최종보고서(일반과제용)

보안등급
일반[✔], 보안[ ]

중앙행정기관명	국토교통부	사업명	사업명	국토교통기술촉진연구사업
전문기관명	국토교통과학기술진흥원		내역사업명	
공고번호	공고-제08호	총괄연구개발 식별번호		-
		연구개발과제번호		21CTAP-C153033-03

국가과학기술 표준분류						
	EI1101	50%	EI1105	30%	EI0307	20%

총괄연구개발명	국문	Multi-Physics 및 Data fusion 비파괴기술 기반 기존 철근콘크리트 건축물의 상태평가를 고려한 내진성능평가 실용화 기술 개발
	영문	Development of an innovative seismic performance evaluation method for existing RC buildings considering condition assessment results from Multi-physics and data fusion Non-destructive evaluation methods
연구개발과제명	국문	Multi-Physics 및 Data fusion 비파괴기술 기반 기존 철근콘크리트 건축물의 상태평가를 고려한 내진성능평가 실용화 기술 개발
	영문	Development of an innovative seismic performance evaluation method for existing RC buildings considering condition assessment results from Multi-physics and data fusion Non-destructive evaluation methods

주관연구기관	기관명	한양대학교 에리카산학협력단	사업자등록번호	134-82-10205
	주소	경기도 안산시 상록구 한양대학로 55	법인등록번호	

주관연구책임자	성명		이강석	직위	교수
	연락처	직장전화	031-400-5186	휴대전화	010-7756-0448
		전자우편	ksleenist@hanyang.ac.kr	국가연구자번호	1017 2432

연구개발기간	전체 2019. 04. 01 - 2021. 12. 31(2 년 9 개월)
	1년차 2019. 04. 01 - 2019. 12. 31(9 개월)
	2년차 2020. 01. 01 - 2020. 12. 31(12 개월)
	3년차 2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(12 개월)

연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
				지방자치단체		기타( )					
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	600,000	31,100	279,900	-	-	-	-	631,100	279,900	911,000	-
1년차	134,000	10,000	90,000	-	-	-	-	144,000	90,000	234,000	-
2년차	135,000	10,000	90,000	-	-	-	-	145,000	90,000	235,000	-
3년차	331,000	11,100	99,900	-	-	-	-	342,100	99,900	442,000	-

공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구기관	동아대학교 산학협력단	기성훈	책임급 (조교수)	051-200-7612	shkee@dau.ac.kr		
위탁연구기관							
연구기관 외 기관	(주)에이엠지그룹건축사사무소	정명철	책임급 (대표)	062-528-1993	j12271@nate.com		

연구개발담당자 실무담당자	성명		정재원	직위	원급(박사과정)
	연락처	직장전화	031-400-5186	휴대전화	01095319366
		전자우편	wjdwodnjs48@naver.com	국가연구자번호	1161 6853

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022 년 01 월 13 일

주관연구책임자 : 이 강 석 (직인)

주관연구기관의 장 : 한양대학교 에리카산학협력단 박 태 준 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

본 서식은 「국가연구개발혁신법」 시행('21.01.01) 이전에 최종 협약하여 '21.01.01 이후에 최종평가를 시행하는 일반과제용 입니다.

< 요 약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성

사업명	국토교통기술촉진연구사업			총괄연구개발 식별번호		-
내역사업명				연구개발과제번호		21CTAP-C153033-02
국가과학기술 표준분류	EI1101	50%	EI1105	30%	EI0307	20%
총괄연구개발명	Multi-Physics 및 Data fusion 비파괴기술 기반 기존 철근콘크리트 건축물의 상태평가를 고려한 내진성능평가 실용화 기술 개발					
연구개발과제명	Multi-Physics 및 Data fusion 비파괴기술 기반 기존 철근콘크리트 건축물의 상태평가를 고려한 내진성능평가 실용화 기술 개발					
전체 연구개발기간	2019. 04. 01 - 2021. 12. 31(2 년 9 개월)					
총 연구개발비	총 900,000 천원 (정부지원연구개발비 : 600,000 천원, 기관부담연구개발비 : 300,000 천원, 지방자치단체 : 천원, 그 외 지원금 : 천원)					
연구개발단계	기초[ ] 응용[ ] 개발[✔] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]		기술성숙도		착수시점 기준( ) 종료시점 목표( )	
연구개발과제 유형	지정공모 [✔] 자유공모 [ ]					
연구개발과제 특성	실용화					
연구개발 목표 및 내용	최종 목표	▪ Multi-physics 측정 및 Data fusion 등 비파괴 기술 기반 상태평가 기술을 융합한 기존 철근콘크리트 건축물의 내진성능평가법을 개발				
	전체 내용	▪ 본 연구의 최종목표는 건축구조물의 경년열화에 따른 손상도를 고려한 내진성능을 보다 합리적이며 효율적으로 평가하기 위하여 Multi-physics 측정 및 Data fusion 등 비파괴 기술 기반 상태평가 기술을 융합한 기존 철근콘크리트 건축물의 내진성능평가법을 개발하는 것으로서, 그 유효성을 구조부재 실험을 실시하여 검증함과 동시에 이를 활용한 구조물 전체의 내진성능평가를 위한 기법을 제안하고 평가법의 실효성을 해석적 연구와 테스트 베드를 병행하여 검증하며, 실용화를 위한 평가메뉴얼 및 기술지침서를 개발함.				
	1년차 목표	▪ 상태평가를 고려한 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 실용화 기술 개발				
	1년차 내용	- 기존 RC 건축물의 내진성능 평가 기술 분석 및 핵심기술구축 - RC 부재 복합열화 평가의 최적화를 위한 Multi-physics 비파괴 검사법 개발 - Data fusion 알고리즘 개발을 위한 Multi-physics 비파괴 검사결과 해석 기술 개발				
	2년차 목표	▪ Multi-Physics 비파괴 검사 기술 및 모니터링 기술 개발				
	2년차 내용	- 구조실험을 통한 상태평가 기반 RC 건축물 내진성능평가 기술 개발 - Multi-Physics 비파괴 검사 활용 구조물 성능 평가기술 개발 - Multi-Physics 비파괴 검사 결과의 data fusion 알고리즘 개발				
	3년차 목표	▪ 탐사기법간 통합 Data fusion 알고리즘 개발				
	3년차 내용	- 테스트베드를 통한 Multi-Physics 및 Data fusion 기반 RC 건축물 내진성능평가 기술 실용화 - 테스트베드를 통한 Multi-Physics 비파괴검사 기술 실용화 - 테스트베드를 통한 Data fusion 비파괴 기술 실용화				
연구개발성과						
연구개발성과 활용방안 및 기대효과	- Multi-physics 및 Data fusion 기반 철근콘크리트 건축물의 경년열화에 따른 상태평가 및 내진성능평가를 위한 핵심인자 예측에 관한 글로벌 표준을 확립하고, 관련 분야글로벌 경쟁력확보에 기여함. - 기존 철근콘크리트 건축물의 내구성능에 따른 손상정도 평가기술을 활용함으로써 다양한 연구/개발에 응용 가능함.					
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	-					

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명정보	생물자원		정보	실물

연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호

국문핵심어 (5개 이내)	멀티피직스	데이터퓨전	상태평가	철근콘크리트	내진성능
영문핵심어 (5개 이내)	Multi-physics	Data fusion	Condition Assessment	Reinforced Concrete	Seismic Performance

<요약문>

연구 개발 목표

본 연구의 최종목표는 건축구조물의 경년열화에 따른 손상도를 고려한 내진성능을 보다 합리적이며 효율적으로 평가하기 위하여 Multi-physics 측정 및 Data fusion 비파괴 기술 기반 상태평가 기술을 융합한 기존 RC 건축물의 내진성능평가법을 개발하는 것임. 그 유효성은 구조부재 실험을 실시하여 검증함과 동시에, 이를 활용한 구조물 전체의 내진성능 평가를 위한 기법을 제안하고, 평가법의 실효성을 해석적 연구와 테스트 베드를 병행하여 검증하고자 함. 또한 실용화를 위하여 평가 매뉴얼 및 기술지침서를 개발하고자 함. 결과적으로 이 연구에서는 다음과 같은 세 가지 핵심요소기술을 개발을 목표로 함.

- **제1개발 핵심요소기술** : 상태평가를 고려한 RC 건축물 내진성능평가 실용화 기술 개발
- **제2개발 핵심요소기술** : Multi-Physics 비파괴 검사 기술 및 모니터링 기술 개발
- **제3개발 핵심요소기술** : 탐사기법간 통합 Data fusion 알고리즘 개발

연구 개발 내용

1차년도 (TRL 5단계) : 기반기술 도출 및 구축

- 문헌조사를 통한 기존 RC 건축물 내진성능평가 기술 조사 및 분석
- 기존 RC 건축물 내진성능평가 기술 도출 및 구축
- 문헌조사를 통한 RC 부재 열화 평가를 위한 개별 비파괴검사법 조사
- 복합열화 단계를 평가할 수 있는 개별 비파괴검사법 구성 (하드웨어 및 분석알고리즘)
- 열화단계에 따른 개별 비파괴 검사법 민감도 분석
- 재료의 역학적 특성과 개별 비파괴 검사 인자 상관관계 정립 (실험실 재료실험)

2차년도 (TRL 6단계) : 핵심기술 개발

- RC 부재 (보, 기둥) 가속열화실험과 구조실험을 통한 내진성능평가 기술 도출 및 개선
- 상태평가 기반 융합 내진성능평가 기술 개발
- 콘크리트 재료 물성 (압축강도, 탄성계수) 평가 모델 개발 (GPR, IE, SASW, UPV)
- 철근부식 상태 및 철근-콘크리트 부착상태 평가 모델 개발 (ER, GPR,USW)
- Multi-physics 비파괴 검사 인자 모니터링 (가속열화시험 중인 RC 부재 실험체)
- 개별 비파괴 검사인자의 통계적 특성 분석 (실험결과 및 문헌연구)
- 머신러닝 기법을 활용한 이종데이터 융합 알고리즘 개발 및 실험을 통한 검증

3차년도 (TRL 8단계) : 테스트 베드 실시 및 기술 실용화

- 테스트베드를 활용한 적용 및 피드백을 통한 평가법 정립
- 비선형 정밀해석법 정립
- 비파괴기술 기반 상태평가를 고려한 기존 RC 건축물 내진성능평가 기준(안) 개발
- 테스트베드를 통한 Multi-physics 비파괴기술의 성능평가 및 피드백을 통한 개선
- Multi-physics 비파괴 검사법의 표준매뉴얼 및 상태평가 기준 개발
- 테스트베드를 통한 Data fusion 비파괴기술의 성능평가 및 피드백을 통한 개선
- Data fusion 기법 표준매뉴얼 및 상태평가 기준 개발

연구 개발 성과

<예상되는 연구개발성과 유형>

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
예상성과 (N/Y)	Y	Y	Y			Y					

활용 계획 및 기대 효과

활용 계획

- 새로운 경년열화를 고려한 RC 기존 건축물의 내진성능평가기술을 활용함으로써 노후화 기존 건축물의 내진성능 평가를 효과적으로 수행.
- 기존 RC 건물의 내진성능 평가법으로는 적용이 어렵거나 혹은 불가능하였던, 경년열화의 정량적 평가 및 이를 고려한 통합내진성능평가법 구현을 위한 기반 구축.
- 내진해석 시 경년열화에 따른 성능저감을 고려하여, 구조설계기술의 최적화를 통한 혁신 및 새로운 설계 패러다임 창출.
- 진행 중이거나 이미 발생된 이상대(결함, 열화, 손상)의 원인 및 규모의 정량적 평가.
- Multi-physics 기반 분석자료의 체계적인 DB 구축을 통한 향후 통계분석 및 인공지능기법 등 고급분석 및 의사결정알고리즘 개발에 기본 자료로 활용.
- 첨단 구조물 진단 기술을 학부 및 대학원의 교과과정에 반영하여 석·박사급의 고급인력 양성하고, 타 학문분야와의 연구 교류 촉진.
- Multi-physics 및 Data fusion 비파괴 기술의 확장을 통해 다양한 미래건축의 안전관리에 효과적 적용.
- 일반 건축/토목 구조물의 내부 복합열화 평가의 효율성 및 결과의 정밀도 향상을 위한 기술 지원.
- Multi-physics 및 Data fusion을 활용한 진단 시스템 (장비, 소프트웨어) 구축 및 상태평가

결과를 활용한 구조물 내진성능평가 전문가 양성으로 관련 분야 발전 견인.

기대 효과

- Multi-physics 및 Data fusion 기반 RC 건축물의 경년열화에 따른 상태평가 및 내진성능평가를 위한 핵심인자 예측에 관한 글로벌 표준을 확립하고, 관련 분야글로벌 경쟁력확보에 기여.
- 기존 RC 건축물의 내구성능에 따른 손상정도 평가기술을 활용함으로써 다양한 연구/개발에 응용 가능함.
- 학술적 연구 기반을 구축하고 우수한 인력을 양성함으로써 RC 건축물의 비파괴 진단 기술을 세계적 수준으로 향상 시킬 수 있게 되며, 개발 기술을 타 학술분야에 적용함으로써 진단-유지관리 업무의 최적화 실현.
- 해외의 우수한 대학 및 연구소와의 국제 협력 사업을 통하여 콘크리트 구조물 진단 기술을 공동개발 하고 첨단의 정보를 공유함으로서 세계 수준의 구조물 진단 시스템 연구 및 개발의 선단에 설 수 있게 됨.
- 저비용으로 건축구조물의 경년열화에 따른 성능저감 평가가 가능하기 때문에 기존 안전성 평가방법에 비해 경제적 비용을 획기적으로 절감.
- 첨단 진단 및 해석 기술의 정립에 따른, RC 건축물의 상태에 따른 선별적 유지관리 계획 수립을 통한 보수/보강 업무의 최적화 및 사회적 비용의 획기적인 절감.
- 국외적으로도 독창성이 있는 연구로서 향후 국내외 내진설계분야에서 부가가치를 창출할 수 있을 것으로 기대.
- 제품 판매, 설치, 교육, 유지관리, 진단 및 해석 업무 수행을 포함한 새로운 비즈니스 모델 구축을 통한 관련 산업 부흥에 기여.
- 복합열화인자에 따른 RC 구조물 경년열화 평가 및 상태평가 결과를 고려한 구조물 내진성능평가 기술의 국산화를 통한 글로벌 경쟁력 확보 및 관련 기술의 해외시장 수출에 따른 기술선도국으로서의 지위 확보.
- 사회 이슈화된 기존 노후화 건축물의 내진성능의 평가를 저비용, 고효율로 평가가 가능하기 때문에 사회적 이슈가 되는 노후화 건축물 해결이 가능.
- 노후화 된 공공·민간시설의 경제적인 최적공법 채택으로 내진보강사업 활성화.
- 안전을 최우선으로 하는 정부의 정책방향 지원.
- 공공시설의 맞춤형 최적 내진보강 가이드라인 개발을 통한 내진보강 및 내진보강공법 개발 활성화를 통한 지진재난에 대한 사회적 대비수준 향상.

국문핵심어 (5개 이내)	멀티피직스	데이터퓨전	상태평가	철근콘크리트	내진성능

〈 Summary 〉

Purpose

The primary objectives of this study is to develop an innovative seismic performance evaluation methodology for old/existing buildings considering the condition assessment results from Multi-physics and Data-fusion non-destructive evaluation methods, which will improve rationality and reliability of structural performance evaluation results. For the purposes, this study includes following three main tasks;

- **Task 1:** Development of a practical technique for seismic performance evaluation of reinforced concrete (RC) buildings considering the results of condition assessment of structures
- **Task 2:** Development of a Multi-Physics Non-destructive evaluation (NDE) and monitoring technology
- **Task 3:** Development of data fusion algorithm of Multi-physics NDE sensors

Contents

Year 1 (TRL Level 5) : Deriving and building basic technology

- Investigation and analysis of conventional seismic performance evaluation methods for RC buildings seismic (literature reviews)
- Development of an innovative seismic performance evaluation technology for existing RC buildings
- Investigation of NDE methods for condition assessment of RC member (literature review)
- Configuration of NDE methods for evaluation of concrete deterioration from multi-physics sources (hardwares and analysis algorithms)
- Sensitivity Analysis of NDE methods with the severity of deterioration
- Establishment of the relationship between the mechanical properties of materials and the individual NDE parameters (laboratory material experiments)

Year 2 (TRL Level6) : Developing core technology

- Identification and improvement of seismic performance evaluation technology through accelerated deterioration test and structural loading tests of RC members (beams and columns)
- Development of seismic performance evaluation technology in conjuction with condition assessment
- Development of measurement model for evaluating concrete material properties (compressive strength, elastic modulus) [GPR, IE, SASW, UPV]
- Development of measurement model of steel corrosion condition and reinforcing steel – concrete adhesion condition [ER, GPR, USW]
- Monitoring of Multi-physics non-destructive test parameters during the accelerated deterioration test of RC members
- Statistical characterization of individual NDE parameters
- Development of heterogeneous data convergence algorithm using machine learning technique and verification through comparison with experimental results

Year 3 (TRL Level 8) : Developing practical technology

- Development of evaluation method by application to test bed and improvement through feedback
- Establishment of nonlinear precision analysis method
- Development of existing RC building seismic performance evaluation standard (draft) considering nondestructive technology based condition evaluation
- Performance evaluation of the multi-physics NDE method through test bed and improvement through feedback
- Development of standard manual and condition evaluation criteria for Multi-physics non-destructive testing
- Improvement of the Multi-physics and Data fusion NDE method through feedback
- Development of a standard manual and a condition evaluation standard for the Multi-physics and Data fusion NDE method

Development results

<Classification of development results>

	Journal paper	Patent	Report	Equipment	Technical note	Software	compound	Bio resources		New variety	
								Bio-information	Bio resources	Information	Product
Results (N/Y)	Y	Y	Y			Y					

<table>
<tr><td>Expected Contribution</td><td colspan="5">

Plan for application

- [Technology] The integrated seismic performance evaluation method eases to evaluate the seismic performance of existing building considering the quantitative aging deterioration that is difficult or impossible to achieve by the conventional seismic performance evaluation method
- [DB construction] Systematic DB of high quality fundamental data for advanced analysis and decision algorithm using statistical analysis and artificial intelligence techniques
- [Application to smart maintenance strategy] Multi-physics and Data fusion-based NDE technology can be expanded to the safety management of various future buildings
- [Education] Fostering high-level manpower of master's and doctoral level by reflecting structural diagnosis techniques utilizing advanced measurement and analysis technology into undergraduate and graduate curriculum and promoting research exchange with other disciplines
- [New Business model] Establishment of diagnostic system (equipment, software) using multi-physics and data fusion and development of relevant seismic performance by training expert of seismic performance evaluation of structure using result of condition evaluation

Benefit

- [Industry and Business] Establishes global standards for the condition assessment and seismic performance of RC buildings based on multi-physics and data fusion, and contributes to securing global competitiveness in related fields
- [Academia] By establishing academic research foundation and cultivating excellent manpower, non-destructive diagnosis technology of RC building can be improved to world-class level, and optimization of diagnosis-maintenance work is realized by applying development technology to other academic fields.
- [International collaboration] By jointly developing concrete structure diagnosis technology and sharing cutting-edge information through international cooperation projects with excellent universities and research institutes abroad, it will be able to stand at the forefront of research and development of world-level structure diagnosis system.
- [Economy] Reduce the economic cost compared with the existing safety evaluation method by accurate condition assessment and seismic performance evaluatio
- [Public safety] Improvement of social contrast level against earthquake disaster through development of seismic reinforcement and seismic reinforcement method development by developing customized optimal seismic reinforcement guidelines for public facilities.

</td></tr>
<tr><td>Keywords</td><td>Multi-physics</td><td>Data fusion</td><td>Condition Assessment</td><td>Reinforced Concrete</td><td>Seismic Performance</td></tr>
</table>

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

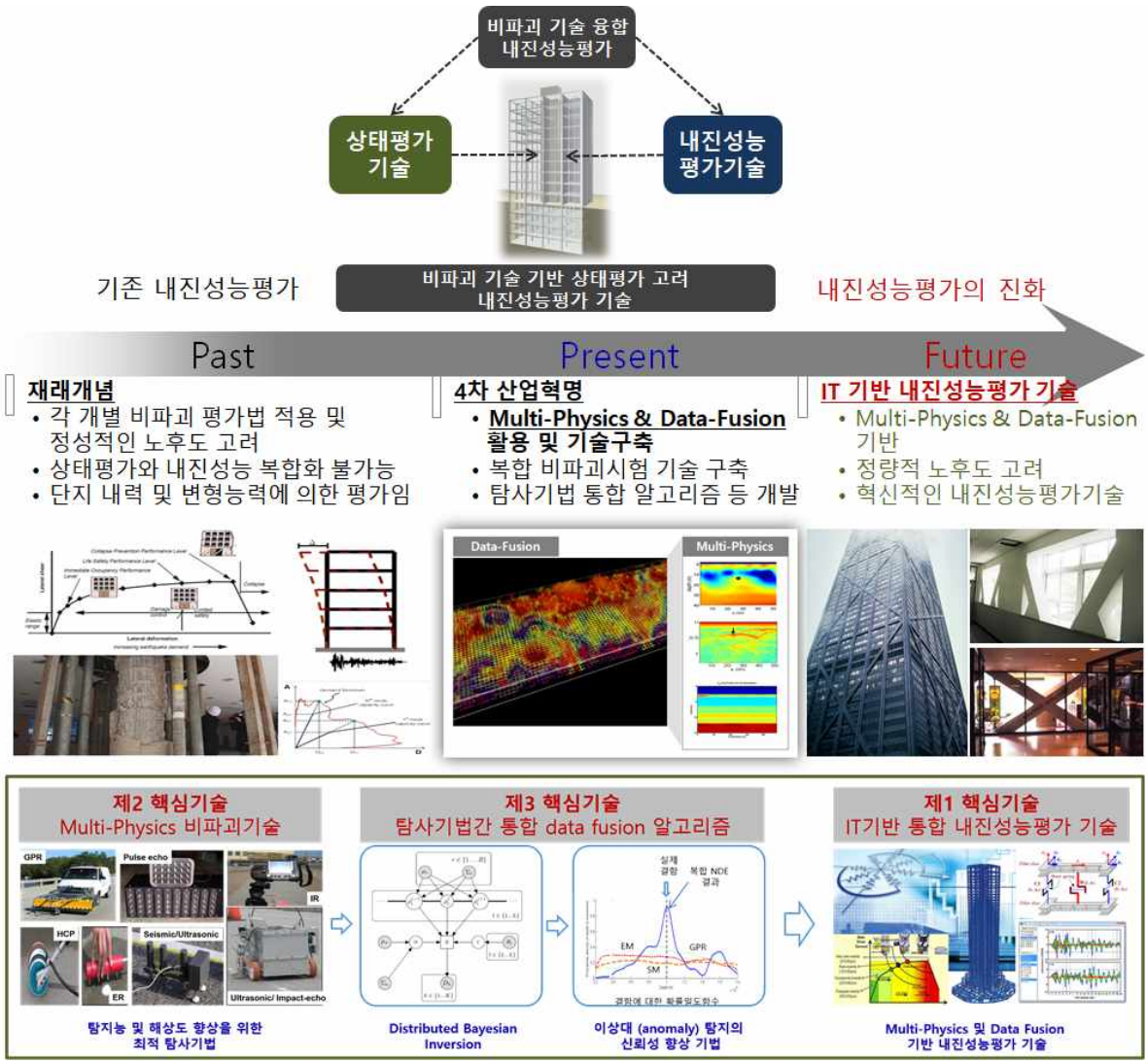
별첨자료(참고문헌 등)

1. 연구개발과제의 개요

1-1. 연구 개발의 개요

(1) 연구개발의 개요 및 창의성

- 본 연구는 철근콘크리트 건축구조물의 경년열화를 고려한 내진성능평가 기술 개선을 위하여 Multi-physics 및 Data fusion 비파괴 기술 기반 상태평가 기술을 융합한 기존 철근콘크리트 건축물의 내진성능평가법을 개발하여 상태평가기술을 내진성능평가기술에 융합한 신개념 기술임(그림 1-1).
- 최종적으로는 개발된 내진성능평가기술의 유효성을 구조부재 시험을 실시하여 검증함과 동시에 이를 활용한 구조물 전체의 내진성능평가를 위한 기법을 제안하고 평가법의 실효성을 해석적 연구와 테스트 베드를 병행하여 검증하며, 실용화를 위한 평가메뉴얼·기술지침서를 제안함.
- 경년열화에 따른 성능저감을 바탕으로 한 내진성능평가 기술에 관한 연구는 국내외적으로 거의 없는 실정이며, Multi-physics 측정 및 Data fusion 비파괴 기술 기반 상태평가 기술을 활용한 철근콘크리트 건축구조물 내진성능평가 기술에 관한 국내 및 국외 연구현황은 전무한 상태로 세계 최초로 연구가 진행되는 것임.

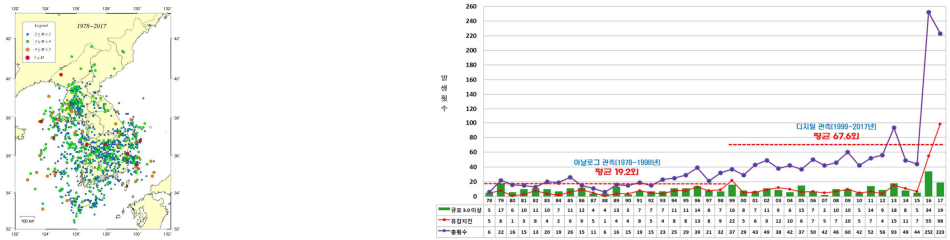


[그림 1-1] Multi-physics 및 Data fusion 비파괴기술 기반 내진성능평가 기술 개념

- 복합인자로 구성되는 주변 환경에 따라 다양한 경년열화가 발생하는 기존 철근콘크리트 건축물의 손상도를 비파괴 기술에 의해서 정량적으로 반영하여 내진성능을 평가할 수 있는 실용화 기술 연구임 (그림 1-1).
- 본 연구에서는 최종목표를 달성하기 위해서 3개의 핵심요소기술, 즉 제1개발 핵심요소기술(상태평가를 통합한 기존 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 실용화 기술 개발), 제2개발 핵심요소기술(Multi- physics 비파괴 검사 기술 및 모니터링 기술 개발), 제3개발 핵심요소기술(탐사기법간 통합 Data fusion 알고리즘 개발)을 설정하였음.

(2) 연구개발의 배경 및 필요성

- 정부는 9.12 경주지진 이후 12월에 지진방재 종합대책을 수립하였지만, 포항지진이 발생하였을 때 기존 지진방재 종합대책의 문제점이 대두되어 “지진방재 개선대책”을 세웠으며, 14개 부처(국토부, 교육부, 기상청 등 지자체)가 참여한 지진방재 개선 TF 구성 및 운영 하여, 4대분야, 즉 ① 체계적 지진위험 조사 및 내진율 제고, ② 신속·정확한 지진정보 제공, ③ 전 국가적 지진대응 역량 강화 및 ④ 피해자 중심의 복구 지원체계를 중점으로 10대 핵심과제 등을 선정하여 실행 중에 있음.



(a) 한반도 지진발생 현황 (b) 연도별 지진발생건수

[그림 1-2] 한반도 지진발생 현황 (기상청)

- 교육부에서는「2019년 국가 안전관리 집행계획」을 수립하여 학생건강(안전사고, 보건 등), 안전관리(학교 폭력 등), 시설안전관리(정기·정밀점검, 정밀안전진단, 지진, 화재 등) 등 학교안전에 대한 예방교육, 사업추진, 대응체계 등 총괄적인 체계를 구축하고, 교육시설의 조기 내진보강을 추진하기 위하여 유·초·중등학교는 18년부터 매년 3500억 원 이상 투자하여 2029년까지 내진보강을 완료 예정임. 국립학교는 매년 1000억원 투자하여 2022년까지 내진보강을 완료하고, 또한 오래된 교육시설을 ‘붕괴 우려 등 재해취약시설‘로 선정하여 정기적 안전점검(연 3회)를 실시할 예정.

- 상기와 같이 최근 안전관리 대책, 특히 노후화된 학교시설을 포함한 건축물의 붕괴, 파손, 지진피해의 위험성이 증가되어 이들에 대한 지진방재를 포함한 안전관리 대책에 대한 연구기관, 법제도를 구축 및 정비하고 있지만, **주로 민간 및 지자체가 관리하고 있는 건축물의 경우에는 관리 부실, 안전관리를 위한 예산 및 전문 인력 부족**, 그 가운데에서도 안전관리 대책의 근간이 되는 내진을 포함한 안전성 평가기법에 대한 문제점이 대두되어 합리적· 효율적인 안전관리 지표 및 평가기술의 개발이 시급한 실정임.

- 예를 들어, 2018년 12월 삼성동에서 30년 된 노후 철근콘크리트 빌딩 기둥의 붕괴위험으로 입주민이 대피하였지만, 관리적 측면에서의 15층 이하의 소규모시설물로 분류되어 법적 안전관리 대상에 포함되지 않았음. 또한, 2018년 6월 붕괴된 용산구의 4층 주상복합 건물은 1966년에 건설된 건축물로 심각한 노후화된 시설임에도 불구하고 안전성평가 및 지진대책의 기본이 되는 내진성능 평가에서는 경년열화 정도를 정량적으로 고려하지 않고 평가하고 있음(그림1-3).

- 2014년 7월 광주광역시 33년 된 노후 철근콘크리트 아파트 지하층 기둥의 붕괴위험으로 입주민이 대피하였지만, 관리적 측면에서의 안전점검에 의한 안전평가 등급을 양호로 관리하였음(그림 1-3).

- 경년열화가 심각한 노후화된 학교시설임에도 불구하고 안전성평가 및 지진대책의 기본이 되는 내진성능 평가에서는 경년열화 정도를 정량적으로 고려하지 않고 평가하고 있음 (교과부 재난위험시설 위원회, 2015~2018).



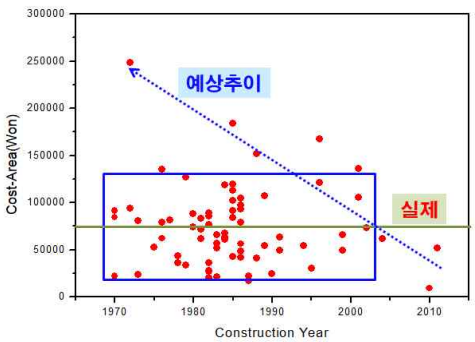
(a) 삼성동 대종빌딩 (아시아경제) (b) 용산구 주상복합 (연합뉴스) (c) 광주광역시 노후 철근콘크리트 아파트 (이데일리 및 SBS)

[그림 1-3] 국내 노후화 건축물 위험 사례

- 한편, 기존 철근콘크리트를 포함한 노후화 건축물의 안전성 평가를 위하여 **안전점검 및 정밀안전진단 세부**

지침(한국시설안전공단, 2010), 기존시설 안전등급 평가 매뉴얼(소방방재청, 2013), 소규모 취약시설 안전점검 매뉴얼(한국시설물안전관리공단, 2013) 등이 활용되고 있음. 그 가운데 널리 사용되고 안전점검 및 정밀안전진단에 관한 한국시설안전공단 세부지침에서는 상태평가 방법과 안전성평가 방법이 각각 제시되어 있으며, 상태평가에서 조사된 결과를 바탕으로 안전성 평가 기준 (주로, 설계당시 구조기준을 토대로 한 구조해석에 의한 검토방법)에 따라서 최종적으로 안전성 평가를 실시하도록 되어 있음.

- 그러나 상태평가에서 제시하고 있는 균열에 대한 상태평가 기준, 탄산화에 대한 상태 평가 기준, 염화물 함유량에 대한 기준, 철근부식에 대한 상태 평가 기준 등 경년열화에 대한 지표는 정성적인 기준에 의한 방법으로 직접적으로 안전성평가에 반영하는 것은 불가능함. 예를 들어 동일한 구조형식을 가지는 40년경과 건물과 20년경과 건물의 안전성 평가결과가 동일하게 나올 가능성이 매우 높으며, 동일 건물에 대한 각 평가자의 공학적 논리에 의해서 서로 상이한 결과가 나올 가능성도 존재함. 그림 1-4는 그 대표적인 예로 노후화에 따른 성능저감이 안전성평가 및 내진성능평가에 반영되지 않아 1970년대의 건물과 2000년대의 건물의 공사비가 유사하게 나타남.
- 경년열화에 따른 균열 및 박락은 내진성능을 포함한 구조성능평가에 매우 중요한 요소로서 그 원인은 주로 철근부식에 따른 열화 (탄산화, 염화물, 철근부식 등이 원인) 등으로 구분 가능하지만, 기존 지침에서는 그 구분이 모호하며, 탄산화, 염화물, 철근부식 등은 열화균열에 상호 연관계가 있는 요소임에도 불구하고, 열화 및 구조균열에 대한 각각의 균열정도(폭, 깊이, 길이)에 따른 성능 저감(내력 및 변형능력 저감)에 관한 지표는 정립되어 있지 않음. 따라서 지침의 정성적인 상태평가 기준에서 도출된 결과를 안전성 평가에 직접적으로 반영하여 안전성 평가를 실시하는 것이 불가능함.
- 주지의 사실, 2016년 경주지진 및 2017년 포항지진은 국내 건축물 등의 내진안전성에 심각한 위기를 나타내었으며, 한반도도 대규모 지진이 발생할 가능성이 매우 크며, 이로 인한 국가적인 재난이 발생 활수 있다는 사실을 절실하게 보여주었음(그림 1-5, 그림 1-6).
- 2016년 경주지진에서는 진앙지 주변에 위치하는 학교시설 및 주택을 포함한 일부 건축물의 기둥 등의 지진피해를 제외한 구조물의 지진피해규모는 크지 않았지만, 2017년 발생한 포항지진에서는 노후화된 공동주택, 학교시설을 포함한 건축구조물에서 심각한 지진피해가 발생하여 향후 국내 내진대책을 위한 중요한 이슈로 부각되었음(그림 1-6).



[그림 1-4] 노후화 학교시설과 내진보강비용 상관관계(교육부 제공)



[그림 1-5] 2016 경주지진 및 2017 포항지진의 진앙지



[그림 1-6] 최근 발생한 국내 지진피해 (2017 포항지진)

- 국내 건축물 지진대책에서 널리 사용되고 있는 기존 건축물 내진성능 평가 및 향상요령에 관한 시설안전공

단 요령(2013)은 예비평가, 1단계 내진성능 평가 및 2단계 내진성능 평가법으로 구분하여 내진성능을 평가하도록 제시되어 있음. 학교시설의 내진성능 평가를 위해서 교과부에서는 학교시설 내진성능 평가 및 내진보강 가이드라인(2011) 및 학교시설 내진설계기준 개정안(2019)에 근거 내진성능을 예비 및 상세평가로 구분하여 평가하도록 제시되어 있음.

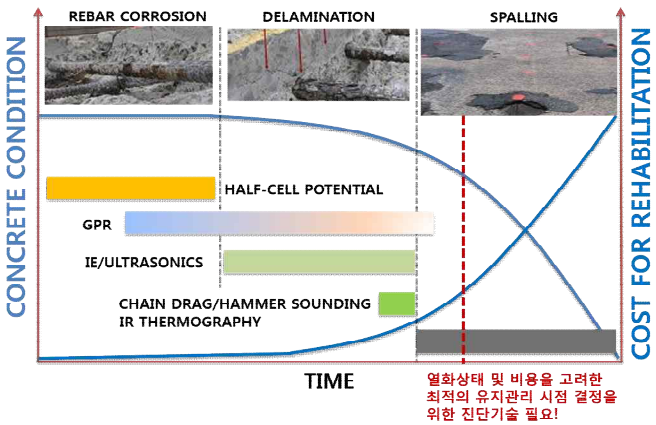
- 그러나 구조물의 경년열화에 따른 손상정도를 고려한 내진성능 평가 방법은 상기 시설안전공단 및 교과부 내진성능 평가법에서는 불가능함. 더욱이 공단 및 교과부뿐 만아니라, 국외의 내진성능 평가법, 즉 미국의 FEMA 301, 356 및 일본 내진진단기준에서도 구조부재가 가지는 보유내력을 바탕으로 내진성능을 평가하고 있으며, 직접적이며, 정량적으로 내구성능 저감을 고려한 내진성능 평가법은 아님.
- 지금까지의 연구에서는 건축구조물 자체가 가지는 내력과 변형능력을 주로 이용하여 내진성능을 평가하였음. 즉, 구조도면과 일부 현장채취 재료강도 등을 바탕으로 구조해석프로그램을 이용하여 내진성능을 평가하였음. 여기서는 건물연수에 따른 열화에 의한 콘크리트 균열 등 열화요인에 따른 성능 저감에 관한 사항은 직접적이며 정량적으로 채택하지 않고 간접적이며 경험 내지는 정성적으로 도입하여 그 내진성능을 평가함. 경년열화에 따른 손상지표를 바탕으로 한 내진성능평가법에 관한 연구는 국내외적으로 거의 없음.
- 따라서 본 연구에서는 건축구조물의 경년열화에 따른 손상지표를 고려한 내진성능평가 기술 개발을 위하여 Multi-physics 측정 및 Data fusion 비파괴기술 기반 상태평가 기술을 융합한 기존 철근콘크리트 건축물의 내진성능평가법을 개발하여, 그 유효성을 구조부재 실험을 실시하여 검증함과 동시에 이를 활용한 건축구조물 전체의 내진성능평가를 위한 기법을 제안함과 동시에 평가법의 실효성을 해석적 연구와 테스트 베드를 병행하여 검증하며, 실용화를 위한 평가메뉴얼 및 기술지침서를 개발하는 IT 기반 혁신적인 신개념 내진성능평가기술을 개발하고자 함.

(3) 연구개발의 중요성

가) 기술적 측면에서의 연구개발의 필요성 및 중요성

① 복합열화 환경을 고려한 Multi-physics 측정/시험방법 필요성

- 철근콘크리트 재료는 주변 환경에 따라 다양한 경년열화가 발생함. 재료적 관점에서 내부 및 표면균열 발생 및 진전은 주로 복합열화 작용을 따르며, 열화단계에 따라 다양한 물리적-화학적 작용이 작용하며, 각 단계의 적절할 조사 기법은 상이함(그림 1-7 및 표 1-1).
- 철근콘크리트 구조물의 주요 열화 메커니즘 중 중성화 및 염해와 관련된 철근부식 현상은 시간경과에 따라 (a)잠재기, (b)진행기, (c)가속기, (d)열화기로 구분할 수 있음. 각 단계를 지배하는 주요 현상은 Multi-physics 현상에 따른 물리-화학현상에 기반하며 열화단계에 따라 상이한 양상을 보임(표 1-1).
- 잠재기에는 콘크리트 내부에 매입된 철근의 부식 환경이 주요한 변수가 되며, 이때 철근의 부식은 전기화학적 현상에 따른 철근의 산화작용과 관련이 있음. 철근의 부식에 따른 부피팽창에 따라 콘크리트 내부응력이 증가하면, 콘크리트 내부에서 미세균열이 발생하며, 이 단계부터는 콘크리트의 열화를 지배하는 인자는 콘크리트의 투수계수이며, 미세균열 밀도가 높아짐에 따라 콘크리트의 투수저항성은 급격히 떨어져서 외부의 수분 및 이물질의 유입속도가 높아짐.



[그림 1-7] 시간에 따른 콘크리트 열화 특성 및 유용한 비파괴 검사법

▪ 미세균열의 폭 및 길이가 커지고, 개별 미세균열의 결함으로 콘크리트 내부에서 박리(콘크리트 표면에 평행으로 발생한 균열) 및 수직균열이 발생함. 이후 가속기를 거쳐 콘크리트 열화는 심화되며, 결과적으로 재료의 열화에 따른 상태변화가 철근콘크리트 부재의 강도 및 강성에 영향을 줌.

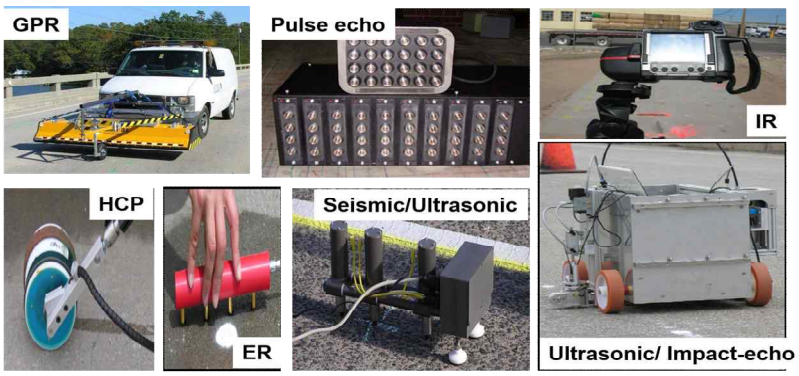
[표 1-1] 열화단계에 따른 주요 현상 및 열화 평가를 위한 유용한 비파괴 검사법

열화단계	현상	육안관측 가능여부	유용한 비파괴 검사법
잠재기	전기화학적 철근 부식	No	ER, HCP
진행기	내부응력 증가 및 미세균열 발생	No	HCP, GPR
가속기	콘크리트 표면균열 및 내부박리 발생	No	GPR. IE, UPV, USW
열화기	콘크리트 표면 박락 (스폴링) 발생	Yes	육안평가

Note: ER: 전기비정항, HCP: 자연전위측정, GPR:지반침투레이더, IE: 충격반향법, UPV: 초음파속도법, USW: 고주파표면파

▪ 하지만 지금까지 콘크리트에 이상이 발생하고 있는 부분의 조사방법은 개별조사법 위주로 발전되어 왔음. 이러한 조사법은 개별 기계적-전기적-화학적-광학적 원리에 기반하여 개별 현상에 대해서는 만족스러운 민감도를 보이지만, 전체 열화단계에서 특성을 정확하게 평가하기에는 어려움이 있음(그림 1-8 및 표 1-2).

▪ 따라서 철근콘크리트 건축구조물의 열화정도를 복합적으로 측정할 수 있는 기술 및 시스템이 확보된다면, 전체 열화단계에서 복합적인 현상에 대해 만족스러운 구조물의 손상도 평가를 수행할 수 있어 평가의 다양성, 요구환경의 적용성 확보로 더욱 정밀한 상태평가가 가능해짐.



[그림 1-8] 미국 연방도로청 LTBP(long-term bridge performance) 프로그램에서 활용하고 있는 상태평가를 위한 주요 NDE 검사법

[표 1-2] 비파괴검사법 적용성 및 문제점 (Haack et al. 1995)

기술		주요적용대상	콘크리트 구조물	장점	제한사항
역학	공진법	교량(상부공)	Very low	-	불균질 암반 벽면요철, 수위변도
	진동반사법	지반조사 (층 두께 결정)	low	콘크리트 벽체 내 대공동 조사	속도, 정도
	미진동 및 AE 해석법	실내실험	very low	Passive 방식	재현성, 정도
	초음파	강구조, 기계설비	very low	-	지질조사 병용 불균질성
방사능	감마선 후방 산란법	도로토공 (함수비, 습윤, 밀도 등)	very low	-	측정속도 측정심도
	중성자 후방 산란법	-	very low	이산점의 함수비	측정속도 측정심도
전기 전자	전류법	전도금속(균열탐지) 보강판단	very low	보강재 조사	측정속도 측정심도 비전도체
	레이다법	교량터널의 지반조사	High	양호한 투과	평가방법 금속피복반사
	전위법	보강재 부식	low	부식탐지	측정속도, 측정심도
광학	열화상	열단열체 검사	High	공동, 누수균열 빠른속도	터널환경 막장의 열방사
	다중스펙 트럼해석	-	High	미소한 마른 균열 탐지	속도, 얕은 측정심도

② 융합(multi-physics) 측정 및 시험방법 분석을 위한 정밀 측정모델의 필요성

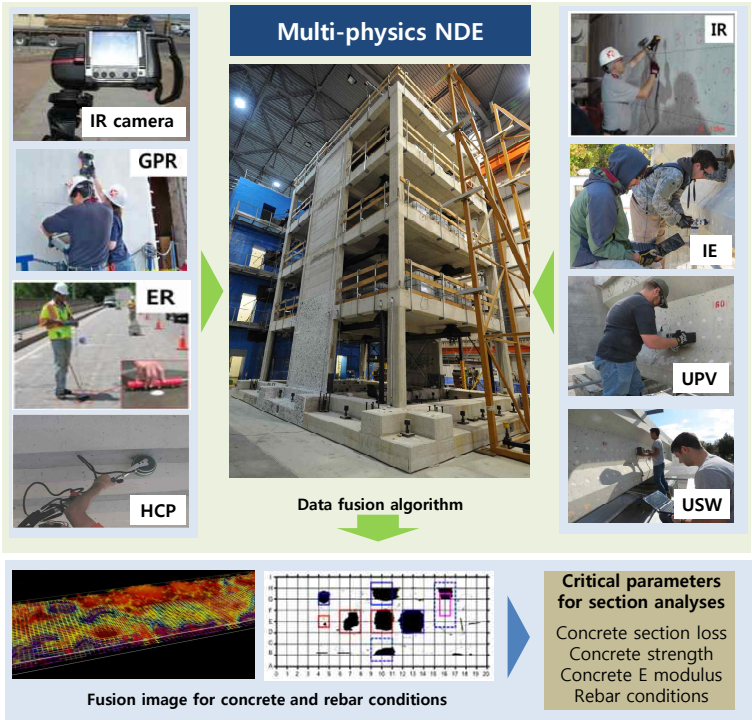
▪ 현재 대부분의 진단법은 개별 검사법에 의존하는 경향이 있으며, 이 조차도 현실의 복잡한 열화 메커니즘에 대한

체계적인 고려가 미흡한 상태에서 적용에 따라 실제 현상의 진단결과의 정확성 및 일관성은 기대에 미치지 못하는 경우가 많은 실정임.

- 이를 개선하고자 철근콘크리트 구조물의 경년열화에 따른 이상대 평가를 위한 Multi-physics 측정방법(그림 1-9)을 적용해 기존의 개별 측정 및 시험방법의 장점을 융합함으로서, 특정 이상대의 발생 및 진행 메커니즘의 단계별 민감도 향상 시키는 연구가 있으나, 개별 열화지도 작성 및 상관관계 분석에 기반하고 있어 데이터의 복잡성으로 엔지니어의 주관에 따른 결정이 큰 부분으로 작용하고 있는 것으로 나타남.
- 기존 분석방법을 대체하고 **복합 비파괴검사법의 내진성능평가 활용을 위하여 개별 NDE 기술의 특성을 정량화 및 통합하여 표현할 수 있는 Data fusion 모듈을 활용하는 것은 매우 유용한 대안**이 될 수 있음. 즉, Data fusion 기술을 이용하여 나타난 지표는 진단 결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있으며, 그에 따라 **정량화된 상태평가 결과가 고려된 내진성능평가**를 기대할 수 있음.

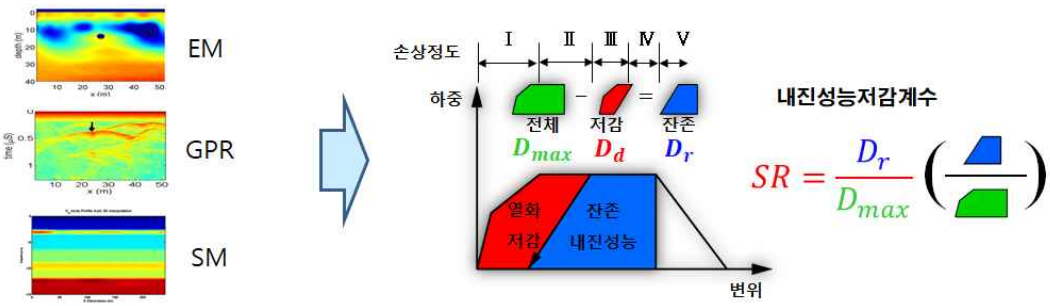
③ Multi-physics 및 Data fusion 비파괴기술 기반 상태평가를 고려한 내진성능평가 기술의 필요성

- 현행 내진성능평가법은 경년열화에 따른 성능저감을 반영하지 못하는 것이 대부분이며, 이에 따라 노후화 철근콘크리트 건축물의 내진성능평가 결과는 확실하지 못한 실정임.
- 이를 개선하고자 철근 단면적 감소, 철근 부착, 탄산화 등 열화인자에 대한 영향을 내진성능평가에 적용하는 연구가 수행되고 있으나, 단일 측정법의 결과와 내진성능저감의 상관관계 분석에 기반하고 있어 다양한 열화구간 및 복합 열화인자를 가지는 실제 현상과의 차이로 정확성 및 일관성을 기대하기 어려움(그림 1-10).



[그림 1-9] 철근콘크리트 구조물의 이상대 평가를 위한 Multi-physics 진단 시스템 예시

- 따라서 다양한 열화구간 및 복합 열화인자를 측정할 수 있는 **Multi-physics 비파괴검사법 및 개별 NDE 기술의 특성을 정량화 및 통합하여 표현할 수 있는 Data fusion 기반 비파괴 기술을 활용하여 경년열화를 정량적으로 반영할 수 있는 내진성능평가 기술이 개발**된다면, 최근 심각한 이슈로 다루어지는 노후화 기존 철근콘크리트 건축물의 합리적이며 정확한 내진성능평가에 기여할 수 있음.



[그림 1-10] 기존 경년열화에 따른 내진성능저감지표 개념도

나) 경제적·산업적 측면에서의 연구개발의 필요성 및 중요성

① 지진피해 예방 및 최소화 대책 필요성

- 지진발생으로 인해 발생된 경제적 손실과 복구비용은 아이티의 경우 GDP의 120%에 달하는 피해비용이 발생하였으며, 일본 고베지진과 중국 쓰촨성 지진은 대략 140조원의 피해비용이 발생하였음. 최근 발생한 동일본 대지진의 경우에는 약 160-250조원의 피해비용이 발생하였음(그림 1-11).또한 **국내에서 발생한 경주지진은 피해액 92.8억, 피해건물 5187동, 포항지진은 피해액 546.1억, 피해건물 1561동**의 경제적 및 사회적 피해가 발생하였음.
- 지진에 의한 피해는 **단일 재해로는 가장 큰 물적/인적 손실을 유발**할 수 있으며, 광범위한 지역에 걸쳐서 피해를 불러일으킬 수 있는 국가적 재난이라는데 문제의 심각성이 매우 크므로, 향후 **지진피해를 예방 및 최소화하기 위해서는 정밀한 내진성능평가 기법의 필요성**이 매우 큼.



중국 쓰촨성 지진(2008.5) 아이티 지진(2010.1) 동일본 대지진(2011.3)

[그림 1-11] 최근 대표적인 해외 지진피해의 손실사례

② 향후 선진국형 건설시장으로 패러다임 변화 본격화

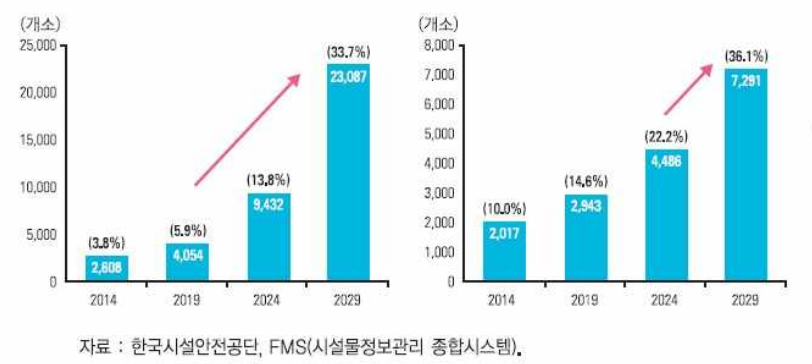
- 2020년 이후 국내 건설시장은 노후 시설의 유지보수 수요가 급증하면서 유지보수 공사의 비중이 상당히 높은 선진국형 건설시장으로 본격 전환되기 시작할 전망임. 주요 선진국들의 경우 자국 건설시장에서 유지보수 시장의 비중이 대체적으로 40~50% 수준이나, 현재 우리나라는 20% 이하 수준으로 추정되며, 2020년 이후 동 비중의 증가속도가 빨라질 전망임.
- OECD 국가들의 지난 30년 간 GDP 대비 건설투자 비중 변화를 소득 수준별로 살펴보면, 1인당 GDP가 3만 달러를 넘어서면서부터 GDP 대비 건설투자 비중이 더 이상 크게 감소하지 않는 특징을 보이는데 이는 기존 시설의 유지보수 투자가 점차 증가하기 때문임(그림 1-12).



주) OECD 국가들 1인당 GDP 데이터와 GDP 대비 건설투자 비중 데이터를 소득 수준 구간별로 통합해 계산한 횡단면 분석(Cross-sectional analysis) 자료이며, 2005년 기준 1인당 실질(PPP 기준) GDP를 기준으로 작성된 것임.
(National Accounts of OECD Countries)

[그림 1-12] OECD 국가 소득 수준별 GDP 대비 건설투자 비중 추이

- 한국시설안전공단의 조사에 따르면, 1990년대 신축된 대부분의 건축물과 사회기반시설(social infrastructure)은 현재까지도 사용되고 있으며, 『시설물의 안전관리에 관한 특별법』 대상 1, 2종 시설물 중 31년 이상 된 시설물의 변화 추이를 살펴보면, 2020년 이후 그 수가 급증하는 것을 알 수 있음(그림 1-13).



[그림 1-13] 31년 이상 1종 및 2종 시설물 추이
(한국시설안전공단)

(4) 타산업 연계 및 국내 및 국제협력 가능성

가) 타산업과의 연계

- 본 연구에서 개발될 새로운 Multi-physics 비파괴기술과 Data fusion 알고리즘을 활용함으로써 다양한 미래건축 유지관리시스템의 연구/개발에 효과적으로 적용될 수 있는 비파괴기술을 개발할 수 있음.
- 기존 개별 비파괴기술을 이용하여 평가하기 어렵거나 혹은 불가능했던 경년열화에 따른 성능저감을 평가할 수 있는 **통합 비파괴기술의 원천기술을 확보하여, 향후 여러 고부가가치 응용사업군의 발굴 및 이들의 효과적인 구현을 위한 기반을 마련할 수 있음.**
- 해당 비파괴기술을 적용한 상태평가 고려가 가능한 내진성능평가 기술은 기존 내진성능평가, 내진보강 및 내진설계 기술을 대체 또는 활용 가능함.
- 기존 철근콘크리트 구조물의 상태평가 기술에 대체 및 활용 가능함.
- 리모델링 및 리노베이션 전문기업, 구조설계사무소 등 건설관련 기업에 기술 제공 및 활용 가능함.
- 건축 분야에 국한되지 않고 도시 전반의 기반시설물 계획 및 국가 정책 등의 계획 기술 및 실용기술로도 활용이 가능함.

나) 국내 및 국제협력 계획

- 연구의 성공적인 수행을 위해 국내외 전문가들의 자문을 구하고 교류협력 프로그램을 추진할 예정임. 또한 국내외 연구기관과의 인적네트워크를 구축하고 정기적인 공동세미나도 개최할 계획이며, 구체적인 국내·외의 대외협력계획은 다음과 같음(그림 1-14 및 표 1-3).

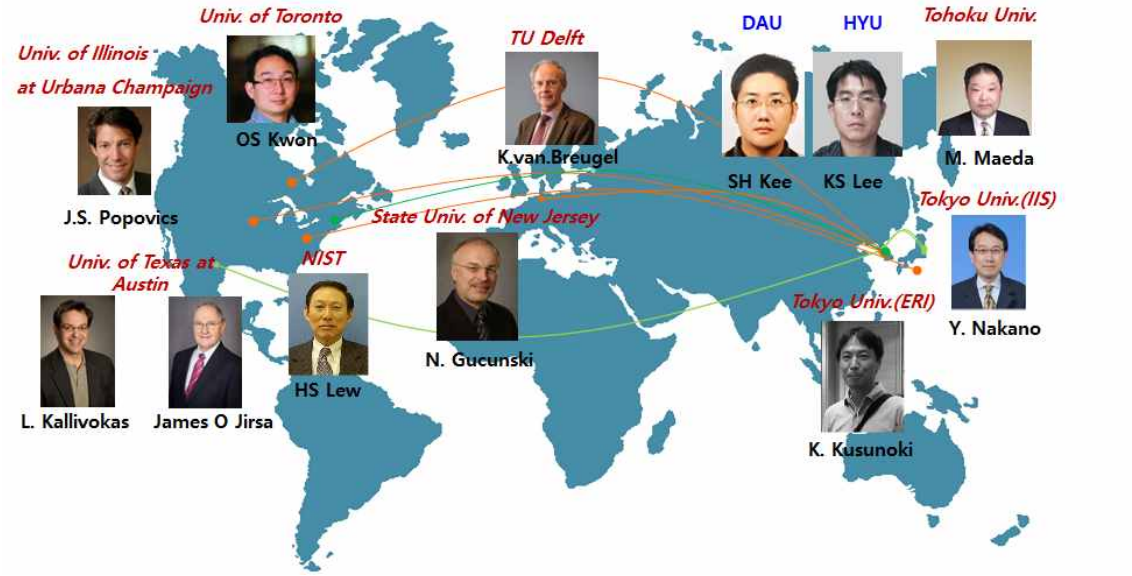
① 국내협력 계획

- 대학, 국공립 연구소, 건설 시공사 및 설계사무소와 협업
- 각 요소 형성기술 구축을 위한 자문기관과 협력체계 유지
- 서울대학교, 한국과학기술원, 단국대학교, 전남대학교, 부산대학교
- 삼성건설, 현대건설, 대우건설, 금호건설, 포스코건설
- LH공사, 한국건설기술원, 동양구조엔지니어링, 티솔루션, 창민우구조설계사무소, (주)콘크리닉, CTS 엔지니어링, ㈜에이엠지그룹건축사사무소

② 국제협력 계획

- 해외 건축 재료구조기술 관련 대학, 연구소, 전문기관과 협력체 구성

- 동경대학 지진연구소 내진연구실(일본), 동경대학 생산기술연구소 재료 및 내진연구실(일본)
- 동북대학 내진연구실(일본), 토론토 대학 구조・재료연구실(캐나다)
- 일본 건축방재협회, 일본 건축연구소, 시미즈건설(일본), 다이세이건설(일본)
- 델프트공대 재료연구실(네덜란드), 뉴저지대학 재료연구실(미국)
- 일리노이대학 재료 연구실(미국), 텍사스 대학 구조・재료연구실
- 국립표준과학기술원(NIST, 미국) 구조・재료연구실



[그림 1-14] Multi-physics 및 Data fusion 통합 비파괴기술 및 내진성능평가 기술 대외협력 체계

[표 1-3] Multi-physics 및 Data fusion 통합 비파괴기술 및 내진성능평가 기술 대외협력 분야

협력기관 및 대학	책임연구자	협력분야
Structures Group, NIST (USA)	HS Lew	내진성능 평가 및 내구성능 평가
University of Texas at Austin (USA)	James O Jirsa	내진성능 평가
University of Texas at Austin (USA)	Loukas Kallivokas	탄성파 해석, 역해석 모델 개발
University of Toronto (Canada)	OS Kwon	내진성능 및 내구성능 구조실험
University of Western Sydney (Australia)	WH Kang	ICT기반 건축물 안전 및 유지관리
Tohoku University (Japan)	Masaki Maeda	철근콘크리트 건축물의 잔존 내진성능 평가
Institute of Industrial Science University of Tokyo (Japan)	KouichKusunoki	ICT 기반 내진 및 내구성능 평가
Earthquake Research Institute University of Tokyo (Japan)	Yoshiaki Nakano	기존 철근콘크리트 건축물의 내구 및 내진성능 평가
TU Delft (Netherlands)	K.van.Breugel	콘크리트 부재의 내구성능 평가
The State University of New Jersey (USA)	Nenad Gucunski	Multi-physics 비파괴 검사 및 로봇을 활용한 측정 자동화
University of Illinois at Urbana Champaign (USA)	John S. Popovics	첨단 비파괴 검사 센서 개발 건설재료 열화 모델

1-2. 연구 개발 대상의 국내・외 현황

(1) 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과

가) 국가 연구개발사업 유사연구 실적

① 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사 및 검토결과

- 본 개발 과제의 중복방지를 위한 조사결과는 아래와 같이 조사되었음(표 1-4).
- 이 과제와 유사성이 있는 것으로 판단된 과제에 대하여 검토결과, 철근콘크리트 건축물의 내진성능평가를 거시적

실험 및 단순 구조적 관점에서 접근하여 해결하는 과제가 대부분이며, 본 과제와 같이 Multi-physics 및 Data fusion 기법을 바탕으로 한 비파괴기술을 적용하여 **경년열화에 따른 상태평가를 직접적·정량적으로 기존 건축구조물 내진성능평가에 적용하는 연구는 수행된 사례가 없는 것으로 판단**되며, 이 과제의 키워드별 기존 과제와의 연관성에 대한 검토 결과는 표 1-5와 같음.

② 연구개발과제의 차별화 방안

- Multi-physics 측정 및 Data fusion 비파괴 기술 기반 상태평가 기술을 활용한 철근콘크리트 건축구조물 내진성능평가 기술에 관한 **국내 및 국외 연구현황은 전무한 상태로 처음으로 연구가 진행**되는 것임.
- 본 연구에서는 건축구조물의 경년열화에 따른 손상도를 고려한 내진성능평가 기술 개발을 위하여 Multi-physics 측정 및 Data fusion 등 비파괴 기술 기반 상태평가 기술을 융합한 기존 철근콘크리트 건축물의 내진성능평가법을 개발하여, 그 유효성을 구조부재 시험을 실시하여 검증함과 동시에 이를 활용한 구조물 전체의 내진성능평가를 위한 기법을 제안하고 평가법의 실효성을 해석적 연구와 테스트 베드를 병행하여 검증하며, 실용화를 위한 평가메뉴얼 및 기술지침서를 개발하는 신개념 내진성능평가기술로 **기존의 내진성능평가, 내진보강 등 내진대책 전 과정에 혁신적 변화가 예상됨.**

[표 1-4] 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사결과

(단위 : 억)

부처명	사업명	과제명	예산
국토교통부	국토교통연구기획사업	무인 검사 장비를 활용한 대형구조물 진단 및 원격 관리시스템 개발 기획	0.5
교육과학기술부	일반연구자지원	비접촉식 레이저 스캐닝 및 부공간 시스템 규명법에 기초한 고속 손상시각화 기법 개발	0.5
한국건설교통기술평가원	건설기술혁신사업	구조물의 동적거동 정밀계측을 위한 LADAR와 LDV의 통합형 비접촉식 레이저시스템 개발	0.5
미래창조과학부	중견연구자지원	첨단 NIT센서와 FRP를 융합한 매입형 FRP 복합 신소재와 내진구조 적용 및 안전모니터링 시스템 개발	2.4
과학기술부	우수연구센터육성	스마트 구조부재 및 구조계의 비선형 손상해석 모델 개발	1.0
과학기술부	국가지정연구실사업	리모델링을 위한 노후공동주택의 내진성능등급화 및 차세대 보강기술 개발	2.2
교육과학기술부	일반연구자지원	철근콘크리트 구조물의 손상량 평가에 근거한 손상도 및 내진성능 평가기법 개발	0.2
지식경제부	전력산업연구개발	염해부식에 의한 노후 철근콘크리트 발전 구조물의 내진거동 조사 및 성능평가	0.48
과학기술부	특정기초연구지원	전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 저층 철근콘크리트 건물의 내진성능 평가법	3.0
교육과학기술부	일반연구자지원	기존 건물의 내진성능통합시스템 개발	1.5

- 결론적으로, 본 과제는 Multi-physics 측정 및 Data fusion 비파괴 기술을 이용하여 기존 철근콘크리트 건축물의 상태평가를 고려한 내진성능평가 실용화 기술을 개발한 것으로서 **기존 수행된 연구와 중복성이 없고, 복합 비파괴 측정 및 분석기술을 내진성능평가 기술에 접목하여 정량적으로 경년열화를 고려할 수 있는 내진평가기술을 개발 한다는 측면, 연구 방법론에서도 독창성, 창의성, 차별성**이 있다고 판단됨.

[표 1-5] 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사결과에 따른 검토결과

연구과제명	연구주제 키워드				과제 연관성
	비파괴	내진	열화	기존 건축물	
무인 검사 장비를 활용한 대형구조물 진단 및 원격 관리시스템 개발 기획	△	×	△	×	×
비접촉식 레이저 스캐닝 및 부공간 시스템 규명법에 기초한 고속 손상시각화 기법 개발	△	×	△	△	×
구조물의 동적거동 정밀계측을 위한 LADAR와 LDV의 통합형 비접촉식 레이저시스템 개발	△	×	△	△	×
첨단 NIT센서와 FRP를 융합한 매입형 FRP 복합 신소재와 내진구조 적용 및 안전모니터링 시스템 개발	△	×	△	×	×
스마트 구조부재 및 구조계의 비선형 손상해석 모델 개발	△	△	△	×	×
리모델링을 위한 노후공동주택의 내진성능등급화 및 차세대보강기술 개발	×	△	△	×	×
철근콘크리트 구조물의 손상량 평가에 근거한 손상도 및 내진성능 평가기법 개발	×	○	×	△	×
염해부식에 의한 노후 철근콘크리트 발전 구조물의 내진거동 조사 및 성능평가	×	○	△	△	×
전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 저층 철근콘크리트 건물의 내진성능 평가법	×	○	×	△	×
기존 건물의 내진성능통합시스템 개발	×	○	×	△	×

(×: 관련성 없음, △: 키워드는 관련 있으나 본 연구와 내용 및 방법이 차별성을 가짐)

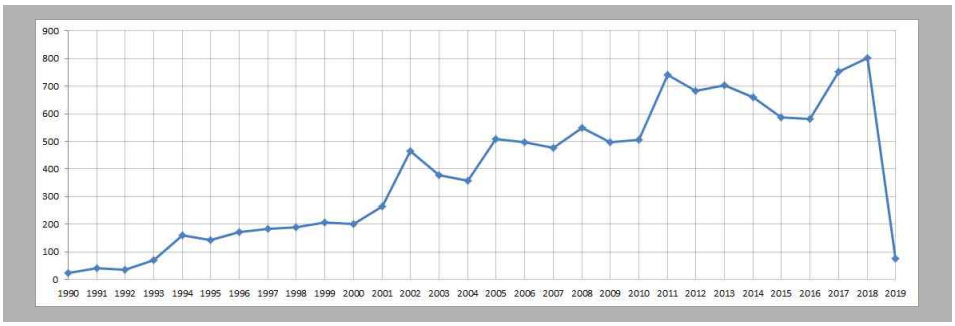
② 연구개발과제의 차별화 방안

- Multi-physics 측정 및 Data fusion 비파괴 기술 기반 상태평가 기술을 활용한 철근콘크리트 건축구조물 내진성능평가 기술에 관한 국내 및 국외 연구현황은 전무한 상태로 처음으로 연구가 진행되는 것임.
- 본 연구에서는 건축구조물의 경년열화에 따른 손상도를 고려한 내진성능평가 기술 개발을 위하여 Multi-physics 측정 및 Data fusion 등 비파괴 기술 기반 상태평가 기술을 융합한 기존 철근콘크리트 건축물의 내진성능평가법을 개발하여, 그 유효성을 구조부재 시험을 실시하여 검증함과 동시에 이를 활용한 구조물 전체의 내진성능평가를 위한 기법을 제안하고 평가법의 실효성을 해석적 연구와 테스트 베드를 병행하여 검증하며, 실용화를 위한 평가메뉴얼 및 기술지침서를 개발하는 신개념 내진성능평가기술로 **기존의 내진성능평가, 내진보강 등 내진대책 전 과정에 혁신적 변화가 예상됨.**
- 결론적으로, 본 과제는 Multi-physics 측정 및 Data fusion 비파괴 기술을 이용하여 기존 철근콘크리트 건축물의 상태평가를 고려한 내진성능평가 실용화 기술을 개발한 것으로서 기존 수행된 연구와 중복성이 없고, 복합 비파괴 측정 및 분석기술을 내진성능평가 기술에 접목하여 정량적으로 경년열화를 고려할 수 있는 내진평가기술을 개발 한다는 측면, 연구 방법론에서도 독창성, 창의성, 차별성이 있다고 판단됨.

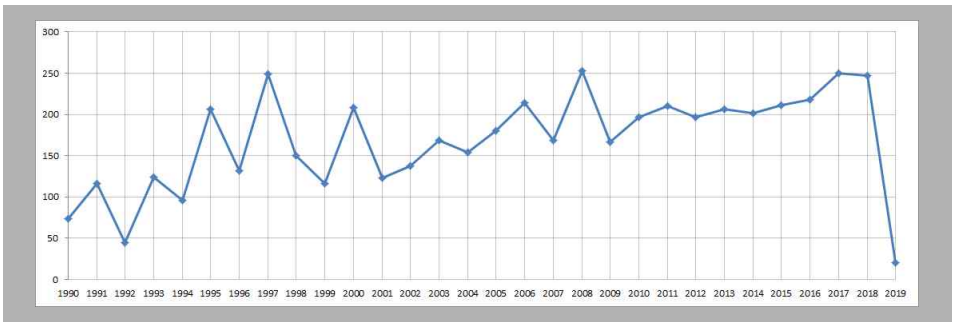
나) 관련분야의 국내외 연구동향 및 학술적 흐름 분석

- 그림 1-15 및 그림 1-15는 NDSL 데이터베이스를 통해 철근콘크리트 구조물의 내진성능에 관련된 논문에 대하여 (콘크리트* or concrete*) and (seismic* or 내진*), (콘크리트* or concrete*) and비파괴* or NDT* or NDE* or Non-destructive* or Nondestructive*)와 같은 키워드로 검색하여 조사한 연도별 논문의 수를 나타냄.
- 그림 1-15에서 확인할 수 있듯이 1965년 이후 2019년까지 총 11683편(국외 9566편, 국내 2117편)의 논문이 발표되었으며, 90년대부터 점차 증가하다가 2000년대 들어서 발표된 수가 급격히 증가함을 통해 철근콘크리트 구조물의 내진성능에 관한 연구의 중요성을 간접적으로 확인할 수 있음.
- 또한, 철근콘크리트 구조물의 비파괴 기술 적용에 관한 연구의 중요성도 마찬가지로 1970년 이후 2019까지 총 4939편(국외 4284편, 국내 655편)의 논문이 발표되었으며, 2000년대 들어 100~250편의 논문이 꾸준히 발표되고 있음을 확인할 수 있음(그림 1-16).

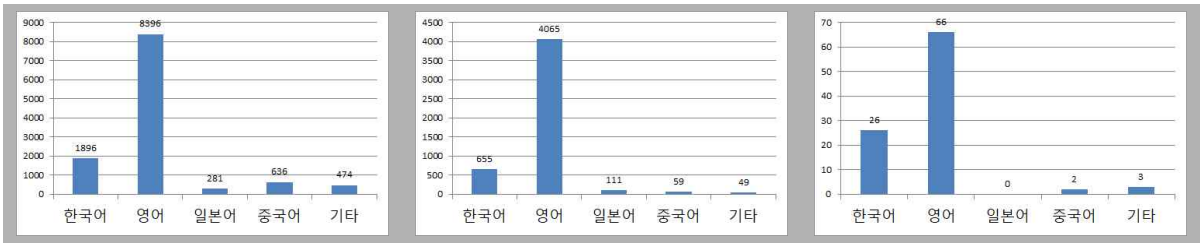
- 그림 1-17은 철근콘크리트 구조물의 비파괴를 통한 내진성능에 관련된 논문에 대하여 (콘크리트* or concrete*) and (seismic* or 내진*) and (비파괴* or NDT* or NDE* or Non-destructive* or Nondestructive*)와 같은 키워드로 검색하여 조사한 발표언어 별 논문 수를 나타냄.
- 철근콘크리트 구조물의 비파괴를 통한 내진성능 분야 총 논문 수는 97건이며 이 중 27%가 한국어로 발표되었음. 국내 연구자들이 한국어와 영어로 대부분 논문을 출판한다는 점을 고려하면 한국 연구자들이 발표한 비중은 더 높을 것으로 판단됨. 다만 대부분의 연구가 단일 비파괴 기술을 통한 안전진단 등에 관한 것이고 상기 연구처럼 복합 비파괴 기술 기반 연구는 미흡한 실정임.
- 복합 비파괴 기술을 활용한 기술은 존재하지만, 신축 구조물에 적용하는 자가 안전진단 및 교량 등에 적용되는 경우가 대부분이며, Multi-physics 측정 및 Data fusion 비파괴기술 기반 상태평가를 고려한 내진성능 평가기술은 전무함.
- 단일 콘크리트 비파괴 연구 및 콘크리트 내진 관련 연구를 벗어난 두 분야가 융합된 새로운 돌파기술이 필요하다고 판단됨.



[그림 1-15] 콘크리트 내진 관련 국내외 논문 발표 건수



[그림 1-16] 콘크리트 비파괴 관련 국내외 논문 발표 건수



(a) 콘크리트 내진 관련　　b) 콘크리트 비파괴 관련　　(c) 콘크리트 비파괴 내진 융합관련

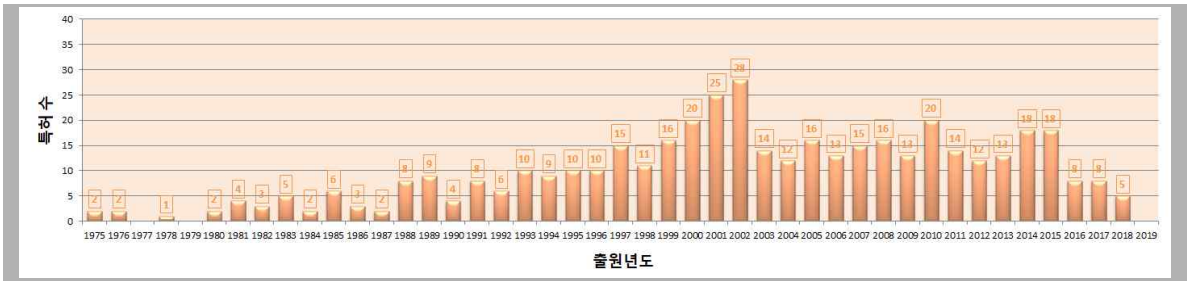
[그림 1-17] 구조물 연구 분야에 대한 언어별 논문 수

(2) 국내외 관련 기술 특허 동향

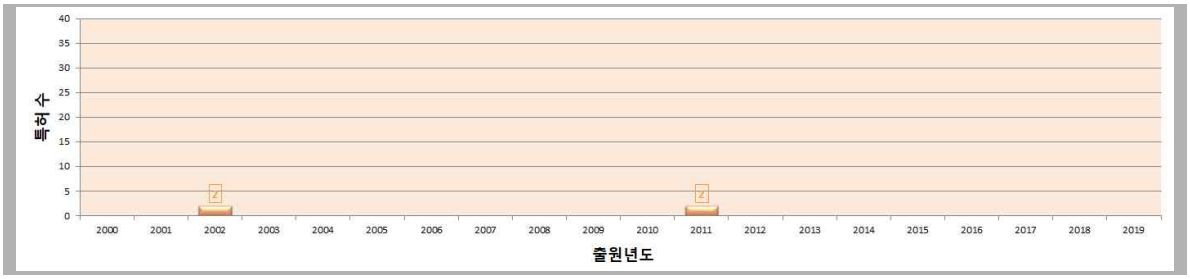
- 그림 1-18은 NDSL 데이터베이스를 이용하여 콘크리트의 비파괴와 관련된 특허에 대하여 (콘크리트* or concrete*) and (비파괴* or NDT* or NDE* or Non-destructive* or Nondestructive*)와 같은 키워드로 검색하여 조사한 연도별 특허 수를 나타냄.
- 1990년대부터 콘크리트 비파괴 관련 특허 출원 건수가 지속적으로 증가하여 2002년 정점에 도달하였으나, 그 이후 수가 해마다 감소하였으며, 이는 90년대 들어 사회적으로 콘크리트 구조물의 비파괴에 대한 기술요구가

증가했음을 의미하는 반면 최근들어 관련 기술의 한계가 나타났음을 의미함. 따라서 본 과제와 같은 기존 기술의 한계를 돌파할 수 있는 기술 개발이 요구되는 시점임을 의미한다고 사료됨.

- 그림 1-19은 콘크리트의 내진성능평가와 관련된 특허에 대하여 (콘크리트* or concrete*) and (seismic* or 내진*) and (성능평가* or Evaluation* or Estimate*)와 같은 키워드로 검색하여 조사한 연도별 특허 수를 나타냄.
- 철근콘크리트 구조물에 대한 내진성능평가기술의 경우 평가법의 특수성에 의해 기준으로 존재하는 경우는 다수가 있으나 기 출원되어 있는 특허는 4건이 존재하였음.



[그림 1-18] 콘크리트 비파괴 관련 국내외 특허 출원 건수



[그림 1-19] 콘크리트 구조물의 내진성능평가 관련 국내외 특허 출원 건수

- 표 1-5는 본 연구와 관련된 대표적인 국내외 특허를 나타내고 있음. 비파괴 기술 관련 출원된 특허의 경우 콘크리트에 대한 개별 비파괴 장치 및 방법 혹은 토목구조물의 복합 평가법에 대해 나타내고 있으며, 내진성능에 대한 연관성이 없음. 콘크리트 구조물의 내진성능평가 관련 기술의 경우, 기존 철근 콘크리트 건축물의 내진성능평가 방법에 대한 기술임은 유사성이 있으나, 경년열화 및 상태평가에 대한 언급이 없음.

[표 1-5] 대표 유사특허 목록

지식재산권명	출원인	출원국/출원번호
콘크리트 구조물의 비파괴검사 방법	주식회사 케이티	10-1999-0046828
프리스트레스트 콘크리트 거더 교량을 위한 하이브리드 손상 모니터링 체계	부경대학교 산학협력단	10-2008-0008477
응력파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴검사 방법	한국과학기술원	10-2008-0042516
콘크리트 구조물의 전기비저항 추정을 통한 비파괴 부식진단시스템	대구가톨릭대학교 산학협력단	10-2009-0068168
콘크리트 비파괴 검사를 위한 탄성파 측정 장치	한국해양연구원	10-2010-0066284
사운드 신호에너지를 이용한 콘크리트의 비파괴 강도 측정방법	대구대학교 산학협력단	10-2015-0164533
콘크리트 구조물의 결함위치 파악을 위한 전기 비저항 탐사용 비파괴 전극 시스템 및 그 방법	주)지오룩스	10-2016-0076451
METHOD FOR ESTIMATING EARTHQUAKE DAMAGE OF REINFORCED CONCRETE BUILDING	CHUGOKU ELECTRIC POWER CO INC	JP-0268568
EXISTING PILE INVESTIGATING METHOD AND EXISTING PILE REINFORCING METHOD	ARAI GUMI LTD	JP-0230143

(3) 국내외 시장분석 및 산업동향

- 국내에서 2008년 자연재해 대책법 등이 정비되면서 공공시설물, 다중이용 건축물에 대한 국내 내진관련 시장 확대가 예측되며, 지진대비 관련 내진비용은 전체 수주 금액 중 0.5%~5% 정도 차지하고 있음.

- 2017년 포항지진 이후 교육부(2018)에 따르면 비내진상세를 가지는 학교시설 전체를 대상으로 향후 10년 이내(2029)에 내진보강을 완료하는데 **약 4조 가량의 예산이 소요될 것으로 분석**하였으며, 현재 이를 실행하기 위하여 **학교시설물 내진성능평가에 매년 1000억**원을 또한 **내진보강공사에 매년 3000억원**, **합계 4000억원 투자계획을 수립**하였으며, 내진보강에 매우 중요한 위치를 차지하는 **내진성능 평가기술에 대한 향후10년 간 시장은 약 1조원이라고 판단함**.
- 국내는 구조물 진단 기술과 장비의 해외의존도가 높고, 관련 산업이 취약한 실정임. 국토부(2016)에서는 현재 국내 비파괴검사 시장규모는 약 5천억 원 정도이며, 연평균 5.5%로 증가할 것으로 분석하였음. 또한, 안전진단 및 내진성능 미달에 의한 국내 시설물 보수·보강공사 실적은 최근 15년간 7배 이상 증가하였으며, 구조물 유지관리 세계 시장 규모는 56.5조원, 국내 시장은 3.1조원 규모인 것으로 분석하였으며, 2020년 이후부터 구조물 노후화에 따라 유지관리 시장의 확대로 내진성능평가 관련 시장도 본격적으로 증가할 것으로 예상됨.
- 한편, **주요 선진국의 건설 산업 영역 내에서 건설시장 규모 증가보다 구조물 유지관리 분야는 이미 매우 중요한 사업영역으로 자리매김하고 있으며, 주요 선진국의 유지관리 건설 관련 투자액은 전체 건설 산업 투자액 중 상당 부분을 점유하고 있음**(국토부, 2016). 그러나 우리나라는 아직 유지관리 건설시장이 본격적으로 형성되지 못한 상황이지만, 도시화와 산업화의 진전, 주택 보급률의 증가 기존 건축물에 대한 요구기능의 변화 등으로 유지관리 건설시장은 향후 급성장할 것으로 예상됨.
- Frost와 Sullivan(대형구조물 진단 및 원격관리 시스템 개발 기획, 국토부, 2016)의 연구에 의하면 유지관리 관련 분야에서도 첨단 IT 등 새로운 기술을 접목한 구조물 진단기술이 개발될 것으로 예상하였으며, 이로 인한 구조물 진단기술 시장의 규모 확대를 예상하였음.

1) 연구개발과제의 최종 목표

구분	내용 및 설정근거
최종 목표	▪ 본 연구의 최종목표는 건축구조물의 경년열화에 따른 손상도를 고려한 내진성능평가 기술 개발을 위하여 Multi-physics 측정 및 Data fusion 등 비파괴 기술 기반 상태평가 기술을 융합한 특정관리대상 철근콘크리트 건축물의 내진성능평가법을 개발하는 것으로서, 그 유효성을 구조부재 시험을 실시하여 검증함과 동시에 이를 활용한 구조물 전체의 내진성능평가를 위한 기법을 제안하고 평가법의 실효성을 해석적 연구와 파일럿 테스트를 병행하여 검증하며, 실용화를 위한 평가메뉴얼 및 기술지침서를 개발함.
세부 목표	▪ 제1개발 핵심요소기술 : RC 부재의 경년열화 평가를 위한 Multi-physics 및 Data fusion 기반 비파괴 검사법 개발 ▪ 제2개발 핵심요소기술 : 상태평가를 고려한 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 실용화 기술 개발

2) 연구개발과제의 년차별 목표

1) 1차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(한양대학교)

▶ **핵심연구성과 B : 상태평가를 고려한 R/C 건축물 내진성능 평가 실용화 기술 개발**

- B-1 (이강석) : 기존 특정관리대상 R/C 건축물의 내진성능평가 기술 개발

- 공동연구기관(동아대학교)

▶ **핵심연구성과 A-1(기성훈) : Multi-Physics 비파괴 검사 기술 및 모니터링 기술 개발**

- A-1 (기성훈) : RC 부재 복합열화 평가의 최적화를 위한 Multi-physics 비파괴 검사법 개발

▶ **핵심연구성과 A-2 : 탐사기법간 통합 Data Fusion 알고리즘 개발**

- A-2 (기성훈) : Multi-physics 비파괴 검사 결과 해석 기술 개발 (실험실 수준)

② 개발 내용 및 범위(그림을 이용하여 시스템 구성도, 구조 등을 구체적으로 표현)

- 주관연구기관(한양대학교)

▶ **핵심연구성과 B : 상태평가를 고려한 R/C 건축물 내진성능 평가 실용화 기술 개발**

- 문헌조사를 통한 기존 R/C 건축물 내진성능평가 기술 조사
- 특정관리대상 R/C 건축물 내진성능평가 기술 구축

- 공동연구기관(동아대학교)

▶ **핵심연구성과 A-1(기성훈) : Multi-Physics 비파괴 검사 기술 및 모니터링 기술 개발**

- 문헌조사를 통한 RC 부재 열화 평가를 위한 비파괴검사법 조사
- 복합열화 단계를 평가할 수 있는 개별 비파괴 검사법 구성 (하드웨어 및 분석 알고리즘 개발)

▶ **핵심연구성과 A-2(기성훈) : 탐사기법간 통합 Data Fusion 알고리즘 개발**

- 열화단계에 따른 개별 비파괴 검사법 민감도 분석
- 재료의 역학적 특성과 개별 비파괴 검사 인자 상관관계 정리

2) 2차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(한양대학교)

▶ **핵심연구성과 B : 상태평가를 고려한 R/C 건축물 내진성능 평가 실용화 기술 개발**

- B-1 (이강석) : 상태평가를 고려한 R/C 건축물 내진성능평가 기술 개발

- 공동연구기관(동아대학교)

▶ 핵심연구성과 A-1 : Multi-Physics 비파괴 검사 기술 및 모니터링 기술 개발

- A-1 (기성훈) : Multi-physics 비파괴 검사를 활용한 구조물 내진성능 평가를 위한 주요 인자 평가 기술 개발

▶ 핵심연구성과 A-2 : 탐사기법간 통합 Data Fusion 알고리즘 개발

- A-2 (기성훈) : Multi-physics 비파괴 검사 결과의 data fusion 알고리즘 개발

② 개발 내용 및 범위(그림을 이용하여 시스템 구성도, 구조 등을 구체적으로 표현)

- 주관연구기관(한양대학교)

▶ 핵심연구성과 B : 상태평가를 고려한 R/C 건축물 내진성능 평가 실용화 기술 개발

- 내진성능평가 기술 및 구조실험 비교 및 피드백
- 비파괴 기술 기반 저감계수 융합 내진성능평가 기술 개발

- 공동연구기관(동아대학교)

▶ 핵심연구성과 A-1 : Multi-Physics 비파괴 검사 기술 및 모니터링 기술 개발

- 콘크리트 재료 압축강도 평가 모델 개발 (GPR, IE, SASW, UPV)
- 콘크리트 재료 탄성계수 평가 모델 개발 (IE, SASW, UPV)
- 콘크리트-철근 부착상태 평가 모델 개발 (ER, GPR, USW)

▶ 핵심연구성과 A-2 : 탐사기법간 통합 Data Fusion 알고리즘 개발

- 개별 비파괴 검사법의 통계적 특성 분석 (실험결과 및 문헌연구)
- 머신러닝 기법을 활용한 이종데이터 융합 알고리즘 개발

2) 3차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(한양대학교)

▶ 핵심연구성과 B : 상태평가를 고려한 R/C 건축물 내진성능 평가 실용화 기술 개발

- B-1 (이강석) : 비파괴기술 기반 상태평가를 고려한 내진성능평가 실용화 기술

- 공동연구기관(동아대학교)

▶ 핵심연구성과 A-1 : Multi-Physics 비파괴 검사 기술 및 모니터링 기술 개발

- A-1 (기성훈) : 파일럿 테스트 실시 및 피드백을 통한 성능 검증

▶ 핵심연구성과 A-2 : 탐사기법간 통합 Data Fusion 알고리즘 개발

- A-2 (기성훈) : Multi-physics 및 data fusion 기반 구조물 평가를 위한 실용화 기술

② 개발 내용 및 범위(그림을 이용하여 시스템 구성도, 구조 등을 구체적으로 표현)

- 주관연구기관(한양대학교)

▶ 핵심연구성과 B : 상태평가를 고려한 R/C 건축물 내진성능 평가 실용화 기술 개발

- 파일럿 테스트 실시 및 피드백을 통한 개선
- 실용화를 위한 비선형 정밀해석법 구축
- 비파괴기술 기반 상태평가를 고려한 특정관리대상 R/C 건축물 내진성능평가 기준(안) 개발

- 공동연구기관(동아대학교)

▶ 핵심연구성과 A-1 : Multi-Physics 비파괴 검사 기술 및 모니터링 기술 개발

- 파일럿 테스트 실시를 통한 성능 평가 및 피드백을 통한 개선

▶ 핵심연구성과 A-2 : 탐사기법간 통합 Data Fusion 알고리즘 개발

- Multi-physics 및 data fusion 기법 표준 매뉴얼 개발
- Multi-physics 및 data fusion 기법을 활용한 RC 구조물 상태평가 기준(안) 개발

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내・외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2019)	기존 철근콘크리트 건축물의 내진성능평가 기술분석 및 핵심기술 구축	문헌조사를 통한 기존 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 기술 조사 및 분석	독일/BAM	80%		
		기존 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 핵심기술 도출 및 구축	독일/BAM	90%		
	철근콘크리트 부재 복합열화 평가의 최적화를 위한 Multi-physics 비파괴 검사법 구축	문헌조사를 통한 철근콘크리트 부재 열화 평가를 위한 비파괴검사법 조사	독일/BAM	90%		
		복합열화 단계를 평가할 수 있는 개별 비파괴 검사법 구성 (하드웨어 및 분석 알고리즘 개발)	미국/Rutgers 대학	200 m^2/hr		
	Data fusion 알고리즘 개발을 위한 Multi-physics 비파괴 검사 결과 해석 기술 개발	열화단계에 따른 개별 비파괴 검사법 민감도 분석	일본/JBDPA	90%		
		재료의 역학적 특성과 개별 비파괴 검사 인자 상관관계 정리	일본/JBDPA	90%		
2년차 (2020)	구조실험을 통한 상태평가 기반 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 기술 개발	철근콘크리트 부재 (보, 기둥) 가속열화실험과 구조실험을 통한 내진성능평가 기술 도출 및 개선	일본/JBDPA	90%		
		상태평가 기반 융합 내진성능평가 기술 개발	독일/BAM	80%		
	Multi-physics 비파괴 검사 활용 구조물 성능평가 기술 개발	콘크리트 압축강도, 콘크리트 탄성계수, 철근-콘크리트 부착상태 평가 모델 개발 및 Multi-physics 비파괴검사 인자 모니터링	독일/BAM	80%		
		개별 비파괴 검사법의 통계적 특성 분석 (실험결과 및 문헌연구)	미국/Rutgers 대학	100 m^2/hr		
	Multi-physics 비파괴 검사 결과의 Data fusion 알고리즘 개발	머신러닝 기법을 활용한 이종데이터 융합 알고리즘 개발 및 비파괴검사 결과를 통한 평가값과 비교	일본/JBDPA	90%		
		테스트 베드 실시 및 피드백을 통한 평가법 정립	일본/JBDPA	90%		
3년차 (2021)	테스트 베드를 통한 Multi-physics 및 Data fusion 기반 기존 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 기술 실용화	비선형 정밀해석법 구축	독일/BAM	85%		
		비파괴기술 기반 상태평가를 고려한 기존 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 기준(안) 개발	미국/FHWA	85%		
	테스트 베드를 통한 Multi-physics 비파괴 기술 실용화	테스트 베드 실시를 통한 Multi-physics 비파괴 성능평가 및 피드백을 통한 개선	미국/Rutgers 대학	150 m^2/hr		
		Multi-physics 기법 표준 매뉴얼 및 상태평가 기준 개발	일본/JBDPA	80%		
	테스트 베드를 통한 Data fusion 비파괴 기술 실용화	테스트 베드 실시를 통한 Data fusion 비파괴 성능 평가 및 피드백을 통한 개선	일본/JBDPA	75%		
		Data fusion 기법 표준 매뉴얼 및 상태평가 기준 개발	독일/BAM	90%		

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

1. 추진일정

연차	연구목표	연구내용	추진일정(월별)												책임자 (소속 기관)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1차 년도	기존 철근콘크리트 건축물의 내진성능평가 기술분석 및 핵심기술 구축	문헌조사를 통한 기존 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 기술 조사 및 분석				■	■	■	■	■					이강석 (한양대)
		기존 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 핵심기술 도출 및 구축							■	■	■	■	■	■	
	철근콘크리트 부재 복합열화 평가의 최적화를 위한 Multi-physics 비파괴 검사법 구축	문헌조사를 통한 철근콘크리트 부재 열화 평가를 위한 비파괴검사법 조사				■									기성훈 (동아대)
		복합열화 단계를 평가할 수 있는 개별 비파괴 검사법 구성 (하드웨어 및 분석 알고리즘 개발)				■	■	■							
	Data fusion 알고리즘 개발을 위한 Multi-physics 비파괴 검사 결과 해석 기술 개발	열화단계에 따른 개별 비파괴 검사법 민감도 분석						■	■	■	■	■			이강석 (한양대)
		재료의 역학적 특성과 개별 비파괴 검사 인자 상관관계 정리								■	■	■	■	■	기성훈 (동아대)
2차 년도	구조실험을 통한 상태평가 기반 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 기술 개발	철근콘크리트 부재 (보, 기둥) 가속열화실험과 구조실험을 통한 내진성능평가 기술 도출 및 개선	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	이강석 (한양대)
		상태평가 기반 융합 내진성능평가 기술 개발					■	■	■	■	■	■	■	■	
	Multi-physics 비파괴 검사 활용 구조물 성능 평가 기술 개발	콘크리트 압축강도, 콘크리트 탄성계수, 철근-콘크리트 부착상태 평가 모델 개발 및 Multi-physics 비파괴검사 인자 모니터링	■	■	■	■	■	■	■	■					기성훈 (동아대)
	Multi-physics 비파괴 검사 결과의 Data fusion 알고리즘 개발	개별 비파괴 검사법의 통계적 특성 분석 (실험결과 및 문헌연구)	■	■	■	■									이강석 (한양대)
		머신러닝 기법을 활용한 이종데이터 융합 알고리즘 개발 및 비파괴검사 결과를 통한 평가값과 비교			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	기성훈 (동아대)
3차 년도	테스트 베드를 통한 Multi-physics 및 Data fusion 기반 기존 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 기술 실용화	테스트 베드 실시 및 피드백을 통한 평가법 정립	■	■	■	■	■								이강석 (한양대)
		비선형 정밀해석법 구축				■	■	■	■	■	■				
		비파괴기술 기반 상태평가를 고려한 기존 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 기준(안) 개발							■	■	■	■	■	■	
	테스트 베드를 통한 Multi-physics 비파괴 기술 실용화	테스트 베드 실시를 통한 Multi-physics 비파괴 성능 평가 및 피드백을 통한 개선	■	■	■	■									기성훈 (동아대)
		Multi-physics 기법 표준 매뉴얼 및 상태평가 기준 개발				■	■	■	■	■	■				
	테스트 베드를 통한 Data fusion 비파괴 기술 실용화	테스트 베드 실시를 통한 Data fusion 비파괴 성능 평가 및 피드백을 통한 개선	■	■	■	■									이강석 (한양대)
		Data fusion 기법 표준 매뉴얼 및 상태평가 기준 개발					■	■	■	■	■	■	■	■	기성훈 (동아대)

1. 1차 년도 연구

1차 년도 연구수행도

구분(연도/단계))	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
1차 연도 (2019)	Multi-Physics 및 Data fusion 비파괴기술 기반 기존 철근콘크리트 건축물의 상태평가를 고려한 내진성능평가 실용화 기술 개발	상태평가를 고려한 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 실용화 기술 개발	• 기존 철근콘크리트 건축물의 내진성능 평가 기술 분석 및 핵심기술 구축	• 내진성능 평가 기술 분석 및 해석적 연구를 통해 각 파괴모드별 비선형 내진성능평가 알고리즘을 제시 • 구조부재의 부식단계에 대한 내진성능(강도능력, 연성능력, 에너지소산능력)의 저감정도 반영 기초이론 구축 1) 문헌조사를 통한 기존 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 기술 조사 및 분석 (100%) 2) 기존 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 핵심기술 도출 및 구축 (100%)
		Multi-Physics 비파괴 검사 기술 및 모니터링 기술 개발	• 철근콘크리트 부재 복합열화 평가의 최적화를 위한 Multi-Physics 비파괴 검사법 개발	• 복합열화가 발생한 철근콘크리트 건축물 상태평가를 위한 Multi-physics 비파괴 검사법 개발 1) 문헌조사를 통한 철근콘크리트 부재 열화 평가를 위한 비파괴검사법 조사 (100%) 2) 복합열화 단계를 평가할 수 있는 개별 비파괴 검사법 구성 (100%) (하드웨어 및 분석 알고리즘 개발)
		탐사기법간 통합 Data fusion 알고리즘 개발	• Data fusion 알고리즘 개발을 위한 Multi-Physics 비파괴 검사결과 해석기술 개발	• 이종 데이터 융합을 위한 최적 data fusion 알고리즘 선정을 위한 사전연구 수행 1) 열화단계에 따른 개별 비파괴 검사법 민감도 분석 (80%) 2) 재료의 역학적 특성과 개별 비파괴 검사 인자 상관관계 정리 (80%) • 복합열화에 의해 발생하는 성능저감의 주요요인인 부착력과 내진성능의 저감사이의 상관관계를 찾기 위한 유한요소해석을 추가적으로 수행

① 복합열화단계를 고려할 수 있는 개별 비파괴 검사법 구성

1차연도 연구에서는 문헌조사를 통항여 철근 부식에 따른 RC 부재 열화 메카니즘 분석 및 복합 열화단계(잠재기, 진행기, 가속기, 열화기)에 따른 평가에 적합한 비파괴검사법을 조사하였다. (표 1-1 참조) 이를 바탕으로 실험실 및 현장에서 단계별 Multi-physics 현상을 측정하기 위한 개별비파괴 검사 장비를 구성하였다. (표 1-1 및 그림 1-2 참조)

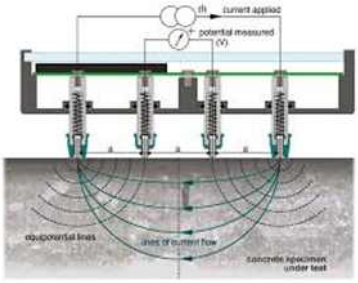
[표 1-1] 열화단계에 따른 주요 현상 및 열화 평가를 위한 유용한 비파괴 검사법

열화단계	현상	비파괴 검사법
잠재기	전기화학적 철근 부식	ER, HCP
진행기	내부응력 증가 및 미세균열 발생	HCP, GPR
가속기	콘크리트 표면균열 및 내부박리 발생	GPR. IE, UPV, USW
열화기	콘크리트 표면 박락 (스폴링) 발생	육안평가

Note: ER: 전기비저항, HCP: 자연전위측정, GPR:지반침투레이더, IE: 충격반향법, UPV: 초음파속도법, USW: 고주파표면파

[표 1-2] 비파괴 검사법에 따른 하드웨어 구성 예시

열화단계	원리	하드웨어 구성
ER	정전류흐름	전극 2개 (외부): 전류발생, 전극2개(내부): 전압측정 (wenner probe 활용예정)
HCP	전기화학	기준전극 1개 (Cu/CuSo4), 전압계 (Half-cell potentiometer 활용예정)
GPR	전자기파 전달	Ground coupled GPR 장비 활용 예정
IE	응력파 전달	센서 1개 (가속도계), 임팩트 해머 1개, DAQ 장치, 해석프로그램 (개발예정)
USW	응력파 전달	센서 2개 (가속도계), 임팩트 해머 1개, DAQ 장치 (2채널), 해석프로그램 (개발예정)
UPV	초음파 전달	초음파센서 2개(발신기, 수신기), Pulser-receiver 1개, DAQ(2채널),해석프로그램 (개발예정)
육안평가	광학적 현상	고해상도카메라, 디지털신호분석 프로그램 (개발예정)

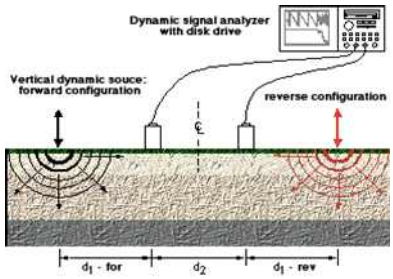


ER


HCP


GPR


IE



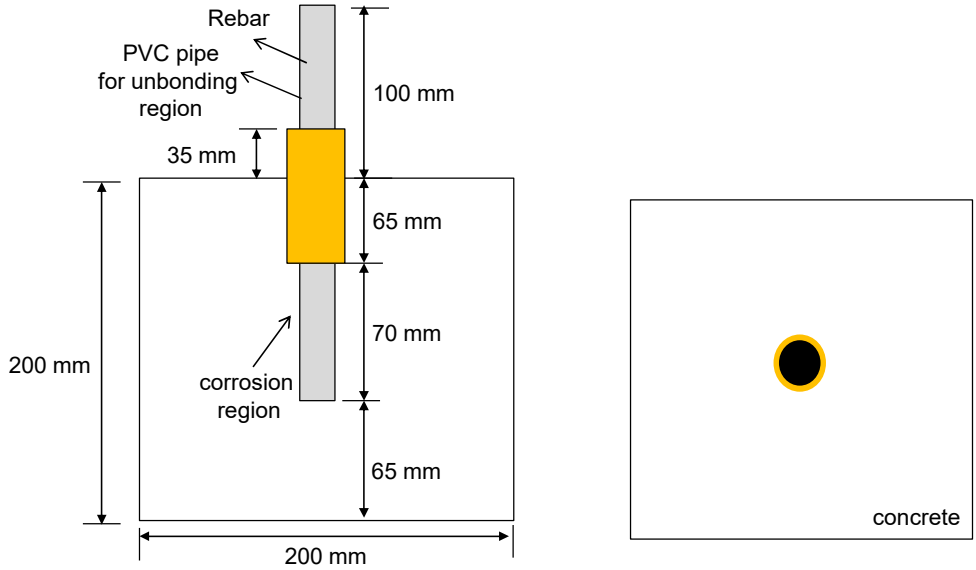
SASW/MASW/SWT


Shear wave tomography

[그림 1-2] Multi-physics 비파괴 검사 수행을 위한 하드웨어 구성

② 콘크리트에 매입된 철근 부식에 따른 복합열화 단계에서 재료물성과 Multi-physics 비파괴검사 인자의 상관관계 규명을 위한 실험적 연구

1차 연도에서는 콘크리트 내부 철근 부식에 따른 재료열화에 대한 Multi-physics 비파괴 검사인자의 민감도 평가를 수행하기 위한 장비 구성 및 실험제 제작(그림 1-3 참조)을 완료하였다. 또한 철근 부식 정도에 따른 콘크리트-철근 계면 부착력 저하 특성 평가를 위한 실험 장치 및 측정 시스템을 구성하였다.

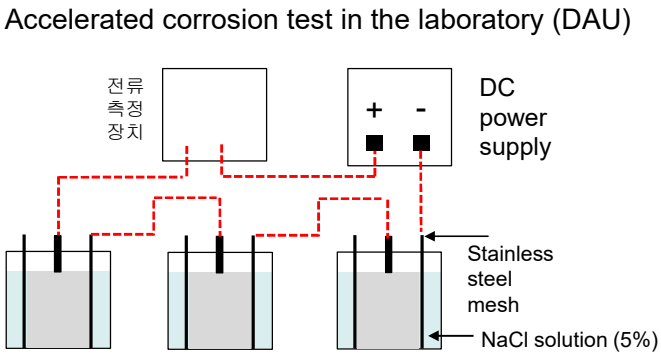


[그림 1-3] 급속 부식 및 철근 부착력 평가를 위한 실험체 계획



(a) (b) (c)

[그림 1-4] 실험체 제작 및 양생보관 중인 실험체 모습





[그림 1-5] 콘크리트에 매입된 철근의 급속부식실험 수행

[표 1-3] 철근 급속 부식실험을 위한 전류인가 계획

부식 상태		1년동안 부식전류 밀도 (μA/cm²)	1년간 녹성장 두께 [μm]	24시간 동안 흘려주어야 하는 전류 [mA/cm²]	D10 [mA]	D13 [mA]	D19 [mA]	D22 [mA]
1	부동태~낮은부식상태	0	0	0	0	0	0	0
2	중간부식상태	0.7	11	0.256	5.37	7.15	10.75	12.50
3	높은부식상태	1.5	27.5	0.548	11.50	15.30	23.00	26.75
4	매우높은부식상태	3.0	60	1.095	22.95	30.58	46.00	53.45

2. 2차 년도 연구

2차 년도 연구수행도

구분 (연도/단계)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
2차 연도 (2020)	Multi-Physics 및 Data fusion 비파괴기술 기반 기존 철근콘크리트 건축물의 상태평가를 고려한 내진성능평가 실용화 기술 개발	구조실험을 통한 상태평가 기반 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 기술개발	• 철근콘크리트 부재 가속열화실험과 구조실험을 통한 내진성능 평가 기술 도출 및 개선	1) 전단 및 휨지배형 철근콘크리트 보 부재 제작 2) 급속부식실험을 통한 5단계 (0,5%,10%,25%,50%) 철근부식 모사 3) 철근부식율에 따른 Multi-physics NDE 인자변화(HCP, ER, GPR, USWT, MASW) 측정 4) 철근부식율에 따른 전단 및 휨지배형 철근콘크리트보의 전단 및 휨성능 평가
		Multi-Physics 비파괴 검사 활용 구조물 성능 평가기술 개발	• 콘크리트 압축강도, 콘크리트 탄성계수, 철근-콘크리트 부착상태 평가 모델 개발 및 Multi-Physics 비파괴검사 인자 모니터링	1) 콘크리트 건조상태(수분상태)에 따른 탄성계수 (동탄성계수 및 정탄성계수) 및 압축강도 변화 평가 2) 철근의 부식상태(0%, 3%, 5%, 10%)에 따른 철근의 부착강도 변화의 실험적 연구 (강도의 영향, 철근 직경의 영향 고려) 3) 철근의 부식율에 따른 철근-콘크리트 부착거동 예측을 위한 유한요소해석 모델 개발
		Multi-Physics 비파괴 검사 결과의 data fusion 알고리즘 개발	• 개별 비파괴 검사법의 통계적 특성 분석	1) 열화단계에 따른 개별 비파괴 검사법 민감도 분석 (80%) 2) 재료의 역학적 특성과 개별 비파괴 검사 인자 상관관계 정리 (80%) 3) 복합열화에 의해 발생하는 성능저감의 주요요인인 부착력과 내진성능의 저감사이의 상관관계를 찾기 위한 유한요소해석을 추가적으로 수행

① 복합열화단계를 고려할 수 있는 개별 비파괴 검사법 구성

1차 연도 연구에서 문헌조사를 통하여 조사한 철근 부식에 따른 RC 부재 열화 메카니즘 분석 및 복합 열화단계(잠재기, 진행기, 가속기, 열화기)에 따른 평가에 적합한 비파괴검사를 조사하였음 (표 1-1 참조). 2차 연도 연구에서는 이를 바탕으로 실험실 및 현장에서 단계별 Multi-physics 현상을 측정하기 위한 개별 비파괴 검사 장비를 구성하였음 (표 1-1 및 그림 1-2 참조).

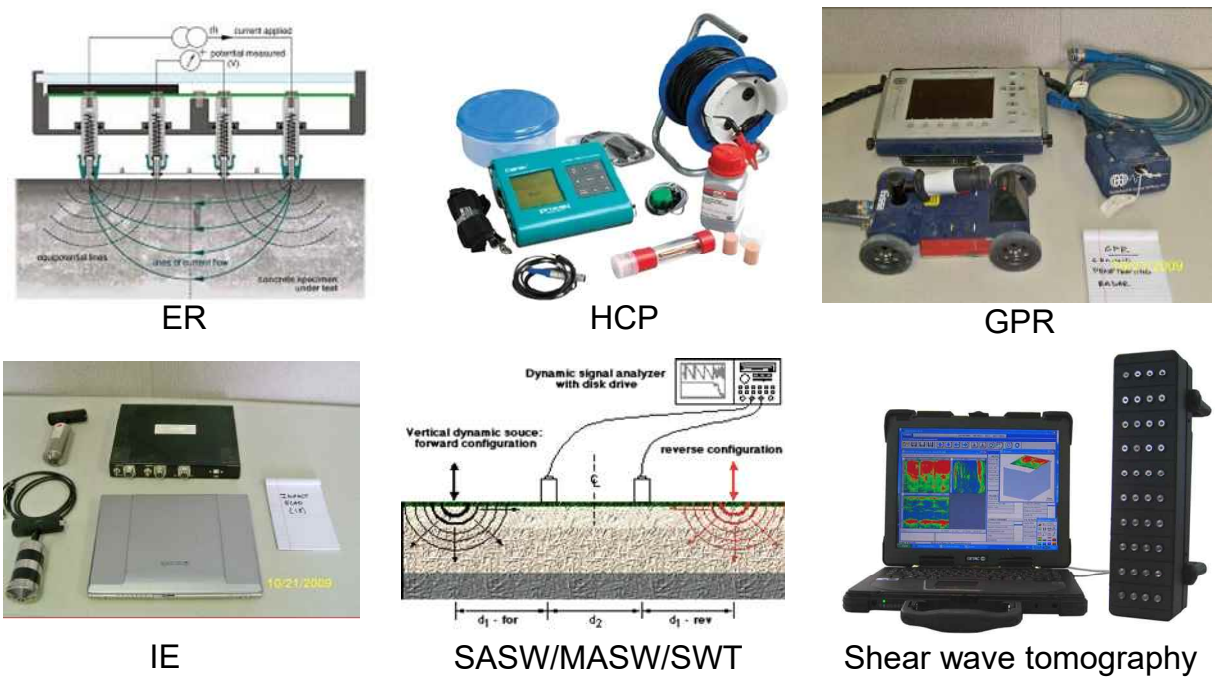
[표 1-1] 열화단계에 따른 주요 현상 및 열화 평가를 위한 유용한 비파괴 검사법

열화단계	현상	비파괴 검사법
잠재기	전기화학적 철근 부식	ER, HCP
진행기	내부응력 증가 및 미세균열 발생	HCP, GPR
가속기	콘크리트 표면균열 및 내부박리 발생	GPR. IE, UPV, USW
열화기	콘크리트 표면 박락 (스폴링) 발생	육안평가

Note: ER: 전기비저항, HCP: 자연전위측정, GPR:지반침투레이더, IE: 충격반향법, UPV: 초음파속도법, USW: 고주파표면파

[표 1-2] 비파괴 검사법에 따른 하드웨어 구성 예시

열화단계	원리	하드웨어 구성
ER	정전류흐름	전극 2개 (외부): 전류발생, 전극2개(내부): 전압측정 (wenner probe 활용예정)
HCP	전기화학	기준전극 1개 (Cu/CuSo4), 전압계 (Half-cell potentiometer 활용예정)
GPR	전자기파 전달	Ground coupled GPR 장비 활용 예정
IE	응력파 전달	센서 1개 (가속도계), 임팩트 해머 1개, DAQ 장치, 해석프로그램 (개발예정)
USW	응력파 전달	센서 2개 (가속도계), 임팩트 해머 1개, DAQ 장치 (2채널), 해석프로그램 (개발예정)
UPV	초음파 전달	초음파센서 2개(발신기, 수신기), Pulser-receiver 1개, DAQ(2채널),해석프로그램 (개발예정)
육안평가	광학적 현상	고해상도카메라, 디지털신호분석 프로그램 (개발예정)

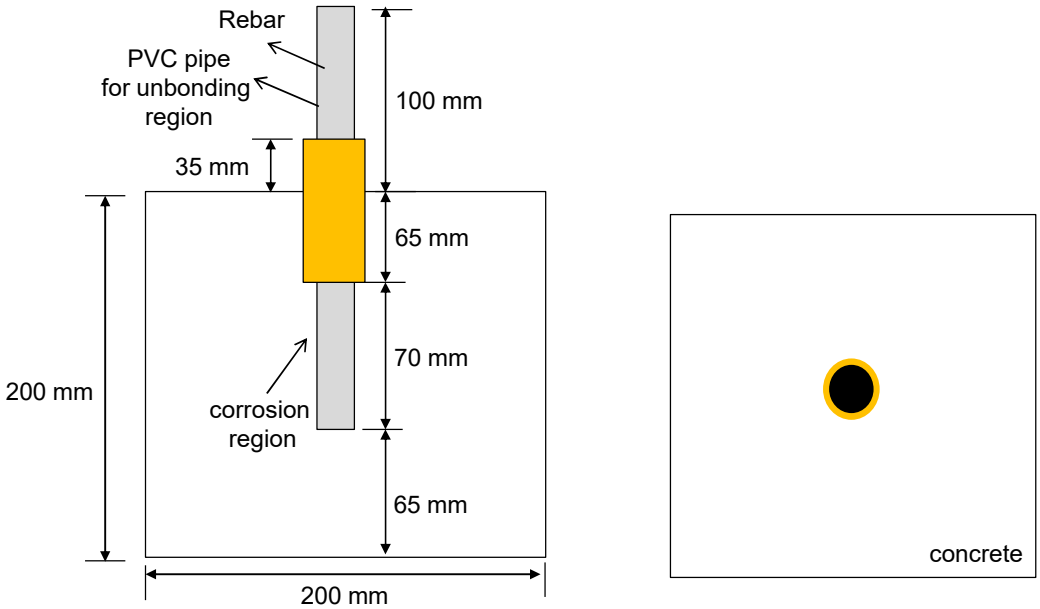


[그림 1-2] Multi-physics 비파괴 검사 수행을 위한 하드웨어 구성

② 콘크리트에 매입된 철근 부식에 따른 복합열화 단계에서 재료물성과 Multi-physics 비파괴검사 인자의 상관관계 규명을 위한 실험적 연구

가. 실험체 계획

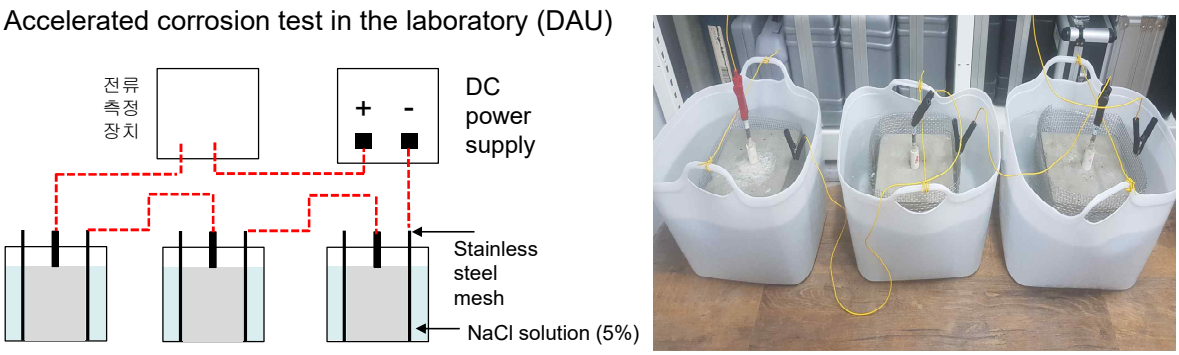
1차 연도에서는 콘크리트 내부 철근 부식에 따른 재료열화에 대한 Multi-physics 비파괴 검사인자의 민감도 평가를 수행하기 위한 장비 구성 및 실험체 제작(그림 1-3 참조)을 완료하였다. 또한 철근 부식 정도에 따른 콘크리트-철근 계면 부착력 저하 특성 평가를 위한 실험 장치 및 측정 시스템을 구성하였다. 2차 연도 연구에서 급속부식실험(그림 1-5)을 통하여 4단계 부식단계(0%, 3%, 5%, 10%)를 모사하였다.



[그림 1-3] 급속 부식 및 철근 부착력 평가를 위한 실험체 계획



[그림 1-4] 실험체 제작 및 양생보관 중인 실험체

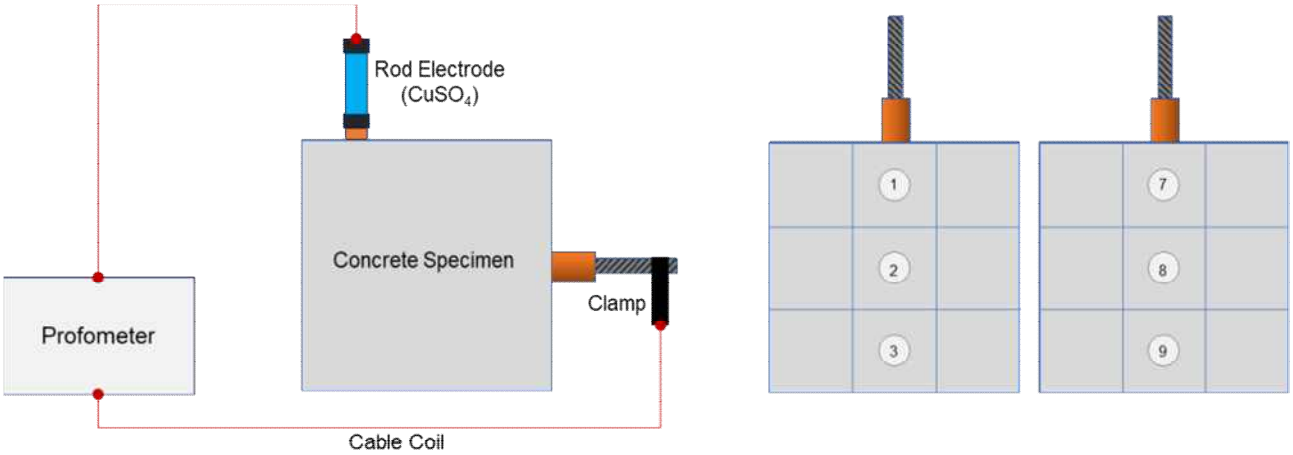


[그림 1-5] 콘크리트에 매입된 철근의 급속부식실험 수행

나. 실험방법

① 반전지 전위 측정법(HCP)

- 자연전위측정법은 철근의 산화작용으로 인한 자유전자 발생에 따른 전위 변화를 기준전극을 이용하여 측정하는 방법임. 이 연구에서 실험은 ASTM C876에 따라 진행하였음. 기준전극은 $Cu/CuSO_4$ 을 사용하여, [그림 1-6]과 같이 실험체에 6개의 지점을 측정을 진행하였다.



[그림 1-6] 철근 콘크리트 실험체 HCP 측정 개략도

[표 1-3] 부식 정도 기준 (ASTM C 876)

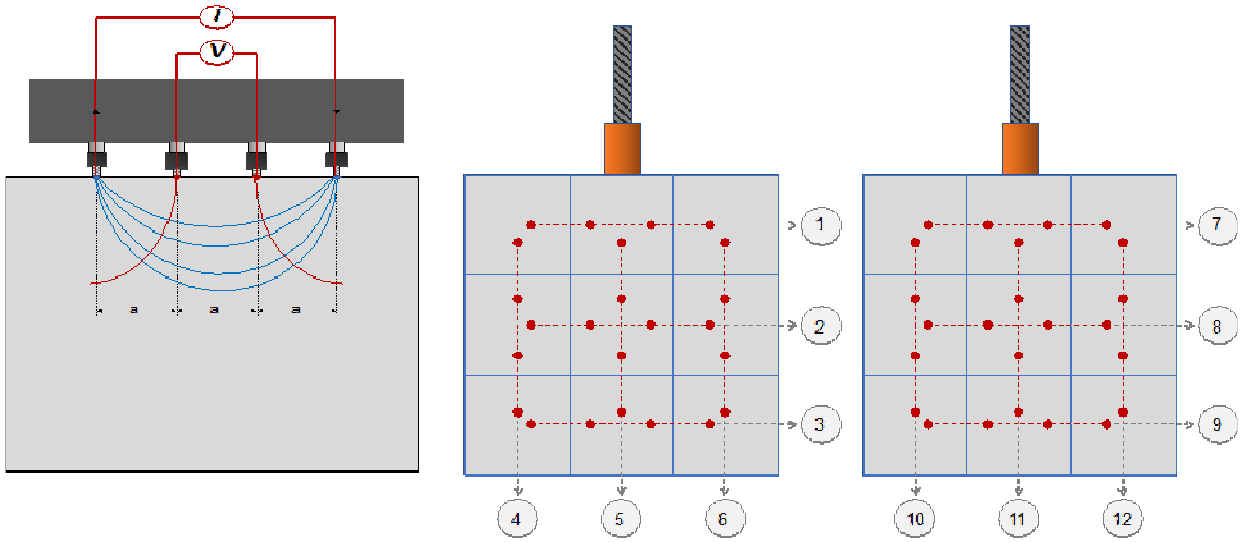
전위 (mV, CSE)	부식확률
-200 이상	낮음 (10% 이하)
-200 ~ -350	불확실
-350 이하	높음 (90% 이상)

② 전기 비저항 측정법(ER)

- 콘크리트에서 전기저항을 측정하기 위해 [그림 1-7]과 같은 4전극방식의 Wenner 측정기를 이용하여 측정을 진행하였다. Wenner 측정기(4전극방식)를 이용한 측정법은 동일한 간격의 전극 4개를 콘크리트 표면에 접촉시킨 후 미소 교류전류(보통 50Hz의 AC current)가 바깥쪽 두 전극 사이에 인가되고 이로 인해 발생된 두 전극사이 전위(Potentail)차(V)를 측정하였다.
- 본 연구에서는 Wenner 측정기 원칙에 기초하여 상용 가능한 장치(Resipod Proceq)를 사용하였다. 이 장치에서 전극의 간격은 38mm(1.5인치)로 표면 저항성 시험 방법을 기술하고 있는 AASHTO T 358기준에 부합 하였다. 기기 설명서에 따르면 시료의 접촉 저항성에 따라 10μA~200μA 범위의 입력 전류가 콘크리트로 구동되었다. 출력 값은 전기저항 측정 단위인 KΩ-cm로 표시되며, 콘크리트 전기저항(ρ)을 다음 식과 같이 표현되었다. 본 실험체에 대해 측정 전 표면에 침지액을 충분히 살포이후 측정을 진행했고, [그림 1-7]과 같이 12지점에 대해 각 10회씩 측정을 수행하였다.

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \qquad (1\text{-}1)$$

여기서 ρ= 전기비저항(kΩ·cm), a = 전극 간격(mm), V = 전압(V) I = 전류(A)를 의미함.



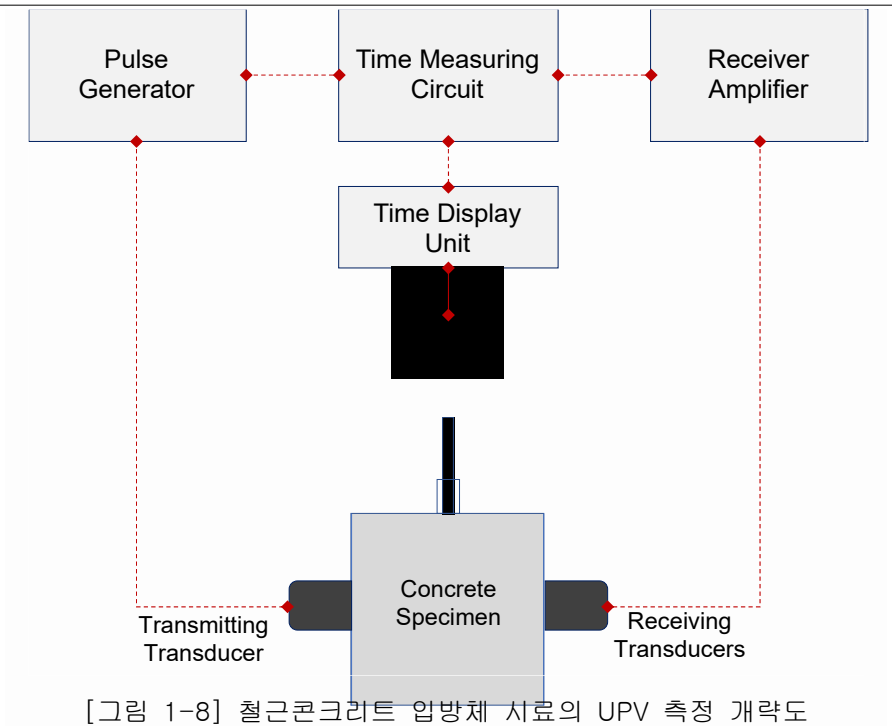
[그림 1-7] Electrical Resistivity 측정 방법

[표 1-4] 부식정도 기준 (Langford and Broomfield, 1987)

Electrical Resistivity (KΩ·㎝)	부식정도
> 20	낮은 부식 상태
10 ~ 20	보통 부식 상태
5 ~ 10	높은 부식 상태
< 5	매우 높은 부식 상태

③ 초음파 속도 측정법(UPV)

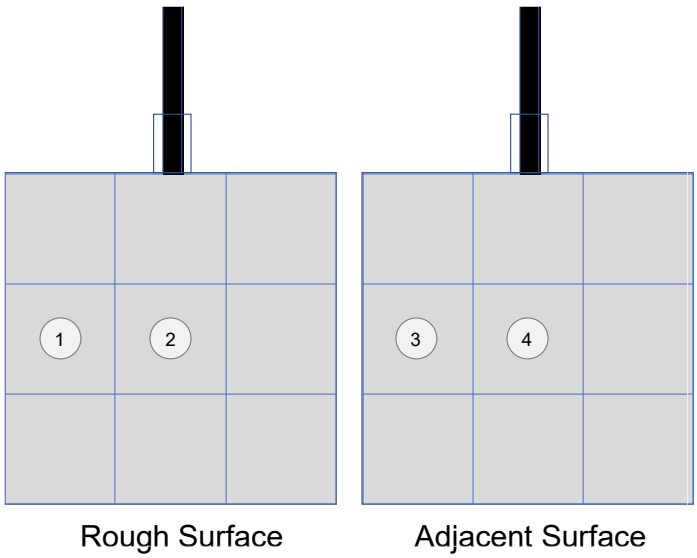
- UPV 테스트는 철근 부식에 따른 콘크리트의 역학적 특성 변화(균열 발생, 공극확대 등)를 평가하기 위하여 활용하였다. 4개의 서로 다른 콘크리트 혼합/설계 강도 및 철근 지름의 철근 콘크리트 입방체의 P파 속도(압축속도)는 ASTM C 597/C597M-16에 따른 표준 시험 방법으로 측정하였다. [그림 1-8]은 초음파 펄스 속도변환기, 펄스 발생기, 수신기 증폭기, 시간 표시 장치 및 측정 회로, 작동 컴퓨터를 사용하여 수집된 방식에 대한 모식도를 나타내었다.
- 본 실험은 [그림 1-9]에 나타낸 것과 같이 서로 다른 주파수의 초음파 펄스를 송수신할 수 있는 변환기 한 쌍을 사용했다. 소스 변환기는 펄스 수신기를 사용하여 지속 시간이 10μs인 200V 사각 펄스에 의해 구동되었다(Panamatics 5077 PR). 센서에 의해 발생된 과도 응력파는 콘크리트에 전파되어 수신 센서에 의해 측정되며, 수신된 신호는 10MHz의 샘플링 속도 및 0.001초의 총 신호 길이로 고속 디지털 오실로스코프(NI-PSI 5101)에 의해 디지털화되었다. 디지털화된 데이터는 데이터 저장과 사후 처리를 위해 노트북 컴퓨터로 전송되며, ASTM C597에 따르면 20-100kHz 범위의 초음파 펄스를 가진 변환기를 콘크리트에 사용할 수 있다. 본 실험에서는 보다 정확한 전송 시간과 더 큰 감도를 달성하기 위해 50kHz 및 1000kHz에 해당하는 센서를 사용했다.
- 콘크리트의 S파속도 VS는 [그림1-8]과 같은 모식도를 따라 위에서 설명한 P파 속도 절차를 사용하여 측정했지만 S파 센서 한 쌍(40kHz)을 사용하여 측정했다. P파속도 측정 절차와 유사하게 S파의 첫 도착 시간도 수정된 임계값 방법에 의해 결정되었다. 단, P파와 달리 직접 P파와 S파의 간섭 때문에 S파의 첫 도착 시간에 대한 정확한 감지가 어려운 경우가 많으며, S파 변환기를 사용하더라도 진폭이 낮은 P파 구성요소는 시간영역의 S파 구성요소와 함께 항상 나타났다. 이 실험에서 P파 및 S파 속도의 경우, 변환기를 4개 위치([그림 1-10] 참조)에 배치하여 철근 유무의 지점에서 파동 속도를 구별하고 평가하였다.



[그림 1-8] 철근콘크리트 압방체 시료의 UPV 측정 개략도



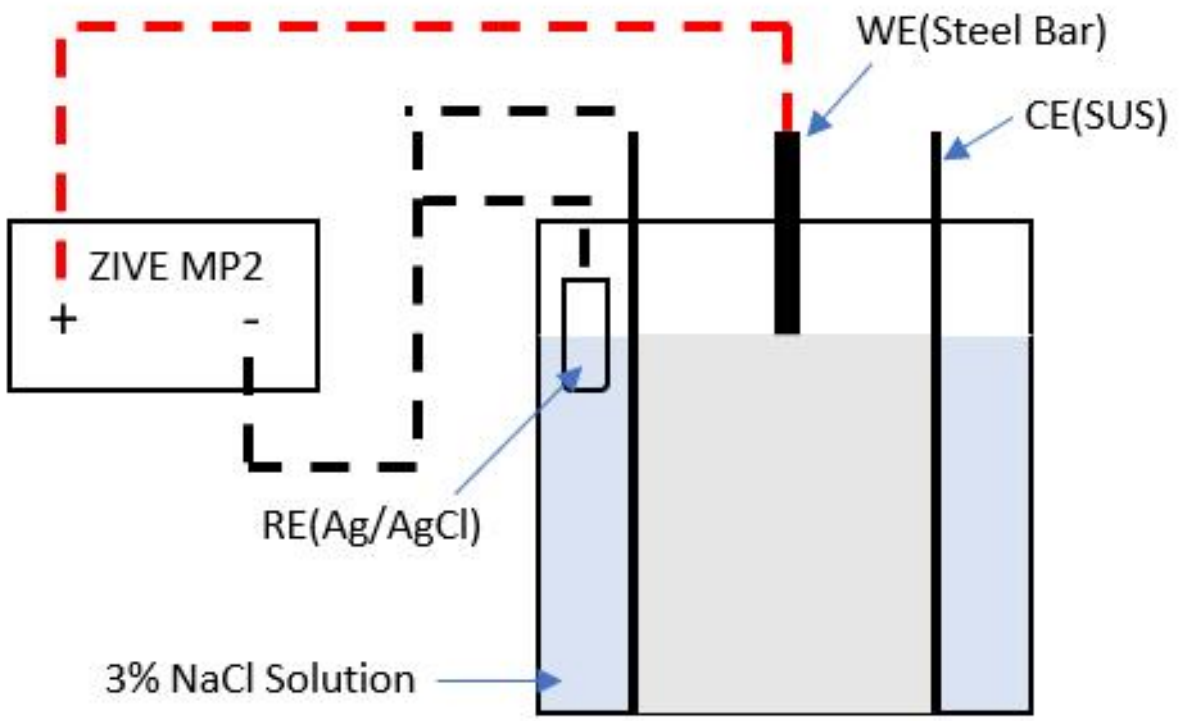
[그림 1-9] 50 kHz 변환기를 이용한 P파속도의 샘플 측정



[그림 1-10]UPV 측정을 위한 변환기 점/위치

④ 전기화학적 임피던스 분광법(EIS)

- 급속부식시험을 적용한 시험체는 3.5% 염화나트륨 수용액에 침지한 상태에서 전기화학적 임피던스 분광법을 활용하여 임피던스를 측정하였다. 전기화학 측정장비는 원아텍 ZIVE MP2를 사용하였으며, 철근을 작업전극(Working electrode,WE), 스테인레스메쉬(SUS304)를 상대전극(Counter electrode,CE), 염화은 전극(Ag/AgCl)을 기준전극(Reference electrode,RE)으로 사용하여 3전극시스템을 구성하였다. (그림 1-11 참조).
- EIS실험은 우선 전극이 평형전위에서 안정이 되도록 부식 전과 후 각각 NaCl 3% 수용액에 침지 후 24시간을 기다린 후에 Zive Lab을 이용하여 ~Hz범위로 교류전압을 인가하였다. 임피던스 측정에 사용된 교류의 진폭은 ±10mV이고, 100kHz에서 1mHz까지 연속적으로 측정하였다. 부식속도를 신속하게 측정하기 위하여 용액저항과 전하이동저항에 각각 해당되는 10kHz와 10mHz 두 개의 주파수에 대응하는 저항을 측정하였고, 실험결과의 분석을 위하여 Scribner Associates사의 Zview를 사용하였다.
- 실험에 앞서 시뮬레이션을 통해 10mHz정도의 저주파수에서 전하이동저항(Rc)을 얻은 후, 모든 주파수에서 측정된 전하이동저항(Rc)의 값과 대략적으로 일치하다는 것을 확인하였고, 실제 실험체에서 같은 결과가 나오는지 실험을 수행하였다.
- Sweep 방식으로 모든 주파수에 해당하는 임피던스를 측정하여 Fitting 진행하여 용액저항(Rs), 전하이동저항(Rc)를 구하여 분극저항(Rp)를 구하였다. 또한, 두 주파수(10kHz, 10mHz)에 해당하는 임피던스만 측정하는 2Points 방식으로도 임피던스 측정하여 분극저항(Rp)를 구하였고, 두 방식으로 구한 용액저항(Rs)과 전하이동저항(Rc), 주파수(Hz)를 이용하여 최종적으로 분극저항, 즉 부식속도를 비교하였다.



[그림 1-11] EIS 실험 개략도

[그림 1-5] EIS 실험 개요

Frequency range	10^{5}~10^{-3} Hz
Specimen Size	200mm×200mm×200mm
WE	D10 rebar
RE	SUS 304
CE	Ag/AgCl

⑤ 인발 시험

- 인발 실험은 [그림 1-12]와 같이 제작된 시편을 250kN급의 UTM에 배치한 후 철근과 콘크리트 사이에 LVDT를

설치하고 1mm/min의 속도로 하중을 재하하면서 철근과 콘크리트 사이 변위를 측정하고 재하 하중을 계측하였음. 부착응력의 산정은 실험을 통해 얻은 파괴하중 값으로부터 (식 1-2)를 이용하여 부착응력을 산정하였다.

$$U = \frac{P}{\pi D l} \tag{1-2}$$

여기서 U = 부착응력[MPa], P= 파괴하중[kN], D= 철근의지름 [mm], l= 철근의 부착길이[mm]를 의미한다.



[그림 1-12] pull out test 장치구성

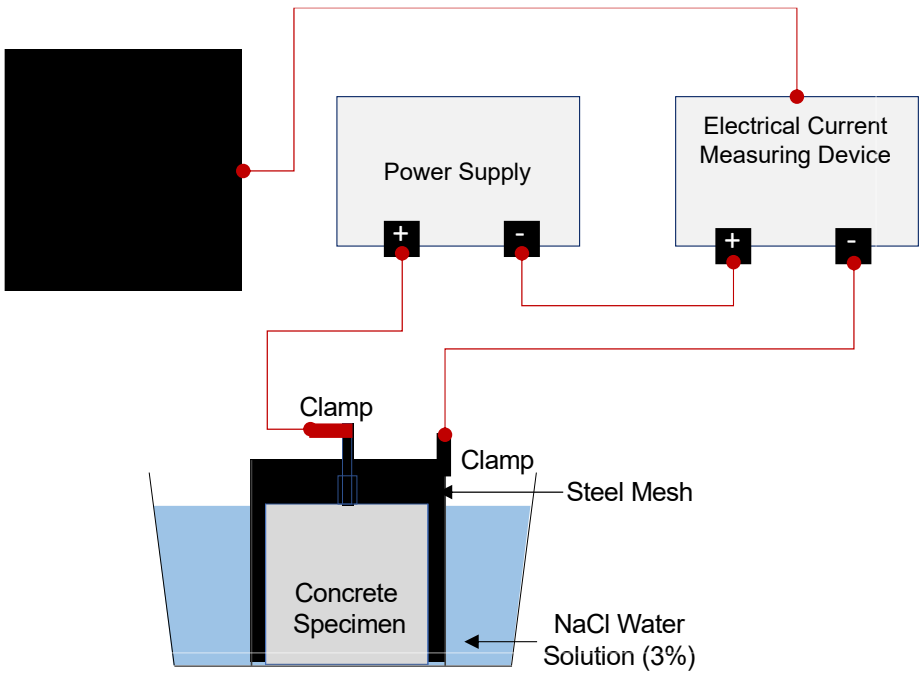
⑥ 급속 부식실험

- 철근부식방법은 3.5wt.% 염화나트륨 수용액에 실험체를 침지하여 직류전원의 (+)극은 철근에, (-)극은 스테인리스스틸 메시에 연결하여 직류회로를 구성하였다. 철근부식은 패러데이 법칙을 이용하여 (식 1-3)와 같이 시간에 대한 전류량의 적분값으로 부식도를 산출하였다.

$$CL_{Faraday} = \frac{1}{n \times F} \int_0^{te} q dt \tag{1-3}$$

- 여기서 n은 철분자당 전자의 수, 2, F는 패러데이 상수 (96500 Coulomb/mol), q는 전류(A)이며, 철 분자 1목의 질량이 55.847g이므로, 시간 te 동안 급속부식을 진행하였을 때 철근의 부식량은 (식 1-4)와 같이 표현된다.

$$m_{loss}(g) = \frac{t_e(\sec) \times q(Coulomn/\sec) \times 55.847(g/mol)}{2 \times 96500(Coulomn/mol)} \tag{1-4}$$

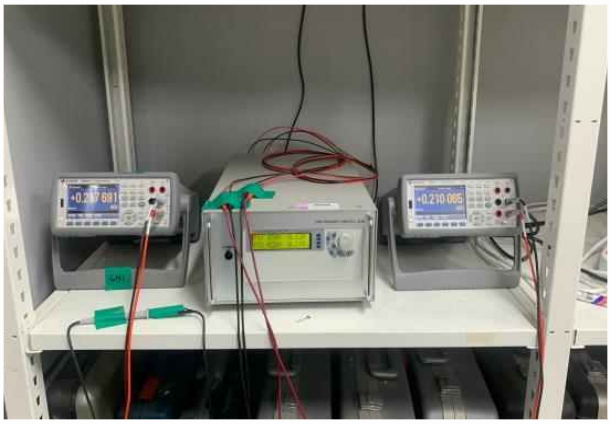


[그림 1-12] 가속도 부식도

- 목표 부식율은 0%, 3%, 5%, 10% 4단계의 부식단계를 모사하였고, 부식율은 부식에 따른 철원자의 질량감량으로 (식 1-5)와같이 정의하였다.

$$CL = \frac{m_{cor}}{m_{solid}} \times 100\,[\%] \quad (1\text{-}5)$$

- 목표 부식율을 얻기 위하여 전하량은 패러데이법칙을 활용하여 결정하였으며, D10, D13 철근에 대하여 [표 1-6]에 정리하였다.



(a) DC전류 공급장치 및 전류모니터링 장치



(b)급속부식실험중인 시험체 사진

[그림 1-13] 가속 부식 설정

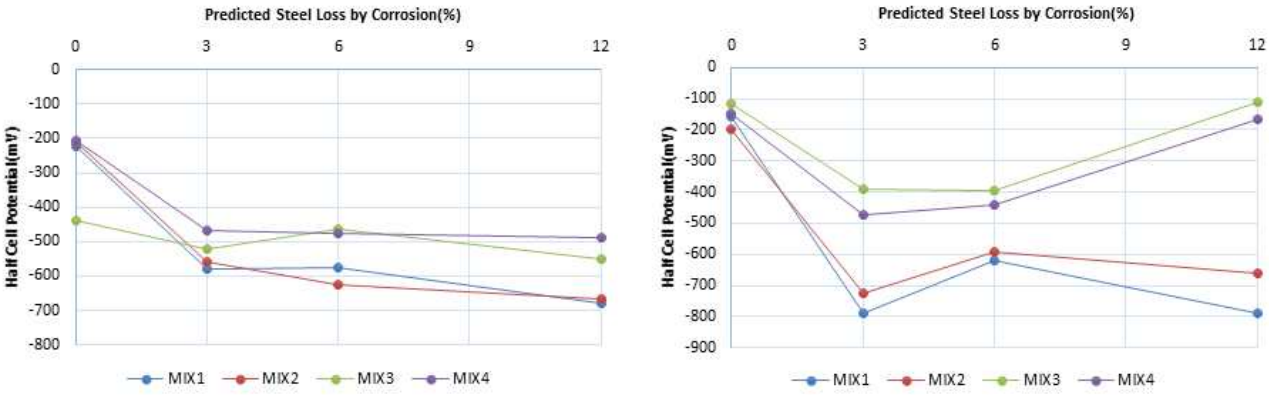
[표 1-6] 부식수준별 부식 및 누적전하에 따른 단면손실율

Corrosion Level	D10		D13	
	Steel Loss by Corrosion (%)	Accumulated Charge (C)	Steel Loss by Corrosion (%)	Accumulated Charge (C)
C0	0	0	0	0
C1	3	4,100	3	7,240
C2	6	14,481	6	14,481
C3	12	28,962	12	109,149

다. 실험결과

① 부식 정도에 따른 HCP

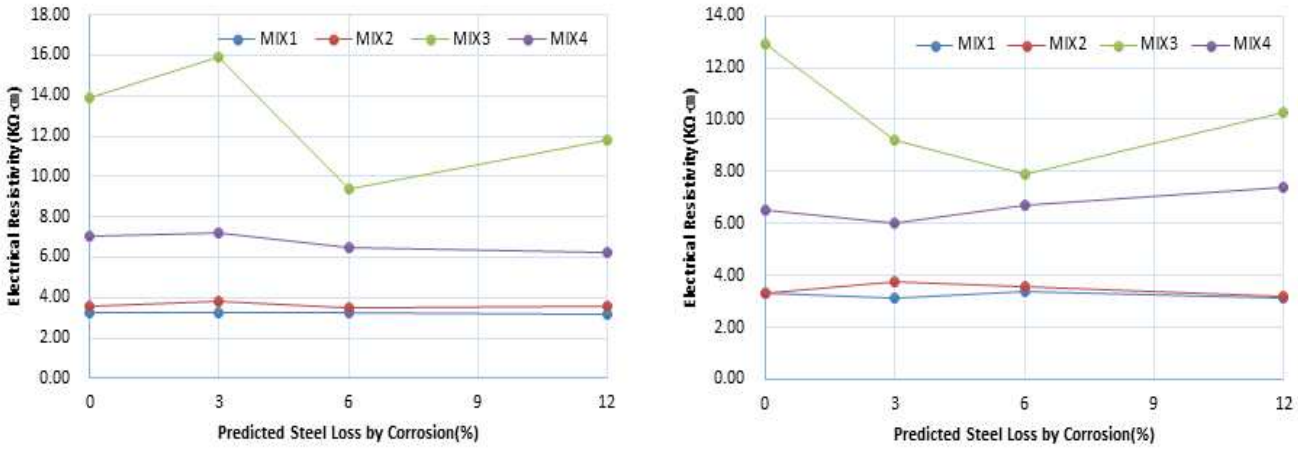
- [그림 1-14]는 부식률에 따른 Hall Cell Potential 값의 변화를 나타내었다. HCP는 [표 1-3]의 기준에 따라 -200이상은 부동태 상태를 나타내었다. 부식률이 0%에는 그 기준에 적합한 값을 나타내며, MIX1과 MIX2에서 다른 강도보다 좀 더 낮은값으로 나타났다. 그러나 부식이 진행된 이후에는 값이 크게 변화가 없는 것으로 판단되며, D13에서 12%에서 MIX3, MIX4의 값은 큰 것으로 보여 부식이 진행되지 않았을 것으로 판단된다.



[그림 1-14] 부식률에 따른 반전지 전위(HCP) 관계

② 부식 정도에 따른 ER

- [그림 1-15]는 페러데이 법칙에 의해 계산된 부식률에 따른 Electrical Resistiviy의 변화를 보여준다. 기존의 ER를 이용한 부식정도를 판단하는 기준과 비교한다면 본 실험에 측정한 값을 MIX3를 제외하고는 모두 부식이 진행되는 측정값을 나타냈다. 이는 ER는 부식정도 뿐만 아니라 철근의 유무, 염화물량, 침지물, 온등, 함수량 등에 의해 간섭을 받았다. 본 실험체는 NaCl 침지물에 침지되어 ER 값이 많이 낮은 것으로 판단되며, 부식률에 따라 크게 변화하는 경향을 발견하기 어려운 것으로 보아 여러 변수를 제어하지 못한다면 ER은 부식정도를 판단하기는 어려운 것으로 판단되었다. 그러나 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 ER값도 증가하는 것로 보아 콘크리트 강도는 ER 값에 영향을 주는 것으로 판단된다.



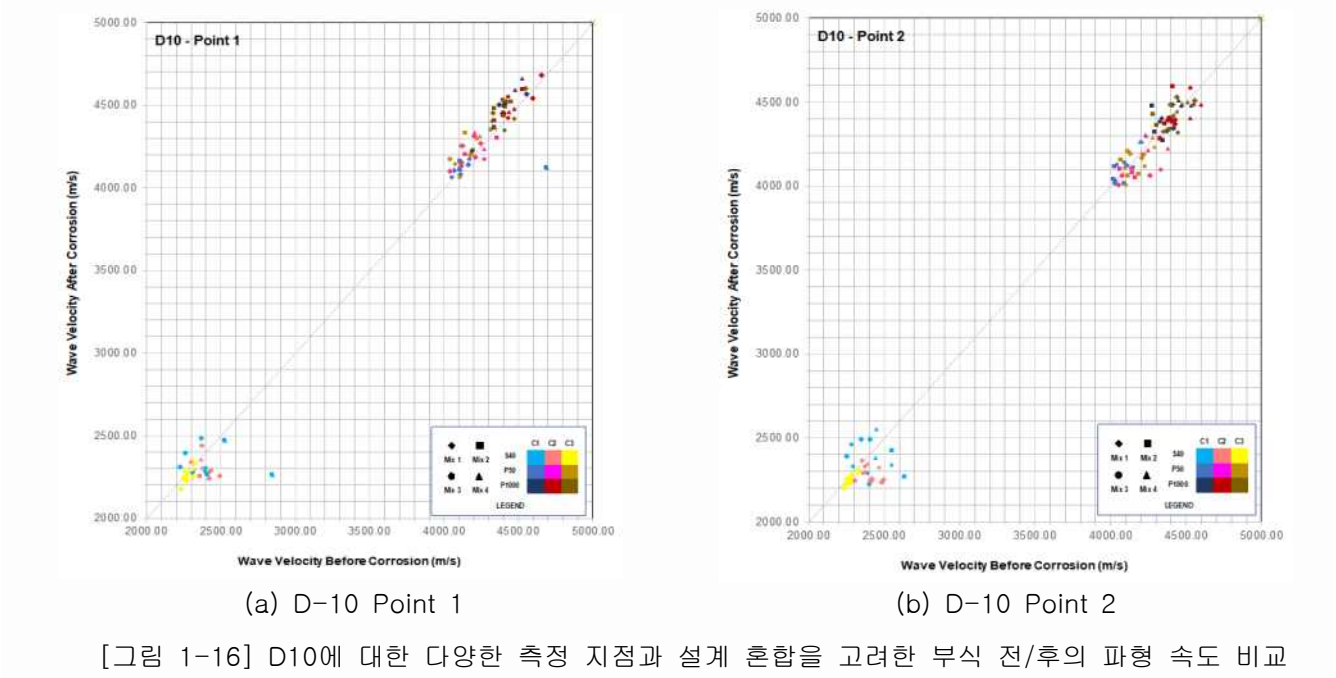
[그림 1-15] 부식률에 따른 전기비저항(ER) 관계

③ 철근 직경따른 UPV 변화

- 직경 10mm와 13mm 중 [그림 1-16]은 직경 10mm에 대한 철근 내장형 콘크리트의 4가지 설계 혼합물을 고려하여 부식 전과 후의 파동 속도의 비교를 보여준다. [그림 1-16]에 나타낸 것과 같이 추세와 결과가 다르기 때문에 확실한 결론을 내리기 어려우며, 이용 가능한 데이터에 따라 다음 사항을 준수하였다.
- 일반적으로 대부분의 그래프는 철근 없는 위치(점 1과 3)에서 수행한 측정치가 철근 있는 위치(점 2와 4)에서 수행한 측정보다 파동 속도가 낮다는 것을 보여준다. 원칙적으로 맥파는 철근이나 장애물이 없는 위치에서 매개체(콘크리트)를 통과하는 직선 경로에서 더 빠르게 이동한다. 이와는 대조적으로 펄스파가 콘크리트를 통과해 장애물/철근에 부딪히면 파동이 분산되어 더 긴 시간에 수신 변환기에 도달하게 된다.
- [그림 1-16]을 이용하여 S파 변환기의 파동 속도가 가장 낮다는 것을 그래프에서 추출할 수 있다. s-파형의 속도는 2200~2400m/s이며, P-Wave의 경우 1000kHz 변환기는 50kHz 변환기에 비해 파형 속도가 더 높다. 50kHz의 파형 속도 범위는 3900~4300m/s까지 다양하지만 1000kHz의 경우 부식 수준에 관계없이 값이 440

0~4800m/s까지 다양하다. 그래프에 따르면 부식 전후의 UPV 측정에는 유의미한 변화가 관찰되지 않았다. 동일 선에 매우 근접하며, 이는 가속된 부식이 파형 속도에 미치는 영향이 거의 없음을 의미한다.

- 하지만 S-Wave 속도는 P-Wave 속도보다 더 산란된 플롯을 보여주며, D10 시료 측정 시 P파 신호에 비해 S파 변환기가 생성하는 파동 신호는 소음이 더 큼. 모든 데이터는 수동으로 수집되며 불일치와 오류가 예상된다는 점에 유의하여야 한다. 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 MATLAB를 통한 데이터의 보다 상세한 추출과 사후 처리가 필요하며, 주어진 데이터에 근거하여 직경과 설계는 파동 속도에 확실한 영향을 미치지 않았다.

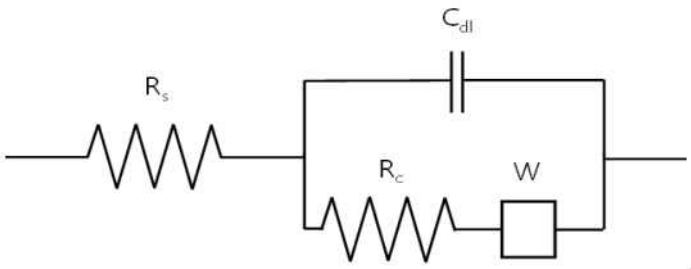


(a) D-10 Point 1 (b) D-10 Point 2

[그림 1-16] D10에 대한 다양한 측정 지점과 설계 혼합을 고려한 부식 전/후의 파형 속도 비교

④ Sweep 방식과 2 points 방식 비교

- 교류전류를 이용하여 모든 주파수(100kHz~1mHz)에 해당하는 임피던스를 측정하여 분극저항을 구하는 Sweep방식과 두 주파수(10kHz, 10mHz)에 해당하는 임피던스를 측정하여 분극저항을 구하는 2points 방식으로 구한 값들을 비교하였다. Sweep 방식으로 측정된 데이터는 등가회로를 구성하여 fitting을 진행한 후 분극 저항을 구하였다.
- 콘크리트에 매입된 철근의 전기화학적 임피던스 분광특성은 저항과 전기저항용량으로 구성된 등가전기회로로 모델링 되었다(Macdonald, 2006; Riberio et al. 2016). 선행연구에서는 측정한 EIS 실험결과의 적합식을 결정하기 위하여, [그림 1-17]에 표시된 Rs(용액저항), Rc(전하이동저항), CPE(constant phase element), W(Warburg Impedance)로 구성된 EIS 등가회로 모델을 활용하였다. Rs(용액저항)는 시멘트 내부의 공극을 채우고 있는 전해질 용액을 따라 발생하는 이온성 전도도를 나타내며, Cdl (전기이중층용량)은 모르타르와 철근의 계면의 이중층 용량을 의미하고, Rc(전하이동저항)은 철근에서 전기화학적 부식 메커니즘에 관여하는 전하의 이동에 대한 저항을 의미한다. 한편 W(Warburg Impedance)는 부식에 따른 확산을 고려하기 위하여 사용되었다.



[그림 1-17] Equivalent circuit model for EIS analysis

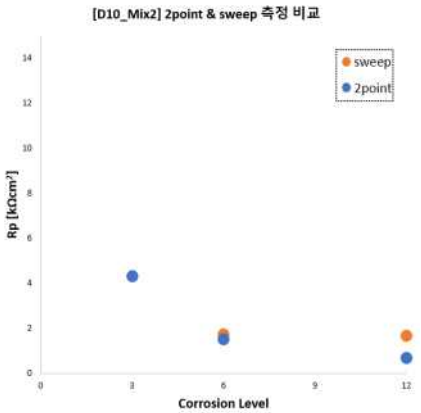
- EIS 등가회로의 전체 임피던스 및 Warburg 임피던스는 (식 1-6), (식 1-7), (식 1-8)으로 표현되며, 여기서 ω는 각주파수 (=2πf), i는 허수단위를 의미한다. α1은 CPE의 특성을 나타내는 상수값으로 부식이 진행됨에 따라 전기이중층 용량의 변화를 표현하기 위하여 도입되었다. 여기서 WR, WT는 Warburg Impedance의 저항성분과 용량성분을 의미하고, α2는 부식에 따른 용량성분의 변화를 보정하기 위하여 도

입되었다. [그림 1-18]에서는 두 방식으로 측정한 데이터 모두 일정한 경향을 나타내는 것을 보여주며, 이를 통하여, 2points 방식이 주파수 sweep방법과 유사한 값을 나타냄을 확인하였다.

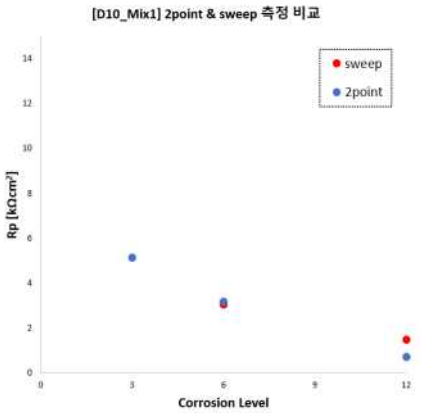
$$Z = R_s + \frac{R_c}{1/Z_{CPE} + (1/(R_c + Z_w))} \tag{1-7}$$

$$Z_{CPE} = \frac{1}{C_{dl}(iw)^{\alpha_1}} \tag{1-8}$$

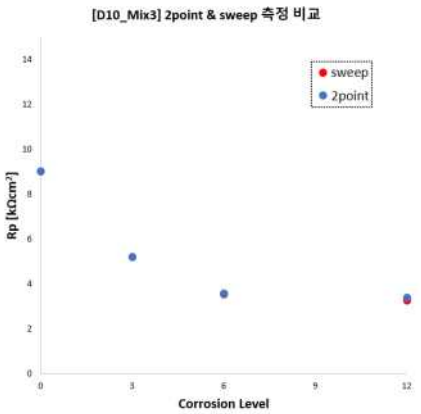
$$Z_w = \frac{W_R \tanh[(iw\,W_T)^{\alpha_2}]}{(iw\,W_T)^{\alpha_2}} \tag{1-9}$$



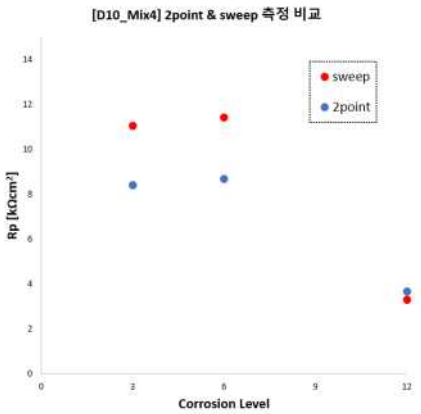
(a) D-10 Mix 1



(b) D-10 Mic 2



(c) D-10 Mix 1

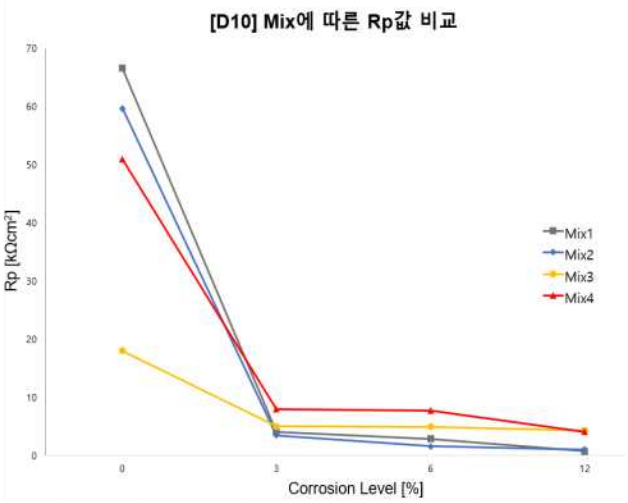


(d) D-10 Mic 2

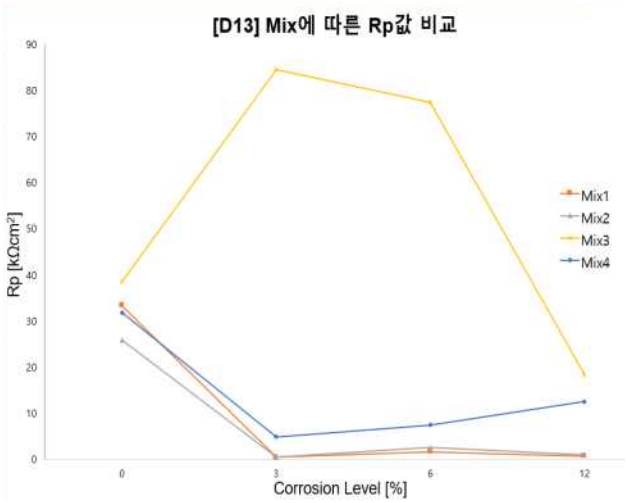
[그림 1-18] D10에 대한 2Point & Sweep 측정 비교

⑤ D10과 D13 실험체의 분극저항 비교

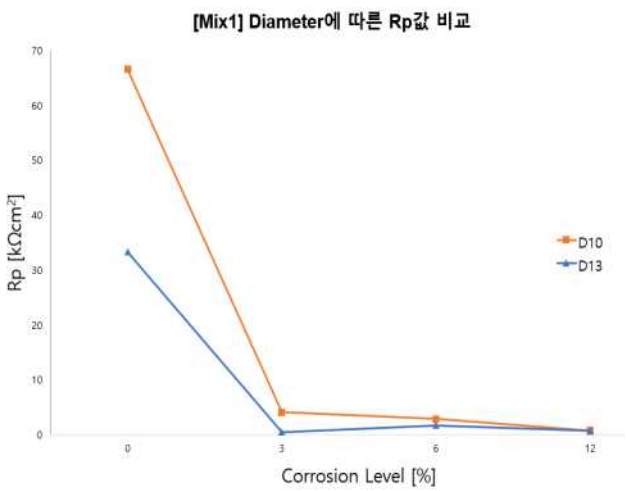
- D13의 경우도 D10과 같이 부식이 많이 진행될수록 분극저항(Rp)이 떨어지는 경향을 확인하였지만, 가장 높은 단계인 C3에서 부식가속이 목표했던 만큼 진행되지 않아서 예상했던 측정값을 얻지 못하였다.
- [그림 1-19]는 D10과 D13철근을 사용한 실험체의 Mix별로 비교하였고, 철근의 직경과 분극저항은 비례하는 경향을 보임을 확인하였다.



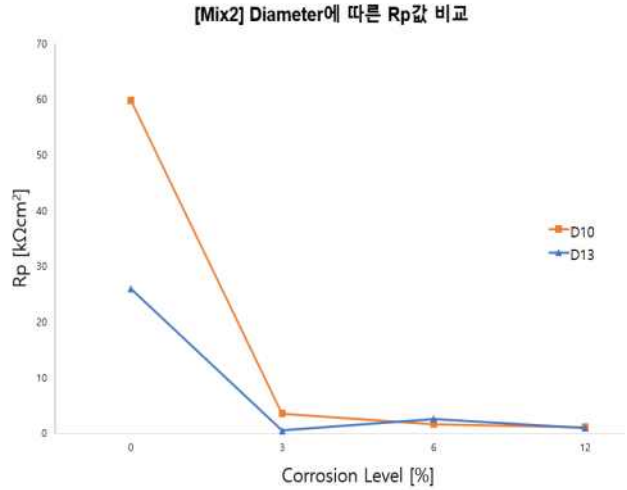
(a) D-10



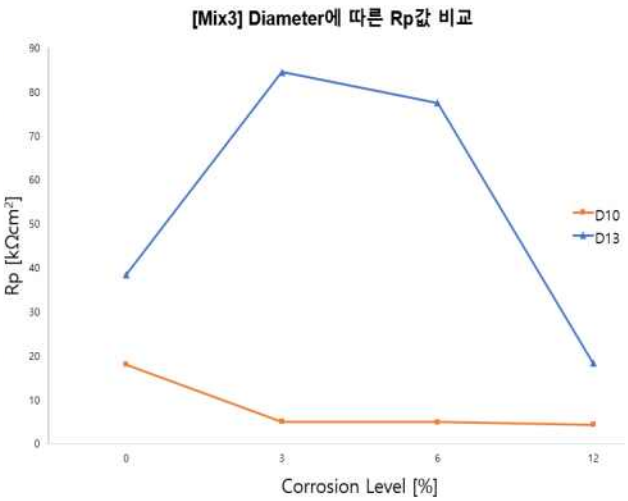
(b) D-13



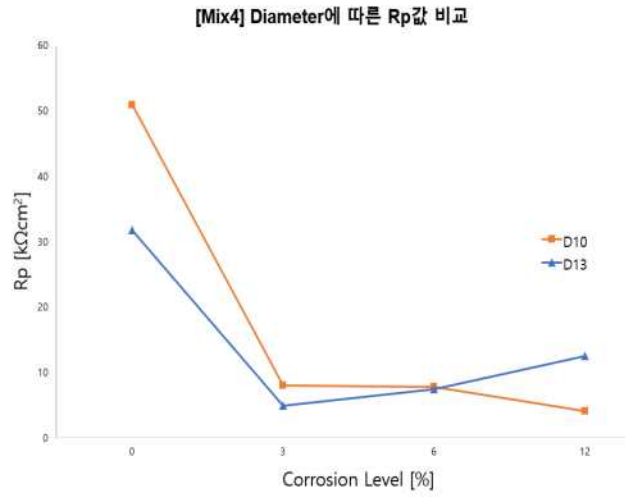
(c) MIX 1



(d) MIX 2



(c) MIX 3

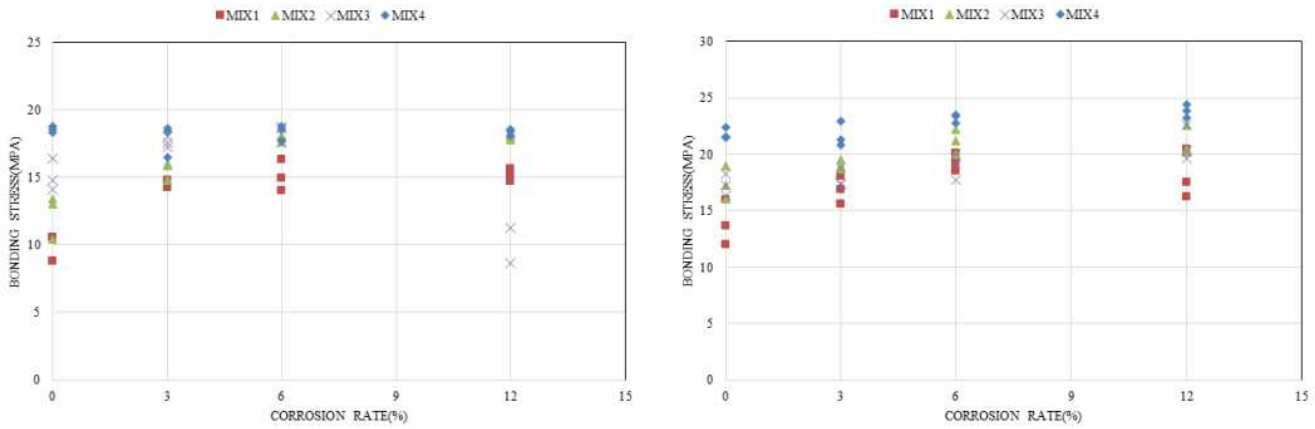


(d) MIX 4

[그림 1-19] D10과 D13 실험체의 분극저항 비교

⑥ 부식 정도에 따른 부착응력

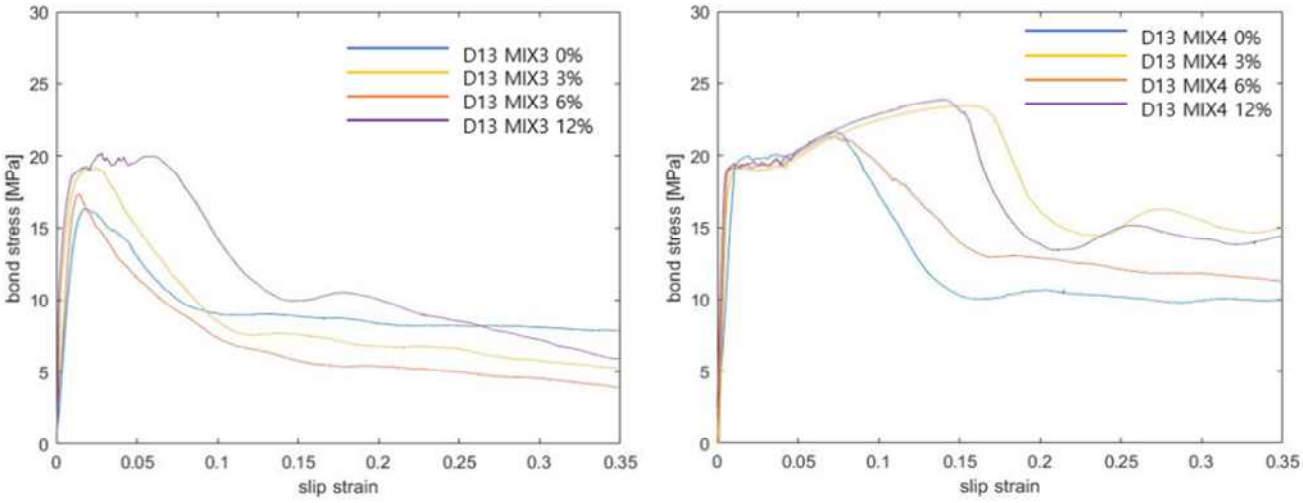
- [그림 1-20]은 콘크리트 배합 강도에 따른 부착응력과 부식률 관계를 나타내었다. D10 철근 콘크리트 경우 부식률이 6%까지 증가함에 따라 배합강도와 상관이 증가하는 것을 볼 수 있으며, 부식률이 12% 도달했을 경우 부착응력이 약간 감소하거나 비슷하다. MIX3 경우 철근의 파단으로 강도가 결정될 수 있음을 확인하였다.
- D13 철근인 경우 MIX3. MIX4인 경우 부식률이 12% 증가함에 따라 부착응력 또한 증가한다. D13과 배합강도가 강해지면서 부착응력이 더욱 밀실히 작용하는 것으로 예상되며, MIX1, MIX2인 경우 12%에서 감소한다.



[그림 1-20] 콘크리트 배합강도에 따른 부착응력 관계

⑦ 부식률에 따른 부착응력과 슬립 관계

- [그림 1-21]은 슬립에 따른 부착응력 관계를 나타내었다. MIX1에 경우 철근의 항복이 일어나지 않았으며 부식이 진행됨에 따라 부착응력 증가함 또한 확인할 수 있다. MIX2, MIX3 에서부터는 철근이 바로 뽑히지 않고 철근이 항복하는 것을 확인하였다. 부식이 진행됨에 따라 부착응력이 증가하여 6, 12% 부식률에서 항복 후 철근이 뽑히는 걸 확인할 수 있다. MIX4 에서는 모든 철근이 항복하는 것을 확인할 수 있다. D13 철근의 경우 철근의 부식됨에 따라 부착응력이 증가하며 철근과 콘크리트가 분리되기 전에 철근 항복이 먼저 일어나며, 이후 뽑히는 것을 확인할 수 있었다.

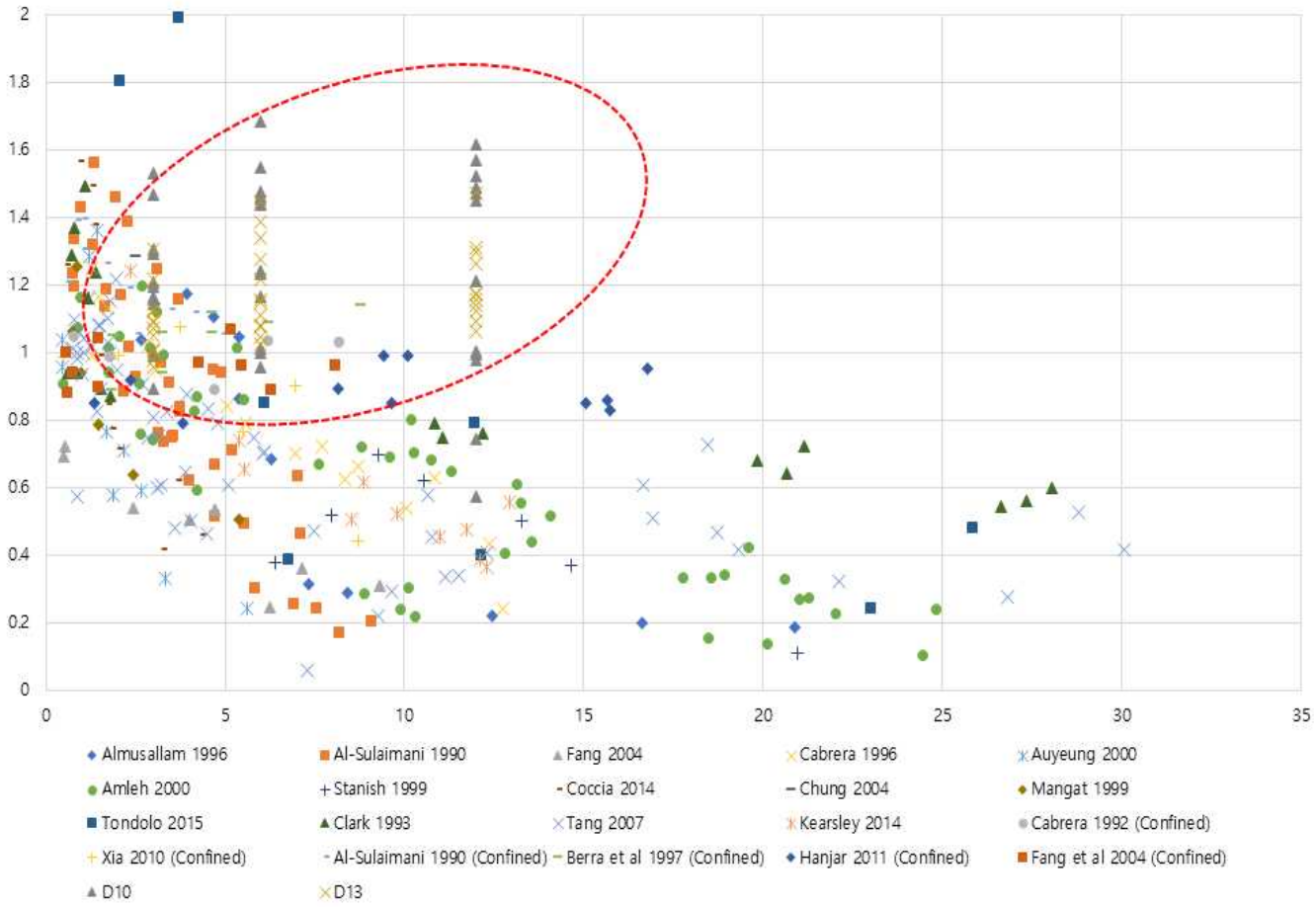


(a) D-13 MIX 1 (b) D-13 MIX 2

[그림 1-21] D13 철근 콘크리트의 부착응력과 슬립관계

⑧ 철근부식율에 따른 철근-콘크리트 부착강도 변화: 기존연구 결과와 비교

- [그림 1-22]는 선행 조사된 부착응력과 부식률에 따란 다른 연구와 본 실험결과를 비교하여 나타내었다. 선행연구에 따르면 부식률이 3%이하인 경우 부착응력이 커지는 경향을 확인할 수 있고, 부식률이 높아질수록 부착응력은 줄어드는 경향을 볼 수 있다.
- 하지만 본 실험 D10, D13 철근 콘크리트 실험체는 부착응력이 낮아지는 경우도 있으나 증가하는 경향을 볼 수 있음. 이는 본 실험체의 피복두께가 두꺼워 철근과 콘크리트 사이에 부식 생성물들이 밀실히 쌓여 부착응력을 높였다고 판단된다. 선행연구와 본 연구의 결과를 통하여 철근 부식율에 따른 철근-콘크리트의 부착강도 변화는 다양한 변수 (콘크리트 강도, 피복두께, 균열 유무 등)에 영향을 받는 것으로 파악된다. 추후 연구에서는 이러한 변수의 영향을 종합적으로 고려한 연구가 필요한 것으로 판단된다.



[그림 1-22] 철근 지름에 따른 부착응력 관계

2. 콘크리트 건조상태(기건 및 표건)에 따른 정·동탄성계수 및 압축강도 비교

가. 개요

- 해양인접 도시의 구조물(장대교량, 항만구조물, 방파제 및 원자력발전소 구조물 등)에 사용된 콘크리트는 습윤 및 건조가 반복되는 환경에 쉽게 노출될 수 있음. 콘크리트는 다양한 무기질 재료(시멘트, 모래, 자갈, 혼화재 등) 및 화학혼화제, 물로 구성된 복합재료임. 콘크리트 내부에는 다양한 크기와 형태의 공극이 포함되어 있으며,공극내부의 함수상태는 콘크리트의 역학적, 내구적 특성에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Neveille, 1981).
- 또한 콘크리트 내부 수분량의 증가는 압축강도를 낮추는 경향을 보이며(Bartlett and MacGregor, 1994), 함수율이 높은 콘크리트는 다양한 열화 메카니즘(철근부식, 동결융해, 알칼리실리카 반응 등)에 취약하다고 알려져 있다.
- 초기단계의 콘크리트 열화는 다양한 형태의 미세균열로 특징됨. 미세균열의 발생이 반드시 철근 콘크리트 구조물의 구조적 성능 저하를 의미하는 것은 아니며, 미세균열은 콘크리트 열화를 촉진시켜, 적절히 관리되지 않는다면, 박리 및 박락과 같은 결함과 함께 구조물의 강성 및 강도 저하를 일으킬 수 있음. 해양환경에 노출된 철근콘크리트 구조물의 기대수명 증대 및 구조적 건전성 유지를 위하여 적절한 유지관리계획에 따른 체계적인 관리가 중요하다.
- 신규 및 기존의 철근콘크리트 구조물의 품질관리 업무에 콘크리트의 압축강도 평가는 중요한 요소로서 현행 콘크리트 표준시방서(KCI, 2009)에서는 기본적으로 현장 콘크리트 압축강도는 콘크리트 구조물에서 채취된 코어샘플의 압축강도(직접강도)를 측정함으로써 평가하도록 한다. 하지만 직접강도를 통한 강도평가는 구조물의 국부상태의 정보만을 제공하고, 코어샘플 채취에 상당한 시간과 노력이 소요되며, 구조물에 어느 정도 손상을 줄 수 있기 때문에, 실용적인 관점에서 제약이 있다.
- 국내 콘크리트 표준시방서(KCI, 2009) 및 대표적인 해외기준(ACI 318, 2014; EN 13791, 2007)에서는 현장 콘크리트 강도평가 시 코어 샘플을 활용한 직접강도 평가와 함께 비파괴검사법을 활용한 간접강도 평가를 허용하여, 강도평가의 효율을 높일 수 있도록 한다. 비파괴검사를 활용한 강도평가는 직접강도 평가법과 비교하여, 구조물에 손상을 입히지 않고 신속하게 전체 구조물의 특성을 평가할 수 있는 장점이 있다.
- 선행연구로서 콘크리트 압축강도 평가를 위한 다양한 비파괴검사법이 연구되었다(ACI 228, 2019; Malhotra and Carino, 2004). 그 중에서 콘크리트와 초음파속도법은 비교적 간단한 장비와 해석방법에 기반하며, 다양한 상용장비가 보급되어 있어, 실험실 및 현장에서 널리 활용되고 있음. 초음파속도법은 재료 내부 또는 표면에서 응력파의 속도를 측정하여 재료의 물리적 특성, 내부결함, 열화정도 등을 측정하는 비파괴검사법 이다. 지금까지 대부분의 연구자 및 현장실무자들은 압축강도 평가에 P파속도에 기반한 초음파속도법을 활용하고 있다. 균질, 등방성 고체에서 P파속도는 재료의 탄성계수, 포아송비, 밀도의 함수로 (식 2-1)와 같이 표현된다.

$$V_P = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu_d)}{\rho(1+\nu_d)(1-2\nu_d)}} \tag{2-1}$$

여기서 E_d는 재료의 동탄성계수, ρ는 질량밀도, ν_d는 동포아송비를 의미함.

- (식 2-2)은 비균질, 이방성 재료이지만, 공학적관점에서 통계적으로 균질, 등방성 재료로 간주할 수 있는, 콘크리트의 P파속도를 설명하는데 효과적으로 활용할 수 있다고 알려져 있다.

$$V_S = \sqrt{\frac{G_d}{\rho}} \tag{2-2}$$

- P파는 진행방향과 매질입자의 진동이 동일한 방향으로 발생하는 압축파로, 축방향 강성을 갖는 물체(고체, 액체, 기체)에 효과적으로 전달된다. 따라서 콘크리트와 같은 복합재료(골재, 시멘트, 물, 공기)에서는 구성재료의 특성에 영향을 받을 수 있다. 기존문헌에서는, 압축파 속도는 콘크리트 강도에 크게 영향을 주지 않는 다양한 인자(건조상태, 공기량 등)에 영향을 받을 수 있기 때문에 결과해석에 특별한 주의가 요구된다고 기술하고 있다(Popovics and Popovics, 1997; Lee et al., 1999; Bogas et al., 2013).

- 특히 콘크리트 내부의 공극 특성 및 내부의 수분함량은 콘크리트의 역학적 특성(탄성계수, 압축강도, 포아송비 등) 및 내구성에 큰 영향을 줄 수 있다. 콘크리트 내부의 함수상태는 콘크리트의 역학특성 및 P파전달에 다른 방향으로 작용하는 것으로 알려져 있으며, 건조상태가 콘크리트 역학특성과 P파속도의 관계에 영향을 줄 수 있다.
- 이와 대조적으로 매질에서 전단파(S파)의 전달방향은 입자의 진동방향과 수직을 이루며, P파와 달리 S파는 고체상태의 물질에서만 전달되어 액체 또는 기체상태의 특성에 크게 영향을 받지 않는 것으로 보고되고 있다. 또한 구속조건에 상관없이 전단파 속도는 다음과 같이 표현된다.
- 여기서 G_d는 재료의 동전탄성계수를 의미한다. 최근에 전단파속도법이 콘크리트의 역학적 특성(압축강도, 강성) 평가에 효과적으로 활용될 수 있음을 보여주는 연구결과가 발표되고 있다(An et al.. 2009; Zhu et al., 2011; Liu et al., 2014). 또한 다양한 전단파 측정 상용장비가 개발되어 실무에서 다양하게 활용되고 있다(Haza et al., 2013; Lee and Oh, 2016; Choi et al., 2016).
- 전단파속도측정으로 콘크리트 역학적 특성을 평가하기 위해서는 전단파속도 값과 역학적특성의 상관관계를 정의되어야 한다. 하지만 지금까지 압축파속도 기반 연구결과에 비하여, 전단파속도와 콘크리트 역학적 특성의 상관관계에 관한 국내외 기본연구가 전무한 실정이다.
- 콘크리트의 두 가지 표준건조상태(절건 및 표건상태)가 기계적특성(압축강도, 정탄성계수)과 두 가지 초음파속도(P파 및 S파)에 미치는 영향을 실험적으로 평가하는 것이다. 실험실에서 다섯 가지 콘크리트 배합(물-결합재 비율 = 0.54, 0.52, 0.46, 0.35 및 0.31)으로 제작된 원주형공시체(100mm X 200mm: 직경 X 높이)를 준비하였다. 표준건조상태(절건상태, 표건상태)에서 초음파 측정 및 일축압축시험을 통하여 압축강도 및 정탄성계수의 변화를 관찰하였다. 실험결과를 바탕으로 정탄성계수-초음파속도, 압축강도-초음파속도 상관관계를 표현하는 근사식을 제안하였으며, 기존 문헌에서 제안된 대표적인 식과 비교하였다.

나. 실험방법

① 시편준비

- 콘크리트의 압축강도를 비교분석하기 위하여 100×200mm 원주형 콘크리트 공시체를 제작하였고, 본 연구에 사용 된 공시체는 다섯 가지 다른 물-결합재 비(W/B) (0.54, 0.52, 0.46, 0.35 및 0.31)를 갖는 콘크리트 배합으로 제작하였다. 각각의 콘크리트 배함은 설계압축강도 21MPa, 24MPa, 27MPa, 40MPa, 50MPa 이다. [표 2-1]은 다섯 가지 콘크리트의 배합표를 나타낸다. 모든 콘크리트 제작에는 동일한 원재료(포틀랜드 시멘트 (1종), 강모래, 깬자갈, 플라이애시(2종), 고로슬래그시멘트(2종) 및 고성능AE감수제 표준형)를 활용하였다. MIX 1, 2, 3은 보통콘크리트, MIX4 및 5는 고강도 콘크리트 그룹이다.
- 콘크리트는 100×200mm의 표준 플라스틱 몰드에 타설 후 30분 이내에 항온항습실로 운반하였고, 플라스틱 몰드는 24시간 이후 제거하였으며, 수조에 침지시켜 수중양생을 수행함. 초음파속도 측정은 최소한 수중양생을 91일 이상 수행한 이후에 시작하였다.

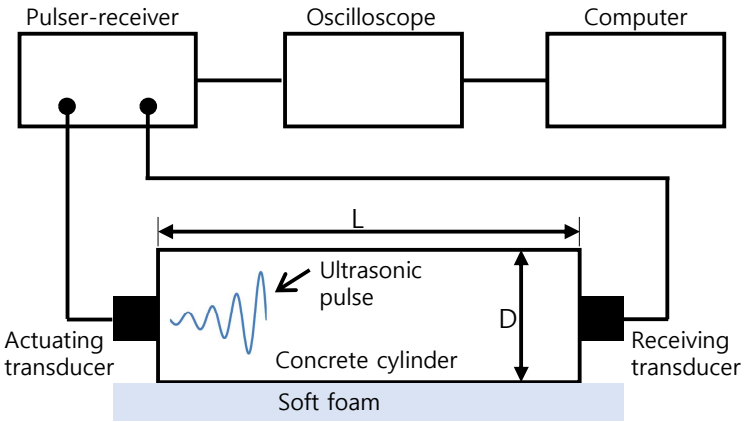
[표 2-1] Concrete mixture proportions

ID	Cement type	W/B	S/A	Unit quantity (kg/m3)						
				W	C	S	G	SCMs		Chemical admixture
								FA	SC	AE
MIX1	Type I	0.538	0.497	168	219	908	931	31	62	2.18
MIX2		0.515	0.490	170	99	884	931	33	198	1.98
MIX3		0.463	0.485	170	110	858	923	37	220	2.57
MIX4		0.354	0.495	163	230	859	887	46	184	4.6
MIX5		0.308	0.486	163	106	799	855	53	370	5.82

Note W : water, C : Portland cement type 1, S : sand, G : gravel, SCMs: Supplementary cementitious materials; FA : fly ash type 2, SC: Slag cement type 2, AE: high performance air-entraining agent

② 초음파속도 측정

- 콘크리트 MIX 한 종류 당 공시체 10개를 수조에서 꺼내어 표면은 마른헝겊으로 닦아내어 표건상태 공시체를 준비하였다. 이후 P파 S파 속도를 측정하여, 이 값을 이 연구에서 표건속도라고 정의함. 표건속도 측정 후 공시체를 전기오븐에서 절건상태가 되도록 하였다. 이후 공시체를 전기오븐내부에서 전원을 끈 상태에서 하루 보관하여 온도가 상온으로 유지됨을 확인하였다. 이후 P파, S파 속도를 측정하여, 측정값을 이 연구에서 절건속도라고 정의한다.
- 초음파의 속도는 2개의 초음파 센서를 활용하여 절건상태와 표건상태의 콘크리트 공시체의 P파속도를 측정하였다[그림 2-1]. 발신기와 수신기를 각각 공시체의 양면에 부착하였고, 초음파의 발생은 신호발생기(Panametrics 5077 PR)에서 발생된 주기가 10μs 진폭이 200V인 사각신호로 진동을 발생시킨다. 발신기에서 발생된 초음파 신호는 콘크리트 공시체를 지나 반대면에 부착된 수신기 센서에서 감지하였다. 수신기에서 감지된 신호는 펄스수신기에서 감지하였으며, 오실로스코프(NI-PXI 5101)를 활용하여 디지털신호로 전환하였고, 샘플링 주파수는 10MHz롤 조정하였으며, 수신된 신호의 전체길이는 0.001s이다.

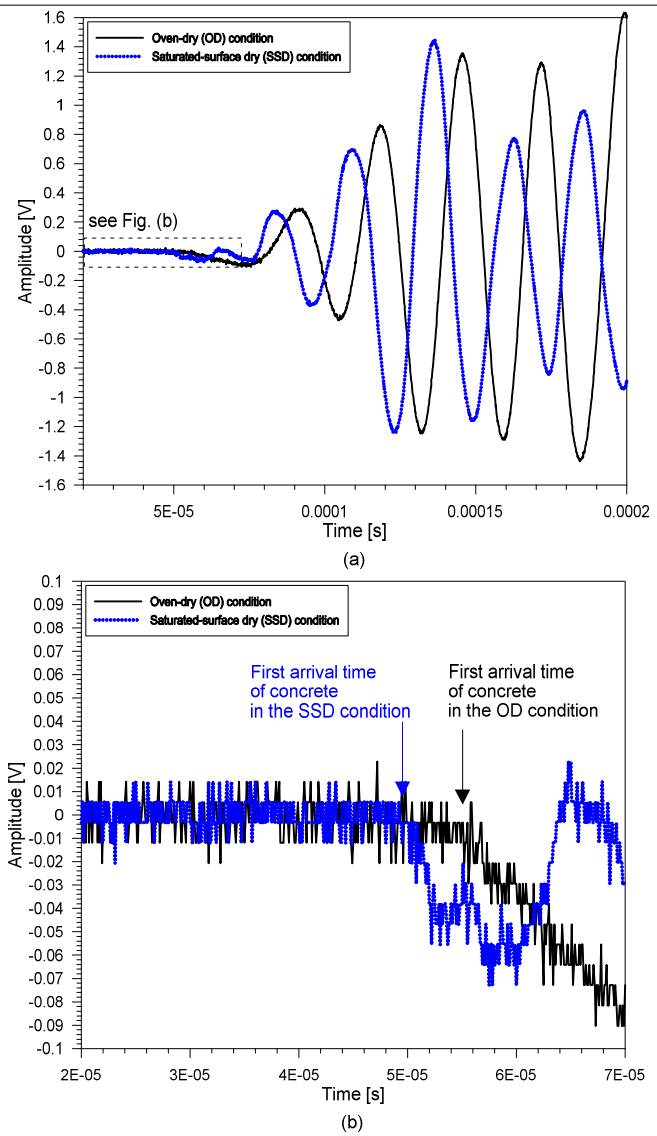


[그림 2-1] Test setup for ultrasonic pulse wave velocity measurements (P- and S-waves) in this study

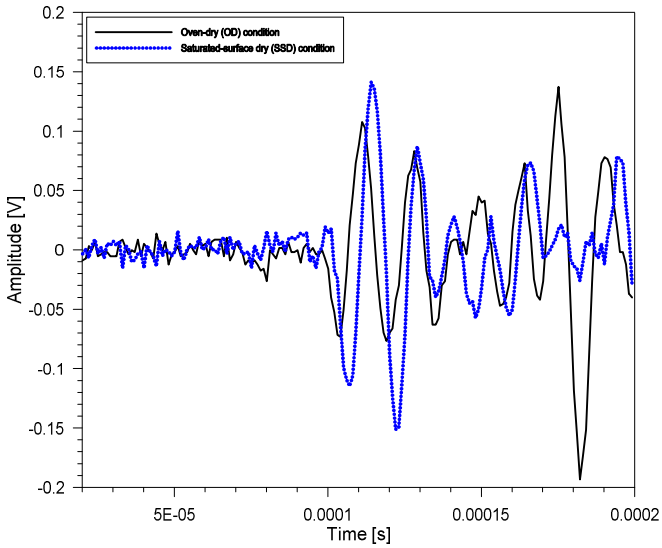
- [그림 2-2(a)]는 MIX1에서 측정한 P파신호를 보여준다. 그림에는 절건상태와 표건상태에서 측정한 신호를 각각 검은색과 파란색 선으로 표시하였다. 그림 [1-23(b)]은 P파의 최초도달시간을 근방의 신호를 확대한 신호를 보여주며, P파속도는 공시체의 길이를 P파의 최초도달 시간으로 나누어 계산하였다(식 2-3).

$$V_P = \frac{L}{t_a - t_d} \tag{2-3}$$

- 여기서 ta는 측정된 시간신호에서 추출된 P파의 최초도달시간이고, td는 측정 전 측정장치의 보정 시 발신기와 수신기를 직접접촉하여 측정된 시간을 의미한다. 본 연구에서 P파의 도달은 최초 (-)신호가 시작되는 시점으로 정의한다.
- 하지만 그림에서 보이듯이 콘크리트에서 전달됨에 따라 신호감쇠로 최초도달 시간을 정확하게 평가하기 어려우며, 본 연구에서는 일관적인 최초도달시간의 일관적인 평가를 위하여 수정임계법(modified threshold method)를 활용하였다. 먼저 최초 (-)신호가 시작되는 신호 근방에서 대략적인 도달시간 ta1을 정하였다. 이후 ta1 이전과 이후의 각각 10μs(100개 점)를 구성된 신호의 선형회귀분석을 통한 적합식의 교차점에서 수정된 최초도달시간을 도출하였다.
- 전단파(S파)속도는 P파속도 측정과 유사한 방법으로 수행하였다. 다만 S파측정을 위하여 2개의 초음파센서를(Prosec)를 신호발생/수신기(Panametrics 5077PR)에 연결하였다. [그림 2-3]은 MIX1 공시체에서 측정한 S파신호를 보여준다. 절건상태와 표건상태에서 측정된 신호를 각각 검은색과 파란색 선으로 나타내었다. S파신호를 명확하게 관찰할 수 있었지만, S파신호가 도달하기 전측정된 잡음의 수준이 P파신호 보다 다소 높은 수준이고, 때로는 약한 P파신호가 감지되어, S파의 정확한 최초도달시간을 평가하기 어려운 경우도 있다. 본 연구에서는 명확한 S파신호의 첫 번째 피크(그림에서 화살표로 표시) 이전에 0 진폭 수준에 대응하는 시간을 S파의 최초도달시간으로 정의한다.



[그림 2-2] Typical time signals for P-wave velocity measurements in concrete MIX1: (a) time signals propagating in concrete MIX1 in the OD and SSD conditions, (b) enlarged image in Fig. 2(a).



[그림 2-3] Typical time signals for S-wave velocity measurements in concrete MIX1.

③ 일축압축시험

▪ 절건상태와 표건상태의 콘크리트 압축강도와 정탄성계수를 측정하였다. 일축압축시험을 위하여, 콘크리트 MI

X당 공시체 10개를 수조에서 꺼내어 초음파 시험과 동일한 방법으로 절건 및 표건상태의 시험체를 콘크리트 MIX당 각각 5개씩 준비하였고, 절건상태와 표건상태의 콘크리트 압축강도와 정탄성계수는 절건속도 및 표건속도 측정 바로 수행하였다.

- [그림 2-4]는 콘크리트 공시체의 압축강도와 정탄성계수 측정을 위한 실험장치 사진을 보여주고 있다. 본 연구에서는 1000kN 용량의 만능재료시험기를 활용하여 1축압축시험을 수행하였고, 압축시험은 ASTM C469/C 469M-14(ASTM, 2014)에 따라 응력속도 0.28MPa/s 속도로 하중을 가력하였다. 축방향하중은 만능재료시험기 가압판 내부에 삽입된 로드셀에서 측정하였다. 축방향변형은 알루미늄 고정 링에 부착된 3개의 LVDT로 측정하였고, 이 연구에서 변형율은 3개의 LVDT에서 얻은 평균값으로 계산하였다.
- 공시체 상부 및 하부 링의 간격은 100mm 이고, 이 값은 본 연구에서 변형전 초기 축방향길이를 의미한다. 본 연구에서는 ASTM에 따라 콘크리트 정탄성계수를 응력-변형율 곡선에서 미소변형율 (50 μstrain)에 대응되는 점과 최대응력의 40%에 대응되는 두 점의 기울기로 정의 하였다(식 2-4).

$$E_s = \frac{0.4f_c - f_{\varepsilon_1}}{\varepsilon_{0.4f_c} - \varepsilon_1} \tag{2-4}$$

여기서 Es는 콘크리트의 정탄성계수, fc는 압축강도, fε1은 변형률 ε1(=50 μstrain)에 대응하는 응력값, ε0.4fc는 압축강도의 40%에 대응하는 변형률값을 의미한다.



[그림 2-4] Test setup for uniaxial compressive test of concrete cylinders

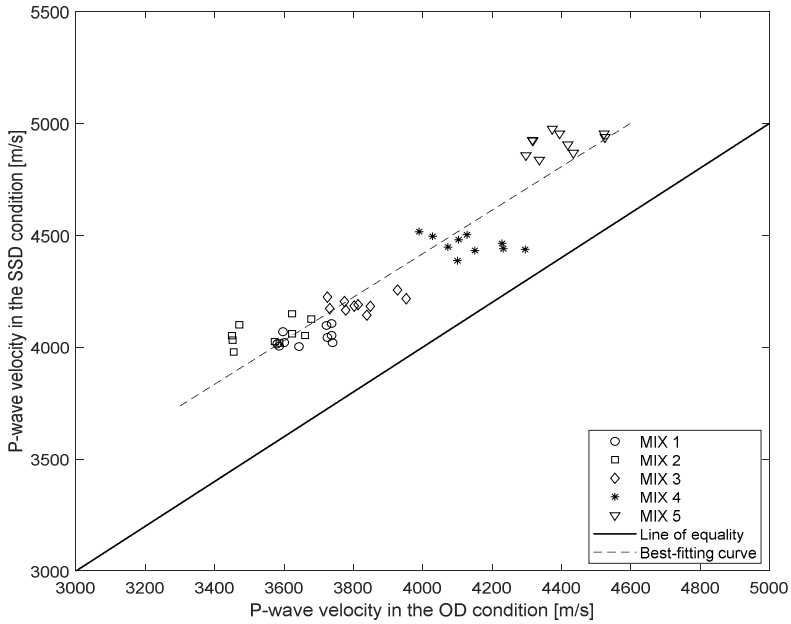
다. 실험결과

① UPV 속도 변화 (P파 및 S파)

- [그림 2-5]은 다섯 종류의 배합(Mix1, Mix2, Mix3, Mix4, Mix5)으로 제작된 콘크리트 공시체에서 표건상태와 절건상태에서 측정한 P파속도(각각 VP,SSD 및 VP,OD)의 관계를 보여준다. 전반적으로 VP,SSD는 VP,OD보다 큰 값을 보인다. 실험값의 선형회귀분석을 통하여 VP,OD와 VP,SSD 상관관계의 최적식(식 2-5)을 결정하였으며, [그림 2-5] 에 점선으로 표시하였다.

$$VP,SSD = 0.97\ VP,OD + 529.3\ [m/s],\ R2 = 0.89 \tag{2-5}$$

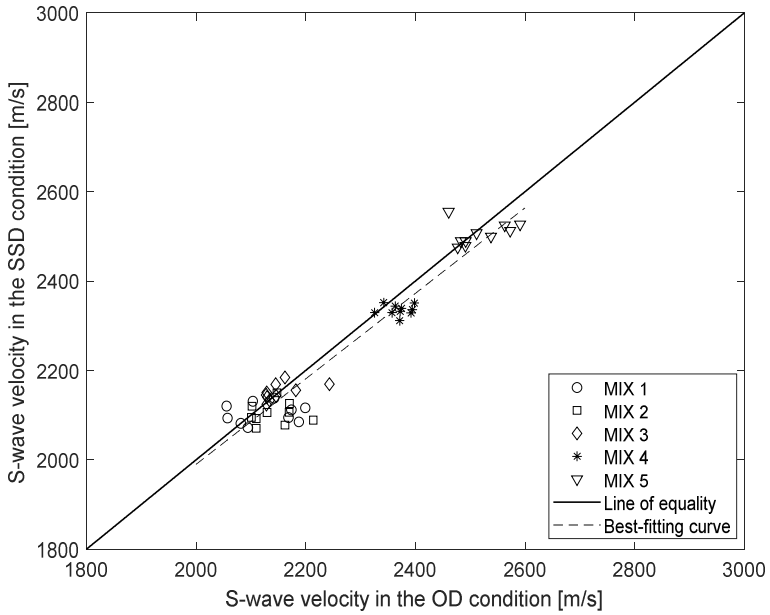
- (식 2-5)에서 1보다 작은 계수 값(0.97)은 VP,OD가 커짐에 따라 VP,OD대한 VP,SSD의 변화가 감소함을 나타냈다. 즉 콘크리트 건조상태에 따라 P파속도의 변화는 고강도콘크리트 보다 보통콘크리트에서 더 크다는 것을 의미한다.
- 표건상태에서 P파속도의 증가는 Biot 이론으로 설명될 수 있음(Biot, 1956; Stern et al., 1985). 다공질 재료에서 P파의 전달은 고체부분과 공극내부의 유체의 특성에 따라 결정된다. 공극내부에 물로 포화된 경우 고체입자의 거동과 액체입자의 거동이 정위상(in-phase)일 때 고체와 액체의 속도보다 빠른 응력파가 발생하며, 이 Biot 이론에서 이 파를 빠른 압축파이다.



[그림 2-5] The relationship between P-wave velocities in the OD and SSD conditions

- [그림 2-6]은 절건상태와 표건상태 콘크리트 실린더에서 S파 속도관계(각각 VS,OD 및 VS,SSD)를 보여주고 있다. P파속도와 달리, S파는 함수상태에 영향이 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다. 실험값을 바탕으로 선형 회귀분석에서 얻은 VS,OD 와 VS,SSD 상관관계에서는 VS,SSD가 VS,OD보다 약간 작은값을 보이고 있고, 이러한 경향은 Gassman이론으로 설명될 수 있다(Berryman, 1999). 다공질재료에서 전단계수값는 함수량에 관계없이 일정한 값을 갖지만, 다공질재료에서 표건밀도가 절건밀도보다 크며, 동일한 재료에서 전단파 속도는 감소한다.

$$VS,SSD = 0.96\ VS,OD + 77.16\ [m/s], R2 = 0.93 \tag{2-6}$$



[그림 2-6] The relationship between S-wave velocities in the OD and SSD conditions

② 탄성계수

- [그림 2-7] 및 [그림 2-8]은 다섯 종류의 콘크리트 배합(Mix1, Mix2, Mix3, Mix4, Mix5)으로 제작된 콘크리트 공시체의 절건 및 표건상태에서 동탄성계수 및 정탄성계수의 관계를 각각 보여주고 있다. [그림 2-7]에서 동탄성계수값은 식(2-1), 식(2-2)를 재구성하여 식(2-7) 및 식(2-8)와 같이 동탄성계수값을 속도값으로 표현할 수 있다.

$$E_{d,\,V_P} = \rho(V_P)^2(1+\nu_d)(1-2\nu_d)/(1-\nu_d) \quad (2\text{-}7)$$

$$E_{d,\,Vs} = 2\rho(V_S)^2(1+\nu_d) \quad (2\text{-}8)$$

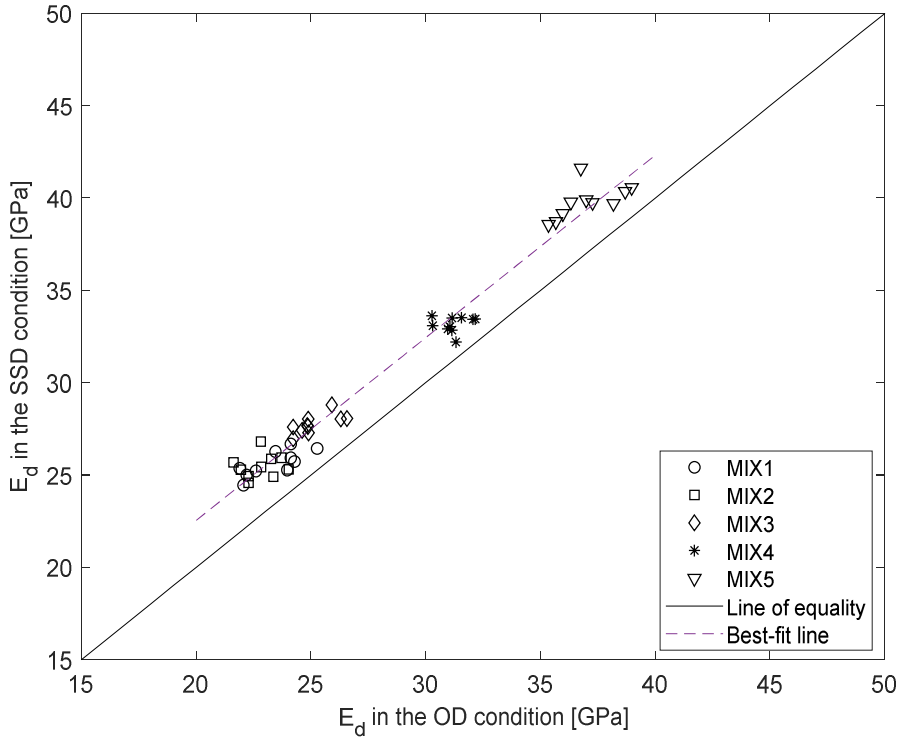
- 본 포아송비값은 공시체에서 측정된 P파속도와 S속도의 비율에 기반한 식(2-9)를 활용하여 계산하였고, 이때 식(2-7) 및 식(2-8)에서 산출된 P파속도와 S파속도에 기반한 두 동탄성계수값은 동일한 값을 갖는다.

$$\nu_d = \frac{(V_P/V_S)^2 - 2}{2(V_P/V_S)^2 - 2} \quad (2\text{-}9)$$

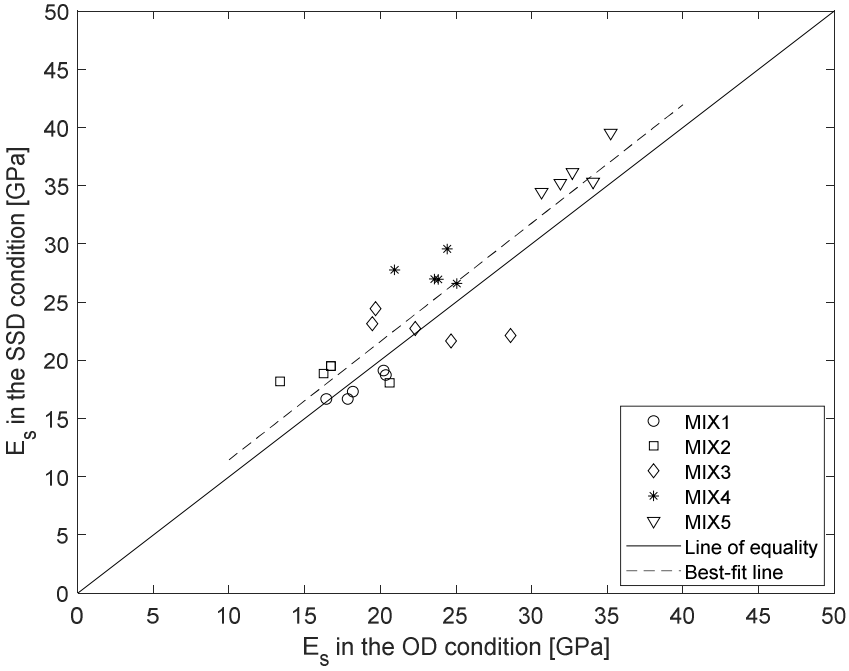
- 대체적으로 표건상태에서 동탄성계수(Ed,SSD) 및 정탄성계수(Es,SSD)는 절건상태에서 값(Ed,OD 및 Es,OD) 보다 큰 값을 보였고, 동탄성계수와 정탄성계수의 함수상태에 따른 실험값의 관계를 선형회귀 분석을 통하여 다음과 같은 수식으로 표현하였다.

$$Ed,SSD = 0.99\,Ed,OD + 2.77[Gpa], R2 = 0.98 \quad (2\text{-}10)$$

$$Ed,SSD = 1.02\,Ed,OD + 1.77[Gpa], R2 = 0.8 \quad (2\text{-}11)$$



[그림 2-7] The relationship between dynamic elastic modulus of concrete in the OD and SSD conditions



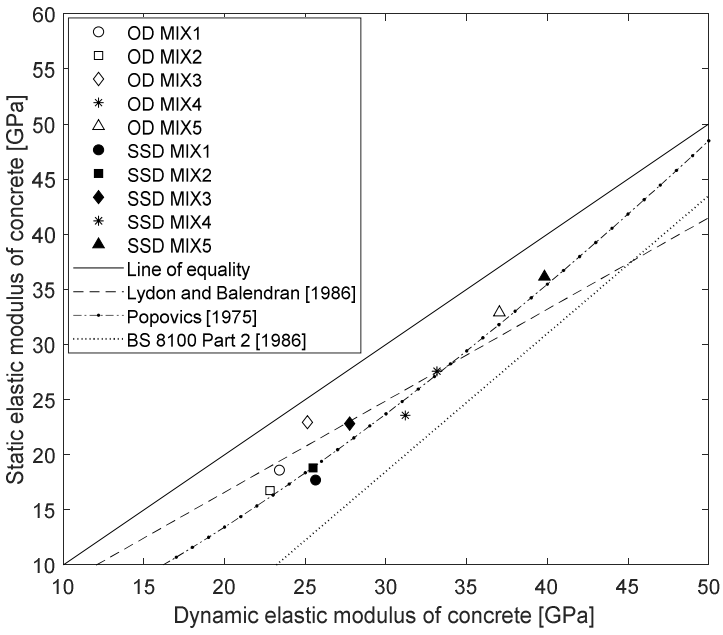
[그림 2-8] The relationship between static elastic modulus of concrete in the OD and SSD conditions

- 식(2-10) 및 식(2-11)에서 이 연구에서 고려된 5종류의 콘크리트 MIX에서는 Ed,OD와 Es,OD의 계수가 거의 1에 가까운 값을 보이는 것은 관계식이 탄성계수의 크기(또는 콘크리트 종류)에 크게 의존하지 않는 특성을 보여준다. 함수량의 영향은 동탄성계수의 경우 정탄성계수보다 더 큰 증가를 보이는 것으로 나타났다.
- [그림 2-9]은 절건상태와 표건상태에서 측정된 정탄성계수와 동탄성계수의 관계를 보여주고 있다. 절건상태 콘크리트에서 정탄성계수와 동탄성계수의 관계(Ed,OD-Es,OD)는 열린기호, 표건상태에서 관계(Ed,SSD-Es, SSD)는 닫힌기호로 표시하였다. 콘크리트 종류에 따라 각각 다른 기호를 사용하였고, 식(2-12)~식(2-14)는 기존연구자들이 제안한 정탄성계수와 동탄성계수의 관계식을 보여주고 있으며, [그림 2-9]에 함께 표시하였다.

$$E_s = 0.83E_d \quad \text{(Lydon and Balendran, 1986)} \tag{2-12}$$

$$E_s = 1.25E_d - 19 \quad \text{(BS, 1985)} \tag{2-13}$$

$$E_s = \frac{446.09E_d^{1.4}}{\rho_c} \quad \text{(Popovics, 1975)} \tag{2-14}$$



[그림 2-9] The relationship between static and dynamic elastic modulus of concrete

- 두 가지 표준함수상태(절건상태, 표건상태)의 콘크리트 공시체에서, 기존 연구자들이 제안한 식의 적합성을 확인하기 위하여, 기존식으로 예측된 정탄성계수값과 이 연구에서 측정된 정탄성계수 값의 RMSE(root mean sq

uare error)를 다음과 같이 구하였고, 결과는 [표 2-2]에 정리하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(E^{i}_{s,predicted} - E^{i}_{s,measured})^2}{N}} \quad (2\text{-}15)$$

- 여기서 Eis,predicted는 기존식과 측정된 동탄성계수값을 활용하여 예측된 정탄성계수 값이고, Eis,measured는 측정된 정탄성계수 값으로, i는 시험값의 인덱스, N은 전체 샘플의 수를 의미한다. Lydon and Balendran식(식 2-12)과 Popovics식(식 2-14)으로 예측된 정탄성계수값은 함수상태에 상관없이 측정값과 2.0GPa에서 2.35GPa의 RMSE를 보였다. 특히 Lydon and Balendran 식은 OD상태에서, Popovics 식은 SSD 상태의 콘크리트에서 더욱 적합한 특성을 나타낸다.

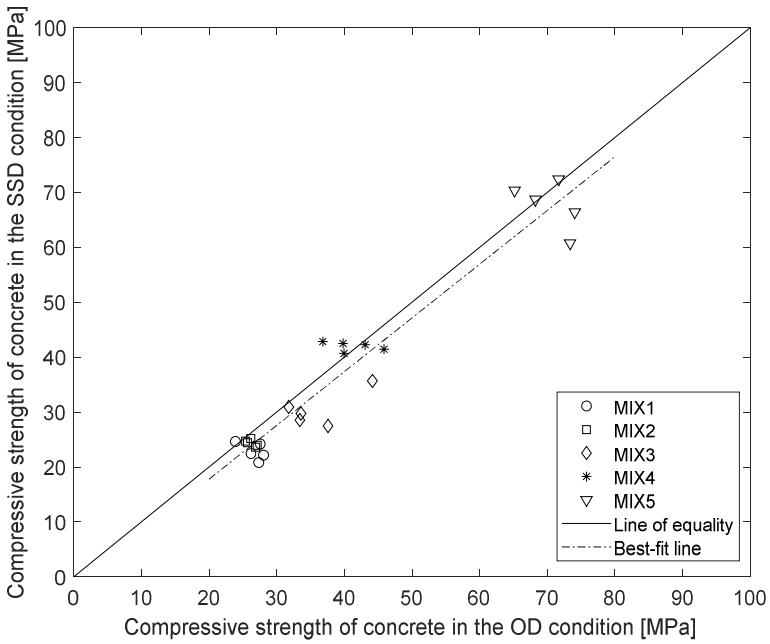
[표 2-2] RMSE between measured- and predicted static elastic moduli of concrete

Equation relating Es-Ed	RMSE [GPa]	
	OD	SSD
Eq. 13	2.00	2.35
Eq. 14	7.45	5.71
Eq. 15	2.28	2.16

③ 압축강도

- [그림 2-10]은 다섯 종류의 콘크리트 배합으로 제작된 콘크리트 공시체의 절건상태와 표건상태에서 측정한 압축강도의 관계를 보여준다. 표건상태에서 압축강도(Fc,SSD)는 절건상태에서 압축강도(Fc,OD)보다 큰 값을 보이는 것을 확인하였고, 5종류의 MIX에서 얻은 모든 실험값의 선형회귀분석을 통하여 Fc,OD와 Fc,SSD 상관관계의 최적식을 다음과 같이 도출하였다. 관계식을 통하여 함수량의 영향은 콘크리트 압축강도값에 크게 영향이 없음을 보여주고 있으며, 콘크리트 강도가 커짐에 따라 포화수가 강도에 미치는 영향은 작아지는 것으로 나타났다.

$$Fc,SSD = 0.98\,Fc,OD - 1.802\,[Mpa], R2 = 0.94 \quad (2\text{-}16)$$

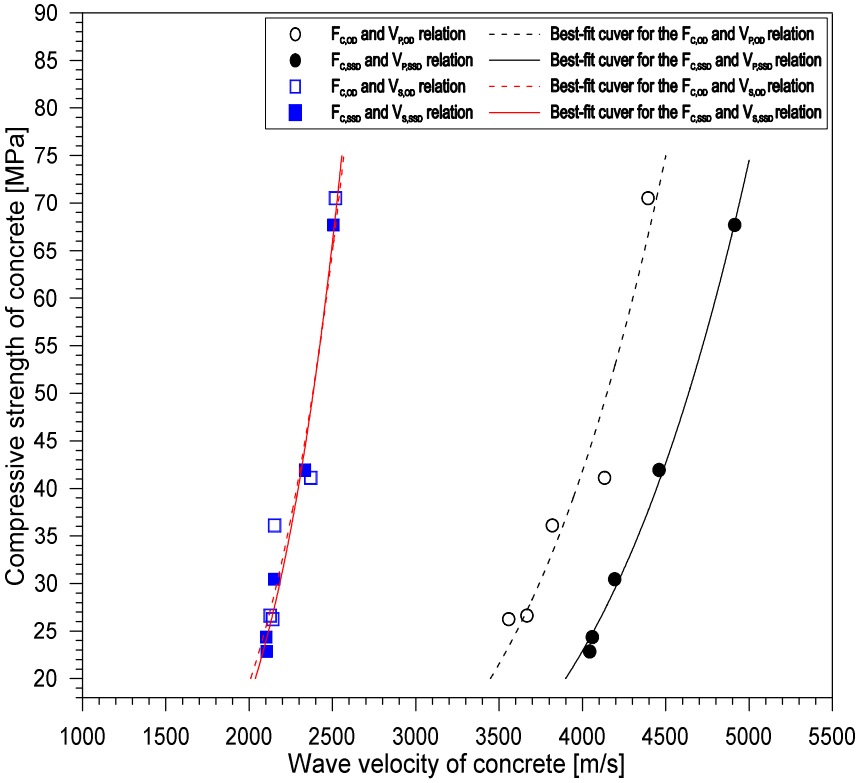


[그림 2-10] The relationship between compressive strength of concrete in the OD and SSD conditions

- [그림 2-11]는 UPV값(VUPV)과 압축강도(Fc)의 관계를 보여주고 있고, 절건상태와 표건상태에서 얻은 실험값의 회귀분석을 통하여 Fc와 VP 관계를 표현하는 최적식을 다음과 같이 구하였다.

$$F_c = a V_{UPV}^{b} \quad (2\text{-}17)$$

- 여기서 a와 b는 회귀분석결과 결정된 상수값이고, 아래첨자 UPV는 초음파의 종류를 의미하여 본 연구에서는 P파또는 S파를 의미한다. 회귀분석 결과로 얻은 관계식은 [표 2-3]에 정리하였으며, [그림 2-11]에 나타냈다. 회귀분석결과 관계식의 적합도를 나타내기 위하여 R2값 및 RMSE값(예측된 강도값과 측정된 강도값의 차이)을 표 정리하였다.



[그림 2-11] The relationship between compressive strength of concrete and ultrasonic pulse wave velocities(P- and S-waves) of concrete in the OD and SSD conditions

- 먼저 압축강도과 P파속도(VP)의 관계는 절건상태와 표건상태에 따라 뚜렷한 차이를 나타내었고, 이러한 결과는 콘크리트 내부의 공극의 포화수가 압축강도와 P파속도에 상이한 영향을 주기때문이라고 판단된다. 즉 절건에서 표건상태로 변함에 따라 압축강도는 대략 10%이내로 감소하였지만, P파속도는 10-15% 증가하는 경향을 보인다.
- 실용적 관점에서, 건조와 습윤이 반복될 수 있는 환경에 노출된 콘크리트의 Fc와 VP는 콘크리트의 내부수분상태에 따라 영향을 받고, 기존의 UPV를 활용한 압축강도 평가 방법을 기술한 기준에서는 현장의 콘크리트 배합의 특성에 맞는 UPV-압축강도 관계식을 코어샘플 채취를 통하여 보정절차가 반드시 필요하다고 사료된다. 하지만 동일한 현장에서 같은 종류의 콘크리트라도 하더라도 환경에 따른 함수상태 변화가 고려되지 않는다면 P파를 활용한 압축강도의 정확한 평가에 어려움을 줄 수 있다.
- 반면에 Fc와 VS의 관계는 절건상태와 표건상태와 상관없이 유사한 경향을 보였고, 이러한 결과는 공극의 포화수가 Fc와 VS를 모두 감소시키는 방향으로 영향을 주기 때문이라 판단된다. [그림 2-11]에서 회귀분석결과 결정된 절건상태와 표건상태의 콘크리트 압축강도와 전단파속도 관계식은 거의 같은 값을 보였고, 이러한 특성은 P파속도와 비교하여, S파속도는 환경변화에 따른 내부수분상태에 변화에 적은 영향을 받는다는 것을 보여준다.
- [표 2-4]는 기존 연구자들이 제안한 콘크리트의 정적 및 동적 역학특성의 상관관계식(압축강도-정탄성계수관계, 동탄성계수-정탄성계수관계, 전단파속도-동탄성계수관계)으로 예측된 압축강도와 일축압축강도 실험에서 얻은 압축강도의 RMSE를 정리하였다. 압축강도와 전단파속도관계식은 다음 식(2-18)과 같은 형태로 유도 된다.

$$F_c = a V_s^b \rho_c^c \tag{2-18}$$

- 여기서 a, b, c는 상수값으로 다양한 정적 및 동적 역학특성의 관계식에 따라 유도된 값이고, 본 연구에서 동탄성계수와 정탄성계수의 관계는 식(2-12)과 식(2-14)을 활용하였고, 전단파속도와 동탄성계수관계는 식(2-2)를 활용하였다. 압축강도-정탄성계수관계는 다음 식(2-19)~식(2-23)에 정리된 대표적인 콘크리트 구조설

계 기준 및 기존연구자들이 제안한 관계식을 활용하였다.

$$E_{KCI} = 0.077\rho_c^{1.5}\sqrt[3]{F_c} \quad \text{(KCI, 2012)} \quad (2\text{-}19)$$

$$E_{ACI318} = 0.043\rho^{1.5_c}\sqrt{F_c} \quad \text{(ACI 318, 2014)} \quad (2\text{-}20)$$

$$E_{ACI63} = (\rho_c/2300)^{1.5}(3320\sqrt{F_c}+6900) \quad \text{(ACI 363, 1984)} \quad (2\text{-}21)$$

$$E_{CEE-FIP} = 22000\sqrt[3]{F_c/10} \quad \text{(ENV1992-1-1, 2014)} \quad (2\text{-}22)$$

$$E_c = k_1 k_2 33500(F_c/60)^{1/3}(\rho_c/2400)^2 \quad \text{(Noguchi et al., 2009)} \quad (2\text{-}23)$$

- [표 2-4]에서 식 (2-2), 식 (2-14) (Popovics, 1975)과 식(2-23) (Noguchi et al. 2009)의 조합으로 유도된 압축강도-전단파속도관계식을 활용하였을때 절건상태에서 6.6 MPa, 표건상태에서 4.3 MPa의 RMSE값을 보여, 강도값을 가장 잘 예측하는 것을 확인하였지만, 여전히 배합에 따라 예측식과 측정값의 상관관계는 상이한 경향성을 보였으며, 이러한 특성이 전체 RMSE 값을 증가시키는 원인이 되고 있음을 관찰할 수 있다.

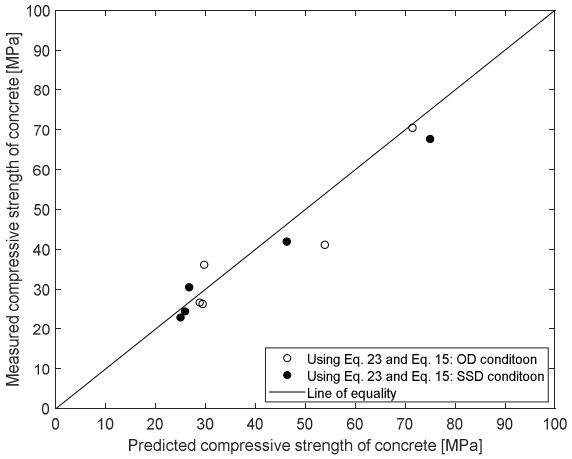
[표 2-3] Summary results of regression analyses for relating compressive strength and ultrasonic pulse velocity

Wave types [km/s]	a	b	R2	RMSE [MPa]
VP,OD	0.043	4.96	0.93	4.40
VP,SSD	0.151	5.29	0.99	0.96
VS,OD	0.466	5.38	0.90	4.89
VS,SSD	0.319	5.82	0.99	1.83

[표 2-4] RMSE(root mean square error) between measured- and predicted compressive strength of concrete

Equation relating Fc-Es	RMSE [MPa]			
	Equation relating Es-Ed			
	Eq. (13)		Eq. (15)	
	OD	SSD	OD	SSD
Eq.(19)	14.6	10.5	18.1	14.8
Eq.(20)	15.0	12.0	17.2	14.3
Eq.(21)	11.3	7.2	14.8	11.4
Eq.(22)	28.4	22.1	30.1	24.6
Eq.(23)	11.8	11.5	6.6	4.3

Note: R2: coefficient of determination, RMSE: root mean square error between measured and predicted compressive strength of concrete.



[그림 2-12] The relationship between compressive strength of concrete and ultrasonic pulse wave velocities(P- and S-waves) of concrete in the OD and SSD conditions

라. 소결

본 연구에서는 콘크리트의 두 가지 표준건조상태(절건 및 표건상태)가 기계적특성(압축강도, 정탄성계수)과 두 가지 초음파 속도(P파 및 S파)에 미치는 영향을 실험적으로 평가하는 것이고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 표건상태에서 P파속도는 절건상태에서보다 8-15% 증가된 값을 나타내었고, 고강도콘크리트(MIX4, 5) 보다 보통콘 크리트(MIX1, 2, 3)에서 내부 포화수분이 P파속도 증가에 큰 영향을 받았다. 반면에 S파속도는 표건상태와 절건상태의 콘크리트에서 큰 변화가 없었다.
- 콘크리트 내부 공극의 포화수는 정탄성계수 및 동탄성계수를 모두 증가시키는 방향으로 영향을 주었고, 기존 연구자들(Lydon and Balendran, 1986; Popovics, 1976)이 제안한 정탄성계수와 동탄성계수의 관계식은 절건상태 및 표건상태의 콘크리트에서 RMSE값이 2.0-2.3GPa의 값을 보여, 실험결과를 잘 예측하는 것을 확인하였다. 따라서 UPV속도(P파 또는 S파)값을 활용하여 정탄성계수를 예측은 내부 포화수의 영향에 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.
- 표건상태와 절건상태에서 각각 얻은 압축강도와 P파속도의 관계는 뚜렷한 차이를 보였고, 이러한 결과는 콘크리트 내부 공극의 포화수의 영향이 압축강도와 P파속도에 다른 영향을 주기 때문이라 판단된다. 따라서 습윤 및 건조상태 변화에 노출되어 있는 콘크리트에서, P파속도 측정으로 압축강도 평가 시 변동계수 증가 및 정확도를 줄여 현장평가도구로 활용 시 각별한 주의가 요구된다.
- 반면에 압축강도와 S파속도의 관계는 표건상태와 절건상태에서 거의 유사한 결과를 보였고, S파속도와 콘크리트 관계식은 습윤-건조 환경에 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

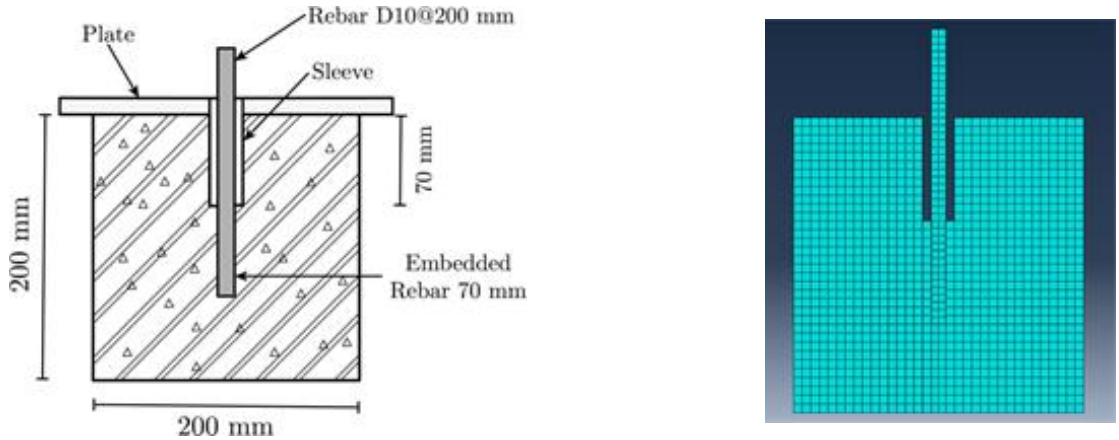
3. 철근의 부식율에 따른 철근-콘크리트 부착거동 예측을 위한 유한요소해석 모델 개발

- 앞서 수행한 철근 부착 성능 실험 결과를 바탕으로 철근-콘크리트의 부착거동을 모사할 수 있는 해석모델을 개발하였고, 이 모델은 철근콘크리트 구조성능 평가 시 철근의 부식율에 따른 철근과 콘크리트의 부착성능의 영향을 고려하기 위하여 활용하고자 한다.
- 수치해석은 유한요소 해석 소프트웨어인 ABAQUS를 이용하여 구조체를 이산화하고 해석을 수행하였다. 본 연구에서 철근과 콘크리트 사이의 부착 성능을 표현하기 위하여 ABAQUS에서 제공하는 Cohesive Zone Model (CZM)을 도입하였고, 수치해석을 위하여 실험 구조체를 [그림 1-34]과 같이 선대칭(axisymmetric) 모델로 생성하고, 이를 Abaqus를 이용하여 유한요소망으로 이산화 과정을 수행하였다.
- 콘크리트와 철근은 각각 선대칭 응력 (CAX4)를 이용하여 요소망을 생성하였고, 콘크리트 및 철근의 전체 자유도(degrees of freedom, DOFs)의 수는 각각 2354개와 456개를 구성하였다. 또한 경계조건(boundary conditions)은 콘크리트 모델 상단 부분에 고정단으로 적용하였고, 외력은 콘크리트 모델 상단 부분에서 50 mm 떨어진 부분의 위치하는 철근에 강제변위 10 mm를 수직 방향으로 적용하였다.
- Abaqus에서 CZM을 모사할 수 있는 기법으로 요소에 적절한 접합부 물성을 부여하는 Cohesive element와 접촉(contact)기능을 이용하여 CZM을 정의하는 Cohesive surface를 제공하였다. 본 연구에서는 철근과 콘크리트의 접촉 거동을 모사하기 위하여, 접촉 해석을 이용하여 접촉면의 정의가 상대적으로 쉬운 이점이 있는 Cohesive surface를 사용하였다.
- 콘크리트-철근 접합 부분의 거동은 [그림 3-1]와 같은 선형 Traction-Separation 법칙으로 표현할 수 있고, δc와 σc는 각각 분리가 일어날 때의 변위가 응력을 나타내며, δf는 파괴가 완전히 일어났을 때의 변위를 나타내었다. 또한 K는 초기 재료 강성을 나타내며 GIC파괴 에너지는 [그림 3-1]에서 그래프의 면적으로 표현할 수 있다. [그림 3-2]의 탄성 거동은 식(3-1)와 같이 탄성구성행렬(elastic constitutive matrix)로 표현된다.

$$\begin{Bmatrix}\sigma_n\\ \sigma_s\\ \sigma_t\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}K_{nn} & K_{ns} & K_{nt}\\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st}\\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\delta_n\\ \delta_s\\ \delta_t\end{Bmatrix} \quad (3\text{-}1)$$

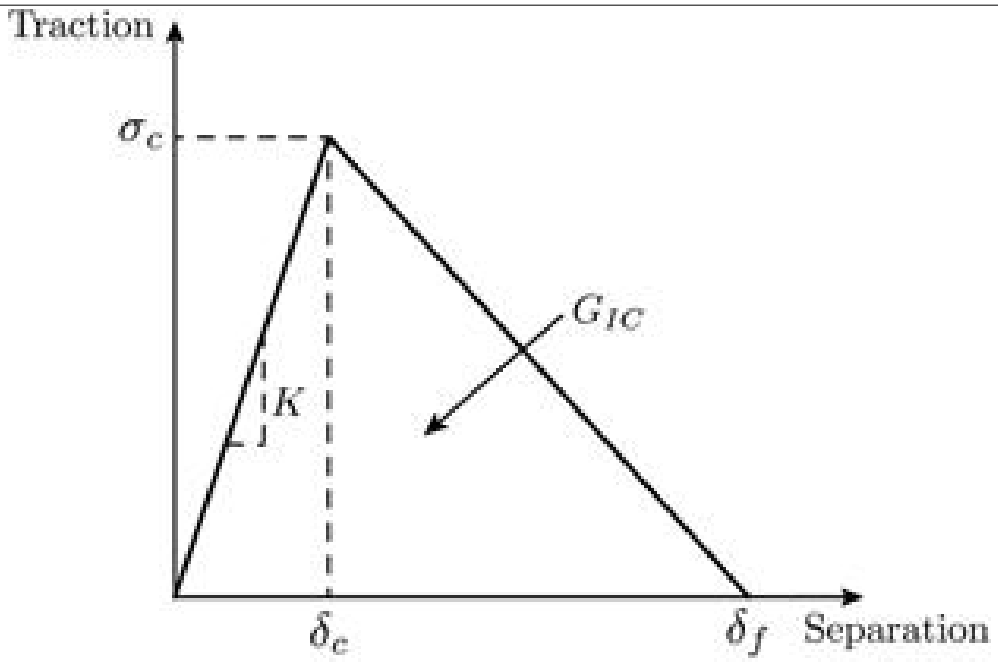
- 공칭 응력(nominal stress) 는 각각 수직 응력 및 전단 응력이며, 는 이에 상응하는 변위임. 콘크리트-철근의 접착 계면 파괴는 접촉 응력 혹은 접촉 분리가 특정 손상 개시 기준(damage initiation criteria)을 만족할 때 시작되며, 손상 개시 기준은 최대 응력 혹은 최대 분리 변위 등으로 나타내었다. 본 해석에서 는 최대 응력 기준을 사용하였으며, 이는 식(3-2)와 같이 정의한다.

$$\max\left\{\frac{\langle\sigma_n\rangle}{\sigma_n^0},\ \frac{\sigma_s}{\sigma_s^0},\ \frac{\sigma_t}{\sigma_t^0}\right\}=1 \quad (3\text{-}2)$$



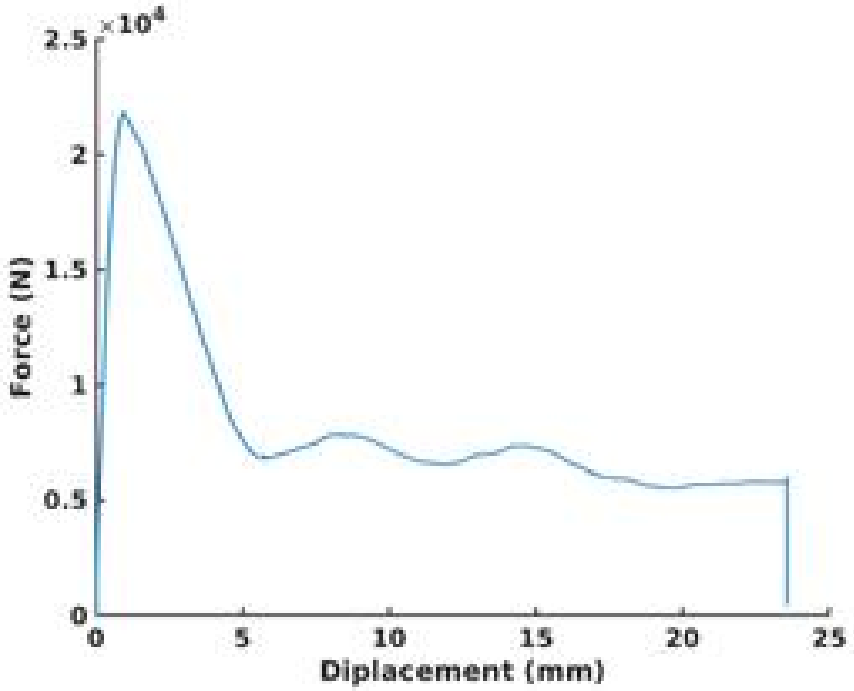
(a) 2D modeling of a pull-out specimen (b) 2D mesh generation by Abaqus

[그림 3-1] 2D Modeling of a pull-out specimen and Abaqus CAX4 meshes



[그림 3-2] Linear elastic traction-separation law

- 손상 전개(damage evolution)는 손상 개시 기준에 도달한 후 재료의 강성이 저하되는 형상을 표현하며, Abaqus에서는 선형 및 비선형 등으로 표현할 수 있으나, 본 연구에서는 손상 전개를 선형으로 가정하여 해석을 수행하였음. 또한, 파괴 에너지 는 실험에서 얻은 콘크리트와 철근 접합부의 파괴가 일어났을 때의 변위를 이용하였다.
- 본 연구에서는 철근 및 콘크리트의 재료 거동은 탄성 거동으로 가정하여 해석을 수행하였고, 이때 사용된 콘크리트와 철근의 탄성 계수와 푸아송 비는 각각 다음과 같다(Ec = 30GPa, v = 0.18 및 Es = 200GPa).
- 콘크리트와 철근의 접촉면 거동을 모사하기 위해 Cohesive surface의 초기 재료 강성 및 손상 개시 기준 그리고 손상 전개 값을 정의가 필요하다. Abaqus에서 사용되는 매개변수는 다음과 같음. 초기 재료 강성을 나타내는 Knn, Kss, Ktt와 공칭응력 δn,δs,δt 그리고 파괴에너지 GIC이며, 앞서 수행한 철근-콘크리트 분리 실험 데이터는 다음 [그림 3-3]과 같은 부착-분리 거동으로 도시하였고, 이 실험 데이터를 바탕으로 수치 해석에 필요한 매개변수 값을 구할 수 있다.



[그림 3-3] Experimental bond-slip behavior

▪ 실험값을 바탕으로 해석에서 사용된 초기 강성 및 공칭 응력을 각각 [표 3-1]과 [표 3-2]에 표시하였다. 파괴 에너지는 앞 절에서 서술한 바와 같이 파괴 시의 변위를 사용하였고, 이는 위 [그림 3-3]에서 도시하는 바와 같이 약 5.8 mm에서 파괴가 되었음을 알 수 있다.

[표 3-1] Initial stiffness for Cohesive behavior (MPa/mm)

K_{nn}	K_{ss}	K_{tt}
D10-Mix1-13		
732.828	20.938	20.938
D10-Mix1-21		
726.989	20.771	20.771
D10-Mix1-23		
605.175	17.291	17.291

[표 3-2] Nominal stress for Cohesive behavior (MPa)

Nominal stress Normal-only	Nominal stress First direction	Nominal stress Second direction
D10-Mix1-13		
12.432	12.432	12.432
D10-Mix1-21		
9.936	9.936	9.936
D10-Mix1-23		
12.818	12.818	12.818

▪ 여기서, 콘크리트-철근 계면 파괴 해석을 위해서 [표 3-2] 에서 사용된 매개변수는 다음과 같은 과정을 통하여 제안하였다. 실험값으로 얻은 반력 단위 kgf (kg force)를 N (newton) 단위로 변환한 후, 이 값을 다시 응력으로 변환을 하게 되며, 응력 변환을 위하여 3차원인 실험체를 2차원의 해석 모델로 변환하는 보정 계수를 도입하였다.

$$\alpha_A = \frac{D \times \pi \times L}{(L \times t) \times 2} \tag{3-3}$$

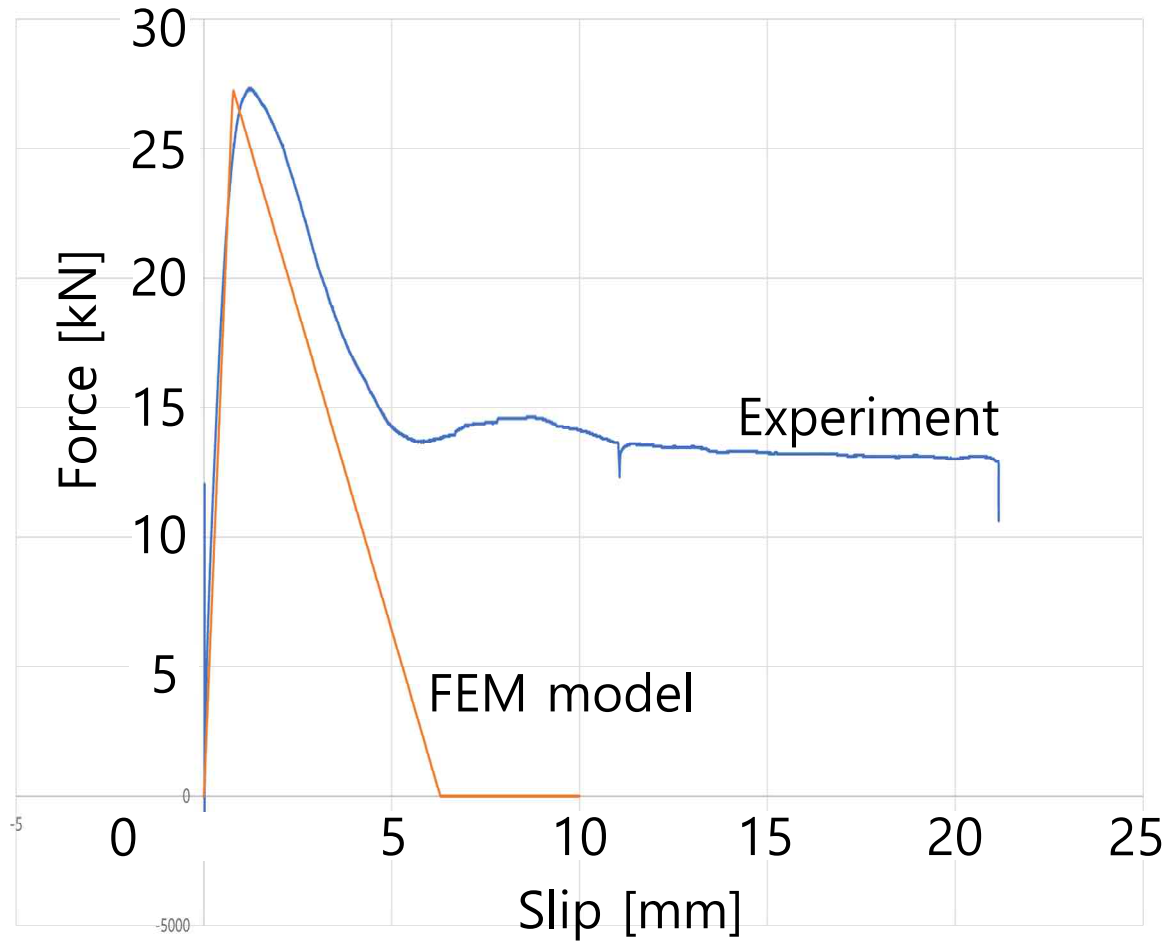
▪ 여기서, L은 콘크리트에 매립된 철근의 길이로 70 mm이며, D는 철근의 지름, t는 요소의 두께로 본 해석에서는 평면 변형을 고려하기 때문에 단위 두께 t=1mm로 가정하였다. 따라서 본 연구에서는 보정 계수를 αA = 5π를 사용하였고, 실험 데이터에서 변환한 최대 응력은 [표 1-12]에서 보이는 바와 같이 해석을 위한 공칭 응력으로 사용하게 된다. 또한 수직 응력에 상응하는 초기 재료 강성은 다음과 같은 관계식을 통하여 얻을 수 있다.

$$K_{nn} = \frac{\sigma_n}{\varepsilon_n} = \frac{\sigma_n T_0}{\delta_n} \tag{3-4}$$

▪ 여기서 To는 콘크리트와 철근의 접촉 계면 길이를 나타내며, 전단 응력과 재료 강성은 다음과 같은 관계식을 이용하였다.

$$K_{ss} = K_{tt} = \frac{2 \times \sigma_s}{\delta_s} \quad (3\text{-}5)$$

- [그림 3-4]은 실험 및 해석모델에서 얻은 콘크리트에 매입된 철근의 인발거동 결과를 비교하였음. FEM 모델 결과는 최대강도까지 거동을 잘 예측하고 있으며, 최대강도 이후의 거동을 잘 묘사하고 있다고 사료된다.
- 실험결과에서는 최대강도 이후 철근과 콘크리트의 마찰작용에 따라 일정한 강도가 유지되는 구간을 보이고 있지만, 마찰작용은 철근의 매입길이, 철근의 직경 및 철근의 마디의 형태에 따라 변하는 값으로 FEM 모델에서는 마찰작용에 의한 파괴후 거동은 고려하고 있지 않았다.



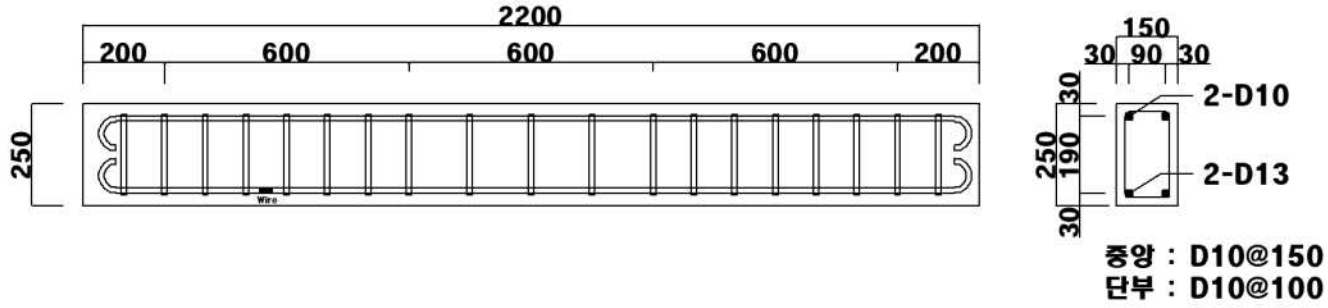
[그림 3-4] 실험값과 해석값의 비교

4. 철근콘크리트 보 매입된 철근 부식에 따른 복합열화 단계에서 재료물성과 Multi-physics 비파괴검사 인자의 상관관계 규명을 위한 실험적 연구 (부재수준 실험)

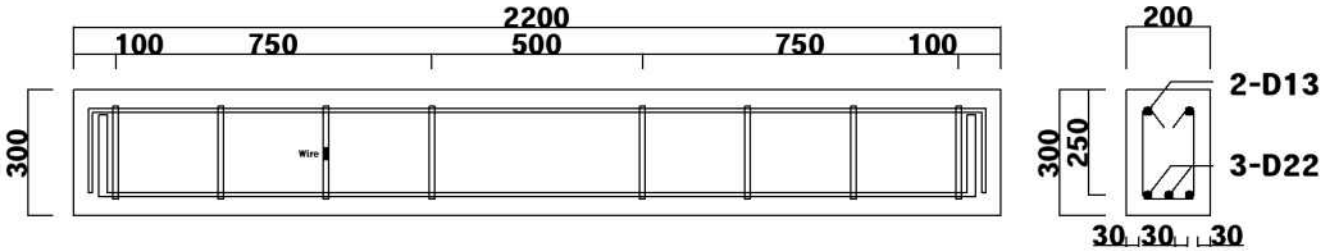
가. 실험체 계획 및 부식 방법

① 실험체 계획

- [표 4-1]와 같이 전단 실험체는 부식률(0,5,10,25,50)%를 변수로 단부에 진행하였으며, 양 단부는 (25, 50)%를 변수로 2개씩 제작하여 총 14개의 실험체를 제작하였다. 휨 실험체는 중앙부에 부식률(0,5,10,25,50)%를 변수로 2개씩 총 10개를 계획 및 제작하였다.



(a) 휨 실험체



(b) 전단 실험체

[그림 4-1] 실험체 도면

[표 4-1] 실험체 일람표

Specimen	부식률(%)	부식 위치	실험체 개수
S	0	-	2
	5	단부	2
	10		2
	25		2
	50		2
	25	양 단부	2
	50		2
F	0	-	2
	5	중앙	2
	10		2
	25		2
	50		2
실험체 합계			10

▪ [그림 4-1]와 같이 실험체 제작은 철근 배근을 실시한 후 부식위치에 구리선을 부착하였으며, 거푸집에 피복을 고려하여 배치하였다. 타설 후 구리선에 이물질이 침투하는 것을 방지하였다.



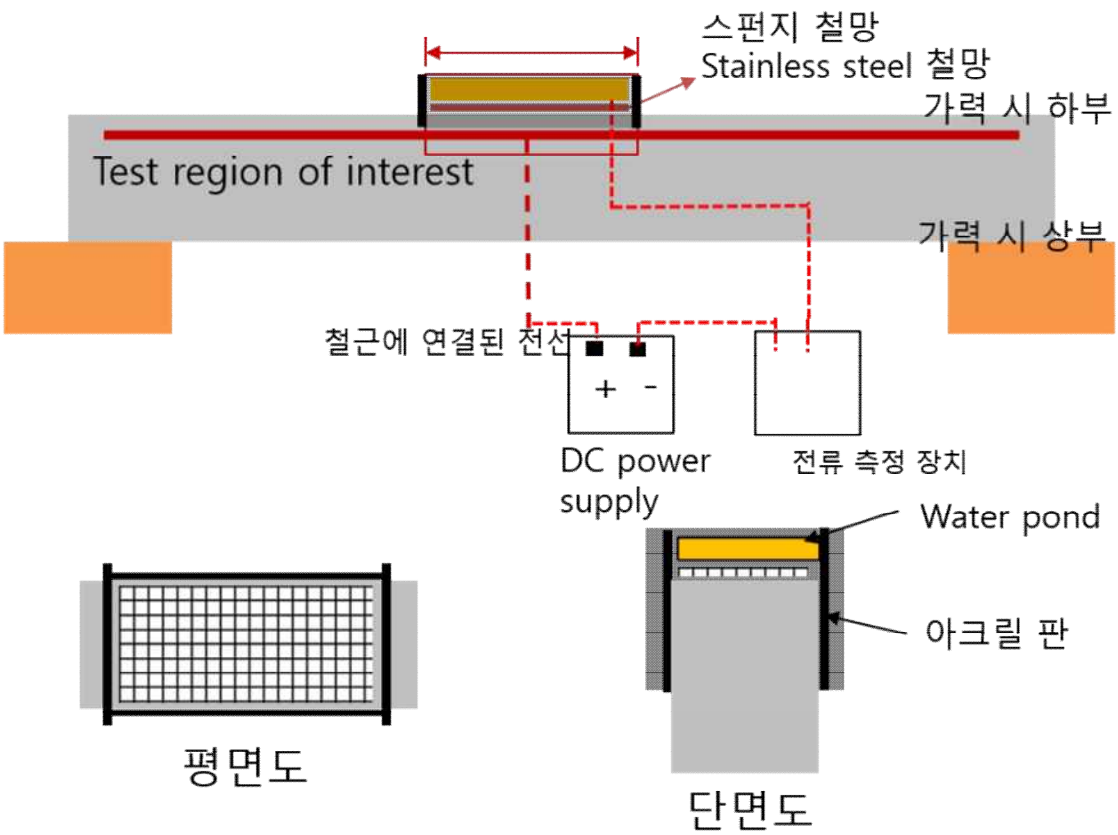
(a) 구리선 부착 (b) 거푸집 및 철근 배근 (c) 타설 (d) 타설 마무리 및 미장

[그림 4-1] 실험체 제작 과정

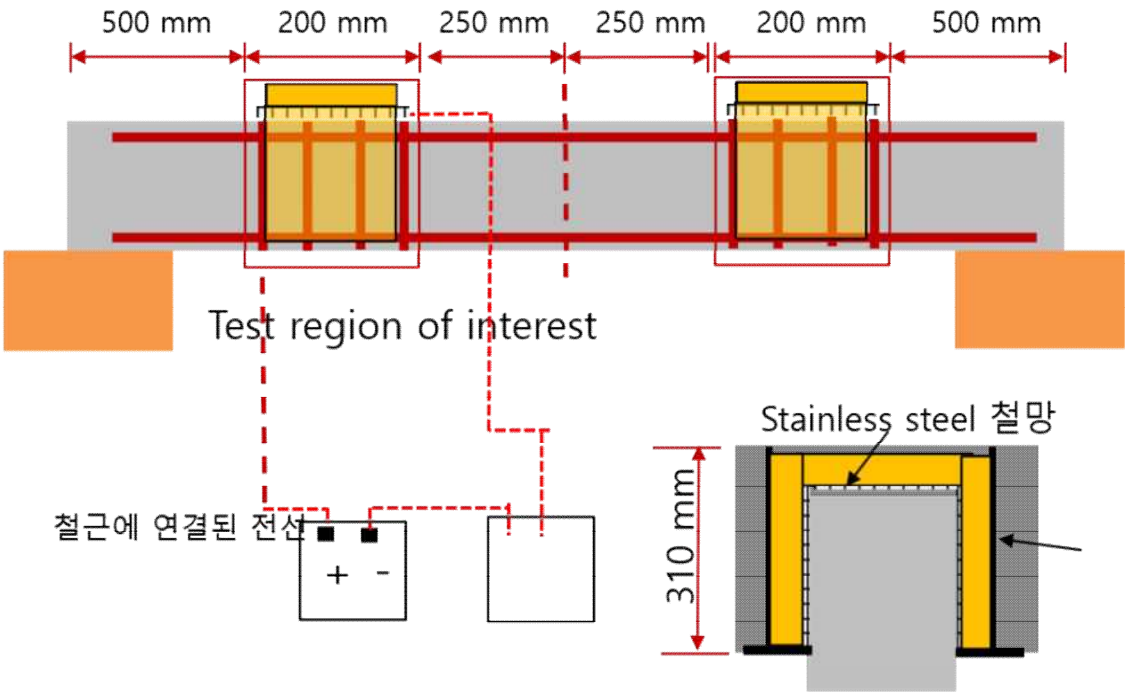
② 부식촉진실험 계획

▪ [그림 4-2],[그림 4-3]과 같이 부식 방법은 부분부식을 위해 아크릴 판을 제작하여 스터럽 부분을 따라 콘크리트 표면에 부착하였고, 아크릴 내부에 스테인레스 철망을 삽입하고 NaCl 수용액을 지속적으로 공급하기 위해 스펀지를 함께 삽입하였다.

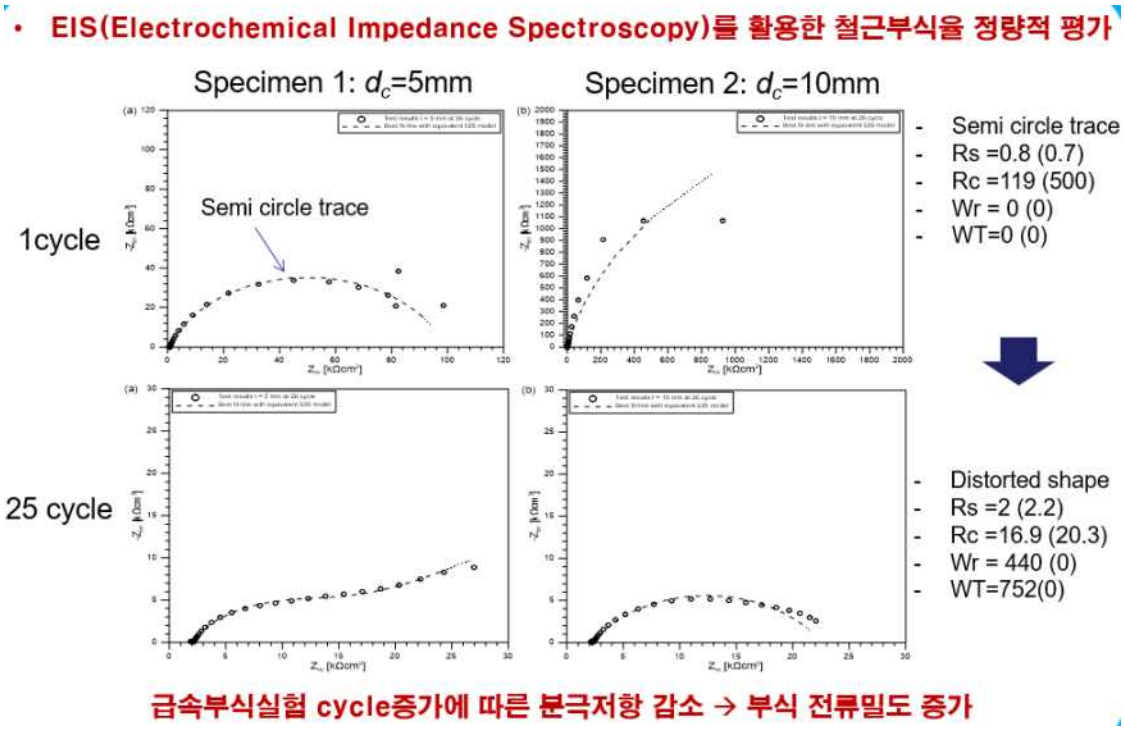
▪ 실험체 제작시 매립한 부식용 구리선과 상대전극(Stainless)을 DC Power Supply에 직렬 연결하여 부식을 진행하였고, 부식진행 과정의 목표열화수준에 따른 전류 및 전압은 Faraday's 법칙을 이용하여 [그림 4-4]와 같이 설정 하였으며 프로그램을 통해 누적 전류량을 측정하였다.



[그림 4-2] 휨 실험체 부식 촉진 계획



[그림 4-3] 전단 실험체 부식 촉진 계획



[그림 4-4] Faraday`s 법칙 적용

나. 재료시험

① 콘크리트 재료실험

- 구조 실험용 콘크리트 설계기준 압축강도는 f'_{ck}=24Mpa로 설계하였으며, [그림 4-5]은 공시체 제작과정 및 제작된 공시체를 나타내었다. 콘크리트의 압축강도는 KS F 2404에 따라 직경 100mm, 높이 200mm의 실린더형 몰드를 사용하여 제작하였고, 7일이 지난후 실린더형 몰드를 제거하여 본 실험체와 동일한 조건으로 양생하였다.


공시체 제작과정


공시체 연마


가력상황


파괴 상황

[그림 4-5] 공시체 제작과정 및 시험

- 측정된 콘크리트 강도는 각각 3개의 공시체의 평균값으로 하며 표준공시체(150mm×300mm)에 대한 보정값은 측정된 압축강도의 97%로 하였으며, 공시체는 하중을 균등하게 작용시키기 위하여 면처리 후 재령에 따라 7일, 14일, 28일 재료시험을 실시하여 강도를 측정하였다.
- 휨 실험체 압축강도는 7일 평균 19.09MPa, 14일 평균 23.35MPa, 28일 평균 24.79MPa 로 나타났으며, 전단 실험체 압축강도는 7일 평균 20.15MPa, 14일 평균 21.65MPa, 28일 평균 24.27MPa 로 나타났다.

[표 4-2] 실험체 콘크리트 배합

호칭방법			
콘크리트종류	굵은골재 최대치수	호칭강도	슬럼프
보통콘크리트	25mm	24MPa	150mm

시방배합표(kg/m3)						
시멘트	물	잔골재	굵은골재	혼화제	물-결합재비	염화물량 : 0.3kg/m3이하 공기량 : 4.5±1.5%
					47.4%	
367	174	871	919	2.94	잔골재율	
					49.4%	

[표 4-3] 휨 실험체 압축강도

7일	압축강도(MPa)	14일	압축강도(MPa)	28일	압축강도(MPa)
F-7d-1	19.61	F-14d-1	24.64	F-28d-1	24.27
F-7d-2	18.69	F-14d-2	23.13	F-28d-2	23.97
F-7d-3	18.96	F-14d-3	22.29	F-28d-3	26.14
Average	19.09	Average	23.35	Average	24.79

[표 4-4] 실험체 콘크리트 배합

7일	압축강도(MPa)	14일	압축강도(MPa)	28일	압축강도(MPa)
S-7d-1	20.44	S-14d-1	22.22	S-28d-1	25.58
S-7d-2	20.37	S-14d-2	19.96	S-28d-2	22.97
S-7d-3	19.63	S-14d-3	22.76	S-28d-3	24.27
Average	20.15	Average	21.65	Average	24.27

다. 부식촉진실험 및 구조실험 결과

① 철근부식결과

- [그림 4-6]와 같이 콘크리트 표면에 아크릴 부착후 NaCl용액을 넣고 전위차 부식을 진행하였고, [그림 4-7]는 Faraday`s 법칙을 적용한 전위차 부식을 진행한 후의 콘크리트 표면이다. 5% 부식을 진행한 콘크리트 표면은 일반 콘크리트와 차이점을 보기 어려움. 10%부식을 진행한 콘크리트 표면은 부분적으로 녹이 가시화 되기 시작하였다. 25% 부식을 진행한 콘크리트의 경우 녹물이 콘크리트 표면으로 흘러 내렸으며 0.1mm 미세균열이 발생하였다. 50% 부식을 진행한 콘크리트는 표면에 녹물과 균열이 뚜렷하게 나타났으며, 균열폭은 0.1mm로 나타났다.



(a) 양 단부 아크릴 부착



(b) 전위차 부식 진행

[그림 4-6] 부식위치 아크릴 부착 및 부식 진행



(a) 5%



(b) 10%



(c) 25%

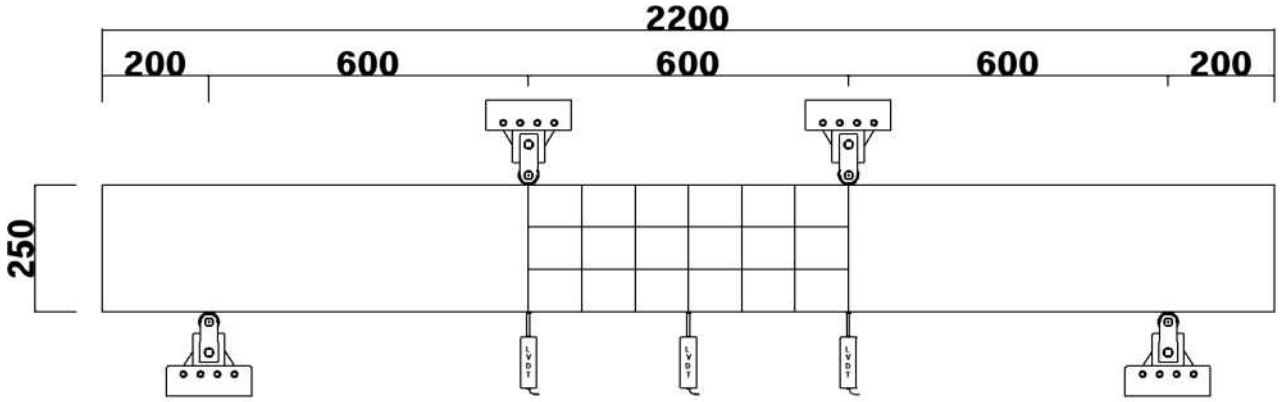


(d) 50%

[그림 4-7] 부식 결과

② 구조실험 상세

- 가력 계획은 [4-8]와 같이 단순지지 형태로 4점 가력 하였으며, LVDT는 가력점과 휨모멘트 최대점인 중앙부에 설치하였다. 가력은 만능시험기(UTM)을 사용하여 분당 0.5mm 변위제어를 실시하였고, 실험에서 사용된 실험기기 및 장치를 [표 4-5]에 나타내었다.



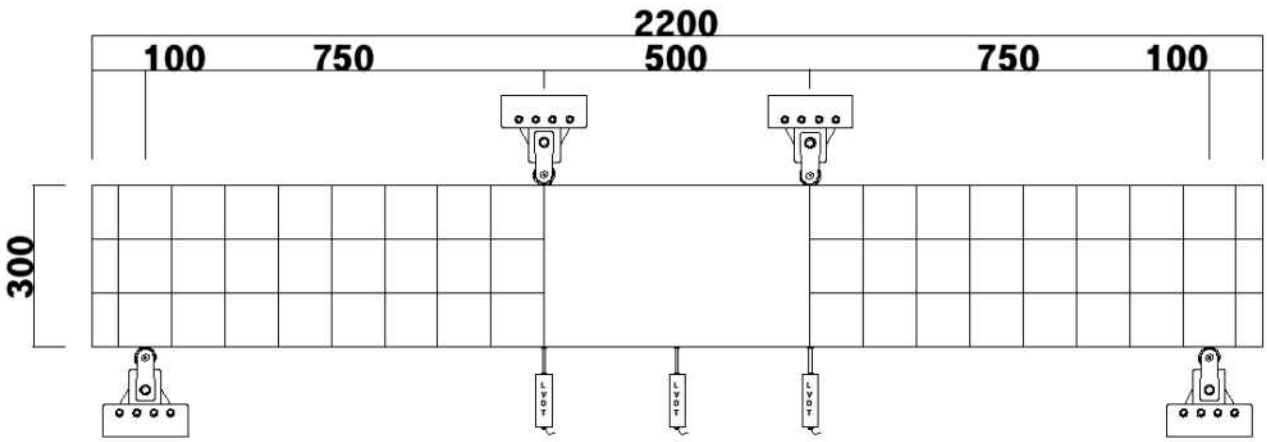
(a) 휨 실험체 가력계획



(b) 실험체 셋팅 상황

[그림 4-8] 휨 실험체 가력계획 및 실험체 셋팅

- 전단 실험체는 [그림 4-9]과 같이 단순지지 형태로 4점 가력 하였으며, LVDT는 가력점과 휨모멘트 최대점인 중앙부에 설치하고, 가력은 만능시험기(UTM)을 사용하여 분당 0.5mm 변위제어를 실시하였다.



(a) 전단실험체 가력계획



(b) 실험체 셋팅
[그림 4-9] 전단 실험체 가력 계획 및 실험체 셋팅

[표 4-5] 실험장비 및 측정기기

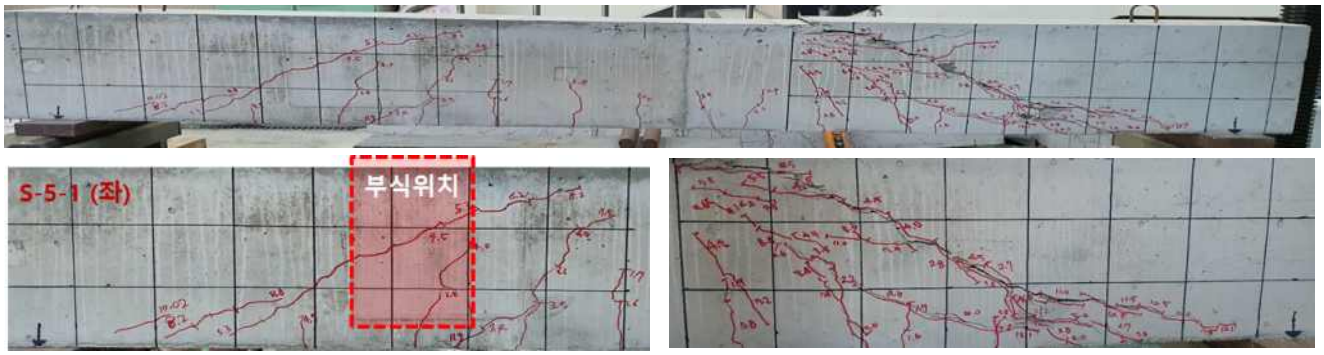
구 분	실험기기	용량	수량
가력장치	UTM	1000kN	1
측정장치	변위측정기(LVDT)	50, 100mm	3
	Crack Viewr	2mm	1
Data 측정장치	Data Logger	TDS-403(30ch)	1
	Swich Box	50ch	1

② 균열 및 파괴상황

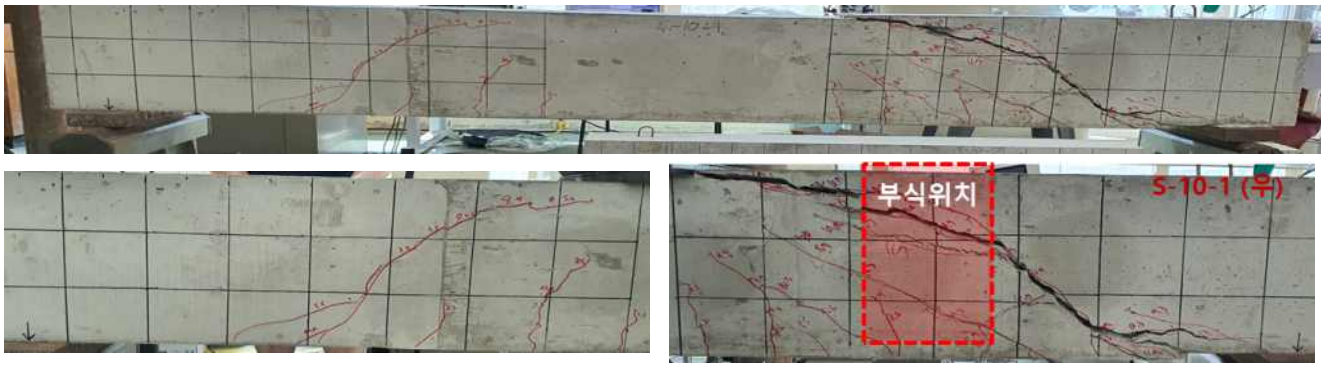
- [그림 4-10]는 전단 실험체의 최종 파괴 상황을 나타내며, FB-0-1 실험체는 부식을 진행하지 않은 실험체로서 양단부에 사인장균열 및 전단균열이 발생한뒤 응력이 집중되는 곳에서 최종 전단파괴가 발생하였다. 최종변위는 13.2mm이며 최대균열폭은 5mm 로 나타났다.(a)
- S-5-1 실험체는 전위차 부식을 5% 진행한 최종 파괴상황을 나타낸며, 변위 0.8mm에서 초기 휨균열이 나타났으며 2.2mm에서 초기 전단균열이 나타났다. 14.4mm에서 최종 전단파괴가 발생하였으며, 최대균열폭은 8mm로 나타남. 최종 전단파괴는 부식을 진행하지 않은 단부에서 나타났다.(b)
- S-10-1 실험체는 전위차 부식을 10% 진행한 최종 파괴상황을 나타났다. 변위 0.5mm에서 초기 휨균열이 나타났으며 3.3mm에서 초기 전단균열이 나타났으며, 이때 최대 균열폭은 0.1mm임. 최대변위 13.4mm에서 최대균열폭은 8mm로 나타났다.(c)
- S-25-1 실험체는 전위차 부식을 25% 진행한 최종 파괴상황을 나타냄. 변위 1.6mm에서 초기 휨균열이 나타났으며, 3.6mm에서 초기 전단균열이 나타내었다. 10.75mm에서 최종 전단파괴가 발생하였으며, 최대균열폭은 4mm로 나타났다.(d)
- S-50-1 실험체는 전위차 부식을 50% 진행한 최종 파괴상황을 나타냄. 초기 휨 균열은 0.5mm에서 발생하였으며, 4mm에서 초기 전단균열이 나타났다. 11.7mm에서 최종 전단파괴가 발생하였으며, 최대 균열폭은 2.7mm로 나타났다.(e)



(a) SB-0-1



(b) S-5-1



(c) S-10-1



(d) S-25-1



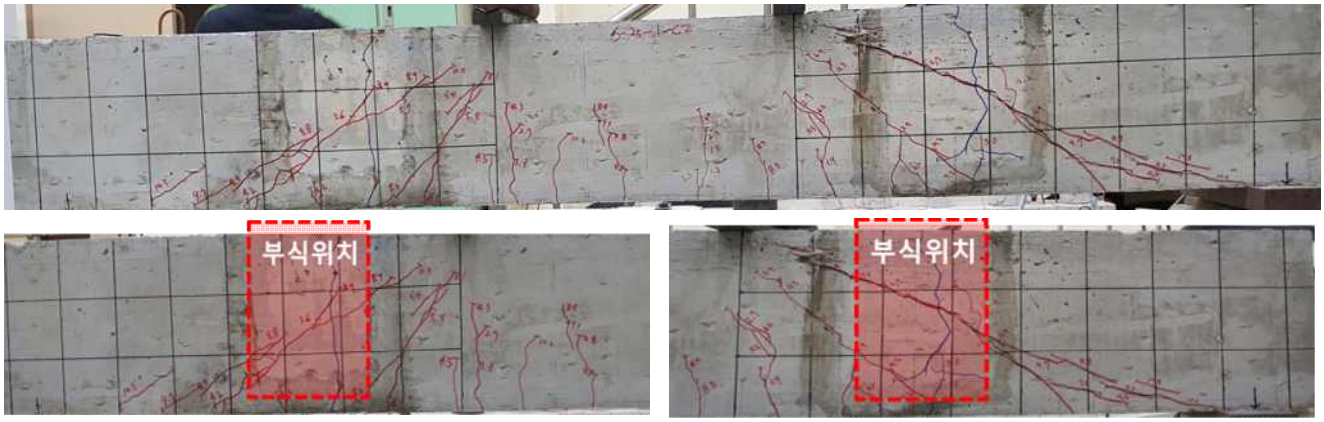
(e) S-50-1

[그림 4-10]. 단부 부식 균열도

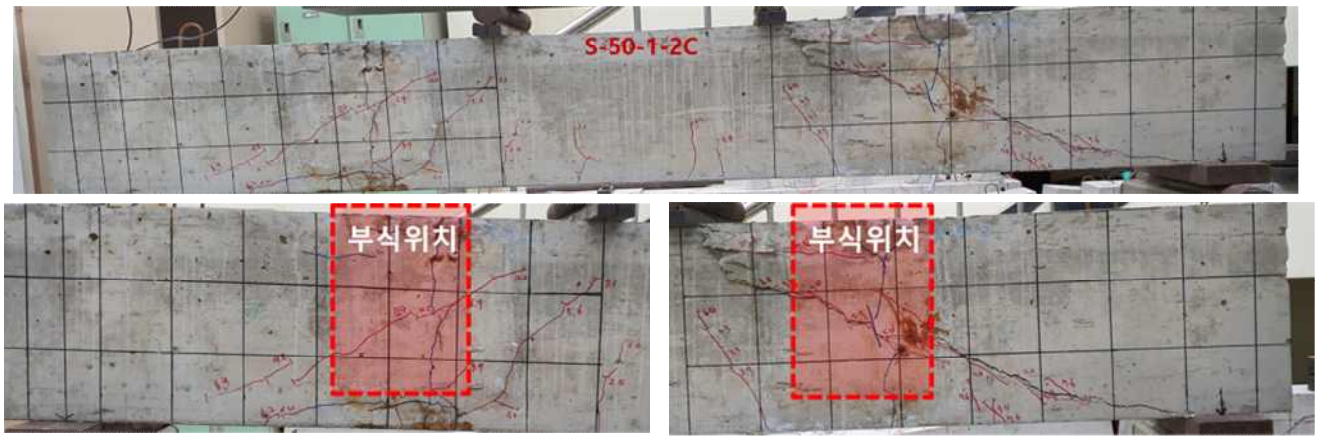
▪ [그림 4-11]는 양단부 전단 실험체의 최종 파괴 상황을 나타냄. S-25-1-C2 실험체는 양단부에 전위차 부식을 25% 진행한 최종 파괴상황을 나타내며, 변위 0.8mm에서 초기 휨균열이 나타났으며 3.6mm에서

초기 전단균열이 발생하였다. 12.5mm에서 최종 전단파괴가 발생하였으며, 최대 균열폭은 5mm로 나타났다.

- S-50-1-C2 실험체는 양단부에 전위차 부식을 50% 진행한 최종 파괴상황을 나타내었다. 변위 1.1mm에서 초기 휨균열이 나타났으며 4.6mm에서 초기 전단균열이 발생하였다. 11.3mm에서 최종 전단파괴가 발생하였으며, 최대 균열폭은 1.3mm로 나타났다.



(a) S-25-1-C2



(b) S-50-1-2C

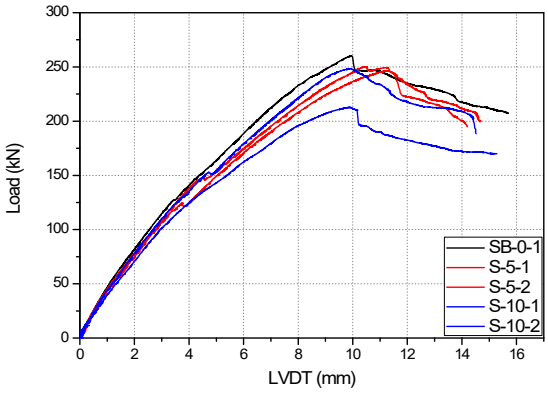
[그림 4-11] 양단부 부식 균열도

③ 하중-변위 및 에너지소산량

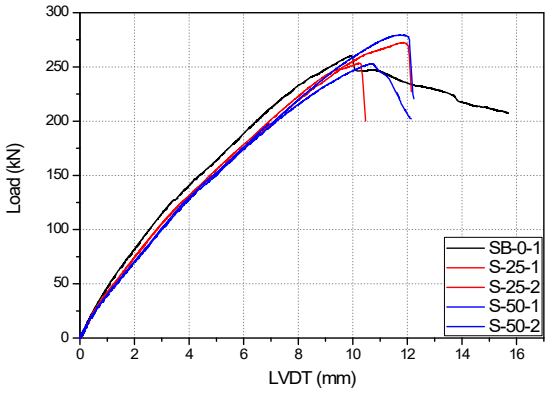
- 전단 파괴형 실험체의 하중-변위 곡선의 이력 거동은 기준 실험체 SB-0부터 부식 된 실험체 S-5-1 ~ S-50-2-C2의 순서대로 [그림 4-12]에 나타내었으며, 최종 파괴 상황까지 실험한 값에 대한 하중-변위 곡선의 넓이에 해당하는 이력 에너지소산은 [표 4-6]과 [그림 4-12] 에 나타내었다. 에너지소산은 기준실험체 대비 부식의 정도가 증가할수록 에너지성능은 저감 되었다.

[표 4-6] 전단 파괴형 보(실험결과)

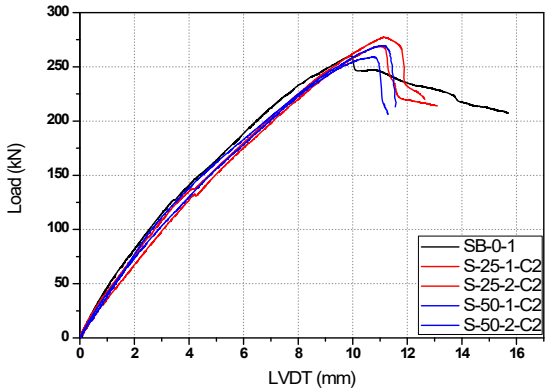
실험체명	에너지소산량 (kN*M)	잔존 에너지 성능	실험체명	에너지소산량 (kN*M)	잔존 에너지 성능
SB-0-1	2.85	100%	S-50-1	2.07	72.6%
S-5-1	2.54	89.1%	S-50-2	1.94	68.1%
S-5-2	2.35	82.5%	S-25-1-C2	2.19	76.8%
S-10-1	2.29	80.4%	S-25-2-C2	2.19	76.8%
S-10-2	2.47	86.7%	S-50-1-C2	1.8	63.2%
S-25-2	2.03	71.2%	S-50-2-C2	1.92	67.4%



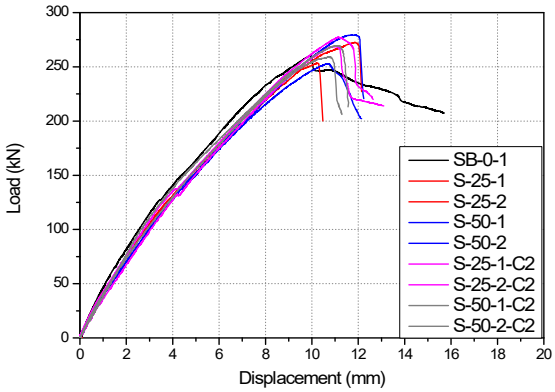
(a) 5%, 10%



(b) 25%, 50%

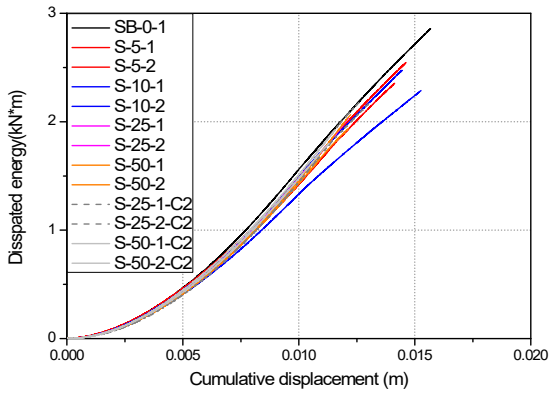


(c) 양단부 25%, 50%

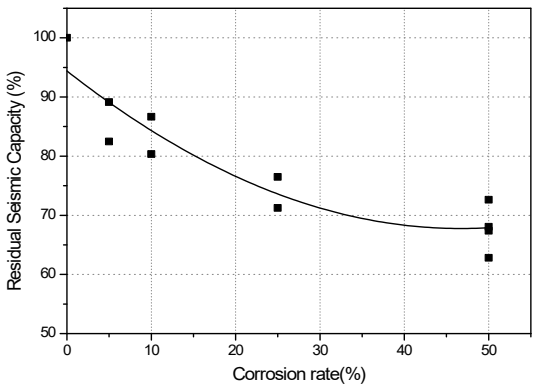


(d) 전단 P-D비교

[그림 4-12] 하중 - 변위 그래프



(a) 에너지 소산능력 그래프



(b) 부식률에 따른 성능저감 그래프

[그림 4-13] 에너지 소산 그래프

라. 철근의 부식정도 평가방법 및 실제부식률

① 철근의 부식정도 평가방법

- 공학적 목적으로 철근의 부식을 다루기 위해서는 반드시 철근의 부식정도에 관한 객관적인 기준이 마련되어야 한다. 즉 철근의 부식정도에 따라 콘크리트와 철근의 부착강도의 상관관계를 얻고자 한다면 철근의 부식정도를 객관적으로 평가할 수 있는 합리적 방법이 존재하여야 한다. 일반적으로 많이 이용되는 철근의 부식정도 평가방법은 [표 4-7]과 같으며, 이들의 평가법은 정량적이고 정성적인 기준에 의해 마련된다. 이외에도 기계장치를 이용하는 방법도 널리 사용되고 있으며 일면으로 볼 때 좀 더 객관적이고

신뢰적인 방법이라 할 수 있다. 본 연구에서는 단면적감소율을 이용해 실제부식율을 구하였다.

[표 4-7] 철근의 부식정도 평가방법

분 류	평가방법	특 징
직접법	육안에 의한 분류법	정성적인 평가법으로 4,5단계의 등급으로 부식도를 평가
	부식면적율 계산법	부식이 발생하나 면적을 전체 철근면적에 대한 비로 평가
	중량감소율 계산법	가장 정확한 평가법으로 부식된 중량감소율로 평가
간접법	인장강도 측정법	부식된 철근의 인장강도 감소율을 이용하여 평가
	공식깊이 측정법	부식에 의해 파인 공식깊이를 이용하여 평가
	단면감소 측정법	부식으로 제거된 녹의 깊이를 이용하여 평가

② 단면적감소율에 의한 측정법

- 단면적감소율에 의한 측정법은 콘크리트에 매립된 철근의 부식정도를 평가하는데 일반적으로 많이 이용되는 정량적인 방법으로서 실험실에서 주로 많이 이용되며, 소규모의 현장 구조물에도 적용이 가능하다. 단면적감소율에 의한 철근의 부식정도는 식 (4-1)과 같이 계산할 수 있으며 이 방법은 철근의 부식면적을 방한지에 스케치하여 철근의 총 면적에 대한 철근의 부식면적비로 구한다 방한지에 스케치하는 대신에 화상처리 자동장치를 이용하여 작업의 시간을 단축시키는 방법을 사용하였다.

$$\psi = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100[\%] \qquad (4\text{-}1)$$

ψ = 단면적감소율에 의한 철근의 부식정도

A = 실험 후 철근 단면적

A_0 = 실험 전 철근 단면적

③ 실제부식률

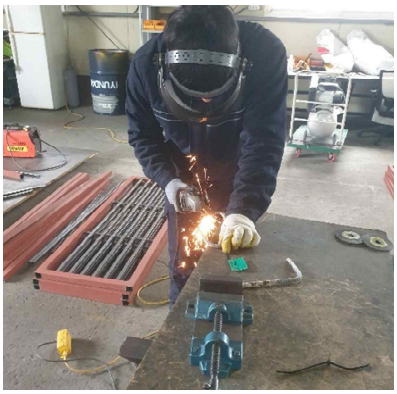
- 상기에 언급한 방법들을 이용해 부분부식 휨 실험체는 단면적감소율에 의한 측정법으로 실제부식율을 구하였다. 그림[4-14] (a)는 단조가력실험을 마친 실험체의 철근추출을 위해 콘크리트를 파쇄하였다. (b)는 각 실험체별 분류하였다. (c)는 정량적인 철근의 부식률을 측정하고자 동일한 크기로 철근을 절단하였다. (d)미세절단기를 이용하여 철근의 길이를 정밀하게 6등분 절단하였다. (e)절단된 철근을 고해상 카메라를 이용하여 철근의 절단된 단면을 촬영하였다. (f)는 이미지 프로레싱 프로그램을 이용하여 부식된 면적을 추출하였다. 그림[4-15]는 부식된 철근을 실험체별 나타내었다. 위의 식을 바탕으로 실제 부식률을 측정하였으며, 실제 부식율로 각각의 실험체명을 변경하였다.



(a) 철근 추출



(b) 철근 네이밍



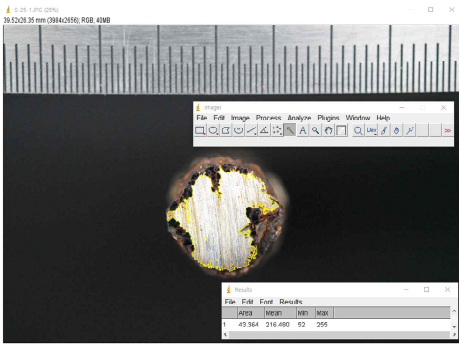
(c) 철근 절단 및 가공



(d) 철근 미세 단면 절단



(e) 이미지 촬영



(f) 이미지 프로세싱

[그림 4-14] 2차년도 실험체 단면적 감소율에 의한 실제부식량 측정과정



(a) FB-5



(b) FB-10



(c) FB-25



(d) FB-50

[그림 4-15] 부식된 부분부식 휨 실험체의 철근

[표 4-8] 목표부식율과 실제부식율 비교

실험체명		목표부식율(%)	실제부식율(%)	변경된 실험체명
FB	FB-0	0	0	FB-0
	FB-5-1	5	15	FB-15
	FB-5-2	5	16	FB-16
	FB-10-1	10	34	FB-34
	FB-10-2	10	20	FB-20
	FB-25-1	25	18	FB-18
	FB-25-2	25	25	FB-25
	FB-50-1	50	19	FB-19
	FB-50-2	50	24	FB-24
	SB-0	0	0	SB-0
	SB-5-1	5	15	SB-15
	SB-5-2	5	9	SB-9
	SB-10-1	10	20	SB-20
	SB-10-2	10	21	SB-21
	SB-25-1	25	39	SB-39
	SB-25-2	25	19	SB-19
	SB-50-1	50	25	SB-25
	SB-50-2	50	20	SB-20
	SB-25-1-C2	25	20	SB-20
	SB-25-2-C2	25	9	SB-9
	SB-50-1-C2	50	43	SB-43
	SB-50-2-C2	50	46	SB-46

F : Flexural, S : Shear B : Beam

- [표 4-8]에 목표부식율과 실제부식율 비교와 실험체명을 변경하여 나타내었다. 두 부식율이 서로 상이하게 나온 원인으로는 패러데이법칙을 적용하여 부식을 진행하였으나, 패러데이법칙의 이론은 순수 철을 이용하여 제안되었고 본 연구에서는 콘크리트 및 불순물 등의 변수의 영향이 많아 실제 계획한 부식률보다 부식이 진행된 것을 확인할 수 있었다.

마. 비파괴검사 방법

- [그림 4-16] (a)는 전류를 콘크리트에 인가하였을 때 미세구조내 공극수를 통한 이온의 전류 흐름을 콘크리트가 저항하는 정도를 나타내는 장비이다. (b)는 자연전위측정법 이라고 하며 시료금속의 전위차를 계측하여 부식의 가능성을 평가하는 방법이다. (c)는 전자기파전파(propagation)와 반사(reflection)의 성질을 이용하여 지중의 각종 현상을 나타내는 방법임 (d)는 25kHz에서 50kHz의 전단초음파를 발생하여 콘크리트 내부의 단면 이미지를 생성하는 기술이며 S파를 이용한 측정법이다. (e)는 p파를 이용한 측정법으로 콘크리트 표면을 따라 전파된 전단파를 발진기에서 일정거리 떨어진 수신기를 통해 측정하여 이동한 시간을 속도로 계산하였다.



(a)ER (electrical resistivity)



(b)HCP (half-cell potential)



(c)GPR(ground penetrating radar)



(d)SWT (Shear wave tomography)





(e) MASW (multi-channel analysis of surface waves)

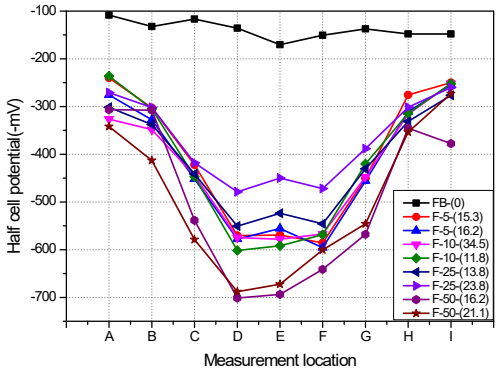
[그림 4-16] Multi-physics NDT 기법을 활용한 부식된 철근을 포함한 철근콘크리트 보 상태평가

바. 실험 결과 및 비파괴 검사결과 분석

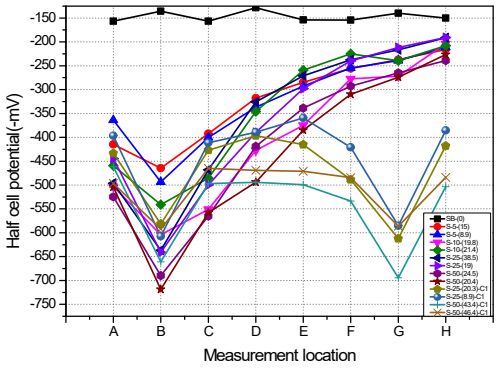
① 부식률에 따른 HCP 관계 비교

- [그림 4-17] (a), (b)는 휨 및 전단실험체의 부위별 부식률과 HCP 관계를 비교하여 나타내었다. 예상 부식률이 올라갈수록 HCP가 감소하는 경향을 보이며, 0%에서는 ASTM C876 기준이 따라 -200mv보다 높음으로 부식진행이 일어나지 않음을 보이고 있다. 나머지 -350mV 보다 낮음 값으로 부식이 진행됨을 알 수 있고, HCP는 부식의 가능성을 나타내는 지표를 나타내지만 정량적인 지표를 가지고 있지는 않았다. 하지만, 본 실험에서는 부식이 진행이 된 이후에서 HCP 값이 낮아지는 경향을 확인 할 수 있음. 또한 부식률에 따라 HCP 값이

다르게 나타남을 확인하였다.



(a) 훰 실험체 HCP 부위별 측정

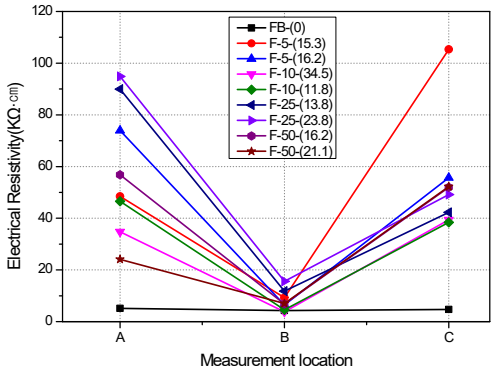


(b) 전단 실험체 HCP 부위별 측정

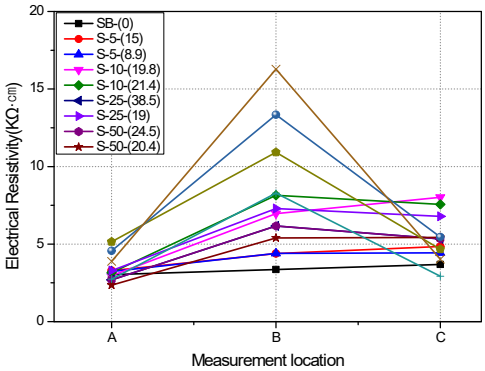
[그림 4-17] 부식률에 따른 HCP 측정 결과 그래프

③ 부식률에 따른 ER 관계 비교

- [그림 4-18] (a), (b)는 부위별 부식률에 따른 ER 상관 관계도를 나타내었다. ER 값은 부식률이 진행됨에 따라 큰 변화를 보이지는 않는 것으로 나타났다. 이는 부식의 환경을 측정하는 장비로서 실제 부식상황과 인위적인 방법으로 전류를 인가하여 부식을 진행하여 상이한 결과가 나타난 것으로 사료된다.



(a) 훰 실험체 ER 부위별 측정

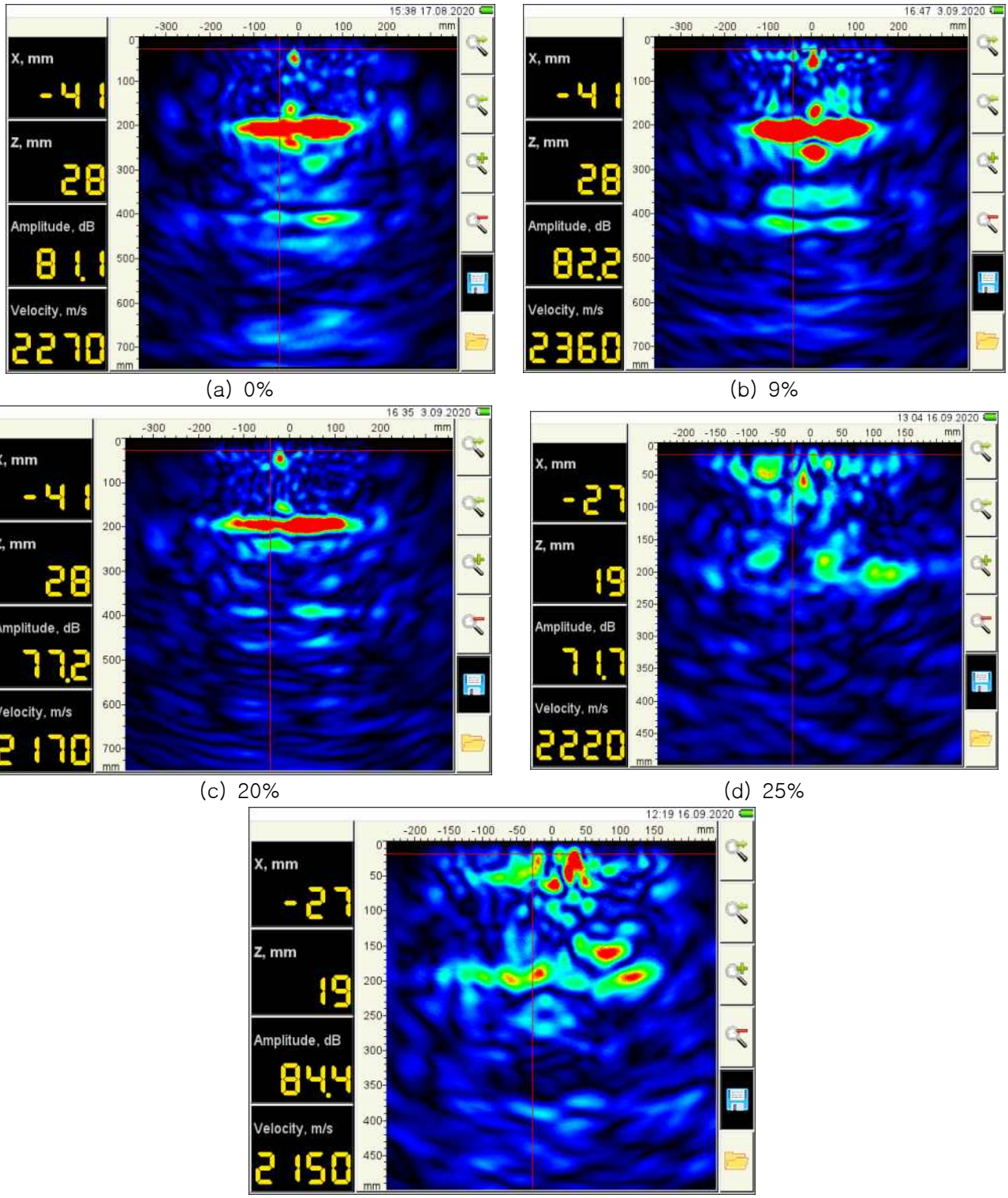


(b) 전단 실험체 ER 부위별 측정

[그림 4-18] 부식률에 따른 ER 측정 결과 그래프

④ MIRA를 이용한 콘크리트 B-scan 촬영

- [그림 4-19]는 부식률에 따른 MIRA의 이미지 변화에 대해 콘크리트를 촬영하여 나타 내었다. 50kHz 주파수로 촬영을 진행하였으며 0, 9, 20% 에서는 철근과 반대 콘크리트 바닥면에서 붉은색 음영으로 반사되는 것을 확인 할 수 있다. 25. 40%인 경우 철근 주위 부식 생성물들이 많이 발생하였고, 이로 의해 콘크리트에 균열이 발생하여 반사파의 간섭이 생겼을 것으로 판단된다.



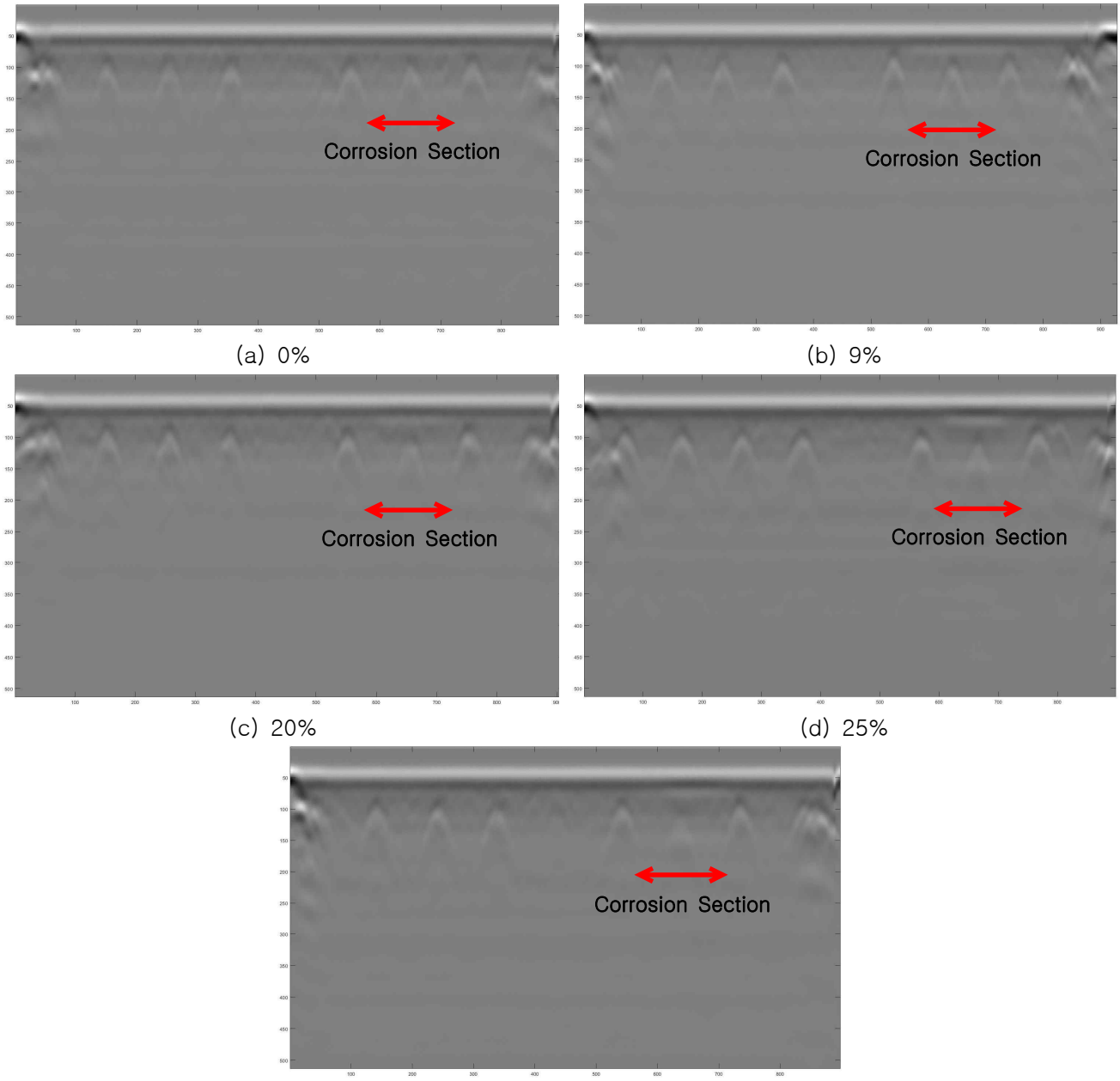
(a) 0% (b) 9%

(c) 20% (d) 25%

(e) 40%

[그림 4-19] 부식율 증가에 따른 전단파 토모그래피 이미지 변화

- [그림 4-20]은 부식률 증가에 따른 GPR-B-scan을 이용하여 스캔하여 나타내었다. 10MHz~수 GHz주파수 대역의 전자기 펄스를 이용하여 콘크리트 내부를 탐사한 결과 (a)는 부식되지 않은 상태의 파장을 나타내며 철근의 위치를 파악할 수 있다. 부식률 9%, 20%의 경우 파장의 변화가 거의 없었으며, 25%,40%에서 파장의 깊이가 감소하여 나타났다.



(a) 0% (b) 9%

(c) 20% (d) 25%

(e) 40%

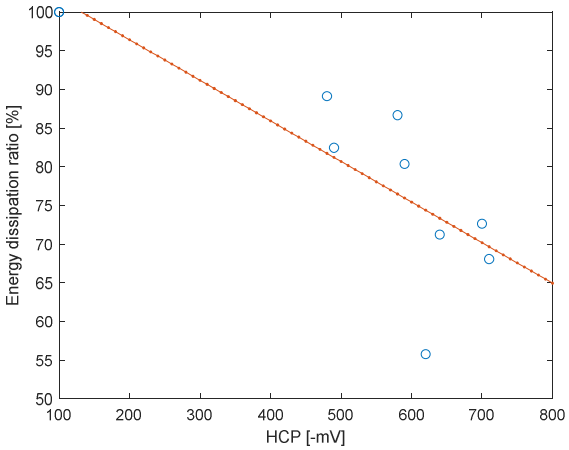
[그림 4-20] 부식율 증가에 따른 GPR B-scan 이미지 변화

바. 상태평가와 구조성능 결과 상관관계

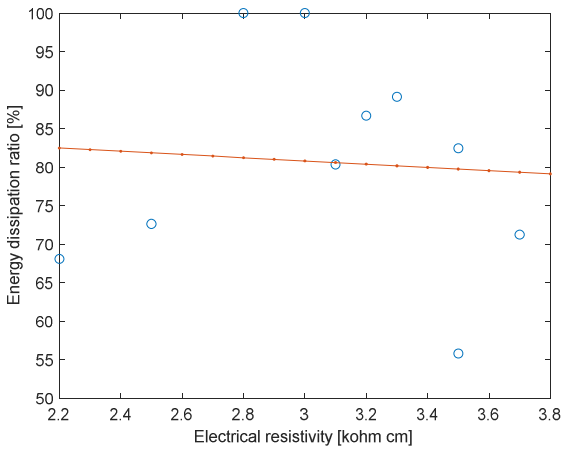
① Multi-physics 비파괴 검사 결과와 에너지소산능력 상관관계

- [그림 4-21]은 Multi-physics 비파괴검사 인자(HCP, ER, 전자기파 감쇠 및 전단파속도) 와 에너지소산율(5단계의 부식상태가 모사된 실험체에서 측정된 에너지소산능력을 부식되지 않은 실험체에서 측정된 에너지소산율로 나눈값)과의 상관관계를 보여주고 있다. 그림에는 선형 회귀분석으로 구한 비파괴검사 인자 및 에너지 소산율의 상관관계식을 표시하였다.
- [그림 4-21] (a)에서 HCP가 증가함에 따라 에너지소산율은 감소하는 경향을 보였다. 선형회귀식의 R^2값은 0.69로 약 70%의 에너지소산율은 HCP의 변화와 상관성을 보인다. 유의도 1% 수준의 양방검증에서 HCP와 에너지소산율의 상관관계는 통계적으로 유의미한다. [그림 4-21] (c)에서 GPR로 측정한 전자기파 감쇠율이 증가함에 따라 에너지소산율은 감소하는 경향을 보였다. 선형회귀식의 R^2값은 0.73로 약 73%의 에너지소산율은 HCP의 변화와 상관성을 보였다. 유의도 1% 수준의 양방검증에서 HCP와 에너지소산율의 상관관계는 통계적으로 유의미한다.
- [그림 4-21] (b)와 (d)에서 ER 및 전단파속도의 변화는 에너지소산율과 뚜렷한 상관관계를 보이지 않았다.

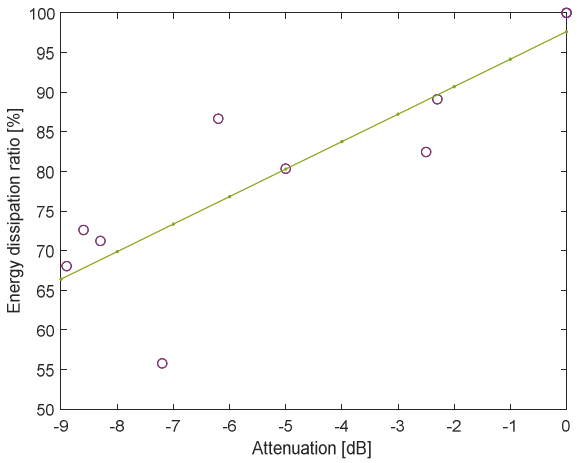
ER과 에너지 소산율의 관계의 R^2은 0.0049로 두 인자는 통계적으로 상관성이 거의 없는 것으로 보인다. 전단파속도와 소산율의 관계의 R^2는 0.222로 약 22%의 에너지소산율 데이터가 전단파속도와 상관성을 보인다. 이 값은 유의도 1% 수준의 양방검증에서 전단파속도와 에너지소산율의 상관관계는 통계적으로 의미를 갖지 않았다.



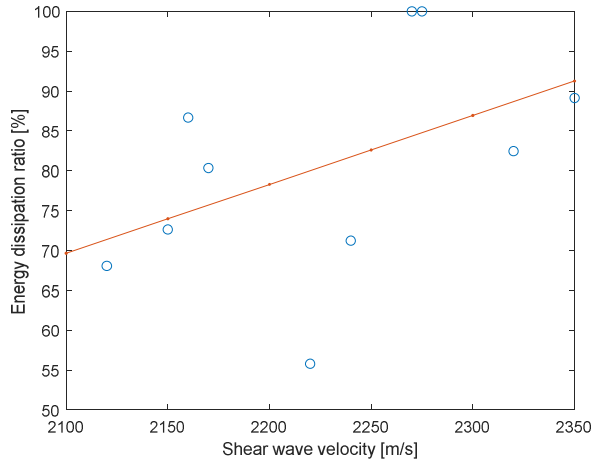
(a) HCP vs. 에너지소산율



(b) ER vs. 에너지소산율



(c) 전자기파 감쇠 vs. 에너지소산율



(d) 전단파 속도 vs. 에너지소산율

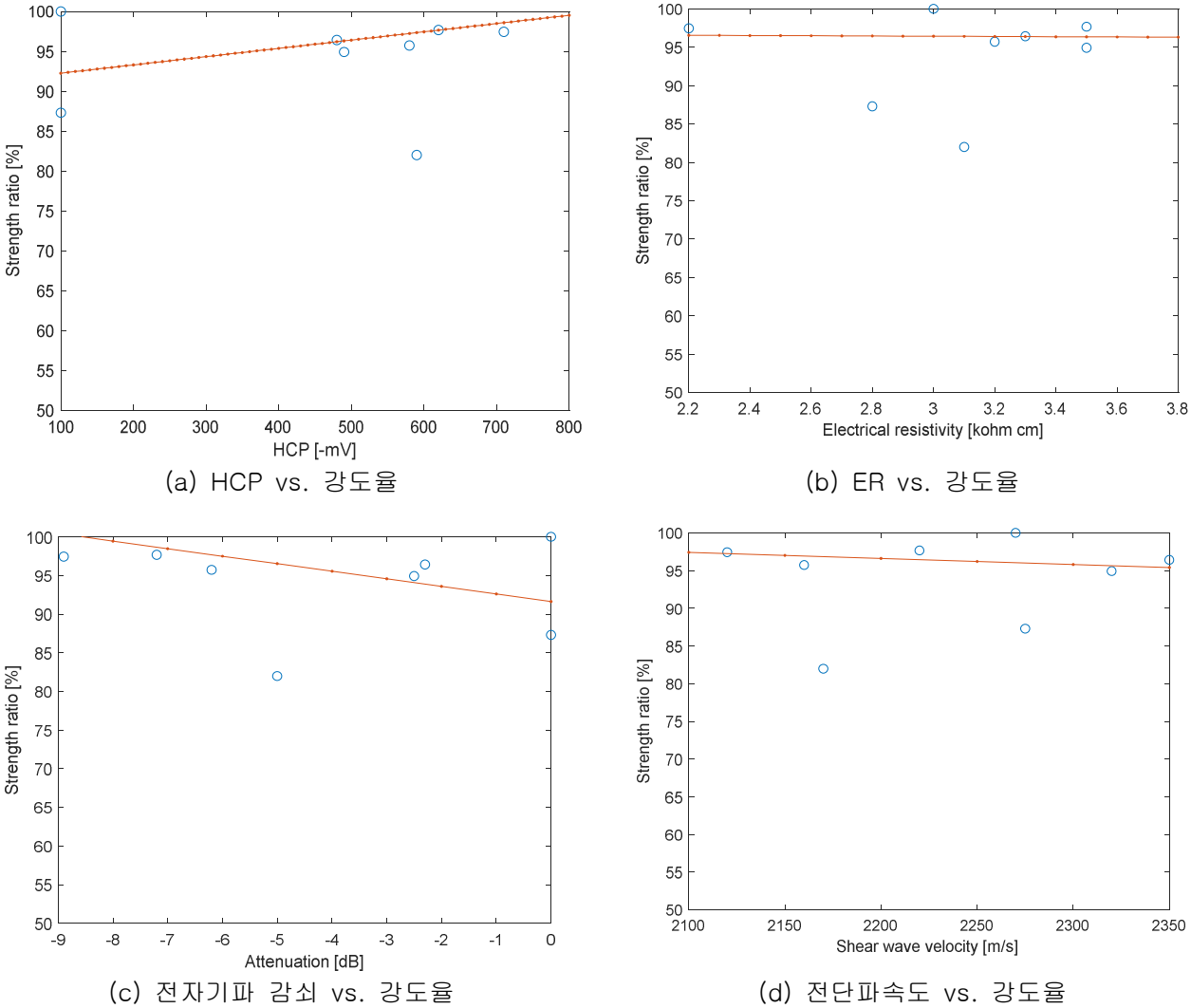
[그림 4-21] Multi-physics 비파괴검사 인자(HCP, ER, 전자기파 감쇠 및 전단파속도) 와 에너지소산율(5단계의 부식상태가 모사된 실험체에서 측정된 에너지소산능력을 부식되지 않은 실험체에서 측정된 에너지소산율로 나눈값)과의 상관관계

- HCP 및 GPR와 전단파괴형 철근 콘크리트보의 에너지소산율이 비교적 높은 상관관계를 보이는 것은 위험단면의 철근의 부식이 전단파괴형 철근 콘크리트 보의 내진성능을 감소시킬 수 있음을 보여준다. 즉 전단철근의 부식은 전단균열의 폭을 크게 하고, 최대강도 도달이후 전단력 저항 메커니즘에 기여를 떨어뜨려 전체적으로 취성거동을 일으킨다.
- 하지만 철근콘크리트보의 에너지소산율은 다양한 변수에 영향을 받는 값으로 철근부식에 따른 상태특성을 반영한 내진성능 평가의 정확도를 향상시키기 위해서는 다양한 변수를 고려한 실험 및 해석적 연구가 추가적으로 요구된다.

② Multi-physics 비파괴 검사 결과와 강도 상관관계

- [그림 4-22]은 Multi-physics 비파괴검사 인자(HCP, ER, 전자기파 감쇠 및 전단파속도) 와 강도율(5단계의 부식상태가 모사된 실험체에서 측정된 극한강도를 부식되지 않은 실험체에서 측정된 강도로 나눈값)과의 상관관계를 보여주고 있다.
- [그림 4-22]의 에너지소산율과 달리, 4가지 비파괴검사 인자는 강도율과 상관계수 R^2 값이 0.01보다 작은 값을 나타내었다. 이 값은 유의도 1% 수준의 양방검증에서 HCP, ER, 전자기파 감쇠 및 전단파속도는 강도율과 상관관계는 통계적으로 의미를 갖지 않음을 보인다.

▪ 이러한 특성은 전단파괴형 보에 위험단면에 배근된 전단철근의 부식정도가 보의 전단강도에 큰 영향을 주지 않기 때문으로 판단된다. 철근콘크리트보의 전단파괴 메카니즘은 전단철근 항복 뿐 아니라 콘크리트 내부 골재의 맞물림(interlocking) 효과 주철근의 Dowel 효과, 압축대에서 아치효과 등 다양한 메카니즘이 복합적으로 작용에 기인한다.



(a) HCP vs. 강도율 (b) ER vs. 강도율

(c) 전자기파 감쇠 vs. 강도율 (d) 전단파속도 vs. 강도율

[그림 4-22] Multi-physics 비파괴검사 인자(HCP, ER, 전자기파 감쇠 및 전단파속도) 와 강도율(5단계의 부식상태가 모사된 실험체에서 측정된 극한강도를 부식되지 않은 실험체에서 측정된 강도로 나눈값)과의 상관관계

사. 내진성능저감계수

본 연구에서 실험한 휨 실험체는 부식률에 따라 저감정도가 나타났으나, 전단 실험체의 경우 부식률과 내력의 상관 관계성이 미비하게 나타났다. 이는 전단거동에 기여하는 전단철근, 주철근의 장부작용, 굵은골재의 다월거동 등의 영향으로 판단된다. 따라서 휨 실험체를 기준으로 내진성능저감계수를 도출 하였다.

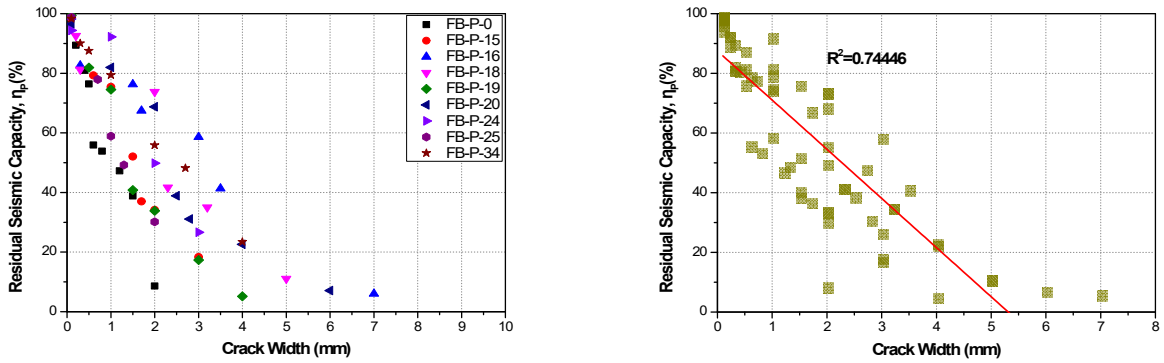
① 균열 폭에 따른 잔존내진성능율

- 부분부식 실험체의 균열 폭(ω_P)에 따른 잔존내진성능율(η_P)과의 상관관계를 [그림 4-23]에 나타내었다. 부식율이 증가하면서 균열 폭이 증가하는 것이 확인되었고 선형회귀분석을 통하여 식 (4-2)와 같은 식을 제안하였다.

$$\eta_P = -16.5\omega_P + 87.6 \qquad (4\text{-}2)$$

η_P = 부분부식 휨 실험체의 잔존내진 성능율

ω_P = 부분부식 휨 실험체의 균열 폭



(a) 균열 폭에 따른 잔존내진성능율 (b) 선형회귀식

[그림 4-23] 균열 폭에 따른 잔존내진성능율

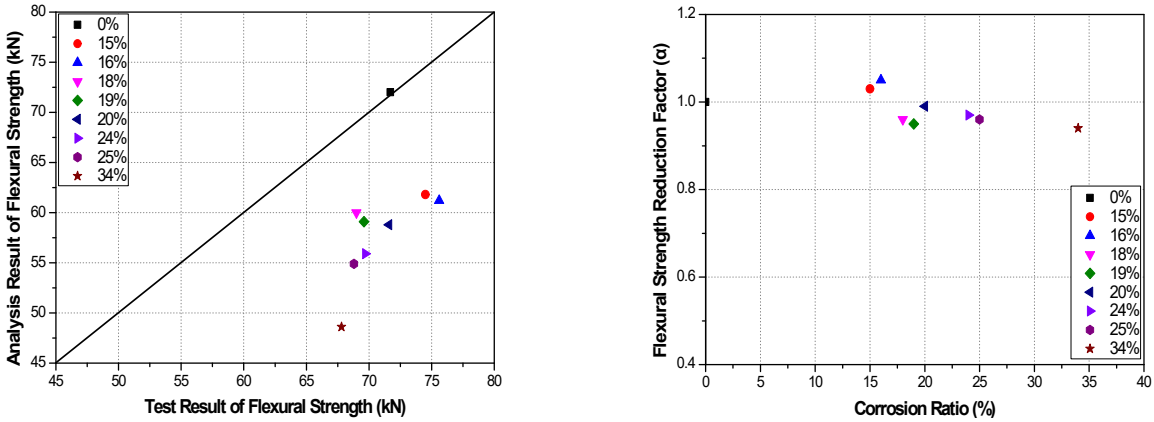
② 휨 파괴형 보 실험체 실험값 및 이론값 비교

- 복철근보 휨강도식을 이용해 부식율에 따른 단면적을 변수로 하여 부분부식 실험체 휨강도의 이론값을 구한 뒤 실험값과 비교하여 나타냈다. 그 결과 [그림 4-24](a)와 같이 이론값 대비 평균적으로 실험값이 20% 높게 나온 것이 확인되었다. 이는 부식율에 따른 부착을 고려하지 않아 이와 같은 결과가 나온 것으로 판단된다. 또한 부식된 실험체의 실험값의 강도저감정도를 파악하기 위해 실험체 각각의 이론값을 동일하게 고정 시킨 뒤 실험값을 비교하여 [그림 4-24] (b)에 나타내었다. 그 결과 실험값의 휨강도가 부식율이 높아짐에 따라 감소하는 경향이 보였다. 이를 통해 부분부식 실험체의 강도저감계수 (α)를 식 (4-3)에 나타내었다.

$$\alpha = \frac{F_c}{F_n} \qquad (4\text{-}3)$$

F_c = 부식된 실험체의 휨강도의 이론값

F_n = 부식되지 않은 실험체의 휨강도의 이론값



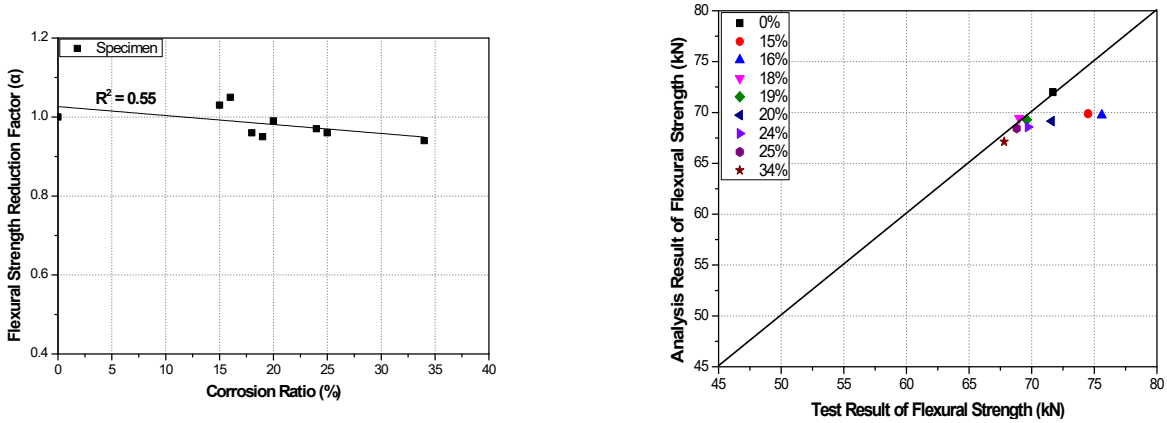
(a) 휨강도 실험값 이론값 비교 (b) 실험체의 휨강도 저감계수 α

[그림 4-24] 휨강도 실험값 이론값 분석 그래프

③ 휨 파괴형 보 실험체 강도저감계수(α) 적용

- 선형회귀분석을 통하여 아래의 식 (4-4)와 같이 부식율 (x)에 따른 휨 파괴형 보 강도저감계수 (α) 관련 식을 제안하였으며, 제안된식을 적용하여 부식률에 따른 강도저감계수 선형회귀분석 그래프를 [그림 4-25] a에 나타내었다.
- [그림 4-25](b)는 제안된 식의 유효성을 판단하기 위하여 실험체의 실험값에 제안된 강도저감계수를 적용하여 나타낸 그래프이며 오차율이 평균 3% 미만으로 나타나 제안식이 타당하다고 판단된다.

$$\alpha = -0.002x + 1.0 \qquad (4\text{-}4)$$



(a) 부식률에 따른 강도저감계수 회귀 분석 (a) 실험체의 이론값 강도 α적용

[그림 4-25] 강도저감계수 적용 그래프

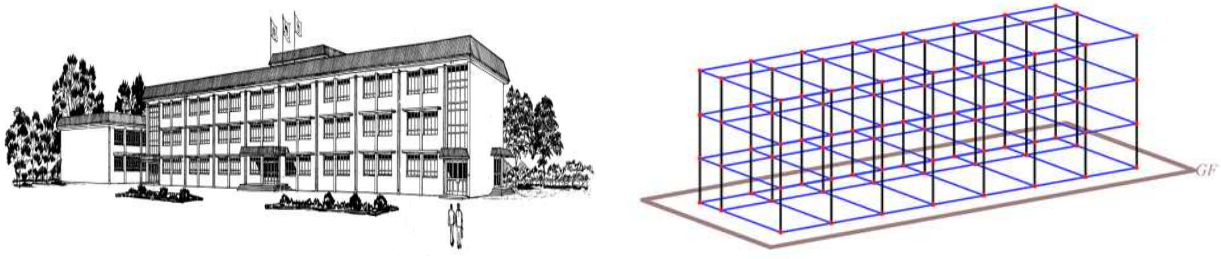
아. 부식률 적용 '다'형 건물 비선형 동적해석

① 모델링 형상화

- 본 연구에서는 3차원 해석 프로그램인 CANNY를 사용하여 비선형 동적해석을 실시하였다. 1980년대를 대표하는 학교 다형 건물의 모델링형상은 [그림 4-26] 와 같다. 해석은 [표 4-9]와 같이 무보강 골조가 붕괴를 나타냈던 Hachinohe.EW 200gal 및 보강 골조에 가해진 Hachinohe.EW 400gal을 수행하였으며, 실험결과와 비교하여 나타내었다.

[표 4-9] 해석 변수

실험체(부식 가정)	지진파	가속도 (gal)
25%	Hachinohe.EW	100gal
		150gal
50%	ElCentro.EW	200gal



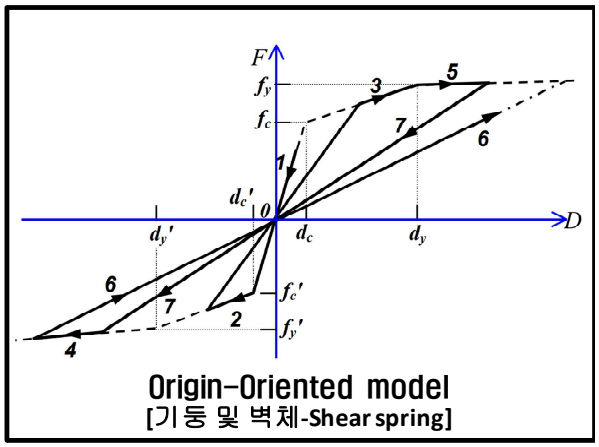
1980년대 대표 학교건물 모델링 형상화

[그림 4-26] 해석 대상건물 및 모델링 형상화

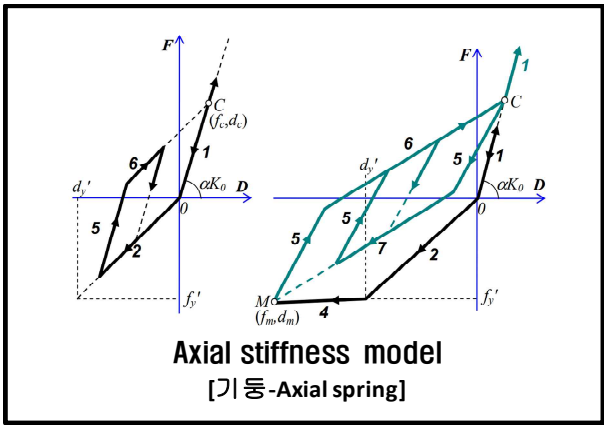
- 구조물은 변형이 작은 범위 내에서는 거의 탄성적인 거동을 나타내지만, 변형이 크게 되면 균열, 항복,

미끄러짐 등의 현상이 나타난다. 이와 같은 복원력특성을 비선형복원력 특성이라고 정의하고 있으며, 구조물이 극히 드물게 발생하는 대지진을 경험할 경우 골조가 항복을 하여 소성영역에 들어가는 것은 피할 수가 없다. 따라서 구조물의 소성변형능력 및 이력에너지 흡수능력은 대지진에 대한 구조물의 안전성을 확보 하기위한 매우 중요한 요소이다.

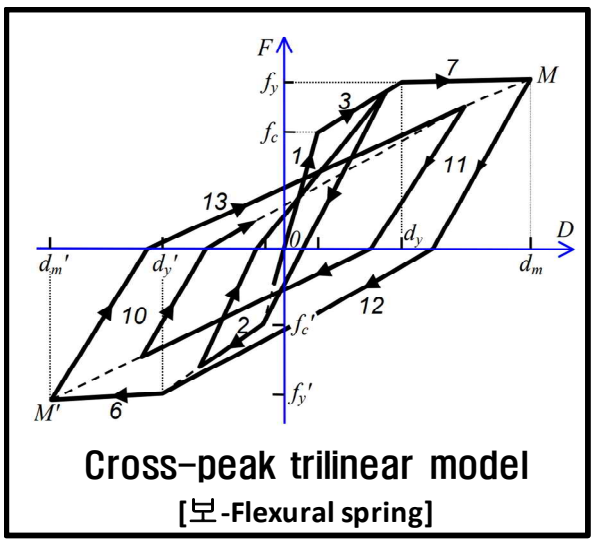
② 복원력 모델



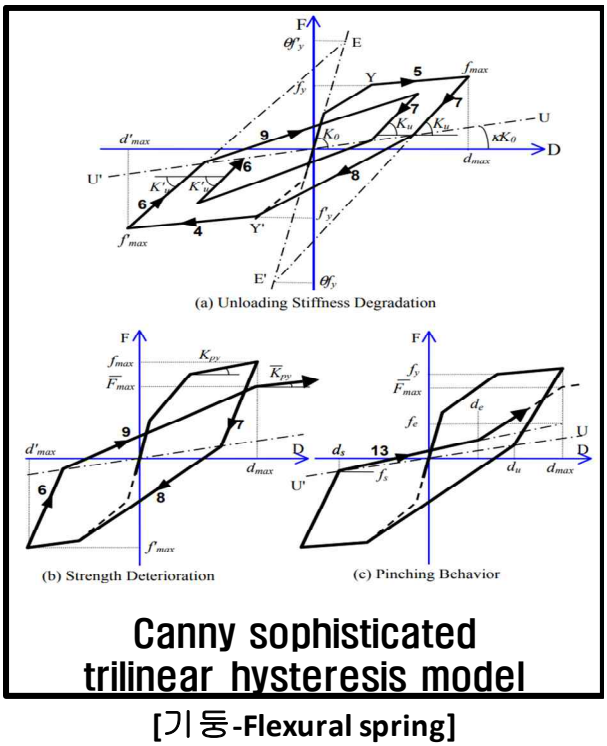
(a) 기둥 및 벽체 Shear spring



(b) 기둥 Axial spring



(c) 보 Flexural spring



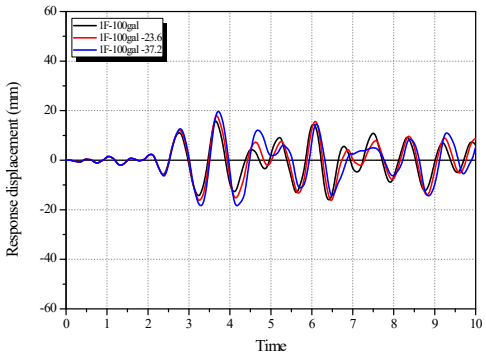
(d) 기둥 Flexural spring

[그림 4-27] 비선형 복원력 특성

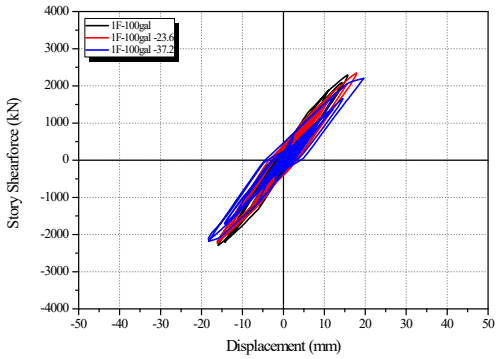
- 전단파괴를 일으키는 철근콘크리트 부재는 [그림 4-27](a)에 나타내는 것처럼 루프(loop)의 면적이 상대적으로 작다. 이것은 지진에너지를 흡수(hysteresis energy dissipation)할 수 있는 능력이 휨파괴형 부재에 비해서 부족하다는 것을 나타내는 취성적인 거동(brittle failure)을 보여주는 부재이다. 또한, 이력곡선이 같은 변위진폭에서도 매우 불안정하며, 루프의 형상이 휨파괴는 방추형을 나타내는 것에 비해서 S자형을 나타낸다. 이러한 전단파괴형 철근콘크리트 부재의 비선형 지진해석을 위해서 널리 사용되고 있는 복원력 특성은 [그림 a]에 나타낸 Origin-Oriented Hysteresis Model이다.
- 휨파괴를 일으키는 철근콘크리트 부재에는 [그림 4-27](c) 및 [그림 4-27](d)에 나타내는 것처럼 루프(loop)의 면적이 상대적으로 매우 크며, 즉 지진에너지를 흡수(hysteresis energy dissipation)할 수 있는 능력이 탁월한 연성능력이 우수한 부재를 나타낸다. 또한, 이력곡선이 같은 변위진폭에서도 안정성을 유지하고 있으며, 루프의 형상이 방추형을 나타내는 것이 일반적이다.

- 이러한 휨파괴형 철근콘크리트 부재의 비선형 지진해석을 위해서 널리 사용되고 있는 복원력 특성은 [그림 4-27](c)에 나타낸 Cross-peak Trilinear Model 및 [그림 4-27](d)에 나타낸 Takeda Model 등이 있다. 특히, 휨파괴를 하는 중·저층 철근콘크리트 구조물(부재)의 비선형 동적해석에 보편적으로 사용되고 있다.

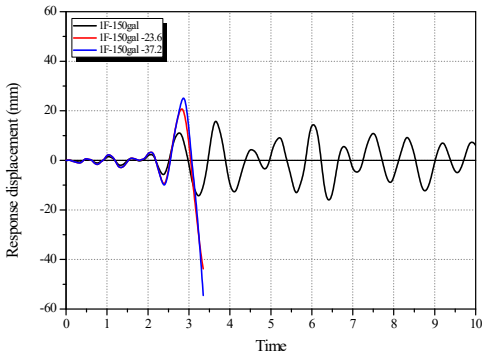
③ 시간이력 곡선 및 하중-변위 그래프



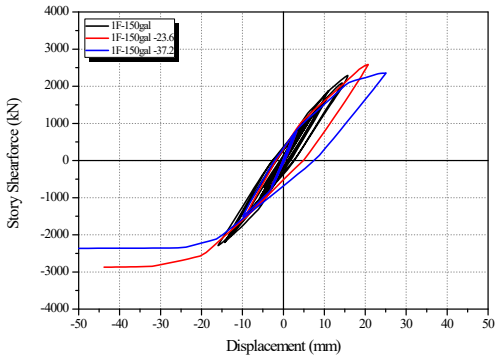
(a) Hachinohe.ew 100cm/s^2 시간이력 그래프



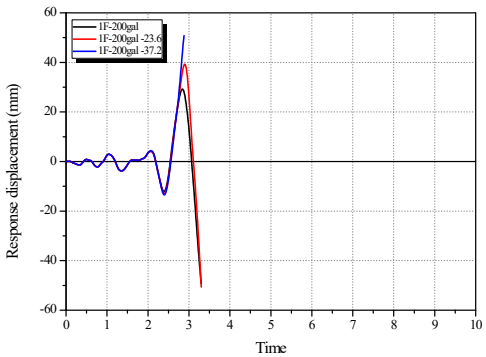
(b) Hachinohe.ew 100cm/s^2 하중 변위 그래프



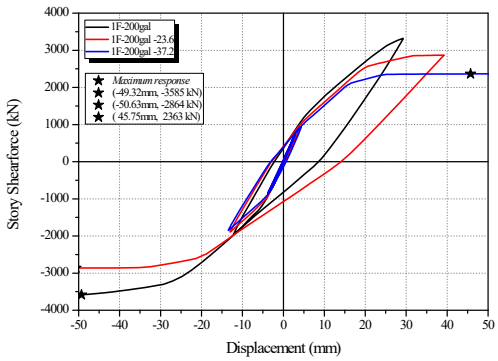
(c) Hachinohe.ew 150cm/s^2 시간이력 그래프



(d) Hachinohe.ew 150cm/s^2 하중 변위 그래프



(e) Hachinohe.ew 200cm/s^2 시간이력 그래프

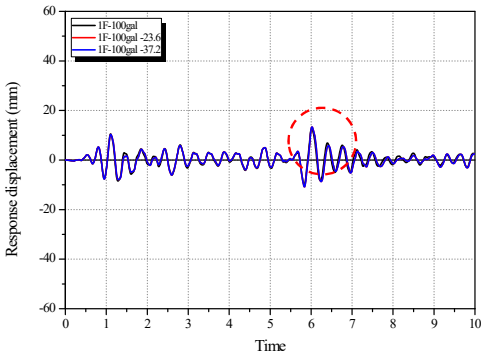


(F) Hachinohe.ew 200cm/s^2 하중 변위 그래프

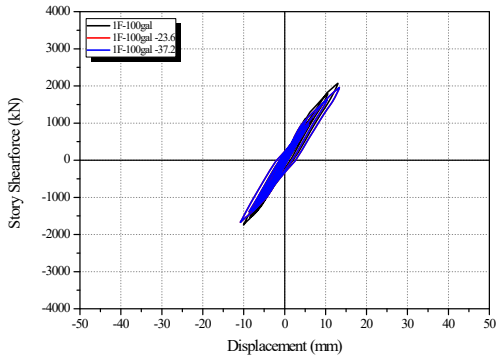
[그림 4-28] Hachinohe.ew 시간 이력 및 하중-변위 그래프

- [그림 4-28]에는 Hachinohe.ew 입력지진동 100gal, 150gal, 200gal에 대한 부식률 25%, 50%변수별 부식되지 않은 다형 건물의 시간 이력 곡선과 하중-변위 곡선을 각각 나타내었다.
- Hachinohe.ew 100gal의 경우 0% 부식이된 실험변수에서 최대변위는 15.95mm 최대 응답강도는 2238kN, 25%에서 최대변위는 17.91mm 최대 응답강도는 2335kN, 50%에서 최대변위는 19.67mm 최대 응답강도는 2204kN으로 부식률과 관계 없이 소규모 피해가 나타났다.

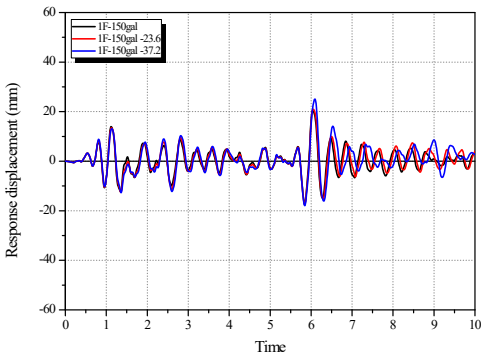
- Hachinohe.ew 150gal의 경우 0% 부식이된 실험변수에서 최대변위는 15.95mm 최대 응답강도는 2238kN, 25%에서 최대변위는 43.79mm 최대 응답강도는 2870kN, 50%에서 최대변위는 54.49mm 최대 응답강도는 2366kN으로 부식되지 않은 건물만 소규모 피해가 나타났으나, 부식이 진행된 건물의 경우 붕괴수준의 지진피해가 발생하였다. 50%부식된 건물대비 무부식은 약 3.5배의 변위가 억제되었다.
- Hachinohe.ew 200gal의 경우 0% 부식이된 실험변수에서 최대변위는 45.75mm 최대 응답강도는 3585kN, 25%에서 최대변위는 49.32mm 최대 응답강도는 2864kN, 50%에서 최대변위는 50.63mm 최대 응답강도는 2363kN으로 모든 건물에서 붕괴가 나타났다. 한편 50%부식된 건물에서 최대응답변위는 0% 건물 대비 10% 억제되었다.



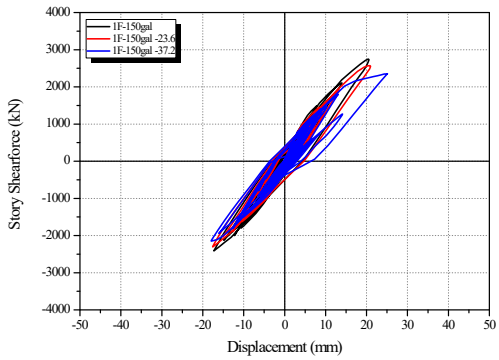
(a) El Centro.ew 100cm/s^2 시간이력 그래프



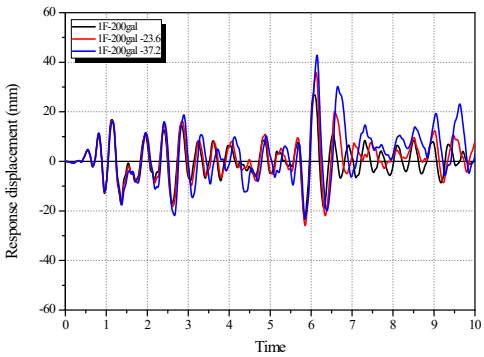
(b) El Centro.ew 100cm/s^2 하중 변위 그래프



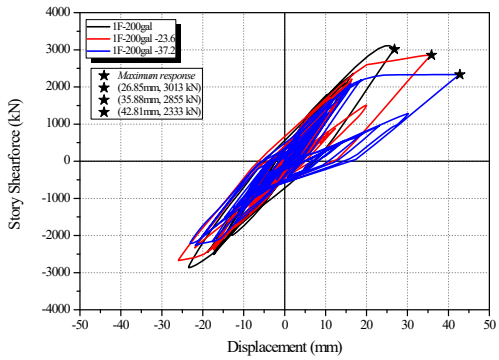
(c) El Centro.ew 150cm/s^2 시간이력 그래프



(d) El Centro.ew 150cm/s^2 하중 변위 그래프



(e) El Centro.ew 200cm/s^2 시간이력 그래프



(f) El Centro.ew 200cm/s^2 시간이력 그래프

[그림 4-29] EL Centero.ew 시간 이력 및 하중-변위 그래프

- [그림 4-29]에는 El Centro.ew 입력지진동 100gal, 150gal, 200gal에 대한 부식률 25%, 50%변수별 부식되지 않은 다형 건물의 시간 이력 곡선과 하중-변위 곡선을 각각 나타내었다.
- El Centro.ew 100gal의 경우 0% 부식이된 실험변수에서 최대변위는 13.03mm 최대 응답강도는 2065kN, 25%에서 최대변위는 13.37mm 최대 응답강도는 1957kN, 50%에서 최대변위는 13.37mm 최대 응답강도는 1957kN으로 부식률과 관계 없이 소규모 피해가 나타났다.
- El Centro.ew 150gal의 경우 0% 부식이된 실험변수에서 최대변위는 20.59mm 최대 응답강도는

2731kN, 25%에서 최대변위는 20.97mm 최대 응답강도는 2557kN, 50%에서 최대변위는 25.11mm 최대 응답강도는 2349kN으로 부식되지 않은 건물만 소규모 피해가 나타났으나, 부식이 진행된 건물의 경우 중규모수준의 지진피해가 발생하였다. 50%부식된 건물대비 무부식은 약 22% 변위가 억제되었다.

- El Centro.ew 200gal의 경우 0% 부식이된 실험변수에서 최대변위는 26.85mm 최대 응답강도는 3013kN, 25%에서 최대변위는 35.88mm 최대 응답강도는 2855kN, 50%에서 최대변위는 42.81mm 최대 응답강도는 2333kN으로 50% 부식이 진행된 건물에서 붕괴수준의 지진피해가 발생하였다.

자. 소결

- 부식률 0%, 25%, 50%를 변수로 비선형 동적해석을 진행하였다. 지진파는 두 종류를 Hachinohe.ew, El Centro.ew 사용하였으며, 지진파의 크기를 100gal, 150gal, 200gal 각각 변수로 해석을 진행하였다.
- Hachinohe.ew에서 부식이 진행된 건물의 경우 150gal부터 붕괴수준의 피해가 발생되는 것을 확인할 수 있었으며, 부식이 진행된 경우 보강이 필요할것으로 사료 된다.
- El Centro.ew의 경우 부식이 50% 진행된 건물의 경우 150gal부터 중규모 피해 200gal에서 붕괴수준의 피해가 발생 한 것으로 나타났으며, 부식진행 정도를 파악하고 보강이 필요하다고 사료된다.

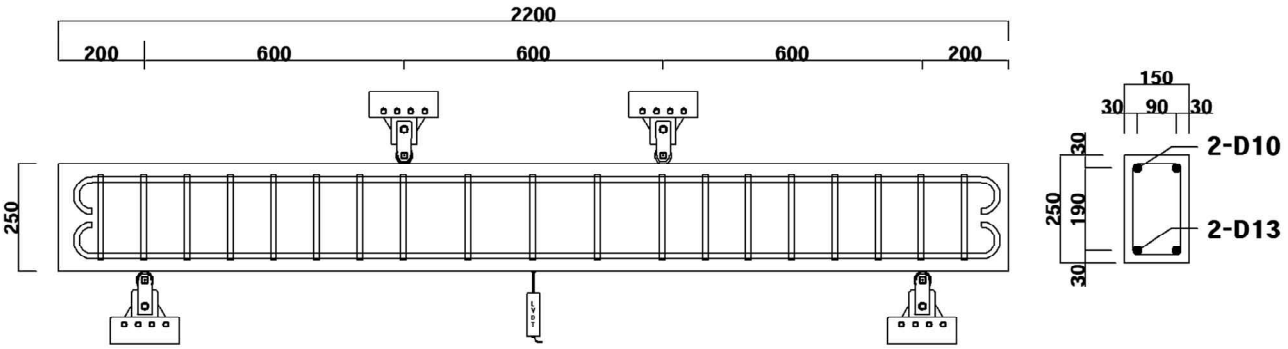
3. 3차 년도

1. 철근콘크리트 보 및 기둥에 매입된 철근 부식에 따른 복합열화 단계에서 재료물성과 Multi-physics 비파괴검사 인자의 상관관계 규명을 위한 실험적 연구 (부재수준 실험)

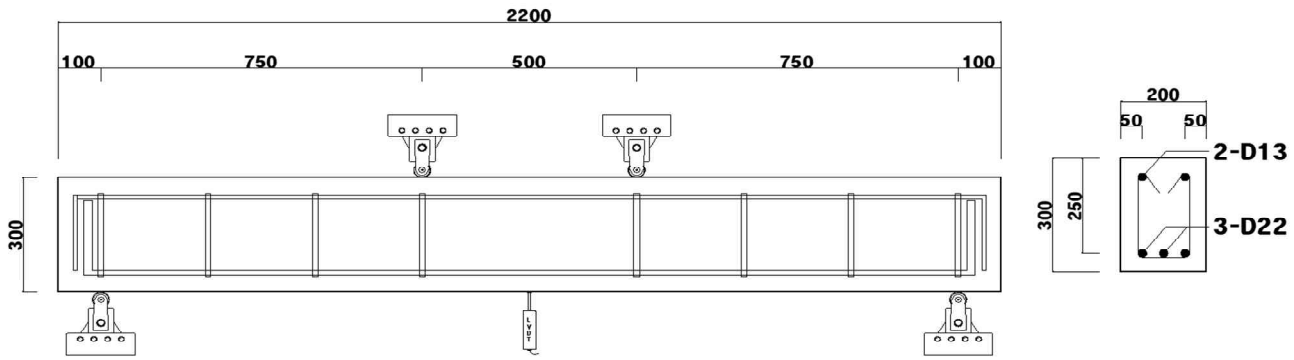
가. 실험체 계획 및 실험방법

① 보 실험체 제작 및 가력계획

- 표 [1-1]는 휨 및 전단 지배형 보의 일람표를 나타내었다. 휨 및 전단 모두 부식률은 (0,5,10,20,40)%를 변수로 계획하였으며, 총 10체 계획하였다. [그림 1-1]에 실험체 상세도 및 단면도를 나타내었다. 실험체 가력은 단순보 형태로 실험체를 설치하고 1000KN UTM(Universal Testing Machine)을 사용하여 분당 1mm로 변위제어방식으로 4점 가력을 실시하였다. 실험체 중앙부에 LVDT를 설치하여 변위를 측정하였다.



[그림 200 휨 보 실험체 임면 상세도 및 단면도]



[그림 1-1 전단 보 실험체 입면 상세도 및 단면도]

[표 1-1] 보 부재 실험체 일람표

Specimen	부식률(%)	부식 위치	실험체 개수
SB*	0	-	1
	5	양 단부	1
	10		1
	20		1
	40		1
SB*	0	-	1
	5	중앙부	1
	10		1
	20		1
	40		1
실험체 합계			10

*SB : 전단 지배형 보 실험체, SB : 휨 지배형 보 실험체

▪ [그림 1-2]와 같이 실험체 제작은 철근 배근을 실시한 후 부식진행을 위한 구리선을 부식하고자 하는 위치에 부착하였으며, 거푸집에 피복을 고려하여 배치 하였다. 타설 후 구리선에 이물질이 침투하는 것을 방지하기 위해 비닐을 덮어 두었다.



(a) 구리선 부착 (b) 거푸집 및 철근 배근 (c) 타설 (d) 타설 마무리 및 미장

[그림 1-2] 실험체 제작 과정

② 기둥 실험체 제작 및 가력계획

• [표 1-2]는 휨 및 전단 지배형 기둥 일람표를 나타내었다. 휨 및 전단 모두 부식률은 (0,5,10,20,40)%를 변수로 계획하였으며, 총 10체를 계획하였다. 실험에 사용된 실험기기 및 측정장치를 [표 1-3]에 나타내었고, 실험체의 설치 및 측정장치를 [그림 1-3]에 나타내었다. 축력은 기둥에 10%에 해당하는 257.3kN을 실험체의 상부에 설치된 1000kN Actuator를 이용하여 일정하게 가력 하였으며, 수평하중은 반력벽에 설치된 1000kN Actuator를 이용하여 변위제어 방식으로 가력하였다.

[표 1-2] 실험장비 및 측정기기

구분	실험기기	용량	수량
가력장치	Actuator	1000kN	2
측정장치	변위측정기(LVDT)	50, 200, 300 mm	5
	Crack Viewer	2mm	1

[표 1-3] 보 부재 실험체 일람표

Specimen	부식률(%)	부식 위치	실험체 개수
SC*	0	-	1
	5	기둥의 모든 전단철근	1
	10		1
	20		1
	40		1
FC*	0	-	1
	5	휨 응력 최대점 stub에서 양단 300mm 지점	1
	10		1
	20		1
	40		1
실험체 합계			10

*SC : 전단 지배형 기둥 실험체, FC : 휨 지배형 기둥 실험체



(a)전단 기둥 실험체 셋팅



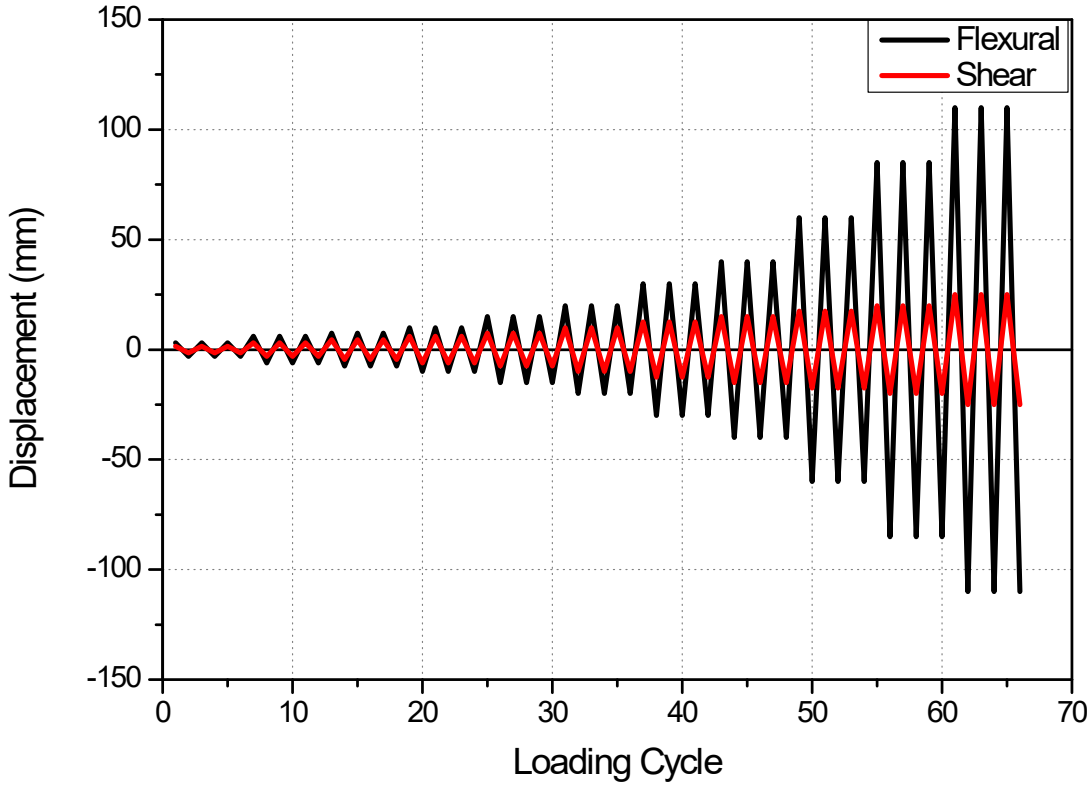
(b) 휨 기둥 실험체 셋팅

[그림 1-3] 기둥 실험체 설치 상황

- 실험체에 횡력을 가하는 Actuator의 가력점을 실험체 높이의 중심에 일치시켰으며, [표 1-4]에 나타낸 것처럼, 횡변위는 수평 부재각(%)에 따라 3cycle씩 단계별로 점증 가력 하였다. 실험체에 적용된 하중 가력 계획도를 [그림 1-4]에 나타내었다.

[표 1-4] 하중 가력계획

Cycle	1~6	7~12	13~18	19~24	25~30	31~36	37~42	43~48	49~54	54~60	61~66	67~72
전단 실험체 부재각(%)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	1.0	1.2	1.3	1.7	2.0
횡변위	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	10	12.5	15	17.5	20	25	30
휨 실험체 부재각(%)	0.2	0.4	13.3	0.7	1.0	1.3	2.0	2.7	4.0	5.7	7.4	
횡변위	3	6	7.5	10	15	20	30	40	60	85	110	-



[그림 1-4] 실험체 가력 계획도

③ 부식 계획 및 부식방법

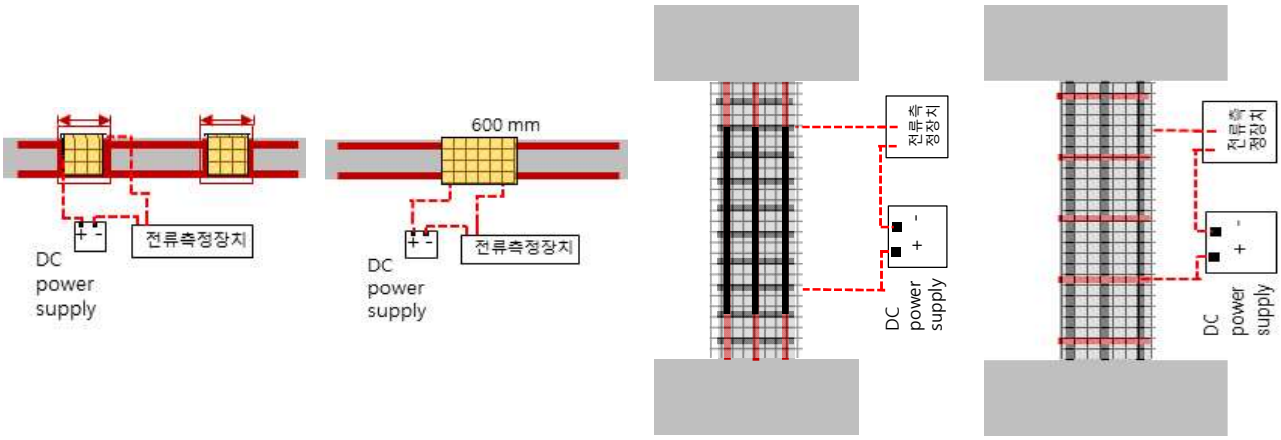
- 철근콘크리트 구조물에 매입된 철근 부식 속도는 느리기 때문에 연구의 효율성을 달성하기 위해 부분적으로 부식을 계획하였으며, 진행과정은 아래 [그림 1-5]와 같이 나타내었다. 보 부재의 경우 (b)와 같이 응력의 최대점을 제외한 부분에 에폭시를 철근에 도포하였으며, 기둥 부재의 경우(d)와 같이 휨 기둥은 휨모멘트 최대점 즉, stub에서부터 300mm까지 양단부를 제외한 부분을 에폭시로 도포하였다. 또한 전단 기둥의 경우(c)와 같이 전단철근을 제외한 모든 철근에 에폭시를 도포하였다.



(a) stub 에폭시 도포 (b) 보 부재 에폭시 도포 (c) 전단기둥 에폭시 도포 (d) 휨 기둥 에폭시 도포

[그림 1-5] 부분 부식을 위한 에폭시도포

- 실험체 부식은 5×3.5×1m의 수조에 5% Nacl 수용액을 공급한 후 실험체들을 함침 시켰으며, 실험체의 제작 시 매립한 부식용 전선과 상대전극(Stainless)을 DC Power Supply에 직렬 연결하여 부식을 진행하였고, 부식 진행 과정의 목표열화수준에 따른 전류 및 전압은 Faraday's 법칙을 이용하여 [그림 1-6]와 같이 설정 하였으며 프로그램을 통해 누적 전류량을 측정하였다.



(a) 전단 보 부식진행 (b) 휨 보 부식진행 (c) 휨 기둥 부식진행 (d) 전단 기둥 부식 진행

[그림 1-6] 부식 진행 과정 모식도

나. 재료시험

① 콘크리트

- 구조실험용 콘크리트의 설계 압축강도는 [표 1-5]와 같이 f_{ck}=21MPa로 설계하였다. [그림 1-7]에는 콘크리트 압축강도 시험상황을 나타낸다. 콘크리트의 압축강도 시험용 원통형 공시체는 KSF 2404에 따라 직경 100mm, 높이 200mm의 실린더형 몰드를 사용하여 제작하였고, 원통형 공시체는 7일이 지난후, 실린더형 몰드를 제거하여 본 실험체와 동일한 조건으로 양생하였으며, 재령에 따라 각각 시험을 실시하였다. 측정된 콘크리트 강도는 3개의 공시체의 평균값으로 하며 표준공시체(150mm×300mm)에 대한 보정값은 측정된 압축강도의 97%로 하였다. 공시체는 하중을 균등하게 작용시키기 위해 표면 처리 후 수행하였다. 최대응력은 평균적으로 약 24MPa로 실험에 사용된 콘크리트의 설계기준강도 21MPa보다 약간 높은 결과를 나타내었다.

[표 1-5] 콘크리트 배합표

호칭방법			
콘크리트종류	굵은골재 최대치수	호칭강도	슬럼프
보통콘크리트	25mm	21MPa	150mm

시방배합표(kg/m^3)						
시멘트	물	잔골재	굵은골재	혼화제	물-결합재비	염화물량 :
					47.4%	0.3kg/m^{3}이하
367	174	871	919	2.94	잔골재율	공기량 :
					49.4%	4.5±1.5%



(a) 콘크리트 연마기 (b) 공시체 연마 (c) 공시체 가력상황 (d) 최종파괴

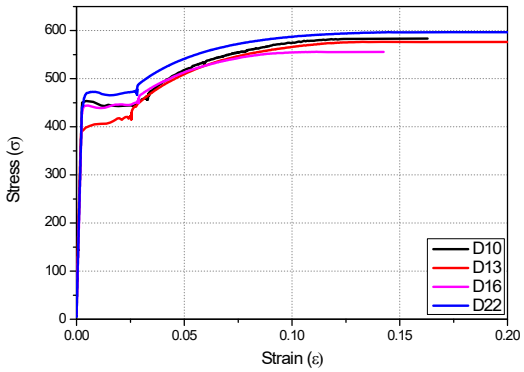
[그림 1-7] 실험체 압축강도 과정

② 철근

- 휨 보 부재의 사용된 철근은 주근 D13, 압축철근 및 전단 보강근 D10을 사용하였으며, 전단 보 부재에 사용된 철근은 주근 D 22, 압축철근 D13, 전단 보강근 D10을 사용하였다.
- 휨 기둥 부재의 사용된 주철근은 D16을 사용하였으며, 띠철근은 D10 전단 기둥 부재에 사용된 주철근은 D19, 띠철근은 D10을 사용하였다.
- 철근의 재료적 특성을 파악하기 위하여 KS B 0801(금속재료 인장시험편)의 '라' 호의 규정에 따라 철근 인장시험편을 각각 3개씩 제작하여 만능재료시험기(UTM)을 이용하여 [그림 1-8](a)와 같이 인장시험을 수행하였다. 실험 결과 철근의 응력-변형률 그래프를 (b)에 나타내었다. 모든 철근이 설계강도 400MPa에 상회하는 것으로 나타났다.



a) UTM 철근 인장 시험



b) 철근 응력 - 변형률 그래프

[그림 1-8] 철근재료시험

- 가력시험 후 모든 실험체의 부식부분의 절단을 실시하였으며, 함마드릴을 이용하여 철근의 손상을 입히지 않으며 (a)와 같이 추출 하였다. (b)와 같이 철근의 화학처리를 실시한 뒤 샌드블라스터를 이용하여 철근주위의 불순물 및 녹을 제거 하였다. 제거한뒤 녹이 제거된 철근의 무게 측정하여 질량 저감 정도를 판별하였다.



a) 철근 추출



b) 철근 화학처리



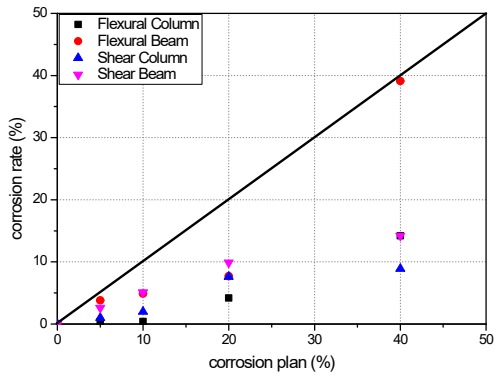
c) 샌드블라스팅



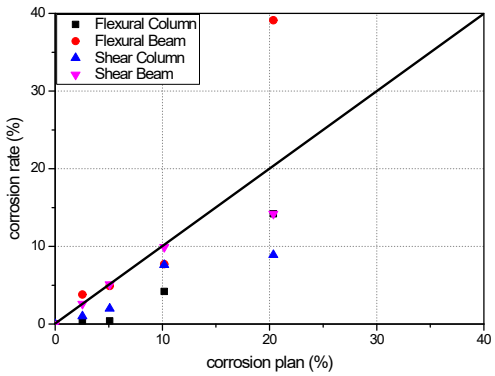
d) 무게 감량 측정

[그림 1-9] 3차년도 철근 추출 과정 및 측정방법

- 부식률 계획과 실제 부식률을 [그림 1-10]와 [표 1-6]에 나타내었다. 페러데이법칙을 이용한 부식계획에 대한 실제 부식률 그래프 결과를 [그림 1-10]의 (a)에 나타내었으며, 계획대비 실제부식률은 50% 저하되어 나타났다. 이는 페러데이 법칙의 이론은 순철로 가정하여 제안된 식으로 불순물, 콘크리트 등은 고려되지 않아 상이한 결과가 나타난 것으로 판단된다. 반면 kim et al. 의 기존 문헌에서 제한된 콘크리트에 매입된 철근을 부식 시키는 경우 콘크리트 강도에 따른 투수성, 콘크리트 속 미네랄 전기적 특성, 염화나트륨 용액 속의 침전물과 동판 및 콘크리트 사이의 경계면의 영향 등이 복합적으로 작용을 고려한 식을 대입하여 (b)에 본 연구 계획에 맞춰 대입한 결과 그래프를 (b)에 나타내었다.



(a) 페러데이법칙의 부식률 그래프



(b) kim et al. 의 제안식 그래프

[그림 1-10] 철근 실제 부식률 및 이론 부식률

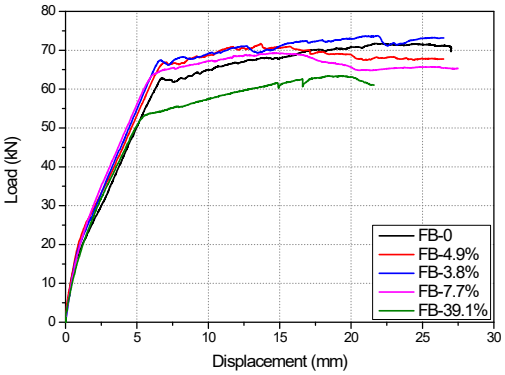
[표 1-6] 부식률계획 및 실제 부식률

Faraday's law (%)	Kim et al. (%)	실제부식률(%)			
		Flexural(C)	Shear(C)	Flexural(B)	Shear(B)
0	0	0	0	0	0
5	2.5	0.4	1	3.8	2.6
10	5.1	0.4	2	4.9	5.1
20	10.2	4.2	7.6	7.7	9.9
40	20.4	14.2	8.9	39.1	14.2

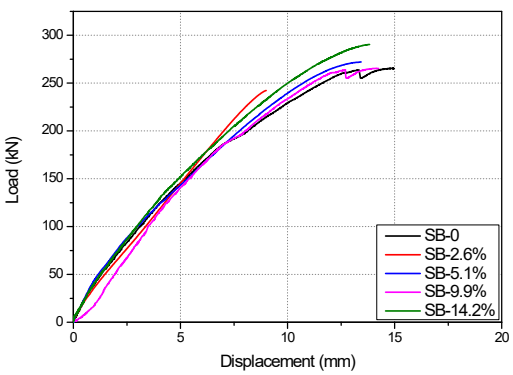
다. 보 부재 실험 결과 및 분석

① 보 부재 하중 - 변위

- [그림 1-11]에 내진성능지표 중 대규모 파괴에 해당하는 연성율 4까지의 휨 보에 대한 하중-변위 그래프를 나타내었으며, 전단 보의 경우 최대내력 까지의 하중-변위를 나타내었다.
- 실험 결과 (a)에 나타난 휨 보는 기준실험체(0%)대비 3.8% 부식된 실험체 하중이 3% 증가하여 나타났으며, 5% 이상 부식된 실험체의 하중은 기준실험체 대비 4.1% ~ 13% 감소되었다. (b)는 전단 실험체의 최대 내력을 나타낸 그래프이며, 기준실험체(0%) 대비 -9% ~ 9%로 나타났다.



(a) 휨 보 하중-변위 그래프

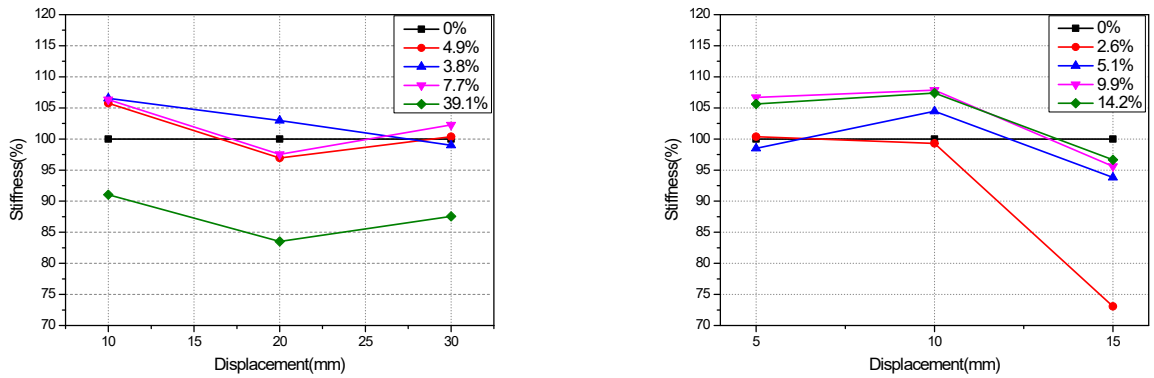


(b) 전단 보 하중-변위 그래프

[그림 1-11] 보 부재의 하중 변위 그래프

② 보 부재 강성 비교 분석

- [그림 1-12]의 (a)에 휨 부재 기준 실험체(0%)대비 변위별 강성을 나타내었다. 초기 10mm변위에서 휨 부재의 경우 40% 부식된 실험체를 제외한 모든 실험체는 기준 실험체 대비 5~6% 증가하여 나타났으며, 40% 부식된 실험체는 9% 감소하였다. 변위 30mm에서 기준실험체 대비 -13% ~ 2% 감소하는 하였다.
- [그림 1-12]의 (b)에 전단 부재 기준 실험체(0%)대비 변위별 강성을 나타내었다. 변위 5mm에서 -2% ~ 6% 증가 하였으며, 변위 15mm에서 기준 실험체 대비 -4% ~ 27% 저감 되어 나타났다.

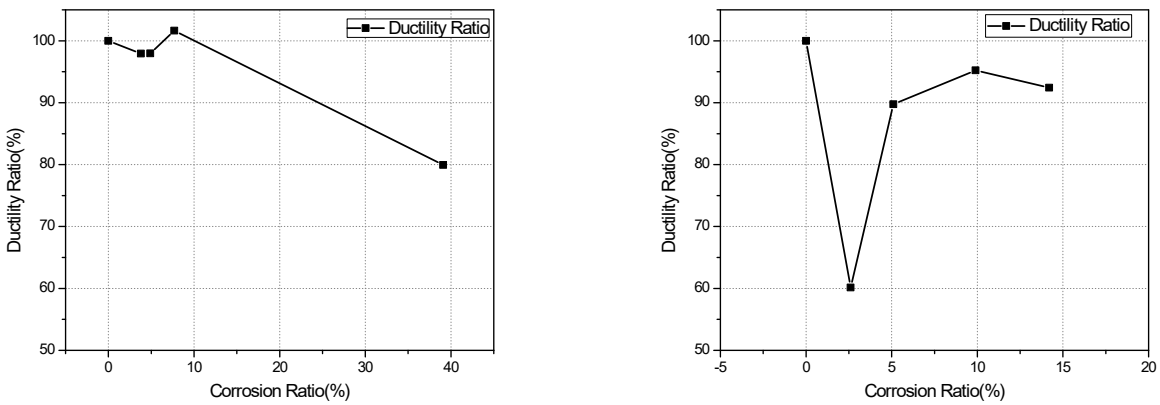


(a) 휨 보 강성 비교 그래프 (b) 전단 보 강성 비교 그래프

[그림 1-12] 보 부재의 강성 비교 그래프

③ 보 부재 연성율 비교 분석

- [그림 1-13]의 (a)는 기준실험체(0%) 대비 부식률에 따른 휨 보 부재의 연성율의 비교 그래프를 나타내었다. 부식률 10% 미만의 실험체는 1% ~ -3%의 미소한 차이를 보였으나, 40%의 부식률에서는 -21% 저감 되어 나타났다. 부식률 10% 이상 진행된 부재에서는 연성율이 현저히 감소될 것으로 판단된다.
- [그림 1-13]의 (b)는 기준실험체(0%) 대비 부식률에 따른 전단 보 부재의 연성율의 비교 그래프를 나타내었다. 부식률 2.6%실험체는 -40% 저감되었으며, 5% 이상 부식된 실험체는 -5% ~ -11%으로 나타났다.



(a) 휨 보 연성율 비교 그래프 (b) 전단 보 연성율 비교 그래프

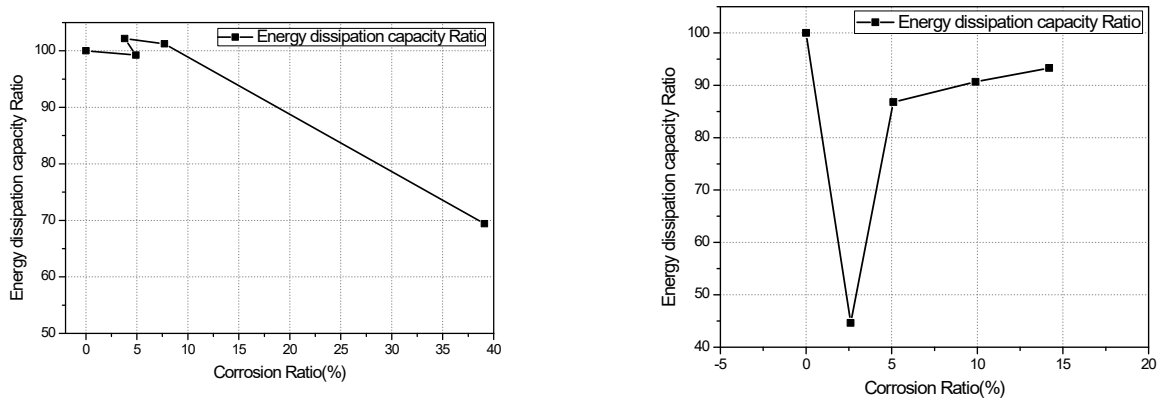
[그림 1-13] 보 부재의 연성율 비교 그래프

④ 보 부재 에너지 소산력 비교 분석

- 그림 [1-14]의 (a)는 기준실험체(0%) 대비 부식률에 따른 휨 보 부재의 에너지소산률의 비교 그래프를 나타내었다. 부식률 10% 이하에서는 -2% ~ 1% 로 나타났으며, 40% 부시된 실험체에서는 31% 저감되어 나타났다. 에너지소산력은 곧 내진성능과 직결되며 부식률이 높은 실험체의 경우 현저히 저감되는 것

을 확인할 수 있었다.

- [그림 1-14]의 (b)는 기준실험체(0%)대비 부식률에 따른 전단 보 부재의 에너지소산률의 비교 그래프를 나타내었다. 부식률 5%이상의 실험체에서는 -7% ~ -13% 저감되어 나타났으며, 2.6% 부식된 실험체는 -66% 저감되어 나타났다.



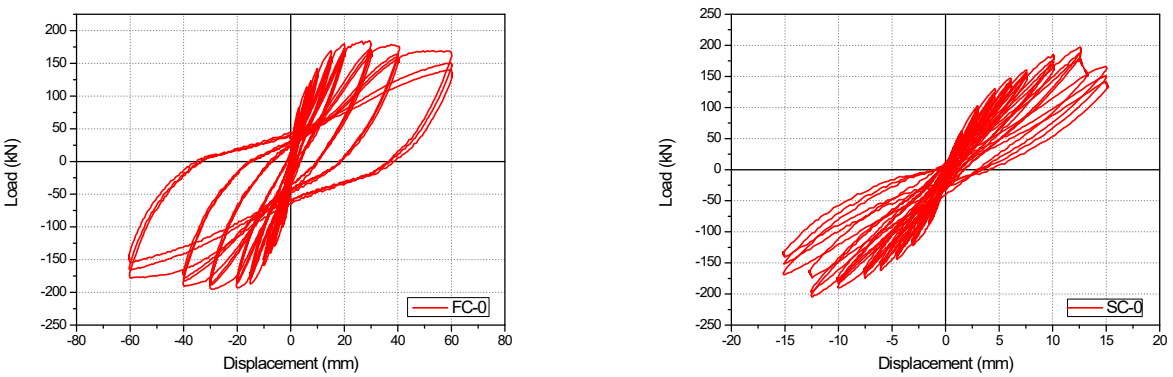
(a) 휨 보 에너지소산률 비교 그래프 (b) 전단 보 에너지소산률 비교 그래프

[그림 1-14] 보 부재의 에너지소산률 비교 그래프

라. 기둥 부재 실험 결과 및 분석

① 기둥 부재 하중-변위

- [그림 1-15]의 (a)는 휨기둥의 하중-변위그래프를, (b)는 전단기둥의 하중-변위 그래프를 나타내었다. 내진성능 지표 중 붕괴에 해당하는 연성율 4(변위 60mm)까지의 하중-변위를 분석하였으며, 전단 기둥은 최대 내력 연성율 1(변위 15mm)의 하중-변위를 분석하였다.

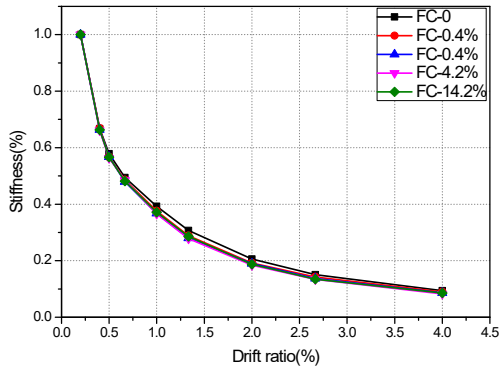


(a) 휨 기둥 하중-변위 (b) 전단 기둥 하중-변위

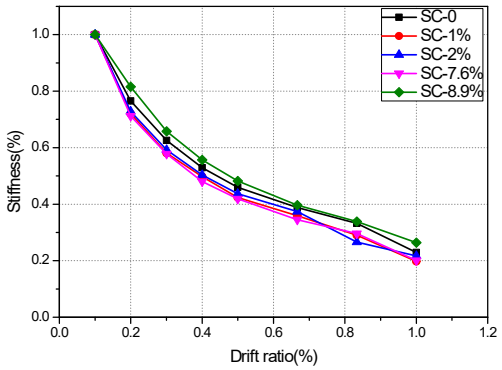
[그림 1-15] 기둥 부재의 하중-변위 그래프

② 기둥 강성 비교 그래프

- [그림 1-16]의 (a)는 휨 기둥의 할선강성을 변위각 별 나타낸 그래프이며, (b)는 전단기둥의 할선강성을 변위각 별 나타낸 그래프이다.
- 휨 기둥에서는 기준실험체(부식0%) 대비 평균 -4% ~ -7% 저감되어 나타났다. 전단 기둥은 기준실험체(부식 0%) 대비 평균 -10% ~ 5%로 나타났으며, 초기 강성이후 기준실험체 대비 저감 되는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 휨 기둥 강성 비교 그래프

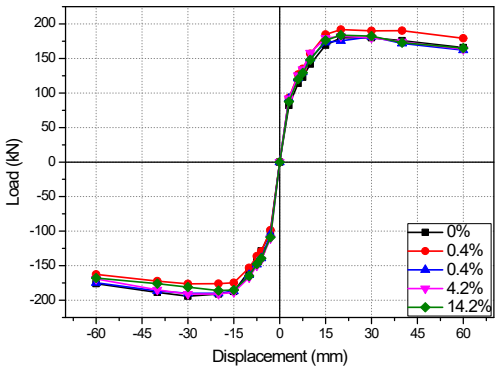


(b) 전단 기둥 강성 비교 그래프

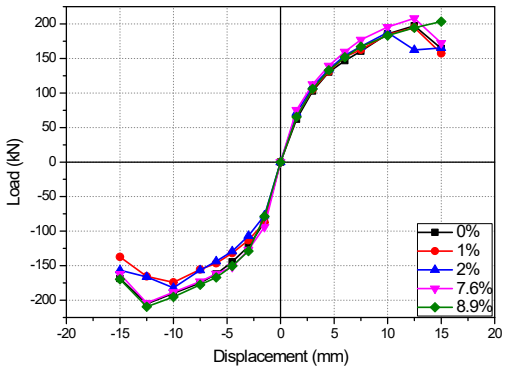
[그림 1-16] 기둥 부재의 강성 비교 그래프

③ 포락곡선 비교 그래프

- [그림 1-17]는 횡하중-변위 이력곡선으로부터, 각 반복가력의 변위각 별 싸이클에 대응되는 최대 횡하중을 연결한 횡하중-변위 포락곡선이다. (a)는 휨 기둥의 포락곡선을 나타낸 그래프이며, (b)는 전단기둥의 포락곡선을 나타낸 그래프이다.
- 휨 기둥의 각 변위각에 따라 강도는 기준실험체(부식 0%)대비 평균 -4% ~ -2% 근소하게 감소하였으며, 전단기둥의 각 변위각에 따라 강도는 기준실험체(부식 0%)대비 평균 -5% ~ -4% 감소되어 나타났다.



(a) 휨 기둥 포락곡선 그래프

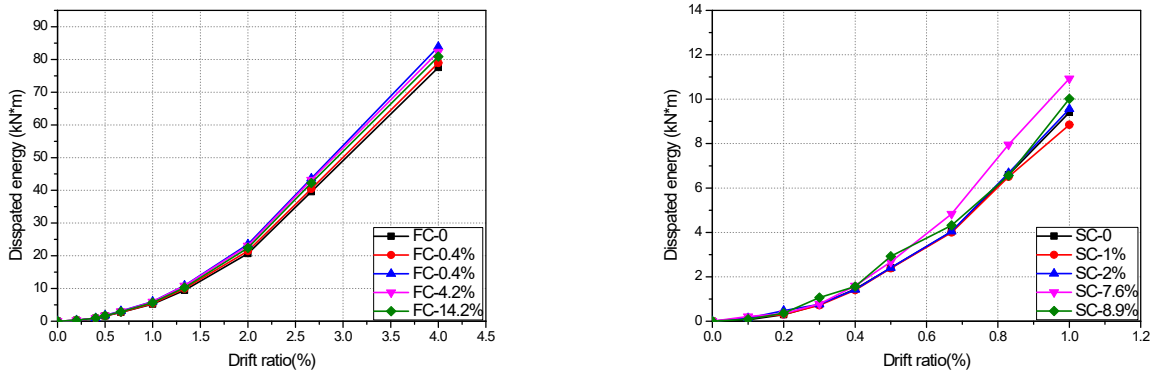


(b) 전단 기둥 포락곡선 그래프

[그림 1-17] 기둥 부재의 포락곡선 그래프

④ 에너지소산력 비교 그래프

- [그림 1-18] 는 각 실험체별 기둥의 횡하중 저항능력의 심층 검토를 위해 누적에너지소산능력을 분석하였다. 실험을 통해 얻어진 횡하중-변위 이력곡선의 내부면적을 각 사이클별로 계산하여 실험체에 축적되는 누적에너지소산능력을 구하였고, 실험체의 각 하중단계별 첫 번째 하중이력에 대한 누적소산에너지를 부식률별로 나타내었다.
- (a)는 휨 기둥의 에너지소산력을 나타낸 그래프이며, 변위각 4%에서 기준실험체(부식 0%) 대비 1% ~ 8% 증가되어 나타났다. (b)는 전단 기둥의 에너지소산력을 나타낸 그래프이며, 변위각 1%에서 기준실험체(부식 0%) 대비 -6% ~ 16%로 나타났다. 부분적으로 부식된 실험체의 경우 하중, 연성율이 실험체별 저감이 일어나기는 하지만 에너지소산력에 영향은 미비한 것으로 판단 된다.

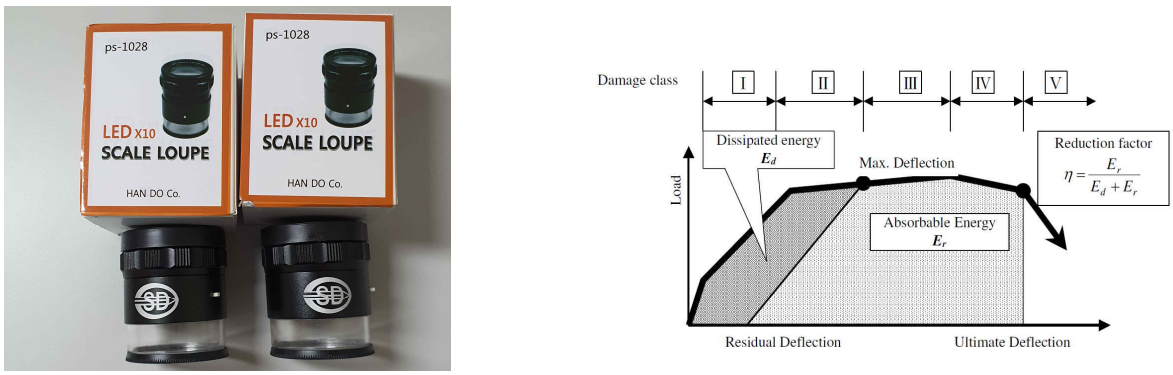


(a) 휨 기둥 에너지소산력 그래프 (b) 전단 기둥 에너지소산력 그래프

[그림 1-18] 기둥 부재의 에너지소산력 그래프

⑤ 균열폭에 따른 잔존에너지성능

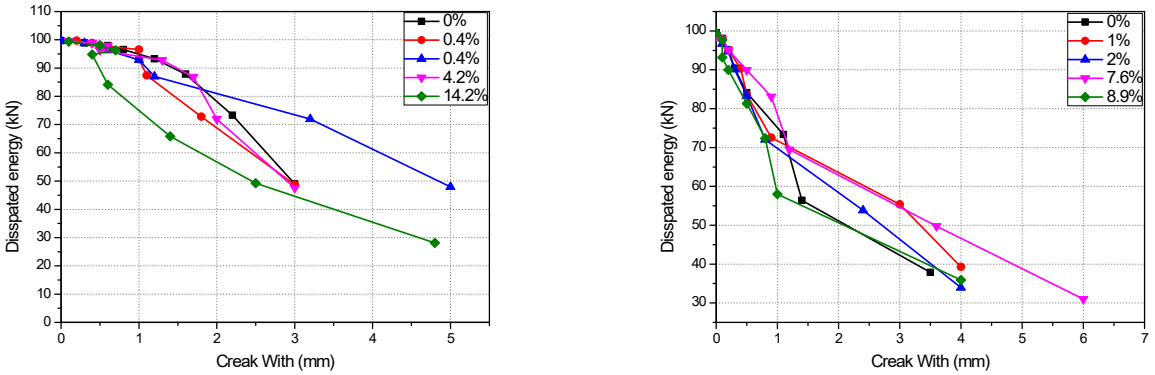
- 각 사이클의 최고시와 제하시(전단력=0인 지점)에 부재측면에 발생한 균열폭을 Crack view를 이용하여 계측하였으며, 내진성능잔존율은 대상부재 및 시스템이 가지고 있는 본래의 수평력에 대한 에너지소산능력 $E_d + E_r$이 과하중에 의한 구조균열 또는 철근부식에 의한 열화저감 E_d이 발생하였을 경우 본래의 에너지소산능력에 대한 잔존한 소산능력 E_r의 비율을 나타내며, [그림 1-19]의 개념도를 나타내었다.



(a) Crack view (b) 내진성능 저감계수(η)의 정의 개념

[그림 1-19] 균열폭 측정기기 및 잔존에너지 성능 개념

- 균열폭에 따른 잔존에너지성능에 대해 [그림 1-20]에 나타내었다. (a)는 휨 기둥의 균열폭 과 잔존에너지성능에 대한 상관관계를 나타내었다. 부식률이 진행될수록 균열폭이 증대되며 잔존내진성능이 저감되는 것을 확인할 수 있었다. (b)는 전단 기둥의 균열폭과 잔존에너지성능에 대한 상관관계를 나타내었다. 부식률이 진행됨에 따라 균열폭이 더 증대되었으며, 잔존에너지성능 또한 감소하는 경향이 나타났다.



(a) 휨 기둥 에너지소산력 그래프 (b) 전단 기둥 에너지소산력 그래프

[그림 1-20] 기둥 부재의 균열폭과 잔존에너지성능 상관관계 그래프

● 소 결

- 본 연구에서는 부식률에 따른 에너지성능의 상관관계성을 도출하기 위해 구조실험을 진행하였으며, 결과는 다음과 같다
- 휨 보의 강성은 기준실험체 대비 근소한 차이를 보였으며, 부식률 40% 진행된 실험체에서는 최대 -17% 저감되는 것으로 나타났다. 전단실험체의 강성은 근소한 차이를 보였다.
- 내진성능을 판별하는 지표중 하나인 에너지소산력은 휨 보의 경우 기준 실험체 대비 2% ~ -31% 저감되었으며, 전단 보의 경우 2.6% 실험체를 제외한 실험체에서 모두 에너지 소산력이 저감되는 것으로 나타났다.
- 기둥 부재의 포락곡선 비교 결과 휨 기둥에서는 기준실험체 대비 하중이 -4% ~ -2% 저감되어 나타났다으며, 전단 기둥에서는 -5% ~ 4%으로 나타났다. 부식률과 강도의 상관관계는 근소한 차이를 보이는 것으로 나타났다.
- 기둥 부재의 부식률에 따른 잔존 에너지성능은 휨 및 전단 기둥 모두 부식률이 진행됨에 따라 균열폭이 증대되는 것으로 나타났으며, 잔존에너지성능은 저감 되는 것으로 나타났다.

2.철근콘크리트 보 및 기둥에 매입된 철근 부식에 따른 복합열화 단계에서 재료물성과 Multi-physics 비파괴검사 인자의 상관관계 규명을 위한 실험적 연구 (부재수준 실험)

가. 비파괴검사 과정 및 계획

- [그림 2-1]에는 보와 기둥 실험체에 활용된 비파괴검사 측정방법을 나타낸다. 본 실험에서는 총 5종류의 비파괴검사 방법으로 ER, HCP, GPR, SWT 그리고 MASW를 사용하여 측정하였다.
- 전기비저항 측정법(ER)은 Wenner의 4전극방식의 기술을 활용하였고, probe 간격은 28mm로 Resipod Proceq사의 장치를 사용하여 표면비저항을 측정하였다. 표면 비저항 시험 방법인 AAHTO T358기준에 부합하여 측정하였으며. 측정 시 콘크리트 표면에 충분히 수분을 살포하여 측정을 진행하였다.
- 자연전위 측정법(HCP)은 Clamp를 미리 내부 철근과 연결된 매입된 구리선과 연결한 후 기준전극(Cu/SO4)를 사용하여 표면에 충분히 수분을 살포한 후 ASTM C876 기준에 준하여 측정하였다.
- 지표투과레이더법(GPR)은 ASSI사의 mini GPR 장비를 사용하여 2.7GHz 주파수 펄스를 이용하여 철근콘크리트 내부의 철근 배근 및 반사파 에너지를 측정하였다.
- 전단파 토모그래피(SWT)를 48개의 저주파 센서를 콘크리트 표면에 접지 시킨 후 50kHz S파를 이요하여 콘크리트 평균 초음파 속도 및 B-scan 이미지를 측정하였다. 사용 장비는 ACSYS사의 A1040 MIRA 장비를 사용하였다.
- 다채널 표면파 측정법(MASW)은 콘크리트 표면에 8개의 응력파 측정 센서를 접촉시킨 후 센서 10~15cm 옆을 타격하여 응력파 신호를 분석하였다.



(a) ER(Electrical Resistivity)



(b) HCP(Half-Cell Potential)



(c) GPR(Ground penetrating Radar)



(d) SWT(Shear Wave Tomography)





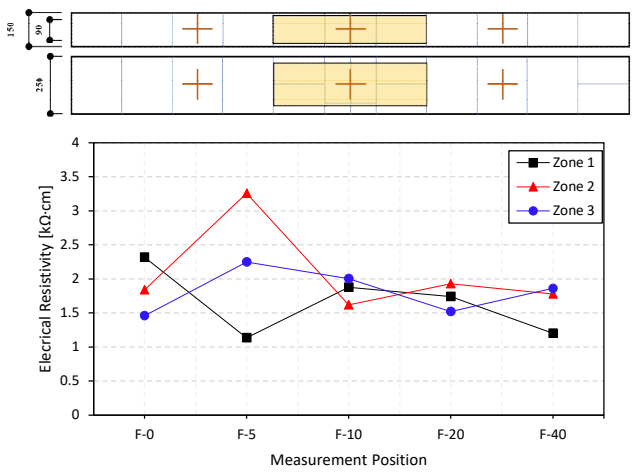
(e) MASW(Multi-channel Analysis of Surface Wave)

[그림 2-1] 비파괴 검사 측정 방법

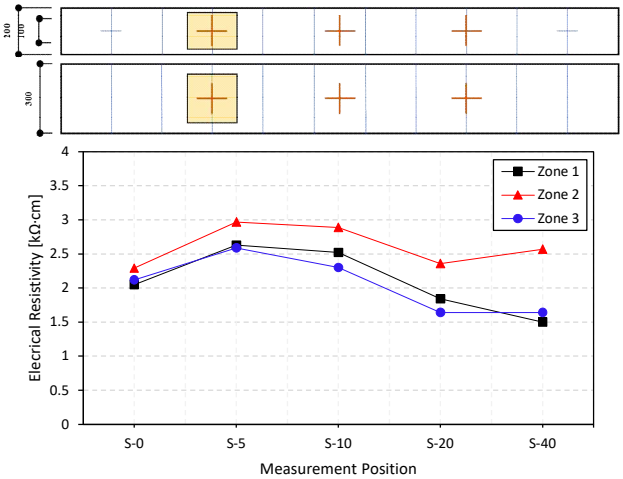
나. 보 부재 비파괴검사 실험결과 및 분석

① 보 부재 ER 분석 결과

- [그림 2-2]는 계획한 부식율(0%, 5%, 10%, 20%, 40%)에 따른 보 부재 실험체에 대한 표면에서 측정한 표면비저항 ER 값을 비교하여 나타내었다. 휨 보는 중앙부에 수직 수평에서 측정한 ER값의 평균을 사용하였고 전단 보는 단부에서 측정한 값의 평균을 사용하여 나타내었다.
- (a) 휨 보 ER 결과 그래프에서는 부식이 진행됨에 따라 감소하는 경향을 보여주고 있으나 그 상관서을 명확히 하기는 어려워 보인다. (b) 전단 보 ER 결과 그래프에서는 5%까지는 ER 값이 증가하나 그 이후는 감소하는 경향을 나타냄.
- ER 값은 부식이 진행됨에 따라 감소하는 경향을 보여주나 그 상관성을 명확히는 보여주지 않는다. 이는 ER 값은 콘크리트 내 수분, 습도, 온도 및 주변 환경적 요인 등에 따라 간섭에 민감함을 보여주기 때문에 비파괴검사 상태평가시 간접적으로 보조적 지표로 활용될 것으로 판단됨



(a) 휨 보 ER 결과 그래프

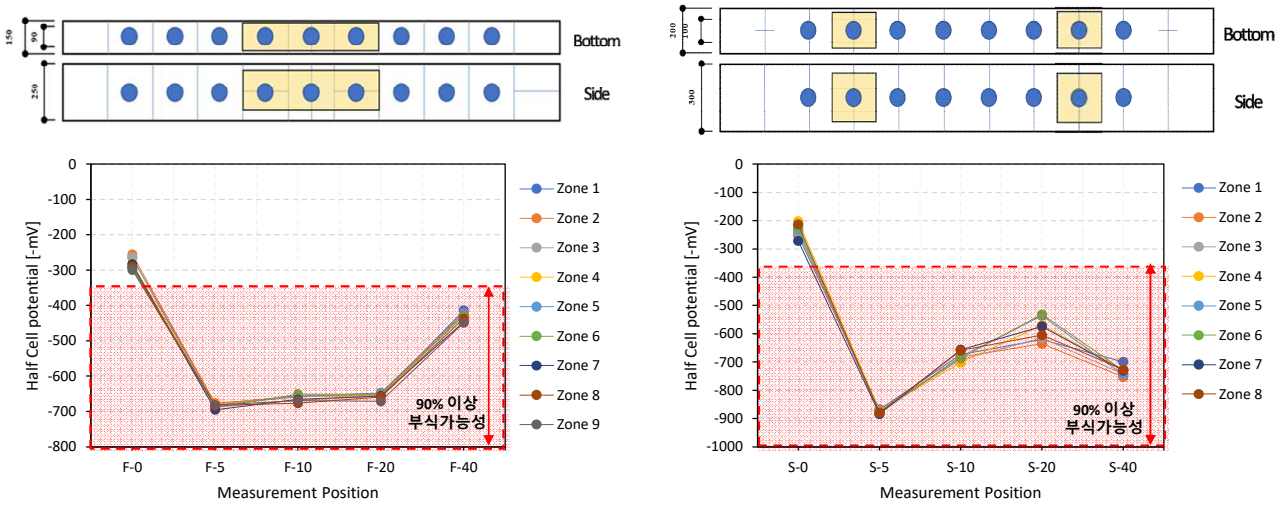


(b) 전단 보 ER 결과 그래프

[그림 2-2] 보 부재 ER 결과 그래프

② 보 부재 HCP 분석 결과

- [그림 2-3]는 계획한 부식율(0%, 5%, 10%, 20%, 40%)에 따른 보 부재 실험체에 대한 자연전위 차 HCP 값을 비교하여 나타내었다. (a) 휨 보 HCP 결과 그래프에서 총9곳을 측정하였으며, (b) 전단 보 HCP 결과 그래프에서는 8곳의 HCP값을 나타내였다. ASTM C876기준에 따라 기준전극으로 사용한 황산동(Cu/SO4)은 -350mV 이하로는 90%이상의 부식가능성을 나타내며 이를 붉은색 부분으로 표시하였다.
- 휨 보, 전단 보 모두에서 부식이 진행되지 않은 0% 실험체에서는 -350mV 이상으로 10%이하 부식가능성이 있거나 불확실 한 것으로 나타났다. 부식이 진행된 후에는 5%, 10%, 20%, 40% 실험체에서는 90%이상 부식가능성이 일어난 것으로 나타났으며, 이는 HCP를 통해 부식 개시기 시기를 확일 할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 부식 개시 이후에는 부식율에 따른 HCP 상관관계를 명확히 파악할 수 없었다.

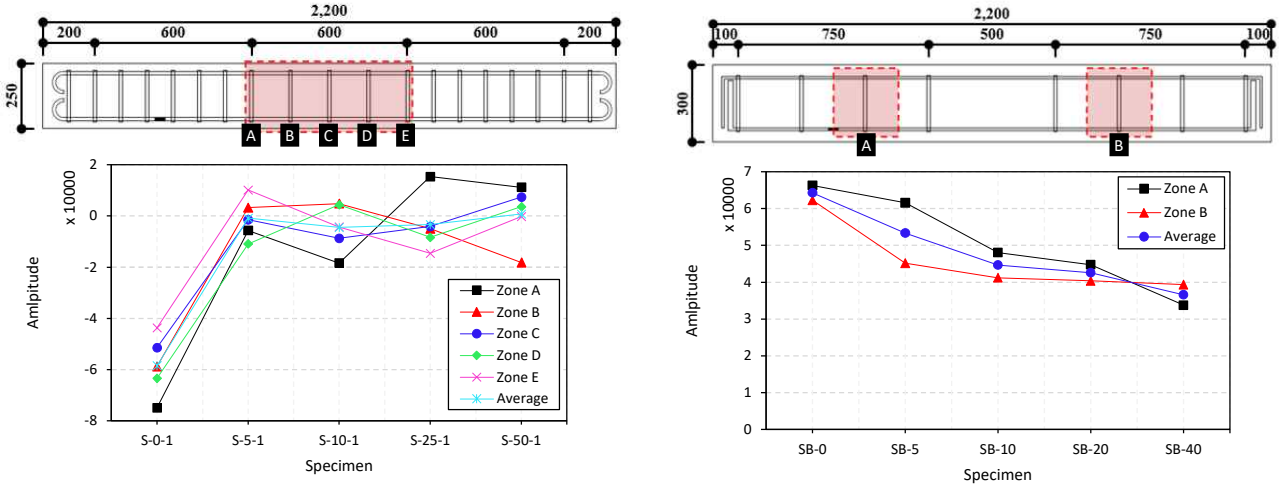


(a) 휨 보 HCP 결과 그래프 (b) 전단 보 HCP 결과 그래프

[그림 2-3] 보 부재 HCP 결과 그래프

③ 보 부재 GPR 분석 결과

- [그림 2-4]은 계획한 부식율(0%, 5%, 10%, 20%, 40%)에 따른 보 부재 실험체에 대한 GPR aplitude 값에 대한 값을 비교하여 나타내었다. (a) 휨 보 HPR 결과 그래프에서는 하부 철근(A,B,C,D,E) 5곳에 대한 결과 값을 나타냈어으며, (b) 전단 보 GPR 결과 그래프에서는 전단 철근(A, B)에 대해 나타내었다.
- 휨 보에서는 0% 대비해여 amplitude 값이 급격히 증가하였지만 이후에는 큰 변화가 보이지 않는다. 이는 하부 철근에 대해 GPR 측정시 콘크리트 표면에 균열이 발생하였고, 측정면적이 좁아 실험이 측정시 오차가 있는 것으로 판단된다.
- 전단 보에서는 부식이 진행됨에 따라 aplitude 값이 감소하는 것을 명확히 확인할 수 있다. 그러나 GPR을 통한 값은 철근 부식과 명확한 상관관계가 있다고 말하기는 어려움이 있다. 비파괴 검사 GPR 값은 콘크리트에 상태가 다른 매질에 대한 반사파에 대한 값을 나타내며 내부공극, 수분상태, 부식물질 등에 대해 영향을 받는다.

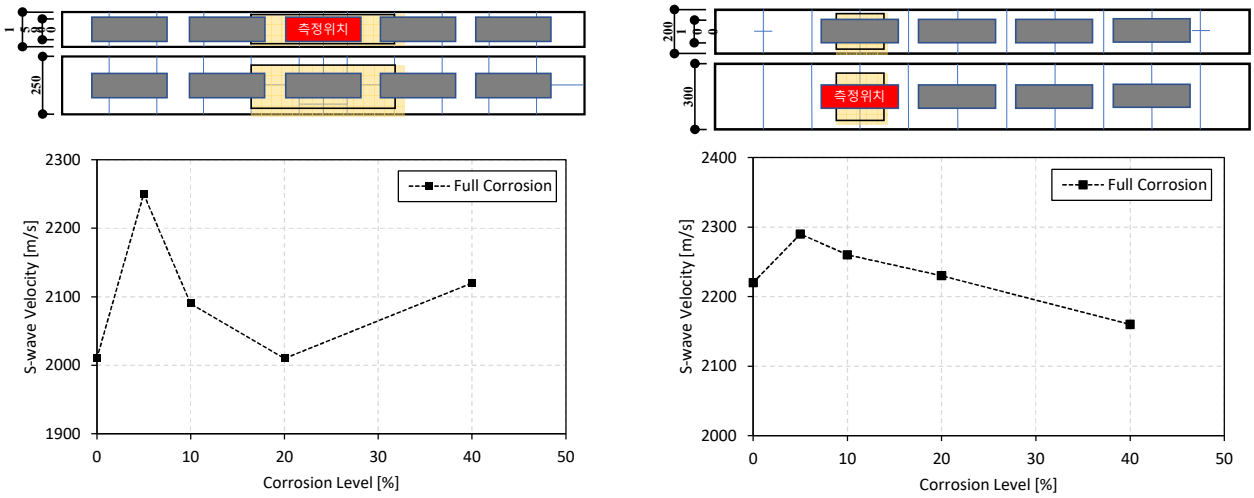


(a) 휨 보 GPR 결과 그래프 (b) 전단 보 GPR 결과 그래프

[그림 2-4] 보 부재 GPR 결과 그래프

⑤ 보 부재 SWT 분석 결과

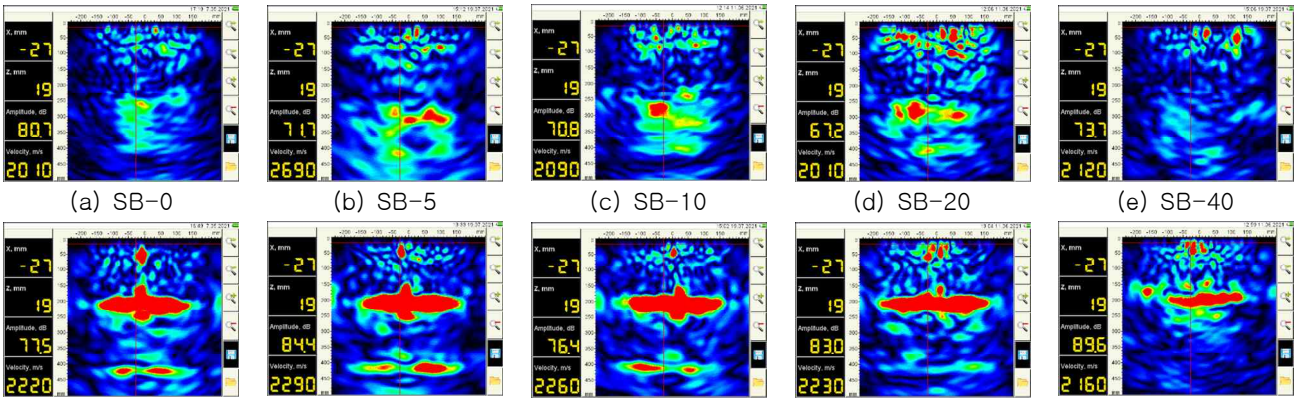
- [그림 2-5]은 계획한 부식율(0%, 5%, 10%, 20%, 40%)에 따른 보 부재 실험체에 대한 SWT를 활용한 S파 초음파 속도 값에 대한 값을 비교하여 나타내었다. 휨 보는 중앙부 하부에 MIRA 장비를 활용하여 측정하였고, 전단 보는 단부에서 전단 철근에 수직 방향으로 측정한 값을 사용하여 나타내었다.
- (a) 휨 보 SWT 결과 그래프는 부식됨에 따라 S파 초음파 속도에 대한 명확한 관계를 확인 할 수 없었다. (b) 전단 보 SWT 결과 그래프는 5%에서는 초음파속도가 증가하였지만 부식이 진행됨에 따라 S파 초음파 속도 감소함을 확인 할 수 있었다. 이는 부식초기는 부식물질이 콘크리트 내부 공극에 축적되어 초음파 속도가 증가하지만 이후는 콘크리트 균열이 발생해 초음파 속도가 감소했다고 판단할 수 있다.



(a) 휨 보 SWT 결과 그래프 (b) 전단 보 SWT 결과 그래프

[그림 2-5] 보 부재 SWT 결과 그래프

- [그림 2-6]는 휨 부재에 대해 MIRA 장비를 활용하여 부식부위에 대해 B-scan 이미지를 통해 콘크리트 단면 이미지를 생성하여 나타내었다. 이미지에 붉은색 부분은 반사된 반사파 에너지를 나타내며, y축은 콘크리트 깊이를 나타낸다.
- 휨 보, 전단 보에서 0%에서 표면에서 가까운 붉은 부분은 철근을 나타내고 깊이 250~300mm에 붉은색 부분은 반대편 콘크리트에서 반사된 부분을 나타낸다. 휨, 전단 보 모두 부식이 진행됨에 따라 표면에서 균열 및 부식물질 생성으로 인해 붉은색 부분이 많이짐을 확인할 수 있으며, 40% 실험체에서는표면 반사파가 많아 반대편 콘크리트 반사파가 줄어들었음을 확인할 수 있다.



(a) SB-0 (b) SB-5 (c) SB-10 (d) SB-20 (e) SB-40

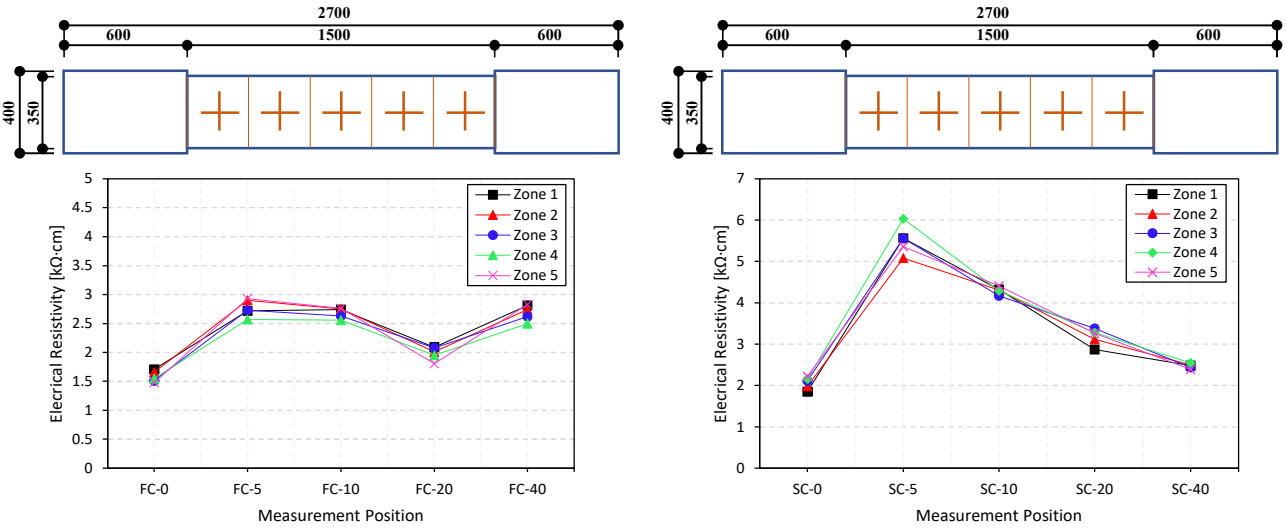
(f) SB-0 (g) SB-5 (h) SB-10 (i) SB-20 (j) SB-40

[그림 2-6] 휨 부재 SWT를 활용한 B-scan 이미지

다. 기둥 부재 비파괴검사 실험결과 및 분석

① 기둥 부재 ER 분석 결과

- [그림 2-7]은 기둥 부재에 대한 부식율(0%, 5%, 10%, 20%, 40%)에 따른 전기비저항 ER 값에 대한 비교 그래프를 나타내었다. 기둥 부재에 대한 300mm 간격으로 총 5곳을 측정하였으며 수평, 수직 측정 값의 평균값을 사용하여 나타내었다.
- (a) 휨 기둥 ER 결과 그래프에서는 부식율에 따른 ER 값의 변화에 대한 명확한 관계를 알기 어려웠다. (b) 전단 기둥 ER 결과 그래프에서는 5%에서는 증가하였지만 이후 ER 값이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 전면 부식된 실험체는 5% NaCl 용액에 침지시켰기 때문에 그 영향이 큰 것으로 판단된다.

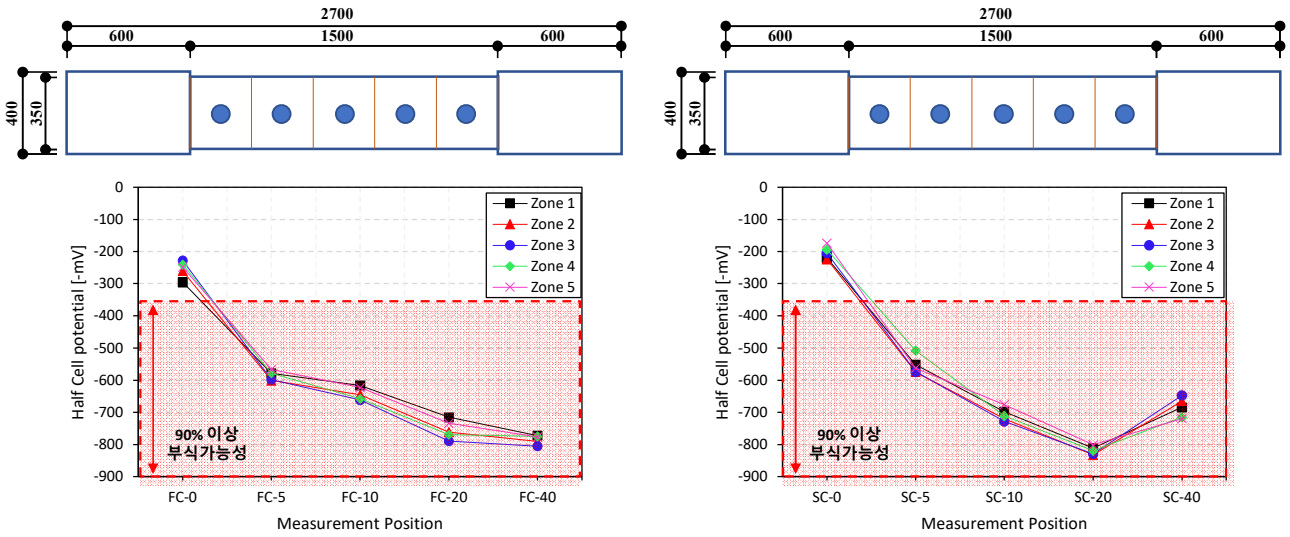


(a) 휨 기둥 ER 결과 그래프 (b) 전단 기둥 ER 결과 그래프

[그림 2-7] 기둥 부재 ER 결과 그래프

② 기둥 부재 HCP 분석 결과

- [그림 2-8]은 기둥 부재에 대한 부식율(0%, 5%, 10%, 20%, 40%)에 따른 자연전위차 HCP 값에 대한 비교 그래프를 나타내었다. 기둥 부재에 대한 300mm 간격으로 총 5곳을 측정하였으며 ASTM C876 기준에 따라 기준전극(Cu/SO4)에 따라 -350mV 이하 부식가능성 90%이상인 부분은 붉은색으로 나타내었다.
- 휨 보에서는 0% 실험체에는 부식가능성이 10% 이하 및 불확실한 결과를 보여주며, 부식이 진행됨에 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 전단 보에서도 0%에는 같은 결과를 보였으며, 40%를 제외하고는 부식이 진행됨에 따라 감소하는 경향을 보인다. 일반적으로 HCP는 부식 개시 전후로 부식 가능성을 정성적으로 보여주는 지표이지만 본 결과에서는 부식율에 따라 감소하는 경향을 보여준다.

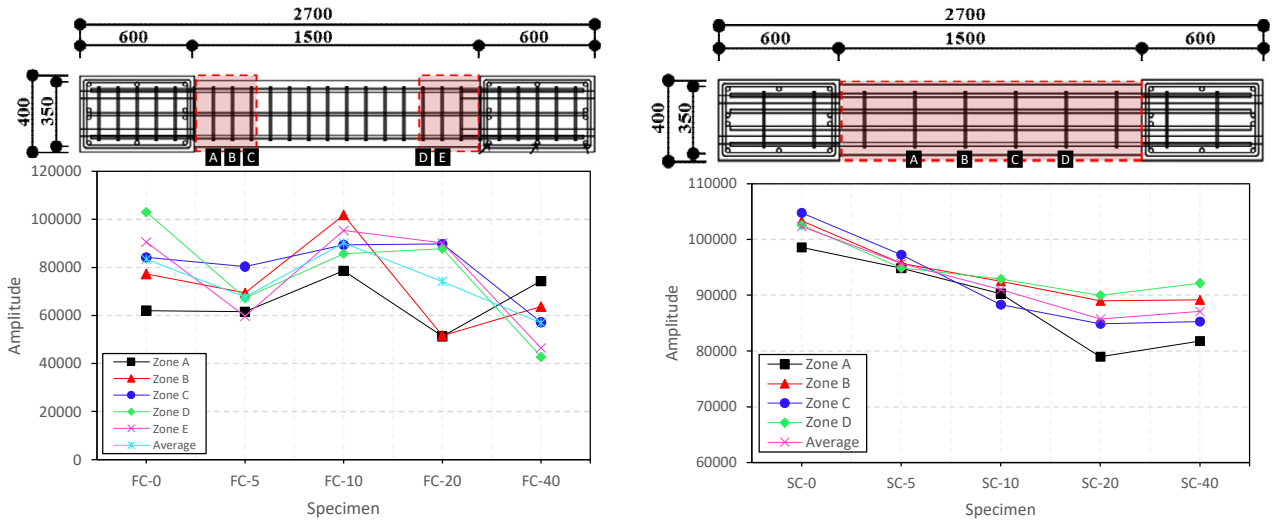


(a) 휨 기둥 HCP 결과 그래프 (b) 전단 기둥 HCP 결과 그래프

[그림 2-8] 기둥 부재 HCP 결과 그래프

③ 기둥 부재 GPR 분석 결과

- [그림 2-9]은 기둥 부재에 대한 계획된 부식율(0%, 5%, 10%, 20%, 40%)에 따른 GPR를 활용한 amplitude 값을 비교하여 나타내었다. (a) 휨 기둥 GPR 결과에서는 휨 지배를 받는 철근(A,B,C,D,E)에 대한 결과를 나타내었고, (b) 전단 기둥 GPR 결과에서는 전단 철근(A,B,C,D)에 대한 결과를 나타낸다.
- 휨 기둥에서는 부식율에 따른 GPR를 활용한 aplitude 값에 대한 관계성을 없는 것으로 보인다. 그러나 전단 기둥에서는 부식이 진행됨에 따라 amplitude 값이 감소하는 경향을 볼 수 있다. 부식 물질생성, 콘크리트 균열 및 염해물로 인해 반사 에너지가 감소한 것으로 판단된다.

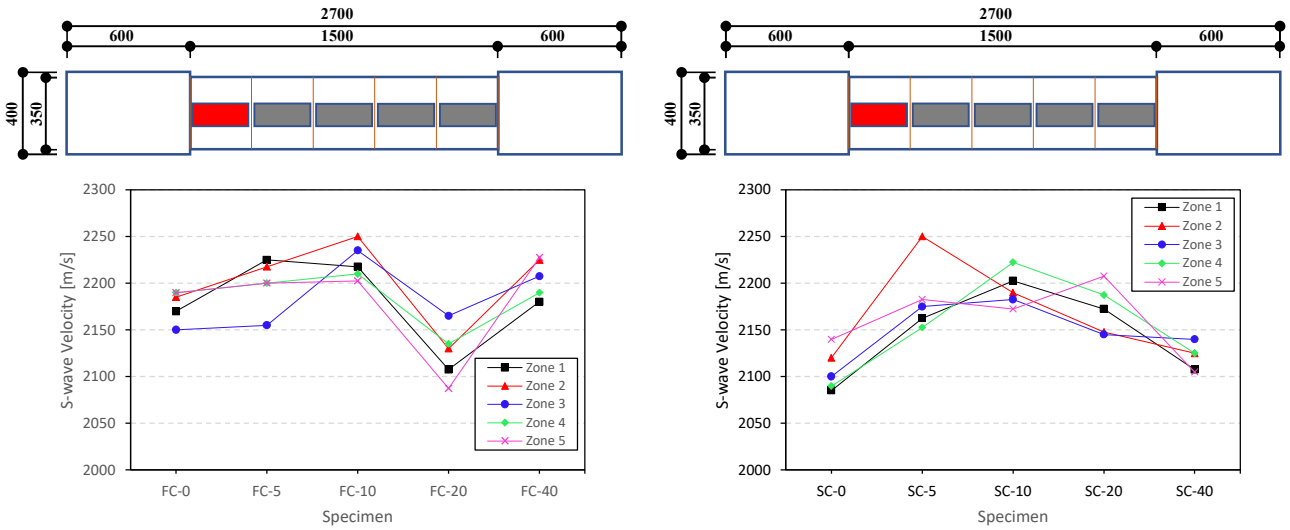


(a) 휨 기둥 GPR 결과 그래프 (b) 전단 기둥 GPR 결과 그래프

[그림 2-9] 기둥 부재 GPR 결과 그래프

④ 기둥 부재 SWT 분석 결과

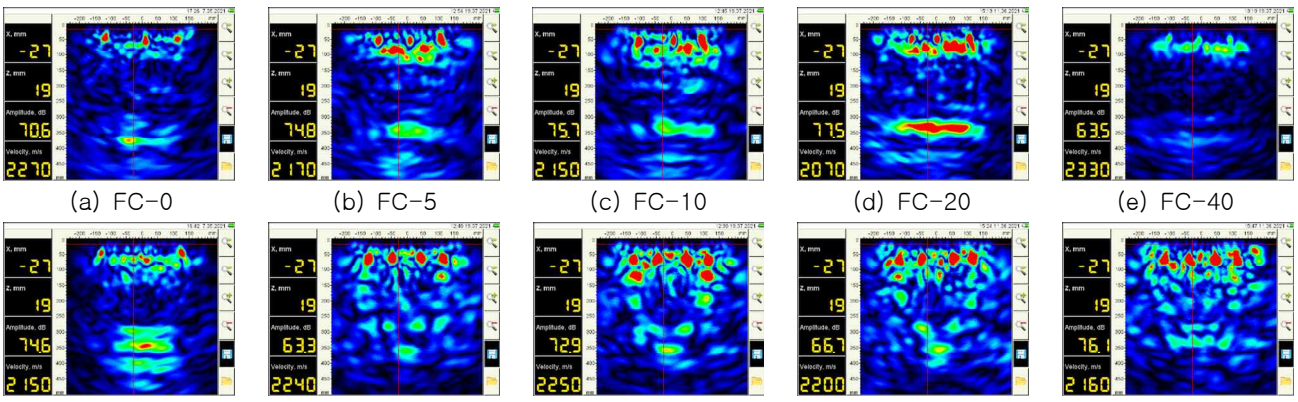
- [그림 2-10]은 기둥 부재에서 부식율(0%, 5%, 10%, 20%, 40%)에 따른 MIRA로 측정한 S파 초음파 속도와 비교한 결과를 나타내었다. 휨 기둥, 전단 기둥 모두 300mm 간격으로 총 5곳을 MIRA 장비를 이용하여 50kHz로 측정하였으며, 부식 부위에 대한 S파 초음파속 결과를 그래프로 나타내었다.
- 휨, 전단 기둥에서 10%까지는 초음파 속도가 증가하는 경향을 보여준다. 이는 콘크리트내 부식물질의 축적으로 인한 결과로 예상된다. 이후 휨 기둥 40%를 제외하고 초음파속도가 감소하는 경향을 보인다. 이는 콘크리트 내부 미세 균열 및 표면 균열로 인해 초음파 속도가 감소하는 것으로 판단된다.



(a) 휨 기둥 SWT 결과 그래프 (b) 전단 기둥 SWT 결과 그래프

[그림 2-10] 기둥 부재 ER 결과 그래프

- [그림 2-11]은 기둥 부재에 대한 MIRA 장비로 측정한 콘크리트 B-scan 이지미를 보여준다. 휨 기둥, 전단 기둥에 0%에서는 모두 표면에서 철근의 반사파 및 반대편 콘크리트 면에 대한 반사파가 보인다. 그러나 부식에 진행됨에 따라 철근 주변에서 균열 및 부식물질으로 보이는 반사파가 붉은색으로 나타지며 많이 지는 것으로 보인다.



(a) FC-0 (b) FC-5 (c) FC-10 (d) FC-20 (e) FC-40

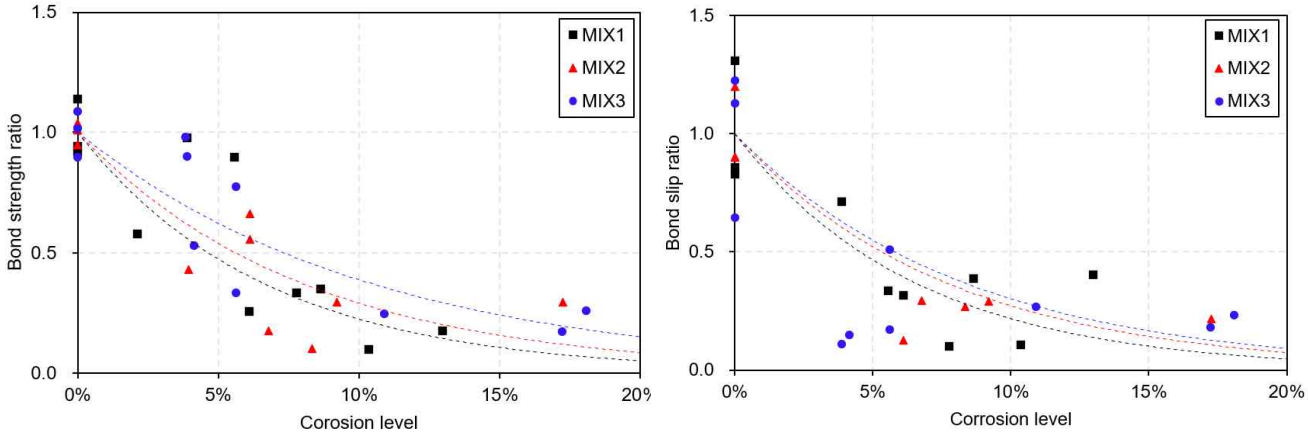
(f) SC-0 (g) SC-5 (h) SC-10 (i) SC-20 (j) SC-40

[그림 2-11] 기둥 부재 SWT를 활용한 B-scan 이미지

라. 철근의 부식율에 따른 철근-콘크리트 부착거동 예측을 위한 유한요소해석 모델 검증

① 재료수준 실험을 통한 철근-콘크리트 부착거동 예측 유한요소해석 모델 개발

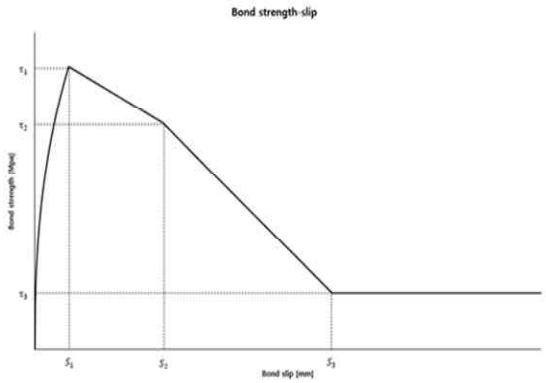
- 철근-콘크리트 부착거동 예측 모델을 개발하기 위해 인발시험(Pull-Out test) 결과 및 Euro code data 수집을 통하여 실제 실험결과 및 기존 문헌에 대한 부착 거동을 조사를 하였다. 부착거동에서 콘크리트와 철근 사이에 계면에서 발생하는 거동에 대한 Parameter에 대해 변수 조건으로 모델을 개발하고 함.
- Cube 실험체의 인발시험에서 D19 및 D22의 실험 결과를 사용하였는데, 그 이유는 구조물 보수적인 관점에서 D10 및 D13의 경우 균열이 발생하지 않아 부착강도 및 슬립거동이 좋아지는 결과를 보였기 때문에 배제하였다.
- [그림 2-12]은 Pull-out test를 통한 부식수준에 따른 부착강도와 슬립거동에 대한 결과를 보여준다. 부착강도 및 슬립거동은 부식수준이 증가함에 따라 비선형적으로 감소하는 경향을 보여주며, 부착강도 및 슬립거동은 최대 약 80%정도의 감소율을 나타내었다.



(a) 부식수준에 따른 부착강도 변화 (b) 부식수준에 따른 슬립거동 변화

[그림 2-12] 재료수준 실험 결과

- 부착거동 모델을 개발하기 위하여 인발시험 D19 및 D22의 부착강도 및 슬립거동의 변화를 Euro code Model에 적용하여 다음과 같은 부착거동 Parameter를 [그림 2-13]과 같이 제안하였다.

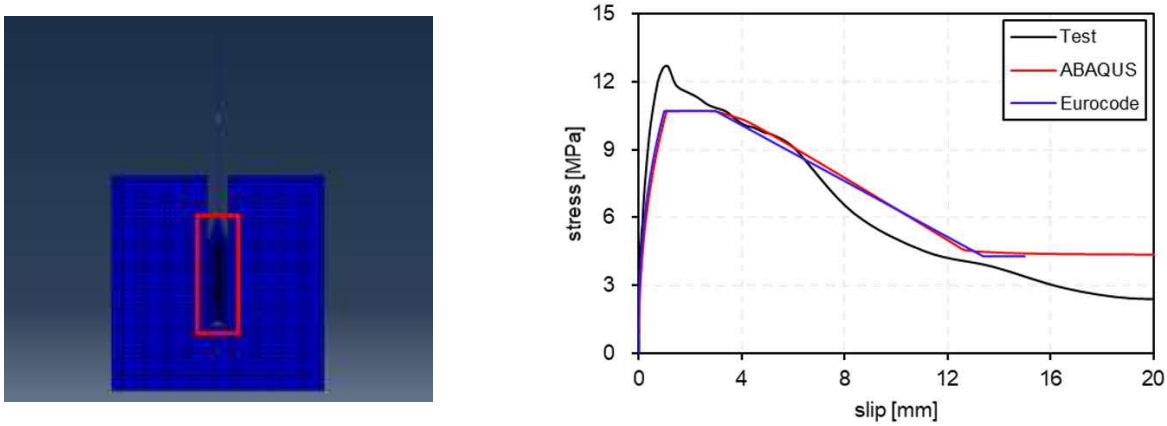


Bond strength-slip model

$$\tau = \begin{cases} \tau_1 \left(\frac{s}{s_1}\right)^{0.4}, & 0 < s \le s_1 \\ \tau_1 - (\tau_1 - \tau_2)\left(\frac{s - s_1}{s_2 - s_1}\right), & s_1 < s \le s_2 \\ \tau_2 - (\tau_2 - \tau_3)\left(\frac{s - s_2}{s_3 - s_2}\right), & s_2 < s \le s_3 \\ \tau_3, & s_3 < s \end{cases}$$

[그림 2-13] 재료수준 실험 결과 및 Euro code Model을 통한 부착거동 Parameter 제안

- 부착거동 모델은 [그림 2-14]과 같이 ABAQUS 유한요소 해석 프로그램을 활용하여 실험과 Euro code model에서 도출된 Parameter에 대해 실험을 진행하였으며, 해석결과 및 실험결과의 Validation을 통한 검증을 진행하였다.
- (b) 실험결과 및 유한요소해석결과 그래프를 보면 ABAQUS와 Eurocode에 결과는 비슷한 결과를 보여준다. 그러나 test 최대응력에 대해서는 다소 다른 경향을 보이나, 이후 거동에서는 유사한 겨동을 보여주고 있다.

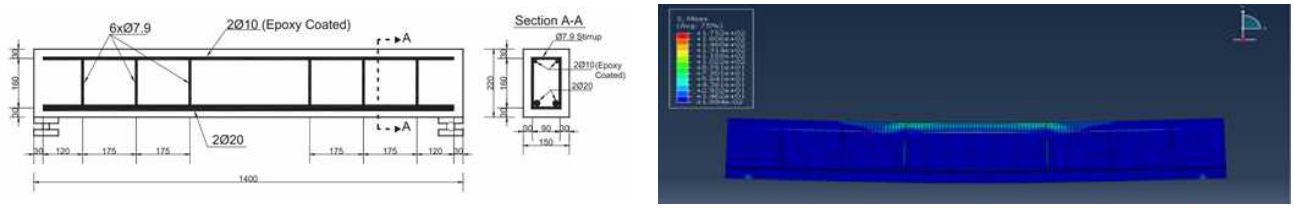


(a) 부착거동 모델을 활용한 유한요소 해석 모델링 (b) 실험결과 및 유한요소해석결과 비교

[그림 2-14] ABAQUS 유한요소 해석을 통한 모델 검증

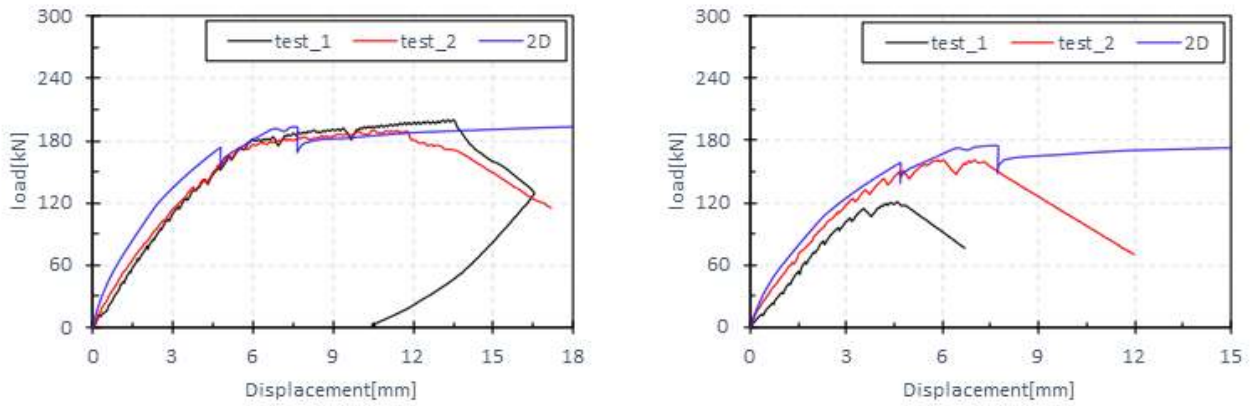
② 부재수준 실험을 통한 철근-콘크리트 부착거동 예측 유한요소해석 모델 개발

- 재료수준의 실험을 통한 유한요소 해석 및 비파괴 검사 인자들에 대한 결과를 부재수준의 실험을 통해 검증하고자 하였으며, 재료수준의 유한요소 해석모델을 활용한 부재수준의 유한요소 해석을 통한 검증을 하고자 하였다. 최종적으로 비파괴 검사를 통한 예측 부식율을 이용하여 해석결과와 내진성능 평가를 위한 모델을 제안하고자 하였다.
- 부착거동 모델의 검증을 위해 기존 문헌의 선행 실험결과를 선정하여 유한요소 모델링을 통해 결과를 비교하였다. 실험결과 및 유한요소 해석결과는 거의 근사하게 나타났다.



(a) 실험 데이터 선정 (b) ABAQUS 해석결과

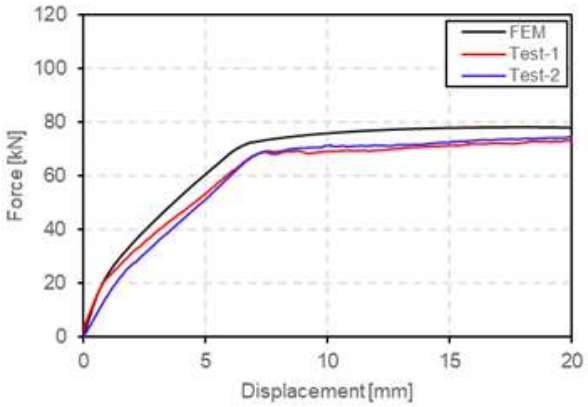
[그림 2-15] ABAQUS 유한요소 해석을 통한 모델 검증



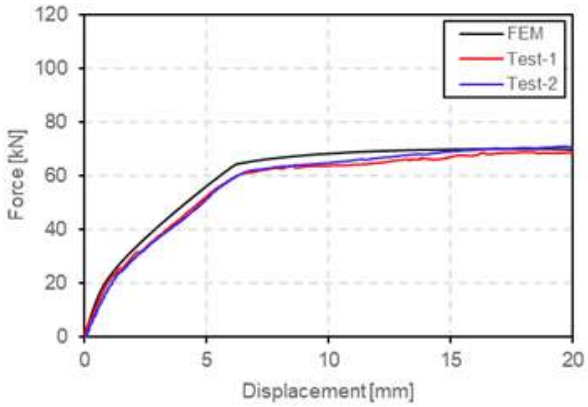
(a) 부식율 5% (b) 부식율 10%

[그림 2-16] ABAQUS 유한요소 해석을 통한 모델 검증

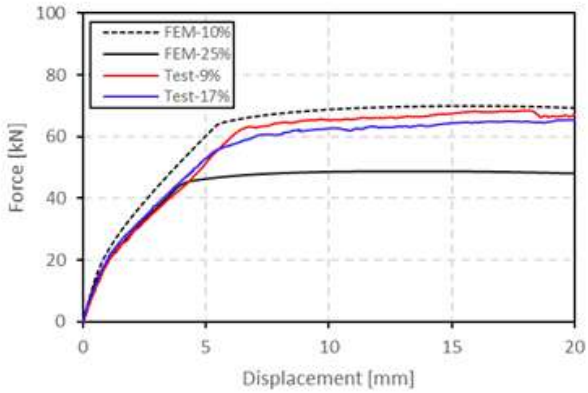
- 부착거동 모델의 검증을 위해 본 연구의 실험결과를 유한요소 모델링을 통해 결과를 비교하였다.
- [그림 2-16] 부분부식 휨 보 실험결과를 보여준다. 목표 부식율 25% 및 50%의 실험체는 실제 부식율이 목표부식율에 미치지 못하여 실제 부식률에 가까운 해석 결과를 추가로 나타내었다. 모든 실험체에서 FEM 해석결과와 실험결과가 비슷한 경향을 보여준다.
- [그림 2-17] 부분부식 전단 보 실험결과를 보여준다. 5%와 10% 경우에는 비슷한 경향을 보여주나 다소 낮은 값으 보여준다. 25%, 50%에서는 약간의 상이한 결과를 보여주나 비슷한 경향을 보여준다.



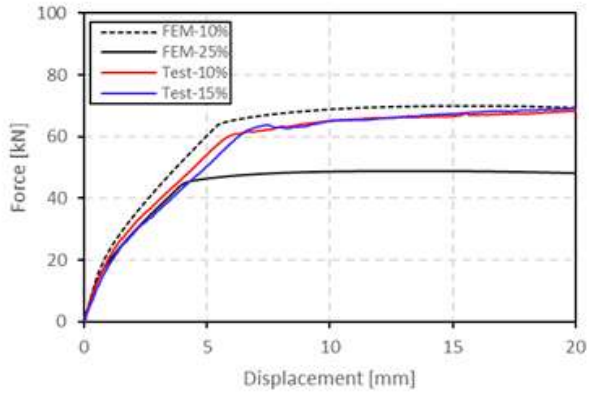
(a) 부식율 5%



(b) 부식율 10%

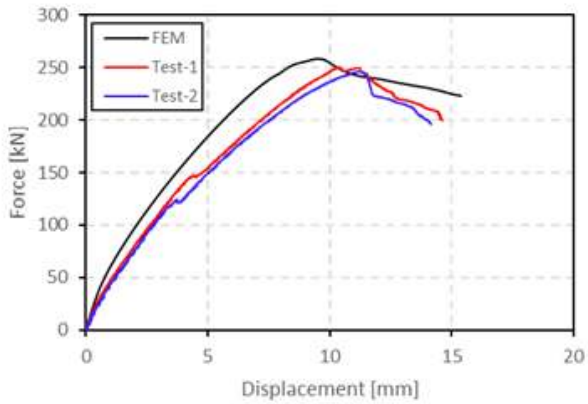


(c) 부식율 25%

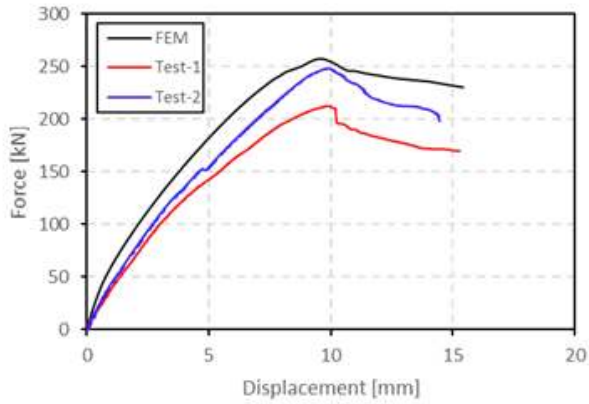


(d) 부식율 50%

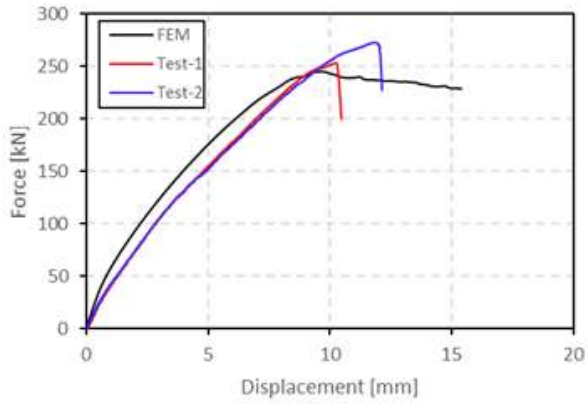
[그림 2-17] 부분부식 휨 보 실험 결과



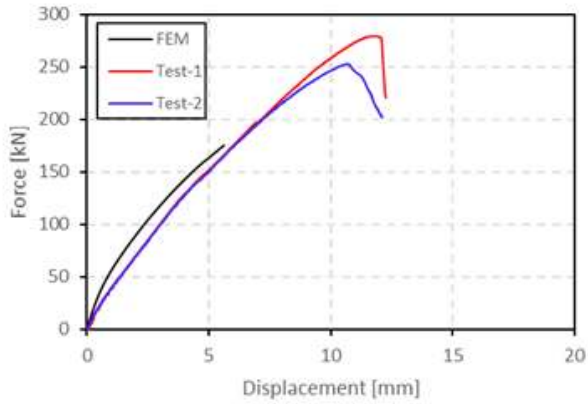
(a) 부식율 5%



(b) 부식율 10%



(c) 부식율 25%



(d) 부식율 50%

[그림 2-18] 부분부식 전단 보 실험 결과

라. 부식에 의한 철근콘크리트 부재 FEM해석

① 해석 프로그램 개요

- 유한요소해석에 사용된 해석모델은 University of Toronto의 Vecchio가 개발한 DSFM(Disturbed stress field model)로서 MCFT(Modified compression field theory)를 확장한 모델이다. DSFM은 MCFT와 동일하게 힘의 평형조건과 변형률의 적합조건을 유도할 때 균열의 방향과 주압축 응력의 방향이 동일한 회전각 이론에 바탕을 두고 있다.
- 그러나 DSFM은 평형조건을 고려할 때 평균응력을 사용한 것과 달리 적합조건을 고려할 때에는 평균변형과 함께 균열면에서의 전단 미끌림에 의한 변형도 함께 고려하였다. DSFM은 기존의 적합조건을 고려한 트러스 모델과 같이 힘의 평형조건과 변형률의 적합조건을 모두 고려하므로 철근콘크리트 구조부재의 휨강도, 휨변형 뿐만 아니라 전단강도 및 전단변형도 함께 예측이 가능하다.
- 본 연구에서 상기 실험들을 수행한 전단 및 휨보 실험체를 대상으로 Vector2를 이용하여 철근부식으로 인한 부착성능의 감소가 강도-변형능력에 미치는 영향, 즉 부착성능계수(β) vs 구조성능저감계수(ϕ)와의 상관관계를 파악하였다.

② 콘크리트 응력-변형률 해석 모델

- 표 2-1에 유한요소에서 사용한 모델을 정리하였다.
- 콘크리트 응력-변형률 관계의 모델은 Compression Pre-Peak Response 에서는 40MPa 이하의 보통콘크리트강도 Hognestad가 제안한 Parabola 모델을 사용하였다. Post-peak Compression response 모델은 Popovics/Mander 모델을 사용하였다.
- 콘크리트 응력 연화 모델은 120여개의 실험 결과를 기반으로 한 통계 모델을 사용하였다. 연화 효과가 과대 평가되는 것을 방지할 수 있는 모델인 Vecchio 1992-A (e1/e2-Form)을 적용하였다.
- 콘크리트 인장 사용된 모델은 Vecchio으로 30개의 패널 실험을 통해 만들어진 모델이다. 콘크리트 내의 균열 위치에서의 인장응력을 계산하여 평균 변형 조건을 결정한다.
- 철근 Dowel Action 모델은 균열이 철근 축의 횡 방향으로 미끄러지면서 철근의 전단 저항을 높인다. 소량의 횡방향 철근 보강을 갖는 보와 같이 Dowel Action은 철근 콘크리트 부재의 전단강도 및 변형률 강화구간 이후의 연성에 중요한 역할을 한다. 적용 모델은 Tassio Model을 사용하였다.
- 철근의 Bonding Factor사용 모델은 Eligehausen을 사용하였다. Bonding의 Stress-Slip의 관계는 상승하는 비선형 분기점, 내림차순의 선형 분기점 및 잔류 응력 분기점으로 나타낼 수 있다.

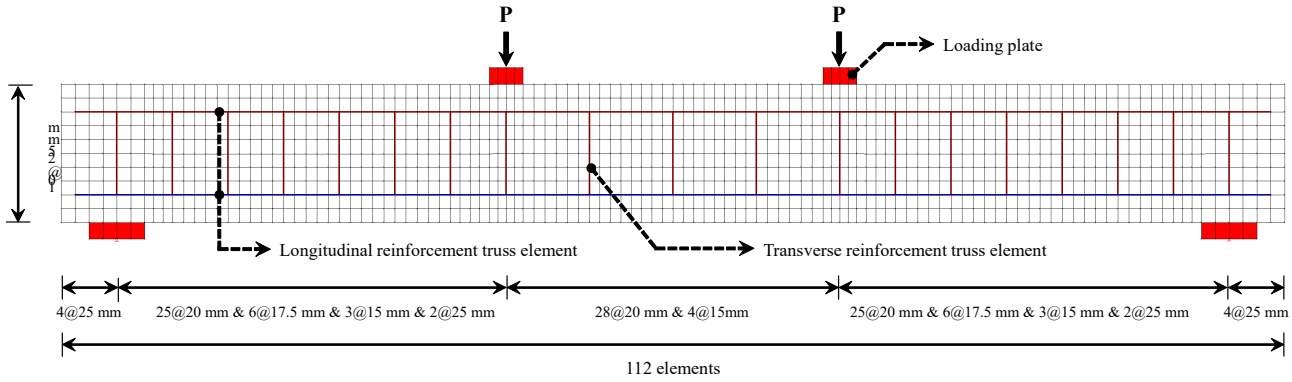
[표 2-1]

사용 모델	Model used in FE analysis
Pre-Peak Compression response	Hognestad
Post-peak Compression response	Popovics/Mander
Vecchio 1992-A(e1/e2-Form)	Vecchio
Dowel Action	Tassio Model
Bonding Factor	Eligehausen

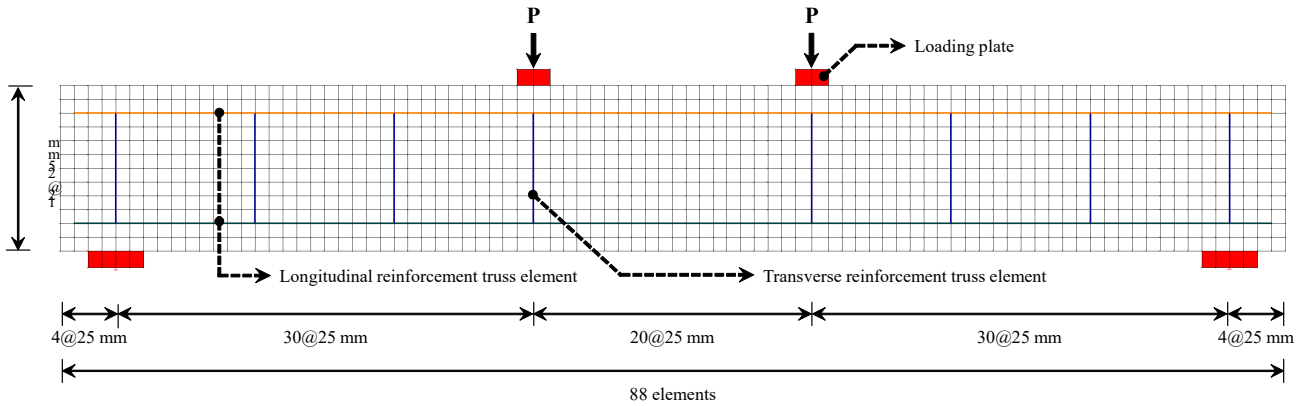
③ 유한요소 해석 모델링 개요

- [그림 2-19]는 콘크리트 및 철근에 관한 해석 모델을 반영하여 (a), (b)에 나타낸 휨 및 전단 실험체와 동일한 형상 및 철근배근을 유한요소로 모델링 하였다. 휨실험체는 부재폭 (250mm) 및 길이방향 (2200mm)에 10 × 112 개, 총 1120 개의 요소를 사용하였으며, 전단실험체는 부재폭(300mm) 및 길이방향 (2200mm)에 12 × 88개, 총 1056개의 요소를 각각 사용하여 모델링 하였다.

• 유한요소해석에서는 철근부식으로 인한 부착성능의 감소가 강도-변형능력에 미치는 영향, 즉 부착성능계수(β) vs 구조성능저감계수 (ϕ)와의 상관관계를 파악할 목적으로 주요변수로 철근의 부착성능을 제어하는 β를 설정하여 Perfect bonding 상태인 β=1를 기준으로 β를 0.4까지 총 12변수를 이용하여 해석을 수행하였다.



(a) 휨 보 모델링

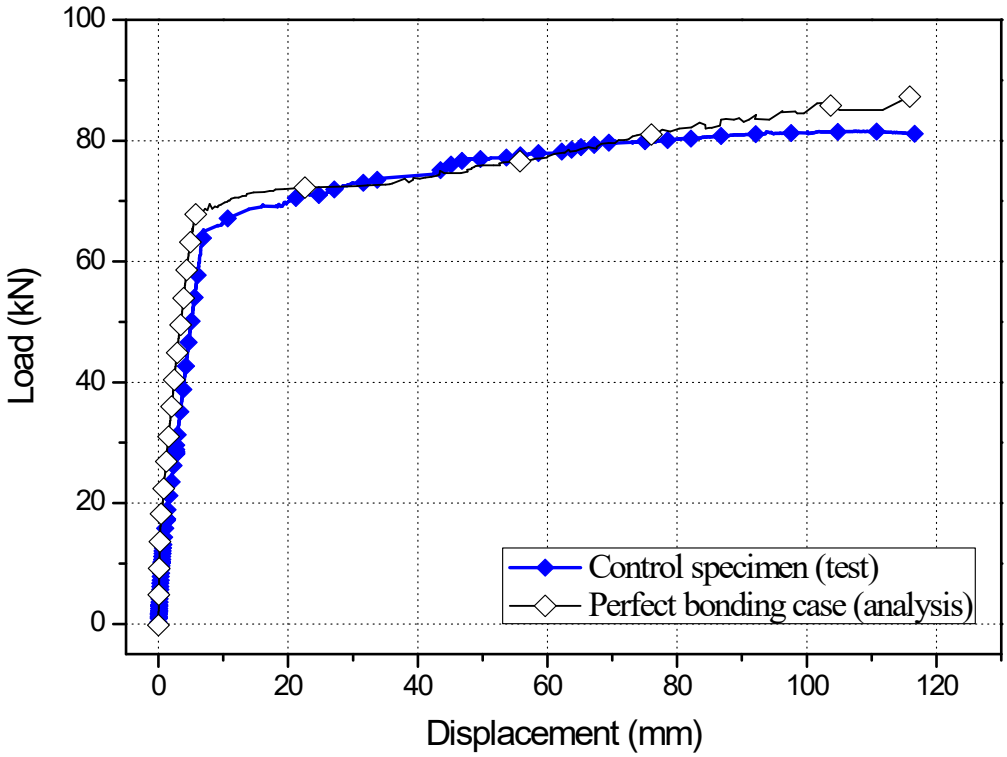


(b) 전단 보 모델링

[그림 2-19] 보의 유한요소 모델링

④ 유한요소해석의 결과

• 휨파괴형 보의 유한요소 결과와 실험결과를 상호 비교하여 [그림 2-20]에 상호 비교하여 나타내었다. [표 2-2]에는 β =1를 기준으로 β를 0.4 까지 총 12변수를 이용하여 해석을 수행한 결과를 나타낸다. 비교용 휨 보 실험체의 극한내력은 해석결과 87.3kN이며, 실험결과는 81.6kN으로 실험결과 대비 약 +1.07 배로 나타났으며, 극한내력 시의 변위는 해석결과 115.9mm이며, 실험결과는 116.7mm로 약 -0.99배로 나타나 VecTor2를 이용한 해석결과는 실험결과와 매우 유사한 거동을 나타내었다.

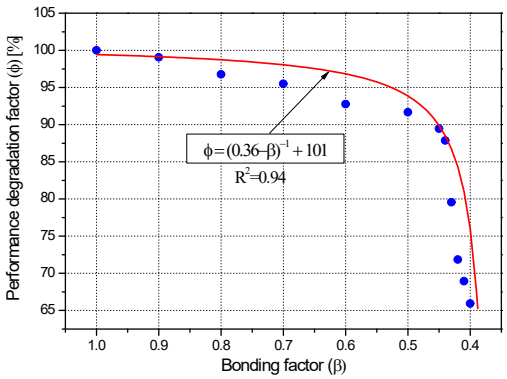


[그림 2-20] 휨보 실험결과와 해석 상호 비교 결과 그래프

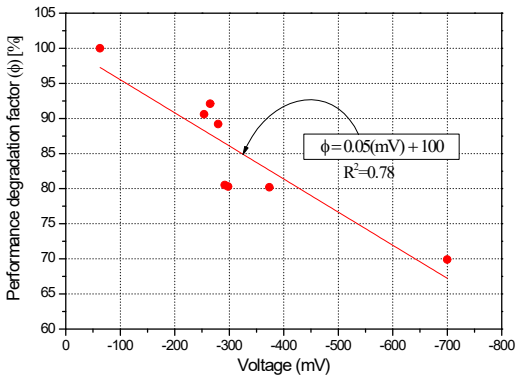
[표 2-2] 휨 보 변수별 해석 결과

Casses	Bonding factor(β)	Ultimate		Dissipation Energy(kN-mm)	Performance degradation factor(ϕ)%
		Load(kN)	Deflection(mm)		
Case -1	1	87.3		115.9	8840.26
Case -2	0.9	84.7		114.9	8756.35
Case -3	0.8	84.3		112.57	8553.4
Case -4	0.7	82.7		111.37	8305.69
Case -5	0.6	81.4		111.41	8288.73
Case -6	0.5	85.8		109.6	8179.35
Case -7	0.45	84.6		105.16	7908.5
Case -8	0.44	81.3		104.13	7767.56
Case -9	0.43	82.5		94.92	7033.94
Case -10	0.42	81.6		87.38	6352.08
Case -11	0.41	80.6		83.46	6093.76
Case -12	0.4	79.1		81.05	5828.68

- [그림 2-21] (a)에는 [표 2-2]에 나타낸 각 Case별 부착성능계수(β)와 구조성능저감계수(ϕ)와의 상관관계를 나타내며, (b)에는 휨 실험체의 철근 부식 전위차에 대한 평균 볼트값(mV)과 구조성능저감계수(ϕ)와의 상관관계를 각각 나타낸다. 유한요소해석에 의한 부착성능계수 (β)와 구조성능 저감계수 (ϕ)는 Regression analysis를 이용하여 얻어진 식이며, β-ϕ의 상관계수는 R^2=0.94로서 높은 상관관계를 나타낸다.



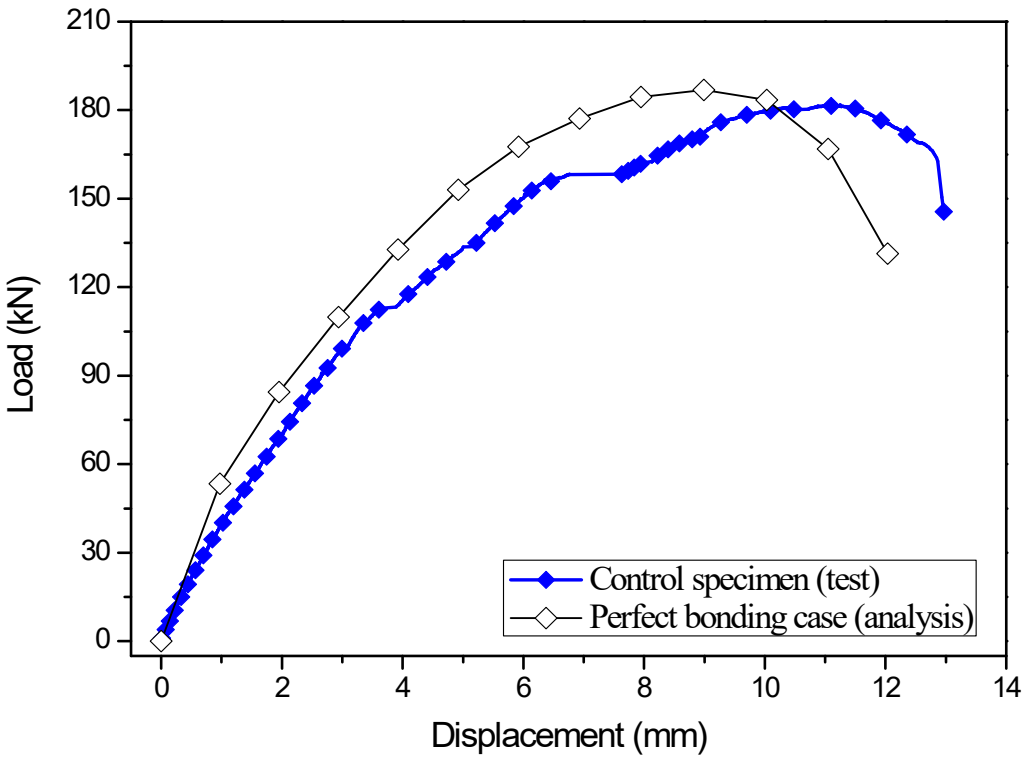
(a) 휨보 접합계수(β)와 성능저하계수(ϕ)의 관계



(b) 전압(mV)에 따른 평균 전위차와 성능 저하계수(ϕ)의 관계

[그림 2-21] 휨보의 성능 저하계수의 상관관계

- 전단파괴형 실험체 실험결과와 유한요소 해석결과를 상호 비교하여 [그림 2-22]에 나타내었다. [표 2-3]에는 β =1를 기준으로 β를 0.4까지 총 12변수를 이용하여 해석을 수행한 결과를 나타낸다. 비곡용 전단보 실험체의 극한내력은 해석결과 186.8kN이며, 실험결과는 181.9kN으로 실험결과 대비 약 +1.03배로 나타났으며, 극한내력 시의 변위는 해석결과 12.03이며, 실험결과는 11.3mm로 약 +1.06배로 나타났다.

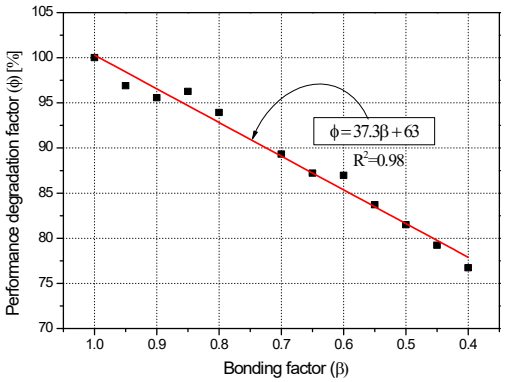


[그림 2-22] 전단보 실험결과와 해석 상호 비교 결과 그래프

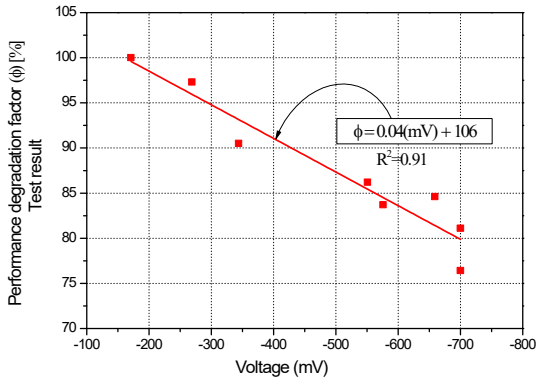
[표 2-3] 전단보 변수별 해석 결과

Casses	Bonding factor(β)	Ultimate		Dissipation Energy(kN-mm)	Performance degradation factor(ϕ)%
		Load(kN)	Deflection(mm)		
Case -1	1	186.8		12.03	1728.21
Case -2	0.95	186.2		12.03	1674.6
Case -3	0.9	185.8		12.02	1668.51
Case -4	0.85	185.2		12.02	1663.45
Case -5	0.8	184.8		12.02	1657.82
Case -6	0.7	183.8		12.02	1610.28
Case -7	0.65	183.2		11.02	1507
Case -8	0.6	182.6		11.02	1502.93
Case -9	0.55	182		11.02	1478.59
Case -10	0.5	181.2		11.02	1454.59
Case -11	0.45	180.4		11.02	1429.91
Case -12	0.4	180.6		10.02	1325.95

- [그림 2-23] (a)에는 [표 2-3]에 나타낸 각 Case별 부착성능계수(β)와 구조성능저감계수(ϕ)와의 상관관계를 나타내며, (b)에는 휨 실험체의 철근 부식 전위차에 대한 평균 볼트값(mV)과 구조성능저감계수(ϕ)와의 상관관계를 각각 나타낸다. 유한요소해석에 의한 부착성능계수 (β)와 구조성능 저감계수 (ϕ)는 Regression analysis를 이용하여 얻어진 식이며, β-ϕ의 상관계수는 R^2=0.98로서 높은 상관관계를 나타낸다.



(a) 전단보 접합계수(β)와 성능저하계수(ϕ)의 관계

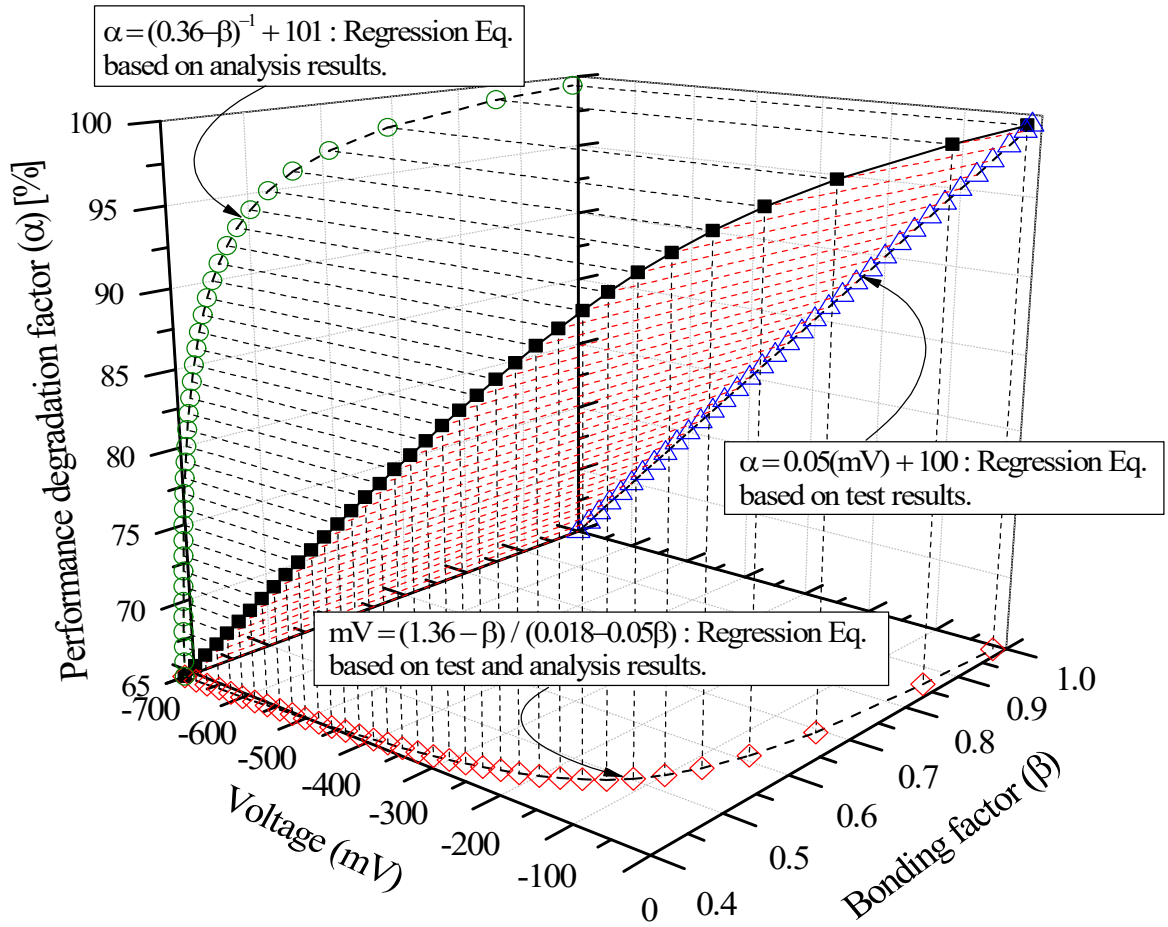


(b) 전압(mV)에 따른 평균 전위차와 성능 저하계수(ϕ)의 관계

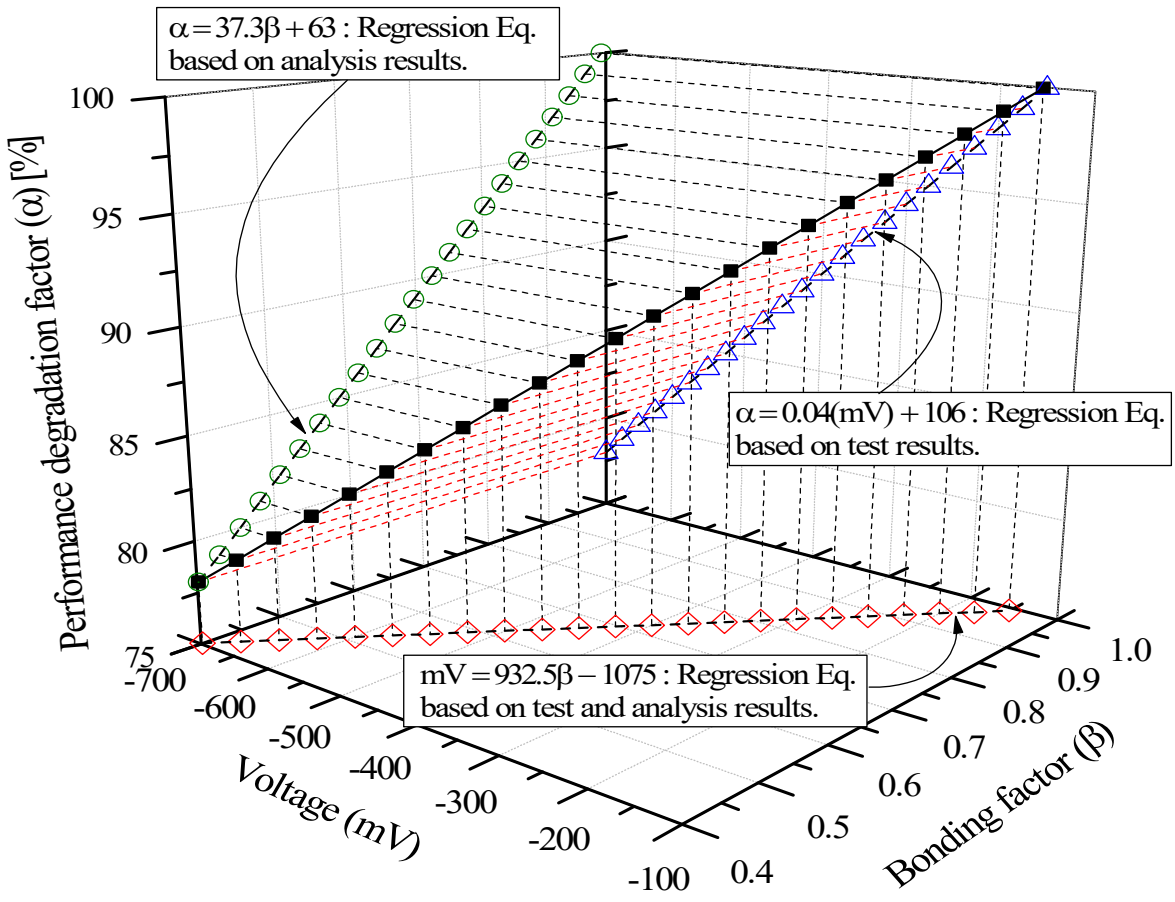
[그림 2-23] 전단보의 성능 저하계수의 상관관계

④ 구조실험 및 유한요소해석에 의한 ϕ-휨 및 전단 보의 철근부식으로 인한 부착성능의 감소가 강도-변형능력에 미치는 영향, 즉 부착성능계수(β) β-mV 상관곡선 제안

- 휨 및 전단 보의 철근부식으로 인한 부착성능의 감소가 강도-변형능력에 미치는 영향, 즉 부착성능계수(β) vs 구조성능저감계수(ϕ)와의 상관관계를 [그림2-21] (a)와 [그림 2-23] (b)과 같이 각각 파악하였다. [그림 2-24]에는 부식 휨보의 mV-β-ϕ 상관곡선을, [그림 2-25]에는 부식 전단보의 mV-β-ϕ 상관곡선을 이용하면 RC전단 및 휨보 부재의 부식정도(mV)에 따른 철근의 부착성능 감소(β)와 이에 따른 강도-변형능력에 기반한 구조성능저감계수(ϕ)를 평가할 수 있다.



[그림 2-24] 부식된 휨보의 전압에 따른 성능저하계수 부착계수 및 평균전위차 상호관계도



[그림 2-25] 전단보의 전압에 따른 성능저하계수 부착계수 및 평균전위차 상호관계도

마. 철근콘크리트 건축물의 내구성능을 고려한 통합내진성능 평가법

① 경년열화에 따른 통합내진성능 우선도 평가법

- 경년열화에 따른 통합내진성능 우선도 평가법은 기존 철근콘크리트 건축물의 구조부재에서 발생한 철근의 부식도를 측정하여 내구성능 저감계수를 반영한 내진성능 평가법이다, 이 방법은 전문가가 약산적으로 내진성능평가를 수행하기 위한 평가법이다.
- 건축물의 준공 시점과 비교하여 철근의 부식 수준에 따른 내진성능 저하율에 대한 평가가 가능하며, 또한 현시점에서의 내구성능 저감을 고려한 내진안전성을 5단계(A,B,C,D,E)의 성능등급으로 평가할 수 있다. 이는 목표성능수준에서 설정한 판단기준에 의해서 평가한다.
- 본 연구에서 실험을 기반으로 내구성능을 고려한 예비 통합내진성능 평가법은 아래 [표2-4] 와 같다.

[표 2-3] 통합내진성능평가를 통한 학교시설 내진안정성 평가법

등급부호	평가결과	조치사항
A등급	OK	최상의 상태로서 통상적인 유지관리
B등급	OK 단, 목표수준에 의해서 상세평가 실시 여부 결정	목표수준에 의해서 통상적인 유지관리를 결정
C등급	상세평가 실시	교육부 내진성능 평가가이드라인[1] 참조
D등급		
E등급		

- 내진성능 예비평가법은 전문가가 내진성능을 약산적으로 평가하는 방법으로서, 통합내진성능 평가용 입력 최대 지진가속도(α) 수준에 대해서 현장조사 결과를 바탕으로 한 철근부식 정도에 따른 내구성능 저감계수를 고려한 기둥, 전단벽체 및 조적조 끼움벽체의 단면치수에 의해서 약산적으로 계산되는 극한 내력에 의해서 건축물의 내진안전성을 판단한다.
- 수직부재의 극한내력은 각 부재의 단면적을 바탕으로 한 전단응력도법에 의해서 산정된다. 내진성능평가용 수직부재 가운데 일반기둥은 휨파괴형 기둥의 내구성능 저감계수를, 전단파괴형 부재는 전단파괴형 기둥의 내구성능 저감계수를 각각 사용하여 평가한다. 단, 전단파괴형 부재인 끼움조적조는 비구조부재이며, 현재 조적조의 내구성능에 따른 내력저하에 관한 기존문헌이 거의 없다는 실정을 고려하여 내구성능 저감계수를 고려하지 않고 평가를 수행한다.

② 휨 및 전단파괴형 부재 내력산정 방법

- 휨파괴형 부재는 일반기둥($\frac{h_0}{D} \geq 6$), 전단파괴형 기둥은 극단주($\frac{h_0}{D} \leq 2$), 단주($2 < \frac{h_0}{D} < 6$), 전단벽체 및 끼움 조적조로 구분한다.
- 철근콘크리트 학교시설 1층의 장변방향과 단변방향에 대한 일반기둥($\frac{h_0}{D} \geq 6$), 즉 휨파괴형 부재의 내구성능 저감계수를 고려한 종국강도 (Cf_y)을 [식 2-1]에 의해서 계산한다.

$$Cf_y = \frac{V_{fy}}{\sum Af \cdot w} = \frac{\tau_{fc} \sum_{i=1}^{n} \xi_i a_{fci}}{\sum Af \cdot w} \qquad (2\text{-}1)$$

- 여기서 $\sum_{i=1}^{n} \xi_i a_{fci}$: 각각 휨파괴형 부재의 철근부식정도(전위차)를 바탕으로 산정된 내구성능저감계수를 고려한 일반기둥의 단면적의 합(τ_{fc}를 곱함으로써 저감내진성능을 의미함)

τ_{fc} : 일반기둥의 평균 전단응력도

$\sum A_f$: 대상건물 전체 층 바닥면적의 합계

w : 바닥면적당 단위중량 (w=10 kPa, 1000 kgf/m^2)

[표 2-4] 시공 기간별 일반기둥의 평균전단응력도 (단위 : MPa (kgf/cm^2))

기둥분류		건설연도			
		1970년 이전	1971년~1987년	1971년~1987년	1971년~1987년
휨파괴	일반기둥 ($h_0/D \geq 6$)	0.73 (7.3)	0.74 (7.4)	0.85 (8.5)	0.86 (8.6)

- 철근콘크리트 학교시설 1층의 장변방향과 단변방향에 대한 극단주($\frac{h_0}{D} \leq 2$), 단주($2 < \frac{h_0}{D} < 6$), 전단벽체 및 끼움조적조의 전단파괴형 부재의 내구성능 저감계수를 고려한 종국강도(C_{su})을 [식 2-2]에 의해서 계산한다.

$$Csu = \frac{V_{sy}}{\sum A_f \cdot w} = \frac{\tau_{fc}\sum_{i=1}^{n}\xi_i a_{fci} + \tau_{oc}\sum_{i=1}^{n}\xi_i a_{oci} + \tau_{sw}\sum_{i=1}^{n}\xi_i a_{swi} + \tau_{bw}\sum a_{bw}}{\sum A_f \cdot w} \qquad (2\text{-}2)$$

- 여기서 $\sum_{i=1}^{n}\xi_i a_{sci}$: 각각 극단주 부재의 철근부식 정도(전위차)를 바탕으로 구성된 내구성능저감계수를 고려한 극단주 기둥의 단면적 합(τ_{sc}를 곱함으로써 극단주의 저감 내진성능을 의미함)

τ_{sc} : 극단주의 전단응력도(표 3.3, 교육부 내진성능 평가가이드라인)

$\sum_{i=1}^{n}\xi_i a_{sci}$: 각각 단주 부재의 철근부식 정도(전위차)를 바탕으로 산정된 내구성능저감계수를 고려한 단주 기둥의 단면적 합(τ_{oc}를 곱함으로써 단주의 저감 내진성능을 의미함)

τ_{oc} : 단주의 전단응력도

$\sum_{i=1}^{n}\xi_i a_{swi}$: 각각 벽체의 철근부식 정도(전위차)를 바탕으로 바탕으로 산정된 내구성능저감계수를 고려한 벽체의 단면적 합(τ_{sw}를 곱함으로써 벽체의 저감 내진성능을 의미함)

τ_{sw} : 벽체의 전단응력도

$\sum a_{bw}$: 조적채움벽의 단면적 합

τ_{bw} : 조적채움벽의 전단응력도

$\sum A_f$: 대상건물 전체 층 바닥면적의 합계

w : 바닥면적당 단위중량 (w=10 kPa, 1000 kgf/m^2)

[표 2-5] 시공 기간별 극단주, 단주 기둥의 평균전단응력도 (단위 : MPa (kgf/cm^2))

기둥분류		건설연도			
		1970년 이전	1971년~1987년	1971년~1987년	1971년~1987년
전단파괴	극단주 ($h_0/D \leq 2$)	1.30 (13.0)	1.35 (13.5)	1.43 (14.3)	1.50 (15.0)
	단주 ($2 < h_0/D < 6$)	1.14 (11.4)	1.18 (11.8)	1.24 (12.4)	1.30 (13.0)

- 입력 지진가속도 수준(α)에 의해서 내진성능판정지표(E_{di}) 및 통합내진성능 평가를 위한 지표(β, G, P)을 산정하여 표 2-6에 나타내었다.

[표 2-6] 내진성능평가지수(β, G, P), 평가계산식에 필요한 성능판정지수(E_{di}), 지진가속도(α)

지진규모 / 지표값	0.1g≤α≤0.2g	0.2g≤α≤0.3g			
E_{di} (i=1 ~ 4)	$E_{d1}=E_{d2}=E_{d3}=E_{d4}$	경미/무피해 판정용(E_{d1})	소규모 피해 판정용(E_{d2})	중규모 피해 판정용(E_{d3}, E_{d4})	대규모 피해 판정용
	2α+0.05	1.1α+0.23	2α+0.05	1.5α+0.15(E_{d3}) 2α+0.05(E_{d4})	-
β	2.1-6α	1.42-2.6α			
G	2.2-0.06α	α+0.3			
P	0.15	0.31-0.8α			

- 내구성능 저감계수를 고려한 통합내진성능 예비평가법의 입력 지진가속도수준(α)에 의해서 산정되는 내진성능판정지표(E_{di}) 및 평가용 지표값(β, G, P)을 바탕으로 대상 건축물의 지진피해도 및 통합내진성능 평가점수(SES)를 제안하였다.
- 지진피해도는 경미한 지진피해, 소규모 지진피해, 중규모 지진피해 및 대규모 지진피해로 평가가 가능하며, 각각의 지진피해규모에 따른 평가점수(SES)는 0에서 약 120점을 기준으로 산정된다.
- 따라서 아래 표 2-7에 철근콘크리트 건축물의 지진피해의 정도와 내진성능 평가점수(SES)에 의해서 내구성능을 고려한 통합내진성능 우선도 평가법의 내진등급을 나타내었다.

[표 2-7] 내진성능 예비평가방법의 평가결과와 내진등급의 관계

지진규모 / 지표값	통합성능수준	통합내진성능 평가점수 (SES)	통합 내진성능 등급
경미한 피해	OP	SES≥120	A
		110≤SES<120	
		100≤SES<110	
소규모 피해	IO	SES≥120	
		110≤SES<120	
		100≤SES<110	
중규모 피해	DCR	SES≥120	B
	LS	110≤SES<120	
		100≤SES<110	
대규모 피해	LSR	90≤SES<100	C
	CP	70≤SES<90	D
붕괴	C	50≤SES<70	E
		0≤SES<50	

⑥ 결론

- 본 연구는 이전연구의 확장으로서, 철근콘크리트 부재의 부식과 부착성능 저감에는 높은 상관관계가 있다는 기존 연구결과에 근거하여 전단 및 휨 보의 철근 부식으로 인한 부착성능의 감소(β)가 강도-변형능력 기반 구조성능저감(ϕ)에 미치는 영형을 유한요소해석을 실시하여 검토하였다.
- 최종적으로 β - ϕ 상관관계(Analysis)와 mV-ϕ를 공학적으로 상호 비교하여 휨 및 전단보의 mV-β-ϕ 상관곡선을 최종적으로 제안하였다.
- 휨보와 동일하게 전단보β - ϕ 상관관계와 실험결과에 대한mV - ϕ 상관관계식(ϕ=0.04(mV)+109, R^2=0.91)을 구조성능저감계수(ϕ)의 관점에서 전단보의β - mV 상관관계가 mV = $932.5\beta-1075$로나타났다.
- 유한요소해석에 의한 각 실험체의 β - ϕ 상관관계와 부식 보 부재를 대상으로 HCP에 의해서 정량적으로 계측한 평균 볼트값과 구조실험에 의한 구조성능저감계수와의 상관관계, 즉 mV - ϕ를 공학적으로

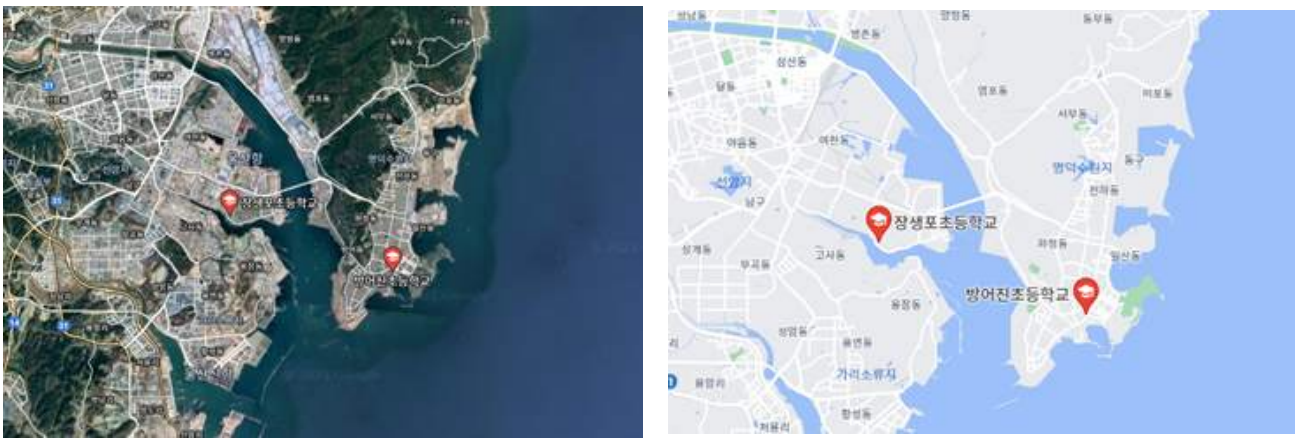
상호 비교하여 휨 및 전단보의 mV – β – ϕ 상관곡선을 최종적으로 제안하였다. 본 연구에서 제안한 mV – β – ϕ 상관곡선을 이용하면 철근콘크리트 전단 및 휨 보 부재의 부식정도(mV)에 따른 철근의 부착성능 감소 (β)와 이에 다른 강도 – 변형능력에 기반한 구조성능저감계수(ϕ)를 평가할 수 있다. 이 결과는 부식 손상을 입은 철근콘크리트 부재의 내진성능을 정량적으로 평가하는 방법에 활용 가능하다고 사료 된다.

- 통합 내진성능 우선도 평가법은 기존 국내 내진성능평가법과 달리 수직부재만을 고려한 신속하게 위험성을 평가하는 방법이다. 기존 중저층 건축물의 내진성능을 평가하기 위해 평가용 지진가속도에 따른 요구성능 판정지표 및 내진성능 평가용 지표를 통해 건축물의 피해 및 내진성능 평가점수를 산정할 수 있다. 통합내진성능 우선도 평가법에 의한 구조물의 내진성능 판정은 A~E등급으로 구분되며, A등급은 일상적인 유지관리가 가능하다. B등급은 목표수준에 의해 상세평가 실시여부를 결정해야하며, C~E등급은 상세평가를 실시하여 내진보강을 하도록 검토해야 한다.

바. Test-bed를 통한 Multi physics 비파괴 검사법 적용 검증

① test bed 적용 대상 시설물 선정 및 개요

- Multi-physics 비파괴검사 방법 성능평가 및 Data fussion 통한 비파괴검사 성능평가 검증을 위해 울산광역시에 소재한 초등학교 시설물(장생포, 방어진)을 Test bed로 선정하여 실험을 진행하였다.
- 장생포와 방어진 초등학교는 [그림 2-26]과 같이 울산에 위치하며 바다와 인접하여 해양환경에 노출되어있으며 염해, 부식 등에 취약할 것으로 판단되어 본 연구에서 부식열화에 따른 Multi-physics 비파괴검사 방법 검증에 적합하여 선정하였다.
- [표 2-4]는 장생포, 방어진 초등학교에 대한 건축물대장을 확인하여 작성된 시설물의 개략적 정보를 나타낸다. 두 시설물 모두 철근콘크리트구조를 주구조로 확인할 수 있으며, 장생포 초등학교는 약 55년, 방어진 초등학교는 17년 이상 된 노후화된 건물로 본 연구에 경년열화 및 부식으로 인한 시설물 성능평가에 적합하여 선정하였다.



(a) 장생포, 방어진 초등학교 지형도 (b) 장생포, 방어진 초등학교 지도

[그림 2-26] 적용 시설물 위치 현황

[표 2-4] 시설물 건축 정보

대상	장생포 초등학교	방어진 초등학교
준공연도	1946 추정	1995.07.05
건축물 주구조	철근콘크리트구조	철근콘크리트구조
층수	3	4
주용도	교육연구 및 복지시설	교육연구시설
연면적	1,592.55	2,700.42
주소지	울산광역시 남구 장생포동 329-1	울산광역시 동구 방어동 146

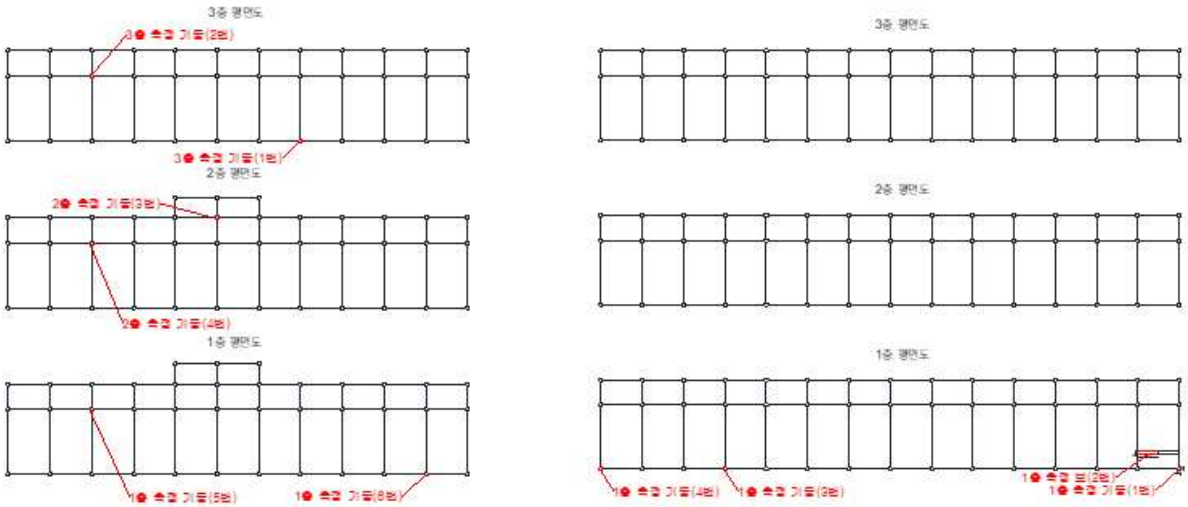
② 대상 시설물 측정 계획

- [그림 2-27]은 Test-bed로 선정된 장생포, 방어진 초등학교에 대한 전경 사진을 나타낸다. 장생포 초등하교는 총 3층으로 구성되어 있으며, 방어진 초등하교는 총 4층으로 구성된 일반적인 철근콘크리트 구조물로 구성되어 있다.
- [그림 2-28]은 적용 시설물(장생포, 방어진 초등학교)에 대한 개략적 평면도와 Multi-physics 비파괴검사를 수행한 기둥을 붉은색으로 나타내었다.
- (a) 장생포 초등학교 평면도에서 각 층에서 기둥에 대해 비파괴검사를 수행하였다. 기둥(2, 4, 5번)은 각 층에서 같은 위치에 기둥에 대해 측정하였으며, 기둥(1, 3, 6번)에서 6번은 1층이라 외부에서 측정을 진행할 수 있었지만 1, 3번은 외부 측정이 어려워 내부에 외측 기둥에 대해 측정을 진행하였다.
- (b) 방어진 초등학교 평면도에서는 코로나로 인해 외부인이 학교 내부에 출입이 어려워 1층 외부 기둥(1, 3, 4번)에 대해서 측정을 진행하였다. 출입 입구에 위치한 2번 보에 대해서도 측정을 수행하였다.



(a) 장생포 초등학교 전경 (b) 방어진 초등학교 전경

[그림 2-27] 적용 시설물 전경



(a) 장생포 초등학교 평면도 (b) 방어진 초등학교 평면도

[그림 2-28] 적용 시설물 평면도

③ Multi-physics 비파괴검사 측정 계획

- [그림 2-29]에는 적용 시설물에 대한 비파괴검사 측정방법을 나타낸다. 본 실험에서는 총 5종류의 비파괴검사 방법으로 해머 사운딩, HCP, GPR, SWT 그리고 ER을 사용하여 측정하였다.
- 해머 사운딩은 콘크리트 표면 두르림을 통해 생기는 소리로 콘크리트 구조물의 박리 및 박락을 확인하는 측정방법이다. 교량의 상판 박리 측정을 위한 ASTM D4580/D4580M-12를 참고하여 측정하였다.
- 전기비저항 측정법(ER)은 Wenner의 4전극방식의 기술을 활용하였고, probe 간격은 28mm로 Resipod Proceq사의 장치를 사용하여 표면비저항을 측정하였다. 표면 비저항 시험 방법인 AAHTO T358기준에 부합하여 측정하였다.

- 자연전위 측정법(HCP)은 구조물의 부식 가능성을 확인하는 측정방법으로, 구조물에서 노출된 철근 및 콘크리트를 천공하여 철근과 Clamp를 연결 후 기준전극(Cu/SO4)를 이용하여 표면에 접촉 시 전위차를 측정한다. ASTM C876에 준하여 측정을 수행하였다.
- 지표투과레이더법(GPR)은 ASSI사의 mini GPR 장비를 사용하여 2.7GHz 주파수 펄스를 이용하여 철근콘크리트 내부의 철근 배근 및 반사파 에너지를 측정하였다.
- 전단파 토모그래피(SWT)를 48개의 저주파 센서를 콘크리트 표면에 접지 시킨 후 50kHz S파를 이요하여 콘크리트 평균 초음파 속도 및 B-scan 이미지를 측정하였다. 사용 장비는 ACSYS사의 A1040 MIRA 장비를 사용하였다.



(a) SWT 측정 (b) GPR 측정

(c) 해머 사운딩 (d) ER 측정 (e) HCP 측정

[그림 2-29] 적용 시설물 비파괴검사 측정방법

④ Test-bed 시설물 비파괴검사 결과 및 분석

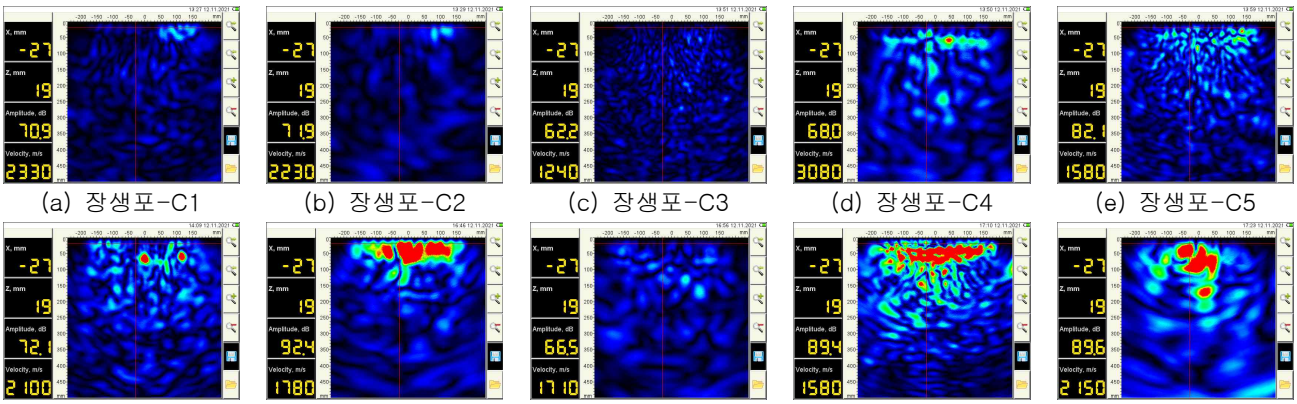
- 현재 사용중인 시설물인 장생포, 방어진 초등학교는 [그림 2-30]과 같이 내외부로 외장재, 마감재 및 코딩으로 기둥 부재를 유지관리 중이었다. 이러한 마감재는 내부 철근콘크리트를 외부 수분 및 부식 열화 등으로 보호하는 장점을 가지고 있다. 그러나 비파괴 상태평가 관점에서는 콘크리트 표면평가를 하는데 제한적이며 전기적, 전기화학적 비파괴검사법 평가시에는 절연효과로 인해 어려움이 발생한다.
- 해머 사운딩 비파괴검사법을 통해서는 외장재와 마감재에 대한 들뜸 및 박리 현상에 대해서는 평가할 수 있었지만, 내부 철근콘크리트 상태에 대해서는 평가에 어려움이 있었다.
- ER, HCP의 평가를 위해서는 콘크리트 표면에 충분한 수분이 살포되어야하며, HCP는 내부 철근과 접촉이 되어야한다. 그러나 마감재와 코딩으로 내부콘크리트는 방수가 되며, 현재 사용중인 시설물에 대해서는 노출된 철근 및 천공에 대해서는 제한적이었다.
- 본 test-bed 시설물에 대해서는 적용가능한 비파괴검사법 SWT와 GPR 활용하여 평가를 진행하였다. SWT 평가는 전단파를 활용하여 내부의 콘크리트의 상태를 평가할 수 있으며, GPR은 전자기파를 통해 철근 신호 및 내부 매질의 상태들을 평가할 수 있다.



(a) 방어진 초등학교 마감 (b) 장생포 초등학교 내부 기둥 (c) 장생포 초등학교 내부

[그림 2-30] 적용 시설물 내외부 마감상태

- [그림 2-31]은 MIRA 장비를 활용하여 장생포, 방어진 초등학교 측정 기둥에 대한 B-scan 이미지를 보여준다. 장생포 초등학교의 경우 (f) 장생포-C6 기둥에 대해서는 내부 철근의 신호가 확인할 수 있었다. 그러나 (d) 장생포-C4, (e) 장생포-C5 표면에서 반사파가 많이 발생하는 것을 확인할 수 있는데 마감재와 콘크리트표면사이 박리로 인해 내부 신호를 확인 하기 어려움이 있으며 나머지 스캔의 경우 코딩으로인해 반사파 신호가 확인되지 않았다.
- 방어진 초등학교의 경우 (h) 방어진-B2 보를 제외하고는 외장재의 박리로 인해 표면 근처 반사파로 인해 확인이 내부 콘크리트상태에 대해 평가가 어려웠으며 보 부재에 대해서는 코딩으로 인해 평가로 어려웠다.

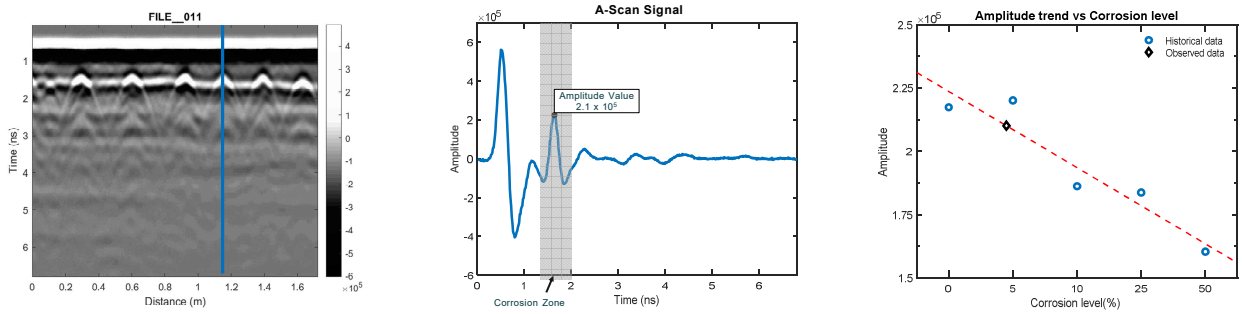


(a) 장생포-C1 (b) 장생포-C2 (c) 장생포-C3 (d) 장생포-C4 (e) 장생포-C5

(f) 장생포-C6 (g) 방어진-C1 (h) 방어진-B2 (i) 방어진-C3 (j) 방어진-C4

[그림 2-31] MIRA를 활용한 B-scan image

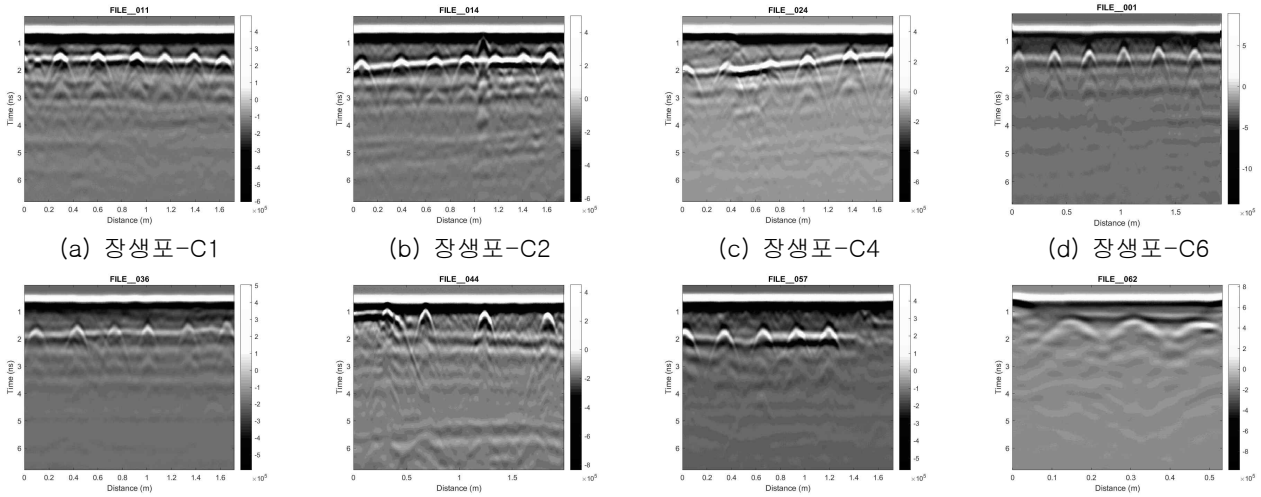
- [그림 2-32]은 GPR 신호에 대해 부식율 예측 precess에 대해 나타낸다. (a) step 1.에서는 시설물에서 획득한 GPR 신호를 통해 B-scan 미지를 생성한다. (b) step 2.에서는 B-scan 이미지에서 철근위치를 확인후 A-scan 이미지를 생성하여 철근 표면에서의 Amplitude 값을 획득한다. (c) step 3.에서는 획득한 Amplitude 값을 부식율과 Amplitude 값과의 상관관계식을 이용하여 부식율을 예측하였다. 상관관계식은 2차 년도에 보,기둥 부재에 대한 얻은 Amplitude 값을 통해 회귀분석을 실시하여 제안된 상관관계식을 사용하였다.



(a) step 1. B-scan 필터링 (b) step 2. GPR signal 추출 (c) step 3. 부식율 예측

[그림 2-32] GPR signal 부식율 예측 Process

- [그림 2-33]은 획득한 B-scan 이미지를 나타내며, 철근 위치, 간격 및 깊이 등의 정보를 얻을 수 있었으며, 일반적인 학교 건물 기준에 맞추어진 철근 배근으로 설계되었음을 확인할 수 있었다.
- [표 2-5]은 GPR Amplitude value에 따른 부식율 평가표를 보여준다. 부식율예측 Precess 통해 얻어진 예측부식율은 최소 1.28%~6.59%로 나타났다. 특히 외부에 위치한 장생포-C6 기둥의 부식율이 6.38로 높으며 이는 해풍 및 염해의 접촉 때문이라 판단되며, 방어진-C4 기둥은 다른 기둥보다 외부와 접촉면이 2면으로 다른 기둥에 비해 높은 6.59 부식율을 나타내었다.



(a) 장생포-C1 (b) 장생포-C2 (c) 장생포-C4 (d) 장생포-C6

(e) 방어진-C1 (f) 방어진-B2 (g) 방어진-C3 (h) 방어진-C4

[그림 2-33] GPR B-scan image

[표 2-5] GPR Amplitude value 따른 부식율 평가

Location	Column Number	GPR Amplitude Value	Corrosion Level[%]
장생포 초등학교	C1	210127	1.90
장생포 초등학교	C2	215808	1.52
장생포 초등학교	C3	201088	2.50
장생포 초등학교	C4	173184	4.36
장생포 초등학교	C5	219520	1.28
장생포 초등학교	C6	142720	6.38
방어진 초등학교	C1	198784	2.65
방어진 초등학교	C2	194656	2.93
방어진 초등학교	C3	211584	1.80
방어진 초등학교	C4	139584	6.59

3. Data Fusion을 통한 부식율 예측 모델 및 알고리즘 개발

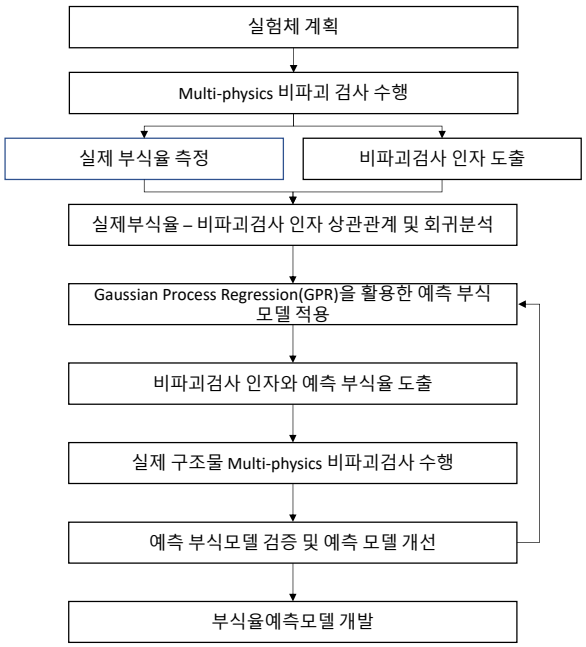
- 2차년도에 수행된 Cube 실험체에서 측정된 비파괴검사 인자들 간의 상관관계와 인자들과 부식율의 상관관계를 도출하며, Gaussian Process Regression(GPR)을 활용한 Machine Leaning을 통해 실험적 Multi-shpysics 비파괴검사를 통한 부식율 예측 모델 및 알고리즘을 개발하고자 함.
- 본 연구에서는 Matlab 프로그램에서 Gaussian Process Regression(GPR)를 활용하여 부식율 예측 모델을 개발 및 적용하였으며, 구조물에서 Multi-physics 비파괴검사를 활용하여 콘크리트내 매입된 철근 부식율의 실험적 결과를 통해 예측부식율을 도출하였다. 이를 통해 구조물 Multi-physics 비파괴검사 상태평가 알고리즘을 제안하였다.

① 부식율 예측 모델 알고리즘 개발

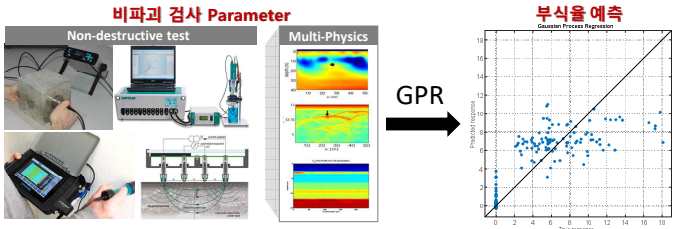
- [그림 3-1]은 Multi-physcis 비파괴검사를 활용한 부식율 예측 모델 및 알고리즘 흐름도에 대해 나타낸다. (a) 부식율 예측 알고리즘 흐름도를 보면 본 연구 1, 2차년도에 수행된 Cube 실험체에 대한 실험적

결과를 토대로 알고리즘을 개발하였다.

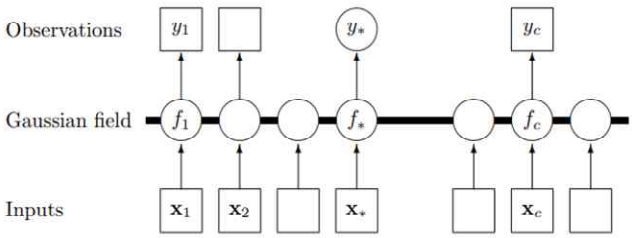
- 흐름도를 보면 Multi-physics 비파괴검사를 수행 후 매입된 철근에 대한 실제부식율과 비파괴검사 인자를 도출한 후에 두 결과에 대한 상관관계 및 회귀분석을 실시하여 예측 모델에 필요한 Parameter를 선정 및 도출하였다.
- 도출된 Parameter를 활용하여 matlab 프로그램에 Gaussian Process Regression(GPR)를 이용하여 부식율을 예측하였다. GPR 활용에 대한 주요 parameter 및 process에 대한 것은 [그림 3-1]에 나타내었다.
- [그림 3-2] Gaussian Process Regression 흐름도 및 Data 및 Parameter 선택 과정에 대해 자세히 나타내었다. 본 실험에서는 총 4가지 비파괴 검사(ER, HCP, EIS, UPV)를 실시하여 NDT parameter 5가지(P-wave, S-wave, ER, HCP, Rp)를 도출하였다. 도출된 NDT Parameter를 총 13가지로 조합시켜 모델 학습을 실시하여 예측 부식율과 실제 부식율 사이의 관계를 도출하였다.



(a) 부식율 예측 알고리즘 흐름도

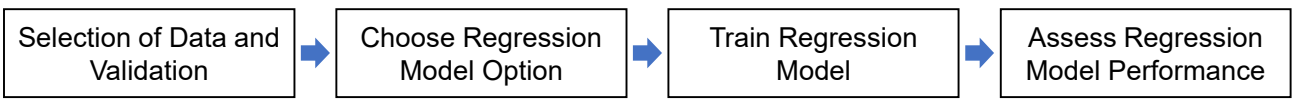


(b) 부식율 예측 모델 모식도

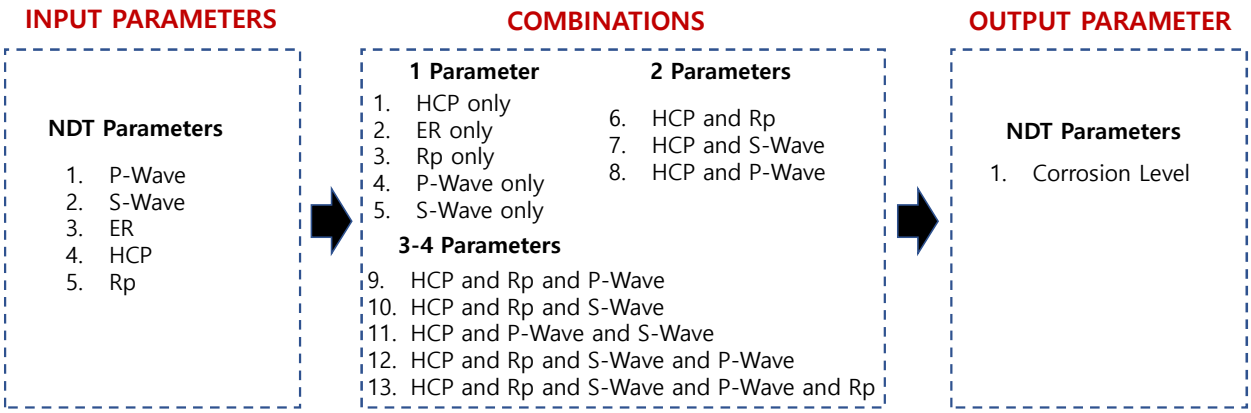


(c) Gaussian Process Regression 모델

[그림 3-1] Multi-physics 비파괴검사 활용한 부식율 예측 모델 및 알고리즘 개발



(a) Gaussian Process Regression 모델 흐름도



(b) Date input 및 Parameter 선정과정

[그림 3-2] Gaussian Process Regression 흐름도 및 Data 및 Parameter 선택 과정

② Multi-physics 비파괴 검사 부식인자 상관관계 결과 및 분석

- [표 3-1]는 Cube 실험체(D10, D13, D19, D22) 비파괴검사 인자와 부식율의 상관관계의 결과를 나타내었다. 상관관계에 분석에 있어 Pearson Correlation Analysis를 활용하여 결과를 도출하였다.
- 부식율 비파괴 검사의 결과를 보면 HCP와 Rp 값에 대한 상관관계가 R=0.705, R=-0.704로 높은 상관관계를 보였다. HCP는 주로 정량적인 결과를 보여주는 비파괴검사로 알려져 있으나 본 결과에서는 부식율과의 상관관계도 있는 것으로 나타나며, Rp 값은 정략적인 결과로 부식속도와 부식율 간의 관계를 간접적으로 나타내는 지표로 활용되며, 본 실험에서 상관관계가 있는 것을 확인할 수 있음.
- 비파괴검사 인자들 간에서는 HCP와 Rp 값은 R=-0.781으로 높은 상관관계를 보여주었음. 현장에서 주로 활용되는 HCP 값을 활용하여 현장적용이 어렵지만 실험적으로 부식율과 Rp 값은 정량적 관계성을 보여주기에 부식율을 예측하는 지표로 사용할 수 있을것으로 판단됨.

[표 3-1] Cube 실험체(D10, D13, D19, D22) 비파괴검사 인자와 부식율의 상관관계

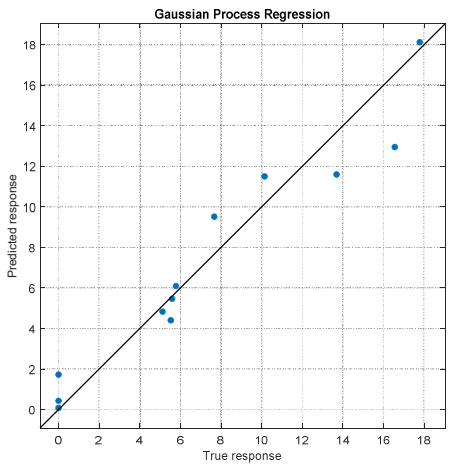
	HCP	ER	Rp	P-wave	S-wave	Corrosion
HCP [mV]	1.000	-	-	-	-	-
ER [KΩ·㎝]	-0.326	1.000	-	-	-	-
Rp[kΩcm2]	-0.781	0.084	1.000	-	-	-
P-wave [m/s] (50 kHz)	0.127	0.286	-0.220	1.000	-	-
S-wave [m/s] (40kHz)	-0.168	0.436	0.035	0.155	1.000	-
Corrosion [%]	0.705	0.015	-0.704	0.330	-0.117	1.000

③ 부식율 예측 모델 결과 및 분석

- [그림 3-2]은 Gaussian Process Regression를 활용한 Cube 실험체(D22 Mix1) 부식예측 모델 결과를 나타낸다. (a) Gaussian Process Regression 결과 table은 NDT parameter 조합에 따른 RMSE와 R^2를 나타내며, (b) 실제 부식율과 예측 부식율 비교 그래프는 HCP, Rp, P-wave, S-wave, ER의 조합에 대한 비교 그래프를 나타낸다.
- [그림 3-2] (a) Gaussian Process Regression 결과 table에서는 HCP, Rp, P-wave, S-wave, ER의 조합이 RMSE는 1.5121, 결정계수 R^2=0.94로 높은 결과값을 보여주었다. 이는 조합적으로 Multi-physics 비파괴검사를 활용하여 부식율을 예측하는 방법이 개별비파괴검사를 활용하는 것보다 더 효과적이라는 결과를 보여준다.

RMSE (Mix1D22)		
Combination	**RMSE**	**R^2**
HCP only	5.1193	0.34
ER only	2.4785	0.85
Rp only	5.0139	0.37
P-Wave only	6.7222	-0.13
S-Wave only	6.1296	0.06
HCP and Rp	5.0583	0.36
HCP and S-Wave	4.0268	0.59
HCP and P-Wave	6.1724	0.04
HCP and Rp and P-Wave	5.7883	0.16
HCP and Rp and S-Wave	5.1521	0.33
HCP and S-Wave and P-Wave	6.8946	-0.19
HCP and Rp and P-Wave and S-Wave	6.1822	0.04
HCP and Rp and P-Wave and S-Wave and ER	1.5121	0.94

(a) Gaussian Process Regression 결과 table



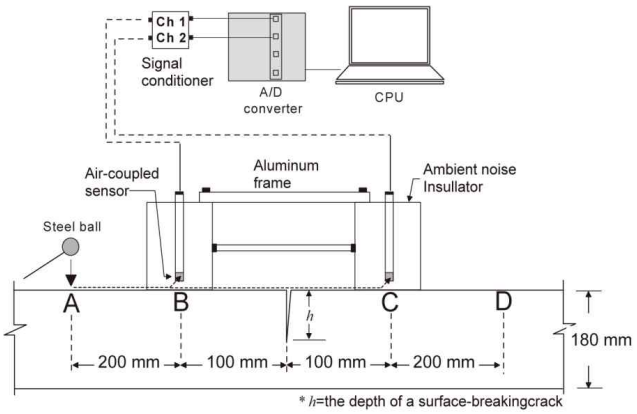
(b) 실제 부식율과 예측 부식율 비교 그래프

[그림 3-2] Cube 실험체(D22 Mix1) 부식예측 모델 결과

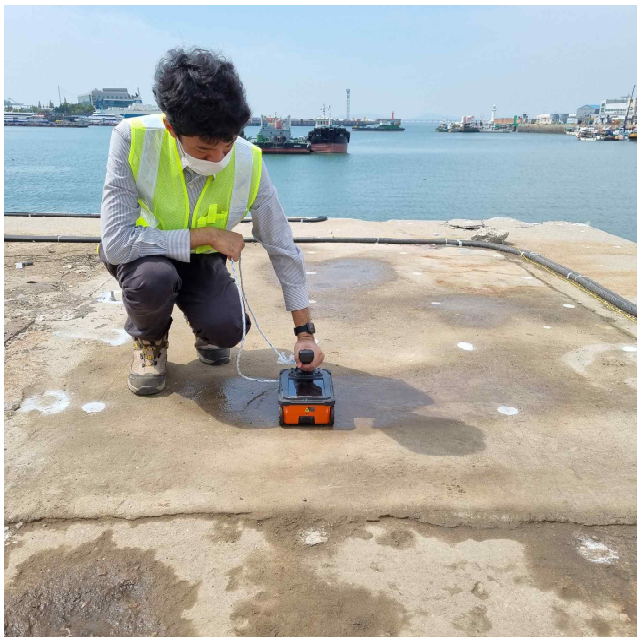
4. 향후 계획

① 다양한 구조부재(슬래브 및 전단벽 등)에 대한 비파괴 기법을 통한 다양한 인자 및 데이터베이스 확보

- 본 연구에서 실험한 부재는 보, 기둥의 부식에 따른 다양한 비파괴 기법을 통한 다양한 인자 및 데이터를 추출하고 분석하였다. 하지만 건축물의 구성은 보, 기둥, 슬래브 및 전단벽 등의 다양한 부재가 있다.
- 건축물에 대해 평가하기 위해서는 슬래브 및 전단벽의 부재의 데이터가 필요할 것으로 사료된다. 더 나아가 건축물뿐만 아니라 부식이 일어나기 쉬운 염해의 영향을 받는 해양구조물의 데이터베이스가 더욱 필요할 것으로 사료되며, 현재 [그림 4-1]과 같이 다양한 장소 및 다양한 부재의 데이터베이스를 구축하고 있다. 또한 복합적인 데이터를 활용하여 부재의 내구성 및 내진성능저감 정도를 파악하는데 활용하고자 한다.



(a) 슬라브 비파괴 장비 데이터 측정 방법



(b) 항만 GPR 비파괴 장비 데이터 측정

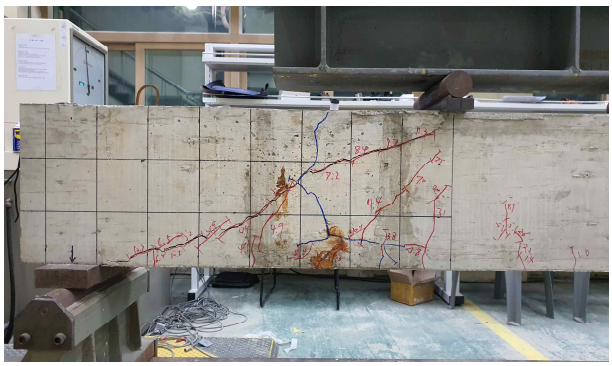
[그림 4-1] 다양한 구조부재에 대한 비파괴 검사

② 실제 콘크리트-철근 경계면의 파괴패턴에 따른 해석모델링 개발

- 경화한 콘크리트는 시멘트의 수화생성물인 수산화칼륨에 의해 PH가 12~13의 강알칼리성을 띠며 이 때문에 콘크리트중의 철근 표면에는 철의 수산화물의 보호피막으로 덮여 부식을 방지할 수 있다. 그러나 콘크리트의 중성화 또는 균열에 의해 내부의 철근이 부식 환경에 노출되어 부식이 시작되게 된다.
- 철근의 부피팽창으로 인한 팽창압은 주위의 콘크리트에 영향을 주어 콘크리트는 응력을 받게 된다. 이러한 팽창압이 증가할수록 콘크리트의 변형률은 증가하고 균열을 일으킬 정도로 인장변형률이 커지면 콘크리트에는 내부에서부터 균열이 발생하게 된다. 따라서 팽창압에 의해 가장 응력이 크게 작용하는 부위에 균열이 생성되며, 불규칙적으로 생성된다. [그림 4-2]에 실험전과 실험후의 균열도를 나태낸 그림이며, 부식전 생성된 균열에 의해 파괴 패턴이 각각 다르게 나타났다.



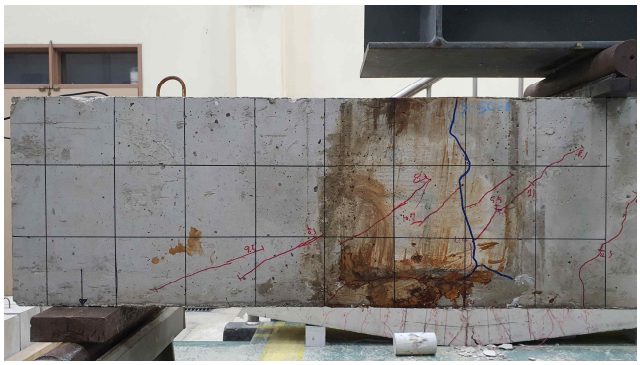
(a) 전단실험체(25%) 실험전 균열 생성



(b) 실험후 균열도



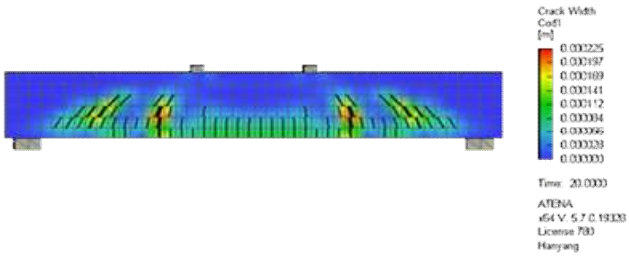
(c) 전단실험체(50%) 실험전 균열 생성



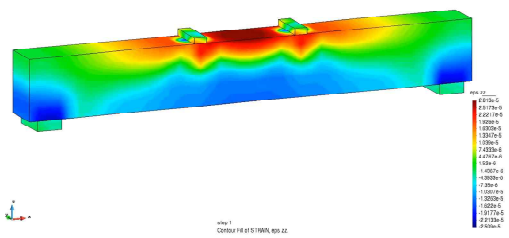
(d) 실험후 균열도

[그림 4-2] 균열에 따른 파괴패턴

- 철근 부식에 의한 피복의 균열발생을 예측하기 어려우며 균열에 따라 파괴 패턴이 변하는 해석이 필요할것으로 사료된다. 따라서 향후 아래 그림 3-4와 같이 ATENA 유한요소 프로그램을 이용하여 콘크리트-철근 경계면의 파괴 패턴에 따른 해석모델을 개발할 예정이다. (a)는 균열폭 및 균열 패턴에 대해 나타내었으며, (b)는 변위에따른 응력 분포도를 확인할 수 있다. 따라서 향후 연구에서 ATENA 프로그램을 이용하여 부식률에 따른 부착력 저감을 적용한 모델을 생성하고 해석을 통해 파괴패턴을 예측 가능할것으로 사료 된다.



(a)ATENA 해석 프로그램을 이용한 전단보 해석



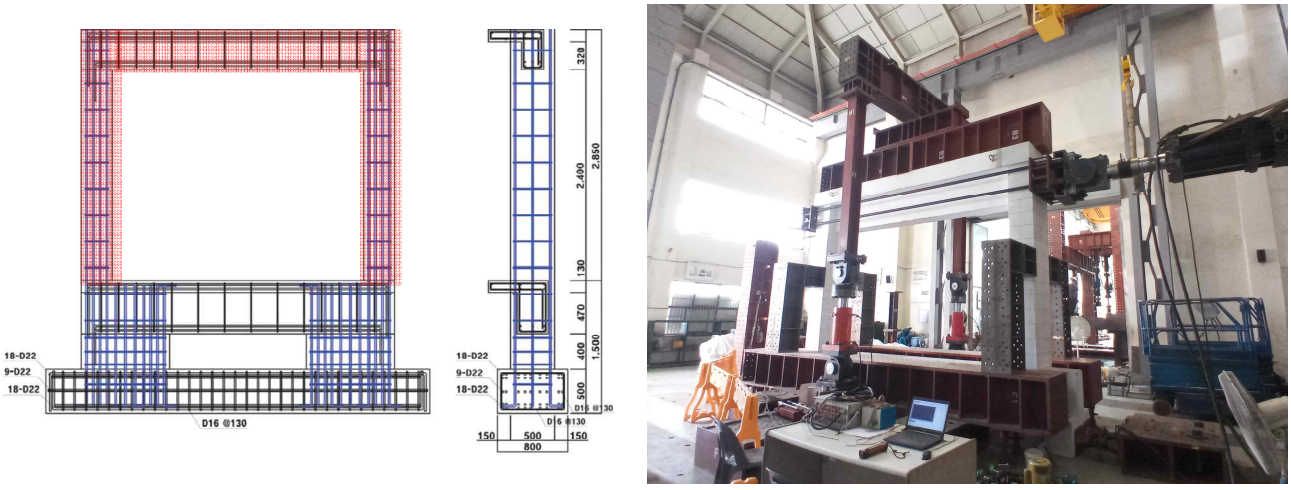
(b) 변위에 따른 응력 분포도(초기 1mm 변화)

[그림 4-3] ATENA 프로그램을 이용한 해석

③ 유사동적실험을 통하여 기둥 및 보의 성능검증 상태평가를 통하여 내진성능 평가 상용화

- 본 연구에서 부식률 적용 '다'형 건물 비선형 동적해석을 수행한바 있다. 해석결과에 따르면 부식이 진행됨에 따라 건물의 내진성능이 현저히 저감되어 Hachinohe.EW 150gal , 200gal에서 대규모 붕괴 수준으로 나타났다. 따라서 경년열화에 따른 내진성능 저감정도를 파악하고자 국내 비내진상세를 가지는 '다'형 건물의 R/C 학교 건물의 골조를 제작계획을 [그림 4-4]에 나타내었다. (a)의 골조 도면의 붉은 음영처리된 부분의 부식을 진행하고 (b)의 사진과 같이 유사동적 실험을 진행할 계획이다.
- 진동대실험은 구조물의 지진에 대한 거동을 알아보기 위해서 가장 효과적인 실험방법이 되겠으나, 진동대의 크기, 용량에 따라서 실험체의 무게와 크기에 대해 크게 제약을 받으므로 대부분 축소모델이 사용되고 있으며, 이에 따라 실제 구조물과의 상사성 문제가 발생하게 된다. 따라서 이러한 제약조건으로 인해 실물크기 건축구조물의 비탄성 거동을 평가하기 위해서 구조물의 변위 또는 하중으로 제어하는 준정

적실험이 많이 사용되고 있다. 한편, 유사동적실험은 진동대 실험과 준정적 실험의 장점만을 모아 Takanashi et al에 의해서 개발되었다. 유사동적실험은 실험과 수치적 해석이 서로 결합되어 실험이 진행되는 복합 실험기법이다. 유사동적실험은 컴퓨터에 의한 수치계산 부분과 실험체의 가력실험 부분으로부터 구성되며, 수치계산 부분은 가력 실험 부분에서 계측 된 특정 변형에 대한 실험체의 응답량, 입력 지진가속도 및 현 스텝의 응답량에 근거하여 수치적분을 이용하여 운동 방정식을 계산하며, 다음 스텝의 응답변형을 산정한다. 한편, 가력실험은 그 응답변형을 액츄에이터 등의 가력 장치에 의하여 실험체에 강제하며 그때의 변위이력을 측정한다. 이상의 조작을 반복하는 것으로 실험체에 유사적인 지진시의 응답변형을 강제하면서, 컴퓨터에 의하여 지진응답을 계산하여 대상 구조물의 지진응답을 산정한다.



(a) 일반 골조 부식 계획도 (b) 부식된 골조 실험체 유사동적 실험 계획도

[그림 4-4] 부식된 골조 실험 계획

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

○ 구조실험을 통한 상태평가 기반 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 기술개발(비파괴)
- 부식률에 따라 HCP 값이 -200 이하로 저하되는것으로 확인
- ER은 부식정도를 판단하기는 어려우나 콘크리트의 강도에 따라 영향이 있는것으로 판단됨
- 철근직경에 따른 UPV 변화는 부식률에 따라 파형 속도변화가 거의 없는 것을 확인
- EIS 등가회로의 전체 임피던스는 부식률에 따라 분극저항(Rp)값이 떨어지는 경향을 확인

○ 구조실험을 통한 상태평가 기반 철근콘크리트 건축물 내진성능평가 기술개발
- 부식률과 부착응력의 관계는 부식률에 따라 부착력이 감소하는 것을 확인
- 기존연구와 비교한 결과 부식률 3%이하의 경우 부착응력이 증가하는 경향이 나타나며, 부식률이 증가함에 따라 부착응력이 줄어드는 경향이 있음.
- 본 연구에서는 D10, D13철근에서 부착응력이 낮게 또는 증가하는 경향을 볼 수 있음.
- 부식이 진행되며 콘크리트와 철근사이에 부식 생성물들이 밀실히 쌓여 부착응력이 높아졌다고 판단됨

○ 콘크리트 건조상태(기건 및 표건)에 따른 정·동탄성계수 및 압축강도 비교
- 콘크리트 공시체 표건상태에서 P파속도는 절건상태에서 보다 8~15% 증가된 값을 나타내었고, 고강도 콘크리트 보다 보통 콘크리트에서 내부 포화수분이 P파속도 증가에 큰영향을 미쳤음.
- 반면 S파 소고도는 표건상태와 절건상태의 콘크리트에서 큰 변화가 없음.
- 습윤 및 건조상태 변화에 노출되어 있는 콘크리트에서, P파속도 측정으로 압축강도 평가 시 변동계수 증가 및 정확도를 줄여 현장평가도구로 활용 시 각별한 주의가 요구됨.

○ 철근의 부식율에 따른 철근-콘크리트 부착거동 예측을 위한 유한요소해석 모델 개발
- 실험 및 해석 모델에서 얻은 콘크리트 매입된 철근의 인발거동 결과를 비교하였음. FEM모델 결과는 최대 강도의 예측이 매우 유사함.

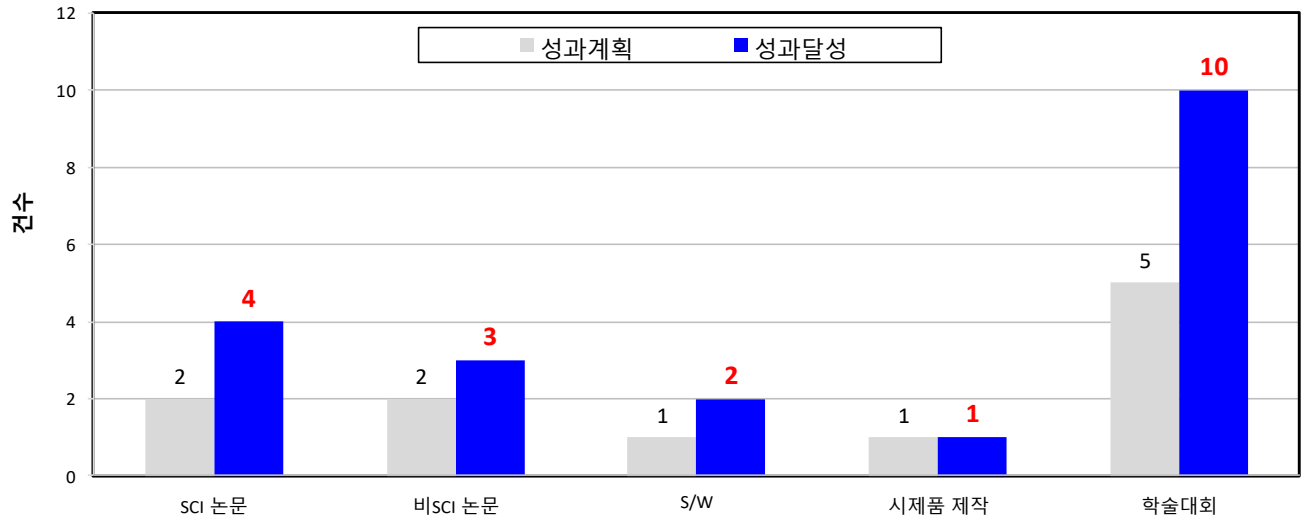
○ 철근콘크리트 보 매입된 철근 부식에 따른 복합열화 단계에서 재료물성과 Multi-physics 비파괴검사 인자의 상관관계 규명을 위한 실험적 연구 (부재수준 실험)
- 부식률 0%, 25%, 50%를 변수로 비선형 동적해석을 진행하였음. 지진파는 두 종류를 Hachinohe.ew, El Centro.ew 사용하였으며, 지진파의 크기를 100gal, 150gal, 200gal 각각 변수로 해석을 진행함
- Hachinohe.ew에서 부식이 진행된 건물의 경우 150gal부터 붕괴수준의 피해가 발생되는 것을 확인할 수 있었으며, 부식이 진행된 경우 보강이 필요할것으로 사료 됨.
- El Centro.ew의 경우 부식이 50% 진행된 건물의 경우 150gal부터 중규모 피해 200gal에서 붕괴수준의 피해가 발생 한 것으로 나타났으며, 부식진행 정도를 파악하고 보강이 필요하다고 사료됨.

○ 철근콘크리트 보 및 기둥에 매입된 철근 부식에 따른 복합열화 단계에서 재료물성과 Multi-physics 비파괴검사 인자의 상관관계 규명을 위한 실험적 연구 (부재수준 실험)
- 내진성능지표 중 대규모파괴에 해당하는 연성율 4까지의 휨 보 및 전단보의 하중-변위 그래프 결과 부식이 진행됨에 따라 최대 13% 감소하는 경향이 나타났으며, 전단실험체의 경우 최대내력은 미소하게 증가하나 변위가 감소하는 경향이 나타남.
- 에너지소산력은 휨 보의 경우 기준 실험체 대비 2 ~ -31% 저감되었으며, 전단보의 경우 2.6% 실험체를 제외한 모든 실험체의 에너지소산력이 감소함.
- 기둥 부재의 부식률에 따른 잔존 에너지성능은 휨 및 전단 기둥 모두 부식률이 진행됨에 따라 균열폭이 증대되는 것으로 나타났으며, 잔존에너지성능은 저감 되는 것으로 나타남.

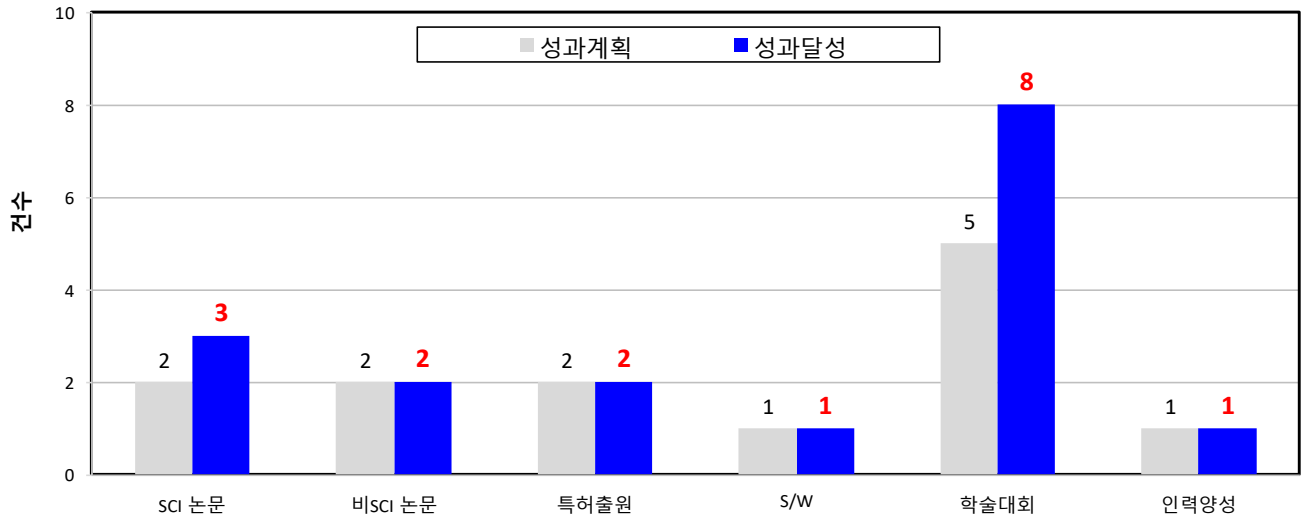
(2) 정량적 연구개발성과

○ 양적성과

- 1차년도
  - SCI논문 목표 2건 대비 4건, 비SCI논문 목표 2건 대비 2건 달성
  - 시제품 목표 1건 대비 1건, S/W등록 목표 1건 대비 2건 달성
  - 학술발표 목표 5건 대비 10건 달성

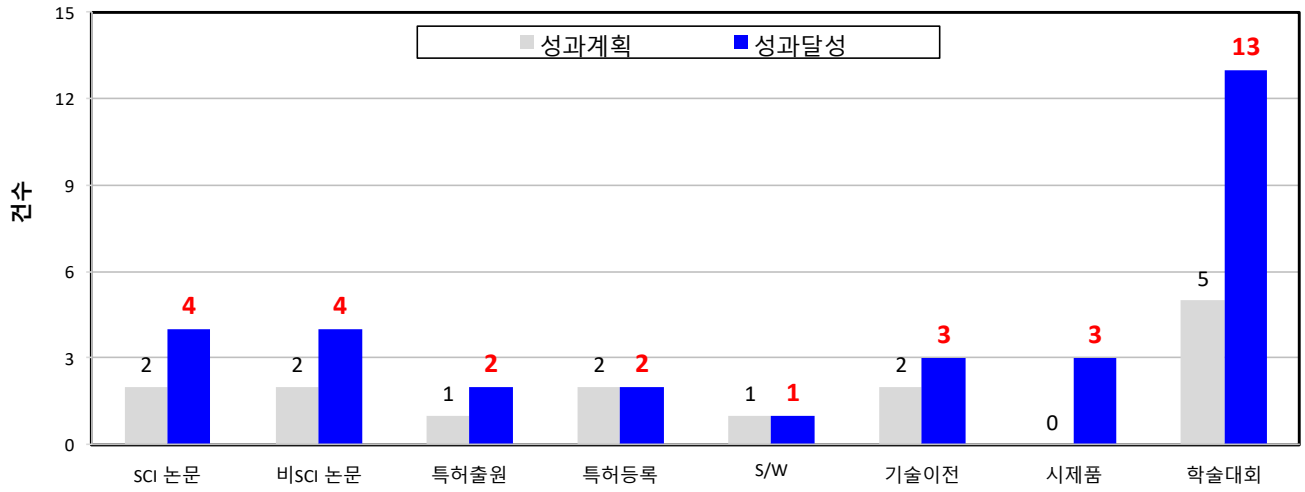


- 2차년도
  - 특허출원 목표 2건 대비 2건 달성
  - SCI논문 목표 2건 대비 3건, 비SCI논문 목표 2건 대비 2건 달성
  - S/W등록 목표 1건 대비 1건 달성
  - 학술발표 목표 5건 대비 8건 달성
  - 인력양성 목표 1건 대비 1건 달성



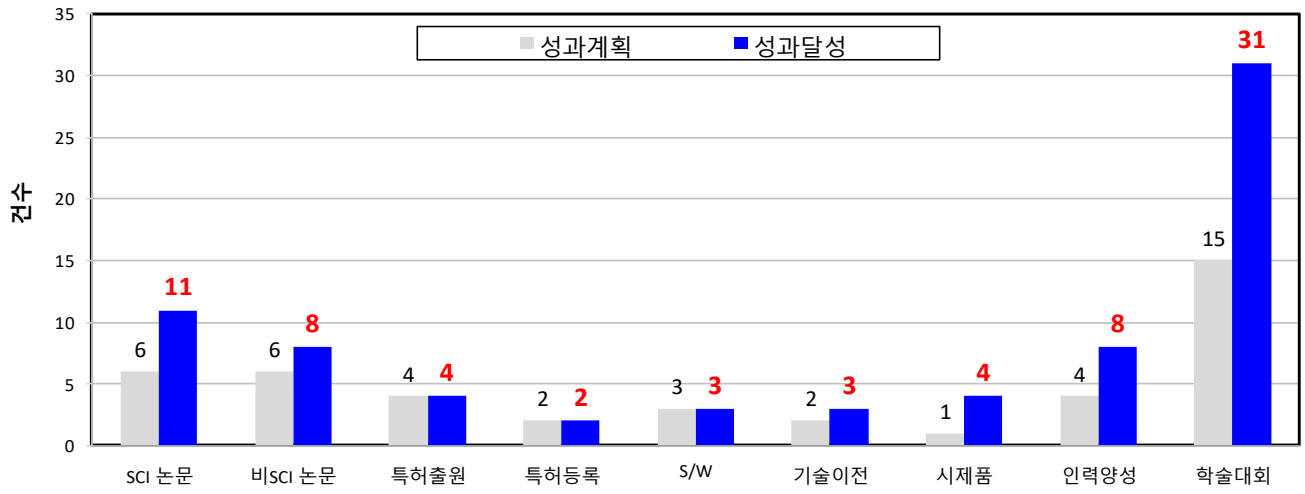
- 3차년도
  - 특허출원 목표 2건 대비 2건, 특허등록 목표 2건 대비 2건 달성
  - SCI논문 목표 2건 대비 4건, 비SCI논문 목표 2건 대비 4건 달성
  - S/W등록 목표 1건 대비 1건 달성
  - 학술발표 목표 5건 대비 13건 달성
  - 인력양성 목표 3건 대비 7건 달성

- 기술이전 목표 2건 대비 3건 달성
- 시제품 목표 0건 대비 3건 달성



○ 총괄

- 특허출원 목표 4건 대비 4건, 특허등록 목표 2건 대비 2건 달성
- SCI논문 목표 6건 대비 11건, 비SCI논문 목표 6건 대비 8건 달성
- 시제품 목표 1건 대비 4건, S/W등록 목표 3건 대비 3건 달성
- 학술발표 목표 15건 대비 31건 달성하고, 기술이전 목표 2건 대비 3건 달성
- 인력양성 목표 4건 대비 8건 달성



성과	계획	실적	비고
특허	출원 4건/ 등록 2건	출원 4건/ 등록 2건	달성
논문	SCI 6건/ 비SCI 6건	SCI 11건/ 비SCI 8건	초과달성
시제품	1건	4건	초과달성
S/W 등록	3건	3건	달성
학술발표	15건	31건	초과달성
인력양성	4건	8건	초과달성
기술이전	2건	3건	초과달성

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Experimental Study on the Structural Performance Degradation of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams	Advances in Civil Engineering	정주성/이강석	9562574	영국	HINDAWI LTD	SCIE	19.10.16	1687-8086	33%
2	Flexural Performance Evaluation of Novel Wide Long-Span Composite Beams Used to Construct Lower Parking Structures	Sustainability	최윤철/이강석	21(1)	스위스	MDPI	SCIE	19.12.21	2071-1050	50%
3	Evaluation of Delamination in Concrete by IE Testing Using Multi-Channel Elastic Wave Data	Sensors	기성훈	20(1)	스위스	MDPI	SCIE	2019.12.30	1424-8220	50%
4	A Methodology for Evaluation Seismic Capacity and Seismic Risk Assessment of Reinforced Concrete Buildings in Korea	Journal of Asian Architecture and Building Engineering	정주성/이강석	19(2)	일본	ARCHITECTURAL INST JAPAN	SCIE	20.02.02	1346-7581	33%
5	Pseudodynamic Testing of a Full-size Two-story Reinforced Concrete Frame Retrofitted with an H-Section Steel Frame Installed using a Length-adjustment Control Box	Bulletin of Earthquake Engineering	정주성/이강석	18	네덜란드	SPRINGER	SCIE	20.06.12	1570-761X	100%
6	Pseudodynamic testing of buildings retrofitted with external steel reinforced concrete frames to increase lateral strength for earthquake damage prevention	SHOCK AND VIBRATION	정주성/이강석	2020(3027094)	미국	HINDAWI LTD	SCIE	2020.07.16	1070-9622	100%
7	Interpretation of IE testing data from a fire-damaged reinforced concrete slab using discrete	Sensors	기성훈	20(20)	스위스	MDPI	SCIE	20.10.15	1424-8220	50%

	layered concrete damage model									
8	Seismic Strengthening Effects of Full-Size Reinforced Concrete Frame Retrofitted with Novel Concrete-Filled Tube Modular Frame by Pseudo-Dynamic Testing	APPLIED SCIENCES-BASEL	김진선/ 이강석	11(11)	스위스	MDPI	SCIE	21.05.26	2076-3417	50%
9	Nonlinear dynamic response of R/C buildings strengthened with novel stud-typed seismic control system using non-buckling slit damper	Engineering Structures	이강석/ 정주성	244	영국	ELSEVIER SCI LTD	SCIE	21.07.02	0141-0296	50%
10	Effect of the Geometrical Constraints to the Wenner Four-Point Electrical Resistivity Test of Reinforced Concrete Slabs	Sensors	Kevin Paolo V. Robles/ 기성훈	21(13)	스위스	MDPI	SCIE	21.07.05	1424-8220	50%
11	Prediction of compressive strength of partially saturated 3 concrete using machine learning methods: Neural Network, 4 Support Vector Machine and Gaussian Process Regression	Materials	기성훈		스위스	MDPI	SCIE	심사중	1996-1944	100%
12	국내 기존 철근콘크리트 건물의 내진성능평가법 및 지진위험도 추정	콘크리트학회 논문집	정원희/ 이강석	31(6)	대한민국	한국콘크리트학회	비SCI	19.08.31	1229-5515	100%
13	전단파 속도 측정을 통한 콘크리트 강도 및 탄성계수 평가: 재령 3일에서 28일 실험결과	한국철도학회논문집	기성훈/ 이진욱	23(2)	대한민국	한국철도학회	비SCI	20.02.29	1738-6225	50%
14	유사동적 실험에 의한 카고메트러스 삽입 콘크리트 패널 날개벽으로 내진보강 된 실물 2층 철근콘크리트 골조의 내진성능평가	콘크리트학회 논문집	김규익/ 이강석	32(2)	대한민국	한국콘크리트학회	비SCI	20.04.30	1229-5515	100%
15	유사동적실험에 의한 NISF 내부접합공법으로 내진보강 된 철근콘크리트 2층 골조의 내진성능평가	차세대융합기술학회논문지	채주원/ 최윤철	5(3)	대한민국	국제차세대융합기술학회	비SCI	21.06.30	2508-8270	50%
16	유사동적실험에 의한 탄성패드 접합 H형 철골프레임공법으	한국구조물진단유지관리공학회 논문집	김진선/ 이강석	25(4)	대한민국	한국구조물진단유지관리공학회	비SCI	21.08.31	2234-6937	50%

	로 보강 된 기존 중·저층 R/C 골조의 내진성능 평가									
17	콘크리트 건조상태에 따른 정·동탄성계수 및 압축강도 비교	콘크리트학회 논문집	이강석/ 기성훈	33(5)	대한민국	한국콘크리트학회	비SCI	21.10.31	1229-5515	100%
18	CSTF 내부접합공법으로 내진보강된 실물 철근콘크리트 골조의 내진성능 평가	대한건축학회논문집	강병훈/ 이강석	37(11)	대한민국	대한건축학회	비SCI	21.11.30	2733-6239	100%
19	전단파 토모그래피를 활용한 철도 콘크리트 궤도 슬래브 층분리 결함 평가	한국구조물진단유지관리공학회 논문집	기성훈		대한민국	한국구조물진단유지관리공학회	비SCI	심사중	2234-6937	100%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2019년도 한국구조물진단유지관리공학회 가을 학술발표회	유사동적실험에 의한 수직거동 마찰댐퍼로 보강된 2층 골조의 내진성능 평가	김규익	19.10.10	부산	대한민국
2	2019년도 한국구조물진단유지관리공학회 가을 학술발표회	간주형 좌굴방지 강재 슬릿댐퍼 시스템으로 내진보강된 철근콘크리트 골조의 내진성능평가	이복기	19.10.10	부산	대한민국
3	2019년도 한국구조물진단유지관리공학회 가을 학술발표회	전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 철근콘크리트 건물의 이력특성	정주성	19.10.10	부산	대한민국
4	2019년 대한건축학회 추계학술발표대회	전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 중 저층 철근콘크리트 건물의 복원력 특성 제안	정주성	19.10.25	대전	대한민국
5	2019년 대한건축학회 추계학술발표대회	브레이스형 좌굴방지 강재 슬릿댐퍼 시스템으로 내진보강된 철근콘크리트 건물의 내진성능평가	이복기	19.10.25	대전	대한민국
6	2019년도 한국콘크리트학회 가을 학술대회	전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 중저층 R/C 건물의 내진성능평가	정주성	19.11.07	변산	대한민국
7	2019년도 한국콘크리트학회 가을 학술대회	좌굴방지 강재 슬릿댐퍼를 적용한 R/C 골조의 내진성능평가	이복기	19.11.07	변산	대한민국
8	2019년도 한국콘크리트학회 가을 학술대회	유사동적실험에 의한 NF 내진보강법의 내진성능 검증	성조성	19.11.07	변산	대한민국
9	2019년도 한국콘크리트학회 가을 학술대회	수직응답 마찰댐퍼 시스템으로 보강된 2층 철근콘크리트 실물골조의 내진성능평가	김규익	19.11.08	변산	대한민국
10	2019년도 한국콘크리트학회 가을 학술대회	비선형동적해석에 의한 철근콘크리트 건물의 평면비정형에 따른 내진성능평가	정원희	19.11.08	변산	대한민국
11	2020 년도 한국콘크리트학회 봄 학술대회	전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 중·저층 철근콘크리트 건물의 내진특성 및 내진성능 평가	정주성	20.06.25	온라인	대한민국
12	2020 년도 한국콘크리트학회 봄 학술대회	유사동적실험에 의한 TSD 시스템으로 보강된 실물 2층 철근콘크리트 건물의 내진성능평가	강병훈	20.06.25	온라인	대한민국
13	2020 년도 한국콘크리트학회 봄 학술대회	유사동적실험에 의한 CFT-MF 내진보강공법을 적용한 철근콘크리트 골조의 내진성능평가	채주원	20.06.25	온라인	대한민국
14	2020년도 한국구조물진단유지관리공학회 봄 학술대회	유사동적실험에 의한 전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 R/C 건물의 내진특성 검증 및 내진성능평가법 제안	정주성	20.07.07	제주	대한민국
15	2020년 대한건축학회 봄 학술대회	유사동적실험에 의한 NF 내진보강법으로 보강된 2층 철근콘크리트 실물골조의	성조성	20.04.24	온라인	대한민국

		내진성능평가				
16	2020년 한국지진공학회 가을 학술대회	전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 다자유도 수평저항시스템의 내진성능평가	정주성	20.09.25	온라인	대한민국
17	2020 년도 한국콘크리트학회 가을 학술대회	전단 및 휨파괴형 부재가 혼합된 다자유도 수평저항시스템의 내진성능평가	정주성	20.11.03	대구	대한민국
18	2020 년도 한국콘크리트학회 가을 학술대회)	창호형 좌굴방지 강재슬릿댐퍼 공법으로 보강된 실물 2층 철근콘크리트골조의 내진성능 평가	이복기	20.11.03	대구	대한민국
19	2021 년도 한국콘크리트학회 봄 학술대회	경년열화된 R/C 전단보의 비파괴검사 기반 내진성능저감 평가를 위한 연구	정재원	21.05.12	여수 엑스포컨벤션센터	대한민국
20	2021 년도 구조물유지관리공학회 봄 학술대회	비파괴검사기반 경년열화 된 철근콘크리트 보의 내진성능평가를 위한 구조실험 및 해석적 연구	정재원	21.06.02	부산 파라다이스 호텔	대한민국
21	2021 년도 구조물유지관리공학회 봄 학술대회	철근부식정도에 따른 R/C보의 내진성능 저감계수에 관한 실험적 연구	강병훈	21.06.02	부산 파라다이스 호텔	대한민국
22	2021 년도 구조물유지관리공학회 봄 학술대회	유사동적 및 비선형동적해석에 의한 프리스트레싱 프레임공법으로 보강된 2층 R/C골조의 내진보강의 검증	마란천	21.06.02	부산 파라다이스 호텔	대한민국
23	2021 년도 구조물유지관리공학회 봄 학술대회	장주기 지진에 대한 철근콘크리트 건물의 비선형요구내력 스펙트럼에 관한 연구	민지영	21.06.02	부산 파라다이스 호텔	대한민국
24	2021 년도 구조물유지관리공학회 봄 학술대회	수평마찰댐퍼를 이용한 철근콘크리트 골조의 내진성능평가에 관한 연구	김진영	21.06.02	부산 파라다이스 호텔	대한민국
25	2021 년도 한국콘크리트학회 가을 학술대회	경년열화된 철근콘크리트 기둥의 비파괴검사 기반 내진성능저감 평가를 위한 연구	정재원	21.11.03	경주 화백컨벤션 센터	대한민국
26	2021 년도 구조물유지관리공학회 가을 학술대회	비선형동적해석에 의한 프리스트레싱 프레임공법으로 보강된 R/C건물의 내진보강효과의 평가	마란천	21.11.17	제주 휘닉스 섭지코지	대한민국
27	2021 년도 구조물유지관리공학회 가을 학술대회	철근부식정도에 따른 R/C보의 내진성능 저감계수에 관한 실험적 연구	강병훈	21.11.17	제주 휘닉스 섭지코지	대한민국
28	2021 년도 구조물유지관리공학회 가을 학술대회	장주기 지진에 대한 R/C 건물의 비선형 요구내력 스펙트럼 분석을 통한 건축물의 내진성능평가	민지영	21.11.17	제주 휘닉스 섭지코지	대한민국
29	2021 년도 대한건축학회 가을 학술대회	콘크리트 함수량이 초음파 속도 및 전기비저항에 미치는 영향	칸델라리아 마도린	21.10.27	여수엑스포 컨벤션센터	대한민국
30	2021 년도 한국콘크리트학회 가을 학술대회	콘크리트 공극률과 초음파 속도의 관계에 관한 연구	칸델라리아 마도린	21.11.17	제주 휘닉스 섭지코지	대한민국
31	2021 년도 한국콘크리트학회 가을 학술대회	부식정도에 따른 철근콘크리트 보의 기계적 거동에 대한 유한요소해석	조상현	21.11.17	제주 휘닉스 섭지코지	대한민국

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

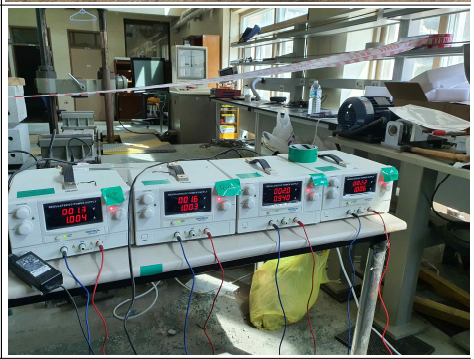
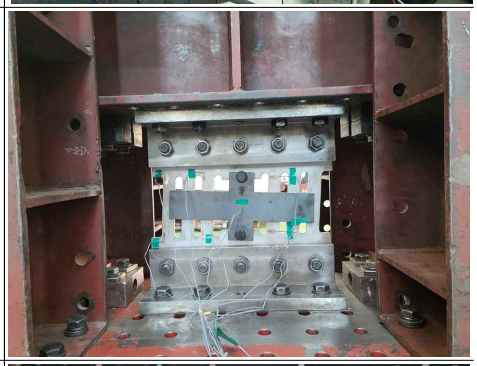
번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	출원	내진성능 개선을 위한 스테인레스강 적용 제진댐퍼 시스템	대한민국	한양대학교 에리카산학협력단 &한밭대학교 산학협력단	2020.10.14	10-2020-0132698				60%	
2	출원	내진성능 개선을 위한 스테인레스강 적용 제진댐퍼 시스템	대한민국	한양대학교 에리카산학협력단 &한밭대학교 산학협력단	2020.10.14	10-2020-0132674				60%	
3	출원	제진 댐퍼 시스템(GVA)	대한민국	한양대학교 에리카산학협력단	2021.03.02	10-2021-0027425				100%	
4	출원	아연도막을 산화전극으로 사용하는 전기화학 전착기구 및 이를 이용한 콘크리트 마이크로 크랙 보수 및 철근부식을 억제하는 방법	대한민국	동아대학교 산학협력단	2021.12.24	10-2021-0187536				100%	

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율
1	철근부식에 대한 내구성능 저감계수를 고려한 전단파괴형 콘크리트 건물의 비선형동적해석 프로그램	2019.10	한양대학교 에리카산학협력단	19.11.25	C-2019-035491	한양대학교 에리카산학협력단	100%
2	철근부식에 대한 내구성능 저감계수를 고려한 휨파괴형 콘크리트 건물의 비선형동적해석 프로그램	2019.10	한양대학교 에리카산학협력단	19.11.25	C-2019-035492	한양대학교 에리카산학협력단	100%
3	철근콘크리트 부재 부식전류 모니터링을 위한 프로그램	2020.06	동아대학교 산학협력단	20.11.11	C-2020-041027	동아대학교 산학협력단	100%
4	딥러닝(U-Net알고리즘) 활용한 균열 자동검출을 위한 이미지 프로세싱 프로그램	2021.10	동아대학교 산학협력단	등록중		동아대학교 산학협력단	100%

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	이용분야	사업화 소요 기간	제품 사진
1	다채널탄성파측정 센싱 장치	19.08.16	동아대학교	비파괴검사		
2	경년열화를 위한 전류인가 부식 촉진 시스템	21.04.01	한양대학교	철근콘크리트 부재 부식 실험		
3	좌굴방지 간주형 스테인레스 댐퍼 시스템	21.11.01	한양대학교	건축물 내진보강		
4	좌굴방지 창호형 스테인레스 댐퍼 시스템	21.11.01	한양대학교	건축물 내진보강		

□ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)
1	Multi-physics 비파괴 검사 기술 및 모니터링 기술 개발	21.11.12	**한양대학교**	**한양대학교**	장생포초등학교
2	Multi-physics 비파괴 검사 기술 및 모니터링 기술 개발	21.11.12	**한양대학교**	**한양대학교**	방어진초등학교

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)
1	특허양도	제진장치(10-2020-0132674호)에 관한 기술이전 건	㈜ 아이에스피건축사사무소	2021.11.19.	2021	15,000
2	특허양도	제진장치(10-2020-0132698호)에 관한 기술이전 건	㈜ 아이에스피건축사사무소	2021.11.19.	2021	15,000
3	노하우	철근부식에 대한 내구성능 저감계수를 고려한 철근콘크리트 건물의 비선형동적해석법 노하우	㈜ 제이텍구조엔지니어링	2021.11.22.	2021	매출액 3%

[사회적 성과]

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	공학박사	2020	√				√		√				
2	공학석사	2022		√			√		√				
3	공학석사	2022		√			√		√				
4	공학석사	2022		√				√	√				
5	공학석사	2022		√				√	√				
6	공학석사	2022		√				√	√				
7	공학석사	2021		√			√		√				
8	공학석사	2021		√				√	√				
9	공학석사	2022		√			√				√		

2) 목표 달성 수준

연 구 개 발 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
❍ 요소기술개발 - 기존 RC 건축물의 내진성능 평가 기술 분석 및 핵심기술 구축 - RC 부재 복합열화 평가의 최적화를 위한 Multi-physics 비파괴 검사법 개발 - Data fusion 알고리즘 개발을 위한 Multi-physics 비파괴 검사결과 해석기술 개발	❍ 1차 년도 성과 - 문헌조사를 통한 기존 RC 건축물내진성능평가 기술 조사 및 분석 완료 - 기존 RC 건축물 내진성능평가 기술 도출 및 구축 - 문헌조사를 통한 RC부재 열화 평가를 위한 개별 비파괴검사법 조사 - 복합열화 단계를 평가할 수 있는 개별 비파괴검사법 구성 - 열화단계에 따른 개별 비파괴 검사법 민감도 분석완료 - 재료의 역학적 특성과 개별 비파괴 검사 인자 상관관계 정립 완료	100%
❍ 핵심기술개발 - 구조실험을 통한 상태평가 기반 RC 건축물 내진성능평가 기술 개발 - Multi-physics 비파괴 검사 활용 구조물 성능 평가기술 개발 - Multi-physics 비파괴 검사 결과의 Data fusion 알고리즘 개발	❍ 2차 년도 성과 - RC부재(보) 가속열화실험과 구조실험을 통한 내진성능 평가기 기술 도출 및 개선 완료. - 상태평가 기반 융합 내진성능평가 기술개발 완료. - 콘크리트 재료 물성(압축강도, 탄성계수) 평가 모델 개발(GPR, IE, SASW, UPV) - 철근부식 상태 및 철근콘크리트 부착상태 평가 모델 개발(ER, GPR, USW) - Multi-physics 비파괴 검사 인자 모니터링(가속열화시험 중인 RC 부재 실험체) 완료 - 개별 비파괴 검사인자의 통계적 특성 분석(실험결과 및 문헌연구) 완료 - 머신러닝 기법을 활용한 이종데이터 융합 알고리즘 개발 및 실험결과와 비교를 통한 검증 (진행중 부분 완료)	100%
❍ 실용화 기술개발 - 테스트베드를 통한 Multi-physics 및 Data fusion 기반 RC 건축물 내진성능평가 기술 실용화 - 테스트베드를 통한 Multi-physics 비파괴 검사 기술 실용화 - 테스트베드를 통한 Data fusion 비파괴 기술 실용화	❍ 실용화 기술개발 - 테스트베드를 활용한 적용 및 피드백을 통한 평가법 정립 - 비파괴기술 기반 상태평가를 고려한 기존 RC 건축물 내진성능평가 기준(안) 개발 - 테스트베드를 통한 Multi-physics 비파괴기술의 성능평가 및 피드백을 통한 개선 - Multi-physics 비파괴 검사법의 표준매뉴얼 및 상태평가 기준개발 - 테스트베드를 통한 Data fusion 비파괴기술의 성능평가 및 피드백을 통한 개선 - Data fusion 기법 표준매뉴얼 및 상태평가 기준 개발	100%

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

❍ 기술적 기여도

- Multi-physics 및 Data fusion 기반 철근콘크리트 건축물의 경년열화에 따른 상태평가 및 내진성능평가를 위한 핵심인자 예측에 관한 글로벌 표준을 확립하고, 관련분야 글로벌 경쟁력확보에 기여함.
- 기존 철근콘크리트 건축물의 내구성능에 따른 손상정도 평가기술을 활용함으로써 다양한 연구 및 개발에 기여함.
- 학술적 연구 기반을 구축하고 우수한 인력을 양성함으로써 철근콘크리트 건축물의 비파괴 진단 기술을 세계적 수준으로 향상 시킬 수 있게 되며, 개발 기술을 타 학술분야에 적용함으로써 진단-유지관리 업무의 최적화 실현.
- 해외의 우수한 대학 및 연구소와의 국제 협력 사업을 통하여 콘크리트 구조물 진단 기술을 공동개발 하고 첨단의 정보를 공유함으로서 세계수준의 구조물진단 시스템 연구 및 개발의 선단에 설 수 있게 됨.

❍ 경제 및 산업적 기여도

- 저비용으로 건축구조물의 경년열화에 따른 성능저감 평가가 가능하기 때문에 기존 안전성 평가방법에 비해 경제적 비용저감이 가능함.
- 첨단 진단 및 해석 기술의 정립에 따른, 철근콘크리트 건축물의 상태에 따른 선별적 유지관리 계획 수립을 통한 보수/보강 업무의 최적화 및 사회적 비용의 획기적인 절감.
- 국외적으로도 독창성이 있는 연구로서 향후 국내외 내진설계분야에서 부가가치를 창출할 수 있을 것으로 기대.
- 제품 판매, 설치, 교육, 유지관리, 진단 및 해석 업무 수행을 포함한 새로운 비즈니스 모델 구축을 통한 관련 산업 부흥에 기여.
- 복합열화인자에 따른 철근콘크리트 구조물 경년열화 평가 및 상태평가 결과를 고려한 구조물 내진성능평가 기술의 국산화를 통한 글로벌 경쟁력 확보 및 관련 기술의 해외시장 수출에 따른 기술 선도국으로서의 지위 확보.

❍ 사회 및 정책적 기여도

- 사회 이슈화된 기존 노후화 건축물의 내진성능의 평가를 저비용, 고효율로 평가가 가능하기 때문에 사회적 이슈가 되는 노후화 건축물 해결이 가능
- 노후화 된 공공·민간시설의 경제적인 최적내진보강 채택으로 내진보강사업 활성화 가능.
- 안전을 최우선으로 하는 정부의 정책방향 지원.
- 공공시설의 맞춤형 최적 내진보강 가이드라인 개발을 통한 내진보강 및 내진보강공법 개발 활성화를 통한 지진재난에 대한 사회적 대비수준 향상.

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

❍ 철근콘크리트 건축물의 경년열화에 따른 상태평가를 고려한 구조물 최신 내진성능도구
- 기 사용중인 건축물에 적용 새로운 경년열화를 고려한 철근콘크리트 기존 건축물의 내진성능평가기술을 활용함으로써 노후화 기존 건축물의 내진성능의 평가를 효과적으로 수행 가능함.
- 기존 철근콘크리트 건물의 내진성능 평가법으로는 이루어지기 어렵거나 혹은 불가능했던 정량적인 경년열화를 고려한 내진성능 평가를 쉽게 평가할 수 있는 통합내진성능 평가법을 통하여, 새로운 내진성능 평가법의 구현을 위한 기반을 마련할 수 있을것으로 판단됨.
- 노후화 건축물 내진보강 공사비의 예측에 활용 가능함.
- 최적 내진공법을 내진등급, 건설연도, 보강공법 등을 고려하여 채택 가능함.

❍ 상태평가 기술응용 적용계획
- Multi-physics 기반 분석자료의 체계적인 DB 구축을 통한 향후 통계분석 및 인공지능기법을 활용한 고급분석 및 의사결정알고리즘 개발에 기본 자료로로 활용 가능함.
- Multi-physics 및 Data fusion 비파괴 기술의 확장을 통해 다양한 미래건축의 안전관리에 효과적 적용
- 일반 건축/토목 구조물의 내부 열화 및 배면 상태 평가의 효율성 및 결과의 정밀도 향상을 위한 기술지원이 가능할 것으로 사료됨.
- 로봇을 활용한 구조물 진단 기술을 학부 및 대학원의 교과과정에 반영하여 석 박사급의 고급인력을 양성하고 타 학문분야와의 연구 교류 활성화.

❍ 대학연구와 인력양성계획 (교육, 신진연구자 활용)
- 고급 측정 및 해석기술을 활용한 구조물 진단 기법을 학부 및 대학원의 교과과정에 반영하여 석 박사급의 고급인력 양성하고, 타 학문분야와의 연구 교류 촉진 계획.
- 기존 내진해석 시 경년열화에 따른 성능저감의 고려가 불가능했으나, 이를 향상시킴으로써 구조설계기술의 혁신이 가능해지며, 새로운 설계 패러다임의 창출이 가능하게 됨.
- Multi-physics 및 Data fusion을 활용한 진단 시스템 (장비, 소프트웨어)구축 및 상태평가 결과를 활용한 구조물 내진성능평가 전문가 양성으로 관련 분야 발전 가능.
- 첨단 건축 및 토목공학 기술과 로봇 및 IT기술을 융합한 구조물 진단법을 체계화함으로서 건설분야의 학문영역을 확대하고 학제 간 연구 시스템을 확립.

< 별첨 >

별첨 자료

1. 참고문헌

1. 한 범송 et al.콘크리트 강도와 철근 부식도에 따른 저층 구조물 철근콘크리트 기둥의 거동Behavior of Reinforce Concrete Columns by Concrete Strength and Degree of Rebar Corrosion. (2009).
2. Density, C., Method, M., Lan, C., Seung-ho, C. & In-kwan, P. 전기저항 및 전류밀도 측정법에 의한 철근 부식률 예측. (2021).
3. Hunkeler, F. Corrosion in reinforced concrete: Processes and mechanisms. Corrosion in Reinforced Concrete Structures(2005). doi:10.1533/9781845690434.1.
4. Miwa, T. Non-destructive and quantitative evaluation of rebar corrosion by a vibro-doppler radar method. Sensors21, (2021).
5. Wang, H. D., Zhou, L., Deng, P. H. & Sheng, W. C. Seismic performance of RC columns confined by low-prestressed steel belts. Hunan Daxue Xuebao/Journal Hunan Univ. Nat. Sci.41, 19–25 (2014).
6. Standards, P. 건축물 경년열화에 따른 안전성 평가기법 및 센서 모니터링 성능기준 개발. (2015).
7. Performance, S., Durability, C. & Style, U. R. L. A. P. A. 내구성능을 고려한 기둥부재의 내진성능에 관한 연구. (2016).
8. Woon, S. 멀티코어를 이용한 철근 부식에 따른 철근콘크리트골조의 내진성능 평가기법A Study on the Evaluation Method for Seismic Performance of Chloride-corroded Reinforced Concrete Frames using. 332–333.
9. Potential, C., Concrete, C., According, B. & Assessment, C. R. 부식 저항성 평가에 따른 균열 콘크리트 보의 부식전위 연구. 97–105 (2009).
10. Corrosion, S., Structures, D. C. & Style, U. R. L. A. P. A. 우리나라 콘크리트 구조물의 철근 부식 현황. (2001).
11. Sang-heon, S., Han-seung, L. & Je-woon, K. 인장주근의 부식위치 및 형태가 철근 콘크리트 보의 내력성상에 미치는 영향에 관한 연구. (2007).
12. Bars, H., Lan, C., Jong-ho, W. & Seung-ho, C. 주근 및 띠철근의 부식에 따른 철근콘크리트 기둥의 구조성능. (2004).
13. Hyoung, K. & Seon, H. 철근 부식의 정도에 따른RC 모멘트 골조의 내진성능 저하 기초 연구Relationship between the Corrosion of Rebar in RC Structure with the Decline of Capacity of resistance to Earthquake. 239–240.
14. 철근부식을 고려한R / C 보의 내구성능에 관한 연구A study for durability performance on R / C beam considering corrosion reinforcing bar. 693–694.
15. Gi, B., Seok, K., Seong, J., Chang, H. & Soo, L. K. 철근부식을 고려한 철근 콘크리트 기둥의 내구성능 저감에 관한 연구Durability Reduction of R / C Columns. (2018).
16. Won, D.-Y. Failure Behaviour and Shear Strength Equations of Reinforced Concrete Deep Beams. J. Korea Concr. Inst.25, 683–691 (2013).
17. Code, L. 철근콘크리트 보 부재의 철근부식 정도에 따른 내구성능저감에 관한 연구 전남대학교 대학원.
18. Kang-seok, L. & Young-seon, S. Sprayed FRP로 보강된 철근 콘크리트 전단기둥의 보강성능 평가. J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.11, 132–142 (2007).

19. Lee, S., Park, K., Park, K., You, Y. & Seo, D. 콘크리트구조물 중의 철근 부식 저감을 위한FRP Hybrid Bar의 적용성 연구A Study on the Application of FRP Hybrid Bar to Prevent Corrosion of Reinforcing Bar in Concrete Structure. (2019).
20. 한 범송 et al.콘크리트 강도와 철근 부식도에 따른 저층 구조물 철근콘크리트 기둥의 거동Behavior of Reinforce Concrete Columns by Concrete Strength and Degree of Rebar Corrosion. (2009).
21. Bennacer, M. A., Beroual, A., Kriker, A. & Demonceau, J. F. Analytical model for composite joints under sagging moment. Eng. Struct.101, 399–411 (2015).
22. Han, S. J. et al.Degradation of flexural strength in reinforced concrete members caused by steel corrosion. Constr. Build. Mater.54, 572–583 (2014).
23. Bechtoula, H., Kono, S. & Watanabe, F. Experimental and Analytical Investigations of Seismic Performance of Cantilever Reinforced Concrete Columns Under Varying Transverse and Axial Loads. J. Asian Archit. Build. Eng.4, 467–474 (2005).
24. Han, S. J., Lee, D., Yi, S. T. & Kim, K. S. Experimental shear tests of reinforced concrete beams with corroded longitudinal reinforcement. Struct. Concr.21, 1763–1776 (2020).
25. Habibi, S. Finite Element Modelling of Corrosion Damaged Reinforced Concrete Structures.
26. Mostafaei, H., Vecchio, F. J. & Kabeyasawa, T. Nonlinear displacement-based response prediction of reinforced concrete columns. Eng. Struct.30, 2436–2447 (2008).
27. Lee, K. S. Experimental study on sprayed frp system for strengthening reinforced concrete beams. J. Adv. Concr. Technol.10, 219–230 (2012).
28. 철근 콘크리트 부착 하중에 철근의 직경이 미치는 영향Effect of Rebar Size on Bond Strength of Reinforcement Concrete. 146946 (2002).
29. Condition, R., Strength, B. & Members, R. C. 철근의 부식정도와 부착강도에 대한 연구A Study on the Relationship between Degree of Rust Condition and Bond Strength in Reinforced Concrete Members. (1997).
30. Tae-young, K., Ji-sun, P., Jung-yoon, L. & Keung-hwanaik, K. 콘크리트 압축강도가GFRP 복합재료 보강근의 부착강도에 미치는 영향Effect of Compressive Strength of Concrete on the Bond Strength of Glass Fiber. (2005).
31. can.csa.s806-02. Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers (CAN/CSA S806-02). Csa S806-02177 (2009).
32. The Investigation on Bond characteristics of Reinforced Concrete.pdf.
33. Kim, J. S. & Park, J. H. An experiment on bond properties of reinforcements embedded in ultra high performance concrete. Mater. Sci. Forum857, 323–326 (2016).
34. Byoung-il, K. Effect of ECC for Resisting Propagation of Splitting Crack 철근 및GFRP 보강근의 부착계면에서 할렬균열의 성장억제에 대한ECC의 효과. (2021).

2. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료
[서식3] 별도 첨부

3. 세부 정량적 연구개발성과 증빙자료(총 연구개발기간 성과점검기준표 실적 증빙자료에 기 포함되어 있는 증빙자료 제외)

- 증빙자료집에 첨부

[뒷면지]

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 '**Multi-Physics 및 Data fusion 비파괴기술 기반 기존 철근콘크리트 건축물의 상태평가를 고려한 내진성능평가 실용화 기술 개발**' 연구개발과제 최종보고서이다.

2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.