

# 배합조건이 다른 콘크리트의 물-시멘트비와 압축강도를 고려한 염화물 확산계수 예측모델식 구성

## Construction of Prediction Model Formula of Chloride Diffusion Coefficient Considering Water-Cement Ratio and Compressive Strength of Different Mix Conditions

이택우\*      박승범\*      윤의식\*\*  
Lee, Taek Woo      Park, Seong Bum      Yoon Eui Sik

### ABSTRACT

This study selected three different specified concrete strength types of mixture which were applied to domestic seawater concrete structure and measured compressive strength and chloride diffusion coefficient and composed the formula of prediction model of chloride diffusion coefficient in order to provide the useful data for concrete mix decision of seawater structures.

As a result, the formula of prediction model of chloride diffusion coefficient which set W/C and compressive strength as parameters and performed multiplex regression analysis which was based on the mathematical theory was confirmed more reliable than the formula of prediction which was composed existing water-cement ratio function.

### 1. 서론

염화물과 같은 콘크리트 성능저하 인자의 침투 메카니즘 및 속도는 구조물의 사용환경, 콘크리트의 내구성 및 기하학적 미세구조에 의존하며 이들 요인들은 복잡 다양한 특성을 지니고 있다. 콘크리트의 미세구조는 콘크리트 재료와 이들의 배합비, 제조방법, 양생조건 및 기간 등에 의해 영향을 받으며, 특히 물-시멘트비(W/C)는 시멘트 매트릭스의 미세구조를 결정하여 압축강도 및 수밀성(공극률, 투기성 등)과 같은 콘크리트의 품질에 많은 영향을 미치는 중요한 요소이다.

따라서 본 연구에서는 내황산염 포틀랜드시멘트(V종 시멘트)를 사용한 국내 해양구조물의 내해수성 평가와 해양구조물용 시멘트 선정 및 콘크리트의 배합결정을 위한 유용한 자료 제공을 위하여 국내 해양구조물에 적용된 설계기준강도가 다른 3종류의 배합을 선정하여 설계기준강도별 W/C의 변화(설계기준강도 3종, W/C 4종)에 따른 실험을 통하여 콘크리트의 압축강도와 염화물 확산계수를 평가하였으며, 수학적 이론에 근거한 다중회귀분석을 통하여 콘크리트의 W/C와 압축강도 특성을 반영한 신뢰성이 높은 염화물 확산계수 예측모델식을 제시하였다.

### 2. 실험개요

#### 2.1 사용재료

본 연구에서 사용된 재료의 주요 물성은 표 1에 나타내었다. 시멘트는 국내 해양구조물에 적용된 V종 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 강모래를 사용하였고 굵은 골재는 최대 치수 20mm의 채석을 사용하였다. 혼화제는 감수제와 공기 연행제를 사용하였고 염화물 침투 및 확산을 검토하기 위하여 NaCl 95%의 용액으로 3.6%(약 36kg/m<sup>3</sup>)의 염화물 용액을 제조한 후 사용하였다.

\* 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수  
\*\* 정회원, 충남대학교 토목공학과 공학박사  
\*\*\* 정회원, 한국원자력안전기술원 구조지부실

표 1 사용재료의 주요물성

사용재료	주요 물성	사용재료	주요물성
시멘트	밀도 : 3.16g/cm <sup>3</sup> , 분말도 : 334 m <sup>2</sup> /g,	잔골재	밀도 : 2.56g/cm <sup>3</sup> , 조립율 : 2.56
혼화제	감수제 : Pozzolith 84K, AE제 : Vinsol Resin계의 AEA 202	굵은 골재	밀도 : 2.63g/cm <sup>3</sup> , 조립율 : 2.63

### 2.2 콘크리트의 배합

본 연구에서는 국내 주요 해양 콘크리트 구조물에 V종 시멘트가 널리 사용되었으므로, 이들 콘크리트 구조물의 염화물 확산특성을 평가하기 위하여 표 2와 같이 국내 주요 해양구조물에 널리 적용된 설계기준강도(28, 35, 40 MPa)별로 콘크리트 표준시방서 및 구조설계기준에 규정된 해양 콘크리트의 W/C 요건에 적합한 4종류의 W/C(35, 40, 45, 50%)를 설정하였고, 콘크리트 비빔은 잔골재와 굵은골재를 섞은 후 시멘트를 넣고 20초간 건비빔을 하고 물과 혼화제를 넣고 1분 30초간 비빔을 실시하여 콘크리트를 제조하였다.

표 2 콘크리트의 W/C의 변화에 따른 배합설계

Mix Type	Specified Strength (MPa)	G <sub>max</sub> (mm)	W/B (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m <sup>3</sup> )				Admixtures	
					W	C	S	G	WRA(ml)	AEA(ml)
A-1	40	20	35	45	175	500	716	906	8	0.3
			40	46	200	500	703	854	7.6	0.3
			45	47	225	500	688	803	7.2	0.3
			50	48	250	500	672	753	6.8	0.3
A-2	35	20	35	42	153	437	714	1020	7	0.3
			40	43	175	437	707	970	6.7	0.2
			45	44	197	437	698	920	6.3	0.2
			50	45	219	437	689	872	5.6	0.2
A-3	28	20	35	43	130	371	779	1069	6.0	0.2
			40	44	148	371	776	1023	5.6	0.2
			45	45	167	371	773	978	5.3	0.2
			50	46	185	371	768	933	5.0	0.2

### 2.3 시험방법

#### 2.3.1 압축강도

콘크리트의 압축강도는 KS F 2405 [콘크리트의 압축강도 시험방법]에 준하여  $\phi 100 \times 200$ mm 원주공시체를 제작하여 23±1℃의 수중에서 28일간 표준양생을 실시한 후 강도를 측정하였다.

#### 2.3.2 염화물 침투시험

콘크리트의 염화물 침투특성을 평가하기 위하여 배합조건별로  $\phi 100 \times 100$ mm의 원주공시체를 제작해 재령 28일간 온도 23±1℃의 수중에서 양생을 실시한 후, 염화물의 1방향 침투를 유도하기 위하여 옆면을 에폭시로 실링(Sealing)한 공시체를 NaCl 3.6% 농도의 수용액에 365일간 침지시켰다. 그리고 일본콘크리트공학협회 표준(인)[경화콘크리트 중의 염분량 측정방법]에 의해 염화물을 추출한 다음, 이온전극법을 이용한 일본 K사 제품의 AG-100을 사용하여 가용성 염화물량을 측정하였다. 또한 염화물 확산계수는 콘크리트 공시체를 NaCl 3.6% 용액에 침지하기 전에 28일간 표준양생을 실시해 강도발현이 상당히 진행되어 외부로부터 유입되는 염소이온으로 인한 고정화 효과는 미미할 것으로 판단되고, 시멘트의 종류별 염화물 확산특성 파악을 위해서 자유 염화물이온에 의미를 두었기 때문에 공시체의 깊이 2.25cm에서 측정한 가용성 염화물량을 기준으로 하여 Fick의 제2법칙에 의해 유도된 식(1)을 이용해서 염화물 확산계수를 산출하였다<sup>1)</sup>.

$$C_{(x,t)} = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_e t}} \right) \right] \quad (1)$$

### 3. 실험결과 분석 및 고찰

#### 3.1 W/C와 압축강도의 관계

설계기준강도가 28MPa, 35MPa, 40MPa인 배합에 대하여 각각 W/C를 35, 40, 45, 50%로 변화시킨 콘크리트의 W/C와 압축강도의 상관성을 평가하기 위한 회귀분석결과를 그림 1에 나타내었다.

설계기준강도에 관계없이 시멘트-물비(C/W)와 압축강도 사이에는 직선적인 상관관계가 있음이 확인되었고 W/C의 변화에 따라 콘크리트의 강도발현 경향은 대체로 비슷하고, W/C가 증가할수록 비례적으로 압축강도가 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 시멘트 페이스트 내에서 화학적으로 결합하지 못한 잉여수가 콘크리트 내부에 존재하게 되어 공극률을 증가시켰기 때문인 것으로 판단된다.

#### 3.2 W/C와 염화물 확산계수의 관계

W/C와 염화물 확산계수의 상관성을 평가하기 위하여 염화물 확산계수 계산결과를 Press 및 Flannery<sup>2)</sup> 등이 제안한 Levenberg-Marquardt 연산방식으로부터 W/C의 증가에 따른 염화물 확산계수의 변화를 지수함수로 변환하여 회귀분석한 결과를 그림 2에 나타내었으며, 설계기준강도가 다른 배합별 염화물 확산계수를 비교하기 위하여 설계기준강도 40MPa의 배합(A-1)을 기준으로 선형회귀분석을 실시한 결과를 그림 3에 나타내었다. 전체배합(A-1~A-3)에 대한 시멘트-물비(C/W)의 변화에 따른 염화물 확산계수의 변화에 관한 회귀분석식을 다음 식(2)와 같이 추정하였다.

$$D_e = 11.397 \cdot e^{-0.8573 \cdot C/W} \quad (R^2 = 0.8295) \quad (2)$$

이를 분석하면 설계기준강도가 높은 배합일수록, W/C가 낮을수록 염화물 확산속도는 낮게 평가되었으며, W/C와 염화물 확산계수와 높은 상관성을 나타내어 콘크리트의 W/C와 설계기준강도는 염화물 확산계수에 중요한 영향인자라는 기존의 연구결과를 확인하였다.

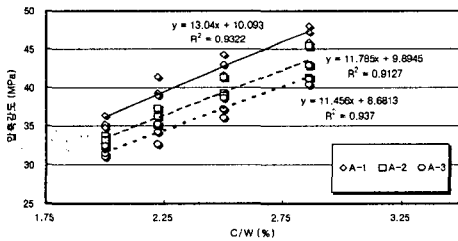


그림 1 C/W와 압축강도의 관계

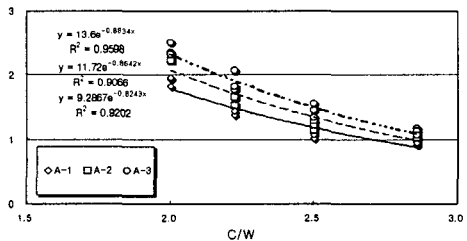


그림 2 C/W와 수용성 염화물확산계수의 관계

#### 3.3 압축강도와 염화물 확산계수의 관계

Powers<sup>3)</sup>의 공극방정식을 근거로 압축강도와 염화물 확산계수의 상관성을 평가하기 위하여 염화물 확산계수를 압축강도의 변화에 따른 멱함수로 변환하여 회귀분석한 결과를 그림 4에 나타내었으며, 전체배합(A-1~A-3)에 대한 회귀분석식을 식(3)과 같이 추정하였다.

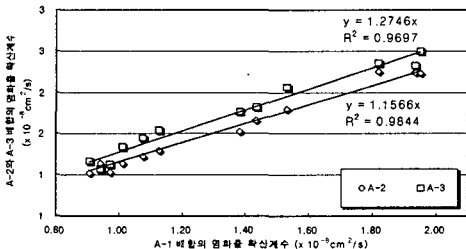


그림 3 A-1과 (A-2, A-3) 배합의 염화물 확산계수 비교

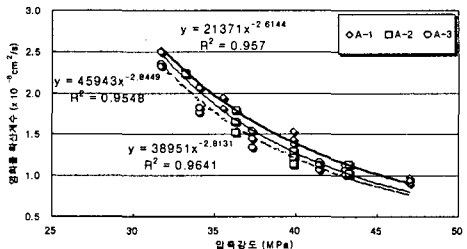


그림 4 압축강도와 염화물 확산계수의 관계

$$D_e = 14830 \cdot f_{28}^{-2.531} \quad (R^2 = 0.9372) \quad (3)$$

이를 분석하면 각 배합별은 물론 전체 배합에 대해서도 압축강도와 염화물 확산계수 간에는 높은 상관관계를 갖고 있는 것으로 나타났다.

### 3.4 염화물 확산계수 예측모델 구성

콘크리트의 W/C 및 압축강도는 염화물 확산계수에 영향을 미치는 주요 인자임이 확인되었으므로 콘크리트의 W/C와 압축강도를 매개변수로 설정하여 염화물 확산계수 예측모델을 구성하였다.

배합특성에 관련된 매개변수는 시멘트-물비(C/W), 압축강도( $f_{28}$ )로 하였고, 각 매개변수의 단일회귀분석에서 얻은 결과를 기초로 하여  $f_1(C/W)$  변수는 식(2)와 같은 지수함수로 가정하였으며,  $f_2(f_{28})$ 은 식(3)과 같이 멱함수로 가정하였고, 염화물 확산계수에 영향을 미치는 인자를 수학적으로 표현하면 식(4)와 같고, 전체배합(A-1~A-3) 즉, 설계기준강도 28~40MPa, W/C 35~50% 범위에 대한 W/C와 압축강도를 매개변수한 염화물 확산계수 예측모델식 식(5)을 추정하였다.

$$D_e = f_1(C/W) \cdot f_2(f_{28}) = (\alpha_1 \cdot e^{\beta C/W}) \cdot (\alpha_2 \cdot f_{28}^\gamma) \quad (4)$$

$$D_e = 2715.53 \cdot e^{-0.2645 \cdot C/W} \cdot f_{28}^{-1.8913} \quad (R^2 = 0.9563) \quad (5)$$

추정된 염화물 확산계수 예측모델 식(5)에 의한 염화물 확산계수 추정값과 실험에 의한 염화물 확산계수값을 비교하기 위하여 선형 회귀분석을 실시하여 그림 5에 나타내었다.

따라서 W/C와 압축강도를 매개로 하는 염화물 확산계수 예측 모델식은 W/C와 압축강도 각각에 대한 염화물 확산계수에 대한 단일 회귀분석결과에 비하여 높은 상관성과 신뢰성을 가지고 있는 것으로 확인되었으므로 해양구조물의 설계·시공단계에서 내해수성 평가를 위해 콘크리트의 염화물 확산계수를 추정할 경우 콘크리트의 W/C와 압축강도를 고려한 겉보기 염화물 확산계수 추정식을 적용하면 W/C만으로 구성된 기존식에 비해 신뢰성이 높은 염화물 확산계수 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

또한 본 연구에서는 식(5)와 같이 콘크리트의 W/C와 압축강도의 함수로 구성되는 다양한 조건의 실험과 실측 자료들을 통해 계수  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 를 만족하는 식(6)과 같은 시멘트의 종류 및 배합조건에 따른 발전된 겉보기 염화물 확산계수 예측모델식을 제안하고자 한다.

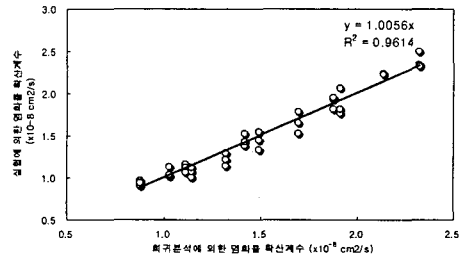


그림 5 실험결과와 회귀분석 결과 비교

$$D_e = \alpha \cdot e^{\beta C/W} \cdot f_{28}^\gamma \quad (6)$$

## 4. 결 론

- (1) 설계기준강도가 다른 배합에 대하여 W/C의 변화에 따른 압축강도와 염화물 확산계수 평가에 관한 실험 결과 콘크리트의 염화물 확산계수는 콘크리트의 W/C 및 압축강도와 상관관계가 높은 것을 확인하였다.
- (2) 해양구조물의 설계·시공단계에서 내해수성 평가를 위해 콘크리트의 염화물 확산계수를 추정할 경우 콘크리트의 W/C와 압축강도를 고려한 겉보기 염화물 확산계수 추정식을 적용하면 W/C만으로 구성된 기존식에 비해 신뢰성이 높은 염화물 확산계수 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 설계기준강도 28~40MPa, W/C 35~50%의 범위에서 콘크리트의 배합조건에 대한 W/C와 설계기준강도에 따른 신뢰성 높은 염화물 확산계수 예측모델식을 제시하였다.

## 참고 문헌

1. 박승범, 김도겸, “콘크리트 중의 염소이온 확산 특성에 관한 실험적 연구”, 콘크리트학회 논문집, Vol. 12, No.1, pp. 33~44, 2000
2. Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., and Vetterling, W.T., “Numerical Recipes in C - The Art of Scientific Computing”, Cambridge Univ. New York, N.Y., 1988
3. Powers, T.C., “The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete”, Portland Cement Association, Research Bulletin, No.90, 1958