

현장 해양 콘크리트의 동탄성계수와 정탄성계수 분석 Analysis of Dynamic and Static Elastic Modulus of In-situ Marine Concrete

한상훈* · 박우선**

Sang Hun Han* and Woo Sun Park**

요 지 : 콘크리트 구조물의 안전성이나 내구성을 파악하기 위해 비파괴 검사를 실시하는데, 충격공진법을 이용하면 동탄성계수를 얻을 수 있다. 동탄성계수는 일축압축실험에서 얻을 수 있는 일반적인 정탄성계수와는 절대 값에서 차이가 있다. 본 연구에서는 현장 항만 콘크리트 구조물에서 채취된 코어시료에 대한 실내실험을 통해 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계를 규명하고자 하였다. 현장 항만 콘크리트 코어는 완도항, 마산항, 인천항에서 채취하였으며, 노출환경에 따라 대기부, 비말대, 간만대로 나누어 작업을 실시하였다. 채취된 시료는 실험실로 이송하여 충격공진법과 일축압축실험을 실시하였다. 충격공진법을 이용하면 개별시료의 공진주파수를 측정할 수 있으며, 이를 바탕으로 동탄성계수를 계산할 수 있다. 일축압축실험을 수행하면 시료의 응력-변형률 곡선을 얻을 수 있는데, 이를 바탕으로 일반적으로 설계에 사용되는 정탄성계수(현탄성계수)와 낮은 응력수준의 초기현탄성계수를 구하였다. 동탄성계수와 정탄성계수 및 초기현탄성계수의 상관관계는 채취 지역에 따라 차이가 있었지만 같은 안벽 내에서의 노출 환경에 따라서는 거의 차이가 없었다. 또한, 압축강도와 동탄성계수의 상관관계도 코어채취지역에 따라 조금씩 차이가 있었다. 그러나, 압축강도와 정탄성계수는 코어채취지역에 따라 차이가 발생하지 않았다.

핵심어 : 탄성계수, 압축강도, 충격공진법, 해양 콘크리트

Abstract : Impact echo method estimating the soundness of concrete measures the dynamic elastic modulus of specimens which are different with static elastic modulus tested by uni-axial compression test. Thus, this paper investigates the relationships between dynamic and static elastic modulus based on in-situ concrete cores. Also, dynamic elastic modulus was compared with compressive strength. Concrete cores were obtained from about 20 to 70 years concrete structures at three different harbors which were Incheon, Wando, and Masan in Korea. In order to investigate the influence of exposure condition on the relationship, air zone, splash zone, and tidal zone were selected. Different harbors showed the different relationships between dynamic and static elastic modulus, but exposure conditions have no influence on the relationship between dynamic and static elastic modulus. Also, the relationship between dynamic elastic modulus and compressive strength has the same tendency as the relationship between dynamic and static elastic modulus. The relationship equations were proposed to estimate the relationships properly.

Keywords : Elastic modulus, compressive strength, impact echo method, marine concrete

1. 서 론

콘크리트 구조물의 안전성이나 내구성을 파악하기 위해 비파괴 검사법을 실시하는데, 이러한 비파괴 검사법을 이용하면 많은 경우에 동탄성계수(dynamic elastic modulus)를 얻을 수 있다. 이 값은 시료의 일축압축실험에서 얻어

지는 일반적인 정탄성계수와는 다르다. 일축압축실험에서 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 원

*한국해양연구원 연안개발에너지연구부(Corresponding author : Sang Hun Han, Coastal Engineering & Energy Depart. KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea. shhan@kordi.re.kr)

**한국해양연구원 연안개발에너지연구부(Coastal Engineering & Energy Depart. KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

점과 압축강도의 40%에 해당하는 지점을 연결한 직선의 기울기를, 현탄성계수는 50×10^{-6} 의 변형률에 해당하는 지점과 압축강도의 40%인 지점을 연결한 직선의 기울기를 나타낸다. 일반적으로 KS F 2438 규격(콘크리트 원주공시체의 정탄성계수 및 푸아송비 시험방법)에서 측정되는 정탄성계수는 위의 3가지 탄성계수에서 현탄성계수를 의미한다. 한편, 비파괴 시험법 중에서 충격공진(Impact Echo: IE)법 등은 실험체에 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 이용하는데 매우 중요하다(김동수 *et al.*, 1997; 김진근 *et al.*, 1995; Hsiao *et al.*, 2008).

본 연구에서는 현장 향만 콘크리트 구조물에서 채취된 코어시료에 대한 실내실험을 통해 채취지역과 수직위치에 따른 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계를 규명하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

향만구조물에 대한 리모델링 기반 구축 연구의 일환으로 노후 향만구조물에 대한 현장 비파괴 실험과 코어채취를 실시하였다. 대상 향만은 마산항 제1부두(1939년), 인천항 제2부두(1974년), 완도항 제2물양장(1989년)이다. 인천항 제2부두와 완도항 제2물양장은 콘크리트 블록식 구조물이고 마산항 제1부두는 케이슨식 구조물이다. 각 구조물에 대한 진단자료에 의하면 완도항 제2물양장의 설계기

준강도는 21 MPa, 인천항 제2부두와 마산항 제1부두의 설계기준강도는 18 MPa이다. 그러나, 각 구조물에 대한 정확한 배합설계표를 구할 수는 없었다.

코어는 수직벽체에 대해서 간만대, 비말대, 대기부로 영역을 나누어 채취하였다. 그러나, 인천은 내항으로 간만대가 존재하지 않아 비말대와 대기부에서만 시료를 채취하였다.

2.2 실험방법

완도의 3가지 영역, 마산의 3가지 영역, 인천의 2가지 영역에 대한 3개씩의 코어시료를 가지고 실험하였다. 즉, 총 24개 시료에 대해서 실험을 실시하였다. 그러나, 균열 등의 존재로 완도와 마산의 시료 1개씩에서 다른 실험결과들보다는 상당히 낮은 결과값이 제시되어 이 두 시료의 결과는 분석에서 제외하였다.

압축강도와 정탄성계수 실험전에 공시체의 상하면은 연마기로 연마하였으며 정탄성계수 실험시의 변형률은 LVDT를 사용하여 측정하였다. 압축강도는 KS F 2405 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 실험체에 충격을 가하여 실험체의 공명주파수를 측정하는 방법이다(Fig. 1(a) 참조). 감지기에서 구한 시간영역상에서의 신호를 FFT(fast fourier transform)하여 주파수 영역으로 변환시킨 후에 진폭이 가장 큰 첫 번째 모드의 공진 주파수로부터 종파속도를 구해 동탄성계수를 계산 한다(Fig. 1(b) 참조).

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

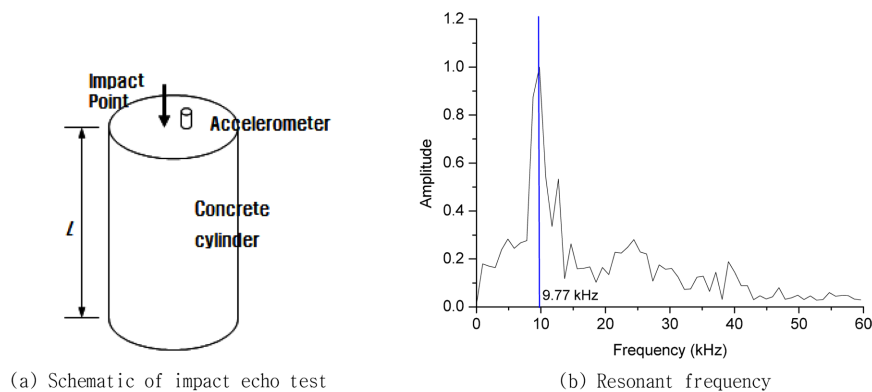


Fig. 1. Impact echo test.

여기서, V_c : 종파속도

f_1 : 첫 번째 모드의 공진주파수

L : 실험체의 길이

이러한 종파속도에서 동탄성계수를 식 (2)와 같이 구할 수 있다(한상훈 *et al.*, 2001; Hsiao *et al.*, 2008).

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

여기서, E_d : 동탄성계수

ρ : 실험체의 밀도

L : 실험체의 길이

3. 실험결과 및 분석

3.1 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계

항만별 노출환경에 따른 동탄성계수, 압축강도, 정탄성계수, 초기 현탄성계수, 단위중량 등의 실험값들은 Table 1에 정리되어 있다. 이러한 실험값들의 상관관계를 뚜렷하게 분석하기 위해서 Fig. 2에서는 이러한 실험값들을 그림으로 나타내었다. Fig. 2는 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계를 나타내고 있다. 그림과 같이 모든 정탄성계수값은 동탄성계수값보다 작다. 시료채취 지역에 따라서도 경향이 조금씩 다른데, 인천에서의 실험값보다는 마산에서의

실험값이 정탄성계수 대비 동탄성계수의 값이 크다. 즉, 같은 정탄성계수에서 인천 시료의 동탄성계수가 크며, 이것은 배합 콘크리트의 재료의 차이에서 기인한 것으로 판단된다. Fig. 2(b)는 시료의 채취 높이에 따라서 두 탄성계수의 상관관계이다. 그림에 나타난 바와 같이, 코어채취 높이는 두 탄성계수의 상관관계에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

두 값들의 상관관계를 좀 더 정확하게 파악하기 위해서 식 (3)을 이용하여 실험값들을 회귀분석하였다.

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

여기서, E_c : 정탄성계수(GPa)

a, b : 비례상수

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 0 이면 정탄성계수의 값도 0 이어야할 것이다. 이러한 조건들을 만족시키도록 식 (3)을 구성하였다(한상훈 *et al.*, 2001).

Table 1. Experimental results

Harbor	Exposure condition	Dynamic elastic modulus (GPa)	Static elastic modulus (GPa)	Initial chord elastic modulus (GPa)	Compressive strength (MPa)	Specific weight (kg/m ³)
Wando	Air zone	35	31	32	41	2,345
		29	22	24	23	2,322
		32	26	27	21	2,307
	Splash zone	35	24	30	25	2,345
		29	26	28	19	2,337
		32	28	28	24	2,357
Tidal zone	29	22	22	25	2,345	
	29	26	27	20	2,295	
Masan	Air zone	38	32	33	46	2,369
		39	36	37	40	2,349
		38	29	30	38	2,322
	Splash zone	35	29	28	39	2,292
		33	28	32	28	2,369
		33	24	26	32	2,345
	Tidal zone	36	20	23	27	2,353
		35	30	34	33	2,310
		36	27	30	28	2,357
Incheon	Air zone	38	26	30	32	2,322
		42	31	35	31	2,310
		34	23	24	28	2,333
	Splash zone	34	23	24	23	2,333
		33	21	25	17	2,288
		33	21	25	17	2,288

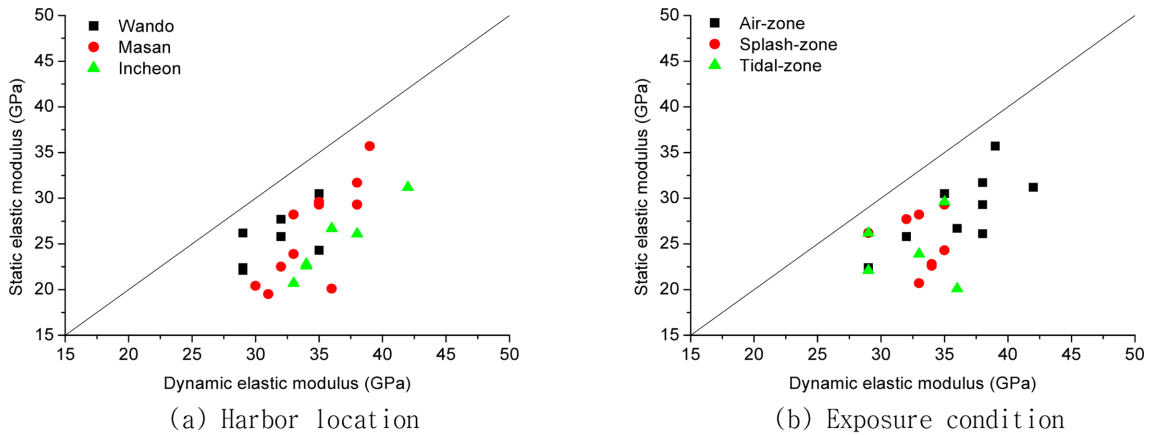


Fig. 2. Experimental results of dynamic and static elastic modulus.

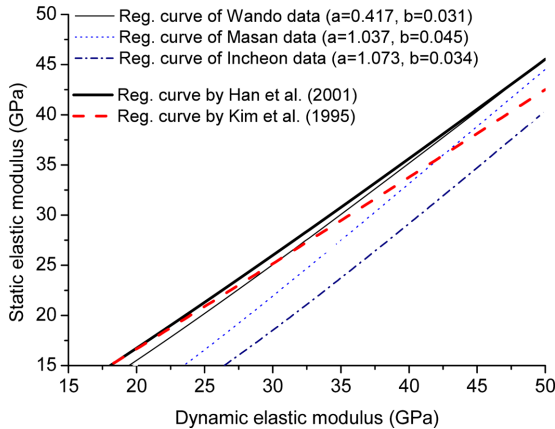


Fig. 3. Regression curves of dynamic and static elastic modulus.

Fig. 3은 각 항만들의 실험값에 대한 회귀분석결과와 기존 연구자들에 의해 제안되었던 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계 식들을 비교하고 있다. 그림에 나타난 바와 같이, 완도항의 결과는 기존 모델식과 유사하지만 마산항과 인천항의 결과는 기존 모델식과 큰 차이를 나타내고 있다. 이러한 차이는 콘크리트에 사용된 재료들의 물성 차이로 판단된다. 같은 정탄성계수에서 인천항의 동탄성계수가 가장 크고 완도항의 동탄성계수가 가장 작다. 실험실에서 파괴된 시료를 보면 인천항은 골재가 강자갈, 완도항은 쇠석으로 파악된다. 즉, 강성이 큰 강자갈을 골재로 사용하면 파의 전달속도가 빨라져서 동탄성계수가 커진다(Malhotra *et al.*, 1991). 그러나, 20에서 30 GPa의 정탄성계수 수준에서는 골재의 종류가 정탄성계수에 미치는 영향이 동탄성계수보다 작다(Neville 1995; Mehta *et al.*, 1993; 최신 콘크리트공학, 2005). 앞에서 살펴본 바와 같이, 동탄성계

수와 정탄성계수의 상관관계는 사용재료의 종류가 큰 영향을 미치므로 하나의 단일모델식으로 두 값들의 상관관계를 정의하는 것은 힘들고 골재나 시멘트의 종류 등에 대한 영향인자가 고려되어야 할 것으로 판단된다(한상훈 *et al.*, 2001).

3.2 동탄성계수와 초기현탄성계수의 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-변형률 곡선에서 변형률이 10×10^{-6} 과 50×10^{-6} 인 곡선상의 점들을 연결한 직선의 기울기를 ‘초기현탄성계수’로 정의하고 이 값을 동탄성계수와 비교하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 동탄성계수와 초기현탄성계수의 차이는 동탄성계수와 정탄성계수의 차이보다 작다. 앞에서 언급한 바와 같이 충격공진법은 시험체에 매우 작은 충격을 주어 공진주파수를 측정하는 것으로 이 방법에 의해 구해지는 동탄성계수는 매우 낮은 변형률 수준에서 측정된 초기접선탄성계수이므로 응력-변형률 곡선의 초기영역에서 구한 초기현탄성계수와와의 차이가 정탄성계수와와의 차이보다 작은 것은 합리적이다. Fig. 4(a)와 같이 완도지역 코어에 의한 두 탄성계수의 차이가 인천지역 코어에 의한 값보다는 작다. 그러나, 이러한 차이는 Fig. 2(a)의 동탄성계수와 정탄성계수의 차이보다는 작다. 마산지역 코어는 Fig. 2(a)와 같이 여전히 실험값들의 흠어짐이 큰 편이다. 한편, 시료채취 높이에 의한 두 탄성계수의 상관관계 차이는 크지 않음을 Fig. 4(b)를 통해 다시 확인할 수 있다.

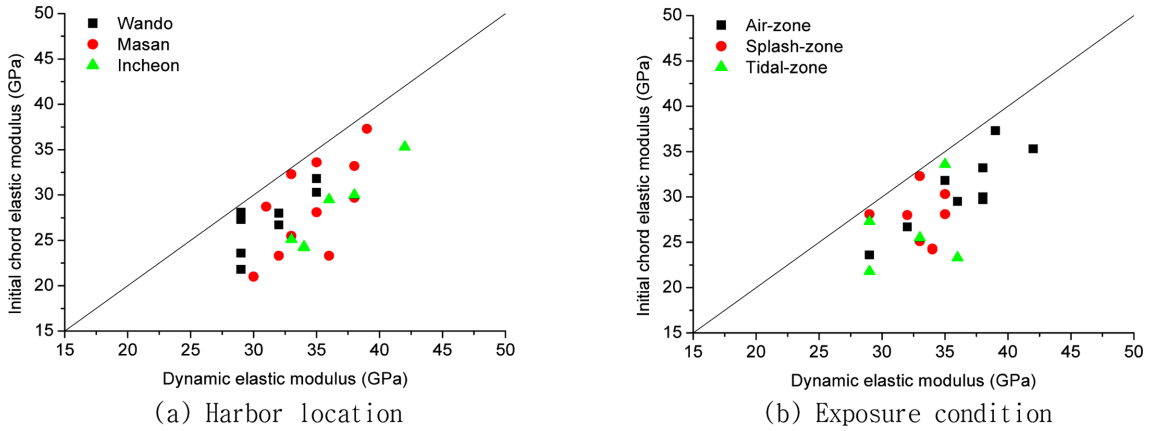


Fig. 4. Experimental results of dynamic and initial elastic modulus.

3.3 동탄성계수와 압축강도의 상관관계

구조물의 설계시나 진단시에 가장 많이 인용되는 재료 물성이 압축강도이다. 따라서, 본 논문에서 이러한 압축강도와 비파괴 검사법에 의한 동탄성계수를 비교하고자 한다. Fig. 5는 두 값의 상관관계를 나타내고 있다. Fig. 5(a)와 같이 동일한 압축강도에서 인천항 코어에 의한 동탄성계수가 마산과 완도지역 코어에 의한 동탄성계수보다 크다. 경향을 추정해보면 마산과 완도지역 코어들에 의한 압축강도와 동탄성계수의 상관관계는 유사함을 알 수 있다. 이러한 경향은 앞에서 언급한 바와 같이 콘크리트 사용재료의 차이에서 기인한 것으로 사료된다. 강성이 큰 강자갈을 사용한 인천항 시료는 같은 강도수준에서 좀 더 빠른 파전달속도를 가지고 이로 인해 다른 항만의 시료들보다는 큰 동탄성계수를 가진 것으로 추정된다. Fig. 5(b)와 같이 코어 채취높이는 압축강도와 동탄성계수의 상관관계에 큰

영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 일반적으로 고찰되는 압축강도와 정탄성계수의 상관관계는 Fig. 6에서 고찰되었다. 그림에 나타난 바와 같이 코어채취 항구의 종류나 코어 채취 높이에 따라 정탄성계수와 압축강도의 상관관계가 거의 변화하지 않음을 알 수 있다. 이러한 경향은 동탄성계수와 재료물성들의 상관관계가 코어채취 항에 따라 조금씩 달랐던 이전의 결과들과는 구분되는 경향이다. 한편, 두 값들의 상관성을 좀 더 명확하게 파악하기 위해 다음과 같은 모델식을 이용하여 실험값들을 분석하였다.

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

여기서, f_{cu} : 압축강도(MPa)

α, β : 비례상수

a, b : 식 (3)에서 도출된 비례상수

동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계식들은 앞 3.1절에

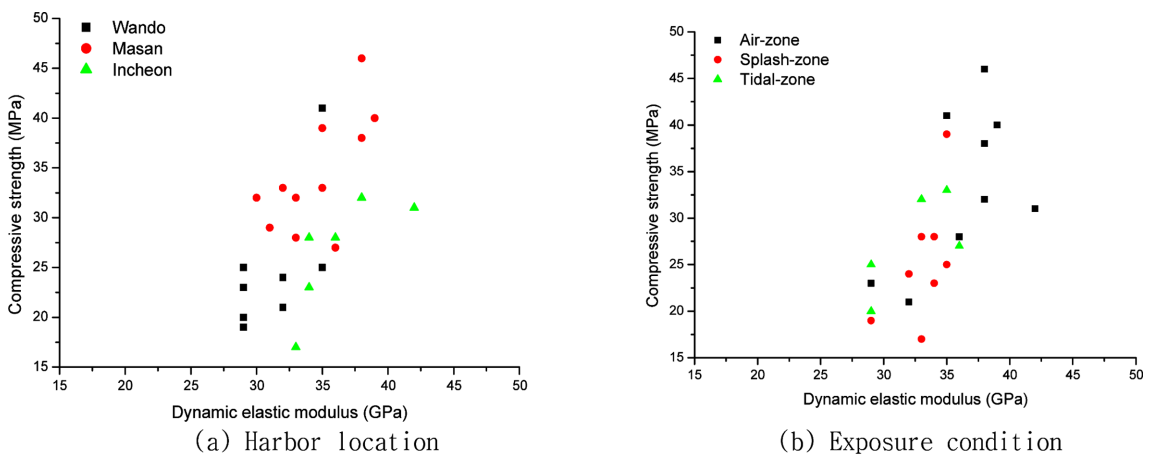


Fig. 5. Dynamic elastic modulus and compressive strength.

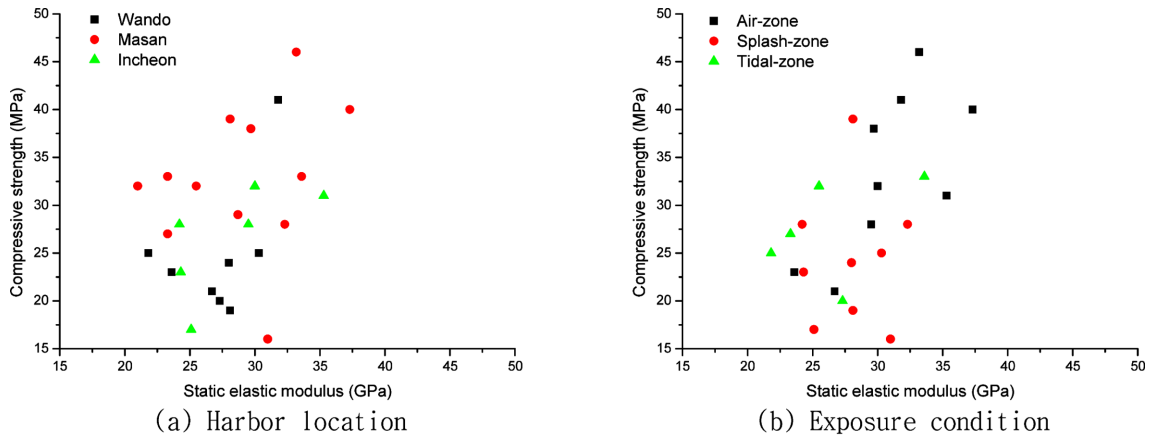


Fig. 6. Static elastic modulus and compressive strength.

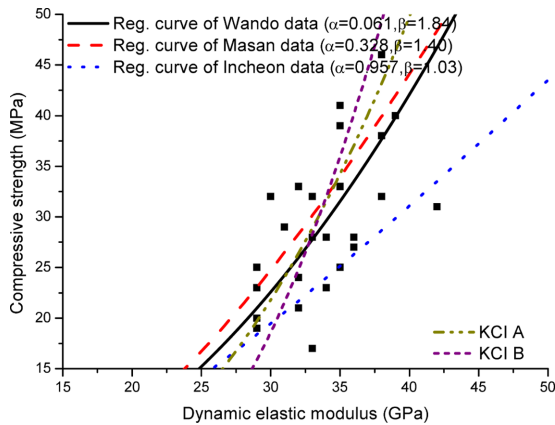


Fig. 7. Regression curves of dynamic elastic modulus and compressive strength.

서 구했으므로 이 상관관계식들을 이용하여 동탄성계수와 압축강도의 상관관계식들을 구하고자 하였다. 그래서 기존의 시방서나 논문들에서 제시한 압축강도와 정탄성계수의 상관관계식에 3.1절에서 구한 식들을 대입하여 식 (4)를 수식화하였다. Fig. 7은 회귀분석결과를 나타내고 있는데, 실험결과의 고찰에서와 같이 인천항에서의 실험결과와 완도와 마산에서의 실험결과는 경향상 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 한국콘크리트학회에서는 압축강도와 탄성계수의 상관관계 모델식을 30 MPa의 압축강도를 기준으로 2 가지를 제시하고 있다. Fig. 7의 한국콘크리트학회(KCI) A 모델식($E_c = 4.7\sqrt{f_{cu}}$)은 압축강도 30 MPa이하에서 적용하는 모델식이고 한국콘크리트학회(KCI) B 모델식($E_c = 3.3\sqrt{f_{cu}} + 7.7$)은 압축강도 30 MPa이상에서 적용하는 모델식이다. 이러한 모델식들과 마산항의 실험값을 바탕으로 구한 동

탄성계수와 정탄성계수 상관관계식을 이용하여 Fig. 7의 설계기준식에 의한 동탄성계수와 압축강도의 상관관계를 구하였다. 경향을 추정에 보면 KCI B식보다는 KCI A식과 실험값의 유사성이 더 깊은데, 30 MPa 이하의 압축강도가 많다는 점에서 이러한 경향성은 합리적이라고 판단된다. 그러나, 현재의 실험값들은 그 숫자가 작아 일반화가 가능한 수준의 모델식이나 뚜렷한 경향성을 주장하기는 어려운 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 현장 항만 콘크리트 구조물에서 채취된 코어시료에 대한 충격공진 실험을 통해 채취지역과 수직 위치에 따른 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계를 규명하고자 하였다. 시료의 채취 항에 따라 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계는 서로 다른 경향을 보였는데, 이것은 배합에 사용된 재료들의 물성 차이로 판단된다. 특히, 파괴된 시료들을 보면 인천항은 골재가 강자갈, 완도항은 쇠석으로 파악되는데, 강성이 큰 강자갈을 골재로 사용하면 파의 전달속도가 빨라져서 동탄성계수가 커진다. 그러나, 20에서 30 GPa의 정탄성계수 수준에서는 골재의 종류가 정탄성계수에 미치는 영향이 작아 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계는 시료 채취 항만에 따라 달라진다. 응력-변형률 곡선에서 변형률이 10×10^{-6} 과 50×10^{-6} 인 곡선상의 점들을 연결한 직선의 기울기인 초기현탄성계수와 동탄성계수의 차이는 동탄성계수와 정탄성계수의 차이보다 작았다. 한편, 같은 항의 대기부, 비말대, 간만대에서의 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계 등은 큰 차이를 나타내지 않았다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국해양과학기술진흥원에서 위탁시행한 항만리모델링 기반구조연구사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 또한, 항만들에 대한 시료 채취를 도와주신 (주)비엔티엔지니어링의 이상민 박사님과 강도실험을 도와주신 강릉대학교 양은익 교수님에게 감사드립니다.

참고문헌

- 김동수, 박형춘, 이광명, (1997). 충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴 검사. 한국콘크리트학회 논문집, 9(2), 109-119.
- 김진근, 김훈, 노재호, (1995). 공명주기식 동탄성계수를 이용한 초기재령 콘크리트의 역학적 성질 예측. 한국콘크리트학회 논문집, 7(5), 164-171.
- 최신콘크리트공학 (2005). 한국콘크리트학회.
- 한상훈, 김진근, 박우선, (2001). 온도와 재령이 콘크리트의 동탄성계수와 정탄성계수의 상관관계에 미치는 영향. 한국콘크리트학회 논문집, 13(6), 610-618.
- Hsiao, C., Cheng, C. C., Liou, T. and Juang, Y. (2008). Detecting flaws in concrete blocks using the impact-echo method, NDT & E international, 41(2), 98-107.
- Malhotra, V. M. and Carion, N. J. (1991). CRC^ohandbook on nondestructive testing of concrete, CRC Press.
- Mehta, P. K. and Monteiro, P.J.M.(1993). Concrete, Prentice Hall.
- Neville, A. M. (1995). Properties of concrete, Longman.

원고접수일: 2009년 10월 27일

수정본채택: 2009년 12월 1일

게재확정일: 2009년 12월 7일