

플라이애쉬를 혼입한 콘크리트의 염화물 확산특성

The properties of chloride ion diffusion in concrete with Fly-ash

박 정 준* 고 경 택** 김 도 곽** 김 성 욱*** 하 진 규***
Park, Jung Jun Go, Gyung Taek Kim, Do Gyeum Kim, Sung Wook Ha, Jin Gyu

ABSTRACT

Reportedly, the use of mineral admixtures make concrete more durable and tighten against water. But, it is needed to study more about the relationship between the admixtures and the chloride ion diffusion. When concrete is mixed with fly-ash, pozzolanic reaction occur to time. So we should consider the factors that can evaluate inner structure of concrete in order to evaluate the chloride diffusion of the concrete more accurately.

Therefore, in this study, 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 fly-ash.

1. 서 론

콘크리트는 적은 비용과 양호한 특성 때문에 건설재료로 가장 광범위하게 사용되고 있다. 대부분의 콘크리트는 인장응력을 감당하기 위해서 철근을 보강한 철근콘크리트 구조물로 만들어진다. 일반적인 환경조건에서 철근은 콘크리트의 높은 알칼리도에 의해 만들어진 얇은 산화물층에 의해 부식으로부터 자연스럽게 보호된다.

그러나 철근표면에서의 높은 염화물 농도나 콘크리트의 알칼리도의 손실로 콘크리트내의 철근은 부식한다. 특히, 해양환경에 놓여진 구조물들은 외부로부터 침투되는 염분의 영향을 받아 콘크리트 내부의 철근부식을 유발하고 콘크리트는 열화현상이 나타나게 된다. 이들 염화물에 의한 철근부식을 방지하기 위한 대책으로 혼화재 사용^{1,2)}에 관한 연구들이 진행되고 있다. 혼화재는 수밀성과 내구성 향상에 효과적인 것으로 보고되고 있으나 염화물 확산에 대한 보다 체계적인 연구³⁾가 필요하다.

한편, 플라이애시를 혼입한 콘크리트의 경우 포졸란반응 등에 의해 콘크리트의 내부조직이 변하므로 콘크리트의 염화물 확산에 대한 보다 정확한 평가를 위해서는 재령에 따른 콘크리트 내부의 조직을

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구그룹 연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구그룹 선임연구원

*** 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구그룹장

**** 정회원, 한국건설기술연구원 원장

평가할 수 있는 요인들을 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 압축강도, 공극률, 투기성을 콘크리트의 물리적 특성으로 설정하고 염화물 확산계수와와의 관계 분석을 통하여 플라이애시를 혼입한 콘크리트의 염화물 확산 메카니즘 분석의 기초자료로 사용하고자 하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트 및 혼화제

본 실험에 사용한 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트이고 혼화제로는 플라이애시를 사용하였으며 이들의 물리적, 화학적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 properties of Cement and Fly-ash

Item Type	Surface Area (cm ² /g)	Specific Gravity	Ig.loss (%)	Chemical composition (%)		
				MgO	SO ₃	SiO ₂
OPC	3333	3.14	1.40	2.8	2.3	-
Fly ash	3618	2.13	3.82	-	-	55.93

2.1.2 골재

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

Table 2 Physical properties of aggregate

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

2.1.3 침적 용액

해수의 염소이온 농도는 해양과 해역에 따라 다소간의 차이가 있으나 NaCl로 환산하여 약 3~4% 정도의 염소를 함유하고 있다. 본 연구에서는 염소이온에 의한 확산만을 고려하기 위하여 NaCl 3.6%의 용액을 제조한 후 사용하였다.

Table 3 Mixing design

Series Item	Replacement ratio(%)	Unit Weight (kg/m ³)		W/B (%)	S/a (%)
		(C+B)	W		
Plain	0	350	192.5	55	45
F15	15				
F30	30				
F45	45				

2.2 배합 및 실험방법

2.2.1 배합

본 연구에서는 단위시멘트량 350kg/m³, 물시멘트 비 55%, 잔골재율 45%로 고정하고 플라이애시의 혼입률은 0, 15, 30, 45%로 하여 Table 3과 같이 배합설계 하였다.

2.2.2 실험방법

(1) 압축강도

콘크리트 압축강도는 $\Phi 10 \times 20$ cm 공시체를 제작하여 1일 후 탈형하고 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 수중에서 표준양생을 실시한 후 재령에 따라 KS F 2405에 준하여 측정하였다.

(2) 공극률

콘크리트 공극률은 $\Phi 10 \times 20$ cm 공시체를 제작하여 ASTM C 642 [Standard Test Method for Specific Gravity, and Voids in Hardened Concrete]에 준하여 재령에 따라 측정하였다.

(3) 투기성

콘크리트의 투기성은 $200 \times 200 \times 200$ mm의 정육면체 공시체를 제작하여 5개면을 에폭시로 실링한 후 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 수중에서 표준양생을 실시하였으며 재령에 따라 측정시, 항온항습실(온도: 20°C , 습도: $60 \pm 10\%$)에서 48시간 건조시킨 후 Permeability Tester를 사용하여 구하였다.

(4) 염화물 확산계수

$200 \times 200 \times 200$ mm의 콘크리트 공시체를 제작하여 28일간 표준양생 후 염화물의 일방향 침투를 유도하기 위해 5면을 에폭시로 실링하고 NaCl 3.6%의 용액에 침적시켜 재령에 따라 깊이별 가용성 염화물 함유량을 측정 후 Fick의 제2법칙에 의해 유도된 (식 2.1)을 이용하여 염화물 확산계수를 얻었다.

$$C_{(x,t)} = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_e t}} \right) \right] \quad (2.1)$$

여기서, $C_{(x,t)}$: 콘크리트 표면에 C_0 의 염화물 농도가 존재할 때, 재령 t 에서 콘크리트 표면으로부터 x cm 깊이에의 염화물 농도(kg/m^3) C_0 : 표면의 염화물 농도(kg/m^3) x : 염화물 확산계수(cm^2/sec) erf: 오차함수

(5) 콘크리트 미세공극 측정

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

3. 실험결과

3.1 재령에 따른 콘크리트의 특성

Fig. 1은 플라이애시 혼입률에 따른 재령별 압축강도를 나타낸 것으로 혼입률에 따라 콘크리트의 압축강도 발현이 각각 다르게 나타나고 있음을 보여주고 있다. 초기재령에서는 혼입률의 증가에 따라 강도가 저하하지만 재령이 증가하면서 F15의 경우 Plain 콘크리트에 비해 강도발현이 향상되어 재령 1년의 경우 Plain 콘크리트에 비해 F15는 5.5%정도 크게 나타나고 있다. 또한 F30의 경우 초기재령에서는 Plain 콘크리트에 비해 강도가 저하하지만 재령이 증가함에 따라 거의 동등이상의 강도증진 효과를 보이고 있다. Fig. 2는 Plain 콘크리트와 F15에 대해 재령 1년 공시체에 대해 MIP를 이용하여 공극분포를 측정된 결과를 비교하여 나타낸 것이다. Plain은 $0.03 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 의 공극분포가 많고 이에 비해 F15는 $0.01 \sim 0.03 \mu\text{m}$ 의 공극분포가 많은 것으로 나타나 재령증가에 따른 플라이애시의 포졸란반응으로 인하여 콘크리트 내부의 조직이 밀실해짐을 알 수 있다.

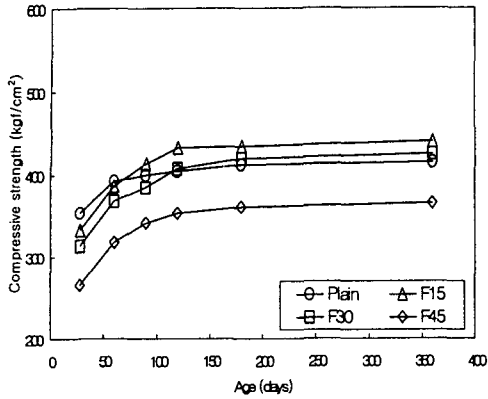


Fig. 1 The Variation of Compressive Strength of Concrete

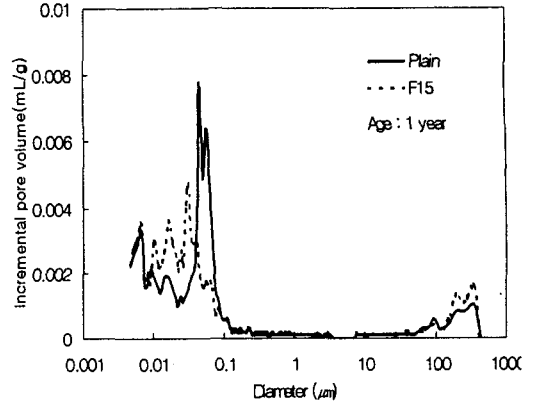


Fig. 2 Incremental pore size distribution of concrete

이는 Fig 3의 공극률의 변화 및 Fig. 4의 투기성의 변화를 통해 알 수 있듯이 재령이 증가하면서 플라이애시의 포졸란반응으로 인한 C-S-H 수화물의 생성으로 콘크리트 내부가 치밀한 조직구조 형성 및 강도증진의 주요요인으로 작용한 것으로 보인다.

따라서 혼화재를 콘크리트에 혼입한 경우 재령, 혼화재의 혼입률에 따른 포졸란 반응 등의 여러 요인에 의해 강도 및 내부조직이 변화하기 때문에 보다 정확한 콘크리트의 염화물 확산에 대한 평가를 하기 위해서는 재령에 따른 콘크리트 내부의 조직을 평가하는 것이 바람직하다고 사료된다.

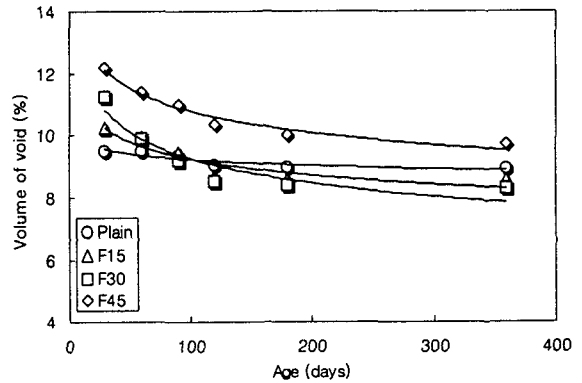


Fig. 3 The Variation of Volume of Void

3.2 재령에 따른 콘크리트의 염화물 확산

Fig. 5는 28일 표준양생 후 NaCl 3.6%의 용액에 침적시켜 재령에 따라 플라이애시를 혼입한 콘크리트의 확산계수 변화를 나타낸 것이다. 모든 시험체에서 재령증가에 대한 확산계수는 감소하고 있는데 이는 수화반응의 지속적인 진행과 더불어 콘크리트내의 미세구조의 형성에 따른 것으로 보여진다. 한편, 침적재령 60일 이후부터 Plain 콘크리트에 비해 플라이애시를 혼입한 콘크리트의 확산계수가 낮게 형성되고 있으며 재령이 증가할수

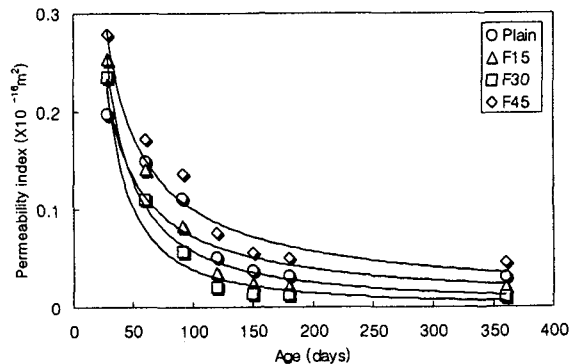


Fig. 4 The Variation of Permeability Index

록 이러한 경향이 현저하게 나타났다. F15와 F30의 경우 침적재령 60일을 기점으로 Plain 콘크리트에 비해 확산계수가 낮은 값을 형성하고 있다. 따라서 플라이애시의 혼입률 15~30%가 압축강도, 공극률, 투기성과의 관계를 고려할 때 염화물이온 저항성에 효과적인 것으로 판단된다.

F45의 경우 확산계수의 값은 Plain에 비해 다소 낮게 형성된 것은 포졸란반응 및 염화물 고정화 효과 등에 기인¹⁾한 것으로 보이나 염해 저항성에는 유리하지 못한 것으로 판단된다. 따라서 적절한 혼화재의 혼입률을 보통 포트랜드시멘트에 적용하면 포트랜드 시멘트 수화시 포졸란 반응 등에 의해 재령이 증가함에 따라 콘크리트 내부가 치밀한 조직구조를 형성하여 염해저항성에 기여하는 것으로 나타났다.

3.3 콘크리트의 물리적 특성과 확산계수와 의 관계

플라이애시를 혼입한 콘크리트의 압축강도, 공극률과 투기성을 물리적특성이라 설정하고 염화물 확산과의 관계를 각각 Fig. 6~Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 6에서는 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 확산계수가 $D_e = A \cdot f_{ck}^{-m/n}$ 과 같

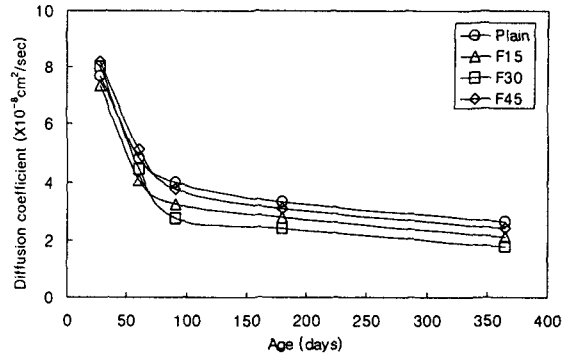


Fig. 5 The Variation of Diffusion Coefficient

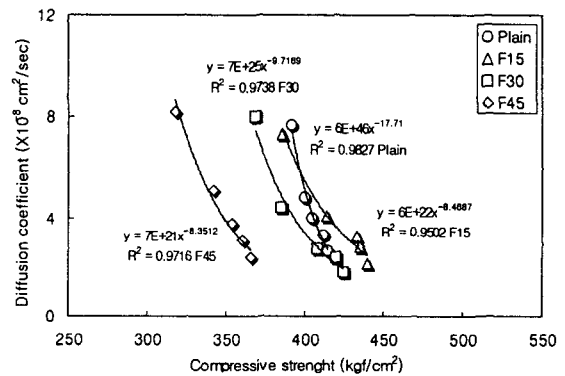


Fig. 6 The relationship between the compressive strength and diffusion coefficient

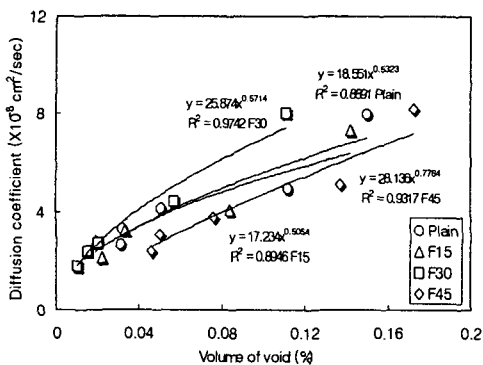


Fig. 7 The relationship between permeability index and diffusion coefficient

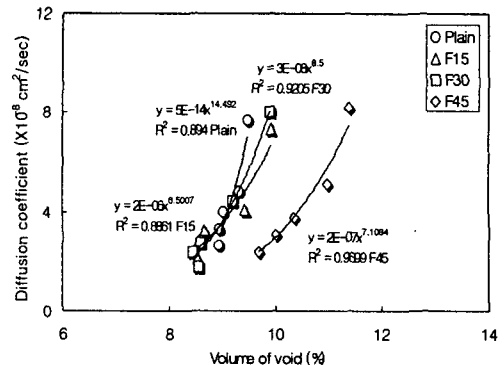


Fig. 8 The relationship between the volume of void and diffusion coefficient

은 경향으로 감소하는 것을 보이고 있다. Fig. 7에서 콘크리트의 확산계수는 공극률이 증가함에 따라 n제곱의 비율로 증가하는 것으로 분석된다. 이는 Kozeny-Carman 방정식⁴⁾($D = V_p^a / S^b K_K$)에서 제시한 확산계수와 공극률의 관계가 본 실험에서도 성립됨을 알 수 있다. 한편 Fig. 8에서 염화물 확산계수는 투기성이 증가함에 따라 n제곱의 비율(단, $n < 0$)로 증가하는 경향을 나타내고 있다.

이를 종합하여 보면, 염화물 확산은 압축강도, 공극률 및 투기성 등의 콘크리트의 물리적 특성에 영향을 받는 것을 알 수 있으며 이들을 기초자료로 하여 장기적인 실험을 통한 자료축적과 염화물에 의한 확산 및 부식개시시기에 미치는 여러 요인들과 함께 분석함으로써 혼화재를 사용한 콘크리트의 성능저하를 예측할 수 있을 것으로 보여진다.

4. 결론

본 연구에서는 플라이애시 혼화재를 사용한 콘크리트에 대해 염화물 확산 특성에 관하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 혼화재를 콘크리트에 혼입한 경우 재령, 혼화재의 혼입률에 따른 포졸란반응 등의 여러 요인에 의해 강도 및 내부조직이 변화하기 때문에 보다 정확한 콘크리트의 염화물 확산에 대한 평가를 하기 위해서는 재령에 따른 콘크리트 내부의 조직을 평가하는 것이 바람직하다고 사료된다.
- 2) 플라이애시 혼화재의 적절한 사용은 Plain과 비교할 때 포졸란반응에 따른 콘크리트 조직의 밀실화 효과에 의해 외부로부터 침투되는 염화물 확산에 대한 저항성이 향상됨을 알 수 있었고 본 연구에서는 15~30% 혼입시 효과가 큰 것으로 나타났다.
- 3) 염화물 확산은 압축강도, 공극률 및 투기성 등의 콘크리트 물리적 특성에 영향을 받는 것을 알 수 있었으며 이들을 기초자료로 하여 장기적인 실험을 통한 자료축적과 염화물에 의한 확산에 미치는 여러요인들과 함께 분석하므로써 혼화재를 사용한 콘크리트의 성능저하를 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 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., Aug. 1999.
2. 문한영, 김성수, 류재석. "염분환경하에 있는 모르타 및 콘크리트 중의 염분 확산에 대한 연구". 콘크리트학회 논문집, 제25권 2호, 1995. 3, pp.283~292.
3. 박승범, 김도겸, "콘크리트 중의 염소이온 확산 특성에 관한 실험적 연구", 콘크리트학회 논문집, 제12권 1호, 2000. 2., pp. 33~44.
4. Carman. P.C., "Flow of Gases through Porous Media", Academic. new York, 1956.