

콘크리트의 투수성 측정 및 초저투수성 콘크리트의 개발 연구

An Experimental Study on the Permeability Measurement and Development of Ultra Low Permeable Concrete



오병환*

Oh-Byung Hwan



정원기**

Chung-Won Ki



차수원***

Cha-Soo Won



장봉석***

Jang-Bong Seok

요 약

콘크리트의 투수성은 내구성에 커다란 영향을 미치는 요인이 된다. 콘크리트의 강도가 커질수록 투수성은 적어지므로 재래적인 방법으로는 투수 실험이 어렵다. 본 연구에서는 콘크리트의 투수성능 향상을 위하여 투수성이 작은 콘크리트에 효과적으로 사용할 수 있는 새로운 투수기법을 연구하고, 투수성이 매우 낮은 초저투수성 콘크리트를 개발하는데 주목적을 두고있다. 이를 위하여 주요 실험 변수로서 시멘트의 종류, 단위시멘트량, 혼화제 종류 및 첨가량 그리고 굵은 골재의 최대치수를 주요 변수로 하여 투수성 시험과 강도시험을 포괄적으로 수행하였다. 본 시험 결과 콘크리트의 강도가 증가함에 따라서 콘크리트의 내투수성은 향상됨을 알 수 있으며, 내투수성을 증진하기 위해서는 단위시멘트량의 증가보다는 적절한 혼화제 사용과 그 혼입량을 조절하는 것이 더욱 효과적임을 알 수 있었다. 보통배합의 일반 콘크리트는 투수성이 매우 높은 반면 본 연구에서 제안된 콘크리트는 실리카흄 등의 적정 혼입으로 일반 콘크리트의 1/100 이하의 매우 낮은 투수성을 보여 초저투수성 콘크리트의 개발이 가능하였다. 본 연구는 앞으로 콘크리트 구조물의 내구성 향상을 위한 중요한 토대를 구축하고 이에 따른 기초자료를 제공할 수 있는 것으로 사료된다.

* 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수
** 정희원, 동아건설산업(주) 기술연구소 선임연구원
*** 정희원, 서울대학교 토목공학과 박사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1996년 12월 30일까지 학회로 보
내주시면 1997년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

Abstract

The permeability of concrete influences the durability of concrete remarkably. The conventional test method for permeability is very difficult to apply to high strength concrete because of its very low permeability. The present study employs a reasonable and realistic test method for permeability of concrete and proposes a very low permeability concrete. To this end, comprehensive tests have been conducted and major test variables include the types and amount of cement, the types and amount of admixtures, and the size of aggregates. The present test results indicate that the permeability decrease with the increase of strength and that the concrete with certain mineral admixtures exhibits very low permeability. The permeability of those high performance concrete is about 1/100 of conventional normal concrete. The present study provides a firm base for the use of very low permeable and hence very durable concrete.

Keywords : Permeability of Concrete, Low Permeable Concrete, Permeability Test, Mineral Admixtures, Silica Fume, Durability.

1. 서 론

최근 고속도로, 교량, 댐, 고속철도, 항만시설, 원자력 및 화력발전소, 고층건물 등 국가 산업발전을 위한 기반 시설물이 활발히 건설되고 있고, 기존의 시설물들도 상당히 늘어난 실정이다. 이러한 신설 및 기존 구조물들은 대부분 열악한 환경에 노출되어 있으며 따라서 이들에 대한 내구수명 관리가 매우 중요한 사항으로 부각되고 있다. 이러한 내구성에 영향을 주는 가장 중요한 인자가 바로 콘크리트의 투수성이다.^{1), 2)} 투수성이 클 경우 외부의 물과 공기의 반복적인 침투를 유발하여 성능저하(열화)가 빨리 일어날 수 있기 때문이다. 콘크리트의 투수성은 내부식성, 내황산염저항성 등에도 큰 영향을 미친다. 콘크리트가 유해환경에 노출되어 염이 나 이온의 침투로 인하여 콘크리트의 성능저하를 유발하게 된다.^{3), 4)}

본 연구에서는 콘크리트의 내구성 결정에 중요한 인자인 투수특성을 규명하기 위하여 시멘트 종류, 단위시멘트량, 혼화재의 종류 및 대체량 그리고 굵은 골재의 최대치수를 변수로 하여 포괄적인 투수성 시험을 수행하였으며, 콘크리트의 투수성은 강도가 증가함에 따라 낮아지는 경향이 있으므로 일

반적인 재래식 투수시험으로는 투수성이 매우 낮은 콘크리트의 투수성 시험을 수행하기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 투수성이 낮은 경우에 적절히 활용할 수 있는 염소이온 투과시험법에 의해 콘크리트의 투수성을 효율적으로 측정하였다. 이와 동시에 유동성 시험 및 강도 시험도 수행하였다.

또한 본 연구에서는 투수성 실험결과 특히 실리카흄과 플라이에쉬의 효과를 면밀히 고찰하여 치밀하고 내투수성이 강한 초저투수성 콘크리트의 배합비를 도출하였다.

2. 콘크리트의 투수성 실험

본 연구에서는 예비실험을 통하여 각 배합의 기본적인 물성과 강도 특성을 파악하고 이를 토대로 유동화제량 등의 배합을 결정하였으며, 이를 통하여 내투수성 실험을 위한 변수를 결정하고 이들 변수들에 대하여 각각 투수성 시험을 수행하였다.

2.1 실험변수

본 연구에서는 콘크리트의 각 배합 인자가 투수성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 시멘트 종류

(제1종 시멘트, 제5종 시멘트), 단위시멘트량 (380kg/m³, 550kg/m³), 혼화재의 종류(실리카흙, 플라이애쉬, 고로슬래그) 및 첨가량 (SF:0%, 10%, 20%, FA:0%, 15%, 30%, BS:0%, 12.5%, 25%) 그리고 굵은 골재의 최대 치수와 공기연행율 한 경우(3.4%~4.2%)와 하지 않은 경우(1.0%~1.9%)를 변수로 하여 유동특성 실험 및 강도실험 그리고 투수성 시험을 수행하였고, 이들 변수에 대한 배합특성은 표 1과 같다. 또한 시험에 사용된 결합재의 물성은 표 2~표 4에 보인 것과 같다.

각 실험변수에 대한 균지 않은 콘크리트의 물성은 표 5에 나타내었으며, 각 변수에 대한 강도 시험

결과는 표 6에 나타내었다.^{5), 6)} 표 1에서 N1은 보통강도 콘크리트로서 제1종 시멘트의 단위시멘트량이 380kg/m³임을 나타내고, H1은 고강도 콘크리트로서 제1종 시멘트의 단위시멘트량이 550kg/m³임을 나타낸다. 그리고, S10, F15, B12.5 등은 각각 실리카흙 10% 혼입, 플라이애쉬 15% 혼입, 고로슬래그 12.5% 혼입을 나타낸다. 기호에서 맨 끝에 있는 숫자는 공기연행률(AE제)의 첨가율을 나타낸 것이다.

2.2 실험방법

콘크리트의 투수시험은 높은 압력으로 물을 강제

Table 1 Mix proportions of concretes

Test Series	Cement (kg/m ³)	Admixture (kg/m ³)			Water (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Air Entraining (C×%)	Super-plasticizer (C×%)
		FA	SF	BS					
Aggregate size 19mm	N1-0-0	380	—	—	164	850	1040	—	1.7
	N1-F15-0	323	57	—	164	850	1040	—	1.5
	N1-F30-0	266	114	—	164	850	1040	—	1.2
	N1-F15-0.04	323	57	—	164	850	1040	0.04	1.3
	N1-S10-0	342	—	—	164	850	1040	—	1.4
	N1-S20-0	304	—	—	164	850	1040	—	1.5
	N1-S10-0.04	342	—	—	47.5	164	850	0.04	1.5
	N1-V12.5-0	332.5	—	—	95	164	850	—	1.8
	N1-B25-0	285	—	—	164	850	1040	—	1.7
Aggregate size 25mm	N1-B25-0360	285	57	—	164	850	—	0.04	1.6
	N1-0-0	380	—	—	164	850	1040	—	1.9
	N1-F15-0.04	323	57	—	164	850	1040	0.04	1.4
	N1-S10-0.04	342	—	—	164	850	1040	0.04	1.5
Aggregate size 19mm	N1-B25-0360	285	57	—	164	850	1040	0.04	1.5
	H1-0-0	550	—	—	154	609	1142	—	1.8
	H1-F15-0.04	467.5	82.5	—	154	609	1142	0.04	1.7
	H1-F15-0.04	495	—	—	154	609	1142	0.04	1.7
	H1-F15,S10-0.04	412.5	82.5	—	154	609	1142	0.04	1.6
	N5-0-0	380	—	—	154	850	1040	—	1.2
	N5-F15-0.04	323	57	—	154	850	1040	0.04	0.6
	N5-S15-0.04	342	—	—	154	850	1040	0.04	0.8
N5-B12.5-0	332.5	—	—	47.5	154	850	1040	—	1.0

Table 2 Chemical properties of blast furnace slag

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
34.4%	15.9%	0.6%	41.3%	6.2%

Table 3 Properties of fly ash

SiO ₂	Moisture %	Ig. loss %	Specific Gravity	Blaine cm ² /g	Water Requirement %	Strength Activity Index % of Control 28day
63	0.06	3.5	2.15	3.166	100	92

Table 4 Chemical properties of silica fume

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	C	K ₂	N ₂
97%	0.3%	0.07%	0.23%	0.7%	0.9%	0.1%	0.4%

Table 5 Properties of fresh concrete

Test Series	Slump(cm)		Air Contents (%)	Unit Weight (t/m ³)	Remarks
	After mixing	After 1 hour			
N-0-0	19.0	9.0	1.8	2.39	Aggregate size 19mm
N1-F15-0	17.0	9.0	1.2	2.37	
N1-F30-0	22.0	12.0	1.0	2.36	
N1-F15-0.04	16.0	6.5	3.6	2.37	
N1-S10-0	17.5	7.0	1.1	2.38	
N1-S20-0	18.0	6.5	1.0	2.38	
N1-S10-0.04	18.5	7.5	3.5	2.37	
N1-B12.5-0	19.35	8.5	3.4	2.38	
N1-B25-0	15.5	7.0	3.8	2.37	
N1-F15,S10-0.04	19.0	12.5	4.1	2.40	
N1-0-0	20.5	10.5	1.9	2.39	Aggregate size 25mm
N1-F15-0.04	19.0	12.5	3.8	2.38	
N1-S10-0.04	17.5	11.0	3.7	2.40	
N1-F15,S10-0.04	18.5	10.5	3.9	2.42	Aggregate size 19mm
H1-0-0	19.5	9.0	1.6	2.37	
H1-F15-0.04	19.0	11.0	4.2	2.36	
H1-S10-0.04	20.5	10.5	4.0	2.39	
H1-F15,S10-0.04	18.5	9.0	3.8	2.42	
N5-0-0	19.5	11.0	1.6	2.41	
N5-F15-0.04	20.5	11.5	4.1	2.42	
N5-S10-0.04	21.0	10.5	3.9	2.43	
N5-B12.5-0	15.5	6.5	1.9	2.42	

투수시켜 Darcy의 법칙에 의하여 투수계수를 결정하는 방법이 있으나 조적이 치밀한 콘크리트의 경우 투수되는 수량이 극히 적으며 실험에 장시간이 요구되는 단점이 있다. 이에 반하여 전위차에 의한 염소이온의 침투를 이용한 방법은 각 시편들간의 뚜렷한 특성이 나타나고 있으며 또한 빠른 시간안에 콘크리트 시편에 대한 투수성에 대한 상대적인 지표표를 얻을 수가 있다는 점이 장점으로 인식된다.

따라서 본 연구에서는 수압에 의한 촉진실험보다 치밀한 콘크리트 등에 효율적인 염소이온의 투과를 전압차에 의하여 촉진하는 시험법을 채택하였다. 염소이온 투과 시험은 ASTM C1202-91 "Electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration"⁶⁾와 AASHTO T259의 방법에 의거하여 수행하였으며, 시험 방법

은 다음과 같다.

28일 수중양생한 직경 10cm의 콘크리트 시편을 길이가 5cm가 되도록 절단한 다음 실험을 수행하기 전까지 상대 습도 95% 이상을 유지시킨다.

실험시 시편은 Applied Voltage Cell(이하 A.V. Cell)에 고정시키고 회로를 구성한다. 그림 1은 염소이온 투과시험의 직류회로를 설명하고 있고, 그림 2는 A.V. Cell의 상세도이다. 이 회로에서 전원은 60V의 직류전압을 $\pm 0.1V$ 의 정밀도로 안정적으로 유지할 수 있는 것이어야 한다. 실험을 수행하는 동안 전해질용액이 새지 않게 하기 위하여 사용되는 Sealant는 고무제품이고 무게는 20~40g 정도의 것으로 Cell과 시편사이를 고정시킨다.

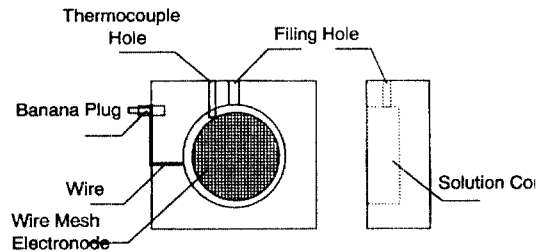
기지의 저항체를 회로에 연결하여 전압을 측정함으로써 전류를 측정할 수 있는데 이때 사용되는

Table 6 Strength properties for various mixes

Test Series	Strength (kg/cm ²)	Compressive Strength		Splitting Tensile Strength	Flexural Strength	Remarks
		7days	28days	28days	28days	
N1-0-0		33.7	431	44	51	Aggregate size 19mm
N1-F15-0		270	433	48	48	
N1-F30-0		262	335	34	48	
N1-F15-0.04		305	430	38	55	
N1-S10-0		449	525	68	80	
N1-S20-0		550	630	50	63	
N1-S10-0.04		403	511	69	79	
N1-B12.5-0		292	429	46	61	
N1-B25-0		327	426	48	59	Aggregate size 25mm
N1-F15.S10-0.04		399	539	54	78	
N-0-0		301	420	32	43	
N1-F15-0.04		280	414	59	38	
N1-S10-0.04		378	484	74	38	Aggregate size 19mm
N1-F15.S10-0.04		395	516	78	47	
H1-0-0		372	590	50	67	
H1-F15-0.04		341	645	49	74	
H1-S10-0.04		516	724	64	87	Aggregate size 19mm
H1-F15.S10-0.04		415	593	54	81	
N5-0-0		285	389	56	62	
N5-F15-0.04		236	331	52	59	
N5-S10-0.04		307	443	54	69	Aggregate size 19mm
N5-B12.5-0		270	383	45	49	

저항으로는 콘크리트 시편에 적용되는 전압에 영향이 적도록 하기 위하여 가능한 작은 저항을 사용하는데 본 실험에서는 0.2Ω을 사용하였다.

콘크리트 시편의 노출된 부분은 불투수성의 재료로 덮개를 하는데 이는 실험이 진행되는 동안 콘크리트 표면이 건조되어 염소이온의 투과에 영향을



Applied Voltage Cell

그림 2 Applied Voltage Cell

미치는 것을 방지하기 위함이다.

A.V. Cell의 (-)전극에 3.0%의 염화나트륨(NaCl) 용액을 채우고 (+)전극쪽에는 0.3N의 수산화나트륨(NaOH) 용액을 채운다. 실험시 용액의 초기온도 및 대기온도는 20~25℃ 범위내에 있어야 하며 실험중 용액의 온도는 90℃ 이하가 되도록 한다.

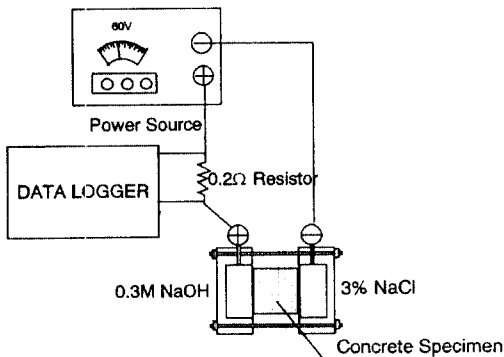


그림 1 염소이온 투과시험의 장치도

시험중 30분마다 저항 0.2Ω에 걸리는 전압을 데이터로거(Data logger)로 측정하여 기록한다. 이때 전압은 0.1mV까지 측정가능해야 하고 ±0.1%의 정도를 가진 장치이어야 한다. 측정된 전압값은 다음 식에 의하여 전류치로 환산한다.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{0.2}$$

여기서, I = 전류(Amperes, A)

V = 전압(Volts, V)

R = 저항(Ohms, Ω)

염소이온 투과실험은 매 시편마다 6시간이 소요되고 30분간격으로 전압값을 측정한다. 측정된 전압을 전류를 환산하여 다음 식을 이용하여 회로를 통과한 총 전하량을 산정한다.

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

여기서,

Q = 회로를 통과한 전하량(coulombs)

I_n = 실험시작후 n분 경과후 전류(amperes)

만약 시편의 염소이온 투과직경이 95mm가 아닐 경우 투과면적에 대한 보정을 해야 하고, 이는 다음 식에 의거한다.

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

여기서, Q_s = 직경 95mm를 통과한 전하량

Q_x = 직경 x mm를 통과한 전하량

ASTM의 규정에서는 표 7와 같이 본 실험에서 산정된 전하량을 염소이온 투과성과 비교하는 자료⁶⁾를 제시하고 있다.

3. 결과 분석 및 초저투수성 콘크리트의 개발

3.1 실리카흙 혼입에 따른 투수특성

단위시멘트량 380kg/m³의 경우, 실리카흙을

Table. 7. Chloride Ion penetrability based on charge passed

Charge Passed(Coulombs)	Chloride Ion Penetration
>40000	High
2000~4000	Moderate
1000~2000	Low
100~1000	Very Low
100)	Negligible

0%, 10%, 20% 혼입한 경우의 28일 강도는 각각 431kg/cm², 525kg/cm², 630kg/cm²으로 실리카흙을 10% 혼입한 경우에는 21.8%, 실리카흙을 20%혼입한 경우에는 46.2%의 강도 증진을 가져왔으며, 투과전하량은 각각 2766C, 465C, 144C으로 실리카흙을 10% 혼입한 경우 83%, 실리카흙을 20% 혼입한 경우 95% 정도의 투수성 감소를 나타내었다. 이를 그림 3에 나타내었으며 그림에서 보듯이 실리카흙을 0%, 10%, 20% 혼입에 따라 강도는 거의 직선적으로 증가하며 투수성은 현저히 감소함을 알 수 있다.

단위시멘트량 550kg/m³의 경우, 그림 4에 나타난 바와 같이 실리카흙을 혼입하지 않은 것과 실리카흙 10%를 혼입하고 4%의 공기연행을 한 경우, 강도는 590kg/cm²에서 724kg/cm²로 약 22.7% 증가하였으며 투과전하량은 1891C에서 95C로 약 96%정도 감소하였다. 이를 그림 4에 나타내었다.

단위시멘트량이 380kg/m³과 550kg/m³의 경우에 실리카흙 10%혼입에 따라 강도증진효과와 투수성 감소효과는 단위시멘트량이 550kg/m³인 경우가 더 큰 것으로 나타났다.

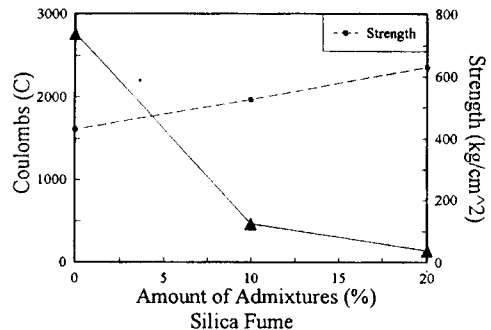


그림 3 실리카흙 혼입에 따른 강도 및 염소이온투과성(단위시멘트량:380kg/m³)

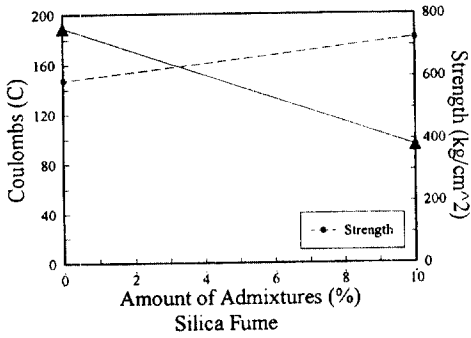


그림 4 실리카흙 혼입에 따른 강도 및 염소이온투과성 (단위시멘트량: 550kg/m³)

따라서, 실리카흙은 강도증진효과와 함께 탁월한 투수성 감소 효과를 기대할 수 있는 혼화재임을 알 수 있으며, 강도와 투수성 모두를 고려한 실리카흙의 적정 혼입량은 각 배합에 따라 약간의 차이가 있으므로 예비실험을 통하여 결정하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

3.2 플라이애쉬 혼입에 따른 투수특성

단위시멘트량 380kg/m³의 경우, 플라이애쉬를 0%, 15%, 30% 혼입한 경우의 28일 강도는 각각 431kg/cm², 433kg/cm², 335kg/cm²으로 플라이애쉬를 15% 혼입한 경우 0.5% 강도 증가를 플라이애쉬를 30% 혼입한 경우 22%의 28일 강도 감소를 가져왔으며, 투과전하량은 각각 2766C, 565C, 597C으로 플라이애쉬를 15% 혼입한 경우 80%, 플라이애쉬를 30% 혼입한 경우 78% 정도의 투수성 감소를 나타내었다. 이를 그림 5에 나타내었으며 그림에서 보듯이 플라이애쉬를 0%, 15%, 30% 혼입에 따라 28일 강도 증진 효과는 기대할 수 없으나 현저한 투수성 감소효과를 보였다.

단위시멘트량 550kg/m³의 경우, 그림 6에 나타난 바와 같이 플라이애쉬를 혼입하지 않은 것과 플라이애쉬 15%를 혼입하고 4%의 공기연행을 한 경우, 강도는 590kg/cm²에서 645kg/cm²로 약 9.3% 증가하였으며 투과전하량은 1891C에서 1048C로 약 45% 정도 감소하였다.

단위시멘트량이 380kg/m³과 550kg/m³의 경우에 플라이애쉬 15% 혼입에 따라 강도증진효과는 단

위시멘트량 550kg/m³인 경우가 더 큰것으로 나타났으나, 투수성 감소효과는 단위시멘트량이 380kg/m³인 경우가 더 큰 것으로 나타났다.

따라서, 플라이애쉬는 28일 강도증진효과는 크지 않으나 현저한 투수성 감소 효과를 기대할 수 있는 혼화재임을 알 수 있으며, 플라이애쉬는 장기강도 증진 특성을 가진 혼화재이므로 강도증진과 투수성 감소 두 가지 효과를 모두 기대할 수 있으며, 강도

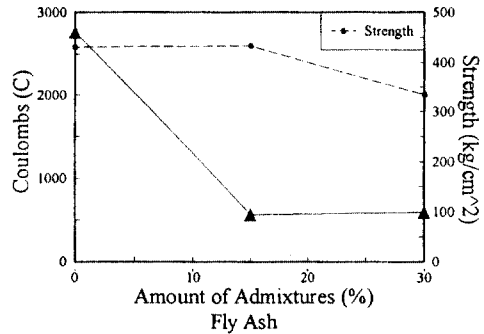


그림 5 플라이애쉬 혼입에 따른 강도 및 염소이온투과성 (단위시멘트 : 380kg/m³)

와 투수성 모두를 고려한 플라이애쉬의 적정 혼입량은 단위시멘트량에 따라 차이가 다소 있는 결과를 보이므로 예비실험을 통하여 적정 혼입량을 결정하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

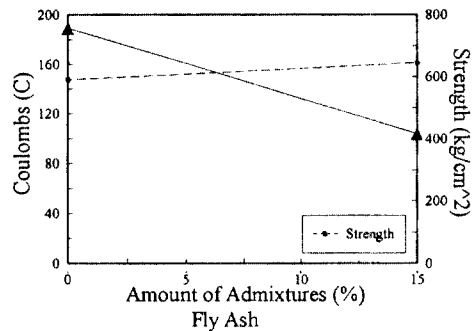


그림 6 플라이애쉬 혼입에 따른 강도 및 염소이온투과성 (단위시멘트 : 550kg/m³)

3.3 고로슬래그 혼입에 따른 투수특성

단위시멘트량 380kg/m³의 경우, 고로슬래그를

0%, 12.5%, 25% 혼입한 경우의 28일 강도는 각각 431kg/cm², 429kg/cm², 426kg/cm²으로 강도의 변화는 거의 없으며, 투과전하량은 각각 2766C, 1572C, 976C으로 고로슬래그를 12.5% 혼입한 경우 43%, 고로슬래그를 25%혼입한 경우 65% 정도의 투수성 감소를 나타내었다. 이를 그림 7에 나타내었으며 그림에서 보듯이 고로슬래그를 0%, 12.5%, 25% 혼입에 따라 28일 강도증진 효과는 기대 할 수 없으나 투수성 감소효과를 보였다.

따라서, 고로슬래그는 28일 강도에 큰 영향을 미치지 않는 투수성 감소 효과를 기대할 수 있는 혼화재임을 알 수 있으며, 고로슬래그는 강도를 유지하면서 투수성 감소 효과를 기대할 수 있다.

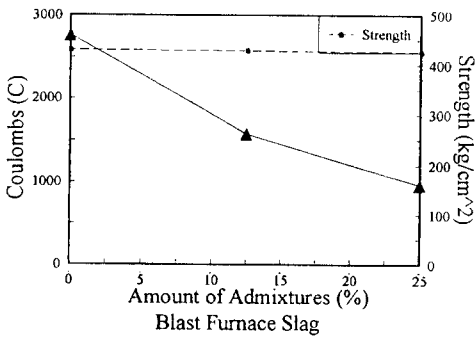


그림 7 플라이애쉬 혼입에 따른 강도 및 염소이온투과성 (단위시멘트 : 550kg/m³)

3.4 물-시멘트비에 따른 투수특성

단위시멘트량 380인 N1-0-0배합(w/c=0.43)과 단위시멘트량 550kg/m³인 H1-0-0배합(w/c=0.28)은 투과전하량이 각각 2766C, 1891C로 단위시멘트량이 380kg/m³에서 550kg/m³으로 증가함에 따라 투수성이 약 32% 정도 감소하는 결과를 보였다. 이러한 결과는 시멘트량의 증가로 인한 콘크리트의 내부구조가 치밀해져 강도증가와 함께 내투수성이 커진 것으로 설명할 수 있다.

3.5 시멘트 종류 및 골재크기에 따른 투수특성

본 실험 결과 시멘트의 종류에 따른 투과전하량은 제1종 시멘트의 경우 2766C, 제5종 시멘트의

경우 3453C으로 내황산염(제5종) 시멘트는 제1종 시멘트보다 투수저항성이 크지 않은 것으로 나타났으며, 실리카흙, 플라이애쉬, 고로슬래그를 혼화재로 혼입한 경우에도 내황산염 시멘트의 투수저항성 증진 효과가 작음을 알 수 있다.

그리고 굵은 골재의 최대치수에 따른 투수성은 N1-0-0배합의 경우 굵은 골재의 최대치수 19mm, 25mm의 경우에 대해서 투과전하량이 각각 2766C, 2312C으로 골재의 크기에 따라서는 큰 차이를 보이지 않았으며, 혼화재를 혼입한 경우에도 굵은골재의 최대치수에 따라서 큰 차이가 없는 것으로 나타났으나 큰 상관관계는 없는 것으로 판단된다.(그림 8)

3.6 공기연행에 따른 투수특성

콘크리트의 동결융해저항성을 증진시키는 공기연행제는 목표 공기량을 4±0.5%로 맞추었을 경우에, 플라이애쉬를 15% 혼입한 경우 약 18%, 실리카흙을 혼입한 경우 8% 정도 투수성이 증가하는 결과를 나타내었다. 이는 공기연행에 의한 내부 기공이 많아져서 생긴 결과에 기인한 것이며 투수성의 증가량은 크게 문제가 되지 않는 정도의 값이다.

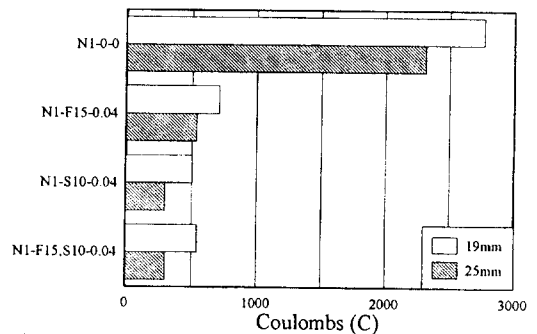


그림 8 굵은 골재 크기에 따른 염소이온투과성

3.7 초저투수성 콘크리트의 개발

콘크리트의 투수계수에 대한 연구는 주로 1930~1950년대 주로 이루어졌고, 일반적인 콘크리트의 투수계수는 다음에 명시한 범위를 가지는 것으로

Table 8 Comparison between permeabilities of rocks and cement pastes⁵⁾

Type of Rock	Coefficients of Permeability (m/sec)	W/C ratio of mature paste of the same permeability
Dense Trap	2.4710 ¹⁴	38
Quartz diorite	8.2410 ¹¹	42
Mable 1	2.3910 ¹³	48
Mable 2	5.7710 ¹²	66
Granite 1	5.3510 ¹¹	70
Sandstone	1.2310 ¹⁰	71
Granite 2	1.5610 ¹⁰	71

Table 9 Comparison of chloride ion penetration test results with permeability coefficients

Other researcher's permeability test ¹⁰⁾		Chloride ion penetration test		Remarks
W/C ratio	30%	W/C ratio	28%	H1-0-0
Cement content	550kg/m ³	Cement content	550kg/m ³	
Coefficient of permeability	2.8×10 ⁻¹⁴ m/sec	Chloride ion penetration	1891C	
W/C ratio 40 ~ 50%		W/C ratio	43%	N1-0-0
Coefficient of permeability 1~2×10 ⁻¹³ m/sec		Cement content	380kg/m ³	
		Chloride ion penetration	2312C	

로 보고되고 있다. 즉, 물-시멘트비 0.5, 단위시멘트량 356kg/m³, 최대골재치수 38mm인 보통강도 콘크리트의 투수계수는 약 1×10⁻¹²m/sec 정도이고, 물-시멘트비 0.75, 단위시멘트량 148kg/m³, 최대골재치수 75~150mm인 저장도 콘크리트의 투수계수는 약 30×10⁻¹²m/sec 정도이다.⁷⁾ 또한 암석종류에 따른 골재의 투수계수와 동일 투수계수를 가지는 시멘트풀의 물-시멘트비는 다음 표 8에 보인 바와 같고, 여기서 시멘트풀의 투수계수는 콘크리트에 비해 낮은 값을 가지는데 이는 콘크리트와 모르타르는 골재와 시멘트풀보다 투수성이 크고, 이는 골재와 시멘트풀사이의 경계면에 존재하는 미세균열이 존재하기 때문이다.⁸⁾

따라서 상기의 기존 연구자의 연구결과에 의하면 저투수성 콘크리트는 약 1~10×10⁻¹⁴m/sec 범위의 투수계수를 가지며, 이것은 재래식 투수계수 산정법으로 구할 수 있는 한계값으로 사료된다. 다음 표 9과 같이 기존 연구자의 투수계수에 대한 연구 내용과 본 연구의 염소이온 투과성과의 결과를 비교하면 ASTM C1202의 염소이온 투과성에 따른 투수성의 분류에서 통과전하량이 1000C 이하인 경우 재래식 투수시험법을 적용하는 것이 기술적으로 불가능하며, 결론적으로 통과전하량이 1000~2000C인 경우 저투수성 콘크리트로 분류될 수 있

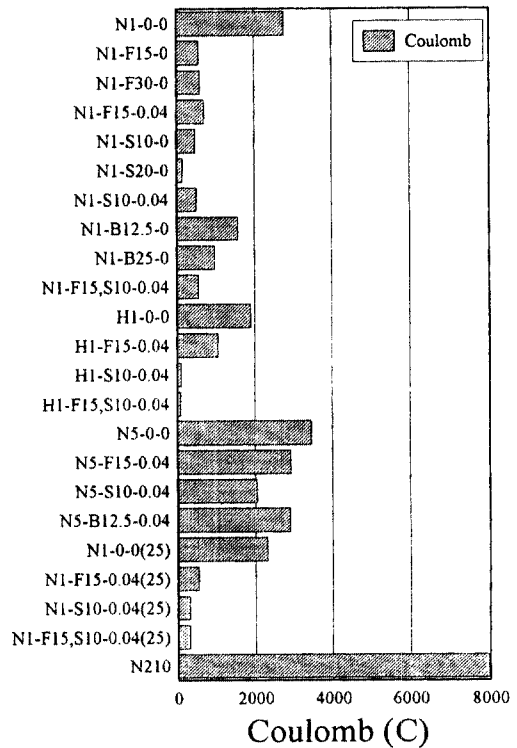


그림 9 시험변수에 따른 투과전하량

Table 10 Test results for chloride ion penetration

Test Series	Charge Passed (Coulombs)	Remarks
N1-0-0	2766	Aggregate Size 19mm
N1-F15-0	565	
N1-F30-0	597	
N1-F15-0.04	707	
N1-S10-0	465	
N1-S20-0	144	
N1-S10-0.04	503	
N1-B12.5-0	1572	
N1-B25-0	967	
N1-F15, S10-0.04	544	
N1-0-0	2312	Aggregate Size 25mm
N1-F15-0.04	535	
N1-S10-0.04	297	
N1-F15, S10-0.04	302	
H1-0-0	1891	Aggregate Size 19mm
H1F15-0.04	1048	
H1-S10-0.04	95	
H1-F15, S10-0.04	79	
N5-0-0	3453	
N5-F15-0.04	2919	
N5-S10-0.04	2048	
N5-B12.5-0	2897	

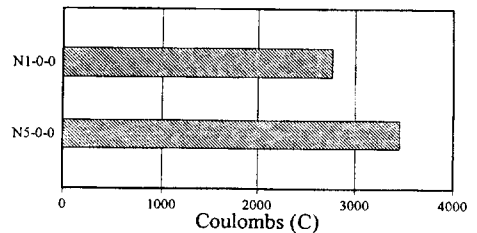
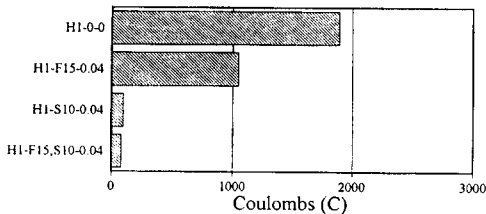
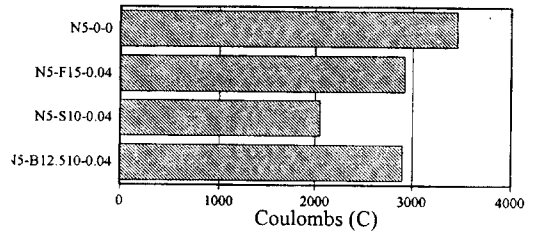
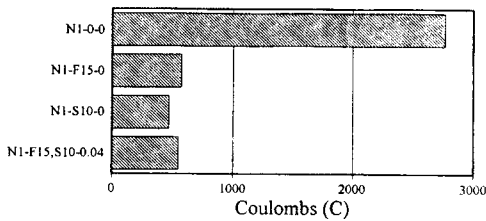


그림 10 시험변수에 따른 투과전하량(시멘트 종류, 시멘트 및 혼화재)

고, 1000C 이하인 경우 초저투수성 콘크리트로 분류할 수 있다.

배합특성별 염소이온투과성 결과 분석에서 알 수 있듯이, 콘크리트의 내투수성 향상을 위해서는 단

위시멘트량의 증가도 효과적이나 적정 혼화재의 선정 및 혼입량의 결정이 더욱 효율적임을 알 수 있다. 실리카흄을 혼입한 경우가 투수성을 감소시키는데 가장 효과적이며 플라이애쉬의 혼입도 상당한

Table 11 Grading of chloride of penetration

ASTM Specification		Test Series	Cuirents (Coulomb)
Chloride Ion Penetrability	Currents (C)		
Negligible	<100	H1-F15, S10-0.04	79
		H1-S10-0.04	95
Very Low	100~1000	N1-S20-0	144
		N1-S10-0.04(25)	297
		N1-F15, S10-0.04(25)	302
		N1-S10-0	465
		N1-S10-0.04	503
		N1-F15-0.04(25)	535
		N1-F15, S10-0.04	544
		N1-F15-0	565
		N1-F30-0	597
		N1-F15-0.04	707
Low	1000~2000	N1-B25-0	967
		H1-F15-0.04	1048
		H1-0-0	1891
Moderate	2000~4000	N5-S10-0.04	2048
		N1-0-0(25)	2312
		N1-0-0	2766
		N5-B12.5+0	2897
		N5-F15-0.04	2919
High	4000<	N5-0-0	3453
		N210	7960

* Normal Concrete Mixing(Design Strength 210kg/cm²)

효과가 있음을 알 수 있다. 그리고, 동결융해저항성 증진을 목적으로 하는 공기연행은 목표공기량 4±0.5% 정도에서는 콘크리트의 투수성이 다소 증가하나 콘크리트의 투수성에 큰 영향은 미치지 않는 것으로 사료된다. 시험 결과는 표 10에 나타내었으며 각 배합 변수들에 대한 투수성 시험 결과는 ASTM 규정에 의한 투수 정도와 비교하여 나타내면 표 11과 같다.

이 표에서 보듯이 보통콘크리트의 약 1/100 이하의 투수성을 갖는 배합을 포함하여 염소이온투과성이 1000C이하의 초저투수성 콘크리트를 개발하였다. 개발된 초저투수성 콘크리트는 현장 적용성 실험을 통하여 열악한 환경에 노출된 실제 구조물에 적용하여 그 효과를 검증할 예정이다.

4. 결 론

본 연구에서는 콘크리트의 내구성에 영향을 미치

는 중요한 인자인 콘크리트의 내투수성을 향상하기 위하여 시멘트 종류, 단위시멘트량, 혼화재의 종류 및 첨가량 그리고 굵은 골재의 최대치수를 변수로 하여 내투수성 시험을 수행하였으며, 이와 동시에 유동특성 및 강도실험을 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 재래식 투수시험 방법은 투수성이 낮은 치밀한 콘크리트에는 물이 거의 투수되지 않아 사실상 적용하기 어려우며 따라서, 본 연구에서는 고강도 콘크리트나 고성능 콘크리트에 적합한 염소이온 투과 시험법에 의해 투수시험을 수행하였다. 이 투수 시험 방법은 콘크리트의 각 배합에 따른 상대적인 투수특성을 잘 표현하고 있음을 보여준다.

2) 콘크리트의 단위시멘트량이 증가할 수록 콘크리트의 투수성은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 시멘트량의 증가로 콘크리트의 내부구조가 치밀해져 생긴 결과로 사료된다. 시멘트종류의 영향으로는 제5종 시멘트가 제1종 시멘트보다 다소 높은 투

수성을 보여주고 있다. 철근 부식과 황산염해가 복합적으로 예상되는 경우 제1종 시멘트가 효과적인 것으로 사료된다.

3) 실리카흙을 혼입한 콘크리트는 입자가 매우 작은 실리카흙이 콘크리트내의 미세 간극을 충전하여 내투수성은 현저히 향상시키는 결과를 보였다. 특히, 고강도 콘크리트로서 실리카흙을 혼입한 경우에는 염소이온투과성이 거의 무시할 만한 아주 낮은 수준이었다. 이는 침투능의 개선으로 수중 구조물이나 건습이 교차되는 구조물에 아주 유효하게 활용될 수 있음을 보여주고 있다.

4) 플라이애쉬의 혼입도 콘크리트의 투수성을 감소시키는 결과를 보였다. 플라이애쉬의 혼입량을 15%에서 30%로 증가시켜도 콘크리트의 내투수성은 향상되지 않는 것으로 나타나 내투수성 향상을 위한 플라이애쉬의 적정혼입량이 15% 내외가 되는 것으로 추정할 수 있다. 고로슬래그 미분말의 혼입도 콘크리트의 염소이온투과성을 감소시키나 실리카흙보다는 효과가 아주 적고 플라이애쉬보다 다소 염소이온투과성 감소 효과가 작은 것으로 나타나고 있다.

5) 콘크리트의 내투수성은 단위시멘트량의 증가도 효과적이나 적정 혼화재의 선정 및 혼입량의 결정이 더욱 효율적임을 알 수 있다. 따라서, 콘크리트의 내투수성을 향상시키기 위해서는 적절한 혼화재의 사용이 바람직하며, 또한 내투수성이 향상됨으로 콘크리트의 다른 내구성 향상도 기대할 수 있을 것으로 사료된다. 투수성에 대한 공기량과 골재의 영향은 단위시멘트량, 혼화재의 혼입 등에 비해 크지 않은 것으로 나타났다.

6) 저투수성 콘크리트는 약 $1 \sim 10 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{sec}$ 범위의 투수계수를 가지며, 이것은 재래식 투수계수 산정법으로 구할 수 있는 한계값으로 사료되므로, 본 연구의 염소이온 투과성에 따른 투수성의 분류에서 통과전하량이 1000C이하인 경우 재래식 투수시험법을 적용하는 것이 기술적으로 불가능하다. 따라서, 통과전하량이 1000~2000C인 경우 저투수성 콘크리트로 분류될 수 있고, 1000C 이하인 경우 초저투수성 콘크리트로 분류할 수 있으며, 보통 콘크리트의 약 1/100 이하의 투수성을 갖는 배합을 포함하여 염소이온투과성이 1000C 이하의 초저투

수성 콘크리트를 개발하였다.

7) 개발된 초저투수성 콘크리트는 현장 적용성 실험을 통하여 열악한 환경에 노출된 실제 구조물에 적용하여 그 효과를 검증할 예정이다.

참 고 문 헌

1. Neville, A.M., Properties of concrete, 3rd edition, 1981.
2. Mindess, S., Young, J.F., Concrete, 1981.
3. Mehta, P. K., Concrete: Structure, Properties, and Materials, Prentice-Hall, Inc., 1986.
4. Ozyildirim C., "Laboratory Investigation of Low-Permeability Concretes Containing Slag and Silica Fume," ACI M. J. v.91, No.2, March-April 1994.
5. 한국공업규격협회, 한국공업규격
6. Annal Book of ASTM Standard, C1202, "Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 1990.
7. Concrete Manual, 8th Ed., U. S. Bureau of Reclamation, 1975
8. T. C. Powers, L. E. Copeland and H. M. Mann, Capillary Continuity and Discontinuity in Cement Paste, J. of Potl. Cem. Research and Development Laboratories, 1, No.2, pp. 38-48, May, 1959
9. T. C. Powers, Structure and Physical Properties of Hardened Potland Cement Paste, J. of American Ceramic Society, 41, pp1-6, Jan., 1958
10. 김생빈, 고강도 콘크리트의 동결융해저항에 미치는 기포조직 및 수밀성의 영향, 박사학위 논문, 1993.
11. 오병환, 정원기, 이동근, 장봉석, "고강도 콘크리트의 역학적 특성 및 현장타설 실험 연구", 한국콘크리트학회 가을 학술발표회, 제6권 2호, 1994. 11, pp. 83-86.
12. 오병환, 정원기, 안상기, 장봉석, "고강도 콘크리트의 실용화를 위한 역학적 특성 및 경제성 분석", 대한토목학회 학술발표회, 1995.10, pp223-226.
13. 오병환, 정원기, 강승희, 장봉석, 조윤구, "고내구성 콘크리트 개발 및 실용화 연구", 한국콘크리트학회 가을 학술발표회, 제7권 2호, 1995. 11, pp. 155-158. (접수일자 : 1996. 4. 4)