

무기질 혼화재가 염수침지한 콘크리트의 염화물 확산에 미치는 영향에 관한 연구

김동석^{1)*}·유재강¹⁾·박상준¹⁾·원철¹⁾·김영진¹⁾

¹⁾(주)대우건설 기술연구소

(2004년 9월 2일 원고접수, 2005년 9월 15일 심사완료)

A Study of the Effect of Mineral Admixtures on the Chloride Diffusion of the Concrete Immersed in Chloride Solution

Dong-Seok Kim^{1)*}, Jae-Kang Yoo¹⁾, Sang-Joon Park¹⁾, Cheol Won¹⁾, and Young-Jin Kim¹⁾

¹⁾Institute of Daewoo Construction Technology, Suwon, 440-210, Korea

(Received September 2, 2004, Accepted September 15, 2005)

ABSTRACT

The corrosion of reinforcement induced by chloride ingress is the main deterioration cause of coastal reinforced concrete structures. In this paper, an experimental study was executed to investigate the effect of the kinds and replacement ratios of mineral admixtures (fly-ash, ground granulated blast-furnace slag, silica fume and meta-kaolin), W/B and curing time on chloride diffusion of concrete by long-time immersion test in chloride solution. According to the result, the use of mineral admixtures was effective in improving the resistant to chloride ingress. The chloride penetration depth and diffusion coefficient were decreased as replacement ratios of mineral admixture were increased. The kind and replacement ratio of the mineral admixture are more important than the W/B in reducing the chloride diffusion of concrete. Chloride binding capacity of mineral admixture, which was sequenced in the order of MK>Plain>SF>BS>FA in this study, showed that MK was most effective. Although curing time had an effect on the chloride diffusion of all concrete mixtures, the effect was gradually decreased with time. Therefore, it can be said that the time of form work removal after 7 days curing is not important from the viewpoint of chloride ingress.

Keywords : immersion test, admixtures, curing time, chloride penetration depth, diffusion coefficient

1. 서 론

콘크리트 구조물이 공용기간 중 요구되는 성능의 수준을 지속시킬 수 있는 성질을 내구성이라 하며, 콘크리트 구조물은 시간이 지나면서 일반적인 내구성 저하 요인인 동결융해, 중성화, 염해, 알칼리골재반응 등에 의해 성능이 저하하게 된다. 특히, 구조물이 해양 환경에 노출되어 있다면, 물리·화학적인 내구성 저하 요인 중에 염해가 가장 주요한 성능 저하 요인으로 작용하게 되는데, 그 이유는 다른 성능 저하 인자에 비하여 염화물의 침투 및 확산속도가 빠르고, 철근부식에 직접적인 영향을 미치기 때문이다¹⁾. 염해는 콘크리트 구조물에서 염화물에 의한 철근부식과 그 팽창압으로 콘크리트가 박리·박락하여 구조물의 내력이 저하하게 되는 염화물에 의한 피해이다. 따라서,

해양 환경에 건설되는 콘크리트 구조물에 있어서 염해에 대한 내구성을 확보하기 위해서는 가능한 한 콘크리트 구조물의 내부로 유입되는 염화물의 양을 제한하는 것이 가장 효과적이다.

이를 위해, 기존의 콘크리트 구조물 내구설계에 있어서는 콘크리트의 수밀성 확보 차원에서 단순히 W/C나 설계 기준강도의 한계를 정하고 있지만, 이는 구조물의 정량적인 내구수명의 평가가 곤란하였다. 따라서, 최근에는 해양 콘크리트 구조물의 내구수명을 정량적으로 평가하기 위하여, 여러 연구자들이 콘크리트 내부로의 염화물 확산에 관해 연구를 수행하였다. 그 결과로 콘크리트 내에서 염화물 침투 기구 및 확산 모델 등에 대한 많은 성과가 나타나고 있다²⁻³⁾. 그러나, 연구 범위는 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 배합이거나, 플라이애시, 고로슬래그 등 단일 혼화재만을 대상으로 하는 경우가 많고, 각 혼화재 종류가 염화물 확산에 미치는 영향에 관해 종합적으로 평가가 이루어진 경우는 적었다. 또한, 콘크리트는 재령이 경과함에 따라 밀실하게 되지만, 아직 해양 환경에 노출되기 전

* Corresponding author
E-mail : cellon@dwconst.co.kr
©2005 by Korea Concrete Institute

의 양생기간이 콘크리트의 염화물 침투저항성에 미치는 영향은 고려되지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 현재 콘크리트에 적용 가능한 4종의 혼화재를 사용한 콘크리트의 염수침지시험을 통해 혼화재 종류 및 치환율과 양생기간이 콘크리트의 염화물 확산에 미치는 영향을 상호 비교·검토함으로써, 염화물 확산만을 고려한 경우에 있어서 내염콘크리트 배합에 적용할 혼화재의 종류 및 치환율 선정과 양생기간 설정에 관한 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 계획

본 연구의 실험 계획은 Table 1에 나타난 바와 같다. 콘크리트 배합은 W/B 0.40, 0.45, 0.50, 0.55의 4수준에 대하여, 혼화재를 치환하지 않은 배합을 기준배합(Plain)으로 하고, 고로슬래그미분말(BS) 및 플라이애쉬(FA)는 각각 3수준, 실리카폼(SF) 및 메타카올린(MK)은 각각 4수준으로 치환한 총 60배합을 대상으로 하였다.

또한, 실제 구조물에서 타설된 콘크리트가 해양 환경에 노출되는 시기는 거푸집이 탈형되는 시점으로 볼 수 있으므로, 이를 실내 실험에서는 표준양생기간으로 간주하여, 표준양생기간을 7일과 28일의 2수준으로 설정하였다.

Table 1 Experimental plan

| W/B | Type of mineral admixtures | Replacement ratio (%) | Standard curing (days) | Measurement items | Immersed time (days) |
|------------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|--|--------------------------------|
| 0.40 0.45 0.50 0.55 | Plain | - | · 7 · 28 | · Chloride penetration depth · Chloride concentration | · 28 · 91 · 182 · 330 |
| | BS | 30,50,70 | | | |
| | FA | 10,20,30 | | | |
| | SF | 5,10,15,20 | | | |
| | MK | 5,10,15,20 | | | |

Table 2 Mix proportion of the plain concrete

| W/C | S/a (%) | Unit weight (kg/m ³) | | | | SP (×B,%) |
|------|---------|----------------------------------|--------|------|--------|-----------|
| | | Water | Cement | Sand | Gravel | |
| 0.40 | 45.6 | 158 | 395 | 793 | 954 | 0.5 |
| 0.45 | 46.7 | 158 | 351 | 829 | 957 | 0.5 |
| 0.50 | 47.7 | 158 | 316 | 861 | 951 | 0.5 |
| 0.55 | 47.8 | 164 | 298 | 863 | 949 | 0.5 |

Table 3 Physical properties and chemical composition of mineral admixtures

| Kinds of mineral admixtures | Specific gravity | Blain (cm ² /g) | Ig. loss (%) | Chemical proportion (%) | | | | | |
|---|------------------|----------------------------|--------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|
| | | | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ |
| Ground granulated blast-furnace slag (BS) | 2.85 | 3,860 | 0.27 | 33.7 | 14.4 | 0.4 | 41.7 | 6.4 | 1.0 |
| Fly ash (FA) | 2.15 | 3,158 | 3.57 | 56.4 | 23.7 | 9.0 | 2.5 | 1.3 | 1.1 |
| Silica fume (SF) | 2.20 | 200,000 | 2.10 | 91.2 | 1.3 | 0.8 | 0.7 | 0.3 | - |
| Meta kaolin (MK) | 2.59 | 10,000 | - | 52.0 | 40.0 | 3.0 | 1.2 | 0.5 | - |

각각의 표준양생된 시험체는 양생이 종료된 시점에서 염수용액에 침지하였으며, 침지 후의 소정의 재령에서 염화물 침투깊이 및 깊이별로 침투된 염화물량을 측정하고, 측정된 염화물량으로부터 염화물확산계수를 추정하였다.

Table 2는 혼화재를 치환하지 않은 기준배합(Plain)으로 예비시험결과를 바탕으로 W/C 0.40~0.50의 배합은 단위수량을 158 kg/m³로 고정하였으며, W/C 0.55의 배합은 단위수량을 164 kg/m³로 하였다. 혼화재를 사용하는 경우에는 각 배합의 단위시멘트량에 대하여 Table 1의 실험계획에 따라 각 치환율별로 중량치환하여 사용하였으며, 고성능 AE감수제 첨가량은 시험 배합을 통하여 결합재(B) 중량비의 0.7~2.0% 범위내에서 목표 슬럼프 18±2.5 cm, 목표 공기량 4.5±1.5%를 만족하도록 조절하였다.

2.2 사용 재료

본 실험에서는 국내에서 생산된 1종 시멘트(비중 : 3.15, 분말도 : 3,200 cm²/g)를 사용하였다. 혼화재는 광양산 고로슬래그미분말, 보령산 F급 플라이애쉬, 캐나다산의 실리카폼 및 국내 A사의 메타카올린을 사용하였으며, 각각의 물리적 성질 및 화학 조성을 Table 3에 나타내었다. 또한, 잔골재는 비중 2.60, 조립률 2.60인 세척사, 굵은골재는 최대 치수 25 mm, 비중 2.63, 조립률 6.98인 쇄석을 사용하였고, 고성능 AE감수제는 국내 E사 제품을 사용하였다.

2.3 실험 방법

본 연구는 무기질 혼화재 종류 및 치환율과 염해 환경 노출전의 양생기간이 콘크리트 중의 염화물 확산성에 미치는 영향을 알아보기 위하여, Fig. 1과 같이 7일과 28일의 표준양생 종료 시점에서 철근부식속도가 최대¹³⁾로 되는 3.6%의 NaCl 수용액에 330일간 침지실험을 실시하였다. 침지시험체는 타설면에 직각인 2면을 제외한 나머지 면에 염화물의 침투를 방지하기 위하여 에폭시를 도포하였다. 또한, 최종 시험 재령까지 동일 시험체에 대해 시험을 수행하기 위하여 100×100×400 mm의 각주형으로 제작·양생·침지하고, 각 침지 재령에서 꺼내서 시료 채취를 위해 시험체를 100 mm 길이로 절단한 후, 나머지 시험체는 절단면에 에폭시 코팅하여 다시 침지하였다. 절단된

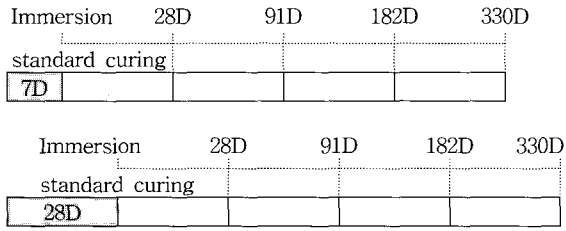


Fig. 1 Plan of immersion test in chloride solution

시험체의 절단면에 0.1N AgNO₃을 분무하여 변색된 깊이를 버니어캘리퍼스로 0.5mm의 정밀도로 10개소 측정된 평균값을 염화물 침투깊이로 하였다.

염화물량을 측정하기 위한 시료는 표면으로부터 염화물이 침투한 깊이까지 5mm간격으로 물을 사용하지 않는 진식 다이아몬드 커터기를 사용해 채취하였다. 채취된 시료에서 KS F 2713에 따라 염화물을 추출하고, 전위차 적정기를 사용하여 전(산-가용성)염화물과 수용성 염화물량을 각각 측정하였다.

2.4 염화물확산계수

본 연구에서는 비정상상태의 침지실험을 통하여 얻어진 표면으로부터의 깊이별 염화물량을 사용하여 Fick's second law의 일반해인 식 (1)을 이용하여 겉보기 염화물 확산계수를 구하였다. 이때 사용된 염화물농도는 콘크리트 중의 액상에 있어서의 염화물이온농도가 아니라 콘크리트 단위용적 당 전염화물량으로 하였다⁴⁾.

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

여기서, C(x,t)는 시간 t에서 깊이 x의 염화물농도, C₀는 표면염화물농도, D는 겉보기 확산계수, erf는 에러 함수(error function)이다.

한편, 식 (1)을 사용하여 염화물확산계수를 추정하는 경우에는 표면염화물농도인 C₀의 영향을 많이 받게 된다. 표면염화물량을 결정하기 위한 방법으로는 깊이에 따른 염화물량을 바탕으로 식 (1)을 사용하여 비선형회귀분석으로 추정하는 방법⁵⁾이 있으나, 이 때 추정된 표면염화물량은 깊이에 따른 염화물량 분포 상태에 의해 크게 영향을 받는다. 다른 방법⁶⁾으로는 가능한 표면에서 가까운 부위의 염화물량을 측정하여 이를 표면염화물량으로 간주하는 방법이 있는데, 현재에는 이 방법이 가장 타당한 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 깊이 0~5mm 사이에서 채취한 시료의 염화물량을 표면염화물량으로 하였다.

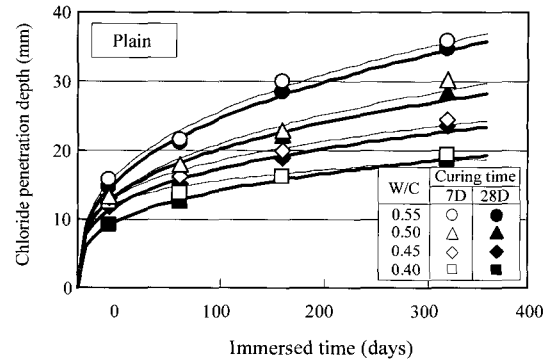


Fig. 2 Chloride penetration depth for plain

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 염수침지 결과

3.1.1 염화물 침투깊이

염화물 침투깊이는 염해에 대한 내구설계에 직접적으로 사용되지는 않지만, 염화물 침투저항성을 나타내는 정성적인 지표로 사용될 수 있다.

비색법에 의한 변색구간으로부터 구한 Plain 배합의 염화물 침투깊이 측정 결과는 Fig. 2에 나타난 바와 같이, 모든 W/C에서 재령의 경과에 대해 거듭제곱함수의 형태를 갖는 것으로 나타났다. 또한, 동일 재령에서는 W/C가 커질수록 염화물 침투깊이가 증가하고 있으며, 재령이 경과하면서 W/C가 커질수록 염화물 침투깊이의 절대량은 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 재령의 경과에 따라 시멘트의 수화가 진행되고, 더욱이 W/C가 작을수록 콘크리트 내부 조직이 치밀해짐으로 인해 물리적인 염화물 침투저항성이 향상되기 때문이다. 한편, 염화물 침투깊이에 미치는 양생기간의 영향은 표준양생 7일에 비해서 표준양생 28일의 경우가 침투깊이가 작은 것으로 나타났다.

Fig. 3은 W/B 0.40인 경우에 혼화재 종류 및 치환율별로 재령에 따른 염화물 침투깊이 결과를 나타낸 것이다.

Plain을 기준으로 하여 혼화재 종류에 따른 경향을 살펴보면, FA의 초기재령을 제외하고 모든 혼화재에 있어서 염화물 침투깊이가 작게 나타났다. 특히, 혼화재 치환율에 상관없이 SF의 경우에 침투깊이가 가장 적게 나타나고 있어 염화물 침투저항성이 가장 우수함을 알 수 있다. FA의 침투깊이는 Plain과 유사한 정도를 보이지만, 침지재령 28일에서는 Plain보다 다소 큰 값을 보이다가 침지재령 91일 이후에는 침투깊이가 작아지는 경향을 나타냈다. 이것은 일반적으로 알려져 있는 FA의 장기재령에서의 포졸란 반응에 의한 효과로 판단된다. 또한, BS의 경우에는 치환율 30%를 제외하고는 SF와 유사한 성능을 보이고 있으며 치환율이 높을수록 염화물 침투저항성이 우수한 것으

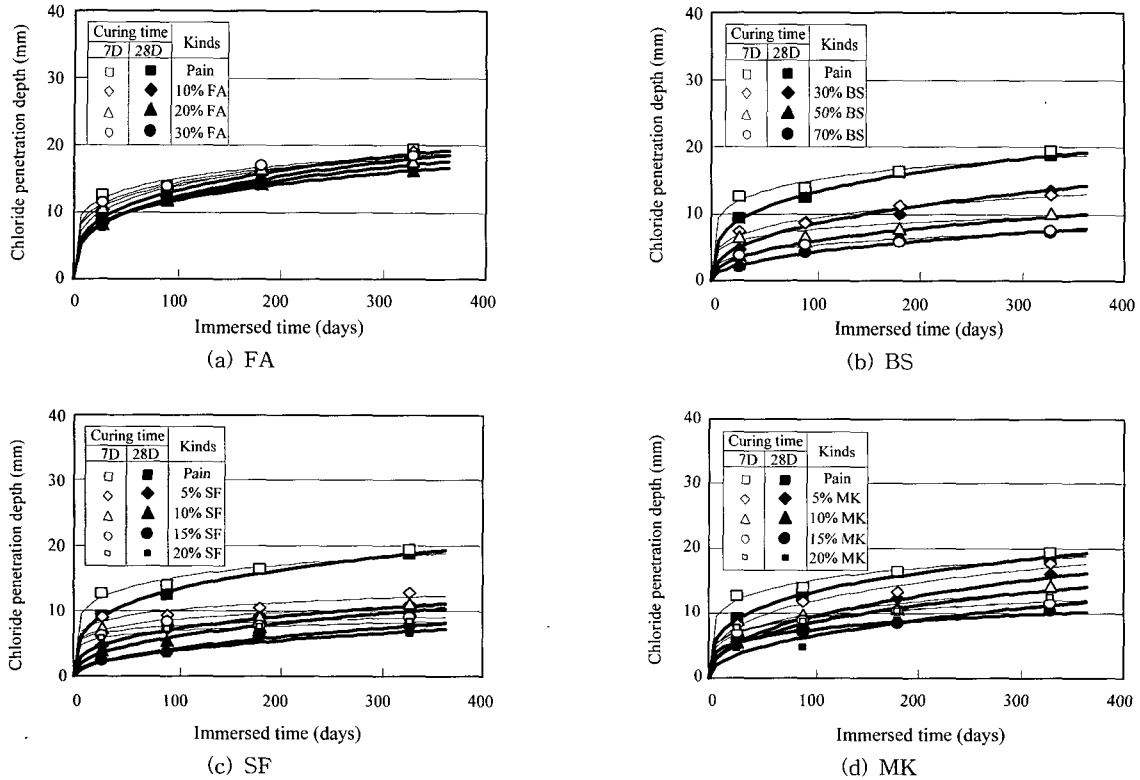


Fig. 3 Chloride penetration depth for different kinds of admixture (W/B 0.40)

로 나타났다. 이는 BS의 잠재수경성에 의해 미세구조를 치밀하게 하기 때문이다⁷⁾. MK도 치환율 5%를 제외하고는 염화물 침투저항성이 상당히 양호한 것으로 나타났는데, 이는 MK가 미세공극을 충전하여 조직을 치밀화함으로써 염화물의 침투를 저하시키기 때문이다⁸⁾.

또한, 모든 배합에서 혼화재 치환율이 증가할수록 염화물 침투깊이는 작아지고, 재령 증가에 따라 침투깊이의 증가 폭은 감소되는 경향이어서, 혼화재 치환율과 재령이 염화물 침투저항성 향상에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

혼화재를 사용한 경우, 염화물 침투깊이에 미치는 양생기간의 영향은 Plain과 상이하여, 혼화재 종류에 상관없이 표준양생 7일인 경우가 표준양생 28일에 비해서 초기재령에서의 침투깊이가 컸지만, 장기재령으로 갈수록 염화물 침투깊이가 유사해져서 양생기간에 의한 영향은 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 다른 W/B에서도 유사하게 나타났으며, 특히 각 혼화재 치환율이 증가할수록 영향은 더 감소했다. 이것은 실제 현장에서 거푸집 탈형 시기와 공기 단축과의 관계에서 중요한 인자로 작용하는 것으로, 혼화재를 사용한 경우에는 Plain에 비해 염해 측면에서의 거푸집 탈형 시기의 단축이 가능한 것으로 판단된다.

3.1.2 염화물 프로파일

Fig. 4는 Plain 배합에 대해서 각각 7일 및 28일간 표준

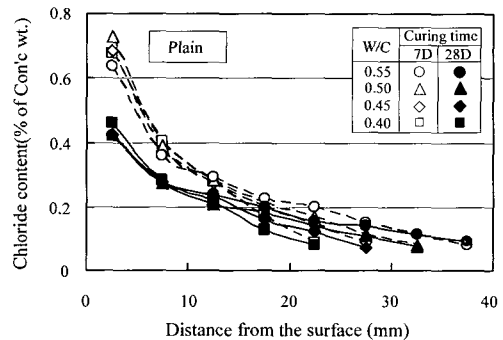


Fig. 4 Chloride profiles for Plain (330 days)

양생된 시험체를 염수에 침지한 후 재령 330일에 측정된 표면으로부터의 깊이별 전염화물량을 나타낸 것이다.

동일 양생재령에서 깊이 0~15mm까지는 W/C에 상관없이 침투된 염화물량이 유사하였으나, 깊이 15mm부터 각 침투깊이까지는 W/C가 커질수록 염화물량이 증가하였다. 특히, 0~5mm에서의 표면염화물량은 표준양생 7일의 경우가 표준양생 28일에 비해서 약 1.6배 정도 더 많았으나, 깊이가 깊어질수록 차이는 감소하여 최종 침투깊이 위치에서는 양생기간에 관계없이 유사하게 나타났다.

Fig. 5는 혼화재 종류별로, 콘크리트 구조설계기준⁹⁾에서 권장하고 있는 혼화재의 한계치 내에서 최대치환율을 갖는 배합에 대해서, 각각 7일 및 28일간 표준양생한 시험체를 염수에 침지한 후 재령 330일에 측정된 표면으로부터

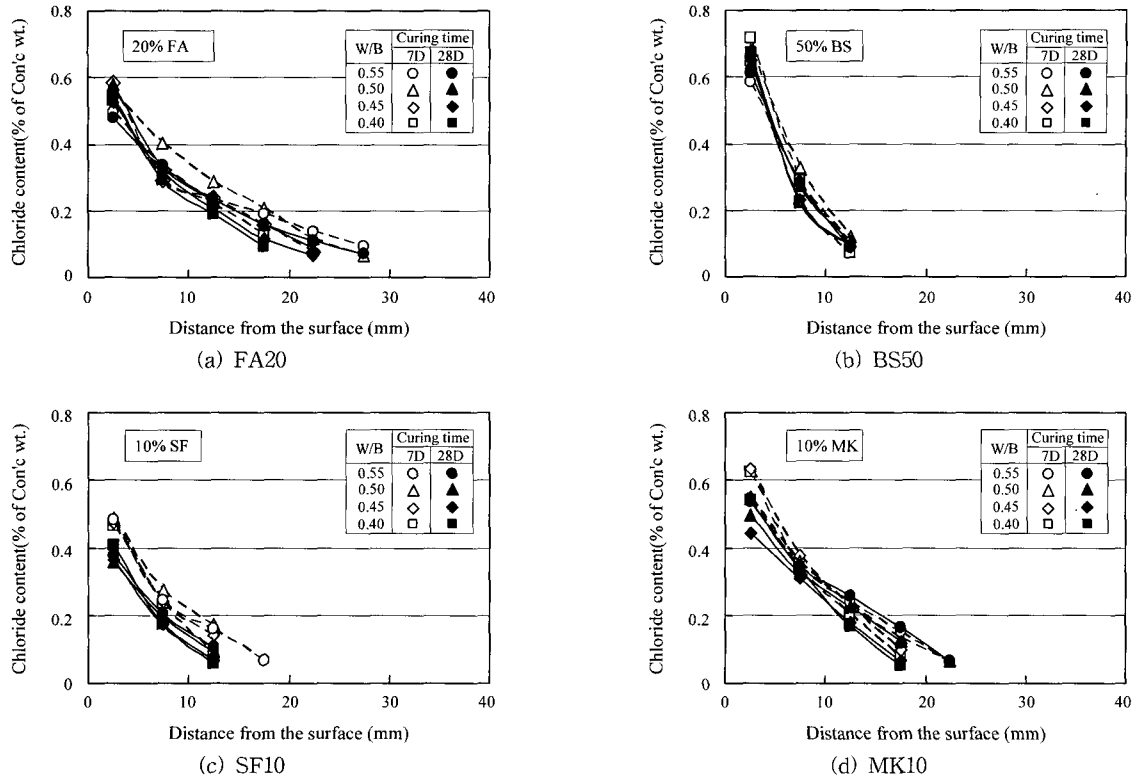


Fig. 5 Chloride profiles for different kinds of admixture (330 days)

의 깊이별 전염화물량을 W/B에 따라 나타낸 것이다.

양생기간이 염화물 침투깊이에 미치는 영향은 Plain의 경우 침지재령 330일까지 나타난 반면, 혼화재를 사용하는 경우 종류에 따라 약간 상이하지만, 침지재령 330일에서는 그 영향이 작아지는 것으로 나타났다. 이것은 FA20과 BS50의 경우에 일반적으로 알려져 있는 것처럼, 장기재령에서 포졸란반응과 잠재수경성에 의해 조직이 치밀해지고, SF10과 MK10의 경우에는 포졸란반응과 함께 미세공극 충전 등의 효과를 갖기 때문으로 추정된다.

한편, 혼화재 종류 및 치환율이 동일한 경우 W/B가 염화물 침투량에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 동일 W/B에서 혼화재 종류에 따른 염화물 침투량은 크게 상이하여, F10과 BS50의 경우가 가장 작고, FA20은 Plain과 유사하거나 약간 작았다. 또한, 혼화재가 동일한 경우 장기재령에 있어 염화물침투에 대한 혼화재 치환율의 영향은 크게 작용하여 치환율이 클수록 염화물 침투량은 작아지는 것을 알 수 있었다.

3.2 염화물 확산계수

3.2.1 혼화재 종류 및 치환율에 따른 영향

Fig. 6은 W/B 0.50에서 혼화재 종류 및 치환율별 재령 경과에 따른 확산계수 추정 결과를 나타낸 것으로, 모든 배합에서 재령이 경과함에 따라 염화물 확산계수가 감소

하는 경향이였다. 확산계수의 감소는 초기재령에서는 크지만, 재령이 경과할수록 점차 완만해지고 있다.

한편, 혼화재 사용에 따라 염화물 확산계수는 재령 91일의 FA 배합을 제외한 모든 배합에서 Plain보다 저감되었으며, FA 배합의 경우에도 재령경과와 함께 확산계수가 저감되었다. 혼화재 종류별로는 BS, SF의 확산계수 저감 효과가 가장 크고, 각 혼화재 치환율이 증가할수록 염화물 확산계수가 더 작아졌다. 표준양생기간에 의한 영향은 혼화재별로 약간 상이하지만, 재령이 경과할수록 감소하는 경향이였다.

Fig. 7은 W/B 0.50에서 각 배합의 염화물 확산계수를 재령에 관계없이 평균하여 Plain에 대한 상대 확산계수 감소비를 나타낸 것이다. Plain의 평균 염화물 확산계수 $1.02 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ 에 대하여, FA 배합은 20~26%로 가장 작은 감소 효과를 보였으나, BS, SF, MK 배합의 경우에는 각각 61~81%, 60~87%, 30~79%의 수준으로서, BS \approx SF > MK > FA의 순으로 염화물 확산계수 감소 효과가 있는 것으로 나타났다. 이처럼 염화물 확산계수의 저감 효과는 사용 혼화재의 종류 및 치환율에 따라 크게 달라지므로, 향후 염해 환경에 적용되는 콘크리트 배합에는 사용 혼화재 종류 및 치환율 선정에 주의가 요망된다.

3.2.2 W/B에 따른 영향

압축강도 발현을 등을 고려해서 혼화재별로 최적으로

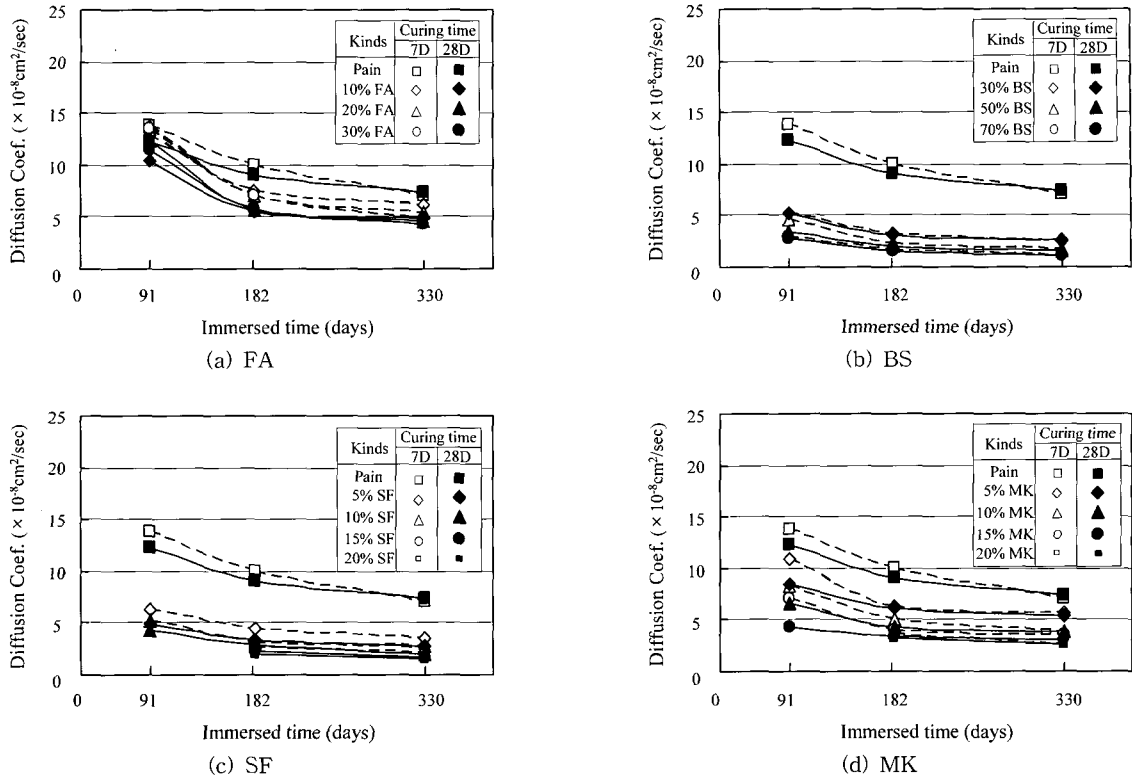


Fig. 6 Chloride diffusion coefficient with immersed time (W/B 0.50)

평가되는 치환율¹⁰⁾에서의 W/B와 재령에 따른 확산계수를 Fig. 8에 나타냈다.

본 연구범위 내에서는 W/B가 작아질수록, 더욱이 침지 재령이 증가할수록 염화물 확산계수가 비선형적으로 감소되는 경향을 나타냈다. 이것은 일반적인 Plain 배합과 유사한 경향으로, W/B가 작아질수록 콘크리트 내부조직이 치밀하게 되고, 재령이 증가할수록 수화반응에 따른 공극 구조가 치밀해지기 때문으로 판단된다. 특히, FA20의 경우에는 모든 W/B에서 염화물 확산계수가 재령 91일부터 182일 사이에서 크게 감소하였다. 또한, 각 W/B에서 표준 양생기간이 염화물 확산계수에 미치는 영향은 배합별로 약간 상이하지만, 재령 91일에서는 크지만 침지재령이 증가함에 따라 그 영향은 작게 되는 경향을 보였다.

한편, Fig. 9는 배합별로 각 W/B에서 재령에 따라 구해진 염화물 확산계수를 평균하여, W/B가 0.55에서 0.40으로 작아질 때의 확산계수의 감소 기율기를 나타낸 것이다. Plain의 경우가 W/C 감소에 따른 영향이 가장 크게 나타났다. 즉, Plain 배합은 W/C를 감소함으로써 염화물 확산계수를 크게 저감할 수 있지만, 혼화재 사용배합은 W/B 변화에 따른 영향이 상대적으로 적다는 것을 의미한다.

3.3 전염화물과 자유염화물

Fig. 10은 W/B에 상관없이 Plain과 각 혼화재 배합의 28일간 양생한 시험체에서 침지 330일에 측정된 전염화물

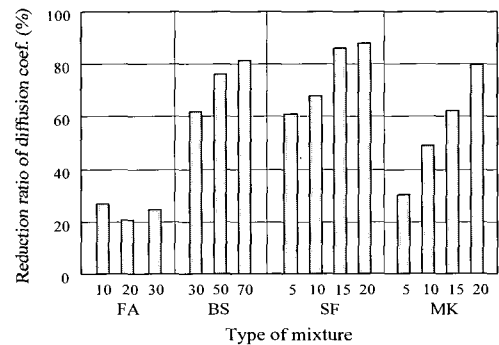


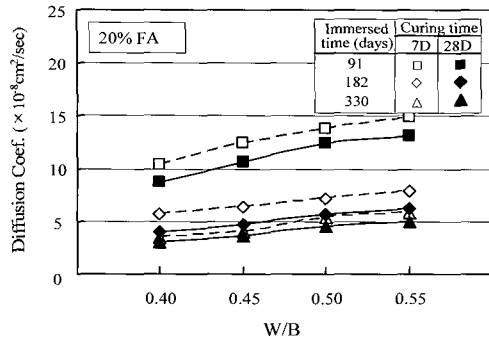
Fig. 7 Relative reduction ratio of average diffusion coefficient to Plain (W/B 0.50)

량(C_t)과 수용성염화물량(C_f)의 상관관계를 나타낸 것이다.

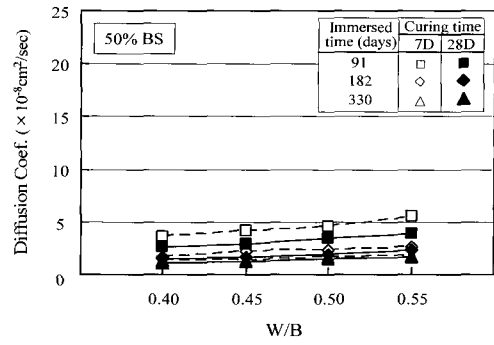
모든 배합에서 C_t 와 C_f 는 선형으로 증가하는 비례 관계로 C_t 가 증가할수록 C_f 도 증가하는 것으로 나타났으며, 이 관계는 식 (2)와 같은 자유등온식¹¹⁾으로 표현할 수 있다.

$$C_f = a \cdot C_t \quad (2)$$

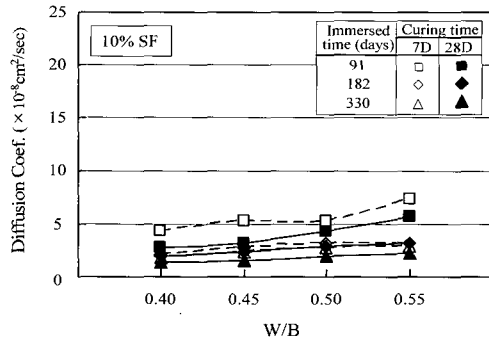
여기서, a 는 C_t 와 C_f 의 관계를 나타내는 값으로서, Plain의 경우 0.64정도인 것에 비해 혼화재 종류별로는 FA 0.74, BS 0.72, SF 0.66, MK 0.61 정도인 것으로 나타났다. 즉, 혼화재 종류에 따른 염화물 구속능(binding capacity)은 $MK > Plain > SF > BS > FA$ 의 순으로 평가할 수 있으며, 이는 다른 연구 결과¹²⁾와도 유사한 경향이다. 이러한 경향



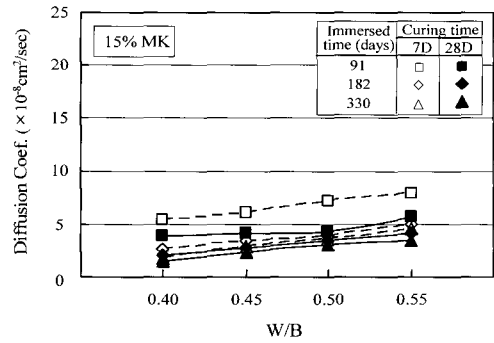
(a) FA20



(b) BS50



(c) SF10



(d) MK15

Fig. 8 Chloride diffusion coefficient with W/B

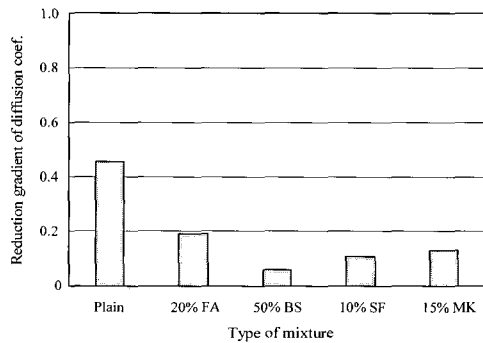


Fig. 9 Reduction gradient of average chloride diffusion coefficient of each mixture

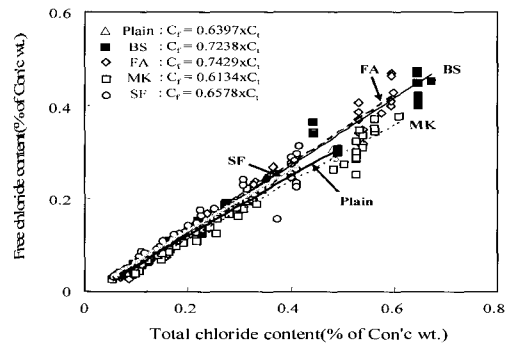


Fig. 10 Correlation between C_t and C_f

은 시험체를 인공 염수에 침지하기 전에 28일간 표준양생을 실시하여, 염화물 고정화에 영향을 주는 C_3A 의 수화가 상당히 진행되어 외부로부터 유입되는 염소이온에 대한 염화물 고정화에 미치는 영향은 적었던 것¹¹⁾으로 판단된다. 특히, MK의 경우는 Plain보다 높은 고정화 능력을 보이고 있으며, 이는 MK가 10% 또는 20% 혼입된 페이스트가 시멘트페이스트보다도 염화물 고정화 능력이 우수하다는 연구 결과⁸⁾와도 잘 일치하고 있다.

혼화제의 이러한 염화물 고정화 특성은 염화물 확산계수와 함께 염해 환경에 적용될 콘크리트 배합을 선정함에 있어서 중요한 인자로 작용할 수 있으므로, 이에 대한 충분한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 각종 혼화제를 사용한 콘크리트의 염수침지 시험에 의해 혼화제 종류, 치환율 및 양생기간이 콘크리트의 염화물 확산에 미치는 영향에 대하여 실험적 연구를 수행한 것으로 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 염화물 침투저항성은 혼화제를 사용함으로써 크게 개선되었고, Plain의 염화물 침투저항성은 W/C에 의한 영향이 큰 반면, 혼화제를 사용하는 경우에는 W/B에 의한 영향은 작아지고, 혼화제의 종류 및 치환율의 영향이 커졌다.

- 2) 염화물 확산계수는 재령의 경과에 따라 감소하는 시간 의존적인 경향을 갖으며, Plain에 대한 확산계수 감소율은 BS>SF>MK>FA의 순으로 BS, SF의 확산계수 저감효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 또한, 각 혼화제 치환율이 증가할수록 염화물 확산계수가 저감되었다.
- 3) 따라서, 염해의 우려가 있는 콘크리트의 배합선택에는 사용 혼화제의 종류 및 치환율 선정이 우선되어야 한다.
- 4) 외부로부터 침투하는 염화물을 고정화하는 능력은 MK>Plain>SF>BS>FA의 순인 것으로 평가되어, 염화물 고정화 능력은 MK가 가장 우수한 것으로 나타났다.
- 5) 모든 배합에서 염화물 확산은 양생기간의 영향을 받는 것으로 나타났으나, 장기재령으로 갈수록 그 영향은 감소하였다. 따라서 현행의 공정에서는 염해 측면의 거푸집 탈형 시기는 크게 고려하지 않아도 좋을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김영진, 김동석, 유재강, “콘크리트의 염화물 침투저항성에 미치는 무기질 혼화제 종류의 영향”, 한국콘크리트학회 2004년도 봄학술발표회 논문집, 16권 1호, 2004. 5. pp.802~805.
2. 竹上浩史, 任意の配合條件を有するセメント硬化體中の鹽化物移動・平衡則の一般化, 東京大學校大學院修士論文, 2002.
3. A. Ababneh, F. Benboudjerna, and Y. Xi, “Chloride Penetration in Nonsaturated Concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, March/April, 2003, pp.183~191.
4. 콘크리트 표준시방서 해설, 한국콘크리트학회, 2003, pp.397.
5. 콘크리트 염해 및 탄산화로 인한 내구성 저하 방지대책 연구, 한국콘크리트학회, 2001. 10. 113pp.
6. 川上英男, 콘크리트中への鹽化物浸透機構, 콘크리트工學, Vol.25, No.11, 1987, pp.49~52.
7. 송하원, 권성준, 이석원, 변근주, “고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물 침투저항성에 관한 연구”, 콘크리트학회 논문집, 15권, 3호, 2003. 6. pp.400~408.
8. Coleman N.S. and Page C.L., “Aspects of the pore solution chemistry of hydrated cement pastes containing metakaolin”, *Cement Concrete Res.*, Vol.27, No.1, 1997, pp.147~154.
9. 콘크리트 구조설계기준 및 해설, 한국콘크리트학회, 2003, pp.93.
10. 김영진, 이상수, 김동석, 유재강, “혼화제 종류 및 치환율이 콘크리트의 내염성능 향상에 미치는 영향에 관한 연구”, 콘크리트학회 논문집, 16권, 3호, 2004. 6. pp.319~326.
11. 박정준, 고경택, 김도겸, 김성욱, 하진규, “혼화제를 혼합한 콘크리트의 염화물 고정화에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 2001년도 가을학술발표대회 논문집, 13권2호, 2001. 10. pp.787~792.
12. Tarek Uddin Mohammed, Toru Yamaji, and Hidenori Hamada, “Chloride Diffusion, Microstructure, and Mineralogy of Concrete after 15 Years of Exposure in Tidal Environment”, *ACI Materials Journal*, May-June 2002, pp.256~263.
13. 大郎信明, 小林明夫 外, 鹽害(I),(II) 콘크리트構造物の耐久性シリーズ, 技報堂出版, 1987.

요 약

해양에 건설되는 철근콘크리트 구조물은 외부의 염화물 확산에 의한 철근부식이 구조물의 내구성과 관련하여 가장 큰 성능저하 요인이 된다. 이에 본 연구에서는 각종 혼화제를 사용한 콘크리트의 장기염수침지시험에 의해 혼화제 종류, 치환율 및 양생기간이 콘크리트의 염화물 확산에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 연구 결과, 무기질 혼화제를 사용한 콘크리트의 염화물 침투깊이와 염화물 확산계수는 혼화제 치환율이 증가할수록 감소되어, 무기질 혼화제는 염화물 침투저항성 개선에 효과적인 것으로 나타났으며, 염화물 확산계수 저감에는 W/B의 저감보다는 사용 혼화제의 종류 및 치환율의 선정이 더 중요한 것으로 나타났다. 염화물 구속능은 MK>Plain>SF>BS>FA의 순으로, Meta-Kaolin이 가장 우수한 것으로 나타났다. 모든 배합에서 염화물 확산은 양생기간의 영향을 받는 것으로 나타났으나, 장기재령으로 갈수록 그 영향은 감소하였다. 따라서, 염해 측면에서 양생재령 7일 이후의 거푸집 탈형 시기는 크게 고려하지 않아도 좋을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 염수침지시험, 혼화재료, 양생기간, 염화물 침투깊이, 확산계수