

승례문 사례를 통한 육축 문화재의 구조특성 연구

A Study on Structural Characteristics of Stone Masonry Wall Structure

이 성 민* 이 기 학** 최 희 수*** 박 주 경**** 최 취 경*****
Lee, Sung-Min Lee, Ki-Hak Choi, Hee-Soo Park, Joo-Kyung Choi, Chui-Kyoung

요 약

우리나라의 석조문화재를 모델링할 때 불연속면을 갖는 구조재의 강성을 어떻게 규명하느냐가 매우 중요하지만 원형보존을 해야 하는 문화재의 특성상 이를 파악하기란 매우 곤란하다. 이를 위해 본 연구에서는 비파괴조사를 이용하여 고유진동수를 측정된 후, 시행착오법을 이용하여 측정된 고유진동수와 컴퓨터 모델링 해석을 통해 고유진동수를 비교함으로써 불연속면의 강성, 구조재의 탄성계수 등 승례문 육축 구조를 이루는 재료의 구조적 물성을 추정하였다. 이를 통해 육축 문화재에 대한 컴퓨터 모델링 기법을 제시하고 육축구조물의 안전성에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. 연구결과 적심석의 강성이 육축구조물의 안전성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

Abstract

It is hard to predict the mechanical characteristics of discontinuous stone masonry structures with the use of by the static analysis method, because of irregularity of face stones and also due to randomness of backfill materials. Inversely, one can estimate the mechanical characteristics by comparing the natural frequencies between measured from the field tests and computed from the analytical models. The aim of this paper is to investigate the effectiveness and confidence of the computational modeling method of ancient stone arch bridges in Korea and to find the factors influencing their dynamic characteristics. The results revealed that the rigidity of spandrel walls and backfill materials are the most important factors influencing the natural frequencies of stone arch bridges, which are the critical for the stability of the stone arch structure.

키워드 : 석축, 석조 문화재, 고유진동수, 동적특성, 비파괴시험, 승례문

Keywords : Stone Masonry wall, Historic Stone Masonry Structures, Natural Frequency, Dynamic characteristics, Non-destructive test, Sungnyemun

1. 서 론

1.1 연구의 목적 및 배경

지금까지는 기존 성벽구조물을 구조적으로 해석을 한 사례가 거의 없으며, 특히 재료의 불규칙성으

로 인하여 구조물의 실제적인 거동을 현실적으로 반영하기가 매우 곤란하고, 또 비정형성의 부재를 쌓기 때문에 구조안전성을 평가하기에 상당한 문제점을 안고 있다. 석조문화재는 비파괴시험을 위주로 안전성평가를 하거나 상태평가를 해야 하므로 실물에 대한 재하시험이나 재료시험 등을 하기가 곤란하며, 따라서 실질적인 자료를 취득하기가 매우 어렵다. 이러한 이유로 석조문화재의 상태평가를 위한 수단으로서 동적특성을 관찰하는 방법에 대한 연구가 이루어지고 있다. 구조물의 물리적 상태가 변하

* 교신저자, (재)한국건설품질연구원, 공학박사
Tel : 010-3790-9063 Fax : 031)753-0669
E-mail : safecity@naver.com,

** 세종대학교 건축공학과 교수, 공학박사

*** 공주대학교 문화재보존과학과, 박사과정

**** (주)대한이엔씨 대표, 공학박사

***** 경원대학교 건축공학과 교수, 공학박사

면 시스템 파라미터(강성, 질량 및 감쇠)의 영향을 받는 동적특성도 변하게 된다. 따라서 문화재에 균열이나 공동이 발생하면 강성이 감소하여 고유진동수, 모드 형태, 감쇠계수 등과 같은 동적 특성이 변하게 된다. 특히 석축문화재의 경우 석재 접촉면의 물리적 특성을 파악하기가 곤란하다. 따라서 석조문화재의 고유진동수를 파악함으로써 대상구조물의 강성을 추정할 수 있고 이 가정치는 구조모델링을 할 때 활용할 수 있을 것이며, 이를 통해 내하력을 추정하는 데에도 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

1.2 관련 연구 동향

우리나라 석축은 문화재로서 실험을 하지 못하는 문제가 있으며 관련 연구도 거의 이루어지지 않았다. 영국 등에서는 아치형 교량을 대상으로 구조물이 파괴에 이르기까지 직접 재하시험을 실시하여 내하력을 추정하는 노력도 이루어졌다.¹⁾ 1834년 아일랜드의 Kingstown(현 Dun Laoghaire)에서 full scale의 4개의 건식 옹벽을 대상으로 실험이 이루어졌다는 기록이 있다.²⁾ 석구조물에서는 콘크리트나 철골구조처럼 변수가 적은 예측식을 만들기가 어렵다. 컴퓨터 모델링을 통해 내하력 또는 안전성을 예측하는 방법을 생각할 수 있지만 가장 중요한 사항은 석재 불연속면의 강성이다. 아직까지는 국내외에서 석재 불연속면 강성에 대한 연구가 제대로 수행한 바 없으며 단지 지진공학이나 지반공학에서 단층이나 절리면의 강성 또는 마찰력에 대한 연구가 이루어졌을 뿐이다.³⁾ 이러한 수치는 응력이 매우 높은 압절리면 등에 적용되기 때문에 석조문화재의 실제 조건과는 상당한 차이가 있을 수 있다. 그러므로 석조문화재에 적용할 수 있는 정수를 어떻게 산정할 것인가 하는 것이 과제로 남아 있다. 요즘 해외 연구에서도 ADINA, DIANA 등 유한요소법을 이용한 컴퓨터 모델링이 수행되고 있는데, 근본적으로 성석 접촉면의 강성과 적심석의 강성, 그리고 성석과 적심석의 역학관계를 어떻게 규명하는지 여부가 핵심

적이면서도 어려운 문제로 여겨지고 있다. 이러한 강성을 추정하는 데는 고유진동수 등 동적특성을 파악하는 방법이 제시되고 있다. 이성민 등은 석축, 홍예교, 석담구조물 등을 대상으로 고유진동수를 측정함으로써 불연속면의 전단강성을 추정하는 방법에 대해 연구를 수행한 바 있다.^{4),5),6)}

1.3 연구의 방법

승례문 육축은 석축의 형식으로 구축되었으며 전형적인 건식줄눈 석축에 해당한다. 석축의 사고유형은 거의 대부분 전도, 슬라이딩, bursting과 같은 불안정성(unstability)에 기인하기 때문에 육축의 구조 안전성을 결정짓는 가장 큰 변수는 횡력에 대해서는 성석 접촉면의 강성 또는 마찰계수와 적심석의 토압이다. 또 연직하중에 대해서는 지반의 내력과 석재의 강도일 것이다. 따라서 구조모델링을 위한 가정에서 가장 큰 변수는 성석 접촉면의 강성 또는 마찰계수와 적심석의 전단탄성계수와 같은 물성이라고 판단된다. 본 연구에서는 승례문 육축에서 직접 진동을 측정하여 고유진동수를 파악한 다음, 이 수치를 이용하여 적심석의 강성을 추정할 뿐 아니라, 육축의 안전성에 영향을 미치는 여러 가지 요인들을 모델링을 통해 관찰하고자 한다.

2. 승례문 육축의 구조와 동적특성

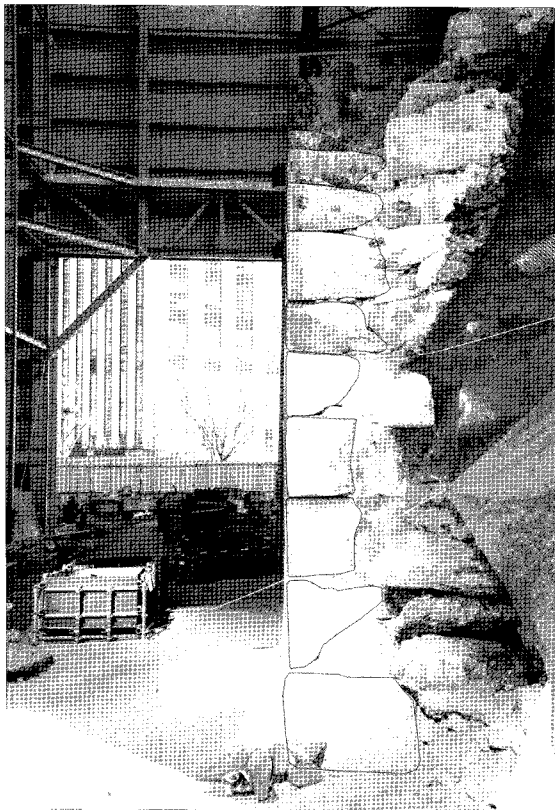
2.1 승례문 육축의 구조

승례문 육축 적심석은 일부는 강회다짐으로 채워져 있고 일부는 진흙을 적심석 사이에 다져 넣은 것으로 보인다. <그림 1>~<그림 2>를 보면 무사석을 제거한 후에도 적심석은 거의 자립을 한 상태로 남아 있다. 또한 사진을 볼 때 무사석의 상하면은 비교적 고르게 치석되어 있어 무사석 사이의 접촉면이 전반적으로 안정되게 횡력에 저항할 수 있는 구조임을 알 수 있다. 또한 무사석의 두께는 하부가 깊고 상부로 갈수록 얇아지는 경향이 있다.

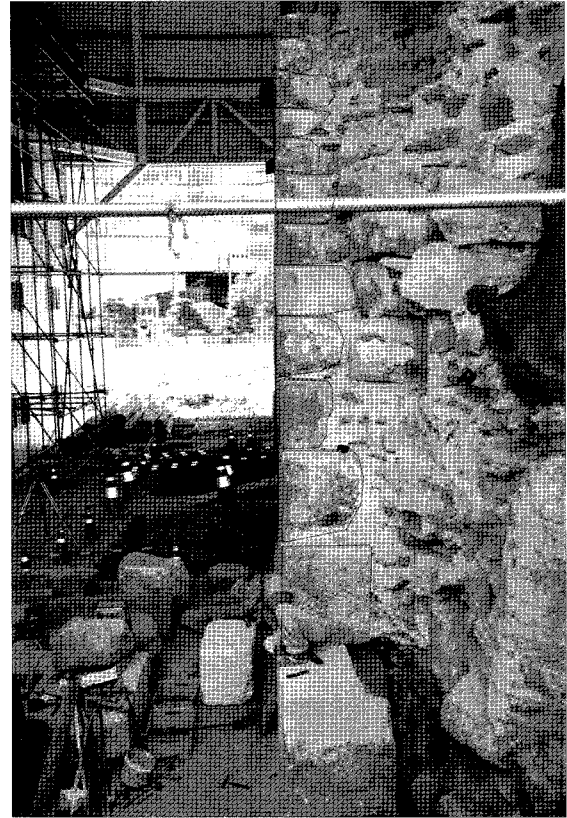
우리나라의 문루구조물에서는 일반적으로 기둥의 초석과 육축의 석재는 연결되지 않도록 시공하며, 기둥초석의 하부는 우물정자 모양으로 하부부터 적심이 채워지며 육축은 육축대로 시공이 되어 힘의 전달경로가 분리되도록 시공한다.⁷⁾ 그러나 송례문의 경우 해체과정에서 보면 문루 하중이 초석을 통해 바로 지반으로 전달되도록 시공된 흔적은 보이지 않고 있다.

2.2. 육축구조물의 동적특성과 강성

구조물의 고유진동수는 재료의 특성, 치수, 지지조건 및 하중조건 등에 따라 달라진다. 탑과 같이 여러개의 석재로 이루어진 석조구조물은 불연속계(다자유도계)로 해석할 수 있다. 그러나 다자유도계의 치수가 높아지면 계산이 매우 복잡하다. 특히 석축과 같은 구조물은 단위석재의 불규칙성이 크고 내부가 호박돌, 자갈, 흙 등으로 채워져 있기 때문에 불연속계로 해석하는 것이 불가능하다. 석조구조물에서 집중질량모델의 자유도수가 높을수록 전단보로 해석



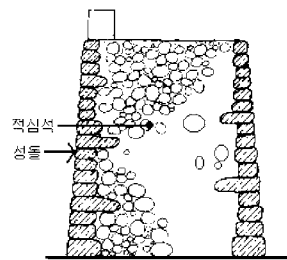
〈그림 1〉 송례문 육축 부분 해체 상태(1)



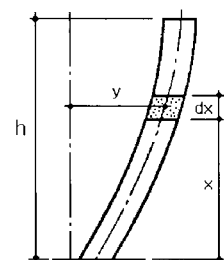
〈그림 2〉 송례문 육축 부분 해체 상태(2)

한 것과 거의 차이를 보이지 않고 있는 것으로 연구된 바 있다.^{8),9)} 따라서 고차의 자유도를 갖는 석조구조물은 연속계로 해석을 해도 무방하다.

보의 공간에 대한 보침의 비가 1보다 약간 크거나 적을 경우를 깊은 보(deep beam)라 할 수 있다. 이러한 보에서는 전단변형이 휨변형에 비해 월등히 크다.¹⁰⁾ 따라서 〈그림 3〉과 같은 육축구조물의 진동은 〈그림 4〉와 같이 하부에서 고정된 캔틸레버보의 전단진동계 형태로 해석을 하도록 한다.



〈그림 3〉 협축의 모양



〈그림 4〉 전단진동계

〈그림 4〉와 같이 전단진동을 하는 캔틸레버 보의 1차 고유진동수 f_1 은

$$f_1 = \frac{1}{4H} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1)$$

여기서, G =매질의 전단탄성계수(kgf/cm^2)
 ρ =매질의 질량밀도(mass density)

식(1)을 이용하면 현장에서 측정된 고유진동수를 가지고 진동체의 전단탄성계수를 구할 수 있다.

$$G = (4H \cdot f_1)^2 \cdot \rho \quad (2)$$

성벽문화재의 고유진동수를 실측하여 전단탄성계수를 추정된 연구 자료를 보면 〈표 1〉과 같다. 일반 성벽의 전단탄성계수는 적심석의 종류와 상태에 2,000~20,000 kgf/cm^2 의 범위를 보이고 있는데, 충주 미륵리 석축의 경우 내부가 매우 큰 암석덩어리로 채워져 있는 관계로 전단탄성계수가 상대적으로 높게 나온다.¹¹⁾

〈표 1〉 석축문화재의 고유진동수 측정 결과

명칭	1차 고유진동수	전단탄성계수 (kg/cm^2)	내부 채움재
낙안읍성	26~41Hz	$2.1 \times 10^3 \sim 8.9 \times 10^3$	모래 또는 모래-자갈
고창읍성	40~51Hz	$6.4 \times 10^3 \sim 13.6 \times 10^3$	모래-자갈 또는 자갈
해미읍성	17~52Hz	$2.3 \times 10^3 \sim 19.6 \times 10^3$	모래 또는 자갈
충주 미륵리석축	64~78Hz	$32.2 \times 10^3 \sim 47.5 \times 10^3$	암석

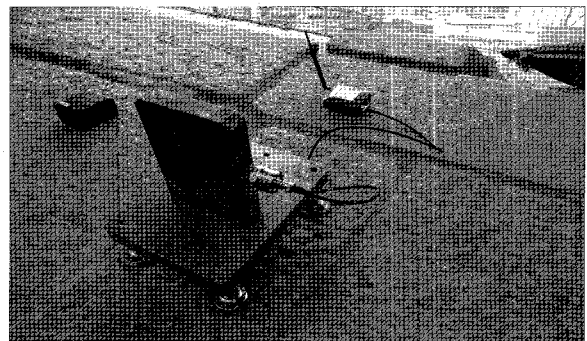
〈표 2〉 내부채움재의 종류에 따른 전단탄성계수

지반 종류	상태	v_s (m/sec)	ρ (kg/m^3)	G (kg/cm^2)
모래	밀실	60	2000	73
사질점토	밀실	200	1900	775
모래·자갈	밀실	400	2000	3265
자갈	입도양호	600	2000	7347

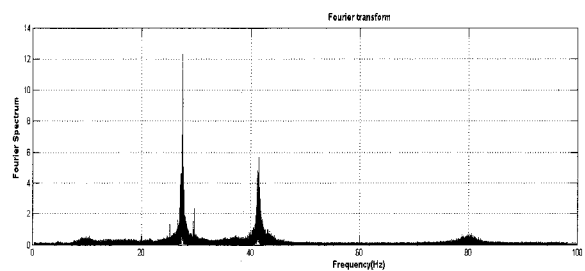
2.3 동적특성 분석을 통한 적심석의 강성

연구를 위해 직접 승레문 육축 상부에 센서를 설치하여 진동을 측정하였다. 본 연구에서 계측을 위한 진동측정 시스템은 〈그림 6〉과 같다. 본 측정에 사용된 사용된 가속도계의 유효 주파수 범위(동적 범위)는 1~6000Hz, 민감도는 1000mV/g이다.

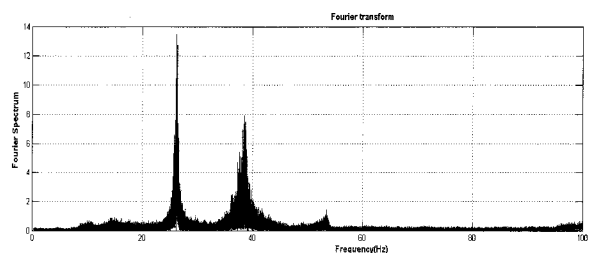
승레문 육축 진동측정 결과, 1차 고유진동수는 서측 육축과 동측 육축이 각각 27.6Hz, 26.3Hz로 분석되었다. 동·서측 육축 평균 1차고유진동수를 27Hz, 평균 높이를 7.9m, 적심석의 질량밀도 $\rho = 2,000kg/m^3$ 라고 할 때, 식(2)를 적용해서 전단탄성계수를 계산하면 $G = 15,235kgf/cm^2$ 이다.



〈그림 5〉 센서 설치 장면



〈그림 6〉 육축 상부 서측 남북



〈그림 7〉 육축 상부 동측 남북

4. 구조모델링

4.1 개요

구조내하력 검토를 하는 방법으로는 실험, 계산식, 모델링 등이 있을 것이다. 석조구조물을 모델링하는 방법으로는 구조물을 극단적으로 이상화·단순화한 방법부터 석재사이의 접촉부의 소성변형까지 고려하는 비선형유한요소해석법까지 매우 다양하다. 이상화·단순화하여 해석하는 방법으로는 석조구조물을 연속체 모델로 가정하여 해석하는 방법을 생각할 수 있는데, 매우 간편하지만 구조물의 특성을 파악하지 않으면 안 된다. 석구조는 부재의 응력에 의한 파손보다는 석재와 석재사이의 힘의 불균형에서 오는 안정성 상실에 의한 붕괴가 많기 때문에 연속체로 가정할 경우 국부적인 응력이나 변형, 그리고 평형상태를 파악하기가 어렵다. 따라서 석조구조물의 쌓기 특성, 부재의 접합 상태, 붕괴기구(collapse mechanism) 등 주요한 포인트를 파악하지 않으면 오류를 범하기 쉽다. 또 석재는 워낙 불규칙하고 문화재라는 특성상 비파괴시험이 원칙이므로 석재의 상태와 석재와 석재사이 접합부의 상태를 명확히 파악하기는 곤란하며 또한 알 수 있다고 해도 아주 많은 시간과 노력이 필요하다. 그러므로 석조구조물의 중요한 특성을 반영하면서도 해석을 최대한 간편하게 할 수 있는 방법이 필요하다.

4.2 구조모델링을 위한 가정

4.2.1 무사석 접촉면의 강성

무사석의 접촉면은 무사석에 비해 강성이 크게 낮다. 무사석 접촉면의 강성은 마찰계수나 스프링상수로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 무사석 접촉면의 강성을 나타내는 지표로서 마찰계수를 활용하기로 하며, $\mu = 0.2 \sim 1.0$ 까지 단계별로 마찰계수를 증가시켜가면서 안정성을 살피도록 한다.

4.2.2 성석과 적심석의 강성

성석과 적심석은 호박돌, 자갈, 흙 등으로 이루어

져 있는데, 이러한 불연속체를 어떻게 구조적으로 가정하느냐 하는 문제가 있다. 본 연구에서는 적심석을 연속체로 가정하였으며, 따라서 적심석의 물성은 전단탄성계수로 대표할 수 있다. 직접 고유진동수 측정을 통해 추정된 승레문 육축의 전단탄성계수가 $G = 15,235 \text{ kgf/cm}^2$ 이나, 본 연구에서는 전단탄성계수를 $G = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ 부터 점차로 증가시켜가면서 고유진동수의 변화를 관찰하고자 한다.

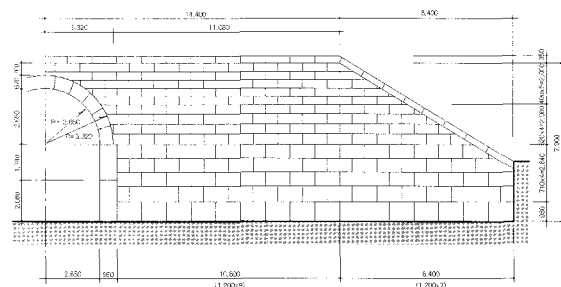
4.2.3 재료의 물성

무사석의 중량은 단위중량 $w = 2,600 \text{ kgf/m}^3$ 으로 가정하였으며, 압축강도는 현장에서 직접 실시한 초음파시험 결과를 참고하여 $f_c = 276 \text{ kgf/cm}^2$ 로 가정하였고 포외송비는 0.3을 적용하였다.

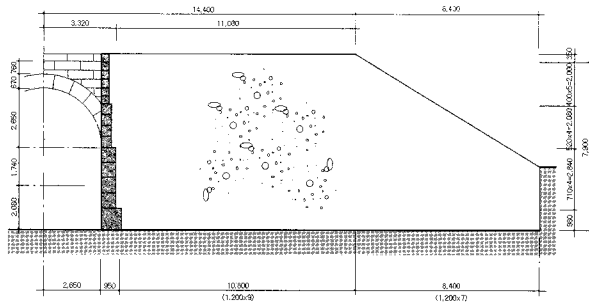
3.4 육축에 대한 모델링 방법

3.4.1 구조체의 제원과 이상화

구조체는 불규칙한 부분이 많기 때문에 결과를 좌우하지 않은 범위에서 컴퓨터 모델링을 이상화 할 필요가 있다. 모델링을 위해 이상화를 실시한 구조체의 제원은 <그림 8.8>~<그림 8.8>와 같다. 높이는 현재의 높이를 반영하여 7.9m로 가정하였다. 성석의 크기는 매우 다양하다. 그렇지만 사진자료를 보면 위로 올라갈수록 크기가 줄어들기 때문에 <그림 9>처럼 정사각형 단면을 가진 성석이 단이 올라갈수록 점차 크기가 작아지는 것으로 가정하였다. 또한 육축의 단변방향 폭은 11.9m로 가정하였다.



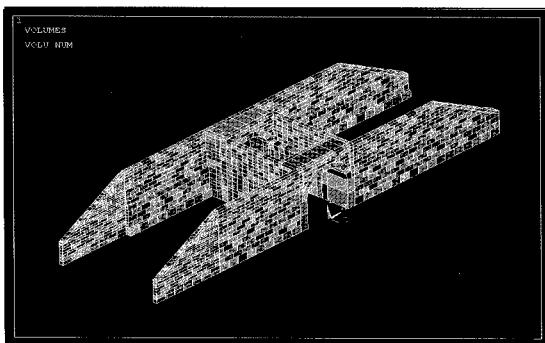
<그림 8> 이상화한 복축 육축입면도



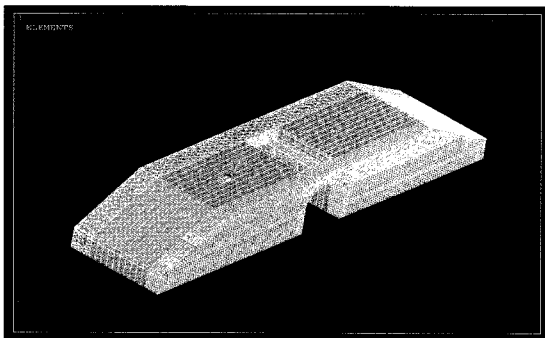
〈그림 9〉 이상화한 육축 단면도

3.4.2 프로그램

사용 프로그램은 ANSYS 9.0으로서 면적은 불연속면을 갖는 이산(discrete) 모델로 모델링하였으며 불연속면의 물성은 마찰계수로 부여하였다. 적심석은 연속체 모델로 모델링하였다. 이상화한 승례문 육축을 〈그림 10〉~〈그림 11〉과 같이 정렬 격자(structured grid)를 사용하여 격자계(gird system)를 생성하여 나타내었다. Contact Algorithm은 Augmented Lagrange Method를 사용하였고, 접촉면이 초기에는 접촉된 상태로 가정하여 해석을 수행하였다.



〈그림 10〉 무사석 모델링을 한 상태



〈그림 11〉 적심석 모델링 시 격자시스템(23만개)

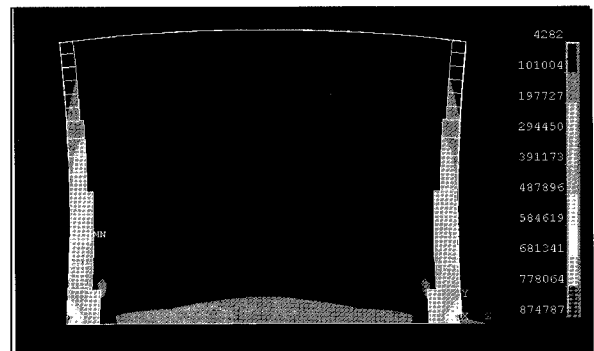
3.4.3 동적특성 분석

ANSYS를 이용한 1차 모델링 결과 큰 에너지를 내포하여 가장 유해한 1차 모드의 고유진동수를 실제 측정된 1차 고유진동수(수직방향 13~20Hz, 수평방향 12~14Hz 범위)와 비교하여 큰 차이가 발생하면 재료의 물성을 변화시켜가며 실제 고유진동수와 모델링 결과가 근접하도록 하여 수치해석에서 도입된 가정과 실제 물리적인 특성의 차이를 작게 하였다.

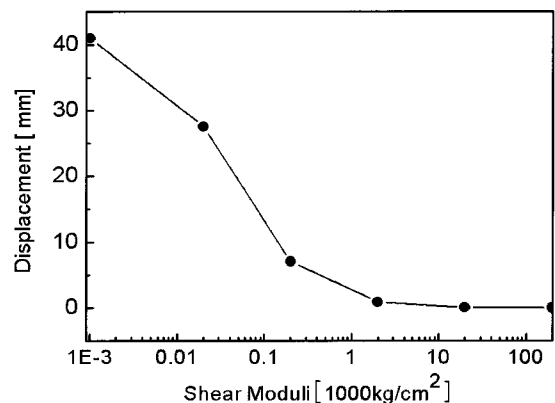
4. 연구 결과

4.1 적심석의 강성에 따른 벽체의 안정성

〈그림 12〉는 내부 적심석의 전단 탄성계수가 $10.0 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ 일 때의 응력 변화와 변위를 나타내는데, 하부 무사석에서 상부 무사석으로 갈수록 변위가 커지는 것을 알 수가 있다.



〈그림 12〉 무사석의 횡변위 및 응력분포도

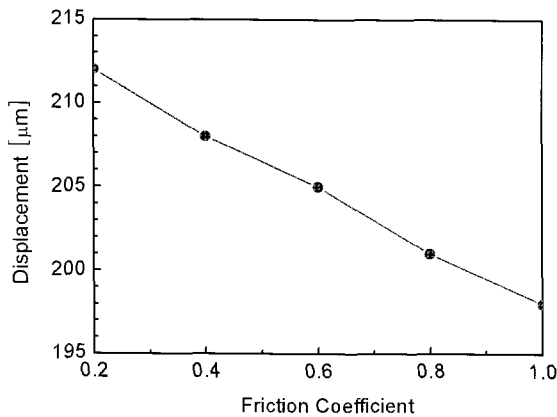


〈그림 13〉 적심석의 강성에 따른 무사석의 변위

〈그림 13〉은 무사석 불연속면의 마찰계수를 $\mu = 0.5$ 로 가정하고 내부 적심석의 전단탄성계수를 $2.0 \sim 2.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 까지 광범위하게 변화시켜가며 내부 적심석의 전단 탄성계수의 변화에 따른 육축 구조물의 안정성을 살펴본 그래프로써 전단탄성계수가 $2.0 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ 정도까지는 상당히 불안정한 형태를 보이지만 $2.0 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ 부터는 상당히 안정적인 것으로 분석되고 있다. 진동조사를 통해 측정된 고유진동수를 이용하여 추정한 승레문 육축의 전단탄성계수는 $G = 15,235 \text{ kgf/cm}^2$ 정도이므로 횡변위는 무시할 정도로 작다는 것을 알 수 있으며, 따라서 현재 상태에서 안정적이라고 평가할 수 있다. 또한 이때의 무사석 압축응력은 최대 약 8 kgf/cm^2 로서 압축응력이 구조물의 안전성을 좌우하지는 않을 것이다.

4.2 마찰계수와 변위의 관계

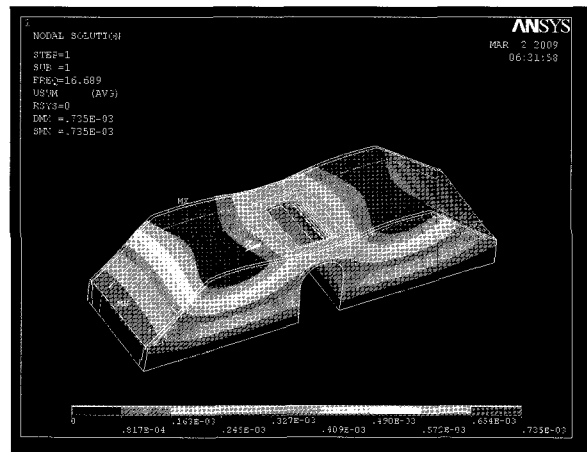
적심석의 전단탄성계수를 $10.0 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ 로 고정하고 무사석의 마찰계수를 0.2부터 1.0까지 변화시켜가면서 육축 상단 최대변위를 관찰하였다. 그 결과 마찰계수가 높아지면서 변위는 점차 줄어들었지만 그 크기는 그다지 크지 않음을 알 수 있었다.



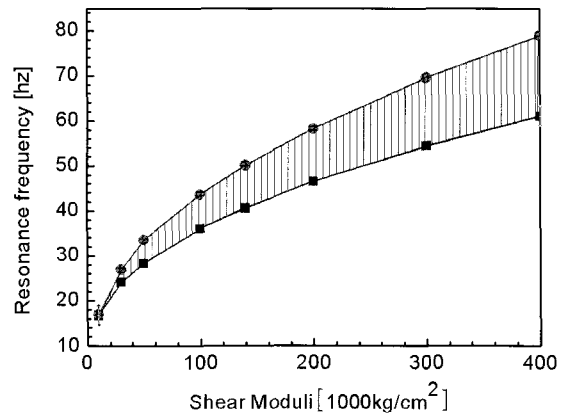
〈그림 14〉 마찰계수에 따른 육축의 변위

4.3 진동모드

적심석의 전단탄성계수가 $10.0 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ 일 때 1차~6차 고유진동수는 각각 16.7hz, 19.6hz, 23.2hz, 26.3hz, 32.3hz, 35.4hz로 해석되었다. 적심석의 전단탄성계수가 증가하면 고유진동수도 높아지지만 진동모드와 형상은 유사하다. 〈그림 16〉은 적심석의 탄성계수에 따른 육축의 1차 고유진동수 범위를 나타내고 있는데, 붉은 선과 푸른 선 사이에 분포함을 의미한다. 승레문 육축의 고유진동수는 약 27Hz, 전단탄성계수 $G = 15,235 \text{ kgf/cm}^2$ 이므로 이 수치를 〈그림 16〉에 적용하면 예측치와 실측치가 상당히 잘 맞는다는 것을 알 수 있다.



〈그림 15〉 승레문 육축의 1차모드 형상



〈그림 16〉 적심석의 강성에 따른 육축의 1차 고유진동수

4.4 기둥 하중을 부가하였을 때의 안전성

기둥 하부에는 기둥 기초를 설치하는 것이 일반적 기법이나, 이러한 시공이 잘되어 있지 않을 경우를 대비하여 적심석에 기둥 하중을 작용시켜 보았다. 기둥 하중을 작용한 경우의 검토 결과는 <표>과 같다. 내부채움재의 강성이 높을수록 상재하중을 지반으로 직접 전달하는 능력이 커지기 때문에 무사석의 변위와 응력의 증가폭은 급속히 줄어든다. 기둥 하부에 작용하는 하중이 50톤 정도이고 현재 내부채움재의 강성이 $15,235\text{kgf/cm}^2$ 정도일 것으로 추정되기 때문에 기둥 하중이 육축에 작용하는 영향은 구조물의 안전을 위협할 만큼 크지는 않을 것으로 사료된다. 특히 문루하중이 기둥초석을 통해 지반으로 직접 전달되도록 기초시공이 되었다면 기둥 하중이 육축의 안전성에는 영향을 미치지 않을 것이다.

<표 3> 기둥 하중 재하시 육축의 변위

전단탄성계수 G (kgf/cm^2)	최대 변위(mm)			
	P=0	p=20tf	p=50tf	p=100tf
100	15.23	18.46	20.46	53.0
1,000	1.91	3.712	5.825	14.70
10,000	0.129	0.406	5.27	1.159
100,000	0.0111	0.048	0.135	0.181

5. 결론

본 연구에서는 승례문 육축에서 직접 진동을 측정하여 고유진동수를 파악한 다음, 이 수치를 이용하여 적심석의 강성을 추정하였을 뿐 아니라, 육축의 구조적 특성에 영향을 미치는 여러 가지 요인들을 컴퓨터모델링을 통해 관찰하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 육축구조물의 안전성에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 적심석의 강성, 즉 전단탄성계수인 것으로 연구되었다.
- (2) 육축구조물에서 무사석 접촉면의 마찰계수가

높을수록 구조물의 안전성은 높아지나, 영향력은 그다지 크지 않음을 알 수 있었다.

- (3) 적심석의 전단탄성계수가 증가하면 육축구조물의 고유진동수도 높아지며, 진동모드와 형상도 유사함을 알 수 있었다. 또 고유진동수는 컴퓨터 모델링과 현장실측이 비교적 잘 맞는 것을 확인하였다.
- (4) 현장에서 직접 측정된 승례문 육축의 1차 고유진동수는 약 27Hz 로 나타났으며, 이를 통해 적심석의 전단탄성계수 $G=15,235\text{kgf/cm}^2$ 으로 계산되었다.
- (5) 육축 상부에 기둥 하중이 재하될 경우, 적심석의 강성에 따라 무사석의 횡변위가 크게 영향을 받으며, 비교적 잘 다져진 잡석다짐의 정도이면 안전성이 확보되는 것으로 나타났다.
- (6) 현재 승례문육축의 적심석은 잡석다짐 사이에 강회 또는 진흙으로 채운 상태여서 위의 연구 결과들을 참고할 때 상당히 안정된 상태임을 판단할 수 있었다.

참고문헌

- 1) A. M. Sowden, 'The Maintenance of Brick and Stone Masonry Structures', E. & F. N. Spon, 1990.
- 2) K. C. Brady & J. Kavanagh, 'Analysis of the Stability of Masonry-faced Earth Retaining Walls', Transport Research Laboratory, United Kingdom, 2002.
- 3) Christopher H. Scholz, 'The Mechanics of Earthquakes and Faulting', Cambridge University Press, pp88~89, 1990.
- 4) 이성민, 이수곤, 송창영, '무사석과 적심석이 홍예 교량의 동적특성에 미치는 영향', 한국구조물진단학회지, 제9권 제3호, 2005. 7
- 5) 이성민, 박이선, 최희수, 최취경, '동적특성을 이용한 홍예교의 모델링방법 연구', 한국공간구조학

- 회지, 2008. 6.
- 6) 이성민, 이기학, 박선우, 서만철, 이찬희, '고유진 동수를 이용한 정립사지 5층석탑의 구조모델링', 한국공간구조학회지, 2008. 10.
 - 7) (재)한국건설안전기술원, 송례문정밀안전진단보고서, 부록, 자문회의 녹취록
 - 8) 이성민, 박현구, 김선우, 이수곤, "석벽돌의 쌓기 단수에 따른 동적특성 변화에 대한 연구", 대한건축학회지 제17권 제5호 2001. 6.
 - 9) 이성민, 손호웅, 이수곤, "석벽돌 적층모형의 압축응력과 동적특성", 지구물리, 제7권 제1호, 2004, pp.31~40.
 - 10) Daniel Schiff, "Dynamic Analysis and Failure Modes of Simple Structures", John Wiley & Sons, Inc., 1990.
 - 11) 이성민, 서만철, 권경원, 백용진, 이수곤, '충주 미륵리사지내 석굴석축의 구조', 문화재과학기술, Vol. 1, No. 1, 2002. 2, pp.97~111
 - 12) 金井 清 外 2人, "建築學大系 11, 地震・振動學", 彰國社, 1968

(접 수 일 자 : 2011년07월08일)

(심사완료일자 : 2011년09월14일)

(게재확정일자 : 2011년10월31일)