

## 콘크리트내의 이중구조와 시간의존성을 고려한 염화물 해석기법의 개발

문진만<sup>1</sup>, 김진영<sup>2</sup>, 김영준<sup>3</sup>, 오경석<sup>1</sup>, 권성준<sup>4\*</sup>

### Analysis Technique for Chloride Penetration using Double-layer and Time-Dependent Chloride Diffusion in Concrete

Jin-Man Mun<sup>1</sup>, Jin-Yeong Kim<sup>2</sup>, Young-Joon Kim<sup>3</sup>, Gyeong-Seok Oh<sup>1</sup>, Seung-Jun Kwon<sup>4\*</sup>

**Abstract:** With varying conditions of concrete surface, induced chloride contents are changed and this is a key parameter for steel corrosion and service life in RC (Reinforced Concrete) structures. Many surface enhancement techniques using impregnation have been developed, however the evaluation techniques for chloride behavior through doubly layered media and time-dependent diffusion are rarely proposed.

This paper presents an analysis technique considering double-layer concrete and time-dependent diffusion behavior, and the results are compared with those from the previous test results through reverse analysis. The chloride profiles from the surface-impregnated concrete exposed to atmospheric, tidal, submerged zone for 2 years are adopted. Furthermore surface chloride contents and diffusion coefficients are obtained, and are compared with those from Life365. Through consideration of time effect, the relative error decreases from 0.28 to 0.20 in atmospheric, 0.29 to 0.11 in tidal, and 0.54 to 0.40 in submerged zone, respectively, which shows more reasonable results. Utilizing the diffusion coefficients from Life365, relative errors increases and it needs deeper penetration depth ( $\epsilon$ ) and lower diffusion coefficient ratio ( $D_1/D_2$ ) due to higher diffusion coefficient.

**Keywords:** Double layer, Apparent diffusion coefficient, Time-dependent diffusion, Surface impregnation, Surface chloride contents

## 1. 서 론

콘크리트 내부의 철근부식은 부착력 저하와 함께 구조물에 균열을 야기하여 내구성에 영향을 주고 이는 구조적인 안전성에 문제가 된다. 부동태 피막을 파괴하는 여러 유해이온 중 염소이온(Cl<sup>-</sup>)은 전달 속도가 매우 빠르고 작용이 강력하며, 콘크리트 구조물 내부에 혼입될 수 있는 기회가 많아 부식에 가장 큰 영향을 미치게 된다(Broomfield, 1997; RILEM, 1994). 따라서, 염소이온 침투의 정확한 평가를 통한 콘크리트 구조물의 내구수명 예측과 그에 따른 보수·보강은 매우 중요하다(Kim et al., 2008). 구조물의 내구성 저하를 방지하기 위해 염소이온 침투 메커니즘과 내구성 설계를 위한 연구들이 진행되어 왔으며(Koo et al., 2003; Kim et al., 2008; Kim et al., 2010), 기존에 건설된 콘크리트 구조물의 염소이온 확산으로 인한 내구성 저하를 방지하기 위해 표면함침과 같은 콘크리

트 표면에 유·무기 침투제를 도포해 콘크리트 구조물의 열화 저항성능을 개선하려는 연구들이 진행되었다(Kwon et al., 2008; Park et al., 2004). 이러한 보수기법은 콘크리트의 표면이 침투깊이 만큼 개선되어 염소이온이 직접적으로 유입되는 것을 막아주게 되며(Kwon et al., 2008), 이는 피복두께의 확보와 더불어 가장 중요한 염해대책이다. 콘크리트 내부 염소이온 침투는 Fick's 2<sup>nd</sup> law에 기반을 둔 걸보기 확산계수를 통한 해석이 많이 사용되고 있다. 콘크리트 모래의 수화물이 형성되면서 공극률이 감소하게 되며, 이에 따라 염화물 농도의 구배가 감소해 확산계수가 시간이 경과할수록 감소하게 된다. 염소이온의 확산계수는 이러한 시간의존적인 특성을 가지게 되며, 시간의존적 확산계수 해석을 위한 프로그램 개발과 연구들이 진행되어 왔으나(Thomas and Bamforth, 1999; Thomas and Bentz, 2002; Tang and Joost, 2007), 표면 강화된 콘크리트의 이중구조를 통과하는 염화물 거동 해석기법에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 논문에서는 이중 콘크리트 구조에서 시간의존성을 고려한 염화물 농도 식을 제안하였다. 제안된 식을 검증하기 위해 기존의 표면함침제 폭로실험 결과를 바탕으로 역해석 방법을 적용해 본 논문에서 제안하는 식을 검증하였다.

<sup>1</sup>정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과, 석사과정

<sup>2</sup>정회원, 한국산업단지공단 과장

<sup>3</sup>정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과, 박사과정

<sup>4</sup>정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과, 교수, 교신저자

\*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

•본 논문에 대한 토의를 2015년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2015년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 2. 이중 콘크리트 구조에서의 염화물 확산계수

다공성 매체를 통과하는 염화물 거동은 식 (1)과 같은 Fick's 2<sup>nd</sup> law에 의해 구현할 수 있으며, 반무한 매개체(Semi-infinite composite medium)에서의 염화물농도  $C$ 와 확산계수  $D$ 의 초기값 및 경계조건을 나타내면 식 (2a), (2b)와 같이 쓸 수 있다 (Thomas and Bentz, 2002).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\text{Initial} \quad C(x, 0) = 0 \quad (x > 0) \quad (2a)$$

$$\text{Boundary} \quad C(0, t) = C_s \quad (t \geq 0) \quad (2b)$$

여기서,  $C$ 는 염화물 농도( $kg/m^3$ ),  $t$ 는 시간(sec),  $x$ 는 c침 투깊이( $m$ )를 나타낸다.

식 (3)에는 식 (2a), (2b)와 같은 경계조건을 만족하는 지배 방정식을 나타내었다.

$$C(x, t) = C_s \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\} \quad (3)$$

여기서,  $C_s$ 는 표면염화물량( $kg/m^3$ ),  $\operatorname{erf}$ 는 오차함수,  $D$ 는 염화물 확산계수( $m^2/sec$ )를 나타낸다(RILEM, 1994).

표면이 침투제 등으로 강화되어 있는 경우, 콘크리트는 이중구조를 가지게 되며, 이러한 특성을 고려한 콘크리트의 모 식도를 Fig. 1에 나타내었다. 또한, 이 경우의 경계 조건은 식 (4a), (4b)와 같다(Andrade et al., 1997).

$$\text{Initial} \quad \begin{cases} C_1(x, 0) = 0 & (0 < x < e) \\ C_2(x, 0) = 0 & (x > e) \end{cases} \quad (4a)$$

$$\text{Boundary} \quad \begin{cases} C_1(e, t) = C_2(e, t) & (t \geq 0) \\ C_1(0, t) = C_s & (t \geq 0) \end{cases} \quad (4b)$$

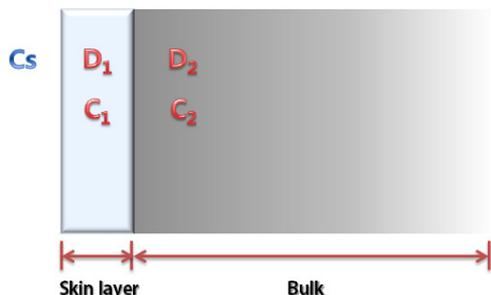


Fig. 1 Schematic diagram of double-layer concrete

여기서,  $e$ 는 침투깊이를 나타낸다.

식 (4a), (4b)와 같은 경계조건에 대한 지배방정식은 식 (5a), (5b)와 같다(Andrade et al., 1997).

$$C_1(x, t) = C_s \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \left[ \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2ne+x}{2\sqrt{D_1t}} \right\} - \alpha \cdot \operatorname{erfc} \left\{ \frac{(2n+2)e-x}{2\sqrt{D_1t}} \right\} \right] \quad (5a)$$

$$C_2(x, t) = \frac{2kC_s}{k+1} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \left[ \frac{(2n+1)e+k(x-e)}{2\sqrt{D_1t}} \right] \quad (5b)$$

여기서,  $C_1$ ,  $C_2$ 는 콘크리트 표면과 구체의 염화물 농도 ( $kg/m^3$ ),  $D_1$ ,  $D_2$ 는 콘크리트 표면과 구체의 확산계수( $m^2/sec$ )를 나타내며,  $k$ 와  $\alpha$ 는 식 (6a), (6b)와 같다(Andrade et al., 1997).

$$k = \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} \quad (6a)$$

$$\alpha = \frac{1-k}{1+k} \quad (6b)$$

식 (5a), (5b)에서는 농도에 대하여 깊이별로 고정된 시간의 농도를 고려하고 있지만, 농도를 결정짓는 요소인 확산계수에 대해서는 시간의존성을 고려하고 있지 않기 때문에 합리적인 염화물 거동을 나타내기는 어렵다.

## 3. 시간의존성을 고려한 이중구조의 확산계수

### 3.1 시간의존성을 고려한 확산계수의 변화

콘크리트 내부의 염화물 침투에 대해서는 Fick's 2<sup>nd</sup> law에 기반을 둔 겉보기 확산계수를 통한 염화물 해석이 일반적이며, Life-365와 같은 범용 프로그램을 통해 사용이 더욱 늘고 있다. 겉보기 확산계수는 실태조사 결과로부터 도출된 식 (7)과 같은 지수함수의 형태를 가지고 있다(Thomas and Bentz, 2002).

$$D(t) = D_{ref} \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (7)$$

여기서,  $D(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 확산계수( $m^2/sec$ ),  $D_{ref}$ 는 기준시간( $t_{ref}$ )에서의 확산계수,  $m$ 은 시간에(재령)에 따른 시간 계수로서 Life-365에서는 일반 OPC의 경우 0.2를 가정하고 있다. 확산계수는 시간에 따라 일정하지 않고 재령이 증가함

에 따라 수화가 진전되어 점차 감소하게 된다. 따라서 확산계수가 시간에 따라 감소하는 것을 고려하지 않고 재령 초기의 확산계수를 적용하게 되면 지나치게 보수적인 결과를 가져오게 된다. 이러한 확산계수의 시간에 따른 의존성은 식 (8a), (8b)와 같이 나타낼 수 있다(Poulsen, 1993).

$$D(m) = \frac{D}{1-m} \left( \frac{t_0}{t} \right)^m \quad (t < t_c) \quad (8a)$$

$$D(m) = \frac{D}{1-m} \left( \frac{t_0}{t_c} \right)^m \left[ 1 - m + m \left( \frac{t_c}{t} \right) \right] \quad (t \geq t_c) \quad (8b)$$

여기서,  $D(m)$ 은 시간  $t(\text{sec})$ 에서의 확산계수( $\text{m}^2/\text{sec}$ ) $D$ 는  $t_0$ 에서의 확산계수,  $t_c$ 는 확산계수가 더 이상 감소하지 않는 시간 (일반적으로 30년 가정)을 나타낸다(Thomas and Bentz, 2002).

### 3.2 이중 콘크리트 구조에서의 시간의존성 확산계수

본 논문에서는 이중 콘크리트 구조와 시간의존성 확산계수 두 가지를 모두 고려한 해석을 위해 식 (5a), (5b)에 시간의존 확산계수인 식 (8a), (8b)를 각각 적용해 식 (9a), (9b)를 도출하였다.

$$\left\{ \begin{aligned} C_1(x,t) &= C_s \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \left[ \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2ne+x}{2\sqrt{\frac{D}{1-m} \left( \frac{t_0}{t} \right)^m t}} \right\} \right. \\ &\quad \left. - \alpha \operatorname{erfc} \frac{(2n+2)e-x}{2\sqrt{\frac{D}{1-m} \left( \frac{t_0}{t} \right)^m t}} \right] \\ C_2 &= \frac{2kC_s}{k+1} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \left[ \frac{(2n+1)e+k(x-e)}{2\sqrt{\frac{D}{1-m} \left( \frac{t_0}{t} \right)^m t}} \right] \end{aligned} \right. \quad (t < t_c) \quad (9a)$$

$$\left\{ \begin{aligned} C_1(x,t) &= C_s \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \left[ \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2ne+x}{2\sqrt{\frac{D}{1-m} \left( \frac{t_0}{t_c} \right)^m \left[ 1 - m + m \left( \frac{t_c}{t} \right) \right] t}} \right\} \right. \\ &\quad \left. - \alpha \operatorname{erfc} \frac{(2n+2)e-x}{2\sqrt{\frac{D}{1-m} \left( \frac{t_0}{t_c} \right)^m \left[ 1 - m + m \left( \frac{t_c}{t} \right) \right] t}} \right] \\ C_2 &= \frac{2kC_s}{k+1} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \left[ \frac{(2n+1)e+k(x-e)}{2\sqrt{\frac{D}{1-m} \left( \frac{t_0}{t_c} \right)^m \left[ 1 - m + m \left( \frac{t_c}{t} \right) \right] t}} \right] \end{aligned} \right. \quad (t \geq t_c) \quad (9b)$$

본 논문에서는 식 (9a), (9b)를 적용해 염화물 농도를 해석하였다. 실제로는 표면에 노출된 skin 영역과 내부의 bulk 영역의 시간의존성이 다르게 되지만, 본 연구에서는 보통포틀랜드 시멘트를 사용할 경우 동일하다고 가정하였다.

## 4. 실태조사 결과를 고려한 이중 콘크리트 구조의 해석기법

### 4.1 표면 강화된 콘크리트내의 침투저항성 변화

표면함침제를 도포한 표면 강화된 콘크리트의 경우 표면에 침투한 침투제의 실리케이트 성분이 콘크리트 수화물인 수산화칼슘( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )과 반응해 C-S-H겔을 형성하게 된다. 추가적으로 형성된 C-S-H 겔에 의해 공극이 밀실해지고 수밀성을 확보 하게 된다(Yang et al., 2006). Fig. 2에서는 표면강화된 콘크리트의 염화물량 변화와 시간의존성을 고려했을 경우 염화물량의 변화를 개념적으로 나타내었다.

본 논문에서는 2년간 비말대, 조석대, 해수중 상태에 노출된 기존의 연구결과(Park et al., 2014)에 제한한 식을 적용해 비교 분석 하였다. 폭로실험에 사용된 배합은 Table 1과 같다.

Fig. 3에는 본 논문에 사용된 폭로실험 연구결과를 도시하였는데, 2년 경과 후 전염화물량에 대한 프로파일을 나타낸 것이다.

폭로실험 결과 침투제를 도포해 표면 강화된 콘크리트(Surface impregnation)에서 일반 콘크리트(Control)에 비해 두 가지 조건 모두 염화물 농도가 감소하는 것을 알 수 있다.

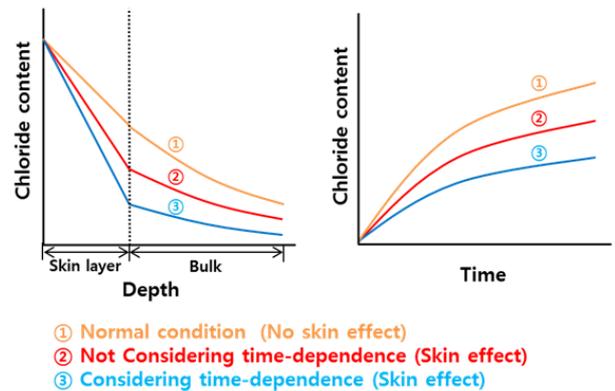
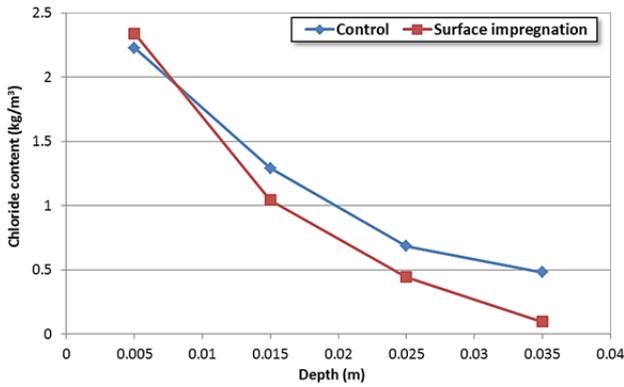


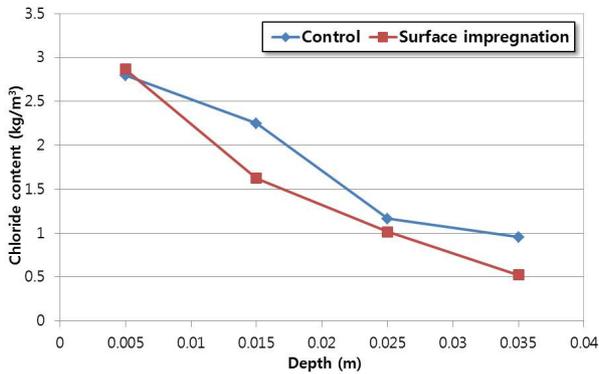
Fig. 2 Concentrations for skin effect

Table 1 Mix proportions (Park et al., 2014)

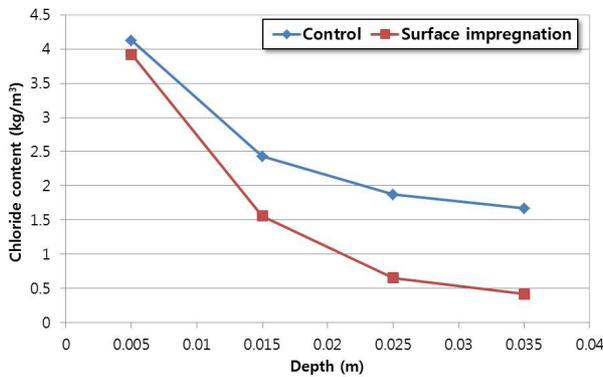
MPa	Slump (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			
				W	C	S	G
21	150	55.4	45.8	166	267	810	979



(a) Atmospheric condition



(b) Tidal condition



(c) Submerged condition

**Fig. 3** Chloride concentrations in concrete with/without impregnation after 2 years (Park et al., 2014)

본 논문에서는 이와 같은 결과를 바탕으로 이중구조와 시간의존성을 고려한 콘크리트의 염화물 확산계수 모델링을 진행하였다.

## 4.2 역해석을 통한 염화물 침투해석기법

### 4.2.1 회귀분석을 통한 표면염화물량 및 확산계수 도출

표면염화물량과 확산계수는 선형 및 비선형 회귀분석을

**Table 2** Results from regression analysis

	$C_s$ ( $kg/m^3$ )	$D_2$ ( $10^{-12} m^2/sec$ )	
		Not Considering time-dependence	Considering time-dependence
Atmospheric condition	2.49	6.91	4.50
Tidal condition	3.27	10.56	6.87
Submerged condition	4.18	14.64	9.53
Life-365		18.60	12.11

통해 도출 할 수 있다.  $0 \leq z \leq \sqrt{3}$  의 범위에서  $erfc(z) = 1 - erf(z)$  로 가정할 수 있으며, 다음 식 (10), (11), (12)와 같이 실무적으로 많이 사용되는 회귀분석방법을 통해 표면염화물량( $C_s$ )과 콘크리트 구체의 확산계수( $D_2$ )를 도출하였다(Sam Sung Construction, 2003). Fig. 3에 도시된 비말대, 조석대, 해수중의 염화물 침투자료를 식 (10)을 이용하여 회귀분석하여 식 (11) 및 식 (12)의 과정을 거쳐 표면염화물( $C_s$ ) 및 확산계수( $D_2$ )를 도출한 것이다.

$$\sqrt{C} = \sqrt{C_o} - \sqrt{\frac{C_o}{12Dt}} \cdot x \quad (10)$$

$$y = ax + b \quad (11)$$

$$y = \sqrt{C}, a = \sqrt{C_o}, b = -\sqrt{\frac{C_o}{12Dt}} \quad (12)$$

위 식과 같은 회귀분석 방법으로 매개변수  $a, b$ 를 통해 Control의 표면염화물량( $C_s$ )과 확산계수( $D_2$ )를 도출하였다. Life-365에서는 식 (13)과 같이 물-시멘트비( $W/C$ )에 따른 염소이온 확산계수식을 제안하고 있으며, 회귀분석을 통한 확산계수 및 표면 염화물량과 식 (13)을 통해 도출한 확산계수를 Table 2에 나타내었다.

$$D_{28} = 1 \times 10^{(-12.06 + 2.40^{W/C})} \quad (13)$$

여기서,  $D_{28}$ 은 28일 확산계수( $m^2/sec$ )를 나타낸다.

회귀분석을 통해 구해진 확산계수는 2년 경과후의 확산계수를 나타내므로,  $m$ 을 0.2로 설정한 뒤 식 (8a)을 이용하여  $D_{28}$ 을 산정하였다.

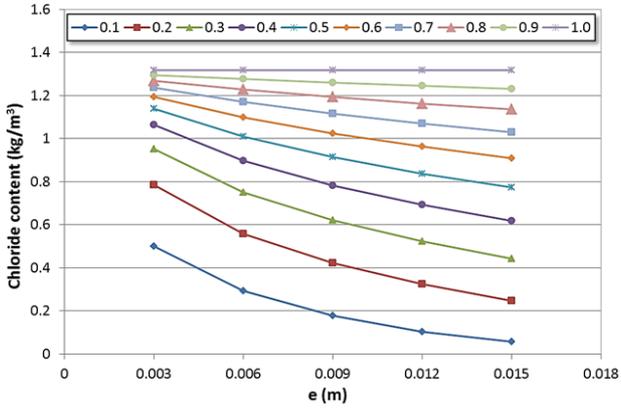
Table 2의 결과값을 바탕으로 표면두께( $e$ )와 표면확산계수( $D_1$ )을 도출한다.

#### 4.2.2 표면강화된 콘크리트의 염화물 농도해석

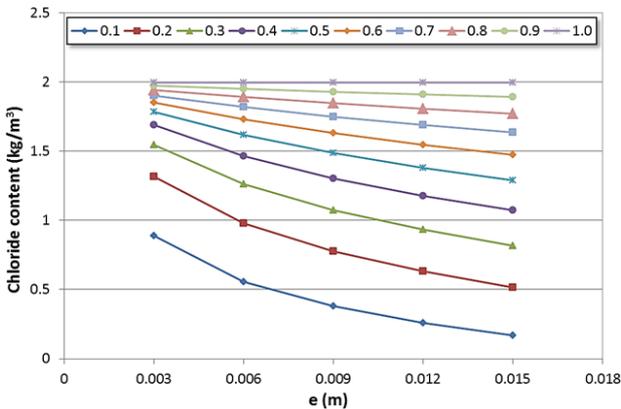
표면함침제를 연구한 기존의 연구결과에 따르면 침투제의 침투 깊이는 3~14 mm 정도이다(Kwon et al., 2007; Park et al., 2004). 따라서 적합한 표면두께( $e$ )와 확산계수비( $D_1/D_2$ )를 산출하기 위해  $e$ 를 3~15 mm,  $D_1/D_2$ 를 0.1~1.0 수준을 고려하였다. Fig. 4, Fig. 5에는 회귀분석을 통해 도출한 확산계수

와 식 (13)을 통해 계산된 확산계수를 적용하여 깊이 15 mm에서 표면두께  $e$ 와  $D_1/D_2$ 에 따른 염화물 농도를 도시하였다. 또한, Fig. 4, Fig. 5의 결과값을 Fig. 6에 컨투어로 나타내었다.

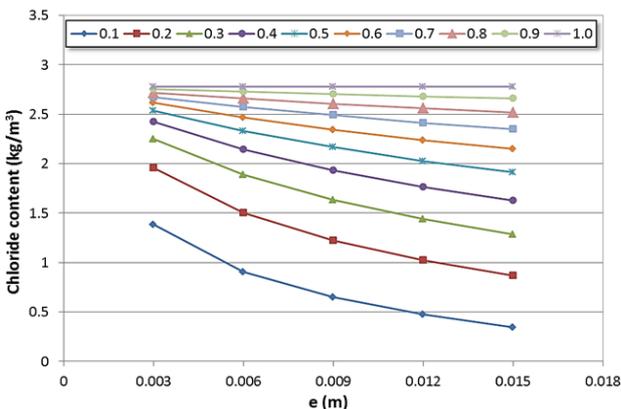
$D_1/D_2$ 가 작아질수록,  $e$ 가 커질수록 염화물농도가 감소하는 것을 확인할 수 있다.  $e$ 가 3 mm 증가할 경우 염화물 농도는 평균 0.78~26.63% 감소하며,  $D_1/D_2$ 가 0.1 증가할수록 평균 6.33~16.79% 증가하는 것을 확인할 수 있다.



(a) Atmospheric condition

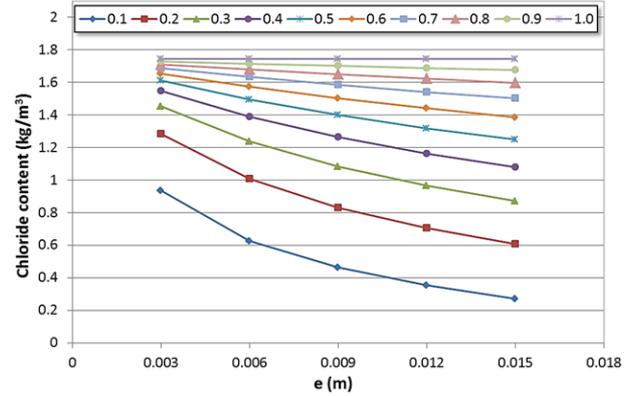


(b) Tidal condition

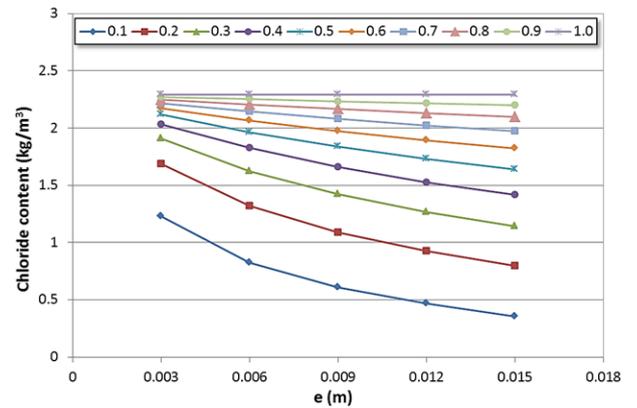


(c) Submerged condition

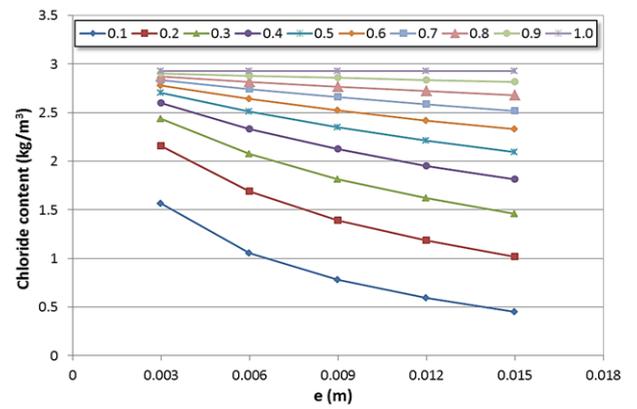
Fig. 4 Relationship between  $e$  and  $D_1/D_2$  ( $x=15$  mm, Regression analysis)



(a) Atmospheric condition

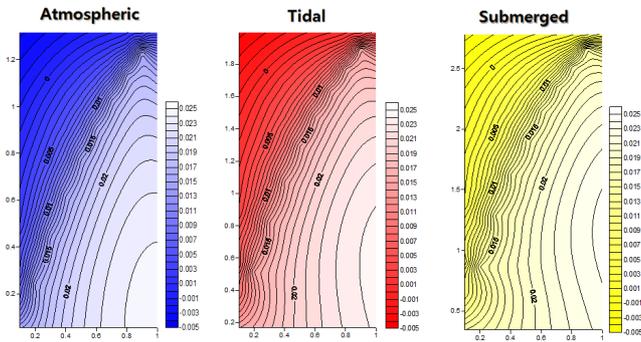


(b) Tidal condition

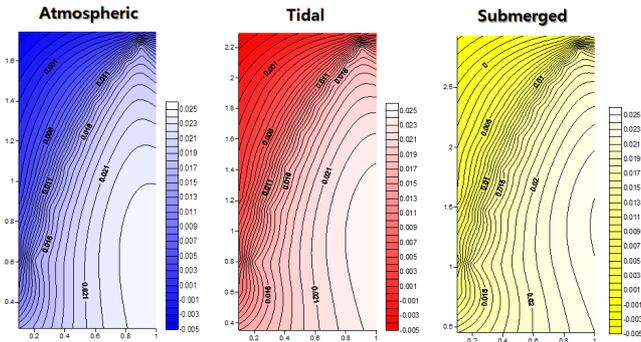


(c) Submerged condition

Fig. 5 Relationship between  $e$  and  $D_1/D_2$  ( $x=15$  mm, Life-365)



(a) Regression analysis



(b) Life-365

Fig. 6 Relationship between  $e$  and  $D_1/D_2$  (Contour)

#### 4.2.3 표면두께와 확산계수비를 고려한 염화물 해석결과

본 절에서는 시간의존성의 여부와 이중구조의 여부를 고려하여 실험조사 결과값과 비교 하였다. 전술한대로  $e$ 는 침투깊이이므로 최대값을 15 mm로 하였으며,  $D_1/D_2$ 는 콘크리트 모재의 확산계수( $D_2$ )의 30% 수준까지 감소할 수 있다고 가정하여 침지된 염화물 분포에 근접하도록 해석을 수행하였다. 표면함침된 구체의 성능이 개선되었다 하더라도 24 MPa 콘크리트 성능을 40 MPa 콘크리트 성능정도로 개선할 수는 없기 때문이다.

Table 3에는 실험값을 가장 적합하게 만족시키는 표면두께( $e$ )와 확산계수비( $D_1/D_2$ )를 나타내고 있으며 그 결과를 Fig.7 및 Fig. 8에 나타내었다.

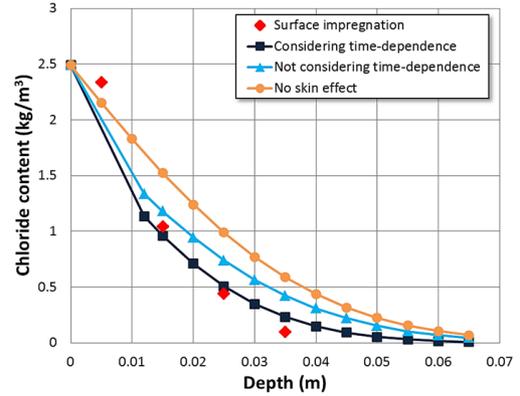
해석결과와 실험값의 오차수준을 확인하기 위해 식 (14)를 통해 5~35 mm 4개 지점 깊이의 평균제곱근오차(Root mean square error, RMSE)를 계산하였으며, 결과를 Table 4에 나타내었다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (14)$$

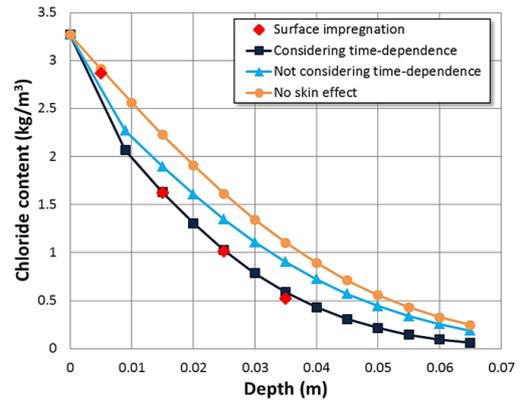
여기서,  $n$ 은 측정 수,  $y_i$ 는 기존의 실험값,  $x_i$ 는 본 논문에서

Table 3 Results for  $e$  and  $D_1/D_2$

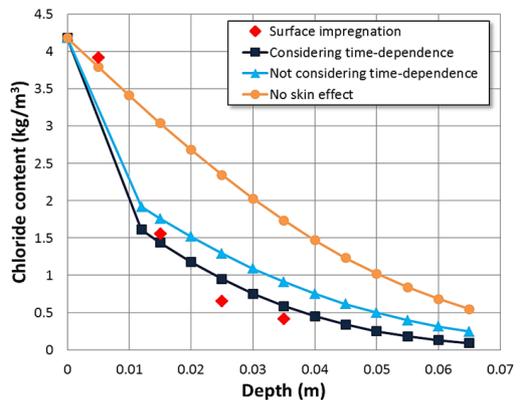
	Type	$e$ (mm)	$D_1/D_2$
Regression analysis	Atmospheric condition	12	0.6
	Tidal condition	9	0.6
	Submerged condition	12	0.3
Life-365	Atmospheric condition	15	0.3
	Tidal condition	12	0.4
	Submerged condition	15	0.3



(a) Atmospheric condition

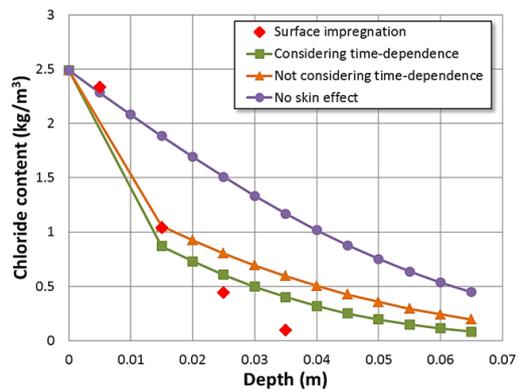


(b) Tidal condition

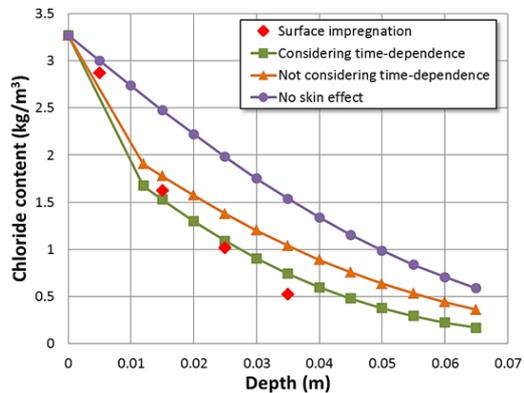


(c) Submerged condition

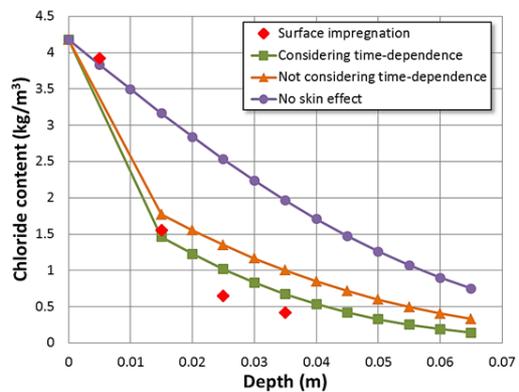
Fig. 7 Analysis results (Regression analysis)



(a) Atmospheric condition



(b) Tidal condition



(c) Submerged condition

Fig. 8 Analysis results (Life-365)

Table 4 RMSE

		Not Considering time-dependence	Considering time-dependence
Regression analysis	Atmospheric	0.28	0.20
	Tidal	0.29	0.11
	Submerged	0.54	0.40
Life-365	Atmospheric	0.34	0.26
	Tidal	0.33	0.18
	Submerged	0.54	0.40

실시한 해석값을 나타낸다(Kim et al., 2006).

Table 4의 결과에서 알 수 있듯이 시간의존성을 고려할 경우 0.11~0.40 수준의 오차가 발생했지만 시간의존성을 고려하지 않은 경우 0.28~0.54 수준의 상대적으로 높은 오차가 발생했다. Life-365에서 제안하는 확산계수 모델식을 사용할 경우 상대적으로 높은 확산계수가 평가되기 때문에 회귀분석과 비슷한 오차 수준의 값을 해석하려면, 표면침투깊이( $e$ )와 확산계수비( $D_1/D_2$ )를 12~15 mm, 0.3~0.4 수준으로 가정해야 함을 알 수 있다. 시간의존성을 고려하지 않은 경우 해석값이 크게 산정되어 상대적으로 큰 오차를 야기 시켰으며, 엄밀한 해석이 필요함을 알 수 있다.

#### 4.2.4 회귀분석을 통한 Life-365 확산계수 추정

해석결과를 통해 Life-365에서 제안하고 있는 확산계수 모델식은 실제 확산계수보다 다소 높게 측정됨을 알 수 있다. 이미 기존의 연구성과에서도 Life-365에서 제안한 확산계수 모델식이 과다한 확산계수를 도출한다고 알려져있다(Kwon et al., 2009; Lee and Kwon, 2012). 회귀분석을 통해 도출된 확산계수는 Life-365 추정 확산계수의 약 57% 수준이었다. 따라서, 본 절에서는 Life-365 확산계수의 60% 수준을 고려한 해석을 진행하였다. Table 5에 기존 Life-365 모델식의 확산계수와 수정 제안된 확산계수를 적용한  $e$ ,  $D_1/D_2$ 를 나타내었다.

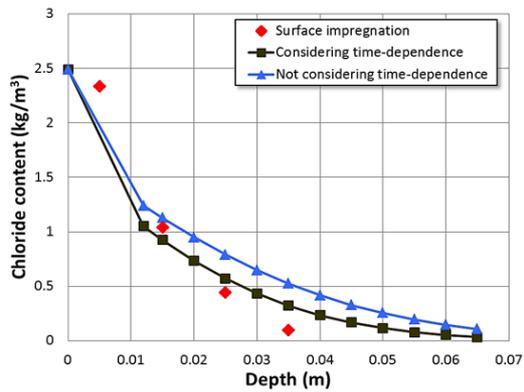
Table 5의 결과를 바탕으로 한 해석 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 또한, 기존 Life-365 확산계수와 Fig. 9의 해석결과에 대한 평균제곱근오차를 Table 6에 나타내었다.

Life-365에서 제안한 확산계수의 60% 수준을 고려해 해석한 결과 실태조사 결과와 좀 더 유사한 염화물농도 결과값을 해석할 수 있었으며, 오차의 범위가 0.18~0.54 수준에서 0.13~0.49 수준으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

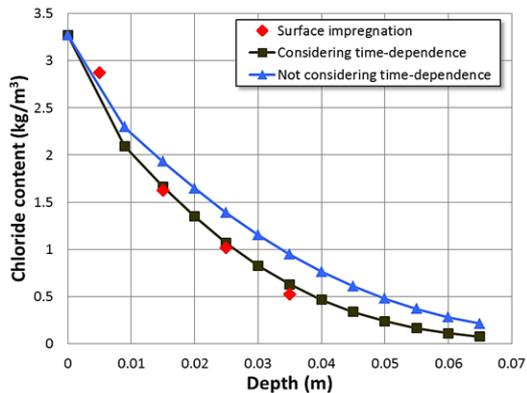
인용한 실험결과를 통한 역해석 방법에 대해서는 몇가지 제한성이 평가되었는데, 침투깊이의 실측값이 없으므로 일정한 깊이를 변화시키면서 해석한 점, 표면개선된 구체 및 모재의 염화물 확산계수를 가정한 점이다. 또한 표면이 개선된 콘

Table 5 Results for  $e$  and  $D_1/D_2$

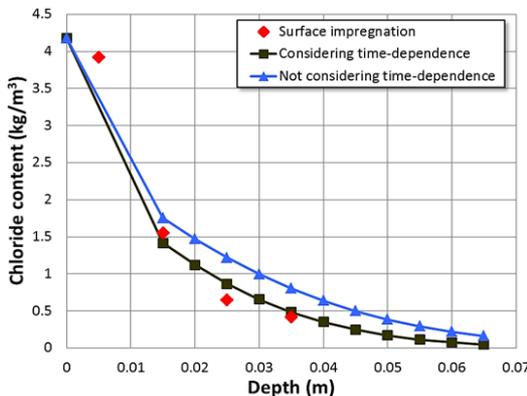
		$e$ (mm)	$D_1/D_2$
Life-365	Atmospheric condition	15	0.3
	Tidal condition	12	0.4
	Submerged condition	15	0.3
Revised Life-365	Atmospheric condition	12	0.4
	Tidal condition	9	0.6
	Submerged condition	15	0.4



(a) Atmospheric condition



(b) Tidal condition



(c) Submerged condition

Fig. 9 Analysis results

Table 6 RMSE (Revised)

		Not Considering time-dependence	Considering time-dependence
Life-365	Atmospheric	0.34	0.26
	Tidal	0.33	0.18
	Submerged	0.54	0.40
Revised Life-365	Atmospheric	0.32	0.25
	Tidal	0.32	0.13
	Submerged	0.49	0.34

크리트의 경우 모재 콘크리트와 확산계수의 시간의존성이 달라질 수 있는데, 본 연구에서는 0.2로 가정한 점이 개선될 사항이라고 평가되었다.

## 5. 결론

콘크리트내의 이중구조와 시간의존성을 고려한 염화물 해석기법의 개발을 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 콘크리트의 이중구조와 시간의존성을 고려한 확산계수를 이용하여 표면강화된 콘크리트 구체의 염화물 해석기법을 제안하였다. 제안된 기법은 표면이 강화되어 염화물의 유입이 감소하는 거동을 잘 모사할 뿐 아니라, 시간의존성이 고려되어 전반적으로 감소되는 염화물 거동을 합리적으로 나타내고 있다.
- 2) 표면침투영역( $e$ )와 표면층의 확산계수를 변수화 하여 염화물 이동에 대한 역해석을 수행하였다. 해석결과 침투깊이는 9~12 mm 수준으로 평가되었으며, 표면층의 확산계수는 0.3~0.6 수준으로 감소함을 알 수 있다. 또한 상대적으로 비교한 Life-365 모델식은 확산계수를 크게 평가하여 침투깊이를 과다하게 산정해야함을 알 수 있으며, 확산계수비( $D_1/D_2$ )를 0.3~0.4 수준으로 낮게 가정해야 함을 알 수 있다.
- 3) Life-365 모델식을 통한 확산계수의 60% 수준을 고려했을 경우 기존의 Life-365 제안 확산계수보다 실험결과와 좀 더 유사한 값을 얻을 수 있었다. 오차 수준 비교 결과 0.18~0.54에서 0.13~0.49로 감소해 Life-365에서 제안하는 모델식의 60% 정도 수준으로 실험결과에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 제안된 해석결과는 표면층과 구체에 동일한 시간지수(시간의존성)를 가정하였는데, 같은 OPC를 사용하더라도 시간의존성 거동은 달라지게 된다. 표면층 및 구체 콘크리트에 대해 각각의 시간의존성을 고려한 모델링이 제안된다면 더욱 합리적인 이중구조에서의 염화물 거동 평가가 가능해질 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단에서 지원하는 기초연구사업(NRF-286 2013R1A1A2060114)의 지원으로 수행되었으며, 저자는 이에 감사드립니다.

## References

1. Andrade, C., Diez, J. M., and Alonso, C. (1997), Mathematical Modeling of a Concrete Surface "Skin Effect" on Diffusion in Chloride Contaminated Media, *Advanced Cement Based Materials*, 6(2), 39-44.
2. Broomfield, J. P. (1997), Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, E&FN, London, 1-15.
3. Kim, K. H., and Cha, S. W. (2010), Reliability-Based Service Life Estimation of Concrete in Marine Environment, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(4), 595-603.
4. Kim, K. H., Jang, S. Y., Cha, S. W., and Chang, S. P. (2008), Development of Chloride Penetration Analysis Program Considering Environmental Conditions, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 28(5), 709-718.
5. Kim, W. C., Kim, J. J., Park, B. W., Park, T. S., Song, M. S., Lee, S. Y., Lee, Y. J. (2006), Introductory Statics, Youngji Publisher, Korea.
6. Kwon, S. J., Na, U. J., Park, S. S., and Jung, S. H. (2009), Service Life Prediction of Concrete Wharves with Early-Aged Crack : Probabilistic Approach for Chloride Diffusion, *Structural Safety*, 31(1), 75-83.
7. Kwon, S. J., Park, S. J., and Lho B. C. (2008), Durability Evaluation of Inorganic-Impregnated Concrete Exposed to Long-Term Chloride Exposure Test, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 20(3), 283-290.
8. Kwon, S. J., Park, S. S., Lee, S. M., and Kim, J. H. (2007), A Study on Durability Improvement for Concrete Structures Using Surface Impregnant, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, 11(4), 79-88.
9. Koo, H. B., Kim, E. T., and Lee, K. M. (2003), Modeling of Chloride Ingress in Reinforced Concrete Structures, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 15(16), 25-34.
10. Lee S. H., and Kwon S. J. (2012), Experimental Study on the Relationship between Time-Dependent Chloride Diffusion Coefficient and Compressive Strength, *Journal of Korea Concrete Institute*, 24(6), 715-726.
11. Park, S. S., Kim, Y. Y., Lee, B. J., and Kwon, S. J. (2014), Evaluation of Concrete Durability Performance with Sodium Silicate Impregnants, *Advance in Materials Science and Engineering*, 2014, 1-11.
12. Park, S. S., Lee, S. K., and Lee, S. M. (2004), Development of a Sealer for the Durable-Performance Improvement of the Nuclear Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 16(2), 821-824.
13. Poulsen, E. (1993), On a Model of Chloride Ingress into Concrete, Nordic Mini Seminar-Chloride Transport, Department of Building Materials, Gothenburg.
14. RILEM. (1994), Durability Design of Concrete Structures, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN, 28-52.
15. Sam Sung Construction (2003), Evaluation of chloride diffusion coefficient in High Performance Concrete, Technical Report, 18-28.
16. Tang, L., and Joost, G. (2007), On the Mathematics of Time-Dependent Apparent Chloride Diffusion Coefficient in Concrete, *Cement and Concrete Research*, 37(4), 589-595.
17. Thomas, M. D. A., and Bamforth, P. B. (1999), Modeling Chloride Diffusion in Concrete: Effect of Fly Ash and Slag, *Cement and Concrete Research*, 29(4), 487-495.
18. Thomas, M. D. A., and Bentz, E. C. (2002), Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, Life365 Manual, SFA, 12-56.
19. Yang E. I., Kim, M. Y., Kim, B. C., and Kim, J. H. (2006), Evaluation on Resistance of Chloride Attack and Freezing and Thawing of Concrete with Surface Penetration Sealer, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 18(1), 65-71.

Received : 05/19/2015

Revised : 07/06/2015

Accepted : 07/21/2015

**요 지** : 콘크리트 표면의 상태에 따라 염화물은 증가 또는 감소하게 되며 이는 철근부식 및 내구수명에 매우 중요한 인자가 된다. 콘크리트의 내구성 저하를 방지하기 위해 표면함침과 같이 많은 표면강화 기술이 개발되었으나 이중 콘크리트 구조와 확산계수의 시간의존성을 고려한 염화물 해석방법은 매우 제한적이다.

본 논문에서는 표면 강화된 이중구조 콘크리트에 대해 시간의존성 확산계수를 도입하여 염화물 해석기법을 제안하였으며, 역해석을 통하여 기존의 실험결과와 비교하였다. 2년간 비말대, 해수중, 조석대 상태에 노출된 표면 함침된 콘크리트 시편에 대해 표면염화물량과 확산계수를 도출하고 Life-365에서 제안한 확산계수 식과 비교 분석하였다. 시간의존성을 고려한 결과 비말대 시편의 오차는 0.28에서 0.20 수준으로, 조석대 시편은 0.29에서 0.11 수준으로, 해수중에서는 0.54에서 0.40 수준으로 오차가 감소함을 알 수 있었다. 또한 Life365에서 사용되는 확산계수식을 사용할 경우, 과도한 확산계수로 인해 상대오차가 커지고 높은 침투깊이( $e$ )와 낮은 확산계수비( $D_1/D_2$ )를 필요로 함을 알 수 있다.

**핵심용어** : 이중구조, 겹보기염화물 확산계수, 시간의존성 확산, 표면함침, 표면염화물