

# 인공경량골재 콘크리트의 수분이동 특성에 관한 연구

## A Study on Moisture Transport of Artificial Lightweight Concrete

이창수\* · 최상현\*\* · 박종혁\*\*\* · 김영욱\*\*\*\*

Lee, Chang Soo · Choi, Sang Hyun · Park, Jong Hyok · Kim, Young Ook

### Abstract

For the first step on the quantitative evaluation of shrinkage reduction and differential shrinkage analysis of lightweight aggregate concrete, this study sets the moisture transport model of concrete by pre-absorbed water of porous lightweight aggregates and measured effective moisture diffusion coefficient, moisture capacity, degree of humidity supply and degree of humidity consumption by water binder ratio and aggregate type. The effective moisture diffusion coefficient in steady state caused by humidity difference between inside and outside of concrete had low value as low water-binder ratio. And in case of same water-binder ratio, effective moisture diffusion of mixtures used normal aggregates were lower than those used lightweight aggregates. To determine moisture store capability of concrete - moisture capacity, moisture contents were measured in 9 humidity conditions. As a result moisture contents of mixtures used lightweight aggregates was higher than mixtures used normal aggregates in all humidity conditions. This study measured lightweight aggregates' degree of humidity supply that applicable to normal atmospheric environment (above RH 50%) and made it quantitatively. Also amount of moisture release was set as a exponential function that represents a clear trend proportion to time and inverse proportion to humidity of the surroundings. As the result of measurement about degree of moisture consumption inside concrete following the internal consumption caused by cement hydration self-drying, it was showed that rapid decrease of humidity, around 10%, at early ages (7~10 days) when water-binder ratio is 0.3 and slow decrease around 5% and 1% when water-binder ratio is 0.4 and 0.5.

**Keywords :** *lightweight concrete, moisture transport, effective diffusion, moisture capacity, humidity supply*

### 요 지

다공성 경량골재의 사전흡수수에 따른 콘크리트 수축 저감 효과의 정량적 평가와 부등수축해석모델 상수 제공을 위한 첫 번째 단계로서, 수분이동모델을 설정하고 이에 따른 수분이동 특성상수인 유효수분확산계수, 수분용량, 습도공급도, 습도소모도를 물-결합재비, 골재 종류를 변수로 하여 측정하였다. 콘크리트 내, 외부 습도차에 의한 정상상태에서의 유효수분확산계수는 물-결합재비가 낮을수록 낮은 값을 나타내었으며 동일한 물-결합재비인 경우 일반골재를 사용한 배합이 경량골재를 사용한 배합보다 낮은 유효수분확산계수값을 나타내었다. 콘크리트 내 수분의 저장 능력 즉, 수분용량을 산정하기 위해 9가지 습도에서 콘크리트의 수분량을 측정하였으며 경량골재를 사용한 배합이 일반골재를 사용한 배합보다 모든 습도조건에서 수분량이 크게 나타났다. 일반 대기환경 습도 50% 이상 조건에서 적용할 수 있는 경량골재의 습도공급도를 측정하여 정량화하였으며, 경량골재에서의 수분 방출량은 주변 습도에 반비례하고 시간에 비례하는 뚜렷한 경향을 나타내는 지수함수의 형태로 설정하였다. 시멘트 수화 자기건조에 의한 수분의 내부소모에 따른 콘크리트 내 습도소모도를 측정하였으며, 측정결과 물-결합재비 0.3의 경우 7~10일 이내의 초기재령에서 약 10% 내외의 급격한 습도감소를 나타내었으며 물-결합재비 0.4, 0.5의 경우 완만한 형태로 약 5%, 1% 내외의 습도 감소를 나타내었다.

**핵심용어 :** 경량콘크리트, 수분이동, 유효확산, 수분용량, 습도공급

### 1. 서 론

구조 설계 및 시공 기술 발달에 따라 건물, 교량 등 건설 구조물은 초고층화, 장대화, 세장화하고 있으며, 대형 구조물 건설을 위한 건설 재료도 고강도, 경량화하고 있다. 콘크리트

의 경우도 이러한 흐름에 맞추어 경량골재의 적용을 위한 기술 개발이 활발히 이루어져 특수재료가 아닌 천연골재와 다름없는 일반 건설재료로 인식되고 있다(Rathby 등, 1981; Thomas 등, 2000; Thomas 등, 2001; ACI, 2003).

일반적으로 점토, 혈암, 플라이애쉬 등을 원료로 하여 사

\*정희원 · 교신저자 · 서울시립대학교 토목공학과 교수 (E-mail : csll@uos.ac.kr)  
\*\*한국철도대학 철도시설토목과 교수 (E-mail : schoi@krc.ac.kr)  
\*\*\*정희원 · 서울시립대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : mgibson@uos.ac.kr)  
\*\*\*\*서울시립대학교 토목공학과 박사과정

용되고 있는 경량골재의 주요특성은 일반골재에 비해 크게 두 가지 차이점을 지닌다(Sideney, 2003). 첫 번째, 경량골재의 비중은 1.2~1.6으로서 일반골재 2.6~2.7의 약 40~60% 수준이며 이는 단위질량 1,600~2,000 kNm<sup>3</sup>의 경량화를 가능하게 한다. 두 번째, 경량골재의 흡수율은 10~20%의 범위를 지니며 일반골재 흡수율 1% 내외의 비해 매우 큰 값을 나타낸다. 이는 경량골재 생산과정 중 소성, 팽창 메커니즘으로 인한 것이며, 이러한 큰 흡수율은 굳지 않은 콘크리트 타설 시 배합수를 흡수하여 슬럼프, 압송성 감소 등 시공성 저하의 원인으로 작용하였으나, 경량골재를 타설 전 미리 사전 흡수함으로써 기술적 문제를 극복하고 있다(ACI, 2004; George 등, 2002).

한편 최근 높은 흡수율을 갖는 다공성 경량골재의 특성을 이용한 콘크리트의 수축 저감 효과에 대한 연구가 주목을 받고 있다. 특히 실리카흡을 첨가한 낮은 물-결합제비의 고강도 콘크리트에 10~20% 범위의 큰 흡수율을 지니는 경량골재를 사전흡수하여 적용할 경우, 경량골재가 수분의 저장고와 유사한 역할을 하여 수화에 필요한 수분의 공급하고 수분의 외부이동 또는 내부소모에 따른 수분손실을 보상하여 고강도 콘크리트의 수축 발생을 억제하는 효과가 있음이 발견된 바 있다(Persson, 1998; Kohno 등, 1999; Zhutovsky 등, 2002).

Bentz 등은 포화된 경량골재의 내부양생효과로 인한 시멘트 페이스트의 체적변화에 대한 연구를 수행하였으며, Bentur 등은 구속 조건에서의 고강도 경량골재 콘크리트의 자기수축 저감 효과에 대한 실험적 연구를 수행하였다(Bentz 등, 1999; Bentur 등, 2001). Lura 등, Zhutovsky 등은 경량골재 사전흡수 정도를 변수로 하여 시멘트 페이스트, 모르타르, 콘크리트에서의 자기수축 저감효과와 골재 경계면 천이대에서의 내부 양생효과를 실험을 통해 증명하였다(Lura 등, 2003, 2004, 2006; Zhutovsky 등, 2004). 이외에 Gesolglu 등은 환경부하저감형 경량골재인 플라이애쉬 경량골재를 이용한 콘크리트의 수축저감효과에 대한 연구를 수행하였다(Gesolglu 등, 2006). 그러나 현재까지 발표된 연구는 콘크리트에 사전흡수된 경량골재 적용시의 수축저감 효과에 대한 실험적인 연구에 그치고 있으며, 경량골재 사전흡수수가 콘크리트의 수축에 미치는 영향을 정량적으로 규명하기 위해 경량골재 사전흡수수에 의한 콘크리트 내부 수분의 이동 특성, 수분 분포와 수축과의 관계 등에 관한 연구는 미진한 실정이다(Bazant 등, 1971; Sakata, 1983; Xi 등, 1993a, 1993b; Xin 등, 1995; Kim 등, 1999; Ayano 등, 2002).

본 연구에서는 경량골재 사전흡수수가 콘크리트의 수축에 미치는 영향을 정량화하기 위한 첫 번째 단계로서 사전흡수된 경량골재 적용 시 콘크리트 내부의 수분 이동 변화에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 일반 콘크리트의 수분 이동 메커니즘과 사전흡수된 경량골재를 적용함에 따른 경량골재의 수분공급 효과, 물-결합제비가 낮은 콘크리트에서의 자기건조 효과를 반영한 경량골재 콘크리트의 수분이동 모델을 제시하였다. 제시된 모델은 경량골재 콘크리트의 수분이동에 미치는 영향인자로서 정상상태에서의 수분이동 속도를 나타내는 유효확산계수와 이후 수분의 비정상상태를 야기하는 재료의 수분용량, 경량골재의 수분공급, 자기건조 효

과에 따른 수분소모의 4가지 수분이동특성변수로 구성되었으며, 이러한 변수의 영향을 규명하기 위하여 골재의 종류(일반골재 및 경량골재)와 물-결합제비(0.3, 0.4, 0.5)의 변화에 따른 유효확산계수, 수분용량, 수분공급, 수분소모량을 측정하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 연구내용 및 구성

본 연구에서는 다양한 물-결합제비(0.3, 0.4, 0.5)를 갖는 콘크리트에서 경량골재의 큰 흡수율에 따른 사전흡수수가 콘크리트 내 수분이동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 1과 같이 콘크리트 내 수분이동 모델을 설정하였다.

먼저, 콘크리트 내 수분이동에 관한 지배방정식을 정식화하기 위한 첫 번째 과정으로서, 콘크리트 양 쪽으로 습도  $h_1$ ,  $h_2$ 가 유지되고 있는 정상상태의 수분이동의 경우 식 (1)과 같이 Fick의 1법칙에 따라 나타낼 수 있으며, 연속 방정식을 적용할 경우 단위시간당 수분질량 변화는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다(Bazant 등, 1972; Bazant 등, 1982).

$$J = D_c \text{grad } h \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \text{div}(D_c \text{grad } h) \quad (2)$$

여기서,

$J$  : 단위시간당 단위면적을 통과하는 수분질량 [kg/(m<sup>2</sup>·sec)]

$h$  : 상대습도

$D_c$  : 유효수분확산계수 [kg/(m·sec)]

본 연구에서는 식 (2)에서 경량골재에 의해 공급되는 수분 질량과 시멘트 수화와 자기건조에 의해 소모되는 수분질량을 고려하여 콘크리트 내부에서의 수분이동 모델을 식(3)과 같이 설정하였다.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \text{div}(D_c \text{grad } h) + Q_w + Q \quad (3)$$

여기서,

$w$  : 단위부피당 수분질량 [kg/m<sup>3</sup>]

$Q_w$  : 경량골재에 의해 공급되는 단위부피당 단위시간당 수분질량[kg/m<sup>3</sup>·sec]

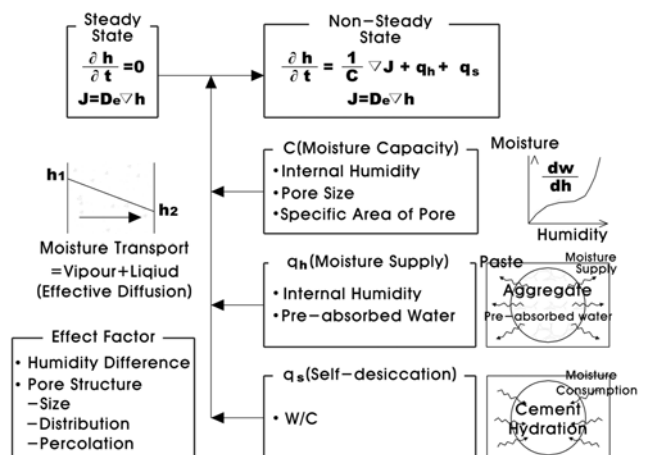


Fig. 1 Modelling Method for Moisture Transport

$Q_s$  : 자기건조에 의해 소모되는 단위부피당 단위시간당 수분질량[kg/m<sup>3</sup>·sec]

여기서 콘크리트의 수축과 수분이동과의 연관성 측면에서 콘크리트 내 수분질량을 대신하여 상대습도에 따른 연속방정식 형태로 변환하기 위해 식 (3)에 chain rule을 적용하면

$$\frac{\partial h}{\partial t} \frac{\partial w}{\partial h} = \text{div}(D_e \text{ grad } h) + Q_w + Q_s \quad (4)$$

식 (4)에서  $(\partial w / \partial h) = C$ 로 치환할 경우 식 (5)와 같이 콘크리트 내 습도의 향으로 표시되는 경량골재 사전흡수수에 의한 습도공급효과와 자기건조에 의해 소모되는 습도소모효과를 고려한 경량콘크리트의 수분이동 지배방정식을 설정할 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{C} \text{div}(D_e \text{ grad } h) + q_h + q_s \quad (5)$$

여기서,

$C$  : 콘크리트 수분용량, 특정 상대습도 변화에 대한 수분 질량의 변화율 [kg/m<sup>3</sup>]

$q_h$  : 경량골재에 의해 공급되는 단위시간당 상대습도, 습도 공급도 [/sec]

$q_s$  : 자기건조에 의해 소모되는 단위시간당 상대습도, 습도 소모도 [/sec]

이와 같이 설정된 수분이동모델에 대하여 본 연구에서는 다양한 물-결합제비 0.3, 0.4, 0.5의 범위에서 경량골재, 일반골재 콘크리트의 유효확산계수  $D_e$ , 수분용량  $C$ 를 측정하여 해석 상수로서 제공하고, 간접적으로 콘크리트의 공극 크기, 분포, 연결성 등의 투수성과 관련된 공극 구조변화를 파악해보고자 한다. 또한 식 (5)의 수분이동모델에 적용 가능한 경량골재의 습도공급도를 산정하고, 물-결합제비 0.42이하에서 문제시 되는 자기건조를 고려하기 위해 수분이동 차단 조건에서의 습도감소량을 측정하였다(Kenneth, 1999; 이창수, 2006a, 2006b, 2008).

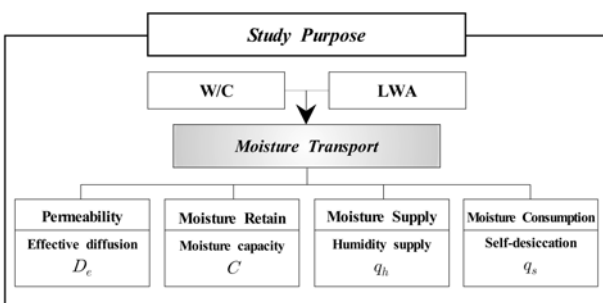


Fig. 2 Purpose of this study

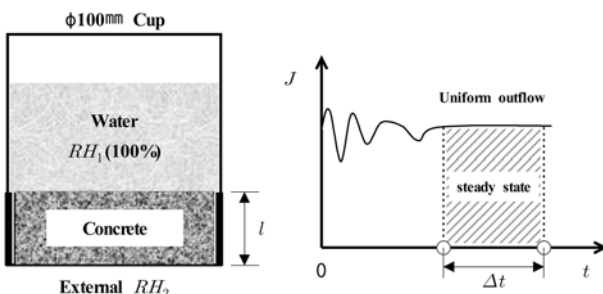


Fig. 3 Test Method for Effective Moisture Diffusion Coefficient (Upside down cup method)

## 2.2 연구방법

### 2.2.1 유효수분확산계수

콘크리트 매체사이의 습도차이로 인한 수분의 정상상태 확산 속도를 나타내는 유효수분확산계수  $D_e$ 의 측정방법은 Fig. 3과 같이 지름 100 mm의 원형 투명컵에 일정량의 물을 채우고 20°C조건에서 28일간 수증양생한 지름 100 mm의 콘크리트 시편을 두께 10 mm로 절단하여 컵과 시편을 밀봉한 후 시간에 따른 수분 감소량을 측정한다. 이 때 시편 안쪽 물이 채워진 부분은 습도 100%의 조건이 형성되며 시편 바깥쪽은 습도 50%를 유지하여야 한다. 습도 100%의 조건은 타설 후 콘크리트 내부의 습도 조건이 되며, 습도 50%는 대기 중 평균 습도를 묘사하게 된다(Xi, 1993b). 이와 같은 조건 하에 감소한 물의 질량을 일정 시간 간격으로 측정하여 시간 변화에 대한 감소율이 일정해지는 구간을 선정하고, 식 (6)을 통해 각 배합에 대한 유효확산계수를 도출하였다.

$$J = D_e \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$\frac{\Delta w}{A \cdot \Delta t} = D_e \frac{(RH_1 - RH_2)}{l} \quad (6)$$

$$\therefore D_e = \frac{\Delta w \cdot l}{(RH_1 - RH_2) \cdot A \cdot \Delta t}$$

여기서,

$J$  : 단위시간당 단위면적을 통과하는 수분질량 [kg/(m<sup>2</sup>·sec)]

$D_e$  : 유효수분확산계수 [kg/(m·sec)]

$\Delta w$  : 감소한 물의 질량 [kg]

$A$  : 시편 면적 [m<sup>2</sup>]

$l$  : 시편두께 [m]

### 2.2.2 수분용량

물-결합제비와 경량골재 치환에 따른 콘크리트의 수분 저장 능력 즉, 수분용량을 평가하기 위하여 재료 주변 상대습도 변화에 따른 재료 자체의 수분질량 변화율로서 정의하고 식 (7)과 같이 표현한다(Xi, 1993a).

$$C = \frac{\partial w}{\partial h} [\text{kg/m}^3] \quad (7)$$

측정방법은 Fig. 4와 같이 20°C, 28일간 수증 양생한 시험체에 대해서 압축강도 시험 후 수 mm의 시편조각을 일정한 습도가 유지되는 밀폐상자에 보관하고 시간에 따라 시편의 질량이 일정해 지는 구간에서 시편 질량과 상대습도와의

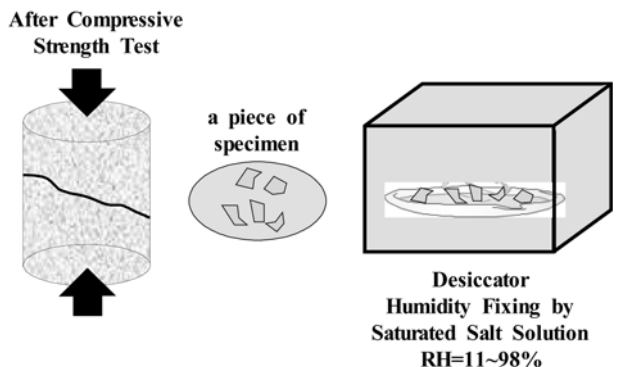


Fig. 4 Test Method for Moisture Capacity

Table 1. Solubility of Salt and Relative Humidity at Equilibrium Moisture Condition

Chemical Name	Chemical Equation	20°C Reference	
		Solubility(g)-Water 100 g	Relative Humidity (%)
Potassium hydrogen sulfate	KHSO <sub>4</sub>	48.6	98
Potassium nitrate	KNO <sub>3</sub>	31.6	95
Potassium chloride	KCl	34.2	85
Sodium chloride	NaCl	35.9	75
Sodium bromide	NaBr	90.8	59
Magnesium nitrate	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	69.5	54
Potassium carbonate	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	111.0	43
Magnesium chloride	MgCl <sub>2</sub>	54.6	33
Lithium chloride	LiCl	83.5	11

관계를 도시하여 sorption isotherm 곡선을 구한 후 그 기울기를 수분용량으로 나타낸다. 여기서 일정 습도를 유지하기 위한 포화염 용액은 Table 1과 같이 적용하였다(KS A 0078, 1999; KS B 5344, 1997; Johannesson, 2002).

이 때 콘크리트 시편 채취 시 각 배합끼리의 굵은 골재 채취량의 상대적인 부피 차이를 최소화하기 위하여 모르타르 시편만을 채취하였으며, 굵은 골재는 모든 배합에서 일정한 부피비를 갖도록 조절하였다. 이에 대한 예로서 LWC30 배합에서 모르타르 시편 200 g을 사용할 경우 이에 해당하는 부피는 식 (8)과 같다.

$$\text{모르타르 부피} = 200g \times \frac{1l}{1362g} = 0.147l \quad (8)$$

이 때 모르타르 부피와 굵은 골재의 부피는 Table 4에서와 같이 0.634 : 0.366을 만족해야 하므로

$$\text{골재 부피} = 0.147 \times \frac{0.366}{0.634} = 0.085l$$

따라서 desorption test에 사용되는 골재의 양은 각각 표면 건조포화상태 밀도 1,898 [g/l]를 적용할 경우 다음과 같다.

$$\text{표건시료} = 0.085 \times 1898 = 161 \text{ g(desorption)}$$

이와 같은 방법을 적용하여 LWC30, LWC40, LWC50, NWC30, NWC40, NWC50의 sorption test에 사용되는 모르타르, 굵은 골재의 시편 질량을 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2. Mass of Mortar and Aggregate Used in Sorption Tests

Mixture	Item	Type	Sorption test				
			Mortar (g)	Aggregate(g)		Mortar (l)	Aggregate (l)
				SSD*	OD**		
LWC30		1,362	200	161	134	0.147	0.085
LWC40		1,311	200	167	138	0.153	0.088
LWC50		1,271	200	173	143	0.157	0.091
NWC30		1,362	200	234		0.147	0.085
NWC40		1,311	200	242		0.153	0.088
NWC50		1,271	200	250		0.157	0.091

\*SSD : 표면건조포화상태 골재 질량(desorption)

\*\*OD : 절대건조상태 골재 질량(adsorption)

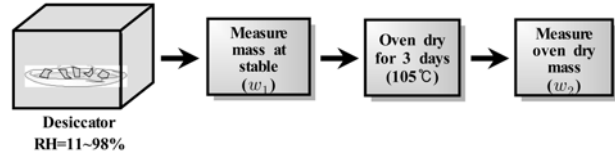


Fig. 5 Measuring Method for Effective Moisture Mass (w<sub>c</sub>)

한편, 수분량은 건조된 콘크리트 단위체적에 포함된 수분 질량으로서 식 (9)와 같이 표현한다.

$$\frac{\text{수분질량}}{\text{건조 콘크리트 부피}} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (9)$$

측정방법은 Fig. 5와 같이 포화염 용액으로 설정된 각각의 상대습도를 유지하는 밀폐상지에서 시편의 질량이 변화하지 않는 평형수분상태에서의 시편 질량을 측정한다. 이후 105°C 건조로에서 3일간 건조한 후 건조시편의 질량을 측정하면 다음과 같이 수분질량과 건조 콘크리트의 부피를 결정할 수 있다.

$$\text{수분질량} = w_1 - w_2 \quad [\text{kg}] \quad (10)$$

$$\text{건조 콘크리트 부피} = \frac{w_2}{W_o} \quad [\text{m}^3] \quad (11)$$

여기서, w<sub>1</sub> : 수분평형상태에서의 시편질량 [kg]

w<sub>2</sub> : 건조시편의 질량 [kg]

W<sub>o</sub> : 노건조 단위용적질량 [kg/m<sup>3</sup>]

한편 sorption isotherm을 정식화하기 위한 대표적 모델로는 흡착 열역학의 통계적 접근법을 이용한 BET(Braunauer-Emmett-Teller) 모델이 있으나, 이 모델은 시멘트 페이스트나 콘크리트의 경우 0.05~0.5 범위의 낮은 습도에서는 부적절한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 개선한 모델로서 식 (14), (15)와 같은 BSB 모델을 사용하기로 한다(Xi 등, 1995a).

$$w_e = \frac{C_T k v_m h}{(1 - kh)[1 + (C_T - 1)kh]} \quad (14)$$

$$\frac{\partial w_e}{\partial h} = \frac{C_T k v_m [1 + (C_T - 1)h^2 k^2]}{(1 - kh)^2 [1 + (C_T - 1)kh]^2} = C \quad (15)$$

식 (14)와 (15)를 구성하는 3가지 매개변수 v<sub>m</sub>, k, C<sub>T</sub>에 대해서 살펴보면, 먼저 단일층 능력 (monolayer capacity)

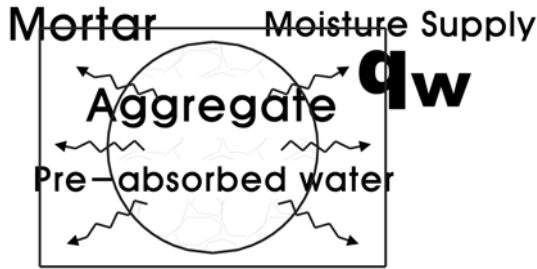


Fig. 6 Moisture Supply by Pre-absorbed Water in LWA

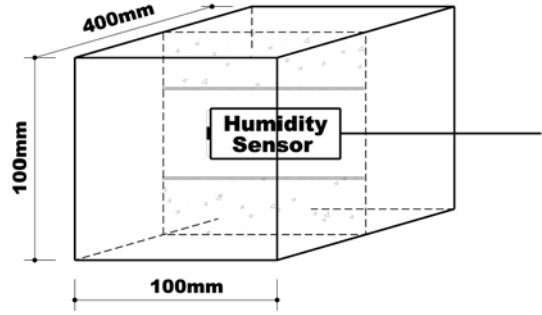


Fig. 7 Measuring Method for Self-desiccation

$v_m$ 은 고체 표면에 흡착될 수 있는 단일층의 수분량을 의미하며, 흡착층상수  $k$ 는 공극이 포화되기 위해 필요한 분자층의 개수와 연관되는 실험상수, 열교환상수  $C$ 는 수증기가 고체 표면에 흡착하기 위한 에너지  $E_1$ 과 모세관 응축에 필요한 증발 잠열 에너지  $E_2$ 의 차이로서 물의 경우 일정한 상수 값을 나타낸다.

### 2.2.3 수분공급도

경량골재의 사전흡수수에 의한 수분공급능력을 평가하기 위해 Fig. 6과 같이 콘크리트를 모르타르, 굵은골재로 구성된 2상 구조로 가정할 경우 경량골재의 수분공급도  $q_w$ 는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 콘크리트 내에서 수분의 외부 이동, 내부소모 등의 수분 변화 요인에 의해 시간에 따라 골재 주변 습도가 변화하게 되며, 이러한 변화하는 시간, 습도에서 경량골재의 수분공급도가 결정되는 것으로 설정하였다. 경량골재의 수분공급도  $q_w$ 는 Table 1의 포화염 용액으로 일정 습도를 유지하는 밀폐상자를 이용하여 시간에 따라 감소되는 경량골재의 질량을 측정하여 산정하였다.

$$q_w = f(h, t) = \frac{\Delta w_{LA}}{V_{LA} \Delta t} \quad (16)$$

여기서

$q_w$  : 단위부피 경량골재에서 단위시간당 방출되는 수분질량 [kg/m<sup>3</sup>.sec]

$V_{LA}$  : 경량골재의 부피 [m<sup>3</sup>]

$\Delta t$  : 시간 변화 [sec]

여기서, 경량골재의 부피  $V_{LA}$ 는 다음과 같이 구한다.

$$V_{LA} = \frac{\text{표면건조포화상태 시편의 질량 [kg]}}{\text{표면건조포화상태 시편의 밀도 [kg/m}^3\text{]}}$$

### 2.2.4 자기건조

시멘트 수화에 따른 자기건조 현상을 파악하기 위하여 Fig. 7과 같이 내부에 습도센서를 매입한 100×100×400 mm 시편을 Table 4의 NWC30, NWC40, NWC50 배합에 대하여 제작한 후 외부와의 수분이동을 차단하기 위해 모든 면을 파라핀으로 밀봉하였다. 이 후 20°C의 등온 조건에서 시간에 따른 콘크리트 내부의 습도를 측정하여 습도소모도를 파악하였다. 이 때 경량콘크리트는 경량골재 사전흡수수에 의한 습도공급과 자기건조의 습도소모가 동시에 발생하므로 동일한 페이스트 체적을 갖는 일반콘크리트 배합과 동일한 습도감소가 발생하는 것으로 가정하였다.

### 2.2.5 콘크리트 배합 선정

본 연구에서는 CSH겔 내 존재 가능한 수분의 형태에 따라 겔공극 내 포화조건을 임계치인 0.42를 경계로 하여 물-결합재비 0.3, 0.4, 0.5를 선정하고 각각의 물-결합재비에서 경량골재의 사전흡수수가 콘크리트의 수분이동 특성에 미치

Table 3. Physical and Chemical Properties of Cement

Material	Item	Chemical composition (%)						Physical properties		
		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>	Ignition loss	Specific gravity	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
Cement		20.7	5.2	3.0	62.4	4.7	2.4	1.36	3.15	3,450

Table 4. Mixture Proportions of Lightweight and Normal Weight Concrete

Type	Mixture	W/C	Gmax (mm)	Air content (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				Volume (m <sup>3</sup> )				Slump (mm)	28day compressive strength (MPa)
					W	C	S	G	W	C	S	G		
Light-weight Aggregate Concrete	LWC30	0.3	19	5.0±1.0	165	550	647	695	0.165	0.175	0.244	0.366	183	52
	LWC40	0.4			190	474			0.190	0.150			182	45
	LWC50	0.5			208	416			0.208	0.132			178	39
Normal-weight Aggregate Concrete	NWC30	0.3			165	550		1,006	0.165	0.175			188	56
	NWC40	0.4			190	474			0.190	0.150			182	56
	NWC50	0.5			208	416			0.208	0.132			184	45

Table 5. Physical Test Items of Aggregate

Test Item	Specification and method
Density	KSF 2533 Method of test for particle density and water absorption of light weight coarse aggregate for structural concrete
Absorption	
Fineness	KS F 2502 Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates
Unit Weight	KSF 255 Methods of test for bulk density of aggregates and solid content in aggregates

Table 6. Physical Properties of Aggregates

Material	Item	Density (ton/m <sup>3</sup> )	Fineness	Absorption (%)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )
Fine Aggregate		2.65	2.71	1.90	1,420
Coarse Aggregate		2.75	6.78	0.72	1,415
Lightweight Coarse Aggregate		1.58 (OD) 1.90 (SSD)	6.24	20.19	910

는 영향을 파악하고자 한다(Neville, 1998). 또한 본 연구의 목적은 물-결합재비 변화에 따라서 경량골재가 콘크리트 수분이동에 미치는 영향을 파악하기 위함이므로 물-결합재비 변화, 경량골재 치환 이외의 배합요소는 모두 동일하게 제한하기 위해 시멘트 페이스트와 골재 부피비율은 일정하게 유지하였다. 이와 같은 조건하에 단위결합재량과 압축강도와의 관계를 고려하여 Table 4와 같은 실험배합을 설정하였다(ACI, 2003). 콘크리트 슬럼프는 고형분 40%의 고성능감수제를 결합재 질량 대비 0.6~0.8% 범위 내에서 사용하여 목표값 150~200에 맞추었으며, 콘크리트 28일 압축강도는 공시체 제작 1일 후 탈형하여 20, 습도 50%의 항온항습조건에서 기건양생 후 측정하였다.

한편, 본 연구에서는 잔골재는 일반 모래로 강사를 사용하였으며, 굵은골재는 일반골재로서 강사갈을 그리고 경량골재는 인공경량골재를 적용하였다. 사용된 골재의 물리적 특성을 파악하여 콘크리트 배합설계의 기본 자료로 활용하기 위해 Table 5와 같은 시험을 수행하였으며, 그 결과를 Table 6에 나타내었다.

여기서 경량골재의 흡수율은 굳지 않은 콘크리트에서의 유동성과 경화콘크리트의 물성에 큰 영향을 미치게 되므로 본 연구에서는 입경별, 침수 시간별, 보관 시간별 흡수율을 측정하여 그 특성을 파악하고 실용적으로 일정한 흡수율을 유지할 수 있는 방안으로서 Fig. 9와 같이 100%습도유지 보관방법을 통해 경량골재의 표면건조포화 상태를 Table 7에서의 골재 24시간 침수 후 100% 습도환경에서 2일 이상 보관한 흡수 상태로 정의하고 이후 경량골재의 표면건조상태에서의 밀도와 경량콘크리트의 배합설계 및 타설시 이를 적

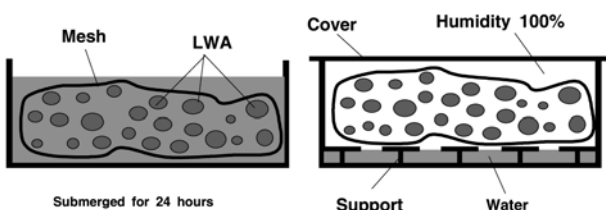


Fig. 8 Method for Humidity Holding of LWA

Table 7. Lightweight Aggregate Absorption with Humidity Holding Time

Absorptive fabric	Absorption(%)			
	24 hours	2 days	3 days	7 days
	19.76	20.21	20.19	20.41

용하기로 한다. 즉, 경량골재의 흡수율은 20.19%, 표면건조포화 밀도는 1.898 kg/를 적용한다.

### 3. 연구결과

#### 3.1 유효수분확산계수

콘크리트 내, 외부 습도차에 의한 정상상태에서의 유효수분확산계수를 LWC30, LWC40, LWC50, NWC30, NWC40, NWC50의 배합에 대해 식 (6)을 적용하여 측정된 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 먼저 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 유효수분확산계수 산정에 필요한 수분의 정상상태 확인을 위해 시간에 따른 수분 손실량을 살펴보면, 일반 골재 배합인 NWC30, NWC40의 경우 약 50일 부근 이후부터 일정한 수분 손실량을 나타냈으며 NWC50은 약 30일 이후부터 일정한 경향을 나타내었다. 즉, 물-결합재비가 낮을수록 정상상태의 수분이동이 늦게 형성되며 높을수록 반대의 양상을 나타내었다. 경량골재를 사용한 LWC30, LWC40의 경우도 약 50일 부근에서 일정한 수분 손실 경향을 나타내었으며, LWC50의 경우 약 30일 이후 정상상태 흐름을 나타내었다. 즉, 경량골재를 사용한 배합에서도 물-결합재비가 낮을수록 정상상태가 느리게 도달하는 것으로 나타났으며, 이와 같이 나타난 수분 손실량에 대해 유효수분확산계수를 산정한 결과 LWC30은  $3.68 \times 10^{-6}$  kg/m-hr, LWC40은  $5.06 \times 10^{-6}$  kg/m-hr, LWC50은  $6.16 \times 10^{-6}$  kg/m-hr, NWC30은  $2.30 \times 10^{-6}$  kg/m-hr, NWC40은  $3.43 \times 10^{-6}$  kg/m-hr, NWC50은  $5.84 \times 10^{-6}$  kg/m-hr의 값을 나타내었다. 측정된 유효수분확산계수는 물-결합재비가 낮을수록 낮은 값을 나타내었으며 동일한 물-결합재비인 경우 일반골재를 사용한 배합이 경량골재를 사용한 배합보다 낮은 유효수분확산계수를 나타내었다. 이는 경량골재가 일반골재보다 공극을 다수 함유하고 있는 다공성이기 때문으로 판단된다. 따라서 단면 내 수분 분포가 일정한 정상상태에서의 유효수분확산 즉, 투수성은 경량골재를

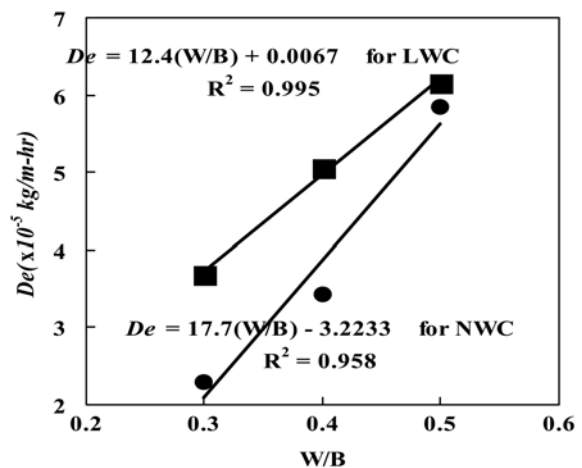


Fig. 9 Measured Effective Moisture Diffusion Coefficient

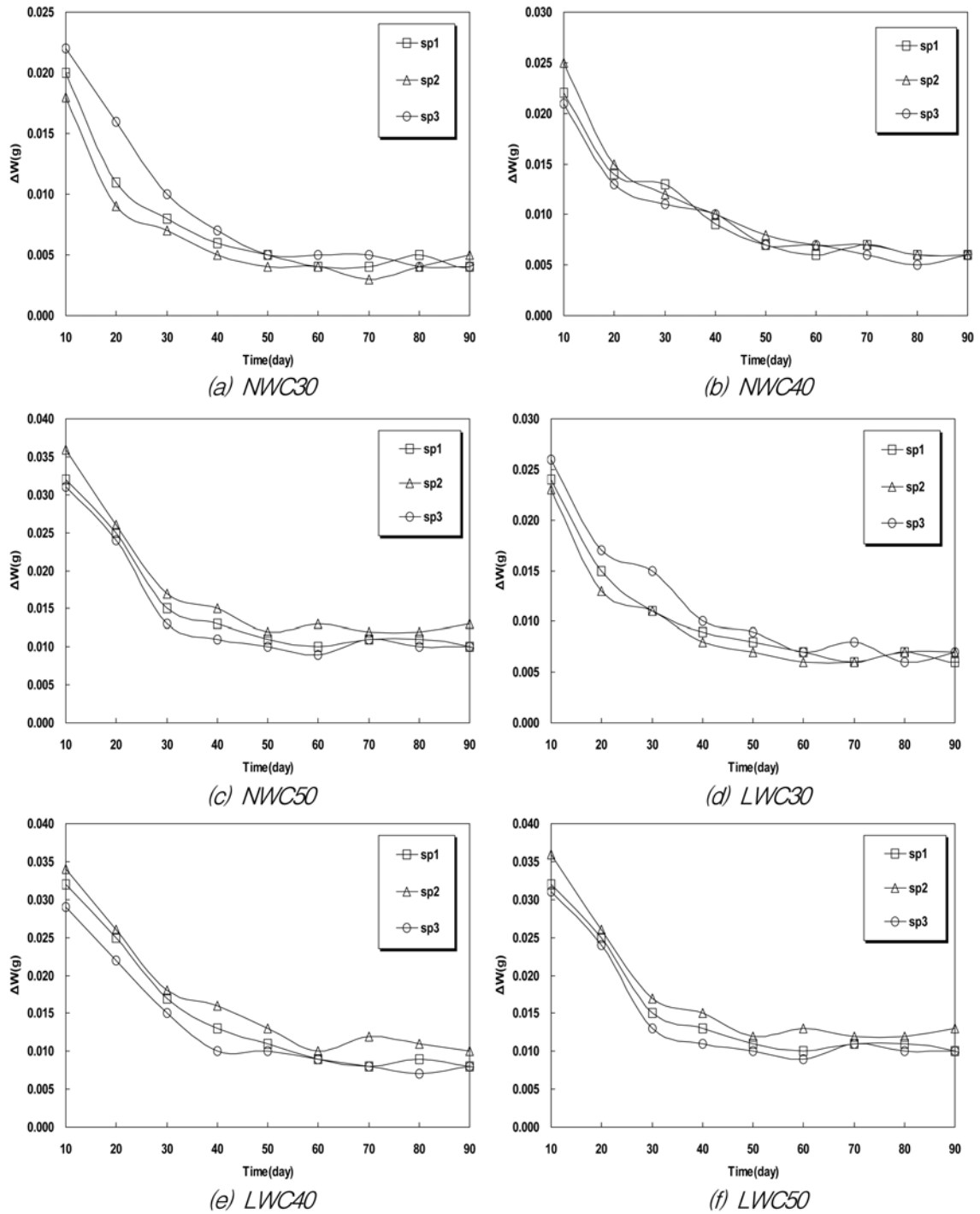


Fig. 10 Moisture Loss with Time

사용할 경우 커지는 것으로 생각할 수 있으며 Fig. 9에서와 같이 물-결합재비와 골재종류에 따른 유효화산계수 관계식을 설정하였다.

### 3.2 수분용량

콘크리트 내 수분의 저장 능력 즉, 수분용량을 산정하기 위해 먼저 Table 1과 같은 각각의 습도에서 콘크리트의 수분량과 수축등온선 측정 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 결과를 살펴보면 경량골재를 사용한 배합이 일반골재를 사용한 배합보다 모든 습도조건에서 수분량이 크게 나타났다. 이에 대한 원인을 분석하기 위하여 콘크리트 구성 상태를 Fig. 13과 같이 가정할 경우 식 (17)~(19)와 같은 수화 과정 관련 식을 설정할 수 있다.

$$C + W \rightarrow C_{gel} + W_{mc} \quad (17)$$

$$C + W + W_{pre} \rightarrow C_{gel} + W'_{mc} + W_{pre} \quad (18)$$

$$C_{gel} = \alpha \cdot C \quad (19)$$

여기서

$C$  : 배합 단위시멘트량 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$W$  : 배합 단위수량 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$C_{gel}$  : 시멘트 겔 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$W_{mc}$  : 습도 100%에서의 일반골재 콘크리트 수분량 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$W'_{mc}$  : 습도 100%에서의 경량골재 콘크리트 수분량 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$W_{pre}$  : 경량골재 사전흡수량 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\alpha$  : 수화상수

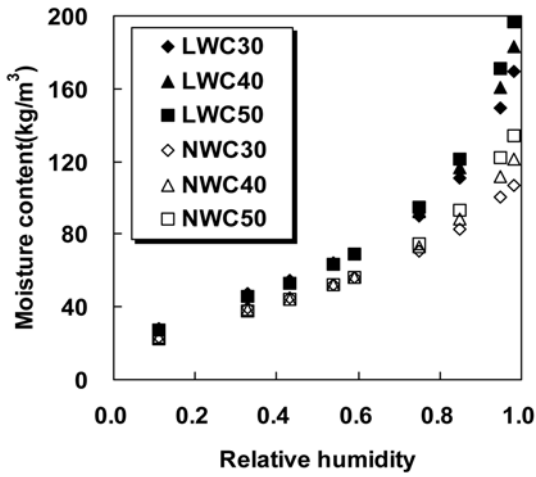


Fig. 11 Measured Moisture Content

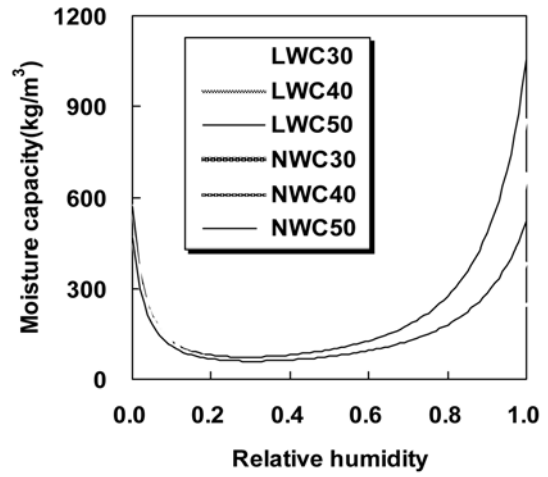


Fig. 14 Derived Moisture Capacity

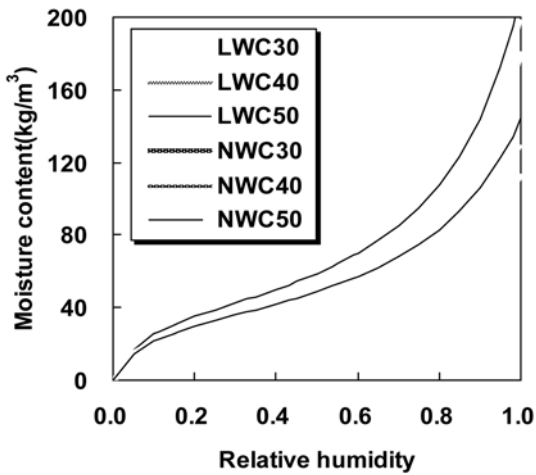


Fig. 12 Measured Sorption isotherm

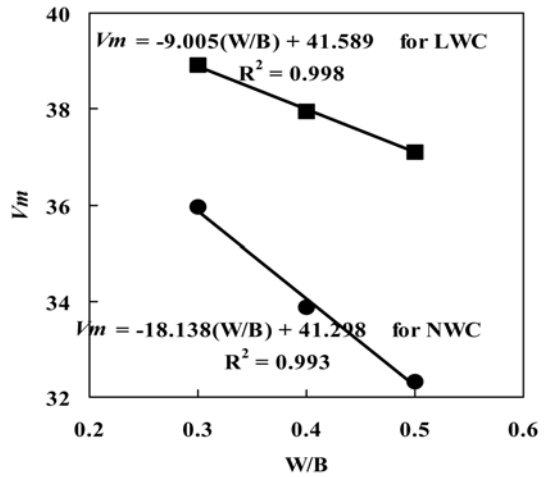


Fig. 15 Measured monolayer capacity

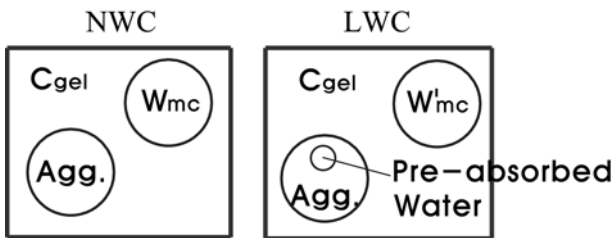


Fig. 13 Assumed Hydrates Structures in Hardened Concrete

식 (17)~(19)에 대해 부연하면  $C_{gel}$ 은 결합수는 포함하고 자유수는 배제한 시멘트 겔이며,  $W_{mc}$ ,  $W'_{mc}$ 를 각각 습도 100%에서의 일반골재, 경량골재 콘크리트의 수분량, 그리고  $W_{pre}$ 를 경량골재 사전흡수량으로 정의하면 식 (19)에서의 수화상수를 설정할 수 있다. 이를 Table 4와 수분량 측정결과 Fig. 11을 이용하면 Table 8과 같은 습도 100%에서의 수분 함유량과 수화상수를 도출할 수 있다. 이러한 습도 100% 조건은 콘크리트 내부가 완전 포화된 상태를 의미하며, 물리적으로 도출된  $W_{mc}$ 는 시멘트 겔 화학적 결합수량을 제외한 물리적 흡착수, 모세관수의 자유수를 나타낸다. 따라서  $W_{mc}$ 는 온도 20°C에서 콘크리트 내외부로 자유롭게 이동할 수 있는 수분량 혹은 수분이 존재할 수 있는 공간, 공극을 의미하게 된다. 도출된  $W_{mc}$ 는 동일 물-결합제비에서 일반골재 콘크리트가 경량골재 콘크리트보다 작은 값을 나타내고 있다. 즉, 콘크리트 내부에 자유수가 존재할 수 있는 공간 혹

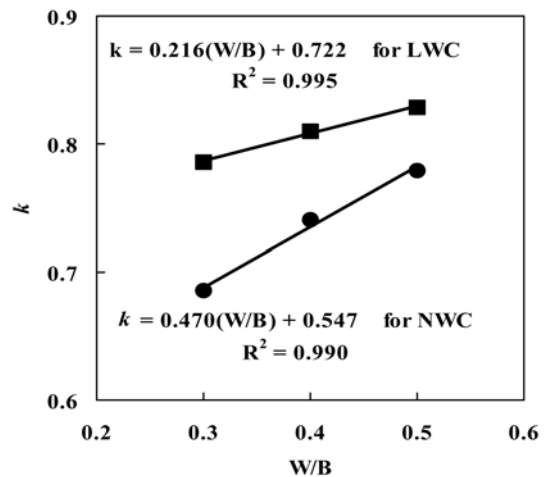


Fig. 16 Measured adsorption layer constant

은 저장 공간은 경량골재 콘크리트가 일반골재 콘크리트보다 크음을 의미한다. 이에 대해 순수한 시멘트 겔 내에서의 자유수 공극을 산정하기 위해 경량골재의 사전흡수량을 배제하고  $W'_{mc}$ 과  $W_{mc}$ 를 비교하면 경량골재 콘크리트의 자유수 공극이 일반골재 콘크리트의 자유수 공극보다 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 경량골재 콘크리트의 수분량 혹은 자유수 공극이 일반골재 콘크리트보다 증가하는 원인이 시멘트 겔 내에서의 자유수 공극이 증가하는 것이 아니라 흡수율 1%내외의 일반골재와 20%의 흡수율을 갖는 경량골재



Table 8. Moisture Content and Hydration Constant at RH 100%

	C	W	$W_{mc}$	$W'_{mc}$	$W_{pre}$	$C_{gel}$	$\alpha$
NWC50	416	208	144	-	-	480	1.15
NWC40	474	190	128	-	-	536	1.13
NWC30	550	165	111	-	-	604	1.10
LWC50	416	208	215	76	139	548	1.32
LWC40	474	190	197	58	139	606	1.28
LWC30	550	165	179	40	139	675	1.23

Table 9. Derived Moisture Capacity Variables (BSB Model)

	$V_m$	$C_T$	$k$	$R^2$
LWC30	38.9049	18.050	0.7858	0.943
LWC40	37.9529	18.050	0.8100	0.953
LWC50	37.1039	18.050	0.8291	0.965
NWC30	35.9477	18.050	0.6853	0.948
NWC40	33.8618	18.050	0.7405	0.958
NWC50	32.3201	18.050	0.7793	0.954

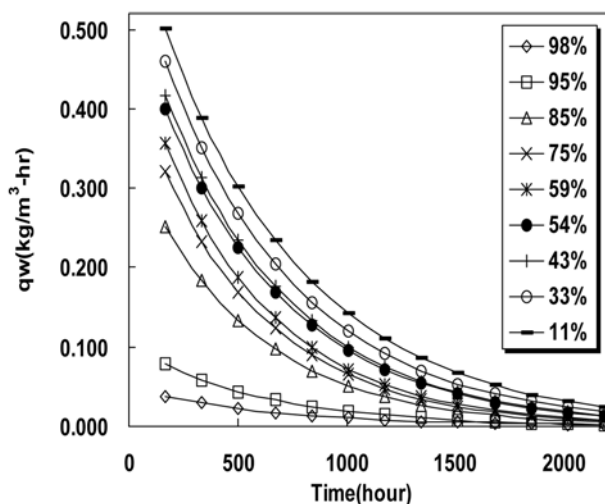
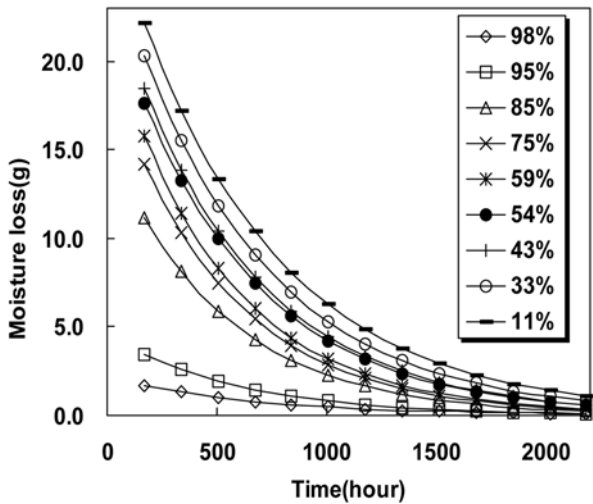


Fig. 17 LWA Moisture Loss and Supply with Humidity and Time

의 골재 자체의 공극을 차이에서 기인한 것으로 해석할 수 있다. 따라서 이와 같이 경량골재 자체의 자유수 공극을 배제하고 도출된 수화상수는 동일 물-결합재비에서 일반골재

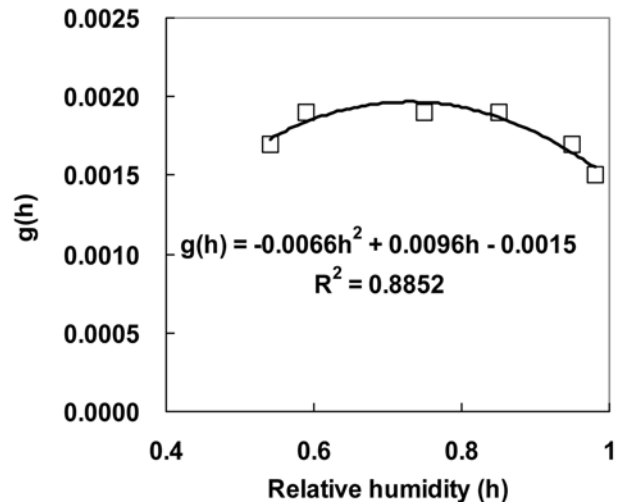
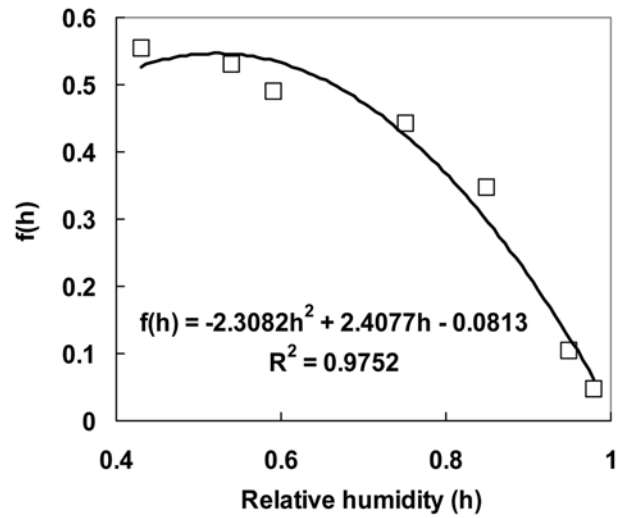


Fig. 18 Derived  $f(h)$  and  $g(h)$  applied to Humidity Supply Function

콘크리트보다 경량골재 콘크리트가 크게 나타나고 있다. 상기의 내용을 정리하면 경량골재 콘크리트는 일반골재 콘크리트보다 자유수의 저장 공간 혹은 이동 공간이 일반골재 콘크리트보다 49%(W/B=0.5), 54%(W/B=0.4), 61%(W/B=0.3) 증가하며, 이는 시멘트 겔에서의 자유수 공극이 증가하는 것이 아닌 골재 자체의 공극 차이 때문인 것으로 생각할 수 있다. 또한 시멘트 겔에서의 자유수 공간은 경량골재 콘크리트가 일반골재 콘크리트보다 각각 47%(W/B=0.5), 55%(W/B=0.4), 64%(W/B=0.3) 감소하며, 이를 근거로 할 때 시멘트의 수화도는 각각 15%(W/B=0.5), 13%(W/B=0.4), 12%(W/B=0.3) 증가하는 것으로 판단할 수 있다.

이제 측정된 수분량을 이용하여 식 (14), (15)의 BSB 모델의 상수값 회귀분석을 통하여 도출한 결과값을 Table 9와 Fig. 14, 15에 나타내었고, 이에 대한 sorption isotherm과 수분용량을 Fig. 12와 Fig. 14에 나타내었다. 먼저 콘크리트 내 공극에 대해 표면 한 층을 물분자로 덮는 능력을 나타내는  $V_m$ 은 물-결합재비가 낮을수록 큰 값을 나타내었고, 공극을 포화시킬 수 있는 능력인  $k$ 는 물-결합재비가 낮을수록 작은 값을 나타내었다. 이를 분석하면 물결합재비가 낮을수록 전체적인 공극의 크기와 공극량이 감소하지만 작은 공극이 다수 분포하여 공극의 비표면적은 증가하는 것으로 해석된다. 한편 동일 물-결합재비에 대하여 일반골재 콘크리트는

경량골재 콘크리트에 비하여  $V_m$ 과  $k$ 값이 모두 낮은 값을 나타내었으며 이는 앞서 자유수 공간과 관련하여 생각해볼 때 경량골재 콘크리트의 경량골재의 공극이 일반골재보다 크므로 인해서 나타나는 현상으로 판단된다. 즉 경량골재 콘크리트는 공극의 크기와 공극량이 일반골재보다 큰 경량골재를 사용하므로 일반골재 콘크리트보다  $V_m$ 과  $k$ 이 모두 증가하는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 일반골재 콘크리트와 경량골재 콘크리트의 수분 저장 능력은 상대습도 0.4~0.6에서부터 차이가 발생하기 시작하여 0.6이상에서는 그 차이가 크고 뚜렷하게 나타난다. 이는 콘크리트내 습도가 감소함에 따라 탈착(desorption) 과정이 큰 공극에서부터 작은 공극으로 불포화한다고 가정하였을 때 0.6이상의 높은 습도에서 경량골재 콘크리트가 일반골재 콘크리트보다 수분용량이 큰 것은 일반골재 콘크리트보다 공극의 크기와 공극량이 큰 것으로 해석할 수 있다. 반면에 0.4이하의 낮은 습도에서 수분용량이 유사한 것은 일반골재 콘크리트와 경량골재 콘크리트의 공극 비표면적이 유사하기 때문으로 생각된다. 이와 같은 두 가지 근거를 바탕으로 경량골재 콘크리트는 일반골재 콘크리트보다 높은 습도에서 포화되는 큰 공극의 분포와 같은 공극량에서 높은 비표면적을 나타낼 수 있는 작은 공극이 동시에 증가하는 것으로 해석할 수 있다. 이는 큰 공극은 경량골재 자체공극으로 인해서 증가하며, 작은 공극은 경량골재 사전흡수수에 의한 경량골재 콘크리트의 수화도 증진에 따른 결과로 유추할 수 있다. 따라서 향후 경량골재 콘크리트와 경량골재의 공극 분포와 결합수량 변화를 고려한 수화도 모델 설정에 관한 보다 세밀한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

### 3.3 수분공급도

경량골재 사전흡수수의 콘크리트 내 수분 공급도를 파악하기 위하여 Table 1의 습도 조건에서의 시간에 따른 경량골재의 수분 감소량을 측정하고 식 (16)에 따라 수분공급도를 산정한 결과를 Fig. 17에 나타내었으며, 경량골재에서의 수분 방출량은 주변 습도에 반비례하고 시간에 비례하는 뚜렷한 경향을 나타내고 있다. 따라서 경량골재의 수분공급도를 식 (20)과 같은 지수함수의 형태로 설정할 수 있다.

$$q_w(h, t) = f(h) \cdot \exp[-g(h) \cdot t] \quad (20)$$

식 (20)에서의 습도에 관한 함수  $f(h)$ 와  $g(h)$ 는 회귀분석에 의해 Fig. 18과 같은 결과를 나타내었다. 설정된  $f(h)$ 와  $g(h)$ 는 정도를 높이기 위해  $f(h)$ 는 습도 0.43이상에서  $g(h)$ 는 습도 0.54이상에서의 데이터 값을 이용하였다. 일반적으로 콘크리트 주변의 평균상대습도가 50%인 것을 가정할 경우 콘크리트 내부의 상대습도는 50% 이상이 되므로 선정된 데이터의 범위는 타당할 것으로 생각된다. 이와 같이 선정된 경량골재의 수분공급도는 경량 콘크리트에서의 부피비를 고려하여 식 (21)~식 (23)과 같이 수분공급도  $q_w(h, t)$ 로 변환하며, 이후 경량 콘크리트의 수분용량을 반영하여 습도공급도  $q_{wc}(h, t)$ 로 수정하여 수분이동 지배방정식 식 (5)에 적용할 수 있다.

$$q_{wc}(h, t) = 0.366q_w(h, t) \quad (21)$$

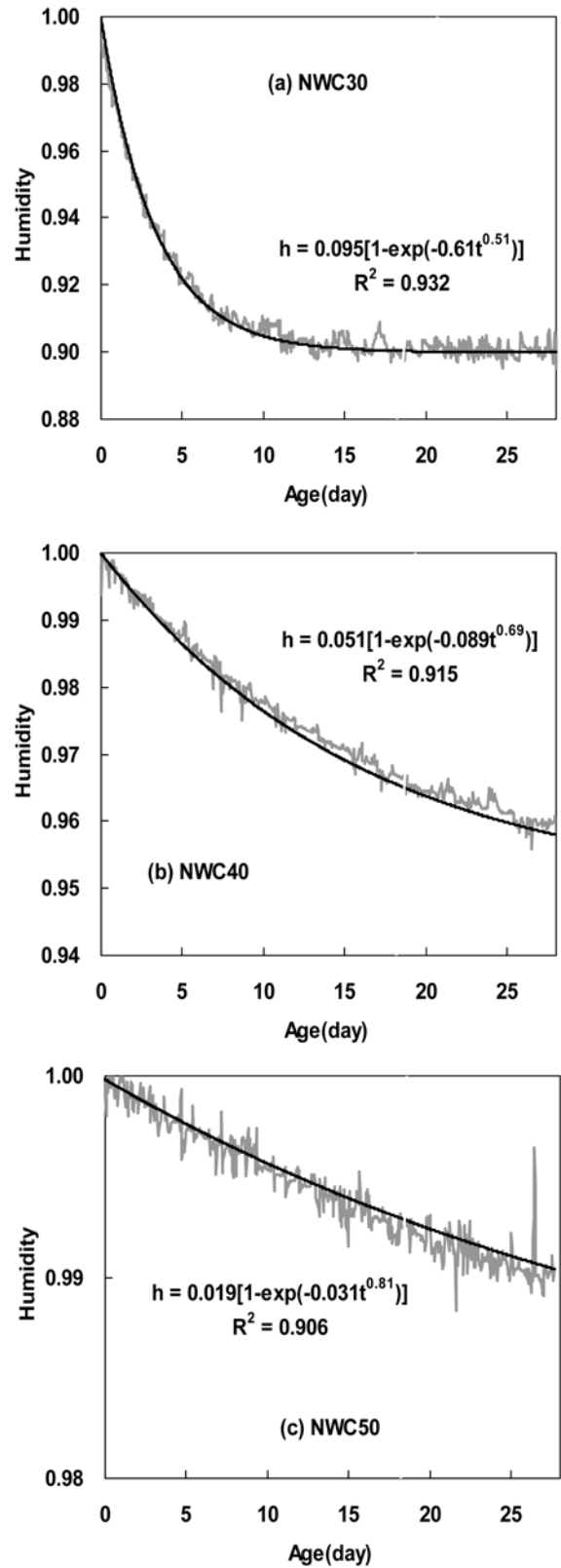


Fig. 19 Humidity Consumption Function by Mixtures

$$q_h(h, t) = q_{wc}(h, t)/C \quad (22)$$

$$q_h(h, t) = (-2.3082h^2 + 2.4077h - 0.0813) \cdot \exp[-(-0.0066h^2 + 0.0096h - 0.0015) \cdot t]/C \quad (23)$$

### 3.4 자기건조

시멘트 수화 자기건조에 의한 수분의 내부소모에 따른 콘크리트 내 습도감소량을 NWC30, NWC40, NWC50에 대

Table 10. Derived Humidity Consumption Function by Mixtures

Mixture	Function	$q_h$	$R^2$
NWC30, LWC30		$q_s = -0.095[1 - \exp(-0.61t^{0.51})]$	0.932
NWC40, LWC40		$q_s = -0.051[1 - \exp(-0.089t^{0.63})]$	0.915
NWC50, LWC50		$q_s = -0.019[1 - \exp(-0.031t^{0.81})]$	0.906

해 측정된 결과를 Fig. 19에 나타내었다. 먼저 NWC30의 경우 재령 7~10일까지 약 9~10%의 급격한 습도 감소를 나타낸 후 거의 일정한 습도를 유지하였다. NWC40의 경우 NWC30보다 완만한 형태로 습도 감소가 이루어졌으며 재령 28일까지 약 96%의 습도를 나타내었다. NWC50의 경우 습도감소량은 약 1%내외의 값을 나타내어 자기건조에 의한 습도감소는 미미한 것으로 나타났다. 이러한 현상에 대해 분석하면, NWC30의 경우 콘크리트 내 겔공극이 포화하기 위한 물-결합재비 0.42이하이므로, 초기재령에서의 급격한 수화와 겔공극 생성 시 포화하기 위한 겔공극수가 부족하여 급격한 습도 감소량을 나타내는 것으로 생각된다. 이후 재령 경과에 따라 시멘트 입자 주위의 겔조직이 성장하게 되어 수화의 진행이 둔화되고, 겔조직 사이의 모세공극수가 겔공극 내로 이동하여 수분 평형상태가 이루어지며 일정한 습도상태가 유지되는 것으로 판단된다. NWC40의 경우 NWC30보다 초기 재령 상태에서 겔공극 내를 포화하기 위한 수화잉여수가 크게 존재하게 되어 급격한 습도감소를 나타내지 않지만, 재령 경과와 모세관 공극을 함께 고려해 볼 때 수화잉여수 중 모세관 공극에 존재하는 모세관수는 수화에 소모되고 남은 물은 모두 공극의 형성에 기여하므로 결국 NWC30은 수화잉여수가 부족한 조건이 모세관 공극의 감소를 의미하지만, NWC40의 경우 수화잉여수 중 모세관수가 NWC30보다 많음으로서 모세공극이 증가함을 나타낸다. 즉, NWC30의 경우 재령 경과에 따라 수화잉여수가 부족하지만 NWC40보다 공극량이 감소함으로써 일정한 습도가 유지되며, NWC40은 수화잉여수는 NWC30보다 많지만 상대적으로 공극량이 증가하게 되므로 시간에 따라 지속적으로 습도가 감소하는 것으로 판단된다. 한편 NWC50의 경우는 수분이동이 외부와 차단된 조건에서 겔공극의 포화, 모세관공극의 포화를 형성하기에 충분한 수화잉여수가 존재하여 자기건조에 의한 습도감소효과는 큰 영향을 받지 않는 것으로 생각된다. Talbe 10은 습도감소량을 지수함수의 형태로 회귀분석하여 나타낸 것으로 수분이동 지배방정식 (5)의 해석상수로 적용할 수 있다.

#### 4. 결 론

다공성 경량골재의 사전흡수수에 따른 콘크리트의 수분이동모형을 설정하고 이에 따른 수분이동 특성상수인 유효수분확산계수, 수분용량, 습도공급도, 습도소모도를 측정하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 콘크리트 내, 외부 습도차에 의한 정상상태에서의 유효수분확산계수는 물-결합재비가 낮을수록 낮은 값을 나타내었으며 동일한 물-결합재비인 경우 일반골재를 사용한 배합

이 경량골재를 사용한 배합보다 낮은 유효수분확산계수값을 나타내었다. 이는 경량골재가 일반골재보다 공극을 다수 함유하고 있기 때문으로 판단된다.

2. 콘크리트 내 수분의 저장 능력 즉, 수분용량을 산정하기 위해 9가지 습도에서 콘크리트의 수분량을 측정하였으며 경량골재를 사용한 배합이 일반골재를 사용한 배합보다 모든 습도조건에서 수분량이 크게 나타났다. 이는 경량골재 콘크리트는 일반골재 콘크리트보다 자유수의 저장 공간 혹은 이동 공간이 일반골재 콘크리트보다 증가하며, 이러한 원인은 시멘트 겔에서의 자유수 공극이 증가하는 것이 아닌 골재 자체의 공극 차이 때문인 것으로 판단된다.
3. 일반 대기환경 습도 50% 이상 조건에서 적용할 수 있는 경량골재의 습도공급도를 측정하여 정량화하였으며, 경량골재에서의 수분 방출량은 주변 습도에 반비례하고 시간에 비례하는 뚜렷한 경향을 나타내는 지수함수의 형태로 설정할 수 있었다.
4. 시멘트 수화 자기건조에 의한 수분의 내부소모에 따른 콘크리트 내 습도소모도를 측정하였으며, 측정결과 물-결합재비 0.3의 경우 7~10일 이내의 초기재령에서 약 10% 내외의 급격한 습도감소를 나타내었으며 물-결합재비 0.4, 0.5의 경우 완만한 형태로 약 5%, 1% 내외의 습도 감소를 나타내었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2008-314-D00425)

#### 참고문헌

이창수, 박종혁(2006a) 흡착 영역 분리 압력을 고려한 시멘트페이스트의 자기 수축, **한국콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, 제18권 2호, pp. 213-218.

이창수, 박종혁(2006b) 불포화 공극 보정 수화도 모델을 이용한 콘크리트의 자기수축 예측, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권 제5A호, pp. 909-915.

이창수, 박종혁(2008) 공극 내 상대습도, 모세관압력, 표면에너지 변화에 따른 콘크리트 자기수축, **한국콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, 제20권 2호, pp. 131-138.

KS A 0078 (1999) **습도-측정방법**, 산업자원부 기술표준원

KS B 5344 (1997) **습도계 성능 시험방법**, 산업자원부 기술표준원.

ACI Committee 211 (2004) *Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete*, American Concrete Institute, pp. 30-34.

ACI Committee 213 (2003) *Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete*, American Concrete Institute, pp. 30-34.

Ayano, T. and Wittmann, F.H. (2002) Drying, moisture distribution and shrinkage of cement based materials, *Materials and Structures*, Vol. 35, pp. 134-140.

Bazant, Z.P. and Najjar, L.J. (1971) Drying of concrete as a nonlinear diffusion problem, *Cement and Concrete Research*, Vol. 1, pp. 461-473.

Bazant, Z.P. and Najjar, L.J. (1972) Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete, *materials and structures*, Vol. 5, pp. 3-20

Bazant, Z.P. (1982) *Mathematical Models for Creep and Shrinkage of Concrete*, Creep and Shrinkage in Concrete Structures, edited by Bazant, Z.P., Wittmann, F.H., John Wiley & Sons, pp.

- 163-256.
- Bentur, A., Igarashi, S., and Kovler, K. (2001) Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregate, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 1587-1591.
- Bentz, D.P. and Snyder, K.A. (1999) Protected paste volume in concrete extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 1863-1867.
- George, C.H. (2002) *Guide for the Use of Low-Density Concrete in Civil Works Projects*, U.S. Army Corps of Engineers, Report No ERDC/GSL TR 02-13, pp. 26-31.
- Gesoglu, M., Ozturan, T., and Guneyisi, E. (2006) Effects of cold-bonded fly ash aggregate properties on the shrinkage cracking of lightweight concretes, *Cement and Concrete Composite*, Vol. 28, pp. 598-605.
- Helland, S. (2000) Lightweight aggregate concrete in norwegian bridges, *HPC Bridge Views*, Vol. 11, pp. 2-3.
- Johannesson, B. and Janz, M. (2002) Test of four different experimental methods to determine sorption isotherms, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 471-477.
- Kenneth, W.M. and Nicholas, J.C. (1999) *Curing of High Performance Concrete : Report of the State of the art*, NIST IR 6295, National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, pp. 17-34.
- Kim, J.K. and Lee, C.S. (1999) Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 1921-1927.
- Kohnno, K., Okamoto, T., Isikawa, Y., Sibata, T., and Mori, H. (1999) Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 611-614.
- Kovler, K. and Zhutovsky, S. (2006) Overview and future trends of shrinkage research, *Materials and Structures*, Vol. 39, No. 9, pp. 827-847.
- Lura, P. (2003) *Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete*, Ph.D thesis, Delft University of Technology.
- Lura, P. and Bisschop, J. (2004) On the origin of eigenstresses in lightweight aggregate concrete, *Cement and Concrete Composite*, Vol. 34, pp. 445-452.
- Lura, P., Jensen O.M., and Igarashi, S.I. (2006) Experimental observation of internal water curing of concrete, *Materials and Structures*, Vol. 40, No. 2, pp. 211-220.
- Nevile, A.M. (1998) *Properties of Concrete*, John Wiley & Sons Inc., 4th Ed.
- Ozyildirim, H.C. (2004) Lightweight hpc on poute 106 bridge in virginia, *HPC Bridge Views*, Vol. 32, pp. 3.
- Persson, B. (1998) Experimental studies on shrinkage of high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, pp. 1023-1036.
- Rathby, K.D. and Lydon, F.D. (1981) Lightweight concrete in highway bridges, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 2, pp. 133-146.
- Sakata, K. (1983) A study on moisture diffusion in drying and drying shrinkage of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 13, pp. 216-224.
- Sideney, M., Francis, J. Young and David, D. (2003) *Concrete*, 2nd Ed., Prentice Hall, pp. 547-562.
- Thomas, A.H. and Theodore, W.B. (2000) *State of the Art Report on High-Strength, High-Durability Structural Low-Density Concrete for Applications in Severe Marine Environment*, U.S. Army Corps of Engineers, Report No ERDC/SL TR 00-3, pp. 9-52.
- Thomas, A.H. and John, P.R. (2001) Benefits of lightweight HPC, *HPC Bridge Views*, Vol. 17, pp. 3.
- Xi, Y., Bazant, Z.P., and Jennings, H.M. (1993) Moisture Diffusion in Cementitious Materials-Adsorption Isotherms, *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 1, pp. 248-257.
- Xi, Y., Bazant, Z.P., Molina, L., and Jennings, H.M. (1993) moisture diffusion in cementitious materials-moisture capacity and diffusivity, *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 1, pp. 258-266.
- Xin, D., Zollinger, D.G., and Allen, G.D. (1995) An approach to determine diffusivity in hardening concrete based on measured humidity profiles, *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 2, pp. 138-144.
- Zhutovsky, S., Kovler, K. and Bentur, A. (2002) Efficiency of lightweight aggregates for internal curing of high-strength concrete to eliminate autogenous shrinkage, *Materials and Structures*, Vol. 35, pp. 97-101.
- Zhotovsky, S., Kovler, K., and Bentur, A. (2004) Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete, *Cement and Concrete Composite*, Vol. 26, pp. 499-507.

(접수일: 2009.2.18/심사일: 2009.4.12/심사완료일: 2009.5.15)