

시멘트 모르타르의 공극률과 내구특성과의 관계에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Durability Characterization using Porosity

박상순* · 권성준** · 김태상***

Park, Sang Soon · Kwon, Seung-Jun · Kim, Tae Sang

Abstract

The porosity in porous media like concrete can be considered as a durability index since it may be a routine for the intrusion of harmful ions and room for the keeping moisture. Recently, modeling and analysis techniques for deterioration are provided based on the pore structure with the significance of durability and the relationship between porosity and durability characteristics is an important issue. In this paper, a series of mortar samples with five water to cement ratios are prepared and tests for durability performance are carried out including porosity measurement. The durability test covers those for compressive strength, air permeability, chloride diffusion coefficient, absorption, and moisture diffusion coefficient. They are compared with water to cement ratios and porosity. From the normalized data, when porosity increases to 1.45 times, air permeability, chloride diffusion coefficient, absorption, and moisture diffusion coefficient decrease to 2.3 times, 2.1 times, 5.5 times and 3.7 times, respectively, while compressive strength decreases to 0.6 times. It was evaluated that these are linearly changed with porosity showing high correlation factors. Additionally, intended durability performances are established from the test results and literature studies and a porosity for durable concrete is proposed based on them.

Keywords : porosity, air permeability, chloride diffusion coefficient, absorption, moisture diffusion coefficient

요 지

콘크리트의 공극률은 유해인자의 주된 이동통로가 될 뿐 아니라, 수분을 보유할 수 있는 역할을 하게 되므로, 열화물질 이동 저항성을 평가할 수 있는 주된 지표가 되고 있다. 내구성에 대한 연구가 중요해짐에 따라, 공극구조를 기본으로 하는 열화모델이 최근 들어 개발되고 있으며, 공극구조와 내구특성간의 관계는 매우 중요하게 평가되고 있다. 본 연구는 5가지의 다른 물-시멘트비(40%, 45%, 50%, 55%, 60%)를 가진 시멘트 모르타르를 제조하여, 공극률을 포함한 다양한 내구성 실험을 수행하였다. 내구성 실험은 기본적인 압축강도 실험을 포함하여, 투기성 실험, 염화물 확산계수 실험, 흡수율 및 수분확산계수 실험 등이 수행되었다. 평가된 내구성 실험결과는 물-시멘트비와 공극률에 따라 분석되었다. 공극률이 1.45 배 높아질수록, 강도는 0.6배 수준으로 감소하였으며, 투기성, 염화물 확산계수, 흡수율, 수분확산계수는 각각 2.3배, 2.1배, 5.5배, 그리고 3.7배 수준으로 증가하였다. 이러한 내구성 변화율은 높은 상관성을 보이며, 공극률에 따라 선형적으로 변화함을 알 수 있었다. 한편, 실험결과와 문헌분석을 통하여, 목표내구성능을 설정하였으며, 이에 따라서 고내구성 콘크리트를 위한 공극률을 제안하였다.

핵심용어 : 공극률, 투기성, 염화물 확산계수, 흡수율, 수분확산계수

1. 서 론

콘크리트는 다공질 매체(porous media)로서 투기성, 투수성을 가지고 있으며, 이러한 특성은 강도 특성 뿐 아니라 내구특성에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 이산화탄소 또는 염화물 이온과 같이 철근부식에 영향을 주는 유해이온들은 공극을 통하여 침투를 하게 되며, 열화해석을 위한 모델링 역시 포화도와 공극률에 의존하여, 해석을 수행하

는 것이 일반적이다(송하원 등, 2005; 권성준 등, 2004). 배합초기에 시멘트입자와 물은 수화반응을 통하여 수화물을 생성하게 되며, 이때 발생하는 공극은 다양한 분포를 가지면서 수분유입의 주된 통로가 된다.

배합조건에 따른 공극률과 포화도에 대한 연구는 이미 많은 문헌에서 제시되어 있으나, 이러한 연구들은 단순한 배합을 통하여 도출된 실험결과이며, 다양한 내구특성과 직접 연결되지 못하고 있다(Ishida and Maekawa, 2003; Maekawa

*한국건설재시험연구원 주임연구원 · 공학박사 (E-mail : park87@kicm.re.kr)

**교신저자 · University of California, Irvine 객원연구원 · 공학박사 (E-mail : jjuni98@yonsei.ac.kr)

***한국건설재시험연구원 연구원 (E-mail : kts740@kicm.re.kr)

et al., 2003). 공극률과 강도에 대한 연구는 오래전부터 수행되어 왔으며(Metha and Monterio, 2003; Neville, 1996), 공극률을 고려한 염화물 확산계수에 대한 연구(송하원 등, 2005), 공극률을 고려한 탄산화에 대한 연구(권성준 등, 2004; Ishida and Maekawa, 2001; Ishida et al., 2004), 공극률과 투수성에 대한 연구(Maekawa et al., 1999; Song and Kwon, 2007) 등이 제시되어 있으나 각각의 해석적 모델에 관한 독립적인 연구 성과일 뿐 동일한 배합을 통하여 통합적으로 실험하고 분석하지는 못하였다. 최근 들어 미세 공극구조 모델링을 기반으로 하는 열화해석 모델이 도입됨에 따라(Maekawa et al., 1999; Song et al., 2006; Ishida et al., 2007; Mabrouk et al., 2004), 공극률은 물질이동에 가장 기본적인 요소가 되고, 이를 위한 실험적 접근은 매우 중요하게 평가되고 있다.

공극률의 평가는 내구성평가의 직접적인 지표로 사용되기도 한다. 물론 동일한 공극률을 가지고 있더라도, 염화물 확산계수의 경우, 혼화재의 사용여부에 따라 염화물 구속의 변화가 생기므로 달라지게 되고(Tang and Nillson, 1992; 1993), 노출환경에 따라 매우 민감하게 변화하게 된다(Magnet and Molly, 1994). 탄산화에 대해서도, 탄산화 진행에 따라 공극률은 감소하며, 이에 따라 이산화탄소의 확산계수 역시 변하는 것이 일반적이다(Ngala and Page, 1997; Papadakis et al., 1991). 그러나 일정한 노출환경에서 관리된 보통포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement: OPC)를 사용한 시편의 경우에는 공극률과 내구적인 특성의 직접적인 비교가 가능하다.

본 연구에서는 MIP(Mercury Intrusion Porosimetry) 실험을 통하여 공극률을 분석하였으며, 강도 뿐 아니라, 염화물 확산계수, 투기계수, 수분포화도 등의 내구특성 실험결과와 비교를 수행하였다. 각각의 실험결과는 일반배합특성인 물-시멘트비 뿐 아니라, 공극률과 비교되어 각각의 상관관계가 도출되었다. 본 실험에서는 OPC를 사용한 모르타르를 대상으로 내구성 실험이 수행되었다. 혼화재료를 사용한 콘크리트에 대해서, 공극률과 내구특성에 대한 연구가 향후 수행될

예정이다.

2. 내구특성 실험 계획

2.1 시편의 배합

본 연구에서는 일반적인 콘크리트 배합이 아닌, OPC로 제조된 시멘트 모르타르를 사용하였다. 굵은 골재를 사용할 경우, 공극률 시험을 위한 시편채취가 용이하지 않으며, 관련 실험오차가 커질 수 있으므로 시멘트 모르타르를 대상으로 하였다. 물-시멘트비는 40%에서 60%까지 총 5가지의 배합이 사용되었는데, Table 1에서는 시험에 사용된 배합표를 나타내고 있으며, 시멘트 및 골재의 물리적 특성은 Table 2에서 나타내었다.

2.2 내구특성 평가를 위한 실험

2.2.1 공극률 및 압축강도 평가

공극률은 수화과정에 따라 발생하여 재령에 따라 감소하게 되는데, 이는 외부양생조건과 밀접한 관계가 있다. 시멘트계 재료의 공극률 평가를 위해서는 화상분석법, 질소흡착법, 수은압입법(MIP)이 있는데, 일반적으로 수은압입법이 많이 사용되고 있다(김태상 등, 2008). 본 실험에서는 시멘트 모르타르 시편을 분석이 가능하게 작은 조각으로 파쇄한 후, 수화정지를 위하여 아세톤에 침지시켰다. 이후 105의 건조로에서 24시간 동안 건조시킨 후 미세공극을 측정하였다. 본 연

Table 1. Mix proportions and characteristics of sand (C:S = 1:3.125)

W/C (%)	Cement (kg/25liter)	Sand (kg/25liter)	Water (kg/25liter)	Flow (mm)
40	8.5	25	3.4	250
45	8.5	25	3.83	300
50	8.5	25	4.25	300
55	8.5	25	4.68	330
60	8.5	25	5.1	360

Table 2. Physical properties of cement and sand

Physical properties of aggregate		Specific gravity (g/cm ³)		Absorption (%)		F.M		
		2.60		0.95		2.64		
Physical properties of cement		Chemical composition of cement (%)						
Specific gravity (g/cm ³)	3.15	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI
Blaine (cm ² /g)	3,120	21.5	5.10	3.04	61.3	2.85	2.21	1.93

Table 3. Conditions for measuring porosity through MIP

Contacting angle	130°
Mercury surface tension	485 dynes/cm
Maximum head pressure	4.45 psi
Stem volume	0.392 ml
Bulb volume	5 cc
Pemetrometer constant	10.79/pF
High Pressure Measurement	33,000 psi



Table 4. Chloride diffusion coefficient using NT BUILD 492

Catholyte	10% NaCl	
Anolyte	0.3N NaOH	
Temperature	20~25°C	
Applied potential	15~35V	
Initial current	30~180 mA	
Duration time	24 hours	

구에서는 수중양생후 재령 28일 및 91일에 공극률 평가를 수행하였으며, 기초실험으로 압축강도 평가를 KS F 2405를 참고하여, 28일 및 91일 수중양생후 실험을 수행하였다. Table 3에서는 공극률 측정을 위한 측정장비와 초기조건을 나타내고 있다.

2.2.2 염화물 확산계수 평가

염화물 확산계수의 평가는 염화에 노출된 RC(Reinforcement Concrete) 구조물의 내구수명 평가에 필수적인 평가 항목이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 비정상상태 축진영동 실험(NT BUILD 492)을 통하여 염화물 확산계수를 도출하였다. 시편은 91일 재령 후 각 물-시멘트비에 따라 2개를 채취한 것이며, 그 평균값을 도출하였다. Table 4에서는 실험조건 및 실험사진을 나타내었다. 시편은 할릴후에 0.1N의 질산은용액(AgNO₃)을 분무하여 침투깊이를 측정하는데, 확산계수 도출은 식(1) 및 식(2)와 같이 제시되어 있다.

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

$$E = \frac{U-2}{L}, \alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1} \left[1 - \frac{2C_d}{C_0} \right] \quad (2)$$

여기서, D_{nssm} 는 비정상 상태에서 구한 전위차 축진 염소이온 확산계수(m²/sec), R 은 기체 상수(8.314 J/mol·K), T 절대온도(K), L 은 시편 두께(m), z 는 이온 전자가, F 는 패러데이 상수(96,500J/V·mol), U 는 전위차(V), x_d 는 비색법에 의한 평균 침투 깊이(m), t 는 전위차의 적용 시간(sec), C_0 는 음극셀의 염소이온 농도(≈2N), C_d 는 비색법에 의한 반응 농도(≈0.07N), α 는 실험 상수($T=295K, U=30V, L=0.05m$ 이면, $\alpha=23,800m^{-1}$), erf^{-1} 는 오차 함수의 역함수를 나타낸다.

2.2.3 수분발산량 평가

공극률이 높은 시편의 경우, 수분의 유입이 많아지고 이에 따라 수분 발산량이 크게 증가한다. 수분의 시편내에 존재할 수 있는 장소는 공극밖에 없으므로, 화학적으로 결합되지 않은 공극수의 경우, 이에 따라 수분발산량이 변화하는 것이다. 해당시편의 수분발산량을 평가하기 위해, 수화가 충분히 진행되었다고 가정한 91일된 정육면체 시편(50×50×50 mm)을 사용하였으며, 일주일간 포화시킨 후 실내상태에서 중량변화를 측정하였다. 노출상태는 온도 22~25°C, 상대습도 55~62%의 환경이었으며 시편의 포화도를 구하기 위해 식(3)이 사용되었다.

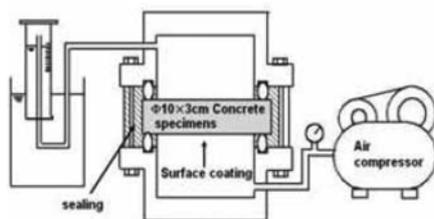
$$S(\%) = \frac{W_{act} - W_{dried}}{W_{sat} - W_{dried}} \times 100 \quad (3)$$

여기서, W_{sat} 는 포화시의 중량, W_{act} 는 측정시의 중량, W_{dried} 는 105°C에서 24시간 경과후의 중량을 나타내고 있다.

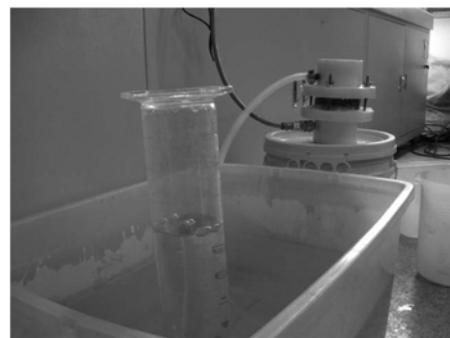
2.2.4 투기성 평가

현재까지 국내외 투기계수에 관한 시험방법은 표준화되어 있지 않으며, 각 연구자별로 다양한 방법들이 적용되고 있다(소형석과 소양섭, 2003). 그러나 모든 방법은 기본적으로는 Darcy의 흐름 이론에 기초하고 있는데, 본 연구에서는 내부 직경 7 cm의 실린더에 시험체를 고정하고 밀봉한 뒤, 0.2 MPa의 압축공기를 주입하여 메스실린더를 이용한 수중치환법에 의해 투기량을 측정하였다. 식(4)에서는 투기계수의 산정식을 나타내고 있으며, 실험의 개요 및 현황을 Fig. 1에 나타내었다. 한편 시험에 사용된 시편의 재령은 수중양생 91일 후를 대상으로 하였다.

$$K = \frac{2P_2 h \gamma}{P_1^2 - P_2^2} \cdot \frac{Q}{A} \quad (4)$$



(a) schematic for test



(b) photos for test

Fig. 1 Test for air permeability

여기서, K 는 투기계수(m/s), P_1 은 재하압력(MPa), P_2 는 대기압(MPa), h 는 시험체 두께(m), Q 는 투기량(m²/s), A 는 투기면적(m²), γ 는 기체의 단위용적중량(1.205×10^{-12} kg/m³)을 나타낸다.

식(4)는 공기의 점도(η : 0.018 cP)와 중력가속도(g)를 고려하여 식(5)와 같은 고유투기계수로 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{\eta K}{\gamma g} \quad (5)$$

여기서 k (m²)는 고유투기계수를 나타낸다.

2.2.5 수분확산계수 평가

염화물 확산과 마찬가지로 수분의 확산성은 매우 중요한 인자로 고려되지만, 시간에 따른 깊이별 함수비 측정이 현실적으로는 매우 어려운 일이다. 최근 연구에서는(Naithalath, 2006), 콘크리트 시편의 흡수율 시험결과만을 이용해서도 비교적 쉽게 확산계수를 도출할 수 있는 방법이 제안되었다. 이 논문에서는 Fourier series를 기초로 하여, 수분확산 방정식의 엄밀해로 식(6)을 제안하였다.

$$\left(\frac{M}{A}\right)_t = B \left[1 - \exp\left(\frac{-St}{B}\right) \right] + C_o L \left[1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left[\frac{-D_m(2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right] \right] \quad (6)$$

여기서, M 은 확산수분량, A 는 단면적으로 중량변화를 정규화시키기 위한 흡수면적, B 는 모세관 공극까지의 이동계수(m), S 는 물흡수 계수(kg/m²·h^{0.5}), C_o 는 표면수분농도(kg/m³), L 은 시편의 침투길이(m)를 나타낸다. 본 연구에서는 Table 1에서 제시된 배합인 물-시멘트비 40~60%인 시멘트

모르타르에 대한 흡수율 시험을 KS F2609에 따라 시험하였으며, 이 결과를 기초로 식(6)에서 확산계수 D_m 을 회귀분석을 통하여 도출하였다. 흡수율 시험은 큐빅몰드(50×50×50 mm)를 이용해서 1방향으로만 침투를 허용하고 나머지 3면은 파라핀을 이용해 밀봉하여 수행하였는데, Fig. 2에서는 확산계수의 시험사진을 나타내고 있다.

3. 배합조건에 따른 실험결과 분석

3.1 공극률 및 압축강도 평가

사용된 물-시멘트비가 낮을수록 수화물 생성이 많아지고 이로 인해 공극이 감소된다. 한편 재령이 증가하게 될 경우 역시, 시멘트입자의 수화에 따라 공극률이 감소하게 되는데, 이는 압축강도와도 밀접한 관계가 있다(Maeakawa *et al.*, 1999). Fig. 3에서는 재령 28일 및 재령 91일에 대한 각 시편의 공극률의 측정결과를 나타내고 있는데, 공극률은 재

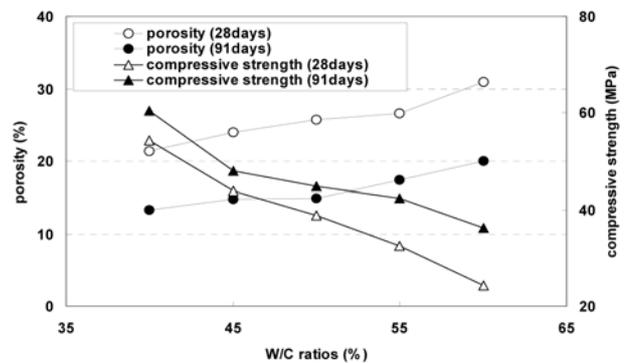


Fig. 4 Changed porosity and strength with different W/C ratios

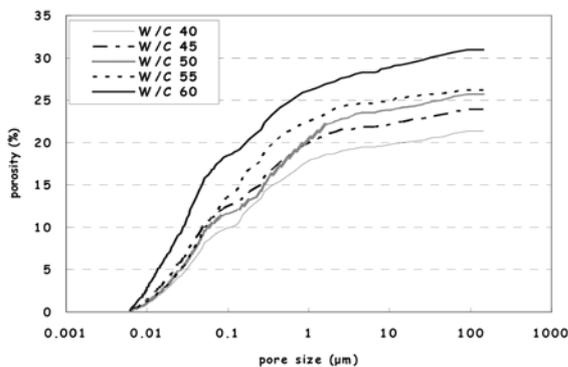


(a) samples for moisture test

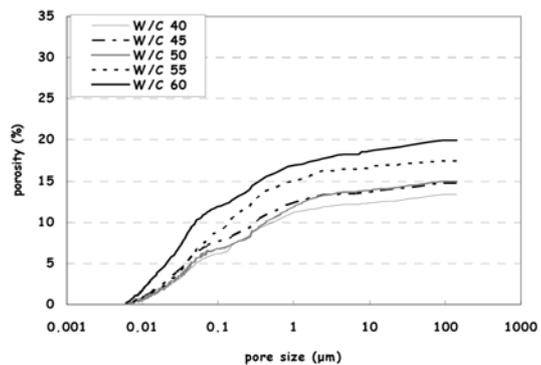


(b) measuring weight

Fig. 2 Test for moisture diffusion



(a) cumulative porosity (28days)



(b) cumulative porosity (91days)

Fig. 3 Cumulative porosity measured through MIP

령의 증가에 따라 대략 58~64% 수준으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 한편 각각의 재령에서의 압축강도는 Fig. 4에 공극률의 변화와 함께 나타내었다. Fig. 4에서는 물-시멘트비의 감소에 따른 전형적인 강도증가를 나타내고 있으며, 재령의 증가 및 물-시멘트비의 감소에 따라 공극률이 감소하는 것을 알 수 있다.

3.2 염화물 확산계수 평가

염화물의 확산 역시 공극률에 주로 지배적이므로 공극률이 큰 배합일수록 큰 확산계수를 가지게 된다. 물론 혼화재료를 사용한 콘크리트에 있어서는 염화물 이온의 구속효과가 크게 차이가 나므로(Tang and Nilsson, 1993), 확산계수의 차이가 발생할 수 있지만 본 연구는 OPC만을 사용한 배합이므로 일정한 구속능을 가지게 되며, 이에 따라 확산계수 및 공극률을 분석할 수 있다. Fig. 5에서는 물-시멘트비에 따른 확산계수의 변화를 나타내고 있다. 91일 수중양생후의 시편에 대해서 각 배합당 2개씩 시편을 추출하였으므로 변동성이 크지만, 물-시멘트비의 증가에 따라 뚜렷한 확산계수의 증가를 확인할 수 있다. 본 실험에서 도출된 값은 기존의 실험값에 비하여 약간 작게 평가되었는데, 이는 비교적 긴 양생기간(91일)에 기인한다고 할 수 있다. 최근 들어서 다양한 신경망이론 또는 다중회귀분석과 같은 이론을 이용하여, 배합특성을 고려한 확산계수예측에 대한 연구가 시도되고 있다(권성준 등, 2007a; 2007b). 그러나 본 연구의 목적은 각각의 배합에서 도출된 공극률과 확산계수를 포함한 내구적 특성값과의 비교가 주목적으로 본 실험에서는 배합에 따른 단순한 비교만 수행되었다.

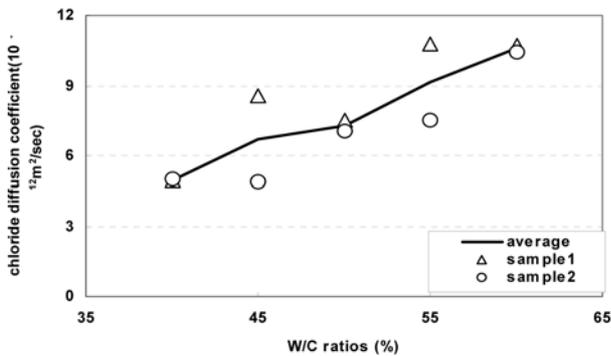


Fig. 5 Chloride diffusion coefficient with different W/C ratios

3.3 수분발산량 평가

수분발산량은 초기에는 명확한 배합별 차이를 보이지 않으나, 건조가 진행됨에 따라 물-시멘트비가 높은 배합에서 더욱 큰 발산량을 보이고 있다. 이는 공극률이 높은 시편에서 더욱 큰 수분을 보유하고 있으며, 이러한 수분발산이 중량차이로 나타나는 것이다. 최근에는 이러한 특성을 이용하여 중량차이를 이용한 확산계수의 평가 또는 공극률 평가 방법도 제시되어 있으며(오병환 외, 2003), 본 실험결과는 기존에서 연구된 실험결과와 동일한 경향을 보이고 있다(Song et al. 2001). 포화도의 경우, 각 물-시멘트비의 경우에서 뚜렷한 차이를 보이지는 않았다. 그 이유는 수분증발량이 많은 시편은 공극에 따른 자유수를 많이 가지고 있으므로, 그 비율(증발된 수분량/포화시 수분량)이 거의 일정해지는 것으로 판단된다. 배합에 따른 증발량 및 포화도의 변화는 Fig. 6에 나타나 있다.

3.4 투기성 평가

투기성 역시, 공극률에 크게 지배를 받게 된다. 탄산화와 같이 이산화탄소가 공극을 통해 유입될 경우, 공극내의 공극수에 용해된 상태로 내부에 이동하게 되므로, 공극은 액체뿐 아니라 기체상태의 유입에도 큰 역할을 하게 된다. Fig. 7에서는 투기성 실험결과를 물-시멘트비에 따라 나타내었는데, 물-시멘트비가 높아질수록 증가하고 있음을 알 수 있다.

3.5 흡수율 및 수분 확산계수 평가

수화물이 많이 생성되는 배합일 경우, 조밀한 공극구조를 가지게 되며, 이는 밀실한 콘크리트의 기본적인 특성이 된다.

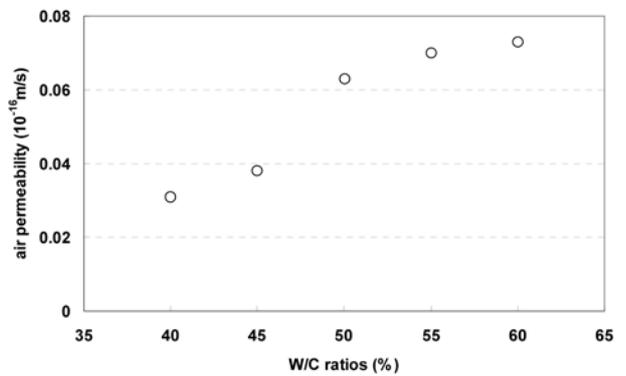
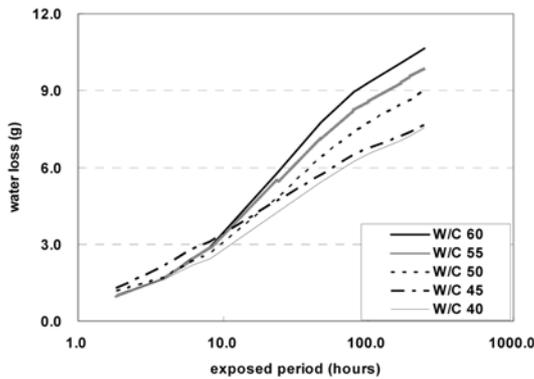
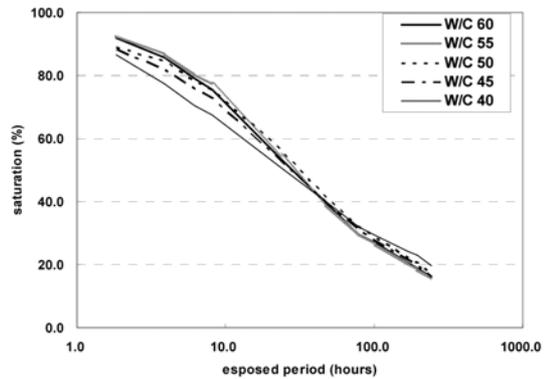


Fig. 7 Changes in air permeability with different W/C ratios



(a) Water loss with different W/C ratios



(b) Saturation with different W/C ratios

Fig. 6 Water loss and saturation with W/C ratios exposed to drying condition

Table 5. Results from absorption and diffusion coefficient for moisture

W/C (%)	Sorptivity coefficient (S:kg/m ³ h ^{0.5})	Thickness ×10 ⁻³ (L:m)	Surface area ×10 ⁻⁴ (A:m ²)	Transfer constant ×10 ⁻³ (B:m)	Surface concentration (C ₀ :kg/m ³)	Moisture diffusion coefficient ×10 ⁻⁷ (D _m :m ² /h)
40	0.08	50	25	0.02	25.37	6.5
45	0.17	50	25	0.02	42.89	9.1
50	0.18	50	25	0.02	48.73	12.4
55	0.24	50	25	0.02	53.89	14.3
60	0.44	50	25	0.02	56.43	24.2

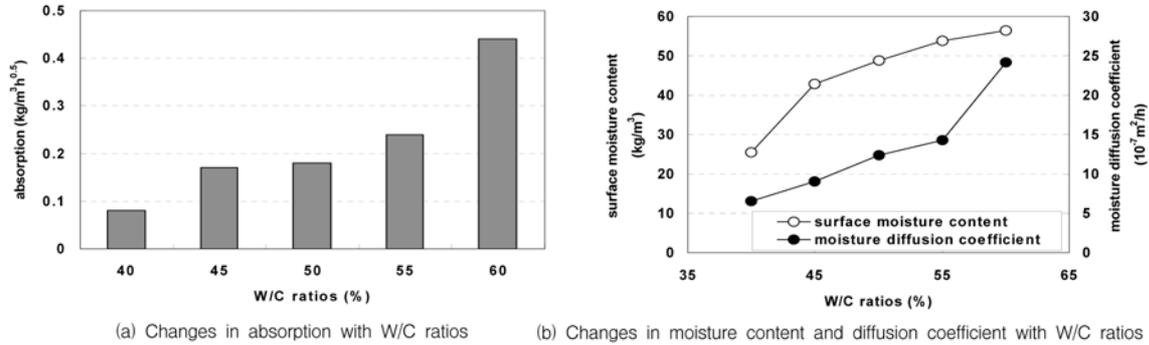


Fig. 8 W/C ratios and moisture characteristics in mortar specimens

높은 공극률을 가진 시편의 경우, 공극이 수분에 포화되므로 건조에 따라 증량 차이가 크게 발생하게 된다. 수분확산계수 역시, 물-시멘트비에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 표면의 수분농도와 수분확산계수는 물-시멘트비가 증가할수록 크게 평가되었는데, 이는 공극률의 증가에 따른 흡수율의 증가가 주원인으로 평가되었다. 실험결과는 3.2절에서 수행된 수분증발량과 같은 경향을 가지고 있었다. 물-시멘트비에 따른 표면수분농도 및 확산계수의 변화는 Table 5에 나타내었으며, 이를 Fig. 8에 도시하였다.

4. 내구특성과 공극률과의 관계

4.1 공극률의 변화에 따른 내구특성의 변화

본 장에서는 각 배합에 따라 도출된 공극률과 3장에서 도출된 내구특성 실험결과와의 관계를 분석하였다. 물-시멘트비는 배합시 설계항목으로서 물리적인 특성을 가지고 있지 못하므로, 공극률의 변화에 따라 변화하는 OPC 모르타르의 내구특성을 분석하였다. Fig. 9에서는 28일 재령의 공극률의 변화에 따른 91일 재령 시멘트 모르타르의 강도특성의 변화(a), 염화물 확산계수의 변화(b), 투기성 변화(c), 흡수율의 변화(d), 수분확산계수의 변화(e)를 나타내고 있다. 강도평가 결과 이외에, 모든 내구특성은 공극률의 증가에 따라 일정한 수준의 증가를 보이고 있음을 알 수 있다.

4.2 공극률에 따른 내구특성 변화율의 분석

본 절에서는 실험결과를 하나의 그림으로 도시하기 위하여, 각각의 측정값을 물-시멘트비 40%인 경우로 나누어 정규화한 결과를 나타내었다. 이러한 평가는 공극률의 증가정도에 따라 내구특성의 변화정도를 파악할 수 있는 지표가 될 수 있다. 공극률의 변화에 따른 내구특성치의 변화는 선형회귀 분석결과와 함께 Fig. 10에 나타내었으며, 그 회귀분석 결과

를 Table 6에 정리하였다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이, 공극률이 45% 증가하는 동안, 강도는 60% 수준으로 감소하였으며, 투기성은 230%, 염화물 확산계수는 210%, 흡수율은 550%, 수분확산계수는 370% 수준으로 증가하였다. 각각의 내구특성 변화율을 선형으로 회귀분석 할 경우, 높은 상관성을 가지고 있음을 알 수 있다. 투기성의 경우에는 상관성이 약간 떨어지지만, 선형회귀분석결과 모두 0.9이상의 높은 상관성을 보이고 있었다. 이와 같이 각각의 내구적 특성은 공극률과 밀접한 관계를 가지고 있었는데, 다수의 실험결과가 추가된다면, 공극률 평가를 통하여 정량적인 내구성 특성값의 변화를 평가할 수 있을 것이다.

4.3 내구성 확보를 위한 공극률의 제한

본 절에서는 강도 및 내구특성 실험결과에 따라 변화하는 공극률을 분석하여, 내구성 확보를 위한 공극률을 제안하였다. 비교적 최근에 개발된 수분확산계수에 대해서는 명확한 상대비교 자료가 없으므로, 강도, 염화물 확산계수, 투기성의 실험결과를 이용하여, 공극률을 제안하도록 한다. 목표성능을 강도에서는 40 MPa로 설정하였고, 28일 확산계수는 13×10⁻¹² m²/sec를 설정하였다. 일반적으로 40 MPa 강도는 고강도 콘크리트 인식되고 있으며, 기존의 연구에서 13×10⁻¹² m²/sec(28일 확산계수)는 보통포틀랜드 시멘트를 사용할 경우, 우수한 내구성능을 보이고 있는 배합이기 때문이다(송하원 등 2005; 삼성기술연구소, 2003). 투기성과 내구특성을 직접적으로 연결시킨 연구는 적은데, 기존의 연구(Bassat *et al.*, 1990)에 의하면 투기성이 28×10⁻¹⁷ m²에서 4×10⁻¹⁷ m²으로 감소할 경우, 압축강도는 30 MPa에서 60 MPa로 증가한다고 알려져 있다. 한편 Bamforth(1987)의 연구에서는 물-시멘트비 33%의 콘크리트에서 10⁻¹⁸ m² 정도의 크기를 가지고 있는 투기계수가 나타난다고 조사되었다. 실험결과(Bassat *et al.*,

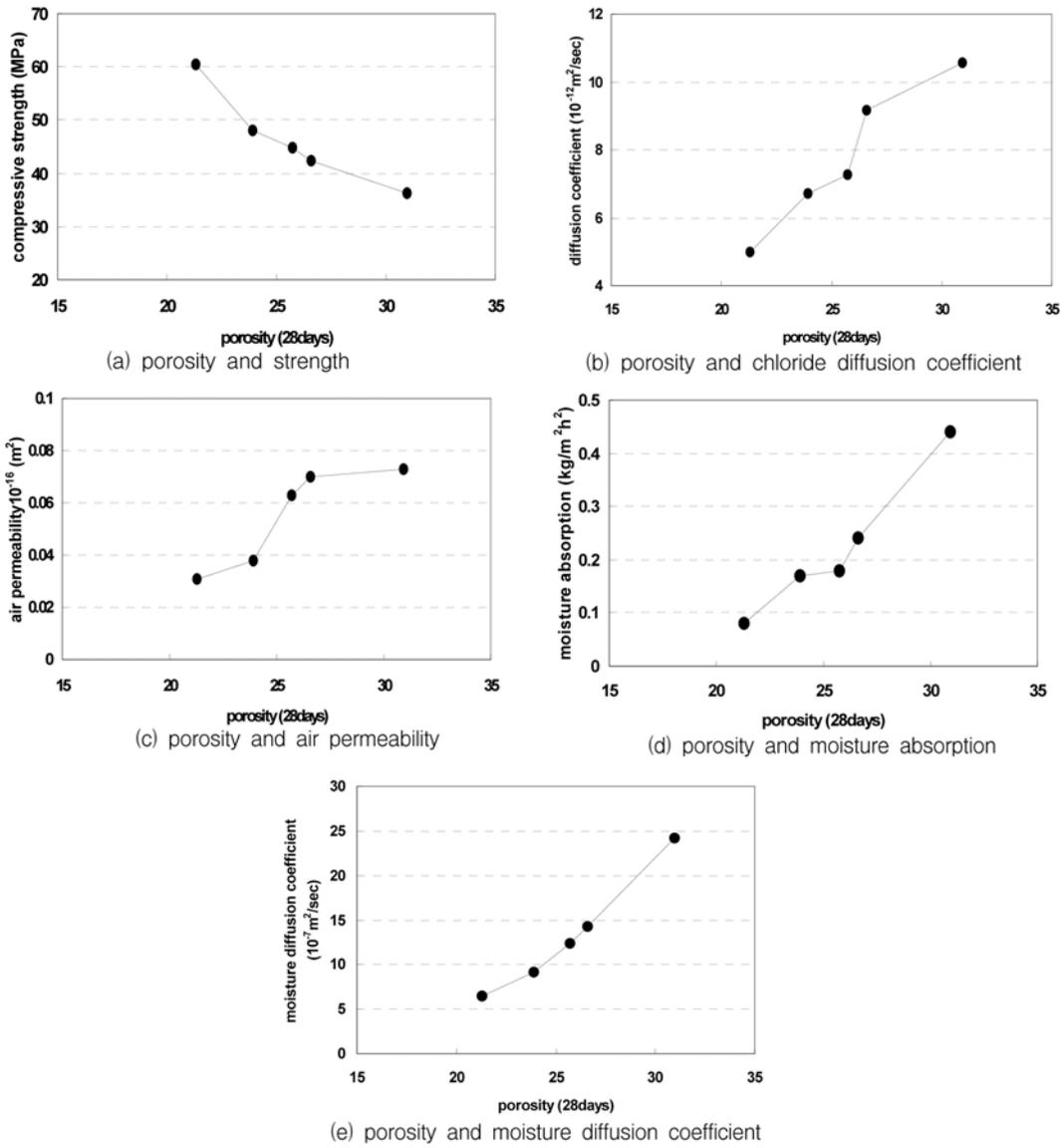


Fig. 9 Durability characteristics with changing porosity

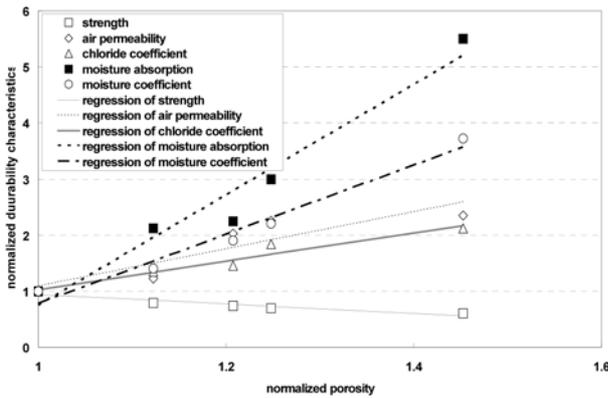


Fig. 10 Normalized porosity and durability characteristics

1990)에서 투기성이 $7 \sim 16 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 일 경우, 압축강도가 40~50 MPa로 조사되었으므로, 대략 $10 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 이하의 투기계수를 갖는 것을 목표로 하였다. 이와 같이 압축강도, 염화물 확산계수, 투기계수의 한계값을 설정하면, 고내구성 확보를 위한 공극률을 도출할 수 있다. Fig. 11에서는 Fig. 9의 실험결과중 강도, 투기계수, 확산계수의 회귀분석결과를 이용하여, 공극률을 도출하는 과정을 나타내고 있다.

Table 6. Results from the linear regression analysis

Variables	Results of regression analysis (Y: normalized variables, X: normalized porosity)	Corelation factor (R ²)
Strength	$Y = -0.8401X + 1.7809$	0.90
Air permeability	$Y = 3.2973X - 2.2028$	0.79
Chloride diffusion coefficient	$Y = 2.5301X - 1.4975$	0.94
Sorptivity	$Y = 9.8264X - 9.077$	0.96
Moisture diffusion coefficient	$Y = 6.1541X - 5.3765$	0.97

Fig. 11에서 알 수 있듯이, 목표강도, 목표투기계수, 목표 염화물 확산계수에 따른 공극률을 도출하였는데, 강도에 대해서는 28%, 염화물 확산계수에 대해서는 34%, 투기성에 대해서는 37%의 공극률로 평가되었다. 최종적으로 고내구성 콘크리트를 위한 공극률은 28%로 제안할 수 있다. 본 제안은 보통포틀랜드 시멘트로 제조된 모르타르에 대한 것이며, 실내실험결과에 국한된 것이므로, 다양한 배합조건을 가진 콘크리트를 이용한 추가적인 실험이 필요하다.

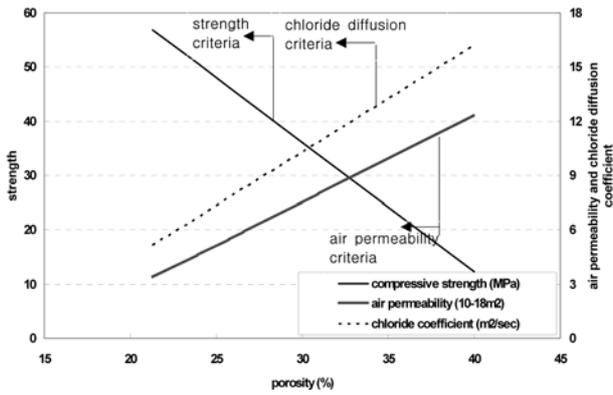


Fig. 11 Porosity for high porosity durable concrete with OPC

5. 결 론

시멘트 모르타르의 공극률과 내구특성과의 관계에 대한 실험적 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 5가지의 서로 다른 물-시멘트비를 가진 시멘트 모르타르를 대상으로 강도를 포함한 내구성 실험을 수행하여 배합 특성과의 비교를 수행하였다. 물-시멘트비가 커질수록, 강도의 감소가 명확히 발생하였으며, 염화물확산계수, 수분발산량, 투기성, 흡수율, 수분확산계수는 모두 크게 증가하였다. 공극률이 높은 시편에서는 수분을 보유할 수 있는 공간이 커지고 또 건조과정에서, 수분발산량이 크게 증가하므로 공극률의 변화에 따라 흡수율 및 수분확산계수의 변화는 민감하게 변하고 있음을 알 수 있다.
- 공극률은 수중양생기간이 28일에서 91일로 늘어남에 따라, 58~64% 수준으로 감소하였다. 수화반응이 지속적으로 진행됨에 따라 수화물 팽창에 의한 것이며, 이러한 공극특성은 내구특성변화에 중요한 역할을 하게 된다.
- 정규화된 공극률의 변화와 내구특성의 변화를 분석하였는데, 공극률이 45% 증가하는 동안, 강도는 60% 수준으로 감소하였으며, 투기성은 230%, 염화물 확산계수는 210%, 흡수량은 550%, 수분확산계수는 370% 수준으로 각각 증가하였다. 정규화된 내구특성의 변화율은 높은 상관계수를 가지고 선형으로 변화하였다.
- 공극률과 내구성능과의 관계를 분석한 연구는 다양한 배합을 가진 실험자료가 확보될 경우, 정량적인 내구특성 평가가 가능하리라고 사료된다. 한편 고내구성 콘크리트를 위해서는 28%이하의 공극률이 요구됨을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구[이공분야: KRF-2008-357-D00266]로, 교신저자는 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 권성준, 송하원, 변근주(2007) 인공신경망을 통한 확산계수 도출과 공극구조 변화를 고려한 콘크리트 탄산화 해석, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권 제1A호, pp. 107-116.
- 권성준, 송하원, 변근주, 박찬규(2007) 신경망 이론과 마이크로 모델링을 통한 혼화제를 사용한 콘크리트의 염화물 침투해석,

대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제27권 제1A호, pp. 117-129.

- 권성준, 송하원, 변근주, 이승훈(2004) 균열을 가진 초기재령 콘크리트의 탄산화 해석, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제24권 제5A호, pp. 1011-1022.
- 김태상, 정성화, 채성태, 이봉준, 우영제, 송하원(2008) MIP를 통한 혼합시멘트계 재료의 미세구조 특성에 관한 실험적 연구, 2008년 **콘크리트학회 봄학술발표회**, 한국콘크리트학회, pp. 533-536.
- 소형석, 소양섭(2003) 포졸란재 함유 콘크리트 및 투기성과 염화물 이온 투과성, **대한건축학회 논문집**, 대한건축학회, 제19권 제11호, pp. 117-124.
- 송하원, 권성준, 변근주, 박찬규(2005) 혼화제를 사용한 고성능 콘크리트의 배합특성을 고려한 염화물 확산 해석기법에 관한 연구. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제25권 제1A호, pp. 213-223.
- 오병환, 정성화, 이명규(2003) 공극률을 고려한 콘크리트중의 이산화탄소 확산특성에 대한 연구, **한국콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, Vol. 15, No. 3, pp. 443-453.
- Bamforth, P.B. (1987) The relationship between permeability coefficient for concrete obtained using liquid and gas, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 39, No. 138, pp. 3-11.
- Bassat, M.B., Nixon, P.J., and Hardcastle, J. (1990) The effect of differences in the composition of Portland cement on the properties of hardened concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 42, No. 151, pp. 59-66.
- Ishida, T. and Maekawa, K. (2003) Modeling of durability performance of cementitious materials and structures based on thermo-hygro physics, *Rilem Proceeding PRO 29, Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures*, pp. 39-49.
- Ishida, T. and Maekawa, K. (2001) Modeling of PH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory, *Concrete Library of JSCE*, No. 37, pp. 151-166.
- Ishida, T., Maekawa, K., and Kishi, T. (2007) Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, pp. 565-578.
- Ishida, T., Soltani, M., and Maekawa, K. (2004) Influential parameters on the theoretical prediction of concrete carbonation process, *Proceedings 4th International Conference on Concrete Under Severe Conditions*, Seoul, Korea, pp. 205-212.
- Mabrouk, R., Ishida, T., and Maekawa, K. (2004) A unified solidification model of hardening concrete composite for predicting the young age behavior of concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, pp. 453-461.
- Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T. (2003) Multi-scale modeling of concrete performance, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 2 pp. 91-126.
- Maekawa, K., Chaube, R., and Kishi, T. (1999) *Modeling of Concrete Performance: Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport*, Routledge, London and New York.
- Mangat, P.S. and Molloy, B.T. (1994) Prediction of free chloride concentration in concrete using routine inspection data, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 46, No. 169, pp. 279-287.
- Metha, K. and Monteiro, P.J.M. (1993), *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, Vol. 2, Prentice Hall, New Jersey.
- Narayanan Neithalath (2006), Analysis of moisture transport in mortar and concrete using sorption-diffusion approach, *ACI Materials Journal*, 103M24, pp. 209-217.
- Neville, A. (1996) *Properties of Concrete*, Longman (revised).
- Ngala, V.T. and Page, C.L. (1997) Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement paste, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, pp. 995-1007.
- NORDTEST (1999) *Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments*, NT BUILD 492.

- Papadakis, V.G., Vayenas, C.G., and Fardis, M.N. (1991) Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation, *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 4, pp. 363-373.
- Song, H.-W., Cho, H.-J., Park, S.-S., Byun, K.J., and Maekawa, K. (2001) Early-age cracking resistance evaluation of concrete structure, *Concrete Science and Engineering*, Vol. 3, pp. 62-72.
- Song H.-W. and Kwon, S.-J. (2007) Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, Issue 6, pp. 909-915.
- Song, H.-W., Park, S.-W., Lee, C.-H., and Kwon, S.-J. (2006) Service life prediction of concrete structures under marine environment considering coupled deterioration, *J. of Restoration of Buildings and Monuments*, Vol. 12, No. 4, pp. 265-284.
- Tang, L. and Nilsson, L.O. (1992) A study of the quantitative relationship between permeability and pore size distribution of hardened cement pastes, *Cement and Concrete Research*, Vol. 22, pp. 541-550.
- Tang, L. and Nilsson, L.O. (1993) Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC paste and mortar, *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, pp. 347-353.

(접수일: 2008.12.1/심사일: 2009.1.2/심사완료일: 2009.3.2)