함수율과 이방성을 고려한 석조문화유산의 초음파 측정방법 설정

조영훈 | 이찬희¹

공주대학교 문화재보존과학과

Establishment of Ultrasonic Measurement Method for Stone Cultural Heritage Considering Water Content and Anisotropy

Young Hoon Jo | Chan Hee Lee¹

Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Gongju, 314-701, Korea

¹Corresponding Author: chanlee@kongju.ac.kr, +82-41-850-8543

초록 이 연구에서는 암석의 함수율과 이방성에 따른 초음파속도 변화를 분석하여 석조문화유산에 적합한 측정방법을 설정하였다. 암석의 함수율과 포화도는 건조 초기에 급격한 변화를 보이다가 변화율이 서서히 줄어드는 지수함수 형태를 나타냈다. 그러나 초음파속도 및 변화율은 10시간의 자연건조 이후 거의 일정한 수치를 유지하였다. 따라서 수분에 포화된 석조문화유산은 기상환경 및 함수조건을 고려하여 약 10시간의 자연건조 후에 초음파 측정을 수행해야 한다. 이방성지수는 화강암과 석회암에서 가장 높은 수치를 보였으며, 간접전달방법이 직접전달방법에 비해 이방성에 둔감한 측정법으로 나타났다. 그러나 간접전달방법에 의한 이방성은 모든 암석에 미약하게나마 존재하므로 다양한 방향성을 고려한 초음파 측정이 요구된다. 이 연구결과는 석조문화유산의 암석학적 특성에 적합한 맞춤형 비파괴진단과 신뢰도 높은 정밀 평가에 크게 기여할 것으로 사료된다.

중심어: 석조문화유산, 초음파 측정방법, 함수율, 이방성, 신뢰도

ABSTRACT This study was focused on measurement methods for stone cultural heritages by analyzing Ultrasonic (P-wave) velocity variations according to the water content and anisotropy of rocks. As a result of analyzing of rock properties, the water content and saturation degree were rapidly changed at the beginning of drying and then showed exponential curve which their rates of change gradually decreased. However, P-wave velocity and its rate of change maintained constant values after natural drying of 10 hours. Therefore, the ultrasonic measurement for stone cultural heritages should be performed after natural drying of 10 hours considering the weather and moisture conditions. In addition, the highest values of anisotropy coefficient exhibited in granite and limestone, and indirect method was insensitive to anisotropy compared to direct method. However, all rocks remained anisotropy by indirect method. Accordingly, ultrasonic measurement considering various directions is required. The research results will contribute to customized non-destructive testing and precise diagnosis for lithological characteristics of stone cultural heritage.

Key Words: Stone cultural heritage, Ultrasonic measurement method, Water content, Anisotropy, Reliability

1. 서론

암석의 강도와 물성을 측정하는 방법에는 대표적으로 파괴를 동반하는 압축강도 시험과 비파괴방법인 초음파 측정이 있다(Vishnu *et al.*, 2010). 이 중 압축강도 시험은 암석을 적당한 크기와 모양으로 성형해야하기 때문에 석조문화유산에 직접적으로 적용할 수 없다. 그러나 초음파 측정은 초음파가 가지고 있는 물리적 성질을 이용하여 암석의 강도, 균열심도 및 내부결함 등을 비파괴적으로 조사할 수 있다(Sharma and Singh, 2008). 특히 이 방법은 현장 적용성과 기기적 내구성이 뛰어나 석조문화유산의 풍화도 평가에 널리 사용되고 있으며(Lee *et al.*, 2011; Jo *et al.*, 2012; Fort *et al.*, 2013), 최근에는 손상도 모니터링을 비롯한 보존처리 지침에도 활용되고 있다(Guadagnuolo *et al.*, 2014).

그러나 석조문화유산의 초음파 측정은 대상 유산의 암석학적 특성 및 형태, 외부 환경, 탐사기의 설정, 운영자의 숙련도 등 다양한 요인들에 의해 영향을 받기 때문에 해석에 어려운 점이 있다(Lama and Vutukuri, 1978). 특히 암석학적 특성(암종, 조직, 입도, 밀도, 공극률, 함수율, 이방성)과 관련된 다양한 인자 중 함수율과 이방성은 측정 환경 및 방법에 따라 민감하게 반응하므로 신뢰도 높은 데이터를 확보하기 위해서는 초음파와의 상관관계를 명확히 이해할 필요가 있다(Kahraman, 2007).

Wyllie *et al.*(1956)과 Thill and Bur(1969)은 공극률이 낮은 신선한 암석일지라도 함수율이 높아짐에 따라 초음파 속도가 급격히 증가함을 밝혔다. 또한 Ruedrich *et al.*(2013)과 Cerrillo *et al.*(2014)은 암석의 입자조직과 구조에 민감한 초음파속도를 이용하여 이방성 분석이 가능하다고 보고하였다. 이로 인해 암석역학 분야의 ISRM(1978)과 ASTM D2845-08(2008) 규격에는 암석의 함수율과 이방성을 비롯하여 적용범위, 탐촉자 배치, 측정위치 및 강도추

정 등을 고려한 초음파 측정법 기준을 표준화하는데 노력하고 있다. 그러나 이러한 규격은 석조문화유산에 적합한 기준도 있으나 문화유산이라는 특수성 때문에 현장 측정에 필요한 요인들을 충분히 갖추고 있지 않다.

또한 함수율과 이방성을 고려한 초음파 연구는 대부분 암석학적 강도와 풍화특성의 상관관계를 규명하는데 초점이 맞춰져 있다(Mohamad *et al.*, 2011). 이처럼 석조문화유산에 적합한 초음파 측정방법은 아직까지 표준화되지 않은 실정이며, 현장조사 시 암석학적 요인인 함수율(Figure 1a, 1b)과 이방성(Figure 1c, 1d)을 고려하지 않은 경우가 많아 획득데이터의 신뢰도 문제가 발생하기도 한다. 따라서 이 연구에서는 야외에 노출된 석조문화유산의 비파괴 초음파 진단을 위해 다양한 암석학적 인자 중 함수율과 이방성에 따른 초음파 특성을 분석하였고, 측정법의 신뢰도 향상을 위한 새로운 방법론적 모델을 제안하였다.

2. 실험대상 및 분석기기

2.1. 시편제작

한국의 석조문화유산 조성에 사용된 암석 중 가장 높은 비중을 차지하는 재질은 화성암으로 국가지정문화재의 약 84% 정도이다. 이를 암석의 종류에 따라 세분화하면 화강암이 68.2%(397건)로 가장 높은 점유율을 차지하고 있고, 다음으로 섬록암이 8.2%(48건)를 구성한다. 이 외에 사암과 석회암 등이 각각 4% 이하의 분포를 갖는다(National Research Institute of Cultural Heritage, 2011). 따라서 이 연구에서는 국내의 대표적 화강암 4종과 석영섬록암, 사암, 석회암 및 반려암을 실험대상으로 선정하였고, 최근 들어 시멘트로 구성된 근대문화재의 비파괴 초음파진단이 요구되고 있어 KS L 5015(2012)에 따라 시멘트 모르타르 공시체(CE)도 제작하였다.

Figure 1. Stone cultural heritages influenced by moisture and lithological anisotropy. (a) Five-story Stone Pagoda of Magoksa Temple, Gongju. (b) Dinosaur trackways in Jeori, Uiseong. (c) Five-story Stone Pagoda in Geumgolsan Mountain, Jindo. (d) Ranks Stone at Gyeongbokgung Palace.

이 중 화강암은 중조립질의 회백색 거창화강암(Figure 2a), 세중립질의 회백색 익산화강암(Figure 2b), 중조립질의 경주 남산 알칼리장석화강암(Figure 2c), 조립질의 회색 양주화강암이며(Figure 2d)이며, 기타 암석은 세립질의 암회색 공주 석영섬록암(Figure 2e), 조립질의 암흑색 충주반려암(Figure 2f), 세중립질의 흑색 보령사암(Figure 2g), 중립질의 유백색 완주석회암(Figure 2h)이다. 특히 익산화강암은 미륵사지석탑의 석재공급지로 규명된 바 있으며(Yang *et al.*, 2006), 알칼리장석화강암은 불국사 삼층석탑 및 다보탑을 비롯한 남산지역 석조문화유산의 원산지로 보고된 바 있다(Jwa *et al.*, 2000). 각 암석들은 실험목적에 맞도록 직경 54mm의 NX 코어와 정방형 공시체(200×200×200mm)로 제작되었다. 특히 공주 석영섬록암과 충주반려암은 다른 시편과 달리 자연노두에서 수습하여 시료의 양이 충분하지 않아 NX 코어로 제작하지 못했다.

2.2. 시편의 인공풍화

일반적으로 석조문화유산의 구성석재는 다양한 요인들에 의해 풍화작용을 받아 축조 당시의 신선한 상태에 비해 물리적 및 역학적 특성이 저하되어 있다. 그러나 연구대상 시편들은 암종별 동일 암반에서 채취하여 물성차이가 거의 없으며 대부분 신선한 물성을 가지고 있어 석조문화유산의 풍화도를 대별하기 어려웠다. 따라서 이 연구에서는 자연환경 상태의 시간 스케일로 암석을 풍화시키는 것이 거의 불가능하므로 NX 코어(거창화강암, 보령사암, 완주석회암)를 대상으로 인공풍화실험을 수행하였다. 특히 동

결-용해, 산침수, 염결정 및 열파괴 등의 다양한 인공풍화 실험 중 비교적 실험방법이 간단하고 물리적 풍화 효과가 높은 열파괴 실험을 실시하였다(Simmons and Cooper, 1978).

이때 암종별 풍화도를 구분하기 위해 서로 다른 온도 조건을 설정하여 세 종류의 열충격 그룹 시편을 인위적으로 제작하였다. 먼저 각 암종별 열충격을 가하지 않은 암석은 신선한 1그룹(GG-1, BS-1, WL-1)으로 구분하였고, 2그룹(GG-2, BS-2, WL-2)과 3그룹(GG-3, BS-3, WL-3)은 각각 10℃/분의 승온속도로 300℃와 500℃까지 열충격을 가한 후 최고온도에서 2시간을 유지한 다음 상온에서 냉각시켰다. 그러나 보령사암은 이러한 온도조건 하에서 뚜렷한 열파괴가 발생하지 않아 동일한 승온속도로 500℃까지 3회 열충격을 가한 다음 2그룹은 600℃까지, 3그룹은 700℃까지 온도를 올려 서로 다른 풍화도 시편을 완성하였다. 여기서 각 시편의 풍화그룹은 절대물성이 아니라 열충격 온도에 따른 상대적 물성을 의미한다.

각 암석의 그룹별 물성치는 3개 시편의 평균값을 산출하여 Table 1에 제시하였다. 이 중 흡수율과 공극률은 ASTM C97/C97M-09(2009)을 이용하였고, 공극형태지수는 Bourges (2006)이 제시한 방법으로 계산하였다. 이 결과를 살펴보면, 전체적으로 모든 암석들은 열충격 온도가 증가함에 따라 비중은 감소한 반면 흡수율, 공극률 및 공극형태지수는 증가하는 경향을 나타냈다. 특히 공극형태지수의 상관도에 따르면 화강암과 사암의 1그룹 및 2그룹과 석회암 1그룹은 미세 공극 및 균열이 공존하는 특징을 나타냈고, 화강암과 사암의 3그룹을 포함한 석회암 2그룹 및 3그룹의 경

Figure 2. Lithological photographs of rock samples used for experiments. (a) GG; Geochang granite. (b) IG; Iksan granite. (c) NG; Namsan alkali feldspar granite. (d) YG; Yangju granite. (e) GD; Gongju quartz diorite. (f) CG; Chungju gabbro. (g) BS; Boryeong sandstone. (h) WL; Wanju limestone.

Table 1. Some physical properties of the tested rocks.

Properties	GG-1	GG-2	GG-3	BS-1	BS-2	BS-3	WL-1	WL-2	WL-3
Specific gravity	2.64	2.63	2.62	2.70	2.69	2.63	2.72	2.69	2.65
Absortion ratio(%)	0.32	0.37	0.56	0.28	0.50	1.01	0.10	0.36	0.83
Porosity(%)	0.85	0.96	1.46	0.75	1.33	2.65	0.27	0.98	2.21
Porosity shape factor	0.13	0.19	0.27	0.11	0.21	0.27	0.23	0.30	0.35

우 미세 균열이 전체적인 공극을 형성하고 있는 것으로 확인되었다.

2.3. 분석기기

각 시편들의 초음파 측정은 암석공학 및 석조문화유산 분야에서 국내외적으로 널리 사용되고 있는 CNS Farnell사의 Pundit-plus를 이용하였으며, 이때 펄스 전압은 1200V로 설정하였다. 또한 탐촉자는 54kHz의 공칭 주파수를 가지는 원뿔형(exponential)을 이용하였으며, 이 원뿔형 탐촉자는 접촉면적(6mm)이 작아 커플링 없이 거친 표면에 사용가능한 장점이 있어 석조문화유산의 초음파 측정에 많이 활용되고 있다(Jo *et al.*, 2013).

일반적으로 초음파는 공기와 고체물질의 경계면에 부딪히면 반사 및 산란되기 때문에 탐촉자와 시편 사이에는 접촉매질이 필요하다(Kahraman, 2007). 접촉매질이 없다면 탐촉자와 시편 사이의 임피던스 차이가 커져 초음파는 시편 내부로 잘 들어갈 수 없기 때문이다. 이 연구에서는 두 종류의 접촉매질을 활용하였다. 먼저 함수율과 초음파 특성 실험의 경우 젤 타입의 접촉매질은 암석 표면에 침투하여 공극률에 영향을 줄 수 있으므로 Jo(2011)가 개발한 엘라스토머 커버를 사용하였다. 또한 이방성과 초음파 특성 실험에서는 가장 안정적인 초음파속도를 획득할 수 있는 젤 타입의 수용성 접촉매질을 이용하였다.

3. 함수율과 초음파 특성

3.1. 연구방법

수분은 석조문화유산의 동결-융해작용, 물리화학적 풍화, 생물학적 손상 및 구조적 문제를 야기하는 주요 인자일 뿐만 아니라 비파괴진단의 신뢰도를 떨어뜨리는 환경적 요소로 알려져 있다(Verstryngne *et al.*, 2014). 특히 암석은 함수율에 따라 초음파속도가 민감하게 변하며, 수분에 완

Figure 3. Experiment processes for analyzing relation between the water content and P-wave velocity. (a) Rock samples in an electric furnace. (b) 27 samples saturated in water.

전히 함침(약 48시간)되면 일정한 초음파속도를 유지한다. 이처럼 암석의 함수율과 초음파속도는 일정한 상관관계를 가지고 있다. 따라서 이 연구에서는 각 시편의 풍화도와 함수율에 따른 초음파속도 변화를 분석하여 석조문화유산에 적합한 측정조건을 설정하였다.

먼저 열과괴 실험을 통해 인위적으로 풍화도가 분류된 27개의 시편들을 증류수에 48시간 동안 함침한 후 무게와 초음파속도를 측정하였다(Figure 3a, 3b). 그런 다음 함침이 완료된 암석들을 20℃의 대기온도와 40% 상대습도를 유지하고 있는 실내 환경에서 50시간 동안 자연건조 시켰다. 건조 기간 중 1, 2, 3, 4, 6, 10, 18, 34, 50시간에 무게와 초음파속도를 측정하여 주기적으로 물성변화를 모니터링 하였다. 마지막으로 모든 시편들을 105℃의 온도조건에서 24시간 동안 건조시킨 다음 최종 무게와 초음파속도를 획득하였다.

이 연구에서는 함침 후 자연건조 중 나타나는 시편의 무게 및 초음파속도 변화를 이용하여 함수율(WC, %), 포화도(SD, %), P파 속도(V_p , m/s) 및 변화율(ΔV_p , %)을 산출하였다. 이 중 포화도와 함수율은 각각 아래 식 1과 2를 이용하였으며, 초음파속도 변화율은 Vasconcelos *et al.*(2007)이 제시한 방법을 활용하여 계산하였다.

$$SD = \frac{V_w}{V_v} \quad (1)$$

$$WC = \frac{W_w}{W_g} \quad (2)$$

Table 2. Variations of some physical properties during the drying time. Sample names are the same as those of Figure 2 and Table 1.

Properties	Time	GG-1	GG-2	GG-3	BS-1	BS-2	BS-3	WL-1	WL-2	WL-3
Water content (%)	CS	0.32	0.37	0.56	0.28	0.50	1.01	0.10	0.36	0.83
	1h	0.22	0.24	0.34	0.22	0.36	0.75	0.04	0.14	0.41
	2h	0.20	0.21	0.28	0.21	0.31	0.61	0.04	0.10	0.25
	3h	0.19	0.19	0.23	0.20	0.27	0.47	0.03	0.08	0.19
	4h	0.17	0.17	0.22	0.19	0.24	0.40	0.03	0.07	0.17
	6h	0.16	0.15	0.20	0.17	0.21	0.33	0.03	0.06	0.14
	10h	0.15	0.13	0.16	0.16	0.18	0.25	0.03	0.05	0.11
	18h	0.13	0.11	0.13	0.13	0.13	0.17	0.03	0.03	0.07
	34h	0.11	0.09	0.09	0.10	0.09	0.11	0.01	0.01	0.03
	50h	0.10	0.08	0.07	0.09	0.08	0.08	0.01	0.01	0.03
	CD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Degree of saturation (%)	CS	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	1h	68.20	64.67	60.31	80.86	72.55	74.61	41.02	37.18	48.94
	2h	62.01	56.17	49.81	74.57	62.45	60.32	36.60	28.14	30.02
	3h	57.46	51.15	42.10	71.53	54.69	46.94	33.64	22.08	23.33
	4h	54.07	46.32	38.97	67.84	49.39	40.30	32.16	20.10	20.23
	6h	50.08	42.08	35.41	62.46	43.04	33.28	31.65	17.13	16.97
	10h	45.97	36.48	29.31	56.61	35.38	24.67	28.77	13.46	12.72
	18h	39.17	30.88	22.88	47.83	26.07	16.82	26.37	8.51	8.16
	34h	34.63	23.74	16.61	37.79	19.23	10.83	15.11	2.37	3.43
	50h	31.49	20.64	13.22	33.21	15.80	7.79	13.62	1.79	3.26
	CD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P-wave velocity (m/s)	CS	4,090	3,507	2,664	4,562	3,624	3,053	4,602	1,962	1,284
	1h	3,891	3,176	2,184	4,341	3,252	2,632	3,904	1,526	1,111
	2h	3,861	3,076	2,076	4,318	3,147	2,461	3,812	1,461	1,075
	3h	3,822	3,048	2,049	4,296	3,098	2,408	3,800	1,445	1,068
	4h	3,777	2,997	2,028	4,296	3,018	2,334	3,776	1,419	1,058
	6h	3,765	2,960	2,006	4,281	2,951	2,302	3,734	1,408	1,051
	10h	3,710	2,901	1,981	4,216	2,894	2,244	3,667	1,396	1,041
	18h	3,678	2,883	1,963	4,216	2,855	2,224	3,590	1,394	1,037
	34h	3,647	2,874	1,938	4,167	2,806	2,203	3,586	1,384	1,031
	50h	3,643	2,854	1,932	4,092	2,788	2,191	3,516	1,368	1,023
	CD	3,599	2,852	1,930	4,059	2,753	2,177	2,577	1,332	832
Δ P-wave velocity (%)	CS	12.27	22.88	37.89	11.49	29.99	39.34	30.89	43.42	25.51
	1h	6.81	11.28	13.04	6.09	16.64	20.13	11.04	11.55	8.60
	2h	5.98	7.78	7.45	5.52	12.88	12.32	8.42	6.80	5.08
	3h	4.91	6.80	6.06	4.99	11.12	9.90	8.08	5.63	4.40
	4h	3.68	5.01	4.97	4.99	8.25	6.53	7.39	3.73	3.42
	6h	3.35	3.71	3.83	4.62	5.85	5.07	6.20	2.92	2.74
	10h	1.84	1.65	2.54	3.03	3.80	2.42	4.29	2.05	1.76
	18h	0.96	1.02	1.60	3.03	2.40	1.51	2.10	1.90	1.37
	34h	0.11	0.70	0.31	1.83	0.65	0.55	1.99	1.17	0.78
	50h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	CD	-1.21	-0.07	-0.10	-0.81	-1.26	-0.64	-26.71	-2.63	-18.67

CS; completely saturated, CD; completely dried.

$$\Delta V_p = \frac{V_{pS} - V_{pD}}{V_{pD}} \quad (3)$$

여기서 V_v 와 V_w 는 각각 암석 내 공극과 공극 내 수분의 부피이며, W_g 와 W_w 는 각각 암석 입자 및 물의 중량이다. V_{pS} 와 V_{pD} 는 각각 함침 및 자연건조된 시편의 초음파속도(P-wave velocity)를 의미한다.

3.2. 연구결과

각 시편의 함침 후 자연건조 시간에 따른 함수율, 포화도, 초음파속도 및 변화율을 Table 2에 제시하였다. 분석 결과를 살펴보면, 암종별 함수율과 포화도는 공극률이 낮은 신선한 암석일지라도 건조 직후 급격히 줄어들었고 (Nur and Simmons, 1969), 풍화도에 따라 서로 다른 거동

경향을 보이면서 건조 시간이 증가할수록 지속적으로 감소하였다(Figure 4a, 4b).

특히 함수율은 풍화도와 정비례 관계를 보이면서 34시간 이후 거의 변화가 없는 일정한 값을 유지한 반면 포화도는 50시간까지 서서히 감소하는 특징을 보였다. 이는 함수율이 포화도에 비해 수분 영향에 좀 더 둔감한 측정인자임을 의미한다. 또한 자연건조가 완료된 것으로 판단되는 50시간의 암종별 함수율은 풍화도에 따라 약간의 차이가 있지만 화강암 0.07~0.10%, 사암 0.08~0.09%, 석회암 0.01~0.03%로 석회암이 압도적으로 낮은 수치를 나타냈다.

초음파속도 역시 전반적으로 함수율 및 포화도와 유사하게 건조시간에 따라 감소하는 부의 상관관계를 보였으나(Figure 4c), 이와 달리 건조 후 비교적 빠른 시간 안에 일정한 초음파속도에 도달하였다. 특히 각 암석들의 초음파속도는 함수율이 증가할수록 지속적으로 증가하는 정의

Figure 4. Graphs showing variations of some physical properties during the drying time. (a) Water content(%). (b) Degree of saturation(%). (c) P-wave velocity(m/s). (d) Δ P-wave velocity(%). Sample names are the same as those of Figure 2 and Table 1.

상관관계가 뚜렷이 확인되었으며, 이때 두 측정 인자 사이의 상관관계(R^2) 역시 0.95~0.99의 매우 높은 수치를 나타냈다(Figure 5).

함수율을 고려한 석조문화유산의 초음파 측정조건을 설정하기 위해 자연 상태에서 완전히 건조된 것으로 추정되는 50시간의 초음파속도를 기준으로 변화율을 검토하였다(Figure 4d). 야외에 노출되어 있는 석조문화유산은 인위적으로 건조하지 않는 한 일정 이상의 수분을 함유하고 있기 때문이다. 이 결과를 살펴보면, 모든 암석의 초음파속도는 건조 초기 2시간 이내에 가장 높은 감소율을 보였으며, 이러한 경향은 풍화도가 높은 암석일수록 좀 더 뚜렷하였다. 또한 수분에 완전히 포화된 상태와 자연건조 완료 후의 초음파속도 차이는 화강암 447~732㎍, 사암 470~862㎍, 석회암 261~1,086㎍를 나타냈다. 이는 수분에 의해 석조문화유산의 물성이 최대 1등급 정도 과대평가 될 수 있음을 의미한다.

또한 자연건조가 완료된 것으로 판단되는 50시간의 초음파속도를 기준으로 약 3% 이내의 변화율을 나타내는 건조시간을 살펴본 결과, 화강암은 6시간 이후, 사암은 6~10시간 이후, 석회암은 4시~10시간 이후로 관찰되었다. 최단 시간은 암종별 약간의 차이가 있으나 공통적으로 10시간 이후에 초음파속도의 큰 변화 없이 안정적인 수치를 유지하였다. 완전 건조(105℃) 이후의 초음파속도 변화를 살펴보면, 화강암(-0.07~-1.21%)과 사암(-0.64~-1.26%)은 거의 유사한 초음파속도를 보였지만 1그룹(WL-1) 및 3그룹(WL-3)의 석회암은 각각 -26.71%와 -18.67%의 매우 높은 초음파속도 변화율을 보였다.

이러한 초음파속도 변화율은 화강암과 사암에서는 볼

수 없었던 현상으로, 이 연구에서는 이에 대한 원인을 규명하기 위해 검증실험을 재차 수행하였다. 먼저 신선한 석회암을 다시 준비한 다음 105℃(24시간)로 건조한 전·후의 초음파속도를 측정하였다. 이 결과, 건조 전 3,773㎍의 초음파속도를 보였으나 건조 후 2,864㎍로 약 909㎍ 만큼 감소한 것을 알 수 있다. 이러한 석회암의 물성저하는 가열과정 중 방해석이 이산화탄소(CO_2)의 해리를 수반하는 하소반응(calcination)에 의해 발생한 것으로 판단된다. 즉 석회암은 생석회로 변화되는 과정에서 중량이 감소하고 동시에 결정구조상의 변화로 부피가 줄어들어 석회암 내에는 많은 공극이 형성된다(Noh and Lee, 2009). 이는 Christaras (2009)의 결과와도 잘 일치한다.

4. 이방성과 초음파 특성

4.1. 연구방법

일반적으로 암석은 구성 입자 또는 조직의 배열에 따라 방향성을 갖고 있으며, 층리와 절리 등이 복잡하게 구성된 경우에는 방향에 따라 역학적 특성도 달라진다. 이러한 특성을 이방성이라 한다(Park and Park, 2007). 특히 층리 및 엽리 등을 포함하는 퇴적암과 변성암의 구조적인 이방성은 개략적인 조사를 통해 잘 알 수 있으나, 구성광물 및 미세 균열의 분포성이 모호한 암석들은 정밀한 분석이 없으면 이방성을 확인하기 어렵다. 이로 인해 화강암은 다른 종류의 암석에 비하여 균질한 등방성인 것으로 알려져 있다.

그러나 Lo *et al.*(1986)은 화강암의 이방성 탄성특성을 보고 한 바 있으며, Osborne(1935)은 강도 측면에서 화강

Figure 5. The correlations between P-wave velocity and water content of representative rock samples. Sample names are the same as those of Figure 2 and Table 1.

암을 이방성으로 취급하였다. 이러한 이방성 원인은 구성 광물의 입자배열 방향성(Brace, 1965), 미세층리(Backus, 1962) 및 미세 균열의 방향성(Crampin *et al.*, 1980) 등 또는 이들의 조합에 의한 것으로 구분된다. 또한 석공들은 화강암의 채석 작업 시 이방성을 경험적으로 관찰할 때가 많아 이와 같은 자연 연약 면을 따라 채석작업을 하고 있으며 (Park, 1995), 옛날부터 이러한 방향성을 ‘결’이라는 용어로 표현하였다.

현재 암석역학 분야에서도 가장 잘 쪼개지는 방향성을 1결(rift plane), 다음으로 잘 쪼개지는 방향성을 2결(grain plane), 쪼개지는 정도가 가장 미약한 방향성을 3결(hardway plane)이라고 정의하기도 한다(Jang and Oh, 2001). 대부분의 석산에서 이 결들은 서로 직각의 상관관계를 보이고

Figure 6. Schematic diagram for ultrasonic measurement considering anisotropy.

있다. 특히 결의 방향성은 화강암이 냉각될 때 생성되는 미세 균열의 방향성과 관련이 높으며, 화강암체내에 작용하던 응력이 해방될 때 생성되는 미세 균열의 방향성과 상당한 연관이 있는 것으로 알려져 있다(Plumb *et al.*, 1984).

현재 이방성을 규명하기 위한 파괴분석으로는 현미경 관찰, 일축압축 시험, 압열인장 시험 및 점하중 시험 등이 있으며(Vishnu *et al.*, 2010), 비파괴 방법으로는 초음파 측정과 GPR이 널리 사용되고 있다(Martínez-Sala *et al.*, 2013). 이 중 석조문화유산의 비파괴 진단기법으로 널리 사용되고 있는 초음파 측정은 암석의 입자조직과 구조에 영향을 받는 성질이 있어 이방성 분석에 가장 많이 활용되고 있는 방법이다(Song and Suh, 2014).

이 연구에서는 암종별 초음파속도를 측정하여 축 방향별 초음파 특성을 파악하였고, 이 결과를 통해 이방성을 고려한 초음파 측정방법을 제시하였다. 이를 위해 자연건조된 200×200×200mm 크기의 정방형 공시체를 암종별로 준비한 후, X, Y, Z축에 평행하게 직접전달방법과 간접전달방법으로 초음파속도를 측정하였다(Figure 6). 이때 한 개의 축 방향으로 20개의 데이터를 획득하여 평균 초음파속도를 산출하였으며, 이 중 가장 빠른 속도를 보인 방향을 1결(V_1), 중간 속도를 보인 방향을 2결(V_2), 가장 느린 속도를 보인 방향을 3결(V_3)이라고 명명하였다. 또한 측정된 초음파속도 결과를 아래 식 4에 대입하여 이방성지수(anisotropy coefficient)를 산출하였다(Birch, 1961).

$$c = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\text{mean}}} \times 100(\%) \quad (4)$$

Figure 7. Diagrams showing P-wave velocity variations of the tested rock samples. P-wave velocity measured by direct (a) and indirect methods (b). Sample names are the same as those of Figure 2 and Table 1.

Table 3. P-wave velocity values according axis planes and anisotropy coefficient of the investigated rock samples. Sample names are the same as those of Figure 2 and Table 1.

Method	Sample	Hardway($\frac{m}{s}$)	Grain($\frac{m}{s}$)	Rift($\frac{m}{s}$)	Mean($\frac{m}{s}$)	c(%)
Direct method	GG(A)	3,351	3,742	3,891	3,661	14.7
	GG(B)	3,330	3,641	3,875	3,616	15.1
	IG(A)	3,117	3,120	4,024	3,420	26.5
	IG(B)	2,998	3,052	3,437	3,163	13.9
	NG	2,963	3,112	3,188	3,088	7.3
	YG	3,637	3,740	3,838	3,739	5.4
	GD(A)	4,058	4,345	4,393	4,266	7.9
	GD(B)	4,217	4,335	4,385	4,312	3.9
	CG(A)	3,509	3,631	3,642	3,594	3.7
	BS(A)	4,670	4,708	4,916	4,765	5.2
	WL(A)	3,972	4,503	4,540	4,338	13.1
	CE	3,692	3,716	3,717	3,708	0.7
Indirect method	GG(A)	2,603	2,621	2,674	2,633	2.7
	GG(B)	2,476	2,608	2,654	2,580	6.9
	IG(A)	2,326	2,358	2,687	2,457	14.7
	IG(B)	2,428	2,447	2,469	2,448	1.7
	NG	2,220	2,255	2,283	2,253	2.8
	YG	2,710	2,745	2,752	2,736	1.5
	GD(A)	2,791	2,938	2,975	2,901	6.3
	GD(B)	2,887	2,997	3,071	2,985	6.2
	CG	2,703	2,788	2,808	2,766	3.8
	BS	3,171	3,219	3,278	3,223	3.3
	WL	2,694	2,889	2,934	2,839	8.5
	CE	2,428	2,447	2,469	2,448	1.7

4.2. 연구결과

각 시편의 축방향에 따른 초음파속도와 이방성지수는 Table 3에 제시하였다. 먼저 초음파속도에 의한 암석학적 방향성을 살펴보면, 시멘트 모르타르를 제외하고 모든 암석은 2개 또는 3개의 축으로 구분되었다. 이 중 2축에 가까운 암석은 석산화강암, 경주 남산 알칼리장석화강암, 공주 석영섬록암, 충주반려암 및 완주석회암이며, 3축은 거창화강암, 양주화강암 및 보령사암으로 확인되었다(Figure 7a, 7b). 또한 암종별 직접전달방법으로 측정된 초음파속도를 이용하여 이방성지수를 산출한 결과, 두 종류의 거창화강암은 각각 14.7%와 15.1%를 나타냈고, 중립질 및 세립질의 석산화강암은 각각 26.5%와 13.69%를 보였다. 또한 경주 남산 알칼리장석화강암은 7.3%, 양주화강암은 5.4%가 산출되었으며, 두 종류의 석영섬록암은 7.9%와 3.9%로 확인되었다. 충주반려암은 3.7%, 보령사암은 5.2%, 완주석회암은 13.1%, 시멘트 모르타르는 0.7%로 집계되었다

(Figure 8a).

전반적으로 석산화강암과 거창화강암이 구성입자의 배열과 미세 균열에 의한 높은 이방성을 나타냈고, 경주 남산 알칼리장석화강암과 양주화강암은 뚜렷한 방향성을 보이지 않았다. 또한 석영섬록암, 반려암 및 보령사암은 미세한 이방성만이 관찰되었으며, 시멘트 모르타르는 이방성이 존재하지 않는 것으로 확인되었다. 그러나 육안으로도 층리가 확인되는 석회암은 2결과 3결에 평행한 방향으로 구성입자가 배열되어 상대적으로 높은 이방성지수를 보였다.

한편 간접전달방법으로 측정된 초음파속도를 이용하여 이방성지수를 산출한 결과, 두 종류의 거창화강암은 각각 2.7%와 6.9%를 보였고, 중립질 석산화강암은 14.7%, 세립질 석산화강암은 1.7%, 알칼리장석화강암은 2.8%, 양주화강암은 1.5%로 계산되었다. 또한 두 종류의 석영섬록암은 각각 6.3%와 6.2%를 나타냈고, 반려암은 3.8%, 보령사암은 3.3%, 완주석회암은 8.5%, 시멘트 모르타르는 1.7%의 이방성지수가 확인되었다(Figure 8a).

전체적으로 간접전달방법으로 측정된 이방성지수는 직접전달방법에 비해 급격히 감소하는 특징을 보였다. 특히 이러한 차이는 구성입자의 배열과 미세 균열에 의한 이방성을 가지는 저장화강암(8.17~12.05%)과 익산화강암(11.83~12.21%)에서 두드러졌으며, 엽리 및 층리에 의한 구조적 이방성을 가지고 있는 석회암(4.64%)은 상대적으로 낮은 감소율을 나타냈다(Figure 8b). 따라서 이방성을 고려한 초음파탐사의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 2축 또는 3축 방향을 반영할 수 있는 측정방법의 개선이 필요할 것으로 판단된다. 이는 1축 방향에 의한 초음파 측정은 대상 석조문화유산의 물성보다는 이방성에 의존한 결과를 제시할 수 있기 때문이다.

5. 고 찰

초음파를 이용한 석조문화유산의 비파괴진단에서 가장 중요하게 고려해야 할 사항은 대상 유산에 적합한 측정 조건과 방법을 설정하여 신뢰도 높은 데이터를 확보하는 것이다. 이는 같은 대상과 조건 하에서 항상 동일한 검사결과를 제시할 수 있는 정확도와 재현성이 갖추어져야 하기 때문이다. 현재 석조문화유산 초음파법의 신뢰도 향상을 위한 연구로는 운전자 및 온도에 의한 오차 분석(Lee *et al.*, 2012), 접촉매질 선정 및 거칠기 보정(Kim *et al.*, 2010), 직접 및 간접전달방법의 보정계수 산출(Yaman *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2009), 풍화도 평가 개선(Fort *et al.*, 2013) 등이 수행되었으나 아직까지 암석학적 특성에 따른 방법론적 검토는 미비하다. 따라서 이 연구에서는 암석학적 인자 중

측정 환경 및 조건에 따라 민감하게 반응하는 함수율과 이방성을 고려하여 석조문화유산에 적합한 초음파 측정방법을 설정하였다.

먼저 함수율과 초음파 특성을 종합해보면, 수분에 포화된 암석들은 건조 초기에 포화도와 함수율이 급격히 감소하다가 50시간까지 변화율이 서서히 줄어드는 지수함수 형태를 나타냈고, 105℃로 완전히 건조한 이후에는 선형적으로 급격한 변화를 보였다. 그러나 초음파속도 및 변화율은 각 암종의 풍화도에 따라 약간의 차이가 있지만 공통적으로 10시간의 자연건조 이후에 큰 변화 없이 안정된 수치를 유지하였다.

이는 수분에 완전히 포화된 암석일지라도 10시간의 자연건조만 진행된다면 암석의 함수율은 초음파속도에 큰 영향을 미치지 않는 것을 의미한다. 이는 Kahraman(2007)이 보고한 4시간보다 상대적으로 오랜 시간이지만 건조시간이 길수록 수분에 의한 영향이 줄어드는 것을 감안할 때 신뢰도 높은 초음파속도를 확보할 수 있는 유효시간으로 판단된다. 또한 Wyllie *et al.*(1956)은 암석의 포화도가 100%에서 약 70%로 감소할 때 P파 속도는 두드러지게 감소하고, 70%에서 10% 사이에서 거의 일정한 값을 유지한다고 보고하였는데, 이는 이번 연구결과와도 매우 잘 일치한다.

따라서 수분에 포화된 석조문화유산은 약 10시간 정도 자연건조 후에 초음파 측정을 수행해야 한다. 그러나 이 시간은 20℃의 대기온도와 40%의 상대습도 환경에서 NX 코어를 대상으로 도출된 결과이므로 대상 석조문화유산의 환경과 크기에 따라 달라질 수 있다. 따라서 수분영향을 고

Figure 8. Diagrams showing anisotropy variations of the tested rock samples. (a) Anisotropy coefficients of each rock sample. (b) Anisotropy differences of investigated rock samples between direct and indirect methods. Sample names are the same as those of Figure 2 and Table 1.

려한 초음파 측정을 수행하기 위해서는 대상 유산의 지리적 위치, 조사 당시의 계절, 시간, 기상환경 및 함수조건 등을 반드시 고려해야 한다.

강수 후 건조되지 않은 상태에서 초음파 측정을 실시하면 수분이 암석의 공극, 공동 및 미세 균열 등을 채워 초음파 속도를 증가시키고, 이로 인해 석조문화유산의 물성은 실제 강도에 비해 과대평가되기 때문이다. 그러나 강수에 영향을 받지 않은 자연 상태의 석조문화유산은 항상 일정한 수분을 유지하고 있고 이때의 초음파속도는 함수율에 상당히 둔감하므로 건습조건에 따른 환경변화는 초음파속도에 큰 영향을 끼치지 않을 것으로 판단된다.

한편 구성입자의 배열, 미세 균열, 엽리 및 층리에 의한 이방성은 암석의 풍화특성을 결정하는데 중요한 인자일 뿐만 아니라 석조문화유산의 대체석 선정 시 고려해야 할 암석학적 특성이다(Rozenbaum *et al.*, 2008). 또한 이방성은 초음파속도에 상당한 영향을 주므로 다양한 측방향을 가지고 있는 암석의 초음파 측정 시 이를 고려하지 않고 1축 방향에서만 분석을 수행한다면 측정지점에 따라 데이터의 표준편차가 커져 신뢰도는 현저하게 떨어진다. 따라서 이 연구에서는 국내 석조문화유산을 구성하고 있는 주요 암석인 화강암, 섬록암, 사암 및 석회암을 대상으로 측방향별 초음파 특성을 파악하였고, 이를 토대로 이방성을 고려한 초음파 측정방법을 제시하였다.

먼저 각 암종별 이방성지수를 종합해보면, 전체적으로 재질별로 다양한 이방성(0.7~26.5%)을 가지고 있는 것을 알 수 있었다. 특히 구성입자의 방향성 및 미세 균열에 의해 이방성이 발생하는 화강암(5.4~26.5%)과 층리 및 엽리에 의한 구조적 이방성이 두드러지는 석회암(13.1%)이 다른 재질에 비해 높은 이방성지수를 보였다. 또한 측정방법별로는 간접전달방법이 직접전달방법에 비해 이방성지수가 급격히 감소하는 특징을 나타냈다. 이처럼 동일한 암석이라도 간접전달방법으로 측정할 경우 이방성지수가 급격히 감소하는 것은 초음파의 전달방향과 관련된 것으로 판단된다. 즉, 직접전달방법은 탐촉자가 대향 면에 놓여 있어 발신자에서 발생한 초음파 펄스가 종방향의 한 방향으로만 전달되어 암석의 이방성을 그대로 반영한다.

그러나 간접전달방법은 발신자에서 발생한 초음파 펄스가 구면파를 형성하면서 종방향 뿐만 아니라 횡방향으로도 전달되기 때문에 상대적으로 암석의 이방성에 둔감해진 것으로 해석된다. 그렇지만 석조문화유산의 초음파 측정에 주로 사용되는 간접전달방법에서도 이방성(1.5~

14.7)은 미약하게나마 존재하였다. 따라서 이방성에 의한 초음파법의 신뢰도 감소를 보완하기 위해서는 다양한 측 방향을 고려한 측정방법의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

이를 위해 먼저 육안 및 휴대용 실체현미경을 이용하여 대상 석조문화유산의 이방성을 명확히 파악해야 한다. 그러나 구조적 이방성이 뚜렷한 퇴적암 계열과 달리 화성암들은 대부분 조직적 이방성을 가지고 있어 비파괴적인 조사가 거의 불가능하다. 따라서 이러한 암석들은 간접법을 이용한 초음파 측정 시 한 개의 측정지점별 최소 2축 또는 3축 방향으로 초음파속도를 획득하고, 측정 데이터의 최소, 최대, 평균값 및 표준편차를 함께 제시해야 한다. 또한 직접전달방법은 대상 유산의 형태에 따라 큰 제약을 받아 이방성을 충분히 고려할 수 없으므로 측정지점뿐만 아니라 초음파의 전달방향까지 도면에 기록하여 분석결과에 대한 오인을 방지해야 한다.

6. 결 론

1. 초음파속도는 암석의 함수율이 증가할수록 지수적으로 증가하는 정의 상관관계(R^2 : 0.95~0.99)를 보였으나 함수율(약 34시간 이상)과 달리 자연건조 후 비교적 빠른 시간(4~10시간) 안에 일정한 값을 유지하였다.

2. 수분에 완전히 포화된 상태와 자연건조 완료후의 초음파속도 차이는 화강암 447~732m/s, 사암 470~862m/s, 석회암 261~1,086m/s로 석조문화유산의 현장 초음파 측정 시 수분영향을 고려하지 않을 경우 획득결과의 오인을 야기할 수 있다.

3. 수분에 영향을 받은 석조문화유산의 초음파 측정을 수행할 경우, 실제 강도에 비해 최대 1등급 정도 과대평가될 수 있기 때문에 신뢰도 높은 데이터를 획득하기 위해서는 약 10시간 정도의 자연건조가 필요할 것으로 판단된다.

4. 9종 12개의 암석 시편을 대상으로 초음파를 이용하여 이방성을 분석한 결과, 구성입자의 방향성 및 미세 균열에 의해 이방성이 발생하는 화강암(5.4~26.5%)과 층리 및 엽리에 의한 구조적 이방성이 두드러지는 석회암(13.1%)이 다른 재질에 비해 높은 이방성지수를 보였다.

5. 직접전달방법은 초음파 펄스가 종방향의 1축으로만 전달되어 암석의 이방성을 그대로 반영하는 반면 간접전달방법은 초음파 펄스가 구면파를 형성하면서 종방향 뿐만 아니라 횡방향으로도 발생되어 상대적으로 이방성에 둔감한 특성을 나타냈다.

6. 이방성을 고려한 석조문화유산의 초음파 측정을 수행하기 위해서는 간접법 측정 시 최소 2축 또는 3축 방향으로 초음파속도를 획득해야 하고, 직접전달방법은 대상 유산의 형태에 따라 많은 제약을 받으므로 초음파 전달방향을 기록하여 분석결과의 오차를 방지해야 한다.

사 사

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(355-2011-1-C00001)임을 명기하며, 위 기관의 행정 및 재정적 지원에 감사한다.

REFERENCES

- ASTM C97/C97M-09, 2009, Standard test methods for absorption and bulk specific gravity of dimension stone.
- ASTM D2845-08, 2008, Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock.
- Backus, G.E., 1962, Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering. *Journal of Geophysical Research*, 67, 4427-4440.
- Birch, F., 1961, the velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, Part II. *Journal of Geophysical Research*, 66, 2199-2244.
- Bourgès, A., 2006, Holistic correlation of physical and mechanical properties of selected natural stones for assessing durability and weathering in the natural environment. PhD dissertation, Universität München, 1-198.
- Brace, W.F., 1965, Relation of elastic properties of rocks to fabric. *Journal of Geophysical Research*, 70, 5657-5667.
- Cerrillo, C., Jiménez, A., Rufo, M., Paniagua, J. and Pachón, F.T., 2014, New contributions to granite characterization by ultrasonic testing. *Ultrasonics*, 54, 156-167.
- Christaras, B., 2009, P-wave velocity and quality of building materials. *Proceedings of the 3rd IASME/WSEAS International Conference on Geology and Seismology (GES'09)*, 41-46.
- Crampin, S., McGonigle, R. and Bamford, D., 1980, Estimating crack parameters from observation of P-wave velocity anisotropy. *Geophysics*, 45, 345-360.
- Fort, R., Alvarez de Buergo, M. and Perez-Monserrat, E., 2013, Non-destructive testing for the assesment of granite decay in heritage structures compared to quarry stone. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 61, 296-305.
- Guadagnuolo, M., Faella, G., Donadio, A. and Ferri, L., 2014, Integrated evaluation of the Church of S. Nicola di Mira: Conservation versus safety. *NDT&E International*, 68, 53-65.
- ISRM, 1978, Suggested method for determining sound velocity. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15, 53-58.
- Jang, B.A. and Oh, S.H., 2001, Mechanical anisotropy dependent on the rock fabric in the Pocheon granite and its relationship with microcracks. *The Journal of Engineering Geology*, 11, 191-203. (in Korean with English abstract)
- Jo, Y.H., 2011, Physical deterioration evaluation and structural safety diagnosis of stone cultural heritage using nondestructive precision technology. PhD., Thesis, Kongju National University, 1-469. (in Korean with English abstract)
- Jo, Y.H., Lee, C.H. and Chun, Y.G., 2012, Material characteristics and deterioration evaluation for the 13th century Korean stone pagoda of Magoksa temple. *Environmental Earth Sciences*, 66, 915-922.
- Jo, Y.H., Lee, C.H. and Shim, H.Y., 2013, Reconsideration and conservational scientific diagnosis of Silla Stone Monument in Bongpyeong-ri, Uljin. *MUNHWAJAE, Korean Journal of Cultural Heritage Studies*, 46, 48-67. (in Korean with English abstract)
- Jwa, Y.J., Lee, S.W., Kim, J.S. and Sohn, D.W., 2000, Source area of stones used for the stone buildings of Bulguksa Temple and Seokguram Grotto. *Journal of Geological Society of Korea*, 36, 335-340. (in Korean with English abstract)
- Kahraman, S., 2007, The correlations between the saturated and dry P-wave velocity of rocks. *Ultrasonics*, 46, 341-348.
- Kim, J.S., Shin, Y.S. and Kim, J.H., 2010, Granite strength

- estimation of construction considering surface roughness effect on ultrasonic velocity method. Journal of the Korea Institute of Building Construction, 10, 137-145. (in Korean with English abstract)
- KS L 5105, 2012, Testing method for compressive strength of hydraulic cement mortars. (in Korean)
- Lama, R.D. and Vutukuri, V.S., 1978, Handbook on mechanical properties of rocks. Trans Tech Publications, 2, 236-307.
- Lee, C.H., Jo, Y.H. and Chun, Y.G., 2009, Establishment of ultrasonic measurement and correlations of direct-indirect method for weathering evaluation of stone cultural heritage. Journal of Conservation Science, 25, 233-244. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.H., Jo, Y.H. and Kim, J., 2011, Damage evaluation and conservation treatment of the tenth century Korean rock-carved Buddha statues. Environmental Earth Sciences, 64, 1, 1-14.
- Lee, Y., Keehm, Y., Lee, M., Han, J. and Kim, M., 2012, Assessment and calibration of ultrasonic velocity measurement for estimating the weathering index of stone cultural heritage. Journal of Korean Earth Science Society, 33, 126-138. (in Korean with English abstract)
- Lo, T-W., Coyner, K.B. and Toksoz, M.N., 1986, Experimental determination of elastic anisotropy of Berea sandstone, Chicopee shale, and Chelmsford granite. Geophysics, 51, 164-171.
- Martínez-Sala, R., Rodríguez-Abad, I., Díez-Barra, R. and Capuz-Lladro, 2013, Assessment of the dielectric anisotropy in timber using the nondestructive GPR technique. Construction and Building Materials, 38, 903-911.
- Mohamad, E.T., Isa, M.F.M., Amin, M.F.M., Komoo, I. Gofar, N. and Saad, R., 2011, Effect of moisture content on the strength of various weathering grades of granite. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 16, 863-886.
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2011, Restoration scheme for material loss and rock properties of stone cultural heritage. 4-5. (in Korean)
- Noh, J.H. and Lee, H.C., 2009, Applied-mineralogical characterization for the quick-lime manufactured from fine-grained domestic limestones. Journal of the mineralogical society of Korea, 22, 261-277. (in Korean with English abstract)
- Nur, A. and Simmons, G., 1969, The effect of saturation on velocity in low porosity rocks. Earth and Planetary Science Letters, 7, 183-193.
- Osborne, F.F., 1935, Rift, grain and hardway in some pre-Cambrian granites, Quebec. Economic Geology, 30, 540-551.
- Park, C. and Park, C.W., 2007, Suggestion of equation for determination of elastic constants of a transversely isotropic rock. KIGAM Bulletin, 11, 14-24. (in Korean with English abstract)
- Park, H.D., 1995, A study of the laboratory scale measurement technique of P-wave velocity for the assessment of the anisotropy of engineering property of rock. The Journal of Engineering Geology, 5, 237-247. (in Korean with English abstract)
- Plumb, R., Engelder, T. and Yale, D., 1984, Near-surface in situ stress : 3. Correlation with microcrack fabric within the New Hampshire Granites. Journal of Geophysical Research, 89, 9350-9364.
- Rozenbaum, O., Barbanson, L., Muller, F. and Bruand, A., 2008, Significance of a combined approach for replacement stones in the heritage buildings' conservation frame. Comptes Rendus Geoscience, 340, 340-355.
- Ruedrich, J., Knell, C., Enseleit, J., Rieffel, Y. and Siegesmund, S., 2013, Stability assessment of marble statues of the Schlossbrücke (Berlin, Germany) based on rock strength measurements and ultrasonic wave velocities. Environmental Earth Sciences, 69, 1451-1469.
- Sharma, P.K. and Singh, T.N., 2008, A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. Bulletin of Engineering Geology and The Environment, 67, 17-22.
- Simmons, G. and Cooper, H.W., 1978, Thermal cycling cracks in three igneous rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15, 145-148.
- Song, I. and Suh, M., 2014, Effects of foliation and

- microcracks on ultrasonic anisotropy in retrograde ultramafic and metamorphic rocks at shallow depths. *Journal of Applied Geophysics*, 109, 27-35.
- Thill, R.E. and Bur, T.R., 1969, An automated ultrasonic pulse measurement system. *Geophysics*, 34, 101-105.
- Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., Alves, C.A.S. and Pamplona, J., 2007, Prediction of the mechanical properties of granites by ultrasonic pulse velocity and schmidt hammer hardness. 10th North American Masonry Conference, Missouri, USA, 980-991.
- Verstrynge, E., Adriaens, R., Elsen, J. and Balen, K.V., 2014, Multi-scale analysis on the influence of moisture on the mechanical behavior of ferruginous sandstone. *Construction and Building Materials*, 54, 78-90.
- Vishnu, C.S., Mamtani, M.A. and Basu, A., 2010, AMS, ultrasonic P-wave velocity and rock strength analysis in quartzites devoid of mesoscopic foliations—implications for rock mechanics studies. *Tectonophysics*, 494, 191-200.
- Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R. and Gardner, L.W., 1956, Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, 21, 41-70.
- Yaman, I.O., Inci, G., Yesiller, N. and Aktan, M., 2001, Ultrasonic pulse velocity in concrete using direct and indirect transmission. *ACI Materials Journal*, 98-M48, 450-457.
- Yang, H.J., Lee, C.H., Choi, S.W. and Lee, M.S., 2006, Petrological characteristics and provenance presumption for rock properties of the stone pagoda in Mireuksaji Temple site, Iksan, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 293-306. (in Korean with English abstract)
-