



경량콘크리트 및 일반콘크리트의 수분관련 수축에 대한 다중물리모델

이창수¹⁾

¹⁾서울시립대학교 토목공학과

Multi-physics Model of Moisture Related Shrinkage on Lightweight and Normal Concrete

Chang-Soo Lee¹⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, University of Seoul, Seoul 130-746, Korea

ABSTRACT A multiphysics model analysis including moisture transport, heat transfer and solid mechanics and experiments on the normal and light weight concrete were carried out in order to study the effect of preabsorbed water in the light weight aggregates on the drying and shrinkage characteristics of concrete. Consequently, with fixed water-cement ratio, loss of water content of normal and light weight concrete were compared and the results showed that the lightweight concrete lost less moist than the normal concrete in early age and long term which was by moist supply effect. Accordingly, shrinkage strain size and distribution of lightweight concrete were decreased, and shrinkage reducing effect was efficient in early age with water cement ratio 0.3 and in both early age, and long term with water cement ratio 0.5. The comparison of analysis results and exaperimental results indicate that characteristic values of moisture transport and the relation humidity and shrinkage strain from this study are resonable for application for other differential shrinkage analysis in lightweight concrete.

Keywords : lightweight concrete, normal concrete, moisture transport, shrinkage, multi-physics

1. 서 론

콘크리트는 외부의 하중이 작용하지 않는 조건에서도 콘크리트 내부의 시멘트 겔, 공극 등의 수화조직 변화, 수분의 변화, 내부 수화열과 주변 온도 변화 등의 재료 구성체 및 환경 조건에 따라 변형을 일으킨다.¹⁾ 이러한 변형은 프리스트레스트 콘크리트 구조물에서 긴장재 긴장력 손실의 주요 원인으로 작용하며, 구조물 자체의 형상, 또는 외부 구속 정도에 따라 응력이 유발되며, 발생한 응력이 콘크리트의 균열저항성을 초과할 경우 구조물의 균열 원인으로 작용한다.²⁾ 이 연구에서는 이러한 콘크리트의 재료적, 환경적 변형 요인 중 콘크리트 내부의 수분 변화에 의한 수축에 초점을 맞추어 콘크리트 내 수분 이동 특성, 수분 변화와 수축 변형 발생 간 관계에 대하여 살펴보고자 한다. 이를 위해 이 연구와 일련의 연구과정을 통해 도출된 수분 이동 특성 상수, 수분 변화와 수축간의 관계를 이용하여 실제 구조물에서 발생할 수 있는 환경을 묘사하여 수축 변형에 대한 고찰을 수행하고자 하며, 또한 이러한 수축 변형에 있어 경량골재

사전흡수수가 미치는 영향을 파악하고자 한다. 이를 위한 고려사항으로는 콘크리트에 외부 하중이 작용하지 않는 상태에서 발생할 수 있는 변형으로서 콘크리트 내 수분 이동 또는 변화, 시멘트 수화에 의한 수화열 발생을 포함한다. 이 연구에서는 콘크리트의 수분 이동에 의한 수축이 문제시되는 얇은 부재에서의 수분 이동과 변형을 주 연구 범위로 한정하며, 초기재령에서 수화열에 의한 수축의 영향을 고려하기 위하여 열전달 해석을 수행하되 그 영향이 미미할 것으로 가정하여 수화열 해석이 요구되는 해석 상수는 기존 연구 결과를 이용한다.

연구 내용 및 구성은 Fig. 1과 같이 습도 변화에 의한 수분 이동 해석, 수화열에 의한 열전달 해석, 그리고 수분 이동, 온도 변화에 의한 변형과의 상호 관계를 이용하여 전체적인 부재의 다중 물리 현상에 의한 다중 물리 모델 해석과 실험을 수행하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 수분 이동 모델링

이 연구에서는 콘크리트 내 수분이동 지배방정식을 경량골재 사전흡수수에 의한 습도공급도 q_h 와 자기건조에 의한 습도소모도 q_s 를 고려한 식 (1)을 적용하며, 연구과

*Corresponding author E-mail : csll@uos.ac.kr
 Received July 1, 2009, Revised December 22, 2009,
 Accepted December 31, 2009
 ©2010 by Korea Concrete Institute

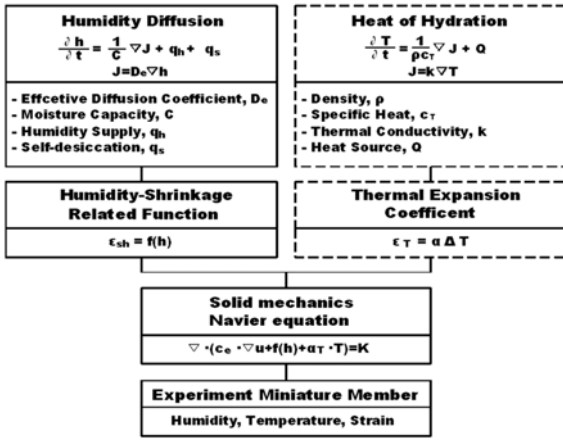


Fig. 1 Multi-physics modelling flow

정에서 도출된 수분 이동 특성 상수로서 정상상태의 수분 이동 속도를 나타내는 유효수분확산계수 D_e 는 Table 1을, 수분의 저장능력을 나타내는 수분용량 C 는 식 (2)와 Table 2를, 습도공급도 q_h 는 식 (3)을, 습도소모도 q_s 는 Table 3을 적용한다.³⁾

Table 1 Applied effective moisture diffusion coefficient

$D_e \times 10^{-5}$ (kg/m-hr)	NWC30	NWC40	NWC50
	2.30	3.43	5.84
	LWC30	LWC40	LWC50
	3.68	5.06	6.16

Table 2 Applied moisture capacity variables Brunauer-Skalny-Bodor Model)

Mixture	V_m	C_T	k	R^2
LWC30	38.905	18.050	0.786	0.943
LWC40	37.953	18.050	0.810	0.953
LWC50	37.104	18.050	0.829	0.965
NWC30	35.948	18.050	0.685	0.948
NWC40	33.862	18.050	0.741	0.958
NWC50	32.320	18.050	0.779	0.954

Table 3 Applied humidity consumption function by mixtures

Mixture	Humidity consumption function
NWC30 LWC30	$q_s = -0.095[1 - \exp(-0.61t^{0.51})]$
NWC40 LWC40	$q_s = -0.051[1 - \exp(-0.089t^{0.63})]$
NWC50 LWC50	$q_s = -0.019[1 - \exp(-0.031t^{0.81})]$

Table 4 Applied variables of heat transfer analysis

Mix.	Item	ρ (kg/m ³)	c_p (kcal/kg°C)	k_T (kcal/m-hr°C)	q_s (kcal/m ² -hr°C)	$Q(^{\circ}C)$		α_T
						Q_{∞}	r	
LWC30		2039	0.3	1.3	12	73.5	2.054	0.9×10^{-5}
LWC40		1992				65.1	1.770	
LWC50		1948				58.8	1.540	
NWC30		2351	2.5	12		73.5	2.054	1.0×10^{-5}
NWC40		2305				65.1	1.770	
NWC50		2253				58.8	1.540	

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

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

$$q_h(h, t) = (-2.3082h^2 + 2.4077h - 0.0813) \cdot \exp[-(-0.0066h^2 + 0.0096h - 0.0015) \cdot t] / C \quad (3)$$

2.2 열전달 모델링

열전달은 임의의 시간 t 에서 단면의 각 점에서의 온도와 관계된 Fourier방정식인 식 (4)로 나타낼 수 있다.⁴⁾

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho c_p} \text{div}(k_T \text{grad } h) + q_T \quad (4)$$

여기서 T : 온도(°C)

k_T : 열전도도(kcal/m·hr·°C)

c_p : 비열(kcal/kg·°C)

ρ : 밀도(kg/m³)

q_T : 내부발열량(kcal/m³·hr)

일반적으로 보통 시멘트를 사용한 콘크리트의 경우에 비열은 0.27~0.31 kcal/kg·°C, 열전도율은 2.15~2.51 kcal/m·hr·°C 범위를 나타내며, 이 연구에서는 기존 연구 결과를 이용하여 식 (4)의 열전달 해석을 위한 해석 상수를 Table 4와 같이 적용하였다.

2.3 다중물리 모델링

콘크리트 내부의 수분 이동, 열전달 지배방정식 식 (1), (4)에 따른 콘크리트의 변형률 해석을 위해서는 식 (5)와 같이 콘크리트 내 습도, 온도를 고려한 Navier방정식을 구성할 수 있다.⁶⁾

$$\nabla \cdot (c_e \cdot \nabla u + f(h) + \alpha_T \cdot T) = K \quad (5)$$

여기서 c_e 는 탄성계수와 포아송비를 고려한 매트릭스 상수이며, $f(h)$, α_T 는 각각 수분관련 수축과 온도에 따른 변

Table 5 Applied relation shrinkage strain and humidity change to multi-physics

LWC30	$\varepsilon_{sh} = 341[1 - \exp(-9.725\Delta h)]$
LWC40	$\varepsilon_{sh} = 404[1 - \exp(-3.439\Delta h)]$
LWC50	$\varepsilon_{sh} = 1923[1 - \exp(-0.721\Delta h)]$
NWC30	$\varepsilon_{sh} = 444[1 - \exp(-11.591\Delta h)]$
NWC40	$\varepsilon_{sh} = 433[1 - \exp(-4.133\Delta h)]$
NWC50	$\varepsilon_{sh} = 11569[1 - \exp(-0.141\Delta h)]$

형을 고려하기 위한 매트릭스 상수, K 는 체적력이다. 다음으로 콘크리트 응력-변형률을 구성하기 위해서는 내부 습도, 온도와 변형률간의 관계식이 요구되며, 습도-변형률 관계는 일련된 연구의 결과인 Table 5를 적용하며 온도-변형률 구성방정식은 Table 4의 열팽창계수 α_T 를 이용하여 식 (6)과 같이 적용한다.⁵⁾

$$\varepsilon_T = \alpha_T \cdot \Delta T \quad (6)$$

일반적으로 콘크리트의 수분관련 수축이 문제시 되는 구조부재는 단면이 얇은 형상을 지니며 대표적인 예로서 콘크리트 바닥판을 들 수 있다. 이러한 경우 대부분의 균열 방향은 교축직각방향의 횡방향 균열이 발생하며 이는 바닥판이 교축 방향으로 거더에 의해 혹은 수축 이음간의 구속에 의해 변형이 구속됨을 의미한다. 따라서 이 연구에서는 이러한 구속조건을 묘사하기 위해 2차원 평면 변형률 요소를 적용한다.

이와 같은 식 (5)의 모델에서 습도변화와 온도에 따른 하중항만을 고려할 경우 응력-변형률의 구성방정식은 식 (7)과 같다.

$$\sigma = D \cdot \varepsilon = D \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{sh} - \varepsilon_T) \quad (7)$$

여기서 2차원 평면변형률의 경우, 변위-변형률 관계에 대응하는 변형률-습도, 변형률-온도와의 관계는 식 (8), (9)와 같다.

$$\varepsilon_{sh} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{sh,x} \\ \varepsilon_{sh,y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (1+\nu)f(h) \\ (1+\nu)f(h) \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$\varepsilon_T = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{T,x} \\ \varepsilon_{T,y} \end{Bmatrix} = \alpha_T \begin{Bmatrix} (1+\nu)(T-T_0) \\ (1+\nu)(T-T_0) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

따라서 응력-변형률의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{dry} &= D\varepsilon_{sh} \\ \begin{Bmatrix} \sigma_{sh,x} \\ \sigma_{sh,y} \end{Bmatrix} &= \frac{E(t)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu \\ \nu & 1-\nu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} (1+\nu)f(h) \\ (1+\nu)f(h) \end{Bmatrix} \\ &= \frac{E(t)}{(1-2\nu)} \begin{Bmatrix} f(h) \\ f(h) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\sigma_T = D\varepsilon_T$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \sigma_{T,x} \\ \sigma_{T,y} \end{Bmatrix} &= \frac{E(t)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu \\ \nu & 1-\nu \end{bmatrix} \alpha_T \begin{Bmatrix} (1+\nu)(T-T_0) \\ (1+\nu)(T-T_0) \end{Bmatrix} \\ &= \frac{E(t)}{(1-2\nu)} \alpha_T \begin{Bmatrix} (T-T_0) \\ (T-T_0) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

이 때 식 (10), (11)에서 시간경과에 따른 탄성계수의 변화를 고려하기 위하여 기준 탄성계수로는 ACI-213을 적용하며, 시간 효과와 크리프 효과는 CEB-FIP의 시간 함수를 이용하였다.^{7,8)}

$$E_0 = 0.043w_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}} \quad (12)$$

$$\beta(t) = \{\exp[0.25(1 - \sqrt{1/t})]\}^{0.5} \quad (13)$$

$$E(t) = \frac{E_0\beta(t)}{1 + \phi(t, t')} \quad (14)$$

2.4 실험 방법

콘크리트 내부의 습도와 변형률의 관계를 파악하기 위하여 Figs. 2~3과 같은 실험방법을 구성하였다. 먼저 Fig. 3과 같이 200×200×500 mm 공시체에 습도측정 센서, 열전쌍과 변형률 게이지를 매입한 후 1개의 수분이동면을 제외하고 다른 5면은 모두 테프론 시트와 파라핀으로 밀봉하여 시간과 깊이에 따른 습도와 변형률을 측정

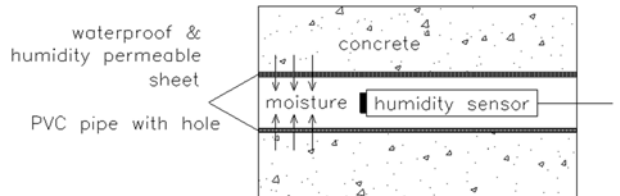


Fig. 2 Figure out for humidity measurement

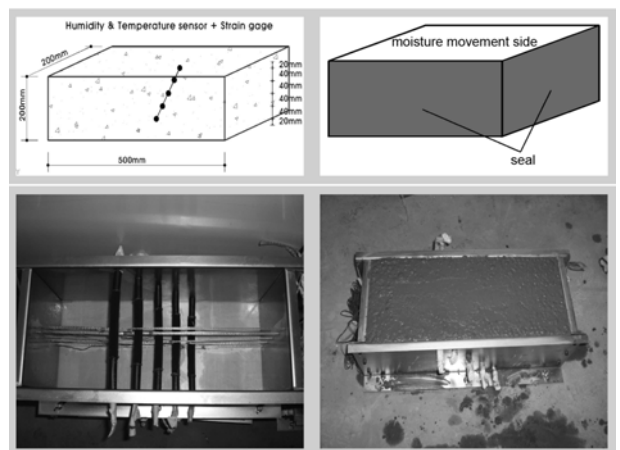


Fig. 3 Miniature tests setting for multi-physics

하였다. 여기서 습도 측정은 Fig. 2와 같이 방수투습 소재를 이용하여 타설 초기에서의 센서를 배합수로부터 보호함으로써 측정의 정밀도를 향상하였다. 수분의 내부소모, 외부 이동, 수화열에 의한 콘크리트의 변형을 살펴보기 위하여 타설 후 90일까지 깊이별 습도, 변형률, 온도를 측정하였다. 실험에 사용된 시멘트 특성과 콘크리트 배합은 Tables 6, 7과 같다.

2.5 콘크리트 배합 설정

이 연구에서는 CSH겔 내 존재 가능한 수분의 형태에 따라 겔공극 내 포화조건의 임계치인 0.42를 경계로 하여 물-결합재비 0.3, 0.4, 0.5를 선정하고 각각의 물-결합재비에서 경량골재의 사전흡수수가 콘크리트의 수분이동 특성에 미치는 영향을 파악하고자 한다.⁹⁾ 또한 이 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 부피율은 일정하게 유지하였다.

이와 같은 조건하에 단위결합재량과 압축강도와의 관계를 고려하여 Table 4와 같은 실험배합을 설정하였다.¹⁰⁾ 콘크리트 슬럼프는 고품분 40%의 고성능감수제를 결합재 질량 대비 0.6~0.8% 범위 내에서 사용하여 목표값 150~200 mm에 맞추었으며, 콘크리트 28일 압축강도는 공시체 제작 1일 후 탈형하여 20°C, 습도 50%의 항온항습조건에서 기건양생 후 측정하였다.

한편 이 연구에서는 잔골재는 일반 모래로 강사를 사용하였으며, 굵은골재는 일반골재로서 강자갈을 그리고 경량골재는 인공경량골재를 적용하였다. 사용된 골재의 물리적 특성을 파악하여 콘크리트 배합설계의 기본 자료로 활용하기 위해 Table 8과 같은 시험을 수행하였으며, 그 결과를 Table 9에 나타내었다.

여기서 경량골재의 흡수율은 굳지 않은 콘크리트에서

Table 8 Physical test items of aggregate

Test item	Specification and method
Density	KS F 2533 method of test for particle density and water absorption of light weight coarse aggregate for structural concrete
Absorption	KS F 2533 method of test for particle density and water absorption of light weight coarse aggregate for structural concrete
Fineness	KS F 2502 standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates
Unit weight	KS F 255 methods of test for bulk density of aggregates and solid content in aggregates

Table 9 Physical properties of aggregates

Material \ Item	Density (ton/m ³)	Fineness	Absorption (%)	Unit weight (kg/m ³)
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

의 유동성과 경화콘크리트의 물성에 큰 영향을 미치게 되므로 이 연구에서는 입경별, 침수 시간별, 보관 시간별 흡수율을 측정하여 그 특성을 파악하고 실용적으로 일정한 흡수율을 유지할 수 있는 방안으로서 Fig. 4와 같이 100% 습도유지 보관방법을 통해 경량골재의 표면건조포화 상태를 Table 10에서의 골재 24시간 침수 후 100% 습도환경에서 2일 이상 보관한 흡수 상태로 정의하고 이후 경량골재의 표면건조포화상태에서의 밀도와 경량콘크리트의 배합설계 및 타설시 이를 적용하기로 한다. 즉, 경량골재의 흡수율은 20.19%, 표면건조포화상태 밀도는 1.898 kg/l를 적용한다.

Table 6 Physical and chemical properties of cement

Material \ Item	Chemical composition (%)							Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ignition loss	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)
Cement	20.7	5.2	3.0	62.4	4.7	2.4	1.36	3.15	3,450

Table 7 Mixture proportions of lightweight and normal weight concrete

Type \ Mixture	W/C	Gmax (mm)	Air content (%)	Unit weight (kg/m ³)				Volume (m ³)				Slump (mm)	28 days 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

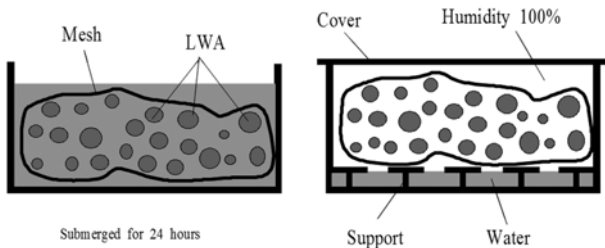


Fig. 4 Method for humidity holding of LWA

Table 10 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	20.77

3. 연구 결과

Fig. 5에서와 같이 전체적으로 시간에 따른 습도 변화는 두 가지 양상으로 변화하였다. 타설 시부터 약 7일 초기재령까지는 전단면이 거의 동일한 습도 변화를 나타내며, 이후 시간 경과에 따라 단면 깊이 별 상이한 습도 분포를 나타내었다. 이러한 7일 초기재령까지의 동일한 습도 변화는 물-결합재비가 낮을수록 뚜렷하게 나타났으며, 이후 시간 경과에 따른 단면 내 습도 분포 폭은 물-결합재비가 높을수록 크게 나타났다. 이를 기존 연구 결과와 비교하여 분석하면, 먼저 7일 초기재령에서의 단면 내 동일한 습도 감소는 시멘트 수화에 의한 자기건조 현상으로 설명된다. 즉, 자기건조 현상은 수분의 외부이동과는 관계없이 수분의 내부소모에 의해 발생하므로 전체 단면이 동일한 습도 감소량을 나타내게 된다. 또한 물-결합재비가 낮을수록 자기건조 현상이 크게 발생하므로 Fig. 5에 나타난 바와 같이 물-결합재비가 낮을수록 7일 초기재령까지의 습도 감소폭이 큰 것으로 판단할 수 있다. 한편 장기재령에서 물-결합재비가 높을수록 단면 내 습도 변화 폭이 큰 원인은 물-결합재비가 높아짐에 따라 유효수분확산계수가 증가하여 수분의 외부로의 이동이 커지기 때문으로 생각할 수 있다. 물론 물-결합재비가 증가하면 수분의 이동에 저항하는 수분용량이 동일 습도에 대해서 커지기 때문에 습도 변화 폭이 작아질 수 있지만, 시간 경과와 함께 습도가 감소함에 따라 물-결합재비에 따른 수분 용량의 차이가 감소하기 때문에 이후부터는 유효수분확산계수가 수분의 외부이동 속도에 지배적인 인자가 되는 것으로 판단된다.

한편 동일 물-결합재비에서 경량 콘크리트와 일반 콘크리트와의 습도 변화 비교는 모두 경량 콘크리트가 일반 콘크리트보다 초기재령, 장기재령 모두에서 작은 습도 감소를 나타내었다. 이는 동일 물-결합재비일 경우 자기건조에 의한 수분의 내부소모는 동일한 것으로 가정할 경우, 초기재령에서의 급속한 자기건조에 의한 수분의 내부 소모는 경량 골재 사전흡수수에 의한 수분 공급이 이

루어져 콘크리트 내부의 습도 저하를 감소시키며, 장기재령의 경우 경량 콘크리트의 유효수분확산계수가 일반 콘크리트보다 크므로 수분의 외부 이동 속도가 증가하지만, 경량 콘크리트의 수분 용량 증가로 인해 수분의 외부 이동 저항성이 커지고 경량 골재 사전흡수수의 지속적인 수분 공급으로 내부 습도 변화를 작게 유지시켜 주는 것으로 판단된다.

물-결합재비 0.3의 경우 NWC30의 습도 변화를 살펴 보면 재령 7일까지 습도가 0.94까지 급격하게 감소하며, 이후 깊이 20 mm에서는 습도 0.74까지 완만한 형태의 습도 감소 형태를 나타내지만, 깊이 20 mm 이하의 단면에서는 동일한 습도를 유지하는 양상을 나타내고 있다. 이는 재령 7일까지는 자기건조에 의한 수분의 급격한 내부소모가 이루어지며, 7일 이후부터는 표면을 통한 수분의 외부이동으로 인해 습도 감소가 이루어지는 것으로 생각할 수 있다. 이에 비해 LWC30의 경우 재령 7일까지 습도가 0.987까지 급격하게 감소하지만 NWC30의 0.94보다 0.047의 습도 증가를 나타내었으며, 이후 깊이 20 mm에서의 습도도 0.81로서 NWC30의 0.74보다 약 0.07의 증가를 나타내었다. 또한 NWC30의 경우 약 70~80일 사이에서 깊이 60 mm의 습도가 일정한 양상에서 완만하게 감소하는 형태를 나타냄으로서 수분의 외부 이동 시작이 이루어짐을 알 수 있지만, LWC30의 경우 깊이 20 mm를 제외한 단면에서는 습도가 감소하지 않고 오히려 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 물-결합재비 0.3의 경우 LWC30은 NWC30에 비해 유효수분확산계수가 증가하여 수분의 외부 이동 속도가 빨라질 수 있지만, 수분용량이 감소하고 경량골재의 사전흡수수로 인해 초기재령, 장기재령에서 모두 NWC30보다 습도 감소량, 습도 분포 폭이 모두 감소하는 것으로 판단된다.

물-결합재비 0.4의 경우 NWC40의 습도 변화를 살펴 보면 NWC30과 같은 초기재령에서의 급격한 습도 감소 현상은 발생하지 않았으며, 깊이 20 mm에서는 습도 0.74까지 완만한 기울기의 습도 변화를, 깊이 60 mm는 약 70~80일 사이에서 수분의 외부 이동이 시작되었으며, 이외의 단면은 자기건조에 의한 미소한 습도 감소만 있을 뿐 수분의 외부이동에 의한 습도 감소는 이루어지지 않았다. 이에 비해 LWC40은 NWC40보다 동일 깊이에서 모두 높은 습도를 나타내었으며, 이는 물-결합재비 0.3의 경우와 같이 경량콘크리트의 수분용량 증가, 경량 골재의 사전흡수수로 인한 결과로 생각된다.

물-결합재비 0.5의 경우 NWC50의 습도 변화를 살펴 보면, NWC40보다 초기재령에서의 습도 감소 현상은 발생하지 않았으며, 깊이 20 mm에서는 습도 0.69까지 완만한 기울기의 습도 변화를, 깊이 60 mm는 약 50~60일 사이에서 수분의 외부 이동이 시작되어 0.93까지의 습도 감소를 나타내었으며, 이외의 단면은 자기건조에 의해 매우 미소한 습도 감소만 있을 뿐 수분의 외부이동에 의한 습도 감소는 이루어지지 않았다. 이에 비해 LWC50은 NWC50보다 동일 깊이에서 모두 높은 습도를 나타내

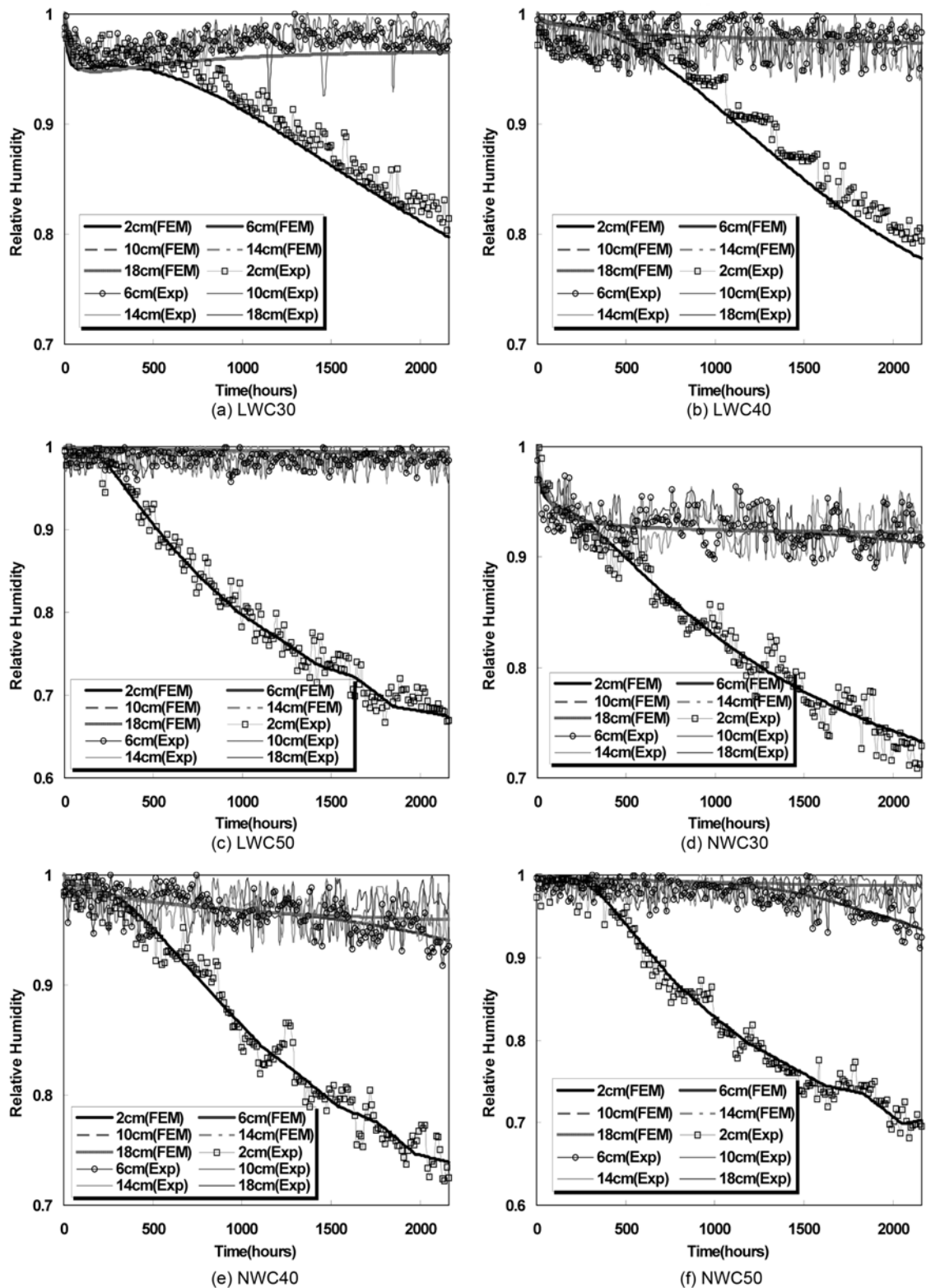


Fig. 5 Experiment and FEM analysis data for humidity

었으며, 이는 물-결합재비 0.3, 0.4의 경우와 같이 경량콘크리트의 수분용량 증가, 경량 골재의 사전흡수수로 인한 결과로 생각된다. 한편 물-결합재비 0.5는 깊이 20 mm에서의 습도공급효과가 물-결합재비 0.3에서의 0.07, 물-결합재비 0.4에서의 0.04보다는 다소 작지만, 경량 골재의 사전흡수수로 인해 단면의 습도 유지 효과는 유지되는 것으로 나타났다.

이상에서의 모형 부재를 이용한 콘크리트 내 습도 분포의 측정값과 해석값에 대해 정리하면 측정값과 해석값이 비교적 일치하는 경향을 나타내므로 앞 장에서 도출한 수분이동 관련 상수인 유효수분확산계수, 수분용량, 습도 공급도, 습도 소모도가 적절하게 산정되었으며, 이를 적용한 식 (1)의 지배방정식에 의한 수분 이동 모델이 타당한 것으로 판단된다. 시간에 따른 콘크리트 내

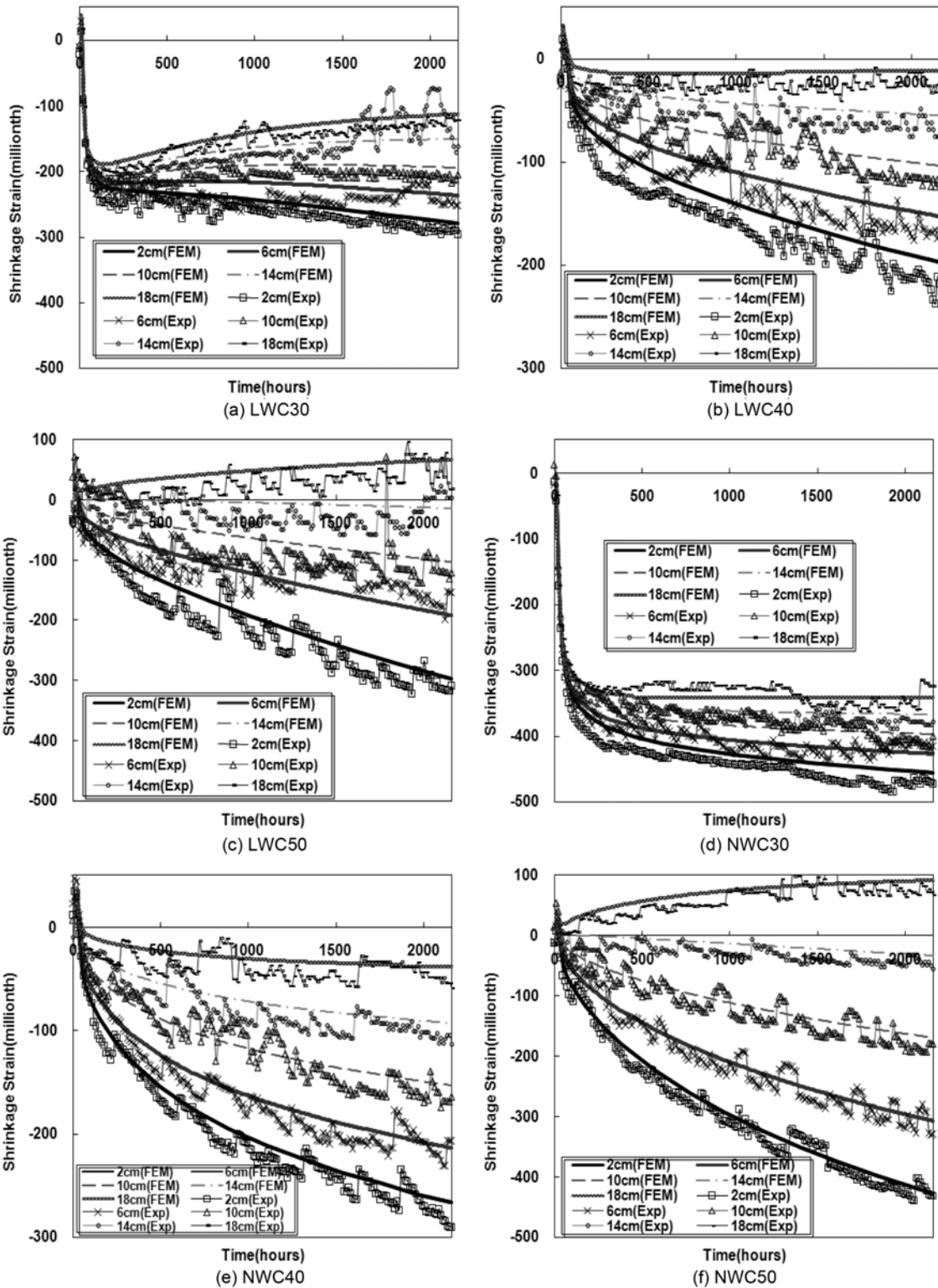


Fig. 6 Experiment and FEM analysis data for shrinkage strain

수분 분포는 물-결합재비가 낮은 0.3의 배합은 타설 시부터 7일 초기재령까지는 자기건조에 의한 수분의 내부 소모로서 단면 내 동일한 습도 감소량을 나타내며, 이후 장기재령으로 갈수록 수분의 외부이동에 의한 습도 감소에 의해 단면 깊이에 따라 표면에서 깊이 별로 상이한 분포 양상을 나타내었다. 물-결합재비 0.3과는 반대로 물-결합재비 0.4, 0.5의 배합은 초기재령에서의 자기건조 영향은 크지 않았으나 수분의 외부 이동에 의한 습도 감

소는 증가하는 것으로 나타났다. 동일 물-결합재비에서 경량 골재 사전흡수수에 의한 습도 공급 효과는 물-결합재비 0.3의 경우 초기, 장기 재령에서 모두 효과적으로 이루어졌으며, 물-결합재비 0.5의 경우 초기보다는 장기 재령에서 우수하게 나타났다. 한편 물-결합재비 0.4에서 경량 골재의 수분공급효과는 상대적으로 물-결합재비 0.3과 0.5보다 작게 나타났으며, 이에 대한 원인은 물-결합재비 0.4의 경우 자기건조 현상은 물-결합재비 0.3보다

현저하게 감소하여 수분의 내부소모도 감소할 뿐만 아니라, 물-결합재비 0.5보다 유효수분확산계수의 감소로 인해 수분의 외부 이동에 대한 저항성이 향상되었기 때문으로 판단된다.

다음으로 Fig. 7에서와 같이 시간에 따른 변형률은 전체적으로 세 가지 단계로 변화하였다. 타설 후 약 2~3일은 약 $20\sim30 \times 10^{-6}$ 의 인장 변형률을 나타내었고, 이 후 약 3~7일 동안은 단면 내 균일한 수축 변형률을, 그리고 장기재령으로 경과하면서 단면 내 부등 수축 변형률이 증가하는 경향을 나타내었다. 이에 대한 원인은 타설 초기 인장 변형률의 경우 수화열에 의한 팽창, 3~7일 초기 재령에서의 단면 등수축은 자기건조에 의한 자기수축, 이후 장기재령에서의 단면 부등수축은 수분의 외부 이동인 것으로 판단된다.

먼저 물-결합재비 0.3 중 NWC30의 변형률 추이를 살펴보면, 타설 시부터 약 7일 재령까지 급격한 단면 등수축 변형률 339×10^{-6} 을 보이며, 이후 재령 90일에서는 단면 평균 변형률 396×10^{-6} , 변형률 분포 폭 125×10^{-6} 을 나타내었다. 이에 대해 LWC30의 경우 재령 7일까지 등수축 등수축 변형률 207×10^{-6} 을, 이후 재령90일에서는 단면 평균 변형률 193×10^{-6} , 변형률 분포 폭 177×10^{-6} 을 나타내었다. 즉 LWC30은 7일 초기재령에서의 수축 저감률은 39%, 재령 90일에서의 수축저감률은 51%를 나타내지만, 변형률 분포 폭은 42%의 증가를 보였다. 이와 같이 변형률 분포 폭이 커진 원인은 경량 골재 사전흡수수가 다소 과도하게 포함되어 그림 7와 같이 단면 내

부에서 습도가 감소하지 않고 오히려 증가에 의해 인장 변형률이 발생했기 때문으로 판단된다. 그러므로 LWC30의 경우 NWC30에 비해 초기, 장기 재령에서의 수축 저감으로 외부 구속에 의한 응력은 감소될 수 있지만, 장기 재령에서 변형률 분포 폭, 즉 부등 수축이 커짐으로서 내부 구속에 의한 응력 증가를 야기할 수 있는 가능성을 지니게 된다. 따라서 LWC30 장기 재령에서의 변형률 분포 폭을 감소하기 위해서는 이 연구에서 사용한 흡수율 20%보다 낮은 흡수율을 갖는 경량 골재를 사용하는 방안과 이 연구에서 적용한 표면건조포화상태의 흡수수보다 낮은 흡수수를 이용해야 할 것으로 생각된다.

다음으로 물-결합재비 0.4 중 NWC40의 변형률 추이를 살펴보면, 타설 시부터 약 7일 재령까지의 초기재령에서는 NWC30보다 완만한 형태의 변형률을 나타내었으며 이후 장기재령으로 갈수록 NWC30보다 급격한 기울기의 변형률 진행 양상을 나타내었다. 7일 초기재령에서의 단면 평균 변형률은 51×10^{-6} , 변형률 분포 폭 86×10^{-6} 을 보였으며, 이후 재령 90일에서는 단면 평균 변형률 154×10^{-6} , 변형률 분포 폭 237×10^{-6} 을 나타내었다. 이에 대해 LWC40의 경우 재령 7일까지 단면 평균 변형률 39×10^{-6} , 변형률 분포 폭 61×10^{-6} 을 나타내었고, 이후 재령90일에서는 단면 평균 변형률 105×10^{-6} , 변형률 분포 폭 193×10^{-6} 을 나타내었다. 즉 LWC40은 7일 초기재령에서의 수축 저감률은 24%, 변형률 분포 폭 감소율은 29%, 재령 90일에서의 수축 저감률은 32%, 변형률 분포 폭 감소율은 19%를 나타내었다. 따라서 물-결합재비 0.4에서는 LWC40

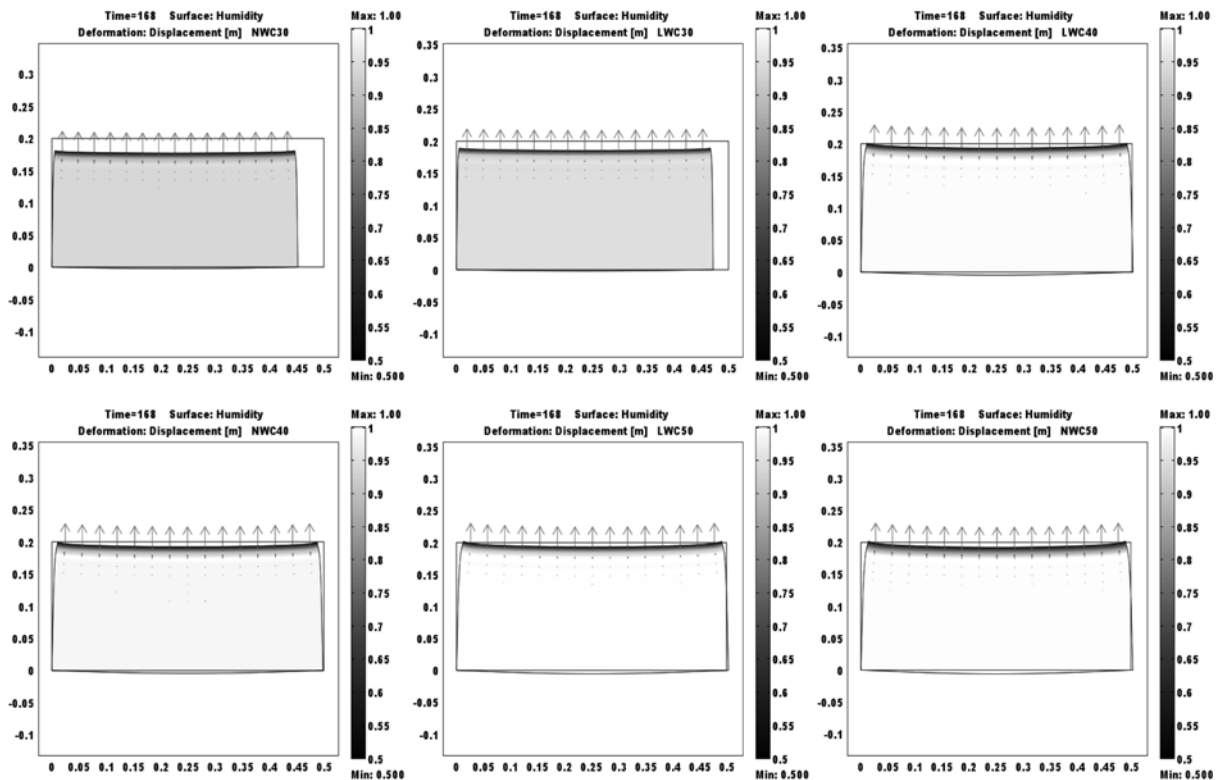


Fig. 7 Humidity distribution shape by FEM analysis (7 days)

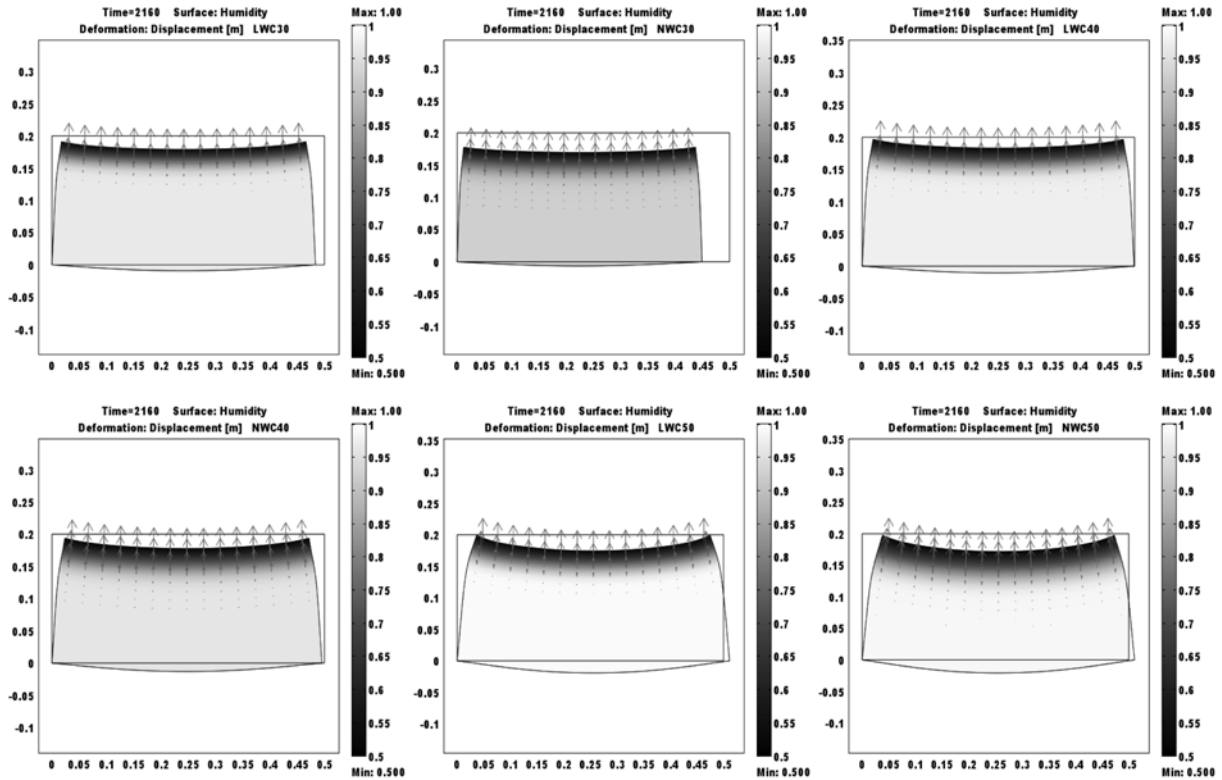


Fig. 8 Humidity distribution shape by FEM analysis (90 days)

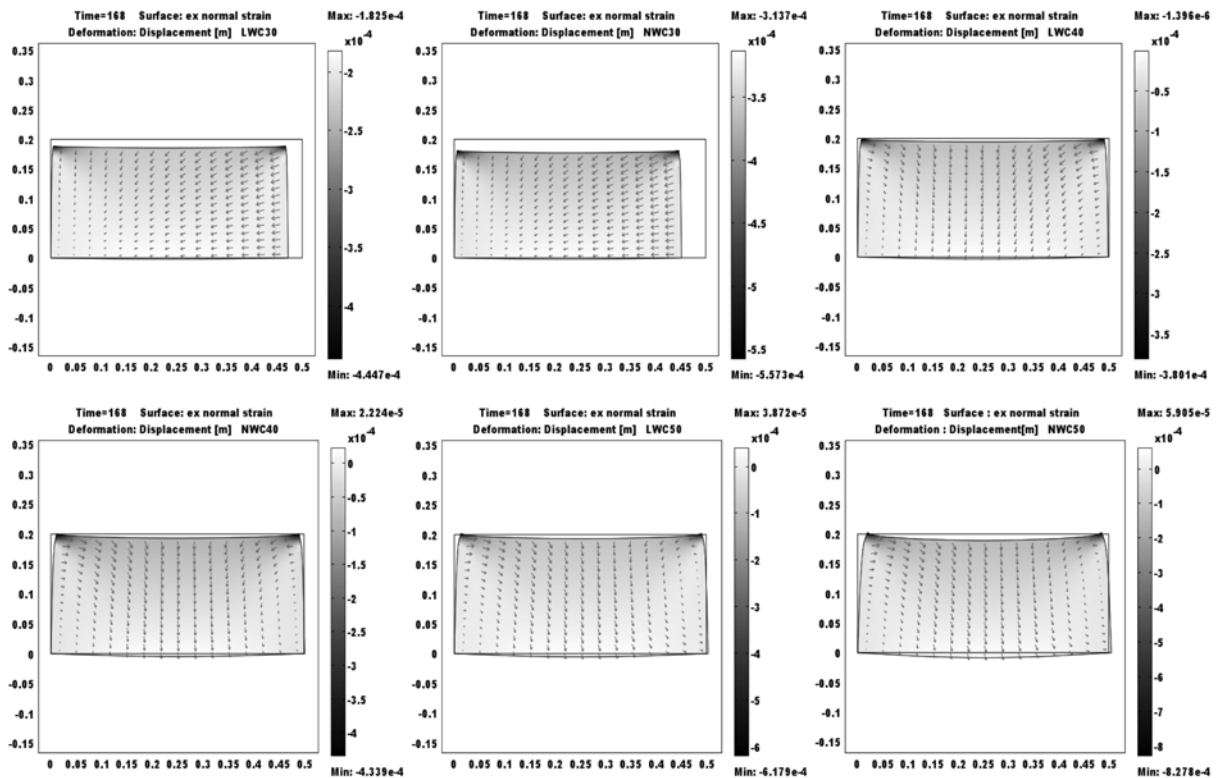


Fig. 9 Shrinkage strain distribution shape by FEM analysis (7 days)

이 NWC40에 비해 재령에 상관없이 구조물의 내적, 외적 구속에 의한 응력 감소에 모두 효과적일 것으로 판단된다.

마지막으로 물-결합재비 0.5 중 NWC50의 변형을 추이를 살펴보면, 초기재령에서는 NWC30보다는 완만한 기울기로, 이후 장기재령에서는 급격한 기울기의 변형을 진

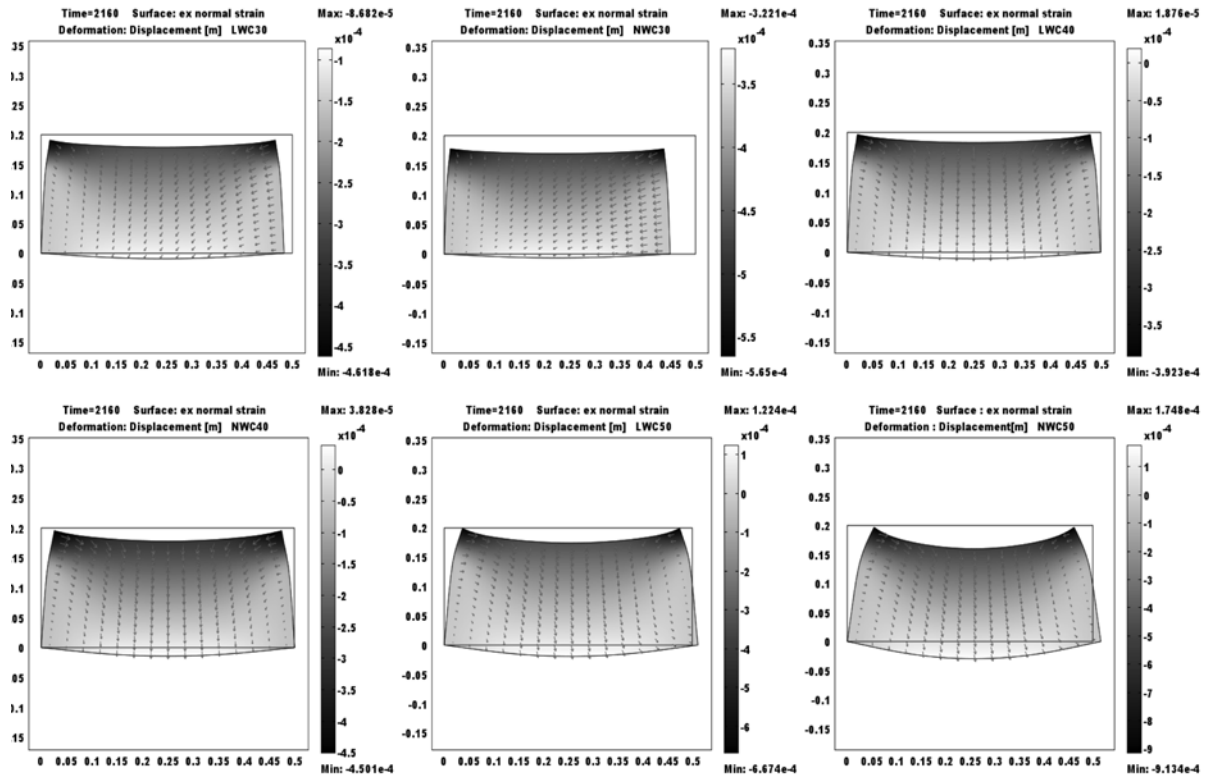


Fig. 10 Shrinkage strain distribution shape by FEM analysis (90 days)

행을 나타내었으며, 전체재령에서 NWC40보다 급격한 기울기의 변형을 진행 양상을 나타내었다. 7일 초기재령에서의 단면 평균 변형률은 44×10^{-6} , 변형률 분포 폭 146×10^{-6} 을 보였으며, 이후 재령 90일에서는 단면 평균 변형률 168×10^{-6} , 변형률 분포 폭 519×10^{-6} 을 나타내었다. 이에 대해 LWC50의 경우 재령 7일까지 단면 평균 변형률 26×10^{-6} , 변형률 분포 폭 100×10^{-6} 을 나타내었고, 이후 재령90일에서는 단면 평균 변형률 100×10^{-6} , 변형률 분포 폭 349×10^{-6} 을 나타내었다. 즉 LWC50은 7일 초기재령에서의 수축 저감률은 41%, 변형률 분포 폭 감소율은 32%, 재령 90일에서의 수축 저감률은 38%, 변형률 분포 폭 감소율은 33%를 나타내었다. 따라서 물-결합재비 0.5에서는 LWC50이 NWC50에 비해 재령에 상관없이 구조물의 내적, 외적 구축에 의한 응력 감소에 모두 효과적일 것으로 판단된다.

4. 결 론

일반콘크리트 및 경량콘크리트의 수분이동, 열전달, 변형률의 다중물리모델의 해석과 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 동일 물-결합재비에서 경량 콘크리트와 일반 콘크리트와의 습도 변화 비교는 모두 경량 콘크리트가 일반 콘크리트보다 초기재령, 장기재령 모두에서 작은 습도 감소를 나타내어 경량 골재 사전흡수수에 의한 수분 공급이 효과적으로 이루어진 것으로 판단된다.

- 2) 경량 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 수축변형률 크기 및 분포 모두 감소하였으며, 물-시멘트비 0.3에서는 초기재령에서 물-시멘트 0.5에서는 초기재령, 장기재령 모두에서 효과적인 것으로 나타났다.
- 3) 수분이동 및 변형률 해석값과 모형실험을 통해 일련된 연구에서 도출한 수분이동 특성값과 수분, 습도 관련식은 적합한 것으로 판단되며, 향후 경량콘크리트의 부등수축해석에 적절히 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Mindess, S., Young, J. F., and Darwin, D., *Concrete*, Prentice-Hall Inc., 2003, pp. 182~190.
2. 이철성, “콘크리트의 수분확산과 부등건조수축에 관한 연구,” 박사학위논문, 한국과학기술원, 1998, pp. 55~61.
3. 이창수, 최상현, 박종혁, 김영욱, “인공경량골재 콘크리트의 수분이동 특성에 관한 연구,” 대한토목학회 논문집, 29권, 4A호, 2009, pp. 373~384.
4. Schindler, A. K., “Concrete Hydration, Temperature Development and Setting at Early-Age,” Ph.D Thesis, The University of Texas at Austin, 2002, pp. 112~113.
5. 이창수, 박종혁, 정봉조, 최영준, “물-시멘트비에 따른 경량콘크리트 및 일반콘크리트의 수축과 습도와의 관계,” 대한토목학회 논문집, 29권, 4A호, 2009, pp. 385~393.
6. Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L., *The Finite Element Method*, McGraw Hill, 2000, pp. 260~262.
7. ACI Committee 213, *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*, ACI 213R-03, American Concrete

- Institute, 2003, pp. 26~27.
8. CEB-FIP, *CEB-FIP Model Code 90 for Concrete Structures*, Comite Euro-International du Beton, Lausanne, 1990, 35 pp.
9. Neville, A. M., *Properties of Concrete*, John Wiley & Sons Inc., 4th Ed., 1998, pp. 265~268.
10. ACI Committee 211, *Recommended Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete*, ACI 211.2-98, American Concrete Institute, 2004, pp. 26~28.

요 약 경량골재 사전흡수에 의한 콘크리트 내 수분이동 변화와 수축 저감 효과를 파악하기 위하여 일반콘크리트 및 경량콘크리트의 수분이동, 열전달, 변형률의 다중물리모델의 해석과 실험을 수행하였다. 그 결과 동일 물-결합재비일 경우 경량 콘크리트와 일반 콘크리트와의 습도 변화 비교는 모두 경량 콘크리트가 일반 콘크리트보다 초기재령, 장기재령 모두에서 작은 습도 감소를 나타내어 경량 골재 사전흡수수에 의한 수분 공급이 효과적으로 이루어진 것으로 판단된다. 이에 따라 경량 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 수축변형률 크기 및 분포 모두 감소하였으며, 수축저감효과는 물-시멘트비 0.3에서는 초기재령에서, 물-시멘트비 0.5에서는 초기재령, 장기재령 모두에서 효과적인 것으로 나타났다. 수분이동 및 변형률 해석과 모형실험을 통해 일련된 연구에서 도출한 수분이동 특성값과 습도, 수축 관련식은 적합한 것으로 판단되며, 향후 경량콘크리트의 부등수축해석에 적절히 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

핵심용어 : 경량콘크리트, 일반콘크리트, 수분이동, 수축, 다중물리