

# 콘크리트의 염화물 침투저항성에 미치는 무기질 혼화재 종류의 영향

## The Effect of Mineral Admixtures' Type on the Chloride Penetration Resistance of Concrete

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

### ABSTRACT

This study was performed to investigate the effect of mineral admixture' type and replacement ratios on the chloride penetration resistance of concrete which was immersed in the artificial chloride solution. The chloride penetration resistance was evaluated by penetration depth and chloride diffusion coefficient. As a result, all of the mineral admixtures were effective on the chloride penetration resistance of concrete compared to ordinary portland cement only.

#### 1. 서론

구조물은 소요의 사용기간 중 요구되는 성능의 수준을 지속시킬 수 있도록 내구적이어야 한다. 그런데, 철근콘크리트 구조물은 건설된 후부터 시간이 경과하면서 동결융해, 중성화, 염해, 알칼리골재반응 등에 의해 성능이 저하하게 된다. 특히, 구조물이 해양환경에 노출되어 있다면, 물리·화학적인 내구성 저하요인 중에 염해가 가장 주요한 성능저하요인으로 작용하게 되며, 그 이유는 다른 성능저하 인자에 비하여 염화물의 침투 및 확산속도가 빠르고, 철근부식에 직접적인 영향을 미치기 때문이다.

기존의 콘크리트 구조물의 내구설계에 있어서는 콘크리트의 수밀성 확보차원에서 단순히 물-시멘트 비나 설계기준강도의 한계 등을 정하고 있지만, 이는 구조물의 정량적인 내구수명의 평가가 곤란하다. 따라서, 최근에는 해양콘크리트 구조물의 내구수명을 정량적으로 평가하기 위하여, 많은 연구자들이 콘크리트 내부로의 염화물 확산에 관해 연구를 수행하였으나, 연구대상은 대부분이 보통포틀랜드시멘트만을 사용하거나, 고로슬래그 미분말 등 한 종류의 혼화재 만을 대상으로 하는 경우가 많고, 각각의 혼화재 종류가 염화물 확산에 미치는 영향에 관해 종합적으로 평가가 이루어진 경우는 적었다.<sup>1)~2)</sup>

따라서, 본 연구에서는 현재 콘크리트에 적용 가능한 4종의 혼화재 종류 및 치환율이 염수에 침지한 콘크리트의 염화물 확산에 미치는 영향을 상호 비교·검토하여, 염화물 확산만을 고려한 경우에 있어서 각각의 혼화재 종류 및 치환율이 염화물 침투저항성에 미치는 영향에 대해 고찰하고자 하였다.

#### 2. 실험계획 및 방법

- \* 정회원, (주)대우건설 기술연구소 수석연구원, 공박
- \*\* 정회원, (주)대우건설 기술연구소 전임연구원
- \*\*\* 정회원, (주)대우건설 기술연구소 연구원

## 2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1에 나타난 바와 같다. 콘크리트 배합은 물-결합재비 40, 45, 50, 55%의 4수준에 대하여, 혼화재를 치환하지 않고 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 배합을 기준배합(Plain)으로 하였다. 또한, 각각의 혼화재는 시멘트에 대하여 중량치환으로 고로슬래그 미분말(ground granulated Blast-furnace Slag, BS) 및 플라이애쉬(Fly Ash, FA)는 각각 3수준, 실리카흄(Silica fume, SF) 및 메타카올린(Meta kaolin, MK)은 각각 4수준으로 치환하였으며, 총 60배합을 실험대상으로 하였다.

표 1 실험계획

W/B (%)	혼화재		표준양생재령	측정항목	침지재령
	종류	치환율(%)			
40	Plain	-	7일	염화물 침투깊이, 산-가용성 염화물량	28일, 91일, 182일, 330일
45	BS	30,50,70			
50	FA	10,20,30			
55	SF	5,10,15,20			
	MK	5,10,15,20			

표 2 Plain의 배합표

W/B (%)	S/a (%)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )			
		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

염수침지 시험체는 7일간의 표준양생이 종료된 시점에서 3.6%의 NaCl 수용액에 침지하였으며, 침지 후의 침지재령 28일, 91일, 182일 및 330일에서 비색법으로 염화물 침투깊이를 측정하였다. 또한, 깊이별로 침투된 산-가용성 염화물량을 KS F 2714<sup>3)</sup>에 제시된 방법에 따라 분석하였다. 표 2는 혼화재를 치환하지 않은 Plain의 배합으로서, 수차례의 시험배합 결과를 바탕으로 물시멘트비(W/C) 40~50%에서 단위수량 158kg/m<sup>3</sup>, 잔골재율(S/a) 45.6~47.7%로 설정한 배합과 W/C 55%, 단위수량 164kg/m<sup>3</sup>, S/a 47.8%인 배합을 선정하였다. 혼화재를 사용한 배합은 목표슬럼프치인 18±2.5cm를 만족하도록, 시험배합을 통해 고성능AE감수제의 사용량을 조절하였다.

표 3. 사용재료의 물리적 성질

시멘트	종류 : 보통포틀랜드시멘트 (1종) 비중 : 3.15, 분말도 : 3,200cm <sup>2</sup> /g
잔골재	종류 : 세척사, 비중 : 2.60, 조립율 : 2.60
굵은골재	종류 : 부순자갈, 최대치수 : 25mm 비중 : 2.63, 조립율 : 6.96
고성능 AE감수제	종류 : 나프탈렌계, 비중 : 1.20±0.02 pH : 7.0±1.0 (20°C)

## 2.2 사용재료 및 실험방법

본 실험에 사용된 시멘트는 국내에서 생산된 1종 시멘트(비중 : 3.15, 분말도 : 3,200cm<sup>2</sup>/g)이다. 혼화재는 4종류로서, 광양산 고로슬래그 미분말, 보령산 F급 플라이애쉬, 캐나다산의 실리카 흄 및 국내 A사의 메타카올린을 사용하였으며, 각 사용재료의 물리적 성질 및 화학조성을 표 3 및 표 4에 나타내었다.

표 4. 혼화재료의 물리적 성질 및 화학성분별 구성비율

종류	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	강열감량 (%)	화학조성비 (%)					
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
FA	2.15	3,158	3.57	56.4	23.7	9.0	2.5	1.3	1.1
BS	2.85	3,860	0.27	33.7	14.4	0.4	41.7	6.4	1.0
SF	2.20	200,000	2.10	91.2	1.3	0.8	0.7	0.3	-
MK	2.59	10,000	-	52.0	40.0	3.0	1.2	0.5	-

골재는 비중 2.60, 조립율 2.60인 세척 해사 및 굵은골재 최대치수 25mm이고, 비중 2.63, 조립율 6.96인 쇄석을 굵은골재로 사용하였다. 염수침지 시험체는 10×10×40cm의 각주형 시험체로 제작하였으며, 7일간 표준양생을 실시한 후, 타설면에 직각인 2면을 제외한 나머지 면은 염화물의 침투를 방지하기 위하여 에폭시코팅을 실시하였다. NaCl 3.6%의 인공해수를 제작하여 시험체를 침지하였으며, 침지재령 28, 91, 182일 및 330일에 시험체를 절단하여 0.1N AgNO<sub>3</sub>에 의해 변색되는 깊이를 측정하였다. 분말 시료는 표면으로부터 5mm간격으로 침투깊이까지 커터기를 사용해 채취하였으며, 전위차 적정기를 사용하여 산-가용성 염화물량을 측정하였다. 측정된 결과는 KS F 2713<sup>4)</sup>에 따라 시료의 중량에 대한 Cl %로 환산하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 염화물 침투깊이

염화물 침투깊이는 염해에 대한 내구 설계에 직접적으로 사용되지는 않지만, 염화물 침투저항성을 나타내는 정성적인 지표로 사용될 수 있다. 그림 1은 물-결합재비 45%에서 혼화재 종류 및 치환율별로 재령에 따른 염화물 침투깊이를 나타낸 것이다.

Plain의 경우에 물-결합재비 수준에 따라 침지재령 28일에서는 12.5~15.7mm의 염화물 침투깊이가 측정되었으며, 330일간 염수침지 후에는 19.3~34.7mm 정도 염화물이 침투한 것으로 나타났다.

혼화재 종류별로 보면, SF의 침투깊이가 가장 적게 나타나, 염화물 침투저항성이 가장 우수함을 알 수 있다. FA는 Plain과 유사하지만, 침지재령 91일 이후에서는 침투깊이가 작아지고, BS는 치환율 30%를 제외하고는 SF와 유사한 성능을 보였으며, MK도 치환율 5%를 제외하고는 염화물 침투저항성이 상당히 양호한 것으로 나타났다. 또한, 모든 배합에서 혼화재 치환율이 증가할수록 염화물 침투깊이는 적어지고, 재령증가에 따라 침투깊이의 증가폭은 감소되는 경향이어서, 혼화재 치환율과 재령이 염화물 침투저항성 향상에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

#### 3.2 염화물 확산계수

각 배합의 겉보기 염화물 확산계수는 침지재령별 표면으로부터의 거리에 따른 산-가용성 염화물량을 구한 후, Fick의 확산방정식의 해인 식 1을 이용하여 구하였다.

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

여기에서,  $C_{(x,t)}$ 는 시간  $t$ 에서 깊이  $x$ 의 염화물 농도,  $C_0$ 는 표면염화물 농도,  $D$ 는 겉보기 확산계수,  $\operatorname{erf}$ 는 에러함수(error function)이다.

그림 2는 물-결합재비 45%에서 혼화재 종류 및 치환율별 재령에 따른 확산계수 추정결과를 나타낸 것으로, 모든 배합에서 재령이 경과함에 따라 염화물 확산계수는 감소하는 경향이였다.

FA 치환배합의 경우, 재령 91일에서 Plain과 유사한 값을 보이고 있으나, 재령이 경과할수록 Plain보다 낮은 염화물 확산계수를 보이고 있다. BS, SF, MK 치환배합의 경우, 모든 재령에서 Plain보다

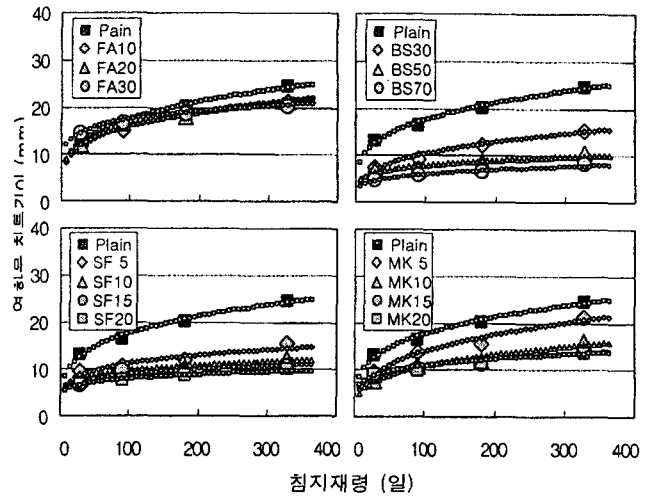


그림 1. 혼화재 종류별 재령에 따른 염화물 침투깊이(W/B 45%)

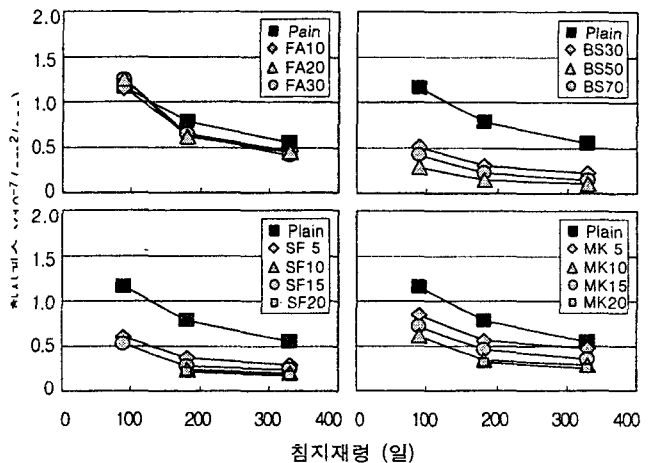


그림 2. 혼화재 종류별 재령에 따른 염화물 확산계수(W/B 45%)

낮은 염화물 확산계수를 보이고 있고, 각 혼화재 치환율이 증가할수록 염화물 확산계수가 저감되고 있어서, 혼화재 치환율이 증가할수록 염화물 침투저항성이 우수한 것으로 나타났다.

그림 3은 혼화재 종류에 따른 염화물 침투저항성을 상대평가하기 위하여, 물-결합재비 45%에서, 혼화재 종류 및 치환율별로 추정된 모든 염화물 확산계수를 재령에 관계없이 평균하여 Plain에 대한 상대 확산계수 감소비를 나타낸 것이다.

Plain의 재령에 따른 평균 염화물 확산계수  $1.02 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ 에 대하여, FA의 경우에는 10%이내의 적은 감소효과를 보였으며, BS, SF, MK의 경우에는 각각 59~79%, 50~77%, 24~66%의 수준으로, 염화물 침투저항성은 BS≈SF>MK>FA의 순으로 나타났다. 또한, 혼화재 치환율이 증가할수록 감소효과는 우수하였다. 그러나, BS의 경우에 치환율 70%에서는 압축강도가 현저히 감소하고, SF, MK의 경우에는 시공성 및 경제성도 고려해야 하므로, 실제 사용에 있어서는 이러한 점들을 고려하여 적절한 혼화재 종류 및 치환율을 선정하여야 할 것이다.

또한, 염화물 확산계수는 물-결합재비가 커질수록 혼화재 치환율 증가에 따른 염화물 확산계수의 감소효과 및 재령경과에 따른 확산계수의 저감폭도 커지고 있어서, 물-결합재비가 커질수록 염화물 침투저항성에 미치는 혼화재의 효과가 큰 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

- 1) 염화물 침투저항성을 나타내는 정성적 지표인 염화물 침투깊이는, FA의 경우에는 Plain과 유사하였으나, BS, SF, MK의 경우에는 현저히 감소하였고, 특히 각 혼화재 치환율이 증가할수록 감소하였다.
- 2) 염화물 확산계수는 재령에 따라 감소하며, FA의 경우는 Plain보다 약간 감소되는 경향이거나, BS, SF, MK의 경우는 각 혼화재 치환율이 증가할수록 Plain보다 현저히 저감되고 있어서 염화물 침투저항성이 우수해지는 것을 알 수 있었다.
- 3) 상대 염화물 확산계수 감소비로 비교한 결과, 염화물 침투저항성은 BS≈SF>MK>FA의 순으로 우수하고, 혼화재 치환율이 증가할수록 감소효과는 우수하였으나, 실제 사용에 있어서는 압축강도, 시공성 및 경제성 등을 고려하여 적절한 혼화재 종류 및 치환율을 선정하여야 할 것이다.

#### 참고문헌

1. 김도겸 : 콘크리트 중의 염화물 확산속도에 따른 철근부식 예측에 관한 연구, 충남대학교 대학원 토목공학 석사학위 논문, 2000. 2.
2. 지남용, 김현수 : 고로슬래그미분말 치환 콘크리트의 염화물 침투특성에 관한 연구, 한국콘크리트학회 봄 학술발표대회 논문집, pp.997~1002, 2001.
3. KS F 2714, 「모르타르 및 콘크리트의 산-가용성 염화물 시험 방법」, 한국표준협회, 2002.
4. KS F 2713, 「콘크리트 및 콘크리트 재료의 염화물 분석 시험 방법」, 한국표준협회, 2002.

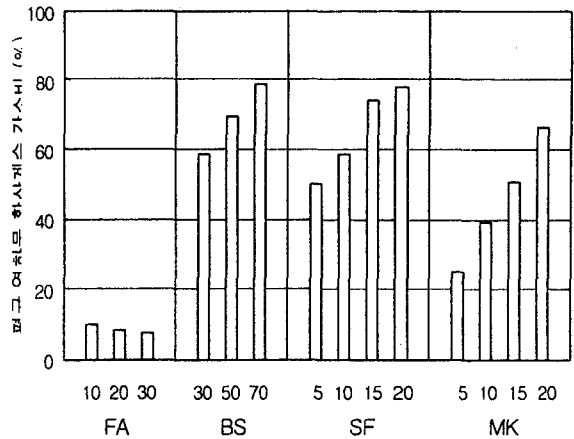


그림 3. Plain에 대한 평균 염화물 확산계수 감소비(W/B 45%)