

17CTAP-C
O9546-03

해양환경 콘크리트 구조물의
내구수명 예측 소프트웨어 개발

최종보고서

2018

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

Infrastructure R&D Report

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()
국토교통기술촉진연구사업 제○차 연도 최종보고서

R&D /
17CTAP-CO9546-03

해양환경 콘크리트 구조물의 내구수명 예측 소프트웨어 개발 최종보고서

2018. 8. 2.

주관연구기관 / 한양대학교 에리카 산학협력단
공동연구기관 / (주)세일콘

국토교통부

국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘해양환경 콘크리트 구조물의 내구수명 예측 소프트웨어 개발’(연구개발 기간 : 2015.06.19. ~ 2018.06.18.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2018. 08. 02.

주관연구기관명 : 한양대학교 에리카 산학협력단

(대표자) 좌용호 (인)



주관연구기관책임자: 안기용

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘해양환경 콘크리트 구조물의 내구수명 예측 소프트웨어 개발’(연구개발 기간 : 2015.06.19. ~ 2018.06.18.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2018. 08. 02.

공동연구기관명 : (주)세일콘

(대표자) 이상석



공동연구기관책임자: 정호섭

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C09546-03	해당 단계 연구 기간	2015.06.19. ~ 2018.06.18.	단계구분	3단계/3단계
연구사업명	중사업명	-			
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명	해양환경 콘크리트 구조물의 내구수명 예측 소프트웨어 개발			
	세부과제명	콘크리트 구조물의 내구수명 예측 소프트웨어 개발 혼합 시멘트를 사용한 콘크리트 내구성능 증진인자 정의			
연구책임자	안기용	해당단계 참여 연구원 수	총: 22명 내부: 14명 외부: 8명	해당단계 연구개발비	정부:275,000천원 기업:93,000천원 계:368,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 35명 내부: 20명 외부: 15명	총 연구개발비	정부:815,000천원 기업:273,000천원 계:1,088,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	한양대학교 에리카 산학협력단, (주)세일콘			참여기업명 RNA 산업	
				보고서 면수	111

요약

본 연구의 최종목표는 해양환경 콘크리트구조물의 내구수명 예측 소프트웨어 개발로써, 다음과 같은 세부목표를 기반으로 함

- 시멘트 경화체의 공극모델 기반 염소이온침투 모델 개발: FEM 기반 수치적 안정성을 갖는 대류-확산 모델
- 부식팽창에 따른 콘크리트 균열전파 모델 개발: 철근부식진행 모델의 부식팽창에 따른 콘크리트 균열발생 시점 결정
- 콘크리트 구조물의 내구수명 예측 통합 소프트웨어 개발: Electrochemical treatment를 이용한 방식 효과 예측 및 최적 적용 조건 도출

핵심성과인 내구수명 예측 소프트웨어 개발을 위해 해양환경에 노출된 콘크리트의 유해요소(염분, 수분, 온도)에 대한 침투과정을 모델화하고 철근주위 유해요소의 농도에 따른 부식진행 모델화, 그 이후 부식 팽창에 따른 콘크리트 균열전파 모델화를 완료하였음. 또한 이를 통해 콘크리트 구조물의 내구수명을 정의하고, 나아가 Electrochemical treatment 적용 모델을 개발하여 최적 보수적용 시기, 조건 등에 대한 정량적인 가이드라인을 제시하여, RC 구조물의 유지관리 방안을 마련함.

〈 요약 문 〉

연구의 목적 및 내용	본 연구의 최종목표는 해양환경 콘크리트구조물의 내구수명 예측 소프트웨어 개발로써, 다음과 같은 세부목표를 기반으로 함 ■ 시멘트 경화체의 공극모델 기반 염소이온침투 모델 개발: FEM 기반 수치적 안정성을 갖는 대류-확산 모델 ■ 부식팽창에 따른 콘크리트 균열전파 모델 개발: 철근부식진행 모델의 부식팽창에 따른 콘크리트 균열발생 시점 결정 ■ 콘크리트 구조물의 내구수명 예측 통합 소프트웨어 개발: Electrochemical treatment를 이용한 방식 효과 예측 및 최적 적용 조건 도출 핵심성과인 내구수명 예측 소프트웨어 개발을 위해 해양환경에 노출된 콘크리트의 유해요소(염분, 수분, 온도)에 대한 침투과정을 모델화하고 철근주위 유해요소의 농도에 따른 부식진행 모델화, 그 이후 부식 팽창에 따른 콘크리트 균열전파 모델화를 완료하였음. 또한 이를 통해 콘크리트 구조물의 내구수명을 정의하고, 나아가 Electrochemical treatment 적용 모델을 개발하여 최적 보수적용 시기, 조건 등에 대한 정량적인 가이드라인을 제시하여, RC 구조물의 유지관리 방안을 마련함				
연구개발성과	연구기간동안 다음과 같은 핵심연구성과와 각각의 단위성과물 개발을 완료함 ■ 콘크리트 구조물의 내구수명 예측 통합 소프트웨어 - 시멘트 경화체의 공극모델 기반 염소이온 침투 모델 - 부식팽창에 따른 콘크리트 균열전파 프로그램 - Electrochemical treatment 기반 보수효과 예측 프로그램 ■ 실내시험을 통한 혼합 시멘트의 공극모델 변수 도출 - 혼합시멘트를 사용한 경우의 내구성 증진 효과 검증 데이터 ■ 기상관측 데이터 확보를 통한 모델의 환경인자 설정 - 실 데이터를 활용한 인자별 분포함수 양적 연구 성과로는 SCI(E) 6편, 학술대회 발표 6건, S/W 등록 5건의 목표 연구개발성과 중 3년의 연구 기간 동안 SCI(E) 6편, 학술활동 11건 및 S/W 등록 4건을 달성하여, 양적 성과에 있어 100%의 달성도를 확보하였음				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	본 연구를 통해 개발된 콘크리트 구조물의 내구수명 예측 통합 소프트웨어는 실제 염해 환경(해양, 제설제 등)에 노출된 콘크리트 구조물(항만, 교량, 도로 등)에 염해로 인한 내구성능 저하를 예측하고, 이를 기반으로 구조물의 잔존 수명 평가에 활용 될 수 있음. 또한 콘크리트 내 철근에 염해로 인한 부식 발생 시점 및 균열 발생 시점의 예측이 가능하며, 그에 따라 철근 콘크리트 구조물의 내구 상태에 대한 정확한 진단이 가능함 개발 프로그램은 콘크리트 내 부식 발생 저감 및 억제를 위한 Electrochemical treatment의 최적 방식 조건 제시가 가능하여, 철근 콘크리트 구조물의 내구수명 증진과 보수비용 절감 효과를 가져다 줄 것으로 예상됨. 따라서 개발 프로그램을 활용한 철근 콘크리트 구조물의 유지관리는 사회간접자본에 대한 국민의 신뢰성을 증진 시켜줄 것으로 기대됨 궁극적으로 이러한 기술력을 바탕으로 국제 표준화 기관 (ISO) 및 관련 전문 학술활동 단체 (Rilem ETC, ACI outreach committee)와의 협업을 통해 연구 성과에 대한 제도화 기반을 마련하고 실용화를 도모함. 지속적인 현장 적용을 통해 개발 프로그램의 데이터베이스를 확장한다면 프로그램 예측 결과의 정확성이 증진되어, 개발 프로그램의 시장 점유율 확보를 통해 경제적 이윤 창출이 가능 할 것으로 예상됨				
핵심어 (5개 이내)	내구성	소프트웨어	철근 부식	수명 예측	전기화학적 처리

< SUMMARY >

Purpose & Contents	Final objective of the this research is to devise service life prediction software package for the concrete structure exposed to a marine environment and sub-objectives are as followed: ▪ Chloride ion penetration modeling based on hardened cement pore model: FEM based convection-diffusion model which has numerical stability ▪ Crack propagation model caused by rust expansion: determine the time of concrete crack during rust progress in reinforcement model caused by rust expansion ▪ Development of software package for predicting service life of concrete structure exposed to a marine environment: prediction of anti-corrosive effect and optimization application condition using electrochemical treatment Modeling of penetration progress of deleterious elements (chloride, moisture, temperature), modeling of corrosion process regarding concentration of deleterious elements and modeling concrete crack propagation resulted from rust expansion which were key accomplishment of the software package development for service life prediction. In addition, maintenance method for reinforced concrete structure was established by using them for defining service life where electrochemical treatment application model provided quantitative guideline for optimum maintenance work period and condition.				
Results	Following key R & D achievements and accomplishment at each unit level was performed and completed during the term of R & D: ▪ Software package of service life prediction of concrete structure - Modeling of chloride ion penetration based on pore model of hardened cement - Modeling of crack propagation program resulted from rust expansion - Maintenance effect prediction program based on electrochemical treatment ▪ Deriving input variables for pore model from in-lab testing - Validation data set of durability enhancement effect where combined cement was used ▪ Deriving environmental variables from meteorological observation data - distribution function in sort of variables using actual data Quantitative R & D achievements were fulfilled 100% by publishing 6 SCI(E) papers, 11 presentations in academic symposium, and 4 S/W registration during 3 years of R & D term. The objectives set were: SCI(E) paper- 6, academic presentation- 6, and S/W register- 5.				
Expected Contribution	The S/W package developed within this research is applicable to practical use for prediction of chloride induced deterioration (marine, deicer) of concrete structures (port, bridge, road) and assessment on service life of the structures. Corrosion initiation and time of crack caused by chloride attack is also predictable, and precise diagnosis on durability of the structure is possible accordingly. Developed program can provide optimized condition of electrochemical treatment for reduction or/and inhibition of corrosion, therefore improvement of service life of RC structure and benefits on cost efficiency are expected. As a result, application of the developed program would give people higher reliability on SOC. Ultimately, commercialization of the program is expected by establishing system and specifications through co-operation with ISO (International Organization for Standardization) or related expert institutes (Rilem ETC, ACI outreach committee). If data base is updated by continuous field application, prediction would be more accurate, then economic profit will be created as it is more compatible in market.				
Keywords	durability	programming	corrosion of steel	prediction of service life	Electrochemical treatment

< Contents >

1. Outline of the research project	7
2. State of the art in the technology development	13
3. Contents and results of the research	14
4. Achievement and contributions in related area	98
5. Application plan of the R&D results	101
6. Scientific and technological informations obtained in the research ·	104
7. Security level for research products ...	105
8. Registered facility and apparatus for research on NTIS	106
9. Safety action at laboratory in the research process	107
10. Representative results of the research project	108
11. Etc.	109
12. References	110

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	7
2. 국내외 기술 개발 현황	13
3. 연구 수행 내용 및 성과	14
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	98
5. 연구개발성과의 활용 계획	101
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	104
7. 연구개발성과의 보안등급	105
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	106
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	107
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	108
11. 기타 사항	109
12. 참고 문헌	110

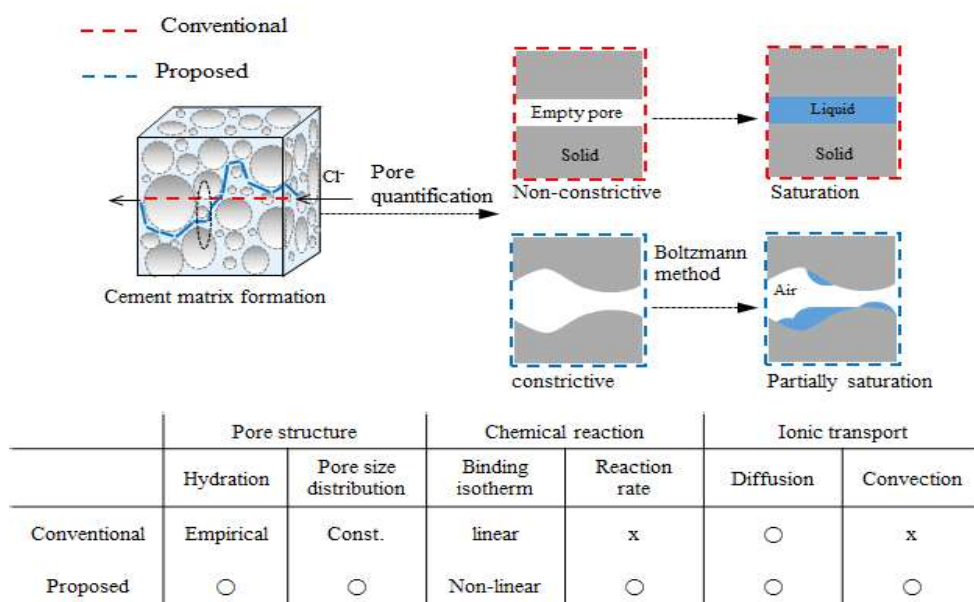
제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

본 연구과제의 핵심성과 내용인 내구수명 예측 소프트웨어 개발에 있어, 주관기관(한양대학교)의 과제 진행방향은 해양환경에 노출된 콘크리트의 유해요소(염분, 수분, 온도)에 대한 침투과정을 모델화 하며, 철근주위 유해요소의 농도에 따른 부식진행 및 그 이후 부식 팽창에 따른 콘크리트 균열전파 모델화를 통해 콘크리트 구조물의 사용기간을 정의하고, 보수기법으로 Electrochemical treatment를 적용한 모델을 통해 보수적용 시기, 조건 등에 대한 정량적인 가이드라인 제시를 목적하였다.

가. 시멘트 경화체의 공극모델 기반 염소이온침투 모델 정립

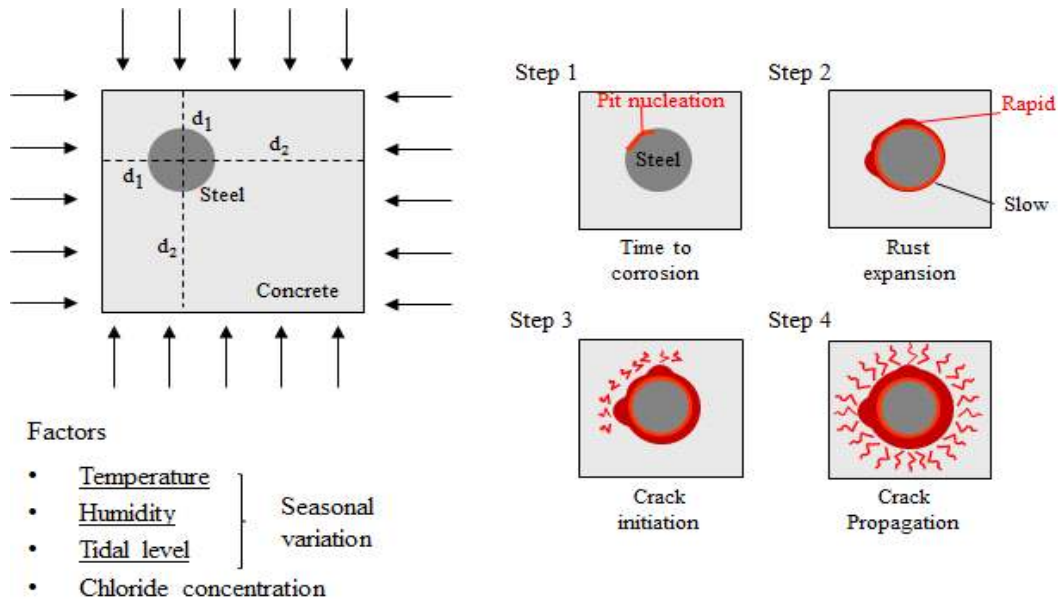
- 콘크리트의 기본 요소가 되는 시멘트의 수화반응을 화학적 반응 메커니즘을 통해 모의하고, 동시에 염소이온의 시간 의존적 침투과정에 적용 및 모델화
- 기존의 내구성 해석모델에 필연적으로 적용되는 시간 의존적 변수의 정의는 중요한 사항이며, 이에 대해 대부분 경험상수 및 경험식에 의존하는 경우가 대부분임
- 이에 대해, 본 연구에서는 시멘트 배합/온도/클링커 성분에 영향을 받는 시멘트 구조체 형성 과정을 모의하여, 시간에 따른 공극구조 변화를 시뮬레이션 함으로써, 시멘트 경화체 내 Traverse 기반 유효 침투경로를 구함
- 이를 통해, FEM 기반 구조물 노출 상황별 확산 (침지부), 대류-확산(간만대) 및 압침(심해부) 지배식을 결정하고 인자별(염분농도, 온도, 습도)에 대한 투과성(확산계수, 열전달계수, 수분확산계수)을 결정함으로써 공극모델에서 얻은 모델변수를 적용, 최종적으로 염분침투모델 정립
- 이로써, 시멘트 클링커 성분/콘크리트 배합조건/구조물의 노출환경을 모델화, 실제 현장에서 발생하는 다양한 조건들을 수렴할 수 있는 모델 개발을 목표로 하며, 다음 모식도와 같이 모델과정을 표현함



<그림 1.1> 기존모델 대비 제안 염분침투모델의 적용범위

나. 부식팽창에 따른 콘크리트 균열전파 모델 정립

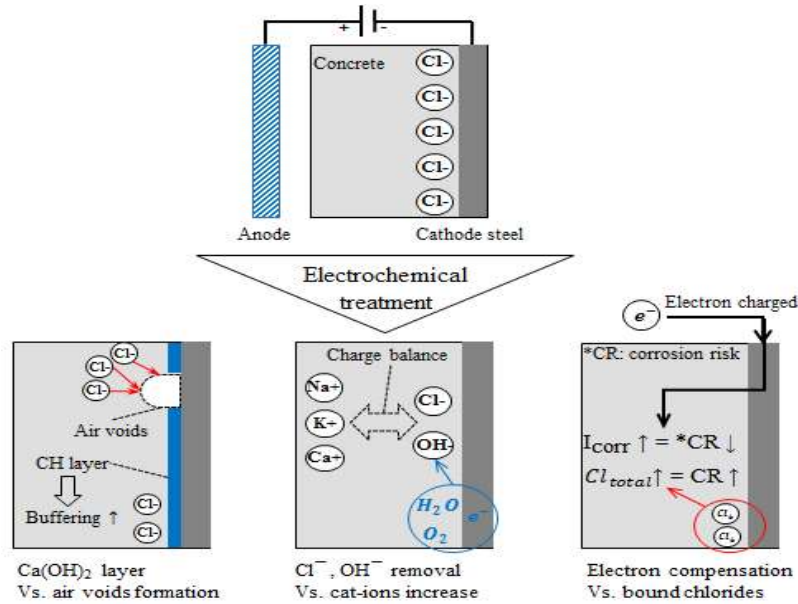
- 본 연구에서는 확률론적 접근법을 통해 계절변동을 고려한 유해인자 경계조건 모델화, 전 단계에 완성된 염분침투모델에 적용에 따른 철근 부식개시 시점의 정확성 향상을 목표로 함
- 부식개시 시점 이후, 발생하는 철근의 부식팽창률과 시간의존변수(온도, 습도, 염계염화물 농도, 콘크리트 움저항)와의 상관성 도출에 따른 콘크리트 응력발생 단계까지의 부식팽창모델 개발
- 철근주위 계면 내 부식생성물충진 완료 후 발생하는 콘크리트 강성저하를 고려한 FEM 기반 콘크리트 균열전파 모델 개발에 따른 잔존수명 예측
- 또한, 실제 구조물에서 측정된 부식인자의 침투속도 및 내구수명에 관한 자료와 관련 연구를 통해 얻어진 데이터들의 Neural network이용 조합하여, Unified 된 모델 구현
- 전 단계 완성된 염분침투모델과의 통합화에 따른 철근부식의 진행과정을 모델화함으로써 다음 모식도의 설명과 같은, 유해인자 침투에 따른 철근부식진행에 의한 구조물의 잔존수명 산출



<그림 1.2> 환경인자에 따른 부식팽창 및 콘크리트 균열전파 모델

다. Electrochemical treatment 기반 보수효과 예측 모델 개발

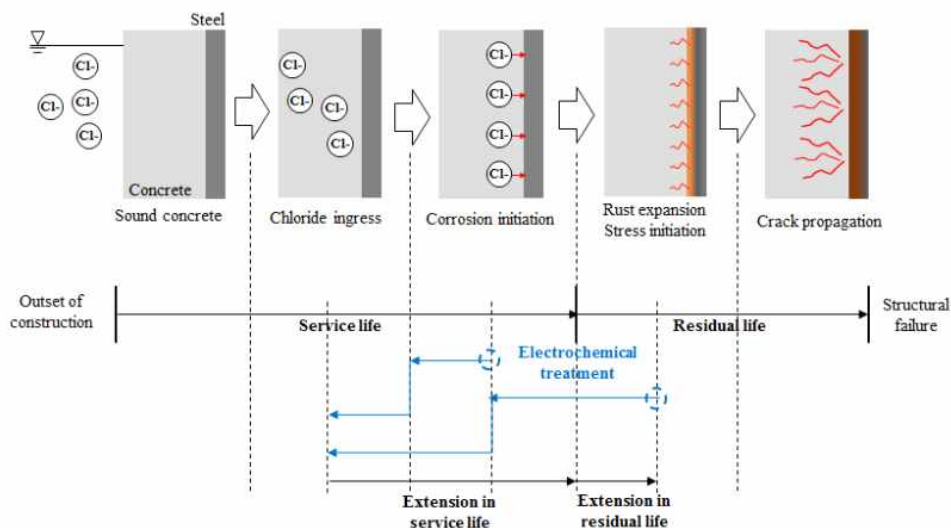
- 기존 내구성 해석관련 연구의 최종 단계는 유해인자에 따른 철근부식의 위험도 예측에 국한되며, 보수기법 적용에 대한 모델화 부재. 또한, 철근부식 개시 시점 전후 및 부식 진행 단계에 대한 Electrochemical treatment의 적용에 관한 모델 관련 연구 미흡
- 본 연구에서는 다음 모식도와 같이, 전압 차에 따른 콘크리트 내 이온들의 이동현상을 고려, 철근주위 염소이온 및 수산화 이온의 이탈현상 모델화를 통한 방식효과 검증 및 보수 시 전류량에 따른 콘크리트 내 철근 부식밀도 증가 및 염소이온의 철근 주변 시멘트 수화물 내 흡착정도를 고려한 모델의 방식효과 검증



<그림 1.3> Electrochemical treatment에 대한 보수증진 효과

라. 콘크리트 구조물의 내구수명 예측 통합 소프트웨어

- 본 연구에서는 건설된 구조물 혹은 건설할 구조물의 내구연한을 예측하여, 현 단계에서 최적인 Electrochemical treatment를 수행하는 조건들을 제시하며, 이로 인한 구조물의 내구성 증진을 예측하고자 함
- Neural network 알고리즘을 이용해 기존 시험 데이터의 불확실성 분포특성에 대한 보안을 통해 모델의 적합성 검증 및 Unified 모델 구현
- 프로그램 등록을 통한 실무자들의 모델이용 환경 제공에 따른 다양한 환경을 반영한 모델의 적합성 평가 및 프로그램 실용성 향상. 또한 GUI 기반 사용자 환경 구축을 통해 내구성 진단 및 보수효율 검증 모델의 통합 소프트웨어 개발을 목표로 설정. 이와 같은 구조물의 노후화/보강화에 따른 생애주기기반 내구성 예측 모델은 다음 그림과 같은 시스템을 가짐



<그림 1.4> 구조물의 생애주기형 내구수명 예측 통합 소프트웨어 적용과정

2. 연구개발의 필요성

기존의 내구성 예측 프로그램(Life 365, Duracrete 등)은 주로 내구성 해석을 통한 구조물의 철근 부식 개시 시점의 산정을 중점적으로 고려하고 있으며 특히 염분의 침투를 해석하여 수명기간으로 산출하는 방식을 택하고 있다. 오랜 기간 축적되어온 연구 및 실험 데이터를 바탕으로 정확한 유해인자의 침투 매커니즘에 대한 해석을 하고 있으나, 콘크리트의 부분 포화된 공극 상태를 고려하였을 때 실 구조물의 침투환경에 대한 완벽한 모사를 하지 못하고 있는 것으로 판단된다. 또한 염소이온이 침투하여 철근 깊이에서의 임계염화물량에 도달하는 시점을 내구수명으로 정의함으로써, 철근 부식 개시 이후 발생하는 부식진행 정도 및 콘크리트의 균열 전파 현상을 무시함으로써, 구조물의 잔존 수명에 대한 고려가 부재한 실정이다.

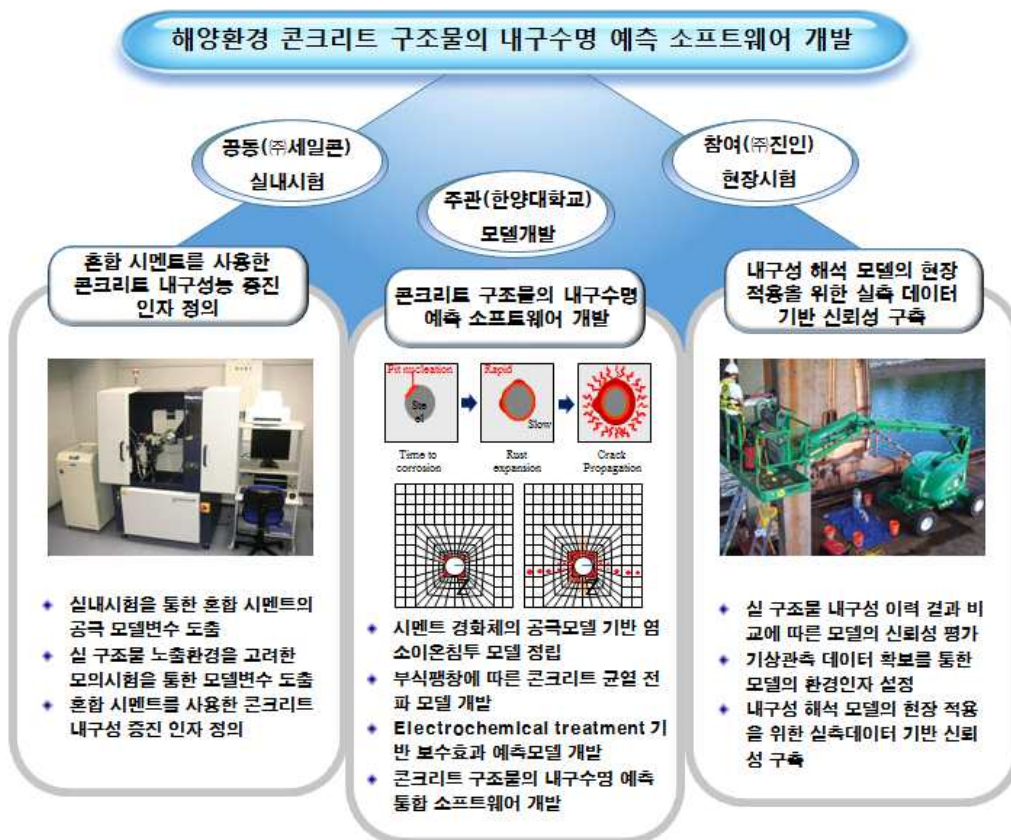
연번	소프트웨어	관련 내용 및 적용가능 범위	한계점
1	Life 365	- 기상관측 데이터를 통한 지역에 따른 연간 온도변화의 데이터베이스 - 지역/구조물의 종류에 따른 표면염화물 프로파일을 통한 초기 조건 - 수명시간을 부식 개시시점과 부식진행 기간에 대한 통합 기간으로 결정 - 이산화탄소 및 염소이온의 콘크리트 침투과정에 대한 기간 산출 고려	- 콘크리트의 시간 의존성/초기조건에 대한 간소화 - 환경인자(온도, 습도)에 대한 장기적 거동 고려 부재 - 콘크리트 내 삼성(기체, 액체, 고체)에 대한 설정 부재 - 염분이온의 침투과정 중 발생하는 온도 및 수분 전달과정 부재
2	Ducom	- 온도/습도의 초기조건 설정에 따른 시멘트 수화발현 - 시멘트의 수화 반응에 있어, Single particle expansion 모델 적용 - Gel 공극(흡착수, air) 고려 - 시멘트 수화도 및 물-시멘트 비에 따른 공극분포도	- 시멘트 입자사이즈 별 반응속도 영향성(integrated kinetic)의 미반응에 따른 모의결과 현실성 저하 - 시멘트 경화체 모의에 따른 유효공극, 투수성 도출에 대한 알고리즘 부재 - 염분침투의 확산-대류현상에 대한 수분/온도의 불분명한 상호 의존성

3	Duracrete	- 염분침투의 이동과정은 확산으로 고려 - 시간 의존적 경험식의 확산계수 - 재료 특성 별, 시멘트 양에 따른 표면염소이온, 고정확산계수 사용 - 부식개시 확률에 대한 몬테카를로시뮬레이션 적용	- 염분의 침투과정 중 발생하는 온도/습도의 전달과정 고려 부재 - 염분의 침투과정을 확산만으로 해석, 또한 염분의 흡착성의 모델화 부재 - 시간 의존적 확산계수의 간소화에 따른 신뢰성 저하 - 시멘트의 재료 특성에 따른 공극구조 특성 고려 부재
---	-----------	--	--

3. 연구개발 범위

가. 최종목표

본 연구의 최종목표는 “해양환경 콘크리트 구조물의 내구수명 예측 소프트웨어 개발”이며, 이는 기존의 내구수명 평가 모델과 달리 보수기법(Electrochemical treatment)을 모델화하여, 최적 보수시기 산정 및 이로 인한 구조물의 내구성 증진 효과를 검증하는 프로그램 개발에 최종목표를 산정하였다. 본 연구를 수행하기에 앞서, 다음과 같은 세부연구목표를 바탕으로, 최종목표를 달성하였다.



<그림 1.5> 세부연구목표를 통한 최종목표 달성 흐름도

나. 연구내용의 범위

본 연구과제는 해양환경 콘크리트 구조물의 내구성 평가 및 보수효율 검증에 관한 소프트웨어 개발이며, 이에 대한 연구범위 설정은 다양한 영향인자가 존재하므로 콘크리트의 재료적 특성 및 노출환경에 따라 다음과 같이 제한하였다.

1) 콘크리트 구성

보통 포틀랜드 시멘트 외에 재료적으로 포졸란계 혼화재를 사용한 혼합콘크리트로 국한. 콘크리트 성능향상을 위한 특수재료 (예: Steel-fibre, 내화재 등)의 사용은 본 연구범위에서 제외하며, 철근의 경우 실제 구조물에서 사용하는 연강으로 국한 (Ni, Cr 도금강이나 특수강은 제외)

2) 내구성 인자 및 노출환경 구성

노출환경에 따른 인자는 부식인자의 침투 Driving force를 고려하여 일반 확산 (침지대), 대류 (간만대) 및 압침 (심해)으로 구분하고 위의 3가지 침투메커니즘은 모두 고려함. 또한 부식인자의 침투 및 부식팽창 및 콘크리트 균열 모델에 있어 외부조건으로는 온도 및 습도의 변화 및 노출염도를 인자로 산정. 즉, 노출환경의 혹독함에 따라 부식의 위험성을 달리 할 수 있으므로 실제 프로그램 개발의 기초배경으로 활용 될 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 환경의 제반조건을 모두 반영하기 위해 부식인자의 침투조건을 확산에 대류, 압침의 3가지 조건의 혼합형으로 모델을 구성함으로써 환경의 혹독함에 따른 부식위험성을 모두 포함하고 있다. 뿐만 아니라 콘크리트의 배합조건 및 노출환경의 대기조건 (온도, 습도)에 따른 부식의 위험성을 모델로 정립하며, 이에 따른 부식의 전진도 및 콘크리트의 물성 (균열)을 포함한 전생애적인 해석기반 실험적 연구를 포함한다. 또한, 이를 기반으로 보수보강의 전 생애주기 과정에 관한 모델링을 위해 Electrochemical treatment에 따른 수명연장 및 내구성능 향상을 포함하고 있다.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

국내의 경우, 철근부식에 따른 콘크리트 구조물의 열화현상의 개별 요소 혹은 복합적인 연구에 대해서는 활발한 연구가 진행되고 있다. 하지만 철근부식에 대한 요소들을 유기적으로 연계하여 통합한 RC 구조물의 성능평가 시스템 모듈 및 수명예측 시스템 구축에 관해서는 시도 자체가 전무한 실정이다. 철근 부식 방지를 위한 내구성 설계 규정을 살펴보면 콘크리트 학회에서 발간한 콘크리트표준 시방서 내 철근 콘크리트 구조물의 임계염화물량을 1.6 kg/m^3 으로 규정하고 있다. 본 규정은 일본 JCI 규정에 바탕을 두고 있으며, 철근 부식에 대한 내구성 해석에 염분 침투 외 영향 인자는 전혀 고려하지 않고 있다.

내구성 인자별 고려되는 범위에 있어, 국외 최고의 기술 수준은 콘크리트 구조물의 외부환경 변화의 거동에 따른 유해인자 침투조건을 동시적 고려 및 콘크리트 물성변화를 고려한 유효확산계수 변화율 산정과 더불어 부식개시 이후 철근팽창 및 그에 따른 균열전파의 내구력 상실까지 과정을 포함하고 있다. 아래는 국외의 대표적인 철근 콘크리트 구조물 내구수명 예측 프로그램을 나타내고 있다.

선진국의 사례를 살펴 보면, Life 365, Ducom 등은 개발 및 상용화가 10년 이전부터 진행되어왔으며, 데이터베이스가 축적되어 염분 침투 현상에 대해서는 상당히 높은 예측 정확도를 나타내고 있다. 하지만 염분 침투 과정을 확산만으로 해석하거나, 노출 환경 또는 시멘트 재료의 특성에 대해 고려하지 않아 경험 상수에 의존하고 있다.

본 연구를 통해 개발된 모델은 기존 모델과 다음과 같은 차별성을 가지고 있다.

- (1) 부식인자의 침투: 기존 확산위주의 부식인자의 침투를 Traverse 모델을 사용하여 확산 외에 대류, 압침에 의한 모델을 구현함으로써 실제 구조물 상황 모사
- (2) 부식모델: 부식개시 뿐만 아니라 노출환경 (염도, 온도, 습도)에 따른 부식의 진전에 따른 녹새성 모델을 구현하고 이에 따른 콘크리트 균열을 정량적으로 정립
- (3) 유지관리: 전기방식법을 사용한 유지관리 및 보수보강법에 대한 내구성능 향상을 정량화하여 소프트웨어에 반영함으로써 전생애 주기적 내구성능 및 수명예측

또한 본 연구과제의 가장 큰 창의성은 기존의 내구성 향상을 위한 연구는 콘크리트 내 철근의 내식성 향상 또는 콘크리트의 물성향상에 따른 수명연장에 국한되어 있었으나 본 연구는 가장 기본적인 콘크리트 배합인 혼합 콘크리트를 기준으로 환경용소별 부식모델을 구현하여 실제 구조물에 적용 가능하게 함에 있다.

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

해양환경 콘크리트 구조물의 내구수명 예측 소프트웨어 개발 과제의 연구 기간 3차 년도에 서는 콘크리트 내부 유해인자침투 및 철근부식 예측 모델을 이용하여, 해양환경에 노출된 콘 크리트구조물의 장기 내구성능을 평가할 수 있었으며, 이를 토대로 콘크리트 구조물의 내구 성능 증진효과 예측을 가능하게 하는 소프트웨어 개발을 목표로 연구를 진행하였다.

3.1. 콘크리트 구조물의 내구수명 평가 모델 개발

3.1.1. 콘크리트 내 염분침투 모델 개발

가. 공극분포도를 통한 유효확산계수 산정

실제 공극구조를 크기별로 나타낼 수 있는 실측 데이터를 이용하여, 공극 크기 분포도를 큰 사이즈의 겔 공극 (gel pore)으로부터 모세관 공극 (capillary pore) 및 대공극 (macro pore)으로 표현한다. 전체 공극 크기 범위는 약 2.5 nm ~ 250,000 nm에 해당하며, MIP 를 통해 이를 정량적으로 측정할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 실험 데이터를 기반으로 위 의 크기분포를 확률밀도함수인 Rayleigh-Ritz (R-R) 분포함수를 이용하여 MIP 데이터 중 간헐적으로 분포된 공극 크기와 해당 수은압입량을 회귀함수로 표현한다. 이에 대한 확률밀 도함수는 다음 식 3.1과 같다.

$$\phi(d)=\phi_{micro}(1-\exp(-B_{micro}d))+\phi_{macro}(1-\exp(-B_{macro}d)) \quad (3.1)$$

여기서, ϕ : 전체 공극률 ϕ_{micro} : 1 μm 이하 공극률 B_{micro} : 미세공극 분포함수 상수 ϕ_{macro} : 1 μm 이상 공극률 B_{macro} : 매크로공극 분포함수 상수 d : 공극직경 (μm). 위 식과 MIP의 누적 공극률과 회귀분석을 통해 얻어지는 변수들로 다음과 같은 절차로 굴곡비와 유효확산 계수를 도출하였다.

먼저, 굴곡비 (Tortuosity factor)는 다공체 내 이온의 실제 이동경로 대비 출발점과 도착점 간의 직선거리 비율로, 공극구조를 무시한 단일 모세관 모델 (Single capillary model)과 상이한 개념이다. 이를 확산계수와 공극률과의 관계식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{F\phi} = \frac{D_{\infty}}{D_0} \quad (3.2)$$

여기서, τ : 굴곡비 F: formation factor D_{∞} : 정상상태에서 다공체 내 확산계수 D_0 : 자유수 내에서 확산계수이다. Nernst-Einstein 관계식에 따르면 다공체 내 이온의 상대 확산계수는 전자의 상대 전도율과 같다는 가정으로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{D_e}{D_0} = \frac{\sigma_e}{\sigma_0} \quad (3.3)$$

여기서, D_e : 유효확산계수 σ_e : 유효 전자 전도율 σ_0 : 자유수 내 전자 전도율이다. 위의 두 식을 통해 다공체 내 굴곡비는 1 이상임을 알 수 있다.

콘크리트와 같은 개념의 다공체로써 암석에 관한 투수계수 모델에 따르면, 가장 큰 연결공극 (Spanning clusture)은 전도도가 최대치에 해당하는 직경이상의 공극크기에서 발생된다는 이론이며, 다음과 같은 전기전도도에 관한 trial solution을 가정했다.

$$g_e = (\sigma_0 L / d_c \phi) S(d) d \quad (3.4)$$

여기서, L : 샘플의 크기 (μm) d_c : 공극 크기 분포도 중 첫 번째 peak에 해당하는 직경 (임계직경) $S(d)$: 직경 d 이상에 해당하는 공극률이다. 위의 식들을 조합하여 다음과 같은 관계식을 도출하였다.

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_0} = \frac{d_{\max}}{d_c} \phi S(d_{\max}) \quad (3.5)$$

여기서, $d_{\max}$: 전기전도도가 최대일 때 해당 직경 크기이며, 이는 식 3.1과 3.4를 이용하여 구할 수 있다. 식 3.2-2.5를 이용하여 굴곡비를 다음과 같은 관계식을 이용하여 구한다.

$$\tau = \frac{d_c}{d_{\max} S(d_{\max})} \quad (3.6)$$

임계직경 (d_c)은 MIP시험 중 첫 번째 peak 점에 해당하는 공극크기로 정의할 수 있지만, 실제 측정 시 기술적 결함이나, 시편확보 과정 중 균열발생에 따른 오차로 여겨질 수 있으므로, 본 연구에서는 매크로 공극 사이즈 분포도를 적용하여 최대 연결공극에 해당하는 변수들을 정의하였다. 여기서, 임계직경 이후 공극 분포도는 앞서 언급한 문제로 인해 0으로 수렴시키고 수정된 공극 분포 함수를 이용하여 굴곡비를 결정한다.

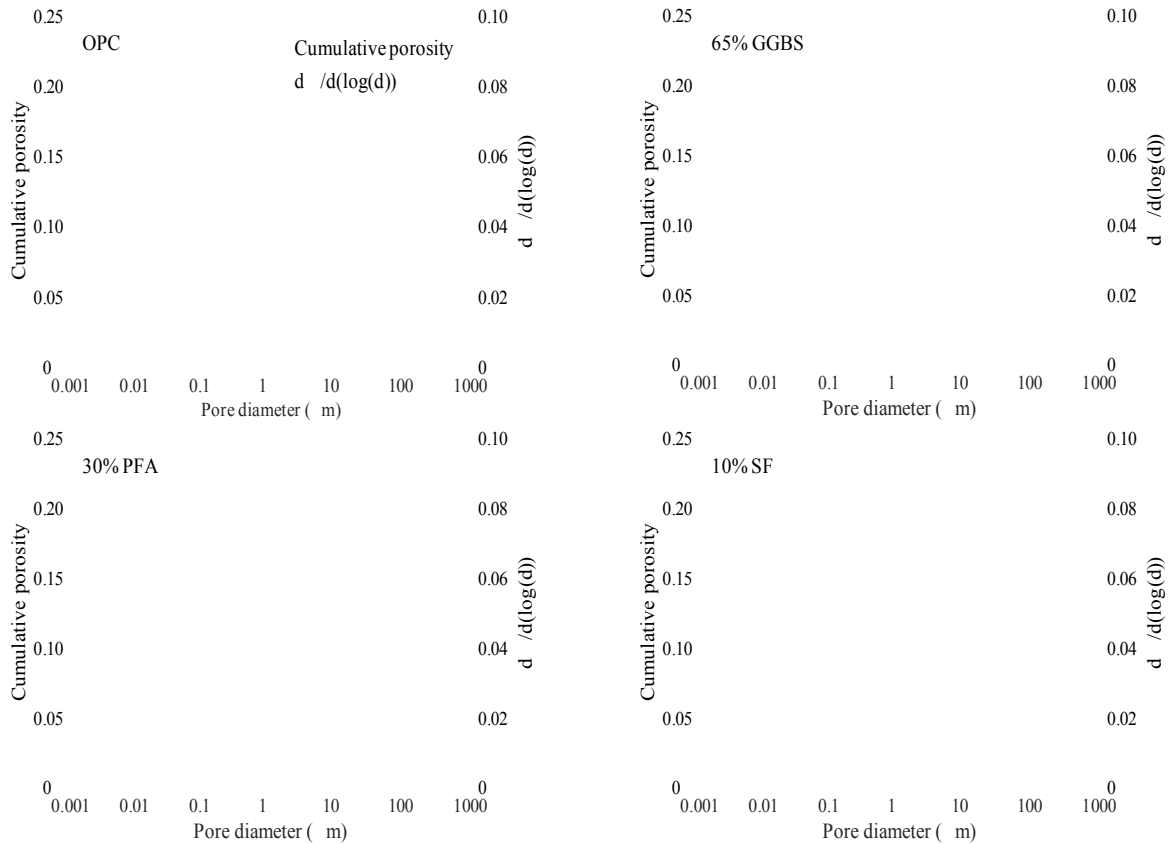
위에서 정의한 공극률 및 굴곡비를 이용하여, 시멘트 경화체의 유효확산계수를 다음 식 3.7를 통해 결정한다.

$$D_e = \frac{D_f \phi}{\tau} \quad (3.7)$$

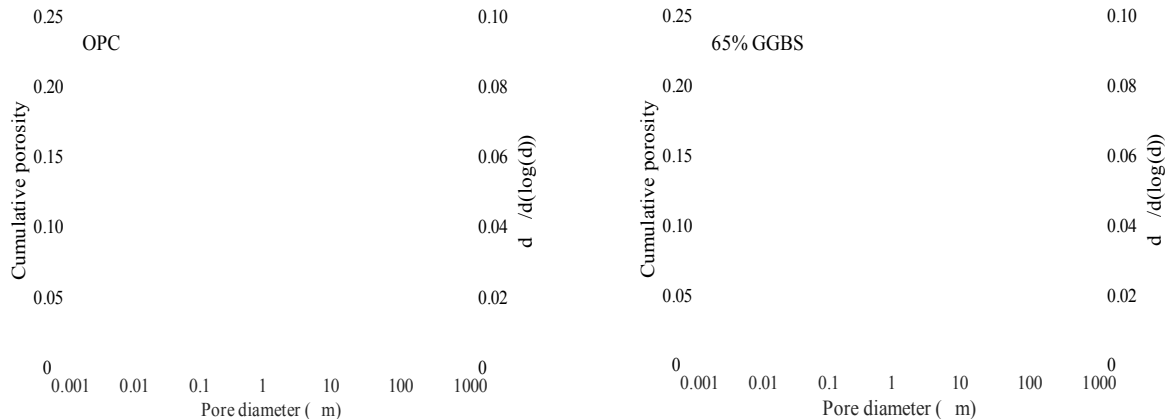
여기서, D_f : 자유수 내 확산계수이다. Wilke-Chang 방정식에 의하면, D_f 를 정의하기 위해 용매 (물)에 용질을 NaCl로 산정하고, 물의 온도 20 °C에 해당하는 점성계수 (1.0019 cP), 물의 몰질량 (18 g/mole), 표준대기압에 해당하는 물의 몰부피 (23 cm³/mole)를 고려하여 계산하였다.

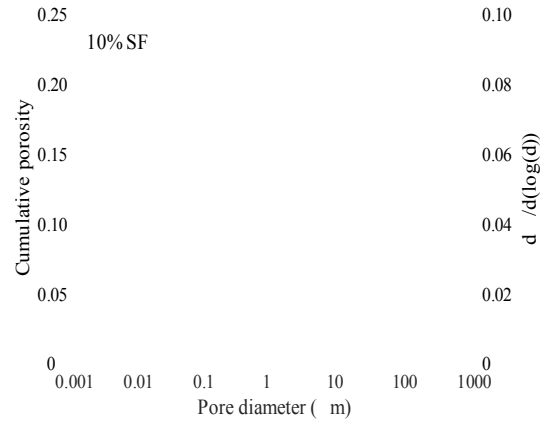
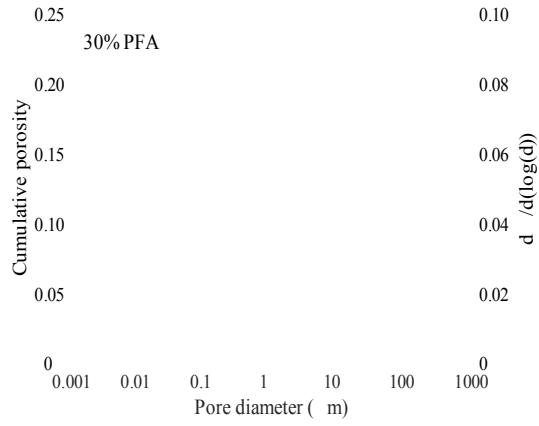
다음 <그림 3.1.1>은 본 연구에서 개발한 공극분포도를 이용한 유효확산계수 모델의 변수 도출을 위한 회기분석을 나타낸다. 회기분석은 MIP의 압력에 따른 수은압입 량에 대해 해당 건조시편 밀도 (bulk density)를 곱하여, 각 공극크기에 대한 공극률을 나타낸 데이터에 대한 결과이다. 회기분석 결과 MIP 데이터와 비교 시, 두 가지 공극 범위의 분포도 (마이크로 및 매크로 공극)를 적용하여 전체적으로 높은 일치율을 나타내었다. 재령일이 높아질수록 시멘트 경화체 내 수화가 진행됨에 따라 모든 배합에 대해서 총 공극률이 낮아지는 현상을 보였으며, 특히 재령 180일에 공극율 10% 미만을 나타내었다. 이는 콘크리트의 재령일이 증가할수록 유효확산계수의 감소를 의미하며, 이로 인해 외기로부터 들어오는 유해인자 침투속도를 줄이는 효과를 나타낸다.

(a) 28일 양생

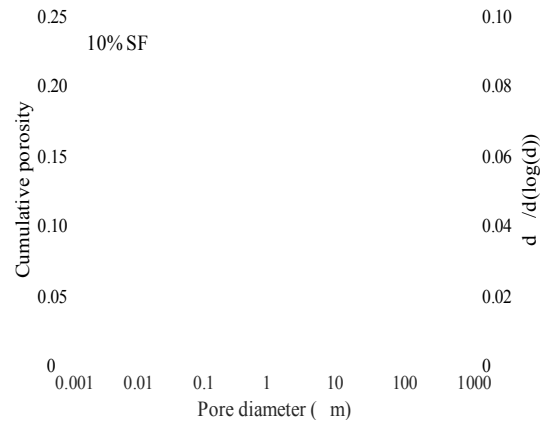
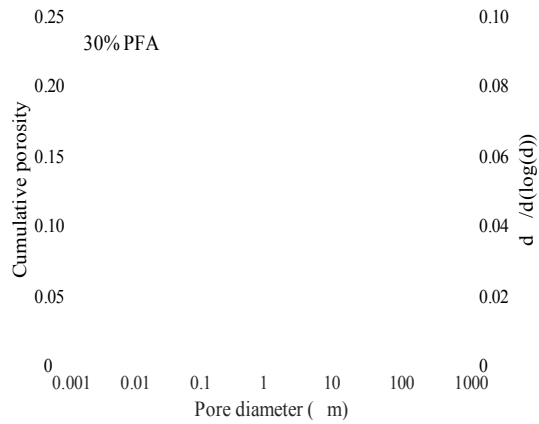
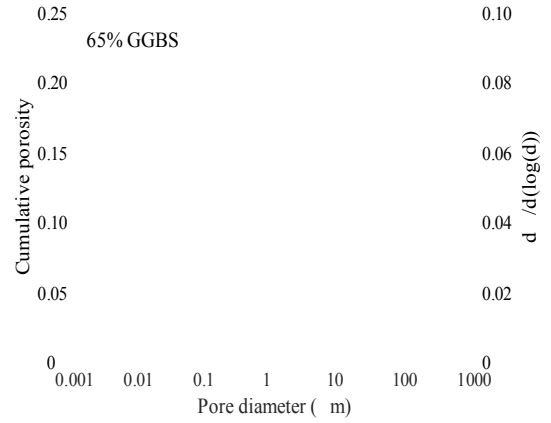
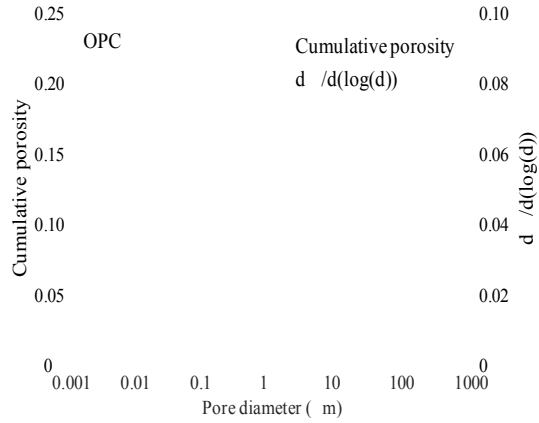


(b) 56일 양생

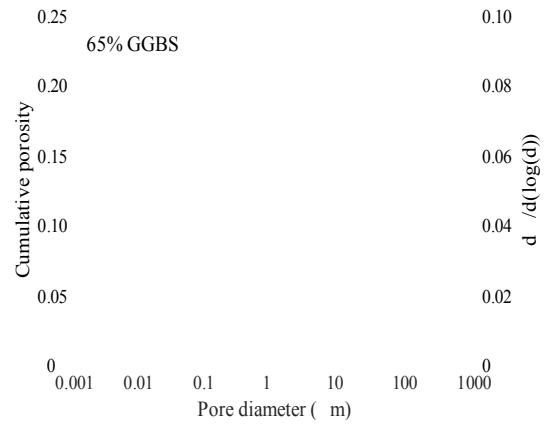
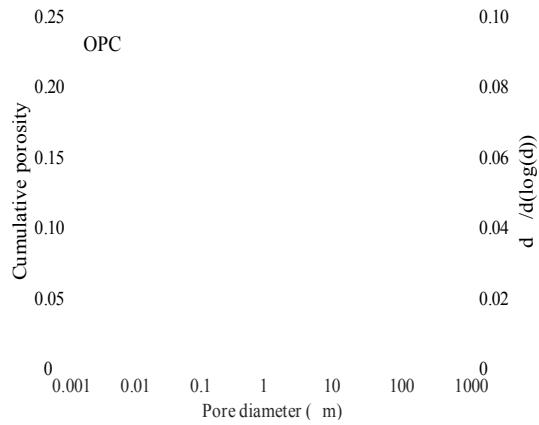


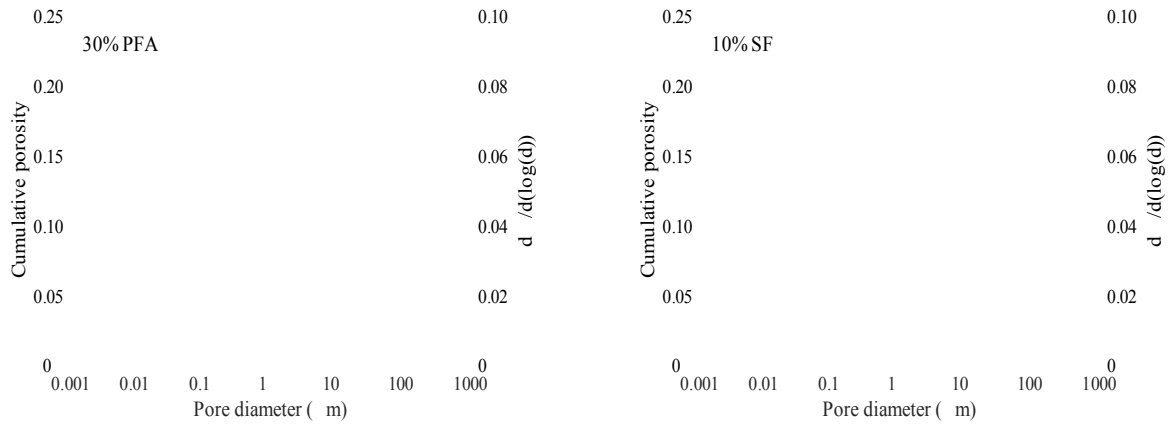


(a) 28일 양생



(b) 56일 양생





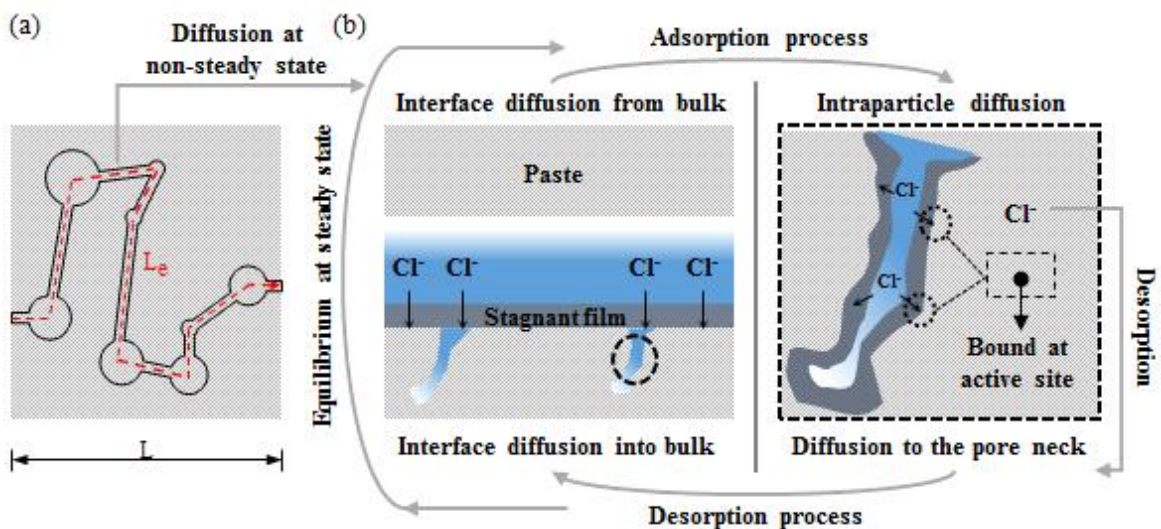
<그림 3.1.1> 양생 28-180에 대한 배합 별 모르타르 공극분포도 및 회기분석 모델적용

나. 확산에 의한 염분이동 모델

다음은 염소이온의 침투과정 중 염분흡착 메커니즘을 반영하기 위해 콘크리트 내 염소이온의 평형상태에서의 존재형태를 정의한다. 일반적으로 외부환경에서 콘크리트 내로 염소이온의 침투과정 중 공극수에 존재하는 자유염소이온 (이동상)과 흡착과정에서 발생하는 고정화 염소이온 (고정상)으로 구별된다. 이는 다음과 같은 연속적인 염소이온의 시멘트 매트릭스 내 반응단계로 설명될 수 있다.

- (1) Interphase diffusion: 자유수 내 염소이온이 반응을 위해 매크로 공극 내 수화물과 반응을 시작하려는 단계
- (2) Interparticle diffusion: 매크로 공극으로부터 수화물의 표면에서 수화물 사이 공극 (마이크로 혹은 겔 공극)을 통해 반응위치를 찾는 과정
- (3) Adsorption: 염소이온의 물리 화학적 반응단계

이와 같은 연속적인 반응단계를 흡착과정 (adsorption process)으로 정의되며, 반대의 경우 탈착과정 (desorption process)라 정의한다. 이와 같은 염소이온의 반응단계를 다음 <그림 3.1.2 (b)>와 같이 나타내었다.



<그림 3.1.2> (a) 비정상상태 염소이온 침투경로 (b) 염소이온의 수화물 내 흡착 및 탈착과정

염소이온의 자유수로부터 고체상태의 고정상이 될 때까지 두 가지 상 (액체, 고체)에 대한

막 (stagnant film)이 중간에 발생된다. 이는 자유염소이온이 고정화염소이온으로 되는 과정을 억제하는 역할을 하고 이는 물질전달률을 고려한 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$C_b = \frac{\alpha C_f^*}{1 + \beta C_f^*} \quad (3.8)$$

$$\frac{dC_f}{dt} = -k(C_f - C_f^*) \quad (3.9)$$

여기서, C_f : 자유수내 염소이온 C_f^* : stagnant film 내 염소이온 k : 물질전달상수 (1/sec) 이다. 위 식이 의미하는 바는 단위시간 당 자유수내 염소이온의 반응정도는 자유수 내 염소이온이 평형상태의 이온 (stagnant film에 존재)으로 도달하는 flux (kg/m²s)와 비례하는 것으로, 물질전달상수가 높거나 두 가지 상에 존재하는 염소이온 농도의 차이가 클수록 흡착 과정이 빠르게 일어나며, 반대일 경우 탈착과정이 우세하는 것을 의미한다.

또한, C_f^* 는 고정화염소이온과 평형을 이루어, 다음과 같은 Langmuir 등온선으로 그것들의 관계를 표현할 수 있다.

$$C_b = \frac{\alpha C_f^*}{1 + \beta C_f^*} \quad (3.10)$$

여기서, α, β : Langmuir 등온선 상수 C_b : 고정화염소이온이다. 이러한 비선형적 관계를 도출하기 위해 염분흡착시험에서 얻은 상수들을 대입하여, 농도별 고정화염소이온을 정의할 수 있다. 본 연구에서는 모든 염소이온의 단위는 시멘트 중량 대비 퍼센트 농도로 표현한다.

다음은 비정상상태에서의 시멘트 매트릭스 내 염소이온의 이동현상을 확산에 대해 정의하기 위해 다음과 같은 일 방향 염소이온 확산 지배 식을 적용한다.

$$\frac{dC_f}{dt} + \frac{dC_b}{dt} = D_e \frac{d^2 C_f}{dx^2} \quad (3.11)$$

여기서, x : 콘크리트 표면으로부터 깊이 t : 노출 시간이다. 염분이동에 있어 한 시스템 내 단위 시간 당 들어오고 나가는 염분량과 반응하여 줄어드는 염분량을 고려하였을 때 전체 염소이온은 보존되는 법칙을 따를 때 위 식 2.16은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{dC_b}{dt} = k(C_f - C_f^*) \quad (3.12)$$

위 식에 Langmuir 등온선을 대입하기 위해 식 3.12를 C_f^* 에 대해 표현하면 다음과 같다.

$$C_f^* = \frac{C_b}{\alpha - \beta C_b} \quad (3.13)$$

그 후, 위 식 3.12, 3.13을 식 3.11에 대입하면, 다음과 같은 염분흡착 특성을 고려한 염분 확산 모델 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dC_f}{dt} + k \left(C_f - \frac{C_b}{\alpha - \beta C_b} \right) = D_e \frac{d^2 C_f}{dx^2} \quad (3.14)$$

위 식을 시간에 따른 콘크리트 깊이별로 계산을 하기 위해 유한차분법 중 내삽법 (Implicit method)을 사용하였다. 그리고 깊이와 시간에 대해 각각의 단위변화량 (dt, dx)을 이용하여 다음과 같이 표현하였다.

$$x = 0, \Delta x, \Delta 2x, \dots m\Delta x (i = 1, 2, \dots, m+1) \quad (3.15)$$

$$t = 0, \Delta t, \Delta 2t, \dots n\Delta t (j = 1, 2, \dots, n+1) \quad (3.16)$$

여기서, i, j : 거리와 시간에 대한 step indice이다. 내삽법을 이용하여 거리와 시간에 대한 차분형태는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Distance : \frac{d^2 C_f}{dx^2} = \frac{1}{(\Delta x)^2} [C_{i+1}^{j+1} - 2C_i^{j+1} + C_{i-1}^{j+1}] \quad (3.17)$$

$$Time : \frac{dC_f}{dt} = \frac{1}{\Delta t} [C_i^{j+1} - C_i^j] \quad (3.18)$$

위의 거리 및 시간에 차분형태를 지배 식 3.14에 대입하면, 다음과 같은 형태의 염분침투에 대한 물질보존 식을 얻을 수 있다.

$$C_i^{j+1} - C_i^j + \alpha' \left[C_i^j - \frac{C_{b,i}^j}{\alpha - \beta C_{b,i}^j} \right] = \gamma [C_{i+1}^{j+1} - 2C_i^{j+1} + C_{i-1}^{j+1}] \quad (3.19)$$

위 식의 상수 α', γ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha' = k\Delta t \quad (3.20)$$

$$\gamma = \frac{D_e \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (3.21)$$

고정화염소이온 계산의 경우 초기 조건 (t=0)을 제외하고 식 3.17, 3.18를 C_f 대신 C_b 로 치환하여, 식 3.14에 대입하여 다음 시간에 대한 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$C_{b,i}^{j+1} = C_{b,i}^j - [C_i^{j+1} - C_i^j] + \gamma [C_{i+1}^{j+1} - 2C_i^{j+1} + C_{i-1}^{j+1}] \quad (3.22)$$

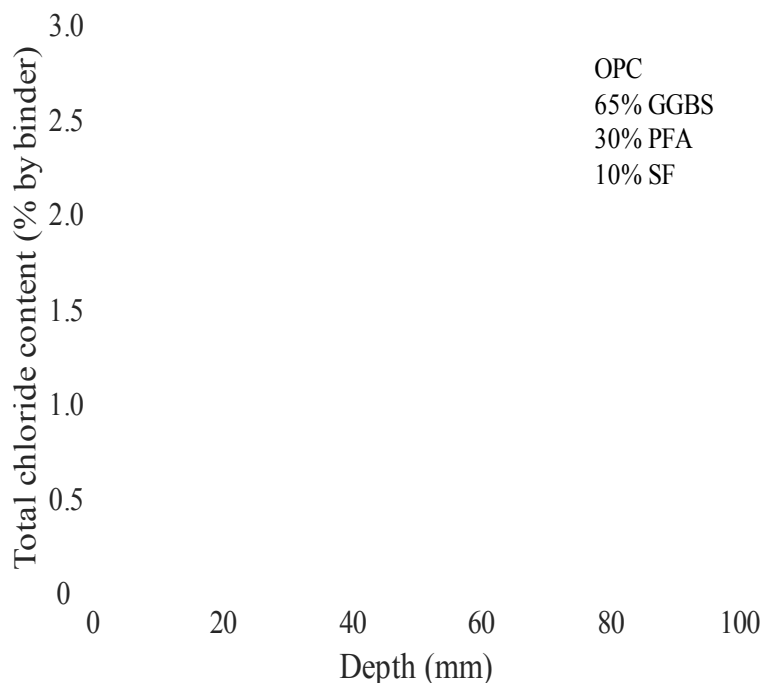
$C_{b,i}^{j+1}$ 를 위의 식을 통해 구하여, 식 3.19에 대입하여, 주어진 시간 step에 따라 수렴 때 까지 반복적으로 계산을 한다. 이를 통해 자유염소이온 및 고정화염소이온을 해당 깊이 및 노출시간에 대해 구할 수 있다. 또한 $t=0$ 에 대해서는 흡착등온선 식에 C_f^* 를 C_f 로 가정 (local equilibrium)으로 가정을 하여 초기값을 정의한다. 수치해석에 안정성을 유지하기 위해 시간 및 거리에 대한 차분은 다음 관계식을 따르는 것으로 하였다.

$$\Delta t < \frac{k}{D_p} (\Delta x)^2 \quad (3.23)$$

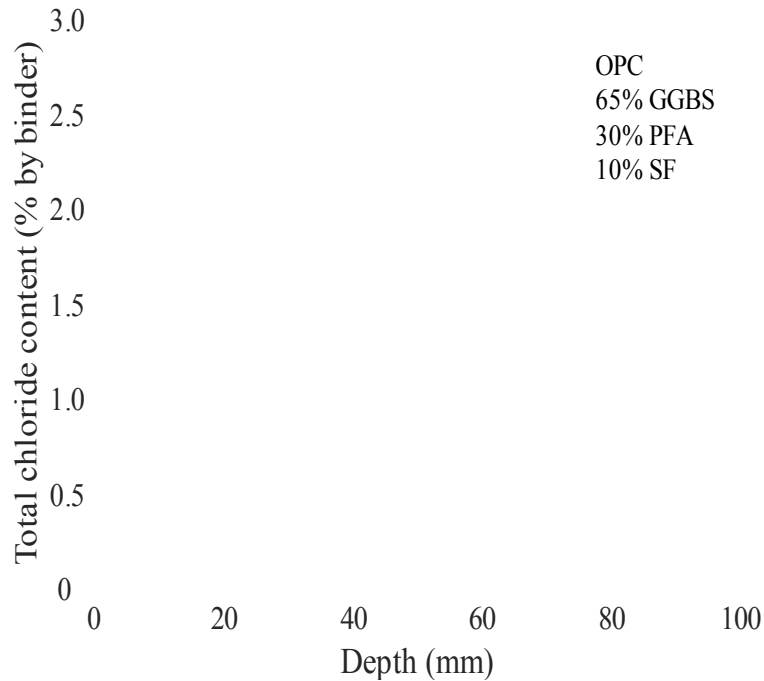
여기서, k 는 0.5로 고정하고, 거리에 대한 차분보다 상대적으로 시간에 대한 차분을 높이는 방법으로 매 계산마다 수치안정성을 유지하였다.

각 노출 기간에 따른 배합 별 전염소이온의 비교분석을 위해 <그림 3.1.3>과 같이 각각 5, 50, 100년에 대한 깊이에 따른 전염소이온 프로파일을 나타내었다. 그 결과, OPC의 경우 30% PFA에 비해 약 65%의 표면염화물 농도를 나타내어, 표면으로부터의 낮은 농도 차를 보이는 반면, 높은 확산계수로 인해 50, 100년 노출기간에 있어 약 깊이 20 mm 이후에 높은 염분농도를 나타내었다. 이러한 경향은 65% GGBS와 10% SF에서도 발생되었으며, 5년 노출 기간에 있어 약 깊이 20 mm에 해당하는 염분농도 역전을 보이거나, 시간이 지날수록 약 40 mm 깊이에 도달하였다. 이는 시간에 따른 유효확산계수의 감소율이 65% GGBS의 경우 10% SF보다 높기 때문에 이러한 현상이 발생된 것으로 판단된다.

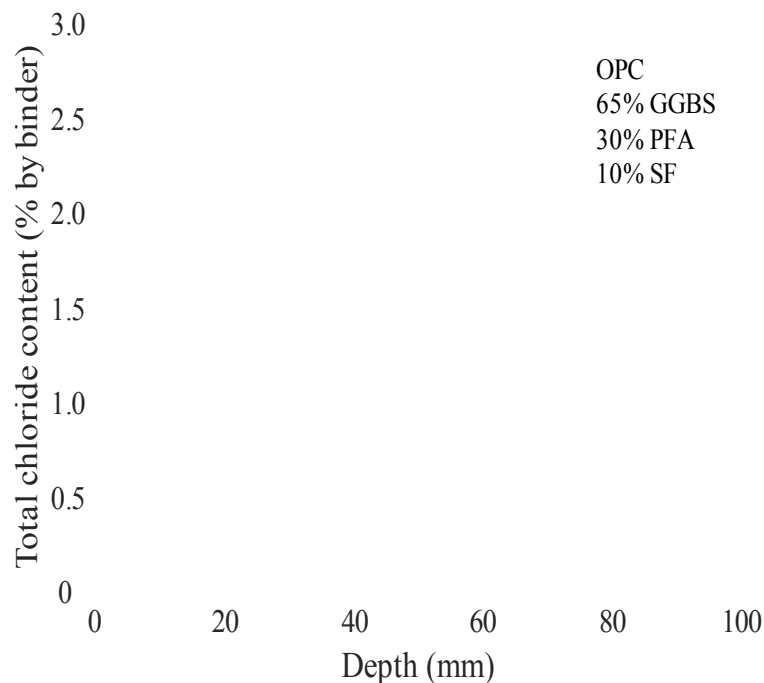
(a) 5년 노출



(b) 50년 노출



(c) 100년 노출



<그림 3.1.3> 노출 기간에 따른 배합 별 예측 염소이온 프로파일

다. 건습환경에서의 염분이동 모델

콘크리트 구조물의 외기환경에 따른 염소이온 이동 메커니즘은 확산을 기반으로 공극수의 포화도에 따라 수분이동을 동반하는 대류현상을 포함한다. 이는 주로 건습환경에 건설된 구조물에 해당하며, 외기습도가 변화하며 동시에 콘크리트 내 수분분포가 깊이별로 상이한 경우에 발생된다. 해양환경 콘크리트 구조물의 경우 침지대 (최저 해수위)는 외기환경으로부터 수분포화상태에 쉽게 도달하여, 콘크리트 내 철근깊이까지 수분의 포화정도를 100%에 가정하고 주로 확산에 의한 이동으로 해석할 수 있다. 반면, 조수 간만대 (최저 해수위로부터 최대 해수위 사이)의 경우 일반적으로 만나절은 해수에 잠기고, 남은 시간에는 대기에 노출되

는 환경으로, 염분이동은 외기조건에 민감할 수밖에 없다. 마찬가지로, 교량의 상부구조는 약 11월부터 3월까지 적설시기에 따른 제설염에 의한 염해환경에 노출되는데 이는 연간 제설시기와 그렇지 않은 경우에 대해 외기 염분농도 조건을 설정해야하며, 동시에 연간 변화하는 습도조건을 고려하여, 염분이동을 해석한다.

이와 같이 고정적이지 않은 외기조건에 따른 염분이동 메커니즘은 확산-대류현상으로 정의되며, 수분에 대한 이동 메커니즘을 동반한다. 이와 같은 통합적인 염분이동을 해석하기 위해 콘크리트 내 수분분포에 대한 현상을 다음 절차와 같이 모델화하였다.

일반적으로 다공체 내 수분의 이동은 기체 (vapour)와 액체 (liquid)의 형태로 구분이 되며, 이는 상대습도 (relative humidity)로 표현할 수 있다. 이와 같은 현상은 콘크리트 구조물에 적용할 수 있으며, 연결된 공극을 통해 압력차로 수분분포를 해석할 수 있다. 일 방향 수분이동에 대한 지배 식은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\frac{dw}{dt} = \frac{d}{dx} \left(-k_l \frac{dP_c}{dx} + k_v \frac{dP_v}{dx} \right) \quad (3.24)$$

여기서, w : 수분 함유량 (kg/m^3) k_l : 액상 투수계수 (kg/msPa) P_c : 모세관 액상 압력 (Pa) k_v : 수증기의 투수계수 (kg/msPa) P_v : 수증기압 (Pa)이다.

콘크리트 공극내 액상과 수증기의 열역학적 평형 상태 (Thermal equilibrium state)를 고려하면, Kelvin' s law에 의해 포화수증기압과 수증기압의 관계에 의해서 공극 내 액상의 곡률형태가 정해지며, 주어진 온도조건에 따라 최대 모세관 포화 공극 크기를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\ln \frac{P_v}{P_0} = - \frac{P_c M_w}{\rho_w R T} \quad (2.25)$$

여기서, P_0 : 포화수증기압 (Pa) ρ_w : 물의 밀도 (kg/m^3) R : 기체 상수 (J/kgK) T : 절대온도 (K) M_w : 물 분자량 (kg/mole)이다. 여기서 P_v/P_0 는 상대습도로 변환할 수 있다. 위의 변수들은 온도에 의해 결정될 수 있으며, 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

August-Roche-Magnus formula:

$$P_0 = 610.94 \exp \left(\frac{17.625(T-273)}{T-29.96} \right) \quad (3.26)$$

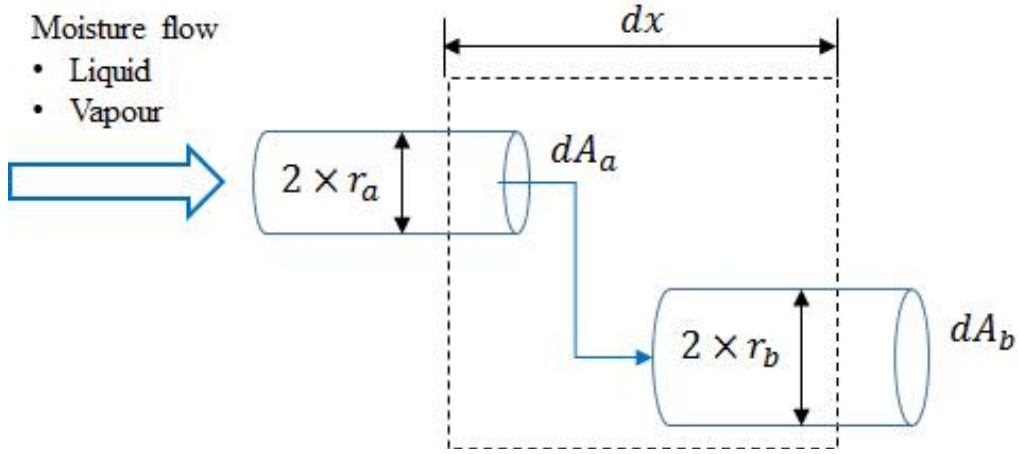
Regression analysis:

$$\rho_w = 1.54 \times 10^{-5} T - 1.85 \times 10^{-2} T^2 + 6.65 T + 247 \quad (273 < T < 373) \quad (3.27)$$

위에 식을 종합하여, 다음과 같은 상대습도에 관한 수분이동 지배 식을 도출할 수 있다.

$$\frac{dw}{dh} \frac{dh}{dw} = \frac{d}{dx} \left(-k_l \frac{\rho_w R T}{M_w h} \frac{dh}{dx} + k_v P_0 \frac{dh}{dx} \right) \quad (3.28)$$

여기서, dw/dh : 수분저류능효율 (moisture storage capacity) (kg/m^3) h : 상대습도이다. 본 연구에서는 수분이동에 대한 투수계수 모델로써, Statistical permeability model에 기반하여 공극에 대한 분포도를 이용해 액상 및 수증기에 대한 이동 통로를 확률론적인 방법으로 접근하였다. 이는 국소요소 내 수분이동 과정에 있어 공극의 무작위한 배열에 대해 다음 <그림 3.1.4>와 같이 설명 된다.



<그림 3.1.4> Statistical permeability model에 관한 개념적 모식도

포아조유의 법칙 (Hagen-Poiseuille ' law)에 의하면, 유체의 비압축성 및 등방성 성질에 대한 가정조건으로 뉴턴 유체흐름을 갖는 원통형 파이프에 대해 체적 유량을 정의한다. 본 연구에서는 콘크리트 내 수분이동 메커니즘은 포아조유 법칙을 따르는 원통형 연결 공극 및 Statistical permeability model에 의해 정의하였으며, 액상에 대한 투수계수는 다음 식과 같이 결정하였다.

$$k_l = \frac{\rho_w}{8\tau^2\eta} \int_0^\infty \int_0^\infty r_a r_b dA_a dA_b \quad (3.29)$$

여기서, η : 물의 점성계수 (Pas) r_a, r_b : 국소요소 내 수분의 입장 및 탈출에 해당하는 공극 크기 dA_a, dA_b : r_a, r_b 에 해당하는 면적 비이다. 온도에 의존적인 점성계수 성질은 다음 경험식과 같이 정의된다.

$$\eta = \eta_0 \exp(-1.94 - 4.8(T_0/T) + 6.74(T_0/T)^2) \quad (3.30)$$

여기서, η_0 : 0.001792 (kgs) T_0 : 273.16 (K)이다. 공극을 통한 액상의 이동은 모세관 응축 (Capillary condensation)에 해당하는 포화된 공극분포도에 의존하므로, 수정된 Kelvin' s law에 의해 최대 응축 가능 공극크기를 다음 식과 같이 결정한다.

$$r_c = - \frac{2C\gamma M_w}{\rho_w RT} \frac{1}{\ln h} \quad (3.31)$$

여기서, r_c : 임계직경 (Critical radius) (m) C : 상수 (2.15) γ : 물의 표면장력 (N/m)이며,

이는 온도에 의존하는 성질을 가지며, 다음 경험식과 같이 표현된다.

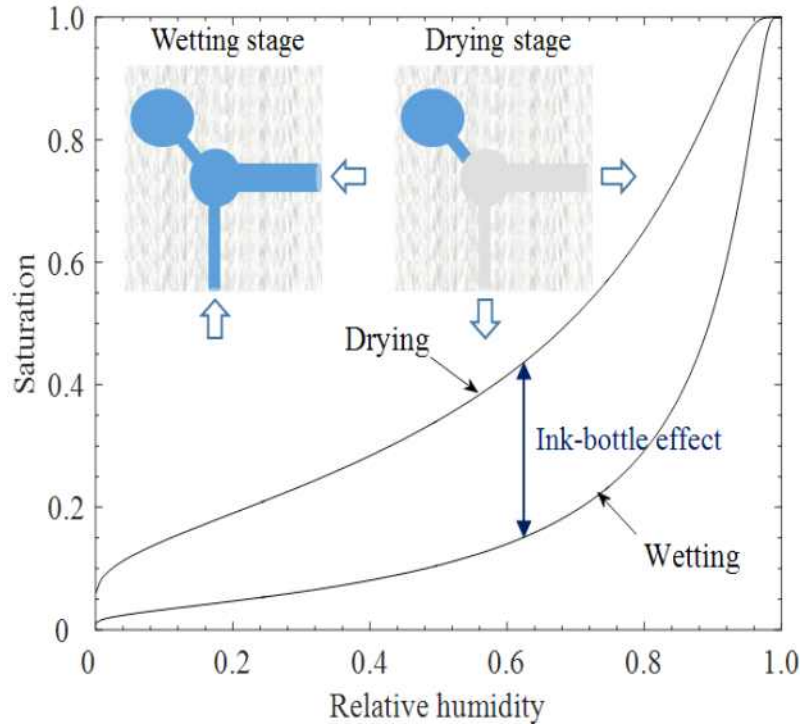
$$\gamma = 7.5796 \times 10^{-2} - 1.45 \times 10^{-4}(T-273) - 2.4 \times 10^{-7}(T-273)^2 \quad (3.32)$$

따라서 액상에 대한 투수계수는 임계직경까지의 공극크기 분포에 대해 적용할 수 있으며, 위 식 3.29는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$k_l = \frac{\rho_w}{8\tau^2\eta} \left(\int_0^{r_c} r_{eq} f(r) dr \right)^2 \quad (3.33)$$

여기서, r_{eq} : 등가 공극크기 (m)이며, r_a, r_b 의 기하평균임 $f(r)$: 정규화된 공극 분포도이며, 마이크로에서 매크로 공극 크기에 해당한다. 이를 통해 위에서 언급한 국소요소 내 공극크기 분포의 난해성을 등가공극으로 환산하여, 공극분포도 함수를 적용하여, 위 투수계수 모델 식을 정의할 수 있다.

콘크리트 내 수분의 흡착과정 (water sorption)은 외기의 수증기압을 통해 공극 내 벽을 통해 흡착 (vapour adsorption)과 모세관 응축을 포함한다. 특히, 높은 상대습도 조건에서 공극 내 포화도를 결정하는 상태는 주로 모세관 응축에 의해 결정되며, 낮은 상대습도인 경우 주로 수증기의 흡착에 의해 결정된다. 이러한 두 가지 현상은 열적평형상태에서 동시에 결정되며, 콘크리트의 깊이별 공극 내 전체 포화도 (degree of saturation)와 수분 함유량을 결정하게 된다. 이와 같은 현상을 두 가지 상태로 구분하면, 먼저 완전 건조된 습윤성 콘크리트의 경우 외기에서 들어오는 수증기에 대해 공극에 포화도를 상대습도에 따라 임계직경 이하 공극에 대해서 100% 포화 상태를 그 이상 크기의 공극에 대해서 부분적인 포화 상태를 거친다. 이러한 수분 흡착과정은 전체 공극이 100%에 가까운 포화상태에 이를 때까지 지속되며, 콘크리트의 경우 모세관 활성물질 (Capillary active material)이지만 플라스틱과 같은 고분자계열의 물질이 아니기 때문에 95% 이상 100% 미만의 상태의 포화도를 나타낸다. 이러한 상태를 Super-hygroscopic region이라 하며, 콘크리트 흡착과정 중 최대 포화도 상태를 의미한다. 반면 외기변화가 건조한 경우 콘크리트 내 최대 포화도 상태에서부터 점점 수분의 함유량이 감소하면서 외기 습도와 같은 상태로 변하는 과정을 수분의 탈착과정 (water desorption process)이라 정의 한다. 그러나 탈착과정은 흡착과정과 달리 갇힌 공극으로 인해 이력현상 (hysteresis)이 발생된다. 이러한 전체적인 과정을 표현하였을 때 다음 <그림 3.1.5>과 같이 설명된다.



<그림 3.1.5> 콘크리트 내 수분의 흡착 및 탈착에 대한 이력현상

본 연구에서는 실제 변화하는 외기조건에 노출된 콘크리트 구조물을 고려하여 공극 내 임의적인 수분의 증가 및 감소에 대한 과정 및 이력현상을 다음과 같은 절차로 모델화 하였다. 수증기에 대한 흡착과정을 제외하고 콘크리트 내 수분 흡착 과정에 대한 전체 포화도는 완전건조 상태에서부터 공극 분포에 따라 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{total} = S_c = \int_{r_{min}}^{r_c} dv = \phi_{micro}(1 - \exp(B_{micro}r)) + \phi_{macro}(1 - \exp(B_{macro}r)) \quad (3.34)$$

여기서, S_c : 모세관 응축에 해당하는 포화도 r_{min} : 공극 분포도 내 최소 반지름 크기 (m)
 dv : 모세관 응축에 해당하는 전체공극 내 부피 비이다. 이와 반면에 수분의 탈착 과정에서는 모세관 응축과 함께 갇힌 공극물을 고려하여 전체 포화도는 다음과 같이 표현된다.

$$S_{total} = S_c + S_{ink} = S_c + \int_{r_{min}}^{r_c} \left(\frac{S_c}{V} \right) dv = S_c(1 - \ln S_c) \quad (3.35)$$

여기서, V : 전체 공극 부피 S_c/V : 탈착 과정 중 갇힌 수분 부피 비이며, 확률적인 값이다. 위 두 가지 경우에 대해 실제 콘크리트 구조물 내 임의적인 수분분포는 특정 포화도에서 건조 상태 (drying cycle)에 이르는 다음 식과 같이 표현된다.

$$S_{total} = S_c + S_{ink} = S_c + \int_{r_c}^{r_{max}} \left(\frac{S_c}{V} \right) dv = S_c + S_c(\ln S_{r_{max}} - \ln S_c) \quad (3.36)$$

여기서, $r_{\max}$: 콘크리트 내 공극의 최대 포화상태이며, 이는 수분의 탈착과정에 앞서 가장 큰 포화도 상태를 의미한다. 마찬가지로 탈착과정에서 다시 흡착과정 (wetting cycle)로 변화되는 상태의 포화도는 다음 식과 같이 표현된다.

$$S_{total} = S_c + S_{ink} = S_c + \int_{r_c}^{\infty} \left(\frac{S_{r_{\min}}}{V} \right) dv = S_c + S_{r_{\min}} \ln S_c \quad (3.37)$$

여기서, $S_{r_{\min}}$: 콘크리트 내 공극의 최저 포화상태이며, 이는 수분의 흡착과정에 앞서 가장 작은 포화도 상태를 의미한다. 이 두 가지 경우에 대해 수증기에 대한 흡착과정으로 발생되는 포화도 (S_{ad})를 고려하여, 전체 포화도에 적용하면 다음 식과 같다.

$$S_{total} = S_c + S_{ink} + S_{ad} \quad (3.38)$$

여기서, S_{ad} 를 정의하기 위해 특정 상대습도 하 공극 벽에 다층으로 흡착하는 물 분자들에 대한 두께를 Bradley 식을 사용하여 다음과 같이 나타냈다.

$$t_a = 3.85 - 1.89 \ln(-\ln h) \quad (3.39)$$

여기서, t_a : 부분포화 상태의 공극 벽에 물 분자 흡착 두께 (m)이며, 공극의 비표면적 분포도에 대해 다음 식과 같이 적용하여 S_{ad} 를 결정한다.

$$S_{ad} = t_a \int_{r_c}^{r_{0.99}} \frac{1}{r} dv \quad (3.40)$$

여기서, $r_{0.99}$: 공극 분포도 내 부피 비율이 99%에 해당하는 공극 크기이다. 위 식 3.34-3.37를 이용하여 변화하는 외기조건에 대한 콘크리트 내 수분 포화도 및 수분 함유량을 결정한다.

다음은 콘크리트 내 수분이동 중 수증기에 의한 투수성 (k_v)으로 이는 주로 낮은 상대습도에서 수분이동을 지배하며, 모세관 응축이 일어나는 임계공극 이상의 공극에 해당한다. 또한 수증기의 이동 메커니즘은 크누센 확산 (Knudsen diffusion)에 해당하며, 공극크기가 평균 입자 이동 거리보다 작을 시 투수성은 감소하게 된다. 이를 고려하여 다음 단일 공극에 대한 k_v 은 다음 식과 같이 정의된다.

$$k_v = \frac{D_0}{1 + N_k} \left(\frac{M_w}{RT} \right) \quad (3.41)$$

여기서, D_0 : 공기 중에서 수증기의 확산계수이며, 본 연구에서는 $21.6E-6$ m²/s으로 정의

N_k : 크누센수 (Knudsen number)이며, 다음과 같이 정의된다.

$$N_k = \frac{l_m}{2r_e} \quad (3.42)$$

여기서, r_e : 유효 공극 크기 (m)이며, 실제 공극 크기에 물 분자 두께를 제외한 값 l_m : 물 분자의 평균 자유 이동거리 (m)이다. 공극의 굴곡현상과 부분 포화상태의 공극분포를 고려하여 식 3.42을 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$k_v = \frac{D_0}{\tau(1+l_m/2(r_m-t_a))} \left(\frac{M_w}{RT} \right) (1-S) \quad (3.43)$$

여기서, r_m : 부분포화 된 공극분포 크기에 대한 기하평균이다.

다음은 콘크리트 내 수분이동에 대한 모델을 기반으로 건습환경에서의 염분이동 모델을 정의한다. 일반적으로 염소이온의 확산-대류 (diffusion-convection)는 다음과 같은 형태의 편미분 식으로 표현된다.

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2 C}{dx^2} - v \frac{dC}{dx} \quad (3.44)$$

여기서, C : 염분농도 (kg/m^3) D : 확산계수 (m^2/s) v : 염분과 함께 용매 (수분)의 이동속도 (m/s)이다. 이와 같은 편미분 형태의 방정식은 위 계수들의 시간 및 거리에 대한 일정 조건에서 다음 초기 및 경계조건을 통해 다음과 같이 시간 및 거리에 대한 해석해로 나타낼 수 있다.

$$\text{Boundary condition: } C(0,t) = C_0, C(\infty,t) = 0 \quad (3.45)$$

$$\text{Initial condition: } C(x,0) = 0, x > 0 \quad (3.46)$$

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \left[\exp\left(\frac{v}{D}x\right) \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} + \frac{v\sqrt{Dt}}{2D}\right) + \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} - \frac{v\sqrt{Dt}}{2D}\right) \right] \quad (3.47)$$

여기서, erfc : complementary error function이다. 일반적으로 확산계수의 값은 고정으로 볼 수 있지만, 속도에 대한 항 (vdC/dx)은 모든 조건 (시간 및 거리)에서 일정하게 정의 내리기 어렵다. 이는 수분에 대한 이동을 무시하는 가정 하에 적용되는 것이며, 식 3.47과 같은 해석 해는 실제 부분 포화된 콘크리트의 염분이동 해석에 적합하지 않다.

이러한 점을 고려하여, 본 연구에서는 다음과 같은 형태의 확산-대류 기반 염분이동 지배식을 제안한다.

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2 C}{dx^2} - C \frac{dh}{dt} \quad (3.48)$$

여기서, 속도에 대한 항은 위에서 정의한 수분에 대한 단위시간 변화량으로 이는 보통 거리에 대한 변화량으로 표현되나 이 경우 수반되는 차분 항들의 조합이 전체 수치해석 정확성에 영향을 미칠 수 있으므로, 본 연구에서는 $C(dh/dx)$ 형태로 유지하였다.

다음은 건습환경에 대한 경계조건 설계로 교량의 상부 패널 (제설염) 및 조수간만 대를 주된 염해 구조물로 외기 습도 및 염분에 대해 다음과 같이 결정하였다.

먼저 습도의 경우 외기로부터 콘크리트 표면에 시간 당 변화되는 량을 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_h \frac{dh}{dx} = B_h (h_s - h_{en}) \quad (3.49)$$

여기서, D_h : 수분 확산계수 (m^2/s) B_h : 수분 전달계수 (m/s) h_s : 콘크리트 표면에서의 상대습도 h_{en} : 외기환경에서의 상대습도이며, 수분 확산계수는 다음과 같이 정의된다.

$$D_h = \left(k_l \frac{\rho_w R T}{M_w h} + k_v P_0 \right) / \left(\frac{dw}{dh} \right) \quad (3.50)$$

여기서, 수분확산계수는 수분의 액상 및 기체의 투수성 및 수분저류능효율을 포함한다. 외기의 염분농도에 대한 콘크리트 표면으로의 물질전달은 다음 식과 같이 표현된다.

$$D \frac{dC}{dx} = B_c (C_s - C_{en}) + C_{en} J_m^s = B_c (C_s - C_{en}) + C_{en} B_h (h_s - h_{en}) \quad (3.51)$$

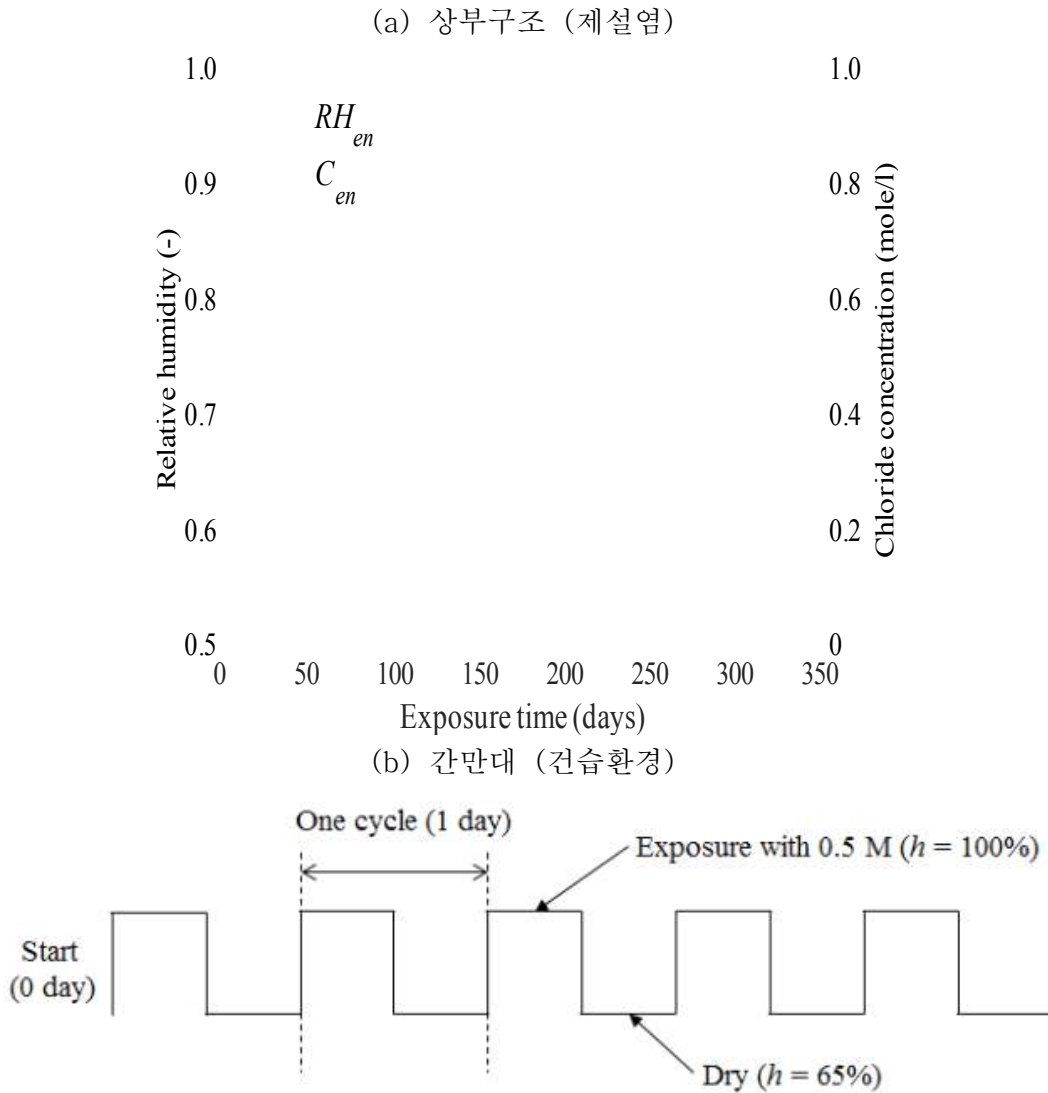
여기서, B_c : 염분전달 계수 (m/s) C_s : 표면염화물 농도 C_{en} : 외기 염분농도이다. 수분이동에 대한 항 ($C_{en} J_m^s$)은 외기의 수분포화 상태에서의 염분이동은 확산과 대류에 의해 발생하는 것을 의미하며, 건조 상태에서의 경계조건은 washing effect가 없는 한 외기에 대해 감소되지 않으므로, 각 전달율 (B_c, B_h)은 0으로 설정한다.

앞서 언급한 노출형태에 따른 제설염 및 조수간만대의 경계조건을 모의하기 위해 교량의 상부구조물 및 하부구조물 중 조수간만대에 해당하는 외기습도 및 염분농도의 변화는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{상부구조: } h_{en} &= \frac{h_{\min} + h_{\max}}{2} + \frac{h_{\min} - h_{\max}}{2} \sin(2\pi t) \\ C_{en} &= C_{en} (h_{en} > \frac{h_{\min} + h_{\max}}{2}) \text{ or } 0 (h_{en} < \frac{h_{\min} + h_{\max}}{2}) \end{aligned} \quad (3.52)$$

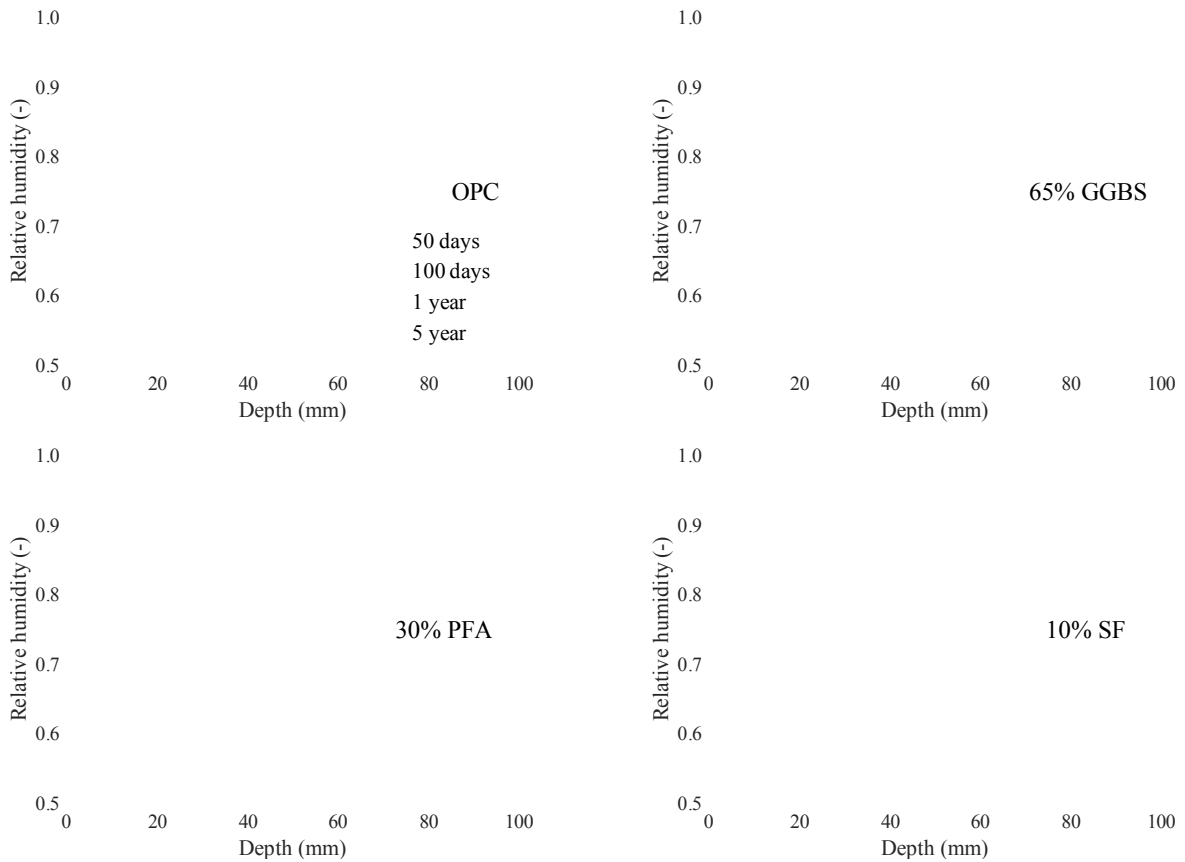
$$\begin{aligned} \text{하부구조 (조수간만대): } h_{en} &= 100\% (\text{hightide}) \text{ or } \frac{h_{\min} + h_{\max}}{2} (\text{lowtide}) \\ C_{en} &= C_{en} (\text{hightide}) \text{ or } 0 (\text{lowtide}) \end{aligned} \quad (3.53)$$

여기서, $h_{\min}$: 연간 최저 상대습도 $h_{\max}$: 연간 최대 상대습도이며, 만조 (high tide) 및 간조 (low tide)는 각각 0.5 일을 기준으로 이루어지는 것으로 가정한다. 위 식을 이용해 연간 및 하루 동안 변화하는 외기조건에 대한 염분의 확산-대류 이동을 시간에 따라 결정한다.

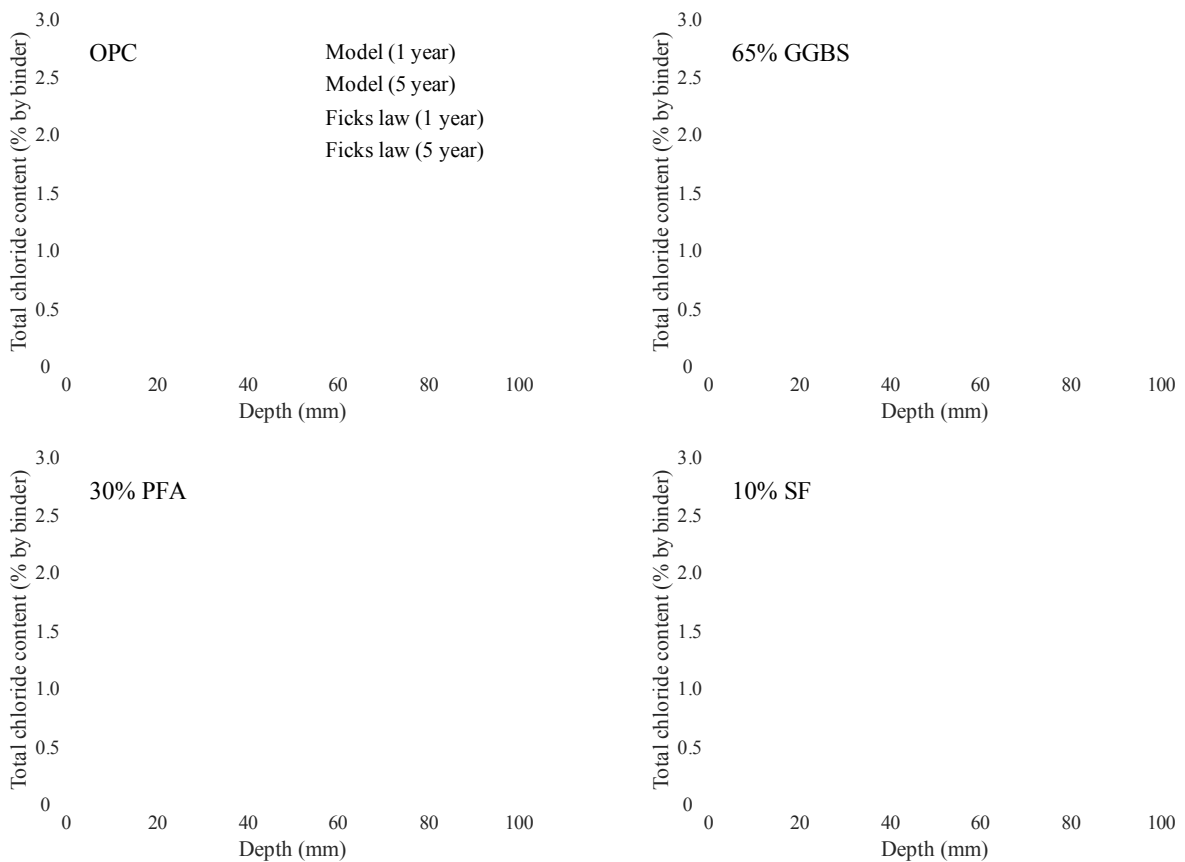


<그림 3.1.6> 외기 조건 별 상대습도 및 염분농도 조건

(a) 상대습도 분포

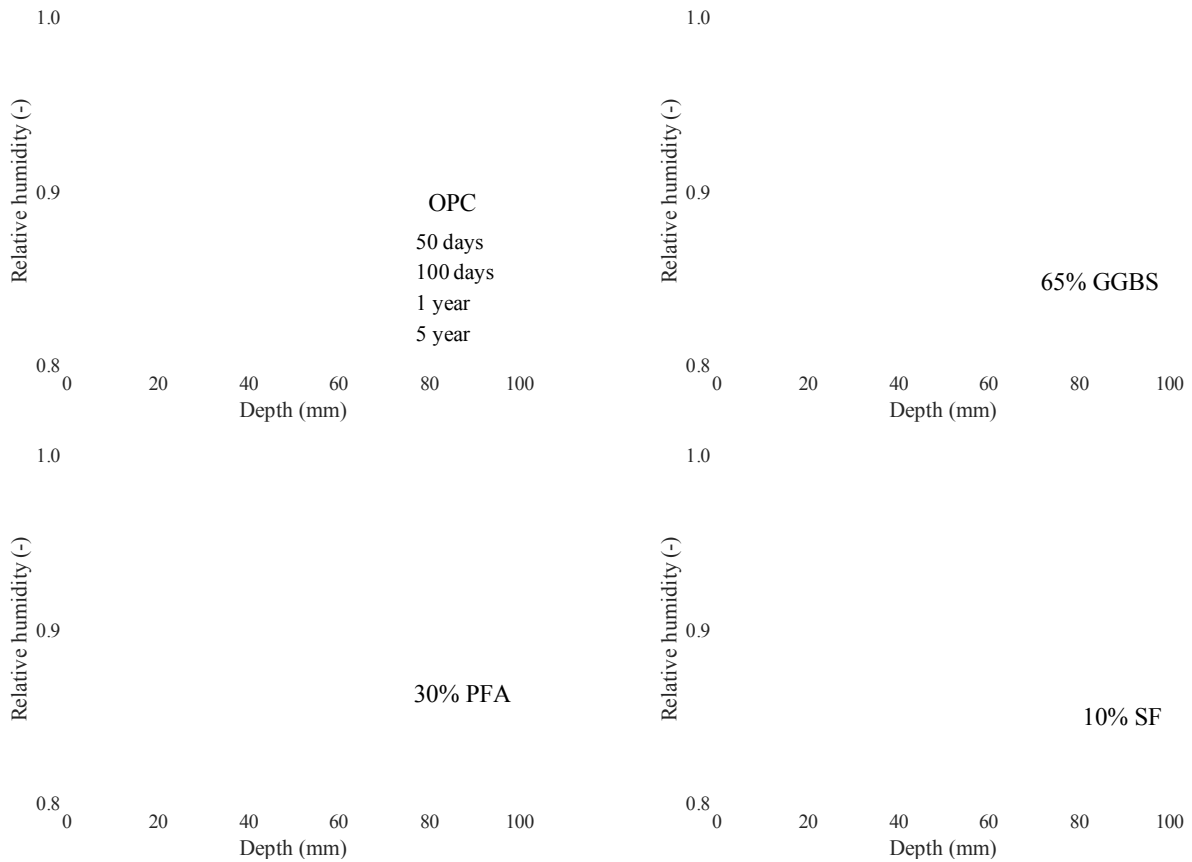


(a) 염분농도 분포

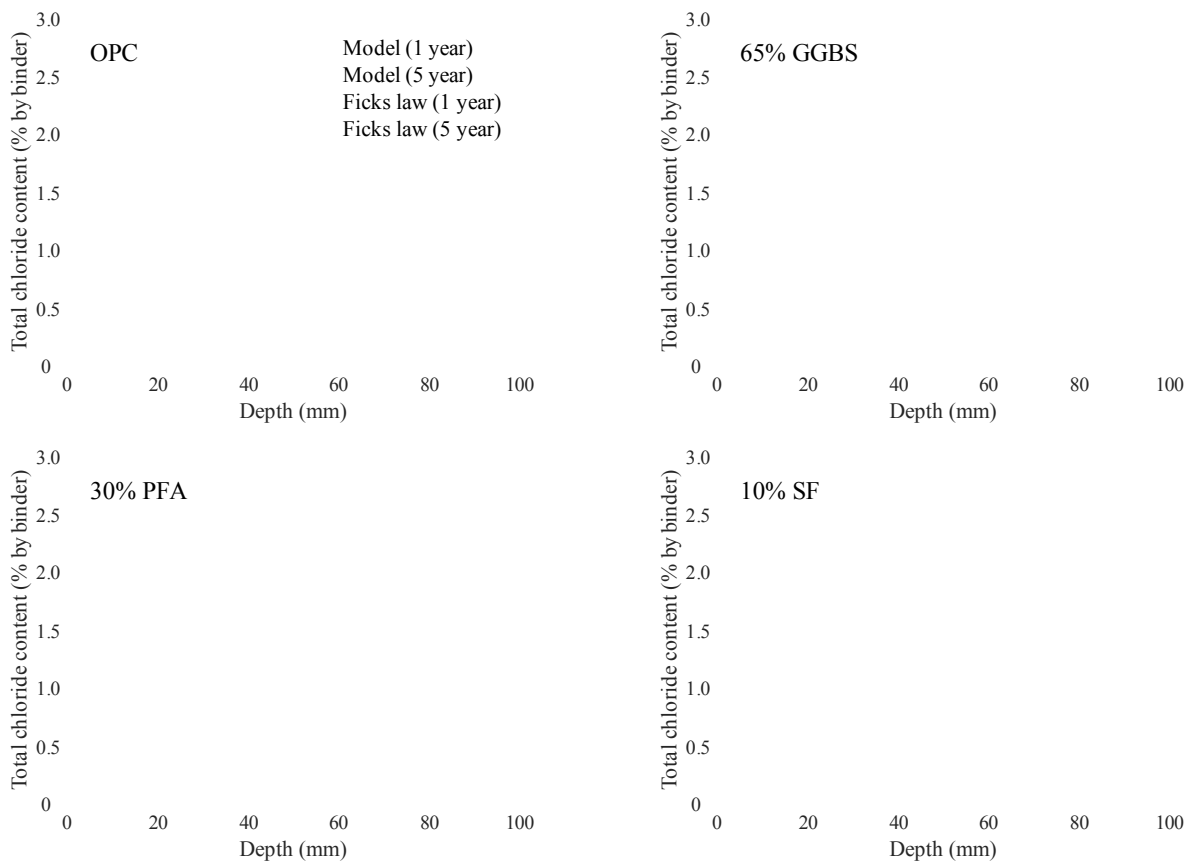


<그림 3.1.7> 상부구조를 고려한 콘크리트 내 수분 및 염분농도 분포

(a) 상대습도 분포



(a) 염분농도 분포



<그림 3.1.8> 간만대를 고려한 콘크리트 내 수분 및 염분농도 분포

외기조건 (습도 및 염분농도)에 따른 콘크리트 내 염분이동에 대한 모의결과를 다루기 위

해 먼저, 구조물의 노출환경 별 외기조건을 다음 <그림 3.1.6>과 같이 나타냈으며, 각 경우에 대해 수분 및 염분농도 분포를 <그림 3.1.7, 3.1.8>에 나타내었다.

상부구조 (제설염)에 대한 경계조건은 약 150일 동안 최대 습도 99%와 최저 습도 65%의 평균인 약 80%이하에 대해서 건조 환경을 설정하였고, 그 이후 약 170일 동안 평균습도를 웃도는 기간에 대해 습윤 환경을 설정하였다. 이는 교량의 상부구조 상판에 해당하는 콘크리트 도로에 제설염의 투입 (0.5 M)은 적설량에 영향을 받아 콘크리트 표면부에 높은 상태의 습도를 유지하기 때문이다. 반면 건조 환경에서는 외기의 습도변화 약 65-80%에 해당함으로 이 상태에서는 외부 염분농도는 0으로 간주하였다. 반면, 바닷물의 해수위 변화에 따른 교량 하부구조 중 간만대의 경우 만조 시 콘크리트 표면이 완전하게 해수에 잠기기 때문에 이때의 경계조건은 상대습도 약 100% (모든 공극이 포화상태) 및 염분농도 0.5 M로 설정하였으며, 간조 시 콘크리트 표면은 외기에 노출되기 때문에, 상대습도 연평균 65% 및 염분농도 0 M로 설정하였다.

이와 같은 경계조건을 적용하여, 콘크리트 내 수분 및 염분 분포에 대해 초기 노출기간 (50, 100일) 및 1, 5년에 해당하는 노출기간을 적용하여, <그림 3.1.7, 3.1.8>과 같이 나타내었다. 교량의 상부구조의 경우 콘크리트 내부의 수분분포는 최대 노출기간 (5년)에 대해 약 98%이상을 나타냈으며, 이는 초기조건인 99% 수분함유량과 유사한 값을 보여, 콘크리트 내부는 초기 노출기간동안 (약 100일) 외기의 건조 환경에 영향을 받지만, 시간이 지날수록 원래 함수량을 되찾는 경향을 보였다. 또한, 노출기간 1년에서 5년 동안 표면염화물 농도가 일반 확산 식 (Fick's law)에 근접해가는 경향을 나타냈다. 이는 외기염분농도와 콘크리트의 표면염화물 상태를 일치하게 설정하였을 때 보다 약 0.5배에 해당하기 때문에 초기노출 기간에는 외기로부터 표면염화물의 생성이 매우 낮기 때문이다. 이 결과 콘크리트 내 전반적인 염분분포 또한 표면으로부터 영향을 받아 일반 확산 식과 비교 시 낮은 결과를 나타내었다.

간만대의 경우 외기변화는 상부구조와 달리 0.5일 간격으로 변화하기 때문에 표면에서의 습도분포는 급격히 줄어들다가 콘크리트 내부로 갈수록 수분이 증가하는 추세를 나타내었다. 그러나 시간이 흐를수록 외부로 유출되는 수증기 형태의 수분으로 인해 콘크리트 내부 전반적으로 감소하는 경향을 보였으며, 이는 염분이동에 있어 일반 확산 식과 비교 시 표면에서부터 감소하는 경향을 보였다. 반면 모든 배합에 대한 표면염화물농도는 외기조건을 고정으로 본 확산 식에 비해 약 85%의 감소된 값을 노출시간에 상관없이 나타내었으며, 이는 전체 노출기간에 비해 0.5일 간격의 매우 짧은 건습기간에 기인한 것으로 판단된다.

다양한 외기조건에 대한 콘크리트 구조물의 내구성을 평가하기 위해 일반 확산 식을 사용할 경우 구조물의 내구수명을 과소 및 과대평가할 수 있으므로, 본 연구에서 개발한 건습환경 조건의 확산-대류 기반 염분이동 모델은 이와 같은 구조물의 내구성 예측에 적합한 것으로 판단된다.

3.1.2. 부식팽창에 따른 콘크리트 균열전파 예측

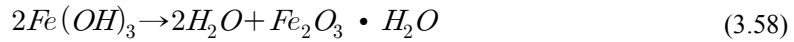
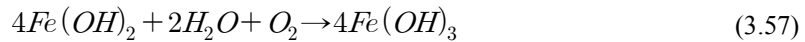
가. 철근부식진행 예측 모델

외기환경으로부터 콘크리트 매체내로 온도, 습도, 염도의 유입은 콘크리트 내 철근의 부식을 유발시킨다. 이러한 환경을 갖는 해양 구조물의 경우 위 3가지 물질들에 대한 침투 해석을 먼저 수행하고, 철근깊이에서의 이들 간의 상관성을 고려하여 부식모델을 개발하였다.

이에 대한 열화기구는 외부로부터의 유해인자 침투로 인해 콘크리트 내 철근표면에 시간에 따라 누적되면서, 수산화피막 부동태 형성에 따른 보호막 (Passive film)을 파괴시키면서, 부식이 다음과 같은 절차로 진행된다.



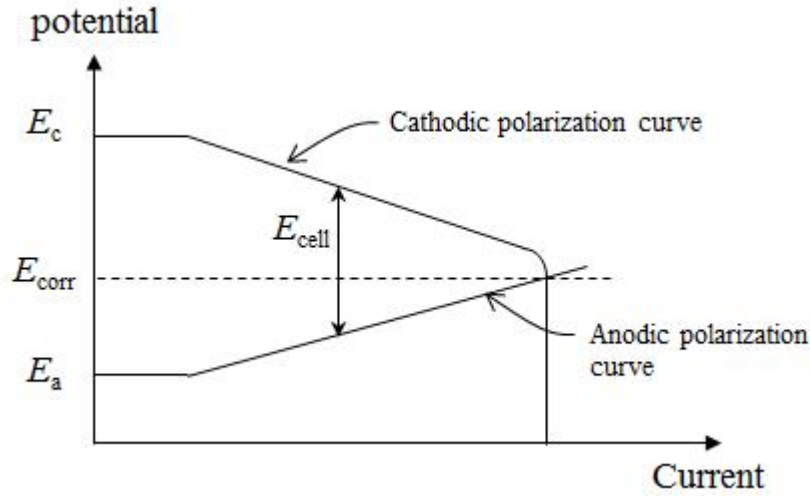
만약, 식 3.54와 같이, 양극반응에 있어 식 3.55와 같이 1단계의 산화반응만이 일어나면, 콘크리트 내 부식으로 인한 콘크리트의 균열이 발생하지 않는다. 이는 추가적으로 콘크리트 공극수 내 수산화이온과 반응을 하여 다음과 같은 형태의 녹을 발생시킨다.



여기서, $Fe_2O_3 \cdot H_2O$: red rust이며, 철의 원래 부피보다 약 4배의 팽창을 하여, 부식물의 진전이 철근과 콘크리트 계면을 가득 채우면, 콘크리트 요소에 팽창력을 일으키며, 철근주변 으로부터 응력변화에 따른 균열 및 탈락현상을 발생시킨다. 부식전위가 생성되면서, 각 음극과 양극 사이 전류의 흐름은 평형상태에서의 전위 값과 멀어지게 되며, 전극 간 분극화를 일으키며, 부식전류를 유발시킨다. 이에 대한 설명으로 <그림 3.1.9>의 Evans 다이어그램을 나타내었다. 여기서, 철근주변 분극화로 인해 새로운 평형상태 (Ecorr) 발생에 따라, 철근 콘크리트 계면을 통과하는 양극과 음극 간 전류량은 다음과 같이 평형상태로 간주할 수 있다.

$$i_{corr} = i_a A_a = i_c A_c \quad (3.59)$$

여기서, A_a , A_c : 각각 양극과 음극에 해당하는 철근면적.



<그림 3.1.9> 철근부식의 양극 및 음극 반응에 대한 Evans 다이어그램

철근 주변에 염소이온으로 인한 보호막의 용해로 인해 상대적으로 전위차가 발생되며, 부식 전류가 철근표면에서부터 발생하여 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$i = -\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial n} \quad (3.60)$$

여기서, i : 전류밀도 (A/cm^2), ϕ : 전위 (volts), r : 콘크리트 음저항 (ohm-cm), n : 철근 표면으로부터 전류의 방향벡터.

철근의 부식진전 속도는 전류밀도와 비례하며, 패러데이 법칙 (Faraday's law)에 따라 수산화제일철 ($Fe(OH)_2$)의 철근표면에서부터 발생시킨다. 이는 음극에서 소비되는 산소밀도와 비례하며, 다음 식과 같이 철근계면에서의 산소이동 속도 (확산-대류)와 관련시킬 수 있다.

$$J_c = -\frac{i_c}{zF} \quad (3.61)$$

여기서, J_c : 음극에서의 산화반응에 따른 전류흐름 (mol/m^2s), z : 철근표면에서의 전류 흐름에 대한 단위 이온 수, F : 패러데이 상수 ($96,486.7 C/mol$).

위 식 3.61의 Flux 방향은 외기로부터 철근표면으로 산소의 유입을 의미하며, 산소 단위 분자 O_2 ($32 g/mol$)가 음극에서 소비될 때 4 mol의 수산화이온 (OH^-)를 발생시킨다. 이는 4개의 단위 이온 수 (z)를 의미하며, 위 식 3.60에 대입 시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_{c,o} = -8.291 \times 10^{-8} i_c \quad (3.62)$$

음극에서 발생하는 수산화이온의 공급수를 통한 양극에서의 철 이온과 반응속도는 양극에서 발생하는 전류밀도를 이용하여 다음과 같이 관계시킬 수 있다.

$$J_{fer} = \frac{i_a}{zF} = 4.656 \times 10^{-7} i_a \quad (3.63)$$

여기서, j_{fer} : 양극에서 발생하는 수산화철의 생성율 ($\text{kg/m}^2\text{s}$). 또한, 위 식 3.57과 같이 산소와의 추가적인 반응으로 red rust를 발생시키며, 이는 4 mol의 수산화철 (359.38 g)과 산소 1 mol (32 g/mol)의 반응에 의해 4 mol에 해당하는 Fe(OH)_3 를 발생시킨다. 이를 위의 녹 생성율과 같은 방법으로 이번엔 양극에서의 추가 산소 소비량을 적용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J_{a,o} = -\frac{32}{359.38} J_{fer} = -4.144 \times 10^{-8} i_a \quad (3.64)$$

이는 외기로부터 시간에 따른 철근주변 공극수내 용존 산소량이 부식전전에 단일 인자로 간주하는 방법이나, 실제 콘크리트 내 철근에서의 녹 생성은 산소이외, 습도, 온도, 염도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 양극에서의 부식전류를 철근주변 유해인자 농도와 관련시키기 위해 Dynamic corrosion model을 다음과 같이 도입하였다. 이는 기존 고정 임계 전류밀도 ($i_{corr} = 1 \mu\text{A/cm}^2$)를 통한 해석과 달리, 해수에 노출된 실 콘크리트 구조물의 5 년간 수집한 데이터를 통한 비선형 회기분석 모델 (Cady and Weyers)로써, 콘크리트 내 염도, 온도, 및 콘크리트 옴저항을 주된 변수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{corr} = 0.926 \times \exp \left[7.98 + 0.7771 \times \ln(1.69 C_t) - \frac{3006}{T} - 0.000116 R_c + 2.24 t^{-0.215} \right] \quad (3.65)$$

여기서, C_t : 총 염소이온 농도 (kg/m^3), R_c : 콘크리트 피복두께에 해당하는 옴저항 (ohm), t : 부식진행 시간 (year).

또한, 외기조건을 반영한 콘크리트 옴저항과 총 염소이온 량과의 비선형 관계로써, 다음과 같은 식을 이용할 수 있다.

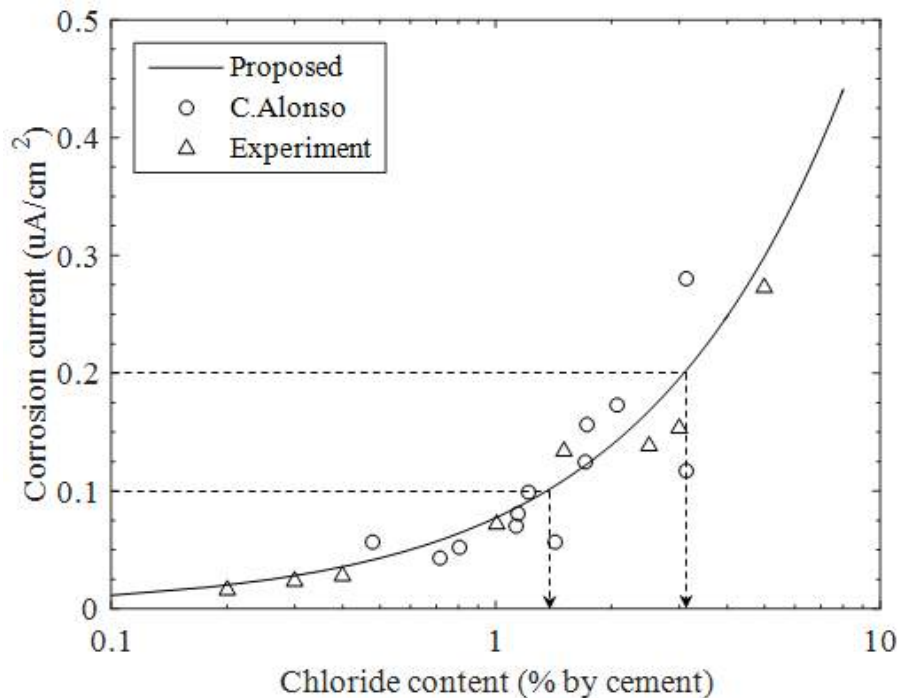
$$R_c = \exp [8.03 - 0.549 \times \ln(1 + 1.69 C_t)] \quad (3.66)$$

이를 통해 콘크리트 내 온도, 습도, 염도의 시간에 따른 침투농도에 대해 철근깊이에서의 부식전류를 결정할 수 있으며, 패러데이 법칙을 적용하여 다음과 같은 부식 생성물 (Fe(OH)_3)을 결정할 수 있다.

$$J_{rust} = \frac{106.845}{89.845} J_{fer} = 5.536 \times 10^{-7} i_a \quad (3.67)$$

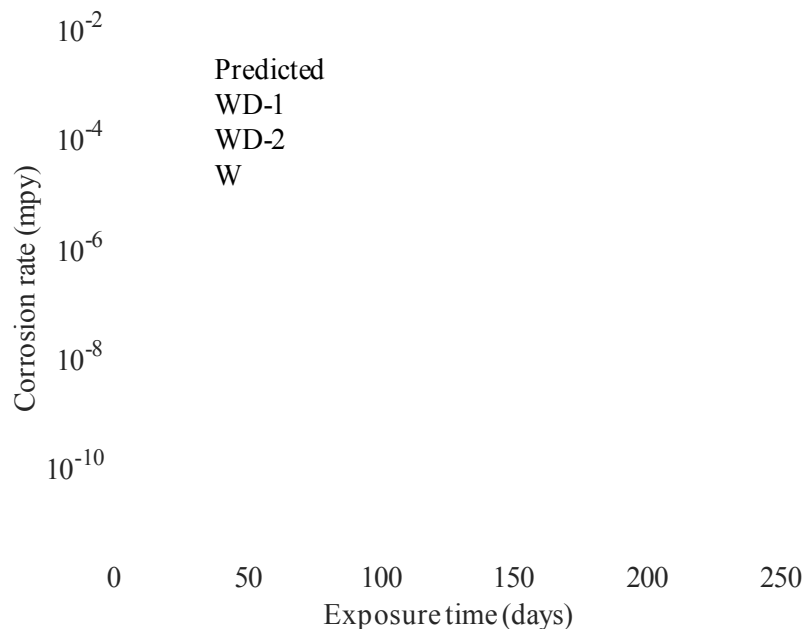
콘크리트 내 철근의 유해인자 (염화물 농도)에 따른 부식성을 평가하기 위해 제안 모델과 부식 시험 데이터와 비교분석을 다음 <그림 3.1.10>에 나타내었다. 온도 및 습도조건은 각

각 상온 20℃ 및 준 포화상태로 설정하고, 염화물농도에 따른 부식전류밀도를 측정한 결과 농도에 비례하여 증가하는 추세를 나타내었다. 이는 기존의 갈바닉 전류방법으로 철근 콘크리트 내 부식전류를 측정한 C.Alonso et al [2000]의 연구결과와 비슷한 경향을 보였으며, 제안 모델과 비교 시 근접한 결과를 나타내었다. 염화물 농도와 부식전류간의 상관성은 낮은 농도 (0.1 ~ 0.5 % by cement mass)에 대해서는 서서히 증가하는 추세를 보였으나, 약 1.0 % by cement mass 이상 농도를 나타낼 시 전류밀도의 급격한 증가율을 나타내었다. 또한, 부식개시 전류밀도로 알려진 약 $0.1 \sim 0.2 \mu A/cm^2$ 에 해당하는 임계염화물 농도 범위는 시멘트 중량대비 1.3 ~ 3.2%로 나타났으며, 이는 BS8110의 규정에 알려진 0.4%의 약 3~8배 이상의 값에 해당된다. 따라서 기존의 염화물 농도만을 기준으로 부식개시 시점을 평가하고 이를 콘크리트 내구수명에 판단기준으로 도입 시 수명예측에 있어 과소평가된 결론을 얻을 수 있음을 암시한다.



<그림 3.1.10> 유해인자 (염화물 농도)에 따른 철근에서 부식임계 농도 평가

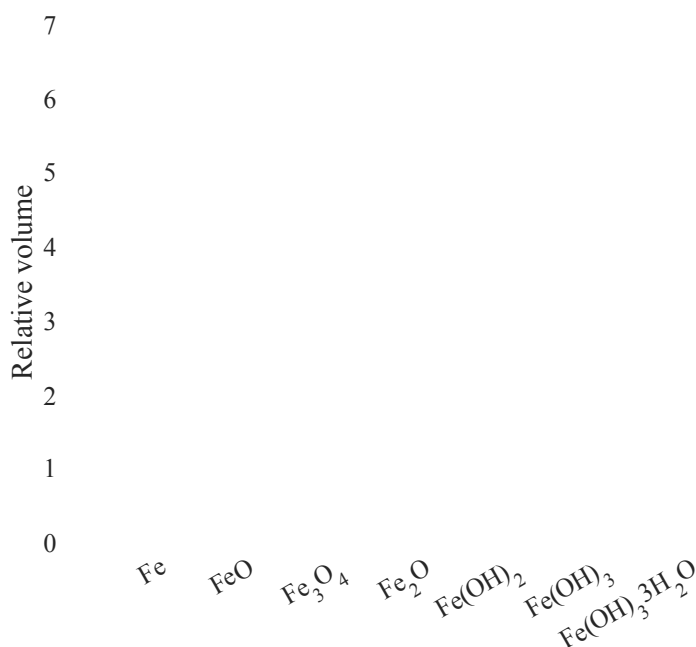
또한, 시간에 따른 콘크리트 내 철근의 부식성을 평가하기 위해 실제 해양환경에 노출된 콘크리트 구조물의 해수 위에 따른 유해인자 침투조건을 고려하여, 다음 <그림 3.1.11>과 같이 조수간만 대 중 만조 (high tide)에 가까운 WD-1 (2일 염수침지 및 8일 건조)와 간조 (low tide)에 가까운 WD-2 (5일 침지 5일 건조)를 확산-대류 현상을 감안하여 실험인자로 설정하였으며, 비교대상으로 침지 대를 모사한 W (연속침지) 상태를 추가로 시간대 별 콘크리트 내 철근의 부식률 (corrosion rate)을 측정하였다. 그 결과 해수 침지 기간이 낮을수록 혹은 건조기간이 높을수록 시간에 따른 부식진전 속도는 높아짐을 알 수 있으며, 모의 과정과 비교 시 매우 근접한 결과를 나타내었다. 이는 해수 침투과정이 해수 위 별로 상이함을 의미하며, 건조시간이 길어질수록 콘크리트 표면에서 염분침투는 습윤 상태에서 표면건조로 인한 외부와 내부의 습윤 차로인해 액상의 압침과 더불어 전반적인 염분의 확산-대류의 속도를 가속화시킨다.



<그림 3.1.11> 시간에 따른 콘크리트 내 해수 침투 조건 별 부식진전 속도

나. 철근부식에 의한 콘크리트 균열진전 모델

철근부식으로 인한 콘크리트 구조물의 주된 열화현상은 부식물의 공극충전에 따른 팽창압 발생으로 인한 균열 및 탈락현상을 들 수 있다. 이러한 팽창 압은 철은 원래 비중보다 산화되면서 발생하는 비중저하로 인한 부피증가이며, <그림 3.1.12>와 같이 산화물 상태에 따라 최대 6배까지의 상대증가율을 나타낸다. 이러한 부피증가는 철근으로부터 콘크리트 주변 요소에 인장응력을 부가시키며, 콘크리트 최대 인장응력을 넘어선 경우 해당지점으로부터 균열을 발생시키며, 이는 콘크리트 내하력을 상실하는 단계이며, 긴급보수를 요하는 시점이다.



<그림 3.1.12> 철근부식물의 산화물 형태에 따른 상대부피 증가율

철근부식으로 인한 부피팽창에 대해 본 연구에서는 원형철근에 대해 방사형 녹 생성 모델을 제안하며, 다음 <그림 3.1.13>과 같이 철근직경과 상관성을 갖는다. 철근의 단위면적을 고려하여, 부식개시 이후 시간에 따른 부식진행 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_{rust} = J_{rust}(t - t_i)\pi d \quad (3.68)$$

여기서, m_{rust} : 철근표면의 부식침전율 (kg/m), t_i : 부식개시 시점 (year).

따라서 부식개시 이후 철근계면 공극에 부식침전물은 시간에 대해 식 3.68를 합산한 것과 같으며, 철근의 표면부에서 부식으로 인한 단면손실은 철근의 원래 비중을 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_{steel} = 0.523 \times m_{rust} \quad (3.69)$$

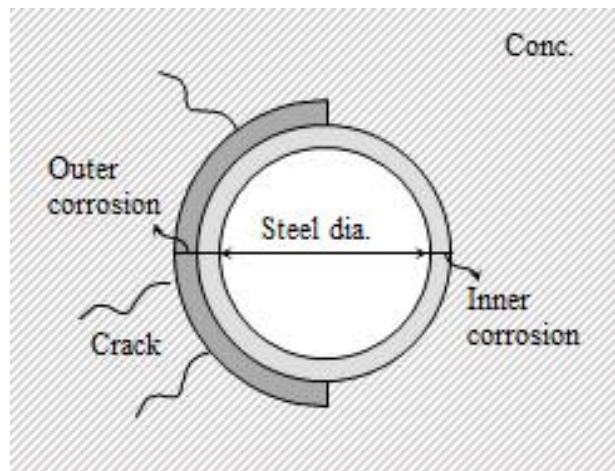
여기서, m_{steel} : 부식진전으로 인한 철근손실을 (kg/m).

위 식 3.68와 3.69를 이용하여, 부식으로 인한 철근부피 증가율은 외부 부식물 (Outer corrosion product)에서 철근내부 부식으로 인한 손실량 (Inner corrosion product)을 제외한 값이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta V = \frac{m_{rust}}{\rho_{rust}} - \frac{m_{steel}}{\rho_{steel}} = m_r \left(\frac{1}{\rho_{rust}} - \frac{0.523}{\rho_{steel}} \right) \quad (3.70)$$

여기서, ΔV : 철근부식으로 인한 철근 단위길이 당 부피증가 량 (m^3), ρ_{rust} , ρ_{steel} : 철근 및 부식물의 비중 (kg/m^3). 철근직경 반경과 같은 방향으로 부식팽창이 일어나는 조건을 가정으로, 2차원 원형 철근직경 증가에 따른 단위 팽창율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \frac{4m_r}{\pi d^2} \left(\frac{1}{\rho_{rust}} - \frac{0.523}{\rho_{steel}} \right) \quad (3.71)$$



<그림 3.1.13> 원형철근의 부식진행 방향

또한, 철근표면으로부터 콘크리트 요소에 전파되는 내부팽창력은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\epsilon_v = \frac{2p_i}{E_r}(1+v_r)(1-2v_r) \quad (3.72)$$

여기서, p_i : 철근 팽창 압 (MPa), v_r : 부식물의 포아송 비, E_r : 부식물의 탄성계수이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_r = 3(1-2v_r)K_r \quad (3.73)$$

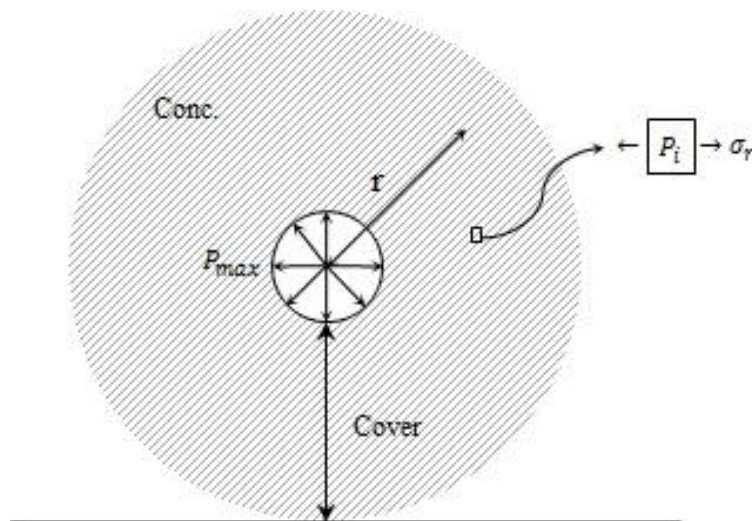
여기서, K_r : 부식물의 체적 탄성율이며, 2 GPa로 가정하였다.

본 연구에서는 콘크리트 균열전파모델의 가정으로 Concrete ring model을 사용하였으며, 이는 부식물의 팽창에 따른 방사형 응력변화를 콘크리트 최소 피복두께에 균열전파를 일으키는 것으로, <그림 3.1.14>와 같은 방식이다. 2차원 콘크리트 단면으로 고려하였을 때 부식으로 인한 팽창력은 철근표면에 근접한 콘크리트 요소에 최대 응력 값을 부여하며, 철근표면에서 멀어질수록 인장응력은 현저히 감소한다.

콘크리트 내 응력은 철근 반 직경 ($d/2$)에서 콘크리트 최소 피복두께 ($c + d/2$)까지 균일하게 변화하는 것으로 가정하여, 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma_r = \frac{(d/2)^2 p_i}{(c+d/2)^2 - (d/2)^2} \left(1 - \frac{(c+d/2)^2}{r^2} \right) \quad (3.74)$$

$$\sigma_t = \frac{(d/2)^2 p_i}{(c+d/2)^2 - (d/2)^2} \left(1 + \frac{(c+d/2)^2}{r^2} \right) \quad (3.75)$$



<그림 3.1.14> Concrete ring 이론에 대한 방사형 철근부식 팽창압 전파

여기서, σ_r : 반지름 방향 압축응력 (MPa), σ_t : 접선 방향 인장응력 (MPa), d : 철근 지름 (mm), c : 콘크리트 피복두께 (mm), p_i : 부식물 팽창에 따른 계면에서의 팽창압력 (MPa), r : 콘크리트 방사방향 응력에 해당하는 반지름 (mm).

또한, 접선방향 인장응력은 철근계면에서 최대치를 갖으며, 위 식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_t^{\max} = p_i \times \frac{(c+d/2)^2 + (d/2)^2}{(c+d/2)^2 - (d/2)^2} \quad (3.76)$$

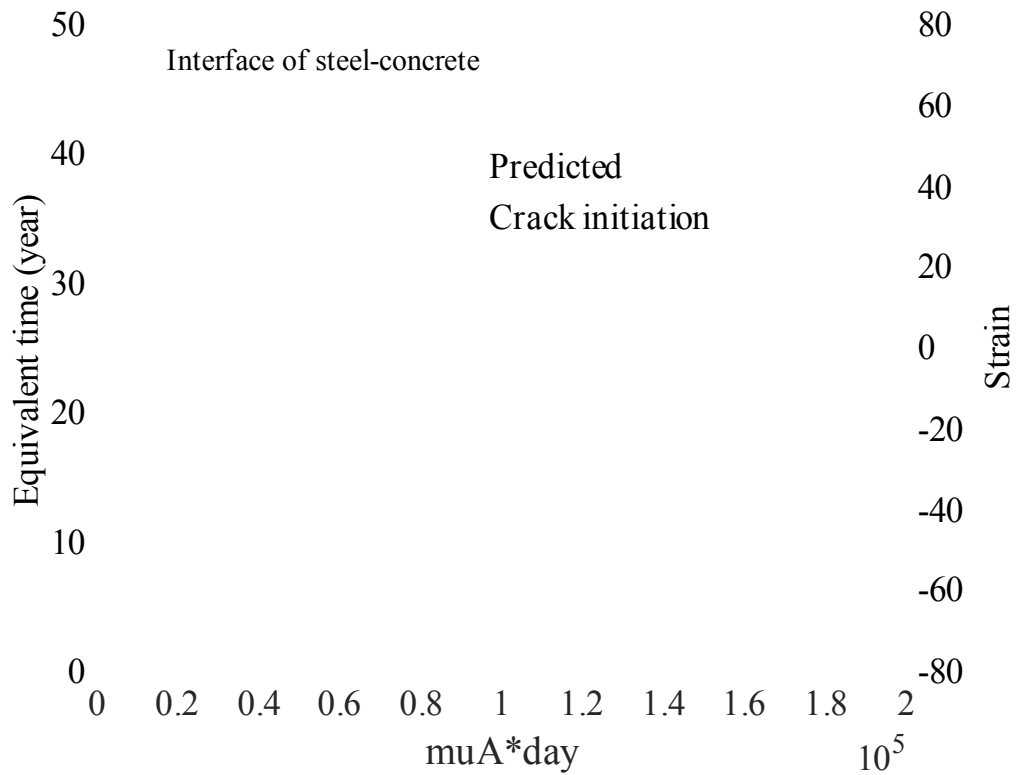
부식 팽창압력이 철근주변에서 최대치를 가지며, 콘크리트 내부 피복두께까지 전파된다. 이는 콘크리트 최대 인장응력을 넘기는 부분은 균열이 발생하는 요소로 간주하고, 시간에 따라 철근주변으로부터 바깥방향으로 진행되는 강성저하 구간으로, 균열전파 수렴까지의 기간을 잔존수명으로 정의하였다. 콘크리트 강성에 대한 규정 (ACI committee 363)은 다음과 같이 압축강도에 대한 식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{Normal strength concrete} \quad f_{sp} = 0.4 \times \sqrt{f'_c} \quad (3.77)$$

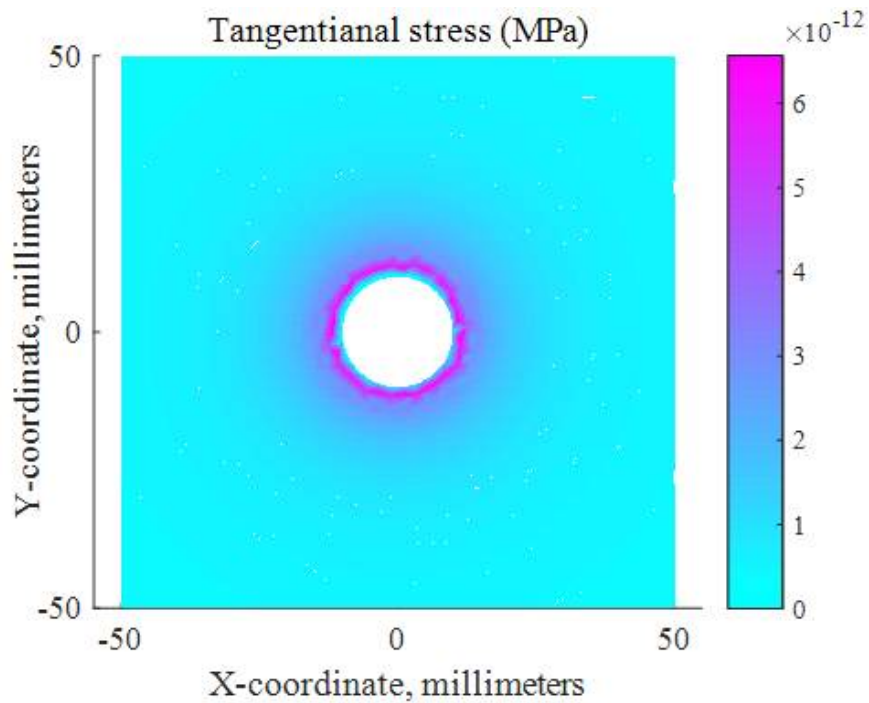
$$\text{High strength concrete} \quad f_{sp} = 0.59 \times \sqrt{f'_c} \quad (3.78)$$

유해인자의 콘크리트 내 철근주변 농도변화에 따른 부식전류 발생 및 이로 인한 부식물 발생은 콘크리트 내부로부터 응력을 발생시킨다. 부식물이 콘크리트와 철근계면을 채우게 되면, 철근깊이에서부터 압축 및 인장응력을 일으키며, 콘크리트 요소 전방으로 응력이 분포된다. 콘크리트의 인장응력은 압축과 비교 시 취약하므로, 최대 인장응력을 벗어난 지점부터, 균열이 발생되고, 이는 철근깊이에서 콘크리트 최소 피복두께를 통해 전파된다.

본 연구에서는 이러한 현상을 탄성이론에 의해 Faraday's law 기반 철근부식전류와 부식물진전을 기반으로 모델화하였으며, 콘크리트 인장응력을 기반으로 전류인가 응력변화도 시험결과와 철근에서 방사형 팽창 형태의 모델과의 비교분석을 다음 <그림 3.1.15>에 나타내었다. 그 결과 철근과 콘크리트 사이 계면에서의 철근주변 부식물 침전에 따른 팽창성은 시간에 따라 급증하며, 이는 인가전류량과 비례하는 특성을 보였다. 이러한 경향은 유해인자의 철근깊이 (50 mm)에 누적되는 시간이 필요하며, 10-20년 사이에 증가하는 추세를 나타내었다. 이는 인가전류를 시편에 가했을 시 누적되는 부식전류를 실제 유해인자가 콘크리트 내 철근에 도달하고 부식전류가 발생하는 시간으로 환산한 결과이다.



<그림 3.1.15> 인가전류로 인한 응력변화도와 Free expansion 모델과의 균열발생
시점 비교분석



<그림 3.1.16> 10년 염해환경 노출 후 철근주변 부식생성에 따른 2차원 콘크리트
단면 내 인장응력 분포

이와 같은 콘크리트 내 응력분포 현상을 실제 구조물 노출 환경을 모사한 경계조건에 적용하여, 다음 <그림 3.1.16>과 같은 결과를 나타내었다. 콘크리트 FEM 요소 별 응력전과 특성은 철근주변에 집중되며, 원주형 철근 중심부로부터 방사형으로 진행되는 결과를 나타내었

다. 특히, 철근표면에서 약 5 mm 부근까지 응력변화가 극심하며, 그 이상 깊이에서는 급격하게 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 콘크리트 구조물의 피복두께 설계 시 해당 외기조건이 염분과 직접적으로 노출된 경우 충분한 깊이로 보강해야함을 의미한다.

3.1.3 Electrochemical treatment 기반 내구성증진 평가

염해로 인한 콘크리트 내 철근부식은 외부로부터 염소이온을 함유한 수용액 (제설제 혹은 해수 등)의 콘크리트 피복두께를 통해 철근표면에 누적됨으로써 발생되며, 콘크리트 균열발생 및 피복탈락 등 구조적 결함을 야기 시킨다. 따라서 염해환경에 노출된 RC구조물의 경우 항상 부식으로 인한 내구성저하 현상을 수반해야하며, 이를 예방하고자 다양한 보수기법들이 적용되어졌다. 그중 전기화학적 처리기법인 Electrochemical chloride removal (ECR)은 기타 공법들에 비해 비교적 짧은 기간 내에 염해로부터 내구성능을 향상시키는 방법으로 알려져 있다. 또한, ECR은 가압 전류량 및 인가시간에 따라 그 효율성이 상이하며, 콘크리트 내 염분탈착 시 공극수 내 존재하는 이온들 간의 전기적 상호작용 (electrical interaction)에 따라 이동속도가 결정되어진다. 본 연구에서는 콘크리트 표면에 양극제를 설치하고 콘크리트 내 철근으로부터 인위적으로 전류를 가하여 콘크리트 내부 염해이온의 시간에 따른 분포도를 수학적 모델을 통해 결정하고, 이를 실험적인 절차로 검증 및 평가하여, 최적의 보수 효과 조건을 도출하고자 다음과 같은 연구를 진행하였다.

가. Electrochemical treatment에 따른 철근주위 염소이온 이탈 모델 정립

전기장 존재 하 포화된 콘크리트 공극수 내 이온들은 농도 차에 의한 확산과 전압 차에 의한 이온영동에 의해 이동되며, 다음과 같은 Nernst-Planck의 물질전달 식을 따른다.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\phi \nabla J_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.79)$$

$$J_i = -z_i D_i \left(\frac{F}{RT} \nabla \Phi \right) C_i - D_i \nabla C_i \quad (3.80)$$

여기서, C_i : 공극수 내 i 이온농도 (mol/m^3), J_i : 이온유속 ($\text{mol}/\text{s} \cdot \text{m}^2$), z_i : 이온 전하수, D_i : 이온 확산계수 (m^2/s), Φ : 정전기 퍼텐셜 (Volts). 콘크리트 내부 이온들 간 전기적 상호작용 하 각 이온들의 이동은 전하 중성조건 (Charge neutrality)을 따르며, 해석 시 모든 시간 및 콘크리트 깊이에 대해 다음과 같은 조건을 갖는다.

$$I = F \sum_{i=1}^n z_i J_i \quad (3.81)$$

$$\nabla I = 0 \quad (3.82)$$

여기서, I : 전류밀도 (A/m^2). 식 3.79-3.81을 통해 전기장 하 비정상상태에서의 이온들의

이동 기구는 다음과 같은 식을 따른다.

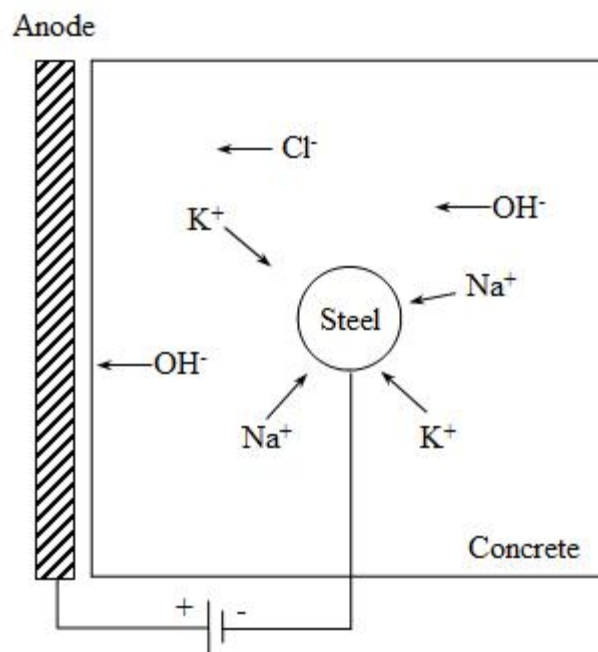
$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \nabla \left[z_i D_i \left(\frac{F}{RT} \nabla \Phi \right) C_i \right] + \nabla (D_i \nabla C_i) \quad (3.83)$$

$$\frac{F}{RT} \nabla \Phi = - \frac{(I/F) + \sum_{i=1}^n z_i D_i \nabla C_i}{\sum_{i=1}^n (z_i)^2 D_i \nabla C_i} \quad (3.84)$$

위 식 3.83은 콘크리트 깊이 별 전기장 차이에 따라 이온들의 이동능이 결정되며, 외부에서 걸어주는 전류량에 비례한다. 콘크리트 내부 철근 (음극)과 외부에서 걸어주는 양극제간 일정 전압 차에 의해 콘크리트 피복에서 전류밀도 분포는 다음과 같은 2차원 라플라스 방정식을 따른다.

$$\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad (3.85)$$

여기서 $I_x = \partial \psi / \partial x$, $I_y = \partial \psi / \partial y$. 콘크리트 표면에 위치한 양극제와 내부 철근 간 특정 전류 밀도를 가하여, 발생하는 예상 이온흐름은 다음 <그림 3.1.17>과 같다. 시멘트수화 시 발생하는 주요 성분들에 대해 본 연구에서는 칼륨 (K^+), 나트륨 (Na^+), 칼슘 (Ca^+), 수산화기 (OH^-), 염소 (Cl^-) 이온으로 가정하였다. 그밖에, 황산염, 마그네슘 이온들 혹은 미수화물에 의해 발생하는 추가적인 이온들은 위 5가지 성분들에 비해 콘크리트 공극수 내 그 존재량이 매우 적으므로, ECR 모델해석에서 제외시켰다.



<그림 3.1.17> ECR 도입 후 콘크리트 공극수 내 이온이동

ECR 도입 시 콘크리트 내부 이온분포는 외부에서 걸어주는 전압 차에 비례하며, 그로부터 발생하는 전류밀도는 콘크리트 내부 철근에서 다음과 같은 음극반응으로 일으키며, 철근주변에 수산화이온 (OH^-)을 발생시킨다.

$$2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4e^- = 4\text{OH}^- \quad (3.86)$$

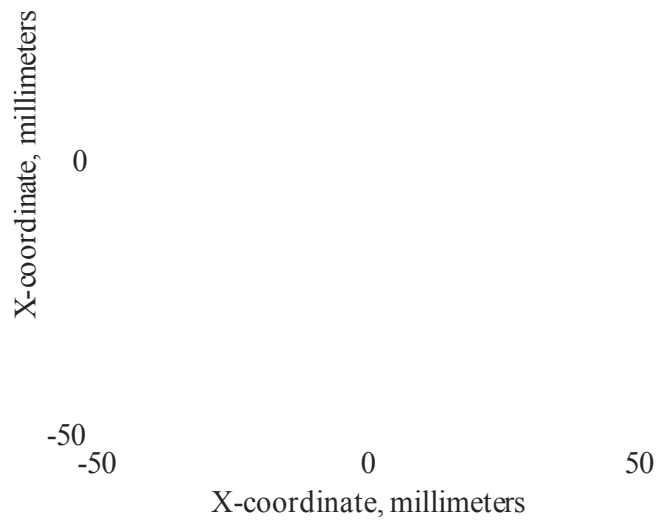
$$J_{\text{OH}} = \frac{I_{\Omega}}{F} \quad (3.87)$$

Faraday 법칙에 따라 철근깊이에서의 경계조건은 가압 전류밀도와 철근주변 수산화이온 생성량의 선형적인 관계식을 나타내지만, 그밖에 이온들에 대해서는 식 3.87의 이온유속은 0이 된다. 외부 전류가압 상태에서 콘크리트 내부 이온들의 움직임은 전압 차에 비례하지만, 동시에 해당 이온들의 고유 확산계수에 의존한다. 그러나 실험적인 방법으로 염소이온 이외 성분들에 대한 확산계수 산정법은 알려져 있지 않으며, 주로 회기분석을 통해 얻어진 값으로 사용되어진다. ECR 모델해석을 위한 초기 및 경계조건에 대한 각 이온들의 변수들은 다음 테이블 3.1에 명시하였다.

<표 3.1> ERC 해석의 초기 및 경계조건

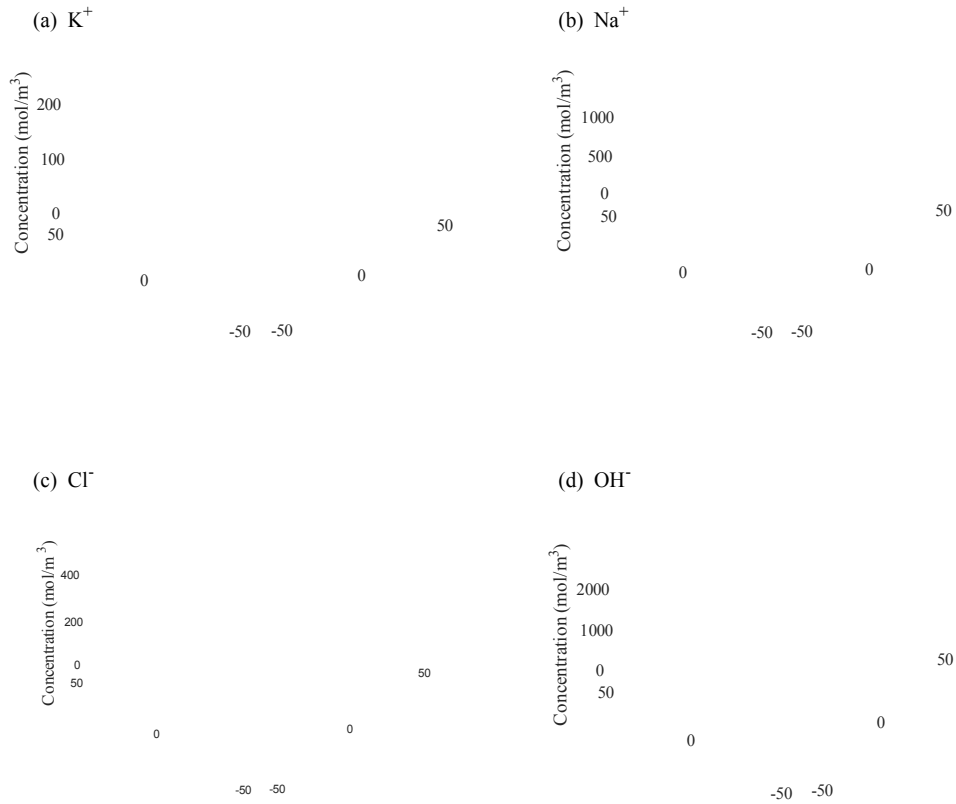
Property	Potassium	Sodium	Chloride	Hydroxyl	Calcium
C_i (mol/m ³) at anode	5	5	10	25.2	12.6
C_i (mol/m ³) at $t = 0$	100	900	380	620	0
z_i (-)	1	1	-1	-1	2
D_i ($\times 10^{-10}$ m ² /s)	0.39	0.27	1.02	5.28	0.16

Electrochemical treatment의 보수효과의 전류밀도 및 인가시간에 대한 정량적인 영향성을 평가하기 위해 위 식 3.83을 지배 식으로 표 3.1과 같은 초기 및 경계조건을 2차원 FEM 해석에 도입하였다. <그림 3.1.17>과 같이 가상 콘크리트 단면 (50×50 mm)에 철근 (φ10 mm)을 중앙에 위치시키고, 한 단면에 양극제를 위치하여, 일정 전류밀도를 가하여, 가압시간에 따른 보수효과를 평가하였다.



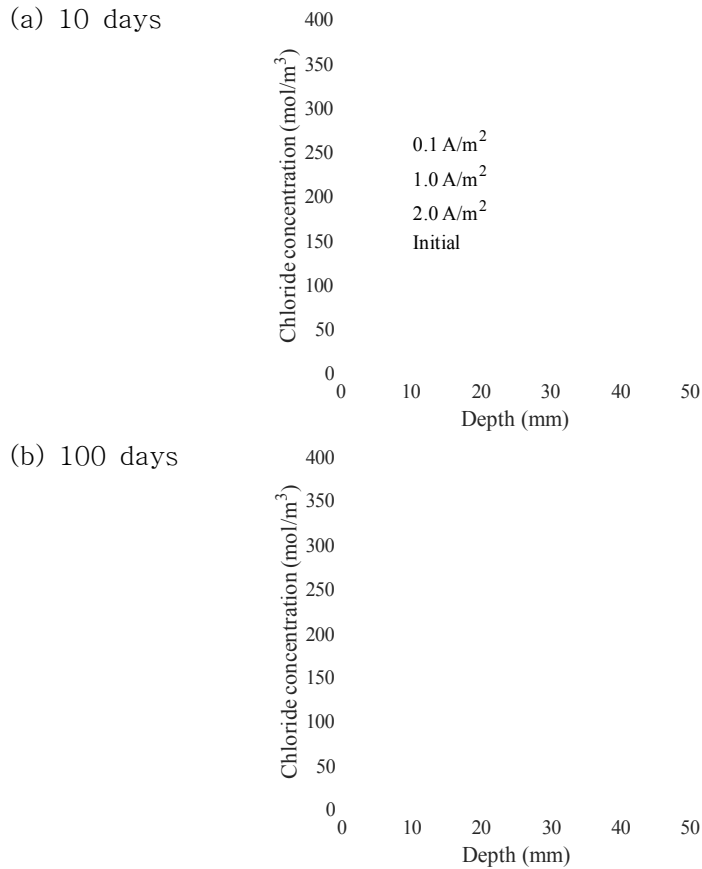
<그림 3.1.18> ECR 도입 후 콘크리트 공극수 내 이온이동

전류밀도는 총 3가지 단계로 0.1, 1.0, 2.0 A/m²로 설정하였으며, 인가시간에 따라 변화하는 이온분포도를 계산하였다. 콘크리트 내부 초기 이온분포는 전하 중성조건을 만족하는 농도이며, 콘크리트 표면과 양극제 사이 전해질로 용출된다. 1.0 A/m² 전류밀도 조건에서 10일간 이온이동을 <그림 3.1.19>에 나타내었다. 그 결과, 칼륨과 나트륨은 외기로부터 용출 속도가 낮은 반면 염소이온의 이동속도는 철근깊이에서부터 콘크리트 표면까지 비교적 높은 감소율을 나타내었다. 수산화이온의 경우 철근표면에서 음극반응으로 인해 전류밀도와 비례하게 농도증가를 보이며, 염소이온과 함께 양극제로 용출되는 속도가 높게 나타내었다. 따라서 콘크리트 내 마이너스 이온들은 확산과 염동에 의해 양극 이온보다 비교적 높은 속도로 양극제 방향으로 용출되며, 이온이동 속도는 철근직경 크기보다 콘크리트 단면 크기에 영향을 받는다.



<그림 3.1.19> 10일간 1.0 A/m² 전류밀도에서 ECR 이후 이온농도 분포

다음은 3가지 전류밀도에 대해 철근깊이에서부터 염소이온의 탈착정도를 평가하기 위해 10, 100일에 걸쳐 1차원 프로파일을 <그림 3.1.20>에 나타내었다. 그 결과, 초기 염분농도 380 mol/m³에 비해 콘크리트 표면부에서 급격한 감소를 나타내었으며, 전류밀도 및 인가시간에 상관없이 전해질농도에 도달하였다. 콘크리트 내부로부터 높은 농도 차에 의한 염분확산으로 시간에 따라 내부농도는 감소하나, 인가전류 밀도에 따라 그 감소율은 비선형적으로 증가하는 추세를 보였다. 10일간 ECR 처리과정에서 내부 염분농도는 약 20 mm 깊이에서는 초기농도를 유지하여, 보수효과를 나타내지 않았으나, 그 이후 100일 동안 철근깊이에서 급격한 염분탈착 현상이 관측되었다. 이는 인가전류밀도와 상관없이 특정 철근깊이로부터 염분 탈착성능 즉 보수효과를 얻기 위해 최소인가 시간이 필요함을 의미한다. 또한, 일정 인가 시간에 있어 전류밀도 증가는 염소이온의 전압차에 의한 이동속도를 증가시키며, 철근깊이에서 외부로의 이온 용출을 가속화시킨다. 따라서 단기기간에 높은 보수효율을 얻기 위해, 인가 전류밀도를 증가시킬 필요가 있다. 특히 100일 동안 ECR 처리기간에 있어 철근깊이에서의 초기농도 대비 감소율은 3.4, 11.6, 45.8%로 각각 인가전류밀도 0.1, 1.0, 2.0 A/m²에 해당한다.



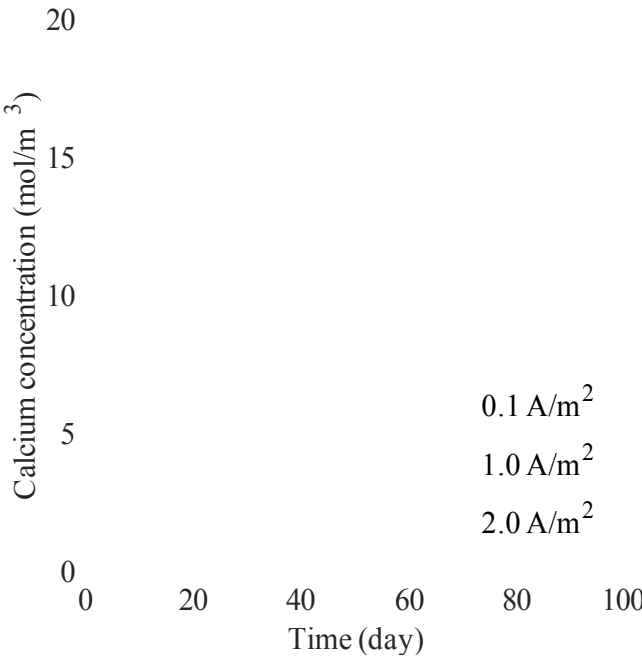
<그림 3.1.20> ECR 처리이후 철근깊이에서의 염분 프로파일

콘크리트 내 철근의 부식위험성은 고 알칼리성을 갖는 공극수에 의해 철근주변 산화피막을 형성시킴으로써 경감되지만, 장기간 염해에 노출된 상태에서는 철근주변에 유해인자 (산소, 염도 등)의 누적으로 인해 부식이 발생된다. 이를 방지하고자 인위적으로 철근에 전류를 가하여 수산화 이온의 형성을 유도하여 공극수의 알칼리도를 높이는 방법이 알려져 있다. 이는 수산화칼슘피막을 철근표면에 누적시키는 역할을 하며, 칼슘이온의 농도로 이를 평가할 수 있다. ECR 모델해석을 통해 전류밀도별 시간에 따라 증가하는 수산화이온 농도를 칼슘이온과의 평형 해리도 관계식을 통해 철근주변에서의 칼슘이온농도를 다음과 같은 식으로 산출하였다.

$$C_{Ca} = K_s / (C_{OH})^2 \quad (3.88)$$

여기서 K_s : 용해도 곱 상수 (mol^3/m^9)이며, 8.9×10^{-6} 이다. 위 식 3.88을 3가지 전류밀도에 대해 계산된 철근깊이에서의 수산화이온농도에 적용하여, 다음 <그림 3.1.21>에 나타내었다. 음극반응에 의해 인가전류량에 비례하여 수산화이온 양이 증가함에 따라 칼슘이온은 감소하나, 시간에 따라 전류밀도가 감소할수록 높은 칼슘이온 농도를 나타내었다. 이는 ECR 초기에 철근깊이에서부터 수산화이온의 급격한 발생과 동시에 시간에 따라 외기로 용출되는 양이 지속적이므로 해리된 칼슘이온이 초기에 급격히 감소하나, 시간이 지날수록 감소속도는 낮아지는 결과를 나타내었다. 그러나 0.1 A/m^2 전류밀도에서 초기 감소량은 미미하며, 오히려 시간이 지날수록 높아지는 경향을 보였다. 이는 콘크리트 표면으로 용출되는 수산화이온 양이 철근깊이 발생량에 비해 상대적으로 높기 때문이며, 철근표면에 수산화칼슘 피막을 형

성시킬 가능성이 높은 것으로 판단된다. 따라서 외부로 용출되는 염분이온의 탈착성능은 인가 전류밀도에 비선형적으로 비례하여 높아지지만, 반면 낮은 전류밀도 환경에서 철근주변에 누적되는 수산화칼슘피막은 오히려 부식개시시점을 늦출 수 있는 효과를 내재하고 있다.



<그림 3.1.21> ECR 도입 후 철근깊이에서의 칼슘이온 발생량

3.2. 모델 변수 도출 및 신뢰성 구축 (세일콘)

3.2.1. 염분침투 모델 변수 도출 시험

가. 염분흡착 능력 및 확산침투 저항성

선행 연구와 이를 기반으로 개발된 콘크리트 구조물의 내구성수명 산정 프로그램은 염분침투 메커니즘에 대한 해석과 철근 계면부에 염분 침투까지의 시간을 예측하는데 초점을 두고 있다. 하지만 기존에 개발되어온 프로그램 또는 염분침투 모델들은 콘크리트 내 염분의 확산만을 주로 해석하고 있으며 또한 시멘트의 흡착능력에 의한 염소이온 고정화 및 확산 영향성을 전혀 고려하고 있지 못하다. 따라서 본 1차년도 연구에서 주관기관 한양대학교는 선행 염분 이동 모델에 시멘트의 염분흡착 능력과 건습 반복에 의한 대류/확산 현상을 고려한 모델을 개발하였으며, 본 모델 변수 도출을 위해 아래와 같은 실내 및 실외 실험을 실시하였다.

시멘트 종류별 콘크리트 내 염분이동에 따른 염분흡착 특성을 평가하기 위해 binding test를 실시하였다. 실험 절차로는 미리 설정한 염분농도 0.1~3.0 % (시멘트 중량대비 퍼센트 농도)에 대해 8~9 단계를 두어 배합시 혼입하여 시멘트 페이스트를 제작한다. 시편의 크기는 높이 약 2cm 직경 약 5cm 크기로 제작하며, 56일 수분양생기간을 거쳐 이를 동안 오븐 건조를 시켜 시편 내 공극수를 감소시킨다. 그 이후 직경 1~3 mm 정도의 시편조각들을 얻기 위해 분쇄 후 체 가름을 실시하며, 각 농도에 해당하는 측정 샘플을 약 5 g이상 확보한다. 그 이후 뜨거운 증류수 (약 50℃ 이상)에 1시간 정도 충분히 샘플을 교반하여, 공극수 내 자유염소이온의 침출을 유도한다. 그 이후 필터종이를 이용해서 샘플을 제외한 염소이온 수용액을 여과시키고, 이온측정기를 이용해 염분농도를 측정한다 <그림 3.2.1>.



① 시편 분쇄



② 체가름



③ 교반



④ 염소이온 농도 측정

<그림 3.2.1> 염분 흡착 시험 과정

각 시편 당 8-9 단계의 자유염소이온 농도를 시멘트 중량 대비 농도 (%)로 변환시키고, 미리 설정한 염분농도 (0.1-3.0%)를 전염소이온으로 가정하여, 해당 고정화염소이온 농도를 산출한다. 그 후 다음 염분흡착 등온선 식을 이용하여, 회기분석을 통해 각 등온선 모델에 대한 상수들을 도출한다.

$$\text{Langmuir isotherm: } C_b = \frac{\alpha C_f}{1 + \beta C_f} \quad (3.X)$$

$$\text{Freundlich isotherm: } C_b = \alpha C_f^\beta$$

여기서, C_b : 평형상태에서의 고정화 염소이온 농도 C_f : 평형상태에서의 자유 염소이온 농도 α, β : 해당 등온선에 대한 모델상수이다. 회기 분석을 통해 각 페이스트 시편 별 해당 등온선에 대한 변수 값을 얻은 후 염분침투 모델 식 중 확산모델에 적용하여, 시간 및 깊이에 따른 비정상상태에서의 확산계수를 결정할 수 있다.

비정상상태에서의 콘크리트 내 염분의 확산을 평가하기위해 본 연구에서는 NT BUILD 443의 시험법을 적용하였다. 본 실험은 염분이동과정에서 수화물과 염분의 반응성 및 수분의 부분 포화도에 따른 깊이별 상이한 침투 조건을 포함하기 때문에 콘크리트의 확산계수와 표면염화물 계수를 도출하여 해당 콘크리트의 염해 내구성능 평가가 가능하였다.



① 시편 제작 및 절단



② 에폭시 코팅 및 침지



③ 깊이별 분쇄



④ 염소이온 측정

<그림 3.2.2> 비정상상태 염분 침투 시험 과정

NT BUILD 443을 활용한 콘크리트 염분 확산 평가는 다음과 같다. 먼저 양생된 콘크리트 시편을 일 방향 침투조건을 전제로 높이 5 cm 및 직경 10 cm의 시편의 한 단면 (원주형 시편의 중앙부분)을 제외한 나머지 부분에 에폭시 코팅을 하여, 하루이상 건조시킨다. 그 후

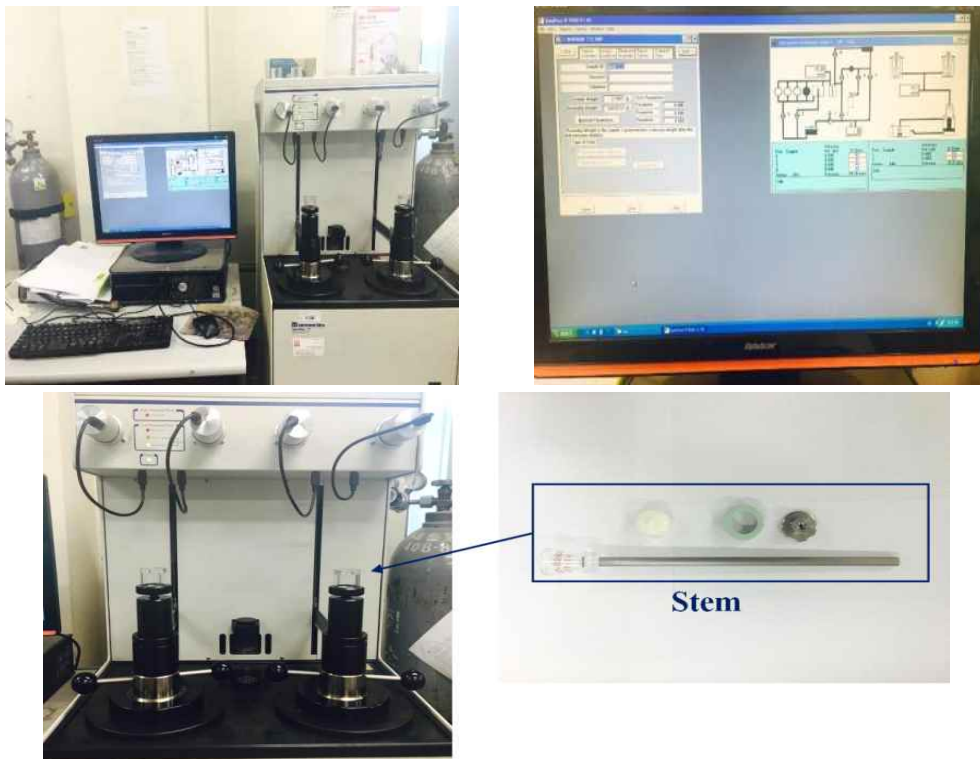
에폭시를 처리한 시편들을 미리 준비된 0.5M의 NaCl 수용액에 침지시키고, 시편 내 염분이 충분히 들어갈 수 있는 시간동안 약 2-3주 간격으로 같은 농도의 수용액을 교체해준다. 목표 침지기간 달성 시기에 해당 시편들에 대해 프로파일을 실시하여, 깊이별 (0.5 mm 혹은 0.25 mm)단위로 약 3g 이상의 분말을 채취한다. 그 이후 NT BUILD 208에 명시된 질산 용액 (0.1 N)에 대해 해당 분말을 충분히 스테어링을 시켜 분말 내 고정화염소이온 및 공극수 내 자유염소이온의 침출을 유도한다. 그 이후 필터종이를 이용하여, 분말을 제외한 염소이온을 포함한 수용액을 여과시키고 해당 샘플에 대한 전염소이온을 이온측정기를 이용해 측정한다. 다음 <그림 3.2.2>는 본 연구에서 수행한 비정상상태 염분침투 시험과정을 나타낸다. 해당 시편에 대한 깊이 별 염분농도를 구한 뒤 다음 식 3.X를 이용해 비정상상태의 확산계수 및 표면염화물량을 회기 분석을 통해 도출한다.

$$C(x,t) = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \right) \quad (3.X)$$

여기서, $C(x,t)$: 해당 염분노출 시간 (t) 및 깊이 (x)에 따른 측정 염화물 농도 (M) C_s : 표면염화물 농도 (M) D : 비정상상태에서의 확산계수 (m^2/s)이다.

나. 시멘트 매트릭스의 공극정량화 시험

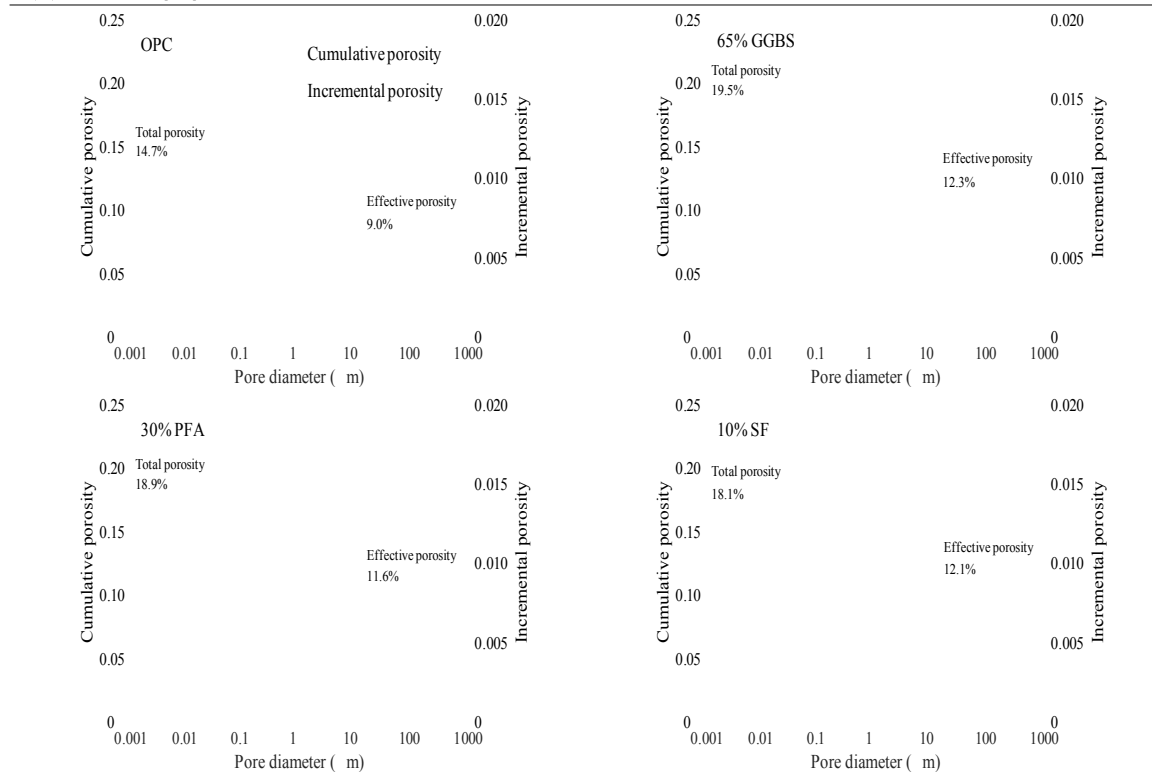
염분의 대류/확산 및 고정화 능력에 더하여 염분 침투 해석의 정확성을 높이기 위해 공극 변수를 추가하여 바인더의 공극 구성에 따른 염분 침투 변화를 본 프로그램에 적용해 보았다. 공극 모델 변수 도출을 위해 단위 시멘트 내 총 공극량과 뒤틀림 계수(tortuosity)를 각각 측정하였다. 모르타르 시편에 대한 배합 별 공극량 및 공극분포도를 수은압입법 (Mercury intrusion porosimetry; MIP)을 통해 도출하였다. MIP는 주로 시멘트 매트릭스 내 공극 분포, 총 공극량, 비표면 적 등을 측정하는데 사용되어지며, 본 연구에서는 공극 분포도를 주로 이용하여 모델변수를 도출하였다.



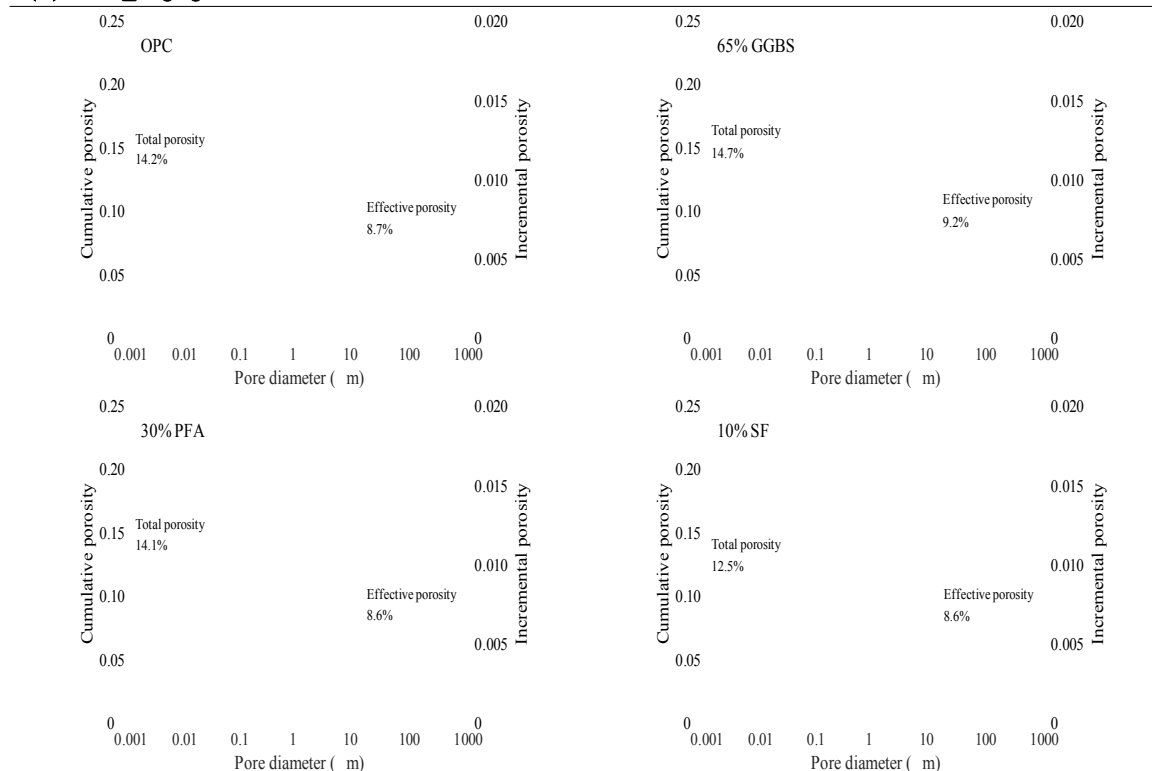
<그림 3.2.3> 수은압입 시험 장치 (모델명: AutoPore IV 9500 V1.08)

MIP 시험 전처리 과정으로, 먼저 페이스트 시편을 최대 직경 1 cm 크기 이하로 확보하고 건조 및 수화 정지를 위해 아세톤에 보관한다. 그 후 수은압입 시험 장치를 통해 cell 안에 샘플이 1차적으로 세공 내 투입되기까지 압력을 서서히 가한다 <그림 3.2.3>. 그 후 2차적으로 압력을 증가시켜 샘플 내 압력이 평형이 될 때까지 이를 지속시킨다. 이에 대해 wash' burn 방정식을 적용하여, 각 압력단계에 대한 최소 공극 직경을 구한다. 이에따라 양생시간 별 각 배합의 공극크기 분포도 (Cumulative intrusion curve, Incremental intrusion curve)를 공극률로 환산하여 다음 <그림 3.2.4>와 같은 결과를 나타내었다.

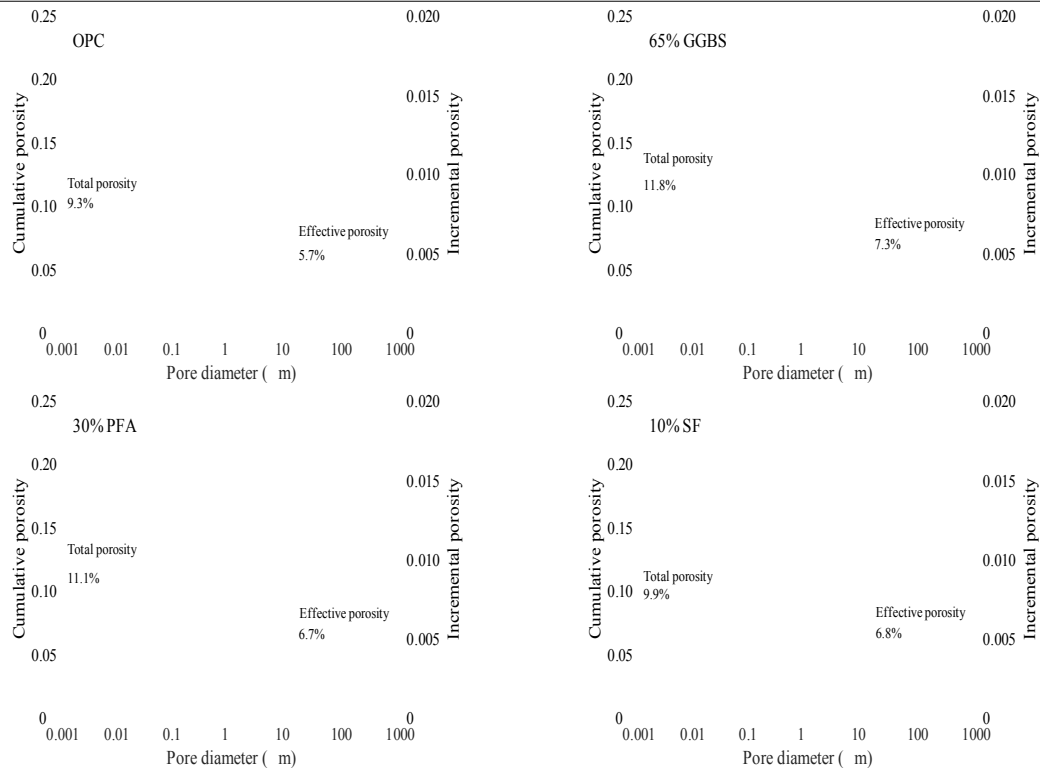
(a) 28일 양생



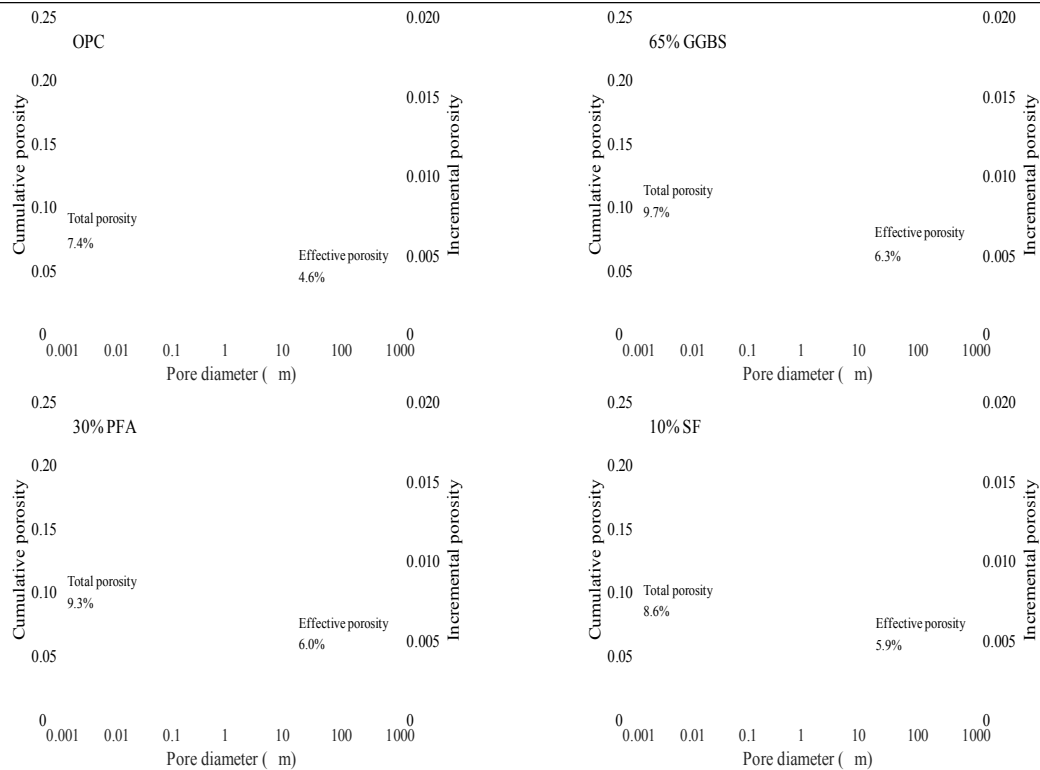
(b) 56일 양생



(C) 90일 양생



(d) 180일 양생



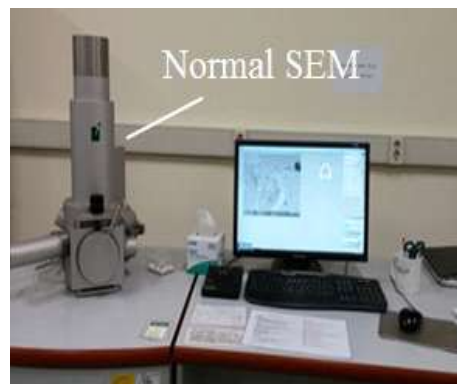
<그림 3.2.4> 각 재령 기간에 대한 공극 분포도

여기서, 전 공극률 (Total porosity)은 1차 수은이 최대 압력까지 압입된 상태에서의 누적 공극률을 의미하여, 유효공극률 (Effective porosity)은 최대압력에서 평형상태까지 수은이 이탈하는 시점에서의 공극률을 의미한다. 여기서, 유효공극률은 시편 내 잔존된 수은 (Ink-bottle)의 양을 전 공극률에서 제외한 값이다. 모든 결과에 대해 수은 압입량은 양생 기간에 따른 수화발현에 대해 전 공극률 및 유효공극률의 감소를 보였으며, 각 공극크기에 따른 peak의 형태 및 크기 또한 다른 양상을 나타냈다. 이는 배합 별 수화발현 메커니즘이 다르기 때문에 마이크로 및 매크로 공극률에 대한 분포도 또한 달라지는 것을 나타냈다.

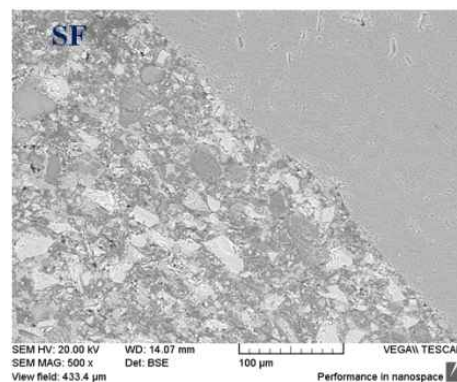
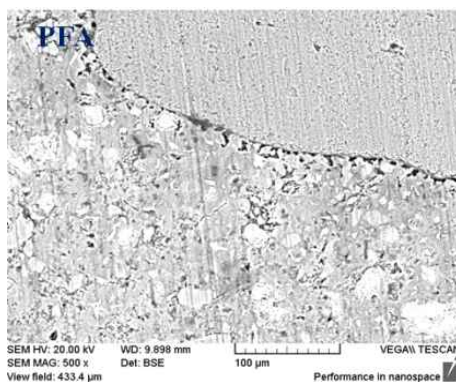
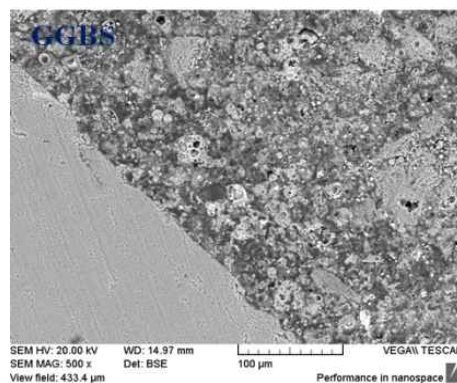
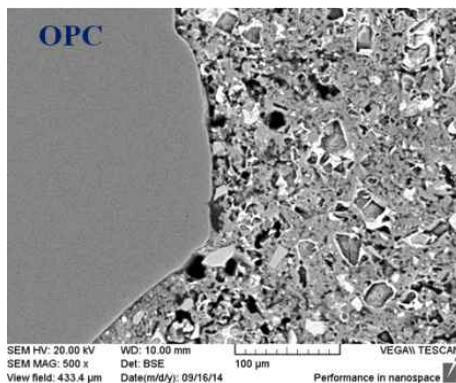
다음은 골재가 함유되어 있을 경우 시멘트 매트릭스와 골재 사이 계면 공극 특성을 평가하기 위해 모르타르 시편의 미세구조를 분석하였다. 샘플의 형태는 약 한 변이 1-2 cm 정도의 정육면체 형태의 모르타르 시편을 확보한 폴리머 경화체를 도포한 후 (mounting), 관측면과 반대 면의 수평도를 맞춰 연마(polishing)한다 <그림 3.2.5>. 그 후, 후방 산란 전자 (Backscattered electron; BSE) 기능을 가진 주사 전자 현미경 (Scanning electron microscope; SEM)을 이용하여, 전처리 완료 된 시편을 진공 챔버에 넣은 후 가속전압을 15-20kv로 유지하고 골재와 페이스트의 구분이 가도록 명암을 조정 한 후 계면부의 사진을 저장한다, 골재를 포함한 시멘트 매트릭스의 그레이스케일 사진을 500 배율 상태에서 약 30 프레임을 확보하였으며, 배합 변화에 따른 명암도의 차이는 수화물 및 미수하물의 화학적 구성성분에 따른 밀도차이로 인해 상이하나, 공극분석에 있어 가능한 범위로 판단되었다. 확보된 그레이스케일 이미지(BSE 이미지)는 Matlab 2016b를 활용하여 표 3.X와 같이 골재 계면으로부터의 공극량 산출의 데이터가 된다. 여기서, 확보한 30 프레임의 평균 값을 토대로 각 배합별 모르타르의 골재 계면으로부터의 공극률을 계산하였다.



(a) SEM 시편 전처리



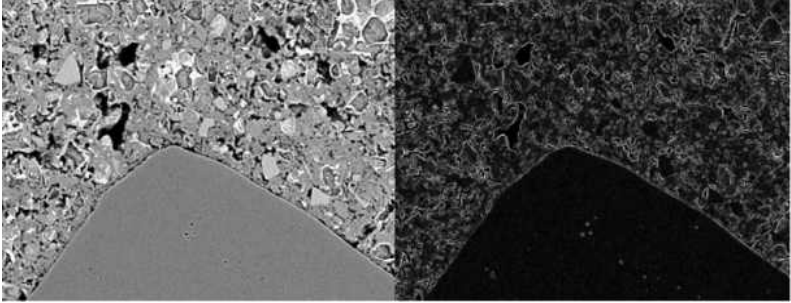
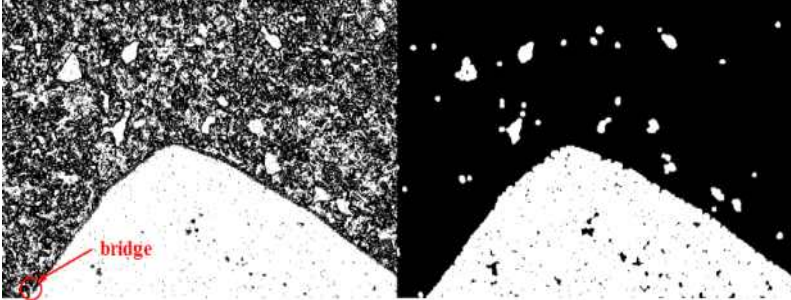
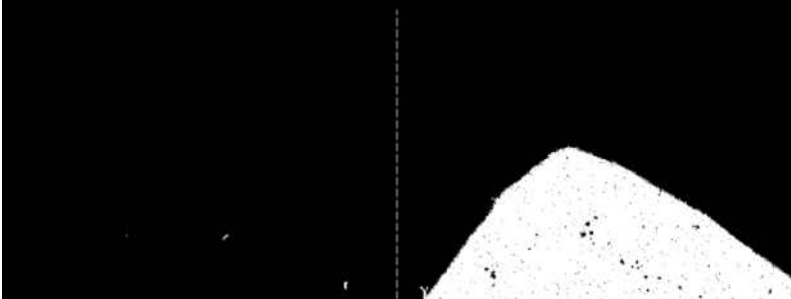
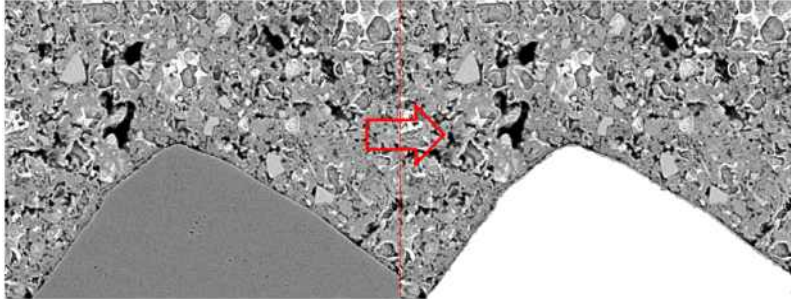
(b) SEM 측정 장치

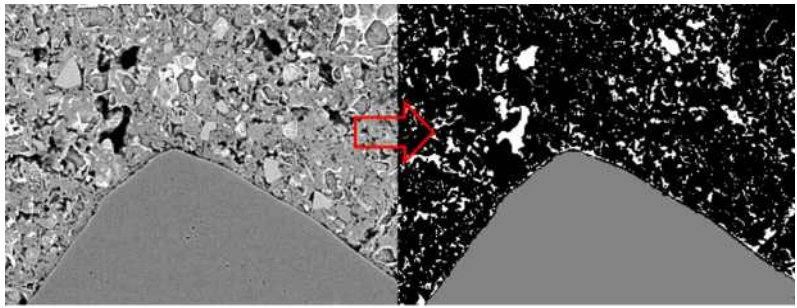
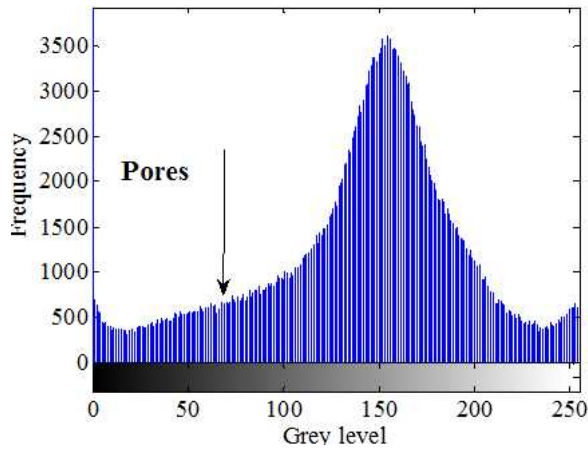
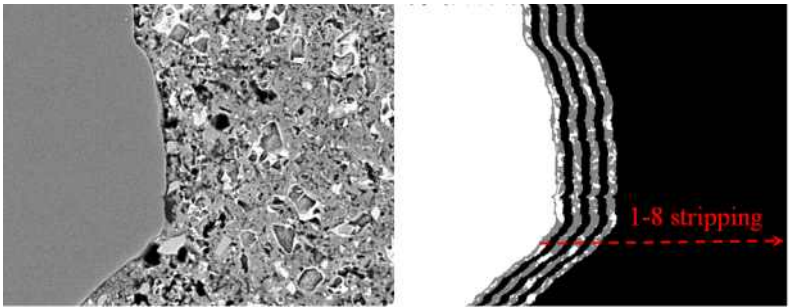


(c) 배합 별 대표 BSE 이미지

<그림 3.2.5> 전처리 시편, 분석용 SEM 기기 및 배합 별 BSE 이미지

[표 3.X] 골재의 세그먼팅(Segmenting) 알고리즘 과정

(1) 경사 이미지 변환 - SEM 분석 장비를 통한 시편의 그레이스케일 이미지 확보 - 골재와 페이스트 사이의 경계 구분을 위한 엣지 탐색(edge detection)의 첫 단계로써, 경사 이미지 변환	 1. Grey image from SEM 2. Gradient image
(2) 이미지 Opening - 경사 이미지에 대해 양의 방향으로 그레이스케일 한계점 설정에 따른 이진 이미지 도출 - 이에 대해 골재와 페이스트 간의 구별되지 않는 픽셀구역(bridge)에 대한 disc rolling 알고리즘 적용	 3. Positive binary image from 2 4. Opening image by disc rolling
(3) Eroding, Reconstruction - 이미지 내 페이스트 해당 픽셀들의 완벽한 제거를 위한 Eroding 작업 - Reference 이미지(Opening 이미지)에 대해 골재형상을 복원 시키는 Reconstruction 알고리즘 적용	 5. Eroding image by disc rolling 6. Reconstruction image from 3
(4) 재 이미지 Opening - Reconstruction 후 해당 골재 내 흑백 픽셀들에 대한 Hole filling 알고리즘 적용 - 골재 주변 남아있는 페이스트 중첩 픽셀들에 대한 Opening 알고리즘 적용	 7. Hole filling 8. Opening again
(5) 골재 세그먼팅 - 원본 그레이스케일 이미지에 대해서 전 단계에서 얻은 Opening 이미지를 이진화 - 이진화 후 골재에 해당하는 픽셀 배열을 전체 픽셀 정보에서 제외	 10. Aggregate segmented

(6) 삼진 이미지 - 원본 그레이스케일 이미지 내 공극, 수화물과의 구별을 위한 골재의 단일 명암 설정 - 골재를 제외한 그레이스케일 이미지에 대해 세그먼팅 기법을 적용하여 골재, 공극, 페이스트에 대한 삼진 이미지 확보	 11. Ternary image for the Aggregate(grey), pore(white) and paste(black)
(7) 이미지 문턱처리 - 골재와 시멘트 페이스트 간의 이미지 segmenting 이후 Otsu's method를 이용하여, 페이스트 이미지에 대한 공극의 최대 그레이스케일 값 도출 - 각 프레임마다 임계값을 도출하여, 골재를 제외한 페이스트의 공극 이진화 작업 수행	 12. Grey scale histogram and segmented value for the pores
(8) 계면으로부터 공극률 도출 - 골재계면과 페이스트 간의 segmenting 이후 페이스트 이미지 문턱처리를 통해 각 stripping 별 공극률 산출 - 총 8 stripping을 통해 골재계면으로부터 약 120 μm에 해당하는 공극분포 결정	 13. Pixel grouping and porosity determination

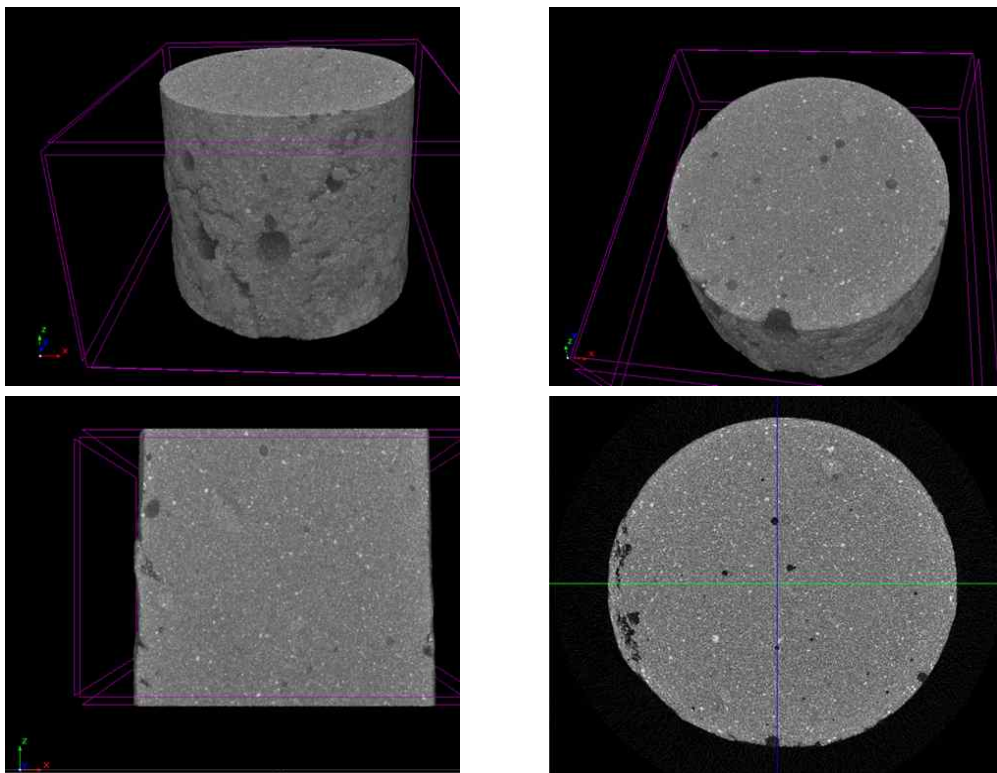
배합 별 단위 콘크리트 내 공극량을 산출한 다음, 공극의 뒤틀림 계수를 산정하기 위해 컴퓨터 단층 촬영법(Computed tomography; Ct)을 활용하였다. 지름 1-2 mm, 높이 5 mm 이하의 원통형으로 시멘트 페이스트를 제작하여 충분한 양생을 거친 뒤 다음 단층 촬영을 시작하였다. 시편의 크기는 단층촬영 장비 내 허용 규격과 X 선의 투과를 유도하기 위해 소형으로 제작하였다. 시편의 횡단면 기준으로 360도 방면으로 시편 중앙을 향해 X선을 투사하여 일정한 해상도의 단층 이미지를 획득하였으며 이를 바탕으로 3차원 공극 구조를 확보하였다.

각 배합 별 양생 시편을 가지고, 다음 표 3.X와 같은 장비 조건을 각 시편에 대해 유지하여, 시편 중앙단면에 대해 약 475 프레임 이미지를 얻었다. 이는 화상도 (약 5 micron/pixel)에 대해 높이를 계산하면, 약 2.3 cm 이다. 측정 후 샘플 이미지의 횡단면 이미지, 측면 이미지는 다음 <그림 3.2.6>과 같다.

[표 3.X] 단층촬영 장비에 대한 기본사항 (모델명: ScyScan 1272)

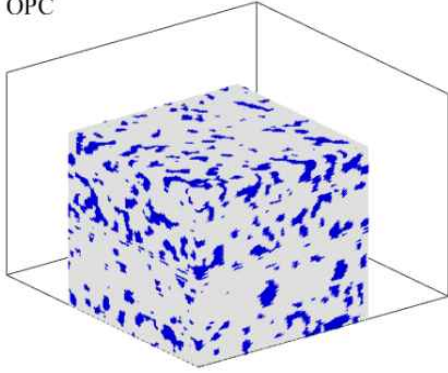
Image size (Row/column)	Source voltage (Kv)	Source currunt (uA)	Rotation step (deg)	Scan duration (sec)
1344/2016	100	100	0.4	7227

분석을 위해 각 시편별 대표요소체적 (representative elementary volume; REV)을 정육각형 형태의 pixel 집단으로 한 변의 길이는 약 500 micron (=100 pixel)로 각 단층 이미지에 대해 중앙부분을 선택하여, 3차원 배열이미지를 상용 프로그램인 Matlab 2015 내 영상처리기법 tool을 이용하여 매트릭스 형태로 정보를 저장하였다. 그 후, BSE 이미지 분석 중 공극 (back ground)과 수화물 및 미수화물 형태 (fore ground)를 기준으로 이진화 기법으로 각 단층 이미지별로 thresholding 작업을 실시하였으며, 3차원 형태의 공극과 결정체로 구별하였다. 이에 대한 배합 별 페이스트 시편의 공극에 대한 이진화 3차원 이미지는 다음 <그림 3.2.7>과 같이 나타내었다. 또한, 56일 OPC 시편에 대한 공극, 수화물의 형태로 C-S-H 및 CH와 미수화물을 4구간으로 그레이스케일 분포를 thresholding 하여, 3원 형태로 <그림 3.2.8>과 같이 나타내었으며, 공극변수 도출에 있어 공극과 결정체 에 대한 3차원 정보만 이용하였다.

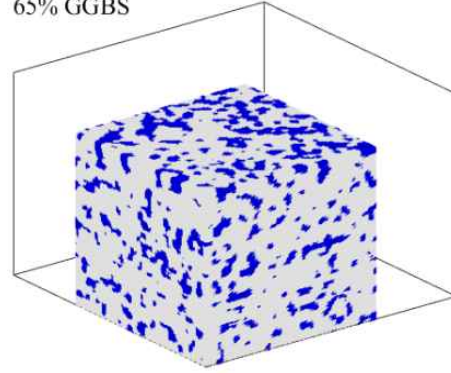


<그림 3.2.6> 단층촬영 중 시편의 x-ray 투과에 대한 각 측면 횡단면 이미지

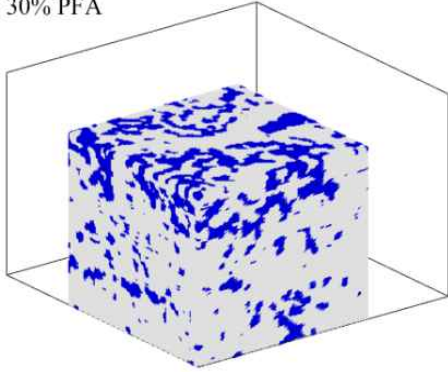
OPC



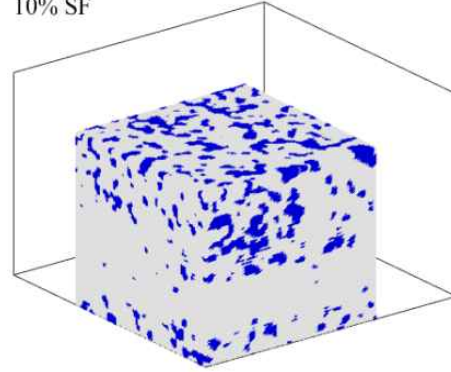
65% GGBS



30% PFA

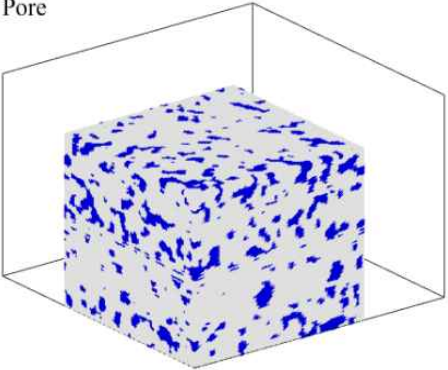


10% SF

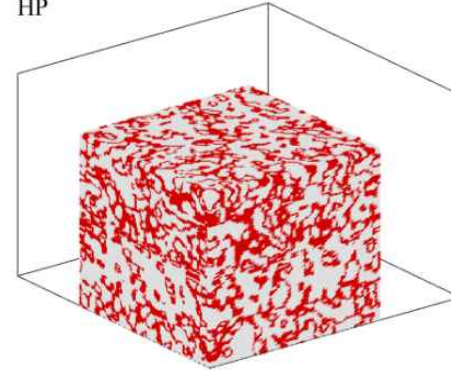


<그림 3.2.7> CT 이미지를 이용한 유효공극에 대한 3차원 이진화 이미지

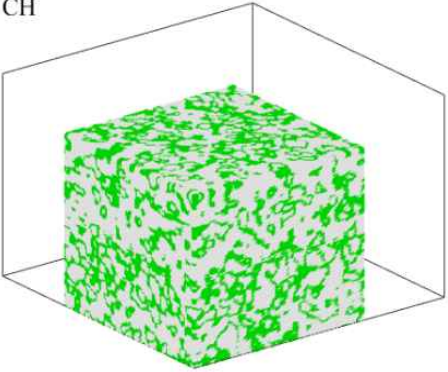
Pore



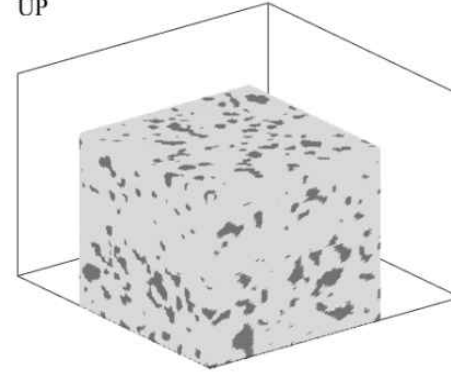
HP

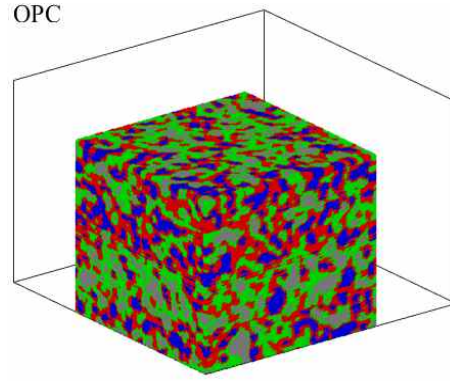


CH



UP





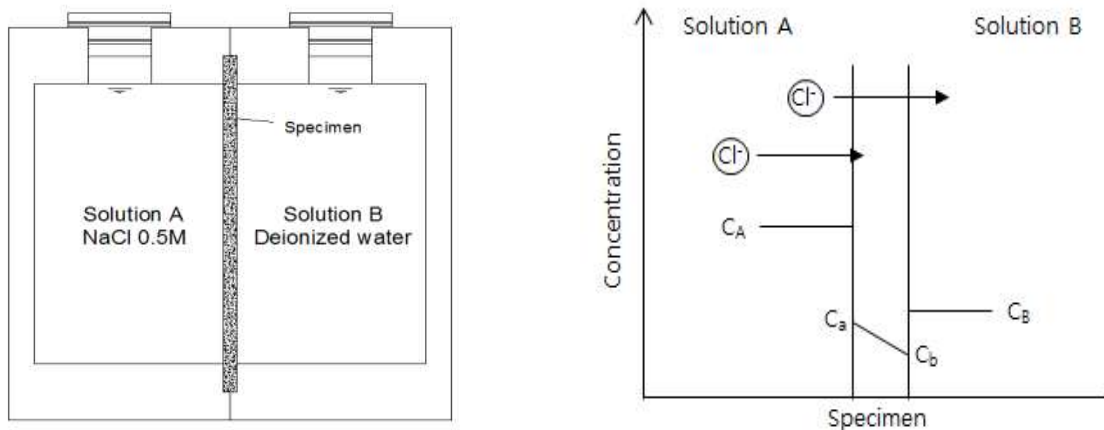
<그림 3.2.8> Ct이미지의 영상처리기법을 통한 OPC 페이스트의 3차원 이미지화, 공극 (Pore), 수화물 (Hydration product; HP), 수산화칼슘 (Calcium hydroxide; CH), 미수화물 (Unhydrated product; UP)

공극변수 도출에 있어, 전체 공극에 해당하는 pixel 개수 대비 전체 대표체적에 해당하는 pixel 개수로 공극률을 결정하였으며, 유효확산계수는 정상상태의 염분이동을 고려하여 가상의 시편에 대해 다음 식을 이용하여 결정하였다.

$$J^i = D \frac{C_L^i - C_0^i}{L}$$

$$C_L^{i+1} = \frac{J^i A}{V} dt + C_L^i \quad (3.X)$$

여기서, J^i : 시간 i 에 해당하는 정상상태에서의 염소이온 유속 (kg/m^2) D : 각 요소에 대한 평균 확산계수 (수화물: $5.12\text{E}^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 공극: $2.05\text{E}^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 미수화물 및 수산화칼슘 침전물: $0 \text{ m}^2/\text{s}$), L : 가상 시편의 침투방향 두께 (m) C_L^i, C_0^i 각 가상 시편에 대한 시간 i 에 해당하는 가상 증류수가 담긴 cell 안의 농도 및 가상 초기 염분농도가 담긴 cell안의 농도 (kg/m^3)이다. 정상상태 염분침투에 대한 개념적 모식도는 다음 <그림 3.2.9>와 같다.



<그림 3.2.9> 유효확산계수를 결정하기 위한 정상상태에서의 염분농도 변화 모식도

위 식 3.X에서 <그림 3.2.9>에 해당하는 낮은 농도 (solution B)의 시간에 따른 농도변화를 구한 후 정상상태에 따른 염분농도의 선형증가를 고려한 다음 식을 이용하여 해당 염분

농도 및 시간에 대해 회기분석 후 유효확산계수 (D_e)를 도출하였다.

$$C = D_e \frac{A}{VL} C_0 (t - t_0) \quad (3.X)$$

여기서, C_0 : 초기 높은 농도 (solution A)에 해당하는 염분농도 t : 시험 진행 시간 t_0 : 농도 증가 시작 시간 (transient 구간 이후)이다. 여기서, 염분흡착에 따른 비 정상상태에서 발생하는 transient 구간은 발생하지 않기 때문에 t_0 는 0으로 간주하였다. 또한, 해당 시멘트 경화체에 대한 공극 연결 도를 평가하기 위해 굴곡 비 (tortuosity)를 산정하였다. 이에 대한 계산은 위 유효확산계수를 구한 후 공극에 대한 확산계수 및 공극률을 이용하여 다음 관계식과 같이 도출하였다.

$$\tau = \frac{D_{aq}}{D_e} \phi_e \quad (3.X)$$

여기서, D_{aq} : 자유수 내 염소이온 확산계수이며, 또한 공극에 대한 확산계수 (m^2/s) ϕ_e : 유효공극이다. 이는 전체 공극 중 대표요소체적 내 연결공극에 대한 공극률이며, 본 연구에서는 Matlab 2015 내 영상처리 기법 중 이진화 이미지에 대한 Labelling 알고리즘을 통해 가장 많은 pixel을 갖는 Label에 대해 유효공극으로 정의하였다.

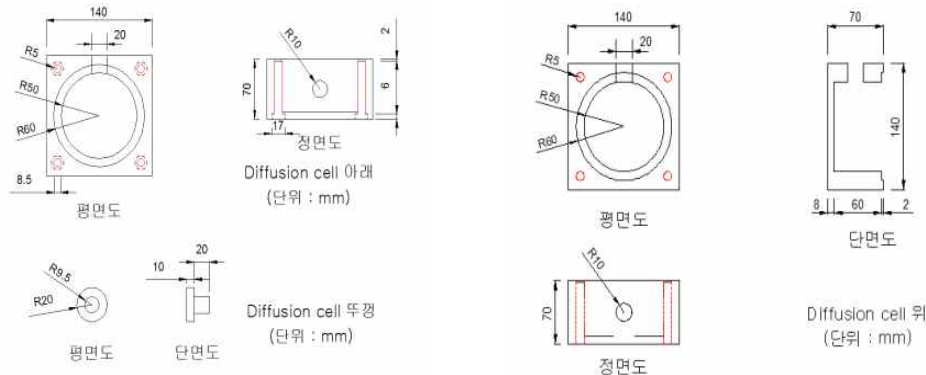
정의된 시멘트 경화체의 유효확산 계수를 실험적으로 검증하기 위해 정상상태의 염분이동을 고려한 Diffusion cell test를 각 배합별 및 재령별로 실시되었다. 기존의 시험법이나 규정이 정해져 있지 않는 실험이라 본 연구에서는 다음 <그림 3.2.10>과 같은 도면을 작성 및 이에 대한 diffusion cell을 제작하였으며, 증류수 및 NaCl의 셀을 중앙에 시편 (직경: 10 cm, 두께: 0.5 cm)를 장착하여 실험체를 완성하였다.



(a) Diffusion cell test 시험 기기



(b) 염소 이온 농도 변화 측정



(c) Diffusion cell test 몰드 제작 설계도

<그림 3.2.10> Diffusion cell test 측정 사진 및 몰드 제작 설계도

제작 된 몰드는 증류수와 NaCl 수용액 (0.5 M)을 각각 셀에 약 500 ml의 양으로 채우고, 중앙에 시편은 가장자리에 물이 새지 않게 접착제를 얇게 바른 후 몰드 가장자리 4부분에 나사를 충분히 조여 준다. 셀 안에 물이 새지 않는지 마른 종이를 몰드 밑면에 댄 상태에서 눈으로 확인을 하고 이상이 없을 시 하루간격으로 약 30-32일 동안 NaCl 수용액의 농도를 측정한다. 시편을 통해 염분의 정상상태 이동을 이룰 때까지 하루에서 이틀 간격은 시험 측정치에서 제외할 수 있으나, 충분히 수분양생을 시킨 시편은 공극수내 포화상태를 이루며, 매우 높은 농도차로 인해 확산이 원활하게 진행되어, 본 연구에서는 시험체 준비 하루 이후 값들을 다음 식을 통해 회기 분석하여, 유효확산계수를 도출하였다.

$$C = D_e \frac{A}{VZ} C_0 t \quad (3.X)$$

여기서, C : 시간에 따른 NaCl 셀 수용액의 염소이온 농도 (mole/l) D_e : 유효확산계수 (m^2/s) A : 시편 단면적 (m^2) V : 셀 수용액 부피 (m^3) C_0 : 초기 NaCl 셀 수용액의 염소이온 농도 (mole/l) t : 측정시간 (일)이다. 시편의 농도는 일정하게 증가하는 것을 가정하여, 초기 염분이동의 비정상상태 (염분흡착률이 탈착률보다 높은 시기)는 측정 전에 종료되고 하루 이후 측정 단계에서는 염분이동의 정상상태를 가정하여 위 식 3.X와 시간에 대한 염분 농도 증가량을 회기 분석하여 재령 (28-180일)에 대한 각 배합별 유효확산계수를 도출하였다.

다. 모델 예측의 신뢰성 구축 및 검증

콘크리트 구조물의 염해노출 환경을 모의하기 위해 먼저 실내 실험을 통해 침지대 (확산)에 해당하는 구조물의 염분침투 시험을 실시하였으며, 건습환경에 대한 조수간만 대 (확산-대류)의 염분침투 시험은 해양쪽으로 시험장에 시편을 실제 바닷물에 침지하여 노출 기간 100일 후 분석하였다. 또한 수집된 실 구조물의 데이터를 이용하여, 표면염화물 농도 모델과의 비교분석을 실시하였다. 실 데이터의 해당 부재는 콘크리트 교량의 조수간만대로 남해와 서해를 거친 지점의 교량 50개를 통해 얻은 자료이다. 침지대의 경우 해양 환경 조건과 유사하게 100일간 바닷물과 근접한 염소이온농도 (약 0.5M)에 해당하는 수용액을 제조하여, 침지 하였으며 바닷물의 다른 성분들 (Mg, Na, K계열 양이온들)과의 영향성을 배제하는 조건하에 실내 실험으로 대체하였다.

본 연구에서는 침지대의 모사 시험으로, 비정상상태에 대한 NT BUILD 443의 시험법을 각 배합조건 별 콘크리트 시편에 적용하였다. 정상상태에서의 염분이동과 달리 염분이동과정에서 수화물과 염분의 반응성 및 수분의 부분 포화도에 따른 깊이별 상이한 침투 조건을 포함하는 이론으로, 콘크리트의 확산계수와 표면염화물 계수를 도출하여 해당 콘크리트의 염해 내구성능을 평가하는 시험법이다.

비정상상태에서의 염분이동을 측정하기 위해 먼저 양생된 콘크리트 시편을 일 방향 침투조건을 전제로 높이 5 cm 및 직경 10 cm의 시편의 한 단면 (원주형 시편의 중앙부분)을 제외한 나머지 부분에 에폭시 코팅을 하여, 하루이상 건조시킨다. 그 동안 미리 증류수와 NaCl 분자량을 고려하여, 약 0.5 M에 해당하는 수용액 부피 및 NaCl 분말 량에 대해 충분히 용해가 이루어진 상태의 염소이온 수용액을 제조한다. 그 후 에폭시를 처리한 시편들을 준비된 수용액에 침지시키고, 시편 내 염분이 충분히 들어갈 수 있는 시간동안 약 2-3주 간

격으로 같은 농도의 수용액을 교체해준다. 목표 침지기간 달성 시기에 해당 시편들에 대해 프로파일을 실시하여, 깊이별 (0.5 mm 혹은 0.25 mm)단위로 약 3g 이상의 분말을 채취한다. 그 이후 NT BUILD 208에 명시된 질산용액 (0.1 N)에 대해 해당 분말을 충분히 스테어링을 시켜 분말 내 고정화염소이온 및 공극수 내 자유염소이온의 침출을 유도한다. 그 이후 필터종이를 이용하여, 분말을 제외한 염소이온을 포함한 수용액을 여과시키고 해당 샘플에 대한 전염소이온을 이온측정기를 이용해 측정한다.

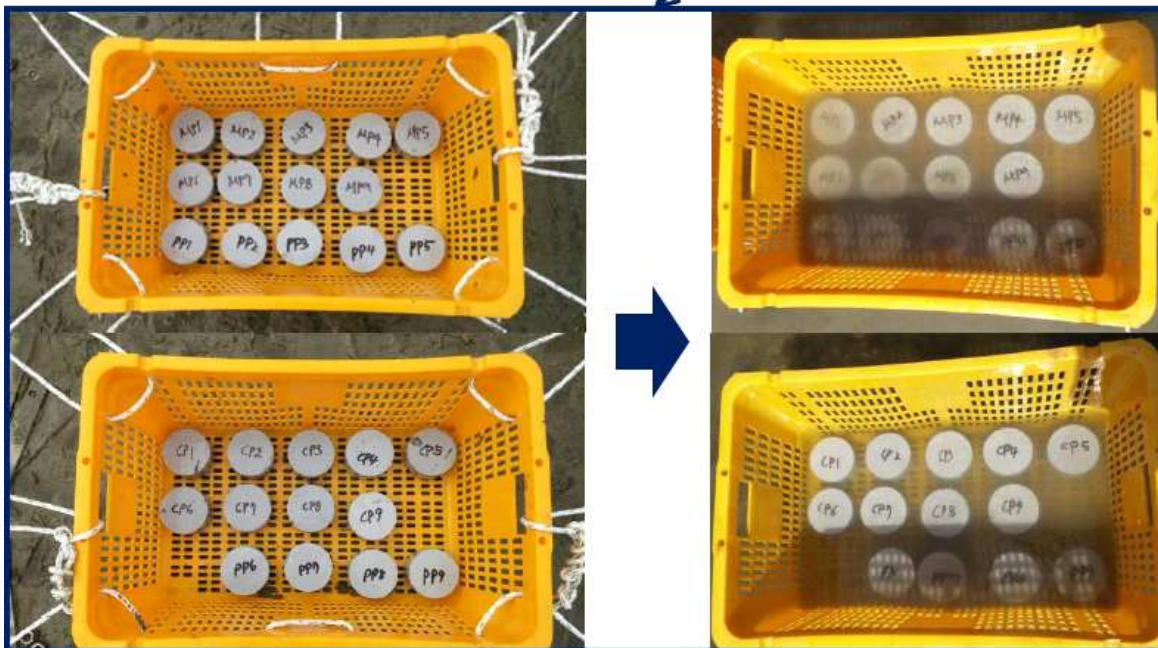
해당 시편에 대한 깊이 별 염분농도를 구한 뒤 다음 식 3.X를 이용해 비정상상태의 확산계수 및 표면염화물량을 회기 분석을 통해 도출한다.

$$C(x,t) = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \right) \quad (3.X)$$

여기서, $C(x,t)$: 해당 염분노출 시간 (t) 및 깊이 (x)에 따른 측정 염화물 농도 (M) C_s : 표면염화물 농도 (M) D : 비정상상태에서의 확산계수 (m^2/s)이다.

다음은 건습환경에 대한 콘크리트 구조물의 염해 조건을 모사하기 위해 실제 바닷가에 위치한 해양환경폭로시험장에 시편을 의뢰하여, 간만대에 해당하는 곳에 시편을 침지하였다. 시험장의 소재지는 경기도 안산시 단원구 대부도에 위치하며, 서해 시화방조제가 주변에 위치한다. 폭로시험장의 총 면적은 약 2,250 m^2 이며, 그중 간만대의 면적은 약 900 m^2 이며, 간조 때 시험체를 간만 대의 약 2 m^2 해당하는 면적에 다음 <그림 3.2.11>과 같이 설치하였다.

해수의 하루 평균 간조 및 만조의 간격은 약 0.5일로 가정하고, 습도에 대한 범위는 건조 때 약 65% (국내 3-5월 평균 습도)로 가정하였으며, 습도가 100%일 때를 시편의 침지 상태로 설정하여, 모델 해석 시 이를 반영하였다. 실제 환경에 근접한 외기조건을 설정하여 경계조건에 반영할 수 있으나, 장기적인 구조물의 노출조건을 고려하였을 때 이는 계산량을 증폭시키며, 장기적 계산결과에서 구조물 내 공극의 습도변화에 미흡한 변화량을 보이므로, 본 연구에서는 이를 고정 값으로 설정하여, 해석 모델에 적용하였다. 온도의 조건에 있어, 침지대 및 간만대의 모델 해석에 있어, 연 평균 20 $^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였으며, 이는 콘크리트의 확산계수 산정 시 및 투수계수 산정에 있어 변수로 작용하나, ± 10 $^{\circ}\text{C}$ 에 있어 침투속도에 미흡한 영향을 주기 때문에 계산 상 이를 고정으로 설정하여도 무방하다. 이와 같은 경계조건을 모델에 적용하여, 실측 데이터와 비교분석하였다. 그 결과 확보된 현장 데이터와 개발 모델의 오차율은 10% 미만인 것을 확인하였다 (핵심 성과: CTE-3-C-2 / 내구성 모델의 신뢰성 검토, 오차범위 10% 이내).



<그림 3.2.11> 해양환경시험장 위치도 및 해당 간만대 시험체 침지

3.2.2. 부식팽창 및 균열전파 모델 변수 도출

본 연구의 2차년도에는 침투한 염분에 따른 부식 개시 및 전파에 따른 균열 발생 모델을 개발하기 위해 해양 환경 모의시험 및 모델의 적합성 검토를 수행하였다. 해양환경을 모사한 부식모사시험 및 부식진전에 대한 콘크리트 내구성능 저하를 평가하기 위해 부식단계 별 부식 전류, 철근-콘크리트 계면 공극감소, 강성저하, 부착강도 저하에 대한 시험 등을 다음과 같이 진행하였다.

가. 모델 변수 도출을 위한 해양 환경 모사 부식 실험

(1) 해양 환경을 모사한 부식 거동 분석

철근 부식은 충분한 염화물과 산소가 공급되어 발생하기 때문에 잠복기 및 진전기에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 염화물 이온과 산소의 확산이다. 해양환경 구조물은 구조물의 위치에 따라 조수의 영향을 받아 염화물과 산소의 노출 조건이 달라지기 때문에 이러한 차이점을 고려하여 시험을 수행할 필요가 있다. 본 연구에서 모사한 해양 환경은 싸이클 1 회를 10 일로 설정하였을 때 침지 및 건조 일수에 따라 WD-1, WD-2, W 3단계로 구성되며, 자세한 조건은 <그림 3.2.12>에 명시하였다. 비교를 위해 통제 집단으로 증류수에 침지된 시편(C)에 대해서도 동일한 실험이 수행되었다. 침지수는 1 M NaCl 수용액을 사용하였으며 일정한 외부 농도를 유지하기 위해 2 싸이클에 한 번씩 수용액을 교체하였다. 건조는 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 상대습도 95%의 조건 하에 양생 챔버에서 진행되었다.



<그림 3.2.12> 노출 조건에 따른 모의 시험 환경

각각의 모사 해양 환경에 노출된 철근의 부식 거동을 분석하기 위해서는 갈바닉 전류 측정법(Galvanic current method), 반전위 측정법(Half-cell potential measurement), 타펠 곡선법(Tafel curve method), 선형분극저항법(Linear Polarization Resistance method), 중량 감소법(Mass loss)이 사용되었다. 실험 방법 별 시험 이론 및 절차는 다음과 같다.

(가) 갈바닉 전류 측정 (Galvanic current method)

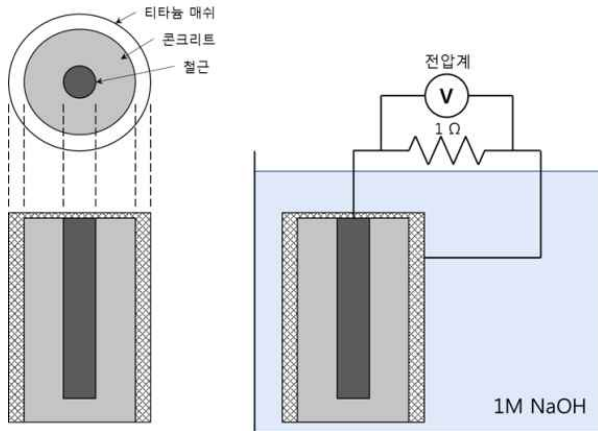
서로 다른 금속이 전기적으로 접해있거나 합금의 경우 금속의 이온화도에 따라 전위차를 보이며 이온화도가 높은 금속에 부식이 발생하는 것을 발견할 수 있다. 이를 콘크리트 철근 부식 측정법에 적용하면 콘크리트에 매립된 철근과 스테인리스 판의 전위차를 측정하여 철근의 부식 개시 여부를 판단할 수 있다. 본 연구에서는 티타늄 매쉬를 음극판으로 사용하여 10 Ω 의 저항과 전압계를 연결하여 전위차를 측정하였다 <그림 3.2.13>.



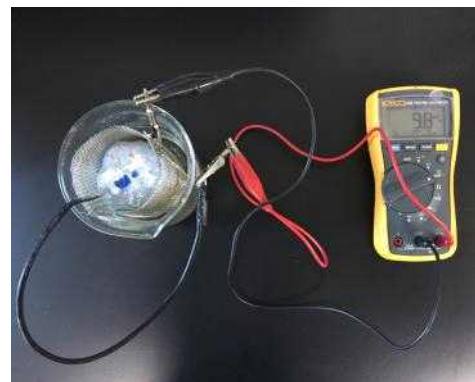
(a) 시편 제작



(b) 시편 양생



(c) 시험 모식도

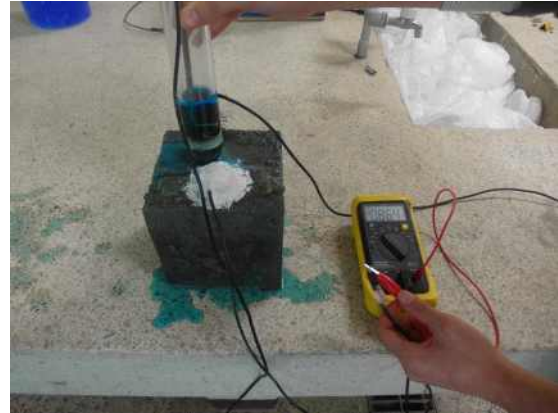
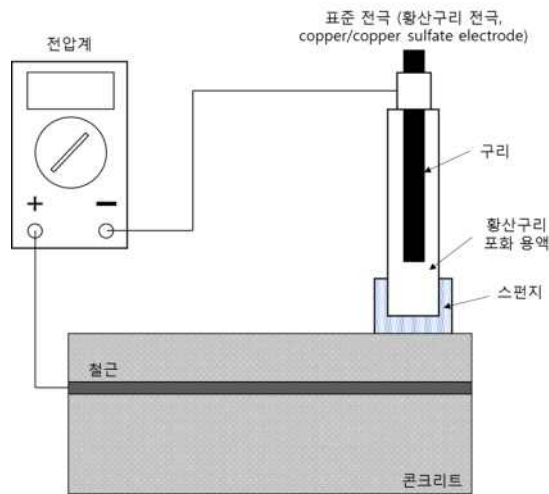


(d) 시험 측정 사진

<그림 3.2.13> 갈바닉 전류 측정 방법 모식도 및 측정 사진

(나) 반전위 측정법 (Half-cell potential measurement)

콘크리트 내 철근에 부식이 발생된다면 철근 표면에는 분극이 발생해 양극과 음극이 형성되며 그 사이로 전류가 흐른다. 부식 속도를 산정하기 위해서는 분극에 흐르는 철근의 부식 전류를 알아야 하지만 철근이 콘크리트 내에 삽입되어 있고 양극면과 음극면 사이로 흐르기 때문에 부식 전류를 측정하기는 매우 어렵다. 때문에 일반적으로 콘크리트 내부 철근을 인위적으로 노출시켜 전선을 연결하고, 이에 반전위를 갖는 전극(예: Ag/AgCl, Cu/CuSO₄)을 연결한 뒤 콘크리트 표면부에 접촉시킨다. 이때 반전위 전극과 콘크리트 내부의 철근 사이 전류는 콘크리트 내부 공극수를 통해 흐르게 되며, 하나의 계로 인식되어 반전위 전극과 철근 사이의 전위차가 구해진다 <그림 3.2.14>. 이 전위차는 Open Circuit Potential(OCP)이라고도 불리며, 이를 통해 간접적, 확률적으로 부식 여부와 정도를 판단할 수 있다. 본 연구에서의 OCP는 Copper Sulfate Electrode(CSE)로 측정되었으나 편의상 Standard Calomel Electrode(SCE)에 대한 값으로 표기하였다.



<그림 3.2.14> 반전위 측정법 모식도

“ASTM C876-09 Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete”에 따르면 반전위 값에 따른 부식도를 다음과 같이 판단 할 수 있다.

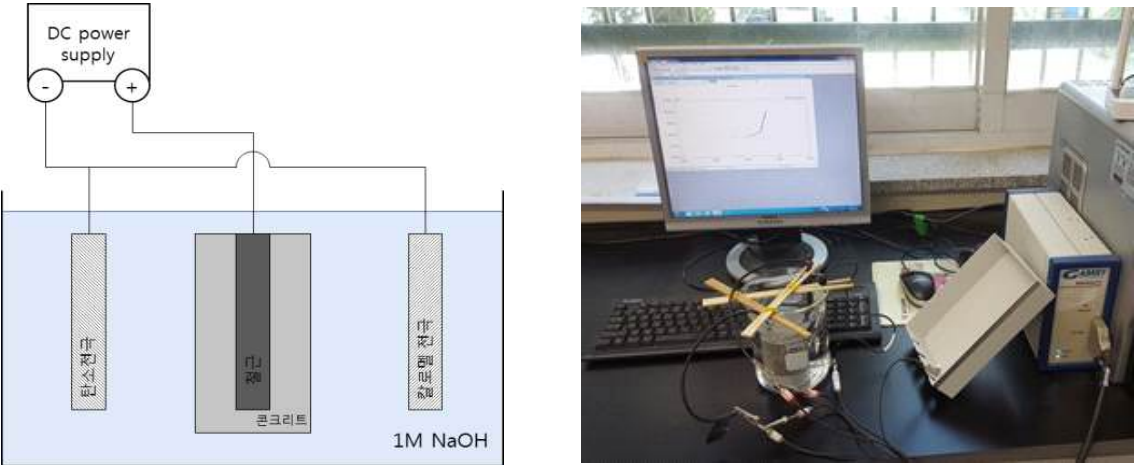
표 3.X ASTM C876-09을 통한 반전위값에 따른 부식 위험도	
Cu/CuSO ₄ 전극	부식 위험도
> -200mV	낮음 (10% 이하의 부식 위험도)
-200mV ~ -350mV	중간
< -350mV	높음 (90% 이상의 부식 위험도)

(다) 타펠 곡선법 (Tafel curve method)

널리 사용되는 중인 반전위 측정법이 비교적 간편하게 부식전위를 측정하여 부식의 발생 여부를 확률론적으로만 평가하는 것이라면 전기화학적 시험법(Tafel curve, Linear Polarization Resistance, AC Impedance 등)은 부식전류를 측정하는 시험 방법으로, 부식 속도를 평가하여 철근 부식의 정도를 정량적으로 나타낼 수 있다.

타펠 곡선의 양극분극곡선과 음극분극곡선의 교차점이 의미하는 부식전위와 부식전류는 물질의 전기화학적 부식 특성을 나타낸다. 부식전위는 금속의 산화 경향에 대한 것으로 전자를 잃는 산화 반응이 잘 일어나는 환경일수록 음(-)으로 높은 값을 가지며, 부식전류는 부식이 발생된 시점 이후의 부식 반응이 일어나는 속도로 빠를수록 양(+)으로 높은 값을 가진다. 부식 거동 측정을 위하여 부식 특성을 알고자 하는 금속인 철근을 Working Electrode(WE)에, 전위 측정의 기준이 되는 Saturated Calomel Electrode(SCE)를 Reference Electrode(RE)에, 전위 측정의 안정화를 위해 전류의 통로가 되어 줄 Carbon stick은 Auxiliary Electrode(AE)에 연결하여 동일한 전해질 내에 연결부를 남겨 놓고 침수시킨다 <그림 3.2.15>. 이때 전극간의 간섭을 최소화하기 위하여 세 전극 간의 거리를 서로 동일하도록 삼각형 형태로 만들어 준다. 측정엔 Gamry사의 Reference 600 Model

Potentiostat이 사용되었으며 연계 프로그램을 통해 분석하였다. 전류 변화 측정은 Open Circuit Potential (OCP)을 기준으로 ± 250 mV 범위를 scan rate 1 mV/s로 이루어졌다.



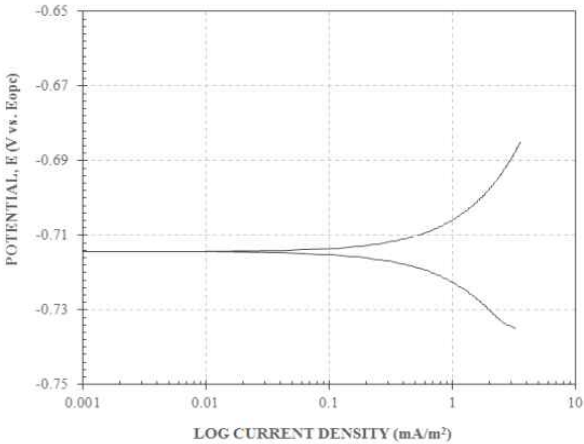
<그림 3.2.15> 타펠 곡선법 측정 모식도 및 측정 사진

분석 시, Tafel 곡선의 음극 곡선의 선형 구간을 연장시켜 환원전류 값(i_c)을 구한 뒤, 측정된 산화전류($i_{app, a}$)와 환원전류 사이의 관계식 식 2.50을 이용하여 실제 산화전류(i_a)를 구함. i_c 와 i_a 의 교차점의 x축 값은 부식전류 밀도 값(i_{corr})을, y축 값은 부식전위(E_{corr}) 값을 나타냄. <그림 3.2.16>

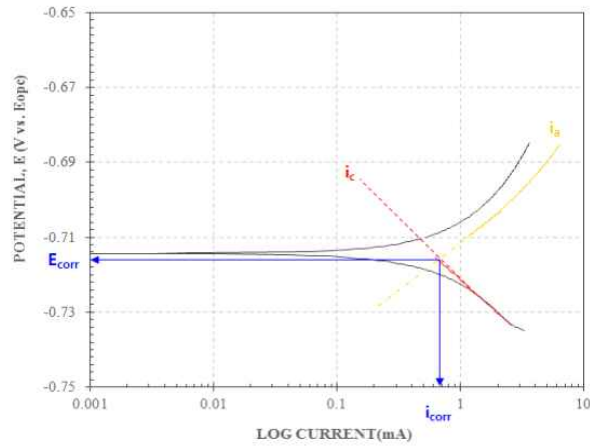
$$i_{app, a} = i_a - i_c \tag{3.X}$$

분극 저항을 부식전류로 환산할 때 사용되는 계수 B는 철의 부식에서 일반적으로 통용되는 값인 26, 52 mV를 사용하지 않고 매 측정마다 구해지는 Tafel 곡선의 양극분극곡선에서 β_a , 음극분극곡선에서 β_b 값을 얻어 식 3.X을 이용해 Tafel constant B를 구하여 사용하였다.

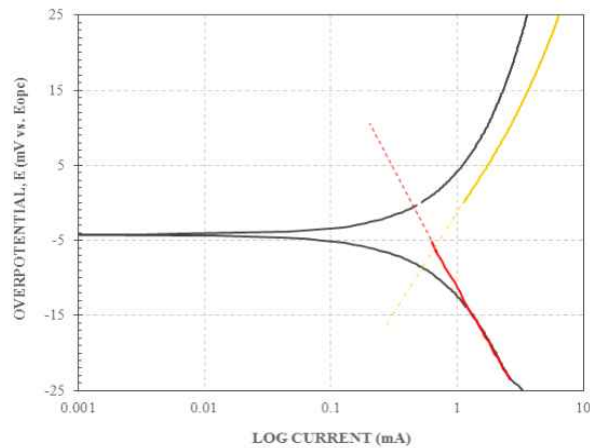
$$B = \frac{\beta_a \beta_b}{2.3(\beta_a + \beta_b)} \tag{3.X}$$



(a) 시험으로 인해 구해진 Tafel curve



(b) 측정값의 변환을 통한 부식전위 · 전류 분석



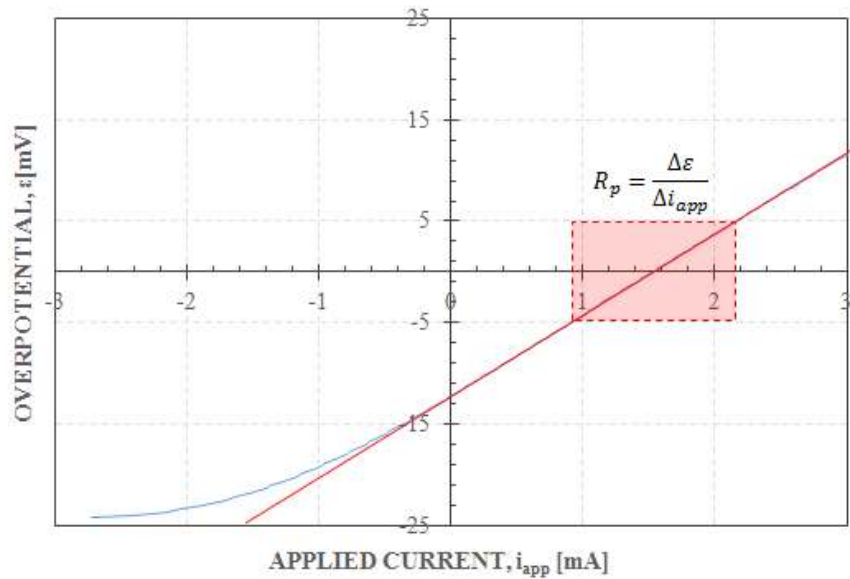
(C) 산화전류 분석을 위한 y축 변환

<그림 3.2.16> Tafel curve 분석

(라) 선형분극저항법 (Linear Polarisation Resistance method)

일반적으로 철근에 전위를 인가하면 전류량에 변화가 발생하지만 옴법칙(Ohm`s law)와 같이 선형 관계를 나타내지 않는다. 하지만 Stern-Geary 이론에 따르면 $\pm 30\text{mV}$ 이하의 미소 전위를 인가할 경우 그 범위 내에서는 다음과 같은 선형 관계를 가진다. 선형분극저항법은 미소전위를 인가하여 전류 변화량을 측정하는 것으로, 기계상에서 설정된 과전압을 달성하는데 요구되는 전류를 측정하기 때문에 바로 분극저항이 그래프로 나타내어짐. 따라서 미소전류를 인가하여 전위 변화량을 측정하는 Galvanostatic에 비해 간편하고 재현성이 높아 장비가 보편화되어 있다.

분극 저항 측정은 타펠 곡선 측정법과 같은 Cell과 같은 Potentiostat을 통해 이루어졌으며 측정 조건은 OCP 기준 $\pm 25\text{ mV}$ 범위를 scan rate 0.1 mV/s 로 두었다. 선형분극저항법은 타펠 곡선 분석법에 비해 간소화된 절차가 장점으로, 분극 저항을 부식전류로 환산할 때 사용되는 계수 B는 타펠 곡선법과는 다르게 갈바닉 전류 측정법을 통해 도출된 철근 부식 개시점을 기준으로 개시 전은 52 mV , 개시 후엔 26 mV 를 사용하였다. LPR 곡선 역시 Tafel 곡선과 마찬가지로 y축을 과전압으로 변환시키고 선형구간인 과전압의 범위는 $\pm 5\text{ mV}$ 로 설정해 식 3.X을 사용하여 분극저항을 구한다 <그림 3.2.17>.



<그림 3.2.17> LPR curve 분석

$$R_p = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta i_{app}} = \frac{B}{i_{corr}} \quad (3.X)$$

여기서 R_p 는 분극저항($k\Omega \cdot cm^2$), ΔE 는 인가된 전위(V), ΔI 는 전류 변화량(A)을 나타낸다. 그리고 분극저항으로부터 부식전류 및 부식전류밀도는 다음 식을 통해 결정된다.

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (3.X)$$

$$i_{corr} = \frac{I_{corr}}{A} \quad (3.X)$$

여기서 I_{corr} 는 부식전류(μA), B 는 Stern-Geary 상수(일반적으로 부식 철근의 경우 26mV), i_{corr} 는 부식전류밀도($\mu A/cm^2$), A 는 내부철근의 표면적(cm^2)을 나타낸다. 만일 부식전류밀도가 산정된다면 패러데이법칙 (Faraday's law)를 이용하여 부식 전류에 따른 내부철근의 부식속도(부식율)를 계산할 수 있다.

$$CR = \frac{Mi_{corr}t}{\rho zF} \quad (3.X)$$

여기서 CR (corrosion rate)은 부식속도($\mu m/year$), M 은 철분자량(55.85g/mol), t 는 시간(s), ρ 는 철의 밀도($7.85g/cm^3$), z 는 분자당 전자 이동수(=2) 그리고 F 는 패러데이 상수(96,500C/mol)이다.

(2) 부식단계 별 콘크리트 균열 거동 분석

(가) 철근/콘크리트 계면 공극 BSE 분석

부식에 따른 철근/콘크리트 계면의 변화를 관측하기 위해 중앙에 철판($1 \times 10 \times 25$ mm)을 삽입한 정육면체 시멘트 페이스트 시편($20 \times 20 \times 20$ mm)을 제작하였다. 철판 삽입 시 전류 인가가 가능하게 하기 위해 5mm 이상을 시편으로부터 돌출되게 하였으며, 양생 기간 동안 노출 철근부의 부식을 방지하기 위해 파라필름(Parafilm)으로 공기와 수분과의 접촉을 차단하였다. 제작된 시편은 28일간 온도 $25 \pm 1^\circ\text{C}$, 상대습도 $95 \pm 2\%$ 조건의 챔버에서 양생을 하고, 전류 인가 하루 전 증류수에 철근이 닿지 않게 침지하여 시멘트 공극에 RH를 높여 시편의 전기전도도를 높였다.

인가 전류는 부식 단계에 따라 총 8단계로 나누어 인가하였으며, 각 단계의 목표 부식 전류 밀도치는 0.1, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0, 10.0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이다.

단계별 부식이 진전된 시편은 에폭시로 틀을 성형한 뒤(마운팅) 관측할 단면을 평탄하게 폴리싱하였다. 폴리싱이 완료 되면 공극 내 수분을 완전히 제거하기 위해 진공 데시케이터에서 1 주간 보관한 뒤 후방 산란 전자 (Backscattered electron; BSE) 기능을 가진 주사 전자 현미경 (Scanning Electron Microscope; SEM)을 통해 철근/콘크리트 계면을 관측하였다 <그림 3.2.18>.



(a) 제작 시편



(b) 부식 전류 인가 후

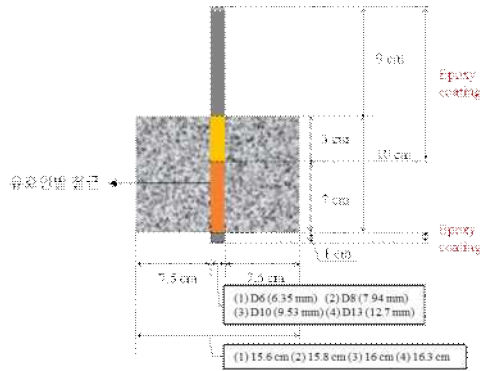


(c) 마운팅 및 폴리싱

<그림 3.2.18> 철근/콘크리트 계면 관측 시편 사진

(나) 철근의 부착강도 시험

부식의 콘크리트 부착강도에 대한 영향성을 알아보기 위해 철근 인발 실험을 수행하였으며, 철근의 직경과 부식량을 변수로 하였다. 제작 시편의 모식도는 다음 <그림 3.2.19>와 같으며, 피복 두께를 동일하게(7.5cm) D6, 8, 10, 13 총 4가지 철근을 사용하여 제작하였다. 28일간 양생한 뒤 부식 전류를 인가하였으며 철근/콘크리트 계면 관측 실험과 동일하게 $0.1 \sim 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 까지 목표 부식전류밀도를 8단계로 나누어 인가하였다. 완료된 시편은 KS F 2441:2010 ‘철근의 부착에 의한 콘크리트 비교 시험 방법’에 따라 인발 시험을 진행하여 인발 시 최대 응력을 통해 부착강도를 산정하였다.



(a) 인발 실험 시편 모식도



(b) 시편 제작



(c) 부식 전류 인가



(d) 부식 후 사진

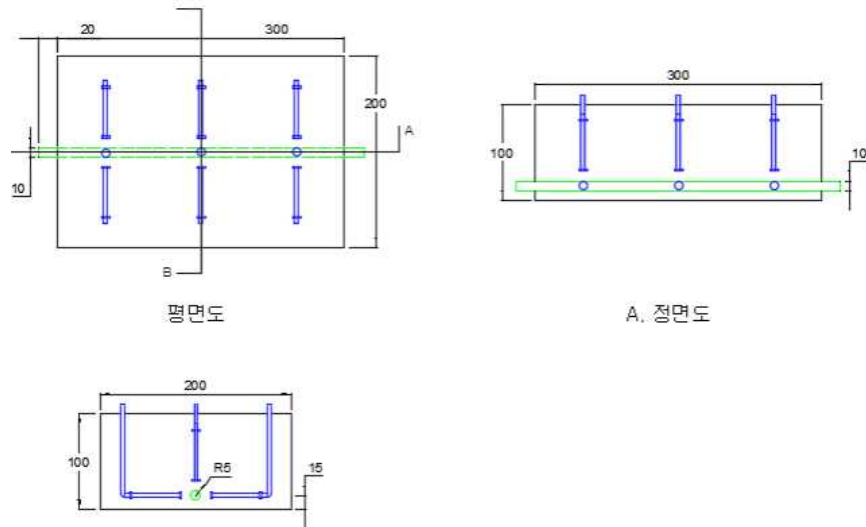
<그림 3.2.19> 철근 인발실험 시편 모식도 및 제작 사진

(다) 콘크리트 변형 및 균열 전파

부식이 진전되면 철근과 콘크리트 계면의 공극에 부식물이 축적이 되고 허용 부피를 초과하면 공극 내벽에 압력이 가해져 균열이 발생한다. 본 연구에서는 철근 주위 콘크리트에 매립형 변형률측정기를 삽입하여 부식에 따른 콘크리트 변형/응력 측정과 균열 시점을 알아 보았다.

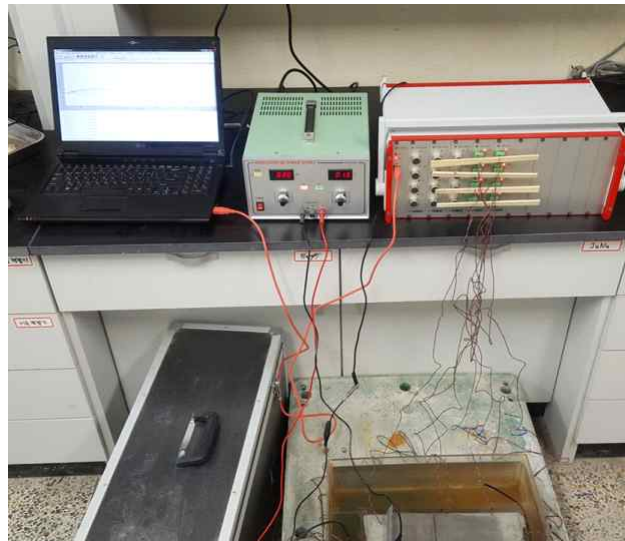
하단부에 철근($\varnothing 10 \times 340 \text{ mm}$)이 위치한 직육면체 몰드($300 \times 200 \times 100 \text{ mm}$)에 철근으로부터 10mm 간격에 3방향으로 매립형 변형률 측정기(Strain gauge)를 설치하여 모르타르 시편을 제작하였다. <그림 3.2.20>. 한 시편 당 9 개의 변형률 측정기를 방향별로 위치시키며 측정기가 위치한 한 지점의 변화 감지에 한정된다는 측정기의 한계를 극복하고자 했다. 양생 기간 동안 노출 철근부가 부식되지 않도록 전선을 연결한 뒤 에폭시와 실리콘을 도포하였으며, 그 후 28 일 동안 $25 \pm 1^\circ \text{C}$, 상대습도 $95 \pm 2\%$ 의 조건에서 양생하였다.

본 실험은 인위적으로 철근에 인가되는 부식전류의 영향 아래 시간에 따른 콘크리트의 응력 및 변형 측정을 목표로 한다. 인가 부식전류 밀도는 총 4단계로 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 $\mu \text{A}/\text{cm}^2$ 이며, 동일한 통과 전하량 15,000 C를 갖기 위해 전류 인가는 각 부식전류 밀도별로 462, 307, 230, 184 일 동안 진행되었다. 추가적으로 결합재가 부식에 끼치는 영향을 분석하기 위하여 혼합 시멘트 콘크리트에 대해서는 10.0 $\mu \text{A}/\text{cm}^2$ 의 전류를 위와 같은 조건으로 인가하였다. 인가 기간 동안엔 변형률 측정기를 데이터로거에 연결하여 1 분마다 콘크리트의 응력/변형률을 측정하였다.



B. 단면도

(a) 응력/변형률 시험 시편 모식도



(b) 전류 인가 및 응력/변형률 시험 측정 사진

<그림 3.2.20> 부식에 따른 콘크리트 응력/변형률 실험 사진

나. 노출환경에 따른 부식 모델의 적합성 검토

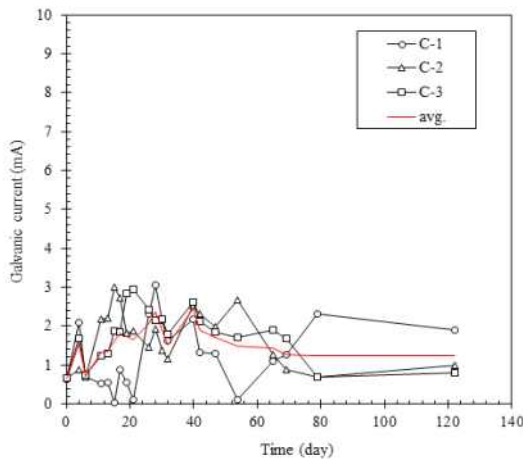
(1) 실내 실험에 의한 부식 거동 분석

염화물에 노출된 이후 염화물이 축적되어(잠복기) 임계 염화물량을 초과하면 부식의 개시가 되며 부식물이 팽창하여(진전기) 철근의 균열을 유발한다. 균열이 발생할 경우 부식은 가속화 되어 급속도로 진행되며(가속기) 균열이 전파되어 콘크리트 내력 저하, 철근 단면 손실로 인한 탈락 등 구조물의 열화를 발생시킨다(열화기). 이처럼 콘크리트에 매설된 철근의 부식에 의한 열화는 단계적으로 일어나며, 구간에 따라 콘크리트 내 철근의 부식 정도를 판단할 수 있는 시험 방법이 다양하여, 각 구간에 알맞은 시험방법을 각각 따로 적용하여 실험을 진행하였다.

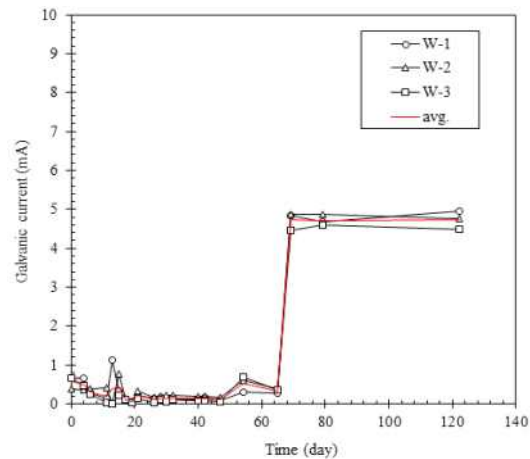
(가) 부식 개시 시점 결정

콘크리트 내 철근과 티타늄 금속과의 갈바닉 전류 측정 결과는 다음 <그림 3.2.21>와 같다. 갈바닉 전류 측정의 결과 해석은 갈바닉 전류 값이 급격하게 증가하는 구간이 발생할 경우 그 구간을 부식 개시 시점으로 판단할 수 있다.

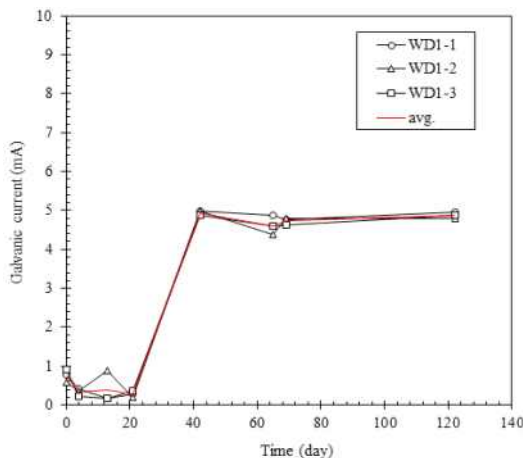
표준 조건 (중류수 침지, Control)의 경우에는 갈바닉 전류가 시간이 지남에 따라 지속적으로 변화를 보이지만 특정 지점에서 급격하게 증가하지는 않는다. 특히 20일 이후로 갈바닉 전류가 증가하였으나 40일 이후 다시 감소하여 안정적인 값을 보이는 것은 콘크리트로 인해 철근 표면에 부동태 피막이 안정적으로 형성되어 내부식성이 강화된 것으로 판단된다. 표준 조건의 시편은 실험 종료 120일 이상 까지 부식이 갈바닉 전류 측정을 통해서도 발견되지 않았다. 표준 조건의 경우 시편마다 오차 범위가 큰 반면 NaCl 용액에 침지한 시편들의 경우 실험 초기에만 서로 오차가 발생하고 40일 이후에는 모두 비슷한 값을 나타낸다. 완전침지(Wet), 2일 침지 8일 건조(Wet/Dry-1), 5일 침지 5일 건조(Wet/Dry-2)의 경우 각각 70, 40, 50일 정도에 갈바닉 전류의 급격한 증가가 관측되었다. 세 결과 모두 4cm 정도의 얇은 피복 두께로 시편이 제작되었다는 점과 높은 농도의 NaCl 용액에 침지함에 따라 부식이 정상적인 경우(해양 구조물) 보다 촉진된 것으로 판단된다. 또한 Wet/Dry-1과 Wet/Dry-2의 시편이 Wet 조건의 시편 보다 부식이 발생한 것으로 보아 콘크리트 내 철근 부식이 발생하기 위해 소금과 물의 침투 뿐 아니라 산소의 공급도 원활하게 이루어져야 한다는 것을 알 수 있다. 증가 이후의 갈바닉 전류 값은 Wet/Dry-2 조건이 가장 높으나 갈바닉 전류는 반전위 측정이나 분극저항법을 통해 결정된 부식 전류와 달리 그 절대 값은 중요한 의미를 가지지 못한다.



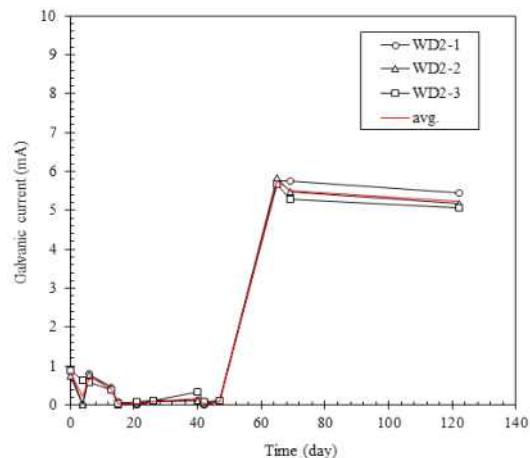
(a) 표준 조건



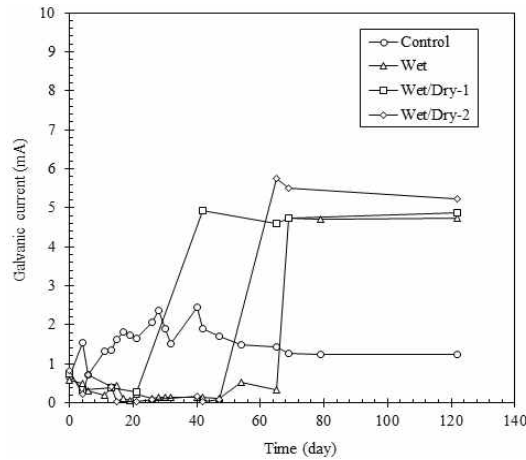
(b) 완전 침지



(c) 2일 침지 8일 건조



(d) 5일 침지 5일 건조



(e) 조건별 평균치
<그림 3.2.21> 갈바닉 측정 결과

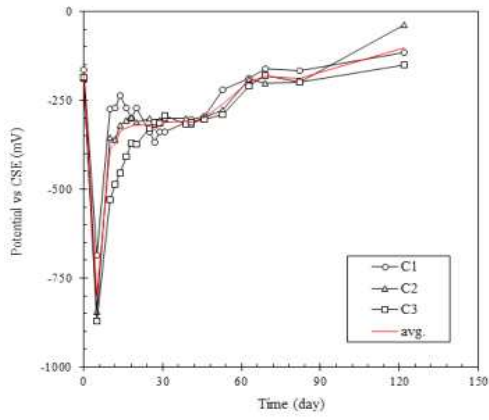
(나) 반전위 결과에 따른 부식 위험성 분석

반전위 측정 결과는 다음 <그림 3.2.22>와 같으며, 일반적으로 통용되는 황산구리 전극 (CSE, Copper/copper sulfate electrode)에 대한 반전위 값으로 나타내었다. 본 연구 실험에 사용된 표준 전극은 황산구리 전극이 아닌 칼로멜 기준 전극으로 전위값 보정 과정을 거쳐 ASTM 기준에 따라 콘크리트 내 철근의 부식 위험성을 판단하였다.

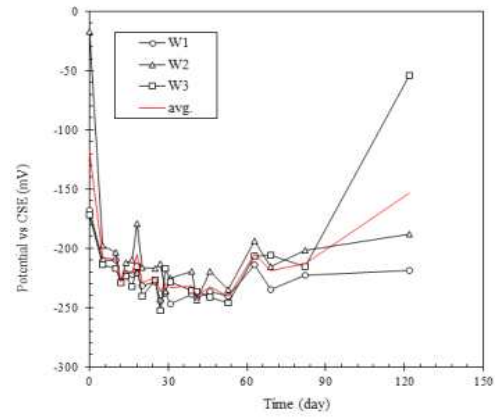
표준조건의 경우 초기 약 10~20일에 반전위 값이 -750mV 이하로 급격하게 감소했다가 지속적으로 상승해 실험 종료 때에는 -100mV 까지 꾸준히 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 갈바닉 전류 측정을 통해서도 확인한 것처럼 철근 표면에 형성되는 산화 피막 역시 철의 산화물의 형태로 시멘트 공극의 높은 pH로 인해 철근 표면에 산화 피막이 형성되면서 반전위가 급격하게 떨어지고 이로 인해 높은 부식위험도를 일시적으로 나타낸 것으로 판단된다. 30일 이후에는 반전위 값은 지속적으로 상승하여 낮은 부식 위험도를 나타내는 -100mV 까지 상승하여 추가적인 부식의 진전은 없는 것으로 판단된다. 즉 120일 이상의 장기 노출에도 불구하고 표준 조건에서는 철근의 추가적인 부식이 발생하지 않고, 철근의 부동태화가 안정적인 상태로 유지되었다.

표준조건을 제외한 3가지 침지 조건의 경우 모두 반전위 값이 부식 중간 위험 단계인 $-200\text{mV} \sim -350\text{mV}$ 사이의 값을 나타내고 있다. 특히 5일 침지 5일 건조의 조건에 침지한 시편의 경우 표준조건과 같이 초기에 급격한 부식이 발생한 것이 관측되지만(산화 피막 형성) 약 70일 이후에도 조금씩 반전위 값이 떨어지고 있음을 확인하였다. 이러한 결과 값은 시편에 따라 조금씩 상이하지만 -400mV 이하로 내려가는 시편의 경우 급격하게 부식이 진전되고 있음을 알 수 있다. 그 외 2일 침지 8일 건조 시편의 경우 급격한 하락은 없지만 꾸준히 중간 부식 위험도를 나타내고 있으며 추후 실험을 지속할 경우 높은 위험 단계 까지 감소할 것으로 여겨진다.

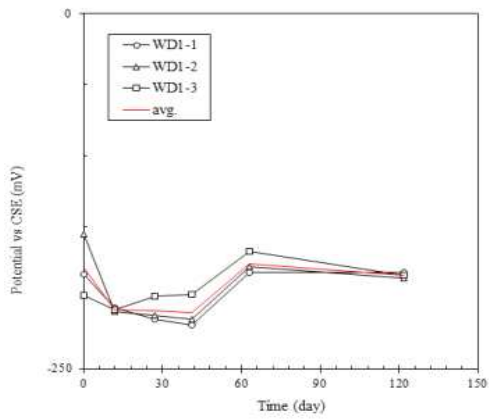
반전위법에 의한 부식 위험성 분석은 정량적인 부식 정도를 판단할 수 있는 기준은 아니지만 측정 결과에 따라 노출 조건의 부식 위험성을 판단하였을 때 2일 침지 8일 기건의 시편이 가장 높은 부식 위험성을 나타내는 것으로 보인다. 이는 기건과 침지의 반복에 따라 염소 이온의 침투가 확산 뿐 아니라 대류의 영향을 받아 더 많이 침투를 하며, 또한 산소 침투 역시 원활하게 발생하는데 기인한 결과로 판단된다. 특히 부식 개시 이후의 부식 전파의 시기에는 염소이온 침투량 또는 철근 계면의 염소이온 농도 보다 산소와 온도에 부식 거동이 민감하게 반응하는 선행 연구 결과를 바탕으로 본 실험 결과 해석이 가능하였다.



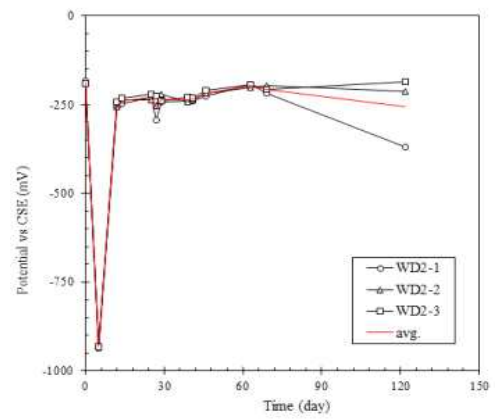
(a) 표준 조건



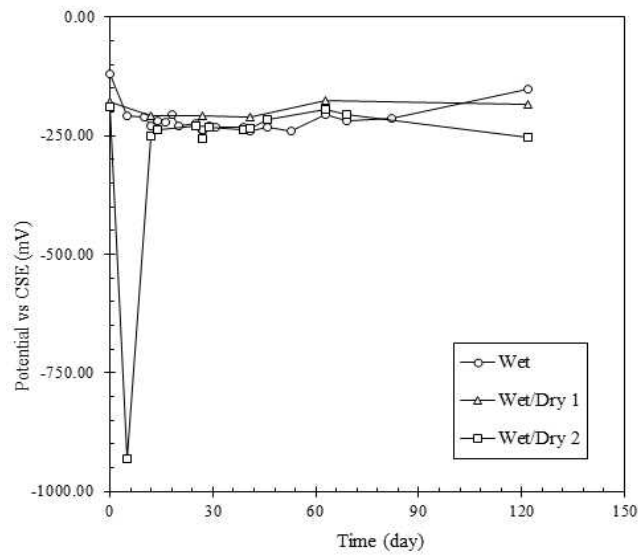
(b) 완전 침지



(c) 2일 침지 8일 건조



(d) 5일 침지 5일 건조



(e) 조건별 평균치

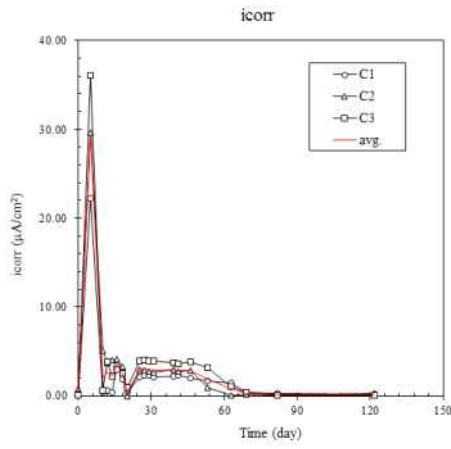
<그림 3.2.22> 반전위 측정 결과

(다) 노출 조건에 따른 철근 부식 전류 밀도

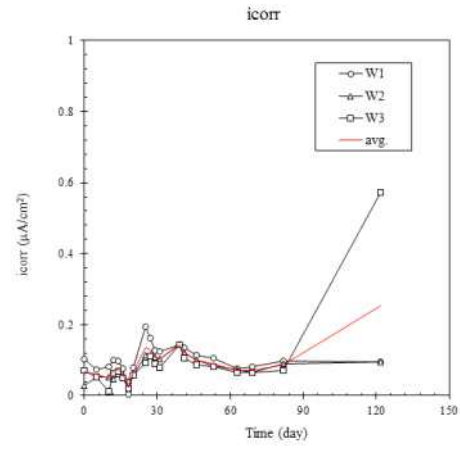
타펠곡선에 따른 부식전류 값은 <그림 3.2.23>에 나타내었다. 타펠곡선과 선형분극저항법 각각을 이용한 부식전류를 비교하였을 때 전체적으로 타펠곡선을 이용한 경우의 부식전류 값이 높게 해석되었다. 표준 조건은 침지 초기 타 조건들에 비해 현저하게 높은 부식전류를 가지며 부식되다가 곧 감소하더니 60 일 이후부터는 0에 수렴하며 산화피막의 형성 및 산화피막으로 인한 부동태 상태를 나타냈다. 그 외 조건들은 120 일 동안 뚜렷한 변화 없이 0.3과 0.5 (단위) 사이의 범위 안에서만 변동하는 경향을 보였다. 이 중 WD-2의 경우, 선형분극법에서는 침지 초기 급격히 증가하였다가 감소하여 다른 조건들과 비슷한 경향을 보이다 60 일쯤부터 표준 조건을 제외하고 모든 조건의 부식전류 값이 증가하며 부식의 진전을 나타내었으나 타펠곡선을 이용해 분석한 경우 급격한 변화도 없었으며, 모든 조건에서 동요하던 부식전류 값이 60 일 이후엔 안정적으로 변하며 감소하는 추세를 보인다. 이것은 B값을 상수로 두고 적용하는 선형분극법과는 달리 매 측정 시점에 새로 양극·음극 분극저항 값을 새로 구하여 적용하기 때문에 콘크리트 내의 환경변화로 인한 분극상태를 더 잘 반영한 것으로 보여진다. 부식전위 값은 부식전류와 비교하였을 때 경향은 반비례하였으나 절대값은 의미 없는 것으로 사료된다.

선형분극저항법에 따른 분극 저항(R_p)를 <그림 3.2.23>와 같이 나타내었다. 추후 시험 방법에서 언급될 예정이지만 한 번 더 기재하자면, 철근에 인위적으로 미소 전위를 인가할 경우 부식전류와 분극저항은 옴의 법칙(Ohm's law)를 따르기 때문에 분극저항은 부식전류와 반비례하는 특징을 갖는다. 분극저항을 부식전류로 전환 시 이 계산식에 사용되는 상수 B 값은 갈바닉 전류를 분석하였을 때 부식 개시 전으로 판단되는 시점 전은 52 mV, 후는 26 mV를 분석하였다.

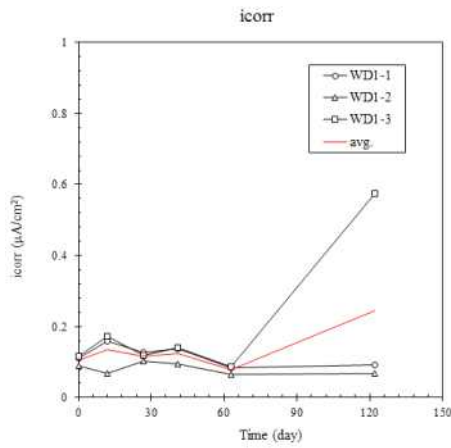
문헌에 따르면 콘크리트 내 철근의 부동태 피막이 파괴가 되는 시기(dep passivation)의 철근 부식 전류 밀도는 $0.1 \sim 0.2 \mu A/cm^2$ 에 해당하며 이때를 부식 개시 시점으로 판단한다.. 표준 조건의 경우 초기 높은 부식전류가 관측되지만 곧바로 감소하며 $3 \mu A/cm^2$ 부근의 값을 떠다가 70 일 이후에는 부식 전류가 거의 측정되지 않았다. 그 외의 침지 조건에서는 대부분 표준 조건에 비하여 매우 낮은 값인 $0.1 \mu A/cm^2$ 정도의 부식전류가 관측되어 부식이 개시 및 진전이 지속적으로 일어나고 있는 것으로 여겨진다. 특히 90 일 이후의 값은 모두 상승 곡선을 나타내고 있어 지속적으로 침지함에 따라 더 많은 부식이 발생할 것으로 예상되며, 이러한 결과 값은 반전위 측정과 일치하는 부분이다. 부식 개시 시점에서 2일 침지 8일 기건의 시편이 가장 먼저 부식이 발생하는 것으로 판단되며 그 뒤에 5일 침지 5일 기건, 그리고 완전 침지 시편에서 부식이 발생한다. 부식 개시 이후의 부식 전류 역시 2일 침지 8일 기건의 부식 전류가 가장 높은 부식 전류를 나타내고 있으며, 이는 부식 개시 이후에도 부식 전과 속도가 가장 빨라 철근 계면 균열 발생시점까지의 시간이 가장 짧을 것으로 예상된다. 이 역시도 철근부에 염소이온 침투 뿐 아니라 산소의 전달이 원활하게 발생한 경우에 철근의 부식(산화)이 촉진된다는 해석이 가능하다.



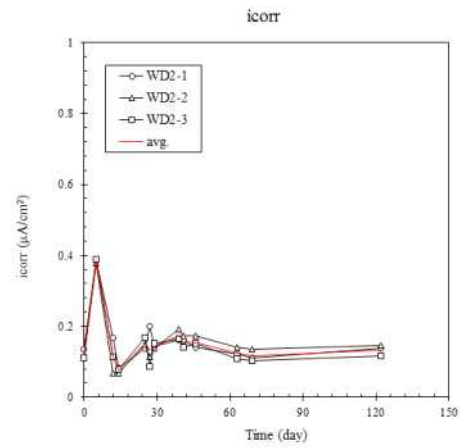
(a) 표준 조건



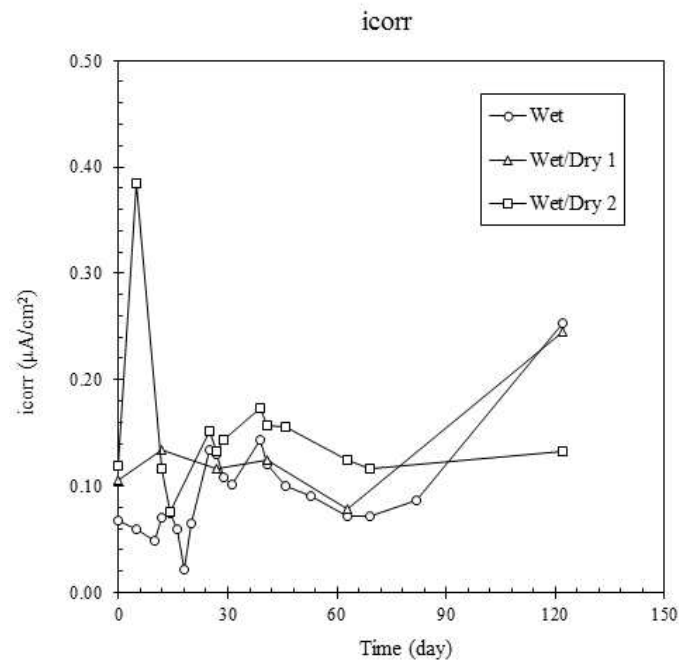
(b) 완전 침지



(c) 2일 침지 8일 건조

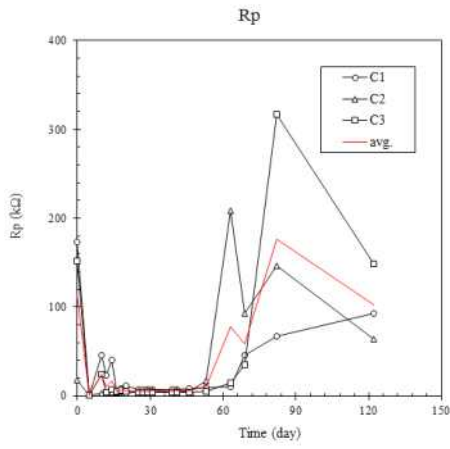


(d) 5일 침지 5일 건조

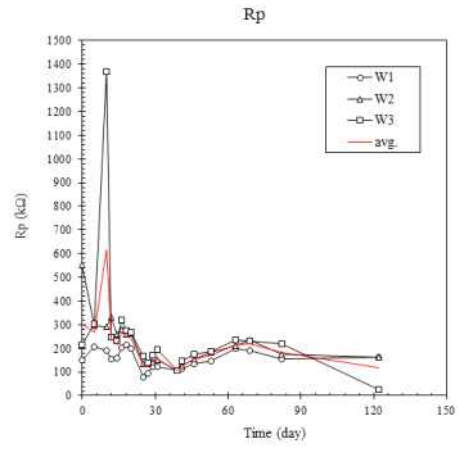


(e) 조건별 평균치

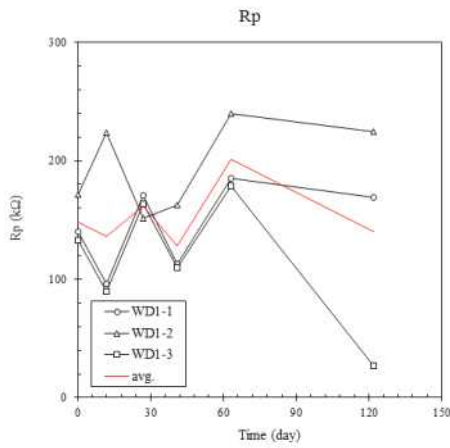
<그림 3.2.24> 타펠법에 따른 분극전류 측정 결과



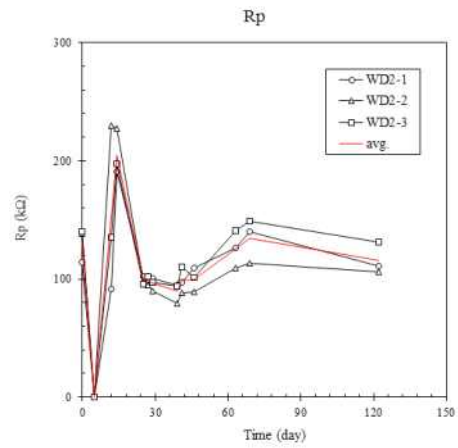
(a) 표준 조건



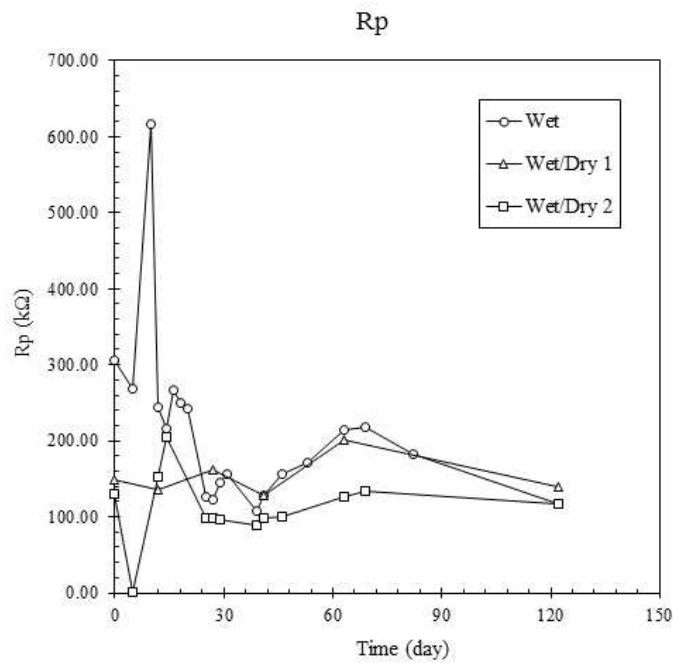
(b) 완전 침지



(c) 2일 침지 8일 건조



(d) 5일 침지 5일 건조



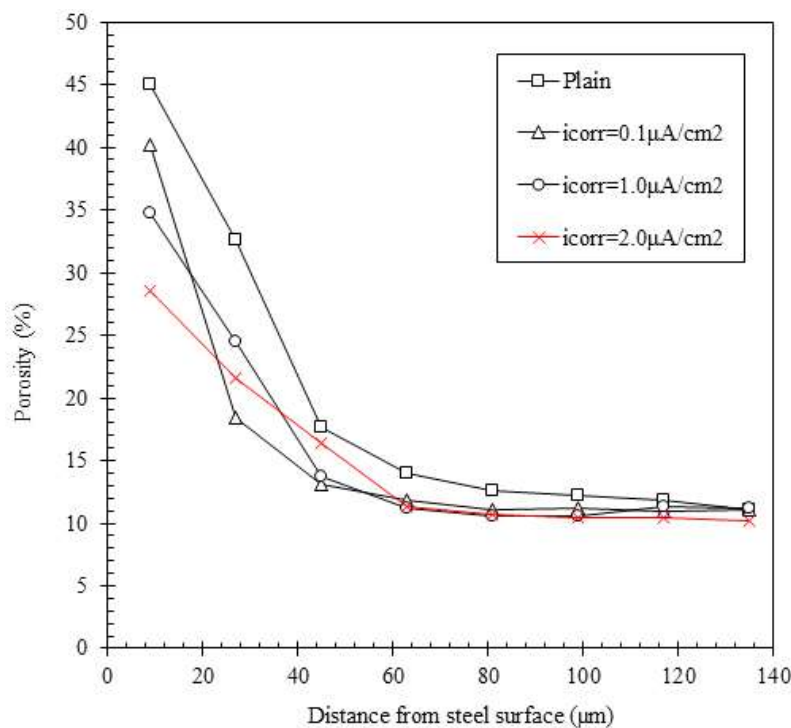
(e) 조건별 평균치

<그림 3.2.25> 선형분극법에 따른 분극저항 측정 결과

(2) 부식 거동에 의한 균열 모델 경험상수 도출

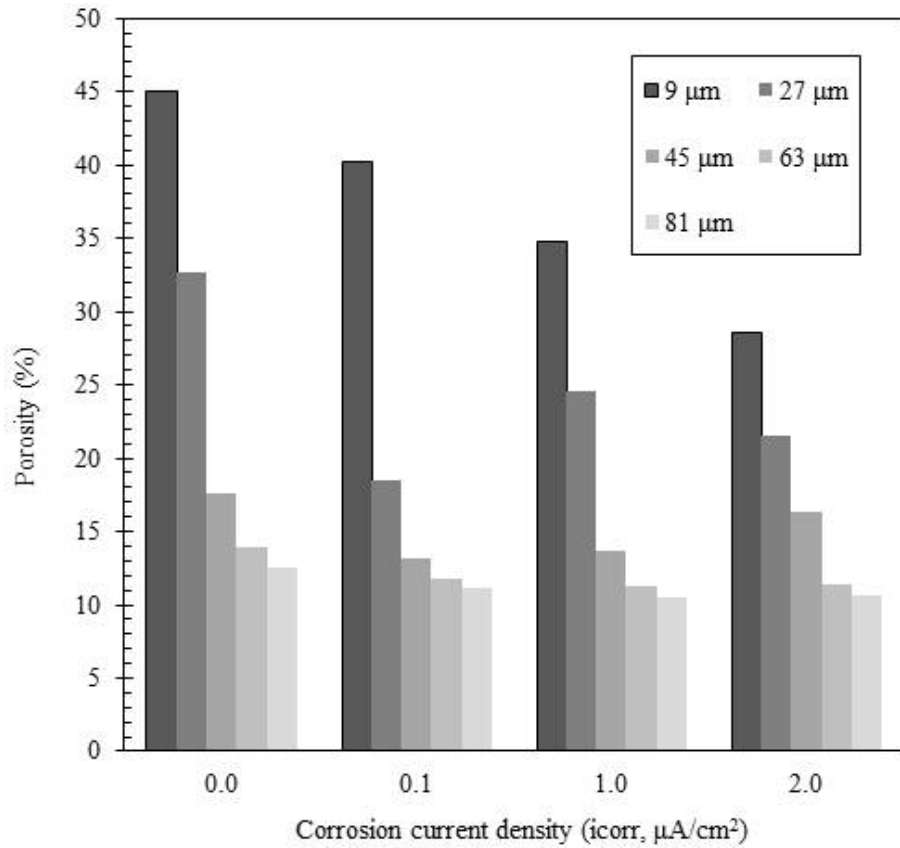
부식 및 균열 예측 모델의 실험 인자 및 모델의 신뢰성 확보를 위해 인위적으로 산화전류 인가하여 부식단계별 콘크리트의 균열 거동을 모사하고 그에 따른 영향인자를 분석하였다. 철근/콘크리트 계면은 부식 단계별 BSE 이미지 분석을 통해 계면의 공극률을 산정하고 부식물이 철근의 표면 중 공극부에서 발생하고, 부식물이 공극을 채워나감에 따라 응력이 발생하고 균열을 유도하여 전과함을 확인하였다. 균열 발생에 따른 철근과 콘크리트 계면부의 물성 변화는 부착강도 실험을 통해서 평가하였으며, 콘크리트 내부에 변형률 게이지를 매립하여 균열 발생 시기를 산출하고 전과 방향을 추정하였다.

(가) 철근/콘크리트 계면 공극 BSE 분석

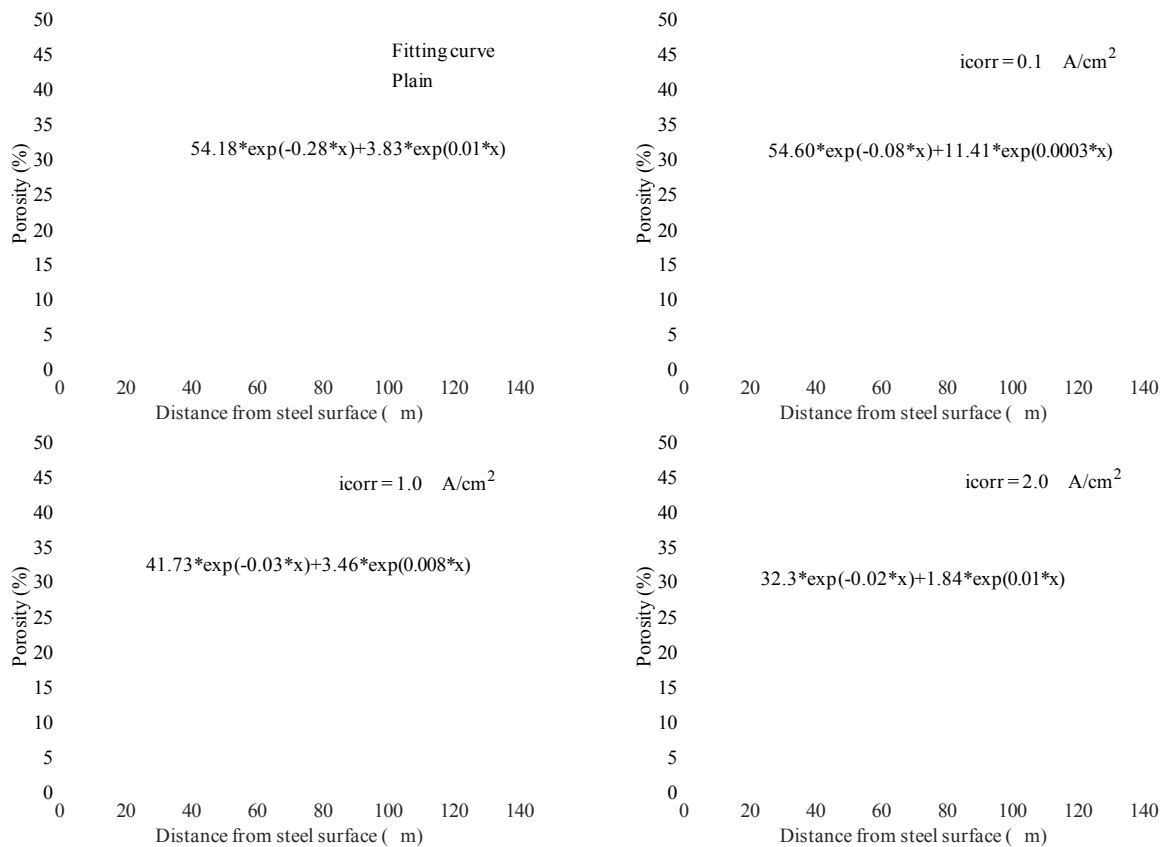


<그림 3.2.26> 철근으로부터 깊이별 공극률 변화

<그림 3.2.26>에서 계면에서부터 시멘트 경화체 내부로 분포되는 공극구조는 약 20 μm 까지 급감을 보이며, 그 이후 감소현상을 보이거나 어느 이상 (약 60 μm)에는 시멘트 경화체 내 고유 공극률에 수렴하는 경향을 보였다. 이는 철근과 시멘트 페이스트 간의 반발특성 및 배합 수의 철근표면 흡착현상에 따른 일시적인 높은 물-시멘트 형성으로 철근계면에서 높은 공극률을 보이며 내부 경화체로 갈수록 이에 대한 영향성은 감소하는 것과 비례하여 공극률의 감소를 나타낸 것으로 기인된다. 그러나 일반적인 계면공극률 특성 (Plain)과 비교 시 인위적인 전류인가의 경우 부식전류가 높을수록 철근부식 침전에 따른 계면공극 충전현상으로 20 μm 내후 범위에서 낮은 공극률을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상을 수학적 방법으로 회기분석 한 결과 지수함수 형태로 다음 <그림 3.2.27>과 같이 추정식을 제안하였으며, 각 전류밀도에 해당하는 경험상수를 도출하였다. 각 경우에 대해서 결정계수 98.24, 99.97, 98.46, 99.02%를 전류밀도 0, 0.1, 1.0, 2.0 μA/cm²에 대해 나타내었으며, 높은 상관성을 보였다.



<그림 3.2.27> 철근으로부터 깊이별 공극량 변화



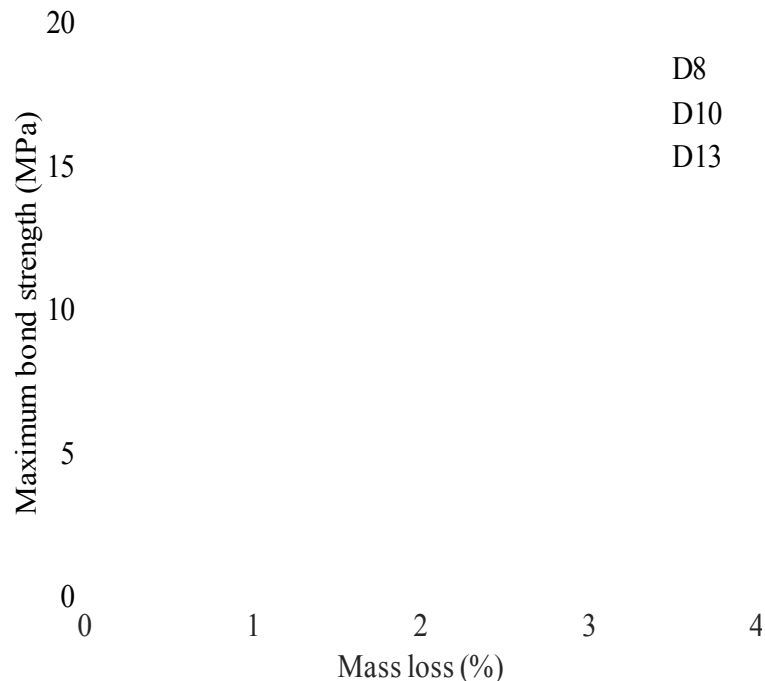
<그림 3.2.28> 부식전류 인가에 따른 철근 깊이별 공극량 변화의 경험식 산출 (B-4 ① 만족)

(나) 철근의 부착강도

철근콘크리트의 압축 및 인장응력의 정량평가 중 철근과 콘크리트 계면사이 부착강도는 대표적인 물리적 내구성능 측정방법이다. 이를 이용하여, 유해인자 침투에 따른 콘크리트 내 철근의 부식성과 콘크리트의 부착강도간의 상관성을 콘크리트 응력분포 모델과 비교한 결과를 <그림 3.2.28>에 나타내었다. 부식 단계는 전류를 $10 \mu A/cm^2$ 까지 콘크리트 내 철근에 인가하여 인발 시험 후 철근의 부식물을 중량감소법으로 측정하였으며, 이를 최대 부착강도와 비교하였다. 다만 측정된 철근의 중량감소

그 결과 철근 직경에 관계없이 초기 부식에 의해 부착강도가 소폭 증가하다가 최고 부착강도에 도달하며 더욱 부식이 진전될 경우 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 초기 부식으로 인한 녹의 철근 계면 축적이 철근과 콘크리트 계면의 부착력을 일정 수준 증가시켜 준다는 것으로 보이며, 선행 연구와도 일치하는 결과를 나타내고 있다. 최고 부착강도 이후에는 철근 계면부에 균열이 발생하여 부착력이 급격하게 감소하는 경향을 나타내는 것으로 판단된다.

본 실험의 결과를 살펴보면, 직경이 8 ~ 10 mm일 때 부착강도 최대치는 14.1 ~ 14.5 MPa를 보였으며, 직경 13 mm일 때 12.9 MPa를 나타내었다. 유해인자 침투에 따른 콘크리트 내구성능에 있어 철근 직경은 중요한 인자로 판단될 수 있다. 실제로도 철근 직경이 증가함에 따라 철근 계면부에 형성되는 공극의 양이 증가하며, 그에 따라 부식물이 축적될 수 있는 공간이 더 많아진다. 결과적으로 더 많은 부식 전류에 의해 철근 계면부에 응력 및 균열이 발생하며, 또한 부식으로 인해 부착강도가 감소하는 시기도 지연되는 결과가 예상 가능하다. 이러한 실험 결과는 모델 결과와 비교하였을 때, 철근 직경 D8, 10, 13에 대한 오차율은 각각 1.7, 5.1, 6.1%를 보였으며, 이는 목표 오차율 10%내를 달성한 결과이다.

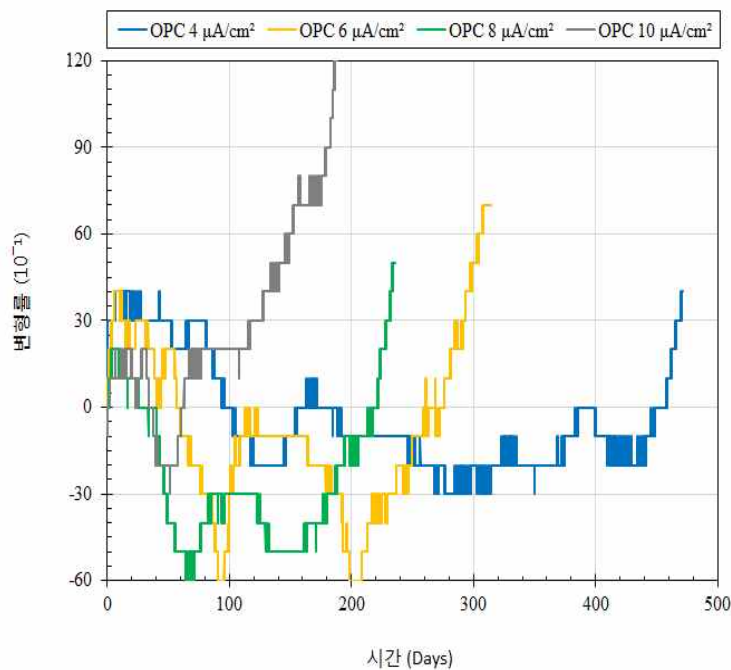


<그림 3.2.29> 부식 진전율 (mass loss)에 따른 최대 부착강도 및 모델 검증 (B-3 ① 만족)

(다) 콘크리트 변형 및 균열 전파

철근과 콘크리트의 계면에 축적되는 부식물은 공극을 채우며 콘크리트 공극 내벽에 압력을 가하게 된다. 철근의 부식 단계가 진전됨에 따라, 즉 공극을 채워나가는 정도에 따라 내벽의 압력은 콘크리트의 인장응력을 발생시키며 내부 균열의 원인이 된다. 따라서 본 실험은 동일한 배합의 시편은 동일한 계면 공극을 갖는다는 가정 하에 인위적으로 부식전류를 인가하여 부식 진행을 촉진함으로써 균열을 유도하여 철근에 인가되는 부식전류의 영향 아래 시간에 따른 콘크리트의 응력 및 변형 측정을 목표로 한다. 인가 부식전류 밀도는 총 4단계로 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이며, 전류 인가는 각 부식전류 밀도별로 462, 307, 230, 184 일 동안 진행되었다. 추가적으로 결합재로 인한 계면공극량의 변화가 부식에 끼치는 영향을 분석하기 위하여 혼합 시멘트 콘크리트에 대해서는 10.0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 전류를 위와 같은 조건으로 인가하였다.

한 시편 내에 매립된 9개의 변형률측정기는 서로 비슷한 경향의 결과값을 가지는데, 이는 측정기의 계측은 한 지점에 국한되나 부식으로 인해 철근으로부터의 거리가 일정하다면 변형률 값에 차이가 있을 뿐 부식이 미치는 영향은 동일한 것으로 판단되어, 하나의 평균값으로 나타내었다. 변형률의 값이 대폭으로 증가 혹은 감소하는 것은 측정기에 이상이 생긴 것이므로 그 이후의 값은 평균 산정 시 포함하지 않는다.



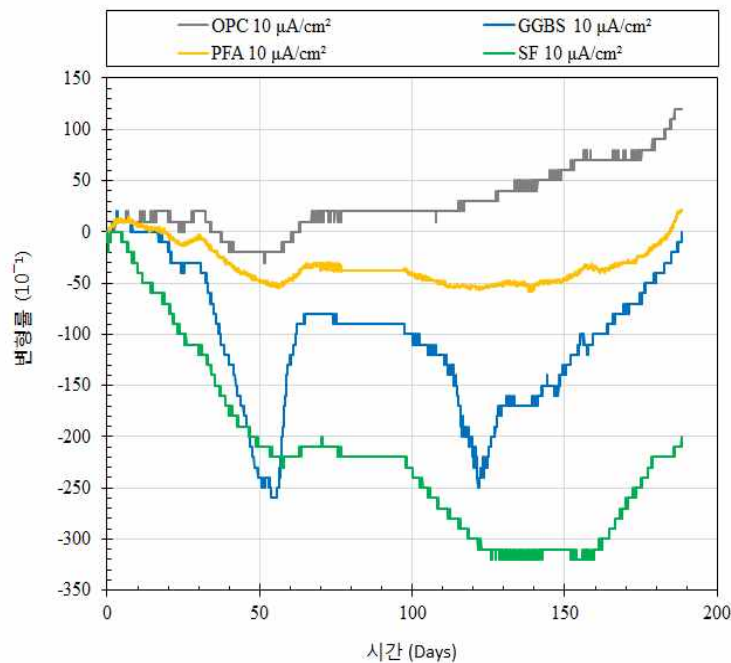
<그림 3.2.30> 인가한 전류밀도별 시간에 따른 OPC의 변형률

<그림 3.2.30>에는 인가한 전류밀도별 시간에 따른 OPC의 변형률을 나타내었다. 부식전류 밀도 값과는 상관없이 일반적으로 부식이 진행됨에 따라 측정기는 (-) 방향으로 높아지는 변형률 값을 가지며 압축되다가 변형률 값이 (+) 방향으로 높아지는데, 이 시점에서 콘크리트의 내벽에 균열이 발생하여 콘크리트의 구속이 풀리기 때문이라 간주한다. 약 40 일간의 안정기를 거친 뒤 별다른 현상 없이 인장 현상을 보이는 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 경우를 제외하고는 첫 균열 이후 안정기를 보낸 후엔 다시 압축되다가 처음과 비슷한 변형률 값에서 이차 균열이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 부식전류 밀도 값이 높아질수록 균열 발생 시기가 당겨지

는 것을 명확하게 알 수 있는데 이는 동일한 계면 공극을 갖는다면, 빠르게 계면을 메울수록 응력 또한 빠른 속도로 발생할 것이므로 당연한 결과로 사료된다. 일차적으로 균열이 발생한 후 균열까지 메우는 데 요구되는 부식물의 양 또한 부식 속도가 높을수록 빠르게 충족시킬 수 있기 때문에 이차 균열이 발생하기까지의 기간도 부식전류 밀도 값이 높을수록 짧아진다.

이차 균열이 발생한 이후의 변형률 값은 (+) 방향으로 높아지며 콘크리트 내부의 균열이 벌어지는 것을 의미한다. 다시 변형률이 구속되지 않는 것으로 보아 콘크리트의 역할을 하지 못한다고 판단하여, 본 연구에서는 첫 균열 이후 안정기를 거친 뒤 다시 균열이 발생하는 이 시점을 콘크리트 구조물의 파괴로 정의한다.

인가한 부식전류 밀도는 $10.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 로 동일하나 결합재별 변형률 그래프는 <그림 3.2.31>에 나타내었다. 동일한 배합 내에서 부식 속도를 다르게 설정하였을 때 시간에 따른 차이만 있을 뿐 비슷한 경향이었던 것을 감안하면, 결합재에 따른 변형률 변화는 매우 상이하다.



<그림 3.2.31> 결합재 종류별 시간에 따른 변형률

3.2.3 Electrochemical treatment 모델 변수 도출

철근 콘크리트 구조물의 전기화학적 방식법은 인가 전류와 기간에 따라 음극 방식법과 염소이온 추출법으로 분류 할 수 있다. 음극 방식법의 경우 100 mA/cm^2 이하의 미소 전류를 장기간 인가하여 콘크리트 내 철근의 부동태화를 유도하는 방식법이다. 초기 부식 발생 시 적용 효율이 높지만 장기간 전류를 인가해야하기 때문에 시간과 비용이 많이 소모된다. 반면 염소이온 추출법은 부식 발생 이전에 침투한 염소이온을 추출하는 방법으로 $1\text{--}2 \text{ A/cm}^2$ 의 높은 전류를 30–60일 정도 인가하는 방법이다. 염소이온 추출을 통해 추후 발생 가능한 부식의 위험성을 제거하는 효율적인 방법이지만 높은 저항을 가지는 콘크리트에 $1\text{--}2 \text{ A/cm}^2$ 의 전류를 인가하는 방법이 까다로우며, 전류 인가 이후 부착 강도가 감소한다는 연구 결과가 있다.

가. 전류 인가에 의한 Electrochemical treatment 효율 검증

Electrochemical treatment는 전류를 인가하여 철근을 음극으로 분극시켜 부식을 방지하는 방법이다. 따라서 콘크리트 내 존재하는 다양한 이온들은 전류가 인가됨에 따라 철근 혹은 외부 양극쪽으로 공극수를 따라 이동하게 된다. 이러한 이온 이동은 콘크리트의 저항, 인가 전류량, 인가 기간 또는 전해질의 종류 등에 따라 영향을 받게 되며 본 연구에서는 인가 전류량, 인가 기간 및 전해질 종류를 변수로 하였다. 이온 이동 분석을 위한 실험에서 인가 전류량은 음극 방식 실험에서는 30, 3000, 15000 mA/m^2 , 탈염 실험에서는 1, 3 A/m^2 의 전류 밀도로 인가하였다. 전류 인가 기간은 28일로 동일하게 하였으나, 인가 중단 없이 28일 인가하는 경우와 14일 인가 이후 7일 뒤 다시 14일 인가 시편으로 분류하였다. 전해질은 중류수, 포화수산화칼슘 용액(Ca(OH)_2)을 사용하였다.

(1) ICCP (Impressed Current Cathodic Protection)

ICCP 시편은 직경 5 cm 높이 10 cm의 원통형 시편으로 제작되었으며 시편 정 중앙에 직경 1 cm 높이 8 cm의 철근을 매립하였다. 타설 이후 수축으로 인한 시편 변형을 방지하기 위해 모르타르 배합으로 시편을 제작하였으며, 배합 및 타설 24시간 뒤에 탈형을 실시하였다. 시편 제작 시 발생한 철근 노출부는 물시멘트 비율 0.3의 페이스트 배합을 도포하여 공기와의 노출을 방지하고 12.5 이상의 높은 pH를 유지하여 갈바닉 부식의 발생을 방지하였다. 페이스트 배합이 완전하게 굳은 후 온도 $25\pm 1^\circ\text{C}$, 상대습도 $95\pm 2\%$ 조건 하에 항온항습 챔버에서 58일 동안 양생을 실시하였다 <그림 3.2.X>. 양생이 완료된 이후 콘크리트 저항을 최대한 낮추기 위해 각 전해질에 2일간 침지를 한 후 각각 전류를 인가하였다. 전류 인가 전 사전 침지를 통해 시멘트 공극의 수분 포화도를 상승시켜 콘크리트 내 저항을 최소화 시킬 수 있기 때문에 실험의 정확도를 높일 수 있다. 준비된 시편은 상기 명시한 전류 인가 기간과 전류량에 따라 방식 전류를 인가하였고, 최종적으로 철근 계면부의 수산화 칼슘 형성 정도를 포함한 이온 이동 정도를 판단하기 위해 XRD 및 SEM 분석을 실시하였다. 추가로 철근 계면부의 모르타르를 채취하여 분쇄한 후 pH를 측정하여 ICCP로 인한 콘크리트 내 철근의 재알칼리화(re-alkalization)를 확인해 보았다.



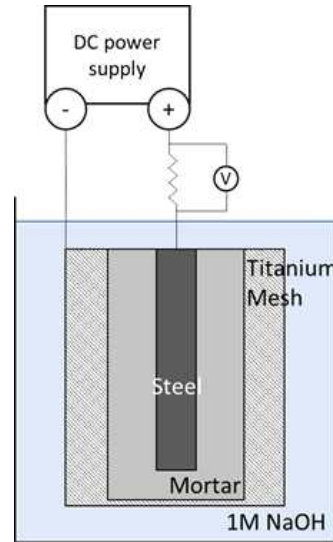
(a) ICCP 시편 제작



(b) 철근 노출부 실리콘 코팅



(c) 페이스트 코팅



(d) ICCP 모식도

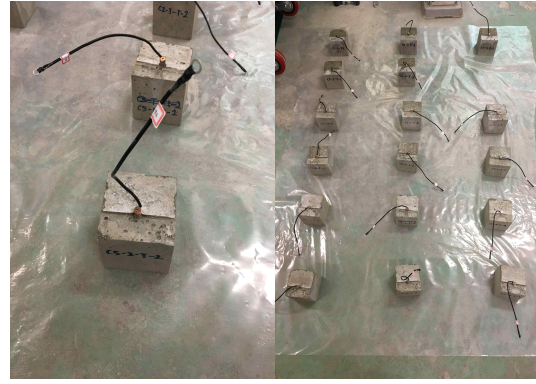
<그림 3.2.X> ICCP 시편 제작 과정 및 모식도

(2) ECE (Electrochemical Chloride Extraction)

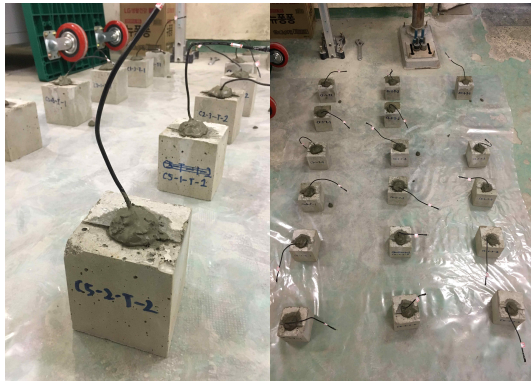
ECE 시편은 $10 \times 10 \times 10$ cm의 정사각형 시편으로 제작하였다. 인가 방식 전류에 의한 염소이온 추출을 확인하기 위한 시험이기 때문에 배합 당시에 배합수에 시멘트 무게 대비 2 또는 5%의 염화나트륨을 첨가하였다. 이론상으로는 양생이 완료된 시편에는 일정량의 고정화 염소 이온과 자유 염소 이온 모두 고르게 분포되어 있다고 가정한다. 시편의 중앙으로부터 2 cm 떨어진 곳에 철근을 위치시켜 피복 두께를 7 cm로 유지하였으며 해당 면으로만 전류가 통할 수 있도록 다른 면은 모두 에폭시를 도포하여 전류를 차단하였다. ICCP 시편과 동일하게 24시간 양생 이후 물시멘트비 0.3의 페이스트 배합을 노출 철근부에 도포하였다 <그림 3.2.X>. 페이스트 배합이 완전하게 굳은 후 온도 $25 \pm 1^\circ\text{C}$, 상대습도 $10 \pm 2\%$ 조건 하에 항온항습 챔버에서 58일 동안 양생을 실시하였다. ECE 시편의 경우 배합 당시 염소 이온을 첨가하였기 때문에 습도가 높은 조건에서 양생을 시킬 경우 철근의 부식을 가속화 시킬 수 있기 때문에 낮은 습도 조건에서 양생을 완료하였다. 이후, 7일간 증류수에 침지한 뒤 전해질이 담긴 통으로 옮겼다. 양극 전극으로는 산화 반응이 발생하지 않는 Titanium 매쉬를 사용하였고 노출면과 일정한 거리 (약 1 cm) 간격을 두고 평행하게 배치했다. 서로 다른 전해질 통에 담긴 시편 3개 또는 4개를 직렬로 연결하여 전류값을 해당 전류 밀도에 맞춰 인가하였다. 전반적인 실험 사진은 <그림 3.2.X>와 같다.



(a) ECE 시편 제작



(b) 철근부 전선 연결

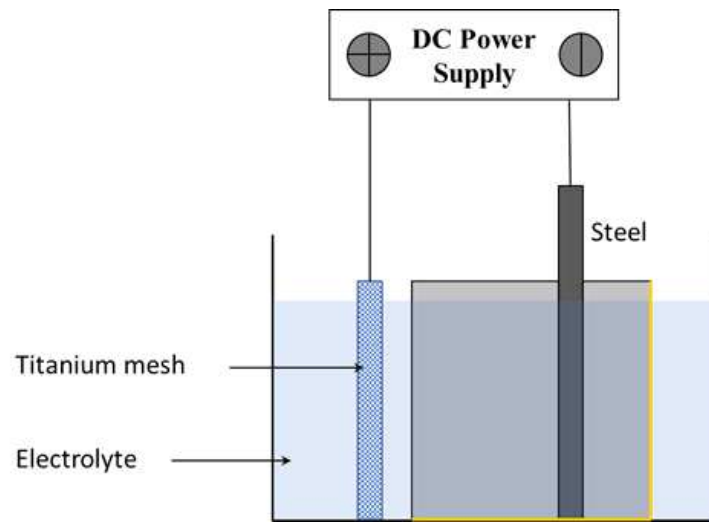


(c) 페이스트 코팅

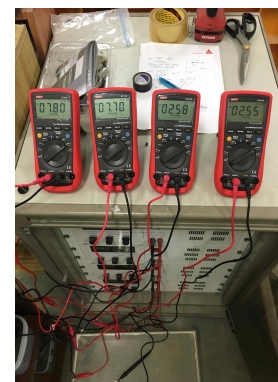


(d) 에폭시 코팅

<그림 3.2.X>ECE 시편 제작 과정



(a) ECE 모식도



(b) ECE 시편 연결 및 방식 전류 인가 사진
<그림 3.2.X> ECE 모식도 및 방식 전류 인가

(3) Electrochemical treatment 의 부착강도 영향성

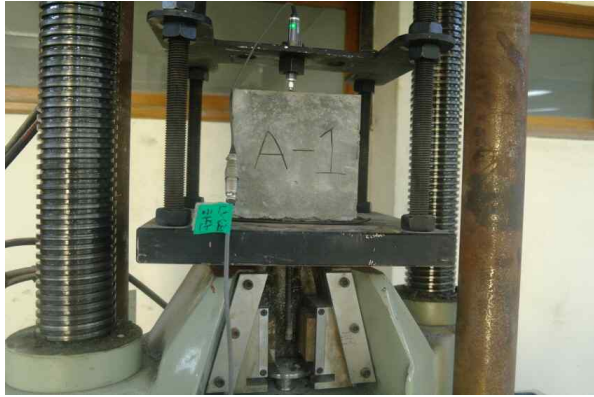
선행 연구에 따르면 Electrochemical treatment 중 ECE의 경우 철근에 높은 방식 전류를 흘려보내며, 그 과정에서 철근 계면부의 시멘트 매트릭스의 변화가 발생해 부착강도가 감소한다는 연구 결과가 있다. 이를 설명하는 가설로 철근이 음극으로 분극 됨에 따라 철근 계면부에 Ca^{2+} 의 농도가 높아지고, 시멘트 공극내의 수산화 이온과 결합하여 수산화칼슘을 형성되어 계면부의 마찰력이 감소한다는 것으로 설명되고 있다. 또는 철근 계면부의 환원 반응으로 인해 수소 가스가 발생하여 계면 공극 내에 축적되면서 계면부의 균열을 발생시킨다는 이론 또한 있지만 아직까지 정확한 원인에 대해서 밝혀진 바는 없다. 하지만 최적 방식 조건 도출을 위해서는 탈염 효과 또는 방식 효과 뿐 아니라 전류 인가 이후 부착강도의 저하 정도를 판단할 필요가 있다. 설계 강도 이하로 부착강도가 감소할 경우 해당 방식 조건은 부적합한 것으로 판단되며, 이를 분류하기 위해 본 실험에서는 ECE 전류를 인가한 시편에 대해 부착강도를 측정하여, 부착강도 감소가 적은 전류 범위를 찾고자 하였다.

ECE가 완료된 철근 콘크리트 시편의 부착강도 측정을 위해 ASTM C234에 따라 인발 실험(Pull out test)을 실시하였다. 규정을 만족하면서 콘크리트 저항을 최소화하기 위해 시편은 한 변의 길이가 20 cm인 정육면체로 제작하였으며 D 13 철근을 중앙에 배치하였다. 철근의 길이는 총 X cm로 인발력을 가할 수 있도록 상단부에 X cm 하단부에 X cm 만큼 돌출되었으며, 양생 및 전류 인가 기간 동안 돌출부의 부식을 방지하기 위해 에폭시를 도포하였다 <그림 3.2.X>.



<그림 3.2.X> 인발 시험용 시편 사진

제작된 시편은 철근과 평행한 면만 전류가 통하도록 하단부에 실리콘을 도포하였다. 이후 증류수가 담긴 통에 배치하였고 사면에 양극인 Titanium mesh를 설치한 후 전원 공급장치(Power supply)와 연결하였다. 시편의 인가 전류량은 1, 3 A/m^2 이며, 인가 기간은 총 28일로 하였고, 28일 연속인가와 14일 인가 7일 휴식 14일 인가하는 경우로 분류하였다. 전류 인가가 완료된 시편은 전원 차단 24시간 이내에 인발 시험기를 통해 하중 및 변위를 각각 측정하였다 <그림 3.2.X>.



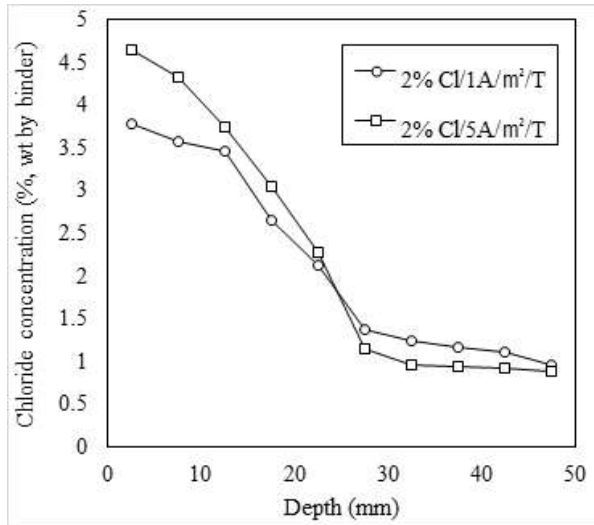
(c) 인발 시험

<그림 3.2.X> 인발 시험 시편 전류 인가 후 부착강도 측정 사진

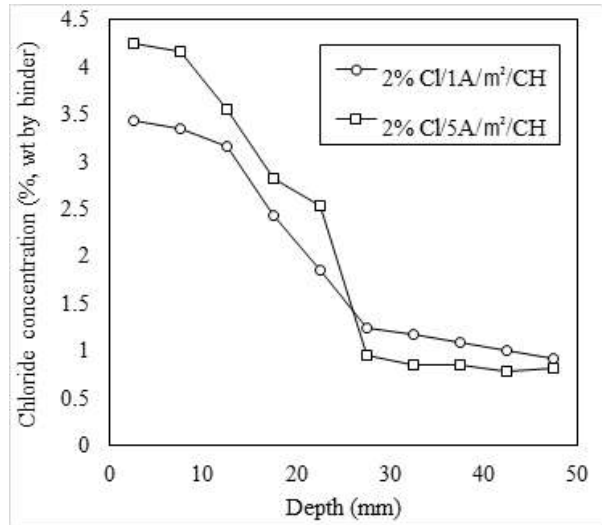
나. Electrochemical treatment 모델 검증

(1) 전류 인가에 따른 탈염 효과 검증

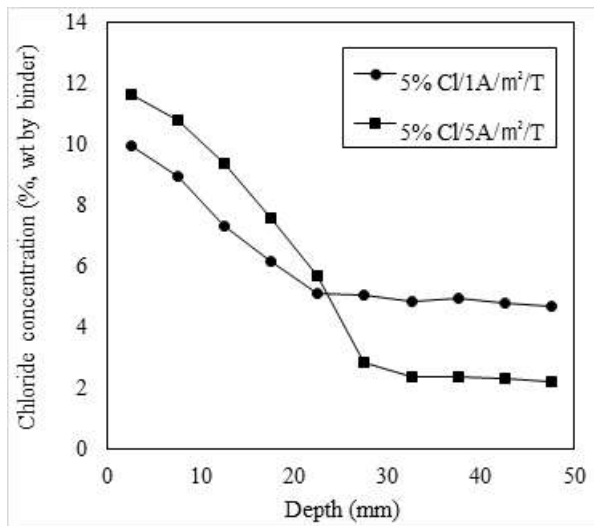
방식 전류에 의한 탈염 결과는 다음 <그림 3.2.X>와 같다. 동일 전해질과 첨가 염소 이온을 함유한 시편의 경우 전류량이 높아짐에 따라 추출 염소이온 양이 높아지는 것을 확인하였다. 25 mm 이상의 깊이에서 염소이온 함유량의 변화에 큰 차이가 없는 것으로 보아 28 일간의 인가 기간 동안의 유효 깊이는 25 mm인 것으로 판단된다. 하지만 <그림 3.2.X (a)>의 경우 혼입 시 2%의 염소이온을 첨가하였으나 25 mm 이상 깊이에서 약 1%의 잔류 염소 이온이 있는 것을 확인하였으며, 이는 ECE 전류 인가가 고정화된 염소이온을 모두 추출하지는 못하기 때문인 것으로 판단된다. 잔류 염소이온은 인가 전류량을 높일 경우 소폭 감소하지만 확실한 차이를 발견하지는 못했다. 전해질을 증류수가 아닌 포화수산화칼슘 용액으로 변경할 경우 잔류 염소이온의 감소폭이 증가하였으며, 이는 전해질 내 이온 함유량이 높아짐에 따라 전류 전도도가 증가한 것에 원인이 있는 것으로 판단된다. 인가 전류를 높일 경우에는 잔류 염소 이온량은 높지만 염소이온 추출률은 약 60%로 더 높은 추출률을 나타내고 있다. 1 A/m²의 전류량에서의 추출률은 약 50%정도이며 이는 기존 대비 내구성능 150% 향상의 성과 목표를 달성하는 수치이다.



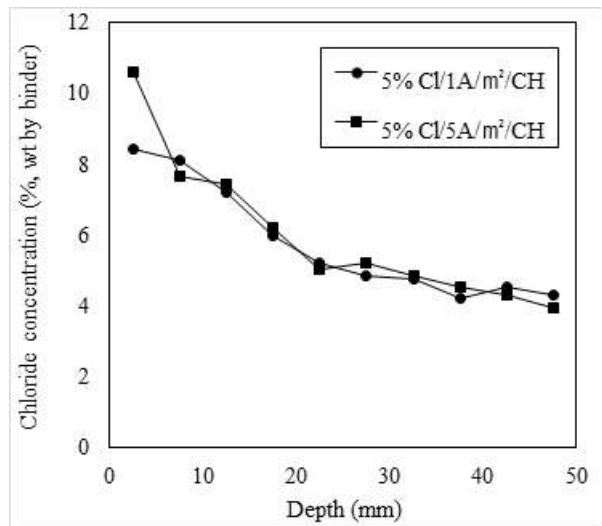
(a) 2% Cl- 농도, 증류수



(b) 2% Cl- 농도, 포화수산화칼슘용액



(c) 5% Cl- 농도, 증류수

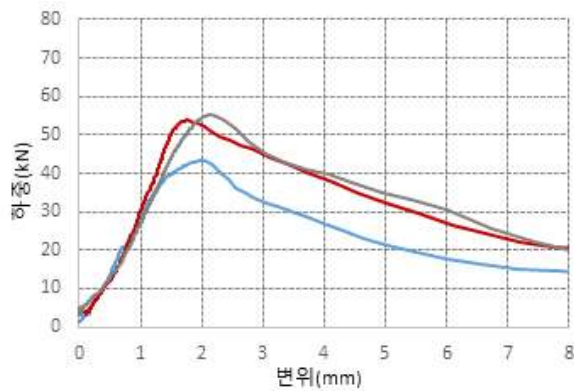


(b) 5% Cl- 농도, 포화수산화칼슘용액

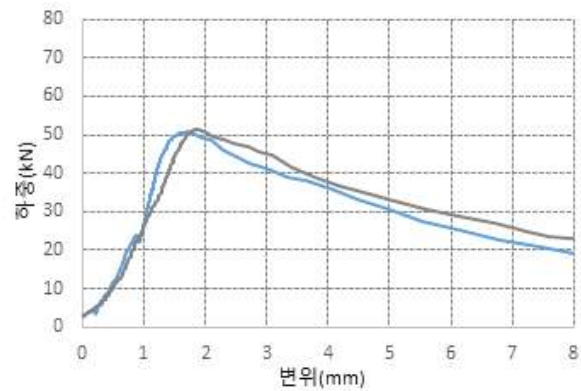
<그림 3.2.X> 첨가 염소 이온 양, 인가 전류 및 전해질 종류에 따른 탈염 효과

(2) 최적 Electrochemical treatment 조건 도출

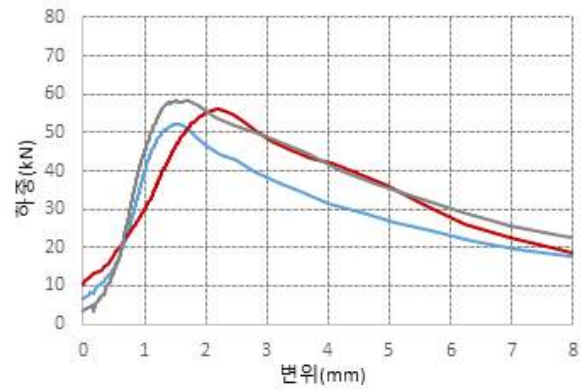
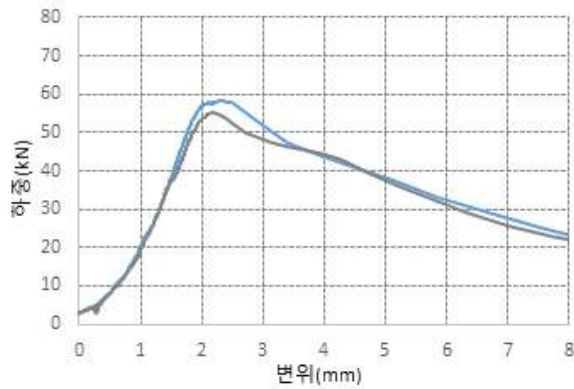
다음 <그림 3.2.X>는 전류 인가 이후의 부착강도 결과를 나타내고 있다.



(a) 1 A/m², 28일 인가



(b) 3 A/m², 28일 인가



(c) 1 A/m², 14일 인가, 7일 중단, 14일 인가 (d) 3 A/m², 14일 인가, 7일 중단, 14일 인가
<그림 3.2.X>

28일간 꾸준히 인가한 시편의 경우 1 A/m²의 전류 인가 시편은 평균 20.1 MPa의 부착강도를 나타내었으며, 3 A/m²의 경우 19.1 MPa의 결과를 나타내었다. 전류를 인가하지 않았을 때 평균 24.6 MPa의 부착강도를 나타내었으며, 전류 인가에 따라 약 20% 정도의 부착강도 감소를 확인하였다. 또한 인가 전류량이 높아짐에 따라 부착강도 저감률이 소폭 상승하였으나, 전류량이 3배로 증가한 것에 비해 저감 폭은 매우 적다. 철근 콘크리트가 부식으로 인해 부착강도를 상실할 때의 부착강도는 10 MPa 이하로 측정치에 비해 매우 낮은 값이다. 실제 구조물에서는 10 MPa 이하의 부착강도를 발현하기 이전에 부식으로 인해 철근 단면이 손실되어 철근이 끊어지는 현상이 발생하기 때문에 10 MPa 이하의 부착강도를 가지는 경우가 발생하지는 않는다. 따라서 본 연구 결과는 측정 시편 모두 20 MPa 이상의 부착 성능을 발휘하기 때문에 설정 인가 전류 및 기간이 적절한 것으로 판단된다.

부착강도의 감소는 ECE 전류를 인가함에 따라 철근 계면부의 시멘트 매트릭스에 변화가 발생하는데 원인이 있다. 선행 연구 결과에 따르면 인가 이후 일정 시간이 흐름에 따라 감소한 부착강도는 어느 정도 회복이 되는 경향을 나타내고 있다. 본 연구의 실험 결과에서는 부착강도의 회복을 감안하여 14일 인가이후 7일간 전류 인가를 중단하고 다시 14일간 전류 인가를 실시하였다. 그 결과 1 A/m² 시편의 평균 부착강도는 21.9 MPa, 3 A/m²의 부착강도는 20.9 MPa로 중단 없이 전류를 인가한 시편에 비해 약 2 MPa의 부착강도가 증가하였다. 이는 전체 부착강도의 약 10%이며, 실제 콘크리트 구조물에 Electrochemical treatment를 적용할 경우 전류 인가 기간에 휴면기를 포함할 것을 권장한다.

해양환경에 노출된 콘크리트 구조물의 시간에 따른 실제 환경변화를 고려하여, 수명예측의 정확성을 높이고자, 본 연구에서는 조위간만에 따른 해수 위 예측, 온도 및 상대습도에 대한 시간에 따른 변화를 실제 데이터를 기반으로 예측 모형을 만드는데 목표가 있다.

가. 시간별 변화하는 환경인자 예측의 수학적 방법론 제시

외기환경 인자 중 콘크리트 내 철근부식을 일으키는 요소는 주로 온도, 습도, 염도이며, 특히 염분침투에 대한 철근부식은 pit nucleation을 발생시키며, 철근의 단면적 손실에 따른 인장강도 저하, 추가적인 pH 저하에 따른 국부적인 부식을 일으켜, 구조물의 내하력을 상실 시키게 된다. 이러한 시간 의존적인 환경인자 변화를 정량적으로 수식화 및 예측을 하기위해 시계열 모형 (Time series model)에 입각한 해석 기법을 적용하고자 한다. 시계열 해석의 정의는 주어진 현상들의 시간에 따라 변화하는 것을 수학적 모형으로 만들거나, 이를 기반으로 미래에 일어나는 현상들을 예측하는 방법론이다. 따라서 본 연구에서는 해양환경 하 콘크리트 구조물의 내구성에 영향을 미칠 수 있는 인자들 (온습도 및 조위변화)을 자기회귀모형 (Autoregressive model: AR model) 혹은 인공신경망 알고리즘 (Artificial neural network)을 이용하여 정량화시키고, 내구성 해석 모델에 적용할 수 있는 시스템을 제공하여, 수명예측에 정확성을 높이고자 한다. 최종적으로, 본 연구에서는 시간에 따른 외기조건 변화 (습도, 온도, 염도)를 고려한 모델 경계조건 적용 및 철근부식 예측을 하고자 한다. 먼저, 자기회귀모형이란 시계열 자료 (y_t)가 자기자료의 과거에 해당하는 값들로써 예측이 된다는 모형이며, 다음과 같이 표현된다.

$$y_t = \alpha_1 y_{t-1} + \alpha_2 y_{t-2} + \dots + \alpha_p y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (3.X)$$

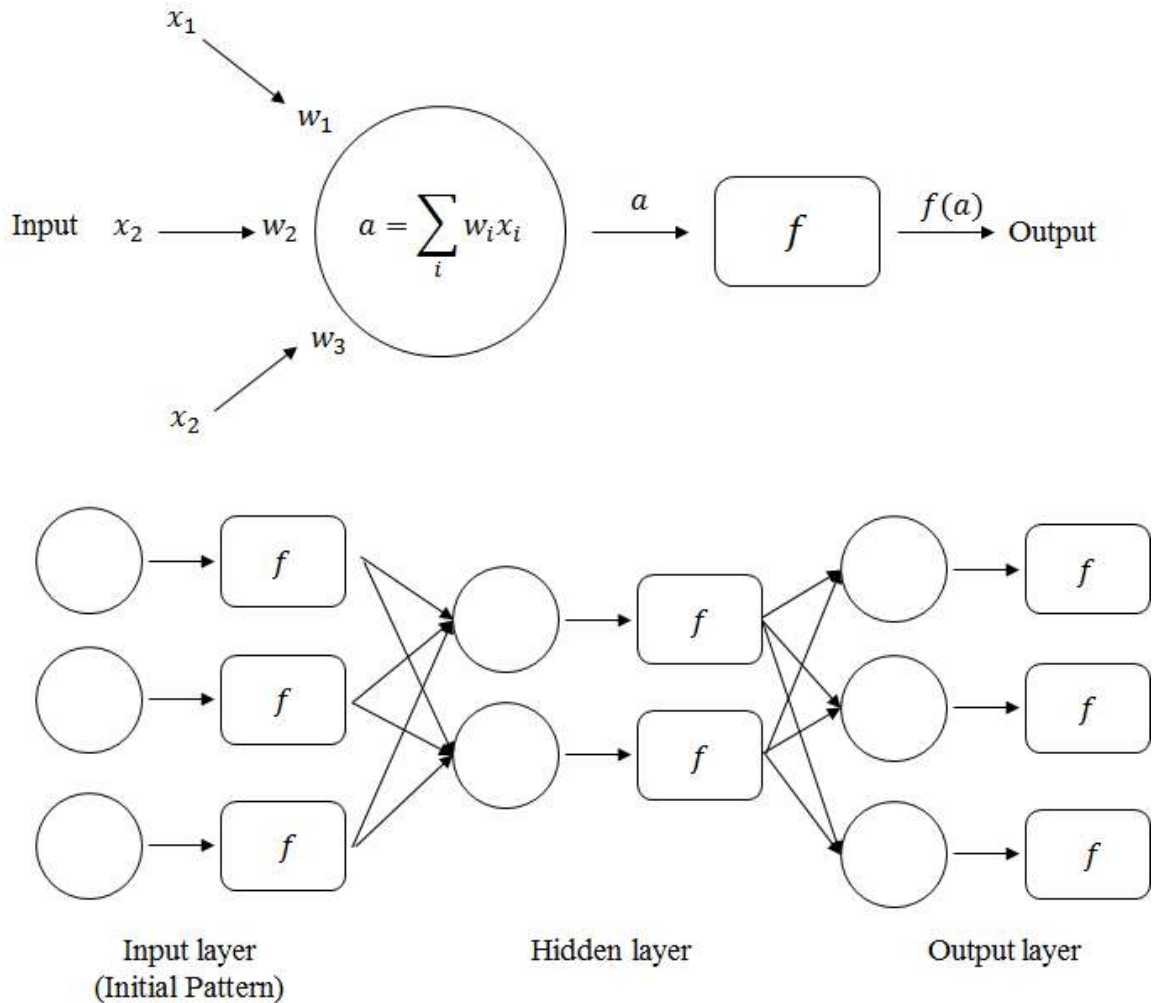
여기서, $\alpha_{i=1\dots p}$ 는 자기상관계수이며, 범위는 $-1 < \alpha < 1$ 이며, ε_t 는 현재 시점의 오차이며, t 는 시간을 의미한다. 자기상관계수의 절대 값 범위가 1이상을 경우 정상시계열이 되지 못하고, 발산하는 형태의 random walk가 된다. 또한, 바로 전기의 값이 현재의 값에 중요한 영향을 주는 경우 자기회귀모형은 다음과 같이 표현된다.

$$y_t = \alpha_1 y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (3.X)$$

여기서, 오차 ε_t 는 시점에 관계없이 독립적이고 정규분포를 한다는 것으로 가정하고 다음과 같은 특성을 가진다.

$$\varepsilon_t \sim N(0, \sigma^2), E(\varepsilon_t) = 0, Var(y_t) = Var(y_{t-1}) \quad (3.X)$$

이는 정상시계열에 대한 조건을 의미하며, α 의 절대 값이 0에 가까울수록 정상성이 높아지며, 반대로 1에 가까워지거나, 그 이상일 경우 비정상 시계열이 된다. 본 연구에서는 자기회귀모형 이론을 이용하여, 환경인자의 시간에 따른 변화도를 예측하기 위해 스프레드의 정상성이 최대가 되는 조건을 반복적으로 최적화하여, 대표 모형을 구축하였다.



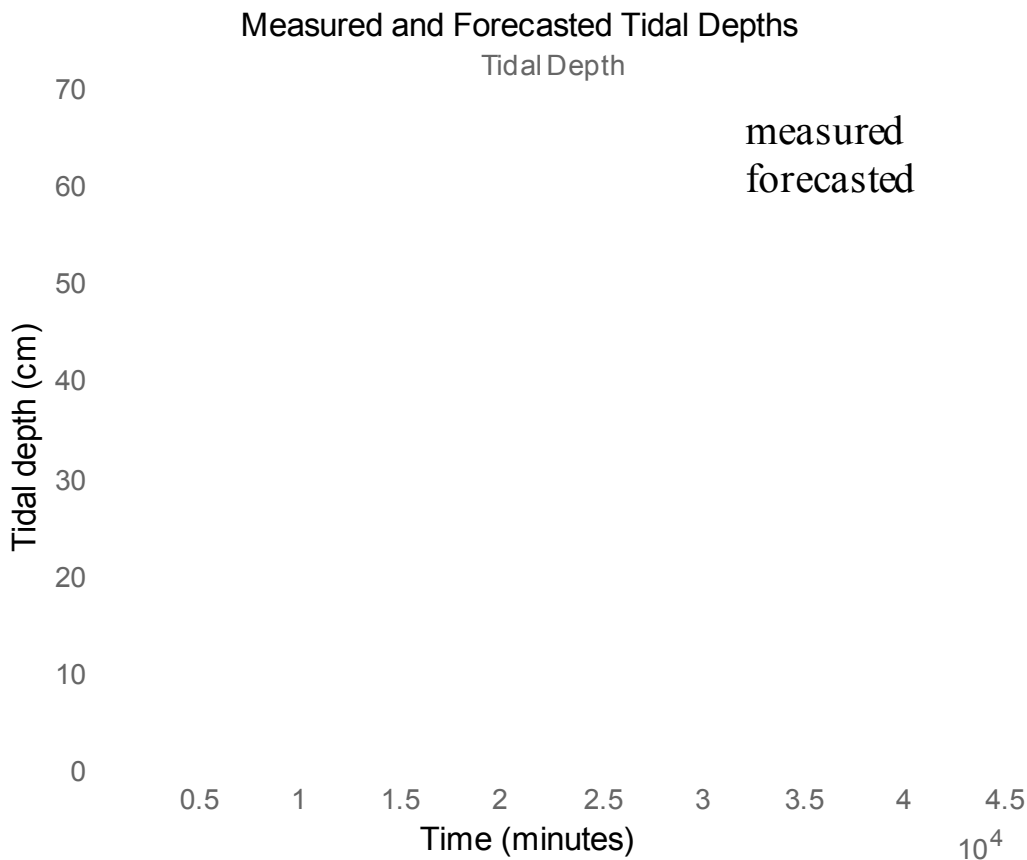
<그림 3.2.4.1> 뉴런의 수학적 모델

시그널 예측 방법 중 하나로, 인공신경망 법 (Artificial Neural Network)을 이용하여, 복잡한 현상 (비선형시스템)에 대해 입력 값과 출력 값을 토대로, 반복적인 학습을 통해 최적 신경망 층을 회기분석으로 찾으려 하며, 이를 통해 비선형 해석을 가능하게 한다. 이를 위한 뉴런 형태에 대한 개념적인 모식도는 <그림 3.2.4.1>를 참고한다. 각 시간 별 환경인자 데이터를 취득하고, 이를 Input으로 설정하며, 초기 Output에 대해서는 데이터 중 Input에 해당하는 시간범위에서 다음 시간대에 해당하는 값을 주었으며, Layer 수를 입력하고, 반복학습 (Training)을 통해 최적 범위로 수렴하는 값에 대해서 뉴런 시스템을 완성한다. 이를 통해, 다음 시간에 대한 환경인자를 예측할 수 있으며, 모델의 Input 값으로 적용가능하게 하였다. 또한, Matlab에서 지원가능 한 Open channel인 www.thingspeak.com에서 얻은 실시간 환경인자 데이터 (조수위, 온습도)를 이용하여, 모델 분석을 위한 Input인자에 적용하였다.

나. 해양 구조물의 영향 조위 예측

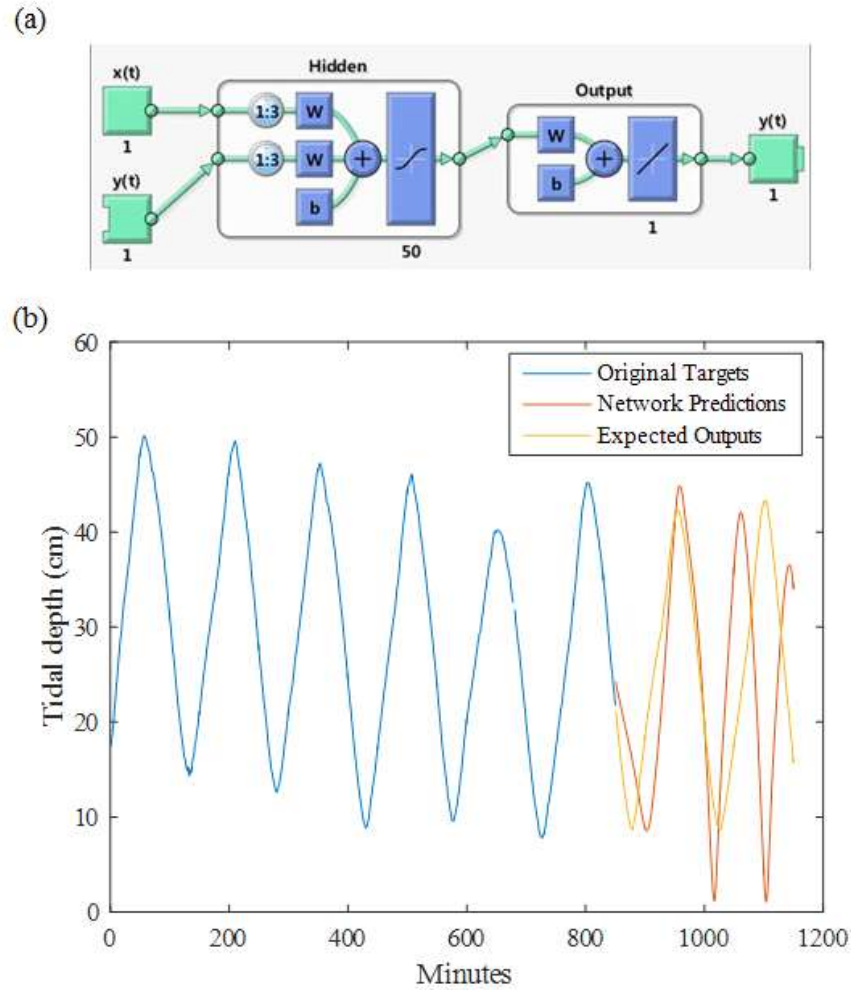
해양환경에 노출된 콘크리트 구조물의 부식에 대한 위험성은 외기환경 조건 (온도, 습도, 염도) 변화에 크게 의존하며, 이를 분석모델에 적용하는 것은 기존의 내구성 모델 (일정 경계조건 적용)과 달리 특정 환경에 노출된 구조물의 내구수명 설계의 정확성을 높일 수 있다. 본 연구에서는 자기회기모형 (Autoregressive model) 및 인공신경망 (Artificial Neural network) 기법을 사용하여, 특정 해안 지역 (Ockway Bay)의 조위 분석을 실시하였다. 먼

저, 자기회기모형을 적용하여, 약 한달 (31일)간 해수 위 데이터 중 약 3일에 해당하는 기간을 예측하였으며, <그림 3.2.4.2>에 두 가지 경우를 나타내었다. 관측된 데이터의 경우 하루에 2-3번으로 해수위의 변화를 보였으며, 최대 약 50 cm의 변동 폭을 나타내고, 일정한 경향을 보이지 않았다. 이를 정량적으로 시그널분석을 적용하기 위해 자기회기모형 중 다항식의 차수를 높여 수치결과의 정확성을 높였으나, 실제 값과 비교 시 시간이 길어질수록 수렴하는 형태를 나타내었다. 이는 조위간만대의 변화는 기존의 수학적 표현방법으로 예측하기 힘들며, 이를 회기하기 위해서는 다양한 인자들을 동시에 고려한 모델이 필요하다. 그러나 이러한 모델의 경우 수많은 input data가 필요하며, 복잡한 계산과정을 수반하기 때문에 실용적인 측면에서 재현성이 낮다.



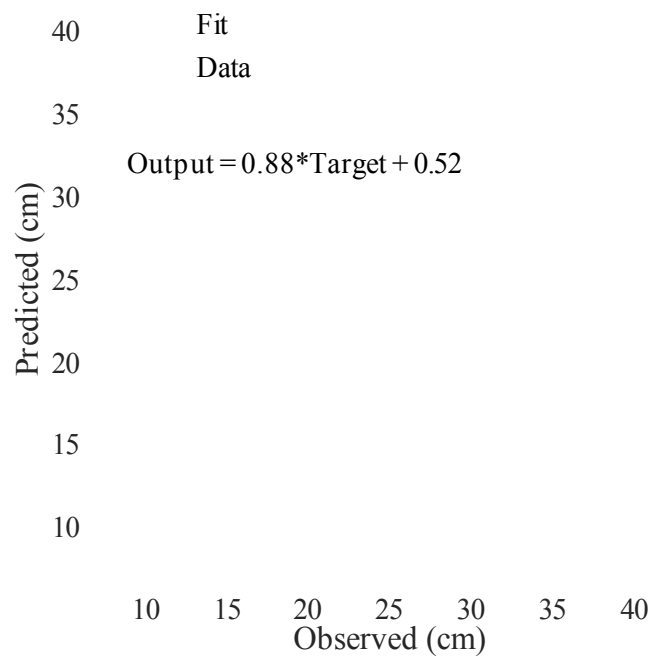
<그림 3.2.4.2> 자기회기방법론을 적용한 시간에 따른 조위 데이터의 예측 (C-3 ① 만족)

따라서 본 연구에서는 이러한 과정을 간단하고 명료한 형태로 표현하기 위해 인공신경망 알고리즘을 적용하여, 다음 <그림 3.2.4.3>과 같이 데이터 분석을 실시하였다. 해석의 정확성을 높이기 위해 input과 output 결과간의 반복적 학습을 통해 관측데이터와 output간의 최적화를 유도하였다. 뉴런의 구성으로 <그림 3.2.4.3(a)>와 같이 hidden layer 개수를 50으로 설정하고, time delay 반복회수를 3번으로 네트워크 구성라인을 구축하였다. 이러한, 상태로 실측값과 output간의 최적화를 위해 시뮬레이션을 반복적으로 실행하였으며, 약 이틀에 해당하는 실측값과 예측함수의 차이를 다음 그림 <그림 3.2.4.3(b)>와 같이 최소화시켰으며, <그림 3.2.4.4>에 실측 데이터와 예측 값과의 상관계수를 나타내었다.



<그림 3.2.4.3> 인공신경망 알고리즘을 적용한 시간에 따른 조위 분석: (a) 알고리즘 (b) 분석결과

$$r^2 = 0.97234$$

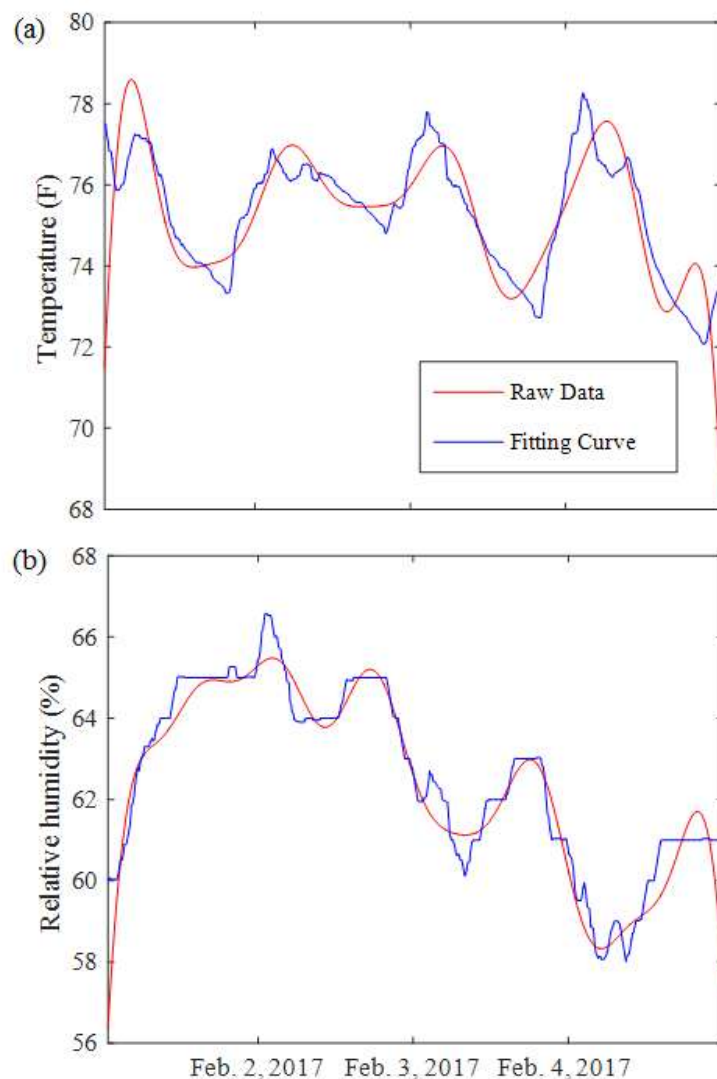


<그림 3.2.4.4> 인공신경망 알고리즘을 적용한 조위 분석의 상관성 분석 (C-4 ③ 만족)

그림 <그림 3.2.4.4>에 나타나듯이, 조위 데이터의 일부분은 예측 함수와 상관성이 낮은 구간이 발생하나, 전체적으로 상관성을 고려하였을 때 97% 이상 매우 높은 값을 나타내어, 목표치 (C-4 ③)를 만족하였다.

다. 해양 구조물의 영향 환경 인자 예측

시간에 따른 온도 및 습도변화에 대해서도 같은 해안지역 (Ockway Bay)에 대해 인공신경망 알고리즘을 적용하여, 다음 <그림 3.2.4.5>와 같이 나타내었다. 그 결과 온습도 2가지 경우 상관계수 90% 이상 높은 회기결과를 얻었으며, 관련 문헌 [Emillo, 2009]의 온습도 분석에 대한 알고리즘 결과 비교 시 그에 상응하는 결과 (상관계수 85% 이상)를 얻었으며, 이는 목표치 (C-4 ①)를 만족하는 결과를 얻었다. 이는 시간에 따른 온도와 수분분포는 다양한 인자들을 포함하는 변칙성 때문에 기존 sine 함수 형태나 혹은 step function 형태와 같은 단순한 해석 해로는 일정 상관관계를 얻기 불가하다. 그러므로 본 연구에서는 확률론적인 이론을 바탕으로 인공신경망 알고리즘을 적용하여 해안환경 하 콘크리트 구조물의 유해 인자의 시간 의존성을 고려하여, 내구성 해석에 적용하였다.

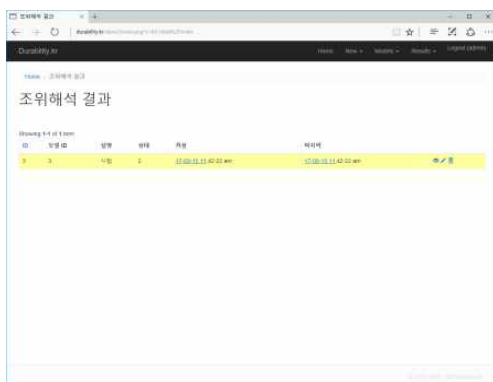


<그림 3.2.4.5> 인공신경망 알고리즘을 적용한 환경인자 분석: (a) 온도 (b) 습도
(C-4 ① 만족)

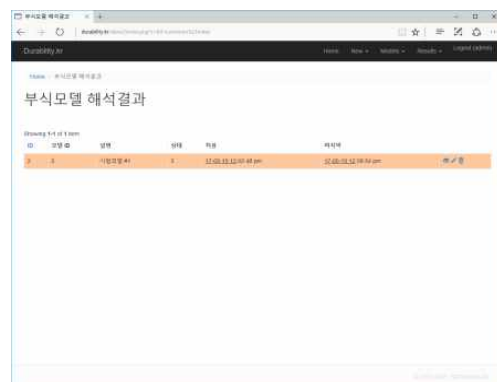
본 연구에서는 Web 기반 내구성 해석 모델의 활성화를 위해 기 수행된 (1 차년도) 사이트 구동방식에서 데이터 수집 알고리즘을 적용한 조위해석 모델과 그로인한 콘크리트 내 철근의 부식거동에 대한 모델조건을 반영한 GUI 기반 소프트웨어의 input에서 output에 해당하는 절차를 다음 <그림 3.2.4.6>에 나타내었다. 이는 기존의 단일 물성인자를 input으로 적용한 해석 툴 (Life 365, Ducom)과 달리 해양환경을 모사한 외기조건 (온습도 및 조위변화)를 고려한 모델을 기반으로 개발된 소프트웨어이며, <그림 3.2.4.6>과 같이 시간에 따른 조위변화를 실제 데이터와 비교할 수 있으며, 콘크리트 내 2차원 FEM 기반 해석을 이용하여 부식진전에 따른 콘크리트 내 응력변화를 알 수 있다.

[조위해석 모델 Input 입력 창]

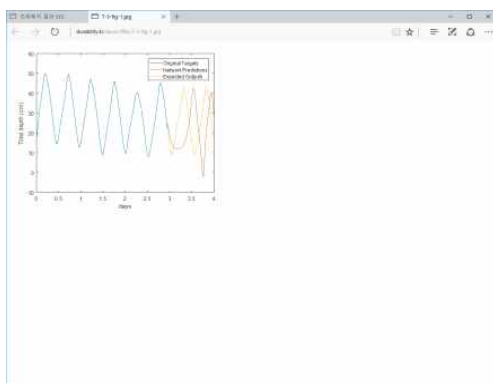
[부식해석 모델 Input 입력 창]



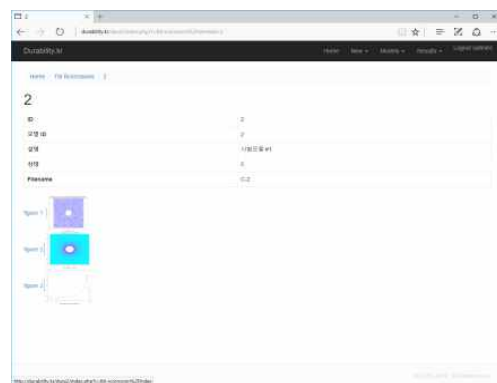
[조위해석 결과 상태 창]



[부식해석 결과 상태 창]



[조위해석 output 생성 창]



[부식해석 output 생성 창]

<그림 3.2.4.6> 환경인자를 고려한 내구성 해석 모델 웹 사이트 구동 절차 (C-3 ② 만족)

4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

과제의 최종적인 목표인 콘크리트 구조물의 내구성명 예측 통합 소프트웨어 개발 목표를 달성하였으며, 세부 모델인 시멘트 경화체의 공극모델 기반 염소이온 침투 프로그램, 부식팽창에 따른 콘크리트 균열잔과 프로그램, Electrochemical treatment 기반 보수 효과 예측 프로그램에 대하여 질적 성과를 완료하였다. 또한 공동기관과의 협업을 통해 혼합 시멘트를 사용한 경우의 내구성 증진 효과를 다양한 실험을 통해 완료하였으며, 기상 관측 데이터 확보 및 민감도 분석을 통한 인자별 모델의 환경인자 설정을 완료하였다.

○ 성과점검기준표 [총괄]

구분	핵심성과 (CIE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
주관	A	콘크리트 구조물의 내구성명 예측 통합 소프트웨어	A-1,2	시멘트 경화체의 공극모델 기반 염소이온침투 프로그램 개발	①	수화과정 기반 공극모델	오차범위 10% 이내	100	단층영상 기법	발표 (데이터 제시)	2	논문 : 4 건 학술화야 : 6 건 SW : 4 건
					②	확산, 압침, 대류-확산 모델	상관계수 0.95 이상	100	염소이온 침투 시험	프로그램 등록	3	
			A-3,4	부식팽창에 따른 콘크리트 균열전파 프로그램 개발	①	철근부식진행 모델	정량관계 제시	100	기존 추정치와 비교	발표 (데이터 제시)	2	
					②	콘크리트 균열전파 모델	오차범위 10% 이내	100	관련 논문 측정치와 비교	프로그램 등록	3	
			A-5~7	Electrochemical treatment 기반 보수 효과 예측 프로그램 개발	①	철근주위 수산화칼슘 피막 형성 모델	모델 식 도출	-	기존 측정과 비교	발표 (데이터 제시)	2	
					②	철근주위 염소이온 이탈 모델	상관계수 0.95 이상	-	보수 후 염분 프로파일	프로그램 등록	2	
주관, 공동	B	실내시험을 통한 혼합 시멘트의 공극 모델 변수 도출	B-1~5	혼합 시멘트를 사용한 경우 내구성 증진 효과 검증	①	혼합시멘트의 모델변수	모델식 도출	-	각 과정의 모델식	발표 (데이터 제시)	1	논문 : 2 건 학술화야 : 5 건
					②	혼합시멘트의 내구성증진 효과	확산계수 $1.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이하	100	기존 측정과 비교	보고서	1	
주관	C	기상관측 데이터 확보를 통한 모델의 환경인자 설정	C-1~5	실 데이터를 활용한 인자별 분포함수 도출	①	Web 기반 기상관측 데이터 시스템	GUI 기반 데이터 수집 프로그램	-	데이터베이스 가동	보고서 (Website)	2	
					②	Neural network 알고리즘	상관계수 0.95 이상	100	알고리즘 구현	발표 (데이터 제시)	2	
계											20	논문 : 6 건 학술화야 : 11 건 SW : 4 건

○ 성과점검기준표 [3차년도]

구분	핵심성과 (CIE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
주관	A	Electrochemical treatment 기반 보수효과 예측 프로그램 개발	A-5 Electrochemical treatment에 따른 철근주위 수산화칼슘 피막 형성 모델 개발	①	전류공급에 따른 자연전위 상승	모델 식 도출	-	기존 측정과 비교	발표 (데이터 제시)	2	SCI(타급 학술지): 5 건 학술회의: 3 건 SW: 2 건
				②	철근 주위 수산화칼슘 피막 형성	모델 식 도출	-	기존 추정치와 비교	발표 (데이터 제시)	3	
			A-6 Electrochemical treatment에 따른 철근주위 염소이온 이탈 모델 정립	①	전류밀도에 따른 염소이온 이탈 예측	상관계수 0.95 이상	-	보수 후 염분 프로파일	발표 (데이터 제시)	2	
				②	최적 Electrochemical treatment 조건 도출	기존 대비 내구성 150% 증가	-	모의결과 분석	프로그램 등록	2	
		A-7 콘크리트 구조물의 내구수명 예측 통합 소프트웨어	A-7 내구수명 예측 통합 소프트웨어 개발	①	환경하중별 모의결과 신뢰성 구축	상관계수 0.95 이상	-	실측 데이터 비교	보고서	1	
				②	GUI기반 소프트웨어 패키지화	현장 활용	-	전문가 검증	프로그램 등록	2	
주관 공동	B	실내시험을 통한 혼합시멘트의 공극 모델변수 도출	B-5 혼합 시멘트를 사용한 콘크리트 내구성능 증진 인자 정의	①	혼합시멘트의 물성변화를 고려한 모델변수	모델 식 도출	-	기존 측정과 비교	보고서	1	학술회의: 2 건
				②	혼합시멘트의 내구성 증진 인자 정의	기존 대비 내구성 120% 증가	-	모의결과 분석	발표 (데이터 제시)	2	
주관	C	기상관측 데이터 확보를 통한 모델의 환경인자 설정	C-5 내구성 해석 모델의 현장 적용을 위한 신뢰성 구축	①	Neural network기반 Unified 모델	모델 식 도출	-	기존 모의결과 비교	발표 (데이터 제시)	3	
				②	보수 전/후 내구성 변화 모의검증	상관계수 0.95 이상	-	실측 데이터 비교	발표 (데이터 제시)	2	
계										20	SCI(타급 학술지): 5 건 학술회의: 5 건 SW: 2 건

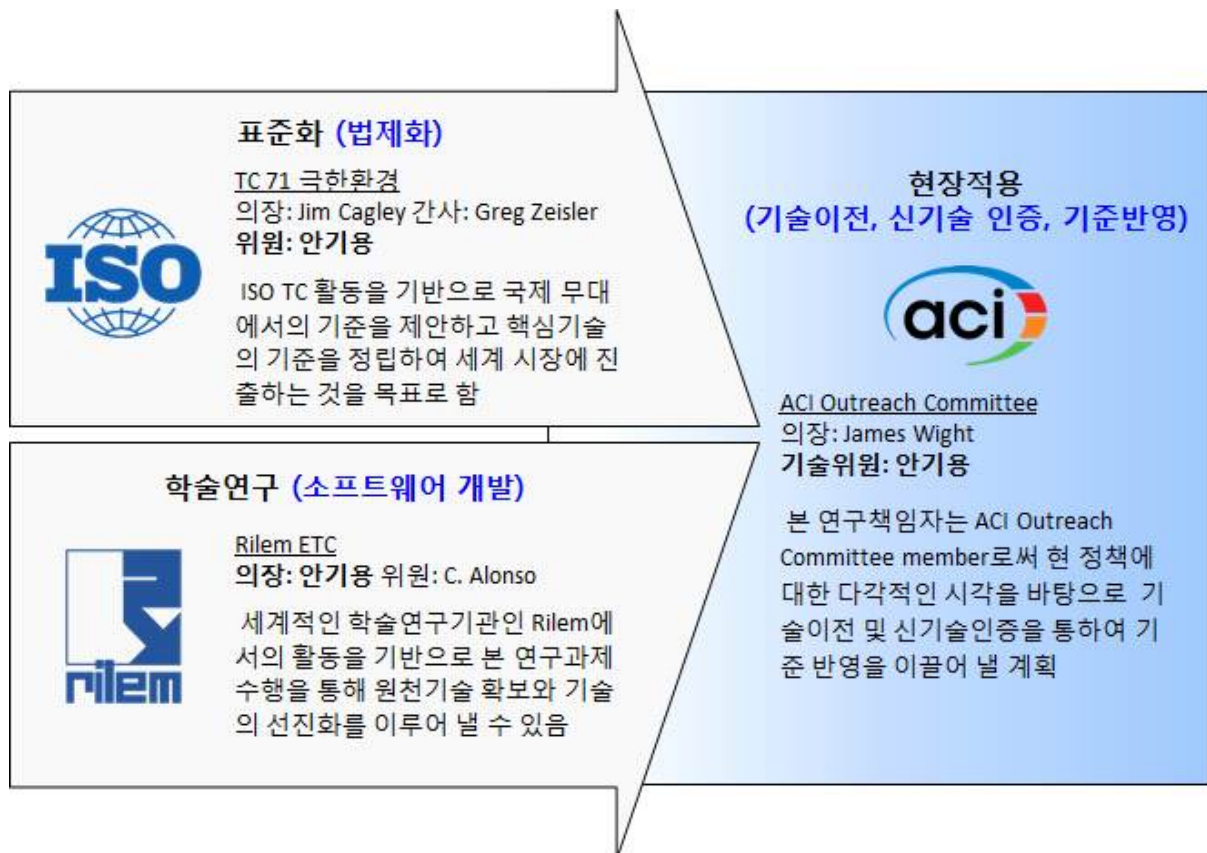
2. 관련 분야 기여도

본 연구의 최종 성과물인 콘크리트 구조물의 내구수명 예측 통합 소프트웨어의 개발을 통해 건설구조물 유지관리 중 염해환경(해양, 제설제 등)에 노출된 콘크리트 구조물(항만, 교량, 도로 등)에 염해로 인한 내구성능 저하를 예측하고, 이를 기반으로 구조물의 목표수명 평가가 가능하다. 또한, 콘크리트 내부 부식으로 인한 균열발생으로 내구성능 저하 기간인 잔존수명 예측이 가능하고, 이를 치유하기 위해 전기방식으로 염분추출 시 발생하는 수명증진 기간을 반영하여, 구조물의 설계에서부터 유지관리까지의 전생애주기 평가가 가능하다. 본 성과물의 분야별 예상 기여도를 다음과 같이 정리할 수 있다.

분야	기술개발의 중요성 및 필요성	
학술/ 기술적 측면	콘크리트 내 철근부식 열화 메커니즘 규명	- 실제 수화 메커니즘을 구현하는 공극모델의 기반으로, 모의 시멘트 경화체의 공극구조 정량화 및 수분 포화정도에 따른 염해이온의 침투 메커니즘 정립 - 기존의 경험식 위주의 모델구조 대비 FEM 기반 결정론적인 모델 개발로, 환경인자(온도, 습도, 조수간만)를 고려한 건설 지역 별 구조물 열화과정 규명 - 콘크리트 내 외부인자의 영향에 따른 철근부식진행에 대한 정량적인 모델화, 이로 인한 특정 콘크리트의 강성에 따른 균열전파 메커니즘 규명
	실 구조물의 노출환경 및 열화현상을 고려한 모델 개발	- 기존의 철근주위 임계염소농도 평가를 기반 한 내구성 해석과 달리, 부식모델의 정량적인 기준구축으로, 염해환경 하 RC 구조물의 실측 데이터 비교분석에 따른 기존 모델 대비 120% 이상 높은 상관계수 달성 - Web기반 데이터 구축 시스템 활용한 열화모델 프로그램 활성화 및 인공지능경망 (Neural network) 알고리즘을 적용한 실 구조물의 내구성 대 모델의 상관관계 도출에 따른 Unified 모델 구현 - 내구수명 예측 시스템에 비 파괴적 방식모델을 적용하여 실 구조물의 내구수명 예측에 대한 신뢰도 상승
경제적 측면	유지관리비용 저감 제고	- Electrochemical treatment의 최적 적용시기 도출을 통해 RC 구조물의 기존 유지관리비용 대비 50% 이상 절감 효과 - RC 구조물의 염분침투와 철근부식 모델의 연계성에 따른 정확한 내구수명예측을 통해 구조물의 기존 보수보강비용 대비 50% 이상 절감
	유지관리 프로그램의 시장성 확보	- 기존의 경험식에 의존하는 수명예측 프로그램에 비해 다양한 염해환경에 대한 해석이 가능하므로, 높은 적용성에 따른 시장 우위성 및 유일성 제고 - Electrochemical treatment의 모델화 적용에 대한 최적 보강상태 검증에 따른 제품의 유일성 및 국내외 시장 점유 가능
사회적 측면	인프라구조물의 안전성 제고	- 높은 신뢰성 기반, RC 구조물의 염해에 대한 정확한 내구연한 예측을 통한 사회간접자본 유지관리기술 향상 - Electrochemical treatment의 최적 조건(수행시기/전류량/공급시기 등)의 적용을 통해 구조물의 안정성 확보
	전문인력 양성	- 구조물 내구성 해석 관련분야 선진연구개발에 따른 참여 연구원의 해외진출 제고 - 관련 응용분야와의 지식융합과정을 통한 프로그램 기반 사업의 전문인력 양성 기회 제공

제5장. 연구개발성과의 활용계획

기존의 해양환경 콘크리트 구조물의 내구수명 예측은 염화물 함유량에 대한 설계 지침을 참고할 뿐 구조물의 재료 특성 또는 노출 환경에 대한 세부적인 영향을 반영하지 않아 실 해양 환경을 완벽하게 재현하지 못한다. 본 연구에서 개발하는 소프트웨어는 구조물의 다양한 내구성 인자를 고려하였으며, 이를 이용하여 구조물의 생애주기형 내구성 진단 및 최적 보수 시기 산정에 따른 목표 내구수명 증진이 가능하다. 이러한 연구 성과를 활용하여 국제 표준화 기관 (ISO TC 71) 및 관련 전문 학술활동 단체 (Rilem ETC, ACI outreach committee)를 통해 제도화 및 실용화가 가능할 것으로 예상된다.



<그림 5.1> 본 연구 개발 성과의 법제화 및 실용화 추진 단계

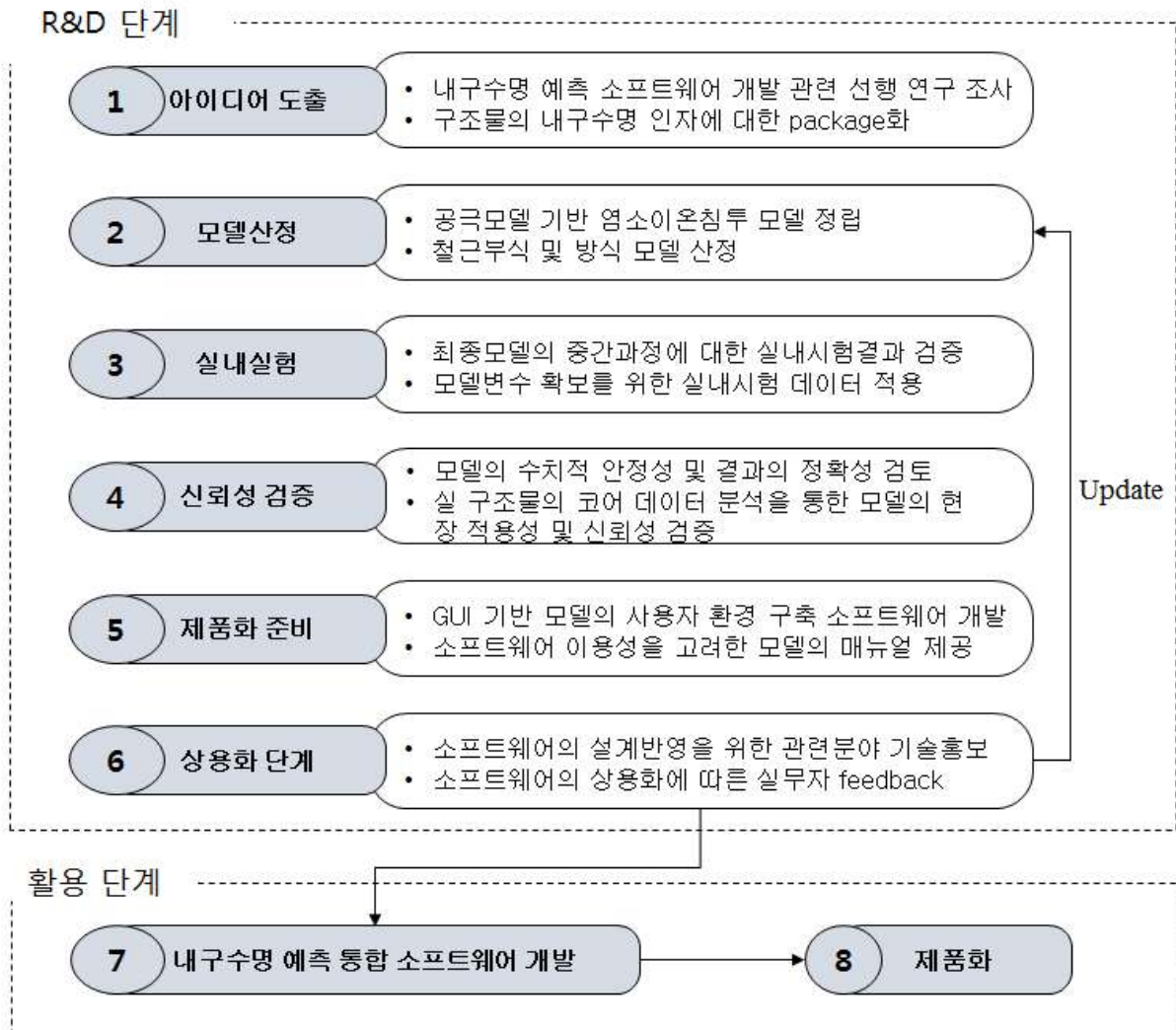
현재 토목·건설 사업의 국내 시장규모 약 85조 원 중 보수 및 유지관리 비용은 연간 약 2.4조원에 해당되며, 국외의 경우 연간 약 50억 달러(미국), 8억 파운드(영국)를 발생시키는 현황이다. 이러한 추세는 앞으로도 지속될 전망이며, 구조물의 정확한 내구성 진단 및 열화단계에 따른 효율적인 보수보강 예측 통합 시스템 개발이 요구된다. 본 연구에서는 다양한 환경에 노출된 구조물의 내구성 인자에 대한 지속적인 업데이트 반영 및 실내 및 현장구현 시험을 통해 개발 소프트웨어의 적용성을 확대할 예정이다.

또한 최근 각종 건설공사가 급증함에 따라 RC 구조물 내 부식기법이 도입되고 있으나 기술적 적용에 대한 충분한 검토가 부족하여 현재 건설시장에 있어 낮은 활용도를 나타내고 있다. 이를 본 연구에서 개발하는 소프트웨어의 실내검증(콘크리트 내 부식성 예측 및 검증) 및 현장검증(환경변화를 고려한 실외 검증)을 기반으로 기존 구조물의 내구성능을 정의하며, 보수효과를 예측하여, 구조물의 내구연한 증진 방법 도모 및 이에 따른 소프트웨어의 사용성 향상시키고자 한다.

콘크리트 구조물의 건설 재료의 선택, 외부 환경인자 고려, 재료의 구조적 성능지표 설정

등 구조물의 설계반영에 있어 이러한 인자들의 조합을 위해 첫 번째로 재료의 특성 고려 (공극특성 정량화 기법을 통한 콘크리트 내 유해인자 침투속도 결정), 두 번째로 건설 환경 조건 고려 (콘크리트 내 철근부식 환경을 고려한 부식진행성 평가), 그리고 구조물의 최적 보수시기 산정 (전기화학적 기법을 통한 구조물의 내구연한 증진)을 개발 소프트웨어에 구현 가능하게 함으로써 기존 건설 된 구조물 혹은 설계 시 목표 내구연한 예측 등 폭 넓은 유지관리 기술 구현 제고가 가능하다. 특히 기존 시공된 콘크리트 구조물의 유지관리 기법과 달리 본 연구에서는 구조물의 콘크리트 배합조건 및 환경조건에 따른 정확한 내구성 진단 및 조기열화 발생 저감을 확보하는 Electrochemical treatment의 최적 조건 도출을 통한 보수보강기법의 실용화 제고 및 보수에 따른 구조물의 목표수명 증대를 고려한 내구성 설계에 반영이 가능할 것이라 예상한다.

소프트웨어의 개발 단계 및 사업화를 위한 순차적인 계획은 다음 <그림 5.2>와 같다. 연구 단계를 통해 3번 단계까지는 완료하였으며, 신뢰성 검증은 실내 시험에 의해서는 완료되었으며, 부분적인 변수값에 대해서는 현장 데이터 검증이 완료되었다. 하지만 추가적인 신뢰성 확보 방안의 마련이 필요하며 이는 test-bed를 활용하여 수행할 계획에 있다. 이후 제품화 단계에서는 본격적인 상품화를 위한 GUI 개선 및 모델의 매뉴얼을 작성하여 사용자의 편의성을 극대화 하고자 한다. 또한 관련분야 기술 홍보와 함께 내구성 진단, 예측, 평가 등에 관한 국제/국내 표준의 제정을 통해 프로그램 사용을 의무화하고자 한다.



<그림 5.2> 본 연구 개발 성과의 실용화 및 사업화를 위한 준비 단계

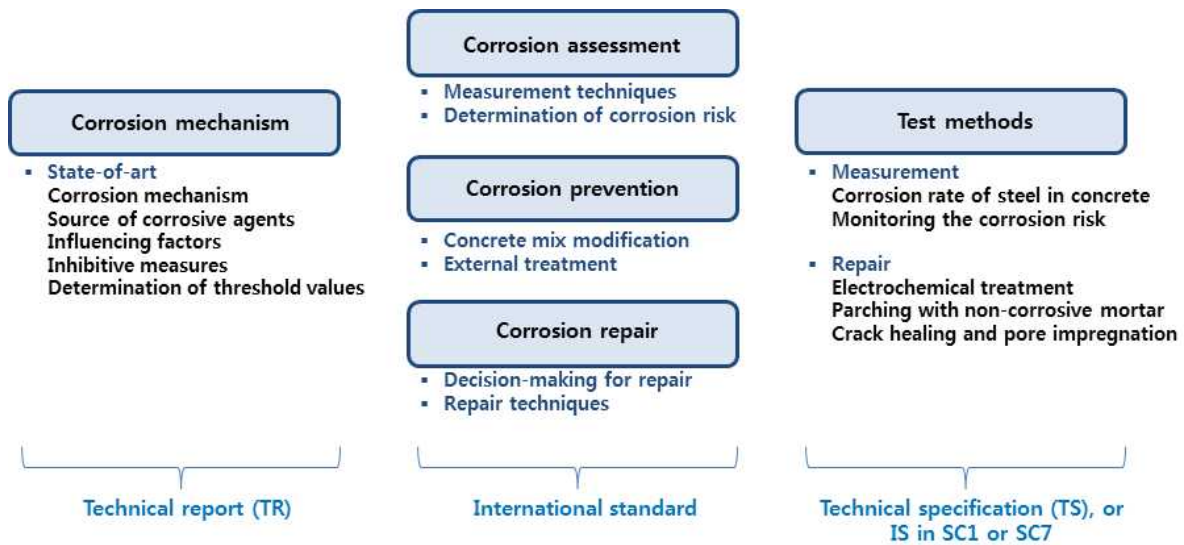
- Test-bed 활용 계획

향후 개발 소프트웨어의 신뢰성 확보를 위해 실제 구조물에 대한 적용 및 검증 단계를 수행할 계획이다. 현재까지 test-bed 활용을 위해 시화방조제와 (구)섬진강교에 대한 소프트웨어 적용 및 전기화학적 방식법의 적용에 대한 합의가 이루어졌으며 상세 사항은 다음과 같다.

	시화 방조제	(구)섬진강교
협 의 내 용	수자원공사 융합연구원 이승경 연구원 및 장봉석 연구원과 협의 완료.	도로공사 도로교통연구원 김기환 연구원과 협의 완료.
활 용 계 획	- 음극 방식법 및 염소이온 추출법의 적용에 따른 실 구조물의 방식 효과 검증 - 현장 데이터(이온 추출 양, 부식 전류 변화 등)와 개발 프로그램 예측치의 비교 분석	- 염분 침투 데이터 확보 및 노출 조건에 따른 부식 진단 - 개발 소프트웨어를 활용한 잔존 수명 산정
활 용 지 점	- 내측면(시화호 방면), 1개소 5지점(수평 2.0m² 간격) - 외측면(서해 방면), 1개소 5지점(수평 2.0m² 간격) - 방조측면(서해 방면), 1개소 2지점(수직 1.0m² 간격)	- 최상단 교각, 2개소 1지점 - 교각 2개소 3지점(수직 1.0m² 간격) - 상판 1개소 5지점 (수평 2.0m² 간격)

- 제도화 계획

현재 국내의 내구성 설계 또는 내구성 평가에 대한 규정 또는 가이드라인의 부재로 인해 선행 연구 개발 실적들의 실용화에 한계가 있었다. 따라서 본 연구기관에서는 국제표준 ISO SC7의 설립을 제안하였으며, 부식 평가 및 진단에 대한 표준화를 수행하고자 한다. 최종적으로 국제 표준의 제정이 완료되면, 국내로의 도입을 통해 개발 소프트웨어와 연구 개발 내용의 현장 적용 방안을 마련하고자 한다. 제안 표준인 ISO SC7 “Assessment prevention and repair for corrosion of steel in concrete structure” 는 콘크리트 내 철근 부식의 진단, 방식 및 보수 보강과 함께 현장 적용까지를 범위로 하고 있다. 세부 내용은 다음 <그림 5.3>과 같다.



<그림 5.3> 국제 표준 ISO SC7의 제안 범위 및 내용

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

– ACI Fall Convention

참여연구원 정민선 외 2인이 참가한 ACI Fall Convention에서는 학술대회 참석을 통해 국제 콘크리트 연구 동향을 살펴보았다. 국제 건설 시장의 이산화탄소 배출 규제로 인해 SCM (Supplementary Cementitious Materials)의 개발 및 연구에 대한 내용이 주를 이루고 있었으며, 부식과 관련된 연구 동향으로는 본 연구과제와 동일하게 부식 개시 혹은 부식으로 인한 구조물 열화 예측에 대한 연구가 수행되고 있었다. 또한 ACI Committee 222에 참석하여 미국의 철근 내구성 설계 방안과 중점사항에 대하여 확인하였다.

– fib Task Group 10.1

연구책임자 안기용 교수는 2018년 4월 12일부터 14일까지 3일간 개최한 fib (Fédération internationale du béton / International Federation for Structural Concrete) Task Group 10.1에 참석하였다. 본 Task Group 10.1 - Model Code 2020에서 작성중인 새로운 내구성 설계 코드인 MC2020의 저작을 위해 회의에 참석하였으며, 각국의 전문가들과 모델 코드 제작 방향에 대한 논의를 하였다. 특히 본 연구개발 과제와 연계하여 부식 측정 및 해석 그리고 부식 예측에 대한 토론을 실시하였다.

– 해외 문헌 구입

철근 부식과 Electrochemical treatment 관련 다수의 학술 논문을 구입하였으며, 이를 바탕으로 개발 모델을 학문적 배경을 구축하였다. 또한 수행 실험의 정확성을 높이고자, “Scanning Electron Microscopy of Cement and Concrete” 외 2건의 문헌 구입을 통해 수행 실험 및 사용 기기의 이해를 높였다.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 기술적 위험 요소 분석, 안전 관리

- 기술적 위험 요소 분석

시험 장비	유해인자 종류	위험분석
믹서	진동, 소음, 협착, 분진	- 작업 중 기계작동으로 인한 끼임 - 90 데시벨 이상의 소음 발생 - 작업 중 발생하는 미세 분진
진동다짐기	진동, 소음, 전기	- 90 데시벨 이상의 소음 발생 - 작업 중 발생하는 미세 분진으로 인한 합선, 화재 등
항온항습챔버	전기	- 24시간 연속 작동으로 인한 전기 합성, 화재 등
압축, 휨강도 시험기	전기, 협착	- 가동 중인 기계의 정비 등으로 인한 끼임
커팅기	진동, 소음, 협착, 분진	- 작업 중 기계작동으로 인한 신체 절단 - 90 데시벨 이상의 소음 발생 - 작업 중 발생하는 미세 분진

- 안전 관리 대책 마련 및 안전교육 실시

유해인자 종류	안전 관리 대책	공통사항
진동	- 보호 장비 착용 - 장비 취급 방법 명시	참여 연구원 모두 연간 2회 해당 분야 온라인 및 현장 안전교육 실시
소음	- 청력 보존을 위한 귀마개 착용 - 장비 취급 방법 명시	
협착	- 방호장치 설치를 통한 기계 작동 중 접근 최소화 - 장비 취급 방법 명시	
분진	- 미세 분진 발생 시 작업 중지 조치 - 신체 내 흡입 방지를 위한 마스크 착용	
전기	- 적정 굵기의 전선을 짧게 사용 - 문어발식 사용 제재 - 배전함 항시 점검	

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	The Influence of C ₃ A Content in Cement on the Chloride Transport	한양대 학교 ERICA 산학협 력단	교신저 자	Advances in Materials Science and Engineering	1.372	2016.09.06.	단독 사사	SCI / 3
2	논문	Estimation of Corrosion-Free Life for Concrete Containing Ground Granulated Blast-Furnace	한양대 학교 ERICA 산학협 력단	교신저 자	Advances in Materials Science and Engineering	1.372	2017.06.24.	단독 사사	SCI / 0
3	논문	Evaluation of Electrochemical Treatment of Chloride Contaminated Mortar Containing GGBS	한양대 학교 ERICA 산학협 력단	제 2저자 (참여 연구원 정영희)	Advances in Materials Science and Engineering	1.372	2017.08.08.	단독 사사	SCI / 1
4	논문	Numerical Prediction of Chloride Penetration in Concrete Exposed to a Marine Environment at Tide	한양대 학교 ERICA 산학협 력단	교신저 자	Advances in Materials Science and Engineering	1.372	2018.04.24.	단독 사사	SCI / 0
5	논문	Modeling Chloride Transport in Concrete at Pore and Chloride Binding	한양대 학교 ERICA 산학협 력단	교신저 자	ACI Materials Journal	1.252	2018.07.	단독 사사	SCI / 0
6	논문	Effect of Hydrophobic Surface Treatment in Lowering Ionic Percolation into Concrete	한양대 학교 ERICA 산학협 력단	교신저 자	Magazine of Concrete Research	1.488	2018.06 (submitted)	단독 사사	SCI / 0

제11장. 기타 사항

제12장. 참고 문헌

1. A. Costa et al, "Modelling of chloride penetration into non-saturated concrete: Case study application for real marine offshore structures, Construction and Building Materials, 2013, 43, pp. 217-224.
2. B. Savija, J. Pacheco and E. Schlangen, "Lattice modeling of chloride diffusion in sound and cracked concrete", Cement and Concrete Composites, 2013, 42, pp. 30-40.
3. B. Violetta, "Life-365 Service Life Prediction Model", Concrete International, December 2002, pp. 53-57
4. C. Pan, M. Hilpert, and C.T. Miller, "Lattice-Boltzmann simulation of two-phase flow in porous media", Water resources research, 40.
5. E. Bastidas-Arteaga et al, "A comprehensive probabilistic model of chloride ingress in unsaturated concrete", Engineering Structures, 2011, 33, pp. 720-730.
6. G.K. Glass, N.R. Buenfeld, "The inhibitive effects of electrochemical treatment applied to steel in concrete", Corrosion Science, 2000, 42, pp. 923-9237.
7. J.C. Orellan, G. Escadeillas and G. Arliguie, "Electrochemical chloride extraction: efficiency and side effects", Cement and Concrete Research, 2004, 34, pp. 227-234.
8. J.S. Reou, K.Y. Ann, "The distribution of hydration products at the steel-concrete interface for concretes subjected to electrochemical treatment", Corrosion Science, 2010, pp. 2197-2205.
9. K. Breugel, "Simulation of Hydration and Formation of Structure in Hardening Cement-Based Materials", Ph. D. Technische University, Delft, 1991.
10. L. Chemin, D.V. Val, "Prediction of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures", Construction and Building Materials, 2011, 25, pp. 1854-1869.
11. L.T. Ngoc Dao et al, "Modeling Steel Corrosion in Concrete Structures – Part 1: A New Inverse Relation between Current Density and Potential for the Cathodic Reaction", International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE, 2010, pp. 302-313.
12. R.W. Lewis, P. Nithiarasu and K.N. Seetharamu. Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow, John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
13. Y.E. Guang, "Experimental Study and Numerical Simulation of the Microstructure and Permeability of Cementitious Materials", Ph. D. Technische University, Delft, 2003.
14. 강릉대학교, "해양환경을 고려한 RC구조물의 수명 예측시스템 개발", 한국과학재단, 2006
15. 송하원, 백승우, 안기용, "해안 환경 하에 있는 콘크리트 구조물의 시간의존적 염화물침투 평가", Journal of the Korea Concrete Institute, 2007, 19(5), pp. 585-593.
16. 송하원 외 3인, "분극저항 측정기법을 이용한 혼합 시멘트 모르타르의 임계 염화물 농도에 대한 연구", Journal of the Korea Concrete Institute, 2009, 21(3), pp. 245-253.
17. 송하원 외 3인, "콘크리트의 화학적 특성을 고려한 철근 부식 임계 염소이온 농도", 대한토목학회논문집, 2009, 29(1), pp. 75-84.
18. 송하원 외 4인, "삼성분계 혼합콘크리트의 염화물 침투 저항성 및 내구성에 대한 고찰", Journal of the Korea Concrete Institute, 2008, 20(4), pp. 439-449.
19. 심현보, 안기용, "염해 환경 하 보수된 콘크리트 구조물의 사용수명 예측 및 보수 비용 평가", 구조물진단학회지, 2011, 15(1), pp. 226-234.
20. 전주대학교, "콘크리트 구조물의 내구수명 예측을 위한 실험적 연구 및 수치해석

-
- (염소이온 확산 및 탄산화를 중심으로)”, 한국과학재단, 2004
21. 정신택 외 4 인, “MATLAB GUI 환경기반 신뢰성 설계기법의 개발”.
한국해안해양공학회논문집, 2010, 22(6), pp. 415-422.
-

주 의

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