

동적특성을 이용한 홍예교의 모델링방법 연구

Computational Modelling Method by Using the Dynamic Characteristics of Stone Masonry Arch Bridges

이 성 민*
Lee, Sung-Min

박 이 선**
Park, I-Sun

최 희 수***
Choi, Hee-Soo

최 취 경****
Choi, Chui-Kyoung

요 약

우리나라의 석조문화재를 모델링할 때 불연속면을 갖는 구조체의 강성을 어떻게 규명하느냐가 매우 중요하지만 원형보존을 해야 하는 문화재의 특성상 이를 파악하기란 매우 곤란하다. 이를 위해 본 연구에서는 비파괴조사를 이용하여 고유진동수를 측정 후, 시행착오법을 이용하여 측정된 고유진동수와 컴퓨터 모델링 결과 파악된 고유진동수를 비교함으로써 불연속면의 강성, 구조체의 탄성계수 등 홍예교를 이루는 재료의 구조적 물성을 추정함으로써 컴퓨터 모델링을 하는 방법을 제시하고 홍예교량의 동적특성에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. 연구결과 무사석 및 적심석의 강성이 홍예교의 동적특성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

Abstract

It is hard to predict the mechanical characteristics of discontinuous stone masonry structures 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 and computed. The aim of this paper is to investigate 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.

키워드 : 홍예교, 석조 문화재, 고유진동수, 동적특성, 비파괴시험, 불연속면, 조적조

Keywords : Historic masonry stone pagodas, natural frequency, dynamic characteristics, eigenvalue analysis

1. 서 론

1.1 연구의 목적 및 배경

우리나라의 홍예교, 탑, 석축과 같은 석조문화재는 대부분 불규칙한 석재를 교착제를 사용하지 않고 조적식으로 구축하였기 때문에 컴퓨터 모델링이 용이하지 않다. 특히 불연속면의 강성을 어떻게 가정해야 할지가 매우 중요하다. 요즘은 비선형해석과

유한요소해석이 가능하며 또 불연속면을 모델링을 통해 구현할 수 있도록 개발된 컴퓨터 프로그램이 개발되어 사용되고 있다. 또 국내외에서 이러한 프로그램들을 이용하여 석조구조물을 모델링하고 해석하는 사례도 많아졌다. 그러나 석조구조물의 물성을 파악하지 않고서는 이러한 프로그램을 이용하여 실제거동을 예측하기가 매우 곤란하다.

석조구조물을 모델링하는 방법으로는 구조물을 극단적으로 이상화·단순화한 방법부터 석재사이의 접촉부의 소성변형까지 고려하는 비선형유한요소해석법까지 매우 다양하다. 이상화·단순화하여 해석하는 방법으로는 석구조물을 연속체모델로 가정하여 해석하는 방법을 생각할 수 있는데, 매우 간편하

* 교신저자, 정회원 · (재)한국건설품질연구원 이사, 공학박사
Tel : 02-2057-8878 Fax : 02-2057-8879

E-mail : safecity@hanmail.net

** 정회원 · 세종대학교 기계공학과 박사과정

*** 학생회원, 공주대학교 문화재보존과학과 박사과정

**** 정회원 · 경원대학교 건축공학과 교수, 공학박사

지만 구조물의 특성을 정확히 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 접합상태, 붕괴메커니즘 등 주요한 포인트를 파악하지 않으면 오류를 범하기 쉽다.

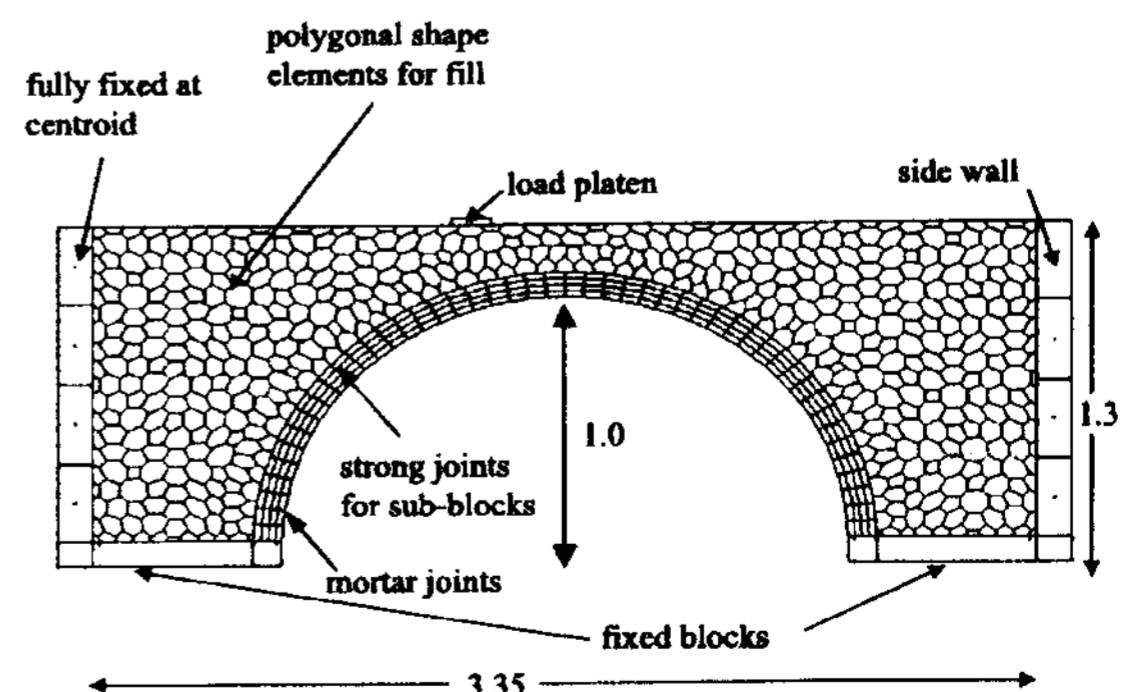
그러나 우리나라의 석조문화재는 대부분 부재의 형태가 불규칙하고 문화재라는 특성상 비파괴시험이 원칙이므로 석재의 상태와 석재와 석재사이 접촉면의 상태를 명확히 파악하기는 곤란하며 또한 알 수 있다고 해도 아주 많은 시간과 노력이 필요하다. 그러므로 석조구조물의 중요한 특성을 반영하면서도 해석을 최대한 간편하게 할 수 있는 방법이 필요하다. 또 석조구조물의 거동을 충실히 규명할 수 있어야 하지만 컴퓨터 모델링은 그냥 형식적인 모양내기에 그칠 가능성이 많다.

이러한 점을 극복하기 위하여 석조문화재의 동적 특성, 그중 고유진동수를 이용하는 연구가 진행되어 왔다. 이성민 등은 고유진동수를 측정함으로써 불연속면의 전단강성을 추정하는 방법에 대해 연구를 수행한 바 있다.^{2,3,5,7)} 구조물의 동적 응답은 강성, 질량, 감쇠 등 시스템 파라미터의 영향을 받기 때문에 이러한 파라미터들이 변하면 고유진동수, 모드 형태, 감쇠계수 등과 같은 동적 특성이 변하게 된다. 균열이나 공동 등이 발생함으로써 인해 구조체가 약해지면 강성이 감소하기 때문에 구조체의 고유진동수가 낮아지며 다른 동적특성에도 영향을 미치게 되는 것이다. 전남 승주군 선암사 승선교는 과거 차량이 통과하는 등의 이유로 지반이 이완되고 홍예석에 변형이 생기는 등 붕괴 위험이 있다고 판단되어 2002년 11월~2004년 7월까지 해체복원공사를 한 구조물이다. 깨지거나 강도가 약해진 홍예석을 교체하고 기초보강공사를 하면서 최대한 원형의 모습을 구현하기 위해 노력을 하였는데, 해체 전 9.9Hz이었던 고유진동수는 해체복원 공사 후 14.9Hz로 증가하였다.⁸⁾ 이러한 사실로 석조홍예교는 그 재료나 짜임새에 따라 동적특성에 큰 차이가 있는 것을 알 수 있으며, 고유진동수를 측정함으로써 문화재의 이상

여부를 감지할 수 있음을 의미하기도 한다.

1.2 기존 연구현황

컴퓨터 모델링을 할 때 가장 중요한 사항은 석재 불연속면의 강성이다. 아직까지는 국내에서나 국외에서 석조문화재의 불연속면 강성에 대한 연구가 많지 않으며 단지 지진공학이나 지반공학에서 단층이나 절리면의 강성 또는 마찰력에 대한 연구 위주로 이루어졌다. 우리나라에서는 손영식이 병영성홍교를 대상으로 유한요소법을 이용한 컴퓨터 해석을 하였는데 불연속면의 전단강성을 4.5kgf/cm^3 로 가정하였다.¹⁾ 또 정형식 등은 Barton-Bandis 제안식을 활용하여 여천 홍국사 홍교를 대상으로 컴퓨터 해석을 실시하였다. 이때 홍예석 접촉면의 전단강성을 1.7kgf/cm^3 로 가정하였다.¹⁰⁾ 이러한 수치는 응력이 매우 높은 암절리면 등에 적용되는 지표이기 때문에 석조문화재의 실제조건과는 상당한 차이가 있을 수 있다. 그러므로 석조문화재에 적용할 수 있는 정수를 어떻게 산정할 것인가 하는 것이 현실적인 과제이며 이를 위해 많은 실험과 연구가 있어야 한다. 석조구조물의 접촉면의 강성은 축응력에 따라 증가하는 것으로 이성민 등에 의해 연구된 바 있다.⁵⁾ 요즘 해외 연구에서도 ADINA, DIANA 등의 프로그램을 사용하여 유한요소법을 이용한 컴퓨터 모델링이 수행되고 있는데,^{12,16,17)} 근본적으로 홍예석 접촉면의 강성과 적심석의 강성, 그리고 홍예석과 적심석의 역학관계를 어떻게 규명하는지 여부가 핵심적이면서도 어려운 문제로 여겨지고 있다.



〈그림 1〉 조적조 아치교 구조모델링 사례

1.3 연구 방법

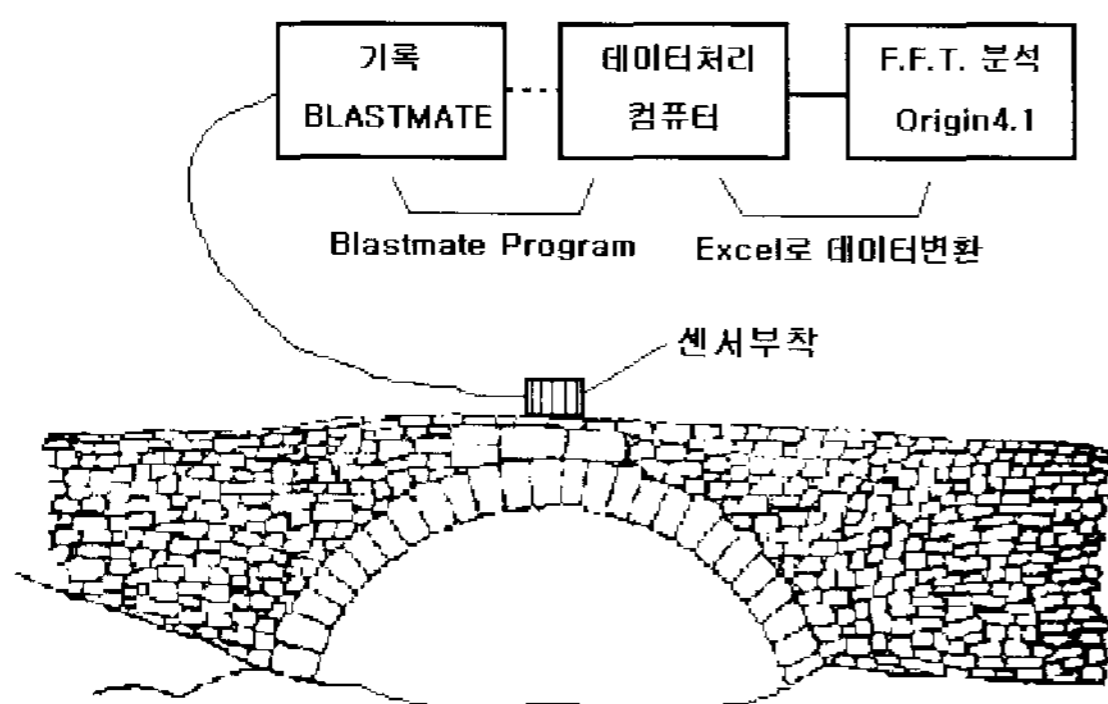
본 연구는 석조문화재 중 홍예교를 대상으로 하였고 case-study 대상 홍교는 강진 병영성 홍교로 하였다. 고유진동수를 직접 구조물에서 측정한 후 석조문화재의 재료적 변수들을 'trial and error' 방식으로 변경시켜가면서 측정된 고유진동수와 가장 근접한 거동을 보이는 수치를 선정하는 방법이다. 또한 홍교에서는 구조적 변수도 여러 가지이기 때문에 본 연구에서는 구조적 특징에 가장 밀접한 영향을 미치는 변수를 설정하기로 한다. 홍예교의 모델링 프로그램으로는 ANSYS를 사용하였다. 모델링을 할 때 필요한 홍예교의 제원은 3d 스캐너를 이용한 3차원 측량을 수행하여 그 결과를 바탕으로 이상화하여 결정하였다. 또한 현장에서 직접 측정한 초음파속도를 이용하여 석재의 강도와 탄성계수를 추정하였다.

2. 고유진동수 측정

2.1 측정 및 분석 방법

2.1.1 측정 장비

강진 병영성 홍교의 진동측정 장비로 Blastmate III를 사용하였으며 장비의 제원은 <표 1>과 같다. 본 장비는 캐나다 Blastmate Inc. 제품으로서 발파진동 계측용으로 많이 사용되고 있으나 기계적 신뢰성이 높고 계측데이터 활용도가 높아서 본 진동 측정에 매우 적합한 장비라고 생각된다.



<그림 2> 진동 측정방법

<표 1> 측정장비의 제원

장비명	Blastmate III
측정범위	0.127mm/sec~254mm/sec
주파수범위	2~300Hz
제작사	캐나다 Blastmate Inc.

2.1.2 가진 방법

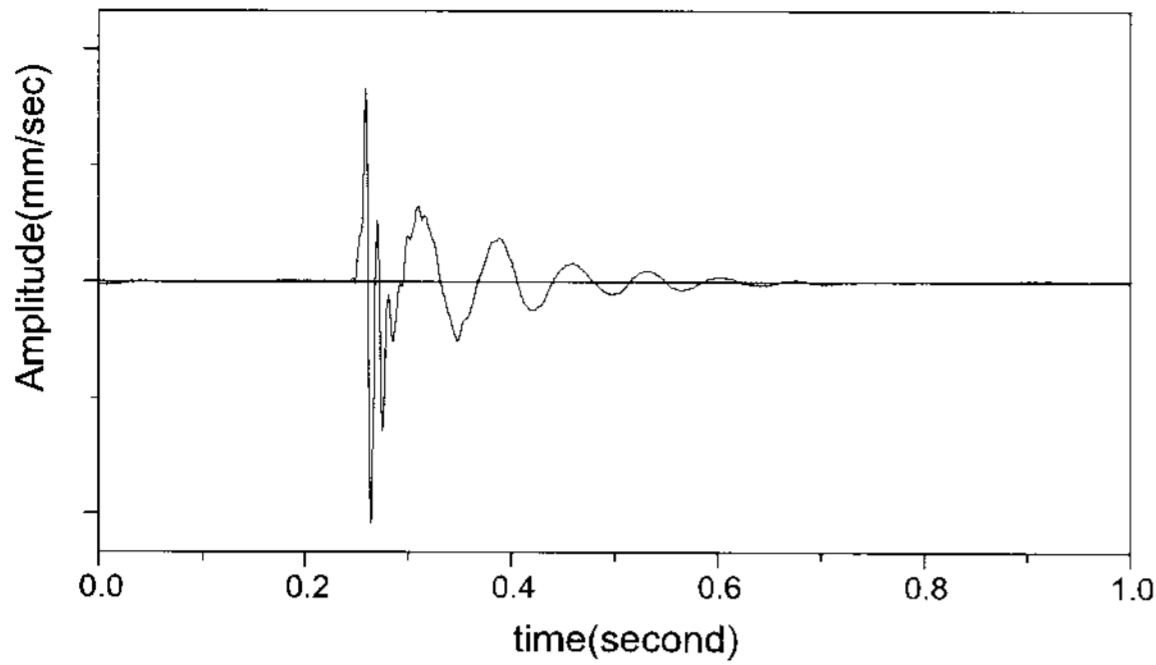
고유진동수 측정을 위한 가진방법으로는 여러 가지가 있지만 충격법이 간편하면서도 분석이 쉬워 이 방법을 채택하였으며 구조체를 충분히 진동시키기 위해 구조물의 강성에 따라 1~3인이 도약하는 방법을 사용하였다. 또 보조 수단으로 대상 홍예교의 주변 국도를 지나가는 차량에 의한 자유진동을 측정하였다. 진동 측정을 위한 센서는 홍예의 중앙부에 설치하였다.

2.1.3 FFT(fast fourier transform) 해석

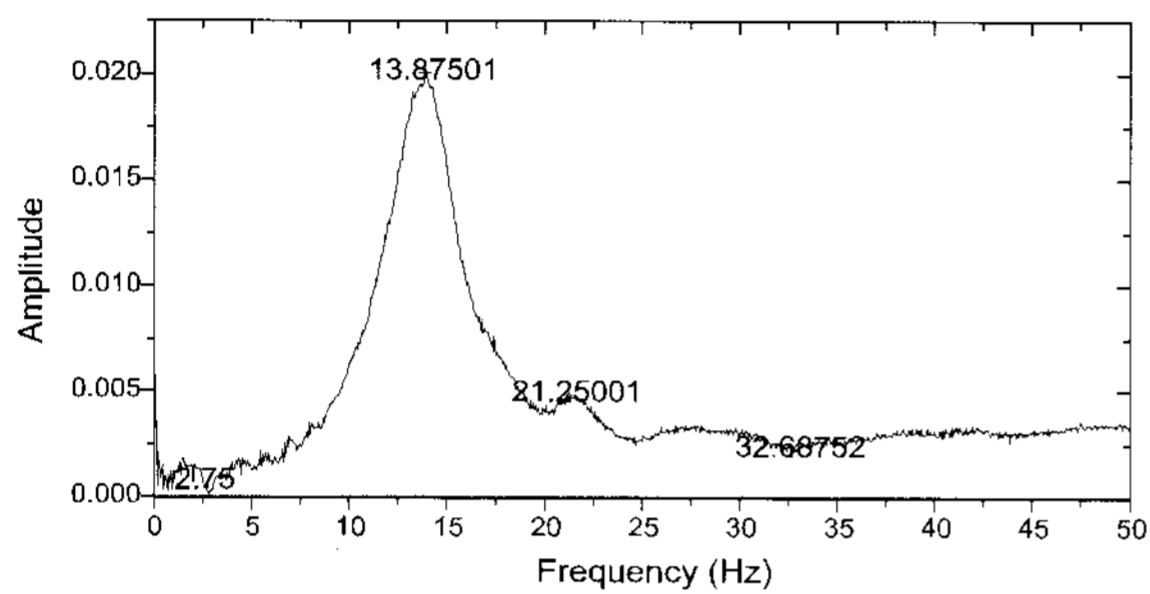
Blastware 프로그램으로부터 획득한 시간영역 데이터를 Excel 프로그램을 이용하여 데이터파일로 변환한 후 컴퓨터프로그램 Origin 4.1을 이용하여 FFT분석을 함으로써 고유진동수 및 감쇠비를 구하였다. Origin 4.1은 데이터 해석 및 그래프용 프로그램으로서 미국의 Microcal Software Inc. 제품이다. 본 연구에서는 충격가진을 하였고 따라서 가진주파수 성분을 배제하기 위하여 시간이력 데이터에서 초기의 충격성분을 제거하고 자유진동 성분이 충분히 나타나도록 교정한 후 FFT 분석을 하였다.

2.2 고유진동수 측정결과 및 분석

강진 병영성 홍교의 동적특성을 측정한 결과 수직방향 진동의 1차 고유진동수는 13.9Hz인 것으로 나타났다. 또한 수평방향 진동의 1차 고유진동수는 7.31Hz로 나타났다. 자유진동에 가까운 진동상태에서 감쇠비를 측정한 결과 0.207이었다, 대부분의 홍예교의 감쇠율은 0.1미만으로서⁴⁾ 본 홍교는 매우 높은 감쇠율을 나타내고 있다. 병영성홍교의 자유진동시 시간이력곡선과 진동수 스펙트럼은 각각 <그림 3>, <그림 4>와 같다.



〈그림 3〉 자유진동 시 시간이력곡선

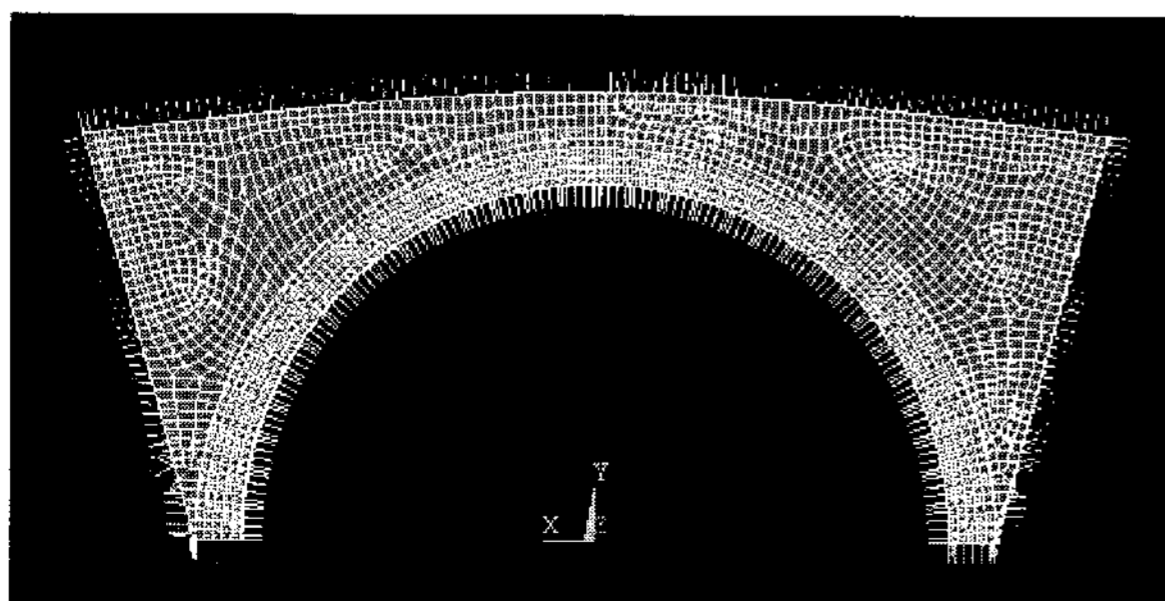


〈그림 4〉 자유진동 시 진동수 스펙트럼

3. 컴퓨터 모델링 방법

3.1 모델링 개요

사용 프로그램은 ANSYS 9.0으로서 홍예석은 불연속면을 갖는 이산(discrete) 모델로 모델링하였으며 불연속면의 물성은 마찰계수로 부여하였다. 적심석과 무사석은 연속체모델로 모델링하였다. 이상화한 병영성 홍교를 <그림 5>와 같이 정렬 격자(structured grid)를 사용하여 격자계(grid system)를 생성하여 나타내었으며, 격자수는 약 18600 개로써 더 이상 격자수가 증가하여도 해의 변화가 거의 없음을 확인하였



〈그림 5〉 18600개의 격자를 사용한 모델링 상태

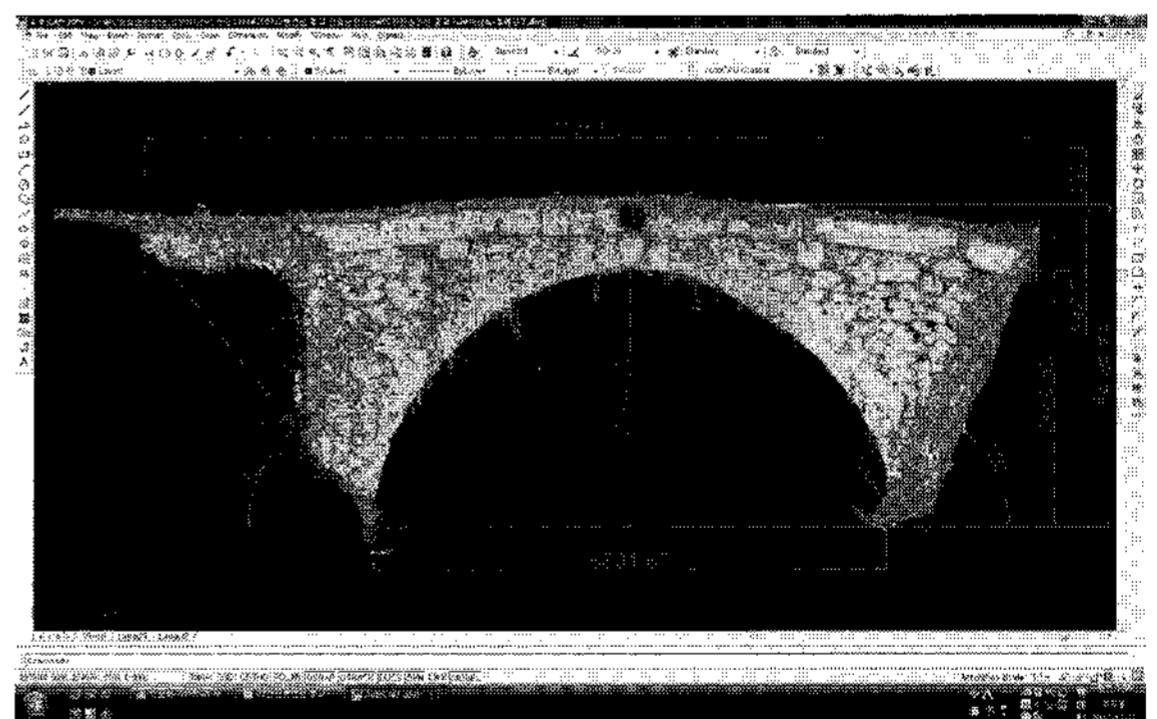
다. Contact Algorithm은 Augmented Lagrange Method를 사용하였고, 접촉면이 초기에는 접촉된 상태로 가정하여 해석을 수행하였다.

3.2 구조물의 이상화

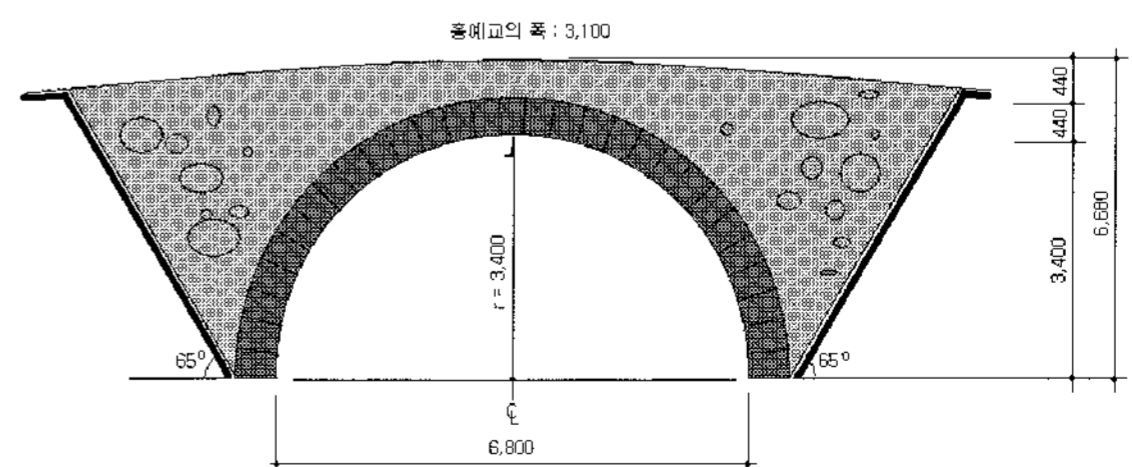
석조문화재는 정형화된 구조물이 아니므로 컴퓨터 모델링의 편의성을 위해 구조물을 단순화, 이상화하였다. 기초적인 구조의 제원과 형태는 3d 스캐너에 의한 측량결과를 이용하였다. 측량을 통해 산정된 병영성홍교의 제원은 <그림 7>과 같으며 이를 이상화한 제원은 <그림 8>과 같다.



〈그림 6〉 강진 병영성홍교의 실제 모습



〈그림 7〉 3D 측량을 통해 재현된 병영성홍교



〈그림 8〉 모델링을 위해 이상화한 병영성 홍교

3.3 초기치로 사용한 재료의 물성

3.3.1 무사석과 적심석의 강성

무사석과 적심석은 호박돌, 자갈, 흙 등으로 이루어져 있는데, 이러한 불연속체를 어떻게 구조적으로 가정하느냐 하는 문제가 있다. 이러한 불연속체는 구성하고 있는 부재가 많을 경우 연속체 거동을 하므로 연속체로 가정을 해도 무방한 것으로 연구된 바 있다.^{9,15)} 적심석과 벽석으로 이루어진 구조물인 석축문화재의 고유진동수 측정 자료를 보면 <표 2>와 같다.⁶⁾

<표 2> 석축문화재 고유진동수 측정 결과

명칭	석축 형식	1차 고유 진동수	전단탄성계수 (kg/cm ²)	내부 채움재
낙안 음성	협축	26~41Hz	2.1×10 ³ ~8.9×10 ³	모래 또는 모래-자갈
고창 음성	편축	40~51Hz	6.4×10 ³ ~13.6×10 ³	모래-자갈 또는 자갈
해미 음성	편축	17~52Hz	2.3×10 ³ ~19.6×10 ³	모래 또는 자갈

전단탄성계수 G 를 이용하여 탄성계수 E 를 구하는 관계식은 다음과 같다.

$$G = \frac{E}{1+\nu} \quad (1)$$

모래-자갈 혼합체의 포와송비 $\nu = 0.3$ 이라 할 때, <표 2>와 식(1)를 통해 석축의 탄성계수를 추정해 보면

$$G = 2.1 \times 10^3 \sim 19.6 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$$

$$E = 2.7 \times 10^3 \sim 25.5 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$$

범위라고 볼 수 있다. 이러한 점을 고려할 때 무사석과 적심석의 탄성계수는 평균치를 적용하기로 한다.

3.3.2 홍예석의 물성

병영성홍예교의 홍예석에 대해 초음파탐사법에 의한 비파괴조사를 한 결과 홍예석의 평균 탄성과 속

도는 2,259.41m/sec로 측정되었다. 탄성과속도 v_p 를 이용하여 탄성계수 E 를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

$$E = v_p^2 \cdot \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (2)$$

여기서, E = 매질의 탄성계수
 ν = 포와송비
 ρ = 매질의 질량밀도

화강암의 포와송비를 0.25, 재료의 밀도를 2,600kg/m³이라 할 때, $E \approx 1.13 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 정도로 산정된다.

3.3.3 홍예석 불연속면의 마찰계수

ANSYS 프로그램에서 불연속면의 물성은 마찰계수로 입력하도록 되어 있다. 따라서 석재면의 마찰계수를 가정해야 하는데, 마찰계수는 석재면의 거칠기의 영향을 매우 크게 받는다. 암석의 불연속면의 마찰계수는 낮은 하중을 받는 매끈한 표면에서는 $\mu = 0.15$ 정도이며 거칠기가 증가함에 따라 $\mu = 0.4 \sim 0.6$ 으로 증가하는 것으로 연구된 바 있다.¹³⁾ 본 연구에서는 석재표면의 거칠기를 고려하여 $\mu = 0.5$ 로 가정한다.

3.3.4 입력된 재료의 물성

홍예를 이루는 각 부재별, 각 재료별 물성을 가정하는 것이 매우 중요하다. 앞에서 거론하였던 이론적 배경을 근거로 컴퓨터 해석을 위해 가정한 각 부재 및 재료별 초기 물성은 다음과 같다.

① 홍예석

- 탄성계수 : $E \approx 1.13 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
- 질량밀도 : $\rho = 2,600 \text{ kg/m}^3$
- 불연속면의 마찰계수 : $\mu = 0.5$

② 무사석 및 적심석(fill)

- 탄성계수 : $E = 1.4 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$
- 전단탄성계수 : $G = 1.1 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$
- 질량밀도 : $\rho = 2,000 \text{ kg/m}^3$

4. 모델링을 통한 분석 결과

4.1 개요

ANSYS를 이용한 1차 모델링 결과 1차 모드의 고유진동수를 실제 측정된 1차 고유진동수 13.9Hz와 비교하여 차이가 발생하면 재료의 물성을 변화시켜 가며 실제 고유진동수와 모델링 결과가 일치하도록 하여 수치해석에서 도입된 가정과 실제 물리적인 특성의 차이를 최소화하여 재료의 물성의 차이에 따른 동적특성의 변화를 살펴보았다.

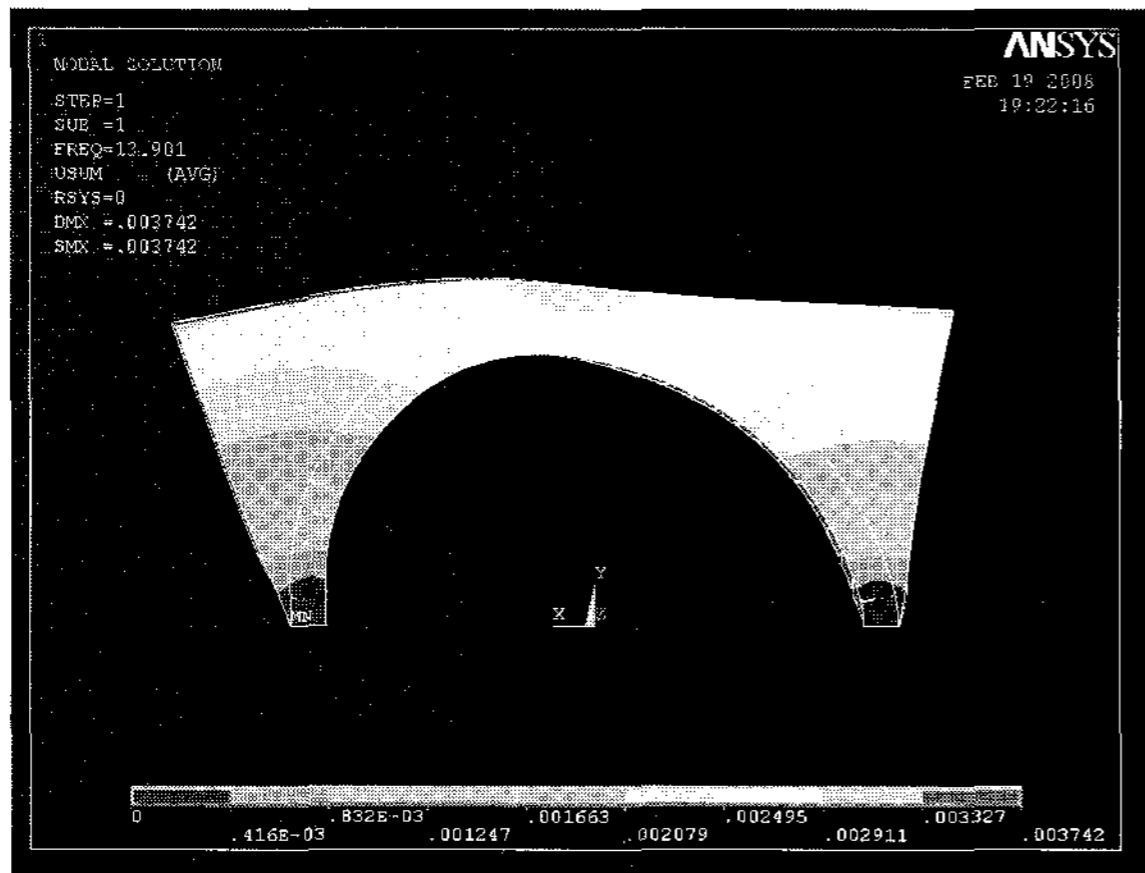
4.2 무사석의 강성 변화에 따른 동적특성

홍예석 불연속면의 마찰계수 $\mu = 0.5$ 로, 탄성계수 $E = 1.13 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 로 고정한 상태에서 무사석 탄성계수의 초기치를 $E = 1.4 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 로 모델링

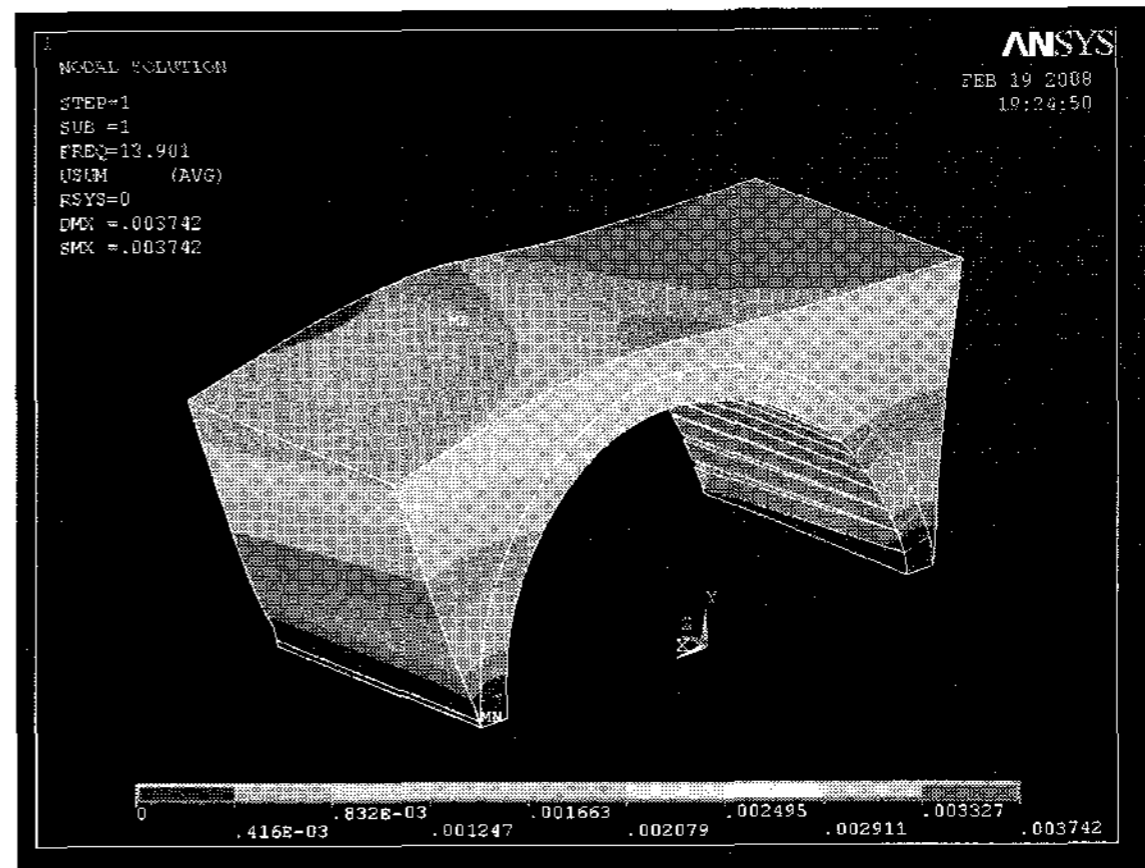
을 한 결과 1차 고유진동수는 13.6 Hz가 되었으며 이보다 약간 큰 $E = 1.49 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 로 모델링을 하였더니 측정된 실제 고유진동수인 13.9Hz와 일치하였다. 반면 $E = 1.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 하여 모델링을 했을 경우 고유진동수는 9.0Hz로 현저히 낮게 나타났으며 $E = 2.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 하여 모델링을 했을 경우 고유진동수는 15.4Hz로 분석되었다. 이 결과를 통해 볼 때 무사석 과 적심석의 강성이 홍예교의 동적특성에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

〈표 3〉 무사석의 강성에 따른 고유진동수 변화

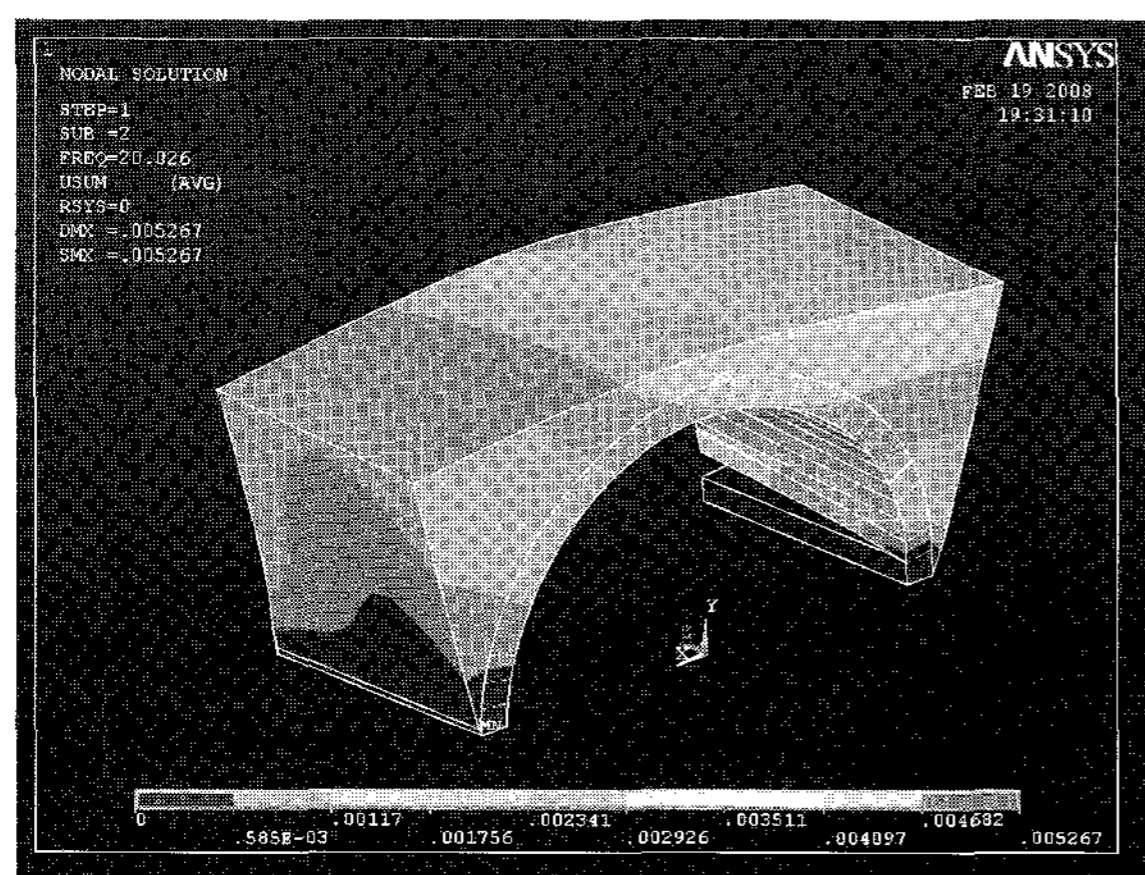
탄성계수 kgf/cm^2	1.0×10^4	1.4×10^4	1.49×10^4	2.0×10^4
고유진동수	12.1Hz	13.6Hz	13.9Hz	15.4Hz



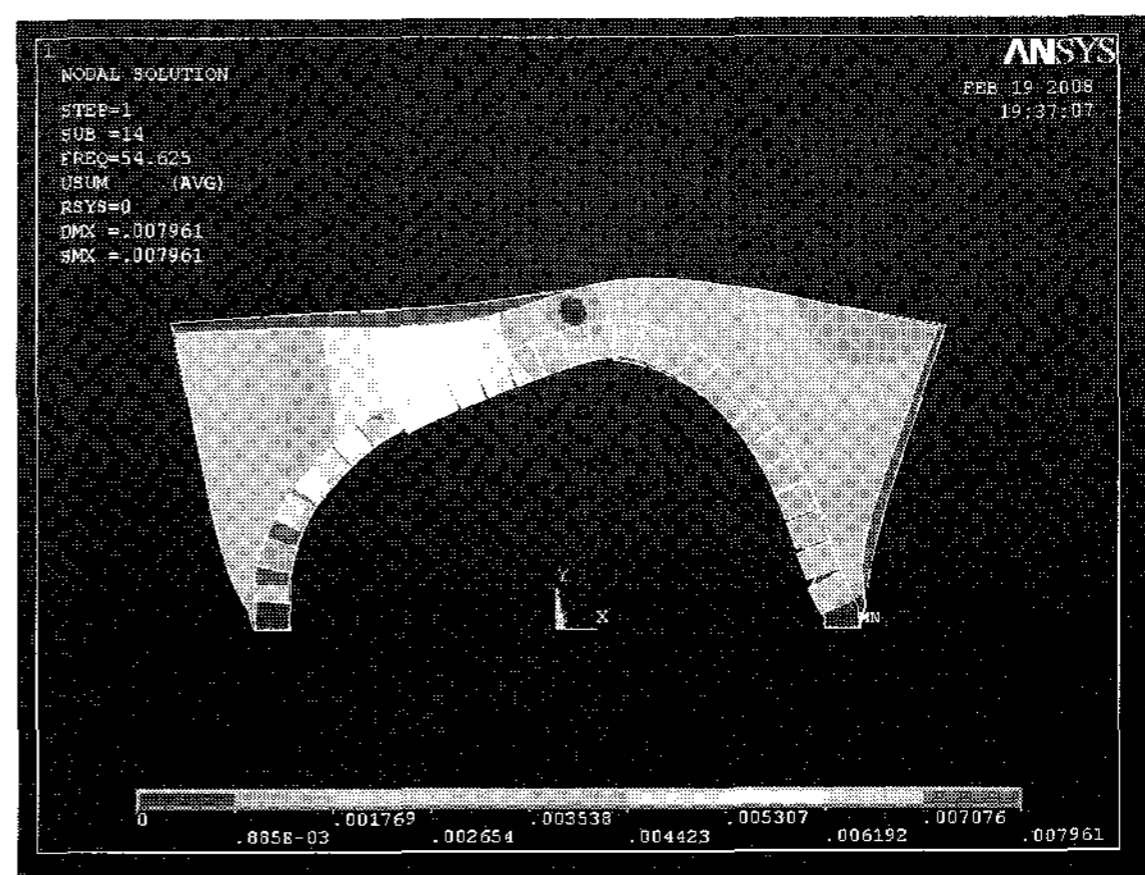
1차 모드, 13,9Hz



1차 모드, 13,9Hz

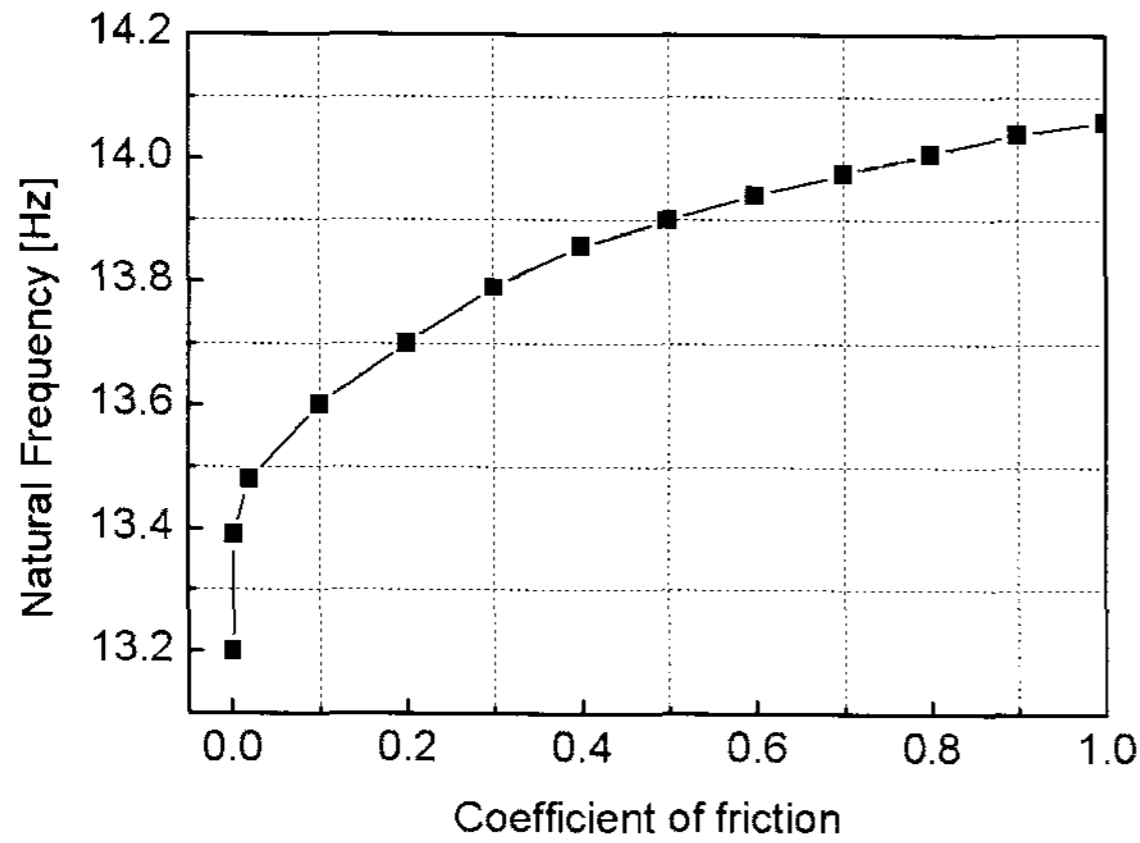


2차 모드, 20.0Hz

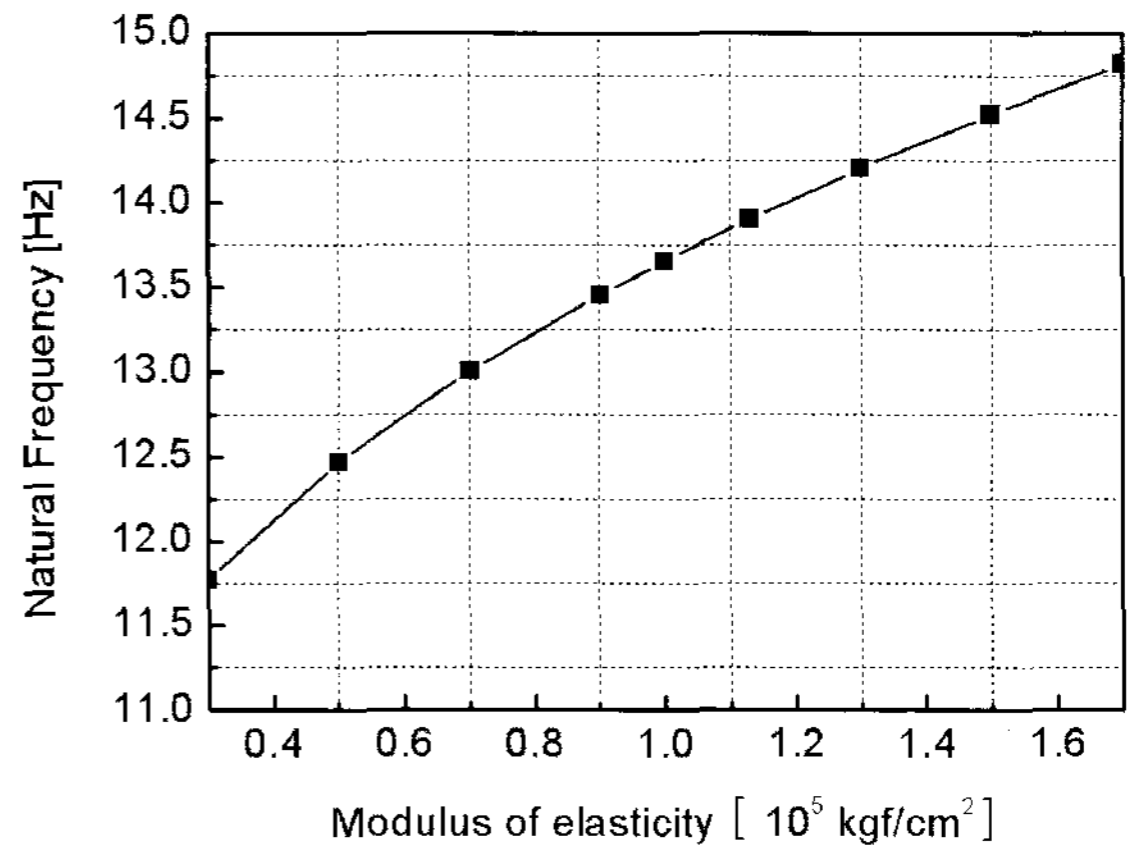


3차 모드, 54.6Hz

〈그림 9〉 대상구조물의 진동모드



〈그림 10〉 불연속면의 마찰계수에 따른 고유진동수



〈그림 11〉 강도에 따른 고유진동수 변화

4.3 홍예석 불연속면의 마찰계수의 변화에 의한 동적특성

무사석의 탄성계수를 $E = 1.49 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 로, 홍예석의 탄성계수 $E = 1.13 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 로 고정한 상태에서 홍예석 불연속면의 마찰계수를 변화시켜 가면서 모델링을 한 결과 마찰계수에 따른 동적특성의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 마찰계수 0.5 일 경우 1차 고유진동수는 13.9Hz인 반면 마찰계수를 1.0으로 높여도 고유진동수는 14.1Hz인 것으로 분석되었다. 이는 홍예석은 압축력을 받기 때문에 전단에 저항하는 마찰력은 동적특성에 별로 기여하지 않기 때문인 것으로 사료된다.

4.4 홍예석의 물성에 따른 동적특성

무사석과 적심석의 탄성계수의 차이에 따른 홍예교의 고유진동수 변화와 비교할 때 상대적으로 홍예석의 탄성계수의 차이는 홍예교의 동적특성에 큰 영향을 주지 못함을 알 수 있었다. 홍예석의 탄성계수는 초음파탐사법에 의한 비파괴조사를 통해 홍예석의 탄성과 속도를 측정하고 탄성과속도 v_p 와 탄성계수 E 의 관계식을 이용하여 구할 수 있으며, 이는 또 홍예석의 강도와도 밀접한 관계를 갖고 있다고 보아야 할 것이다. 따라서 홍예석의 강도는 고유진동수에 큰 영향을 미치는 요인은 아니라고 생각할 수 있다. 그렇지만 이는 홍예석 자체의 강도를 의미하는 것이지 홍예석으로 이루어진 홍예의 강성을 의미하는 것은 아니다. 홍예가 얼마나 많은 홍예

석으로 이루어졌느냐에 따라 홍예교의 고유진동수는 상당한 차이가 있다. 이는 불연속면이 있음으로 인해 홍예의 강성이 크게 낮아지기 때문이다. 진도 단홍교와 쌍홍교는 매우 많은 개수의 편마암 조각으로 홍예를 구성하였기 때문에 다른 대상 교량들에 비해 고유진동수가 상당히 낮게 나타난 것으로 조사된 바 있다. 반면 줄눈을 모르타르로 채운 홍예교는 일반적으로 고유진동수가 높은 것으로 분석되었다.⁴⁾



〈그림 12〉 진도 단홍교, 쌍홍교의 홍예석

5. 결 론

ANSYS를 이용한 컴퓨터 모델링을 통해 홍예교에서 구조재의 물성이 동적특성에 어떠한 영향을 미치는지를 검토한 결과 다음과 같은 연구 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 홍예교의 동적특성, 특히 고유진동수를 측정함

으로써 실제고유진동수와 모델링을 한 구조물의 고유진동수가 같도록 재료의 물성을 변화시켜가며 모델링을 하는 것이 현실적으로 현재의 상태를 반영하기 위한 매우 효과적인 방법으로 사료된다.

- 2) 무사석과 적심석의 강성은 홍예교의 동적특성에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 나타났다. 이는 홍예교가 그 짜임새에 따라서 동적특성이 영향을 받는다는 의미로 생각할 수 있으며 또한 홍예교의 내하력에도 영향을 미칠 것으로 사료된다.
- 3) 홍예석의 불연속면의 마찰계수는 홍예교의 동적특성에 큰 영향을 주지 않는다. 이는 홍예석은 압축력을 받기 때문에 전단에 저항하는 마찰력은 동적특성에 별로 기여하지 않기 때문인 것으로 사료된다.
- 4) 홍예석 자체의 탄성계수 또는 강도는 동적특성에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다.
- 5) 지점부의 상태도 매우 중요한 것으로 예측되지만 본 연구에서는 고려하지 못하였으며 앞으로 추가로 연구를 해야 할 사항이다.

참고문헌

1. 손영식, "韓國 古 橋梁의 構造形式에 관한 研究", 한양대학교 박사학위 논문, 1992.
2. 손호웅, 이성민, "석조구조물의 효율적 유지관리를 위한 지질공학적 및 구조동역학적 특성연구", 지구물리, Vol. 6, No. 4, 2003, pp.277-294.
3. 이성민, 박현규, 김선우, 이수곤, "석벽돌의 쌓기 단수에 따른 동적특성 변화에 대한 연구", 대한건축학회지 Vol. 17, No. 5, 통권 152호, 2001년 6월.
4. 이성민, 박현규, 서만철, 이수곤, "우리나라 홍예교의 동적특성에 관한 연구", 대한건축학회지 Vol. 17, No. 9, 통권 155호, 2001년 9월, pp.107-106.
5. 이성민, 손호웅, 이수곤, "석벽돌 적층모형의 압축응력과 동적특성", 지구물리, Vol. 7, No. 1, 2004, pp.31-40.
6. 이성민, 손호웅, 이수곤, "석축문화재의 형상역공학과 동적특성 파악을 이용한 유지관리", 한국구조물진단학회지, Vol. 9, No. 1, 2005. 1.
7. 이성민, 손호웅, 이수곤, "석탑문화재의 강성과 고유진동수에 관한 연구", 구조물진단학회지 Vol. 8, No. 3, 2004, 7, pp.263-270.
8. 이성민, 이수곤, 송창영, "무사석과 적심석이 홍예교량의 동적특성에 미치는 영향", 한국구조물진단학회지, Vol. 9, No. 3, 2005. 7.
9. 이성민, 이중호, 박현규, 이수곤, "석축의 고유진동수에 관한 연구(낙안읍성을 대상으로 하여)", 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집, Vol. 19, No. 2(통권 38집), 1999. 10.
10. 정형식 외, "고대 석조아치교량의 내하력에 관한 연구", 한국지반공학회지 Vol. 8, No. 4, 1992.
11. A. Brencich et al, "Load Carrying Capacity of Masonry Arch Bridges", Programma di Ricerca Scientifica di Rilevante Interesse Nazionale Anni 2002-2003, Italy
12. A. Thavalingam et al, "Computational framework for discontinuous modelling of masonry arch bridges", Computers and Structures 79, 2001.
13. Christopher H. Scholz, "The Mechanics of Earthquakes and Faulting", Cambridge University Press, pp.88-89, 1990.
14. Daniel Schiff, "Dynamic Analysis and Failure Modes of Simple Structures", John Wiley & Sons, Inc., 1990.
15. Mario Como, "Equilibrium and Collapse Analysis of Masonry Bodies", Meccanica 27, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp.185-194, 1992.
16. N. Bićanić et al, "Discontinuous Modelling of Structural Masonry", Fifth World Congress on Computational Mechanics, July 7-12, 2002, Vienna, Austria.
17. Paul J. Fanning, et al, "Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges", Computers & Structures 79, 2001.