

양생온도변화에 따른 콘크리트의 재료역학적 특성

Mechanical Properties of Concrete with Different Curing Temperature

김진근^{*}
Kim, Jin-Keun

한상훈^{**}
Han, Sang-Hun

양은익^{***}
Yang, Eun-Ik

조명석^{****}
Cho, Myung-Sug

우상균^{*****}
Woo, Sang-Kyun

ABSTRACT

In this study, mechanical properties of type V cement concrete with different curing temperature were investigated. The tests for mechanical properties, i.e., compressive strength and modulus of elasticity, were carried out on two kinds of type V cement concrete mixes. Concrete cylinders cured at 10, 23, 35 and 50 °C were tested at 1, 3, 7 and 28 days. The 'rate constant model' was used to describe the combined effects of time and temperature on compressive strength development.

Test results show that concrete subjected to high temperature at early age attains greater strength than concrete to low temperature but eventually attains lower later-age strength than that. With type V cement concrete, the linear and Arrhenius rate constant models both accurately describe the development of relative strength as a function of the equivalent age.

1. 서론

5종 시멘트가 많이 사용되는 원자력 발전소 격납 구조물은 구조물의 특성상 구조물 내부의 기밀성이 매우 중요한데 이런 기밀성에 큰 영향을 미치는 것이 초기제형 콘크리트에 발생하는 균열이다. 이

-
- 1) *정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수
 - 2) **정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
 - 3) ***정회원, 한국과학기술원 토목공학과 연구원
 - 4) ****한국전력공사 전력연구원, 선임연구원
 - 5) *****한국전력공사 전력연구원, 연구원

러한 콘크리트의 초기균열발생 여부를 예측하기 위해서는 콘크리트의 양생온도에 따른 탄성계수, 압축강도 및 인장강도 등의 재료역학적인 물성치를 알아야 한다. 그러나 많은 연구들이 28일 이후의 재령에 대한 것이거나 1종 시멘트에 대한 것으로서 5종 시멘트 콘크리트에 대한 것은 전무한 실정이다. 예를 들어 양생온도변화에 따른 콘크리트의 압축강도를 판단하기 위한 많은 연구가 행해졌고 많은 모델식들이 제시되었지만 이는 대부분이 1종 시멘트 콘크리트에 대한 것들로 5종 시멘트 콘크리트에 대해서는 그 유효성이 증명되지 않았다.

따라서 이 논문에서는 5종 시멘트 콘크리트에 대한 초기재령에서의 압축강도와 탄성계수 실험을 수행하여 그 결과를 바탕으로 'rate constant model'의 적용성을 평가하였다.

2. Rate constant model

온도와 재령에 따른 강도의 변화양상을 모사하기 위한 많은 모델식이 제시되고 발전되었다. 이러한 모델식들 중 근래에 들어 가장 주목받고 있는 것이 Carino가 제시한 rate constant model이다. 1984년에 Carino⁽¹⁾⁽²⁾는 다음의 식(1)과 같은 강도-재령 관계식을 제시하였고 1991년에 rate constant⁽²⁾⁽³⁾를 이 모델식에 도입하였다. 그리고 기존의 실험data를 분석하여 가장 적합한 rate constant 함수를 제시하였다. 이러한 Carino 모델식의 가장 중요한 요소는 'rate constant(k_T)'의 양생온도와의 상관관계이다.

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

여기서,

- S = 압축강도
- S_u = 한계강도
- k_T = 양생온도 T에서의 rate constant
- t = 재령
- t_0 = 강도발현이 시작되는 재령

rate constant와 양생온도와의 관계는 아래와 같이 크게 선형함수와 비선형함수로 표현할 수 있으며 가장 대표적인 비선형 함수는 Arrhenius 함수이다.

선형함수

$$k_T(T) = CT + D \quad (2)$$

Arrhenius 함수

$$k_T(T) = Ae^{\left(\frac{-Q}{T}\right)} \quad (3)$$

여기서,

- $k_T(T)$ = rate constant
- T = 양생온도
- C, D, A = 비례상수
- Q = E/R (E:활성에너지, R:가스상수)

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험변수

실험변수는 물-시멘트비와 양생온도로 나눌 수 있다. 이 실험변수들을 나타내면 표1.과 같다.

표1. 실험변수

시멘트의 종류	물-시멘트비(%)	단위 시멘트량(kg/m ³)	양생온도(℃)
5종	40	450	10, 23, 35, 50
	50	360	10, 23, 35, 50

3.2 실험재료

실험에 사용된 시멘트, 잔골재, 굵은 골재의 물리적 성질은 표2.에 제시되어있다.

표2. 재료의 성질

	5종 시멘트	잔골재	굵은 골재
종류		강모래	쇄석
비표면적(cm ² /g)	3210	-	-
비중	3.15	2.55	2.58
조립률	-	2.95	7.23
28일 압축강도(MPa)	36	-	-

3.3 배합설계

표3.은 이 실험에 사용한 콘크리트의 배합설계표이다.

표3. 5종 시멘트 콘크리트의 배합설계

배합명	물-시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위 사용량 (kg/m ³)					
			물	시멘트	잔골재	굵은 골재	혼화제	
							AE제	감수제
T1	40	39	181	452	630	989	0.023	2.26
T2	50	42	181	362	707	989	0.018	1.81

3.4 실험방법

압축강도(f_c'), 탄성계수(E_c) 등과 같은 콘크리트의 재료역학적인 특성에 대한 실험이 수행되었다. 모든 실험은 적어도 3개의 $\phi 100 \times 200$ mm 공시체에 대해 동일한 실험을 수행하여 그 값들의 평균을 취했다. 압축강도는 KS F 2405에 따라서 실험을 수행하였고 탄성계수는 KS F 2438에 제시된 시험법에 따라 실험을 수행하였다. 특히 탄성계수는 길이 60mm의 strain gage를 사용하여 변형률을 측정하였고 압축강도와 탄성계수 실험전에 공시체의 상하면을 연마기로 캠핑한 다음에 실험을 수행하였다.

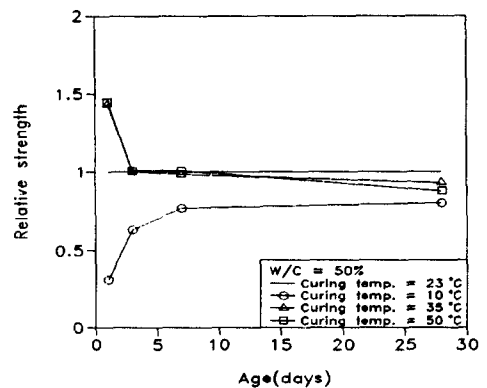
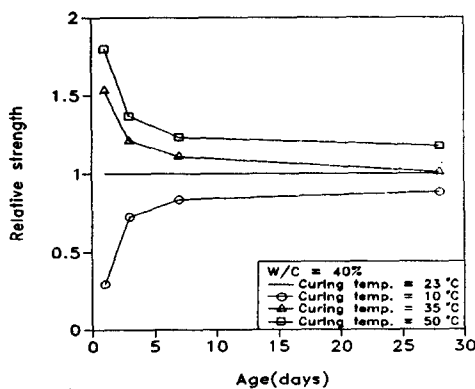
4. 실험결과

4.1 압축강도

그림1. (a)는 물-시멘트비가 40%이고 단위 시멘트량이 450kg/m^3 일 때의 양생온도에 따른 압축강도 변화추이를 나타내고 있고 그림1. (b)는 물-시멘트비가 50%이고 단위 시멘트량이 360kg/m^3 일 때의 양생온도에 따른 실험결과이다. 그림은 모두 각 양생온도에서의 실험값을 23°C 에서 양생한 콘크리트의 실험결과로 나눈 것들이다. 그림1. (a)에 의하면 물-시멘트비가 40%일 때는 양생온도가 증가함에 따라 재령 7일까지의 초기재령의 압축강도가 증가함을 알 수 있다. 그러나 재령 28일에서는 23°C 로 양생한 시료가 35°C 로 양생한 시료보다 압축강도가 커진다. 이러한 현상은 물-시멘트비가 50%일 때 좀 더 현저하게 나타나는데 그림1. (b)에서 보는 바와 같이 재령 28일의 압축강도는 23°C 로 양생한 시료가 가장 크고 그 다음이 35°C , 50°C 순이다. 즉 초기재령의 양생온도가 높을수록 초기재령의 압축강도는 커지지만 장기재령으로 갈수록 그 경향은 역전되어 양생온도가 낮을수록 압축강도가 커지게 되는 경향을 보인다. 이러한 현상을 'Cross over' 효과라고 부르기도 한다. 물-시멘트비가 40%인 경우도 장기재령으로 가면 물-시멘트비가 50%인 경우와 같이 23°C 양생온도일 때의 압축강도가 35°C , 50°C 양생온도일 때의 압축강도보다 크고 재령이 더 경과하면 압축강도는 양생온도가 10°C 일 때가 가장 크고 23°C , 35°C , 50°C 순으로 양생온도가 증가할수록 강도는 감소할 것으로 판단된다.

4.2 탄성계수

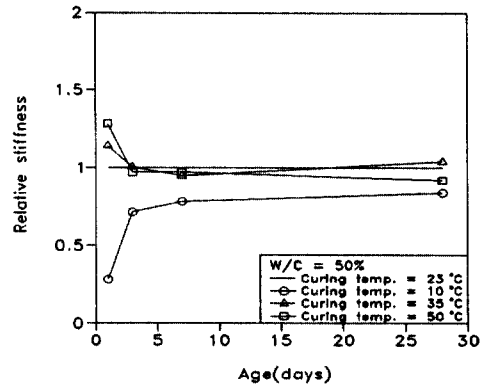
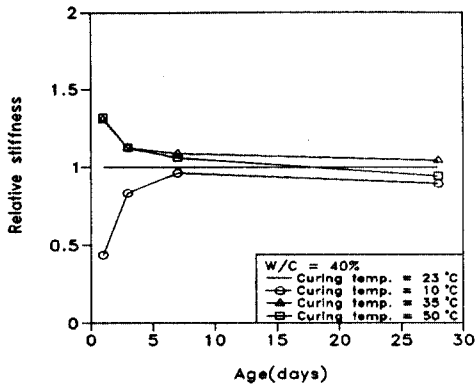
그림2. (a)는 물-시멘트비가 40%이고 단위 시멘트량이 450kg/m^3 일 때의 양생온도에 따른 탄성계수 변화추이를 나타내고 있고 그림2. (b)는 물-시멘트비가 50%이고 단위 시멘트량이 360kg/m^3 일 때의 양생온도에 따른 실험결과이다. 압축강도와 마찬가지로 그림은 모두 각 양생온도에서의 탄성계수를 23°C 에서 양생한 콘크리트의 탄성계수로 나눈 것들이다. 그림 2.에 의하면 물-시멘트비에 관계없이 재령 1일에서는 양생온도가 커짐에 따라 탄성계수도 커짐을 알 수 있다. 그러나 재령 28일에서의 탄성계수는 35°C 에서 양생한 시료가 가장 크고 그 다음이 23°C , 50°C 순이다. 그림2.에서 재령에 따른 탄성계수의 변화양상을 살펴보면 양생온도가 증가할수록 탄성계수가 작아질 것으로 예측된다. 즉 앞의 압축강도와 같이 'Cross over' 효과가 탄성계수에도 나타남을 알 수 있다.



(a) 물-시멘트비 40%, 단위 시멘트량 450kg/m^3

(b) 물-시멘트비 50%, 단위 시멘트량 360kg/m^3

그림1. 양생온도에 따른 압축강도의 변화



(a) 물-시멘트비 40%, 단위 시멘트량 450kg/m³
그림2. 양생온도에 따른 탄성계수의 변화

(b) 물-시멘트비 50%, 단위 시멘트량 360kg/m³
그림2. 양생온도에 따른 탄성계수의 변화

표4. 압축강도와 탄성계수의 실험결과

		W/C = 40%				W/C = 50%			
		압축강도(kg/cm ²)							
양생온도	재령	1 day	3 day	7 day	28 day	1 day	3 day	7 day	28 day
	10℃		35	167	250	344	23	111	175
23℃		120	231	300	390	72	175	227	313
35℃		183	279	333	393	104	176	223	292
50℃		215	316	370	458	105	177	229	276
		탄성계수($\times 10^5$ kg/cm ²)							
10℃		0.70	1.86	2.39	2.61	0.36	1.44	1.88	2.29
23℃		1.60	2.23	2.48	2.92	1.27	2.02	2.40	2.73
35℃		2.09	2.51	2.70	3.05	1.45	2.03	2.27	2.84
50℃		2.11	2.51	2.63	2.76	1.63	1.96	2.41	2.51

5. Rate constant model을 사용한 실험결과의 분석

5.1 Rate constant와 온도와의 관계

Carino가 제안한 식 (1)을 사용하여 실험결과들에 대해 회귀분석을 실시하면 다음 표5와 같은 결과를 얻을 수 있다. 표5의 회귀분석 결과 중 압축강도의 rate constant를 기존의 실험결과들과 비교하면 그림3과 같다. rate constant는 상대강도(S/S_u)와 재령에 대한 곡선의 초기 기울기와 같고 또한 $1/(\text{rate constant})$ 는 한계강도의 50%를 얻기 위해서 t_0 이후 경과되어야 할 재령과 같다. 즉 rate constant가 크면 50%의 한계강도를 도달하는데 필요한 시간이 작아서 초기재령의 강도발현이 빠르고 rate constant가 작으면 그 반대이다. 그림3.에서 나타난 바와 같이 23℃이하의 양생온도에서 5종 시멘트 콘크리트의 rate constant는 1종 시멘트 콘크리트와 유사하지만 양생온도가 증가할수록 rate constant는 큰 차이를 보인다. 즉 23℃이상의 양생온도에서는 5종 시멘트 콘크리트의 초기강도발현속도가 1종 시멘트 콘크리트보다 늦다고 판단할 수 있다.

표5. 압축강도와 탄성계수 실험결과와 회귀분석

회귀분석 결과 양생 온도	W/C = 40%			W/C = 50%		
	S_u (kg/cm ²)	k_t (1/day)	t_0 (day)	S_u (kg/cm ²)	k_t (1/day)	t_0 (day)
압축강도						
10℃	380.7	0.32	0.67	285.8	0.26	0.66
23℃	425.7	0.36	-0.10	343.5	0.33	0.15
35℃	414.2	0.60	-0.34	322.2	0.32	-0.49
50℃	490.6	0.44	-0.83	297.1	0.46	-0.17
탄성계수						
	S_u ($\times 10^5$ kg/cm ²)	k_t (1/day)	t_0 (day)	S_u ($\times 10^5$ kg/cm ²)	k_t (1/day)	t_0 (day)
10℃	2.74	0.94	0.63	2.40	0.63	0.72
23℃	3.04	0.69	-0.65	2.85	0.80	-0.01
35℃	3.17	0.77	-1.55	3.05	0.41	-1.28
50℃	2.78	2.81	-0.12	2.64	0.78	-1.04

그림4는 압축강도와 탄성계수의 rate constant를 온도에 따라 표현한 것이다. 압축강도의 rate constant는 물-시멘트비가 40과 50%일 때 곡선의 형태가 크게 다르지 않고 온도변화에 따라 일정한 경향을 보이고 있다. 그러나 탄성계수의 rate constant는 물-시멘트비에 따라 전혀 다른 곡선의 형태를 나타내고 있고 온도에 따른 변화도 경향성을 상실하고 있다. 따라서 rate constant 모델로 탄성계수에 대한 온도와 재령의 영향을 표현하는 것은 적당하지 않은 것으로 사료된다.

표6은 압축강도의 rate constant를 선형함수와 Arrhenius 함수를 사용하여 회귀분석했을 때의 결과이다. 표에서 나타난 바와 같이 선형함수와 Arrhenius 함수의 coefficient of determination 값이 물-시멘트비에 관계없이 거의 비슷하였다. 기존의 1종 시멘트의 연구결과들은 rate constant와 온도사이의 관계를 나타내는 적합한 함수로 Arrhenius 함수를 추천하였지만 5종 시멘트 콘크리트에서는 선형함수와 Arrhenius 함수 모두 적당한 것으로 판단된다.

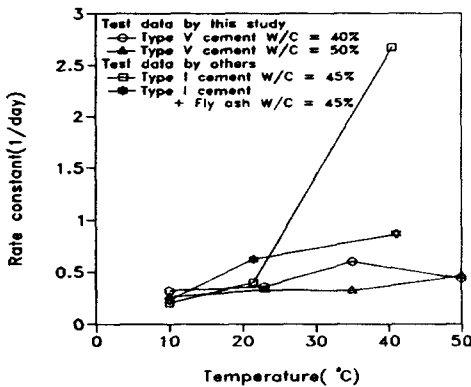


그림3. 시멘트의 종류에 따른 rate constant

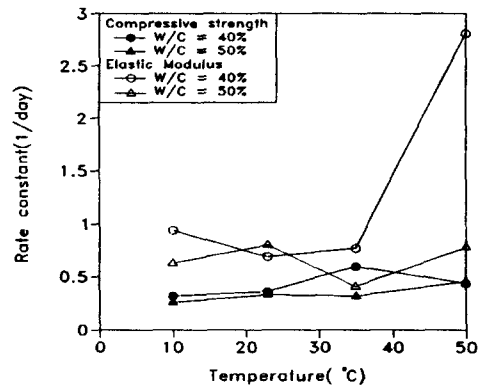


그림4. 압축강도와 탄성계수의 rate constant

표6. 압축강도의 rate constant 실험결과를 선형함수와 Arrhenius 함수를 이용하여 회귀분석한 결과

회귀분석 결과	선형함수			Arrhenius 함수		
	C	D	r (coefficient of determination)	A	Q	r (coefficient of determination)
물-시멘트비 40%	0.00428	0.30362	0.5902	9.3187	934.03	0.5779
50%	0.00455	0.20818	0.9924	17.301	1187.44	0.9293

5.2 상대강도(relative strength)와 등가재령과의 관계

다음의 식(4)와 같이 상대강도와 등가재령사이의 관계는 온도에 관계없이 하나의 상관관계로 표현하는 것이 가능하다. 이러한 상관관계로부터 구한 모델 곡선을 그림5.와 그림 6.에 나타내었다. 이 때 t_{or} 의 값은 표5.의 회귀분석결과 중 23℃일 때의 값을 사용하였고 k_r 은 표6.의 선형 rate constant 함수를 이용하여 23℃의 값을 계산하였다. 따라서 물-시멘트비가 40%일 때, $t_{or}=-0.10$ 과 $k_r=0.40$ 이고 물-시멘트비가 50%일 때는 $t_{or}=0.15$ 와 $k_r=0.31$ 이다.

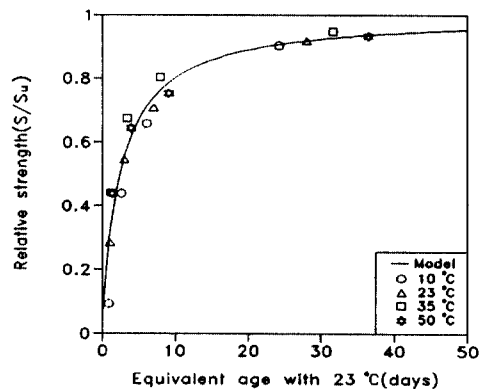
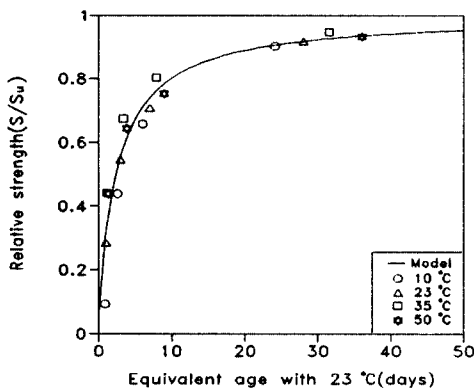
$$\frac{S}{S_u} = \frac{k_r(t_e - t_{or})}{1 + k_r(t_e - t_{or})} \quad (4)$$

여기서 $t_e = 23^\circ\text{C}$ 의 온도에 대한 등가재령

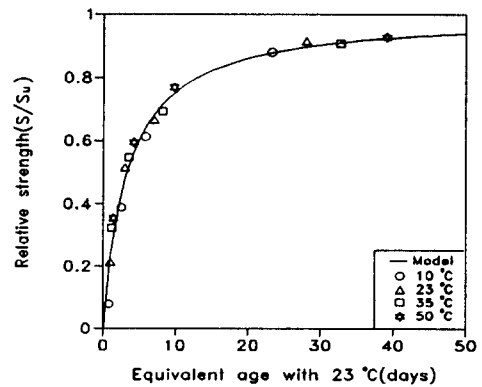
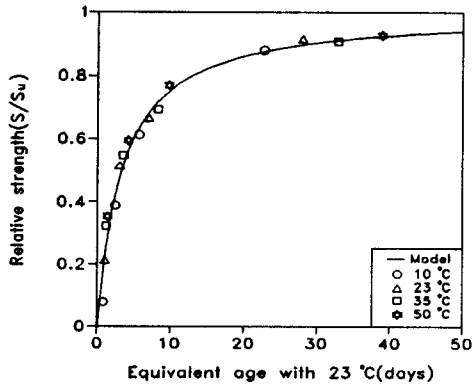
$t_{or} = 23^\circ\text{C}$ 의 온도에서 강도가 발현되기 시작하는 재령

$k_r = 23^\circ\text{C}$ 에서의 rate constant

선형함수와 Arrhenius함수를 사용하여 등가재령을 각각 계산한다. 그리고 표4.의 강도값들을 표5.의 한계강도 S_u 로 나누어 상대강도를 구하고 이를 앞에서 구한 등가재령의 함수로 나타낸 것이 그림5.와 그림6.이다.



(a) 선형함수를 사용한 등가재령에 따른 상대강도 (b) Arrhenius함수를 사용한 등가재령에 따른 상대강도
그림5. 등가재령에 따른 상대강도의 변화(W/C = 40%)



(a) 선형함수를 사용한 등가재령에 따른 상대강도 (b) Arrhenius함수를 사용한 등가재령에 따른 상대강도
그림6. 등가재령에 따른 상대강도의 변화(W/C = 50%)

그림5와 그림6.에서 보는 바와 같이 물-시멘트비에 관계없이 선형함수를 사용한 등가재령에 따른 상대강도 값들과 Arrhenius 함수를 사용한 값들이 서로 거의 비슷하고 두 값 모두 모델 곡선에 가깝다. 따라서 앞에서도 언급한 바와 같이 5종 시멘트 콘크리트는 양생온도변화에 따른 강도와 재령사이의 관계를 모사하는데 선형함수와 Arrhenius함수 모두를 사용할 수 있다.

6. 결론

앞의 양생온도 변화에 따른 5종 시멘트 콘크리트의 압축강도와 탄성계수에 대한 실험을 통하여 다음의 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 초기재령의 양생온도가 높을수록 초기재령의 압축강도와 탄성계수는 커지지만 장기재령으로 갈수록 그 경향은 역전되어 양생온도가 낮을수록 압축강도와 탄성계수가 커지게 되는 경향을 보인다.
- 2) 23°C이상의 양생온도에서 5종 시멘트 콘크리트의 rate constant는 1종 시멘트 콘크리트보다 작다. 이를 바탕으로 23°C이상의 양생온도에서 5종 시멘트 콘크리트는 1종 시멘트 콘크리트보다 초기재령에서의 강도발현속도가 늦다고 판단할 수 있다.
- 3) Rate constant 모델을 5종 시멘트 콘크리트에 적용하면 선형함수와 Arrhenius함수 모두 양생온도 변화에 따른 강도와 재령사이의 관계를 모사하는데 사용할 수 있다.

참고문헌

1. Carino, N. J., Lew, H. S., and Volz, C., Journal ACI, Vol.80, No.2, 1983, p.p.93~101
2. Tank, R. C. and Carino, N. J., Journal ACI, Vol.88, No.1, 1991, p.p.74~83
3. Tank, R. C. and Carino, N. J., Journal ACI, Vol.89, No.2, 1992, p.p.188~196