

혼화재 종류 및 치환율이 콘크리트의 내염성능 향상에 미치는 영향에 관한 연구

김영진¹⁾ · 이상수²⁾ · 김동석¹⁾ · 유재강^{1)*}

¹⁾ (주)대우건설 기술연구소 ²⁾ 한밭대학교 건축공학과

(2003년 10월 10일 원고접수, 2004년 4월 15일 심사완료)

Effect of the Kinds and Replacement Ratios of Mineral Admixtures on the Development of Concrete Resistance against the Penetration of Chloride Ions

Young-Jin Kim¹⁾, Sang-Soo Lee²⁾, Dong-Seuk Kim¹⁾, and Jae-Kang Yoo^{1)*}

¹⁾ Institute of Construction Technology, Daewoo E & C Co., Ltd. Suwon, 440-800, Korea

²⁾ Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 305-719, Korea

(Received October 10, 2003, Accepted April 15, 2004)

ABSTRACT

This paper investigates 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 replaced mineral admixtures for 3~4 replacement ratios under water-binder ratios ranged from 0.40 to 0.55. For the electro-migration test, Tang and Nilsson's method was used to estimate the diffusion coefficient of chloride ion.

As a results, the water-binder ratios, kinds of mineral admixtures and replacement ratios, water curing periods had a great effect on the diffusion coefficient of chloride ion, and the optimal replacement ratios had a limitation for each mineral admixtures. Also, the use of mineral admixtures by mass (replacement of OPC) enhance the resistance ability against chloride penetration compared with the plain concrete.

The compressive strength was shown related to the diffusion coefficient of chloride ion, the compressive strength increases with the diffusion coefficient of chloride ion decreasing. Below the 50 MPa, the variation of diffusion coefficient of concrete replaced mineral admixtures was bigger than that of plain concrete.

Keywords : electro-migration test, diffusion coefficient of chloride ion, mineral admixture, compressive strength

1. 서 론

해양환경 하에 노출된 철근콘크리트 구조물은 외부로부터 침입한 염화물이 콘크리트 내부로 이동, 확산하여 콘크리트 내부에 쌓이게 되며, 시간이 경과함에 따라 철근의 부식을 유발시킬 수 있는 염화물량이 축적되면 철근부식에 의해 성능이 저하된다. 이와 같은 염해에 대하여 철근콘크리트 구조물의 내구성능을 확보하기 위하여 각국에서는 철근의 피복이 되는 콘크리트의 품질수준과 피복두께 등에 관한 규정을 제시하고 있다. ACI 318¹⁾의 경우 환경 조건을 고려하여 물-시멘트비 및 설계기준강도의 한계를 제시하고 있으며, 콘크리트 표준시방서²⁾에서도 물-시멘트비와 단위시멘트량의 한계를 제시하는 등 콘크리트의 조

질을 밀실하게 함으로서 외부로부터 유입되는 염분의 침투량이나 침투속도를 저하시키거나 지연시킴으로서 내구수명을 확보하는 방안이 제시되고 있다.

한편, 포졸란계 재료는 장기재령에서의 강도발현이 크고, 부재의 종류 및 크기에 따라 수화열에 의한 균열이 우려되는 경우에는 수화열을 저감시킬 수 있는 특성이 있어, 콘크리트 표준시방서에서는 해양 구조물에 고로슬래그미분말 및 플라이애쉬가 혼입된 혼합시멘트의 사용을 제안하고 있다. 혼합시멘트는 시멘트의 일정부분을 혼화재료로 치환한 것으로서, 콘크리트 내에 플라이애쉬, 고로슬래그미분말, 실리카 폼 등의 광물질 혼화재를 사용하면 시멘트 경화체 내부의 공극 크기를 감소시킴으로서 공극의 연속성을 저하시키고, 외부로부터의 성능저하 인자의 침투경로를 길게 함으로서 침투저항성능을 향상시킬 수 있다³⁾.

이와 같은 혼화재료를 사용한 콘크리트의 내염성능 평가에 관한 연구로서는 마이크로한 세공구조 분석을 비롯

* Corresponding author

Tel : 031-250-1219 Fax : 031-250-1131

E-mail : lord1337@dwconst.co.kr

Table 1 Experimental plan

W/B (%)	Mark	Kinds of mineral admixtures	Replacement ratios (%)	Measurements	Age (days)
40 45 50 55	Plain	-	-	· Compressive strength · Diffusion coefficient of chloride ion	· 7 · 28 · 56 · 91
	FA	Fly ash	10, 20, 30		
	BS	Ground granulated blast-furnace slag	30, 50, 70		
	SF	Silica fume	5, 10, 15, 20		
	MK	Meta kaolin	5, 10, 15, 20		

Table 2 Mix proportions of plain concrete

Max. of coarse (mm)	Slump (mm)	Air contents (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)			
					Water	Cement	Sand	Gravel
250	180±25	4.5±1.5	40	45.6	158	395	793	954
			45	46.7	158	351	829	954
			50	47.7	158	316	861	951
			55	47.8	164	298	863	949

하여 혼화제 치환율에 따른 내염성능 평가에 이르기까지 다양한 연구가 촉진시험 및 폭로시험 등을 통해 진행되어 왔다⁴⁻⁶⁾. 이러한 연구는 대부분 일부 혼화재료를 대상으로 하고 있어 기존의 결과들을 상호 비교하기에는 배합조건, 사용재료 및 실험평가 조건 등의 차이가 있다. 따라서, 혼화제 종류 및 치환율이 내염성능 향상에 미치는 효과를 비교·평가하기 위해서는 동일한 조건하에서 무치환 배합에 대한 혼화재료의 사용효과를 검토할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 혼화제 혼입 및 치환율이 콘크리트의 염화물 이온 침투저항성에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 물-결합재비(W/B), 혼화제의 종류 및 치환율을 실험변수로 하여 플라이애쉬, 고로슬래그미분말, 실리카 폼 및 메타카올린을 각각 사용한 콘크리트의 압축강도와 전기촉진시험에 의한 염화물 확산계수를 재령에 따라 평가하였다. 측정결과를 바탕으로 염화물 확산계수에 미치는 혼화제 종류 및 치환율, 물-결합재비의 영향을 검토한 후, 염화물 확산계수와 압축강도의 상호관계를 분석함으로써 내염성능 향상을 위해 사용되는 혼화제의 적정 사용량 결정을 위한 기초 자료로서 제시하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1에 나타난 바와 같다. 물-결합재비는 ACI 318규준 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 플

라이애쉬(FA), 고로슬래그미분말(BS)을 각각 3수준, 실리카 폼(SF) 및 메타카올린(MK)을 각각 4수준으로 치환한 배합과 무치환 4수준을 포함하여 총 60배합을 대상으로 하였다. 시험체는 $\phi 10 \times 20$ cm의 원주형 시험체를 제작하여 수중양생을 실시하였으며, 수중양생 재령 7, 28, 56 및 91 일에 압축강도를 측정하였고, 동일 재령에서 전기촉진 시험에 의한 염화물 확산시험을 실시하였다.

Table 2는 혼화제를 치환하지 않은 무치환 콘크리트의 배합을 나타낸 것으로서, 예비실험 결과를 바탕으로 물-시멘트비 40~50%의 배합은 단위수량을 158 kg/m³로 고정하였으며, 물-시멘트비 55%의 배합은 단위수량을 164 kg/m³로 하였다. 각각의 배합은 목표슬럼프 18±2.5 cm, 공기량 4.5±1.5%를 만족시키기 위하여 소량의 고성능 AE감수제를 첨가하였다. 혼화제 치환배합의 경우 각 물-결합재비별로 해당하는 시멘트량에 대하여 Table 1에 나타난 치환율별로 치환하여 제작하였다.

2.2 사용재료

실험에 사용한 재료의 물리적 성질은 Table 3에 나타난 바와 같다. 혼화제는 보령산 F급 플라이애쉬와 고로슬래그미분말, 실리카폼 및 분말도 10,000 cm²/g의 A사 메타

Table 3 Physical properties of materials used

Cement	Kind : ordinary portland cement (Type I) Specific gravity : 3.15, Brain : 3,200 cm ² /g
Sand	Kind : Washed sand, Specific gravity : 2.60 Fineness Modulus : 2.60
Gravel	Kind : crushed gravel, Specific gravity : 2.63 Maximum size : 25 mm Fineness modulus : 6.96
SP agent	Kind : naphthalene, pH : 7.0±1.0 (20°C) Specific gravity : 1.20±0.02 (20°C)

Table 4 Physical properties and chemical compositions of mineral admixtures

Kinds of mineral admixtures	Specific gravity	Brain (cm ³ /g)	Ig loss. (%)	Chemical proportion (%)					
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
Fly ash (FA)	2.15	3,158	3.57	56.4	23.7	9.0	2.5	1.3	1.1
Ground granulated blast-furnace slag (BS)	2.85	3,860	0.27	33.7	14.4	0.4	41.7	6.4	1.0
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	-

카울린을 사용하였으며, 각각의 물리적 성질 및 화학성분별 구성비율은 Table 4에 나타난 바와 같다. 혼화재 종류별로 주요 구성성분을 보면 고로슬래그미분말은 SiO₂와 CaO, Al₂O₃를 주성분으로 하고 있으며, 실리카폼은 SiO₂, 플라이애쉬 및 메타카울린은 구성비의 차이는 다소 있지만 SiO₂와 Al₂O₃가 주성분인 것을 알 수 있다.

2.3 측정항목 및 방법

압축강도는 ø10×20cm의 원주형 시험체를 대상으로 측정재령에서 만능재료시험기를 사용하여 측정하였다.

염소이온 확산시험체의 제작은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 측정재령까지 수중양생을 실시한 ø10×20cm 원주형 공시체의 일정부위를 커터기를 사용하여 50mm 두께로 절단한 후, 시험기간 동안 수분의 증발을 방지하기 위하여 랩을 사용하여 원주면을 보호하였다. 염소이온 확산시험은 Tang과 Nilsson이 제안한 전기촉진시험방법⁷⁾을 참조하여 0.3M의 NaOH 수용액을 양극으로, 3%의 NaCl 수용액을 음극으로 하여 30V의 전압을 가하였을 때 0.2Ω의 저항에 걸리는 전류와 확산셀 내부의 온도를 8시간 동안 측정하였다(Fig. 2). 염소이온의 침투깊이는 시험이 종료한 후 시험편을 할렬하여 0.1N AgNO₃를 분무하였을 때 변색되는 부위를 버니어캘리퍼스를 사용하여 측정하였다. 측정된 결과를 바탕으로 Eq. (1)을 이용하여 염화물 확산계수를 산출하였다.

$$D = \frac{RTL}{zFU} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

여기서, $\alpha = 2\sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \cdot \text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2c_d}{c_0}\right)$

- D : 염화물 확산계수 (cm²/sec)
- z : 이온의 원자가 (염소이온의 경우 $z=1$)
- F : 페러데이 상수 (96,481.04 J/Vmol)
- U : 양극과 음극 사이의 전압차 (V)
- R : 기체상수 (8.314 J/Kmol)
- T : 용액의 온도 (K)
- L : 시편의 두께 (m)
- x_d : 염소이온의 침투깊이 (m)
- t : 실험 지속시간
- erf : error function

c_d : 질산에 의해 변색된 부분의 염소이온 농도
 c_0 : 음극쪽 셀의 염소이온 농도

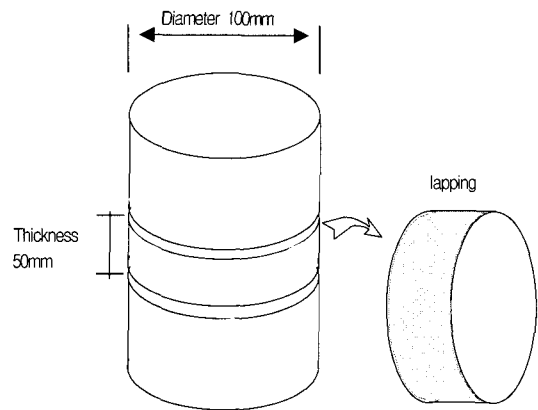


Fig. 1 Specimen for electro-migration test of chloride ion

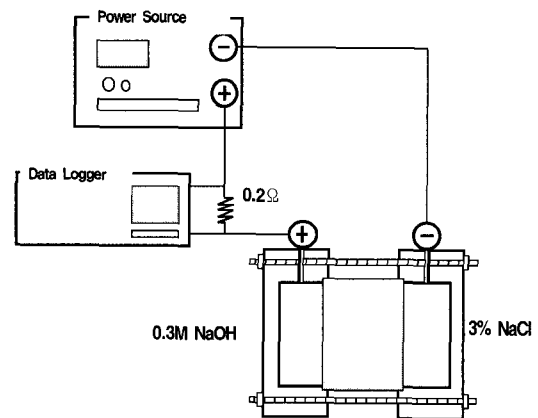


Fig. 2 Test setup for electro-migration test of chloride ion

3. 실험결과 및 고찰

3.1 염화물 확산계수

3.1.1 혼화재 종류 및 치환율에 따른 영향

Fig. 3 및 Table 5는 물-결합재비 45% 조건하에서 혼화재 종류 및 치환율별 재령에 따른 염화물 확산계수 측정 결과를 나타낸 것으로서, 비교적 초기재령에서는 다소의

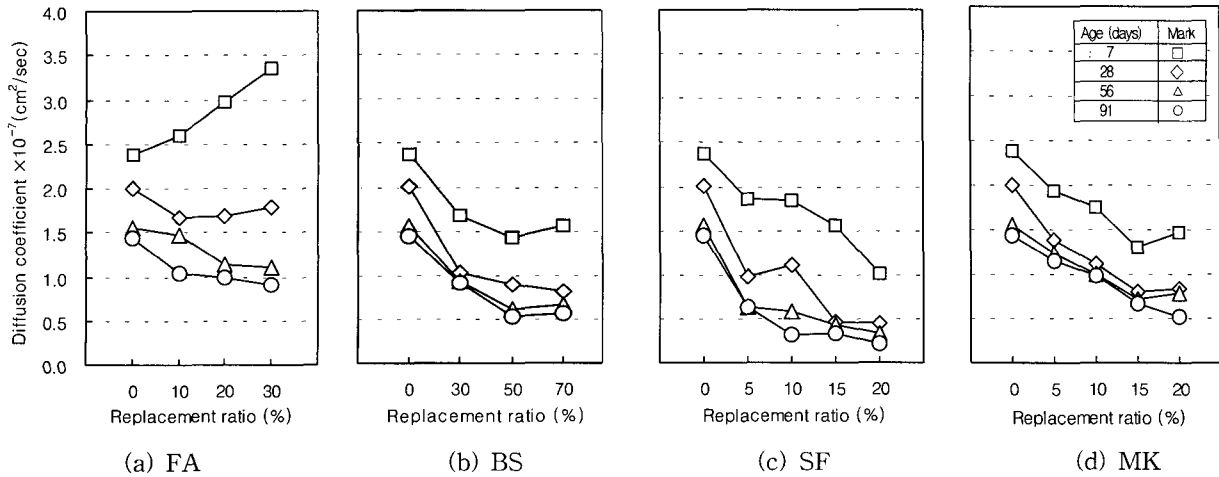


Fig. 3 Diffusion coefficient according to the kinds of admixture and replacement ratio with age (W/B 45%)

차이를 보이고 있으나, 후기재령에서는 혼화제 사용량이 증가할수록 염화물 확산계수도 감소하는 경향을 보이고 있다. FA 치환배합의 경우, 재령 7일에서의 염화물 확산계수는 무치환($2.38 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$)보다 모두 큰 값으로 나타났다. 치환율에 따라서 보면 FA10은 $2.59 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$, FA20은 $2.97 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$, FA30은 $3.35 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ 로 치환율의 증가에 따라 확산계수도 증가되는 경향을 보이고 있다. 그러나, 수중양생 28일 이후에는 모든 FA 치환배합이 무치환보다 낮은 염화물 확산계수를 보이고 있으며, FA10에 비하여 FA20 및 FA30의 염화물 확산계수가 다소 낮게 나타났다. 이러한 경향은 재령이 경과됨에 따라 포졸란반응에 의한 조직의 치밀성 증대로 인해 염화물 침투저항성이 향상되었기 때문으로 사료된다.

BS 치환배합의 경우, 모든 재령에서 무치환 배합에 비하여 낮은 염화물 확산계수를 보이고 있으며, 치환율에 따라서 보면 BS30에 비하여 치환율이 다소 높은 BS50 및 BS70의 염화물 확산계수가 다소 낮게 측정되었다. 특히, BS50의 경우는 BS70과 유사한 확산계수 수준을 보이고 있어 50% 이상의 치환율 수준에서는 고로슬래그미분말 치환율 증가에 따른 염화물 확산계수 저감효과는 크지 않은 것으로 나타났다. SF 치환배합도 치환율 증가에 따라 전반적으로 염화물 확산계수는 감소되는 경향을 보이고 있으며, SF5, SF10의 경우 재령의 경과에 따라 지속적인 감소경향을 보인 반면, SF15, SF20은 재령 28일까지 염화물 확산계수가 급격히 낮아졌으며, 이후 재령에서의 감소 경향은 작게 나타났다. 한편, SF20은 재령 7일에서 가장 낮은 염화물 확산계수를 보였으나 28일 이후 재령에서는 SF15 배합과 유사한 수준을 보이고 있으며, 재령 91일에서는 SF10, SF15와 유사한 $0.21 \sim 0.34 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ 의 염화물 확산계수를 갖는 것으로 나타났다.

MK 치환배합의 경우, MK15까지는 치환율 증가에 따라 염화물 확산계수도 감소되는 경향을 보이고 있으나,

Table 5 Chloride diffusion coefficient at W/B 45% ($\times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$)

Types	Replacement ratios	Age (days)			
		7	28	56	91
Plain	-	2.38	2.01	1.56	1.44
FA	10	2.59	1.67	1.48	1.05
	20	2.97	1.68	1.14	1.00
	30	3.35	1.78	1.11	0.91
BS	30	1.68	1.03	0.93	0.91
	50	1.42	0.89	0.61	0.52
SF	70	1.56	0.81	0.66	0.56
	5	1.86	0.98	0.63	0.63
	10	1.84	1.12	0.58	0.31
	15	1.56	0.46	0.43	0.34
MK	20	1.02	0.45	0.34	0.21
	5	1.93	1.38	1.24	1.15
	10	1.75	1.12	1.00	0.98
	15	1.30	0.79	0.72	0.66
	20	1.47	0.83	0.79	0.51

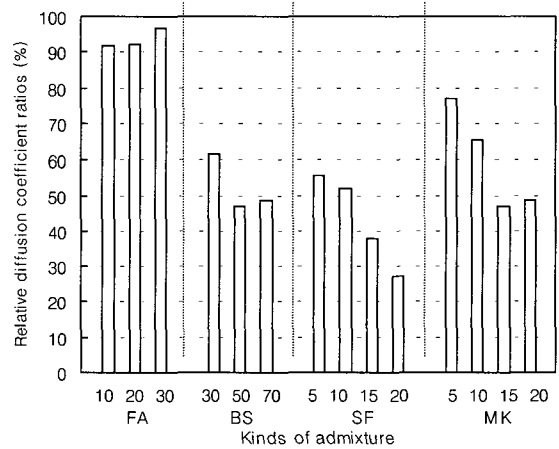


Fig. 4 Relative average chloride diffusion coefficient ratios with age in comparison with the plain (W/B 45%)

MK20의 경우 모든 재령에서 MK15와 유사한 수준을 보이고 있어 치환율 15% 이상의 영역에서는 치환율 증가에 따른 염화물 확산계수 저감효과는 작은 것으로 사료된다.

Fig. 4는 물-결합재비 45% 조건에서 혼화제 종류 및 치환율별 재령에 따른 염화물 확산계수의 평균값을 무치환에 비교한 상대 확산계수비를 나타낸 것이다.

무치환 배합의 재령에 따른 평균 염화물 확산계수 $1.85 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 에 대하여 FA의 경우 치환율에 따라 92~97%의 수준을 보여 10%이내의 감소효과를 보였으며, FA10과 FA20의 염화물 확산계수는 유사한 수준을 보였다. BS의 경우 무치환에 비하여 47~62%의 수준을 보이고 있으며, 치환율에 따라서는 BS50이 가장 우수한 결과를 보이고 있다. SF의 경우 치환율 증가에 따라 점진적으로 감소되는 경향을 보이고 있으며, 무치환에 비하여 27~56% 수준으로 나타났다. 또한, MK의 경우 MK15가 무치환에 비하여 47%수준을 보이고 있어 염화물 침투저항성이 가장 우수한 결과를 보였다.

한편, ACI 318에서는 제설제의 화학적 침식이 고려되는 구조물에 플라이애쉬와 같은 포졸란계 재료, 실리카 폼, 슬래그 또는 혼합시멘트를 사용할 경우 치환율의 한계치를 제안하고 있으며, 혼화재료별로 ASTM 규준에 적합한 재료를 사용할 경우 플라이애쉬 또는 포졸란계 재료는 25%, 슬래그 50%, 실리카 폼 10% 이내의 사용을 권장하고 있다. 따라서, 혼화제 종류별로 일정 치환율 조건에서의 비교·검토는 본 연구에서 비교적 양호한 성능을 보인 FA20, BS50, MK15와 ACI 규준에서 제시하고 있는 SF10을 선정하였다.

3.1.2 물-결합재비에 따른 영향

Fig. 5는 혼화제 종류별로 3.1.1에서 설정한 치환율 배합에 대하여 재령 7, 28, 56 및 91일에서의 물-결합재비별

염화물 확산계수를 나타낸 것이다. 각 배합별로 재령에 관계없이 물-결합재비가 증가함에 따라 염화물 확산계수도 증가하는 경향을 보이고 있으며, 수중양생 재령이 증가함에 따라 염화물 확산계수는 감소하는 경향을 보이고 있다. 본 연구 범위에서 혼화제 혼입 유·무 및 치환율을 고려하지 않고 물-결합재비별 염화물 확산계수를 보면, 재령 7일에서 물-결합재비 40% 시험체의 염화물 확산계수는 물-결합재비 55% 시험체의 염화물 확산계수에 비하여 약 50% 정도로 나타나, 수치적으로 2배 정도의 염화물 침투저항성이 있는 것으로 사료된다. 그러나, 수중양생 재령이 증가함에 따라 물-결합재비에 따른 염화물 확산계수의 차이는 감소하는 경향을 보이고 있다.

특히, 동일한 전기촉진 시험에 의해 평가된 염화물 확산계수임을 고려해 볼 때, BS50의 염화물 확산계수는 물-결합재비 55% 수준에서도 재령에 관계없이 물-시멘트비 40%의 무치환 배합의 염화물 확산계수와 유사하거나 낮은 수준을 보이고 있어, 염화물 침투저항성을 향상시키기 위해서는 물-결합재비를 저감시키는 방법과 더불어 사용효과가 우수한 혼화제를 적정 치환율로 사용함으로써 내염성능의 향상을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 6은 재령 28일 및 91일에서의 각 배합별 염화물 확산계수를 물-결합재비별로 나타낸 것으로서 혼화제를 사용한 콘크리트의 염화물 확산계수는 모두 무치환보다 낮게 나타났다. FA20의 경우 재령 28일에서는 무치환의 80~90% 수준을 보이고 있지만 재령이 경과하여 91일에서는 70%내외의 수준을 보이고 있어 재령과 더불어 염화물 확산계수의 저감효과를 보이고 있다.

각 혼화제 종류에 따른 염화물 침투저항성은 물-결합재비 수준 및 재령에 따라 다소 편차는 있지만, 재령 28일에서는 MK15>BS50>SF10>FA20>무치환의 순으로 나타났으며, 재령 91일에서는 SF10>MK15~BS50>FA20>무

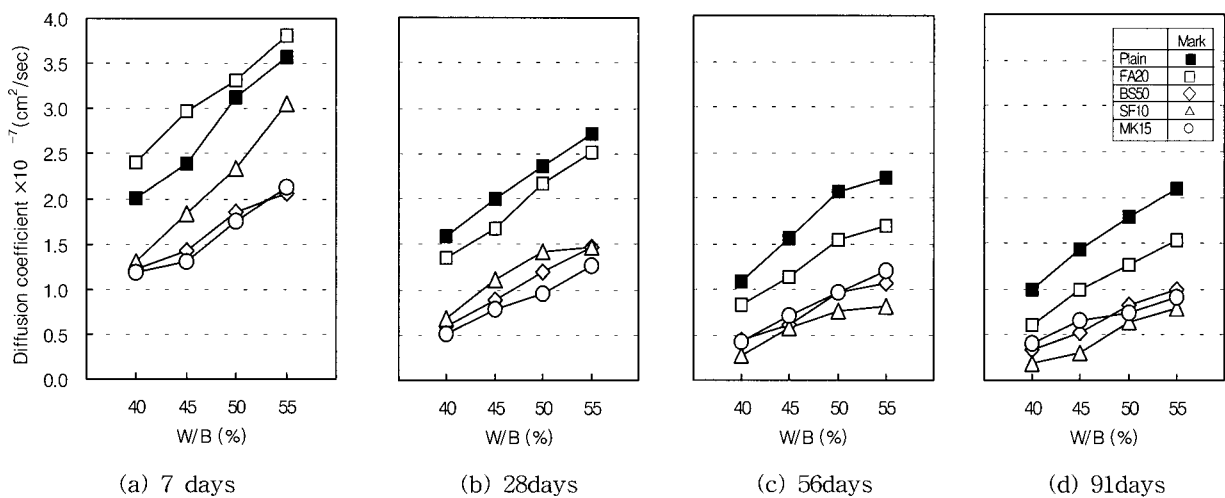
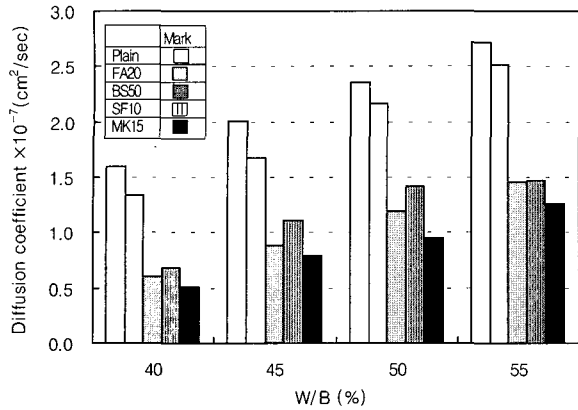
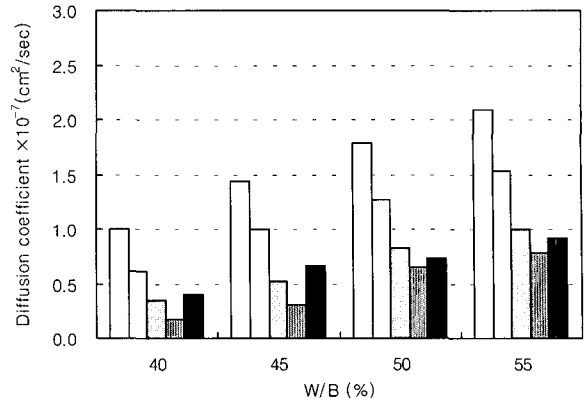


Fig. 5 Diffusion coefficient of concrete using each admixture with age



(a) 28 days



(b) 91 days

Fig. 6 Diffusion coefficient of each mixes according to the W/B ratios

치환의 순으로 염화물 침투저항능이 우수한 것으로 나타났다. 이러한 경향으로 보면, 염화물 확산계수는 시간의 경과에 따라 감소되는 시간의존적(Time dependent)⁶⁾인 특성을 갖으며, 재령경과에 따라 감소되는 정도, 시기 및 속도 등은 사용하는 혼화재 종류 등에 의해 큰 영향을 받는 것으로 사료된다.

3.2 압축강도

Fig. 7은 물-결합재비 45% 수준에서 FA20, BS50, SF10 및 MK15 배합의 재령에 따른 압축강도 발현성상을 나타낸 것이다. FA20 및 BS50은 비교적 초기재령인 7일에서는 혼화재를 치환하지 않은 무치환보다 낮은 강도수준을 보이고 있으며, 재령이 경과함에 따라 강도도 서서히 증가하여 BS50은 재령 28일에서, FA20은 재령 91일에서 무치환보다 높게 나타났다. 그러나, 3.1.1의 염화물 확산계수 측정결과에서 알 수 있듯이 FA20의 경우 재령 28일부터 무치환보다 낮은 염화물 확산계수를 보이고 있으며, BS50의 경우도 모든 재령에서 무치환보다 낮은 값을 보

이고 있다. 이는 혼화재를 사용한 콘크리트의 염화물 확산계수는 조직의 치밀성을 대표하는 압축강도 이외에 혼화재료가 갖는 재료적 특성 및 치환율 등에 의해서도 영향을 받는 것으로 사료되며, 혼화재를 사용할 경우 염화물 확산계수는 감소되는 경향이 있는 것을 알 수 있다. 한편, SF10 및 MK15의 경우 모든 재령에서 무치환보다 높은 강도를 보이고 있으며, 재령 28일까지 강도발현이 현저히 나타났으나 이후에서의 강도증진경향은 작은 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 재령 91일 압축강도에 대한 28일 압축강도 발현율을 나타낸 Fig. 8을 보면 혼화재 종류에 따른 압축강도 발현특성을 잘 알 수 있다.

Fig. 8은 각각의 혼화재 종류별로 모든 치환율 조건에서 재령 91일 압축강도에 대한 28일 압축강도의 비를 나타낸 것으로서, 혼화재를 치환하지 않은 무치환의 경우 91일 압축강도를 100으로 하였을 경우 재령 28일까지 약 85%의 강도를 발현하였으며, SF 및 MK를 각각 치환한 경우 약 90% 정도로 무치환보다 높게 나타났다. 한편, FA 치환배합은 약 75%, BS는 83% 정도로 나타나 무치환보다 낮은 강도발현율을 보이고 있다.

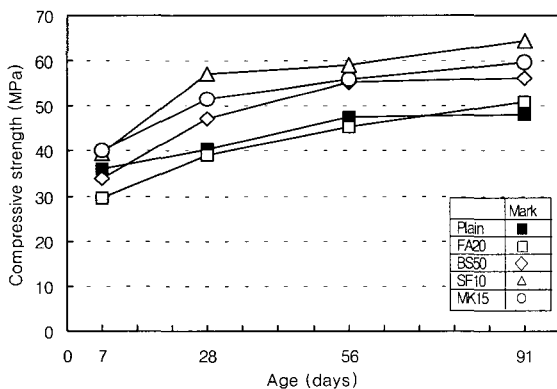


Fig. 7 Development of compressive strength according to the kinds of admixture with ages (W/B 45%)

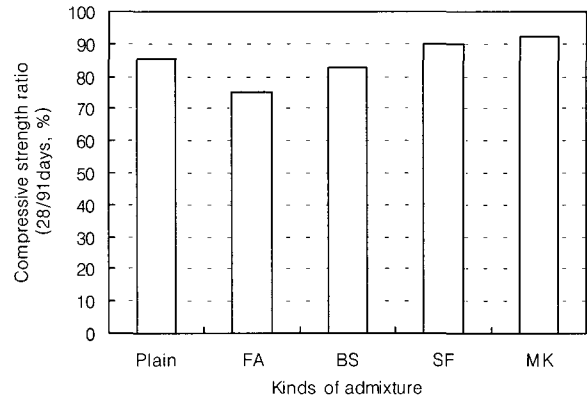


Fig. 8 Compressive strength ratios of 28days compared with 91days

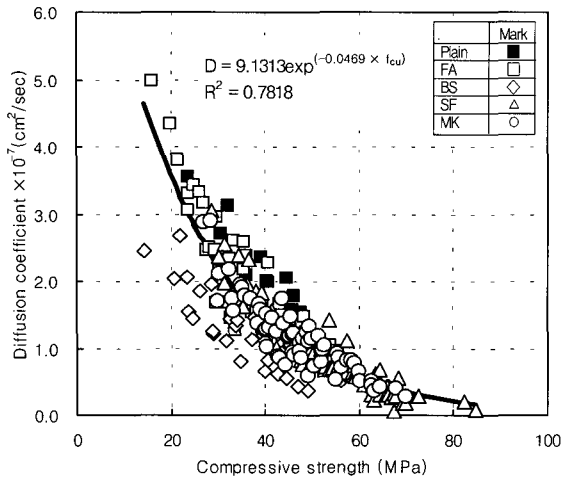


Fig. 9 Relationship between compressive strength and diffusion coefficient

이러한 경향은 혼화재료의 화학조성, 분말도, 수화반응 속도 등에 기인한 것으로 사료되며, 비표면적이 비교적 크며 입경이 작은 SF 및 MK의 경우 초기강도 확보에 유리할 것으로 사료된다.

3.3 압축강도와 염화물 확산계수의 상관관계

Fig. 9는 물-결합재비(4수준), 측정재령(4재령), 혼화재 종류(4종류) 및 치환율(3~4수준)에 따른 압축강도와 동일 재령에서 측정된 염화물 확산계수의 상관관계를 종합적으로 나타낸 것으로서, 각 배합조건에 관계없이 압축강도가 증가함에 따라 염화물 확산계수는 감소하는 경향을 보이고 있으며, 압축강도는 14~85 MPa의 수준으로, 염화물 확산계수는 $5.5 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{sec} \sim 4.99 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 의 수준으로 나타났다. 압축강도 50 MPa를 기준으로 이보다 낮은 강도 영역에서는 염화물 확산계수가 무치환 및 혼화재 종류 및 치환율 조건에 따라 다소 편차를 갖고 있지만, 50 MPa 이상의 영역에서는 편차가 작게 나타나고 있다. 이러한 경향은 50 MPa 이상의 강도영역에서는 강도가 증가함에 따른 콘크리트 조직 내의 미세공극의 불연속화⁵⁾에 염화물 확산계수가 크게 영향을 받는 반면, 50 MPa 이하의 강도영역에서는 조직의 치밀성에 의한 영향과 더불어 혼화재 종류 및 치환율에 의해 염화물 침투저항은 영향을 받는 것으로 사료된다.

Fig. 10 및 Table 6은 본 연구 범위에서의 무치환과 치환율을 고려하지 않은 혼화재 종류별 압축강도와 염화물 확산계수의 상관관계를 나타낸 것이다. 각 배합조건에서의 압축강도와 동일재령에서 평가한 염화물 확산계수의 관계에서 알 수 있듯이 혼화재를 사용하면 무치환에 비하여 염화물 확산계수가 감소되는 경향을 보이고 있으며, 혼화재 종류에 따라서도 다소 차이를 갖는 것을 알 수 있다. 특히, BS 치환배합의 경우 다른 혼화재에 비하여 염화물

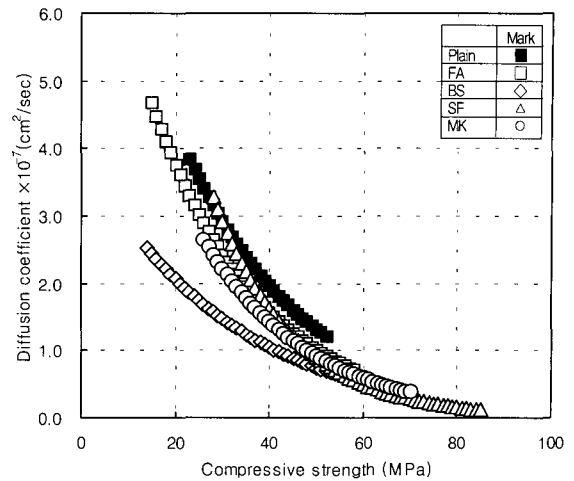


Fig. 10 Tendency curve of relationship between compressive strength and diffusion coefficient

Table 6 Tendency equation of relationship between compressive strength and diffusion coefficient according to the kinds of admixture

D = a × exp(-b × f _{cu})				
Mark	a	b	R ²	Range of compressive strength (MPa)
Total	9.1313	0.0469	0.7818	14.4~84.8
Plain	9.5691	0.0396	0.8431	23.4~51.2
FA	9.0482	0.0438	0.8624	15.8~58.6
BS	4.0838	0.0340	0.7174	14.4~66.3
SF	16.825	0.0584	0.8200	28.8~84.8
MK	8.3648	0.0441	0.8210	26.7~69.9

확산계수의 저감 폭이 큰 경향을 보이고 있는데, 이는 기존에 제시되고 있는 연구⁸⁻¹⁰⁾에서와 같이 고로슬래그미분말의 염화물 이온 고정화 능력과 더불어 높은 혼화재 치환율 등의 영향에 기인한 것으로 사료된다.

한편, 혼화재를 사용한 콘크리트의 염화물 확산계수는 압축강도와 양호한 상관성을 갖고 있지만, 혼화재 종류 및 치환율 등에 의해 영향을 받기 때문에 기존의 철근콘크리트 구조물의 내구성 설계시에 물-결합재비, 단위시멘트량과 같은 배합조건과 콘크리트의 기계적 특성인 압축강도 이외에 콘크리트의 성능저하 인자의 침투·확산에 영향을 미치는 확산계수의 검토가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

각종 혼화재를 사용한 콘크리트의 전기축진시험에 의한 염화물 확산계수 및 압축강도 발현성상 검토를 통해 혼화재 종류 및 치환율이 콘크리트의 내염성능 향상에 미치는 영향에 관해 비교·평가한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 혼화재 종류 및 치환율별 재령에 따른 염화물 확산계수는 다소 차이가 있지만 재령의 경과에 따라 감소하는

시간의존적인 경향을 갖는 것으로 나타났으며, 본 연구의 범위에서 각각의 혼화재 종류별로 염화물 침투저항성이 우수한 적정의 치환율 수준을 제시하였다.

- 2) 물-결합재비 40%의 염화물 확산계수는 55%에 비하여 7일 재령에서는 약 2배정도 염화물 확산계수가 낮게 나타났으며, 수중양생 일수가 증가함에 염화물 확산계수의 차이는 감소하는 경향을 보였다.
- 3) 혼화재 종류별로 재령에 따른 염화물 침투저항성은 재령 28일에서는 메타카올린 15%, 고로슬래그미분말 50%, 실리카 폼 10%, 플라이애쉬 20% 그리고 무치환의 순으로 나타났다. 한편, 재령 91일에서는 실리카 폼 10%가 가장 우수했으며, 메타카올린 15%와 고로슬래그미분말 50% 치환배합은 유사한 수준으로 나타났고, 플라이애쉬 20%, 그리고 무치환의 순으로 나타나 시간의 경과에 따라 감소되는 확산계수의 시간의존적인 특성은 혼화재 종류에 의해 큰 영향을 받는 것으로 사료된다.
- 4) 혼화재 종류에 따라 콘크리트의 강도발현 속도는 다소 차이가 있으며, 실리카폼, 메타카올린 치환배합의 경우 무치환에 비하여 상대적으로 빠른 강도발현을 보인 반면, 플라이애쉬, 고로슬래그미분말 치환배합은 재령 7~28일까지는 낮으나 이후 재령에서의 포졸란 반응에 의해 무치환보다 높은 강도를 나타냈다.
- 5) 혼화재를 사용한 콘크리트의 염화물 침투저항성능은 조직의 치밀성을 대표하는 강도특성 이외에 혼화재료가 갖는 재료적 특성 및 치환율 등에 의해서도 영향을 받기 때문에 향후 염해환경에 노출되는 철근콘크리트 구조물의 보다 정확한 내구성능 평가를 위해서는 압축 강도 발현특성 검토와 더불어 염화물 확산계수의 평가가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. ACI 318, "Part 3 - Construction Requirements, Chapter 4 - Durability Requirements," American Concrete Institute, 2000, pp.35~39.
2. 한국콘크리트학회, "콘크리트 표준시방서", 한국콘크리트학회, 2003.
3. 송하원, 권성준, 이석원, 변근주, "고로슬래그미분말 콘크리트의 염화물 침투저항성에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집, 15권, 3호, 2003, pp.400~408.
4. 문한영, 이승태, 김홍삼, "시멘트 경화체의 해수침식에 의한 성능저하 및 저항성 평가", 콘크리트학회 논문집, 13권, 2호, 2001, pp.175~183.
5. 소양섭, 소형석, "포졸란재 함유 콘크리트의 세공구조와 염화물 이온 침투저항성", 콘크리트학회 논문집, 14권, 1호, 2002, pp.100~109.
6. Steen Rostam, "Realism in Service Life Design of Concrete Structures-The Designers Possibilities," *Proceedings of the 1st fib Congress, Osaka, 2002*, pp.53~70.
7. L.Tang and L.-O.Nilsson, "Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field," *ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 1, Jan.-Feb., 1992*, pp.49~53.
8. 日本建築学会, "高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの調合設計・施工指針(案)・同解説-塩分遮へい性", 日本建築学会, 1996, pp.979~984.
9. 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.
10. 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, VVI, 1989*, pp.73~79.

요 약

본 연구는 콘크리트의 시공성 및 역학적 특성을 향상시키기 위하여 사용되는 혼화재료(플라이애쉬, 고로슬래그미분말, 실리카폼 및 메타카올린)를 해양환경에 노출되는 콘크리트에 적용할 경우, 혼화재료가 콘크리트의 내염성능 향상에 미치는 영향을 검토하기 위하여 비교적 단기간에 평가할 수 있는 전기적 촉진시험방법을 사용하여 혼화재 종류 및 치환율, 물-결합재비, 재령에 따른 염화물 확산계수를 비교·평가하였다. 혼화재 종류 및 치환율에 따른 염화물 확산계수 평가결과 물-결합재비 수준에 따라 성능의 차이는 있지만 각 혼화재별로 염화물 침투저항성이 우수한 치환율 수준이 있는 것을 알 수 있었다. 또한, 염화물 확산계수는 물-결합재비 수준에 따른 영향과 더불어 적정의 치환율을 적용한 혼화재의 사용에 의해서도 현저하게 저감시킬 수 있는 것으로 나타났으며, 시간의 경과와 함께 염화물 확산계수도 감소되는 시간의존적인 특성은 혼화재 종류 및 치환율에 의해 영향을 받는 것으로 사료된다. 압축강도와 염화물 확산계수는 반비례의 관계를 보이고 있으며, 본 연구의 범위에서 보면 50 MPa 이하영역에서는 염화물 확산계수는 압축강도 발현특성과 더불어 혼화재 사용 및 치환율에 따른 영향도 크게 나타나고 있어, 향후 염해 환경하에서 내구성을 고려한 구조물 설계시 보다 정확한 내구성능 평가를 위해서는 압축강도 발현특성 검토와 더불어 염화물 확산계수의 평가가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

핵심용어 : 전기촉진시험, 염화물 확산계수, 혼화재료, 압축강도