

포졸란계 혼화재를 혼입한 모르타르 및 콘크리트의 내염해 저항성 평가에 관한 실험적 연구

An experimental study on the evaluation of chloride attack resistance in mortar and concrete mixed with pozzolanic admixtures

박 정 준* 김 도 겸** 하 진 규***
Park, Jung Jun Kim, Do Gyeum Ha, Jin Gyu

ABSTRACT

To improve the quality of concrete, we usually consider the reduction of water/cement ratio, the increase of concrete cover depth and the use of mineral admixtures. Reportedly, the use of 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.

Therefore, in this study, we focused on the chloride ion diffusion properties of the pozzolanic admixtures such as fly-ash, slag and silica fume which are known as being useful on chloride attack resistance when mixed into mortar or concrete. Furthermore, we tried to analyze the correlation between mortar and concrete using the admixture, which is useful for analyzing chloride ion diffusion mechanism.

1. 서 론

콘크리트는 경제적이고 내구성이 우수하여 건설 재료로 가장 광범위하게 사용되고 있으며, 철근콘크리트 구조에 적용되어 해안구조물 축조에도 이용되고 있다. 그러나 해양환경에 놓여진 구조물들은 외부로부터 침투되는 염분의 영향을 받아 콘크리트 내부의 철근 부식을 유발하고 콘크리트는 열화현상이 나타나게 된다. 이들 염화물에 의한 철근부식을 방지하기 위한 대책¹⁾으로는 도장이나 수지철근의 사용에 따른 철근자체의 내구성을 확보하는 것과 콘크리트 품질을 개선하는 것으로 나눌 수 있다.

콘크리트의 품질개선을 위한 일환으로는 W/C의 감소, 뿔개의 증가, 혼화재의 사용 등을 예로 들 수 있으며, 특히, 혼화재는 수밀성과 내구성 향상에 효과적인 것으로 보고되고 있으나 염화물 확산에 대한 보다 체계적인 연구²⁾가 필요한 실정에 있다.

따라서, 본 연구에서는 포졸란반응으로 조직을 치밀하게 하여 내해수성에 유리하다고 보고되어지는 플라이애쉬, 고로슬래그, 실리카흄 등의 포졸란계 혼화재료를 콘크리트에 혼입함으로써 이들이 염화물 확산에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 더 나아가 혼화재를 혼입한 모르타르와 콘크리트간의 상관관계를 분석하여 염화물 확산 메카니즘 분석의 기초자료로 사용하고자 한다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원

*** 정회원, 한국건설기술연구원 원장

2. 실험개요 및 방법

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트 및 혼화제

본 실험에 사용한 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트이며 혼화제는 플라이애쉬, 고로슬래그, 실리카흙 등의 포졸란계 혼화제로 이들의 화학적·물리적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1. properties of Cement and pozzolanic admixtures

Type	Item	Surface Area (m ² /g)	Specific Gravity	lg.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
	Slag	4530	2.80	0.10	4.9	0.3	-
	S.Fume	240000	2.10	1.50	0.1	-	96.00

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

Type	Item	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 혼화제

혼화제는 비중 1.212의 나프탈렌 설폰산염 고축합물계의 고성능 감수제를 사용하였다.

2.1.4 침적 용액

해수의 염소이온 농도는 해양과 해역에 따라 다소간의 차이가 있으나 NaCl로 환산하여 약 3~4% 정도의 염소를 함유하고 있다. 본 실험에서는 염소이온에 의한 확산만을 고려하기 위하여 NaCl 95% 농도의 화학약품을 사용하여 3.6%의 용액을 제조한 후 사용하였다.

2.2 배합 및 실험방법

2.2.1 배합

콘크리트 배합은 단위시멘트량 350kg/m³, 물시멘트 비 55%, 잔골재율 45%로 고정하고 고성능감수제를 사용하여 슬럼프 8±3cm내에 들도록 Table 3과 같이 배합설계 및 실험을 하였다. 이때 모르타르는 제조된 콘크리트에 4.95mm 체로 체가름 하여 사용하였다.

Table 3. Mixing design

Item Series	G _{max} (mm)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m ³)					SP (C×%)	Slump (%)	Air (%)
				C	B	W	S	G			
C100	19	55	45	350	0	192.5	791.38	997	0	7	2.5
F15	19	55	45	297.5	52.5	192.5	791.38	997	0	8	1.5
F30	19	55	45	245	105	192.5	791.38	997	0	7.5	1.2
F45	19	55	45	192.5	157.5	192.5	791.38	997	0	10	1.0
BS30	19	55	45	245	105	192.5	791.38	997	0	6	2.0
BS50	19	55	45	175	175	192.5	791.38	997	0	7	2.0
BS70	19	55	45	105	245	192.5	791.38	997	0	6	1.8
SF5	19	55	45	332.5	17.5	192.5	791.38	997	0.5	6	2.0
SF10	19	55	45	315	35	192.5	791.38	997	0.75	7	2.2
SF20	19	55	45	280	70	192.5	791.38	997	1.0	5	2.2

2.2.2 실험방법

(1) 모르타르 및 콘크리트의 압축강도

모르타르 및 콘크리트 압축강도는 각각 50×50×50mm와 Ø100×200mm의 공시체를 제작하여 1일 후 탈형하고 28일간 표준양생을 실시한 후 KS F 2405와 KS L 5105에 준하여 측정하였다.

(2) 모르타르의 염분확산 실험

염분확산 실험은 Fig 1과 같이 콘크리트의 석회성분이 유출되지 않도록 포화된 수산화칼슘 용액을 양쪽 셀에 넣고 한쪽에 염화나트륨을 넣어 염화물 이온의 확산을 평가³⁾하였다. 시험편은 200×200×5 mm의 크기로 제작하고, 28일 수중양생 후 실험장치에 고정하여 28일간 침투된 염분의 농도를 측정 한 후 다음 식으로 확산계수를 구하였다.

$$D_e = \frac{V \Delta Q}{A \Delta t} \times \frac{L}{C_1 - C_2} \quad (1)$$

여기서,

- V : cell 2의 용적 (m³)
- ΔQ : cell 2에서 염화물 이온의 증가량 (kg/m³)
- Δt : 측정시간 간격 (s)
- A : 실험용액에 노출된 시험편의 면적 (m²)
- L : 시험편의 두께 (m)
- C₁ : cell 1에서의 염화물 이온량 (kg/m³)
- C₂ : cell 2에서 염화물 이온의 평균 응집량 (kg/m³)

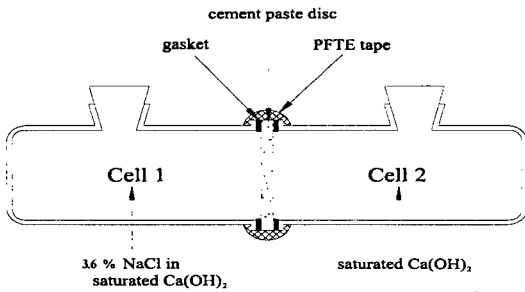


Fig 1 Configuration of typical diffusion cells

(3) 공극률

콘크리트 공극률은 Ø100×200mm 공시체를 제작하여 1일 후 탈형하여 28일간 표준양생한 후에 ASTM C 642 [Standard Test Method for Specific Gravity, and Voids in Hardened Concrete]에 의해 공극률을 측정하였으며 계산식은 다음과 같다.

$$V_{EP}(\%) = \frac{W_B - W_A}{W_B - W_C} \times 100 \quad (2)$$

여기서, W_A: 완전건조중량(g) W_B: 끓인 후의 표면건조 포화중량(g) W_C: 수중중량(g)

(4) 투기성

콘크리트의 투기성은 200×200×200mm의 정육면체 공시체를 제작하여 1일 후 탈형하고, 28일간 표준양생한 후에 48시간 자연건조시킨 상태에서 5개면을 에폭시로 실링한 후 Permeability Tester를 사용하여 구하였다. 여기서 측정된 투기성계수(K)는 Torrent가 제안한 이론적 모델에 의하여 계산된다.

$$K = 4 \left(\frac{V_c (dP_I/dt)^2}{A (P_A^2 - P_I^2)} \right) \cdot \frac{\mu P_a}{\epsilon} \int_{t_0}^t \left[1 - \left(\frac{P_I}{P_a} \right)^2 \right] dt \quad (3)$$

여기서, K: 투기성계수(m²) dP_I/dt: 시간 t에 대한 미분항(Nm⁻²s⁻¹) μ: 기체의 동점도(Nsm⁻²) V_c: 챔버 내부용량(m³)
 ε: 콘크리트의 공극(m⁻³) A: 내부 챔버와의 접촉면적(m²) P_I: 내부챔버의 압력(Nm⁻²s⁻¹) P_a: 대기압(Nm⁻²)

(5) 흡수성

콘크리트의 흡수성 시험은 200×100×100mm의 콘크리트 공시체를 제작하여 28일 표준양생 후 각각 1일, 3일을 건조한 뒤 Hooton이 제시한 방법에 의해 수행하였으며 다음 식을 이용하였다.

$$I = A + S t^{1/2} \quad (4)$$

여기서, I: 흡수된 축척된 체적/유입표면 단위면적(mm³/mm²=mm)

A: 측정초기값(mm) S: 재료의 흡수성(mm√min) t: 경과시간(min)

(5) 염화물 함유량 측정

200×200×200mm의 정육면체 콘크리트 공시체를 제작하여 1일 후 탈형하고, 28일간 표준양생 후 염화물의 일방향 침투를 유도하기 위해 5개면을 에폭시로 실링하고 NaCl 3.6%의 침적용액에 28일간 침적시켜 깊이별 가용성 염화물 함유량을 측정하였다.

실험조건은 염수침적조건과 조석대의 조건을 인위적으로 만든 건습반복(6hr 침적, 18hr 건조)조건으로 나누어 수행하였다. 염화물 함유량 측정은 콘크리트 표면으로부터 15mm 간격으로 시료 40g을 채취한 후 일본 콘크리트공학협회 기준(안)[경화 콘크리트 중의 염분량 측정방법]에 의해 염화물을 추출하여 AG-100으로 측정하였다. 염화물 확산계수는 Fick의 제2법칙에 의해 유도된 다음 식을 이용하였다.

$$C_{(x,t)} = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_e t}} \right) \right] \quad (5)$$

여기서, $C_{(x,t)}$: 콘크리트 표면에 C_0 의 염화물 농도가 존재할 때, 재령 t 에서 콘크리트 표면으로부터 x cm 깊이에의 염화물 농도(kg/m³) C_0 : 표면의 염화물 농도(kg/m³) x : 염화물 확산계수(cm²/sec) erf: 오차함수

3. 실험결과

3.1 압축강도

혼화재의 종류 및 혼입량에 따른 모르타르와 콘크리트의 재령 28일의 압축강도비를 각각 Fig 2와 Fig 3에 나타내었다. 모르타르와 콘크리트에 플라이애쉬와 고로슬래그의 혼입량이 증가할수록 강도비가 감소하고 실리카흄의 경우는 혼입량 증가에 따라 강도증가의 경향을 보이고 있다.

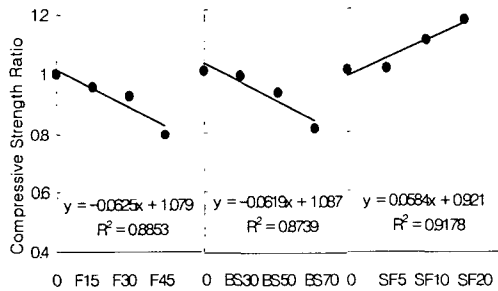


Fig 2. Compressive Strength Ratio of Mortar

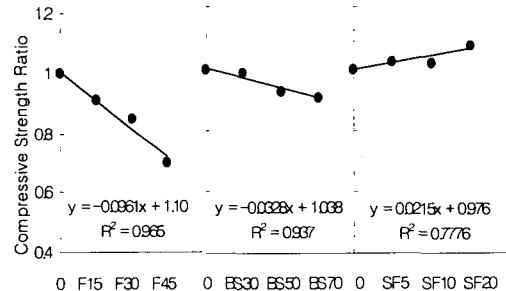


Fig 3. Compressive Strength Ratio of Concrete

3.2 모르타르의 염분확산계수

침투된 염분의 농도를 측정한 결과에 따른 확산계수를 구하여 Fig 4에 나타내었다. Fig 4는 플라이애쉬를 혼입한 경우를 나타낸 것으로 혼입율이 증가함에 따라 확산계수가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 포졸란 반응으로 C-S-H 생성량이 증가하여 내부조직이 밀실화 되면서 나타나는 현상으로 판단된다.

3.3 공극률

혼화재 종류 및 혼입량에 따른 콘크리트의 실험

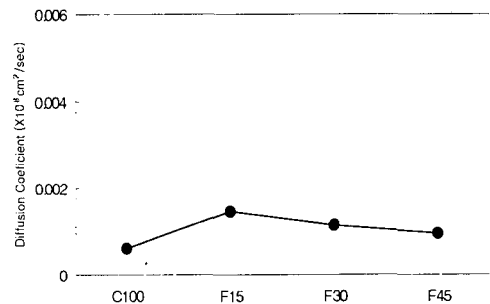


Fig 4. Diffusion Coefficient of Mortar

공극률 변화를 Fig 5에 나타내었다. Fig 5에서 혼입량이 적은 경우인 BS 30과 SF5의 공극률은 C100에 비해 각각 16, 10%정도 감소한 것으로 나타나고 있으나 혼입량이 증가함에 따라 혼화제의 종류에 관계없이 공극률이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 재령초기에는 포졸란 반응성이 대체로 늦게 나타나기 때문에 재령의 경과에 따른 공극률의 변화가 나타날 것으로 예상된다.

3.4 투기성

혼화제를 혼입한 콘크리트의 재령 28일 투기성 변화를 Fig 6에 나타내었다. Fig 6은 C100의 투기성을 기준으로 할 때 혼화제를 사용한 경우 혼입량이 증가할수록 투기성은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 특히 BS70인 경우 C100에 비해 70%정도 감소하고 있어 포졸란계 혼화제 사용은 콘크리트 내부의 조직을 밀실하게 만드는 것을 알 수 있다.

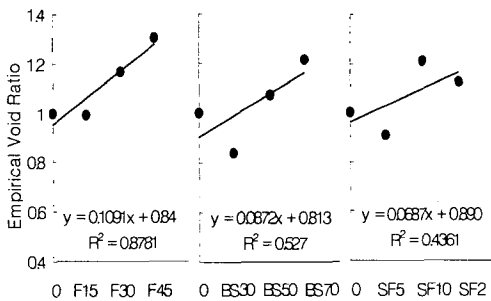


Fig 5. Empirical Void Ratio of Concrete

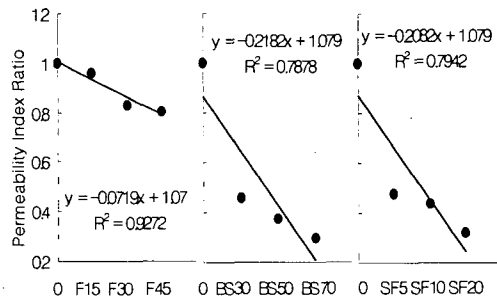


Fig 6. Permeability Index Ratio of Concrete

3.5 흡수성

혼화제를 혼입한 콘크리트의 재령 28일 흡수성 측정결과를 Fig 7, Fig 8을 나타내었다. Fig 7,8은 F45의 흡수성이 1일 건조시 0.0484, 3일 건조시 0.0605로 건조일수와 관계없이 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트가 고로슬래그와 실리카흄을 혼입한 콘크리트보다 흡수성이 높게 형성됨을 나타내고 있다.

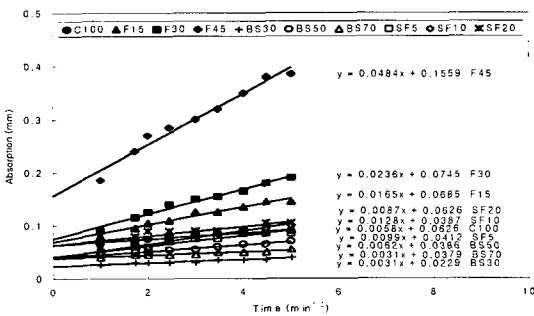


Fig 7. Sorptivity of Concrete (1day)

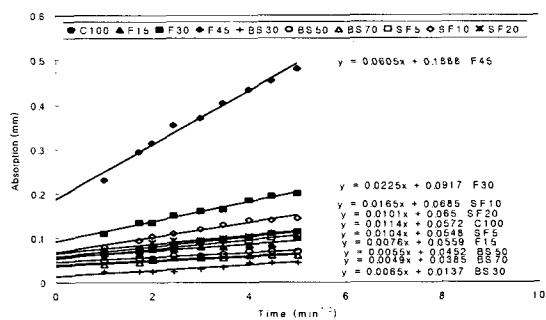


Fig 8. Sorptivity of Concrete (3days)

3.6 깊이별 염화물 함유량 및 확산계수

3.6% NaCl의 수용액에 28일간 침적시켜 콘크리트의 표면에서의 깊이별 가용성 염화물 함유량과 깊이별 확산계수 변화를 플라이애쉬를 혼입한 경우에 대해서 Fig 9~12에 나타내었다.

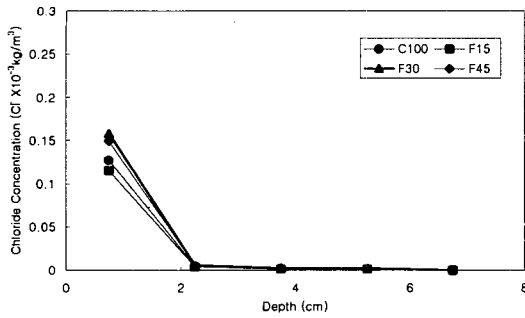


Fig 9. Chloride Concentration at Submerged Zone (28days)

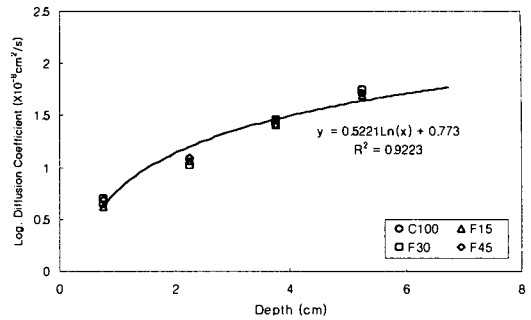


Fig 10. Diffusion Coefficient at Submerged Zone (28days)

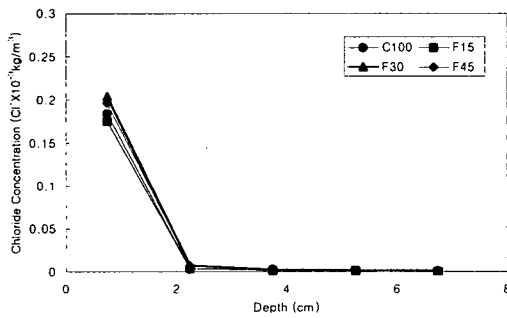


Fig 11. Chloride Concentration at Tidal Zone (28days)

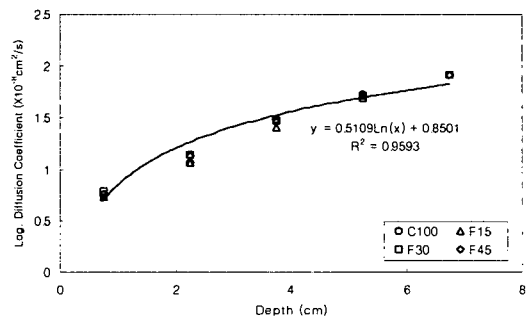


Fig 12. Diffusion Coefficient at Tidal Zone (28days)

Fig 9, 10은 염수침적조건이고 Fig 11, 12는 건습반복조건에서의 변화를 나타낸 것이다. 염화물 함유량은 염수침적조건이 건습반복조건보다 다소 높게 나타나고 있으나 장기적인 실험을 통해 혼화제의 종류 및 혼입량에 따른 염화물 확산에 대한 분석이 이루어져야 할 것으로 보여진다.

4. 결론

염화물에 의한 철근부식시기 및 구조물의 사용수명을 정확히 예측하기 위해서는 콘크리트의 강도, 재령 등에 따른 미세구조의 변화를 분석하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 혼화재료의 사용에 따른 강도, 재령에 따른 수화도, 공극률 및 투기성의 변화를 분석하므로써 콘크리트의 미세구조 변화에 따른 염화물 확산특성과 함께 모르타르 및 콘크리트의 상관관계를 분석하고자 하였다.

현재까지의 연구결과 적절한 포졸란계 혼화제 사용에 대해 염화물의 확산에 큰 영향을 미치는 투기성을 감소시킬 수 있는 것으로 판단되지만 장기적인 기간의 측정자료의 축적 및 분석이 필요로 하며 현재 진행 중에 있다.

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. 박승범, 김도겸 : 콘크리트 중의 염소이온 확산 특성에 관한 실험적 연구, 콘크리트학회 논문집, 제12권 1호, pp. 33~44, 2000. 2.
3. Roy, D.m., Kumar, A. and Rhodes, J.P. : Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Pastes, Cement and Concrete Reserch, Vol.11, No. 3, pp. 395~406, 1981.