

혼화재를 사용한 콘크리트의 염소이온 확산 특성

The Chloride Diffusion Properties of Concrete with Mineral Admixtures

박 정 준* 고 경 택** 김 도 겸** 김 성 욱***
Park, Jung-Jun Koh, Kyoung-Taek Kim, Do-Gyeum Kim, Sung-Wook

Abstract

To improve the durability of concrete structure, we usually consider the reduction of water-cement ratio, the increase of concrete cover depth and the use of mineral admixtures. The use of admixtures make concrete more durable and tighten against water in recent papers so it is needed to study more about the relationship between the admixtures and the chloride ion diffusion. Therefore we analyzed the correlation between chloride ion diffusion and physical properties such as compressive strength, void ratio, air permeability of the concrete, and tried to use them as fundamental data for analyzing chloride ion diffusion mechanism of the concrete mixed with mineral admixtures.

요 지

콘크리트의 구조물의 내구성을 향상시키기 위해서는 W/C의 감소, 피복두께의 증가, 혼화재의 사용 등을 예로 들 수 있다. 특히, 혼화재를 사용한 경우 콘크리트의 수밀성이 향상되고 구조체의 내구성이 향상되는 것으로 보고되고 있으나 염소이온 확산에 대해서는 보다 체계적인 연구를 수행할 필요가 있다. 또한 혼화재를 사용한 콘크리트의 경우, 혼화재 종류에 따라 포졸란반응 및 잠재수경성 등에 의해 콘크리트 내부조직의 변화가 발생하므로 콘크리트의 염소이온 확산에 대한 보다 정확한 평가를 위해서는 콘크리트 내부의 조직을 평가할 수 있는 요소들을 고려해야 한다. 이에 본 연구에서는 혼화재를 사용한 콘크리트의 내구수명을 평가하기 위한 연구의 일환으로 콘크리트의 압축강도, 공극률, 투기성을 물리적 특성으로 설정하고 이들과 염소이온 확산계수와의 관계를 분석하였다.

Keywords : mineral admixtures, chloride ion diffusion, compressive strength, void ratio, air permeability

* 한국건설기술연구원 구조연구부 연구원

** 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원

*** 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원

E-mail : jjpark@kict.re.kr 031-9100-714

• 본 논문에 대한 토의를 2004년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 2004년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

콘크리트는 경제적이면서 기능이 우수한 건설재료로서 건설현장에서 가장 광범위하게 사용되고 있다. 또한 콘크리트가 구조체로 사용될 경우 인장응력을 감당하기 위해서 철근을 보강한 철근콘크리트(RC)구조물로 만들어진다.

일반적인 환경조건에서 철근은 콘크리트의 높은 알칼리도에 의해 부식으로부터 자연스럽게 보호된다. 그러나 철근콘크리트 구조물은 공용기간 중 외부로부터 침투되는 여러 가지 열화 인자들의 작용으로 인해 설계 수명보다 빠른 기간 내에 내구성능이 저하하는 경우가 많다.⁽¹⁾ 이러한 원인은 염소이온 침투, 도로의 제설제 사용, 토양오염 등 사용환경적 요인에 의해 콘크리트 손상 및 철근의 부식을 유발시키기 때문인 것으로 볼 수 있다. 특히, 해양환경에 놓여진 구조물들은 외부로부터 침투되는 염분에 의해 철근부식을 유발하고 이것은 콘크리트의 균열, 탈락 등의 손상으로 나타난다.⁽²⁾

이들 염소이온에 의한 철근부식을 방지하기 위한 대책⁽³⁾으로는 도장이나 수지철근의 사용 등에 따른 철근 자체의 내구성을 확보하는 것과 콘크리트 품질을 개선하는 것으로 나눌 수 있다. 콘크리트의 품질을 개선하기 위해서는 W/C의 감소, 피복두께의 증가, 혼화재의 사용 등을 예로 들 수 있으며, 특히, 혼화재는 수밀성과 내구성 향상에 효과적인 것으로 알려져 있으나 혼화재를 사용한 콘크리트의 염소이온 확산에 대한 보다 체계적인 연구⁽⁴⁾가 필요하다.

본 연구에서는 혼화재 종류에 따라 포졸란반응 및 잠재수경성 등에 의해 콘크리트 내부의 조직의 변화를 관찰하고, 콘크리트내의 염소이온 확산에 대한 보다 정확한 평가를 위해서 콘크리트의 압축강도, 공극률, 투기성을 물리적 특성으로 설정하여 이들 물리적 특성과 염소이온 확산계수와의 관계를 분석하였다.

2. 실험계획

2.1 사용재료

(1) 시멘트 및 혼화재

본 실험에 사용한 시멘트는 보통포틀랜드시멘트이며 혼화재는 플라이애쉬, 고로슬래그, 실리카폼 등의 포졸란계 혼화재로 이들의 물리·화학적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 시멘트 및 포졸란계 혼화재의 물리·화학적 성질

Item Type	Surface Area (cm ² /g)	Specific Gravity	Ig.loss (%)	Chemical Composition (%)		
				MgO	SO ₃	SiO ₂
OPC	3,333	3.14	1.40	2.8	2.3	-
Fly ash	3,618	2.13	3.82	-	-	55.9
Slag	4,530	2.80	0.10	4.9	0.3	-
S.Fume	200,000	2.10	1.50	0.1	-	96.0

(2) 골재

잔골재는 강모래를 입도 조절하여 사용하였고, 굵은 골재는 부순돌로서 최대치수 19mm의 골재를 사용하였으며, 그 물리적 특성은 Table 2와 같다.

Table 2 골재의 물리적 특성

Item Type	Specific Gravity	Absorption (%)	F.M	Unit Weight (t/m ³)	Abrasion (%)
Sand	2.60	1.27	2.64	1.537	-
Gravel	2.68	0.45	6.69	1.560	16.8

(3) 혼화제

혼화제는 나프탈린계의 고성능감수제를 사용하였으며 그 물리적 성질은 Table 3과 같다.

Table 3 고성능감수제의 물리적 특성

Apperearance	Specific Gravity	pH	Solid Contents(%)
Dark Brown Liquid	1.212	7~9	41~45

(4) 침적용액

본 실험에서는 염소이온에 의한 확산만을 고려하기 위하여 화학약품을 사용하여 3.6% NaCl 수용액을 제조한 후 사용하였다.

2.2 배합

콘크리트 배합은 단위결합재량 350kg/m³, 물-결합재 비 55%, 잔골재율 45%로 고정하고 고성능감수제

를 사용하여 슬럼프 8±3cm가 되도록 하였으며, 배합 설계는 Table 4와 같다.

2.3 실험방법

(1) 압축강도

콘크리트 압축강도는 $\Phi 100 \times 200$ cm 공시체를 제작하여 1일 후 탈형하고 23±1℃의 수중에서 표준양생을 실시한 후 재령에 따라 KS F 2405⁵⁾에 준하여 측정하였다.

(2) 공극률

콘크리트 공극률은 $\Phi 100 \times 200$ cm 공시체를 제작하여 ASTM C 642⁶⁾에 준하여 재령에 따라 측정하였다.

(3) 투기성

콘크리트의 투기성은 200×200×200mm의 정육면체 공시체를 제작하여 5개면을 에폭시로 실링한 후 23±1℃의 수중에서 표준양생을 실시하였으며 재령에 따라 측정시, 항온항습실(온도:20℃, 습도:60±10%)에서 48시간 건조시킨 후 투기성 시험장치를 이용하여 측정하였다.

(4) 염소이온 이온량 및 확산계수

① 가용성 염소이온 이온량과 전 염소이온 이온량

200×200×200mm의 콘크리트 공시체를 제작하여 28일간 표준양생 후 염소이온의 일방향 침투를 유도하기 위해 5개면을 에폭시로 실링하고 NaCl 3.6% 수용액에 침적시켜 재령에 따른 깊이별 가용성 염소이

온 함유량 및 전 염소이온 함유량을 측정하였다. 가용성 염소이온 함유량은 콘크리트 표면으로부터 15mm 간격으로 시료 40g을 채취한 후 일본 콘크리트공학협회 기준(안)[경화 콘크리트 중의 염분량 측정방법, 이하 JCI 기준(안)]에 의해 염소이온을 추출한 다음, 이온전극법을 활용하는 염분측정기로 측정하였다.

또한 전 염소이온 함유량은 콘크리트 표면으로부터 15mm 간격으로 시료 3g을 채취한 다음, 전 염분량 측정기(CL-1000)를 사용하여 산에 녹는 염소이온 함유량(전 염소이온 함유량)을 측정하였다.

② 염소이온 확산계수

JCI 기준(안)에 준하여 이온 전극법에 의해 측정된 깊이별 가용성염소이온 함유량을 Fick의 제2법칙에 의해 유도된 다음 식(1)을 이용하여 염소이온 확산계수를 얻었다.

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

여기서, $C(x,t)$: 콘크리트 표면에 C_0 의 염소이온농도가 존재할 때, 재령 t 에서 콘크리트 표면으로부터 x cm 깊이에의 염소이온농도(kg/m³)

C_0 : 표면의 염소이온농도(kg/m³)

x : 염소이온 확산계수(cm/sec)

erf: 오차함수

(5) 콘크리트 미세공극 측정

콘크리트의 미세공극을 측정하기 위하여 수은압입법(MIP:Mercury Intrusion Porosimetry)을 이용하였다.

Table 4 배합설계

Series	Item	Gmax (mm)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m ³)					SP (C×%)	Slump (%)	Air (%)
					C	B	W	S	G			
	Plain	19	55	45	350	0	192.5	791.38	997	0	7	2.5
	FA15	19	55	45	297.5	52.5	192.5	782.04	985.23	0	8	1.5
	FA30	19	55	45	245	105	192.5	772.7	973.47	0	7.5	1.2
	BS30	19	55	45	245	105	192.5	788.01	992.76	0	6	2.0
	BS50	19	55	45	175	175	192.5	785.77	989.94	0	7	2.0
	SF 5	19	55	45	332.5	17.5	192.5	788.13	992.9	0.5	6	2.0
	SF10	19	55	45	315	35	192.5	784.88	988.91	0.75	7	2.2

3. 실험결과

3.1 콘크리트의 물성변화

Fig. 1은 재령별 압축강도를 나타낸 것으로서 사용 혼화제에 따라 압축강도의 발현이 각각 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 여기서 Plain은 혼화제를 혼입하지 않은 보통 콘크리트, FA는 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트, BS는 고로슬래그를 혼입한 콘크리트, SF는 실리카폼을 혼입한 콘크리트를 나타내고 각각 뒤에 첨부된 숫자는 혼화제의 혼입률로서 시멘트 대체율을 나타낸다. 초기재령에서는 FA, BS의 경우 Plain에 비해 강도가 저하되지만 재령이 증가함에 따라 포졸란 반응에 의해 장기강도가 증가함을 나타내고 있다. 특히 재령 1년 경과시 Plain 콘크리트에 비해 F15와 BS50은 압축강도가 각각 약 5.5%, 7%정도 크게 나타나고 있으며, SF10의 경우 재령초기에서부터 압축강도가 Plain 콘크리트에 비해 크게 나타나 재령 1년에서는 약 15%의 강도증진을 보이고 있다. 이 결과는 재령이 증가하면서 고로슬래그의 잠재수경성 및 플라이애쉬와 실리카폼의 포졸란 반응으로 인한 C-S-H 수화물의 생성으로 콘크리트 내부의 조직이 밀실해지기 때문으로 판단된다.

또한 Fig. 2의 공극률 변화 실험결과에서는 재령 초기의 공극률은 혼화제를 혼입한 콘크리트가 Plain 콘크리트 보다 전반적으로는 높게 나타나지만 재령이 증가할수록 공극률이 감소한다. 그리고 Fig.3의 투기성 변화 시험에서도 혼화제를 혼입한 콘크리트의 투기성이 재령이 증가하면서 낮아지는 결과를 나타내고 있다. 이러한 실험결과는 압축강도 시험결과와 마찬가지로 재령이 증가하면서 혼화제의 잠재수경성 및 포졸란 반응으로 C-S-H 수화물이 콘크리트 내부조직을 치밀하게 만든 결과이다.⁽⁷⁾

한편 콘크리트의 미세구조는 시멘트, 물, 골재, 혼화제 등의 콘크리트의 재료와 이들의 배합비, 제조방법 및 양생조건 등에 의해 영향을 받으므로 정량적인 분석이 어렵지만 콘크리트의 물리적 특성을 평가함으로써 간접적으로 판단할 수 있다. 특히 혼화제를 사용한 콘크리트는 재령 및 사용량에 따라 내부조직이 변

화하기 때문에 이를 평가할 수 있는 방법이 필요하다.

이에 본 연구에서는 압축강도, 공극률, 투기성 등의 콘크리트 물리적 특성을 재령의 변화에 따라 실험을 수행하여 간접적으로 미세구조 변화를 측정하고, 이들 특성과 염소이온 확산과의 관계를 정립하고자 하였다.

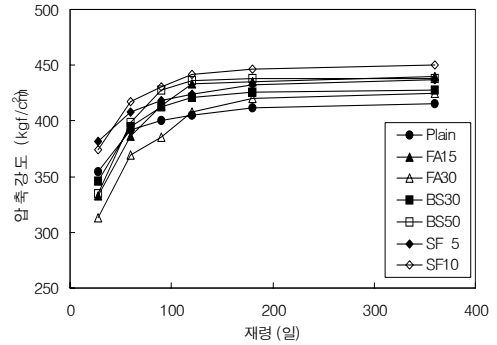


Fig. 1 재령에 따른 압축강도의 변화

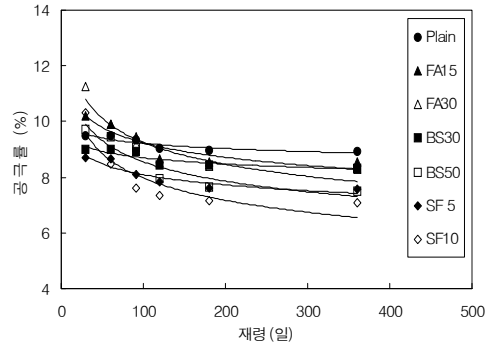


Fig. 2 재령에 따른 공극률 변화

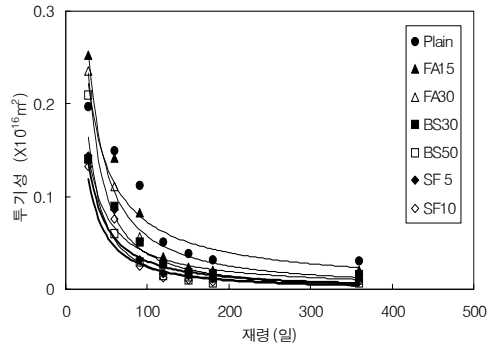


Fig. 3 재령에 따른 투기성 변화

3.2 염소이온 확산

Fig. 4는 침적재령 1년에 대한 깊이별 가용성 염소이온 농도를 나타낸 것이다. 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트의 얇은 표면깊이를 제외하고는 혼화재를 사용한 콘크리트의 경우 표면에서 깊이 2.25cm 이후부터 Plain 콘크리트에 비해 염소이온의 농도가 낮게 형성됨을 알 수 있다.

이는 혼화재를 혼입한 콘크리트의 경우, 내부 공극 속에 OH 이온의 농도가 낮아져 오히려 Plain에 비해 부식환경에 쉽게 노출될 수 있다. 그러나 포졸란 반응 등에 의해 생성된 불용성 수화물인 C-S-H가 콘크리트의 내부조직을 더욱 더 밀실하게 하여 외부로부터 유입되는 염소이온의 침투를 차단함으로써 결과적으로는 혼화재를 혼입한 콘크리트는 염소이온 침투 저항성이 Plain 콘크리트에 비해 더 우수한 효과를 발휘하는 것을 알 수 있다.⁽⁸⁾

Fig. 5는 혼화재를 사용한 콘크리트를 28일 표준양생 후 NaCl 3.6%의 수용액에 침적시키고 재령에 따라 염소이온의 확산계수 변화를 실험·분석한 것이다. 모든 시험체에서 재령이 증가하면서 확산계수는 감소하고 있는데 이는 수화반응이 진행되면서 콘크리트 내 수화물이 치밀한 미세구조를 형성하기 때문이다⁽⁹⁾.

한편, 침적재령 60일 이후부터 Plain 콘크리트에 비해 혼화재를 사용한 콘크리트의 확산계수가 낮게 나타나며, 재령이 증가할수록 이러한 경향이 현저하게 나타났다. 따라서 침적재령 60일을 기점으로 혼화재의 잠재 수경성 반응과 포졸란 반응 효과로 인해서 콘크리트 내부 조직이 치밀해지고, 또 이로 인해서 콘크리트의 염해저항성이 높아짐을 알 수 있다.

3.3 침투 염소이온의 고정화

전염소이온과 구속염소이온이 평형농도 관계를 유지하는 것을 나타내는 식을 구속등온식(binding isotherm)이라 하며 선형구속등온식을 함수로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_b = \alpha C_t \quad (2)$$

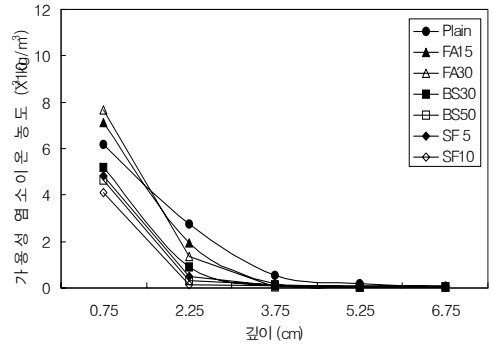


Fig. 4 깊이별 가용성 염소이온 농도

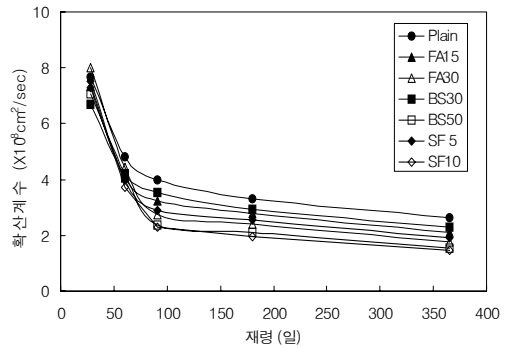


Fig. 5 재령에 따른 확산계수

Fick의 제 2법칙으로부터 유도된 식(2)에 대하여 콘크리트가 완전히 포화되어 있다고 가정하면 전염소이온농량 C_t 는 다음과 같이 표현할 수 있다

$$C_t = W \cdot C_f + (1 - W) \cdot C_b \quad (3)$$

여기서, W : 증발 가능한 콘크리트의 수분량(%)

C_b : 고정화 염소이온농량(%)

C_f : 가용성 염소이온농량(%)

이온의 용적분포계수(volumetric distribution coefficient) γ 를 사용하여 고정화 염소이온농량과 가용성 염소이온농량으로 표현하면 다음과 같다.

$$C_b = \gamma \cdot C_f \quad (4)$$

식(3)에 식(4)를 대입하면 다음과 같은 자유등온식이 된다.

$$C_t = W \cdot C_f + (1 - W) \cdot \gamma \cdot C_f = \alpha \cdot C_f \quad (5)$$

여기서, α 는 가용성 염소이온량과 전염소이온량과의 관계를 나타내는 값으로서, 염소이온이 포화된 공극 매개물에서 결합되는 양을 측정하거나 전 염소이온량과 가용성 염소이온량을 측정함으로써 분석할 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 6의 전염소이온과 가용성염소이온과의 관계에 나타난 바와 같이 Plain 콘크리트의 α 값이 1.84의 값으로 분석되었으며 혼화제를 사용한 경우에는 혼화제의 종류나 혼입률에 상관없이 Plain 콘크리트 보다는 다소 높은 1.85~1.91사이의 값을 나타내고 있다.

염소이온의 고정화는 주로 시멘트 광물의 알민산칼슘($3C_aO \cdot Al_2O_3$)과 염소이온이 반응하여 고정화염($3C_2O \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$)을 생성하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁰⁾ 이러한 고정화 효과는 화학적인 구속 메카니즘으로 설명할 수 있으며, 화학적 구속은 주로 재령 초기에 일어나는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 NaCl 3.6% 수용액에 침적하기 전 28일간 표준양생을 실시하였기 때문에 강도발현이 상당히 진행되어 외부로부터 유입되는 염소이온에 대한 염소이온의 고정화에 대한 효과는 거의 없는 것으로 사료된다.

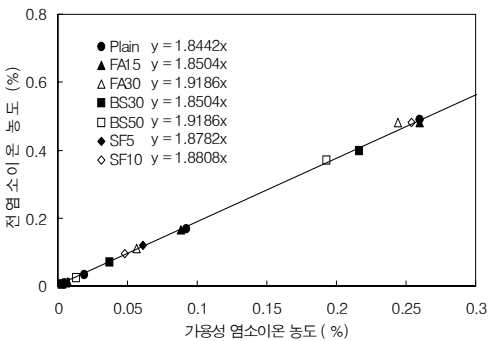


Fig. 6 전 염소이온과 가용성 염소이온과의 관계

이러한 원인을 Fig. 7의 콘크리트의 공극분석을 통해 고찰하면 혼화제를 혼입한 콘크리트는 Plain 콘크리트에 비해 공극분포의 피크점들이 약 $0.05\mu m$ 보다 작은 곳에서 형성하고 있다. 이것은 혼화제를 혼입한 콘크리트는 포졸란 반응 및 잠재수경성에 의해 생성되는 치밀한 C-S-H 수화물이 염소이온 확산에 영향을 미치는 모세관 공극을 채워 콘크리트의 공극구조가 Plain 콘크리트에 비해 더 밀실하여지기 때문이다.

따라서 염소이온의 투과경로인 모세관 기공이 줄어들기 때문에 혼화제의 사용은 Plain 콘크리트와 비교할 때 염소이온 고정화에 대한 영향보다 염소이온의 침투억제의 효과가 더 큰 것으로 보여지며 이것은 3.2절의 기술한 바와 같이 혼화제를 사용한 콘크리트는 콘크리트 조직의 밀실화로 인해 외부로부터 침투되는 염소이온 확산을 감소시킬 수 있는 효과를 나타내는 것을 알 수 있다.

3.4 물성변화와 확산계수의 관계

혼화제를 혼입한 콘크리트의 압축강도, 공극률과 투기성을 물리적 특성으로 설정하고 혼화제 종류에 따라 염소이온 확산과의 관계를 각각 Fig. 8~10에 나타내었다. Fig. 8에서는 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 확산계수가 $D = A \cdot f_{ck}^{-m/n}$ 과 같은 경향⁽⁴⁾으로 감소하는 것을 보이고 있다. Fig. 9에서 콘크리트의 확산계수는 공극률이 증가함에 따라 n제곱의 비율로 증가하는 것으로 분석된다.

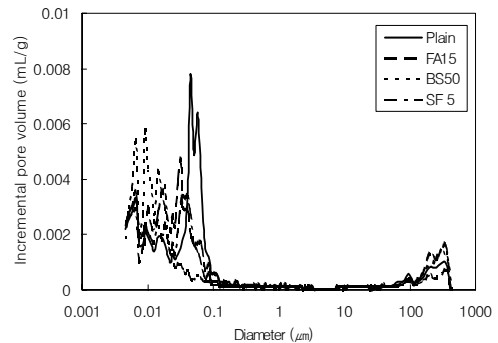


Fig. 7 수은압입법에 의한 공극분석

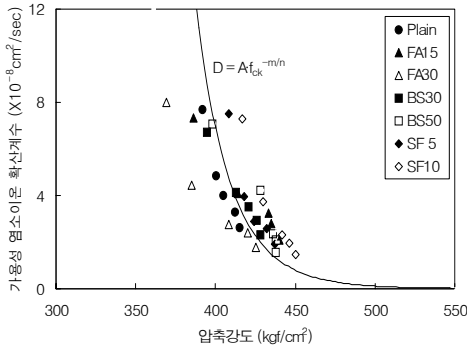


Fig. 8 압축강도와 확산계수와의 관계

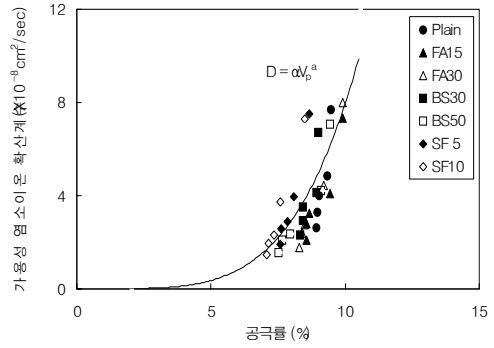


Fig. 9 공극률과 확산계수와의 관계

이는 Kozeny-Carman 방정식($D = V_p^a / S^b K_K$)에서 제시한 확산계수와 공극률의 관계¹¹⁾가 본 실험에서도 성립됨을 알 수 있다.

Fig. 10에서 염소이온 확산계수는 투기성이 증가함에 따라 n제곱의 비율로 증가하는 경향¹⁴⁾을 나타내고 있으며 Table 5에 콘크리트 물리적 특성과 확산계수와의 관계를 통해 구해진 계수를 나타내었다.

이를 종합하여 보면, 염소이온 확산은 압축강도, 공극률 및 투기성 등의 콘크리트의 물리적 특성에 영향을 받는 것을 알 수 있으며 혼화재 종류에 따라 각기 다른 특성을 나타내고 있다.

따라서 이들을 기초자료로 하여 장기적인 실험을 통한 자료축적과 염소이온에 의한 확산 및 부식개시시기에 미치는 여러 요인들과 함께 분석하므로써 혼화재를 사용한 콘크리트의 내구수명을 평가할 수 있을 것으로 보여진다.

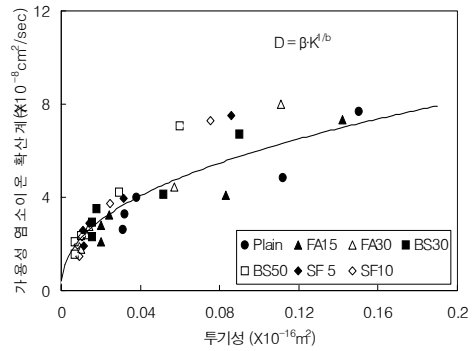


Fig. 10 투기성과 확산계수와의 관계

4. 결론

본 연구에서는 혼화재를 사용한 콘크리트에 대해 염소이온 확산 특성에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

Table 5 콘크리트 물리적 특성과 확산계수와의 관련계수

구분	압축강도관련 계수			공극률 관련 계수			투기성 관련 계수		
	A	-m/n	R2	α	a	R2	β	1/b	R2
Plain	6E+46	17.71	0.9827	5E-14	14.492	0.894	17.307	0.497	0.8403
FA15	6E+22	8.4687	0.9502	2E-06	6.5214	0.8799	16.143	0.479	0.8568
FA30	7E+25	9.7169	0.9738	2E-07	7.7629	0.9731	24.419	0.5444	0.9556
BS30	1E+32	12.095	0.9475	2E-09	9.9919	0.7899	18.758	0.4613	0.8487
BS50	3E+36	13.673	0.8306	2E-05	5.6573	0.954	39.856	0.6224	0.964
SF 5	1E+50	18.853	0.9591	1E-08	9.4192	0.9727	30.677	0.5771	0.948
SF10	8E+53	20.236	0.9951	1E-07	8.4383	0.9624	40.394	0.6532	0.9485

- 1) 혼화재를 사용한 콘크리트의 경우 플레인(plain) 콘크리트에 비해 내부공극의 OH⁻ 이온의 농도가 낮아져 부식환경에 불리할 수 있다. 그러나 포졸란 반응등에 의해 생성된 불용성 수화물인 C-S-H가 콘크리트의 내부조직을 더욱 더 밀실하게 하여 외부로부터 유입되는 염소이온의 침투를 차단하여 염소이온 침투 저항성이 Plain 콘크리트에 비해 더 우수한 효과를 발휘하는 것을 알 수 있었다.
- 2) 본 연구에서는 혼화재를 사용한 콘크리트에 대해 외부로부터 유입되는 염소이온에 대한 염소이온의 고정화에 미치는 영향은 적은 것으로 나타났다. 이는 NaCl 3.6% 수용액에 침적하기 전 28일간의 표준양생을 실시하여 강도발현이 상당히 진행되었기 때문으로 사료된다. 따라서 혼화재를 사용한 콘크리트가 염소이온저항성이 Plain 콘크리트에 보다 우수한 것은 외부로부터 유입되는 염소이온에 대한 고정화 효과보다는 포졸란 반응 및 잠재수경성에 따른 콘크리트 조직의 밀실화 효과가 지배적인 것으로 사료된다.
- 3) 혼화재를 콘크리트에 혼입한 경우, 혼화재의 종류에 따라 포졸란 반응 등의 여러 요인에 의해 강도 및 내부조직이 변화가 다르므로 보다 정확한 염소이온 침투에 대한 평가를 위해서는 혼화재 종류에 따른 콘크리트 내부조직을 평가할 수 있는 요인들을 고려하는 것이 바람직하다고 사료된다.
- 4) 콘크리트내의 염소이온의 확산은 압축강도, 공극률 및 투기성 등의 콘크리트 물리적 특성에 영향을 받는 것을 알 수 있었으며 이들을 기초자료로 하여 염소이온 침투에 따른 혼화재를 사용한 콘크리트의 내구수명을 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. P.A.M. Basheer, S.E.Chidiac and A.E.Long, "Predictive Models for Deterioration of Concrete Structures", Construction and Building Materials, Vol.10, No.1, pp.27-37, 1995.
2. 박정준, 김도겸, 김성욱, 하진규, "혼화재를 혼입한 콘크리트의 염화물 확산평가에 관한 연구" 한국구조물진단학회 봄학술발표회 논문집, 제5권 1호(통권 7집), pp.37-40, 2001. 5.
3. Stéphanie Charvin "Influence of Possolanic Admixtures on Concrete Pore Water pH, Chloride Diffusion and Chloride Binding", A Thesis of Master of science, Florida Atlantic Univ., 1994.
4. 박승범, 김도겸 "콘크리트 중의 염소이온 확산 특성에 관한 실험적 연구" 콘크리트학회 논문집, 제12권 1호, pp. 33-44, 2000. 2.
5. KS F 2405, "콘크리트의 압축 강도 시험 방법", 한국산업규격, 1997
6. ASTM C 642-97, "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete", ASTM, 1997
7. 문한영, 김성수, 류계석, "염분환경하에 있는 모르타 및 콘크리트 중의 염분 확산에 대한 연구" 대한 토목학회 논문집, 제15권 제2호 pp.283-292, 1995. 3.
8. Kazuyuki Torii and Mitsunori Kawamura, "Pore Structure and Chloride Ion Permeability of Mortars Containing Silica Fume", Cement & Concrete Composites 16, pp.279-286, 1994.
9. 김남중, 최상훈, 정재동, 한기성, "시멘트 경화체 중에서의 Cl⁻의 확산과 세공용액의 pH에 미치는 혼화재의 영향", 콘크리트학회 논문집, 제4권 1호, pp.97-106, 1992.3.
10. 김문한, "염해(鹽害)와 그 대책(對策)" 콘크리트학회지 제4권 1호, pp.35-42, 1992.3.
11. Carman. P.C., "Flow of Gases through Porous Media", Academic. New York, 1956.

(접수일자 : 2004년 1월 29일)