

# 초기재령 콘크리트의 강도에측모델 비교

## Comparison of Strength Estimation Models for Early Age Concrete

황 수 덕\*  
Hwang, Soo-Deuk

채 요 환\*  
Chae, Yo-Hwan

이 광 명\*\*  
Lee, Kwang-Myong

### ABSTRACT

In order to estimate strength of concrete, many attempts have been made. However, it is difficult to estimate concrete strength with ages. In this study, the factors influencing the strength of concrete such as w/c ratio and curing temperature, were investigated and results predicted by the established strength models were compared to measured strength data. It is found that in general the estimated values are approximate to the test results. In order to accurately predict the concrete strength, curing temperature factor should be employed in the strength models.

### 1. 서론

현재까지 콘크리트의 강도를 예측하기 위해 많은 연구가 수행되었으나, 강도는 수많은 인자에 의해서 영향을 받기 때문에 재령에 따른 강도의 발현정도를 정확히 예측하는 데는 많은 어려움이 있다. 이 연구에서는 콘크리트의 강도에 영향을 미치는 인자들에 대해 조사하였고, 기존의 강도 예측식을 강도 실험결과와 비교하였다. 그 결과 대체적으로 예측결과가 실험결과와 근사하였으나, 강도를 보다 정확히 예측하기 위해서는 강도 예측식에 양생온도를 고려해야 할 것으로 사료된다.

### 2. 이론 배경

#### 2.1 콘크리트 강도에 영향을 미치는 인자

강도에 영향을 미치는 인자에는 여러 가지가 있으나, 그 중에서도 w/c비와 양생조건이 가장 중요한 인자이다. 일반적으로 w/c비가 낮으면 강도가 높아지는 경향을 나타낸다. 그리고, 콘크리트의 양생온도가 높으면 수화반응이 빨라 재령 28일까지의 강도가 높아지나, 재령 28일 이후의 강도는 낮아진다. 그 이유는 양생온도가 높으면 시멘트 입자의 표면에 생기는 수화물이 치밀하여 내부에 물이 침투되기 어렵기 때문에 장기 재령에 있어서의 수화반응이 방해를 받지만, 양생온도가 낮으면 물이 쉽게 통과하기 때문에 수화반응이 서서히 진행되나 장기 재령에서의 강도는 높아지기 때문이다<sup>(1)</sup>. 콘크리트 양생 시 외기습도가 높으면 수화에 사용되는 콘크리트 자유수의 손실이 적어서 높은 강도를 발현하지만 상대습도가 낮은 경우에는 내부의 자유수가 손실되어 수화반응에 나쁜 영향을 미치게 된다.

\*정회원, 성균관대학교 토목공학과 석사과정

\*\*정회원, 성균관대학교 토목공학과 부교수

## 2.2 기존의 강도예측모델

콘크리트의 강도를 예측하는 모델에는 여러 형태가 있으나, 크게 분류해 보면, 28일 강도로부터 초기 재령의 강도를 예측하는 방식과 숙성도(Maturity)를 이용하는 방법이 대표적이다.

ACI Committee 209<sup>(2)</sup>에서는 재령 28일의 압축강도로부터 초기 재령에서의 강도를 예측하기 위해 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$f_{cm}(t) = f_{c28} \left( \frac{t}{4 + 0.85t} \right) \quad (1)$$

여기서  $f_{c28}$ 은 재령 28일 압축강도(MPa)이며,  $f_{cm}(t)$ 는 각 재령에서의 압축강도(MPa),  $t$ 는 재령(day)이다.

CEB-FIP<sup>(3)</sup>도 ACI Committee 209와 유사하게 28일 강도로부터 초기 재령에서의 강도를 예측하는 모델을 제안하였다. ACI모델과 달리 시멘트의 종류에 따른 계수를 사용하여, 보다 일반적인 모델을 제안하였다.

$$f_{cm}(t) = f_{c28} \exp \left[ s \left( 1 - \sqrt{\frac{28 t_1}{t}} \right) \right] \quad (2)$$

여기서,  $s$ 는 시멘트의 종류에 따른 계수로서, 조강시멘트는 0.2, 보통시멘트는 0.25, 그리고 완결성시멘트는 0.38이 적용된다. 또한, 강도의 단위는 MPa이며,  $t_1$ 은 1일이다.

Oluokun<sup>(4)</sup>은 적산온도와 강도와의 상관관계를 파악하여, 초기 재령에서의 강도를 추정하는 다음과 같은 예측모델을 제안하였다. 상수  $\gamma$ 는 초기 강도발현률과 관계가 깊으며 물/시멘트비와 시멘트 종류에 따른 상수이다.

$$f_{cx} = f_{c28} (1 - e^{-m}) \quad (3)$$

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (4)$$

여기서,  $f_{cx}$ 는 숙성도가  $M$ 일 때의 압축강도,  $m$ 은 숙성도를 10,000으로 나눈 값,  $f_{c28}$ 은 28일 압축강도,  $T_0$ 는 강도발현시작온도, 그리고  $T$ 는  $\Delta t$  동안 콘크리트의 평균온도이다.

## 3. 실험 연구

### 3.1 재료 및 배합비

콘크리트 배합에는 1종 포틀랜드 시멘트가 사용되었으며, 슬럼프 조절을 위해 단위 시멘트량의 0.2%의 AE감수제가 사용되었다. 굵은 골재는 최대치수 25 mm의 화강암 쇄석으로 비중 2.74, 조립율 6.70이며, 잔 골재로는 비중 2.65, 조립율 2.73인 강모래를 세척하여 불순물을 제거한 후 사용하였다. 실험에 사용된 네 가지 종류의 배합비는 Table 1에 나타난 바와 같이 단위 수량은 185 kg/m<sup>3</sup>으로 일정하게 하고, 물/시멘트비를 0.46~0.58로 변화시켜 정하였다.

Table 1. Mix Proportions of Four Concrete Mixtures (kg/m<sup>3</sup>)

Type	Water	Cement	Aggregate		S/a (%)	AEWR/C (%)	W/C
			Coarse	Fine			
C1(C320)	185	320	1025.6	712.7	41	0.2	0.58
C2(C350)	185	350	1008.3	703.1	41	0.2	0.53
C3(C370)	185	370	1016.2	680.8	40	0.2	0.50
C4(C400)	185	400	1032.0	691.0	40	0.2	0.46

Table 2. Curing Method and Temperature for Concrete Specimen

Type	Curing Temperature (°C)	Curing Method
C1, C3	10	Specimens are placed in a water bath until tested.
	20	
	30	
C2, C4	20	

### 3.2 실험 방법

초기재령 콘크리트의 강도에측모델을 비교하기 위한 실험을 위해, Table 1의 네 가지 배합이 사용되었으며, 배합별 양생온도와 방법은 Table 2와 같다. 배합시 콘크리트 시방서에 따라 굵은 골재, 잔골재, 시멘트를 투입하여 건비빔을 약 1분간 실시한 후 배합수와 혼화제를 첨가하여 2분간 배합하였다. 각 재령당 3개의 원주형 공시체를 제작하였으며, 타설 직후 24시간 동안 항온 항습실에서 양생 후 탈형하여 각 양생온도로 설정된 항온수조에서 수중양생하였다.

콘크리트의 압축강도는 KS F2405에 준하여 수행되었으며 실험 재령은 1, 2, 3, 7, 28일이었다. 강도실험시의 편심의 발생을 최소화하기 위해 공시체 표면을 연마하여 실험하였다.

## 4. 실험 결과 및 분석

### 4.1 강도실험결과

각 재령별로 콘크리트 압축강도를 측정한 결과는 Table 3과 같다. C1, C2, C3, C4의 배합은 재령 28일의 평균압축강도가 각각 28.2, 35.6, 37.1, 39.6 MPa로서 물/시멘트비가 감소함에 따라 점진적으로 강도가 증가하였다. 또한 양생온도를 10, 20, 30°C로 변화시킨 C1, C3의 결과를 보면, 양생온도 20°C를 기준으로 볼 때 온도가 낮을수록 초기재령의 압축강도는 작게 나타났지만, 재령의 경과와 함께 강도의 발현이 점진적으로 커짐을 알 수 있었다. 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 확인하였다. 즉, 압축강도에 대한 양생온도의 영향은 초기재령에서 그 영향이 크고, 재령이 증가할수록 큰 차이를 보이지 않았다.

Table 3. Experimental Results on Compressive Strength of Concrete (MPa)

Type	Curing Temperature (°C)	Age (day)				
		1	2	3	7	28
C1	10	0.8	4.6	8.4	16.1	27.4
	20	6.0	10.0	13.8	21.3	28.2
	30	7.5	11.9	14.8	21.6	27.7
C2	20	7.2	11.8	17.7	26.6	35.6
C3	10	1.2	7.96	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
C4	20	10.0	16.2	22.4	32.1	39.6

#### 4.2 기존 강도예측모델의 결과 비교 및 분석

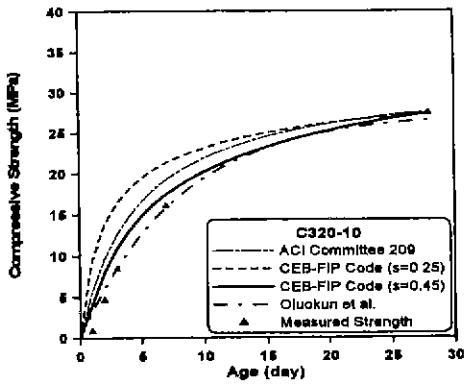
재령에 따른 압축강도 실험결과와 기존의 강도예측모델에 의해 산정된 압축강도를 비교해 보면 Fig. 1과 같다. 기존 강도예측모델과의 비교결과를 정리해 보면, ACI Committee 209모델은 양생온도 20°C에서는 실험치와 근사한 값을 보이지만, 30°C에서는 초기강도가 실제강도에 비해 작고, CEB-FIP 모델은 양생온도 30°C에서는 대체적으로 실험치와 근사한 값을 보이지만, 10, 20°C에서는 실제강도에 비해 초기강도가 높게 평가되고 있음을 알 수 있다. 또한, 숙성도(maturity)를 이용한 Oluokun 등의 강도모델은 양생온도 10°C에서는 실제강도와 가장 근사한 값을 보였으며, 숙성도에 온도의 영향이 고려되므로 다른 모델에 비해 양생온도에 따른 강도발현율의 차이를 반영할 수 있음을 알 수 있다.

ACI모델은 28일 강도를 근거로 하여 재령에 따른 초기강도를 예측하는 모델로서, 수화도에 많은 영향을 미치는 양생온도에 대한 고려가 충분치 못함을 알 수 있다. CEB-FIP모델이 ACI모델과 다른 점은 시멘트의 종류에 따른  $s$ 라는 계수를 사용하였다는 점이다. 이 연구에서는 네 가지 배합 모두 동일한 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였으므로  $s$ 에 0.25를 적용해야 하지만, 양생온도에 따라  $s$ 의 값에 변화를 주어 모델에 적용해 본 결과, CEB-FIP모델은 양생온도 30°C의 경우 실험값과 근사하므로, 30°C의  $s$ 값 0.25를 기준으로 양생온도가 10°C인 경우에는 초기 강도발현율이 작으므로  $s$ 값을 0.45로 양생온도가 20°C이면  $s$ 값을 0.33으로 조정하였을 때 실험결과와 가장 잘 일치하였다. CEB-FIP모델에서  $s$ 를 양생온도에 따라 변화시킨 결과는 Fig. 1에서 굵은 실선으로 나타내었으며, 양생온도 30°C의 경우에는 기준이 되므로  $s=0.25$ 경우만을 표시하였다.

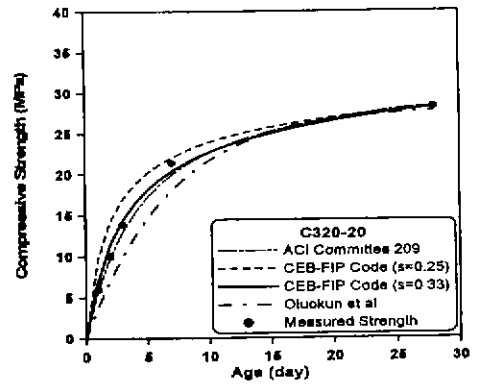
#### 5. 결론

이 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

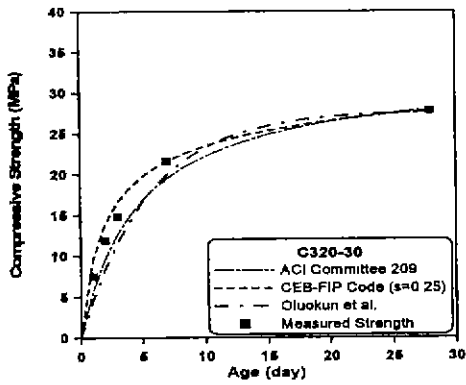
- (1) 기존의 초기재령 콘크리트 강도예측모델을 비교해 본 결과, ACI Committee 209모델은 양생온도 20°C에서는 실험치와 근사한 값을 보였으나, 양생온도 30°C에서는 CEB-FIP모델이 실제강도를 더 잘 근사하게 예측함을 알 수 있다. 숙성도(maturity)를 이용한 강도모델은 양생온도 10°C에서 실제강도와 가장 근사한 값을 보였으며, 숙성도에 온도의 영향이 고려되어 다른 모델에 비해 양생온도에 따른 강도발현율의 차이를 잘 반영함을 알 수 있다



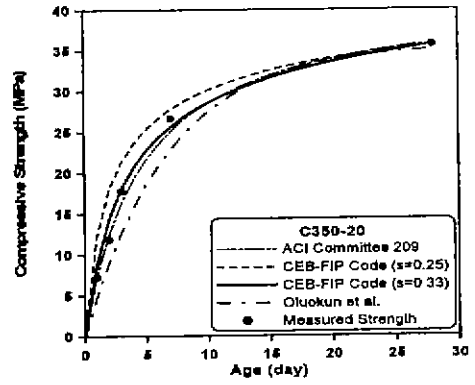
(a) C320-10°C



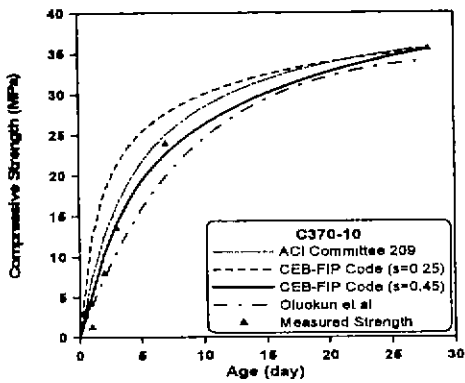
(b) C320-20°C



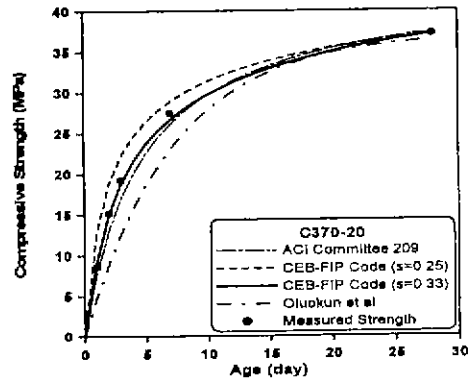
(c) C320-30°C



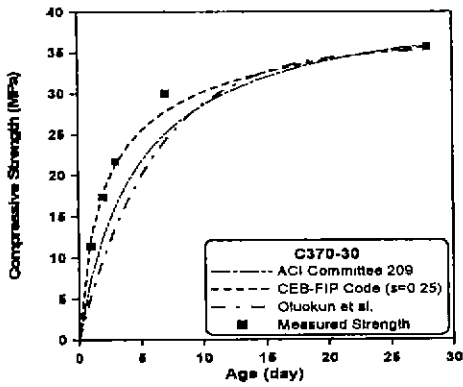
(d) C350-20°C



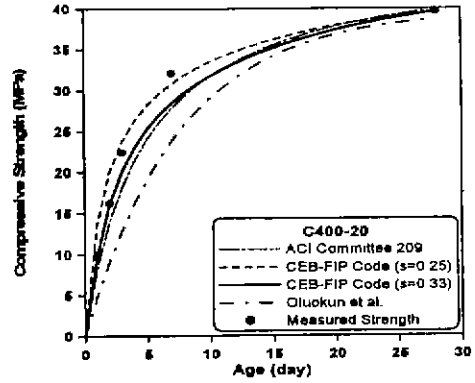
(e) C370-10°C



(f) C370-20°C



(g) C370-30°C



(h) C400-20°C

Fig. 1 Measured Strength vs. Estimated Strength

- (2) ACI Committee 209와 CEB-FIP모델은 콘크리트의 강도발현에 많은 영향을 미치는 양생온도에 대한 고려가 없으므로, 실제적으로 양생온도가 변하는 조건에는 적용할 수 없다. 따라서, CEB-FIP 모델의 경우 양생온도를 고려할 수 있는 계수로서  $s$ 값을 변화시켰을 때는 실제강도에 보다 잘 일치하는 결과를 얻었다.
- (3) 기존의 강도예측모델은 강도발현에 가장 큰 영향을 미치는 인자인 양생온도와 양생방법을 충분히 고려하지 못하고 있으므로, 이를 고려한 일반적인 강도예측모델이 필요하다. 따라서, 강도발현에 가장 큰 영향을 미치는 수화도를 이용하면 보다 더 일반적인 강도예측이 가능할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

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

#### 참고 문헌

1. Timms, A. G. and Withey, N. H. (1934), "Temperature Effects on Compressive Strength of Concrete," *ACI Journal, Proceedings* Vol. 30, No. 3, pp. 159~180.
2. Mehta, P.K. and Monteiro, P. J.M. (1993), *Concrete*, 2nd edition, Prentice Hall, pp. 57.
3. Comite Euro International Du Beton (1990), *CEB-FIP MODEL CODE(DSIGN CODE)*, pp. 33-81.
4. Oluokun, F. A., Burdette, E. G., and Deatherage, J. H. (1990), "Early-Age Concrete Strength Prediction by Maturity Another Look," *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 6, pp. 565~572.