

R&D / BSPN63700

# 해양/항만구조물의 건전도 평가기법 개발

2009. 4. 17

한 국 해 양 연 구 원

# 제 출 문

사회기반 시설물 평가 중점연구단 연구단장 귀하

본 보고서를 “해양/항만구조물의 건전도 평가기술 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2009. 4. 17.

주관연구기관명 : 한국해양연구원

주관연구책임자 : 박 우 선

연 구 원 : 한상훈, 이진학, 권오순

장인성, 최영철, 백승미

# 최종 보고서

세부과제명				
세세부 연구명	해양/항만구조물의 건전도 평가기법 개발			
연구책임자	성 명	박 우 선	근무지	한국해양연구원
	전화	031-400-6325	휴대폰	016-440-99174
	E-mail	wspark@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	2006. 7. 20 ~ 2009. 5. 19 (2년10개월)			
참여 연구원		연구개발비 (현금)	85,000,000 원	
연구책임자 (박우선)외 3 명				
<p>본 보고서를 “사회기반 콘크리트 구조물의 성능평가 통합시스템 구축”의 2단계 최종보고서로 연구단에 제출합니다.</p> <p style="text-align: right;">2009 년 4 월 17 일</p> <p style="text-align: right;">세세부 연구책임자: 박 우 선 (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
해양/항만 구조물의 건전도 평가기법 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>표면처리제에 따른 내구성 해석 시스템 개발</li> <li>균열존재시의 내구성 해석 시스템 개발</li> <li>현장실험결과를 이용한 내구성 해석 시스템 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>표면처리제의 염소이온침투에 대한 저항성을 고려할 수 있는 수치 모델 개발</li> <li>기존에 개발된 염소이온 해석 시스템에 표면처리제의 영향을 도입하여 프로그래밍</li> <li>수치모델을 통해 표면처리제의 각 영향인자가 염소이온침투에 미치는 영향을 파악</li> <li>균열의 존재가 염소이온침투에 미치는 영향을 수학적으로 모델링</li> <li>기존에 개발된 염소이온 해석 시스템에 균열이 미치는 영향을 프로그래밍</li> <li>수치모델을 통해 균열특성이 염소이온침투에 미치는 영향을 파악</li> <li>현장실험결과를 통한 내구성 해석 시스템의 개발</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>현장비파괴 검사시스템을 기반으로한 내구성 평가모델의 개발</li> <li>현장비파괴 검사시스템에 의한 내구성 평가인자 검토</li> <li>기개발된 표면처리제 모델 개선</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>현장비파괴 검사 데이터를 이용하여 항만구조물의 내구신뢰성을 평가할 수 있는 간편해석 알고리즘 개발</li> <li>현장비파괴 검사시스템 데이터를 이용한 내구성 평가 프로그램 개발</li> <li>항만구조물의 내구성 평가 인자들의 내구신뢰성 관점에서의 민감도 분석</li> <li>현장비파괴 검사시스템에 의해 측정되는 재료물성치 인자들을 분석하고 측정되는 물성치의 내구성평가 적용가능성 평가</li> <li>시판 중인 표면처리제에 대한 내구성 개성 효과 검증 실험</li> <li>기존 개발된 모델링의 개선</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>개발된 해양/항만 구조물 내구성 해석 시스템 지침서 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>사용자 지향 형태로 프로그램 개선</li> <li>개발된 프로그램의 사용을 위한 매뉴얼 개발</li> </ul>

### Ⅳ. 연구개발결과

과제	연구목표	연구결과
신뢰성을 바탕으로 한 수리항만 콘크리트 구조물의 건전도 평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>표면처리제에 따른 내구성 해석 시스템 개발</li> <li>균열존재시의 내구성 해석 시스템 개발</li> <li>현장실험결과를 이용한 내구성 해석</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>표면처리제 수치모델 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>표면처리제의 확산계수, 재시공기간, 처리제 열화특성 등을 고려하여 모델링</li> </ul> </li> </ul> $D_{st,t} = D_{st,i} + (D_{c,i,10y} - D_{st,i}) \left( \frac{year}{10} \right)^n$ <ul style="list-style-type: none"> <li>표면처리제의 특성치에 따른 염소이온 침투해석                             <ul style="list-style-type: none"> <li>표면처리제의 성능 중 염소이온침투에 가장 큰 영향을 주는 것은</li> </ul> </li> </ul>

	<p>시스템 개발</p>	<p>표면처리제 자체의 확산계수임</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 균열폭, 깊이 등을 고려한 균열특성 수치모델 개발</li> <li>• 균열특성치를 바탕으로 한 염소이온확산계수 모델 개발</li> </ul> $D_t = \left(1 + \frac{m\omega}{L} \left(\frac{k\omega^2}{D_o} - 1\right)\right) D_o = D_o \left(1 - \frac{m\omega}{L}\right) + \frac{mk\omega^3}{L}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• 균열폭의 증가에 따라 염소이온확산계수가 급격히 증가하므로 균열깊이까지가 표면에 노출된 것과 같은 해석 결과를 도출함</li> <li>• 현장실험결과를 내구성 해석 시스템에 대입하여 그 결과를 이용하여 구조물의 내구성을 해석하는 시스템 개발</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 현장비파괴 검사시스템을 기반으로한 내구성 평가모델의 개발</li> <li>• 현장비파괴 검사시스템에 의한 내구성 평가인자 검토</li> <li>• 기개발된 표면처리제 모델 개선</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일계이차모멘트법에 의한 내구신뢰성 모델 개발 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 평균일계이차모멘트법(MV FOSM)에 의한 항만구조물 내구성신뢰성을 해석할 수 있는 알고리즘을 개발함</li> <li>- 개선된 일계이차모멘트법(AFOSM)에 의한 항만구조물 내구성신뢰성을 해석할 수 있는 모델 개발</li> </ul> </li> </ul> $Z(C_d, C_o, x, D_d) \approx \frac{\partial Z}{\partial C_d} \Big _{\text{measvalue}} C_d + \frac{\partial Z}{\partial C_o} \Big _{\text{measvalue}} C_o + \frac{\partial Z}{\partial x} \Big _{\text{measvalue}} x + \frac{\partial Z}{\partial D_d} \Big _{\text{measvalue}} D_d$ $+ C_{d,ii} - C_{o,ii} \left[ 1 - \text{erf} \left( \frac{x_{ii}}{2\sqrt{D_{d,ii} t}} \right) \right] - C_{d,ii} \frac{\partial Z}{\partial C_d} \Big _{\text{measvalue}} - C_{o,ii} \frac{\partial Z}{\partial C_o} \Big _{\text{measvalue}} - x_{ii} \frac{\partial Z}{\partial x} \Big _{\text{measvalue}} - D_{d,ii} \frac{\partial Z}{\partial D_d} \Big _{\text{measvalue}}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• 개발된 평가모델의 유효성 검증 <ul style="list-style-type: none"> <li>- Monte Carlo Simulation법에 의한 결과와 제안된 모델을 비교하여 제안모델의 유효성 검증</li> </ul> </li> <li>• 제안 모델에 의한 해석변수들의 내구신뢰성 관점에서의 민감도 분석</li> <li>• 해석변수들의 부분안전계수의 검토를 통한 내구신뢰성 해석의 간편성과 신속성 증가방안 제시</li> <li>• 시판 중인 표면처리제 모델에 대한 내구성 증진 효과를 실험하여 각 모델의 장단점 파악하고 기 개발된 모델의 개선</li> </ul> $\overline{D_{st}} = \frac{1}{y} \int_0^y \left[ D_{st,i} + (D_{c,i,10y} - D_{st,i}) \left( \frac{\text{year}}{10} \right)^m \right] dy$ $= D_{st,i} + \frac{(D_{c,i,10y} - D_{st,i}) \left( \frac{\text{year}}{10} \right)^m}{1+m}$
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 개발된 해양/항만 구조물 내구성 해석 시스템 지침서 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사용자 지향 형태로 프로그램 개선</li> <li>• 개발된 프로그램의 사용을 위한 매뉴얼 개발</li> </ul>

### III. The contents and scope of research

Items	Objectives	Research contents and scope
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Development of durability analysis program considering surface treatment</li> <li>• Development of durability analysis program considering crack of structure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Development of numerical modeling estimating the influence of surface treatment on chloride ion penetration</li> <li>• Programming of durability analysis system based on numerical modeling about surface treatment</li> <li>• Evaluation of the influence of surface treatment on chloride ion penetration based on the developed program</li> <li>• Development of numerical modeling estimating the influence of crack on chloride ion penetration</li> <li>• Programming of durability analysis system based on numerical modeling about crack characteristics</li> <li>• Evaluation of the influence of crack on chloride ion penetration based on the developed program</li> </ul>
Development of durability evaluation system for marine/harbor structure	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Development of durability analysis program on the basis of NDT test results</li> <li>• Investigation of durability analysis variables based on reliability concept</li> <li>• Improvement of surface treatment mode</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Development of convenient and prompt algorithm estimating reliability index for harbor concrete structure</li> <li>• Programming of durability analysis system on the basis of the developed algorithm</li> <li>• Sensitivity analysis of durability analysis variables based on reliability concept</li> <li>• Evaluation of applicability of material characteristics measured by NDT</li> <li>• Experiments on durability enhancement by surface treatment</li> <li>• Improvement of developed surface treatment model</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Development of guideline for durability analysis program of harbor concrete structure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Development of user-oriented program for harbor concrete structure</li> <li>• Development of User manual for development program</li> </ul>

#### IV. The result of research

Items	Research scope	Research results
Development of durability evaluation system for marine/harbor structure	<ul style="list-style-type: none"> <li>Development of durability analysis program considering surface treatment</li> <li>Development of durability analysis program considering crack of structure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Development of numerical modeling estimating the influence of diffusion coefficient, durable period, durability of surface treatment</li> </ul> $D_{st,t} = D_{st,i} + (D_{c,i,10y} - D_{st,i}) \left( \frac{year}{10} \right)^n$ <ul style="list-style-type: none"> <li>The most important factor among the characteristics of surface treatment is the diffusion coefficient of surface treatment</li> <li>Development of numerical modeling estimating the influence of crack width, crack depth, crack spacing, etc</li> <li>If the crack larger than critical crack width occurs, the chloride ion penetrates promptly into the crack depth. Therefore, the concrete structures have the crack smaller than the allowable crack to prevent the corrosion</li> </ul> $D_t = \left( 1 + \frac{m\omega}{L} \left( \frac{k\omega}{D_o} - 1 \right) \right) D_o = D_o \left( 1 - \frac{m\omega}{L} \right) + \frac{mk\omega^3}{L}$
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Development of durability analysis program on the basis of NDT test results</li> <li>Investigation of durability analysis variables based on reliability concept</li> <li>Improvement of surface treatment model</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Development of durability reliability analysis model by First Order Second Moment Method               <ul style="list-style-type: none"> <li>Development of analysis model based on MV FOSM algorithm</li> <li>Development of analysis model based on AFOSM algorithm</li> </ul> </li> </ul> $Z(C_d, C_o, x, D) \approx \frac{\partial Z}{\partial C_d} \Big _{\text{mean value}} C_d + \frac{\partial Z}{\partial C_o} \Big _{\text{mean value}} C_o + \frac{\partial Z}{\partial x} \Big _{\text{mean value}} x + \frac{\partial Z}{\partial D} \Big _{\text{mean value}} D$ $+ C_{d,u} - C_{o,u} \left[ 1 - \text{erf} \left( \frac{x_u}{2\sqrt{D_{d,u}t}} \right) \right] - C_{d,u} \frac{\partial Z}{\partial C_d} \Big _{\text{mean value}} - C_{o,u} \frac{\partial Z}{\partial C_o} \Big _{\text{mean value}} - x_u \frac{\partial Z}{\partial x} \Big _{\text{mean value}} - D_{d,u} \frac{\partial Z}{\partial D} \Big _{\text{mean value}}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>Evaluation of proposed models on the basis of comparison between Monte Carlo Simulation and the proposed models</li> <li>Sensitivity analysis of durability analysis variables based on reliability concept</li> <li>Propose of convenient and prompt model based on partial safety factors of durability analysis variables</li> <li>Experiments on durability enhancement by surface treatment on the market</li> <li>Improvement of developed surface treatment model</li> </ul> $\overline{D_{st}} = \frac{1}{y} \int_0^y \left[ D_{st,i} + (D_{c,i,10y} - D_{st,i}) \left( \frac{year}{10} \right)^m \right] dy$ $= D_{st,i} + \frac{(D_{c,i,10y} - D_{st,i})}{1+m} \left( \frac{year}{10} \right)^m$
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Development of guideline for durability analysis program of harbor concrete structure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Development of user-oriented program for harbor concrete structure</li> <li>Development of User manual for development program</li> </ul>

## 목 차

1. 연구개발수행 내용 및 결과 .....	1
2. 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도 .....	30
3. 연구개발결과의 활용계획 .....	33
4. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 .....	34
5. 참고문헌 .....	35
6. 연구개발결과 활용 실적 .....	36



# 제 1 장 연구개발수행 내용 및 결과

## 1. 표면마감재 고려 내구성 모델

### 1.1. 표면마감재 모델링

#### 1.1.1 표면마감재 종류

표면마감재는 크게 코팅제(coating), 실러(sealer), 침투제(penetrant) 등으로 구분될 수 있다. 코팅제는 콘크리트 표면에 물리적인 보호층을 생성시키는 것이다. 실러는 코팅제처럼 콘크리트 표면에 물리적인 보호층을 생성시킬 뿐만 아니라, 실러가 표면내부 콘크리트의 공극을 채워 2중의 흡수방지층을 형성한다. 침투제는 표면에는 뚜렷한 보호층을 형성하지 않고 콘크리트의 내부로 침투하여 내부흡수방지층을 형성하는 것이다. 코팅제와 실러는 물리적인 보호층이 첫 번째 목적이고, 침투제는 방수 등을 위해 공극매립을 통한 내부흡수방지층의 형성이 주목적이다.

코팅제는 건조형태로부터 열가소성형과 반응경화형으로 나누어 진다. 전자는 마감재 성분 일부가 증발등의 물리적 변화만으로 표면도막을 형성하는 것이다. 후자는 마감재 성분들이 서로 반응하거나 혹은 대기 중 수분 등과 화학반응을 일으켜 도막을 형성하는 것으로 폴리우레탄 수지도료 등이 이에 해당한다.

실러에는 아크릴성분의 실러와 폴리우레탄 성분의 실러로 나눌 수 있으며, 대표적인 침투제로는 실란계 화합물을 들 수 있다.

#### 1.1.2 표면마감재 모델링

표면마감재가 적용된 콘크리트 구조물의 염소이온 침투현상을 모델링하고자 한다. 염소이온의 확산은 Fick의 첫 번째 법칙으로 모델링할 수 있고, 코팅영역과 콘크리트 영역을 통과하는 물질의 이동량은 동일하므로 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$J = D_t \frac{C_o - C}{T_t} = D_{st} \frac{C_o - C_b}{T_{st}} = D_c \frac{C_b - C}{T_c} \quad (1-1)$$

여기서,  $D_t$ ,  $D_{st}$ ,  $D_c$ : 콘크리트와 표면마감재 전체, 표면마감재, 콘크리트의 확산계수

$C_o$ ,  $C_b$ ,  $C$ : 콘크리트의 표면, 표면마감재와 콘크리트 경계면, 콘크리트의 염소이온농도

$T_t$ ,  $T_{st}$ ,  $T_c$ : 콘크리트와 표면마감재전체, 표면마감재, 콘크리트의 두께

현재의 식은 표면마감재와 콘크리트 2부분으로 나누었다. 코팅제가 사용된다면, 표면마감재 영역은 코팅제의 두께가 될 것이고, 침투제가 사용된다면 표면마감재 영역은 침투깊이가 될 것이다. 실러가 사용된다면 표면마감재 영역은 코팅영역과 침투영역으로 나뉘겠지만 본 연구에서는 실러의 영향을 하나의 영역으로 하고자 하였다.

표면마감재( $T_{st}$ )와 콘크리트의 두께( $T_c$ )의 합이 전체 두께( $T_t$ )가 되는 것을 이용하면 다음과 같은 확산계수의 상관관계를 구할 수 있다.

$$\frac{T_t}{D_t} = \frac{T_{st}}{D_{st}} + \frac{T_c}{D_c} \quad (1-2)$$

일반적인 표면마감재에 대한 실험에서 표면마감재 자체의 확산계수를 구하기는 어렵지만 표면마감재가 도포된 콘크리트 시료의 확산계수는 쉽게 측정할 수 있다. 이 때, 콘크리트의 확산계수를 함께 측정한다면 위 식(1-2)를 이용하여 표면마감재의 확산계수를 유추할 수 있다. 이렇게 표면마감재의 확산계수를 얻을 수 있다면, 본 연구자들이 개발한 유한요소법을 이용하여 표면마감재가 적용한 콘크리트의 염소이온 침투 양상을 합리적으로 예측할 수 있다.

표면마감재는 시간이 지남에 따라 그 성능이 저하되므로 이것에 대한 모델링이 필요하다. 침투제의 경우에는 공극속의 침투제가 제거되어 점차 초기의 성능이 저하될 것이다. 많은 제품에서 제시하고 있는 침투제의 지속시간은 재령 10년정도이다. 초기재령에서는 침투제의 침식이 작을 것이고 재령이 경과할수록 침식이 가속화될 것을 유추해볼 수 있다. 이러한, 가정을 바탕으로 다음과 같은 침투제의 재령에 따른 변화를 유추할 수 있다.

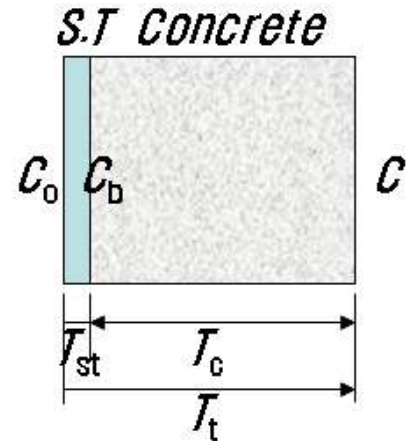


그림 1-1 표면처리제 모식도

$$D_{st,t} = D_{st,i} + (D_{c,i,10y} - D_{st,i}) \left( \frac{year}{10} \right)^n \quad (1-3)$$

여기서,  $D_{st,t}$ : 재령 t에서의 표면마감재의 확산계수

$D_{st,i}$ : 표면마감재 적용시점의 표면마감재 확산계수

$D_{c,i,10y}$ : 표면마감재 적용후 10년이 지난 시점에서의 표면마감재 확산계수

year: 표면마감재 적용후 경과재령 (년)

n: 비례상수

코팅제의 경우에는 재령의 경과에 따라 코팅제의 침식으로 보호층의 두께가 얇아져서 제 성능을 발휘하지 못한다. 일반적으로 코팅제의 두께가 0.2-0.3mm 정도이므로 위의 식(3)을 적용하여 코팅제의 재령에 따른 변화를 유추해도 큰 무리가 없을 것으로 사료된다.

## 1.2 표면마감재를 고려한 염소이온 침투 모델링

### 1.2.1 모델링 변수

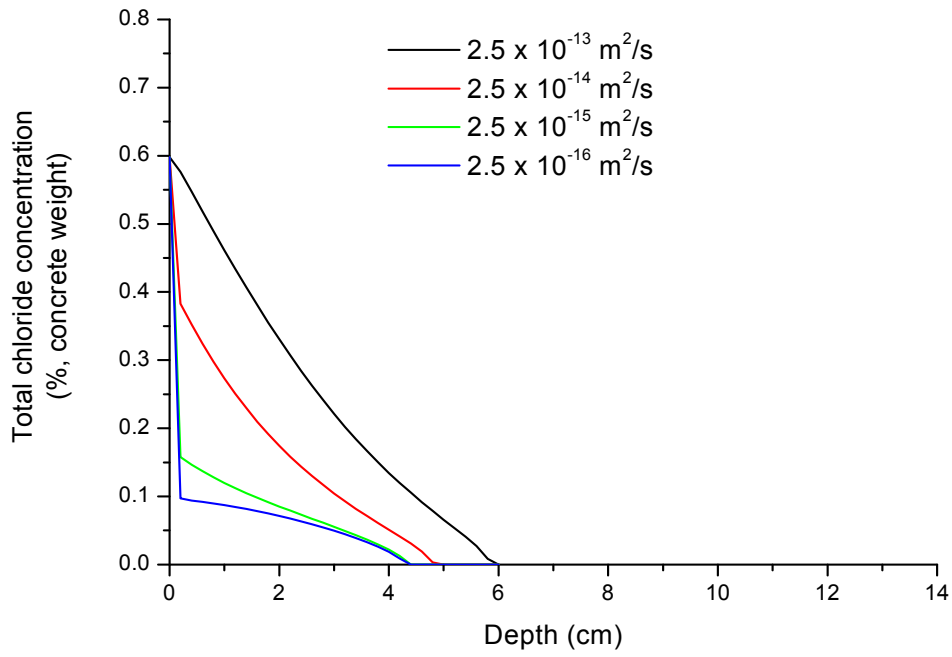
기존의 다른 연구자들이 제안한 실란과 코팅제의 확산계수값을 이용하여 표면마감재의 염소이온침투에 대한 영향을 고찰하였다. 해석에 사용된 콘크리트는 물-시멘트비 0.45, 단위시멘트량  $350 \text{ kg/m}^3$ , 일반 보통포틀랜드 시멘트를 사용하는 것으로 가정하였다. 또한, 고정염소이온의 양과 관련이 있는  $C_3A$ 의 농도는 8%, 콘크리트의 염소이온확산계수는 ACI의 Life 365모델을 이용하였다.

실란과 코팅제의 확산계수는 Buelfeld (Cement and Concrete Research, 1998)등의 연구결과를 이용하고자 한다. Buenfled 등은 실란의 두께가 2 mm인 경우에는  $2.5 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ , 코팅제의 두께가 1.5 mm인 경우에는  $6.3 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ 의 확산계수를 제시하였다.

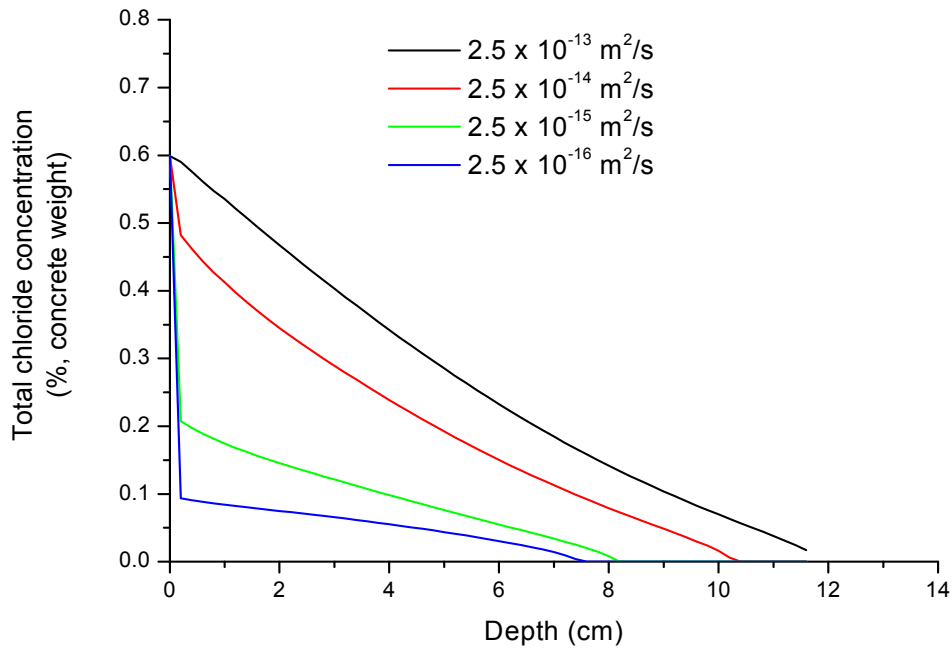
### 1.2.2 모델링 결과

식 (1-3)에서 표면마감재의 확산계수는 초기 표면마감재의 확산계수, 10년이 지난 후의 표면마감재 확산계수, 재령보정계수의 함수임을 알 수 있다. 이에 대한 영향을 파악하기 위해서 실란을 사용한 표면마감재의 각 변수에 대해 변화시키면서 그 특성을 고찰하였다. 그림 1-1, 1-2, 1-3에서 나타난 바와 같이 염소이온침투 깊이에 가장 큰 영향을 미치는 것은 초기 표면마감재의 확산계수임을 알 수 있다. 초기 표면마감재의 성능이 증가하면 재령 50년에서 4 cm이상의 염소이온침투깊이의 차이가 있음을 알 수 있다. 재령 10년후의 표면마감재 확산계수가 초기값의 10배, 5배, 2배인 경우에 대해서 해석을 수행하였는데 2배에서 10배사이의 값에서는 재령 50년의 염소이온침투 깊이가 1 cm정도의 차이가 있음을 알 수 있다. 초기확산계수값이 재령에 따라 변화하지 않는다면 변화하는 것에 비해서 재령 50년의 염소이온침투깊이가 60%정도이고 표면마감재를 사용하지 않은 것의 50%이하임을 예측할 수 있다. 한편, 식 (1-3)이 재령보정계수  $n$ 의 영향을 고찰하면, 그림에 나타난 바와 같이 염소이온침투에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

이상의 내용을 종합해 보면, 표면마감재의 효과를 증대시키기 위해서는 표면마감재의 확산계수가 매우 작은 것을 사용하고 또한, 재령이 10년이상 경과해도 초기의 확산계수가 크게 감소하지 않는 것을 채택하여야 한다.

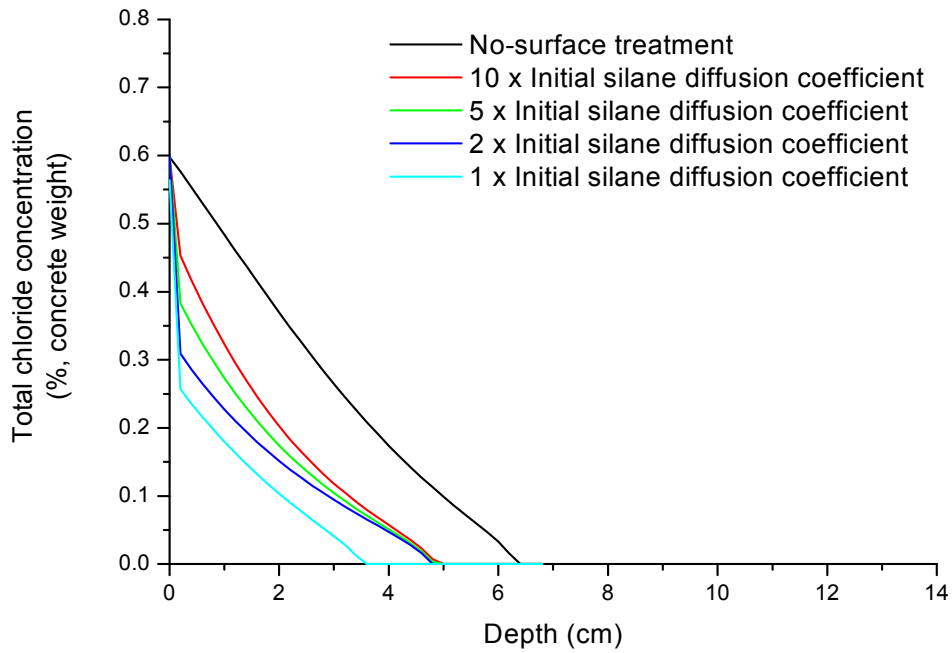


(a) 재령 10년

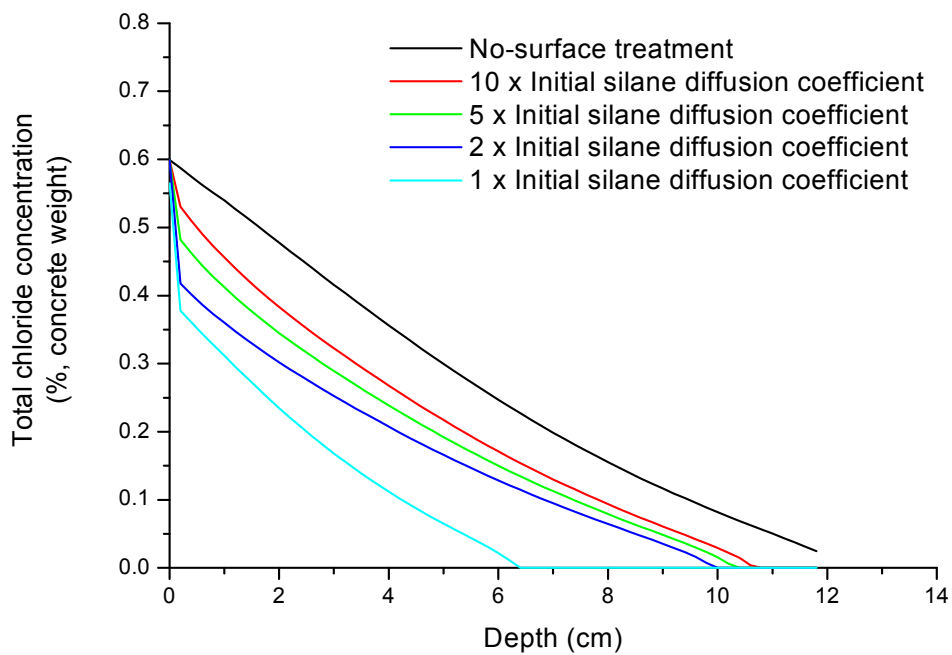


(b) 재령 50년

그림 1-1 표면마감재(실란)의 확산계수의 염소이온침투 영향

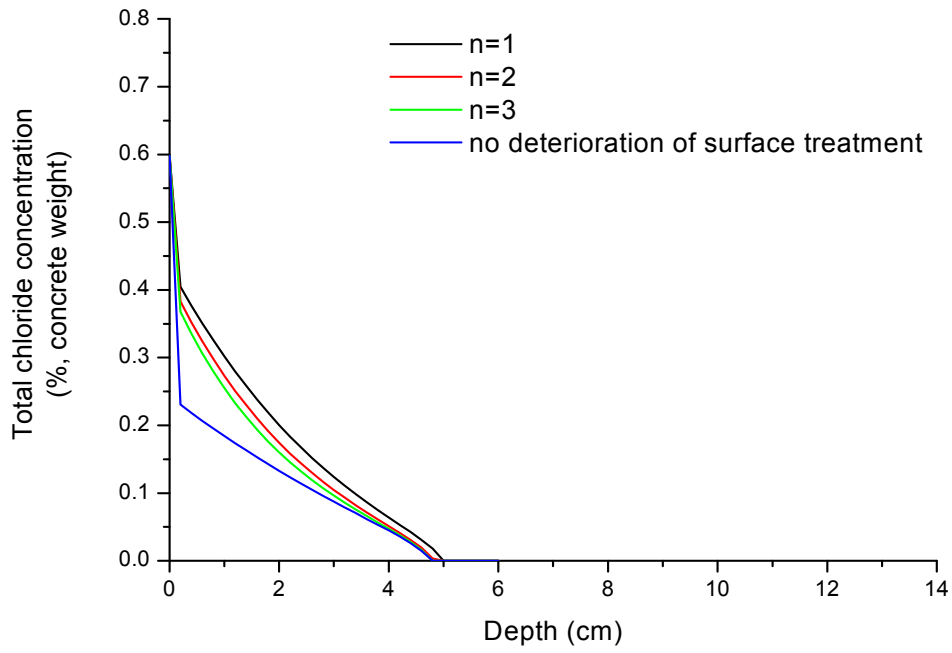


(a) 재령 10년

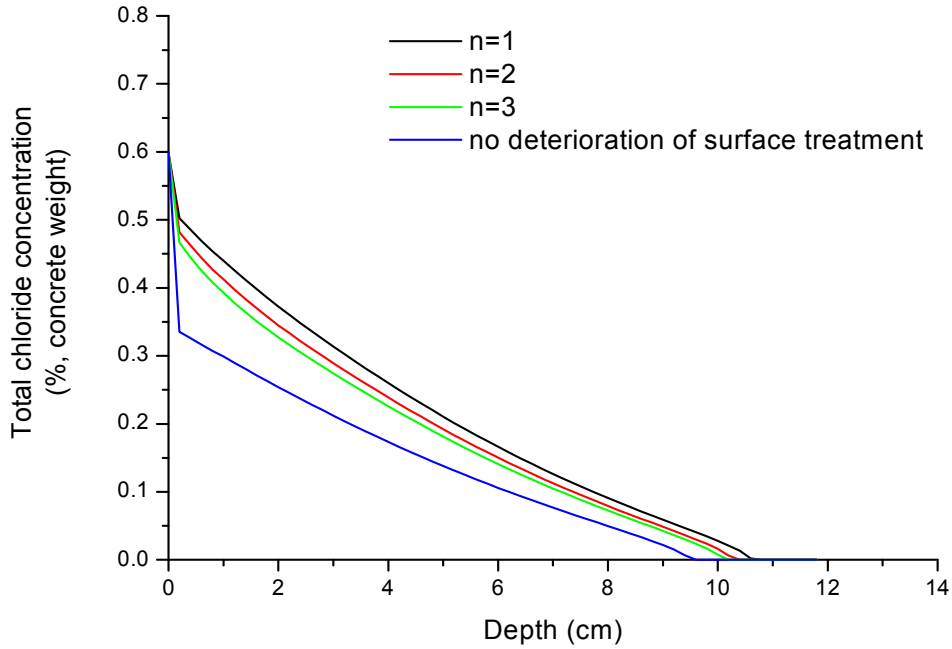


(b) 재령 50년

그림 1-2 표면마감재(실란)의 열화의 염소이온침투 영향



(a) 재령 10년



(b) 재령 50년

그림 1-3 표면마감재(실란)의 열화 변화율의 염소이온침투 영향

### 1.3 균열시의 확산계수

#### 1.3.1 균열모델링

균열이 유체의 이동에 미치는 영향에 대한 연구는 몇몇 연구자들에 의해 이루어졌지만, 그 절대적인 숫자는 매우 작다. 본 연구에서는 균열과 유체의 이동에 대한 연구결과를 바탕으로 균열의 유체이동에 대한 영향을 정량화하고 이를 바탕으로 균열에 따른 확산계수 모델을 제시하고자 하였다.

구조물의 균열형태는 균열폭, 균열사이의 간격, 균열 깊이, 단위길이당 균열개수 등으로 그 특성을 나타낼 수 있다. 길이 L에 균열폭 w인 균열이 m개 존재한다면 균열은 다음과 같은 형태로 간략화할 수 있다. 여기서, 균열사이의 간격의 영향은 균열모델의 간략화를 위해서 배제되었다. 모델의 첫 번째 층은 균열영역과 비균열영역으로 나눌 수 있고 이것은 다음과 같은 식으로 모델링할 수 있다.

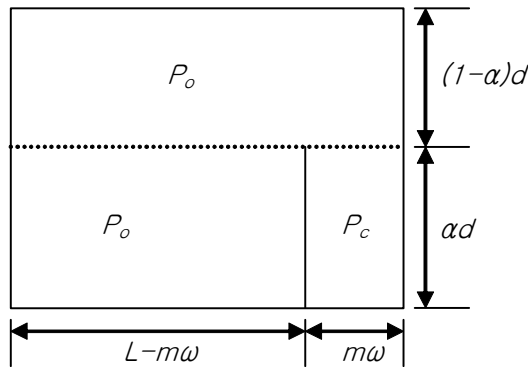


그림 1-4 균열효과 모델

$$P_1 = \left(1 - \frac{m\omega}{L}\right)P_o + \left(\frac{m\omega}{L}\right)P_c \quad (1-4)$$

여기서,  $P_1$ : 균열과 비균열 영역이 함께 존재하는 층의 유체이동계수,  $P_o$ : 균열이 존재하지 않은 영역의 유체이동계수,  $P_c$ : 균열영역의 유체이동계수,  $m$ : 균열의 개수,  $L$ : 균열발생영역의 길이,  $\omega$ : 균열폭

그림 1-4의 전체 콘크리트의 유체이동계수는 다음과 같은 식으로 모델링할 수 있다.

$$\frac{1}{P_t} = \frac{\alpha}{P_1} + \frac{1-\alpha}{P_o} \quad (1-5)$$

여기서,  $P_t$ : 전체 콘크리트의 유체이동계수,  $\alpha$ : 전체깊이에 대한 균열깊이의 비  
식(1-4)를 식 (1-5)에 대입하면 다음과 같은 형태의 식을 구할 수 있다.

$$P_t = \left(\frac{1+r}{1+(1-\alpha)r}\right)P_o \quad r = \frac{m\omega}{L} \left(\frac{P_c}{P_o} - 1\right) \quad (1-6)$$

### 3.2 균열시의 확산계수

투수(permeability)현상에 의한 유체이동에서 균열을 통과하는 유체의 흐름이 poiesulle flow 이면 투수계수는 균열의 제곱에 비례한다. 이에 대한 결과를 확산(diffusion)에도 차용한다면 균열영역의 확산계수는 다음과 같은 형태로 제시될 수 있다.

$$D_c = k\omega^2 \quad (1-7)$$

여기서,  $k$  는 비례상수,  $D_c$ : 균열영역에서의 확산계수

일반적인 균열과 유체이동에 대한 실험에서는 관통균열을 생성시키고 이에 대한 실험을 수행하는데, 이러한 경우 식 (1-6)의  $\alpha$ 는 1이 될 것이다. 또한, 균열모델을 내구성해석시에 적용할 때, 균열깊이까지 메쉬를 자른다면 깊이이내의 유한요소는 관통균열에 해당되고  $\alpha$ 는 1로 가정하여 해석을 수행할 수 있다.

식 (1-6)에 식 (1-7)을 대입하고,  $\alpha$ 가 1이라면 다음과 같은 균열콘크리트의 확산계수를 구할 수 있다.

$$D_t = \left(1 + \frac{m\omega}{L} \left(\frac{k\omega^2}{D_o} - 1\right)\right)D_o = D_o\left(1 - \frac{m\omega}{L}\right) + \frac{mk\omega^3}{L} \quad (1-8)$$

식 (1-8)에서의  $m$ ,  $\omega$ ,  $L$ 은 구조물에 대한 검사를 통해서 그 정보를 얻을 수 있고, 비균열 콘크리트의 확산계수( $D_o$ )는 기존에 제안된 식이나 일반적인 실험을 통해서 알 수 있다. 따라서, 식 (1-8)에서 비례상수  $k$ 만 결정된다면 균열이 발생한 콘크리트의 확산계수를 계산할 수 있다.

균열과 확산 또는 투수에 대한 연구를 수행한 연구자들의 결과들을 살펴보면 균열폭의 두께가 0.02-0.05 mm 이하에서는 확산이나 투수계수가 크게 증가하지 않는다. 따라서, 본 모델에서도 균열폭이 0.02mm이하인 경우에는 균열이 확산계수에 미치는 영향을 고려하지 않는다. Wittman(2006)과 Kato(2005)의 연구결과를 살펴보면 둘다 모두 0.1mm 정도의 균열폭에서  $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 의 확산계수를 제시하고 있다. 이 값을 이용하여 식 (8)의  $k$ 값을 계산할 수 있고 식 (1-8)은 다음과 같이 변환될 수 있다.

$$\omega > 0.02 \text{ mm이면}$$



$$D_t = D_o \left( 1 - \frac{m\omega'}{L} \right) + \frac{mk\omega'^3}{L} \quad (1-9)$$

여기서,  $\omega$ : 측정된 균열폭과 허용균열폭의 차이( $\omega=0.02$ ),  $k=1.95 \times 10^{-2}$

#### 1.4 균열시의 염소이온 침투 모델링

균열시의 염소이온 침투결과를 앞서 제안된 확산계수모델을 이용하여 모델링하였다. 해석에 사용된 콘크리트는 물-시멘트비 0.45, 단위시멘트량 350 kg/m<sup>3</sup>, 일반 보통포틀랜드 시멘트를 사용하는 것으로 가정하였다. 또한, 고정염소이온의 양과 관련이 있는 C<sub>3</sub>A의 농도는 8%로 가정하였다. 균열 폭이 0.02mm에서 0.18mm 사이에 있을 때의 재령 10년과 30년일 때의 염소이온 침투깊이를 고찰하였다. 균열의 깊이는 균열폭에 비례한다고 가정하여 0.02mm 균열 폭은 2mm의 균열깊이를, 0.18 mm의 균열폭은 1.8cm의 균열깊이를 가지고 있다고 가정하였다.

균열 폭이 0.06일 경우에는 앞의 식을 이용하면 확산계수가 10,000배정도 증가한다. 따라서, 재령 10년이 경과하면 균열이 발생된 영역의 염소이온농도는 콘크리트의 최외각면과 동일할 것이다. 즉, 균열이 발생한 깊이까지는 염소이온의 침투가 급격히 일어나고 장기간에 노출될 경우에는 외부염소이온 농도와 균열깊이까지의 염소이온 농도가 거의 동일함을 알 수 있다. 따라서, 장기간의 재령에 대한 염소이온 침투해석시에 0.02 mm 이상의 균열이 발생한 영역까지는 콘크리트 덮개에서 제외하고 해석해도 큰 오차가 없을 것으로 예측된다.

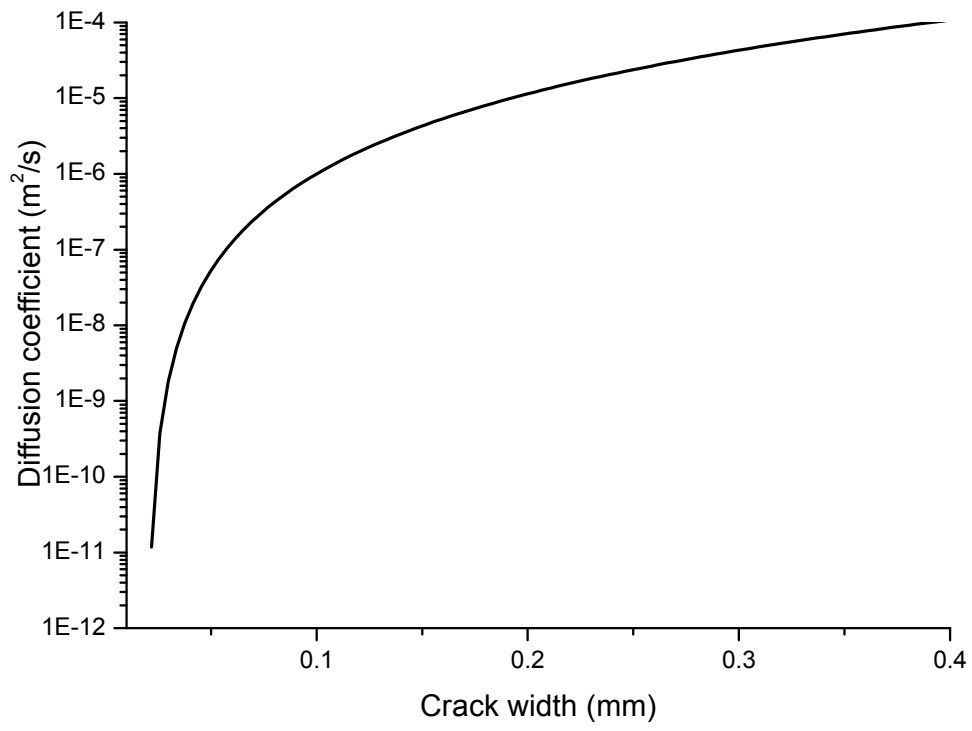
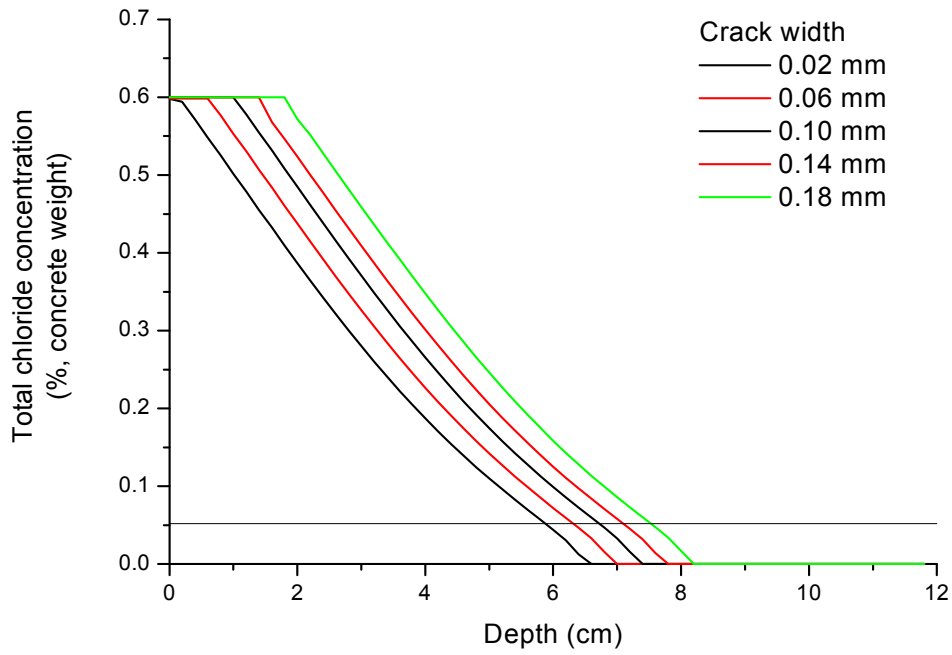
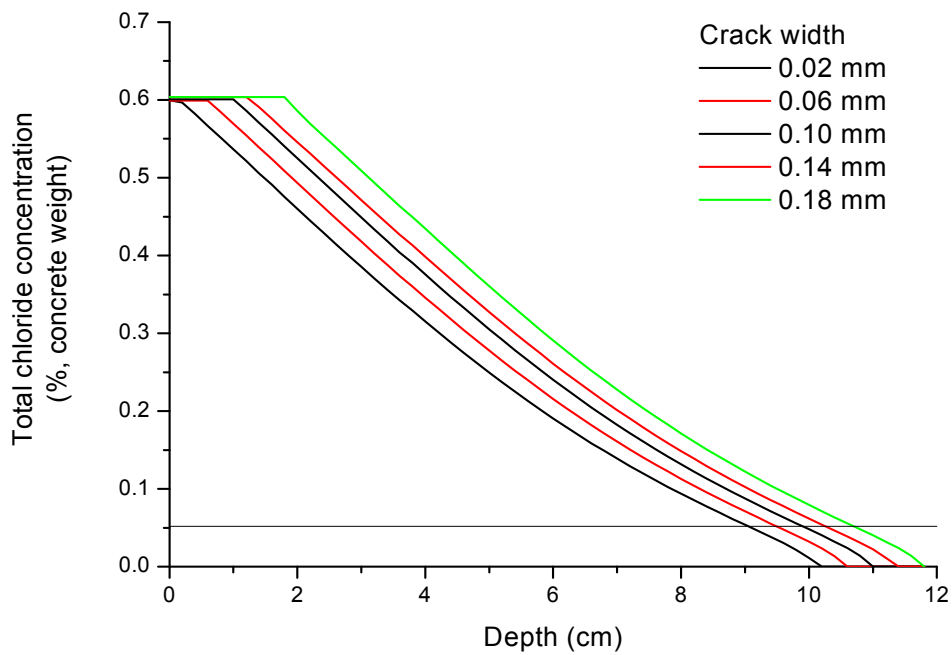


그림 1-5 관통균열폭과 확산계수의 변화



(a) 재령 10년



(b) 재령 30년

그림 1-6 균열의 확산계수의 염소이온침투 영향

## 2. 현장비파괴 검사시스템 기반 내구성 평가모델의 개발

### 2.1 개요

최근 들어, 구조물의 설계와 해석에 기존의 하중저항계수설계법보다 수준이 높은 신뢰성 이론을 도입하는 사례가 증가하고 있으며, 콘크리트에 대한 설계기준도 고수준의 신뢰성 이론의 적용이 필요한 성능중심의 설계법으로 변환되는 추세이다. 이러한, 경향에 따라 콘크리트 구조물의 내구성 해석에서도 Level III 수준의 신뢰성 해석법인 몬테칼로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation, MCS)을 적용하여 구조물을 설계하거나 해석한 사례가 증가하고 있다. 그러나, MCS법은 하나의 해를 얻기 위해서 수십만 번의 반복계산이 필요하고, 더구나 입력변수를 바꾸면서 최적의 피복두께나 배합 등의 도출이 필요할 경우에는 수백에서 수천만 번의 반복계산이 필요하다. 한편, 대부분의 염해해석에 사용되는 해석변수들은 정규분포로 가정되어 해석이 수행되고 있으며, 사용되는 지배방정식도 에리함수로 표현된 확산방정식이 주류이다. 이러한 조건에서는 Level III 수준의 MCS법 뿐만 아니라 Level II 수준의 일계이차모멘트법(first order second moment method, FOSM)이나 이계이차모멘트법(second order second moment method, FOSM)도 충분히 신뢰할 수 있는 신뢰성 해석결과를 제공할 가능성이 많다. 또한, Level II 수준에서 항만구조물의 내구 신뢰성해석이 가능하다면 간단한 스프레드시트를 이용해서도 신뢰성 설계가 가능하므로 내구성에 대한 신뢰성 해석의 접근성과 편리성이 크게 증가될 것이다. 이러한 접근성과 편의성의 증가는 현장비파괴 계측데이터를 이용한 실시간 내구성 평가가 가능하다. 즉, 정기 점검이나 정밀안전점검시에 계측되는 비파괴 데이터를 기반으로 해서 항만구조물의 내구신뢰성 평가가 가능하여 점검보고서와 안전진단보고서의 수준이 높아지고 발주처에서는 구조물의 대한 좀 더 신뢰성 높은 판단자료를 얻을 수 있다.

본 장에서는 항만구조물의 내구성 해석 시에 사용되는 MCS 기반 신뢰성 기법의 사용성과 접근성을 개선하기 위해 Level II 수준의 신뢰성 기법의 이용 가능성을 평가하고자 한다. 이를 위해, 평균 일계이차모멘트법과 개선된 일계이차모멘트법을 이용하여 내구성 해석을 수행하고 그 결과를 MCS법과 비교한다.

### 2.2 신뢰성 이론 기반 내구성 해석

#### 2.2.1 신뢰성 이론

공학문제에서 외부하중이나 재료상수와 같은 해석변수들은 특정값으로 고정되어있는 것이 아니라 일정한 기댓값을 중심으로 임의적으로 분산되어있다. 또한, 구조해석이론 자체도 여러 가정들을 포함하고 있어 결정론적인 해석방법만으로 공학문제를 해석하는 것은 어려움이 적지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 많은 시방서와 구조설계기준들은 신뢰성 이론을 차용하여 Level I 수준의 하중저항계수설계법을 제시하고 있다. 그러나, 하중저항계수설계법은 해석변수들의 변동성이 사전에 정해져 있어 지역적인 특성이나 구조설계 환경변화 등의 요인을 고려하는 것은 한계가 있어 Level III나 Level II 방법의 적용이 증가하고 있다.

Level III 방법은 구조물의 파괴에 관련된 모든 확률변수의 평균, 분산, 결합확률밀도함수를 이용하여 한계상태식이 0보다 작을 확률을 구하는 것이다.

$$Z = R_{resistance} - L_{loading}, \quad P_f = P[Z \leq 0] \quad (2-1)$$

대부분의 공학문제에서 한계상태방정식을 직접 적분하여 파괴확률을 구하는 것이 상당히 어렵기 때문에 수치적인 반복계산법인 Monte Carlo Simulation법을 일반적으로 많이 사용한다. MCS법은 입력변

수들의 확률밀도함수를 이용하여 각 변수들의 확률특성이 반영된 표본집단을 생성하고 생성된 표본집단을 한계상태방정식에 대입하여 0보다 작은 값이 계산되면 이를 파괴로 규정하여 표본집단의 개수와 파괴된 개수를 바탕으로 파괴확률을 산정하는 방법이다.

$$P_f \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[Z(x) \leq 0] \quad (2-2)$$

MCS법은 정해에 가까운 해를 얻기 위해 수십만 번의 반복계산이 필요하다. 하나의 경우에 대해서 해석을 수행한다면 적절한 방법이지만 설계 등을 위해 입력변수들의 기댓값과 분포값을 여러 경우에 대해서 계산할 필요가 있다면 각 경우들의 해를 얻기 위해서 많은 시간과 노력이 필요할 것이다.

Level II 방법은 각 확률변수들의 평균과 분산을 바탕으로 해서 신뢰도지수를 계산하는 방법으로 Level III와 달리 한계상태식의 결합밀도함수를 직접 적분하거나 MCS로 표본집단을 만들 필요가 없다. Level II 방법은 일계이차모멘트법과 이계이차모멘트법으로 나눌 수 있는데, 본 연구에서 사용된 일계이차모멘트법은 다시 평균 일계이차모멘트법(MV FOSM)과 개선된 일계이차모멘트법(AFOSM)으로 나눌 수 있다.

확률변수  $X_i$  를 가진 한계상태방정식이 선형 합으로 구성된다면 다음과 같은 형태로 표현될 수 있다.

$$Z = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_n X_n \quad (2-3)$$

확률변수  $X_i$  가 정규분포이므로 한계상태방정식  $Z$  도 정규분포이다. 또한, 확률변수  $X_i$  의 평균과 표준편차가 각각  $\mu_i, \sigma_i$  라면, 한계상태방정식  $Z$  의 평균과 분산은 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

$$\mu_Z = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu_i \quad (2-4)$$

$$\sigma_Z^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j \text{Cov}[X_i, X_j] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad (2-5)$$

한계상태방정식이 정규분포이고 파괴확률은 한계상태방정식이 0보다 작을 확률이므로 파괴확률은 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

$$P_f = P[Z \leq 0] = \Phi\left(\frac{0 - \mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) \quad (2-6)$$

한계상태방정식의 평균과 표준편차의 비는 신뢰도지수(Reliability Index,  $\beta$ )라고 정의할 수 있다.

한계상태식이 선형적이지 않고 비선형인 경우에는 방정식을 선형식으로 변환해야 일계이차모멘트법이 적용될 수 있다. 각 확률변수의 평균에서 한계상태식을 Taylor 전개를 하여 일차항까지 고려하면 비선형 한계상태방정식을 선형으로 변화시킬 수 있다.

$$Z(X) \approx g(\mu) + \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial Z}{\partial X_i} \right|_{\mu} (X_i - \mu_i) \quad (2-7)$$

선형화된 한계상태식의 평균과 분산은 다음 식으로 표현될 수 있으며 파괴확률과 신뢰도지수도 식 (5)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\mu_Z = Z(\mu) \quad (2-8)$$

$$\sigma_Z^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial Z}{\partial X_i} \right|_{\mu} \left. \frac{\partial Z}{\partial X_j} \right|_{\mu} \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad (2-9)$$

한계상태식의 확률변수들의 평균점에서 Taylor 전개를 이용하여 일차항(first order)까지만을 고려하여 한계상태방정식을 선형화한 후에, 평균에 대한 확률밀도함수의 이차(second-order) 모멘트인 분산을 고려하여 신뢰도지수나 파괴확률을 산정하는 것을 평균 일계이차모멘트법(Mean Value First-Order Second-Moment method, MV FOSM)라고 부른다.

평균 일계이차모멘트법은 평균점에서의 Taylor 전개를 이용하여 비선형 한계상태식을 선형화함에 따라, 동일한 역학현상에 대해 한계상태방정식을 다른 식으로 표현하면 파괴확률이 달라진다. 이러한 불변성의 결여현상이 평균 일계이차모멘트법의 가장 큰 단점인데 이러한 단점을 해결한 것이 개선된 일계이차모멘트법이다. 개선된 일계이차모멘트법은 파괴확률의 산정을 위하여 주어진 확률변수와 한계상태식을 서로 통계적으로 독립인 표준정규분포 확률변수의 공간에서 표현되도록 변환한 다음, 원점으로부터 가장 가까운 직선거리에 위치한 한계상태식상의 점을 계산하고 그 직선거리를 신뢰도지수로 취하고 이를 이용하여 파괴확률을 계산할 수 있다. 이 때, 신뢰도 지수의 산정을 위해 구해진 한계상태식상의 점은 한계상태식상에 존재하는 점 중에서 가장 파괴확률이 높은 점으로 Most Probable Failure Point or Design Point(MPFP)라고 불린다.

정규분포 확률변수는 정규분포의 평균  $\mu_i$ , 표준편차  $\sigma_i$ , 표준정규분포 확률변수  $u_i$ 로 표현되고 이 정규분포 확률변수를 한계상태방정식에 대입하고 비선형인 한계상태방정식을 MPFP에서 Taylor 전개하여 1차항까지 고려하면 다음과 같은 표준정규분포의 한계상태방정식을 얻을 수 있다.

$$u_i = \frac{(x_i - \mu_i)}{\sigma_i} \quad (2-10)$$

$$z(u) \approx \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial z}{\partial u_i} \right|_{u^*} (u_i - u_i^*) \quad (2-11)$$

신뢰도지수는 기하학적으로 원점에서 가장 가까운 파괴경계면 상의 점(MPFP)까지의 거리이므로 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

$$\beta = - \frac{\sum_{i=1}^n \left( \left. \frac{\partial z}{\partial u_i} \right|_{u^*} u_i^* \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \left. \frac{\partial z}{\partial u_i} \right|_{u^*} \right)^2}} \quad (2-12)$$

Hasofer와 Lind는 개선된 일계이차모멘트법의 MPFP는 신뢰도지수가 최적화되는 과정으로 고려하여 다음과 같은 단계별 변수값을 계산하는 방법을 제시하였다.

$$u^{k+1} = \frac{P_u^{kT} u^k - z(u^k)}{P_u^{kT} P_u^k} P_u^k \quad (2-13)$$

$$P_u^k = \left\{ \frac{\partial Z}{\partial u_1}, \frac{\partial Z}{\partial u_2}, \dots, \frac{\partial Z}{\partial u_n} \right\}^T \quad \text{at } u = u^k \quad (2-14)$$

신뢰도지수는 다음과 같다.

$$\beta = \sqrt{u^{*T} u^*} = - \frac{P_u^{*T} u^*}{\sqrt{P_u^{*T} P_u^*}} \quad (2-15)$$

신뢰도지수에 각 확률변수가 미치는 영향을 계량화할 수 있는 척도로서 민감도값이 사용되는데 그 값은 다음과 같은 형태이다.

$$\alpha = - \frac{P_u^{*T}}{\sqrt{P_u^{*T} P_u^*}} \quad (2-16)$$

### 2.2.2 내구성 해석

항만구조물의 염해를 평가하는 일반적인 방법은 염소이온의 침투해석을 수행해서, 철근 위치에서의 염소이온농도와 부식염소이온농도를 비교하여 침투에 의한 염소이온농도가 부식염소이온농도보다 클 경우에 철근이 부식되고 이 시점부터 구조물은 염해에 대한 저항성을 완전히 상실했다고 판단하는 것이다. 이러한 해석을 위해서는 염소이온의 침투 해석이 필요하고 다음과 같은 Fick의 확산 제2법칙을 이용하여 침투현상을 모델링한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_d \left[ \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] = D_d \nabla^2 C \quad (2-17)$$

일반적인 염소이온 침투에 대한 해석은 1차원 방향성 고려되고 또한, 확산기간동안의 평균적 특성치를 가지는 확산계수를 이용하여 해석을 수행하면 식 (2-17)의 해로 에러함수로 구성된 다음과 같은 방정식을 도출할 수 있다.

$$C = C_o \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right] \quad (2-18)$$

식 (2-18)에서 표면염소이온농도와 피복두께는 시방서에서 제시된 값이나 설계 또는 계측값을 사용할 수 있지만 확산계수는 콘크리트 특성에 따른 모델식이 필요하다. 염화물이온의 확산계수는 여러 모델식이 있지만 본 연구에서는 일반적으로 널리 사용되는 ACI의 Life 365의 모델식을 사용하기로 한다. Life 365의 모델식에서 재령 28일된 콘크리트의 확산계수와 재령보정계수는 다음과 같이 제시하고 있다.

$$D_{28} = 10^{-12.06 + 2.4w/cm} \quad (2-19)$$

$$D(t) = D_{28} \left( \frac{t_{28}}{t} \right)^n \quad (2-20)$$

$$n = 0.2 + 0.4 \left( \frac{\%FA}{50} + \frac{\%SG}{70} \right) \quad (2-21)$$

식 (2-18)의 확산계수는 Life 365에 의한 순간확산계수가 아니라 재령  $t$ 까지의 평균적인 의미의 확산계수이다. 이러한 확산계수를 구하기 위해서는 Life 365의 모델을 다음과 같이 변환시키는 것이 필요하다.

$$D_d = \frac{D_{28}}{1-n} \left( \frac{t_{28}}{t} \right)^n \quad t < t_c \quad (2-22)$$

$$D_d = D_{28} \left[ 1 + \frac{t_c}{t} \frac{n}{1-n} \right] \left( \frac{t_{28}}{t_c} \right)^n \quad t > t_c \quad (2-23)$$

## 2.3 FOSM법에 의한 염해 해석

### 2.3.1 염해해석에 일계이차모멘트법의 적용

염해에 의한 파괴는 철근부식이 발생하는 부식염소이온농도와 철근위치에서의 염소이온농도를 비교하여 부식유무에 따라 파괴를 판정하므로 다음과 같은 한계상태방정식을 구성할 수 있다.

$$Z(C_d, C_o, x, D_d) = C_d - C_o \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right] \quad (2-24)$$

이러한 한계상태방정식에 평균 일계이차모멘트법을 적용하기 위해서는 비선형 형태인 한계상태방정식을 선형화하는 것이 필요하다. 확률변수  $C_d$ ,  $C_o$ ,  $x$ ,  $D_d$ 의 평균값에서 Taylor 전개를 수행하고 전개된 식의 1차항까지를 고려하여 정리하면 다음과 같은 선형한계상태방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z(C_d, C_o, x, D_d) \approx & \frac{\partial Z}{\partial C_d} \Big|_{\text{mean value}} C_d + \frac{\partial Z}{\partial C_o} \Big|_{\text{mean value}} C_o + \frac{\partial Z}{\partial x} \Big|_{\text{mean value}} x + \frac{\partial Z}{\partial D_d} \Big|_{\text{mean value}} D_d \\ & + C_{d,\mu} - C_{o,\mu} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x_\mu}{2\sqrt{D_{d,\mu} t}} \right) \right] - C_{d,\mu} \frac{\partial Z}{\partial C_d} \Big|_{\text{mean value}} - C_{o,\mu} \frac{\partial Z}{\partial C_o} \Big|_{\text{mean value}} \\ & - x_{,\mu} \frac{\partial Z}{\partial x} \Big|_{\text{mean value}} - D_{d,\mu} \frac{\partial Z}{\partial D_d} \Big|_{\text{mean value}} \end{aligned} \quad (2-25)$$

한계상태방정식이 선형화되었으므로 식 (2-8)과 (2-9)를 이용하여 평균과 표준편차를 구할 수 있고 이렇게 계산된 평균과 표준편차를 이용하면 신뢰도지수를 구할 수 있고 파괴확률도 식 (2-6)을 이용하면 쉽게 계산할 수 있다.

한편, 개선된 일계이차모멘트법을 적용하기 위해서는 정규분포로 되어있는 한계상태 염해방정식을 다음과 같은 변환식을 적용하여 표준정규분포식으로 변환시켜야 한다.

$$C_d = C_{d,\mu} (1 + C_{d,cov} u_{C_d}) \quad (2-26)$$

$$C_o = C_{o,\mu} (1 + C_{o,cov} u_{C_o}) \quad (2-27)$$

$$x = x_{,\mu} (1 + x_{,cov} u_x) \quad (2-28)$$

$$D_d = D_{d,\mu} (1 + D_{d,cov} u_{D_d}) \quad (2-29)$$

Hasofer와 Lind가 제안한 식들을 이용하면 개선된 일계이차모멘트법의 적용을 위한 MPFP와 신뢰도 지수를 쉽게 구할 수 있다. 식 (2-11)의 한계상태방정식의 미분값은 다음의 식(2-30) ~ (2-33)으로 구할 수 있고, 이 값들을 이용하여 식 (2-10)에서 변수값들을 계산할 수 있다. 식 (2-12)로 계산된 신뢰도 지수는 반복과정을 통해 정해에 수렴하게 된다.

$$\frac{\partial Z}{\partial u_{C_d}} = \frac{\partial Z}{\partial C_d} \frac{\partial C_d}{\partial u_{C_d}} = C_{d,\mu} C_{d,cov} \quad (2-30)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial u_{C_o}} = \frac{\partial Z}{\partial C_o} \frac{\partial C_o}{\partial u_{C_o}} = - \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right] C_{o,\mu} C_{o,cov} \quad (2-31)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial u_x} = \frac{\partial Z}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial u_x} = \left( C_o \frac{1}{\sqrt{\pi D_d t}} e^{-\left( \frac{x}{2\sqrt{D_d t}} \right)^2} \right) x_{,\mu} x_{,cov} \quad (2-32)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial u_{D_d}} = \frac{\partial Z}{\partial D_d} \frac{\partial D_d}{\partial u_{D_d}} = \left( - \frac{C_o x}{2\sqrt{\pi t}} e^{-\left( \frac{x}{2\sqrt{D_d t}} \right)^2} D_d^{-1.5} \right) D_{d,\mu} D_{d,cov} \quad (2-33)$$



### 2.3.2 FOSM법의 유효성

일계이차모멘트법들의 유효성을 검증하기 위해서 일계이차모멘트법에 의해서 계산된 파괴확률과 Monte Calo Simulation에 의해 구한 파괴확률을 비교하고자 한다. 해석에 필요한 한계상태방정식의 4 가지 변수는 다음과 같이 가정한다.

$$\begin{aligned}
 C_d &= 1.2 \text{ kg/m}^3 \text{ (콘크리트 표준시방서 기준)}, & C_{d,\text{cov}} &= 0.1 \\
 C_o &= 13 \text{ kg/m}^3 \text{ (비말대 조건)}, & C_{o,\text{cov}} &= 0.1 \\
 x &= 5 \sim 12 \text{ cm}, & x_{,\text{cov}} &= 0.1 \\
 D_d &= 0.2 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}, & D_{d,\text{cov}} &= 0.1
 \end{aligned}$$

먼저 개선된 일계이차모멘트법은 MPFP를 찾기 위해서 수차례의 계산반복이 필요한데 이러한 반복계산은 계산시간의 증가로 이어질 수 있으므로 반복연산의 횟수를 파악하는 것이 필요하다. 피복두께가 7cm일 때의 반복에 따른 신뢰도지수를 재령 30년, 65년, 100년에서 구해보면 그림 2-1과 같다. 그림에 나타난 바와 같이 반복횟수 8회 미만에서 신뢰도지수는 특정값에 수렴함을 알 수 있다.

그림 2-2에 나타난 바와 같이, MCS에 의한 결과와 개선된 일계이차모멘트법에 의한 파괴확률은 잘 일치하고 그 오차는 0.1%미만이다. 즉, 개선된 일계이차모멘트법은 염해에 대한 파괴확률이나 신뢰도지수의 산정에 충분한 합리성을 가지고 적용될 수 있음을 알 수 있다. 평균 일계이차모멘트법의 결과와 MCS의 결과는 파괴확률 50%이하의 영역에서 5~10%의 오차를 나타내고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 파괴확률의 계산은 파괴확률이 50%이하인 영역에서 계산되므로 개선된 일계이차모멘트법은 충분한 정확성을 가진 염해에 대한 신뢰성 해석법임을 확인할 수 있다. 또한, MCS법은 수만 번의 반복계산이 필요하지만 개선된 일계이차모멘트법은 10회 미만의 반복계산으로 정해에 가까운 값을 제시하므로 MCS법보다 편리성과 신속성이 크다는 사실을 알 수 있다.

결론적으로 염해의 신뢰성 해석시에 평균 일계이차모멘트법을 적용하는 것은 염해식의 비선형성으로 인해 오차가 발생할 가능성이 크지만 개선된 일계이차모멘트법은 거의 MCS와 같은 결과를 제시한다. 따라서, 개선된 일계이차모멘트법으로 염해에 대한 신뢰성 해석을 수행하면 MCS보다 편리하고 신속하게 신뢰도지수나 파괴확률을 계산할 수 있다.

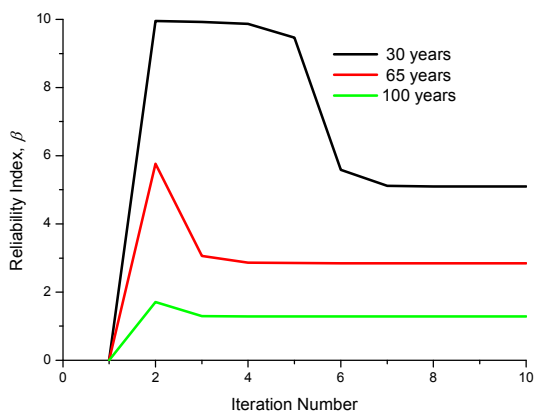


그림 2-1 AFOSM법의 수렴속도

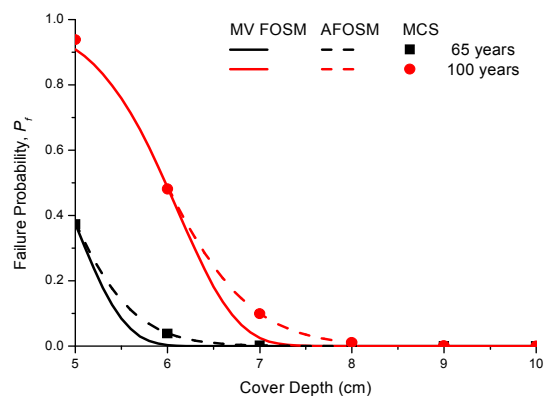


그림 2-2 FOSM과 MCS법의 비교

## 2.4 현장 비파괴 검사시스템에 의한 내구성 평가인자 검토

### 2.4.1 개요

정밀안전점검과 정밀안전진단에서 비파괴 검사법들에 의해 측정되는 재료물성치나 구조변수는 피복 두께와 강도 등이고 코아를 채취하여 염소이온농도 등 측정하는 경우는 많지 않다. 이러한 경우에 얻을 수 있는 자료는 피복두께와 염소이온확산계수(강도로 추정)에 대한 추정치이다. 이러한 변수값들의 변동성을 살펴보면 측정되는 결과가 파괴확률이나 신뢰도지수에 미치는 영향을 추정할 수 있다.

개선된 일계이차모멘트법을 이용하면 해석변수들의 평균값과 변동성의 변화에 따른 신뢰도지수(또는 파괴확률)의 변화를 MCS법보다는 손쉽게 계산할 수 있다. 또한, 식 (2-16)을 사용하면 각 변수들이 신뢰도지수에 미치는 민감도를 정량적으로 계산할 수 있다. 민감도가 계산되면 일반적으로 콘크리트 표 준시방서 등의 하중저항계수설계법에서 사용되는 저항감소계수와 하중증가계수를 구할 수 있는데, 본 연구에서는 앞 절의 FOSM법의 유효성 고찰에서 사용된 한계염소이온농도, 표면염소이온 농도, 염소이온 확산계수에 대한 값과 피복두께 8 cm인 경우의 각 변수들의 민감도를 계산하고 이를 바탕으로 신뢰도지수가 1.28(파괴확률 10%)일 때의 각 변수들의 부분안전계수를 산출해 보았다(그림 2-3). 변동계수가 증가하면 변동성이 증가하므로 같은 신뢰도지수를 얻기 위해 한계염소이온농도와 피복두께에 대한 부분안전계수는 감소하고 표면염소이온농도와 염소이온 확산계수의 부분안전계수는 그림 2-3에 나타난 바와 같이 증가한다. 변동계수의 변화에 따라 계수의 변화율이 가장 큰 것은 피복두께이다. 즉, 피복 두께의 변동성에 따라 신뢰도지수의 변화율이 가장 크고 표면염소이온 농도의 변동성이 신뢰도지수에 미치는 영향이 가장 작다. 그러나, 염해 평가식에 사용되는 4가지 변수들의 변동계수는 제반 여건에 따라서 달라지므로 이를 감안하여 감소계수나 증가계수를 선택할 필요가 있다.

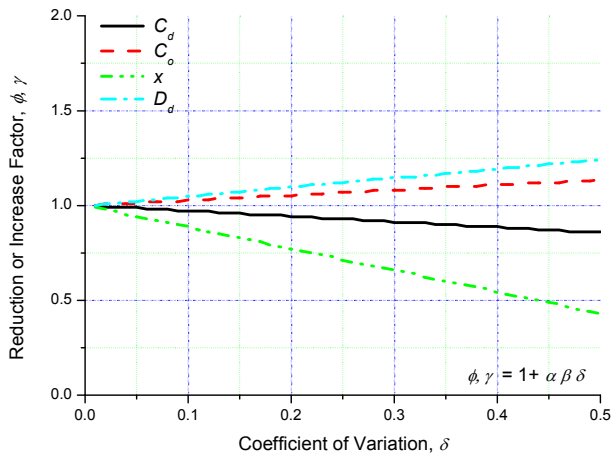
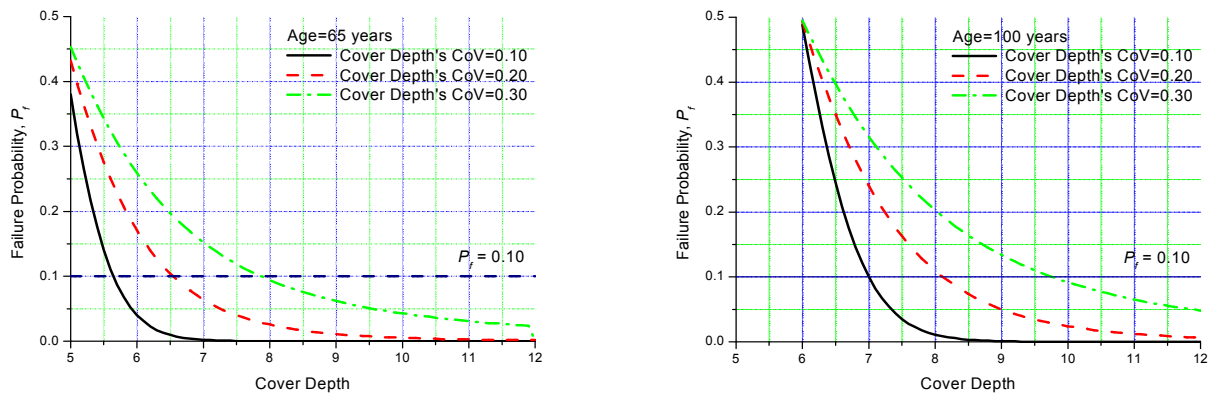


Fig. 3 변동계수에 따른 내구성 변수들의 부분안전계수

### 2.4.2 피복두께

현장의 항만구조물을 점검하면 철근부식이 일어나 피복이 탈락한 지점을 관찰할 수 있는데, 이러한 내구성 파괴 영역들의 공통점 중의 하나가 설계 피복두께에 비해 얇은 철근 피복을 가지고 있다는 점이다. 즉, 염해에 의한 내구성 파괴의 많은 부분이 시공상의 부주의로 특정부분의 피복두께가 설계치

보다 작게 구조물이 만들어 지거나 피복두께가 적절하게 설계되지 못해서 나타난다. 이러한 피복두께의 변동성에 따른 신뢰도지수의 변화를 개선된 일계이차모멘트법을 바탕으로 고찰하였다. 앞 절의 FOSM법의 유효성 고찰에서 사용된 한계염소이온농도( $1.2\text{kg/m}^3$ , 변동계수=0.1), 표면염소이온농도( $13\text{kg/m}^3$ , 변동계수=0.1), 염소이온 확산계수( $2 \times 10^{-9}\text{cm}^2/\text{s}$ , 변동계수=0.1)에 대한 평균값과 변동계수를 사용하고 피복두께를 5~12 cm로 변화시키고 피복두께의 변동계수가 0.1에서 0.3으로 증가할 때의 파괴확률을 구하여 그림 2-4에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 변동계수가 0.1에서 0.3으로 증가하면 파괴확률을 10%이하로 유지하기 위해서 피복두께가 재령 65년에는 5.6 cm에서 7.9 cm로, 재령 100년에는 7.0 cm에서 9.8 cm로 증가해야 함을 알 수 있다. 즉, 변동계수의 증가에 따라 필요 피복두께가 급격히 증가함으로 내구성 설계에서 피복두께를 산정하는 것도 중요하지만 시공관리를 통한 피복두께의 시공오차를 줄이는 것도 매우 중요함을 확인할 수 있다. 피복두께의 변동성에 대한 데이터가 축적된다면 국내의 현장특성에 적합한 피복두께의 부분안전계수를 본 모델을 통해 손쉽게 추출할 수 있고, 시공관리 능력이 향상됨에 따라 이러한 부분안전계수를 주기적으로 최적화할 수 있을 것이다.



(a) 재령 65년

(b) 재령 100년

그림 2-5 피복두께에 따른 파괴확률 변화

### 2.4.3 염소이온 확산계수

피복두께와 함께 염해를 제어할 수 있는 가장 중요한 요인이 염소이온 확산계수의 감소를 통한 염소이온침투의 제어이다. 앞의 식 (2-19)에서 (2-21)에 언급된 바와 같이 염소이온확산계수는 물-시멘트비, 혼화재량, 재령 등의 함수이고 이러한 값들의 변동에 따라 확산계수값도 변화한다. 또한, 확산계수의 측정법에 따라 확산계수의 변동성도 크다. 이러한 측면을 종합하면 염소이온 확산계수는 다른 변수들보다 큰 값의 변동계수값을 가질 가능성이 있다. 따라서, 본 연구에서는 염소이온 확산계수의 변동성이 0.1에서 0.6로 증가할 때의 파괴확률의 변화를 고찰하였다. 한계염소이온농도( $1.2\text{kg/m}^3$ ), 표면염소이온농도( $13\text{kg/m}^3$ ), 피복두께(7cm 또는 8cm)는 앞 절의 값들을 이용하고 이 값들의 변동계수는 0.1로 고정하였다. 염소이온 확산계수가  $1 \times 10^{-9}\text{cm}^2/\text{s}$ 과  $10 \times 10^{-9}\text{cm}^2/\text{s}$ 사이에서 변화할 때의 파괴확률변화는 그림 2-6과 같다.

그림에 나타난 바와 같이 변동성이 증가하면 파괴확률을 0.1보다 작게 유지하기 위해서 염소이온 확산계수가 작아져야 함을 알 수 있다. 재령 65년에서 피복두께가 8cm이고 변동계수가 0.1인 경우에는  $4.0 \times 10^{-9}\text{cm}^2/\text{s}$ 의 염소이온 확산계수로 파괴확률 10%를 담보할 수 있지만 변동계수가 0.6으로 증가하면  $2.8 \times 10^{-9}\text{cm}^2/\text{s}$ 의 염소이온 확산계수가 필요함을 알 수 있다. 그림 2-5의 확산계수 변화도를 이용하면

물-결합재비 35%일 때에는 플라에아시 대체율이 40%, 물-결합재비가 40%일 때에는 플라에아시 대체율이 50%정도이면 변동계수가 0.1이고 피복두께가 8cm인 구조물의 부식확률을 10% 이내로 제어할 수 있지만 변동계수가 0.6으로 증가하면 물-결합재비가 35%일 때에는 플라에아시 대체율을 50%로 증가시키거나 물-결합재비가 40%인 경우에는 내염도장 등을 도입해야 한다. 재령 100년인 경우에는 파괴확률을 10%미만을 유지하기 위해서 재령 65년보다 작은 염소이온 확산계수가 필요함을 그림 2-6에서 확인할 수 있다. 그러나, 변동계수의 변화에 따른 파괴확률의 변화는 재령 65년보다 작은 것을 확인할 수 있다.

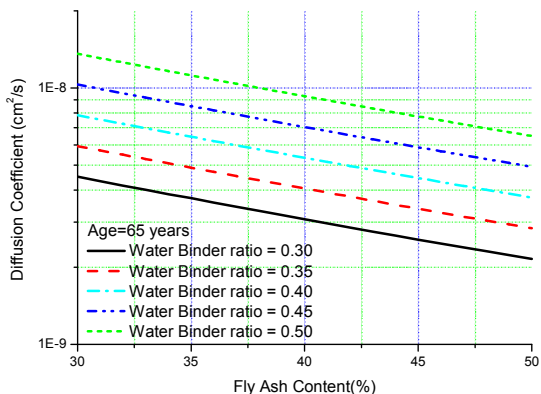
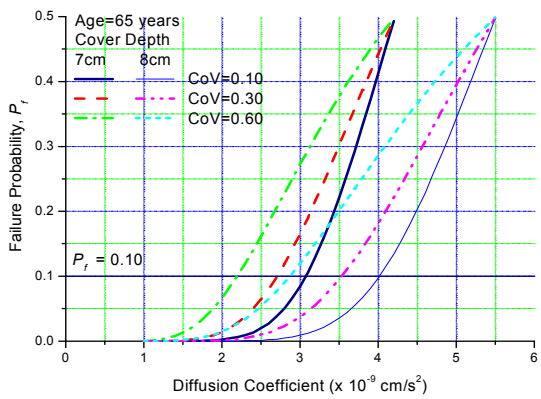
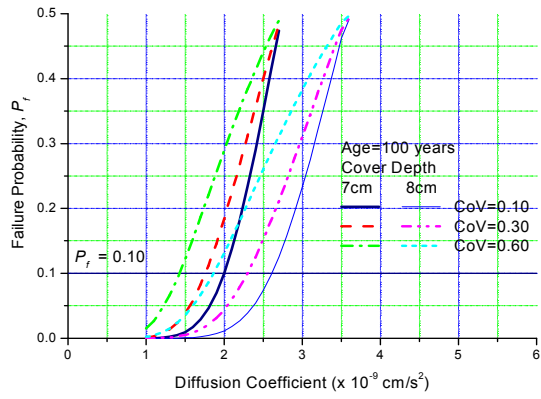


그림 2-5 물-결합재비와 플라에아시 치환율에 따른 염소이온 확산계수



(a) 재령 65년



(b) 재령 100년

Fig. 2-6 확산계수에 따른 파괴확률 변화

### 3. 표면처리제 모델의 개선

#### 3.1 개요

표면마감제는 크게 코팅제(coating), 실러(sealer), 침투제(penetrant) 등으로 구분될 수 있다. 코팅제는 콘크리트 표면에 물리적인 보호층을 생성시키는 것이다. 실러는 코팅제처럼 콘크리트 표면에 물리적인 보호층을 생성시킬 뿐만 아니라, 실러가 표면내부 콘크리트의 공극을 채워 2중의 흡수방지층을 형성한다. 침투제는 표면에는 뚜렷한 보호층을 형성하지 않고 콘크리트의 내부로 침투하여 내부흡수방지층을 형성하는 것이다. 코팅제와 실러는 물리적인 보호층이 첫 번째 목적이고, 침투제는 방수 등을 위해 공극매립을 통한 내부흡수방지층의 형성이 주목적이다. 코팅제는 건조형태로부터 열가소성형과 반응경화형으로 나누어 진다. 전자는 마감재 성분 일부가 증발등의 물리적 변화만으로 표면도막을 형성하는 것이다. 후자는 마감재 성분들이 서로 반응하거나 혹은 대기 중 수분 등과 화학반응을 일으켜 도막을 형성하는 것으로 폴리우레탄 수지도료 등이 이에 해당한다. 실러에는 아크릴성분의 실러와 폴리우레탄 성분의 실러로 나눌 수 있으며, 대표적인 침투제로는 실란계 화합물을 들 수 있다.

본 실험에서는 일반적으로 국내에 시판되는 표면처리제 중에서 코팅제, 실러, 침투제 각각 1종에 대해서 실험을 수행하였다.

#### 3.2 실험방법

RCPT시험법은 AASHTO T277실험 장치와 같은 원리로 실험되었으며, 아래의 그림은 실험 개요를 나타낸다. 본 실험에서는 동일한 콘크리트 시험체(∅10×5cm)를 사용하였으며, 30V의 전압을 8시간동안 걸어 전기 영동현상을 발생시켜 음극에서 양극으로 염화물이온(Cl-)을 침투시킨다. 전극은 stainless wire mesh를 사용하였으며, 옆쪽은 방수처리를 하였다.

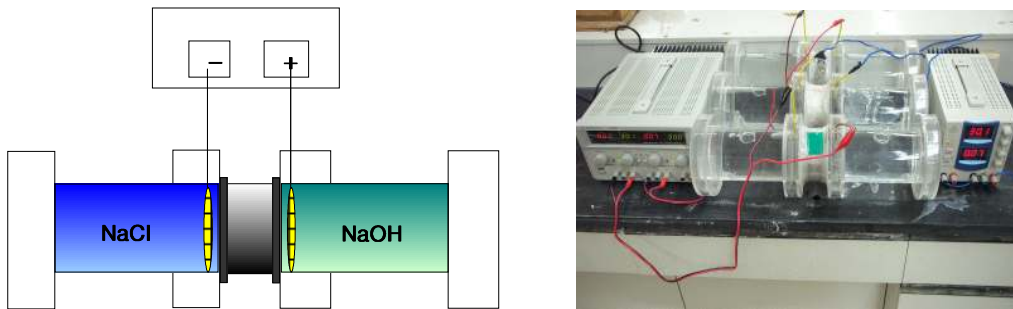


그림 3-1 RCPT test diagram

질산은 변색법에 의해 측정된 침투 깊이를 통하여 Browne, Crank 및 Laylor가 제시한 식으로 확산계수를 결정하였다. 확산 계수 결정에 사용된 식은 다음과 같다.

$$D = \frac{RTL}{zFU} \times \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (3-1)$$

여기서,  $\alpha = 2\sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \times \text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2C_d}{C_0}\right)$  이다.

#### 3.3 실험결과 및 고찰

실험에 의한 표면처리제와 콘크리트의 염소이온확산계수는 다음의 그림과 같다.

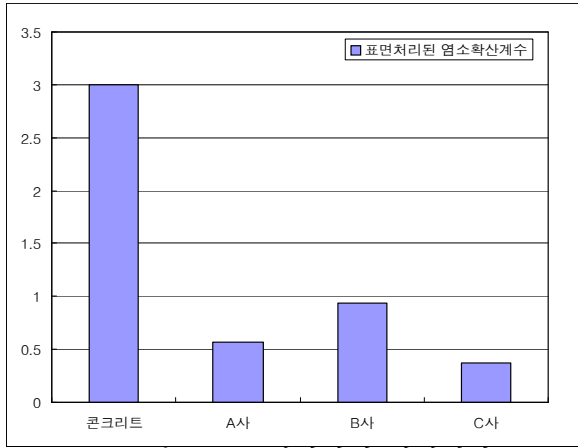


그림 3-2 표면처리제 실험결과

기존에 개발된 다음과 같은 모델식을 이용하면 표면처리제의 확산계수를 구할 수 있다.

$$\frac{T_t}{D_t} = \frac{T_{st}}{D_{st}} + \frac{T_c}{D_c} \quad (3-2)$$

여기서,  $D_t$ ,  $D_{st}$ ,  $D_c$ : 콘크리트와 표면마감재 전체, 표면마감재, 콘크리트의 확산계수  
 $T_t$ ,  $T_{st}$ ,  $T_c$ : 콘크리트와 표면마감재전체, 표면마감재, 콘크리트의 두께

이렇게 구한 표면처리제의 확산계수를 재령에 따라서 열화되고 이렇게 열화되는 표면처리제의 열화 정도는 다음과 같은 식으로 모델링하였다.

$$D_{st,t} = D_{st,i} + (D_{c,i,10y} - D_{st,i}) \left( \frac{year}{10} \right)^m \quad (3-3)$$

여기서,  $D_{st,t}$ : 재령 t에서의 표면마감재의 확산계수  
 $D_{st,i}$ : 표면마감재 적용시점의 표면마감재 확산계수  
 $D_{c,i,10y}$ : 표면마감재 적용후 10년이 지난 시점에서의 표면마감재 확산계수  
 $year$ : 표면마감재 적용후 경과재령 (년)  
 $m$ : 비례상수

앞 절에서 내구성 해석의 간편성과 신속성을 위해서 일계이차모멘트법을 적용하였다. 이러한 모델식을 표면처리제에 대해서도 적용하기 위해서는 한계상태방정식에 사용되는 확산계수에 표면처리제의 영향이 고려되는 형태로 표면처리제 모델링이 변화되어야 한다. 이를 위해서 재령 y년동안의 평균표면처리제의 평균확산계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{D_{st}} = \frac{1}{y} \int_0^y \left[ D_{st,i} + (D_{c,i,10y} - D_{st,i}) \left( \frac{year}{10} \right)^m \right] dy = D_{st,i} + \frac{(D_{c,i,10y} - D_{st,i})}{1+m} \left( \frac{year}{10} \right)^m \quad (3-4)$$

이러한 식을 이용하면 표면처리제가 적용된 콘크리트 구조물의 전체확산계수는 다음과 같다.

$$D_t = \frac{D_c D_{st}}{D_c T_{st} + D_{st} T_c} T_t \quad (3-5)$$

이렇게 구한 확산계수를 다음과 같은 한계상태방정식에 대입하면 표면처리제의 확산계수 변화에 따른 신뢰도지수를 FOSM법을 이용하여 신속하고 간편하게 구할 수 있다.

$$Z(C_d, C_o, x, D_t) = C_d - C_o \left[ 1 - \text{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_t t}} \right) \right] \quad (3-6)$$

## 4. 사용자 중심 프로그램 개발

### 4.1 GUI 기반 모델

AFOSM 기반으로한 내구성 해석 프로그램을 User가 손쉽게 사용하도록 GUI 인터페이스를 도입하였다. 신뢰성 이론을 기반으로한 내구성 해석을 몇가지의 변수입력으로도 손쉽게 결과를 알 수 있도록 하였다.

입력변수로는 목표신뢰도지수, 최대염소이온농도와 그 변동계수, 표면염소이온농도와 그 변동계수, 피복두께의 범위와 그 변동계수, 확산계수와 그 변동계수이다. 이러한 값들을 대입하면 아래의 그림과 같이 손쉽게 신뢰도지수와 파괴확률을 구할 수 있다.

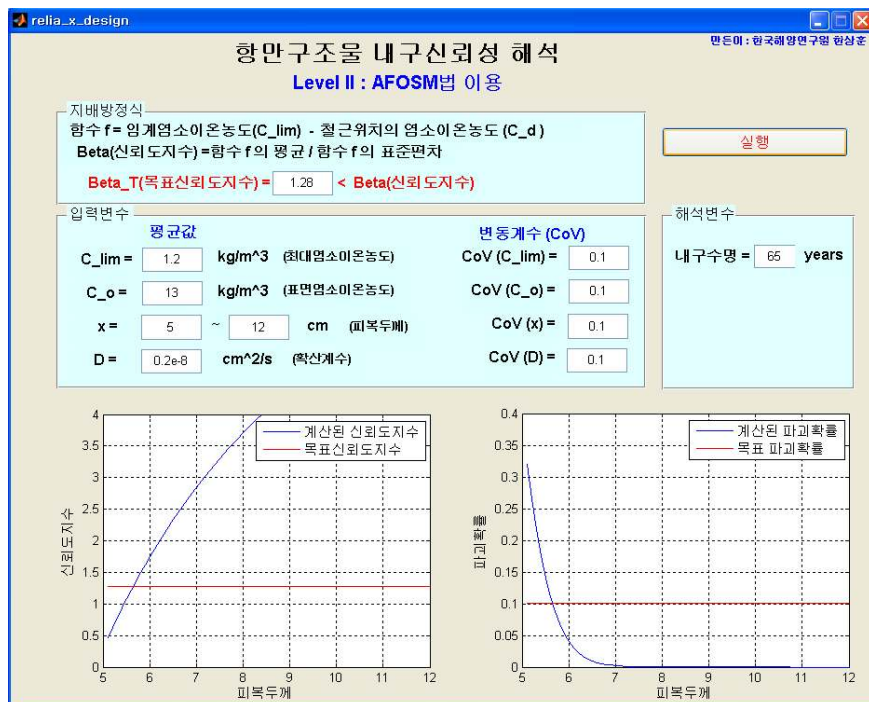
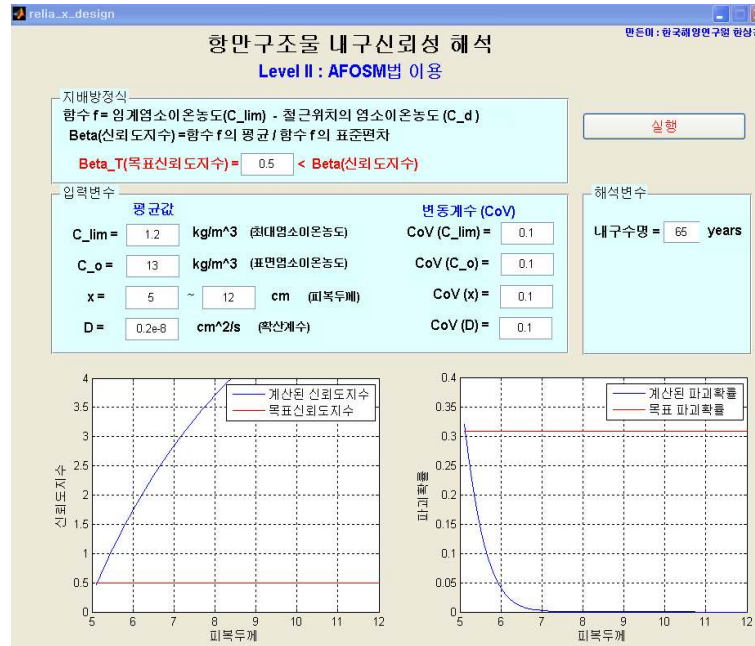


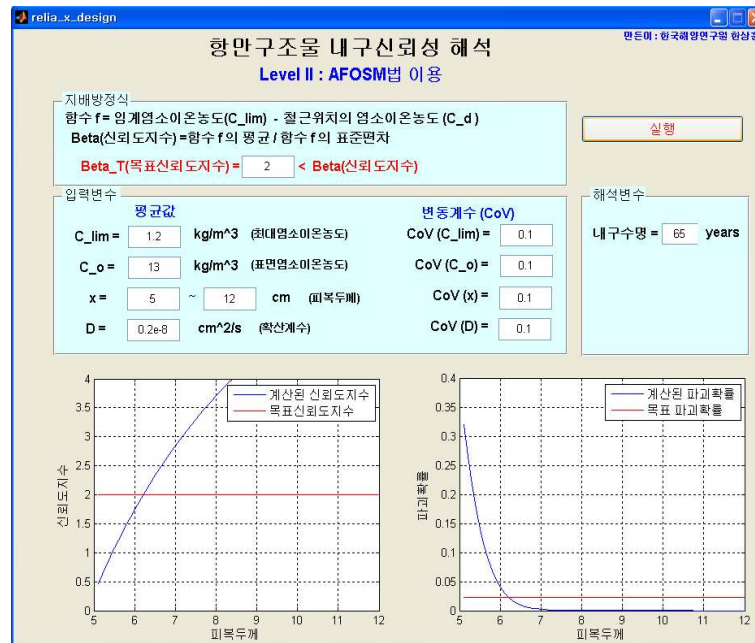
그림 4-1 AFOSM 기반 내구신뢰성 해석

## 4.2 내구성 해석 예

프로그램은 일반적인 기본값으로 그림 4-1과 같은 값을 제시하고 있다. 목표신뢰도지수를 1.28(파괴 확률 10%에 해당)0.5나 2.0으로 변환시키면 아래와 같이 목표신뢰도지수와 목표파괴확률이 변화한다.



(a) 목표파괴확률 = 0.5

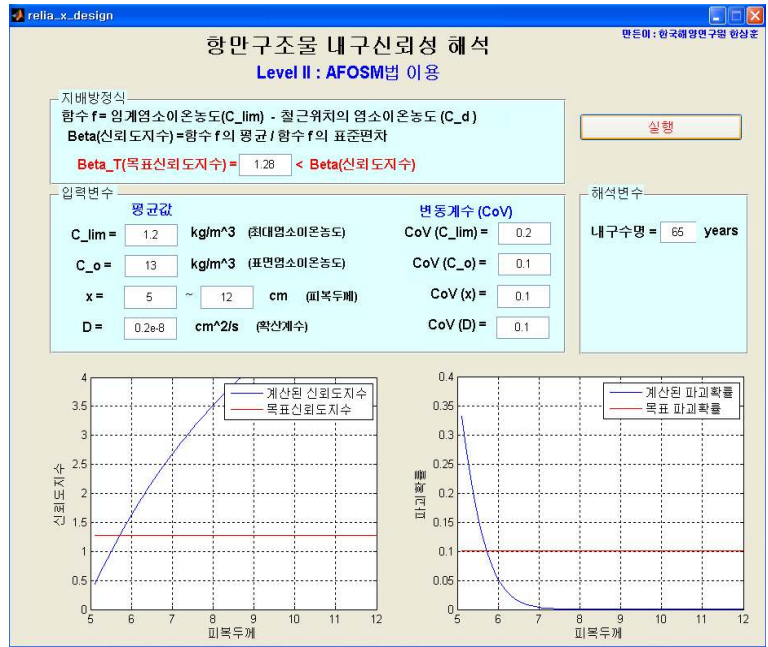


(b) 목표파괴확률 = 0.5

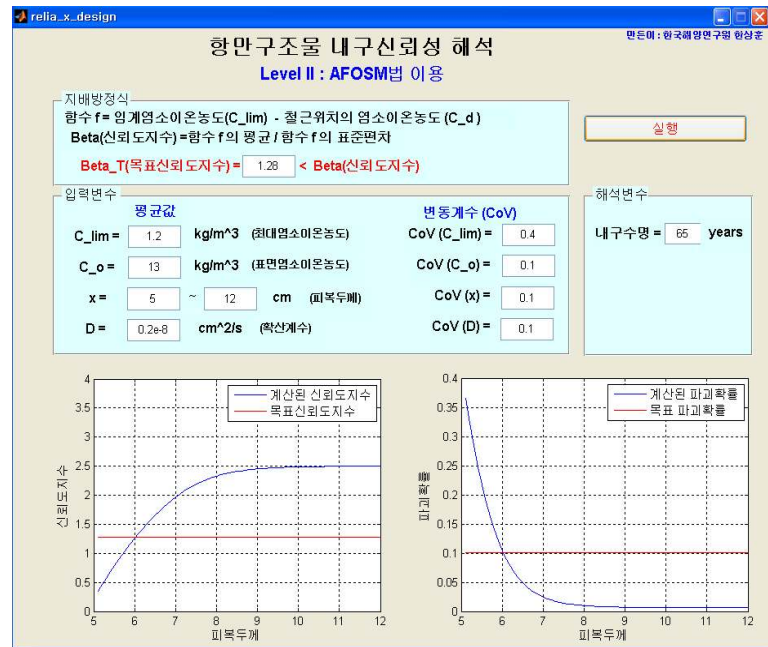
그림 4-2 목표파괴확률 변화



일반적으로 최대염소이온농도는 시방서에서 제시하고 있는  $1.2 \text{ kg/m}^3$ 을 사용함으로 프로그램을 초기값을 그대로 이용할 수 있다. 그러나, 최대염소이온농도에 대한 변동계수값은 해석자에 따라 다른 값들을 사용하는데, 변동계수가 0.2에서 0.4으로 증가하면 목표파괴확률을 위한 피복두께가 증가함을 관찰할 수 있다.

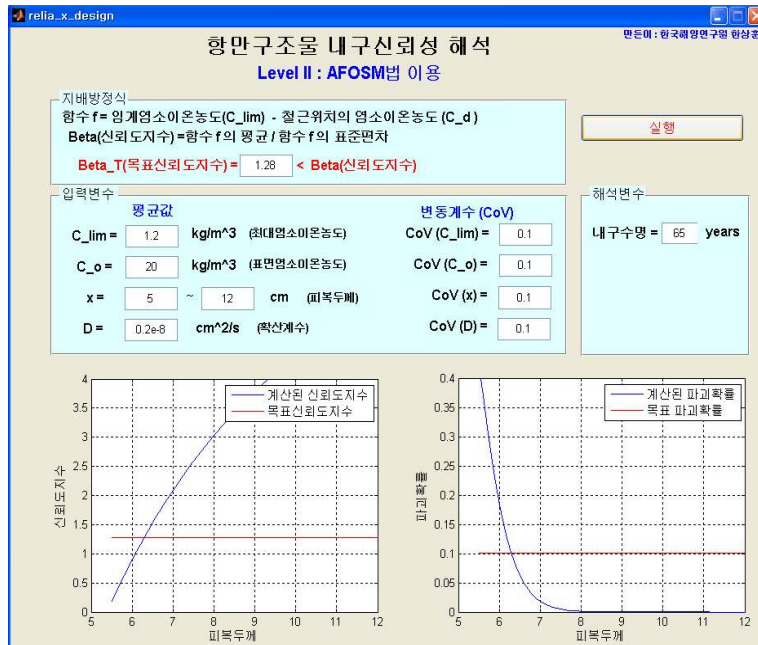


(a) 최대염소이온농도 변동계수 = 0.2

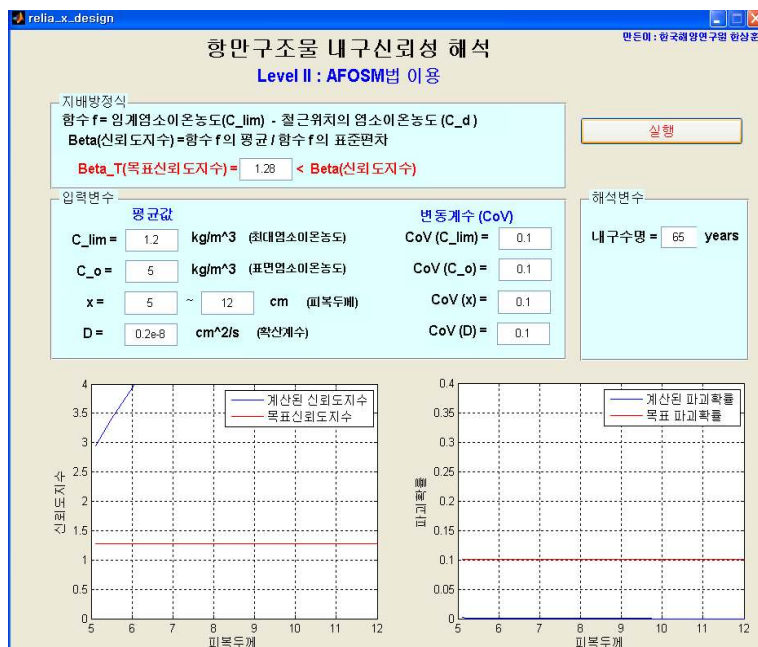


(b) 최대염소이온농도 변동계수 = 0.4  
그림 4-3 최대염소이온농도 변동계수 변화

표면염소이온농도는 노출환경에 따라 다양한 값들이 적용되는데, 서해안의 간만대와 비말대에 해당되는  $20 \text{ kg/m}^3$ 과  $5 \text{ kg/m}^3$ 의 값들에 대한 해석을 수행해 보았다. 표면염소이온의 변화에 따른 급격한 신뢰도지수와 파괴확률 변화를 관찰할 수 있다. 특히, 표면염소이온농도가  $5 \text{ kg/m}^3$ 의 인 경우에는 내구성 파괴 가능성이 거의 없음을 알 수 있다.



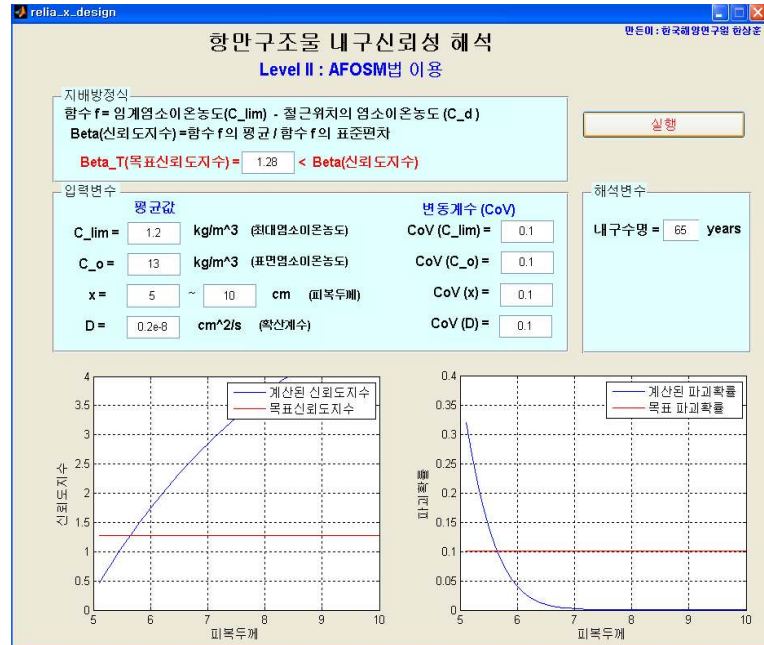
(a) 표면염소이온농도 =  $20 \text{ kg/m}^3$



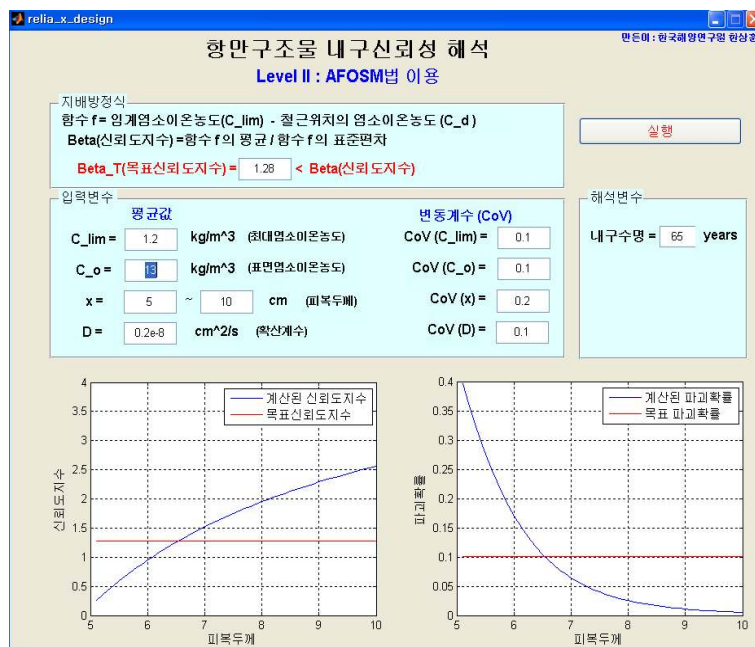
(b) 표면염소이온농도 =  $5 \text{ kg/m}^3$

그림 4-4 표면염소이온농도 변화

피복두께는 내구성해석에서 가장 중요한 요소이다. 이러한 피복두께의 변동계수에 따라, 아래의 그림과 같이 파괴확률이 급격히 변한다. 즉, 피복두께의 변동계수가 0.1에서 0.2로 변하면 목표파괴확률을 달성하기 위한 피복두께가 5.5 cm에서 6.5 cm로 증가함을 관찰할 수 있다.



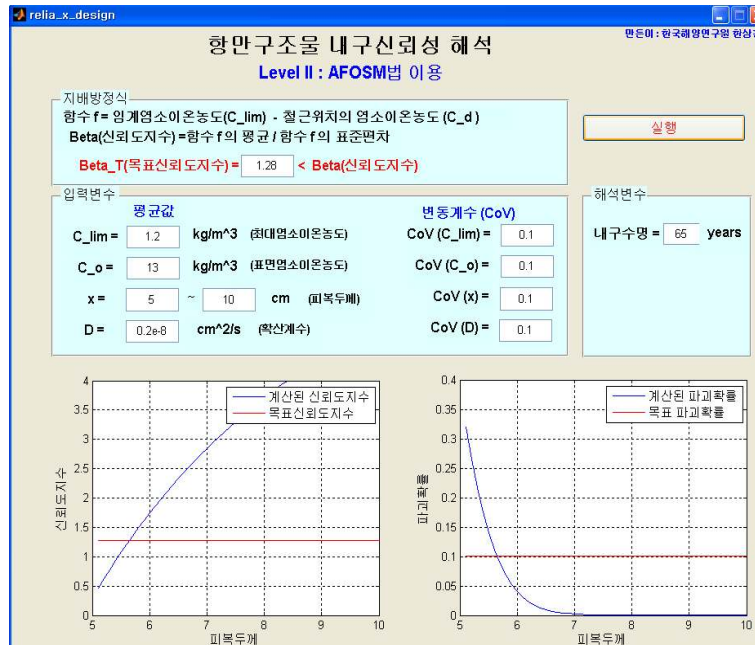
(a) 피복두께 변동계수 = 0.1



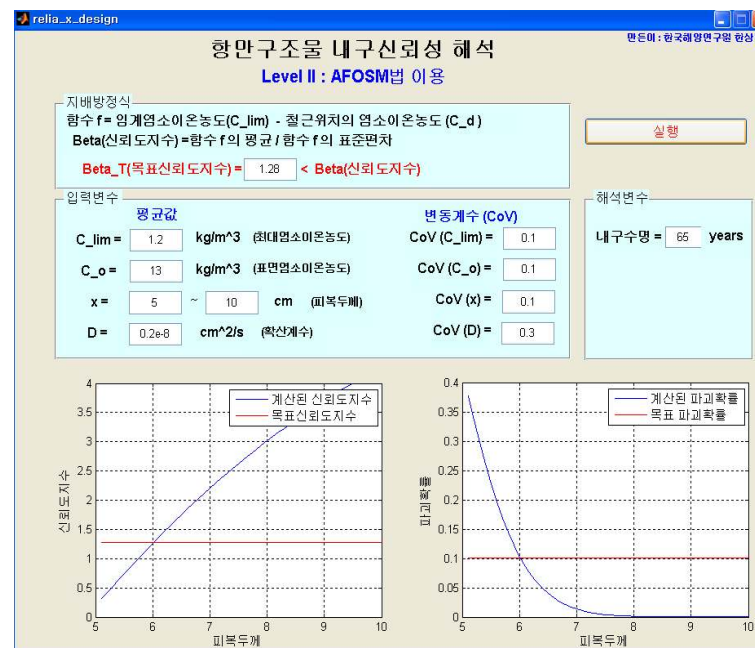
(b) 피복두께 변동계수 = 0.2

그림 4-5 피복두께 변동계수 변화

아래의 그림은 염소이온확산계수의 변동에 따른 파괴확률변화를 나타내고 있다. 변동계수의 증가에 따라 파괴확률의 증가를 관찰할 수 있다.



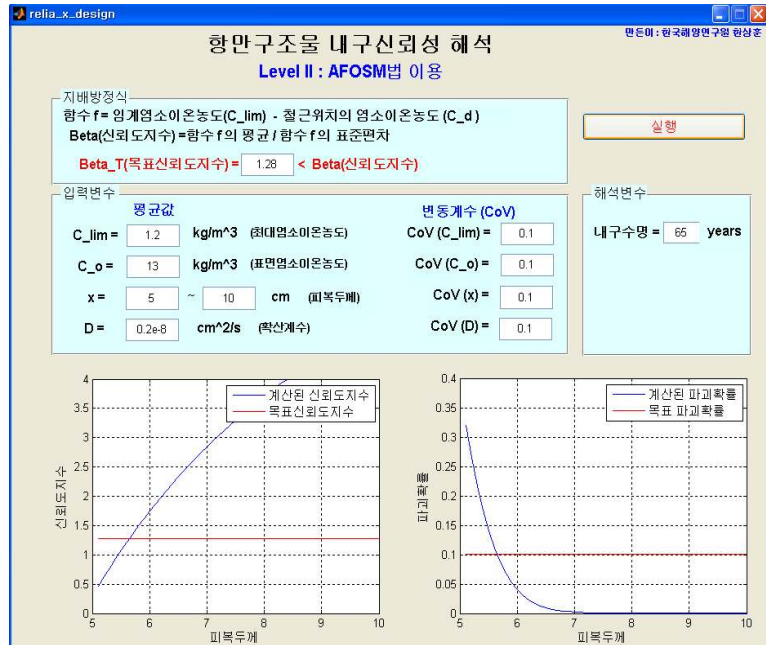
(a) 염소이온확산계수 변동계수 = 0.1



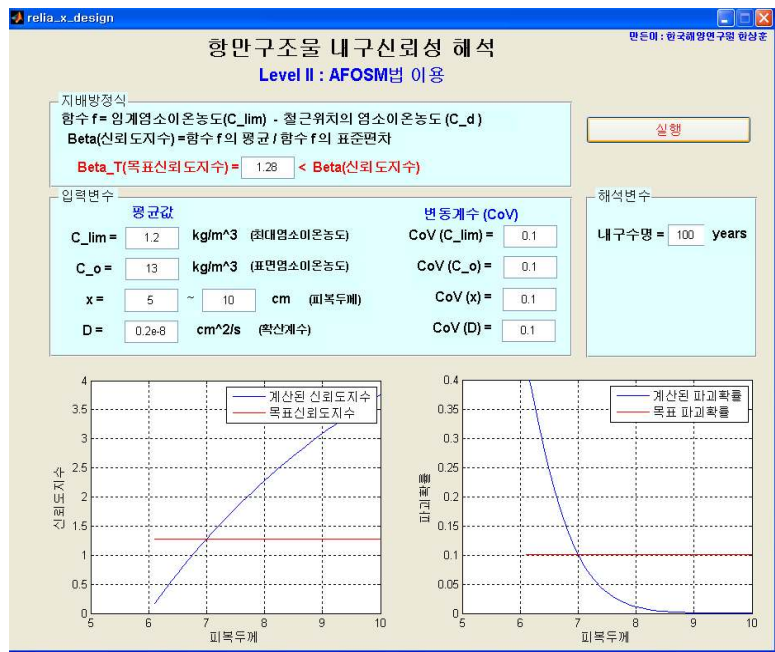
(b) 염소이온확산계수 변동계수 = 0.2

그림 4-6 염소이온확산계수 변동계수 변화

내구등급에 따라 내구수명은 30, 65, 100년으로 나뉜다. 아래의 그림은 내구수명이 65년과 100일때의 파괴확률과 필요 피복두께를 나타내고 있다. 아래의 예제에서는 내구수명이 65년에서 100으로 증가하기 위해 피복두께가 5.5에서 7.0으로 증가시키는 것이 필요함을 알 수 있다.



(a) 내구수명 = 65년



(b) 내구수명 = 100년  
그림 4-7 내구수명 증가

## 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>표면처리제에 따른 내구성 해석 시스템 개발</li> <li>균열존재시의 내구성 해석 시스템 개발</li> <li>현장실험결과를 이용한 내구성 해석 시스템 개발</li> </ul>	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>표면처리제의 염소이온침투에 대한 저항성을 고려할 수 있는 수치 모델 개발</li> <li>기존에 개발된 염소이온 해석 시스템에 표면처리제의 영향을 도입하여 프로그래밍</li> <li>수치모델을 통해 표면처리제의 각 영향인자가 염소이온침투에 미치는 영향을 파악</li> <li>균열의 존재가 염소이온침투에 미치는 영향을 수학적으로 모델링</li> <li>기존에 개발된 염소이온 해석 시스템에 균열이 미치는 영향을 프로그래밍</li> <li>수치모델을 통해 균열특성이 염소이온침투에 미치는 영향을 파악</li> <li>현장실험결과를 통한 내구성 해석 시스템의 개발</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>현장비파괴 검사시스템을 기반으로한 내구성 평가모델의 개발</li> <li>현장비파괴 검사시스템에 의한 내구성 평가인자 검토</li> <li>기개발된 표면처리제 모델 개선</li> </ul>	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>현장비파괴 검사 데이터를 이용하여 항만구조물의 내구신뢰성을 평가할 수 있는 간편해석 알고리즘 개발</li> <li>현장비파괴 검사시스템 데이터를 이용한 내구성 평가 프로그램 개발</li> <li>항만구조물의 내구성 평가 인자들의 내구신뢰성 관점에서의 민감도 분석</li> <li>현장비파괴 검사시스템에 의해 측정되는 재료물성치 인자들을 분석하고 측정되는 물성치의 내구성평가 적용가능성 평가</li> <li>시판 중인 표면처리제에 대한 내구성 개성 효과 검증 실험</li> <li>기존 개발된 모델링의 개선</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>개발된 해양/항만 구조물 내구성 해석 시스템 지침서 개발</li> </ul>	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>사용자 지향 형태로 프로그램 개선</li> <li>개발된 프로그램의 사용을 위한 매뉴얼 개발</li> </ul>

## 2. 연구개발성과

과제	구분	논문내용
<p style="text-align: center;">해양/항만 구조물의 건전도 평가기법 개발</p>	<p style="text-align: center;">국내 학술발표 논문</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 한상훈, 박우선, 콘크리트 구조물 내구성에 대한 표면처리제 영향의 평가 모델 개발, 한국구조물진단유지관리공학회 가을학술발표회 논문집, 2007</li> <li>• 한상훈, 박우선, 시멘트페이스트의 탄산화에 미치는 온도의 영향, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 가을학술발표회 논문집, 2007</li> </ul>
	<p style="text-align: center;">국제 학술발표 논문</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sang-Hun Han, Woo-Sun Park, Evaluation of Carbonation-induced Corrosion Initiation for Coastal Concrete Structure, NUCPERF 2009</li> <li>• Sang-Hun Han, Reliability assessment of corrosion initiation of harbor concrete structure using FOSM, Advances in Fracture and Damage Mechanics VII, pp. 621-624, 2008</li> </ul>
	<p style="text-align: center;">국내학술지 논문</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 한상훈, “해양 콘크리트 구조물에 대한 Level II 수준에서의 염소이온침투 신뢰성 해석”, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 12권, 6호, 2008, pp.129~139.</li> </ul>
	<p style="text-align: center;">국제학술지 논문 (SCI인 경우 표시)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sang-Hun Han, influence of diffusion coefficient on chlorideion penetration of concrete structure, Construction and Building Materials, Vol 21, pp.370-378, 2006.(SCIE)</li> <li>• Sang-Hun Han, Reliability assessment of corrosion initiation of harbor concrete structure using FOSM, Key Engineering Materials, Vol. 385, pp. 621-624, 2008.</li> </ul>
	<p style="text-align: center;">프로그램 등록</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 한상훈, 박우선, FOSM법을 이용한 항만구조물 내구성 해석 프로그램(Version 1.0), 2008</li> <li>• 한상훈, 박우선, AFOSM(개선된 일계이차모멘트법)을 이용한 항만구조물 내구성 해석 프로그램(Version 1.0), 2008</li> </ul>
	<p style="text-align: center;">기타</p>	<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 기본자료료 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. 심현보, 이민석, "옥외폭로에 따른 실리콘계 유화형 흡수방지재의 내수성에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제 16 권, 제 4 호, pp. 477-484, 2004.
2. Buenfeld, N. R., Zhang, J. Z., "Chloride Diffusion Through Surface-Treated Mortar Specimens", Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 5, 1998, pp.665-674.
3. Almusallam, A. A., Khan, F. M., Dulaijan, S. U., Al-Amoudi, O. S. B., "Effectiveness of Surface Coatings in Improving Concrete Durability", Cement and Concrete Compoistes, Vol. 25, 2003, pp.473-481.
4. Kato, E., Kato, Y., Uomoto, T., "Development of Simulation Model of Chloride Ion Transportation in Cracked Concrete", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 3, No. 1, 2005, pp.85-94.
5. Wittman, F., "Optimizing SHCC with respect to Durability and Integral Water Repellent Treatment", PARI Workshop, Japan, 2006.

## 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	(v)	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	( )
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	AFOSM을 이용한 항만구조물내구성 해석 프로그램

#### 2. 기술의 명칭

국 문	AFOSM을 이용한 항만구조물내구성 해석 프로그램
영 문	Reliability assessment of corrosion initiation of harbor concrete structure using AFOSM

### 3. 기술(연구결과물) 개요 및 특징

	내 용
기술의 개요	<ul style="list-style-type: none"> <li>항만구조물의 염해해석을 위한 신뢰성해석 프로그램</li> </ul>
기술의 특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>Level II 수준의 신뢰성 해석 프로그램이지만 Level III 수준의 해석결과를 제시하고 있다. 즉, 빠르고 정확하게 항만구조물의 신뢰성 해석이 가능한 프로그램</li> </ul>
용도 이용분야	<ul style="list-style-type: none"> <li>항만구조물의 신뢰성 해석</li> <li>항만구조물 내구성 설계시의 피복두께 산정</li> <li>항만구조물의 보수보강 시점 계획</li> </ul>

### 4. 연구결과 활용내역

해당사항없음

## 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	박 우 선	전화번호	031-400-6325
	Fax	031-408-5823	E-Mail	wspark@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

개발된 프로그램의 ASP 서비스를 통해 사회기반시설 특히 항만구조물의 안전진단시에 사용할 수 있도록 함

### 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