

양생온도변화에 따른 콘크리트의 재료역학적 특성

Mechanical Properties of Concrete with Different Curing Temperatures

김진근*
Kim, Jin-Keun

한상훈**
Han, Sang-Hun

양은익***
Yang, Eun-Ik

송영철****
Song, Young-Chul

방기성*****
Pang, Gi-Sung

ABSTRACT

Experimental investigation was undertaken to determine early-age strength development and the relationships between the mechanical properties of type I, V and V/fly ash cement concrete with different curing temperature. The tests for mechanical properties, i.e., compressive strength, splitting tensile strength and modulus of elasticity were carried out for type I, V and V with 15% replacement with fly ash cement concrete. For this purpose 480 concrete cylinders cured at isothermal conditions of 10, 23, 35 and 50°C were tested at the ages of 1, 3, 7 and 28 days.

According to the experiments, the concrete subjected to high temperature at early age got greater strength at early age, however eventually lower strength at late age. The derived relationships between compressive strength and splitting tensile strength and elastic modulus of elasticity appeared to be identical for all types of cement.

1. 서론

시멘트 수화열에 의한 콘크리트 구조물의 온도상승은 매스 콘크리트 구조물에서 크게 문제가 되는 데, 경우에 따라서는 콘크리트 블록의 내외부 온도차가 50°C 이상이 될 수도 있다. 이러한 온도변화는 콘크리트의 내구성과 재료역학적 성질 등에 영향을 미친다. 즉 온도변화는 구속에 의한 온도 균열을 발생시키고 높은 온도에 노출된 콘크리트의 미세구조를 변화시킨다. 따라서 실험실에서 상온으로 양생한 시료의 강도는 이러한 구조물 내부의 재료역학적인 특성을 제대로 모사할 수 없다.⁽¹⁾

콘크리트의 재료역학적 성질들 사이의 관계를 나타내는 기존의 규정식들은 대부분 상온상태에서 양생한 재령 28일 콘크리트의 실험결과들을 바탕으로 하고 있다. 그러나 근래에 들어 경제적인 고려와 기술의 발전으로 건설공기가 단축되고 있어 초기재령 콘크리트의 재료역학적 성질에 관한 연구의 필요성이 점점 중대되고 있는 상황이다. 구조물의 중요 부분에 대한 재료역학적 성질을 예측하는 것은 거푸집의 제거 시기, 프리스트레싱 시기, 구조물의 균열예측 등과 관련하여 매우 중요한 요소가 되고 있다.

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

5종 시멘트가 많이 사용되는 원자력 발전소 격납 구조물은 구조물의 특성상 구조물 내부의 기밀성이 매우 중요한데 이러한 기밀성에 큰 영향을 미치는 것이 초기재령 콘크리트에 발생하는 균열이다. 이러한 콘크리트의 초기균열 발생 여부를 예측하기 위해서는 콘크리트의 양생온도에 따른 탄성계수, 압축강도 및 인장강도 등의 재료역학적 물성치를 알아야 한다.

이 연구에서는 온도변화에 따른 초기재령 콘크리트의 재료역학적 성질을 파악하기 위한 실험을 수행하고 그 특성을 파악하고자 하였다. 또한 콘크리트의 재료역학적 성질들 사이의 관계를 나타내는 기존의 규정식들이 시멘트의 종류와 양생온도의 변화에도 유효성을 확보하고 있는지 고찰하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험변수

실험변수는 시멘트의 종류, 물/시멘트비, 양생온도로 나눌 수 있다. 이 실험변수들을 나타내면 표 1과 같다.

표 1. 실험변수

시멘트의 종류	물/시멘트비(%)	단위시멘트량(kg/m ³)	양생온도(℃)
1종, 5종	40	450	10, 23, 35, 50
	50	360	10, 23, 35, 50
5종+플라이애쉬	40	385(플라이애쉬 68)	10, 23, 35, 50

2.2 배합설계

표 2는 이 실험에 사용한 콘크리트의 배합설계표이다.

표 2. 배합설계

배합명	물/시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위 사용량 (kg/m ³)						
			물	결합재		잔골재	굵은 골재	혼화제	
				시멘트	플라이애쉬			AE제	감수제
1종	40	39	181	452	-	630	989	0.023	2.26
5종	50	42	181	362	-	707	989	0.018	1.81
5종+플라이애쉬	40	38	181	385	68	608	989	0.023	2.23

2.3 실험방법

먼저 콘크리트를 1회용 몰드를 사용하여 타설하였다. 공시체를 각 실험온도로 설정된 항온항습조 내부에 넣어 1일동안 양생한 후에 공시체를 항온항습조에서 꺼내어 탈형하였다. 탈형한 공시체들은 비닐로 싸서 외기와의 수분이동을 차단한 후 다시 항온항습조안에 넣었다. 각 실험시점마다 공시체들을 항온항습조에서 꺼내어 실험을 실시하였으며, 모든 실험은 적어도 3개의 $\phi 100 \times 200$ mm 공시체에 대해 동일하게 실험을 수행하여 그 값들을 평균하였다. 압축강도는 KS F 2405에 따라 실험을 수행하였고,

조깅인장강도는 KS F 2423을, 탄성계수는 KS F 2438에 제시된 시험법에 따라 실험을 수행하였다. 이때 압축강도와 탄성계수 실험전에 공시체의 상하면을 연마기로 연마한 다음에 실험을 수행하였다. 탄성계수는 길이 60mm의 strain gage를 사용하여 변형도를 측정하였으며, 표 2의 배합에 대해 재령 1, 3, 7, 28일에서 실험을 수행하였다.

3. 실험결과

3.1 압축강도

3.1.1 1종 시멘트

[그림 1] (a)는 물/시멘트비가 40%이고 단위시멘트량이 $450\text{kg}/\text{m}^3$ 일 때의 1종 시멘트 콘크리트의 양생온도에 따른 압축강도 변화추이를 나타내고 있고, [그림 1] (b)는 물/시멘트비가 50%이고 단위시멘트량이 $360\text{kg}/\text{m}^3$ 일 때의 양생온도에 따른 실험결과이다.

물/시멘트비에 관계없이 양생온도가 증가함에 따라 재령 3일까지의 초기재령 압축강도가 증가함을 볼 수 있다. 그러나 재령 28일에서는 23°C 로 양생한 시료가 35°C 나 50°C 로 양생한 시료보다 압축강도가 커진다. [그림 1] (a)에서 보는 바와 같이 재령 28일의 압축강도가 10°C 로 양생한 시료가 가장 크고 그 다음이 23°C , 35°C , 50°C 순이다. 이러한 강도순서는 재령 1일 강도 순서와 정반대이다. 타설 초기에 양생온도가 높을수록 초기재령 압축강도는 커지지만 장기재령으로 갈수록 그 경향은 역전되어 양생온도가 낮을수록 압축강도가 커지게 되는 경향을 보이는데, 이러한 현상을 'Cross over' 효과라고 부른다.

3.1.2 5종 시멘트

[그림 2] (a)는 5종 시멘트 콘크리트의 물/시멘트비가 40%이고 단위시멘트량이 $450\text{kg}/\text{m}^3$ 일 때의 양생온도에 따른 압축강도 변화추이를 나타내고 있다. [그림 2] (b)는 물/시멘트비가 50%이고 단위시멘트량이 $360\text{kg}/\text{m}^3$ 일 때의 양생온도에 따른 실험결과이다.

물/시멘트비가 40%일 때는 양생온도가 증가함에 따라 재령 7일까지의 초기재령의 압축강도가 증가함을 볼 수 있다. 그러나 재령 28일에서는 23°C 로 양생한 시료가 35°C 로 양생한 시료보다 압축강도가 커진다. 5종 시멘트 콘크리트의 경우 이러한 현상은 물/시멘트비가 50%일 때 좀 더 확연하게 드러나는데, [그림 2] (b)에서 보는 바와같이 재령 28일의 압축강도가 양생온도 23°C 일 때에 가장 크고 그 다음이 35°C , 50°C 순이다. 물/시멘트비가 40%일 때도 좀 더 장기재령으로 가면 물/시멘트비가 50%일 때와 같이 23°C 의 양생온도일 때 압축강도가 가장 크고 그 다음으로 35°C , 50°C 일 때의 압축강도가 클 것으로 사료된다. 그리고 재령이 더 경과하면 압축강도는 양생온도가 10°C 일 때가 가장 크고 23°C , 35°C , 50°C 순으로 양생온도가 증가할수록 강도는 감소할 것이다. 즉 1종 시멘트 콘크리트와 마찬가지로 초기재령의 양생온도가 높을수록 초기재령의 압축강도는 커지지만 장기재령으로 갈수록 그 경향은 역전되어 양생온도가 낮을수록 압축강도가 커지게 되는 경향을 보이게 될 것이다. 그러나 이러한 'Cross over' 효과가 1종 시멘트 콘크리트만큼 분명하지는 않고 일찍 일어나지도 않았다.

3.1.3 5종 시멘트+플라이애쉬

[그림 3]은 물/시멘트비가 40%인 5종 시멘트+플라이애쉬 콘크리트의 양생온도에 따른 압축강도 변화추이를 나타내고 있다. 양생온도가 증가함에 따라 재령 7일까지의 초기재령의 압축강도가 증가함을 볼 수 있다. 그러나 재령 28일에서는 10°C 로 양생한 시료가 23°C 로 양생한 시료보다 압축강도가 커진다. 앞의 5종 시멘트 콘크리트와 마찬가지로 1종 시멘트 콘크리트보다는 양생온도에 따른 'Cross over' 효과가 뚜렷하지 않지만 재령이 경과할수록 그 효과가 발현될 것으로 예측된다. 5종 시멘트 콘크리트와 5종 시멘트+플라이애쉬 콘크리트가 양생온도에 따른 강도발현현상이 1종 시멘트 콘크리트와 다르게 나타나는 것은 시멘트의 특성상 그 강도발현속도가 늦기 때문인 것으로 사료된다.

4. 실험결과와 분석

4.1 압축강도와 쪼갬인장강도

1종 및 5종 시멘트 콘크리트와 5종+플라이애쉬 콘크리트의 압축강도 및 쪼갬인장강도 실험결과를 여러 압축강도-쪼갬인장강도 모델식들과 실험결과들과 비교해 보았다. [그림 4]에 나타난 바와 같이 시멘트의 종류의 차이는 압축강도와 쪼갬인장강도 관계에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

다음의 세가지 압축강도-쪼갬인장강도 모델식들⁽²⁾과 실험결과를 비교하였다.

$$\text{ACI 318-95 모델식} \quad f_t' = 1.741 (f_c')^{0.5} \quad (1.1)$$

$$\text{ACI 363-R92 모델식} \quad f_t' = 1.96 (f_c')^{0.5} \quad (210 \text{ kg/cm}^2 < f_c' < 840 \text{ kg/cm}^2) \quad (1.2)$$

$$\text{Oluokun 모델식} \quad f_t' = 0.599 (f_c')^{0.69} \quad (1.3)$$

여기서, f_t' = 쪼갬인장강도 (kg/cm^2)

f_c' = 압축강도 (kg/cm^2)

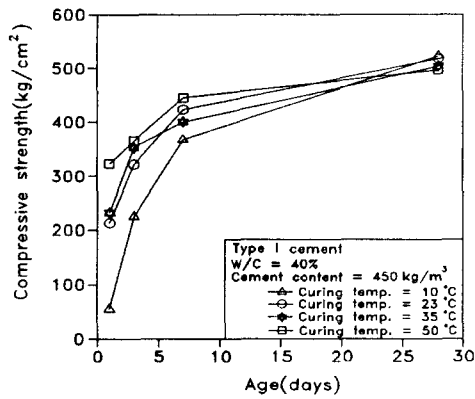
세 가지 예측모델식과 실험결과를 비교하면 모델식들이 쪼갬인장강도를 작게 예측하고 있음을 알 수 있다. 또한 기존의 다른 연구자들의 실험결과들과 본 연구의 실험결과를 비교해 보면 압축강도 200kg/cm^2 이상에서 본 연구의 실험결과가 다른 연구자들의 실험결과보다 조금 크다. 전체 실험결과와 세가지 모델식들을 비교해 보면 곡선의 형태상 Oluokun의 모델식이 실험결과들과 유사하다. ACI 318-95식은 저강도에서 쪼갬인장강도를 과대 평가하고 고강도에서는 쪼갬인장강도를 과소 평가한다. 본 논문의 연구결과와 기존의 연구결과들을 종합하여 전체 강도구간에서 적용할수 있는 새로운 모델식을 제시하면 다음과 같다.

$$f_t' = 0.7 (f_c')^{0.68} \quad (1.4)$$

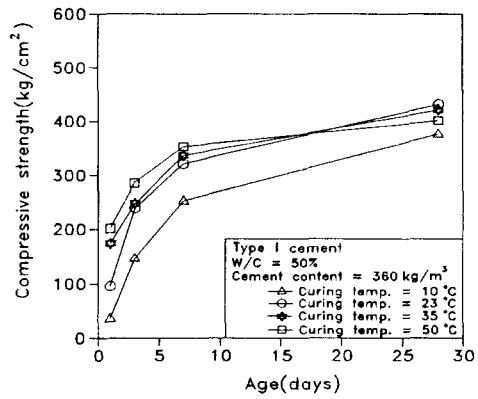
본 논문의 실험결과들로만 모델식을 제시하는 것보다 기존의 연구결과들을 종합하여 모델식을 작성하여 좀 더 일반화된 모델식을 만들었다. 또한 실험 쪼갬인장강도가 기존의 연구결과보다 크기 때문에 모든 연구결과들을 종합하여 제시된 모델식의 쪼갬인장강도는 실제 거동의 값보다 안전측일 수 있다.

4.2 압축강도와 탄성계수

먼저 1종 및 5종 시멘트 콘크리트와 5종+플라이애쉬 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수 실험결과를 여러 압축강도-탄성계수 모델식들과 비교해 보았다. 기존의 모델식들은 건조 단위 중량이 2346kg/m^3 (145lb/ft^3), 양생온도가 23°C 일 때를 기준으로 제시된 것이다. 가장 널리 알려진 모델식은 다음과 같은 형태의 식이다. ACI 318-95에서 추천된 식으로 가장 간단하여 널리 쓰이는 모델식이다.

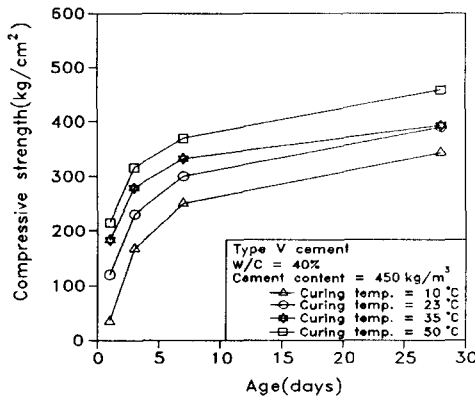


(a) 물/시멘트 비 = 40%

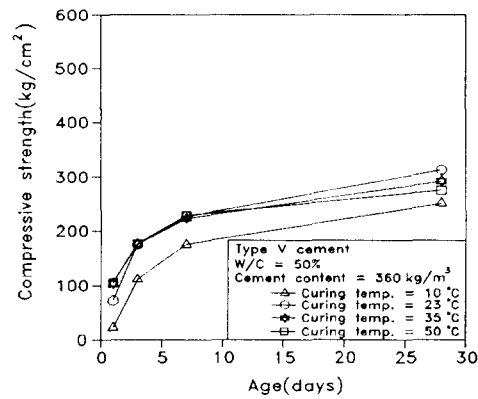


(b) 물/시멘트 비 = 50%

[그림 1] 1종 시멘트 콘크리트의 양생온도에 따른 압축강도의 변화

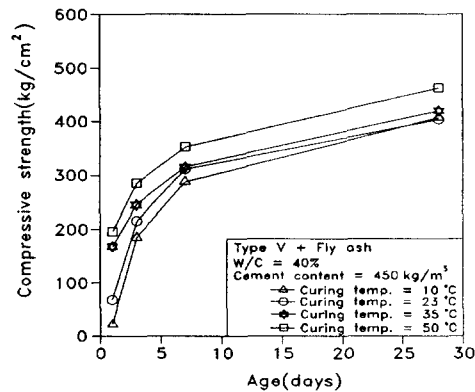


(a) 물/시멘트 비 = 40%

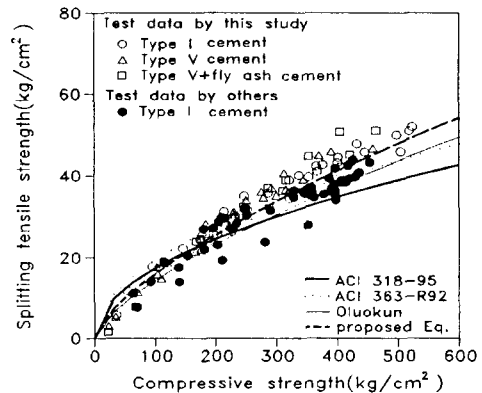


(b) 물/시멘트 비 = 50%

[그림 2] 5종 시멘트 콘크리트의 양생온도에 따른 압축강도의 변화



[그림 3] 5종 시멘트+플라이애쉬 콘크리트의 양생온도에 따른 압축강도의 변화



[그림 4] 압축강도와 쪼갬인장강도

$$E_c = 15000\sqrt{f'_c} \quad (1.5)$$

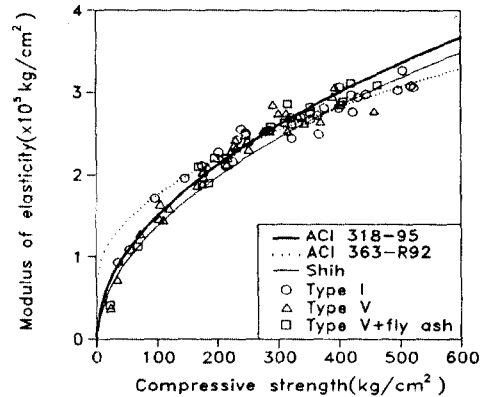
여기서, E_c = 콘크리트의 탄성계수 (kg/cm^2)

f'_c = 압축강도 (kg/cm^2)

그러나, 압축강도가 400kg/cm^2 이상에서는 위와 같은 식이 많은 실험결과들의 거동을 제대로 묘사할 수 없는 것으로 나타나 ACI 363-R92에서는 이와 같은 단점을 극복하기 위해 다음과 같은 새로운 모델식을 제시하였다.

$$E_c = 10607\sqrt{f'_c} + 70320 \quad (1.6)$$

$(210 \text{ kg/cm}^2 < f'_c < 840 \text{ kg/cm}^2)$



[그림 5] 압축강도와 탄성계수

최근에 Shih 등은 자신의 실험결과와 기존의 실험치들을 바탕으로 다음과 같은 새로운 모델식을 제시하였다.

$$E_c = 14585\sqrt{f'_c} - 8438 \quad (210 \text{ kg/cm}^2 < f'_c < 840 \text{ kg/cm}^2) \quad (1.7)$$

[그림 5]는 위의 세가지 모델식과 실험결과를 나타낸 것이다. 모든 양생온도의 실험결과들을 구분없이 그림에 나타내었다. [그림 5]에 나타난 바와 같이 300kg/cm^2 이상의 강도에서는 ACI 363-R92 모델식이 실험결과와 잘 일치하고 200kg/cm^2 이하의 강도에서는 ACI 318-95 모델식이 실험결과와 잘 일치한다. 250kg/cm^2 이하의 강도에서는 ACI 318-95 모델식을, 250kg/cm^2 이상의 강도에서는 ACI 363-R92 모델식을 사용한 예측결과와 실험결과를 비교하면 결정계수가 0.977 정도로 실험결과와 예측값이 일정오차안에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 250kg/cm^2 이하의 강도에서는 ACI 318-95 모델식을, 250kg/cm^2 이상의 강도에서는 ACI 363-R92 모델식을 사용하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

5. 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) 압축강도와 쪼갬인장강도, 압축강도와 탄성계수 사이의 관계를 나타내는 가장 적합한 모델식들을 제시하였다. 이 모델식들은 시멘트의 종류에 관계없이 일정수준의 오차범위내에서 사용될 수 있다.

참고문헌

1. Tank, R. C. and Carino, N. J., "Rate Constant Functions for strength Development of Concrete," ACI Journal, Vol.88, No. 1, 1991, p.p.74~83
2. Gardner, N. J., "Effect of Temperature on the Early-Age Properties of Type I, Type III, and Type I/Fly Ash Concretes," ACI Journal, Vol. 87, No. 1, 1991, p.p.68~78