



가변 온도 양생 방법을 이용한 콘크리트 성숙도 (Maturity)의 실험적 고찰

김태완^{1)*} · 김광수¹⁾ · 한경봉¹⁾ · 박선규¹⁾ · 오석민¹⁾

¹⁾성균관대학교 건설환경시스템공학과

Concrete Maturity Method Using Variable Temperature Curing: Experimental Study

Tae-Wan Kim^{1)*}, Kwang-Soo Kim¹⁾, Kyung-Bong Han¹⁾, Sun-Kyu Park¹⁾, and Seok-Min Oh¹⁾

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering System, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

ABSTRACT The maturity method is used to estimate the effects of time and temperature on the strength development of concrete. The purpose of this paper is to show how variable curing temperatures affect strength development for both normal and high-strength concrete using the maturity concept. The experimental results for normal-strength concrete show clearly the cross-over effect of strength development as the time of the peak temperature varied. However, this cross-over effect does not exist after the actual ages are converted to the temperature dependent equivalent age. In other words, the existing maturity method does not include the effect of varying the time to peak temperatures but instead includes the effect of the magnitude of peak temperatures. For high-strength concrete, the results were inconclusive. This fact for normal-strength concrete coincides with the ASTM stated limitation that the existing maturity method doesn't take into account the effect of early age temperature on long-term ultimate strength. The results of this 3-year study are used as a basis for an improved concrete maturity function.

Keywords : curing temperature, hydration, high-strength concrete, aging, maturity method

1. 서 론

콘크리트가 양생되는 환경은 물성치에 영향을 주는 온도, 상대습도, 풍속, 태양광 등의 다양한 변수에 의해 지배된다. 이러한 변수 중에서 대기 양생 온도는 콘크리트 강도발현에 가장 영향을 주는 변수이다. 이 논문에서 변화하는 양생 온도 (가변 온도 양생)를 이용해 어떻게 온도가 강도발현에 영향을 주는지 조사하였다. 또한 선행 연구로써 항온, 계단식 항온 온도도 양생에 적용하였다. 성숙도는 온도와 경과 시간의 동시 효과를 연구하는데 사용되는데, 성숙도 개념은 1950년대에 개발되었고 연구가 계속 진행 중이나 여전히 답습되는 한계를 가진다. 결과적으로 본 연구의 전반적인 목적은 후기 강도에 대한 초기재령 온도 효과를 고려해서 그러한 주요 한계 사항을 줄이거나 제거할 수 있는 보다 향상된 함수를 개발하는 것이다. 이러한 해석 모델을 개발하기 전에 보통강도와 고강도콘크리트를 사용하여 가변 온도 양생이 적용된 실험을 완료하였다. 본 논문에서는 성숙도의 주요 한계 사항만을 기술하고 향상된 등가 재령 수식의 필요성을 제안하려고 한다. 그 수식의 개발은 향후 논문에 기술하기로 한다.

2. 배경 이론

기존 성숙도는 두 주요 수식으로 이루어진다^{4,5)}. 식 (1)은 실제 재령을 등가 재령으로 전환하는데 이용되고 식 (2)는 양생 온도에 대한 재령과 강도의 관계를 추정하는데 이용된다. 미국의 여러 주를 대상으로 한 Lacombe⁸⁾의 설문 연구에서 식 (2)는 현재의 많은 강도-성숙도 수식에도 불구하고 여전히 많이 사용되고 있다. 그래서 본 연구에서 식 (2)를 강도와 성숙도 관계에 대해 사용하였다.

$$t_e = \int_0^t \exp[\beta(T - T_r)] \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$S = S_u \left[\frac{k(t - t_0)}{1 + k(t - t_0)} \right] \quad (2)$$

이 두 수식과 함께 주어진 콘크리트의 강도-성숙도 관계를 결정하기 위해 기본적인 절차를 수행하였다. 식 (1)과 (2)의 등가 재령에서 β 값을 결정하기 위해 속도 상수 k 는 5°C, 25°C, 50°C 항온 양생으로부터 획득된 강도-재령 데이터를 이용한 식 (2)의 회귀분석으로 획득하였다. 그리고 다시 k 값을 식 (3)의 온도 민감 요소 β 를 양상하기 위해 회귀분석에 사용하였다.

$$k = A_0 e^{\beta T}$$

*Corresponding author E-mail : tk776@skku.edu

Received January 15, 2007, Accepted August 31, 2007

©2007 by Korea Concrete Institute

온도 민감 요소 (β)를 획득하기 위한 과정을 요약하면,

- 1) 항온 양생된 공시체로부터 재령-강도 데이터 획득
- 2) 획득된 데이터를 이용해 식 (2)를 회귀분석
- 3) 속도상수 k 결정
- 4) 획득된 k를 이용해 식 (3)을 회귀분석
- 5) 온도 민감 요소 β 결정

본 연구에서 항온 양생을 이용하여 민감 요소를 결정하는 이 과정을 Phase I이라 정의하고, 결정된 민감 요소는 보통강도콘크리트에 대해 0.0591 ($1/^\circ\text{C}$)이고 고강도콘크리트에 대해 0.0352이었다. 식 (1)을 이용하여 이 Phase I에서 결정된 β 값을 가변온도 양생 시 등가 재령을 계산하는데 사용하였다. 실제 재령을 등가 재령으로 전환한 후 콘크리트의 강도-등가 재령 관계를 식 (4)의 회귀분석에 의해 구하였다.

$$S = S_u \left[\frac{A(t_e - t_{e0})}{1 + A(t_e - t_{e0})} \right] \quad (4)$$

결국 식 (4)의 최적선을 이용해 한계 강도 (s_u), 등가 재령 속도 상수 (A), 강도발현 시작점 (t_{e0})을 결정하였다.

가변온도 양생 (Phase III)을 이용한 실험을 시작하기 전 Phase II라고 명하는 실험을 수행하였는데, 이 단계는 Phase III에 대한 실험적 상세를 결정하기 위해 step function 온도-시간을 이용했다. 실험적 상세란 초기양생 온도가 후기 강도발현에 더 이상 큰 영향을 미치지 않는 가변 온도 주기를 찾는 것이고, 이를 위해 25°C에서 5°C로, 50°C에서 25°C로, 25°C에서 50°C로 양생 온도를 변화시킨 공시체들의 강도를 관찰하였다. Phase II의 결과에 기인해 Phase III에서 가변 온도 양생의 주기로서 7일을 결정하였다. Phase I과 II의 자세한 절차는 Kim and Rens⁹⁾에서 확인할 수 있다.

3. 실험

Phase III는 12개의 실험군으로 구성되고 각 실험군은 각기 다른 가변 온도를 이용해 양생하였다. 각 실험군은 30에서 40개의 공시체로 구성하였다⁷⁾.

3.1 양생 시스템

주 데이터 획득 컴퓨터를 공시체 양생을 위한 4개의 수조에 연결하였다. 또한 이 컴퓨터를 이용해 수조의 온도를 조정하였다. 정확도가 $\pm 1^\circ\text{C}$ 인 열전대를 이용하여 측정된 물의 온도와 콘크리트의 온도는 데이터 획득 시스템에 기록하였다. 각 수조마다 3개의 열전대를 이용하였는데, 2개는 콘크리트 공시체로 연결하였고 다른 1개는 물의 온도를 측정하였다. 콘크리트의 온도를 측정하기 위해 두 공시체의 평균 온도를 이용하였다. 양생 시스템은 계획한 온도로부터 0.5°C의 차가 발생할 때마다 수조의 발열기나 냉각기를 자동으로 작동해 온도를 조절하는 Lab VIEW라는 소프트웨어를 이용하였다.

3.2 콘크리트 배합

Table 1에서 보여지 듯 보통강도콘크리트의 배합은 1종 시멘트, 물, 모래, 자갈로 구성하였다. 모래와 자갈은 배합 전 공기 중에서 건조하였다. Table 2에서와 같이 고강도콘크리트 배합은 혼화제인 고성능감수제, 혼화제인 플라이애쉬 (Class F), 실리카폼을 포함하였다. 여기서, Class F 플라이애쉬의 사용 목적은 높은 후기 강도를 위해서이고, 실리카폼은 초기재령에서 높은 강도를 획득하기 위해 사용하였다. 고강도 배합을 위해 1%의 수분함량이 가정된 젖은 골재를 사용하였다. 그래서 Table 2에서 물의 양은 골재의 수분 함량에 따라 경미하게 차이가 있을 수 있다. 또한 화학 혼화제를 포함하지 않았을 때 Table 2에 물-시멘트 비는 0.28이나 ACI committee 211에 의하면 다량의 고성능감수제를 사용할 때 이는 물의 양에 포함할 수 있다. 고성능감수제를 물의 양으로 간주하면 물-시멘트 비는 0.35로 증가한다. 이 연구에서 작업성 요건을 충족시키기 위해 상대적으로 많은 양의 고성능감수제를 사용하였다. 다량의 고성능감수제의 사용은 시멘트 수화 시 긴 dormant period를 야기하는 것으로 보고되었다. 보통강도와 고강도콘크리트 모두 100 mm × 200 mm의 공시체를 이용해 실험을 진행하였다.

3.3 양생 온도

Phase III 실험에서 양생 시 가변 온도 함수를 사용하였다. 앞서 언급했듯이 주기와 최고 온도의 시간을 Phase II의 결과에 의해 결정하였다. Moe⁹⁾가 가변온도 코사인 함수를 개발하였고 식 (5)에서 나타난다.

$$-\left(\frac{B}{2}\right) \cos(t_1 P) + \left(\frac{B}{2}\right) + T_0 \quad \text{Before peak} \quad (5a)$$

$$\left(\frac{B}{2}\right) \cos[(t_2 - T_p)P] + \left(\frac{B}{2}\right) + T_0 \quad \text{After peak} \quad (5b)$$

Table 1 Mixture proportions of normal-strength concrete

Material	Mass (N)	Proportion by mass (%)
Cement (type I)	249.78	16.72
Water	133.81	8.96
Gravel	686.90	28.33
Sand	423.15	45.99

Table 2 Mixture proportions of high-strength concrete

Ingredient	Mass (N)	Proportion by mass (%)
Cement (type I)	274.74	17.21
Fly ash (type F)	40.20	2.52
Silica fume	23.85	1.49
Water	96.18	6.02
HRWR (type F)	22.50	1.41
Gravel	644.37	40.36
Sand	494.70	30.99

보통강도콘크리트에 대해 가변 온도 곡선은 6시간, 12시간, 36시간에서 각각 40°C, 50°C, 60°C의 최고점 온도를 나타내었다. Phase III 보통강도콘크리트는 9개의 가변온도 실험군과 3개의 항온 실험군으로 이루어졌다. 그래서 실험군 1, 2, 3은 각기 6시간, 12시간, 36시간에서 40°C의 최고온도에 대응되는 양생 온도 곡선을 가진다. 이는 Fig. 1에서 나타난다.

실험군 4, 5, 6은 6시간, 12시간, 36시간에서 50°C의 최고 온도를 가지고 실험군 7, 8, 9는 60°C의 최고 온도를 가진다. 실험군 10은 31.8°C의 항온양생으로 행해졌는데 이 양생 온도는 실험군 1, 2, 3의 평균 온도이다. 실험군 11은 실험군 4, 5, 6의 평균 온도인 35.9°C, 실험군 12는 실험군 7, 8, 9의 평균 온도인 40°C에서 항온 양생하였다. 모든 실험군의 양생 온도는 초기 7일이 지난 후에는 실내 온도인 25°C로 옮겨져 56일까지 양생하였다. 또한 콘크리트 공시체 물드는 1시간 이내에 양생 수조에 위치시켰다. Table 3은 12개의 보통강도 실험군에 대한 최고 온도와 최고 온도에 이르기까지 시간을 나타낸다.

고강도콘크리트에 대해 다양한 양생 온도 곡선의 최고점은 40°C, 50°C, 60°C로 보통강도콘크리트와 같았으나 최고 온도까지의 시간은 2, 3, 5일이었다. 고강도콘크리트의 실험군 10, 11, 12는 각기 실험군 1, 2, 3의 평균 온도인 32.5°C,

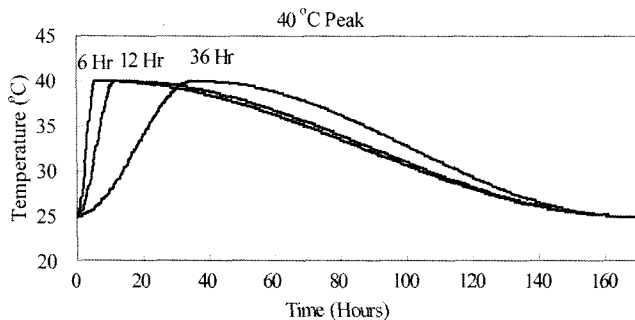


Fig. 1 The variable temperature curing curves for 40°C peak temperature for normal-strength concrete

Table 3 NSC peak temperature and peak time in P phase III

Normal strength concrete		
Set	Peak temperature (°C)	Time at peak (hour)
1	40	6
2	40	12
3	40	36
4	50	6
5	50	12
6	50	36
7	60	6
8	60	12
9	60	36
10	31.7	Constant
11	35.9	Constant
12	40	Constant

실험군 4, 5, 6의 평균 온도인 37.4°C, 실험군 7, 8, 9의 평균 온도인 42.4°C였다. 예를 들자면 Fig. 2는 실험군 1, 2, 3의 양생 온도와 대응되는 시간을 보여준다. Table 4는 12개 고강도콘크리트의 최고 온도와 그 온도까지의 시간을 보인다.

3.4 압축강도 실험

후기 강도에 대한 초기 양생 온도의 영향을 연구하기 위해 콘크리트의 압축강도 실험을 수행하였다. 보통강도콘크리트에 대해 0.5, 1, 3, 7, 14, 28, 56일에 압축강도 실험을 수행하였고 고강도콘크리트에 대해 2, 3, 5, 7, 14, 28, 56일에 압축강도 실험을 수행하였다. 압축강도 실험 절차는 ASTM C39¹⁾를 토대로 하여 진행하였다. 세 개 공시체의 강도를 각 실험 재령에서 평균하였다. 보통강도와 고강도콘크리트의 압축 실험 일시가 다른 이유는 고강도콘크리트에서 다량의 고성능감수제의 사용으로 인한 강도발현이 지연되는 효과 때문이다.

보통강도콘크리트의 56일 최고 강도는 49 MPa, 12개 실험군의 56일 평균 강도는 45 MPa이었다. 고강도콘크리트의 56일 평균 강도는 76 MPa, 56일 최고 강도는 83 MPa였다.

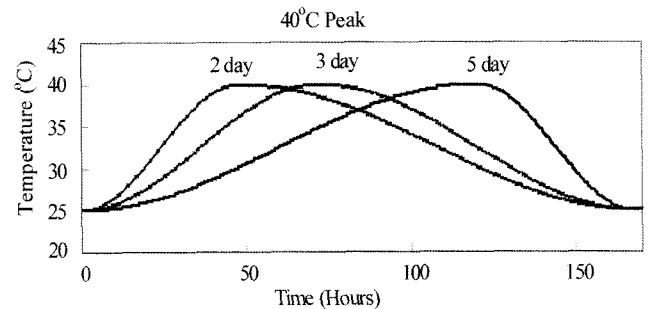


Fig. 2 The variable temperature curing curves for 40°C peak temperature for high-strength concrete

Table 4 HSC peak temperature and peak time in P phase III

High strength concrete		
Set	Peak temperature (°C)	Time at peak (day)
1	40	2
2	40	3
3	40	5
4	50	2
5	50	3
6	50	5
7	60	2
8	60	3
9	60	5
10	32.5	Constant
11	37.4	Constant
12	42.4	Constant

4. 실험 결과

보통강도콘크리트의 압축강도와 재령에 대한 실험 결과는 예상했던 것처럼 cross-over 효과를 나타내었다. Cross-over 효과는 초기 저온 양생된 공시체가 초기 저강도를 보이나 후기 고강도를 가진 반면 초기 고온 양생된 공시체는 초기 고강도를 보이나 후기 저강도를 가지는 것을 의미한다. Fig. 3은 최고 온도가 다르나 최고 온도에 이르는 시간이 6시간으로 동일한 실험군 사이에서 cross-over 효과를 묘사하고 있다. 덧붙여 cross-over 효과는 최고 온도가 동일하나 최고 온도에 이르는 시간이 다른 실험군 사이에도 나타난다. 예를 들면 40°C 최고 온도와 최고 온도까지 6시간이 걸리는 실험군 1은 40°C 최고 온도와 최고 온도까지 36시간이 걸리는 실험군 3에 비해 초기에 높은 강도를 보이나 후기에는 낮은 강도를 가진다. 실험군 1과 3 사이에 존재하는 강도발현의 차는 실험군 1이 실험군 3보다 앞서 고온을 경험했기 때문일 것이다. 초기 양생에 있어 이러한 최고 온도와 최고 온도에 이르는 시간은 후기 강도에 영향을 미친다. 실험군 1, 2, 3의 강도는 실험군 1, 2, 3의 초기 7일 양생 온도 평균인 31.7°C 항온에서 양생된 실험군 10의 강도와 비교하면 56일 강도에서 높은 값을 보인다. 실험군 4, 5, 6과 실험군 11, 실험군 7, 8, 9와 실험군 12의 비교도 유사한 결과로 나타났다. 그래서 56일 강도에서 평균 항온으로 양생된 공시체가 가변 온도로 양생된 공시체보다 낮

다. Table 5는 보통강도콘크리트의 압축강도 결과를 보여준다.

Carino⁴⁵⁾는 cross-over 효과가 고온 양생된 고강도콘크리트에서 일어나지 않을 수 있음을 밝혔다. 이 사실은 본 연구의 고강도콘크리트 실험 결과에 의해서 재입증 되었다. 고강도콘크리트 결과는 양생온도가 높을수록 초기강도와 후기 강도 모두 높은 것으로 나타났다. 예를 들자면 60°C 최고 온도를 가지고 최고 온도에 이르는 시간이 2일인 실험군 7은 각각 40°C와 50°C 최고 온도를 가지고 최고 온도에 이르는 시간이 2일인 실험군 1과 4보다 높은 초기강도와 후기 강도를 보였다. 이러한 거동은 Fig. 4에 나타난다. 이는 고강도콘크리트의 배합에 사용한 혼화제의 영향으로 추측할 수 있다. 사용한 플라이애쉬 및 실리카퓌미가 포졸란반응을 일으키며 초기재령에서 강도 기여도가 좋지 못하기 때문일 수도 있다. 그러나 강도발현 속도는 예상이 가능했다. 60°C 최고 온도와 혹은 최고온도에 이르는 시간이 2일인 실험군들은 보다 빠른 강도발현을 보였다. 덧붙여 보통강도와 다르게 가변 양생 온도와 평균 항온 양생 온도 사이에는 두드러지는 일관성이 없었다. Table 6은 고강도콘크리트의 압축강도 실험 결과를 나타낸다.

보통강도와 고강도 사이의 강도발현 경향이 다른 이유로 고강도콘크리트에서 길어진 dormant period를 추론할 수 있다. 본 연구에서 고강도콘크리트의 dormant period는 20시간 정도였다. 달리 표현하면 처음 20시간 동안은 강도발현이 일어나지 않았다. 이러한 현상은 Fig. 5에서 보여지 듯

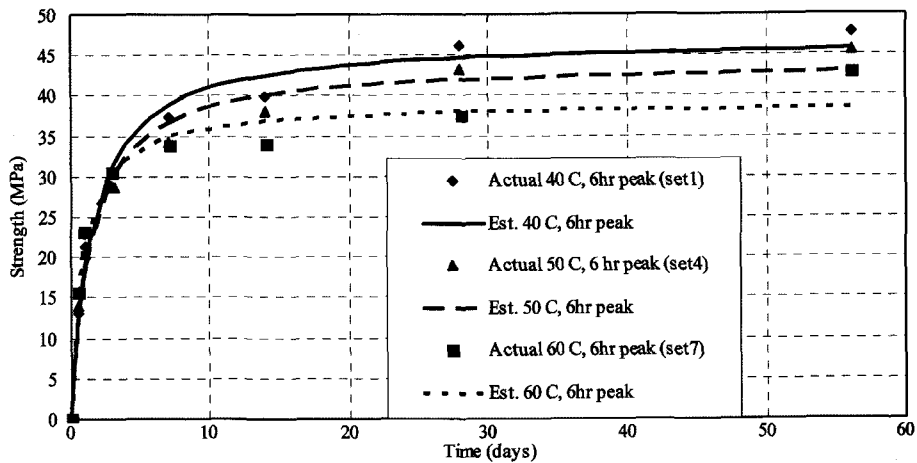


Fig. 3 Strength comparison among 40, 50, and 60°C peak (set 1, set 4, and set 7 respectively) temperature curing with 6 hours peak (normal-strength concrete)

Table 5 Strength versus age data for normal-strength concrete

Age (day)	Strength (MPa)											
	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 6	Set 7	Set 8	Set 9	Set 10	Set 11	Set 12
0.5	13.1	13.5	6.3	13.9	11.0	5.5	15.7	13.0	6.7	8.7	9.9	13.6
1	21.4	21.5	19.0	20.4	20.7	16.3	23.1	19.5	20.3	16.4	16.6	20.0
3	30.3	33.8	32.2	28.7	31.6	28.3	30.5	29.5	33.2	26.9	23.6	28.9
7	37.4	36.9	38.4	34.2	36.2	35.3	33.8	33.3	36.0	34.8	33.7	34.6
14	39.9	41.9	42.4	38.0	41.5	38.1	34.0	39.2	40.1	36.7	37.5	37.7
28	46.1	46.3	43.8	43.1	41.0	41.7	37.5	41.2	41.6	41.7	39.3	40.3
56	47.8	47.8	48.7	45.5	45.5	44.4	42.8	41.2	45.1	45.3	42.2	42.7

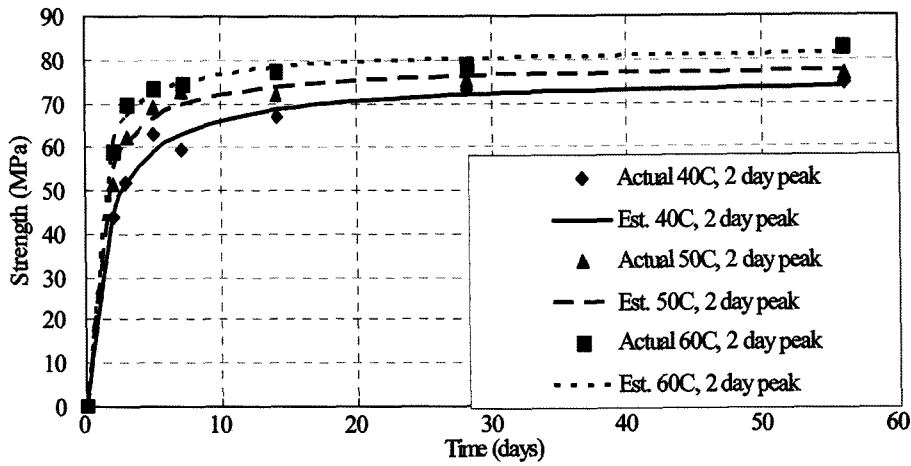


Fig. 4 Strength comparison among 40, 50, and 60°C peak (set 1, set 4, and set 7 respectively) temperature curing with 2 day peak (high-strength concrete)

Table 6 Strength versus age data for high-strength concrete

Age (day)	Strength (MPa)											
	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 6	Set 7	Set 8	Set 9	Set 10	Set 11	Set 12
2	43.8	34.8	36.0	51.6	39.9	31.1	59.1	41.0	35.7	39.9	35.6	44.8
3	51.9	46.7	45.2	62.4	57.3	45.2	69.8	59.1	51.0	47.8	42.4	46.6
5	63.2	59.6	64.4	69.3	66.9	62.9	73.5	66.0	68.7	59.1	49.7	59.1
7	59.4	62.6	68.3	72.6	67.5	70.9	74.5	67.8	72.9	68.2	53.8	58.9
14	67.1	58.0	71.7	71.9	69.9	73.3	77.3	68.4	73.1	72.5	60.3	66.0
28	73.2	74.5	77.1	75.2	71.7	73.7	78.8	70.2	76.8	77.2	62.9	67.3
56	74.6	77.1	76.4	76.8	73.3	77.2	82.8	72.8	77.3	82.8	67.6	68.7

콘크리트의 온도와 양생 수조 내 물의 온도를 분석함에 의해 찾을 수 있다. 물의 온도가 감소하고 콘크리트 온도가 증가하는 순간 혹은 구간은 빠른 수화의 시작이다. 물리·화학 이론에 의거하여 이 현상은 흡열 반응으로 설명할 수 있다³⁾. 흡열 반응은 열의 상태로 에너지를 흡수하는 과정이고 흡열 현상은 재료 내 반응 기간 동안 재료의 온도가 올라가고 재료 주위의 물의 온도가 내려갈 때 일어난다. 그리고 이 현상은 정확하게 콘크리트 수화의 발열 반응에 반대된다. 그래서 빠른 수화 작용의 시작에서 수조의 콘크리트 공시체는 온도 증가를 경험하고, 반면 주위의 물은 동시에 온도 감소를 경험한다. 이 순간 혹은 구간이 지나자마자 공

시체와 물의 온도는 Fig. 5에서 보여지 듯 평형을 이뤘다

5. 성숙도 해석

본 연구에서 콘크리트와 물의 양생 온도는 열전대를 이용해 측정했고 등가 재령 계산에 이용되었다. 이 두 가지 온도 측정은 거의 유사해서 등가 재령 계산 시 어떤 쪽을 사용해도 무방하다.

앞서 언급했듯이 Phase I로부터 β 값을 이용하여 Phase III의 등가 재령이 식 (1)에 의해 계산되었다. 추산된 강도 곡선은 식 (4)를 이용하여 등가 재령과 강도 간의 비선형 회

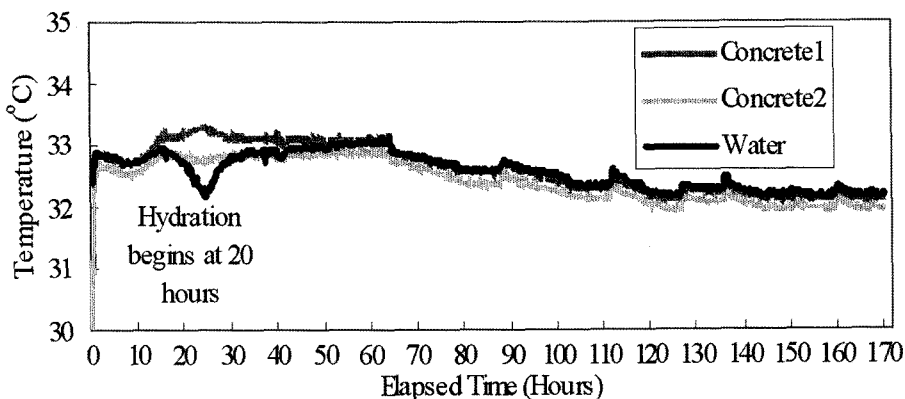


Fig. 5 Typical water and concrete temperature in curing tank for high-strength concrete (set 10)

귀 분석에 의해 획득되었다. 강도-재령과 강도-성숙도 관계는 보통 강도 실험군에 대해 차이가 있었다. 40°C 최고 온도와 각기 다른 최고 온도까지 시간을 가진 보통강도 실험군 1, 2, 3은 등가 재령을 이용했을 때 유사한 후기 추산 강도를 가졌다. 실제, 그 세 개 실험군은 실제 재령에 기초해서 각기 다른 후기 추산 강도를 가진다. 실험군 4, 5, 6과 실험군 7, 8, 9의 추산된 56일 강도 결과는 실험군 1, 2, 3과 유사하다. Fig. 6은 등가 재령에 기초한 보통강도콘크리트의 추산 강도를 보인다. Verbeck과 Helmuth(1968)은 cross-over 효과가 일어나는 이유에 대해 연구하였다. 그들은 초기재령에서 높은 양생 온도가 수화율을 증가시킨다고 제안했다. 이 증가된 수화율은 반응물이 경화되는 페이스트의 간극 내에 균일하게 배분되는 시간을 갖지 못하게 한다. 그래서 높은 초기재령온도는 후기 강도를 줄인다.

실제 재령에 기초한 강도발현의 경우에서 최고 온도를 보다 일찍 경험한 실험군이 초기에 더 높은 강도와 후기에 더 낮은 강도를 보였다. 그러나 등가 재령에 기초한 추산 강도 결과는 최고 온도를 경험한 시기와는 무관하게 유사한 후기 강도를 가졌다. 그래서 등가 재령에 기초한 추산 강도와 실제 압축강도 사이의 차가 존재한다. 이는 ASTM 1074²⁾ 성숙도 방법의 주요 한계 사항과 일치한다 (성숙도 방법은 후

기 강도에 대한 초기 콘크리트 온도에 대한 효과를 고려하지 않음). 식 (1)은 최고 온도까지 시간의 변화에는 영향을 받지 않으나 최고 온도의 크기에는 민감하다. 그럼에도 불구하고 다른 최고 온도를 가진 실험군 사이 후기 추산 강도에는 차가 있다. Fig. 6은 각기 다른 최고 온도를 가지나 최고 온도까지 이른 시간이 6시간으로 같은 세 실험군 사이의 차이를 나타낸다. 덧붙여 Figs. 3과 6의 비교는 가변 양생 온도에 대한 성숙도 기법의 이용이 실제 재령을 이용하는 것보다 초기강도 추정에서 정확하지 못함을 보였다. 이것은 식 (1)이 최고 온도까지 이르는 시간을 고려하지 않고 최고 온도의 크기만을 고려하는 것을 의미한다. 그래서 식 (1)은 최고 온도에 이르는 시간의 변화에는 영향을 받지 않고 최고 온도의 크기에만 영향 받는다고 결론 내릴 수 있다.

고강도콘크리트에 대해 등가 재령을 고려한 후기 추산 강도의 경향은 앞서 언급한 보통강도와는 유사하지 않았다. 하지만 실제 재령과 등가 재령에 기초한 고강도 후기 추산 강도 결과는 유사한 경향을 보였다. Table 8은 등가 재령의 함수로 고강도콘크리트의 추산 강도를 보인다. 보통강도와 고강도콘크리트 사이에 강도 경향 차이는 고성능감수제의 다량 사용으로 인한 수화 지연에 기인하는 것 같다. 고성능 감수제 (type F)는 일반적으로 1~2시간 정도 수화 과정 지

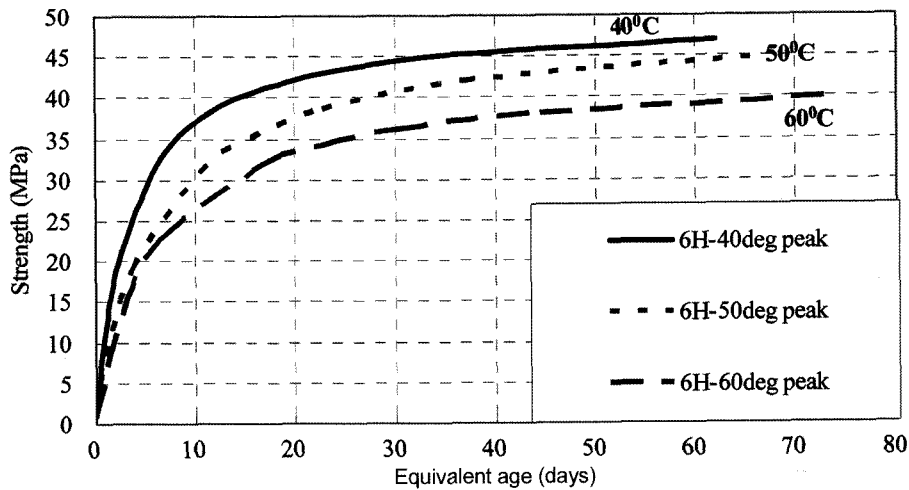


Fig. 6 The relationship between the equivalent age and strength development for 40, 50, and 60°C peaks at 6 hours (normal-strength concrete)

Table 7 Estimated strength versus equivalent age for normal-strength concrete

Age	Set 1 ($S_u=47.0$)		Set 2 ($S_u=47.2$)		Set 3 ($S_u=47.0$)		Set 4 ($S_u=48.4$)		Set 5 ($S_u=44.7$)		Set 6 ($S_u=45.0$)		Set 7 ($S_u=40.0$)		Set 8 ($S_u=41.9$)		Set 9 ($S_u=44.8$)		Set 10 ($S_u=44.8$)		Set 11 ($S_u=42.3$)		Set 12 ($S_u=41.8$)	
	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S
0.5	1.0	12.0	0.8	11.9	0.5	8.2	1.7	11.5	1.0	9.7	0.6	6.0	2.8	14.1	1.8	10.0	0.6	7.8	0.8	9.0	1.0	9.2	1.4	12.8
1	2.3	19.8	2.0	21.2	1.3	16.0	3.9	19.4	3.2	20.4	1.6	12.7	6.5	22.6	5.6	20.2	1.9	17.5	1.5	15.0	2.0	14.7	2.6	19.1
3	6.4	32.1	6.2	34.1	5.8	33.5	10.6	31.0	9.9	33.0	9.2	31.2	16.9	31.9	16.7	31.9	15.1	36.7	4.6	26.9	5.9	26.0	7.4	29.9
7	11.0	37.7	11.0	39.2	10.9	39.2	15.6	35.1	15.2	36.9	15.2	35.7	22.9	34.2	22.9	34.8	22.6	38.6	10.5	35.1	13.7	33.9	17.0	36.2
14	18.2	41.6	18.2	42.5	18.1	42.5	22.8	38.5	22.4	39.7	22.4	38.5	30.1	36.0	30.1	37.0	29.8	39.7	17.7	38.8	20.9	36.9	24.3	38.1
28	32.6	44.8	32.6	45.1	32.6	45.0	37.2	42.0	36.9	42.4	37.0	41.1	44.5	38.0	44.5	39.5	44.2	40.8	32.6	41.7	35.8	39.9	38.7	39.9
56	62.0	46.9	62.1	46.8	62.0	46.6	66.7	44.8	66.3	44.5	66.3	43.2	73.2	39.9	73.3	41.9	73.0	41.8	61.4	43.6	64.6	41.6	67.5	41.3

Note) EA is equivalent age (day) and S is compressive strength (MPa).

Table 8 Estimated strength versus equivalent age for high-strength concrete

Age	Set 1 ($S_u=75.6$)		Set 2 ($S_u=77.9$)		Set 3 ($S_u=82.9$)		Set 4 ($S_u=78.6$)		Set 5 ($S_u=77.0$)		Set 6 ($S_u=83.5$)		Set 7 ($S_u=82.3$)		Set 8 ($S_u=75.5$)		Set 9 ($S_u=83.5$)		Set 10 ($S_u=85.4$)		Set 11 ($S_u=68.6$)		Set 12 ($S_u=70.8$)	
	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S	EA	S
2	2.6	43.6	2.4	35.9	2.2	38.5	3.3	53.8	2.7	44.4	2.3	35.5	3.6	59.7	2.9	44.6	2.3	39.2	2.7	40.6	3.1	35.2	3.6	43.2
3	4.2	52.2	3.9	45.5	3.5	48.1	5.4	61.8	4.8	54.8	3.8	46.0	6.6	68.3	5.7	56.0	4.0	50.7	4.0	49.1	4.6	42.3	5.4	49.9
5	7.0	59.8	6.9	55.5	6.6	60.0	8.8	67.6	8.6	63.2	7.8	60.2	10.8	73.5	10.6	63.9	9.2	65.0	6.5	59.0	7.5	50.0	8.8	56.7
7	9.2	63.1	9.1	59.6	9.1	65.1	11.1	69.8	11.1	65.9	11.0	65.6	13.2	75.1	13.4	66.1	13.4	69.9	9.1	64.9	10.5	54.2	12.3	60.4
14	16.3	98.4	16.2	66.3	16.2	71.9	18.2	73.4	18.2	70.1	18.1	71.7	20.3	77.8	20.4	69.2	20.3	73.9	16.2	72.9	17.6	59.8	19.4	64.2
28	30.5	72.0	30.5	71.2	30.5	76.7	32.4	76.0	32.4	73.2	32.3	76.6	34.5	80.0	34.5	71.9	34.5	77.5	30.5	78.8	31.7	64.0	33.5	67.4
56	59.0	74.1	58.9	74.2	58.9	79.6	60.8	77.7	60.7	75.3	60.6	79.8	62.8	81.5	63.0	73.8	62.9	80.0	58.8	82.5	60.3	66.8	62.0	69.5

Note) EA is equivalent age (day) and S is compressive strength (MPa).

연을 유발시킬 수 있으나 본 논문의 결과처럼 10시간에 이르는 수화 과정 지연은 작업성을 확보하기 위해 사용된 다량의 고성능감수제가 원인일 것으로 추정된다. 빠른 수화의 느린 시작은 식 (4)에서 이 순간을 t_0 로 정의하기 때문에 강도를 추정하는 데 있어서 중요하다. 그러나 그 순간은 혼화제의 양과 종류에 따라 예측 불가능하다. 그래서 빠른 수화의 시작점에 대한 정보는 실험적으로 획득될 수 있고 이는 양생온도에 대한 고강도콘크리트의 후기 강도를 예측하기 전에 필수불가결하다.

6. 결 론

초기재령에서 온도는 콘크리트의 강도발현에 영향을 준다. 보통강도콘크리트에 대해 처음 7일간의 고온 양생은 저온 양생과 비교할 때 낮은 후기 강도를 보였다. 덧붙여 높은 고온 양생 또한 낮은 후기 강도를 발생시킨다. 고강도콘크리트에 대해 후기 강도에 대한 양생 온도의 효과는 보통강도와는 다르다. 이러한 차이는 포졸란과 고성능감수제의 첨가로 인해 dormant period가 길어졌기 때문인 것이라 추정된다. Dormant period는 흡열 반응 이론을 이용한 콘크리트 공시체와 주위 물의 온도 변화를 관찰함으로써 측정할 수 있었다.

압축강도에 기초한 강도-성숙도 관계에 대한 초기양생 온도의 효과가 해석되었다. 보통강도콘크리트에 대한 결과는 등가 재령에 기초한 추산 후기 강도는 최고 온도까지 이르는 시간의 변화에는 영향을 받지 않으나 최고 온도의 크기에는 영향을 받는 것으로 나타났다. 기존의 성숙도 기법은 양생 온도에 대한 시기적 효과는 포함하고 있지 않다. 이 사실은 성숙도 기법이 후기 강도에 대한 초기 온도의 효과를 고려하지 않는다는 ASTM의 한계와 부합된다. 실제 재령과 등가 재령 사이에서 고강도콘크리트의 결과는 유사한 경향을 보였다. 고강도콘크리트에 식 (4)의 적용은 후기 강도에 대한 초기 온도 효과를 고려하는 듯하다. 하지만 고강도콘크리트는 최고 온도와 최고 온도에 이르는 시점에 따라 다양한 강도발현 양상을 보였다. 그래서 고강도콘크리트의 강도발현을 일반적으로 예측하는 것은 어렵다고 판단된다.

Notations

- A = Equivalent age constant (days⁻¹)
- A₀ = Value of the rate constant at 0°C (days⁻¹)
- B = Amplitude x 2, T_p - T₀ (°C)
- k = Rate constant (days⁻¹)
- P = Period, $\pi/(t_r - t_p)$
- p = Period, π/t_p
- S = Strength at age t (MPa)
- S_u = Limiting strength (MPa)
- T = Average concrete temperature (°C)
- T_p = Peak temperature (°C)
- T_r = Reference temperature (°C)
- T₀ = Temperature at start of curing (°C)
- t = age (days)
- t₀ = Age at start of strength development (days)
- t_{e0} = Equivalent age at start of strength development (days)
- t_e = Equivalent age
- t₁ = Time to peak (minutes)
- t₂ = Time between time of peak, t_p, and 7 days (minutes)
- t_p = Time to reach peak temperature (minutes)
- t_r = 10,080 minutes
- β = Temperature sensitivity factor (°C⁻¹)
- Δt = Time interval (days)

감사의 글

본 논문은 건설교통부 건설핵심연구개발사업 05건설핵심 D11-01)의 지원으로 수행되었으며 전폭적인 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. ASTM C 39, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", 2001 ASTM Book of Standards, ASTM, West Conshohocken, PA, Vol.04.02, 2001.

2. ASTM C 1074-98, "Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method", *ASTM Book of Standards*, West Conshohocken, PA, Vol.04.02, 1998.
3. Atkins, P. W., *Physical Chemistry*, 7th Edition, Oxford University Press, Oxford, England, 2002, pp.1~1130.
4. Carino, N. J., Knab, L. I., and Clifton, J. R., *Applicability of the Maturity Method to High-Performance Concrete*, NISTR 4819, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, May 1992, 64pp.
5. Carino, N. J. and Tank, R. C., "Maturity Functions for Concrete Made With Various Cements and Admixtures", *ACI Materials Journal*, Vol.89, No.2, 1992, pp.188~196.
6. Kim, T. and Rens, K. L., "The Maturity Method Using Variable Temperature", *Proc. Advances in Cement and Concrete*, Copper Mt., Aug 2003, pp.403~412.
7. Kim, T., *Concrete Maturity: A Quantitative Understanding of How Early-Age Temperature Affect the Maturity Concept*, Doctoral Thesis, University of Colorado at Boulder, 2004, pp.1~175.
8. LaCome, M. L., *Concrete Maturity: The Combined Effect of Temperature and time on Early-Age Strength Development*, Master Thesis, Univ. of Colorado at Denver, Denver, 2000, pp.21~25.
9. Moe, C., *Concrete Maturity: The Effect of Early-Age Varying Temperature Using a Normal Mix Design*, Master Thesis, Univ. of Colorado at Denver, Denver, 2002, pp.45~63.

요 약 성숙도는 콘크리트의 강도발현에 대한 시간과 온도의 효과를 산정하는데 사용된다. 이 논문의 목적은 변화하는 양생 온도가 성숙도 개념을 이용하여 보통 강도와 고강도의 강도발현에 어떻게 영향을 미치는지 보이는 것이다. 보통 강도콘크리트에 대한 실험 결과에서 변화하는 양생 온도의 최고점 시간이 달라짐에 따라 강도발현의 교차 (cross-over) 효과가 나타난다. 그러나 이 교차 효과는 콘크리트의 실제 재령이 온도를 고려한 등가 재령 (equivalent age)로 전환된 이후에는 찾아보기 힘들다. 다른 말로 표현하자면, 기존의 성숙도는 양생 온도의 최고점에 대응하는 시간의 변화에는 민감하지 않으나 그 양생 온도 최고점의 크기에는 민감하다. 고강도콘크리트에 대해서는 그 결과가 결론을 내리기가 쉽지 않다. 보통강도콘크리트에 대한 실험 결과는 기존의 성숙도가 후기 강도에 대해 초기양생 온도에 대한 효과를 고려하지 못한 다는 제한을 언급한 ASTM과 동일함이 있다. 그래서 이 연구는 향상된 콘크리트 성숙도에 대한 기초로서 사용될 것이다.

핵심용어 : 양생, 수화, 고강도, 재령, 성숙도