

화강석 건조물의 표면 거칠기별 초음파속도법에 의한 강도 추정

Granite Strength Estimation of Construction Considering Surface Roughness Effect on Ultrasonic Velocity Method

김 정 섭* 신 용 석** 김 정 훈***
Kim, Jeong-Sup Shin, Yong-Seok Kim, Jeong-Hoon

Abstract

The mechanical properties of stone structures are generally characterized according to the strength of the stone used. An ultrasonic velocity method that does not damage cultural heritages is used to measure the strength of stone. However, there is no correction involved for surface roughness and thickness of the stone in the ultrasonic method currently used. In addition, a contact agent such as grease can cause contamination on the surface of a cultural heritage. Accordingly, this study suggests an indirect method of strength estimation formula for stone structures based on the surface roughness of the structure, its thickness, and the type of contact agent.

- ① Rock strength estimation formula using ultrasonic velocity method of dapped finish : $f_{su} = 30.51 V_p^{0.82}$ ($R^2=95$)
- ② Rock strength estimation formula using ultrasonic velocity method of harsh finish : $f_{su} = 61.52 V_p^{0.32}$ ($R^2=92$)

Keywords : Granite, Surface Roughness, Ultrasonic Velocity Method, Strength Estimation

1. 서 론

1.1 연구의 목적

석재는 인류의 시작과 더불어 건축 및 조형물의 주요 재료로 사용되어지고 있다. 우리나라는 국토의 70%가 산악지형으로 이루어져 있으며, 양질의 화강암이 대량으로 분포된 지질학적 조건과 석재의 우수한 내구성에 기인하여 석재로 다양한 건조물이 조성되었다.

우리나라의 국보 및 보물로 지정된 건조물 문화재 중에서 석재로 만들어진 석조문화재는 2004년 6월경 조사당시 국보 64기(基), 보물 449기 등 총 533기의 국가지정문화재와 673기의 각 시도 유형문화재가 있으며, 이외에도 지정되지 않은 유물 또한 많다.

현존하는 한국 문화재의 다수를 차지하고 있는 석조건조물에는 석탑, 석불, 부도, 당간지주, 비석, 성곽, 홍교 등이 있다. 석조 건조물의 보존에 있어서 가장 위험 요소가 되는 요인들은 석재의 자체의 풍화현상과 지반의 불안정에 의한 부동침하, 석재 적층의

불합리 및 불균등에 의한 균열 및 변형 등이다.

석조 건조물의 역학적 성질은 일반적으로 석재 강도의 관점에서 설명되며, 강도를 측정하기 위해서는 문화재의 훼손이 없는 초음파속도의 측정이 유용한 수단으로 이용되고 있다.

석재의 강도를 추정할 경우에는 대상 석재의 특정 강도와 초음파속도 간 상관관계를 먼저 확립하는 것이 필요하다. 이 상관관계는 실험적으로 예상되는 강도의 범위를 포함하고 통계적으로 신뢰도를 가질 수 있는 만큼의 충분한 실험을 통해 확립되어야 한다.

또한 현재 적용하고 있는 초음파속도법은 석재의 절리, 표면거칠기, 석재 두께 등에 의한 보정이 없을 뿐만 아니라 석재 표면의 요철이 매우 심해 초음파속도를 측정하기 어려워 그리스(Grease)와 같은 접촉재를 사용하여 탐촉자와 모재를 밀착시켜 여러 가지 방법으로 초음파속도를 측정하고 있다.

그러나 그리스와 같은 접촉재를 사용함으로써 건조물의 표면에 오염이 발생할 수 있다. 또한, 젤은 수용성이므로 석재 표면에 오염은 발생하지 않지만 온도가 높은 경우에 점도에 따라 표면에서 흘러내려 모재와 밀착되지 않아 수직면에서 사용이 곤란한 경우가 발생하게 된다.¹⁾

따라서 석조 건조물의 강도 측정시 석재 표면에 오염이 발생하지 않고 모재와 탐촉자의 밀착이 양호한 접촉재한 접촉재의 선정 및 석조 건조물의 강도 추정을 위한 비파괴 시험식을 제안함으로써 실제 석재 강도에 근접한 강도를 추정하는데 목적이 있다.

* 조선대학교 건축학부 교수, 공학박사
 ** 조선대학교 대학원 박사과정, 교신저자(ysshin27@naver.com)
 *** 조선대학교 군사학부 교수
 이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (KRF-2007-521-D00544)

1.2 연구 방법 및 범위

우리나라 석조 건조물은 화강암이 주로 사용되었다.²⁾

따라서 실험에 사용된 석재는 석조 건조물의 보존 및 활용성의 확대 등 실험의 취지에 부합되도록 화강암 석조문화재가 비교적 풍부하게 산재하는 익산지역의 황등석을 사용한다. 실험체는 표 1, 그림1~그림 2와 같이 크기 및 거칠기별로 1개 이상 총 12개를 제작한다.

표 1. 실험체의 분류

실험체	크기 (길이mm×두께mm×폭mm)	표면 거칠기	수량
1-1	300×100×500	거친다듬	2
1-2	300×100×500	잔다듬	2
2-1	300×150×300	거친다듬	1
2-2	300×150×300	잔다듬	1
3-1	300×200×300	거친다듬	1
3-2	300×200×300	잔다듬	1
4-1	300×300×300	거친다듬	1
4-2	300×300×300	잔다듬	1
5-1	300×400×300	거친다듬	1
5-2	300×400×300	잔다듬	1
총계			12

표 2. 화강암 석재의 물리적 성질(익산 황등석)

비중	흡수율	압축강도(MPa)	인장강도(MPa)
2.64	0.38	105	8.5



그림 1. 비파괴 실험체 및 파괴 실험체 제작

석재 표면 거칠기에 대한 정량적으로 평가하기 위해 그림 3과 같은 JRC(Joint Roughness Coefficient)³⁾에 의해서 석재의 표면 거칠기를 측정한다.

그림 3과 같이 JRC에 의해 잔다듬 실험체는 ‘JRC 2’ 정도, 거친다듬 거칠기는 ‘JRC 4’ 정도의 표면 거칠기로 실험체를 제작한다.

따라서 본 연구에서는 석조 건조물의 강도 추정을 위하여 석재 표면거칠기, 석재두께, 접촉재의 종류, 초음파속도 측정방법 등을 주변수로 실험과 연구를 실시한다.

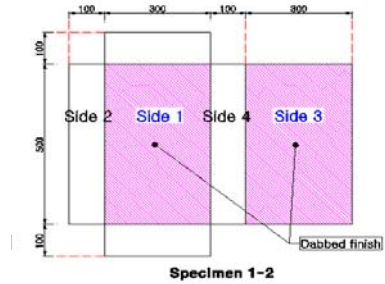
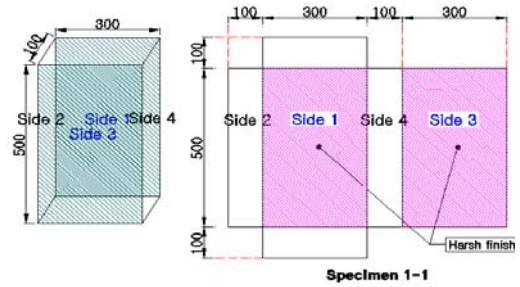


그림 2. 실험체의 제작 전개도

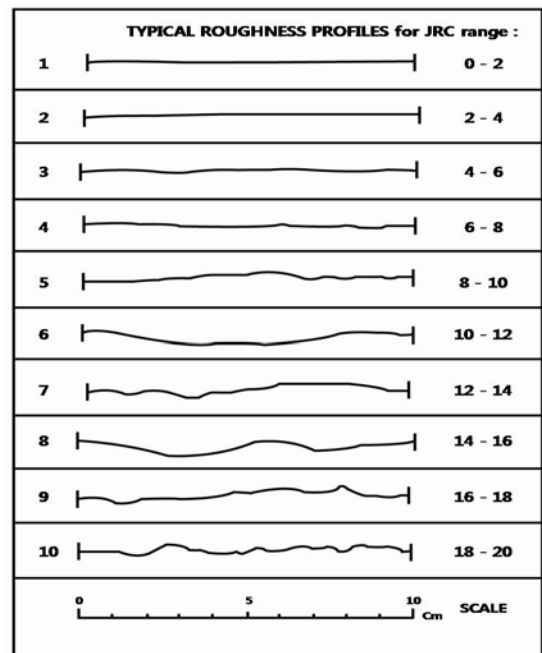


그림 3. 석재 표면 거칠기 범례(JRC)

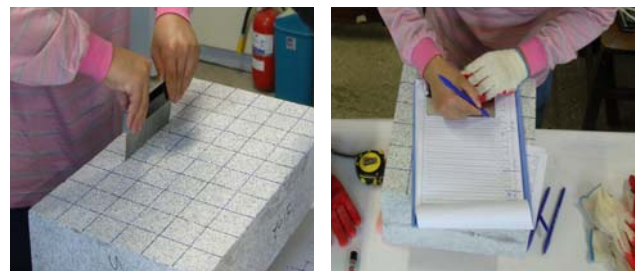


그림 4. 석재 표면 거칠기(JRC) 측정

2. 이론적 고찰

현재까지 석조 건조물에 대한 연구는 건축사학적인 측면에서 주로 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 석조 건조물의 보존에 대한 노력이 활발하게 진행되고 있으며 석조 건조물의 훼손 분석 및 보존대책에 관한 연구가 주로 진행되었다.

석조 건조물의 보존에 하기 위한 안전진단은 1997년 공주대학교 기초과학연구소에서 송산리 고분군에 대해 구분주변의 지반조사, 구조안전성 조사, 미생물조사, 공기조화시스템 연구가 진행되었다.

이후 (재)한국건설안전기술원에서 중원 미륵리 사지 석불입상 보호석실, 익산미륵사지 석탑, 청계천 수표교, 광통교에 대한 안전진단, (재)한국건설품질연구원에서는 무진 고성지 정밀안전진단, (구)고려구조ENG에서 불국사3층석탑, 불국사다보탑 및 감은사지 3층석탑 등의 안전진단을 실시하였다.

또한 국립문화재연구소에서는 1981년 부여정림사지 5층석탑 등 11건의 석조문화재에 대한 정기 안전점검을 실시하였으며 1994년까지 점검장비를 이용한 수직 및 수평 기울기 점검 등을 진행하였다.

1997년부터는 중요석조문화재 10건, 2008년 12건에 대해 각 대상 문화재의 보존상태에 따라 안전점검을 실시하여 점검 횟수를 증대 및 점검방법의 다각화를 도모함으로써 점검에 만전을 기하고 있다.

3. 실험계획 및 방법

실험체를 제작하여 석재 표면 거칠기, 두께, 접착제 등에 따라 초음파속도를 측정 후 100mm×100mm×100mm 크기로 압축파괴 실험체를 제작 및 가공하여 그림 5와 같이 파괴압축강도 실험을 실시한다.

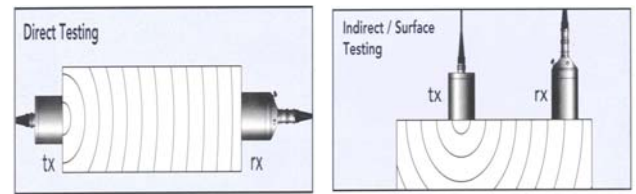


(a) 압축파괴 전 (b) 압축파괴 후

그림 5. 석재 1축 압축 파괴실험 전경

초음파속도는 그림 6의 방법에 따라 동일한 실험체에 대하여 그림 7과 같이 직접법과 간접법을 중복 실시하며 초음파속도 측

정시 탐촉자와 실험체의 밀착을 위해 그림 8과 같은 그리스, 수용성 젤, 스너그(SNUG) 등을 접착제로 사용한다.



(a) 직접법 (b) 간접법

그림 6. 초음파속도 측정 방법

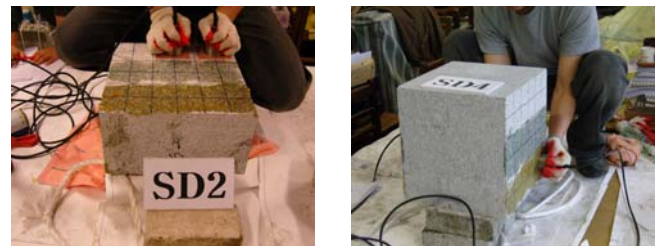


그림 7. 석재 초음파속도(간접법, 직접법) 측정



(a) 그리스(Grease), 젤(Gel)

(b) 스너그(SNUG)

그림 8. 초음파 접착제의 종류

4. 실험 결과

4.1 접착제에 따른 실험결과

접착제의 종류와 표면 거칠기에 따른 간접법 초음파속도를 측정 결과는 표 3 및 그림 9와 같다.

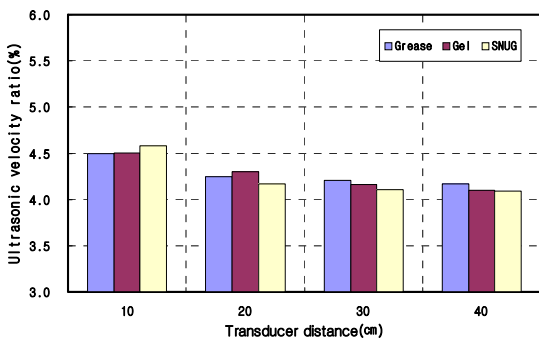
잔다듬 실험체의 경우 접착제별로 거의 유사한 초음파속도를 나타냈다. 거친다듬 실험체의 경우, 그리스와 스너그는 유사한 초음파속도를 나타내었고, 젤의 경우는 7~18% 정도 초음파속도가 낮게 나타났다. 이는 표면의 요철이 심한 거친다듬의 경우 젤을 사용했을 때 탐촉자가 실험체 표면에 밀착되지 않고 특정 돌출부위만 접촉함에 따른 것으로 사료된다. 이러한 결과는 실제 석조 건조물을 대상으로 조사했던 국립문화재연구소 보고서에서도 스너그를 사용한 경우 수용성 젤보다 약 10~20% 정도 초음파속도가 빠른 것으로 나타났다.⁴⁾

표 3. 접착제 종류별 간접법 초음파속도 측정 결과

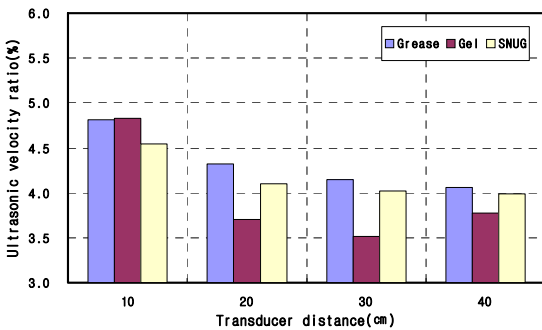
표면 거칠기	탐촉자거리 (mm)	초음파속도(km/s)		
		그리스	젤	스너그
잔다듬	100	4.49	4.50	4.58
	200	4.25	4.30	4.17
	300	4.21	4.16	4.10
	400	4.17	4.10	4.09
거친다듬	100	4.81	4.83	4.54
	200	4.32	3.71	4.10
	300	4.15	3.51	4.02
	400	4.06	3.78	3.99

표 4. 접착제 종류별 직접법 초음파속도 측정 결과

표면 거칠기	탐촉자거리 (mm)	초음파속도(km/s)		
		그리스	젤	스너그
잔다듬	100	3.90	3.90	3.55
	200	3.87	3.88	3.68
	300	3.84	3.91	3.79
	400	3.81	3.84	3.79
거친다듬	100	3.68	3.84	3.40
	200	3.88	3.87	3.77
	300	3.77	3.81	3.62
	400	3.86	3.81	3.76



(a) 잔다듬



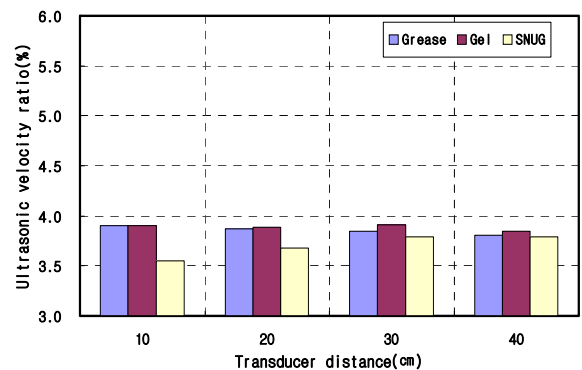
(b) 거친다듬

그림 9. 접착제 종류별 간접법 초음파속도 측정 결과

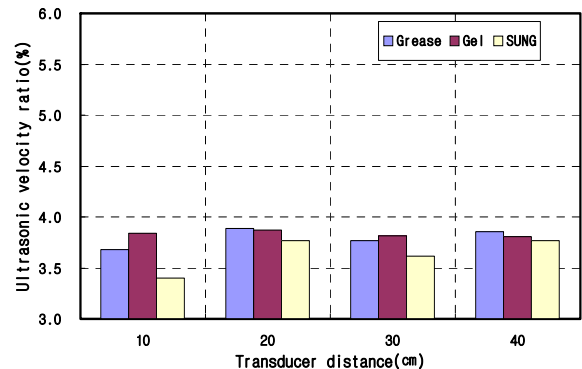
실험체의 접착제별 직접법으로 초음파속도를 측정한 결과는 표 4 및 그림 10과 같다. 간접법과 다르게 직접법에서는 그리스와 젤이 비슷한 초음파속도를 보였다. 스너그는 3~12% 정도 초음파속도가 낮게 나타났다.

이는 석재 모재와 탐촉자가 거의 밀착되는 그리스와 젤과는 다르게 스너그 패드의 두께가 상대적으로 두꺼워 초음파속도에 차이를 보이는 것으로 사료된다.

그림 9 (b)의 탐촉자 거리 10cm에서 다른 거리와는 다른 경향을 보인 것은 이는 석재 모재와 탐촉자가 돌출 부위에서만 밀착되는 그리스와 젤과는 다르게 스너그 패드의 두께가 상대적으로 두꺼워 초음파속도에 차이를 보이는 것으로 사료된다.



(a) 잔다듬



(b) 거친다듬

그림 10. 접착제 종류별 직접법 초음파속도 측정 결과

4.2 탐촉자 거리에 따른 실험결과

간접법의 탐촉자 거리별 초음파속도를 탐촉자 거리 10cm~40cm에 대해 초음파속도를 비교한 결과는 다음과 표 5 및 그림 11과 같다.

표 5. 탐촉자 거리별 간접법 초음파속도 비교

표면거칠기	탐촉자거리 (mm)	그리스	젤	스너그
잔다듬	100	100	100	100
	200	95	96	91
	300	94	92	90
	400	93	91	89
거친다듬	100	100	100	100
	200	90	77	90
	300	86	73	89
	400	84	78	88

잔다듬 실험체의 경우, 탐촉자간 거리가 증가할수록 그리스는 5~7% 정도, 젤은 4~9% 정도, 스너그는 9~11% 정도 초음파속도는 저하되는 것으로 나타났다.

거친다듬 실험체의 경우도 잔다듬 실험체와 마찬가지로 그리스는 10~16% 정도, 젤은 23~27% 정도, 스너그는 10~12% 정도 초음파속도는 저하되는 경향을 보였으며 젤이 거리에 따른 초음파속도의 차가 가장 크게 나타났다.

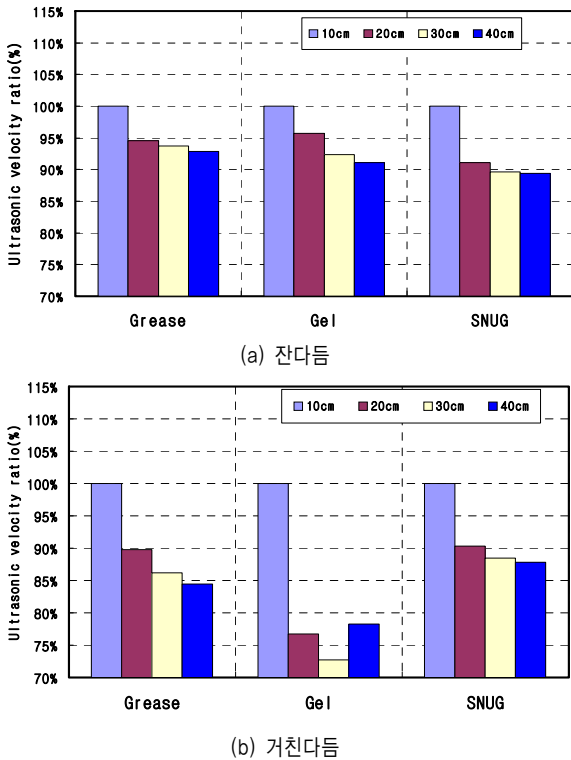


그림 11. 탐촉자 거리별 간접법 초음파속도 비교

직접법의 탐촉자 거리별 10cm~40cm에 대해 초음파속도를 비교한 결과는 표 6 및 그림 12와 같다.

표 6. 탐촉자 거리별 직접법 초음파속도 비교

표면거칠기	탐촉자거리 (mm)	그리스	젤	스너그
잔다듬	100	100	100	100
	200	99	100	103
	300	98	100	107
	400	98	99	107
거친다듬	100	100	100	100
	200	106	101	111
	300	102	99	106
	400	105	99	111

탐촉자 거리별 잔다듬 실험체에서 직접법 초음파속도의 경우, 탐촉자간 거리가 증가할수록 그리스는 1~2% 정도, 젤은 1% 정도 초음파속도가 저하되었으며 스너그는 3~7% 정도 빠른 경향을 보였다.

거친다듬 실험체의 경우, 그리스는 2~6% 정도, 스너그는 6~11% 정도 초음파속도가 빨라지는 경향을 보였으나, 젤의 경우는 앞의 잔다듬 실험체와 마찬가지로 탐촉자 거리별 1% 정도의 차이를 보여, 직접법으로 초음파속도를 측정하였을 경우 신뢰성 있는 초음파속도의 측정이 가능할 것으로 사료된다.

이는 석재의 매질이 상대적 균질한 재료적 특성상 직접법에서는 초음파속도는 증가하지만 간접법에서는 초음파속도가 빠르게 전달되는 경향을 보였다.

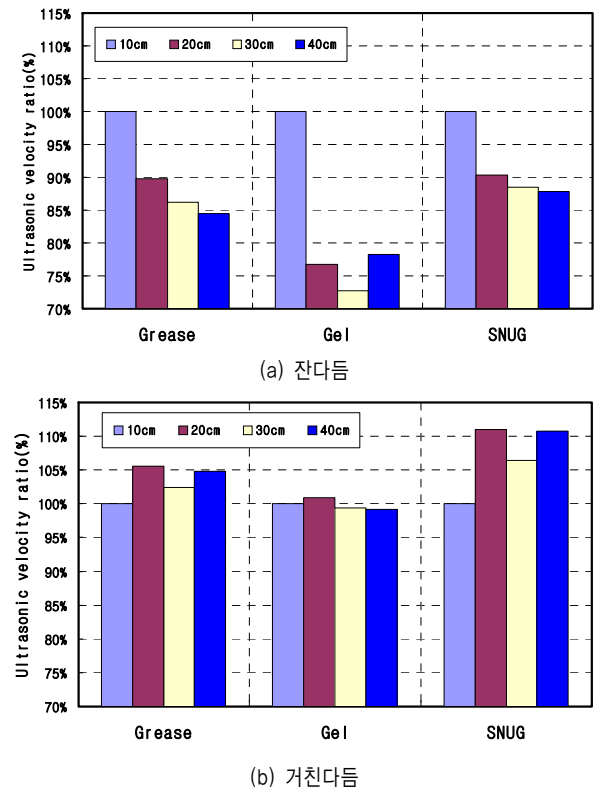


그림 12. 탐촉자 거리별 직접법 초음파속도 비교

4.3 초음파속도 측정 방법에 따른 실험결과

실험체에서 초음파속도 측정방법에 따른 직접법에 대한 간접법의 초음파속도의 비교는 다음 표 7과 같다.

표 7. 간접법과 직접법의 초음파속도 비교

표면거칠기	탐촉자거리 (mm)	그리스	젤	스너그
잔다듬	100	1.15	1.15	1.29
	200	1.10	1.11	1.13
	300	1.10	1.06	1.08
	400	1.10	1.07	1.08
거친다듬	100	1.31	1.26	1.34
	200	1.11	0.96	1.09
	300	1.10	0.92	1.11
	400	1.05	0.99	1.06

잔다듬에서 직접법 초음파속도를 간접법의 초음파속도로 나눈 초음파속도 비는 그리스의 경우 10~15%, 젤은 6~15%, 스너그는 8~29% 정도 탐촉자 거리별로 직접법에 비해 간접법의 초음파속도가 빠른 경향을 보였으며, 그리스와 젤은 거의 비슷한 초음파속도 비를 나타내었다.

거친다듬에서 직접법 초음파속도를 간접법의 초음파속도로 나눈 초음파속도 비는 그리스의 경우 5~31%, 스너그는 6~34% 정도 탐촉자거리별로 간접법의 초음파속도가 빠른 경향을 보였다. 젤의 경우는 탐촉자거리 10cm에서는 26% 정도 간접법이 빠른 것으로 나타났으나, 20cm이후에는 1~8% 정도 직접법의 초음파속도가 빠른 경향을 보였다.

이는 직접법에서 빠른 초음파속도를 나타내는 콘크리트와 달리 암석내부의 절리나 암(巖)조직의 성상 등 육안으로 구별되지 않는 암석의 특성요인으로 인해 초음파의 전달 경로가 회절(回折)된 것으로 추정되며 간접법의 경우 고강도 암석에서는 내부 특성요인의 영향을 적게 받는 것으로 사료된다.

4.4 석재표면 거칠기에 따른 실험결과

잔다듬 실험체의 초음파속도를 거친다듬 실험체의 초음파속도 비로 나눈 비는 다음 표 8과 같다. 그리스는 2~7%, 젤은 7~16% 정도, 스너그는 2~8% 정도 초음파속도의 차이를 보였다.

표 8. 잔다듬과 거친다듬 실험체의 초음파속도 비교

구분	탐촉자거리 (mm)	그리스 (%)	젤 (%)	스너그 (%)
간접법	100	93.4	93.2	100.8
	200	98.3	116.1	101.6
	300	101.6	118.4	102.1
	400	102.7	108.4	102.6
직접법	100	106.1	101.6	104.5
	200	99.6	100.3	97.4
	300	102.0	102.5	104.8
	400	98.8	101.0	100.8

따라서 젤과 달리 그리스와 스너그는 거칠기에 따른 초음파속도의 편차가 적어 석조 건조물에 적용 시 접촉재로 사용하는 것이 좋을 것으로 사료된다. 그러나 그리스 접촉재는 석조 건조물의 오염을 유발시킬 수 있어 스너그를 접촉재로 사용하는 것이 문화재의 손상을 방지할 수 있어 바람직할 것으로 판단된다.

5. 추정식 제안

석재 실험체의 실험에서 얻어진 초음파속도 및 파괴압축강도는 다음 표 9와 같고, 실험체별로 측정된 초음파속도와 파괴압축강도의 회귀분석을 실시하여 석재 거칠기별 강도 추정식은 다음 표 10 및 그림 13과 같다.

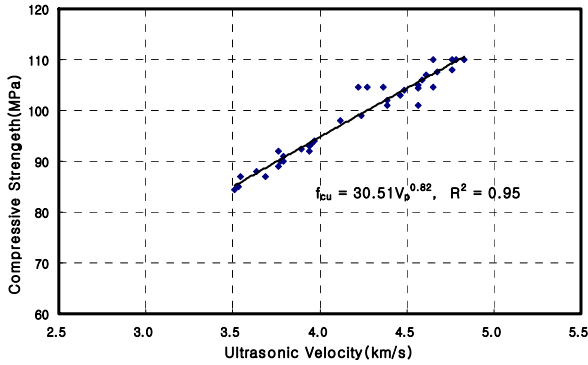
회귀분석결과 잔다듬 실험체의 95%, 거친다듬 실험체는 92%로 거친다듬 실험체 추정식의 신뢰성을 나타내는 결정계수가 다소 낮게 나타났다.

표 9. 초음파속도와 파괴압축강도의 결과

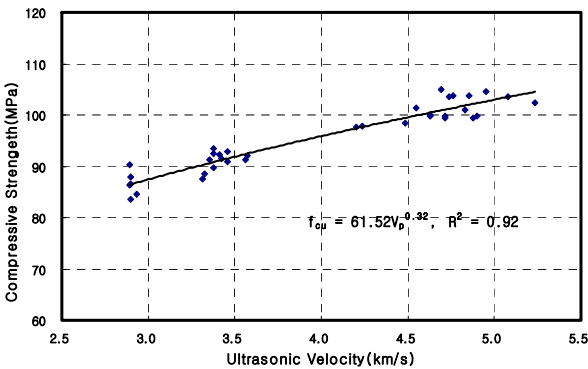
표면 거칠기	구분	탐촉자거리 (mm)	초음파속도(km/s)			압축강도 (MPa)
			그리스	젤	스너그	
잔다듬	간접법	100	4.49	4.50	4.58	110.0
		200	4.25	4.30	4.17	104.7
		300	4.21	4.16	4.10	86.9
		400	4.17	4.10	4.09	93.5
	직접법	100	4.81	4.83	4.54	110.0
		200	4.32	3.71	4.10	104.7
		300	4.15	3.51	4.02	86.9
		400	4.06	3.78	3.99	93.5
거친다듬	간접법	100	3.90	3.90	3.55	110.0
		200	3.87	3.88	3.68	104.7
		300	3.84	3.91	3.79	86.9
		400	3.81	3.84	3.79	93.5
	직접법	100	3.68	3.84	3.40	110.0
		200	3.88	3.87	3.77	104.7
		300	3.77	3.81	3.62	86.9
		400	3.86	3.81	3.76	93.5

표 10. 석재 표면 거칠기별 강도추정식

표면거칠기	강도 추정식	상관계수(R ²)
잔다듬	$f_{su} = 30.51 V_p^{0.82}$	95
거친다듬	$f_{su} = 61.52 V_p^{0.32}$	92



(a) 잔다듬



(b) 거친다듬

그림 13. 석재 표면 거칠기별 간접법 강도 추정식

이는 거친다듬이 잔다듬보다 석재 표면의 심한 요철로 인하여 초음파속도와 파괴압축강도 간의 상관성이 다소 저하되어 결정계수가 3% 정도 낮은 경향을 보인 것으로 사료된다.

6. 기존 제안식과 비교

석재의 강도를 평가하기 위해 초음파속도를 활용한 기존의 제안식 중 국내에서 대표적으로 사용되는 백승철외 4인 제안식⁵⁾과 경험적으로 사용되는 익산미륵사지 석탑 진단식⁶⁾은 다음과 같다.

1) 백승철외 제안식 : $f_{su} = 69.4 V_p - 88.4$

2) 익산미륵사지 석탑 진단식 :

$$f_{su} = 66.039 \times \exp^{(0.000578598 \times V_p)}$$

잔다듬 실험체에 대해 본 연구의 추정식을 평가하기 위하여 백승철외 4인 제안식과 익산미륵사지 진단식을 비교한 결과는 표 11 및 그림 14와 같다.

표 11. 파괴압축강도와 비파괴 추정 압축강도의 비교

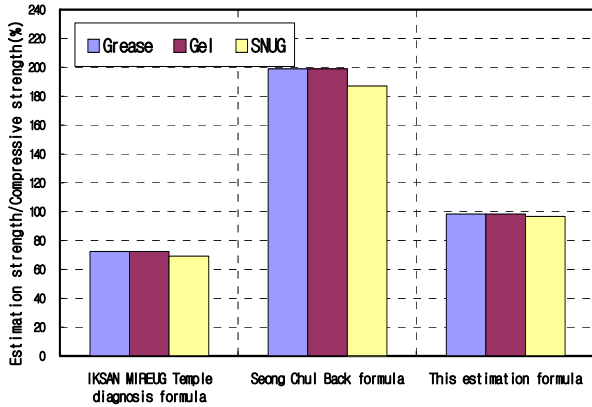
표면거칠기	구분	거리 (cm)	파괴 압축 강도 (MPa)	비파괴 압축강도 추정(MPa)								
				그리스			젤			스너그		
				(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
잔다듬	간접법	10	110	88	222	104	89	223	105	93	228	105
		20	104	77	205	99	79	209	98	73	200	98
		30	86	75	203	98	73	199	96	71	195	96
	직접법	40	93	73	200	98	70	195	96	70	195	96
		10	110	63	182	92	63	181	86	51	157	86
		20	104	62	179	92	62	180	88	55	166	88
거친다듬	간접법	30	86	61	177	91	63	182	90	59	174	90
		40	93	59	175	91	61	177	90	59	174	90
		10	110	97	222	92	98	223	92	83	205	90
	직접법	20	104	76	201	93	53	160	89	67	187	92
		30	86	83	228	111	58	178	105	77	218	110
		40	93	74	206	103	62	185	100	71	200	102
직접법	10	110	50	151	84	55	161	86	42	133	82	
	20	104	59	172	90	59	171	90	55	165	89	
	30	86	67	198	108	69	202	108	61	186	106	
40	93	65	191	101	63	187	100	62	184	100		

(1) 익산 미륵사지석탑 진단식, (2) 백승철 제안식 (3) 본 연구 추정식

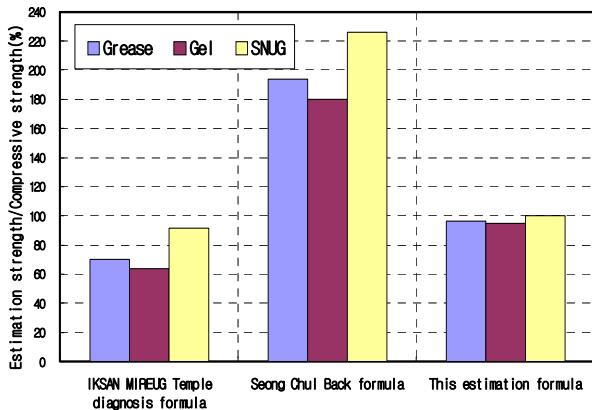
잔다듬 실험체의 제안식별 추정강도와 파괴압축강도를 비교한 결과, 익산미륵사지 진단식은 30% 정도, 본 연구의 추정식은 4% 정도 실제 압축강도에 비해 과소평가되는 경향을 보였다. 백승철 외 4인 제안식은 실제 압축강도보다 94% 정도 과대평가되는 경향을 보였다.

거친다듬 실험체에 대해 기존 제안식별 추정강도와 파괴압축강도를 비교한 결과, 익산미륵사지 진단식은 25% 정도, 본 연구 추정식은 5% 정도 실제 압축강도에 비해 과소평가되는 경향을 보였다. 백승철 외 4인식은 실제 압축강도보다 최대 100% 정도 과대평가되는 경향을 보였다.

본 연구에서는 거칠기를 변수로 하여 제안된 적용식으로 기존 제안식은 표면거칠기 및 접촉재를 적용하지 않아본 연구의 적용식과 기존 제안식은 다소 차이를 보이는 것으로 사료된다.



(a) 잔다듬



(b) 거친다듬

그림 14. 파괴 압축강도와 추정 압축강도의 비교

또한 저하되는 경향을 보였으나 그 외의 거칠기 및 접촉재에서는 이 같은 양상이 나타나지 않아, 상관관계가 명확하지 않은 것으로 사료된다.

4. 실험결과를 종합하면, 석조 건조물에서 초음파속도에 의한 석재의 압축강도를 추정할 경우, 초음파 전달속도와 실제 조사방법의 접근성 등을 고려할 때 간접법과 접촉재를 스너그로 사용하는 것이 신뢰성이 높은 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 국립문화재연구소, 문화재 모니터링 기술개발, 2007.12
2. 백승철, 김용태, 김홍택, 윤준식, 이윤규, 초음파 속도를 이용한 암석의 일축압축강도 평가, 한국지반환경공학회 논문집 제7권 제2호, pp.33~42, 2006.4
3. 이상현, 박경립, 석조문화재의 특징과 암석에 대한 지질학적 연구(Ⅰ) - 강원도 원주시, 원주군, 횡성군 및 홍천군 지역, 제1권 제1호, 1992.
4. 조기만, 좌용주, 석조문화재의 석재공급지에 관한 연구(익산지역에 대한 지형학적 및 암석학적 접근), 한국암석학회 논문집 제14권 제1호, pp.24~37, 2005
5. (재)한국건설안전기술원, 익산미륵사지 석탑 안전진단, pp34, 1998.
6. Barton, N. and Choubey, The Shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mech, Vol,10, pp.1~54, 1977

(접수 2009.10.30, 심사 2009.12.3, 게재확정 2009.12.30)

7. 결 론

본 연구는 석조 건조물의 초음파속도법을 적용한 비파괴 강도 추정을 위해 파괴실험과 비파괴실험을 통해 석재 강도 추정식을 제안한 것으로, 그 결론은 다음과 같다.

1. 접촉재 종류에 따른 초음파 속도는 간접법의 경우 잔다듬 실험체에서는 젤과 스너그를 사용한 속도는 거의 유사한 것으로 나타났다. 그러나 거친다듬 실험체의 경우 스너그를 접촉재로 사용할 때의 초음파 속도가 가장 빠른 것으로 나타났다.
2. 스너그는 젤의 경우와 달리 패드의 쿠션이 부재 표면의 요철을 고르게 메워 탐촉자와 부재의 밀착이 양호하여 탐촉자 거리별 초음파속도의 편차가 적은 것으로 판단된다. 석조 건조물에서는 오염을 유발시키는 그리스와 젤보다 스너그를 접촉재로 사용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.
3. 간접법 실험체에서 탐촉자간 거리에 따른 초음파속도는 접촉재 및 거칠기에서 거리가 증가할수록 초음파속도는 저하되는 것으로 나타났다. 직접법 실험체의 경우, 그리스를 접촉재로 사용한 잔다듬 실험체에서는 거리의 증가에 따른 초음파속도

요 약

석조 건조물의 역학적 성질은 일반적으로 석재 강도의 관점에서 설명된다. 강도를 측정하기 위해서 문화재의 훼손이 없는 초음파속도의 측정 방법이 이용되고 있다. 현재 시행되고 있는 초음파속도법은 표면거칠기, 석재 두께 등에 대한 보정을 실시하지 않고 있는 실정이다. 그리고 그리스와 같은 접착재 사용으로 문화재의 표면에 오염이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 석조 건조물의 강도를 간접법으로 추정하기 위하여 석재 표면거칠기, 석재두께, 접착재의 종류, 초음파속도 측정방법 등을 주변 수로 석재 간접법 강도 추정식을 제안한다.

① 잔다듬 석재 초음파속도법에 의한 강도 추정식 : $f_{su} = 19.1 \times V_p + 18.3 (R^2 = 76.0)$

② 거친다듬 석재 초음파속도법에 의한 강도 추정식 : $f_{su} = 7.9 \times V_p + 64.6 (R^2 = 69.8)$

키워드 : 화강석, 표면 거칠기, 초음파속도법, 강도추정
