

수화도와 공극률을 고려한 초기재령 콘크리트의 강도 예측 모델

황수덕^{1)*} · 이광명¹⁾ · 김진근²⁾

¹⁾성균관대학교 토목환경공학과 ²⁾한국과학기술원 토목공학과
(2001년 5월 18일 원고접수, 2002년 1월 10일 심사완료)

Strength Estimation Model of Early-Age Concrete Considering Degree of Hydration and Porosity

Soo-Duck Hwang^{1)*}, Kwang-Myong Lee¹⁾, and Jin-Keun Kim²⁾

¹⁾ Dept. of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea

²⁾ Dept. of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Yusong, Daejeon, 305-701, Korea

(Received May 18, 2001, Accepted January 10, 2002)

ABSTRACT

Maturity models involving curing temperature and curing ages have been widely used to predict concrete strength, which can accurately estimate concrete strength. However, they may not consider physical quantities such as the characteristics of hydrates and the capillary porosity of microstructures associated with strength development. In order to find out the effects of both factors on a strength increment, the hydration model and the estimation method of the amount of capillary porosity were established, and the compressive strength test of concrete with various water/cement ratios was carried out considering two test parameters, curing temperature and curing age. In this study, by analyzing the experimental results, a strength estimation model for early-age concrete that can consider the microstructural characteristics such as hydrates and capillary porosity was proposed. Measured compressive strengths were compared with estimated strengths and good agreements were obtained. Consequently, the proposed strength model can estimate compressive strength of concrete with curing age and curing temperature within an acceptable error.

Keywords : degree of hydration, porosity, compressive strength, early-age, curing temperature.

1. 서 론

콘크리트 구조물의 설계와 시공에 있어서 압축강도와 탄성계수 등의 콘크리트의 물성을 예측하는 것이 매우 중요하다. 현재까지 재령에 따른 콘크리트의 압축강도를 예측하기 위해 많은 연구가 수행된 바 있다. 가장 대표적인 강도 예측 방법은 성숙도를 이용한 방법으로 적산온도를 이용하는 방법^{1,2)}과 반응률 상수를 이용하는 방법^{3,4)}이 있다. 그러나 성숙도 모델을 사용하면 비교적 정확하게 콘크리트의 압축강도를 예측할 수 있지만, 강도발현의 직접적인 근원이 되는 물리량을 고려한 모델이라고 보기는 어려운 점이 있다. 최근 관심을 끌고 있는 시멘트의 수화도를 이용한 강도예측모델^{5~7)}은 재령의 증가에 따라 수화도와 강도의 상관관계를 잘 나타내고는 있지만, 검증이 될 만한 많은 연구가 이루어지지 못한 실정이다.

콘크리트의 강도는 수화작용의 부산물인 수화생성물의

강도뿐 아니라 미세구조 내부의 공극분포에 의해 결정된다. 즉 시멘트의 수화도가 증가함에 따라 강도가 증진되며 또한 동일한 수화도에서 공극률이 증가하면 강도가 감소하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 수화도를 강도 예측 모델식에 도입하기 위하여 양생온도와 물/시멘트비에 따른 수화모델을 정립하였으며 콘크리트의 강도에 영향을 미치는 인자인 양생온도, 물/시멘트비를 고려하여 압축강도실험을 수행하였다. 실험에 의해 얻은 결과를 토대로 재령에 따른 압축강도의 증분과 수화도 증분 및 재령별 공극률과의 관계를 분석하여 강도예측식을 제안하였다. 또한 기존 연구자들의 강도실험값을 이용하여 제안된 강도 예측식의 적용성 여부를 검토하고, 기존 강도예측식에 의한 추정결과와도 비교 분석하였다.

2. 수화모델링

임의의 콘크리트 배합에서 물과 시멘트의 반응률은 아래와 같이 동일한 종류의 시멘트를 사용한 콘크리트 가장 반응률에 반응률 계수를 곱하여 얻을 수 있다. 여기서 콘

* Corresponding author

Tel : 031-290-7541 Fax : 031-290-7549

E-mail : impact@nature.skku.ac.kr

크리트의 가상 반응물이란, 모든 시멘트가 수화될 수 있는 물/시멘트비로 배합된 콘크리트를 표준상태(20 °C, 완전포화상태)로 양생했을 경우의 반응물을 말한다⁵⁾.

$$\frac{\partial \alpha_c(t)}{\partial t} = \beta_T \beta_{w/c} \beta_w \left. \frac{\partial \alpha_c(t_{eq})}{\partial t} \right|_{ref} \quad (1)$$

여기서, 반응률 계수 β_T , $\beta_{w/c}$, β_w 는 각각 양생 온도, 물/시멘트비, 수분분포를 고려한 반응률 계수이며, 등가 재령, t_{eq} 는 실제 콘크리트의 수화도와 같은 수화도를 발휘하는데 걸리는 가상 콘크리트의 양생 시간이다⁸⁾.

본 연구에서 채택한 Byfors⁴⁾에 의해 제안된 수화도 모델은 다음과 같다.

$$\alpha_c = \exp \left[-\lambda_1 \left\{ \ln \left(1 + \frac{t_{eq}}{t_1} \right) \right\}^{-k_1} \right] \quad (2)$$

여기서, λ_1 , t_1 , k_1 은 시멘트 종류에 따라 결정되는 상수이고, 등가재령 t_{eq} 는 식 (1)에서 언급한 세 가지 반응률 계수로 표현된다.

$$t_{eq} = \int_0^t \beta_T \beta_{w/c} \beta_w dt \quad (3)$$

양생온도에 따른 반응률 계수, β_T 는 Arrhenius-형태의 반응률 식으로 표현할 수 있다⁹⁾.

$$\beta_T = \exp \left[\frac{E}{R} \left\{ \frac{1}{293} - \frac{1}{T+273} \right\} \right] \quad (4)$$

여기서, E 는 활성화 에너지, R 은 기체상수 (8314.73 J/mol · K), T 는 섭씨온도, 그리고 활성화 온도 E/R 는 양생온도의 함수로 다음과 같이 표현된다¹⁰⁾.

$$\frac{E}{R} = \theta = \theta_{ref} \left\{ \frac{30}{T+10} \right\}^{k_3} \quad (5)$$

여기서, θ_{ref} 와 k_3 는 실험으로부터 얻어지는 재료 상수이다.

물/시멘트비에 따른 반응률 계수 $\beta_{w/c}$ 는 주어진 물/시멘트비에 대해 재령을 무한대로 했을 경우의 수화도인 최대 수화도의 향으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\beta_{w/c} = \left\{ \frac{\alpha_{max} - \alpha_c}{\alpha_{max}} \right\}^\gamma \quad (6)$$

$$\alpha_{max} = \frac{1.031 \times w/c}{0.194 + w/c} \quad (7)$$

여기서, α_{max} 는 최대 수화도, γ 는 재료상수이다.

콘크리트내의 수분분포가 수화속도에 미치는 반응률 계수 β_w 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\beta_w = \frac{\phi_{wat}(\alpha) - \phi_0}{\phi_{max}(\alpha) - \phi_0} \frac{\phi_{max}(\alpha)}{\phi_{wat}(\alpha)} \quad (8)$$

여기서, ϕ_0 는 모세관 공극의 최소 직경(0.002 μ m), $\phi_{max}(\alpha)$ 는 수화도에 따른 모세관 공극의 최대 직경이며 $\phi_{wat}(\alpha)$ 는 물로 채워져 있는 모세관 공극의 최대 직경을 나타낸다. 수분분포에 대한 반응률 계수 β_w 는 수화작용의 기본 조건인 시멘트 입자와 물과의 접수환경을 나타내는 것으로서, 물로 채워져 있는 모세관 공극이 많을 경우에 수화작용은 활발하게 진행하게 된다.

본 연구에서 사용한 수화도 모델은 물/시멘트비에 따라서 콘크리트의 최대 수화도, 즉 α_{max} 를 사용한다. 최대 수화도는 식 (7)과 같이 물/시멘트비의 함수로 표현할 수 있으며, 콘크리트의 재령이 무한대로 증가하더라도 수화도는 100 %에 이르지 못하는데, 이는 조밀한 수화 생성물로 형성된 셸이 무수 입자 표면에서 이온의 이동을 방해하기 때문이다. 실제로 수십년이 지난 실제 구조물의 파단면을 관찰해 보면 많은 미수화 시멘트 입자의 존재를 확인할 수 있다.

물/시멘트비가 0.5로 동일한 경우 양생온도를 0, 10, 20, 30, 40, 50 °C로 변화시켰을 때 재령에 따른 수화도 증가는 Fig. 1과 같다.

3. 실험 연구

3.1 재료 및 배합비

콘크리트 배합에는 1종 포틀랜드 시멘트와 슬럼프 조절을 위해 단위 시멘트량의 0.2 %의 AE감수제를 사용하였다. 굵은 골재는 최대치수 25 mm의 화강암 쇄석으로 비

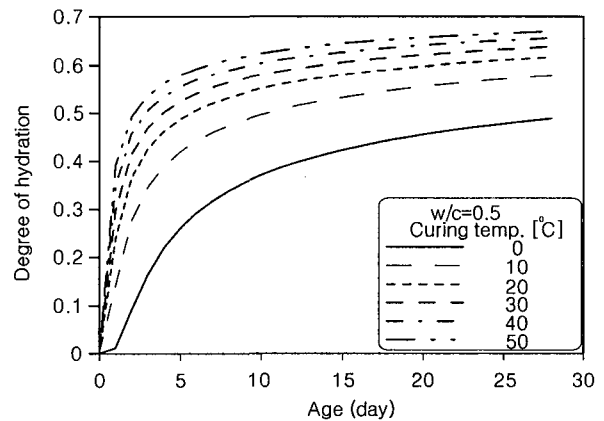


Fig. 1 Degree of hydration with curing temperature

중 2.74, 조립물 6.70이며, 잔 골재는 비중 2.65, 조립물 2.73인 강모래를 세척하여 불순물을 제거한 후, 배합시 표면건조포화상태가 되도록 흡수율을 조정하여 사용하였다. Table 1과 같이 단위수량을 185 kg으로 동일하게 하고, 단위시멘트량을 변화시켜 재령 28일 압축강도가 약 28~40 MPa인 4가지 배합을 실험에 사용하였다.

3.2 실험 방법

배합시 콘크리트 시방서에 따라 굵은 골재, 잔 골재, 시멘트를 투입하여 건비율을 약 1분간 실시한 후 배합수와 혼화제를 첨가하여 2분간 배합하였다. C320과 C370 배합은 10, 20, 30 °C인 수중에서 양생하였으며, C350과 C400 배합은 20 °C로 수중양생하였다. 각 재령당 3개의 실린더를 제작하였으며, 표준양생 후 KS F 2405에 준하여 재령 1, 2, 3, 7, 28일에 압축강도를 측정하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 압축강도 실험결과

Table 2의 실험결과와 같이 C320, C350, C370, C400의 배합은 양생온도 20 °C에서 재령 28일의 평균압축강도가 각각 28.2, 35.6, 37.1, 39.6 MPa로서 물/시멘트비가 감소함에 따라 강도가 증가하였다. 또한 양생온도를 10, 20, 30 °C로 변화시킨 C320, C370의 결과를 보면, 양생온도 20 °C를 기준으로 볼 때 온도가 낮을수록 초기재령의 압축강도는 작게 나타났지만, 재령의 경과와 함께 강도의 발현이 점진적으로 증가함을 알 수 있다. 반대로, 온도가 높은 30 °C에서는 초기 재령에서의 압축강도는 20 °C에 비해 크지만, 재령 28일의 압축강도는 다소 작게 나타났다. 따라서, 양생온도가 초기재령 콘크리트의 강도발현에 큰 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었다.

콘크리트의 슬럼프는 모든 배합에서 15±1 cm 정도를 나타내었으며 공기량은 3~3.5%이었다. 각 배합의 물/시멘트비는 차이가 있으나 단위수량과 AE감수제의 사용량이 동일하여 슬럼프와 공기량이 비슷한 결과를 보인 것으로 사료된다.

4.2 기존 강도예측식의 적용

4.2.1 수화도를 이용한 강도예측식

수화도를 이용한 콘크리트의 압축강도예측식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{f_{cu}(a)}{f_{cu}(a=a_{28})} = \left(\frac{a - a_o}{a_{28} - a_o} \right)^a \quad (9)$$

$$\alpha_o = k_h \frac{w}{c} \quad (10)$$

여기서, a 는 식 (2)에 의해 구할 수 있는 수화도, $f_{cu}(a)$ 는 임의 수화도에서의 압축강도, $f_{cu}(a=a_{28})$ 는 재령 28일의 압축강도, a 는 재료상수, α_o 는 임계 수화도이며, 상수 k_h 는 약 0.4~0.6의 값을 나타낸다⁸⁾. 식 (9)에서 재료상수 a 는 일반적으로 1.0~1.5의 값을 나타내지만, 본 실험결과를 적용해 보았을 경우에는 1.0을 적용하는 것이 가장 정확도가 높은 것으로 나타났다. 또한 임계 수화도 α_o 결정시에 사용되는 k_h 는 0.4를 적용하였다.

식 (9)의 강도예측식을 실험결과에 적용하여 상대강도와 수화도의 상관관계를 분석한 Fig. 2를 보면, 양생온도와 재령에 따라 a 값이 변화함을 알 수 있다. 그러나, 양생온도가 같은 경우에는 물/시멘트 비가 변해도 재령에 따른 a 값은 거의 차이를 보이지 않았다.

Fig. 3(a)는 양생온도가 20 °C일 때 고정된 a 값($a = 1.0$)을 사용한 경우의 강도예측결과이고, Fig. 3(b)는 양생온도와 재령에 따른 a 값의 변화 즉, Fig. 2의 a 값을 사용한 경우의 강도예측결과이다. 두 그림을 비교해 보면 a 값의 변화를 고려한 Fig. 3(b)의 경우가 초기재령에서 좀 더 정확하게 강도발현을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

4.2.2 반응을 상수를 이용한 강도예측식

Tank와 Carino⁴⁾는 양생온도에 따른 압축강도의 변화를

Table 1 Mix proportions of concrete (kg/m³)

Type	Water	Cement	Aggregate		S/a (%)	W/C
			Coarse	Fine		
C320	185	320	1025.6	712.7	41	0.58
C350	185	350	1008.3	703.1	41	0.53
C370	185	370	1016.2	680.8	40	0.50
C400	185	400	1032.0	691.0	40	0.46

Table 2 Results of slump, air content, and compressive strength test

Type	Slump (cm)	Air content (%)	Curing temp. (°C)	Strength (MPa)				
				1	2	3	7	28d
C320	16.0	3.4	10	0.8	4.6	8.4	16.1	27.4
			20	6.0	10.0	13.8	21.3	28.2
			30	8.7	13.9	18.2	22.9	28.0
C350	14.5	3.2	20	7.2	11.8	17.7	26.6	35.6
C370	15.0	3.0	10	1.2	8.0	13.5	23.9	35.5
			20	8.6	15.1	19.2	27.5	37.1
			30	11.4	17.4	21.7	30.0	35.7
C400	14.5	3.3	20	10.0	16.2	22.4	32.1	39.6

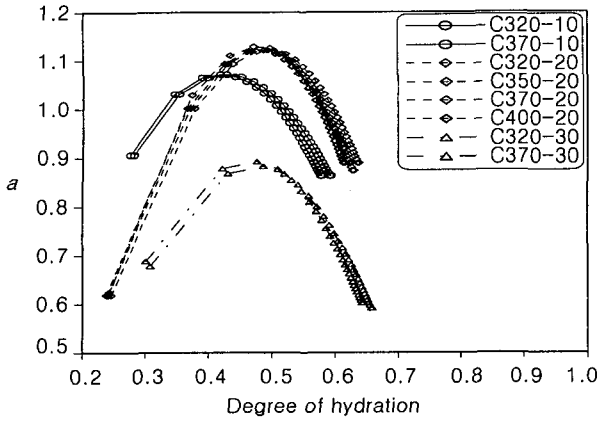
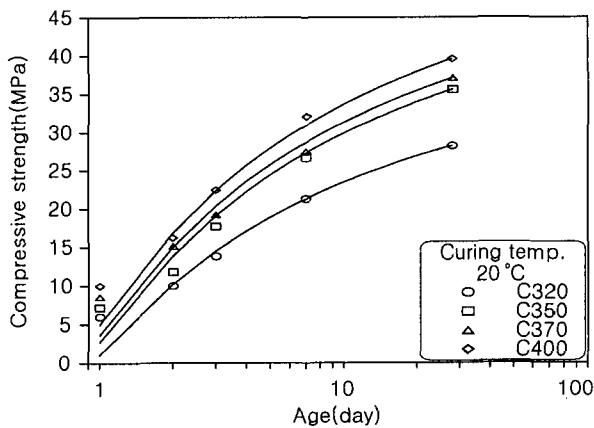
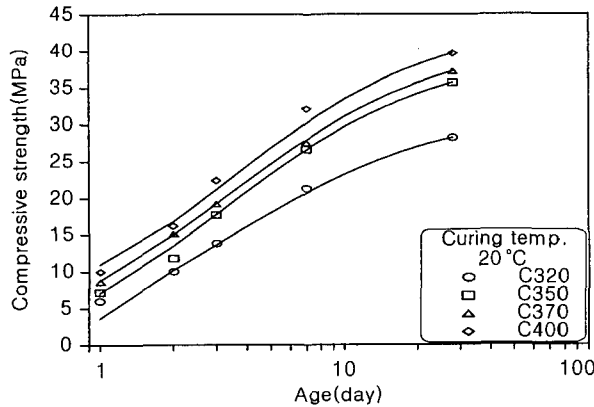


Fig. 2 a -value with degree of hydration



(a) $a = 1.0$



(b) varied a -value(Fig. 2)

Fig. 3 Concrete strength estimated by Eq. (9)

나타내기 위해 반응률 상수 모델(rate constant model)이라고 불리는 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$f_{cu}(t) = f_{cu,\infty} \frac{k_T(t - t_0)}{1 + k_T(t - t_0)} \quad (11)$$

여기서, $f_{cu}(t)$ 는 재령 t (일)에서의 압축강도, $f_{cu,\infty}$ 는 한계압축강도, k_T 는 양생온도 T 에서의 반응률 상수, 그리고 t_0 는 강도발현이 시작되는 재령이다. 또한 식 (11)을 등가재령 t_e 를 사용하면 다음과 같이 표현된다.

$$f_{cu}(t_e) = f_{cu,\infty} \frac{k_r(t_e - t_{or})}{1 + k_r(t_e - t_{or})} \quad (12)$$

$$t_e = \sum \left(\frac{k_T}{k_r} \right) \Delta t \quad (13)$$

여기서, k_r 은 기준온도에서의 반응률 상수, t_{or} 은 기준온도에서 강도가 발현되기 시작하는 재령을 나타내며, 기준온도는 20 °C이다.

강도실험결과를 이용하여 식 (11)의 상수 $f_{cu,\infty}$ 와 k_T , t_0 를 결정하고, 식 (12)의 t_{or} 은 기준온도 20 °C의 실험결과인 C320, C350, C370, C400 배합의 t_0 를 산술평균하여 구하였다. 실험결과를 이용하여 결정된 k_T 를 양생온도에 대하여 지수함수 형태($k_T = A * \exp[B * T(°C)]$)로 회귀분석 한 후, 기준온도인 20 °C를 회귀분석식에 대입하여 기준온도에서의 반응률 상수 k_r 을 구하였다. 반응률 상수모델에서의 재료상수는 Table 3과 같고, 압축강도 예측결과는 Fig. 4와 같다.

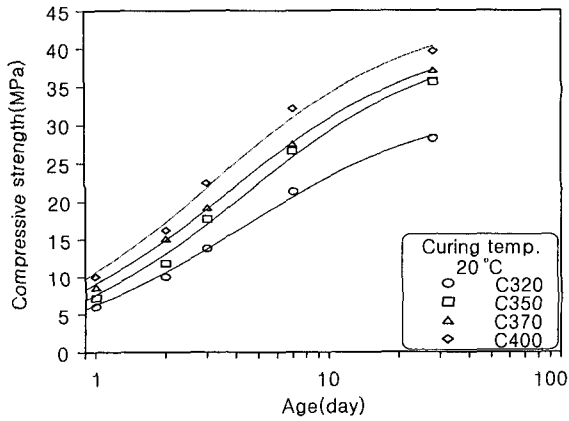
5. 강도예측식의 제안

5.1 수화도와 공극률을 고려한 강도예측식의 제안

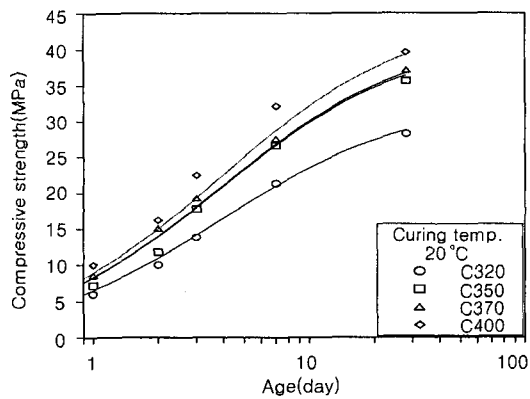
4.2절에서 언급한 강도예측식 중에서 성숙도를 이용한 반응률 상수 모델⁴⁾은 상당히 정확하게 강도를 예측하는 것으로 나타났다. 그러나, 실험결과로부터 결정된 재료상수들의 민감도가 커서 다른 강도실험값에 적용할 경우에는 정도가 떨어지는 경향을 보였으며, 또한 동일한 양생온도일 경우에도 t_0 와 k_T 값이 많은 편차를 나타내었다. 이

Table 3 Regression constants for rate constant function

Type	Temp. (°C)	$f_{cu,\infty}$ (MPa)	t_0 (day)	k_T (day ⁻¹)	t_{or} (day)	k_r (day ⁻¹)
C320	10	37.54	0.3350	0.1013	0.0305	0.254
	20	32.72	0.0338	0.2429		
	30	30.42	0.0139	0.4420		
C350	20	41.52	0.0468	0.2344		
C370	10	45.21	0.2954	0.1440		
	20	41.87	0.0107	0.2776		
	30	39.21	0.0068	0.4165		
C400	20	44.79	0.0309	0.3185		



(a) Eq. (11)



(b) Eq. (12)

Fig. 4 Concrete strength prediction by maturity method

렇게 재료상수의 편차를 보이는 이유는 양생온도와 재령 외에도 강도에 영향을 미치는 인자가 존재하기 때문으로 판단된다.

식 (9)의 수화도를 이용한 강도예측식은 재료상수 a 값을 고정시킨 경우에는 초기재령에서의 강도예측에 대한 정확도가 현저히 낮아지는 현상을 보였다. 한편, 재료상수 a 를 양생온도와 재령에 따라 변화시켰을 경우에는 강도예측의 정확도가 상당히 향상되었다. 따라서 본 연구에서는 수화도가 강도에 미치는 영향이 양생온도와 재령에 따라 달라진다고 판단하여, 재령별 수화도 증분 및 모세관 공극률이 28일 강도에 대한 강도 증분에 미치는 영향정도를 분석하여 다음과 같은 강도예측식을 제안하였다.

$$\frac{df_{cu}(t)}{f_{28}} = [1 - P(t)]^m \times da^{n(t)} \times 10^6 \quad (14)$$

여기서, t 는 재령(day), f_{28} 은 재령 28일 압축강도, $df_{cu}(t)$ 는 강도 증분량, da 는 수화도 증분량, $P(t)$ 는 재령별 콘크리트의 모세관 공극률, m 은 공극률이 상대강도

증분에 미치는 영향을 나타내는 상수이며, $n(t)$ 는 상대강도 증분에 대한 수화도 증분이 미치는 효과를 나타낸다.

5.2 수화도 산정

실험에 사용된 Table 1의 네 가지 배합 중에서 대표적으로 C370 배합의 수화도를 수화모델식에 의해 구해 보면 Fig. 5와 같다. 기타 배합의 수화도 발현곡선도 Fig. 5와 비슷한 경향을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 양생온도가 높으면 초기 재령에서의 수화도가 큰 반면, 재령이 경과할수록 수화도의 증분은 점차로 작아짐을 알 수 있다. 반대로, 양생온도가 낮은 10°C의 경우를 보면 양생온도 20, 30°C에 비해서 초기재령의 수화도는 작지만 재령이 경과할수록 그 차이가 점차로 작아짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 양생온도에 따른 압축강도의 발현과 비슷하였다.

5.3 콘크리트의 공극률

콘크리트의 강도는 내부에 존재하는 모든 공극의 체적에 의해 영향을 받는다. 그러나, 콘크리트의 강도에 가장 큰 영향을 미치는 공극은 직경 50 μm 이상의 모세관 공극이며, 직경이 작은 겹공극은 강도보다는 콘크리트의 건조수축에 더 많은 영향을 미친다고 알려져 있다. 따라서 모세관 공극을 콘크리트 압축강도에 대한 영향인자로 적용하였으며, 수화도를 이용하여 재령에 따른 콘크리트의 모세관 공극률을 계산하였다¹²⁾. 콘크리트 내부의 모세관 공극률을 계산하는 절차는 Fig. 6과 같고 W 는 중량비, M 은 배합량, S 는 비중, 그리고 V 는 부피를 나타내며, 첨자 C, CA, FA 는 각각 시멘트, 굵은 골재, 잔 골재를 나타낸다.

Fig. 6에 따라 주어진 배합비와 재령에 따른 수화도를 이용하여 양생온도 20°C인 경우 재령에 따른 콘크리트의 모

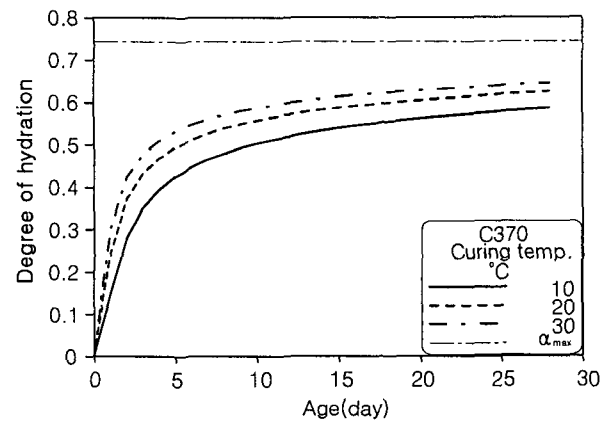


Fig. 5 Degree of hydration for C370

세관 공극률을 나타내는 Fig. 7을 보면, 재령이 경과할수록 공극률이 점차 감소하며, 물/시멘트비 변화에 따른 공극률의 차이는 재령이 경과할수록 커짐을 알 수 있다. 또한 동일한 물/시멘트비라도 양생온도가 달라지면 양생온도에 따라 수화생성물의 양이 달라지기 때문에 조직 내부의 미세관 공극률도 변하게 된다.

5.4 강도에측식에 사용된 재료상수의 결정

본 연구에서 얻은 압축강도 실험값과 기존의 강도실험값을 식 (14)의 강도에측식에 적용하여 재료상수를 구하였다. 모르타르의 압축강도는 $[1-P(\text{공극률})]$ 의 3승과 비례한다는 Powers¹¹⁾의 연구결과에 따라 공극률이 강도에 미치는 영향을 나타내는 상수 m 에 3.0을 적용하여 Table 4와 같은 재료상수값을 얻었다.

Fig. 8은 재령에 따른 $n(t)$ 값의 변화 즉, 강도 증분비와 수화도 증분의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 초기재령의 경우 양생온도에 따라 $n(t)$ 값은 큰 차이를 보이지만 재령이 경과할수록 $n(t)$ 는 큰 차이를 보이지 않고 거의 일정한 값을 나타내었다. 특히, 재령 1일차의 경우에는 양생온도에 따라 많은 차이를 나타내었

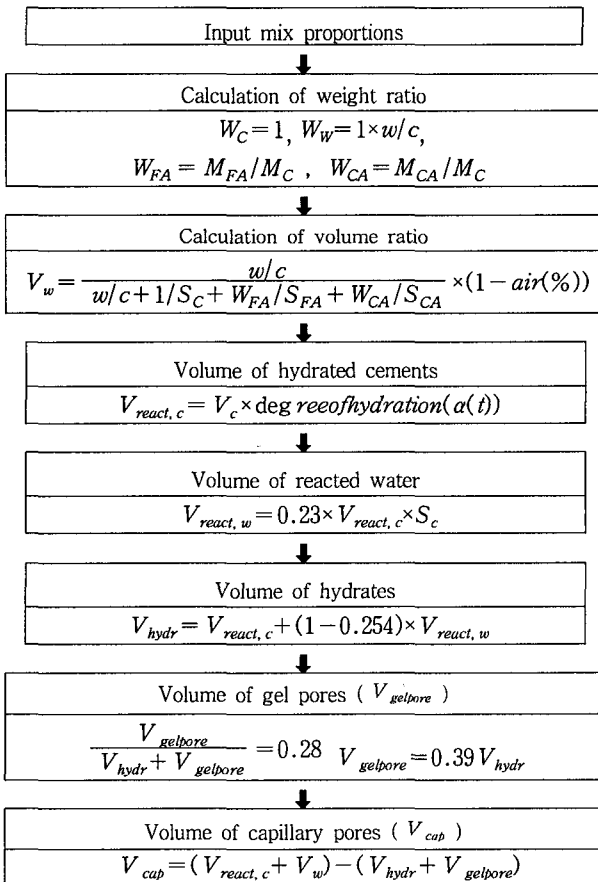


Fig. 6 Calculation procedure of capillary porosity

다. 이것은 재령 1일의 경우 수화의 초기단계에 해당하므로 공극률보다는 수화생성물의 양이 압축강도에 많은 영향을 미친다. 또한 초기재령일수록 수화생성물의 양 즉, 수화도가 공극률에 비해 양생온도에 따라 상대적으로 많

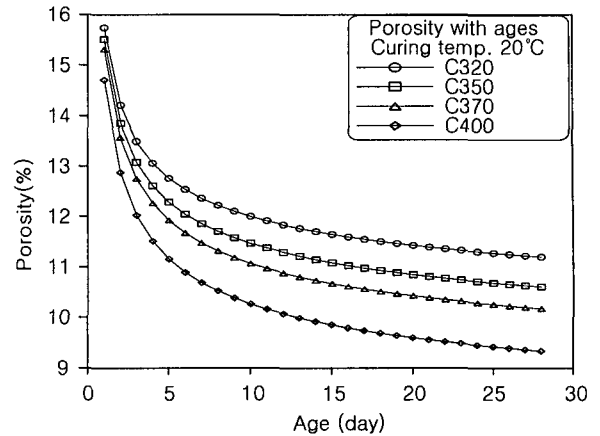


Fig. 7 Capillary porosity of concrete

Table 4 Material constants for proposed strength estimation model

Mix.	w/c	Temp (°C)	n_{28}	s	k	t_0
C320	0.58	10	3.0591	-0.1820	0.6812	0.6949
		20	3.0692	-0.1251	0.7909	0.3607
		30	3.1020	-0.1067	0.8216	0.1369
C350	0.53	20	3.0588	-0.1259	0.7879	0.3565
		30	3.0650	-0.1269	0.7850	0.3822
C370	0.5	10	3.1102	-0.1687	0.6910	0.6654
		30	3.0616	-0.1107	0.8152	0.1600
C400	0.46	20	3.0892	-0.1241	0.7840	0.3640
Oluokun et al ²⁾	0.763	23	3.0241	-0.1341	0.7845	0.3582
	0.534	23	3.0535	-0.1249	0.7939	0.3985
Gardner ¹³⁾	0.55	20	3.1370	-0.1235	0.7900	0.3956
	0.55	30	3.0331	-0.1286	0.7924	0.2632
Tank & Carino ⁴⁾	0.45	21.5	3.0694	-0.1255	0.7887	0.3890
	0.45	40.5	2.9515	-0.1280	0.7913	0.1399
Kjellsen & Detwiler ¹⁴⁾	0.43	5	3.0046	-0.3514	0.4862	2.0167
		12	3.0313	-0.1655	0.7090	0.6742
		23	3.0529	-0.1194	0.7974	0.2967
		32	3.0101	-0.1079	0.8217	0.1213
		43	2.9904	-0.1094	0.8221	0.0663
Popovics ¹⁵⁾	0.5	4.44	2.9378	-0.4953	0.4104	2.2002
		12.78	3.0207	-0.1694	0.7103	0.6445
		22.78	3.0410	-0.1226	0.7965	0.3111
		32.22	3.0459	-0.1076	0.8239	0.1273
		40.56	3.0308	-0.1020	0.8325	0.0220
		48.86	2.9689	-0.1046	0.8304	-0.0337
Chengju ¹⁶⁾	0.56	5.5	2.9938	-0.3539	0.4951	1.7696
		12.5	3.0586	-0.1575	0.7253	0.6245
		23	3.1077	-0.1146	0.8062	0.2847
		32	3.1013	-0.1039	0.8250	0.1016
		43	3.1190	-0.0989	0.8217	-0.0602

은 차이를 보이기 때문으로 판단된다. 여기서 가장 주목할 점은 양생온도가 같은 경우에는 물/시멘트비가 달라도 $n(t)$ 값 즉, 강도 증분 비에 대한 수화도 증분과 공극률의 효율은 거의 차이를 보이지 않았다는 것이다.

식 (14)에서 $n(t)$ 는 강도증분에 대한 수화도 증분의 효과를 나타내는 재료특성으로 다음과 같이 표현하였다.

$$n(t) = n_{28} \times \exp \left[s \left(1 - \left(\frac{28}{t^*} \right)^k \right) \right] \quad (15)$$

$$t^* = t \quad (t \geq 2) \quad (16-a)$$

$$t^* = t + t_0 \quad (t = 1) \quad (16-b)$$

여기서, t 는 재령(일), n_{28} 은 재령 28일의 $n(t)$ 값 즉, 재령 28일에서의 강도 증분 비에 대한 수화도 증분의 효과를 의미하고, s 와 k 는 $n(t)$ 곡선의 형상을 결정하는 재료상수이다. 식 (16-b)에서 t_0 는 양생온도에 따른 재령 1일차 보정상수이다.

5.5 제안된 강도예측식의 적용

본 연구의 압축강도 실험결과와 기존 연구의 실험결과를 식 (14)의 강도예측식에 의한 예측결과와 비교하기 위하여, 각 배합별로 결정된 Table 4의 재료상수를 사용한 경우의 압축강도 예측결과를 양생온도별로 Fig. 9(a)~(h)에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 식 (14)에 의한 예측 결과와 실제 강도가 양생온도에 관계없이 매우 근사함을 알 수 있다. 본 연구에서 제안한 강도예측식의 상수는 본 연구에서 수행한 실험 결과와 기존의 다른 연구자들의 강도실험결과를 바탕으로 결정된 것으로 적용 범위는 25~60 MPa이다.

5.6 일반화된 재료상수식의 결정

Fig. 10, 11, 12는 본 연구에서 수행한 압축강도 실험결과와 기존의 여러 실험값을 이용하여 결정된 재료상수 s , k , t_0 값을 양생온도에 대하여 나타낸 것이다.

그림에서 나타난 바와 같이 모든 실험결과와 회귀분석 결과에서 s 와 k 는 양생온도가 같은 경우에는 거의 근사한 값을 보였으나 양생온도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 s 와 k 를 각각 다음과 같은 양생온도의 함수로 표현하여 일반화된 상수값을 결정하였다.

$$s = -0.0945 \exp \left[-0.0766 \left(1 - \frac{100}{T} \right) \right] \quad (16)$$

$$k = 0.8829 \exp \left[0.0316 \left(1 - \frac{100}{T} \right) \right] \quad (17)$$

여기서, T 는 양생온도(°C)이다. Fig. 11의 k 값의 변화를 보면 양생온도가 30 °C 이상일 경우에는 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 그러나 식 (17)의 식이 이러한 경향을 완벽히 표현하지 못하므로 양생온도 30 °C 이상의 경우에는 30 °C에서의 k 값 약 0.825를 사용하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

Fig. 12에 나타난 바와 같이 t_0 값은 양생온도에 따라 비선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다. s 나 k 와 마찬가지로 동일한 양생온도일 경우에는 t_0 값은 거의 일정한 수치를 나타내었다. 따라서, t_0 를 다음과 같이 양생온도의 함수로 표현하였다.

$$t_0 = -0.121 + 11.695 \times (T)^{-1.078} \quad (18)$$

식 (15)의 계수 n_{28} 은 양생온도와 물/시멘트비에 따라 현저한 차이를 보이지는 않았다. 이는 재령 28일의 경우, 강도 증분비에 대한 수화도 증분의 효율이 양생온도가 따라 큰 차이를 보이지 않는다는 의미이다. 즉, 초기재령에서는 양생온도에 따라 강도 발현에 대한 수화도 증분과 공극률의 효율이 큰 차이를 나타내지만 재령이 경과할수록 그 차이는 현저히 감소하여 재령 28일이 되면 거의 일정한 값을 나타낸다. 또한 n_{28} 을 나타내는 Fig. 13을 보면 양생온도에 관계없이 n_{28} 이 거의 일정함을 알 수 있다.

Fig. 14는 Table 4의 재료상수를 사용한 강도예측값과 실제 실험값을 비교한 결과이고, Fig. 15는 일반화된 재료상수를 사용한 경우의 예측값과 강도 실험값을 비교한 결과이다. Fig. 15에 나타난 바와 같이 일반화된 재료상수를 사용하면, 그렇지 않은 경우(Fig. 14)보다 실험값과 예측값의 오차가 상당히 증가함을 알 수 있다. 이러한 오차는 연구자별로 사용한 배합비의 차이, 시멘트의 종류나 양생 조건의 영향으로 판단되며, 본 연구에서 제안한 일반화된 강도예측식은 콘크리트의 양생온도와 재령에 따른 압축강도를 일정오차 내에서 예측할 수 있다고 사료된다.

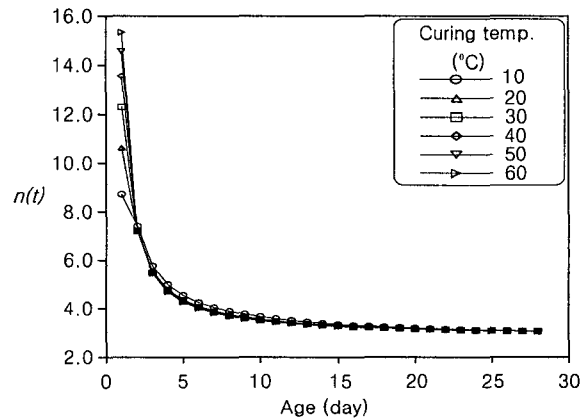
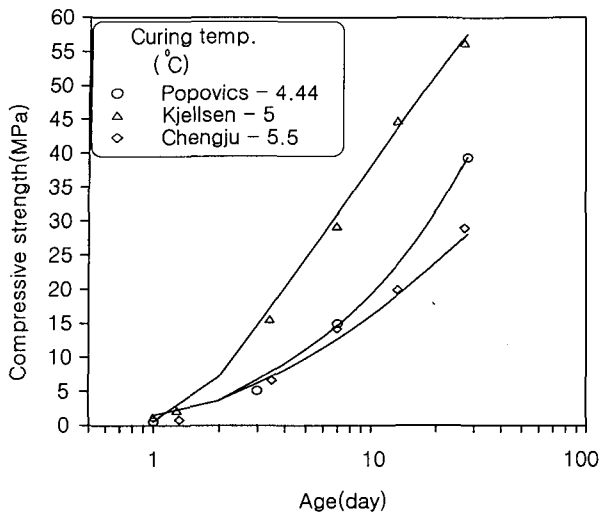
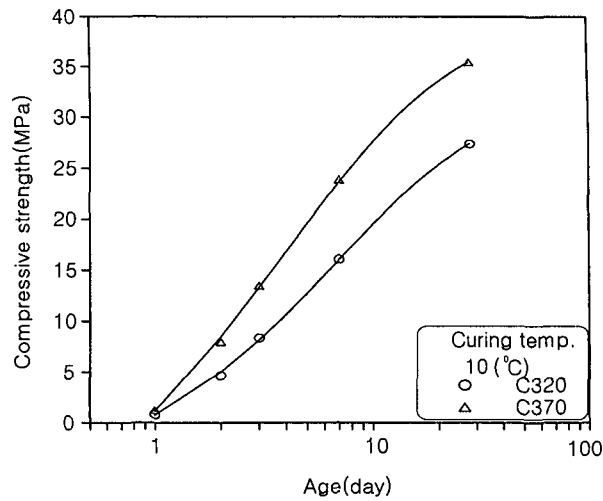


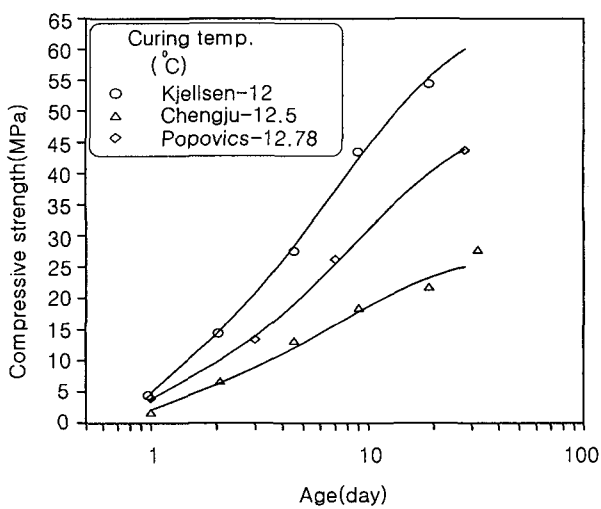
Fig. 8 Effect of hydration on strength



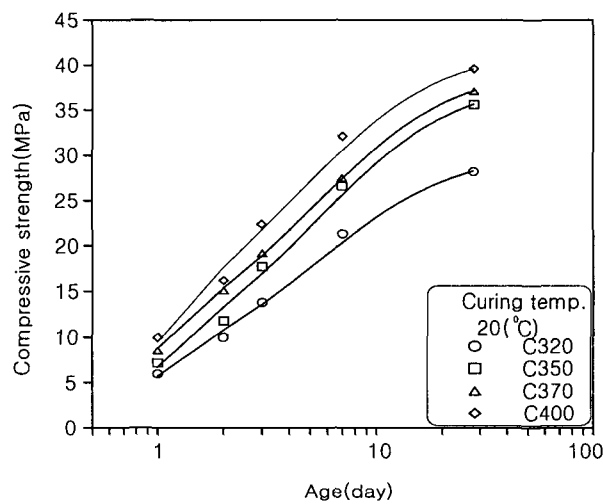
(a) Curing temperature of 4~6°C



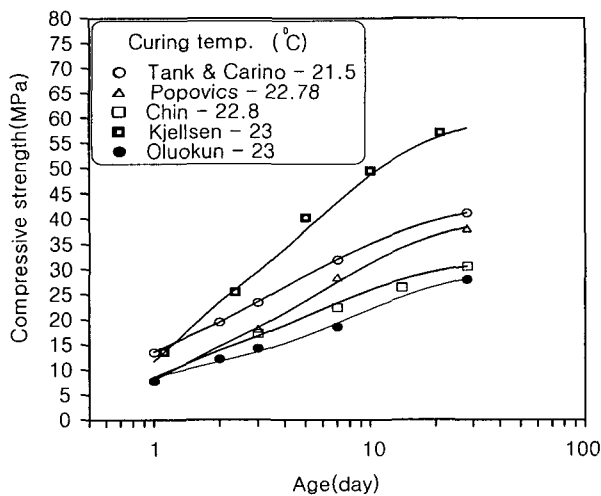
(b) Curing temperature of 10°C



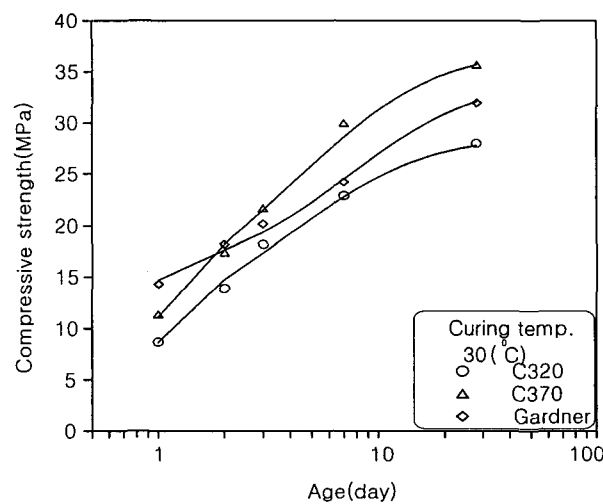
(c) Curing temperature of 12~13°C



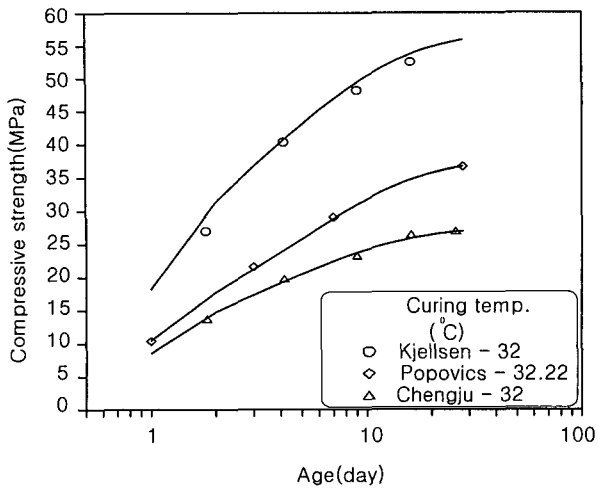
(d) Curing temperature of 20°C



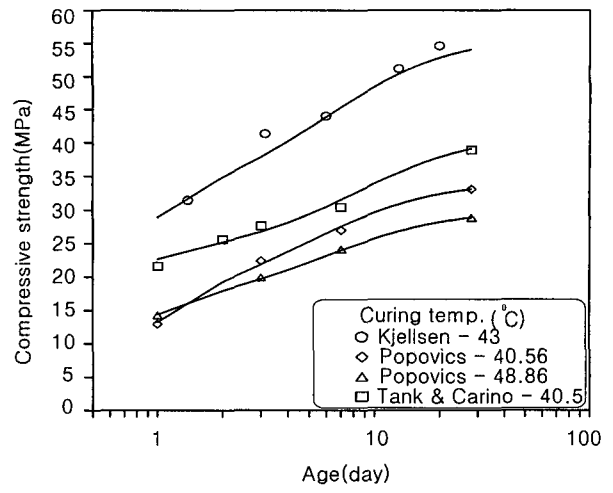
(e) Curing temperature of 21~23°C



(f) Curing temperature of 30°C



(g) Curing temperature of 32~33°C



(h) Curing temperature of 40~49°C

Fig. 9 Comparison of measured strength and estimated strength by Eq. (14)

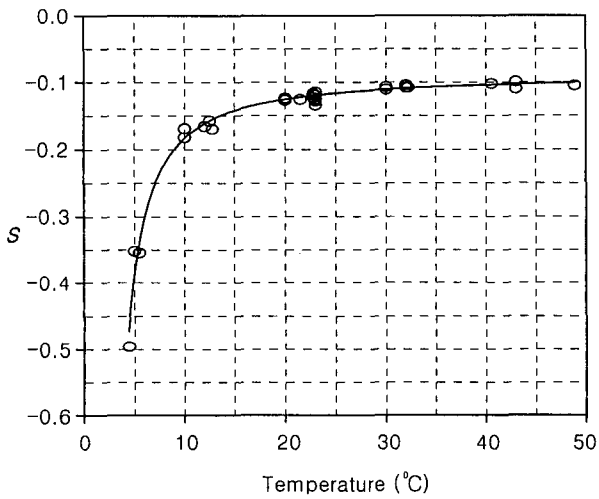


Fig. 10 s -value with curing temperature

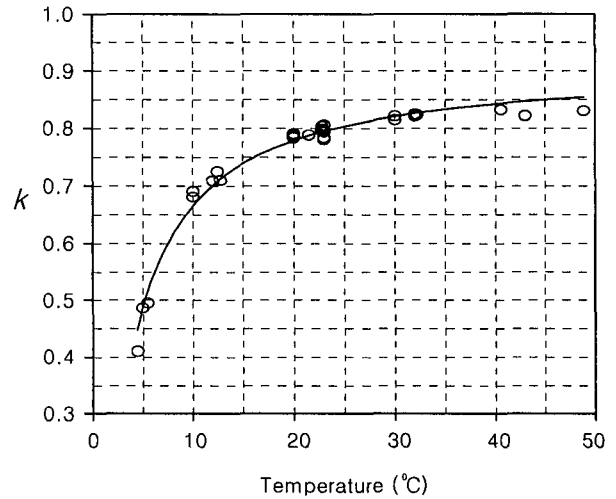


Fig. 11 k -value with curing temperature

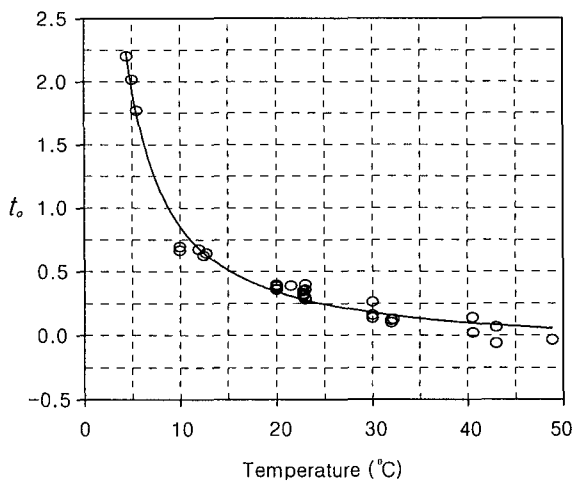


Fig. 12 t_0 -value with curing temperature

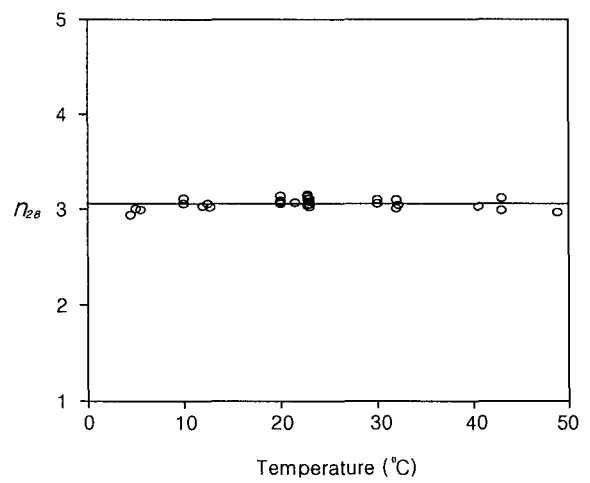


Fig. 13 n_{28} -value with curing temperature.

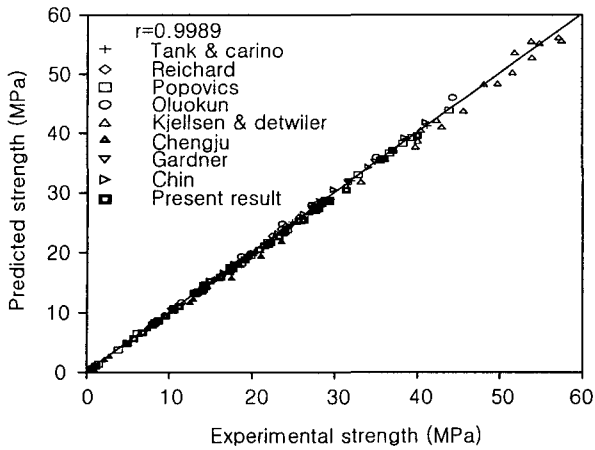


Fig. 14 Experimental vs. predicted strength using variable n_{28}, s, k, t_0

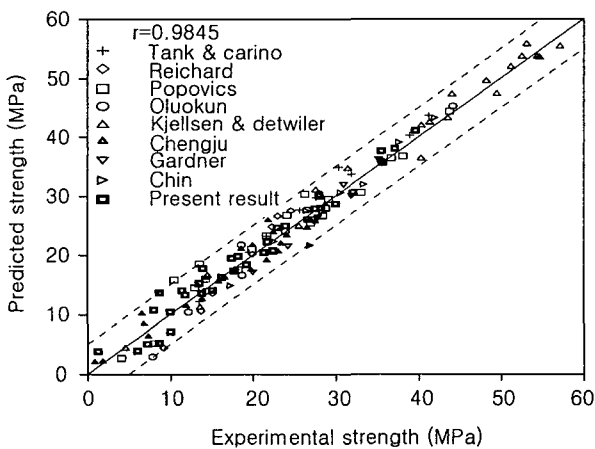


Fig. 15 Experimental vs. predicted strength using general n_{28}, s, k, t_0

6. 결 론

본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 기존의 강도예측식인 성숙도모델이 강도예측의 정확성은 높으나 재료상수의 민감도가 크고 콘크리트의 미세구조 특성을 반영하지 못하는 점을 고려하여 재령에 따른 공극률 및 수화도 증분량과 강도 증분량과의 상관관계를 분석하여 초기재령 콘크리트의 강도예측식을 제안하였다.
- 2) 본 연구와 기존 연구의 강도실험결과를 이용하여 제안된 강도예측식의 재료상수를 결정하였다. 공극률의 영향 정도가 일정하다고 가정한 경우 동일한 양생온도에서는 강도 증분에 대한 수화도 증분의 효율을 나타내는 $n(t)$ 가 물/시멘트비에 관계없이 거의 일치함을 알 수 있었다.
- 3) 제안한 강도예측식을 이용하여 얻은 예측 강도와 실제 강도를 비교하여 잘 일치하는 결과를 얻었다. 각 배합별로 결정된 재료상수를 사용한 경우보다 일반화된 재료

상수를 사용하면 오차가 다소 증가하지만, 이는 콘크리트 배합비, 사용한 재료의 특성 혹은 양생조건 차이에 기인한 것으로 판단된다.

4) 강도예측식의 재료상수를 결정하기 위하여 다양한 영향 인자를 고려한 강도실험을 실시하고, 콘크리트 강도에 미치는 공극률의 영향에 대한 정량적인 평가와 변온양생에 대한 적용성 검토 등에 대한 연구를 지속적으로 수행한다면 보다 정확한 강도예측이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 KISTEP의 엔지니어링 핵심 공통 기반기술 개발사업의 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 주지현, 최성우, 박선규, 길배수, 남재현, 감무한, “등가 재령을 이용한 콘크리트의 강도예측에 의한 건설현장에서의 강도관리에 관한 실험적 연구,” 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제12권 1호, 2000, pp.287~290.
2. Oluokun, F. A., Burdette, E. G., and Deatherage, J. H., “Elastic Modulus, Poisson’s Ratio, and compressive Strength Relationships at Early Ages,” *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 1, 1991, pp.3~10.
3. 한상훈, 김진근, 문영호, “수정 반응률 상수 모델에 의한 콘크리트 압축강도의 예측,” 콘크리트학회 논문집, 제12권 2호, 2000, pp.31~42.
4. Tank, R. C and Carino, N. J., “Rate Constant Functions for Strength Development of Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 1, 1991, pp.74~83.
5. 차수원, 초기재령 콘크리트의 수화과정 모델링과 온도 및 습도 응력해석, 박사논문, 서울대학교, 1999.
6. Kishi, T and Maekawa, K., “Multi-component Model for Hydration Heat of Concrete based on Cement Mineral Compounds,” *Proceedings of the JCI*, Vol. 15, No. 1, 1993, pp.1211~1216.
7. Bentz, D. P., “Modeling Cement Microstructure : Pixels, Particles, and Property Prediction,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol. 32, 1999, pp.187~195.
8. Byfors, J., *Plain concrete at early ages*, CBI report FO 3:8, Sweden, 1980.
9. Hansen, F. P and Pedersen, E. J., “Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete,” *Journal of the Nordic Fed-*

- eration, No 1, 1977, pp.21~25, Stockholm, Sweden.
10. Jonasson, J. E., *Modelling of Temperature, Moisture, and Stresses in Young Concrete*, Ph.D dissertation, Lulea University of Technology., Lulea, Sweden, No. 153D, 1994.
 11. Powers, T. C., "Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 41, No. 1, 1958, pp. 1~6.
 12. Neville, A. M., *Property of Concrete*, 4th Edition, 1996, pp. 269~279.
 13. Gardner, N. J., "Effect of Temperature on the Early-Age Properties of Type I, Type III, Type I/Fly Ash Concretes," *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 1, 1990, pp. 68~78.
 14. Kjellsen, K. O and Detwiler, R. J., "Later-Age Strength Prediction by a Modified Maturity Model," *ACI Materials Journal*, Vol. 90, No. 5, 1993, pp. 220~227.
 15. Popovics, S., "History of Mathematical Model for Strength Development of Portland Cement Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 5, 1998, pp. 593~600.
 16. Chengju, G., "Maturity of Concrete: Method for Predicting Early-Stage Strength," *ACI Materials Journal*, Vol. 86, No. 4, 1989, pp.341~353.

요 약

콘크리트의 강도를 예측하기 위하여 널리 사용되어 온 성숙도 모델은 양생온도와 재령을 이용하여 콘크리트 강도를 비교적 정확하게 평가할 수 있다. 그러나 수화생성물의 특성과 미세구조의 공극 분포와 같이 강도 발전과 관련이 있는 물리량을 고려하지는 못한다. 따라서, 본 연구에서는 강도에 대한 이러한 인자들의 영향정도를 규명하기 위해서 수화모델 및 모세관 공극률 계산방법을 정립하였고, 실험 변수로 재령과 양생 온도를 고려하여 다양한 물/시멘트비를 갖는 콘크리트의 압축강도실험을 수행하였다. 실험결과를 분석하여 수화도와 모세관 공극률과 같은 미세구조특성을 고려한 강도예측모델을 제안하였다. 실제 실험값과 모델식에 의한 강도 예측값을 비교하여 잘 일치하는 결과를 얻었다. 결론적으로, 본 연구에서 제안한 강도예측모델은 양생온도와 재령에 따른 초기재령 콘크리트의 압축강도를 일정오차 내에서 예측할 수 있다고 판단된다.

핵심용어 : 수화도, 공극률, 압축강도, 초기재령, 양생온도