

성숙도 개념을 이용한 콘크리트의 강도에측을 위한 실험적 연구

An Experimental Study for Concrete Strength Prediction by Maturity Concept

윤 청 호* 이 주 형* 김 태 경** 윤 경 구*** 박 제 선****

Yun, Cheong-Ho Lee, Ju Hyung Kim, Tae Kyung Yun, Kyong Ku Park, Je-Seon

ABSTRACT

The maturity concept was adopted to predict the strength of concrete, which was subjected to same temperature conditions and variable curing conditions. Penetration test and compressive test were conducted to measure the initial and final setting time and the compressible strength of concrete specimen, respectively. Also, the temperature and time were recorred at some intervals of time for calculating the maturity. The initial and final setting were delayed as the w/c ratio increased and curing temperature decreased. The activiting energy decreased as the w/c ratio increased. The relationships at the relative strength and the maturity were proposed at different w/c ratio for the same temperature curing condition, and these were applied for the variable curing conditions. The results indicated that the difference between the strength of the proposed and the specimen was big at 1 day's age but quite similar after 3 day's age.

1. 서 론

지난 70년이상 콘크리트의 품질 보증의 방법으로서 또는 구조물의 구조적 안정성 확보의 일환으로서 표준양생공시체를 이용한 재령28일 강도 측정법이 가장 보편적으로 사용되어 왔으며, 이는 표준양생 공시체에 의한 강도 결정이 용이하고 시험편제작 및 시험에 따른 변동이 적기 때문이다.

그러나, 표준 공시체에 의한 강도 결정 방법은 시험결과를 얻기까지 상당한 시간이 소요되고, 거푸

-
- 1) * 정회원, 강원대학교 토목공학과 대학원
 - 2) ** 정회원, 성덕전문대학 토목환경과 전임강사
 - 3) *** 정회원, 한국도로공사 콘크리트포장연구실 책임연구원
 - 4) **** 정회원, 강원대학교 토목공학과 교수

집 제거 및 포스트텐션닝 시기의 결정을 위한 초기강도의 추정이 어려우며, 시험편의 제작 및 시험에 따른 시간과 노력이 필요하며, 특히 콘크리트의 타설 및 다짐, 양생조건등의 차이로 인하여 정확히 현장 구조물의 강도를 나타낸다고 볼 수 없다는 등의 여러 가지 제한사항이 따른다.

따라서, 본 연구에서는 성숙도개념을 이용한 비파괴 시험을 통해 콘크리트의 강도를 예측하기 위한 제안식을 제시하고 이를 양생조건을 달리한 동일한 콘크리트 배합에 적용하여 검증하고자 한다.

2. 이론적 배경

1951년에 Saul^{(1),(2)}은 시간과 온도의 복합 효과에 의한 한 인자를 성숙도로 정의하였으며, 성숙도가 강도 발현이 가능한 가장 낮은 온도인 기저온도와 관련이 있다고 가정하여 다음과 같은 제안식을 제시하였다.

$$M = \sum (T - T_0) \Delta t \quad (1)$$

여기서, M = 재령 t 에서의 성숙도, T = 콘크리트 온도, T₀ = 기저온도

Nurse-Saul 함수는 기저온도에서의 등가재령에 대해

$$t_e = \frac{\sum (T - T_0)}{(T_r - T_0)} \Delta t \quad (2)$$

여기서, t_e = 기저온도에서의 등가재령, T_r = 양생기준온도

식 (2)의 Nurse-Saul의 함수에서, 양생기준온도는 -10℃를 사용하였으나, 어떤 콘크리트 배합에서는 -10℃이상이나 이하에서 강도발현이 시작되기 때문에 -10℃가 기저온도에 대한 값으로 반드시 사용되는 것은 아니다.

Carino^{(1),(3)}는 기본 성숙도나 initial time t₀를 제안했는데, 등온의 조건에 대하여 일반적인 강도-재령 관계는

$$S = S_0 \frac{k_T (t - t_0)}{1 + k_T (t - t_0)} \quad (3)$$

로 표현된다.

Freiesleben Hansen과 Pederson⁽⁴⁾에 의해 Arrhenius 함수가 온도와 관계가 있는 것으로 다음과 같은 식으로 제시하였다.

$$k(T) = Ae^{-Q/T} \quad (4)$$

여기서, A = 상수(day⁻¹), Q = E/R(K), E = 활성화에너지(J/mol), R = 개스상수 8.3144 J/(mol · K), T = 경화절대온도 K

식 (4)의 자연로그를 사용함으로써, rate constant와 활성화에너지의 비는 간단히 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\ln[k(T)] = \ln[A] - \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (5)$$

위의 식 (4), (5)의 경우 절대온도의 역수를 사용하므로 계산이 불편하기에 다음과 같은 지수함수식을 Carino에 의해 제안되었다.

$$k(T) = Ae^{(BT)} \quad (6)$$

여기서, B=온도감도계수(1/℃), T=경화온도(℃)

Carino는 Arrhenius 함수와 지수함수가 강도발현에 대한 온도의 영향을 더 정확하게 나타낸다는 것을 보여 주었다. 그는 또한 Arrhenius 함수와 지수함수가 간단하게 되는 것을 보여주었다. Arrhenius 식에서 활성화에너지는 지수함수에서의 B의 값으로 전환된다. 이 관계에 대해, Carino는 $B = 0.00135E$ 로서 E와 B사이의 밀접한 상호관계가 있다고 보고하였고, 여기서 E는 KJ/mol으로 표현되었다.⁽⁶⁾

$$B = \frac{E}{R} \frac{1}{296 \cdot (273 + T)} \quad (7)$$

B 값은 활성화에너지뿐만 아니라 양생온도에 따라 달라진다. 10~50°C의 양생온도범위에서 변수 B는 0.001258E ~ 0.001436E의 범위이다.

등가재령이나 등가시간은 다른 양생온도조건에서 발생한 같은 등가재령으로 끝나는 양생기준온도에 서의 어떤 양생시간으로 나타나는데, 그것의 개념은 Rastrup에 의해 처음 소개되었다.

Arrhenius 함수에서,

$$\gamma = \frac{k_T}{k_r} = e^{-\frac{E}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)} \quad (8)$$

여기서, t_e 는 시간이나 일수에 의한 등가시간, T_r 은 절대기저온도이다.

등가재령은 콘크리트 구조물이나 시편에서 온도이력으로부터 계산된다. 그러나 등온의 양생조건 의 경우에 대해, 다음식에 따라 결정된다.

$$t_e = \int_0^t \left(\frac{k_T}{k_r}\right) \cdot dt = \frac{k_T}{k_r} \cdot t \quad (9)$$

마지막으로, $k_T t = k_r t_e$ 는 이상의 식으로부터 일정한 양생조건에서 얻어진다.

콘크리트 시편의 극한강도(S_u)는 성숙도(또는 등가재령)에 의해 영향을 받지 않는 강도-재령 모델 에서 추정되어진다. 그러나, S_u 는 양생온도가 증가함에 따라 감소한다. 그러므로, 식 (3)는 유일한 강도- 등가재령 관계를 제공하지 못한다. 게다가, 양생온도는 극한강도뿐만 아니라 초기 offset time (기본 시간)에도 영향을 미친다. 이러한 특징으로부터, 등가재령의 형태로 극한강도의 일부분을 근거 로 한 상대강도발현은 다음과 같이 Carino에 의해 제안되었다.

$$\frac{S}{S_u} = \frac{k_r(t_e - t_{or})}{1 + k_r(t_e - t_{or})} \quad (10)$$

여기서, t_{or} = 기본 시간(offset time)의 가장 적합한 값.

식 (10)을 근거로 하여, 식 (3)에서 강도-재령 식은 다음과 같이 정리된다:

$$\frac{S}{S_u} = \frac{k_r(t_e - \gamma t_{or})}{1 + k_r(t_e - \gamma t_{or})} \quad (11)$$

식 (10)과 (11)와 비교할 때 차이점은 단지 t_{or} 과 t_0 인데, t_{or} 의 기본(offset) 등가재령은 제안된 곡선의 값에 가장 잘 맞게 나타내기 위한 실험으로부터 결정된다.

3. 실험

3.1 사용재료

시멘트는 국내S사 제품인 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 굵은골재는 홍천지역에서 생산되는 최대치수 25mm인 래미콘용 채석과 천연강모래를 이용하였다.

3.2 배합

콘크리트의 조기강도를 예측하기 위해 물-시멘트비를 주요요인으로 하여 Table 3.1과 같은 콘크리트배합을 하였다.

표 3.1 배합 조건

시멘트	물-시멘트비(%)	양생 조건	
		등온 조건(℃)	변온 조건
보통포틀랜드시멘트	40, 50, 60	8, 25, 42	변온의 살수·기건·수중 양생

소정의 워어커빌리티를 확보하기 위하여 슬럼프값을 $8 \pm 2\text{cm}$ 로 미리 정하여 비빔을 실시하였다. 타설시기는 6월중순부터 7월중순에 걸쳐 $23 \pm 3\text{℃}$ 의 온도에서 실험실에서 이루어졌으며, 타설후 등온조건인 경우 항온항습기로 일정한 온도를 유지하였다.

또한, 시험체는 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 의 원통형공시체를 등온조건인 경우 각 조건별로 각각 18개씩 162개, 변온조건을 달리한 경우 각 조건별로 각각 15개씩 135개를 제작하였다.

3.3 실험방법 및 측정

물과 시멘트의 수화작용에 따른 콘크리트의 온도이력을 측정하여 콘크리트의 조기강도를 추정하기 위하여 먼저 콘크리트의 강도발현이 시작되는 재령을 파악하기 위하여 관입저항시험을 실시하였다.

기 제작된 시험편의 중심에 매립된 Thermocouple Wire를 이용하여 처음 1일은 30분 간격으로, 2일은 1시간 간격으로 그리고 그 이후에는 일정한 시간간격으로 수화열을 측정 이를 Data Logger에 자동적으로 기록되도록 하였다.

또한, 성숙도 시험결과와 상관관계를 보이기 위해 경화된 콘크리트의 압축강도시험을 KS F 2405의 제 규정에 준하여 등온조건인 경우 종결 시간의 2배의 간격으로 6회에 걸쳐, 변온조건을 달리한 경우 1, 3, 7, 14, 28일 재령에서 성숙도 실험과 동시에 실시하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 등온 조건의 결과로부터 제안식 도출

콘크리트의 강도 발현이 시작되는 재령을 파악하기 위한 관입저항시험의 결과치는 회귀분석을 통해 표 4.1과 같이 나타내었다.

표 4.1 각 배합에 대한 초결과 종결시간

굵은골재 최대치수 (mm)	W/C (%)	용 결 시 간 (day)					
		8 ℃		25 ℃		42 ℃	
		t_{oi}^a	t_{of}^b	t_{oi}	t_{of}	t_{oi}	t_{of}
25	40	0.49	0.78	0.21	0.28	0.14	0.18
	50	0.54	0.83	0.23	0.31	0.16	0.21
	60	0.58	0.87	0.26	0.35	0.19	0.26

a: 초결 시간, b: 종결 시간

각 배합에 대해 온도가 상승함에 따라 응결시간이 빨라지는 것을 알 수 있으며, 초결과 종결 사이의 시간 간격이 줄어드는 것을 보여준다. 또한, 물-시멘트비가 증가할수록 시멘트의 수화반응이 늦어지므로 응결시간이 길어지는 것이 모든 배합에서 관찰되었다.

다음으로, 각 배합에 대한 실험재령과 평균압축강도를 이용한 회귀분석을 행하여 식 (3)에서의 콘크리트의 강도발현 변수인 S_u , t_o , k_T 의 값들을 얻어내었다. 이러한 결과값들이 표 4.2에 주어져 있다.

표 4.2 각 배합에 대한 강도발현 변수들

굵은골재최대치수 (mm)	W/C (%)	양생온도 (°C)	S_u	k_T	t_o
25	40	8	268.38	0.038	0.78
		25	229.95	0.379	0.28
		42	200.00	1.342	0.18
	50	8	205.59	0.058	0.83
		25	203.85	0.350	0.31
		42	169.19	1.461	0.21
	60	8	185.33	0.046	0.87
		25	121.92	0.355	0.35
		42	109.29	0.993	0.26

표 4.2에서 알 수 있듯이 극한강도 (S_u)는 양생온도가 높아짐에 따라 감소하고, 온도와 밀접한 관련이 있는 k_T 의 값은 양생온도가 높아질수록 크게 증가하며 물-시멘트비가 증가함에 따라 약간 감소하는 경향이 있다.

양생온도의 형태로 rate constant의 관계를 확립하기위해 활성화에너지는 식 (7)을 사용함으로써 구할 수 있는데, rate constant의 자연로그와 절대온도의 역수의 관계에서 음의 기울기를 가진 값이 활성화에너지이다. 표 4.3은 각 배합에 대한 활성화에너지 E값과 온도감도계수 B값을 보여주고 있는데, 물-시멘트비가 증가할수록 활성화에너지와 온도감도계수가 감소함을 알 수 있다.

표 4.3 콘크리트의 활성화에너지와 온도감도계수

굵은골재최대치수 (mm)	W/C (%)	활성화에너지 E (KJ/mol)	온도민감계수 B (1/°C)
25	40	78	0.1053
	50	70	0.0945
	60	66	0.0891

또한, 기저온도를 23°C로 하였을 때 affinity ratio는 식 (8)을 사용하여 그 결과를 표 4.4에 나타내었다.

표 4.4 각 배합에 대한 Affinity ratio와 offset time

굵은골재최대골재 (mm)	W/C (%)	양생온도 (°C)	γ	t_o (day)	$\gamma \times t_o$ (day)
25	40	8	0.186	0.78	0.145
		25	1.235	0.28	0.346
		42	6.685	0.18	1.203
	50	8	0.221	0.83	0.183
		25	1.209	0.31	0.375
		42	5.509	0.21	1.157
	60	8	0.241	0.87	0.210
		25	1.196	0.35	0.419
		42	4.985	0.26	1.296

등온조건에 대해, 등가재령은 실제재령과 affinity ratio의 결과물이다. 따라서, 최종적으로 상대강도 증진은 식 (11)을 사용하여 등가재령의 형태로 사용되었는데, 콘크리트에 대한 활성화에너지의 값들은 식 (8)과 (10)에 의해 등가재령 형식으로 전환되었다.

23°C에서의 상대강도와 등가재령의 관계에서 대한 제안식은 그림 4.1 ~ 그림 4.3 및 표 4.5에 각각 나타내었다.

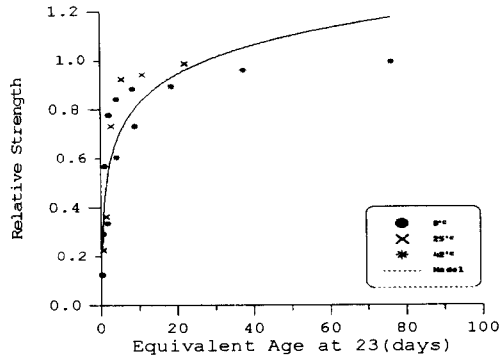


그림 4.1 등가재령과 상대강도와의 관계(W/C=40%)

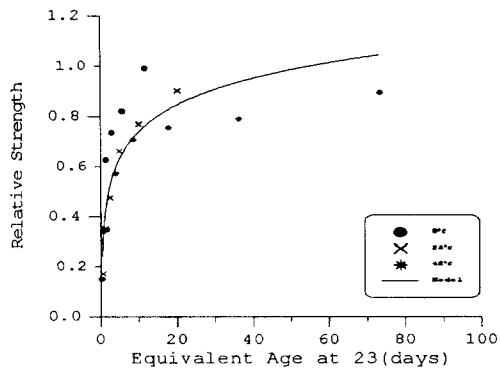


그림 4.2 등가재령과 상대강도와의 관계(W/C=50%)

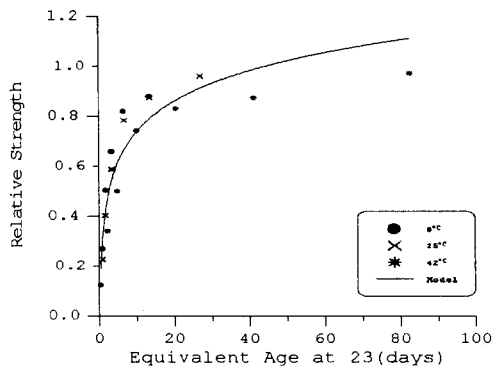


그림 4.3 등가재령과 상대강도와의 관계(W/C=60%)

표 4.5 물-시멘트비 변화에 따른 강도 제안식

W/C (%)	제안식	상관계수
40	$Y = 0.169466 * \log(X) + 0.433342$	R-squared = 0.79
50	$Y = 0.153271 * \log(X) + 0.384987$	R-squared = 0.77
60	$Y = 0.176692 * \log(X) + 0.331128$	R-squared = 0.88

4.2 변은 조건에 제안식 적용 및 분석

기건·수중·살수 양생조건에서의 성숙도값을 제안식에 대입하여 상대강도를 구하고 이를 공시체 압축강도와 비교하여 그 결과를 표 4.6 ~ 표 4.8에 각각 나타내었다.

표를 살펴보면, 변은의 양생조건일 때 재령 1일에서는 제안치와 실측치가 차이를 보이고 있으나, 재령 3일 이후에는 상당히 근접함을 알 수 있다.

표 4.6 기건양생일 때 물-시멘트 변화에 따른 상대강도

재령별 상대강도		1일	3일	7일	14일	28일
W/C(%)	40	0.433	0.620	0.763	0.881	0.998
	40	0.179	0.467	0.776	0.885	1.000
	40	0.413	0.753	1.017	1.004	1.002
50	50	0.385	0.553	0.683	0.789	0.896
	50	0.128	0.416	0.691	0.828	1.000
	50	0.332	0.752	1.012	1.050	1.116
60	60	0.331	0.525	0.675	0.797	0.920
	60	0.124	0.418	0.687	0.829	1.000
	60	0.375	0.797	1.018	1.040	1.087

표 4.7 수중양생일 때 물-시멘트 변화에 따른 상대강도

재령별 상대강도		1일	3일	7일	14일	28일
W/C(%)	40	0.433	0.600	0.763	0.881	0.998
	40	0.129	0.518	0.753	0.872	1.000
	40	0.298	0.836	0.987	0.988	1.002
50	50	0.385	0.553	0.683	0.789	0.896
	50	0.120	0.469	0.679	0.815	1.000
	50	0.312	0.848	0.995	1.033	1.116
60	60	0.331	0.525	0.675	0.797	0.900
	60	0.116	0.403	0.664	0.826	1.000
	60	0.350	0.768	0.985	1.036	1.087

표 4.8 살수양생일 때 물-시멘트 변화에 따른 상대강도

재령별 상대강도		1일	3일	7일	14일	28일
W/C(%)	40	0.433	0.600	0.763	0.881	0.998
	40	0.153	0.467	0.736	0.869	1.000
	40	0.354	0.750	0.965	0.986	1.002
50	50	0.385	0.553	0.683	0.789	0.896
	50	0.162	0.414	0.677	0.800	1.000
	50	0.421	0.749	0.991	1.014	1.116
60	60	0.331	0.525	0.675	0.797	0.920
	60	0.171	0.430	0.630	0.826	1.000
	60	0.517	0.820	0.933	1.036	1.087

5. 결론

성숙도 개념을 이용한 콘크리트의 강도예측을 위한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 양생온도가 높아짐에 따라 응결이 빨리 이루어졌으며, 초결과 종결 사이의 시간간격이 짧아짐을 알 수 있었다.
2. 활성화에너지 값은 물-시멘트비가 증가할수록 감소함을 알 수 있었다.
3. 등온 조건의 실험결과로부터 물-시멘트비의 변화에 따른 등가재령과 상대강도와의 관계에 대한 제안식을 제시하였으며, 이때 상관도는 거의 80% 이상이였다.
4. 등온 조건에서 도출된 제안식을 양생조건을 달리하여 적용한 결과 제안식의 강도와 공시체의 강도가 재령 1일에서는 차이를 보이나 재령 3일 이후에는 상당히 근접함을 보여주었다.

6. 참고문헌

- (1) Carino, N.J., "The Matuity Method: Theory and Application". Journal of Cement, Concrete, and Aggregate, American Society for Testing and Materials, Vol. 6, No. 2, Winter, 1984, pp.61-73
- (2) Malhotra, V. M., "Maturity Concept and the Estimation of Concrete Strength,"information Circular IC 277, Department of Energy, Mines and Resources(Canada), Mines Branch, Nov, 1971, pp.43
- (3) Knudsen, T., "On Particle Size Distribution in Cement Hydration," Proceedings, 7th International Congress on the Chemistry of Cement, V.II, Paris, 1980, pp. I -170-175
- (4) Freiesleben Hansen, P., and Pedersen, E.J., "Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete." Nordisk Betong, V. 1, 1977, pp. 61-73
- (5) Carino, N.J., and Tank, R. C., "Maturity Functions for concretes made wity various cements and admixture." ACI Matuerials 188-196
- (6) 오 병환 외, "성숙도를 고려한 콘크리트 강도예측에 관한 실험연구", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제6권 2호, 1994. pp77-82
- (7) 오 병환 외, "콘크리트 초기강도 예측을 위한 합리적인 기법 연구", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제7권 2호, 1995, pp.124-128
- (8) 오 병환 외, "성숙도 개념을 이용한 콘크리트 초기강도 예측 모델 개발 연구", 한국콘크리트학회 논문집 제8권 3호, 1996, pp. 197-207
- (9) 양 성철, "C급 플라이애쉬를 사용한 모르타의 응결 및 성숙도", 한국콘크리트학회지 제9권 3호, 1997.6, pp. 107-118