

물-시멘트비에 따른 경량콘크리트 및 일반콘크리트의 수축과 습도와의 관계

Relation Between Shrinkage and Humidity on Lightweight Concrete and Normal Concrete by Water-Cement Ratio

이창수* · 박종혁** · 정봉조*** · 최영준****

Lee, Chang Soo · Park, Jong Hyok · Jung, Bong Jo · Choi, Young Jun

Abstract

This study grasped the relationship between relative humidity in concrete and concrete shrinkage followed by pre-absorbed water of porous lightweight aggregates through measurements of concrete shrinkage and humidity and comparisons with established research results. It was showed that shrinkage reduction effect of lightweight concrete is 36% at 7 days early ages and 25% at 180 days long-term ages when water-binder ratio is 0.3. It also showed that shrinkage reduction effect is 19% at 7 days and 16% at 180 days when water-binder ratio is 0.4 and 37%, 32% when water-binder ratio is 0.5. The moisture supply effect of lightweight aggregates was remarkable at early age within 7~10 days irrespective of water-binder ratio. In case of water-binder ratio is 0.3, the relationship between shrinkage and internal humidity of concrete has been underestimated regardless of applied existing model type and in case of water-binder ratio is 0.4, 0.5, measurement values are relatively similar with existing model equations. Finally this study did regression analyses about the relation among the humidity change and the shrinkage strain as a high-degree polynomial and derived parameters that can connect moisture movement analysis with differential shrinkage analysis in case of considering relative humidity at the time by moisture movement analysis of concrete.

Keywords : lightweight concrete, normal concrete, shrinkage, humidity, water-cement ratio

요 지

콘크리트 수축과 습도를 측정하고 기존 연구 결과와의 비교를 통해 다공성 경량골재의 사전흡수수에 따른 콘크리트의 수축과 콘크리트 내 상대습도와의 관계를 파악하였다. 물-결합재비 0.3에서 경량 콘크리트의 수축 저감효과는 7일 초기재령에서 36%, 6개월 장기재령에서 25%를 나타내었으며, 물-결합재비 0.4는 7일 초기재령에서 19%, 6개월 장기재령에서 16%의 수축 저감률을 그리고 물-결합재비 0.5에서는 각각 37%, 32%를 나타내었다. 물-결합재비에 관계없이 경량골재 사전흡수수의 습도 공급 효과는 7~10일 이내의 초기 재령에서 두드러지게 나타났다. 콘크리트 내 습도와 수축과의 관계는 물-결합재비 0.3의 경우 기존 모델식 적용 종류에 상관없이 습도 변화 전체 구간에 대하여 수축이 과소평가되었으며, 물-결합재비 0.4, 0.5의 경우 비교적 기존 모델식과 측정값이 유사한 경향을 나타내었다. 습도감소와 수축 변형률간의 관계를 고차 다항식으로 회귀분석할 수 있었으며, 콘크리트의 수분이동 해석을 통해 시간에 따른 상대습도를 고려할 경우 수분이동 해석과 부등수축 해석을 연관할 수 있는 매개변수로 적용할 수 있는 결과를 도출하였다.

핵심용어 : 경량콘크리트, 일반콘크리트, 수축, 습도, 물-시멘트비

1. 서 론

교량 구조부재 중 제빙 화학제, 대기 중 이산화탄소 등 철근 부식에 의한 내구성능 저하가 가장 극심한 부재인 콘크리트 바닥판의 경우 내구성 저하 속도를 가속하는 원인으로서는 실리카흙, 높은 단위시멘트량 등 의 고성능 콘크리트 적용과 이에 따른 수축 증가와 균열 발생으로 보고되고 있

다(Whiting 등, 1998; Ala 등, 2002; Haluk 등, 2003; Xi 등, 2003; Will 등, 2005). 이러한 내구성 저하의 원인으로서는 수축과 균열 제어는 다음과 같이 두 가지 측면에서 논의 될 수 있다. 먼저, 재료적 측면에서 콘크리트의 수축 변형을 저감하는 방안으로서 글리콜-에테르 계열의 수축저감제를 이용하여 배합수의 표면장력을 낮추는 방법과 경량골재, 고흡수성수지 등의 흡수율이 큰 재료를 사용하여 지속적인 수화

*정회원 · 교신저자 · 서울시립대학교 토목공학과 교수 (E-mail : csll@uos.ac.kr)

**정회원 · 서울시립대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : mgibson@uos.ac.kr)

***서울시립대학교 토목공학과 박사과정

****서울시립대학교 토목공학과 석사과정

잉여수를 공급하는 내부 양생방법 등이 제시되고 있다 (Weiss, 2002; Ribeiro, 2006; Jensen, 2006; Lura, 2006). 다음으로 콘크리트 내 수분이동 및 부등수축 해석에 의한 콘크리트의 외적, 내적구속을 모두 고려하여 단면 고유응력을 산출하고 이에 적합한 부재 두께 설정, 철근 배근, 줄눈 간격 조정 등을 통해 발생하는 인장응력을 제어하는 방안으로 나눌 수 있다(이철성, 1998; 곽효경 등, 2004). 즉, 콘크리트 수축에 따른 균열을 최소화하기 위해서는 재료적 측면에서 콘크리트의 수축 저감이 요구되며, 해석적 측면에서 콘크리트 수분이동, 부등수축의 다중물리 현상에 대한 응력 예측이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 수축 저감 방안 중 콘크리트의 경량화와 수축 저감 효과의 복합적인 장점을 지닌 경량골재 콘크리트의 사전흡수수에 의한 수분 분포 변화와 수축 특성을 파악해보고자 하며, 수분이동 및 부등수축 해석의 두 가지 물리 현상에 연관성을 부여하는 매개변수에 대해 기존 연구와의 비교를 통해 분석해보고자 한다.

2. 연구방법

2.1 콘크리트 내 수분 분포와 수축과의 연관성

콘크리트 단면 내 수분분포에 따른 수축 현상을 묘사하기 위해서는 식 (1), 식 (2)와 같이 습도 h 를 미지수로 하는 수분이동 지배방정식과 변위 u 를 미지수로 하는 Navier 방정식으로 구성되는 편미분방정식을 해석해야 한다.

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

$$\text{div}[c_e \cdot \text{grad } u + f(h)] = K \quad (2)$$

여기서, C : 수분용량

D_e : 수분확산계수

c_e : 탄성계수와 포아송비를 고려한 매트릭스 상수

K : 체적력

이와 같이 수분이동, 수축 변형률의 독립된 다중물리 현상을 연관하기 위해서는 콘크리트 내 수분량과 수축과의 관계를 정의해야 하며 기존 연구의 경우 식 (3) 또는 식 (4)와 같이 나타내고 있다(Bazant 등, 1982, 1995).

$$\epsilon_{sh} = f(h) = \alpha_{sh}(1-h) \quad (3)$$

$$\epsilon_{sh} = f(h) = \alpha_{sh}(1-h^3) \quad (4)$$

여기서, ϵ_{sh} : 콘크리트 수축변형률

α_{sh} : 습도수축계수

식 (3), 식 (4)의 특징은 콘크리트의 수축변형률은 최종수축변형률의 의미를 갖는 습도수축계수에 콘크리트 습도감소량을 곱하여 산정되며, 콘크리트의 수축변형률은 습도감소량과 직선 혹은 직선에 가까운 비례관계를 나타내고 있다. 그러나 최근 물-결합재비가 낮은 고성능 콘크리트의 경우 수분의 외부이동보다는 수분의 내부소모에 의한 자기수축이 전체 수축의 지배적 인자로서 작용하며, 이러한 경우 수축변형률과 습도감소량의 관계는 콘크리트 종류에 따라 그림 1과 같이 상이한 양상을 나타내므로 식 (3), 식 (4)와 같은 형태

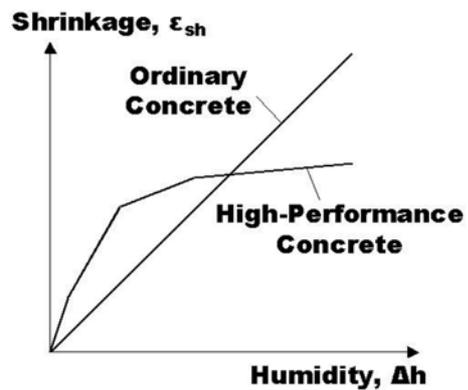


그림 1. 콘크리트 수축변형률과 습도와와의 관계

로서 나타낼 수 없는 것으로 판단할 수 있다(Lura, 2003; Zachary 등, 2006; 이창수 등, 2008).

본 연구에서는 식 (1)과 식 (2)의 매개변수 역할을 하는 식 (3), 식 (4)의 적정성을 파악하기 위해 다양한 물-결합재 비에서 수축과 수분과의 관계 측정과 기존 모델과의 비교를 수행하고자 하였다. 여기서 기존 모델의 적용은 식 (3), 식 (4)를 적용하기 위해 요구되는 습도수축계수, 즉 최종수축변형률의 산정에 이용하였으며, 각각 자기수축을 고려하지 않은 KCI 모델, 건조수축과 자기수축을 분리하여 고려한 CEB-FIP 모델, 그리고 자기수축만을 고려한 Tazawa 모델을 선정하였다(한국콘크리트학회, 2007; CEB-FIP, 1990; Tazawa, 1993). 또한 일반골재 콘크리트와 사전흡수한 경량골재 콘크리트에서의 수분 변화량과 수축과의 관계 차이점을 파악하고 향후 수분이동 및 부등수축 해석의 매개변수 자료를 제공하며, 다양한 물-결합재비에서 경량골재 콘크리트의 수축 저감 효과에 대하여 논의하고자 한다.

2.2 콘크리트 수분 분포 및 수축 실험방법

다양한 물-결합재비, 일반골재와 경량골재를 변수로 하여 콘크리트 내부의 습도와 변형률의 관계를 파악하기 위하여 그림 2, 그림 3과 같은 실험방법을 구성하였다. 100×



그림 2. 습도 및 변형률 측정 시험체

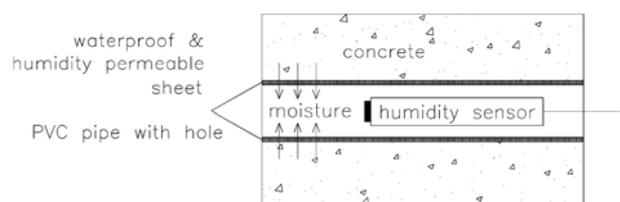


그림 3. 습도 측정 장치 모식도

표 1. 시멘트의 물리, 화학적 특성

재료	항목	화학적 조성 (%)						물리특성		
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ignition loss	비중	Blaine (cm ² /g)
시멘트		20.7	5.2	3.0	62.4	4.7	2.4	1.36	3.15	3,450

표 2. 경량콘크리트 및 일반콘크리트 배합

종류	배합	W/C	Gmax (mm)	공기량 (%)	단위량 (kg/m ³)				용적 (m ³)				슬럼프 (mm)	28일 압축강도 (MPa)
					W	C	S	G	W	C	S	G		
경량 콘크리트	LWC30	0.3	190	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
일반 콘크리트	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	

100×400 mm공시체에 습도측정 센서, 변형률 게이지를 매입한 후 20°C, 습도 50%가 유지되는 항온항습 조건에서 6개월까지의 시간에 따른 습도와 변형률을 측정하였다. 여기서 습도 측정은 그림 2와 같이 방수투습 소재를 이용하여 타설 초기에서의 센서를 배합수로부터 보호함으로써 측정의 정밀도를 향상하였다. 본 연구에서 적용된 시편은 6면이 모두 수분 방출면이므로 단면 내에서의 습도는 평균 습도로서 단면의 대표성을 지니는 것으로 가정하였다.

적용된 물-결합재비 조건은 CSH겔 내 존재 가능한 수분의 형태와 겔공극 내에 포화조건을 만족하지 못하는 경우와 포화조건을 임계치, 그리고 수화잉여수의 존재로 포화조건을 만족시킬 수 있는 물-결합재비로서 0.3, 0.4, 0.5를 선정하고 각각의 물-결합재비에서 수분과 수축과의 관계, 경량골재의 사전흡수수에 의한 콘크리트의 수축저감효과를 파악하고자 한다(Nevile, 1998). 또한 물-결합재비, 골재종류 이외의 변수가 수분-수축 관계 및 수축저감효과에 미치는 영향을 배제하기 위하여 모든 배합에서 시멘트 페이스트와 골재 부피비율은 일정하게 유지하는 조건으로 표 2와 같은 실험배합을 설정하였다. 콘크리트 슬럼프는 고흡분 40%의 고성능감수제를 결합재 질량 대비 0.6~0.8% 범위 내에서 사용하여 목표

값 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 강자갈을 그리고 경량골재는 인공경량골재를 적용하였다. 사용된 골재의 물리적 특성은 표 3과 같은 시험을 수행하였으며, 그 결과를 표 4에 나타내었다.

3. 실험결과

시간에 따른 콘크리트의 수축 변형률, 습도 변화를 6개월간 측정하고 수축변형률과 습도 변화와의 관계를 각각 그림 6, 그림 7에 나타내었다. 먼저 시간에 따른 콘크리트 수축 변형률을 살펴보면 물-결합재비가 낮을수록 초기재령에서 급격하게 증가한 후 이후 완만한 형태의 수축 증가를 나타내었으며, 물-결합재비가 높을수록 시간에 따라 일정한 속도의 수축 변형률 증가 경향을 나타내었다. 또한 동일 물-결합재비인 경우 일반골재 콘크리트보다 경량골재 콘크리트의 수축 변형률이 현저하게 감소하는 결과를 나타내었다. 시간에 따른 콘크리트의 수축 변형률을 보다 자세히 분석하기 위해 물-결합재비 별 수축변형률과 콘크리트 구조설계기준(KCI), CEB FIP MC90, 그리고 Tazawa 모델에 따른 예측값을 그림 4에 나타내었다. 먼저 6개월 경과 후 수축 변형률은 물-결합재비 0.3의 경우 LWC30은 344×10^{-6} , NWC30은 458×10^{-6} 의 값을 보이며 약 25%의 수축 변형률 감소를 나타내었다. 수축 변형률 발현 경향은 6개월 수축 변형률의 58%, 68%가 7일 시점에서 나타났으며 이러한 초기재령에서의 수축 저감률은 약 36%로서 경량골재의 사전흡수수는 물-결합재비가 낮은 콘크리트 배합의 초기재령 수축저감에 더욱 효과적인 것으로 생각할 수 있다. 한편 기존 모델과의 비교에서 NWC30은 Tazawa 모델과 가장 유사한 경향을 나타냈으며 이외의 모델과는 큰 차이를 보였다. 이에 대한 원인은 물-결합재비가 0.3과 같이 낮은 경우 자기수축에 의한 수축 변형이 매우 지배적이지만, KCI 모델의 경우 이를 반

표 3. 골재의 물리적 특성 시험 항목

시험 내용	기준 및 방법
밀도	KS F 2533 구조용 경량 굵은 골재의 밀도 및 흡수율 시험 방법
흡수율	
조립률	KSF 2502 굵은골재 및 잔골재의 체가름 시험방법
단위용적질량	KSF 255 골재의 단위용적질량 및 실적률 시험방법

표 4. 골재의 물리적 특성

재료	항목	밀도 (ton/m ³)	조립률	흡수율 (%)	단위용적질량 (kg/m ³)
잔골재(강모래)		2.65	2.71	1.90	1,420
		2.75	6.78	0.72	1,415
굵은골재(경량골재)		1.58 (건조)	6.24	20.19	910
		1.90 (표건)			

영하지 않기 때문에 수축의 과소평가가 이루어졌으며, CEB 모델의 경우 자기수축의 가장 큰 영향인자가 물-결합재비임에도 불구하고 강도만의 함수로 표현되므로 이를 반영하지 못하여 자기수축이 과소평가되고 이로 인해 초기재령에서 전체적인 수축이 과소평가 되는 것으로 판단된다. 따라서 KCI 모델의 경우 물-결합재비가 낮은 콘크리트에 대한 자기수축의 추가적인 반영이 요구되며, CEB 모델의 경우 물-결합재비를 고려한 자기수축 예측 모델의 보완이 필요할 것으로 생각된다. 그림 6의 물-결합재비 0.4의 수축 변형률은 LWC40은 295×10^{-6} , NWC40은 350×10^{-6} 의 값을 보이며 약 16%의 수축 변형률 감소를 나타내었다. 7일 초기재령에서의 수축 변형률은 LWC40은 60×10^{-6} , NWC40은 74×10^{-6} 로서 약 19%의 수축저감률을 나타내며 물-결합재비 0.3에 비해 작은 값을 보이고 있다. 이는 자기수축의 영향이 작아졌기 때문으로 생각되며 이로 인해 기존 KCI 모델값과 가장 유사한 경향을 나타내고 있다. 한편 그림 6의 물-결합재비 0.5의 수축 변형률은 LWC50은 475×10^{-6} , NWC50은 702×10^{-6} 의 값을 보이며 약 32%의 수축 변형률 감소를 나타내었다. 7일 초기재령에서의 수축 변형률은 LWC50은 56×10^{-6} , NWC50은 90×10^{-6} 로서 약 37%의 수축저감률을 나타내며 물-결합재비 0.3에 비해 작은 값을, 물-결합재비 0.4와는 유사한 값을 보이고 있다. 이는 물-결합재비 0.4이상에서는 자기수축의 영향이 작아졌기 때문으로 생각된다. 기존 모델과의 비교에서는 KCI, CEB 모델값 약 40일 까지는 유사한 경향을 나타내고 있지만 이후 재령에서는 측정값이 모델값에 비하여 상당히 큰 값을 나타내고 있다. 이는 본 연구에서 설정한 물-결합재비 0.5의 배합에서 사용된 배합수가 일반적으로 사용되는 범위인 $170 \sim 185 \text{ kg/m}^3$ 를 크게 상회하는 208 kg/m^3 이 적용되어 페이스트의 체적이 증가되었기 때문으로 생각된다.

이상에서의 시간에 따른 콘크리트의 수축 변형률 측정 결과를 정리하면, 물-결합재비 0.3에서 경량 콘크리트의 수축저감효과는 7일 초기재령에서 36%, 6개월 장기재령에서 25%를 나타내었다. 물-결합재비 0.4는 7일 초기재령에서 19%, 6개월 장기재령에서 16%의 수축저감률을 그리고 물-결합재비 0.5에서는 각각 37%, 32%를 나타내었다. 즉, 경량골재의 사전흡수수에 의한 수축저감 효과는 물-결합재비가 0.3일 경우에 초기재령에서 매우 효과적이며, 물-결합재비가 0.4이상일 경우에는 재령에 대해 일정한 수축저감효과를 나타내는 것으로 판단된다.

그림 7은 시간에 따른 콘크리트 내부 상대습도 변화를 나타내고 있으며 6개월간 약 0.55~0.67의 값을 나타내었으며 전체적으로 물-결합재비가 낮을수록 초기재령에서 큰 습도변화를 그리고 장기재령에서는 물-결합재비가 높을수록 큰 습도변화를 나타내었다. 또한 동일 물-결합재비일 경우 경량 콘크리트가 일반 콘크리트 보다 작은 습도변화를 나타내었다. 먼저 물-결합재비 0.3의 경우 LWC30은 0.67, NWC30은 0.63까지 습도 변화를 나타내었으며 7일 초기재령에서는 0.93, 0.91을 나타내었다. 습도 감소로는 LWC30은 6개월에 0.33, 7일에 0.07로 나타나 7일 초기재령에서 전체의 21%가 감소하였으며 NWC30의 경우 6개월에 0.37, 7일에 0.09로 나타나 7일 초기재령에서 전체의 24%가 감소하였다. 습도

공급 효과는 7일 재령에서 0.91에서 0.02가 증가한 0.93으로 나타나 22%의 상승 효과를 보였으며, 6개월에서는 0.63에서 0.04 증가한 0.67로 나타나 약 11%의 상승 효과를 보였다. 즉 물-결합재비 0.3에서 경량골재 사전흡수수의 습도 공급 효과는 초기 재령에서 두드러지게 나타났다.

다음으로 물-결합재비 0.4의 경우 LWC40은 0.63, NWC40은 0.60까지 습도 변화를 나타내었으며 7일 초기재령에서는 0.97, 0.96을 나타내었다. 습도 감소로는 LWC40은 6개월에 0.37, 7일에 0.03로 나타나 7일 초기재령에서 전체의 10%가 감소하였으며 NWC40의 경우 6개월에 0.40, 7일에 0.04로 나타나 7일 초기재령에서 전체의 10%가 감소하였다. 습도 공급 효과는 7일 재령에서 0.96에서 0.01가 증가한 0.97으로 나타나 25%의 상승 효과를 보였으며, 6개월에서는 0.60에서 0.03 증가한 0.63로 나타나 약 8%의 상승 효과를 보였다. 즉 물-결합재비 0.4에서도 경량골재 사전흡수수의 습도 공급 효과는 초기 재령에서 두드러지게 나타났다. 그러나 물-결합재비 0.3과 비교하여 7일 초기재령에서의 습도 감소량이 일반 콘크리트의 경우 0.09와 0.04이므로 물-결합재비 0.4의 경우 자기건조에 의한 습도 감소가 현저하게 감소한 것으로 생각할 수 있다. 따라서 이에 따른 수축 변형률의 감소도 물-결합재비 0.3인 경우 36%로 크게 나타났지만 물-결합재비 0.4인 경우 19%로 상대적으로 작은 값을 나타냈다. 즉 물-결합재비 0.4인 경우 7일 재령에서 습도 감소 효과는 25%로 물-결합재비 0.3의 21%보다 크지만 절대적인 습도 감소의 크기가 0.09에서 0.04로 작아지므로 수축 변형률에 미치는 영향은 작게 나타나는 것으로 판단된다.

마지막으로 물-결합재비 0.5의 경우 LWC50은 0.61, NWC50은 0.55까지 습도 변화를 나타내었으며 7일 초기재령에서는 0.97, 0.94을 나타내었다. 습도 감소로는 LWC50은 6개월에 0.39, 7일에 0.03로 나타나 7일 초기재령에서 전체의 8%가 감소하였으며 NWC50의 경우 6개월에 0.45, 7일에 0.06으로 나타나 7일 초기재령에서 전체의 13%가 감소하였다. 습도 공급 효과는 7일 재령에서 0.94에서 0.03이 증가한 0.97으로 나타나 50%의 상승 효과를 보였으며, 6개월에서는 0.61에서 0.06 증가한 0.61로 나타나 약 13%의 상승 효과를 보였다. 즉 물-결합재비 0.5에서도 경량골재 사전흡수수의 습도 공급 효과는 초기 재령에서 두드러지게 나타났다. 물-결합재비 0.3과의 비교에서도 7일 초기재령에서의 습도 감소량이 일반 콘크리트의 경우 0.09와 0.06이므로 물-결합재비 0.4의 경우 0.04보다는 차이가 줄어들었다. 이에 대해 수축과의 관계를 살펴보면 7일 초기재령에서 물-결합재비 0.3의 경우 습도 0.09 감소에 대해 수축 변형률은 111×10^{-6} 이 감소했으며, 물-결합재비 0.4의 경우 습도 감소 0.01에 대해 14×10^{-6} , 물-결합재비 0.5의 경우 습도 감소 0.06에 대해 34×10^{-6} 의 수축 변형률 감소를 나타내었다. 6개월 장기재령에서는 물-결합재비 0.3의 경우 습도 0.09 감소에 대해 수축 변형률은 114×10^{-6} 이 감소했으며, 물-결합재비 0.4의 경우 습도 감소 0.01에 대해 55×10^{-6} , 물-결합재비 0.5의 경우 습도 0.06에 대해 227×10^{-6} 의 수축 변형률 감소를 나타내었다.

이상에서의 결과를 정리하면 콘크리트의 수축 변형률은 습도의 감소량과 감소 시점에 모두 연관되어 있는 것으로 판

표 5. 도출된 수축변형률과 습도 감소량의 관계

$\varepsilon_{sh}(h)$	$f(h)$	R^2
LWC30	$-298998h^5 + 393306h^4 - 192419h^3 + 43531h^2 - 5054h$	0.9648
LWC40	$-92057h^5 + 122062h^4 - 59005h^3 + 13333h^2 - 2108h$	0.9846
LWC50	$-294h^3 + 637h^2 - 1416h$	0.9885
NWC30	$-340479h^5 + 481999h^4 - 256145h^3 + 63354h^2 - 7644h$	0.9576
NWC40	$-73244h^5 + 95723h^4 - 46340h^3 + 11412h^2 - 2277h$	0.9974
NWC50	$-1822h^3 + 1323h^2 - 1330h$	0.9986

단할 수 있으며 이를 분석하기 위해 그림 8과 같이 콘크리트 습도와 수축 변형률의 관계를 배합별로 나타내었다. 먼저 물-결합재비 0.3의 경우 습도 감소 약 0.1까지는 수축 변형률이 급격하게 증가하지만 이후의 습도 감소에 대해서는 완만한 형태의 수축 변형률 증가를 나타낸다. 이는 물-결합재비 0.3의 경우 재령 초기 약 7~10일 까지 급격한 자기건조 현상으로 습도가 약 0.1 만큼의 급격한 감소와 수축 변형률이 발생하며, 이후 자기건조에 의한 수분의 내부소모보다는 지속적인 수분의 외부이동에 의해 완만한 형태의 습도 감소와 수축 변형률의 진행이 이루어지는 것으로 판단된다. 이에 대해 기존 연구에 의한 공극 내 수축 변형을 유발하는 구동력 측면에서 살펴볼 때 공극의 크기가 작을수록 발생하는 모세관 압력과 표면에너지 변화가 큰 값을 나타내므로 자기

건조에 의한 습도 감소는 상대적으로 작은 공극에서부터 수분 손실에 따라 발생하는 것으로 판단되며, 반대로 수분의 외부 이동에 의한 습도 감소는 상대적으로 큰 공극에서부터의 수분 손실과 습도 감소가 이루어지는 것으로 생각된다.

다음으로 물-결합재비 0.5의 경우 습도 감소 0.4~0.45의 범위까지 일정한 기울기를 가진 직선 형태의 수축 변형률 증가를 나타내고 있다. 이는 자기건조에 의한 수분소모보다는 수분의 외부이동에 의한 지속적인 습도 감소가 수축의 지배적인 구동력으로 작용하기 때문으로 생각된다. 한편 물-결합재비 0.4의 경우 물-결합재비 0.3과 물-결합재비 0.5의 중간 형태를 나타내고 있다. 즉 물-결합재비 0.3보다 초기의 수축 증가율은 낮으나 장기 수축 증가율은 크며, 물-결합재비 0.5보다는 초기 수축 증가율을 크고 장기 수축 증가율은

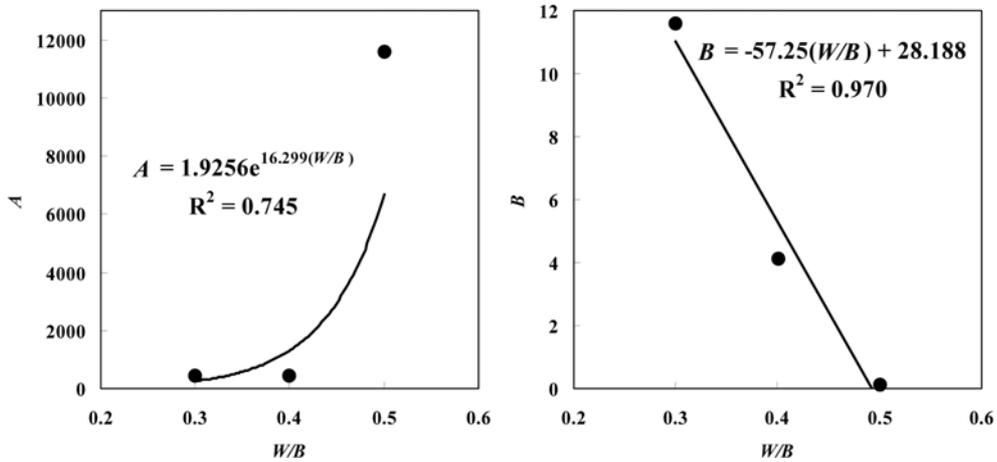


그림 4. 일반콘크리트 회귀분석 상수 식 (6)

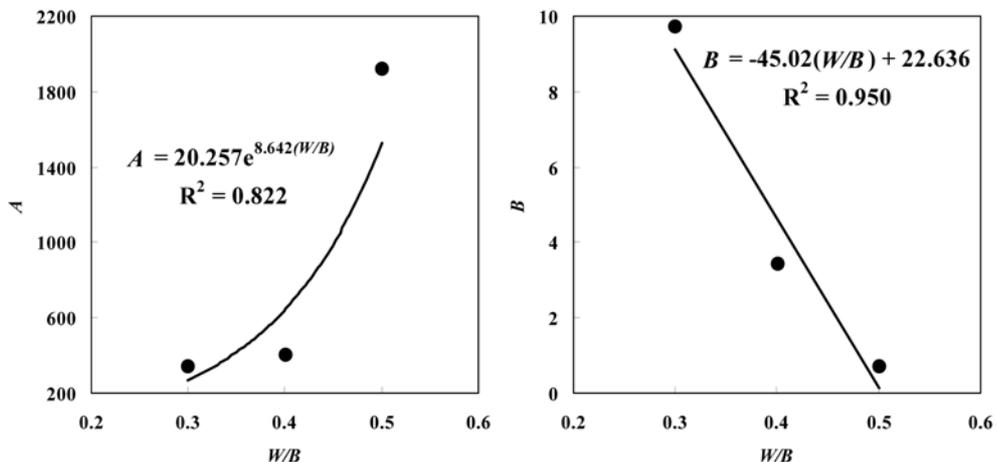


그림 5. 경량콘크리트 회귀분석 상수 식 (6)

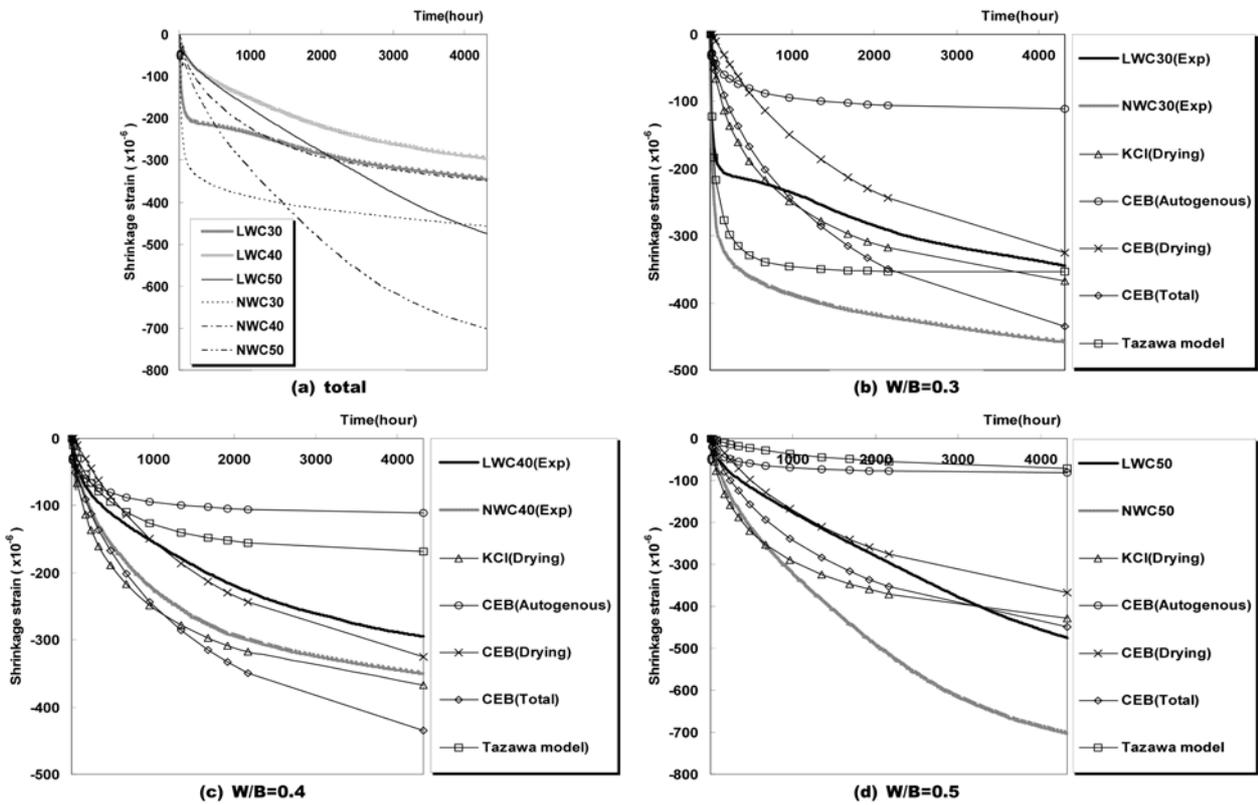


그림 6. 시간에 따른 수축 변형을 측정값 및 모델값 비교

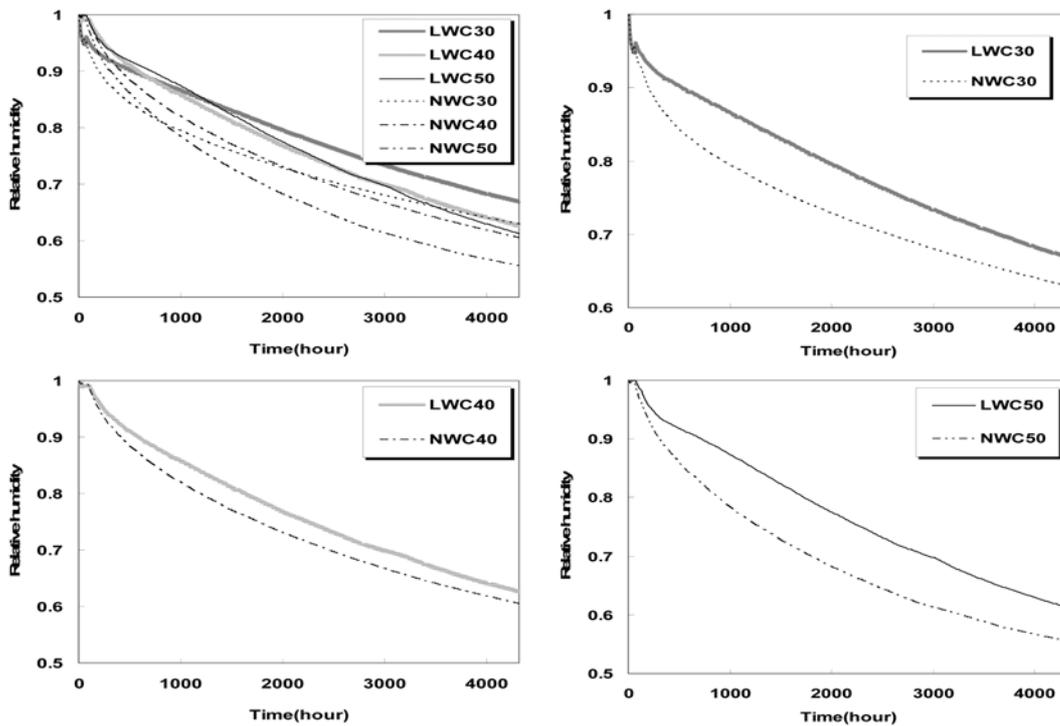


그림 7. 시간에 따른 콘크리트 내부 습도 측정값

작게 나타났다. 이는 물-결합재비 0.3보다는 초기의 자기 건조 현상이 크게 감소하며, 이후 장기 재령에서는 절대적인 콘크리트 내 수분의 존재량 감소와 함께 콘크리트의 외부 수분 이동에 저항하는 유효수분확산계수의 감소에 따라 외부의 수분 동에 따른 습도 감소가 물-결합재비 0.5에 비해 감소하기 때문으로 판단된다.

한편 물-결합재비가 동일한 경우 일반 콘크리트에 비해 경량 콘크리트의 습도 감소에 대한 수축 변형을 증가 값과 기

울기는 모두 작게 나타났으며 이는 같은 습도 감소 크기를 갖더라도 같은 습도 감소에 도달하는 시간이 경량골재의 사전흡수수에 의해 지연되기 때문에 수축에 저항할 수 있는 강성이 보다 증가하고, 경량골재의 사전흡수수가 큰 수축을 발생할 수 있는 작은 공극에 효과적으로 수분을 공급하기 때문으로 생각된다.

이상에서의 그림 6의 시간에 따른 수축 변형률과 그림 7의 시간에 따른 습도감소를 각각의 배합에 대한 습도감소량과 수

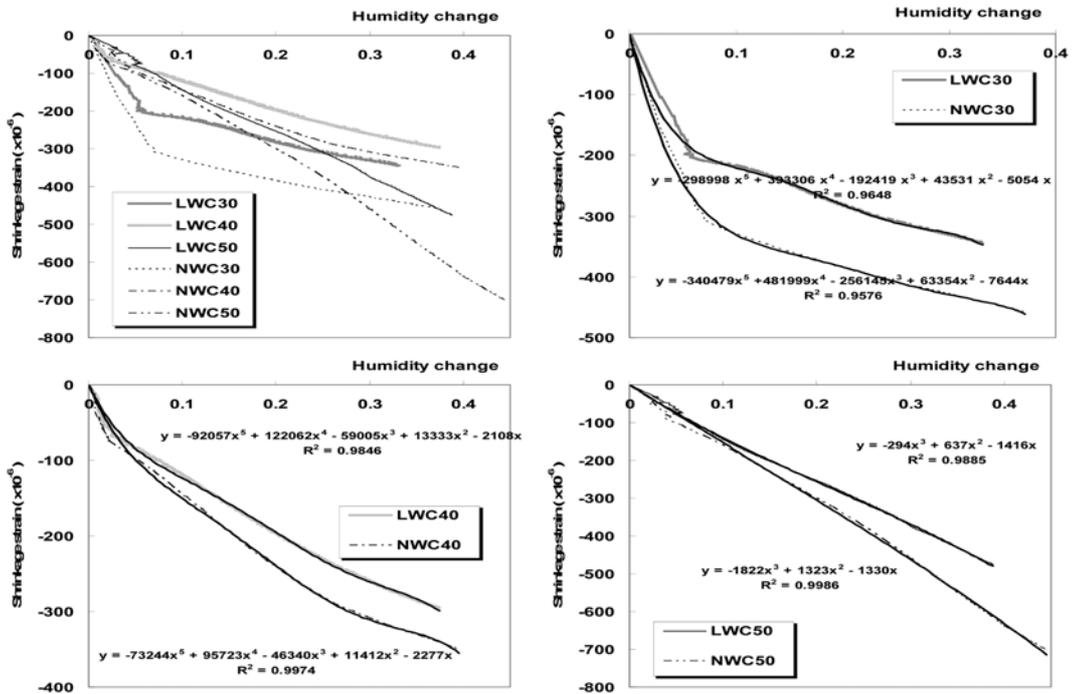


그림 8. 습도 변화와 수축 변형률과의 관계

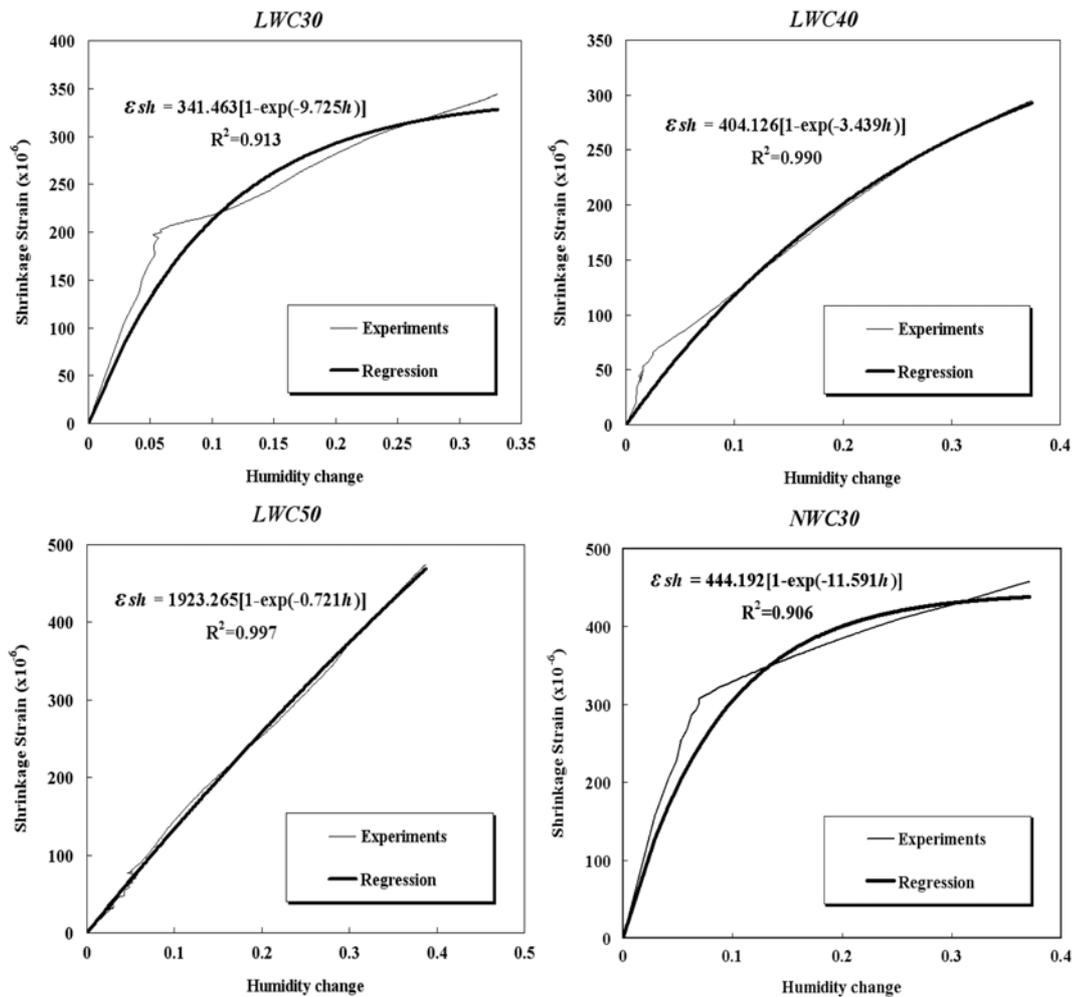


그림 9. 측정값과 식 (6)의 수축-습도 관계 비교

축변형률의 관계로 그림 8과 같이 나타내고 고차 다항식으로 회귀분석한 결과를 표 5에 나타내었다. 식 (5)의 의미는 콘크리트 수축 변형률은 콘크리트 내 상대습도의 함수로 표현됨을 나타내며, 콘크리트의 수분이동 해석을 통해 시간에 따른 상

대습도를 도출할 경우 수분이동 해석과 응력 해석을 연관할 수 있는 매개변수로 적용할 수 있음을 나타낸다.

$$\epsilon_{sh}(h(t)) = f(h(t)) \quad (5)$$

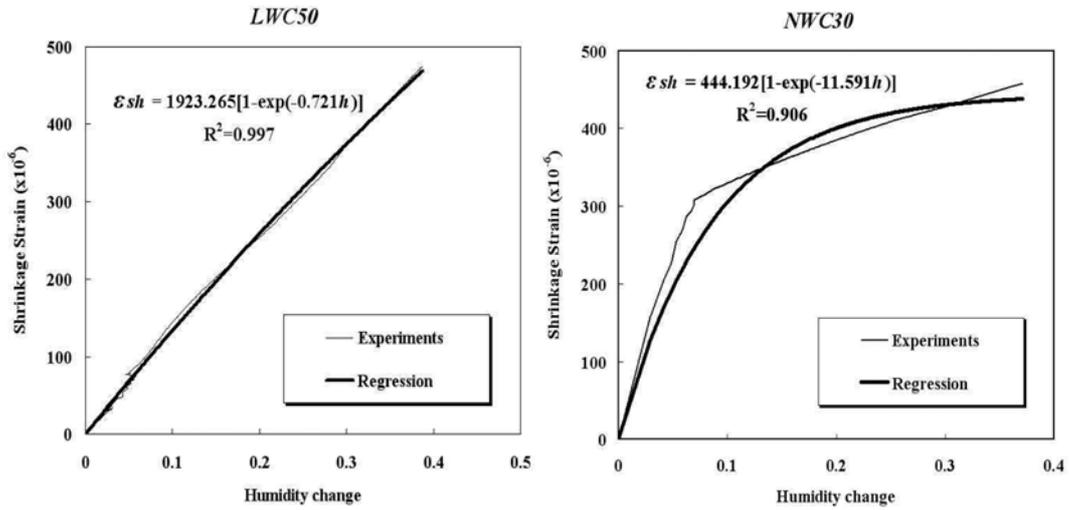


그림 9. 계속

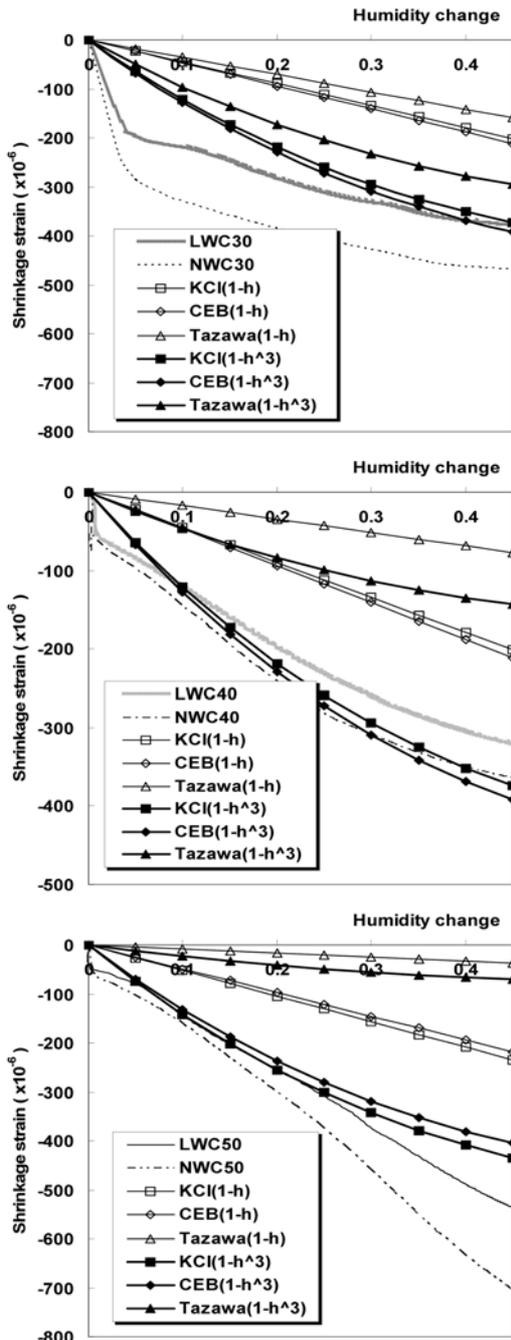


그림 10. 기존 습도수축계수를 이용한 수축변형률과 측정값 비교

한편 본 연구의 실험 변수인 물-결합재비와 골재 종류에 따른 수축-습도 관계를 보다 명확히 하고 실용적 적용을 위해 식 (6)과 같이 지수함수 형태의 관계식을 제안할 수 있으며, 이에 요구되는 회귀 상수와 수축-습도 측정값과의 관계를 각각 그림 4, 그림 5, 그림 9에 나타내었다.

$$\varepsilon_{sh}(h) = A \cdot [1 - \exp(-B \cdot h)] \quad (6)$$

그림 10은 콘크리트 내 습도와 수축과의 관계를 측정값과 기존 모델의 최종수축변형률을 적용한 식 (3), (4)와 비교하였다. 먼저 물-결합재비 0.3의 경우 기존 모델식 적용 종류에 상관없이 습도 변화 전체 구간에 대하여 수축이 과소평가되고 있다. 이는 기존 연구 결과가 콘크리트의 자기수축을 적절히 묘사하고 있지 못하며, 시간에 대한 함수로 평가되어 콘크리트 내부 습도와의 연관성을 반영하지 못하기 때문으로 생각된다. 한편 물-결합재비 0.4, 0.5의 경우 비교적 식 (2)와 측정값이 유사한 경향을 나타내었으며, 이는 물-결합재비 0.4이상부터는 자기건조에 의한 자기수축이 전체 수축의 지배적 요인이 아닌 수분의 외부이동에 의한 건조수축이 수축의 지배적인 요인으로 작용하며 따라서 이를 반영하고 있는 기존 연구결과와 유사한 값을 나타내는 것으로 판단된다.

4. 결 론

다공성 경량골재의 사전흡수수에 따른 콘크리트 수축 저감 효과와 수분이동 및 부등수축 해석의 매개변수 적용 시 요구되는 콘크리트의 수축과 콘크리트 내 상대습도와의 관계를 파악하기 위하여 수축과 습도를 측정하고 기존연구 결과와의 비교를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 시간에 따른 콘크리트 수축 변형률을 살펴보면 물-결합재비가 낮을수록 초기재령에서 급격하게 증가한 후 이후 완만한 형태의 수축 증가를 나타내었으며, 물-결합재비가 높을수록 시간에 따라 일정한 속도의 수축 변형률 증가 경향을 나타내었다. 동일 물-결합재비인 경우 일반골재 콘크리트보다 경량골재 콘크리트의 수축 변형률이 현저하게 감소하는 결과를 나타내었다. 물-결합재비 0.3에서 경량 콘크리트의 수축 저감효과는 7일 초기재령에서 36%, 6개월 장기재령에서 25%를 나타내었다. 물-결합재비 0.4는 7일

- 초기재령에서 19%, 6개월 장기재령에서 16%의 수축 저감률을 그리고 물-결합재비 0.5에서는 각각 37%, 32%를 나타내었다. 즉, 경량골재의 사전흡수수에 의한 수축 저감 효과는 물-결합재비가 0.3일 경우에 초기재령에서 매우 효과적이며, 물-결합재비가 0.4이상일 경우에는 재령에 대해 일정한 수축 저감 효과를 나타내는 것으로 판단된다.
2. 물-결합재비에 관계없이 경량골재 사전흡수수의 습도 공급 효과는 7~10일 이내의 초기 재령에서 두드러지게 나타났다. 이는 물-결합재비 0.3에서는 초개재령 자기 건조에 의한 습도감소에 의한 수분공급효과가, 물-결합재비 0.5에서는 수분의 외부이동에 의한 습도감소가 지배적이며 이러한 환경에서 경량골재 사전흡수수가 효과적으로 콘크리트 내부에 수분을 공급하는 것으로 판단된다.
 3. 콘크리트 내 습도와 수축과의 관계는 물-결합재비 0.3의 경우 기존 모델식 적용 종류에 상관없이 습도 변화 전체 구간에 대하여 수축이 과소평가되고 있다. 이는 기존 연구 결과가 콘크리트의 자기수축을 적절히 묘사하고 있지 못하며, 시간에 대한 함수로 평가되어 콘크리트 내부 습도와의 연관성을 반영하지 못하기 때문으로 생각된다. 물-결합재비 0.4, 0.5의 경우 비교적 기존 모델식과 측정값이 유사한 경향을 나타내었으며, 이는 물-결합재비 0.4이상부터는 자기 건조에 의한 자기수축이 전체 수축의 지배적 요인이 아닌 수분의 외부이동에 의한 건조수축이 수축의 지배적인 요인으로 작용하며 따라서 이를 반영하고 있는 기존 연구결과와 유사한 값을 나타내는 것으로 판단된다.
 4. 습도감소와 수축 변형률간의 관계를 고차 다항식으로 회귀분석할 수 있었으며, 콘크리트의 수분이동 해석을 통해 시간에 따른 상대습도를 고려할 경우 수분이동 해석과 부등수축 해석을 연관할 수 있는 매개변수로 적용할 수 있는 결과를 도출하였다.

감사의 글

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

참고문헌

- 곽효경, 허수준(2004) 철근콘크리트 벽체의 초기재령 거동 해석, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제24권 제1A호, pp. 35-47.
- 이창수, 박종혁(2008) 공극 내 상대습도, 모세관압력, 표면에너지

- 변화에 따른 콘크리트 자기수축, 한국콘크리트학회 논문집, 한국콘크리트학회, 제20권 2호, pp. 131-138.
- 이철성(1998) 콘크리트의 수분확산과 부등건조수축에 관한 연구, 박사학위논문, 한국과학기술원.
- 한국콘크리트학회(2007) 콘크리트 구조설계기준해설, 기문당.
- Ala, M.S. and Hadidi, R. (2002) *Cause and Control of Transverse Cracking in Concrete Bridge Decks*, FHWA-NJ-2002-019, Department of Civil and Environmental Engineering New Jersey Institute of Technology, Newark.
- Bazant, Z.P. and Raftshol, W.J. (1982) Effect of Cracking in Drying and Shrinkage Specimens, *Cement and Concrete Research*, Vol. 12, pp. 209-226.
- Bazant, Z.P. and Murphy, W.P. (1995) Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures-model B3, *Materials and Structures*, Vol 28, pp. 357-365.
- CEB-FIP (1990) *CEB-FIP Model Code 90 for Concrete Structures*, Comite Euro-International du Beton, Lausanne, 1990.
- Haluk, A., Fu, G., and Dekelbab, W. (2003) *Investigate Causes and Develop Methods to Minimize Early-Age Deck Cracking on Michigan Bridge Decks*, Research Report RC-1437, Michigan Department of Transportation, Detroit.
- Jensen, O.M. and Lura, P. (2006) Techniques and materials for internal water curing of concrete, *Materials and Structures*, Vol. 39, pp. 817-825.
- Lura, P. (2003) *Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete*, Ph.D thesis, Delft University of Technology.
- Lura, P., Jensen, O.M., and Igarashi, S.I. (2006) Experimental observation of internal water curing of concrete, *Materials and Structures*, Vol. 40, pp. 211-220.
- Ribeiro, A.B., Goncalves, A., and Carrajora, A. (2006) Effect of shrinkage reducing admixtures on the pore structures properties of mortars, *Materials and Structures*, Vol. 39, pp. 159-166.
- Tazawa, E. and Miyazawa, S. (1993) *Autogenous shrinkage of Concrete and Its Importance in Concrete Technology*, Creep and Shrinkage of Concrete, edited by Bazant, Z. P. E&FN Spon, pp. 105-133.
- Weiss, W.J. and Shah, S.P. (2002) Restrained shrinkage cracking : the role of shrinkage reducing admixtures and specimen geometry, *Materials and Structures*, Vol. 35, pp. 85-91.
- Whiting, D. and Detwiler, R. (1998) *Silica Fume Concrete for Bridge Decks*, NCHRP Report 410, Transportation Research Board, Washinton D.C.
- Will, D.L., David, D., and Joann, P.B. (2005) *Cracking and Chloride Contents in Reinforced Concrete Bridge Decks*, SM Report No. 78, Kansas Department of Transportation, Lawrence, Kansas.
- Xi, Y., Shing, B., and Suwito, A. (2003) *Assesment of Cracking Problems in Newly Constructed Bridge Decks in Colorado*, CDOT-DTD-R-2003-3, Colorado Department of Transportation, Denver.
- Zachary, C.G., David, A.L., and Matthew, D.D. (2006) Internal relative humidity and drying stress gradients in concrete, *Materials and Structures*, Vol. 39, pp. 901-909.

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