

범용적 적용을 위한 콘크리트의 염화물 확산계수 예측에 관한 연구

A Study on the Prediction of Chloride Diffusion Coefficient in Concrete for mediocre apply

김 동 석* 유 재 강** 김 영 진***
Kim, Dong Seok Yoo, Jae Kang Kim, Young Jin

ABSTRACT

This study was performed to suggest the mediocre prediction equation of chloride diffusion coefficient which is used to estimate the service life of marine concrete, in order to provide the useful data for concrete mix design of marine concrete. As a result, the mediocre prediction equation of chloride diffusion coefficient which set W/B and mineral admixture replacement ratio as parameters was presented by performing the multivariate non linear regression analysis.

1. 서론

콘크리트의 염화물은 연속한 세공에 존재하는 세공용액 중을 농도구배를 구동력으로 이동하거나 세공용액의 이동과 함께 이동한다. 더욱이, 콘크리트의 물-시멘비(W/C)가 큰 경우에는 콘크리트의 미세구조가 치밀하지 못하게 되어 염화물이 이동하기 쉽게 된다.¹⁾ 이처럼 염화물의 침투속도를 좌우하는 콘크리트의 미세구조는 W/C의 영향을 크게 받지만, 혼화재를 사용하는 경우에는 W/C에 의한 영향보다는 혼화재의 종류 및 치환율의 영향이 더 커지며, 특히 고로슬래그 미분말 및 실리카 흙을 사용한 배합의 경우에 염화물 확산속도 저감효과가 우수한 것으로 보고되고 있다.²⁾

한편, 염화물의 확산예측은 염해에 의한 성능저하 과정 중 잠복기의 예측에 있어서 매우 중요하다. 즉, 염해의 우려가 있는 철근콘크리트 구조물이 목표내구수명 내에 철근위치에 있어서 염화물이온농도가 철근부식임계농도에 도달하지 않는 것을 확인하기 위해서는 염화물 확산계수가 필수불가결하다.³⁾ 이 때문에 염화물 확산계수 추정에 대해 많은 연구가 진행되어 여러 모델식이 제안되고 있지만, 적용 범위가 한정되어 있거나 고려요인이 많아 범용적 적용이 어려운 측면이 있다.

따라서, 본 연구에서는 염화물 확산계수 저감에 효과적인 고로슬래그 미분말 및 실리카 흙을 사용한 콘크리트의 인공염수침지시험을 통하여 물-결합재비(W/B) 및 각 혼화재별 치환율에 따른 결보기 염화물 확산계수를 평가하고, 그 결과를 다변수 비선형 회귀분석을 수행함으로써 W/B 및 혼화재별 치환율을 변수로 하여 범용적 적용이 가능한 염화물 확산계수 예측식을 제안하고자 한다.

* 정회원, ㈜대우건설 기술연구소 선임연구원

** 정회원, ㈜대우건설 기술연구소 전임연구원

*** 정회원, ㈜대우건설 기술연구소 수석연구원, 공학박사

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료

본 실험에서는 국내에서 생산된 1종 시멘트(비중:3.15, 분말도:3,200cm²/g)를 사용하였고, 무기질 혼화재는 광양산 고로슬래그 미분말(비중:2.85, 분말도:3,860cm²/g), 캐나다산의 실리카 흙(비중:2.20, 분말도:200,000cm²/g)을 사용하였다. 또한, 잔골재는 비중 2.60, 조립율 2.60인 세척사, 굵은골재는 최대치수 25mm, 비중 2.63, 조립율 6.98인 쇄석을 사용하였고, 고성능AE감수제는 국내 E사 제품을 사용하였다.

2.2 콘크리트의 배합

표 1은 무기질 혼화재를 치환하지 않은 기준배합(Plain)으로서 예비배합시험결과를 바탕으로 W/C 0.40~0.50의 배합은 단위수량을 158kg/m³로 고정하였으며, W/C 0.55의 배합은 단위수량을 164kg/m³로 하였다. 무기질 혼화재를 사용하는 경우에는 각 배합의 단위시멘트량에 대하여 고로슬래그 미분말(BS)은 30, 50, 70(%), 실리카 흙(SF)는 5, 10, 15(%) 치환하여 사용하였으며, 고성능AE감수제 첨가량은 시험배합을 통하여 결합재(B) 중량비의 0.7~2.0% 범위내에서 목표 슬럼프 18±2.5cm, 목표 공기량 4.5±1.5%을 만족하도록 조절하였다.

표 1 Plain의 배합표

W/B (%)	S/a (%)	단위중량 (kg/m ³)			
		물	시멘트	잔골재	굵은골재
40	45.6	158	395	793	954
45	46.7	158	351	829	957
50	47.7	158	316	861	951
55	47.8	164	298	863	949

2.3 실험방법

인공염수침지를 위한 시험체는 10×10×40cm의 각주형 시험체로 제작하여 7일간의 표준양생종료시점에서 타설면에 직각인 2면을 제외한 나머지 면을 염화물의 침투를 방지하기 위하여 에폭시코팅을 실시하여 3.6%의 NaCl 수용액에 침지하였다. 침지 후의 재령 91일에서 시험체를 절단하여 0.1N AgNO₃에 의해 변색되는 깊이를 측정하고, 깊이별로 침투된 산-가용성 염화물량을 KS F 2714에 제시된 방법에 따라 분석하였다. 각 배합의 겉보기 염화물 확산계수는 침지재령별로 측정된 표면으로부터의 깊이 에 따른 산-가용성 염화물량을 바탕으로 Fick의 확산방정식의 해인 식 (1)을 이용하여 구하였다.

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

여기에서, C(x,t)는 시간 t에서 깊이 x의 염화물 농도, C₀는 표면염화물 농도, D_c는 겉보기 염화물 확산계수, erf는 에러함수(error function)이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 W/B와 염화물 확산계수의 관계

그림 1 및 그림 2는 W/B와 염화물 확산계수의 상관성을 파악하기 위하여 W/B를 0.40에서 0.55까지 변화시키면서 고로슬래그 미분말 및 실리카 흙 치환율에 따른 염화물 확산계수를 단순회귀분석 한 결과를 나타낸 것이다.

고로슬래그 미분말 및 실리카 흙을 치환한 각 배합에서 W/B와 염화물 확산계수와의 사이에는 지수 함수적으로 높은 상관관계가 있음이 확인되었다. 이는 콘크리트의 미세구조, 즉 Porosity가 콘크리트의 강도를 결정하며, Porosity는 콘크리트의 W/C에 의해서 결정된다는 Abrams의 W/C 이론⁵⁾이 염화물 확산계수와 W/B와의 관계도 잘 설명해 주는 것이라고 할 수 있다.

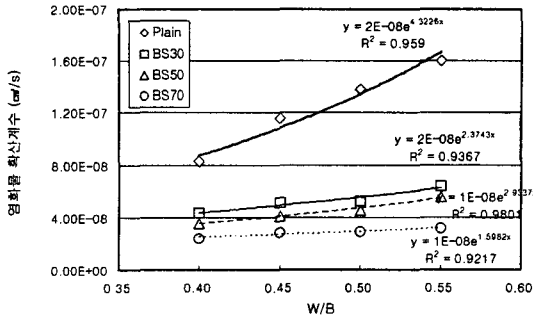


그림 1 W/B와 염화물 확산계수와의 관계(BS)

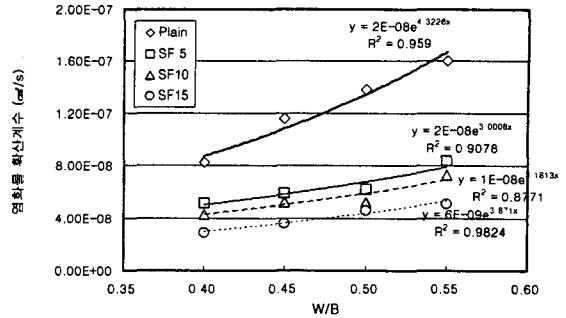


그림 2 W/B와 염화물 확산계수와의 관계(SF)

3.2 혼화재 치환율과 염화물 확산계수의 관계

그림 3 및 그림 4는 W/B에 상관없이, 고로슬래그 미분말 및 실리카 흙 치환율과 염화물 확산계수와의 상관성을 평가하기 위해 단순회귀분석 한 결과를 나타낸 것이다.

고로슬래그 미분말 및 실리카 흙을 사용한 배합에 있어서 염화물 확산계수는 각 혼화재 치환율에 따라 지수함수적으로 높은 상관성을 갖는 것으로 나타났다. 특히, 실리카 흙을 사용한 배합은 결정계수가 0.82~0.97정도인 것에 비해서, 고로슬래그 미분말을 사용한 배합은 결정계수가 0.95~0.99정도로 높게 나타나 고로슬래그 미분말 치환율과 염화물 확산계수의 상관성이 더 양호한 것으로 나타났다.

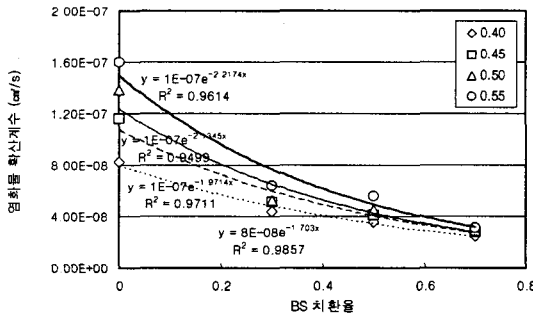


그림 3 BS 치환율과 염화물 확산계수와의 관계

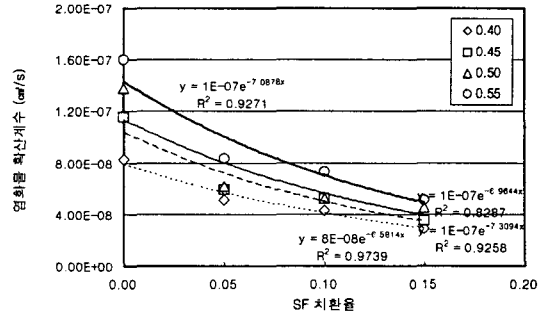


그림 4 SF 치환율과 염화물 확산계수와의 관계

3.3 염화물 확산계수 예측식의 구성

고로슬래그 미분말 및 실리카 흙을 사용한 콘크리트의 겉보기 염화물 확산계수에 영향을 미치는 요인 중 W/B와 혼화재별 치환율을 매개변수로 하는 단일회귀분석결과에서 W/B 및 혼화재별 치환율과 염화물 확산계수는 지수함수적으로 높은 상관성을 갖는 것으로 나타남에 따라, 이를 바탕으로 W/B 및 혼화재별 치환율을 매개변수로 하는 염화물 확산계수 예측식을 구성하였다.

염화물 확산계수에 영향을 미치는 인자를 수학적으로 표현하면 식 (2)와 같고, W/B 0.40~0.55, 고로슬래그 미분말 치환율 0~0.7 및 실리카 흙 치환율 0~0.15 범위에 대한 W/B와 혼화재별 치환율을 매개변수로 한 염화물 확산계수 예측식은 각각 식 (3) 및 식 (4)와 같이 추정하였다.

$$D_c = f(w/c) \cdot f(R) = e^{ax} \cdot e^{bR^2+cR+d} = e^{ax+bR^2+cR+d} \quad (2)$$

여기서, D_c 는 겉보기 염화물 확산계수, x 는 W/B, R 은 혼화재 치환율이다.

$$D_c(BS) = e^{3.61x + 1.67R^2 - 3.19R - 17.63} \quad (R^2 = 0.9811) \quad (3)$$

$$D_c(SF) = e^{3.60x + 61.45R^2 - 18.49R - 17.63} \quad (R^2 = 0.9728) \quad (4)$$

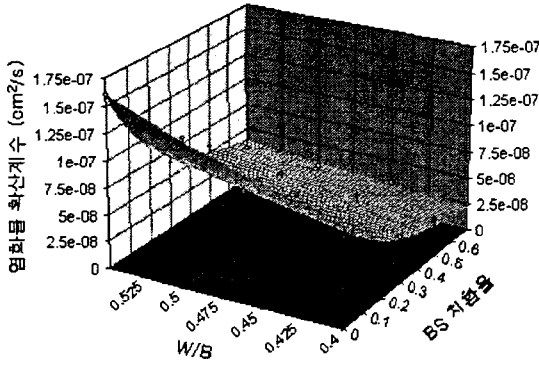


그림 5 BS 배합의 염화물 확산계수 추정식

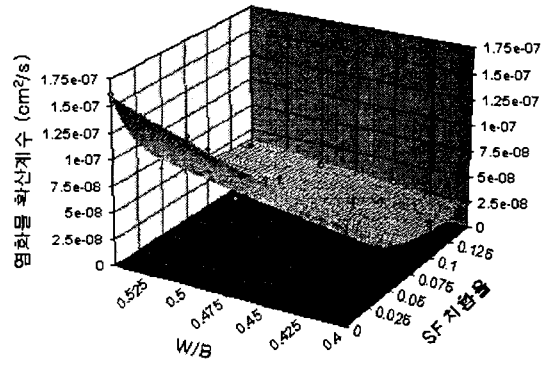


그림 6 SF 배합의 염화물 확산계수 추정식

그림 5 및 그림 6은 염화물 확산계수에 대한 매개변수인 W/B와 혼화재 치환율 간의 3차원 반응표면을 나타낸 결과이다. W/B와 혼화재별 치환율을 매개변수로 하는 다변수 비선형 회귀분석에 의해 도출된 혼화재별 염화물 확산계수 예측식은 단일회귀분석을 수행한 경우와 같이 높은 상관성을 보이고 있음에 따라 식 (2)를 범용적 적용을 위한 염화물 확산계수 추정식으로 제안하고자 한다. 이 식은 향후 염해가 우려되는 지역에 적용되는 콘크리트에 있어서 보통포틀랜드시멘트만을 사용하는 경우에는 물론 염화물 침투저항성을 높이기 위하여 고로슬래그 미분말 및 실리카 흙을 치환하여 사용하는 경우에도 염화물 확산계수 예측에 범용적으로 유용하게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 각종 무기질 혼화재가 해양환경에 노출된 콘크리트의 품질 및 경제성 확보를 위해서 그 사용이 증가하고 있음에 따라서 인공염수침지시험을 통하여 W/B 및 혼화재별 치환율에 따른 겔보기 염화물 확산계수를 평가하고, 그 결과를 다변수 비선형 회귀분석함으로써 보통포틀랜드시멘트 뿐만 아니라 염화물 침투저항성을 향상시키는 고로슬래그 미분말 및 실리카 흙을 사용한 콘크리트의 경우에 있어서도 범용적으로 적용할 수 있는 염화물 확산계수 추정식을 제안하였다. 그러나, 이 제안식은 실험을 통해 제시된 경험식이므로 더 범용성을 넓히기 위해서는 본 연구에서 수행하지 못한 범위에 대해서도 추가적인 연구를 계속적으로 수행하여 본 제안식의 신뢰도를 높여야 할 필요가 있다.

참고문헌

- 1) 日本土木学会, 콘크리트標準示方書【維持管理編】, 2001년제정
- 2) 김동석, 유재강, 박상준, 원철, 김영진, “무기질 혼화재가 염수침지한 콘크리트의 염화물 확산에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 제17권, 5호, 2005. 10. pp.679~686.
- 3) 杉山隆文, “耐久性照査のカギ-コンクリートの塩化物イオン拡散係数”, セメント・コンクリート, No.681, pp.40~46, 2003. 11.
- 4) 日本土木学会, 콘크리트標準示方書【施工編】, 2002년제정
- 5) 윤재환, “포틀랜드 시멘트 및 콘크리트”, 세진사, 2000. 2. pp.259~262.