



# 공극 내 상대습도, 모세관압력, 표면에너지 변화에 따른 콘크리트 자기수축

이창수<sup>1)\*</sup> · 박종혁<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>서울시립대학교 토목공학과

## Relation between Autogenous Shrinkage of Concrete and Relative Humidity, Capillary Pressure, Surface Energy in Pore

Chang-Soo Lee<sup>1)\*</sup> and Jong-Hyok Park<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

**ABSTRACT** Humidity and strain were estimated for understanding the relation between humidity change by self-desiccation and shrinkage in high-performance concrete with low water binder ratio. Internal humidity change and shrinkage strain were about 10%, 4% and  $320 \times 10^{-6}$ ,  $120 \times 10^{-6}$  respectively on concrete with water binder ratio 0.3, 0.4 and from the results, humidity change and shrinkage represented the strong linear relation regardless of mixture. For specifying the relation on internal humidity change and autogenous shrinkage strain, shrinkage model was established which is driven by capillary pressure in pore water and surface energy in hydrates on the assumption of a single network and extended meniscus in pore system of concrete. This model and experimental results had a similar tendency so it would be concluded that the internal humidity change by self-desiccation in HPC originated in small pores less than 20 nm, therefore controlling plan on autogenous shrinkage might be focused on surface tension of water and degree of saturation in small pore.

**Keywords :** autogenous shrinkage, relative humidity, surface energy, capillary pressure, pore

### 1. 서 론

물-결합재비가 낮은 고성능콘크리트에서의 자기수축 연구가 활발히 진행되면서 이에 대한 제어 방안으로 글리콜-에테르 계열의 수축저감제를 이용하여 배합수의 표면장력을 낮추는 방법과 경량골재, 고흡수성 수지 등의 흡수율이 큰 재료를 사용하여 지속적인 수화잉여수를 공급하는 내부 양생 방법 등이 제시되고 있다<sup>1,4)</sup>. 그러나 이러한 제어 방법들의 효과를 극대화하기 위해서는 먼저 자기수축의 발생 원인과 특성을 파악하는 것이 선행되어야 한다. 이를 위해 기존 연구 결과를 살펴보면 콘크리트 내 수분관련 수축 원인은 Table 1과 같이 모세관압력, 표면에너지 변화, 수화조직체 내의 충전수 이동 등에 기인하고 있는 것으로 알려져 있으며 모두 공극 내 상대습도에 따른 작용으로 묘사하고 있다. 즉 공극 내 수분과 수화조직체, 기체가 이루는 3상 구조에서 상호간 에너지 평형을 이루기 위한 상대습도로서 수축을 연관하고 있다. 따라서 본 연구에서는 계면 역학을 이용한 콘크리트 공극 내부의 수분 분포 형상을 설정하여 자기건조에 의한 콘크리트 내부의 상대습도 감소와 변형률의 관계를 파악

하고 자기수축 제어 방안에 대한 기초 자료를 제공하고 자 한다.

### 2. 연구 방법

#### 2.1 연구 내용 및 흐름

콘크리트 공극 내 수분 분포 형상은 자기건조에 의해 고체-액체-기체로 이루어진 불포화 공극이 형성될 경우 Fig. 1과 같이 크게 세 가지 영역으로 구분할 수 있다<sup>5)</sup>. 이러한 세 가지 영역의 특징과 수축발생 메커니즘에 대해 살펴보면 먼저 흡착 영역의 경우 공극 내 상대습도에 따라 몇 개의 물 분자 층을 형성하고 있으며, 상대습도가 감소할 경우 흡착된 물 분자 층이 기체 상태로 증발되고 고체의 표면에너지가 커지게 되면서, 즉 표면장력이 커지면서 수축구동력으로 작용한다<sup>6)</sup>. 메니스커스 영역은 물 분자끼리의 점착력보다 물-고체 분자 간 부착력이 더 클 경우 발생하며 공극 크기가 식 (6)에 의해 정의되는 Kelvin's radius 보다 작을 경우 모세관 응축 현상에 의해 모세관 압력이 발생하고 수축구동력으로 작용하게 된다<sup>7-10)</sup>. 마지막으로 흡착 방해 영역은 인접한 두 고체 사이의 반데르발스 힘에 의한 인력과 포화된 액체 사이에 유발된 분리압력이 작용하는 구간으로서, 습도가 감

\*Corresponding author E-mail: csl@uos.ac.kr  
Received March 12, 2007 Accepted January 4, 2008  
©2008 by Korea Concrete Institute

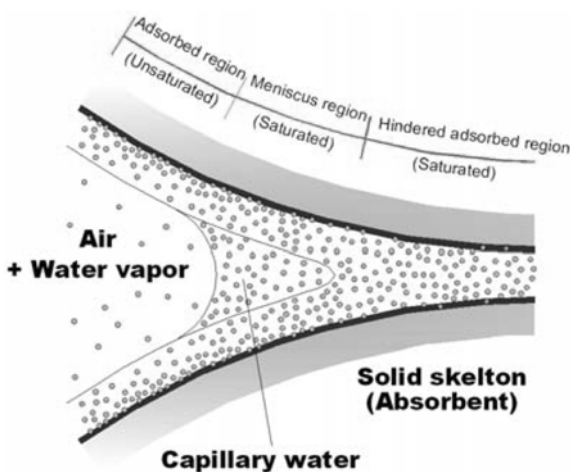
**Table 1** Shrinkage mechanism by humidity variation in concrete<sup>21)</sup>

Authority	Relative humidity (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	Variations in swelling pressure										
	Augmentation by capillary effects										
Powers	Variations in surface energy					Capillary tension					
Ishai Feldman & Sereda	Movement of interlayer water					Capillary tension and variations in surface energy					
Wittmann	Variations in surface energy					Variations in swelling pressure					

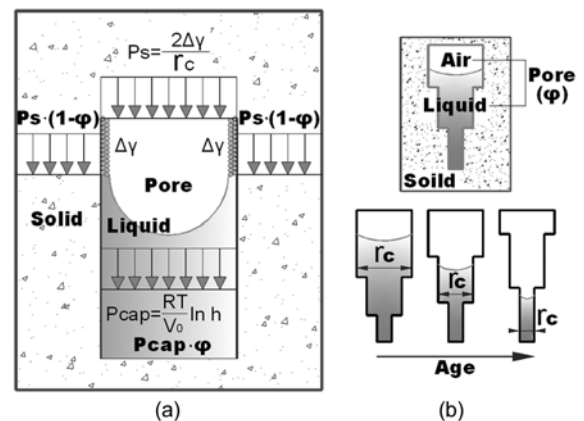
소하고 고체 사이의 액체가 불포화 될 경우 작용하고 있던 분리압력의 감소로 인해 수축이 유발되는 영역이다<sup>11,12)</sup>. 따라서 Fig. 1과 같은 공극 내 수분분포를 근거로 할 경우 작용되는 수축구동력은 Table 2와 같이 고체-액체-기체 3상 구조에서의 에너지 평형을 이루기 위하여 모두 공극 내 상대습도와 연관성을 지닌다. 이 중 분리압력의 감소는 공극의 상대습도가 매우 낮아 모두 불포화 상태가 이루어져야 발생 가능하며, 상대습도보다는 인접한 두 고체 경계면의 거리에 더욱 큰 영향을 받는 특성을 지닌다<sup>13,14)</sup>. 본 연구에서는 외부와의 수분 이동을 차단하고 자기건조에 의한 내부수분 소모와 상대습도 변화에 따른 수축 변형률의 관계를 파악하고자하며 다음과 같이 연구 범위와 내용을 한정하였다. 먼저 자기수축에 따른 습도 감소는 기존 연구에서 약 5~20% 정도로 나타나고 있으므로 이와 같은 습도 상태 하에서의 수분 분포 형상은 모세관 응축에 의한 메니스커스 영역과 고체 표면에 물리적인 흡착수가 결합되어 있는 흡착 영역으로 구성된 확장

메니스커스 영역으로 설정하여 이에 따른 각각의 표면에너지 변화와 모세관 압력을 수축의 구동력으로 적용하였다<sup>15-18)</sup>. 즉, Fig. 2와 같이 공극은 한 개의 단일 네트워크를 구성하고 있으며 콘크리트 공극 분포 형상과 상대 습도에 따라 확장 메니스커스를 이루는 것으로 가정하였다. 따라서 이와 같은 메니스커스 존재 하에서는 공극이 완전 불포화되어 흡착 영역만이 존재하는 경우는 고려되지 않으므로 흡착 방해 영역에서의 분리압력 감소 효과는 연구 범위에서 제외하였으며, 기존 연구에서의 분리압력 감소 효과는 습도 80% 이하에서 발견되는 것으로 보고되고 있으므로 본 연구에서 설정된 가정 사항은 타당성을 지닐 것으로 판단된다<sup>19,20)</sup>.

이와 같이 확장 메니스커스 영역에서의 표면에너지 변화와 모세관압력으로 구성된 콘크리트 내부의 상대습도와 변형률의 관계를 파악하기 위하여 Fig. 3과 같은 수축모델 설정, 탄성계수, 공극분포, 상대습도, 변형률 측정 등의 실험 내용을 수행하였다.



**Fig. 1** Idealized sketch of the expanded meniscus region in pore



**Fig. 2** Shrinkage modeling (a) Mechanism of driving force on shrinkage (b) Process of pore and moisture distribution

**Table 2** Equilibrium process of energy and phase change in solid-liquid-air interface of concrete

Phase	Process	Energy	Phase change process
Dehydration	Chemical	Loss	Solid matrix (CSH or CH) → water - energy + matter (C or CyS)
Hydration		Gain	Water + matter (C or CyS) → solid matrix (CSH or CH) + energy
Evaporation	Physical	Loss	Capillary water → water vapor - energy
Condensation		Gain	Water vapor → capillary water + energy
Desorption	Physical	Loss	Physically adsorbed water → water vapor - energy
Sorption		Gain	Water vapor → physically adsorbed water + energy

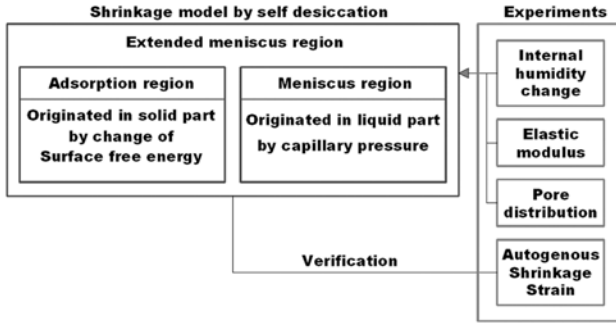


Fig. 3 Strategy and flow of study

## 2.2 수축 모델링

콘크리트의 자기건조에 의한 수축을 모델링하기 위하여 콘크리트 내부는 Fig. 1과 같이 고체-액체-기체의 3상 구조로 이루어져 있으며 고체는 골재, 수화조직체를 형성하고, 액체, 기체는 공극을 구성하는 것으로 가정한다. 이와 같이 가정하여 시멘트 수화와 자기건조가 이루어져 공극 내 메니스커스가 형성될 경우 발생하는 수축구동력은 기체-액체 경계면 압력의 차이로 인한 모세관압력과 흡착 영역 표면에너지 변화로 인한 표면장력으로 구성된다. 먼저 모세관압력은 식 (1)과 같이 액체-기체 간 평형 에너지를 이루기 위한 조건으로서 Kelvin's 식으로 표현된다.

$$P_{cap} = P_v - P_l = \frac{RT}{V_0} \ln h \quad (1)$$

여기서  $P_{cap}$ : 모세관압력 (Pa)  
 $P_v$ : 기체압력 (Pa)  
 $P_l$ : 액체압력 (Pa)  
 $R$ : 이상기체상수 (8.314J/(mol·K))  
 $T$ : 절대온도 (273K)  
 $V_0$ : 물의 몰분율 (18.02 × 10<sup>-6</sup>m<sup>3</sup>/mol)  
 $h$ : 상대습도

식 (1)에서의 모세관압력은 공극에서 작용하므로 전체 콘크리트에 미치는 수축구동력은  $P_{cap} \cdot \phi$ 로 구성되며 모세관압력에 의한 변형률은 식 (2)와 같다.

$$\varepsilon_{cap} = \frac{P_{cap}}{E} \phi \quad (2)$$

여기서  $\phi$ : 공극률  
 $E$ : 탄성계수 (Pa)

다음으로 흡착 영역 표면에너지 변화에 따른 수축구동력을 묘사하기 위하여 공극을 둘러싼 고체 단위 길이 당 표면에너지 변화  $\Delta\gamma$ 에 따른 표면압력  $P_s$ 를 식 (3)과 같이 정의한다.

$$P_s = \frac{2\pi r_c \Delta\gamma}{\pi r_c^2} = \frac{2\Delta\gamma}{r_c} \quad (3)$$

여기서 고체의 표면에너지 변화  $\Delta\gamma$ 은 기존 연구에 의해 다음과 같이 상대습도의 함수로 나타낼 수 있다<sup>22)</sup>.

$$\Delta\gamma = -\frac{10^{-9}RT}{V_0} \{0.584 \ln(h) - 0.189 \ln(h) \ln[-\ln(h)]\} \quad (4)$$

식 (4)는 흡착 영역과 흡착 방해 영역에서의 물질 이동 제한 가정과 화학적 포텐셜에너지가 같음을 이용하여 습도에 따른 두 영역에서의 표면에너지 변화는 같음을 증명하였으므로 고체 전 영역에 적용할 수 있다<sup>23)</sup>.

한편 식 (3)의 Kelvin's radius  $r_c$ 는 일정 상대습도의 공극 내 모세관 응축을 일으키는 최소 반경을 의미하며 식 (5)의 Laplace's 식과 식 (1)의 Kelvin's 식을 이용하여 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{cap} = \frac{2\gamma}{r_c} \quad (5)$$

$$r_c = \frac{2\gamma V_0}{\ln(h)RT} \quad (6)$$

식 (3)의 표면압력은 고체에서 작용하므로 전체 콘크리트에 미치는 수축구동력은  $P_s \cdot (1-\phi)$ 로 구성되며 표면 에너지 변화에 의한 Gibbs-Bingham 수축 변형률은 식 (7)과 같이 표현될 수 있다.

$$\varepsilon_{GB} = \frac{P_s}{E} (1-\phi) \quad (7)$$

따라서 모세관압력과 표면에너지 변화에 따른 콘크리트 전체 수축 변형률은 식 (8)과 같이 구성되며 공극 내 상대습도, 공극률, 탄성계수의 함수로서 표현된다.

$$\varepsilon_{as} = \varepsilon_{cap} + \varepsilon_{GB} \quad (8)$$

여기서  $\varepsilon_{as}$ : 전체 수축 변형률  
 $\varepsilon_{cap}$ : 모세관 압력에 의한 수축 변형률  
 $\varepsilon_{GB}$ : 표면에너지 변화에 의한 수축 변형률

한편 식 (2), (7)에 사용되는 탄성계수의 경우 모세관 압력, 표면압력이 작용되는 시점부터 수축에 대한 응력 이력을 지니고 있으므로 식 (9)와 같이 크리프 현상을 고려한 유효탄성계수로 환산하여 적용한다.

$$E_e = \frac{E_{ci}}{1 + \Phi} \quad (9)$$

여기서  $E_{ci}$ : 측정 접선탄성계수  
 $\Phi$ : CEB-FIP MC 90에 의한 크리프계수<sup>24)</sup>

또한 가정된 단일 공극 네트워크의 포화도를 산정하기 위하여 측정된 상대습도에서 모세관 응축을 발생하기 위한 Kelvin's radius 이하의 공극과 이상의 공극을 구분하여 식 (10)과 같이 포화도를 정의하고 모세관압력과 표면에너지 변화에 의한 수축구동력 적용을 위한 확장 메니스커스 형성 조건으로 적용하였다.

$$S = \frac{\phi_s}{\phi} \quad (10)$$

여기서  $S$ : 포화도

$\phi_s$ : Kelvin's radius 이하의 공극률

### 2.3 실험 내용 및 방법

콘크리트 자기건조에 의한 내부의 습도변화와 변형률의 관계를 파악하기 위하여 식 (8)의 구성에 필요한 습도, 탄성계수, 공극률과 변형률 측정 실험을 수행하였다. 기존 수화도 연구에 의하면 외부와의 수분이동이 차단된 상태에서 시멘트의 완전 수화를 이루기 위한 최소의 물-결합재비는 0.42 정도로 알려져 있다. 즉, 최소 물-결합재비 0.42 이하에서는 완전 수화에 필요한 잉여수가 부족하여 미수화 시멘트 입자가 존재하게 되며 실용적인 배합 측면에서 현재 고성능콘크리트에 적용되는 물-결합재비는 0.30~0.40의 범위를 지니고 있으므로 본 연구에서는 Table 5와 같이 물-결합재비 0.30, 0.40을 설정하였다<sup>25)</sup>. 사용된 시멘트는 Table 3과 같은 특성을 지니는 보통포틀랜드시멘트를 적용하였으며, 골재는 Table 4와 같이 최대치수 19 mm 부순돌과 강모래를 사용하였다.

구체적인 실험 방법으로서 공극 특성은 배합별로  $\phi 100 \times 200$  mm 공시체를 제작하고 각 1, 3, 5, 7, 14, 28일 재령별로 만능시험기를 이용하여 탄성계수 및 압축강도 측정 후 아세톤 1일 침지 후 수화 정지된 시편을 수은압입법에 의한 공극률 측정 장치를 이용하여 공극률을 측정하였다.

자기건조에 따른 습도와 변형률은 Fig. 4와 같이  $100 \times 100 \times 400$  mm 공시체에 습도 측정 센서와 변형률게이지를 매입한 후 테프론 시트와 파라핀으로 밀봉하여 시간에 따른 습도와 변형률을 측정하였다. 여기서 습도 측정은 Fig. 5와 같이 액체 물 분자는 통과하지 못하고 기체 물 분자만을 통과시키는 방수투습 소재를 이용하여 타설 초기에서의 센서를 배합수로부터 보호함으로써 측정의 정밀도를 향상하였다.

### 3. 연구 결과

콘크리트 자기건조와 변형률의 관계를 파악하고 모세관압력과 표면에너지 변화에 따른 변형률 식 (8)을 구성하기 위한 탄성계수, 공극률, 습도변화 실험 결과를 Figs. 6~10

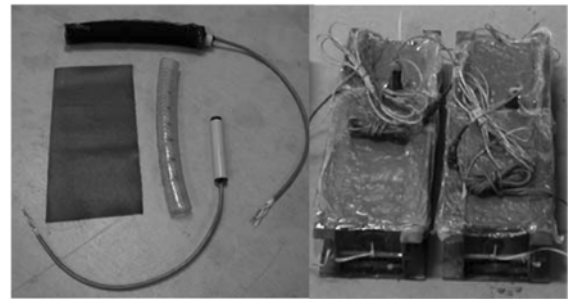


Fig. 4 Specimens of humidity and strain estimated

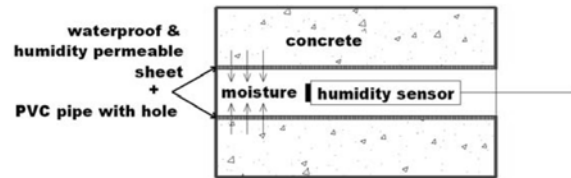


Fig. 5 Apparatus of humidity estimation

Table 3 Physical and chemical properties of cement

Item Material	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 (m <sup>2</sup> /g)
Cement	20.7	5.2	3.0	62.4	4.7	2.4	1.36	3.15	0.345

Table 4 Physical properties of aggregates

Item Material	Specific gravity	FM	Absorption (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Abrasion (%)
Fine aggregate	2.65	2.71	1.90	1,420	-
Coarse aggregate	2.67	6.78	0.72	1,415	16.3

Table 5 Mixture proportions of concrete

Item Mixture	G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					Slump (mm)	Initial setting (h:m)	28day compressive strength(MPa)
				W	C	S	G	SP(C×%)			
OPC30	190	30	48	156	520	750	825	1.2	160	12:15	53
OPC40	190	40	48	180	450	748	823	0.6	155	11:30	42

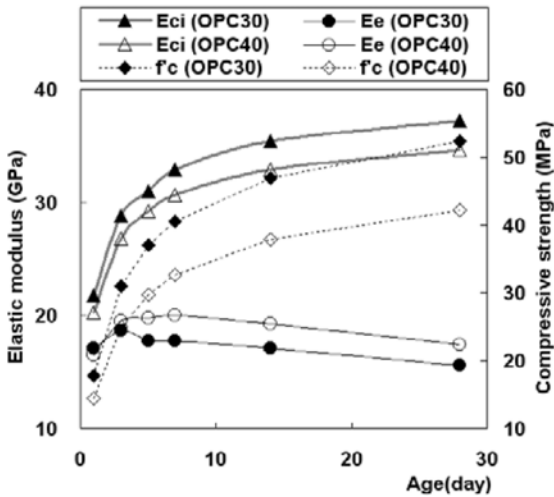


Fig. 6 Results of compressive strength and elastic modulus

에 나타내었다. 먼저 재령 1~28일에 따른 압축강도와 탄성계수의 경우 OPC30은 18~52 MPa, 22~37 GPa, OPC40은 14~42 MPa, 20~35 GPa까지 증가하였다. 식 (8)에 적용하기 위한 식 (9)의 유효탄성계수 산정 시 필요한 크리프계수의 경우 콘크리트는 초결 이후 탄성의 발현과 응력 이력을 지니게 되므로 수축구동력에 의한 증가 응력과 이에 따른 크리프 변형은 초결 이후 하중이 재하되는 것으로 설정하고 하중재하 시기를 Table 5에서와 같이 약 0.5일을 적용하였다. 한편 CEB-FIP에서는 기본 크리프에 대한 사항이 언급되어있지 않으므로 공칭두께는 건조수축 조건을 가정하여 단면  $100 \times 100$  mm로 설정하고  $h = 50$  mm로 적용하였으며, 상대습도 조건은 측정된 습도를 적용하여 크리프계수를 산출한 결과, OPC30은 15~17 GPa, OPC40은 16~20 GPa의 범위를 지니는 유효탄성계수 값을 산출하였다.

배합별, 재령별 공극률 측정 결과는 Figs. 7, 8과 같이 OPC30은 0.21~0.15까지 OPC40은 0.31~0.21까지 변화하였다. 기존 연구에 의해 공극 크기를 대형공극, 중형공극, 소형공극으로 나누어 Figs. 9, 10에 나타낸 결과 메니스커스 형성과 흡착수에 의한 표면에너지 변화에 따른 수축에 영향을 미치는 중형공극 크기 이상의 공극 분포는 OPC30에서 높은 비율을 나타냈으며 특히 3일 이하의 초기재령에서 소형공극의 생성이 두드러진 것으로 나타났다<sup>26)</sup>. 이는 공극크기 분포만으로도 W/B가 낮은 경우 소형공극이 이른 재령에서 빠르게 생성됨으로서 Kelvin's radius에 대응하는 모세관 응축 현상이 발생할 수 있는 환경을 제공하는 것으로 해석될 수 있으며, 따라서 W/B가 낮은 경우의 수축이 빠르고 크게 일어날 수 있음을 예측할 수 있다.

콘크리트 습도와 변형률 측정 결과는 Figs. 11, 12에 각각 도시하였으며 재령 28일까지 OPC30의 습도는 약 10% 정도 감소하였고 이에 따른 수축 변형률은  $320 \times 10^{-6}$ 까지 진행되었다. OPC40의 경우 4%의 습도 감소와  $120 \times 10^{-6}$ 의 수축 변형률을 나타내었다. 각각의 발현 특성을 살펴

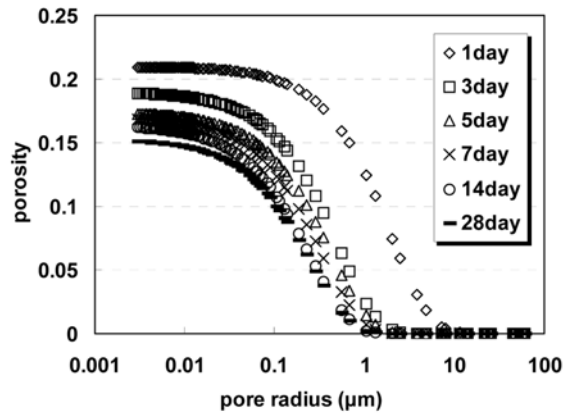


Fig. 7 Results of porosity(OPC30)

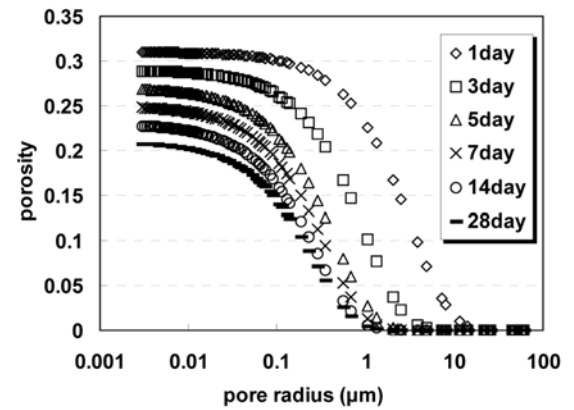


Fig. 8 Results of porosity(OPC40)

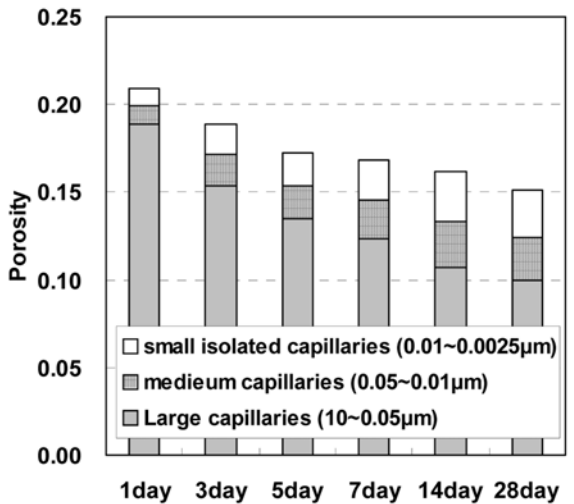


Fig. 9 Distribution of porosity(OPC30)

보면 OPC30의 경우 측정 시점부터 재령 10일까지 급격한 습도 감소와 수축 진행을 나타냈으며 이후 완만한 진행 과정을 보였다. OPC40의 경우 시점에 관계없이 보다 일정한 진행 양상을 나타내었으며, 두 배합 모두 습도와 수축 진행 속도가 유사한 경향을 나타내어 이에 대한 관계를 파악하기 위해 Fig. 13과 같이 내부 습도와 변형률

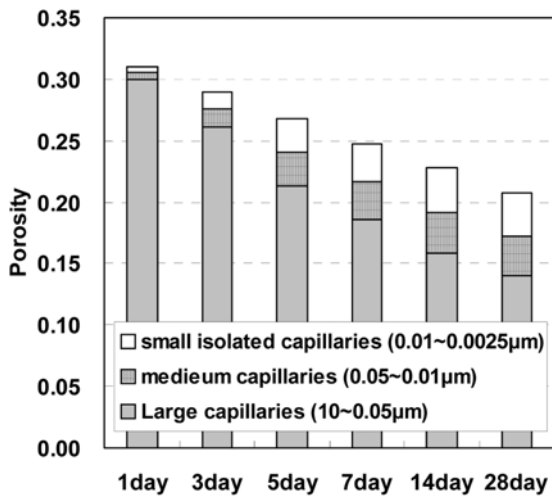


Fig. 10 Distribution of porosity(OPC40)

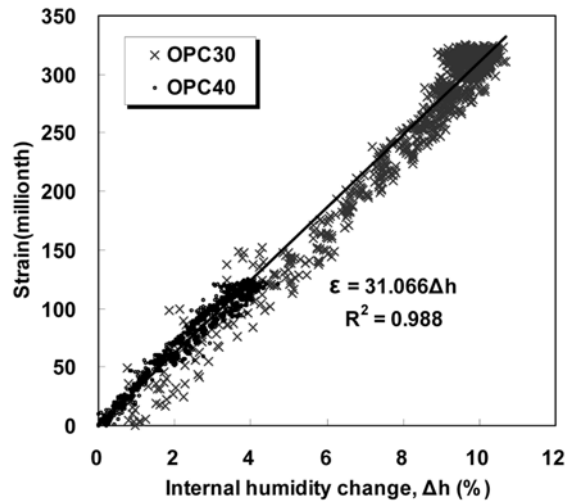


Fig. 13 Relation between internal humidity change and strain

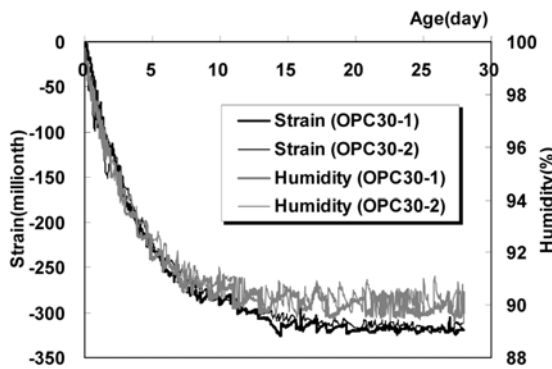


Fig. 11 Results of humidity and strain estimation(OPC30)

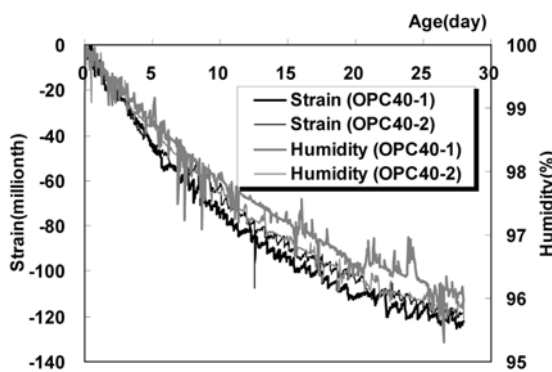


Fig. 12 Results of humidity and strain estimation(OPC40)

의 관계를 분석한 결과 높은 선형성을 나타내었으며, 이는 자기수축의 경우 내부 습도와 변형률만을 고려할 때 W/B비에 상관없이 습도 감소량에 따라 수축이 선형적으로 진행되는 것으로 해석될 수 있다.

Fig. 13에 나타난 수축변형률과 습도와의 관계를 보다 구체적으로 알아보기 위하여 공극 내 확장 메니스커스에서 발생하는 모세관압력과 표면에너지 변화에 의한 수축 변형률을 Figs. 15, 16에 나타낸 결과 식 (8)에 의한 모

델값과 측정값이 유사한 경향을 나타내었으며 이는 콘크리트 공극 내 상대습도 변화에 따른 두 가지 정보를 나타내는 것으로 해석될 수 있다. 첫째, 10% 이내의 상대 습도 변화까지는 공극수의 모세관압력에 의한 수축이 표면에너지 변화에 의한 수축보다 크게 작용하지만 이후의 변형률은 공극 크기 감소와 함께 표면에너지 변화에 의한 수축이 보다 우세해지는 것으로 판단된다. 따라서 물-결합재비가 높을수록, 초기재령일수록 수축저감제에 의한 공극수 표면장력 감소가 수축 제어에 효과적이며, 물-결합재비가 낮을수록, 장기재령일수록 지속적인 수화 잉여수 공급이 수화조직체의 표면에너지 변화를 최소화하여 수축발생을 감소할 수 있을 것으로 생각된다. 두 번째 해석으로서 Fig. 14의 표면압력과 모세관압력을 유발하기 위한 Kelvin's radius에 대응하는 실제 공극 습도 변화에 따른 메니스커스를 형성하며 불포화 평형상태를 이루고 있음을 파악할 수 있다. 즉 Fig. 14에 나타난 습도 변화 10%까지의 Kelvin's radius는 이론상 10 nm 이하의 크기이며 이는 기존 연구에 따른 공극 크기 분류에서 20 nm 이하의 소형공극 중 주로 겔공극의 크기에 해

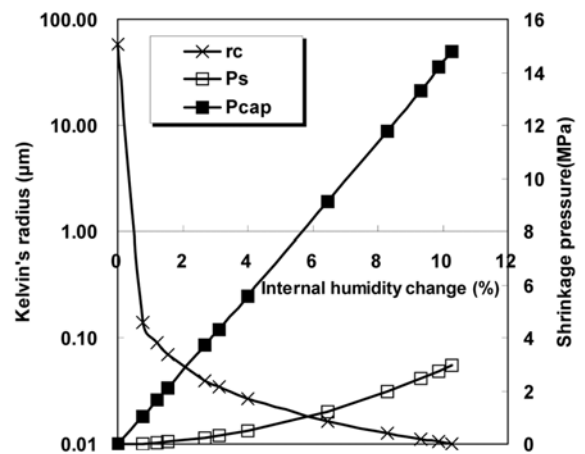


Fig. 14 Relation between internal humidity change and Kelvin's radius

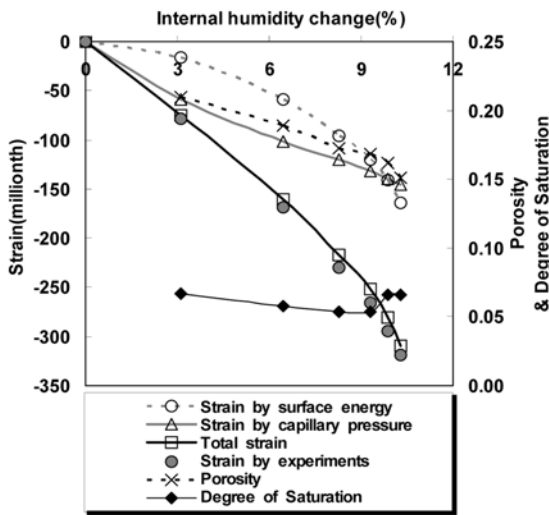


Fig. 15 Comparison values of experimental and modeling by Eq.8(OPC30)

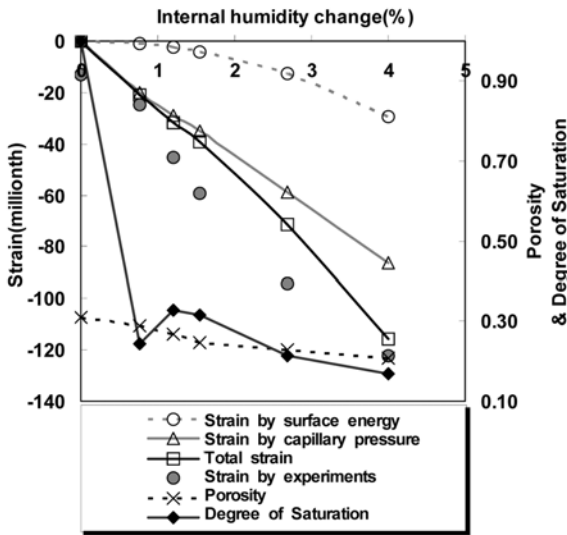


Fig. 16 Comparison values of experimental and modeling by Eq.8(OPC40)

당한다. 따라서 본 연구의 실험 내용으로서 Kelvin's radius 이상의 공극 내에서의 수분 분포와 포화 정도는 정확히 파악할 수 없으나 각각의 습도 변화에 대응하는 Kelvin's radius 공극은 매우 낮은 포화도와 확장 메니스커스를 이루며 표면에너지 변화와 모세관압력에 의한 수축구동력이 작용하는 것으로 유추할 수 있다. 이는 외부와의 수분이동이 차단된 상태에서 시멘트의 완전 수화를 이루기 위한 최소의 물-결합재비 0.42보다 낮은 콘크리트에서 자기건조에 의한 수분 감소는 주로 수화조직체 내의 겔공극 내에서 진행됨을 의미하며, 물-결합재비가 0.42보다 높은 일반콘크리트에서는 동일한 습도 감소가 있더라도 상대적으로 변형률의 크기가 작은 것은 모세관 공극에 존재하는 수화잉여수가 겔공극 내에 지속적인 수분 공급 가능성 측면과 외부로의 수분이동은 비교적 크기가 큰 모세공극 내의 수분이 이동하여 불포화 메니스커스를 형성하므로 상대적으로 큰 수축 구동력이 발현되

지 못하여 수축이 작게 나타나는 것으로 생각될 수 있다. 따라서 W/B가 낮은 콘크리트의 자기수축을 제어하기 위한 방안으로서 제시되고 있는 수축저감제와 내부양생의 방법적 측면에서 수축저감제의 콘크리트 내부 중소형 공극수 특히 겔공극수 표면장력 감소 효과와 지속 여부, 내부양생에 의한 수화수 공급이 겔공극 내부의 수분 분포에 미치는 영향 등이 추후 후행되어야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

자기건조에 의한 콘크리트 내부의 상대습도와 변형률의 관계를 파악하기 위하여 콘크리트의 탄성계수, 공극 분포, 상대습도, 변형률 등을 측정하고, 확장 메니스커스 영역으로 설정한 공극 내 수분 분포 형상에 작용하는 모세관압력과 표면에너지 변화에 의한 수축변형률 모델 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 콘크리트 습도와 변형률 측정 결과 재령 28일까지 OPC30의 습도는 약 10% 정도 감소하였고 이에 따른 수축 변형률은  $320 \times 10^{-6}$ 까지 진행되었으며, OPC40의 경우 4%의 습도감소와  $120 \times 10^{-6}$ 의 수축 변형률을 나타내었다.
- 2) 내부 습도와 변형률의 관계를 분석한 결과 높은 선형성을 나타내었으며 자기수축의 경우 내부 습도와 변형률만을 고려할 때 W/B비에 상관없이 습도 감소량에 따라 수축이 선형적으로 진행되는 것으로 나타났다.
- 3) 자기건조에 의한 수축은 물-결합재비가 높고 초기 재령일수록 수축 저감제에 의한 공극수 표면장력 감소가 수축 제어에 효과적이며, 물-결합재비가 낮고 장기재령일수록 지속적인 수화잉여수 공급이 수화조직체의 표면에너지 변화를 최소화하여 수축발생을 감소할 수 있을 것으로 생각된다.
- 4) 물-결합재비가 낮은 콘크리트에서 자기건조에 의한 수축을 제어하기 위해서는 20 nm 이하의 소형공극에서의 공극수 표면장력 감소와 수화잉여수의 공급이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업 (과제번호:06건설핵심D05)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Weiss, W. J. and Shah, S. P., "Restrained Shrinkage Cracking : the Role of Shrinkage Reducing Admixtures and Specimen Geometry", *Materials and Structures*, Vol.35, 2002,

- pp.85~91.
2. Jensen, O. M. and Lura, P., "Techniques and Materials for Internal Water Curing of Concrete", *Materials and Structures*, Vol.39, No.9, 2006, pp.817~825.
  3. Lura, P., Jensen, O. M., and Igarashi, S. I., "Experimental Observation of Internal Water Curing of Concrete", *Materials and Structures*, Vol.40, No.2, 2006, pp.211~220.
  4. Ribeiro, A. B., Goncalves A., and Carrajora, A., "Effect of Shrinkage Reducing Admixtures on the Pore Structures Properties of Mortars", *Materials and Structures*, Vol.39, No.2, 2006, pp.159~166.
  5. Bazant, Z. P., "Constitutive Equations for Concrete Creep and Shrinkage Based on Thermodynamics of Multiphase Systems", *Materials and Structures*, Vol.3, No.13, 1970, pp.2~36.
  6. Hansen, W., "Drying Shrinkage Mechanisms in Portland Cement Paste", *Journal of American Ceramic Society*, Vol.70, No.5, 1987, pp.323~331.
  7. Ferraris, C. F., "Shrinkage Mechanisms of Hardened Cement Paste", *Cement and Concrete Research*, Vol.17, 1987, pp.453~464.
  8. Nikolai, V. C., Gerhard, S., and Jurge, A., "Isotherms of Capillary Condensation Influenced by Formation of Adsorption Films", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.221, 2000, pp.246~253.
  9. Maekawa K., Ishida T., and Kishi T., "Multi-scale Modeling of Concrete Performance Integrated Material and Structural Mechanics", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.2, 2003, pp.91~126.
  10. Klemen, K., *Physics of Surfaces and Interfaces*, GPL, 2005, pp.1~35.
  11. Bazant, Z. P., "Thermodynamics of Hindered Adsorption and its Implication for Hardened Cement Paste and Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.2, 1972, pp.1~16.
  12. Beltzung, F. and Wittmann, F. H., "Role of Disjoining Pressure in Cement Based Materials", *Cement and Concrete Research*, Vol.35, 2005, pp.2364~2370.
  13. Radjy, F., "Moisture Transport in Microporous Substances", *Journal of Materials Science*, Vol.9, 1974, pp.744~752.
  14. Garwin, D. and Schrefler B. A., "Thermo-Hydro-Mechanical Analysis of Partially Saturated Porous Materials", *Engineering Computations*, Vol.7, 1996, pp.113~143.
  15. Persson, B., "Self-desiccation and its Importance in Concrete Technology", *Materials and Structures*, Vol.30, 1997, pp.293~305.
  16. Lura, P., Jensen, O. M., and van Breugel, K., "Autogenous Shrinkage in High-Performance Cement Paste: an Evaluation of Basic Mechanisms", *Cement and Concrete Research*, Vol.33, 2003, pp.223~232.
  17. Yang, Q. B. and Zhang, S. Q., "Self-Desiccation Mechanism of high-Performance Concrete", *Journal of Zhejiang University Science*, Vol.5, No.12, 2004, pp.1517~1523.
  18. Jinag, Z., Sun, Z., and Wang, P., "Autogenous Relative Humidity Change and Autogenous Shrinkage of High-Performance Cement Paste", *Cement and Concrete Research*, Vol.35, 2005, pp.1539~1545.
  19. Xi, Y., Bazant, Z. P., Molina, L., and Jennings, H. M., "Moisture Diffusion in Cementitious Materials", *Advn. Cem. Bas. Mat.*, Vol.1, 1994, pp.258~266.
  20. Hua, C., Acker, P., and Ehlacher, A., "Analysis and Models of the Autogenous Shrinkage of Hardening Cement Paste", *Cement and Concrete Research*, Vol.25, No.7, 1995, pp.1457~1468.
  21. Kovler, K. and Zhutovsky, S., "Overview and Future Trends of Shrinkage Research", *Materials and Structures*, Vol.39, No.9, 2006, pp.827~847.
  22. Bentz, D. P., Garboczi, E. J., and Quenard, D. A., "Modeling of Drying Shrinkage in Reconstructed Porous Materials : Application to Porous Vicour Glass", *Mod. Simul. Mat. Sci. Eng.*, Vol.6, 1998, pp.211~232.
  23. Pane, I., *Hydration Kinetics and Thermomechanics of Blended Cement Systems*, Ph.D thesis, University of Michigan, 2001, pp.108~114.
  24. CEB-FIP, *CEB-FIP Model Code 90 for Concrete Structures*, Comite Euro-International du Beton, Lausanne, 1990.
  25. NISTIR 6295, *Curing of High Performance Concrete: Report of the State of the art*, United states Department of Commerce Technology Administration, 1999, pp.23~30.
  26. Mindess, S., Young, J. F., and Darwin, D., *Concrete*, Prentice-Hall Inc., 2003, pp.75~76.

**요약** 물-결합재비가 낮은 고성능콘크리트의 자기건조에 의한 습도감소와 수축과의 연관성을 파악하기 위하여 물-결합재비 0.3, 0.4의 배합에 대하여 습도와 변형률을 측정하였다. 그 결과 물-결합재비 0.3의 콘크리트 내부 습도 감소는 약 10%, 수축변형률은 약  $320 \times 10^{-6}$ 을 나타내었고, 물-결합재비 0.4의 콘크리트의 경우 4%의 습도 감소와  $120 \times 10^{-6}$  수축변형률을 나타내었으며 배합에 상관없이 습도와 변형률은 모두 강한 선형성을 보였다. 콘크리트 내부 습도 변화와 수축변형률의 관계를 보다 구체화하기 위하여 콘크리트 내부 공극을 단일 네트워크로 가정하고 확장 메니스커스 생성 가정 하에 공극수에서 발생하는 모세관 압력과 수화조직체에서 발생하는 표면에너지 변화를 습도의 함수로 모델링하여 수축의 구동력으로 작용시킨 결과 실험값과 비교적 일치하는 값을 나타내었다. 이를 근거로 물-결합재비가 낮은 고성능 콘크리트에서 자기건조에 의한 습도감소는 20 nm 이하의 소형공극에서 발생함을 파악할 수 있었으며 따라서 자기수축에 대한 제어 방안은 이러한 소형공극에서의 공극수 표면장력과 포화도에 초점을 맞추어야 함을 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : 자기수축, 상대습도, 표면에너지, 모세관압력, 공극