

콘크리트중의 염소이온 확산계수 추정 실험법의 비교

Comparision of Test Methods for Estimating Chloride Ion Diffusion Coefficient in Concrete

문한영*
Moon, Han Young

김홍삼**
Kim, Hong Sam

문재흠***
Moon, Jae Heum

한아름***
Han A Rum

ABSTRACT

To estimate durability of reinforced concrete structures located in or nearby seawater, many different kinds of accelerated tests for evaluation of chloride ion permeation in concrete were proposed. At present the only standardized test is the ASTM C 1202(RCP test). This test method is used to estimate the concrete's resistivity of the chloride penetration in concrete by using the total charges passed and sometimes used to calculate the chloride diffusion coefficients. However, this test may lead to an erroneous chloride diffusion coefficient. So this test method was compared with the modified Dhir's test and the traditional concentration diffusion test. Experimental results showed that the diffusion coefficients determined the RCP test and the PD Index gave wrongous values, but the diffusion coefficient acquired by considering a migration term was nearly the same to the CD Test.

1. 서론

근년에 와서 철근콘크리트 구조물의 내구성에 대한 관심이 고조되면서 철근콘크리트의 내구성과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있는 현실이다. 철근콘크리트 구조물의 내구성을 저하시키는 요인으로는 동결융해의 반복작용에 의한 콘크리트의 팽창저하, 대기중의 이산화탄소의 침투에 따른 중성화, 알칼리 골재반응에 의한 콘크리트의 열화 및 해양 환경하와 같은 염화물의 침투 확산에 의한 철근부식 등을 들 수 있다. 그런데 해양환경하에 건설되는 철근콘크리트 구조물의 경우, 염소이온과 같은 유해이온이 침투확산 되어 콘크리트중의 철근을 부식시키므로 내구적인 콘크리트 구조물을 건설하기 위해서는 콘크리트 중의 염소이온과 같은 유해이온의 확산계수의 평가결과는 콘크리트 구조물의 내구설계 또는 수명예측을 위한 중요한 인자로 생각된다. 그래서, 해양환경하에 건설되는 철근콘크리트 구조물 중의 염화물의 침투 확산속도를 평가하기 위한 방법으로 기존의 농도차 확산실험법을 주로 적용하고 있으나 이 실험방법에 의하면 콘크리트의 배합이나 시편의 두께에 따라 차이가 있으며, 실험기간이 1년이상 소요되는 문제점이 지적되고 있다.

본 연구에서는 염소이온의 확산계수를 추정하기 위한 촉진실험방법 중 ASTM C 1202, Dhir Test 및 농도차 확산실험법(CD Test)에 의하여 구한 염소이온 확산계수를 비교 고찰하였다.

* 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*** 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정

2. 실험개요

(1) 시멘트 및 혼화재 : 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC로 약함)와 고로슬래그 미분말(이하 BFS로 약함)을 사용하였으며, 각각의 화학성분 및 물리적 성질은 표 1과 같다.

표 1 시멘트 및 혼화재의 화학성분 및 물리적 성질

항목 종류	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Ig.loss (%)	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)
OPC	21.95	6.59	2.81	60.1	3.32	2.11	2.58	3.15	3,112
BFS	31.88	12.64	0.39	42.46	6.38	3.63	0.65	2.92	4,580

(2) 골재 : 잔골재는 비중 2.61, 흡수율 0.752%, 조립률 2.92인 강모래를 사용하였으며, 굵은골재는 최대치수 20mm, 비중 2.61, 흡수율 1.0 및 마모율 31.4%인 부순돌을 사용하였다.

(3) 모르터 및 콘크리트의 배합

물-결합재비 48.5%, 결합재:모래 = 1:2 인 보통 모르터(이하 OPCM으로 약함)와 시멘트의 50%를 고로슬래그 미분말로 치환한 모르터(이하 BFSM으로 약함)를 사용하였다. 콘크리트의 배합은 물-결합재비 45%, 공기량 4.5±1.5%를 목표로 AE감수제를 시멘트 중량에 대하여 0.15% 혼합한 보통콘크리트(이하 OPCC로 약함)와 시멘트 40%를 고로슬래그 미분말로 치환한 콘크리트(이하 BFSC로 약함) 2종류를 사용한 콘크리트의 배합은 표 2와 같다.

표 2 콘크리트의 배합표

항목 종류	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kgf/m ³)				
					W	C	S	G	BFS
OPCC	16±1	5.6	45	42	187	416	673	970	-
BFSC	16±1	4.9	45	42	187	249	698	964	166

3. 실험방법

(1) 실험방법 및 조건

콘크리트중의 염소이온 확산계수 추정을 위한 실험방법 및 조건은 표 3과 같으며, 모르터는 수중에서 재령 28동안 양생하였으며, 콘크리트는 수중에서 재령 1년간 양생한 공시체를 소정의 두께로 절단하여 시편으로 사용하였다.

표 3 염소이온 침투확산실험법 및 조건

구분 항목	시편두께 (mm)	Cell I	Cell II	전압 (V/m)	측정기간	측정항목
RCP Test*	50	3% NaCl (-)	0.3N NaOH(+)	1200	6 (hr)	총통과전하량
Dhir Test	30	5M NaCl (-)(포화Ca(OH) ₂)	포화Ca(OH) ₂ (+)	333.3	7~20 (day)	농도증가율
CD Test	10	5M NaCl(포화Ca(OH) ₂)	포화Ca(OH) ₂	-	3~5(month)	"

* ASTM C 1202 Test : Rapid Chloride Ion Penetration(RCP) Test

(2) 염소이온 확산계수의 추정

콘크리트중의 염소이온 확산계수는 ①RCP Test : 총통과전하량을 계산하여 Berke의 식(1)을 적용, ② Dhir Test : Dhir가 제안한 PD Index 식(2), ③ Dhir의 실험결과를 Migration을 고려한 식(3) 적용, ④ CD Test : Fick의 제1법칙(4)을 적용하여 구하였다.

$$D = 0.0103 \times 10^{-12} \times (Q_{total})^{0.84} \quad \text{-- (1)} \quad \ln(C_1 - C_2) = -\frac{DA}{Vl} (t_n - t_0) + \ln C_1 \quad \text{-- (2)}$$

$$D = \frac{RT}{zFC_1 \Delta E} J_{cl} \quad \text{-- (3)} \quad D = \frac{V \Delta C_2}{A \Delta t} \times \frac{L}{(C_1 - C_{2ave})} \quad \text{-- (4)}$$

여기서 Q_{total} = 총통과전하량 (Coulomb) C_1, C_2 = Cell I, II의 NaCl 농도 (mol/l)
 V = Cell II의 용액부피 (m^3) l, L = 시편두께 (m)
 A = 시편 단면적 (m^2) t = 시간 (s)
 z = 이온 전하값 F = Faraday 상수 (J/V.mol)
 R = 기체 상수 (J/V.mol) J_{cl} = 염소이온의 이동도 ($m^2 \cdot mol/l \cdot s$)
 T = 절대 온도 (K) C_{2ave} = Cell II의 평균염소이온 농도 (mol/l)

4. RCP 및 Dhir Test 결과의 비교 평가

RCP 와 Dhir Test에서 측정된 전류량 및 농도를 경과시간별로 나타낸 것이 그림 1 및 2이다. 그림 1은 RCP Test의 결과로서 모르터 및 콘크리트의 전류량이 경과시간에 따라 증가함을 알 수 있었으나, OPCM의 경우 실험 시작 약 2시간이 경과하면서 Cell의 온도가 90℃를 넘는 탓으로 ASTM C 1202 규정에 따라 실험을 종료하였다. 그림 2는 Dhir Test의 결과로서 Cell의 염소이온 농도가 서서히 증가하여 약 4~5일 이후부터 직선적인 증가현상을 나타냄을 알 수 있었으며, 시간에 대한 농도증가의 기울기는 모르터나 콘크리트에 관계없이 슬래그를 치환한 경우가 작게 나타났다. 위의 2가지 실험방법에 의하여 측정 및 계산한 결과를 정리한 것이 표 4이다.

표 4 RCP 및 Dhir Test 실험결과 및 확산계수

항 목 구 분	RCP Test				Dhir Test	
	총통과전하량 (Coulomb)	종료시온도 (℃)	염소이온 투과도	확산계수(m^2/s) 식 (1)	PD Index(m^2/s) 식 (2)	확산계수(m^2/s) 식 (3)
OPCM*	39,916	90 ℃	매우높음	7.55×10^{11}	2.26×10^{10}	5.76×10^{13}
BFSM	8,899	70 ℃	매우높음	2.13×10^{11}	4.67×10^{11}	1.17×10^{13}
OPCC	3,200	40 ℃	보통	9.06×10^{12}	1.24×10^{10}	3.16×10^{13}
BFSC	1,403	30 ℃	낮음	4.53×10^{12}	2.39×10^{11}	7.31×10^{14}

* OPCM의 약 2시간까지의 총통과전하량은 약 7,900Coulomb이며, 실험종료시까지 측정된 총통과전하량을 전류가 선형적으로 증가하는 것으로 가정하여 계산한 값임.

RCP Test에 의한 총통과전하량을 살펴보면, OPCM이 39,916Coulomb으로서 가장 큰 값을 나타내었을 뿐만아니라, OPCM 및 BFSM의 염소이온 투과도도 매우 높음을 알 수 있었다. 한편, 재령 1년된 OPCC의 경우 총통과전하량 약 3,200Coulomb 정도로서 염소이온 투과도는 보통이었으나, BFSC의 경우는 총통과전하량이 약 1400Coulomb으로서 염소이온 투과도는 낮은 영역에 해당하였다.

이번에는 Berke가 RCP Test 결과와 농도차 확산 실험결과를 상호 비교하여 제시한 식(1)에 의하여 추정된 확산계수와 Dhir가 제시한 식(2)로부터 구한 PD Index 및 Dhir Test의 결과로부터 식(3)에 의하여 구한 확산계수 들을 비교해 보면 크게 상이하였으며, 확산계수는 식(2), 식(1) 및 식(3)의 순으로 작게 나타났다.

5. 촉진실험 및 농도차에 의한 확산계수의 비교평가

모르터 실험편을 대상으로 촉진실험방법과 적용식에 따른 확산계수와 농도차 확산계수를 비교하여 정리한 것이 표 5이다. 이 표에서 알 수 있듯이 전위차에 의한 염소이온의 이동을 촉진시킨 조건을 반영하여 migration 항을 고려하여 계산한 식(3)의 확산계수가 CD Test에 의하여 구한 확산계수와 가장

근접하는 결과를 나타내었다.

Dhir가 제안한 식(2)로부터 구한 확산계수가 가장 큰 값을 나타낸 이유는 전위차에 의한 촉진 실험방법을 적용하였음에도 불구하고 migration 항을 고려하지 않은 탓으로 생각된다.

한편, Berke에 의한 식(1)에 의하여 구한 확산계수는 CD Test에 의한 확산계수에 비하여 약 100배 정도의 큰 값을 나타내었으며, 그 이유는 RCP Test의 외부전압이 60V(1200V/m)로 Joule effect에 의해 실험셀의 온도가 크게 상승함에 따른 세공용액 중의 이온들의 활성도가 증가된 탓으로 생각된다.

이상의 실험결과를 종합해 보면 전위차에 의하여 염소이온의 이동을 촉진시킨 Dhir Test의 식(3)에 의하여 구하는 방법이 단기간에 염소이온의 확산계수를 추정하기 위한 촉진실험방법으로 적절하다고 생각되었다.

6. 결론

- (1) Berke의 제안식 (1)로부터 구한 확산계수가 큰 이유는 실험에 적용된 외부전압이 60V로 joule effect에 의한 실험셀의 온도상승과 세공용액 중의 이온들의 활성도가 증가된 탓으로 추정된다.
- (2) Dhir가 제안한 식(2)로부터 구한 확산계수가 가장 큰 값을 나타낸 이유는 전위차에 의한 촉진 실험방법을 적용하였음에도 불구하고 migration 항을 고려하지 않은 탓으로 생각된다.
- (3) 전위차에 의하여 염소이온의 이동을 촉진시킨 Dhir Test의 식(3)에 의하여 구하는 방법이 단기간에 염소이온의 확산계수를 추정하기 위한 촉진실험방법으로 적절하다고 생각된다.

표 5 실험방법 및 적용식에 따른 확산계수

구 분 \ 항 목		확산계수(m ² /s)	
		OPCM	BFSM
RCP Test : 식(1)		7.55×10^{-11}	2.13×10^{-11}
Dhir Test	식(2)	2.26×10^{-10}	4.67×10^{-11}
	식(3)	5.76×10^{-13}	1.17×10^{-13}
CD Test : 식(4)		6.11×10^{-13}	1.80×10^{-13}

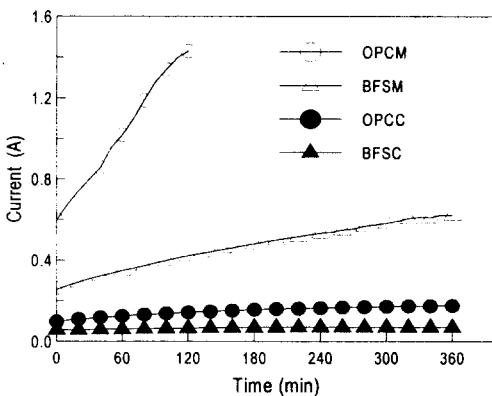


그림 1 경과시간별 통과전류값(RCP Test)

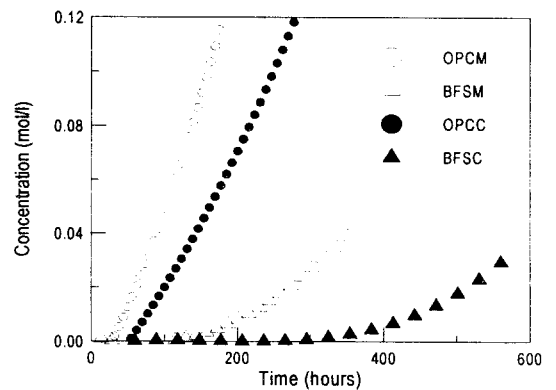


그림 2 시간에 따른 염소이온농도 변화