

진동 측정에 의한 석조문화재 복원 공사 전·후의 동특성 추정

최재성^{1*}, 조철희²

Estimation of Dynamic Characteristics Before and After Restoration of the Stone Cultural Heritage by Vibration Measurement

Jae-Sung Choi^{1*}, Cheol-Hee Cho²

Abstract : Naju Seokdanggan, Treasure No. 49, was dismantled and reconstructed due to poor performance. During construction, the crack area was reinforced and the inclination was improved. It is necessary to analyze the stiffness changes before and after the reconstruction of these cultural properties, and to establish a database of related information. In addition, there is a need for research on a scientific non-destructive testing method capable of predicting or evaluating the reinforcing effect.

In this study, a simple equation for estimating the overall stiffness of the structural system was derived from information on the elasticity coefficient and the natural frequency measured by vibration tests before and after reconstruction work, and the applicability of the equation was examined. If the stiffness of important cultural properties is regularly investigated by the suggested method, it is judged that it can be used as data to estimate the time when structural safety diagnosis is necessary or when repair or reinforcement is necessary.

Keywords : Stone Cultural Heritage, Restoration, Vibration Measurement, Natural Frequency, Global Stiffness, Modulus of Elasticity

1. 서 론

석조문화재는 석탑이 대표적이며, 필요에 따라 건조한 석조물로 석조부도, 석등, 석비, 당간지주, 석조 등이 있다. 이 중에서 당간지주는 당간을 세우기 위한 시설이며, 당간(幢竿)은 직접적으로 당(幢)을 걸기 위하여 깃대와 같이 높이 세우는 부분으로 일반적으로 철, 돌, 나무 등으로 제작되었다. 지금까지 당간과 당간지주에 대한 연구는 석탑, 석불, 석등 등에 비하여 많지 않은 실정이지만, 국가지정문화재로 지정되어 있는 당간지주의 수량은 상당하다. 현재 한국에는 많은 당간지주가 남아 있는데, 완전하지는 않지만 당간까지 남아있는 것은 8기(基) 정도이며, 당간지주는 남북한을 합하여 총 100여기 정도인데, 대부분이 남한 지역에 집중되어 있다.(Eom, 2007)

석조문화재인 나주 동점문 밖 석당간(羅州 東漸門外 石幢竿, 보물 제49호)은 도로 주변에 위치하여 보존환경이 열악하고, 오랜 세월을 거치면서 전체적으로 이끼와 풍화에 의한 변색과 표면박락이 발생하였다. 또한, 재료적 노후화의 급속한

진행으로 간봉(杆棒, 철심)이 끼워진 원공(圓孔) 주변으로 다수의 균열이 발생되었고 당간 전체가 북동측으로 기울어지는 등의 손상 및 변형이 심화되었다(KICST, 2004). 이에 정밀한 진단을 실시하고, 그 결과에 따라 해체 및 복원공사를 실시하였다.

석조문화재의 수리 기술은 최근에 작성된 석조문화재 수리 기술에 대한 보고서(NRICH, 2019)에서 현재까지 축적된 기술을 확인할 수 있다. 이 보고서에는 기본 단계에서의 조사 및 분석 방법부터 구조해석 등의 정밀한 분석 기술 등이 체계적으로 설명되어 있다. 또한 기초 및 구조 보강, 성형, 균열충진, 접합, 강화처리, 세척, 색맞춤, 석재가공, 조립 등의 수리 및 보존 작업에 대한 전체 과정의 기술적 내용을 서술하고 있다.

본 논문에서는 해체 및 복원 시 구조적 안정성 확보를 위한 조치사항을 확인하고, 공사 전·후에 측정된 진동시험 데이터를 이용하여 동특성의 변화를 추정하였다.

2. 대상 구조물 현황

2.1 문화재 현황

나주 동점문 밖 석당간(이하 나주 석당간)은 고려시대에 세워진 것으로 추정하고 있으며, 나주읍성의 동문인 동점문 밖에 세워졌던 석조당간으로 전남 나주시 성북동 229-9번지에

¹정회원, 유노빅스이엔씨(주), 연구소장

²정회원, (주)한국구조안전연구원, 대표이사, 공학박사, 문화재 전문위원

*Corresponding author : phdr007@naver.com

UNOVICS ENC Co.,Ltd, #707, Uspace1-A, 660, Daewangpangyo-ro,

Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 13494, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2021년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2021년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.



(a) Before Restoration (b) After Restoration

Fig. 1 The Whole View of Naju SukDangGan

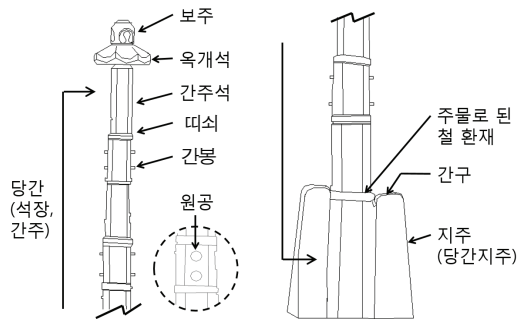


Fig. 2 The Name of Members

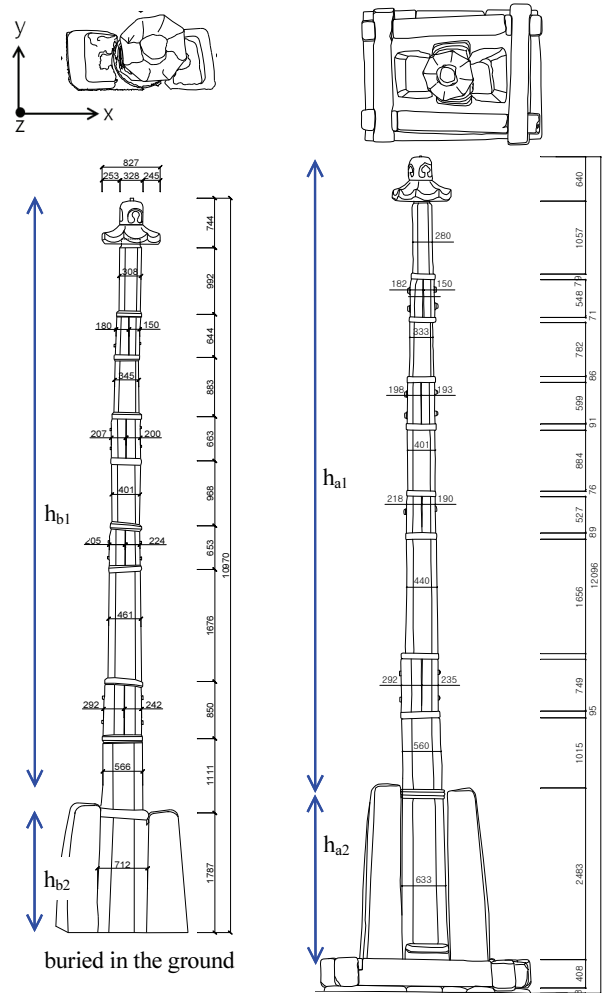
위치하고 있다. Fig. 1(a)는 해체 복원 공사 이전, (b)는 해체 복원 이후의 전경이다.

Fig. 2는 각 부위별 명칭이다. 당간은 사찰입구에 세워두는 것으로, 절에 행사가 있을 때 당(幢)이라는 깃발을 달아두는데 이 깃발을 걸어두는 길쭉한 장대를 당간이라 하며, 당간을 양쪽에서 지탱해 주는 두 돌기둥을 당간지주라 한다. 대개는 당간이 목재여서 소실되어 양쪽 지주만 남아 있는데, 이것은 돌로 만들어져 당간이 함께 남아 있어 중요한 유산이며, 1963년 1월 21일에 보물 제49호로 지정되었다(KISS, 2011).

2.2 구조 현황

나주 석당간의 기본적인 정보는 Fig. 3 및 Table 1과 같다. Table 1에서 ρ 는 밀도, I_{xx} , I_{yy} 는 간주석의 방향별 평균적인 단면 2차 모멘트, $I_{0,xx}$, $I_{0,yy}$ 는 최하단 간주석의 밀면에서의 방향별 단면 2차 모멘트, A_0 는 최하단 간주석의 밀면의 면적, d_0 , d_1 , h_0 , h_1 은 최하단 및 최상단 단면에서 한번의 길이, m 은 질량, l_{before} 및 l_{after} 은 복원 전, 후의 옥개석을 제외한 당간의 높이이다.

사용된 석재는 화강암이며, 당간은 5개 돌(간주석)을 서로



(a) Before Restoration

(b) After Restoration

Fig. 3 The Dimensions of Naju SukDangGan

맞물리게 하여 세웠는데, 아래는 굽고 올라갈수록 차츰 가늘어진다. Fig. 4와 같이 맞물릴 때 상·하에 철 띠쇠를 두르고 2개의 원공에 간봉을 넣어 고정하였다. 당간과 지주는 당간에 띠쇠를 두른 후 지주의 안쪽에 마련된 받침돌 윗면에 구멍을 파서 이를 고정시키는 방식으로 연결되어 있다(CHA, 2021).

특이사항으로 Fig. 3과 같이 복원 전에는 주변의 성토로 인해 당간 및 지주가 현재의 지면 아래로 약 1.2m 묻혀 있었으나, 복원 시에는 발굴조사를 통해 성토된 토사를 제거하여 해당 부위가 완전히 노출되도록 하였다.

2.3 해체 복원 전의 상태

나주 석당간의 정밀안전진단 보고서(KICST, 2004)에서는, Fig. 5와 같이 나주 석당간에 균열, 표면박리, 입자박락, 흑화 현상 등의 성능저하 양상이 나타나는 것으로 기술하였다. 여기서 박리는 석재의 결(두께 10mm 이상)을 따라 모재로부터

Table 1 Structural Informations

Item	Unit	Value	Remark	
ρ	kg/m ³	2,570	Density of Granite	
I_{XX}	m ⁴	6.71E-3	Geometrical Moment of Inertia in The First Level GanJuSuk (Average)	
I_{YY}	m ⁴	7.08E-3		
$I_{0,XX}$	m ⁴	2.14E-2	Geometrical Moment of Inertia in the root section	
$I_{0,YY}$	m ⁴	1.96E-2		
A_0	m ²	0.50	Cross-sectional area in the root section	
d_0	m	0.72	Refer to Fig. 14	
d_1	m	0.30	Refer to Fig. 14	
h_0	m	0.69	Refer to Fig. 14	
h_1	m	0.30	Refer to Fig. 14	
Before Restoration	mb	kg	779	not include the Pillar weight
	hb ₁	m	9.18	$l_{before} = hb_1 + hb_2$
	hb ₂	m	1.79	Refer to Fig. 3
After Restoration	ma	kg	824	Not include the Pillar weight
	ha ₁	m	9.14	$l_{after} = ha_1 + ha_2$
	ha ₂	m	2.48	Refer to Fig. 3

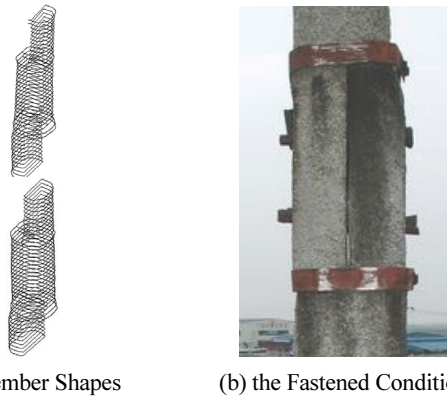


Fig. 4 Examples of Member Shapes and the Fastened Condition

분리되려는 들뜸 현상, 박락은 석재의 결(두께 10mm 이상)을 따라 석재의 일부가 떨어져 나오는 현상을 의미한다. 흑화는 화학적 변화에 의해 석재의 표면색이 검게 변하는 현상을 의미한다.

또한 균열은 주로 심한 풍화와 집중 응력, 표면 박리 및 박락은 심한 풍화, 흑화현상은 풍화와 미생물, 철물 부식물 등의 영향인 것으로 조사 보고하였다.

그리고 기둥 형상의 나주 석당간은 1/85~1/75의 비교적 큰 기울기를 나타내고 있었는데, 풍화중을 고려한 구조검토 결과, 특정 방향으로 1/147 정도의 기울기가 추가적으로 발생될

수 있어 기울기를 감소시키는 대책이 필요한 것으로 조사 보고되었다.

2.4 해체 복원시 보강 실시 사항

2.4.1 균열 부위 등의 보강

보수, 보강에 대한 KISS의 보고서(2011)을 정리하면 다음과 같다. 해체 복원 전에 조사된 균열 부위에 에폭시 수지를 주입하여 보수하였고, 절단된 부위와 접합부에서 균열이 깊은 부위는 스테인리스 재질의 $\Phi 10\text{mm}$ 꺾쇠와 강봉을 이용하여 보강하였다. 스테인리스 꺾쇠길이는 균열의 위치에 따라 100~300mm로 하였고 꺾쇠의 삽입 깊이는 30~40mm로 하였다. 꺾쇠는 Fig. 6(a)와 같이 표면을 15~20mm 정도 잘라낸 후에 에폭시 수지로 매입하여 부착하고 표면을 의석 처리하였다.

당간의 접합부가 절단된 부위에는 단부에서 100mm 이상의 이격된 중심에 100~150mm 정도 천공하고 스테인리스 강봉($\Phi 10\text{mm}$)을 삽입하여 에폭시 수지로 부착하여 보강하였다. 스테인리스 꺾쇠와 강봉 보강은 외부에서 육안에 노출되지 않도록 당간 접합부 내측에서 실시하였다.

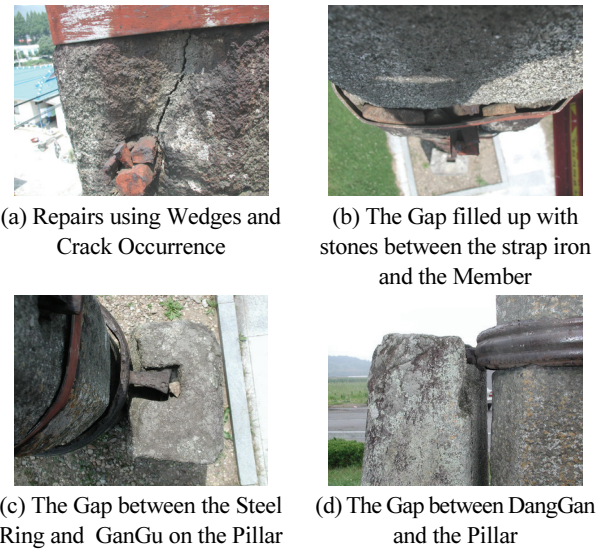


Fig. 5 Examples of Structural Performance Degradation before Restoration

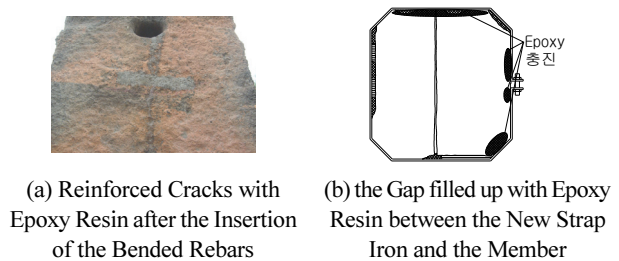


Fig. 6 Examples of Applied Reinforcement Methods

또한 Fig. 5(c) 및 (d)와 같이 당간 간의 접합부가 이격되거나 그 둘레의 띠쇠와의 접합면이 이격되어 있는 경우에는, Fig. 6(b)와 같이 스테인리스 철판을 다중으로 겹쳐 삽입 후 에폭시 수지를 주입하거나 에폭시 수지만을 주입하여 이격 공간을 밀실하게 채움으로써 새로 제작된 띠쇠가 당간의 접합 부간에 밀착 고정시키기 위한 기능을 할 수 있도록 하였다.

2.4.2 기울기 개선

KICST(2004)와 KISS(2011)의 보고서에서 변형을 평가하기 위해 3D-SCAN DATA를 분석하여 수평변위의 변화량을 제시하였다. Fig. 7과 같이, 복원 전, 후에 조사된 변위를 비교하여 정리하면 다음과 같다.

(1) X방향 수평변위

해체 전에는 최하단에 비해 최상단에서 우측으로 135mm (1/75) 정도 변형되었던 것이 복원 후에는 좌측으로 64mm (1/177) 정도 변형되었다.

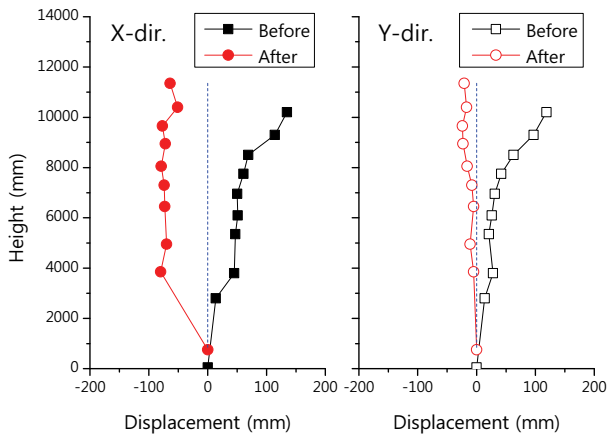


Fig. 7 Improvement of Horizontal Displacements (Slopes) before and after Restoration

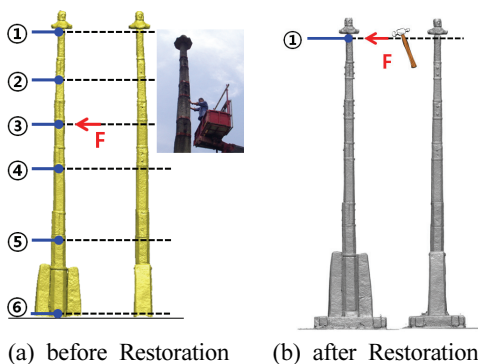


Fig. 8 The Measurement Location and Method

(2) Y방향 수평변위

해체 전에는 최하단에 비해 최상단에서 배면 측으로 119mm (1/85) 정도 변형되었던 것이 복원 후에는 정면으로 21mm (1/540) 정도 변형된 것으로 나타났다.

이상과 같이 수평변위는 해체 전에 발생된 변위와 복원 후를 비교하면 X방향에서 199mm, Y방향에서 140mm 정도 좌측면과 정면으로 바로 잡아졌으며 기울기가 1/177과 1/540로 작아진 것으로 KISS 보고서에 제시되었다.

3. 진동측정에 의한 고유진동수 분석

3.1 진동 측정

해체 복원 전, 후에 현장에서 진동 측정을 위한 시험을 진행하였다. 측정방법은 복원 공사 전의 경우에는 Fig. 8 (a)와 같이 6개소에 가속도 센서를 설치하고 위치 ③에서 입력가진을 하다가 일정시간 이후에 멈추면서 자유진동이 발생되도록 하

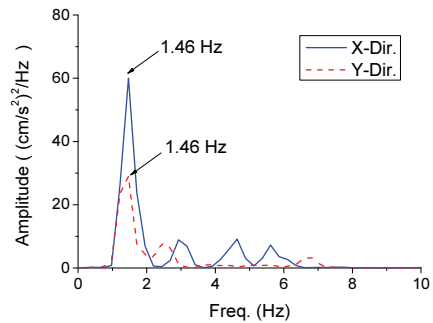


Fig. 9 PSD Curve of Location ① (before Restoration)

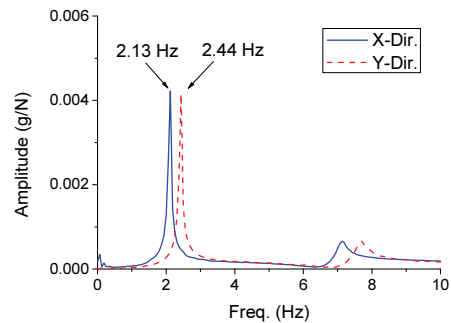


Fig. 10 FRF Curve of Location ① (after Restoration)

Table 2 Experimental Natural Frequencies (Unit : Hz)

Direction	Before	After
X	1.5	2.1
Y	1.5	2.4

였다. 복원 공사 후의 경우에는 Fig. 8과 같이 위치 ①에 가속도 센서를 설치하고 해당 위치를 임팩트 햄머로 충격가진하였다(Choi et al., 2010; Park et al., 2011).

3.2 해체 복원 전·후의 고유진동수 변화

Fig. 9는 복원 공사 전에 인력가진에 의한 진동시험 시 위치 ①에서의 진동가속도의 방향별 Power Spectrum Density(PSD) 계산 결과이다(LMS International, 2000). Fig. 10은 복원 공사 후에 임팩트햄머를 이용한 충격가진 시험에 의한 Frequency Response Function(FRF) 계산 결과이다.

Table 2는 석당간의 해체 및 복원 공사 전, 후의 고유진동수 분석 결과를 나타내는 것으로, X방향은 2.1 Hz, Y방향은 2.4 Hz로 분석되었다. 복원 공사 전(2004년)의 X, Y방향의 고유진동수 1.5 Hz와 비교하였을 때 X방향은 0.6Hz, Y방향은 0.9 Hz가 증가되었다. 이는 보강에 의해 간주석 간의 연결 상태가 견고해져서 구조 시스템의 전체적인 강성이 증가된 것으로 판단된다.

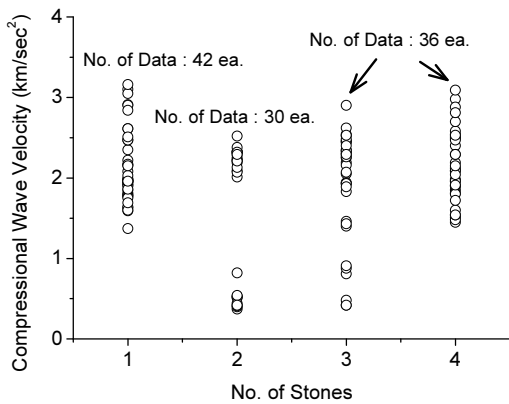


Fig. 11 Measurements of Compressional Elastic Wave by Stones

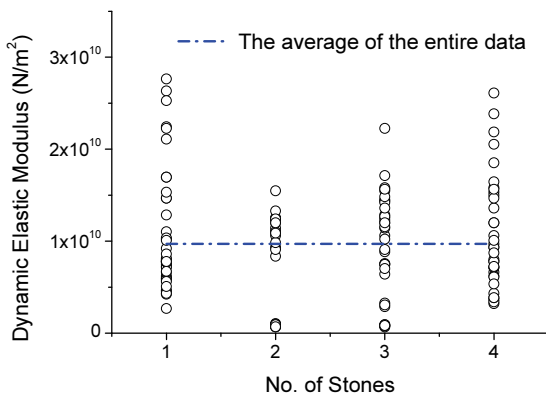


Fig. 12 Estimation of Dynamic Elastic Modulus by Stones (E_1)

4. 고유진동수의 이론적 고찰

4.1 탄성계수 추정

석재의 물리적 특성값을 시험 데이터를 이용하는 추정 방법에는 시료를 채취하여 직접 파괴하는 방법과 부재에 손상을 주지 않고 간접적으로 추정하는 비파괴 검사법이 있다. 결과값에 대한 신뢰도로 볼 때 직접파괴 방법이 효과적이라고 할 수 있으나, 석조문화재의 경우는 시험을 위한 인위적 시료 채취가 부재의 손상을 초래하기 때문에 현실적으로 불가능한 방법이라 할 수 있다. 그 대안으로 간단한 장비를 이용하여 손쉽게 결과를 도출할 수 있는 비파괴 검사가 주로 이용되고 있으며, 시험방법에는 초음파속도법과 반발경도법이 있다.

탄성과 정보는 해체 후 복원공사시 해체된 상부의 4개 당간석에서 초음파속도법을 이용하여 각각의 석재별로 30~42개소에서 측정된 정보를 이용하였다(KISS, 2011). 그리고 본 논

Table 3 Averaged Modulus of Elasticity (unit : N/m²)

Item	Average	Average		Remark	
		No.	min.		max.
E_1	0.97E+10	#1	4.48E+09	2.63E+10	by eq. (1)
		#2	6.89E+08	1.33E+10	
		#3	7.60E+08	1.55E+10	
		#4	3.41E+09	2.03E+10	
E_2	1.26E+10			by KICST (2001)	

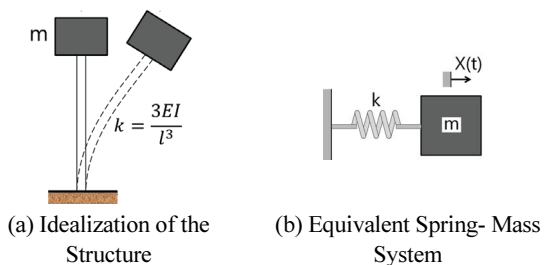


Fig. 13 Modeling of the Structure as Spring-Mass System

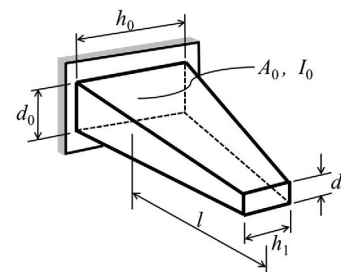


Fig. 14 Doubly-Tapered Beam

문에서는 측정된 탄성파(Fig. 12 참조)와 동탄성계수와와 상관관계식을 이용하여 평균적인 동탄성계수를 추정하였다. 동탄성계수(Dynamic Elastic Modulus)란 탄성파와 같은 외부파의 속도와 밀도의 변화 즉, 변화율 비례 계수로 정의된다(Lee, 2007).

탄성파와 동탄성계수와의 상관관계식은 Lee(2007)의 논문에서 제시한 식을 사용하였다. Lee는 화강암의 상태에 따라 구분하여 상관식을 제시하고 있는데, 성능이 저하된 화강암을 위해 제시된 식은 식 (1)과 같다.

$$E_d = 4.40 \times 10^{-6} \times V_p^2 - 6.00 \times 10^{-3} \times V_p + 2.65 \quad (1)$$

$$(R^2 = 0.91)$$

여기서, V_p 는 압축탄성파(m/sec), E_d 는 동탄성계수(N/m²)를 의미한다.

Fig. 12는 식 (1)을 이용하여 동탄성계수를 계산한 결과로, 각 석재의 위치별 계산값과 전체 평균값을 나타냈다. 석재의 표면 거칠기 및 표면 노후상태에 따라 탄성계수값의 분포 범위가 넓어지는 양상을 보이고 있다.

이 논문에서는 석당간의 전체적인 특성을 분석하기 위해 Table 3과 같이 석당간의 석재에 시험적으로 구한 위치별 동탄성계수 추정값의 전체 평균을 E_1 값으로 사용하였다. 그리고 화강암이 사용된 홍인지문에 대해 2001년도에 실시된 정밀안전진단 중 석재 시편을 채취해 물성에 대한 실내 시험을 파괴시험법을 적용하여 얻은 탄성계수 값들의 평균을 화강암 탄성계수의 또 하나의 값인 E_2 값으로 사용하였다(KICST, 2001; KICST, 2004).

Table 4 Frequency Parameters λ for a Doubly-Tapered Cantilever Beam

		H = h ₁ / h ₀	
D = d ₁ / d ₀	Theory	0.40	0.70
0.4	Bernoulli-Euler	5.00903	4.33622
	Timoshenko	4.74979	4.13389
0.7	Bernoulli-Euler	4.73721	4.06693
	Timoshenko	4.46107	3.85346

4.2 1차 고유진동수의 이론적 추정

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 얇고 긴 기둥 형상의 나주 석당간은 단순화하여 지면에 고정된 외팔보로 가정할 수 있다. 본 논문에서는 횡방향 진동을 검토하기 위한 두 가지 단순모델을 비교 검토한다.

첫 번째 모델은 Fig. 15와 같이 분포된 질량을 상부 한 지점의 집중 질량 모델이다. 지지구조는 하나의 스프링으로 근사

화하여 1자유도 모델을 구할 수 있으며, 이 모델의 고유진동수 식은 식 (2)와 같다(Rao, 2003). 단, 간주석 간의 접합은 강접합, 지면에 고정된 상태는 완전고정으로 가정한다. 또한 Fig. 5(c), (d)와 같이 측면 지주와 당간의 결속력이 약하여 측면 지주의 영향은 고려하지 않는다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{1}{m}\right) \left(\frac{3EI}{l^3}\right)} \quad (2)$$

여기서, k 는 등가강성(N/m), m 은 질량(kg), E 는 탄성계수(N/m²), I 는 면적관성모멘트(m⁴), l 은 높이(m)를 의미한다.

두 번째 모델의 식 (3)은 Fig. 14와 같이 측면의 4면이 선형적으로 경사져서 단면이 변하는 보에 대한 고유진동수 식을 나타낸다(Karnovsky and Lebed, 2000).

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda}{l^2} \sqrt{\frac{EI_0}{\rho A_0}} \quad (3)$$

여기에서, λ 는 무차원의 주파수 파라미터, A_0 는 고정단에서의 단면 면적(m²), l 은 높이(m), E 는 탄성계수(N/m²), ρ 는 밀도(kg/m³), I_0 는 고정단 단면에서의 면적관성모멘트(m⁴)를 의미한다.

또한, Bernoulli-Euler 및 Timoshenko 보 이론을 고려한 주파수 파라미터 λ 는 Table 4에 제시되어 있다(Downs, 1977; Karnovsky and Lebed, 2000).

Table 5 Natural Frequencies of the Theoretical Simple Model - After Restoration (Unit : Hz)

Item	Dir.	by Eq.(2)		by Eq.(3)			
		f _n	ε (%)	Euler		Timoshenko	
		f _n	ε (%)	f _n	ε (%)	f _n	ε (%)
when using E ₁	x	2.0	6.1	2.6	-22.1	2.5	-16.0
	y	2.1	16.0	2.5	-2.0	2.4	3.3
When using E ₂	x	2.3	-6.6	3.0	-39.4	2.8	-31.9
	y	2.3	4.1	2.8	-16.4	2.7	-10.2

식 (2), (3)과 Table 1의 값을 이용하여 단순 모델의 고유진동수를 구하면 Table 5 및 Fig. 15와 같다. 간주석 간의 접합이 강하게 접합된 조건으로 가정된 단순 모델식을 이용한 복원 후의 고유진동수 추정값이다. 이때 λ 는 Table 1의 d₀, d₁, h₀, h₁을 이용해서 H, D값을 계산하고, Table 4를 이용해서 보간법으로 계산하였다.

Table 5의 ε는 백분율 상대오차(%)로서 식 (4)로 계산된다(Chapra and Canale, 2003).

$$\varepsilon = \frac{A_{test} - B_{theory}}{A_{test}} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

여기서 A_{test} 는 시험 데이터를 이용해서 추정된 값, B_{theory} 는 이론식에 의해 추정된 값을 의미한다.

Table 5에서 ε 값은 Table 2의 고유진동수 실험값과의 상대 오차를 계산한 결과이다. 식 (2)에 의해 고유진동수를 추정하면 비파괴시험에 의해 추정된 E_1 값을 사용한 경우, X방향이 Y방향보다 측정 고유진동수와의 차이가 적다. 파괴 재료시험에 의해 추정된 E_2 값을 사용한 경우, Y방향이 X방향보다 측정 고유진동수와의 차이가 적은 것으로 계산되었다.

식 (3)에 의해 X, Y방향의 고유진동수를 추정하면, Euler 보 이론과 Timoshenko 보 이론이 적용된 경우 모두에서 E_1 값을

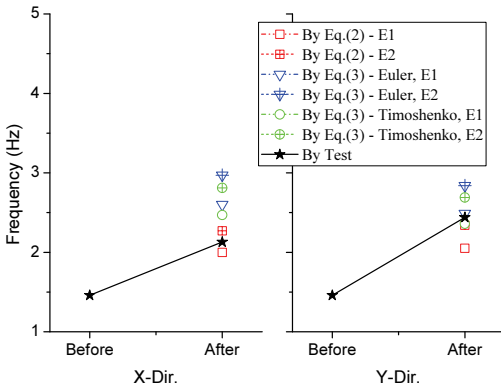


Fig. 15 Estimates of Natural Frequencies (Before and After Restoration)

Table 6 Stiffness - After Restoration

Item	Theory	Dir.	Case	k (N/m)	ε (%)	
Eq.(2)	-	X	Eq.(5) by E_1	1.25E+5	15.5	
			Eq.(5) by E_2	1.62E+5	-9.7	
			Eq.(6) by Test	1.48E+5	-	
		Y	Eq.(5) by E_1	1.32E+5	32.1	
			Eq.(5) by E_2	1.71E+5	-11.8	
			Eq.(6) by Test	1.94E+5	-	
Euler	-	X	Eq.(7) by E_1	3.15E+6	-18.6	
			Eq.(7) by E_2	4.09E+6	-54.0	
			Eq.(8) by Test	2.65E+6	-	
		Y	Eq.(7) by E_1	2.88E+6	17.2	
			Eq.(7) by E_2	3.74E+6	-7.4	
			Eq.(8) by Test	3.48E+6	-	
Eq.(3)	-	X	Eq.(7) by E_1	2.83E+6	-6.7	
			Eq.(7) by E_2	3.68E+6	-38.6	
			Eq.(8) by Test	2.65E+6	-	
		Timo-shenko	Y	Eq.(7) by E_1	2.59E+6	25.5
				Eq.(7) by E_2	3.37E+6	3.3
				Eq.(8) by Test	3.48E+6	-

사용한 경우가 측정 고유진동수와의 차이가 적다. 그리고 Euler 보 이론이 적용된 경우가 Timoshenko 보 이론이 적용된 경우보다 차이가 적게 계산되었다. 또한 X방향보다 Y방향의 차이가 적다.

5. 복원 전·후의 고유진동수 및 강성 비교

Fig. 15는 고유진동수의 실험값과 이론값을 표시한 그래프이다. 그리고 Fig. 16, 17 및 Table 6은 식 (2), (3)으로부터 유도된 식 (5)~(8)을 이용해 강성 값 $k_{Eq.(2)}$, $k_{Eq.(3)}$ 을 계산해 비교한 것이다.

$$k_{Eq.(2)} = \left(\frac{3I_{ave}}{l^3} \right) E = C_5 E \quad (5)$$

$$k_{Eq.(2)} = (4\pi^2 m) f_{n, test}^2 = C_6 f_{n, test}^2 \quad (6)$$

$$k_{Eq.(3)} = \left(\frac{\lambda^2 I_0}{l^3} \right) E = C_7 E \quad (7)$$

$$k_{Eq.(3)} = (4\pi^2 \rho A_0 l) f_{n, test}^2 = C_8 f_{n, test}^2 \quad (8)$$

여기서, $f_{n, test}$ 는 실험에 의해 산정된 고유진동수(Hz)를 의미한다.

강성 식은 식 (5), (7)과 같이 탄성계수의 일차 함수로써 표현되거나, 식 (6), (8)과 같이 고유진동수의 이차 함수로써 표현되는 2가지 방법이 있다. 2가지 방법 모두, 시스템의 모델식이 결정되고 치수 및 밀도 등의 기본 재원일정하다면 고유진동수 또는 탄성계수의 변화에 따른 강성 예측이 가능하다.

Table 6에는 식 (5), (7)을 이용하여 탄성계수 정보로부터 계산된 강성 값과 식 (6), (8)을 이용하여 고유진동수 정보로부터 계산된 강성 값, 그리고 두 값 간의 편차가 계산되어 있다.

식 (5)에 E_1 과 E_2 를 적용하여 계산하면, E_2 를 적용하였을 때

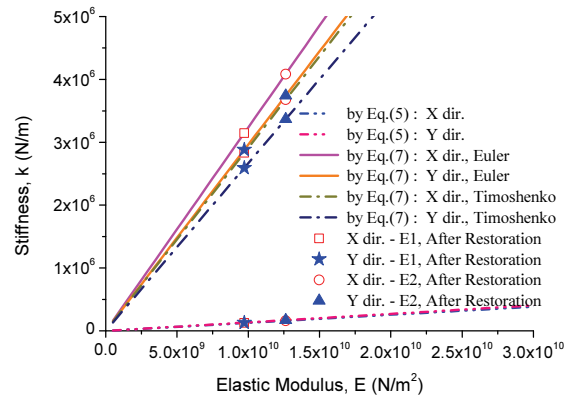


Fig. 16 Stiffness Changes According to Changes in Elastic Modulus - After Restoration

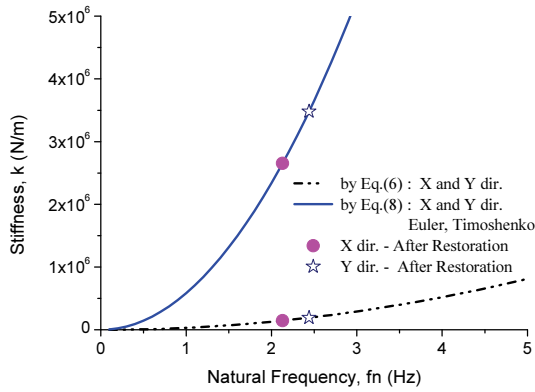


Fig. 17 Stiffness Changes According to Changes in Natural Frequency - After Restoration

의 강성 값과 고유진동수가 적용된 식 (6)의 강성 값이 X, Y 방향 모두 편차가 작은 것으로 나타났다.

식 (7)의 경우에는 X방향은 Timoshenko 보 이론과 E_1 을 적용한 경우, Y방향은 Euler 보 이론과 E_2 를 적용한 경우가 식 (8)의 고유진동수로 계산된 강성 값과의 편차가 작았다.

구조 시스템의 장기적인 상태 모니터링시, 상기 식들의 탄성계수와 고유진동수가 각각 주기적인 측정 관리 항목이 될 수 있다. 이때, 식 (5), (7)에 의하면, 탄성계수의 변화에 대한 강성의 변화 비율이 일차 함수의 선형적 관계임을 알 수 있다. 또한 식 (6), (8)은 고유진동수와 강성의 관계가 포물선 곡선으로 그려질 수 있어서, 작은 고유진동수 변화에도 강성의 변화폭이 커짐을 알 수 있다. Fig. 16, 17은 탄성계수와 고유진동수의 변화에 따른 강성의 변동 추세곡선을 보여준다.

일반적으로 석조문화재는 표면이 매끄럽게 가공되어 있지 않기 때문에 위치에 따라 표면 거칠기의 변화와 성능저하 상태의 변화가 크다. 그로 인해 비파괴시험으로 측정되는 탄성계수는 측정 위치의 변화에 따라 값의 변화폭이 커진다. Table 3에서 3번 간주석의 경우에는 동일 석재임에도 위치에 따라 최대값이 최소값의 약 38.3배인 것을 확인할 수 있다. 상태모니터링을 위한 측정값을 선정할 때, 이 변화폭은 입력값의 오차 범위가 되어 결과 분석을 어렵게 하는 단점이 있다. 또한 재료특성인 탄성계수는 구조모델식이 단순한 단일 부재의 상태를 파악할 때는 효과적인 관리 항목일 수 있다. 그러나, 다중 부재로 구성된 구조시스템의 경우에는 접합부 또는 경계조건이 반영된 모델식이 적용되어야 구조결합의 상태 변화를 추정할 수 있는 데, 복잡한 구조는 모델식 개발에 어려움이 있을 수 있다.

반면에 실제 모델에서 진동측정에 의해 구해진 고유진동수에는 현재 상태의 구조 상태가 반영되므로, 단순화된 구조 모델식에 대입하여 계산하여도 접합부 또는 경계조건이 반영된 전체적인 시스템 강성의 추정이 가능하다.

또한 관심 고유진동수에서의 모드형상 중 진폭이 영인 위치만 아니라면, 측정위치가 다르더라도 관심 고유진동수가 측정되어 식별이 가능하므로, 모델식에 입력하기 위한 신뢰성 있는 측정값을 선정하기 용이하다. 따라서 정기 점검 방식으로 고유진동수를 측정, 관리하는 방식이 탄성계수를 측정하는 방법보다는 강성의 변화 확인에 더 편리할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 석조문화재와 같이 얇고 긴 기둥형상의 석조문화재에 대해 단순화된 고유진동수 이론식을 적용하고 실험값과 비교 분석하였다. 이때 복원 공사 후의 상태를 고려하여 간주석 간의 접합은 강접합, 지면에 고정된 상태는 완전고정으로 가정하고, 질량을 집중 질량으로 가정하였다. 또한 Bernoulli-Euler 및 Timoshenko 보 이론에 대한 경사진 면을 가진 보에 대한 이론식도 적용하였다.

적용된 이론식으로부터 탄성계수와 고유진동수에 대한 강성식을 유도하여 실험에 의해 얻어진 탄성계수와 고유진동수로 강성값을 추정하였다. 탄성계수를 이용하는 방법은 비파괴시험법으로 측정된 데이터로부터 추정되는 탄성계수가 데이터 측정 위치에 따라 값의 변화폭이 커질 수 있어서 강성값 추정에 어려움을 줄 수 있는 단점이 있다. 또한 재료특성인 탄성계수는 접합부 또는 경계조건 등의 구조 시스템의 특성을 반영하는 인자가 아니므로, 다중 부재로 구성된 구조시스템의 경우에는 접합부 또는 경계조건이 반영된 모델식이 적용되어야 구조결합의 상태 변화를 추정할 수 있는 데, 복잡한 구조는 모델식 개발에 어려움이 있을 수 있다.

반면에 실제 모델에서 진동측정에 의해 구해진 고유진동수에는 현재 상태의 구조 상태가 반영되므로, 단순화된 구조 모델식에 대입하여 계산하여도 접합부 또는 경계조건이 반영된 전체적인 시스템 강성의 추정이 가능하다. 또한 측정 위치 변화에 따른 오차 발생 가능성이 적어서 강성의 변화를 장기적으로 관측하고자 할 때, 고유진동수를 정기적으로 측정하면 강성 변화 추정이 가능할 것으로 판단된다.

본 논문에서 사용된 단순 모델식은 석재들 간 연결부의 체결 상태가 강하고 균일한 강성 특성을 나타낸다는 가정에 의해 강성값이 단일값으로 추정되었으나 실제 구조물은 다자유도 모델로서 개별 부재간의 연결상태가 전부 다르므로 위치별 연결 강성을 추정할 수 있는 방법에 대한 연구가 추가적으로 필요하다.

문화재들의 복원 공사 전·후의 강성 변화를 정량적으로 분석하고 데이터베이스로 구축한다면 보강 효과에 대한 예측 및 평가를 과학적으로 할 수 있다. 또한, 중요 문화재의 강성

을 정기적으로 조사한다면 구조안전진단 또는 보수, 보강의 필요 시점을 추정하는 자료로 활용될 수 있을 것을 판단된다.

References

1. Eom, G. P. (2007), Buddhist Banner Pole and Stone Posts in Korea, Hakyoun, Korea, Seoul, 15-23.
2. Korea Institute of Construction Safety Technology(KICST) (2004), Report on the Precision Safety Diagnosis of Naju Suk-Dang-Gan, KICST, Korea, Seoul, 1-165.
3. National Research Institute of Cultural Heritage(NRICH) (2019), A Study on Repair Techniques of Stone Architectural Heritage : Stone Pagoda, NRICH, Korea, Daejeon, 1-654.
4. Cultural Heritage Administration(CHA). (2021), Korea National Heritage Online. Korea, Daejeon : Naju SukDangGan. Available at: <http://www.heritage.go.kr/heri/idx/index.do>.
5. Korea Institute of Structural Safety(KISS) (2011), Structural Safety Evaluation Report after Restoration of Naju Suk-Dang- Gan, Report, KISS, Korea, Gwangju Metropolitan City, 1-117.
6. Choi, J. S., Lee, S. K., Min, K. W., Yoon, W. K and Kim, D. M. (2010), Investigation on Vibration Characteristics and Structural Reciprocity of Heung-In-Ji-Mun, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, KSNVE., 20(4), 338-347.
7. Park, S. A., Min, K. W., and Choi, J. S. (2011), Ambient Vibration Analysis of Heung-In-Ji-Munn, Journal of The Architectural Institute of Korea: Structure & Construction, AIK., 27(5), 19-26.
8. LMS International (2000), LMS Theory and Background, LMS International, 23-52.
9. Lee, B. K. (2007), A Study on the Dynamic Modulus of Rock Masses in Various Rocks, Ph.D. Thesis. Department of Civil Engineering, University of Seoul, 17-21 and 118-121.
10. Korea Institute of Construction Safety Technology(KICST) (2001), Report on the Precision Safety Inspection of Heung-In-Ji-Mun, KICST, Korea, Seoul, Ch.4.
11. Rao, S. S. (2003), 5th ed., Mechanical Vibrations, Pearson Education, Ch.2.
12. Karnovsky, I. A., Lebed, O. I. (2000), Formulas for Structural Dynamics: Tables, Graphs and Solutions, McGraw-Hill, 355-395.
13. Downs, B. (1977), Transverse Vibrations of Cantilever Beams Having Unequal Breadth and Depth Tapers, Journal of Applied Mechanics, ASME, 44, 737-742.
14. Chapra, S. C. and Canale, R. P. (2003), 5th ed., Numerical Methods for Engineers, McGraw Hill, Ch.3.

Received : 01/07/2021

Revised : 01/27/2021

Accepted : 02/18/2021

요 지 : 보물 제49호 나주 석당간은 성능 저하로 인해 해체 및 복원 공사가 이루어 졌다. 공사시 균열 부위가 보강되고 기울어짐이 개선되었다. 이러한 문화재들의 복원 공사 전·후의 강성 변화를 정량적으로 분석하고 데이터베이스로 구축하여 보강 효과에 대한 예측 또는 평가를 할 수 있는 과학적인 비파괴 검사 방법에 대한 연구가 필요하다.

복원 공사 전·후에 진동실험에 의해 측정된 고유진동수와 탄성계수 정보로부터 구조 시스템의 전체적인 강성을 추정할 수 있는 단순 식을 유도하였고, 활용성을 검토하였다. 제시된 방법으로 중요 문화재의 강성을 정기적으로 조사한다면 구조안전진단 필요 시점 또는 보수, 보강의 필요 시점을 추정하는 자료로 활용될 수 있을 것을 판단된다.

핵심용어 : 석조문화재, 복원공사, 진동측정, 고유진동수, 동적 강성, 탄성계수
