



Moving Mesh Technique을 이용한 2차원 염해 침투 예측 모델의 개발

Development of Two Dimensional Chloride Ion Penetration Model Using Moving Mesh Technique

최원* · 김한중**,†

Choi, Won · Kim, Hanjoong

Abstract

Most of chloride diffusion models based on finite difference method (FDM) could not express the diffusion in horizontal direction at each elevation. To overcome these weakness, two dimensional chloride ion penetration model based on finite element method (FEM) to be able to combine various multi-physics simultaneously was suggested by introducing moving mesh technique. To avoid the generation of mesh being able to be distorted depending on the relative movement of water level to static concrete, a rectangular type of mesh was intentionally adopted and the total number of meshes was empirically selected. The simulated results showed that the contents of surface chloride decreased following to the increase of elevation in the top part of low sea level, whereas there were no changes in the bottom part of low level. In the DuraCrete model, the diffusion coefficient of splashed zone is generally smaller than submerged zone, whereas the trend of Life365 model is reverse. Therefore, it could be understood that the developed model using moving mesh technique effectively reflects DuraCrete™ model rather than Life365™ model. In the future, the model will be easily expanded to be combined with various multi-physics models considering water evaporation, heat of hydration, irradiation effect of sun and so on because it is based on FEM.

Keywords: DuraCrete; chloride; finite element method; moving mesh technique

1. 서 론

해안가에 설치된 구조물은 해수에 포함된 염화물의 침투에 상시 노출되어 있다. 특히, 이러한 염화물은 철근 부식을 유발하는 주요 인자이기 때문에 염화물의 침투깊이가 철근이 설치된 위치에 도달하기 이전에 콘크리트 표면을 보수하여 구조물의 수명을 늘리고자 하는 연구가 다수 진행되었다 (Song, Lee, & Ann, 2008; Val & Stewart, 2003; Zhang, McLoughlin, & Buenfeld, 1998; Ji, Tan, & Yuan, 2009). 염화물의 침투는 콘크리트의 위치별 상대적인 수분함량, 미세공극을 통한 모세관 현상, 수압의 변화에 의한 콘크리트 내부 압력의 변화, 콘크리트 구성 물질의 특성, 구조물 주변 환경의 영향 등에 의해서 영향을 받는다. 현재까지 모델들 중 콘크리트의 염해 침투를 잘 표현할 수 있는 모델은 확산계수를 이용하는 방법으로 알려져 있다. 대부분의 확산모델에서 침투계

수는 시간의 흐름과 더불어 감소하는 특징을 가지고 있는데 이는 콘크리트의 수화작용이 콘크리트 내부의 치밀도를 증가시키는 현상을 잘 반영한다. 그러나 현재까지 개발된 모델은 경험적인 공식에 기초한 단순 모델이거나 유한차분법 (Finite Difference Method)을 기반으로 한 수치해석 모델이 대부분이었다 (Leandro, Chen, Djordjević, & Savić, 2009; Liska & Wendroff, 2003; Marchand & Samson, 2009).

유한차분법은 도메인을 구성하는 미분방정식을 만족하는 임의의 점의 해석 값을 수치적으로 계산할 때, 주변 지역과의 상호 관계를 차분의 형태로 나타내고, 위상학적 관계만을 이용해서 다루기 때문에 형태에 제약을 받을 수밖에 없으며, 다양한 다중물리현상 (Multi-physics phenomenon)을 구현하는데도 수치적인 약점을 보이고 있다. 또한 구조형태가 복잡하거나 다양한 물리 현상이 복잡하게 유기적으로 조직화될수록 수렴 속도가 기하급수적으로 늘어나는 한계도 보인다.

현장에서 실무적으로 적용 가능한 염분침투 모델은 크게 두 가지로 구분해 볼 수 있다. 하나는 미국을 중심으로 개발된 Life365™ 모델이며, 다른 하나는 실제 실험 데이터를 바탕으로 신뢰성 코드에 기초한 DuraCrete™ 모델이다. Life365™ 모델은 수중구간보다 비말대 구간에서의 염분침투가 더욱 빠르다는 기본 가정을 가지고 출발하지만, DuraCrete™ 모델은 실제 측정된 데이터를 바탕으로 신뢰성 해석에 기초하여 접근하기 때문에 좀 더 능동적으로 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. Life365™ 모델은 재료의 특성이나 환경적인 요인

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

** Professor, Department of Bioresource and Rural System of Engineering, Hankyong National University

† Corresponding author

Tel.: +82-31-670-5135 Fax: +82-31-673-2704

E-mail: hanjoong@hknu.ac.kr

Received: May 22, 2015

Revised: September 17, 2015

Accepted: October 1, 2015

에 따른 경험식에 입각한 사용자 중심의 편의성 모델인데 비해서, DuraCrete™ 모델은 Level 2 방법에 기초한 확률론적 계산을 수행하기 때문에, Life365™ 모델에 비해서 상세한 환경 분류가 가능하고, 내구수명과 목표 신뢰성지수를 통해서 염분침투계수를 산정할 수 있는 특징을 가지고 있다. 최근에는 부산-거제간 민자 고속도로 건설사업 등에 이러한 DuraCrete™ 모델이 적용되었으며, 우리나라의 경우 수중구간이 비말대보다 더욱 침투가 빠르다는 결론을 이끌어 내고 있다. 그러나 DuraCrete™ 모델도 1차원 해석 모델이기 때문에 구조물의 위치별로 해수의 침투량의 변화는 보여주지는 못하는 단점을 가지고 있다.

기존 연구에서 제시한 모델의 염분 침투량 산정은 대표 지점의 평균값 산출 개념으로 단순화해서 계산하여왔다. 또한 대부분의 모델은 격자의 형태가 제한적이고 다양한 물리현상과 접목이 가능하지 못한 유한차분법에 기초하여 개발되어왔다. 따라서 본 연구는 추후 다양한 물리 현상이 접목 가능한 유한요소법을 주 해석엔진으로 적용하고, 이 모델에 Moving Mesh Technique을 결합하여 실제 해수의 조석 움직임에 따라서 수중구간 및 조간대에서 실시간 염분침투량을 모사하고, 염해 손상부위의 보수를 위해서 전체적인 단면을 대상으로 시행하던 기존의 일괄적인 보수방법 대신에, 구조물의 높이별로 염분의 침투량을 현실적으로 평가하여 합리적인 보수 기법을 제시할 수 있는 평가모델을 제안함을 목적으로 한다.

II. 염해예측모델

1. 기본모델

콘크리트 내부로 염화물이 침투하는 현상은 공극수를 통한 염소 이온의 확산(diffusion)과 모세관 내부 공극수 자체의 이동(convection)으로 구분될 수 있다. 일반적으로 외부 습도와 콘크리트 내부 습도의 분포가 연중을 통해서 일정하다고 가정하면 convection에 의한 이동은 무시할 수 있다. 따라서 현재까지의 모델 중 염화물침투 현상을 실제적으로 잘 반영할 수 있는 이론은 Fick의 제 2 법칙으로 확산계수만을 이용한 방법이다 (Pack et al., 2010; Song et al., 2008).

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

여기서, t 는 시간(초), C 는 염화물 이온 축적량(kg/m^3), D 는 염화물이온의 확산계수(m^2/s).

위의 미분 방정식을 풀기 위한 해법으로 Laplace 방정식에

기초한 2차원 유한요소 해석법을 도입하였다. 또한 해석 효율을 높이고 시간을 절약하기 위해서, 격자의 효율적 배치가 가능한 사면체 격자가 이용되었다.

2. 표면염분농도

표면 염화물량은 크게 두 가지 방법으로 구분할 수 있다. 하나는 시간의 흐름에 따른 변동된 값을 적용하는 경우 (Ann et al., 2009; Arora et al., 1997; Ha-Won et al., 2007; Kassir and Ghosn, 2002; Song et al., 2009; Weyer et al., 1994)이고 다른 하나는 고정된 값으로 가정 (Weyers, 1993)하는 경우이다. 우리나라 또는 일본에서 수십년간 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_s 는 표면 염화물의 농도(kg/m^3), α 와 β 는 바다로부터의 거리에 따른 계수: $\alpha = 1.52$ and $\beta = 3.77$.

3. 염분확산계수

콘크리트 내에서 염소이온의 확산계수는 시간에 따라 일정한 것이 아니라 콘크리트의 수화가 진전되기 때문에 감소하는 경향을 보인다. 일반적으로 확산계수의 시간 의존성은 다음과 같이 표현할 수 있다 (Takewaka and Mastumoto, 1988; Tang and Nilsson, 1992; Bentz and Thomas, 2001).

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

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

여기서, $D(t)$ 는 염화물 이온의 확산계수(m^2/s), t_{ref} 는 기준시간(1 year), D_{ref} 는 기준시간 시점의 염화물이온의 확산계수(m^2/s), t_c 는 30년 시점, n 은 경과시간에 따른 계수, 기본 값으로 0.2를 사용함.

4. 시뮬레이션 설정조건

가. DuraCrete™ 모델

부산시 및 경남도청에서 2004년에 발주한 ‘부산-거제간

Table 1 Environmental exposure grade of the site and the bridge

Zone	Region	Exposure condition
Air (+3.5 m)	Outer Pier Outer Tower Upper Slab	Carbonation and chloride penetration by the carbon dioxide (CO ₂) in the atmosphere and seawater blowout
Splash and submerged zone (-9.5 ~ +3.5 m)	Outer Pier Outer Tower Upper Cason	Wet and dry conditions due to repetitive tide of the sea water
Under water (-9.5 m)	Lower Cason	The environment outside of the structure is continually exposed to sea water

Table 2 Coefficient of Diffusion of Chloride Ion Penetration

Exposure grade	Max of diff. coeff. (m ² /s)	Min. cover depth (mm)
Air	3.5×10 ⁻¹²	50
Splash and submerged zone	3.5×10 ⁻¹²	75
Under water	6.5×10 ⁻¹²	75

연결도로 민간투자사업'은 사장교를 포함한 총 8개 교량 4.5 km와 침매터널 3.7 km를 합해 총 8.2 km로 구성된 구조물의 목표내구연한은 철근의 부식이 시작되는 시점으로 100년으로 가정하였다 (Jeong, Chang, & Jang, 2005; Kim, Cha, & Jang, 2009; Gu, 2008). 본 사업은 노출환경과 교량의 부위별 노출등급을 구분하였으며, 세분화된 내용은 Table 1에 요약하였다.

DuraCrete™ 모델은 교량의 부위와 환경에 따른 노출등급에 따라서 염화물확산계수를 산정하기 위하여 실제 데이터의 측정치, 실험결과, 일부 공학적인 판단을 근거로 이용한다. 확산계수 및 시간의존계수를 변수로 설정하여 다양한 환경조건을 고려하였으며, 실제 DuraCrete™ 모델의 계산에 이용된 설계변수의 자세한 사항은 Table 2에 나타내었다. 사용된 변수 중 국내기준 (콘크리트 표준시방서 내구성편)에서 제시된 값과 상이한 값은 임계염화물 농도이다. 피복두께의 경우 국내 기준은 수중구간 및 해수에 접하는 구조물의 경우 최소 80 mm 이상을 제시하고 있으며, ACI 기준은 100 mm 까지 제시한다. 그러나 이는 염화물침투에 저항하는 콘크리트의 품질 특성을 반영하지 않고 충분한 피복 두께만을 반영한 값으로서 경험치적인 값인데 비해서, DuraCrete™ 모델은 실제 특성을 반영할 수 있는 확률론적 특성을 가지고 있기 때문에, 구조계산에서 사용되는 피복두께 (표면으로부터 주철근까지의 거리)가 사용되었다.

나. Moving mesh technique 적용을 위한 설계조건

본 모델은 Moving Mesh Technique을 이용하여 바닷물의

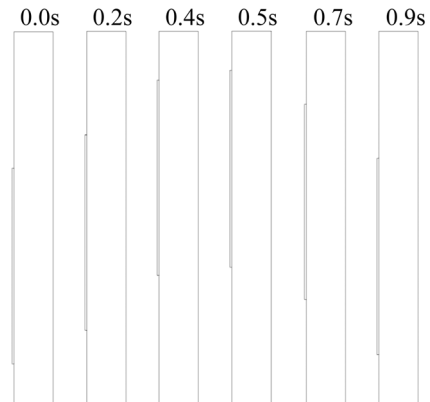


Fig. 1 Movements of sea water level depending on time

이동을 묘사하기 때문에 염화물이 침투되는 영역은 크게 구간대 및 수중구간으로 나뉜다 (Table 3). 이 중 바닷물의 침투는 수중구간에서는 계속적으로 일어나기 때문에, 수중구간의 최대 염화물 확산계수를 본 모델의 확산계수로 선택하였다. 또한 중성화, 알칼리골재반응, 화학적 침식, 동결융해 등은 고려하지 않는다. 따라서 확산계수는 Duracrete™ 모델에서 제시한 6.5×10⁻¹²을 선택하였으며, 조수 간만의 차이로 이동하는 바닷물을 묘사하기 위하여 가상의 사각형 박스 (Virtual Rectangular Shape)를 설정하였다 (Fig. 1).

사각형 박스는 비말대 구간을 1년을 주기로 움직이는 것으로 설정하였으며, 비말대와 구간대를 통하여 염분 침투가 이루어지는 것으로 가정하였다. 그리고 사각형 박스의 왼쪽은 염분의 표면 농도로 설정하였고, 오른쪽 경계는 콘크리트와 맞닿을 때 염분이 침투되도록 설정하였다. 또한 바닷물로부터 콘크리트 내부로의 염분침투 시간 지체를 최소화하기 위해서 사각형 박스의 폭은 10 mm로 설정하였다. 시간이 0에서 바닷물의 상부는 +z로 하부는 -z로 좌표체계를 설정하였으며, 바닷물의 침투를 지배하는 물리적인 현상은 확산계수만의 지배를 받는다고 설정하였다. 염분확산계수는 시간에 따라서 그 값이 감소하지만, 표면의 염분량은 반대로 증가하는

Table 3 Model parameters

Conditions	Physics of chloride ion	Under water zone		Splash and submerged zone	Etc.
		Left side	Right side		
Boundary conditions	Penetration	No	Yes	Yes	Flux
	Concentration	$C_s \text{ kg/m}^3$	-	-	Equation (1)
Domain conditions	Diffusion coefficient	$D(t) \text{ kg/m}^3$		$D(t) \text{ kg/m}^3$	
	Concentration	$C_s \text{ kg/m}^3$		0.0 kg/m^3	

시간의존성도 고려하였다. 염화물의 침투는 비말대와 조간대에서 바닷물과 접하는 경우만 가능하다고 가정하였으며, 표면 농도의 변화는 식 (2)를 이용하여, 염화물의 침투와 관련된 확산계수는 식 (3)을 이용하여, 시간에 따라 변화하는 함수로 설정하였다.

격자의 형태는 복잡한 구조물 형상도 효율적으로 묘사할 수 있는 Tetrahedron 형태가 선택되어야 하지만, Moving Mesh Technique를 적용할 때 Mesh의 찌그러짐을 최소화시키기 위하여 사각형 격자가 이용되었다. 총 격자는 2,096 개가 이용되었으며 Minimum Mesh Quality는 0.9441, Averaged Mesh Quality는 0.9967로 높은 격자 정밀도를 갖도록 하였다. 해석 Solver로는 메모리 활용을 최소화하면서 Laplace 방정식을 계산하는데 최적화 되어있는 PARDISO (Parallel Direct Solver)가 이용되었다. 시뮬레이션 총 시간은 50년을 설정하였으며, 시간 스텝은 0.05년을 단위로 계산되었다. 또한 수렴 조건은 상대오차가 0.1 % 이내가 되도록 설정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 적용엔진의 유효성 검증

본 연구는 선행 연구인 Multi-physics 3D model을 기본엔진으로 여기에 Moving mesh technique을 결합하여 수치해석을 수행한다. Multi-physics 3D model의 엔진은 이미 유효성이 검증된 방법으로 구체적인 내용은 다음과 같다(Choi, & Kim, 2015). 가로, 세로, 높이가 200 mm인 사각형 블록을 이용하여 깊이 80 mm에서 30년 후에 침투량을 예측하였다. 이때, 콘크리트 표면의 염분량 변화는 식 (2)를 따른다고 가정하였으며, 물 시멘트 배합비(w/c)는 0.3, 기준시간은 28일, 콘크리트 내부로의 확산계수는 $10^{(-12.06+2.4 \times w/c)} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 시간에 따라서 식 3의 지배를 받는다고 가정하였다. Song et al. (2009)이 연구한 내용과 비교해 본 결과 상대오차가 5 % 이내에 있음을 확인할 수 있었기 때문에 본 모델을 적용하는 것은 타당하다고 판단된다.

2. 염분침투엔진과 Moving Mesh Technique의 결합

선행 연구에서 개발된 Multi-physics 3D model 엔진에 해수의 이동을 묘사할 수 있는 Moving Mesh Technique를 결합하여 사실적인 염분침투를 묘사할 수 있는 2차원 해석모델을 시도하였다. 시작점을 기준으로 해수면이 위로 움직였다가 아래로 내려오는 방식을 한 주기로 택하였기 때문에 시작점 아래는 상시 해수에 접하는 구역으로 가정하였다. 조석 간만의 차이는 하루에 두 번 발생하며 일 년이면 724번 발생하지만 수치해석 시간을 단축시키기 위해서 1년에 한 번만 조석 간만의 차이가 발생하는 것으로 가정하였다. 그리고 해수의 움직임은 싸인 함수를 따라서 선형으로 움직인다고 가정하였다.

본 모델에서는 조석 간만의 차이에 의해 해수는 0.5 m가 움직인다고 가정하였으며, 콘크리트는 표면으로부터 100 mm까지를 관찰하려는 두께로 가정하였기 때문에 안전치를 고려하여 콘크리트의 크기는 200 mm (높이 1.9 m)로 설정하였다. 또한 염분의 침투를 위한 해수 도메인에서 맨 왼쪽 경계면은 표면 농도로 정의하였는데, 이러한 표면 농도가 오른쪽 콘크리트로 빠르게 전달되기 위해서 해수의 폭은 매우 좁아야 한다. 그러나 너무 좁아진다면 왼쪽과 오른쪽의 mesh 크기가 달라지기 때문에 Moving Mesh 과정 중 오류가 발생할 수 있고, 만약 너무 많은 mesh를 생성한다면 해석시간이 기하급수적으로 느려질 것이다. 따라서 해수의 폭은 경험적으로 결정되었으며, 본 수치해석 상에서는 10 mm로 설정하였다. 그리고 해수는 0.5 m의 조석 간만의 차이가 발생한다고 가정하였기 때문에 해수의 길이는 그 두 배인 1.0 m로 설정하였다. 그러나 수치해석 모델에서 0.5 m는 실제 해수의 조석 간만의 차이와는 일치하기 않기 때문에 상사 법칙을 이용하여 실제 높이를 보정해야 한다. 따라서 실제 해수의 조석 간만의 차이를 계산할 필요가 있다. 자료는 실시간 해양관측 정보시스템 자료를 활용하였으며, 위치는 경상남도 거제군 조위관측소(주소: 경상남도 거제시 일운면 구조라리, 위도: 북위 34도 48분 05초, 경도: 동경 128도 41분 57초)를 기준으로 작업하였다. 2014년 3, 6, 9, 12월 일 자료의 조석 간만의 차이를 산술평균하였으며, 계산된 평균 조석 간만의 차이는 129.57 cm로 산정

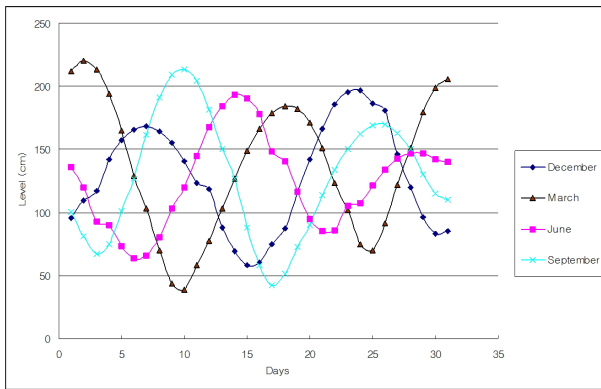


Fig. 2 Tidal range per day in Geoje station, the Republic of Korea (2014)

되었다 (Fig. 2). 따라서 수치해석상에서 0.5 m의 움직임은 129.57 cm에 상응하는 값으로 이해할 수 있다.

3. 기존 모델과의 비교

Fig. 3은 시간에 따른 해수의 농도 변화를 50년까지 시뮬레이션 한 결과이다. 앞에서 언급한 DuraCrete™ 모델을 통한 염분침투량 계산결과는, 수중이 조간대 구간보다 약 2배 높다고만 언급하였지, 실제 조간대 구간에서 높이별로 어떻게 변화하는지는 보여주지 못하는 한계가 있다. 하지만 본 연구에서는 Moving Mesh Technique과 수치해석 엔진을 접목하여, 조간대에서 높이가 증가할수록 침투량이 감소하는 경향성을 뚜렷이 묘사하였다. Fig. 4는 수중에 잠긴 콘크리트에 침투하는 염분의 양이 시간에 따라서 변화되는 양상을, 콘크리트 표면으로부터 깊이 100 mm에서 모델별로 비교하였다. 여기서 Simple Model이란 현재 콘크리트 시방서에서 제시하는 단순 확산모델을 의미하며, Multiphysics 3D Model은 본 연구에서 확산 (Diffusion) 엔진으로만 사용된 모델이다. 그리고 Moving mesh 2D Model은 본 연구에서 개발된 최종 모델을 의미한다. 결과에서 알 수 있듯이 본 연구에서 개발된 모델은 Multiphysics Model에 좀 더 가깝게 근접하였지만 Multiphysics Model에 비해서 좀 더 안전 측 설계가 가능함을 알 수 있었다.

Fig. 5의 (a), (b), (c)는 콘크리트의 높이에 따른 깊이방향으로의 염화물의 침투양상의 변화를 보여준다. 상층부로 갈수록 염화물의 침투량이 감소함을 알 수 있으며, 침투곡선이 더욱 요동치는 것도 관찰할 수 있다. 이는 상층부로 갈수록 해수 수위의 변화가 뚜렷이 반영되고 이로 인해서 침투의 양상이 변하는 구간(염화물이 침투되는 시기와 그렇지 않은 시기)이 시간을 두고 명확하게 구별되기 때문이다. 특히, 콘크리트의 표면부일수록 그러한 현상은 더욱 두드러지게 나타남을

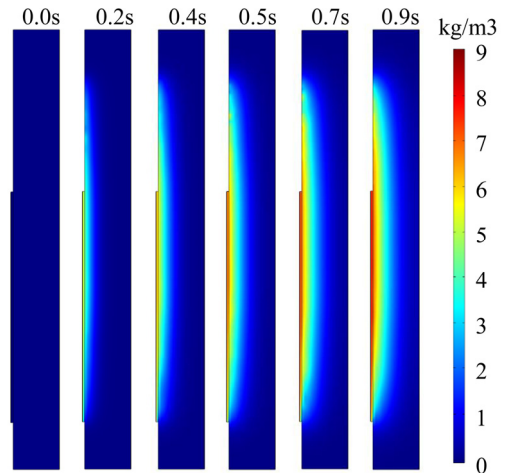


Fig. 3 Chloride distributions due to moving seawater source depending on time

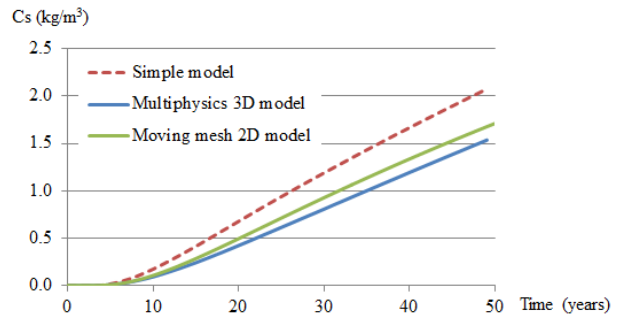


Fig. 4 Comparison of moving mesh technique and other models

알 수 있었다. 향후 본 모델을 응용한다면 지금까지 획일적으로 전 표면에 대한 보수 보강이 이루어진 부분을 구간별로 나누어 경제적으로 보수 보강을 하는 것을 가능하게 할 수 있을 것이다. 또한 본 모델은 유한요소해석법에 기초를 두고 있기 때문에, 농업토목구조물처럼 수중에 일부 잠긴 구조물(여수토 등)에서 중력의 영향에 의해 침투가 상부에서 하부로 전달되는 양상도 묘사할 수 있는 모델로의 확장도, 쉽게 가능할 것으로 보인다. 또한 복사열에 의한 콘크리트의 온도 상승이나 대기의 습도 변화에 따른 콘크리트 표면의 염분 침투량 변화와 같은 다중물리현상을 구현하는데 쉽게 접근이 가능할 것으로 보인다.

Fig. 5의(d)는 맨 상층부와 하층부 사이에 침투량이 대략 2배가 차이가 나는 것을 보여주고 있다. DuraCrete™ 모델에서는 조간대와 상시해수면의 침투계수가 2배 차이를 보이고 있는데, 이는 해수가 가장 최대로 올라갈 수 있는 맨 상층부와 해수에 늘 접해있는 부분의 차이임을 본 모델을 통해서 유추할 수 있다. 콘크리트 표면에서 해수방향으로 아주 얇은 경계층이 형성되어, 이러한 경계층으로부터 염분량의 감소가

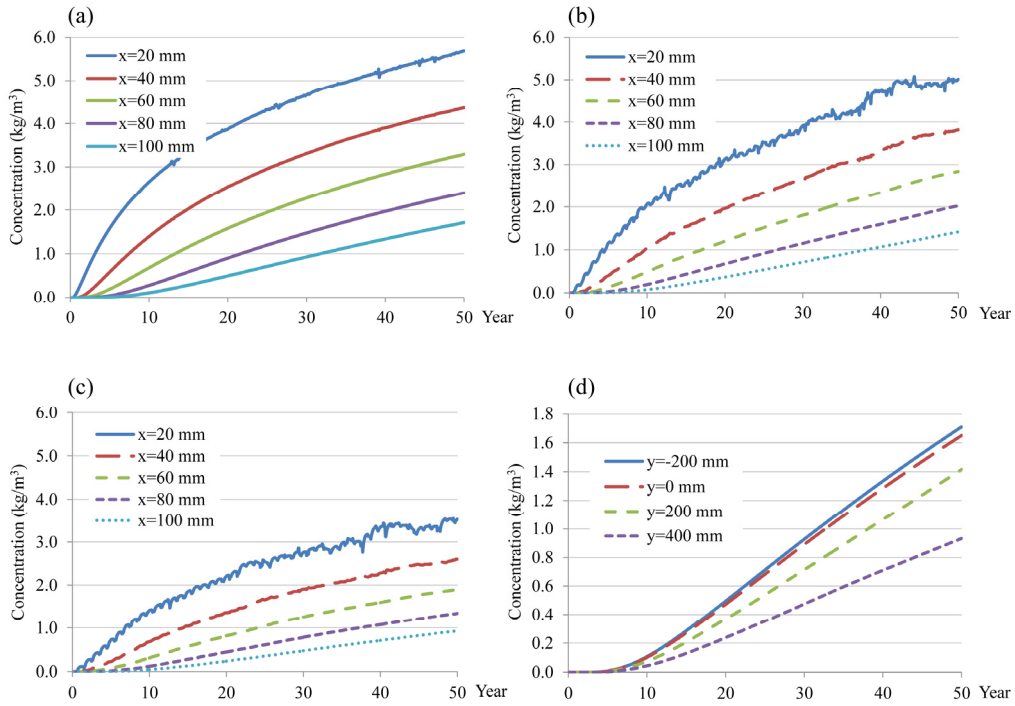


Fig. 5 Chloride (kg/m^3)-depth (x)-time (year) profiles at height (a) -200, (b) +200 and (c) +400 mm, and (d) Chloride (kg/m^3)-height (y)-time (year) profiles at depth 100 mm

관찰된다고 하였다. 또한 표면에 코팅을 한 경우는 코팅부에서 콘크리트 표면까지 급격한 염분량의 감소를 보인 후 그 이후는 일정하게 감소하는 경향을 보인다고 기술하였다. 이는 간만의 차가 있으며 건습작용이 반복되는 경우 해수에 있는 염분이 콘크리트 내부로 이동할 때 표면 부근에서 염분 결정체가 생성되기 때문인 것으로 알려져 있다. 지금까지 연구된 내용들에 대한 정확한 메커니즘이 알려지지 않았기 때문에 현재까지 연구의 수준은 미비하지만, Meira et al. (2010)의 연구결과에서는 표면에서 대략 1~10 mm 깊이에서 염분량의 증가가 관찰되었다고 보고 한 바 있으며, 불연속 함수를 이용하여 표면 근처의 염화물 축적량을 예측하는 방법을 사용한 바 있다. 따라서 향후 연구 방향은 본 모델을 이용하여 표면에서의 조위 메커니즘을 좀 더 사실적으로 묘사할 수 있는 다양한 모델로의 확장을 고려할 것이다.

IV. 결론

현재까지 개발된 콘크리트 염해침투 모델은 콘크리트 시방서에서 제시하는 경험식에 기초한 1차원 해석 방법이 주를 이루고 있으며, 특히 대부분의 모델은 유한차분법을 이용하

고 있는데, 유한차분법은 미분방정식의 유도 없이 직접적으로 상호관계를 도출해내는 방법이기 때문에 성격이 다른 다중 물리 현상을 결합하는데도 어려움이 있다.

이에 반해서, 확률론적 해석이론에 배경을 둔 DuraCrete™ 모델은 구조물의 내구성 설계를 위한 기준으로 유럽을 중심으로 개발되었다. 신뢰성 해석을 기반으로 한 하중저항설계법과 동일한 방법으로 구조물의 내구성 한계를 설정하고 여기에 더하여 환경적 열화 요인을 고려한 실질적인 설계방법이다. 또한 구조물의 사용수명을 계산하는데 합리적으로 결정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 DuraCrete™ 모델은 조건대에서 높이에 따른 염분의 변화 양상을 보여주지 못하는 한계를 가지고 있다. 이러한 DuraCrete™ 모델을 보완할 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발하기 위하여 유한요소법에 기초한 염해침투 모델과 Moving Mesh Technique를 이용하여, 2차원 염해침투를 사실적으로 구현할 수 있는 모델을 개발하였다. 이 때 해석 시간을 단축하기 위해서 해수의 움직임은 1년을 주기로 움직인다고 가정하였다. 해석 결과는 시간에 따른 비탈대구간과 수중구간의 염분 침투 양상을 높이에 따라서 표현해 줄 수 있었다. 따라서 향후 본 모델을 이용한다면 높이에 따른 효율적인 보수 보강공사를 시행할 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. Choi, W., and H. J. Kim, 2015. Development of three dimensional chloride ion penetration model based on finite element method. *Korean Society of Agricultural Engineers* 57(5): 43-49 (in Korean).
5. Edvardsen, C. K., Y. J. Kim, S. J. Park, S. K. Jeong, and H. C. Im, 2006. Busan-Geoje fixed link concrete durability design for the bridges and tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* 21(3-4): 432.
6. Gu, I. S., 2008. The study on the mix design of high durable marine concrete for GK project. Master's Thesis, University of Ulsan, South Korea (in Korean).
7. Song H.W., S.W. Park, 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. Ji, Y., Z. Tan, and Y. Yuan, 2009. Chloride Ion Ingress in Concrete Exposed to a Cyclic Wetting and Drying Environment. *Transactions of the ASABE* 52(1): 239-245.
10. Kassir, M. K., and M. Ghosn, 2002. Chloride-induced corrosion of reinforced concrete bridge decks. *Cement and Concrete Research* 32(1): 139-143.
11. Kim, K. H., S. W. Cha, and S. Y. Jang, 2009. Target Diffusion Coefficient of Marine Concrete Using DuraCrete Method. *Korean Society of Civil Engineers* 2009(10): 1335-1338 (in Korean).
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Meira, G. R., C. Andrade, C. Alonso, J. C. Borba Jr., and 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.
16. Ministry of Construction and Transportation (MOCT). Standard specification for concrete structures on durability. Kimundang, Seoul, Korea, 2004 (in Korean).
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Takewaka, K., and S. Matsumoto, 1988. Quality and cover thickness of concrete based on the estimation of chloride penetration in marine environments. *Concrete in Marine Environment*, V. M. Malhotra, ed., SP-109, Am. Concrete Inst. (ACI), Detroit, Mich., 381-400.
21. 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.
22. Val, D. V., and M. G. Stewart, 2003. Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments. *Structural Safety* 25(4): 343-362.
23. Weyers, R. E., 1993. Service Life Estimates (SHRP-S-668). Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington DC.
24. 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.