

혼화재 종류 및 치환율이 염수에 침지한 콘크리트의 내염성능 향상에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Effect of the Kinds and Replacement Ratios of Mineral Admixtures on the Development of Chloride Invasion Resistance Property of Concrete Immersed in Salt Water

○ 유재강* 김동석** 박상준** 원철***
Yoo, Jae-Kang Kim, Dong-Seuk Park, Sang-Joon Won, Chul

ABSTRACT

This paper investigate that the effect of the concrete containing mineral admixtures(pozzolanic materials such as fly-ash, ground granulated blast-furnace slag, silica fume and meta kaolin) on the resistance properties to chloride ion invasion The purposed testing procedure was applied to the concrete added mineral admixtures for 3~4 replacement ratios under W/B ratios ranged from 0.40 to 0.55.

Specimens were immersed in 3.6% NaCl solution for 330 days, and penetration depth, water soluble chloride contents and acid soluble chloride contents were measured in 28, 91, 182 and 330 days. Then, diffusion coefficient were calculated using total chloride contents.

As a results, the kinds of mineral admixture and replacement ratios had a great effect on the resistance property of the concrete to chloride ion invasion compared with the plain concrete. And the optimal replacement ratios of mineral admixture had a limitation for each admixtures.

The amount of acid soluble chloride ions and water soluble chloride ions were varied with the kinds of mineral admixtures and the penetration depth from the concrete skin.

Chloride diffusion coefficient of each concretes decreased with the time elapsed, and the diffusion coefficients of the concrete immersed salt water for 330 days had a establishment with the compressive strength measured before immersing.

키워드 : 혼화재료, 치환율, 염화물 확산계수, 침지시험

Keywords : mineral admixture, replacement ratio, chloride diffusion coefficient, immersion test

1. 서론

해양환경에 노출된 철근콘크리트 구조물의 내구성에 가장 큰 영향을 미치는 인자로는 염해를 들 수 있으며, 다른 성능저하 인자에 비하여 염화물의 침투에 의한 철근 부식이 가장 직접적인 성능저하 요인으로 작용하기 때문이다. 따라서, 해양환경에 건설되는 콘크리트 구조물에 있어서 염해에 대한 내구성을 확보하기 위해서는 가능한 한 콘크리트 구조물의 내부로 유입되는 염화물의 양을 적게 하는 것이 가장 효과적인 방안이다. 이에 대하여 콘크리트 표준시방서¹⁾ 및 ACI2) 기준에서는 염해환경에 놓인 철근콘크리트 구조물의 내구성 확보 방안으로 물-결합재비 및 단위시멘트량과 같은 배합조건의 한계를 두고 있으며, 혼화재료의 적정 사용에 의한 포졸란 반응으로 보다 밀실한 콘크리트를 시공하도록 하고 있다.

이에 본 연구에서는 현재 콘크리트에 적용 가능한 4종의

혼화재를 사용하여 제작한 콘크리트를 대상으로 인공염수에 침지시킨 후, 염수침지재령에 따른 염화물 침투성상을 평가함으로써 혼화재 종류 및 치환율이 콘크리트의 내염성능 향상에 미치는 영향을 검토하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1에 나타난 바와 같다. 물-결합재비는 ACI 318 기준 및 콘크리트 표준시방서에서 내구성 확보를 위하여 제안하고 있는 최대 물-결합재비 50%를 기준으로 ACI 318의 철근부식 방지를 위해 제안하고 있는 40%까지 물-결합재비를 5%씩 저감시킨 3수준과 비교적 열악한 조건을 가정한 물-결합재비 55%의 총 4수준으로 하였다. 또한, 각 물-결합재비 조건에서 플라이애쉬(FA), 고로슬래그 미분말(BS)을 각각 3수준, 실리카 폼(SF) 및 메타카올린(MK)을 각각 4수준으로 치환한 배합과 무치환 4수준을 포함하여 총 60배합

* (주)대우건설 기술연구소, 연구원

** (주)대우건설 기술연구소, 전임연구원

*** (주)대우건설 기술연구소, 선임연구원

표 1. 실험계획

W/B (%)	기호	혼화제 종류	치환율 (%)	측정항목	측정재령 (일)
40	Plain	-	-	· 압축강도 · 염화물 침투깊이 · 산 가용성 염화물량 · 수용성 염화물량 · 염화물 확산계수	· 28
	FA	플라이애쉬	10, 20, 30		
45	BS	고로슬래그 미분말	30, 50, 70		· 91
50	SF	실리카폼	5, 10, 15, 20		· 182
55	MK	메타카올린	5, 10, 15, 20		· 330

표 2. 콘크리트 배합 (Plain)

굵은골재 최대치수 (mm)	목표 슬럼프 (mm)	목표 공기량 (%)	W/C (%)	S/a (%)	물	단위 용적 (ℓ/m ³)			단위 중량 (kg/m ³)		
						시멘트	잔골재	굵은골재	시멘트	잔골재	굵은골재
250	180±25	4.5±1.5	40	45.6	158	125	304	363	395	790	954
			45	46.7	158	111	318	363	351	826	954
			50	47.7	158	100	330	362	316	858	951
			55	47.8	164	95	330	361	298	859	949

을 대상으로 하였다.

한편, 실 구조물의 경우 거푸집 탈형시기에 따른 염분환경 노출시기의 영향을 검토하기 위하여 수중양생 기간을 7일 및 28일의 2수준으로 하였다.

염수침지재령 28, 91, 182 및 330일에 염화물 침투깊이, 수용성 및 산 가용성 염화물량을 측정하였으며, 그 결과를 바탕으로 염화물 확산계수를 산출하였다.

표 2는 혼화제를 사용하지 않은 기준배합(Plain)을 나타낸 것이며, 혼화제 치환배합은 각각의 혼화제를 시멘트 중량에 대하여 치환하였다. 또한, 콘크리트 비빔시 목표슬럼프 180±25mm, 목표공기량 4.5±1.5%를 만족시키기 위하여 소량의 고성능 감수제를 첨가하였다.

2.2 사용재료

표 3. 사용재료의 물리적 성질

시멘트	종류 : 보통포틀랜드시멘트 (1종) 비중 : 3.15, 분말도 : 3,200cm ² /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 (20℃) pH : 7.0±1.0 (20℃)

실험에 사용한 재료의 물리적 성질은 표 3에 나타난 바와 같다. 혼화제는 보령산 F급 플라이애쉬와 광양산 고로슬래그

미분말, 캐나다산 실리카폼 및 분말도 10,000cm²/g의 A사 메타카올린을 사용하였으며, 각각의 물리적 성질 및 화학성분별 구성비율은 표 4에 나타난 바와 같다. 혼화제 종류별로 주요 구성성분을 보면 고로슬래그 미분말은 SiO₂와 CaO, Al₂O₃를 주성분으로 하고 있으며, 실리카폼은 SiO₂, 플라이애쉬 및 메타카올린은 구성비의 차이는 다소 있지만 SiO₂와 Al₂O₃가 주성분인 것을 알 수 있다.

2.3 실험방법

시험체는 10×10×40cm의 각주형 시험체로 제작하였으며, 염분환경에 노출되는 시기에 따른 영향을 고려하여 그림 1과 같이 7, 28일간 수중양생을 실시한 시험체를 대상으로 염수 침지 시험을 실시하였다. 양생이 종료된 시험체는 타설면에 직각인 2면을 제외한 나머지 면에 대하여 염화물의 침투를 방지하기 위하여 에폭시코팅을 실시하였다. 3.6% NaCl 수용액에 시험체를 침지시킨 후, 침지재령 28, 91, 182 및 330일에 시험체를 커팅하여 0.1N AgNO₃에 의해 변색되는 깊이를 측정하였으며, 염화물량 측정용 분말시료는 시험체의 표면으로부터 5mm 간격으로 변색깊이 이상까지 콘크리트 커터를 사용하여 채취하였다. 산 가용성 및 수용성 염화물량은 각각 KS^{3,4)}에 준하여 전처리 한 후, 사진 1에 나타난 Cl⁻ 이온 선택성전극과 전위차적정장치를 사용하여 측정하였고, 측정결과 는 KS⁵⁾에서 제시한 식 1에 의해 시료중량에 대한 %로 환산 하였다.

표 4. 혼화재료의 물리적 성질 및 화학성분별 구성비율

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

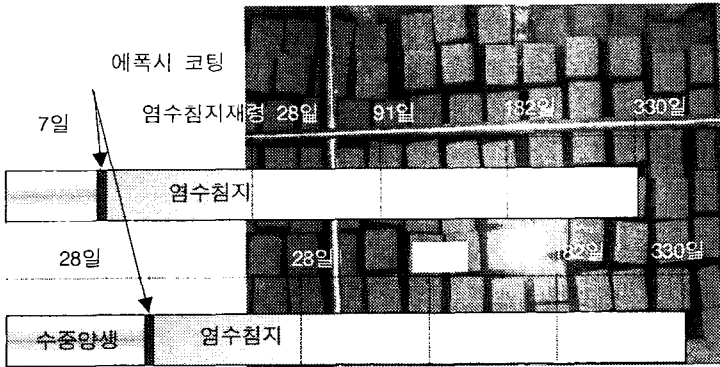


그림 1. 염수침지 시험의 플로우

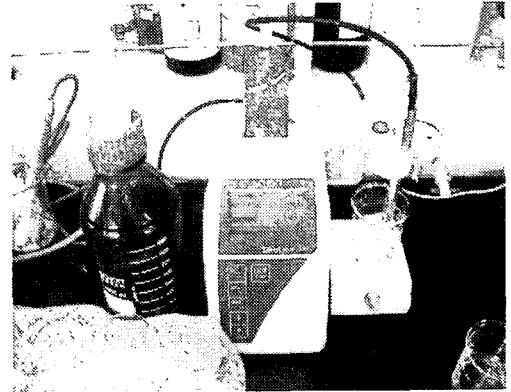


사진 1. 전위차 적정장치

$$Cl^{-}, \% = -\frac{3.545[(V_1 - V_2)N]}{W} \dots\dots \text{식 1}$$

여기서 V_1 : 시료의 적정에 사용된 0.05N 질산은 용액의 부피
 V_2 : 바탕적정에 사용된 0.05N 질산은 용액의 부피
 N : 질산은의 정확한 노르말 농도 (N)
 W : 시료의 질량 (g)

확산계수(Diffusion coefficient)는 측정된 염화물량을 바탕으로 Fick의 제 2법칙의 일반해인 식 2를 사용하여 산출하였다.

$$Cl_{(x,t)} = C_0 [1 - \text{erf}(\frac{x}{2\sqrt{Dt}})] \dots\dots \text{식 2}$$

여기서 $Cl_{(x,t)}$: 시간 t에서 깊이 x의 염화물 농도
 C_0 : 표면 염화물 농도
 D : 확산계수(Diffusion coefficient) (cm²/sec)
 erf : 에리함수

특히, 표면 염화물 농도는 깊이에 따른 염화물 측정결과를 바탕으로 비선형 회귀분석 함으로서 추정하는 방법이 많이 사용되고 있으나, 이 방법은 깊이별 염화물량 분포상황에 크게 영향을 받기 때문에 본 연구에서는 기존의 논문⁽⁶⁾에서도

사용되고 있는 0~5mm에서 채취한 시료의 염화물량을 표면 염화물량으로 간주하여 확산계수를 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 염화물 침투깊이

그림 2는 물-결합재비 45%에서 염수 침지전 수중양생 기간 및 혼화재 종류별 재령에 따른 염화물 침투성상을 나타낸 결과이며, 혼화재 종류별 치환율은 기존의 연구결과⁽⁷⁾를 바탕으로 적정의 치환율 조건으로 평가되는 수준으로 하였다.

각각의 콘크리트의 재령에 따른 염화물 침투성상은 시간의 제공근의 형태로 진행하며, 재령이 경과와 함께 서서히 둔화되는 경향을 보이고 있다. 또한, 재령에 따른 염화물 침투깊이 측정결과를 바탕으로 시간에 대하여 제공근의 함수로 비선형 회귀분석한 결과도 실측결과와 더불어 표기해 놓았으며, 그 결과는 표 5에 정리해 놓았다.

수중양생 기간에 따른 염화물 침투성상은 초기재령(28일이전)에서 7일간 수중양생을 실시한 시험체의 경우 28일간 수중양생을 실시한 시험체에 비하여 염화물 침투가 급속히 진행되는 경향을 갖는 것을 알 수 있었으며, 조직이 아직 치밀하지 않은 초기재령에서 염분환경에 노출될 경우 염화물의 침투속도가 빠르기 때문에 내염성능을 확보하기 위해서는 적절한 보양기간을 갖아야 할 것으로 판단된다.

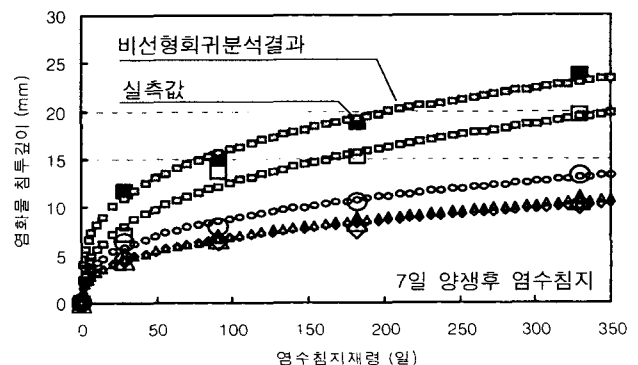
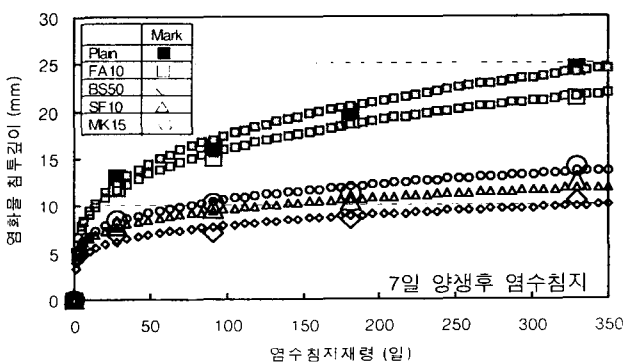


그림 2. 재령에 따른 염화물 침투깊이 측정결과 (W/B 45%)

3.2 깊이별 염화물량

그림 3은 물-결합재비 45%에서 혼화재 종류별로 일정한 치환율 조건으로 제작한 시험체를 28일간 수증양생 실시한 후, 염수에 330일간 침지한 시험체의 깊이별 염화물량 측정 결과를 나타낸 것이다.

표 5. 재령에 따른 염화물 침투깊이 및 침투속도 계수

7일 수증양생 시험체의 염화물 침투깊이					$X = \textcircled{R} \times t$	
종류	28일	91일	182일	330일	\textcircled{R}	-
Plain	13.09	16.21	20.02	24.55	5.05	0.27
FA10	11.75	15.03	18.95	21.25	5.06	0.25
BS50	6.87	7.02	8.58	10.52	3.30	0.19
SF10	7.98	9.72	10.47	12.37	4.41	0.17
MK15	8.58	10.19	11.19	13.92	4.25	0.20

28일 수증양생 시험체의 염화물 침투깊이					$X = \textcircled{R} \times t$	
종류	28일	91일	182일	330일	\textcircled{R}	-
Plain	11.70	15.03	18.83	23.65	4.03	0.30
FA10	7.16	13.71	15.28	19.58	2.39	0.36
BS50	4.78	6.43	7.65	10.34	1.50	0.33
SF10	4.47	6.74	8.56	10.56	1.40	0.35
MK15	6.28	7.92	10.45	13.26	1.92	0.33

표면으로부터 깊이별 염화물량 측정결과, 표층부위인 0~5mm에서 전염화물에 대한 고정염화물의 비율은 21~43% 정도로 나타났으며, 10mm 이상의 깊이에서는 41~56% 정도로 전염화물의 절반정도를 차지하는 것으로 나타났다. 또한, 표층부위의 수용성염화물이 고정염화물보다 많이 나타나는 현상은 물-결합재비, 혼화재 종류 및 치환율, 염수침지 재령 등에 관계없이 대부분 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

특히, MK의 경우 Plain 및 다른 혼화재 치환 콘크리트에 비하여 전염화물에 대한 고정염화물의 비율이 높게 나타나고 있는데, 이는 기존의 보고⁸⁾와 같이 메타카올린의 염화물 고정화능력에 기인한 것으로 사료된다.

한편, BS50의 경우, 0~5mm의 전염화물은 0.651%로 plain의 0.425%에 비하여 1.5배정도 높게 나타나고 있으며 전염화물에 대한 수용성염화물의 비율도 큰 경향을 보이고 있으나, 5~10mm에서 전염화물은 급격하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 기존의 연구⁹⁾에서 보고된 바와 같이 고로슬래그 미분말의 염화물 흡착특성에 의해 표층부의 수용성염화물량이 크게 증가되었으며, 표층부에 흡착된 염화물로 인해 염화물의 침투경로를 차단하여 침투저항성이 향상된 것으로 사료된다.

3.3 염화물 확산계수

그림 4는 91, 182 및 330일간 3.6% NaCl 수용액에 침지한 시험체의 깊이별 전염화물 측정결과를 바탕으로 산출한 확산계수를 나타낸 것이다.

FA 치환배합의 경우, 침지재령 91일에서 FA10은 Plain보다 다소 낮은 확산계수를 보이고 있으나, FA20 및 FA30의 경우 다소 높게 나타나고 있는데, 이는 시멘트 중량에 대하여 플라이애쉬를 치환하였기 때문에 단위시멘트량의 차이에 기인한 수화조직의 치밀도 차이에 의한 것으로 사료된다. 한편, 이후 재령에서의 확산계수는 모든 치환율 수준에서 Plain보다 낮게 나타나 염화물 침투저항성이 재령의 증가와 더불어 개선되는 특성을 갖는 것을 알 수 있었으며, 침지재령 330일에 측정된 확산계수는 플라이애쉬 치환율에 관계없이 거의 유사한 수준을 보였다.

BS 치환배합의 경우, 동일 재령에서 측정된 Plain의 확산계수에 비하여 50% 이내의 수준을 보이고 있으며, 치환율에 따라 보면 BS30은 31~46%, BS50은 21~29%, BS70은 18~25%로 치환율이 증가됨에 따라 확산계수의 저감효과는 커지는 것으로 나타났다.

SF 치환배합도 치환율 증가에 따라 확산계수는 순차적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며, Plain에 비하여 실리카폼을 5% 치환할 경우 확산계수를 60% 이상 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다.

MK 치환배합의 경우, 치환율 15%까지는 치환율 증가에 따라 순차적인 확산계수 저감경향을 보이고 있으나, 20%의

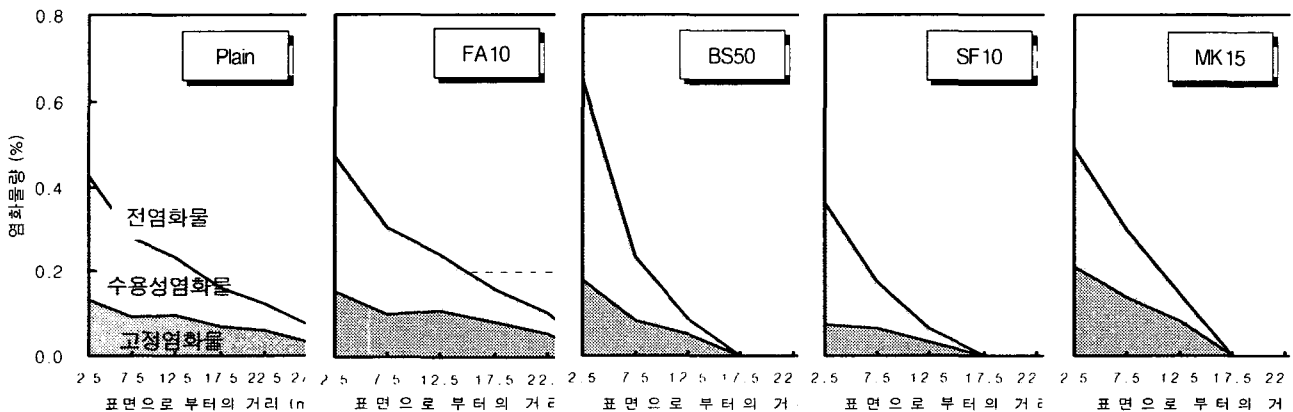


그림 3. 표면으로부터의 깊이별 염화물량 측정결과 (W/B 45%. 28일 수증양생 후 330일간 염수에 침지시킨 시험체)

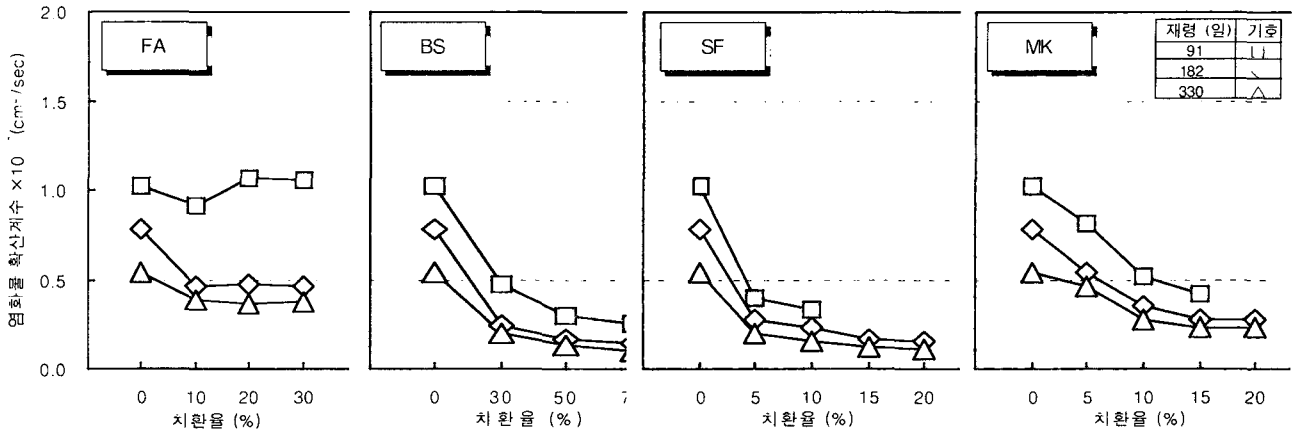


그림 4. 혼화재 종류별 치환율에 따른 염화물 확산계수 (W/B 45%, 28일 수중양생)

경우 15%와 유사한 수준을 보여 15%이상의 치환율 수준에서는 치환율 증가가 내염성능 향상에 미치는 효과는 비교적 작은 것으로 사료된다.

시험체가 96%의 수준을 갖는 것으로 나타나고 있으며, 결정계수 0.959의 높은 상관관계를 보이고 있다.

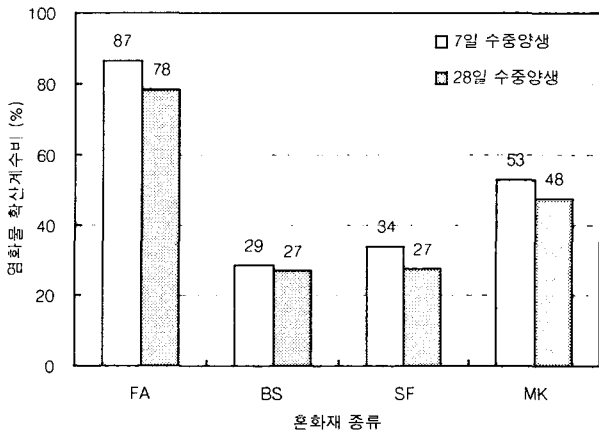


그림 5. 혼화재 종류별 Plain에 대한 염화물 확산계수비

그림 5는 물-결합재비, 혼화재 치환율 및 측정재령을 고려하지 않은 평균 염화물 확산계수를 Plain의 평균 확산계수에 대한 비율로 나타낸 것이다. 혼화재 종류별로는 FA의 경우 Plain의 78~87% 수준을 보이고 있어 확산계수의 저감효과가 가장 낮은 것으로 나타났으며, MK의 경우 50% 수준을 보이고 있다. 특히, BS 및 SF의 경우 Plain에 비하여 30% 수준을 보이고 있어 70% 정도의 염화물 확산계수 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 한편, 수중양생 재령에 따른 염화물 확산계수비는 혼화재 종류에 관계없이 수중양생 재령이 길수록 염화물 확산계수비도 저감되는 경향을 보이고 있으며, 저감 효과는 FA가 9%로 가장 크게 나타났고 BS가 2%로 가장 적게 나타났다.

그림 6은 7일 및 28일간 수중양생을 실시한 시험체의 염수 침지 330일의 염화물 확산계수 측정결과를 상관관계의 형태로 나타낸 것이다.

혼화재 종류별로 나타나는 확산계수의 범위에는 다소 차이를 보이고 있으나, 수중양생 재령의 차이에 따른 확산계수는 7일 수중양생한 시험체에 비하여 28일간 수중양생을 실시한

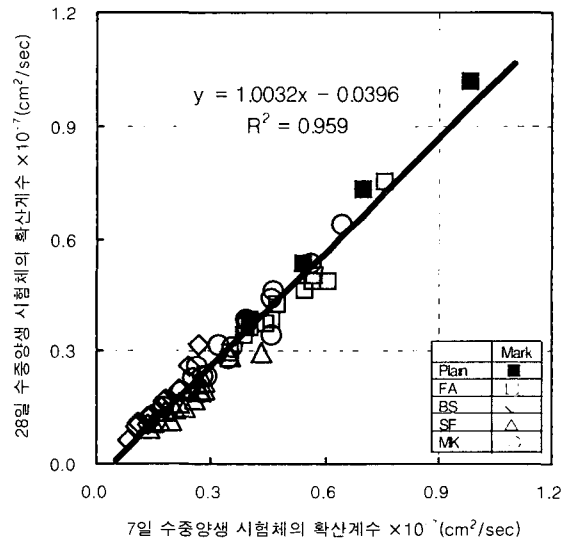


그림 6. 수중양생 일수별 염수침지 330일에서의 염화물 확산계수의 상관관계

3.4 압축강도와 확산계수의 관계

그림 7은 28일간 수중양생을 실시한 시험체의 압축강도 측정결과와 28일 수중양생 후 염수침지시킨 시험체의 침지재령 330일의 염화물 확산계수 측정결과와의 상관관계를 나타낸 것으로서, 염수침지 전 압축강도가 증가할수록 염화물 확산계수는 지수함수의 형태로 감소하는 경향을 보이고 있다.

특히, BS의 경우 동일 압축강도 영역에서의 다른 콘크리트에 비하여 염화물 확산계수는 현저하게 낮게 나타나고 있다. 이는 고로슬래그 미분말을 다량 치환한 콘크리트의 경우 28일 강도는 Plain에 비하여 낮지만, 330일에 걸친 염화물의 침투저항성능은 3.3절에서 나타난 바와 같이 현저하게 개선되기 때문에 조직의 치밀성을 대표하는 압축강도와는 다소 큰 편차를 보이고 있다. 이러한 현상은 기존의 보고^{11), 12)}에서와 같이 고로슬래그 미분말의 염화물 이온 고정화 능력과 더불어

어 높은 혼화재 치환율 등의 영향에 기인한 것으로 사료된다.

한편, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트를 제외한 다른 혼화재 사용 콘크리트의 압축강도와 염화물 확산계수의 상관관계는 결정계수 0.7698로 나타나 일련의 상관성을 갖는 것을 알 수 있었다.

기존에는 내구성 설계를 함에 있어 물-결합재비, 단위시멘트량 또는 압축강도의 적정수준에 기초하여 내구성을 확보하고자 하는 노력이 진행되어 왔으나, 본 연구 결과에 기초해서 보면 혼화재를 사용한 콘크리트의 경우 압축강도 이외에 혼화재 종류 및 치환율 등에 의해서 염화물 확산특성은 크게 영향을 받기 때문에 향후에는 성능저하 인자의 침투-확산속도를 나타내는 확산계수의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

플라이애쉬, 고로슬래그 미분말, 실리카폼 및 메타카올린을 각각 3, 4수준으로 치환하여 제작한 시험체를 염수침지시험에 의해 내염성능을 평가한 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 염수침지 재령에 따른 염화물 침투깊이는 시간의 제곱근 형태로 초기에는 빠르게 침투하나 시간이 경과할수록 서서히 느리게 침투하는 경향을 보였으며, 염수침지 전의 수중양생 기간이 길수록 침투속도는 느려지는 것으로 나타났다.
- 2) 콘크리트 표층부는 수용성 염화물이 전염화물보다 많이 분포하고 있으나, 콘크리트 내부는 유사한 비율로 존재하는 것을 알 수 있었다. 특히, 고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트는 표면부의 수용성 염화물량이 높게 측정되었으며, 메타카올린을 치환한 콘크리트는 고정염화물량이 높게 나타나 기존의 연구 결과와 동일한 결과를 보였다.
- 3) 혼화재 사용 콘크리트의 염화물 확산계수는 플라이애쉬의 경우 치환율에 따라 초기재령에서는 Plain보다 높게 나타나 내염성능의 확보를 위해서는 적절한 보양 방법 및 기간에 주의가 필요할 것으로 사료된다.
- 4) 본 연구 범위에서 물-결합재비, 혼화재 치환율을 고려하지 않고 각각의 혼화재 종류별 Plain에 대한 염화물 확산계수 비를 평가한 결과 FA의 경우 78~87%, BS는 27~29%, SF는 27~4% 그리고 MK는 48~53%로 나타나, 해양환경에 노출된 콘크리트의 염화물 확산계수 저감을 위해서는 혼화재를 적절한 치환율로 적용할 필요가 있을 것으로 판단된다.
- 5) 혼화재를 사용한 콘크리트의 경우 압축강도 이외에 혼화재 종류 및 치환율 등에 의해서 염화물 확산특성은 크게 영향을 받기 때문에 향후에는 성능저하 인자의 침투-확산속도를 나타내는 확산계수의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

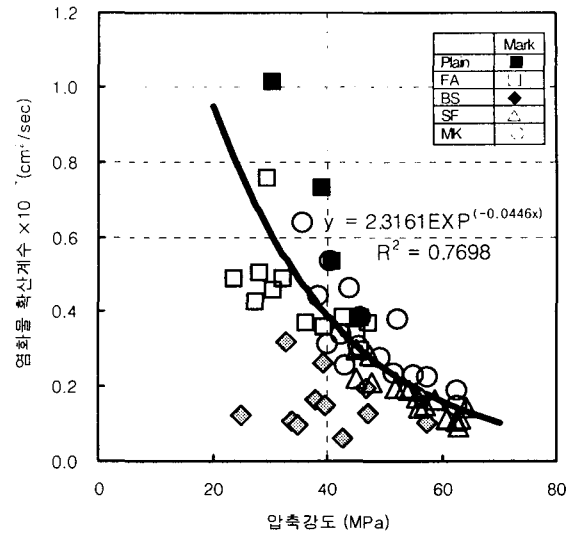


그림 7. 수중양생 28일의 압축강도와 염수침지 330일에서의 염화물 확산계수의 상관관계

참 고 문 헌

1. 한국콘크리트학회, 「콘크리트 표준시방서, 15장 해양콘크리트」, 건설교통부, pp.187~192, 1999.
2. ACI Building Code 318, 「Requirements for Structural Concrete and Commentary, Part 3 - Construction Requirements, Durability Requirements」, American Concrete Institute, pp.35~37, 1995.
3. KS F 2714, 모르타르 및 콘크리트의 산-가용성 염화물 시험방법, 한국표준협회, 2002
4. KS F 2715, 모르타르 및 콘크리트의 수용성 염화물 시험방법, 한국표준협회, 2002
5. KS F 2713, 콘크리트 및 콘크리트 재료의 염화물 분석시험방법, 한국표준협회, 2002
6. Arvind K. Suryavanshi, Estimation of Diffusion Coefficient for Chloride Ion Penetration into Structural Concrete, ACI Materials Journal, Sep-Oct., 2002, pp.441~449
7. 이상수 외, 혼화재 종류 및 치환율이 콘크리트의 내염성능 향상에 미치는 영향에 관한 연구, 한국콘크리트학회 논문집, 제 16권, 3호, 2004. 6. pp.319~326
8. Coleman N.S., Page C.L., Aspects of the Pore Solution Chemistry of Hydrated Cement Pastes Containing Metakaolin, Cement Concrete Research, 27(1), 1997, pp.147~154
9. 竹上浩史, 「任意の配合条件を有するセメント硬化体中の塩化物移動-平衡則の一般化」, 東京大学大学院, 2002
10. 日本建築学会, 「高カスラグ微粉末を使用するコンクリートの調査設計-施工指針(案)-同解説-塩分遮へい性」, 日本建築学会, 1996. pp.979~984.
11. Ping Gu, J.K. Beaudoin, Min-Hong Zhang, and V.M. Malhotra, "Performance of Reinforcing Steel in Concrete Containing Silica Fume and Blast -Furnace Slag Ponded with Sodium Chloride Solution." ACI Materials Journal, Vol. 97, No. 3, May-June, 2000, pp.254~262.
12. Kumer, A. and Roy, D. M., "Pore Structure and Ion Diffusion in Admixture Blended Portland Cement Systems," 8th International Conference on the Chemistry of Cement, V VI, 1989, pp.73~79.