

# 보수전과 후의 홍예교의 동적특성과 구조성능에 대한 해석연구

## Analytical Study of a Historic Stone Arch Bridge After Retrofit to Evaluate Dynamic Characteristics and Structural Behavior

이 가 윤\*  
Lee, Ga-Yoon

이 성 민\*\*  
Lee, Sung-Min

이 기 학\*\*\*  
Lee, Kihak

### Abstract

This study evaluates safety assessment before and after repair of Seonamsa temple seungseon bridge, which refer to the representative Hongye bridge in Korea. In this approach natural frequency of the structure were considered in the modeling procedure. Trial & error method is applied to obtain the approximate natural frequency before and after retrofit construction. Stiffness of the actual structure was examined to account for the dynamic characteristics of Hongye bridge measured in the field and adjusting parameters in computer modeling. The safety and usability of the stone structure in terms of load bearing capacity and displacement were examined.

*Keywords : Historic stone arch bridge, Natural frequency, Dynamic characteristics, Maintenance*

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

국내 홍예교는 8세기경 처음 가설되기 시작하여 현존하는 홍예교는 15~18세기에 건설되었다. 하지만 현재 30여개만 남아있으며 이마저도 상당수는 원형이 많이 훼손되었다. 대부분의 홍예교에 차량 통행은 물론 사람의 통행조차 제한되고 있으나 얼마 남지 않은 홍예교를 보존하기 위해서는 더 많은 노력이 필요한 실정이다. 반면 유럽의 경우 홍예교에 대한 지속적인 관심과 노력으로 오늘날에도 도로교나 철도교로 사용하고 있다. 하지만 외국의 사례를 국내의 홍예교량에 적용하기에는 설계 방법이나 재료적 특성이 다르기 때문에 한계가 있다.

국내 홍예교에 대한 연구는 지속적으로 진행되고 있으며, 석재 표면에 대한 강성연구는 컴퓨터 모델링을 수

행할 때 가장 중요한 사항이다. 최근 연구된 바에 따르면 홍예석의 마찰계수는 홍예교의 동적특성에 큰 영향을 주지 않는다는 결과가 있다. 오히려 무사석과 적심석의 탄성계수 또는 강도가 동적특성에 크게 영향을 주며 내하력에도 영향을 미칠 것이라는 연구가 Chung et al.(1992), Lee, Lee & Song(2005), Lee et al.(2008), Mai, Lee & Lee(2019), Kim et al.(2012)에 의해 진행되었다<sup>1-5)</sup>. 본 연구는 선행연구를 바탕으로 보수전과 보수후의 동적특성을 분석하고 안전성을 검토하는 것을 목적으로 한다.

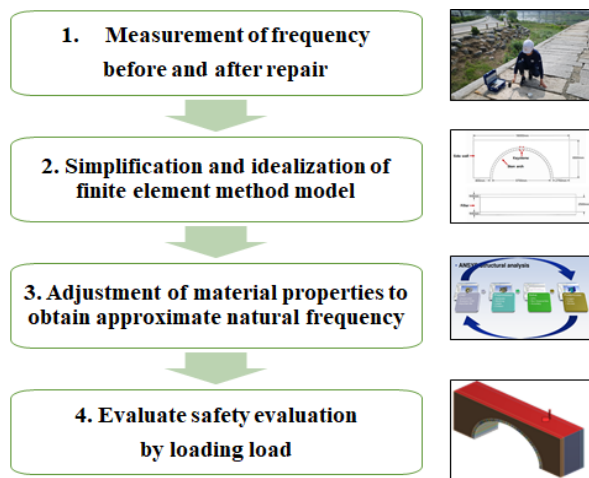
### 1.2 연구 방법 및 절차

본 연구는 2002~2004년 보수·보강이 진행된 전라남도 순천에 위치한 선암사의 승선교에 대해서 연구하였다. 본 홍예교는 과거 차량이 통과하는 등의 이유로 지반이 이완되고 홍예석에 변형이 생겼으며 채움재에 공극이 생기면서 붕괴 위험이 있다고 판단되어 보수되었다. 보수 과정에서 석회, 시멘트와 같은 교착제를 사용하지 않고 원래의 공법을 사용하여 보수된 것으로 확인된다. <Fig. 1>은 선암사 승선교의 모습을 보여준다.

\* 학생회원, 세종대학교 건축공학과, 석박사통합과정  
Dept. of Architecture, Sejong University  
\*\* 정회원, (재)한국건설품질연구원 부원장, 공학박사  
Korea Construction Quality Research Center(KCQR)  
\*\*\* 교신저자, 정회원, 세종대학교 건축공학과 교수, 공학박사  
Dept. of Architecture, Sejong University  
Tel: 02-3408-3286 Fax: 02-3408-4331  
E-mail: kihaklee@sejong.ac.kr



〈Fig. 1〉 Seonamsa Temple Seungseon bridge



〈Fig. 2〉 Flow chart

본 연구는 〈Fig. 2〉와 같은 순서로 진행하였다. 첫 번째, 보수전과 보수후의 고유진동수를 측정하였다. 선암사 승선교는 지정 문화재로 실물재하 실험을 할 수 없으므로 고유진동수를 통한 불연속면의 전단강성을 추정하였다. 두 번째, 유한요소해석 프로그램을 통해서 이상화·단순화 하였지만 실제와 비슷한 거동을 하도록 모델링을 진행하였다. 세 번째, 모델링이 측정된 고유진동수와 비슷한 거동을 보일 수 있도록 재료적 특징을 변수로 하여 시행착오를 거친 후 재료의 물성치를 결정하였다. 네 번째, 하중을 재하하여 안전성을 평가하였다. 동적특성을 고려하여 보수전과 보수후의 컴퓨터 구조해석 모델링을 통해서 변수에 따라 홍예교의 거동을 검토하여 유지관리에 유용한 정보를 제공하는 것을 목적으로 한다.

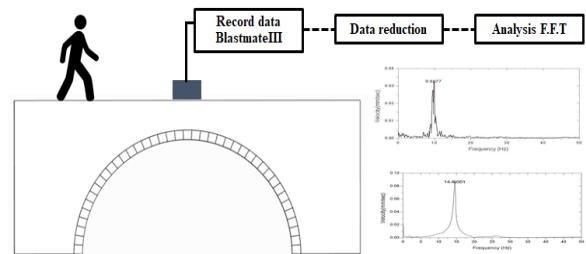
## 2. 고유진동수 측정

### 2.1 진동 측정 장비 및 진동 측정 방법

홍예교의 안전성을 평가하기 위해서 동적특성을 활용

〈Table 1〉 Specification of Bastmate III

Apparatus	Blastmate III
Production company	Canada Blastmate Inc.
Measuring range	0.127~254mm/sec
Frequency range	2~300Hz



〈Fig. 3〉 Blastmate III and transducer

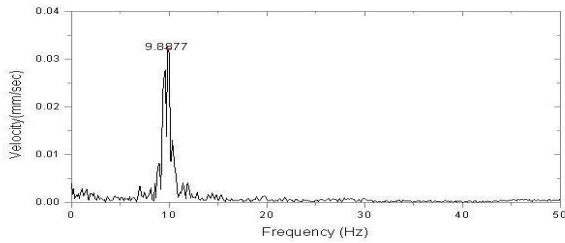


〈Fig. 4〉 Blastmate III and transducer

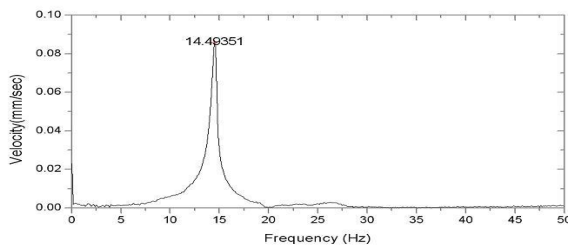
하였다<sup>4,5)</sup>. 본 연구에서는 캐나다 Blastmate Inc. 제품인 Blastmate III를 사용하였으며, 장비의 제원은 〈Table 1〉과 같다. 〈Fig. 3〉은 진동을 측정하는 절차를 보여준다. 홍예교 주변에 발생하는 상시진동과 교량의 안전에 영향을 주지 않는 선에서 가진을 주기 위해서 75kg의 남성이 본 문화재를 정상적인 속도로 걸어갔을 때를 기준으로 진동 측정을 진행하였다. 진동수를 측정하기 위한 센서는 홍예교의 중앙부에 설치하였다. Blastmate III로 얻은 데이터를 Blastware 프로그램을 이용하여 F.F.T(Fast Fourier Transform) 분석했다. 〈Fig. 4〉는 진동을 측정하는 모습을 보여준다<sup>6,7)</sup>.

### 2.2 데이터 해석 결과

진동 측정 결과, 보수전에는 9.89Hz, 보수후에는 14.49Hz로 측정되었다. 측정 결과를 볼 때 똑같은 재료를 사용하더라도 채움재의 조밀함과 견고성에 따라서 동적특성에 많은 영향을 준다는 것을 볼 수 있다. 보수전보다 보수후에 주변 노이즈가 적어진 것으로 보아 보



〈Fig. 5〉 Frequency domain before repair



〈Fig. 6〉 Frequency domain after repair

수전보다 보수후에 무사석 및 적심석이 더 밀실하게 채워졌다는 것을 알 수 있다. 보수전·후의 진동 측정 결과, 1차 모드만 두드러지게 보이는 것으로 보아 1차 모드에 가장 큰 에너지를 가지고 있다고 판단된다. 따라서 추후 구조해석 시 1차 모드의 고유진동수를 고려하여 모델링을 진행하였다. 보수전과 보수후의 진동수 스펙트럼은 각각 〈Fig. 5〉 및 〈Fig. 6〉과 같다.

### 2.3 국내 다른 홍예교와 비교

〈Table 2〉는 보수된 다른 홍예교의 보수전·후 고유진동수와 선암사 승선교의 보수전·후 고유진동수를 보여준다. Lee(2006)에 의하면 적심석의 존재가 질량 증가보다 강성 증가에 더 크게 영향을 미친다<sup>16)</sup>. 이에 따라 식 (1)에서 질량(m)에 대한 값이 동일하다고 가정했을 때 강성(k)의 증가를 비교해 보았다. 건봉사 능파교, 고성 홍교는 각각 1.2배, 1.3배의 강성이 증가하였고, 선암사 승선교는 2.2배 증가하였다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

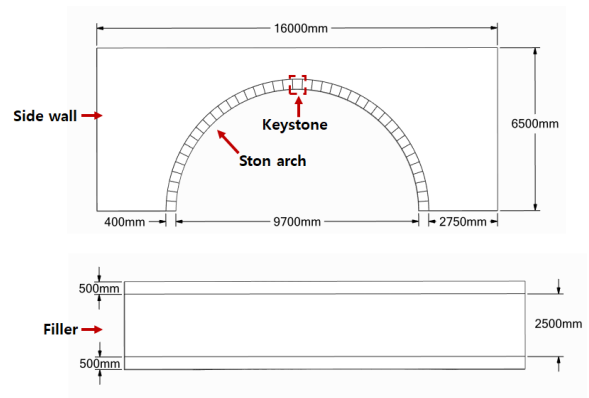
$f_n$ : 고유진동수

$k$ : 강성

$m$ : 질량

〈Table 2〉 Compare with natural frequency before and after repair other bridges

Name	Before (Hz)	After (Hz)	Rigidity ratio
Seonamsa Seungseongyo	9.9	14.5	2.2
Geonbongsa Neungpagyo	13.7	14.8	1.2
Goseong Honggyo	17.8	20.3	1.3



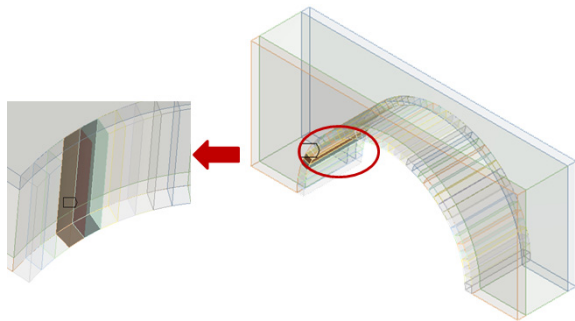
〈Fig. 7〉 Idealised image of Hongye bridge

## 3. 컴퓨터 모델링

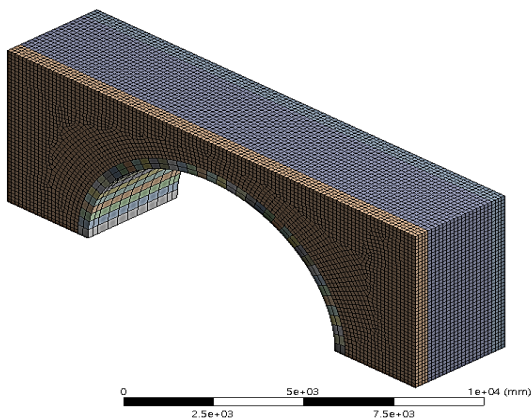
### 3.1 모델링 개요 및 이상화

홍예석의 크기와 모양이 각각 다르고 구조체에 불규칙한 부분들이 많으므로 추후 해석 시 발생할 수 있는 오류를 방지하기 위해서 이상화를 진행하였다. 〈Fig. 7〉은 이상화한 모델을 반영한 도면을 보여준다.

컴퓨터 모델링에는 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였다<sup>8)</sup>. 홍예교는 구조적으로 독립적인 홍예석들로 구성되어 있으며, 무사석과 적심석 부분은 작은 잡석들로 이루어져 하나로 거동하도록 모델링 하였다. 홍예석과 무사석, 적심석은 각 절점에 3개의 자유도를 가지고 3차원으로 해석하였으며, 큰 변형과 균열이 가능한 8개의 절점에 의하여 정의하여 모델링 되었다. 마찰계수는 석재면의 거친 정도에 영향을 받으며, 거친 정도에 따라  $\mu=0.4\sim0.7$ 로 증가되므로 본 연구에서는  $\mu=0.5$ 로 석재 표면의 거칠기를 고려하였다. 〈Fig. 8〉과 같이 ANSYS 프로그램 안에서 표면에 각각의 마찰계수를 설정할 수 있다.



〈Fig. 8〉 Friction surface



〈Fig. 9〉 Meshing in ANSYS

경계 조건은 하단의 움직임을 차단하기 위해서 고정 단으로 설정하였고, 횡단 방향에 대해서는 구속하지 않았다. Mesh 사이즈는 컴퓨터 해석 시 오류가 발생하지 않는 범위 내에서 최소값인 200mm로 지정하였다. 그 이하의 작은 범위를 적용할 경우 오류가 발생하여 해석 결과의 신뢰성이 없다. 〈Fig. 9〉는 최종적으로 모델링된 모습을 보여준다.

### 3.2 재료의 물성

홍예교의 모델링에서 각 부재의 물성을 가정하는 것은 매우 중요하다. Kim & Cheon(2014)에 의하면 홍예 석은 흑운모 화강암으로 이루어졌다<sup>9)</sup>. 보수 시 일부 파손과 균열이 발생한 부재를 제외하고는 재사용이 가능한 정도였으므로 보수전과 보수후에 똑같은 홍예석을 사용하였다. 〈Table 3〉은 보수 시 재사용된 홍예석과 대체된 홍예석을 보여준다. 147개의 홍예석 중 깨지거나 강도가 약해진 33개의 홍예석을 기존의 석재와 같은 흑운모 화강암으로 대체하였다.

〈Table 3〉 Detailed repair information of arch stone<sup>9)</sup>

Division	Reuse	Repair	Replacement
Number	111	3	33
Sum		147	

〈Table 4〉 Classification according to the uniaxial compressive strength of rocks

Rock classification	Compressive strength (MPa)
Extremely hard rock	180
Hard rock	130~180
Moderate rock	100~130
Soft rock	70~100
Weathered rock	30~70

〈Table 5〉 Modal results of measured masonry cultural heritage structures

Name	Natural frequency (Hz)	Shear elasticity (MPa)	Infill material
Castle at Nakaneup	26~41	210~890	Sand or sand-gravel
Castle at Gochangup	40~51	640~1,360	Sand-gravel or gravel
Castle at Haemieup	17~52	230~1,960	Sand or gravel

홍예석의 보수전 강도는 신재의 50~60%의 강도를 가진다고 확인되었다. 측정된 압축강도는 43~100MPa 정도이며, 평균 강도는 74.5MPa로 확인되었다. 이는 〈Table 4〉 건설공사 비탈면 설계기준에서 암석의 일축 압축강도에 따른 분류에 따르면 연암에 해당하는 강도로 판단된다. 이는 시간이 지남에 따라서 풍화로 인해서 강도저하가 일어난 결과로 판단된다. 연암은 석축용으로는 부적합한 약한 암질로 분류되며, 보통 경암 정도가 화강암 부재로 분류된다. 신재의 경우 보수전의 2배 정도이므로 압축강도를 150MPa로 예상했을 때 경암에 해당하는 강도를 가진다.

무사석과 적심석은 깬 돌이나 잡석 등으로 이루어졌다. 불연속체로 이루어진 부재가 많은 경우 연속체 거동을 하므로 연속체로 가정을 해도 문제가 없을 것으로 판단된다<sup>10)</sup>. 따라서 기존에 연구된 〈Table 5〉의 전단탄성계수(G)를 이용하여 탄성계수(E)를 계산하였다<sup>11)</sup>.

전단탄성계수 G를 이용하여 탄성계수 E를 구하는 식은 (2)와 같다.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

G: 전단탄성계수

E: 탄성계수

$\nu$ : 포와송비

모래-자갈 혼합체의 포와송비를  $\nu = 0.25$ 로 가정하면 전단탄성계수(G) 210~1,960MPa, 탄성계수(E) 525~4,900MPa 범위의 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

보수전 홍예석은 연암 정도의 강도를 가지므로 Seo et al.(2016)의 연구를 통해 10GPa의 탄성계수를 적용하였다<sup>12)</sup>. 무사석은 외부에 쌓은 돌들로 적심석보다 더 큰 강성을 가질 것이라고 판단하였다. <Table 6>은 보수전 재료의 물성치를 보여준다. 보수후 홍예석의 재사용률을 고려하여 연암과 경암 사이의 강도로 홍예석의 강성을 32.5GPa로 적용하였다. 무사석과 적심석의 강성도 보수전보다 큰 값을 적용하였는데, 보수를 진행하면서 중간중간 비었던 내부 채움재들을 더 밀실하게 채웠을 것이라고 판단했기 때문이다. 따라서 적심석의 탄성계수를 2.5GPa로 적용하였다. <Table 7>에 보수후의 재료적 물성치를 정리하였다.

### 3.3 모델링 고유진동수 비교

<Table 8>은 보수전의 1차 및 2차 고유진동수의 형상을 보여주며, <Table 9>는 보수후의 1차 및 2차 고유진동수 형상을 보여준다. 보수전 측정된 1차 모드의 고유진동수는 9.89Hz로 해석된 10.05Hz와 매우 근사한 값을 가진다. 보수후의 고유진동수는 14.49Hz이며, 해석된 고유진동수는 14.96Hz이다. 보수전·후의 1차 및 2차 모드형상은 비슷한 거동을 함을 볼 수 있다.

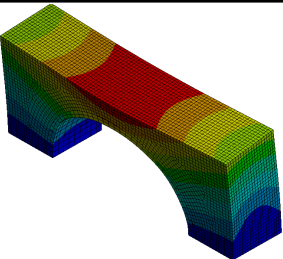
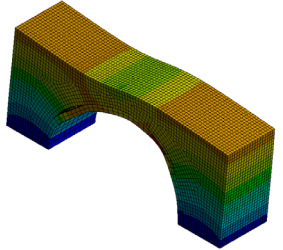
<Table 6> Material properties before repair

Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson's ratio	Modulus of elasticity (GPa)
Stone arch	2,650	0.2	10
Side wall	2,000	0.25	3.75
Filler	2,000	0.25	2.5

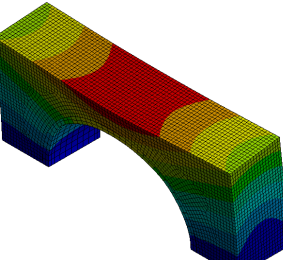
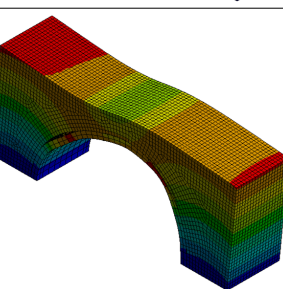
<Table 7> Material properties after repair

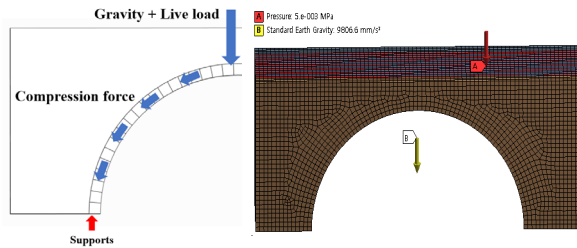
Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson's ratio	Modulus of elasticity (GPa)
Stone arch	2,650	0.2	32.5
Side wall	2,000	0.25	6.9
Filler	2,000	0.25	4.6

<Table 8> Mode shape after repair

Mode	View	Frequency (Hz)
Before 1st mode		10.05
Before 2nd mode		12.40

<Table 9> Mode shape before repair

Mode	View	Frequency (Hz)
After 1st mode		14.96
After 2nd mode		17.71



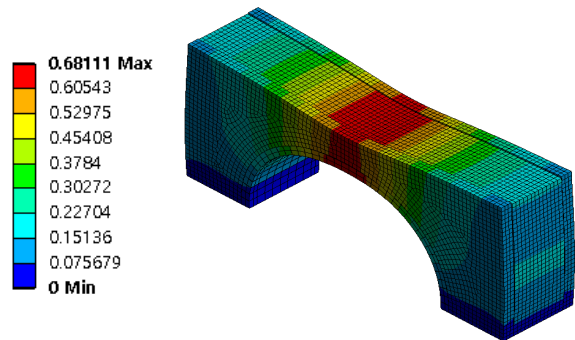
〈Fig. 10〉 Load applying and transmission

### 3.4 하중재하

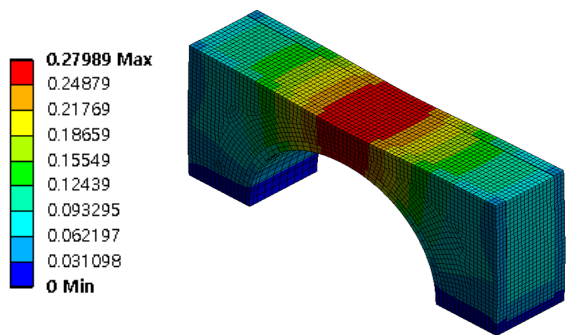
〈Fig. 10〉은 하중의 흐름과 하중이 재하된 모습을 보여준다. 아치 형태의 홍예교는 외부 하중이 홍예석의 압축응력에 저항하도록 축조되어 홍예석의 압축강도가 크게 나타나는 특징을 가진다. 국내의 홍예교들은 대부분 보도교에 해당되지만 승선교는 보수전에도 승용차가 지나다닐 수 있을 정도의 하중을 분담하였다. 본 연구에서는 도로의 구조시설기준에 관한 규칙에 따라서 자중과 활하중 기준인  $5\text{kN/m}^2$ 에 해당하는 하중을 적용하였다<sup>13),14)</sup>.

〈Fig. 11〉과 〈Fig. 12〉는 각각 보수전과 보수후의 전체적인 처짐을 보여준다. 보수전은 0.68mm, 보수후는 0.28mm의 최대처짐이 발생했다. 두 모델 모두 중앙부에서 최대 처짐이 발생하며, 무사석과 적심석의 부위가 벌어지는 모습을 나타내는데 이는 횡력에 의한 구속이 없으므로 하중에 의해서 벌어지는 것으로 판단된다. 무사석 및 적심석의 강성이 약한 보수전 모델이 보수후 모델 보다 간격이 더 커진 것으로 보아 보수전에 더 큰 횡력이 발생했음을 알 수 있다.

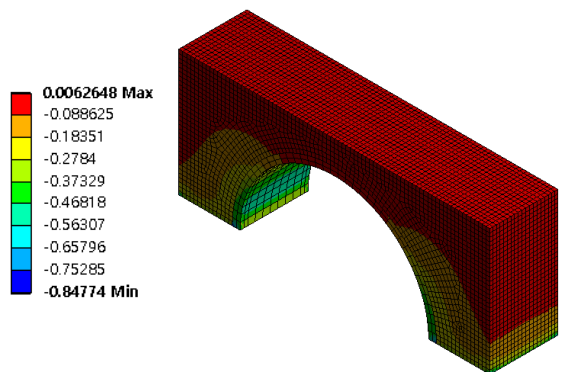
〈Fig. 13〉과 〈Fig. 14〉는 각각 보수전과 보수후의 Y축에 관한 응력을 보여준다. 〈Table 10〉은 보수전·후의 최대 인장력 및 압축력을 보여준다. 보수전 수직방향으로 받는 응력은 홍예석에서 압축응력이 0.85MPa로 나타났으며, 보수후 홍예교의 홍예석 응력은 압축응력이 1.20MPa로 나타났다. 붉은색으로 표시된 부분은 인장력이 발생하는 것을 나타내며, 그 외의 구간들은 압축력을 나타낸다. 무사석 및 적심석에는 인장응력이 발생하고 있으며, 보수전 0.01MPa, 보수후 0.008MPa의 인장응력이 발생하였다. 이는 하중이 홍예석에 전달되고 홍예 축을 따라 지면에 전달되면서 보수전에는 무사석과 적심석에 과도한 처짐과 인장력이 발생한 반면, 보수후에는 무사석과 적심석의 처짐은 작아지고 홍예석으로 하중이 이동했음을 보여준다.



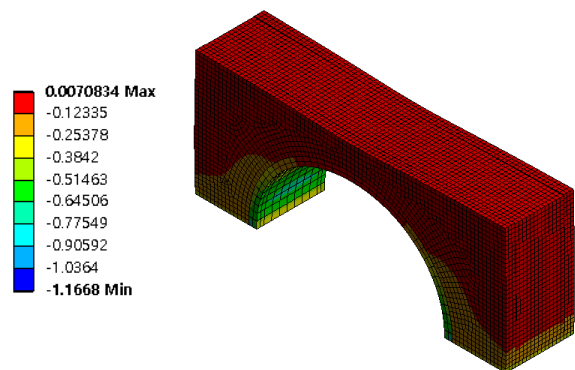
〈Fig. 11〉 Total deformation before repair



〈Fig. 12〉 Total deformation after repair



〈Fig. 13〉 Normal stress before repair



〈Fig. 14〉 Normal stress after repair

〈Table 10〉 Maximum normal stress (Unit: MPa)

	Tensile	Compressive
Before	0.01	-0.85
After	0.008	-1.2

본 홍예교는 차량이 지나다녀도 충분한 안전성을 가진 것으로 판단된다. 하지만 문화재의 특성상 실물재하 실험을 할 수 없으므로 외관조사, 동적특성조사와 같은 간접적인 조사에만 의존하기 때문에 사용은 매우 신중하게 고려되어야 한다고 판단된다.<sup>15)</sup>

#### 4. 결론

본 연구에서는 국내의 대표적인 홍예교인 선암사 승선교의 동적특성을 이용하여 컴퓨터 모델링을 진행한 후 내하력에 대한 안전성을 검토하였다. 컴퓨터 모델링과 하중재하에 대한 결론은 다음과 같다.

1) 홍예교의 동적특성 분석 결과, 보수전 고유진동수는 9.89Hz, 보수후 고유진동수는 14.49Hz로 측정되었다. 이는 보수전 공극인 부위가 밀실하게 채워져 고유진동수가 증가한 것으로 판단된다.

2) 같은 재료를 사용하여도 견고성에 따라서 동적 특성에 큰 차이가 나타났다. 따라서 재료의 강성을 변화시켜서 고유진동수가 같도록 모델링을 하는 것이 현실적이며, 현재의 상태를 반영하기 위한 가장 효과적인 방법으로 판단된다.

3) 선암사 승선교에 도로 구조시설기준에 관한 규칙에 따라서 자중과 활화중 기준인  $5\text{kN/m}^2$ 를 적용하였을 때 보수전 처짐은 0.68mm, 보수후 처짐은 0.28mm이다. 수직 최대 압축응력은 보수전 압축 0.83MPa 및 인장 0.01MPa, 보수후 압축 1.16MPa 및 인장 0.008MPa로 측정되었다. 보수전과 보수후 모두 극한응력에 미달하였다. 이는 내하력에 대한 평가도 중요하지만 지반과 현장 조사를 통한 안전성 검토도 중요함을 뜻한다.

4) 무사석과 적심석의 강도는 3배 증가하였지만, 인장에 대한 저항력은 10배 이상의 차이가 나타났다. 이는 내부 채움재의 강성이 증가하면서 홍예의 변형을 구속함으로써 홍예교의 전체적인 강성을 증가시키는 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2020년도 국토교통부 국토교통과학 기술진흥원 기술촉진 연구사업의 연구비지원 (20CTAP-C143093-03)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### References

1. Chung, H. S., & Lee, S. H., Hwang, Y. C., & Kim, N. Y., "A study on Local Carrying Capacity of Ancient Stone Arch Bridge", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol.8, No.4, pp.31~39, 1992
2. Lee, S. G., Lee, S. M., & Song, C. Y., "The Influence of Spandrel Wall and Fill on the Dynamic Characteristic of Historic Stone Masonry Arch Bridge", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol.9 No.3, pp.161~168, 2005
3. Lee, S. M., Park, I. S., Choi, H. S., & Choi, C. K., "Computational Modelling Method by Using the Dynamic Characteristics of Stone Masonry Arch Bridges", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.8, No.3, pp.83~90, 2008, Retrieved from file:///C:/Users/user/Downloads/Computational\_Modelling\_Method\_by\_Using\_the\_Dynamic\_Characteristics\_of\_Stone\_Masonry\_Arch\_Bridges.pdf
4. Mai, K. Q., Lee, S. M., & Lee, K. (2019). Assessment of historic stone arch bridge characterisation: experiments and numerical model. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, Republic of Korea, Vol.172, No.7, pp.480~489, doi: 10.1680/jstbu.18.00014
5. Kim, H. S., Cha, G. C., Jung, S. J., Kim, W. J., Bae, B. S., & Kim, D. M., "Structural Behavior Analysis of Arched Stone Bridges

- considering Arch Type”, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.28, No.9, pp.91~98, 2012
6. Park, Y. H., Back, Y. J., Kwon, G. W., Lee, S. M., & Lee, S. G. (2000). A experimental study on natural frequency of ancient stone arch bridge. Proceedings of the Architectural Institute of Korea, Republic of Korea, Vol.20 No.1, pp.35~38
  7. Bayraktar, A., Türker, T., & Altunişik, A. C., “Experimental frequencies and damping ratios for historical masonry arch bridges”, Construction and Building Materials, Vol.75, pp.234~241, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.044
  8. ANSYS Academic Research Mechanical, Release 19.0
  9. Kim, J. E., & Cheon, D. Y., “A Study on the Repair Method for Performance Degradation Cause of Korean Arch Bridge -Focused on the Seonamsa Seungseonggyo, Songgwangsa Geukrockgyo-”, Journal of Architectural History, Vol.23, No.1, pp.7~19, 2014, doi: 10.7738/JAH.2014.23.1.007
  10. Lee, S. M., Shon, H. W., & Lee, S. G., “Dynamic Characteristics and Compressive Stress of Multi-Layered Stone Masonry Model”, Journal of the Korea Geophysical Society, Vol.7 No.1, pp.31~40, 2004, Retrieved from <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200410102453495.pdf>
  11. Lee, J. H., Park, H. K., Lee, S. M., & Lee, S. G. (1999). A Experimental Study on Natural Frequency of Ancient Castle Wall. Proceedings of the Architectural Institute of Korea, Republic of Korea, Vol.19, No.2, pp.625~630
  12. Seo, Y. S., Yun, H. S., Kim, D. G., & Kwon, O. I., “Analysis on Physical and Mechanical Properties of Rock Mass in Korea”, The Journal of Engineering Geology, Vol.26, No.4, pp.593~600, 2016, doi: 10.9720/kseg.2016.4.593
  13. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Rules about the Road Structure & Facilities Standards
  14. Ng, K. H., Fairfield, C. A., & Lusas, A. S. (1999). Finite-element analysis of masonry arch bridges. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, Vol.134 No.2, pp.119~127, doi: 10.1680/istbu.1999.31378
  15. Aydin, A. C., & Özkaya, S. G., “The finite element analysis of collapse loads of single-spanned historic masonry arch bridges (Ordu, Sarpdere Bridge)”, Engineering Failure Analysis, Vol.84, pp.131~138, 2018, doi: 10.1016/j.engfailanal.2017.11.002
  16. Lee, S. M., “Non-destructive Diagnosis and Maintenance of Historic Stone Masonry Arch Bridges in Korea”, Computational Structural Engineering, Vol.19, No.4, pp.25~31, 2006, Retrieved from <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200606141775340.pdf>
- Received : November 24, 2020
  - Revised : November 30, 2020
  - Accepted : November 30, 2020