한국방재학회논문집
제7권 3호 2007년 8월
pp. 19 ~ 31

광물질 혼화재를 함유한 고성능 콘크리트의 자기수축

Autogenous Shrinkage of High-Performance Concrete Containing Mineral Admixture

이 창 수* / 박 종 혁** / 김 용 혁** / 김 영 욱**
Chang Soo Lee / Jong Hyok Park / Yong Hyok Kim / Young Ook Kim

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 and containing fly ash and blast furnace slag. Internal humidity change and shrinkage strain were about 10%, 10%, 7%, 11%, 11% and 320×10^{-6}, 274×10^{-6}, 231×10^{-6}, 371×10^{-6}, 350×10^{-6} respectively on OPC30, O30F10, O30F20, O30G40, O30G50 and from the results, fly ash made humidity change and strain decrease but slag increase comparing with ordinary portland cement. Considering only relation internal humidity and shrinkage by self-desiccation, humidity change and shrinkage represented the strong linear relation regardless of mineral admixture. 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 20nm, therefore controlling plan on autogenous shrinkage might be focused on surface tension of water and degree of saturation in small pore.

key words : Mineral admixture, Autogenous shrinkage, Relative humidity, Surface energy, Capillary pressure

요 지

플라이 애쉬와 고로슬래그를 함유하고 물-결합재비가 낮은 고성능 콘크리트의 자기건조에 의한 습도감소와 수축과의 연관성을 파악하기 위하여 내부 습도와 변형률을 측정하였다. 그 결과 일반 콘크리트 내부 습도 감소는 약 10% 수축변형률은 약 320×10^{-6}까지 진행하였으며 플라이 애쉬 10%, 20% 혼입한 콘크리트의 경우 각각 10%, 7%의 습도 감소와 274×10^{-6}, 231×10^{-6}의 변형률을 나타내었다. 고로슬래그 40%, 50%를 혼입한 콘크리트는 11%, 371×10^{-6}, O30G50은 11%, 350×10^{-6}의 습도감소와 수축 변형률을 나타내었으며 플라이 애쉬 혼입 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 습도 감소량과 변형률이 감소하며 고로슬래그 혼입 콘크리트는 증가하는 경향을 보였다. 자기수축의 경우 내부 습도와 변형률의 관계만을 고려할 때 플라이 애쉬, 고로슬래그 혼입 유무에 상관없이 모두 습도와 변형률은 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

* 정회원 · 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: csll@uos.ac.kr)
** 서울시립대학교 대학원 토목공학과 박사과정

습도의 함수로 모델링하여 수축의 구동력으로 작용시킨 결과 실험값과 비교적 일치하는 값을 나타내었다. 이를 근거로 물-결합재비가 낮은 고성능 콘크리트에서 자기건조에 의한 습도감소는 20nm이하의 소형공극에서 발생함을 파악할 수 있었으며 따라서 자기수축에 대한 제어 방안은 이러한 소형공극에서의 공극수 표면장력과 포화도에 초점을 맞추어야 함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 광물질 혼화재, 자기수축, 상대습도, 표면에너지, 모세관압력

1. 서 론

플라이 애쉬, 고로슬래그 등의 광물질 혼화재를 함유하고 물-결합재비가 낮은 고성능 콘크리트에서의 자기수축 연구가 활발히 진행되면서 이에 대한 제어 방안으로 글리콜-에테르 계열의 수축저감제를 이용하여 배합수의 표면장력을 낮추는 방법과 경량골재, 고흡수성수지 등의 흡수율이 큰 재료를 사용하여 지속적인 수화잉여수를 공급하는 내부 양생방법 등이 제시되고 있다(Weiss, 2002; Termkhajorkit, 2005; Jensen, 2006; Lee, 2006; Lura, 2006; Ribeiro, 2006). 그러나 이러한 제어 방법들의 효과를 극대화하기 위해서는 먼저 자기수축의 발생 원인과 특성을 파악하고 광물질 혼화재가 수축에 미치는 영향을 이해하는 연구가 선행되어야한다. 이를 위해 기존 연구결과를 살펴보면 콘크리트 내 수분관련 수축 원인은 Table 1과 같이 모세관 압력, 표면에너지 변화, 수화조직체 내의 층간수 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 수분분포 형상을 설정하여 자기건조에 의한 콘크리트 내부의 상대습도 감소와 변형률의 관계를 살펴보고 광물질 혼화재가 미치는 영향을 파악하여 자기수축 제어방안에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 연구내용 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(Bazant, 1970). 이러한 세 가지 영역의 특징과 수축발생 메커니즘에 대해 살펴보면 먼저 흡착 영역의 경우 기체의 상대습도에 따라 몇 개의 물 분자층을 형성하고 있으며, 상대습도가 감소할 경우 흡착된 물 분자 층이 기체 상태로 증발되고 고체의 표면에너지가 커지게 되면서, 즉 표면장력이 커지면서 수축 구동력으로 작용한다(Hansen,1987). 메니스커스 영역은 물 분자끼리의 점착력보다 물-고체 분자 간 부착력이 더 클 경우 발생하며 공극 크기가 식(6)에 의해 정의되는 Kelvin's radius r_c보다 작을 경우 모세관 응축 현상에 의해 모세관 압력이 발생하고 수축구동력으로 작용하게 된다(Ferraris, 1987; Nicolai, 2000; Maekawa, 2003; Klemen, 2005). 마지막으로 흡착방해영역은 인접한 두 고체 사이의 반데르발스 힘에 의한 인력과 포화된 액체 사이에 유발된 분리압력이 작용하는 구간으로서, 습도가 감소하고 고체 사이의 액체가 불포화 될 경우 작용하고 있던 분리압력의 감소로 인해 수축이 유발되는 영역이다(Bazant, 1972; Beltzung, 2005). 따라서 Fig. 1과 같은 공극 내 수분분포를 근거로 할 경우 작용되는 수축구동력은

Table 1. 콘크리트 내 수분관련 수축 메커니즘 (Kovler, 2006)

Autority	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					

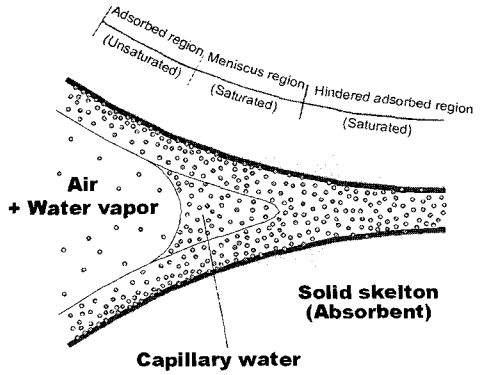

Fig. 1. 콘크리트 공극 내 수분 분포 형상

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(Radjy, 1974; Garwin, 1996).

본 연구에서는 외부와의 수분이동을 차단하고 자기건조에 의한 내부수분 소모와 상대습도 변화에 따른 수축변형률의 관계를 파악하고자하며 다음과 같이 연구범위와 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(Perrson, 1997; Lura, 2003; Yang, 2004 ;Jiang, 2005). 즉, Fig. 3과 같이 공극은 한 개의 단일 네트워크를 구성하고 있으며 콘크리트 공극 분포 형상과 상대습도에 따라 확장 메니스커스를 이루는 것으로 가정하였다. 따라서 이와 같은 메니스커스 존재 하에서는 공극이 완전 불포화되어 흡착영역만이 존재하는 경우는 고려되지 않으므로 흡착방해영역에서의 분리압력 감소효과는 연구범위에서 제외하였으며, 기존 연구에서의 분리압력 감소효과는 습도 80%이하에서 발현되는 것으로 보고되고 있으므로 본 연구에서 설정된 가정 사항은 타당성을 지닐 것으로 판단된다(Xi,1994; Hua, 1995).

이와 같이 확장 메니스커스 영역에서의 표면에너지 변화와 모세관 압력으로 구성된 콘크리트 내부의 상대습도와 변형률의 관계를 파악하기 위하여 Fig. 2와 같은 수축모델설정, 탄성계수, 공극분포, 상대습도, 변형률 측정 등의 실험 내용을 수행하였다.

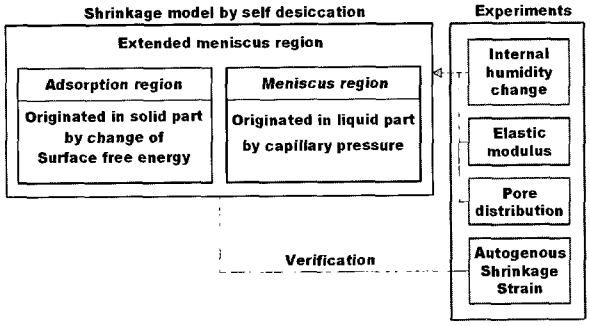

Fig. 2. 연구 구성 및 흐름

2.2 수축 모델링

콘크리트의 자기건조에 의한 수축을 모델링하기 위하여 콘크리트 내부는 Fig. 1과 같이 고체-액체-기체의 3상구조로 이루어져 있으며 고체는 골재, 수화조직체를 형성하고, 액체, 기체는 공극을 구성하는 것으로 가정한다. 이와 같은 가정하여 시멘트 수화와 자기건조가 이루어져 공극 내 메니스커스가 형성될 경우 발생하는 수축구동력은 기체-액체 경계면 압력의 차이로 인한 모세관 압력과 흡착영역 표면에너지 변화로 인한 표면장력으로 구성된다. 먼저 모세관 압력은 식(1)과 같이 액체-기체 간 평형에너지를 이루기 위한 조건으로서 Kelvin's Eq.으로 표현된다.

Table 2. 콘크리트 고체-액체-기체 내에서의 상변화와 에너지 평형

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

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

여기서, P_{cap} : 모세관 압력 (Pa)
P_v : 기체압력 (Pa)
P_l : 액체압력 (Pa)
R : 이상기체상수 $(8.314 J/(mol \cdot K))$
T : 절대온도 $(293K)$
V_0 : 물의 몰분율 $(18.02 \times 10^{-6} m^3/mol)$
h : 상대습도

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

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

여기서, ϕ : 공극률
E : 탄성계수 (Pa)

다음으로 흡착 영역 표면에너지 변화에 따른 수축 구동력을 묘사하기 위하여 공극을 둘러싼 고체 단위 길이 당 표면에너지 변화 $\Delta\gamma$에 따른 표면압력 P_s를 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. (Bentz, 1998)

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

식(4)는 흡착영역과 흡착방해영역에서의 물질이동 제한 가정과 화학적 포텐셜 에너지가 같음을 이용하여 습도에 따른 두 영역에서의 표면에너지 변화는 같음을 증명하였으므로 고체 전 영역에 적용할 수 있다 (Pane, 2001).

한편 식(3)의 Kelvin's radius r_c는 일정 상대 습도의 공극 내 모세관 응축을 일으키는 최소 반경을 의미하며 식(5)의 Laplace 's Eq.과 식(1)의 Kelvin's Eq.을 이용하여 식(6)와 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 표면에너지 변화에 의한 Gibbs-Bingham 수축 변형률은 식(7)과 같이 표현될 수 있다.

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

따라서 모세관 압력과 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, ε_{as} : 전체 수축 변형률
ε_{cap} : 모세관 압력에 의한 수축 변형률
ε_{GB} : 표면에너지 변화에 의한 수축 변형률

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

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

여기서, E_{ci} : 측정 접선탄성계수
Φ : CEB-FIP MC 90에 의한 크리프 계수 (CEB-FIP, 1990)

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.

$$S = \frac{\phi_s}{\phi} \tag{10}$$

여기서, S : 포화도

ϕ_s : Kevin's radius 이하의 공극률

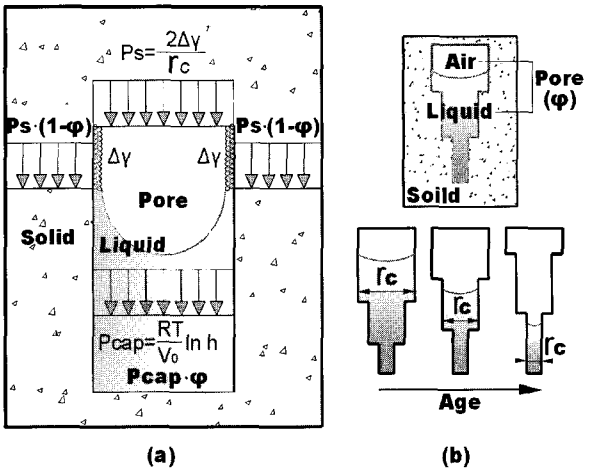

Fig. 3. 수축모델링 (a) 수축구동력 발생 메커니즘 (b) 공극 및 수분 분포 진행

2.3 실험내용 및 방법

콘크리트 자기건조에 의한 내부의 습도변화와 변형률의 관계를 파악하고 플라이 애쉬와 고로슬래그가 미치는 영향을 살펴보기 위하여 식(8)의 구성에 필요한 습도, 탄성계수, 공극률과 변형률 측정 실험을 수행하였다. 기존 수화도 연구에 의하면 외부와의 수분 이동이 차단된 상태에서 시멘트의 완전 수화를 이루기 위한 최소의 물-결합재비는 0.42정도로 알려져 있다. 즉, 최소 물-결합재비 0.42이하에서는 완전 수화에 필요한 잉여수가 부족하여 미수화 시멘트 입자가 존재하게 되며 실용적인 배합 측면에서 현재 고성능 콘크리트에 적용되는 물-결합재비는 0.30~0.40의 범위를 지니고 있으므로 본 연구에서는 Table 5와 같이 물-결합재비를 0.30으로 고정하고, 플라이 애쉬 10, 20%, 고로슬래그 40, 50%를 시멘트 중량대비 치환한 배합을 설정하였다(NISTIR, 1995). 여기서 페이스트 부피에 대한 자기수축 영향을 배제하기 위하여 페이스트 부피와 골재의 부피비는 0.6으로 고정하였다. 사용된 결합재는 Table 3과 같은 특성을 지니는 보통포틀랜드 시멘트, 플라이 애쉬, 고로슬래그를 적용하였으며, 골재는 Table 4와 같이 최대치수 19mm 부순돌과 강모래를 사용하였다.

구체적인 실험방법으로서 공극 특성은 배합별로 φ 10×20㎝ 공시체를 제작하고 각 1, 3, 5, 7, 14, 28일 재령별로 만능시험기를 이용하여 탄성계수 및 압축강도 측정 후 아세톤 1일 침지 후 수화 정지된 시편을 수은 압입법에 의한 공극률 측정 장치를 이용하여 공극률을 측정하였다.

자기건조에 따른 습도와 변형률은 Fig. 4와 같이 100×100×400㎜공시체에 습도측정 센서와 변형률 게이지를 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 보호함으로서 측정의 정밀도를 향상하였다.

Table 3. 결합재의 물리·화학적 특성

Item / Material	Chemical composition (%)							Physical properties	
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Ignition loss	Specific gravity	Blaine (m^2/g)
Cement	20.7	5.2	3.0	62.4	4.7	2.4	1.36	3.15	0.345
FA	55.8	21.5	6.0	6.8	1.5	0.1	3.44	2.26	0.332
GS	34.2	15.7	0.1	43.5	5.8	2.7	0.06	2.93	0.443

Table 4. 골재의 물리적 특성

Item / Material	Specific gravity	F.M	Absorption(%)	Unit weight(kg/m^3)	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. 콘크리트 배합

Item / Mixture	Gmax (mm)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m^3)							Slump (mm)	Initial setting (h:m)	28day compressive strength (MPa)
				W	C	FA	GS	S	G	SP (B×%)			
OPC30	190	30	48	156	520	-	-	750	825	1.2	160	12:15	53
O30F10	190	30	48	153	459	51	-	750	825	1.1	156	12:45	48
O30F20	190	30	48	150	400	100	-	750	825	1.0	155	13:20	45
O30G40	190	30	48	153	307	-	204	751	826	1.2	162	13:30	56
O30G50	190	30	48	153	255	-	255	750	825	1.3	166	13:55	51

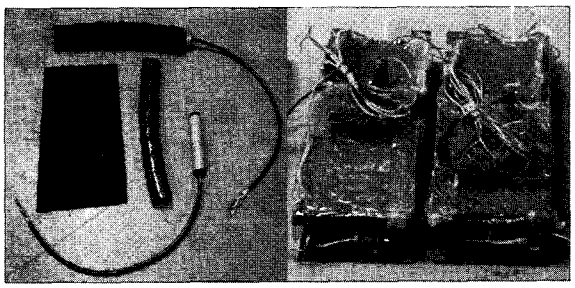

Fig. 4. 습도 및 변형률 측정 시험체

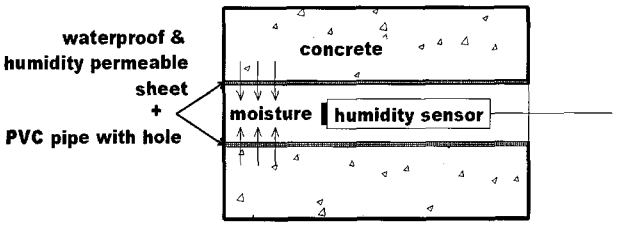

Fig. 5. 습도 측정 장치 모식도

3. 연구결과

3.1 수축모델 매개변수 측정결과

콘크리트 자기건조와 변형률의 관계를 파악하고 모세관압력과 표면에너지 변화에 따른 변형률 식(8)을 구성하기 위한 매개변수인 탄성계수, 공극률, 습도변화 실험결과를 Fig. 6~Fig. 10에 나타내었다. 먼저 재령 1~28일에 따른 압축강도와 탄성계수의 경우 OPC30은 18~52MPa, 22~37GPa, O30F10과 O30F20은 각각 13~48MPa, 18~35GPa, 12~45MPa, 17~33GPa,까지 증가하였으며, O30G40, O30G50은 각각 17~56MPa, 20~38GPa, 15~51MPa, 20~36GPa으로 나타났다. 식(8)에 적용하기 위한 식(9)의 유효탄성계수 산정 시 필요한 크리프계수는 자기수축이 콘크리트 종결시점부터 진행한다는 가정 하에 하중 재하시기를 Table 5에서와 같이 약 0.5일을 적용하여 OPC30은 15~17GPa, O30F10과 O30F20은 각각 12~15GPa, 11~14GPa, O30G40과 O30G50은 각각 14~18GPa, 14~16GPa의 범위를 지니는 유효탄성계수 값을 산출하였다.

배합별, 재령별 공극률 측정 결과는 Fig. 8과 같이 OPC30은 0.21~0.15, O30F10과 O30F20은 각각 0.22~0.16, 0.23~0.17, O30G40과 O30G50은 각각

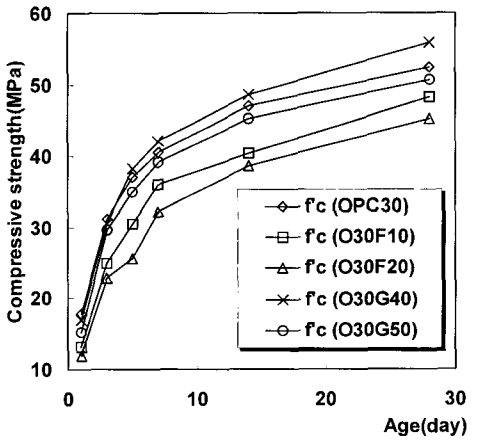

Fig. 6. 배합별 압축강도 측정 결과

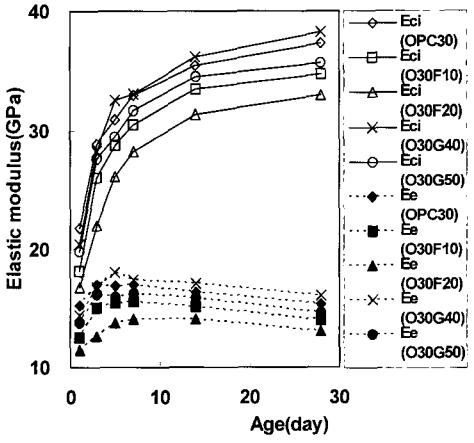

Fig. 7. 배합별 탄성계수 측정 결과

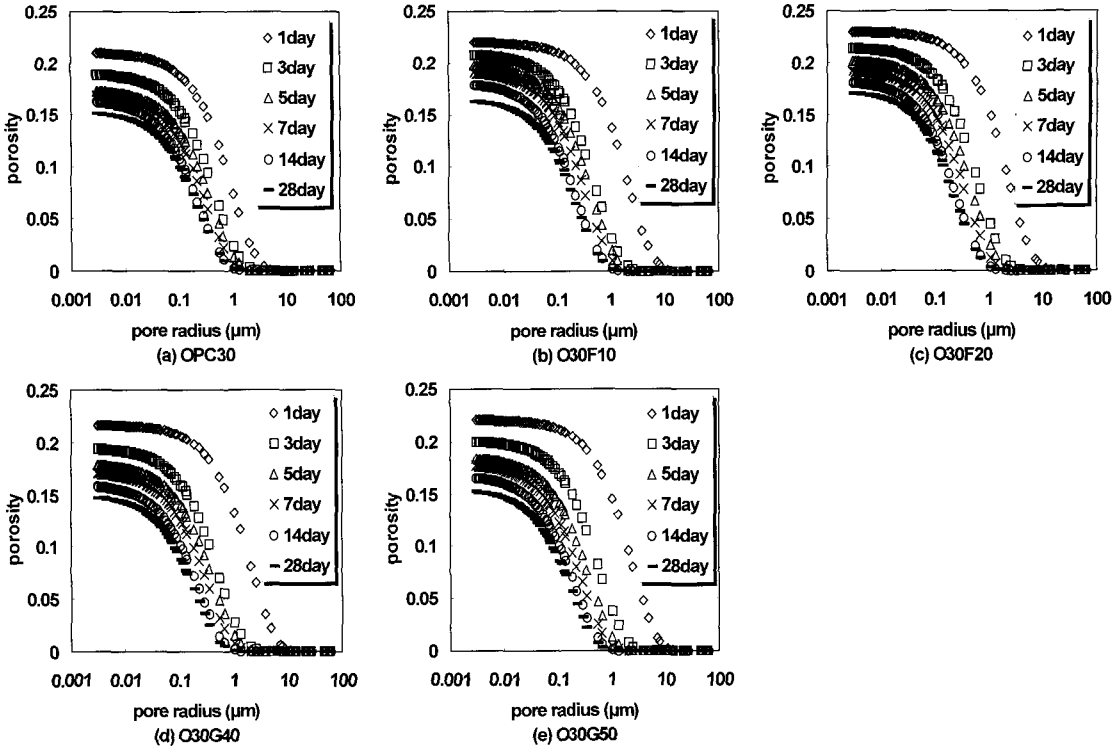

Fig. 8. 배합별 공극률 측정 결과

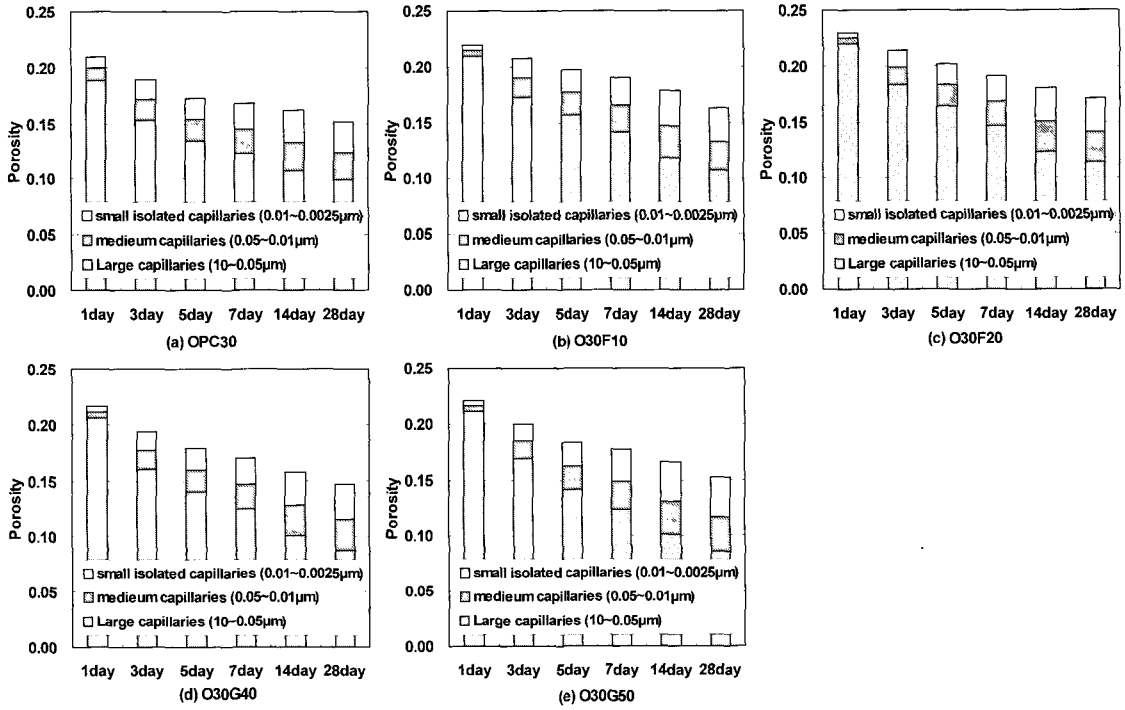

Fig. 9. 배합별 공극률 크기 분포

0.15~0.22, 0.22~0.15까지 변화하였다. 기존 연구에 의해 공극 크기를 대형공극, 중형공극, 소형공극으로 나누어 Fig. 9에 나타낸 결과 수축에 영향을 미치는 중형공극 크기 이하의 공극 분포는 OPC30, O30G40, O30G50에서 높은 비율을 나타냈으며 특히 3일 이하의 초기재령에서 플라이 애쉬 혼입 콘크리트에 비하여 소형공극의 생성이 두드러진 것으로 나타났다 (Mindess, 2003). 이는 플라이 애쉬 혼입 콘크리트

는 일반 콘크리트에 비하여 소형공극의 생성과 비율이 다소 작고 지연되는 현상을 나타내며, 고로슬래그 치환 콘크리트는 일반 콘크리트에 비하여 초기에서는 동등하거나 다소 작지만 재령이 경과함에 따라 소형공극이 보다 높게 생성됨으로서 Kelvin's radius에 대응하는 모세관 응축 현상이 발생할 수 있는 환경을 제공하는 것으로 해석될 수 있다. 따라서 고로슬래그 혼입 콘크리트는 일반 콘크리트와 플라이 애쉬 혼입 콘크리트에 비하여 수축이 빠르고 크게 일어날 수 있음을 예측할 수 있다.(고경택, 2003)

콘크리트 습도와 변형률 측정 결과는 Fig. 10에 도시하였으며 재령28일까지 OPC30의 습도는 약 10%정도 감소하였고 이에 따른 수축 변형률은 320×10^{-6}까지 진행되었다. O30F10의 경우 9%의 습도감소와 274×10^{-6}의 수축 변형률을 나타내었으며 O30F20은 각각 7%, 231×10^{-6}, O30G40은 11%, 371×10^{-6}, O30G50은 11%, 350×10^{-6}의 습도감소와 수축 변형률을 나타내었다. 각각의 발현 특성을 살펴보면 OPC30, O30G40의 경우 측정시점부터 재령 10일까지 급격한 습도감소와 수축진행을 나타냈으며 재령 10~14일 이후 완만한 진행 과정을 보였다. O30F10, O30F20, O30G50의 경우 시점에 관계없이 보다 일정한 진행 양상을 나타내었으며, 전체적으로 모두 습도와 수축 진행 속도가 유사한 경향을 보였다. 따라서 이에 대한 관계를 파악하기 위해 Fig. 11과 같이 내부 습도와 변형률의 관계를 분석한 결과 높은 선형성을 나타내

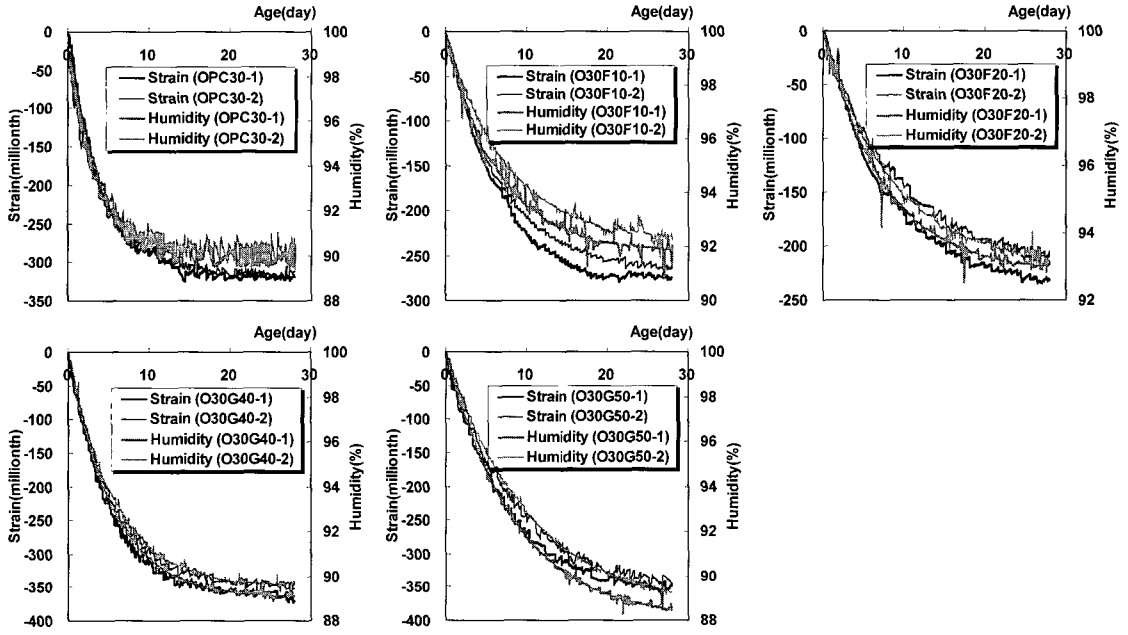

Fig. 10. 배합별 습도 및 변형률 측정 결과

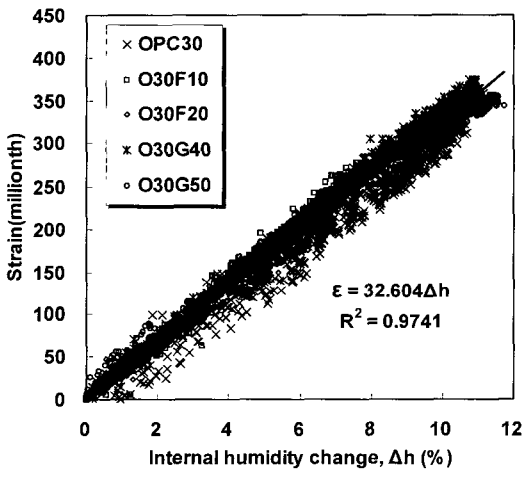

Fig. 11. 내부 습도변화와 변형률의 관계

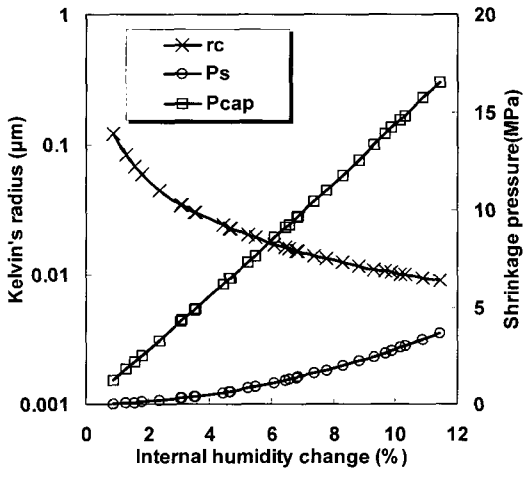

Fig. 12. 습도변화와 Kelvin's radius

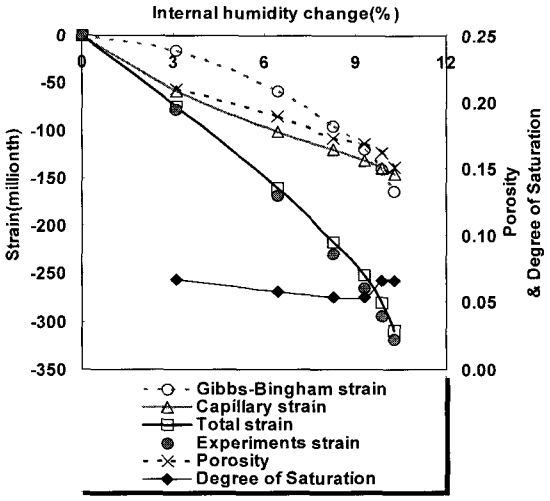

Fig. 13. 변형률 측정값과 모델식(식 8)과의 비교(OPC30)

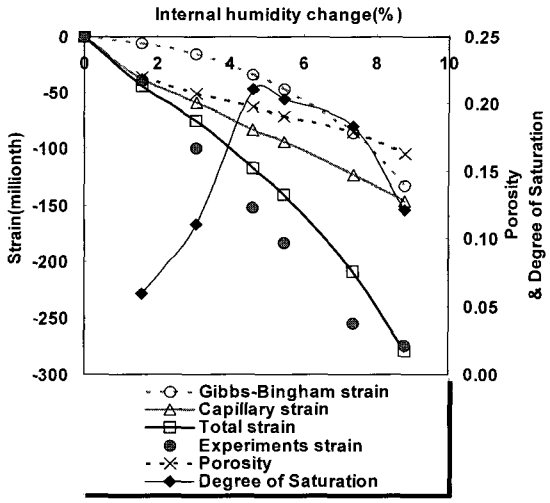

Fig. 14. 변형률 측정값과 모델식(식 8)과의 비교(O30F10)

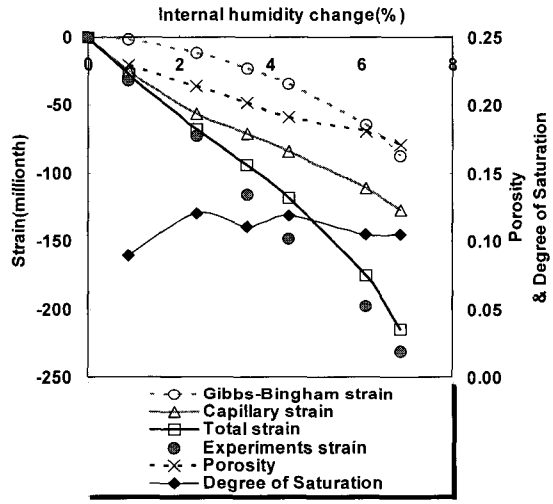

Fig. 15. 변형률 측정값과 모델식(식 8)과의 비교(O30F20)

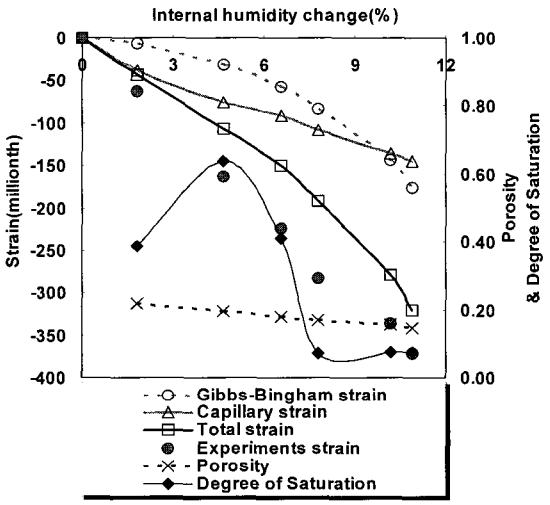

Fig. 16. 변형률 측정값과 모델식(식 8)과의 비교(O30G40)

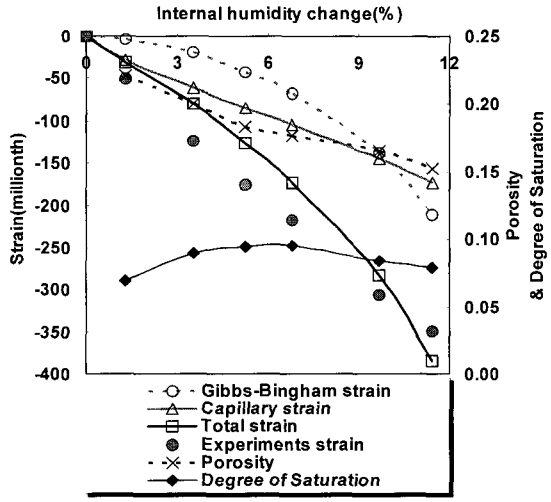

Fig. 17. 변형률 측정값과 모델식(식 8)과의 비교(O30G50)

었으며 이는 자기수축의 경우 내부 습도와 변형률의 관계만을 고려할 때 플라이 애쉬, 고로슬래그 혼입 유무에 상관없이 습도 감소량에 따라 수축이 선형적으로 진행되는 것으로 해석될 수 있다.

3.2 수축변형률과 습도와의 관계

Fig. 11에 나타난 수축변형률과 습도와의 관계를 보다 구체적으로 파악하기 위하여 공극 내 확장 메니스커스에서 발생되는 모세관 압력과 표면에너지 변화에 의한 수축변형률을 Fig. 13~17에 나타내었다. 먼저 수축변형률과 습도와의 관계 측면에서 살펴보면 식(8)에 의한 모델값과 측정값이 유사한 경향을 나타내었으며 이는 자기건조에 의한 콘크리트 공극 내 상대습도 변화에 따른 두 가지 정보를 나타내는 것으로 해석될 수 있다. 첫째, 10%이내의 상대습도 변화까지는 공극수의 모세관압력에 의한 수축이 표면에너지 변화에 의한 수축보다 크게 작용하지만 이후의 변형률은 공극률 크기 감소와 함께 표면에너지 변화에 의한 수축이 보다 우세해지는 것으로 판단된다. 따라서 물-결합재비가 높을수록, 초기재령일수록 수축저감제에 의한 공극수 표면장력감소가 수축제어에 효과적이며, 물-결합재비가 낮을수록, 장기재령일수록 지속적인 수화잉여수 공급이 수화조직체의 표면에너지 변화를 최소화하여 수축발생을 감소할 수 있을 것으로 생각된다. 두 번째 해석으로서는 Fig. 12의 표면압력 P_s와 모세관 압력 P_{cap}을 유발하기위한 Kelvin's radius r_c에 대응하는 실제 공극이 습도변화에 따른 메니스커스를 형성하며 불포화 평형상태를 이루고 있음을 파악할 수 있다. 즉, Fig. 12에 나타난 습도변화 10%까지의 Kelvin's radius는 이론상 $10nm$이하의 크기이며 이는 기존 연구에 따른 공극 크기 분류에서 $20nm$이하의 소형공극 중 주로 겔공극의 크기에 해당한다. 따라서 본 연구의 실험내용으로서 Kelvin's radius 이상의 공극 내에서의 수분 분포와 포화 정도는 정확히 파악할 수 없으나 각각의 습도변화에 대응하는 Kelvin's radius 공극은 매우 낮은 포화도와 확장 메니스커스를 이루며 표면에너지 변화와 모세관 압력에 의한 수축구동력이 작용하는 것으로 유추할 수 있다. 이는 물-결합재비가 낮은 콘크리트에서 자기건조에 의한 수분감소는 주로 수화조직체 내의 겔공극 내에서 진행됨을 의미하며, 물-결합재비가 높은 일반콘크리트의 경우 동일한 습도감소가 있더라도 상대적으로 변형률의 크기가 작은 것은 모세관 공극에 존재하는 수화 잉여수가 겔공극 내에 지속적인 수분 공급 가능성 측면과 외부로의 수분이동은 비교적 크기가 큰 모세공극 내의 수분이 이동하여 불포화 메니스커스를 형성하므로 상대적으로 큰 수축 구동력이 발현되지 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 지속여부, 내부양생에 의한 수화수 공급이 겔공극 내부의 수분분포에 미치는 영향 등이 추후 후행되어야 할 것으로 판단된다.

3.3 광물질 혼화재와 자기수축과의 관계

측정된 상대습도값에 의한 수축모델값과 측정 수축변형률이 비교적 가장 유사한 값을 나타내는 28일 측정결과를 나타내면 표 와 같으며 모델의 타당성을 전제로 광물질 혼화재 치환이 콘크리트의 자기건조와 자기수축에 미치는 영향은 다음과 같이 해석될 수 있다. Kelvin's radius r_c는 각각의 수축변형률을 발생하기 위한 불포화공극의 크기를 의미하며 실제 수축변형률이 발생하려면 r_c 크기의 공극이 불포화되어 있어야만 수축변형률을 유발할 수 있는 모세관압력, 표면에너지 변화의 수축구동력이 발생됨을 나타낸다. 플라이 애쉬의 경우 치환률이 증가할수록 Kelvin's radius r_c가 커지며 이는 전체공극률이 커져 수축이 발생될 수 있는 환경적 조건은 생성되지만 Kelvin's radius r_c가 커지면서 포화된 미세공극이 증가함을 의미한다. 즉 플라이 애쉬 치환 콘크리트의 경우 OPC에 비하여 자기건조에 의한 습도감소량의 감소와 Kelvin's radius r_c이하의 미세공극의 불포화 시기가 지연되어 수축이 감소하는 것으로 생각된다. 이에 비해 고로슬래그의 경우 치환률이 증가할수록 습도감소량이 커지며 이에 대응하는 Kelvin's radius r_c는 감소하게 된다. 즉 고로슬래그 치환 콘크리트의 경우 OPC에 비하여 상대습도의 감소가 커지며 또한 이러한 상대습도의 감소는 OPC에 비하여 미세공극에서 이루어지는 것으로 유추할 수 있다. 이는 플라이 애쉬와 고로슬래그의 포졸란 반응과 잠재수경성 반응의 반응성 차이로 생각되며 이에 대해 Fig. 6의 강도 발현을 수화도로 가정하여 습도감소와 수화의 관계를 고찰할 경우 플라이 애쉬는 일반 시멘트에 비해 낮은 수화도를 나타내므로 낮은 자기건조량을 타나내며, 고로슬래그의 경우 유사한 수화속도를 나타내므로 유사

Table 6 수축모델 매개변수 및 수축변형률 측정값(28일)

Item / Mixture	S (Degree of Saturation)	ϕ (Porosity)	Kelvin's radius r_c (μm)	Shrinkage strain (Experiments)	Shrinkage strain (Model Eq.8)
OPC30	0.066	0.151	100	319	310
O30F10	0.120	0.163	118	274	279
O30F20	0.110	0.171	153	231	215
O30G40	0.076	0.148	94	371	320
O30G50	0.079	0.152	90	349	384

한 자기건조량을 나타내는 것으로 생각될 수 있다. 따라서 수화도와 자기건조에 의한 습도감소와의 가역적인 관계가 증명될 경우 수화-자기건조-변형률의 수축 메커니즘이 보다 명확해질 것으로 판단된다.

4. 결 론

자기건조에 의한 콘크리트 내부의 상대습도와 변형률의 관계를 파악하고 플라이 애쉬, 고로슬래그가 이에 대해 미치는 영향을 알아보기 위하여, 콘크리트의 탄성계수, 공극 분포, 상대습도, 변형률 등을 측정하고, 확장 메니스커스 영역으로 설정한 공극 내 수분분포 형상에 작용하는 모세관압력과 표면에너지 변화에 의한 수축변형률 모델 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 콘크리트 습도와 변형률 측정 결과 재령28일까지 OPC30의 습도는 약 10%정도 감소하였고 이에 따른 수축 변형률은 320×10^{-6}까지 진행되었다. O30F10의 경우 9%의 습도감소와 274×10^{-6}의 수축 변형률을 나타내었으며 O30F20은 각각 7%, 231×10^{-6}, O30G40은 11%, 371×10^{-6}, O30G50은 11%, 350×10^{-6}의 습도감소와 수축 변형률을 나타내었다.

(2) 내부 습도와 변형률의 관계를 분석한 결과 높은 선형성을 나타내었으며 이는 자기수축의 경우 내부 습도와 변형률의 관계만을 고려할 때 플라이 애쉬, 고로슬래그 혼입 유무에 상관없이 습도 감소량에 따라 수축이 선형적으로 진행되는 것으로 판단된다.

(3) 자기건조에 의한 수축은 초기재령일수록 수축저감제에 의한 공극수 표면장력감소가 수축제어에 효과적이며, 장기재령일수록 지속적인 수화잉여수 공급이 수화조직체의 표면에너지 변화를 최소화하여 수축발생을 감소할 수 있을 것으로 생각된다.

(4) 물-결합재비가 낮은 콘크리트에서 자기건조에 의한 수축을 제어하기 위해서는 20nm이하의 소형공극에서의 공극수 표면장력 감소와 수화잉여수의 공급이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

(5) 일반 콘크리트에 비해 플라이 애쉬를 혼입한 콘크리트는 자기건조에 의한 내부 습도 변화량을 감소시키며 고로슬래그의 경우 동등 또는 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서 자기수축을 저감하기 위해서는 플라이 애쉬의 혼입이 효과적일 것으로, 고로슬래그 적용 시에는 적절한 주의가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 서울시립대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

고경택, 박정준, 이종석, 김도겸(2003), "광물질 혼화재를 사용한 고성능 콘크리트의 수축특성." 대한토목학회논문집, 23권, 6A호, pp.1133-1141

Bazant, Z. P. (1970), "Constitutive Equations for Concrete Creep and Shrinkage Based on Thermodynamics of Multiphase Systems," Materials and Structures, Vol. 3, No. 13, pp.2-36

Bazant, Z. P. (1972), "Thermodynamics of Hindered Adsorption and its Implication for Hardened Cement Paste and Concrete." *Cement and Concrete Research*, Vol. 2, pp.1-16

Beltzung, F., Wittmann, F. H. (2005), "Role of Disjoining Pressure in Cement Based Materials," *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp.2364-2370

Bentz, D. P., Garboczi, E. J., and Quenard, D. A. (1998), "Modeling of Drying Shrinkage in Reconstructed Porous Materials : Application to Porous Vicour Glass," *Mod. Simul. Mat. Sci. Eng.*, Vol. 6, pp.211-232

CEB-FIP(1990), CEB-FIP Model Code 90 for Concrete Structures, Comite Euro-International du Beton, Lausanne.

Ferraris, C. F. (1987), "Shrinkage Mechanisms of Hardened Cement Paste," *Cement and Concrete Research*, Vol. 17, pp.453-464

Garwin, D., Schrefler B. A. (1996), "Thermo-Hydro-Mechanical Analysis of Partially Saturated Porous Materials," *Engineering Computations*, Vol. 7, pp.113-143

Hansen, W. (1987), "Drying Shrinkage Mechanisms in Portland Cement Paste," *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 70, No. 5, pp.323-331

Hua, C., Acker, P., Ehrlacher, A.(1995), Analysis and Models of the Autogenous Shrinkage of Hardening Cement Paste, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7, pp.1457-1468.

Jensen, O. M., Lura, P.(2006),"Techniques and Materials for Internal Water Curing of Concrete," *Materials and Structures*, Vol. 39, No. 9, pp.817-825

Jiang, Z., Sun, Z., Wang, P.(2005), "Autogenous Relative Humidity Change and Autogenous Shrinkage of High-Performance Cement Paste," *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 1539-1545

Klemen, K. (2005), Physics of Surfaces and Interfaces, GPL

Kovler, K., Zhutovsky, S. (2006), "Overview and Future Trends of Shrinkage Research," *Materials and Structures*, Vol. 39, No. 9, pp.827-847

Lee, K. M., Lee, H. K., Lee, S. H., Kim, G. Y. (2006),"Autogenous Shrinkage of Concrete Containing Granulated Blast-Furnace Slag," *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp.1279-1285

Lura, P., Jensen, O. M., van Breugel, K. (2003), "Autogenous Shrinkage in High-Performance Cement Paste : an Evaluation of Basic Mechanisms," *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp.223-232

Lura, P., Jensen, O. M., Igarashi, S. I. (2006),"Experimental Observation of Internal Water Curing of Concrete," *Materials and Structures*, Vol. 40, No. 2, pp.211-220

Maekawa K., Ishida T., Kishi T.(2003), Multi-scale Modeling of Concrete Performance Integrated Material and Structural Mechanics, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 2, pp.91-126.

Mindess, S., Young, J. F., Darwin, D.(2003), "Concrete," Prentice-Hall Inc.

Nikolai, V. C., Gerhard, S., Jurge, A. (2000), "Isotherms of Capillary Condensation Influenced by Formation of Adsorption Films," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 221, pp.246-253

NISTIR 6295(1999), Curing of High Performance Concrete : Report of the State of the art, United states Department of Commerce Technology Administration.

Pane, I.(2001), Hydration Kinetics and Thermomechanics of Blended Cement Systems, Ph.D thesis, University of Michigan.

Persson, B.(1997)," Self-desiccation and its Importance in Concrete Technology," *Materials and Structures*, Vol. 30, pp. 293-305

Radjy, F.(1974)," Moisture Transport in Microporous Substances," *Journal of Materials Science*, Vol. 9, pp.744-752

Ribeiro, A. B., Goncalves A., Carrajora, A. (2006), "Effect of Shrinkage Reducing Admixtures on the Pore Structures Properties of Mortars," *Materials and Structures*, Vol. 39, No. 2, pp.159-166

Termkhajajornkit, P., Nawa, T., Nakai, M., Saito, T. (2005), "Effect of Fly Ash on

Autogenous Shrinkage," *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp.473-482

Weiss, W. J., Shah, S. P.(2002), "Restrained Shrinkage Cracking : the Role of Shrinkage Reducing Admixtures and Specimen Geometry," *Materials and Structures*, Vol. 35, pp.85-91

Xi, Y., Bazant, Z. P., Molina, L., Jennings, H. M.(1994), "Moisture Diffusion in Cementitious Materials," *Advn. Cem. Bas. Mat.*, Vol. 1, pp. 258-266

Yang, Q. B., Zhang, S. Q. (2004),"Self-Desiccation Mechanism of high-Performance Concrete," *Journal of Zhejiang University Science*, Vol. 5, No. 12, pp.1517-1523

◎ 논문접수일 : 2007년 05월 09일
◎ 심사의뢰일 : 2007년 05월 10일
◎ 심사완료일 : 2007년 06월 25일