

시멘트 모르타르 재료의 동탄성계수와 정탄성계수 비교 연구

오선환* · 김형수** · 장보안*** · 서만철*

*공주대학교 문화재비파괴진단연구실 · **한국수자원공사 수자원연구소 ·

***강원대학교 지구과학부

요 약

시멘트 모르타르 재료에 대한 동탄성계수와 정탄성계수의 차이를 고찰하고자 일곱 단계의 물시멘트 혼합비에 대해 다양한 길이의 시료를 제작, 시험하였다. 이들 시료의 동탄성계수 및 정탄성계수는 비중 측정, 초음파 전파 속도 측정 및 일축 압축 시험을 통해 결정되었으며, 시료에 대해 측정된 P파 및 S파 속도 분석은 기존의 아날로그 방식이 아닌 디지털 방식을 통해 수행되었다. 일련의 자료 처리 과정을 거친 디지털 방식 자료는, 초음파 전파 속도를 정밀하게 분석하는데 결정적인 역할을 할 수 있음이 확인되었으며, 복수 시료를 이용한 거리 변화에 따른 파의 지연 시간 변화를 이용한 속도 산정 방식이, 단일 시료 길이와 전파 시간을 이용한 기존 속도 산정 방식보다 더욱 정밀한 값을 보여주는 것으로 판명되었다. 밀도는 시료의 P파 및 S파 속도와 뚜렷한 양의 상관성을 보여주며, 일축 압축 강도 역시, 밀도와 뚜렷한 양의 상관성을 보여준다. 초음파 전파 속도를 통해 측정된 동탄성계수(E_D)와 일축 압축 시험을 통해 측정된 정탄성계수(E_S)의 비율(E_D/E_S)은 시료의 강도가 커질수록 함께 커지는 경향을 보여주었으며, 모든 시료에 대해 항상 동탄성계수가 정탄성계수보다 높게 평가됨이 확인되었다. 그러나 동포아송비(ν_D)와 정포아송비(ν_S)의 비율(ν_D/ν_S)은 강도와 특별한 상관성을 보여주지 않았으며, 그 비율도 69~122 %정도로 동포아송비와 정포아송비가 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

주요어: 탄성계수, 초음파 전파 속도, 포아송비, 일축 압축 강도

O, Seon Hwan, Kim, Hyung-Soo, Jang, Bo-An & Suh, Mancheol, 2000, A Comparative study on Dynamic & Static elastic modulus of cement mortar specimens. *Journal of the Korean Geophysical Society*, v. 3, n. 2, p. 127-138

ABSTRACT: This study was conducted to examine the differences between dynamic and static elastic constants by use of some laboratory tests of cement mortar specimens which have different water/cement mixing ratios. Specific gravity measurement, ultrasonic velocity estimating and uniaxial compression test were adopted to acquire the dynamic and static elastic constants. Digital data acquisition and processing enhanced the accuracy of estimating the velocities of specimens drastically. Also, the method using the gradient of propagation delay time in according to increment of specimen length more enhanced the accuracy than the method using the only one specimen length over total propagation time. The correlation between density and the P and S wave velocity of specimens shows reliable positive relation and the correlation between density and the strength of uniaxial compression has the similar relationship. The dynamic Young's modulus (E_D) is always greater than the static Young's modulus (E_S) and there is increasing tendency of the ratio (E_D/E_S) according to the increase of density or strength of the specimens. On the other hand, there is no typical relationship between dynamic Poisson's ratio (ν_D) and static Poisson's ratio (ν_S) and just the ratio of ν_D/ν_S ranges from 69 to 122 %.

Key words: Elastic modulus, Ultrasonic velocity, Poisson's ratio, Uniaxial compressive strength

(O, Seon Hwan and Suh, Mancheol, Nondestructive Research Lab. of Cultural Property, Kongju National University, Kongju, Chungnam 314-701, Korea; Kim, Hyoung-Soo, Water Resources Research Institute, Korea Water Resources Corporation, 462-1, Jonmin-Dong, Yusung-Gu, Taejon, 305-390, Korea; Jang, Bo-An, Division of Earthscience, Kangwon National University, 192-1 Hyoja-2-dong, Chuncheon, Kangwon 200-701, Korea. email: seonano@kongju.ac.kr)

1. 서 론

암석의 변형 특성을 규명하는 것은 구조물의 설계와 사공과정에 있어서 매우 중요한 과정중의 하나이다. 따라서 실내에서 행해지고 있는 암석이나 구조재료에 대한 실험은 암반공학적 사업에 있어서 요구되는 조사의 한 부분을 차지하고 있다. 그러나, 변형 특성을 측정하기 위한 실내시험은 준비과정에서 결과 및 분석의 과정까지 오랜 시간이 소요되고 또한 매우 많은 비용이 필요하기 때문에 제한적으로만 사용되고 있는 실정이다.

변형 특성을 규명하는 또 다른 방법은 동탄성계수를 산정 하여 결정하는 것으로, 물질의 변형 특성이 물질 내부로의 초음파 전파 속도에 의해 결정된다(Kolsky H., 1953)는 사실에서 기인한다. 이러한 탄성파나 음파의 확산에 관련된 기술은 현장과 같은 광범위한 부분에 대한 조사라 할지라도 실내 시험에 비해 신속하고 저렴한 비용으로 수행할 수 있기 때문에 광물자원탐사, 광산작업, 암반사면 현장조사 등 암석, 암반의 특성을 분석하는데 있어서 그 중요성이 증대되고 있다. 그럼에도 불구하고 동적 계수의 측정이 아직까지는 여러 사업에서 활성화되지 못하고 있는 실정이다. 그 이유는 동적 계수의 결정에 있어서 P파의 결정에 비해 S파의 결정이 용이하지 않아서 S파의 변화에 따라 계수의 편차가 매우 심하게 발생하기 때문이다. 이는 대부분의 암석이 완전 선형 탄성이나, 균질 등방의 성질을 보이지 않기 때문이며, 따라서 동적 시험에 의한 결과로부터 확실한 정탄성계수 값이 추정될 경우에 한해 암반 공학적 사업 분야에 정성적인 자료만을 제공하고 있다.

Simmons & Brace(1965), King(1970), Geyer & Myung(1971), Myung & Helander(1972), Lama & Vutukuri(1978), Paulsson & King(1980)등의 연구에 의하면, 일반적으로 대기압 또는 낮은 봉압(confining pressure)의 조건 하에서 강제 건조시킨

암석의 동탄성계수는 정탄성계수에 비해 높은 값을 보이고 있으며, 그 범위는 0 ~ 300% 정도로 보고 되어있다. 동포아송비의 경우도 정포아송비에 비해 다소 큰 값을 보이는 것으로 알려져 있다. 이는 암석내에 존재하고 있는 미세균열이나 미세구조가, 동적 시험시 초음파의 전파 특성보다는 정적 시험을 수행하는 과정에서 암석의 변형 특성에 영향을 미치기 때문인 것으로 설명될 수 있다. 따라서 발달된 미세균열의 양이 상대적으로 적을 경우, 정탄성계수는 동탄성계수 값과 거의 일치하고 있다.

본 연구는 현장의 암석, 암반에 비해 상대적으로 선형 탄성과 균질 등방성의 특징을 나타낼 수 있는 시멘트 모르타르를 이용하여 제작된 시료에 대하여, 동탄성계수의 산정 과정에서 신뢰성을 높일 수 있는 속도 측정방법을 통한 정량화된 초음파 속도값을 획득하고, 밀도와 초음파 속도 측정으로부터 계산된 동탄성계수와 일축압축시험을 통해 계산된 정탄성계수간의 연관성을 실험적으로 비교하고자 하였다.

2. 시료 준비

탄성계수의 산정에 있어서 암석은 등방성과 균질성 및 선형 탄성의 특성을 보인다는 가정하에 결과를 획득하지만, 실제로는 이방성과 불균질성인 시료가 대부분이다. 따라서 본 시험에 사용된 시료는 등방성과 균질성을 유지할 수 있도록 물, 시멘트, 모래를 혼합하여 제작된 모르타르를 이용하였다. 탄성계수는 응력에 비례하고 변형률에는 반비례하는 관계를 보이고 있으므로, 시험시료의 탄성계수와 강도에 차이를 주기 위한 방법으로 시멘트 모르타르를 제작할 때, 물과 시멘트의 비율에 차이를 주어 시료를 제작하였다(김무한외, 1991). 시멘트의 중량에 대한 물의 중량의 비(W/C)를 25%, 30%, 35%, 40%, 50%, 60%, 70%의 7 단계로 구분하여 배합한 후, 비빔효율을 높이기 위해 물/시멘트비 25, 30, 35%

Table. 1 Water, Cement & Sand mixture table

Water/Cement Ratio (%)	Water		Cement		Sand	
	(kg)	ratio	(kg)	ratio	(kg)	ratio
25	5.23	0.25	20.92	1.0	21.16	1.01
30	5.41	0.3	18.05	1.0	23.01	1.27
35	5.54	0.35	15.83	1.0	24.25	1.54
40	5.94	0.4	14.87	1.0	24.27	1.63
50	5.66	0.5	11.34	1.0	27.91	2.46
60	5.63	0.6	9.36	1.0	29.64	3.17
70	5.99	0.7	8.51	1.0	29.43	3.46

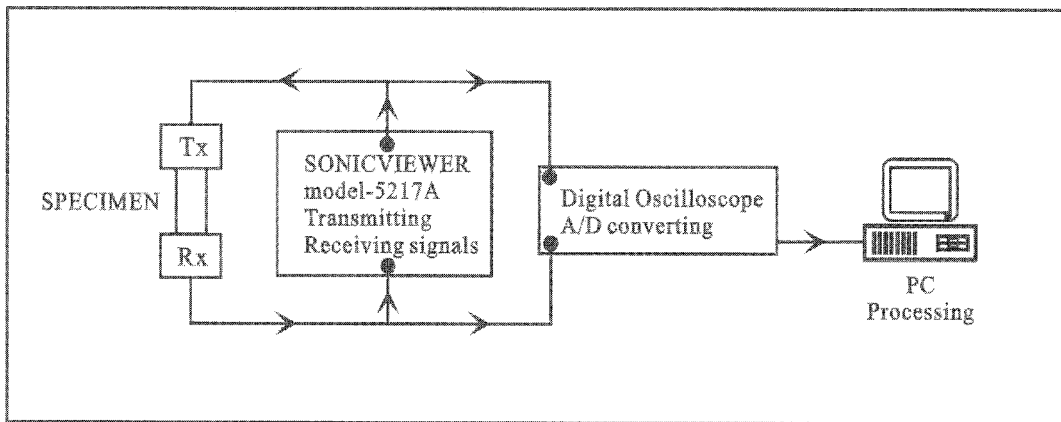


Fig. 1. Block diagram of ultrasonic test system.

시료에 대해서는 초기에 시멘트 중량의 1 % 무게에 해당하는 감수제를 물과 함께 혼합하였다 (Table. 1).

혼합된 재료들을 직경 15 cm, 길이 30 cm의 몰드에 넣어 상온에서 24 시간 이상 건조시킨 후, 28 일 이상 수중양생으로 시료를 성형하였다. 콘 크리트나 모르타르를 양생할 경우, 강도는 재령과 더불어 증가하게 되지만, 일반적으로 표준양생을 한 재령 28 일 시료의 강도를 기준으로 재령 7 일의 강도는 67 %, 재령 5 년의 강도는 135 %로 재령 28 일을 전후로 하여 강도의 증가율이 현격히 낮아진다(서영갑외, 1999). 따라서 시험에 사용될 모르타르 시료는 재령 28 일 이상의 수

중양생 후에 시험에 적합한 크기로 가공하였다.

시험 시료는 동탄성계수 측정용 시료와 정탄성계수 측정용 시료로 구분된다. 동탄성계수 측정용 시료는 직경 15 cm, 길이 30 cm로 성형된 시료에서 직경 5.4 cm(NX-size)의 원통형시료를 Core Drill을 통해 채취한 후, 각각의 물/시멘트 비에서 길이 5 cm에서 15 cm까지 2 cm 간격으로 각각의 물/시멘트 비에서 6 개씩 총 42 개의 시료를 제작하였다(Fig. 1). 시료 양끝 면의 편평도는 0.02 mm 이하가 되도록 표면 연삭기(KSA500HA, 유압반자동식)를 이용하여 연마하였으며, 105 °C 의 온도를 유지할 수 있는 건조로에서 24 시간 이상 강제건조 시킨 후 시험을 실시하였다(ISRM,

Table. 2 Summary of test results

W/C ratio	V_P (m/s)	V_S (m/s)	density (kg/m ³)	E_D (GPa)	ν_D
25	4979	3128	2000	45.95	0.174
30	4350	2746	1947	34.32	0.169
35	4195	2660	1940	31.95	0.164
40	3846	2255	1930	24.30	0.238
50	3441	1965	1854	18.01	0.258
60	3045	1775	1800	14.09	0.243
70	2706	1667	1763	11.70	0.194

1979). 정탄성계수 산정을 위해 제작된 시료는 앞의 경우와 동일한 조건으로 제작되었다. 다만, 시료의 직경에 대한 길이의 비율이 200~400 % 정도일 경우에는 일축 압축강도 값이 거의 일치하지만 그 이하의 비율로 제작할 경우 일축 압축강도 값이 커지게 되므로(김성균외, 1995), 시험 결과의 신뢰성을 높이기 위해 시료의 길이를 직경에 대해 200 ± 10 % 정도의 크기로 제작하여, 시료의 직경이 5.27 cm에서 5.47 cm임을 감안할 때, 10.22 cm에서 11.51 cm의 길이로 물/시멘트비 25, 30, 35, 60 % 시료는 각각 5 개씩, 물/시멘트비 40, 50, 70 % 시료는 각각 3 개씩, 총 29 개의 측정용 시료를 제작하였다.

3. 동탄성계수

3.1. 초음파속도 측정

속도 측정에 관한 장비 및 순서를 Fig. 1에 도시하였다.

시험에 사용된 장비는 SONICVIEWER model-5217A (일본, oyo사)로 P파는 500 KHz, S파는 100 KHz의 초음파를 발생시켜서 발신기를 통해 시료를 통과시킨 후, 수신기를 통해 다시 장비로 파가 되돌아오는 과정에서 모든 신호는 이날로그 형식이므로, Digital Oscilloscope (Tek THS-720, 미국)를 이용하여 트리거신호와 초음파 신호를 이날로그 형식에서 디지털 형식으로 변환시켜 PC로 전송하였다. 전송된 신호는 Colorado school of mines에서 발전시킨 연구용 소프트웨어 SU (Seismic Unix)를 이용하여 포맷 변환과정을 거친

후, 탄성과 탐사자료 해석 방법과 유사하게 자동 이득조정 또는 스펙트럼 분석과 필터링을 한 후, 작성된 결과로부터 길이의 증가에 대한 시간의 변화량을 계산하여 P파와 S파의 속도를 계산하였다(Fig. 2).

3.2. 초음파속도 결정

S파 측정의 경우, 발/수신기와 시료 사이, 결합재(couplant)에 의한 접촉부에서의 S-P파 변환(S-P conversion)과 P-S파 변화에 의해 실제로 시료 내부를 P파의 형태로 통과한 파를 초동으로 감지되는 현상이 S파 속도 결정에 많은 오류를 일으키는 것으로 분석되었다(Fig. 3). 결합재를 사용하지 않은 경우에는 초동의 결정이 비교적 용이하였으나(Fig. 3(c)), 결합재를 사용하였을 때는 초동결정에 어려움이 있으며, 신호로 간주하기 어려운 잡음(A)들이 초동보다 먼저 수신기에 도달되는 경우도 발생하였다(Fig. 3(d)). 그러나, 결합재를 사용하지 않고 획득한 자료는 zero-crossing을 할 경우 편향되기 때문에(Fig. 3(a)) 초동을 결정할 때 편향의 영향을 신중히 고려하였다.

3.3. 동탄성계수 계산

동탄성계수(E_D)와 동포아송비(ν_D)는 P파의 속도(V_P)와 S파의 속도(V_S), 그리고 밀도(ρ)를 이용하여 계산할 수 있으며, Lama R. D. & Vutukuri V. S. (1978)와 M. S. King (1983)은 아래와 같은 식을 이용하여 동탄성계수와 동포아송비를 계산하였고,

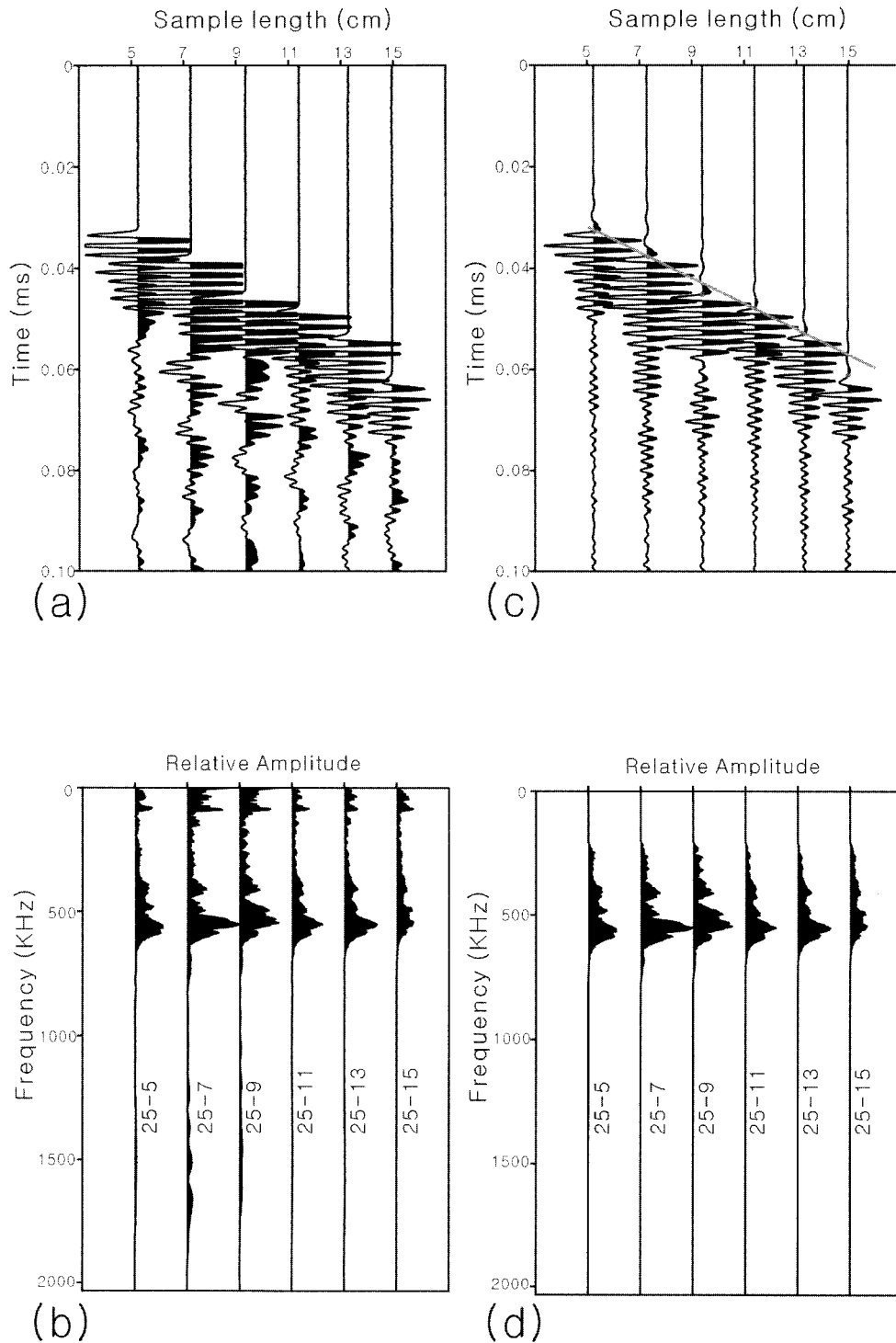


Fig. 2. (a) Stacked raw data acquired from W/C ratio 25 % specimen (VS), (b) Frequency spectra of (a), (c) data filtering and first arrival time picking of (a), (d) Frequency spectra of (c)

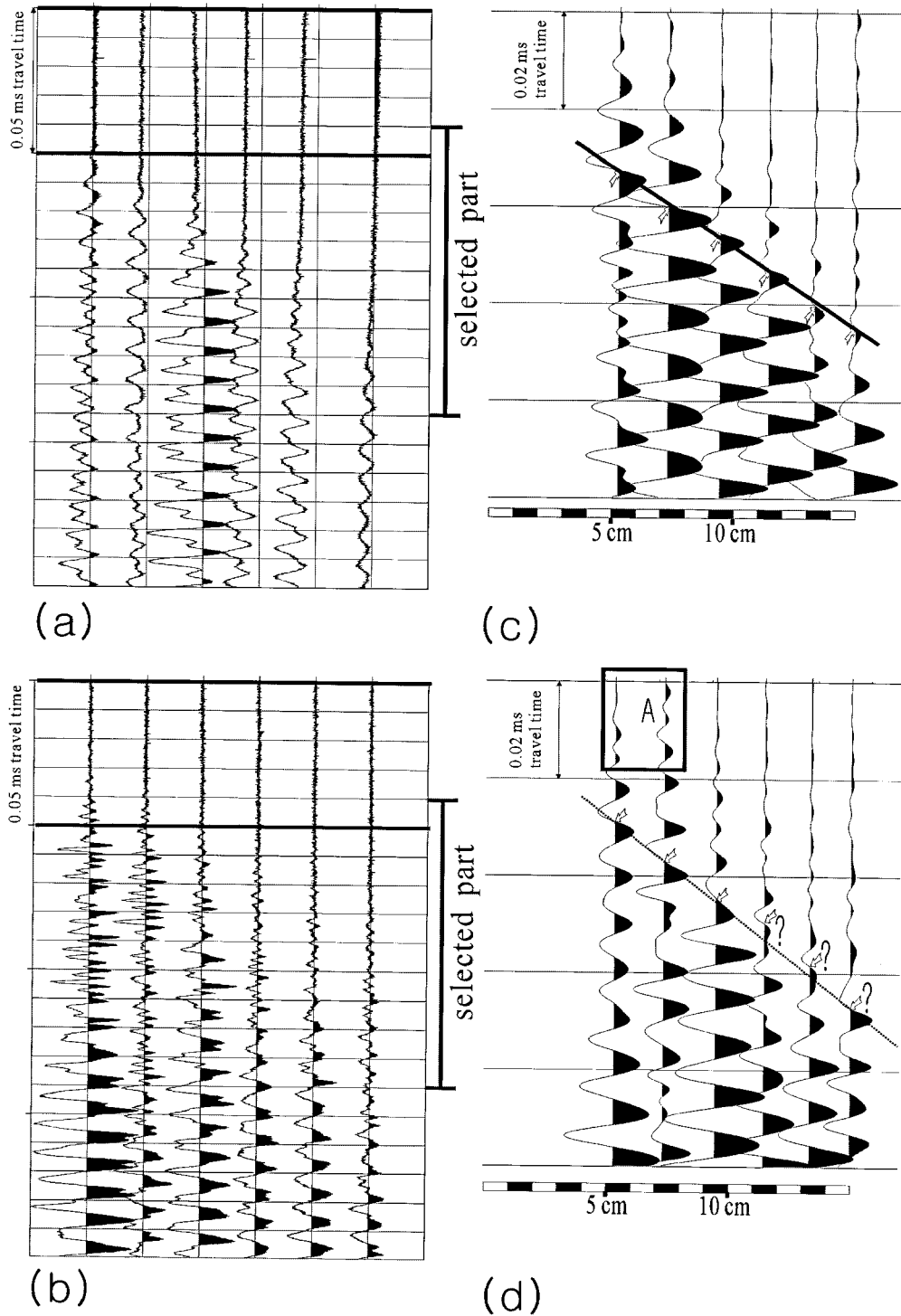


Fig. 3. Effect of couplant : W/C ratio 25 % specimen (a) Raw data : couplant is not used (b) Raw data: couplant is used, (c)&(d) Part of (a)&(b) : 20-25 KHz bandpass filtering

$$E_D = \rho V_S^2 \left[\frac{3V_P^2 - 4V_S^2}{V_P^2 - V_S^2} \right] \quad (1)$$

$$\nu_D = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)} \quad (2)$$

F. Homand *et al.* (1993)은 동탄성계수를 계산할 때 앞의 방법과는 다른, P파의 속도와 밀도, 그리고 포아송비를 이용하여 동탄성계수를 계산하였다.

$$E_D = \rho V_P^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (3)$$

이상의 수식들은 대상 매질이 균질하고 등방 및 탄성체의 성질을 보인다는 가정 하에 적용되고 있으므로, 본 연구에서도 균질, 등방의 전제

조건 하에서 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 계산하였으며, Table. 2에 물/시멘트비에 따른 속도와 밀도, 그리고 이 값으로 계산된 동탄성계수와 동포아송비를 나타내었다.

4. 정탄성계수

4.1. 일축압축시험

시료 준비과정을 거쳐 제작된 시료에 대해 가압축과 평행한 방향 및 수직방향으로 한 개씩 길이 5 mm의 변형률 게이지 두 개를 부착하여 축 방향 변형률과 횡 방향 변형률을 획득하였다 (Fig. 4).

압축시험기는 영점조정과 하중속도의 조절이 가능한 server controller 가 부착된 KDC 9409-20(용량 100 ton)으로, 하중 속도는 평균 0.63 ~ 0.64 MP/s

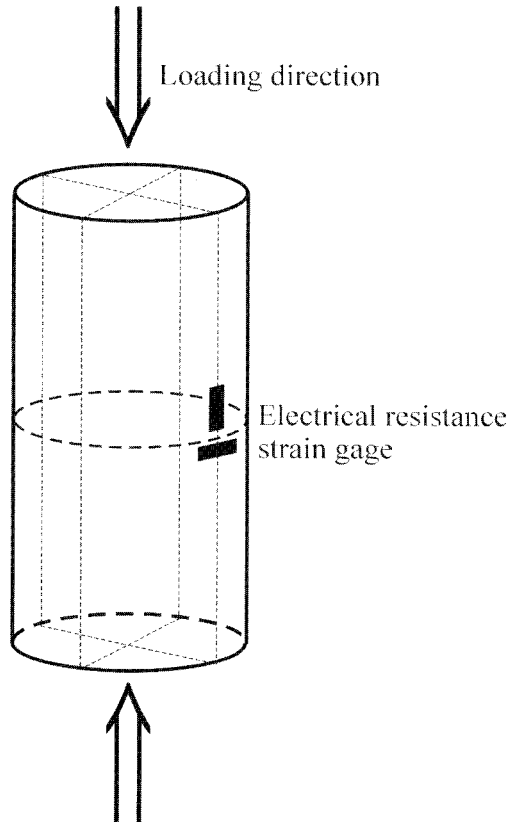


Fig. 4. Shape of test specimen & locations of electrical resistance strain gages

로 하였다(ISRM, 1981). 가압 하중과 변형을 게이지에서 획득된 축 방향과 횡 방향의 변형률은 Data Logger를 통하여 digital 신호로 변환된 후, 개인용 컴퓨터에 아스키파일로 저장하였다.

4.2. 정탄성계수 계산

일축압축강도(σ)는 다음과 같이 계산되며,

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

여기서, P 는 시료에 가해진 압축력이고, A_0 는 압축력을 받는 초기의 단면적이다. 압축응력

을 양의 값(positive)으로 정의할 경우, 인장응력은 반대로 음의 값(negative)으로 나타나지만, 본 연구에서는 응력과 변형률 상호간의 비교를 용이하게 하기 위해 모두 양의 값(positive)으로 정의하였다(Fig. 5).

정탄성계수(영률, E_s)는 축방향의 변형률에 대한 축방향의 응력의 비로 정의되며, 응력-변형률 곡선의 기울기로 계산할 수 있다(C. E. Fairhurst, J. A. Hudson, 1999). 본 연구에서의 정탄성계수는 파괴강도의 50%수준에서 발생된 변형률에 대한 응력수준으로 계산하는 접선 탄성계수(Tangent Young's Modulus)를 적용하였으며, 계산된 정탄성계수 값은 Table. 3과 같다.

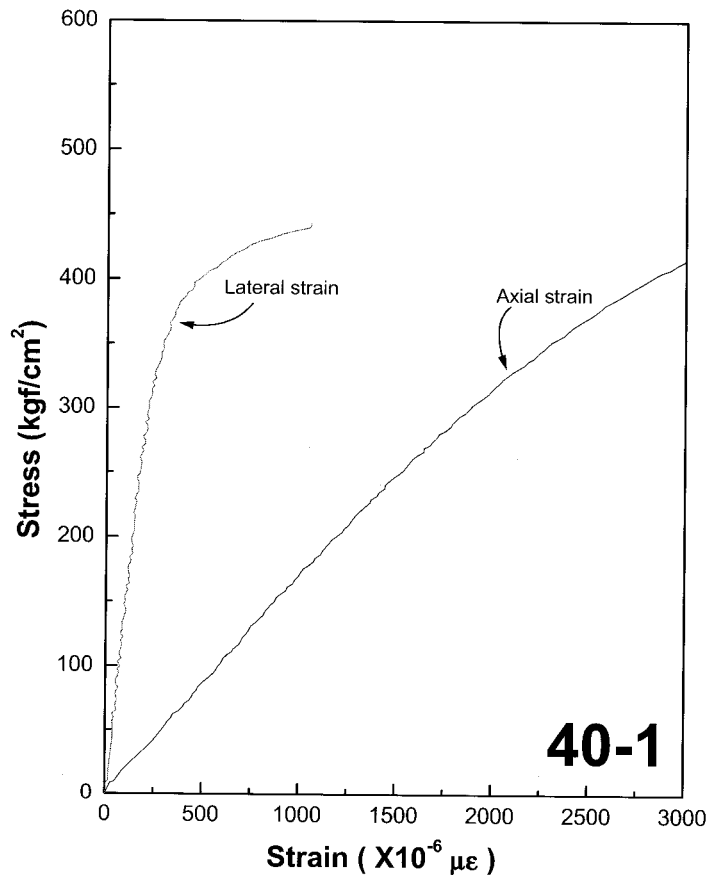


Fig. 5. Stress-Strain curve under uniaxial compressive stress (W/C 40 % sample)

Table. 3 Summary of test Results

Sample Name	Length (cm)	Diameter (cm)	Density (kg/m ³)	UCS* (kgf/cm ²)	E _s (GPa)	Poisson's ratio
25-1	11.29	5.46	2.00	911	19.7	0.383
25-2	11.5	5.46	2.03	850	20.7	0.212
25-3	11.5	5.46	1.98	818	20.7	0.283
25-4	11.46	5.46	1.99	847	19.1	0.200
25-5	11.45	5.46	2.00	908	21.5	0.183
30-1	11.42	5.46	1.947	726	17.1	0.338
30-2	11.39	5.46	1.951	763	18.4	0.164
30-3	11.24	5.47	1.945	776	19.9	0.196
30-4	11.48	5.46	1.945	745	18.1	0.209
30-5	11.42	5.46	1.947	895**	24.4	0.337
35-1	11.34	5.46	1.93	684	16.8	0.368
35-2	11.45	5.46	1.94	693	20.5	0.181
35-3	11.48	5.46	1.94	624	18.4	0.191
35-4	11.55	5.47	1.95	648	18.5	0.190
35-5	11.34	5.46	1.94	784**	22.4	0.262
40-1	10.58	5.27	1.93	447**	15.3	0.115
40-2	10.57	5.28	1.93	565	20.8	0.257
40-3	10.64	5.28	1.93	555	17.6	0.228
50-1	10.5	5.28	1.854	358	18.5	0.279
50-2	10.5	5.28	1.852	353	14	0.178
50-3	10.55	5.47	1.856	378	15.5	0.216
60-2	11.42	5.46	1.8	237	8.1	0.196
60-3	11.51	5.46	1.792	245	8.9	0.277
60-4	11.47	5.46	1.803	250	10.7	0.169
60-5	11.38	5.45	1.805	234	8.7	0.159
70-1	10.25	5.29	1.763	160	8.96	0.252
70-2	10.25	5.28	1.765	187	8.5	0.196
70-3	10.22	5.28	1.761	148	6.5	0.107

* : Uniaxial Compressive Strength, ** : abnormal value, ignored

Table. 4 Comparison of Dynamic & Static Elastic Modulus

W/C Ratio	Density (kg/m ³)	UCS (kgf/cm ²)	ED (GPa)	ES (GPa)	$\frac{E_D}{E_S}$	ν_D	ν_S	$\frac{\nu_D}{\nu_S}$
25	2000	867	45.95	20.30	2.26	0.174	0.252	0.69
30	1947	753	34.32	18.40	1.87	0.169	0.227	0.74
35	1940	662	31.95	18.50	1.73	0.164	0.232	0.71
40	1930	560	24.3	17.90	1.36	0.238	0.200	1.19
50	1854	363	18.01	16.00	1.13	0.258	0.224	1.15
60	1800	242	14.09	9.10	1.55	0.243	0.200	1.22
70	1763	165	11.70	8.00	1.46	0.194	0.185	1.05

5. 결론 및 토의

동탄성계수와 정탄성계수를 상호 비교하기 위하여, 시멘트 모르타르 재료를 이용한 시료를 제작하여 정밀한 시험을 통해, 이들 계수들에 대한 차이 및 특성을 고찰하였다. 시험은 초음파를 이용한 P파와 S파 속도측정, 비중측정 그리고 일축압축 시험을 통해 수행되었다.

본 연구에서는 동탄성계수를 결정할 때, 가장 중요한 요소인 속도측정에 정확성을 기하고자, 디지털 방식의 자료 취합 및 자료 처리를 수행하였으며, 길이 단계별 시료에 대한 초동 지연 차이를 이용하여 속도를 평가하였다. 디지털 방식 자료 이용과 길이 단계별 측정은 기존의 단일 시료에 대한 아날로그 방식 측정에 비해 월등히 정밀한 속도 분석이 가능함을 본 연구에서 확인할 수 있었다. 길이 단계별 측정 방식이 초동의 정확한 위치 보다 같은 위상 신호에 대한 위치 확인만으로 시료의 초음파 전파 속도를 측정할 수 있다는 장점을 갖기는 하지만, 실제 암석 시료 등을 측정할 경우, 다수의 단계별 길이 시료 제작이 어렵다는 문제점을 갖고 있다. 이러한 어려움을 해결하기 위한 방법으로는, 암석 시험용 시료를 가능한 범위 내에서 길게 제작한 후, 길이를 단계별로 줄여 나가면서 각 단계별로 초음파 속도를 측정하는 방식을 추천 할 수 있다.

일곱 단계의 물시멘트 혼합비에 대한 시험 결과, 동탄성계수, 정탄성계수, 동포아송비 및 정포아송비를 구할 수 있었다(Table 4). 동탄성계수

가 정탄성계수보다 크게 평가되는 경향이 뚜렷이 나타났으며, 그 비율은 밀도 및 파괴 강도가 커질수록 더 커지는 경향을 보여주었다(Fig. 6). 실제 시험을 통해 확인한 동탄성계수와 정탄성계수는 최소 1.13 배에서 최대 2.26 배 사이의 범위를 갖는 것으로 평가되어, 현장에서 탄성과 속도를 통해 획득된 동탄성계수를 구조물 설계 값으로 사용할 경우는 그 값에 대한 적절한 보정이 요구될 것으로 판단된다. 한편, 포아송비의 경우는, 동포아송비와 정포아송비 변화가 밀도 및 파괴 강도와는 특별한 상관성이 없는 것으로 나타났으며, 그 비율도 동적인 방법의 평가와 정적인 방법의 평가 중 어느 방법에 의한 평가 값이 더 크거나 작은 현상을 보여주지 않았다. 본 연구를 통해 확인한 동포아송비와 정포아송비의 비율은 약 0.7 배에서 1.2 배 정도의 범위를 보여주는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업으로 지원된 공주대학교 자연과학대학 문화재비파괴진단연구실 제 2 호 논문이며 재정적 지원에 감사 드립니다. 또한 실험에 관련된 많은 조언과 도움을 주신 대전대학교 김학준 교수님과 수자원연구소 실험실 관계직원, 강원대학교 지구물리학과 암석역학실험실 대학원생들에게도 감사드립니다.

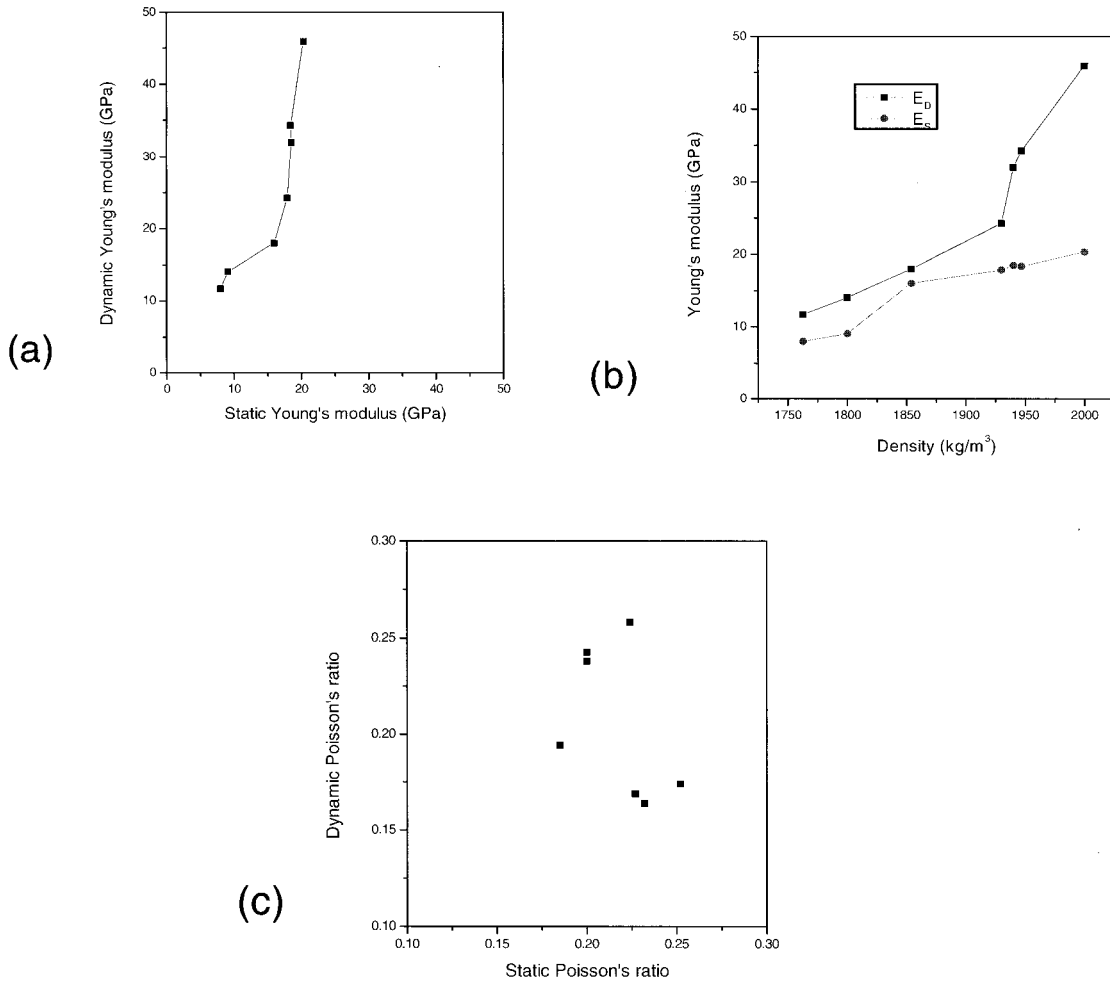


Fig. 6. (a) E_D vs E_S , (b) E vs density, (c) ν_D vs ν_S

참고 문헌

김무한, 신현식, 김문한, 1991, 건축재료학, 문운당, p. 156.
 김성균, 김영화, 박창업, 서만철, 송무영, 장보안, 정상용, 조봉곤, 지질공학원론, 교학연구사, pp. 56-57.
 서영갑, 안주옥, 1999, 철근콘크리트 공학, (주)사이텍미디어, pp. 6-14.
 C. E. Fairhurst, J. A. Hudson, 1999, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 36, pp. 279-289.
 F. Homand, E. Morel, J.-P. Henry, P. Cuxac, E. Hammade, 1993, Characterization of the Moduli of Elasticity of

an Anisotropic Rock Using Dynamic and Static Methods, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 30, No. 5, pp. 527-535.
 Kolsky H., 1953, Stress Waves in Solids, Clarendon Press, Oxford, p. 211.
 Lama R. D. & Vutukuri V. S., 1978, Handbook of Mechanical Properties of Rocks, Trans. Tech. Publ., Clausthal, pp. 196-220.
 M. S. King, 1983, Static and Dynamic Elastic Properties of Rock from the Canadian Shield, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 20, No. 5, pp. 237-241.
 Paulsson B. N. P. & King M. S., 1980, A cross-hole

- investigation of rock mass subjected to heating. Proc. Int. Symp. on Subsurface Space: Rockstore 80, Vol. 2, pp. 969-976.
- Simmons G. & Brace W. F., 1965, Comparison of static and dynamic measurements of compressibility of rocks. J. geophys. Res. 70. 5649-5656.
- King M. S., 1970, Static and dynamic elastic moduli of rocks under pressure. Proc. 11th U. S. Symp. on Rock Mechanics, Berkeley, pp. 329-351.
- Geyer R. L. & Myung J. I., 1971, The 3-D velocity log : a tool for in-situ determination of the elastic moduli of rocks. Proc. 12th U. S. Symp. on Rock Mechanics, Rolla, pp. 71-107.
- Myung J. I. & Helander D. P., 1972, Correlation of elastic moduli dynamically measured by in-situ and laboratory techniques. Proc. 13th. Annual Logging Symp. of SPWLA, Tulsa, pp. H1-H25.
- ISRM Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 16, No. 2, pp. 141-156.
-
- 2000년 1월 27일 원고접수
2000년 6월 20일 원고채택