

포졸란재 함유 콘크리트의 세공구조와 염화물이온 침투 저항성

소양섭¹⁾ · 소형석^{2)*}

¹⁾전북대학교 건축학부 ²⁾서남대학교 건축공학부

(2001년 9월 3일 원고접수, 2002년 1월 3일 심사완료)

Resistance to Chloride Ion Penetration and Pore Structure of Concrete Containing Pozzolanic Admixtures

Yang-Seob Soh¹⁾, and Hyoung-Seok So^{2)*}

¹⁾ Faculty of Architecture, Chunbuk National University, Chonju, 561-756, Korea

²⁾ Faculty of Architectural Engineering, Seonam University, Namwon, 560-711, Korea

(Received on September 3, 2001, Accepted on January 3, 2002)

ABSTRACT

Significant damage to concrete results from the intrusion of corrosive solutions, for example, dissolved chlorides corrode reinforcing steel and cause spalling. Effectively blocks the penetration of these solutions will eliminate or greatly reduce this damage and lead to increased durability.

This study is to investigate the effects of pozzolanic admixtures, fly ash and silica fume, and a blast furnace slag on the chloride ion penetration of concretes. The main experimental variables were the water-cementitious material ratios, the types and amount of admixtures, and the curing time. And it is tested for the porosity and pore size distributions of cement paste, chloride ion permeability based on electrical conductance, and 180-day ponding test for chloride intrusion. The results show that the resistance of concrete to the penetration of chloride ions increases as the w/c was decreased, and the increasing of curing time. Also, concrete with pozzolans exhibited higher resistance to chloride ion penetration than the plain concrete. The significant reduction in chloride ion permeability(charge passed) of concrete with pozzolans due to formation of a discontinuous macro-pore system which inhibits flow. It is shown that there is a relationship between chloride ion permeability and depth of chloride ion penetration of concrete, based on the pore structure (porosity and pore size distributions) of cement paste.

Keywords : pozzolans, chlorides ion permeability, porosity, pore size distributions, depth of chloride ion penetration

1. 서 론

철근콘크리트 구조물에서 가장 대표적인 성능저하 증상은 철근의 부식이다. 철근 부식 메커니즘(mechanism)에 기초해 볼 때, 콘크리트 내부로 이동되는 유해물질은 순수한 혹은 유해한 이온(황산염이나 염화물이온 등)을 운반하는 물, 이산화탄소, 그리고 산소이다¹⁾. 이것들은 부분적인 침투나 확산, 흡수, 모세관작용, 그리고 그 조합과 같은 다양한 메커니즘에 의해 콘크리트 내부로 이동된다²⁾. 하지만 이들의 이동은 결국 콘크리트 표면을 통해 일어날 것이며, 단면 깊은 부분까지 침투하는 유해물질들의 콘크리트 내 이동특성은 철근의 부식속도와 부식비율을 지배할 것이다²⁾. 이것은 콘크리트 내 물질의 이동특성이 철근콘크리트구조물의 내구성을 결정하는 가장 중요한 인자

중 하나임을 나타낸다. 콘크리트 내 물질의 이동특성에 관한 기존 연구는 대부분 철근부식 등 다양한 성능 저하 과정에서 중요한 이동 메커니즘으로 고려된 가스나 이온의 확산성을 중심으로 전개되어 왔다^{2,3)}. 그러나 확산실험은 결과 산출을 위해 정교한 실험장비나 장기간의 실험과정이 요구되었다. 더욱이 확산실험에서 이동된 적은 수량의 매개물은 민감한 분석기나 감지기(censer)들을 필요로 하기 때문에 많은 어려움이 뒤따른다³⁾. 이에 따라 성능저하 과정과 직접적인 관계는 없지만, 최근 비교적 간단한 실험장비와 방법으로 단시간 내에 실험결과를 얻을 수 있는 투과성(permeability) 실험에 관심이 증가되고 있다²⁾. 특히 1980년 이후 투과계수와 모세관 흡수성 및 확산계수의 상호 관련성이 확립되면서 콘크리트의 투과성에 관한 연구는 중성화나 염화물이온 침투와 같은 내구성과의 관계를 규명하는 데 그 초점이 모아지고 있다^{2,3)}. 그러나 콘크리트의 투과성과 내구성 연구는 표준화되지 못한 실험 방법 및 기술 등으로 아직 미비한 상태이며 각기 다른 실

* Corresponding author

Tel : 063-620-0220 Fax : 063-620-0211

E-mail : sohol@tiger.seonam.ac.kr

협조건 및 방법에 의해 단편적으로 수행되고 있어 철근콘크리트 구조물의 내구설계 및 내구성 예측을 위해 실질적으로 이용 가능한 자료는 거의 없는 실정이다. 특히 콘크리트의 투과성과 내구성 연구는 투과계수와 내구성 항목과의 직접적인 관련성뿐 아니라 콘크리트의 세공구조에 기초하여 투과성을 평가하고 철근부식 발생의 주원인인 중성화나 염화물이온 침투 저항성 등과 투과계수의 상호관계를 검토하는 종합적인 연구방법으로 접근되어야 할 것이다.

본 연구는 염화물이온 투과성을 중심으로 콘크리트의 조직구조 개선에 효과적인 포졸란재 함유 콘크리트의 염화물이온 침투 저항성을 평가하는 데 그 목적이 있다. 이를 위해 물-결합재비(W/B), 혼화제의 종류 및 치환율, 양생기간을 실험변수로 하여 플라이애쉬, 실리카흙, 고로슬래그분말 함유 콘크리트의 세공구조와 염화물이온 투과성, 10% NaCl용액에 180일간 침지된 염화물이온 침투 깊이를 측정하고 보통콘크리트와 비교·분석하였다. 또한 콘크리트의 염화물이온 투과성과 전세공용적 및 염화물이온 침투 깊이의 상호관계를 검토하여 유해물질의 침투로 발생하는 철근부식의 억제 및 예방을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료

시멘트는 KS L 5201에 규정된 국내 S사의 보통포틀랜드 시멘트였으며 골재는 최대 골재크기가 20 mm인 쇄석(절건비중 2.55)과 5 mm인 강모래(절건비중 2.6)를 사용하였다. 또한 혼화제는 충남 보령산 플라이애쉬와 북미(캐나다)산 실리카흙, 광양제철소의 고로슬래그분말을 사용하였다. 시멘트 및 혼화제의 화학적 성분과 물리적 성질은 Table 1과 같다.

2.2 공시체 제작 및 양생

본 연구의 콘크리트는 물-결합재비(W/B)와 혼화제의 종류 및 치환율, 그리고 양생기간을 변수로 슬럼프(slump)

값 8 cm를 유지하도록 제작되었으며 공시체의 크기는 ϕ 100×200 mm였다. NaCl 10% 용액 침지실험에 의한 염화물이온 침투깊이 측정용 공시체는 80×100×200 mm였다. 이중 혼화제 치환 콘크리트의 경우 공기량 변화 없이 슬럼프 값 8 cm를 유지하기 위해 고유동화제(SP제)를 시멘트 중량에 대해 0.3~0.7%로 첨가하였으며 그 배합결과는 Table 2와 같다. 양생은 타설 후 1일 보습(20±2 °C, RH 80±5%)하여 탈형하고 측정일까지 수중양생(20±2 °C)하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 세공용적의 측정

ϕ 100×200 mm 공시체 표면의 0~5 mm 부분에서 입경 2 mm 정도의 시료를 채취하고 아세톤에 침지한 후 D-dry 처리된 시료를 수은 압입식 포로시메타(AUTOPORE 9220)를 이용하여 공극반경 3.75~7500 nm 범위의 세공용적 및 전세공용적을 측정하였다. 이때 제공된 최대 압력은 3290 kgf/cm²이었고 접촉각은 130°, 수은의 표면 인장력은 0.489 ×10⁵ kgf/cm²이었다.

2.3.2 염화물이온 투과성 시험

콘크리트의 염화물이온 투과성은 Whiting⁴⁾이 발표한 Fig. 1의 Coulomb test 장치와 유사하게 제작하여 측정하였다. 실험은 ASTM C 1202⁵⁾와 AASHTO T 277-831⁶⁾ "Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete"에 의거하였으며 그 방법을 요약하면 다음과 같다. 각 실험변수에 따라 제작된 ϕ 100×200 mm의 공시체를 50 mm 두께로 3등분하고 절단면을 제외한 원주 면에 에폭시 페인팅(시편 표면에서 수분의 누출방지)하여 Fig. 1에 장치한 후 6시간동안 30분 간격으로 저항 0.2Ω에 걸리는 전압을 측정하였다. 측정된 전압 값은 식(1)에 의해 전류 값(amperes)으로 환산되었고 식(2)에 의해 전체 통과전하량(charge passed, coulombs)을 산출하였다. 이때 전체 통과전하량은 식(3)에 의거하여 실험된 공시체의 투과면적으로 보정 되었다.

한편, ASTM C 1202에서는 통과전하량에 기초하여 콘

Table 1 Chemical and physical proportion of admixture

Chemical composition (%)	Cement	Fly ash	Silica fume	Blast furnace slag
SiO ₂	20.57	53.08	97.33	33.1
Al ₂ O ₃	5.48	25.25	0.24	13.76
Fe ₂ O ₃	3.18	12.84	0.33	0.85
CaO	63.03	2.61	0.3	40.59
MgO	3.41	1.37	0.33	7.22
SO ₃	2.23	0.06	-	1.65
Ig.loss	1.24	2.1	4.42	0.91
Blaine's specific surface area(cm ² /g)	3,240	3,280	200,000	4,550
Specific gravity	3.15	2.17	2.2	2.9

Table 2 Mix proportions of concrete

Test series	Mix.	W/B (%)	Unit of weight (kg/m ³)						Air (%)
			C	FA	SF	BFS	S	G	
1. Plain concrete	P40	40	490	-	-	-	584	1076	1.1
	P45	45	462	-	-	-	642	1010	1.6
	P50	50	400	-	-	-	711	1013	1.5
	P55	55	351	-	-	-	767	1019	1.7
	P60	60	320	-	-	-	797	1014	2.5
	P65	65	308	-	-	-	807	994	1.4
2. Fly ash concrete	FA45-20	45	370	92	-	-	607	1010	1.1
	FA55-10	55	316	35	-	-	755	1016	1.9
	FA55-20		281	76	-	-	742	1016	1.7
	FA55-30		246	105	-	-	730	1016	1.1
	FA65-20	65	246	62	-	-	772	994	2.1
3. Silica fume concrete	SF45-10	45	416	-	46	-	625	1010	1.2
	SF55-5	55	333	-	18	-	763	1016	1.7
	SF55-10		316	-	35	-	756	1016	1.9
	SF55-20		281	-	70	-	737	1016	0.6
	SF65-10	65	277	-	31	-	773	994	1.6
4. Blast furnace slag concrete	BFS45-50	45	231	-	-	231	625	1010	1.0
	BFS55-40	55	211	-	-	140	759	1016	1.0
	BFS55-50		176	-	-	175	756	1016	1.2
	BFS55-60		140	-	-	211	754	1016	0.8
	BFS65-50	65	154	-	-	154	794	994	1.9

Note) W/B : Water-Binder ratio, P : Plain, FA : Fly ash, SF : Silica fume, BFS : Blast furnace slag

콘크리트의 염화물이온 투과성 비교 자료를 Table 3과 같이 제시하고 있다.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{0.2} \quad (1)$$

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (2)$$

$$Q_s = Q_x \cdot \left(\frac{95}{x}\right)^2 \quad (3)$$

여기서, I = 전류(amperes), V = 전압(volts),
 R = 저항(ohms), Q = 통과 전하량(coulombs),
 I₀ = 초기 전류 값(amperes),
 I_t = t분 후 전류 값(amperes),
 Q_s = φ 95 mm를 통과한 전하량,
 Q_x = φ x mm를 통과한 전하량이다.

2.3.3 염화물이온 침투깊이 측정

콘크리트의 염화물이온 침투 깊이는 실험변수에 따라 80×100×200 mm의 크기로 제작된 재령 28일 공시체에 대해 Fig. 2와 같이 양측면을 제외한 모든 표면에 에폭시 페인트로 도포하고 10% NaCl 용액에 180일간 침지한 후 일본 콘크리트학회 “폴리머 시멘트 모르타르의 염화물 침투깊이 시험방법 규준(안)⁷⁾에 따라 측정하였다.

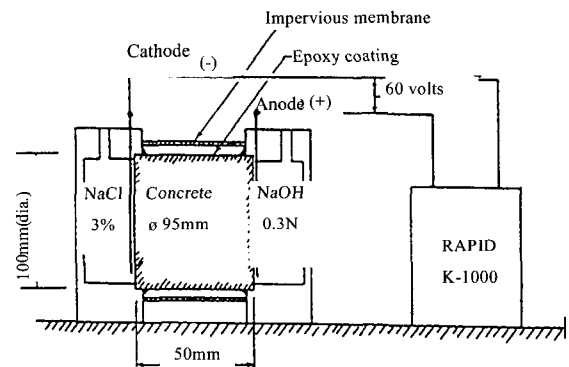


Fig. 1 Schematic of rapid chloride permeability test apparatus⁴⁾

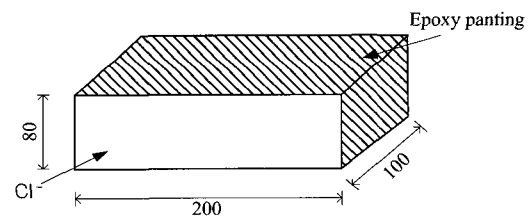


Fig. 2 Sedimentation specimen

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전세공용적 및 세공경 분포 특성

Table 3 Chloride ion permeability based on charge passed⁵⁾

Charge passed (Coulombs)	Chloride permeability	Type of concrete
4000 ≤ 2000~4000	High Moderate	High water-cement ratio(≥0.6) Moderate water-cement ratio (0.4~0.5)
1000~2000	Low	Low water-cement ratio(<0.4) "Iowa" dense concrete
100~1000	Very low	Latex modified concrete, Internally sealed concrete
≤ 100	Negligible	Polymer impregnate concrete, Polymer concrete

Table 4는 실험변수에 따른 각 콘크리트의 실험결과이며 Fig. 3 및 Fig. 4에는 재령 28일에 측정된 각 콘크리트의 물-결합재비에 따른 세공경 분포 및 전세공용적 결과를 나타내었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 보통콘크리트 및 혼화재 치환 콘크리트의 세공구조는 모두 물-결합재비가 낮아짐에 따라 큰 공극(50 nm 이상)의 용적이 감소되면서 작은 공극(50 nm 이하)들의 용적이 크게 증가되는 경향을 나타내었다. 또한 Table 4와 Fig. 4에서 알 수 있듯이 각 콘크리트의 전세공용적은 혼화재의 사용유무에 관계없이 물-결합재비가 높아질수록 증가되었으며 물-결합재비 60 % 이상에서 크게 증가되었다. 이는 보통콘크리트 뿐 아니라 혼화재 치환 콘크리트의 세공구조가 물-결합재비에 크게 의존하고 있음을 보여준다.

Fig. 5와 Fig. 6에는 혼화재의 종류와 치환율에 따른 각 콘크리트의 재령 28일 세공경 분포 및 전세공용적 실험결과를 보통콘크리트와 함께 비교하여 나타내었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 혼화재의 사용과 치환율이 증가할수록 비교적 큰 공극들의 용적이 감소된 반면 반경 50 nm 이하의 작은 세공들이 많이 분포하는 결과를 나타내었으며 이러한 경향은 실리카흄과 고로슬래그분말로 치환된 콘크리트에서 더욱 현저하였다. 또한 Table 4 및 Fig. 6에서와 같이 혼화재 치환 콘크리트의 재령 28일 전세공용적은 혼화재 치환율이 증가됨에 따라 일률적으로 감소되지 않고 불규칙하게 나타났으며 플라이애쉬로 치환된 경우는 치환되지 않은 콘크리트에 비해 오히려 증가되었다. 따라서 혼화재의 사용 및 치환율의 증가에 따른 콘크리트 내 세공구조의 변화는 전세공용적 보다는 세공경 분포에 더욱 영향을 미치며 특히 반경 50 nm 이상의 큰 세공(모세관공극) 용적을 크게 감소시키는 것으로 나타났다. 이것은 혼화재들의 포졸란반응과 매트릭스 충전효과에 의한 콘크리트 내 세공구조의 개선효과를 설명한다.

Fig. 7과 Fig. 8은 물-결합재비 55 %를 갖는 각 콘크리트의 양생기간에 따른 세공경 분포 및 전세공용적 결과이다. Fig. 7 및 Fig. 8에서 알 수 있듯이 혼화재의 사용이나 종류 및 첨가량 등에 관계없이 콘크리트의 세공구조

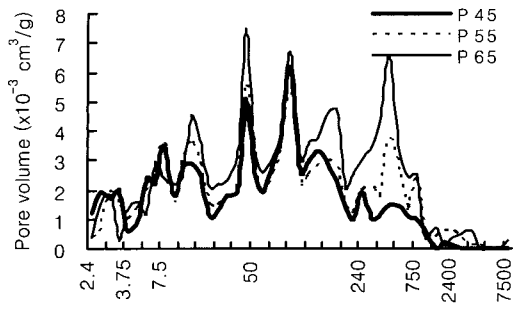
(전세공용적 및 세공경 분포)는 양생기간에 크게 의존함을 보여준다. 시멘트 수화의 진행과 혼화재들의 포졸란반응에 기인되어 콘크리트 내 세공경 분포는 양생기간이 증가될수록 작은 공극들의 증가와 큰 공극들의 감소로 변화되었다. 특히 Fig. 7에서와 같이 장기재령일수록 양생기간은 보통콘크리트 보다 혼화재 치환 콘크리트의 세공구조에 더욱 큰 영향을 주었다. 또한 각 콘크리트의 전세공용적은 양생기간이 증가함에 따라 반-지수곡선으로 감소되었으며 재령 28일까지 급격히 변화되었다. 사용 혼화재 중 플라이애쉬로 치환된 콘크리트의 전세공용적은 양생기간이 증가함에 따라 가장 큰 변화를 보였다.

3.2 염화물이온 투과성

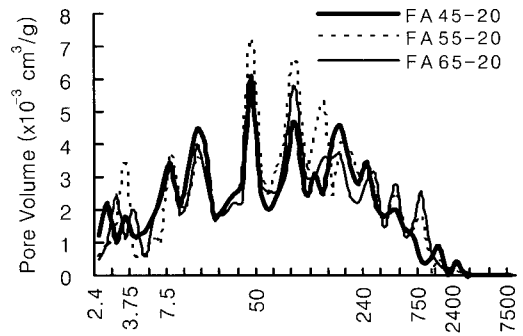
Table 4와 Fig. 9 및 Fig. 10에는 실험변수에 따른 보통콘크리트 및 혼화재 치환 콘크리트의 염화물이온 투과성 결과를 나타내었다. Fig. 9와 Fig. 10은 각 콘크리트의 염화물이온 투과성이 물-결합재비와 혼화재의 사용 및 치환을 그리고 양생기간에 크게 의존하고 있음을 보여준다. Fig. 9(a) 및 Fig. 10(a)에서 볼 수 있듯이 재령 28일 콘크리트의 염화물이온 투과성은 혼화재 사용유무에 관계없이 물-결합재비가 높아짐에 따라 지수곡선으로 증가하고 있으며 특히 물-결합재비 60 % 이상에서 크게 증가되어 보통콘크리트 뿐 아니라 혼화재 치환 콘크리트에서도 물-결

Table 4 Results of test

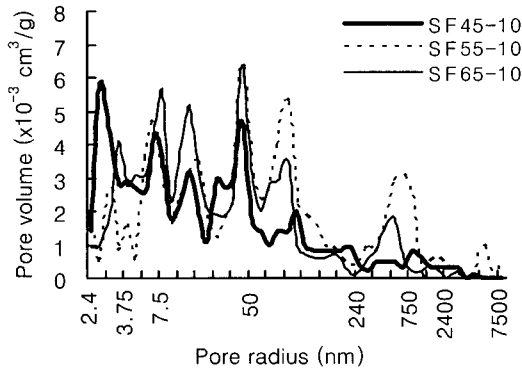
Type of concrete	Total proosity ($\times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$)			Chloride ion permeability (coulombs)			Depth of chloride ion penetration (6months, mm)
	7D	28D	160D	7D	28D	160D	
P40		84.0	74.9		2044	1882	26.3
P45		86.3	77.8		2774	2213	31.2
P50		90.4	81.5		3456	2708	33.4
P55	118.5	92.3	84.2	5945	4208	3565	37.3
P60		107.4	89.4		4910	4190	43.6
P65		118.4	98.4		5840	1939	49.2
FA45-20		87.2	75.3		1935	1070	29.5
FA55-10		93.4	84.4		3657	2754	35.4
FA55-20	121.3	93.1	83.9	5881	3444	2189	31.8
FA55-30		94.7	85.3		3132	1270	28.3
FA65-20		102.1	88.2		4544	3760	46.9
SF45-10		80.7	70.4		688	204	22.6
SF55-5		85.1	79.1		2351	1548	31.5
SF55-10	102.1	84.8	78.5	4521	1543	936	28.5
SF55-20		87.4	82.4		883	399	24.4
SF65-10		91.7	84.6		3872	3349	44.3
BFS45-50		82.7	73.1		986	447	24.1
BFS55-40		86.0	80.5		3297	1684	31.3
BFS55-50	105.5	85.2	79.8	4867	2725	1130	28.8
BFS55-60		87.6	83.5		1814	841	26.3
BFS65-50		92.6	85.1		4072	3518	45.1



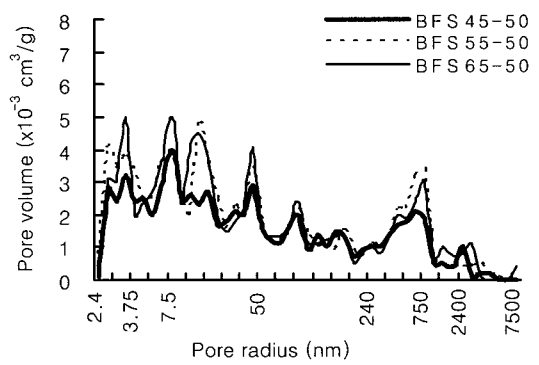
a) Plain concrete



b) Fly ash concrete



c) Silica fume concrete



d) Blast furnace slag concrete

Fig. 3 Pore size distribution of concrete versus water/binder ratios

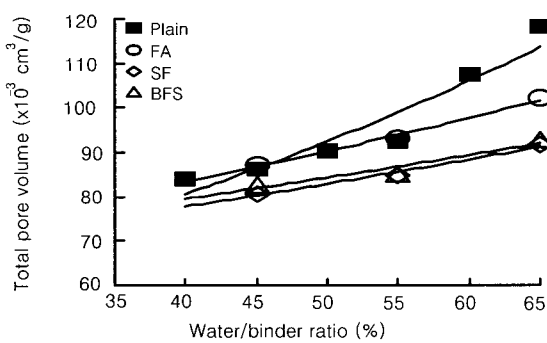


Fig. 4 Influence of water/binder ratio on total pore volume

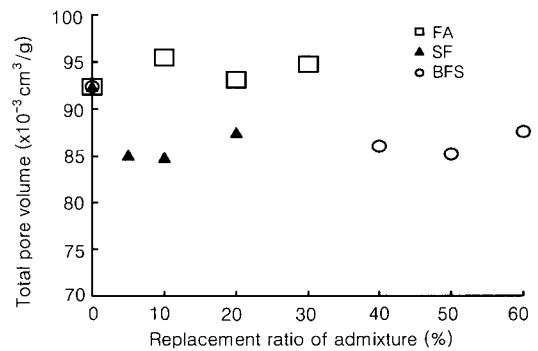
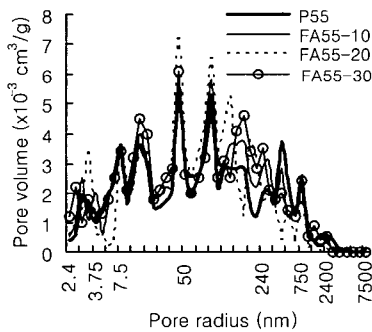
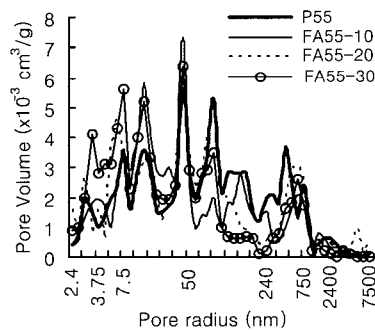


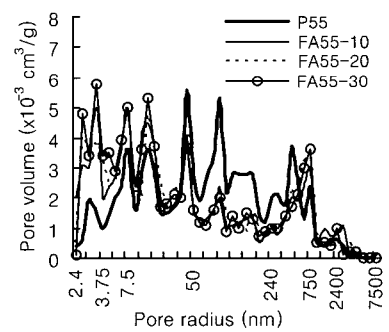
Fig. 6 Influence of replacement ratio of admixture on total pore volume



a) Replace of fly ash



b) Replace of silica fume



c) Replace of blast furnace slag

Fig. 5 Pore size distribution of concrete versus replacement ratio of admixture

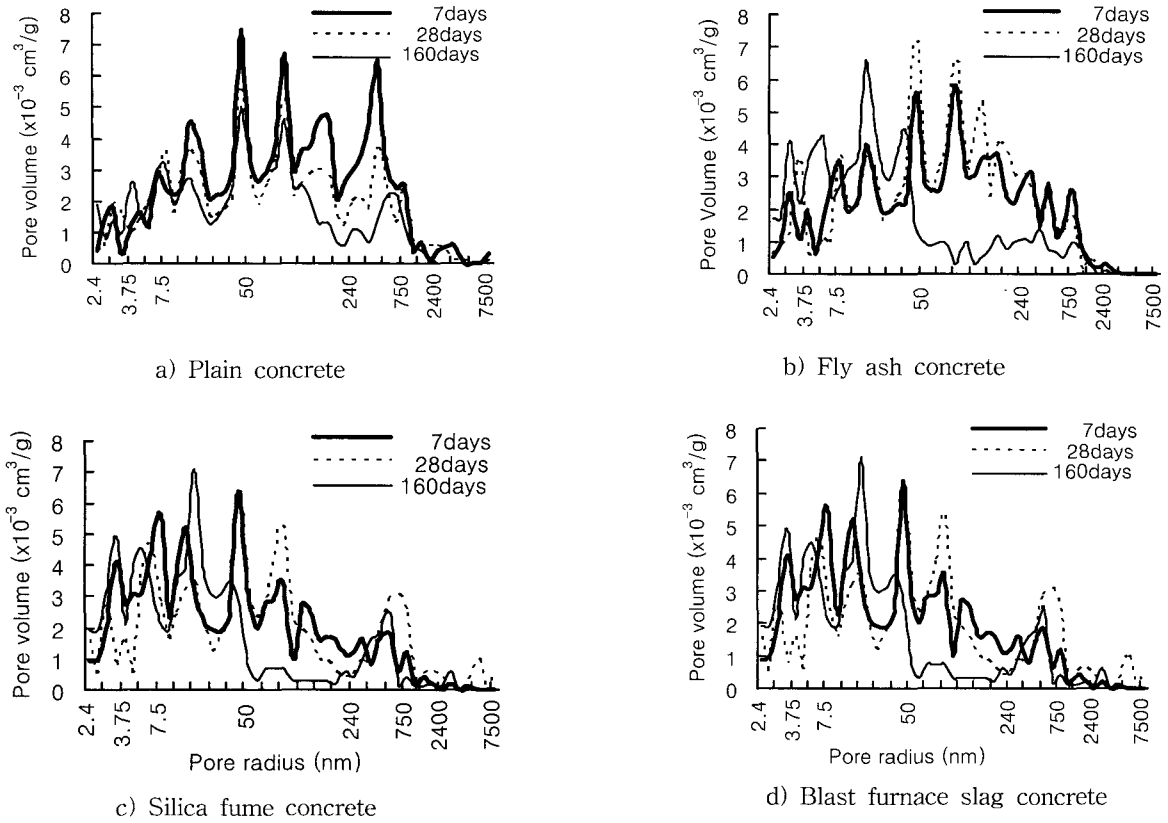


Fig. 7 Pore size distribution of concrete versus curing time

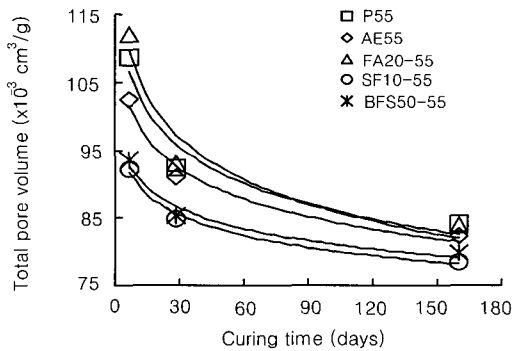


Fig. 8 Influence of curing time on total pore volume

합재비의 한계값에 대한 고려가 필요한 것으로 판단되었다. 또한 물-결합재비 65%를 갖는 실리카흙 및 고로슬래그분말 치환 콘크리트의 염화물이온 투과성은 물-결합재비 55%의 보통콘크리트와 동등수준으로 나타나 혼화재의 사용효과가 높음을 알 수 있었다. Fig. 9(b)와 Fig. 10(b)은 물-결합재비 55%인 혼화재 치환 콘크리트의 재령 28일 염화물이온 투과성 결과를 혼화재 종류 및 치환율에 따라 나타낸 것이다. Fig. 9(b)와 같이 혼화재 치환 콘크리트의 염화물이온 투과성은 혼화재를 사용하지 않은 보통콘크리트에 비해 매우 낮게 나타났으며 치환율이 증가됨에 따라 낮아지고 있다. 또한 사용 혼화재 중 실리카

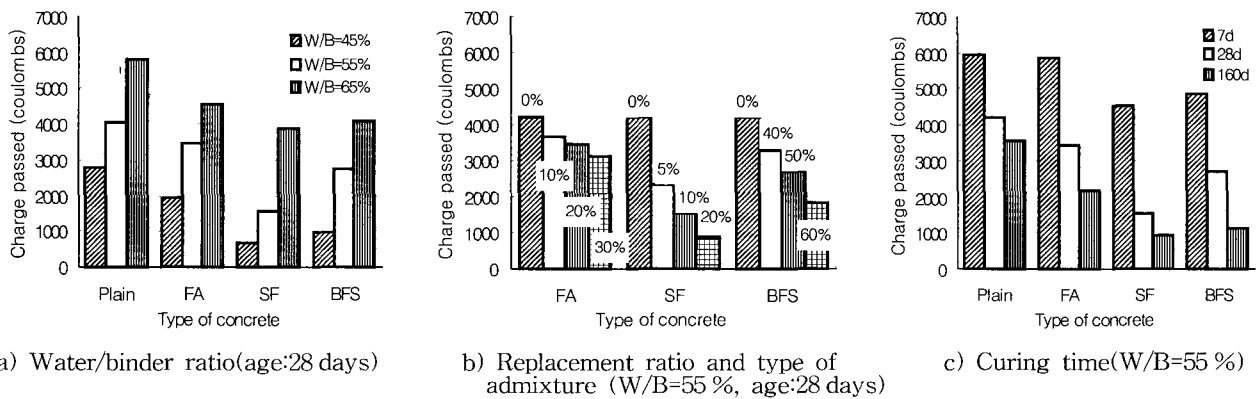


Fig. 9 Chloride ion permeability of concrete

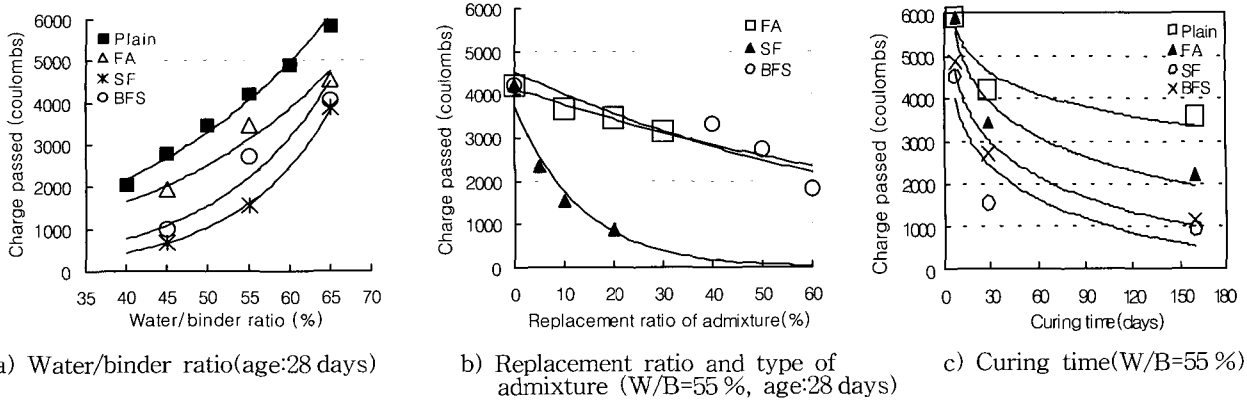


Fig. 10 Influence of test parameters on chloride ion permeability of concrete

흡은 가장 큰 감소효과를 나타냈으며 치환율에 따라 큰 변화를 보였다. 이는 실리카흡의 높은 분말도에 기인된 결과이다. 각 콘크리트의 염소이온 투과성을 혼화재의 종류 및 치환율에 따라 살펴보면, 보통콘크리트(P55)에 비해 플라이애쉬의 경우 치환율이 10~30%로 증가됨에 따라 약 1.2배~1.4배정도 감소되었고 실리카흡의 경우 치환율이 5~20%로 증가될수록 약 1.8배~4.8배정도, 그리고 고로 슬래그분말의 경우 40~60% 치환됨에 따라 약 1.3배~2.3배정도로 크게 감소되었다. Fig. 9(c)와 Fig. 10(c)에는 물-결합재비 55%를 갖는 각 콘크리트의 염화물이온 투과성을 양생기간에 따라 나타내었다. Fig. 9(c)와 Fig. 10(c)에서 알 수 있듯이 각 콘크리트의 염화물이온 투과성은 양생기간이 증가됨에 따라 크게 낮아지고 있으며 특히 재령 28일까지 급격히 변화되었다. 또한 동일재령에서 혼화재 치환 콘크리트들은 보통콘크리트에 비해 낮게 나타났으며 장기재령일수록 높은 감소효과를 나타내었다. 즉 양생기간이 콘크리트의 염화물이온 투과성에 미치는 영향은 보통콘크리트 보다 혼화재 치환 콘크리트에서 더욱 컸다. 이는 분말도가 높은 혼화재들의 매트릭스 충전효과, 그리고 보다 장기재령에서 활발하게 일어나는 혼화재들과 수산화칼슘(Ca(OH)₂)사이의 포졸란반응에 기인된 결과이며 3.1절의 세공구조 결과로 설명할 수 있다.

따라서 콘크리트의 염화물이온 투과성은 물-결합재비의 감소, 혼화재의 사용과 치환율의 증가, 양생기간의 증가에 따라 크게 감소됨을 알 수 있었으며 이것은 콘크리트 내 세공구조의 변화, 즉 전세공용적의 감소와 침투 및 확산이 비교적 용이한 모세관공극(50 nm 이상) 용적의 큰 감소로 설명할 수 있다. 그러나 Fig. 6과 Fig. 9(b) 및 Fig. 10(b)에서 보는 바와 같이 혼화재의 치환율이 증가됨에 따라 전세공용적은 일률적으로 감소되지 않고 불규칙적으로 나타났으며 플라이애쉬로 치환된 경우는 오히려 높아졌지만 염화물이온 투과성은 일률적으로 감소되었다. 이것은 콘크리트의 염화물이온 투과성이 세공들의 전체용적 보다 오

히려 세공경들의 분포, 즉 침투 및 확산이 어려운 세공들의 용적비에 더욱 관련하고 있음을 나타낸다. 그리고 혼화재의 사용은 콘크리트 내 전세공용적의 감소보다 공극간 연결성이 있어 침투 및 확산이 용이한 모세관공극 용적의 큰 감소에 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

한편 Table 5에는 염화물이온 침투 저항성에 관한 참고 자료로서 실험변수에 따라 측정된 각 콘크리트의 염화물이온 투과성을 Table 3의 ASTM C 1202 비교 자료에 의해 분류하여 나타내었다. Table 4와 Table 5에서 보는 바와 같이 재령 7일인 물-결합재비 55%의 보통 및 혼화재

Table 5 Grading of chloride penetration

Chloride ion permeability	Charge passed (Coulombs)	Type of concrete (Test series)		
		7day	28day	160day
High	4000 ≤	P55 FA55-20, SF55-10, BFS55-50	P55, P60, P65 FA65-20 BFS65-50	P60, P65
Moderate	2000 ~ 4000	-	P40, P45, P50 FA55-10 FA55-20, FA55-30, SF55-10, SF65-10, BFS55-40 BFS55-50	P45, P50, P55 FA55-10, FA55-20, FA65-20, SF65-10, BFS65-50
Low	1000 ~ 2000	-	FA45-20, SF55-10, BFS55-60	P40 FA45-20, FA55-30, SF55-5 BFS55-40, BFS55-50
Very Low	100 ~ 1000	-	SF45-10, SF55-20, BFS45-50	SF45-10, SF55-10, SF55-20 BFS45-50, BFS55-60
Negligible	≤ 100	-	-	-

치환 콘크리트와 물-결합재비가 65% 이상인 재령 28일의 혼화재 치환 콘크리트(실리카흙은 제외) 및 물-결합재비 55% 이상인 보통콘크리트의 염화물이온 투과성은 4000C 이상인 높은(high) 투과성으로 나타내었다. 그러나 재령 160일의 혼화재 치환 콘크리트는 물-결합재비가 55% 이상임에도 물-시멘트비 40~50%의 보통콘크리트가 갖는 중간(moderate)의 염화물이온 투과성과 동등수준 혹은 그 이하로 나타났다. 특히 재령 28일 혼화재 치환 콘크리트의 염화물이온 투과성에서 물-결합재비 45%와 55%의 실리카흙 및 고로슬래그분말 치환 콘크리트는 폴리머 시멘트 콘크리트(latex modified concrete) 등이 갖는 "매우 낮은(very low)" 투과성을 나타내었다.

따라서 Table 2의 배합과 Table 4 및 5의 실험결과에서 알 수 있듯이 콘크리트의 염화물이온 침투 저항성 향상을 위해서는 단위시멘트량의 증가 보다 적절한 혼화재의 선정 및 치환율 결정이 더욱 효과적일 것으로 판단된다.

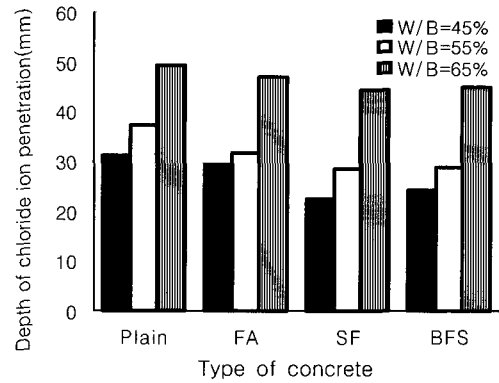
3.3 염화물이온 침투 저항성

Fig. 11은 재령 28일 콘크리트를 대상으로 NaCl 10% 용액에 6개월(180일)간 침지한 후 측정된 염화물이온 침투 깊이 결과이다. Table 4와 Fig. 11에서 알 수 있듯이 각 콘크리트의 염화물이온 침투 깊이는 물-결합재비와 혼화재의 사용 및 치환율에 크게 의존하고 있음을 보여준다.

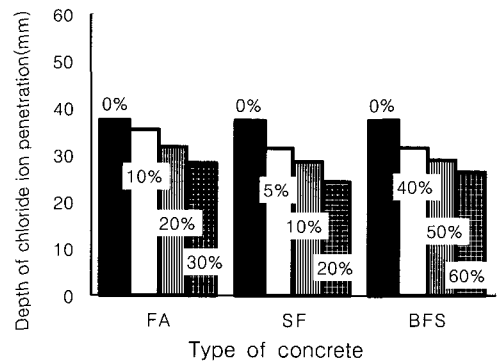
Fig. 11(a)과 같이 콘크리트의 염화물이온 침투 깊이는 혼화재의 사용유무에 관계없이 물-결합재비가 높아질수록 증가되고 있으며 특히 물-결합재비 65%에서 급격히 증가되었다. 또한 동일 물-결합재비에서 혼화재 치환 콘크리트의 염화물 이온 침투 깊이는 보통콘크리트에 비해 작게 나타났으며 Fig. 11(b)에서와 같이 물-결합재비 55%를 갖는 치환율에 따른 혼화재 치환 콘크리트의 실험결과에서도 확인할 수 있다. 혼화재 치환 콘크리트에서 염화물이온 침투 깊이는 그 치환율이 증가될수록 낮게 나타나고 있으며 혼화재의 사용에 따른 염화물이온 침투 억제효과는 실리카흙과 고로슬래그분말에서 높게 나타났다. 이것은 3.2절 염화물이온 투과성과 동일한 경향의 결과이며 물-결합재비의 감소와 혼화재의 사용 및 치환율의 증가에 따른 콘크리트 내 세공구조의 개선효과에 기초하여 설명할 수 있다. 즉 낮은 염화물이온 투과성의 콘크리트는 시간이 증가될수록 더욱 높은 염화물이온 침투 저항성을 나타낼 것이다.

3.4 염화물이온 투과성과 전세공용적 및 염화물이온 침투 깊이의 관계

Fig. 12에는 실험변수에 따라 제작된 각 콘크리트의 염화물이온 투과성과 전세공용적의 관계를 나타내었다.



a) Water/binder ratio (age : 28 days)



b) Curing time

Fig. 11 Depth of chloride ion penetration of concrete versus water/binder ratio (age : 28 days) and curing time

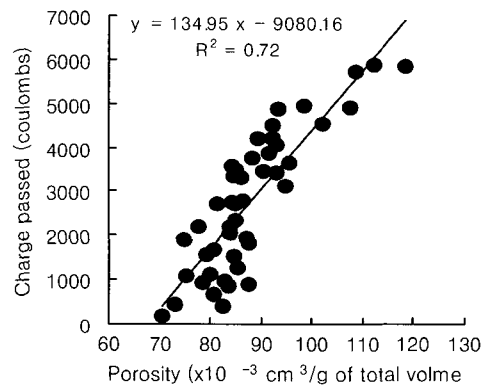


Fig. 12 The relationship between chloride ion permeability and porosity of concrete

3.2절에서 살펴본 바와 같이 콘크리트의 염화물이온 투과성은 전세공용적 보다는 오히려 침투 및 확산이 어려운 세공들의 용적비(세공경들의 분포)에 더욱 관련하고 있다. 그럼에도 불구하고 Fig. 12는 염화물이온 투과성과 전세공용적이 서로 관련하고 있음을 보여주었다.

Fig. 13은 10% 염화나트륨용액에 6개월간 침지한 후 측정된 각 콘크리트의 염화물이온 침투 깊이와 전기적 방법에 기초하여 통과전하량으로 측정된 염화물이온 투과성의

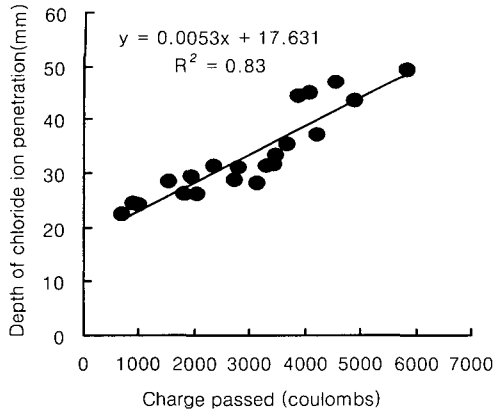


Fig. 13 The relationship between chloride ion permeability and depth of chloride ion penetration of concrete

관계를 나타낸 것이다. Fig. 13과 같이 콘크리트의 염화물 이온 투과성의 증가와 함께 침지실험에 의한 염화물 이온 침투 깊이도 대수의 관계로 증가되고 있으며 이들은 높은 관련성을 보였다.

따라서 콘크리트의 염화물 이온 침투 저항성은 통과전하량에 기초한 염화물 이온 투과성에 의해 평가될 수 있으며 이들의 관계는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$D_{K(6M)} = 0.0053K_c + 17.631 \quad (4)$$

여기서, $D_{K(6M)}$: 10 % 염화나트륨용액에 6개월간 침지 한 후 측정된 콘크리트의 염화물 이온 침투 깊이(mm)이고, K_c : 통과전하량에 기초한 염화물 이온 투과성(coulombs)이다.

4. 결 론

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 콘크리트의 염화물 이온 투과성은 물-결합제비의 감소, 혼화재의 사용 및 치환율의 증가, 양생기간의 증가에 따라 크게 감소되었으며 이것은 콘크리트 내 세공구조의 변화, 즉 전세공용적의 감소와 침투 및 확산이 비교적 용이한 모세관공극 용적의 큰 감소로 설명할 수 있다.
- 2) 콘크리트의 염화물 이온 투과성은 콘크리트 내 세공들의 전체용적(전세공용적)에 관련하지만 상관계수가 낮았으며 오히려 침투 및 확산이 어려운 세공들의 용적비(세공경 분포)에 더욱 관련하고 있었다.
- 3) 포졸란재의 사용은 콘크리트 내 전세공용적의 감소보다 모세관공극(반경 50 nm 이상) 용적의 큰 감소에 더욱 효과적이었으며 이러한 효과로부터 포졸란재 함유 콘크리트

트의 염화물 이온 투과성과 침지실험에 의한 염화물 이온 침투 깊이는 동일 배합의 보통콘크리트에 비해 크게 개선되었다.

4) 물-결합제비 45 %와 55 %의 실리카흙 및 고로슬래그분말 치환 콘크리트(재령 28일)의 염화물 이온 투과성은 폴리머 시멘트 콘크리트(latex modified concrete) 등이 갖는 "매우 낮은(very low)" 투과성을 나타내었다.

5) 실험결과로부터 콘크리트의 염화물 이온 침투 저항성 향상을 위해서는 단위시멘트량의 증가 보다 적절한 혼화재의 선정 및 치환율 결정이 더욱 효과적일 것으로 판단되었다.

6) 통과전하량에 기초한 콘크리트의 염화물 이온 투과성은 침지실험에 의한 염화물 이온 침투 깊이 측정결과와 높은 관련성을 나타내었다. 따라서 콘크리트의 염화물 이온 침투 저항성은 통과전하량에 기초한 염화물 이온 투과성에 의해 평가 될 수 있으며, 이들의 관계는 $D_{K(6M)} = 0.0053K_c + 17.631$ 와 같이 나타낼 수 있다.

참고문헌

1. Haque, M. N., and Kawamura, M., "Carbonation and Chloride-Induced Corrosion of Reinforced in Fly Ash Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol.89, No.1, 1992, pp.41~48.
2. Hilsdorf, H. K., and Kropp, J., "Performance Criteria for Durability," Rilem Report 12, London, 1995, pp.166~178.
3. Garboczi, E. J., "Permeability, Diffusivity, and Micro-Structural Parameters : Critical Review," *Cement and Concrete Research*, Vol.20, No.4, 1990, pp.591~601.
4. Whiting, D., "Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete," Washington DC, Federal Highway Administration, 1981, Report No. RD-81/119.
5. ASTM Standard C 1202, "Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration," 1990.
6. AASHTO, "Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing," Fourteenth Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 1986.
7. 폴리머-세멘트모르탈시험방법소위원회 "폴리머-세멘트모르탈의 염화물 이온 침투 깊이 시험 방법(案), 同解説", *콘크리트공학*, V.25, N.8, 1987, pp.5~7.

요 약

본 연구에서는 콘크리트의 염화물이온 침투 저항성에 미치는 포졸란재의 사용 효과를 평가하고자 물-결합재비와 혼화재의 종류 및 치환율, 양생기간을 변수로 제작된 각 콘크리트에 대해 세공용적, 염화물이온 투과성, 10% 염화나트륨용액 침지실험을 실시하여 보통콘크리트와 비교·분석하였으며 염화물이온 투과성과 세공구조 및 염화물이온 침투깊이의 상호관계를 검토하였다. 연구결과, 포졸란재의 사용은 콘크리트 내 세공들의 전체용적의 감소보다 모세관공극(50 nm이상) 용적의 큰 감소에 더욱 효과적이며 이러한 효과로부터 포졸란 함유 콘크리트의 염화물이온 침투 저항성은 동일 배합의 보통콘크리트보다 매우 우수하게 나타났다. 콘크리트의 염화물이온 투과성은 콘크리트의 전세공용적에 관련하고 있지만 상관계수가 낮았으며 오히려 침투 및 확산이 용이한 모세관공극의 용적비(세공경 분포)에 더욱 관련하고 있었으며 침지실험에 의한 염화물이온 침투 깊이와 높은 상관관계를 나타내어 콘크리트의 염화물이온 침투 저항성 평가에 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 포졸란재, 염화물이온 투과성, 전세공용적, 세공경 분포, 염화물이온 침투 깊이
