

A Study on the Watertightness of Shotcrete with Watertightness Materials

Hyun Ju Kang, Myong Shin Song[†], and Sang Kook Lee*

Research Institute of Chemical Engineering, Kangwon National University, Samchok 245-711, Korea

*Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon 305-338, Korea

(Received May 2, 2008; Accepted June 3, 2008)

수밀성 재료에 의한 슛크리트의 수밀성에 관한 연구

강현주 · 송명신[†] · 이상국*

강원대학교 화학공학연구소

*한국원자력 안전기술원

(2008년 5월 2일 접수; 2008년 6월 3일 승인)

ABSTRACT

The use of shotcrete-sprayed concrete for the support of underground excavations was pioneered by the civil engineering. Now, for the nuclear wastes disposal plant in our country, watertightness of shotcrete is one of the very important properties. This study evaluated the watertightness of shotcrete using cement mineral accelerator with watertightness materials for the long-term watertightness. In this study, for improvement of watertightness of shotcrete, it used two types of obtainable at a store. Watertightness tests of shotcrete were performed the water absorption coefficient, permeability, porosity and hydrates variation. In a shotcrete containing watertightness materials, watertightness of shotcrete was improved about 15%~65% rather than plain shotcrete.

Key words : Shotcrete, Watertightness, Water-absorption coefficient, Permeability, Porosity

1. 서 론

콘크리트는 시멘트, 물, 모래, 자갈, 혼화재료 등 성질이 서로 다른 재료의 혼합으로 만들어지는 만큼 각 재료의 품질 및 시공관리가 철저히 이루어짐으로써 양질의 건축물을 만들 수 있다. 그러나 콘크리트는 제조 및 양생이 현장조건에 따라 특별한 주의를 요하는 만큼 고도의 품질관리를 유지하기에는 많은 어려움이 따르고 있다. 특히 터널 시공에 사용되는 슛크리트는 강지보, 록볼트와 함께 NATM 공법에서 굴착 후의 지반 안정을 위한 주요 지보재로서의 기능을 수행한다.¹⁾ 슛크리트는 지반에 부착하여 급격히 경화하는 특성과 함께 조기에 강도를 발현하여 후속작업을 신속히 진행하도록 하고 장기적으로 안정한 강도 발현 및 내구성능을 발휘하여 영구적으로 1차 지보재로서의 역할을 하여야 한다. 그러나 이제까지의 슛크리트는 초기의 부착성능과 초기 급결성능, 리바운드율 등에만 관심을 갖고 연구^{2,3)}가 진행되어 장기적인 안정성을 위한 수밀성능의 검토에 관한 연구는 극히 미미하다. 더구나 최근 방사능 폐기물 처리장의 방식이 동굴 처분식으로 선정되면서 슛크리트의 장기 내구성능 확보를 위한 수밀성

능의 향상은 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 본 연구에서는 기존의 상업화 수밀성 재료를 사용하여 슛크리트에 대한 흡수성 및 투수성, porosity와 수밀성능과의 관계를 검토하여 슛크리트의 수밀성능 증진 방안에 대하여 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1. 실험재료 및 배합

2.1.1. 보통 포틀랜드 시멘트

보통 포틀랜드 시멘트는 국내 D사의 제품을 사용하였으며, 화학 조성을 Table 1, 물리적 특성을 Table 2에, XRD 분석 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

2.1.2. 시멘트 광물계 급결제

Shotcrete용 시멘트 광물계 급결제는 calcium aluminate 광물을 사용하는 급결재로서 일본에서 개발되어 1980년대 이후부터 사용하기 시작하여 현재에는 80% 이상의 점유율을 확보하고 있는 대표적인 시멘트 광물계 급결재라 할 수 있다. 광물계 급결재 중 가장 급결력이 뛰어난 것은 $C_{12}A_7$ 계로서 결정질 보다는 비정질의 상태일 때 급결력이 우수하므로 $C_{12}A_7$ 의 제조시 용융물을 급속 냉각하여 비정질화 하는 방법으로 제조되고 있다. $C_{12}A_7$ 은 시멘트와 혼합하면 시멘트 중의 $Ca(OH)_2$ 및 $CaSO_4$ 와 반응

[†]Corresponding author : Myong Shin Song

E-mail : msong0422@kangwon.ac.kr

Tel : +82-33-570-6558 Fax : +82-33-570-6535

Table 1. Chemical Composition of OPC

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Cl
17.30	4.08	66.50	3.02	3.13	0.09	1.33	3.25	0.01

Table 2. Physical Properties of OPC

specific gravity	Blain (cm ² /g)	Setting Time (min)		Compressive Strength (kg/cm ²)		
		initial	final	3d	7d	28d
3.15	3,412	237	341	245	301	387

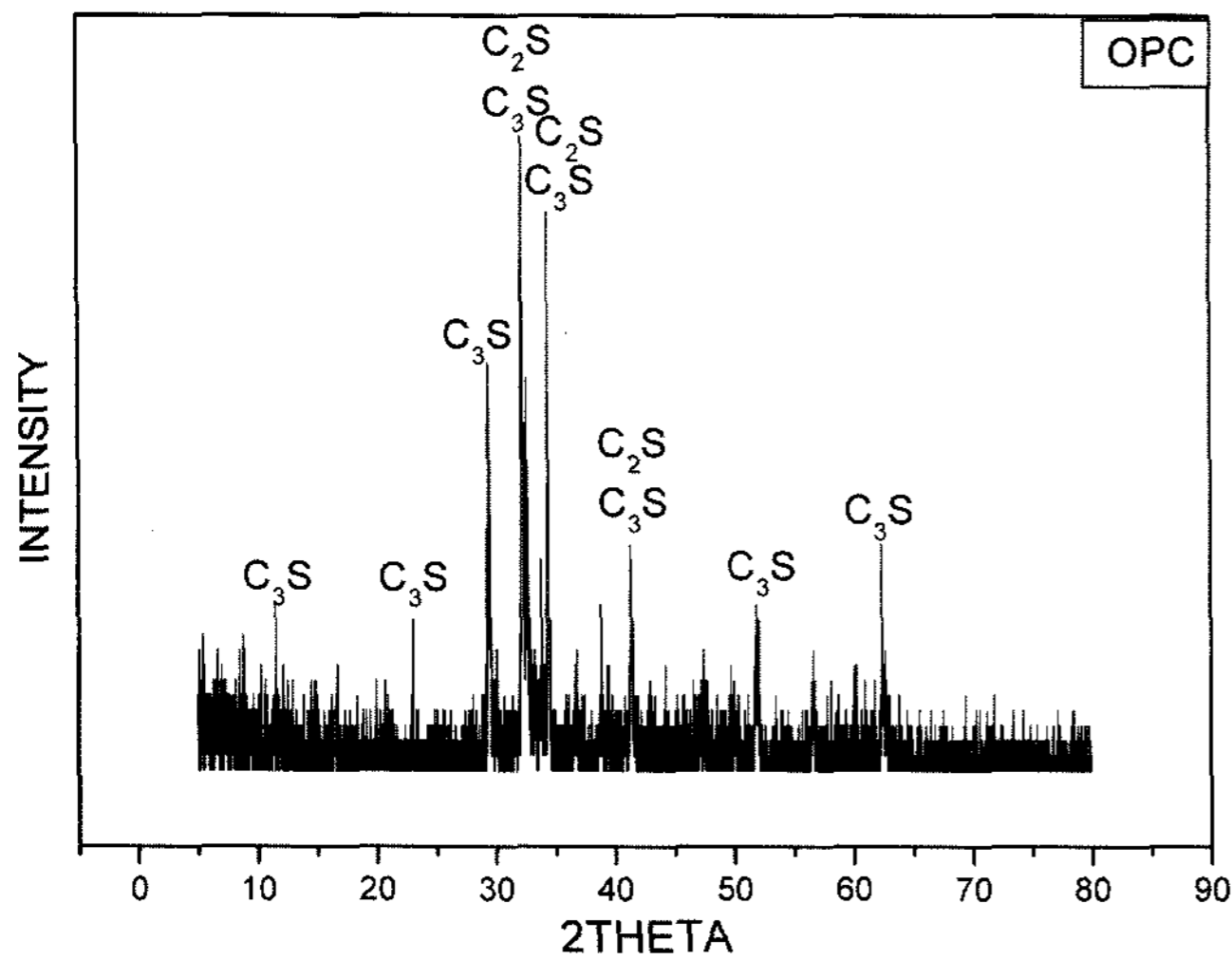


Fig. 1. XRD of OPC.

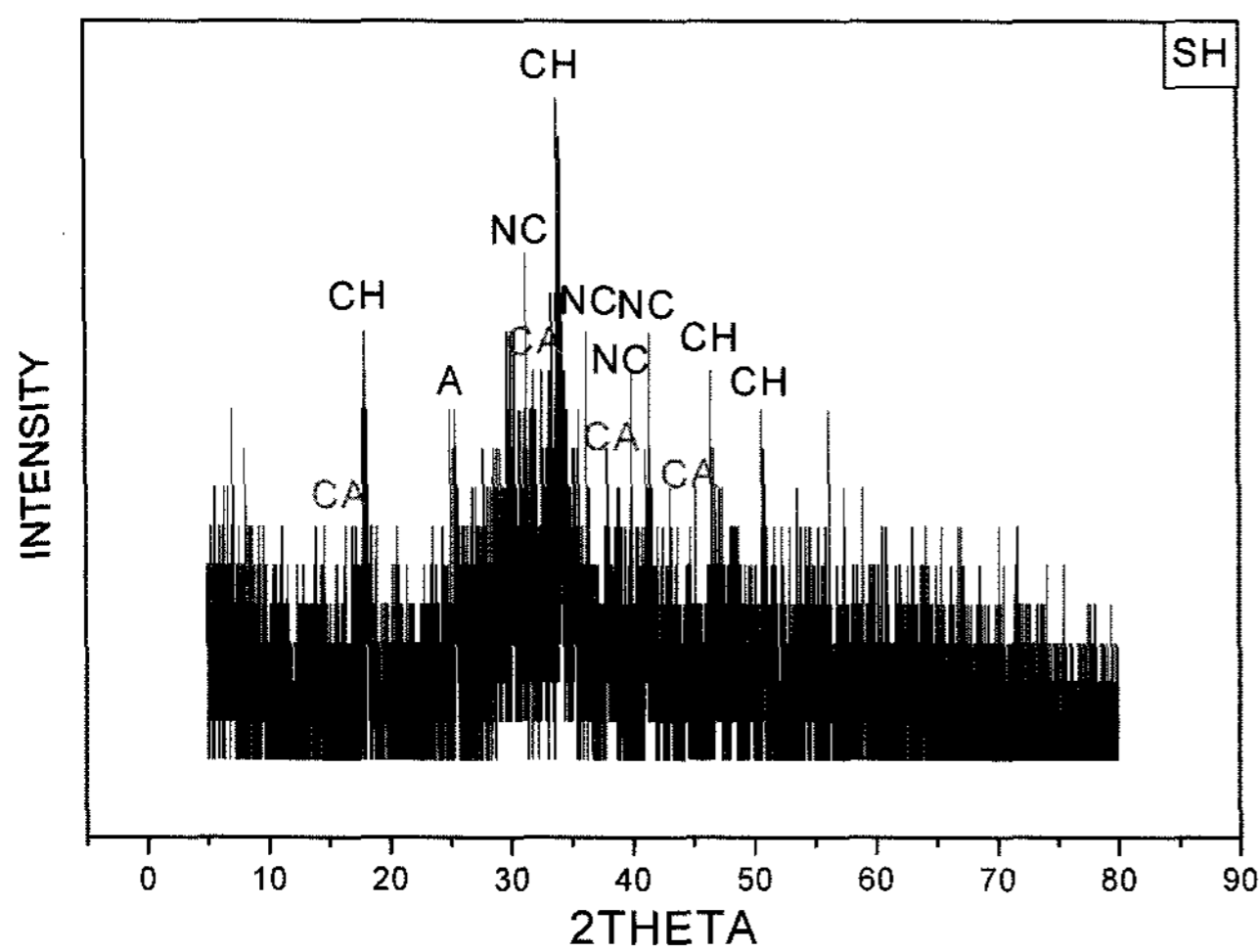


Fig. 2. XRD of Shotcrete.

Table 3. Chemical Composition of Cement Mineral Accelerator

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Cl
3.34	50.30	35.10	0.72	0.09	1.61	5.78	0.41	0.04	0.62	1.73	0.08

Table 4. Physical Properties of Aggregate

Agg. Types	Sp. Gr.	F.M.	Absorption Ratio (%)	Unit mass (kg/m ³)	Solid Volume Percentage (%)	Max. Size
Fine Agg.	2.59	2.87	0.98	1,590	61.2	5.0
Coarse Agg.	2.66	7.12	0.95	1,527	57.8	25.0

하여 급속히 ettringite가 형성되어 급결하게 된다. 이때 즉, 수화초기에 형성된 ettringite는 시멘트의 수화를 저해하지 않으므로 장기적으로 안정된 강도를 나타내는 것으로 알려져 있다. 본 연구에 사용된 급결재는 국내 U사에서 제조된 calcium aluminate 계 급결재로서 화학조성을 Table 3에, XRD 분석결과를 Fig. 2에 나타내었다.

2.1.3. 골재

골재는 JIS A 1109와 1110의 골재의 비중 및 흡수율 시험과, JIS A 1102의 체가름 시험방법에 준하여 실시한 다음의 Table 4와 같은 물리적 특성을 가지는 것으로, 잔골재는 5 mm 이하로 입도 조정하고, 굵은 골재는 경기도 광주 석산의 쇄석으로 최대치수 25 mm 이하로 입도 조정된 것을 사용하였다.

2.1.4. 수밀성 재료

시멘트 경화체의 수밀성능을 향상시키기 위하여서는 여러 가지 방법이 있다.⁴⁾ 그 중에서 혼화제 형태로 시멘트 재료에 혼입되어 수밀성능을 향상시키는 것이 일반적인 공정이라 할 수 있다. 시멘트 재료의 수밀성 향상 재료는 매우 다양하나 크게 경화체 매질과 용액의 접촉각을 크게 하기 위한 방법으로 지방산 염계 재료의 사용과 경화체 내부의 porosity를 줄이기 위한 방법으로 규산질 재료가 사용되는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 시중에 판매되는 수밀성 재료를 사용하였으며 이들 재료는 지방산 염계 재료와, 규산질 계 재료, 지방산 염과 규산질 재료의 복합구성 재료 등으로 구분할 수 있다. 본 연구에서 사용된 수밀성 재료는 규산질 재료를 기본으로 하는 수밀성 재료(이하 "D Type"이라 표기함)와 규산질 재료와 지방산 염으로 구성된 수밀성 재료(이하 "T Type"이라 표기함)를 선정하였다. Fig. 3의 FT-IR 분석결과에서 D type은 1000 cm⁻¹ 부근의 Si-O 결합과 1100 cm⁻¹의 sulfate 결합, 그리고 Figs. 4, 5의 XRD 분석결과와 Table 5의 화학 분석 결과로 gypsum과 silica 질이 주성분임을 확인 할 수 있었으며 T type은 FT-IR 분석결과 지방산인 stearic acid의 band와 동일한 양상을 나타내고 있으며, 화학조성에서

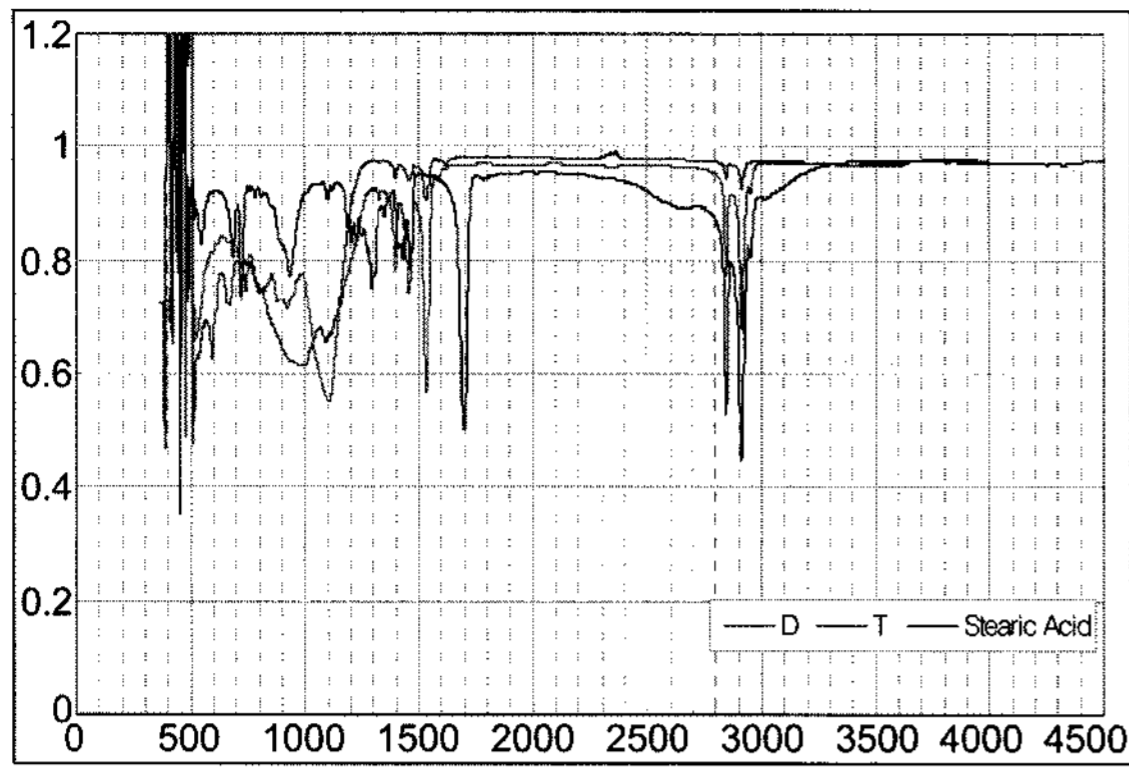


Fig. 3. FT-IR of D type and T type.

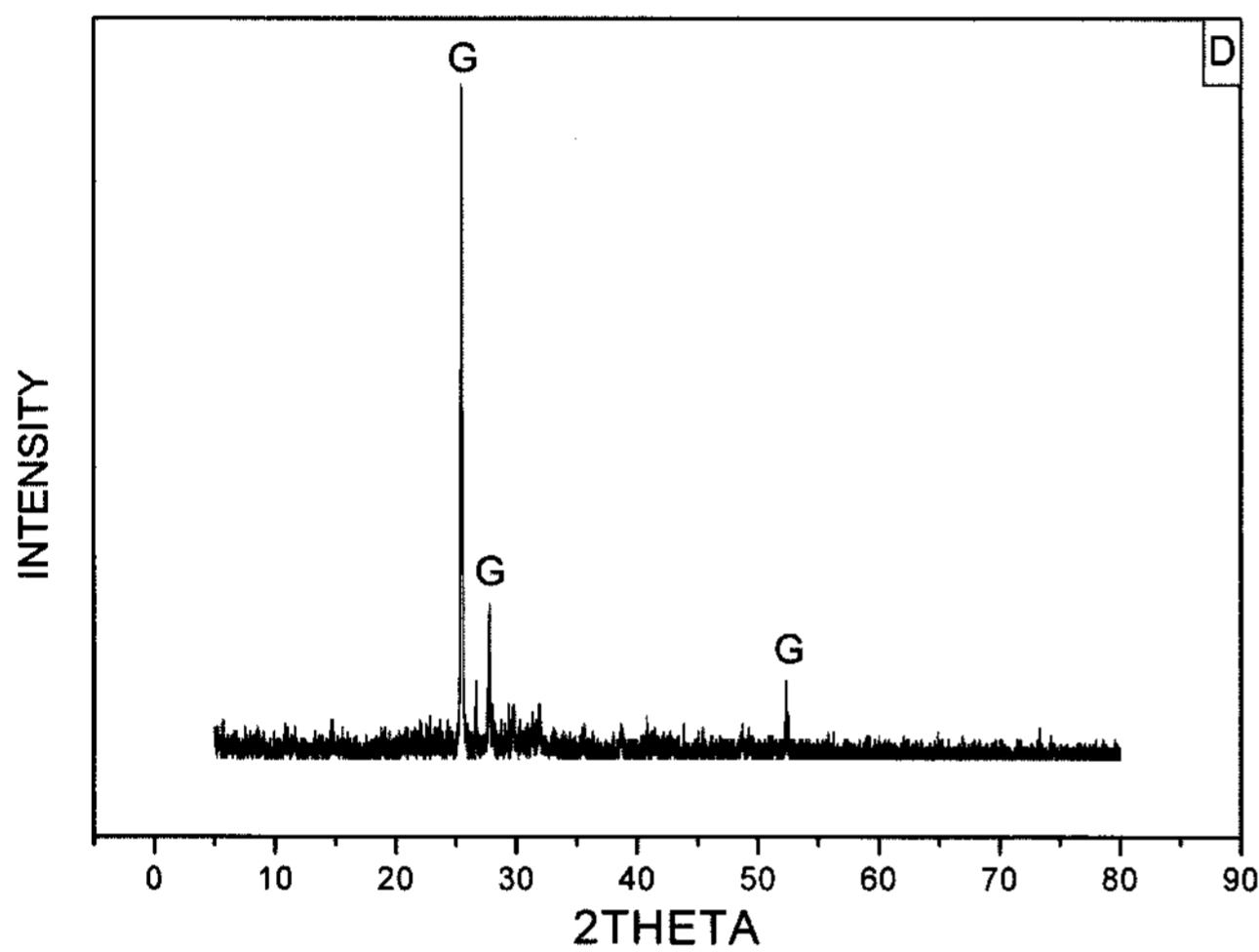


Fig. 4. XRD of D type.

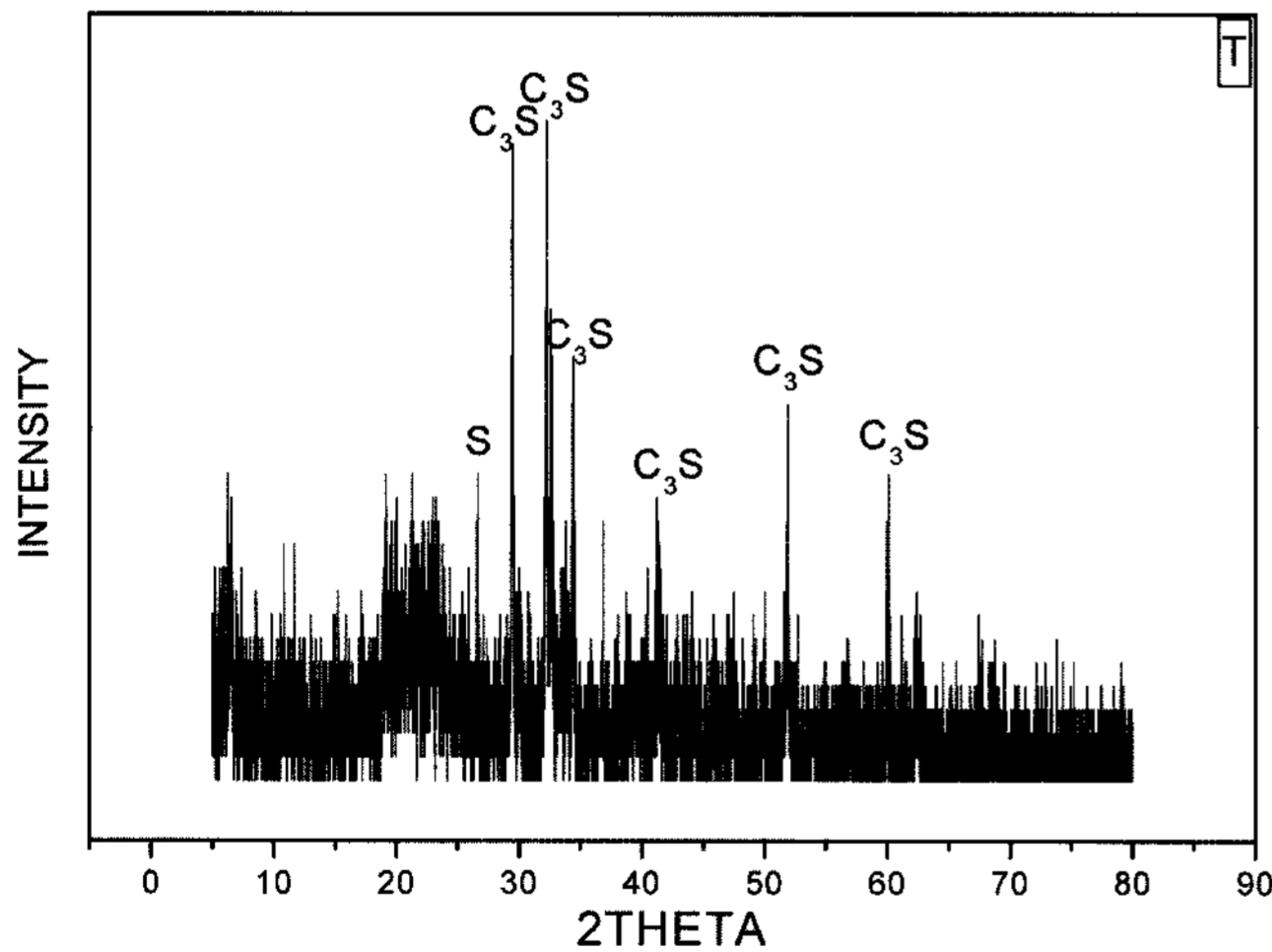


Fig. 5. XRD of T type.

Table 5. Chemical Composition of Watertightness Materials

	Results : wt%												
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	ZnO	SO ₃	Cl
D	35.90	30.7	10.10	2.46	0.055	0.519	1.280	0.791	0.011	1.120	0.402	16.50	0.012
T	45.20	41.2	2.11	1.47	0.111	0.137	0.971	1.020	0.014	1.760	3.780	1.95	0.038

Table 6. Experimental Plan of Concrete Test

	Mixed Condition		Test Items
	W/C(%)	Kind of Con'c	Hardened
Test 1	45	OPC Con'c(P1)	Compressive Strength Absorption Coefficient Permeability Porosity
		OPC Con'c(D1)	
		OPC Con'c(T1)	
Test 2	45	Shotcrete(P2)	
		Shotcrete(D2)	
		Shotcrete(T2)	

Table 7. Criteria of Shotcrete

Compressive Strength	210 kg/cm ² (28 d)
Weight of OPC	320~449 kg/m ³
A/C	3.0~5.0
W/C	0.4~0.45
Weight of Steel fiber	48~64 kg/m ³ (ASTM A820)
	Tensile Strength 8,158 kg/cm ² over diameter 0.3~0.6 mm, minimum length 25 mm

도 ZnO 함량이 매우 높게 나타났는데 이를 T type의 XRD 분석결과와 함께 유추한다면 재료의 구성이 규산질 재료와 zinc stearate와 같은 지방산 염으로 구성되었음을 확인 할 수 있었다.

2.1.5. 실험배합

수밀성 혼화재료를 이용한 콘크리트 및 슛크리트의 실험계획은 Table 6과 같으며 실험 대상 콘크리트의 배합 기준 및 물성 기준은 Tables 7, 8과 같으며 이는 방사능 폐기물 처분장 슛크리트를 대상으로 한 배합이다. 배합사항으로 W/B는 45% 1개 수준으로 고정하였으며, plain 콘크리트("P"로 표기)와 수밀성 재료 종류에 따른 실험("D", "T"로 표기)으로 총 6 배치를 계획하였다. 굳지 않은 콘크리트에서는 일반적으로 슬럼프, 공기량을 측정하여야 하나 슛크리트의 특성상 굳지 않은 콘크리트의 기본 물성 측정은 배제하였으며 경화 콘크리트의 실험은 압축강도, 흡수시험, 투수시험을 실시하는 것으로 하였다. 이때, 배합사항은 Table 9와 같다.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 콘크리트 혼합

본 연구에서의 슛크리트 배합 및 공시체 제작은 슛크

Table 8. Mixing Criteria of Basic Concrete

Strength kgf/cm ²	w/(c+fa)	Water (kg)	Cement (kg)	Sand (kg)	Agg. (kg)	Admixture		Remark
						WRA (%)	AEA (%)	
272	0.45	169	376	726	1,004	C×2.22	C×0.15	1 M3
Cement Density		3.15						
Fine Agg.		F.M. 2.73, Specific Gravity(SSD) 2.57, Absorption 1.720						
Coarse Agg.		Specific Gravity(SSD) 2.73, Absorption 0.670, U/W 102.8 pcf						
Air		4.5~5.5 %						
Slump		10±2 cm						

Table 9. Mixing Ratios of Concrete

Types	W/B (%)	W (kg/m ³)	S/A (%)	AE (C×%)	Weight mixing ratio (kg/m ³)			
					C	S	G	W.M
P1	45	169	42	0.075	376	720	1056	0
P2					470	1026	559	0
D1	45	169	42	0.075	376	720	1056	14
D2					470	1026	559	14
T1	48	169	65	0.075	376	720	1056	14
T2					470	1026	559	14

*Maximum size of aggregate for Shotcrete is 10 mm

리트의 특성 상 국내의 시공현장에서 시공되고 있는 국내 U사의 시공장비 및 공법을 이용하여 혼합 및 성형하

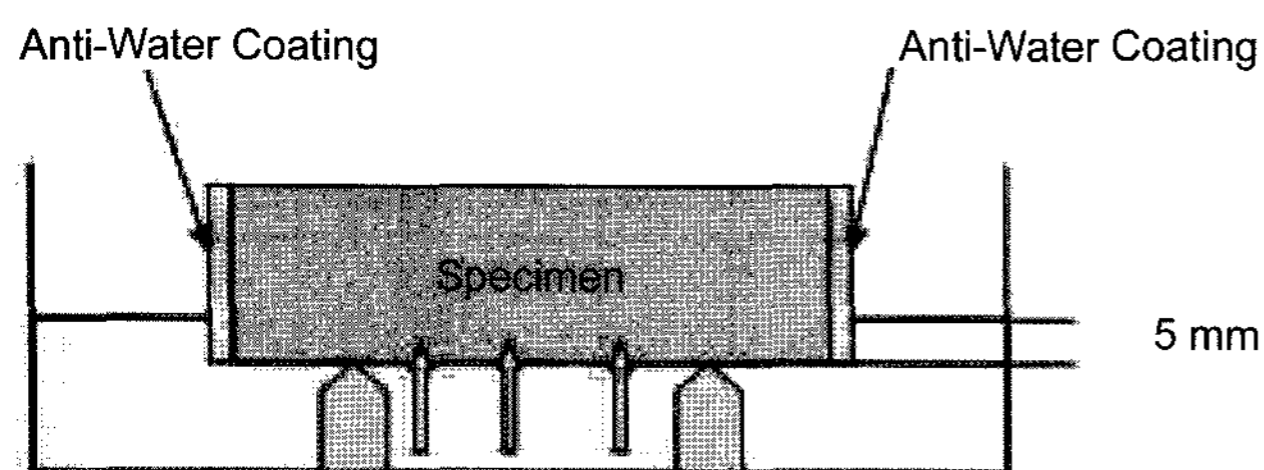


Fig. 6. Schema of Water Absorption Test.

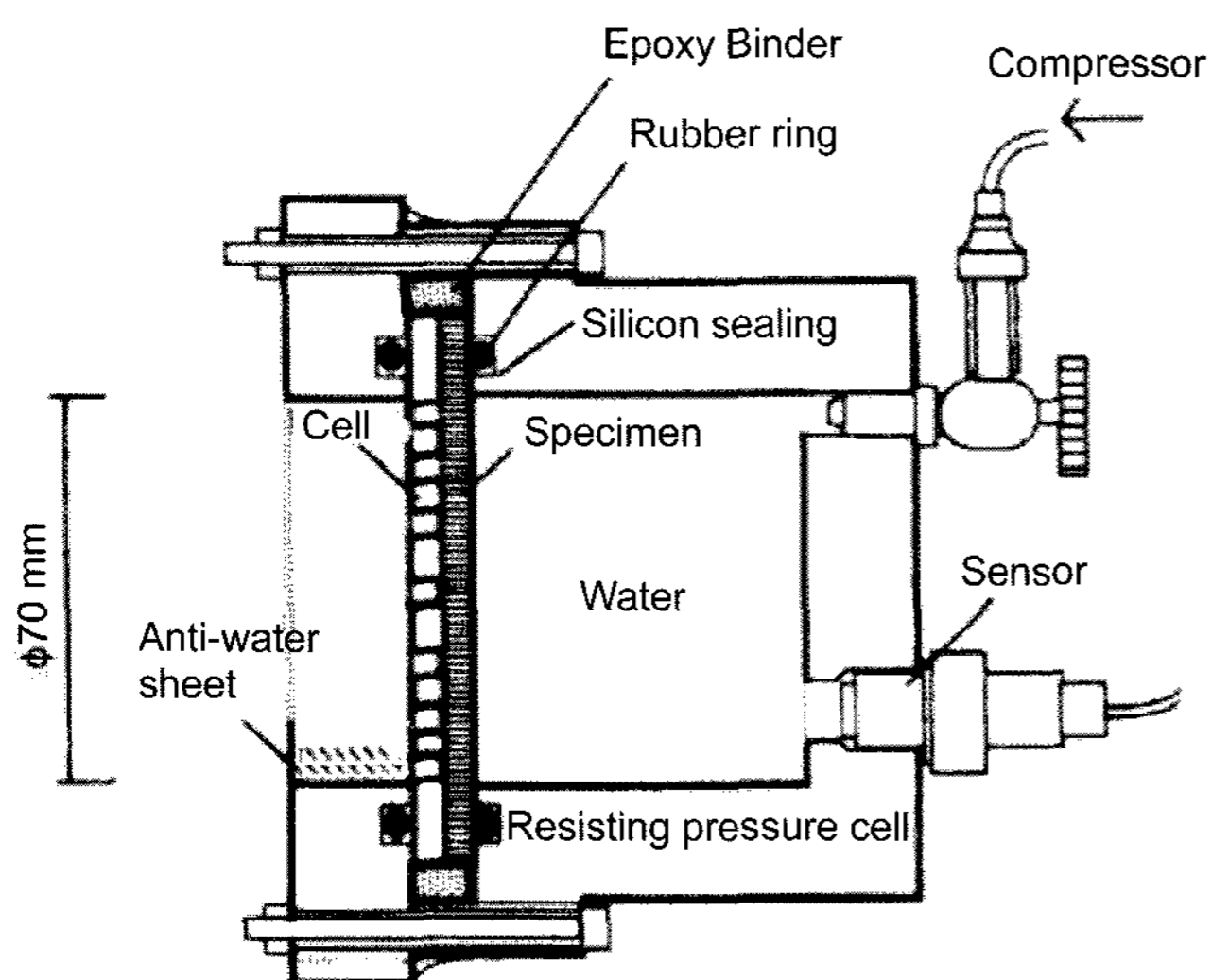


Fig. 7. Apparatus of Permeability Test.

였으며, 공시체 제작은 15×15×55 cm 규격의 공시체를 제작한 후 소요 재령에서 Ø10 cm 코아를 채취하여 압축강도 시험용 공시체 시료로 하였으며, 흡수시험용 공시체 및 투수 시험용 공시체는 코아 채취한 시료를 다이아몬드 cutter로 Ø10 cm×3 cm의 공시체를 만들어 실험하였다.

2.2.2. 경화 콘크리트의 실험

경화 콘크리트의 압축강도는 KS F 2405의 규정에 따라 실시하였으며, 물 흡수 계수를 위한 흡수시험은 KS F 2609 “건축재료의 흡수계수 시험”의 규정을 기본으로 하였다. 물 흡수계수는 일정한 면적을 갖는 대기건조 상태의 시험체를 몇 mm 정도의 깊이로 물에 담금으로서 측정한다. Fig. 6에 흡수계수 측정 방법에 대한 모식도를 나타냈다.

투수시험은 별도로 제작한 외압투수 시험 장치를 이용하여 원통형 공시체(Ø10 cm×20 cm)를 두께 5 cm의 크기로 slice 한 후 시료로 사용 하였으며 10 kg/cm²의 시험수압을 일정하게 유지하도록 하여 1시간 동안 투수되는 물의 양을 측정하여 다음 식 (1)에 의해 투수 량을 구하였다. Fig. 7에 측정 장치를 나타내었다.

$$\text{Weight of Permeability(g)} = W_1 - W_2 \tag{1}$$

W₁: 1시간 10 kg/cm²의 수압을 가한 직후의 무게(g)

W₂: KS F 2451 규정에 의거 양생 및 건조한 후 실내 공기 중에 1시간 보존 후의 무게(g)

콘크리트에 수밀성 재료를 사용하는 경우, 콘크리트의 수밀 효과는 수화의 진행에 따라 기준 콘크리트와는 다

Table 10. Compressive Strength of Test Concretes

	3d	7d	28d
P1	201.3	259.6	382.8
P2	157.1	216.5	298.2
D1	217.8	289.3	385.0
D2	153.1	274.6	334.0
T1	226.6	303.6	415.8
T2	167.2	266.3	327.0

큰 미세한 세공구조를 나타내는 것이 일반적이라 할 수 있다.^{5,6)} 따라서 이러한 세공구조의 변화유무를 측정하기 위하여, 고압 수은 압입법에 의한 미세 세공량을 측정할 수 있는 porosity meter를 사용하여 세공구조의 변화를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 압축강도

Table 10, Fig. 8에 압축강도 측정 결과를 나타냈다. 압축강도 측정 결과를 보면 일반 OPC 콘크리트의 경우 수밀성 재료인 D와 T를 혼합하였을 때 재령 28일에서 plain에 비하여 압축강도가 동등 또는 약 8.5% 정도 향상되었으며, 숏크리트 콘크리트의 경우 수밀성 재료인 D와 T를 혼합하였을 때 재령 28일에서 plain에 비하여 모두 약 10% 정도 높게 나타났는데 이는 경화체의 조직 내에 치밀화가 이루어졌기 때문에 압축강도가 향상된 것으로 판단된다.

3.2. 흡수계수

다공질의 친수성을 갖고 있는 건축 재료가 물과 접촉하면 모세관 현상을 통해 기공의 내부로 물이 흡수 된다. 물론 표면 장력의 대소에 따라 흡수되는 물의 양이 달라지

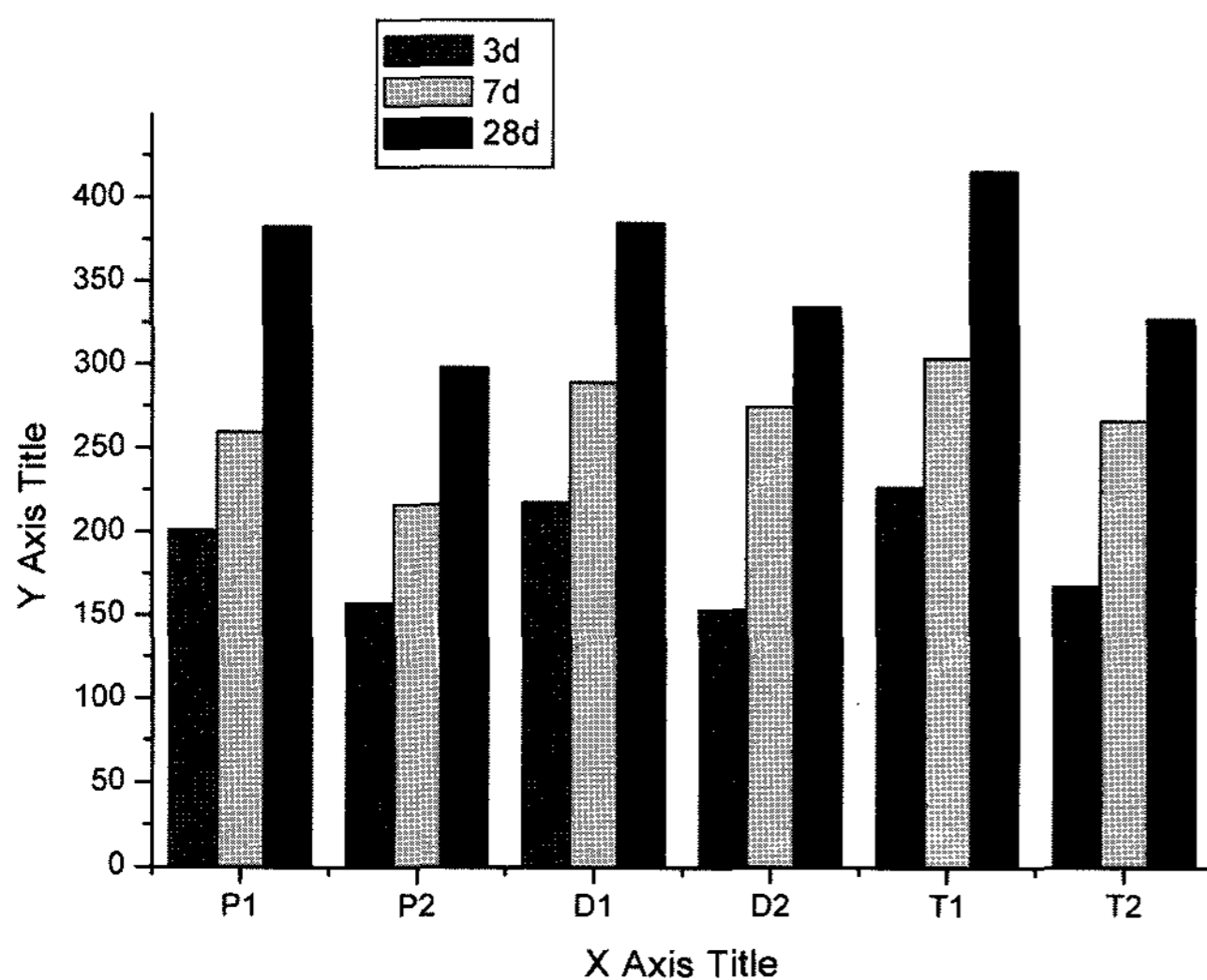


Fig. 8. Compressive Strength of Test Concretes.

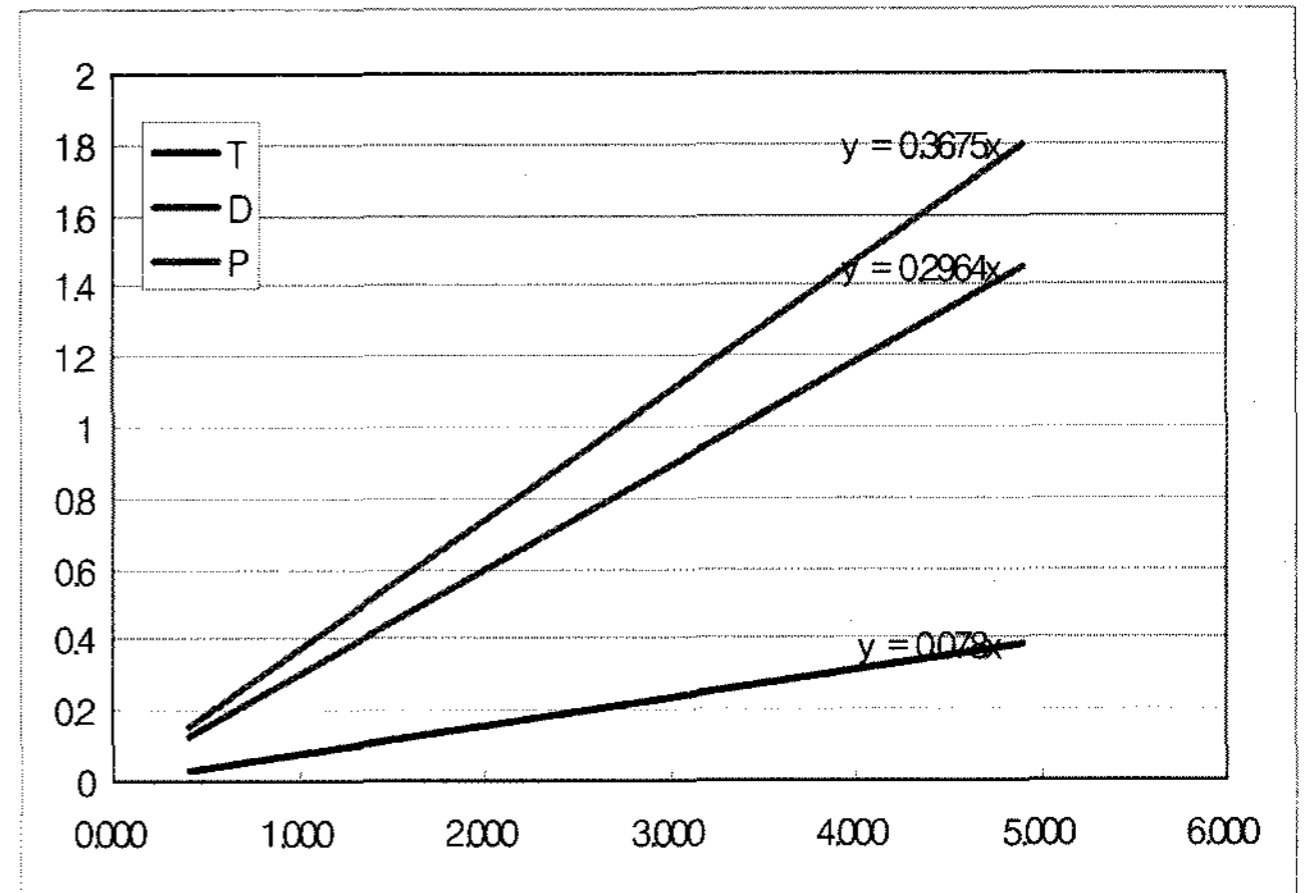


Fig. 9. Water Absorption Coefficient of Test 1.

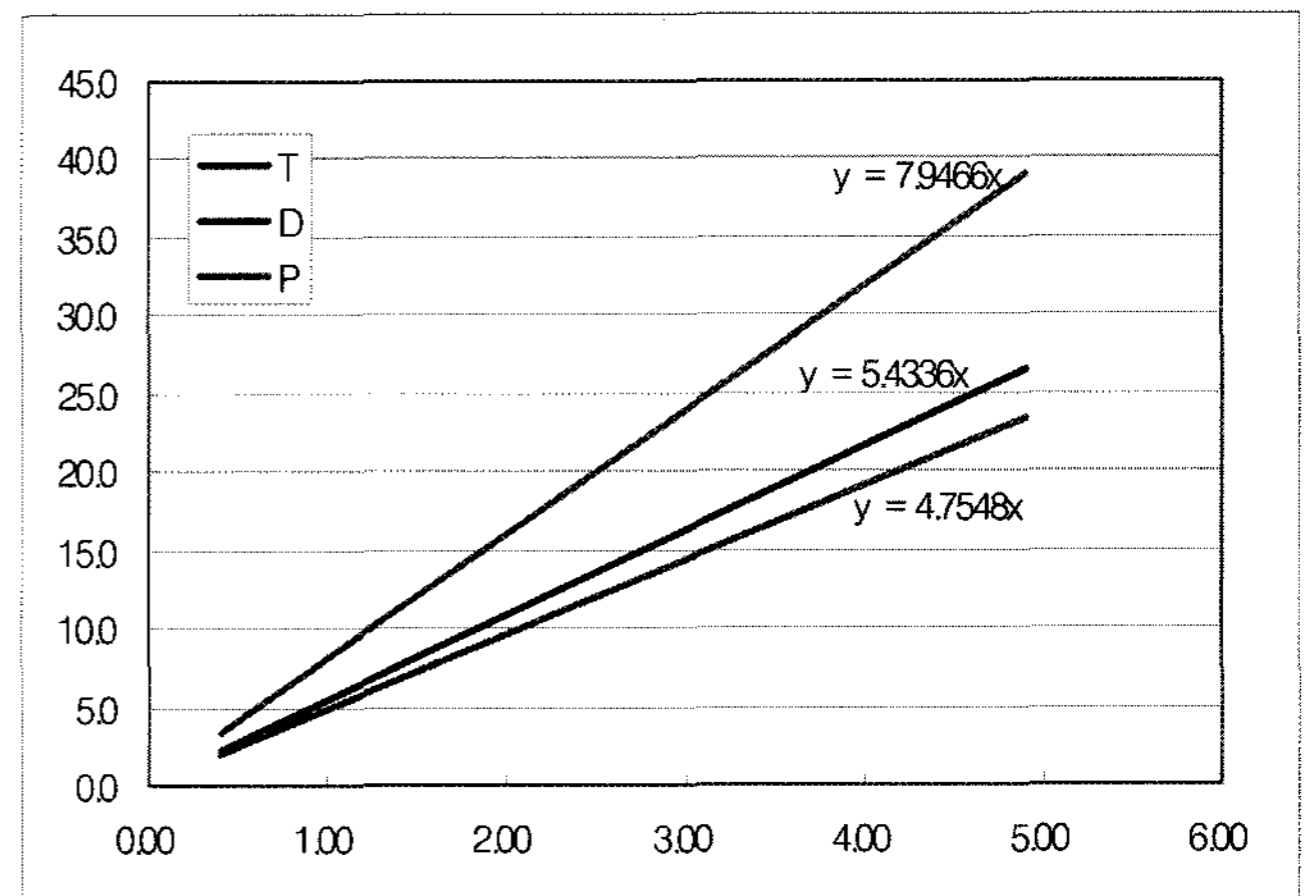


Fig. 10. Water Absorption Coefficient of Test 2.

지만 일반적으로 초기에는 많은 양의 물이 흡수되고 시간의 흐름에 따라 점차 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 물 흡수 현상을 다음과 같이 지수적으로 수식화 할 수 있으며,

$$m = c \cdot t^n \tag{2}$$

이미 많은 실험을 통하여 그 지수 값이 $n=1/2$ 이라는 것이 입증되었다.^{7,8)} 즉, 단위 면적 당 물 흡수량 $m(\text{kg/m}^2)$ 은 시간 t 와 포물선적 관계를 갖는다. 따라서 물 흡수량 m 을 y 축으로, 그리고 실용적 측면을 고려하여 시간 t 의 x 축을 $t^{1/2}$ 로 나타내면 물 흡수량과 시간과의 관계를 1차원 직선으로 표시할 수 있다.

$$m = w \cdot t^{1/2} \tag{3}$$

$m (\text{kg/m}^2)$: Water absorption weight by unit area

$t (\text{h})$: Water absorption time

$w (\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$: Water absorption coefficient

식 (3)의 기울기 W 를 “물 흡수계수”라 하며, 무기질 건

축재료의 흡수성을 파악하는 기초 물성으로 사용된다. 예로, $w=3$ 를 갖는 건축재료는 1 m^2 의 면적을 통하여 1시간 동안 3 kg의 물을, 그리고 2시간 동안 4.24 kg의 물을 흡수한다는 의미로 표현할 수 있다. Figs. 9, 10에 일반 콘크리트 및 숯크리트의 흡수계수를 나타냈다. 흡수계수는 그림에서의 기울기로서 test 1인 일반 OPC 콘크리트에서 수밀성 재료가 혼입된 콘크리트가 plain concrete보다 흡수계수가 약 70%~80% 낮게 나타나 수밀성 재료의 사용으로 콘크리트의 흡수율을 저감할 수 있음을 확인하였다. 또한 숯크리트에서도 수밀성 재료가 혼입된 숯크리트가 plain 숯크리트보다 흡수계수가 약 15%~65% 낮게 나타났으며, 따라서 숯크리트에서도 수밀성 재료를 사용함에 의하여 수밀성 향상효과가 있음을 확인 할 수 있다.

3.3. 투수율

Table 11, Fig. 11에 투수율 측정 결과를 나타내었다. 투수비는 plain type을 100으로 기준하여 계산하였는데, 실험결과 일반 OPC 콘크리트에서 수밀성 재료 D가 혼입된 시료는 plain 대비 20% 정도의 투수율 저감효과가 있었으며, 수밀성 재료 T가 혼입된 시료는 약 80% 정도의 투수율 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 숯크리트 실험인 test 2에서도 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 숯크

Table 11. Permeability of Test Concrete

		Quantity of Permeability	Ratio of Permeability
Test 1	P1	262.46	100.00
	D1	211.40	80.54
	T1	55.71	21.22
Test 2	P2	309.72	100.00
	D2	253.29	81.78
	T2	212.17	68.50

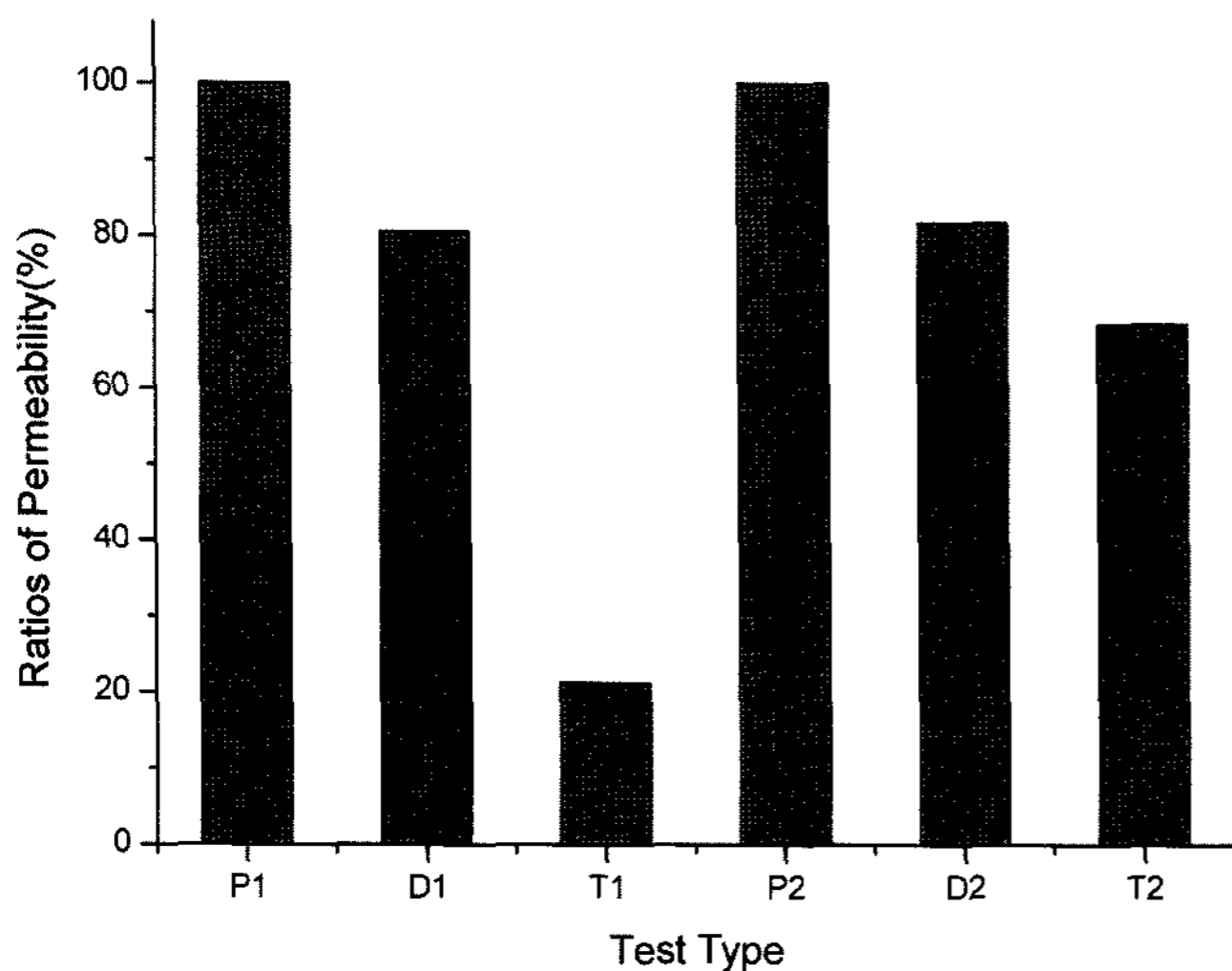


Fig. 11. Permeability of Test Concrete.

리트의 경우 일반 OPC 콘크리트에 비하여 투수율 저감 효과가 낮게 나타났는데 이는 숯크리트의 급결성으로 인

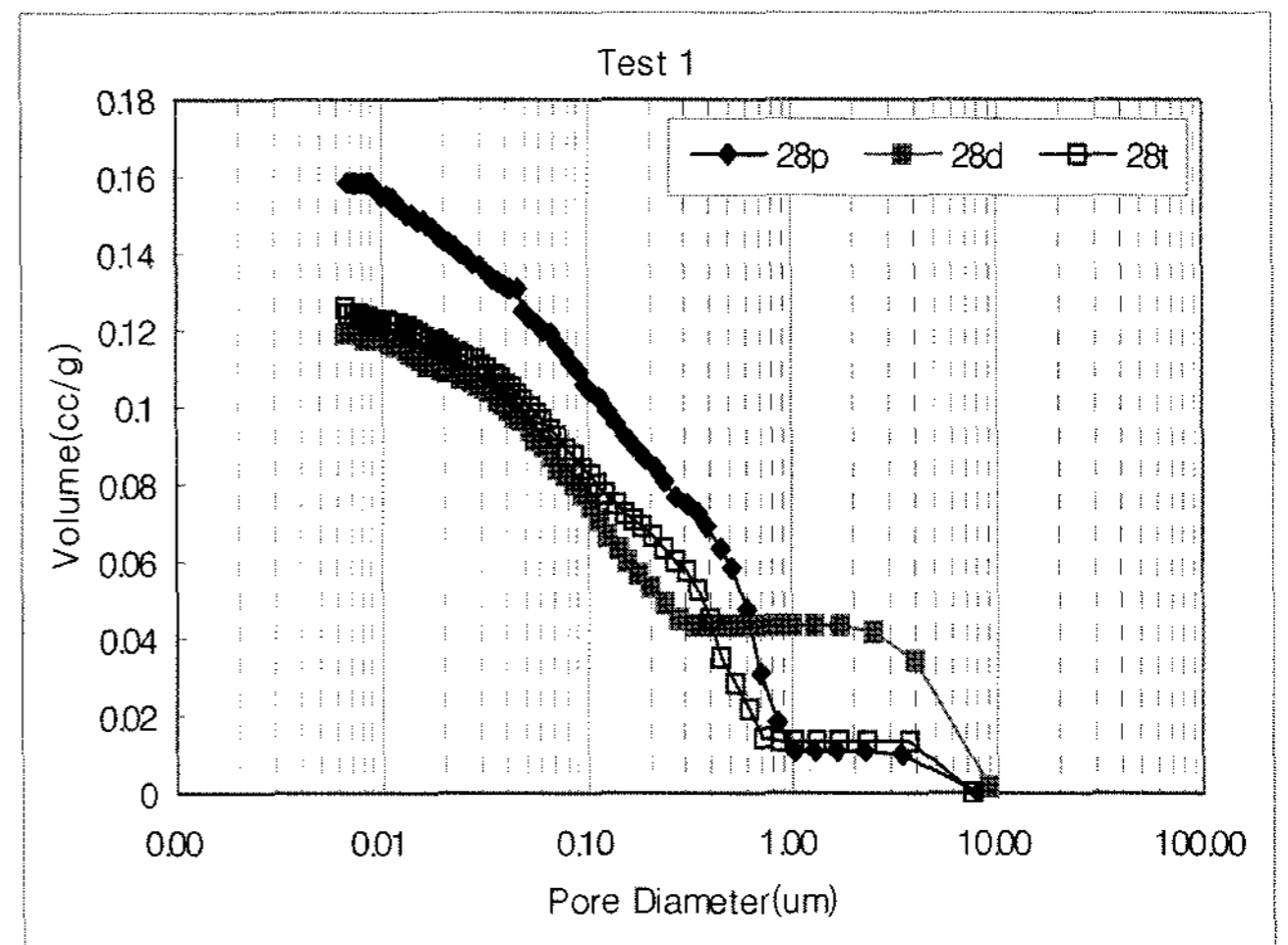


Fig. 12. Cumulated Pore Volume of Test 1.

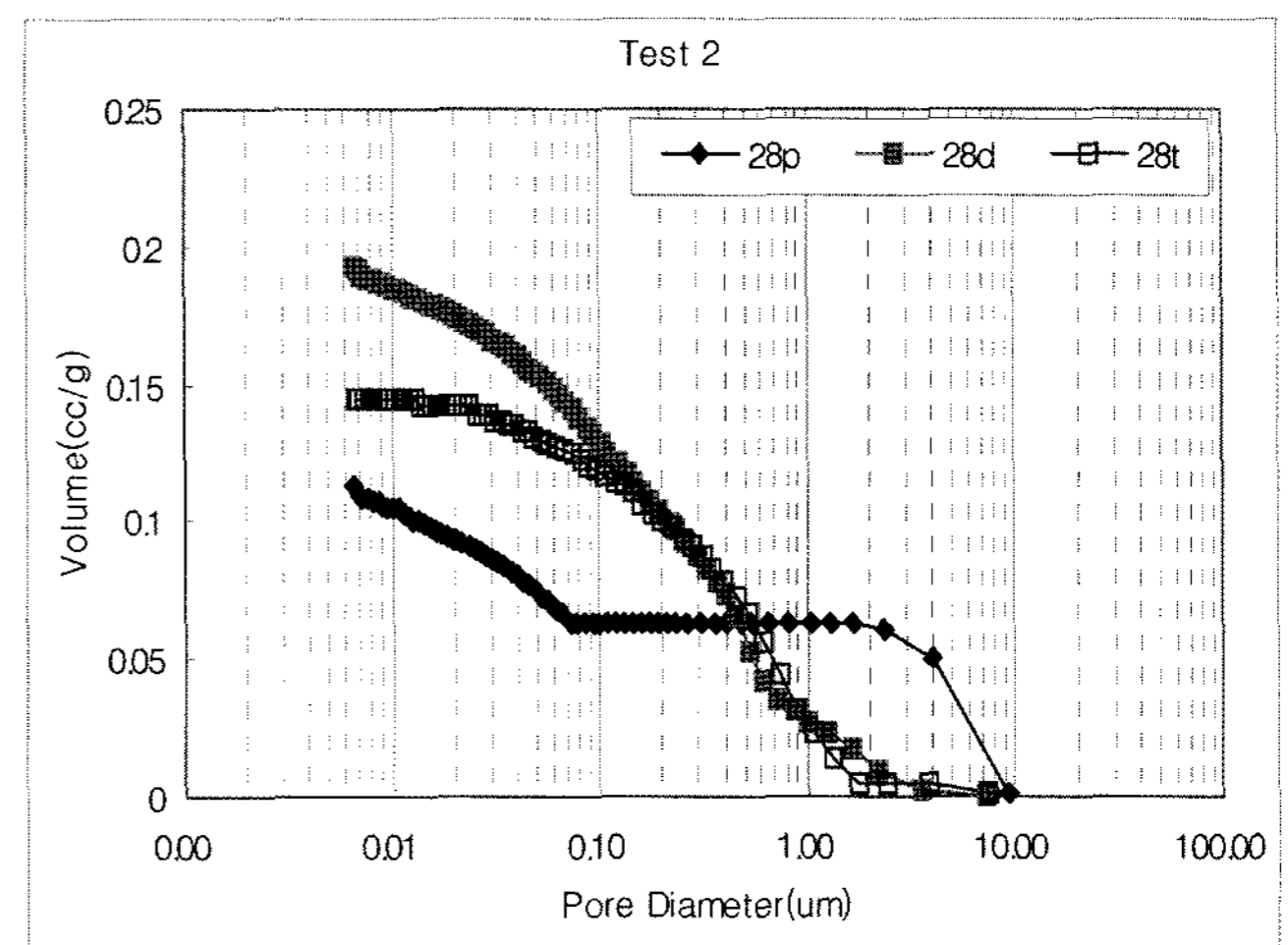


Fig. 13. Cumulated Pore Volume of Test 2.

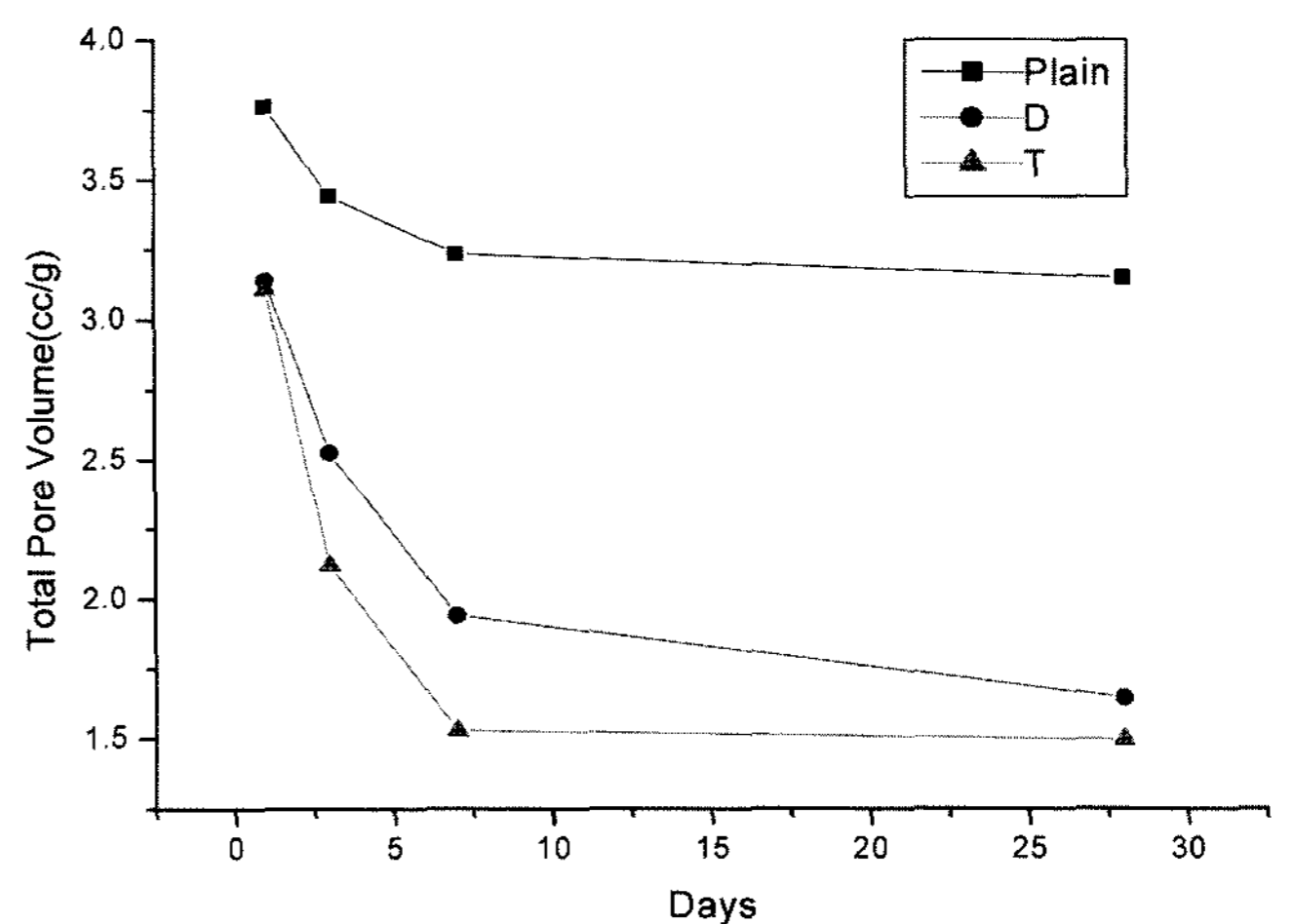


Fig. 14. Total Pore Volume of Test 2.

하여 충분한 다짐이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 수밀성 재료를 혼입함으로써 숏크리트의 투수저항성이 향상됨을 확인할 수 있었다.

3.4. Porosity

Figs. 12, 13에 porosity 실험 결과를 나타내었다. 수밀성 재료가 혼입된 시료가 plain 대비하여 pore 부피가 적고 직경이 작은 미세한 pore가 많이 생성되었음을 확인할 수

있다. 또한 수밀성 재료로는 T type이 가장 우수함을 알 수 있다. Fig. 14에 Test 2의 total pore volume을 나타내었다. 역시 수밀성 재료를 혼입한 시험체가 전체 공극율이 적게 나타났으며 공극율 역시 수화초기에 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 수화 초기에 수밀성 재료에 의해 C-S-H가 활발하게 생성되어 pore 부피를 감소시키기 때문인 것으로 판단된다.

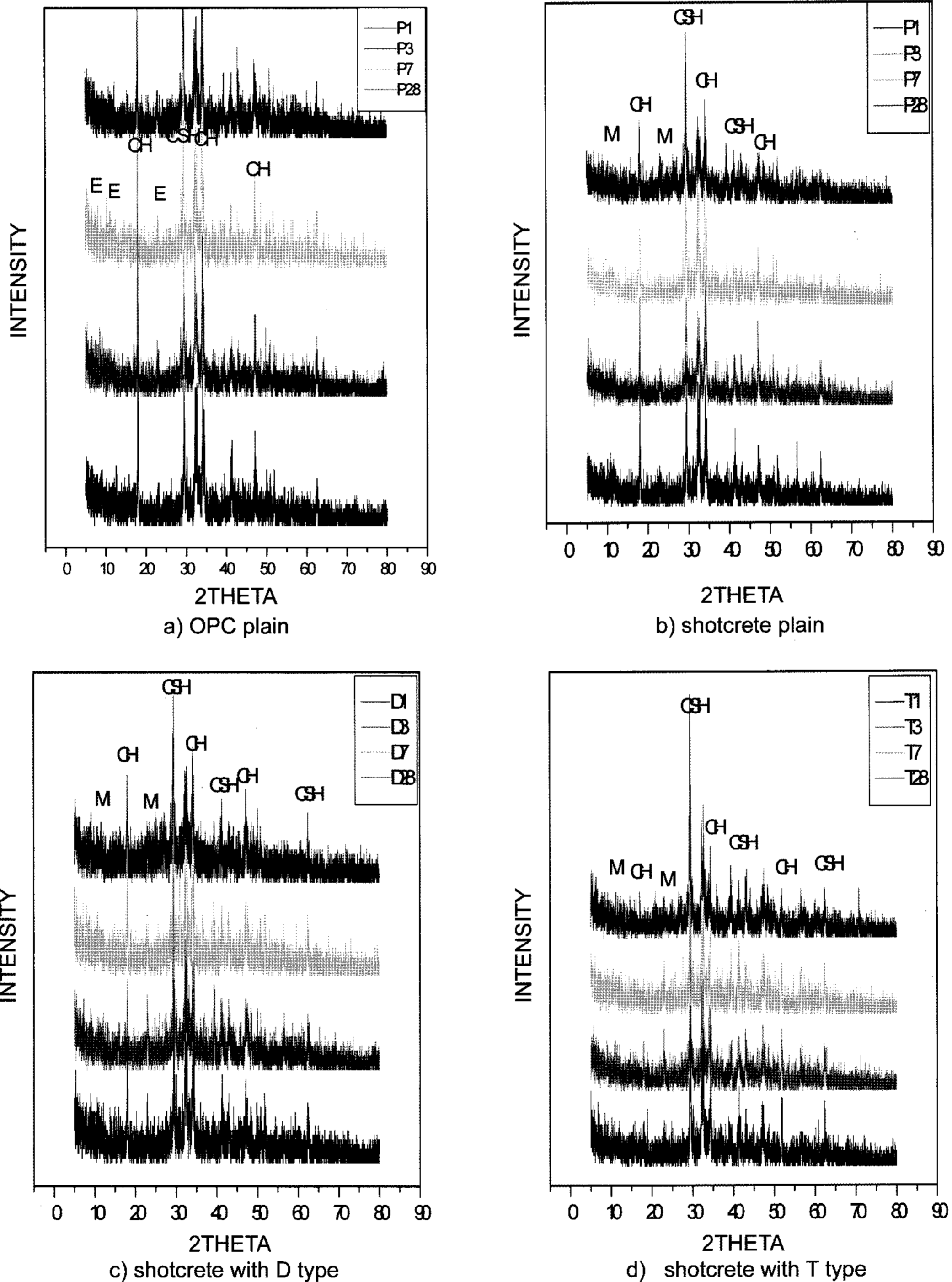


Fig. 15. Results of XRD Analysis.

3.5. 수화물

Fig. 15는 OPC의 재령별 수화물에 대한 XRD 분석결과를 나타낸 것이다. 그림 a)는 OPC, b)는 수밀성 재료 D의 혼입, c)는 수밀성 재료 T를 혼입한 수화물을 나타낸다. OPC의 경우 재령별로 Ca(OH)_2 가 강하게 생성되고 있음을 확인할 수 있으며, 재령 3일까지는 ettringite가 존재하나 재령 3일 이후에는 ettringite의 존재를 확인할 수 없었다. 이는 일반적인 OPC 수화 mechanism으로서 석고의 소모에 의한 monosulfate로의 전환으로 해석할 수 있다. 그러나 수밀성 재료인 D type이 혼입된 경우에는 ettringite가 재령 28일까지도 존재하는데 이는 D type의 경우 재료의 성분에 다량의 석고 성분의 함유에 의한 것으로 판단되며, T type이 혼입된 수화물의 경우 재령이 경과하면서 C-S-H의 peak intensity가 plain이나 D type이 혼입된 수화물보다 감소하며, Ca(OH)_2 의 intensity는 크게 증가하는 것으로 나타났다. 슛크리트 plain의 수화물은 일반 OPC 수화물과 비교하여 재령이 경과할수록 Ca(OH)_2 의 존재가 급격히 감소하며 재령 1일에서도 ettringite의 존재를 확인할 수 없었다. ettringite의 존재 여부는 슛크리트용 급결재에 함유되어 있는 calcium aluminate 성분에 의해 수화 시작 수시간 이내에 이미 ettringite가 monosulfate로 전이되었기 때문으로 판단된다. 슛크리트에 D type이 혼입된 경우 시간이 경과할수록 Ca(OH)_2 의 생성은 저하되고 있으며, 이는 T type에서는 더욱 Ca(OH)_2 의 생성이 적게 나타났다. 이는 슛크리트에서의 수화가 수시간 이내에 빠르게 진행되어 용출된 Ca(OH)_2 가 빠르게 C-S-H 생성에 소모된 결과로 해석된다.

4. 결 론

스�크리트의 수밀성 향상을 위한 방안으로서의 장기 내구성 향상을 위한 수밀성 재료의 적용 실험을 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 압축강도 측정결과 슛크리트 콘크리트의 경우 수밀성 재료를 사용 하였을 때 재령 28일에서 plain에 비하여 모두 약 10% 정도 높게 나타났는데 이는 수밀성 재료에 의한 수화반응에 의해 경화체의 조직 내에 치밀화가 이루어지기 때문에 압축강도가 향상되는 것으로 판단된다.
2. 흡수율 및 투수율 실험 결과 기존의 상용화 수밀성 재료는 일반 OPC 콘크리트와 동일하게 슛크리트에서도 수밀성능을 발휘하는 것으로 나타났으며, 슛크리트에서의 흡수율 저감 효과는 plain 대비 약 15%~65% 수준이었으며 투수율 저감 효과 역시 20%~30% 수준이었다.
3. Porosity 측정결과 수밀성 재료를 첨가한 경우 모두

plain 대비 공극부피 및 누적 공극율이 감소되었으며 따라서 슛크리트의 경우도 일반 OPC와 동일하게 수밀성 재료에 의해 시멘트 경화체의 수밀성이 크게 향상되는 것을 확인하였다.

4. 수화생성물에 대한 분석결과 슛크리트에서는 Ca(OH)_2 의 생성이 감소되는 것으로 나타났는데 이는 사용된 시멘트 광물계 급결재와 수밀성 재료와의 반응에 의해 시멘트 수화시 용출된 Ca(OH)_2 가 수화물로 빠르게 전이되면서 나타난 결과로 판단된다.

5. 슛크리트의 장기 내구성 확보를 위하여서는 수밀성능의 개선이 필요하고 수밀성능의 개선을 위해서는 일반 콘크리트에서와 같이 슛크리트에 적합한 수밀성 재료를 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

Acknowledgment

이 논문은 2007년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제 번호: KRF-2007-359-D0007)

REFERENCES

1. E. Grove., "Active Design in Tunnelling with Sprayed Concrete as a Permanent," *Inter. Conf on Eng., Developments in Shotcrete*, Australia, 123-33 (2001).
2. H. G. Park, "Performance of Wet-Mixed Shotcrete with Powder Types Cement Mineral Accelerator," *KSCE J. Civil. Eng.*, **24** [1C] 65-9 (2004).
3. J.-P. Won, "Durability Characteristics of High Performance Shotcrete for Permanent Support of Large Size Underground Space," *J. Kor. Concr. Ins.*, **19** [6] 45-55 (2007).
4. S. K. Oh, "Phenomena and Solutions of Concrete for Water Proofing," *J. Kor. Concr. Ins.*, **6** [2] 40-51 (1994).
5. A. S. El-Dieb and R. D. Hooton, "Water-permeability Measurement of High Performance Concrete using a High-pressure Triaxial Cell," *Cem. Concr. Res.*, **25** [6] 3199-208 (1995).
6. Kim, Jae On, "Changes in Hydration and Watertightness of Cement Containing Two-Component Fluosilicate Salt Based Chemical Admixture," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **40** [10] 749-55 (2004).
7. A. S. El-Dieb and R. D. Hooton, "A High Pressure Triaxial Cell with Improved Measurement Sensitivity for Saturated Water Permeability of High Performance Concrete," *Cem. Concr. Res.*, **24** [5] 854-62 (1994).
8. G. W. Scherer, "Measuring Permeability of Rigid Materials by a Beam-bending Method: 1. Theory," *J. Am. Ceram. Soc.*, **83** [9] 2231-39 (2000).