



유한요소법을 이용한 3차원 염해 침투 예측 모델의 개발

Development of Three Dimensional Chloride Ion Penetration Model Based on Finite Element Method

최원* · 김한중**,†

Choi, Won · Kim, Hanjoong

Abstract

Most of agricultural structures located in seashore could not avoid rapid deterioration of concrete because chloride-ion and CO₂ gradually penetrate into concrete. However, since most of models can be able to describe the phenomenon of penetration by using one or two dimensional models based on finite difference method (FDM), those modes can not simulate the real geometry and it takes a lot of computational time to complete even the calculation. To overcome those weaknesses, three dimensional numerical model considering time dependent variables such as surface concentration of chloride and diffusion coefficient of domain based on finite element method (FEM) was suggested. This model also included the neutralization occurred by the penetration of CO₂. Because the model used various sizes of tetrahedral mesh instead of equivalent rectangular mesh, it reduced the computational time to compare with FDM. As this model is based on FEM, it will be easily extended to execute multi-physics simulation including water evaporation and temperature change of concrete.

Keywords: concrete; chloride; finite element method; three dimensional analysis; multiphysics

1. 서 론

해안 또는 근처에 설치된 콘크리트 구조물들의 노후에 미치는 인자 중 가장 큰 비중을 차지하는 것은 염화물 이온의 침투에 의한 철근의 부식이다 (Song, Lee, & Ann, 2008; Zhang, McLoughlin, & Buenfeld, 1998). 특히, 배수갑문의 경우 상시 바닷물에 노출되었기 때문에 염화물의 침투가 다른 구조물들에 비하여 급속도로 진행된다. 염화물의 침투 메카니즘은 농도 차이에 의한 확산, 모세관 흡착, 수두의 차이에 따른 압력의 변화 등 다양한 방법을 통해 진행된다. 또한 콘크리트 자체가 가지고 있는 공극크기, 수분함량, 구성하는 물질의 비율 및 주변온도에 영향을 받는다. 콘크리트는 시간의 흐름에 따라서 수화작용에 의해 자체조직을 더욱 치밀해지기 때문에 염분의 확산침투 현상도 감소할 수 있다.

염분침투모델은 걸보기확산계수와 Fick의 제2법칙을 이용한 방법이 보편적으로 쓰인다 (Ann, Ahn, & Ryou, 2009; Bitaraf & Mohammadi, 2008; Chatterji, 1995; Ehlen, Thomas,

& Bentz, 2009; Kassir & Ghosn, 2002; Song et al., 2009; Ha-Won, Song, Pack, & Ann, 2007). 초기에는 확산계수와 콘크리트 표면염분농도를 일정한 값으로 놓고 해석하였으나 최근에는 이러한 값들이 시간에 따라서 변화하는 함수로 표현하여 좀 더 현실에 가까운 시뮬레이션을 구현하고자 하였다. 이를 위해서 현장장기폭로실험에 의한 지정학적 특성을 포함한 충분한 데이터가 확보되지 못한 상황이며, 실내에서 시행되는 경우인 촉진실험에서 얻어진 영향인자를 어떻게 실제모델에 적용할 수 있는 지에 대한 연구가 충분하지 않은 것으로 판단되며, 현재까지 개발된 모델은 대부분 1차원이나 2차원 모델이고 그 기반이 유한차분법에 기초하고 있다 (Leandro, Chen, Djordjević, & Savić, 2009; Liska & Wendroff, 2003; Marchand & Samson, 2009). 유한차분법은 어떠한 계를 지배하는 미분방정식을 차분의 형태로 유도하여 해석하는 간단한 방법이기 때문에, 격자의 형태에 제약을 받을 수밖에 없다. 또한 열해석이나 구조해석과 같은 다양한 다중물리현상(Multiphysics Phenomenon)을 결합하는데 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 다중물리현상을 구현하는데 유리한 유한요소법에 기초하여 3차원 염해침투모델을 개발하고 CO₂의 중성화가 염분침투에 미치는 영향을 포함시켜, 향후 실용적인 모델로 전환할 경우 부족한 현장폭로실험을 보완할 수 있는 정보를 생산할 수 있는 체계를 구축하는데 목적이 있다.

* Postdoctoral Fellow, Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University

** Professor, Hankyong National University

† Corresponding author

Tel.: +82-31-670-5135 Fax: +82-31-670-5139

E-mail: hanjoong@hknu.ac.kr

Received: May 22, 2015

Revised: August 21, 2015

Accepted: August 26, 2015

Table 1 Diffusion coefficient of chloride ion

Diffusion coefficient (10^{-12} m ² /s)	SRC-30
Without considering neutralization	5,780

Table 2 Diffusion coefficient of carbon dioxide (CO₂) in the each zone penetrated by chloride ion and not penetrated

Diffusion coefficient (10^{-9} m ² /s)	SRC-30
Chlorinated zone	1.40
No chlorinated zone	20.70

Table 3 Diffusion coefficient of chloride ion in the each zone penetrated by carbon dioxide and not penetrated

Diffusion coefficient (10^{-12} m ² /s)	SRC-30
Neutralized zone	4.195
No neutralized zone	14.021

II. 재료 및 방법

전라북도 군산시 옥도면 비안도리 가력도에 위치한 가력 갑문의 피어를 대상으로 하였다. 콘크리트를 구성하는 성분 중 시멘트는 5종 내황산염 KS 제품, 잔골재는 부여산 모래, 굵은골재는 부안소재 석산에서 채취한 최대치수 25mm의 부순돌, 혼화재는 고성능 AE 감수제가 이용되었으며 소요 콘크리트의 강도는 30 MPa로 설정하였다 (Lee & Kim, 2013, 2014). Table 1은 중성화도를 고려하지 않은 염화물의 확산 계수, Table 2는 탄산가스의 확산계수로 해수의 침투 유무에 따라 구분하였다. Table 3은 중성화도에 따른 염분의 확산계수를 보여준다 (Korea Rural Community Corporation, 2012). 해수의 침투와 관련된 실험방법은 3% 황산에 침지된 코팅되지 않은 실린더 형태 샘플을 이용한 연구에서 0.308×10^{-9} m²/s의 확산계수를 얻을 수 있다 (Mebarkia and Vipulanandan, 1995).

III. 염해예측모델

1. 기본모델

콘크리트 내부로 염화물이 침투하는 현상은 공극수를 통한 염소 이온의 확산(diffusion)과 모세관 내부 공극수 자체의 이동(convection)으로 구분된다. 일반적으로 외부습도와 콘크리트 내부습도의 분포가 연중을 통해서 일정하다고 가정하면 convection에 의한 이동은 무시할 수 있다. 따라서 현재까지의 모델 중 염화물이온 침투현상을 실제적으로 표현할 수 있는 이론은 확산만을 고려한 Fick의 제 2 법칙이다(Pack

et al., 2010; Song et al., 2008).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla c) = 0 \quad (1)$$

여기서, t는 시간 (s), C는 염화물의 농도 (kg/m³), D는 염화물의 확산계수 (m²/s)이다.

위의 미분 방정식을 풀기 위한 방법은 Laplace 방정식에 기초한 3차원 유한요소 해석법을 이용하였다. 또한 해석 효율을 높이고 시간을 절약하기 위해서, 격자의 효율적 배치가 가능한 사면체 격자가 이용되었다.

2. 표면염분농도

표면 염화물량은 크게 두 가지 방법으로 구분한다. 하나는 시간의 흐름에 따른 변동된 값을 적용하는 경우 (Ann et al., 2009; Arora et al., 1997; Song, Pack, & Ann., 2007; Kassir and Ghosn, 2002; Song et al., 2009; Thomas and Bamforth, 1999; Uji et al., 1990; Weyer et al., 1994)이고 다른 하나는 고정된 값으로 가정하는 경우이다. 우리나라 또는 일본에서 수십 년간 실측한 결과에 따르면 시간에 대해서 증가하는 경향을 보인다 (JSCE, 2002; MOCT, 2004). 한국콘크리트학회도 표준시방서에 이를 명기하고 있으므로, 본 연구에서도 시간 의존성을 갖는 다음 식을 사용하였다.

$$C_s(t) = \alpha [\ln(\beta t + 1)] \quad (2)$$

여기서, C_s는 콘크리트 표면 염분의 함량 (kg/m³), α와 β는 구조물이 해안가로부터 떨어진 거리에 따라 바뀌는 상수로 α는 1.52, β는 3.77을 설정하였다.

3. 염분확산계수

콘크리트 내에서 염소이온의 확산계수는 시간에 따라 일정한 것이 아니라 콘크리트의 수화가 진전되기 때문에 감소한다. 일반적으로 확산계수의 시간 의존성은 다음과 같이 표현할 수 있다 (Tang & Nilsson, 1992; Bentz & Thomas, 2001).

$$D(t) = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^n \quad (t \leq t_c)$$

$$D(t) = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t_c} \right)^n = const. \quad (t \geq t_c) \quad (3)$$

여기서, D(t)는 시간에 따른 염소이온의 확산계수 (m²/s),

t_{ref} 는 기준시간(1년), D_{ref} 는 기준시간의 염소이온의 확산계수(m^2/s), t_c 는 염소이온의 확산계수가 더 이상 감소하지 않는 시간(30년), n 은 염소이온의 확산계수가 시간에 따라 감소를 나타내는 재령계수(0.2)를 의미한다.

4. 시뮬레이션 설정조건

시뮬레이션은 바닷물, 이산화탄소, 염화물의 침투를 동시에 해석하였으며 각각의 현상마다 비말대와 조간대로 나누어 경계조건을 설정하였다(Table 4, Fig. 1). 바닷물의 침투는 여러 가지 요인에 의해 일어나지만 확산계수만으로도 물리적 현상을 표현할 수 있다. 해수의 침투에 대한 경계조건으로는 해수가 상시 접하는 조간대만 침투가 가능하다고 설정하였으며, 콘크리트 표면에서 해수의 양은 100 %로 설정하였다. 또한 해수의 침투를 지배하는 확산계수는 시간에 따라서 그 값이 감소하는 염분확산계수법칙을 적용하였다.

이산화탄소 침투로 인한 중성화는 대기중으로 노출 될 수 있는 비말대로의 침투만을 반영하였으며, 표면농도는 대기 중의 이산화탄소 농도인 0.39 kg/m^3 을 채용하였다. Table 2에서 Chlorinated Zone 이란 엄밀히 말해 염화물을 포함한 해

수가 침투된 영역을 의미하나, 이러한 침투된 존을 해수의 침투가 발생된 존으로 가정하여도, 공학적인 의미에서 타당하기 때문에, 앞서 언급된 Mebarkia and Vipulanandan의 확산계수 $0.308 \times 10^{-9} \text{ m}^2/s$ 가 Chlorinated Zone을 결정하기 위한 확산계수로 사용되었다. 즉, 이산화탄소의 침투량을 계산은 해수포화도에 따라서 구간별로 Table 2를 이용하여 선형으로 보간 하였다.

염화물의 침투는 조간대에서만 이루어진다고 가정하였으며, 표면 농도의 변화는 식 (2)를 이용하여 시간에 따라 변화하는 함수로 설정하였다. 염화물의 침투와 관련된 확산계수는 Table 3에서 보는 바와 같이 중성화지역과 비중성화지역으로 구분하였으며, 이산화탄소의 침투와 같은 방법으로, 그 사이 구간에 대해서는 이산화탄소의 농도에 따른 선형관계로 Interpolation된 값을 적용하였다.

격자의 형태는 복잡한 구조물 형상에도 효율적으로 배치할 수 있는 Tetrahedron 형태가 선택되었으며, 총 528,676개의 격자가 이용되었다. 해석의 질을 높이기 위한 격자의 정밀도는 다음과 같이 정의된다.

$$Q = \frac{4\sqrt{3}A}{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2} \quad (4)$$

여기서, Q 는 정밀도 (dimensionless unit), A 는 격자의 넓이(m^2), A 는 격자 한 변의 길이(m)를 의미한다.

본 연구에서 사용된 격자의 경우 평균 정밀도는 0.7723으로 설정되었다. 해석 Solver로는 메모리 활용을 최소화하면서 Laplace 방정식을 계산하는데 최적화 되어있는 PARDISO (Parallel Direct Solver)가 이용되었다. 시뮬레이션 총 시간은 50년을 설정하였으며, 시간단위는 1년을 단위로 계산되었다. 또한 수렴 조건은 상대오차가 0.1 % 이내가 되도록 세팅하였다.

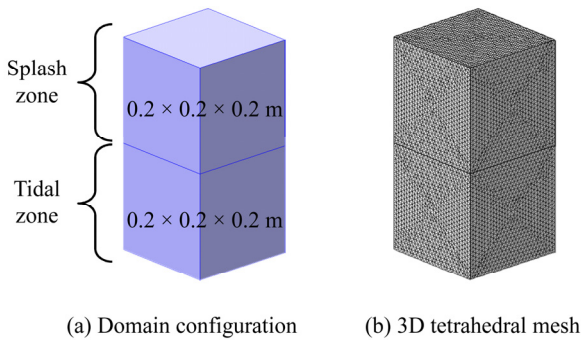


Fig. 1 Configuration of domains and its 3D tetrahedral meshes

Table 4 Model parameters

Conditions	Physics	Splash zone	Tidal zone	Etc.
Boundary conditions	penetration of seawater	No	Yes	Flux
	penetration of CO ₂	Yes	No	Flux
	penetration of chloride ion	No	Yes	Flux
	Concentration of seawater	-	100 %	
	Concentration of CO ₂	0.39 kg/m ³	-	
	Concentration of chloride ion	-	Equation (1) kg/m ³	
Domain conditions	Concentration of seawater	0 %	0 %	
	Concentration of CO ₂	0 kg/m ³	0 kg/m ³	
	Concentration of chloride ion	0 kg/m ³	0 kg/m ³	

IV. 결과 및 고찰

1. 모델의 유효성 검증

본 모델의 유효성을 검증하기 위하여 가로, 세로, 높이가 200 mm인 사각형 블록을 이용하여 깊이 80 mm에서 30년 후에 침투량을 예측하였다. 염화 이온의 침투만을 시간에 따라 고려하였으며 유한차분법에 기반한 모델과 비교하기 위하여 격자는 입방체 형태로 총 527,971 개가 이용되었다. 콘크리트 표면 염분량 변화는 식 (2)를 따른다고 가정하였으며, 물 시멘트 배합비 (w/c)는 0.3, 기준시간은 28일, 콘크리트 내부로의 확산계수는 $10^{-(12.06+2.4 \times w/c)}$ m²/s로 시간에 따라서 식 (3)의 지배를 받는다고 가정하였다. Song et al. (2009)이 연구한 내용과 비교한 결과 상대오차가 5 % 이내에 있음을 확인할 수 있었기 때문에 본 모델은 유효하다.

또한 한국농촌공사에서 ‘새만금지구 배수갑문 콘크리트 노후도 감시시스템 구축연구’를 위해 유한차분법을 기반으로 개발된 해석방법과의 시뮬레이션 속도를 비교하기 위하여 동일한 예제를 적용하였다. 유한차분법을 이용한 해석 결과는 총 7,864초가 걸렸으며 이에 비해서 유한요소법을 바탕으로 본 연구에서 개발된 해석 방법을 이용할 경우에는 총 163초가 걸려서 대략 50배의 속도 향상을 기대할 수 있었다.

2. Multiphysics 모델링

CO₂의 침투, 바닷물의 침투, 염화물의 침투를 모두 실시간으로 고려한 Multiphysics 모델을 시뮬레이션 하였다. Fig. 2는 3차원으로 해석결과를 표현한 것이며, Fig. 3의 (a), (b), (c)는 조건대 상부를 기준 (z=0 mm)으로 높이별로, 콘크리트 표면으로부터 일정한 깊이 (100 mm)의 농도변화를 그래프로 나타내었다.

CO₂가 콘크리트 내부로 침투하는 현상과 관련된 확산계수는 바닷물이 콘크리트 내부로 확산되는 계수보다 상대적으로 매우 크다. 따라서 대기로부터 콘크리트 내부로의 CO₂의 침투가 전 구역에 대해서 먼저 발생된 후 바닷물이 침투하는 현상을 목격할 수 있다 (Fig. 3의 (a)와 (b) 비교). 특히, CO₂의 침투는 5년 이내 콘크리트의 전 범위로 침투가 완료된 것을 눈여겨 볼 수 있다.

바닷물과 염화물의 침투경향성은 바닷물이 염화물에 비해서 상대적으로 침투속도가 빠름을 Fig. 3의 (a)와 (c)를 비교함으로써 알 수 있었다. 염화물의 침투는 조건대 부분에서는 전 범위에 걸쳐서 일정하였지만 비말대의 상부로 올라갈수록 침투정도가 급격히 줄어들었다. 그러나 50년이 지나도 비말대의 경우는 바닷물의 침투 농도가 염화물의 침투에 계속하여 대비해야 함을 확인 하였다.

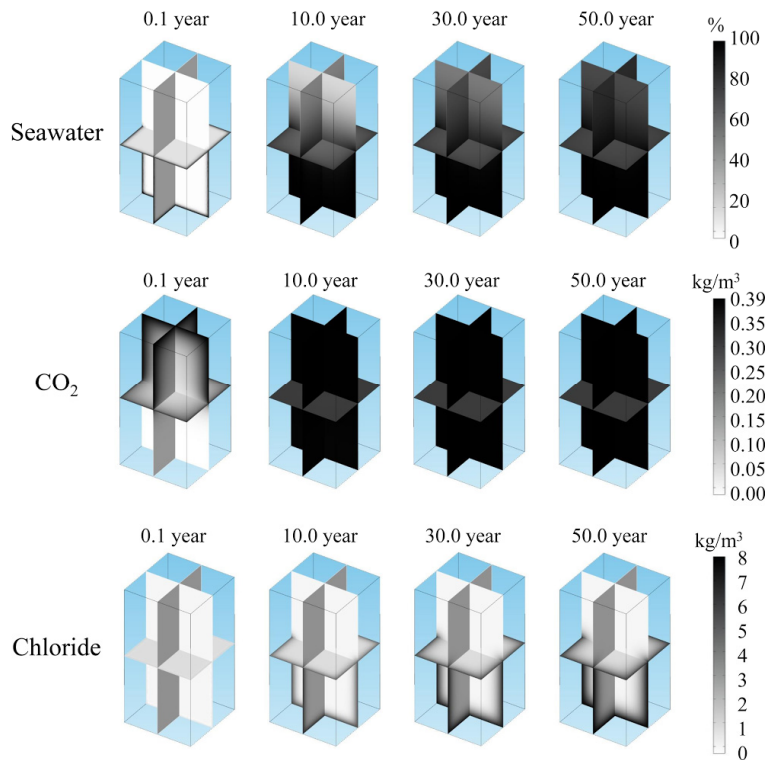


Fig. 2 Penetration distributions of seawater, CO₂ and chloride ion depending on time

3. 기존 모델과의 비교

앞서 언급한 Fig. 3의 (c)는 Multiphysics 모델이며 Fig. 3 (d)는 시방서 상에서 제시하는 단순모델을 시뮬레이션한 결과이다. 시방서 상에서 제시하는 단순모델이 Multiphysics 모델보다 침투농도가 증가함을 알 수 있다. 시방서에서 제시하는 단순모델에 비해서 Multiphysics 모델의 그래프는 초반 15년 이내에서는 좀 더 곡선의 형태를 보여주었다. 이는 바닷물의 침투 효과가 반영된 결과라 할 수 있다. Fig. 4는 조건대 상부를 기준 ($z=0$ mm)으로 300 mm 높이에서 콘크리트 표면으로부터 깊이에 따른 염분 농도의 변화를 두 가지 모델에 대하여 비교한 것이다. 여기서도 마찬가지로 단순모델이 Multiphysics 모델보다 침투 효과가 증가함을 알 수 있다. Fig. 5는 Fig. 4 중 깊이 100 mm 인 경우를 확대한 것으로 50년차에는 두 모델간

의 차이가 대략 0.5 kg/m^3 가 된다. 하지만 Fig. 3과 Fig. 4의 그래프에서 10년까지는 Multiphysics 모델과 시방서 상에서 제시하는 단순모델 사이에 큰 차이가 없었다. Fig. 6은 두 모델에 있어서 조건대 내부 ($z=-300$ mm)에서의 염분 침투 과정을 보여준 것으로 값의 차이가 크지 않았다. 그렇지만 여전히 Multiphysics 모델이 단순 모델에 비해서 조금 낮은 농도를 보여주었다.

Shimomura 과 Maruyama (2004)의 연구에 따르면 콘크리트 표면에서 해수방향으로 아주 얇은 경계층이 형성이 되며, 이러한 경계층으로부터 염분량의 감소가 관찰된다고 하였다. 또한 표면에 코팅을 한 경우는 코팅부에서 콘크리트 표면까지 급격한 염분량의 감소를 보인 후 그 이후는 일정하게 감소하는 경향을 보인다고 기술하였다. 본 모델은 이러한 경계층

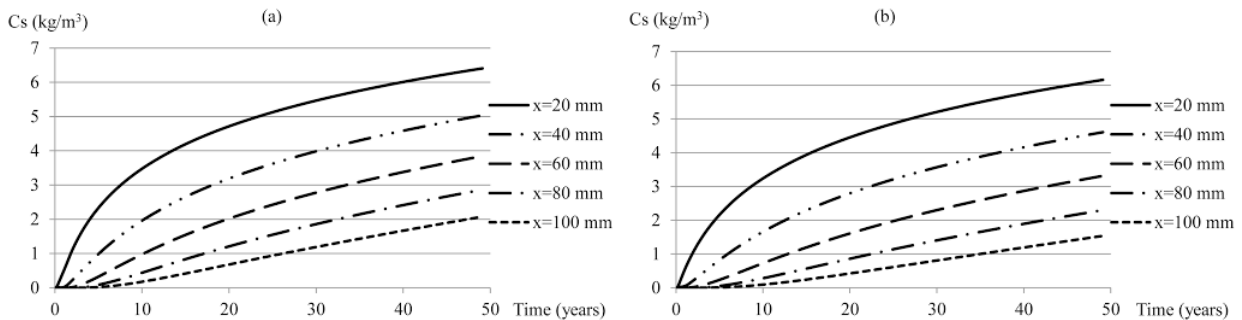


Fig. 3 Chloride-time profiles of simple (a) and multiphysics (b) models following to depth (x) at height +300 mm

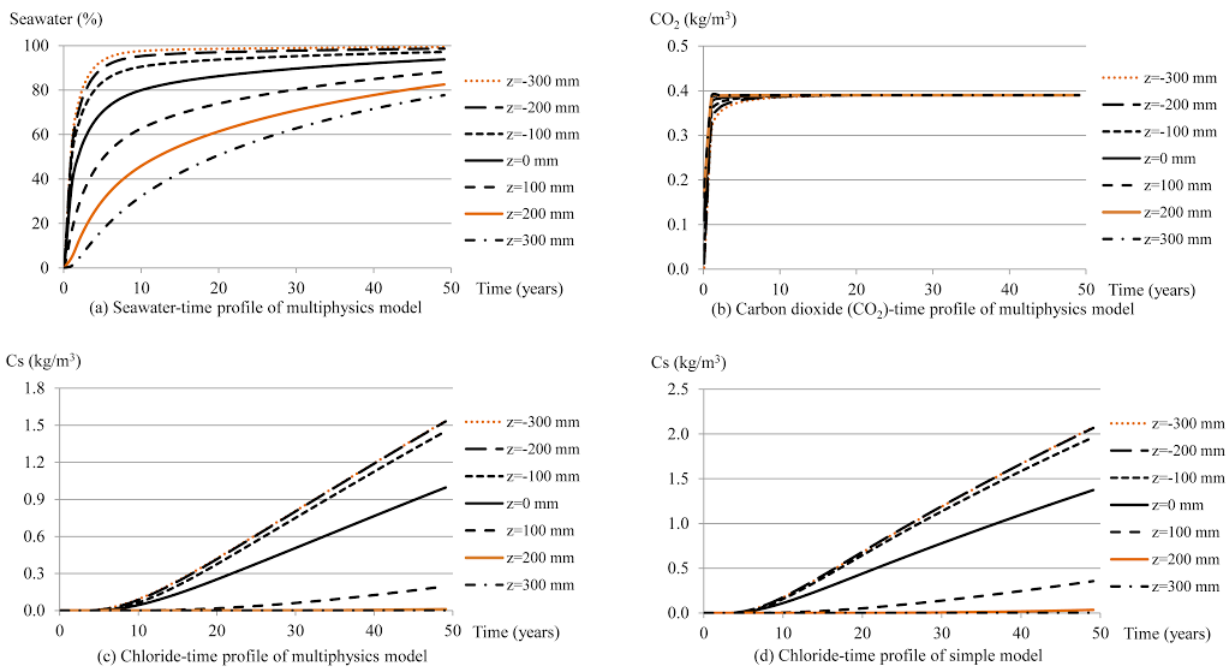


Fig. 4 Comparison of simple and multiphysics models following to height (z) at depth 100 mm

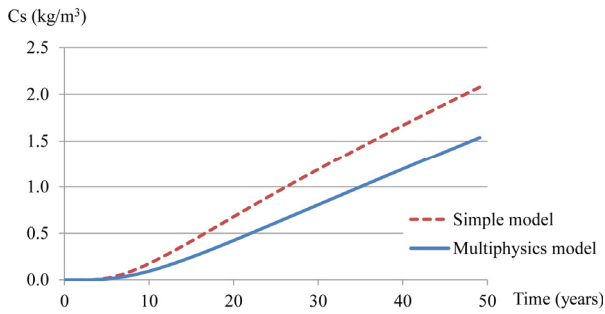


Fig. 5 Chloride-time profiles of simple and multiphysics models at depth 100 mm and height +300 mm

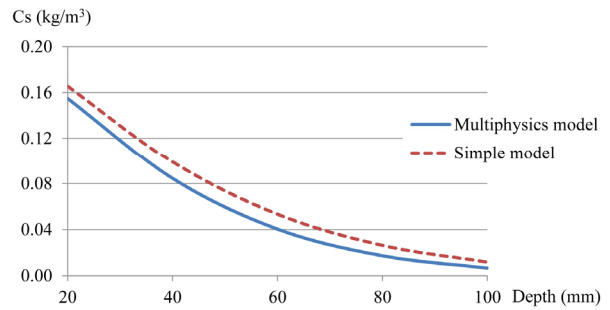


Fig. 6 Chloride-depth profiles of simple and multiphysics models after 12 years at height -300 mm

을 포함하지 못하는 한계를 지니고 있으나 일부 국내의 실제 측정된 데이터나 Meira et al. (2010)의 연구결과에서와 같이 표면에서 대략 1~10 mm 깊이에서 염분량의 증가가 관찰되었다. 이는 간만의 차가 있으며 건습작용이 반복되는 경우, 해수에 있는 염분이 콘크리트 내부로 이동한 경우, 표면 부근에서 염분 결정체가 생성되기 때문인 것으로 알려져 있다. 하지만 이에 대한 메카니즘이 정확히 알려지지 않았기 때문에 지속적인 현장검증 연구 및 모사할 수 있는 해석기법의 개발이 요구되고 있다. 우리나라나 유럽의 경우 일부 지역에서는 간만대보다는 오히려 해중에 계속적으로 노출된 콘크리트에서, 표면에서의 염분량이나 콘크리트 내부로의 염분침투 정도가 더 활발히 진행되는 것을 목격할 수 있었다(KCI, 2010).

현재 한국농촌공사의 콘크리트 현장폭로실험 자료구축이 진행되는 중이기 때문에 Multiphysics 모델과 단순 모델 중 어느 것이 더 현실을 정확히 표현한다고 판단하기는 한계가 있다. 만약 설계자가 10년에서 20년 이후에 발생할 유지보수를 안전 측으로 계산하고 싶다면 중성화를 고려하지 않은 염화물의 침투를 한계상태식으로 설정하여야 한다. 하지만 10년 이후 중성화를 고려한 현장시험 결과와 Multiphysics 모델과의 큰 차이가 발생하지 않는다면 본 모델을 이용하는 것이 복구공사비 절감 차원에서 보다 현실적이라 판단된다. 정확한 해석을 위해서는 중성화를 고려한 모델이 필요할 것으로 보이며 형상을 고려한 경우는 그 차이가 더욱 극명할 것으로 보인다.

V. 결 론

대부분의 콘크리트 염해침투는 경험식에 기초하여 예측하거나 유한차분법을 도입한 수치해석적 방법을 이용한다. 그러나 유한차분법은 전 도메인에 대하여 동일한 크기의 격자를 이용하여야 하기 때문에 격자를 생성하는 방법이 비효율적이고 이로 인해서 해석 시간이 길어질 수 있는 단점이 있다.

이를 해결하기 위한 방안으로 능동 격자를 이용한 해석모델을 개발하기 위하여 유한요소법을 적용하였다.

현재까지의 실용적인 결과 도출을 위해 개발이 필요하였던 3차원 모델을 제안하였으며, 다양한 확산이 실시간으로 고려되도록 하였다. 기존 시방서상에서 제시한 중성화를 고려하지 않은 단순모델과 비교하여 본 연구에서 다룬 Multiphysics 모델은 염분 침투정도를 다소 과소평가한다.

현재 측정된 실제 실험결과는 10년 미만의 자료밖에 확보가 불가함으로 보다 더 장기간의 콘크리트 염분확산 및 중성화 진행에 관한 연구결과를 통해서 검증에 시간이 요구된다. 하지만 본 모델은 중성화를 고려한 Multiphysics 모델임으로 이론적으로 더욱 현실세계를 잘 반영할 수 있다고 볼 수 있다. 따라서 보수보강을 위한 설계자의 입장에서 좀 더 안전측으로 고려하고자 한다면 기존 시방서상의 단순모델의 적용이 맞을 것이지만, 10년 이후 실제 실험치가 본 모델과 일치한다면 공사비 절감을 위해 Multiphysics 모델을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

본 모델은 유한요소법에 기초하였기 때문에 향후 온도나 습도의 변화와 같은 다양한 물리적인 환경을 쉽게 이식시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 표면에서의 비말대와 간조대의 메카니즘을 사실적으로 묘사할 수 있고 콘크리트로 내부로 침투된 해수가 건조에 의해 증발되는 과정을 포함하는 포괄적 모델로 확장될 수 있을 것으로 보인다.

REFERENCES

1. Ann, K. Y., J. H., Ahn, and J. S., Ryou, 2009. The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures. *Construction and Building Materials* 23(1): 239-245.
2. Arora, P., B. N., Popov, B., Haran, M., Ramasubramanian, S., Popova, and R. E., White, 1997. Corrosion initiation time of

- steel reinforcement in a chloride environment – a one dimensional solution. *Corrosion Science* 39(4): 739-759.
3. Bentz, E. C., and M. D. A., Thomas, 2001. Manual of Life-365, Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides.
 4. Bitaraf, M., and S., Mohammadi, 2008. Analysis of chloride diffusion in concrete structures for prediction of initiation time of corrosion using a new meshless approach. *Construction and Building Materials* 22(4): 546-556.
 5. Chatterji, S., 1995. On the applicability of Fick's second law to chloride ion migration through portland cement concrete. *Cement and Concrete Research* 25(2): 299-303.
 6. Ehlen, M. A., M. D., Thomas, and E. C., Bentz, 2009. Life-365 Service Life Prediction Model™ Version 2.0. *Concrete international* 31(5): 41-46.
 7. Song, H.-W., S.-W. Pack, and K. Y. Ann, 2007. Time dependent chloride transport evaluation of concrete structures exposed to marine environment. *Journal of the Korea Concrete Institute* 19(5): 585-593. (in Korean).
 8. Japan Society of Civil Engineers (JSCE). Standard specification for durability of concrete. *Concr Libr* 2002: 108. (in Japanese).
 9. Kassir, M. K., and M., Ghosn, 2002. Chloride-induced corrosion of reinforced concrete bridge decks. *Cement and Concrete Research* 32(1): 139-143.
 10. Korea Rural Community Corporation, 2012. Development of the Maintenance System for Saemangeum-Gate Bridge Concrete. Ansan-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea: Korea Rural Community Corporation. (in Korean).
 11. Leandro, J., A. S., Chen, S., Djordjević, and D. A., Savić, 2009. Comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled (sewer/surface) hydraulic models for urban flood simulation. *Journal of hydraulic engineering* 135(6): 495-504.
 12. Lee, C. S., and M. W. Kim, 2013. Development of maintenance simulation system and prediction of chloride ion permeation for marine concrete structures. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection* 17(1): 64-75. (in Korean).
 13. Lee, C. S., and M. W. Kim, 2014. Prediction of service life for marine concrete structures by exposure experiments. *J. Korean Soc. Hazard Mitig* 14(3): 341-349. (in Korean).
 14. Liska, R., and B., Wendroff, 2003. Comparison of several difference schemes on 1D and 2D test problems for the Euler equations. *SIAM Journal on Scientific Computing* 25(3): 995-1017.
 15. Marchand, J., and E., Samson, 2009. Predicting the service-life of concrete structures – Limitations of simplified models. *Cement and Concrete Composites* 31(8): 515-521.
 16. Mebarkia, S., and C., Vipulanandan, 1995. Mechanical Properties and Water Diffusion in Polyester Polymer Concrete. *Journal of Engineering Mechanics* 121(12): 1359-1365.
 17. Meira, G. R., C., Andrade, C., Alonso, J. C., Borba Jr., M., Padilha Jr., 2010. Durability of concrete structures in marine atmosphere zones – the use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator. *Cement and Concrete Composites* 32: 427-435.
 18. Ministry of Construction and Transportation (MOCT). Standard specification for concrete structures on durability. Kimundang, Seoul, Korea, 2004. (in Korean).
 19. Pack, S.-W., M.-S., Jung, H.-W., Song, S.-H., Kim, and K. Y., Ann, 2010. Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment. *Cement and Concrete Research* 40(2): 302-312. (in Korean).
 20. Shimomura, T., and K., Maruyama, 2004. Durability of Reinforced Concrete Structures with Externally bonded FRP sheets. The Second International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Adelaide, Australia.
 21. Song, H.-W., C.-H., Lee, and K. Y., Ann, 2008. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. *Cement and Concrete Composites* 30(2): 113-121. (in Korean).
 22. Song, H.-W., H.-B., Shim, A., Petcherdchoo, and S.-K., Park, 2009. Service life prediction of repaired concrete structures under chloride environment using finite difference method. *Cement and Concrete Composites* 31(2): 120-127.
 23. Tang, L., and L. O., Nilsson, 1992. Chloride diffusivity in high strength concrete at different ages. *Nordic concrete research* 11: 162-171.
 24. Tang, L., and L. O., Nilsson, 1992. Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field, *ACI Materials Journal* 89(1): 49-53.
 25. Tang, L., and L.-O., Nilsson, 1992. Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field. *ACI Mater. J.* 89: 49-53.
 26. Thomas, M. D. A., and P. B., Bamforth, 1999. Modelling Chloride Diffusion in Concrete-Effect of Fly Ash and Slag. *Cement and Concrete Research* 29: 487-495.
 27. Uji, K., Y., Matsuoka, and T., Maruya, 1990. Formulation of an Equation for Surface Chloride Content of Concrete due to Permeation of Chloride. *Corrosion of Reinforcement in Concrete*, Elsevier Applied Science, pp. 258-267.
 28. Zhang, J. Z., I. M., McLoughlin, and N. R., Buenfeld, 1998. Modelling of chloride diffusion into surface-treated concrete. *Cement and Concrete Composites* 20(4): 253-261.
 29. Korea Concrete Institute, 2010. Chloride Durability Design of Offshore Concrete, Kimundang. (in Korean).