

콘크리트의 재료역학적 성질에 대한 양생온도와 재령의 효과(I)

-실험결과 및 분석을 중심으로-

Effect of Curing Temperature and Aging
on the Mechanical Properties of Concrete (I)

-Experimental Results and Analysis-



한상훈*

Han, Sang-Hun



김진근**

Kim, Jin-Keun



송영철***

Song, Young-Chul

ABSTRACT

This paper reports the effects of curing temperature and aging on the strength and the modulus of elasticity. In order to determine the strength and the modulus of elasticity with curing temperature and aging, experimental and analytical methods are adopted.

The tests of 480 cylinders are carried out for type I, V and V with 15 percent replacement of fly ash cement concretes, which are cured at isothermal conditions of 10, 23, 35 and 50 °C. And the concrete cylinders are tested at the ages of 1, 3, 7 and 28 days.

According to the experimental results, the concrete subjected to high temperature at early ages attains higher early-age compressive and splitting tensile strength but eventually attains lower later-age compressive and splitting tensile strength. Even if modulus of elasticity has the same tendency, the variation of modulus of elasticity with curing temperature is smaller than that of compressive strength. Based on these experimental results, the relationships among compressive strength, modulus of elasticity and splitting tensile strength are proposed considering the effects of curing temperature, aging and cement type.

Keywords : modulus of elasticity, strength, curing temperature, aging, cement type

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

*** 정회원, 한국전력공사 전력연구원, 책임연구원

· 본 논문에 대한 토의를 2001년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2001년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

시멘트 수화열에 의한 콘크리트 구조물 내부의 온도상승과 계절적 요인에 의한 콘크리트 구조물 주변의 온도변화는 콘크리트의 내구성과 재료역학적 성질에 큰 영향을 미친다. 콘크리트의 재료역학적 성질은 거푸집의 제거 시기, 프리스트레싱 도입의 시기, 구조물의 균열예측 등과 관련하여 매우 중요한 요소이기 때문에 이러한 온도변화에 의한 콘크리트의 성질변화를 파악할 필요가 있다. 특히, 5종 시멘트가 많이 사용되는 원자력 발전소 격납 구조물은 구조물의 특성상 기밀성이 매우 중요한데 이러한 기밀성에 큰 영향을 미치는 것이 콘크리트에 발생하는 균열이다. 이러한 콘크리트의 균열발생 여부를 예측하기 위해서는 콘크리트 주변의 온도변화에 따른 탄성계수와 쪼갠인장강도를 예측하는 것이 필요하다.⁽¹⁾⁽²⁾

양생온도에 따른 콘크리트의 압축강도 변화에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 이루어졌지만 탄성계수와 쪼갠인장강도에 대한 연구는 많지 않다. 또한 이러한 탄성계수와 쪼갠인장강도를 온도와 재령에 따라 예측하는 모델식을 제시하거나 기존의 여러 설계기준에서 제시하는 압축강도와 탄성계수 및 쪼갠인장강도의 상관관계식들에 대한 온도와 재령의 효과를 검토한 연구는 그 숫자가 더욱 적다. 따라서 이 연구에서는

온도변화에 따른 콘크리트의 탄성계수와 쪼갠인장강도 변화를 파악하기 위한 실험을 1종 및 5종 시멘트와 5종 시멘트+플라이애쉬 콘크리트에 대해 수행하고 이를 바탕으로 양생온도와 재령에 따른 탄성계수와 쪼갠인장강도의 변화를 고찰하고자 하였다. 또한 압축강도와 탄성계수 및 쪼갠인장강도의 관계를 나타내는 기존의 모델식들이 시멘트의 종류와 양생온도 및 재령의 변화에도 그 유효성을 확보하고 있는지 고찰하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험변수

실험변수는 시멘트의 종류, 물/시멘트비, 양생온도로 나눌 수 있고 이 실험변수들은 Table 1과 같이 나타낼 수 있다.

2.2 실험재료

실험에 사용된 시멘트, 잔골재, 굵은 골재의 물리적 성질은 Table 2에 제시되어 있다.

2.3 배합설계

Table 3은 이 실험에 사용한 콘크리트의 배합설계표이다.

Table 1 Test variables

Cement Type	W/B	Binder (kgf/m ³)		Curing temperature (°C)
		Cement	Fly ash	
Type I, V	0.40	452	-	10, 23, 35, 50
	0.50	362	-	10, 23, 35, 50
Type V+Fly ash	0.40	385	68	10, 23, 35, 50

Table 2 Material properties

	Type I cement	Type V cement	Fly ash	Fine aggregate	Coarse aggregate
Type	-	-	-	River sand	Crushed stone
Specific surface (cm ² /g)	3315	3210	4300	-	-
Specific gravity	3.15	3.15	2.10	2.55	2.58
Fineness modulus	-	-	-	2.95	7.23
Compressive strength at 28 days (kgf/cm ²)	400	360	-	-	-

Table 3 Basic mixture proportions

Cement type	W/B	S/A	Unit weight (kgf/m ³)						
			W	B		S	G	Admixture	
				C	FA			A.E. agent (B×%)	Superplasticizer (B×%)
Type I, V	0.40	0.39	181	452	-	630	989	0.023	2.26
Type I, V	0.50	0.42	181	362	-	707	989	0.018	1.81
Type V+Fly ash	0.40	0.38	181	385	68	608	989	0.023	2.26

2.4 실험방법

먼저 1회용 몰드를 사용하여 콘크리트를 타설하였다. 타설된 공시체들을 각 실험온도로 설정된 항온항습조 내부에 넣어 1일동안 양생한 후, 공시체를 항온항습조에서 꺼내어 탈형하였다. 탈형한 공시체들은 비닐로 싸서 외기와의 수분이동을 차단하고 다시 실험온도로 설정된 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. 압축강도와 탄성계수 실험전에 공시체의 상하면은 연마기로 연마하였으며 탄성계수 실험시의 변형률은 길이 60 mm의 변형률 게이지를 사용하여 측정하였다. Table 3의 배합을 사용하였고 실험은 재령 1, 3, 7, 28일에서 수행하였다. 압축강도는 KS F 2405 규격(콘크리트의 압축강도 시험방법)을, 탄성계수와 조깅인장강도는 각각 KS F 2438 규격(콘크리트 원주공시체의 정탄성계수 및 푸아송비 시험방법)과 KS F 2423 규격(콘크리트의 인장강도 시험방법)에 따라 실험을 수행하였다.

3. 실험결과

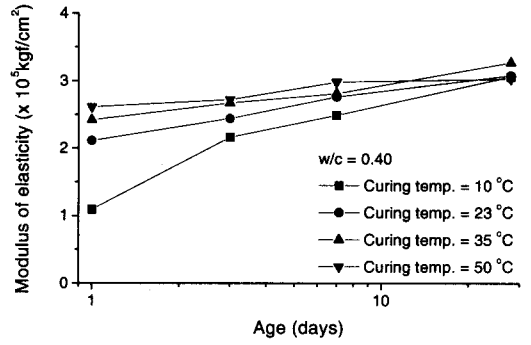
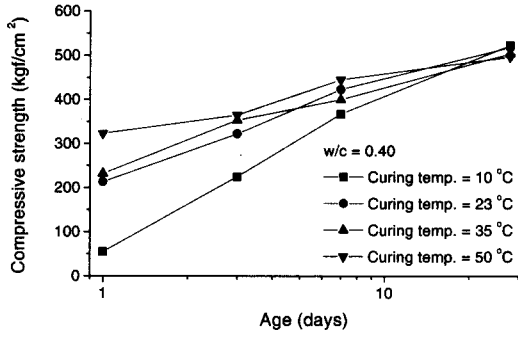
3.1 1종 시멘트

Fig. 1(a)는 물/시멘트비가 0.40일 때의 1종 시멘트 콘크리트의 양생온도에 따른 압축강도와 탄성계수의 변화를 나타내고 있다. 양생온도가 증가함에 따라 재령 3일까지의 초기재령의 압축강도가 증가함을 볼 수 있다. 그러나, 재령 7일에서는 23 °C로 양생한 시료가 35 °C로 양생한 시료보다 압축강도가 커지고 재령

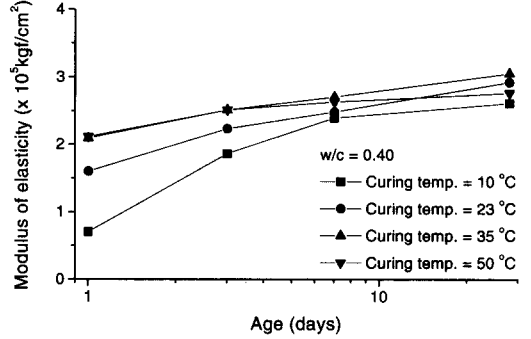
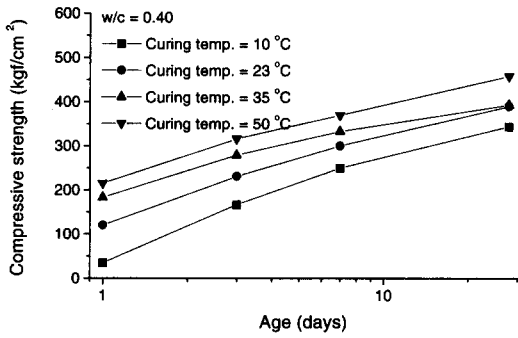
28일의 압축강도는 10 °C로 양생한 시료가 가장 크고 그 다음이 23 °C, 35 °C, 50 °C 순이다. 이러한 강도 순서는 재령 1일 강도 순서와 정반대이다. 타설 초기에는 양생온도가 높을수록 압축강도가 커지지만 장기재령으로 갈수록 이러한 경향은 역전되어 양생온도가 낮을수록 강도가 커지게 되는 현상을 보이는데, 이것을 'Crossover' 효과라고 부른다. 탄성계수의 경우도 그림에 나타난 바와 같이 재령 1일에서는 양생온도가 커짐에 따라 탄성계수도 커지지만 재령이 경과할수록 낮은 온도로 양생한 콘크리트의 탄성계수가 높은 온도로 양생한 콘크리트의 탄성계수보다 커진다. 그러나 이러한 'Crossover' 효과는 압축강도만큼 뚜렷하게 나타나지는 않는다. 이것은 압축강도와 탄성계수의 재령에 따른 발현양상이 다른 데에서 기인한 것으로 사료된다. 압축강도는 재령 3일의 강도가 재령 28일 강도의 약 50~60 퍼센트 수준이지만 탄성계수의 경우는 재령 28일 값의 80 퍼센트 이상이다. 따라서 탄성계수의 경우는 장기재령에서 양생온도에 따른 값의 차이가 크지 않고 이로 인해 'Crossover' 효과도 압축강도처럼 뚜렷하지 않다. 1종 시멘트 콘크리트의 나머지 실험 결과들은 Table 4에 제시하였다. Table 4에 나타난 바와 같이 그 정도의 차이는 있지만 대부분의 실험결과에서 'Crossover' 효과를 관찰할 수 있다.

3.2 5종 시멘트와 5종 시멘트+플라이애쉬

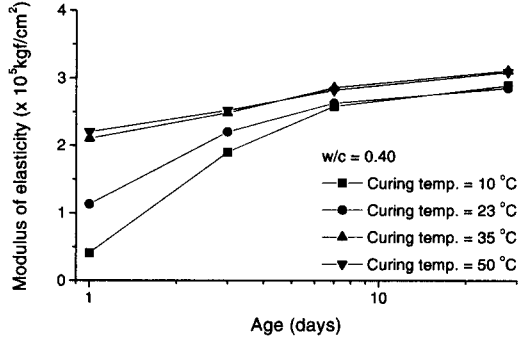
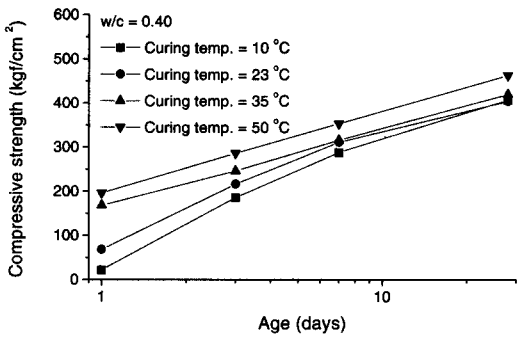
Fig. 1(b)와 (c)는 5종 시멘트 콘크리트와 5종 시멘트+플라이애쉬 콘크리트의 압축강도와 탄성계수에 대한 실험결과이다. 압축강도의 경우는 그림에 나타난 바와 같이 재령 7일까



(a) Type I cement



(b) Type V cement



(c) Type V cement + Fly ash

Fig. 1 Compressive strength and modulus of elasticity

지는 양생온도가 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 현상을 보이지만 재령 28일에서는 23 °C로 양생한 시료의 강도가 35 °C로 양생한 강도보다 더 큰 증가율을 나타내고 있음을 알 수 있다. 탄성계수의 경우도 압축강도와 마찬가지로 재령 7일까지는 양생온도가 증가할수록 그 값이 증가하지만 재령 28일에서는 23 °C로 양생한 시료의 탄성계수의 증가량이 35 °C로 양

생한 시료의 증가량보다 커짐을 알 수 있다. 그러나 전체적으로 5종 시멘트 콘크리트의 압축강도와 탄성계수가 1종 시멘트 콘크리트보다는 양생온도에 따른 'Crossover'효과가 뚜렷하지 않음을 알 수 있다. 이것은 5종 시멘트 콘크리트와 5종 시멘트+플라이애쉬 콘크리트의 양생온도에 따른 강도와 탄성계수의 발현양상이 1종 시멘트 콘크리트와 다른 데에서 기인한 것으로

Table 4 Experimental results of type I cement

W/C = 0.40												
Temp	Compressive strength (kgf/cm ²)				Splitting tensile strength (kgf/cm ²)				Modulus of elasticity ($\times 10^3$ kgf/cm ²)			
	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days
10 °C	55	225	367	523	12	26	41	52	1.09	2.16	2.49	3.06
23 °C	213	322	423	518	31	35	43	51	2.11	2.44	2.76	3.08
35 °C	232	353	400	504	30	40	43	46	2.42	2.67	2.81	3.27
50 °C	323	365	445	497	36	42	46	50	2.61	2.72	2.98	3.03

W/C = 0.50												
Temp.	Compressive strength (kgf/cm ²)				Splitting tensile strength (kgf/cm ²)				Modulus of elasticity ($\times 10^3$ kgf/cm ²)			
	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days
10 °C	36	146	252	376	6	22	32	43	0.93	1.96	2.39	2.81
23 °C	96	239	321	432	18	30	39	48	1.72	2.55	2.69	2.94
35 °C	174	247	337	421	25	35	40	43	2.11	2.50	2.70	2.97
50 °C	202	286	353	401	26	36	40	45	2.27	2.54	2.75	3.07

Table 5 Experimental results of type V cement

W/C = 0.40												
Temp.	Compressive strength (kgf/cm ²)				Splitting tensile strength (kgf/cm ²)				Modulus of elasticity ($\times 10^3$ kgf/cm ²)			
	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days
10 °C	35	167	250	344	5	21	34	40	0.70	1.86	2.39	2.61
23 °C	120	231	300	390	18	30	35	46	1.60	2.23	2.48	2.92
35 °C	183	300	333	393	28	35	37	41	2.09	2.51	2.70	3.05
50 °C	215	390	370	458	28	36	45	46	2.11	2.51	2.63	2.76

W/C = 0.50												
Temp.	Compressive strength (kgf/cm ²)				Splitting tensile strength (kgf/cm ²)				Modulus of elasticity ($\times 10^3$ kgf/cm ²)			
	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days
10 °C	23	111	175	252	3	15	22	30	0.36	1.44	1.88	2.29
23 °C	72	175	227	313	11	25	31	40	1.27	2.02	2.40	2.73
35 °C	104	176	223	292	18	25	28	37	1.45	2.03	2.27	2.84
50 °C	105	177	229	276	16	26	31	36	1.63	1.96	2.33	2.51

Table 6 Experimental results of type V cement + Fly ash

W/C = 0.40												
Temp.	Compressive strength (kgf/cm ²)				Splitting tensile strength (kgf/cm ²)				Modulus of elasticity ($\times 10^3$ kgf/cm ²)			
	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days
10 °C	22	186	288	407	2	24	32	42	0.41	1.90	2.58	2.89
23 °C	68	216	311	404	8	28	36	51	1.13	2.20	2.63	2.85
35 °C	168	246	316	420	24	33	39	45	2.10	2.48	2.86	3.11
50 °C	196	286	353	463	26	37	45	51	2.20	2.52	2.82	3.09

시멘트의 특성상 그 강도와 탄성계수의 발현속도가 1종 시멘트보다 조금 늦기 때문인 것으로 사료된다. Table 5에 물/시멘트비가 0.50일 때의 5종 시멘트 콘크리트의 강도와 탄성계수에 대한 실험값이 제시되어 있는데 양생온도와 재령에 따른 그 값의 변화양상이 물/시멘트비가 0.40인 경우와 유사함을 알 수 있다.

4. 실험결과와 분석

4.1 탄성계수와 압축강도 상관관계

탄성계수를 추정하는 간단한 방법 중의 하나가 압축강도와 탄성계수의 상관관계를 수립한 후 압축강도를 바탕으로 탄성계수를 추정하는 방법이다.

Table 7 Regression results

Constant	Cement type			Curing temperature (°C)				Age (days)			
	Type I	Type V	Type V + Fly ash	10	23	35	50	1	3	7	28
$E_c = a(f_{cu})^b$											
a	26,340	14,670	14,100	13,510	21,940	21,620	27,880	11,380	19,460	32,460	42,660
b	0.397	0.500	0.510	0.509	0.430	0.438	0.388	0.556	0.450	0.362	0.320
r	0.974	0.973	0.983	0.984	0.972	0.968	0.960	0.977	0.936	0.884	0.822
$f_{sp} = a(f_{cu})^b$											
a	0.868	0.506	0.327	0.414	0.563	1.184	0.689	0.406	0.502	0.660	1.300
b	0.652	0.748	0.825	0.776	0.731	0.597	0.695	0.791	0.750	0.701	0.588
r	0.987	0.985	0.984	0.993	0.980	0.978	0.981	0.981	0.966	0.951	0.900

r : coefficient of determination

그러나 이러한 상관관계를 구하기 위해서 사용한 대부분의 실험값들은 1종 시멘트 콘크리트를 상온에서 양생하여 28일 재령에서 실험한 결과들이다. 따라서 시멘트의 종류가 다르거나 양생온도와 재령이 변화하면 이러한 탄성계수와 압축강도의 상관관계가 다른 형태를 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 시멘트의 종류, 재령, 양생온도에 따라서 탄성계수와 압축강도의 상관관계가 어떤 특성을 나타내는지 고찰해 보았다.

Fig. 2는 앞에서 실험한 콘크리트의 압축강도와 탄성계수를 시멘트의 종류, 양생온도, 재령에 따라 나타낸 것이고 Fig. 3은 이 결과들을 다음의 식을 이용하여 회귀분석한 것이다. 식 (1)은 기존의 여러 설계기준에서 제시한 모델식을 바탕으로 한 것이다.

$$E_c = a(f_{cu})^b \quad (1)$$

여기서, E_c = 탄성계수 (kgf/cm²)

f_{cu} = 압축강도 (kgf/cm²)

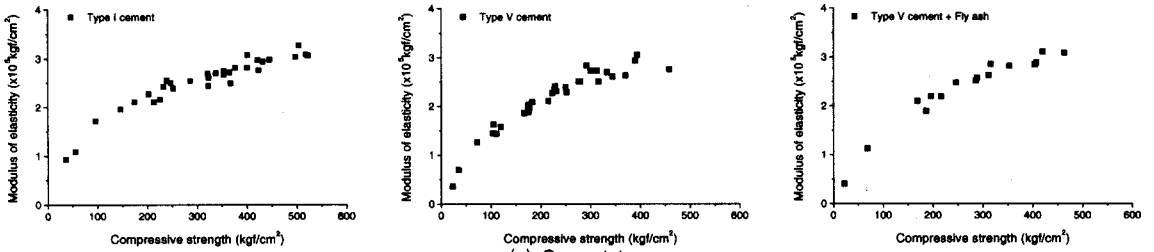
a, b = 비례상수

Fig. 3의 회귀분석 곡선들을 살펴보면 각 영향인자가 탄성계수와 압축강도의 상관관계에 미치는 영향을 좀 더 편리하게 살펴볼 수 있다. Fig. 2(a)의 실험값 분포를 고려해 보면 시멘트 종류에 따른 회귀분석 곡선들이 100 kgf/cm² ~ 450 kgf/cm²의 압축강도 구간에서 유효함을 알 수 있다. 이 압축강도 구간 이외의 부분에서는 회귀분

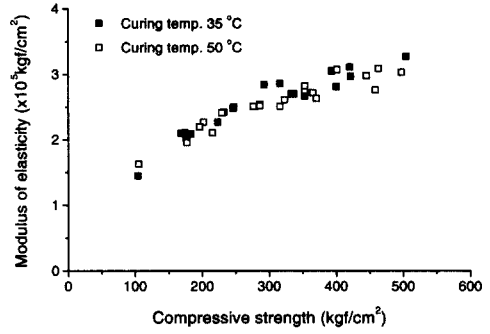
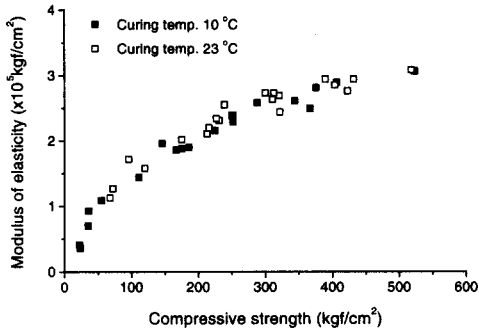
석을 위한 실험값이 적어 그 회귀분석 곡선들의 값을 신뢰할 수 없다. 이 강도구간에서의 시멘트 종류에 따른 회귀분석 곡선들의 차이를 Fig. 3(a)에서 살펴보면 그 값들의 차이가 ±5 퍼센트를 넘지 않는다. 즉 시멘트의 종류가 탄성계수와 압축강도의 상관관계에 거의 영향을 미치고 있지 않음을 알 수 있다. 또한 Fig. 3(b)는 양생온도에 따른 탄성계수와 압축강도의 상관관계의 회귀분석 곡선들이다. 그림에 나타난 바와 같이 10 °C의 양생온도인 경우를 제외하면 회귀분석 곡선들이 거의 일치함을 알 수 있다. 10 °C로 양생한 경우도 회귀분석 곡선들의 유효압축강도 범위(그림에서 수직으로 그려진 점선구간)에서는 다른 양생온도로 실험한 결과와 큰 차이를 나타내지 않는다. Fig. 3(c)는 재령에 따른 상관관계 회귀분석 곡선들로 그림에 나타난 바와 같이 유효강도 범위에서 곡선들이 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 유효압축강도 범위(400 kgf/cm² 이하)가 비슷한 재령 1일과 3일에서 실험한 콘크리트들의 회귀분석곡선들이 서로 일치하고 재령 7일과 28일에서 양생한 콘크리트들의 회귀분석곡선들도 200 kgf/cm² 이상의 압축강도에서 거의 일치한다. 따라서 시멘트의 종류, 양생온도, 재령은 콘크리트의 탄성계수와 압축강도의 상관관계에 큰 영향을 미치고 있지 않음을 알 수 있다.

이러한 분석을 바탕으로 전체 실험값들을 이용하여 다음과 같은 회귀분석식을 구하였다.

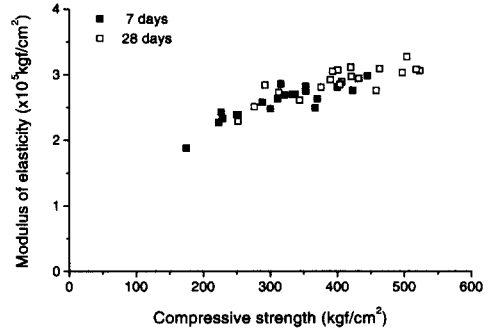
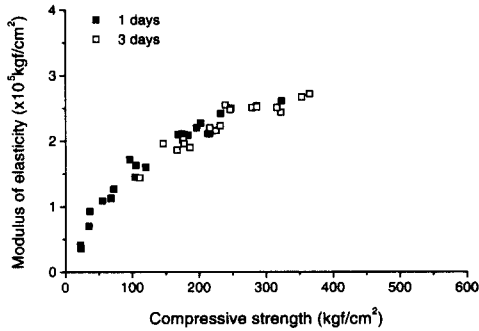
$$E_c = 18,500 f_{cu}^{0.46} \quad (2)$$



(a) Cement type

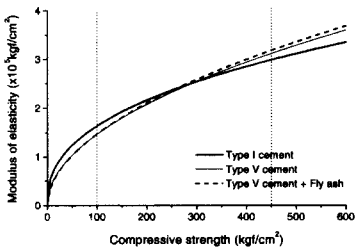


(b) Curing temperature

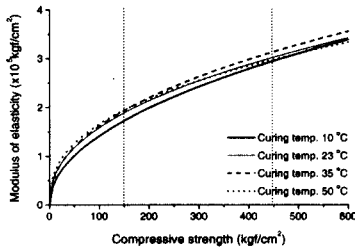


(c) Age

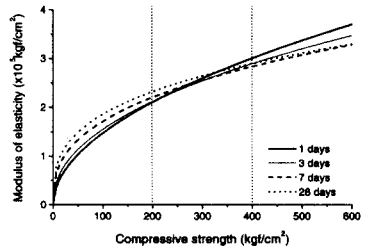
Fig. 2 Comparison of modulus of elasticity and compressive strength



(a) Cement type



(b) Curing temperature



(c) Age

Fig. 3 Regression curves of modulus of elasticity and compressive strength

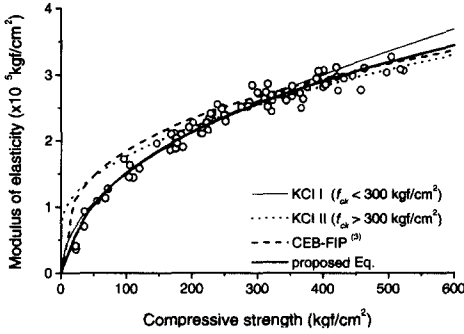


Fig. 4 Prediction curves of modulus of elasticity

Fig. 4에서는 기존의 여러 탄성계수 예측 모델 식들과 본 논문에서 제안한 모델식을 실험값들과 비교하고 있다. 「콘크리트구조 설계기준」의 모델식에서는 압축강도와 탄성계수의 상관관계식에 적용되는 강도가 설계기준강도(f_{ck})이고 CEB-FIP 모델식에서는 평균압축강도(f_{cm})이지만 여기서는 두 모델식에 사용되는 강도가 모두 콘크리트의 압축강도(f_{ck})라고 가정하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 「콘크리트구조 설계기준」 식들과 위의 제안식이 500 kgf/cm²이하의 압축강도에서 거의 유사하고 실험결과를 잘 모델링하고 있음을 알 수 있다. 앞 단락에서 콘크리트의 탄성계수와 압축강도 상관관계식이 시멘트의 종류, 양생온도, 재령에 큰 영향을 받지 않는다는 결과를 제시하였다. 따라서 현재의 「콘크리트구조 설계기준」에서 제시한 탄성계수와 압축강도의 상관관계식을 시멘트의 종류, 재령, 양생온도에 관계없이 사용할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 「콘크리

트구조 설계기준」의 식들과 유사한 결과를 예측하는 본 논문의 제안식 (2)는 2가지 강도구간에서 다른 모델식을 적용해야 하는 「콘크리트구조 설계기준」 식들의 불편함을 해소한 장점이 있다^{(7)~(10)}.

Fig. 5에서는 식 (2)에 의한 예측값이 시멘트의 종류, 양생온도, 재령에 따라 어떤 경향을 보이는지 살펴보았다. Fig. 5(a)는 시멘트의 종류에 따른 실험값과 예측값의 상관관계를 나타내고 있는데 그림에 나타난 바와 같이 1종과 5종 시멘트의 콘크리트의 결정계수가 거의 유사하다. 5종 시멘트+플라이애쉬 콘크리트도 다른 두 종류의 콘크리트와의 결정계수의 차이가 크지 않다. 또한 실험값과 예측값의 오차형태가 시멘트의 종류에 따라 큰 변화가 없다. Fig. 5(b)는 양생온도에 따른 압축강도와 탄성계수의 상관관계를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 양생온도에 따른 결정계수의 차이가 작고 실험값과 예측값의 차이도 한 쪽방향으로 치우쳐져 있지 않아 실험값과 예측값의 상관관계가 양생온도에 따라 크게 변하지 않음을 알 수 있다. Fig. 5(c)는 재령에 따른 실험값과 예측값의 상관관계를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 재령이 증가할수록 결정계수가 줄어들므로 실험값과 예측값의 차이는 재령이 경과할수록 초기재령보다 커진다. 그러나 그 차이가 한 쪽방향으로 치우치지 않아, 예측식이 탄성계수를 과대평가하거나 과소평가한다고 볼 수는 없다.

앞의 내용을 종합해 볼 때, 시멘트의 종류, 재령 및 양생온도는 압축강도와 탄성계수 상관관계에 큰 영향을 주지 않는 것으로 사료된다.

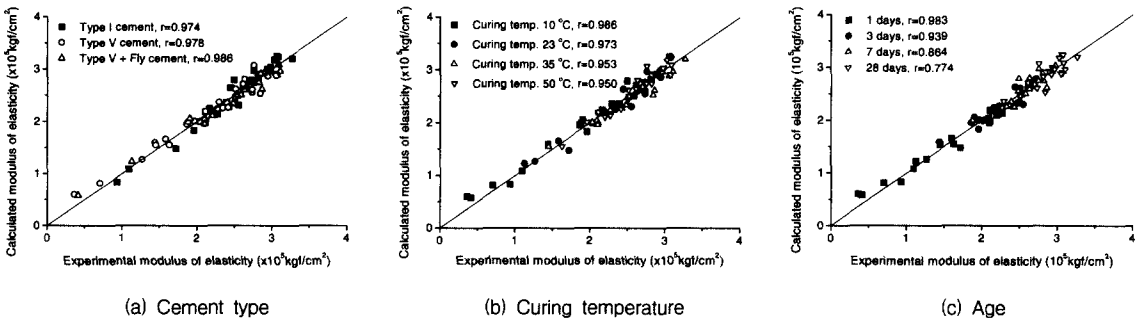


Fig. 5 Experimental and calculated modulus of elasticity

4.2 쪼갬인장강도와 압축강도 상관관계

앞의 탄성계수의 경우와 같이 콘크리트의 쪼갬인장강도를 추정하는 간단한 방법 중의 하나가 압축강도와 쪼갬인장강도의 상관관계를 수립한 후 압축강도를 바탕으로 쪼갬인장강도를 추정하는 방법이다. 이러한 쪼갬인장강도와 압축강도 상관관계에 대해서도 탄성계수와 같이 시멘트의 종류, 재령, 양생온도의 변화에도 그 유효성을 확보하고 있는지 검토해 보았다.

Fig. 6은 앞에서 실험한 콘크리트의 압축강도와 쪼갬인장강도를 시멘트의 종류, 양생온도, 재령에 따라 나타낸 것이고 Fig. 7은 이 결과들을 다음의 식을 이용하여 회귀분석한 것이다. 식 (3)은 기존의 여러 설계기준에서 제시한 모델식을 바탕으로 한 것이다.

$$f_{sp} = a (f_{cu})^b \quad (3)$$

여기서, f_{sp} = 쪼갬인장강도 (kgf/cm²)

f_{cu} = 압축강도 (kgf/cm²)

a, b = 비례상수

Fig. 6(a)의 실험값 분포를 고려해 보면 시멘트 종류에 따른 회귀분석 곡선들이 450 kgf/cm² 이하의 압축강도 구간에서 유효함을 알 수 있다. 이 강도구간에서의 시멘트 종류에 따른 회귀분석 곡선들의 차이를 Fig. 7(a)에서 살펴보면 그 값들의 차이가 크지 않다. 즉 시멘트의 종류가 쪼갬인장강도와 압축강도의 상관관계에 큰 영향을 미치고 있지 않음을 알 수 있다. 또한 Fig. 7(b)는 양생온도에 따른 쪼갬인장강도와 압축강도의 상관관계의 회귀분석 곡선으로 그림에 나타난 바와 같이 유효압축강도 범위(그림에서 수직으로 그어진 점선구간)에서 회귀분석 곡선들이 큰 차이를 보이고 있지 않다. Fig. 7(c)은 재령에 따른 회귀분석 곡선들로 그림에 나타난 바와 같이 유효강도 범위에서 모든 곡선들이 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 유효강도 범위가 비슷한 재령 1일과 3일의 곡선 및 재령 7일과 28일 곡선을 서로 비교하면 전 강도구간에서 각 곡선들이 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 탄성계수와

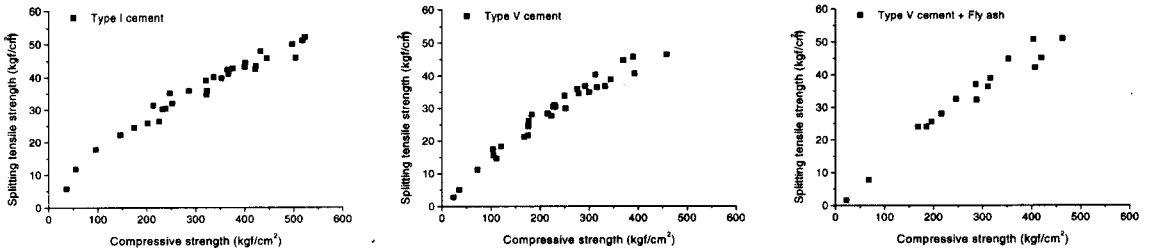
마찬가지로 시멘트의 종류, 양생온도, 재령의 변화는 콘크리트의 쪼갬인장강도와 압축강도의 상관관계에 큰 영향을 미치고 있지 않음을 알 수 있다.

이러한 분석을 바탕으로 전체 실험값들을 이용하여 다음과 같은 회귀분석식을 구하였다.

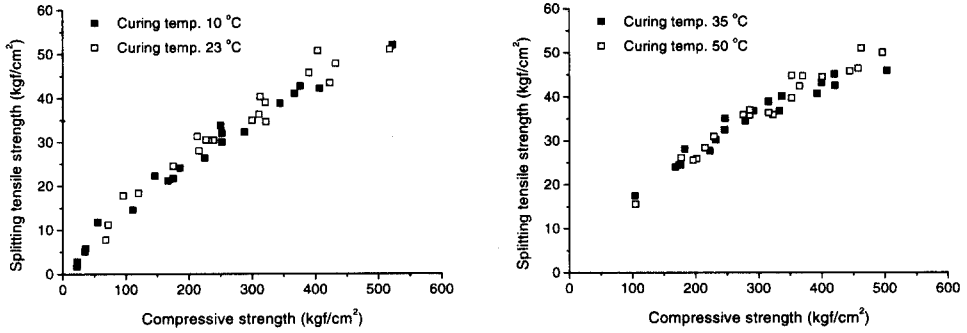
$$f_{sp} = 0.61 f_{cu}^{0.71} \quad (4)$$

Fig. 8에서는 기존의 여러 쪼갬인장강도 예측 모델식들과 본 논문에서 제안한 모델식을 실험값들과 비교하고 있다. ACI 318-95 모델식과 CEB-FIP 모델식은 상관관계식에 사용되는 압축강도가 설계기준강도(f_{ck})이지만 여기서는 두 모델식에 사용되는 강도가 모두 콘크리트의 압축강도(f_{cu})라고 가정하여 Fig. 8에 나타내었다. 또한 Ahmad 와 Shah 모델식과 Oluokun 모델식에서 사용되는 압축강도는 f_{cu} 로 그 상관관계식을 그대로 이용할 수 있다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 ACI 318-95 모델식⁽⁴⁾과 Ahmand와 Shah 모델식⁽⁵⁾은 저강도에서는 쪼갬인장강도를 크게 예측하고 200 kgf/cm² 이상의 압축강도에서는 쪼갬인장강도를 작게 예측한다. Oluokun 모델식⁽⁶⁾과 CEB-FIP 모델식⁽³⁾은 200 kgf/cm² 이하의 압축강도에서는 실험결과에 근접한 쪼갬인장강도를 예측하지만 그 이상의 강도에서는 조금 작게 예측한다. 일반적으로 쪼갬인장강도는 균열의 발생여부를 판단하는 자료로 사용되므로 예측값이 실험값보다 작으면 그 차이만큼의 안전율을 확보할 수 있다. 따라서 Oluokun 모델식과 CEB-FIP 모델식을 이 실험결과와 쪼갬인장강도를 예측하는데 사용해도 별 문제가 없을 것으로 사료된다.

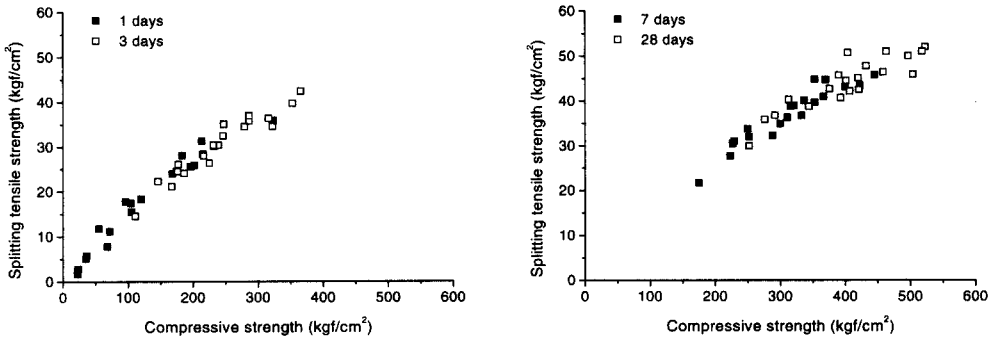
시멘트의 종류, 재령 및 양생온도에 따른 실험값과 식 (4)에 의한 예측값을 비교하면 Fig. 9와 같다. Fig. 9(a)는 시멘트의 종류에 따른 실험값과 예측값의 상관관계를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 시멘트의 종류에 따른 결정계수가 유사하고 오차값의 형태도 별 차이가 없어 실험값과 예측값의 상관관계는 시멘트 종류에 큰 영향이 없음을 알 수 있다. Fig. 9(b)는 양생온도에 따른 실험값과 예측값의 상관관계를 나타내고 있다.



(a) Cement type

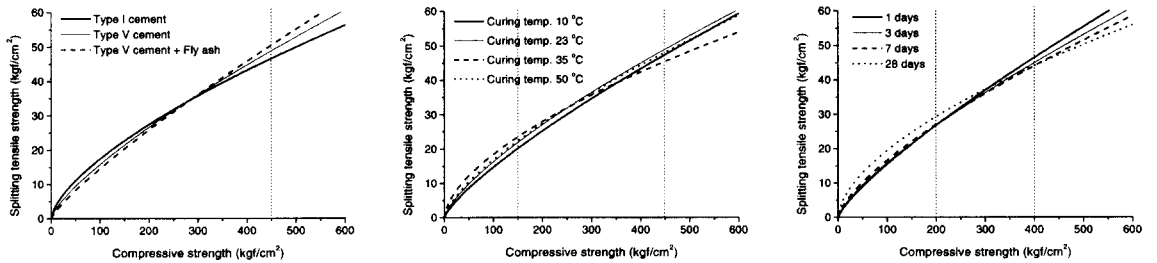


(b) Curing temperature



(c) Age

Fig. 6 Comparison of splitting tensile strength and compressive strength



(a) Cement type

(b) Curing temperature

(c) Age

Fig. 7 Regression curves of splitting tensile strength and compressive strength

5. 결론

양생온도와 재령 및 시멘트의 종류에 따른 콘크리트의 강도와 탄성계수에 대한 실험을 통하여 다음의 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 초기재령의 양생온도가 높을수록 초기재령의 압축강도와 조깅인장강도는 커지지만 장기재령으로 갈수록 그 경향은 역전되어 양생온도가 낮을수록 압축강도와 조깅인장강도가 커지게 되는 경향을 보인다. 탄성계수도 동일한 경향을 나타내지만 압축강도와 조깅인장강도만큼 그 경향이 뚜렷하지는 않았다.
- 2) 탄성계수와 압축강도의 상관관계식은 양생온도와 재령의 변화에 관계없이 사용될 수 있음을 관찰하였다. 또한 시멘트의 종류도 탄성계수와 압축강도의 상관관계식에 큰 영향을 주지 않았다. 강도구간에 따라 2가지를 사용해야 하는 기존 모델식의 단점을 개선한 새로운 모델식을 제안하였다.
- 3) 조깅인장강도와 압축강도의 상관관계식도 탄성계수의 경우와 같이 양생온도와 재령의 변화에 관계없이 사용될 수 있음을 관찰하였고 시멘트의 종류도 조깅인장강도와 압축강도의 상관관계식에 큰 영향을 주지 않았다.

참고문헌

1. Tank, R. C., and Carino, N. J., "Rate Constant Functions for Strength Development of Concrete," ACI Material Journal, Vol. 88, No. 1, 1991, pp. 74-83.

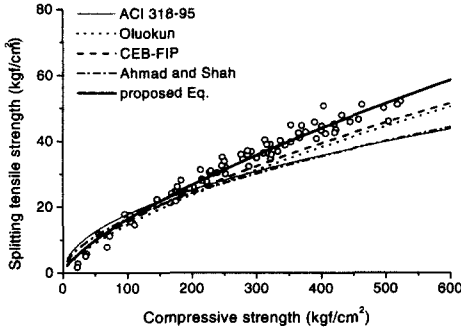


Fig. 8 Prediction curves of splitting tensile strength

그림에 나타난 바와 같이 양생온도에 따른 결정계수의 차이가 작아 실험값과 예측값의 상관관계가 양생온도에 따라 변한다고 볼 수 없다. Fig. 9(c)는 재령에 따른 실험값과 예측값의 상관관계를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 재령이 증가할수록 결정계수가 줄어든다. 즉 재령이 증가할수록 실험값과 예측값의 오차가 커진다. 그러나 이러한 오차값은 실험값의 흩어짐에서 기인한 것으로 이러한 결과가 실험값과 예측값의 오차가 재령에 따라 변화한다는 것을 나타내는 것은 아니다. 또한 그림에서 나타난 바와 같이 재령이 증가할수록 오차의 범위는 증가하지만 그 오차값이 한쪽 방향으로 치우치지 않아 예측 모델식이 조깅인장강도를 과대평가하거나 과소평가한다고 볼 수 없다.

지금까지의 연구결과를 종합해 볼 때, 시멘트의 종류, 재령 및 양생온도에 관계없이 앞에서 제시한 압축강도와 조깅인장강도 상관관계 모델을 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

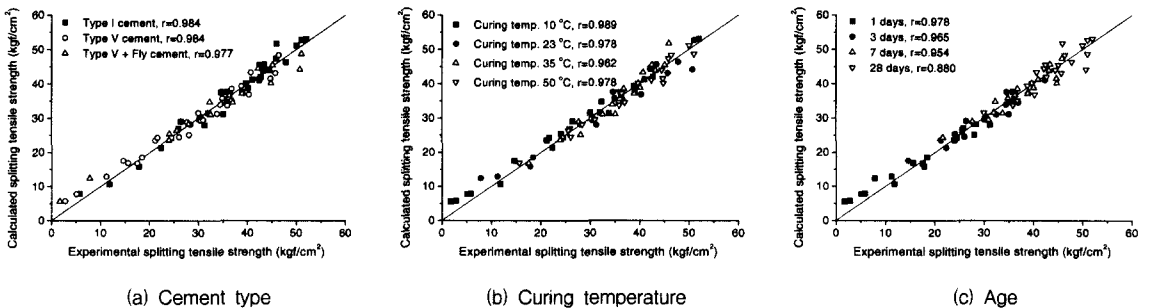


Fig. 9 Experimental and calculated splitting tensile strength

2. Gardner, N. J., "Effect of Temperature on the Early-Age Properties of Type I, Type III, and Type I/Fly Ash Concretes," ACI Material Journal, Vol. 87, No. 1, 1990, pp. 68-78.
3. CEB-FIP MODEL CODE 1990, Thomas Telford, 1993.
4. ACI 318-95, Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, 1995.
5. Ahmad, S. H., and Shah, S. P., "Structural Properties of High Strength Concrete and its Implications for Precast Prestressed Concrete," PCI Journal, Vol. 30, No. 6, 1985, pp. 92-119.
6. Oluokun, F. A., "Prediction of Concrete Tensile Strength from its Compressive Strength," ACI Material Journal, Vol. 88, No. 3 1991, pp. 302-309.
7. ACI Committee 363, State-of-the Art Report on High-Strength Concrete, ACI 363R-92, American Concrete Institute, Farmington Hills, 1992.
8. 김진근, 한상훈, 외 3명, "양생온도변화에 따른 콘크리트의 재료역학적 특성," 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제10권 2호, 1998. 11, pp. 42-47.
9. 김진근, 한상훈, 외 2명, "초유동 콘크리트의 재료 특성에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트학회 논문집, 제8권 3호, 1996. 6, pp. 135-146.
10. 장일영, 박훈규, 윤영수, "국내의 실험자료를 이용한 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성계수식 제안," 한국콘크리트학회 논문집, 제8권 6호, 1996. 12, pp. 213-222.

요 약

본 논문에서는 양생온도와 재령에 따른 콘크리트의 강도와 탄성계수 변화를 고찰하기 위해 실험적인 방법과 해석적인 방법을 사용하였다. 실험에서는 1종, 5종, 5종+플라이애쉬 시멘트를 사용하였으며 양생온도는 10, 23, 35, 50 °C를 선택하여 실험을 수행하였다. 또한 재령 1, 3, 7, 28일에서 강도와 탄성계수 실험을 하였다.

실험결과에 의하면 고온으로 양생된 콘크리트의 압축강도와 쪼갬인장강도는 초기재령에서 발현속도가 빨라지지만 장기재령에서는 저온 양생 콘크리트보다 낮은 강도를 가진다. 탄성계수도 압축강도와 쪼갬인장강도와 같은 경향을 보이지만 양생온도에 따른 탄성계수의 절대값의 차이는 강도보다는 작다. 이러한 실험결과들을 바탕으로 압축강도, 쪼갬인장강도, 탄성계수의 상관관계식을 제시하였다. 또한 제시된 상관관계식들이 양생온도, 재령, 시멘트의 종류에 따라서도 그 유효성을 확보하고 있는지 검토하였다.

(접수일자 : 2000. 4. 20.)