

## 양생온도변화에 따른 콘크리트의 강도 예측

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

### Concrete Strength Prediction with Different Curing Temperatures

Park, Je-Seon\* · Kim, Tae-Kyung\*\* · Lee, Joo-Hyung\*\*\* · Yun, Cheong-Ho\*\*\*\*

#### ABSTRACT

The maturity concept was adopted to predict the strength of concrete, which was subjected to several temperature levels 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 measured at some time intervals for calculating the maturity. The initial and final setting were delayed as the w/c ratio increased and curing temperature decreased. The relationships at the relative strength and the equivalent age were proposed at different w/c ratio for the several temperature curing conditions, and these were applied for the variable curing conditions.

#### 1. 서 론

지난 70년 이상 콘크리트의 품질 보증의 방법으로서는 또는 구조물의 구조적 안정성 확보의 일환으로서 표준양생 공시체를 이용한 재령28일 강도 측정법이 가장 보편적으로 사용되어 왔는데, 이는 표준양생 공시체에 의한 강도 결정이 용이하고 시험편 제작 및 시험에 따른 변동이 적기 때문이다.

그러나, 표준 공시체에 의한 강도 결정 방법은 시험결과를 얻기까지 상당한 시간이 소요되고, 거푸집 제거, 포스트텐션닝 시기 및 동해방지작업완료 시기의 결정을 위한 조기강도의 추정이 어렵다. 이러한 콘크리트의 조기강도를 예측하기 위해서는 콘크리트의 양생온도 변화에 따른 압축강도 특성을 파악해야 한다.

따라서, 본 연구에서는 콘크리트의 양생온도를 달리하여 강도발현 특성을 고찰하고 성숙도 개념을 도입하여 등온조건일 경우 콘크리트의 조기강도를 예측하기 위해 상대강도와 등가재령 모델과 모델식을 제시하고자 한다.

\* 강원대학교 토목공학과 교수

\*\* 성덕전문대학 토목환경과 전임강사

\*\*\* 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*\*\*\* 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정

## 2. 이론적 배경

1951년에 Saul은 시간과 온도의 복합 효과에 의한 인자를 성속도로 정의하였으며, 성속도가 강도 발현이 가능한 가장 낮은 온도인 기저온도와 관련이 있다고 가정하여 다음과 같은 제안식을 제시하였다.<sup>(1),(2)</sup>

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (1)$$

여기서, M = 재령 t에서의 성속도,  
T = 콘크리트 온도, T<sub>0</sub> = 기저온도

Nurse-Saul 함수는 기저온도에서의 등가재령에 대해 다음과 같은 식을 제안하였다.

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

여기서, t<sub>e</sub>는 기저온도에서의 등가재령이고, T<sub>r</sub>은 양생기준온도이다.

식 (2)의 Nurse-Saul의 함수에서, 양생기준온도는 -10°C를 사용하였으나, 어떤 콘크리트 배합에서는 -10°C이상이나 이하에서 강도발현이 시작되기 때문에 -10°C가 기저온도에 대한 값으로 반드시 사용되는 것은 아니다.

Carino는 기본 성속도나 initial time t<sub>0</sub>를 제안했는데, 등온의 조건에 대하여 일반적인 강도-재령 관계는

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

로 표현된다.<sup>(1),(3)</sup>

Freiesleben Hansen과 Pederson에 의해 Arrhenius 함수가 온도와 관계가 있는 것으로 다음과 같은 식으로 제시하였다.<sup>(4)</sup>

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

여기서, A = 상수(day<sup>-1</sup>), Q = E/R(K),  
E = 활성화에너지(J/mol), R = 기체상수 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/°C), T=경화온도(°C)

Carino는 Arrhenius 함수와 지수함수가 강도발현에 대한 온도의 영향을 더 정확하게 나타낸다는 것을 보여 주었다. 그는 또한 Arrhenius 함수와 지수함수가 간단하게 되는 것을 보여주었다. Arrhenius식에서 활성화에너지는 지수함수에서의 B의 값으로 전환된다. 이 관계에 대해, Carino는 B = 0.00135E로서 E와 B사이의 밀접한 상호관계가 있다고 보고하였고, 여기서 E는 KJ/mol으로 표현되었다.<sup>(5)</sup>

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

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 양생기준온도에서의 어떤 양생기간으로 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, γ는 affinity ratio이고, T<sub>r</sub>은 절대기저온도이다.

등가재령은 콘크리트 구조물이나 시편에서 온도가 력으로부터 계산된다. 그러나 등온의 양생조건에 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<sub>T</sub>t = k<sub>r</sub>t<sub>e</sub>는 이상의 식으로부터 일정한 양생조건에서 얻어진다.

콘크리트 시편의 극한강도(S<sub>u</sub>)는 성속도(또는 등가재령)에 의해 영향을 받지 않는 강도-재령 모델에서 추정되어진다. 그러나, S<sub>u</sub>는 양생온도가 증가함에 따라 감소한다. 그러므로, 식 (3)은 유일한 강도- 등가재령 관계를 제공하지 못한다. 게다가, 양생온도는 극한강도뿐만 아니라 조기 offset time(기본 시간)에도 영향을 미친다. 이러

한 특징으로부터, 등가재령의 형태로 극한강도의 일부분을 근거로 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,  $t_{or}$  는 기본 시간(offset time)의 회귀분석을 한 가장 적합한 값이다.

### 3. 실험

#### 3.1 사용재료

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

#### 3.2 배합

콘크리트의 조기강도를 예측하기 위해 물-시멘트비를 주요요인으로 하여 Table 3-1과 같은 콘크리트배합을 하였다.

Table 3-1. Specified Mix Table of Concrete for Test Series

Mix Series	Curing Condition (°C)	W/C (%)	S/A (%)	Unit Quantity ( kg/m <sup>3</sup> )			
				Water	Cement	Fine Aggre.	Coarse Aggre.
25mm	8, 23, 42	40	34	193	484	576	1119
	8, 23, 42	50	37	193	386	657	1119
	8, 23, 42	60	39	193	320	715	1119

소정의 워어커빌리티를 확보하기 위하여 슬럼프값을  $8 \pm 2$ cm로 미리 정하여 비빔을 실시하였다. 타설시기는 6월중순부터 7월중순에 걸쳐  $23 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 온도에서 실험실에서 이루어졌으며, 타설후 등온조건인 경우 항온항습기로 일정한 온도를 유지하였다.

또한, 시험체는  $\phi 100 \times 200$ mm의 원통형 공시체를 등온조건인 경우 각 조건별로 각각 18개씩 162개를 제작하였다.

#### 3.3 실험방법 및 측정

물과 시멘트의 수화작용에 따른 콘크리트의 온도 이력을 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 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 Table 4-1과 같이 나타내었다.

Table 4-1. Times of Initial and Final Setting for Test Series ( a: Initial Time, b: Final Time )

Mix Series	W/C (%)	Setting Time ( day )					
		8 °C		25 °C		42 °C	
		t <sup>a</sup> day	t <sup>b</sup> day	t <sup>a</sup> day	t <sup>b</sup> day	t <sup>a</sup> day	t <sup>b</sup> day
25 mm	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

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, 등가재령과 상대강도 모델에 대한 강도 발현 변수들을 알아보기 위하여 실시한 재령별 압축강도시험 결과치를 Fig. 4-1에 각각 나타내었다. 그림에서 보여주듯이 동일한 조건의 양생조건인 경우 물-시멘트비가 증가할수록 응결 종결시간으로부터 주어진 재령은 길어지나 압축강도는 감소

하는 경향을 보이고 있다.

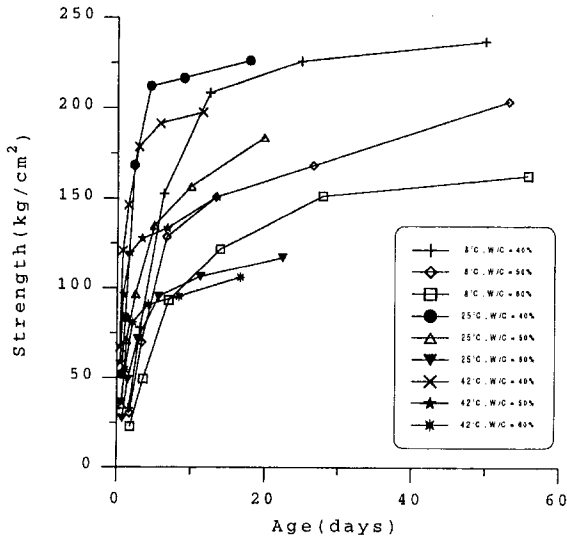


Fig. 4-1 Compressive Strength-Age Data for Test Series

또한, 각 배합에 대한 실험재령과 평균압축강도를 이용한 회귀분석을 행하여 식 (3)에서의 콘크리트의 강도발현 변수인  $S_u$ ,  $t_0$ ,  $k_T$ 의 값들을 얻어 내었다. 이러한 결과값들이 Table 4-2에 주어져 있다.

Table 4-2. Strength Development Parameters for Test Series

Mix Series	W/C (%)	Curing Temp. (°C)	$S_u$	$k_T$	$t_0$
25 mm	40	8	268.38	0.258	0.78
		25	229.95	1.534	0.28
		42	200.00	3.157	0.18
	50	8	205.59	0.161	0.83
		25	203.85	0.497	0.31
		42	169.19	1.718	0.21
	60	8	185.33	0.129	0.87
		25	121.92	0.460	0.35
		42	109.29	1.309	0.26

표에서 알 수 있듯이 극한강도( $S_u$ )는 양생온도가 높아짐에 따라 감소하고 있고, 온도와 밀접한 관련이 있는  $k_T$ 의 값은 양생온도가 높아질수록 크게 증가하는 경향으로 나타났다.

양생온도의 형태로 rate constant의 관계를 확립하기 위해 활성화에너지는 식 (7)을 사용함으로써 구할 수 있는데, rate constant의 자연로그와 절대온도의 역수의 관계에서 음의 기울기를 가진 값이 활성화에너지이다. Table 4-3은 각 배합에 대한 활성화에너지 E값을 보여주고 있는데, 물-시멘트비가 증가할수록 활성화에너지가 다소 감소하는 경향을 보이고 있으나, 다른 연구자들에 의해 보통포틀랜드시멘트의 활성화에너지 값인 40~60 KJ/mol의 범위에 포함되는 것으로 나타났다.

Table 4-3. Activation Energy E of Concrete for Test Series

Mix Series (mm)	W/C (%)	Activation Energy E (KJ/mol)
25	40	55.3
	50	53.5
	60	50.0

콘크리트 구조물이나 시편의 실험에 의한 온도이력으로부터 계산되는 등가 재령이나 등가 시간은 다른 양생온도조건에서 발생한 같은 등가재령으로 끝나는 기준온도에서의 어떤 양생기간으로 나타낸다. 따라서, 최종적으로 상대강도 증진은 식 (10)을 사용하여 등가재령의 형태로 사용되었는데, 콘크리트에 대한 활성화에너지의 값들은 식 (8)과 (10)에 의해 등가재령 형식으로 전환되었다.

기준온도 23°C에서의 상대강도와 등가재령의 관계에 대한 모델식은 Fig. 4-2 ~ Fig. 4-4에 각각 나타내었다.

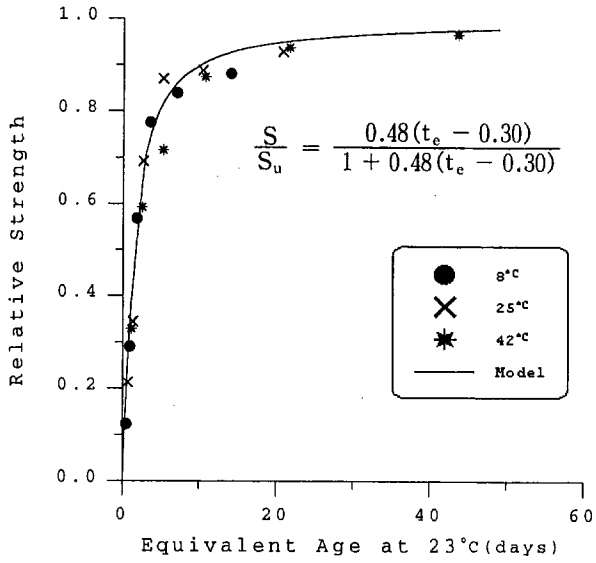


Fig. 4-2 Relative Strength vs. Equivalent Age at Reference Temperature 23°C ( W/C = 40%)

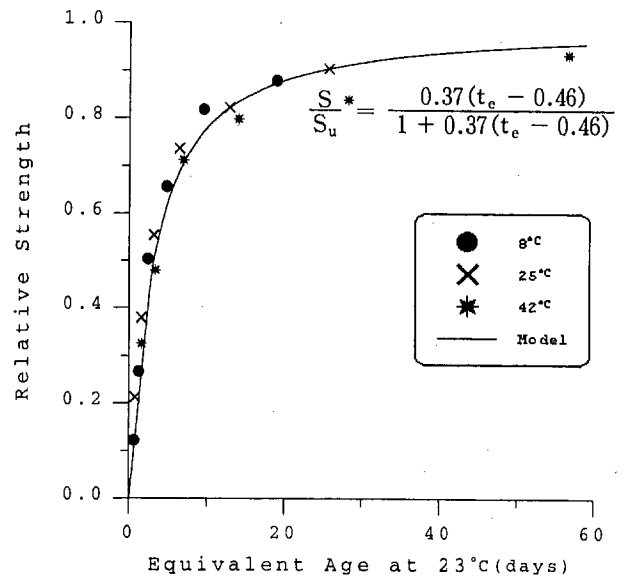


Fig. 4-4 Relative Strength vs. Equivalent Age at Reference Temperature 23°C ( W/C = 60%)

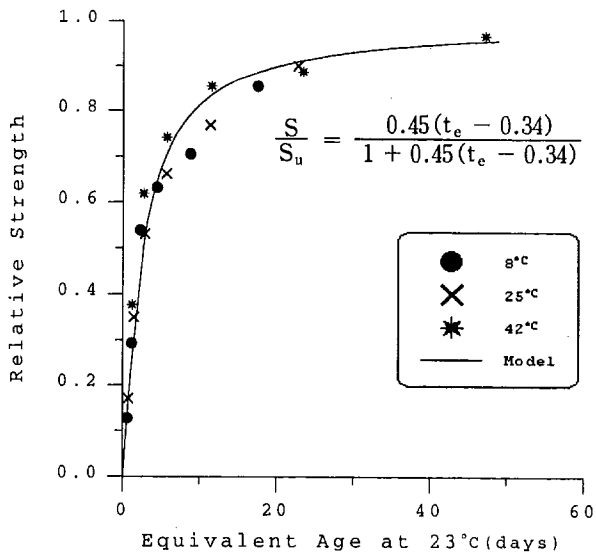


Fig. 4-3 Relative Strength vs. Equivalent Age at Reference Temperature 23°C ( W/C = 50%)

#### 4.2 영향인자 분석

현장 구조물의 콘크리트의 조기강도 추정을 위해 성숙도법을 도입하여 상대강도와 등가재령에 대한 제안 모델로부터 기준온도, 물-시멘트비의 변화에 따른 영향을 분석하였다.

##### (1) 기준온도

기준온도의 변화에 따른 등가재령과 상대강도의 관계를 Table 4-4에 각각 나타내었다.

표에서 보면 알 수 있듯이, Table 4-5는 기준온도 변화에 따른 등가재령과 상대강도의 관계를 제시한 것으로서 재령 3일을 기준으로 분석하여 보면, 기준온도 23°C인 경우에 비해 10°C, 35°C로 변화함에 따라 물-시멘트비가 40%에서는 0.84배, 1.56배, 물-시멘트비가 50%에서는 0.54배, 1.36배, 물-시멘트비가 60%에서는 0.52배, 1.43배로 나타났다.

위와 같은 결과를 살펴보면, 기준온도 23°C의 상대강도에 비해 기준온도 10°C인 경우에는 대략 50%정도의 강도발현으로 물-시멘트비 변화에 따라 큰 영향을 보이고 있지 않으나, 기준온도 35°C인 경우는 물-시멘트가 낮을수록 그 강도발현에 따른 증가폭이 다소 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 물-시멘트비가 작을수록 단위시멘트량을 많

이 필요로 하고 높은 기준온도의 설정은 초기재령에서의 시멘트의 수화작용을 촉진시킴으로서 나타난 결과로 판단된다.

또한, 동일한 조건의 물-시멘트비인 경우 기준온도가 10℃, 23℃, 35℃로 증가함에 따라 초기 재령에서의 상대강도는 크게 발현되는 경향을 보이고 있으나, 재령의 증가에 따른 상대강도의 증가폭은 기준온도가 낮을수록 다소 크게 나타나는 경향을 보여주고 있다.

Table 4-4. Relative Strength for Reference Temperature Variation

W/C (%)	Curing Temp. (°C)	Age Strength	Equivalent Age ( Days )				
			1	3	7	14	28
40	10	Relative Strength	0.118	0.467	0.702	0.832	0.910
	23		0.239	0.560	0.761	0.867	0.930
	35		0.664	0.875	0.944	0.972	0.986
50	10	Relative Strength	0.054	0.295	0.533	0.707	0.832
	23		0.229	0.545	0.750	0.860	0.926
	35		0.443	0.743	0.876	0.935	0.967
60	10	Relative Strength	0.040	0.259	0.491	0.671	0.808
	23		0.167	0.486	0.709	0.834	0.911
	35		0.371	0.695	0.850	0.920	0.959

(2) 물-시멘트비

물-시멘트비 변화에 따른 영향을 분석하고자 기준온도 23℃에서 제시된 각 배합의 상대강도와 등가재령 모델을 근거로 하여 Fig. 4-5에 나타내었다. 그림에서 보면 알 수 있듯이, 재령 3일을 기준으로 할 경우 물-시멘트비가 40%에 비해 물-시멘트비가 50%, 60%로 증가할수록 상대강도는 0.97배, 0.87배로 나타났다.

위의 결과로부터 동일한 조건의 기준온도 23℃일 경우 물-시멘트비가 40%, 50%, 60%로 증가함에 따라 초기강도 발현이 적게 이루어짐을 알 수 있었고, 기준온도를 변화시켰을 때도 유사한 경향으로 나타나고 있었다.

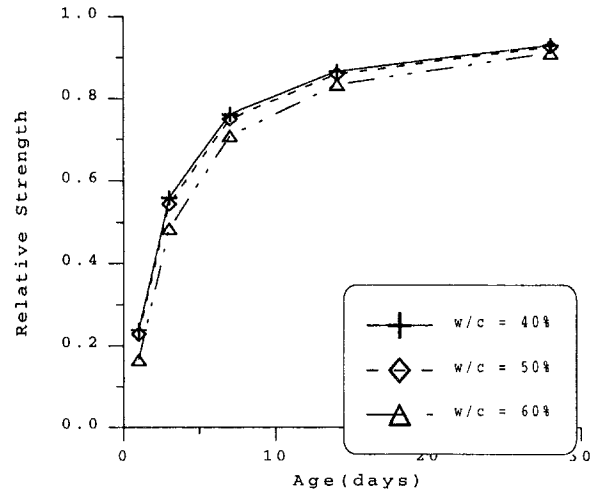


Fig. 4-5 Relative Strength of Each W/C

### 5. 결 론

본 연구에서 양생온도를 달리하여 콘크리트의 강도발현 특성을 알아보기 위해 성숙도 개념을 도입하였고, 이러한 개념을 이용한 콘크리트 강도의 조기에측을 위한 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 관입저항시험을 한 결과 양생온도가 높아짐에 따라 응결이 빨리 이루어졌으며, 초결과 종결 사이의 시간간격이 짧아짐을 알 수 있었다. 또한, 물-시멘트비가 증가할수록 단위시멘트량의 감소에 따라 응결시간이 지연되는 것으로 나타났다.
- (2) 활성화에너지 값은 물-시멘트비가 증가할수록 약간 감소하는 경향을 보이고 있지만, 다른 연구자들이 제시한 활성화에너지 값의 범위에 대체로 포함되는 것으로 나타났다.
- (3) 콘크리트의 초기강도에 영향을 미칠 것으로 사료되는 기준온도와 물-시멘트비에 대해 살펴본 결과, 기준온도를 달리하였을 때 높은 기준온도에서 강도발현이 높게 나타났고, 기준온도가 낮을수록 상대강도 증가폭이 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 물-시멘트비가 증가할수록 초기강도 발현이 적게 이루어짐을 알 수 있었다.

(4) 각 배합조건별로 등가재령과 상대강도 모델과 모델식을 제시할 수 있었고, 이와 같은 모델은 실험데이터와 상당히 일치함을 알 수 있었다. 이는 콘크리트 시편의 양생온도만 정확히 측정한다면 콘크리트 강도를 알 수 있어 초기강도가 필요한 현장조건에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 등온인 경우의 양생조건으로 콘크리트의 초기강도를 예측하기 위한 모델식을 제시하였다. 따라서, 향후 등온조건과 동일한 배합의 콘크리트를 변온조건으로 양생하여 등온조건의 모델식을 변온조건의 현장 구조물에 적용할 수 있는가에 대한 타당성을 검증해 보아야 할 것으로 사료된다.

## 6. 참고문헌

- [1] Carino, N.J., "The Maturity 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] 양성철, "C급 플라이애쉬를 사용한 모르터의 응결 및 성숙도", 한국콘크리트학회지 제9권 3호, 1997.6, pp. 107-118