

# 미세구조 특성을 고려한 초기재령 콘크리트의 강도예측모델

## Strength Estimation Model for Early-Age Concrete Considering Microstructural Characteristics

황 수 덕<sup>\*</sup> 김 의 태<sup>\*\*</sup> 이 광 명<sup>\*\*\*</sup>  
Hwang, Soo-Duck Kim, Eui-Tae Lee, Kwang-Myong

### ABSTRACT

Microstructural characteristics such as hydrates and porosity greatly influence the development of concrete strength. In this study, a strength estimation model for early-age concrete considering the microstructural characteristics was proposed, which considers the effects of both an increment of degree of hydration and capillary porosity on a strength increment. Hydration modeling and compressive strength test with curing temperature and curing ages were carried out. By comparing test results with estimated strength, it is found that the strength estimation model can estimate compressive strength of early-age concrete with curing ages and curing temperature within a margin of error.

### 1. 서 론

최근들어 콘크리트의 강도를 예측하는 방법으로 적산온도를 응용한 반응률 상수모델의 개발이 활발히 진행되어왔다.<sup>(1-3)</sup> 그러나, 콘크리트의 강도발현의 물리적 원인에 대한 고려가 다소 미흡한 실정이다. 실제로 콘크리트의 강도는 수화작용의 부산물인 수화생성물의 강도와 미세구조 내부의 공극률에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 즉, 시멘트의 수화작용의 진행과 더불어 강도가 증진되며 또한 동일한 수화도에서 공극률이 증가함에 따라 강도가 감소하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 수화도와 공극률과 같은 미세구조 특성을 고려할 수 있는 강도예측모델의 개발 연구를 수행하였다. 콘크리트의 강도에 영향을 미치는 인자인 양생온도, 물/시멘트비를 고려하여 압축강도실험을 수행하였으며, 재령에 따른 압축강도의 증분과 수화도 모델에 의해 산정된 수화도 증분 그리고 재령별 모세관 공극률과의 관계를 분석하여 강도예측식을 제안하였다.

\* 정회원, 성균관대학교 토목공학과 석사

\*\* 정회원, 성균관대학교 토목공학과 석사과정

\*\*\* 정회원, 성균관대학교 토목공학과 부교수

## 2. 미세구조 특성

### 2.1 콘크리트의 수화도

본 연구에서 채택한 Byfors<sup>(4)</sup>에 의해 제안된 수화도 모델은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서,  $t_{eq}^c$ 는 등가재령이며,  $\lambda_1$ ,  $t_1$ ,  $k_1$ 은 시멘트 종류에 따라 결정되는 상수이다. 등가재령  $t_{eq}^c$ 는 세 가지 반응을 계수로 표현된다.

$$t_{eq}^c = \int_0^t \beta_T \beta_{w/c} \beta_w dt \quad (2)$$

양생온도에 따른 반응률 계수  $\beta_T$ 는 Arrhenius-형태의 반응률 식으로 표현할 수 있다<sup>(5-6)</sup>.

$$\beta_T = \exp\left\{\frac{E}{R} \left\{\frac{1}{293} - \frac{1}{T+273}\right\}\right\} \quad (3)$$

$$\frac{E}{R} = \theta = \theta_{ref} \left\{\frac{30}{T+10}\right\}^{k_3} \quad (4)$$

여기서, E는 활성화 에너지, R은 기체상수(8314.73 J/mol·K), T는 온도,  $\theta_{ref}$ 와  $k_3$ 는 재료상수이다.

물/시멘트비에 따른 반응률 계수  $\beta_{w/c}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\beta_{w/c} = \left\{\frac{\alpha_{max} - \alpha_c}{\alpha_{max}}\right\}^\gamma \quad (5)$$

$$\alpha_{max} = \frac{1.031 \times w/c}{0.194 + w/c} \quad (6)$$

여기서,  $\alpha_{max}$ 는 최대수화도,  $\gamma$ 는 재료상수이다.

콘크리트내의 수분분포가 수화속도에 미치는 반응률 계수  $\beta_w$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\beta_w = \frac{\phi_{wat}(\alpha) - \phi_0}{\phi_{max}(\alpha) - \phi_0} \frac{\phi_{max}(\alpha)}{\phi_{wat}(\alpha)} \quad (7)$$

여기서,  $\phi_0$ 는 모세관 공극의 최소직경(0.002  $\mu$ m),  $\phi_{max}(\alpha)$ 는 수화도에 따른 모세관 공극의 최대직경이며  $\phi_{wat}(\alpha)$ 는 물로 채워져 있는 모세관 공극의 최대직경을 나타낸다.

### 2.2 콘크리트의 공극률

콘크리트의 강도는 내부에 존재하는 모든 공극의 체적에 의해 영향을 받는다. 그러나, 콘크리트의 강도에 가장 큰 영향을 미치는 공극은 직경 50  $\mu$ m이상의 모세관 공극이며, 직경이 작은 젤공극은 강도 보다는 콘크리트의 건조수축에 더 많은 영향을 미친다. 따라서 모세관 공극을 콘크리트 압축강도에 대한 영향인자로 적용하였으며, 수화도를 이용하여 재령에 따른 콘크리트의 모세관 공극률을 계산하였다.<sup>(7)</sup>

## 3. 실험 연구

### 3.1 재료 및 배합비

콘크리트 배합에는 1종 포틀랜드시멘트가 사용되었으며, 워커빌리티의 확보를 위해 단위 시멘트량의 0.2%의 AE감수제가 사용되었다. 굵은 골재는 최대치수 25 mm의 화강암 쇄석으로 비중 2.74, 조립률 6.7이며, 잘 골재로는 비중 2.65, 조립률 2.73인 강모래를 사용하였다. 실험에 사용된 네 가지 종류의

배합비를 표 1에 나타내었다.

표 1. 실험에 사용된 콘크리트 배합비 (kg/m<sup>3</sup>)

Type	Water	Cement	Aggregate		S/a (%)	AEWR/C (%)	W/C
			Coarse	Fine			
C320	185	320	1025.6	712.7	41	0.2	0.58
C350	185	350	1008.3	703.1	41	0.2	0.53
C370	185	370	1016.2	680.8	40	0.2	0.50
C400	185	400	1032.0	691.0	40	0.2	0.46

### 3.2 실험 방법

배합시 콘크리트 시방서에 따라 굵은 골재, 잔 골재, 시멘트를 투입하여 건비빔을 실시한 후 배합수와 혼화제를 첨가하여 2분간 배합하였다. C320과 C370배합은 10, 20, 30℃인 수중에서 양생하였으며, 나머지 배합은 20℃로 수중양생하였다. 표준양생 후 KS F 2405에 준하여 재령 1, 2, 3, 7, 28일에 압축강도를 측정하였다.

### 3.3 압축강도 실험결과

표 1의 배합비를 사용한 콘크리트 공시체를 제작하여 각 재령별로 압축강도를 측정하였으며, 그 결과는 표 2와 같다. 양생온도를 10, 20, 30℃로 변화시킨 C320, C370의 결과를 보면, 양생온도 20℃를 기준으로 온도가 낮을수록 초기재령의 압축강도는 작게 나타났지만, 재령의 경과와 함께 강도의 발현이 점진적으로 증가함을 알 수 있다. 반대로, 온도가 높은 30℃에서는 초기 재령에서의 압축강도는 20℃에 비해 크지만, 재령 28일의 압축강도는 다소 작게 나타났다.

표 2. 압축강도 실험결과 (MPa)

Type	Curing Temperature (°C)	Age (day)				
		1	2	3	7	28
C320	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	20	7.2	11.8	17.7	26.6	35.6
C370	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	20	10.0	16.2	22.4	32.1	39.6

## 4. 강도에측식의 제안

### 4.1 미세구조를 고려한 강도에측식의 제안

본 연구에서는 콘크리트 조직내부의 모세관 공극률과 재령에 따른 수화도 증분과 같은 미세구조 특성이 콘크리트 압축강도에 미치는 영향을 분석하여 강도에측식을 제안하였다. 양생온도, 상대습도, 물/시멘트비 그리고, 콘크리트 내부의 수분 및 공극 분포를 고려한 수화도 모델을 이용하여 수화도를 산정하였으며, 재령별 수화도 증분량 및 모세관 공극률과 강도 증분과의 상관관계를 분석하여 강도에측식에 적용하였다.

$$\frac{df_c'}{f_{28}} = [100 - P(t)]^m da^{n(t)} \quad (8)$$

여기서,  $t$ 는 재령(day),  $f_{28}$ 은 재령 28일 압축강도,  $df_c'$ 은 강도 증분량,  $da$ 는 수화도 증분량,  $P(t)$ 는 재령별 콘크리트의 공극률(%),  $m$ 과  $n(t)$ 는 각각 공극률과 수화도 증분이 상대강도증분에 미치는 영향을 나타내는 재료상수이다.

#### 4.2 미세구조모델에 사용된 재료상수의 결정

본 연구에서 수행된 압축강도 실험값을 이용하여 식 (8)의 재료상수를 결정하였다. 공극률이 강도에 미치는 영향을 나타내는 재료상수  $m$ 이 3.0인 경우, 표 3과 같은 재료상수값을 얻었다. 그림 1은 재령에 따른  $n(t)$ 값의 변화 즉, 강도 증분비와 수화도 증분의 상관관계를 나타낸 것이다. 재령 1일의 경우 양생온도에 따라  $n(t)$ 값은 큰 차이를 보이지만 재령이 경과할수록  $n(t)$ 는 큰 차이를 보이지 않고 거의 일정한 값을 나타냈다. 이것은 재령 1일의 경우 양생온도에 따른 수화도의 변화가 공극률의 변화보다 더 크기 때문으로 판단된다. 여기서 가장 주목할 점은 양생온도가 같은 경우에는 물/시멘트비가 달라도  $n(t)$ 값 즉, 강도 증분 비에 대한 수화도 증분과 공극률의 효율에는 큰 차이를 보이지 않았다는 것이다.

식 (8)에서  $n(t)$ 는 강도증분에 대한 수화도 증분의 효율을 나타내는 재료특성으로 다음과 같이 표현하였다.

$$n(t) = n_{28} \times \exp \left[ s \left( 1 - \left( \frac{28}{t^*} \right)^k \right) \right] \quad (9)$$

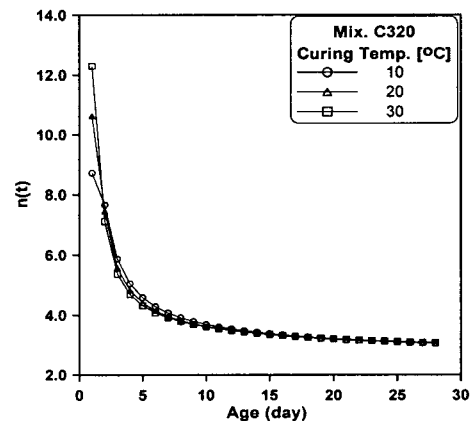
$$t^* = t \quad (t \geq 2) \quad (10-a)$$

$$t^* = t + t_0 \quad (t = 1) \quad (10-b)$$

여기서,  $n_{28}$ 은 재령 28일의  $n$ 값 즉, 재령 28일에서의 강도 증분 비에 대한 수화도 증분의 효율을 의미하고,  $s$ 와  $k$ 는  $n(t)$ 곡선의 형상을 결정하는 상수이다. 식 (10)에서  $t^*$ 는 실험결과를 통해서 구할 수 있으며,  $t_0$ 는 양생온도에 따른 상수이다.

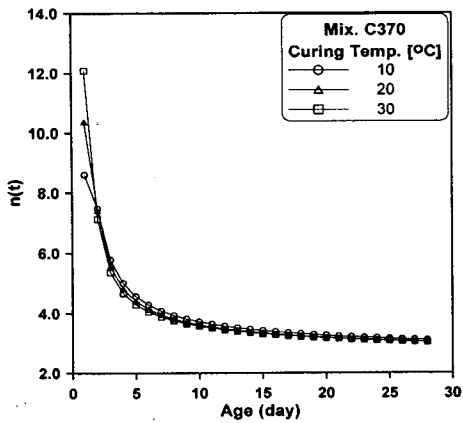
표 3. 강도에측식에 사용된 재료상수

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
C370	0.5	10	3.1102	-0.1687	0.6910	0.6654
		20	3.0650	-0.1269	0.7850	0.3822
		30	3.0616	-0.1107	0.8152	0.1600
C400	0.46	20	3.0892	-0.1241	0.7840	0.3640

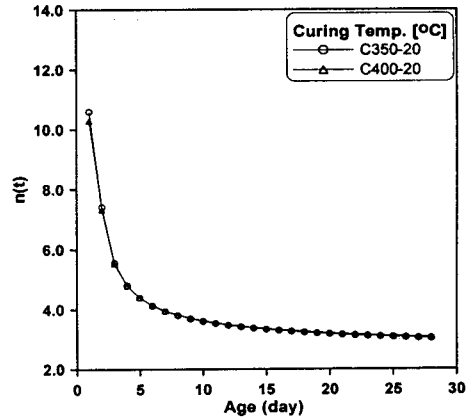


(a) C320

그림 1. 강도 증분과 수화도 증분의 관계



(b) C370

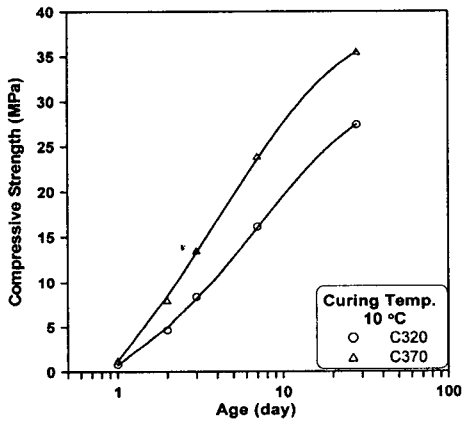


(c) C350, C400

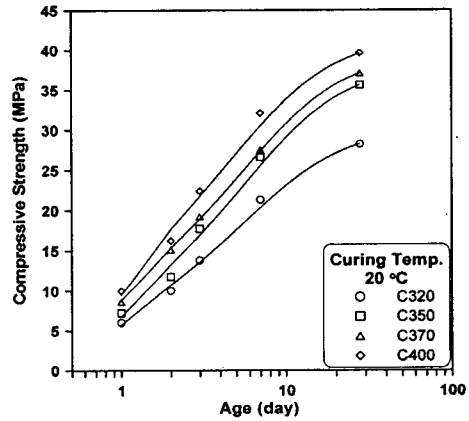
그림 1. 강도 증분과 수화도 증분의 관계

#### 4.3 제안된 강도예측식의 적용

본 연구에서 수행한 압축강도 실험결과를 식 (8)의 강도예측식에 의한 예측결과와 비교하여 그림 2에 나타내었고, 그림 3은 식 (8)에 의한 예측결과와 실제강도를 종합적으로 비교한 결과이다. 그림 2와 3을 보면 실험결과와 예측결과가 양생온도에 관계없이 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 미세구조 특성을 고려한 강도예측식을 적용하면 콘크리트의 양생온도와 재령에 따른 압축강도를 일정오차 내에서 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

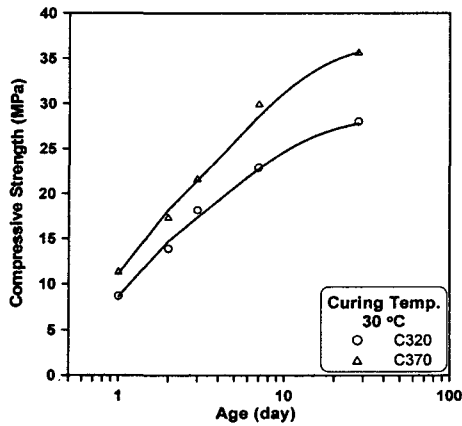


(a) 양생온도 10°C



(b) 양생온도 20°C

그림 2. 강도예측결과와 실험결과의 비교 (계속)



(c) 양생온도 30°C  
그림 2. 강도예측결과와 실험결과와의 비교

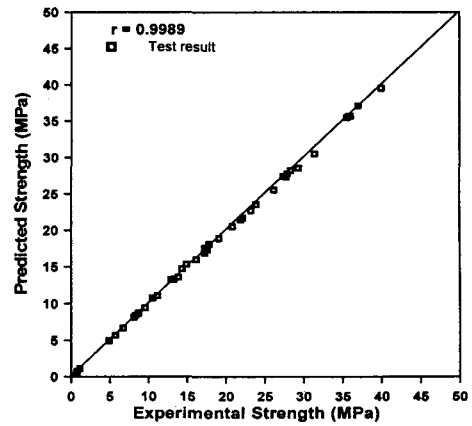


그림 3. 실험결과 vs. 예측결과

## 5. 결 론

- (1) 콘크리트 강도발현의 직접적인 근원이 되는 수화생성물의 양 즉, 수화도와 수화생성물 자체의 강도에 영향을 미치는 모세관 공극률을 고려할 수 있는 초기재령 콘크리트의 강도예측식을 제안하였다. 압축강도 실험값으로부터 제안된 강도예측식의 재료상수를 결정된 결과 수화도 증분의 효율을 나타내는 재료상수  $n(t)$ 가 같은 양생온도에서는 물/시멘트비에 관계없이 거의 일치함을 알 수 있었다.
- (2) 양생온도에 따른 콘크리트의 압축강도 실험값과 강도예측값을 비교하여 잘 일치하는 결과를 얻었다. 추후 제안된 강도예측식의 상수를 결정함에 있어서 콘크리트 강도에 미치는 공극률의 영향에 대한 정량적인 평가가 이루어진다면 보다 정확한 강도예측이 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 KISTEP의 엔지니어링 핵심 공통 기반기술개발사업의 지원 하에 이루어 졌으며, 이에 관계자 여러분에게 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 오병환, 이명규, 홍경욱, 김광수, "성숙도 개념을 이용한 콘크리트 초기강도 예측 모델 개발 연구," 콘크리트 학회 논문집, 제 8권 3호, 1996, pp. 197~207.
2. 한상훈, 김진근, 문영호, "수정 반응률 상수 모델에 의한 콘크리트 압축강도의 예측," 콘크리트 학회 논문집, 제 12권 2호, 2000, pp. 31~42.
3. 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.
4. Byfors, J., Plain concrete at early ages, CBI report FO 3:8, Sweden, 1980.
5. Hansen, F. P. and Pedersen, E. J., "Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete," *Journal of the Nordic Federation*, No 1, 1977, pp. 21~25, Stockholm, Sweden.
6. Jonasson, J. E., "Modelling of Temperature, Moisture, and Stresses in Young Concrete," PhD dissertation, Lulea University of Technology., Lulea, Sweden, No. 153D, 1994.
7. Neville, A. M., *Property of Concrete*, 4th edition, 1996, pp. 269~279.