

공극률을 이용한 고성능 콘크리트의 압축강도 특성 모델링

Modeling on Compressive Strength in High Performance Concrete Using Porosity

이 학 수¹⁾ 권 성 준^{2)*}
Lee, Hack Soo Kwon, Seung Jun

Abstract

Compressive strength in concrete increases with time. Regression analysis with time is conventionally performed for strength evaluation and prediction. In this study, hydrate amount is assumed as a function of hydration rate and porosity, and modeling on compressive strength is carried out considering decreasing porosity with time, which does not need the regression analysis with time. For twenty one mix proportions of HPC (High Performance Concrete), DUCOM (FE program) which can simulate the behavior in early aged concrete is utilized, and porosity from each mix proportions is obtained with time. For HPC with OPC (Ordinary Portland Cement) concrete, modeling on compressive strength is performed considering hydration rate, unit content of cement, and porosity with time. For HPC with mineral admixtures, a long-term parameter which can handle long-term strength development is additionally considered. From the comparison with the previous test results, the applicability of the proposed model is verified.

Keywords : Compressive strength, High performance concrete, Porosity, Early aged concrete, Long term strength

1. 서론

콘크리트의 압축강도는 가장 기본적인 콘크리트의 공학적 특성이며 최근에는 내구성 지표로 사용될 만큼 다양한 분야에서 사용되고 있다(Neville, 1996; Al-Amoudi et al., 2009). 강도 예측에 대한 연구는 매우 고전적인 연구분야로서 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 대표적으로 물-시멘트비와 재령을 고려하여 반경험식의 형태로 제안된 연구결과들이 있다(CEB-FIP, 1990; Park et al., 2011). 이러한 연구들은 기술자들이 강도평가를 쉽게 할 수 있으나, 주로 회귀분석을 통하여 얻어지는 식들이며, 다양한 혼화재료를 사용한 고성능 콘크리트(HPC; High Performance Concrete)에서는 적용이 매우 제한적일 수 밖에 없다. 또 하나의 접근방법은 비파괴 또는 다양한 확률수치해석기법을 이용하여 압축강도를 예측하는 기법이다. 최근 들어 신경망이론(Kim et al., 2004; Stegemann

and Buenfeld, 2002) 또는 초음파기법(Lim and Kang, 2001) 등을 이용한 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구는 콘크리트의 강도를 적절하게 예측할 수 있으나 재료모델링을 포함하고 있지 않으므로 다양한 배합 및 재령에 대한 영향을 고려할 수 없다. 마지막으로 공극률 및 수화물량을 고려한 강도모델링이 있다. 이러한 연구는 오래전부터 수행되어 왔으나(Ryshkewitch, 1953; Schiller 1958), 최근들어 콘크리트 초기재령 모델링에 대한 연구가 수행되면서 크게 각광받고 있다(Ishida and Maekawa, 2003; Ishida et al., 2007; Maekawa et al., 2003).

콘크리트의 공극구조 및 공극률은 콘크리트의 강도 뿐만 아니라 내구적인 특성과도 매우 밀접한 관계가 있으므로, 다양한 내구성능과의 관계에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있으며(박상순 등, 2009), 수화발열모델과 미세공극형성 모델링을 고려한 강도 및 균열저항성에 대한 연구 역시 활발하게 진행되고 있다(Song et al., 2001; Kato

1) 정희원, 한남대학교 건설시스템 공학과 교수

2) 정희원, 한남대학교 건설시스템 공학과 조교수, 교신저자

* Corresponding author : juni98@hannam.ac.kr 042-629-8020

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2013년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

and Kishi, 1994).

본 연구는 미세공극구조 모델링(MPSFM; Micro Pore Structure Formation Model)을 이용하여 공극률을 도출하고 이를 이용하여 재령 7일에서 180일 간의 압축강도를 예측하였다. 이를 위해, 열역학적 연성모델인 DUCOM 프로그램을 이용하여 재령에 따른 공극률을 도출하였으며, 수화물 생성을 공극률의 함수로 구현하여 고로슬래그 미분말(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag) 및 플라이애쉬(FA: Fly Ash)를 혼입한 고성능 콘크리트의 강도예측을 수행하였다. 간단한 지수함수와 실험상수를 도입하여 OPC 콘크리트의 강도를 예측하였으며, 혼화 재료를 사용한 콘크리트의 장기강도증가를 고려하기 위해 공극률 변화함수를 도입하였다.

2. 공극구조 형성모델(MPSFM) 및 실험의 개요

2.1 공극구조 형성모델(Maekawa et al., 1999)

DUCOM 프로그램에서는 다상복합수화발열모델에 의해 수화반응이 진행되고 이에 따라 생성물 두께가 구해지면 외부생성물 표면적을 도출한다. Fig. 1에서는 수화의 진행에 따른 공극구조 형성모델의 개요를 나타내고 있다 (Maekawa et al., 1996).

본 연구에서 이용한 DUCOM 해석 모델 중 공극구조 형성모델에서는 내부생성물 및 외부생성물을 동시에 다룬 전체적인 체계에서의 공극구조를 식 (1)과 같이 공극 분포 밀도함수로 제시하였다.

$$\phi(r) = \phi_{cp} V_{cp}(r) + \phi_{gl} V_{gl}(r) + \phi_{lr} \quad (1)$$

여기서, ϕ_{cp} , ϕ_{gl} , ϕ_{lr} 은 각각 capillary pore, gel

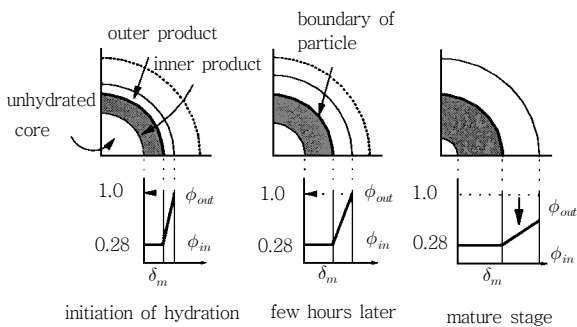


Fig. 1 Pore structure modeling with hydration process

pore, layed pore를 나타내며, $V_{cp}(r)$ 과 $V_{gl}(r)$ 은 시멘트 경화체중의 모세관 공극 및 겔공극에 대한 공극경 분포를 규정한 함수이다. 각각의 공극 i 에 대해서 공극경 분포함수는 식 (2)과 같은 형태로 정의할 수 있고 이 식을 미분하면 식 (3)을 도출할 수 있다.

$$V_i = 1 - \exp(-B_i r), \quad (0 \leq V_i(r) \leq 1.0) \quad (2)$$

$$dV_i = B_i r \exp(-B_i r) \cdot d \ln(r) \quad (3)$$

여기서, B_i 는 함수형상을 결정하는 변수, r 은 공극반경을 나타낸다. 모세관공극 또는 겔공극을 원통형으로 가정할 때 표면적의 값 S_i 는 식 (4)로부터 도출된다.

$$S_i = 2\phi_i \int_{r_{min}}^{\infty} r^{-1} dV = 2\phi_i \int_{r_{min}}^{\infty} B_i \exp(-B_i r) d \ln(r) \quad (4)$$

여기서, r_{min} 은 최소공극반경을 나타낸다. 식 (4)는 수학적으로 풀기가 어렵기 때문에 많은 수치해석결과에 의해 구한 B 와 S/ϕ 의 관계를 이용하여 실제의 수치계산에 이용한다(Maekawa et al., 1999). 전술한대로 내부 및 외부생성물의 함수를 고려하여 전체 공극구조분포는 bimodal 분포함수로 나타나며 식 (5)와 같이 구성할 수 있다. 또한 Fig. 2에서는 전술한 공극구조모델에 대한 개요를 나타내고 있다.

$$\phi(r) = \phi_i + \phi_g [1 - \exp(-B_g r)] + \phi_{cp} [(1 - \exp(-B_{cp} r))] \quad (5)$$

본 절의 내용만으로 계산을 통해 공극률을 직접 도출할

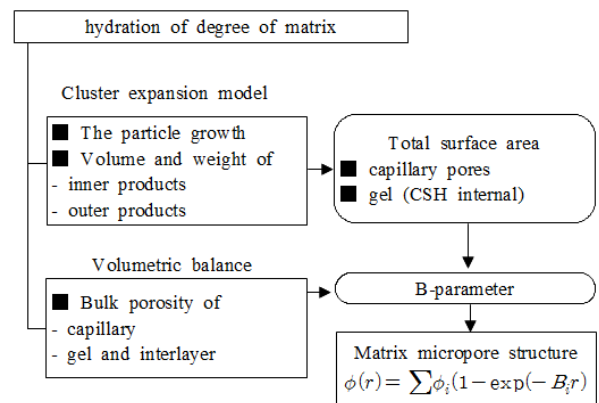


Fig. 2 Schematic diagram for pore structure development

수 없는데, 공극구조형성 모델은 DUCOM 프로그램의 일부이며, 다상수화발열모델(MCHHM: Multi Component Hydration Model), 수분이동모델(MTM: Moisture Transport Model) 등과 연계하여 계산이 수행되기 때문이다. 이러한 미세공극구조 모델에 대한 자세한 이론은 기존의 연구에서 찾아볼 수 있다(Maekawa et al., 2003; Ishida et

al., 2007; Maekawa et al., 1999, Ishida et al., 1996).

2.2 인용된 실험의 개요(삼성건설 기술연구소, 2003)

본 절에서는 모델링 및 검증에 인용될 실험에 대하여 요약하였다. 시멘트로는 보통포틀랜드 시멘트(OPC: Ordinary

Table 1 Properties of cement and mineral admixtures

Types	Chemical composition(%)							Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig. loss	Specific gravity (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)
OPC	21.96	5.27	3.44	63.41	2.13	1.96	0.79	3.16	3,214
GGBFS	32.74	13.23	0.41	44.14	5.62	1.84	0.2	2.89	4,340
FA	55.66	27.76	7.04	2.70	1.14	0.49	4.3	2.19	3,621
SF	93.3	0.5	1.21	0.27	1.03	0.02	1.1	2.21	190.620

Table 2 Physical properties of aggregate

Types	Items	G _{max} (mm)	Specific gravity (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.
Fine aggregate		-	2.58	1.01	2.90
Coarse aggregate		25	2.64	0.82	6.87

Table 3 Mix proportions for High Performance Concrete

Names of Mix.	Items	w/b (%)	Unit weight (kg/m ³)						binder×%		
			W	Binder Materials				S	G	Admixture	
				C	GGBS	FA	SF			SP	AE
OPC100-37		37	168	454	-	-	-	767	952	1.0	0.017
OPC100-42		42	168	400	-	-	-	787	976	0.9	0.015
OPC100-47		47	168	357	-	-	-	838	960	0.85	0.017
G30N70-37		37	168	318	136	-	-	762	946	0.8	0.018
G30N70-42		42	168	280	120	-	-	783	972	0.75	0.013
G30N70-47		47	168	250	107	-	-	835	956	0.65	0.015
G50N50-37		37	168	227	227	-	-	760	943	0.75	0.017
G50N50-42		42	168	200	200	-	-	780	969	0.7	0.0135
G50N50-47		47	168	178	179	-	-	832	853	0.6	0.015
F10N90-37		37	168	409	-	45	-	760	943	0.75	0.018
F10N90-42		42	168	360	-	40	-	780	969	0.9	0.021
F10N90-47		47	168	321	-	36	-	832	952	0.75	0.017
F20N80-37		37	168	363	-	91	-	752	934	0.75	0.018
F20N80-42		42	168	320	-	80	-	774	961	0.85	0.025
F20N80-47		47	168	286	-	71	-	826	946	0.7	0.017
F30N70-37		37	168	318	-	136	-	745	952	0.75	0.2
F30N70-42		42	168	280	-	120	-	768	953	0.75	0.015
F30N70-47		47	168	250	-	107	-	820	939	0.65	0.019
G35F15-37		37	168	227	159	68	-	751	932	0.65	0.014
G35F15-42		42	168	200	140	60	-	773	959	0.65	0.014
G35F15-47		47	168	178	125	54	-	804	921	0.7	0.014

w/b : water to binder ratio
SP: super-plasticizer

S: sand
AE: air entrainer

G : gravel

Portland Cement)가 사용되었으며, 혼화재료로서 GGBFS 및 FA 등이 사용되었다. 본 논문에서의 고성능 콘크리트는 시공성을 위한 15cm 이상의 높은 슬럼프치와 40MPa 이상의 고강도 콘크리트를 의미한다.

Table 1에서는 시멘트 및 혼화재료의 화학성분 및 물리적 특성을, Table 2에서는 골재의 물리적 성질을 나타내고 있다. Table 3에서는 고성능 콘크리트의 배합표를 나타내었는데, 슬럼프 15±1.5cm, 공기량 4.5±1.0%를 목표로 하였으며, 물-결합재비를 37%, 42% 및 47%로 변화시켜 고성능 콘크리트를 제조하였다.

Table 3에서 OPC100-37은 OPC 100% 콘크리트로 37%의 물-결합재비를 나타내고 있다. G30N70-37에서 G30은 GGBFS 30%(중량비)를, N70은 OPC70%(중량비)를, 37은 물 결합재비(%)를 나타낸다. F10N90-37에서도 F10은 FA 10% (중량비)를 나타내며, G35F15는 GGBFS 치환률 35%, FA 치환률 15%를 나타낸다.

3. 콘크리트 압축강도 모델링

3.1 공극률과 압축강도와의 관계

콘크리트 내부의 공극률은 강도와 밀접한 관련이 있으며 많은 문헌에서 이러한 관계를 다루고 있다(Neville, 1996; Park et al., 2009). 강도에 대한 실험결과를 Table 4에 나타내었으며, Fig. 3에서는 재령에 따른 강도변화와 DUCOM 프로그램 해석을 통하여 도출된 공극률의 변화를 나타내고 있다.

콘크리트의 압축강도는 재령의 증가에 따라 증가하는 전형적인 강도발현곡선을 나타내었으며, GGBFS 및 FA를 사용할수록 장기강도가 발현되고 있었다. 많은 문헌에서 다루어졌듯이, GGBFS는 잠재수경성 반응을 통하여 CSH가 추가적으로 생성되므로 장기강도발현이 우수해지고 FA는 포졸란 반응을 통하여 Ca(OH)₂가 CSH로 치환되므로 장기강도가 우수해진다(Sam Sung Construction, 2003; Song et al., 2005). 공극률은 시간의 경과에 따라 감소되어 지는데, 해석결과 혼화재료(GGBFS, FA)를 사용한 콘크리트의 경우 외부생성물의 증가와 함께 공극률이 더욱 감소되고 있음을 알 수 있다.

Table 4 Compressive strength with different ages in HPC

Mixture	ages			
	Compressive strength (MPa)			
	7	28	91	180
OPC100-37	43.5	49	55.4	60
OPC100-42	37.8	44.3	50.1	55.2
OPC100-47	29.2	38.5	43.6	45.8
G30N70-37	40.4	47	58.3	62.4
G30N70-42	31.8	40.5	53	56.4
G30N70-47	28.1	37	48.7	49.8
G50N50-37	40.9	47.3	60.8	64.8
G50N50-42	31.1	42.6	54	58.1
G50N50-47	24	38.2	43.1	47.2
F10N90-37	38.2	44.2	53.1	62.5
F10N90-42	32.2	38	47.8	54.3
F10N90-47	26.4	34.3	41.9	48.2
F20N80-37	37.1	42.5	56.2	65.4
F20N80-42	30.5	37.3	46.8	54.4
F20N80-47	24.3	32.3	40.1	46.8
F30N70-37	30.4	38.2	55.6	63.2
F30N70-42	26	33	46.7	52
F30N70-47	22.1	28.5	40	45.1
G35F15-37	35.2	48.1	59.8	66.1
G35F15-42	28.5	41	55.7	61.5
G35F15-47	22.5	36	50.7	57.6

3.2 공극률을 고려한 고성능 콘크리트 강도모델링

3.2.1 OPC 콘크리트의 강도 모델링

공극률을 고려한 강도 모델링은 1900년대 중반부터 수행되었는데(Ryshkewitch, 1953; Schiller, 1958), 간단한 공극률의 지수함수 또는 로그함수와 실험상수를 이용하여 제안되었다. 최근 들어 지수함수를 이용한 식들이 제안되고 있는데, 이 식은 재령의 영향, 즉 t 를 함수로 고려하지 않으므로, 기존의 시간에 대하여 회귀분석한 예측식들(Park et al., 2011)과는 차별성을 가진다.

식 (6)은 재료모델링과 지수함수를 이용한 강도발현모델링을 나타낸다(Maekawa et al., 2009).

$$f_c = f_\infty [1 - \exp(-\alpha D_{hyd.out}^\beta)] \quad (6)$$

여기서, f_∞ 는 콘크리트의 극한강도(MPa), α, β 실험상수, $D_{hyd.out}$ 은 외부수화물의 체적비를 나타내며, 식 (7)과 같은 식으로 구현된다(Maekawa et al., 2009).

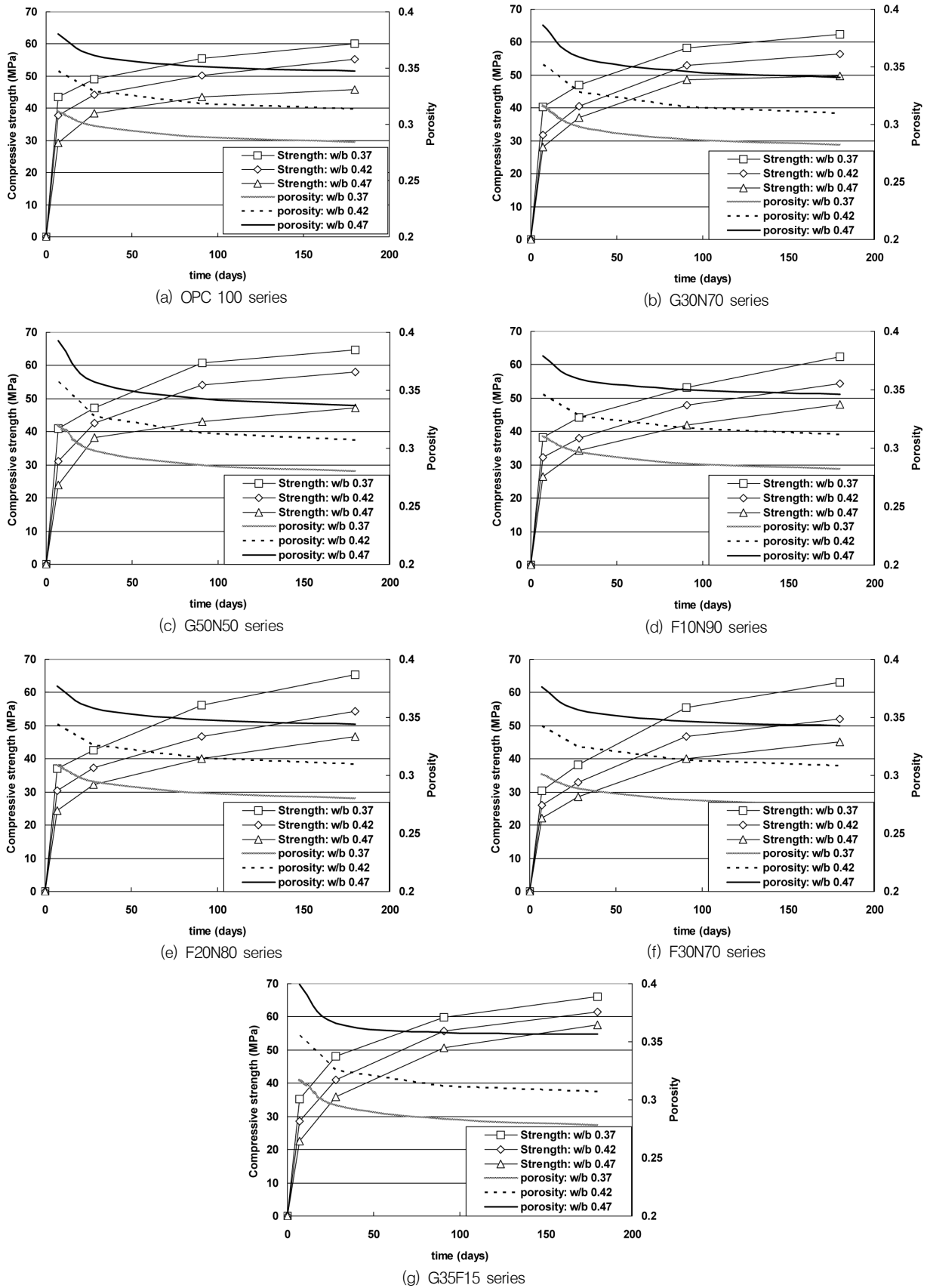


Fig. 3 Compressive strength and calculated porosity

$$D_{hyd.out} = \frac{V_{hyd.out}}{V_{c.ini}} = \frac{V_{hyd.total} - V_{hyd.in}}{V_{c.ini}} \quad (7)$$

여기서, $V_{hyd.out}$ 시멘트 입자 바깥으로 형성되는 수화물 체적, $V_{hyd.in}$ 은 시멘트 입자 내부로 형성되는 수화물 체적, $V_{c.ini}$ 는 초기 모세관 공극의 체적을 나타낸다.

식 (7)의 수화물 체적은 전체체적에서 강도를 전달할 수 있는 체적, 즉 전체공극률을 제외한 체적으로 가정할 수 있으므로 식 (8)과 같이 가정하였다.

$$f_c = f_\infty [1 - \exp(-a(1-\phi))^n] \quad (8)$$

여기서, a 는 수화도, ϕ 는 전체공극률이며 각각의 변수는 DUCOM 해석을 통하여 도출된다. 식 (6)의 f_∞ 에 대하여 OPC 콘크리트에 대해서는 민감도 해석을 통하여 190으로 제안되었으나(Maekawa et al., 2009), 식 (9)와 같이 C_3S 및 C_2S 의 체적비를 이용하여 제안되기도 하였다.

$$f_\infty = A \frac{P_{C_3S}}{P_{C_3S} + P_{C_2S}} + B \frac{P_{C_2S}}{P_{C_3S} + P_{C_2S}} \quad (9)$$

여기서, A 와 B 는 각각 215MPa, 250MPa, P_i 는 i 의 체적비를 나타내고 있다(Maekawa et al., 2009).

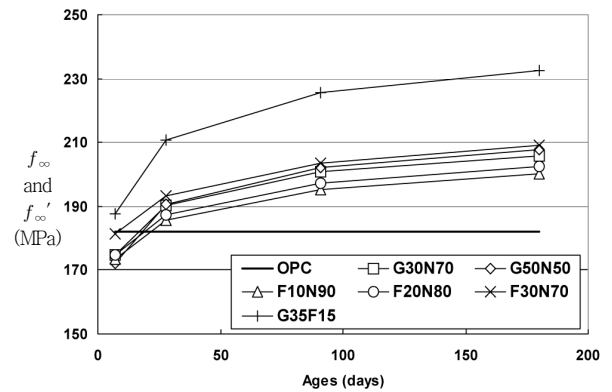
본 연구에서는 OPC만을 사용한 경우는 C_3S 및 C_2S 의 비가 일정하므로 f_∞ 를 하나의 상수로 치환할 수 있다. 단위시멘트량(C)의 증가에 따라 f_∞ 가 증가하므로 선형 관계를 가정하여 식 (10)과 같이 가정하였다.

$$f_\infty = \beta + \gamma \cdot C \quad (10)$$

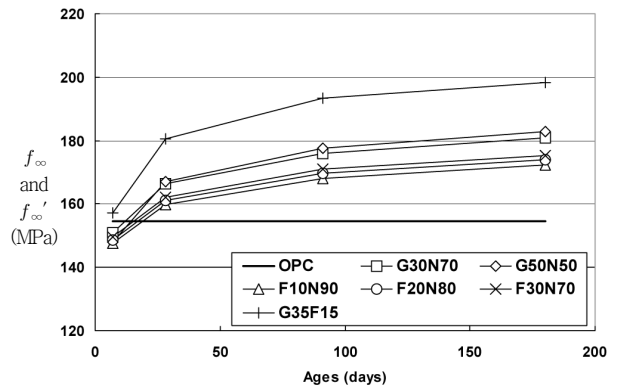
식 (8)과 식 (10)을 고려하면 OPC를 사용한 콘크리트의 압축강도식은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_c = (\beta + \gamma \cdot C) \cdot [1 - \exp(-a(1-\phi))^n] \quad (11)$$

여기서 β 와 γ 는 최적의 Curve Fitting을 통하여 -48.95



(a) w/b 0.37 series



(b) w/b 0.42 series

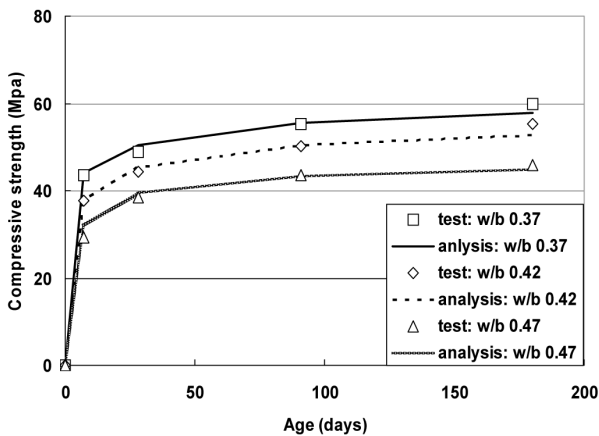
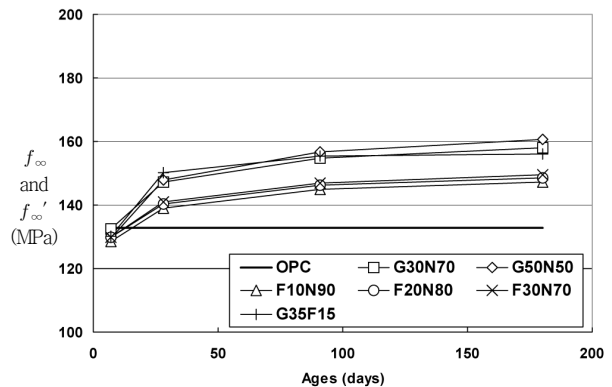


Fig. 4 Comparison of results with test and analysis (OPC)



(c) w/b 0.47 series

Fig. 5 Assumed ultimate strength with various mineral admixtures

와 0.509로 가정하였다. 또한 n 은 실험상수인데 2로 가정하였으며, 공극률(ϕ) 및 수화도(a)는 공극구조형성모델로부터 도출하였다. 각각의 상수는 식 (11)의 지수함수의 형상을 기준으로 실험값의 경향을 반영하도록 회귀분

석하여 최적의 상수를 도출한 것이다. 압축강도 실험값과 제안된 모델식과의 검증은 Fig. 4에 나타나있다. 초기재령(7일)부터 장기재령(180일)까지 압축강도를 비교적 정확히 구현하고 있음을 알 수 있다.

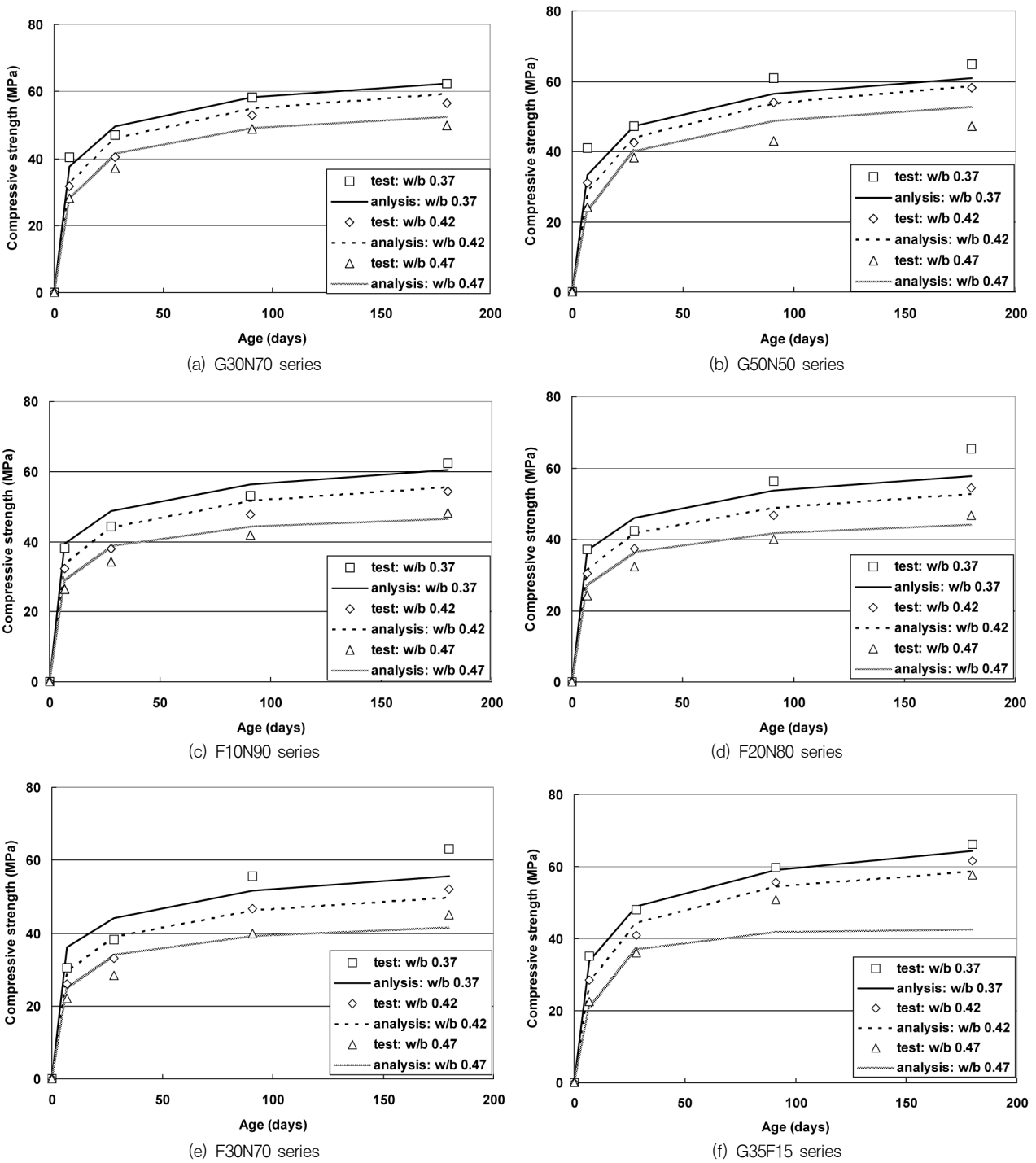


Fig. 6 Comparison of results with test and analysis (HPC with mineral admixture)

3.2.2 혼화재료를 혼입한 HPC 강도 모델링

혼화재료를 혼입한 HPC의 강도발현 특성은 실험결과에서도 알 수 있듯이 장기재령의 강도 증가가 두드러진다. 식 (11)을 사용할 경우, 장기강도의 영향을 고려하기 어려우므로, f_{∞} 를 공극률의 함수로 가정하여 장기강도를 식 (12)와 같이 고려하였다. 또한 식 (8)을 고려하면 식 (13)과 같이 최종적인 압축강도 예측식을 구성할 수 있다.

$$f_{\infty}' = (1/\phi)^n N \quad (12)$$

$$f_c = (1/\phi)^n N \cdot [1 - \exp(-a(1-\phi)^n)] \quad (13)$$

여기서, n 과 N 은 실험상수이며, 혼입한 혼화재료의 특성을 반영하기 위하여 압축강도결과와 curve fitting을 통하여 최적의 실험상수를 도출하였다.

GGBFS를 혼입한 콘크리트에 대해서는 1.4 및 35로, FA 치환 콘크리트에서는 1.5 및 30으로 가정하였다. 또한 GGBFS와 FA를 같이 혼입한 경우에 대해서는 1.6 및 30으로 가정하였다. OPC 콘크리트와는 달리 식 (12)에서의 f_{∞}' 은 물리적 의미를 가지지 못하며, 장기강도 발현을 위하여 공극률의 함수로 구현한 것이다. 추후 연구

를 통하여 f_{∞}' , 즉 혼화재료를 사용한 콘크리트의 극한 강도에 대한 모델링을 수행할 필요가 있다.

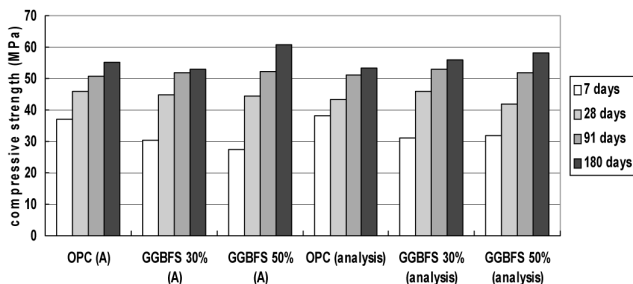
OPC 콘크리트의 f_{∞} 와 식 (11)의 f_{∞}' 과의 비교를 Fig. 5에 나타내었다. 각 배합에서 일정한 OPC 콘크리트의 f_{∞} 와는 다르게 f_{∞}' 는 혼화재의 치환 및 재령의 증가에 따라 변화하는 강도특성을 나타내고 있다.

Fig. 6에서는 GGBFS 및 FA를 사용한 HPC의 해석결과를 실험값과 비교하여 나타내었다. 혼화재료의 치환량과 물-결합재비의 변화를 고려하여 비교적 정확하게 강도 예측을 하고 있음을 알 수 있다.

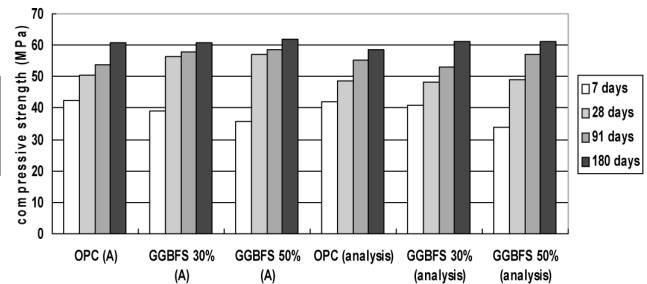
이상의 결과를 하나의 표로 요약하면 Table 5와 같다. 혼화재의 종류에 상관없이 공극률을 이용하여 간단한 압

Table 5 Summary of the proposed technique for compressive strength

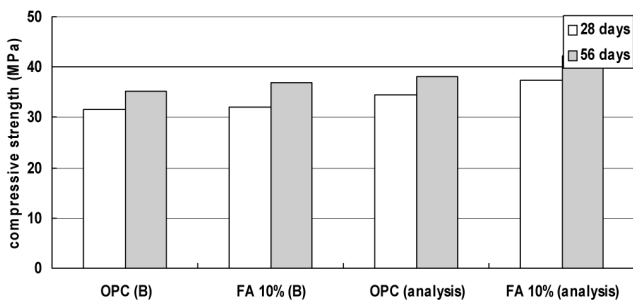
Binder type	Compressive strength modeling	
OPC	$f_c = (-48.95 + 0.509C) \cdot [1 - \exp(-a(1-\phi)^n)]$	
OPC + GGBFS	n: 1.4 N: 35	$f_c = (1/\phi)^n N \cdot [1 - \exp(-a(1-\phi)^n)]$
OPC + FA	n: 1.5 N: 30	
OPC + GGBFS+FA	n: 1.6 N: 30	



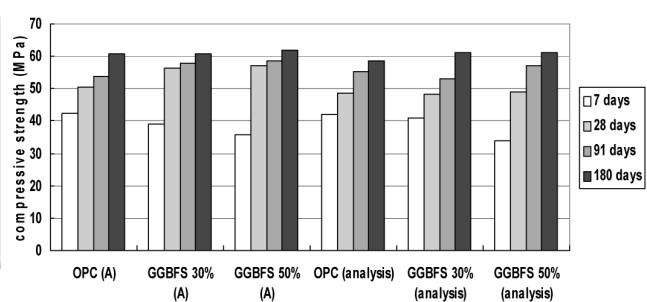
(a) Comparison with test and analysis results (OPC and GGBFS concrete, w/b 42%)



(b) Comparison with test and analysis results (OPC and GGBFS concrete, w/b 37%)



(c) Comparison with test and analysis results (OPC and FA concrete, w/b 42%)



(d) Comparison with test and analysis results (OPC and FA concrete, w/b 40%)

Fig. 7 Comparison of compressive strength between the previous test (A-C) and analysis results

축강도 모델링을 수행하였으며, 혼화재의 종류에 따라 간단한 실험상수를 도입함으로써 물-결합재비의 영향도 고려할 수 있는 압축강도 예측식을 제안하였다.

예측된 결과는 대부분 실험값과 일치하였으나, 3성분계(OPC+GGBFS+FA) 콘크리트가 높은 물-결합재비를 가진 경우 장기강도의 증가를 잘 고려하지 못하였으므로, 장기강도의 증가를 고려하기 위한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

3.2.3 기존의 실험결과와의 검증

본 절에서는 Table 5의 결과를 이용하여, 제안된 기법과 기존의 실험자료와의 검증을 수행하도록 한다. 물-결합재비의 범위는 37~47% 수준으로, 단위 결합재량이 380kg/m^3 이상을 대상으로 하였다. FA 및 GGBFS는 분말도에 따라 많은 강도차이가 발생하게 되므로, 일반적인 수준인 $3,000\sim 40,00\text{cm}^2/\text{g}$ 분말도 수준으로 기존의 자료를 취합하였다.

(A)자료는 물-결합재비 37%와 42%인 배합으로 단위 결합재량은 400kg/m^3 이다(Lee et al., 2004). (B)자료는 물-결합재비 42%, 단위결합재량 380kg/m^3 인 배합(Lee and Yoon, 2003), 그리고 (C)자료는 물-결합재비 40%, 단위결합재량 400kg/m^3 인 배합(Lee et al., 2009)을 나타낸다. 각 실험자료에 대한 검증결과는 Fig. 7에 나타내었다.

제안된 기법은 비교적 정확하게 다양한 혼화재료(FA, GGBFS)를 포함한 콘크리트의 강도를 예측하고 있었다. 일부 오차가 크게 발생한 이유는 강도 모델링에 사용한 배합의 단위 결합재량이 454kg/m^3 이므로 이에 대한 차이라고 판단된다. 단위 결합재량이 400kg/m^3 이상의 경우 더욱 강도예측을 정확히 하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

공극률을 이용한 고성능 콘크리트의 압축강도 특성 모델링을 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) OPC 콘크리트의 강도예측을 위하여 극한강도를 시멘트량의 함수로 가정하고 DUCOM을 통하여 도출된 공극률을 이용하여 고성능 콘크리트의 강도예측 모델링을 수행하였다.
- (2) 혼화재료(GGBFS 및 FA)가 혼입된 고성능 콘크리트의 강도모델링을 위해, 공극률의 제곱근에 반비례하는 변수를 고려하여 강도특성 모델을 제안하였다. 제안된 기법은 물-결합재비의 감소에 따라서 감소하는 공극률이 고려되어 있으며, 다양한 물-결합재비 및 혼화재료를 가진 고성능 콘크리트의 압축강도 실험값에 대하여 비교적 정확하게 강도증가를 예측하고 있었다.

- (3) 실험결과와의 비교에서 높은 물시멘트비를 가진 삼성분계 콘크리트(OPC+GGBFS+FA)의 경우, 충분한 수화작용을 통하여 높은 장기강도를 나타내고 있으므로 이를 고려하는 변수를 추가적으로 도입할 필요가 있다. 또한 혼화재를 가진 콘크리트의 장기강도증가를 고려하기 위하여, 공극률에 반비례하는 함수를 사용하였는데, 시멘트 겔의 극한 강도 뿐 아니라, 수화물(CSH)의 극한 강도를 고려한 재료 모델링이 수행되어야 한다.

참고문헌

1. Al-Amoudi, O. S. B., Al-Kutti, W. A., Ahmad, S., Maslehuddin, M., "Correlation between Compressive Strength and Certain Durability Indices of Plain and Blended Cement Concretes", *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, 2009, pp.672-676.
2. CEB-FIP, Model Code Comite' Euro-International du beton, 1990, pp.65-82.
3. Ishida, T., Chaube, R., P., Maekawa, K., "Modeling of Pore Content in Concrete under Generic Drying Wetting Conditions", *Concrete Library of JSCE*, vol. 18, No. 1, 1996, pp.113-118.
4. Ishida, T., Maekawa, K., Kishi, T., "Enhanced Modeling of Moisture Equilibrium and Transport in Cementitious Materials under Arbitrary Temperature and Relative Humidity History", *Cement and Concrete Research*, vol. 37, 2007, pp.565-578.
5. Ishida, T., Maekawa, K., "Modeling of Durability Performance of Cementitious Materials and Structures based on Thermo-Hygro Physics", *RILEM PRO 29, Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures*, 2003, pp.39-49.
6. Kato, Y., Kishi, T., "Strength Development Model for Concrete in Early Ages Based on Hydration of Constituent Minerals", *Proceeding of JCI*, vol. 16, No. 1, 1994, pp.503-508.
7. Kim, D.-K., Lee, J.-J., Chang, S.-K., "Probabilistic Neural Network for Prediction of Compressive Strength of Concrete", *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, vol. 87, No. 2, 2004, pp.159-167.
8. Lee, C.-S., Yoon, I.-S., "An Experimental Study on the Durability Performance for Ternary Blended Concrete Containing Both Fly Ash and Granulated Blast Furnace

-
- Slag”, Journal of Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, vol. 7, No. 1, 2003, pp.139-145.
9. Lee, K.-M., Kwon, K. H., Lee, H.-K., Lee, S.-H., Kim, G.-Y., “Characteristics of Autogenous Shrinkage for Concrete Containing Blast-Furnace Slag”, Journal of Korea Concrete Institute, vol. 16, No. 5, 2004, pp.621-626.
 10. Lee, S.-S., Song, H.-Y., Lee, S.-M., “An Experimental Study on the Influence of High Fineness Fly Ash and Water-Binder Ratio on Properties of Concrete”, Journal of Korea Concrete Institute, vol. 21, No. 1, 2009, pp.29-35.
 11. Lim, S.-H., Kang, H.-S., “Estimating Compressive Strength of high Strength Concrete by Ultrasonic Pulse Velocity Method”, Journal of Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, vol. 5, No. 3, 2001, pp.123-130.
 12. Maekawa, K., Chaube, R. and Kishi, T., Modeling of Concrete Performance: Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport, Routledge, London and New York. 1999. pp.31-58.
 13. Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T., “Multi-Scale Modeling of Concrete Performance”, Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 1, 2003, pp.91-126.
 14. Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T., Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor&Francis, 2009, pp.86-105.
 15. Neville, A. M., Properties of Concrete, 4th Ed. Longman (revised), 1996, pp.56-93.
 16. Park, S.-S., Kwon, S.-J., Kim, T. S., “An Experimental Study on the Durability Characterization Using Porosity”, Journal of Korean Society of Civil Engineering, vol. 29, No. 2-A, 2009, pp.171-179.
 17. Park, S.-S., Kwon, S.-J., Song, H.-W., “Analysis Technique for Restrained Shrinkage of Concrete Containing Chlorides”, Materials and Structures, vol. 44, 2011, pp.475-486.
 18. Ryshkewitch, E., “Composition and Strength of Porous Sintered Alumina and Zirconia”, Journal of American Ceramic Society, vol. 36, 1953, pp.65-68.
 19. Sam Sung Construction, Evaluation of Chloride Ion Diffusion Coefficient for High Performance Concrete, Technical Report, 2003, pp.27-33.
 20. Schiller, K. K., Mechanical Properties of Non-Metallic Materials, Butterworth, London, 1958, pp.35-50.
 21. Song, H.-W., Cho, H.-J., Park, S.-S., Byun, K. J., Maekawa, K., “Early-Age Cracking Resistance Evaluation of Concrete Structure”, Concrete Science and Engineering, vol. 3, 2001, pp.62-72.
 22. Song, H.-W., Kwon, S.-J., Byun, K. J., Park, C. K., “A Study on Analytical Technique of Chloride Diffusion Considering Characteristics of Mixture Design for High Performance Concrete Using Mineral Admixture”, Journal of Korean Society of Civil Engineering, vol. 25, No. 1-A, 2005, pp.213-223.
 23. Stegemann, J. A., Buenfeld, N. R., “Prediction of Unconfined Compressive Strength of Cement Paste with Pure Metal Compound Additions”, Cement and Concrete Research, vol. 32, 2002, pp.903-913.

Received : 07/17/2012
 Revised : 09/18/2012
 Accepted : 09/21/2012

요 지

콘크리트의 강도는 시간에 따라 증가하며, 많은 연구에서 시간에 대한 회귀 분석식을 사용하고 있다. 본 연구는 수화물량을 수화도 및 공극률의 함수로 가정하였으며, 재령의 증가에 따라 감소하는 공극률을 이용하여 고성능 콘크리트의 압축강도 모델링을 수행하였다. 본 연구에서는 기존의 시간에 대한 회귀분석없이 공극률의 감소만을 이용하여 압축강도를 예측하였다. 총 21개의 고성능 콘크리트 배합에 대해 초기재령 콘크리트의 거동 해석프로그램인 DUCOM을 이용하여 각각의 공극률을 도출하였으며, 강도 모델링을 수행하였다. OPC 콘크리트에 대해서 수화도, 단위시멘트량, 공극률의 함수로 강도 예측식을 제안하였으며, GGBFS 및 FA를 혼입한 콘크리트에 대해서는 장기강도 영향을 구현하기 위해 공극률을 고려한 장기강도변수를 도입하였다. 기존의 실험결과와의 비교를 통하여 제안된 강도예측식의 타당성을 입증하였다.

핵심 용어 : 압축강도, 고성능 콘크리트, 공극률, 초기 재령 콘크리트, 장기강도