

콘크리트 중의 염화물 확산평가를 위한 전기화학적 촉진시험법

Electrochemical Accelerated Test for Evaluation of Chloride Diffusion in Concrete

문 한 영* 김 홍 삼** 이 승 태*** 정 호 섭*** 최 두 선****
Moon, Han Young Kim, Hong Sam Lee, Seung Tae Jung, Ho Seop Choi, Doo Sun

ABSTRACT

Many researchers have been trying to evaluate the diffusion coefficient of chloride ion in concrete by using qualitative and quantitative electro-migration tests. Up to now, however, there has been no sufficient method to closely determine the diffusion coefficient of chloride ion through electro-migration test.

In this paper, the diffusion coefficient of chloride ion in concrete was investigated through an electro-migration test, that is, AASHTO T 277, Dhir's method, Tang's method and Andrade's method. And the results of these test were compared with each other.

1. 서 론

최근 철근콘크리트 구조물의 성능저하에 대한 관심이 고조되면서 철근콘크리트 구조물의 내구성에 관련된 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 철근콘크리트 구조물에 발생 가능한 주요 성능저하의 원인으로서는 동결융해의 반복작용, 중성화 및 알칼리 골재반응에 의한 콘크리트의 열화와 유해 이온의 침투·확산에 의한 콘크리트 중의 철근부식 등을 들 수 있다. 특히, 콘크리트 내부로 침투한 염소이온에 의한 철근의 부식 즉, 염해는 그 발생 빈도나 손상 정도 면에서 매우 심각한 요인으로 거론되고 있다. 그러므로 콘크리트 구조물의 내구성 설계와 내구수명 예측을 위해서는 유해 이온의 침투 및 확산의 평가가 대단히 중요하며, 염소이온의 확산에 의한 철근콘크리트 구조물의 성능저하 평가가 실행되어야 한다고 생각한다.

콘크리트 중의 염소이온 확산계수를 평가하는 방법으로는 이온의 농도차를 구동력으로 하는 확산시험이 있으나 이 방법은 콘크리트 배합이나 시편의 두께에 따라 상당한 차이가 있으며 실험기간이 수개월에서 수년이 소요된다는 단점을 가지고 있어 염소이온의 침투·확산 특성을 평가하기 위해서는 실용적이지 못하다.

본 연구에서는 콘크리트 중의 염소이온 확산계수를 단시간에 추정하기 위한 촉진시험방법을 동일 재령 및 조건에서 각 시험방법에 의하여 구하여진 염소이온의 확산계수를 비교, 고찰하였다.

*정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

**정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료

***정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

****정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정

2. 염화물 확산평가를 위한 촉진시험법의 검토

일반적으로 물질이 콘크리트 내부로 이동하는 메커니즘은 1) 농도차에 의한 확산(diffusion), 2) 압력차에 의한 침투(permeation), 3) 모세관 장력에 의한 흡수(capillary suction) 등으로 구분되지만, 염소이온이 콘크리트 중으로 침투하는 메커니즘은 주로 확산현상에 의하여 설명된다. 그러나 농도차를 구동력으로 하는 확산시험의 평가는 시간이 많이 걸리는 단점이 있기 때문에, 최근 염소이온의 확산을 단기간에 추정하기 위하여 전위차에 의한 전기적 이동(migration)현상으로 규명하려는 연구가 진행되고 있다. 대표적인 방법은 콘크리트 시험편에 셀을 구성하여 전위차를 가한 상태에서 셀을 통하여 흐르는 전류로부터 통과전하량을 구하는 ASTM C 1202 Test(이하 RCP method), 셀을 통하여 흐르는 전류값으로부터 각 이온의 수율(transport number)을 고려하는 Andrade's method, 셀 내부의 증가되는 염소이온의 농도를 측정하는 Dhir's method 및 염소이온의 침투깊이를 비색법으로 판정하는 Tang's method 등이 있으며 본 연구에서는 각각의 시험방법을 동일조건에서 비교 검토하고자 하였다. 표 1은 염소이온의 확산계수를 구하기 위하여 적용한 촉진시험법의 조건 및 특징을 정리하였다.

표 1 염소이온의 확산계수를 구하기 위한 촉진시험법 및 조건

Test methods	Thickness of specimen(mm)	Electrolyte solution		Required time	Measurement factor
		Cell I(-)	Cell II(+)		
RCP method*	50	0.5, 5M NaCl	Sat. Ca(OH) ₂	12 hr	Total passed charge
Dhir's method	30			1~2 week	Ratio of Cl ⁻ concentration
Tang's method	50			8 hr	Depth of penetration
Andrade's method	30			2~3 day	Passed current

* ASTM C 1202 시험방법과 동일한 조건에서 30V의 전위차로 12시간 동안 시험하는 AASHTO T 277에 의거한 방법임.

3. 실험개요

3.1 사용재료 및 배합

(1) 시멘트 : 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 화학성분 및 물리적 성질은 표 2와 같다.

표 2 시멘트의 화학성분 및 물리적 성질

Chemical composition(%)							Physical properties	
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	lg.loss	Specific gravity	Blaine(cm ² /g)
60.1	21.95	6.59	2.81	3.32	2.11	2.58	3.15	3,112

(2) 골재 : 잔골재는 비중 2.59, 흡수율 0.80% 및 조립률 2.80인 세척사를 사용하였으며, 굵은골재는 최대치수 25mm, 비중 2.66 및 흡수율 0.78%인 부순돌을 사용하였다.

(3) 콘크리트 배합 : 콘크리트는 단위수량을 187kg/m³으로 고정하고 물-시멘트비 40, 45 및 50%의 3단계로 하여 $\phi 10 \times 20$ cm의 원주형 공시체를 제작하였다. 한편, 공기량 4.5±1.5%를 목표로 AE감수제를 사용하였으며 재령 28일까지 수중양생을 실시하였다.

3.2 염소이온 확산계수의 평가

(1) 확산셀의 구성 및 전위차의 적용

재령 28일까지 수중양생 한 콘크리트 원주형 공시체를 대상으로 공시체의 상, 하부의 30mm를 제외한 중간 부분에서 다이아몬드 커터를 이용하여 30, 50mm 두께로 절단하여 그림 1과 같이 확산셀을 구성하였다.

(2) 전위차 촉진시험에 의한 확산계수의 추정 방법

각각의 시험 방법별로 고려되는 측정항목으로부터 콘크리트 중의 염소이온의 확산계수를 추정하기 위한 적용식은 아래와 같다.

- ① RCP method : 시간대별 측정전류를 부분적분법을 이용하여 총 통과전하량을 계산한 후 Berke가 제안한 식 (1)을 적용하여 확산계수(D_{Berke})를 구하였다.
- ② Dhir's method : Dhir가 제안한 식 (2)로부터 steady-state 조건에서 PD Index를 구하였으며, 이를 전기적 이동항을 고려하여 식 (3)으로부터 확산계수($D_{Migration}$)를 산정하였다.
- ③ Andrade's method : 시험편을 통과하는 전체전류 중 염소이온의 기여 정도를 반영하기 위하여 수율(transport number)을 도입하여 식 (4)와 같이 확산계수($D_{Andrade}$)를 구하였다.
- ④ Tang's method : ① ~ ③까지의 시험방법(정상상태에서의 염소이온 확산계수를 구하는 방법)과는 달리 비정상상태(non-steady state)에서의 확산계수를 추정하기 위하여 Fick's 확산 제 2 법칙을 기본으로 염소이온의 침투깊이 (x_d)로부터 식 (5)과 같이 확산계수(D_{Tang})를 구하였다.

$$D_{Berke} = 0.0103 \times 10^{-12} \times (Q_{total})^{0.84} \quad (1) \qquad D_{PDindex} = \frac{VI}{A \cdot (t_n - t_0)} \cdot \ln\left(\frac{C_1}{C_1 - C_2}\right) \quad (2)$$

$$D_{Migration} = \frac{RT}{zFC_1\Delta E} J_{cl} \quad (3) \qquad D_{Andrade} = \frac{RTit_{cl}}{nF^2\Delta E} \frac{1}{A} \frac{1}{C_{cl}Z} \quad (4)$$

$$D_{Tang} = \frac{RTL}{zFU} \frac{x_d - \alpha x_d^{0.5}}{t} \quad (5)$$

4. 촉진시험법에 의한 염소이온 확산계수의 추정결과 및 고찰

셀 I층의 염소이온 농도를 각각 0.5 및 5M로 변화시킨 후 재령 28일의 콘크리트 시험편을 대상으로 IR Drop를 고려한 전위차 염소이온 촉진시험의 실험 결과를 정리하여 표 3에 나타내었으며, 셀 I층의 염소이온 농도에 따른 확산계수를 비교한 결과를 그림 2 및 3에 나타내었다.

표 3에서 알 수 있듯이 총 통과전하량 및 염소이온의 침투깊이는 물-시멘트비가 증가할수록 커지는 경향을 나타내었으며, 용액의 농도가 증가함에 따라서도 동일한 경향임을 알 수 있었다. 한편, $D_{PDindex}$ 실험으로부터 구한 염소이온의 확산계수가 나머지 결과에 비하여 약 100~1000배 정도로 가장 큰 값을

표 3 물-시멘트비 및 용액농도에 따른 염소이온의 추정 확산계수

W/C	용액농도 (M)	통과전하량 (coulomb)	침투깊이 (mm)	염소이온의 추정 확산계수($\times 10^{-12} m^2/s$)				
				D_{Berke}	$D_{PDindex}$	$D_{Migration}$	$D_{Andrade}$	D_{Tang}
40	0.5	3476.3	10.12	9.71	922	3.72	4.58	13.6
	5	4581.9	12.99	12.97	249	0.68	0.69	15.9
45	0.5	3642.3	11.62	10.17	1690	4.90	4.82	15.8
	5	5949.5	14.06	15.25	278	0.74	0.87	17.4
50	0.5	5270.4	16.06	13.80	2320	5.70	6.90	22.1
	5	6802.7	17.92	17.10	307	0.83	0.93	22.7

알 수 있으며, 추정된 확산계수 값은 용액의 농도 및 물-시멘트비에 관계없이 $D_{PDindex} > D_{Tang} > D_{Berke} > D_{Andrade} > D_{Migration}$ 순으로 작음을 알 수 있다. 한편, 셀 I층의 농도에 따른 영향은 5M의 염화물 용액을 사용한 경우가 1/5 ~ 1/10정도로 작은 값으로 나타났다.

한편, 일반적으로 실구조물 또는 농도차 확산시험 결과로부터 염소이온의 확산계수는 $1 \sim 10 \times 10^{-12} m^2/s$ 정도의 값으로 보고되고 있다. 따라서 $D_{PDindex}$ 가 가장 큰 이유는 전위차에 의한 염소이온의 이동을 촉진시켰음에도 불구하고 이를 반영하지 못한 결과 때문으로 판단되며, 전위차에 의한 전기적 이동효과를 고려한 $D_{Migration}$ 의 결과나 통과전류에 수율을 고려한 $D_{Andrade}$ 값이 현실적으로 타당한 값으로 생각된다. 반면, D_{Tang} 의 값은 비정상상태의 확산계수 값으로 정상상태 조건에서 구한 값과는 직접적인 비교가 곤란하며, 위에서 구한 정상상태의 확산계수 역시 장기간 노출조건에서의 확산계수와의 비교가 요망된다.

5. 결 론

(1) 확산셀을 통과한 전류를 시간에 대해 적분한 통과전하량과 염소이온의 침투깊이는 물-시멘트비가 증가할수록 커지는 경향을 나타내었으며, 용액의 농도 증가에 대해서도 동일한 경향임을 알 수 있었다.

(2) 촉진시험결과로부터 추정한 확산계수는 용액의 농도 및 물-시멘트비에 관계없이 $D_{PDindex} > D_{Tang} > D_{Berke} > D_{Andrade} > D_{Migration}$ 순으로 작음을 알 수 있었다.

(3) 정상상태에서의 염소이온 확산계수는 전위차에 의한 전기적 이동효과를 고려한 $D_{Migration}$ 의 결과 및 통과전류에 수율을 고려한 $D_{Andrade}$ 값이 타당한 값으로 생각되고 장기간의 노출조건에서의 확산계수와의 비교가 요망된다.

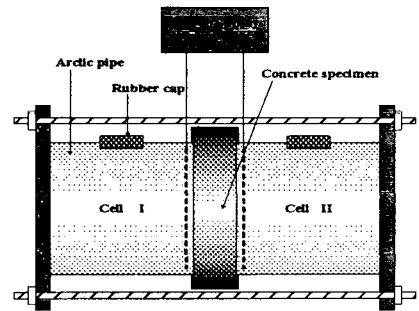


그림 1 확산시험장치의 개요

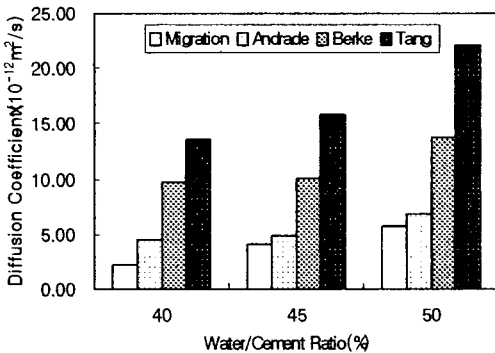


그림 2 염소이온의 확산계수(셀 I 농도 : 0.5M)

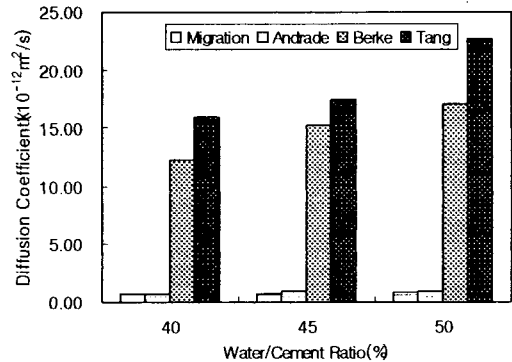


그림 3 염소이온의 확산계수(셀 I 농도 : 5M)