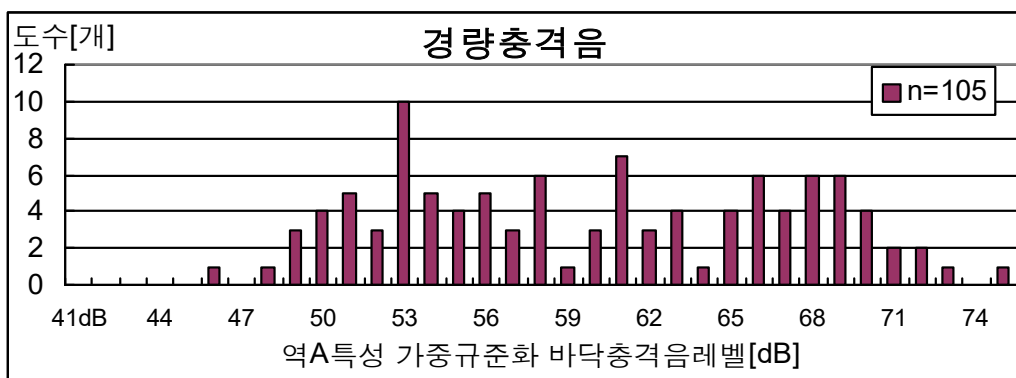
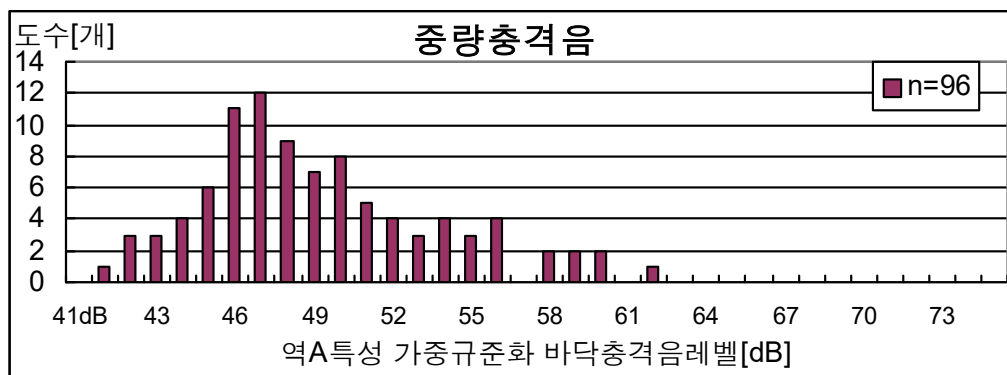
- 이와 같은 일반적인 콘크리트 바닥구조에 대한 바닥 충격음 차단성능 실태분석 결과 경량충격음의 성능레벨은 46dB~75dB까지 약 30dB의 큰 변동폭을 나타냄. 중량충격음은 45~54dB 부근에서 75%를 차지함
- 충격음 차단성능 분포에 대한 분석결과 바닥구조(마감재 제외)는 경량 63dB, 중량 52dB 수준이 48%를 차지하며, 마감재 포함하는 경우 경량 60dB, 중량 50dB 수준이 49%를 차지함. 건교부의 공동주택 바닥충격음 차단성능 기준(안)은 경량 58dB이며 중량은 50dB 임



■ 바닥 구조에 따른 민원현황 ■

< : 고성능 바닥구조 시스템 기술개발 KICT 2015-147, 2016.01>

- 최근 공동주택 층간소음과 관련된 민원과 분쟁 발생 빈도가 높아지고 있으며 층간소음으로 인한 환경분쟁신청 현황을 살펴보면, 2012년 7,021건에서 2013년 15,485건으로 전년대비 두 배이상 증가하였음
- 이에 따 공동 주택의 층간소음 문제를 해결하기 위해 공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준을 개정함



■ 바닥 충격음 차단성능 실태분석(분석대상 : 105개) ■

<자료 : 기존 APT의 층간소음 저감방안, 환경부>

재 료 \ 형태	유기계											무기계						복합
	PE	EPS	EVA	EPP	PP	P0	왕겨	목모	스티로폼	발포고무	플라스틱	Con	금속	질석	모래	고화제	MgO	
시트(판)	○		○			○				○	○		○					
폼	○		○															○
패널					○							○						
충진							○		○									
스파이크																		
보드	○	○	○	○														
액상																○		
패드			○															
보드								○									○	
채움재														○	○			

■ 바닥 완충재 분류 ■

< : 고성능 바닥구조 시스템 기술개발 KICT 2015-147, 2016.01>

종류	특성
EVA	- 투명성과 접착력 탄성이 크고 부드러우면서 내구성이 강함 - 타폴리머에 비해 저가
EPS	- 통상 비드법을 이용, 가열 압축으로 단단하게 만듦 - 보온성, 내충격성이 강함
EPP	- 폴리에틸렌 수지에 발포제를 배합하여 압축 발포하여 제조 - 열전도율이 낮아 단열재로 사용
PP	- 열가소성으로 내광성, 내약품성, 방오성 등 내구성이 큼 - 환경유해성이 낮으며 저가
PO	- 이중 결합을 여러 개 가지고 있는 유기 화합물의 통칭 - 탄성 고무 등이 있음
왕겨	- 벼 도정 후 발생하는 껍데기로 규산질 재료이며 비중 0.25 - 가격이 저가이나 장기간 후 변형 및 퇴비화됨
스티로폼	- 열전도를 줄여 주는 작은 미세공극 다량 함유, 비중 0.02 ~ 0.05 - 내수성이 크고 세균이나 곰팡이에 손상되지 않고 저가
발포고무	- 내구성, 내한성, 내열성, 내수성, 내후성 및 단열성이 높음 - 경질, 연질 종류가 있으며 가격이 고가
복합재	- 합성수지(PVC, PP 등)에 석분(운석, 질석 등)과 목분을 추가하여 발포 - 온도변화와 상부무게에 의한 변형 저하
질석	- 흑운모(黑雲母)가 풍화하여 수분을 함유한 광물 - 경량이며 단열, 보온 성능이 뛰어남

■ 바닥 완충재 재료 특성 ■

<자료 : 고성능 바닥구조 시스템 기술개발 KICT 2015-147, 2016.01>

- 공동주택 층간소음 저감을 목표로 슬래브 상부에 다양한 바닥완충재를 설치하였으며 이러한 완충재는 크게 유기계, 무기계, 복합재료로 분류가 가능
- 바닥충격을 저감용 완충재를 구성 재료별 특성을 살펴보면 유기계는 폴리머류와 고무류를 주원료로 하며 완충재 자체의 탄성체를 이용하여 슬래브 상부에서 충격 가진시 댐퍼 기능을 통한 진동과 소음 저감을 목적으로 함
- 공동주택 층간소음 저감을 목표로 콘크리트 슬래브 상부에 완충재, 기포 콘크리트, 마감모르타르, 표면 마감재를 적층하는 표준바닥구조가 제안되었지만 표준바닥구조로도 중량충격음에 의해 발생하는 진동으로 야기되는 소음 저감이 미비하여 소음 저감이 큰 다양한 바닥구조 시스템이 개발되고 있음
- 개발되는 바닥시스템을 살펴보면, 재료적층구조를 이용하여 충격원에 의하여 발생한

- 국내 기둥 접합부 절연용 완충재 적용으로 진동저감 기술과 바닥구조 이외에 천정재를 이용한 소음저감 기술이 최근 들어 소개되어 있음

5	차음성능, 바닥충격음 관련 ISO 국제표준	정정호	2015
6	기존 공동주택의 바닥충격음 현황 및 저감기술	이병권	2015
7	신축 공동주택 바닥충격음 저감 기술 연구동향	양홍석	2015
8	페타이어칩을 활용한 바닥충격음 저감방안	박지훈	2015
9	층간소음 감소를 위한 바닥마감재 유형별 바닥충격음 감쇠효과 연구	김재규	2014
10	바닥충격음 완충재 재질 및 충격원에 따른 중량충격음 특성	류종관	2014
11	공동주택 바닥충격음 완충재 특성에 따른 중량충격음 저감레벨 평가	정근형	2014
12	강재프레임 모듈러주택의 바닥충격음 성능평가	천영수	2014
13	일체형 바닥완충재의 바닥충격음 차단성능 영향에 관한 연구	김항	2014
14	바닥충격음 저감을 위한 슬래브 보강	이병권	2013
15	바닥충격음 완충층의 처짐 영향 요소	이범식	2013
16	바닥충격음 인정구조 성능 현황	정진연	2012
17	공동주택 바닥충격음 저감공법별 보행감 평가	이병권	2012
18	법제화에 따른 바닥충격음 현황과 이에 대한 대응	유승엽	2012
19	프리패브 주택의 바닥충격음 특성	이원학	2012
20	바닥충격음 해석시 실 내부 공기층의 영향에 관한 연구	이연종	2011

- 한국건설기술연구원에서는 세라믹계 수지와 무기 바인더를 혼합하여 제조한 타설형 완충재에 관한 연구개발을 진행하고 있는 것으로 조사됨
- 한국건설기술연구원에서는 무기계 분말을 혼합하여 30초간 교반한 후 아크릴 수지를 무기재료와 혼합 1분 30초간 교반하였으며 이를 슬러리 상태의 재료와 EPS 비드를 혼합하여 30초간 추가 교반 후 몰드에 타설하였으며 7일간의 건조 및 양생을 실시함
- 한국건설기술연구원에의 타설형 완충재에 대한 충격원별 중량충격음레벨은 1/3을 옥타브 밴드를 나타낸 것으로 조사되어 시멘트 사용량 15% 보다 30%를 사용한 시험체가 충격음 저감에 더 효과적인 것으로 조사됨



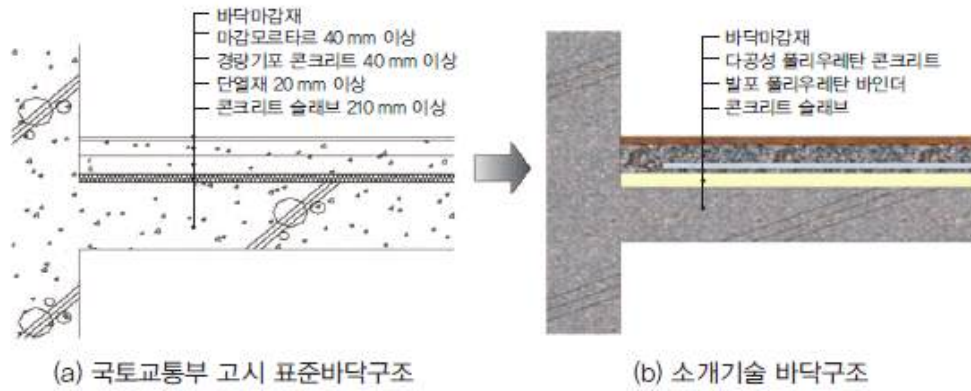
■ 한국건설기술연구원 타설형 완충재 ■

ID	Cement	Silica powder	Sodium sulfate	EPS	Anhydrite	Fly ash
1						
2	0%	25%				
3						
4						
5	15%	30%	1%	1%	8%	30%
6						
7						
8	30%	35%				
9						

■ 한국건설기술연구원 타설형 완충재 제조 배합 ■

<자료 : 고성능 바닥구조 시스템 기술개발 KICT 2015-147, 2016.01>

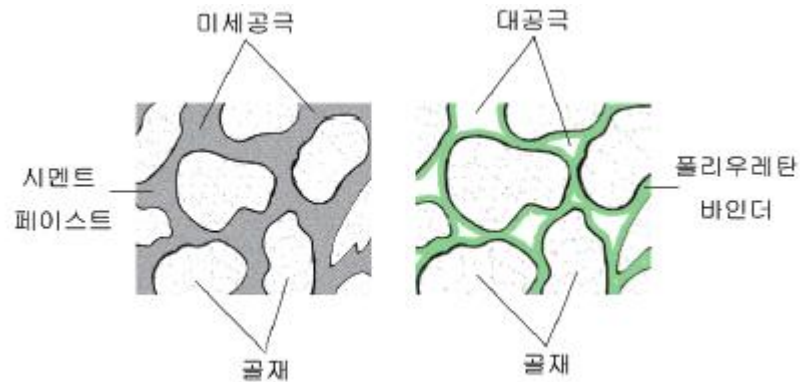
- 주)한길산업과 단국대학교 건축공학과에서는 “바닥충격음 저감을 위한 다공성 폴리우레탄 콘크리트”에 대한 기술 개발을 진행함. 본 기술은 다층 공동 주거공간의 구조부 공사 후 기층면에 시공하는 바닥구조 기술로 표준바닥구조의 완충재(단열재)에 해당부분에 발포 폴리우레탄 바인더를 적용하는 것임
- 이를 통해 발포와 탄성을 이용한 소음진동의 흡수와 더불어 마감모르타르에 삽입된 보일러 배관으로부터 유입되는 열을 슬래브 구조체에 전달되지 않도록 하는 단열의 역할을 수행할 수 있음. 또한, 표준구조의 경량기포콘크리트와 마감모르타르(흔히 방통모르타르라 불림)에 해당하는 부분은 기존에 각 40 mm의 두께로 제작되어 각각의 역할을 수행하였으나 개발기술에서는 다공성의 폴리우레탄콘크리트를 적용하여 기포콘크리트가 갖는 다공질의 요소와 마감모르타르가 갖는 구조적요소를 통합하도록 계획함
- 본 기술에서 적용된 폴리우레탄 콘크리트는 투수포장재와 가로수 보호판 등에 적용되는 건축 및 토목재료임. 기존 시멘트 콘크리트의 경우 전체 용적의 최대 5 %미만의 공기량을 나타내고 있으나 폴리우레탄 콘크리트의 경우 비분을 제거한 골재 표면을 바인더가 코팅하여 골재간 결합되는 특성으로 인해 30 % 이상의 공극률과 1등급의 투수계수를 가짐



■ 한길산업 및 단국대학교 적용기술 ■

< : 한국콘크리트학회지 제27권 2호, 2015.03 >

- 기존 완충재로 가장 빈번히 사용되는 폴리스틸렌(스티로폴)과의 경우 0.5 ~ 1.2 W/m²·K의 열관류율과 1.0 ~ 1.4 mm 이상의 잔류변형을 고려할 때 본 폴리우레탄 바인더 완충재의 우수성을 확인할 수 있음
- 또한 치수안정성과 흡수량, 손실계수 등에서는 국토해양부 고시(2009-1217호)에서 규정한 표준바닥구조 완충재의 기준치를 모두 만족하는 것으로 나타남



■ 한길산업 및 단국대학교 적용 골재구조 ■

<자료 : 한국콘크리트학회지 제27권 2호, 2015.03 >

평가항목(단위)	개발목표치	시험결과
동탄성계수(MN/m ³)	150 이하	209.1
손실계수	0.1 ~ 0.3 범위 이내	0.3
가열 후 동탄성계수(MN/m ³)	—	83.0
가열 후 손실계수	—	0.7
흡수량(%v/v)	3.5 이하	1.4
치수안정성(%)	5 이하	길이: 0.3, 너비: 0.2 두께: -0.8%
잔류변형(mm)	0.3 이하	0.1
열관류율(W/m ² · K)	0.81 이하	0.25

■ 한길산업 및 단국대학교 적용제품 시험결과 ■

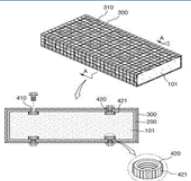
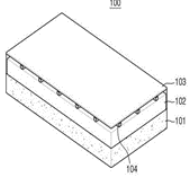
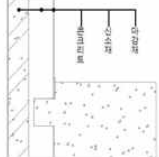
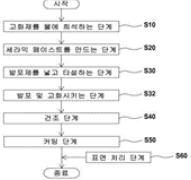
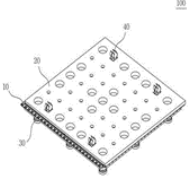
< : 한국콘크리트학회지 제27권 2호, 2015.03>

- 한길산업 개발한 제품인 층간소음 방지를 위한 다공성 폴리우레탄 콘크리트는 기술적으로 기술의 적용을 통해 기존 공동주택 바닥 구조에 비해 약 50mm 이상 두께 감소가 가능함. 이를 통해 본 기술이 적용되는 신규 주택은 거주자의 생활공간 확장이 도모됨. 특히 중요한 것은 기존 주택의 재건축 및 리모델링에 본 기술의 적용 효과인데, 최대의 층고 높이를 확보한 상태에서 재시공이 가능함

다. 국내 최근 특허출원동향

- 최근 들어 청주대학교와 기하엔지니어링에서 출원한 “철근콘크리트 공동주택의 층간소음 저감 공법”을 비롯하여 공동주택의 층간소음 해결을 위한 다양한 구조 및 공법에 대한 특허출원이 이루어지고 있는 것으로 조사됨

■ 층간소음 방지 관련 특허 list ■

구분	발명의 명칭	출원번호	출원일	현재상태	출원인	대표도면
1	철근콘크리트 공동주택의 층간소음 저감 공법	2015-0128952	2015.09.11	등록	청주대학교 산학협력단, (주)기하엔지니어링	
2	철근콘크리트 공동주택의 층간소음 저감 공법	2015-0108501	2015.07.31	심사중	청주대학교 산학협력단, (주)기하엔지니어링	
3	내력 향상이 가능한 층간소음 저감 보강공법	2015-0065953	2015.05.12	거절	한국교통대학교산학협력단, 건양기술공사 건축사사무소	
4	별집형 세라믹 발포품 및 그 제조방법과 이를 이용한 공동주택 층간소음 방지 시공방법	2014-0195909	2014.12.31	등록	주식회사 피오씨	
5	층간소음 바닥재	2014-0009145	2014.01.24	등록	대광공업(주)	

6	공동주택의 층간 바닥충격을 차단구 조 및 그의 시공방 법	2009-0034591	2009.04.21	등록	이피에스코리아, 두산건설	<pre> graph TD A[특정 환경에 설치공법] --> B[EPD에 의한 설치공법] B --> C[탄성발포폴리스틸렌 완충재보드 설치공법] C --> D[절합기로 콘크리트로 타발공법] D --> E[마감, 포로타로 타발공법] </pre>
7	콘크리트 슬래브의 층간소음 차단구조	2011-0014104	2011.02.17	거절	(주)송원산업	

라. 개발기술의 특징 및 장점

- 본 개발기술은 진동 및 소음 제어기술에 대한 것으로, 보다 구체적으로는 고감쇠 성능이 필요한 대상 부재 및 구조체에 적용할 수 있도록 고감쇠성능을 확보하면서 동시에 필요한 폴리우레탄 함량을 최소화하여 경제성까지 우수한 폴리우레탄콘크리트복합체, 그 제조방법 및 콘크리트응용제품에 관한 것임.
- 본 기술의 폴리우레탄콘크리트복합체, 그 제조방법 및 응용제품은 진동 및 소음 제어를 위한 것으로, 굵은 골재가 폴리우레탄매트릭스로 결합되는 구조의 폴리우레탄복합체가 기존 시멘트 기반 콘크리트에 비하여 감쇠성능은 우수하지만 경제성이 떨어지는 단점을 극복하기 위한 것임
- 본 기술은 굵은 골재 사이에 폴리우레탄을 완전히 채우는 구조가 아니라 굵은 골재표면을 폴리우레탄으로 코팅할 정도로만 폴리우레탄을 사용하고 나머지공간은 시멘트페이스트를 사용함으로써 상대적으로 고가인 폴리우레탄 함량을 감소시켜 경제성을 확보하면서도 고감쇠성능까지 우수함
- 또한, 본 발명의 폴리우레탄콘크리트복합체, 그 제조방법 및 응용제품에 의하면 폴리우레탄을 굵은 골재 표면을 코팅하기 위한 함량보다 더 주입하게 되면 감쇠성능이 우수한 층이 생겨 소음 및 진동 저감 성능이 향상될 수 있으므로, 폴리우레탄 함량을 조절하여 소음 및 진동저감에 대한 목표성능을 매우 용이하게 조절할 수 있음
- 본 기술은 폴리우레탄으로 코팅된 굵은 골재를 공극없이 서로 맞닿도록 배치하고, 나머지 공간을 시멘트로 채우는 폴리우레탄콘크리트 복합체에 관한 것임
- 본 기술은 골재를 포함하고 있으므로, 건축, 토목 분야에 적용 가능할 것으로 판단됨
- 본 연구에서 개발된 고점성 폴리우레탄복합체는 댐퍼 시스템 및 주요부재의 적용을 통하여 구조물의 내진·내풍 성능을 개선 가능할 것으로 판단됨
- 또한, 내진·내풍성능뿐만이 아니라 공동주택 슬래브의 소음진동저감에 활용 가능성이 높아 향후 다양한 구조물의 성능개선을 위한 적용성을 크게 확대함
- 수반되는 세부 기술로는 고점성 폴리우레탄복합체가 가지는 비고전 감쇠(non-classical damping) 특성을 처리하는 새로운 알고리즘 및 고감쇠 부재가 적용된 건축물의 내진성능 측정 프로그램 분야로써, 관련분야에 연구개발 견인역할을 수행하

여 국내기술의 세계선도 및 국내보유기술의 선진화가 가능할 것으로 판단됨

■ 도로용 포장재료

- 폴리우레탄은 우수한 열안정성 및 내구성, 기능성으로 우수한 휨강도를 나타내며, 기존 아스팔트를 대체할 수 있음. 폴리우레탄 콘크리트를 사용하여 산책로, 공원으로 또는 자전거 도로 등의 도로 바닥 포장용으로 활용 가능할 것으로 판단됨

■ 건물용 바닥재

- 폴리우레탄은 방음 성능을 가지고 있는 것으로 알려져 있음. 따라서, 본 기술에 따른 폴리우레탄콘크리트 복합체를 건물 소음 저감용 완충재 또는 차단재로서 활용 가능할 것으로 판단됨

■ 건물용 외벽재

- 폴리우레탄은 방사선 차폐 성능을 가지고 있는 것으로 알려져 있음. 따라서, 본 기술에 따른 폴리우레탄콘크리트 복합체를 벽돌 형태로 제조하여 원자력 발전소 등의 건물 외벽재로서 활용 가능할 것으로 판단됨

■ 건물용 내진·내풍 보강공법

- 폴리우레탄은 높은 점성, 내구성, 우수한 휨강도를 나타내며, 높은 에너지 흡수능력을 가지고 있음. 폴리우레탄 복합체를 사용하여, 기존 중·저층 건물의 내진보강공법 및 고층건물, 플랜트건물 등의 내풍보강공법에 활용 가능할 것으로 판단됨

<자전거 도로>



<건물용 바닥재>



<건물용 외벽재>



<건물용 내진·내풍 보강공법>



■ 폴리우레탄 적용 가능 제품 예 ■

3. 연구 수행 내용 및 성과

가. 연구개발 목표

(1) 최종 목표

- **Task A) 전기방사기술 기반 등가감쇠 10%급 신재료 및 콘크리트 복합체의 분산성 평가·향상기술** : 건축구조물의 내풍, 내진, 소음(충간)에 대한 사용성능 개선을 위하여 폴리우레탄(Polyurethane) 등 플라스틱 기반 Nano-Electrospinning 기술을 활용한 등가감쇠 10%급 고감쇠·저비용 다기능 콘크리트 복합 신소재를 개발
- **Task B) 고감쇠 콘크리트 복합체기반 진동소음 저감시스템** : 구조물 전체의 진동·소음 저감시스템 개선을 위한 구조시스템 제안
- **Task C) 내진성능 개선을 위한 고감쇠 구조시스템** : 구조물 전체의 내진성능 개선을 위한 구조시스템 제안

(2) 연차별 연구개발 목표 및 내용

연차	연구목표		주요 연구내용
1차 연도 (15.06 ~16.06)	Task A	신재료 개발 및 복합신소재의 분산성 평가 및 향상기술 Nano-Electrospinning 장비, 공정시스템 개발 및 시성형	- 폴리우레탄 기반 고감쇠 신재료 개발 - 폴리우레탄 기반 고감쇠 신재료와 콘크리트 복합체의 분산성 평가 기술 개발 - Nano-Electrospinning 공정/장비의 설계 및 개발 - 시성형을 통한 시제품 제작 및 성능 평가
	Task B	고감쇠 신재료의 감쇠성능 검증	고감쇠 신재료의 전단시편시험에 의한 감쇠성능 검증법 개발
	Task C	고감쇠 신재료의 내진성능 개선을 위한 감쇠성능 검증	- 고감쇠 신재료 기반 내진성능 개선을 위한 감쇠성능 검증법 개발, 즉 감쇠성능을 고려 할 수 있는 비선형 - 내진해석용 프로그램을 개발함과 동시에 이를 바탕으로 건축물의 감쇠성능에 따른 비선형지진응답 특성을 분석
2차 연도 (16.06 ~17.06)	Task A	성능기반 고감쇠 신재료의 확장 개발 및 확장 개발된 고감쇠 복합 신소재의 분산성 평가 및 향상기술 개발 Nano-Electrospinning 공정 개선 및 콘크리트 복합체 제작	- 성능기반 고감쇠 신재료의 확장 개발 및 비교평가 - 확장 개발된 고감쇠 신재료와 콘크리트 복합체의 분산성 평가 기술 최적화 - Nano-Electrospinning 공정/장비의 개선 및 성능향상 - 콘크리트 복합체 제작 및 평가
	Task B	고감쇠 복합 신소재를 활용한 진동·소음성능 개선을 위한 구조부재 보강재	고감쇠 콘크리트 복합 신소재를 이용한 진동·소음성능 개선을 위한 구조부재·마감재·바닥판 개발 및 재료시험을 통한 감쇠성능의 검증

3차 연도 (2017.06 ~2018.06)		바닥판 개발	• 기존 재료와의 비교 및 검토
	Task C	고감쇠 복합 신소재를 활용한 내진성능 개선을 위한 구조부재 개발	• 고감쇠 콘크리트 복합 신소재를 이용한 내진성능 개선 • 을 위한 구조부재 시스템 개발, 재료시험을 통한 감쇠 • 성능의 검증 및 기존 재료와의 비교 및 검토
	Task A	재료 최적화 및 구조체 적용 기술 개발 Nano-Electrospinning 공정을 활용한 콘크리트 복합체 개발	• 경제성을 고려한 최적 재료 선정 및 제조방법 보완 및 구조체 적용성 검토 및 기술 보완 • Nano-Electrospinning 공정을 적용한 다양한 콘크리트 복합체 개발 및 평가
	Task B	구조실험 및 해석에 의한 구조물 전체의 진동 성능 개선 효과 검증	• 마감재·바닥판의 진동성능 평가를 위한 진동대 구조실험 실시 및 결과 분석 • 구조물 전체의 진동성능 개선 효과를 해석을 실시하여 검증
	Task C	구조실험 및 해석에 의한 구조물 전체의 내진성능 개선 효과 검증	• 고감쇠 구조부재의 내진성능 평가를 위한 반복가력·자유진동 구조실험 실시, 결과 분석 및 건축구조물 전체의 내진성능 개선 효과를 해석을 실시하여 검증

나. 연구수행 내용 및 결과

(1) Task A: 전기방사기술 기반 등가감쇠 10%급 신재료 및 콘크리트 복합체의 분산성 평가·향상기술

- 고감쇠 신재료 개발: (a) 프리플레이스트 골재혼입 폴리우레탄 복합재료

– 고감쇠 폴리머 모르타르와 폴리우레탄

- 폴리머 모르타르 또는 콘크리트는 폴리머(Polymer)인 수지를 결합재로 골재(모래, 자갈)와 충전재(탄산칼슘, 플라이애쉬 등) 등을 결합하여 경화한 복합체로서 결합재인 폴리머의 종류 및 사용량, 혼화재 등의 조건이 폴리머 복합체의 경화정도, 경화시간, 기계적 강도, 부피변화 등의 물리·화학적 특성을 지배하고 있다.
- 폴리머 모르타르 또는 콘크리트의 특징과 폴리우레탄 수지의 특성, 경화 구조 및 제조 등에 대해 대략적으로 살펴보면 아래와 같다.
- 시멘트 모르타르 또는 콘크리트는 건축·토목 등 건설 재료로서 폭넓게 사용되고 있지만 경화가 느리고 건조수축이 크며, 중량에 비해 압축·휨·인장강도가 작고, 수밀성이 낮고, 내약품성이 낮은 등 본질적인 결함이 있어 이를 개선하려는 노력이 가중되고 있다. 이러한 노력의 일부로 시멘트에 폴리머를 첨가하여 성능을 개선시킨 시멘트-폴리머 모르타르, 콘크리트와 경화된 시멘트 복합체에 폴리머를 함침하여 성능을 개선하는 폴리머-함침 모르타르 또는 콘크리트, 그리고 결합재로서 시멘트를 전혀 사용하지 않고 유기 고분자 물질인 폴리머를 사용한 폴리머 모르타르 또는 콘크리트 등이 개발되었다. 폴리머를 사용하는 모르타르 및 콘크리트는 다음의 3종류가 있다.

-
- 폴리머-시멘트 모르타르 또는 콘크리트 : Polymer-Cement Mortar(Concrete) or Polymer-Modified Mortar(Concrete) ; PCM(PCC) : 결합재로서 시멘트와 폴리머를 이용하여 골재를 결합시킨 모르타르 또는 콘크리트로서 폴리머로서는 SBR, PAE, EVA 등의 액상 폴리머와 재유화형 분말수지 등이 이용된다.
 - 폴리머-함침 모르타르 또는 콘크리트 : Polymer-Impregnated Mortar(Concrete) : PIM(PIC) : 경화 모르타르(콘크리트)에 모노머, 프리폴리머, 폴리머 등을 함침시키고, 중합 등의 방법을 통하여 모르타르(콘크리트)를 폴리머와 일체화한다.
 - 폴리머 모르타르 또는 콘크리트 : Polymer Mortar (Concrete) ; PM(PC) : 결합재로 폴리머(Polymer 수지, 합성수지)만을 사용하여 골재와 충전재인 중탄산칼슘이나 플라이애쉬 등을 결합·경화시킨 것으로, 폴리머는 주로 레진을 이용한다.
 - 이 중 폴리머 모르타르 또는 콘크리트는 일반적으로 시멘트 모르타르 또는 콘크리트에 비해 다음과 같은 장점이 있다.
 - 압축강도, 휨강도, 인장강도가 크다.
 - 수밀성이 양호하고 방수성, 내동결융해성이 우수하다.
 - 내약품성(특히 내산성)이 우수하다.
 - 내마모성이 우수하다.
 - 진동감쇄성이 크다.
 - 전기절연성이 크다.
 - 표면이 매끈매끈하여 광택이 있기 때문에 청소하기 쉽다.
 - 안료에 의한 착색이 용이하다.
 - 접착제로 용이하고 확실하게 구조적인 접착이 가능하다.
 - 경화 시간을 광범위하게 조절할 수 있고, 경화 종료까지의 시간이 아주 짧다.
 - 기본적으로는 시멘트 모르타르(콘크리트)와 동일한 제조 방법으로 생산할 수 있다.
 - 폴리머 모르타르 또는 콘크리트에 일반적으로 사용되는 수지의 종류는 다음 그림과 같다.
-

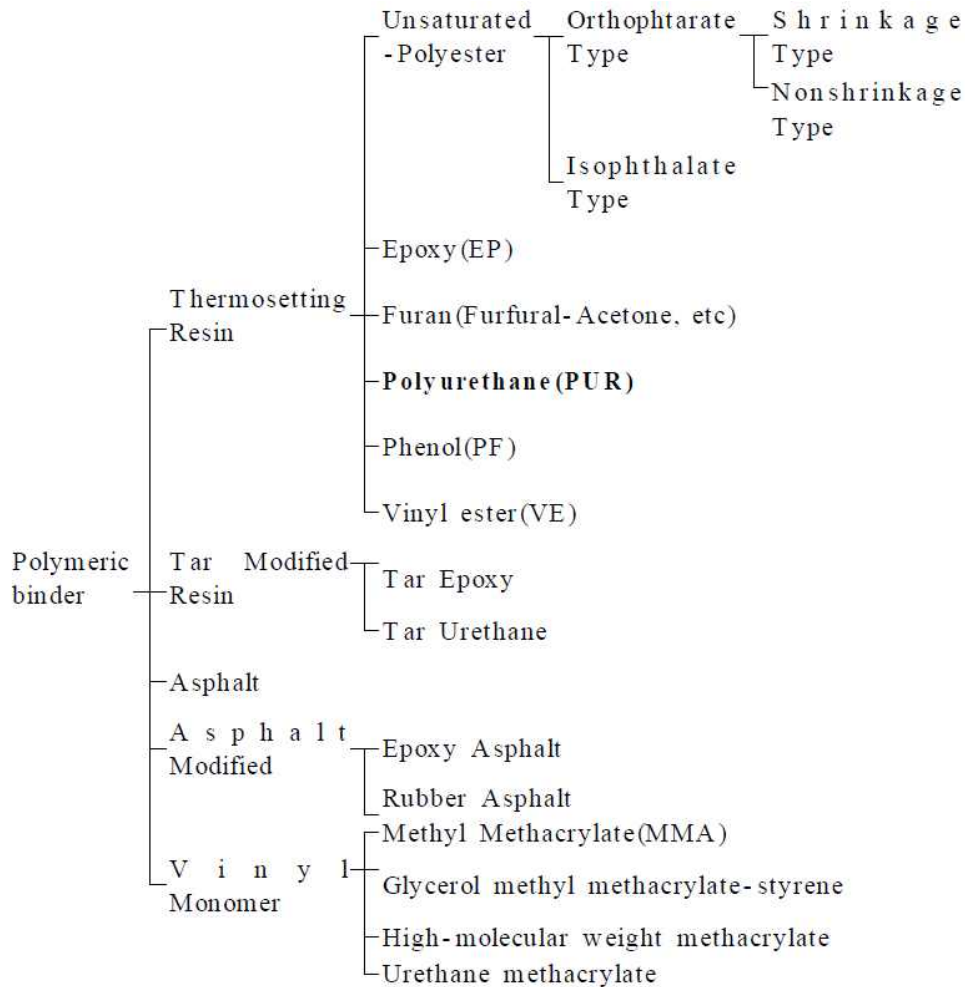


그림. 폴리머 모르타르(콘크리트)에 사용되는 폴리머 바인더와 액상 수지의 분류

- 폴리머 모르타르 또는 콘크리트의 용도는 일반적으로 다음과 같다.
- 보수재(補修材) : 콘크리트 구조물의 열열(葉裂) 또는 균열의 보수재, 손상을 입은 콘크리트 구조물의 때움 부재, 부식성 보강근의 녹방지 피막재 등으로 이용된다. 폴리머 모르타르 또는 콘크리트가 보수재로서 쓰이는 이유는 빠른 경화시간, 모르타르 또는 콘크리트에 대한 우수한 접착성, 매우 낮은 투수성, 우수한 내마모성, 얇은 부재(3~5mm)로서의 이용성, 고강도, 고내구성 등 때문이다. 한편, 폴리머 모르타르 또는 콘크리트의 단점은 재래식 시멘트 모르타르 또는 콘크리트에 비해 단위 부피당 단가가 높고, 열에 의해 영향을 받으며, 수지나 모노머 종류의 영향을 받고, 작업시 작업원 등에 대한 인식 및 친근감 부족 등이다.
- 바닥재 : 주택, 창고, 사무실, 학교, 병원, 백화점, 화장실, 통로, 계단, 주차장, 철도 플랫폼 등의 바닥재로 이용된다.
- 보도블록 : 보도(인도), 교량 상판, 인도교 상판, 비행장 활주로 등.
- 부식방지용 내장재(內粧材) : 약품 배출구, 화학 또는 기계 공장 바닥, 산 저장성 타일의 접착재, 약품 저장소 바닥재, 세균을 이용한 오수 정화조, 전기 절연물, 고온용 탱크, 해양 구조물, 항구 선착장 등
- 접착재 : 바닥용 접착, 벽재 또는 단열재의 접착, 타일 접착, 콘크리트 연결부 접착, 앵커볼트 삽입 접착 등

- 온통 방수재 : 콘크리트 지붕 바닥, 모르타르 벽, 콘크리트 블록, 물탱크, 수영장, 약품 탱크, 사일로 등
- 소구경 터널 시스템 : 전신 전화용 케이블 라인용 맨홀, 하수구용 맨홀 등
- 프리캐스트 제품 : 상·하수도용 FRP보강 폴리머 모르타르 파이프, FRP 보강 폴리머 모르타르 판넬, 진동 격리제(감쇄재), 마블 타일 또는 패널 등 전신 전화용 케이블 라인용 맨홀 또는 핸드홀, 전력 또는 가스 파이프, 하수구 덮개, U형 덮개, 보도판, 테라조 타일 또는 패널, 빌딩의 대형 장식 패널, 욕조, 세면대, 사무실의 카운터 등 일반적으로 프리캐스트 제품 생산을 위해서 폴리에스터-스틸렌이 가장 일반적으로 사용되지만 에폭시 수지는 낮은 경화수축과 높은 강도가 요구되는 기계를 설치하는 곳 등에 폭넓게 사용되고 아크릴과 우레탄은 부식 저항성이 요구되는 곳 또는 산 저항성이 요구되는 곳에 비닐 에스테르와 함께 이용된다. 또한 폴리머 콘크리트 생산을 위한 배치 플랜트, 복합장비, 기계장비나 그 몸체를 고정하는 구조물 등에도 쓰인다.
- 현장적용시공 : 댐의 배수로, 수력발전소의 유출구 보호대, 고온 지역의 건물 기초, 산성 물이 포함된 댐의 수위 조절용 수로의 부식 방지 덧씌우기 채 등.
- 폴리우레탄의 특징
 - 폴리우레탄은 1937년 상업화된 이래 60여년간 괄목할 만한 성장을 이루어 왔다. 또한 폴리우레탄은 단열성, 내약품성, 반응성 등의 우수한 물성으로 인하여 다양한 용도로 사용되고 있으며, 향후 지속적인 발전가능성을 갖고 있는 첨단소재로 인식되고 있다.
 - 폴리우레탄은 사용되는 이소시아네이트와 폴리올의 선택범위가 넓어 연질에서 경질까지, 엘라스토머에서 폼까지 다양한 제품설계가 가능하고 인장강도, 인열강도, 신율, 내마모성 등의 기계적 강도가 우수하며 가공성이 좋아 의류용, 신발용, 산업용 바퀴를 비롯하여 건축용도로써 옥상방수재, 실내체육관 바닥재, 옥상트랙 등 산업용뿐 아니라 생활용품으로의 응용전개가 넓은 대표적인 고분자화합물이다.
 - 모든 화학약품의 기본적인 골격은 원자(Atom)로 구성되어 있는데, 2개 이상의 원자로 결합된 물질을 분자라고 부르고 있다. 모든 화학약품은 분자단위로 형성되어 있다. 예로써 물은 한 개의 산소원자와 두개의 수소원자가 결합되어 한 개의 분자를 만든다.
 - 분자를 구성하고 있는 각각의 원자들 간에는 서로 잡아당기는 전기적인 힘이 있는데 이를 결합력(Bond Strength)이라고 한다. 원자들 사이에 2쌍의 전자를 공유하고 있는 분자결합을 이중결합(Double Bond)이라고 부르며, 이중결합으로 결합된 분자에 열과 압력을 가하면 결합이 끊어지면서 다른 분자와 새로운 결합을 시킬 수 있게 된다. 새로운 결합을 활성화시키기 위해 촉진제로써 촉매를 사용할 수 있다.
 - 이러한 원리를 이용하여 단분자(Monomer)인 물질을 복잡한 구조를 갖는 고분자(High Molecule 혹은 Polymer)물질로 전환시킬 수 있다. Monomer를 사용하여 Polymer화 시키는 반응을 중합(Polymerization) 반응이라고 하며, 단일 Monomer들만으로 만들어진 Polymer를 Copolymer라 부른다.
 - 우레탄결합(Urethane Bond)은 활성 수산기(-OH)를 갖고 있는 알코올과 이소시

아네이트기(Isocyanate Group, $-N=C=O$)를 갖고 있는 이소시아네이트(Isocyanate)가 부가 중합반응(Addition Polymerization Reaction)에 의해 반응열을 발생시키면 형성된다.(아래 그림).

- 1개 이상의 이소시아네이트기 (NCO Group)를 갖고 있는 이소시아네이트류와 1개 이상의 수산기($-OH$)를 갖는 알코올류를 다관능기(Polyfunctional)라고 하며 관능기가 적정조건 하에서 고온의 열을 발산시키면서, $[-NHCOO-]_n$ 의 구조를 가진 화합물질을 생성시키는데 이것을 우레탄 결합(Urethane Bond)이라고 하며, 1000개 이상의 분자가 결합된 것을 폴리우레탄(Polyurethane)이라고한다.(아래 그림).
- 거의 대부분의 폴리우레탄은 디이소시아네이트(Diisocyanate), 폴리올(Polyol), 쉘연장제(Chain extender)의 조합으로 이루어진다. 여기서 디이소시아네이트와 폴리올이 반응하여 이루어진 부분(Segment)은 연질 부분(Soft segment)가 되고, 디이소시아네이트와 쉘연장제가 반응하여 이루어진 부분은 경질 부분(Hard segment)이 되어 한 분자 내에 동시에 존재하게 된다. 이와 같은 분자 구조에 기인하여 폴리우레탄은 다른 합성수지에서는 찾아볼 수 없는 폴리우레탄만의 독특한 성질인 플라스틱 성질(강도)과 고무 성질(탄성)을 동시에 갖게 된다.

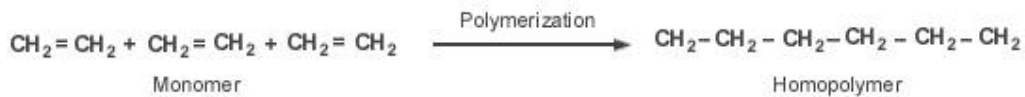


그림. 분자와 폴리머의 구조



그림. 우레탄 결합 (Urethane bond)



그림. 폴리우레탄 결합 반응

- 고감쇠 폴리우레탄 콘크리트 복합재료 제조 방법

- 감쇠는 외부에서 가해진 에너지가 재료 내부에서 열이나 소리 등과 같은 형태로 다른 에너지 형태로 소산되어야 이루어진다. 아래 그림은 재료의 하중에 변위에 따른 이력거동을 나타낸다. 아래 그림에서 하중과 변위 그래프에서 내부 영역의 면적이 재료의 이력거동 과정에서 소산된 에너지의 양을 나타낸다. 즉, 이력거동에서 재료의 반응에 의해 면적이 넓을수록 감쇠성능이 우수한 것이다. 감쇠를 나타

내는 또 다른 예로서 아래 그림에 자유진동 곡선이 있다. 충격이나 하중을 재료에 가하게 되면 재료는 아래 그림과 같이 처음에는 진동폭이 크지만 재료 내부에서 감쇠가 이루어지면서 진폭이 감소하게 된다. 감쇠가 큰 재료는 상대적으로 감쇠가 작은 재료에 비하여 진동 폭이 감쇠하는 비율이 상대적으로 크게 나타난다.

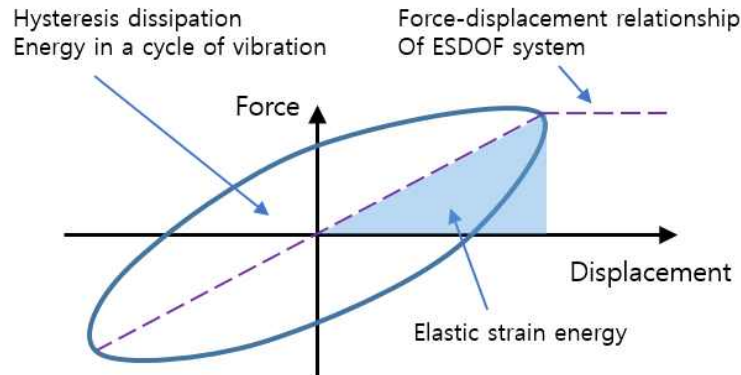


그림. 이력거동에 따른 감쇠

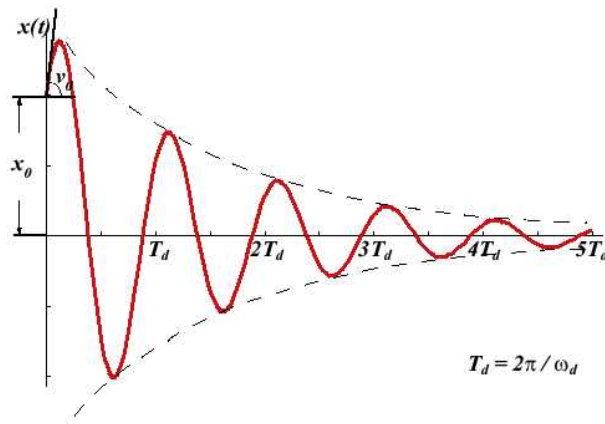


그림. 자유진동 곡선

- 고감쇠 폴리우레탄 콘크리트 복합재료 재료 및 제조 방법
- 진동과 소음을 획기적으로 저감할 수 있는 건설재료로 활용되기 위해서는 일반적으로 가장 많이 사용되는 콘크리트 대비 고감쇠 성능을 나타내야 할 뿐만 아니라 경제성을 확보하며, 이러한 점이 새로운 고감쇠 건설재료를 개발하는 데 있어서 도전적인 일이다. 이 연구에서는 이러한 목표를 달성하기 위하여 두 가지의 감쇠 원리와 2단계를 갖는 제조 프로세스를 제안하고자 한다.
- 이 연구에서는 앞에서 기술한 폴리우레탄을 이용하여 재료자체가 고감쇠 성능을 나타내어 에너지가 소산되도록 하였다. 폴리우레탄은 상용되는 재료 중 감쇠성능이 가장 뛰어난 것으로 알려져 있다. 그러나 폴리우레탄은 시멘트계 재료에 비하여 상대적으로 고가인 단점을 갖고 있다. 이에 폴리우레탄의 사용량을 줄이면서 감쇠성능을 향상시키기 위하여 골재 혼입과 진동이 왔을 때 골재사이의 마찰에 의해 에너지가 소산되는 두 번째 에너지 소산 원리를 적용하였다. 이러한 두 가지 원리를 적용하게 되면 외부에서 진동이 올 경우 감쇠성능이 뛰어난 폴리우레탄이 진동 에너지를 소산시켜 진동이 전달되는 양을 줄일 수 있고, 서로 맞물려 있는 골재들은 미세한 위치변화가 발생하면서 골재들끼리 마찰에 의해 진동 에

너지가 저감되게 된다. 골재를 활용하여 진동을 저감하는 방식은 대표적으로 철도 자갈 도상이다. 기차가 철도를 운행하는 과정에서 큰 하중과 진동이 유발되는데 자갈 도상은 하중을 지지할 뿐만 아니라 골재 맞물림 작용에 의해 진동을 저감한다. 그러나 반복되는 진동으로 자갈이 손상되거나 위치가 변하여 자갈 도상은 전체적으로 위치변화가 생기게 되고 진동 저감 효과도 감소하게 된다. 이에 반하여 이 연구에서 제안한 방법 의해 제조되는 복합재료는 탄성 및 변형 성능이 큰 폴리우레탄이 골재를 원위치로 돌려놓기 때문에 반복된 진동에 의한 감쇠 성능 저하가 없게 된다. 이와 동시에 골재를 혼입하기 때문에 상대적으로 고가인 폴리우레탄의 사용을 줄이게 되어 경제성을 확보할 수 있게 된다.

- 이러한 감쇠 원리가 성공적으로 적용되기 위하여 이 연구에서는 2단계의 제조 프로세스를 개발하였다. 고감쇠 성능이 필요한 대상 부재 및 구조체에 적용하기 위하여, 콘크리트에 통상 사용되는 골재와 액상형 폴리우레탄(시간에 따라 경화됨)을 재료로 사용하고, 두 단계의 프로세스에 의해 제조된다. 첫 번째 프로세스는 거꾸집에 굵은골재를 프리플레이스트로 채워 넣는다. 이때 골재의 입자들끼리는 서로 맞닿을 수 있도록 한다. 그 후 골재 사이사이의 공간을 액상형 폴리우레탄으로 채워 넣은 후 적절한 양생을 실시하여 폴리우레탄이 충분한 성능을 발휘할 수 있도록 한다. 아래 그림은 2단계 고감쇠 폴리우레탄 콘크리트 복합재료의 제조 과정을 나타낸다.

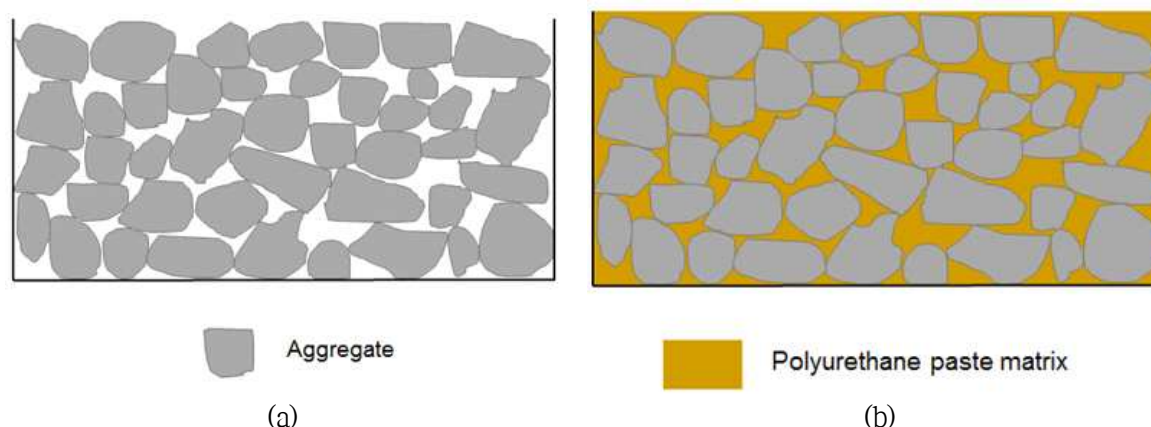


그림. 2단계 제조 공정 다이어그램; (a) 프리플레이스트 골재 (b) 폴리우레탄 페이스트 주입

◦ 재료 및 실험체 제작과 실험 방법

- 이 연구에서 제안한 프리플레이스트 골재 혼입 고감쇠 폴리우레탄 기반 복합재료의 성능을 검증하기 위하여 총 5가지의 배합에 대하여 실험체를 제작하였다. 결합재료는 시멘트 또는 폴리우레탄이며, 골재를 사용하여 콘크리트 복합재료를 아래 표와 같이 C-G-P 내지 PU-G-S-M을 준비하였다. 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트이며, 골재는 콘크리트에 사용하기에 적합한 성질을 갖춘 13 mm 굵은골재이다. 잔골재는 평균직경이 약 200 μm 인 규사를 사용하였다. 폴리우레탄은 주제와 경화제를 중량비로 1대 1로 섞은 액상형 폴리우레탄을 사용하였으며, 폴리우레탄 주제와 경화제의 물성은 아래 표와 같다.
- C-G-P에서 매트릭스는 물/시멘트비가 40%인 시멘트 페이스트이며, 굵은골재를 혼입하였다. 제조는 프리플레이스트 방식으로 하였다. PU-P는 매트릭스가

폴리우레탄으로만 이루어져 있으며, 골재를 혼입하지 않았다. PU-G-P은 PU-P와 같은 매트릭스이지만 골재를 혼입하였으며, 프리플레이스트 방식으로 제조하였다. PU-G-M는 PU-G-P과 재료는 동일하나 콘크리트를 제조할 때와 동일한 방식으로 골재와 폴리우레탄을 먼저 혼합한 후 실험체를 제조한 것이다. PU-G-S-M는 잔골재를 혼입하였을때의 효과를 보기 위한 것으로서 PU-G-M와 제조방법은 동일하지만 잔골재를 폴리우레탄 매트릭스의 부피비로 30 %를 치환하고, PU-G-M와 같은 방식으로 제조한 것이다.

- 이와 같은 PU-P를 통해 일반 콘크리트(C-G-P) 대비 폴리우레탄의 감쇠 특성을 확인할 수 있으며, PU-P와 PU-G-P의 비교를 통해 프리플레이스트 골재혼입에 따른 효과를 확인할 수 있다. PU-G-P과 PU-G-M를 비교하면 제조방법에 따른 차이를 확인할 수 있으며, PU-G-M와 PU-G-S-M를 비교하면 잔골재 혼입에 따른 영향을 확인할 수 있다.
- 감쇠비 측정을 위하여 40 mm × 40 mm × 160 mm의 몰드를 준비하였고, C-G-P에서는 첫 번째 제조 프로세스로서 몰드에 프리플레이스트 방식으로 골재를 최대한 채워 넣은 후, 두 번째 프로세스로서 시멘트 페이스트를 혼합기로 제조한 후 액상일 때 골재 사이에 부어 넣어 실험체를 제조하였다. PU-P에서는 폴리우레탄 주체와 경화제를 혼합기에 넣고 균질한 상태에 도달할 때 까지 혼합한 후 액상일 때 몰드에 부어 넣어 실험체를 제조하였다. PU-G-P에서는 첫 번째 제조 프로세스로서 몰드에 프리플레이스트 방식으로 골재를 최대한 채워 넣은 후, 두 번째 프로세스로서 폴리우레탄 주체와 경화제를 혼합기에 넣고 균질한 상태에 도달할 때 까지 혼합한 후 액상일 때 골재 사이에 부어 넣어 실험체를 제조하였다. PU-G-M 내지 PU-G-S-M에서는 모든 재료를 혼합기에 넣어 균질한 상태로 재료를 만든 후 복합재료를 제조하였다.
- 각 배합 별로 3개씩 실험체를 제작하였고, (23 ± 3) °C와 상대습도 (50 ± 5) % 조건에서 양생하고, 타설 2일 후 탈형하여 재령 28일까지 동일 조건에서 기건양생을 실시하였다.
- 감쇠비는 임계감쇠 대비 실제감쇠의 비로 정의되며 감쇠비가 클수록 진동에너지는 더 빠른 속도로 소산되며, 진폭이 빠른 속도로 감소된다. 따라서 감쇠비는 시스템이나 재료의 에너지 소산 능력을 나타내는 지표로 사용된다. 각 실험 배합별 감쇠비를 측정하기 위하여 ASTM C 215에 의한 충격 가진 시험 방법을 사용하였다. 실험체는 단면의 크기가 40 mm × 40 mm이며, 길이가 160 mm인 각 주형이다. 충격은 한쪽 면에 12.5 mm 직경의 쇠구슬을 타격하여 가하였으며, 반대쪽에 가속도계를 부착하여 진동 신호를 계측하였다. 감쇠비는 하프파워방법(half power bandwidth method)을 사용하여 구하였으며, 이를 위하여 가속도계로 측정한 시간 영역에서의 신호를 푸리에 변환을 통하여 주파수 영역의 신호로 변환하였다. 아래 식은 감쇠비를 구하는 식을 나타낸다.

$$\xi = \frac{f_2 - f_1}{2f_0}$$

- 여기서, ξ 는 감쇠비, f_0 는 공진주파수, f_1 과 f_2 는 공진주파수에 해당하는 파워대비 3 db 낮은 파워를 갖는 주파수를 나타낸다. 3 db의 차이는 절반의 파워를 의미

하며 주파수 영역에서 진폭(amplitude)이 $1/\sqrt{2}$ 인 것을 의미한다.

표. 배합 및 제조방법

구분	재료 구성			제조방법*
	매트릭스	굵은골재	잔골재	
C-G-P	시멘트 페이스트	혼입	미혼입	A
PU-P	폴리우레탄	미혼입	미혼입	—
PU-G-P	폴리우레탄	혼입	미혼입	A
PU-G-M	폴리우레탄	혼입	미혼입	B
PU-G-S-M	폴리우레탄	혼입	혼입	B

- * A: 프리플레이스트로 골재 혼입 후 매트릭스 주입하여 제작,
B: 매트릭스와 골재를 혼합기에 넣고 균질한 상태를 만든 후 제작

표. 폴리우레탄 주제와 경화제의 물성

구분	점도 (mPa.s)	비중	작업시간 (min)	경화시간 (hrs)	인장강도 (MPa)	신율 (%)	반발탄성 (%)
주제	2,000-4,500	1.05	30-70	24	6.9	250	40
경화제	2,000-6,000	1.35					

- 아래 그림은 기준 실험체인 시멘트 기반 콘크리트(C-G-P)와 이 연구에서 제안한 재료 및 제조 방법으로 제조한 프리플레이스트 골재 혼입 고감쇠 폴리우레탄 기반 콘크리트 복합재료(PU-G-P)의 시간 영역과 주파수 영역의 특성을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 PU-G-P 실험체는 C-G-P에 비하여 시간 영역에서 매우 빠른 속도가 감쇠가 이루어지고 있음을 알 수 있다.
- 아래 표는 C-G-P 내지 PU-G-S-M에서 제조된 실험체를 충격 가진 시험(impact test)을 통해 구한 시간 주파수대의 신호를 주파수 영역으로 변환한 후 하프파워법(half power bandwidth method)을 이용하여 구한 감쇠비를 나타낸다. 평균적인 값을 구하기 위하여 각 배합별로 3개의 실험체를 제작한 후 각 실험체별로 3회 반복 실험하였다.
- 아래 표에 나타난 바와 같이 폴리우레탄만으로 구성된 실험체인 PU-P는 일반 콘크리트(C-G-P)에 비하여 12배의 감쇠비를 나타내고 있다. 이를 통해 폴리우레탄은 일반 콘크리트에 비하여 매우 높은 감쇠특성을 갖고 있는 것을 확인할 수 있다. PU-G-P은 PU-P에 비하여 5.9 % 높은 감쇠특성을 갖고 있는 것으로 나타났다. 통상 감쇠특성이 우수한 재료만으로 이루어진 재료가 감쇠특성이 떨어지는 재료와 섞여 있는 경우 감쇠특성이 높을 것으로 예측되나 이 발명에서 제시한 방법에 의해 제조되는 콘크리트 복합재료 즉, 프리플레이스트(preplaced) 골재 혼입 고감쇠 폴리우레탄 콘크리트 복합재료는 폴리우레탄의 우수한 감쇠특

성 및 골재의 맞물림에 의하여 외부에서 가해지는 에너지가 소산되어 일반 콘크리트보다 우수할 뿐만 아니라 폴리우레탄 단독으로 사용된 경우에 비해서도 감쇠특성이 향상되는 것으로 나타났다. 동시에 가격이 낮은 골재 혼입에 따라 폴리우레탄만 사용한 경우에 비하여 제조비용 또한 줄일 수 있는 장점을 갖고 있다. PU-G-M의 경우 PU-G-P에 비하여 5.9 % 감소된 감쇠특성을 나타내었는데 이는 제조방식에 의한 차이로 모든 재료를 혼합하여 제조한 경우 폴리우레탄이 골재를 모두 감싸게 되어 골재의 맞물림에 의한 감쇠가 저감된 것이다. PU-G-S-M의 경우 PU-G-M에 비해서 4.4 % 감소된 감쇠성능이 나타났으며, 이를 통해 잔골재가 혼입되면 감쇠성능이 저감되는 것을 알 수 있다.

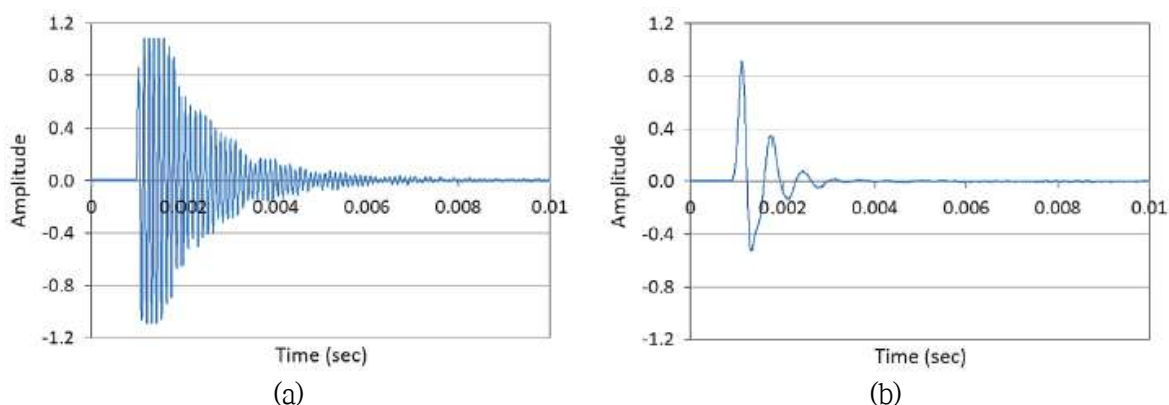


그림. 복합재료에 따른 감쇠특성; (a) C-G-P 실험체 (b) PU-G-P 실험체

표. 재료에 따른 감쇠성능

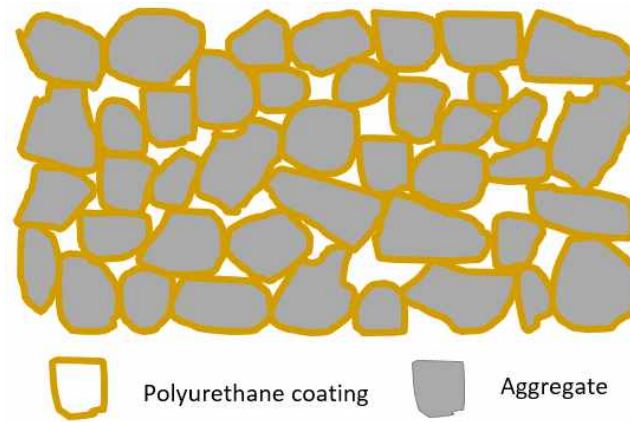
구분	실험체 번호	감쇠비 (%)	평균 감쇠비 (%)	총 평균 감쇠비 (%)
C-G-P	1	1.98	1.57	1.42
		1.13		
		1.60		
	2	1.74	1.68	
		1.68		
		1.61		
	2	0.94	1.01	
		1.11		
		0.98		
PU-P	1	16.83	16.6	17.1
		16.24		
		16.72		
	2	16.91	16.9	
		16.79		
		16.92		
	2	17.37	17.7	
		18.14		
		17.54		
PU-G-P	1	20.61	18.0	18.1
		16.48		
		16.99		

	2	15.63	17.9	
		17.34		
		20.83		
	2	16.36	18.2	
		19.19		
		19.04		
PU-G-M	1	16.29	16.6	17.0
		16.61		
		16.94		
	2	16.87	17.9	
		17.96		
		18.92		
	2	16.52	16.5	
		16.65		
		16.19		
PU-G-S-M	1	17.25	16.5	16.3
		16.13		
		16.15		
	2	17.03	16.3	
		15.97		
		15.84		
	2	16.05	16.0	
		15.76		
		16.10		

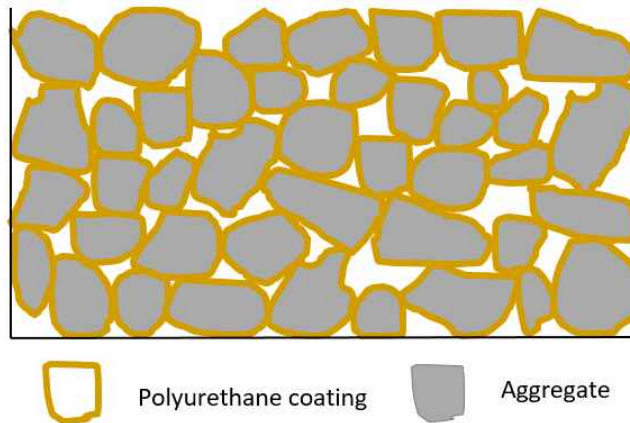
■ 고감쇠 신재료 개발: (b) 폴리우레탄 코팅 골재 혼입 콘크리트 복합재료

－폴리우레탄 코팅 골재 혼입 콘크리트 복합재료 설계 및 제조 공정

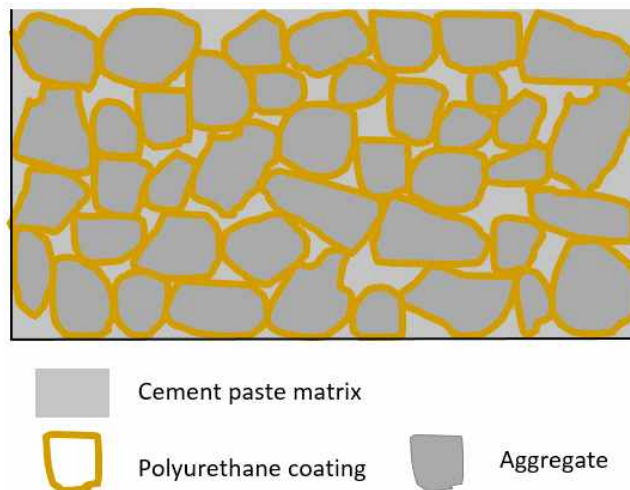
- 여기에서는 콘크리트의 감쇠성능을 높이고, 폴리우레탄의 사용을 최소화하기 위해 3단계 제작방법으로 제조된 고감쇠 프리플레이스 콘크리트를 제안하였다. 본 연구의 콘크리트는 일반 굵은 골재, 폴리우레탄 및 매트릭스 세 가지 재료로 구성된다.
- 일반 굵은 골재는 콘크리트의 전형적인 재료로 사용 할 수 있다. 폴리우레탄은 신선한 상태에서는 적절한 점도를 갖는 액체이며, 경화 상태에서 높은 감쇠를 갖는 고체로 변화한다. 매트릭스는 시멘트 페이스트 또는 모르타르 일수도 있으며, 시멘트 알칼리 활성화 슬래그 및 지오 폴리머를 포함한 모든 유형의 결합 재료를 사용할 수 있다.
- 아래 그림은 고감쇠 성능을 가진 새로운 프리플레이스 콘크리트의 제작과정을 보여준다. 3 단계 제작 과정은 다음과 같다. 굵은 골재와 폴리우레탄 혼합을 통하여 굵은 골재에 폴리우레탄이 코팅된다. (아래 그림(a)). 폴리우레탄으로 코팅된 굵은 골재의 충전 밀도를 최대화하기 위해, 폴리우레탄의 경화 전에 거푸집을 프레임을 형성한다. (아래 그림(b)). 시멘트 페이스트 또는 모르타르는 폴리우레탄 경화 후 코팅된 골재 사이의 공간을 완전히 채울 때까지 거푸집에 부어 넣는다 (아래 그림(c)).



(a)



(b)



(c)

그림. 제작 공정: (a) 폴리우레탄으로 골재 코팅, (b) 프리플레이스트 골재, (c) 시멘트 페이스트 주입

- 제작 과정은 폴리우레탄의 액체 상태에서 경화 상태에 변화 중 화학적 결합을 이용하여 폴리우레탄으로 코팅된 굵은 골재로 구성된 일체화 구조를 형성한다.
- 따라서 고 감쇠 프리플레이스 콘크리트의 높은 감쇠 비를 갖는 재료의 분포 및 구조는 기존 연구에서 보고된 일반고무 혼입 콘크리트의 고무 입자의 분포 및 구조와는 다르다.
- 기존의 일반고무 혼입 콘크리트는 고무 입자가 결합되어 있지 않고, 균일하게 분포되지 않기 때문에, 진동 에너지는 시멘트 페이스트 또는 모르타르 및 고무와 같

은 콘크리트의 골재를 통해 전달 될 수 있다. 반면에 고감쇠 프리플레이스 콘크리트의 폴리우레탄으로 코팅된 굵은 골재는 본질적으로 연결되어 균일하게 분포되어 있다. 그림(c)에 나타난 바와 같이, 폴리우레탄으로 코팅된 골재 층은 모든 방향으로 완전히 분포하고 있다.

- 따라서 진동파는 시멘트 페이스트 및 모르타르만으로 전달되지 않는다. 진동파는 표면에서 시작, 폴리우레탄 층을 통과하고 다른 표면에 도달하여 일반 고무 혼입 콘크리트와 비교하여 진동 에너지의 감쇠가 크다.
- 감쇠성능은 다른 두 재료 간의 계면 미끄럼 감쇠에서 유래한다. 따라서, 폴리우레탄으로 코팅된 굵은 골재를 포함하는 새로운 프리플레이스 콘크리트의 감쇠메커니즘은 폴리우레탄 고유 감쇠성능 및 폴리우레탄 층과 골재 또는 시멘트 페이스트의 계면 미끄럼 감쇠이다.

— 성능 평가를 위한 실험

- 보통 포틀랜드 시멘트를 결합 재료로 사용하여 물시멘트비 0.4 시멘트 페이스트를 매트릭스로 사용했다. 고성능 감수제는 시멘트 부피 0.1 %이며, 이는 높은 유동성 및 매트릭스의 공극의 최소화를 위해 페이스트의 항복 응력 및 점도를 감소시키기 위해 사용되었다. 프리 플레이스 굵은 골재의 최대 크기 및 밀도는 각각 13 mm 및 2.66 g/cm³였다. 아래 표는 굵은 골재를 코팅하는데 사용되는 폴리우레탄 수지 및 경화제의 특성을 열거한다. 이 연구에서 사용되는 폴리우레탄의 작업 시간은 폴리우레탄 수지를 경화제와 혼합된 후 약 1 시간이다.
- 사용하는 재료에 의한 혼합물을 아래 표에 나타낸다. 표 중 PC-P 혼합물은 이 연구에서 제안된 재료 및 제작과정에 의해 제작된 새로운 프리 플레이스 콘크리트이다. 굵은 골재를 혼합 과정을 통해 폴리우레탄으로 코팅된 골재를 거푸집에 넣어 성형하였다. 폴리우레탄의 경화 및 폴리우레탄으로 코팅 된 골재 프레임의 형성(아래 그림)의 후 시멘트 페이스트를 형식에 주입했다. 굵은 골재를 완벽하게 코팅하는데 필요한 폴리우레탄의 양은 골재의 무게의 15 %였다. PC 혼합물은 일반 프리 플레이스 콘크리트입니다.

표. 폴리우레탄 주제와 경화제 특성

Material	Viscosity (mPa.s)	Specific gravity	Tensile strength (MPa)*	Elongation (%)*	Elastic modulus (%)*	Coefficient of restitution (%)
Polyurethane resin	2,000~4,500	1.05	3.53	195	3.69	40
Hardener	2,000~6,000	1.35				

* Measured in the laboratory

표. 배합

Mixture	Materials	
	Matrix	Coarse aggregate
PC-P	Cement paste	Polyurethane coated coarse aggregate
PC	Cement paste	Normal



그림. 폴리우레탄으로 코팅된 골재 (녹색이 폴리우레탄임)

- 각 혼합물의 밀도, 휨 강도, 압축 강도 및 감쇠 비율을 측정하기 위해 두 종류의 시료를 제작하였다. 첫째, 폭 0.04 m, 높이 0.04 m, 길이 0.16 m의 작은 직육면체의 각 혼합물의 밀도, 휨 강도, 압축 강도를 측정하기 위해 만들었다. 감쇠비는 세로 충격 시험으로도 측정했다. 각 혼합물에 대해 6 개의 표본이 형성되었다. 또한 휨 진동 아래의 감쇠 비율을 측정하기 위해, 폭 0.2 m, 높이 0.1 m, 길이 1.9 m의 빔을 제작하였다.
- 각 표본의 경화 밀도는 공기, 표본 및 물에서 표본의 무게를 측정하여 계산하였다. 여기서 물의 밀도는 1 g/cm^3 라고 가정하였다. 실험은 28 일의 재령에 수행하였으며, 압축 강도 및 휨강도는 ISO 679 : 2009에 따라 폭이 0.04 m, 높이가 0.04 m, 길이가 0.16 m 인 직육면체를 사용하여 측정하였다(시멘트 - 시험 방법 - 강도 결정, ISO, 679 (2009)).
- 밀도 및 강도를 측정하기 전에 각 혼합물의 감쇠 비율을, ASTM C215 : 2014에 의한 충격 공명 법에 의해 측정했다. C. ASTM 215, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, 콘크리트 시편의 기본 가로, 세로 방향 및 비틀림 주파수의 표준 시험 방법.) 충격 시험에 의해 손상이 없었기 때문에 강도의 시편과 동일한 시험편을 사용했다. 시험체의 길이 방향의 표면부에 충격을 주었다. 충격을 가하면 위해 로드에서 설치된 직경 12.5 mm의 단단한 강철 공을 사용했다. 충돌에 의해 유도 된 시료의 진동 신호를 얻기 위해 가속도계(PCB 353B16, PCB Piezotronics, Inc, USA)를 반대쪽 표면에 설치 데이터 수집 시스템(PCB 480B21, PCB Piezotronics, Inc., USA NI USB-5132, National Instruments, USA)을 사용했다. 하프 파워 대역폭 법으로 감쇠 비율을 계산하려면 고속 푸리에 변환 알고리즘을 이용하여 시간 영역의 신호를 주파수 영역의 신호로 변환했다. 아래 그림은 측방향 충격시험 셋업을 나타낸다.



그림. 축방향 충격시험 셋업

- 성능 평가 결과

- 아래 표는 각 복합재료의 밀도, 압축 강도 및 휨 강도의 값을 나타낸다. PC-P 복합재료의 밀도는 PC 복합재료의 밀도보다 약 5 % 낮았다. 이는 PC-P 복합재료에서 폴리우레탄 코팅 골재의 밀도가 낮기 때문이다. PC-P 복합재료의 압축 강도는 PC 복합재료의 압축 강도보다 64 % 낮았으며, 이것은 밀도 감소에 비해 훨씬 더 큰 감소이다. 콘크리트의 가장 약한 영역은 골재와 시멘트 페이스트 사이의 계면 천이 영역이다. PC-P 복합재료의 경우 골재와 시멘트 페이스트 사이의 폴리우레탄 층이 낮은 탄성 계수와 폴리우레탄의 높은 포아송 비 (Poisson 's ratio)로 인해 강도 감소의 원인이 될 수 있다. PC-P 복합재료의 압축 강도의 감소는 골재 및 폴리우레탄 페이스트 매트릭스로 구성된 다른 폴리우레탄 기반 복합체 보다 작았다. 이전의 연구는 골재를 포함한 폴리우레탄 매트릭스를 기반 복합 재료의 압축 강도 값이 시멘트 기반 콘크리트의 압축 강도 값보다 80 % 이상 낮았다고 보고했다.
- PC-P 복합재료의 휨 강도는 PC 복합재료의 휨 강도보다 6 % 낮았으며, 이는 압축 강도 감소와 비교하여 훨씬 작았다. 압축력과 관련하여 압축 응력, 전단 응력 및 인장 응력이 골재 주위에서 발생하여 골재와 매트릭스 사이의 결합 파괴가 일어나 결국 콘크리트의 최종 파괴가 일어난다. 반면 인장력의 경우 골재와 매트릭스 사이의 결합 파괴는 인장 응력으로 인해 직접 발생한다. 이는 폴리우레탄과 골재 또는 시멘트 페이스트 간의 결합이 골재와 시멘트 페이스트 사이의 계면 천이 영역의 강도에 비해 현저히 낮지 않음을 나타낸다. 이전의 연구는 또한 폴리우레탄과 골재 사이에 화학적 결합이 있다고 보고했다.

표. 밀도와 강도

Mixture	Density (g/cm ³)	Compressive	Flexural strength
		strength (MPa)	(MPa)
PC-P	2.26 ± 0.01	15.9 ± 0.88	2.87 ± 0.23
PC	2.38 ± 0.01	43.9 ± 2.10	3.05 ± 0.11

- 아래 그림은 종단 충돌 시험 동안 각각의 대표적인 시험편에서의 가속도의 시간 이력을 보여준다. 이 그림에서 보듯이 PC-P 시험편의 진폭은 PC 시험편보다 훨씬 더 빠르게 감소하여 PC-P 시험편은 PC 시험편보다 높은 감쇠율을 나타낸다. 아래 그림은 고속 푸리에 변환 알고리즘을 사용하여 시간 영역의 신호에서 얻은 각 대표 표본에 대한 가속 스펙트럼을 보여준다. 각 복합재료에 대한 공진주파수 값은 아래 표에 나타났다. PC-P 복합재료의 공진주파수는 PC 복합재료의 공진주파수보다 47 % 낮았다. 질량 - 댐퍼 - 스프링 시스템에서 감쇠된 공진 주파수 (w_d)는 시스템의 질량 (m), 감쇠 계수 (c) 및 스프링 상수 (k)에 따라 달라진다. 이는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$w_d = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{c^2}{4m^2}} = \sqrt{\frac{k}{m}(1 - \zeta^2)}$$

- 위 식에서, 감쇠비(ξ)는 그 값이 질량 및 스프링 상수 값보다 훨씬 작기 때문에 무시할 수 있으며 제곱이다. 따라서 감쇠된 공진 주파수는 주로 스프링 상수와 질량의 비율에 따라 달라진다. 위 표에 나와 있듯이, PC-P 복합재료의 밀도는 PC 복합재료의 밀도보다 5 % 낮았으며 이는 PC-P 복합재료의 강성이 PC 복합재료의 강성보다 73 % 낮다는 것을 나타낸다. 이러한 관측으로부터, 골재를 폴리에탄으로 코팅하는 것이 밀도의 강성에 비해 강성을 훨씬 크게 감소시키는 것으로 결론 지을 수 있다.

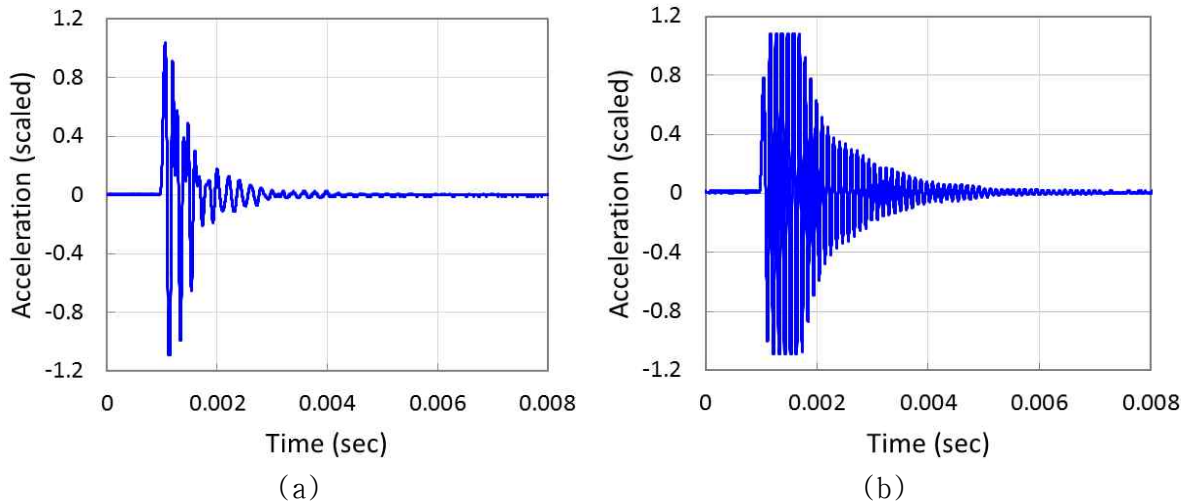


그림. 각 대표 실험체의 시간영역 가속도 진동 특성: (a) PC-P mixture and (b) PC mixture

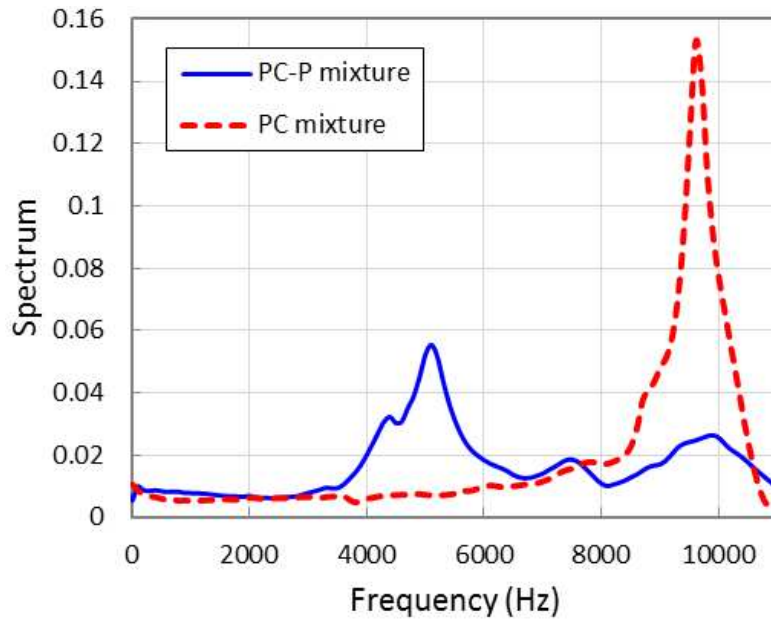


그림. 각 대표 실험체의 주파수 영역 스펙트럼

- 아래 표에는 각 복합재료의 감쇠비도 나타낸다. 이 값은 하프 파워 대역폭법으로 계산하였다. PC-P 복합재료의 감쇠비는 PC 복합재료의 감쇠비보다 4.3배 높았다. 전술한 것처럼 PC-P와 PC 복합재료의 유일한 차이점은 폴리우레탄으로 코팅된 골재의 사용이었다. 테스트 결과에 따르면 감쇠율의 증가(328%증가)가 압축 강도 감소(64%감소), 휨 강도(5%감소)보다 큼니다. 폴리우레탄으로 골재를 코팅하여 강성을 73% 감소시켰다.

표. 각 배합의 종방향 자연주파수 및 감쇠비

Mixture	Longitudinal natural frequency	Damping ratio (%)
	(Hz)	
PC-P	5,133 ± 47	8.22 ± 0.56
PC	9,600 ± 82	1.92 ± 0.15

- 아래 그림은 개발한 재료의 압축강도 시험성적서로서 10.04 MPa가 나타났다.

시험 성적서

전남대학교 산학협력단 바이오하우징연구소

BHRC

주소: 광주광역시 북구 용봉로 77
전남대학교 공대2호관 408호
전화: 062-530-1114 팩스: 062-530-0915
http://www.bhrcu.org.kr

설계서번호 :
TC - 18 - 04
페이지 (1) / (총 1)

BHRC

1. 의뢰자

- 기관명: 전남대학교 고성능 건축재료 연구실
- 주소: 광주광역시 북구 용봉로 77
- 의뢰일자: 2018. 02. 08

2. 시료명: 폴리우레탄 혼입 콘크리트 복합재료

3. 시험기간: 2018. 03. 08.

4. 시험방법: KS F 2405

5. 시험환경: 온도 (6.4 ± 0.4) °C, 습도 (62.3 ± 0.7) %

6. 시험결과:

시험항목	시료명	단위	결과
압축강도	폴리우레탄 혼입 콘크리트 복합재료	MPa	10.04

가) 본 성적서의 시험결과는 의뢰자가 제시한 시료에만 한정됩니다.
나) 본 성적서 권위확인이 필요한 경우, Tel. 062-530-1914로 연락주시면 확인하여 드립니다.

과인	작성자 성명: 김병조	기술책임자 성명: 이만면
----	----------------	------------------

2018. 03. 09.

한국인정기구 인정 전남대학교 산학협력단 바이오하우징연구소장 (인)

CNUBR-TP-22-07(04)

그림. 폴리우레탄혼입 콘크리트 복합재료 강도 시험성적서

- 아래 그림은 개발한 (a) 프리플래이스트 골재혼입 폴리우레탄 복합재료와 (b) 폴리우레탄 코팅 골재 혼입 콘크리트 복합재료의 시공지침서 표지이다.

사업명	국토교통기술촉진연구사업
과제번호	16CTAF-C097491-02
과제명	나노 전기방사기술을 융합한 등가감쇠 10%급 다기능 건축재료 및 구조시스템 개발

**고감쇠 폴리우레탄 콘크리트
복합재료 시공지침서**

2017. 5

전남대학교

그림. 본 연구에서 개발한 고감쇠 폴리우레탄 콘크리트 복합재료 시공지침서

- 개발한 폴리우레탄 복합체와 폴리우레탄 콘크리트 복합체의 구조안전성을 검토하기 위하여 건축구조기준(2016년)에 따라 평가하고 그 결과를 아래 표에 나타내었다.

- 이 때, 단위폭(1m)의 1방향 슬래브로 가정하고, 경계조건은 양단 고정이며, 고정하중은 마감, 온돌, 슬래브, 하부천장이고, 활하중은 2.0 kN/m^2 (건축구조기준 2016년)이며, “ ϕM_n (설계용 강도) $\geq M_u$ (설계용 부재력)”식을 만족하고, 설계용 부재력은 구조해석을 통해 하중계수를 반영한 최대 모멘트이며, 설계용 강도는 재료의 응력변형률 곡선을 반영하여 증상화 단면해석을 통해 구한 것이다.
- 아래 표로부터, 슬래브의 하중저항 능력을 나타내는 설계용 강도 비교를 통해, 진동감쇠형 재료 및 스티드 또는 카고메 트러스로 구성된 슬래브에서 얻어진 소음저감형 철근콘크리트슬래브 구조체의 하중저항 능력이 그 두께가 더 감소되었음에도 불구하고 순수하게 철근콘크리트만으로 구성된 철근콘크리트슬래브 구조체와 비교하여 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다.

표. 개발한 재료로 구성한 슬래브 구조안전성

	철근콘크리트 두께 (mm)	고감쇠 재료 두께 (mm)	ϕM_n (설계용 강도) 단위:	M_u (설계용 부재력) kN·m	구조안전성
일반 RC 슬래브	210	0	19.7	9.9	만족
개발한 재료로 구성한 슬래브	150	폴리우레탄 복합체 두께: 40	18.3	9.2	만족
	150	폴리우레탄 복합체 두께: 60	22.5	9.6	만족
	150	폴리우레탄 콘크리트 복합체 두께: 40	19.2	9.3	만족
	150	폴리우레탄 콘크리트 복합체 두께: 60	23.2	9.8	만족

- 개발한 (a) 프리플레이스트 골재혼입 폴리우레탄 복합재료와 (b) 폴리우레탄 코팅 골재 혼입 콘크리트 복합재료의 경제성 검토
 - 개발한 재료의 경제성을 아래와 같이 분석하였음. 각 재료의 혼합비율 및 재료 단가 (소매가)를 고려하여 산정하였음.
 - 개발한 재료는 일반 콘크리트에 비하여 경제성이 떨어지지만 감쇠비가 평균적으로 8배에서 15배에 이를 정도로 높은 특성을 갖음. 이는 콘크리트의 경제성이 워낙 우수하기 때문이며, 층간소음 재료로 사용되는 EPS, EVA 등의 재료가 1 m x 1 m 크기에 3,000

원에서 15,000원 정도임을 감안하면 폴리우레탄 코팅 골재 혼입 콘크리트 복합재료는 기존 재료들에 비하여 충분한 경제성을 확보하고 있는 것으로 판단됨. 또한 개발한 재료는 압축강도 10 MPa, 휨인장강도 2.5 MPa 이상을 갖기 때문에 기존 층간소음 재료들에 비하여 월등한 역학성능을 확보하고 있음. 프리플레이스트 골재혼입 폴리우레탄 복합재료의 경우 가격 경제성은 떨어지지만 매우 우수한 감쇠성능을 갖고 있기 때문에 특수 구조물이나 특수 목적에 사용이 가능할 것으로 판단됨.

표. 개발한 재료의 감쇠비 비교

기준	콘크리트	프리플레이스트 골재혼입 폴리우레탄 복합재료	폴리우레탄 코팅 골재 혼입 콘크리트 복합재료
1 m ³	34,000 원	3,009,000 원	317,152 원
10 cm 두께 (폭: 1 m, 너비: 1 m)		300,900 원	31,715 원
4 cm 두께 (폭: 1 m, 너비: 1 m)		120,360 원	12,686 원
감쇠비	1%~3%	17%~19%	8%~10%

■ 복합신소재의 분산성 평가 및 향상기술

- 복합재료에서 섬유나 입자의 분산성과 방향성 등 분포특성은 복합재료의 성능을 결정하는 주요한 인자이며, 섬유나 입자가 복합재료 내에서 균일하게 분포할 경우 원하는 복합재료의 성능을 확보할 수 있다. 복합재료 내에서 섬유나 입자의 분포 특성을 평가하기 위해서는 섬유나 입자의 특성에 따라 적절한 방법을 사용해야 한다.
- 아래 표는 섬유 종류별 섬유 분포 특성을 평가할 수 있는 기법을 정리한 것이다. Ozyurt et al.은 고성능 감수제와 증점제의 사용량을 변화시켜서 서로 다른 유동특성을 가진 섬유보강 콘크리트에 대해 진동다짐의 정도를 달리 적용한 경우들에 대해 AC-IS(Alternating current-impedance spectroscopy)를 이용하여 섬유의 침전에 따른 섬유의 분산성을 평가하였으며, 쪼갬인장강도를 비교하여 섬유보강 콘크리트에서 섬유의 분산성이 역학적 특성에 미치는 영향을 비교하였다. 아래 그림은 배합 및 진동다짐의 변화에 따른 위치별로 검출된 섬유 함유량을 비교하여 나타낸 것으로 배합특성에 따라, 그리고 진동다짐의 정도에 따라 깊이별로 섬유의 침강에 따른 함유량의 변화가 발생하는 것을 확인할 수 있다.
- 위와 같은 실험방법에 의한 섬유의 재료분리 현상 평가 외에도 유동 흐름에 따라 섬유의 재료분리 현상에 관한 실험도 이루어지고 있으며, 아래 그림은 섬유의 분산성 평가에 관한 여러 가지 실험방법들을 보여주고 있다.
- 섬유분산성을 평가하기 위해서는 먼저 복합재료 내의 섬유를 검출하여야 한다. 그러나 시멘트계 매트릭스의 낮은 명암비 때문에 X-ray와 광학현미경을 이용하여 매트릭스와 섬유를 구별하기는 쉽지 않다. 이 문제점을 해결하기 위하여 형광 원리가 적용될 수 있다. 임의의 물체에 형광을 비추면 특정한 색의 빛을 다시 반사하는 것을

형광 원리라고 하며, 이 원리를 이용하면 낮은 명암비를 갖는 재료에서도 높은 분해능을 얻을 수 있기 때문에 생물의학 분야와 GFP(Green Fluorescent Protein) 필터를 사용하는 분자생물학 분야에서 이 기법이 널리 활용되고 있다. Torigoe 등은 형광 현미경(fluorescence microscope)을 이용하여 얻은 디지털 이미지를 이진화한 후 전체 이미지를 일정한 크기의 블록으로 나누고 각 블록에 있는 섬유체의 개수를 수작업에 의해 파악한 후 이 자료를 바탕으로 섬유분산성을 파악하였다. 그러나 이 방법은 블록의 크기에 따라 섬유분산성을 나타내는 계수가 달라지는 단점이 있다.

표 섬유 종류별 적용 가능한 분포 특성 평가 기법

	High conductive fiber		Low conductive fiber	
	Steel fiber	Carbon fiber	Glass fiber	Synthetic fiber
Image analysis	Practical	Practical	Practical	Practical
X-ray	Practical	N.A.	N.A.	N.A.
AC-IS	Practical	Practical	Impractical	Impractical

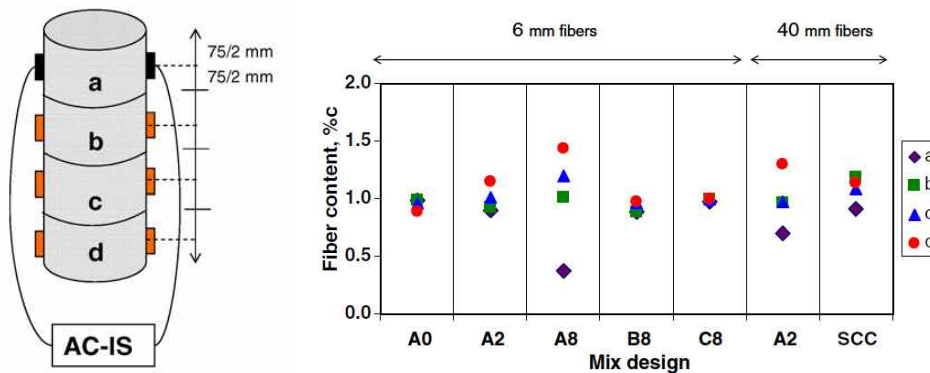


그림. 매트릭스 점성과 인장 변형 성능과의 관계; (a) AC-IS 측정, (b) 배합 및 진동다짐 변화에 따른 섬유함유량 분포

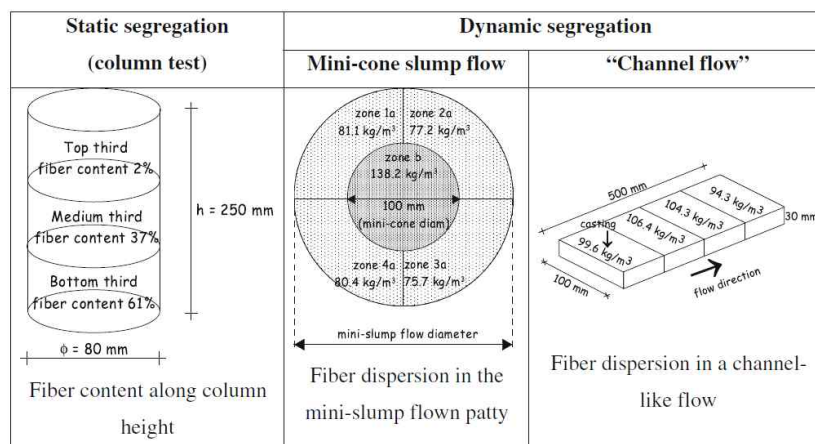


그림. 섬유의 분산성 평가와 관련한 여러 가지 실험 방법 및 결과

- 분산성 및 방향성 평가 프로그램 개발

- 형광 현미경으로 촬영한 복합재료 단면 이미지는 합성 섬유만 초록색으로 나타나기 때문에 섬유와 배경만 분리하면 섬유의 분산 정도를 정량적으로 파악할 수 있다. 먼저 섬유의 분산 정도는 식 (1)과 같은 분산계수를 통해 정량적으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha_f = \exp \left[- \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - 1)^2}{n}} \right] \quad (1)$$

- 여기서 x_i 는 섬유가 균일하게 분포하였을 때 하나의 섬유가 차지하게 되는 i 번째 영역 안에 있는 섬유의 개수이며, n 은 섬유의 총 개수이다. 이 분산계수는 섬유가 이상적인 균일 분포를 하였을 때 1의 값을 갖게 되며 섬유가 비균일 분포를 할수록 0에 가까운 값을 갖게 된다. 이를 자동화하기 위한 이미지 프로세싱 절차는 다음과 같다.

- 1) 칼라 이미지(RGB image)를 회색 이미지(grayscale image)로 변환
- 2) 회색 이미지를 이진 이미지(binary image)로 변환
- 3) 전체 이미지를 섬유의 총 개수에 해당하는 n 개의 정사각형 영역으로 분할
- 4) 각 영역 안에 있는 섬유 개수(x_i) 파악

- 위의 절차에 따라 섬유의 분산성을 파악할 때, 섬유의 방향성이 섬유분산성에 미치는 영향과 섬유가 정확히 검출되는지 여부에 대한 검토가 필요하다. 즉, 아래 그림은 회색 이미지와 위의 절차에 따라 섬유로 검출된 영역의 최외곽 화소만으로 구성된 이미지를 합성한 이미지로서 A, B, C 섬유는 촬영하는 방향과 다양한 각도를 이루는 섬유를 나타내고 있는데, 이러한 섬유의 방향성이 위의 절차에 따라 섬유의 분산성을 파악할 때 어떠한 영향을 미치는지 파악하여야 한다. 또한 B와 D 섬유는 실제로 인접한 두 개의 섬유인데 하나의 섬유로 검출된 경우이다. 따라서 보다 정확히 섬유분산성을 파악하기 위하여 2)와 3)의 과정 사이에 추가적인 검출 알고리즘이 필요하다. 검출 성능을 향상시키기 위하여 이 연구에서는 2단계의 추가 알고리즘을 제안하였다. 1단계는 분류 알고리즘(아래 그림)으로서 이진화 기법에 의하여 1차 검출된 섬유 이미지 중에서 정확히 검출된 이미지와 여러 개의 섬유가 하나로 잘못 검출된 이미지를 유형별로 분류하는 것으로 이 연구에서는 ANN을 분류기로 이용하였다. 2단계는 1차 검출 알고리즘으로 잘못 검출된 섬유 이미지를 정확히 재검출하기 위한 목적으로 개발하였으며, 분수령 알고리즘과 형태학적 재구성 기법을 적용하였다.

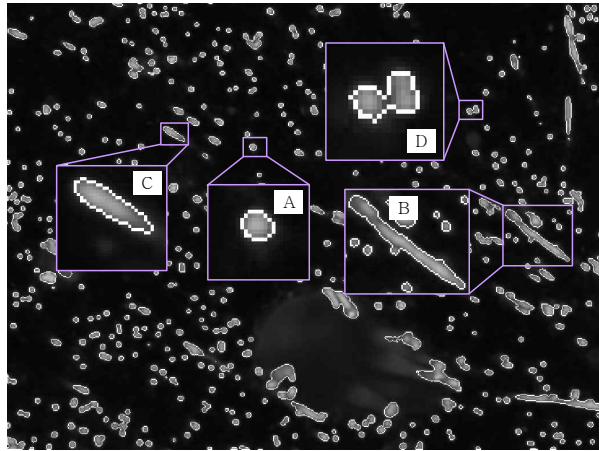


그림. 이진화에 의한 섬유 검출 이미지

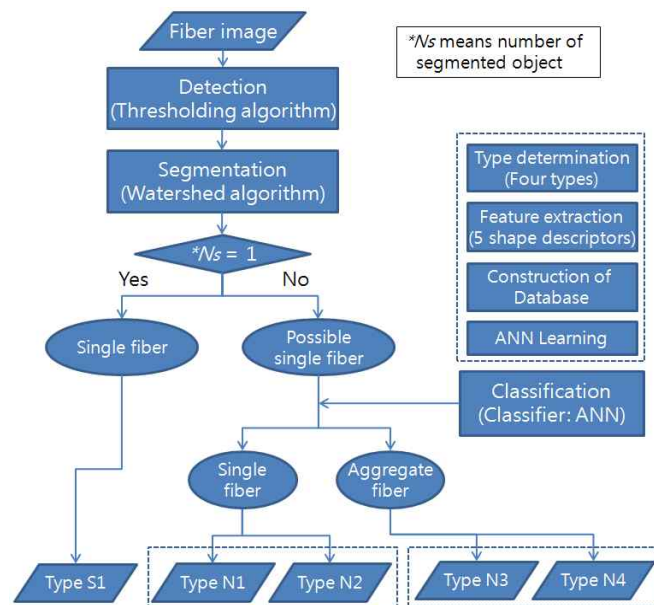


그림. 형상에 따른 섬유 이미지 분류 알고리즘

- 다양한 섬유 이미지를 분류하기 위한 첫 번째 과정은 정확히 검출된 섬유 이미지와 인접한 여러 개의 섬유들이 하나의 섬유로 잘못 검출된 섬유 이미지를 유형별로 구분하는 것이다. 이를 위하여 이미지 밝기의 정점(peak)을 분석하여 물체를 구분하는 분수령 알고리즘을 적용하였다. 분수령 알고리즘을 적용함으로써 1차 검출된 섬유 이미지는 이미지의 밝기 값에 따른 정점의 개수를 물체의 개수로 인식한다. 아래 표는 이진화 기법에 의하여 1차 검출된 섬유의 개수, 분수령 알고리즘에 의해 구분된 물체의 개수, 그리고 원본 이미지로 직접 판단한 섬유의 개수를 각각 비교한 것이다. Type S1은 3가지의 경우 모두가 1개의 섬유 이미지이므로 1차 검출 결과가 정확하다고 판단할 수 있다. 따라서 추가적인 검출 과정이 필요하지 않다. 다른 유형의 섬유 이미지는 분수령 알고리즘에 의해 구분된 물체의 수가 2개 이상에 해당하는 것으로서 검출된 섬유 이미지의 형상과 구분된 섬유 이미지의 개수를 기반으로 4가지로 분류하였다(아래 그림). Type N1과 Type N2는 원본 이미지를 보고 판단하면 하나의 섬유에 해당하지만 분수령 알고리즘에 의하여 여러 개의 섬유로 과도하게 인식되는 섬유 이미지이다. 분수령 알고리즘은 개별 물체를 구분하는데 유용한 방법이지만 이미지에서 노이즈나 국부적인 밝기의 요철

(irregularity)이 있게 되면 과도하게 물체를 분리하는 과도 분할(over-segmentation)이 발생하게 된다. 따라서 이 경우에는 1차 검출 이외의 추가적인 검출과정은 필요하지 않다. 이미지 형상 측면에서 Type N1은 섬유의 방향이 촬영 방향과 평행하여 절단면에서 보이는 섬유 이미지 형상이 원에 가까우며, Type N2는 섬유의 방향이 촬영 방향과 수직에 가까워 섬유의 변장비가 큰 형상을 나타낸다. Type N3은 주로 Type S1의 섬유들이 군집되어 있어 단일 섬유로 잘못 검출된 경우이며, Type N4는 Type N1과 Type N2의 섬유들이 군집되어 잘못 검출된 유형이다. 따라서 Type N3과 Type N4 유형은 개별 섬유로 정확히 검출하기 위하여 추가 과정이 요구된다. 특히, Type N4의 경우 섬유 이미지의 형상이 길이가 긴 특징이 있으므로 국부적인 밝기의 요철이 흔히 존재할 수 있다. 따라서 분수령 알고리즘을 적용할 경우에 과도 분할 문제가 발생할 수 있으므로 이를 반드시 고려할 필요가 있다.

표. 섬유 이미지 종류

섬유 유형		섬유개수 (이진화)	섬유개수 (분수령 알고리즘)	섬유 개수	예
단일섬 유	Type S1	1	1	1	
단일섬 유 또는 다중섬 유	Type N1	1	More than 2	1	
	Type N2	1	More than 2	1	
	Type N3	1	More than 2	more than 2	
	Type N4	1	More than 2	more than 2	

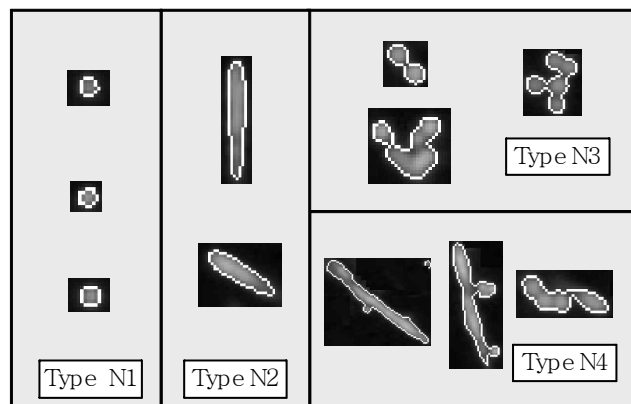


그림. 섬유 이미지 분류를 위한 3가지 히스토그램 기반 분류기법

- 섬유 이미지를 분류하기 위한 두 번째 과정은 섬유 이미지의 유형을 분류하기 위한 특징 추출(feature extraction) 과정이다. 특징 추출의 목적은 크게 2가지이다.

우선, 동일 유형의 물체에 대해서는 비슷한 값을 나타내고 다른 유형의 물체에 대해서는 구분이 될 정도로 다른 값을 나타내어 물체를 유형별로 구분할 수 있도록 한다. 그리고 입력 값의 차원을 줄여 계산 시간을 단축하고 중요한 정보는 보존하면서 불필요한 정보를 제거하는 것이다. 이미지에서 물체 특징은 색상, 질감, 형상 및 위치 등이 있다. 다양한 특징들 중에서 섬유 이미지는 색상 및 질감이 거의 같기 때문에 섬유 유형들을 분류하는데 적합한 특징이 아니다. 위치 또한 개별 섬유들이 무작위로(random) 분포하기 때문에 적절한 특징이 아니다. Fig. 3에서 확인한 바와 같이 섬유 이미지의 형상만이 섬유 이미지의 유형을 분류하는데 적절한 특징이 된다. 형상과 관련된 간단한 형상 기술자로는 물체의 면적(Aob), 최소불록집합(convex hull)의 면적(Ach), 외접원의 면적(Acc), 둘레의 길이(perimeter: lp), 물체의 장변 길이(l) 등이 있다. 그러나 이러한 형상 기술자들은 형상에 대한 특징이 가져야 하는 회전(rotation), 이동(translation), 크기(scale), 그리고 밝기 변화(illumination change) 등의 변환에 대하여 불변 특성을 갖지 못한다. 따라서 섬유 이미지를 4가지 유형 즉, Type N1, Type N2, Type N3과 Type N4 로 분류하기 위한 특징으로 이러한 변환에 대하여 불변 특성을 가지는 5개의 특징값을 형상 기술자로 결정하였다.

- 첫 번째 특징값은 Solidity(Fs)로서 물체의 면적을 최소불록집합의 면적으로 나눈 값이다. 이는 Type N1과 Type N2와 같은 유형을 다른 유형과 분리하는데 적합하며, 이를 수식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$F_s = \frac{A_{ob}}{A_{ch}}$$

- 두 번째 특징값은 Packing density(Fc)로서 물체의 면적을 물체의 외접원에 해당하는 면적으로 나눈 값이다. 이 특징값은 Type N1과 같은 유형을 다른 유형과 분리하는데 적합하며, 이를 수식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$F_c = \frac{A_{ob}}{A_{cc}}$$

- Fc는 폭에 비하여 길이가 긴 물체의 경우 0에 가까운 값을 나타내고, 원에 가까운 물체의 경우 1에 가까운 값을 나타낸다. 또한 Fc와 섬유가 단면과 기울어진 각도는 다음 식과 같은 관계이기 때문에, 섬유의 기울어진 정도를 정량적으로 나타낼 수 있다.

$$F_c = \frac{\pi dl/4}{\pi l^2/4} = \frac{d}{l} = \frac{d}{d/\cos\theta} = \cos\theta$$

- 여기서 θ 는 섬유가 단면에서 기울어진 각도이며, d 는 섬유의 지름이다. l 은 단면에서 섬유가 나타내는 타원의 장변 길이이다. 따라서 Fc는 섬유의 기울어진 각도, θ 에 대하여 $\cos\theta$ 와 같다. 이를 통해 섬유의 방향성을 평가할 수 있다.
- 세 번째 특징값은 단위 면적당 둘레(Fp)로서 둘레 길이를 물체의 면적으로 나눈 값이다. Fp는 Type N3과 같은 유형을 다른 유형과 분리하는데 적합하며 이를 수

식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$F_p = \frac{l_p}{A_{ob}}$$

- 또 다른 특징값은 F_l 과 F_{rl} 로서 장변 길이를 물체의 면적과 모든 섬유 이미지들의 평균 장변 길이(l_{avg})로 각각 나눈 값이다(다음 식). 이들은 Type N2와 Type N4를 다른 유형과 분리하는데 유용한 값이다.

$$F_l = \frac{l_l}{A_{ob}}$$

$$F_{rl} = \frac{l_l}{l_{avg}}$$

- 아래 그림은 1,350개 섬유 이미지를 4가지 유형으로 분류하고 유형별로 5가지 특징값의 분포를 그래프로 표현한 것이다. 이 데이터베이스는 분류기로 사용되는 ANN의 학습에 사용되었다.

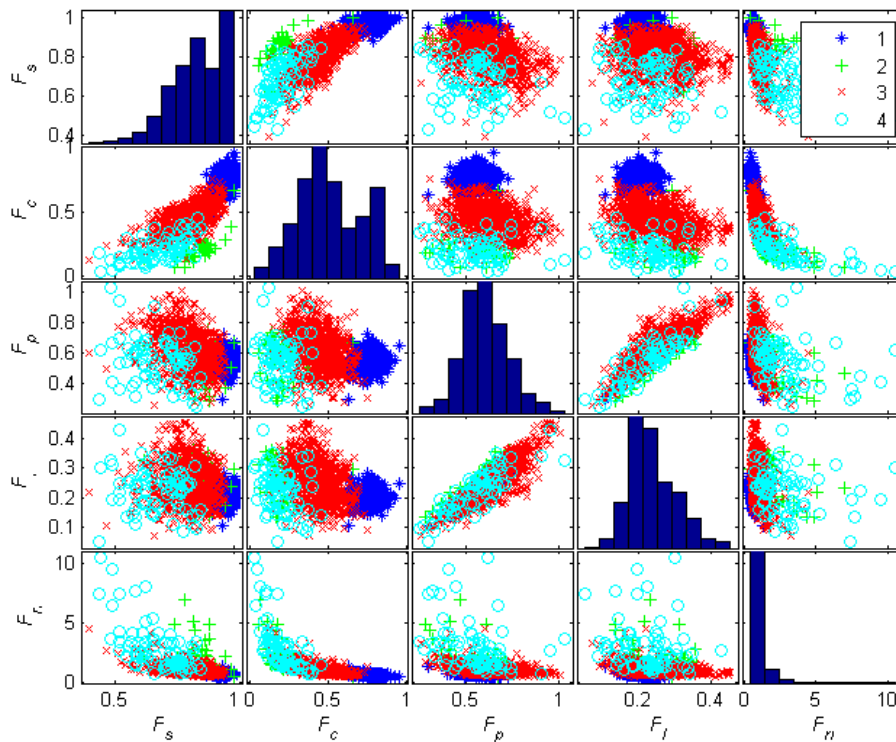


그림 3.6 섬유 유형별 특징값 분포

- ANN을 주어진 데이터베이스로 학습할 경우, 그 데이터베이스에 포함된 지식을 가장 잘 표현할 수 있도록 그 구조를 최적화 할 수 있다. 또한 ANN의 문제 해결 능력은 네트워크의 복잡도(complexity)에 의해 결정되는데, 네트워크의 복잡도는 은닉층(hidden layer)의 수, 뉴런의 복잡도(전달 함수; transfer function), 각 노드를 연결하는 가중치(weight)의 동적범위(range of interconnections), 그리고 은닉 노드의 수에 의하여 결정된다. 일반적으로 ANN의 최적 구조란 문제의 복잡도와 ANN 구조의 복잡도가 일치하는 것을 의미하며 주어진 문제를 풀 수 있으면서도

가장 간단한 구조로 이루어져야 함을 뜻한다(Ockam's Razor 원리).

- Moody and Yarvin은 여러 전달 함수의 성능을 비교하였는데, 그 결과 시그모이드 전달함수를 사용한 경우가 가장 좋은 성능을 나타내는 것을 확인하였다. 특히 노이즈가 포함되거나 비선형성을 갖는 문제에 대하여 우수한 성능을 나타내었다. 따라서 은닉층의 각 뉴런에는 식 (7)과 같은 하이퍼볼릭 탄젠트 시그모이드 함수(hyperbolic tangent sigmoid function)를 전달함수로 사용하였으며, 결과층(output layer)은 다음 식과 같은 선형 함수를 전달함수로 사용하였다.

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1$$

$$f(x) = x$$

- 또한 은닉층의 수는 시그모이드 전달 함수(sigmoidal transfer function)를 사용할 경우 하나의 은닉층만 있으면 모든 문제를 풀 수 있다고 알려져 있기 때문에 이 논문에서는 하나의 은닉층을 사용하였다.
- 가중치와 바이어스는 학습과정에서 자동으로 결정되는데 학습 방법은 과적합 문제를 최소화하기 위하여 가중치 감소(weight decay)항이 추가된 레벤버그 마켓 알고리즘(Levenberg-Marquardt algorithm)을 사용하였다. 이 학습 알고리즘에서 오차 함수(error function)는 다음 식과 같다.

$$E(\mathbf{w}) = \varepsilon(\mathbf{w}_{\text{old}}) + \lambda \cdot (\mathbf{w}_{\text{new}} - \mathbf{w}_{\text{old}})^2 + \frac{\alpha}{2} \cdot \sum_{i \in C} w_i^2$$

- 여기서 λ 는 감쇠 변수(damping parameter)이고, α 는 조정 변수(regularization parameter)이다. 또한 C 는 가중치 집합을 나타낸다. 위 식에서 두 번째 항은 선형 근사가 유효하도록 하기 위해 각 단계(step)의 크기를 작게 유지하기 위한 것이다. 세 번째 항은 가중치 감소항이며, 첫 번째 항은 현재의 오차를 나타내고 다음 식과 같다.

$$\varepsilon(\mathbf{w}_{\text{old}}) = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M [t^m - y^m(\mathbf{w}_{\text{old}})]^2$$

- 여기서 t 와 y 는 각각 목표값(target value)과 결과값(output value)을 나타낸다. 역전파(back-propagation) 네트워크에서 결과 노드의 오차는 노드 사이의 가중치를 수정하면서 은닉층의 노드를 통해 입력층(input layer)의 노드로 전달된다. 수정된 가중치와 바이어스는 다음 식과 같다.

$$\mathbf{w}_{\text{new}} = \mathbf{w}_{\text{old}} - [\mathbf{Z}^T \mathbf{Z} + \mathbf{I}(\lambda + \alpha)]^{-1} \cdot [\mathbf{Z}^T \varepsilon(\mathbf{w}_{\text{old}}) + \alpha \cdot \mathbf{w}_{\text{old}}]$$

- 여기서 $\mathbf{Z}$ 는 오차를 가중치와 바이어스로 1차 편미분한 Jacobian matrix이고, $\mathbf{I}$ 는

identity matrix이다.

- 은닉 노드의 수를 결정하기 위하여 은닉 노드의 수를 1개부터 10개 까지 증가시켜가면서 10-fold 교차 검증을 수행하여 검증 데이터에 대해 최고의 성능을 보이는 은닉 노드의 수를 최적의 구조로 결정하였다. 이 과정에서 가중치와 바이어스의 초기값에 대한 영향을 피하고자 10회씩 반복 수행하였다. 5개의 특징값은 입력값으로 사용되고 ANN의 학습을 위한 결과층의 목표값은 표 3.3에 제시되어 있다. 아래 그림은 은닉 노드의 수에 따른 학습 데이터와 검증 데이터의 성능(정확도)을 나타낸 것이다. 아래 그림에서 확인할 수 있듯이 최적 구조는 5-4-4로 결정되었다. 정확도는 기 분류된 유형과 ANN이 분류한 유형의 일치 정도로 계산하였다. 섬유 이미지의 유형을 평가하기 위한 ANN은 전체 데이터베이스를 사용하여 학습을 통해 구축하였다. 아래 표는 Jack knife 방법으로 검증한 결과를 나타낸다.

표. 학습을 위한 결과층 값

	Type N1	Type N2	Type N3	Type N4
Node 1	1	0	0	0
Node 2	0	1	0	0
Node 3	0	0	1	0
Node 4	0	0	0	1

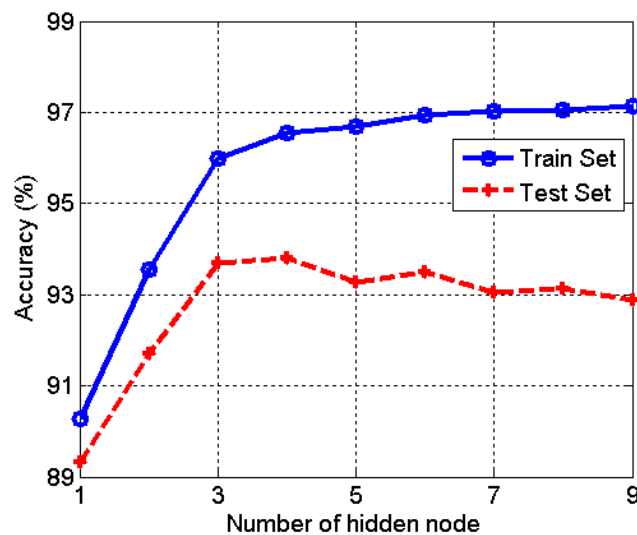


그림. 은닉층의 개수에 따른 분류기의 정확도

표. 분류기의 성능

실제 섬유 분류	ANN 분류					정확도 (%)	
	Type1	Type2	Type3	Type4	Total		
Type N1	378	0	9	0	387	97.7	95.3
Type N2	1	35	0	3	39	89.7	
Type N3	11	3	822	11	847	97.0	
Type N4	0	1	24	52	77	67.5	

- ANN을 Type N3과 Type N4와 같이 실제로 군집을 이루는 섬유 이미지들이 하나의 섬유로 잘못 검출된 섬유 이미지들을 정확히 검출하기 위하여 분수령 알고리즘을 적용하였다. 분수령 알고리즘은 Digabel and Lantuéjoul에 의해 처음 제시되었고, Beucher and Lantuéjoul[19]에 의해 회색 이미지에 적용할 수 있는 일반적인 알고리즘으로 확대되었다. 현재 분수령 알고리즘은 아래 그림에 나타난 것과 같이 이미지에서 밝기값의 차이로 구분되는 물체들을 분리하는데 널리 사용되는 기법이다. 이 연구에서는 Vincent 등에 의해 제안된 침수 분석 방법(immersion analysis)을 적용하였다.



그림. 분수령 알고리즘에 의한 이미지 분리; (a) 원이미지, (b) 분리된 이미지

- watershed algorithm을 이용하여 물체를 구분할 경우 이미지에서 국부적인 밝기의 요철(irregularity)이 있게 되면 과도하게 물체를 분리하는 현상이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위하여 이 연구에서는 형태학적 재구성 기법을 적용하였다. 표준 형태학적 재구성에서 마스크 이미지(mask image: g)는 마커 이미지(marker image: f)를 반복적으로 팽창(dilation) 시키면서 이미지가 안정화 될 때까지 반복하여 재구성한다. 이 때 두 이미지의 크기는 동일해야 하며 각 화소의 밝기값은 $f \leq g$ 관계를 만족한다. 아래 그림은 재구성된 이미지의 개념도를 나타낸다. 여기서 마스크 이미지는 원래 이미지이며, 마커 이미지는 마스크 이미지로부터 상수(h)를 빼서 만든 이미지이다. 이 상수값의 크기에 따라 국부 최소/최고가 제거되며, 이 연구에서는 시행착오법을 적용하여 20의 값을 적용하였다.

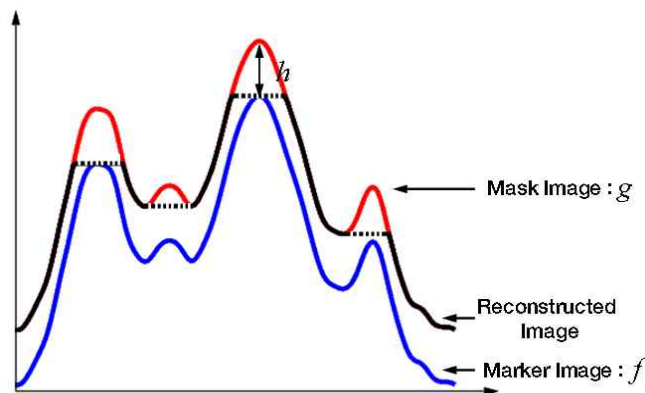


그림. 형태학적 재구성

- 아래 그림은 향상된 검출 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 먼저 1차 검출(이진화 기법)에 의하여 하나의 섬유로 검출된 섬유 이미지는 분수령 알고리즘에 의하여

구분되는 섬유 개수에 의해 두 그룹으로 나뉘게 된다. 즉, 분수령 알고리즘에 의해 구분된 섬유의 개수가 1개이면 확실한 1개의 섬유를 나타내기 때문에 Type S1으로 분류되고, 그렇지 않으면 Type N으로 분류된다. Type N으로 분류된 섬유 이미지는 실제 하나의 섬유를 나타내지만 분수령 알고리즘의 과도 분할에 의하여 여러 개의 섬유로 나타난 경우(Type N1과 Type N2)와 1차 검출에 의해 1개의 섬유로 잘못 검출된 경우(Type N3과 Type N4)로 나뉘게 되며, ANN에 의해 각각의 유형으로 분류된다. Type S1, Type N1과 Type N2는 1차 검출에서 섬유가 정확히 검출되었기 때문에 추가적인 검출 과정이 없고, Type N3은 분수령 알고리즘에 의해 섬유를 정확히 검출하는 과정이 추가 수행된다. Type N4는 긴 섬유 이미지의 밝기값 요철에 의하여 과도 분할의 문제가 발생하기 쉬우므로, 이를 최소화하기 위하여 형태학적 재구성 과정이 먼저 수행된 후, 분수령 알고리즘이 적용되어 섬유를 검출하게 된다.

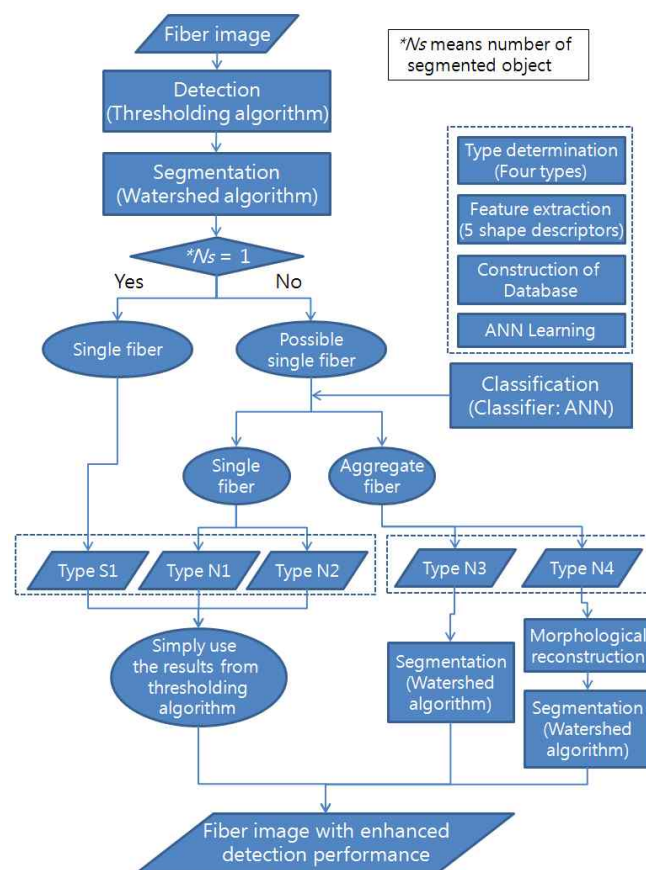


그림. 향상된 섬유 검출 방법

- 아래 그림은 앞절에서 기술한 복합재료 내의 섬유나 입자의 분산성 및 방향성 알고리즘을 구현한 것으로서 사용자 편의를 위하여 GUI(graphic user interface)를 적용한 소프트웨어를 나타낸다. 이미지를 입력한 후 분석 알고리즘을 선택하면 섬유 및 입자의 분산성, 개수, 전체 면적대비 섬유나 입자의 면적, 방향성 등의 결과가 출력된다. 또한 우측하단의 버튼을 통해 검출 성능을 육안으로 확인할 수 있다.

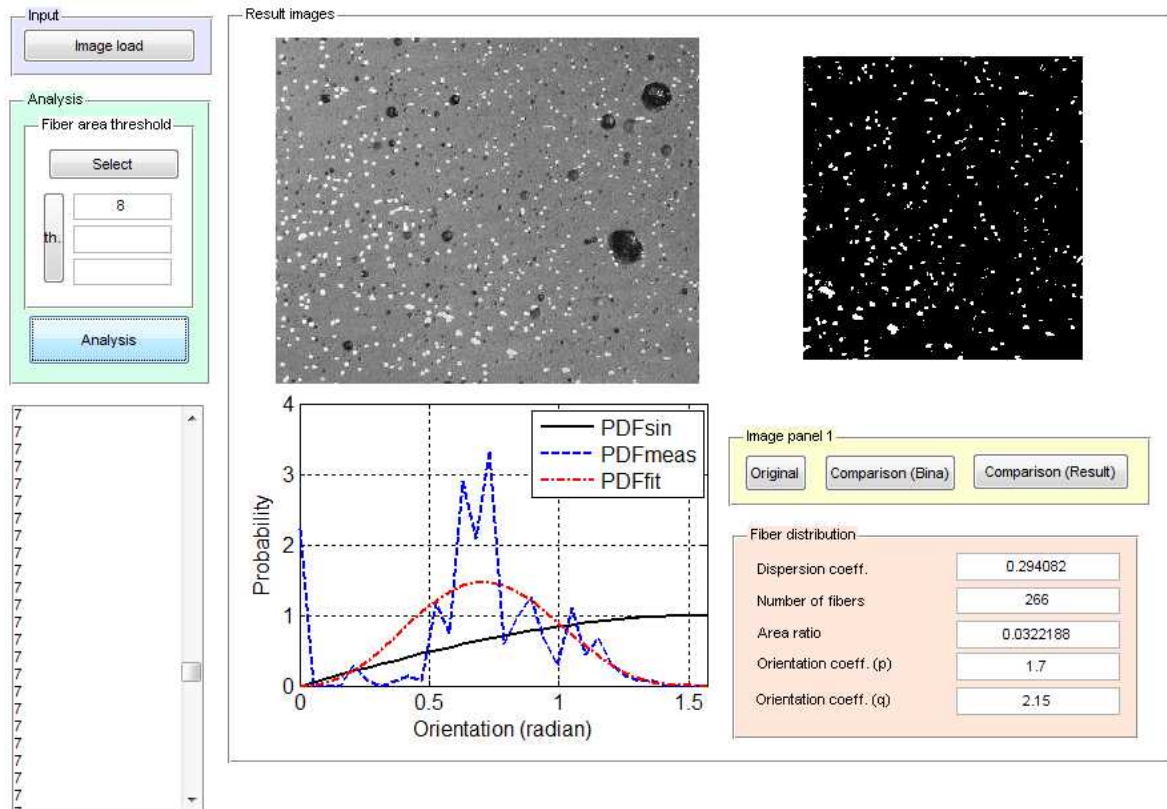


그림. 복합재료 내의 섬유나 입자의 분산성 및 방향성을 평가할 수 있는 개발된 소프트웨어

- 제안된 기법의 검증을 위하여 섬유 검출 성능을 검증하였는데, 이를 위하여 총 3가지 알고리즘의 결과를 서로 비교하였다. 비교한 알고리즘은 1차 검출 후 추가적인 검출 과정이 없는 이진화 알고리즘, Type N3과 Type N4를 재검출하기 위하여 분수령 알고리즘을 추가한 알고리즘, 그리고 Type N4를 검출하는데 선수행 과정(pre-process)으로 형태학적 재구성을 추가한 알고리즘이다. 3번째 알고리즘이 이 연구에서 최종 제안한 알고리즘이다. 그림 3.11에서 A, B, C, D는 전형적인 Type N3 섬유 이미지로서 제안된 알고리즘을 적용함으로써 기존의 이진화 알고리즘에 의하여 발생된 오류, 즉 인접한 여러 개의 섬유들을 1개의 이미지로 검출한 오류가 바로 잡힌 것을 확인할 수 있다. 아래 그림에서 E, F, G는 전형적인 Type N4 섬유 이미지를 나타내며, 그림(c)에서 알 수 있듯이 형태학적 재구성을 우선 수행함으로써 분수령 알고리즘에 의하여 발생할 수 있는 과도 분할 문제를 해결할 수 있음을 알 수 있다. 이렇게 검출된 섬유는 김윤용 등이 제시한 기법을 통하여 섬유의 분산성을 정량적으로 평가할 수 있다.

A			N.A.
			N.A.

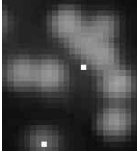
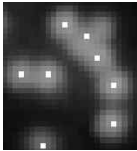
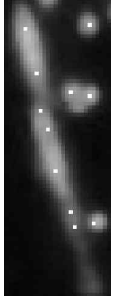
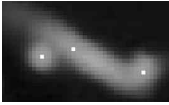
C			N.A.
D			N.A.
E			
F			
G			
	(a)	(b)	(c)

그림. 성능 평가 결과; (a) 이진화 방법, (b) 형태학적 재구성 없는 향상된 방법, (c) 형태학적 재구성 적용한 향상된 방법

▪ Nano-Electrospinning 장비, 공정시스템 개발 및 시성형

– 고감쇠를 위한 나노전기방사 기술의 필요성

- 새로운 고감쇠 건설 재료의 개발을 위하여 분말 혹은 섬유 형태를 가지는 감쇠 특성이 뛰어난 소재를 콘크리트 재료에 혼합하는 기술이 다양하게 연구되어 오고 있으나, 이용되는 섬유 재료의 크기가 mm 혹은 μm 단위의 값으로 콘크리트 결합재의 크기보다 크기 때문에 단면손실이 유발되며, 표면적이 작고, 고감쇠 섬유형상이 단편적이어서 부착력이 떨어지게 되어 강도저하와 감쇠능력이 미약한 것으로 판단된다.
- 따라서 기존 감쇠증진 기법을 대체하고 효율적인 감쇠증가를 얻기 위하여 콘크리트 재료에 포함되는 섬유의 직경을 nm 수준으로 감소시키는 접근법을 적용하고자 한다. 이를 통하여 콘크리트 결합재나 골재사이의 공극을 충전 시킬 수 있으며, 그에 따라 단면 손실 없이 감쇠능력 향상을 기대할 수 있다. 또한, 기존 감쇠 섬유에 비하여 표면적이 커져 콘크리트와의 부착능력이 우수하고, 나노섬유의 길이 조절 및 형상조절을 통하여 효율적인 감쇠능력의 증진이 가능할 것으로 기대할 수 있다.
- 나노 섬유를 제작하는 대표적인 기술은 자기조립(Self Assembly), 상분리(Phase Separation), 주형합성(Template Synthesis), 전기방사(Electrospinning) 등이 있으며, 이 중 전기방사 기술은 타 기술들에 비하여 공정이 간단하고 재료의 선택에 제한이 없을 뿐 아니라 형상에 기인한 높은 비표면적, 공극률(Porosity) 및 구조크기의 조절이 용이하다는 장점을 가진다. 나노 섬유의 제작을 위한 전기방사(Nano-Electrospinning) 기술은 전기적으로 하전된 플라스틱 용액 혹은 용융물의 젯(jet)을 통하여 나노섬유를 제조할 수 있는 공정으로, 마이크로미터에서 나노미

터 스케일의 직경을 가지는 연속상의 플라스틱 섬유를 구현하는 방법이다. 이를 통하여 제작된 섬유 및 이들의 상호연결로 구성되는 3차원 네트워크 매트(Mat)는 기존의 다른 나노 섬유기술로는 얻을 수 없는 매우 가는 직경과 높은 단위의 부피당 표면적을 가질 수 있어, 우수한 경제성을 가지는 나노가공 기반기술이다.

- 또한 현재 전기방사 기술을 바탕으로 보다 다양한 형태의 나노섬유를 가공하기 위한 연구 개발이 진행되고 있으며, 대표적으로 (1)코어-셸(Core-shell) 형태의 나노섬유 제작을 위한 동축 전기방사(Coaxial Electrospinning) 및 (2)두 가지 이상의 다른 플라스틱 용액을 적용하여 융합 나노섬유를 구현하는 다층-혼합 전기방사(Multilayer and Mixed Electrospinning) 등이 있어, 향후 새로운 형태의 나노기반 융합재료의 개발을 기대할 수 있다.
- 우수한 감쇠성능을 가지는 콘크리트 재료의 개발을 위하여 적용될 수 있는 나노섬유의 재료로는 낮은 탄성계수, 큰 탄성변형, 및 큰 이력(Hysteresis) 특성을 보이는 탄성중합체(Elastomer)가 적합하다. 이와 같은 탄성중합체 중, 폴리우레탄은 천연고무(Natural Rubber), 합성고무(Neoprene)에 비하여 외력의 진동수에 따른 전달률(Transmissibility)이 4-10배정도 낮아 진동 저감성능이 우수하며, 감쇠비(Damping Ratio)는 2.34 Hz에서 0.344로 상용 재료 중에 가장 높다. 따라서 전기방사 기술을 적용하여 내부 및 표면 형상을 제어하여 콘크리트와의 부착 성능을 높이고 분산성을 높이는 기술이 개발될 경우 콘크리트의 감쇠비를 획기적으로 높일 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

- Nano-Electrospinning 공정

- 전기방사(electrospinning) 공정에서는 플라스틱 나노 섬유의 제작을 위하여 플라스틱 소재를 용매에 녹인 플라스틱 용액(polymer solution)을 노즐(nozzle)을 통하여 토출한다. 모세관 역할을 하는 노즐의 끝단에서 플라스틱 용액은 중력과 표면장력의 평형에 의하여 구 형상을 유지하게 된다. 이 때 노즐과 집진판(collector) 사이에 전기장을 부여하게 되면 플라스틱 용액에 작용하는 표면장력과 반대되는 정전기력이 발생하게 되어 용액의 형상이 변형되게 된다. 변형된 용액의 형상은 일반적으로 콘과 유사하게 되며, 이와 같은 콘 형상의 용액 표면을 테일러 콘(Taylor cone)이라고 한다. 인가해 주는 외부 전기장의 세기가 임계값을 넘어서게 되면 전기장에 의한 정전기력이 표면장력을 극복하게 되어 용액의 제트(jet)가 형성되며, 이와 같은 제트를 형성하면서 일정한 유량(flow rate)으로 플라스틱 용액을 노즐을 통하여 지속적으로 공급해 줌으로써 연속된 제트의 형성이 가능하게 된다. 노즐을 통하여 분출되는 플라스틱 용액의 제트는 집진판을 향해 진행하면서 용매의 증발이 일어나게 되고, 따라서 플라스틱 나노 섬유만이 집진판에 축적되게 된다. 플라스틱 용액 제트는 이동 중 정전기력에 의하여 표면적이 증가되게 되며 결과적으로 형성되는 섬유의 직경이 나노미터 수준을 가지게 된다.

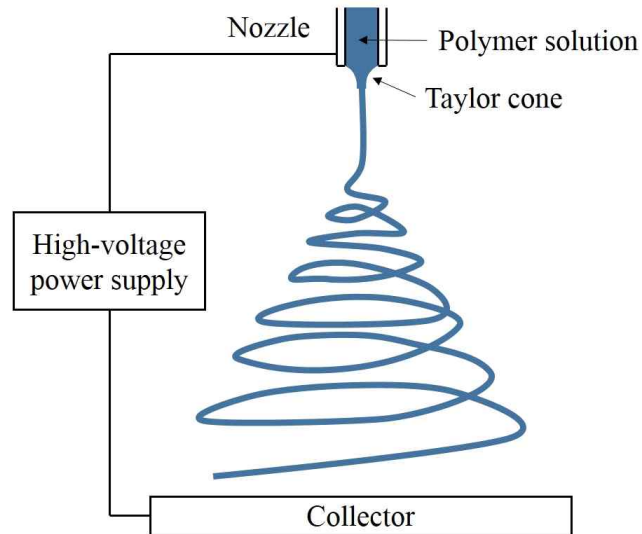


그림. 전기방사의 원리

- 이와 같은 전기방사 혹은 Nano-Electrospinning 공정은 다음과 같은 대표적인 장점을 가지고 있어, 현재 다양한 분야로의 응용이 연구되고 있다.
 - 적용 가능한 광범위한 소재
 - 나노 섬유 제조의 용이성
 - 상대적으로 단순한 제작 공정
 - 저렴한 생산단가
 - 공정 및 시스템의 복잡화 가능
 - 미세한 섬유 등 다양한 형상적 특징을 가지는 나노 섬유의 제작 가능성

– 전기방사 시스템 설계 및 제작

- 전기방사 공정을 효과적으로 수행하여 나노 섬유를 제작하기 위한 전기방사 시스템의 주요 구성 요소로는 (1) 펌프(pump), (2) 노즐(nozzle), (3) 집진판(collector), 및 (4) 고전압 전원공급기(high-voltage power supply) 등이 있다.
 - 펌프는 전기방사 시스템에서 플라스틱 용액을 일정한 유량으로 노즐을 통하여 분출해 주는 역할을 수행한다. 따라서 본 연구에서는 일정한 단면적을 가지는 주사기(syringe)를 일정한 속도로 밀어주는 방식의 주사기 펌프(syringe pump)를 전기방사 시스템에 적용하였다. 전기방사 공정의 경우 일정한 압력을 통한 유동 발생보다 일정한 유량을 유지하면서 유동을 발생시키는 것이 조작성, 정밀성 등의 측면에서 보다 유리하기 때문에, 이와 같은 주사기 펌프를 적용한 전기방사 시스템을 개발하였다.
 - 노즐은 주사기 펌프를 통하여 발생하는 플라스틱 용액의 유동을 분출하는 요소이며, 일반적으로 전기방사 공정에서는 mm 이하의 내경을 가지는 미세 노즐이 이용된다. 따라서 다양한 노즐 중, 23G 규격(내경 0.42 mm, 외경 0.72 mm, 길이 13 mm)의 미세 노즐을 선택하였다. 미세 노즐은 금속 소재(stainless steel)로 구성되어 있으며, 전원공급기를 통한 직접적인 고전압 인가가 가능하도록 설계하였다.
 - 집진판은 전기방사된 나노 섬유가 집적되는 요소로, 나노 섬유에 포함된 전하를

신속하게 제거할 수 있어야 한다. 이와 같은 이유로 금속 집진판이 주로 이용되고 있으며, 0 V의 전위로 접지된 상태를 유지하게 된다. 전기방사로 제작되는 연속적인 나노 섬유를 내부에 포함하는 콘크리트 복합체의 제작을 위하여 콘크리트 재료를 일정한 부피 상에 유지시켜 주기 위한 지그 구조가 요구된다. 따라서 본 연구에서 개발된 집진판은 나노 섬유를 집적하는 구리/황동 금속 표면과 콘크리트 재료의 가두는 지그를 함께 가지도록 설계/제작되었다. 아래 그림은 개발된 집진판 구조의 설계를 나타내고 있으며, 원형 시편 및 사각 시편의 제작을 위한 두 종류의 집진판 구조를 나타내고 있다.

- 고전압 전원공급기는 전기방사 공정 중 노즐과 집진판 사이에 임계 전기장 이상의 전기장을 형성하기 위한 필수적인 요소이다. 임계 전기장 이상의 큰 전기장을 유도하기 위해서는 통상적인 전원공급기에서 인가할 수 있는 전위에 비하여 매우 큰 전위를 노즐에 가해 주어야 하기 때문에, 고전압 전원공급기를 적용하였다. 일반적인 전기방사 공정에서 적용되는 전위의 크기는 수 kV에서 수십 kV 수준이며, 본 연구에서는 15~20 kV 범위의 전위를 노즐에 인가하였을 때 임계 전기장을 넘어설 수 있도록 전기방사 시스템을 설계/제작하였다.

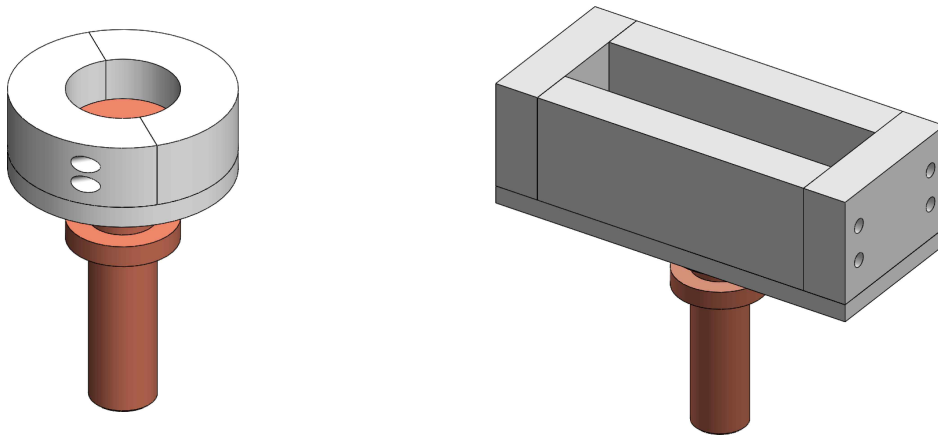


그림. 집진판 및 지그 설계의 예: 디스크 및 사각 형태의 지그

- 시스템 프레임 설계
 - 안정적인 전기방사 공정의 수행을 위하여 본 전기방사 시스템에서는 알루미늄 틀 및 아크릴 판으로 구성된 육면체 프레임을 구성하였다. 큰 전기장이 형성되는 노즐, 집진판은 프레임의 내부에 위치하고, 이외의 구성요소들(주사기 펌프, 고전압 전원공급기 등)은 프레임의 외부에 위치하도록 설계하였다.
- 전기방사 시스템 제작
 - 설계를 바탕으로 실제 구현된 전기방사 시스템은 아래 그림과 같으며, 각 주요 구성 요소들과 프레임을 함께 나타내었다. 이와 같이 제작된 시스템을 이용한 전기방사 공정을 통하여 나노 섬유의 제작 실험 및 나노 섬유를 포함한 콘크리트 복합체의 제작 공정을 진행하였다.

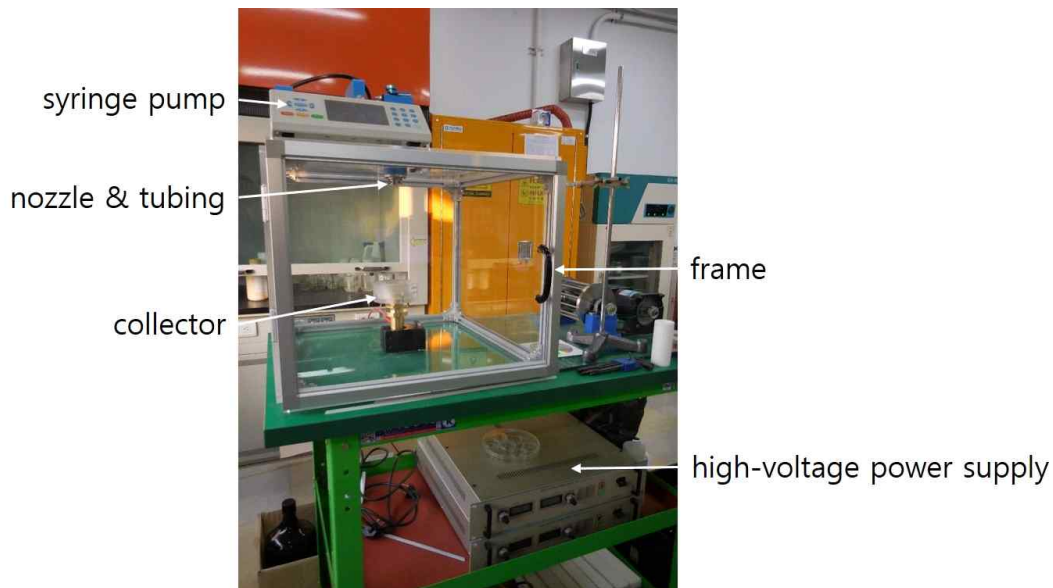


그림. 개발된 Nano-Electrospinning 시스템 및 주요 구성 요소

- 나노 섬유 제작 실험 및 평가

- 본 연구에서 개발된 전기방사 시스템의 검증 및 활용 가능성을 확인하기 위하여 전기방사 공정을 통한 나노 섬유의 제작 실험을 수행하였다. 나노 섬유 전기방사 공정에 적용된 주요 공정조건들은 아래 표와 같다.

표. Nano-Electrospinning 주요 공정조건

Flow rate	3 cc/h
Electric potential	15 kV
Polymer	Thermoplastic polyurethane (TPU, K-385A, Kolon Industries)
Solvent	DMF, THF
Solution	TPU 5 wt% in DMF:THF (1:1 in wt)
Needle-collector distance	24 cm

- 전기방사 용 플라스틱 용액은 DMF(dimethylformamide)와 THF(tetrahydrofuran)을 1:1로 혼합한 용매에 열가소성 폴리우레탄(TPU, thermoplastic polyurethane)을 5 wt% 용해시켜 준비하였다. 용매로 이용된 DMF와 THF의 비율에 따라 제작되는 나노 섬유의 직경 및 분포의 변화가 보고되고 있으나, 기본적인 비율로 주로 이용되고 있는 1:1 비율을 적용하여 용매를 혼합하였다. 준비된 플라스틱 용액은 주사기 펌프를 이용하여 3 cc/h의 일정한 유량으로 노즐로 주입되었으며, 24 cm 간격으로 배치된 노즐과 집진판 사이에는 15 kV의 전위차를 인가하였다.
- 아래 그림은 기본 공정 조건을 적용하여 디스크 형상의 집진판으로 전기방사된 나노 섬유들로 구성된 매트를 나타내고 있다. 집진판에 집적되는 나노 섬유들의 분리가 용이하도록 집진판 표면에 전도성을 가지는 알루미늄 필름을 부착한 후 전기방사 공정을 수행하였으며, 따라서 나노 섬유 매트는 알루미늄 필름 위에 형성되었다.



그림. 전기방사로 제작된 디스크 형태의 나노 섬유 매트: 지름 10 cm

- 제작된 열가소성 폴리우레탄 나노 섬유는 SEM(FE-SEM, JSM-7500F)을 이용하여 관찰하였다. 아래 SEM 사진들에서 확인할 수 있듯이, 본 연구에서 개발한 전기방사 시스템을 통하여 나노 섬유가 효과적으로 제작할 수 있었다. 지름이 1 μm 이하인 나노 섬유들이 주로 제작되었으며, 최소 약 240 nm의 지름을 가지는 나노 섬유도 확인할 수 있었다. 일반적으로 전기방사 공정의 여러 공정 변수들이 나노 섬유들의 지름을 결정하게 되며, 특히 플라스틱 용액의 점도와 전기장의 세기가 많은 영향을 주게 된다.

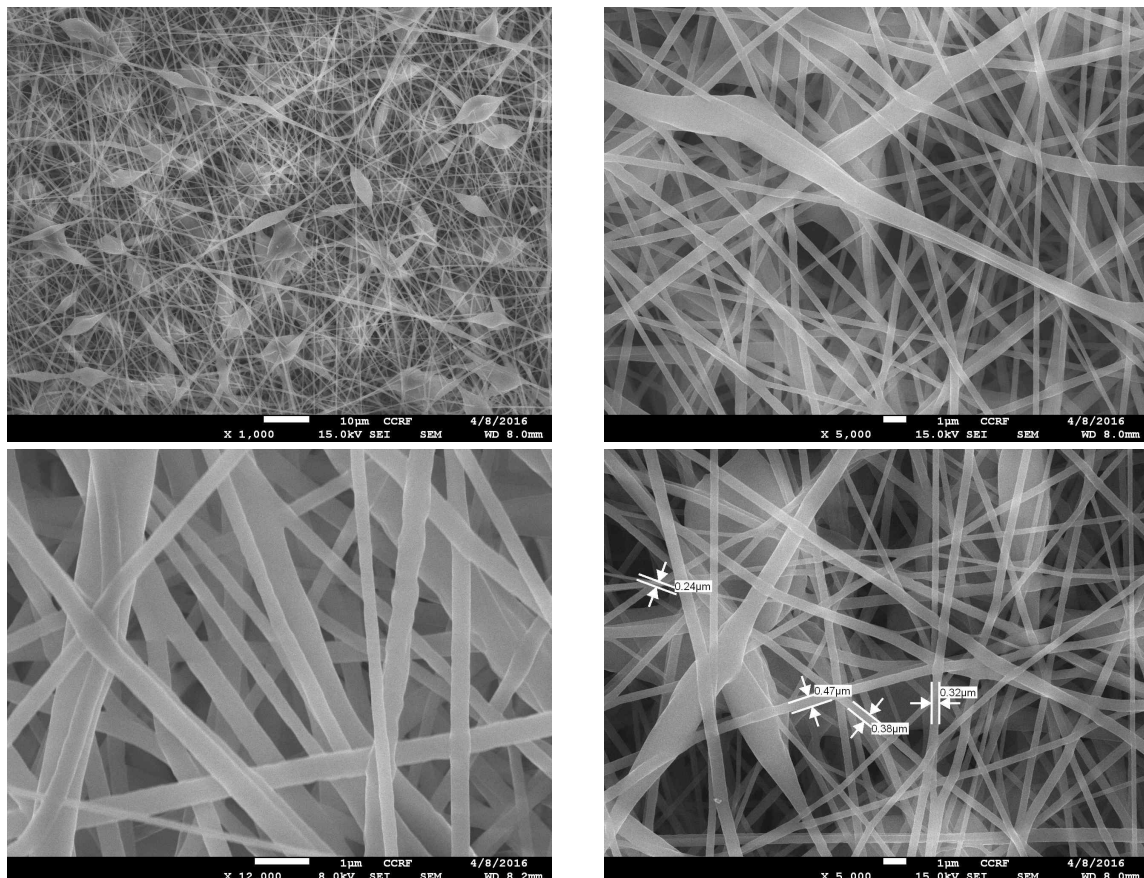


그림. 제작된 나노 섬유의 SEM 사진

▪ Nano-Electrospinning 공정 개선 및 콘크리트 복합체 제작 및 개발

- 전기방사 폴리우레탄 콘크리트 복합체 제작

- 전기방사 방법을 제작한 폴리우레탄 섬유를 혼입한 콘크리트 복합재료의 감쇠 특성을 평가하기 위하여 충격가진 방법을 적용하였다. 개발된 전기방사 시스템이 소형이기 때문에 현재로서는 대량생산이 어렵고 시멘트 페이스트 내에 섬유를 연속적으로 혼입해야하기 때문에 그림과 같은 전기방사 시스템 내에서 직경 50 mm와 높이 10 mm의 원주형 실험체를 제작하였다. 시멘트 페이스트를 일정한 속도로 주입하고 전기방사 폴리우레탄 섬유를 고압으로 전원을 연결하여 상단에 위치한 노즐에서 폴리우레탄이 연속적으로 시멘트 페이스트에 혼입되는 방식이다.

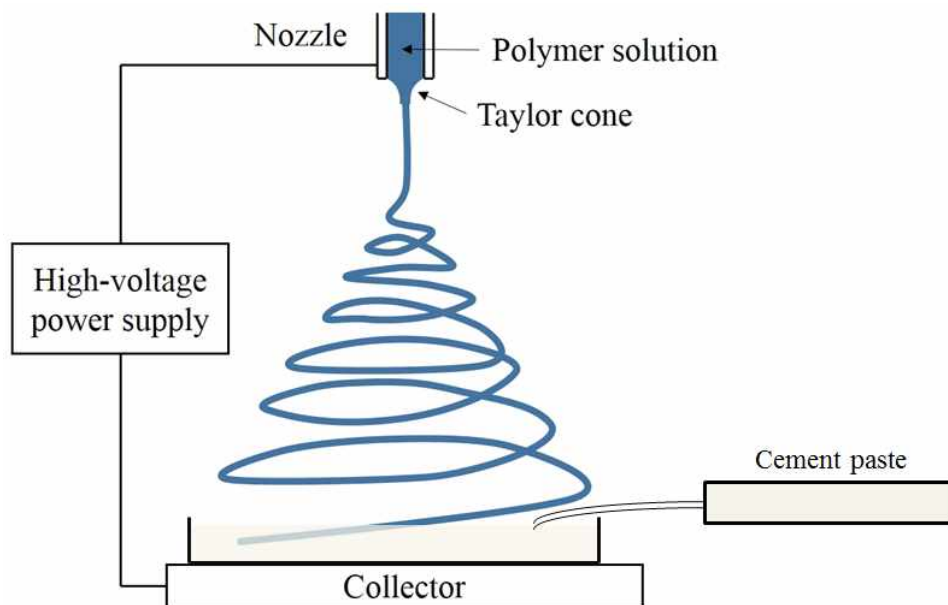


그림. 전기방사 폴리우레탄 섬유 혼입 콘크리트 복합재료 제조 개념도

- 실험체는 물/시멘트비가 40 %인 순수 시멘트 페이스트로 제조된 실험체와 동일 시멘트 페이스트에 섬유를 부피비로 1 % 포함하는 나노전기방사 폴리우레탄 섬유 보강 콘크리트 복합재료 두 종류를 제작하였다. 아래 그림은 제작한 실험체를 촬영한 것이며, 육안으로는 차이점의 식별이 불가능하다.



(a)



(b)

그림. 실험체 사진; (a) 시멘트 페이스트 (b) 나노전기방사 섬유보강 콘크리트 복합재료

- 나노전기방사 폴리우레탄 콘크리트 복합체 성능평가

- 아래 그림은 나노전기방사 폴리우레탄 섬유보강 콘크리트 복합재료의 감쇠성능을 평가하기 위한 초음파 측정 원리를 나타낸다. 이 연구에서는 54 kHz의 초음파를 사용하였다. 일반 충전 소음과 지진, 바람 등과 같은 주파수 영역에서의 감쇠 특성을 비교하기 위해서는 그에 맞는 파를 가진하여 감쇠 특성을 비교해야 하지만 현재 구축된 나노전기방사 시스템이 단일 노즐 방식이며, 하나의 시스템만 구축되어 있어서 충격가진 방식의 측정 방법을 적용하기 불가능하여 실험이 가능한 초음파 측정 방법을 적용하였다.

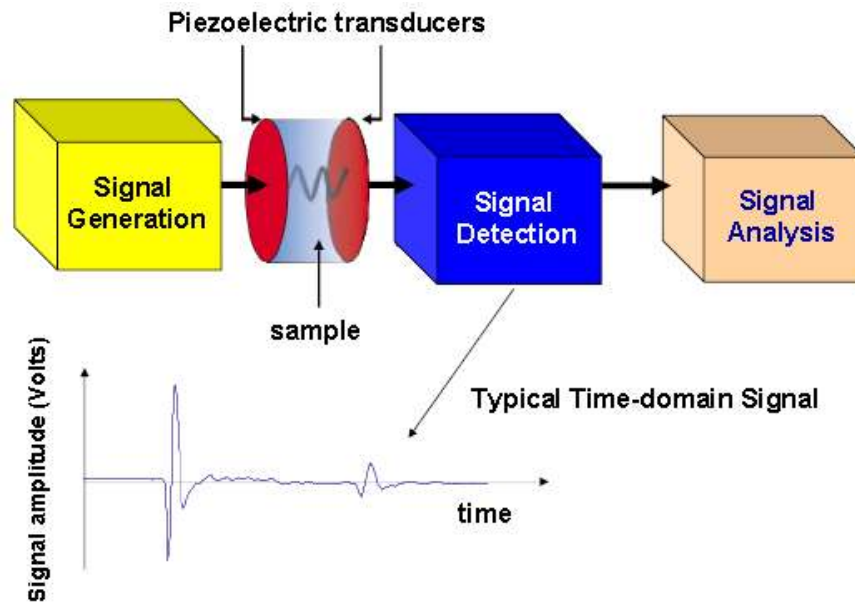


그림. 초음파 측정 원리 (ASTM C597, BS 1881-203)

- 아래 그림은 초음파를 가진한 실험체의 응답 특성을 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 시간 영역에서 동일한 가진을 하였을 때 나노전기방사 폴리우레탄 섬유보강 콘크리트 복합재료는 시멘트 페이스트에 비하여 최대 진폭이 작으며, 빠른 진동 감쇠 성능을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 전기방사 폴리우레탄 섬유보강 콘크리트 복합재료는 동일한 에너지를 갖은 파로 가진하였을 때 반대편으로 전달되는 에너지가 감소되고 전달된 파의 감쇠 속도가 빠르게 되어 결국 나노전기방사 방식으로 나노 크기의 폴리우레탄 섬유를 혼입한 경우 감쇠비를 높일 수 있다는 것을 확인하였다.

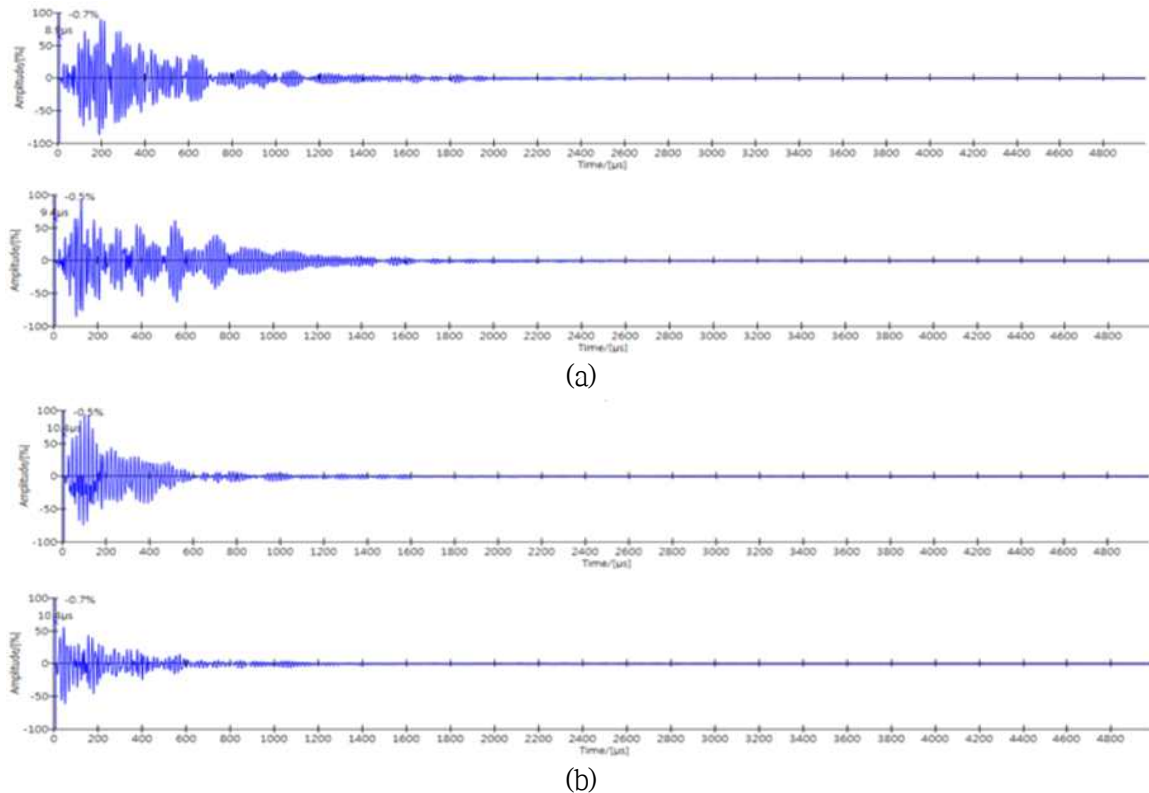


그림. 나노전기방사 폴리우레탄 콘크리트 복합재료 감쇠성능 (동일 실험체 2회 반복); (a) 시멘트 페이스트 (b) 나노전기방사 폴리우레탄 섬유보강 콘크리트 복합재료

■ 다중 노즐 Nano-Electrospinning 공정 개발

- 다중 노즐 Nano-Electrospinning 공정 설계를 위한 기초 연구

- 일반적으로 전기방사 공정은 비교적 단순한 장치를 이용한 공정을 통하여 다양한 종류의 플라스틱 나노 섬유의 제작이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 일반적인 전기방사를 이용할 경우, 타 기술들에 비하여 나노 섬유의 생산성이 상대적으로 낮다는 단점을 가지고 있어 본 기술개발에 직접적으로 적용하기에는 어려움이 있다. 이와 같은 낮은 생산성을 효과적으로 극복하기 위한 기존의 연구들 중 대표적인 것들은 다중 노즐(multi-nozzle), 드림 집적판 및 압축공기 등을 적용한 전기방사 기술 등이 있다.
- 본 연구에서는 전기방사 공정을 이용한 나노섬유의 생산성을 향상시키기 위하여, 먼저 다중 노즐 전기방사 공정을 고려하였다. 따라서 다중 노즐을 적용한 전기방사 공정의 설계 및 이를 바탕으로 한 시스템의 제작을 위한 기초 설계 연구로써 다중 노즐의 수와 배열이 노즐과 집적판 사이에 형성되는 전기장에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 확인하였다. 또한 무차원(dimensionless) 변수를 통한 결과 해석을 바탕으로 다중 노즐 전기방사 공정의 설계를 위한 단순 모델을 제시하였다.
- 단순 모델을 이용한 해석 설계 및 주요 변수 도출
 - 다중 노즐 전기방사 공정의 설계를 위하여 필수적인 노즐과 집적판 사이에 형성되는 전기장의 해석은 다중물리 해석 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics 5.0을 이용하여 수행하였다. 전기방사 시스템의 주요 구성요소인 노즐, 집적판 등이 포함된 해석 모델은 아래 그림과 같다. 또한 다수 개의 노즐을 설계에 고려하기

위하여, 중심에서 일정한 거리(r)만큼 떨어져서 배치되어 있으며, 각 노즐 사이의 거리는 일정한 N 개의 노즐을 가지는 해석 모델을 구성하였다.

- 전기방사 공정의 해석을 위하여 노즐의 표면에는 20 kV의 일정한 전압(V_0)을 적용하였으며, 집진판의 경우에는 0 V의 접지를 적용하였다. 모든 해석 모델에 대하여 다중 노즐과 집진판 사이의 거리(h)는 150 mm로 고정하였으며, 원형 집진판은 반지름(R) 25 mm의 노출된 영역과 콘크리트 복합체 제작을 위한 PMMA 지그(ring barrier) 부분으로 구성하였다.
- 이와 같은 등간격으로 배치된 다중 노즐 배열에서 주요한 설계 변수인 다중 노즐의 반경 위치(r), 노즐 사이의 간격(d), 및 노즐의 개수(N) 사이에는 식 (1) 과 같은 관계식이 존재하게 된다.

$$d = 2r \sin \frac{\pi}{N}$$

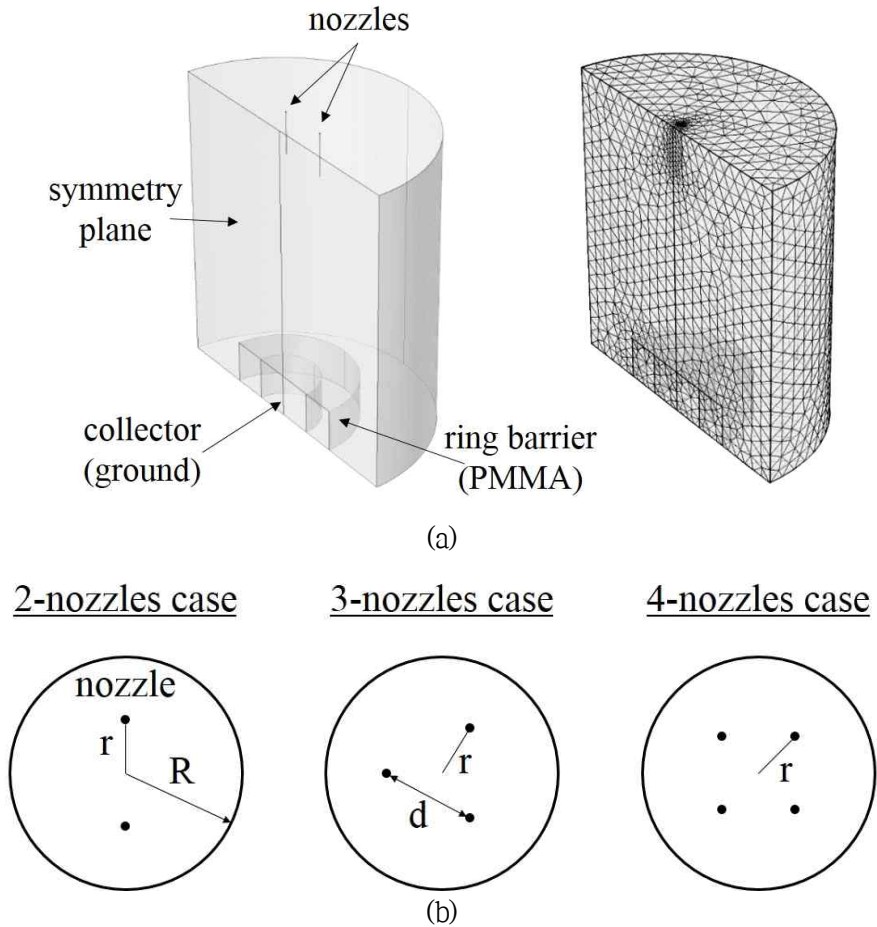


그림. 다중 노즐 Nano-Electrospinning 전기장 해석 모델: (a) 형상 모델 및 유한요소 (b) 고려된 다중 노즐 종류

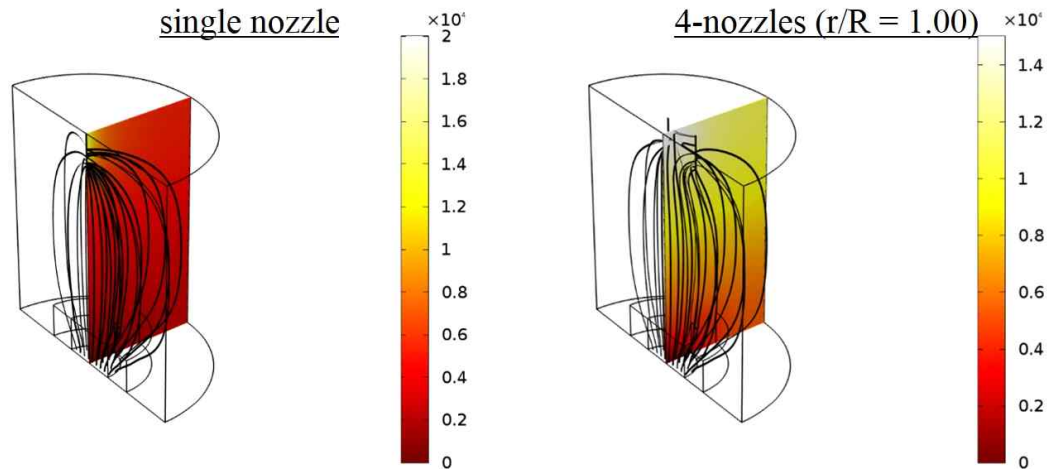


그림. 다중 노즐 Nano-Electrospinning 전기장 해석 결과 - 전위 분포 및 전기장 방향

- 본 연구에서는 노즐의 개수(N)가 2, 3, 4개인 다중 노즐 전기방사 공정에 대하여 해석을 수행하였다. 그림 3.2는 대표적으로 중심에서부터 25 mm 떨어진 4개의 노즐을 이용한 다중 노즐 전기방사 공정에서의 전기장 분포를 보여 주고 있다. 1개의 노즐을 이용한 일반적인 전기방사 공정에 비하여 형성되는 전위 (electric potential)의 분포와 전기장의 세기 및 방향이 달라지고 있으며, 특히 설치된 노즐 사이의 간섭(interference)에 의한 전기장 교란이 발생하고 있음을 확인할 수 있다.
- 해석을 통하여 얻은 결과 중, 다중 노즐 및 집진판 표면 중앙에서 발생하는 전기장의 세기 변화는 아래 그림과 같다. 본 해석에서 고려한 등간격으로 배치된 방사형 다중 노즐의 경우, 노즐의 개수가 증가할수록 집진판 중앙에 형성되는 전기장의 세기가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 집진판 표면에서 형성되는 전기장은 중앙 부근에서는 거의 일정한 크기를 보였으나 반경 방향의 거리가 증가할수록 전기장 세기가 급격하게 증가하는 지점이 나타났다. 콘크리트 복합체 제작을 위하여 도입한 링 형태의 지그 구조가 공기보다 큰 유전율(permittivity)을 가지는 플라스틱 소재로 구성되기 때문에, 전기방사 공정 중 다중 노즐과 집진판 사이에 형성되는 전기장에 영향을 주게 되는 것으로 판단된다. 이에 따라 집진판 표면에서 전기장의 변화가 급격하게 발생하는 지점이 발생하는 것으로 파악된다.

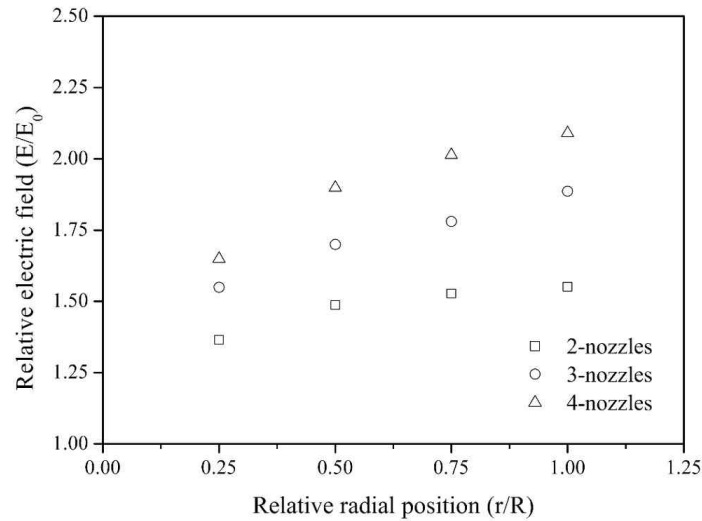


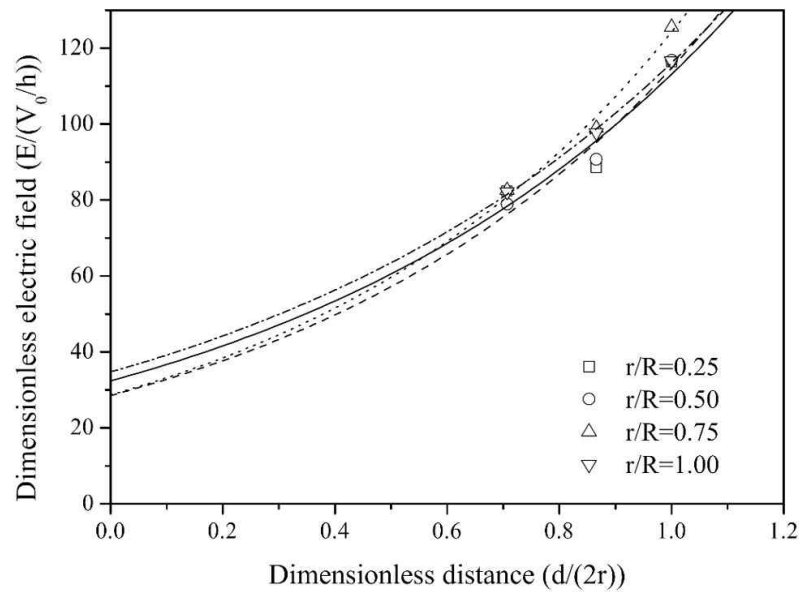
그림. 노즐의 위치에 따른 집진판 중앙의 전기장 크기 변화

- 또한 다중 노즐의 개수가 동일한 경우, 중심으로부터 노즐까지의 거리가 증가할수록 집진판에 형성되는 전기장의 세기가 증가하였다. 중심에서의 거리 증가는 동시에 노즐 사이의 거리를 증가시키는 효과를 주기 때문에 노즐 사이에서 발생하는 간섭이 감소되어 상대적으로 집진판의 전기장 세기가 증가되는 것으로 볼 수 있다.
- 이와 같이 전기장 해석을 통하여 얻은 결과를 바탕으로 전기방사 공정에 적용되는 다중 노즐의 배열과 노즐의 표면에 형성되는 전기장 세기 사이의 무차원 변수를 이용한 단순 모델을 수립하였다. 먼저 고전압을 인가함으로써 형성되는 노즐 표면의 전기장(E)은 전압(V_0)과 집진판까지의 거리(h)를 이용하여 무차원 변수로 나타낼 수 있다. 또한 다중 노즐 사이의 거리(d)는 중심에서의 거리(r) 및 노즐 개수(N)로 표현이 가능하다. 즉, 식 (2)와 같이 노즐의 배열(무차원화시킨 중심에서의 거리)과 노즐에 형성되는 전기장의 세기(무차원화시킨 전기장 세기) 사이의 단순 모델을 유도할 수 있다.

$$\frac{E}{V_0/h} = C_1 \exp\left(C_2 \left(\frac{d}{2r}\right)\right) = C_1 \exp\left(C_2 \sin \frac{\pi}{N}\right)$$

- 본 연구에서 유도한 무차원 단순 모델과 실제 해석 결과들은 아래 그림과 같이 비교할 수 있다. 각 해석 결과들을 이용하여 단순 모델에 도입된 상수들(C_1 , C_2)을 회귀 분석을 통하여 구하였으며, 각 경우에 대한 값들은 아래 표와 같다. 이를 통하여 확인할 수 있듯이 무차원 변수로 표현된 단순 모델은 다중 노즐 전기방사 공정에서 노즐 표면에 형성되는 전기장의 세기를 잘 나타낼 수 있으며, 다중 노즐 전기방사 시스템의 개발을 위한 기초 설계식으로 활용될 수 있을 것이다. 또한 두 상수 중 C_1 의 경우 아래 식과 같은 의미를 가지게 되며, 즉 원통 형상을 가지는 큰 노즐 한 개를 이용한 전기 방사 공정에서의 무차원 전기장 세기를 예측할 수 있게 된다.

$$N \propto \frac{E}{V_0/h} = C_1$$



· 무차원 거리의 변화에 따른 노즐에서의 무차원 전기장 세기 변화

표. 회귀분석으로 구한 단순 모델의 상수들

r/R	C ₁	C ₂
0.25	32.38358	1.25080
0.50	28.50093	1.39281
0.75	28.67697	1.46600
1.00	34.72772	1.20702

– 다중 노즐 Nano-Electrospinning 공정 시스템 개발 및 나노섬유 매트 제작

- 본 연구에서는 다중 노즐 전기방사 공정 시스템의 개발과 이를 통한 대면적 나노섬유 매트의 안정적인 제작을 위하여 그림과 같은 다중 노즐 전기방사 장치의 프로토타입(prototype)을 설계/개발하였다. 전기방사 장치 프로토타입의 주요 구성 요소들은 고분자 용액 분배부(solution distributor), 노즐, 다공성 판(perforated plate), 드럼 집진판 등이 있다.

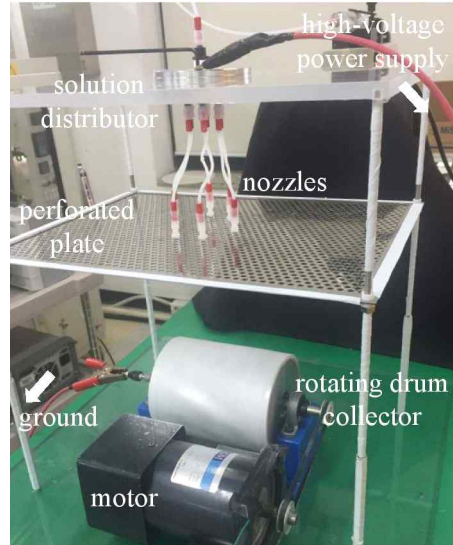
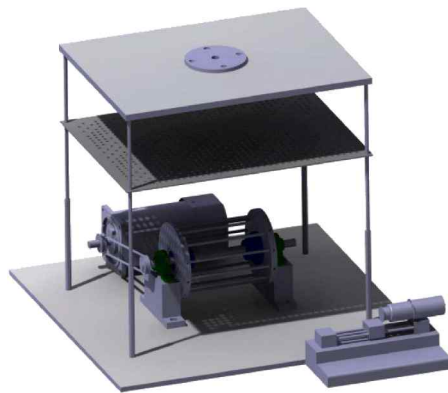


그림. 다중 노즐 Nano-Electrospinning 공정 시스템 설계 및 개발된 프로토타입

- 고분자 용액 분배부: 주사기 펌프(syringe pump; Fusion 100 Touch, CHEMYX)를 통하여 고분자 용액이 주입되는 입구(inlet)와 노즐로 연결되는 다수의 출구(outlet)를 가지고 있다. 다수의 노즐이 연결되는 분배부를 통하여 전기방사를 위한 고분자 용액이 균일하게 분배되고 동일한 유량으로 배출될 수 있도록 내부 유로 및 방사형 배치로 설계되었다.
- 노즐: 내경 0.42 mm, 외경 0.72 mm, 길이 13 mm의 23G 규격 스테인리스 니들과 테프론(teflon) 미세유체 커넥터(microfluidic connector)를 이용하였다. 현재 개발된 프로토타입에는 총 6개의 노즐이 적용되었으나 향후 노즐 개수의 증가 가능하도록 설계되었다.
- 다공성 판: 두께 1 mm의 스테인리스 판재에 정삼각 배열로 배치된 구멍(지름 5 mm, 피치 8 mm)이 존재하며, 이와 같은 구멍에 노즐이 삽입되어 전기방사 공정 중 노즐들의 안정적인 고정 및 용이한 노즐의 위치 조절이 가능하도록 하였다.
- 드럼 집진판: 금속 선재 프레임(metal wireframe), 스냅 링(snap ring), 교류 모터(AC motor) 및 전동 벨트(belt) 등으로 구성되었다. 드럼 집진판의 표면에 나노섬유가 집적되는 알루미늄 필름을 감쌀 수 있도록 하였다. 그리고 고전압 전원 공급기를 이용하여 고분자 용액 분배부와 드럼 집진판 사이에 고전압을 인가하였다.
- 개발된 전기방사 시스템 프로토타입을 활용하여 열가소성 폴리우레탄 나노섬유로 구성된 나노섬유 매트와 다중 노즐 전기방사 공정을 수행하였다. 전기방사 고분자 용액은 열가소성 폴리우레탄(K-385A, Kolon Industries)을 DMF와 THF를 1:1 무게비로 혼합한 용매에 녹여서 5 wt%의 열가소성 폴리우레탄 용액을 제조하고 전기방사 공정에 이용하였다.

표. Nano-Electrospinning 주요 공정조건

Electric potential	15 kV
Needle-collector distance	240 mm
Rotational speed of collector	300 rpm
Electrospinning time	40 min
Flow rate for each nozzle	2.5 ml/hr

- 다중 노즐 전기방사 공정의 기초 특성 연구를 수행하고 이를 바탕으로 균일한 분포를 가지는 열가소성 폴리우레탄 나노섬유 매트를 성공적으로 제작할 수 있었다. 다중 노즐 전기방사 공정을 위한 6개의 노즐은 방사형으로 배열하였으며, 고분자 용액의 전체 주입 유량은 15.0 ml/hr로 일정하게 유지하였다.
- 다중 노즐 전기방사 공정을 이용한 열가소성 폴리우레탄 나노섬유 매트 제작 결과는 다음 그림과 같다. 드럼 집진판의 금속 선재 프레임에 알루미늄 필름을 감싸고 전기방사 공정 중 이를 일정한 속도로 회전시킴으로써, 알루미늄 필름 표면에 나노섬유가 집적된 나노섬유 매트를 제작할 수 있었다. 나노섬유 매트의 크기는 약 $146 \times 381 \text{ mm}^2$ 로, 단일 노즐 전기방사 공정에 비하여 대면적의 나노섬유 매트를 성공적으로 제작할 수 있었다.

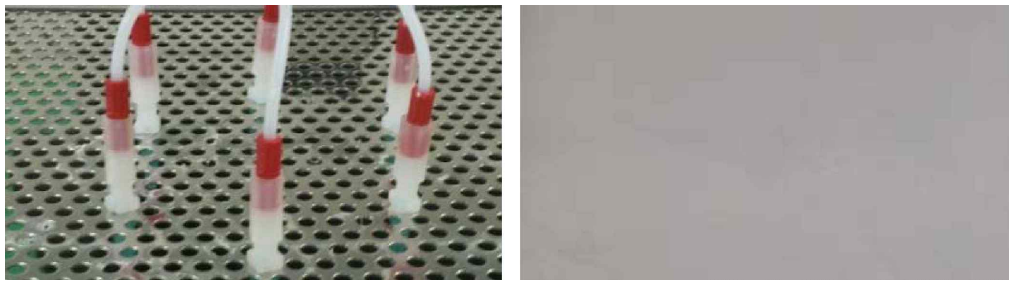


그림. 전기방사 공정을 위한 노즐 배치 및 집진판 표면에 균일하게 형성된 나노섬유 매트

KITECH				시험결과기록서		시험방법:	
				페이지 (1 / 1 총 1)			
시험일자	2018년 04월 06일						
의뢰자	기관명	전남대학교	주소	광주광역시 북구 송암로 77			
	담당자	이봉기	연락처	062) 530-1685			
종류	플라스틱 나노섬유 매트			시험일자	크기 (가로 및 세로)		
시험대상							
종목	길이 측정			파 인	작 성 자	과 경 제	과 경 제
시험방법				기술책임자(부)			
온도	최고	21.0 °C	습도	최고	51% R.H.		
시험환경	최저	20.0 °C	최저	45% R.H.			
시험장소	■ 표준실			□ 이동시험		□ 원장시험	
시험결과							
1. 플라스틱 나노섬유 매트							
구분		사항					
가로 길이		380.87 mm					
세로 길이		146.32 mm					
(만약 측정을 통한 평균치)							

그림. 제작된 나노섬유 매트의 크기 측정 결과

(2) Task B: 고감쇠 콘크리트 복합체기반 진동소음 저감시스템

■ 고감쇠 신재료의 감쇠성능 검증

- 새로운 고감쇠물질을 구조시스템으로 사용하기 위해서는 감쇠물질의 위치, 용량 등에 따라 어떻게 구조시스템의 감쇠를 증가시키는지에 대해 정량적으로 평가할 필요가 있다. 또한 감쇠물질로 구성된 구조재료의 감쇠를 효율적으로 추정하기 위한 기법이 요구된다. 구조시스템, 바닥구조시스템의 소음진동성능을 평가하기 위해서는 대부분 진동실험에 의해 데이터를 획득하고 이를 이용하여 감쇠비를 추정하고 고감쇠물질 적용 전후의 감쇠비의 증가효과를 비교하게 된다. 그러므로 진동실험에 의하여 계측된 응답을 이용하여 감쇠 증가효과를 파악하는 것은 매우 중요한 기술 중의 하나이다.
- 본 1차년도 연구에서는 개발된 신재료로 제조된 비고전 감쇠 구조시스템에 대한 효율적인 모드분해기법과 감쇠성능을 평가하는 기법을 개발하는 것으로, 이러한 기법은 1차년도 뿐만아니라 2, 3차년도 에 개발되는 내풍구조시스템, 바닥판 소음 저감시스템의 진동성능평가를 하는데 활용될 것이다.

- 비고전감쇠를 구조시스템의 상태공간 모드해석법

- 고감쇠 물질, 진동제어장치가 설치된 구조물의 감쇠는 전형적인 비고전 감쇠로 볼 수 있기 때문에 기존의 고전감쇠에 기반한 기존의 모드형상을 이용하면 모드분해가 효과적으로 이루어지지 않을 가능성이 크다. 외부하중을 받는 n 자유도의 구조물의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다. 이러한 운동방정식이 다루어지는 공간을 MCK 공간이라고 부르기로 한다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = Ef \quad (1a)$$

- 여기서, M, C, K 는 $n \times n$ 차원의 구조물의 질량, 감쇠, 강성을 나타내며, E 는 외부하중 f 의 위치를 나타내는 행렬이다. 기존의 모드분해법에서는 감쇠행렬이 강성행렬과 질량행렬로 표현가능하다고 가정하여 구한 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi^T M \Phi \ddot{\eta} + \Phi^T C \Phi \dot{\eta} + \Phi^T K \Phi \eta = \Phi^T E f \quad (1b)$$

- 여기서 $x = \Phi \eta$, η 는 일반화좌표이다.
- 그러나 감쇠행렬이 비고전감쇠 즉 질량, 강성행렬로 표현되지 않는 경우에는 감쇠항이 대각행렬로 표현이 불가능하기 때문에 모드분리가 MCK 공간에서 성립되지 않는다. 이러한 모드분리의 난해성을 해결하고자 상태공간에서의 모드분해법을 제안하고 구조물에 대한 적용 가능성을 검토하였다. 상태공간에서의 모드분리를 위해서 요구되는 상태변수 또는 미분상태변수를 계측된 가속도로부터 추정하는 기법을 이용하여 상태공간에서 모드분리가능성을 개선할 수 있는 방법도 고려하여 적용하였다.
- MCK공간에서의 모드분리의 난해성을 해결하기 위하여 운동방정식을 상태공간으로 변경할 수 있으며, 이를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{z} = Az + Bf \quad (2)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E \end{bmatrix} \quad z = \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \end{pmatrix}$$

- 식 (2)는 MCK공간의 운동방정식을 상태공간의 방정식으로 변환한 상태방정식을 나타내고 있다. 시스템 행렬 A 에 대한 상태공간에서의 고유값 문제는 다음 형태로 나타낼 수 있다.

$$A\Psi = \Psi\Lambda \quad (3)$$

- 여기서 Λ, Ψ 각각 고유값과 고유행렬로 다음과 같다. 고유행렬은 고유값에 해당하는 고유벡터로 다음과 같이구성된다. 여기서 “*”는 공액복소수를 나타낸다.

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_1^* & & 0 \\ & & \ddots & \\ & 0 & & \lambda_n \\ & & & & \lambda_n^* \end{bmatrix} \quad \Psi = [\Psi_1, \Psi_1^*, \dots, \Psi_n, \Psi_n^*] \quad (4a, b)$$

- 이와 같은 고유행렬을 이용하여 상태변수 z 를 상태공간에서의 모드 q 로 나타내면 다음과 같다.

$$z = \Psi q \quad q = \Psi^{-1} z \quad (5a, b)$$

- 식 (5)을 식(2)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{q} = \Lambda q + \Psi^{-1} B f \quad (6)$$

- 식 (5)과 같은 상태방정식의 모드분리가 가지는 문제점 즉 모드응답이 허수로 표현되는 문제점을 개선하기 위하여 공액관계에 있는 응답을 이용하여 다음과 같은 형태로 변환하는 기법을 사용한다.

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -w_i^2 & -2\xi_i w_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \lambda_i & \lambda_i^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \lambda_i & \lambda_i^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_i & 0 \\ 0 & \lambda_i^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

- 여기서, $\lambda_i = -\xi_i w_i + i\sqrt{1+\xi_i^2} w_i^2$ 이다. 식 (7)을 모든 고유값에 적용하여 일반화하여 나타내면 다음과 같다.

$$A_m T = T \Lambda \quad (8)$$

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -w_1^2 & 0 & 0 & 0 & -2\xi_1 w_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -w_2^2 & 0 & 0 & 0 & -2\xi_2 w_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -w_n^2 & 0 & 0 & 0 & -2\xi_n w_n \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_1^* & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_2 & \lambda_2^* & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_n & \lambda_n^* \end{bmatrix}$$

- 식 (8)에서 원래의 고유값을 다음과 같이 나타내고,

$$\Lambda = T^{-1} \Lambda_m T \quad (9)$$

- 이를 식 (3) 에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$A \Psi T^{-1} = \Psi T^{-1} \Lambda_m \quad (10)$$

- 식 (10)에서 ΨT^{-1} 는 시스템 행렬 A 를 Λ_m 으로 변환하는 변환행렬로써 실수이며 다음과 같다.

$$A T_p = T_p \Lambda_m, T_p = \Psi T^{-1} \quad (11)$$

- 여기서 변환행렬 T_p 는 고유진동수 w_i , 고유감쇠비 ξ_i 를 가지는 시스템으로 변환한다는 것이다. 상태변수 z 를 변환행렬 T_p 를 이용하여 변환하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z = T_p p \quad (12)$$

- 여기서 p 는 새로운 변수로 실수값을 가지는 모드응답이다. 식 (12)를 식(2)에 대입하여 정리하면, 다음과 같다.

$$\dot{p} = \Lambda_m p + T_p^{-1} B f \quad (13)$$

- 식 (13)은 변환행렬 T_p 에 의하여 새로운 시스템 행렬 Λ_m 변환된다. 이때 하중 항에 있는 행렬 $T_p^{-1} B$ 는 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$T_p^{-1} B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

- 이상과 같은 이론적인 변환행렬 T_p 는 아래의 상태공간 모드분해법을 통해서 계측 응답으로 구하게 된다.

- 상태공간에서의 모드분해법

- 본 절에서는 상태공간에서 모드 분해하는 방법을 다룬다. 본 모드분해법은 기존의 모드분해법이 가지는 한계점을 해결하고자 시간영역에서 상태변수(속도, 변위)를 구하는 번거로움을 진동수영역에서 좀 더 용이하게 구할 수 있도록 하였다. 상태공간에서의 모드분해를 위해서는 상태변수 또는 미분상태변수가 요구된다. 그러나 대부분 구조물의 진동계측은 가속도계에 의하여 이루어지므로 이로부터 속도 또는 변위를 구해야한다. 시간영역에서의 적분은 가속도에 포함되어 있는 bias 성분이나 노이즈 등에 의하여 변위, 속도가 왜곡되는 경우가 있다. 이를 방지하기 위하여 진

동수영역에서 다음과 같이 가속도로부터 변위, 속도를 구한다.

$$d(s) = a(s)/s^2 \quad v(s) = a(s)/s \quad (15 \text{ a,b})$$

- 여기서 $a(s)$ 는 계측된 가속도의 라플라스 변환으로 $n \times 1$ 벡터이다. 이때 n 은 계측센서의 개수이다. 이와 같이 구한 적분응답을 이용하여 상태변수와 미분상태변수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(s) = \begin{pmatrix} d(s) \\ v(s) \end{pmatrix} \quad \dot{x}(s) = \begin{pmatrix} v(s) \\ a(s) \end{pmatrix} \quad (16 \text{ a,b})$$

- 진동수영역에서의 상태변수 또는 미분 상태변수를 이용하여 선형 변환된 모드응답은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_i(s) = W_i^T z(s) \quad (17)$$

- 여기서 $p_i(s)$ 는 모드응답 중 i 번째 모드만을 선택한 것이며 W_i 는 $2m \times 1$ 벡터로 상태공간에서의 모드행렬 T_p 의 역행렬 i 번째 행을 열벡터로 치환한 것에 해당한다. 식 (17)에 의해 얻어진 응답이 모드가 되기 위해서는 모드응답의 분산 값은 일정하면서 고유진동수 부근에서 모드응답의 스펙트럼이 최대가 되어야 한다. 이를 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J &= S_{pp}(w_n) + \lambda \left(\int_{-\infty}^{\infty} S_{pp}(w) dw - 1 \right) \\ &= W_i^T S_{zz}(w_n) W_i + \lambda \left(\int_{-\infty}^{\infty} W_i^T S_{zz}(w) W_i dw - 1 \right) \end{aligned} \quad (18)$$

- 여기서 w_n 은 타겟이 되는 모드의 고유진동수이며, λ 는 모드응답의 분산을 '1'로 구속하는 라그랑지 멀티플라이어이다. 식 (18)에 주어지는 목적함수를 최대화하기 위해서는 미지의 선형변환벡터로 미분하고 이를 '0'으로 설정함으로써 선형변환 벡터 W_i 를 구할 수 있다.

$$\frac{\partial J}{\partial W_i} = S_{zz}(w_n) W_i + \lambda \left(\int_{-\infty}^{\infty} S_{zz}(w) dw \right) W_i = 0 \quad (19)$$

- 식(23)에서 W_i 는 상태변수의 스펙트럼 행렬 $S_{zz}(w_n)$, $-\int_{-\infty}^{\infty} S_{zz}(w) dw$ 에 의한 고유 벡터이며 λ 는 고유값을 의미한다. 식 (19) 고유값 문제를 풀면 스펙트럼 행렬의 크기가 $2m \times 2m$ 이기 때문에 $2m$ 개의 선형변환벡터가 나오게 된다. 이중에서 고유 값이 최대가 될 때의 벡터가 선형변환벡터가 된다. 제안된 상태공간모드분리법에 의한 분리결과를 검증하였다.

— 시뮬레이션에 의한 검증

- 대상건물은 철골 구조물로서 높이는 184.6m, 총 질량은 50,354ton이다. 대상 건축물이 해안에 위치하고 크기가 유사한 두 구조물이 인접하여 풍하중이 증가할 것으로 예상되었으며 이로부터 발생하는 구조물의 진동을 줄이기 위하여 TMD가 설치되었다. TMD의 고유진동수를 구조물의 고유진동수와 동조를 하게 되면 매우 인접한 두 개의 모드를 만들어내며, 이들 구조물-TMD 시스템은 비고전감쇠를 가지기 때문에 기존 MCK공간에서 모드분리가 불가능하게 된다.



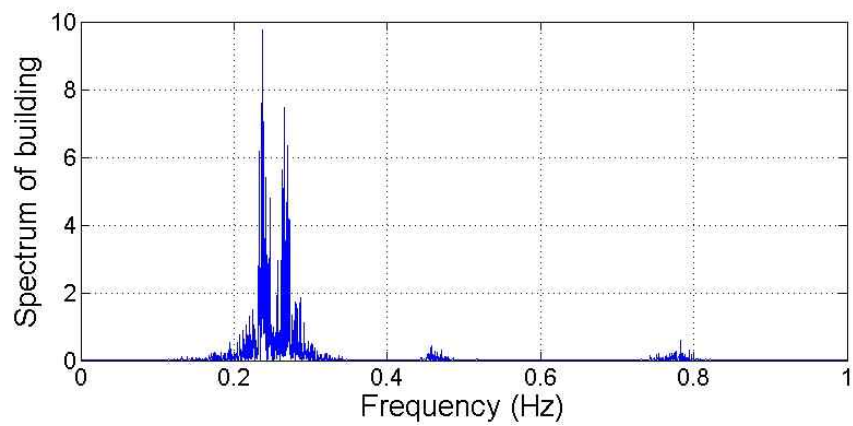
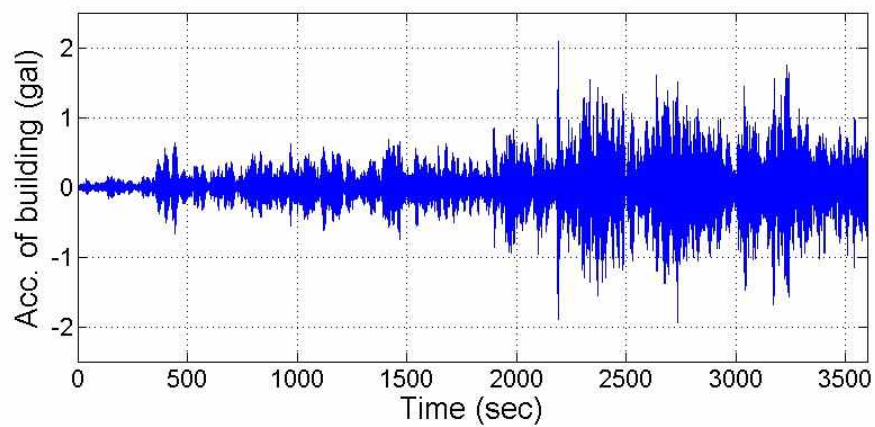
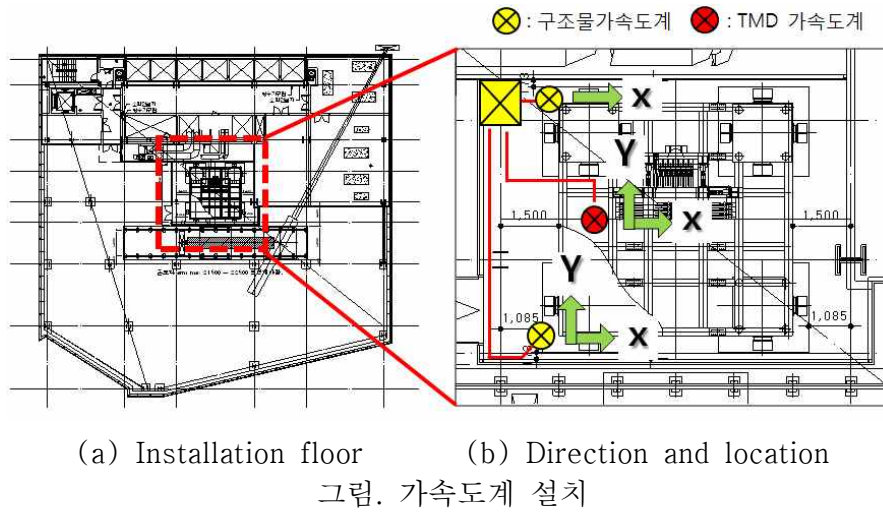
(a) Building

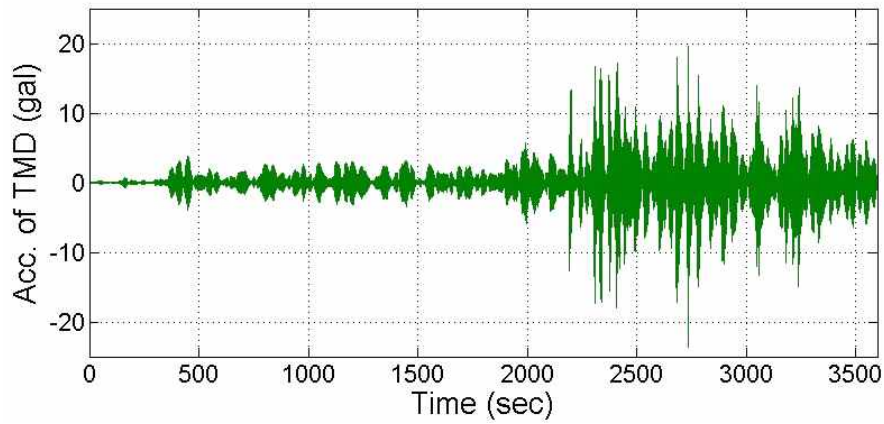


(b) TMD

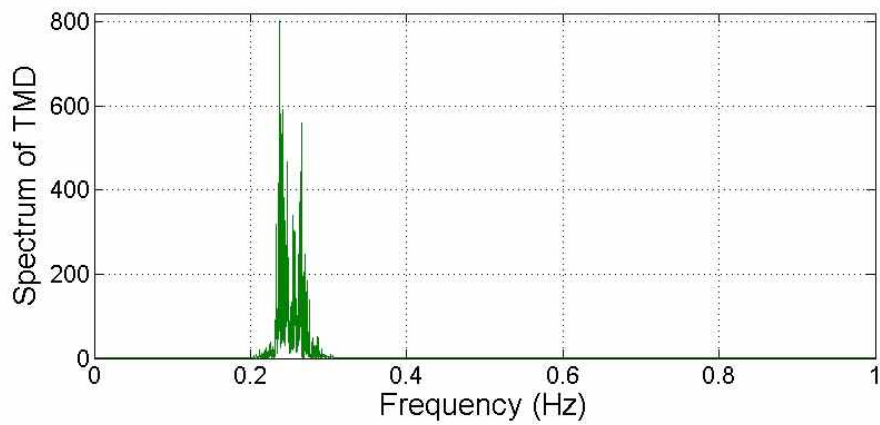
그림. 대상구조물

- 본 연구에서는 두 개의 구조물 중 160톤 질량의 TMD가 설치된 구조물을 대상으로 앞 절에서 제시된 모드분해법을 이용하여 인접한 모드를 분리하고자 한다. 그림 2는 가속도계의 설치위치 및 설치방향을 나타내고 있으며 이중에서 구조물의 Y방향 가속도와 160톤 질량의 TMD의 Y방향 가속도를 이용하여 인접모드를 분해하였다. 대상 구조물의 Y방향 모드질량은 13,452.61 ton, 고유진동수는 0.264 Hz이며 감쇠비는 0.78 %이다. TMD의 크기는 6m x 6m x 4m(H)로 설계 고유진동수 및 요구감쇠비는 각각 0.261Hz, 6.58% 이다. 대상 구조물에는 동적 풍하중에 의하여 발생하는 구조물과 TMD의 응답을 계측하기 위한 모니터링 시스템이 구축되어 있다. 이는 건물의 X, Y-방향 및 Torsion 방향 동적거동, 풍향 및 풍속, TMD 동적거동을 계측하기 위한 것으로 건물 진동 측정용 1방향 가속도계 3개, 풍향풍속계 1개, 그리고 TMD 동적거동 측정용 1방향 가속도계 2개를 포함하고 있다. Y 방향 구조물 및 TMD에 대한 60분 동안의 계측응답이 시간영역과 진동수 영역으로 아래 그림들에 각각 나타나 있다. 그림 3의 건물 가속도를 보면 초기 풍하중이 작다가 점점 커지면서 구조물의 응답도 커지며 최대 2 gal의 값을 가지고 있다. 또 진동수영역에서의 응답을 보면 0.2-0.3Hz 부근의 고유진동수 외에 0.5, 0.8Hz 대역에서 고차모드의 진동수가 나타나고 있다. 0.2-0.3Hz 부근의 고유진동수는 두 개로 나타나고 있는데 이것이 TMD가 구조물의 진동수와 동조되면서 나타나는 현상이다. 그에 비하여 그림 4의 TMD의 응답의 경우 최대 가속도는 25gal으로 구조물의 가속도 최대값의 12배 정도 되며, 주구조물의 1차 모드와 상호작용을 하기 때문에 고차모드의 영향은 거의 나타나고 있지 않다.





(a) Time history



(b) Power spectrum

그림. TMD의 응답

- 앞 절의 대상구조물로부터 계측된 Y방향 구조물, TMD가속도를 이용하여 본 연구에서 제안된 인접모드 시스템의 모드분리기법을 검증하기 수치시뮬레이션이 수행되었다. 계측에 사용된 샘플링 진동수는 100Hz이며 60분간 계측된 것으로 총 데이터의 개수는 60,001으로 진동수 해상도는 1/600 Hz 이다. Y방향 두 개의 가속도를 진동수영역에서 변위, 속도를 구하고 상태변수와 미분상태변수를 구하였다. 제안된 SSMD를 이용하여 구한 진동수 영역에서의 두 개의 모드응답이 아래 그림에 나타나 있다. 상태공간에서 분리된 스펙트럼을 보면 앞 그림들에서와 달리 인접한 각 모드가 잘 분리되어 나타나는 것을 알 수 있다. 이들 통하여 제안된 상태공간 모드분해법에 의하여 비고전 감쇠시스템의 모드 분해가 이루어질수 있음을 알 수 있다.

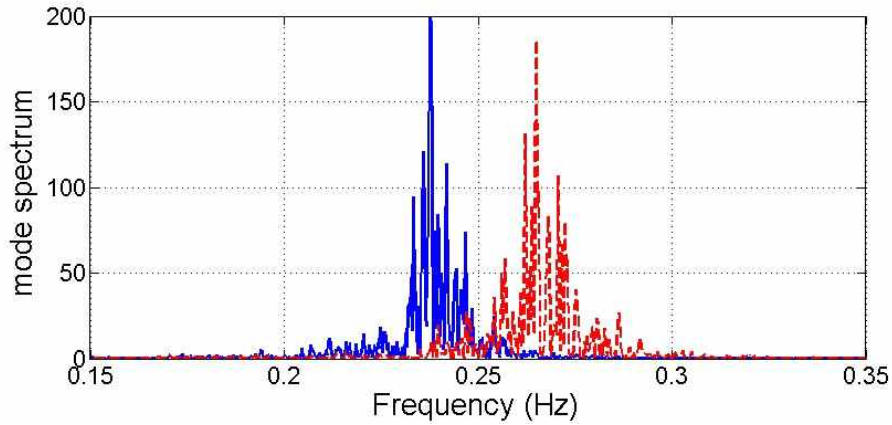


그림. 분리된 모드 스펙트럼

- 본 연구에서는 비고전감쇠 시스템의 내풍성능, 소음진동성능을 평가하기 위한 상태공간에서의 새로운 모달해석법을 제안되었으며, 계측된 응답을 이용하여 인접모드의 모드분리를 위해 제안된 최적화 상태공간 모드분리법의 적용성 및 모드분리가능성을 검토하였다. 적용대상은 역학적으로 상호작용이 매우 강한 것으로 알려진 구조물-TMD 시스템으로 본 연구에서 제안된 모드분리 방법에 의하여 모드분리가 가능함을 알 수 있었다.

- 비고전감쇠시스템의 감쇠비 추정법 개발

- 상태공간 모드분해법에 의하여 모드응답을 추출하면 그 후에는 모드의 고유감쇠비와 진동수를 추정하여야 한다. 본 절에서는 기존 모드특성 추정법보다 더욱 효율적이며, 정확성이 높은 추정기법으로 가질질량가진기(Virtual Dynamic Shaker, VDS)를 개발하였으며 이를 중심으로 연구내용을 전개한다.
- 가상질량 동조기 (Virtual Dynamic Shaker, VDS)
- 감쇠물질로 구성된 구조시스템의 모달특성 (고유진동수, 감쇠비)을 효율적으로 구하는데 사용되는 VDS는 기존의 동조질량감쇠기(TMD : Tuned mass damper)의 특성을 이용한 것이다. 동조질량감쇠기는 주구조물의 고유진동수와 동조시킴으로써 주구조물의 운동에너지가 효율적으로 전달되어 자신의 진동은 커지면서 대상 주구조물의 진동은 저감되는 전통적인 진동제어장치의 일종이다. 동조질량감쇠기의 질량은 보통 주구조물 질량의 1%로 설정하여 주구조물과 동조질량감쇠기의 상호작용에 의하여 진동저감효과를 기대하는 진동제어시스템이다. 동조질량감쇠기의 질량을 점차 작게 하여 주구조물과의 상호작용이 무시할 정도의 수준에 이르게 되면 주구조물의 진동에는 영향을 미치지 않으면서 대상 구조물의 고유진동수 부근에서 동조기 자기 자신의 진동은 매우 커지는 특성이 있다.
- 본 연구에서는 이러한 진동 증폭효과를 가지는 질량동조기의 역학적 특성에 대한 수학적인 모델을 설정하고 수학적 모델을 구성하는 변수에 따른 증폭효과 특성을 분석하였으며 분석결과를 이용하여 계측신호로부터 구조물의 감쇠비를 추정하는 기법을 제안하게 된다. VDS는 주구조물의 계측응답에 대해서 단자유도계 형태의 필터를 적용하는 일종의 모달필터이다. 즉 계측응답을 단자유도 시스템의 입력으로 치환하고 필터를 통과한 응답을 출력으로 정의함으로써 단자유도계를 구성하는 (모달필터를 구성하는) 고유진동수, 감쇠비에 따라 결정되는 응답특성을 분석하여

실제구조물 응답속에 포함되어 있는 모드의 특성을 추정하는 것이다.

- 이러한 모달필터는 기존의 동조질량감쇠기가 주구조물에 설치되어 있는 형태로 형상화할 수 있다. (아래 그림 참조) 아래 그림에서 주구조물은 1개의 자유도를 가지는 것으로 표현했지만 다수의 모드를 포함하는 다 자유도구조물로 확장가능하다. 가상 질량 동조기와 주구조물에 의한 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s + c_t & -c_t \\ -c_t & c_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_s \\ \dot{u}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s + k_t & -k_t \\ -k_t & k_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s \\ u_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

- 여기서 m_s , c_s , k_s 는 각각 구조물의 1차 모드의 질량, 감쇠, 강성, m_t , c_t , k_t 는 각각 VMT의 질량, 감쇠, 강성, u_s 와 u_t 는 각각 구조물과 VMT의 절대변위, f 는 풍하중을 나타낸다.

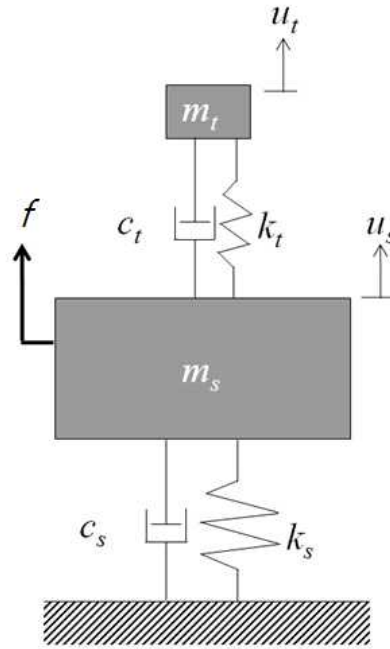


그림. VDS의 개념

- VDS는 실제 구조물에 설치되는 것이 아니고 계측된 응답에 적용하는 모달필터이므로 주구조물에 대한 VDS의 질량이 매우 작아 주구조물에 대한 영향을 무시할 수 있고 그에 따라 상호작용이 없다고 가정한다면, 식(1)은 다음과 같이 매우 단순하게 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_{tr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & 0 \\ 0 & c_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_s \\ \dot{u}_{tr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s \\ u_{tr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ -m_t \ddot{u}_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

- 여기서 새로운 변수 $u_{tr} = u_s - u_t$ 로 주구조물과 VDS의 상대변위를 의미한다. 식 (2)를 보면, 주구조물은 외력 f 에 의해서 진동이 야기되고 VDS의 상대응답은 주구조물의 계측응답에 VDS의 질량을 곱한 관성력으로 영향을 받는 각각 독립적인 시스템으로 거동을 하게 된다. 그 과정에서 VDS의 질량은 상쇄되므로 VDS의 질량은 임의의 값을 가져도 상관없다. 식(2)와 같이 주구조물과 VDS가 독립적으로 거동하기 때문에 주구조물의 응답은 계측된 응답을 곧바로 사용할 수 있으며, 단자유도 VDS의 입력하중으로 다음과 같이 설정된다.

$$m_t \ddot{u}_{tr} + c_t \dot{u}_{tr} + k_t u_{tr} = -m_t \ddot{u}_s \quad (3)$$

- 따라서 주구조물과 VDS의 상대변위는 식(3)에 의하여 곧바로 해석가능하게 되고 VDS의 절대가속도 $\ddot{u}_t$ 는 다음과 같다.

$$\ddot{u}_t = -2\xi_2 w_2 \dot{u}_{tr} - w_2^2 u_{tr} \quad (4)$$

- 여기서, 주구조물 및 VDS 의 감쇠와 강성은 해당하는 감쇠비와 고유진동수를 이용하여 다음과 같이 나타내기로 한다.

$$k_s = w_1^2 m_s \quad c_s = 2\xi_1 w_1 m_s \quad (5a)$$

$$k_t = w_2^2 m_t \quad c_t = 2\xi_2 w_2 m_t \quad (5b)$$

- 여기서 주구조물의 고유진동수와 감쇠비는 추후 추정되어야 할 값이며, VDS의 고유진동수와 감쇠비는 설계자가 임의로 설정할 수 있는 변수 값이다. 주 구조물의 응답은 계측된 값을 곧바로 사용하여 VDS의 응답을 해석적으로 구할 수 있지만, 각 변수 즉 주구조물의 고유진동수와 감쇠비 및 VDS의 고유진동수와 감쇠비가 VDS 응답에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 각 응답에 대한 수학적 전개가 필요하다. 구조물과 VDS의 응답은 식(2-4)의 라플라스 변환을 통하여 다음과 같이 간략히 나타낼 수 있다.

$$u_s(s) = \frac{1}{s^2 + 2\xi_1 w_1 s + w_1^2} \bar{f}(s) \quad (6a)$$

$$u_{tr}(s) = -\frac{1}{s^2 + 2\xi_2 w_2 s + w_2^2} \frac{1}{s^2 + 2\xi_1 w_1 s + w_1^2} \bar{f}(s) \quad (6b)$$

$$\ddot{u}_t(s) = -\frac{2\xi_2 w_2 s + w_2^2}{s^2 + 2\xi_2 w_2 s + w_2^2} \frac{1}{s^2 + 2\xi_1 w_1 s + w_1^2} \bar{f}(s) \quad (6c)$$

- 여기서, s 는 라플라스 변수이며, $\bar{f}(s)$ 주구조물 질량에 정규화된 하중 즉 f/m_s 의 라플라스 변환이다. 라플라스 변수 $s = iw$ 로 치환하고 식 (6b, c)를 이용하여 VDS의 상대변위 분산과 VDS의 절대가속도의 분산을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E[u_{tr}^2] = \int_{-\infty}^{\infty} |H_2(w)|^2 S_{\bar{f}\bar{f}}(w) dw \quad (7a)$$

$$E[\ddot{u}_t^2] = \int_{-\infty}^{\infty} |H_3(w)|^2 S_{\bar{f}\bar{f}}(w) dw \quad (7b)$$

- 여기서 $E[\cdot]$ 는 평균화기호, $H_2(w)$, $H_3(w)$ 는 식 (6b, c)에서 전달함수, $S_{\bar{f}\bar{f}}(w)$ 는 외부 하중의 스펙트럼을 나타낸다. 만약 외부하중 스펙트럼을 백색잡음으로 가정하고 $S_{\bar{f}\bar{f}}(w) = S_o$ 로 치환하면 VDS의 상대변위와 절대가속도의 분산은 다음과 같이 closed-form으로 나타낼 수 있다.

$$E[u_{tr}^2] = \frac{\pi S_o}{2\xi_2 w_2^3} \frac{N_d}{D} \quad (8a)$$

$$E[\ddot{u}_t^2] = \frac{\pi S_o w_1 w_2}{2\xi_1 \xi_2} \frac{N_a}{D} \quad (8b)$$

- 여기서, $D = (w_1^2 - w_2^2)^2 + 4w_1 w_2 [\xi_1 \xi_2 (w_1^2 + w_2^2) + w_1 w_2 (\xi_1^2 + \xi_2^2)]$,

$$N_d = w_1^4 + w_1 w_2^3 (\xi_2 / \xi_1) + 4w_1 w_2 [\xi_1 \xi_2 (w_1^2 + w_2^2) + w_1 w_2 (\xi_1^2 + \xi_2^2)]$$
, $N_a = \xi_1 w_1^3 + \xi_2 w_2^3 + 4[w_1 w_2 (\xi_1^3 w_2 + \xi_2^3 w_1) + \xi_1 \xi_2 (w_1^2 + w_2^2) (\xi_1 w_2 + \xi_2 w_1)] + 16\xi_1^2 \xi_2^2 w_1 w_2 (\xi_1 w_2 + \xi_2 w_1)$
- 앞서 언급하바와 같이 주구조물의 고유진동수와 감쇠비는 미지의 상수이며, VDS의 고유진동수와 감쇠비는 변수이므로 이들 변수를 조정하면서 주구조물의 고유진동수와 감쇠비를 추정하게 된다. 식 (8)을 보면 주구조물의 고유진동수와 VDS의 고유진동수가 일치할 때 VDS의 응답의 최대값이 되는 것을 알 수 있다. 그러므로 주구조물과 VDS의 고유진동수가 같다고 하면 식(8)은 아래 와 같이 더욱 간단히 나타낼 수 있다.

$$E[u_{tr}^2 | w_1 = w_2] = \frac{\pi S_o}{2\xi_2 w_1^3} \frac{1 + \xi_2 / \xi_1 + 4(\xi_1 + \xi_2)^2}{4(\xi_1 + \xi_2)^2} \quad (9a)$$

$$E[\ddot{u}_t^2 | w_1 = w_2] = \frac{\pi S_o w_1}{2\xi_1 \xi_2} \frac{1 + 4(\xi_1^2 + \xi_2^2 + \xi_1 \xi_2) + 16\xi_1^2 \xi_2^2}{4(\xi_1 + \xi_2)} \quad (9b)$$

- 식(9)는 주구조물과 VDS의 고유진동수가 일치할 때 주구조물의 감쇠비와 VDS의 감쇠비의 관계를 나타내는 것이다. 그러므로 VDS의 감쇠비를 임의의 두 값으로 설정하고 각 값에 대한 VDS의 분산의 비율을 구하면 주구조물의 감쇠비를 추정할 수 있다. VDS의 가속도 분산을 이용하여 응답비 R을 나타낸 것이 다음식과 같다.

$$R = \frac{E[\ddot{u}_t^2 | w_1 = w_2, \xi_2 = a]}{E[\ddot{u}_t^2 | w_1 = w_2, \xi_2 = b]} = \frac{b}{a} \frac{1 + 4(\xi_1^2 + a^2 + a\xi_1) + 16a^2 \xi_1^2}{1 + 4(\xi_1^2 + b^2 + b\xi_1) + 16b^2 \xi_1^2} \frac{b + \xi_1}{a + \xi_1} \quad (10)$$

- 임의의 감쇠비를 가지는 VDS의 절대가속도 분산 값 산정이 가능하고 그 비율 R을 알고 있으므로 식 (10)을 이용하여 주구조물 감쇠비에 대한 3차방정식이 유도하고이에 대해 해를 구함으로써 주구조물의 감쇠비 추정이 가능하게 된다.
- 개발된 VDS가 외부하중에 의해 진동이 발생했을 때 진동응답을 이용하여 감쇠비 추정이 가능한지를 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

– 수치해석에 의한 감쇠비 추정검증

- 본 절에서 하중조건에 의하여 발생한 구조물의 계측응답에 대하여 VDS를 적용하였을 때 구조물의 감쇠비를 추정하는 기법에 대해서 다루고, 이들 하중특성이 감쇠비에 미치는 영향을 분석하였다. 인접모드가 섞여있는 응답에 대해 VDS를 적용하면 감쇠비 추정에 오차가 발생할 수 있다. 인접한 모드의 상호간섭에 의하여 VDS의 응답 또한 영향을 받기 때문이다. 이러한 오차를 최소화하기 위하여 계측응답을 기 모드응답으로 사전에 분리해야 한다. 그러므로 여기에서는 VDS에 입력으로 사용되는 응답은 모드분해법에 의해 계측응답으로부터 사전에 모드분해된 모드응답이라고 가정하였으며, 이러한 가정에 따라 수치해석에 의한 검증 또한 1

자유도 구조물을 대상으로 하였다. 또한 구조물의 감쇠비와 달리 구조물의 고유진동수는 상시진동(ambient vibration)을 이용하는 기존 시스템 식별방법에 의하여 매우 정확하게 추정 가능하기 때문에 이미 알고 있다고 가정하였다.

- VDS의 입력으로 사용되는 구조물의 응답은 모드응답이어야 한다. 즉 단자유도 시스템의 응답을 대상으로 한다. 기존의 시스템 식별기술에 의하여 계측된 응답을 모드응답으로 분해하는 것이 충분히 가능하기 때문에 여기에서는 1자유도 구조물에 대한 해석을 수행하고 그 가속도 응답을 이용하여 감쇠비를 추정하여 보았다. 구조물 해석에 사용된 하중은 백색잡음, 충격하중, 정현파 하중이다. 단자유도 구조물의 동적특성, VDS, 하중특성, 해석조건 등이 아래 표에 나타나 있다.
- 단자유도 시스템은 질량을 1로 정규화하였으며, 감쇠비 및 고유진동수는 각각 1.0% 1.0Hz이다. VDS의 고유진동수범위는 0-3Hz 이며, 감쇠비의 범위는 0.5-3%이다. 백색잡음의 크기는 임의지정이며 3Hz이하의 low pass filter를 통과한 것을 사용하였으며, 1 자유도 구조물의 고유진동수 1Hz의 3배까지 고려한 것이다. 백색잡음 외에도 협소대역하중을 고려하였다. 협소대역하중은 아래 표에서와 같이 0.85 Hz, 1 Hz사이의 band pass filter를 백색잡음에 적용하여 구한 것이다.
- 충격하중은 이상화된 Dirac Delta 함수이며 MATLAB에 의한 해석결과를 사용한다. 해석조건 중에서 샘플링 진동수는 100Hz로 하였으며 해석시간은 10분으로 하였다. 다만, 충격하중은 현실적으로 10분 이상 지속하는 것이 어렵기 때문에 응답이 안정화 되는 구간에서 해석시간을 조정하였다. 아래 그림은 해석에 사용된 백색잡음의 스펙트럼을 나타내고 있다. 3Hz 전후로 완만하게 감소하는 것을 알 수 있다.

표. 시스템과 하중의 동적특성

Type	Item	Value	Unit & Remark
1 dof system	Mass	1	normalized
	damping ratio	1	%
	Natural frequency	1	Hz
VDS	Natural frequency	0-3.0	Hz
	Damping ratio	0.5-3.0	%
Load	White noise	low pass filter	f<3 Hz
	Impulse	Dirac delta function	-
Analysis condition	Sampling frequency	100	Hz
	Duration	600	sec

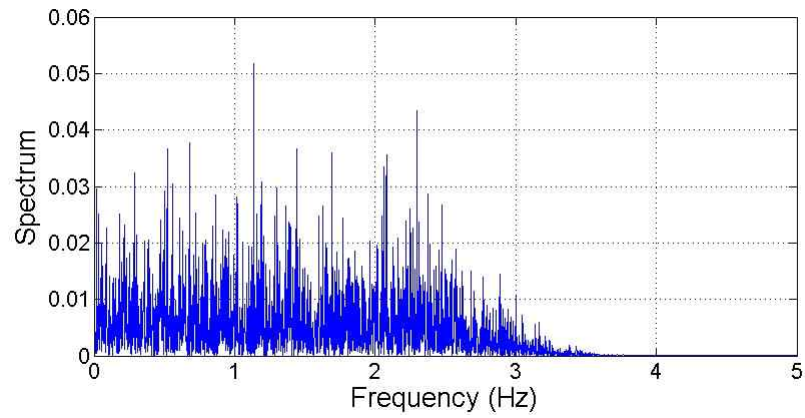
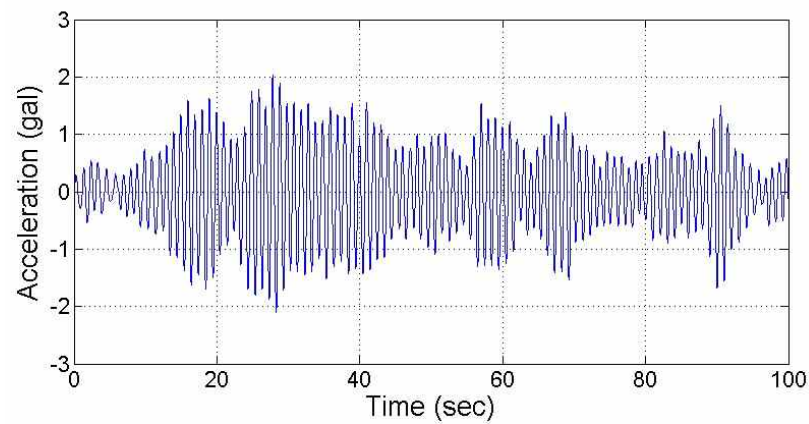
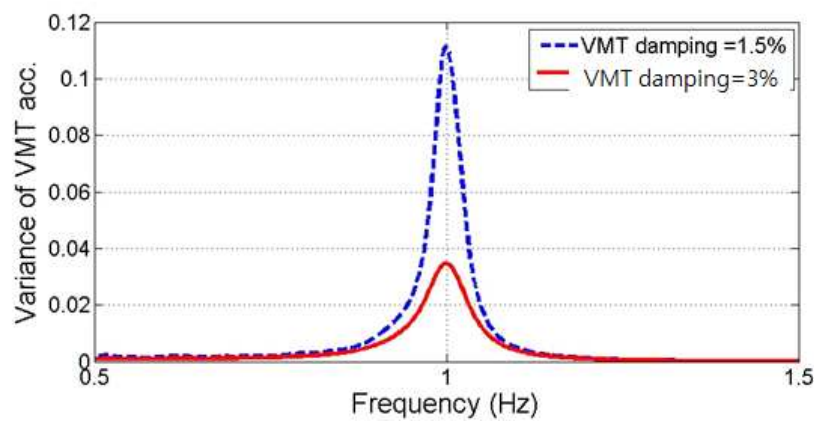


그림. 백색잡음의 파워스펙트럼

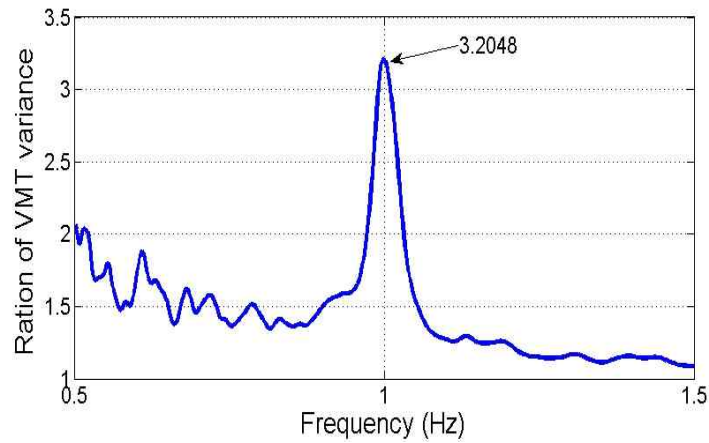
- 다음 그림은 백색잡음을 이용하여 구한 시스템의 가속도, VDS의 감쇠비를 $a=1.5\%$, $b=3\%$ 로 각각 지정했을 때의 VDS 가속도의 분산, 그리고 그 비율을 나타내고 있다.



(a) Acceleration of 1 dof system



(b) Comparison of the VDS variance



(c) Ratio of the VDS variance
그림. 백색잡음에 대한 VDS와 시스템의 응답

- 위 그림(a)의 구조물 가속도를 VDS의 입력으로 사용하고 VDS의 고유진동수를 변화시키면서 구한 분산이 그림(b)이다. 이때 VDS의 감쇠비는 두 개로 고정한 것이다. 그림3(c)는 그 비율을 구한 것으로 시스템의 고유진동수에서 3.2048의 값을 가지며 이를 이용하여 구한 시스템의 감쇠비는 0.97%로 실제 감쇠비 1%와 3%의 오차를 가지는 것을 알 수 있다.
- VDS에서 설정된 감쇠비가 시스템 감쇠비에 미치는 영향을 평가하기 위하여 VDS의 감쇠비 b값은 2%로 고정하고 a값을 0.5%에서 1.9%까지 변화하면서 구한 시스템의 감쇠비가 아래 그림에 나타나 있다.

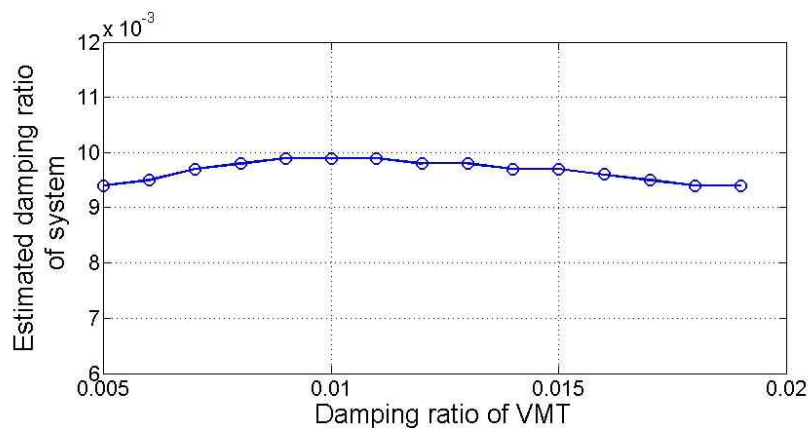
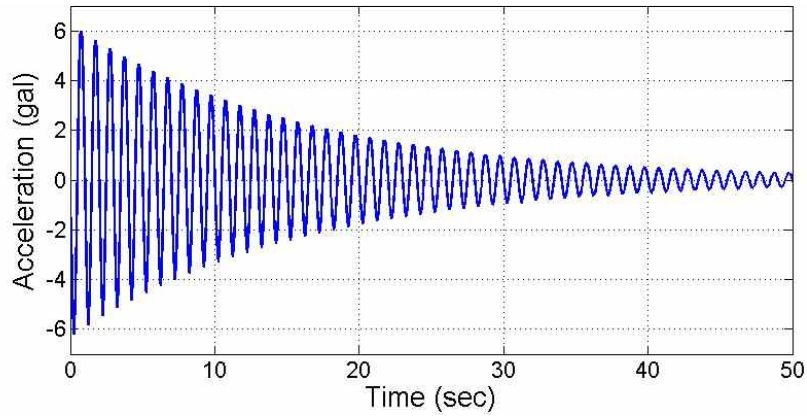
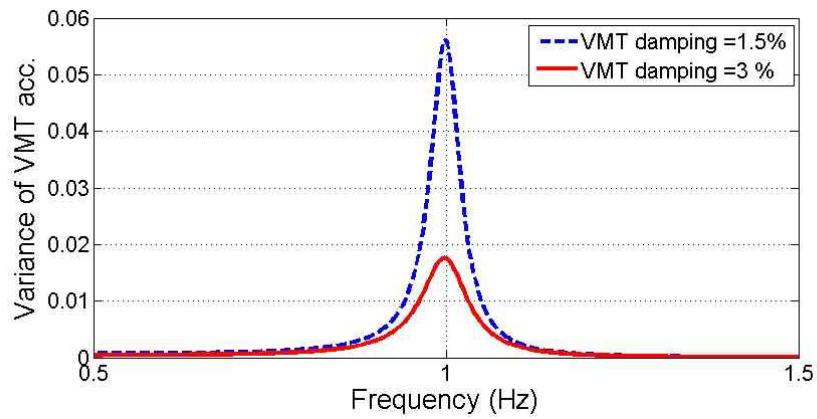


그림. 백색잡음을 받는 시스템의 감쇠비 추정

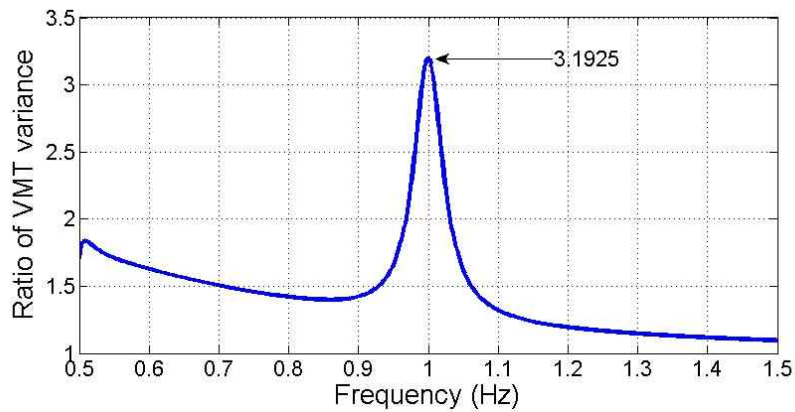
- 위 그림으로부터 VDS의 감쇠비를 너무 작게 가정하지 않으면 시스템의 감쇠비를 신뢰성을 가지고 예측하는 것을 알 수 있다. 그림 5는 충격하중에 대한 해석결과 및 VDS 해석결과를 나타내는 것으로 그림 3과 동일한 프로세서를 통해서 구한 것이다. 충격에 의한 가속도 응답은 50초까지만 확대하여 그린 것이다. 고유진동수에서의 비율은 3.1925로 백색잡음 때와 비교하여 작으며 이를 이용하여 구한 구조물 감쇠비는 0.99%로 더 정확한 것을 알 수 있다.



(a) Acceleration of 1 dof system



(b) Comparison of the VDS variance



(c) Ratio of the VDS variance

그림. 충격하중에 대한 VDS와 시스템의 응답

- 백색잡음과 마찬가지로 VDS의 지정 감쇠비에 따른 시스템의 감쇠비 추정결과가 아래 그림에 나타나 있다. 위 그림과 비교하면 충격하중에 의한 감쇠비 추정이 더 정밀한 것을 알 수 있다. 이것은 충격하중에 의한 구조물 응답 형상이 명확하게 구조물의 감쇠비를 대표하고 있는 것에 기인한다고 볼 수 있다. 즉 기존의 대수로 그 감소법에 의하여 감쇠비를 구하는 방법과 같이 응답형상 자체가 이미 명료하게 감쇠비를 내포하고 있기 때문이며, 또 충격하중 자체가 이상화되어 완벽한 백색잡음으로 볼 수 있기 때문인 것으로 사료된다.

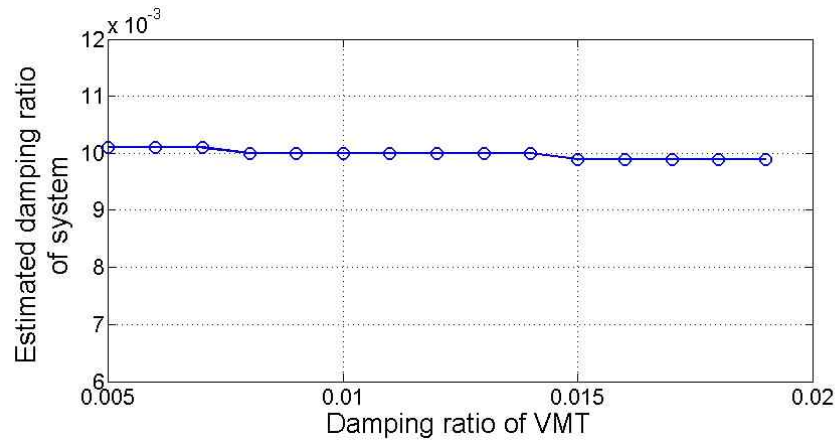


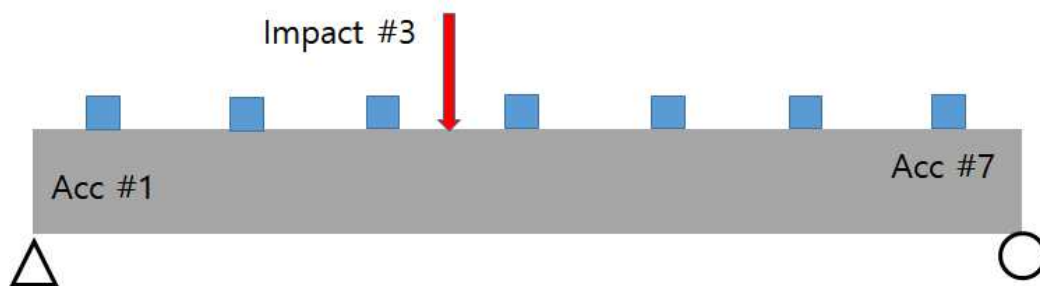
그림. 충격하중에 대한 시스템의 감쇠비 추정

- 본 연구에서는 가상 질량 가진기 이용하여 구조물의 응답만으로부터 감쇠비를 보다 정밀하게 추정하는 방법에 대하여 다루었다. 또한 구조물의 응답이 각기 다른 하중에 의하여 야기되었을 때, 이들 하중 특성이 구조물 감쇠비 추정에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 분석, 검증하였다. 수치해석결과에 의하면, VDS에 의하여 구조물 감쇠비 추정이 충분한 신뢰성을 가지로 예측되는 것을 확인 할 수 있었다.
- 충격하중을 받는 응답을 이용하는 경우 VDS에 의하여 가장 안정적으로 구조물 감쇠비 추정이 가능한 것을 알 수 있었으며, 백색잡음하중에 대해서도 VDS의 지정 감쇠비를 너무 작게 산정하지 않으면 감쇠비 추정이 가능한 것으로 나타났다. 본 연구에서 검토된 VDS 이용 감쇠비 추정기법은 다양한 하중조건에서도 구조물 고유의 감쇠비 추정이 가능할 것으로 나타났으며 향후 고감쇠물질로 구성된 구조시스템이나 바닥판의 감쇠비를 구하고 이를 통하여 진동저감성능과 소음저감성능을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.
- 고감쇠 복합 신소재를 활용한 진동·소음성능 개선을 위한 구조부재·보강재 및 바닥판 개발
 - － 골재 표면 폴리우레탄 코팅 고감쇠 보의 모드특성
 - 본 연구에서는 콘크리트의 고감쇠 구현을 위해 개발된 폴리우레탄 코팅 재료의 감쇠성능을 평가하기 위한 자유진동 실험과 이에 대한 모달분석이 수행되었다. 모달 분석에 사용된 시험체는 단순 보로 이에 대한 자유진동실험을 통해 모달특성을 파악하였으며 특히 보유 감쇠비를 분석하여 폴리우레탄 코팅재료의 고감쇠 재료로서의 특성을 비교 검토하였다.
 - 폴리우레탄 코팅 재료에 의한 고 감쇠 발현 가능성을 평가하기 위하여 보를 제조하고 이에 대한 자유진동 실험을 수행하였다. 자유진동실험에 사용된 보는 폴리우레탄 코팅에 의한 고 감쇠보(PG-P)와 비교를 위한 일반보(G-P)를 제작하였다. PG-P의 크기는 폭 0.2 m 높이 0.1 m 길이 1.8m이며 비교대상으로 크기가 동일한 G-P를 제작하였다. 양단은 힌지이며 그 크기 및 제조법이 아래 표에 나타나 있다.

표 1. 보 성상

Mixture	Width (m)	Height (m)	Span (m)	Manufacturing method
G-P	0.2	0.1	1.8	Preplaced aggregate and cement paste injection
PG-P	0.2	0.1	1.8	Preplaced aggregate coated with polyurethane and cement paste injection

- 폴리우레탄으로 골재를 코팅한 보(PG-P)의 감쇠효과를 평가하기 위하여 자유진동실험을 수행하였다. 제작된 콘크리트 일반 보(G-P)와 폴리우레탄 코팅 보 두 개의 시편에 대한 진동실험과 거동분석을 위하여 보 시편 상부에 가속도계 7개를 설치하였다. 아래 그림(a)는 시편 보 상부에 설치된 가속도 번호와 충격하중 가진 번호를 나타내고 있는 것으로 왼편에서부터 가속도의 위치번호를 시작하고 충격하중 가진 번호는 가속도 사이 6개 지점으로 선정하였다. 그림(b)는 시편 보 상부에 가속도계가 설치된 형상을 나타내고 있다.



(a) Location of Acc. sensor and impact



(b) Installation of sensor



(c) Excitation



(d) Measurement system

그림. 자유진동 실험

- 임팩트 햄머를 이용하여 가속도계 사이 6 지점에 충격하중을 반복 가진 하였으며 (아래 그림(c)), 가속도 응답은 계측시스템에 저장되고 향후 분석된다. (위 그림 (d)) 가속도 응답계측을 위한 샘플링 진동수 1000Hz로 설정하였다.
- PG-P의 가속도계 3, 4사이에 충격하중(impact #3)을 가하였을 때 보의 단부 지점에서 계측된 가속도(Acc #1) 시간이력이 아래 그림에 나타나 있다. 가진 후 초기에는 많은 모드들이 기여하고 있지만 시간이 지나면서 10Hz 대역의 고유진동수를 가지는 모드만이 나타나고 있다. 응답에 기여하는 각 모드의 영향을 고찰하기 위하여 가속도계 1, 2 지점에서의 가속도 스펙트럼을 아래 그림에 나타내었다. 그림으로부터 10, 50, 100, 200, 250, 330 Hz 대역의 6개 모드가 영향을 미치고 있을 알 수 있다. 10 Hz 대역의 1차 모드가 독립적으로 분리되어 있으나 고차의 모드는 인접 모드와 중첩되어 나타나며, 계측지점에 따라 모드의 기여도가 각기 다른 것을 알 수 있다.

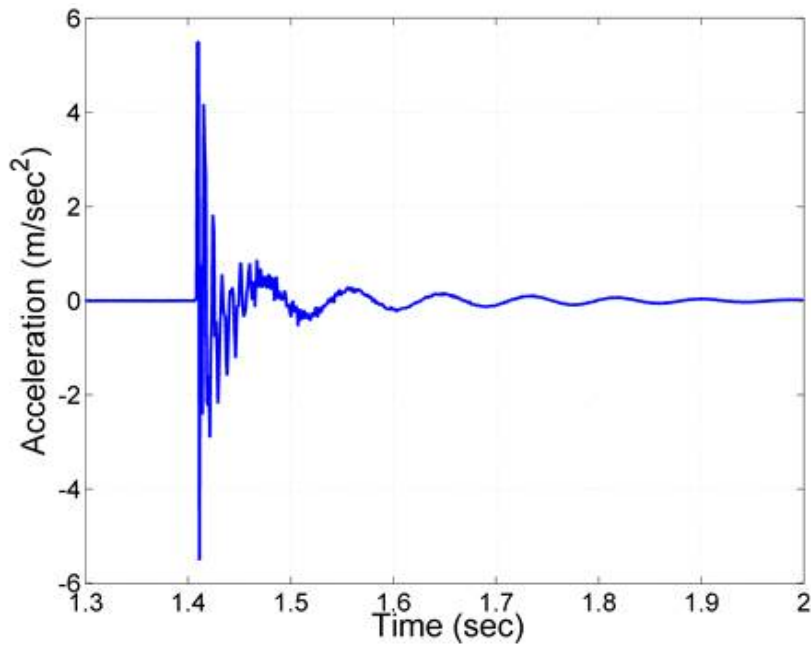


그림. 가속도계#1의 시간이력

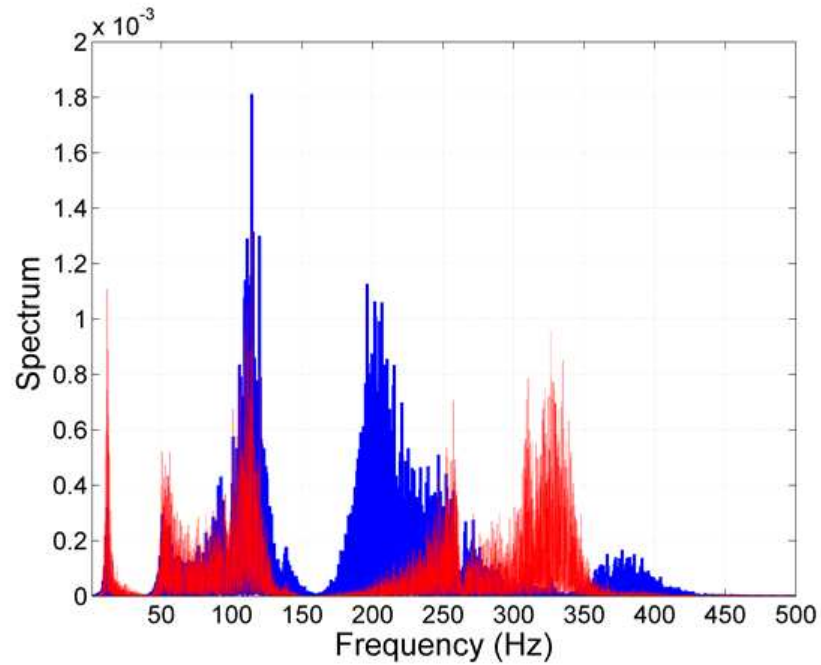
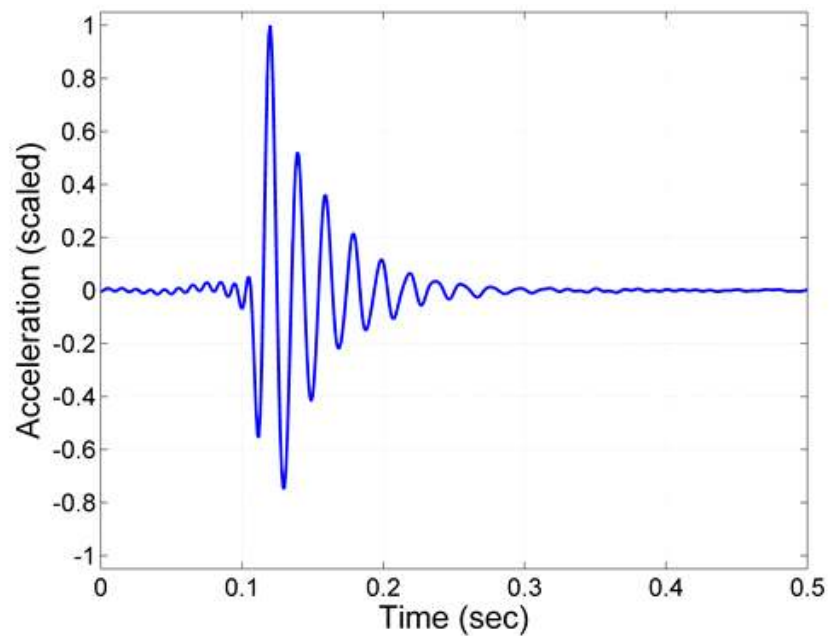


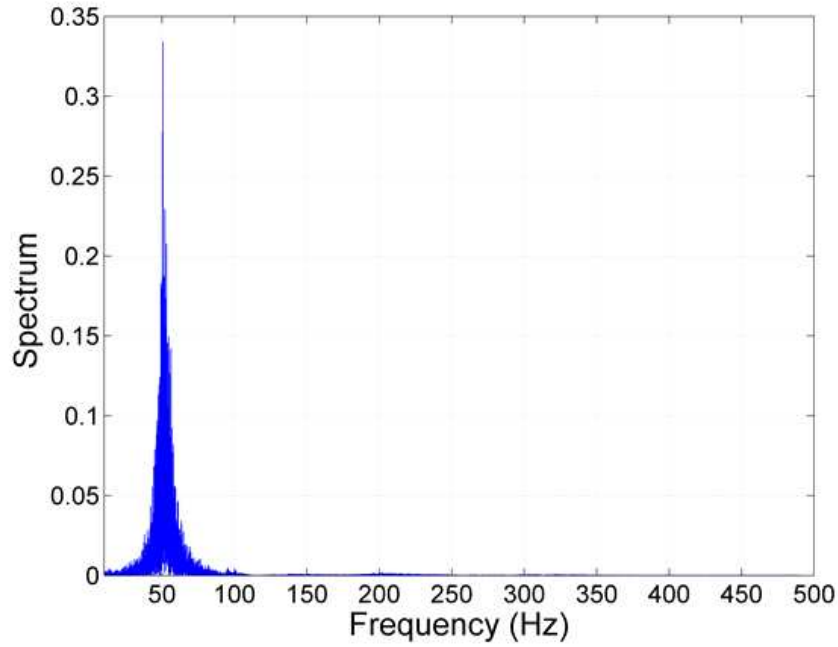
그림. 가속도 스펙트럼

(dotted line (red) : Acc #2, solid line (blue) : Acc #1)

- 각 모드의 동적특성과 기여도를 보다 정밀하게 분석하기 위하여 동일 충격지점 (impact #3)에 대한 7개 가속도응답에 SSBMD(State space based mode decomposition) 기법을 적용하여 모드를 분리하였다. 아래 그림은 SSBMD기법에 의하여 분리된 모드 중에서 2차 모드(고유진동수 50Hz 대역)의 시간이력과 스펙트럼을 나타내고 있다. 2차 모드의 스펙트럼은 모든 모드가 기여하고 있는 위 그림의 스펙트럼에 비하여 모드가 명확하게 분리되는 것을 알 수 있다.



(a) Time history



(b) Spectrum

그림. 2차 모드 응답의 분리

- 모달특성 추정으로 각 모드의 고유진동수는 SSBMD법에 의하여 모드를 분리하는 과정에서 얻어진 modal indicator function (MIF)의 peak로부터 구하였다. 각 모드의 감쇠비는 자유진동 응답을 대상으로 하는 것임을 감안하여 SSBMD로 분리된 모드응답에 Hilbert 변환을 적용하여 자유진동 포락선을 구하고 이론적인 포락선과 비교하여 그 차이를 최소화하는 감쇠비를 구하였다. 힐버트 변환에 의한 포락선과 이론적 포락선의 차이를 나타내는 목적함수는 다음과 같다.

$$J = \int_{t_1}^{t_2} [\text{hilbert}(\eta(t)) - A e^{-\xi \omega t}]^2 dt \quad (1)$$

- 목적함수를 자유진동에 대한 이론적 포락선의 초기값 A, 감쇠비 (ξ)에 대해 미분을 수행하여 최적의 감쇠비를 구할 수 있다. 이러한 과정을 도식화한 것이 아래 그림에 나타나 있다. 그림에서 힐버트변환에 의한 포락선은 부분적으로 변동성을 가지며 이 변동성과 이론적 포락선과의 차이를 최소화함으로써 감쇠비를 추정하게 된다.
- 이상에서 기술된 기법을 통하여 각 모드의 고유진동수와 감쇠비를 구하였으며 그 결과를 표2에 나타내었다. 200Hz 이하 대역에서의 모드 감쇠비는 약 10%정도로 폴리우레탄에 의하여 감쇠비 증가가 이루어 졌음을 알 수 있다. 다만, 표에서 5차 6차 모드의 경우 계측의 해상도가 작아 감쇠비 추정의 신뢰성이 떨어져 여기에는 나타내지 않았음을 밝힌다.

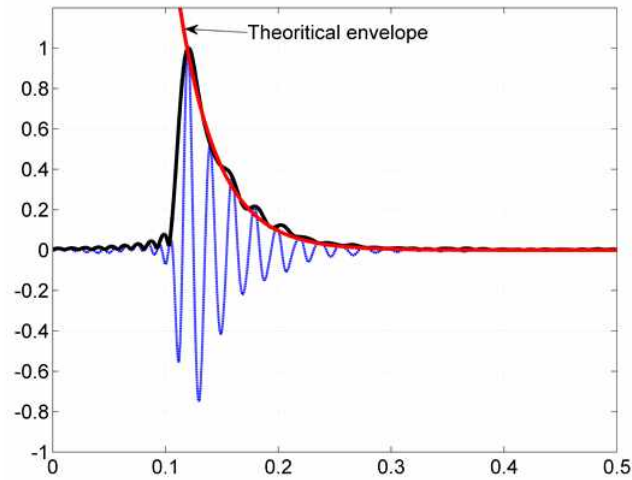


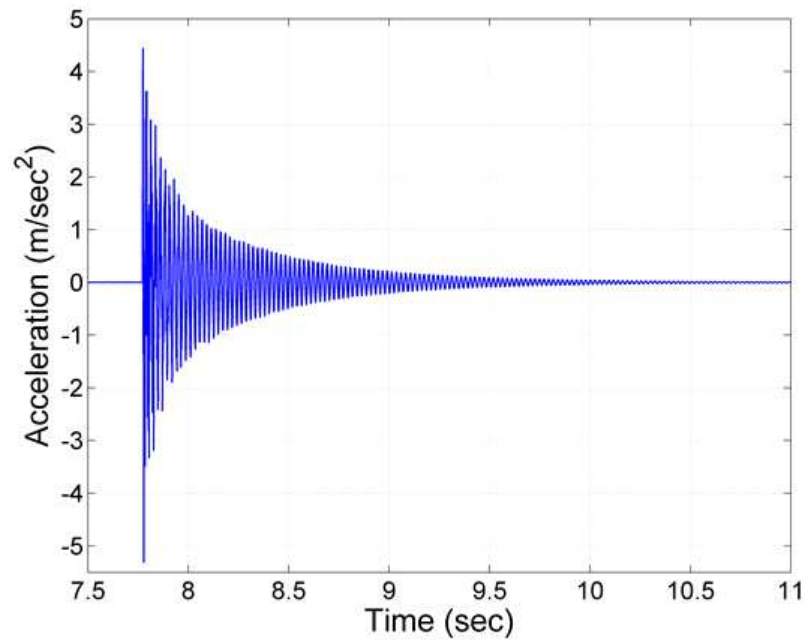
그림. Damping estimation with Hilbert transform

표. Modal properties of PG-P beam

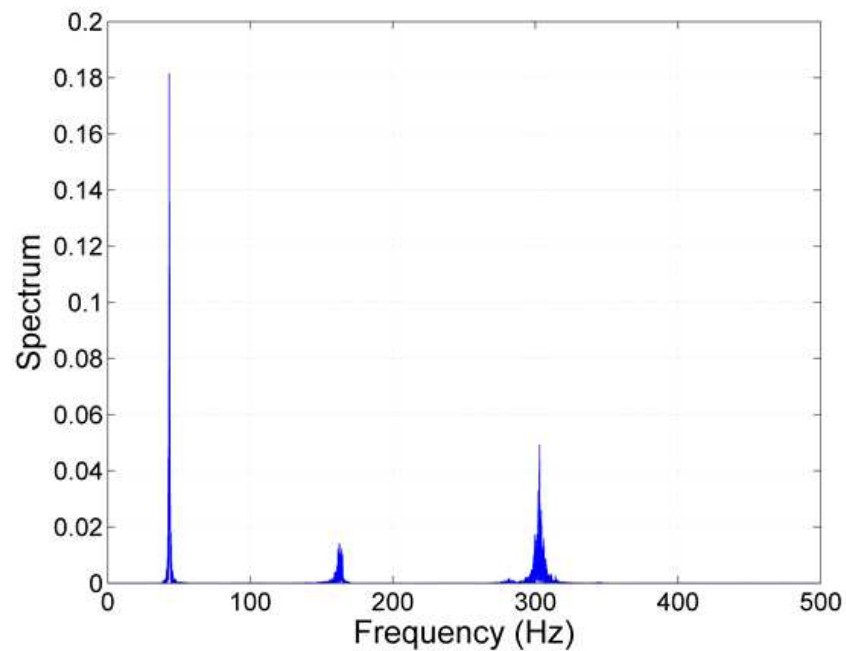
Mode No.	Natural frequency (Hz)	Damping ratio (%)
1	11.63	9.8
2	50.65	9.5
3	114.2	11.2
4	198	10.2
5	252	-
6	333	-

- PG-P의 감쇠비 증가량이 가지는 특성을 비교 고찰하기 위하여 G-P에 대한 자유 진동실험을 수행하고 계측응답을 이용하여 모드분석이 이루어졌다.
- 가속도계의 수, 임팩트 지점 및 계측조건은 앞서 수행한 PG-P 진동실험과 동일하다. 아래 그림은 PG-P와 같이 impact #3 가진 시 Acc #1 지점에서의 가속도 시간이력과 스펙트럼을 나타내는 것으로 진동이 상대적으로 긴 시간동안 지속되는 것을 볼 수 있으며 50, 160, 300 Hz 대역의 3개 모드가 상호 독립적으로 분리되어 나타나는 것을 알 수 있다.
- Impact #3에 가진하여 계측된 7지점의 가속도에 대하여 SSBMD를 적용하여 일반 보에 대한 각 모드의 동적특성을 구하고 그 결과를 표3에 나타내었다. 고유진동수는 MIF를 이용하여 구하였으며, 감쇠비는 PG-P와 마찬가지로 분리된 각 모드응답에 힐버트 변환을 수행하고 식 1과 같은 목적함수를 최소화하여 구하였다. 3차 모드의 감쇠비 또한 진동 분해능이 작아 신뢰성이 작다고 판단하여 여기에는 나타내지 않았다.
- 아래 표에서 보는 바와 같이 감쇠비는 1% 대역으로 PG-P에 비하여 매우 작은 것을 볼 수 있다. 감쇠물질의 특성상 감쇠비는 진동수영역에 따라 달라지는 경향이 있다. 이러한 점을 고려하여 진동수 50Hz 대역에 있는 PG-P와 G-P를의 감쇠비를 비교하면 PG-P의 경우 9.5% G-P의 경우 0.8%로 약 12배의 감쇠비 증가가 이루어지는 것을 알 수 있다. 100 Hz 대역의 고유진동수에 대해서도 PG-P의

경우 10%를 상회하는 감쇠비를 가지며 이는 G-P의 감쇠비 1% 대역 보다 10여 배 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이로부터 폴리우레탄 코팅재료를 구조물의 감쇠비를 증가를 위해 사용할 경우 큰 감쇠증가 효과를 기대할 수 있으며, 그에 따라 구조물의 성능을 개선할 수 있음을 알 수 있다.



(a) Time history



(b) Spectrum

그림. 기존 보의 응답

표. Modal properties of G-P beam

Mode No.	Natural frequency (Hz)	Damping ratio (%)
1	43.3	0.8
2	163.2	1.2
3	302.5	-

- 아래 그림은 고유 진동수에 대한 각 빔의 감쇠 비율을 보여준다. 실험 결과 PC-P 혼합 빔과 PC 혼합 빔의 감쇠비는 모두 주파수가 증가함에 따라 약간 증가 함을 보였다. 이 연구에서 측정 된 데이터를 이용한 선형 회귀 분석 결과, PC-P 혼합 빔의 기울기가 PC 혼합 빔의 기울기보다 다소 높았다. 그러나 그 차이는 크지 않았다.

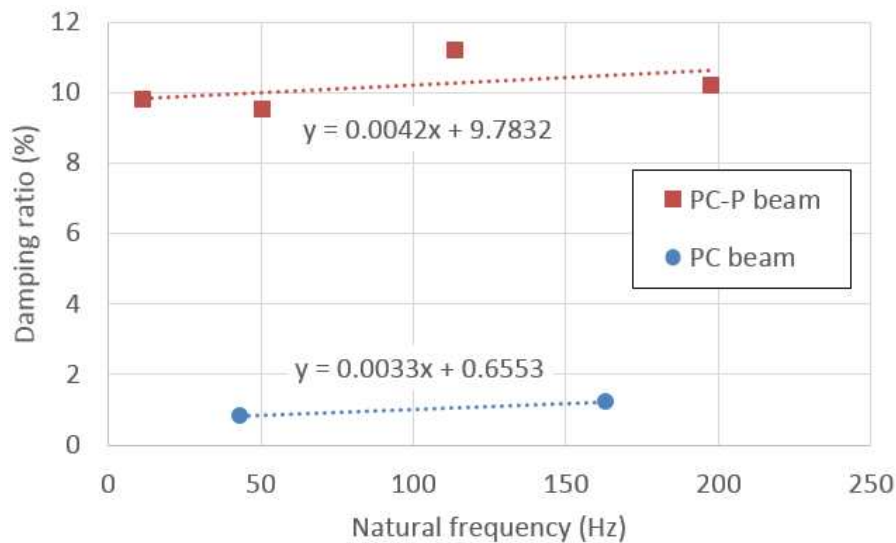
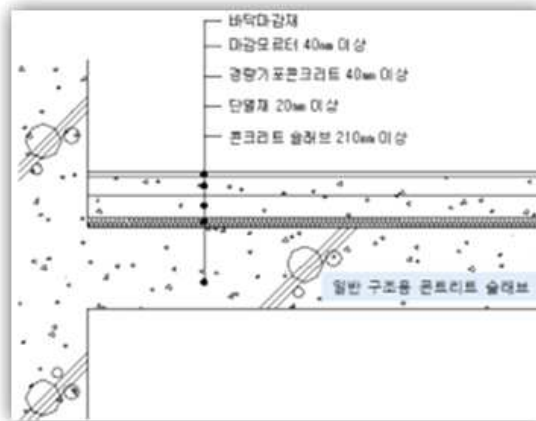


그림. 자연주파수에 따른 각 보의 감쇠비

- 본 연구에서는 폴리우레탄으로 골재를 코팅하여 개발된 고감쇠 콘크리트 재료의 감쇠성능을 평가하기 위한 실험과 모드 분석이 이루어졌다. 감쇠성능 평가를 위하여 폴리우레탄 고 감쇠보와 일반 콘크리트 보를 제작하여 이에 대한 자유진동실험을 수행하였으며, 진동실험으로부터 얻어진 데이터에 대한 모달 분석을 통하여 각 보의 모달 특성을 분석하였다.
- 고감쇠보의 경우 그 특성상 비교전 감쇠특성을 가지며 고감쇠에 의해 응답스펙트럼이 모드 상호간 인접되어 나타난다. 이러한 점을 고려하여 상태공간 모드분해법을 사용하여 각각의 모드를 분리하고, 힐버트 변환에 의한 포락선을 이용하여 감쇠비를 추정하였다.
- 감쇠비 추정결과 폴리우레탄 보의 경우 각 모드의 감쇠비가 약 10%의 값을 가지는 것으로 나타났으며 이것은 일반보의 감쇠비 1%에 비해 매우 크게 감쇠가 증가한 것이다. 이로부터 폴리우레탄 코팅 고감쇠 콘크리트의 감쇠 성능을 평가 할 수 있었으며 이 결과를 바탕으로 고감쇠물질에 의한 내풍성능개선 가능성이 클 것으로 판단된다.

－ 고감쇠 물질 설치 바닥판의 소음 해석

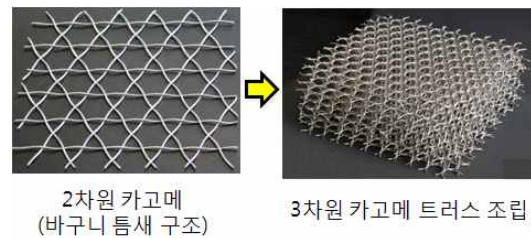
- 공동주택 바닥에 가해지는 동적하중에 의해 슬래브의 진동이 발생한다. 이러한 진동은 다시 슬래브하부 바닥면과 인접하는 공기의 압력변화를 유발하고, 매질 내 전파되면서 하부공간의 음환경과 결합하여 고유의 음장이 형성된다. 중량충격음은 단발성의 충격하중에 의하여 발생하며, 경량충격음에 비해 상대적으로 저주파 영역의 슬래브의 휨 진동모드에 의해 유발되는 것으로 알려져 있다. 슬래브의 진동모드는 재료특성, 형상, 지지 조건과 같은 역학적 특성에 따라 주파수 대역에 넓게 분포하는 고유진동수를 가지고 있으며, 각 고유진동수를 중심으로 집중되어 있는 진동이 슬래브의 진동모드 형상에 따라 소음의 형태로 배출되는 특징이 있다.
- 충격하중에 의해 슬래브 하부공간에 형성되는 음장은 구조체의 진동모드와 하부공간의 음환경에 의해 만들어진 음향모드가 합성된 형태로 나타난다. 충격하중에 대한 슬래브의 진동은 대상 구조체의 구조모델에 대한 동적해석에 의하여 어느 정도 예측이 가능하지만 음향모드에 의한 신호는 음환경에 따라 많은 불확실성이 존재하기도 한다.
- 본 연구에서는 새롭게 개발된 고감쇠 물질을 슬래브에 적용하여 슬래브의 감쇠를 증가시키고 슬래브 감쇠비에 의하여 슬래브의 진동과 소음이 어떠한 영향을 받는 지 해석을 수행하였다. 현재 사용되고 있는 바닥구조시스템은 아래 그림(a)와 같이 표준바닥구조시스템이다. 고감쇠 물질을 슬래브에 적용하는 방안은 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 슬래브와 고감쇠 물질의 연결재로써 카고메 트러스 구조를 사용한다. (그림(b),(c)) 이는 폴리우레탄과 같은 고감쇠물질을 기존 경량기포 시공부분에 충전하고 하부 슬래브와 전단연결재(카고메 트러스 연결재)를 이용하여 바닥슬래브의 감쇠를 증진시키는 시스템이다.



(a)표준바닥구조



(b)고감쇠 바닥구조 시스템



(c) 카고메 트러스 전달 연결재

그림. 고감쇠 바닥구조 시스템

- 수치해석에 사용된 구조물은 부엌과 이어지는 거실, 방이 3개인 30평대 규모의 공동주택 1세대로서 슬래브는 두께 210mm이다. (아래 그림) 재료특성을 고려한 FEM 해석모델에 대해 모드해석을 수행하여 고유진동수와 고유모드형상을 추정하였으며, 이를 진동해석과 소음해석에 사용하였다. 아래 표는 수치해석에 사용된 슬래브의 크기, 지지조건 및 해석조건을 나타낸다.

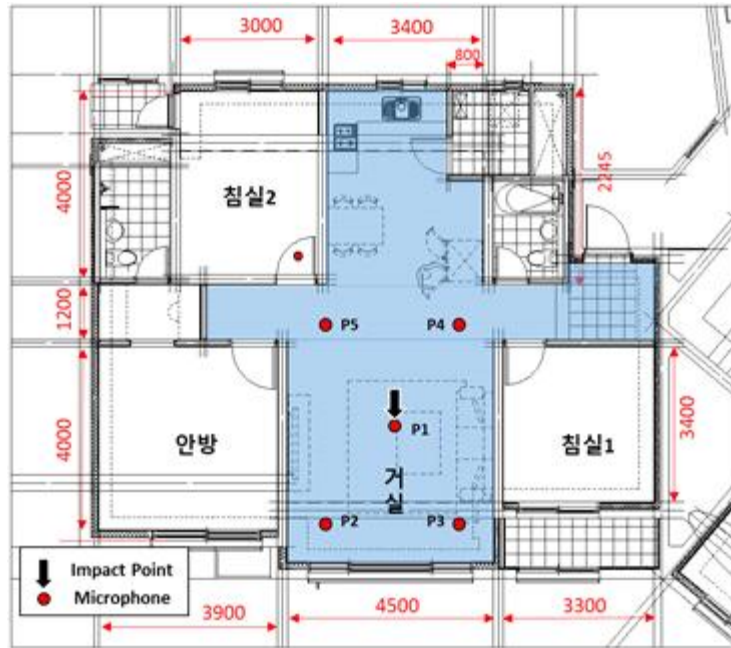
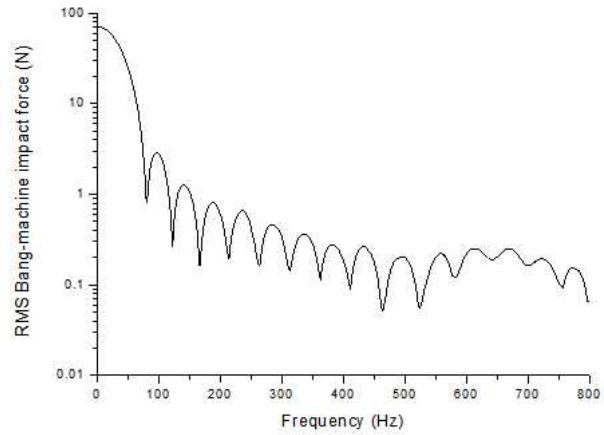


그림. 공동주택 해석 평면
(가진 위치 5곳 하부 같은 위치 5곳에서 음압계측)

표. 해석 조건등

Item	Value	Remark
Slab size	공동주택 1세대	
Density of slab	2,400	kg/m^3
Density of air	1.225	kg/m^3
Sound speed	340	m/sec
Young's modulus	21.152	GPa
Poison ratio	0.167	
Element size	$0.3 \times 0.3 \times 0.18(\text{m})$	Shell element
Analysis method	FEM	Frequency domain

- 해석대상에 대한 모델링 후 뱅머신 표준하중을 이용 거실 부분 가진하여 하부세대 소음해석을 수행하였으며, 고감쇠 물질에 의한 슬래브의 감쇠비를 3, 6, 9, 12, %로 증가시키면서 바닥충격음(중량충격음)을 해석 하여 단일평가지수 산정하였다. 표준 하중의 재하는 뱅머신으로 하였으며 KS 기준에서 제공하는 하중 시간이력을 사용하였다.(아래 그림)가진점은 위 그림과 같으며, 수음점 또한 같은위치로 하부 세대에 5개의 마이크로 폰을 설치한다고 가정하는등 가진 및 수음 설치조건은 KS 기준을 따랐다.



(a) 뱅머신

(b) 뱅머신 충격력 스펙트럼

그림 3. 뱅머신 표준 하중

- 해석은 FEM 모드 및 진동해석을 수행하고 이어 바닥판의 속도장을 이용하여 음향해석을 수행하게 된다. 공동주택의 구조진동 운동방정식을 이용하여 슬래브 표면의 속장장을 구하고 이를 파동방정식과 연동하여 하부세대의 음환경을 고려하여 해석을 수행하게 된다. (아래 그림)

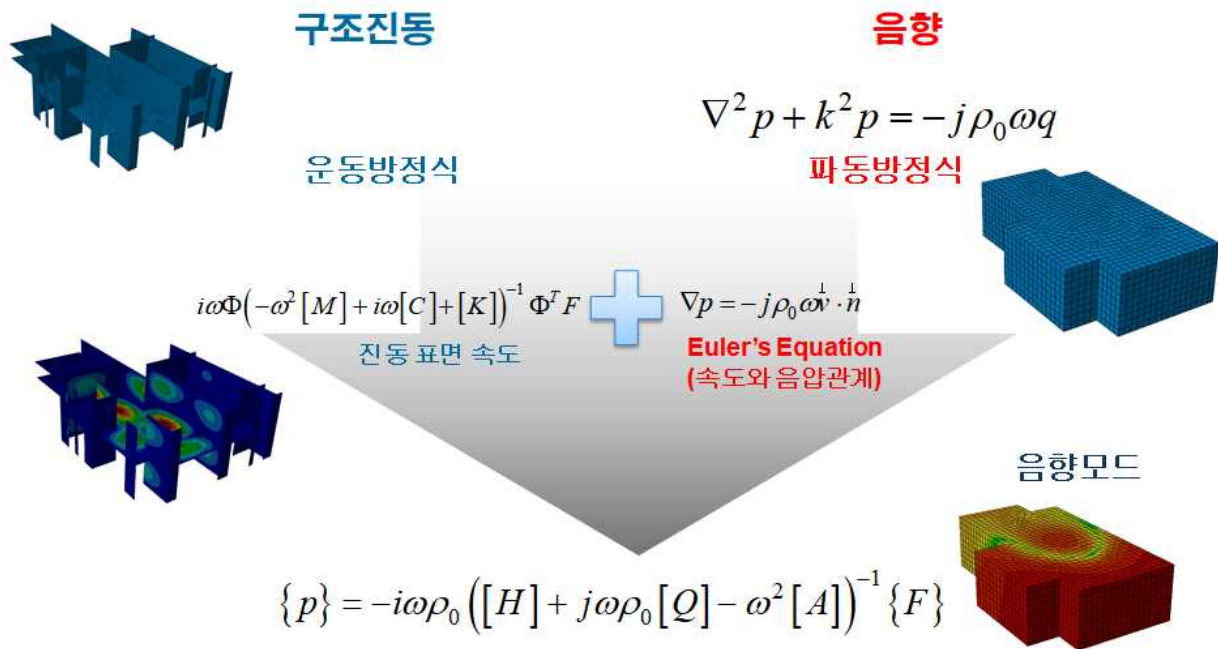
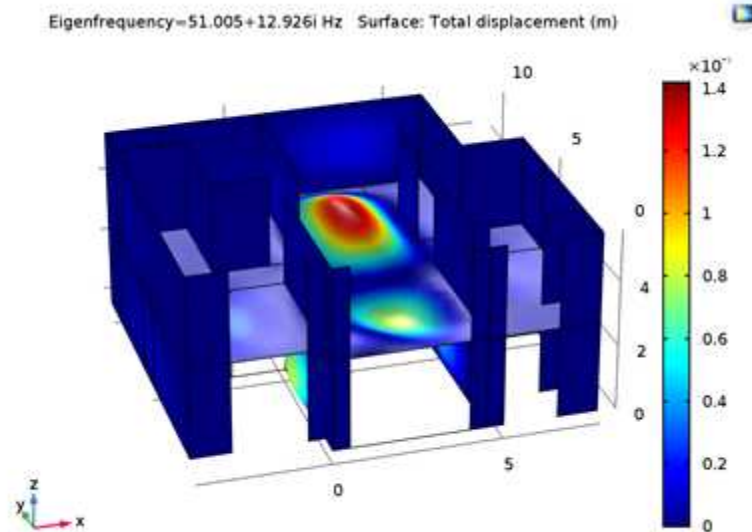
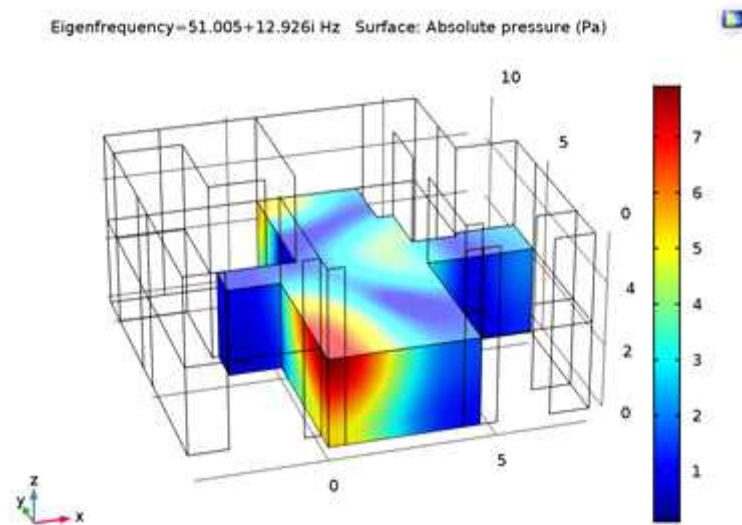


그림. 소음진동 해석 과정 (예시)

- 이러한 소음해석과정으로부터 대상구조물의 구조진동 해석결과와 하부세대의 음압 해석결과가 아래 그림에 나타나 있다. 슬래브의 진동을 주로 거실에서 크게 나타나며, 음압의 경우에는 거실 모서리 부분에서 크게 나타나는 것을 알 수 있다 (아래 그림)



(a) 구조체 진동해석 결과



(b) 하부세대 음압해석결과
그림. 소음진동해석 결과

- 하부세대의 음압분포를 이용하여 마이크론의 설치위치에서의 음압을 산정한후 KS기준에서 제공하는 역A 곡선 평가법에 의하여 단일 평가 지수로 소음해석결과를 나타내었다. 감쇠비값에 따라 1/1 옥타브 밴드의 값이 아래 그림에 나타나 있으며, 감쇠비가 증가할수록 음압 이 감소하는 경향을 나타내고 있다.
- 고감쇠 물질이 없는 슬래브의 감쇠비를 3%로 가정한다면, 고감쇠 물질이 설치되었을때의 감쇠비는 2, 3, 4 배증가하는 것으로 감쇠비 배율 증가에 따른 소음 저감효과를 평가할수 있다. 이를 위하여 단일 수치로 나타낸 결과가 표 2에 나타나 있다. 결과를 보면 단일 평가 지수값이 감쇠비가 증가하면서 감소하는 경향을 나타내고 있으며 감쇠비가 2개증가하면 단위수치 는 2-3 dB 감소하는 것으로 나타난다. 감쇠비가 10% 이상인 경우에는 6dB의 저감효과가 있는 것을 보이며 이것은 현재 법규상 바닥판 성능기준으로 볼 때 2등급의 개선효과가 있는 것을 알 수

있다.

- 본 연구에서는 감쇠물질이 첨가된 슬래브의 진동이 소음에 미치는 영향을 평가하기 위하여 공동주택에 대한 소음해석을 수행하였으며 그결과 감쇠물질에 의한 감쇠비 증가가 중량충격음 저감에 효과를 가질수 있는 가능성을 보임을 알 수 있었다.

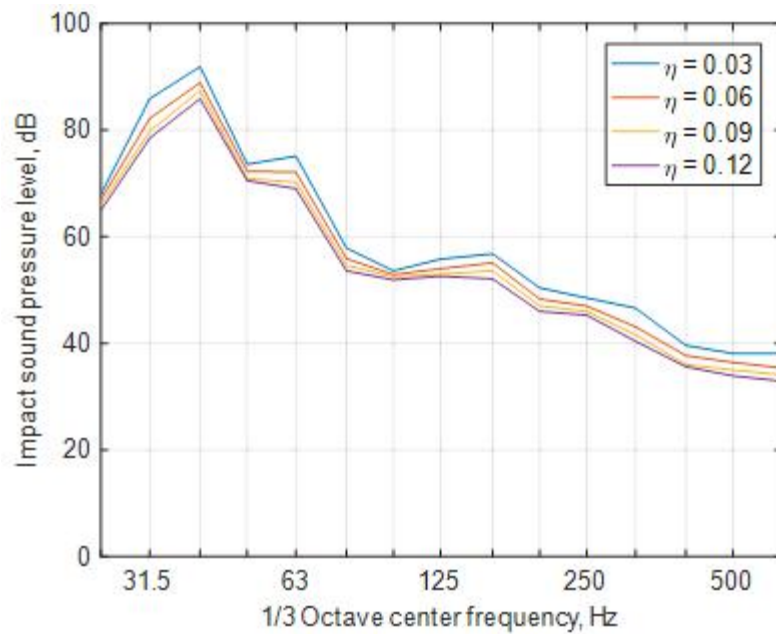


그림. 1/1 옥타브 밴드 해석결과

표. 감쇠비에 따른 단일수치값

Hz	$\eta = 0.03$	$\eta = 0.06$	$\eta = 0.09$	$\eta = 0.12$
31.5	94.5	92.8	91.1	89.7
63	80.0	78.3	76.6	75.9
125	62.4	61.9	60.8	60
250	55.7	54.4	53.2	52.3
500	45.7	44.4	42.9	42.1
단일수치	52	49	47	46

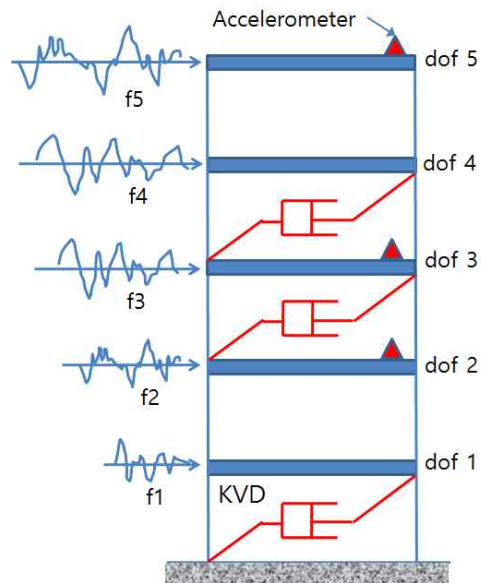
- 구조실험 및 해석에 의한 구조물 전체의 진동 성능 개선 효과 검증

– 내풍 해석

- 바람에 의한 구조물의 진동을 저감하기 위한 제진장치등이 사용되고 있다. 본 연구그룹에서 개발된 고감쇠 재료 및 물질은 건설시장을 주도할 새로운 동력으로

활용될 수 있으며 이를 풍진동 저감 구조시스템 개발에 적용하는 방안을 고려하였다. 적용성을 높이기 위하여 우선적으로 고감쇠 재료 설치에 의한 구조물의 해석평가의 신뢰도, 신재료에 의한 구조 감쇠 증가량을 명확히 추정하는 것이 요구된다.

- 이를 위하여 본 연구에서는 고감쇠재료가 설치된 구조물의 진동저감효과와 계측응답을 이용하여 제진장치에 의해 증가된 구조물의 감쇠비를 추정하는 프로세스를 제안하며, 이를 구조물의 내풍성능을 평가하는 기법으로 활용하고자 한다. 본 제안 기법은 운영 중인 구조물의 응답만을 이용하여 감쇠비를 추정하며, 보다 구체적으로는 고감쇠물질 또는 재료로 구성된 제진장치에 의한 제어효과와 등가적으로 증가된 구조물의 감쇠비를 추정하는 시스템 식별기술이다.
- 본 연구의 주된 관심인 등가감쇠비는 구조물이 고유하게 갖고 있는 감쇠비에 제진장치에 의해서 추가적으로 증가된 감쇠비를 포함하는 것이다. 또한 본 연구에서 추정하고자 하는 등가감쇠비는 구조물의 응답에 지배적인 영향을 미치고 있는 모든 모드의 감쇠비를 대상으로 한다. 그러므로 계측된 구조물 응답은 모드응답으로 분해가 될 필요가 있으며 또는 이웃하는 모드가 충분히 이격되어있음을 확인할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 1차년도에 개발된 상태공간 모드분해법을 적용하여 모드응답을 분해하였고, 분리된 모드응답으로부터 각 모드에 해당하는 감쇠비는 가상 진동기(Virtual Dynamic Shaker : VDS)를 이용하여 추정되었다. 제안된 제진장치 설치구조물 등가감쇠비 추정 프로세스를 검증하기 위하여 수동형 제진장치로써 고감쇠물질과 카고메 트러스구조를 합성한 점탄성댐퍼가 설치된 구조물대상으로 시뮬레이션을 수행하였다.
- 엔지니어링 테스트 베드를 위하여 대상구조물은 40층 규모의 고층 구조물을 선정하였고, 풍동실험을 통하여 구조물에 작용하는 하중을 산정하였다. 고감쇠 물질과 카고메 구조체가 사용된 점탄성 감쇠장치가 구조물에 설치된다. 동적 모델응축에 의하여 주요 모드 5개를 고려하였으며, 5 자유도 중에서 3개 자유도의 가속도 응답이 계측가능하다고 가정하여 수치시뮬레이션이 수행되었다.
- 제진장치가 설치된 구조물의 제어효과와 제어효과를 정량적으로 가늠할수 있는 등가감쇠비는 제진장치의 유형, 설치위치, 사용된 제어알고리즘 등에 따라 구조물 각 모드의 등가감쇠비에 미치는 영향이 다르게 나타난다. 그러므로 계측된 응답은 모드응답으로 분해되고 다시 분해된 모드응답으로부터 각 모드에 해당하는 등가감쇠비를 추정하게 된다. 앞서 언급하마와 같이 본 연구에서는 1차년도에 개발된 상태공간 모드분해법을 이용하여 계측응답으로부터 모드를 분해하고 모드응답으로부터 VDS를 이용하여 등가감쇠비를 추정하게 된다.
- 본 연구에서 제안된 제진장치 설치 구조물의 등가감쇠비 추정 프로세스의 적용을 위하여 수동형 제진장치로 점탄성댐퍼가 설치된 구조물을 대상으로 수치시뮬레이션을 수행하였다. 아래 그림에서와 같이 제진장치가 설치된 대상구조물은 자유도가 5인 전단구조물의 형상이나 이것은 아래 그림의 고층 구조물에 대한 모델축소를 통해서 구해진 것이다.



KVD : Kagome Visco-elastic Damper

그림 1. 모델 응축 구조물의 댐퍼와 가속도계의 위치

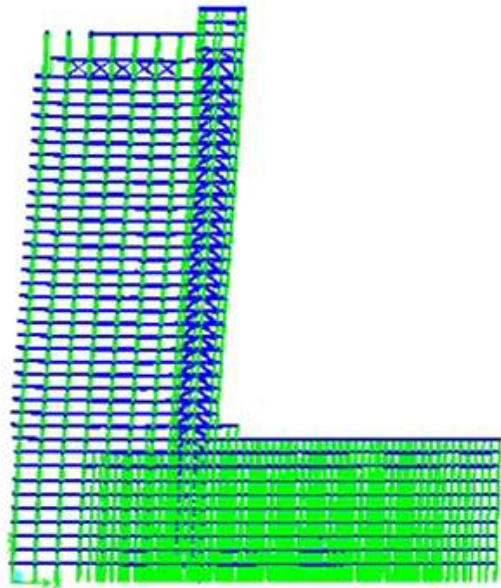


그림 2. 대상 구조물 모델링 및 모드해석
(모드해석에 의하여 주요 5개의 모드 추출)

- 1차 모드의 진동수는 0.2Hz 이며 구조물에 작용하는 하중은 아래 그림의 풍동실험을 통하여 구하였다.



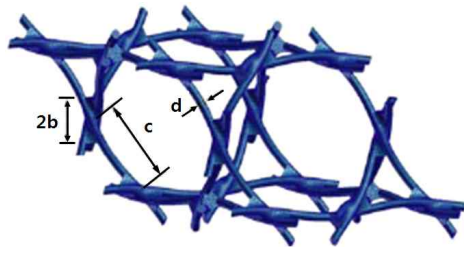
그림3. 풍동실험에 의한 동적 풍하중 산정

- 구조물에 설치된 센서는 가속도계라고 가정하였으며, 모델응축된 구조물의 2, 3, 5 자유도에 설치하여 1, 2, 3차 모드를 추정할 수 있도록 하였다. 풍동실험에 의한 하중은 통상 병진 2방향, 비틀림 1방향으로 구성된 저차의 1-3차 모드가 지배적이며, 가속도계 3개만으로도 지배적인 모드에 대한 가관측성을 크게 확보하기 위한 것이다. 총 계측시간은 3600초, 샘플링 진동수는 20Hz로 설정하여 수치 시뮬레이션을 수행하였으며, 2, 3, 5 자유도에 설치된 가속도 응답만을 추출하여 모드분리를 하였다. 각 모드분리된 응답에 대해 VDS를 적용하여 제진장치가 설치되었을 때의 등가감쇠비를 구하였다.
- 본 수치검증에서 다루는 제진장치는 수동형 제진장치 중의 하나인 점탄성 댐퍼를 대상으로 한다. 점탄성 소재의 낮은 강성과 접합성능저하로 인해 구조물에 곧바로 설치할 수 없기 때문에 점탄성소재를 결속할 수 있는 구조체가 요구된다. 본 연구에서는 카고메 트러스 구조를 사용하여 점탄성소재를 결속하고 구조물과 접합하여 댐퍼로 사용하는 카고메-점탄성 댐퍼(Kagome-viscoelastic damper, KVD)를 사용한다.(아래 그림)



그림. 카고메 트러스 구조와 고감쇠 물질이 결합된 점탄성 댐퍼

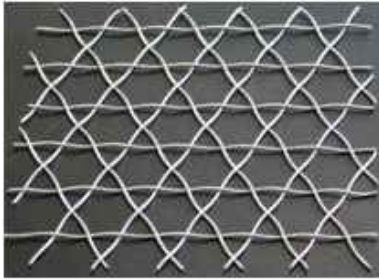
- 카고메 트러스 구조는 와이어를 3차원으로 직조한 구조로 경량이며, 강성이 큰 특성이 있고 내부 공간에 타 소재를 충전하여 합성재로 사용가능하며, 최근에 대량생산이 가능해짐에 따라 활용가능성이 커지고 있다. (아래 그림)



(a) Unit cell



(b) Tetrahedron



(c) 2-dimensional Kagome



(d) Manufactured Kagome

그림. 카고메 트러스 구조

- KVD 댐퍼의 감쇠정수는 1차 모드의 이론적인 감쇠비가 6%가량 되도록 설정한 것이다. 아래 표는 댐퍼 설치 전후의 각 모드에 대한 이론적인 모드특성을 나타내고 있다. 댐퍼 설치후의 각 모드 고유진동수가 미소하게 크게 나타나는 것은 KVD의 강성을 반영하여 고유값 해석을 수행하였기 때문이다. 이론적인 감쇠비는 댐퍼 설치 전 각 모드가 2%의 감쇠비를 가지도록 조정한 것이며, 댐퍼 설치 후 1차 모드는 6%이나 고차 모드의 감쇠비는 10% 이상으로 나타나고 있다. 이것은 댐퍼의 설치위치에서 고차 모드의 상대적인 변형이 크기 때문이다.

표. 댐퍼 전후의 모달 특성

Parameter		Modes				
		1	2	3	4	5
w/o KVD	Natural frequency (Hz)	0.200	0.584	0.920	1.182	1.349
	Damping ratio (%)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
with KVD	Natural frequency (Hz)	0.204	0.609	0.933	1.196	1.364
	Damping ratio (%)	6.08	13.8	16.2	11.8	17.8
	Estimated (error %)	5.74 (5.6)	13.3 (3.6)	16.1 (0.6)	-	-

- KVD 설치 전후의 5자유도 (최상층) 가속도응답의 스펙트럼이 아래 그림에 비교되어 나타나 있다. 설치 전의 각 모드 감쇠비가 2%정도로 작고 고유진동수가 이격되어 있어 각 모드가 잘 분리되어 있는 것처럼 보인다. 반면, 댐퍼 설치 후는 전체적으로 응답이 50% 이상 감소된 것으로 나타나며, 특히 2-3차 모드의 스펙트럼은 KVD에 의해 진동 저감 효과가 크게 나타나 스펙트럼의 값이 작고 두 모드가 거의 구분이 가지 않을 정도로 모드가 합성되어 나타나는 것을 알 수 있다.

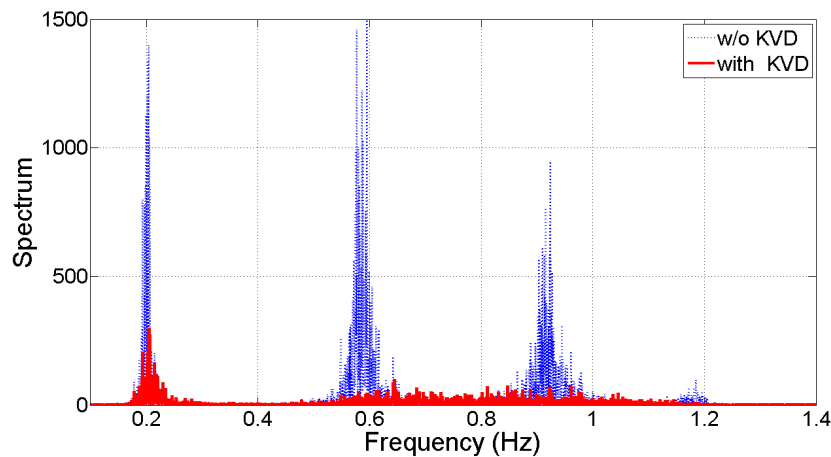


그림. 최상층 스펙트럼 및 댐퍼 설치 전후의 제어효과

- KVD 설치 후의 각 모드의 등가감쇠비를 추정하기 위하여 상태공간 모드분리법을 이용하여 모드를 분리한 결과가 아래 그림에 나타나 있다. 모드분리 된 각 모드의 스펙트럼을 보면 1차 모드뿐만 아니라 모드응답이 섞여있던 2, 3차 모드도 잘 분리됨을 알 수 있다. 가속도계의 수와 분리하고자 하는 모드의 수가 같다는 가정 하에 모드분리가 수행된 것이므로 4-5차의 모드는 다루지 않았다.
- 분리된 모드응답에 VDS를 적용하여 구한 1-3차 모드의 감쇠비가 위 표의 하단부에 이론적인 감쇠비와 비교되어 나타나 있다. 결과를 보면 본 예측된 감쇠비가 이론적 감쇠비의 94% 수준 이상으로 잘 추정하고 있음을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서 제시된 제진장치에 의한 제어효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, 고감쇠물질이 설치된 구조물에서도 등가감쇠비 추정 기법이 신뢰성을 가지는 것을 확인 할 수 있다.

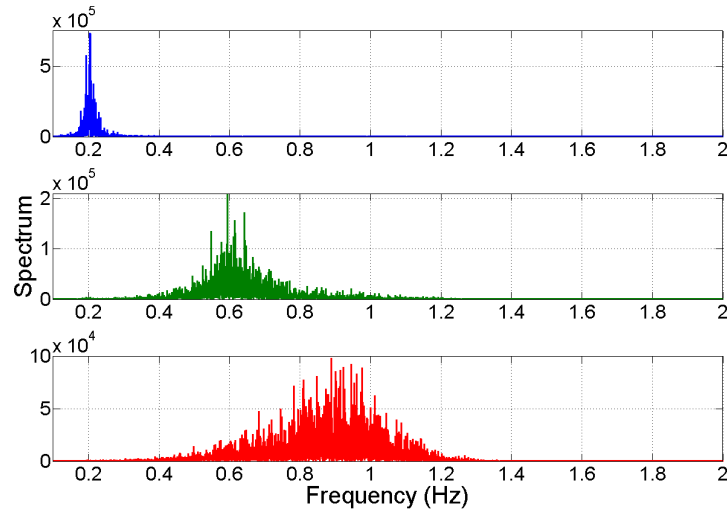


그림. 분리된 각 모드응답의 스펙트럼 (with KVD)

- 본 연구에서는 강풍 등으로 고감쇠 물질로 제작된 제진장치가 운영 중인 가운데 계측된 구조물의 가속도를 이용하여 제진장치에 의하여 제어효과와 증가된 각 모드의 등가감쇠비를 추정하는 프로세스를 개발하였다. 제진장치에 의해 구조물이 비고전 감쇠로 구현되므로 기존 모드분해법으로 모드분리가 안되는 단점을 상태공간 모드분해법을 이용하여 모드분리를 수행하였으며, 분리된 모드응답에 VDS를 이용하여 각 모드의 등가감쇠비를 예측할 수 있었다. 본 연구에서 제안된 감쇠비 추정법을 검증하기 위하여 수동형제진장치로써 카고메 점탄성 댐퍼가 구조물에 설치되었다고 가정하고, 이들에 의한 각 모드의 등가감쇠비를 추정하는 수치시물레이션을 수행하였다. 수치시물레이션결과를 보면 이론적으로 구해진 등가 감쇠비를 오차 5% 이내로 예측하는 것으로 나타났으며 이를 통해 본 연구에서 제안된 고감쇠 물질로 구성된 제진장치의 제어효과를 평가할수 있었으며, 제진장치 설치 구조물의 등가감쇠비 추정법으로 제진장치의 성능을 평가하는 기법으로 활용 가능할 것으로 판단된다.
- － 유사환경 목업실험에 의한 감쇠물질 충전 슬래브의 중량충격음 저감효과
 - 다세대 주택이나 아파트와 같은 집단 주거용 구조물 대부분 철근콘크리트 구조물이며 설계기준이나 주택법 등에 의해 규정된 기준을 만족하도록 안전성과 사용성 등을 고려하여 시공된다. 설계기준에 따라 충분한 안전율을 고려하여 구조물을 설계하고 시공이 이루어지며, 특히 층간소음은 사용자나 거주자의 주위 여건에 따라 발생 정도 및 횟수 등이 달라지고 피해자의 신체적 상태나 심리적 상태에 따라 받아들이는 정도가 달라지는 문제가 있다.
 - 2005년 건설교통부고시 제 2005-189호에 바닥충격음 차단성능 등급 등의 기준에 의하여 기존 150mm 이던 공동주택 슬래브 두께는 과도기 180mm로 증가하였다가, 표준 바닥 구조가 최소인정기준으로 고시되면서 벽식 및 혼합구조의 슬래브 두께 210mm로 지정하였으나 현재에도 층간소음이 발생하여 사회문제화되는 경향이 있다. 아래 그림을 보면 중량충격음의 경우 현재까지도 등급외가 많이 있는 것을 알 수 있다. 이를 고려하여 신축뿐만아니라 기존 다세대 공공주택이나 건축물의 진동 및 소음을 줄이기 위한 새로운 슬래브 시스템이 지속적으로 요구된다고

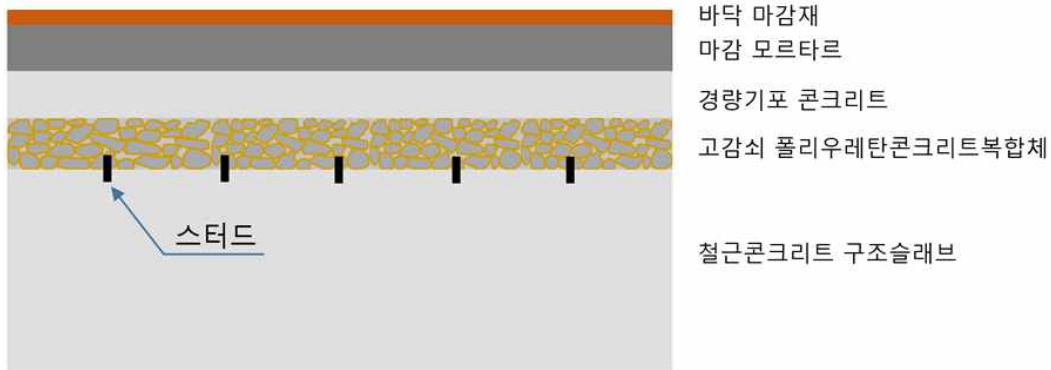
볼 수 있다.



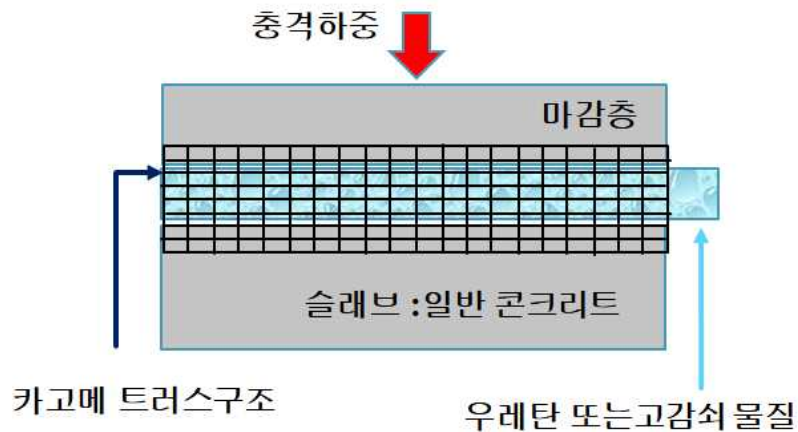
그림. 슬래브 두께에 따른 등급 현황

- 공동주택 슬래브에서 유발되는 층간소음은 슬래브의 진동에 의하여 유발되는 것으로 알려져 있다. 그러므로 층간소음을 줄이는 것은 슬래브의 진동을 줄이는 것에서 비롯될 수 있으며 이를 위한 방법으로는 슬래브의 두께를 증가시키는 방법 등이 있으나 이것을 슬래브의 구조적 안전성 요건에 필요로 하는 슬래브 두께에 비하여 상당히 큰 두께를 요구하고 있다. 그에 따라 구조체의 전체 질량이 증가하고 그 증가분만큼 지진하중에 취약한 구조를 가질수 있으며 기초를 더욱 크게 보강해야하는 경제적인 문제를 유발시키기도 한다.
- 슬래브의 진동을 줄이는 또다른 방법으로는 슬래브 고유의 감쇠비를 증가시킴으로써 슬래브의 진동의 크기를 줄일뿐만 아니라 진동의 지속되는 시간을 줄임으로써 잔향된 소음을 줄이는 기법이다. 본 기술에 대한 2차년도 연구의 시뮬레이션 결과를 보면 감쇠비 2배 증가하면서 소음이 2-3dB저감하는 것으로 나타났음. 현재의 슬래브의 고유 감쇠비가 2-3%인 것을 고려할 때 현재보다 4배정도의 큰 감쇠비를 가질 수 있도록 슬래브가 제조된다면, 소음저감 예상량이 5-6dB정도 예상되어 현재 법적기술인 슬래브 소음 등급을 1, 또는 2등급 상향하는 것을 기대할 수 있다. 그러나 고감쇠 물질과 슬래브의 접합성능, 고감쇠물질에 의한 감쇠비의 증가 효과는 시뮬레이션만으로 한계가 있으며 직접 시제품을 제조하여 그 성능을 실험적으로 검증할 필요가 있다.
- 본 연구에서는 구조체 진동에 의한 소음의 발생 메커니즘에 기반하여 진동에너지가 소산(dissipation)하는 역할을 하는 고감쇠 물질을 슬래브에 사용함으로써 진동과 소음을 동시에 줄이는 기술을 개발한다. 본 기술은 층간소음 저감을 위한 방안으로 기존 슬래브에 고감쇠재료를 설치하고 타설과 설치가 효과적으로 구현될 수 있도록 일반 스티드나 카고메 트러스 구조를 전단 연결재로 사용하고 감쇠재료에 의한 슬래브의 감쇠비를 증가시킴으로써 슬래브의 소음을 저감하는 슬래브 시스템이다.
- 이것은 기존 슬래브에 고감쇠물질을 설치함으로써 고유적으로 가지고 있는 슬래브의 고유감쇠비를 현재의 감쇠비 2-3% 보다 4배 이상을 증가키는 시스템이다. 그러나 슬래브와 고감쇠 물질의 부착성능이 떨어지면 예상되는 고감쇠비의 구현이 어려울 것으로 예상되며 이를 극복하기 위하여 기존 슬래브에 스티드나 카고메 트러스 구조를 설치 매립하고 고감쇠 물질을 타설함으로써 기존 슬래브와 고감쇠 물

질의 계면 및 접착성능이 월등하게 개선되어 고감쇠 물질의 진동저감성능을 슬래브에 구현하게된다. (아래 그림)



(a) 일반 스터드에 의한 고감쇠 물질과 슬래브의 접합



(b) 카고메 트러스에 의한 고감쇠 물질과 슬래브의 접합
그림. 전단연결재에 의한 고감쇠물질 접합 (개념도)

- 감쇠물질에 의한 중량충격을 저감을 검증하기 위하여 슬래브를 제작하였다. 실험실의 여건등을 고려하여 슬래브의 크기는 전용면적 59 m^2 공동주택의 작은 방을 선택한 것이다. 슬래브 시작품의 크기 및 제작 조건은 아래와 같다. 또한 시작품의 시험 조건 등은 아래 표에 나타내었다. 또한 시작품 치수 및 특징에 따라 제작된 시편이 아래 그림에 나타나 있다.
- 시작품 치수 및 특징
 - 시작품 크기: 3,500 mm x 3,000 mm x 210 mm (가로, 세로, 두께)
 - 철근 배근: D10@250
 - 철근 배근: D10+D13@250
 - 모서리 부분 지지대 크기: 300 mm x 300 mm x 400
 - 모서리 부분 지지대 철근 배근: D10@150
 - 모서리 부분 결합을 위한 구멍 제작
 - 콘크리트강도: 24 MPa - 30 MPa

표. 슬래브 실험 조건등

구분	슬래브 크기	형상	비고
1	3500 x 3000 x 210mm	나 슬래브	-59 아파트의 침실 크기 참조, 59 아파트의 배근도 사용
2	3500 x 3000 x 210mm	나슬래브 + 40mm PU (with stud)	- 슬래브와 우레탄의 계면접합 비교, stud 두께 20mm, 길이 70mm, 500 x 500mm 간격 20mm 돌출
3	3500 x 3000 x 210mm	나슬래브 + 카고메 패널(stud)+PU	카고메 높이 100mm 중 60mm 매립 40mm 돌출 PU 타설



(a) 나슬래브



(b) 스터드 전단 연결재 집합 슬래브



(c) 카고메 트러스 구조 전달연결재 접합 슬래브
그림 3. 제조된 시작품

- 중량충격음압을 계측하기 위해서는 하부 구조가 필요하기 때문에 제작된 슬래브 단기둥에 별도의 철골기둥을 제작하여 높이 1.5m 상당의 기둥을 제조하였다. 기둥하부는 실험실의 스트롱 바닥과 연결하여 중량충격음 실험을 위한 유사환경을 구현하였다. (아래 그림) 슬래브 상부에 고감쇠 물질을 타설하고 전달연결재에 의하여 슬래브와 연결되게 하였다. 바닥시스템을 완성하기 위해서는 고감쇠 물질 상부에 다시 마감층과 마감재를 순차적으로 제작, 설치하여야 하나 감쇠물질에 의한 효과를 평가하기 위하여 여기에서는 마감부분을 생략하였다.
- 슬래브에 의한 진동에 의하여 하부에 전달되는 소음만을 계측하기 위하여 외부소음을 차단하여야 한다. 이를 위하여 기둥사이를 마감 벽체를 이용하여 밀실하게 하여 외부소음을 차단하였다. 실험을 KS 기준에 따라 가진, 수음위치를 결정하고 중량충격원인 뱅머신을 이용하여 수행하였다. (아래 그림)



그림. 철골기둥을 이용한 하부 구조 생성



그림. 외부마감된 시제품

- 중량 충격음 시험 결과 위 표 1의 3개의 시편에 대한 1/1 옥타브 밴드 음압결과가 아래 그림에 나타나 있다. 스티드 전달연결재, 카고메 전달연결재에 의한 음압이나 슬래브에 비하여 전반적으로 작게 나타나고 있으며 카고메 전달연결재에 의한 음압 저감이 중심주파수 63Hz 이후 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

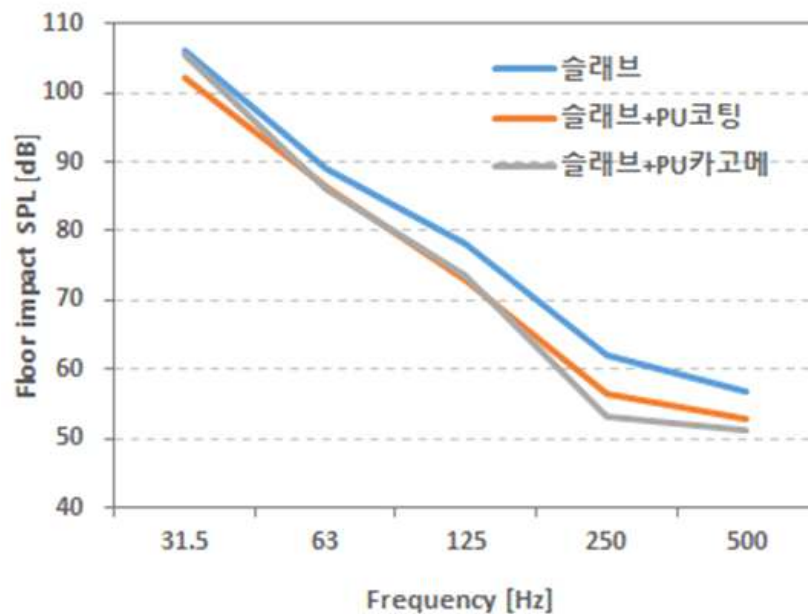


그림. 1/1 옥타브 밴드 음압 분포

- 1/1 옥타브밴드의 중심주파수에 대한 음압을 이용하여 단일 평가지수로 나타낸 것이 아래 표에 나타나 있다. 나 슬래브의 중량 충격음은 62dB로 크게 나타나며 이것은 하 부공간 층고가 실제보다 낮아 음이 더욱 크게 전달된 결과로 판된다.

- 스티드 전단연결재에 의한 단일평지수는 58dB로 나슬래브에 비하여 4dB 저감되며, 카고메 트러스 전단연결재에 의한 단일 평가지수는 57dB로 약 5dB 저감되는 것을 알수 있다. 일반 스티드와 카고메 스티드에 의한 차이는 1dB로 두 시스템 모두 유사한 저감효과를 가지나 카고메 트러스가 일반 스티드에 비하여 더욱 크게 구속하여 슬래브와 접합되기 때문에 효과가 더욱 좋을것으로 사료된다.
- 이러한 실험 결과로부터 고감쇠재료에 의한 슬래브의 진동 및 소음이 저감이 가능할 것으로 사료된다. 다만, 현재 수행된 실험이 유사환경에서 수행된 것인만큼 실 구조물 슬래브에서 같은 효과를 가질 것으로 예단할수 없다. 그럼으로 향후 실제 조건에서 고감쇠물질에 대한 실험을 수행하여 그 결과를 평가할 필요가 있을 것으로 사료된다.

표. 전달 연결재에 따른 소음저감효과

1/1 octave band			
중심주파수 Hz	210mm 나 슬래브	슬래브 +PU 코팅	슬래브 +PU 카고메
31.5	106.2	102.3	105.4
63	88.9	86.5	86.2
125	78.1	73.8	73.5
250	62.0	56.9	53.1
500	56.7	52.7	51.2
Li,Fmax,AW	62dB	58dB	57dB

(3) Task C: 내진성능 개선을 위한 고감쇠 구조시스템

- 감쇠진동 개요

- 구조해석에서는 수학적인 취급이 가능한 다수의 이상화시킨 수학적 모델을 이용해서 실제의 감쇠작용을 표현한다. 가장 널리 사용되는 감쇠모델은 점성감쇠 (viscous damping)로 알려져 있는 아래의 그림의 Dash-pot c 로서 표현된다. Dash-pot에는 그 상대속도에 비례하여, 속도의 역방향의 감쇠력 $-c\dot{y}$ 가 발생한다. 여기서 c 를 점성감쇠계수 (coefficient of viscous damping)로 정의를 하며, 점성 감쇠와 선형복원력 및 비선형복원력을 가지는 각각 시스템의 진동을 선형진동 및 비선형진동이라고 한다.
- 점성감쇠를 가지는 1 질점계 (SDF) 모델은 그림과 같이 표현된다. 자유진동의 방정식은 d'Alembert의 원리로부터 다음 식으로 표현한다.

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = 0$$

여기서, m : 구조물의 질량, c : 구조물의 감쇠, k : 구조물의 강성, y : 변위

- $k/m = \omega^2$ 및 $c/m = 2h\omega$ (ω : 원진동수)를 고려한다면 상기의 식은 다음식으로 치환 가능하다.

$$\ddot{y} + 2h\omega\dot{y} + \omega^2 y = 0$$

- 식에서 h 는 감쇠정수(damping factor, friction of critical damping)를 나타내며, 감쇠정도를 나타내는 중요한 물리량이다.

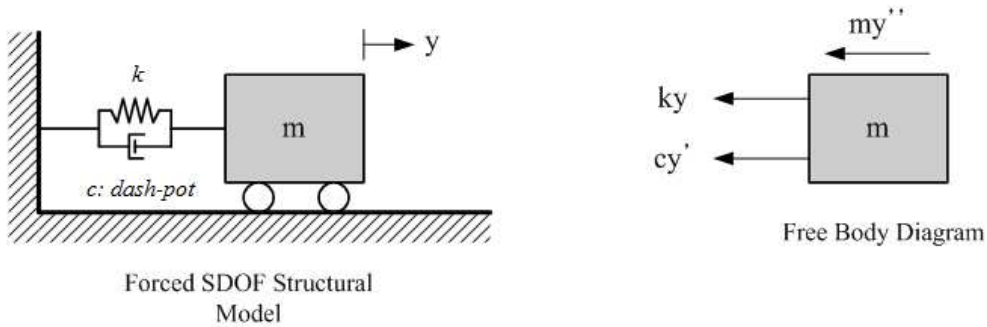


그림. 점성감쇠의 개념

- 상기의 식의 해를 다음 식으로 두면 식은 아래의 식과 같은 특성방정식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$y = Ae^{\lambda t}$$

$$\lambda^2 + 2h\omega\lambda + \omega^2 = 0$$

$$\left\{ \begin{matrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{matrix} \right\} = -h\omega \pm \sqrt{h^2 - 1}\omega = -h\omega \pm \sqrt{1 - h^2}\omega i$$

- $e^{\lambda_1 t}, e^{\lambda_2 t}$ 은 2개의 독립한 기본해이며, 이것의 선형결합 $Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t}$ 는 식의 일반해가 된다. 해의 성질은 h 의 값에 의해서 다음과 같이 3가지로 분류된다.
- $h > 1$ 의 경우
 - λ 는 -의 2실근이 되며, 해는 비진동적인 과감쇠진동 (over-damped vibration)를 나타낸다. 해는 다음과 같다.

$$y = e^{-h\omega t} (Ae^{\sqrt{h^2 - 1}\omega t} + Be^{-\sqrt{h^2 - 1}\omega t})$$

$$= e^{-h\omega t} (a \cosh \sqrt{h^2 - 1}\omega t + b \sinh \sqrt{h^2 - 1}\omega t)$$

여기서, $\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$, $\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$: 쌍곡선 함수 (hyperbolic function)

- $h < 1$ 의 경우
- λ 는 $-$ 의 실수부를 가지는 공액복소근이 되며, 해는 다음 식과 같이 감쇠진동 (damped vibration)을 나타낸다.

$$y = e^{-h\omega t} (Ae^{i\sqrt{1-h^2}\omega t} + Be^{-i\sqrt{1-h^2}\omega t})$$

- A, B는 복소의 미정계수이지만, y 가 실수해이기 때문에 A, B는 공액복소수가 된다. 즉 $e^{i\sqrt{1-h^2}\omega t}$ 와 $e^{-i\sqrt{1-h^2}\omega t}$ 가 공액이다. $A = (a-bi)/2$ 및 $B = (a+bi)/2$ 로 두고 오일러공식. 즉 $e^{\pm ix} = \cos x \pm i \sin x$ 을 고려하면, 다음과 같은 실수표현이 얻어진다.

$$y = e^{-h\omega t} (a \cos \sqrt{1-h^2}\omega t + b \sin \sqrt{1-h^2}\omega t)$$

- $h = 1$ 의 경우
- λ 는 $-$ 의 실수의 중근이 되며, 진동과 비진동의 경계인 임계감쇠 (critical damping)의 상태를 나타낸다. 이 경우의 기본 해는 $e^{-\omega t}$ 와 $te^{-\omega t}$ 이기 때문에 해는 다음 식과 같이 나타낼 수가 있다.

$$y = (a + bt)e^{-\omega t}$$

- 이 경우의 점성감쇠계수 c_r 은 $2\sqrt{km}$ 과 같으며, $c/m = 2h\omega$ 의 관계인 h 는 식과 같이 임계감쇠계수 c_r 에 대한 점성감쇠계수 c 의 비율 (friction of critical damping)을 나타내고 있다.

$$h = c/2\omega m = c/2\sqrt{km} = c/c_r$$

- 상기 식은 2개의 미정계수를 포함하고 있으며, 이것은 초기조건에 의해서 계산할 수 있다. 초기조건으로서 초기변위 d_0 , 초기속도 v_0 가 부여되었을 경우의 해는 다음과 같이 각각 나타낼 수가 있다.

$$h > 1 \quad y = e^{-h\omega t} \left(d_0 \cosh \sqrt{h^2-1}\omega t + \frac{v_0 + h\omega d_0}{\sqrt{h^2-1}\omega} \sinh \sqrt{h^2-1}\omega t \right)$$

$$h < 1 \quad y = e^{-h\omega t} \left(d_0 \cos \sqrt{1-h^2}\omega t + \frac{v_0 + h\omega d_0}{\sqrt{1-h^2}\omega} \sin \sqrt{1-h^2}\omega t \right)$$

$$h = 1 \quad y = e^{-\omega t} \{d_0 + (d_0\omega + v_0)t\}$$

- 아래의 그림은 다양한 감쇠정수에 대한 진동곡선을 나타낸다. 진동은 감쇠의 증가에 따라서 급격히 저하한다는 사실을 알 수가 있다. 일반적인 건축물의 미진동

에서의 감쇠정수는 기존연구에 의하면 철골구조물은 0.5-3%정도이며, 철근콘크리트 구조물은 2-7%정도이다. 본 연구과제에서 개발될 등가감쇠 10%급 재료는 상당한 진동제어 효과를 나타낼 수 있다는 사실을 알 수가 있다.

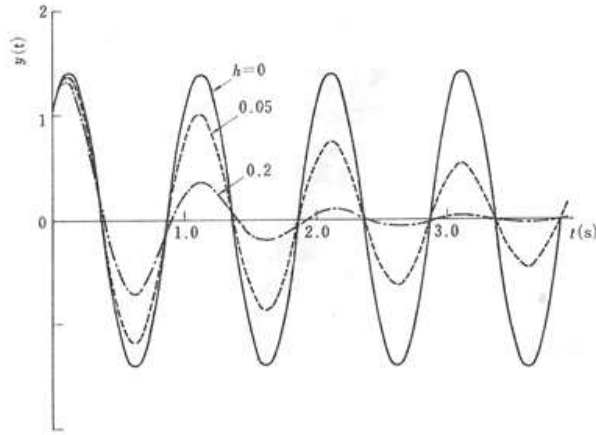


그림. 감쇠정수에 대한 진동곡선

- 부재의 모델법

- 부재의 모델은 각 부재를 강역을 가지는 선재로 치환하며, 다음 그림에 나타내는 것과 같이, 휨스프링과 전단스프링이 직렬 결합한 모델로 가정한다. 즉, 양단의 모멘트로부터 휨에 대한 강성메트리스를 평가하는 Giberson모델 (재단 소성스프링 법)로 가정한 것으로서, 부재의 재축방향의 변형은 무시를 하며, 부재의 휨은 탄성 강성 k_B 를 가지는 탄성선재와 그 양단에 설정한 $(k_{BP})_A$ 및 $(k_{BP})_B$ 의 강성을 가지는 소성회전스프링에 의하여 평가를 하며, 변형은 그것들의 합으로 나타낸다. 또한 전단변형에 대해서는 재중양부에 설정한 비선형 전단스프링에 의하여 평가를 한다. 재단부의 모멘트 M 과 변형각 τ 와의 관계는 증분형식으로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

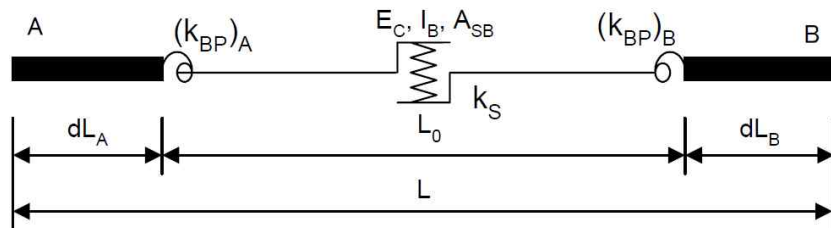


그림. 부재의 모델

$$\left\{ \begin{array}{c} \frac{\Delta \tau_A}{\Delta \tau_B} \end{array} \right\} = \left[\begin{array}{cc} 2f & -f \\ -f & 2f \end{array} \right]_{\text{elastic}} + \left[\begin{array}{cc} f_{Ao} & 0 \\ 0 & f_{Bo} \end{array} \right]_{\text{plastic}} \left\{ \begin{array}{c} \frac{\Delta M_A}{\Delta M_B} \end{array} \right\}$$

여기서, f : 탄성시의 휨유성 ($L/6EI$), f_{Ao} : A단의 소성스프링 유성

- 따라서, 보 및 기둥의 경우는 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$\left\{ \begin{array}{c} \Delta\tau_A \\ \Delta\tau_B \end{array} \right\} = [F_M] \left\{ \begin{array}{c} \Delta M_A \\ \Delta M_B \end{array} \right\}, \quad [F_M] = \begin{bmatrix} 2f + f_{Ao} & -f \\ -f & 2f + f_{Bo} \end{bmatrix}$$

- 실험 등으로부터 얻어진 비선형하중과 변형관계곡선을 바탕으로 순간유성을 f_E 라고 하고, 다음 식과 같은 관계가 성립한다고 가정을 한다.

$$\begin{aligned} L/3EI + (-L/6EI) + f_{Ao} &= f_{EA} \\ -L/6EI + L/3EI + f_{Bo} &= f_{EA} \end{aligned}$$

- 또한, 반곡점이 부재의 중앙에 있다고 가정을 한다면 $\Delta M_A = \Delta M_B$ 이며, 재단모멘트와 부재접선각에 대한 다음관계가 얻어진다.

$$\Delta M = (6EI/L)\alpha\Delta\tau$$

- 여기서, $\Delta M_A = \Delta M_B = \Delta M$ 라고 하면 다음 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \Delta\tau_A &= (L/6EI + f_{Ao})\Delta M \\ \Delta\tau_B &= (L/6EI + f_{Bo})\Delta M \end{aligned}$$

- 식으로부터 유도된 유성 $(6EI/L)\alpha$ 을 대입하면 최종적으로 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{Ao} &= L/6EI\beta - L/6EI \\ f_{Bo} &= L/6EI\gamma - L/6EI \end{aligned}$$

- 여기서, β, γ 는 소성화에 따르는 강성저하율을 나타낸다.
- 한편, 전단변형을 고려한 경우에 있어서의 모델은 부재중앙에 전단스프링을 가지는 것으로 하였으며, 역대칭모멘트를 받는 경우 전단변형각은 휨모멘트를 이용해서 나타내면 다음 식과 같이 나타낼 수가 있다.

$$\Delta\gamma = \kappa/GA_W \cdot (\Delta M + \Delta M)/L$$

- 본 연구에서 이용한 전체모델의 경우는 변형각 $\Delta\tau$ 에는 전단변형각 $\Delta\gamma$ 을 추가하면 된다. 결국 $[F_M]$ 은 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$[F_M] = \begin{bmatrix} f + f_A & -f \\ -f & f + f_B \end{bmatrix} + \frac{\kappa}{GAL} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서, $f : L/6EI$, $f_A : L/6EI\beta$, $f_B : L/6EI\gamma$, G : 전단탄성강성 ($G = E/2(1+\nu)$, $\nu = 1/6$)

κ : 형상계수, A : 부재의 전단단면적, L : 부재길이

- 이상, 순간의 $[F_M]$ 이 결정되며, $[K_M] = [F_M]^{-1}$ 의 관계에 의해서 강성매트릭스인 $[K_M]$ 이 다음과 같이 최종적으로 계산된다.

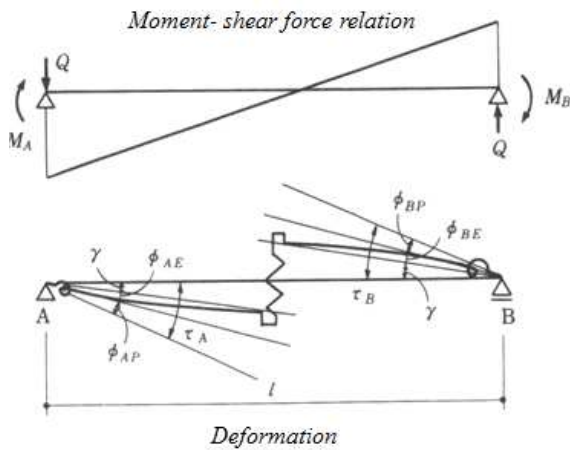
- 기둥 및 보와 같이 반곡점이 지점 내에 있는 경우

$$[K_M] = \left[\begin{bmatrix} \frac{L}{6EI} + \frac{L}{6EI\beta} & -\frac{L}{6EI} \\ -\frac{L}{6EI} & \frac{L}{6EI} + \frac{L}{6EI\gamma} \end{bmatrix} + \frac{\kappa}{GAL} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \right]^{-1}$$

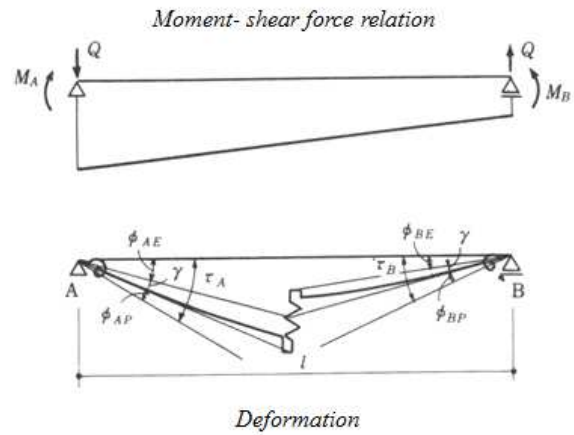
- 벽체와 같이 반곡점이 지점 외에 있는 경우

$$[K_M] = \left[\begin{bmatrix} \frac{L}{2EI\beta} - \frac{L}{6EI} & -\frac{L}{6EI} \\ -\frac{L}{6EI} & \frac{L}{2EI\gamma} - \frac{L}{6EI} \end{bmatrix} + \frac{\kappa}{GAL} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \right]^{-1}$$

- 여기서, β, γ : 소성화에 따르는 강성저하율



(a) 반곡점이 지점 내에 있는 경우



(b) 반곡점이 지점 외에 있는 경우

그림. 부재의 휨모멘트와 전단력 관계

- 건물의 감쇠성능에 따른 비선형지진응답특성

- 내진성능 개선을 위한 고감쇠 구조시스템의 비선형지진응답 해석프로그램, 즉 고

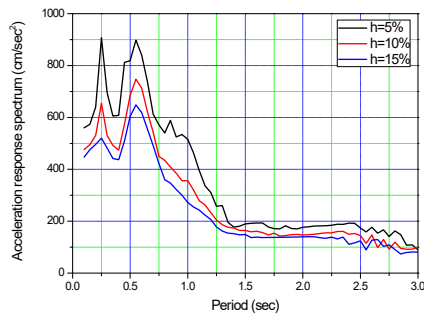
감쇠 내진시스템의 내진성능을 약산적이며, 예비적으로 평가가 가능한 1질점계(SDF) 기반 비선형동적해석 및 보다 정밀하게 고감쇠건물의 내진성능을 평가할 수 있는 부재수준의 비선형동적해석 프로그램을 이용하여 감쇠성능에 따르는 비선형지진응답 특성을 검토하였다.

- 해석에 사용한 입력지진파는 내진성능 검증에 일반적으로 사용하고 있는 El Centro.NS 지진파 및 다수의 중·저층 건물에 거대한 피해를 준 1968년 토카치오키(十勝沖)지진당시의 하치노헤(八戸)시 항만사무소에 관측된 지진기록(지표면)인 Hachinohe.EW를 이용하여 각각의 해석목적에 맞게 2개 지진파의 최대가속도를 표준화하여 해석을 실시하였다. 감쇠는 내부점성감쇠형(순강강성비례형)으로 하여 탄성시의 1차모드의 감쇠정수(Damping Factor) h 를 5%, 10%, 15%로 설정하여 감쇠성능에 따른 건물의 지진응답특성을 검토 및 평가하였다.

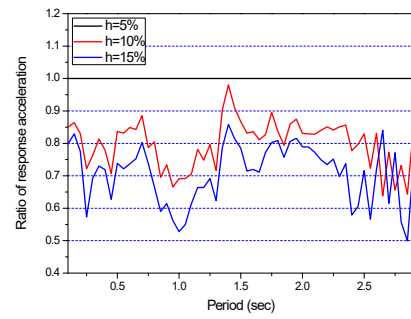
표. 해석케이스

	입력지진파	감쇠율 (%)
ECNS-5	El Centro NS	5
ECNS-10		10
ECNS-15		15
HAEW-5	Hachinohe.EW	5
HAEW-10		10
HAEW-15		15

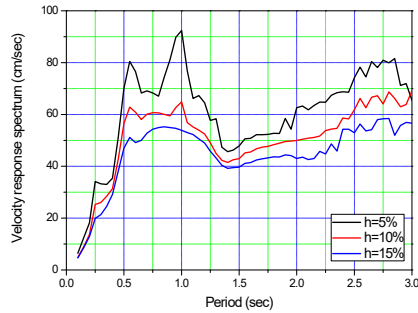
- 그림.은 El Centro.NS 원 지진파 ($A_{max}=0.34G$)에 대한 감쇠성능 (5%, 10%, 15%) 따른 Linear 모델, 즉 지진응답에 대한 가속도스펙트럼과 5% 감쇠대비 10% 및 15% 감쇠의 지진응답가속도에 대한 저감효과(비율) 및 속도 및 변위스펙트럼을 각각 나타낸다.
- 한편, 그림. Hachinohe.EW 원 지진파 ($A_{max}=0.18G$)에 대한 감쇠성능 (5%, 10%, 15%) 따른 지진응답에 대한 가속도스펙트럼과 5% 감쇠대비 10% 및 15% 감쇠의 지진응답가속도에 대한 저감효과(비율) 및 속도 및 변위스펙트럼을 각각 나타낸다.
- 기존연구에서도 밝혀진바, El Centro.NS 원 지진파 ($A_{max}=0.34G$)의 가속도응답에서는 구조물의 감쇠성능이 5%대비 10%가 평균적으로 약 20%의 가속도응답 저감을, 15%일 경우는 약 30%의 가속도응답 저감을 나타내고 있다. 한편 지진파의 최대 가속도가 0.18g인 Hachinohe.EW에서는 감쇠성능이 5%대비 10%가 평균적으로 약 25%의 가속도응답 저감을, 15%일 경우는 약 35%의 가속도응답 저감을 나타내고 있다. 지진파의 최대가속도가 상대적으로 적은 경우에는 건물의 감쇠성능의 증가에 따른 저감효과가 다소 큰 경향을 나타내었다.



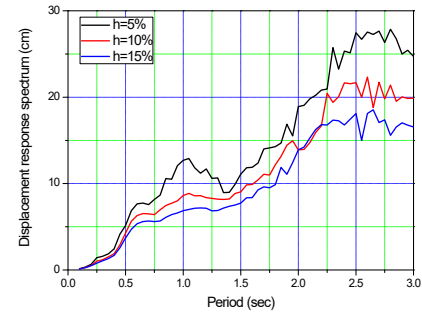
(a) 탄성 가속도 응답스펙트럼
[El Centro.NS, $A_{max}=0.34G$]



(b) 탄성 가속도 응답의 저감비율
[El Centro.NS, $A_{max}=0.34G$]



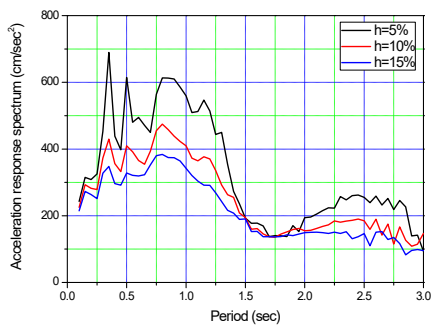
(c) 탄성 속도 응답스펙트럼
[El Centro.NS, $A_{max}=0.34G$]



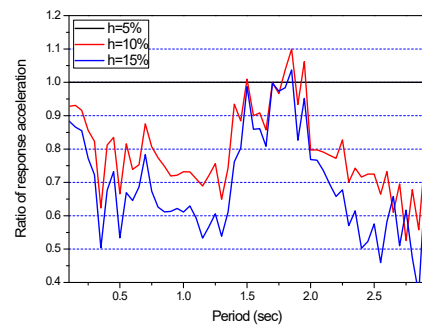
(d) 탄성 변위 응답스펙트럼
[El Centro.NS, $A_{max}=0.34G$]

그림. 감쇠성능에 따른 스펙트럼 [El Centro.NS, $A_{max}=0.34G$]

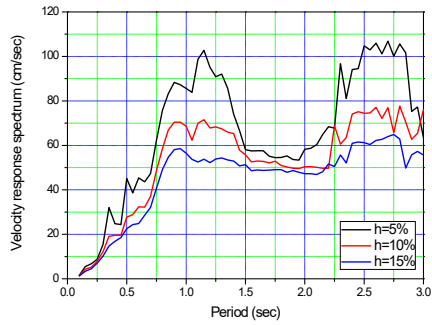
- 그림에는 철근콘크리트 건물의 휨파괴형 부재의 복원력특성을 나타내는 Degrading Trilinear형 모델 및 전단파괴형 부재의 복원력특성을 나타내는 Origin-Oriented형 모델에 대한 El Centro.NS 및 Hachinohe.EW 지진파 ($A_{max}=0.3G$)에 대한 감쇠성능 (5%, 10%, 15%) 따른 변위응답해석결과를 각각 나타낸다.



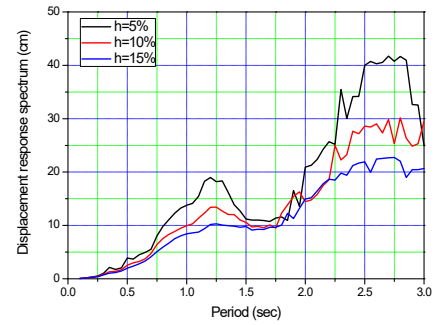
(a) 탄성 가속도 응답스펙트럼
[Hachinohe.EW, $A_{max}=0.18G$]



(b) 탄성 가속도 응답의 저감비율
[Hachinohe.EW, $A_{max}=0.18G$]

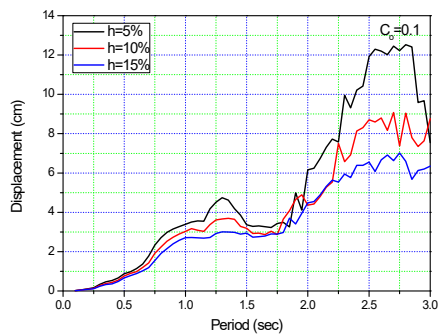


(c)탄성 속도 응답스펙트럼
[Hachinohe.EW, $A_{max}=0.18G$]

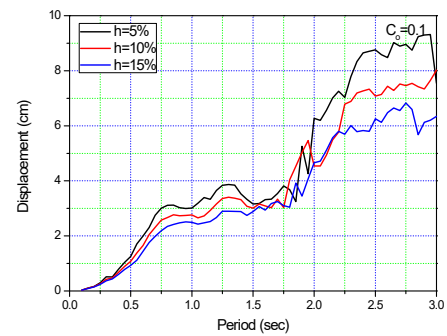


(d) 탄성 변위 응답스펙트럼
[Hachinohe.EW, $A_{max}=0.18G$]

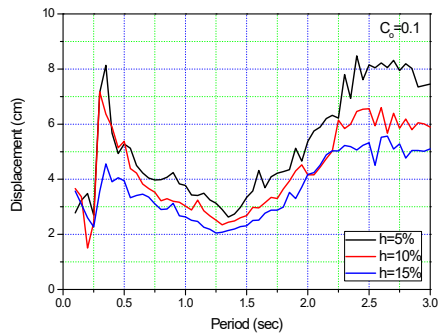
그림. 감쇠성능에 따른 스펙트럼 [Hachinohe.EW, $A_{max}=0.18G$]



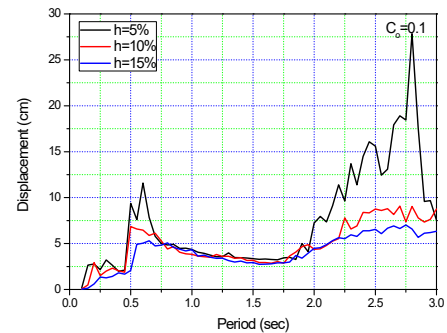
(a)Degrading Trilinear형 변위응답해석
[$C_o=0.1$, El Centro.NS]



(b)(a)Degrading Trilinear형 변위응답해석
[$C_o=0.1$, Hachinohe.EW]



(c)Origin-oriented형 변위응답해석
[$C_o=0.1$, El Centro.NS]



(d)Origin-oriented형 변위응답해석
[$C_o=0.1$, Hachinohe.EW]

그림. 감쇠성능에 따른 변위응답해석 결과 [$A_{max}=0.3G$]

- 건물의 감쇠성능에 따른 비선형지진응답특성

- 비선형동적 해석프로그램을 이용하여 건축물의 감쇠성능에 따른 내진성능 효과를 검증 할 목적으로 아래의 그림에 나타난 비내진상세를 가지는 국내 기존 철근콘크리트 학교건물의 골조 (1980년대 다형 표준도면)를 선정하였으며, 대상 건물의 층고는 330cm, 설계용 콘크리트 강도는 21MPa이며, 층수는 3층이다.

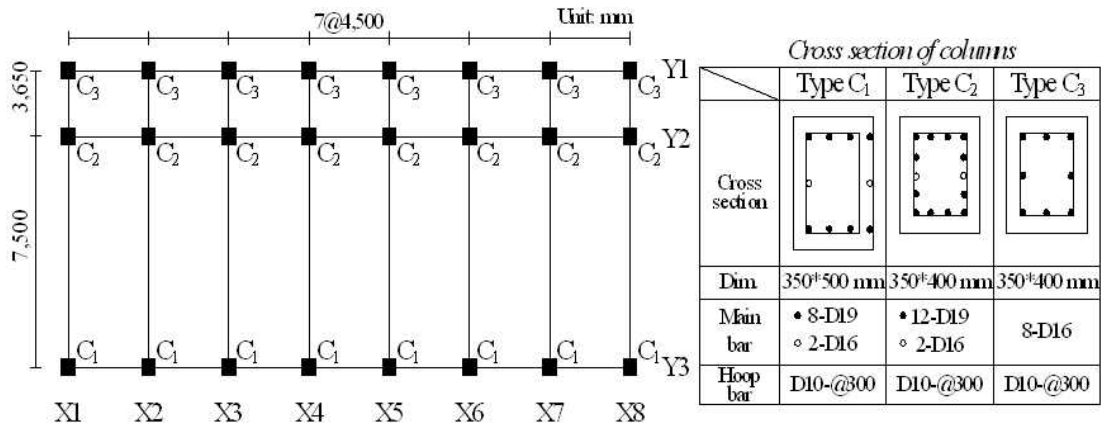
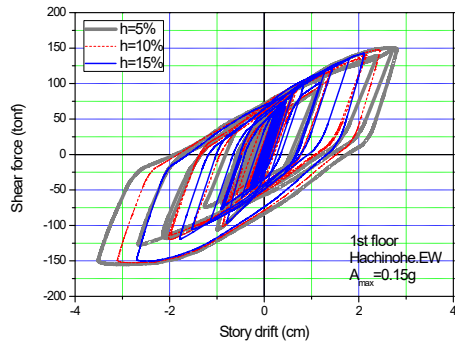


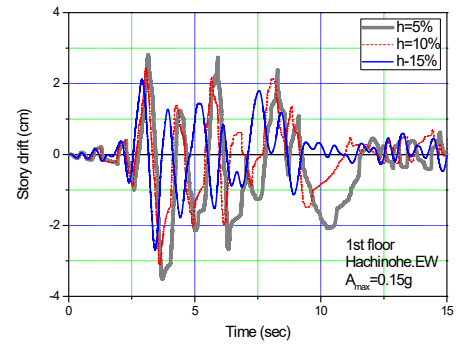
그림. 부재수준의 비선형동적해석을 위한 대상건물의 도면

◦ 하중-변위 및 변위이력 관계

- 그림. 에는 Hachinohe.EW 지진파를 150gal을 입력하였을 경우의 감쇠성능 5%, 10% 및 15% 개선에 따른 1층의 하중-변위 및 변위시간이력 관계를 나타내며, 또한 그림. 에는 Hachinohe.EW 지진파를 200gal을 입력하였을 경우의 감쇠성능 5%, 10% 및 15% 개선에 따른 1층의 하중-변위 및 변위시간이력 관계를 각각 나타낸다.
- 한편 표. 에는 각각의 감쇠성능에 대한 대상건물의 1층의 지진응답해석 결과인 최대 층전단력, 최대 변위, 최대 응답속도, 최대 응답가속도를 비교하여 나타내었다.
- 부재수준의 비선형해석 결과에 의하면 Hachinohe.EW 지진파를 150gal 경우에는 건물 전체의 지진응답변위가 감쇠 5%인 경우에는 3.6cm, 10%에서는 3.1cm, 15%인 경우에는 2.6cm의 변위응답을 보여주었으며, 200gal 경우에는 건물 전체의 지진응답변위가 감쇠 5%인 경우에는 7.5cm, 10%에서는 6.2cm, 15%인 경우에는 5.5cm의 변위응답을 나타내었다. 감쇠 5% 대비 두 지진파에 대한 변위응답은 동일하게 15%인 경우는 약 15% 정도의 변위저감을 보여 주었으며, 15%인 경우는 약 28% 정도의 변위저감 효과를 나타내었다.

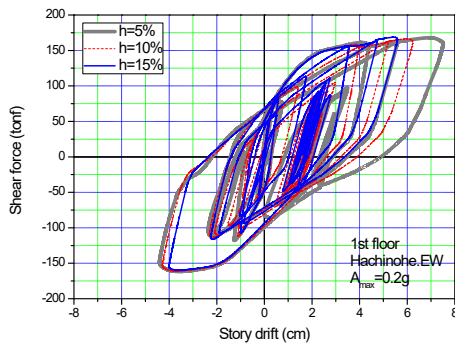


(a) 지진응답 하중-변위 곡선의 비교

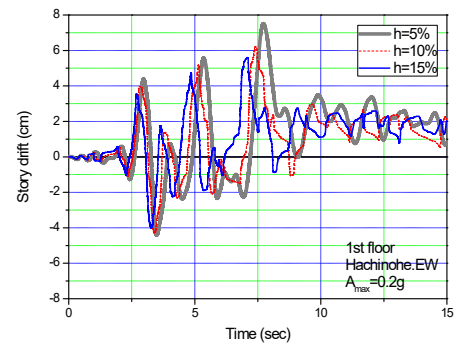


(b) 지진응답 변위-시간이력 곡선의 비교

그림. 지진응답해석 결과 (Hachinohe.EW, Amax=0.15G)



(a) 지진응답 하중-변위 곡선의 비교



(b) 지진응답 변위-시간이력 곡선의 비교

그림. 지진응답해석 결과 (Hachinohe.EW, Amax=0.2G)

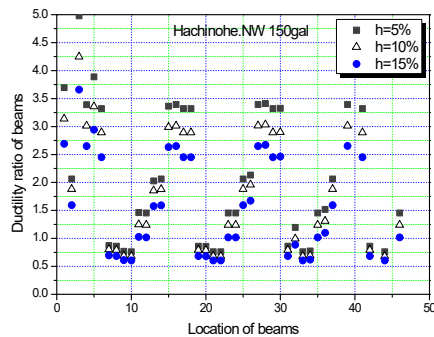
표. 감쇠성능에 따른 부재수준의 비선형동적 해석결과 비교

	비교대상(1층)	5%	10%	15%
150gal	최대층전단력 (tonf)	155.0	152.5	150.0
	최대변위 (cm)	3.6	3.1	2.6
	최대응답속도 (cm/sec)	19.9	16.8	14.4
	최대응답가속도(cm/sec ²)	160.2	154.8	152.6
200gal	최대층전단력 (tonf)	167.9	166.0	168.6
	최대변위 (cm)	7.5	6.2	5.5
	최대응답속도 (cm/sec)	29.0	25.3	22.6
	최대응답가속도(cm/sec ²)	177.0	176.1	175.1

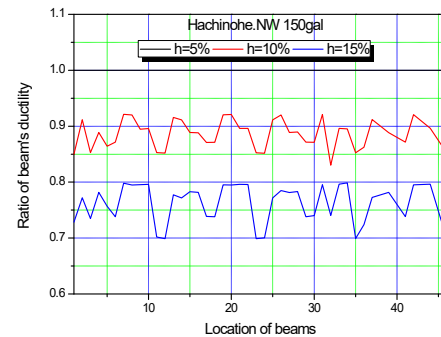
◦ 부재의 소성화 정도

- 그림. 예는 감쇠율 5%, 10%, 15%인 경우의 Hachinohe.EW (Amax=0.15G)에 대한 대상 건물의 1층 보 및 기둥부재의 최대 지진응답시의 소성화 정도를 나타낸것으로서, 최대 응답시의 연성율 (Ductility, μ)은 $\mu = \tau_{max}/\tau_y$ 에 의하여 산정을 하였다 (본 대상건물의 전 부재는 휨파괴에 의하여 내력이 결정되었다). 그림. 예는 감쇠율 5%, 10%, 15%인 경우의 Hachinohe.EW (Amax=0.2G)에 대한 대상 건물의 1층 보 및 기둥부재의 최대 지진응답시의 소성화 정도를 나타낸것으로서, 최대 응답시의 연성율 (Ductility, μ)은 $\mu = \tau_{max}/\tau_y$ 에 의하여 산정을 하였다

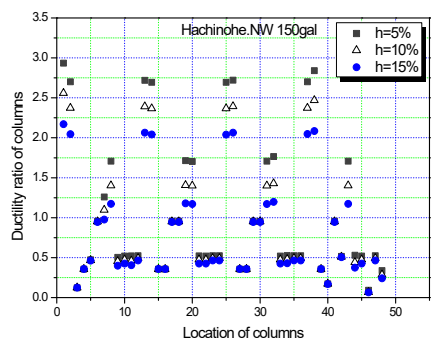
- 해석결과에 의하면 Hachinohe.EW ($A_{max}=0.15G$)에 대한 감쇠성능 (5%, 10%, 15%)에 따른 지진응답 시의 보부재의 연성율은 $h=5\%$ 대비 10%인 경우는 10%~15%의 저감을 나타내었으며, $h=15\%$ 인 경우는 20%~30%의 비율로 연성율이 저감하는 효과를 보여 주었다. 동일 지진동 규모에서 기둥부재는 $h=5\%$ 대비 10%인 경우는 전체의 반 정도가 평균적으로 약 10%의 저감을 나타내었으며, $h=15\%$ 인 경우는 약 20%의 비율로 연성율이 저감하는 효과를 나타내어 감쇠성능에 따른 감쇠효과는 탁월하다고 사료된다.
- 한편, Hachinohe.EW ($A_{max}=0.2G$)에 대한 감쇠성능에 따른 지진응답 시의 보부재의 연성율은 $h=5\%$ 대비 10%인 경우는 전체 보부재의 반 정도가 약 20%의 저감을 나타내었으며, $h=15\%$ 인 경우는 35%의 비율로 연성율이 저감하는 효과를 보여 주었다. 동일 지진동 규모에서 기둥부재는 $h=5\%$ 대비 10%인 경우는 전체의 반 정도가 평균적으로 약 5%의 저감을 나타내었으며, $h=15\%$ 인 경우는 약 10%의 비율로 연성율이 저감하는 효과를 나타내어 200gal에 대한 감쇠성능은 150gal보다 다소 낮은 비율을 보여 주었다. 이것은 지진동의 탁월주기 특성에도 영향을 받지만, 비선형복원력을 가지는 SDF해석에서 기술한 바 지진동의 규모가 클수록 부재의 응력(지진)이 집중하여 감쇠성능에 따른 감쇠효과가 다소 낮아진 것으로 사료된다.



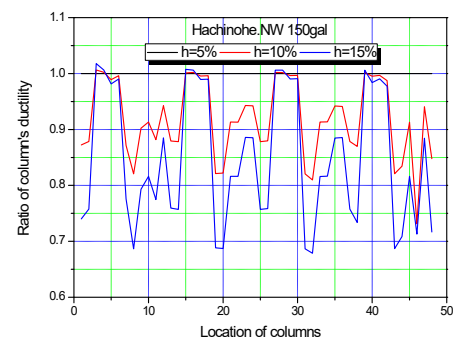
(a) 감쇠성능에 따른 보부재의 연성율 비교



(b) 감쇠성능에 따른 보부재의 다른 연성율 저감효과 비율

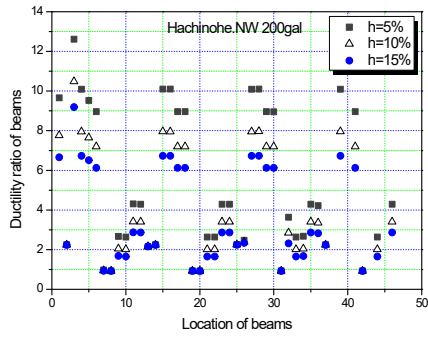


(c) 감쇠성능에 따른 기둥부재의 연성율 비교

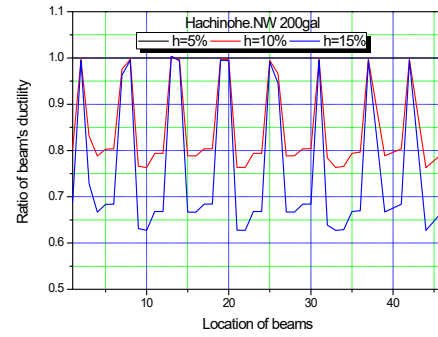


(d) 감쇠성능에 따른 기둥부재의 다른 연성율 저감효과 비율

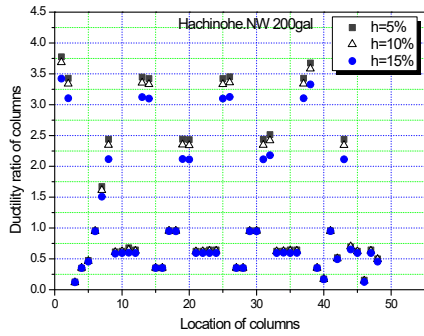
그림. 지진최대 응답 시의 감쇠성능에 따른 연성율 및 연성율 저감효과
(Hachinohe.EW, $A_{max}=0.15G$)



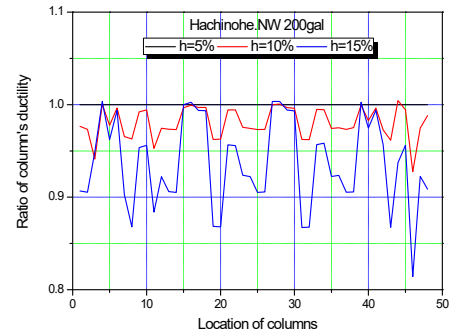
(a) 감쇠성능에 따른 보부재의 연성을 비교



(b) 감쇠성능에 따른 보부재의 다른 연성을 저감효과 비율



(c) 감쇠성능에 따른 기둥부재의 연성을 비교



(d) 감쇠성능에 따른 기둥부재의 다른 연성을 저감효과 비율

그림. 지진최대 응답 시의 감쇠성능에 따른 연성을 및 연성을 저감효과
(Hachinohe.EW, $A_{max}=0.2G$)

- 본 연구에서는 감쇠성능을 고려 할 수 있는 비선형 내진해석용 프로그램을 개발함과 동시에 이를 바탕으로 건축물의 감쇠성능에 따른 비선형지진응답 특성을 분석하였다. 비선형 내진해석용 프로그램은 고감쇠 내진시스템의 내진성능을 약산적이며, 예비적으로 평가가 가능한 1질점계(SDF) 기반 비선형동적해석 및 보다 정밀하게 고감쇠건물의 내진성능을 평가할 수 있는 부재수준의 비선형동적해석이 가능한 프로그램을 구축하였다.

■ 고감쇠 복합 신소재를 활용한 내진성능 개선을 위한 구조부재 개발

－복합 신소재를 활용한 내진성능 개선 구조부재 개발

- 기술이전계약을 체결한 에이엠지그룹(주)의 강관 스프링 제진댐퍼에 대한 기술과 고감쇠 폴리우레탄콘크리트복합체의 제작기술을 융합하여 강재 스프링+고감쇠 폴리우레탄 복합체 제진댐퍼를 제안하였다.
- 강관 브레이스 시스템에 대한 기초성능에 대한 연구는 완료된 상태이며, 폴리우레탄을 이용한 복합재료의 감쇠성능에 대한 실험적 연구 또한 완료된 상태로, 하이브리드 시스템에 대한 검증실험을 실행하였다.

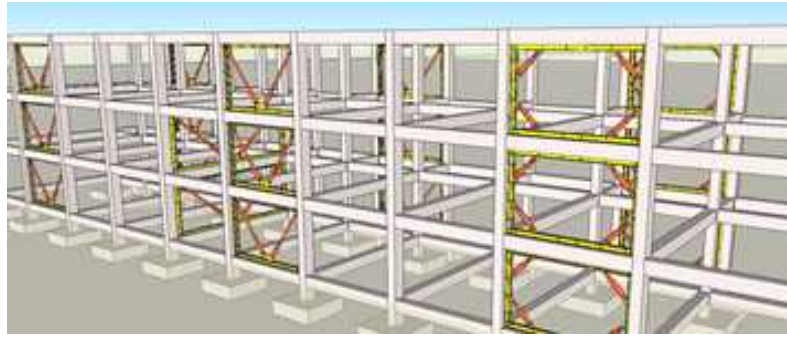


그림. 기존 건물 보강 예시도

－ 재료시험을 통한 제진댐퍼의 성능검증

- 제안한 내진성능 효과를 검증 할 목적으로 실험체는 실제 시공할 때 구조물에 들어가는 실물 크기와 동일하게 제작하였으며, 목표성능에 필요한 변위를 기준으로 반복횟하중을 이용한 구조실험을 수행하였다.
- 그림. 에는 실제 실험에서 사용된 고감쇠 제진댐퍼의 상세를 각각 나타낸다. 고감쇠 제진댐퍼에 사용된 강판의 재질은 SM400으로 양쪽 단부에 쇼트처리하였다. 각 힌지 부에는 $\Phi 30$ 을 적용하였으며, 실험체와 가력프레임은 M24볼트를 이용하여 고정하였다.

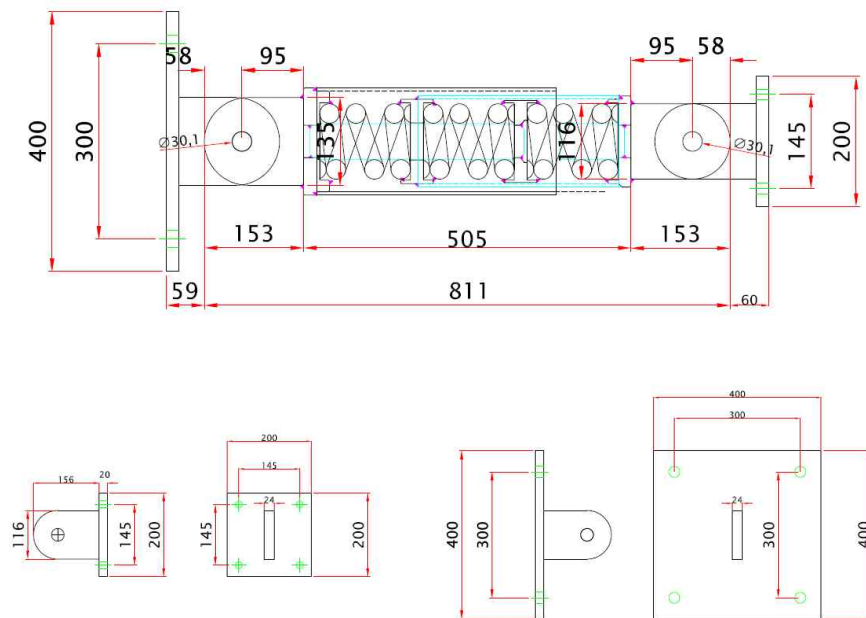


그림. 고감쇠 제진댐퍼 상세

- 바람과 지진 등의 동적하중이 가해질 경우, 철근콘크리트 부재의 거동을 파악하는 것은 기계적, 공간적인 제약 등으로 인해 매우 복잡하고 어렵다. 따라서 구조물의 거동을 파악하기 위해 지금까지 행해졌던 많은 구조해석 모델은 정적실험 결과에 근거하여 수행된 바, 본 실험은 정적하중 상태에서 실험을 수행하였다.

- 실험체에 대한 구조실험은 한양대학교 구조실험동에서 실시되었다. 본 실험에 사용된 실험기기 및 장치를 표. 에 나타내었고, 실험체의 설치 및 측정 장치를 그림에 나타내었다.
- 수평하중은 상부 철물에 설치된 300kN Actuator를 이용하여 변위제어 방식으로 가력하였다.

표. 시험기기 및 장치

개요	입력값	용량	수량
가력장치	Actuator	300kN	1
측정장치	변위측정기(LVDT)	100mm	2
Data 측정장치	Data Logger	TDS630(30ch)	1

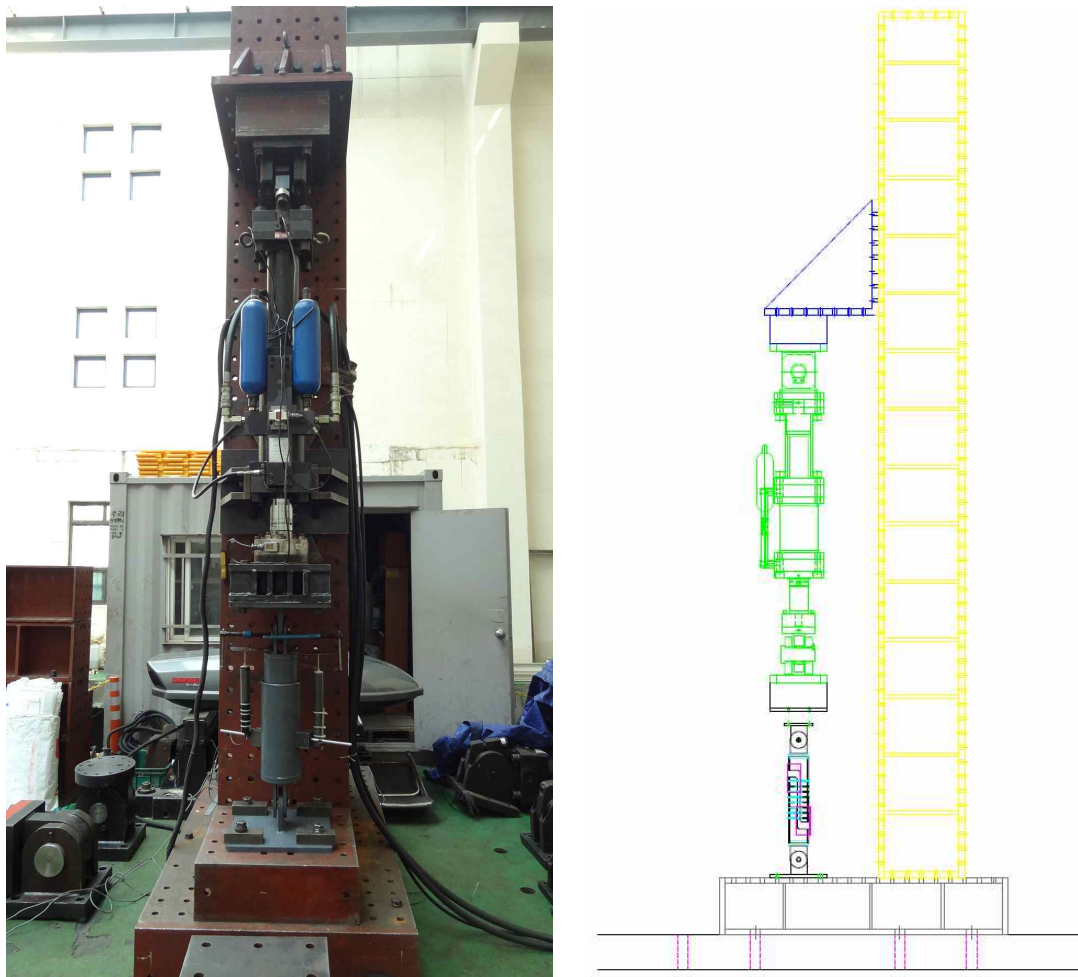


그림. 실험체 설치 및 측정장치 상황

- 실험체에 횡력을 가하는 Actuator의 가력점을 실험체 상부 가력용 철물의 중심에 일치시켰으며, “KBC-2016 제3장 : 감쇠시스템 적용 구조물의 내진설계”에 제시된 제진장치의 시험방법을 참조하여 최대가능 지진수준에서 댐퍼에 발생할 수 있는 변위에 대하여 최소 5회 이상의 반복사이클을 1차 주기의 역수의 진동수로 가력한

다라는 규정에 따라 아래의 표 및 그림과 같이 실험체는 각각 최대 변위 $\pm 20\text{mm}$ 및 $\pm 40\text{mm}$ 의 증간변위로 각각 가력 5회를 실시하였다.

표. 하중 가력계획

사이클	1	2	3	4	5
횡변위 (mm)	20	20	20	20	20
횡변위 (mm)	40	40	40	40	40

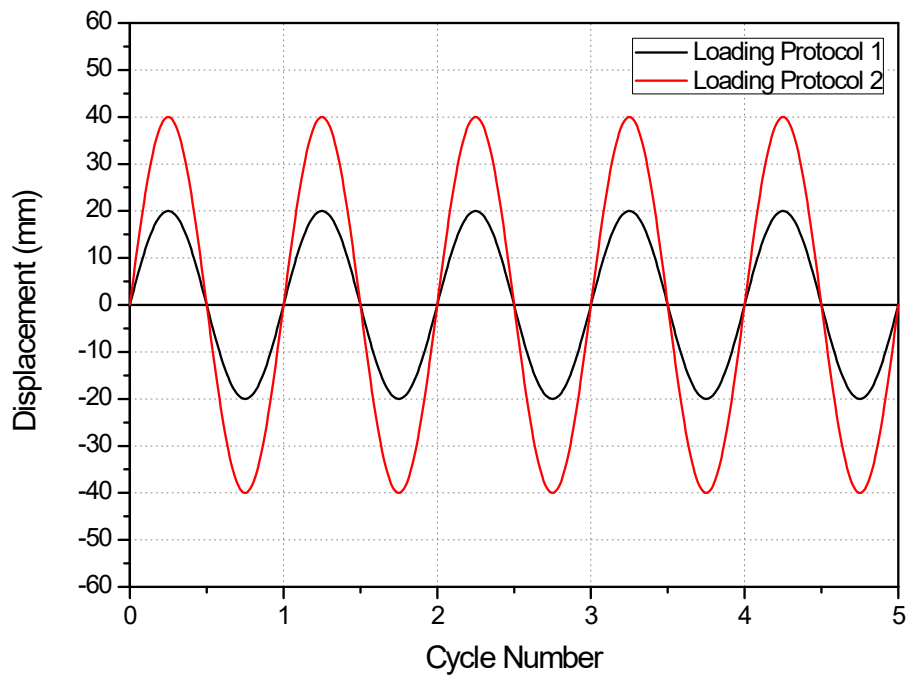


그림. 하중가력 계획도

- 실험체에 대한 정가력 및 부가력에 대한 최대하중 및 최대하중 시의 변위를 각각 비교하여 나타내었으며, 실험체에 대한 항복하중, 항복변위 1차 강성의 비교분석 결과를 아래의 표에 나타내었다.

표. 정가력 및 부가력에 대한 실험 결과

실험체		목표변위 [mm]	정가력		부가력	
			최대하중 V_u [kN]	최대변위 δ_u [mm]	최대하중 V_u [kN]	최대변위 δ_u [mm]
Case1	HS-1	20.0	75.40	20.0	-76.89	-20.0
Case2		40.0	92.97	40.0	-95.08	-40.0

표. 실험체의 항복점 및 이력특성 비교

실험체		항복		강성
		항복하중 V_y [kN]	항복변위 δ_y [mm]	1차 K_1 [kN/mm]
Case1	HS-1	60.87	3.98	22.59

- 앞서 기술한 바와 같이 “KBC-2016 제3장 : 감쇠시스템 적용 구조물의 내진설계”에 제시된 제진장치의 시험 방법을 참고하여 반복가력하였으며, 시험결과를 토대로 KBC-2016에 명시된 제진장치의 성능 적합 조건을 기준으로 제진장치의 성능을 평가하였다.
- 실험체에 대하여 아래의 표에 명시된 변위의존형 제진장치의 성능 적합 조건 만족 여부를 검토하였다. 검토 결과 시료 HS-01은 변위 의존형 제진장치로서 적합한 성능을 보유한 것으로 판단된다. 실험체의 적합성은 최대변위인 40mm를 기준으로 평가하였다.

표. 제진장치의 성능 적합 조건 (KBC-2016)

구분	성능 적합 조건
1	각 사이클별 변위가 0일 때 최대(P_{max}), 최소 하중(P_{min})이 평균 최대, 최소 하중과의 차이가 15% 이하
2	각 사이클별 최대변위일 때 최대, 최소 하중이 평균 최대, 최소 하중과의 차이가 15% 이하
3	각 사이클별 에너지 소산량(E_{loop})이 평균 에너지 소산량과의 차이가 15% 이하

표. 실험체의 제진장치 적합성 평가 (KBC-2016)

구 분	성능 적합 조건						
조건 1	#Cycle	1	2	3	4	5	Average
	P_{max} kN	82.27	82.24	83.14	83.35	82.72	82.74
	P_{min} kN	-76.85	-80.14	-80.67	-80.95	-81.04	-79.93
	$(P_{max}-P_{ave})/P_{ave}$	-0.57	-0.61	0.48	0.73	-0.03	-
	$(P_{min}-P_{ave})/P_{ave}$	-3.85	0.26	0.93	1.28	1.39	-
	결과	적합	적합	적합	적합	적합	-
조건 2	#Cycle	1	2	3	4	5	Average
	P_{max} kN	82.82	90.27	92.15	92.56	92.97	90.15
	P_{min} kN	-93.35	-94.42	-95.08	-94.79	-94.48	
	$(P_{max}-P_{ave})/P_{ave}$	-8.13	0.13	2.21	2.67	3.12	-
	$(P_{min}-P_{ave})/P_{ave}$	-1.14	0.00	0.69	0.39	0.06	-
	판별	적합	적합	적합	적합	적합	-
조건 3	#Cycle	1	2	3	4	5	Average
	E_{loop} (kNmm)	10285.19	10805.77	10915.18	10945.47	10962.96	10782.91
	$(E_{loop}-E_{ave})/E_{ave}$	-4.62	0.21	1.23	1.51	1.67	-
	$(E_{loop}-E_{ave})/E_{ave}$	적합	적합	적합	적합	적합	-

■ 구조실험 및 해석에 의한 구조물 전체의 내진성능 개선 효과 검증

- 고감쇠 폴리우레탄복합체를 적용한 강관 제진댐퍼 모델링

- 점탄성댐퍼의 이력곡선을 그림과 같이 개량 3요소모델로 모델링하였다. K1은 탄소성요소, K2는 탄성요소, C1은 점성요소를 의미한다.
- 본 모델은 하나의 탄소성요소로 표현하는 변형 의존형 수정 Bi-linear와 비교하여 점성요소, 탄성요소를 추가함으로써 시시각각 속도 및 변위가 변화하는 지진파형에 대응하여 정밀하게 모델링하는 것에 뛰어난 특징을 가지고 있다. 구체적으로는 지진동 등의 진폭이 시시각각 변화하는 가진에 대한 가진조건, 초기가진 및 대변형을 경험한 후의 소진폭에 대해 특성의 변화를 고려하여 초기강을 제거한 재료시

험체의 가진실험 결과로 확인이 되었고, 이러한 특성을 고려하여 아래의 식으로의 표현이 가능하다. 또한 개량 3요소모델은 기존의 요소모델에 보다 정확성을 향상시키기 위해 다음의 3가지 사항에 대해서 변경하였다.

- 탄소성요소의 경험 변형 이하의 소진폭에서의 이력곡선의 대응
- 탄성요소에 진동수 의존성을 고려
- 초기 및 미경험 영역 가진시의 응력증가에 대한 대응

$$\tau = \beta_1(\tau_1 + \alpha_1 \cdot \tau_2 + \alpha_2 \cdot \tau_3 + \tau_4)$$

여기서,

τ_1, τ_2, τ_3 : 각각 탄소성요소, 탄성요소, 점성요소의 응력

τ_4 : 초기 및 미경험 영역 가진시의 응력증가를 표현하는 응력

α_1 : 탄성요소의 가진 진동수에 의한 반력의 증가를 표현하는 계수

α_2 : 점성요소의 대변형 경험 후의 특성 변화를 표현하는 계수

β_1 : 온도의 영향을 보정하기 위한 계수

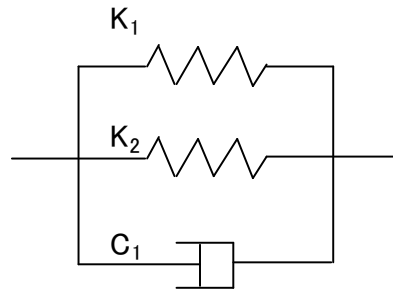


그림. 개량 3요소모델

- 정적가진실험 결과로부터 탄소성요소의 이력특성을 아래의 그림과 같이 설정하였다.
- 골격곡선 : $\tau_1 = G_r \cdot \gamma^\phi$ (N/mm²)
- 여기서, τ =전단응력($\tau=F/S$), γ =초고감쇠고무 전단변형률($\gamma=\delta/t$), F =전단력, S =초고감쇠고무 단면적, t =초고감쇠고무 두께, δ =전단변형
- 골격곡선의 기울기는 변형률 의존이며 $k_s = G_r \cdot \phi \cdot \gamma^{\phi-1}$ 이 된다. 원점 부근에서는 그 기울기가 무한대가되어 정의할 수 없기 때문에 아주 작은 변형인 0.001까지는 선형으로 하였다.

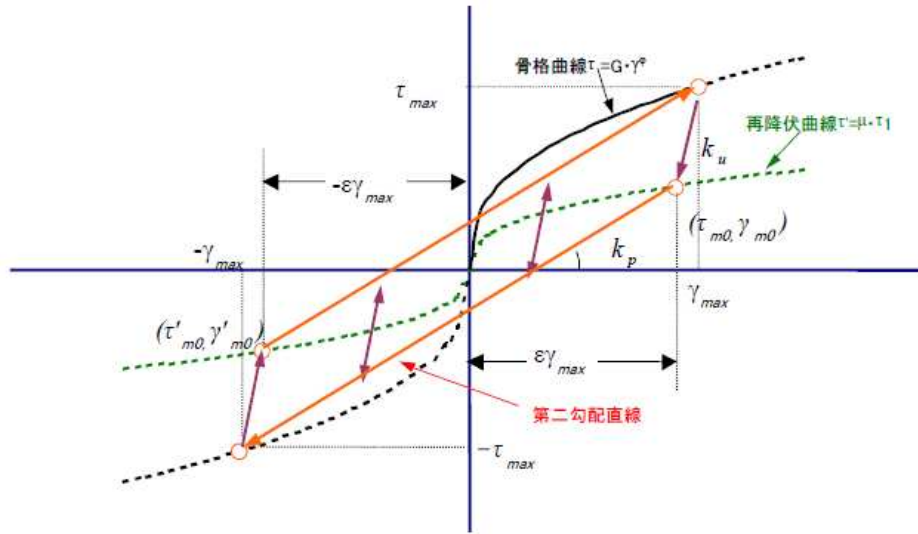


그림. 탄소성요소의 이력

- 하중제거 후의 재항복 곡선은 골격곡선과 비례하도록 설정하였다.
- 재항복 곡선 : $\tau' = \mu \cdot \tau_1 = \mu \cdot G_r \cdot \gamma^\phi$
- 과거의 최대 전단변형률 γ_{max} 를 초과하지 않는 하중제거와 재(再)재하는 그림에 표시한 정상적인 Bi-linear 복원력특성을 그린다.
- 골격곡선에서 하중제거한 점은 최대 전단응력과 최대 전단변형률(τ_{max} , γ_{max})이 된다. 재항복곡선까지 하중제거하면 반대편의 최대점($-\tau_{max}$, $-\gamma_{max}$)을 지향하여 직선 위를 재(再)재하한다. 하중제거 기울기 k_u 와 두번째 기울기 k_p 를 결정하기 위해 그림 5-2에 표시된 하중제거 곡선의 변곡점(τ_{m0} , γ_{m0}) 즉, 최대 항복곡선과 두번째 경사직선의 교차점에서 전단 변형률(γ_{m0})을 다음과 같이 가정한다.
- $\gamma_{m0} = \epsilon \cdot \gamma_{max}$
- 여기서, ϵ 은 다음의 식에 의해 정의된다.

$$\epsilon = \frac{0.94}{1 + 0.01 \cdot \gamma_{max}^{-0.73}}$$

- 교차점(τ_{m0} , γ_{m0})는 재항복곡선상에 있으므로 전단응력(τ_{m0})은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\tau_{m0} = \mu \cdot G_r \cdot \epsilon^\phi \gamma_{max}^\phi = \mu \cdot \epsilon^\phi \tau_{max}$$

- 따라서 하중제거 곡선의 기울기 k_u 와 두번째 기울기 k_p 는 다음과 같이 결정된다.

$$k_u = \frac{\tau_{max} - \tau_{m0}}{\gamma_{max} - \gamma_{m0}} = \frac{1 - \mu \cdot \epsilon^\phi}{1 - \epsilon} \cdot \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}}, \quad k_p = \frac{\tau_{max} + \tau_{m0}}{\gamma_{max} + \gamma_{m0}} = \frac{1 + \mu \cdot \epsilon^\phi}{1 + \epsilon} \cdot \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}}$$

- 정측 교차점(τ_{m0} , γ_{m0})에서 부측의 최대점($-\tau_{max}$, $-\gamma_{max}$)을 향하는 제2구배 직선:

$$\tau = -\tau_{max} + k_p(\gamma + \gamma_{m0}) = \tau_{max} \cdot \left[\frac{1 + \mu \cdot \epsilon^\phi}{(1 + \epsilon) \cdot \gamma_{max}} \cdot \gamma - 1 + \frac{1 + \mu \cdot \epsilon^\phi}{1 + \epsilon} \right]$$

- 부측 교차점(τ'_{m0} , γ'_{m0})에서 정측의 최대점(τ_{max} , γ_{max})을 향하는 제2구배 직선:

$$\tau = \tau_{max} + k_p(\gamma - \gamma_{m0}) = \tau_{max} \cdot \left[\frac{1 + \mu \cdot \epsilon^\phi}{(1 + \epsilon) \cdot \gamma_{max}} \cdot \gamma + 1 - \frac{1 + \mu \cdot \epsilon^\phi}{1 + \epsilon} \right]$$

- 또한, 대변형을 경험한 후의 소진폭에 대해서는 아래의 그림과 같이 경험 최대 변형률에서 얻은 마름모꼴 곡선의 대각선(등가강성)이 같게 되는 얇은꼴의 마름모꼴 곡선 위를 지난다. 또한 그 소진폭의 마름모꼴 곡선에서 경험 최대 변형률의 마름모꼴 곡선까지 변형이 커지는 경우에는 등가강성 위를 추적한다. 또한 경험 최대 변형률을 갱신할 때는 골격곡선을 따른다.

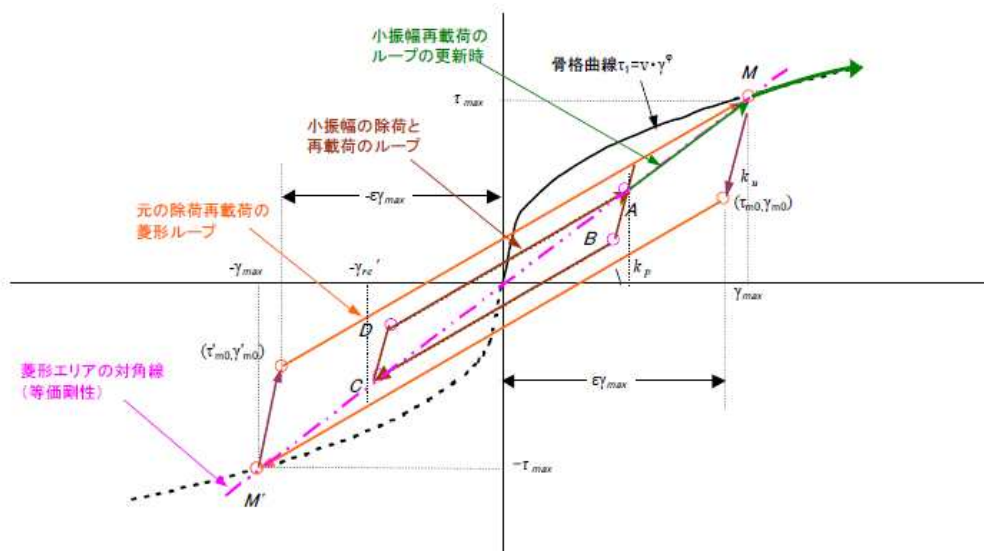


그림. 탄소성요소의 경험변형률 이하에서의 소진폭 이력 규칙

- 진동수 의존성을 고려한 가진실험 결과와의 할선강성의 차이를 진동수의 증가에 따라 부가되는 강성으로 탄성요소를 표현한다. 탄성요소는 실험결과로부터 진동수에 의존하는 것이 확인되었기 때문에 댐퍼설치 전의 건물의 고유진동수를 매개변수로 한 계수(α_1)를 정하고 부가되는 강성을 표현한다. 또한 탄성요소는 경험한 최대 변형률(γ_{max})의 의존성을 표현하고 경험 최대 변형률 이하의 소진폭의 경우 최대 변형시의 강성을 유지하도록 탄성강성을 설정한다.

$$\gamma_{\max} < \gamma_2 : \tau_2 = \xi \cdot \gamma$$

$$\gamma_{\max} \geq \gamma_2 : \tau_2 = \xi \cdot \frac{\gamma}{\gamma_{\max}^{\psi}}$$

- γ_2 는 강성이 변형률에 의존하지 않는 최대 변형률의 한계치로 $\gamma_2=0.005$ 로 한다.
- 정적가진 이외의 가진실험 결과로부터 절편(切片)응력을 구하고, 그 차이를 가진 진동수의 증가로부터 추가되는 응력으로 점성요소를 표현한다. 점성요소의 진동수의 의존성과 변형률 의존성을 변형속도(ν)로 아래의 식과 같이 표현한다.
- 또한, 점탄성댐퍼에 이용한 점탄성체는 대변형을 경험한 후에 반전시의 변형이 동일하더라도 응력의 감소가 확인되었다. 먼저 산출한 탄성요소, 탄성요소는 경험 최대변형에서 얻은 특성으로 그 응력의 감소를 표현하고 있다.
- 한편, 점성요소는 변형률 속도를 이용하여 표현하고 있기 때문에 경험 최대변형과 감소시 진폭비의 함수가 되는 대변형 경험후의 계수(α_2)를 구하는 근사식을 정의하고 그 계수를 사용하여 점성요소의 응력을 조정하였다.

$$\tau_3 = \omega \cdot \nu^{\theta}$$

$$\alpha_2 = A \cdot |\gamma_u / \gamma_{\max}|^B + C$$

- 초기강성을 제거한 제품에서도 초기 및 미경험 영역 가진시의 응력증가가 확인되었다. 그 응력의 증가(부가응력)를 속도 지수형의 점성완충장치로 표현하였다.
- 초기 및 미경험 영역 가진시 : $\tau_4 = \omega_4 \cdot \nu^{\theta_4}$
- 경험 영역 가진시 : $\tau_4 = 0$
- 또한, 이 부가응력은 변형을 새롭게 갱신할 때 발생하지만 경험 최대변형($\gamma_{\max}$)을 초과하면 갑자기 응력이 그 때의 변형속도보다 증가하는 것이 아니라 최대변형($\gamma_{\max}$)에서 $(1+\phi_1)\gamma_{\max}$ 까지의 구간은 정현파 형태로 부가응력을 증가시킨다.

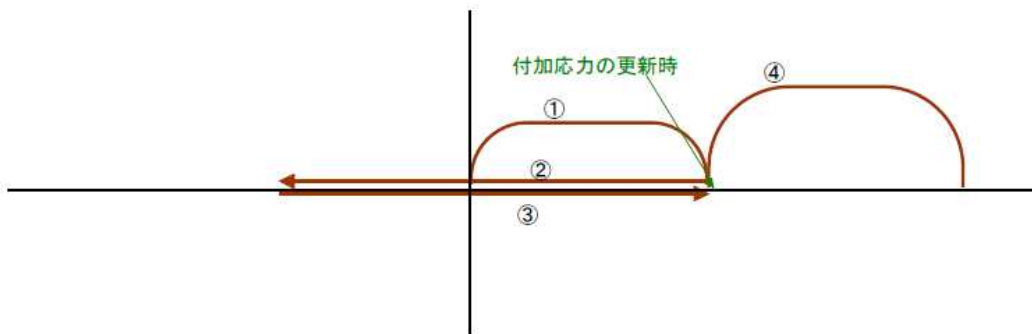


그림. 부가응력 모델 개요도

- 개발된 지진하중 저항시스템의 비선형해석 모델링
 - 대상건물은 1980년대 표준도면에 의한 학교로 El Centro.NS 지진파를 0.2~0.3G

로 표준화하여 적용하였다.

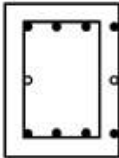
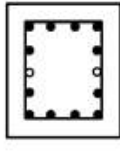
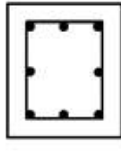
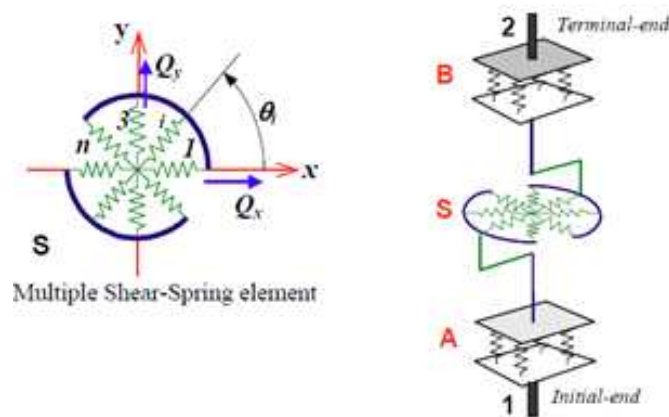
Cross section of columns			
	Type C ₁	Type C ₂	Type C ₃
Cross section			
Dim.	350*500 mm	350*400 mm	350*400 mm
Main bar	• 8-D19 ◦ 2-D16	• 12-D19 ◦ 2-D16	8-D16
Hoop bar	D10-@300	D10-@300	D10-@300

그림. 1980년대 표준도면 수직부재

- 부재 양단부와 중앙부에 비선형 거동을 나타내는 스프링을 갖는 선부재로 모델화하였다. 기둥의 축력 및 휨거동은 부재 양단부에서 가정한 MS(Multi Axial-Spring)모델에 의하여, 전단거동은 기둥 중심에 위치한 전단스프링에 의하여 표현하는 것으로 가정하였다. 또한 보는 전단력에 대하여 탄성거동을 보이는 것으로 가정하였으며, 휨모멘트에 의한 비선형 거동은 부재 양단부의 휨스프링에 의하여 나타내는 것으로 가정하였다. 기둥과 보의 접합부는 Rigid Zone으로 치환하여 나타내었다. 또한 앞서 기술한 고감쇠 댐퍼가 가지는 이력조건을 모델링하기 위해 스프링이 가지는 하중-변위 관계 및 Dash-pot이 가지는 하중-속도 관계 및 각 부재의 단일 스패의 모델링의 개요는 아래의 그림과 같다.



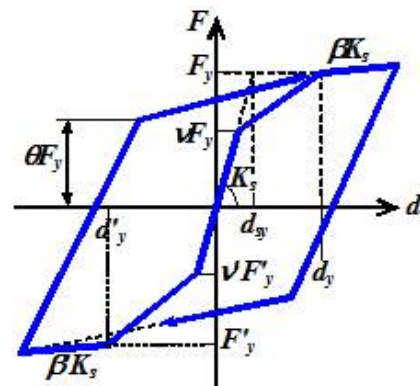
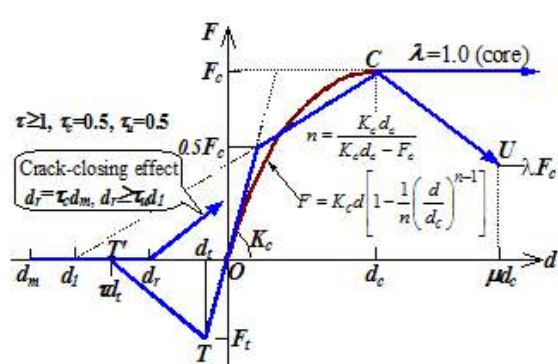


그림. MS(Multi Axial-Spring) 모델

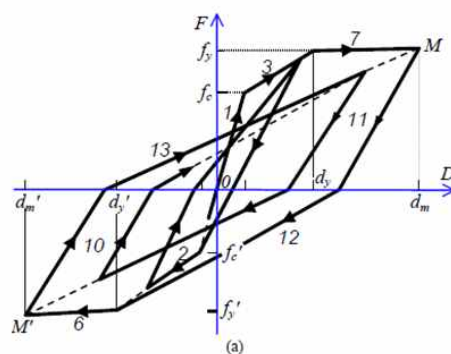
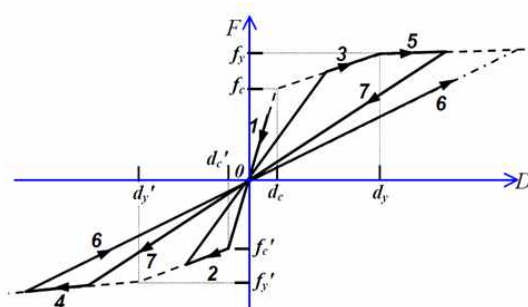


그림. 기둥의 전단력-전단변위 관계

그림. 보의 모멘트-곡률관계

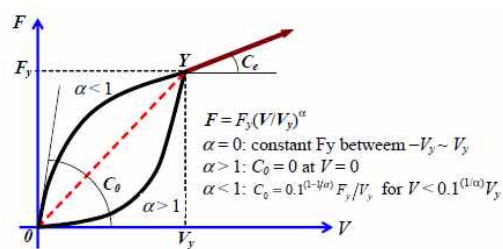
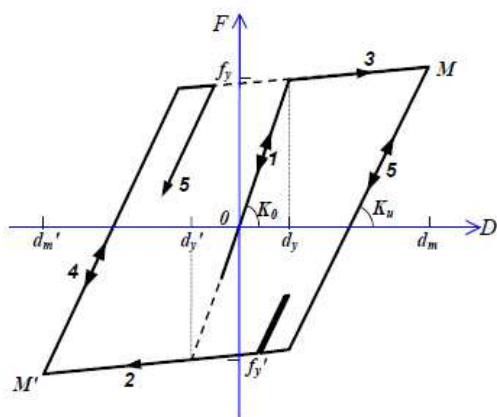


그림. 댐퍼의 탄소성 하중-변위 관계

그림. 댐퍼의 점성 하중-상도속도 관계

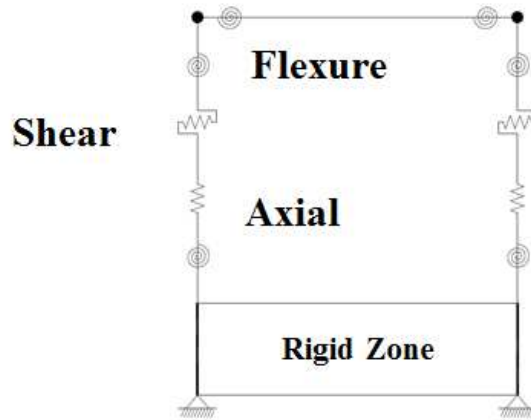


그림. 부재의 모델링 개요

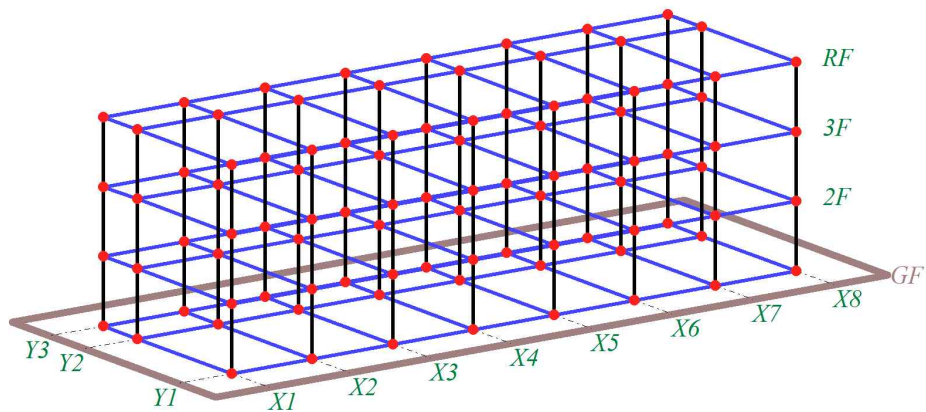


그림. 대상건물 모델링 (무보강)

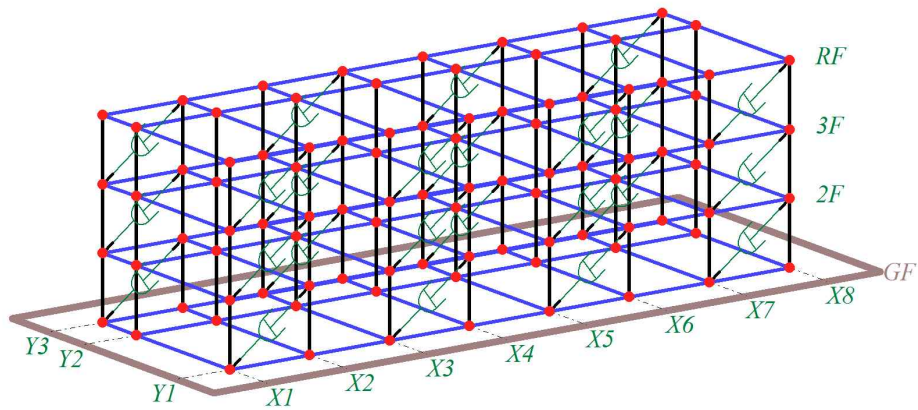


그림. 대상건물 모델링 (기존 체진댐퍼 및 고감쇠 체진댐퍼)

- 해석결과에 의한 건축구조물 전체의 내진성능 개선 효과
 - 상기의 그림에 나타난 모델링에 의한 대상건물의 하중-변위관계를 약축인 장변방향으로 제한하여 아래의 그림에 각각 나타내었다. 표에는 해석결과의 최대내력 및 최대응답변위를 나타내었다.

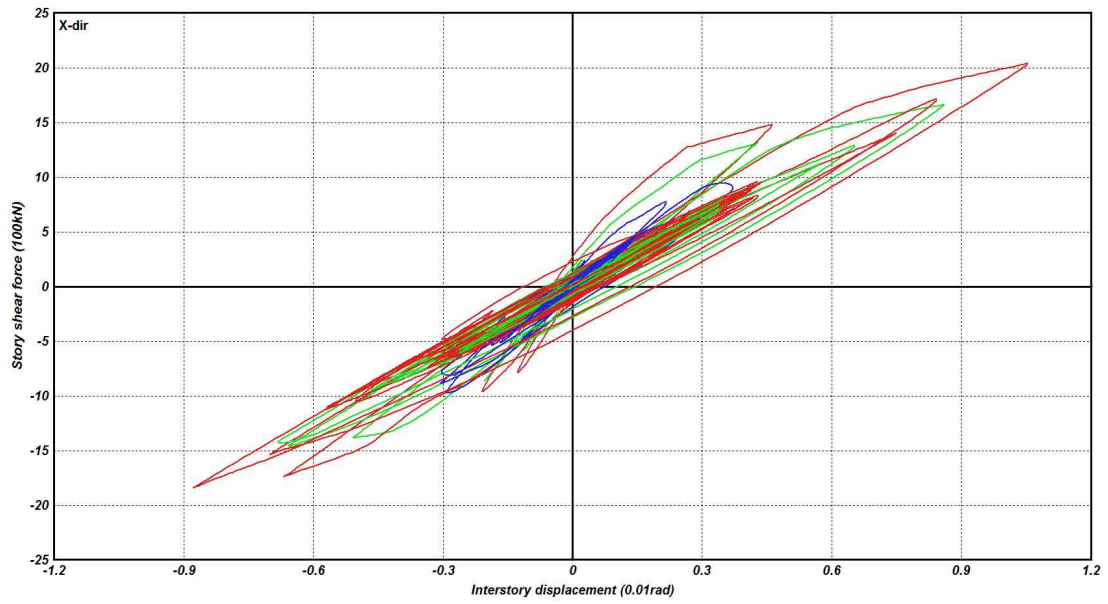


그림. 무보강 건축물 하중-변위 관계 [El centro.NS Amax=0.2G]

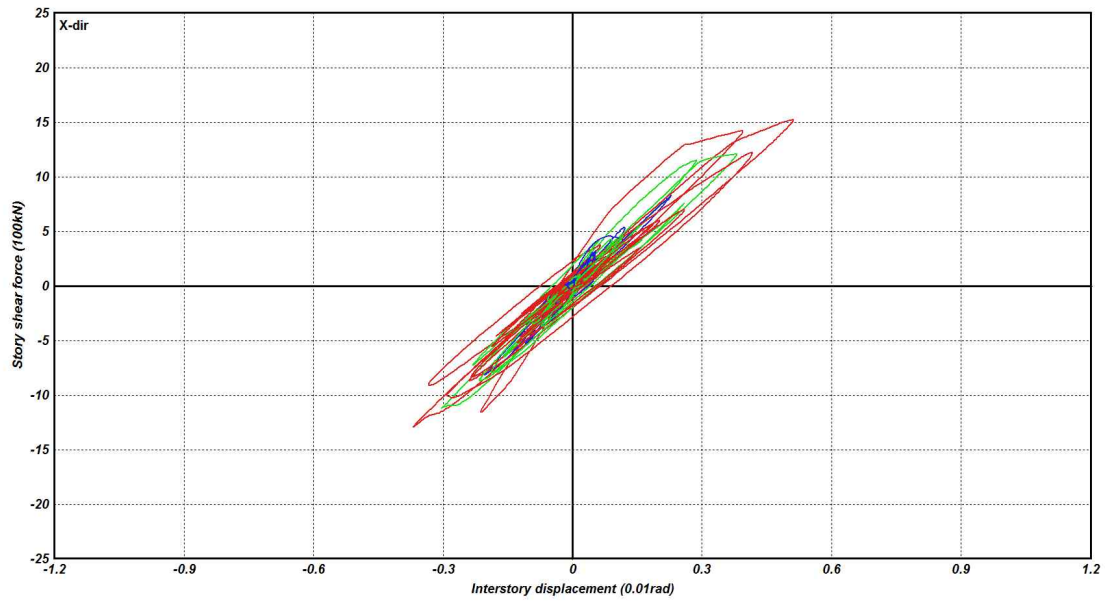


그림. 기존 제진장치를 적용한 건축물 하중-변위 관계 [El centro.NS Amax=0.2G]

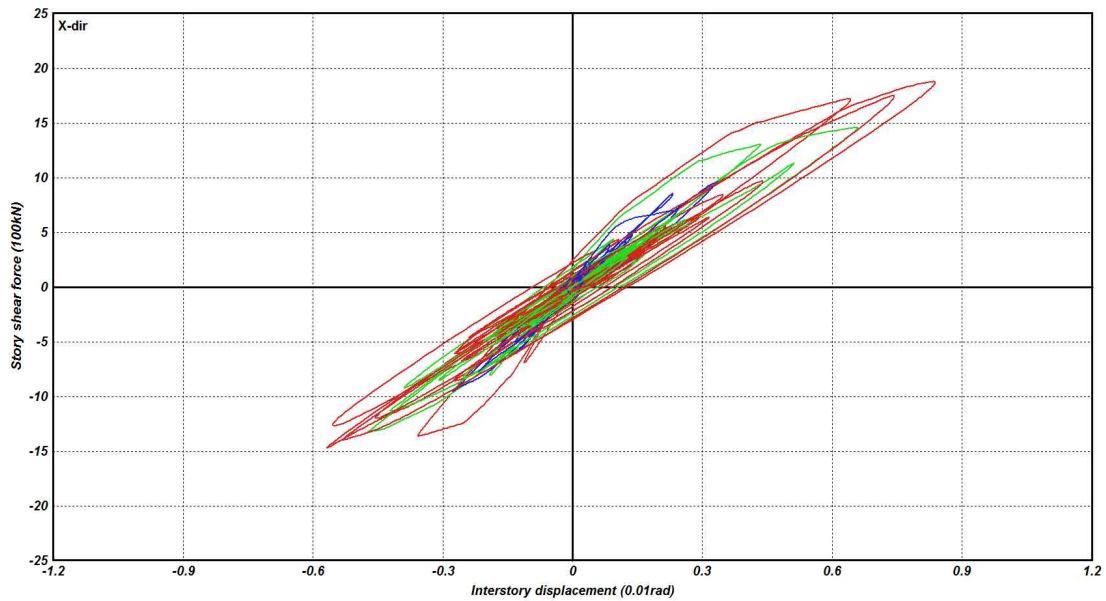


그림. 기존 제진장치를 적용한 건축물 하중-변위 관계 [El centro.NS Amax=0.3G]

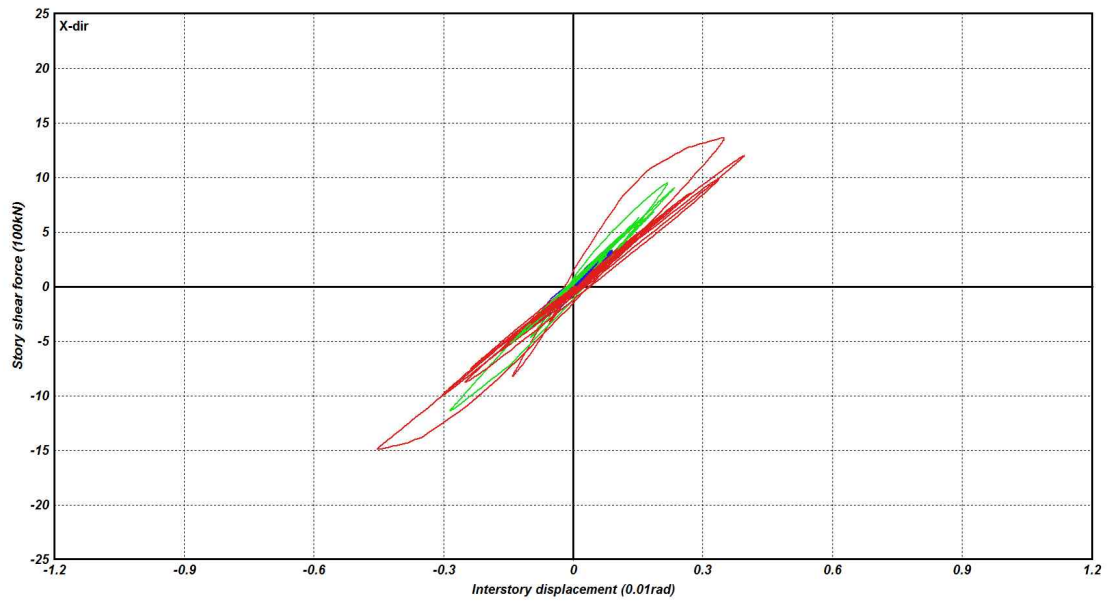


그림. 고감쇠 제진장치를 적용한 건축물 하중-변위 관계 [El centro.NS $A_{max}=0.2G$]

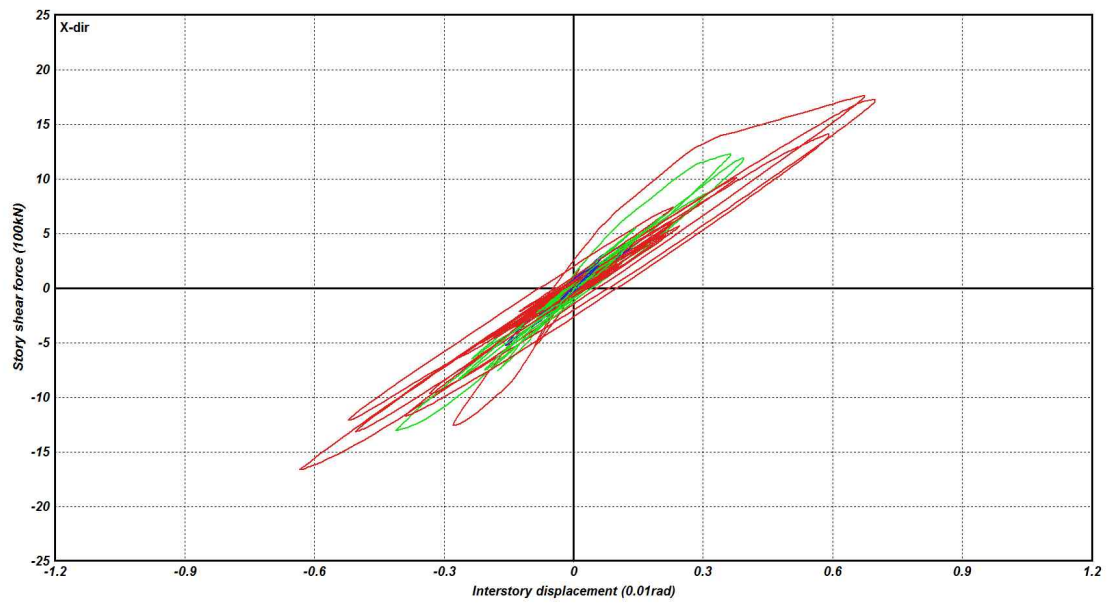


그림. 고감쇠 제진장치를 적용한 건축물 하중-변위 관계 [El centro.NS $A_{max}=0.3G$]

표. 최대내력 및 최대변위

Case	Ground Motions	PGA [Gal]	Maximum Shear Force, V_u [kN]	Maximum Interstory Displacement, Δu [rad] (mm)
No retrofit	El centro [NS]	200	2040.7	0.0105 (34.65)
Existing Damper		200	1524.5	0.0051 (16.83)
		300	1879.4	0.0084 (27.72)
High Damping Damper		200	−1491.8	0.0045 (14.85)
		300	1762.7	0.0006 (19.80)

- 상기의 해석결과를 통해 무보강 건물 대비 보강케이스는 0.2G로 표준화 된 El centro.NS에서 각각 48.6%, 42%로 변위가 억제되었으며, 0.3G에서도 0.2G의 무보강 건물 대비 80%, 57%로 억제되었다.

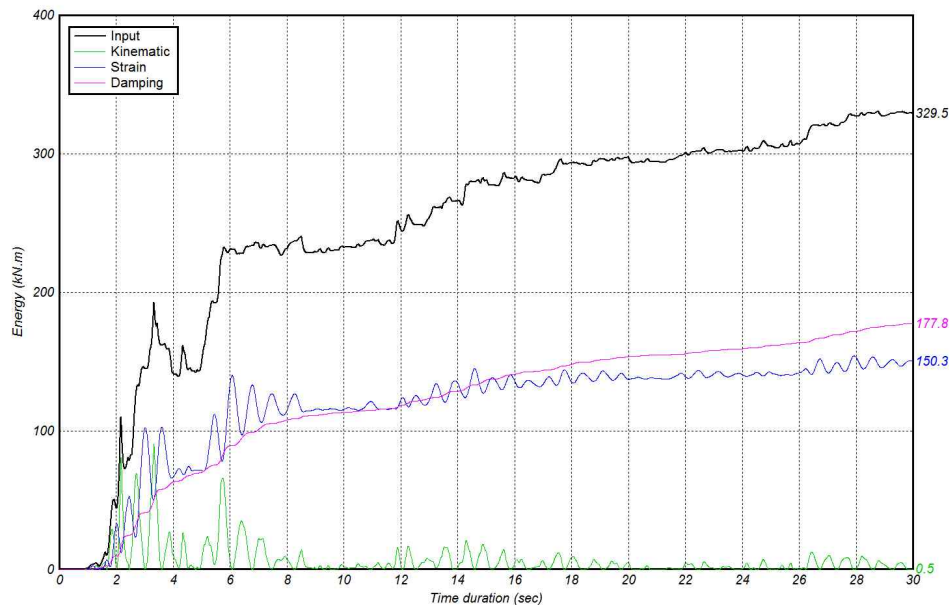


그림. 무보강 건축물 에너지 소산량 분석 [El centro.NS Amax=0.2G]

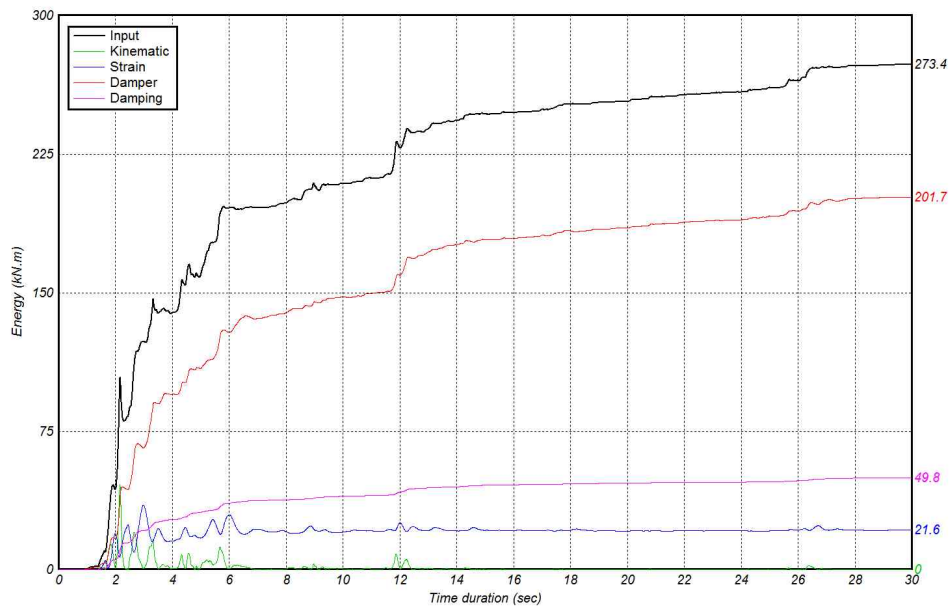


그림. 기존 제진장치를 적용한 건축물 에너지 소산량 분석
[El centro.NS Amax=0.2G]

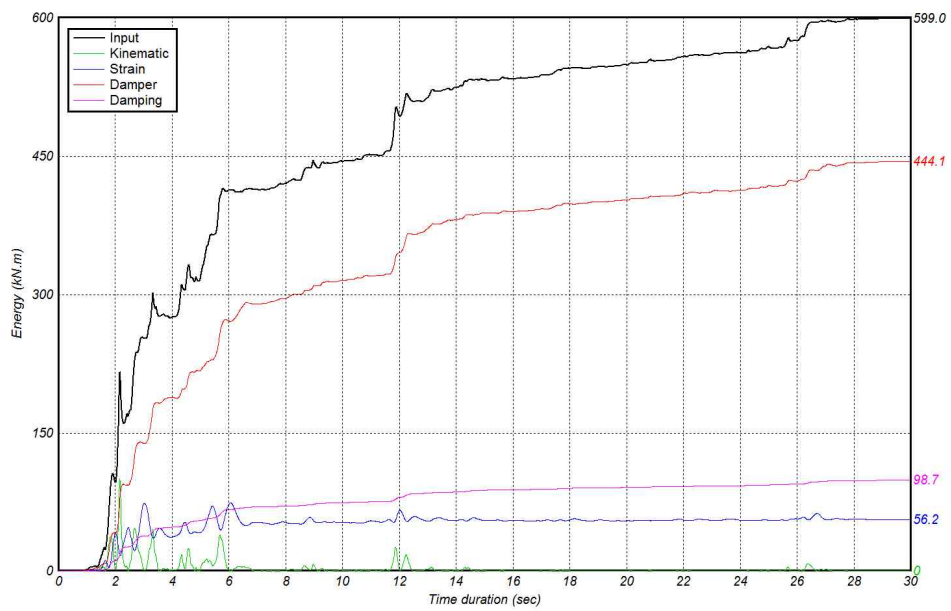


그림. 기존 제진장치를 적용한 건축물 에너지 소산량 분석
[El centro.NS Amax=0.3G]

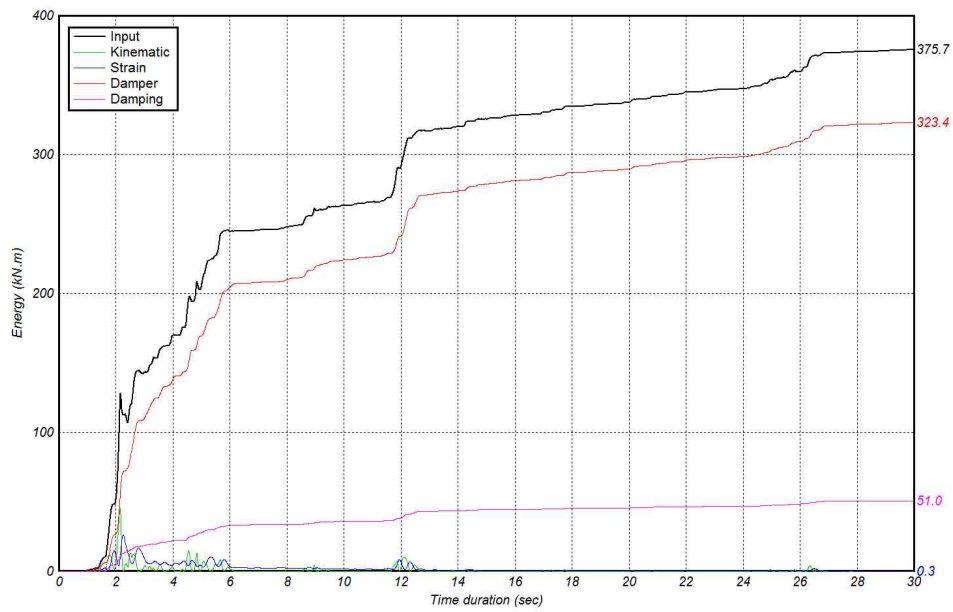


그림. 고감쇠 제진장치를 적용한 건축물 하중-변위 관계
[El centro.NS Amax=0.2G]

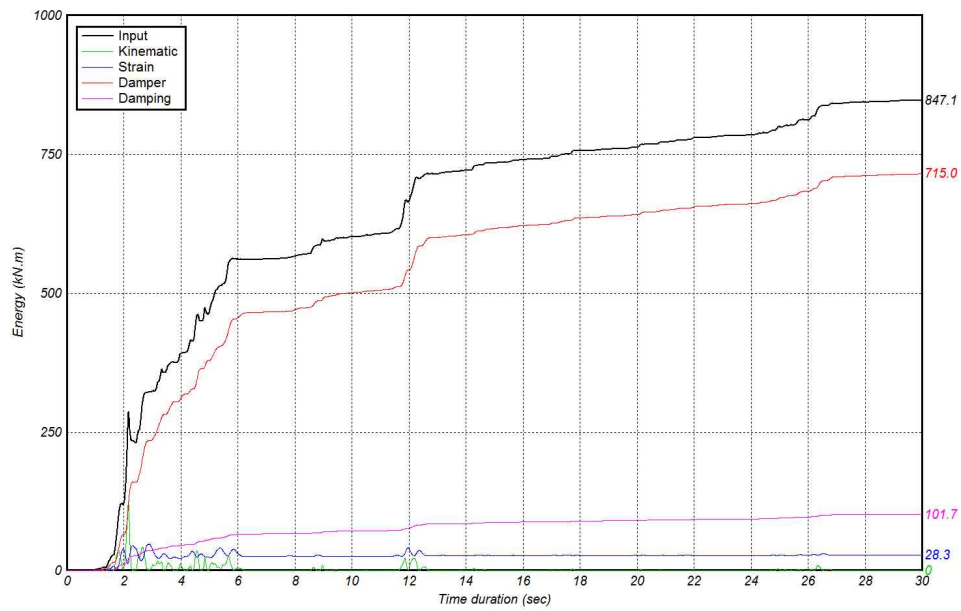


그림. 고감쇠 제진장치를 적용한 건축물 하중-변위 관계
[El centro.NS Amax=0.3G]

표. 전체 에너지 소산량 대비 댐퍼의 에너지 소산비율

Case	Ground Motions	PGA [Gal]	Damper / Input [%]
No retrofit	El centro [NS]	200	—
Existing Damper		200	73.77
		300	74.14
High Damping Damper		200	86.08
		300	84.41

- 각 해석케이스에 따른 건물 전체에 들어오는 입력에너지와 그에 따른 운동에너지, 변형에너지, 감쇠에너지, 댐퍼의 소산에너지로 구분하여 상기의 그림에 나타내었으며, 그 중 댐퍼에 의해 소산된 에너지량을 전체 입력에너지에 대한 %로 표에 나타내었다.
- 본 연구에서 제안한 고감쇠 제진장치를 적용한 해석을 통해 기존 비내진상세를 가지는 골조 대비 동일 지진동에서 42%의 변위가 억제되는 것을 확인하였으며, 지진에 의해 입력되는 전체 에너지의 약 85%를 소산한다는 것을 알 수 있었으며, 기존 제진장치 상대속도가 높아지는 0.3G에서 더욱 변위억제능력이 뛰어난 것이 확인되었다.
- 이러한 해석결과를 통해 고감쇠 제진장치의 내진성능이 확인되었다고 사료된다. 다만 현재 수행된 실험이 재료실험인만큼 실제 골조에 적용되었을 때 같은 효과를 가질 것으로 예단할 수는 없다. 그럼으로 향후 골조실험 및 진동대 실험을 수행하여 그 결과를 평가할 필요가 있을 것으로 사료된다.

4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표 달성도

(1) 질적/양적 성과목표 달성도 (성과점검기준표 및 달성치 (총괄: 1차년~3차년))

	세 세부과제 (공동과제명) (연구목표, 분야)		성과목표		성과지표	성과검증기준				가 중 치	달성 평점 (평점 1~5)
						목표수준		측정 방법	검증 방법		
성과 질적 목표 점검	A	전기방사 기술 기반 등가감쇠 10%급 신재료 및 콘크리트 복합체의 분산성 평가 향상기술	A-1	재료감쇠비 10% 이상의 콘크리트 복합재료	재료감쇠비	15%	18.05 %	감쇠비 측정	최종보 고서	3	5
					압축강도 인장강도	10 MPa 1 MPa	10.04 MPa 2.95 MPa	KS 규격	공인 성적서	1.5	5
					경제성·시공성 평가	순수PU 대비 50% 이상, 기존 기술과 유사	45 % 기존제조 방식과 유사	시공지 침서	결과 보고서	0.5	5
		A-2	Nano-Electros pinning 장비, 공정시스템.	나노섬유매트 크기	100×200mm2 이상	100×200 mm ² 이상	크기측 정	공인 성적서	5	5	
	B	고감쇠 콘크리트 복합체 기반 진동소음 저감시스 템	B-1	중량충격음 저감바타시스 템	법적 바닥충격음레 벨 (dB)	바닥충격음 차단능의 등급기준이내	1-2등급 상향	KS F2810-2	측정결 과 보고서	20	5
					경제성·시공성 평가	기존 기술과 유사 또는 이상	기존기술 이상	시공지 침서	결과 보고서	0.5	5
			B-2	풍진동저감 구조시스템	허용진동가속 도레벨 (gal)	사용성기준 이내	사용성기 준이내확 보	시물레 이션	해석결 과보고 서	25	5
	C	내진성 능 개선을 위한 고감쇠 구조시스 템	C-1	고감쇠 내진구조시스 템	고감쇠 내진해석 SW 신뢰도	내진해석기법	해석 정밀도 확보	시물레 이션	해석결 과보고 서	20	5
					경제성·시공성 평가	기존 기술과 유사 또는 이상	기존기술 이상	시공지 침서	결과 보고서	0.5	5
					설계용 지진가속도 대비 목표성능 (LS, OP)	목표성능 확보	목표성능 LS 이상 확보	실험 및 시물레 이션	측정 및 해석결 과보고 서	25	5
계										20	100
양적 지표 점검	사업연계 지표	목표					목표 건수	달성 건수	달성 율 (%)	가 중 치	달성 평점
		공공적성과	설계기준, 시방서, 지침, 정책제안 작성건수				0	1	100		
		기술적성과	국내 특허 출원 및 등록				8/6	9/3	86		
			국외 특허 출원 및 등록								
			신기술								
			기술이전				0	3	300		
		소프트웨어 등록				3	5	167			
		학술적성과	국내외 학술지 논문 게재 건수(내/외)				10/18	12/17	104		
			국내외 학술회의 발표 건수				14	40	286		
		경제적성과	현장 적용 실적(시제품)				0	11	1100		
			연구개발 관련 홍보건수				0	2	200		
			사업모델				0	1	100		
	기술실시계약										
전문연구인력배출				0	4	400					
종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)										20	100

■ 1차년도 연구성과 목표 및 달성도

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수	
					질적 성과지표		목표치	달성 치	측정방법	검증방 법	기준치		
주관	1	전기방사기술 기반 등가감쇠 10%급 신재료 및 콘크리트 복합체의 분산 성 평가향상 기술	1-1	재료감쇠비 5% 이상의 콘크리트 복합재료	①	재료감쇠비	5 %	18%	감쇠비측정	최종보 고서	2.5	특허: 출원 2(1) 건 등록: 1 건 SQ급 학술지: 1(0) 건 일반학술지: 1(1) 건 학술회의: 3(2) 건 기술이전: 1 건 시제품: 2(0) 건 SW: 1(1) 건	
					②	분산성향 가소프웨어	소프트 웨어	소프트 웨어 개발 및 등록	프로그램	프로그 램	2.5		
		1-2	Nano-Electros pinning 장비, 공정시스템	①	섬유직경	1μm이 하	최소 240 nm	SEM촬영	최종보 고서	5	특허: 출원 1 건 등록: 1 건 SQ급 학술지: 1 건 일반학술지: 1(0) 건 학술회의: 2(1) 건 기술이전: 1 건 시제품: 1(0) 건 SW: 1(0) 건		
	2	고감쇠 콘크리 트 복합체 기 반 진동소음 저감시스템	2-1	중량충격음 저감바닥시스 템	①	소음저감법	저감효 과	저감효 과평가 기술개 발완료	시뮬레이션	해석결 과보고 서	2.5	특허: 출원 1 건 등록: 1 건 SQ급 학술지: 1 건 일반학술지: 1(1) 건 학술회의: 1 건 기술이전: 1 건 시제품: 1 건 SW: 1(1) 건	
			2-2	동진동저감 구조시스템	②	진동저감기법	내진해 석기법	저감효 과평가 기술개 발완료	시뮬레이션	해석결 과보고 서	2.5		
	3	내진성능 개선 을 위한 고감 쇠 구조시스템	3-1	고감쇠 내진구조시스 템	①	고감쇠 내진해석 SW의 신규성	지진응 답저감 효과	고감쇠 내진해 석 알고리 즘 개발완 료	시뮬레이션	해석결 과보고 서	2.5	특허: 출원 1 건 등록: 1 건 SQ급 학술지: 1(0) 건 일반학술지: 1(1) 건 학술회의: 3(0) 건 기술이전: 1 건 시제품: 1 건 SW: 1(0) 건	
					②	지진동저감기 법	저감율 30%이 상	신뢰도 평가기 술개발 완료	시뮬레이션	해석결 과보고 서	2.5		
계												20	특허: 출원 2(1) 건 등록: 1 건 SQ급 학술지: 4(0) 건 일반학술지: 5(5) 건 학술회의: 12(4) 건 기술이전: 1 건 시제품: 3(0) 건 SW: 3(1) 건

■ 2차년도 연구성과 목표 및 달성도

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수	
					질적 성과지표	목표치	달성 치	측정방법	검증방법	가중치		
주관	1	전기방사기술 기반 등가감쇠 10%급 신재료 및 콘크리트 복합체의 분산성 평가향상기술	1-1	재료감쇠비 8% 이상의 콘크리트 복합재료	①	재료감쇠비	8 %	18%	감쇠비측정	최종보고 서	2	특허 : 출원 1(1) 건 등록 1(0) 건 SQ급 학술지 : 1(1) 건 일반학술지 : 2(2) 건 학술회의 : 3(1) 건 기술이전 : 1 건 시제품 : 2(0) 건 SW : 1 건
					②	분산성향 기술	분산성 평가	분산 성평 가함	프로그램	프로그램	1	
					③	압축인장강 도탄성계수	20 MPa	8.0M Pa	KS 규격	공인성적 서	1.5	
					④	시공성 평가	기준 기술과 유사	일반 콘크 리트	시공지침서	결과보고 서	0.5	

						또는 이상	와 유사					
			1-2	Nano-Electrospinning 장비 공정시스템	①	나노섬유매 트크기	100×100mm ² 이상	100×100mm ² 이상	크기측정	공인성적 서	5	특허 : 출원 0(1) 건 등록 : 건 SQ급 학술지 : 0(1) 건 일반학술지 : 1(1) 건 학술회의 : 3(1) 건 기술이전 : 건 시제품 : 1(0) 건 SW : 건
2	고감쇠 콘크리트 복합체 기반 진동소음 저감시스템	2-1	중량충격음 저감바닥시스템	①	소음차단법	저감율 30%이 상	저감 율 30% 이상	실험 및 시뮬레이션	결과보고 서	2.5	특허 : 출원 0(1) 건 등록 : 건 SQ급 학술지 : 0(0) 건 일반학술지 : 0(1) 건 학술회의 : 1(1) 건 기술이전 : 1(0) 건 시제품 : 건 SW : 1(0) 건	
		2-2	풍진동저감 구조시스템	②	진동저감기 법	저감율 30%이 상	저감 율 30% 이상	실험 및 시뮬레이션	해석결과 보고서	2.5	특허 : 출원 건 등록 : 건 SQ급 학술지 : 1(1) 건 일반학술지 : 0(1) 건 학술회의 : 1(1) 건 기술이전 : 건 시제품 : 건 SW : 건	
3	내진성능 개선을 위한 고감쇠 구조시스템	3-1	고감쇠 내진구조시스템	①	고감쇠 내진해석 S/W의 산규성	S/W 1건	S/W 1건	프로그램	프로그램	2.5	특허 : 출원 0(1) 건 등록 : 건 SQ급 학술지 : 1(1) 건 일반학술지 : 0(1) 건 학술회의 : 4(0) 건 기술이전 : 1(0) 건 시제품 : 건 SW : 1(1) 건	
				②	지진동저감 기법	저감율 30%이 상	저감 율 30% 이상	실험 및 시뮬레이션	결과보고 서	2.5	특허 : 출원 0(1) 건 등록 0(1) 건 SQ급 학술지 : 0(1) 건 일반학술지 : 0(1) 건 학술회의 : 6(1) 건 기술이전 : 1(0) 건 시제품 : 건 SW : 건	
계											20	특허 : 출원 1(5) 건 등록 1(1) 건 SQ급 학술지 : 3(5) 건 일반학술지 : 3(7) 건 학술회의 : 18(5) 건 기술이전 : 3(0) 건 시제품 : 3(0) 건 SW : 2(1) 건

■ 3차년도 연구성과 목표 및 달성도

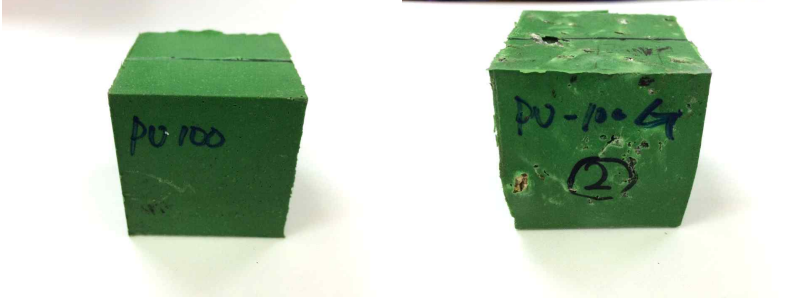
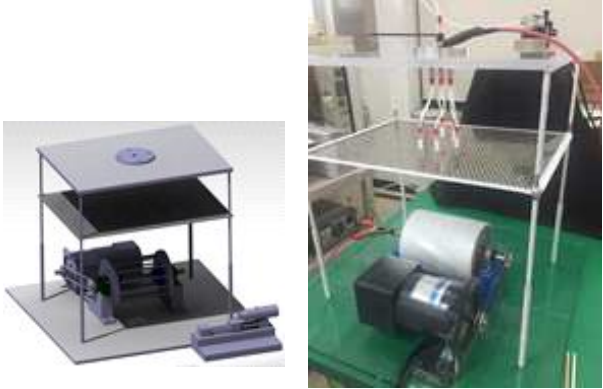
구분	핵심성과 (CTE)		단위성과	성과점검기준						영적 성과 건수	
				질적 성과지표	목표치	달성치	측정방 법	검증방법	기준치		
주관	1	전기방사기술 기반 등가감쇠 10%급 신재료 및 콘크리트 복합체의 분산성 평가향상기술	1-1 재료감쇠비 10% 이상의 콘크리트 복합재료	①	재료감쇠 비	15 %	18.05 %	감쇠비 측정	최종보고 서	3	특허 : 출원 1(0) 건 등록 2(2) 건 SQ급 학술지 : 1(1) 건 일반학술지 : 2(2) 건 학술회의 : 2(1) 건 기술이전 : 건 시제품 : 2(0) 건 SW : 건
				②	압축강도 인장강도	10 MPa, 1 MPa	10.04 MPa 2.95 MPa	KS 규격	공인성적 서	1.5	
				③	경제성· 시공성 평가	순수PU 대비 50% 이상 기존 기술과 유사	45 % 기존제 조방식 과 유사	시공지 침서	결과보고 서	0.5	
		1-2	Nano-Electrospinning 장비, 공정시스템	①	나노섬유 매트크기	100×200 mm2 이상	100×20 0mm2 이상	크기측 정	공인성적 서	5	특허 : 출원 1(0) 건 등록 0(1) 건 SQ급 학술지 : 1(1) 건 일반학술지 : 1(1) 건 학술회의 : 2(0) 건 기술이전 : 건 시제품 : 건 SW : 건
	2	고감쇠 콘크리트 복합체 기반 진동소음	2-1 중량충격음 저감바닥시스템	①	법적 바닥충격 음레벨 (dB)	바닥충격 음 차단성 능 의	1-2등급 상향	KS F2810-2	측정결과 보고서	20	특허 : 출원 2(0) 건 등록 0(1) 건 SQ급 학술지 : 1(1) 건 일반학술지 : 2(0) 건 학술회의 : 0(1) 건 기술이전 : 건

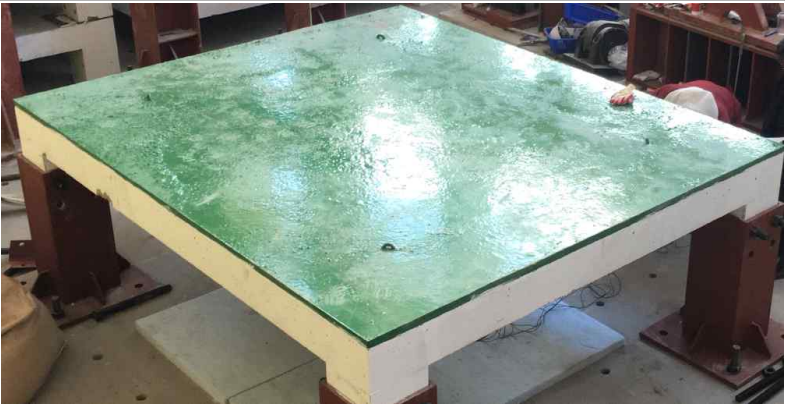
3	저감시스템	2-2	②	경제성 사공성 평가	등급기준 이내 기존 기술과 유사 또는 이상	기존기 술이상	사공지 침서	결과보고 서	0.5	사제품 : 3(0) 건 SW : 0(1) 건	
				허용진동 가속도레 벨 (gal)	사용성기 준 이내	사용성 기준 이내확 보	시물레 이션	해석결과 보고서	25	특허 : 출원 1(1) 건 등록 : 0 건 SQ급 학술지 : 1(1) 건 일반학술지 : 2(1) 건 학술회의 : 0(2) 건 기술이전 : 0 건 사제품 : 0 건 SW : 0 건	
	내진성능 개선을 위한 고감쇠 구조시스템	3-1	고감쇠 내진구조시스템	①	고감쇠 내진해석 SW 신뢰도	내진해석 기법	신뢰성 확보	시물레 이션	해석결과 보고서	20	특허 : 출원 0 건 등록 : 0 건 SQ급 학술지 : 0(0) 건 일반학술지 : 1(1) 건 학술회의 : 3(0) 건 기술이전 : 0 건 사제품 : 0 건 SW : 0 건
				②	경제성 사공성 평가	기존 기술과 유사 또는 이상	기존기 술이상	사공지 침서	결과보고 서	0.5	특허 : 출원 1(1) 건 등록 : 0(1) 건 SQ급 학술지 : 0(1) 건 일반학술지 : 1(1) 건 학술회의 : 3(1) 건 기술이전 : 0 건 사제품 : 0 건 SW : 0 건
				③	설계용 지진가속 도 대비 목표성능 (LS, CP)	목표성능 확보	목표성 능 LS 이내 확보	실험 및 시물레 이션	측정 및 해석결과 보고서	25	특허 : 출원 1(1) 건 등록 : 0(1) 건 SQ급 학술지 : 0(1) 건 일반학술지 : 1(1) 건 학술회의 : 3(1) 건 기술이전 : 0 건 사제품 : 0 건 SW : 0 건
	계								20	특허 : 출원 6(2) 건 등록 : 2(5) 건 SQ급 학술지 : 5(5) 건 일반학술지 : 9(6) 건 학술회의 : 10(5) 건 기술이전 : 0 건 사제품 : 5(0) 건 SW : 0(1) 건	

(2) 정량적 연구성과 목표 및 달성도 (요약)

구분		목표	달성	비고
국외 논문 게재	SCI	10	12	
	비SCI			
	계	10	12	2건 초과달성
국내 논문 게재	SCI			
	비SCI	18	17	
	계	18	17	1건 미달성
특허 출원	국내	8	9	
	국외			
	계	8	9	1건 초과달성
특허 등록	국내	6	3	
	국외			
	계	6	3	3건 미달성
인력 양성	석사	0	4	
	박사			
	계	0	4	4건 초과달성
기술 이전	계약 건수	0	3	3건 초과달성
등록·기탁 대상 성과물	소프트웨어	3	5	2건 초과달성
기타	학술회의	14	40	26건 초과달성
	시제품	0	11	11건 초과달성
	성과 홍보	0	2	2건 초과달성
	사업화모델설계	0	1	1건 초과달성

(3) 시제품 명칭 및 사진

일련번호	명칭	증빙 사진
1	나노전기방사시스템	
2	폴리우레탄 콘크리트	
3	나노PU 콘크리트	
4	다중노즐 전기방사장치	
5	프리플레이트 골재 혼입 고감쇠 폴리우레탄 복합재료	

6	폴리우레탄 코팅 골재 혼입 고감쇠 콘크리트 복합재료	
7	프리플레이트 골재 혼입 고감쇠 폴리우레탄 복합재료로 제조된 보	
8	폴리우레탄으로 코팅된 골재를 혼입한 고감쇠 콘크리트 복합체로 제조된 보	
9	고감쇠 폴리우레탄복합체를 이용한 콘크리트구조슬래브 시스템	
10	폴리우레탄 코팅 골재를 혼입한 콘크리트 복합체를 이용한 콘크리트구조슬래브 시스템	
11	카고메트러스가 설치된 폴리우레탄복합체와 콘크리트구조슬래브 시스템	

(4) 사업화모델(Business Model) 설계

전남대학교 『자산설계 및 BM설계 지원사업』 BM설계 결과보고서 <table border="1"> <tr> <td>기술명</td><td>건축물 층간소음/진동 저감을 위한 폴리우레탄 활용 고감쇠 콘크리트 제조 기술</td></tr> <tr> <td>발명자</td><td>이 방 연 교수</td></tr> </table> SKT PATENT & LAW FIRM 스카이특허법률사무소	기술명	건축물 층간소음/진동 저감을 위한 폴리우레탄 활용 고감쇠 콘크리트 제조 기술	발명자	이 방 연 교수	창의적 자산 고도화 최종보고서(BM설계) 1. 사 업 명 : 자산설계 및 BM설계 지원사업 2. 과 제 기 술 명 : 건축물 층간소음/진동 저감을 위한 폴리우레탄 활용 고감쇠 콘크리트 제조 기술 3. 사 업 비 : 4,950천원(부가세포함) 4. 수 행 기 간 : 2017. 5. 19. ~ 2017. 6. 30. 5. 수 행 기 관 : 스카이특허법률사무소 [주소: 서울시 강남구 봉은사로 116, 5층(역삼동)] 스카이특허법률사무소는 2017년 5월 19일부터 2017년 6월 30일까지 전남대학교 『자산설계 및 BM설계 지원사업』에 참여하여 이를 완료하고 결과보고서를 제출합니다. 붙임 BM설계 결과보고서 1부. 2017. 6. 30. 스카이특허법률사무소 변리사 나 성 곤 (인) 전남대학교 산학협력단장 귀하
기술명	건축물 층간소음/진동 저감을 위한 폴리우레탄 활용 고감쇠 콘크리트 제조 기술				
발명자	이 방 연 교수				

(5) 성과 목표에 대한 자체 평가

성과 목표	자체 평가
재료감쇠비 10 % 이상의 콘크리트 복합재료	1차년과 2차년에 개발된 고감쇠 콘크리트복합재료의 성능을 부재단위에서 평가하기 위하여 개발한 재료로 보(0.2m x 0.1 m x 1.9 m)를 제작함. 또한 일반 콘크리트와 비교하기 위하여 동일 크기를 갖는 콘크리트 보를 제작하였음. 진동실험을 통해 개발한 고감쇠 콘크리트복합체로 제작한 보는 일반 콘크리트 보에 비하여 10 Hz~200 Hz 대역에서 콘크리트보에 비하여 약 10배의 감쇠성능을 나타내는 것을 확인함. 특히 중량충격음에 해당하는 50 Hz 대역에서 개발한 재료로 제작한 보가 일반 콘크리트 보에 비하여 12배에 해당하는 고감쇠 성능을 나타냄. - 개발한 콘크리트복합체의 압축강도는 10.06MPa, 휨인장강도는 2.95MPa를 나타내어 목표로 하는 역학적성능을 모두 만족하였음. 또한 개발한 재료는 감쇠성능에 따라 2가지 방식으로 적용할 수 있으며, 2 가지 방식 모두 순수폴리우레탄 대비 50 % 이상의 경제성을 갖는 것으로 나타남. - 이와 같이 이 연구과제를 통해 개발된 고감쇠 콘크리트복합체는 고감쇠 성능을 갖을 뿐만 아니라 시공방법도 일반 콘크리트와 유사하여 현장타설 뿐만 아니라 프리캐스트 방식의 제조도 가능한 장점을 갖고 있음. - 개발한 재료는 건축, 토목 분야에 다양하게 적용될 수 있을 것으로 판단되며, 도로용 포장재료, 건물용 바닥재, 건물용 외벽재 등 다양하게 적용될 수 있기 때문에 연구과제를 성공적으로 수행했다고 판단됨.
Nano-Electrospinning 장비, 공정시스템	- 다중노즐을 이용한 Nano-Electrospinning 시스템을 설계/제작하고 이를 이용한 전기방사 공정 개발함으로써, 보다 넓은 면적의 고감쇠 플라스틱 나노섬유의 안정적인 생산을 위한 기반을 마련함. - 현재 개발된 Nano-Electrospinning 시스템의 개념을 확대 적용함으로써 향후 보다

	넓은 면적의 전기방사의 구현 및 이를 바탕으로 한 다양한 복합재료의 개발에 적용될 수 있을 것으로 판단함. - 전기방사를 이용하여 제작되는 나노섬유를 포함한 콘크리트 복합재료 등의 직접 생산(in-situ manufacturing) 기술 개발을 위하여 핵심적으로 확보되어야 하는 원천기술의 하나인 다양한 환경(전기적 특성 변화)에서의 전기방사 공정에 대한 기초연구를 수행함. - 대표적으로 유전률의 차이가 존재하는 환경에서 수행되는 전기방사 공정의 경우, 제작되는 나노섬유의 정렬도 차이가 발생하는 것을 확인하였으며 이에 대한 실험적/이론적 연구를 진행하여, 향후 실험실 환경을 벗어난 실제 다양한 환경에서의 전기방사 공정 개발을 위한 기반을 마련함.
중량충격음 저감바닥시스템	고감쇠물질이 가지는 진동저감효과 및 충격차단 효과를 바닥충격음 저감으로 확대 적용하는 기술을 개발하고 이를 mock-up 슬래브 시스템에 대한 실험을 수행하여 그 효과를 검증하였음. 소음저감효과 또한 현재 중량충격음 차음등급을 1-2등급 상향할수 있는 것으로 나타나 설정 목표를 충족한 것으로 나타났으며, 해당연구분야의 적용가능성과 실용화를 견인할 수 있는 연구가 수행된 것으로 판단됨.
풍진동저감 구조시스템	고감쇠물질을 카고메 트러스 구조와 결합하여 벽체형 댐퍼시스템을 개발하고 이를 풍진동저감 구조시스템으로 활용하여 고층구조물의 내풍성능을 개선하는 기법을 제안함. 제안기법의 검증을 위한 엔지니어링 테스트베드 대상으로 고층건물을 설정하고 해당 구조물에 대한 풍동실험을 수행하여 얻어진 동적풍하중에 대한 수치시뮬레이션을 통하여 고감쇠 벽체시스템에 의한 진동가속도가 사용성 기준 이내로 저감됨을 검증함으로써 설정목표를 충족한 것으로 사료됨.
고감쇠 내진구조시스템	고감쇠 폴리우레탄 복합체는 강관댐퍼 시스템과 결합하여 고감쇠 댐퍼시스템을 개발하고 이를 내진보강시스템으로 활용하여 중 저층 구조물의 내진성능을 개선하는 기법을 제안함. 제안기법의 검증을 위해 경주지진 및 포항지진으로 지진피해를 입은 중 저층 건물을 대상으로 설정하고 해당 구조물에 포항지진파를 통한 비선형 동적해석을 통하여 고감쇠 강관댐퍼시스템에 의해 피해규모가 LS 이내를 만족하는 것을 확인함으로써 설정목표를 달성한 것으로 사료됨.

나. 관련 분야 기여도

(1) 핵심연구성과 A (Task A) : 전기방사기술 기반 등가감쇠 10%급 신재료 및 콘크리트 복합체의 분산성 평가·향상기술

- A-1 : 재료감쇠비 10 % 이상의 콘크리트 복합재료 개발 및 부재단위 역학적 성능 평가
 - 다세대 주택이나 아파트와 같은 집단 주거용 구조물 중에 많은 경우가 철근콘크리트 구조물이며, 이러한 구조물을 시공할 때는 설계기준이나 주택법 등에 의해 규정된 기준을 만족하도록 안정성과 사용성 등을 고려하여 시공함. 안전성이나 사용성은 설계기준에 따라 충분한 안전율을 고려하여 구조물을 설계하고 시공하기 때문에 사용

자나 거주자의 불편이 거의 발생하지 않지만, 최근 사회적으로 많은 문제가 되고 있는 층간소음은 사용자나 거주자의 주위 여건에 따라 발생 정도 및 횟수 등이 달라지고 피해자의 신체적 상태나 심리적 상태에 따라 받아들이는 정도가 달라지는 문제가 있음.

- 주택법 제44조 제1항 및 주택법 시행령 제57조 제1항 제 21호에서는 아파트의 층간소음을 아이들이 뛰는 소리, 문을 닫는 소리, 에어컨이 켜는 소리, 늦은 시간이나 이른 시간에 세탁기/청소기/운동기구 등을 사용하는 소리, 화장실과 부엌에서 물을 내리는 소리 등으로 정의하고 있음. 이와 같은 층간소음의 분쟁을 완화하고 피해를 줄이기 위해 환경부 중앙환경분쟁조정위원회는 층간소음 피해 기준을 낮 40데시벨(dB), 밤 30dB 이상으로 정하였고, 주택건설기준 등에 관한 규정에서도 바닥 충격음 차단성능 기준이 강화되고 있는 실정임.
- 일반적으로 슬래브는 하중을 지지하는 콘크리트 슬래브, 단열기능을 하는 경량기포 콘크리트, 마감 모르타르로 이루어지는데, 이와 같은 층간소음의 문제를 해결하고자 기존에는 대부분 콘크리트 슬래브와 경량기포 콘크리트 사이에 추가적인 바닥완충재 또는 차단재(차음재)를 두어 위층에서 발생한 소음이나 진동이 아래층으로 전달되지 않도록 하는 방법을 적용하고 있음.
- 층간소음은 구조체에 가해진 진동에너지가 공기를 통해 소리의 형태로 전파되어 발생하는 것이기 때문에 완충재 또는 차단재(차음재)는 이러한 진동 에너지를 마찰, 열 등과 같은 형태로 소산(dissipation)하는 역할을 하는 것임. 따라서 완충재 또는 차단재(차음재)로 사용되기 위해서는 재료가 높은 감쇠비(damping ratio)를 갖고 있어야 함. 그러나 철근콘크리트의 감쇠비가 5% 이하로 작기 때문에 철근콘크리트 구조만으로 상부에서 가해지는 소음이나 진동이 충분히 차단되지 않기 때문에 바닥완충재 또는 차단재가 필요함. 다만 추가적으로 설치되는 바닥완충재 또는 차단재는 고가이거나 내구성이 떨어지는 단점이 존재하기도 함.
- 이에 층간소음에 의한 분쟁을 완화하고 피해를 줄일 수 있도록 감쇠비가 높으면서 기존 콘크리트와 유사하게 경제성까지 확보된 재료가 개발될 필요성이 존재함. 따라서 콘크리트의 감쇠 성능을 높이기 위한 재료 및 제조 방법을 개발할 필요가 있음.
- 본 개발기술은 진동 및 소음 제어기술에 대한 것으로, 보다 구체적으로는 고감쇠 성능이 필요한 대상 부재 및 구조체에 적용할 수 있도록 고감쇠성능을 확보하면서 동시에 필요한 폴리우레탄 함량을 최소화하여 경제성까지 우수한 폴리우레탄콘크리트 복합체, 그 제조방법 및 콘크리트응용제품에 관한 것임. 일반콘크리트와 기존에 개발된 콘크리트 기반 감쇠재료의 감쇠성능이 1%에서 5% 이내인 반면 이 연구과제를 통해 개발된 고감쇠 콘크리트복합재료는 감쇠비가 10%에서 18%에 달해 기존 재료에 비하여 5배에서 많게는 20배 높은 것으로 나타나 기술적 우수성이 매우 높은 것으로 나타났음. 또한 현장타설, 프리캐스트 등의 제조방식이 가능하여 건축/토목 분야에 용이하게 적용이 가능함. 적용예로는 진동소음 저감을 위한 바닥재, 도로용 포장재료, 건물용 외벽재 등이 있음.

- A-2 : 다중노즐 나노전기방사 기반 나노매트 크기 $100 \times 200 \text{mm}^2$ 이상 개발

- 일반적인 전기방사 공정을 이용하여 나노섬유와 이들로 구성된 나노매트를 제작할 경우, 전기방사 노즐과 집진판의 구성 등에 따라 차이가 있지만 일반적으로 대면적의 나노매트를 제작하기에는 어려움이 있음. 이를 극복하기 위한 대표적인 방법 중 하나는 다수 개의 노즐을 이용하는 다중노즐 전기방사 공정이 있음. 다중노즐 전기방사 공정의 경우 보다 넓은 면적에 나노섬유를 방사할 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 일반적인 전기방사 공정과는 달리 안정적인 나노섬유 제작을 위하여 공정에 이용되는 노즐 사이의 전기장 분포 및 간섭을 함께 고려해 주어야 한다는 어려움이 있음.
- 본 연구에서 설계/개발된 전기방사 공정시스템은 다공성 판을 적용함으로써 플라스틱 용액이 주입되는 다수 개의 노즐을 2차원 상에서 손쉽게 배열하고 그 위치를 조절할 수 있다는 장점을 가지고 있음. 특히 노즐의 배열에 따른 나노섬유 전기방사 특성을 분석하고 평가함으로써 안정적인 전기방사 공정을 위한 적절한 조건을 결정하였음. 이와 같이 확립된 기초 공정조건은 다양한 고감쇠 플라스틱 나노섬유의 나노매트 제작뿐만 아니라 나노섬유가 함유된 다양한 복합재료의 직접 생산/제조에도 효과적으로 활용될 수 있음.
- 플라스틱 나노섬유를 포함하는 콘크리트 복합체와 같은 다양한 복합재료의 직접 생산의 경우, 일반적인 전기방사 공정과는 여러 측면에서의 차이점을 가지고 있음. 특히 높은 전도성을 가지는 금속 집진판으로 나노섬유가 전기방사되는 것이 아니라 골재, 시멘트, 물 등 다양한 물질로 구성된 환경으로의 전기방사가 진행된다는 특징을 가지고 있음. 이와 같은 전기방사 환경의 차이는 제작되는 나노섬유의 특성에도 큰 영향을 주기 때문에, 본 연구에서는 주요한 전기적 특성인 유전률의 차이가 나는 환경에서의 전기방사 공정의 연구와 이를 통한 나노섬유의 정렬도 변화를 밝힐 수 있었음. 이와 같은 기초연구 결과는 2차년도에 수행된 물 집진판 위로의 전기방사 공정인 Wet Nano-Electrospinning 공정과 함께 향후 콘크리트 복합체의 직접 생산의 확립뿐만 아니라 더 나아가 실제 현장에서의 복합체 제조 등을 위한 기반 기술을 확보하였다는 장점을 가짐.

(2) 핵심연구성과 B (Task B): 고감쇠 콘크리트 복합체 기반 진동소음 저감시스템

■ B-1 : 고감쇠 복합재료 기반 바닥시스템 파일럿 테스트 실시 및 기술 최적화

- 뜬 바닥구조를 채택한 현 공동주택 표준 바닥구조시스템은 중량충격음 최저등급인 4등급을 보유한 것으로 인정하고 있음. 중량충격음 저감을 위하여 본 연구에서 개발된 고감쇠물질 적용 바닥슬래브 Mock-up에 대한 바닥충격음 실험결과 하부공간의 음압이 단일평가지수로 6-7dB 저감된 것으로 나타남. 이것은 현 중량충격음 차단기준을 약 1-2 등급 상향시키는 결과로써 기존 바닥구조시스템의 층간소음을 획기적으로 저감할 수 있는 기술임.
- 고감쇠 물질은 구조물에 접합하는 방식 및 구조시스템 내 위치에 따라 감쇠 및 충격 차단효과를 다양하게 구현가능하기 때문에 공동주택 슬래브 뿐만아니라 교량, 장스팬 구조물의 진동저감등에 효과적으로 활용가능하며, 진동소음분야에 확대 적용이 이루어질 것으로 사료됨.

- B-2 : 진동 저감구조시스템 파일럿 테스트 실시 및 기술 최적화

- 구조물의 내풍성능을 개선하기 위해 사용된 기존의 진동제어 시스템은 질량형타입 (AMD, TMD) 또는 선재의 댐퍼시스템이 주종을 이루고 있음. 본 연구에서 개발된 고감쇠 재료 결합 카고메 구조 벽체 댐퍼 시스템은 면재 댐퍼시스템으로 기존 벽체를 대용하여 설치할 수 있고 새로운 댐퍼 시스템이며 특히 조망을 훼손하지 않은 특징을 가져 그 활용성이 클 것으로 예상됨.
- 또한 고층 구조물에 대한 엔지니어링 테스트 베드 수행결과 풍동실험에 의한 풍하중에 대한 진동가속도가 비제어 고층구조물에 비하여 크게 저감되어 사용성능을 충족하는 등 향후 내풍성능확보를 위한 대안으로 활용 가능한 것으로 평가됨.
- 특히 고감쇠 벽체 댐퍼 시스템 의하여 구조물에 구현 되는 비고전감쇠 (non-classical damping)를 효율적으로 해석하기 위하여 본 연구에서 개발된 상태공간 모드 분해기법은 고전 감쇠에 적용되었었던 기존 모드분해기술의 한계를 넘어 비고전 감쇠구조물에도 적용가능한 새로운 알고리즘으로 평가되며, 향후 해당분야 연구에 국내외적으로 선도적인 역할을 할 것으로 사료됨.

(3) 핵심연구성과 C (Task C): 내진성능 개선을 위한 고감쇠 구조시스템

- C: 고감쇠 내진구조부재 파일럿 테스트 실시 및 기술 최적화

- 구조물의 내진성능을 개선하기 위해 사용되는 기존의 내진보강공법은 강도형 보강공법 또는 이력형 강재 댐퍼시스템이 주를 이루고 있음. 본 연구에서 개발된 고감쇠 폴리우레탄 복합체를 적용한 강관 댐퍼시스템은 기존 댐퍼시스템의 주류를 이루는 강재 댐퍼 대비 내화성능, 내구성능, 경량이어 다양한 중·저층 건물에 적용성이 매우 높을 것으로 예상됨.
 - 본 연구에서 개발 된 고감쇠 댐퍼시스템은 1~2차년도에 개발 된 고감쇠 내진구조시스템의 해석기법 및 해석프로그램을 통해서 분석한 결과 비내진설계 된 중·저층 구조물에 비하여 지진응답이 크게 저감되었으며, 경주지진 및 포항지진을 통한 해석에서도 LS수준을 만족하여 향후 지진피해절감에 활용 가능할 것으로 판단됨.
-

5. 연구개발성과의 활용계획

가. 연구개발성과 활용방안

- 본 연구에서 개발될 새로운 건축재료 가공 전기방사 시스템과 나노 가공기술을
- 활용함으로써 다양한 미래건축 융합신소재의 연구/개발에 효과적으로 적용될 수 있는 나노소재·구조를 개발할 수 있음.
- 기존 재료를 이용하여 구현하기 어렵거나 혹은 불가능했던 우수한 성능을 가지 는 새로운 건축재료를 높은 생산성으로 가공할 수 있는 건축용 나노재료 가공의 원천기술을 확보하여, 향후 여러 고부가가치 응용제품군의 발굴 및 이들의 효과적인 구현을 위한 기반을 마련할 수 있음.
- 재료 자체가 가지는 감쇠성능 제어에 의한 자가감쇠 구조시스템에 의해서 사용 성능 (내풍, 내진, 소음성능)을 개선 할 수 있는 건축기술의 혁신을 창출할 수가 있기 때문에 고부가가치 산업으로 연계가 가능함.
- 이상기후에 대비한 성능기반 콘크리트 건물의 내풍 및 내진설계 기술에 활용.
- 콘크리트 구조물의 내구성능 기술 활용 및 리모델링·리노베이션 전문기업, 구조설계 사무소에 연계 기술 활용.
- 높은 내진성능이 요구되는 콘크리트 건물 등에 활용.
- 신개념 내풍 및 내진설계 기준 및 지침 제안서 활용.
- 고효율·저비용 기술로 인한 해외 기술 수출 활용.
- 지진위험도와 기대 성능수준에 따른 정확한 내진설계가 가능하여 건물의 고효율 내진 성능 확보에 활용.

나. 기대효과

(1) 기술적 측면

- 새로운 건축재료 가공 전기방사 시스템과 나노가공기술을 활용함으로써 다양한 미래건축 융합신소재의 연구/개발에 응용가능.
 - 건축 분야에 국한되지 않고 도시 전반의 기반시설물 계획 및 국가 정책 등의 계획 기술 및 실용기술로 활용가능.
 - 보유 나노 원천기술의 융합을 통한 기후변화에 대비한 신개념 건축기술 학제간 연구 분야 확립.
 - 다학제간 첨단융합연구를 기반으로 한 미래건축 융합신소재의 연구개발의 토대 구축.
 - 기후변화 적응형 건축기술 실현을 위한 원천 기술의 확보.
-

- 자가감쇠 핵심기술 보유 및 산학연계기술교류를 통한 확립 및 보급.
- 건축 재료, 구조시스템이 가지고 있는 고유의 자가 감쇠만으로도 구조물의 내진 및 내풍성능을 크게 향상시킴으로써, 구조설계기술의 혁신이 가능해지며, 기존의 면진·제진 시스템을 대체하는 등 새로운 설계 패러다임의 창출이 가능하게 됨.
- 나노 전기방사기술을 활용하게 되면, 감쇠 재료의 표면적 증가에 따라 기존 콘크리트 재료와 부착능력이 증가될 뿐만 아니라 일체성 확보가 가능하며, 부재의 단면손실을 최소화 할 수 있어 재료강도 저하 없이 감쇠비를 증진시킬 수 있는 획기적인 기술 보유.

(2) 경제적·산업적 측면

- Nano-Electrospinning 기술을 활용한 고감쇠 콘크리트 복합 신소재는 폴리우레탄 등 플라스틱 종류를 사용하기 때문에 가격 경쟁이 탁월하여 경제성 확보가 가능함.
- 자가감쇠 구조 시스템 보급을 통한 신개념 친환경 건축 시장의 확대 및 수입 대체효과.
- 저비용으로 건축구조물의 내풍·내진성능 향상이 가능하기 때문에 태풍·지진피해에 따른 경제적 비용 저감가능 함.
- 사회 이슈화된 기존 고가의 층간소음 공법 대비 경제적이며, 효과적으로 층간소음문제 해결이 가능.
- 사회의 지속적인 발전에 필수적으로 요구되는 건축 재료 분야의 미래 나노기술과의 융합을 통한 새로운 시장의 창출 및 관련 산업에서의 국제적 우위 선점.
- 해외 시장 공략을 통한 고유 내풍·내진기술로 진출 가능.
- 개발 요소기술의 산업체 연계 연구 및 기술이전.
- 인명이나 재산피해를 최소화하므로 경제적 손실을 최소화 할 수 있음.
- 내풍·내진·소음 사용성능 향상에 따른 건축구조물 안전에 대한 신뢰성 증가 및 인명과 재산피해의 최소화.

(3) 연구성과 활용 추진전략·방법

- (주)에이엠지그룹 건축사사무소는 주로 시설물유지관리 및 내진보수·보강 기업으로서 공공건축물 내진보강 공법 개발, 시공 기술에 노하우를 갖추고 있으며, 해당 나노 전기방사기술을 활용한 고감쇠 기반 내진성능 개선기술에 대한 기술이전을 수행하였으며, 추후 파일럿 테스트 공동연구와 시공을 통해 연구과제성과를 제품화 및 시공에 직접 참여하고 있음. 포항지진 이후 활발해지는 학교시설 및 공공시설 등의 내진보강사업에 적용할 계획임.

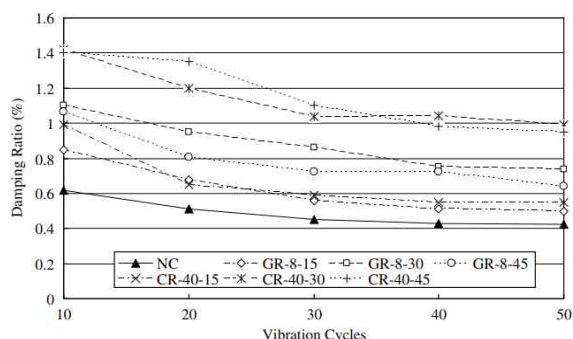
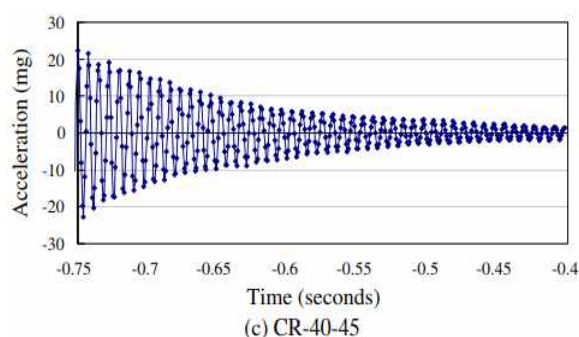
-
- (주)진영코리아는 와이어를 이용한 다양한 제품 생산 및 자동화 설비 제작, 소음, 진동 저감 기술을 확보하고 있으며, 이를 이용한 다양한 국가 개발사업에 참여한 이력을 보유하고 있음. 해당 나노 전기방사기술을 활용한 소음 및 진동 제어 바닥판구조 시스템 기술에 대한 기술이전을 수행하였으며, 연구를 공동으로 진행함과 동시에 기술 최적화를 위하여 파일럿 테스트 공동연구를 진행하였으며, 연구과제성과를 제품화 및 시공에 직접 참여할 계획임. 향후 기술의 상용화, 거래를 촉진하고 제품의 신뢰성을 제고시켜 구매력을 창출을 통하여 시장 진출기반을 조성할 계획임.
 - 건축물 층간소음/진동 저감을 위한 폴리우레탄 활용 고감쇠 콘크리트 제조 기술에 대하여 특허 2건(① 고감쇠 폴리우레탄콘크리트복합체, 그 제조방법 및 콘크리트 응용제품, ② 고감쇠 폴리우레탄복합체, 상기 복합체 제조방법 및 그 응용제품)을 기반으로 특허법령사무소에 의뢰하여 Business Model 수립
 - 본 개발 폴리우레탄 기반 신소재는 폴리머로서 화재취약성이 나타날 수 있으나 콘크리트 구조슬래브와 상부 마감 모르타르와 마감재 사이에 위치하기 때문에 재료 자체의 화재취약성은 구조안전성 문제가 크지 않을 것으로 판단됨.
 - 본 연구성과를 활용하여 아래와 같은 추가적인 연구성과 확장 개발 계획을 수립하였음.
 - 기술 명칭: 건축 소음/진동/지진 제어용 하이브리드 벽체패널시스템
 - 본 기술은 경량이면서 구조에너지 소산능력이 우수한 카고메 트러스와 재료 감쇠비가 15% 이상인 고감쇠 폴리우레탄 매트릭스를 결합하여 건축 구조물의 슬래브 또는 내진벽체에 적용하여 건축 구조물의 소음/진동/지진 제어에 활용함.
 - 하이브리드 형태에 따른 성능 평가
 - Single Type, Layer Type에 따른 감쇠 특성 평가
 - 최적 하이브리드 선정
 - 하이브리드 패널 특허 출원, 사업성 평가, 기술이전
 - 기술 명칭: 강도 및 변형능력을 향상시킨 고감쇠 연결보 시스템
 - 본 기술은 구조에너지 소산능력이 우수한 카고메 트러스와 재료 감쇠비가 15% 이상인 고감쇠 폴리우레탄 매트릭스를 결합하여 배근상세를 획기적으로 개선시킨 고층건물의 병렬 전단벽구조의 연결보 시스템에 확장 개발함.
 - 병렬전단벽의 전단성능 평가
 - 병렬전단벽 특허 출원, 사업성 평가, 기술이전
 - 과제종료 시에는 종료된 날로부터 6개월 이내에 주관연구기관인 전남대와 기술실시계약 1건 이상을 실시할 계획임.
-

6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

가. 고무 및 페타이어 등을 혼입하여 감쇠특성 평가

(1) Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete [국가 : 미국]

- 콘크리트에 혼입하는 고무의 종류를 일반 고무 분말과, 페타이어 조각으로 종류를 달리하여 그에 따른 감쇠특성을 평가하였음
- 콘크리트에 평균 2.62 mm의 크기를 갖는 고무와 약 15 mm ~ 40 mm 크기를 갖는 페타이어 조각을 0 % ~ 45 %까지 각각 혼입량을 달리하여 감쇠특성을 평가하였음
- 일반콘크리트와 비교하여 고무 및 페타이어 조각을 혼입한 경우 감쇠율이 향상되는 것으로 나타났으며, 특히 페타이어 조각을 혼입한 경우 감쇠율을 약 1.7 % 정도까지 향상시킬수 있는 것으로 나타남
- 이 연구 및 기술은 높은 감쇠비를 갖는 복합재료 개발을 위하여 고무 및 페타이어 등을 활용하는 기초자료로서 활용



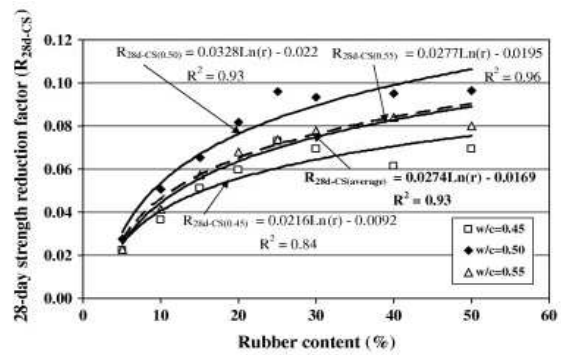
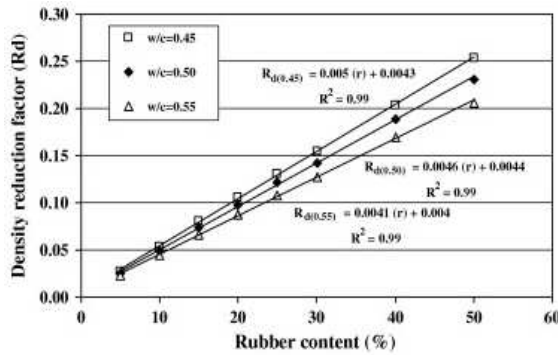
■ 페타이어 혼입 콘크리트의 감쇠 특성 및 각 배합의 감쇠율 비교 ■

나. 고무를 혼입한 콘크리트 복합재료의 역학특성 평가

(1) Prediction of density and compressive strength for rubberized concrete blocks [국가 : 아시아(홍콩)]

- 콘크리트의 잔골재를 고무로 대체하여 역학적 성능을 평가하였음.
- 콘크리트에 약 1 mm ~ 5 mm 크기의 고무를 잔골재의 5 % ~ 50 %까지 대체하여 밀도 및 압축강도 실험을 실시하고 역학적 특성에 대하여 평가하였음
- 고무의 혼입량이 증가함에 따라 밀도 및 압축강도가 감소하는 것으로 나타났고, 잔골재량의 최대 50 %까지 고무로 대체할 경우 밀도는 약 10 % 감소, 압축강도는 약 70 %까지 감소하는 것으로 나타남

- 이 연구 및 기술은 높은 감쇠비를 갖는 복합재료의 압축강도 및 밀도 등의 역학적 성능을 향상시키는 기초자료로서 활용



■ 고무 혼입량과 밀도 감소계수, 고무혼입량과 압축강도 감소계수의 상관 관계 ■

다. 폐타이어를 혼입한 콘크리트 복합재료의 굳기 전 및 굳은 후 특성 평가

(1) Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state [국가 : 유럽 (이탈리아)]

- 폐타이어 고무를 혼입한 콘크리트 복합재료의 굳기 전 특성과 굳은 후 특성을 평가하였음
- 폐타이어를 굵은골재와 잔골재의 부피비로 각각 0 % ~ 75 %까지 대체하여 믹싱 후, 역학적특성을 평가하여 대체 혼입하는 골재의 종류에 따른 역학적특성을 평가함
- 유동특성을 평가하기 위하여 슬럼프 실험을 실시하고, 밀도 실험과, 압축강도, 휨강도 실험을 실시하여 굳은 후 역학적특성을 평가함
- 폐타이어 고무를 혼입하더라도 유동성에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났고, 폐타이어 고무의 혼입량이 증가할수록 밀도는 감소하는 것으로 나타남. 압축강도는 폐타이어 고무를 혼입할 경우 감소하는 것으로 나타났고, 휨강도 역시 폐타이어 고무를 혼입하면 감소하나, 그 감소폭이 압축강도에 비하여 크지 않은 것으로 나타남
- 이 연구 및 기술은 감쇠비가 높은 복합재료의 굳기 전 유동특성 및 휨 실험을 통한 에너지 흡수 능력 등의 역학적특성을 파악하기 위한 기초자료로서 활용



Fig. 6a. Set-up for flexural tests – coarse aggregates replaced by rubber particles.

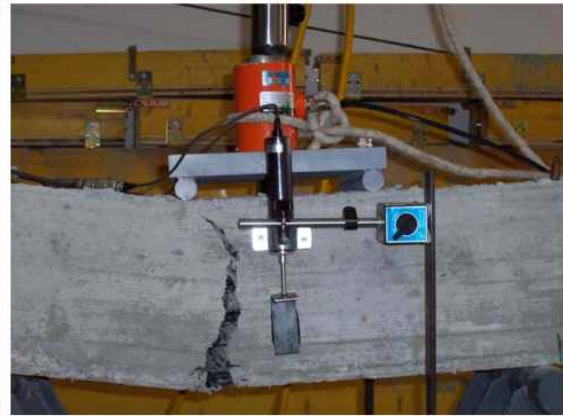


Fig. 9a. RC1 beam after the cracking.

■ 휨강도 test set-up 및 균열 ■

Table 7
Results of compressive tests – coarse aggregates replaced by rubber particles.

No.	Compressive strength ^a (MPa)	COV (%)	St. dev. (MPa)	Decrease (%)
C1	45.80	5.20	±2.38	–
RA1	23.90	12.29	±2.93	47.8
RB1	20.87	12.79	±2.67	54.4
RC1	17.42	12.89	±2.25	61.9

^a Average values of five specimens.

Table 8
Results of compressive tests – fine aggregates replaced by rubber particles.

No.	Compressive strength ^a (MPa)	COV (%)	St. dev. (MPa)	Decrease (%)
C2	27.11	5.78	±1.57	–
RA2	23.97	1.90	±0.46	11.6
RB2	20.41	1.97	±0.40	24.7
RC2	19.45	6.48	±1.26	28.3
RD2	17.06	3.93	±0.67	37.1

^a Average values of five specimens.

■ 압축강도 실험 결과 ■

Table 10
Results of flexural tests – coarse aggregates replaced by rubber particles.

No.	Flexural strength ^a			Decrease (%)
	f_{ct} (MPa)	COV (%)	St. dev. (MPa)	
C1	3.51	10.35	±0.36	–
RA1	2.93	7.67	±0.22	16.6
RB1	2.52	18.22	±0.46	28.2
RC1	2.52	8.73	±0.22	28.2

^a Average values of three specimens.

Table 11
Results of flexural tests – fine aggregates replaced by rubber particles.

No.	Flexural strength ^a			Decrease (%)
	f_{ct} (MPa)	COV (%)	St. dev. (MPa)	
C3	5.34	11.15	±0.60	–
RA3	5.10	4.57	±0.23	4.49
RB3	5.03	6.10	±0.31	5.81
RC3	4.95	9.94	±0.49	7.30

^a Average values of four specimens.

■ 휨강도 실험 결과 ■

라. 고무를 혼입한 콘크리트 복합재료의 구조 성능 평가

(1) Rubberized concrete: A green structural material with enhanced energy-dissipation capability [국가 : 미국]

- 재생고무를 활용하여 친환경적이며, 내진성능을 향상시키기 위하여 재생고무를 혼입한 콘크리트 복합재료의 성능을 평가하였음
- 최대크기 6 mm인 재생고무를 굵은 골재 혼입량의 0 % ~ 20 %까지 대체하여 혼입하고, 기동 실험체와 압축강도 실험체를 제작하여 구조적 재료로서의 성능 및 감쇠 성능을 평가함
- 구조 재료로서의 성능을 평가하기 위하여 자유진동 테스트를 실시하여 감쇠 성능을 평가하고, 지진진동 테이블 테스트를 실시하여 지진 운동에 대한 동적 성능 평가를 실시함
- 재생고무를 혼입한 콘크리트 복합재료가 일반 콘크리트 복합재료보다 감쇠율은 약 62 % 증가하는 것으로 나타났고, 지진 응답 가속도는 약 27 % 감소하는 것으로 나타남.

압축강도는 재생고무 치환율이 20 %일 경우, 일반 콘크리트 대비 약 47 % 감소하는 것으로 나타남.

- 이 연구 및 기술은 높은 감쇠비를 갖는 복합재료의 구조 성능을 검토하는 방법과, 구조 재료로서 활용 여부를 검토하기 위하여 활용

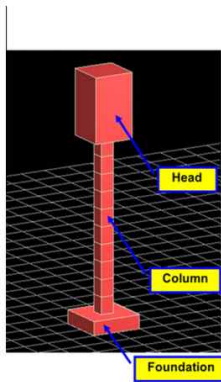


Fig. 2. Concrete column specimen.

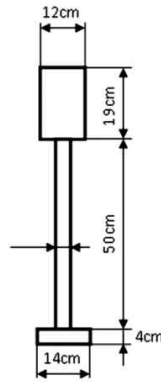
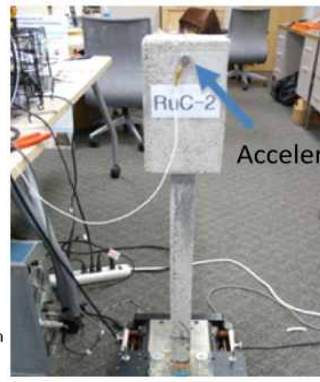


Fig. 6. Free vibration test setup.



Accelerometer



Fig. 10. Seismic shaking table test setup.

■ 실험체 형상 및 test set-up ■

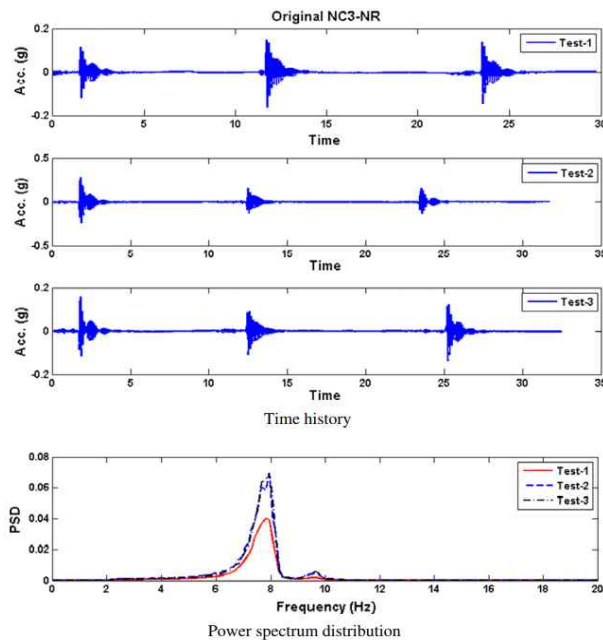


Fig. 7. Free vibration decay time history and PSD for the NC column #3.

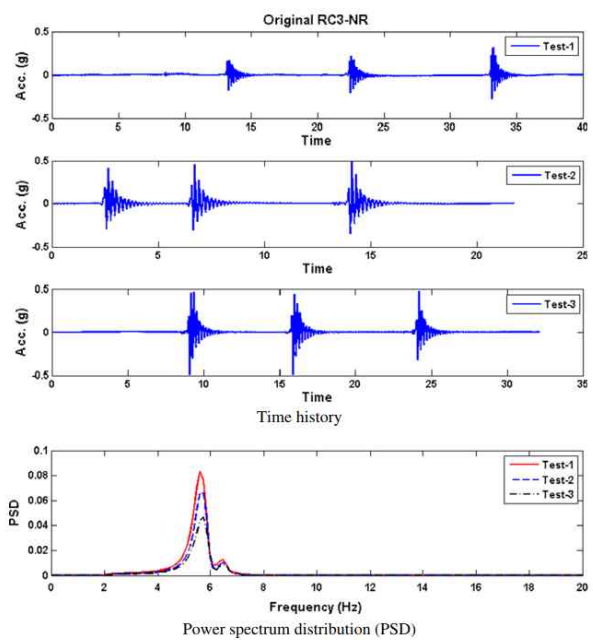
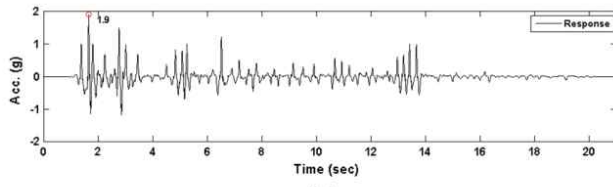
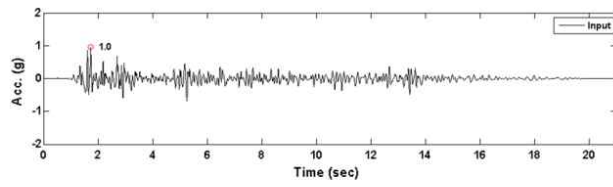
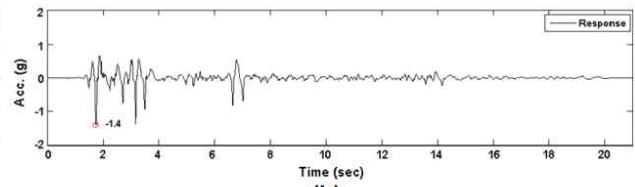
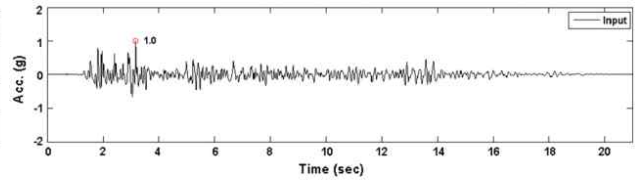


Fig. 8. Free vibration decay time history and PSD for the RC column #3.

■ 자유진동 감쇠 시간이력 및 PSD ■



(a)



(b)

■ 지진 응답 가속도 ■

7. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		√
결정 사유	-	

8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

■ 전남대학교 연구실 안전관리 추진계획도

안전관리추진계획 ⇒	1. 연구활동종사자 안전교육 2. 연구실 정기안전점검 실시 3. 연구실 정밀안전진단 실시 4. 연구실 정기안전점검 및 정밀안전진단 결과에 대한 개선 5. 연구실 안전문화 확산을 위한 사업 등
------------	--

■ 전남대학교 연구실 안전관리 항목

항 목	적 용 범 위	시행기관	비고
연구실 정기 안전점검(년 1회 이상)	- 과학기술분야 모든 연구실	전남대	
연구실 정밀 안전진단(2년 1회 이상)	- 유해물질 및 유해인자 취급 연구실 - 정기점검 결과 추가점검이 필요한 연구실	전남대	
연구실 실내 공기질 관리(매년 실시)	- 측정 및 분석 - 유해화학물질 사용, 유해인자 보유, 정밀진단결과 4등급 연구실	전남대	
연구실 종사자에 대한 안전교육(매학기별 6시간이상)	- 과학기술분야 모든 연구활동종사자	전남대	
연구종사자 건강검진(매년 실시)	- 과학기술분야 연구활동종사자	전남대	
연구활동종사자 안전공제(매년 실시)	- 과학기술분야 연구활동종사자	전남대	

(1) 연구실 정기 안전점검, 정밀안전진단

■ 대상 연구실

- 과학기술분야 모든 연구실
- 연구개발활동에 「화학물질관리법」 제2조제7호에 따른 유해화학물질을 취급하는 연구실
- 연구개발활동에 「산업안전보건법」 제39조에 따른 유해인자를 취급하는 연구실
- 연구개발활동에 과학기술부령이 정하는 독성가스를 취급하는 연구실
 - ※ 위험등급별 환경안전점검을 단계별로 체계화하여 관리, 관리위험등급의 지정
- A등급 : 가연성가스, 인화성 시약, 유해화학물질, 다량의 폐액배출, 독극물, 생물 및 동물, 방사성 동위원소, 위험성이 높은 기계장비가 설치된 실험실
- B 등급 : 일반시약, 소규모 인화성 시약, 불연성가스, 소량의 폐수발생실험실
- C 등급 : 이화학실험을 수행하지 않는 전기, 설계, 컴퓨터 관련 실험실

■ 2017년도 안점점검 및 진단 시행 일정

구 분	안전점검 시행시기	대상 연구실	비 고
정기점검	2017. 4 ~ 6월	광주캠퍼스 해당 연구실	
	2017. 4 ~ 6월	여수캠퍼스 해당 연구실	
정밀진단	2017. 9 ~ 10월	광주캠퍼스 해당 연구실	

	2017. 9 ~ 10월	여수캠퍼스 해당 연구실	
--	---------------	--------------	--

(2) 연구실 공기질 측정

- 실시 일정 및 내용 : 연구실 정기점검 및 정밀진단 실시와 함께 유해물질농도 측정관리, 환기대책수립

(3) 연구실 안전교육

- 교육대상
 - 과학기술분야 연구실에 종사하는 연구활동종사자 전원(대학생, 대학원생, 연구원, 연구보조원, 교수, 조교 등)
 - 연구실(실험·실습실)을 출입하는 자(대학생, 대학원생, 연구원, 연구보조원, 교수, 조교 등) 및 희망하는 창업보육센터 업체의 직원
- 교육 횟수
 - 매학기별 1회 6시간(6차시) 이수를 기본으로 함(총 년 2회-12시간이상)
- 다. 전공특성별 안전교육 실시
 - 연구활동종사자의 교육만족도 향상 및 실질적 안전교육이 될 수 있도록 함
 - 필수 2과목, 선택 4과목, 최종 평가 60점이상 수료

(4) 연구활동종사자 안전공제

- 가입 대상자
 - 과학기술분야 연구실에 종사하는 연구활동종사자 전원(4대보험가입자 제외)
 - 실험·실습실을 출입하여 교육 또는 연구를 수행하는 자(대학생, 대학원생, 연구원, 연구보조원)
- 안전공제 재가입
 - 가입회사명 : 교육시설재난공제회
 - 재가입 년월일 : 2017. 10. 18.
- 보상기준 및 내용

구 분		내 용	비 고
보상기준		- 연구실에서 발생한 사고로 연구활동종사자가 부상·질병 - 신체장해·사망 등 생명 및 신체상의 손해발생시 보상	
보상내 용	사망	1인당 1억원 보상	
	후유장해	1억원을 한도로 후유장해등급별 정액 보상	
	부상	1천만원을 한도로 1인당 상해등급별 정액 및 실손 보상	

(5) 추가 이행 계획

구 분		내 용	비 고
실험실 안전장비 구입		실험실 사고 예방을 위한 안전보호장비와 안전수칙 등 설치	
연구실험실 안전점검시스템 구축		고도화된 안전점검시스템 업데이트 : 자가 일일점검시스템 업데이트 등 시스템 유지 보수	
GHS 안전표식 부착		실험실에 안전 표식 부착	

10. 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	Estimation of Structural Modal Parameters under Winds Using a Virtual Dynamic Shaker	전남대 학교	Jae-Seung , Hwang Dae-Kun, Kwon Ahsan Kareem	ASCE, Journal of Engineering Mechanics	1.116	2018.04	중복	SCI (상위 46.5%)
2	논문	Mode decomposition of structures with closely distributed modes and nonclassical damping	전남대 학교	Jae-Seung , Hwang HongJin, Kim	Structural Control and Health Monitoring	3.622	2018.01	중복	SCI (상위 5.9%)
3	논문	Damping and mechanical properties of composite composed of polyurethane and preplaced aggregates	전남대 학교	이강석, 최정일, 김상구, 이봉기, 황재승, 이방연	Construction and Building Materials	3.485	2017.08	중복	SCI (상위 8.2%)
4	특허	고감쇠 폴리우레탄콘크리트 복합체, 그 제조방법 및 콘크리트 응용제품	전남대 학교	황재승, 이강석, 이봉기, 이방연	대한민국		2018.02	단독	특허등록
5	특허	고감쇠 폴리우레탄콘크리트 복합체, 그 제조방법 및 콘크리트응용제품	전남대 학교	황재승, 이강석, 이봉기, 이방연, 최정일	대한민국		2018.03	단독	특허등록

11. 기타 사항

해당사항 없음.

12. 참고 문헌

- Architectural Institute of Japan, AIJ, (1968). "Report on Damage Due to the 1968 Tokachi-oki Earthquake," Tokyo, Japan (in Japanese).
- Adhikari S., "Structural dynamic analysis with generalized damping models : Analysis, ISTE, John Willy & Sons. 2014.
- Barron, A.R., "Universal approximation bounds for superpositions of a sigmoidal function", IEEE Transactions of Information Theory, Vol.39, No.3, 1993, pp.930~945.
- Berg, G.V. and DaDeppo, D.A., (1960). "Dynamic Analysis of Elastoplastic Structures," Proc. ASCE, Vol. 86, No. EM 2.
- Beucher, S., Lantuéjoul, C., "Use of watershed in contour detection", in International Workshop on Image Processing: Real-time edge and motion detection/estimation. Rennes, France, 1979, pp.17~21.
- Brincker, R., Zhang, L. and Andersen, P., "Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition", Smart Materials and Structures 10 pp. 441-445, 2001.
- David I. G. Jones, "Handbook of viscoelastic vibration damping", John Willy & Sons. 2001.
- Federal Emergency Management Agency, FEMA 356, (2000). "Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings," Washington, DC.
- Federal Emergency Management Agency(FEMA), "FEMA 310 : Handbook for Seismic Evaluation of Buildings - A Prestandard, Washington D.C., 1998, 400pp.
- Gadkari, S. B. (2014), Scaling Analysis of Electrospinning, SpringerPlus, 3(1), 705.
- Gilbertson, M.F., (1966). "Two Non-linear Beams with Definitions of Ductility," Proceedings of ASCE, Vol. 95, No. ST2.
- Gu, J., Wu, G.-h., & Zhao, X. (2007). Preparation and properties of high damping fly ash/epoxy composites. Journal of Functional Materials, 38(5), 764.
- Hecht-Nielsen. R., "Theory of the backpropagation neural network". In Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, Washington, D.C., USA: IEEE, V. I, 1989, pp.593~605.
- Hsiao, H.-Y., Huang, C.-M., Liu, Y.-Y., Kuo, Y.-C., Chen, H. (2012), Effect of Air Blowing on the Morphology and Nanofiber Properties of Blowing-Assisted Electrospun Polycarbonates, Journal of Applied Polymer Science, 124(6), 4904~4914.
- Hwang, E. H., Kim, J. M., & Yeon, J. H. (2013). Characteristics of polyester polymer concrete using spherical aggregates from industrial by-products. Journal of Applied Polymer Science, 129(5), 2905-2912.
- Hwang, J. S., "A Navel Mode Decomposition Method for Non-classical Damping structure Using Acceleration Responses", Journal of the Architectural Institute of Korea, v.31 n.1 2015.
- Hwang, J. S., Lee, S. H., "Characteristics of mode decomposed response in state space using acceleration responses", Journal of the Wind Engineering Institute
-

-
- of Korea, v.19 n.2 2015.
- Japan Building Disaster Prevention Association(JBDPA), "Standard for Evaluation of Seismic Capacity of Existing Reinforced Concrete Buildings," Tokyo, Japan, 2003, 300pp.
- Japan Building Disaster Prevention Association, JBDPA, (2005). "English Version: Standard for Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings, Guidelines for Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings, and Technical Manual for Seismic Evaluation and Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings," Tokyo, Japan.
- Japan Building Disaster Prevention Association, JBDPA, (2001). Standard for Damage Level Classification, Tokyo, Japan (in Japanese).
- Katta, P., Alessandro, M., Ramsier, R. D., Chase, G. G. (2004), Continuous Electrospinning of Aligned Polymer Nanofibers onto a Wire Drum Collector, Nano Letters, 4(11), 2215~2218.
- Kerschen G, Poncelet F. and Golinval J.-C., "Physical interpretation of independent component analysis in structural dynamics", Mechanical Systems and Signal Processing 21, pp. 1561-1575. 2007.
- Lee, K.S. and Shin, S. W. "A New Methodology for Performance-based Seismic Evaluation of Low-rise Reinforced Concrete Buildings Using Nonlinear Required Strengths," Journal of Advanced Concrete Technology, 11, 2013, 151-166.p.
- Lee, K. S., Wi, J. D., Kim, Y. I. and Lee, H. H., "Seismic Safety Evaluation of Korean R/C School Buildings Built in the 1980s," Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 13, No. 5, 2009, pp. 1-11.
- Lee, K.S., (2010). "Seismic Capacity Requirements for Low-rise Reinforced Concrete Buildings Controlled by both Shear and Flexure," Journal of Advanced Concrete Technology, 8(1), 75-91.
- Moody, J.E., and Yarvin, N., "Networks with learned unit response functions", In: Moody, J.E., Hanson, S.J., Lippmann, R.P., editors. Advances in Neural Information Processing Systems 4, Morgan Kaufmann Publishers, 1992, pp.1048 ~ 1055.
- Murakami, M. and Penzien, J., (1975). "Nonlinear Response Spectra for Probabilistic Seismic Design and Damage Assessment of Reinforced Concrete Structures," Report No. EERC 75-38, University of California, Berkeley.
- Nakano, Y., (1986). "Seismic Capacity of Existing Reinforced Concrete Buildings," Proceedings of the Seventh Japan Earthquake Engineering Symposium, 2041-2046.
- Okada, T., (1985). "Seismic Capacity of Existing Reinforced Concrete Buildings and Decision Criteria for Strengthening," Proceedings of the First Workshop on Seismic Performance of Existing Buildings, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York. 86-93.
- Otani, S., (1974). "Inelastic Analysis of RC Frame Structures," Proceedings of ASCE, Vol. 100, No. ST7.
- Ozyurt, N., Woo, L.Y, Mason, T.O., and Shah, S.P, "Monitoring Fiber Dispersion in
-

-
- Fiber-Reinforced Cementitious Materials: Comparison of AC-Impedance Spectroscopy and Image Analysis", *ACI Materials Journal*, Vol.103, No.5, 2006, pp.340 ~ 347.
- Otsu, N.A., "Threshold Selection Method from Gray Level Histogram", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC*, Vol.9, No.1, 1979, pp. 62 ~ 66.
- Poncelet, F., Kerschen, G. and Golinval, J.-C., Verhelst, D., "Output-only modal analysis using blind source separation techniques", *Mechanical Systems and Signal Processing* 21, pp. 2335-2358. 2007.
- Torigoe, S., Horikoshi, T., and Ogawa, A., "Study on evaluation method for PVA fiber distribution in engineered cementitious composite", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.3, 2003, pp. 265 ~ 268.
- Umemura, H., (1973). "Earthquake Resistant Design of Reinforced Concrete Buildings, Accounting for the Dynamic Effects of Earthquakes," Giho-do Publishing Co., Japan (in Japanese).
- Van Overschee, P. and De Moor, B., "Subspace identification for Linear Systems", Kluwer Academic Publishers. 1996.
- Vincent, L., and Soille, P., "Watersheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.13, No.6, 1991, pp.583 ~ 598.
- Vincent, L., "Morphological Grayscale Reconstruction in Image Analysis: Applications and Efficient Algorithms", *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol.2, No.2, 1993, pp.176 ~ 201.
- Wang, M.-f., & Song, X.-y. (2012). Damping property of high damping concrete members [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 11, 038.
- Wang, X., Wang, X., Lin, T. (2012), Electric Field Analysis of Spinneret Design for Needleless Electrospinning of Nanofibers, *Journal of Materials Research*, 27(23), 3013~3019.
- Yang, C., Jia, Z., Liu, J., Xu, Z., Guan, Z., Wang, L. (2009), Guiding Effect of Surface Electric Field of Collector on Deposited Electrospinning Fibers, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 16(3), 785~792.
- Yoon, J. Y., Kim, J. H., Hwang, Y. Y., & Shin, D. K. (2015). Lightweight Concrete Produced Using a Two-Stage Casting Process Materials, 8(4), 1384-1397.
- Zhao, S., Zhou, Q., Long, Y.-Z., Sun, G.-H., Zhang, Y. (2013), Nanofibrous Patterns by Direct Electrospinning of Nanofibers onto Topographically Structured Non-conductive Substrates, *Nanoscale*, 5(11), 4993~5000.
- Zheng, Y., Zeng, Y. (2014) Electric Field Analysis of Spinneret Design for Multihole Electrospinning System, *Journal of Materials Science*, 49(5), 1964~1972.
-

주 의

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

