

# 콘크리트의 염소이온 확산계수 평가를 위한 시험방법 비교

## Comparison of Test Methods for Evaluation of Chloride Diffusion Coefficient in Concrete

이찬영\*      김홍삼\*\*      김진철\*\*      정해문\*\*\*      안태송\*\*\*  
Lee, Chan-young    Kim, Hong-sam    Kim, Jin-cheol    Cheong, Hai-moon    Ahn, Tae-song

### ABSTRACT

Generally, durability of concrete structures under marine environment is grossly declined by detrimental ions such as chlorides, which penetrate concrete and was diffused to corrode reinforcing rod. Therefore, chloride diffusion properties in concrete are important for durability evaluation and design of concrete structure. For estimation of chloride diffusion coefficient in concrete, both evaluation methods are used for steady state and non-steady state derived from Fick's 1st and 2nd law, respectively. However, as it is very difficult to evaluate diffusion coefficient for non-steady state like service environment where concrete is actually exposed, indirect evaluation method by laboratory accelerated test is generally used.

In this study, comparison of chloride diffusion behavior was investigated for fixed mix proportion and age of concrete using four accelerated test methods based on domestic and foreign standards. From test results, only relative comparison between concrete mixtures was possible using ASTM C 1202 test, and diffusion coefficient for steady state was estimated as low as 1/10 of that for non-steady state. In addition, diffusion coefficient estimated by immersion test was similar to result by NT build 492 test.

### 요 약

염해환경에 건설되는 콘크리트 구조물은 염소이온과 같은 유해이온이 외부로부터 콘크리트 중으로 침투, 확산하여 철근을 부식시킴으로써 구조물의 내구성을 크게 저하시키기 때문에 구조물의 내구성 평가 또는 설계시 중요한 고려사항이 된다. 콘크리트 중의 염소이온 확산계수를 추정하는 방법은 Fick의 제1법칙으로부터 유도되는 정상상태(steady state)에서의 확산계수 평가방법과 Fick의 제2법칙으로부터 유도되는 비정상상태(non-steady state)에서의 확산계수 평가방법이 있다. 그러나, 실제 노출환경에서와 같은 비정상상태의 확산계수를 평가하는 것은 매우 어려우므로 실내에서 촉진방법에 의해 콘크리트의 확산특성을 간접적으로 평가하는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 국내 또는 외국의 시험규격에 근거한 촉진 시험방법 중 4가지를 선정하여 동일 재령의 콘크리트 배합에 적용하여 그 결과를 비교 하였다. 실험결과에 따르면, ASTM C 1202 시험법은 콘크리트 배합간의 상대적인 구분만이 가능하며, 정상상태의 확산계수는 비정상 상태의 확산계수에 비해 1/10 정도 수준으로 작게 평가됨을 알 수 있다. 또한 침지시험에 의한 확산계수는 NT Build 492에 의한 결과와 유사한 값을 나타내었다.

\* 정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 전임연구원

\*\* 정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원

\*\*\* 정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원

## 1. 서론

염해환경에 건설되는 콘크리트 구조물은 염소이온과 같은 유해이온이 외부로부터 콘크리트 중으로 침투, 확산하여 철근을 부식시킴으로써 구조물의 내구성을 크게 저하시키기 때문에 구조물의 내구성 평가 또는 설계시 중요한 고려사항이 된다. 일반적으로, 물질이 외부로부터 콘크리트 내부로 침투하여 이동하는 메커니즘은 ① 농도차에 의한 확산(Diffusion) ② 압력차에 의한 투과(Permeation) ③ 모세관력에 의한 흡수(Capillary suction)로 구분된다. 콘크리트에 있어서 확산은 입자(또는 분자)나 이온이 높은 농도지역에서 낮은 농도지역으로 이동하는 현상을 말하며 확산에 영향을 크게 미치는 요인으로 물질의 농도, 거리, 시간, 온도 등으로 알려져 있다. 한편, 콘크리트 중의 염소이온 확산계수를 추정하는 방법은 Fick의 제1법칙으로부터 유도되는 정상상태(steady state)에서의 확산계수 평가방법과 Fick의 제2법칙으로부터 유도되는 비정상상태(non-steady state)에서의 확산계수 평가방법이 있다. 그러나, 실제 노출환경에서와 같은 비정상상태의 확산계수를 평가하는 것은 매우 어려우므로 실내에서 촉진방법에 의해 콘크리트의 확산특성을 간접적으로 평가하는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 국내 또는 외국의 시험규격에 근거한 촉진 시험방법 중 4가지를 선정하여 동일 재령의 콘크리트 배합에 적용하여 그 결과를 비교 하였다.

## 2. 전위차에 의한 촉진 염소이온 확산시험방법에 대한 고찰

콘크리트 중에서의 염소이온 확산특성을 평가하기 위해서는 많은 노력과 시간이 소요되므로 최근의 연구는 주로 전위차에 의하여 이온의 전기적 이동을 유도함으로써 이온의 이동을 촉진시켜 전기화학적 이론으로 해석하려는 시도에 초점이 맞춰져 있다. 전기적 이동현상은 전위구배를 구동력으로 하여 물질이 이동하는 현상으로 전해질용액 중의 이온이동은 Nernst-Planck 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$J = -D \frac{dC}{dx} - \frac{zF}{RT} DC \frac{dE}{dx} + V_e \dots (1)$$

Flux = Diffusion + Migration + Convection

여기서, J : 플럭스 (g/m<sup>2</sup>s), F : 패러데이 상수(J/Vmol), z : 이온의 원자가, E : 전위(V),

R : 기체상수(J/molK), T : 절대온도(K), V<sub>e</sub> : 이동속도(m/s),

이 식은 농도차에 의한 확산(diffusion), 전기장에 의한 전기적 이동(migration) 및 전해질용액 중의 대류(convection) 향으로써 전해질용액 중의 이온 이동량을 나타낸다. 전위차 촉진에 의한 시험방법은 상기 식의 항목 중 주로 확산 항과 전기적 이동항을 고려하여 확산계수를 평가하는 연구가 많이 진행되었다. 본 연구에서 고찰한 촉진시험 방법은 급속 염소이온 침투저항성 시험방법인 ASTM C 1202, NT Build 355, 433 및 492 시험법의 특징을 요약 정리한 것이 표 1이다.

표 1 염소이온 확산 평가를 위한 촉진 시험 방법 및 측정 조건

관련 규격	규격 명칭	측정항목	시간	용액 조건	전압(V)	산정식
ASTM C 1202	Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration	확산 셀의 통과전하량	6 시간	(+) 0.3 N NaOH (-) 3.0 % NaCl	60V	$Q_{total} = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360})$
NT Build 492	Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments	염화물 침투깊이	24-48 시간	(+) 0.3 N NaOH (-) 10.0 % NaCl	10-60V	$D = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t}$
NT Build 355	Chloride Diffusion Coefficient from Migration Cell Experiments	확산 셀의 농도 증가율	1-2 개월	(+) 0.3 N NaOH (-) 5.0 % NaCl	12V	$D = \frac{JRTL}{z_c F \Delta EC_1}$
NT Build 443	Accelerated Chloride Penetration	염분침투 프로파일	최소 1개월	2.8 N NaCl 용액 침지	-	$C(x,t) = C_0 \cdot \text{erf}(x / \sqrt{4 \cdot D \cdot t})$

### 3. 콘크리트의 종류에 따른 시험방법별 평가

4종류 시험을 비교 검토할 목적으로 5 종류의 상이한 콘크리트 배합을 대상으로 재령 28일 까지 수중양생 후 비교시험을 실시하였으며, 대상 배합의 조건은 표 2와 같다. 이 표에서 A 배합은 설계기준 강도가 40MPa로서 보통포틀랜드시멘트 만을 사용한 배합이며, C 배합은 설계기준 강도가 40MPa인 조건에서 슬래그미분말을 30% 혼입한 경우이다. 한편, 나머지 배합은 설계기준 강도가 35MPa이고 슬래그 미분말을 50% 혼입한 경우이다. 본 연구에서 검토한 4가지 규격의 시험방법의 시험광경을 나타낸 것이 그림 1이다.

표 2 시험대상 콘크리트의 배합 특징

배합명	설계기준강도 (MPa)	공기량 (%)	단위 결합재량(kg/m <sup>3</sup> )		W/B (%)	비고
			OPC	슬래그미분말(SG)		
A	40	4.5	500	-	35	OPC
B	35	4.5	211	211	40	SG50
C	40	5.0	370	158	32	SG30
D	35	4.5	216	216	37	SG50
E	35	4.5	213	213	36	SG50

### 4. 시험방법별 확산계수 추정결과와 비교

그림 2는 ASTM C 1202 시험 결과를 정리한 것이다. 이 결과에서 알 수 있듯이 A배합은 총통과전하량이 4872 쿨롱으로 염소이온 침투 저항성이 높은 영역에 해당 하였으며, D배합은 총통과전하량이 1963 쿨롱, E배합은 총통과전하량이 1413 쿨롱으로 염소이온 침투 저항성이 낮은 영역에 해당 하였다. 나머지 배합은 모두 1963~2259 쿨롱으로 중간영역에 해당하였다. 총통과전하량은 A > B > C > D > E 배합의 순으로 작게 나타났으며, 슬래그를 혼입한 경우가 혼입하지 않은 경우의 절반이하 수준이었다.

그림 3은 NT Build 355 시험법에 의한 정상상태의 확산계수 측정 결과로서 각 배합별 콘크리트의 확산계수는  $0.57 \sim 1.11 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 나타났으며, 정상상태 확산계수의 크기는 A > C > D > E > B 배합의 순으로 작게 나타났다.

그림 4는 NT Build 443에 의하여 염수용액에 침지한 콘크리트로부터 분말 시료를 채취하여 질산은 적정법에 의해 구한 확산계수를 나타낸 것으로 비정상 상태의 확산계수이다. 침지시험에 의한 각 배합별 확산계수는  $5.93 \sim 9.58 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 범위였으며, OPC 배합이 가장 큰 것으로 나타났다. 각 배합의 침지시험에 의한 확산계수는 A > D > E ≒ B > C 순으로 작게 나타났다.

그림 5는 NT Build 492 시험방법에 의해서 구해진 콘크리트 배합별 확산계수를 정리하여 나타낸 것이다. 이 방법에 의한 촉진시험에 의한 확산계수는  $5.58 \sim 12.42 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 나났으며, 침투 깊이로부터 구한 염소이온 확산계수의 크기는 A > E > D > C > B 배합의 순으로 작게 나타났다.

이들 결과를 종합해 보면, ASTM C 1202 시험법은 콘크리트 배합간의 상대적인 구분만이 가능하며, 정상상태의 확산계수는 비정상 상태의 확산계수에 비해 1/10 정도 수준으로 작게 평가됨을 알 수 있다. 또한 침지시험에 의한 확산계수는 NT Build 492의 결과와 유사한 범위의 값을 나타내었다.

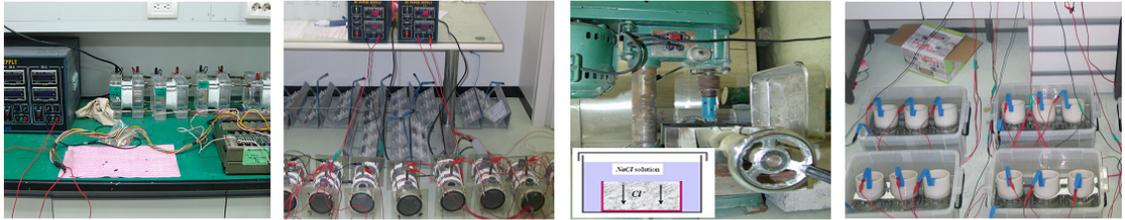
### 5. 참고문헌

1. ASTM C 1202 : Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration
2. NT Build 492 : Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments

- 3. NT Build 355 : Chloride Diffusion Coefficient from Migration Cell Experiments
- 4. NT Build 443 : Accelerated Chloride Penetration

**감사의 글**

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 05년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 05건설핵심기술D-11)의 연구비지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.



a) ASTM C 1202 시험

b) NT Build 355

c) NT Build 443

d) NT Build 492

그림 1 촉진시험 방법별 시험 광경

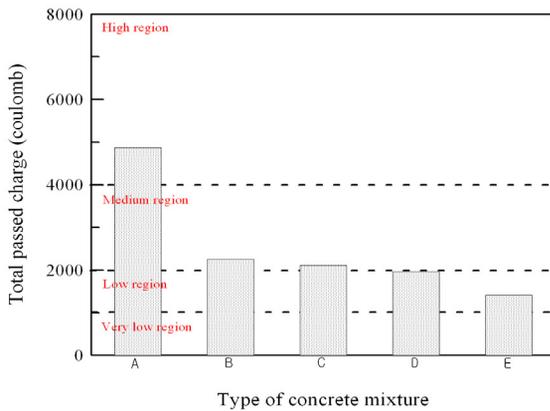


그림 2. ASTM C 1202 시험결과

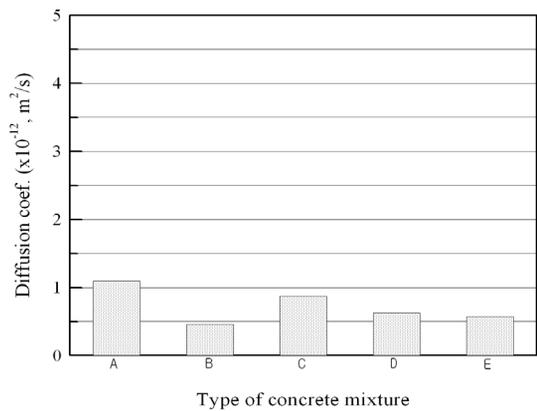


그림 3. NT Build 355 시험결과

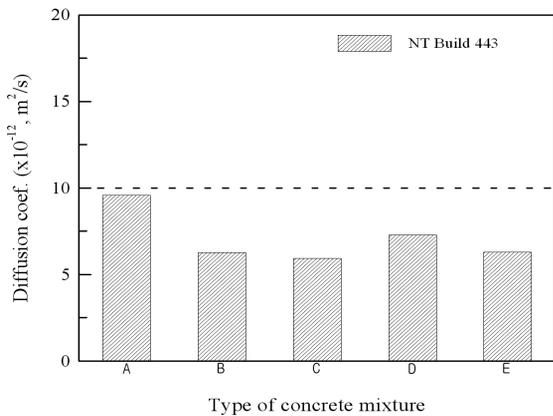


그림 4 NT Build 443 시험결과

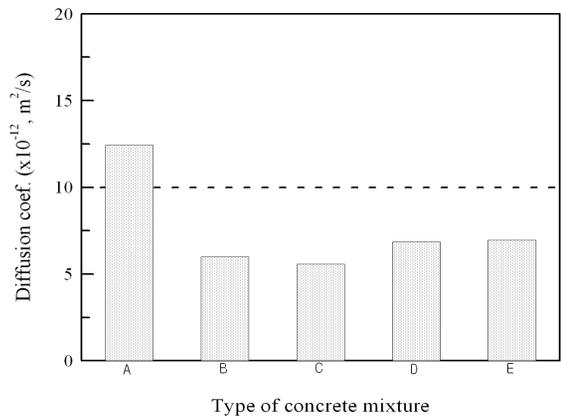


그림 5. NT build 492 시험결과