

# 콘크리트 압축강도에 미치는 양생온도와 양생시점의 영향

The Effect of Different Curing Time and Temperature  
on Compressive Strength of Concrete



김진근\*

Kim, Jin-Keun



문영호\*\*

Moon, Yeong-Ho



어석홍\*\*\*

Eo, Seok-Hong



최응규\*\*\*\*

Choi, Eung-Kyoo

## ABSTRACT

In this experimental and analytical research, the strength development for various curing histories was investigated with particular regard to the influences of points of curing time with given temperatures.

For this purpose, four different points of curing time were considered with individual interval of 24 hours. Two different temperatures of 5°C and 40°C were applied for the selective intervals while the rest period until 28days under reference curing condition of 20°C. And a new model for equivalent age was suggested based on the rate constant model. In this model, the equivalent ages introduced in Saul and Arrhenius model were modified to reflect the effects of curing time point.

Test results show that concrete subjected to high temperature at early age attains greater early-age strength but eventually lower later-age strength. The concrete subjected to low temperature at early age leads to lower early-age strength but almost the same

\* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

\*\* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정희원, 창원대학교 토목공학과 조교수

\*\*\*\* 정희원, 삼성물산(주) 건설부문 건설재료파트장

• 본 논문에 대한 토의를 1998년 10월 30일까지 학회로 보내주  
시면 1998년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

later-age strength. The proposed model showed better agreement with test results than the existing models.

Keywords : curing time, strength, equivalent age, experimental research

## 1. 서론

콘크리트 양생온도에 따른 강도예측은 콘크리트 제품에서뿐만 아니라 일반 콘크리트공사에서도 항상 중요한 사항이다. 특히 매스콘크리트나 한중콘크리트 등에서는 초기의 열 변형에 의한 균열의 지감이나 공사의 효율적인 관리 및 안전성 등을 위하여 보다 정확한 강도예측이 요구된다. 콘크리트의 부재 단면이 큰 경우에는 수화열 발생에 의해 콘크리트 단면 내부와 외부의 온도 구배가 심하고, 재령에 따라 이러한 온도 구배가 달라지게 된다. 즉 시간에 따라 수화열 발생의 감소와 외부로의 열의 이동 등으로 콘크리트 단면 부위별로 온도가 변하게 된다. 이와 같이 재령에 따라 양생온도가 크게 변하는 경우에서 양생온도가 콘크리트 강도에 미치는 영향은 양생온도와 양생기간 뿐만 아니라 양생시점에 의해서도 영향을 받게 된다.

양생온도의 영향을 고려한 콘크리트의 강도예측은 먼저 양생온도의 영향을 적산온도 또는 등가재령으로 변환한 후에 이를 이용하여 강도와 등가재령과의 또 다른 관계식으로부터 구해진다. 등가재령으로 변환하는 방법으로는 Saul<sup>(1)</sup> 모델, Freiesleben과 Pedersen<sup>(2)</sup>에 의해 제안된 Arrhenius식을 이용하는 방법이 있다. 또 최근의 Carino<sup>(3)</sup>에 의해 제안된 등가재령과 강도 값을 회귀분석에 의해 동시에 구하는 반응율상수 모델 등이 있다.

실험적 연구로서, Price<sup>(4)</sup>는 초기 양생온도의 중요성을 지적하고, 처음 2시간 동안 양생온도를 달리한 실험에서 초기 재령에서 높은 온도로 양생한 콘크리트가 초기단계에서는 높은 강도를 나타내지만, 7일 이상을 넘어서면 높은 온도로 양생된 콘크리트가 오히려 낮은 강도를 나타낸다고 하였다. McDaniel<sup>(5)</sup>, Klieger<sup>(6)</sup> 등도 비슷한 실험에서 초기 단계의 양생온도의 영향이 콘크리트 강도에 큰 영향을 미친다고 하

였다. 또 Volz 등<sup>(7)</sup>은 기준온도에 대하여 초기 양생온도와 양생기간을 달리한 실험에서 초기 단계에서는 적산온도 법칙을 적용하기 힘들다고 하였다.

그러나 지금까지의 적산온도에 대한 대부분의 연구는 어떤 양생기간동안 일정한 온도로 등온양생시킨 콘크리트 실험체를 실험하거나 이를 이용한 모델식의 개발에 관한 것이었다. 이러한 식들은 콘크리트의 양생온도가 양생시점에 따라서 크게 변하지 않는 경우에 근사적으로 적용될 수 있다. 즉 지금까지의 적산온도 연구는 콘크리트 양생온도가 양생시점에 따라 그 영향이 일정하다는 가정 하에서 이루어졌고, 콘크리트 강도에 미치는 양생시점과 양생온도의 영향을 동시에 고려한 연구는 거의 보고되지 않고 있다. Guo<sup>(8)</sup>는 양생온도에 따른 콘크리트의 정확한 강도예측은 양생온도 뿐만 아니라 양생시점의 영향을 동시에 고려하는 온도함수에 의해서 가능하다는 것을 지적하였다. 또 Kim 등<sup>(9)</sup>은 실험을 통해서 등가재령이 같더라도 양생시점에 따라 콘크리트 강도가 달라짐을 보였다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트 강도에 미치는 양생온도의 영향이 양생시점에 따라 어떻게 변하는지에 대한 실험을 수행하고 이를 토대로 기존 등가재령을 이용하여 양생시점의 영향을 분석하였다. 실험은 물·시멘트비가 0.55와 0.35의 2가지 배합조건에 대해서 각각 0~1일, 1~2일, 2~3일, 6~7일의 1일 동안씩 선택적으로 5℃ 및 40℃로 양생하고 그 전후는 20℃의 기준온도로 양생시켜 재령 1, 2, 3, 7, 14 및 28일에서의 압축강도를 각각 측정하였다. 이러한 실험으로부터 양생시점의 영향이 콘크리트 강도에 어떤 영향을 미치는가를 밝히고 기존 등가재령식의 결함으로 지적되고 있는 양생시점의 영향을 도입하여 기존 모델식을 수정한 새로운 등가재령식을 제안하였다.

## 2. 실험

### 2.1 배합비

보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트의 2종류에 대하여 실험하였다. 보통강도의 콘크리트는 물·시멘트비를 0.55로 하였고, 고강도콘크리트는 물·시멘트비를 0.35로 선정하였다.

실험에 사용된 재료특성은 시멘트의 경우 D시멘트사의 제1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였고, 그 물리적 성질과 화학적 성질은 각각 Table 1, Table 2와 같다.

Table 1 Physical properties of cement

Specific gravity	Blain (cm <sup>2</sup> /g)	Setting time(hr·min.)		Compressive strength(kg/cm <sup>2</sup> )		
		initial	final	3days	7days	28days
3.15	2967	2:55	6:40	199	288	390

Table 2 Chemical properties of cement

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PG	I <sub>2</sub>
30.6	5.29	2.9	61.8	3.6	2.1	0.04	0.01	0.34	0.15	0.11	1.04

굵은 골재는 경기도 용인 석산의 쇠석 골재로 물리적 성질은 최대 크기 25mm, 비중 2.66, 흡수율 1.27%, 단위용적중량 1537kg/m<sup>3</sup>, 조립율 7.08이다. 또 잔골재는 한강 모래를 사용하였으며 잔골재의 물리적 성질은 비중 2.65, 흡수율 0.64%, 단위용적중량 1469kg/m<sup>3</sup>, 조립율 2.64이다.

콘크리트 배합에서 목표 공기량을 3%로 하였으며 배합비는 Table 3과 같다. 콘크리트의 혼합 직후의 슬럼프와 공기량은 물·시멘트비 0.55에서는 각각 15.9cm, 5.4%였고, 물·시멘트비 0.35에서는 각각 12.5cm, 4.3%로 측정되었다.

Table 3 Mix proportions

	W/C	S/a	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )				SP* (%)	AE* (%)
			W	C	S	G		
NSC	0.55	0.47	185	335	845	939	-	0.2
HSC	0.35	0.45	173	495	759	927	1.0	0.2

\*SP: Superplasticizer \*\*AE: Air entraining agent

### 2.2 공시체의 제작 및 강도 측정

본 실험에는  $\phi 100 \times 200$ mm 실린더 모울드를 사용하여 총 324개의 콘크리트 공시체를 제작하였다. 비빔에는 공칭용량 80리터의 강제식 믹서를 사용하

였으며 다짐은 진동기를 사용하였다. 재료의 투입은 굵은골재, 잔골재, 시멘트의 순으로 하였으며 먼저 1분간 건비빔한 다음 물을 투입하여 3분간 비벼 혼합하였다. 골재는 표면건조 포화상태로 사용하였으며, 굵은골재는 혼합하기 전에 물로 씻어 불순물을 제거한 후 사용하였다. 타설된 공시체는 수분의 증발을 막기 위해 타설 직후 비닐 시트로 밀봉 처리하여 곧바로 각각의 양생조로 이동되었다. 공시체의 제작시 콘크리트의 타설온도는  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 가 되도록 하였다.

압축강도 시험전에 공시체는 연마기를 사용하여 표면처리를 하였다. 압축강도 시험에 사용된 기기는 250톤 용량의 Instron사의 Closed-Loop Dynamic Material Testing System이다. 압축강도의 측정은 재령 1, 2, 3, 7, 14 및 28일에 실시하였고, 실험결과와 각각 3개의 공시체의 평균값으로 하였다.

### 2.3 양생이력

콘크리트 공시체는  $20^\circ\text{C}$  기준온도에서는 수중양생

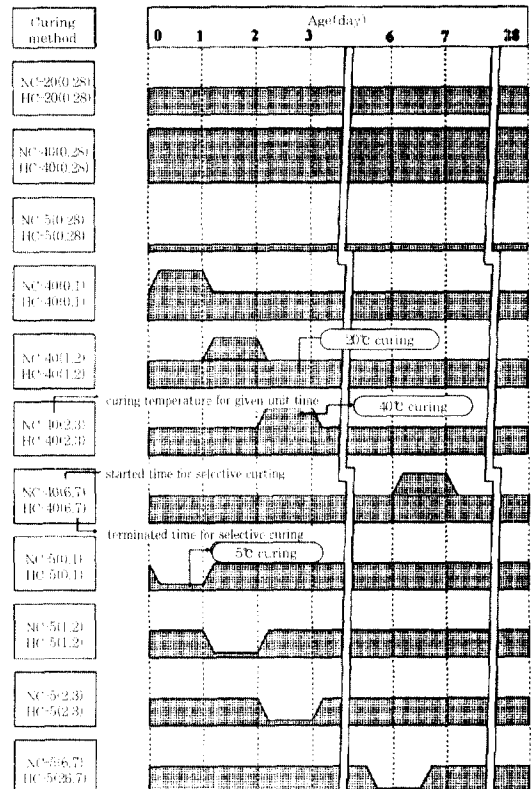


Fig.1 Curing histories of specimens

으로 하였고, 재령에 따라 각각의 선택양생기간에는 전기 양생조에서 양생하였다. 실험에 사용된 양생조는 프로그램에 의해 온도 조절이 가능한 것을 이용하였다. 초기재령 단계에서 양생시점에 따라 콘크리트 강도에 미치는 양생온도의 영향을 알기 위해서 선택양생은 5℃와 40℃의 두 가지의 온도로 재령을 달리 하면서 1일 동안씩 실시하였다. 기준온도(20℃) 보다 온도를 낮추거나(5℃) 높이는(40℃) 시점은 재령 0, 1, 2, 6일의 4종류로 선정하였으며, 선택양생 기간은 24시간으로 하였다. 선택양생의 전후는 모두 20℃ 기준온도로 양생하였다.

일반적으로 적산온도는 양생시점에는 관계없이 단순히 양생온도와 양생기간의 곱으로 정의된다. 그러나 본 실험은 적산온도 값이 같더라도 양생시점이 달라지면 콘크리트 강도에 미치는 적산온도의 영향이 달라질 것이라 가정 하에서 이루어졌다. 구체적인 양생이력은 Fig. 1과 같다.

실험체에 온도를 급격히 높이거나 낮추면 열충격으로 인해 미세균열이 발생하고 따라서 강도저하가 초래될 수 있다. 이러한 열에 의한 손상을 줄이기 위해서 양생조의 온도 상승과 하강은 6시간에 걸쳐서 서서히 진행되도록 하였으며, 온도이력을 조사하기 위해 공시체 중앙에 센서(thermocouple)를 설치하였다. Fig. 2에 콘크리트의 양생온도가 40℃, 양생시점이 0~1일의 경우의 온도이력 측정결과를 나타내었다. 이 그림에서 양생조내의 양생온도가 6시간부터 24시간까지는 40℃로 일정하지만 실험체 내부의 실제 온도는 이 보다 조금씩 높은 값을 보이고 있다.

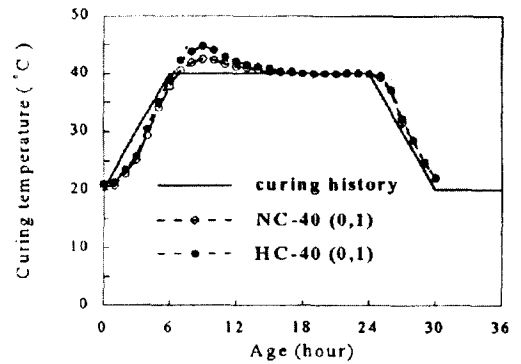


Fig. 2 Typical temperature history for the specimen NC-40(0,1)

험체 내부의 온도가 가장 높은 지점은 양생이 시작된 후에 약 10시간이 지나서이고 그 이후에는 점차 감소하고 있다. 이것은 시멘트의 수화반응에 의한 수화열 발생 때문인 것으로 추정된다.

### 3. 실험결과

주어진 양생조건 하에서 각 재령에서 콘크리트 압축강도 실험결과는 Table 4와 같다. Fig. 3 및 Fig. 4는 재령에 따라 24시간씩 5℃ 및 40℃로 선택양생하고 그 전후의 기간에는 20℃로 등온양생한 경우의 강도-재령 실험 값을 20℃ 등온양생에 대한 상대강도의 비로 나타낸 것이다. 일반적인 적산온도 개념에 따르면 같은 배합조건의 콘크리트는 양생이력이 달라지더라도 등가재령이 같으면 강도가 같아야 한다. 그러나 실험결과는 같은 등가재령에서 양생시점에 따라

Table 4 Test results

Curing method	Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )											
	W/C=0.55						W/C=0.35					
	1day	2day	3day	7day	14day	28day	1day	2day	3day	7day	14day	28day
20℃(0,28)	71	123	167	256	323	366	124	249	315	404	464	506
40℃(0,1)	170	213	232	265	297	317	281	329	343	387	437	472
40℃(1,2)	-	187	228	279	309	325	-	339	360	415	448	492
40℃(2,3)	-	-	211	274	311	336	-	-	385	410	464	513
40℃(6,7)	-	-	-	263	322	344	-	-	-	417	462	523
40℃(0,28)	158	205	217	252	291	331	285	381	403	415	431	452
5℃(0,1)	8	73	129	221	274	342	37	181	279	412	469	534
5℃(1,2)	-	81	134	240	295	362	-	205	283	415	483	521
5℃(2,3)	-	-	131	236	301	353	-	-	282	399	475	523
5℃(6,7)	-	-	-	247	313	356	-	-	-	401	471	503
5℃(0,28)	15	47	78	143	227	308	41	87	133	248	337	441

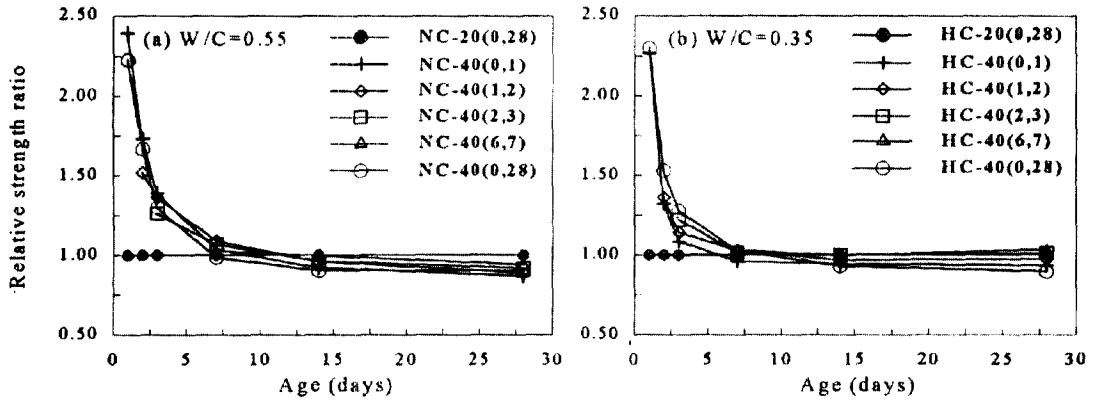


Fig. 3 Relative strength of selectively cured concrete at 40°C to isothermal curing at 20°C

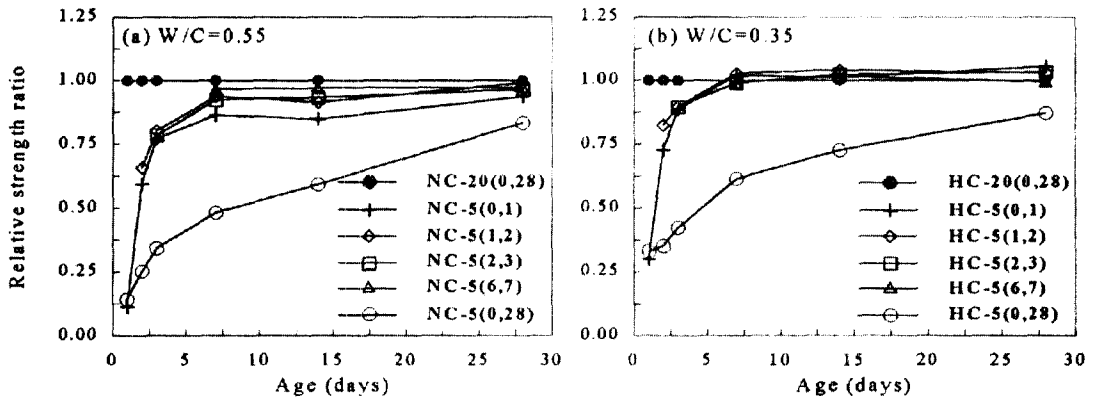


Fig. 4 Relative strength of selectively cured concrete at 5°C to isothermal curing at 20°C

강도가 달라짐을 보이고 있다. Fig. 3과 Fig. 4에서 보듯이 초기 재령에서 상대적으로 고온으로 양생했을 경우에 초기의 강도는 높지만 후기 재령으로 갈수록 강도는 낮아지고, 초기재령에서 저온으로 양생했을 때는 반대의 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 양생시점이 약 7일 이후부터는 양생온도나 양생시점에 관계없이 거의 같은 값을 보인다. 또 이러한 경향은 물·시멘트비에 따라서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. Fig. 5는 5°C, 20°C 및 40°C로 등온양생한 경우를 20°C 기준온도로 양생한 경우에 대한 상대강도비로 나타낸 것이다. 40°C로 등온양생한 경우의 공시체의 강도가 20°C로 양생한 경우보다 초기에는 높은 강도를 보이지만, 후기재령에서는 낮은 강도를 나타낸다. 또 5°C로 등온양생한 공시체는 20°C에 비하여 초기재령에서 상대적으로 낮은 값을 보이지만, 재령이 증가할수록 20°C 공시체의 강도에 접근되

어 28일 이후의 장기재령에서는 높은 강도 값을 나타낼 것으로 예측된다. 이러한 경향은 Kligler<sup>(16)</sup>, Alexander 등<sup>(17)</sup>의 연구결과에서도 언급된 바 있다.

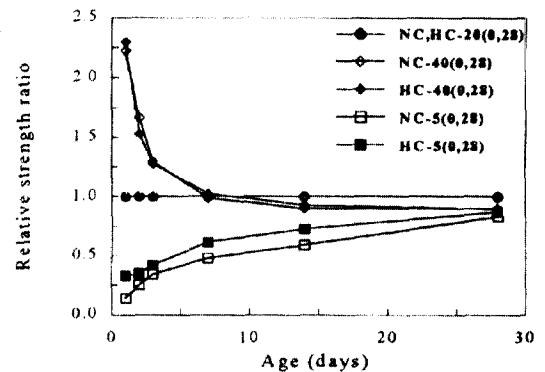


Fig. 5 Relative strength of constantly cured concrete to isothermal curing at 20°C

#### 4. 실험결과 분석

콘크리트의 양생온도가 강도에 미치는 영향을 산정하기 위해서 양생시간과 양생온도의 영향을 적산 온도 또는 등가재령으로 바꾸어야 한다. 이때 양생온도의 영향이 양생시점에 따라 변하지 않는다면 선택 양생한 경우의 재령을 등가재령으로 환산했을 때, 다른 조건이 같은 경우에 동일한 등가재령에서의 강도는 같은 값이어야 한다. 적산온도는 시간과 양생온도의 곱으로 나타낸 것으로 강도 예측을 위해서는 적산 온도와 강도와의 관계식이 필요하다. Carino<sup>(3)</sup>는 재령과 콘크리트의 강도에 대한 이론적인 유도를 통하여 다음의 식을 제시하였다.

$$S = \frac{S_u \cdot k_T \cdot t}{1 + k_T \cdot t} \quad (1)$$

여기서,  $S$ 는 압축강도,  $t$ 는 재령,  $S_u$ 는 한계강도를 나타내고  $k_T$ 는 반응율상수로 양생온도에 따라 변하게 된다. 위의 식에서 한계강도와 반응율상수는 각각 다른 양생온도로 등온양생한 콘크리트의 실험결과를 회귀분석하여 구할 수 있다. 양생온도가 다른 경우에 기준온도에 대한 등가재령으로 변환하면 식(1)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S = \frac{S_u \cdot k_r \cdot t_c}{1 + k_r \cdot t_c} \quad (2)$$

$$t_c = \sum \frac{k_T}{k_r} \Delta t \quad (3)$$

여기서,  $k_r$ 은 20℃ 기준온도에서의 반응율상수이고,  $t_c$ 는 등가재령이다.

등가재령은 기준온도에 대해 같은 적산온도를 나타내는 양생시간으로 정의된다. 만일 기준온도 20℃에 대해서 등가재령으로 환산했다면 20℃의 등온양생에서의 재령은 바로 등가재령이 된다. 다른 온도로 양생한 콘크리트를 등가재령으로 나타내는 방법으로는 Saul모델과 Arrhenius식을 이용한 모델이 가장 많이 사용되고 있는데, 이들을 식으로 표현하면 각각 다음과 같다.

$$t_{es} = \sum \gamma_s \Delta t = \sum \frac{(T - T_o) \Delta t}{(T_r - T_o)} \quad (4)$$

$$t_{es} = \sum \gamma_s \Delta t = \sum \exp \left\{ \frac{E}{R} \left( \frac{1}{T_r + 273} - \frac{1}{T + 273} \right) \right\} \Delta t \quad (5)$$

여기서,  $t_{es}$ ,  $t_{ev}$ 는 각각 Saul모델과 Arrhenius식에 의한 등가재령을 나타내고,  $T$ 는 양생온도,  $T_o$ 는 강도발현온도(datum temperature, ℃),  $E$ 는 활성화에너지(J/mol),  $R$ 은 가스상수(8.3144 J/mol ℃)이며,  $\gamma_s$ ,  $\gamma_a$ 는 각각 Saul모델과 Arrhenius식에 의해 양생온도를 등가재령으로 환산해주는 등가재령비(affinity ratio)를 나타낸다. 강도발현온도는 콘크리트의 수화반응이 일어나지 않는 최저양생온도로 일반적으로 -10℃를 적용하고 있다.

본 연구에서 얻은 실험 결과는 기존의 적산온도 개념을 적용하면 식(4), 식(5)의 Saul모델과 Arrhenius식을 이용한 등가재령으로 각각 변환할 수 있다. Saul모델을 이용한 등가재령은 기준온도,  $T_r$ 을 20℃로, 강도발현온도,  $T_o$ 를 -10℃로 하여 식(4)에서 직접 구할 수 있다. 그러나 Arrhenius식에 의한 등가재령은 활성화에너지,  $E$ 를 알아야 하는데, 활성화에너지는 3개 이상의 등온양생 실험 결과에서 구할 수 있다. 즉 활성화에너지는 5℃, 20℃ 그리고 40℃의 등온양생 콘크리트의 강도-재령 실험결과를 식(1)을 이용하여 회귀분석하여 각각의 반응율상수를 구하고, 이를 이용하여 식(3)과 (5)에서 회귀분석에 의해 구할 수 있다. 본 연구에서 물·시멘트비 0.55, 0.35인 콘크리트의 활성화에너지는 각각 50.31 kJ/mol, 57.29 kJ/mol로 나타났다. Table 5는 등온양생한 콘크리트의 강도측정 결과를 식(1)로 회귀분석하여 얻은 반응율상수,  $k_T$  및 한계강도,  $S_u$ 의 값을 각각 나타낸 것이다.

Table 5 Regression results of isothermal curing using eq. 1

curing temperature	W/C=0.55		W/C=0.35	
	$k_r$ (1/day)	$S_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$k_r$ (1/day)	$S_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )
20℃	0.2252	415.27	0.3821	555.42
5℃	0.0597	492.09	0.0897	615.51
40℃	0.8285	367.86	1.7693	456.93

그런데, 양생온도의 영향이 양생시점에 따라 동일하다면 Saul모델이나 Arrhenius식에 의한 등가재령으로 표현하였을 때 임의의 양생이력의 경우와 기준온도로 양생한 경우의 반응율상수 및 한계강도가

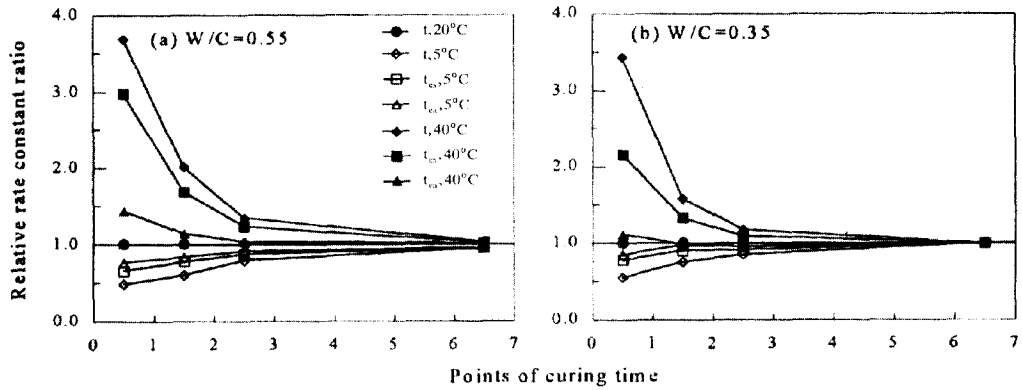


Fig. 6 Relative rate constant of selectively cured concrete to isothermal curing at 20°C

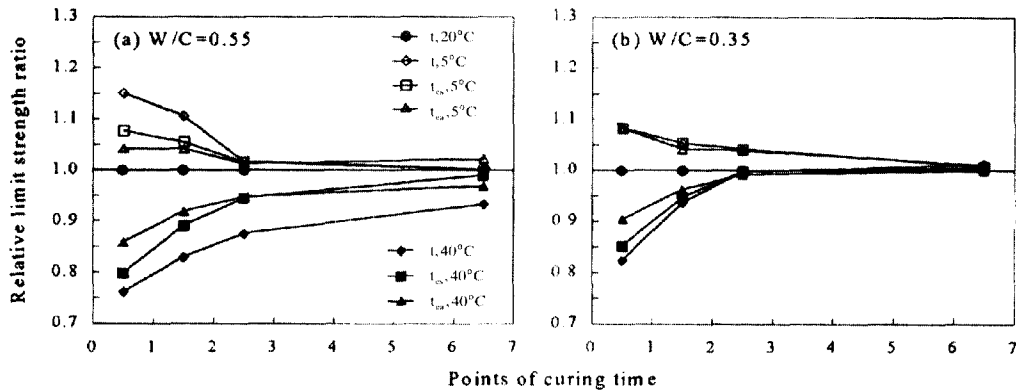


Fig. 7 Relative limit strength of selectively cured concrete to isothermal curing at 20°C

동일한 값이어야 한다. 실험결과를 Saul모델과 Arrhenius식의 등가재령,  $t_{cs}$ ,  $t_{cm}$ 로 각각 변환하여 식(2)에 의해 회귀분석을 하여 양생시점에 따른 반응율상수와 한계강도의 변화를 조사하였다. Fig. 6, 7은 실험결과를 재령, Saul모델의 등가재령 및 Arrhenius식에 의한 등가재령에 대해 반응율상수와 한계강도 값을 식(2)에 의해 각각 회귀분석하여 양생시점에 따른 변화를 나타낸 것이다. 이 때 각각의 반응율상수와 한계강도 값은 20°C 기준온도로 등온양생한 경우의 상대비로 표현한 것이다. 반응율상수와 한계강도가 기준온도로 양생한 것에 비하여 초기의 양생시점에서는 차이가 많고, 7일 이후에는 거의 영향이 없음을 알 수 있다. 이 그림에서 40°C로 선택 양생한 경우에 같은 등가재령에서도 양생시점이 빠를수록 반응율상수는 크지만 한계강도는 상대적으로 낮은 값을 보이고 있다. 또 반대로 5°C로 양생한 경우

에는 초기에 양생한 콘크리트가 반응율상수는 기준온도에 비하여 작지만 한계강도는 커지고 있다. 이러한 현상은 Verbeck<sup>(11)</sup>, Carino<sup>(12)</sup>, Kjellsen<sup>(13)</sup> 등이 지적하였듯이, 초기의 양생온도가 높아지면 수화속도가 빨라지면서 콘크리트의 강도 증가도 빨라지만 수화생성물의 비균일한 확산과 콘크리트를 구성하는 재료의 열팽창계수의 차이로 인하여 시멘트 페이스트내의 공극이 증가하고 미세균열이 발달하게 되어 결국 후기강도는 낮아진다는 사실로부터 설명될 수 있다. 그러므로 기존의 적산온도 방법에 의한 강도예측은 콘크리트 강도에 미치는 양생시점의 영향을 정확히 반영하기 힘들다. 특히 콘크리트 강도 증가는 수화도에 의해 영향을 받지만, 시멘트 페이스트 수화물의 미세구조에 의해서도 영향을 받게 되므로, 양생온도가 같더라도 양생시점이 달라지면 콘크리트 강도에 미치는 영향이 다르게 나타남을 주목할

필요가 있다.

따라서 기존의 Saul모델이나 Arrhenius식에 의한 등가재령은 초기의 양생시점에 의한 영향을 반영하지 못했음을 알 수 있고, 식(2)의 반응율상수모델은 초기의 양생시점의 영향에 의한 시멘트페이스 조직구조의 변화로 한계강도에 미치는 영향을 반영하지 못하고 있다. Fig. 6 및 Fig. 7에서 보듯이 본 실험 결과에서 반응율상수와 한계강도는 양생시점에 따라 점점 감소하거나 증가하면서 기준온도에 수렴함을 알 수 있다. 이러한 경향은 다른 연구자들에 의해서도 확인되고 있는데, Guo<sup>(6)</sup>는 양생온도가 강도 증가에 미치는 영향은 재령에 따라 서서히 감소할 것이라고 하였고, Kjellsen<sup>(12)</sup>도 수화진전될수록 활성화에너지가 감소함을 보여주었다.

그러므로 식(4) 및 (5)의 등가재령은 Fig 6에서 보듯이 양생시점을 영향을 고려하여 다음의 형태로 표현될 수 있다.

$$t_{cm} = \sum \gamma_{cm} \Delta t = \sum \gamma \cdot \frac{1+t_c^2}{a+t_c^2} \Delta t \quad (6)$$

$$\gamma_{cm} = \gamma \cdot \frac{1+t_c^2}{a+t_c^2} \quad (7)$$

여기서,  $t_{cm}$ 은 수정된 등가재령,  $\gamma_{cm}$ 은 수정된 등가재령비,  $\gamma$ 는 Saul모델과 Arrhenius식에서 구한 등가재령비,  $t_c$ 는  $\Delta t$ 동안의 양생시점,  $a$ 는 상수값이다. 양생시점은 양생기간,  $\Delta t$ 의 중간시점으로 하였다.

또 한계강도는 Fig. 7에서 보듯이 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$S_u = S_u(T, t) = S_{ur} \cdot (1 - \lambda) \quad (8)$$

$$\lambda = \sum \frac{1+t_c^2}{b+t_c^2} \Delta t \quad (9)$$

여기서,  $S_{ur}$ 은 기준온도인 20℃로 양생한 경우의 한계강도값,  $\lambda$ 는 양생온도와 양생시점의 영향을 받는 강도증감계수,  $b$ 는 상수이다.

Table 6은 양생시점의 영향을 반영하기 위해서 반응율상수 및 한계강도의 양생시점에 따른 변화를 식(6), (7) 및 식(8), (9)를 이용하여 회귀분석하여 결정된 상수값을 나타낸 것이다. 이 표에서 상수  $b$ 는 양생온도에 따라 변하게 되는데, 20℃ 등온양생한 경

우에는 1.0이 된다.

Fig. 8(a), (b)는 Saul모델과 Arrhenius식에 의한 등가재령으로 변환한 후에 식(2)에 의한 강도 값을 20℃로 등온양생한 경우와 비교한 것이다. 이 그림에서 Arrhenius식에 의한 등가재령은 Saul모델에 비해서는 양생온도의 영향을 비교적 잘 반영하고 있지만 양생시점의 영향은 반영하지 못함을 알 수 있다. 즉 기존의 적산온도 개념을 적용하면 초기재령에서는 정확한 강도예측을 할 수 없는 것이다. Fig. 8(c)는 Saul모델에 양생시점의 영향을 도입한 것으로 20℃ 등온양생한 것에 대한 상대강도비로 나타난 것이다. 또 Fig. 8(d)는 Arrhenius식에 양생시점의 영향을 각각 도입한 등가재령과 이때의 한계강도값을 이용한 것이다. Fig.8(c), (d)에서 기존의 Saul모델과 Arrhenius식을 수정한 식들이 Fig. 8(a), (b)의 기존의 식들에 비해서 전반적으로 초기단계의 신뢰도가 크게 향상되었다. 그리고 Saul모델보다는 Arrhenius식을 개선시킨 Fig. 8(d)의 정확도가 더욱 개선되었다.

기존의 적산온도 개념은 양생온도의 시간의존성을 배제하고 있다. 그러나 실험결과와 분석을 통해서 보다 더 이상적인 등가재령의 표현은 양생온도와 양생시점의 함수가 되어야 함을 알 수 있다. 본 연구의 실험결과와 제안식은 이러한 경향을 잘 보여주고 있다.

Table 6 Regression results of constants a and b

W/C	selective curing conditions	Modified Saul model		Modified Arrhenius equation	
		a	b	a	b
0.55	lowered temperature	0.5653	1.1109	0.6855	1.0655
	elevated temperature	6.0256	0.7482	1.6178	0.8136
0.35	lowered temperature	0.7258	1.1204	0.8327	1.1142
	elevated temperature	3.0653	0.8311	1.1146	0.8830

## 5. 결론

1) 단위 시간동안 40℃로 선택양생한 경우의 강도는 양생시점이 빠를수록 양생시점이 늦은 공시체에 비하여 초기에는 높은 강도를 보였으나 재령이 증가



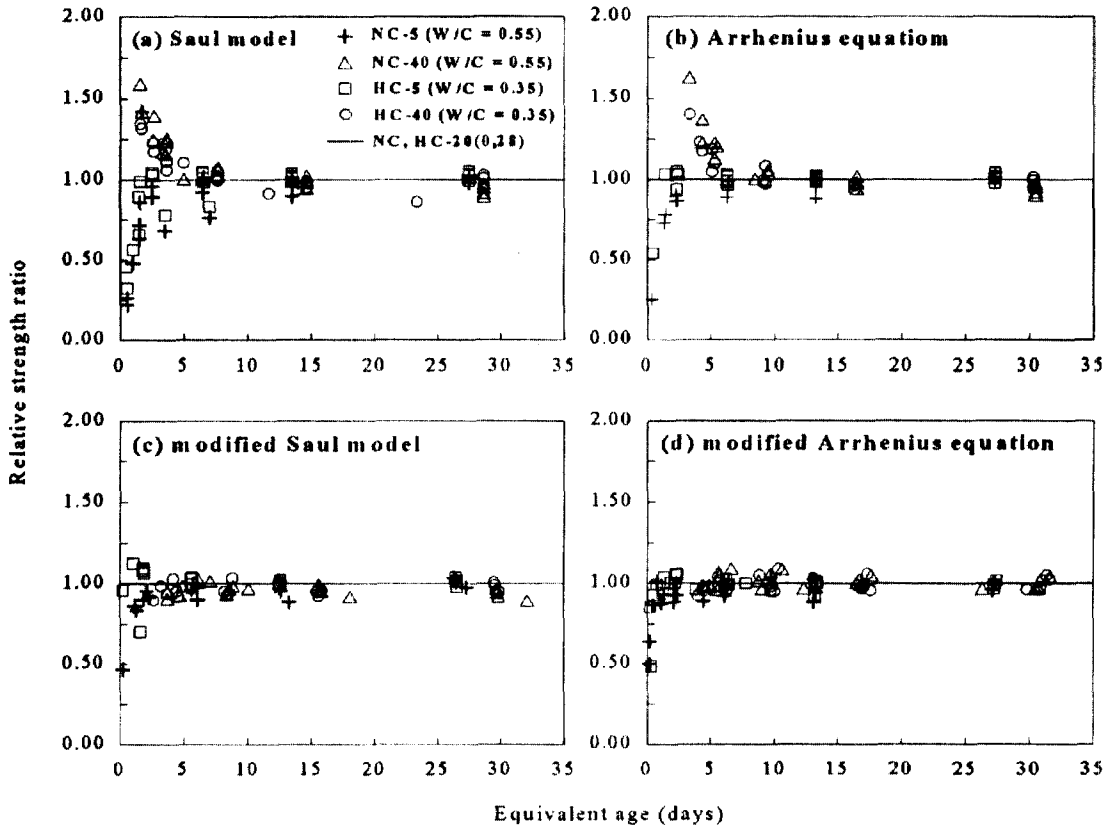


Fig. 8 Comparison of experimental data and predicted value by existing models and proposed models

할수록 낮은 값을 보였다. 5℃로 단위시간 동안 선택 양생한 경우에는 양생시점의 영향을 크게 받지 않았으나 전체적으로 40℃ 선택양생의 경우와는 반대의 경향을 나타내었다.

2) 40℃로 등온양생한 콘크리트의 강도는 20℃ 기준온도로 양생한 경우에 비해 초기재령에서는 높은 강도를 보이지만 후기재령에서는 낮은 강도를 나타내었다. 한편 5℃로 등온양생한 공시체는 20℃에 비하여 상대적으로 낮은 값을 보이지만 재령이 증가할수록 20℃ 공시체의 강도에 근접하는 것으로 나타났다.

3) 양생온도에 따른 콘크리트의 강도는 기존의 등가재령식에서는 등가재령이 같더라도 양생시점에 따라 달라짐을 알 수 있었다. 이때 콘크리트의 양생시점에 따른 양생온도의 영향은 7일 이내에 크게 나타났으며 그 이후에는 온도변화가 콘크리트 강도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

4) 실험결과를 반응율상수 모델을 이용하여 분석한 결과, 콘크리트 압축강도에 미치는 양생온도의 영향은 양생시점에 따라 달라지는 시간의존성을 나타낼 수 있었다. 초기의 양생시점의 영향을 고려하기 위해서 기존의 Saul모델과 Arrhenius식에 양생시점의 영향을 도입하여야 하고, 한계강도 값 또한 양생시점에 따라 달라짐을 알 수 있었다.

5) 양생시점의 영향을 도입한 등가재령식과 한계강도 값을 이용하여 수정된 강도예측식을 제안하였으며, 기존의 모델식과 비교하여 보다 개선된 강도예측이 가능하였다.

## 참고문헌

1. Saul, A. G. A., "Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure." Magazine of Concrete Research, Vol. 2, No. 6, 1951, pp.127-140.

2. Freiesleben, H. P. and Pedersen, E. J., "Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete," Journal of the Nordic Concrete Federation, No.1, 1977, pp.21-25.
3. Carino, N.J., "Maturity Method: Theory and Application," Journal of Cement Concrete and Aggregate, ASTM, Vol. 6, No.2, 1984, pp. 61-73.
4. Price, W.H., "Factors Influencing Concrete Strength," ACI Journal, Proceedings, Vol.47, No. 2, Feb. 1951, pp.417-432.
5. McDaniel, A.B., "Influence of Temperature on the Strength of Concrete," Illinois University Engineering Experiment Station Bulletin, No. 81, 1915, 24p.
6. Klieger, P., "Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength," ACI Journal, Proceedings, Vol. 55, No. 6, June, 1958, pp.1063-1081.
7. Volz, C. K., Tucker, R. L., Burns, N. H. and Lew, H. S., "Maturity Effects on Concrete Strength," Cement and Concrete Research, Vol.11, no.1, 1981, pp.41-50.
8. Guo Chengju, "Maturity of Concrete : Method for Predicting Early Stage Strength," ACI Material Journal, Vol. 86, No. 4, July-Aug., 1989, pp. 341-353.
9. Kim, J. K., Moon, Y. H. and Eo, S. H., "Compressive Strength Development of Concrete with Different Curing Time and Temperature", Proc. of the 7th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Seoul, Korea, Aug.19-21, 1997, pp.951-956.
10. Alexander, K. M. and Taplin, J. H., "Concrete Strength, Paste Strength, Cement Hydration, and the Maturity Rule," Australian Journal of Applied Science, Vol. 13, 1962, pp. 277-284.
11. Verbeck, G. J. and Helmuth, R. H., "Structures and Physical Properties of Cement Paste," Proceedings of the 5th International Conference on the Chemistry of Cement, Tokyo, 1968, pp. 1-32.
12. Carino, N. J., "Temperature Effects on the Strength-Maturity Relation of Mortar," Report No. NBSIR81-2244, National Bureau of Standards, Washington, D. C., 1981, 90p.
13. Kjellsen, K. O. and Detwiler, R. J., "Later-Age Strength Prediction by a Modified Maturity Model," ACI Material Journal, Vol. 90, No.3, 1993, pp. 220-227.

## 요 약

본 연구에서는 콘크리트 강도에 미치는 양생온도의 영향이 양생시점에 따라 어떻게 변하는지에 대한 실험과 기존의 모델식을 이용하여 분석을 수행하였으며, 양생시점의 영향을 고려한 수정된 등가재령식을 제시함으로써 새로운 강도예측식을 개발하기 위한 기초 연구이다.

이를 위해 2종류의 물·시멘트비에 대하여 각각 11종류의 양생이력을 고려한 실험을 수행하였다. 실험 변수로는 3종류의 양생온도(5℃, 20℃, 40℃)와 4종류의 양생시점(0~1일, 1~2일, 2~3일, 6~7일)을 선정하였다. 또 기존의 Saul 및 Arrhenius 모델식을 이용하여 실험결과를 분석하여 양생시점의 영향을 도입한 각각 수정된 등가재령식을 제시하였다.

실험 결과에서 초기재령에서 고온 양생한 경우에는 초기에는 높은 강도를 나타내지만 재령이 증가할수록 오히려 낮은 강도를 나타내었다. 또 초기에 저온으로 양생한 콘크리트는 그 반대의 경향을 보였다. 기존의 등가재령식에서는 같은 등가재령에서도 압축강도는 양생시점에 따라 달라짐을 알 수 있었다. 기존의 모델식은 특히 초기재령에서의 강도예측 결과가 실험결과와 잘 맞지 않았으나 이 논문에서 제시된 수정된 등가재령식은 실험결과와 잘 일치하는 결과를 보여 주었다.

(접수일자 : 1997. 10. 30)