

온도와 재령이 콘크리트의 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계에 미치는 영향

한상훈^{1)*} · 김진근²⁾ · 박우선¹⁾ · 김동현¹⁾

¹⁾한국해양연구원 ²⁾한국과학기술원

(2001년 6월 18일 원고접수, 2001년 10월 26일 심사완료)

Effect of Temperature and Aging on the Relationship Between Dynamic and Static Elastic Modulus of Concrete

Sang-Hun Han^{1)*}, Jin-Keun Kim²⁾, Woo-Sun Park¹⁾, and Dong-Hyawn Kim¹⁾

¹⁾ Coastal & Harbour Engineering Research Center, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan, 425-744, Korea

²⁾ Dept. of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 305-701, Korea

(Received on June 18, 2001, Revised on October 26, 2001)

ABSTRACT

This paper investigates the relationships between dynamic elastic modulus and static elastic modulus or compressive strength according to curing temperature, aging, and cement type. Based on this investigation, the new model of the relationships are proposed. Impact echo method estimates the resonant frequency of specimens and uniaxial compression test measures the static elastic modulus and compressive strength. Type I and V cement concretes, which have the water-cement ratios of 0.40 and 0.50, are cured under the isothermal curing temperatures of 10, 23, and 50 °C.

Cement type and aging have no large influence on the relationship between dynamic and static elastic modulus, but the ratio of dynamic and static elastic modulus comes close to 1 as temperature increases. Initial chord elastic modulus, which is calculated at lower strain level of stress-strain curve, has the similar value to dynamic elastic modulus. The relationship between dynamic elastic modulus and compressive strength has the same tendency as the relationship between dynamic and static elastic modulus according to cement type, temperature and aging. The proposed relationship equations between dynamic elastic modulus and static elastic modulus or compressive strength properly estimates the variation of relationships according to cement type and temperature.

Keywords : elastic modulus, compressive strength, impact echo method, temperature, aging

1. 서 론

최근 콘크리트 구조물의 안전성이나 내구성을 파악하기 위해 비파괴 검사법을 많이 이용하고 있다. 이러한 비파괴 검사법을 이용하면 많은 경우에 동탄성계수(dynamic elastic modulus)를 얻을 수 있는데 이 값은 시료의 일축 압축시험에서 얻어지는 일반적인 정탄성계수와는 다르다. 일축압축시험에서 구해지는 정탄성계수는 크게 다음 3가지로 나눌 수 있다. 접선탄성계수(tangent elastic modulus)는 응력-변형률 곡선의 한 지점에서의 기울기를 나타낸다. 할선탄성계수(secant elastic modulus)와 현탄성계수(chord elastic modulus)는 같은 의미로 쓰이기도 하지만 엄밀히 구별하면, 할선탄성계수는 원점과 압축강도의 40%에 해당하는 지점을 연결한 직선의 기울기를, 현탄성계수

는 50×10^6 의 변형률에 해당하는 지점과 압축강도의 40%인 지점을 연결한 직선의 기울기를 나타낸다. 일반적으로 KS F 2438 규격(콘크리트 원주공시체의 정탄성계수 및 포아송비 시험방법)에서 측정되는 정탄성계수는 위의 3가지 탄성계수에서 현탄성계수를 의미한다. 한편, 비파괴 시험법 중에서 충격공진(impact echo : IE)법 등은 시험체에 매우 작은 충격을 주어 공진주파수를 측정하는 것으로 이 방법에 의해 구해지는 동탄성계수는 매우 낮은 변형률 수준에서 측정된 일종의 초기접선탄성계수로 간주할 수 있다. 따라서, 이러한 동탄성계수와 정탄성계수의 차이를 살펴보고 그 값들의 상관관계를 파악하는 것은 비파괴 검사법에 의해 측정될 수 있는 동탄성계수를 이해하고 이용하는 데 매우 중요하다^{1,2,3)}.

본 연구에서는 충격공진기법에 의해 측정된 동탄성계수를 정탄성계수를 비롯한 여러 재료역학적 성질들과 비교해 보고 이러한 상관관계들이 온도와 재령에 따라 어떻게 변화하는지 고찰하였다.

* Corresponding author

Tel : 031-400-6345 Fax : 031-408-5823

E-mail : shhan@kordi.re.kr

2. 실험계획 및 실험방법

2.1 실험변수

실험변수는 크게 시멘트의 종류, 물-시멘트비, 양생온도로 나눌 수 있고 이 실험변수들은 Table 1과 같이 나타낼 수 있다. 본 논문은 수화열이 문제가 되는 매스콘크리트 구조물에 많이 사용되는 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 온도와 재령에 따른 동탄성계수의 변화를 파악하고자 함에 따라 온도에 따른 실험은 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트에 대해서만 수행하였다. 1종 포틀랜드 시멘트 콘크리트에 대해서는 23 °C로 양생한 시료들에 대해서 실험을 수행하여 이를 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 실험결과와 비교하고자 하였다.

2.2 배합설계

Table 2는 본 실험에 사용한 콘크리트의 배합설계표이다⁴⁾.

2.3 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 항온항습조에 넣었다. 그리고, 각 실험시점마다 공시체들을 항온항습조에서 꺼내어 실험을 실시하였다. 압축강도와 정탄성계수 실험전에 공시체의 상하면은 연마기로 연마하였으며 정탄성계수 실험시의 변형률은 길이 60 mm의 변형률 게이지를 사용하여 측정하였다. 압축강도는 KS F 2405

Table 1 Test variables

Cement type	Water-cement ratio	Age (days)	Curing temperature (°C)
Type I	0.40, 0.50	1, 3, 7, 28	23
Type V	0.40, 0.50	1, 3, 7, 28	10, 23, 50

Table 2 Basic mixture proportions

Cement type	W/C	S/A	Unit weight (kg/m ³)					
			W	C	S	G	Admixture	
							A.E. agent (C×%)	Super-plasticizer (C×%)
Type I, V	0.40	0.39	181	452	630	989	0.005	0.5
	0.50	0.42	181	362	707	989	0.005	0.5

규격(콘크리트의 압축강도 시험방법)을, 정탄성계수는 KS F 2438 규격(콘크리트 원주공시체의 정탄성계수 및 푸아송비 시험방법)에 따라 실험을 수행하였다.

동탄성계수는 충격공진법을 이용하여 측정하였는데 충격공진법은 시험체에 충격을 가하여 시험체의 공명주파수를 측정하는 방법이다. 감지기에서 구한 시간영역상에서의 신호를 FFT(fast fourier transform)하여 주파수 영역으로 변환시킨 후에 진폭이 가장 큰 첫 번째 모드의 공진 주파수로부터 종파속도를 식 (1)과 같이 구한다^{5,6)}.

$$V_c = f_1 \times 2L \quad (1)$$

여기서, V_c : 종파속도

f_1 : 첫 번째 모드의 공진주파수

L : 시험체의 길이

이러한 종파속도에서 동탄성계수를 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$E_d = \rho V_c^2 \quad (2)$$

여기서, E_d : 동탄성계수

ρ : 시험체의 밀도

충격공진법에 대한 세부사항은 참고문헌 5와 6에 자세히 설명되어 있다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 정탄성계수와 동탄성계수의 상관관계

실험결과들은 압축강도, 정탄성계수, 동탄성계수, 초기현탄성계수, 단위중량 등으로 나누어 Table 3에 정리하였다. 이러한 측정값들의 상관관계를 알아보기 위해서 Fig. 1~4에서는 이러한 실험값들을 그림으로 나타내었다. 또한 상관관계를 좀 더 정확하게 파악하기 위해서 식 (3)을 이용

Table 3 Experimental results

Cement Type	Water-cement ratio	Temperature (°C)	Age (days)	Compressive strength (kgf/cm ²)	Static elastic modulus ($\times 10^5$ kgf/cm ²)	Dynamic elastic modulus ($\times 10^5$ kgf/cm ²)	Initial chord elastic modulus ($\times 10^5$ kgf/cm ²)	Specific weight (kg/m ³)	
Type I	0.40	23	1	210	2.07	2.95	2.46	2,330	
				222	2.18	2.93	2.48	2,380	
				209	2.08	2.98	2.48	2,380	
			3	314	2.45	3.49	2.67	2,360	
				323	2.47	3.47	2.90	2,360	
				328	2.39	3.46	2.90	2,380	
			7	391	2.61	3.68	3.31	2,360	
				377	2.64	3.76	3.31	2,360	
	28	354	2.66	3.66	2.90	2,320			
		434	2.95	3.86	3.31	2,340			
				371	3.14	3.90	3.72	2,350	
				353	3.22	3.90	3.72	2,350	
		0.50	23	1	111	1.73	2.51	1.84	2,370
					119	1.77	2.51	1.84	2,350
					108	1.66	2.45	2.09	2,350
				3	227	2.33	3.21	2.67	2,340
223					2.29	3.14	2.75	2,330	
218					2.28	3.11	2.49	2,340	
7				286	2.49	3.45	2.89	2,340	
				257	2.50	3.45	2.89	2,350	
28		281	2.44	3.44	2.89	2,350			
		359	2.75	3.79	3.21	2,350			
				377	2.88	3.81	3.31	2,370	
				371	2.72	3.75	3.31	2,360	
Type V		0.40	10	1	36	0.64	1.35	1.02	2,380
					33	0.71	1.40	1.23	2,390
					36	0.75	1.43	1.21	2,390
				3	167	1.77	2.83	2.46	2,390
	166				1.82	2.81	2.48	2,370	
	169				2.00	2.86	2.66	2,370	
	7			252	2.53	3.46	3.16	2,370	
				243	2.27	3.42	2.97	2,370	
	28		257	2.37	3.31	3.07	2,380		
			331	2.56	3.67	3.21	2,390		
					359	2.65	3.69	3.25	2,370
					341	2.62	3.78	3.57	2,370
		23	1	109	1.51	2.55	2.27	2,380	
				121	1.52	2.49	2.27	2,380	
				134	1.72	2.52	2.30	2,350	
			3	227	2.42	3.34	3.09	2,360	
				240	2.32	3.29	2.79	2,370	
				252	2.18	3.25	2.64	2,380	
			7	293	2.63	3.60	3.05	2,370	
				296	2.74	3.52	3.16	2,360	
28	305	2.83	3.61	3.38	2,370				
	389	2.98	3.86	3.61	2,370				
			404	2.97	4.01	3.60	2,420		
			391	2.87	3.96	3.66	2,420		
	50	1	222	2.19	3.03	2.96	2,370		
			200	2.04	2.93	2.75	2,380		
			223	2.11	3.00	2.64	2,370		
		3	303	2.53	3.44	3.05	2,370		
			321	2.55	3.50	3.33	2,380		
			324	2.46	3.43	2.99	2,370		
		7	372	2.51	3.50	3.07	2,350		
			381	2.70	3.58	3.64	2,360		
		28	356	2.68	3.60	3.54	2,380		
			457	2.81	3.59	3.52	2,340		
					458	2.78	3.65	3.63	2,360
					458	2.68	3.58	3.43	2,350

Table 3 Experimental results (continued)

Cement Type	Water-cement ratio	Temperature (°C)	Age (days)	Compressive strength (kgf/cm ²)	Static elastic modulus (×10 ⁵ kgf/cm ²)	Dynamic elastic modulus (×10 ⁵ kgf/cm ²)	Initial chord elastic modulus (×10 ⁵ kgf/cm ²)	Specific weight (kg/m ³)
Type V	0.50	10	1	20	0.20	0.71	0.53	2,350
				23	0.42	0.75	1.01	2,350
				25	0.47	0.82	0.82	2,380
			3	103	1.32	2.42	2.18	2,360
				113	1.47	2.50	2.28	2,360
				118	1.57	2.67	2.31	2,370
			7	179	1.92	3.19	2.88	2,330
				180	1.88	3.14	2.73	2,310
				166	1.80	3.08	2.66	2,390
			28	222	2.13	3.38	2.78	2,370
				265	2.34	3.62	3.27	2,380
				268	2.41	3.39	3.32	2,370
		23	1	70	1.29	2.04	1.64	2,360
				75	1.22	2.13	1.77	2,370
				73	1.20	1.92	1.81	2,390
			3	175	2.12	3.03	3.17	2,360
				174	1.96	3.09	2.90	2,370
				177	1.98	3.02	2.71	2,360
			7	228	2.33	3.30	2.92	2,360
				225	2.26	3.40	3.04	2,370
				228	2.44	3.44	3.19	2,370
			28	295	2.74	3.75	3.47	2,370
				318	2.72	3.65	3.23	2,350
50	1	103	1.67	2.55	2.15	2,370		
		103	1.55	2.40	2.07	2,340		
		109	1.67	2.45	2.35	2,360		
	3	174	1.81	2.90	2.68	2,330		
		177	2.13	2.99	3.02	2,340		
		179	1.95	2.92	2.84	2,340		
	7	215	2.41	3.09	3.00	2,380		
		232	2.25	3.18	2.82	2,280		
		240	2.58	3.27	3.06	2,340		
	28	268	2.43	3.32	2.87	2,270		
		288	2.58	3.31	3.19	2,320		

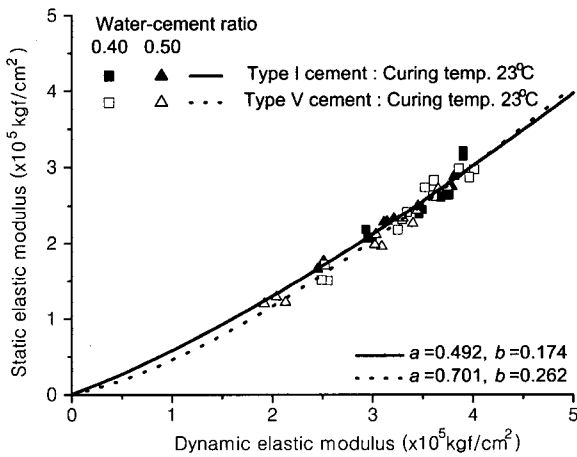


Fig. 1 Dynamic and static elastic modulus with cement type

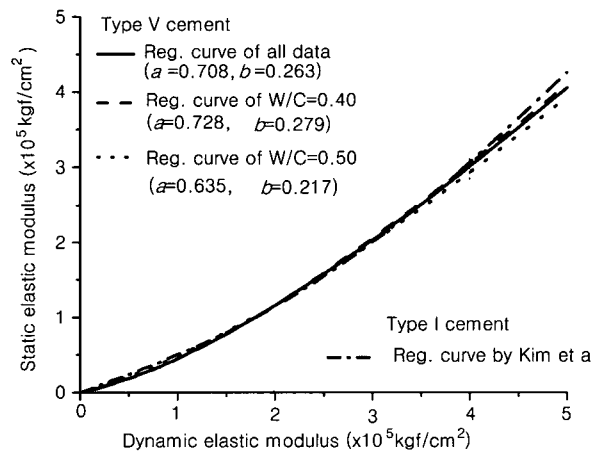


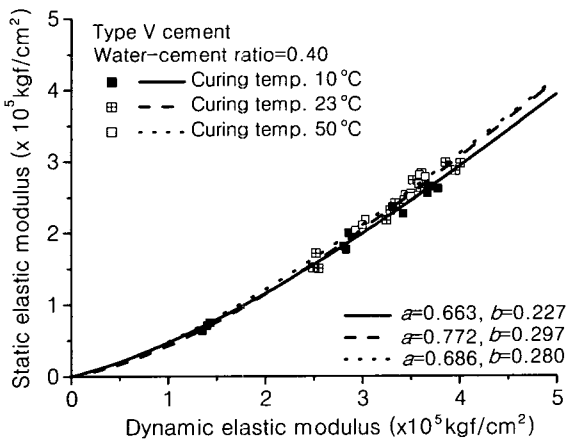
Fig. 2 Regression curves of dynamic and static elastic modulus

하여 실험값들을 회귀분석하였다.

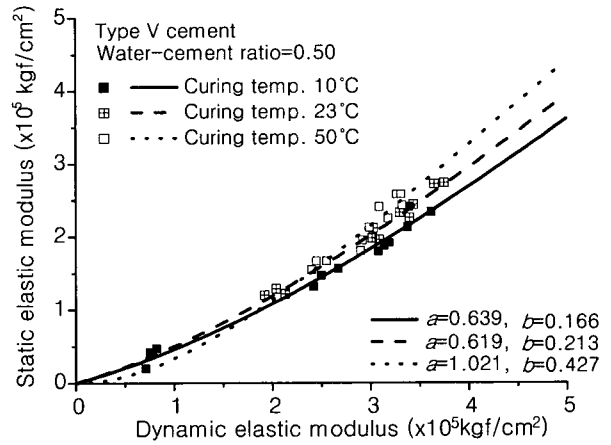
$$E_c = E_d(1 - ae^{-bE_d}) \quad (3)$$

여기서, E_c : 정탄성계수 (×10⁵ kgf/cm²)

a, b : 비례상수

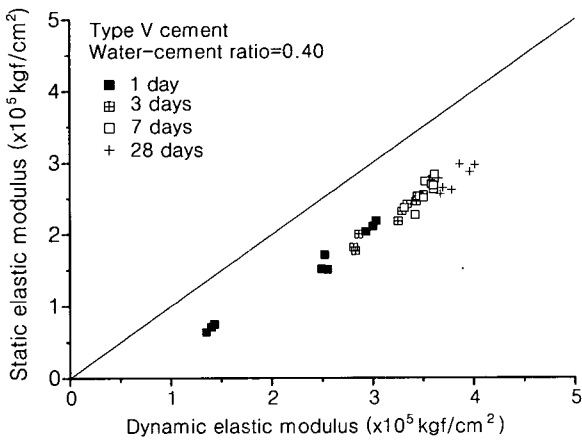


(a) Water-cement ratio=0.40

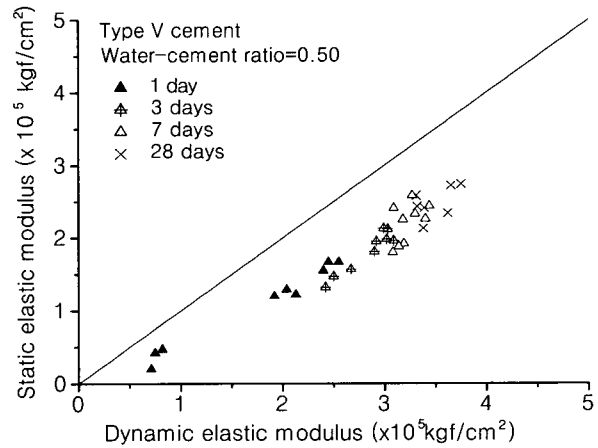


(b) Water-cement ratio=0.50

Fig. 3 Dynamic and static elastic modulus with curing temperature



(a) Water-cement ratio=0.40



(b) Water-cement ratio=0.50

Fig. 4 Dynamic and static elastic modulus with aging

위의 식은 다음과 같은 가정들을 포함하고 있다. 일반적으로 동탄성계수가 커지면 그 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 40%이하의 압축강도에서 좀 더 선형적인 거동을 보인다. 그리고 응력-변형률 곡선이 선형적인 거동을 보일수록 동탄성계수와 정탄성계수의 값의 차이는 줄어든다. 따라서 동탄성계수가 매우 커지면 정탄성계수와 동탄성계수는 거의 같은 값을 가질 것이다. 또한 동탄성계수의 값이 0이면 정탄성계수의 값도 0 이어야 할 것이다. 이러한 조건들을 만족시키도록 식 (3)을 구성하였다⁷⁾.

먼저 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계가 시멘트의 종류에 따라 어떤 변화가 있는지 살펴보았는데, Fig. 1은 23°C로 양생한 1종 및 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계를 나타내고 있다. 두 값들의 상관관계를 좀 더 정확히 파악하기 위해서 실험결과들에 식 (3)을 적용하여 상관관계식을 구하고 이 두 식들을 비교하였다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 $3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$

이하의 동탄성계수에서는 1종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 정탄성계수가 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 정탄성계수보다 조금 크지만 그 값의 차이는 매우 작고 $3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 이상의 동탄성계수에서는 정탄성계수와 동탄성계수가 거의 일치한다. 따라서, 두 종류의 시멘트에 따른 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 한편, 회귀분석에 의한 식 (3)의 상수 a 와 b 값은 그림에 제시되어 있다. 시멘트 종류에 따른 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계의 변화는 기존에 제시되었던 1종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 상관관계식과 본 논문에서 제시된 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 상관관계식을 비교하여 다시 한 번 살펴볼 수 있다. Fig. 2에서 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 회귀분석식들을 기존에 제안했던 1종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 예측모델식⁷⁾과 비교하고 있다. 실험값들의 분포를 고려해 볼 때, 회귀분석식들을 비교할 수 있는 유효범위는 동탄성계수가 $2.0 \times$

10^5 kgf/cm^2 에서 $4.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 사이에 있을 때이고 이러한 범위는 Fig. 2에서 수직점선으로 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 1종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계식과 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 상관관계식이 별 차이가 없음을 알 수 있다. 즉, 앞에서 언급한 바와 같이 정탄성계수와 동탄성계수의 상관관계는 1종과 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트에서 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig. 3은 양생온도에 따른 동탄성계수와 정탄성계수의 비교이다. 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 양생온도에 따른 실험값과 이를 바탕으로 한 회귀분석식들을 나타내고 있다. 물-시멘트비가 0.40인 경우는 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 양생온도가 증가할수록 같은 동탄성계수에서 정탄성계수 값이 조금 증가하지만 그 값들의 차이는 크지 않다. 그러나 이러한 경향은 물-시멘트비가 0.50인 경우에는 좀 더 확연하게 나타나게 된다. Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 동탄성계수가 $2.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 보다 큰 범위에서는 양생온도가 증가하면 같은 동탄성계수에서 정탄성계수가 10%이상 크다. 이것은 양생온도가 증가할수록 콘크리트의 수화가 빨리 진전되어 좀 더 취성적인 성질을 가지게 되는 것에서 그 이유를 찾을 수 있다. 콘크리트가 좀 더 취성적이 될수록 응력-변형률 곡선은 선형적인 거동을 보이고 동탄성계수와 정탄성계수의 비는 1에 가깝게 된다. 그러나 이러한 경향은 물-시멘트비에 따라서 조금씩 다르게 나타나기 때문에 이것을 정량적인 예측식으로 제시하는 것은 아직까지 어렵고 좀 더 많은 실험값들의 축적이 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 4는 재령에 따라 동탄성계수와 정탄성계수를 비교하고 있다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 물-시멘트비가 0.40인 경우에는 재령에 따라 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계가 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 물-시멘트비가 0.50인 경우에는 0.40인 경우보다 실험값들 사이의 오차가 조금 크지만 상관관계는 크게 변하지 않음을 관찰할 수 있다. 즉, 재령에 따라 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 한편, 재령에 따라서 실험값의 분포가 일치하는 정탄성계수 및 동탄성계수의 범위가 넓지 않기 때문에 재령에 따라 실험값들을 회귀분석하는 것은 큰 의미가 없을 것으로 사료되어 실험값들 식 (3)을 이용하여 회귀분석하지는 않았다.

3.2 초기현탄성계수와 동탄성계수의 상관관계

동탄성계수는 변형률 수준이 매우 낮은 상태에서의 접선탄성계수로 볼 수 있으므로 정탄성계수가 측정되는 변형률 수준을 낮추면 낮출수록 정탄성계수와 동탄성계수의 차이는 줄어들 것이다. 이를 확인하기 위해서 응력-변형

률 곡선에서 변형률이 10×10^{-6} 과 50×10^{-6} 인 곡선상의 점들을 연결한 직선의 기울기를 '초기현탄성계수'로 정의하고 이 값을 동탄성계수와 비교하였다.

Fig. 5는 동탄성계수와 초기현탄성계수 및 정탄성계수의 상관관계를 비교하고 있다. 예측한 대로 초기현탄성계수와 동탄성계수의 비가 정탄성계수와 동탄성계수의 비보다 좀 더 1에 가까움을 알 수 있다. 일반적으로 충격공진 기법은 변형률 수준이 약 6×10^{-6} 에 해당하는 지점에서 동탄성계수를 측정하므로⁸⁾ 좀 더 정밀한 실험장치를 이용하여 정탄성계수를 이러한 변형률 수준에서 측정한다면 정탄성계수와 동탄성계수는 거의 일치할 것으로 사료된다.

앞의 정탄성계수의 경우와 마찬가지로 초기현탄성계수와 동탄성계수의 상관관계를 시멘트의 종류, 양생온도 및 재령에 따라 검토해 보았다. Fig. 6은 시멘트의 종류에 따라 초기현탄성계수와 동탄성계수의 상관관계를 비교하고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트가 같은 동탄성계수에서 초기현탄성계수의 값이 1종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 값보다 조금 크지만 두 값의 차이는 그렇게 크지 않다. 또한 Fig. 7과 8은 양생온도와 재령에 따른 초기현탄성계수와 동탄성계수의 상관관계이다. 그림에 나타난 바와 같이 양생온도와 재령은 두 값의 상관관계에 큰 영향을 미치고 있지 않음을 알 수 있다.

3.3 압축강도와 동탄성계수의 상관관계

콘크리트의 재료성질 중에서 가장 많이 사용되는 것이 압축강도이다. 따라서, 이러한 압축강도와 비파괴 시험법에 의한 동탄성계수의 상관관계를 고찰해 보는 것도 매우 중요한 일이다. Fig. 9에서 11은 이러한 두 값의 상관관계를 시멘트의 종류, 양생온도, 재령에 따라 나타내고 있다. 또한 이러한 상관관계를 좀 더 정확하게 파악하기 위해 다

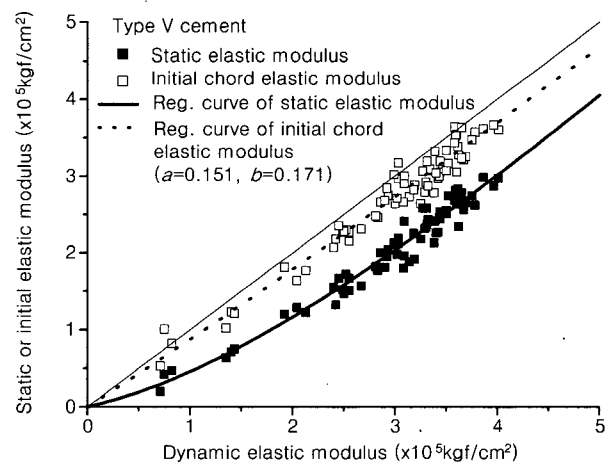


Fig. 5 Dynamic, static, and initial chord elastic modulus

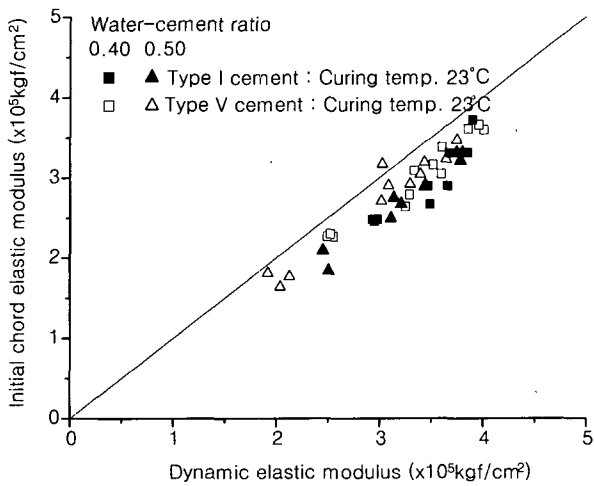


Fig. 6 Dynamic and initial chord elastic modulus with cement type

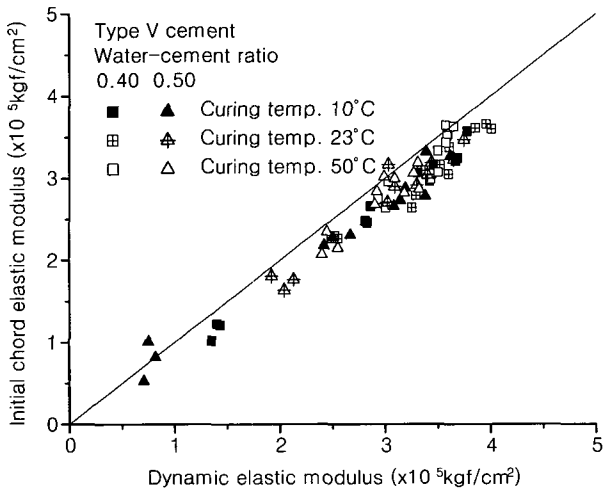


Fig. 7 Dynamic and initial chord elastic modulus with curing temperature

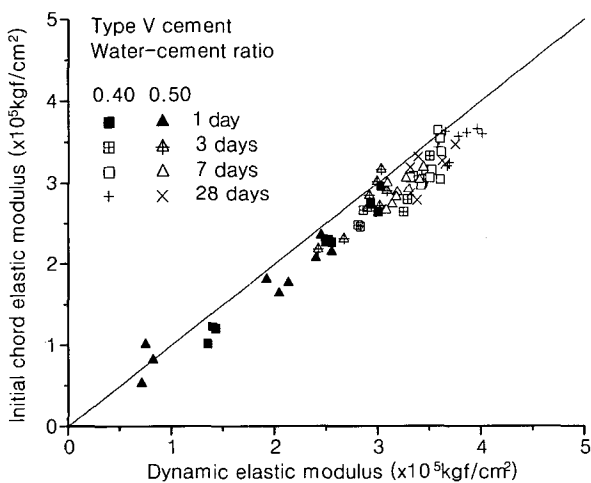


Fig. 8 Dynamic and initial chord elastic modulus with aging

음과 같은 상관관계식을 이용하여 실험값을 분석하였다.

1종 포틀랜드 시멘트 콘크리트

$$f_{cu} = \alpha E_c^\beta = \alpha [E_d(1 - 0.492 e^{-0.174 E_d})]^\beta \quad (4)$$

5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트

$$f_{cu} = \alpha E_c^\beta = \alpha [E_d(1 - 0.701 e^{-0.262 E_d})]^\beta \quad (5)$$

여기서, f_{cu} : 압축강도 (kgf/cm²)

α, β : 실험상수

정탄성계수와 동탄성계수의 상관관계식들은 앞 3.1절에서 구했으므로 이 상관관계식들을 이용하여 동탄성계수와 압축강도의 상관관계식들을 구하고자 하였다. 그래서 기존의 시방서나 논문들에서 제시한 압축강도와 정탄성계수의 상관관계식에 3.1절에서 구한 식들을 대입하여 식 (4)와 (5)를 수식화하였다.

앞의 경우들과 같이 압축강도와 동탄성계수의 상관관계를 시멘트의 종류, 양생온도 및 재령에 따라 검토해 보았다. Fig. 9는 시멘트의 종류에 따라 압축강도와 동탄성계수의 상관관계를 비교하고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 1종 포틀랜드 시멘트 콘크리트가 같은 동탄성계수에서 압축강도의 값이 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 값보다 조금 크지만 그 차이는 5%미만으로 매우 작다. 따라서, 압축강도와 동탄성계수의 상관관계는 1종 및 5종 포틀랜드 시멘트 콘크리트가 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig. 10은 양생온도에 따라 동탄성계수와 압축강도의 상관관계를 비교하고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 10°C와 23°C로 양생한 콘크리트의 동탄성계수와 압축강도의 상관관계는 거의 동일하지만 50°C로 양생한 콘크리트는 조금 다른 경향을 나타낸다. 이에 대한 원인은 크게 2가지로 설명할 수 있다. 먼저 첫 번째 이유로 고강도와 저강도에서 콘크리트의 탄성계수와 압축강도가 서로 다른 상관관계를 보인다는 것에서 찾을 수 있다. 「콘크리트구조 설계기준」에서는 콘크리트의 압축강도와 정탄성계수의 상관관계를 압축강도 300 kgf/cm²를 기준으로 두 가지의 모델식을 제시하고 있다. 이러한 이유로 300 kgf/cm² 이상의 압축강도 실험값이 많은 50°C로 양생한 콘크리트가 10°C나 23°C로 양생한 콘크리트와는 다른 압축강도와 동탄성계수의 상관관계를 나타낼 수 있다. Fig. 10은 「콘크리트구조 설계기준」의 식들과 회귀분석식들을 비교하고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 양생온도 10°C와 23°C로 양생한 콘크리트의 실험결과에 대한 회귀분석식들은 압축

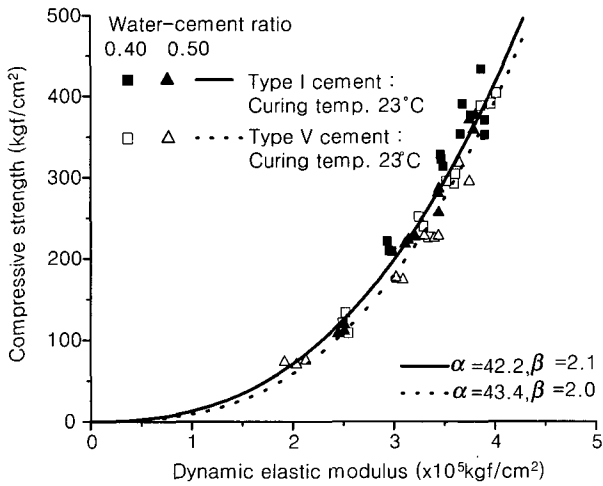


Fig. 9 Dynamic elastic modulus and compressive strength with cement type

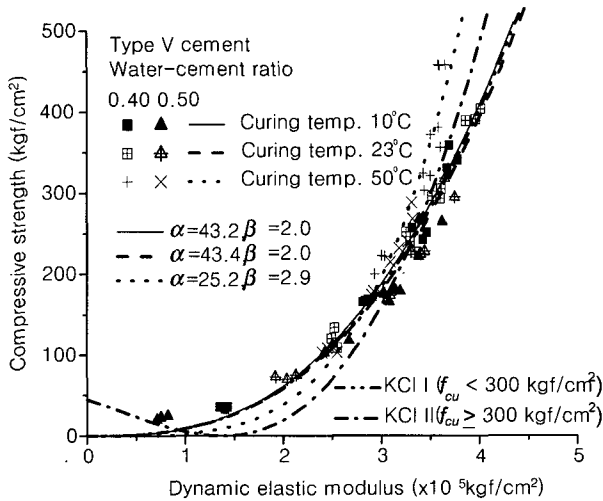


Fig. 10 Dynamic elastic modulus and compressive strength with curing temperature

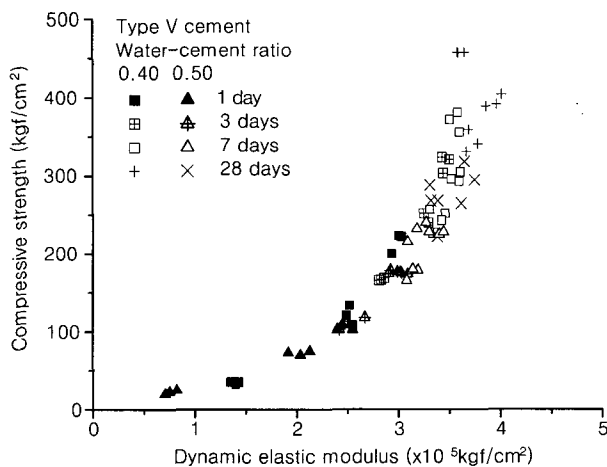


Fig. 11 Dynamic elastic modulus and compressive strength with aging

강도 300 kgf/cm²이하의 콘크리트에 대한 식과 거의 유사함을 알 수 있다. 하지만, 압축강도 300 kgf/cm²이상의 실험값이 많은 양생온도 50 °C로 양생한 콘크리트의 실험결과 회귀분석식은 압축강도 300 kgf/cm²이하의 콘크리트에 대한 식보다 300 kgf/cm²이상의 콘크리트에 대한 식과 더 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 양생온도에 따른 두 값의 상관관계에 대한 차이는 앞서서도 설명한 바와 같이 온도에 따른 콘크리트 수화도의 변화로도 설명될 수 있다. 고온으로 양생한 콘크리트는 저온으로 양생한 콘크리트보다 수화과정이 빨리 진행되어 좀 더 취성적인 성질을 가지게 되며 조직도 저온 양생 콘크리트보다는 치밀하지 못하다. 같은 압축강도에서도 조직이 치밀한 콘크리트가 그렇지 못한 콘크리트보다 좀 더 큰 동탄성계수를 가질 수 있으므로 이러한 결과가 나타날 수 있다. 앞서서 설명한 두 가지 이유가 복합되어 Fig. 10과 같은 결과를 얻은 것으로 사료된다. Fig. 11은 재령에 따라 동탄성계수와 압축강도를 비교하고 있는데 그림에 나타난 바와 같이 재령에 따라 동탄성계수와 압축강도의 상관관계는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

4. 결 론

온도와 재령에 따라 동탄성계수, 정탄성계수, 초기현탄성계수, 압축강도 사이의 상관관계들을 고찰한 후에 다음의 결론을 내릴 수 있었다.

1) 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계식은 시멘트의 종류와 재령에 큰 영향을 받지 않았다. 그러나, 양생온도의 변화에 따라 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계는 변화하여 두 값의 비는 온도가 증가함에 따라 1에 가까워져 갔다. 제시된 모델식은 이러한 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계를 잘 모델링하였다.

2) 초기현탄성계수와 동탄성계수의 비는 정탄성계수와 동탄성계수의 비보다 좀 더 1에 가까웠다. 이것으로 변형률 수준이 동탄성계수와 비슷한 상태에서 일축압축실험으로 탄성계수를 구하면 두 값이 거의 일치함을 추측할 수 있었다. 또한 초기현탄성계수와 동탄성계수의 상관관계는 온도와 재령에 크게 영향을 받지 않았다.

3) 압축강도와 동탄성계수의 상관관계는 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계와 같이 시멘트의 종류와 재령에는 큰 영향을 받지 않았지만 양생온도에 따라서는 그 상관관계가 변하였다. 이러한 상관관계의 변화는 제시된 예측모델식을 사용하여 모델링하였다.

참고문헌

1. 우시창, "사회간접자본시설의 손상도 평가, 진단, 보수·보강에 있어서 비파괴점사의 역할," 한국콘크리트학회지, 제10권 2호, 1998. 4, pp.9~19.
2. Mindess, S., and Young, J. F., "Concrete," Prentice-Hall, 1981.
3. Neville, A. M., "Properties of Concrete," The 4th edition, Longman, 1995.
4. 한상훈, 김진근, 송영철, "콘크리트의 재료역학적 성질에 대한 양생온도와 재령의 효과 (I)," 한국콘크리트학회 논문집, 제12권 6호, 2000. 12, pp.23~34.
5. 김동수, 박형춘, 이광명, "충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴 검사," 한국콘크리트학회 논문집, 제9권 2호, 1997. 4, pp. 109~119.
6. 이회근, 이광명, 김동수, "초기 재령 콘크리트의 종파속도와 강도의 상관관계," 한국콘크리트학회 논문집, 제12권 6호, 2000. 12, pp.67~74.
7. 김진근, 김훈, 노재호, "공명주기식 동탄성계수를 이용한 초기재령 콘크리트의 역학적 성질 예측," 한국콘크리트학회 논문집, 제7권 5호, 1995. 10, pp.164~171.
8. Bay, J. A. and Stokoe, K. H., "Field and Laboratory Determination of Elastic Properties of Portland Cement Concrete Using Seismic Techniques," In *Transportation Research Record* 1355, pp.67~74.

요 약

본 논문에서는 동탄성계수와 정탄성계수 및 압축강도의 상관관계를 양생온도, 재령, 시멘트의 종류에 따라 살펴보고 그 거동을 정확하게 모델링하는 모델식을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 충격공진법을 이용하여 공진주파수를 측정하여 동탄성계수를 계산하고 일축압축실험을 통하여 정탄성계수와 압축강도를 구하였다. 시멘트는 1종과 5종 포틀랜드 시멘트를, 물-시멘트비는 0.40과 0.50을, 양생온도는 10, 23, 50 °C를 선택하여 실험을 수행하였다.

동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계는 시멘트의 종류와 재령에 큰 영향을 받지 않았다. 그러나, 양생온도의 변화에 따라 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계는 변화하여 두 값의 비가 온도가 증가함에 따라 1에 가깝게 접근하였다. 초기현탄성계수와 동탄성계수의 비는 정탄성계수와 동탄성계수의 비보다 좀 더 1에 가까웠다. 압축강도와 동탄성계수의 상관관계는 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계와 같이 시멘트의 종류와 재령에는 큰 영향을 받지 않았지만 양생온도에 따라서는 그 상관관계가 변하였다. 제시된 동탄성계수와 정탄성계수 및 압축강도의 상관관계식들은 이러한 시멘트의 종류와 온도에 따른 상관관계의 변화를 잘 모델링하였다.

핵심용어 : 탄성계수, 압축강도, 충격공진법, 온도, 재령