

철근콘크리트 구조물 염해 내구설계에 있어서 설계확률변수의 민감도 평가

박동천* · 오상균†

*한국해양대학교 해양공간건축학부 전임강사, † 동의대학교 건축공학과 부교수

The Sensitivity Evaluation of Probability Variables to Durability Design of the RC Structures

Dong-Cheon. Park* · Sang-Gyun. Oh†

*Division of Architecture and Ocean Space, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

† Department of Architectural Engineering, Dong-eui University, Busan 614-714, Korea

요 약 : 해안철근콘크리트 구조물은 해수 또는 비래염분에 의하여 철근이 부식하게 되고 결과적으로 콘크리트에 균열로 발전하여 성능을 다하게 된다. 본 연구에서는 염해에 대한 해안 철근콘크리트 구조물의 내구성능 평가를 위하여 수치해석에 의한 결정론적 방법이 아니라 확률론에 입각한 성능평가를 위하여 확률론적 시뮬레이션 수법을 구축하였다. 시뮬레이션 수법으로는 몬테카를로법이 적용되었으며, 파괴확률에 대한 설계확률변수(표면염화물 농도, 초기 함유 염소이온농도, 철근의 피복두께, 염소이온 확산계수) 및 각각의 변동계수의 영향을 평가하였다. Fick의 확산방정식을 이용한 해석결과, 해안에서의 거리의 차 및 확산계수의 차에 의한 영향은 컸으며 상대적으로 변동계수의 영향은 그다지 높지 않다는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 해안 철근콘크리트 구조물, 염해, 확률론적 성능평가, 몬테카를로 시뮬레이션, 부식확률

Abstract : Simulation method based on probability was developed to evaluate the durability of reinforced concrete structures about chloride attack. The effects of the probability parameters(surface chloride ion concentration, initial combined chloride ion concentration, the depth of cover thickness of concrete, and the chloride ion diffusion coefficient), probability distribution function and its variation were calculated using the Monte Carlo method and Fick's 2nd law. From the durability design method proposed in this study, the following results were obtained. 1) The effects of the distance from the coast and the chloride ion diffusion coefficient to the corrosion probability were quite high. 2) The effect of the variation of each parameters was relatively low.

Key words : Coastal reinforced concrete structure, Chloride attack, Probability based properties evaluation, Monte Carlo simulation, Corrosion probability

1. 서 론

콘크리트 구조물은 도로, 터널, 교량, 건축, 항만 등 다양한 분야에 사용되고 있으며 많은 사람들이 이용하므로 구조적 안전성은 어떤 가치보다도 우선되어야 한다. 그러나 구조 안전성 중심의 설계당시의 계획과 달리 환경적, 재료적 요인에 의하여 구조물은 경시 변화하며 내구수명 단축으로 인한 안전성 문제가 사회적 문제로 대두되기 시작하였다(김, 2004).

일반적으로 철근 콘크리트 구조물의 내구성에 미치는 주요인자는 중성화, 염해, 알칼리골재반응, 화학적 침식 등이 대부분을 차지하고 있으며 이에 대하여 계획단계부터 내구설계를 실시하고 있다. 그 방법으로는 물시멘트비, 피복두께, 사용 단위수량

등의 제한을 통하여 건전성 확보를 달성하는 방법이 일반적이거나 이러한 방법만으로는 건물 사용수명의 정량적인 정보 입수가 힘든 상황이며 현재에는 유한요소해석과 같은 수치해석을 통한 결정론적 방법을 넘어서 각각의 실험변수가 가지는 변동계수를 고려한 확률론적 성능평가 방법을 많이 채택하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 종래의 결정론적 방법에 의한 성능평가 방법이 가지는 결점, 즉 설계확률변수의 변동성에 대한 미 고려를 극복하기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation) 기법(柴田, 2005)을 적용한 파괴확률 계산이 가능한 수법을 정립하였으며 각각의 변수가 가지는 영향력에 대하여 민감도 평가를 통한 고찰을 실시하였다.

* 대표저자 : 박동천(정회원), dcpark@hhu.ac.kr 051)410-4587

† 교신저자 : 오상균(정회원), sgoh@deu.ac.kr 051)890-1609

2. 확률론에 근거한 시뮬레이션

2.1 염해에 의한 열화 예측 모델

건전한 콘크리트의 경우 시멘트 수화생성물의 존재 하에 약 pH 12.5 정도의 강알칼리성을 띠며, 철근 표면에는 부동태의 역할을 하는 산화막을 형성하고 있어 일반적으로 부식하지 않는다. 그러나 콘크리트 내부에 유해물질이 유입되면 철근은 활성화 되어 부식하기 쉬운 상태로 변하게 된다. 철근의 부동태 피막을 파괴하는 유해물질로는 할로겐이온(Cl^- , Br^- , I^-), 황산이온(SO_4^{2-}) 또는 황화물(S^{2-}) 등의 음이온이 있다. 이 중에서도 철근 부식에 가장 유해한 이온은 염소이온으로 부동태 피막을 국부적으로 파괴하여 공식을 유발시킨다. 염소이온에 의하여 철근표면의 부동태 피막이 파괴되면 건전부(음극)와 결함부(양극) 사이에 전위차가 발생하게 되며 산소와 수분의 공급에 의한 환원반응과 양극의 산화반응에 의해서 부식은 진전한다(日本建築學會, 2004).

염해에 의한 콘크리트 구조물의 열화단계는 Fig. 1과 같이 잠복기(철근부식 개시까지), 진전기(철근 축방향 균열 발생까지), 열화기(균열이 확대되어 부식이 급증하여 내력저하가 현저한 단계)로 구분할 수 있다. 이 중에서 염화물 이온이 철근의 위치에 도달하여 임계염화물 이온농도가 될 때를 수명이 다했다라고 가정하고 평가할 때, 염화물 이온 확산문제를 Fick의 법칙에 따라 확산하는 것으로 가정한 모델이 가장 일반적으로 사용되고 있으며 반무한 고체의 콘크리트 표면에 비례염분이 충돌하여 염소이온이 내부로 침투, 확산해 가는 과정은 식(1)과 같이 일차원 확산 방정식으로 표현된다(日本콘크리트工學協會 a, 2004).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서, C : 염소이온 농도(kg/m^3)
 x : 콘크리트 표면으로부터의 깊이(m)
 D : 확산계수(콘크리트의 재료, 배합, 시공상태 및 함수상태에 의해 결정되는 콘크리트 중의 염화물 이온 확산계수)(m^2/sec), t : 경과시간(sec)

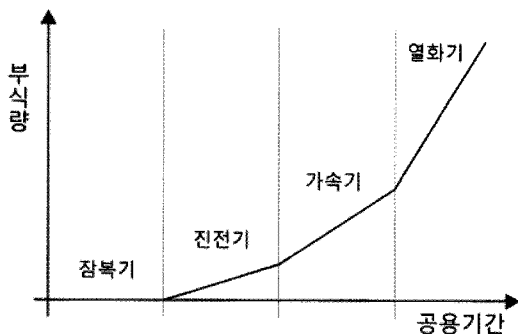


Fig. 1 The model of deterioration by chloride attack

식(1)에 대한 해로서 콘크리트 표면으로부터 염소이온 침투의 경우 철근위치에서의 염화물 이온농도는 콘크리트의 재료, 배합, 시공상태, 함수상태, 콘크리트 표면의 염소이온농도 및 재령을 이용하여 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$C = (C_0 - C_{init}) \cdot \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right\} + C_{init} \quad (2)$$

여기서, C_0 : 콘크리트 표면의 염화물 이온농도(kg/m^3)

C_{init} : 콘크리트 중의 초기염화물 이온농도(kg/m^3)

erf : 오차함수

2.2 몬테카를로법(MSC Monte Carlo Simulation)의 개요

본 연구에서는 MSC 법을 적용하여 염해 환경하에서의 철근 콘크리트 구조물의 내구설계를 확률론적 신뢰해석을 실시하였다. 기존의 결정론적 설계방법은 하중과 저항, 수명은 일정값을 사용하며 각 변수의 변동은 고려되지 않았다. 즉 조사 실험에서 얻은 각종 파라메타의 값을 대입하여 부재 응력도, 변형 또는 안전율을 계산하고 그 값이 허용값 또는 설계소요안전율을 만족하는가를 체크하는 과정으로 이뤄졌다. 그러나 실제로 철근 위치에서 염화물 이온의 농도가 임계치에 도달하였다 하더라도 파괴에 이르렀다고는 할 수 없으며 철근 부식의 시작 가능성을 나타내고 또 구조물의 사용성에는 크게 문제가 발생하지 않는다. 따라서 손상등급에 따른 파괴확률을 구하는 것이 확률론적 설계에 있어 중요한 요소가 된다.

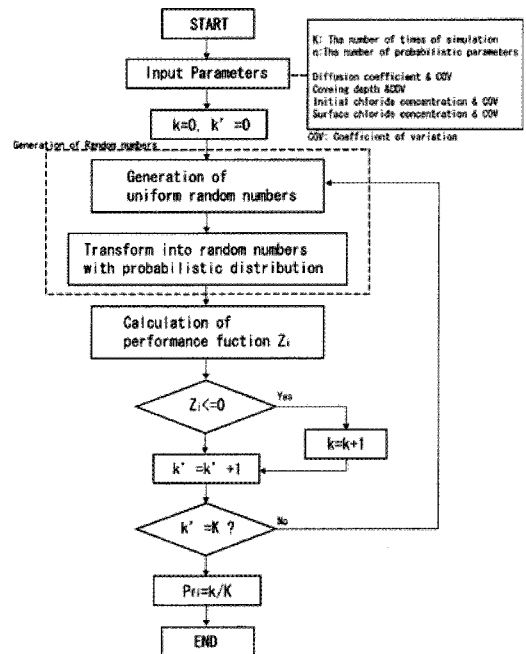


Fig. 2 The flow of Monte Carlo Simulation

Fig. 2(Alfredo H-S. Ang, Wilson H, 1975)는 몬테카를로 시뮬레이션의 흐름을 모식적으로 나타낸 것이다. 신뢰성 설계법은 설계시방서에 정해져 있는 설계기준식(식(2))을 그대로 성능함수로 이용하고, 사용되는 변수는 모두 확률변수로 취급함으로써 이 변수들이 가지는 확률통계론적 특성, 즉 변수의 평균값, 편차, 변수간의 상호특성을 고려하여 구한 파괴확률(P_f)에 기초하여 안전도를 평가하게 된다. 즉 신뢰성설계법에서는 각 변수가 취할 수 있는 어떤 값과 그 값들의 조합을 생각해서 그 가운데 설계기준식(성능함수)를 만족하지 않는 비율을 구하여 파괴확률을 평가하게 된다. 단, 각 변수는 터무니없이 선별되는 것이 아니라 변수가 가지는 확률통계론적 특성을 만족하도록 선택할 필요가 있다.

따라서, 지금 확률변수가 가지는 확률통계적 특성을 만족하는 변수의 값이 각각 추출되었다고 하면, 그 값(Sample)을 설계기준식(성능함수)에 대입함으로써 기준식을 만족하는지, 그렇지 못한지를 직접 계산할 수가 있다. 이 계산은 우연히 추출된 한 조의 확률변수에 의한 시행(Trial)이므로, 시행의 횟수를 증가시키면, 전 시행횟수에 대한 설계기준식을 만족하지 않았던 (즉 $Z_i \leq 0$)회수의 비는, 파괴확률에 가깝게 근접하게 된다.

3. 설계 변수의 불확실성과 부식확률에의 영향

3.1 해안에서의 거리와 표면 염소이온 농도

해안에서 콘크리트에 공급되는 비래염분량은 해수중의 염분 농도, 파랑조건, 풍향, 풍속, 해안의 상황, 해안으로 부터의 거리, 해수면으로부터의 높이, 강우강설량, 장애물의 유무, 구조물 또는 부재의 형상, 콘크리트 면의 방향등 많은 요인에 영향을 받는다. 일반적인 경향으로서는 비래 염분량은 해안에서 내륙으로 멀어짐에 따라 적어진다.

$$C_y = (-2860/d^2 + 510/d + 1.64) \times w/100 \quad (3)$$

$$C_0 = a \cdot b \cdot C_y / L \quad (4)$$

- 여기서, d : 해안선에서 부터의 거리(m)
- w : 풍속(m/s)
- C_0 : 콘크리트 표면부의 염소이온농도(kg/m³)
- a : 콘크리트에 침투하는 비율
- b : 정상상태의 할증
- C_y : 연간 비래염소이온농도(kg/m²/year)
- L : 폭로개시후 1년간의 염소이온 침투깊이(m)

식(3)는 기존의 연구결과를 정리 분석한 Utada(宇多, 1992)의 논문에서 인용한 식이다. 또 일본건축학회 발간 철근콘크리트 조 건축물의 내구설계 시공지침(안)·동해설(日本建築學會, 2004)

을 참조한 식(4)에 의하여 경계조건이 되는 침투 염소이온 농도가 결정되게 된다. 부산의 풍속을 평균 4 m/s로 하면 해안에서 거리에 따른 표면부의 비래 염분의 분포는 Fig. 3과 같게 된다.

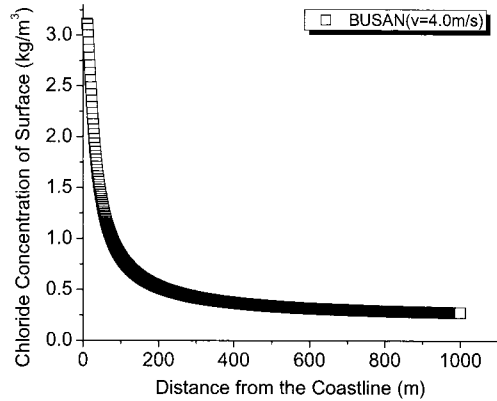


Fig. 3 The concentration of chloride ion by the distance from the coastline (Busan)

그리고, 염분의 영향은 해수면의 높이에 따라서도 변동하게 된다. 간만대(Tidal Zone)에서는 조수의 영향으로 염소이온이 콘크리트 표면에 부착되더라도 씻겨 나가므로 농도가 그다지 높지 않다. 비말대(Splash Zone)는 비래염과 해수염에 직접 노출되는 부분으로 반복되는 건습의 영향으로 농도가 상당히 높으며, 대기부(Atmospheric Zone)는 간만대와 비말대 보다는 높은 지역을 의미하며 해수의 직접적인 영향권이 아니라 비래염분이 구조물에 영향을 미치는 부분이다. 노출된 방향과 노출 시간에 대한 영향도 해수면의 높이와 더불어 설계변수의 변동계수가 된다.

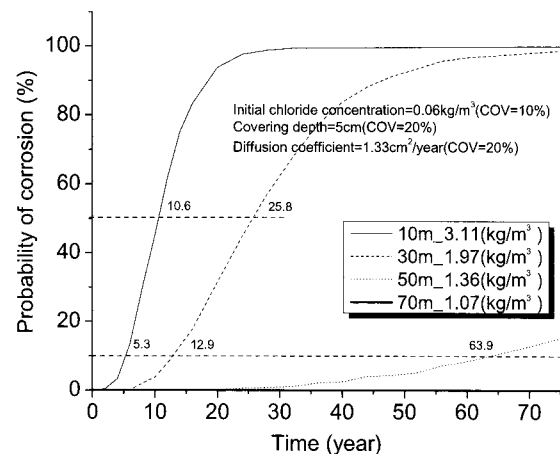


Fig. 4 Corrosion probability vs. the distance from the coastline

Fig. 4는 해안에서의 거리의 차에 의한 부식확률의 변화를 나타내었다. 10m, 30m, 50m, 70m에 대하여 분산계수(COV : Coefficient Of Variation) 10%, 피복두께 50mm, 확산계수 1.33(cm²/year), 초기 함유 염소이온농도 0.06(kg/m³) 에 대한 시뮬레이션 결과이다. 파괴확률 10%에 도달하는데 소요되는

시간이 해안에서 거리 10m, 30m, 50m로 증가할수록 각각 5.3, 12.9, 63.9년으로 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다.

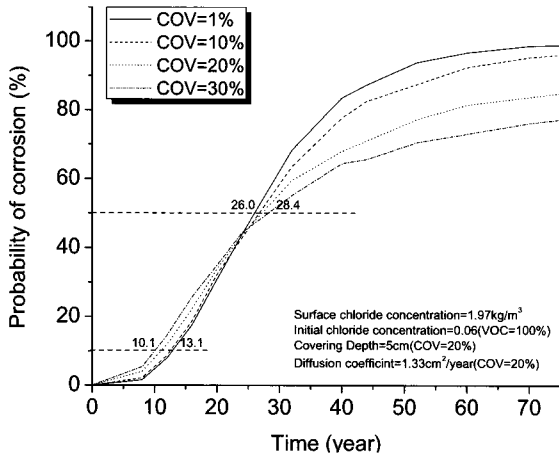


Fig. 5 Corrosion probability vs. the COV of surface chloride ion concentration

Fig. 5는 표면 염소이온 농도의 변동계수의 차에 의한 부식확률의 변화를 나타낸 것이다. 변동계수가 1~30%로 증가함에 따라 파괴확률 10%에 소요되는 시간은 10.1년에서 13.1년으로, 파괴확률 50%(결정론적 방법의 부식개시 기간에 대응)에 소요되는 시간은 26.0년에서 28.4년으로 증가하였다. 즉 해안에서 거리의 차는 부식확률에 미치는 영향이 크나, 표면 염소이온의 농도 변동계수가 미치는 영향은 그다지 심각하지 않다는 것을 알 수 있었다.

3.2 초기염화물 이온

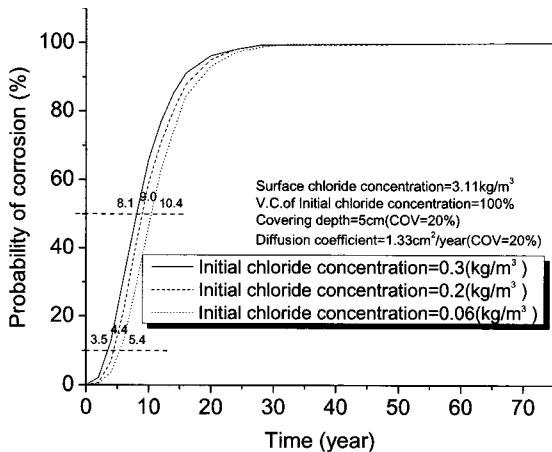


Fig. 6 Corrosion probability vs. the initial chloride ion concentration

초기염소이온 농도 차에 의한 부식확률의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 해안으로부터의 거리 10m의 경우를 상정하여 표면 염소이온농도를 3.11 kg/m³로 하였다. 초기 염소이온 변동계수 및 피복 두께, 확산계수 및 그 변동계수는 그림에 기술된 대로이다. 초기 염소이온 농도가 0.3에서 0.06 kg/m³으로 감소함에

따라 파괴확률 50%에 소요되는 시간은 8.1에서 10.4년으로 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 Fig. 7에서와 같이 초기염소이온 농도를 0.06 kg/m³으로 고정한 채 그 변동계수만을 50에서 200%까지 조절하였을 경우에는 파괴확률에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

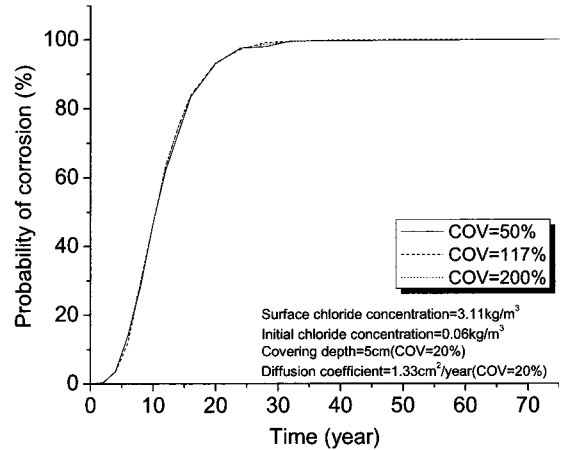


Fig. 7 Corrosion probability vs. the COV of initial chloride ion concentration

3.3 철근의 피복두께

철근의 피복두께를 증가시키든지 배합에 의하여 물질이동 저항성을 강화시키면 철근이 입계 염소이온 농도에 이르는데 더욱 더 시간이 소요되게 되어 내구성 확보에 유리하게 된다. 그러나 철근 콘크리트조의 내구성을 확보하기 위하여 두는 피복두께는 여러 요인, 그 중에서도 특히 시공오차에 의하여 그 값에 변화를 가져올 수 있다.

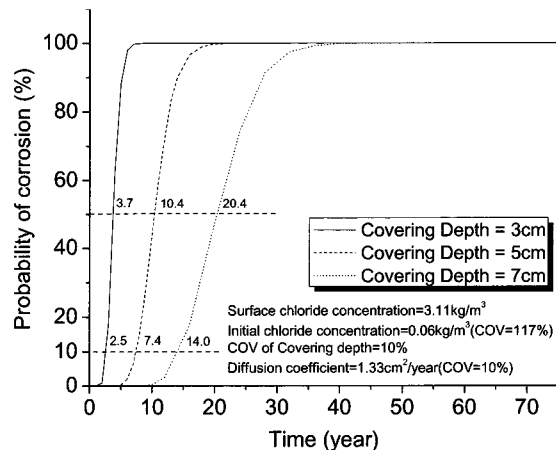


Fig. 8 Corrosion probability vs. the depth of cover concrete

Fig. 8에 피복두께의 차에 의한 부식확률 변화를 나타내었다. 피복두께가 3에서 5 cm로 증가함에 따라 파괴확률은 3.7에서 20.4년으로 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다. 그림9는 동일한 조건하에서 피복두께의 변동계수의 차에 의한 부식확률 변화를 나타낸 것으로 피복두께의 COV가 클수록 일반적 예상과

달리 초기에는 부식확률은 높아지나 약 10년을 경계로 그 경향이 역전되는 것을 알 수 있었다. 이는 기존연구(김, 2006)에서도 같은 경향을 볼 수 있었다.

3.4 염소이온 확산계수

콘크리트의 염소이온 확산계수는 실측 또는 실험에 의하여 평가가 가능하다. 폭로 상태의 구조물에 대한 실측의 경우에는 콘크리트의 초기물성에 대한 정도가 부족한 실정이며, 실험, 즉 전기영동법 또는 침적에 의한 경우에는 그 확산 메카니즘이 실제환경과 상이하여 두 방법 모두 신뢰도 높은 데이터를 구하기 힘들다 할 수 있겠다. 그 중에서도 최근에 가장 많이 인용되는 식이 기존 데이터의 회귀분석을 통해 구한 식(5)이다(日本建築學會, 2004).

$$\log D = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (5)$$

여기서, W/C : 물시멘트(결합재)비

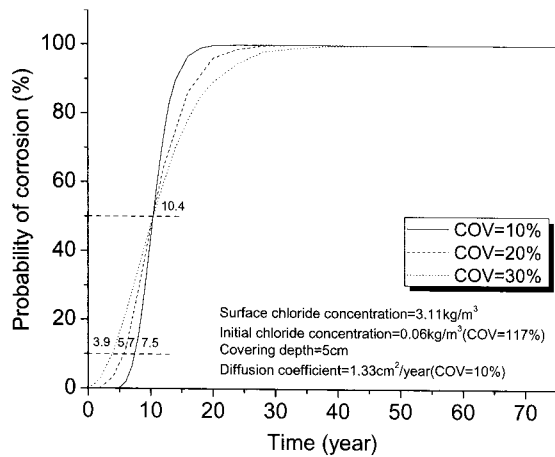


Fig. 9 Corrosion probability vs. the COV of the depth of cover concrete

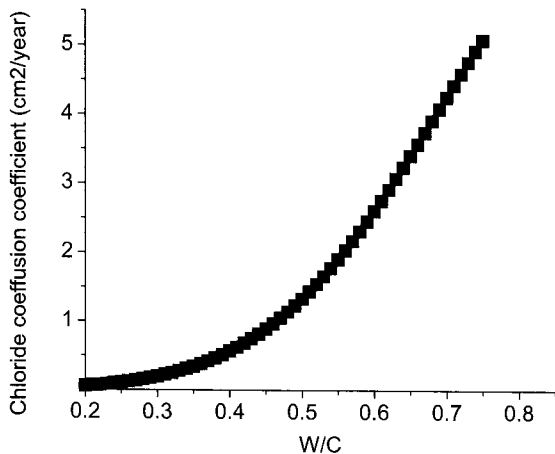


Fig. 10 Chloride ion diffusion coefficient by the W/C

Fig. 10에 식(5)를 플롯하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯

이 물시멘트비 약 50% 부근에서 급격히 물질이동 저항성이 저하하여 확산계수가 증가하는 것을 알 수 있다. 본 시뮬레이션에서는 물시멘트비의 차에 따른 염소이온 확산계수 변화 및 그 변동계수의 파괴확률에 대한 영향을 평가하였다. Fig. 11은 염소이온 확산계수의 차에 의한 변화를 나타내 것으로 동일조건 하에서 물시멘트비가 45, 55, 65(%)로 증가할수록 파괴확률 50%에 소요되는 시간은 7.3, 10.5, 15.8 (년)으로 점점 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 Fig. 12는 염소이온 확산계수의 변동계수의 영향을 나타낸 것으로 해안에서 거리 10, 30(m)의 경우에 시뮬레이션 한 결과 파괴확률 50%에 각각 10.5, 25.8(년) 소요되는 것으로 나타났으나 변동계수의 영향은 매우 작은 것을 알 수 있었다.

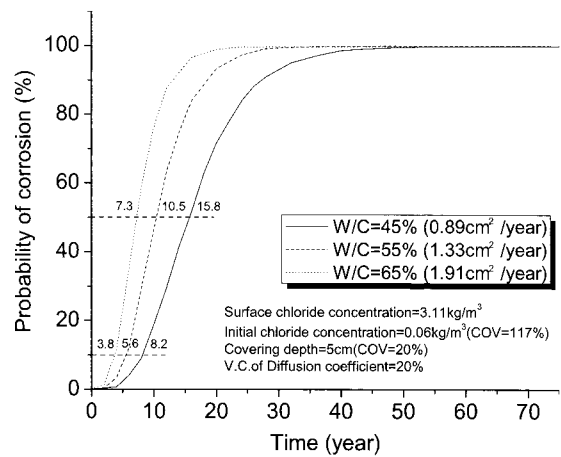


Fig. 11 Corrosion probability vs. the chloride ion diffusion coefficient

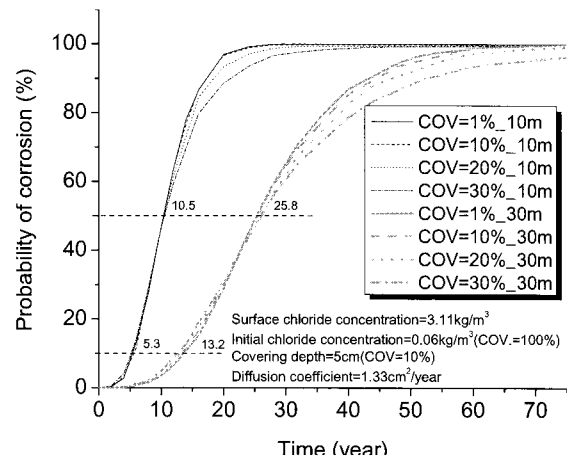


Fig. 12 Corrosion probability vs. the COV of chloride ion diffusion coefficient

4. 결론

본 연구에서는 해양 콘크리트 구조물의 염해에 대한 내구수명 예측을 몬테카를로법을 이용한 확률론적 방법으로 실시하고 실험변수의 변동계수(COV)가 파괴확률에 미치는 영향에 대한 감도 분석을 통하여 아래와 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 해안에서의 거리와 표면염소이온 농도, 초기함유 염소이온 농도, 철근의 피복두께, 염소이온 확산계수와 각각의 변동계수의 확률분포를 고려한 철근 콘크리트 내구수명예측 시물레이션 수법을 구축하였다.
- 2) 해안에서의 거리의 차는 부식확률에 미치는 영향이 크나, 표면염소이온 변동계수의 영향은 미비하다.
- 3) 철근의 피복두께의 변동계수 크기에 따라 어느 시점을 경계로 서로간의 부식확률이 역전되는 현상을 나타내었다.
- 4) 염소이온 확산계수의 차에 의한 영향은 크나, 그 변동계수의 영향은 매우 작게 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] 김원동(2004), 염해를 받는 콘크리트 구조물의 확률론적 내구성 설계, 연세대학교 대학원 토목공학과, 석사학위논문.
- [2] 김지상, 정상화, 김주형, 이광명, 배수호(2006), “염해를 받는 콘크리트 구조물의 확률론적 내구성 해석”, 한국콘크리트학회 논문집, pp. 239-248, 제18권 2호.
- [3] 柴田明德(2005), 確率的手法による構造安全性の解析, 森北出版株式會社.
- [4] 日本建築學會(2004), 鐵筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説.
- [5] 日本コンクリート工學協會(1998), “コンクリート構造物野リハビリテーション研究委員會”.
- [6] 日本コンクリート工學協會(2004), “コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム”.
- [7] 宇多高明(1992), 海岸からの飛來塩分量の計算モデル, 海岸工學論文集, Vol. 39, pp. 1051-1055.
- [8] Alfredo, H. S., A. and Wilson, H(1975). “Tang, Probability Concepts in Engineering Planning and Design”, Willey.

원고접수일 : 2009년 2월 16일
심사완료일 : 2009년 4월 29일
원고채택일 : 2009년 4월 29일