

R&D/BSPN55400

# 해양/항만구조물의 건전도 평가기법 개발

2006. 7

연구기관 : 한국해양연구원



# 제 출 문

사회기반 시설물 평가 중점연구단 연구단장 귀하

본 보고서를 “해양/항만구조물의 건전도 평가기법 개발” 과제의 1단계 보고서로 제출합니다.

2006. 7

연구기관명 : 한국해양연구원  
연구책임자 : 한상훈  
연구원 : 장인성, 권오순, 박우선



# 최종 보고서

세부과제명				
세세부 연구명	신뢰성을 바탕으로 한 수리항만 콘크리트 구조물의 건전도 평가			
연구책임자	성 명	한 상 훈	근무지	한국해양연구원
	전화	031-400-6345	휴대폰	016-404-3654
	E-mail	shhan@kordi.re.kr	Fax	031-408-5823
실무연락 책임자	성 명	한 상 훈	근무지	한국해양연구원
	전화	031-400-6345	휴대폰	016-404-3654
	E-mail	shhan@kordi.re.kr	Fax	031-408-5823
총연구기간	2004. 7. 20 ~ 2006. 7. 19 (2년)			
참여 연구원		연구개발비 (현금)	50,000,000 원	
연구책임자 (한상훈)외 6 명				
<p>본 보고서를 “사회기반 콘크리트 구조물의 성능평가 통합시스템 구축”의 1단계 최종보고서로 연구단에 제출합니다.</p> <p style="text-align: right;">2009 년 4 월 17 일</p> <p style="text-align: right;">세세부 연구책임자: 한 상 훈 (인)</p> <p style="text-align: center; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">사회기반 시설물 평가 중점연구단 연구단장 귀하</p>				



## 요약문

### III. 연구개발의 내용 및 범위

과제	연구목표	주요내용 및 범위
신뢰성을 바탕으로 한 수리항만 콘크리트 구조물의 건전도 평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>항만구조물의 잔존수명 예측 모델 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>기존의 잔존수명 예측기법의 문제점 분석, 적용성 및 한계성 검토를 통한 새로운 예측 모델식 제시</li> <li>국내외 자료 조사 및 신뢰성 평가를 위한 기존의 실험데이터 수집 및 분석</li> <li>잔존수명 예측에 필요한 재료모델링 데이터들의 확률론적인 분포 제시</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>신뢰성 해석이 가능한 내구성 예측 프로그램의 개발</li> <li>내구성 파괴확률 제시 시스템 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1차년도에 개발한 프로그램의 검증</li> <li>내구성 해석변수들에 대한 확률분포 모델링 프로그램</li> <li>Monte-Carlo Simulation을 내구성 해석 프로그램에 도입</li> <li>해석을 통해 염소이온 침투 깊이, 깊이별 염소이온 농도 등에 대한 확률 분포 제시</li> <li>내구성 파괴확률에 대한 개념 제시</li> <li>Monte-Carlo Simulation에 의한 내구성 파괴확률 계산 시스템 개발</li> </ul>

### IV. 연구개발결과

과제	연구목표	연구결과																			
신뢰성을 바탕으로 한 수리항만 콘크리트 구조물의 건전도 평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>항만구조물의 잔존수명 예측 모델 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>기존의 잔존수명 모델링과는 달리 현장상태의 환경변화(온도와 습도)를 연속적으로 고려할 수 있는 새로운 내구성 해석 모델링 제시. 또한, 기존의 실험결과들을 바탕으로 Freundlich isotherm을 이용한 새로운 고정염소이온과 자유염소이온의 상관관계식 제시                     <math display="block">\frac{\partial C_b}{\partial C_f} = a_c \beta_c C_f^{\beta_c - 1}</math>                     여기서, C<sub>3</sub>A: 시멘트 성분의 양(%)                 </li> <li>몇몇의 실험데이터를 이용하여 내구성해석을 위한 재료변수들의 확률분포를 제시하는 것은 적절성과 대표성을 가진다고 보기 어려움. 기존의 시방서(콘크리트 표준시방서, ACI 318-02)에서 제시한 압축강도에 대한 표준편차를 이용하여 물-시멘트비에 대한 표준편차를 역으로 계산하여 이를 통한 내구성 해석에 대한 재료변수 제시</li> </ul> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2">변동발생위치 및 시험장소</th> <th colspan="2">표준편차</th> </tr> <tr> <th>21 MPa 이상 28 MPa 이하*</th> <th>29 MPa 이상**</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">관리상태</td> <td>우수</td> <td>0.0315 ~ 0.042</td> <td>0.032 ~ 0.053</td> </tr> <tr> <td>양호</td> <td>0.042 ~ 0.053</td> <td>0.053 ~ 0.072</td> </tr> <tr> <td>보통</td> <td>0.053 ~ 0.062</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>불량</td> <td>0.062 이상</td> <td>0.072 이상</td> </tr> </tbody> </table>	변동발생위치 및 시험장소		표준편차		21 MPa 이상 28 MPa 이하*	29 MPa 이상**	관리상태	우수	0.0315 ~ 0.042	0.032 ~ 0.053	양호	0.042 ~ 0.053	0.053 ~ 0.072	보통	0.053 ~ 0.062	-	불량	0.062 이상	0.072 이상
	변동발생위치 및 시험장소				표준편차																
21 MPa 이상 28 MPa 이하*			29 MPa 이상**																		
관리상태	우수	0.0315 ~ 0.042	0.032 ~ 0.053																		
	양호	0.042 ~ 0.053	0.053 ~ 0.072																		
	보통	0.053 ~ 0.062	-																		
	불량	0.062 이상	0.072 이상																		
<ul style="list-style-type: none"> <li>신뢰성 해석이 가능한 내구성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>재료변수 중에서 물-결합재비, 염소이온 확산계수, 증발가능수량 등의 확률분포와 한계염소이온 농도에 대한 확률분포를 이용하고 Monte Carlo</li> </ul>																				

	<p>예측 프로그램의 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 내구성 파괴확률 제시 시스템 개발</li> </ul>	<p>Simulation을 바탕으로 부식염소이온농도의 깊이별 분포 산정</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2만회의 Monte Carlo Simulation을 통한 부식한계를 초과한 염소이온농도 깊이의 분포를 구할 수 있었다. 결과에 의하면 재령에 따라서 부식한계를 초과한 염소이온농도 깊이가 증가함을 알 수 있었다. 또한, 결정론적인 침투깊이와 비교해서 확률분포의 peak값(mode값)에 해당하는 확산 깊이가 조금 작았다. 이것은 물-시멘트비가 정규분포라고 할지라도 물-시멘트비의 함수인 염소이온확산계수, 증발가능수량, 수화도 등의 값이 정규분포가 아니므로 염소이온 침투해석 결과는 정규분포가 아니다. 따라서, 결정론적인 해석값과 신뢰성 해석에 의한 침투깊이 확률분포의 peak값(mode값)이 다름</li> <li>• 콘크리트 덮개의 표준편차와 부식염소이온농도의 깊이별 분포를 이용하여 피복덮개 길이에 따른 내구성 파괴확률을 산정</li> <li>• 유럽의 Eurocode 1 (EN 1990 : Management of reliability and risk, 2000)에서는 하중형태에 따른 신뢰성 지수를 제안하고 있다. 내구성 파괴확률도 구조한계상태이기보다는 사용성 한계상태에 가깝기 때문에 본 연구의 임계내구성 파괴확률을 50년의 reference period의 신뢰성지수를 사용</li> <li>• 신뢰성 지수 1.5는 파괴확률로 0.07이다. 즉, 50년에서의 최대파괴확률 6.68%미만의 내구성 파괴확률을 가져야한다. 예제해석에서 결정론적인 방법에 의한 구체콘크리트의 피복두께는 8 cm, 상치콘크리트의 피복두께는 10 cm로 계산되었다. 해석결과를 이용하여 재령 1, 10, 20, 30, 40, 50년의 파괴확률을 계산하면, 재령 1년에서는 구체와 상치콘크리트 모두 내구성파괴가 발생하지 않는다. 재령 50년에서 구체콘크리트의 내구성 파괴확률은 2.48%이고, 상치콘크리트의 내구성 파괴확률은 3.48%이다. Eurocode 1의 기준인 6.68%이하의 내구성 파괴확률을 가짐을 알 수 있다. 즉, 결정론적 방법에 의한 구체와 상치 콘크리트의 피복두께를 바탕으로 한 내구성 파괴확률이 Eurocode 1의 기준을 만족하므로 신뢰성 기법에 의해 피복두께를 변화시킬 필요가 없었음</li> <li>• 그러나, 신뢰성해석에서 구한 파괴확률값이 임계의 내구성 파괴확률보다 크다면 이를 줄이기 위한 설계/시공/유지관리가 이루어져야할 것</li> </ul>
--	---	---



### III. The contents and scope of research

Items	Objectives	Research contents and scope
Development of durability evaluation system for marine/harbor structure	<ul style="list-style-type: none"> <li>• New modeling development for life estimation of Marine/Harbor concrete structure</li> <li>• Probabilistic distribution estimation of numerical variables for life estimation of Marine/Harbor concrete</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propose of new modeling for life estimation of Marine/Harbor concrete based on the analysis of previous modeling</li> <li>• Analysis and collection of experimental material data for reliability analysis</li> <li>• Probabilistic distribution estimation of numerical variables for reliability analysis of durability</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Development of durability analysis program based on reliability concept</li> <li>• Development of system suggesting durability failure probability</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improvement of previous developed program for durability analysis</li> <li>• Acquisition of probability distribution of input variables</li> <li>• Development of durability analysis program based on the Monte-Carlo Simulation</li> <li>• Suggestion of durability failure concept</li> <li>• Development of system analyzing durability failure based on the Monte-Carlo Simulation</li> </ul>

### IV. The result of research

Items	Research scope	Research results
Development of durability evaluation system for marine/harbor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propose of new modeling for life estimation of Marine/Harbor concrete based on the analysis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• New modeling considers the in-situ condition (temperature, humidity) for durability analysis of marine/harbor concrete structure</li> <li>• New chloride ion binding isotherm based on Freundlich isotherm and previous experimental data</li> </ul>

structure	<ul style="list-style-type: none"> <li>of previous modeling</li> <li>• Analysis and collection of experimental material data for reliability analysis</li> <li>• Probabilistic distribution estimation of numerical variables for reliability analysis of durability</li> </ul>	$\frac{\partial C_b}{\partial C_f} = a_c \beta_c C_f^{\beta_c - 1}$ <p>C<sub>3</sub>A: Content of cement composition (%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Probabilistic distribution of material properties in concrete based on a few experimental results can not be used generally. Therefore, this study proposes the material properties for durability analysis on the basis of standard deviation of compressive strength suggested by concrete standard specification and ACI 318-02</li> </ul> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2"></th> <th colspan="2" style="text-align: center;">Standard Deviation</th> </tr> <tr> <th style="text-align: center;">21 MPa – 28 MPa</th> <th style="text-align: center;">more than 29 MPa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4" style="text-align: center; vertical-align: middle;">Status</td> <td style="text-align: center;">Very good</td> <td style="text-align: center;">0.0315 ~ 0.042</td> <td style="text-align: center;">0.032 ~ 0.053</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Good</td> <td style="text-align: center;">0.042 ~ 0.053</td> <td style="text-align: center;">0.053 ~ 0.072</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Normal</td> <td style="text-align: center;">0.053 ~ 0.062</td> <td style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Poor</td> <td style="text-align: center;">more than 0.062</td> <td style="text-align: center;">more than 0.072</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Probabilistic distribution of diffusion coefficient and evaporable water are suggested on the basis of probabilistic distribution of water-cement ratio</li> </ul>			Standard Deviation		21 MPa – 28 MPa	more than 29 MPa	Status	Very good	0.0315 ~ 0.042	0.032 ~ 0.053	Good	0.042 ~ 0.053	0.053 ~ 0.072	Normal	0.053 ~ 0.062	-	Poor	more than 0.062	more than 0.072
					Standard Deviation																
21 MPa – 28 MPa			more than 29 MPa																		
Status	Very good	0.0315 ~ 0.042	0.032 ~ 0.053																		
	Good	0.042 ~ 0.053	0.053 ~ 0.072																		
	Normal	0.053 ~ 0.062	-																		
	Poor	more than 0.062	more than 0.072																		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Development of durability analysis program based on reliability concept</li> <li>• Development of system suggesting durability failure probability</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acquisition of probability distribution of input variables <ul style="list-style-type: none"> <li>- Water-cement ratio, diffusion coefficient of chloride ion, evaporable water</li> </ul> </li> <li>• Reliability analysis method <ul style="list-style-type: none"> <li>- Analysis of limit chloride concentration with depth based on the Monte Carlo Simulation method</li> </ul> </li> <li>• Reliability analysis results <ul style="list-style-type: none"> <li>- Peak value of chloride ion penetration by reliability based analysis results estimate a different chloride ion penetration comparing the results by deterministic analysis</li> </ul> </li> <li>• Based on the standard deviation of concrete cover and the limit chloride concentration, durability failure was calculated with depth</li> <li>• Using the reliability index suggested in Eurocode 1, the applicability of durability analysis program was evaluated in design/construction/maintenance of concrete structure</li> </ul>																				

## 목 차

1. 연구개발수행 내용 및 결과 .....	1
2. 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도 .....	27
3. 연구개발결과의 활용계획 .....	29
4. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 .....	30
5. 참고문헌 .....	31
6. 연구개발결과 활용 실적 .....	32



# 제 1 장 연구개발수행 내용 및 결과

## 1. 잔존수명 예측에 대한 새로운 내구성 모델식

해양 및 항만 콘크리트 구조물의 내구성에 가장 큰 영향은 미치는 요인 중의 하나가 염소 이온의 침투에 의한 철근부식이다. 염소이온이 콘크리트 구조물 내부로 침투하여 철근이 부식하게 되면 철근의 부피팽창으로 콘크리트 덮개에 균열이 발생하고 철근의 단면적도 줄어들게 된다. 따라서, 구조물은 사용연한을 채우지 못 하고 붕괴되거나 사용성에 큰 문제가 발생하게 된다. 이러한 염소이온 침투에 의한 철근부식을 예측하고 방지하기 위해서는 콘크리트 구조물의 깊이에 따른 염소이온 농도를 해석하는 것이 필요하다. 그러나, 콘크리트의 염소이온 농도를 해석하는 것은 쉬운 작업이 아니다. 콘크리트는 재령에 따라서 그 성질이 변화하는 재료이므로 염소이온 확산계수가 매순간마다 변화하고 구조물의 각 부분의 염소이온농도도 다르다. 또한, 습도나 온도와 같은 외부환경요인이 변화하면 이에 따라서도 염소이온의 농도가 달라지게 된다.

콘크리트 내부의 염소이온은 크게 2가지 메카니즘에 의해서 그 농도가 변화하게 된다. 하나는 일반적으로 알려진 염소이온의 확산에 의한 것이다. 염소이온의 농도가 높은 콘크리트 외부에서 내부로 확산현상이 발생하여 염소이온이 내부로 이동하는 메카니즘이다. 다른 하나는 수분확산에 의한 염소이온의 이동을 들 수 있다. 실제의 해양환경하에서는 습도의 증감이 발생하고 내부의 습도가 외부의 습도보다 낮으면 외부의 수분이 내부로 이동한다. 이때, 염소이온도 이러한 수분과 함께 이동하여 콘크리트 내부의 염소이온량을 증가시키게 되는 것이다. 따라서, 현장상태의 콘크리트 구조물에 대한 염소이온 침투 해석을 수행하기 위해서는 2가지 메카니즘이 같이 고려되어야한다.

본 연구에서는 대기중에 노출된 현장상태의 콘크리트 구조물에 대한 염소이온농도를 모델링하기 위해서 염송이온 확산 메커니즘과 수분확산에 의한 염소이온의 이동 메커니즘을 모두 고려하여 염소이온 침투량을 유한요소법으로 모델링하였다. 또한, 실제에 가까운 콘크리트 성질을 모델링하기 위해서 환경조건에 따라 유한요소 각각의 염소이온 확산계수와 수분 확산계수 특성을 달리하여 해석을 수행하였다.

### 1.1 염해해석 모델링

#### 1.1.1 수분이동 모델링

확산에 의한 수분의 변화량은 다음과 같은 Fick의 제1법칙으로 나타낼 수 있다<sup>1)</sup>.

$$J_m = - \left[ k_{hx} \frac{\partial h}{\partial x} \bar{i} + k_{hy} \frac{\partial h}{\partial y} \bar{j} + k_{hz} \frac{\partial h}{\partial z} \bar{k} \right] \quad (1-1)$$

여기서,  $J_m$  : 확산에 의한 수분의 변화량 (m/s)

$k_{hx}, k_{hy}, k_{hz}$  : 각 방향으로의 투수계수 (m<sup>2</sup>/s)

$h$  : 공극의 상대습도

시료의 수분확산이 등방성을 나타낸다면 식 (1-1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_m = -k_h \text{ grad } h \quad (1-2)$$

식 (1-1)에서 (-)기호는 확산이 수분 증가의 반대 방향으로 일어난다는 것을 의미한다. Fick의 제2 법칙(또는 질량보존의 법칙)을 적용하면 수분의 시간에 따른 변화를 다음과 같은 식으로 모델링할 수 있다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = - \text{div} J_m \quad (1-3)$$

여기서,  $H$  : 비함수량 (공극수와 공극의 최대증발수량 사이의 비)

위의 식 (1-3)을 정리하면 다음과 같은 상대습도에 대한 식으로 바꿀 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{\partial h}{\partial H} \text{div} J_m = - \frac{\partial h}{\partial H} \text{div}(k_h \text{ grad } h) = \text{div}(D_h \text{ grad } h) \quad (1-4)$$

여기서,  $D_h$  : 수분확산계수 (m<sup>2</sup>/s) ( $= \frac{\partial h}{\partial H} k_h$ )

### 1.1.2 염소이온 침투 모델링

앞에서 언급한 바와 같이 염소이온의 침투는 크게 확산에 의한 것과 수분이동에 의한 것으로 나뉜다. 확산에 의한 염소이온의 침투량은 앞의 수분확산과 유사한 방법으로 Fick의 제1법칙과 제2법칙을 이용하여 구할 수 있다<sup>2), 3)</sup>.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_f}{\partial t} \text{ diff} &= \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{D_c}{1 + \frac{1}{w_e} \frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{D_c}{1 + \frac{1}{w_e} \frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \frac{\partial C_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{D_c}{1 + \frac{1}{w_e} \frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \frac{\partial C_f}{\partial z} \right) \right] \\ &= \text{div}(D_c' \text{ grad } C_f) \end{aligned} \quad (1-5)$$

여기서,  $C_f$  : 단위공극용액 부피당 자유 염소이온의 농도 (kg/m<sup>3</sup>)

$C_b$  : 단위 콘크리트부피당 고정 염소이온의 농도 (kg/m<sup>3</sup>)

$w_e$  : 단위콘크리트 부피당 증발가능수량 (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

$D_c$  : 염소이온의 확산계수 (m<sup>2</sup>/s)

$D_c'$  : 염소이온의 겉보기 확산계수 (m<sup>2</sup>/s) ( $= \frac{D_c}{1 + \frac{1}{w_e} \frac{\partial C_b}{\partial C_f}}$ )

위의 식 (1-5)에서의  $w_e$ 는 부피단위로 나타낸 증발가능수량이고 식 (1-3)에서의  $H$ 는 질량단위를

바탕으로 계산한 값이다. 두 값들은 물리적으로는 동일한 것이다.

확산이외의 수분이동에 의한 염소이온의 침투는 이동된 수분속의 염소이온량을 계산함으로써 구할 수 있는데 다음과 같은 식으로 모델링할 수 있다<sup>4)</sup>.

$$\frac{\partial C_f}{\partial t}_{sorp} = -div J_{cs} = div C_f J_m = div(C_f k_h grad h) \quad (1-6)$$

여기서,  $J_{cs}$  : 수분이동에 의한 염소이온 침투량 ( $kg/m^2 \cdot s$ )

따라서, 확산과 수분이동에 의한 염소이온 침투량은 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial C_f}{\partial t}_{diff} + \frac{\partial C_f}{\partial t}_{sorp} = div(D_c' grad C_f) + div(C_f k_h grad h) \quad (1-7)$$

## 1..2. 유한요소법에 의한 정식화

### 1.2.1 수분확산의 유한요소법에 의한 정식화

미소체적 내부에서 확산과정이 등방성이고 확산계수가 일정하다면 식 (1-4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = D_h \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] = D_h (\nabla^2 h) \quad (1-8)$$

공간영역에서 유한요소 정식화를 위해, 절점에서의 물리량과 요소내의 물리량을 결합시켜주는 형상 함수와 시간에 따른 요소의 절점에서의 물리량을 나타내는  $h(t)$ 의 곱으로 요소의 물리량 분포를 식 (1-9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h(x, y, z, t) = [N_{x,y,z}]\{h(t)\} \quad (1-9)$$

식 (1-9)를 식 (1-8)에 대입하고 Galerkin법을 이용하면 식 (1-10)과 같다.

$$\int_{V^e} [M]^T \left\{ D_h \nabla^2 ([M] h(t)) - [M] \frac{\partial h(t)}{\partial t} \right\} dV = 0 \quad (1-10)$$

식 (1-10)에 Green의 정리와 경계조건을 적용하면 수분의 확산에 대한 요소내의 평형방정식을 식 (1-11)과 같이 유도할 수 있다.

$$[C]_h \left\{ \frac{dh(t)}{dt} \right\} + [K]_h \{h(t)\} - \{Q\}_h = 0 \quad (1-11)$$

여기서,  $[C]_h = \int_{V^e} [M]^T [M] dV$

$$[K]_h = \int_{V^e} D_h \left\{ \frac{\partial [M]^T}{\partial x} \frac{\partial [M]}{\partial x} + \frac{\partial [M]^T}{\partial y} \frac{\partial [M]}{\partial y} + \frac{\partial [M]^T}{\partial z} \frac{\partial [M]}{\partial z} \right\} dV$$

$$+ \frac{\partial [M]^T}{\partial y} \frac{\partial [M]}{\partial y} + \frac{\partial [M]^T}{\partial z} \frac{\partial [M]}{\partial z} \Big\} dV + \int_{S^e} f_h [M]^T [M] dS$$

$$\{Q\}_h = \int_{S^e} f_h [M]^T h_{en} dS$$

$f_h$  : 수분확산의 표면계수

$h_{en}$  : 외기의 상대습도

### 1.2.2 염소이온침투의 유한요소법에 의한 정식화

염소이온침투는 확산과 수분이동에 의한 침투가 동시에 일어나므로 수분확산보다는 정식화과정이 조금 복잡하다. 확산과정이 등방성이고 미소체적내부에서 자유염소이온에 대한 고정염소이온의 변화율과 확산계수 및 증발가능수량이 일정하다면 식 (1-7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다(2), 5).

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial C_f}{\partial t}_{diff} + \frac{\partial C_f}{\partial t}_{sorp} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_c \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_c \frac{\partial C_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_c \frac{\partial C_f}{\partial z} \right)$$

$$+ \frac{\partial C_f}{\partial x} k_h \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial C_f}{\partial y} k_h \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial C_f}{\partial z} k_h \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$+ C_f \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] \quad (1-12)$$

절점에서의 물리량과 요소내의 물리량을 결합시켜주는 형상함수와 시간에 따른 요소의 절점에서의 염소이온량을 나타내는  $C_f(t)$ 를 이용하여 요소의 염소이온량 분포를 식 (1-13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_f(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] \{C_f(t)\} \quad (1-13)$$

식 (1-12)에 Galerkin법을 적용하면 다음과 같다.

$$\int_{V^e} [M]^T \frac{\partial C_f}{\partial t} dV - \int_{V^e} [M]^T \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_c \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_c \frac{\partial C_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_c \frac{\partial C_f}{\partial z} \right) \right] dV$$

$$- \int_{V^e} [M]^T \left[ \frac{\partial C_f}{\partial x} k_h \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial C_f}{\partial y} k_h \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial C_f}{\partial z} k_h \frac{\partial h}{\partial z} \right] dV$$

$$- \int_{V^e} [M]^T C_f \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] dV = 0 \quad (1-14)$$

식 (1-13)을 식 (1-14)에 대입시키면 식 (1-14)의 첫 번째 항은 다음과 같이 계산된다.



$$\int_{V'} [M]^T \frac{\partial C_f}{\partial t} dV = \int_{V'} [M]^T [M] \left\{ \frac{\partial C_f(t)}{\partial t} \right\} dV \quad (1-15)$$

식 (1-14)의 두 번째 항에는 Green의 정리를 적용한다.

$$\begin{aligned} & \int_{V'} [M]^T \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_c \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_c \frac{\partial C_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_c \frac{\partial C_f}{\partial z} \right) \right] dV \\ &= \int_{S'} [M]^T D_c \left[ l \frac{\partial C_f}{\partial x} + m \frac{\partial C_f}{\partial y} + n \frac{\partial C_f}{\partial z} \right] dS - \int_{V'} D_c \left[ \frac{\partial [M]^T}{\partial x} \frac{\partial [M]}{\partial x} + \frac{\partial [M]^T}{\partial y} \frac{\partial [M]}{\partial y} \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial [M]^T}{\partial z} \frac{\partial [M]}{\partial z} \right] \{C_f(t)\} dV \end{aligned} \quad (1-16)$$

여기서,  $l, m, n$  : 경계면에서의 방향코사인

접촉 경계면에서의 조건을 고려하면 표면에서의 적분항은 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$\int_{S'} [M]^T D_c \left[ l \frac{\partial C_f}{\partial x} + m \frac{\partial C_f}{\partial y} + n \frac{\partial C_f}{\partial z} \right] dS = \int_{S'} f_c [M]^T C_{f, en} dS - \int_{S'} f_c [M]^T [M] dS \{C_f(t)\} \quad (17)$$

여기서,  $f_c$  : 염소이온확산에 대한 표면계수

$C_{f, en}$  : 외기에서의 자유염소이온 농도

식 (1-14)의 세 번째 항에 식 (1-9)와 (1-13)을 대입시키면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int_{V'} [M]^T \left[ \frac{\partial C_f}{\partial x} k_h \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial C_f}{\partial y} k_h \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial C_f}{\partial z} k_h \frac{\partial h}{\partial z} \right] dV = \int_{V'} [M]^T \left[ \frac{\partial [M]}{\partial x} \{C_f(t)\} k_h \frac{\partial [M]}{\partial x} \{h(t)\} \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial [M]}{\partial y} \{C_f(t)\} k_h \frac{\partial [M]}{\partial y} \{h(t)\} + \frac{\partial [M]}{\partial z} \{C_f(t)\} k_h \frac{\partial [M]}{\partial z} \{h(t)\} \right] dV \end{aligned} \quad (1-18)$$

식 (1-3)을 고려한다면 식 (1-14)의 네 번째 항은 다음과 같다.

$$\int_{V'} [M]^T C_f \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] dV = \int_{V'} [M]^T [M] \{C_f(t)\} \frac{\partial H}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} dV \quad (1-19)$$

위의 식들을 정리하면 다음과 같은 요소 매트릭스 방정식을 유도할 수 있다.

$$[C] \left\{ \frac{dC_f(t)}{dt} \right\} + ([K_1] - [K_2] - [K_3] + [K_4]) \{C_f(t)\} - \{Q\} = 0 \quad (1-20)$$

여기서,  $[C] = \int_{V'} [M]^T [M] dV$

$$\begin{aligned}
[K_1] &= \int_{V'} D_c \left\{ \frac{\partial[M]^T}{\partial x} \frac{\partial[M]}{\partial x} + \frac{\partial[M]^T}{\partial y} \frac{\partial[M]}{\partial y} + \frac{\partial[M]^T}{\partial z} \frac{\partial[M]}{\partial z} \right\} dV \\
[K_2] &= \int_{V'} K_h [M]^T \left[ \frac{\partial[M]}{\partial x} \{h(t)\} \frac{\partial[M]^T}{\partial x} + \frac{\partial[M]}{\partial y} \{h(t)\} \frac{\partial[M]^T}{\partial y} + \frac{\partial[M]}{\partial z} \{h(t)\} \frac{\partial[M]^T}{\partial z} \right] dV \\
[K_3] &= \int_{V'} \frac{\partial H}{\partial h} [M]^T [M] \left\{ \frac{\partial h(t)}{\partial t} \right\} [M] dV \\
[K_4] &= \int_{S'} f_c [M]^T [M] dS \\
\{Q\} &= \int_{S'} f_c [M]^T C_{f, en} dS
\end{aligned}$$

### 1.2.3 평형방정식의 해

시간 영역에 대해서 식 (1-11)과 (1-20)의 해를 구하기 위하여, 직접적분법으로서 시간간격의 선택에 관계없이 비교적 안정된 해를 가지는 Newmark- $\beta$ 방법을 사용한다. 자유염소이온량과 자유염소이온의 시간에 따른 변화율은 Newmark- $\beta$ 방법에 의해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dC_f(t)}{dt} = \frac{dC_f(t)^t}{dt} + \left[ (1-\delta) \frac{d^2 C_f(t)^t}{dt^2} + \delta \frac{d^2 C_f(t)^{t+\Delta t}}{dt^2} \right] \Delta t \quad (1-21)$$

$$C_f(t) = C_f(t)^t + \frac{dC_f(t)^t}{dt} \Delta t + \left[ \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \frac{d^2 C_f(t)^t}{dt^2} + \beta \frac{d^2 C_f(t)^{t+\Delta t}}{dt^2} \right] (\Delta t)^2 \quad (1-22)$$

위의 식에서 자유염소이온  $C_f(t)$ 를 상대습도  $h(t)$ 로 치환하면 같은 방법으로 식 (1-11)의 해를 구할 수 있다. 본 논문에서는  $\beta$ 와  $\delta$ 를 각각 0.25와 0.5로 하여 해석을 수행한다<sup>1)</sup>.

구조물에 대한 해석은 수분확산해석이 먼저 이루어진 후에 염소이온침투 해석이 순서대로 수행된다. 예를 들어, 시간 단계  $n$ 에서 먼저  $h^n$ 의 상대습도분포를 바탕으로 수분확산해석을 수행하여  $h^{n+1}$ 의 상대습도분포를 구하며 이를 바탕으로 식 (1-20)의 요소매트릭스를 구하고 염소이온침투 해석을 수행하여  $C_f^{n+1}$ 을 구한다. 이러한 과정을 반복하여 재령에 따른 염소이온의 농도를 각 지점마다 구하게 된다.

## 1.3. 해석결과 및 토의

### 1.3.1 수치해석을 위한 변수들

#### (1) 확산계수

해석을 수행하기 위해서는 수분과 염소이온의 확산계수, 염소이온 고정화 관계식, 증발가능수량 등에 대한 모델식들이 필요하다. 먼저 염소이온 확산계수와 수분확산계수의 상대습도, 온도, 재령에 대한 영향은 다음과 같은 식으로 모델링하였다.

$$D_c = D_{c, ref} F_1(h) F_2(T) F_3(t) \quad (1-23)$$

$$D_h = D_{h, ref} G_1(h) G_2(T) G_3(t) \quad (1-24)$$

여기서,  $D_{c, ref}$ ,  $D_{h, ref}$  : 상대습도가 100 %, 주위온도 23 °C, 재령 28일 일때의 염소이온확산계수

및 수분확산계수

$$F_1(h) = G_1(h) = \gamma + (1-\gamma) \left\{ \frac{1}{1 + \left( \frac{1-h}{1-h_c} \right)^n} \right\} \quad (1-25)$$

$$F_2(T) = G_2(T) = \exp \left[ \frac{E}{R} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (1-26)$$

$$F_3(t) = G_3(t) = \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (1-27)$$

$h$  : 콘크리트의 상대습도

$h_c$  :  $F_1(h)$ 가 최대값과 최소값의 중앙에 있을 때의 상대습도

$\gamma, n$  : 상수

$E$  : 결보기 활성화에너지(J/mol)

$R$  : 가스상수 (= 8.3144 J/K-mol)

$T_{ref}$  : 표준온도 (Kelvin)

$T$  : 양생온도 (Kelvin)

$t$  : 재령 (days)

$t_{ref}$  : 기준 재령 (=28일)

$m$  : 상수 (ACI LIFE-365 모델; 1종 보통 포틀랜드 시멘트 = 0.264)

온도와 재령에 대한 보정식은 ACI LIFE-365 모델식<sup>7)</sup>을 사용하였고, 습도의 염소이온확산계수와 수분확산계수에 대한 영향은 CEB-FIP 1990 MODEL CODE<sup>8)</sup>에서 제안한 식을 사용하였으며 이 식들에 대한 유효성은 국내외 논문들에서 고찰되었다<sup>6)</sup>. 식 (1-25)의  $F_1(h)$  와  $G_1(h)$  는 공극내의 수분이 염소이온 확산계수와 수분 확산계수에 미치는 영향을 모델하는 것으로 공극들이 모두 물로 채워져 있으면 염소이온은 연속적인 공극의 통로를 통하여 확산된다. 그러나 수분의 증발로 물로 채워진 공극이 줄어들게 되면 확산 통로가 줄어들게 되고 또한 시멘트 페이스트 주변의 흡착수들의 감소로 페이스트와 이온의 강한 인력으로 인하여 확산은 방해받게 된다. 상대습도가  $h_c$  에 이르면 확산계수는 급격히 감소한다. 기존의 연구자들의 실험결과들을 이용하여 일반적으로  $h_c$ 는 0.75를,  $\gamma$ 는 0.03을,  $n$  은 4의 값을 사용한다<sup>1)</sup>.

결보기 활성화에너지는 저자가 제안한 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다<sup>9)</sup>.

$$E = E_o^{-\lambda t} \quad (1-28)$$

$$\lambda = 0.00017 (T - 273) \quad (1-29)$$

$$E_o = 42,830 - 43 (T - 273) \quad (1-30)$$

표준 염소이온 확산계수,  $D_{c,ref}$  는 여러 영향인자에 의해 변화하지만 가장 지배적인 영향을 미치는 것이 물-시멘트비이다. 물-시멘트비에 따라 염소이온 확산계수를 예측하는 식은 Papadakis et al.(1996)<sup>10)</sup>, Stewart & Rosowsky(1998)<sup>11)</sup>, Hobbs(1998)<sup>12)</sup> 등에 의해서 제안되었지만, 본 논문에서는 널리 쓰이는 ACI LIFE -365의 제안식을 적용하였다.

$$D_{c,ref} = 10^{-12.06 + 2.40(w/c)} \quad (1-31)$$

고유수분확산계수,  $D_{h,ref}$  는 염소이온확산계수와 같이 많은 적용 실적이 있는 CEB-FIP CODE 1990의 모델식을 다음과 같이 사용한다.

$$D_{h,ref} = \frac{D_{1,o}}{\frac{f_{ck}}{f_{cko}}} \quad (1-32)$$

여기서,  $D_{1,o}$  : 최대염소이온확산계수 (=10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s)

$f_{ck}$  : 설계기준강도 (MPa)

$f_{cko} = 10$  MPa

### (2) 염소이온의 고정화

고정염소이온은 주로 시멘트 C<sub>3</sub>A성분과 염소이온이 결합하여 Friedel염의 형성으로 생성되는 것이다. 따라서, 많은 C<sub>3</sub>A성분을 가진 콘크리트는 많은 양의 고정염소이온을 발생시키게 된다. Glass등 (1997)<sup>13)</sup>은 이러한 C<sub>3</sub>A성분에 따른 자유염소이온(공극용액의 농도)과 고정염소이온의 상관관계를 Langmuir isotherm을 바탕으로 제시하였다. 기존의 연구에서 Freundlich isotherm이 Langmuir isotherm보다 정확한 값을 예측한다는 연구결과를 발표하였으므로<sup>2)</sup> 본 논문에서는 Glass의 결과를 이용하여 고정염소이온과 자유염소이온의 상관관계를 Freundlich isotherm을 이용하여 식 (1-33)과 같이 제시하였다.

$$\frac{\partial C_b}{\partial C_f} = a_c \beta_c C_f^{\beta_c - 1} \quad (1-33)$$

$$a_c = 0.056 + 0.025 C_{3A} \quad (1-34)$$

$$\beta_c = \frac{1}{0.076 C_{3A} + 1.91} \quad (1-35)$$

여기서, C<sub>3</sub>A: 시멘트 성분의 양(%)

### (3) 증발가능수량

식 (1-5)의 확산방정식에서 결정되지 않은 변수는 증발가능수량( $\omega_e$ )이다. 앞선 연구에서 발표한 바와 같이 증발가능수량은 모세관 공극수와 겔 공극수의 합으로 나타낼 수 있으며 그 값은 다음의 식들로 모델링할 수 있다<sup>2)</sup>.

$$\omega_e = v_g + v_c \quad (1-36)$$

$$v_g = w_g \times c \times \frac{1}{w_s} = (0.18a) \frac{c}{1000} \quad (1-37)$$

$$v_c = \frac{P_c}{1000} \times c = \left(\frac{w}{c} - 0.36a\right) \frac{c}{1000} \quad (1-38)$$

여기서,  $v_g$  : 단위콘크리트 부피당 겔 공극의 부피 (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

- $v_c$  : 단위콘크리트 부피당 모세관 공극의 부피 ( $m^3/m^3$ )
- $\omega_g$  : 시멘트량에 대한 겔 공극수량 (g/g)
- $\omega_s$  : 물의 단위중량 ( $kg/m^3$ )
- $\alpha$  : 수화도
- $P_c$  : 단위시멘트량에 대한 모세관 공극의 부피 ( $cm^3/g$ )

물-시멘트비와 단위시멘트량은 배합이 결정되면 얻을 수 있지만 수화도는 얻을 수 없다. 엄밀히 정의하면 수화도란 전체 시멘트량과 수화된 시멘트량의 비이지만 실용적인 관점에서 한계압축강도와 각 재령의 압축강도의 비로도 나타낼 수 있다. 이에 따라 온도와 재령에 따른 강도를 예측하기 위해서 저자가 제시했던 예측식(9)을 이용하여 다음과 같이 수화도를 계산할 수 있다.

$$\alpha = \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + A \sum_{i=1}^n \left( e^{-\frac{E_o}{RT_i}} e^{-\lambda t_i} + e^{-\frac{E_o}{RT_i}} e^{-\lambda t_{i-1}} \right) (t_i - t_{i-1})}} \right] \quad (1-39)$$

$$t_o = 0.66 - 0.011 (T_i - 273) \quad (t_o \geq 0) \quad (1-40)$$

여기서,  $\lambda$  : 비례상수 (식(1-29)로 계산)

$E_o$  : 초기 결보기 활성화에너지 (J/mol) (식 (1-30)으로 계산)

$t_{i-1}, t_i$  : 양생온도가  $T_i$ 인 재령의 시작점과 종료점

$R$  : 가스상수 (= 8.3144 J/K-mol)

$T_i$  : 재령  $t_{i-1}$ 과  $t_i$  사이에서의 양생온도 (Kelvin)

$A$  : 비례상수 (= 107)

또한, 이러한 증발가능수량은 시료표면의 염소이온 농도에도 큰 영향을 미친다. 표면의 증발가능수량이 증가하면 표면염소이온농도가 증가할 것이다. 본 논문에서는 시료표면의 염소이온 농도가 시방서에서 규정한 일정한 값이 아니라, 시료표면의 상대습도에 따라 연속적으로 변화하는 것으로 가정한다. 즉, 시료의 표면염소이온농도는 바닷물의 염소이온 농도와 콘크리트 표면의 증발가능수량을 이용하여 계산된다<sup>2)</sup>.

#### (4) 수축등온선

건습이 반복되는 외부환경을 모델링하는데 있어서 중요한 것 중의 하나가 수분의 수축등온선이다. 수축등온선은 건조시와 수분이 증가할 때가 다르다. 건조시의 수축등온선은 Bazant가 제시한 다음과 같은 식을 이용한다<sup>14)</sup>.

$$H = 0.25 + 0.75 \left( \frac{h}{0.98} \right)^3 \quad (0.25 \leq h \leq 0.98) \quad (1-41)$$

일반적으로 같은 상대습도에서 습윤시의 수축등온선에 의한 증발가능수량이 건조시의 수축등온선에 의한 증발가능수량보다 작다. 기존의 여러 실험결과들을 고려하여 다음과 같은 습윤시의 수축등온선을 가정하였다<sup>15)</sup>.

$$H = 0.15 + 0.85 \left( \frac{h}{0.98} \right)^3 \quad (0.25 \leq h \leq 0.98) \quad (1-42)$$

### 1.3.2 수분이동에 따른 염소이온침투량의 변화

수분이동에 의한 염소이온 침투의 영향을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 염소이온침투량해석을 수행하여 수분이동이 염소이온침투량에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 해석 대상물은 75 mm × 75 mm × 300 mm의 기둥형태를 띠고 있으며 확산이 일어나는 한 쪽면(위쪽의 정사각형의 면)을 제외한 나머지 모든 면은 외부와의 수분이동을 차단하였다. 앞의 재료 모델링 식들을 적용하면 각 요소들의 확산계수는 시간에 따라 변화하게 된다. 배합은 항만 콘크리트용으로 주로 사용되는 0.50의 물-시멘트비를 가지고 단위시멘트량이 345 kg/m<sup>3</sup>인 콘크리트를 모델링하였고 C<sub>3</sub>A의 양은 8 %로 가정하였다. Fig. 1-1는 재령 2개월과 10년으로 나누어서 염소이온침투량에 대한 수분이동의 효과를 나타내고 있다. 수분이동에 의한 염소이온침투를 발생시키기 위해서 초기 콘크리트 내부의 상대습도를 0.40으로 가정하였다. 또한, 내부의 상대습도가 0.98인 경우에도 해석을 수행하여 수분이동이 발생하지 않는 경우의 염소이온변화량도 고찰하였다. 그림 1-1(a)에 나타난 바와 같이 콘크리트 내부의 상대습도가 0.40이면 수분이동을 고려한 해석의 염소이온침투량이 고려하지 않은 것보다 크고, 15 mm 정도의 깊이에서는 그 상대적인 차이가 50%이상임을 알 수 있다. 그러나, 콘크리트 내부의 상대습도가 0.98이면 수분이동이 발생하지 않으므로 수분이동 고려 유무에 따른 염소이온침투량의 차이가 없음을 알 수 있다. 그림 1-1(b)는 재령이 10년인 경우의 염소이온침투량을 나타내고 있다. 재령이 10년정도 경과하면 그림 1-2에 나타난 바와 같이 초기 0.40의 내부 상대습도를 가진 시료가 외부수분의 확산에 의해 내외부의 상대습도의 차이가 크게 줄어든다. 따라서, 그림 1-1(b)에 나타난 바와 같이 초기의 내부상대습도의 차이에 따른 염소이온침투량의 차이가 거의 없어지고 수분이동의 영향도 거의 발생하지 않는다. 따라서, 내외부의 상대습도의 변화가 크면 수분이동에 의한 염소이온침투량의 변화가 발생하지만 그렇지 않은 경우에는 수분이동에 의한 염소이온 침투의 효과가 미미함을 알 수 있다.

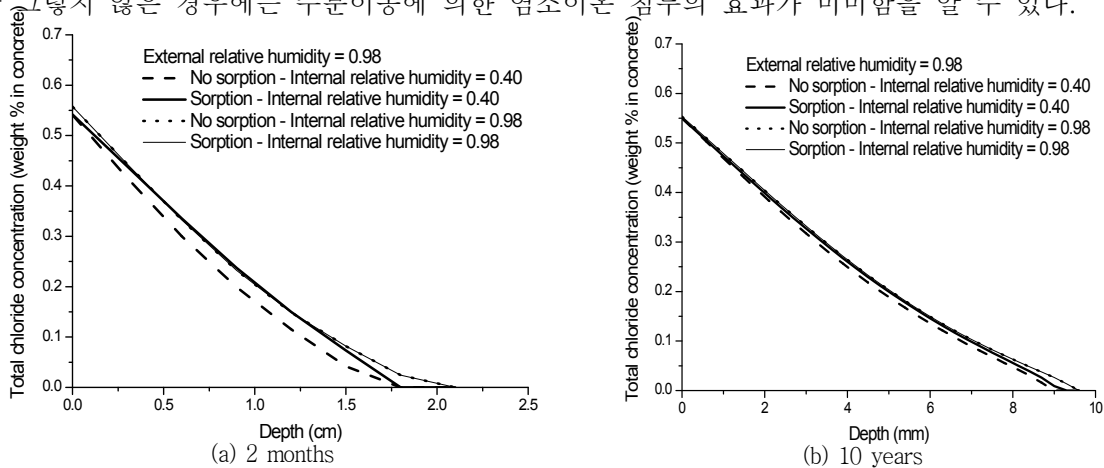


그림 1-1 Analysis of chloride ion 침투 considering sorption

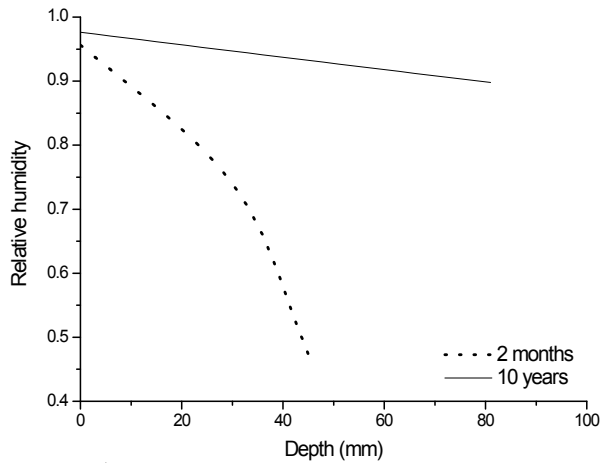
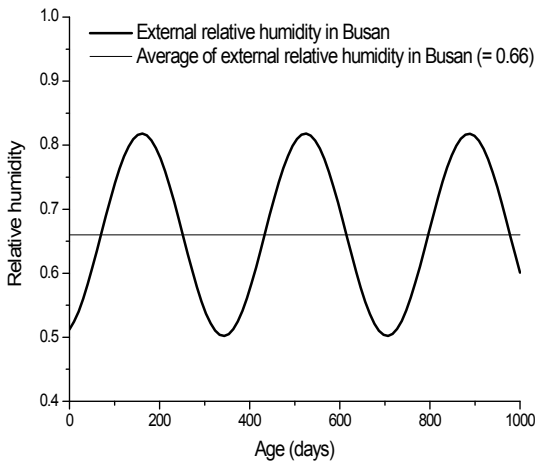


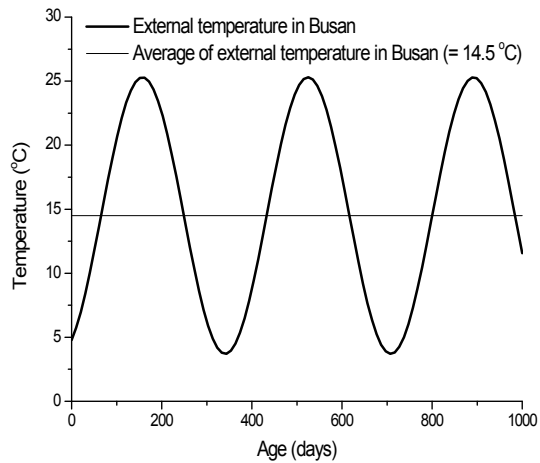
그림 1-2 Relative humidity of inner specimen  
(Initial relative humidity of inner specimen = 0.40)

### 1.3.3 현장환경하에서의 염소이온침투 해석

실제 현장에서의 상대습도와 온도변화에 따른 염소이온침투량을 해석하기 위해서 부산지방에 대한 30년간의 기상측정데이터를 바탕으로 한 온도와 습도의 변화 모델식을 구하였다(그림 1-3 참조). 온도와 습도의 평균값은 각각 14.5 °C와 0.66 정도이다. 그림 1-4는 온도와 습도변화에 따른 재령 100년, 100년6개월시의 염소이온침투량의 변화이다. 온도와 습도가 1월에 최저가 되고 7월에 거의 최고가 되므로 이를 고려하여 재령 100년과 100년 6개월일 때의 해석결과를 비교하였다. 그림 1-4(a)와 (b)에 나타낸 바와 같이 평균온도와 습도가 적용된 해석의 염소이온침투량은 두 재령에서 동일하고 수분 이동에 의한 염소이온 침투의 영향도 거의 없음을 알 수 있다. 외부의 습도와 온도가 계절에 따라 크게 변화하므로 건습의 반복을 고려하는 해석의 재령 100년과 100년 6개월의 표면부근의 염소이온량은 각각 크게 다른 값을 나타낸다. 외부의 상대습도가 표면부근 시료내부의 상대습도보다 높으면 수분 이동에 의해 염소이온이 시료내부로 빨리 이동하지만 확산은 수분이동에 의한 침투만큼 빠른 속도로 전개되지 않으므로 염소이온이 표면 부근에 쌓이게 된다. 이러한 경향이 시간에 따라 누적되면 그림 1-4와 같은 염소이온 농도구배를 갖게 된다. 이러한 농도구배는 외기상대습도의 차이가 큰 여름과 겨울에 따라 다른데 그림 1-4(a)는 여름을, 그림 1-4(b)는 겨울에 해당하는 해석결과이다. 그러나, 시료가 내부로 갈수록 외기의 상대습도에 따른 수분이동에 의한 염소이온 침투의 영향이 줄어들어 따라 깊이 50 mm이하에서는 재령 100년과 100년 6개월의 염소이온량이 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

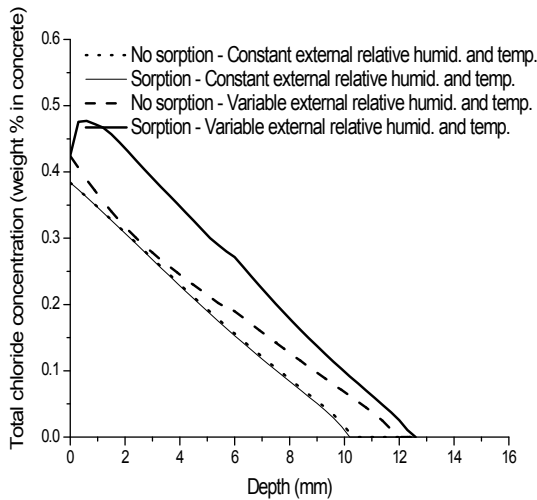


(a) Humidity

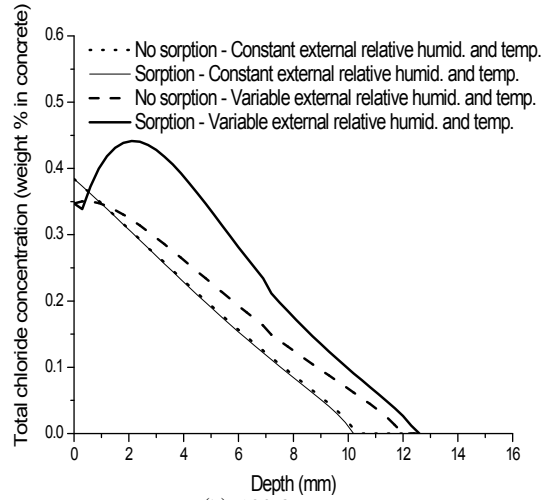


(b) Temperature

그림 1-3 Humidity and temperature in Busan



(a) 100 years



(b) 100.6 years

그림 1-4 Analysis of chloride ion penetration of harbor structure in Busan

## 2. 내구성해석을 위한 재료변수들의 확률 분포제시

### 2.1. 압축강도의 표준편차

앞에서 언급한 바와 같이 내구성해석 변수들은 물-시멘트비, 단위시멘트량, 시멘트 종류 등의 함수이다. 이러한 배합설계 자료 등에 대한 확률분포를 구할 수 있다면 내구성해석 변수들에 대한 확률분포도 함께 구할 수 있다.

배합설계 자료의 오차는 계량오차, 품질오차 등 여러 가지가 있을 수 있는데 이러한 것들을 모두 고려하여 확률분포를 구하는 것은 현실적으로 매우 어렵고 실험자료들을 구한다고 하더라도 각 실험자료는 각각의 특정한 경우에만 해당되는 것으로 일반적인 신뢰성을 확보할 수 없다.

일반적으로 콘크리트의 성질을 대표하는 것은 압축강도이다. 「콘크리트 표준 시방서」에서는 이러한 압축강도가 골재와 시멘트의 품질변동, 계량오차, 비비기 작업 등에 대한 변동성을 고려하여 배합강



도를 설계기준강도보다 조금 크게 산정한다. 또한 ACI에서는 콘크리트 강도의 표준편차를 다음과 같이 제시하고 있다.

표 2-1 ACI에서 조사한 콘크리트 압축강도의 표준편차

변동발생위치 및 시험장소		표준편차 (MPa)	
		21 MPa 이상 28 MPa 이하	69 MPa 이상
관리상태	우수	2.1 ~ 2.8	2.1 ~ 3.5
	양호	2.8 ~ 3.5	3.5 ~ 4.8
	보통	3.5 ~ 4.1	-
	불량	4.1 이상	4.8 이상

또한, 「콘크리트 표준 시방서」에서는 압축강도와 물-시멘트비 사이의 상관관계에 대한 식을 ACI의 자료를 바탕으로 다음과 같이 제시하고 있다.

AE제를 사용하지 않은 콘크리트

- ①  $f_{28} = 16 \sim 23$  MPa인 경우

$$f_{28} = -13.9 + 23.0 C/W \quad (2-1)$$

- ②  $f_{28} = 23 \sim 43$  MPa인 경우

$$f_{28} = -7.6 + 19.0 C/W \quad (2-2)$$

- ③  $f_{28} = 33 \sim 39$  MPa인 경우

$$f_{28} = -2.2 + 14.4 C/W \quad (2-3)$$

공기량이 4%인 AE콘크리트

- ①  $f_{28} = 14 \sim 25$  MPa인 경우

$$f_{28} = -7.4 + 16.2 C/W \quad (2-4)$$

- ②  $f_{28} = 25.1 \sim 32.0$  MPa인 경우

$$f_{28} = -1.8 + 13.4 C/W \quad (2-5)$$

앞에서 콘크리트 압축강도에 대한 표준편차가 제시되어 있으므로 압축강도와 물-시멘트비의 상관관계에 대한 위의 식을 사용하면 물-시멘트비의 확률분포를 추정할 수 있다.

먼저 앞의 강도와 물-시멘트비에 대한 식들을 물-시멘트비에 대한 식( $g(f_{28})_{w/c}$ )으로 정리한다. 압축강도에 대한 표준편차를 알고 있으므로 물-시멘트비에 대한 표준편차는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\sigma_{w/c} = \sqrt{\text{Var}(w/c)} \simeq \sqrt{\text{Var}(f_{28}) \left( \frac{dg(f_{28})_{w/c}}{df_{28}} \right)^2} \quad (2-6)$$

AE제를 사용하지 않은 콘크리트의 강도와 물-시멘트비 상관관계식을 이용하면 다음과 같은 물-시

멘트비의 표준편차를 구할 수 있다.

①  $f_{28} = 16 \sim 23$  MPa인 경우

$$g(f_{28})_{w/c} = \frac{23}{f_{28} + 13.9} \quad (2-7)$$

$$\sigma_{w/c} = \sqrt{\text{Var}(W/C)} \approx \sqrt{\text{Var}(f_{28}) \left( \frac{23}{(f_{28} + 13.9)^2} \right)^2} \quad (2-8)$$

②  $f_{28} = 23 \sim 33$  MPa인 경우

$$g(f_{28})_{w/c} = \frac{19}{f_{28} + 7.6} \quad (2-9)$$

$$\sigma_{w/c} = \sqrt{\text{Var}(W/C)} \approx \sqrt{\text{Var}(f_{28}) \left( \frac{19.0}{(f_{28} + 7.6)^2} \right)^2} \quad (2-10)$$

③  $f_{28} = 33 \sim 39$  MPa인 경우

$$g(f_{28})_{w/c} = \frac{14.4}{f_{28} - 2.2} \quad (2-11)$$

$$\sigma_{w/c} = \sqrt{\text{Var}(W/C)} \approx \sqrt{\text{Var}(f_{28}) \left( \frac{14.4}{(f_{28} - 2.2)^2} \right)^2} \quad (2-12)$$

압축강도의 시험횟수가 14회 이하인 경우에는 각각의 설계기준강도 수준에 따라 배합강도 산정법이 다르다. 설계기준강도가 21 MPa 미만이면 설계기준강도에 7 MPa를, 설계기준강도가 21 MPa 이상 35 MPa 미만이면 8.5 MPa를, 설계기준강도가 35 MPa를 초과하면 10 MPa를 더한 값을 배합강도로 한다. 또한, 강도의 표준편차를 실험에서 구하였다면 설계기준강도는 다음의 2가지 식으로 구한다.

$$f_{cr} = f_{ck} + 1.34s \quad (2-13)$$

$$f_{cr} = (f_{ck} - 3.5) + 2.33s \quad (2-14)$$

이 식과 시험횟수가 14회 이하인 경우의 배합강도를 이용하면 강도수준에 따른 압축강도의 표준편차를 구할 수 있다. 두 식에 의한 표준편차 중에서 큰 것을 취하면 다음의 표와 같은 압축강도의 표준편차를 구할 수 있다.

표 2-2 콘크리트 시방서의 배합강도를 이용한 압축강도 표준편차

	압축강도 수준별 표준편차		
	21 MPa 미만	21 MPa 이상 35 MPa 이하	35 MPa 초과
압축강도 표준편차	5.2	6.3	7.5

## 2.2. 물-시멘트비의 표준편차

앞에서 구한 압축강도의 표준편차를 압축강도와 물-시멘트비의 표준편차 사이의 상관관계식에 대입하면 물-시멘트비의 표준편차를 계산할 수 있다.

식 (2-8), (2-10), (2-12)에 표 1-1에서 제시한 ACI의 강도 표준편차를 대입하면 다음과 같은 물-시멘트비의 표준편차를 구할 수 있다.

표 2-3 콘크리트 시방서의 배합강도를 이용한 물-시멘트비 표준편차

	압축강도 수준별 표준편차		
	21 MPa 미만	21 MPa 이상 35 MPa 이하	35 MPa 초과
물-시멘트비 표준편차	0.107	0.094	0.095

물-시멘트비의 확률분포가 정규분포라고 가정하고 위의 물-시멘트비와 압축강도에 대한 상관관계식을 사용한다면 물-시멘트비의 확률분포함수는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$0.62 < w/c < 0.77$  (평균 물-시멘트비 : 0.70)

$$F(w/c) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{w/c - med(w/c)}{\sigma}\right)^2\right] = \frac{1}{0.107\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{w/c - 0.7}{0.107}\right)^2\right] \quad (2-15)$$

$0.47 < w/c < 0.62$  (평균 물-시멘트비 : 0.55)

$$F(w/c) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{w/c - med(w/c)}{\sigma}\right)^2\right] = \frac{1}{0.094\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{w/c - 0.55}{0.094}\right)^2\right] \quad (2-16)$$

$0.39 < w/c < 0.47$  (평균 물-시멘트비 : 0.43)

$$F(w/c) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{w/c - med(w/c)}{\sigma}\right)^2\right] = \frac{1}{0.095\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{w/c - 0.43}{0.095}\right)^2\right] \quad (2-17)$$

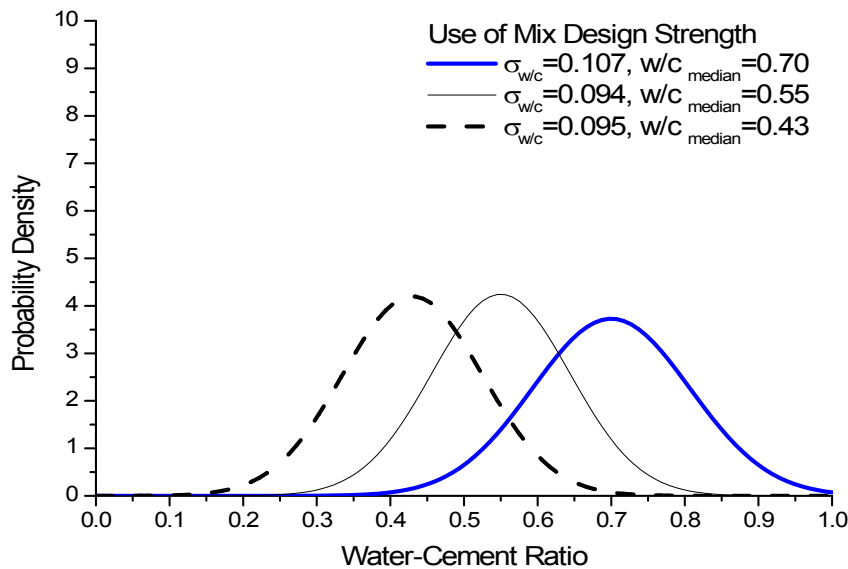


그림 2-1 Probability distribution of water-cement ratio with strength level

앞의 표 1에서 ACI에서 조사한 콘크리트 강도의 표준편차에 대한 통계값을 제시하였다. 이러한 통계값에 따른 물-시멘트비의 표준편차는 다음과 같다.

표 2-4 ACI에서 제안한 압축강도 표준편차를 이용한 물-시멘트 표준편차

변동발생위치 및 시험장소		표준편차 (MPa)	
		21 MPa 이상 28 MPa 이하*	69 MPa 이상**
관리상태	우수	0.0315 ~ 0.042	0.032 ~ 0.053
	양호	0.042 ~ 0.053	0.053 ~ 0.072
	보통	0.053 ~ 0.062	-
	불량	0.062 이상	0.072 이상

\* 식 (2-10) 사용

\*\* 식 (2-12) 사용

21 MPa <  $f_{28}$  < 28 MPa - 보통 관리상태 ( $\sigma = 0.062$ )

$$F(w/c) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{w/c - med(w/c)}{\sigma}\right)^2\right] = \frac{1}{0.062\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{w/c - 0.55}{0.062}\right)^2\right] \quad (2-18)$$

69 MPa <  $f_{28}$  - 양호 관리상태 ( $\sigma = 0.072$ )

$$F(w/c) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{w/c - med(w/c)}{\sigma}\right)^2\right] = \frac{1}{0.072\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{w/c - 0.43}{0.072}\right)^2\right] \quad (2-19)$$

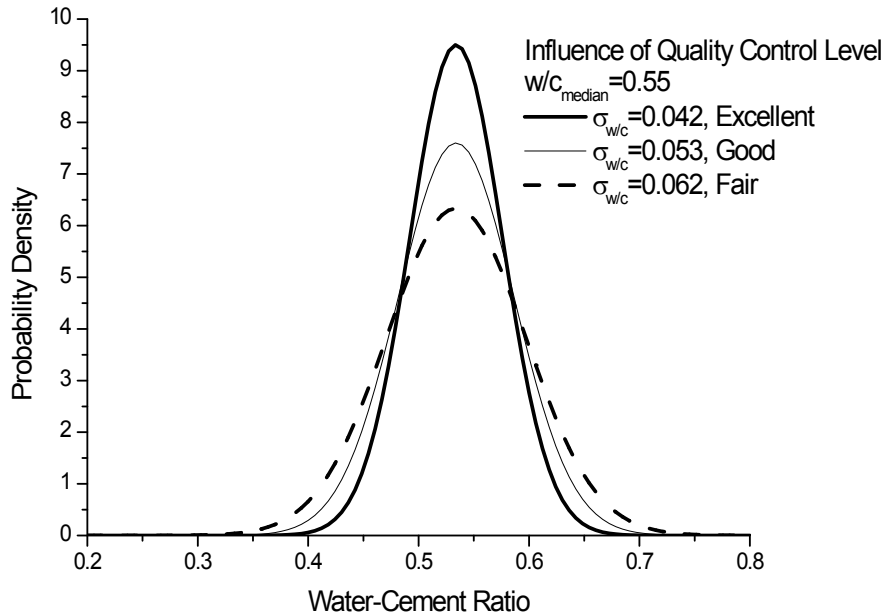


그림 2-2 Probability distribution of water-cement ratio with quality control level  
( $w/c=0.55$ )

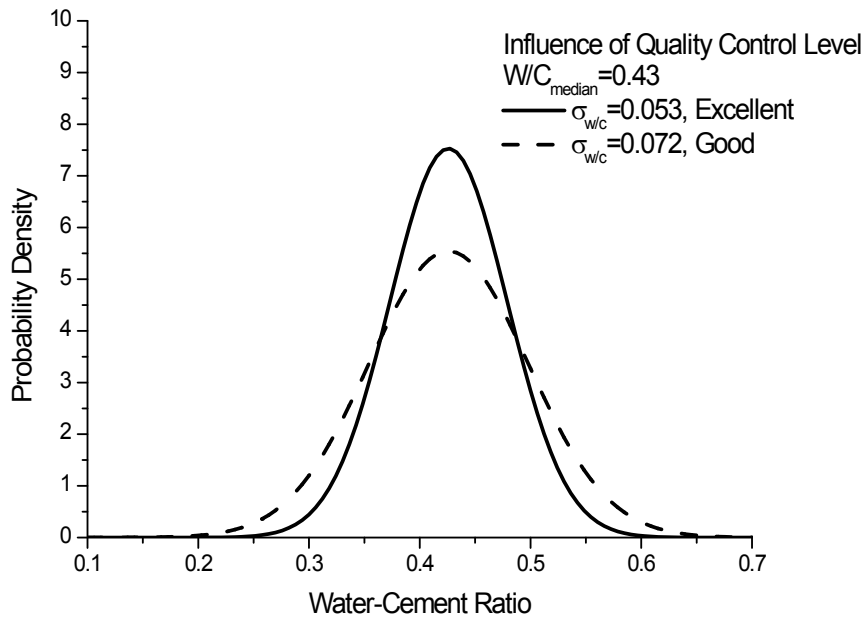


그림 2-3 Probability distribution of water-cement ratio with quality control level  
(w/c=0.43)

## 2.3. 내구성 변수들의 확률 분포

### 2.3.1 물-시멘트비

ACI Life-365 모델에서 제시하는 표준염소이온확산계수는 다음과 같다.

$$D_{c,ref} = 10^{-12.06 + 2.40(w/c)} \quad (2-20)$$

물-시멘트비에 대한 확률분포가 제시되어 있으므로 식 (62)를 이용하면 표준염소이온 확산계수를 구할 수 있다. 표 2-3의 물-시멘트비에 대한 표준편차를 이용하여 10만번의 Monte Carlo Simulation을 통한 표준염소이온확산계수를 구하고 각 확산계수값을 구간별로 나누어 그 구간에 속한 simulation 횟수를 합산하면 다음 같은 분포를 구할 수 있다. 표준염소이온확산계수가 지수함수의 형태로 제시되어 있으므로 그 분포가 물-시멘트비의 확률분포와는 조금 다르게 나타난다.

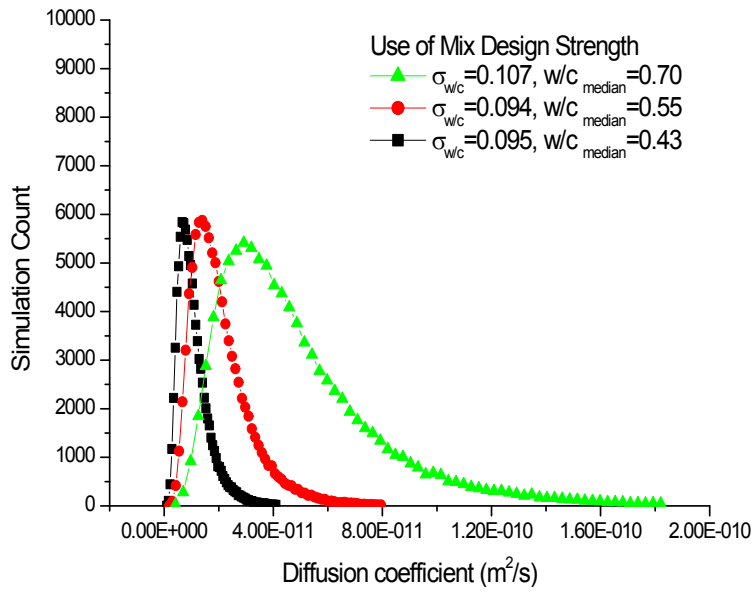


그림 2-4. Probability distribution of diffusion coefficient with strength level

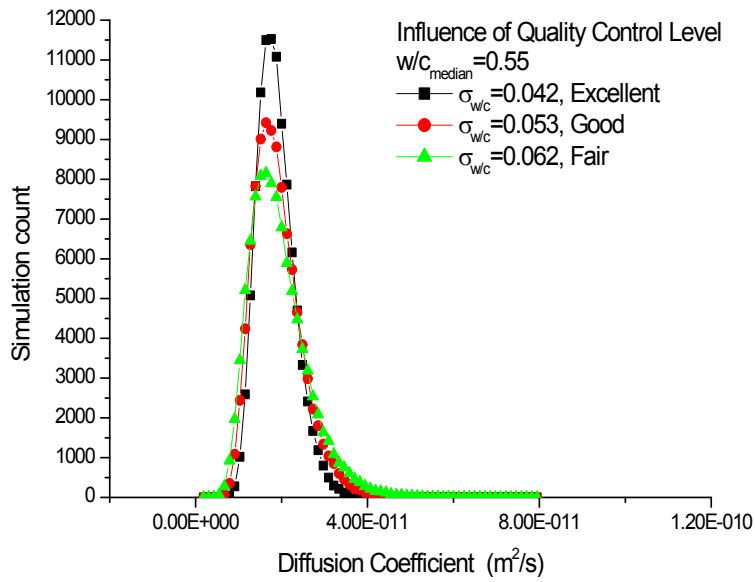


그림 2-5 Probability distribution of diffusion coefficient with quality control level ( $w/c=0.55$ )

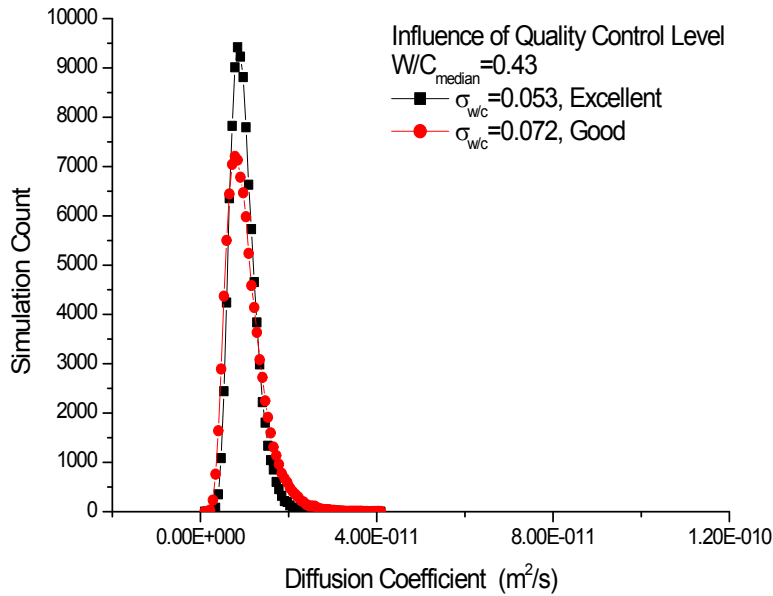


그림 2-6 Probability distribution of diffusion coefficient  
with quality control level (w/c=0.43)

### 2.3.2 증발가능수량

염해에 직접적인 영향을 미치는 자유자유염소이온의 양을 결정하는 증발가능수량도 물-시멘트비에 직접적인 영향을 받는다. 모세관 공극수와 겔공극수의 합인 증발가능수량은 앞의 내구성 해석 프로그램에서 다음과 같은 식으로 모델링하였다.

$$\omega_e = v_g + v_c \quad (2-21)$$

$$v_g = w_g \times c \times \frac{1}{w_s} = (0.18a) \frac{c}{1000} \quad (2-22)$$

$$v_c = \frac{P_c}{1000} \times c = \left(\frac{w}{c} - 0.36a\right) \frac{c}{1000} \quad (2-23)$$

단위시멘트량의 변화의 영향은 물-시멘트비의 표준편차계산에서 고려되었으므로 단위시멘트량은 상수로 가정한다. 또한, 물-시멘트비의 영향을 알아보기 위해 수화도도 현재의 Monte Carlo Simulation에서는 1로 가정한다.

이러한 Simulation에 의한 증발가능수량은 아래의 그림과 같이 나타낼 수 있다. 식 (2-23)에서 모세관 공극수는 물-시멘트비가 0.36이 되면 0이 되므로 물-시멘트비가 0.36이하인 경우에는 모두 같은 증발수량값을 가지게 된다. 이러한 이유로 물-시멘트비가 낮은 경우의 확률분포는 점프가 발생한다. 2차년도 신뢰성을 바탕으로 한 내구성 해석에서는 이러한 부분에 대한 고려가 필요하다.

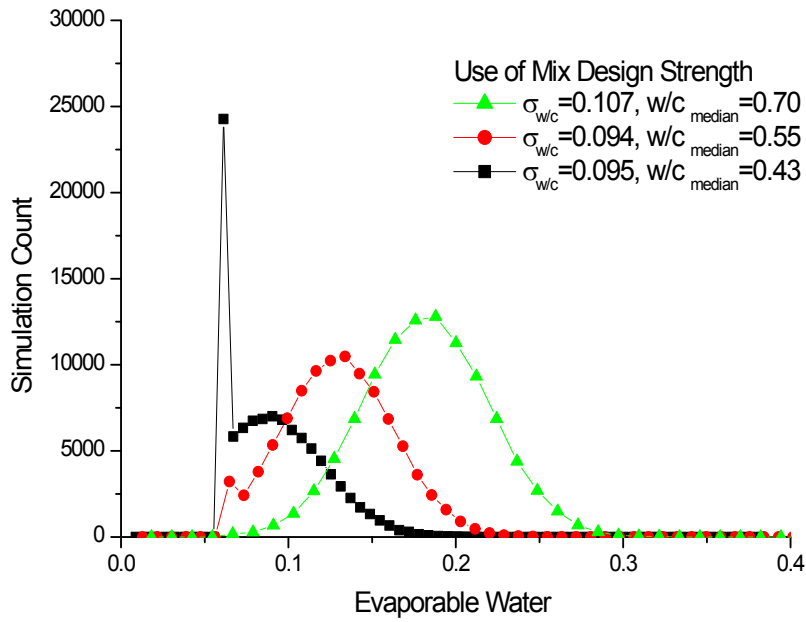


그림 2-7 Probability distribution of evaporable water with strength level

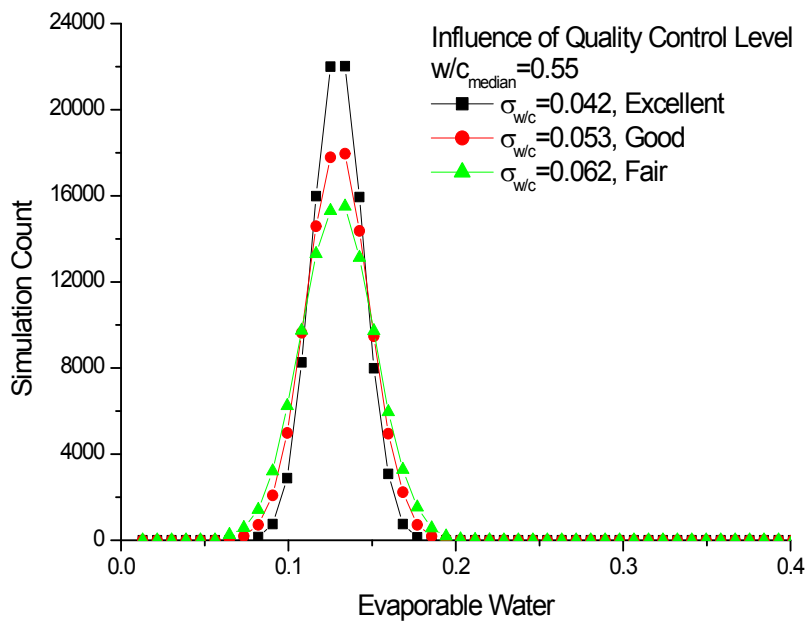


그림 2-8 Probability distribution of evaporable water with quality control level (w/c=0.55)



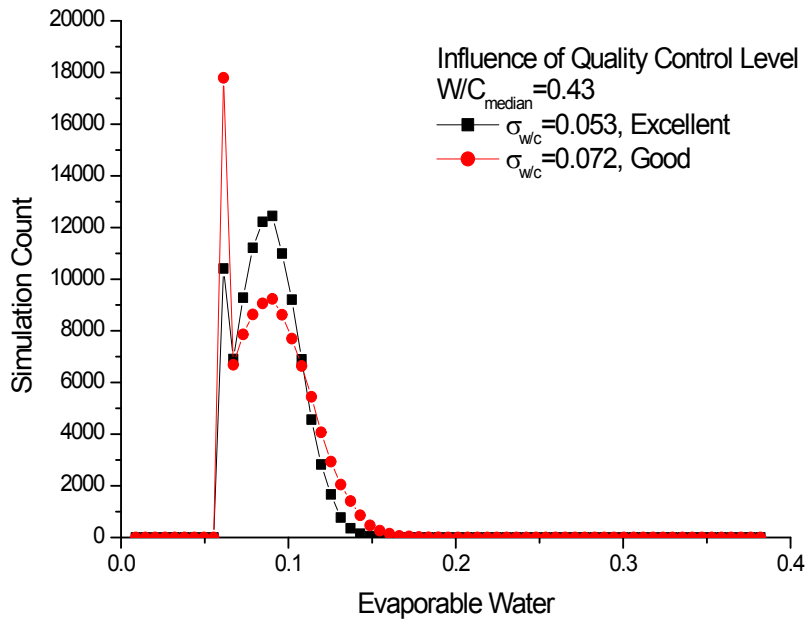


그림 2-9 Probability distribution of evaporable water with quality control level (w/c=0.43)

### 3. 신뢰성 기법에 의한 내구성 해석

신뢰성 해석기법에 의한 내구성 설계도 구조설계에서의 신뢰성 설계와 같이 하중함수( $S(t)$ )와 저항함수( $R(t)$ )의 확률밀도함수를 구하고 두 확률밀도함수가 일치하는 영역을 내구성 파괴확률( $P_f(t)$ )로 정의한다. 내구 신뢰성 해석에서는 저항함수가 구조물의 내구성능함수가 되고, 하중함수가 외부환경하중함수가 된다는 차이점이 있다.

$$g(R, S) = R(t) - S(t) \quad (3-1)$$

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} (1 - F_S(x)) f_R(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(x) f_S(x) dx \quad (3-2)$$

결정론적 방법에 의한 해석은 하중함수와 저항함수의 분산특성을 무시하고 대표값( $\underline{R}$ ,  $\underline{S}$ )들만을 고려하여 적당한 안전계수의 값을 유지하도록 항상  $\underline{R}$ 이  $\underline{S}$ 보다 큰 상태가 유지되도록 설계를 하는 것이다. 일반적으로 내구성 해석에 사용되는 입력변수나 한계염소이온농도 등은 실험방법과 환경에 따라 큰 편차를 가지고 있다. 신뢰성 설계에서는 이러한 편차를 고려하므로 좀 더 합리적이고 설득력있는 설계법이라 할 수 있겠다.

본 연구에서는 재료변수 중에서 물-결합재비, 염소이온 확산계수, 증발가능수량 등의 확률분포와 한계염소이온 농도에 대한 확률분포를 이용하고 Monte Carlo Simulation을 바탕으로 부식염소이온농도의 깊이별 분포 산정한다. 이어서, 콘크리트 덮개의 표준편차와 부식염소이온농도의 깊이별 분포를 이용하여 피복덮개 길이에 따른 내구성 파괴확률을 산정한다. 마지막으로 Eurocode 1 (EN 1990 :

Management of reliability and risk, 2000)에서 제안한 신뢰성 지수와 확률론적인 방법에 의한 최소 피복두께의 파괴확률을 비교하여 내구성 해석을 수행한다.

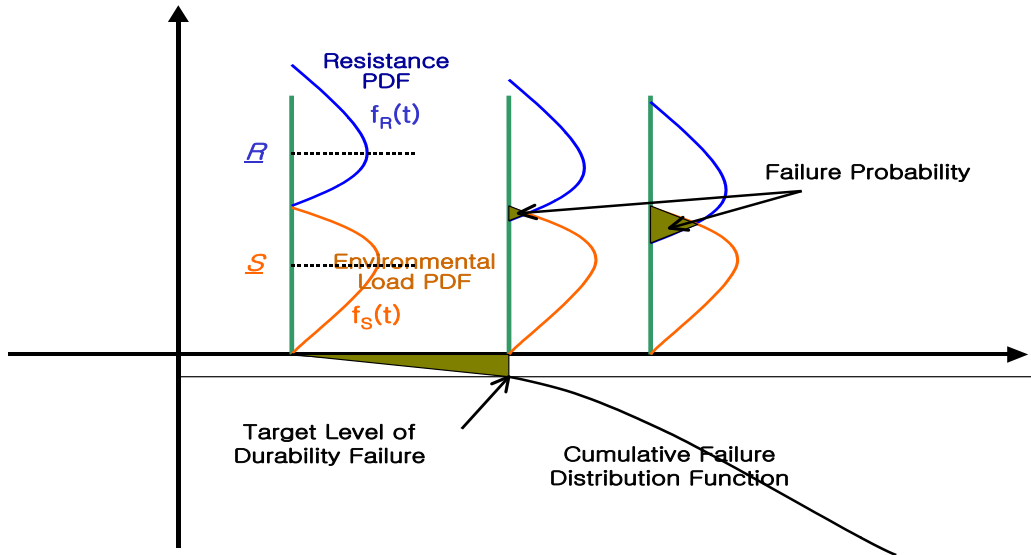


그림 3-1 내구 신뢰성 해석 개념도

### 3.1 해석모델

염소 이온의 침투해석에 관하여 지금까지 비교적 많이 실시된 방법은 콘크리트 단위 용적 중의 전염 소이온량을 걸보기 염소 이온농도로 하여 콘크리트 중의 분포를 단순화한 확산 방정식의 해로서 구하는 방법이 있다. 다른 방법으로는 확산방정식을 지배방정식으로 하여 유한차분법 또는 유한요소법을 이용한 해석을 통해 깊이별 염소 이온 농도 분포를 구하는 방법이다. 방정식의 일반해(에러함수)를 사용하는 것은 간편하지만 재령에 따른 염소이온 확산계수의 변화나 위치에 따른 염소이온 확산계수의 변화, 염소이온의 고정화 등을 모델링하지 못 한다. 따라서, 본 내염설계는 유한요소법을 이용하여 염소이온의 확산 및 흡착에 대한 해석모델을 개발하여 이를 바탕으로 염소이온농도침투해석을 수행한다.

#### 3.1.1 염소이온 침투모델

염소이온침투는 확산과 흡착이 동시에 일어나므로 일반적인 확산모델보다는 정식화과정이 조금 복잡하다. 확산과정이 등방성이고 미소체적내부에서 자유염소이온에 대한 고정염소이온의 변화율과 확산계수 및 증발가능수량이 일정하다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_f}{\partial t} &= \frac{\partial C_f}{\partial t}_{diff} + \frac{\partial C_f}{\partial t}_{sorp} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_c' \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_c' \frac{\partial C_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_c' \frac{\partial C_f}{\partial z} \right) \\ &+ \frac{\partial C_f}{\partial x} k_h \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial C_f}{\partial y} k_h \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial C_f}{\partial z} k_h \frac{\partial h}{\partial z} \\ &+ C_f \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] \end{aligned}$$

이러한 식들을 Galerkin 방법, Green의 정리 등등을 이용하면 다음과 같은 요소 매트릭스 방정식을

유도할 수 있다(한상훈 etc, 2005).

$$[C] \left\{ \frac{dC_f(t)}{dt} \right\} + ([K_1] - [K_2] - [K_3] + [K_4]) \{C_f(t)\} - \{Q\} = 0$$

여기서,  $[C] = \int_{V'} [M]^T [M] dV$

$$[K_1] = \int_{V'} D_c \left\{ \frac{\partial [M]^T}{\partial x} \frac{\partial [M]}{\partial x} + \frac{\partial [M]^T}{\partial y} \frac{\partial [M]}{\partial y} + \frac{\partial [M]^T}{\partial z} \frac{\partial [M]}{\partial z} \right\} dV$$

$$[K_2] = \int_{V'} k_h [M]^T \left[ \frac{\partial [M]}{\partial x} \{h(t)\} \frac{\partial [M]^T}{\partial x} + \frac{\partial [M]}{\partial y} \{h(t)\} \frac{\partial [M]^T}{\partial y} + \frac{\partial [M]}{\partial z} \{h(t)\} \frac{\partial [M]^T}{\partial z} \right] dV$$

$$[K_3] = \int_{V'} \frac{\partial H}{\partial h} [M]^T [M] \left\{ \frac{\partial h(t)}{\partial t} \right\} [M] dV$$

$$[K_4] = \int_{S^c} f_c [M]^T [M] dS$$

$$\{Q\} = \int_{S^c} f_c [M]^T C_{f, en} dS$$

### 3.1.2 수분확산 모델

흡착을 고려하기 위해서는 염소이온확산 뿐만 아니라 수분확산 모델도 필요하다. 수분확산은 다음과 같은 형태로 모델링 가능하다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = D_h \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] = D_h (\nabla^2 h)$$

위의 모델을 염소이온확산모델과 같이 Galerkin법과 Green의 정리 등을 이용하면 다음과 같은 형태의 요소내의 평형방정식을 유도할 수 있다(한상훈 etc, 2002).

$$[C]_h \left\{ \frac{dh(t)}{dt} \right\} + [K]_h \{h(t)\} - \{Q\}_h = 0$$

여기서,  $[C]_h = \int_{V'} [M]^T [M] dV$

$$[K]_h = \int_{V'} D_h \left\{ \frac{\partial [M]^T}{\partial x} \frac{\partial [M]}{\partial x} + \frac{\partial [M]^T}{\partial y} \frac{\partial [M]}{\partial y} + \frac{\partial [M]^T}{\partial z} \frac{\partial [M]}{\partial z} \right\} dV + \int_{S^c} f_h [M]^T [M] dS$$

$$\{Q\}_h = \int_{S^c} f_h [M]^T h_{en} dS$$

$f_h$  : 수분확산의 표면계수

$h_{en}$  : 외기의 상대습도

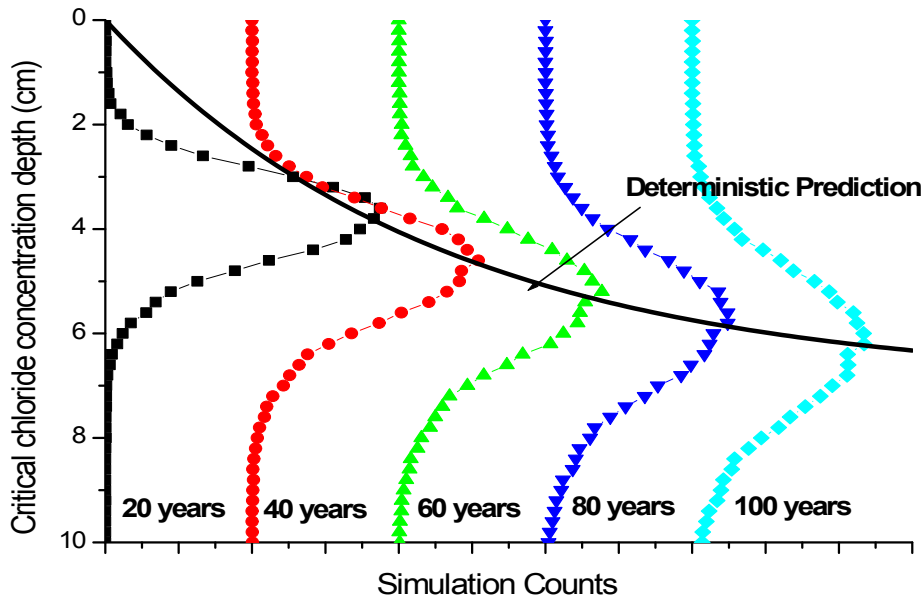
이러한 요소매트릭스 방정식을 바탕으로 유한요소 프로그램을 개발하여 염소이온 침투모델링을 수행하였다.

### 3.2 염소이온 침투깊이에 대한 신뢰성 해석

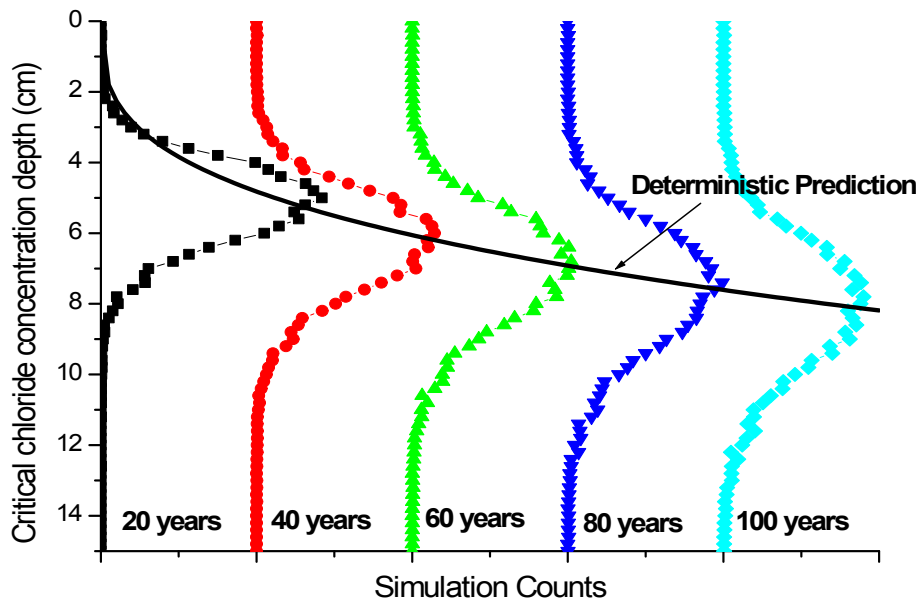
앞에서 언급한 바와 같이 물-시멘트비의 확률분포가 주어지면, 염소이온확산계수, 증발가능수량, 수화도 등의 확률분포를 구할 수 있으며, 이러한 확률분포를 바탕으로 염소이온침투해석을 수행하면 깊이이에 따른 염소이온농도 분포를 구할 수 있다. 본 내구성 해석시스템의 적용성 평가를 위해서 일반적인 방과제에 사용되는 구체와 상치 콘크리트에 대한 내구성 해석을 수행한다. 예제 콘크리트들의 설계 기준강도를 35 MPa로 하고 이러한 강도 수준과 품질관리 조건이 양호하다는 가정을 한다면 물-시멘트비의 표준편차는 0.053을 사용할 수 있다. 본 연구에서는 물-시멘트비의 확률분포가 표준편차 0.053을 가지는 정규분포로 가정하여 해석을 수행한다.

결정론적인 염해해석에서는 한계염소이온 농도가 「콘크리트 표준시방서 해설」의 제안한 값인 1.2 kg/m<sup>3</sup>로 일정하지만, 신뢰성해석에서는 이 값이 확률분포의 형태의 주어져야 한다. 일반적으로 국내외에서 수행한 내구신뢰성해석에서는 한계염소이온농도의 표준편차를 콘크리트 무게의 0.1%정도(0.23 kg/m<sup>3</sup>)으로 가정하고 있다. 따라서, 본 해석에서도 이 값을 이용하여 해석을 수행하였다(Ferreira etc, 2004; 김지상 등, 2005).

다음의 그림은 2만회의 Monte Carlo Simulation을 통한 부식한계를 초과한 염소이온농도 깊이의 분포를 나타낸다. 재령에 따라서 부식한계를 초과한 염소이온농도 깊이가 증가함을 알 수 있다. 또한, 결정론적인 침투깊이와 비교해서 확률분포의 peak값(mode값)에 해당하는 확산깊이가 조금 작다. 이것은 물-시멘트비가 정규분포라고 할지라도 물-시멘트비의 함수인 염소이온확산계수, 증발가능수량, 수화도 등의 값이 정규분포가 아니므로 염소이온 침투해석 결과는 정규분포가 아니다. 따라서, 결정론적인 해석값과 신뢰성 해석에 의한 침투깊이 확률분포의 peak값(mode값)이 다른 것이다.



(a) 방과제 구체 콘크리트



(b) 방파제 상치 콘크리트

그림 3-2 해석변수의 확률분포를 고려한 염소이온 침투해석 결과

### 3.4 신뢰성 기법에 의한 내구성 설계

염소이온 침투의 신뢰성 해석을 통해서 부식염소이온농도의 분포를 각각의 구하였다. 콘크리트 덮개의 변화량을 고려하지 않는다면 이러한 결과를 이용하여 파괴확률을 구할 수 있지만, 콘크리트 덮개의 표준편차를 고려하기 위해서는 Monte Carlo Simulation을 한 번 더 사용해야 한다. 국내외의 신뢰성 해석에서는 4 ~ 10 mm 정도의 콘크리트 덮개의 표준편차를 사용하고 있어, 본 설계에서는 구체 콘크리트 덮개의 표준편차로 8 mm를, 상치 콘크리트 덮개의 표준편차로 10 mm를 사용하였다(Ferreira etc, 2004; 김지상 등, 2005). 부식염소이온농도의 깊이에 따른 분포와 콘크리트 덮개의 표준편차를 입력변수로 Monte Carlo Simulation을 수행하여 내구성 파괴확률 결과를 얻었다.

신뢰성에 의한 내구성 설계를 하기 위해서는 내구성 파괴확률값을 산정해야하는데 이에 대한 명확한 기준이 국내에는 존재하지 않는다. 또한, 내구성설계와 구조설계는 그 개념에서 차이가 있으므로 구조설계의 파괴확률의 그대로 사용하는 것도 어렵다. 그러나, 유럽의 Eurocode 1 (EN 1990 : Management of reliability and risk, 2000)에서는 하중형태에 따른 신뢰성 지수를 제안하고 있다.

표 3-1 Eurocode 1의 신뢰성 지수

Reliability Class	Reliability Index			
	Serviceability		Ultimate limit states	
	1 year reference period	50 year reference period	1 year reference period	50 year reference period
RC 3	-	-	5.2	4.3
RC 2	2.9	1.5	4.7	3.8
RC 1	-	-	4.2	3.3

표에서와 같이 사용성 한계상태에서의 신뢰성 지수가 구조한계상태의 신뢰성 지수보다는 조금 작다. 내구성 파괴확률도 구조한계상태이기보다는 사용성 한계상태에 가깝다. 따라서, 본 연구의 내구성 파괴확률도 50년의 reference period의 신뢰성지수인 1.5를 사용하고자 한다.

신뢰성 지수 1.5는 파괴확률로 0.07이다. 즉, 50년에서의 최대파괴확률 6.68%미만으로 설계가 이루어져야 한다. 결정론적인 방법에서 구체콘크리트의 피복두께는 8 cm, 상치콘크리트의 피복두께는 10 cm로 설계하였다. 해석결과를 이용하여 재령 1, 10, 20, 30, 40, 50년의 파괴확률을 계산하면 표와 같다. 재령 1년에서는 구체와 상치콘크리트 모두 내구성과파괴가 발생하지 않는다. 따라서, Eurocode 1의 기준인 0.19%이하의 파괴확률을 가짐을 알 수 있다. 재령 50년에서 구체콘크리트의 내구성 파괴확률은 2.48%이고, 상치콘크리트의 내구성 파괴확률은 3.48%이다. Eurocode 1의 기준인 6.68%이하의 내구성 파괴확률을 가짐을 알 수 있다. 즉, 결정론적 방법에 의한 구체와 상치 콘크리트의 피복두께를 바탕으로한 내구성 파괴확률이 Eurocode 1의 기준을 만족하므로 신뢰성 기법에 의해 피복두께를 변화시킬 필요가 없다. 따라서, 구체 콘크리트는 8 cm, 상치 콘크리트는 10 cm의 피복두께를 사용하는 것은 신뢰성 기법에 의한 내구성 기준과 결정론적인 방법에 의한 내구성 기준을 모두 만족한다.

표 3-2 신뢰성해석에 의한 최소피복두께

구분	설계피복두께 (cm)	내구성 파괴확률 (%)					
		재령					
		1년	10년	20년	30년	40년	50년
구체 콘크리트	8	0.00	0.00	0.00	0.40	1.19	2.48
상치 콘크리트	10	0.00	0.01	0.13	0.63	1.75	3.48
Eurocode 기준		0.19					6.68
		O. K.					O. K.

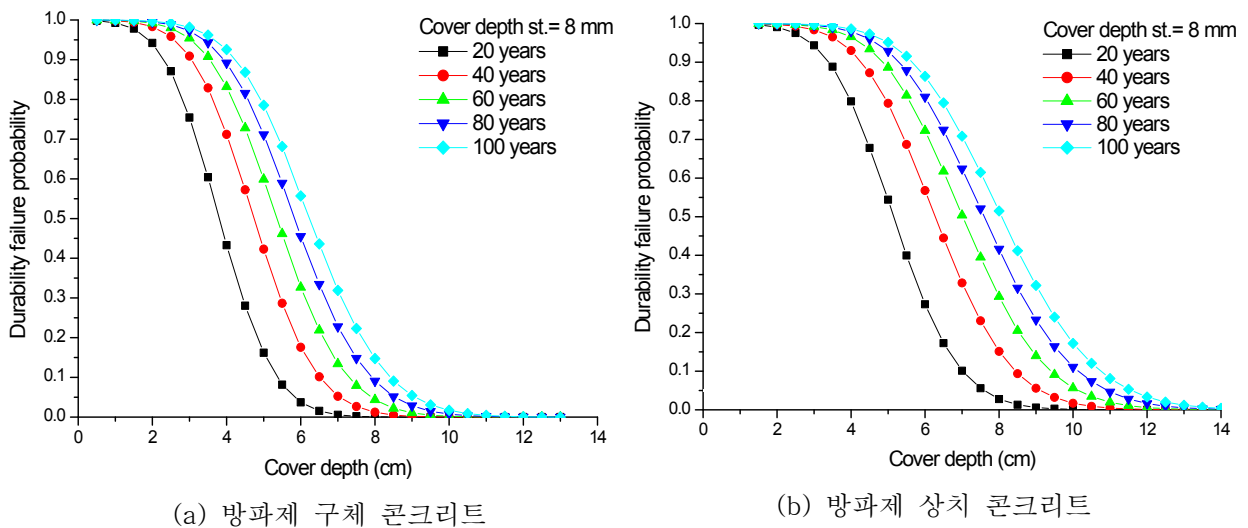


그림 3-3 피복두께에 따른 내구성 파괴확률

## 제 2 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

### 1. 연구개발목표 달성도

과제	연구목표	달성도 (%)	내 용
신뢰성을 바탕으로 한 수리항만 콘크리트 구조물의 건전도 평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 항만구조물의 잔존수명 예측 모델 개발</li> </ul>	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기존의 잔존수명 예측기법의 문제점 분석, 적용성 및 한계성 검토를 통한 새로운 예측 모델식 제시</li> <li>• 국내외 자료 조사 및 신뢰성 평가를 위한 기존의 실험데이터 수집 및 분석</li> <li>• 잔존수명 예측에 필요한 재료모델링 데이터들의 확률론적인 분포 제시</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 신뢰성 해석이 가능한 내구성 예측 프로그램의 개발</li> <li>• 내구성 파괴확률 제시 시스템 개발</li> </ul>	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1차년도에 개발한 프로그램의 검증</li> <li>• 내구성 해석변수들에 대한 확률분포 모델링 프로그램</li> <li>• Monte-Carlo Simulation을 내구성 해석 프로그램에 도입</li> <li>• 해석을 통해 염소이온 침투 깊이, 깊이별 염소이온 농도 등에 대한 확률분포 제시</li> <li>• 내구성 파괴확률에 대한 개념 제시</li> <li>• Monte-Carlo Simulation에 의한 내구성 파괴확률 계산 시스템 개발</li> </ul>

## 2. 연구개발성과

과제	구분	논문내용
신뢰성을 바탕으로 한 수리항만 콘크리트 구조물의 건전도 평가	국내 학술발표 논문	<ul style="list-style-type: none"> <li>한상훈, 박우선, 항만콘크리트 구조물의 내구성 파괴확률 예측을 위한 신뢰성 모델, 한국콘크리트학회 가을 학술발표 논문집, 2005.</li> </ul>
	국제 학술발표 논문	<ul style="list-style-type: none"> <li>한상훈, 채장원, Numerical Modeling of Deterioration in Marine Concrete Structures, The 16th Int. Offshore and Polar Engineering Conference, 2006.</li> </ul>
	국내학술지 논문	<ul style="list-style-type: none"> <li>한상훈, “현장항만콘크리트 구조물에 대한 염소이온 침투해석”, 한국콘크리트학회 논문집, 17권, 5호, 2005, pp.751 ~ 760.</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>•</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>•</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>•</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>•</li> </ul>

## 3. 관련분야에의 기여도

과제	관련 분야	기여도
신뢰성을 바탕으로 한 수리항만 콘크리트 구조물의 건전도 평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>잔존수명 예측 시스템</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>신뢰성 이론기반 내구성 예측 시스템 개발</li> </ul>



### 제 3 장 연구개발결과의 활용계획

- \* 추가연구의 필요성, 타연구에의 응용, 기업화 추진방안을 기술
- \* 연구기획사업 등 사업별 특성에 따라 목차는 변경 가능함

과제	기술적인 측면	사회·경제적인 측면
<p>신뢰성을 바탕으로 한 수리항만 콘크리트 구조물의 건전도 평가</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 내구성 파괴확률을 바탕으로 구조물 안전성 평가에 사용</li> <li>• 신뢰성 이론을 활용한 내구성 해석 기법 적용 가능성 제시</li> <li>• 생애주기비용 계산에 대한 기본자료로 사용 가능</li> <li>• 해양/항만 구조물에 대한 최적의 보수보강 시점 선택에 활용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 내구성 해석 프로그램의 웹서비스 또는 소프트웨어 개발을 통한 기업화 가능</li> <li>• 내구성 파괴에 대한 정량적인 판단근거의 제시를 통한 구조물에 대한 경제성 분석 자료 제공</li> <li>• 합리적인 구조물 설계/유지관리를 통한 국가예산의 절감</li> </ul>

## 제 4 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

참고문헌 참조

## 제 5 장 참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준, 2003.
2. 한국콘크리트학회, 콘크리트 표준시방서, 2003.
3. 한국콘크리트학회, 콘크리트 표준시방서 해설, 2003.
4. 한국콘크리트학회, 염해 및 탄산화에 대한 철근콘크리트 구조물의 내구성 설계 · 시공 · 유지관리 지침, 2003.
5. 한국항만협회, 항만 및 어항 설계기준, 1999.
6. 김지상 등, "콘크리트 구조물의 확률론적 내구성 해석," 한국콘크리트학회 봄 학술 발표회, 제 17 권, 제 1 호, pp. 189-192, 2005.
7. 한상훈, 김진근, 김동현, 박우선, "콘크리트 구조물의 염소이온 침투 해석에 대한 확산계수의 영향," 대한토목학회 논문집, 제 22 권, 제 2-A 호, pp. 347-350, 2002.
8. 한상훈, "현장 항만 콘크리트 구조물에 대한 염소이온 침투 해석," 한국콘크리트학회 논문집, 제 17권, 제 5호, pp. 749-758, 2005.
9. 일본건축학회, JASS 5, 1997.
10. 일본토목학회, 콘크리트 표준시방서, 2001.
11. ACI committee 365, Service life prediction-State of art report, ACI, 2000.
12. ACI committee 318, ACI Building Code Requirement for Reinforced Concrete 318-05, ACI, 2005.
13. CEN EN 1990, Management of reliability and risk in the Structural Eurocodes, 2000.
14. Ferreira, M. etc, "Probability-Based Durability Analysis of Concrete Harbor Structure," Concrete under Severe Conditions. CONSEC'04, SEOUL, KOREA, 2004.,

## 제 6 장 연구개발결과 활용 실적 및 방안

### 연구결과물 개요

#### 1. 연구결과물 현황

##### 1-1. 연구결과물 종류 (복수선택 가능)

① 공법/기법 개발	( )	⑬ 시방서 (안)	( )
② 프로그램·S/W 개발	( )	⑭ 규정, 지침 (안)	( )
③ 자재(재료) 개발	( )	⑮ 기준 (안)	( )
④ 기계장치, 장비 개발	( )	⑯ DB구축	( )
⑤ 공법/기법 개량(개선)	( )	⑰ 시스템(모델) 제시	(V)
⑥ 프로그램·S/W 개량(개선)	( )	⑱ 표준정비	( )
⑦ 자재(재료) 개량(개선)	( )	⑲ 평가방법/지표(안)	( )
⑧ 기계장치, 개량(개선)	( )	⑳ 전략 및 계획 수립	( )
⑨ 공법/기법 검증	( )	기타	( )
⑩ 프로그램·S/W 검증	( )		
⑪ 자재(재료) 검증	( )		
⑫ 기계장치, 장비 검증	( )		

##### 1-2. 연구결과물의 명칭

※ 1-1에서 선택한 연구결과물 종류의 구체적 명칭을 기재

성과물 분류 (번호로 표시)	성과물 명칭
1	신뢰성 해석이 가능한 내구성 해석 모델

#### 2. 기술의 명칭

국 문	신뢰성 해석이 가능한 내구성 해석 모델
영 문	Reliability assessment of corrosion initiation of harbor concrete structure

### 3. 기술(연구결과물) 개요 및 특징

	내 용
기술의 개요	<ul style="list-style-type: none"> <li>신뢰성 해석 가능한 내구성 해석 모델</li> </ul>
기술의 특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>현장환경, 재료물성, 시멘트 수화반응 등을 고려하여 신뢰성 이론기반 내구성 해석을 수행할 수 있는 모델</li> </ul>
용도 이용분야	<ul style="list-style-type: none"> <li>항만구조물의 내구성 해석</li> <li>항만구조물의 내구성 파괴확률 계산</li> </ul>

### 4. 연구결과 활용내역

해당사항 없음.

## 5. 개발기술의 분류

### 5-1. 기술분야

※ 1개만 선택(√로 표시)하여 주십시오

토목기술	<input checked="" type="checkbox"/> 토목구조기술 <input type="checkbox"/> 토목재료기술 <input type="checkbox"/> 지반기술 <input type="checkbox"/> 토목환경기술 <input type="checkbox"/> 수리수문기술 <input type="checkbox"/> 교통시설기술 <input type="checkbox"/> 측정 및 계측기술 <input type="checkbox"/> 기타토목기술
건축기술	<input type="checkbox"/> 건축계획 및 설계기술 <input type="checkbox"/> 건축구조기술 <input type="checkbox"/> 건축재료기술 <input type="checkbox"/> 건축시공 및 유지관리기술 <input type="checkbox"/> 건축환경기술 <input type="checkbox"/> 건축방재 및 안전기술 <input type="checkbox"/> 기타건축기술
설비기술	<input type="checkbox"/> 기계설비기술 <input type="checkbox"/> 전기설비기술 <input type="checkbox"/> 건설기계 및 장비기술 <input type="checkbox"/> 플랜트 설비기술 <input type="checkbox"/> 기타설비기술
건설일반	<input type="checkbox"/> 건설사업관리 <input type="checkbox"/> 건설관리정보화 <input type="checkbox"/> 건설제도정책 <input type="checkbox"/> 건설기술정보 <input type="checkbox"/> 기타건설일반

### 5-2. 시설물/공사단계별 분류

※ 시설물, 공사단계 각각 1개씩 선택(√로 표시)하여 주십시오

시설물	<input type="checkbox"/> 도로 및 공항, <input type="checkbox"/> 철도, <input type="checkbox"/> 댐, <input type="checkbox"/> 하천시설, <input type="checkbox"/> 터널, <input type="checkbox"/> 지하구조물, <input type="checkbox"/> 건축물, <input type="checkbox"/> 교량, <input type="checkbox"/> 건축설비, <input type="checkbox"/> 상하수도, <input type="checkbox"/> 고층건물 <input checked="" type="checkbox"/> 해안시설, <input type="checkbox"/> 산업시설
공사단계	<input type="checkbox"/> 기획, <input type="checkbox"/> 설계, <input type="checkbox"/> 시공, <input type="checkbox"/> 감리, <input type="checkbox"/> 유지관리

### 5-3. 기술의 완성도 분류

※ 1개만 선택(√로 표시)하여 주십시오

	① 기초, 탐색연구단계 : 특정용도를 위해 필요한 신 지식을 얻거나 기술적 가능성을 탐색하는 단계
√	② 응용연구단계 : 기술적 가능성의 실증, 잠재적 실용화 가능성의 입증 등 실험실적 확인 단계
	③ 개발연구단계 : Prototype의 제작, Pilot Plant Test 등을 행하는 단계
	④ 기업화 준비단계 : 기업화에 필요한 양산화 기술 및 주변 기술까지도 확보하는 단계
	⑤ 상품화 완료단계



## 7. 개발자 정보

주관연구책임자	주 소	경기도 안산시 상록구 사2동 1270번지		
	담당자 성명	한 상 훈	전화번호	031-400-6345
	Fax	031-408-5823	E-Mail	shhan@kordi.re.kr
실무책임자	주 소	경기도 안산시 상록구 사2동 1270번지		
	담당자 성명	한 상 훈	전화번호	031-400-6345
	Fax	031-408-5823	E-Mail	shhan@kordi.re.kr

## 연구성과 활용방안

### 1. 연구결과 활용 목표

#### 1-1. 활용분야

※ 복수선택 가능

	① <b>사업화, 기업화</b> : 개발기술을 참여기업 등 기업으로 기술이전 시키거나 주관기관이 기술을 직접 사용할 수 있도록 함
V	② <b>교육 및 지도</b> : 개발기술을 이용하여 산업체 및 정부관계자의 교육·지도에 활용하는 방법으로 연구결과를 확산시킴
	③ <b>정책활용</b> : 개발기술을 이용해 각 정부부처의 정책수립에 활용
	④ <b>설계기준, 시방서, 지침 등 국제표준 반영</b> : 국가 설계기준, 시방서, 지침 등 작성, 개선 등을 통해 국가전체 확산
	⑤ 기타 : ( )

#### 1-2. 활용목표

내구성 해석에 사용

### 2. 개발기술의 활용전략 및 방법

#### 2-1. 연도별 활용계획

2009년 : 웹기반 항만구조물 내구성 해석 프로그램 셋업



2010년 : 항만구조물 안전진단 및 정밀점검 자료기반 신뢰성 데이터 제시

## 2-2. 추진체계

안전진단회사들과의 지속적인 피드백

## 3. 활용성과 측정

### 3-1. 성과내용

항만구조물에 대한 내구신뢰성 해석

### 3-2. 성과측정(확인) 방법

항만구조물의 진단과 설계에서의 신뢰성 해석 증가

### 3-3. 성과근거 자료

프로그램의 적용 사례

## 4. 기대효과

- 내구성 파괴확률을 바탕으로 구조물 안전성 평가에 사용
- 신뢰성 이론을 활용한 내구성 해석 기법 적용 가능성 제시
- 생애주기비용 계산에 대한 기본자료료 사용가능
- 해양/항만 구조물에 대한 최적의 보수·보강 시점 선택에 활용