

# 단위수량 증가에 따른 시멘트 모르타르의 내구성능과 공극분포에 관한 연구

Effect of Additional Water on Durability and Pore Size Distribution in Cement Mortar

권성준<sup>1)</sup> 이학수<sup>2)</sup> 박선규<sup>3)\*</sup>  
Kwon, Seung Jun Lee, Hack Soo Park, Sun Gyu

## Abstract

Porosity in concrete has close relationship with durability characteristics. Additionally mixed water can help easy mixing and workability but causes increased porosity, which yields degradation of durability performance.

In this paper, cement mortar samples with 0.45 of w/c (water to cement ratio) are prepared and durability performances are evaluated with additional water from 0.45 to 0.60 of w/c. Various durability tests including strength, chloride diffusion, air permeability, saturation, and moisture diffusion are performed. Then they are analyzed with changing porosity. Changing ratios and the patterns of durability performance are quantitatively evaluated considering pore size distribution, total porosity, and additional water content.

**Keywords** : Cement mortar, Porosity, Chloride diffusion, Permeability, Saturation, Pore size

## 1. 서론

콘크리트는 다공성 재료로서 투수 또는 투기와 같은 성질을 가지고 있으며, 콘크리트의 이러한 특징은 강도 뿐 아니라, 내구성능에 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 철근부식을 야기하는 유해물질 (염화물 이온, 이산화탄소)은 공극 또는 공극구조를 통하여 침투하게 된다. 그러므로 콘크리트의 침투 및 확산은 공극률을 기본으로 하여 많은 연구가 이루어져 왔다.

초기재령 콘크리트에서 C-S-H (Calcium Silicate hydrates)나  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 포함하는 수화물들은 시멘트와 물과의 반응을 통하여 생성되며, 이러한 수화물에 존재하는 다양한 크기의 공극은 기체와 액체의 주요 통로로 작용하게 된다. 콘크리트의 공극에 영향을 주는 양생조건, 배합비 및 혼화재 등에 대하여 많은 연구가 진행되었지만, 콘크리트의 공극과 내구성능과의 명확한 관계를 구현하지 못하고 정성적인 평가에 국한되었다. 또한 콘크리트의 강도와 공극률의 관계는 오래전부터 연구되었으며, 콘크리트의 내구성능과 공극률에 대한 관계도 염화물 확산, 탄산화 해석 등을 중심으로 많은 연구가 수행되어 왔다.

한편 콘크리트의 투수 및 투기성능과 공극률의 관계도 많은 연구가 수행되었으나, 각각 독립적으로 수행된 연구결과이고, 동일한 배합에서 실험된 것이 아니므로 제한적인 연구성과라 할 수 있다.

콘크리트 시공시 가수는 작업성을 임시로 개선시킬 수 있지만, 재료분리 뿐 아니라 강도 및 내구성의 저하를 야기하게 된다. 또한 단위 시멘트량이 동일한 콘크리트에 있어서 단위수량이 많을수록 수화반응이 활발하게 일어나게 되지만, 소모된 단위수량은 공극을 발생시키고 이는 강도 및 내구저항성을 감소시키게 된다. 콘크리트의 내부에 존재하는 공극은 물질이동에 중요한 역할을 하고 있으며, 내구성 지표로도 고려되고 있다. 동일한 공극률을 가진 콘크리트라 하더라도 혼화재를 사용한 콘크리트의 경우 염화물 확산계수는 낮아지게 된다. 또한 탄산화의 경우, 탄산화 진행 중  $\text{CaCO}_3$  생성에 따라 공극률이 감소하게 된다. 그러나 동일한 양생 및 노출조건을 가진 OPC (Ordinary Portland Cement)로 제조된 콘크리트로 실험을 제한할 경우, 정량적인 내구특성의 분석이 가능할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 동일한 양생조건 및 노출조건에 있어서

1) 정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 조교수  
2) 정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 교수  
3) 정회원, 목원대학교 공과대학 건축학부 조교수, 교신저자

\* Corresponding author : psg@mokwon.ac.kr 042-829-7712  
• 본 논문에 대한 토의를 2012년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2012년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

MIP(Mercury Intrusion Porosimetry)를 통하여 콘크리트의 공극률을 평가하였으며, 단위수량을 증가시키면서 공극률의 변화에 대하여 재령 91일을 기준으로 실험을 수행하였다. 또한 콘크리트의 강도, 염화물, 투기/투수, 포화도, 수분확산계수와 같은 다양한 내구성 실험이 수행되었으며, 단위수량의 증가에 따른 공극률의 변화와 이에 따른 내구성능의 변화에 대하여 정량적으로 평가하였다.

## 2. 실험계획 및 준비

### 2.1 배합 및 양생조건

실험에 있어서 굵은골재의 영향을 받지 않도록 MIP 측정용으로 OPC 모르타르 시편을 제작하였다. W/C(물-시멘트비)는 45%를 기준으로 하였으며, 단위수량은 25리터 기준으로 0.42kg, 0.85kg, 1.27kg씩 증가시켰다. 골재는 표면건조 내부포화상태의 잔골재를 사용하였으며, 최종적으로 물시멘트비는 0.45, 0.50, 0.55 및 0.60 수준이었다. 본 실험에 사용된 각 재료의 배합량을 Table 1, 시멘트 및 잔골재의 특성을 Table 2에 나타내었다.

초기재령 상태에서는 수화반응에 따라 공극률이 상대적으로 빠르게 감소하므로 수화가 상당히 진행된 91일 동안 수중 침지된 시편을 대상으로 MIP 및 내구성능실험도 등을 수행하였다.

Table 1 Mix proportions

w/c	Cement content (kg/25liter)	Sand content (kg/25liter)	Additional water amount (kg/25liter)	Water content (kg/25liter)	Flow (mm)
0.45	8.5	45	-	3.83	280
0.50	8.5	45	0.42	4.25	330
0.55	8.5	45	0.85	4.68	335
0.60	8.5	45	1.27	5.10	360

Table 2 Physical properties of cement and sand

Physical properties of aggregate	Specific gravity(g/cm <sup>3</sup> ): 2.60 Fineness Modulus : 2.64						
Physical properties of cement	Chemical composition of cement (%)						
Density (g/cm <sup>3</sup> ) 3.15	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	LOI
Blaine (cm <sup>2</sup> /g) 3,120	21.5	5.10	3.04	61.3	2.85	2.21	1.93

## 2.2 내구성능 평가

### 2.2.1 공극률과 압축강도

일반적으로 콘크리트의 공극구조는 수화반응과 함께 생성되며, 양생기간의 증가에 따라 공극률은 감소하며, 시멘트 모르타르의 공극률을 평가하기 위한 시험방법으로는 질소흡착법, 화상분석법 및 MIP 등이 널리 사용된다. 특히 MIP시험은 중금속을 이용하기 때문에 시험체 처리에 신중해야하는 등의 어려움이 있지만, 사용이 편리하고 신뢰성 있는 결과를 제공하므로 모세관공극을 평가하는데 많이 사용되고 있다.

본 실험에서 시멘트 모르타르는 91일 수중양생 후, 아세톤에 침지하여 수화반응을 중지시켰으며, 105°C에서 24시간 건조한 후 실험에 사용되었다. 각 실험에 대하여 3배수의 시편을 측정하여 그 평균값을 사용하였다. 압축강도 실험은 원주형 몰드(φ10×20cm)를 이용하여, JIS A 1108에 준하여 실시하였다.

### 2.2.2 염화물 확산계수

염화물 확산계수는 정량적인 염화물 거동을 평가하고 내구수명을 예측하는데 필수적인 변수이다. 염화물 확산계수는 NT BUILD 492에 근거, 재령 91일 시편에 대하여 실험을 수행하였다. Table 3은 실험조건을 나타낸 것으로, 질산은용액(0.1N, AgNO<sub>3</sub>)이 지시약으로 사용되었다.

### 2.2.3 수분발산(포화도)

큰 공극률을 가지는 콘크리트일수록 침지조건에서 많은 수분을 흡수하고, 건조상태에서는 발산이 빠르게 진행된다. 시멘트 모르타르의 자유수는 공극에만 존재하게 되므로 공극률은 수분의 발산량과 밀접한 관계가 있다. 본 실험을 위하여 5cm의 정육각형 몰드가 사용되었으며, 재령 91일 경과후 일주일을 침지하여 수분발산을 측정하였다. 10일동안, 실내조건 (온도 20°C and 상대습도 55%)에 존치된 모르타르의 중량이 측정되었다. 수분의 포화도

Table 3 Conditions for chloride diffusion test (NT BUILD 492)

Catholyte	10% NaCl
Anolyte	0.3N NaOH
Temperature	20 ~ 25°C
Applied potential	30V
Initial current	40~60mA
Duration time	24hours

는 식 (1)에 의하여 도출되었다.

$$S(\%) = \frac{W_{act} - W_{dried}}{W_{sat} - W_{dried}} \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $W_{sat}$ ,  $W_{act}$ ,  $W_{dried}$ 는 포화시, 측정시, 건조시의 중량을 각각 나타낸다.

#### 2.2.4 투기성

현재까지 투기성의 측정방법에 대한 명확한 국제기준은 없는 상태이며, 다양한 방법들이 Darcy의 법칙에 근거하여 제안되고 있다. 본 실험에서는 두께 3cm의 디스크 시편을 사용하였으며, 저면으로부터 0.2MPa의 압력을 받도록 설치하였다. 투기성 시험은 재령 91일의 디스크 시편을 대상으로 실시하였으며, 시편을 통과한 공기의 체적이 시간에 따라 측정되었다. 시편의 투기성은 식 (2)에 나타난 식에 의하여 구하였다.

$$K = \frac{2P_2 h \gamma}{P_1^2 - P_2^2} \times \frac{Q}{A} \quad (2)$$

여기서,  $K$ 는 투기성 (cm/s),  $P_1$ 와  $P_2$ 는 가압압력 (0.2MPa) 및 대기압 (0.1013MPa),  $h$ 는 디스크샘플의 두께 (3cm),  $A$ 는 기압에 노출된 면적 (cm),  $\gamma$ 는 공기의 단위중량( $1.205 \times 10^{-6} \text{kg/cm}^3$ )을 나타낸다.

#### 2.2.5 수분확산

콘크리트의 수분확산은 매우 중요한 인자임에도 불구하고 실험으로 수분확산성을 도출하기는 어렵다. 최근 들어 콘크리트의 수분확산은 중량 이동과 수분흡수를 고려하여 식 (3)과 같이 제안되었다.

$$\left(\frac{M}{A}\right)_t = B \left[ 1 - \exp\left(-\frac{S t^{0.5}}{B}\right) \right] + C_0 L \left[ 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left[-\frac{D_m (2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right] \right] \quad (3)$$

여기서,  $M$ 은 흡수와 확산에 따른 물중량(kg),  $A$ 는 표면적( $\text{cm}^2$ ),  $B$ 는 흡수표면적 및 거리에 따른 상수(mm),  $S$ 는 흡수률( $\text{kg/m}^2 \text{h}^{0.5}$ ),  $C_0$ 는 표면수분량 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $L$ 은 시편의 길이(m),  $D_m$ 은 수분확산계수 ( $\text{m}^2/\text{h}$ )를 나타낸다.

다. 재령 91일의 흡수율은 KS F 2609에 따라 구하였으며, 그 결과에 따라 수분확산계수를 도출하였다.

### 3. 공극률 및 내구성 시험 결과

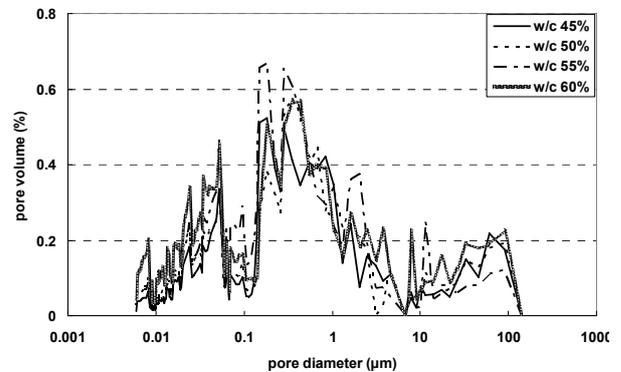
#### 3.1 내구성 시험 결과

##### 3.1.1 압축강도 및 공극률

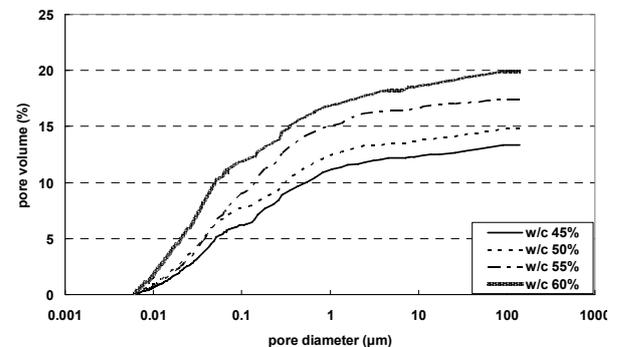
Fig. 1은 물시멘트비 시험체의 공극구조 및 공극률을 나타낸 것이며, Fig. 2는 물시멘트비 증가에 따른 강도 및 공극률의 변화를 나타낸 것이다. 물시멘트비가 0.45에서 0.60으로 증가할 때, 공극률은 1.5배 증가하였으며, 압축강도는 75.6% 수준으로 감소하였다. 또한 동일한 단위시멘트량에 있어서, 단위수량을 33% 추가함으로써 압축강도가 상당히 감소하고 있음을 알 수 있었다.

##### 3.1.2 염화물 확산계수 및 공극률

Fig. 3은 공극률과 확산계수의 변화를 나타낸 것이다. 시멘트 경화체 내부의 공극은 이온의 보유하고 뿐 아니라 이동통로가 되므로 염화물 확산계수는 공극구조에 의존



(a) PSD (91 days)



(b) Cumulative porosity (91 days)

Fig. 1 PSD and total porosity

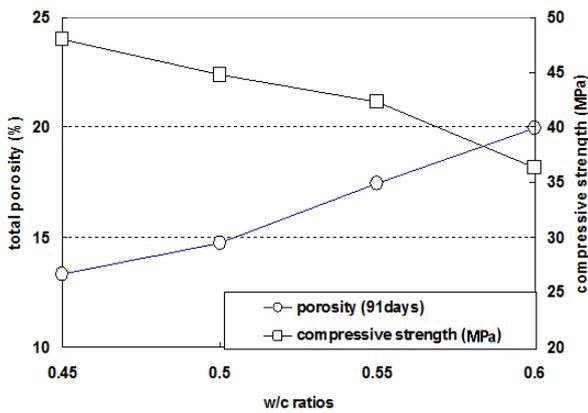


Fig. 2 Strength and porosity with different w/c ratios

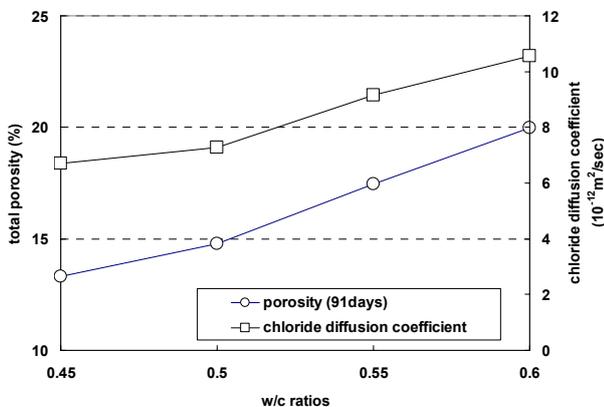
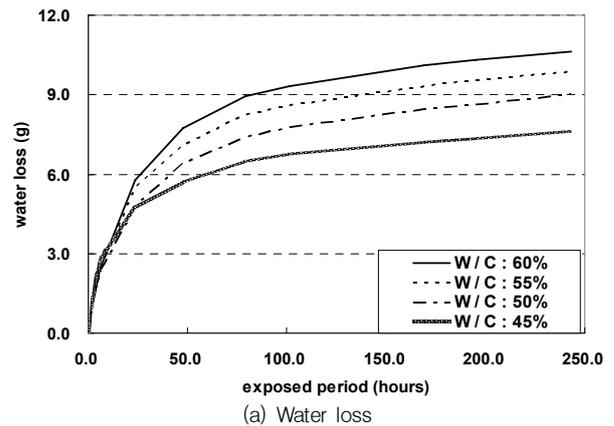


Fig. 3 Chloride diffusion coefficient and porosity with different w/c ratios

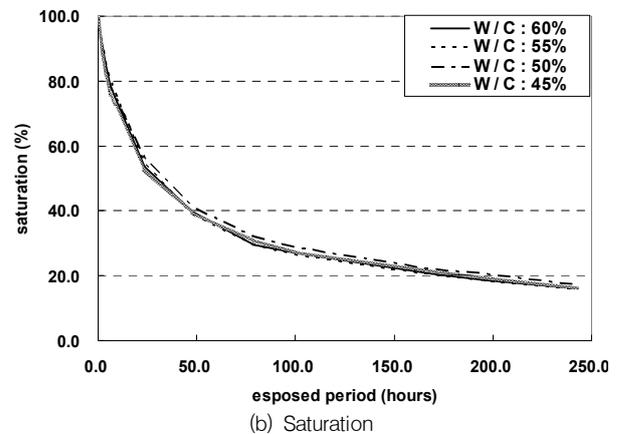
하게 되며, 본 연구에 있어서도 물시멘트비가 증가할수록 염화물 확산계수는 선형적으로 증가하였으며, 약 1.57배의 증가율을 나타내었다.

### 3.1.3 수분 발산과 공극률

Fig. 4는 수분발산량 및 포화도에 대한 결과를 나타낸 것이며, Fig. 5는 수분발산량, 포화도를 공극률과 함께 나타낸 것이다. 수분발산량은 초기 수시간내에 뚜렷한 차이가 발생하지 않았으나, 10일간의 측정결과에서는 뚜렷한 차이를 나타내었다. 즉, 높은 공극률을 가진 시편의 경우, 물을 보유할 수 있는 공극이 많아지므로, 건조과정에 따라 그 차이가 발생하였으며, 기존의 결과와도 일치하고 있다. 또한 식 (1)에서 도출된 포화도에 대해서는 뚜렷한 차이가 발생하지 않았는데, 많은 수분을 가지고 있는 시편에서 역시 많은 수분 발산이 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. 수분발산량은 10일 경과 후 각각 7.65g (w/c:



(a) Water loss



(b) Saturation

Fig. 4 Water loss and saturation with w/c ratios

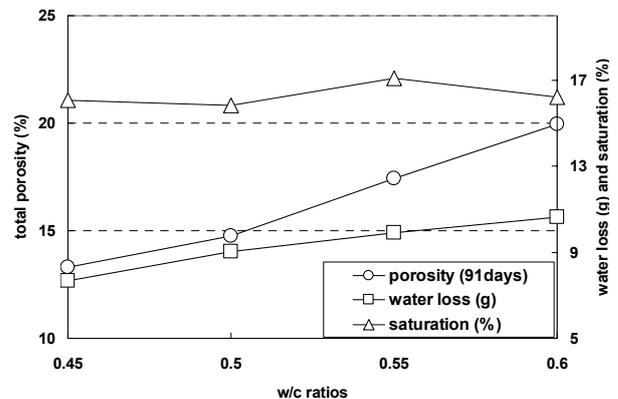


Fig. 5 Water loss, saturation, and porosity with different w/c ratios

0.45), 9.01g (w/c: 0.50), 9.88g (w/c: 0.55), 10.57g (w/c: 0.60)으로 증가하였는데, 이 결과는 공극률의 변화와 일치하고 있다.

### 3.1.4 투기성 및 공극률

Fig. 6은 물시멘트비에 따른 공극률과 투기계수를 나타

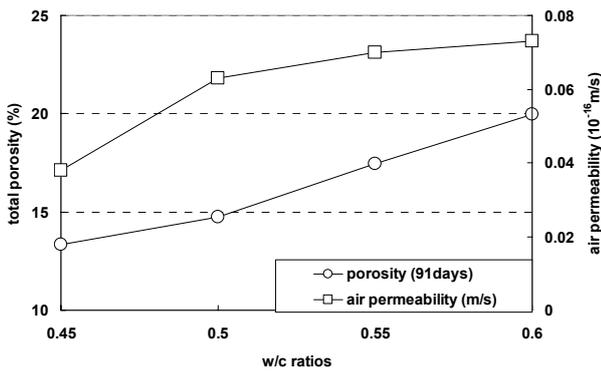


Fig. 6 Air permeability and porosity with different w/c ratios

낸 것이다. 물시멘트비가 증가할수록 모르타르 시편은 조악한 공극구조를 가지게 되고 빠른 투기계수의 증가를 보이게 된다. 물시멘트비가 0.45에서 0.60으로 증가할 때, 투기계수는 1.92배 증가하였는데, 물시멘트비 0.50 이상부터는 투기계수의 큰 차이는 보이지 않았다.

### 3.1.5 수분확산 및 공극률

Table 4는 물시멘트비에 따른 흡수율, 표면수분량 및 수분 확산계수의 결과를 나타낸 것이며, Fig. 7은 흡수율, 표면수분량 및 수분 확산계수를 공극률과 함께 도시한 것이다.

Table 4 Results of sorptivity, surface concentration, and moisture diffusion coefficient

w/c	S (kg/m <sup>3</sup> h <sup>0.5</sup> )	L (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	B (mm)	C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>m</sub> (m <sup>2</sup> /h) × 10 <sup>-7</sup>
0.45	0.17	5	25	0.02	42.89	9.1
0.50	0.18	5	25	0.02	48.73	12.4
0.55	0.24	5	25	0.02	53.89	14.3
0.60	0.44	5	25	0.02	56.43	24.2

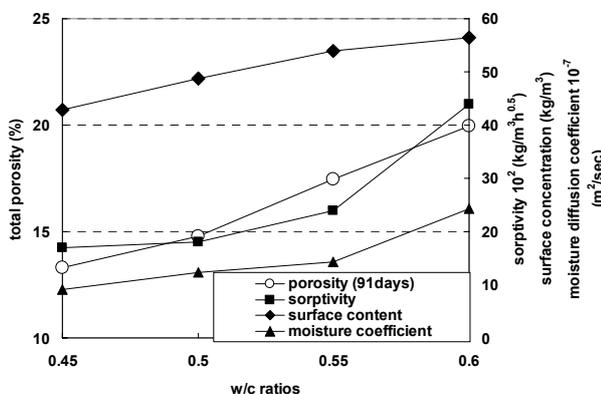


Fig. 7 Sorptivity, surface concentration, moisture diffusion, and porosity with different w/c ratios

다. 물시멘트비가 0.6으로 증가하면, 표면 수분량은 1.32배로 증가하였으며, 흡수율 및 수분확산계수는 각각 2.59 및 2.66배로 증가하였다. 결과적으로 물시멘트비가 증가할수록 수분확산계수는 증가하고 있는 것으로 나타났는데, 이는 공극률이 높은 시험체가 큰 흡착성을 갖기 때문인 것으로 판단된다.

## 3.2 공극률과 내구성능

### 3.2.1 공극크기구조 변화 분석

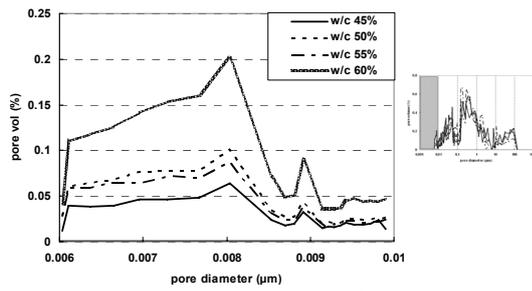
Fig. 1에서는 공극률 및 공극구조를 나타내었는데, 측정된 공극크기 변화를 분석하기 위하여, Fig. 8에 나타난 바와 같이 공극구조를 다섯 개의 구역으로 나누어 평가하였다. 모세관공극은 물질이동과 매우 큰 관련성을 가지고 있는데, 일반적으로 10<sup>-8</sup>~10<sup>-4</sup>m의 크기를 가지며, MIP 측정결과가 이 범위를 포함하고 있다. 각각의 영역에서 측정된 공극률은 하나의 평균값으로 계산되었으며, 물시멘트비와 비교를 수행하였는데, 이렇게 함으로서 물시멘트비 변화에 따른 공극특성 변화를 알 수 있게 된다.

Fig. 9(a)는 물시멘트비 변화에 따른 공극 평균값의 변화를 나타낸 것이며, Fig. 9(b)는 물시멘트비 0.45를 기준으로 한 공극률의 증가비를 나타낸 것이다.

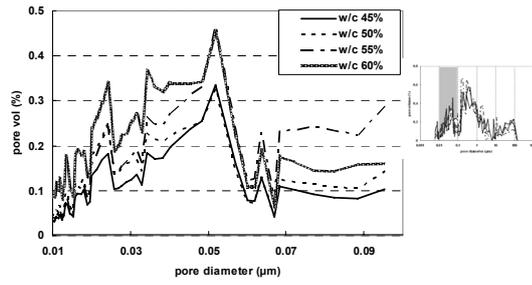
Fig. 9에 나타난 것처럼, 5가지 공극영역으로 구분된 공극특성은 물시멘트비의 변화에 따라 흥미있는 결과를 나타내고 있다. 2개의 그룹 (0.01μm 이하, 0.01~0.1μm)에서는 물시멘트비가 증가함에 따라 상대적으로 높은 공극률 증가비를 나타내고 있다. 또한 더 작은 공극들이 시멘트 수화에 의하여 쉽게 채워지고 있으므로, 공극이 작은 2개의 그룹에서 높은 공극변화 구배가 나타났다.

공극 증가비에 따른 회귀분석 결과를 Fig. 9(b) 및 Table 5에 결정계수(R<sup>2</sup>)와 함께 나타내었다. 공극률에 대한 회귀분석은 영역에 따라 비선형적인 분석이 가능하지만, 본 연구에서는 물시멘트비의 변화에 따라 선형으로 가정하여 분석을 수행하였다. 결정계수가 낮은 영역 (0.1~1 μm, 10μm ~)에서는 매우 낮은 상관계수가 평가되었는데, 이는 다수의 실험값을 확보하여 상관관계를 평가할 필요가 있다.

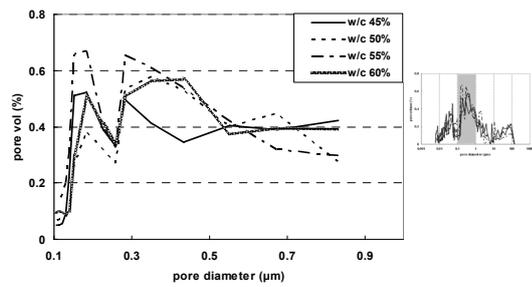
Table 5에 나타난 바와 같이 평균화된 공극변화 기울기는 첫 번째 그룹(~0.01μm)에서 4.3682인 것을 알 수 있었으며, 결정계수 R<sup>2</sup>은 0.7246로 계산되었다. 또한 두 번째 그룹(0.01~0.1μm)에서는 공극변화 기울기가 2.3352를



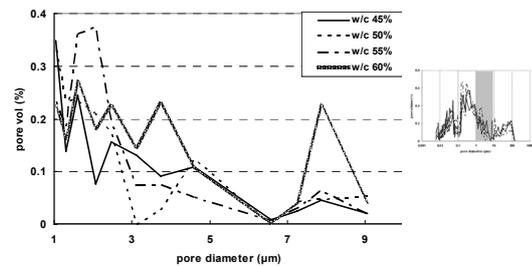
(a) PSD ( $\sim 0.01 \mu\text{m}$ )



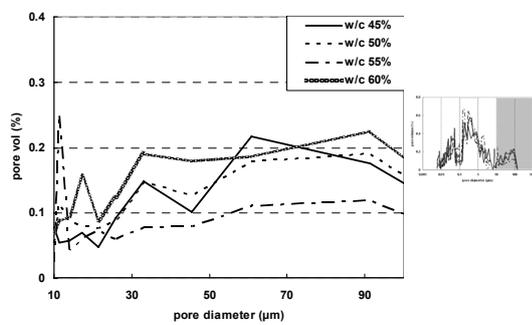
(b) PSD ( $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ )



(c) PSD ( $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ )

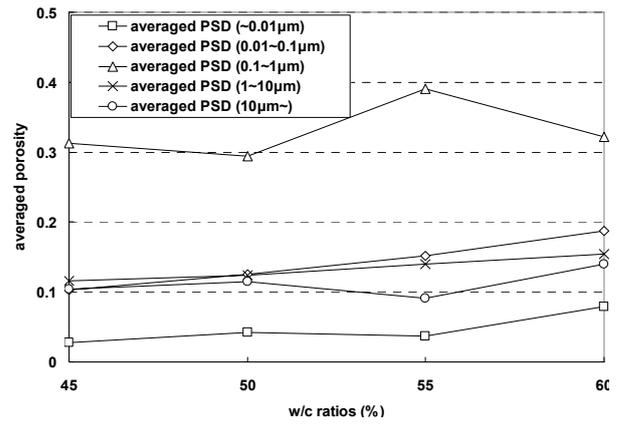


(d) PSD ( $1 \sim 10 \mu\text{m}$ )

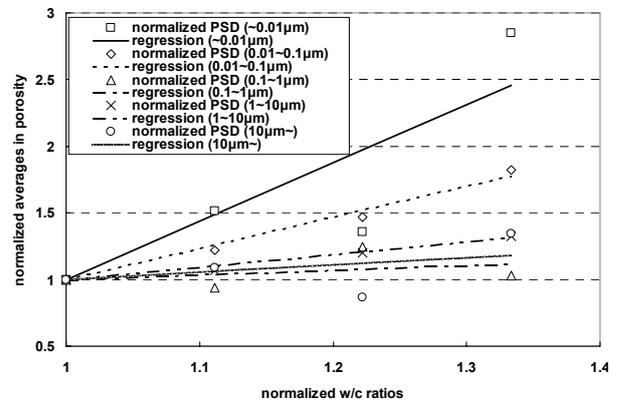


(e) PSD ( $10 \mu\text{m} \sim$ )

Fig. 8 PSD in different pore diameter region



(a) Averaged porosity with w/c ratios



(b) Normalization of porosity and w/c ratios

Fig. 9 changes in averaged and normalized porosity with w/c ratios

Table 5 Regression analysis for various ranges of porosity and w/c ratios

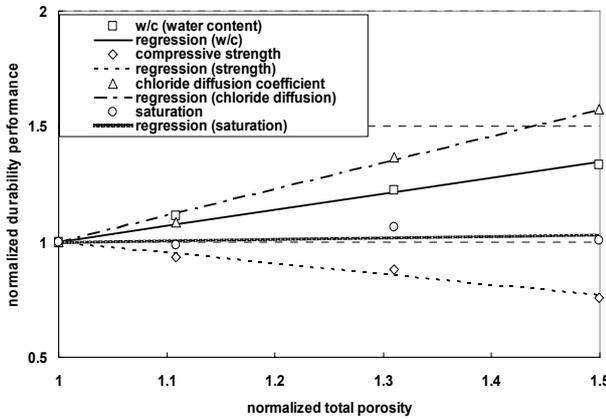
Pore diameter range	$Y = A(X - 1) + 1$ Y : gradient of normalized pore change, X : normalized w/c or water content	
	A	R <sup>2</sup>
$\sim 0.01 \mu\text{m}$	4.3682	0.7246
$0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$	2.3352	0.9839
$0.1 \sim 1 \mu\text{m}$	0.3412	0.1506
$0.1 \sim 10 \mu\text{m}$	0.9321	0.9765
$10 \mu\text{m} \sim$	0.5489	0.2400

나타냈으며, 결정계수 R<sup>2</sup>은 0.9839를 나타내고 있다.

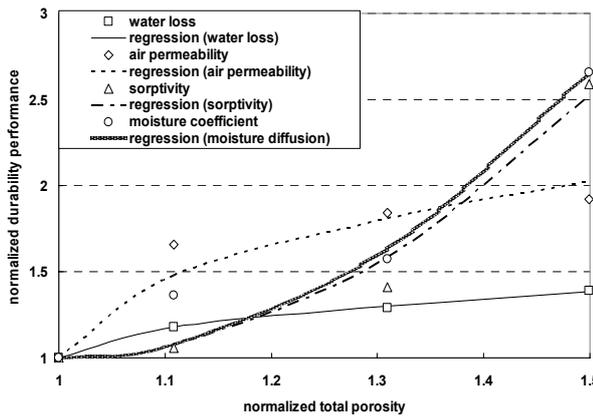
### 3.2.2 공극률 및 내구성능과의 상관성

물시멘트비와 내구성능과의 관련성은 설계상 실용성이 있으나, 실제적인 물리적인 특성을 고려하지 못하므로 본 논문에서는 공극률을 이용하여 시멘트 경화체의 내구특성을 분석하였다. MIP를 통하여 측정된 공극률과 내구성

능은 모두 물시멘트비 0.45를 기준으로 정규화되었다. 그 결과는 Fig. 10에 나타난 바와 같으며, 회귀분석 결과는 Table 6에 나타내었다.



(a) Regression results for w/c, strength, chloride diffusion coefficient, and saturation



(b) Regression results for water loss, air permeability, sorptivity, and moisture coefficient

Fig. 10 Relationships between normalized porosity and durability performance

Table 6 Results of regression analysis for normalized porosity and durability performance

	A	R <sup>2</sup>
$Y = A(X - 1) + 1$		
Y : w/c (water content)	0.6927	0.9755
Y : Compressive strength	-0.4642	0.9678
Y : Chloride diffusion coefficient	1.1446	0.9911
Y : Saturation	0.0621	0.1625
	B	R <sup>2</sup>
$Y = B\sqrt{(X - 1)} + 1$		
Y : Water loss	0.5419	0.9984
Y : Air permeability	1.4559	0.9809
	C	R <sup>2</sup>
$Y = C(X - 1)^2 + 1$		
Y : Sorptivity	6.1042	0.9809
Y : Moisture diffusion coefficient	6.6166	0.9545

회귀분석은 실험결과의 형태를 이상적으로 구현할 수 있는 함수를 선정하였는데, 강도, 염화물확산계수 및 물시멘트비(또는 단위수량)은 선형관계로 회귀분석을 수행하였다. 포화도는 고정값(1.0)으로 정규화된 공극률의 변화에 큰 영향을 받지 않았다. 시멘트 경화체의 투기성과 수분발산량은 공극률의 증가에 따라 비선형적으로 감소하여 공극률 제공근에 비례하는 함수로 가정하였다. 또한 흡수율 및 수분 확산계수는 비선형적으로 증가하였는데, 이를 고려하기 위하여 공극률의 제공에 비례하는 함수를 가정하였다.

특히 흡수율 및 수분확산계수는 공극률이 어느정도 증가하면 수렴할 것으로 예상되므로 추가적인 실험을 통하여 흡수율 및 수분확산계수가 일정해지는 한계 공극상태를 도출할 필요가 있다고 판단된다.

또한 증가하는 공극률이 내구성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 특정 영역의 평균화된 공극률을 선정한 후 각각의 정규화된 내구성능결과와 비교하였다. Table 5에 나타난 0.01~0.1 $\mu$ m 범위의 공극이 물시멘트비 변화와 상관성이 가장 크고, 변화 기울기도 가장 크게 나타났으므로 이 영역의 공극률을 내구성능의 변화와 비교하였다. 즉 0.01~0.1 $\mu$ m의 공극률 평균값의 변화에 따른 내구성능의 변화를 고찰하였다. 또한 변화하는 내구성능의 기울기가 각각 선형적으로 도출된다면, 그 기울기를 통하여 내구성능이 어느 정도나 변화하는지 가늠할 수 있게 된다. 회귀분석 결과는 Table 7에 나타난 바와 같으며, Fig. 11에 기울기를 나타내었다.

회귀분석 결과, 수분확산계수, 흡수율 및 투기성 등이 공극률의 변화에 가장 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이는 공기 및 물의 이동이 초기에는 부분 포화된 상태에서 빠르게 시작하기 때문이다. 각 기울기는 수분확산에서 1.82를, 흡수율에서는 1.61을, 투기성에서는 1.38을

Table 7 Results of linear regression analysis

Variables (X)	$Y = A(X - 1) + 1$	
	A	R <sup>2</sup>
w/c (water content)	0.4275	0.9823
compressive strength (-)	0.2874	0.9896
Chloride diffusion coefficient	0.7021	0.9698
Water loss	0.5277	0.9097
Saturation	0.0354	0.1061
Air permeability	1.6765	0.6006
Sorptivity	1.605	0.8320
Moisture coefficient	1.8172	0.9284

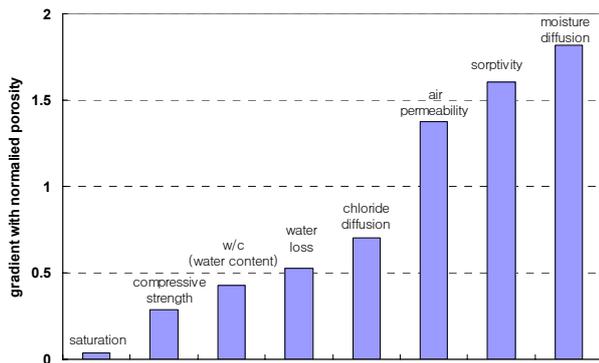


Fig. 11 Comparison of gradient from regression analysis

나타내고 있다. 염화물 확산계수나 수분손실의 경우는 포화상태에서 실험이 수행되므로 기울기는 상대적으로 작은 0.70과 0.53으로 평가되었다. 강도 및 포화도에서는 0.29 및 0.04로 공극률의 변화의 영향이 상대적으로 낮게 나타났다.

#### 4. 결론

단위수량 증가에 따른 시멘트 모르타르의 공극분포와 내구성능에 관한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 물시멘트비가 0.45에서 0.60으로 1.33배 증가할 때의 내구성능 및 공극률 변화를 분석한 결과, 수분발산의 증가비는 1.39배, 공극률의 증가비는 1.50배, 염화물 확산계수의 증가비는 1.57배, 투기성의 증가비는 1.92배, 흡수율의 증가비는 2.59배, 수분확산계수의 증가비는 2.66배로 증가하였다. 반면에 강도에서는 75.6% 수준으로 감소하였다.
- (2) 공극률의 변화에 따라 강도, 염화물 확산계수, 물시멘트비(단위수량)에서는 선형적인 관계인 것으로 분석되었다. 또한 투기성 및 수분 발산량은 공극률의 제곱근에 비례하는 관계가 있는 것으로 평가되었으며, 흡수율 및 수분확산계수는 공극률의 제곱에 비례하여 매우 빠르게 증가하는 상관성이 있는 것으로 평가되었다.
- (3) 0.01~0.1 $\mu$ m의 영역에서 변화하는 공극률과 내구성능 실험결과를 분석하여, 내구성능의 변화 기울기를 평가하였다. 부분포화상태에서 물질이동을 포함하는 실험(수분확산, 흡수율, 투기성)에서 변화하는 기울기가 1.0이상으로 높게 평가되었다.

또한 포화상태를 가정하는 실험, 즉 수분발산 및 염화물 확산에서는 기울기가 0.70, 0.52로 평가되어 상대적으로 낮은 기울기를 갖는 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. 소형석, 소양섭, "포졸란재 함유 콘크리트의 투수 및 투기성과 염화물이온 투과성", 대한건축학회지, 제19권 11호, 2003, pp.117-124.
2. 송하원, 권성준, 변근주, 박찬규, "혼화제를 사용한 고성능 콘크리트의 배합특성을 고려한 염화물 확산 해석기법에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제25권 1A호, 2005, pp.213-223.
3. Bungey, J. H., Millard, S. G., Testing of Concrete in Structures, Blackie Academic & Professional, 1996.
4. Concrete Society, Permeability Testing of Site Concrete-A Review of Methods and Experiments, Technical Report No. 31, London, 1987.
5. Dhir, R. K., Hewlett, P. C., Chan, Y. N., "Near Surface Characteristics of Concrete: Intrinsic Permeability", Magazine of Concrete Research, vol. 41, 1988, pp.87-97.
6. Harry, K. G., Johnson, A., "A Non-Destructive Technique for Measuring Ceramic Porosity using Liquid Nitrogen", Cement and Concrete Research, vol. 31, 2004, pp.1564-1575.
7. Hedenblad, G., "The Use of Mercury Intrusion Porosimetry or Helium Porosity to Predict the Moisture Transport Properties of Hardened Cement Paste", Advanced Cement Based Materials, vol. 6, 1997, pp.123-129.
8. Houst, Y., Wittmann, F. H., "The Diffusion of Carbon Dioxide and Oxygen in Aerated Concrete", International Collaboration on Material Science and Restoration, Technische Akademie, Esslingen, 1986.
9. Ishida, T., Maekawa, K., "Modeling of PH Profile in Pore Water based on Mass Transport and Chemical Equilibrium Theory", Concrete Library of JSCE, vol. 37, 2001, pp.151-166.
10. Ishida, T., Maekawa, K., Kishi, T., "Enhanced Modeling of Moisture Equilibrium and Transport in Cementitious Materials under Arbitrary Temperature and Relative Humidity History", Cement and Concrete Research, vol. 37, 2007, pp.565-578.
11. Ishida, T., Maekawa, K., "Modeling of Durability Performance of Cementitious Materials and Structures based on Thermo-hygro Physics", RILEM PRO 29, Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures, 2003, pp.39-49.
12. Ishida, T., Soltani, M., Maekawa, K., "Influential Parameters on the Theoretical Prediction of Concrete Carbonation Process", Proceedings. 4th International Conference on Concrete Under Severe Conditions, Seoul, Korea 2004, pp.205-212.
13. Jung, S. H., Diffusivity of Carbon Dioxide and Carbonation in Concrete through Development of Gas Diffusion Measuring System, Ph.D. dissertation, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University, Korea, 2002.
14. Kumar, R., Bhattacharjee, B., "Study on Some Factors Affecting the Results in the Use of MIP Method in Concrete

- Research”, *Cem Concr Res* 33: 2003, pp.417-424.
15. Kwon, S.-J., Song, H.-W., “Analysis of Carbonation Behavior in Concrete using Neural Network Algorithm and Carbonation Modeling”, *Cement and Concrete Research*, vol. 40, 2010, pp.119-127.
  16. Maekawa, K., Ishida, T., “Modeling of Structural Performances Under Coupled Environmental and Weather Actions”, *Materials and Structures*, vol. 35, 2002, pp.594-602.
  17. Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T., “Multi-Scale Modeling of Structural Concrete”, London and New York, Taylor & Francis, 2009.
  18. Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T., “Multi-Scale Modeling of Concrete Performance”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1, 2003, pp.91-126.
  19. Metha, K., Monteiro, P. J. M., “Concrete: Structure, Properties, and Materials”, vol. 2, Prentice Hall, New Jersey, 1993.
  20. Neithalath, N., “Analysis of Mixture Transport in Mortar and Concrete Using Sorption-Diffusion approach”, *ACI Materials Journal*, vol. 103, 2006, pp.209-217.
  21. Neville, A., *Properties of Concrete*, 4th Ed. Longman (revised), 1996.
  22. Ngala, V. T., Page, C. L., “Effects of Carbonation on Pore Structure and Diffusional Properties of Hydrated Cement Paste”, *Cement and Concrete Research*, vol. 27, 1997, pp.995-1007.
  23. Nyame, B. K., Illston, J. M., “Relationship between Permeability and Pore Structure of Hardened Cement Paste”, *Magazine of Concrete Research*, vol. 33, 1981, pp.139-146.
  24. Otsuki, N., Nagatataki, S., Nakashita, K., “Evaluation of AgNO<sub>3</sub> Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials”, *ACI Materials Journal*, vol. 89, 1992, pp.587-592.
  25. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., Fardis, M. N., “Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation”, *ACI Materials Journal*, vol. 88, 1991, pp.363-373.
  26. Parrot, L. J., “Effect of Changes in UK Cements upon Strength and Recommended Curing Times”, *Concrete*, vol. 19, 1985, pp.22-24.
  27. Price, H. C., “Factors Influencing Concrete Strength”, *ACI Materials Journal*, vol. 47, 1951, pp.417-432.
  28. Song, H.-W., Cho, H. J., Park, S. S., Byun, K. J., Maekawa, K., “Early-Age Cracking Resistance Evaluation of Concrete Structure”, *Concrete Science Engineering*, vol. 3, 2001, pp.62-72.
  29. Song, H.-W., Kwon, S.-J., “Permeability Characteristics of Carbonated Concrete Considering Capillary Pore Structure”, *Cement and Concrete Research*, vol. 37, 2007, pp.909-915.
  30. Song, H.-W., Kwon, S.-J., Byun, K. J., Park, C. K., “Predicting Carbonation in Early-Aged Cracked Concrete”, *Cement and Concrete Research*, vol. 36, 2006, pp.979-989.
  31. Tang, L., Nilsson, L. O., “A Study of the Quantitative Relationship between Permeability and Pore Size Distribution of Hardened Cement Pastes”, *Cement and Concrete Research*, vol. 22, 1992, pp.541-550.
  32. Tang, L., Nilsson, L. O., “Chloride Binding Capacity and Binding Isotherms of OPC Paste and Mortar”, *Cement and Concrete Research*, vol. 23, 1993, pp.347-353.
  33. Whiting, D., *Permeability of Selected Concrete*. in *Permeability of Concrete*, ACI Special Publication, SP-108, Detroit, 1988, pp.195-222.

(접수일자 : 2012년 1월 26일)

(수정일자 : 2012년 3월 21일)

(심사완료일자 : 2012년 3월 29일)

## 요 지

콘크리트내의 공극률은 콘크리트 구조물의 내구적인 특성과 밀접한 관련성이 있다. 특히, 콘크리트 시공시 가수된 물은 콘크리트의 비빔과 작업성에 일시적으로 도움이 되지만, 이러한 가수는 콘크리트의 공극을 증가하게 하며, 이는 콘크리트 구조물의 내구적인 성능저하를 야기하게 된다.

본 연구에서는 물시멘트비 0.45의 시멘트 모르타르에 대하여, 단위수량을 증가시켜 물멘트비를 0.45에서 0.60으로 증가시키면서 내구성을 평가하였다. 즉, 각 물시멘트비로 소정의 재령까지 양생한 시험체에 대하여 강도, 염화물 확산, 투수성, 포화도 및 수분 확산계수 등의 다양한 내구성 실험을 수행하였으며, 이러한 실험결과들은 변화하는 공극률과 함께 분석되었다. 또한 내구성의 변화 비율 및 그 패턴은 공극분포, 공극률, 그리고 단위수량을 고려하여 정량적으로 평가되었다.

**핵심 용어** : 시멘트 모르타르, 공극률, 염화물 확산, 투수성, 포화도, 공극크기