

# 높은 혼합비율의 플라이 애쉬를 갖는 콘크리트의 침투성 특징에 관한 연구

## Permeability Properties of High Fly Ash Concrete

이진용\*

Lee, Chin Yong

### 요 약

콘크리트의 침투성은 내구성과 밀접한 관계가 있고, 콘크리트의 내구성은 침투성 특성에 의해서 간접적으로 측정될 수 있다. 실험 결과에 의하면 콘크리트의 침투성에서 플라이애쉬의 양이 증가할 수록 (15%, 30%, 그리고 45%) 침투성이 낮아졌으며, 기건양생한 콘크리트가 수중양생한 것에 비해서 월등히 높은 침투성을 보여 주었으나, 그 차이점은 플라이애쉬를 섞는 양이 많을 수록 줄어 들었다. 높은 비율의 플라이애쉬(45%)에 다양한 조강 시멘트를 섞어 만든 콘크리트에서도, 플라이애쉬 콘크리트가 보통(PC1)콘크리트보다 낮은 침투성을 보여주었다. 콘크리트는 양생기간이 길어짐에 따라 시멘트 종류에 관계없이 침투성이 낮아졌으나, 기건양생시에는 증가하는 것을 보여주었다. 침투성 특징에서 모든 콘크리트는 물을 이용해 시험한 것이 기체를 이용해 시험한 것 보다 항상 낮은 값을 갖는다는 것이 발견되었다. 콘크리트의 침투성은 그것의 강도가 증가함으로써 줄어드는 것을 발견하였으나, 침투성의 특징은 주로 사용한 시멘트종류와 좀 더 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다.

### Abstract

The permeability of concrete is closely related to the durability and the latter may be expressed by measuring permeability of concrete. According to the results, the permeability of fly ash concrete was lower than that of OPC(PC1) concrete and decreased with increasing fly ash levels(15%, 30% and 45%). The permeability values of concrete cured in water is significantly lower than those of concrete cured in air, but the differences were reduced with increasing fly ash level. In comparison with OPC(PC1) concrete and high fly ash concrete containing enhanced early strength cements, the latter also had a lower permeability than the former. The permeability of concrete cured in water was decreased with curing time(28 and 180 days) irrespective of cement types. However, the trend of results cured in air was opposite to that cured in water due to the microcracking of concrete. It was found that the properties of strength and permeability of concrete were related each other. However, the permeability of concrete was more dependant upon the type of binder used in concrete.

**Keywords :** concrete, permeability, durability, fly ash, pore, microcracking strength, specimen, air, water

\* 정회원, 동아건설산업주식회사 기술연구실, 공학박사

• 본 논문에 대한 토의를 1995년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 1995년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서론

오래 전부터 중요한 건설소재인 콘크리트는 내구성이 좋은 재료이다. 이 재료는 사용하는 용도와 장소에 따라서 내구성이 많은 차이점을 보여주고 있다. 콘크리트 구조물은 내구성의 문제로 설계시 계획한 기간보다 일찍 손상을 입는 경우가 많은데,<sup>(1)</sup> 이러한 문제는 주로 외부에서 들어오는 해로운 물질이 콘크리트와 반응하여 내구성을 낮추는 작용을 하기 때문이다(예를들어, 염분에 의한 해상구조물의 손상, 또는 대기오염으로 인한 콘크리트의 조기 중성화등). 따라서 이것을 보수하기 위해서 많은 경제적인 손실을 입고 있으며, 국가적인 차원에서 대책이 시급한 것으로 알려져 있다.

콘크리트의 내구성은 일반적으로 콘크리트의 강도에 의해서 결정이 되나,<sup>(2)</sup> 이 방법으로 콘크리트의 내구성을 측정하는 것 보다는 침투성으로 판단하는 것이 좀더 정확한 방법으로 알려져 있다. 그 이유는 콘크리트의 내구성은 쓰이는 시멘트종류, 물-시멘트비 그리고 양생조건들이 강도 보다 좀더 민감하기 때문이다.<sup>(3)</sup> 예를들어, 1985년 이래로 영국시방서 (BS12, part1, 1985)에서는 콘크리트 구조물이 노출되는 다양한 양생조건에 따라서 콘크리트의 강도는 물론 피복두께, 최대 물-시멘트비과 최소시멘트량을 정하여 콘크리트의 내구성을 향상시키도록 하였다. 또한 포조관계의 재료, 즉 플라이애쉬를 콘크리트에 사용시 콘크리트의 수밀성을 변하게 하는 효과가 있으므로, 플라이애쉬를 콘크리트에 사용시 내구성을 강도만으로 측정한다면 정확하지 않은 것으로 간주되었다.<sup>(4)</sup> 위와같은 이유에서 최근에는 콘크리트의 침투성이 콘크리트의 강도보다는 좀더 내구성과 밀접한 관계가 있는 것으로 시험결과에 의해서 증명되고 있으며, 이것에 관한 많은 실험이 행해지는 것으로 알려져 있다 (예를 들어서, 흡수성과 내구성의 관계).<sup>(5)</sup>

플라이애쉬가 콘크리트에 미치는 영향에 대해서 오래전부터 연구가 행해지고 있고, 많은 연구진척을 보인 것으로 알려져 있다. 그러나 플라이애쉬가 구조물에 이용될 때, 그 사용양에 대해서

한계가 주어졌으며, 보편적으로 30% 이내의 플라이애쉬를 사용한 콘크리트가 주로 구조물공사에 사용되었다.<sup>(6)</sup> 1980년 이래로 높은 비율을 섞은 플라이애쉬 콘크리트를 구조물에 사용하기 위한 연구가 이루어져 왔다. 그러나 이 연구들은 플라이애쉬 콘크리트의 내구성보다는 물성과 역학적인 특성에 관해서 주로 연구가 되었다.<sup>(8,9)</sup> 높은 비율의 플라이애쉬를 섞은 콘크리트를 구조물에 사용함에 있어서 주된 문제는 보통시멘트를 사용한 콘크리트보다 낮은 조기강도를 갖는다는 것이다. 이것을 극복하기 위해서, 본 연구에서는 모든 콘크리트 배합을 28일 강도를 기준해서 설계를 하였고, 조강시멘트를 사용하여 조기강도를 높이려고 노력하였다. 얼마전에 발표된 논문에 의하면 이 방법은 플라이애쉬 콘크리트의 조기강도를 높이는 데 많은 공헌을 한 것으로 나타났었다.<sup>(7)</sup>

이 논문은 높은 비율에 플라이애쉬를 섞어서 만든 콘크리트 침투성의 특징을 연구 하므로써, 애쉬가 콘크리트의 내구성에 미치는 영향에 대해서 연구하였다.

## 2. 실험개요

PC1(보통) 콘크리트는 BS 12(British Standard)에 따라 생산된 보통 포틀란트시멘트를 사용하여 만들어졌으며,<sup>(10)</sup> 이것은 다시 플라이애쉬(낮은 양의 lime을 함유한 애쉬, F type)와 결합하여 PCI/PFA 콘크리트 만들었고, 조강시멘트를 45%의 플라이애쉬와 섞어서 PC2/PFA45 콘크리트를 만들었으며, 초조강시멘트에 45%의 플라이애쉬를 섞어서 PC3/PFA45 콘크리트를 만들었다. 콘크리트 골재로는 굵은 골재(20mm와 5mm)와 잔골재를 사용하였으며, 골재와 시멘트의 흡착력을 높이기 위해서 채움재(filler)를 사용하였다. 각 시멘트의 화학적특성과 물리적특성에 대해서는 Table 1에 표시되어 있다

### 2.1 배합

PC1(보통) 콘크리트의 배합은 Teychenne et al<sup>(11)</sup>이 개발한 방법에 의해서 설계되었으며,<sup>(9)</sup> 플

Table 1 Properties of cements and fly ash

PROPERTY	BINDERS			
	PC1 (Portland cement)	PC2 (Rapid hardening portland cement)	PC3 (High early strength cement)	PFA
Chemical Composition				
SiO <sub>2</sub>	21.2	21.0	22.9	47.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.2	5.0	4.9	30.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.7	3.1	1.9	3.8
CaO	64.4	64.7	65.9	7.1
MgO	1.5	2.5	1.6	1.8
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1	-	-	-
TiO <sub>2</sub>	0.2	-	0.25	-
SO <sub>3</sub>	2.4	3.0	1.5	0.7
K <sub>2</sub> O	1.3	0.8	-	0.8
Na <sub>2</sub> O	1.3	1.3	-	0.4
MnO	0.1	-	0.16	-
LOI	1.9	1.1	0.5	1.3
Bogue compound composition, %				
C <sub>3</sub> S	62.1	57.5	54.3	-
C <sub>2</sub> S	14.0	16.7	24.7	-
C <sub>3</sub> A	6.5	8.1	9.8	-
C <sub>4</sub> AF	8.2	9.3	5.8	-
Mineral composition(%)				
Glass	-	-	-	83.4
Mullite	-	-	-	11.0
Quartz	-	-	-	2.2
Magnetite	-	-	-	1.3
Hematite	-	-	-	0.7
Physical properties				
SSA(m <sup>2</sup> /kg)	322	490	341	-
RD	3.2	3.1	3.2	-

라이에쉬를 포함한 15%, 30% 그리고 45% 또한 이 방법에 따라서 설계하였다. 설계한 콘크리트 강도와 슬럼프를 얻기 위해서, 정확한 재령 28일 강도를 얻을 때까지 시험배합을 계속하였다. 설계 강도는 28일을 기준으로 해서 250, 350, 500, 600 그리고 700kg/cm<sup>2</sup>를 채택함으로써 현장에서 사용할 수 있는 다양한 콘크리트의 강도를 고려하였다.

이 연구에서 사용한 콘크리트 배합은 Table 2에 표시하였고, 조기강도 증진을 위해서 두가지 종류의 조강 시멘트를 사용하였다. 조강 시멘트를 사용한 콘크리트는 PC1/PFA45의 배합설계를 이용하여 원하는 28일 강도와 슬럼프(slump)를 얻

Table 2 Mix proportions of PC1 and fly ash concrete

Concrete Mix Design Code Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	MIX PROPORTION (kg/cm <sup>3</sup> )								W/C RATIO	
	Cement	PFA	Total	Water	Aggregate			Total		
					Coarse	Sand	Filler			
PC1										
M1	250	255	-	255	190	975	770	200	2390	0.75
M2	350	305	-	305	190	975	725	200	2395	0.63
M3	500	385	-	385	190	1000	680	150	2405	0.49
M4	600	440	-	440	190	1035	650	100	2415	0.43
M5	700	510	-	510	190	1115	565	50	2430	0.37
PC1/PFA15										
M6	250	215	40	255	175	1005	765	200	2400	0.69
M7	350	285	45	310	175	1000	725	200	2410	0.56
M8	500	330	60	390	175	1030	670	150	2415	0.45
M9	600	380	65	445	175	1065	640	100	2425	0.39
M10*	700	430	75	505	175	1135	565	50	2430	0.35
PC1/PFA30										
M11	250	190	80	270	170	1025	730	200	2400	0.63
M12	350	240	105	345	170	1025	660	200	2400	0.49
M13	500	295	125	420	170	1050	670	100	2410	0.40
M14*	600	345	145	490	170	1100	605	50	2415	0.35
M15*	700	375	165	520	170	1185	520	-	2415	0.31
PC1/PFA45										
M16	250	170	140	310	165	1140	785	-	2400	0.53
M17	350	200	165	365	165	1140	730	-	2400	0.45
M18*	500	270	220	490	165	1180	575	-	2410	0.34
M19*	600	315	255	570	165	1230	455	-	2420	0.29
M20*	700	350	285	635	165	1320	225	-	2345	0.26
PC2/PFA45										
M21	250	160	135	195	170	1100	835	-	2400	0.58
M22	350	195	160	355	170	1100	775	-	2400	0.48
M23*	500	245	200	445	170	1100	695	-	2410	0.38
M24*	600	290	240	530	170	1100	590	-	2415	0.32
M25*	700	335	275	610	170	1100	440	-	2420	0.28
PC3/PFA45										
M26	250	150	120	270	170	1100	925	-	2390	0.63
M27	350	180	145	325	170	1100	870	-	2390	0.52
M28	500	230	185	415	170	1100	760	-	2395	0.41
M29*	600	260	210	470	170	1100	650	-	2390	0.36
M30*	700	310	255	565	170	1100	475	-	2395	0.30

\* Superplasticising admixture used

을 때까지 배합을 시도하여 구했다. 콘크리트 배합에 따르면, 플라이에쉬를 섞은 콘크리트의 배합이 PC1 콘크리트보다 많은 시멘트의 양을 필요로 한다. 예를 들어서 PC2/PFA45 콘크리트는 40~100kg/cm<sup>2</sup>, PC3/PFA45 콘크리트 경우에는 15~55kg/cm<sup>2</sup> 만큼 많이 필요로 하는 것으로 나타났다.

## 2.2 양생조건

양생온도는 수중 23℃(E2) 즉 ASTM C-192에 따라서 양생하였으며 그리고 기건양생에서도 23℃(E7)에 상대습도가 55% 인 조건에서 양생하였다. 양생기간에 따른 콘크리트의 변화를 알기 위해 양생기간은 28일과 180일을 고려하였다.

## 2.3 시험방법

### 2.3.1 시험

시험장비는 영국대학에서 개발된 것을 사용하였으며, 침투성장비는 그림1에서 보여주며, 이것을 간단히 설명하면, 변형된 Hoek-Franklin cell을 이용한 장비로 상하에 있는 펌 피스톤이 기체 누출을 방지하기 위해서 설치되었다. 그리고 공시체의 옆면을 통해서 누출되는 유체를 방지하기 위해서 옆면에 오일압력을 이용해서 봉했다. 시험을 위해 압력을 가한 입 압력과 출 압력을 측정하기 위해 압력 게이지를 설치하였고 입 압력과 출 압력을 동등하게 하기 위해 압력, 온도 그리고 흐름량을 측정하여 고려하였으며, 유체 사용시 압력은 62.0, 48.0, 34.0 그리고 23.0kg/cm<sup>2</sup>로 기체 사용시에는 10.3, 8.6, 6.9, 5.2, 3.4 그리고 1.7kg/cm<sup>2</sup>를 이용해 시험을 했으며, 시험을 위해 반지름 50mm 그리로 깊이 50mm인 원통형공시체를 100mm<sup>3</sup>의 정팔면체로 부터 코아를 떠서 만든다. 가스 침투성 시험 결과는 콘크리트내의 함수율에 영향을 받으므로 시험을 위해 공시체를 105℃ 온도의 오븐에서 일주일 정도 말려서 콘크리트내의 수분의 함유량을 일정하게 한다음 시험을 실시하였다.

### 2.3.2 계산 방법

침투성은 가스나 액체가 압력의 차이로 인하여 콘크리트를 통과하는 것으로 정의 할 수 있고, 이것은 유체흐름의 특성에 의해서 결정되는데, 이것은 델시(Darcy)의 실험치에 의해서 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{Q}{A} = -\frac{K}{\mu} \frac{dp}{dl} \quad (1)$$

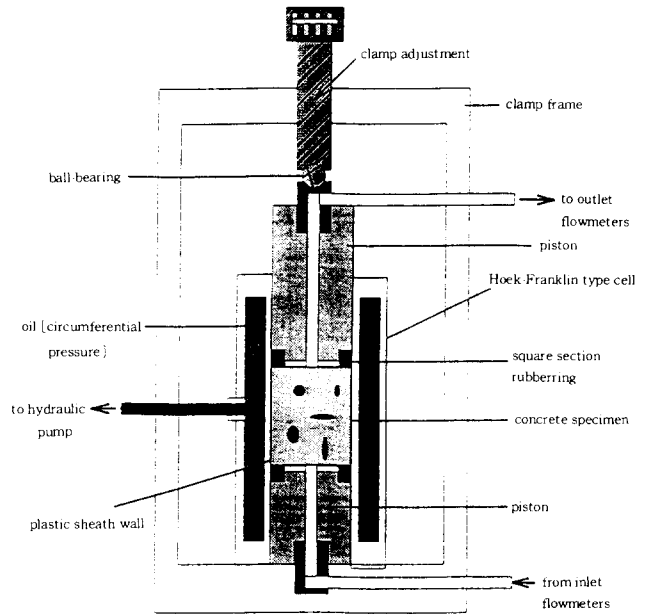


Fig. 1 Schematic view of permeability apparatus.

- 즉, Q : 유체의 흐름양(volume rate of flow)  
 A : 단면적  
 K : 침투성(permeability)  
 $\mu$  : dynamic viscosity  
 $\frac{dp}{dl}$  : 압력의 차이

압축이 되지 않은 유체는 (예를 들어, 물) 그리고 (1)를 적분한 아래의 식에 의해서 물의 침투성이 측정될 수 있다.

$$K = \frac{Q \mu L}{A(P_1 - P_2)} \quad (2)$$

- $P_1$  : 입 압력 (inlet pressure)  
 $P_2$  : 출 압력 (outlet pressure)  
 L : 건본길이

그러나 압축이 가능한 유체 (예를들면, 공기), 위의 식에 의하면 기체의 흐름양이 압력에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 따라서 흐름(flow) 양을 아래에 나타난 식에 의해서 구할 수 있을 것이다.

$$PQ = \text{constant} = P_m Q_m$$

$$P_m = (P_1 + P_2) / 2$$

그리고

$Q_m$  = 평균 유체흐름 (flow rate at the average pressure  $P_m$ )

식 1 에서 보여준  $Q$  을  $Q_m$ 으로 대치해서 쓰고, 이 식을 적분한다면,

$$K = \frac{2 \mu L P_2 Q_2}{A(P_2^2 - P_1^2)} \quad (3)$$

$Q_2$  = 출력유체의 양(outlet volume rate of flow).

이론적으로 콘크리트를 통과하는 유체가 물리적이거나 화학적인 반응을 일으키지 않는다면, 침투성은 식2 와 3을 사용하여 계산 될 수 있으나, 가스(gas)의 흐름은 그것의 물리적인 특성과 압력에 따라 변하기 때문에 침투성의 특징을 계산할 때, 수정치가 필요하다. 그 이유는 가스의 침투성이 액체의 침투성보다 높은 관계로 가스 미끄럼현상이 일어나기 때문이다. Klinkenberg<sup>(10)</sup>는 가스에 의해서 결정이 되는 침투성  $K$ 를 아래의 식을 이용하여 나타냈으며,

$$K = \frac{K'}{1 + \frac{b}{P_m}} \quad (4)$$

$K'$  : 침투성(intrinsic permeability)

$P_m$  : 평균 압력

$b$  : 상수

가스의 미끄럼현상을 극복하기위해서 적은 압력에서 기체가 압축될 수 있는 점을 고려하여, Dhir et al<sup>(13)</sup>는 다양한 평균압력을 사용하여 침투성을 구했으며, 이것의 결과를  $1/P_m$ 에 관계해서 그림으로 나타내고(Fig.2) 그리고 이것을 연장함으로써 점성(visco-inertial) 흐름은 압력이 증가함으로 직선이 곡선으로 바뀌는, 즉 가스의 미끄럼현상에서 올 수 있는 결함을 제거하였다.

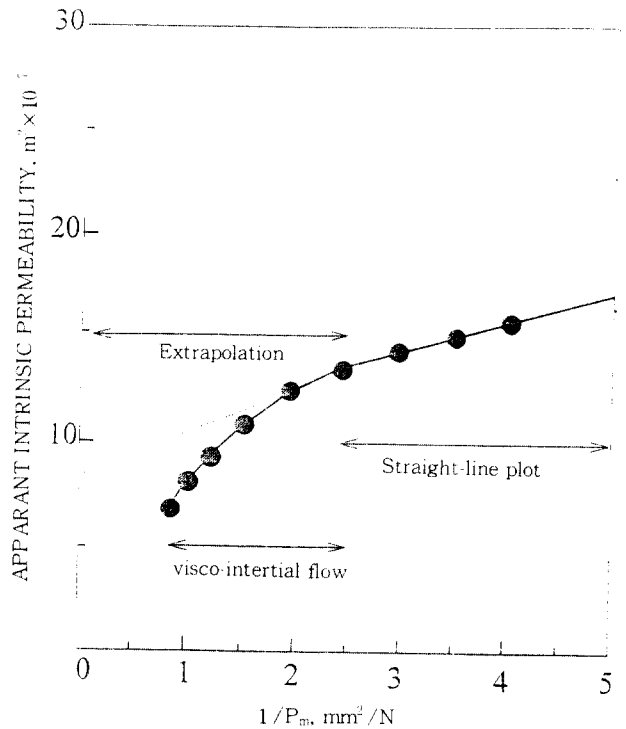


Fig. 2 Example of Klinkenberg permeability plot.

### 3. 시험결과

#### 3.1 플라이애쉬의 효과

다양한 플라이애쉬의 양을 갖는 콘크리트에서 그 양이 콘크리트 침투성에 미치는 영향을 Table 3 와 Fig. 3에 실험결과가 나타나 있으며, 침투성은 콘크리트의 강도와 플라이애쉬의 양에 따라서 변하는 것을 보여주고 있다. 플라이애쉬 콘크리트는 PC1 콘크리트보다 침투성이 낮은 것으로 나타났으며 다양한 설계강도에서 PCI콘크리트는 침투성의 범위가  $5.3 \sim 1.9 \times 10^{-17} m^2$ , PC1/PFA45는  $4.0 \sim 0.3 \times 10^{-17} m^2$ 와 PC1/PFA15 그리고 PCI/PFA30는 이들 사이에 놓여 있다. 자세히 설명하면 콘크리트 설계강도가  $250 kg/cm^2$  경우에는  $1.3 \times 10^{-17} m^2$  낮은 것으로  $500 \sim 700 kg/cm^2$  에서는 플라이애쉬 콘크리트가 PC1 콘크리트 보다  $1.6 \times 10^{-17} m^2$  정도까지 낮은 것으로 나타났으

Table 3 Permeability results for PC1 and fly ash concretes

Design	Intrinsic Air Permeability, $K_a(10^{-17} \times m^2)$		
	E2 curing	E7 curing	Difference(E7-E2)
	28 days	28 days	28days
PC1			
250	5.3	350	344.7
350	2.7	230	227.3
500	1.4	80	78.6
600	1.0	35	34
700	1.9	22	21.1
PC1/PFA 15			
250	4.8	274	269.2
350	2.6	182	179.4
500	1.3	70	68.7
600	0.9	30	29.1
700	0.8	18	17.2
PC1/PFA 30			
250	4.4	233	296.6
350	2.5	142	129.5
500	1.2	55	53.8
600	0.8	27	26.2
700	0.7	15	14.3
PC1/PFA 45			
250	4.0	113	109
350	2.4	63	61.6
500	1.1	23	21.9
600	0.6	12	11.4
700	0.3	6	5.7

며, 즉 플라이애쉬를 사용한 콘크리트는 PC1콘크리트보다 낮은 침투성을 보여주었다. 수중양생과 기중양생을 비교한 결과에서는 기중양생을 한 콘크리트가 수중양생을 한 콘크리트보다 훨씬 높은 침투성을 보여주고 있으나, 그 차이점은 설계강도가 증가할 수록 줄어드는 것을 발견하였다.

### 3.2 시멘트의 효과

#### 3.2.1 수중양생

Table 4에 PC1 콘크리트와 높은비율의 플라이애쉬 콘크리트의 28일, 180일에 결과를 보여주고 있다. 시험결과에 의하면 플라이애쉬를 포함한 콘크리트가 PC1(보통) 콘크리트보다 낮은 침투성을 보여주고 있고, 높은비율의 플라이애쉬 갖는 콘크리트는 낮은강도에서는 PC3/PFA45 콘크리트가 일반적으로 낮은 침투성을 보여주고 있고,

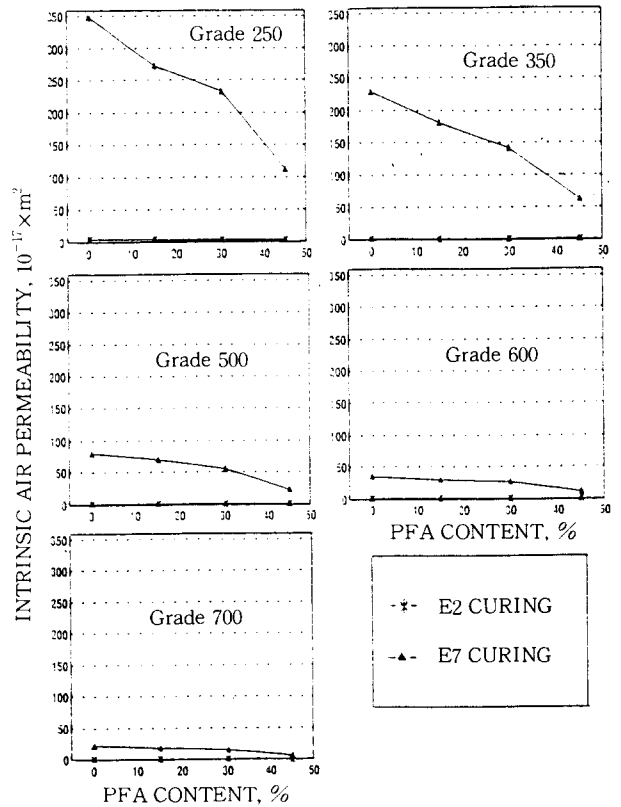


Fig. 3  $K_a$  results of E2 and E7 curing at 28 days

높은강도에서는 PC1/PFA45가 낮은 것으로 나타났다. 이 시험결과와의 이유를 정확하게 설명하기 어려우나, 침투성의 특징이 낮은 강도에서는 (250-500kg/cm<sup>2</sup>)에서는 비표면적이 큰시멘트를 사용한 콘크리트가 포졸란반응을 자극하여, 조기에 수밀성을 높인것으로 간주된다. 그리고 높은 설계강도(500-700kg/cm<sup>2</sup>)에서는 침투성이 시멘트의 종류 보다는 시멘트의 양에 영향을 받은 것으로 간주된다.

양생기간이 늘어남에 따라 침투성이 줄어드는 것을 발견하였는데, 그 차이점은 28일 결과는 0.3~2.2×10<sup>-17</sup>m<sup>2</sup> 그리고 180일 결과는 0.2~1.9×10<sup>-17</sup>m<sup>2</sup> 정도 높은 비율의 플라이애쉬를 갖는 콘크리트가 PC1 콘크리트에 비교해서 높은 것으로 나타났다.

Table 4 Permeability results for high fly ash concrete

DESIGN STRENGTH (kg/cm <sup>2</sup> )	Ka(10 <sup>-17</sup> ×m <sup>2</sup> )				Kw(10 <sup>-17</sup> ×m <sup>2</sup> )	
	E2 Curing		E7 Curing		28 days	
	28 days	180 days	28 days	180 days	E2 Curing	E7 Curing
PC1						
250	5.3	4.9	350	385	0.48	54
350	2.7	2.2	230	255	0.30	35
500	1.4	1.1	80	112	0.12	17
600	1.0	0.8	35	51	0.06	9
700	0.9	0.7	22	22	0.02	3
PC1/PFA 45						
250	4.0	3.8	113	117	0.42	46
350	2.4	2.1	63	72	0.27	34
500	1.1	0.8	23	30	0.12	18
600	0.6	0.5	12	14	0.06	10
700	0.3	0.3	6	6	0.01	3
PC2/PFA 45						
250	3.8	3.4	90	105	0.37	33
350	2.2	2.0	50	63	0.26	25
500	1.0	0.8	15	25	0.11	15
600	0.6	0.5	6	10	0.05	9
700	0.5	0.3	4	3	0.02	3
PC3/PFA 45						
250	3.1	3.0	255	230	0.32	54
350	1.8	1.4	110	130	0.22	35
500	0.9	0.8	18	32	0.10	17
600	0.7	0.6	12	18	0.04	9
700	0.6	0.5	10	12	0.01	3

### 물침투성실험

이 실험은 28일 시험만 고려를 하였으며(Fig. 4), 시험결과는 가스침투성에서 나온 결과와 같이 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 침투성이 낮아지는 것을 보여주었으며, 일반적으로 높은 비율의 플라이애쉬를 갖는 콘크리트가 보통 콘크리트보다 낮은 것으로 나타났다. 또한 콘크리트로 실험한 결과, 물 침투성 시험이 가스 침투성 시험보다 약10배 정도 낮은 것으로 나타났다.

### 3.2.2. 기건양생

콘크리트의 침투성 특징의 변화를 기건양생시를 고려한 결과가 Table 4에 나타나 있다. 낮은 콘크리트 강도에서는 기건양생한 콘크리트가 수중양생한 것보다 10~100배 높은 침투성을 보여주었고, 180일에서는 모든 콘크리트의 침투성이 증가하였으나, 차이점은 콘크리트의 강도가 증가할 수록 줄어들었다.

### 물 침투성 시험

물 침투성 실험결과와 가스 침투성 실험에서 보여준 것과 매우 비슷하고 기건 양생한 콘크리트는 수중양생한 콘크리트보다 훨씬 높은 침투성을 나타내고 있다. 그리고 플라이애쉬 콘크리트는 PC1 콘크리트보다 40% 정도 낮은 것으로 나타났다.

### 4. 시험고찰

시험결과에 의하면 플라이애쉬 콘크리트는 PC1 콘크리트보다 낮은 침투성을 갖고, 애쉬의 양이 증가할수록 침투성이 줄어들었다. 이 결과는 콘크리트 수화작용중 여러가지 반응이 다양하게 그리고 지속적으로 발생하므로써 생긴 결과로 간주된다. 다시말하면, 콘크리트에 플라이애쉬의 첨가는 포졸란 반응을 일으키며 결과적으로 이 반응은 모세관의 공극수를 줄이고 또한 기공을 막게 하는 역할을 할 것이나 포졸란 반응이 주로 콘크리트를 친후 28일에 주로 일어난다고 간주하였을 때,<sup>(14)</sup> 이 효과는 주로 플라이애쉬가 콘크리트의 동질성(homogeneity)을 높이는 역할을 하고, 브리딩을 줄이고, 보통 시멘트의 수화작용을 도와

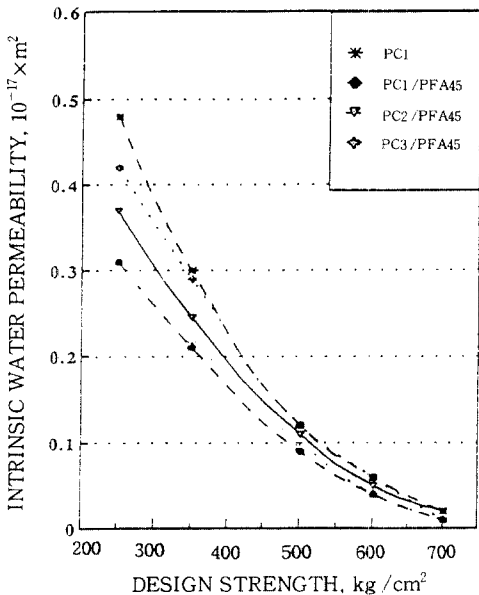


Fig. 4 Kw results for high PFA concrete at 28 days, Curing : E2

수화물을 증가시키는 역할을 함으로써,<sup>(14)</sup> 수화작용에 의해서 플라이애쉬를 사용한 콘크리트가 PC1 콘크리트보다 침투성이 낮은 것으로 생각된다. 예를 들면, 이러한 작용은 모세관의 수를 줄이거나 공극(pore)을 막는 효과를 함으로써 결과적으로 침투성을 줄이는 효과로 나타난 것이라고 생각이 된다.

모든 콘크리트는 양생기간이 지남에 따라(28일에서 180일) 수화작용과 포졸란 반응으로 침투성이 줄어드는 것을 발견하였고, 이 결과는 콘크리트의 양생기간의 시간이 지남에 따라 콘크리트의 밀도를 높힘으로써 콘크리트의 공극(pores)의 수와 크기를 줄이는 효과를 하므로 침투성이 줄어드는 것으로 간주된다.<sup>(15)</sup>

콘크리트가 기전에서 양생한 것이 수중양생한 것보다 침투성이 상당히 높은 것으로 시험결과에서 보여주고 있다. 그 이유는 습도가 수화작용시 충분하지 않은 양생조건에서는 콘크리트의 수화작용과 포졸란의 작용이 상당히 떨어지기 때문이고, 이 결과로 공극의 크기와 수가 증가했기 때문이다.<sup>(16)</sup> 더구나 건조 수축으로 인한 미세균열(microcracking)이 생성되므로 또한 침투성을 증가시키는 역할을 한다.<sup>(7)</sup>

공극의 지름 크기에 의한 공극의 저항성은 모세관 공극의 벽(capillary wall)의 마찰에 의해서 결정이 되는데 이것은 유체의 움직임이나 기공의 지름, 공극의 접촉관계 그리고 공극의 비틀림에 의해서 결정이 되고, 공극의 지름은 콘크리트의 침투성에 반대로 작용하게 된다. 따라서 상대적으로 공극의 크기가 작은 플라이애쉬 콘크리트는 PC1 콘크리트보다 낮은 침투성을 나타내고 있다.<sup>(13)</sup>

기중양생한 콘크리트의 양생기간이 미치는 영향(180일)에 대한 결과에서는 대체적으로 모든 콘크리트 침투성이 증가하는 것을 보여주는데 그 이유는 오랫동안의 기중 양생으로 인하여 28일때 보다 높은 비율의 미세균열 생성으로 인한 것이라고 생각된다.<sup>(7)</sup>

시험결과에 의하면 물 침투성 실험에서 얻은 결과가 가스 침투성에 의해서 얻은 결과보다 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 그 이유는 공기가 물보다는 쉽게 크기가 작은 공극에 통과하기 때문이

고, 또한 시험전 가스 침투성 시험은 공시체를 오븐(oven)에 넣어서 관리하고, 물 침투성 시험은 위해서는 물속에서 관리 함으로써 공시체(specimen)의 내부가 물에 의해서 부풀음으로써 기공의 크기가 줄어드는 효과를 가지게 되어 침투성이 낮아지는 것으로 볼 수 있다.<sup>(16)</sup>

#### 4.1 수중양생 기간이 침투성에 미치는 영향

수중양생 기간이 콘크리트의 내부에 미치는 영향을 알아보기 위해 PCI과 플라이애쉬 콘크리트의 침투성을 수중양생 기간에 따라서 나타난 결과를 Fig. 5에 보여주고 있다. Fig.5에서 보여주는 바와 같이 1일과 3일 사이 침투성의 차이가 상당히 큰 것을 보여주고 있고, 1일 수중양생한 것은 3일 수중양생한 것보다 50에서 100배정도 높은 것으로 나타내고 있다, 그리고 양생조건의 효과는

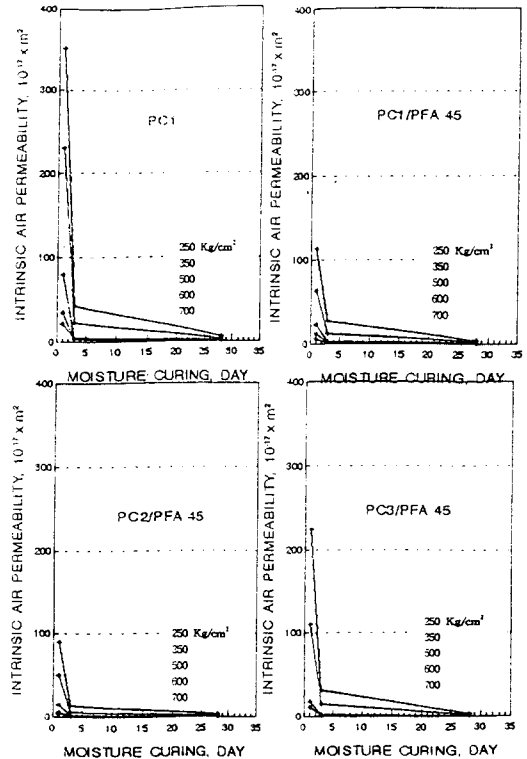


Fig. 5 Effect of permeability of the degree of moisture curing at 28 days.



낮은 설계강도에서 더 효과가 큰 것으로 나타났으며(250과 350kg/cm<sup>2</sup>), 설계강도 500, 600, 700kg/cm<sup>2</sup>에서는 차이점이 줄어들어 가는 것을 보여주고 있다. 그 이유는 기건양생으로 인하여 콘크리트 내부의 수분이 증발하므로써 결과적으로 수화작용이 줄고 따라서 기공이 증가하고 또한 미세균열이 생성됨으로 침투성이 증가한 것을 볼 수 있다.<sup>17)</sup> PCI 콘크리트가 플라이애쉬 콘크리트보다 좀더 높은 침투성을 보여주고 있는데 특히 낮은 콘크리트 강도에서 이 경향이 뚜렷한 것을 보여주고 있다.(1~5배 정도) 그러나, 설계강도가 500kg/cm<sup>2</sup>부터는 그 차이점이 줄어들어 가는 것을 발견하였다.

#### 4.2 동등한 침투성을 갖는 콘크리트의 강도변화

조강 시멘트를 사용하여 동등한 침투성을 갖는 다양한 콘크리트의 강도가 콘크리트 침투성에 미치는 영향에 대해서 시험을 하였다. 예를 들어서,  $1.2 \times 10^{-17} \text{m}^2$ 의 침투성을 가진 콘크리트를 설계하기 위해서 PCI 콘크리트는 500kg/cm<sup>2</sup>의 강도를 가진 콘크리트가 필요하고, PCI/PFA 45 콘크리트는 480kg/cm<sup>2</sup>, PC2/PFA 45 콘크리트를 위해서는 460kg/cm<sup>2</sup> 그리고 PC3/PFA 45 콘크리트를 위해서는 400kg/cm<sup>2</sup>의 강도를 가진 콘크리트가 필요하다. Table 5는 PCI 콘크리트와 같은 침투성을 갖는 높은 비율의 플라이애쉬 콘크리트를 비교해서 두 콘크리트의 강도 변화를 설명한 것이다. 플라이애쉬를 사용한 콘크리트는 PCI 콘크리트보다 항상 낮은 강도로 같은 침투성의 값을 갖는 콘크리트를 생산할 수 있는 이로우이 있다. Table 5에서 보여 주는 바와 같이 콘크리트의 강

도가 350kg/cm<sup>2</sup>인 경우, 플라이애쉬 콘크리트는 10~70kg/cm<sup>2</sup>의 낮은 강도로 같은 값의 침투성인 PCI 콘크리트와 같은 낮은 침투성을 갖는 콘크리트를 만들 수 있고 설계강도 500~600kg/cm<sup>2</sup>에서는 100~140kg/cm<sup>2</sup>정도 낮고, 설계강도 700kg/cm<sup>2</sup>에서는 100~160kg/cm<sup>2</sup>정도로 낮은 강도의 콘크리트로 같은 침투성을 갖는 콘크리트를 설계할 수 있다.

위에 나타난 결과에서 콘크리트의 침투성은 강도에 의한 영향보다는 사용한 시멘트의 종류에 따라서 좀더 영향을 받는 것을 볼 수 있다. 다시 말하면 콘크리트가 비록 같은 강도를 가질지라도 사용하는 시멘트의 종류에 따라서 침투성이 많은 차이점이 있는 것을 보여주고 있다.

### 5. 결 론

1. 콘크리트의 침투성은 콘크리트의 강도, 양생 조건, 실험방법, 양생기간 그리고 사용한 시멘트 종류에 따라서 변한다.
2. 양생조건에 관계없이 콘크리트의 침투성은 애쉬의 양이 증가함에 따라서 줄어 들었다. 그러나 침투성에 차이점은 강도가 증가함에 따라서 줄어들어 가는 것을 발견하였다.
3. 낮은 설계강도에서 침투성은 수증양생과 기건양생의 차이점이 상당히 크나, 콘크리트 강도가 증가하고, 플라이애쉬의 양이 많아 질수록 그 차이점이 줄어들었다.
4. 높은 비율의 플라이애쉬를 갖는 콘크리트는 PCI 콘크리트보다 낮은 침투성을 보여주고 있으나, 높은 비율의 플라이애쉬를 갖는 콘크리트들 중에서 침투성을 비교에서는 실험결과가 대체로 서로 비슷한 것을 보여 주었다.
5. 물을 이용한 침투성 시험이 기체를 이용한 실험보다 침투성이 월등히 낮은 것을 보여 주고 있다. 그리고 콘크리트의 침투성은 강도에 의해서 많은 영향을 받았으나 주된 영향은 사용한 시멘트의 특성과 플라이애쉬의 양에 의해서 좌 우되었다.

Table 5 Compressive strength of fly ash concretes on the equivalent permeability values of PCI at the same design strength : 28 days.

STRENGTH OF OPC CONCRETE (kg/cm <sup>2</sup> )	COMPRESSIVE STRENGTH, kg/cm <sup>2</sup>		
	PC1/PFA 45	PC2/PFA 45	PC3/PFA 45
	E2	E2	E2
300	340	320	280
500	480	460	400
600	520	520	460
700	540	540	510

## 참 고 문 헌

1. ACI committee 226 : Use of fly ash in concrete. ACI material journal, Sep.-Oct. 1987.
2. British Standard Institution : BS 5328, 1991, concrete.
3. Orchard, D.F. concrete technology. Applied science publisher, London, 1979.
4. Dhir, R.K., Hewlett, P.N. and Chan, Y.N. Near surface characteristics of concrete: intrinsic permeability. Magazin of concrete research. Vol.41. No.41, June, 1989, pp.87-97.
5. Dhir,R.K., Byars, E.A. and Shaaban, I, G Prediction concrete durability from absorption. CAMMET International Conference, May, 1994.
6. British Standard Institution: BS 6588, 1985
7. 이진용, PEA 함유량이 높은 콘크리트 강도 발현에 관한 연구, 콘크리트 학회지 VOL. 7, NO.1 Feb. 1995 pp.126~135
8. Malhotra, V.M. Durability of concrete incorporating high-volume of low-calcium (ASTM class f) fly ash. Cement and concrete composites, 12, 1990, pp.271-277.
9. Sivasundarm, V., Carette, G.G. and Malhotra, V.M. Mechanical properties, creep and resistance to diffusion of chroide ions of concrete incoperating high volume of (ASTM class f) fly ashes from seven different sources. ACI materials July, 1991.
10. British Standard Institution: BS 12. 1991. Specification for ordinary and rapid-hardening Portland cement
11. Teychnne, D.C., Franklin, R.N. and Erntroy, H.C. Design of normal concrete. Department of Environment, HMSO, 1985, 30pp.
12. Klinkenberg, G.L.J. Permeability of porous media to required and gases. Drilling and production practice. American petroleum institute, Chicago, 1941, pp.200-202.
13. Dhir, R.K and Byars, E.A. Pulverized fuel-ash concrete: Intrinsic permeability. ACI material journal, Nov.-Dec., 1993.
14. Purverized fuel ash, Cement Replacement Materials, Ed. Swamy. Surrey university press, pp.197-255, 1986.
15. Feldman.R.F., Catette, G.G and Malhotra, M. Studies on mechnism of development of phsical and mechnical properties of high volume flyash cement paste. cement & concrete composites 12, 1990, Canada, pp.245-251.
16. Killoh, D.C., Parrot, L.J. and Patel, R.G. Influence of curing at different relative humidities on the hydration and porosity of a portland /fly ash cement paste. Trondheim conference, 1989, SP 114-117.
17. Byars, E.A. PFA concrete: strength development and permeation propeties. Ph.D. Thesis, Dundee University, 1992, 196pp.

(접수일자 : 1995. 3. 30)