

# 콘크리트의 염소이온 확산특성에 미치는 양생조건의 영향

## Effect of Curing Conditions on the Characteristics of Chloride Ion Diffusion in Concrete

임 병 탁<sup>\*</sup>      배 수 호<sup>\*\*</sup>      정 영 수<sup>\*\*\*</sup>      심 은 철<sup>\*</sup>      하 재 담<sup>\*\*\*\*</sup>  
Lim, Byoung Tak    Bae, Su Ho    Chung, Young Soo    Sim, Eun Choul    Ha, Jae Dam

---

### ABSTRACT

The chief factors for the penetration and diffusion of chloride ions in concrete are water-cement ratio(W/C), aging, curing conditions, chloride ions concentration of given environment, wet and dry conditions and etc. In this study, of these factors effect of curing conditions such as standard and outdoor curing on the characteristics of chloride ions diffusion in concrete were researched when environmental factors for the penetration and diffusion of chloride ions were constant.

For this purpose, the voltages passing through the diffusion cell were measured by using accelerated test method using potential difference, and then diffusion coefficients of chloride ions by using Andrade's method were estimated for 44%, 49.5% and 60% of w/c, respectively.

As a result, according to curing conditions correlation among diffusion coefficients of chloride ions, W/C and aging were concluded through multiple regression model.

---

### 1. 서론

콘크리트용 잔골재로서 바다모래를 사용한 철근콘크리트 구조물, 제설제를 사용한 교량구조물 및 해양환경에 위치한 철근콘크리트 구조물은 구조물 주변의 염분이 직·간접으로 콘크리트 속에 침투되어 그것이 허용치를 초과하면 철근부식 및 콘크리트 균열을 유발하는 등 염해를 일으킨다.

이같은 염해환경하에 있는 철근콘크리트 구조물의 내구성 평가의 일환으로 염소이온 확산계수에

---

\* 정회원, 안동대학교 토목환경공학과 석사과정

\*\* 정회원, 안동대학교 토목환경공학과 부교수

\*\*\* 정회원, 중앙대학교 토목공학과 교수

\*\*\*\* 정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 책임연구원

의하여 콘크리트 표면 염화물량이 강재 위치에서 임계 염화물량에 달할 때까지의 기간을 추정함으로써 강재의 부식개시 시기를 예측할 수 있다. 따라서 염소이온 확산계수가 염해환경하에 있는 철근콘크리트 구조물의 내구성 설계 및 평가의 주요한 인자로 대두되고 있다.

콘크리트 내에 염소이온의 침투·확산에 영향을 미치는 인자는 물-시멘트비, 재령, 양생조건, 주변 환경의 염화물 이온 농도 및 건습조건 등이 있는데, 본 연구에서는 실제 콘크리트 구조물에 근접한 염소이온 확산계수를 구하기 위하여 주변수를 양생조건으로 채택하였다. 양생조건으로서 표준양생과 옥외양생 각각의 시험체에 대해서 물-시멘트비 및 재령에 따라 확산계수를 구함으로써 양생조건에 따라 콘크리트의 염소이온 확산특성에 미치는 물-시멘트비 및 재령의 영향을 검토하였다.

이를 위하여 전위차에 의한 전기적 이동현상을 이용한 전기화학적인 촉진시험법에 의하여 콘크리트 확산셀을 통과하는 총전하량을 구한 다음, Andrade's method에 의하여 확산계수를 구하였다. 콘크리트의 염소이온의 확산특성은 확산계수에 의하여 평가하였는데, 본 연구에서는 물-시멘트비를 44%, 49.5% 및 60%로 설정한 후 재령 7일, 28일, 91일 및 182일 각각에 대해 확산특성을 평가하였다.

또한 양생조건에 따라 확산계수와 물-시멘트비 및 재령의 다중회귀분석을 통하여 이들 간의 상관성을 도출시킴으로써 염소이온 확산계수 추정식을 제안하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

#### (1) 시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 H사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 그 물리적 성질은 표 1과 같다.

#### (2) 골재

본 연구에 사용된 잔골재는 낙동강산(경북 안동시) 하천사, 굵은골재는 안동산(경북 안동시) 부순들을 이용하였으며, 이들의 물리적 성질은 표 2 및 표 3과 같다.

#### (3) 고성능 감수제

본 연구에 사용된 화학혼화제는 고강도 및 유동화 콘크리트용으로 사용되고 있는 나프탈렌계의 고성능 감수제(표준형, K사)로서 품질특성은 표 4와 같다.

표 1. 시멘트의 물리적 성질

시멘트 종 류	비중	응결시간		분말도 (㎍/g)	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
		초결(min)	종결(hr)		f <sub>3</sub>	f <sub>7</sub>	f <sub>28</sub>
보 통 포틀랜드	3.15	250	6.2	3,400	235	330	400

표 2. 잔골재의 물리적 성질

항 목	비중	흡수율 (%)	단위용적 중 량 (tf/m <sup>3</sup> )	200번제 통과량 (%)	조립률
하천사 (낙동강산)	2.60	1.47	1.597	2.2	2.43

표 3. 굵은골재의 물리적 성질

항 목	굵은골재 최대치수 (mm)	비중	흡수율 (%)	단위용적 중 량 (tf/m <sup>3</sup> )	조립률	마모율 (%)
부순들 (안동산)	25	2.68	0.58	1.648	7.27	28.5

표 4. 고성능 감수제의 품질특성

비중	PH	고형분 (%)	표준사용량(%) (시멘트중량비)	주성분	비고
1.21	8	41	0.2~2.0	Sodium salt of a sulfonate naphthalene	액성

## 2.2 실험방법

### (1) 공시체 제작

양생조건에 따라 콘크리트의 염소이온 확산특성에 미치는 물-시멘트비 및 재령의 영향을 규명하기 위하여 표 5와 같이 실험변수를 채택하여 콘크리트 배합실험을 하였는데, 목표 슬럼프 및 공기량은 각각  $15\pm 2\text{cm}$ ,  $4.5\pm 1.5\%$ 로 설정하여, 물-시멘트비 44%, 49.5% 및 60%에 대해서 KS F 2403(콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법)에 따라 콘크리트 공시체( $\phi 10\times 20\text{ cm}$ )를 제작하였다. 제작된 공시체는 성형 후 24시간 경과하여 molds를 제거한 후 표준양생 공시체는 시험 전까지  $20\pm 3^\circ\text{C}$ 의 온도로 습윤양생하였으며, 옥외양생 공시체는 보다 실제 환경에 근접하도록 기상작용에 노출된 건물 외부에서 양생하였다.

한편, 염소이온 확산실험에 사용된 콘크리트의 배합비에 따른 압축강도를 파악하기 위하여 압축강도 시험용 공시체를 추가로 제작하였다. 표 6은 물-시멘트비에 따른 콘크리트의 배합표를 나타낸 것이다.

표 5. 실험조건 및 변수

실험조건	실험변수
양생방법	표준, 옥외
W/C (%)	44, 49.5, 60
재령 (일)	7, 28, 91, 182

표 6. 콘크리트 배합표

G <sub>max</sub> (㎜)	Target slump (cm)	Target air content (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )				Super-plasticizer (C×%)
					W	C	S	G	
25	15±2	4.5±1.5	44	43.0	175	398	729	986	0.8
25	15±2	4.5±1.5	49.5	44.2	175	354	766	986	0.8
25	15±2	4.5±1.5	60	48.0	175	291	857	946	0.6

### (2) 압축강도 시험

염소이온 확산실험에 사용된 콘크리트의 배합비에 따른 압축강도를 파악하기 위하여 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험 방법)에 따라 재령별 (7, 28, 91 및 182일)로 압축강도 시험을 하였다.

### (3) 확산셀의 구성

전위차에 의해 염소이온의 이동을 촉진시키기 위하여 확산셀 장치를 구성하였는데, 콘크리트 시편의 두께는 3cm로 하였고, 음극셀은 0.5M의 NaCl 용액을, 양극셀은 0.1M의 NaOH 용액을 사용하였다.

### (4) 염소이온 확산계수의 평가

염소이온 확산계수 추정 방법은 Berke, Dhir 및 Andrade's method 등 여러 가지 방법이 있으나, 이들 중 Andrade's method가 실제 조사된 해양환경하 구조물의 염소이온 확산계수와 근접한 것으로

알려져 있으므로<sup>1)</sup>, 식(1)과 같은 Andrade's method 에 의하여 확산계수를 구하였다.

$$D = \frac{RT}{n F^2} \frac{i t_{cl}}{\Delta E} \frac{l}{A} \frac{1}{C_{cl} Z} \quad (1)$$

여기서, D : 확산계수 (  $m^2/s$  ), R : 기체상수, T : 절대온도 (K), i : 통과전류(A)  
 $t_{cl}$  : 수율,  $l$  : 시편의 두께, F : 패러데이 상수,  $\Delta E$  : 적용전압 (V)  
A : 시편의 단면적 (  $m^2$  ),  $C_{cl}$  : 농도 (  $mol/m^3$  ), Z : 이온 전자가

### 3. 결과분석 및 고찰

#### 3.1 압축강도

그림 1은 염소이온 확산실험을 위한 콘크리트 공시체의 물-시멘트비에 따른 압축강도를 나타낸 것으로, 콘크리트의 설계기준강도로 채택되는 재령 28일 강도를 기준으로 한 경우 물-시멘트비가 44%, 49.5% 및 60%인 경우의 압축강도는 표준양생의 경우 각각 302kgf/cm<sup>2</sup>, 269kgf/cm<sup>2</sup> 및 157kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났으며, 옥외양생의 경우 각각 250kgf/cm<sup>2</sup>, 202kgf/cm<sup>2</sup> 및 150kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났다. 이 같이 물-시멘트비에 관계없이 표준양생한 콘크리트의 압축강도가 옥외양생한 콘크리트의 경우보다 다소 크게 나타났는데, 이는 전자가 후자보다 일정한 온도하에서 수분이 충분히 공급되므로 콘크리트 수화반응에 유리하게 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

#### 3.2 콘크리트의 염소이온 확산계수에 미치는 재령의 영향

콘크리트는 재령이 경과함에 따라 수화물이 결정화되면서 매우 치밀한 수화물을 생성하므로 콘크리트의 강도증진이 이루어진다. 따라서 양생조건별로 콘크리트의 재령에 따른 조직구조의 변화가 염소이온 확산특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 물-시멘트비에 관계없이 콘크리트의 재령을 독립변수로, 확산계수를 종속변수로 하여 회귀분석을 수행하였는데, 그 결과는 식 (2) 및 식 (3)과 같다.

$$\text{표준양생: } D = 3.42 \times 10^{-12} \times (t)^{-0.16} \quad (m^2/s) \quad R^2 = 0.32 \quad (2)$$

$$\text{옥외양생: } D = 3.46 \times 10^{-12} \times (t)^{-0.14} \quad (m^2/s) \quad R^2 = 0.26 \quad (3)$$

즉, 염소이온 확산계수는 물-시멘트비에 관계없이 콘크리트의 재령이 증가할수록 지수함수 형태로 감소하는 것으로 나타났는데(그림 2), 이것은 전술한 바와 같이 콘크리트의 재령이 증가할수록 수화물의 조직구조가 치밀해지기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 표준양생 및 옥외양생의 경우 염소이온 확산계수와 콘크리트 재령에 대한 결정계수( $R^2$ )는 각각 0.32, 0.26으로 매우 낮게 나타났는데, 이는 물-시멘트비를 고려하지 않고 재령과 염소이온 확산계수와의 상관성을 분석했기 때문인 것으로 판단된다.

#### 3.3 콘크리트의 염소이온 확산계수에 미치는 물-시멘트비의 영향

콘크리트의 성질 중에서 가장 중요한 것 중의 하나가 압축강도이고, 압축강도에 가장 큰 영향을 미치는 것이 물-시멘트비로, 물-시멘트비는 콘크리트의 성질을 특성지우는 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 양생조건에 따라서 독립변수를 물-시멘트비로, 종속변수를 염소이온 확산계수로

하여 이들의 상관분석을 수행하였는데, 그 결과는 식 (4) 및 식 (5)와 같다.

$$\text{표준양생: } D = 9.49 \times 10^{-12} \times (W/C)^{2.41} \quad (m^2/s) \quad R^2 = 0.67 \quad (4)$$

$$\text{옥외양생: } D = 11.22 \times 10^{-12} \times (W/C)^{2.53} \quad (m^2/s) \quad R^2 = 0.72 \quad (5)$$

즉, 콘크리트의 물-시멘트비에 따른 염소이온 확산계수는 양생조건 및 재령에 관계없이 물-시멘트비가 증가할수록 커지는 것으로 나타났는데(그림 2), 이는 물-시멘트비가 증가할수록 공극이 많고 조직구조가 거칠어지기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 표준양생 및 옥외양생의 경우 염소이온 확산계수와 콘크리트의 물-시멘트비에 대한 결정계수( $R^2$ )는 각각 0.67, 0.72로 비교적 높게 나타났는데, 이는 콘크리트의 물-시멘트비가 염소이온 확산특성에도 매우 중요한 영향을 미치는 요소라는 것을 입증해 주는 것으로 해석된다.

### 3.4 콘크리트의 염소이온 확산계수에 미치는 재령 및 물-시멘트비의 영향

전술한 바와 같이 콘크리트의 물-시멘트비나 재령은 염소이온 확산특성에 주요한 영향을 미치기 때문에, 본 연구에서는 양생조건에 따라서 콘크리트의 물-시멘트비와 재령을 독립변수로, 염소이온 확산계수를 종속변수로 하여 이들 간의 상관성을 도출시키기 위하여 다중회귀분석을 수행하였는데, 그 결과는 식 (6) 및 식 (7)과 같다.

$$\text{표준양생: } D = 1.73 \times 10^{-11} \times (t)^{-0.16} \times (W/C)^{2.41} \quad (m^2/s) \quad R^2 = 0.98 \quad (6)$$

$$\text{옥외양생: } D = 1.90 \times 10^{-11} \times (t)^{-0.14} \times (W/C)^{2.53} \quad (m^2/s) \quad R^2 = 0.96 \quad (7)$$

즉, 양생조건에 따라서 물-시멘트비 및 재령을 동시에 고려하여 염소이온 확산계수와 상관성을 도출한 경우가 물-시멘트비 및 재령 각각과 염소이온 확산계수와 상관성을 도출한 경우보다 결정계수가 훨씬 높게 나타났다.

따라서 양생조건별로 콘크리트의 물-시멘트비 및 재령에 따른 확산계수 자료를 축적하여 이 같은 기법을 활용하면 확산계수 추정식 마련에 대한 보다 신뢰성있는 방법이 될 것으로 판단된다.

## 4. 결론

- 1) 양생조건에 따른 염소이온 확산계수는 물-시멘트비에 관계없이 콘크리트의 재령이 증가할수록 지수함수 형태로 감소하는 것으로 나타났는데, 이것은 콘크리트의 재령이 증가할수록 수화물의 조직구조가 치밀해지기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 표준양생 및 옥외양생의 경우 염소이온 확산계수와 콘크리트 재령에 대한 결정계수는 각각 0.32, 0.26로 매우 낮게 나타났는데, 이는 물-시멘트비를 고려하지 않고 재령과 염소이온 확산계수와의 상관성을 분석했기 때문인 것으로 판단된다.
- 2) 콘크리트의 물-시멘트비에 따른 염소이온 확산계수는 양생조건 및 재령에 관계없이 물-시멘트비가 증가할수록 커지는 것으로 나타났는데, 이는 물-시멘트비가 증가할수록 공극이 많고 조직구조가 거칠어지기 때문인 것으로 판단된다. 표준양생 및 옥외양생의 경우 염소이온 확산계수와 콘크리트의 물-시멘트비에 대한 결정계수는 각각 0.67, 0.72로 비교적 높게 나타났는데, 이는 콘크리트의 물-시멘트비가 염소이온 확산특성에도 매우 중요한 영향을 미치는 요소라는 것을 입증해 주는 것으로 해석된다.
- 3) 양생조건에 따라서 물-시멘트비 및 재령을 동시에 고려하여 염소이온 확산계수와 상관성을 도출한 경우가 물-시멘트비 및 재령 각각과 염소이온 확산계수와 상관성을 도출한 경우보다 결정계

수가 훨씬 높게 나타났다. 따라서 양생조건별로 콘크리트의 물-시멘트비 및 재령에 따른 확산계수 자료를 축적하여 이 같은 기법을 활용하면 확산계수 추정식 마련에 대한 보다 신뢰성있는 방법이 될 것으로 판단된다.

- 4) 본 연구에서는 표준 및 옥외양생의 경우 콘크리트의 물-시멘트비 44%, 49.5% 및 60% 각각에 대해서 재령 7일, 28일, 91일 및 182일에 대한 염소이온 확산계수를 분석한 것으로, 측정 자료가 미비한 실정이다. 금후 물-시멘트비 범위를 확장하고, 측정 재령을 장기화하여 양생조건에 따라 콘크리트의 물-시멘트비 및 재령이 염소이온 확산계수에 미치는 영향을 지속적으로 연구할 계획이다.

### 참고문헌

1. 문한영, 김홍삼, 문재흠, “전위차를 이용한 콘크리트 중의 염소이온 확산계수 추정방법”, 대한토목학회논문집, 제21권 제3-A호, 2001. 5, pp. 403~412.
2. 배수호 외 5인, “물-시멘트비 및 재령이 콘크리트 염소이온 확산 특성에 미치는 영향”, 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제 14권 1호, 2002. 5, pp. 737~742.
3. 배수호 외 5인, “적용전압 및 저항이 콘크리트의 염소이온 확산특성에 미치는 영향”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회논문집, 제14권 2호, 2002. 11, pp. 673~678.
4. C. Andrade, “Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements”, Cement and Concrete Research, Vol. 23, 1993, pp. 724~742.
5. ASTM, “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration(C 1202)”, pp. 616~621.
6. 염준근, “선형회귀분석”, 자유아카데미, 1995.

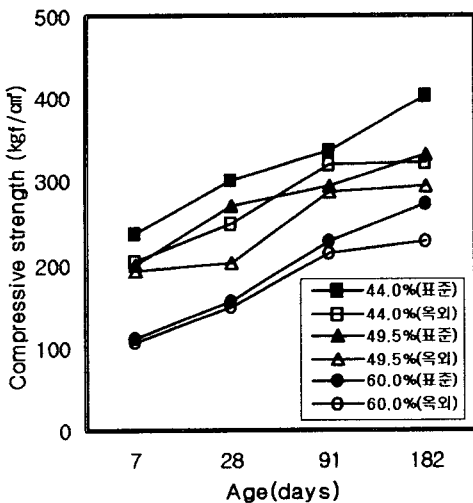


그림 1. 콘크리트의 압축강도

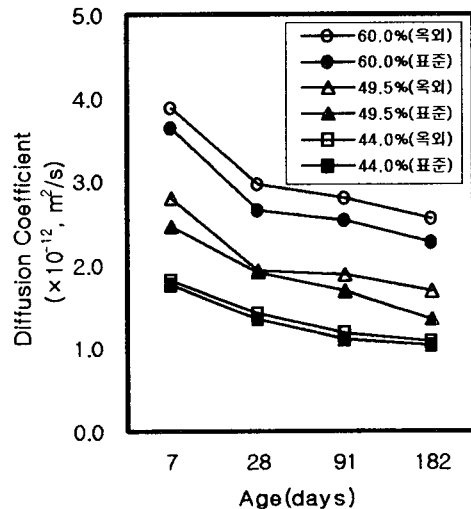


그림 2. 콘크리트의 염소이온 확산계수