

## 촉진 염화물 시험결과를 이용한 비말대 콘크리트 구조물의 내구수명 평가

김정수<sup>1</sup>, 권성준<sup>2\*</sup>

### Service life evaluation in RC structure near to sea shore through accelerated chloride diffusion test

Jeong-Su Kim<sup>1</sup>, Seung-Jun Kwon<sup>2\*</sup>

**Abstract:** In order to evaluate service life of RC (Reinforced Concrete) structures exposed to chloride attack, chloride penetration analysis is required referred to the chloride diffusion coefficient from the actual mix proportions. In this work, accelerated diffusion coefficients are obtained from NT BUILD 492 and ASTM C 1202 and the related apparent diffusion coefficients are derived via the previously proposed relationship for RC structures near to sea shore. Considering the properties of the mix proportions and the most conservative analysis conditions like critical and surface chloride contents, service lives in column and exterior wall member are evaluated through conventional program LIFE 365 ver.2. The different built-up period of 10 and 15 years has no significant effect on service life. The results from mix proportions with slag show longer than 75 years of service life with the help of higher time dependent parameter and lower initial diffusion coefficient.

**Keywords:** Chloride attack, Accelerated diffusion coefficient, Apparent diffusion coefficient, Service life

## 1. 서 론

해안가의 비말대에 노출된 콘크리트 구조물은 수중이 아니라도 충분한 산소와 비래되어 콘크리트 내부로 유입되는 염화물 이온으로 인해 부식이 발생된다(Lee et al., 2017; Broomfield, 2006). 내부에 발생한 부식은 초기에는 부착력의 일부 증가가 발생하지만(Chung et al., 2008), 외관 손상이 시작되고 부식량의 증가에 따라 균열의 진전, 피복 콘크리트의 박락으로 진전된다. 이러한 열화현상은 최종적으로 내력의 저하에 따른 구조물의 안전성의 저하로 연결된다.

많은 연구에서 내구수명을 정량적으로 평가하려는 시도가 되어왔으며, 이는 구조적 거동과 연계하여 더욱 발전하고 있다. 염화물 이온 확산과 압력에 따른 이동을 고려하여 전체 염화물 flux 흐름을 산정하고 시간당 흡착되는 염화물량을 고려하는 지배방정식에서는 정량적인 염화물 평가가 가능하지만 적용이 어렵고, 장기 실험결과와 차이가 발생하는 경향이 있다(Ishida et al., 2007; Song and Kwon, 2009; Maekawa et al., 2003). 또한 이온 간의 상평형을 고려하여 고정된 염화물을 고려하는 함수가 고려되어야 하며, 해석 시 시간의존성 확산계

수의 수렴도 문제가 되는 것으로 알려져 있다(Oh and Jang, 2007; Tang and Nilsson, 1993).

정상상태를 가정한 Fick's 2nd Law를 기반으로 한 지배방정식에서는 하나의 해(염화물량)를 기준으로 식을 구성하므로 적용이 간편하다. 또한 내구성 설계나 수명 평가가 비교적 쉽게 고려될 수 있으므로 시방서 및 관련 기준 등에서 많이 다루어지고 있다(JSCE, 2007; Thomas and Bamforth, 1999; ACI, 2008). 물론 정상상태의 가정, 균열부 및 습도 변화에 따른 영향의 미반영 등 아직도 개선해야 될 분야가 많지만 점차 물리적 실험상수 등을 고려하여 정량적인 방법으로 개선되어 가고 있다(Nilsson et al., 1997). 이러한 방법들 이외에서 각 영향인자(피복두께, 확산계수, 임계염화물량 등)를 확률변수로 구성하여 목표내구수명동안 평가된 특성 값이 설계 값을 넘지 못하도록 유도하는 확률론적인 설계 방법 (Probabilistic method)이 최근에는 많이 사용되고 있으며, 다양한 시공간적 해석을 통하여 적용범위가 확대되고 있다(Bentz, 2003; DuraCrete Final Report, 2000; Pack et al., 2010; CEN, 2000). 촉진 염화물 확산계수는 짧은 시간에 강한 전기적 유도를 통하여 이루어지므로 겉보기 확산계수보가 큰 값을 나타내게 되며 이를 Fick's 2nd Law에 적용할 경우, 내구수명을 과소평가하게 된다.

본 연구에서는 현재 대한민국 남해 해안가에 시공되고 있는 콘크리트 구조물의 옥외 노출 벽체 및 기둥 구조를 대상으

<sup>1</sup>정회원, 한화건설 기술연구소 선임연구원, 공학박사

<sup>2</sup>정회원, 한남대학교 건설시스템공학과, 부교수

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

Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2019년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

로 유한차분법에 준하여 염해에 대한 내구수명을 평가하였다. 실제 해안 구조물에 적용 예정인 3 가지 수준의 배합을 대상으로 압축강도를 재령별로 평가하였으며, 재령 28일 시편을 대상으로 NT BUILD 492(Nordtest method, 1999)방법 및 ASTM 1202(ASTM C 1202, 2005)방법으로 촉진 염화물 확산계수와 통과전하량을 도출하였다. 실제 구조물 적용 배합의 촉진 염화물 확산 시험 결과 데이터를 기반으로 결보기 확산계수를 도출하였으며, 이를 이용하여 구조물의 벽체 및 기둥 구조의 내구수명을 평가하였다. 본 논문에서는 촉진확산계수를 통하여 변환된 결보기 확산계수의 도출과정 및 실제 대한민국 해안 환경을 고려한 내구수명 평가 결과가 고찰될 것이다.

## 2. 대상구조물 노출환경 및 사용재료

### 2.1 대상구조물의 제원 및 노출환경

대상 구조물은 주상복합 콘크리트 구조물로서 해양 인근 250 m 이내에 시공 예정이므로 비래 염분에 따른 철근부식이 발생할 수 있다. 지하수에는 상당한 수준의 염화물 이온과 황산염 이온이 존재하고 있으나, 차수벽 및 35 MPa의 콘크리트로 설계되어 있으므로 내염해 조건을 만족하였다. 내구수명 평가 대상 구조물은 해안가에 인접한 옥외 구조물인 벽체와 기둥으로 국한하였으며, 각각의 피복두께는 50 mm, 80 mm로 설계되어 현행 설계기준을 만족하고 있었다. Fig. 1에서는 대상 구조물의 노출환경을 나타내고 있다.

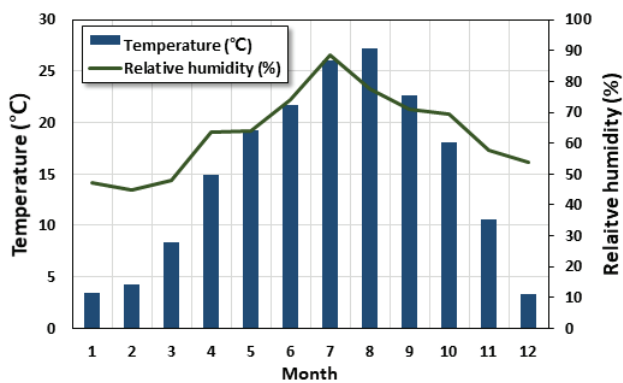


Fig. 1 Average temperature and relative humidity

### 2.2 사용재료

대상 구조물 중 상부(옥외)에 해당되는 구조물은 24 MPa의 설계 강도를 가지고 있으며, 대상 배합을 OPC 또는 2종 고로슬래그 시멘트를 이용하여 3가지 배합군으로 설정하였다. Table 1에서는 적용대상인 3 개의 콘크리트 배합을 나타내고

있으며, 사용된 골재 특성은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Mix proportions for target RC members

Case	$f_{ck}$	W/B	Unit : kg/m <sup>3</sup>					
			W	OPC	Slag Cement	C	S	AE
OPC	30	44.0	178	405	0	754	953	3.03
S-1	27	45.6	178	0	390	752	961	2.92
S-2	27	43.6	179	0	410	752	941	3.08

Table 2 Physical properties of the used aggregates

Types	Items	$G_{max}$ (mm)	Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	F.M.
Sand	-	-	2.58	3.15
Gravel		25	2.58	6.93

## 3. 실험계획 및 평가

### 3.1 압축강도 평가

KSF 2405에 따라 각 배합의 압축강도를 재령 7일, 14일, 28일에 3개의 시편에 대하여 평가하였으며 그 결과를 Table 3과 Fig.2에 나타내었다.

Table 3 Compressive strength results

Case	Compressive strength (MPa)								
	7days			14days			28days		
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 1	No. 2	No. 3	No. 1	No. 2	No. 3
OPC	36.4	35.7	36.1	43.0	42.5	42.9	45.4	46.1	44.1
	Avg. : 36.0			Avg. : 42.8			Avg. : 45.3		
S-1	27.9	27.4	28.3	34.7	33.8	34.2	35.6	34.8	35.1
	Avg. : 27.8			Avg. : 34.2			Avg. : 35.2		
S-2	33.2	33.5	34.3	37.6	38.8	38.4	42.6	43.4	41.8
	Avg. : 33.6			Avg. : 38.3			Avg. : 42.6		

모든 배합에서 재령 28일에 설계 강도를 초과하는 값을 나타내었다. 2종 슬래그 시멘트를 사용한 경우, 단위 결합재량이 많은 S-2에서 S-1 배합 대비 약 20% 수준의 강도 증가를 나타내었다.

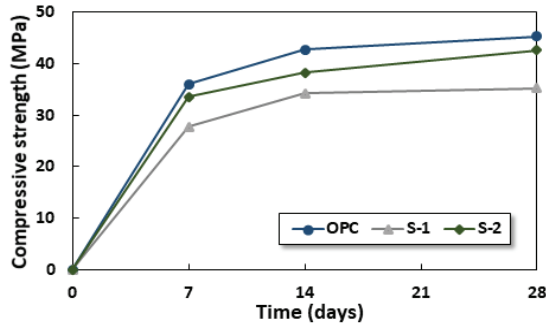


Fig. 2 Results of compressive strength

### 3.2 촉진염화물 확산계수 및 통과량 평가

촉진 염화물 실험에서는 ASTM C 1202에 의한 통과 전하량 측정과 NT BUILD 492 방법을 통한 확산계수를 평가하였다. Fig.3과 Fig.4에서는 실험 전경 및 염화물 침투 깊이 사진을 나타내고 있다. 또한 Table 4과 Table 5에서는 각 2개 시편에 대한 통과전하량과 촉진확산계수 결과를 나타내었다.

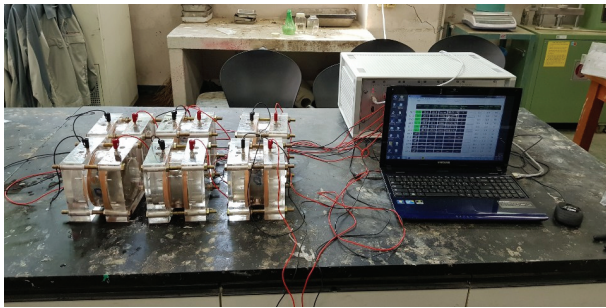


Fig. 3 The whole view of RCPT

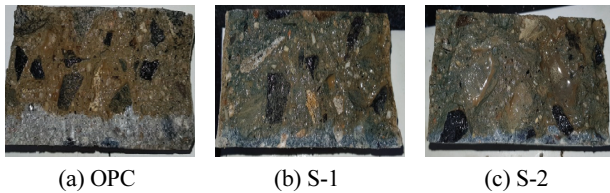


Fig. 4 Photos for penetrated concrete by chloride ion

Table 4 Results of passed charge

Case	OPC		S-1		S-2	
	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
Coulomb	4142.5	5965.2	1190.5	1219.9	993.2	1151.3
	(High)	(High)	(Low)	(Low)	(Very low)	(Low)
	Avg. : 5053.9 (High)		Avg. : 1205.2 (Low)		Avg. : 1072.3 (Low)	

Table 5 Results of diffusion coefficient from NT BUILD 492

Case	OPC		S-1		S-2	
	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
$m^2/s$	1.66E-11	1.37E-11	8.85E-12	8.03E-12	5.41E-12	5.86E-12
	1.52E-11		8.44E-12		5.64E-12	

2종 고로 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 배합에서 OPC 배합 대비 21.2% ~ 23.8%의 통과 전하량을 나타냈으며, 2종 고로 슬래그 시멘트 사용 배합 간에는 상대적으로 큰 차이가 발생하지 않았다. 또한 NT BUILD 측정값에서는 OPC 배합 대비 S-1 배합에서는 55.7%, S-2 배합에서는 37.2% 수준의 감소된 확산계수가 평가되었다.

이러한 염화 통과량 감소 및 전기장내에서의 확산성 감소는 GGBFS의 수화물 생성에 따른 공극구조의 개선과 자유염화물 흡착을 개선하는 기능에 주된 원인이 있다(Song and Kwon, 2009; Thomas and Bamforth, 1999; Leng et al., 2000; Kim et al., 2015; Ehlen, 2018). 기존의 연구에 의하면(Berke and Hicks, 1994) 통과전하량은 촉진 염화물 확산계수로 경험적으로 변환시킬 수 있는데, 이는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 식(1)을 통하여 변환시킨 촉진 염화물 확산계수를 Table 6에 나타내었으며 이를 NT BUILD 측정값과 같이 Fig.5에 도시하였다.

$$D = 0.0103 \times 10^{-12} \times Q \quad (1)$$

여기서,  $D$ 는 촉진 염화물 확산계수( $m^2/s$ ),  $Q$ 는 통과 전하량(Coulomb)를 나타낸다.

Table 6 Converted accelerated diffusion coefficient

Case	OPC		S-1		S-2	
	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
$m^2/s$	1.13E-11	1.53E-11	3.95E-12	4.03E-12	3.39E-12	3.84E-12
	1.33E-11		3.99E-12		3.62E-12	

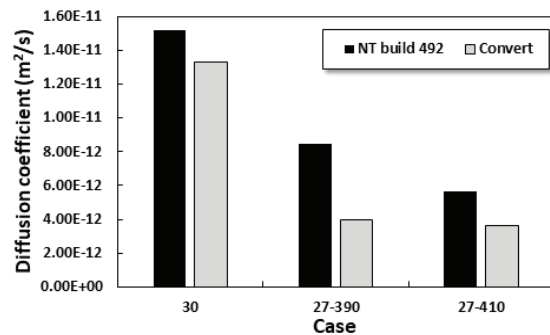


Fig. 5 Results of accelerated diffusion coefficient

## 4. 대상구조물의 내구수명 평가

### 4.1 지배방정식 개요

본 연구에서는 내구수명 평가를 위하여 Fick's 2nd Law의 지배방정식을 유한차분법으로 풀이하고 LCC (Life Cycle Cost)를 평가할 수 있는 Life 365 ver.2 프로그램을 사용하여 내구수명을 평가하였다. 식(2)에서는 Fick's 2nd Law를 식(3)에서는 Fick's 2nd Law해로서 오차함수를 사용한 염화물 이동방정식을, 식(4)에서는 시간의존적으로 감소하는 염화물 확산계수를 나타내는 식을 나타내었다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (2)$$

여기서  $c$ 는 염화물 농도( $\text{g}/\text{m}^3$ )를  $D$ 는 겉보기 염화물 확산계수( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $x$ 는 표면에서부터의 거리를 나타낸다.

$$C(x,t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D(t)t}} \right) \quad (3)$$

$$D(t) = D_{ref} \cdot \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (4)$$

여기서  $C_0$ 는 표면염화물량( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $x$ 는 콘크리트 피복두께( $\text{m}$ ),  $D(t)$ 는 시간( $t$ )에서의 확산계수,  $D_{ref}$ 는 28일에서의 콘크리트 확산계수,  $t$ 는 사용기간(일),  $t_{ref}$ 는 28일,  $m$ 은 시간의존성지수로서 배합에 따라 변하게 된다. 시간의존성 확산계수는 30년까지 시간의 영향에 따라 변화하며, 그 이후는 일정하다고 가정한다(Ehlen, 2018). 온도의 영향은 아레니우스 법칙에 따른 온도의존성을 고려하였다.

### 4.2 내구성 설계인자의 정량화 및 해석조건

남해안 비말대 지역을 고려하여 표면염화물량은 콘크리트 시방서에 따라  $5.0\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 설정하였으며(KCI, 2012), 구조물의 표면에서의 염화물량이 설정한 표면 염화물량 까지 포화되는 기간(Built-up Period)은 10년 및 15년의 두 가지 수준을 고려하였다(Thomas and Bamforth, 1999; Ehlen, 2018; JSCE, 2002; JSCE, 2012). 일반적으로 혼화재를 사용하는 경우, 동일한 기간에 고정화되는 염화물량이 많아 표면 염화물이 증가하는 것으로 알려져 있으나 본 해석에서는 모두  $5.0\text{kg}/\text{m}^3$ 의 표면 염화물량을 고려하였다. 철근의 임계 부식량에 대해서는 많은 의견이 있지만 시방서에서 제안하는  $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 을 기준으로 하였다. 최근 들어 일본에서는 바인더의 종류와 물-결합제비에 따라 임계 염화물량을 함수로 정하고 있는 추후 우리나라에서도 이에 대한 고려가 필요하다(JSCE,

2012). 실제로  $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 의 임계 염화물량은 매우 보수적인 내구설계 조건이다. 시간의존성 지수( $m$ )의 설정은 매우 중요한데 기존의 연구에서는 OPC의 경우 0.2를, 슬래그를 사용한 경우에는 치환된 혼입률로 계산하고 있다. 본 연구에서 사용한 슬래그 시멘트의 경우 2종으로서 50%의 질량 치환을 가정하여  $m$ 값을 산정하였다. Table 7에서는 내구수명 해석조건을 나타내고 있다.

Table 7 Analysis condition of service life evaluation

Structure	Cover depth (mm)	Surface chloride content ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Built-up period (year)	Propagation period (year)	Critical chloride content ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Time parameter
Wall	50	5.00	10	6	1.2	0.2 (OPC)
			15			0.48 (S-1, S-2)
Column	80					

### 4.3 확산계수 변환을 통한 내구수명 도출

3절에서 도출된 축진 염화물 확산계수는 4.1절에서 내구수명 해석에 시 사용되는 지배방정식의 겉보기 확산계수와는 물리적으로 다른 전기장 내 염화물 이온의 이동 속도를 나타내는 값이다. 따라서 내구수명 해석을 위해서는 축진 염화물 확산계수 결과를 겉보기 염화물 확산계수로 변환하여야 합리적인 해석 결과를 얻을 수 있다. 두 가지 확산계수의 상관성은 식(5)와 같은 기존의 연구 결과에서 제안된 상관식으로 제안되어있으며 이를 이용하여, 겉보기 확산계수를 도출하였다.

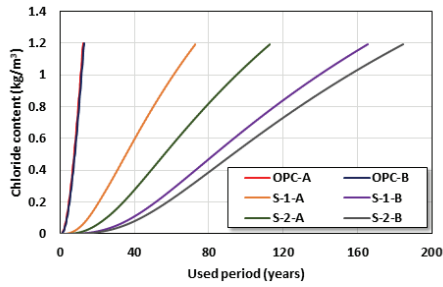
$$D_{rcpt} = 1.16 \times D_{app} + 0.32 \times 10^{-12} \quad (5)$$

여기서  $D_{rcpt}$ 는 축진 염화물 확산계수를,  $D_{app}$ 는 겉보기 염화물 확산계수를 나타낸다.

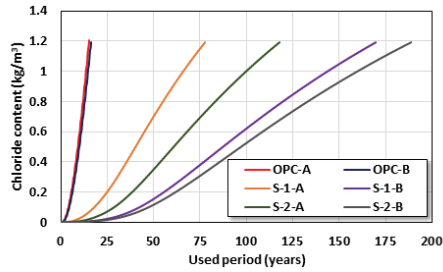
식(5)에서도 알 수 있듯이 축진확산계수( $D_{rcpt}$ )보다 겉보기 확산계수( $D_{app}$ )가 작게 평가되고 있음을 알 수 있다. Table 8에서는 각각의 방법으로 도출된 겉보기 확산계수 결과를 나타내고 있으며 이를 Fig.6에 도시하였다. 이렇게 변환된 확산계수는 Life365v.2에 사용되어 내구수명을 평가하게 된다.

NT BUILD 492 방법을 이용하여 도출된 내구수명을 A로 ASTM C 1202에 의한 확산계수로 평가된 내구수명을 B로 하여 Table 9에 각각의 내구수명을 나타내었으며 이를 Fig.7에 나타내었다. 또한 각 해석기간에 따른 외벽 및 기둥구조의 염화물 확산 해석결과는 Fig.8에 나타내었다.

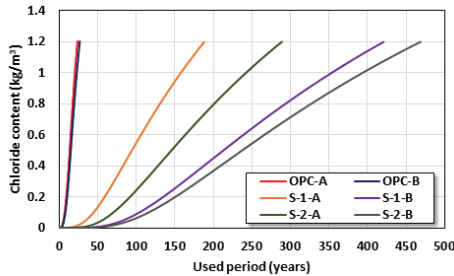
슬래그 시멘트를 사용한 경우 시간의존성지수가 OPC 배합 대비 2.40배 높다. 또한 S-1, S-2 배합은 OPC 배합에 비해 초



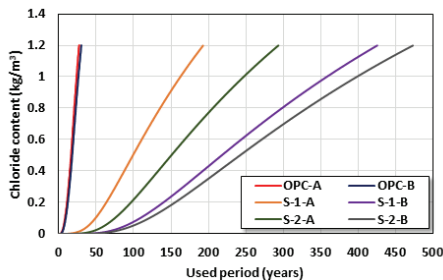
(a) Wall member - 10 years of built-up period



(b) Wall member - 15 years of built-up period

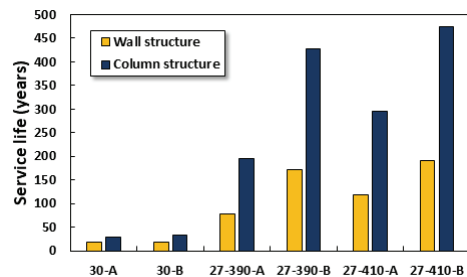


(c) Column member - 10 years of built-up period

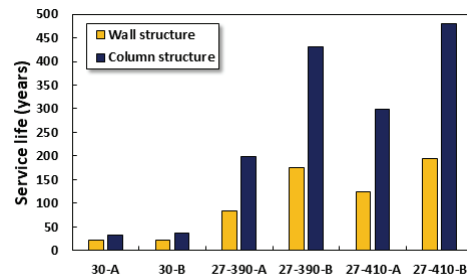


(d) Column member - 15 years of built-up period

Fig. 8 Chloride behavior in wall and column member with different built-up period



(a) Built up 10 years



(b) Built up 15 years

Fig. 7 Results of evaluated service life considering different built-up period

Table 8 Converted apparent diffusion coefficient from accelerated conditions

Case	OPC		S-1		S-2	
	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
ASTM 1202	9.43E-12	1.29E-11	3.13E-12	3.20E-12	2.65E-12	3.03E-12
NT BUILD 492	1.12E-11		3.16E-12		2.84E-12	
Case	OPC		S-1		S-2	
	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
NT BUILD 492	1.40E-11	1.15E-11	7.35E-12	6.65E-12	4.39E-12	4.78E-12
ASTM 1202	1.28E-11		7.00E-12		4.59E-12	

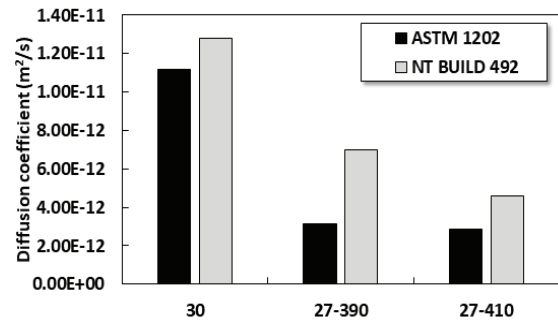


Fig. 6 Converted apparent diffusion coefficient

Table 9 Evaluated service life from various conditions

	OPC			
	Wall structure		Column structure	
	A	B	A	B
Built up 10 years	18.2	19.2	29.7	32.7
Built up 15 years	21.5	22.5	33.2	36.2
	S-1		S-2	
	Wall structure	Column structure	Wall structure	Column structure
	A	B	A	B
Built up 10 years	78.8	171.3	194.2	426.7
Built up 15 years	83.7	175.8	198.8	431.5

기 겉보기 확산계수값이 28.2~25.4%, 54.7~35.9% 수준으로 감소하였으므로 큰 내구수명이 확보되었다. Built-up period 가 10년에서 15년으로 증가함에 따라 내구수명이 외벽 구조의 경우 102.4%~118.1%, 기둥 구조의 경우 101.0%~111.8%의 증가율을 나타내었다. OPC 배합을 제외하고는 모든 해석조건에서 75년 이상의 내구수명을 확보할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 비말대에 노출된 콘크리트 구조물의 옥외 벽체 및 기둥부에 대하여 내구수명을 평가하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) ASTM 1202 의 통과 전하량 시험에서 2종 고로 슬래그 시멘트를 결합재로 사용한 S-1, S-2 배합은 OPC 배합에 비하여 21.2%~23.8%의 낮은 통과 전하량을 확보하였다. 또한 NT BUILD 492로 측정된 확산계수 값에서는 S-1 배합에서는 55.7%, S-2 배합에서는 37.2% 수준으로 확산계수가 감소하였다. 이러한 특성은 OPC 배합보다 낮은 압축강도에도 불구하고 슬래그 기반 잠재수경성을 통하여 공극구조의 감소와 자유 염화물 흡착량 증가에 기인한다.
- 2) 통과전하량 및 NT BUILD 492 방법을 통하여 도출된 촉진염화물 확산계수는 기존의 연구결과를 이용하여 겉보기 확산계수로 변환하였으며 이를 이용하여 비말대에 노출된 기둥 및 외벽의 내구수명을 평가하였다. S-1 및 S-2배합에서는 확산계수의 시간지수가 OPC배합에 비하여 2.40배 높으며 초기 겉보기 확산계수값이 각각 28.2%~25.4%, 4.7%~35.9% 수준으로 감소하였으므로 모두 75년 이상의 내구수명이 확보되었다.
- 3) 피복두께 50mm, Built-up period를 10년, 임계 염화물량을 1.2kg/m<sup>3</sup>인 외벽구조가 가장 열악한 조건인데, OPC 배합에서는 18.2~19.2년, S-1배합에서는 78.8~171.3년, S-2배합에서는 118.8~190.2년이 평가되었다.

#### Acknowledgement

본 연구는 (주)한화건설의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

#### References

1. ACI 201.2R-08 (2008), Guide to Durable Concrete, American Concrete Institute (ACI).
2. ASTM C 1202 (2005), Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, American Society for Testing and Materials.
3. Bentz, E.C. (2003), Probabilistic Modeling of Service life for Structures Subjected to Chlorides, ACI Mater Journal, 100(5) 391-397.
4. Berke, N. S., and Hicks, M. C. (1994), Predicting Chloride Profiles in Concrete, CORROSION, 50(3), 234-239.
5. Broomfield, J.P. (2006), Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, CRC Press: London.
6. CEN (2000), Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures, EN-1991, Brussels: European Committee for Standardization (Comité Européen de Normalisation, CEN).
7. Chung, L., Kim, J. H., and Yi, S. T. (2008), Bond strength prediction for reinforced concrete members with highly corroded reinforcing bars, Cement and Concrete Composites, 30(7), 603-611.
8. DuraCrete Final Report (2000), DuraCrete Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures.
9. Ehlen, M. A. (2018) Life-365TM Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, Life365 manual, SFA, 9-38.
10. Ishida, T., Maekawa, K., and Kishi, T. (2007), Enhanced Modeling of Moisture Equilibrium and Transport in Cementitious Materials Under Arbitrary Temperature and Relative Humidity History, Cement and Concrete Research, 37(4), 565-578.
11. JSCE (2002), Concrete Library 109: Proposal of the Format for Durability Database of Concrete, Japan Society of Civil Engineering (JSCE).
12. JSCE (2007), Standard Specification for Concrete Structures: Materials and Construction, Japan Society of Civil Engineering(JSCE) Guidelines for Concrete, 16.
13. JSCE (2012), Standard Specification for Concrete Structures: Design, Japan Society of Civil Engineering(JSCE) Guidelines for Concrete, 15.
14. KCI (2012), Concrete Standard Specification-Durability Part, Korea Concrete Institute.
15. Kim, J. H., Jeong, J. Y., Jang, S. Y., Jung, S. H., and Kim, S. I. (2015), Strength Development and Durability of High-Strength High-Volume GGBFS Concrete, Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute, 3(3), 261-267.
16. Lee, H. J., Bae, S. H., and Jung, S. H. (2017), Resistance to Corrosion of Reinforcing Steel and Critical Chloride Content of High Volume Fly Ash Concrete, Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute, 5(4), 375-381.
17. Leng, F., Feng, N., and Lu, X. (2000) An Experiment Study on the Properties of Resistance to Diffusion of Chloride Ions of Fly Ash and Blast Furnace Slag Concrete, Cement and Concrete Research 30(6), 989-992.
18. Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T., (2003), Multi-Scale Modeling of Concrete Performance, Journal of Advanced Concrete

- Technology, 1(2), 91-126.
19. Nilsson, L. O., Sandberg, P., Poulsen, E. Tang L., Andersen, A. and Frederiksen, J. M. (1997), HETEK: system for estimation of chloride ingress into concrete: Theoretical background, Denmark Ministry of Transport.
  20. Nordtest method (1999), Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Nordic Council of Ministers, 1-8.
  21. Oh, B. H., and Jang, S. Y. (2007), Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures, Cement and Concrete Research, 37(1), 47-53.
  22. Pack, S. W., Jung, M. S., Song, H. W., Kim, S. H., Ann, K. Y. (2010), Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment, Cement and Concrete Research, 40(2), 302-312.
  23. Song, H. W., and Kwon, S. J., (2009), Evaluations of Chloride Penetration in High Performance Concrete Using Neural Network Algorithm and Micro Pore Structure, Cement and Concrete Research, 39(9), 814-824.
  24. Tang, L., and Nilsson, L. O. (1993), Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC and mortar, Cement and Concrete Research, 23(2), 347-353.
  25. 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.

Received : 12/21/2018

Revised : 05/16/2019

Accepted : 05/27/2019

---

**요 지 :** 염해에 노출된 콘크리트 구조물의 내구수명을 정량적으로 평가하기 위해서는 사용 배합을 통하여 확산계수를 평가하고 이를 이용한 염화물 침투 해석이 필요하다. 본 연구에서는 비말대에 노출된 콘크리트 구조물에 대하여 촉진 확산계수를 NT BUILD 492 및 ASTM 1202를 통하여 평가하였으며, 기존의 연구를 이용하여 길보기 확산계수를 도출하였다. 사용배합의 특성과 가장 보수적인 조건인 입계 염화물량과 표면 염화물량을 고려하였으며, Life 365 ver.2 프로그램을 이용하여 외벽 및 기둥구조의 내구수명을 평가하였다. 10년 및 15년의 Built-up period의 변화에 대해서는 내구수명은 큰 차이를 보이지 않았으며, 슬래그를 사용한 두 개의 배합에서는 높은 시간의존성 지수와 낮은 초기 염화물 확산계수로 인해 75년 이상의 높은 내구수명이 확보되었다.

**핵심용어 :** 염해, 촉진염화물 확산계수, 길보기 염화물 확산계수, 내구수명

---