

무사석과 적심석이 홍예교량의 동적특성에 미치는 영향

The Influence of Spandrel Wall and Fill on the Dynamic Characteristics of
Historic Stone Masonry Arch Bridges

이 수 곤*
Lee, Soo-Gon

이 성 민**
Lee, Sung-Min

송 창 영***
Song, Chang-Young

Abstract

The influence of spandrel wall and fill above the extrados on the structural behavior and load capacity of stone masonry arch bridges has not been thoroughly studied yet. One can estimate the structural characteristics and behavior of stone masonry structures by measuring the dynamic characteristics. To investigate the influence of spandrel wall and fill on the dynamic characteristics of historic stone masonry arch bridges, on-site free vibration tests were performed for 5 stone bare arches with no spandrel wall and backfill. And the natural frequencies of those arches were compared with the natural frequencies of 18 stone arch bridges with spandrel walls. Experimental results show from the experiments show that the presence of spandrel wall and fill may increase the natural frequency of arch bridge because the stiffness increase exceeds the mass increase due to spandrel wall.

요 지

홍예교량에서 무사석 및 적심석이 구조적특성이나 내하력에 미치는 영향에 대해서는 아직도 제대로 연구된 바가 없다. 특히 대부분의 홍예형 구조들이 문화재로 지정되어 있어 실험테스트를 하는 것은 매우 곤란하다. 석조구조물의 동적특성을 파악하면 접촉면의 강성을 파악할 수 있으므로 구조해석시 유용한 정보를 구할 수 있다. 본 연구는 무사석 및 적심석이 없는 5개의 홍예구조물과 우리나라 18개 홍예교량의 동적특성을 비교 분석함으로써 무사석 및 적심석 유무에 따른 고유진동수의 차이를 규명하는 방법으로 수행되었다. 연구결과 줄눈에 모르타르를 사용하지 않은 홍예구조의 경간에 따른 고유진동수는 우리나라 홍예교의 고유진동수보다 현저히 낮은 것으로 조사되었으며, 이러한 사실을 통해 볼 때 무사석 및 적심석이 홍예교의 고유진동수를 높이는 역할을 함을 알 수 있다.

Keywords : Stone Masonry Arch Bridges, Dynamic Characteristics, Natural Frequency, Fill, Spandrel Wall, Historic Stone Structures

핵심 용어 : 석조홍예교, 동적특성, 고유진동수, 적심석, 무사석, 전통석조구조물

* 명예회원, 전남대학교 건축공학부 명예교수, 공학박사

** 정회원, 한국건설품질연구원 이사, 공학박사

*** 정회원, 한국구조물안전원 대표이사, 공학박사

E-mail : sgl6323@hotmail.com 011-607-6323

• 본 논문에 대한 토의를 2005년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2006년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

문화재를 효과적으로 보존하기 위해서는 그 구조 특성을 정확히 파악하여야 한다. 그러나 보존을 최우선 목표로 하는 문화재에 있어서는 일반 구조물과는 달리 비파괴 조사를 우선적으로 고려하여야 하기 때문에 구조특성 파악은 어렵게 된다. 新增東國輿地勝覽에 기록된 우리나라의 古橋梁은 전국적으로 516개였으며, 이 조말기 서울에만 86개의 교량이 있었지만 현재는 개발이라는 명분하에 거의 다 사라지고 전국적으로 62개만 남아 있다. 그중 문화재로 지정된 교량은 총 23개이며 홍예교가 17개로 주류를 이루고 있다. 문화재로 지정되지 않은 것까지 포함해도 우리나라의 홍예교량은 30여개 밖에 남지 않았으며 상당수는 원형이 많이 훼손된 상태에 있다. 앞으로는 얼마 남지 않은 홍예교량들을 현 상태에서 보존하기 위해서는 각별한 노력을 기울여야 할 뿐 아니라 보수·복원시 축조당시 가지고 있던 구조특성도 유지할 수 있도록 관심을 가져야 할 것이다. 석조 홍예교량을 구조공학적 관점에서 연구하기 위해서는 무사석 및 적심석이 홍예교량의 동적특성이나 내하력에 어떠한 영향을 미치는지 여부가 파악되어야 한다. 영국의 경우 아직도 도로교나 철도교에 사용되고 있는 조적조 아치교량이 6000여개나 된다고 한다. 따라서 유럽에서는 조적조 아치(홍예)교량의 내하력에 관한 연구가 충분히 이루어지고 있다. 그러나 spandrel wall(무사석) 및 fill(적심석)이 내하력에 미치는 영향에 대한 연구에 대해서는 아직도 많은 논란이 되어 왔다. 우리나라에서는 아직까지 이와 관련한 연구가 이루어진 바가 없다.

우리나라에는 홍예교량이 30여개 밖에 되지 않고 상당수가 문화재로 지정되어 있으며, 도로교로 활용되고 있는 경우가 거의 없기 때문에 실험테스트를 하는 것이 매우 곤란하다. 따라서 본 연구는 홍예교의 동적특성을 파악함으로써 홍예교의 유지관리와 내력평가에 유용한 정보를 제공하는 것을 목표로 하였으며, 본 연구의 결과로 인해 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다.

첫째, 구조물의 상태를 모니터링할 수 있다. 구조물이 국부적, 또는 전체적으로 피해를 입으면 강성이 감소한다. 동적 응답은 시스템 파라미터(강성, 질량 및

감쇠)의 영향을 받기 때문에 이러한 파라미터들이 변하면 고유진동수, 모드 형태, 감쇠계수 등과 같은 동적특성이 변하게 된다.⁽⁴⁾ 균열이나 공동 등이 발생함으로 인해 구조체가 약해지면 강성이 감소하기 때문에 구조체의 고유진동수 값이 작아지며 다른 모드 성능에도 영향을 미치게 된다. Pretlove 등⁽¹⁰⁾이 수행한 조적조 아치교량 모형실험에서 첫 번째 힌지가 발생하면 1차 고유진동수는 약 10% 정도 저하되는 것으로 발표되었다.

이러한 점을 효과적으로 이용하여 동적 특성을 파악함으로써 홍예교의 역학적 특성 및 건전성의 판단은 물론 원형보존과 비파괴 안전진단을 염두에 두어야 하는 문화재의 유지관리에 더욱 효과적으로 활용할 수 있다. 따라서 석조문화재의 고유진동수가 측정되면 그 문화재가 외부의 동적 환경에 얼마나 저항력이 있는지 여부를 판단할 수 있을 뿐 아니라 지속적인 측정이 이루어지면 그 구조 상태의 변화여부도 파악할 수 있다.

둘째, 동적특성 파악을 통해 접촉면의 강성을 추정할 수 있다. 손영식(1992)은 『韓國 古橋梁의 構造形式에 관한 研究』에서 傳統橋梁 구조의 보편적인 특성을 연구하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 홍예교의 내하력을 추정하는 연구를 수행하였다.⁽¹⁾ 이때 아치 불연속면의 전단강성을 어떻게 가정하느냐에 따라 그 결과치가 달라지게 된다. 이성민 등은 고유진동수를 측정함으로써 불연속면의 전단강성을 추정하는 방법에 대해 연구를 수행한 바 있다.^{(2),(5)} 또한 아치구조물은 축력에 저항하는 구조로, 축력을 받으면 돌기(asperity)가 소성변형을 하면서 동적특성이 변하게 된다.^{(4),(14)} 따라서 축력에 따라 변하는 전단강성에 대한 고려도 필요하다. 따라서 고유진동수를 파악함으로써 강성을 추정할 수 있으며 이 가정치는 구조모델링을 할 때 활용할 수 있을 것이며, 이를 통해 내하력을 추정하는 데에도 유용하게 활용될 수 있다.

셋째, 지진이나 진동 등 동적 외력에 대해 피해를 예측하고 대책을 수립할 수 있는 자료가 된다.

본 연구에서는 무사석 및 적심석이 없는 홍예구조 5곳에 대해 고유진동수를 측정하고, 기존에 수행된 우리나라 18개 홍예교량의 동적특성 분석결과와 비교함으로써 무사석 및 적심석 유무에 따른 고유진동수의 차이를 규명하는 방법으로 수행되었다.

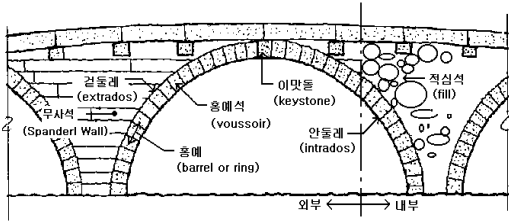


Fig. 1 홍예교의 구조

2. 조적조 홍예교의 고유진동수

2.1 홍예교의 고유진동수

양단이 고정된 두꺼운 원형아치에서 전단변형과 회전관성의 효과를 고려한 면내 휨 1차 고유진동수, F 는 다음 식과 같다.⁽¹⁵⁾

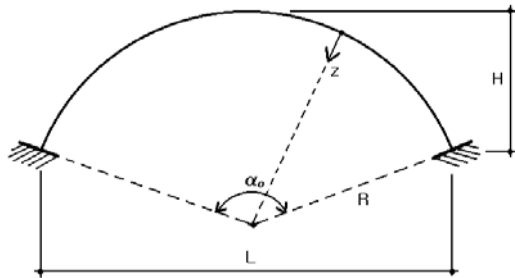


Fig. 2 양단 고정인 아치

$$F = \frac{s/\pi r}{\left[(s/\pi r)^2 + \gamma^2 \Omega + \gamma^2 / (1 + \Omega \pi^2 r^2 / s^2) \right]^{1/2}} \times \frac{\lambda}{2\pi (R\alpha_0)^2} \left[\frac{1 - 2\sigma^2(1 - 2/\sigma\lambda)(\alpha_0/\lambda)^2 + (\alpha_0/\lambda)^4}{1 + 5\sigma^2(1 - 2/\sigma\lambda) \cdot (\alpha_0/\lambda)^2} \right]^{1/2} \times \left(\frac{EI_v}{m} \right)^{1/2} \text{ (Hz)} \quad (1)$$

여기서, R = 아치의 축중심까지의 반경(in.)

m = 아치의 단위길이당 질량(lbm/in.)

α_0 = radian으로 표시된 아치의 중심각

$\lambda = 61.673$ (상수)

$\sigma = 1.00078$ (상수)

$$\Omega = E/KG$$

K = 아치 횡단면의 전단형상계수

G = 전단탄성계수

s = 아치 중심축의 길이 = $R\alpha_0$ (in.)

r = 아치 횡단면의 단면2차반경(in.)

A = 아치 횡단면의 면적(in.2)

$$\gamma = \frac{1.5622}{1 - 0.025330\alpha_0^2} \times$$

$$\left[\frac{(1 + 0.075991\alpha_0^2)(1 - 0.024215\alpha_0^2 + 0.00026291\alpha_0^4)}{1 + 0.060536\alpha_0^2} \right]^{1/2}$$

Pretlove 등⁽¹⁰⁾은 조적조 아치교량의 1차 휨 고유진동수, F 를 다음 식(2)의 실험식으로 제안하고 있다.

$$F = R \left(\frac{d^{3/2}}{c^{1/2} s^2} \right) \text{ (Hz)} \quad (2)$$

여기서, d : 虹蜨石(barrel 또는 ring)의 두께(mm)

c : 頂點에서의 虹蜨石과 적심석(fill) 두께(mm)

s : 徑間의 길이(m)

이며, R 을 使用性指數(serviceability indicator ratio)라고 한다. Brown 등⁽¹⁰⁾은 실험결과를 근거로 하여 보통 아치교량의 R 값은 약 3정도이며, 만약 아치교량에 균열이 발생하여 R 값이 2보다 작게 되면 使用性에 문제가 있을 가능성이 있다고 발표하였다. Fig. 3은 아치교량 모형 시험체에 가해지는 하중과 이에 따라 변화하는 사용성지수의 관계를 보여주고 있다.

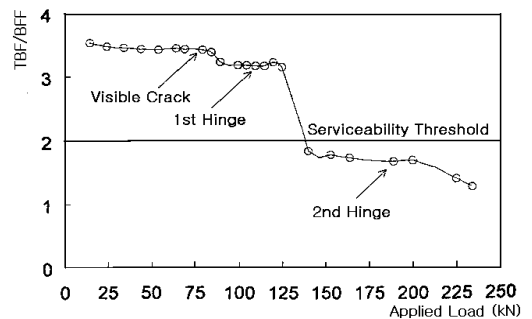


Fig. 3 재하하중에 따른 사용성지수의 변화

이성민 등⁽³⁾은 우리나라의 18개 홍예교량의 고유진동수를 측정된 결과 경간 x 에 대한 고유진동수 f 의 관계를 식(3)과 같이 제시하였다.

$$f = 46.58 x^{-0.5959}, \quad R^2 = 0.736 \quad (3)$$

Fill이 없는 순수한 연속체 아치의 고유진동수 식(1)과 Pretlove 등⁽¹⁰⁾이 제안한 조적조 아치교량의 고유진동수 식(2)에서는 고유진동수가 경간의 제곱에 반비례하는 것으로 나타난 반면, 우리나라 홍예교의 고유진동수는 경간의 약 0.6승에 반비례하는 것으로 연구되었다. 이는 모르타르를 사용하지 않는 우리나라 홍예교량의 구조적 특성으로서 진동형태에 따른 차이가 있기 때문인 것으로 여겨진다.

2.2 보수 전 · 후 선암사 승선교의 고유진동수

전남 승주군 선암사 승선교는 과거 차량이 통과하는 등의 이유로 지반이 이완되고 홍예석에 변형이 생기는 등 붕괴 위험이 있다고 판단되어 최근 해체 복원한 구조물이다. 문화재청과 순천시는 승선교의 반원형태가 뒤틀리는 등 붕괴 위험이 있자 2002년 11월 해체 복원을 시작하였으며 2004년 7월 19일 공사를 완료하였다. 승선교는 기초암반이 화강석으로 보완됐고 홍예석 147개 가운데 깨지거나 강도가 약해진 32개는 기존 석재의 재질과 같은 전북 익산석으로 교체되었다. 해체 전 · 후 현장답사 결과와 복원공사 당시의 사진을 볼 때 홍예석이나 적심석에 석회, 시멘트 등 교착제를 사용하지 않은 원래의 공법을 사용한 것으로 보인다. 복원 전 측정된 고유진동수는 9.9Hz였으나 해체 복원 후 고유진동수는 14.9Hz로 증가하였다. 이러한 측정결과를 볼 때 석조홍예교량은 같은 재료를 사용하였다고 해도 그 견고성에 따라 동적특성에 큰 차이가 있는 것을 알 수 있으며, 고유진동수를 측정함으로써 문화재의 이상여부를 감지할 수 있음을 의미한다.

3. 무사석 및 적심석의 영향

무사석 및 적심석이 고유진동수에 미치는 영향에 대

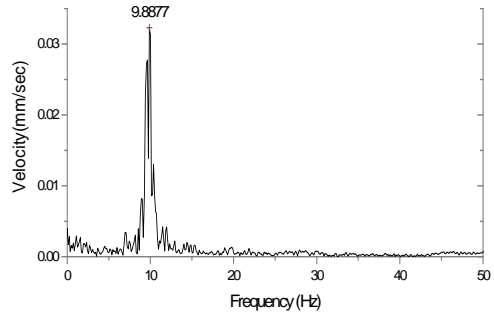


Fig. 4 승선교 보수 전의 고유진동수⁽³⁾

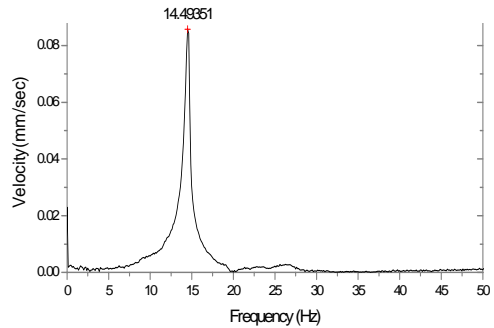


Fig. 5 승선교 보수 후의 고유진동수



Fig. 6 승선교 보수 장면(저작권자의 허가를 득함)⁽¹⁹⁾

해 Brown 등의 식(1)을 검토하면 fill의 두께가 두꺼울수록 고유진동수는 감소하도록 되어 있다. 이는 fill에 의한 강성증진효과를 무시한 채 질량증가만을 고려하였기 때문이다. 반면 Bensalem 등⁽⁸⁾의 연구에 의하면 무사석 역할을 하는 spandrel wall이 있는 경우가 없는 경우보다 고유진동수가 높은 것으로 나타났다.

고유진동수에 관한 연구는 아니지만 fill이 아치교의 내하력에 미치는 영향에 대한 논란은 오래전부터 있었다. Heyman 등은 조적조 아치교에서 fill이 구조적으로 기여하는 바가 없다고 하였으나 Davey는 fill이 있는 경우의 강성이 없는 경우보다 2.5배라는 실험결과를 발표하였다. 반면 근래 컴퓨터 해석이 발달하면서 홍예석간의 접합면을 어떻게 가정할 것인지, 그리고 fill을 어떻게 가정할 것인지에 대하여 연구되어 왔으며, 이러한 연구는 Fanning, Brencich, Thavalingam, Bićanić 등에 의해 수행되었다.^{(9),(11),(12),(16),(18)}

Fanning 등은 fill이 arch barrel과 spandrel wall의 변형을 구속함으로써 강성을 증가시킨다고 하였고, Brencich 등⁽⁹⁾은 fill의 종류에 따라 다르지만 점착력이 있는 fill의 경우 내하력을 15% 증가시킨 것으로 발표하였다. Thavalingam 등⁽¹¹⁾은 fill의 내부 마찰각, 밀도와 두께가 증가함에 따라 아치교의 내하력이 증가한다고 연구하였다.

우리나라에서 홍예교의 내하력에 관한 연구는 손영식과 정형식 등^{(1),(7)}에 의해 수행되었는데, 응력에 따른 강성의 변화에 관해 연구된 것은 정형식 등에 의해서이다. 석조구조물의 접촉면의 강성은 축응력에 따라 증가하는 것으로 이성민 등⁽⁴⁾에 의해 연구된 바 있다. 정형식 등⁽⁷⁾은 축응력과 표면상태에 따른 불연속면의 전단강성을 제시한 Barton-Bandis 제안식(1982)을 활용하여 여천 홍국사 홍교를 대상으로 컴퓨터 해석을 실시하였으나 적심석의 영향에 대해서는 연구되지 않았다. 이러한 일련의 연구결과들을 통해 볼 때 적심석(fill)이 고유진동수 증가의 원인이 되는 물론 적심석

의 종류나 강성에 따라 큰 차이가 있을 것으로 예측할 수 있다. 특히 축력을 받는 홍예교에서는 적심석 층의 두께가 증가함에 따라 고유진동수가 증가할 것이라는 추정이 가능하다. 그러나 전단강성을 파악하기 위해 실험재하시험을 실시하기에는 구조물의 특성상 곤란한 점이 많다. 따라서 고유진동수를 측정함으로써 전단강성을 추정하는 것이 하나의 방법이 될 수 있다.

4. 측정 및 분석

4.1 연구방법

본 연구를 위해 Table 1과 같이 무사석 및 적심석이 없는 순수한 홍예구조의 고유진동수를 측정하였다. 측정대상 홍예는 청도 석빙고, 금산사 홍예문, 오천성 홍예문, 그리고 주변 공사를 하면서 홍예상부 표토를 제거해버린 건봉사 입구 군부대 옆 홍예 및 근래에 구축한 통도사 상류홍예교이다.

Table 1 측정대상 홍예구조

구조물 명칭	소재지	비고
청도 석빙고	경북 청도군	홍예 4개
금산사 홍예문	전북 김제시	홍예 2개
오천성 홍예문	충남 보령시	
건봉사입구 홍예교	강원 고성군	표토제거상태
통도사 상류홍예교	경남 양산시	근래 시공되었음



Fig. 7 청도 석빙고



Fig. 8 금산사 홍예문



Fig. 9 오천성 홍예문



Fig. 11 통도사 상류 홍예교



Fig. 10 건봉사 입구 홍예교

이렇게 측정된 고유진동수와 이성민 등⁽³⁾에 의해 측정된 18개 홍예교의 고유진동수 자료를 비교함으로써 무사석과 점심석이 홍예교의 동적특성에 미치는 영향 요인을 분석하였다.

4.2 측정장비

측정장비로는 Blastmate III를 사용하였으며 장비의 제원은 Table 2과 같다.

Table 2 측정장비의 제원

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

4.3 측정 방법

구조물의 가진 방법으로는 여러 가지가 있으나 충격법이 간편하면서도 분석이 쉬워 이 방법을 채택하였으며 구조체를 충분히 진동시키기 위해 구조물의 강성에 따라 1~3인이 도약하는 방법을 사용하였다. 연직방향의 진동수 측정을 위한 센서는 홍예의 중앙부에 설치하였다.

4.4 FFT(fast fourier transform) 해석

시간영역 데이터를 소프트웨어 Origin 4.1을 이용하여 FFT분석을 하여 고유진동수 및 감쇠비를 구하였다. 본 연구에서는 충격가진을 하였고 따라서 가진주파수 성분을 배제하기 위하여 시간영역 데이터에서 초기의 충격성분을 제거하고 1차모드의 자유진동 성분이 충분히 나타나도록 교정한 후 FFT 분석을 하였다.

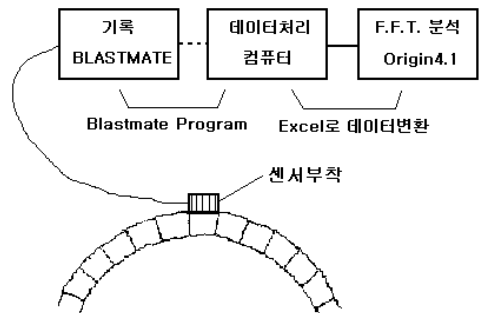


Fig. 12 측정 및 분석과정

5. 연구 결과 및 분석

무사석과 적심석이 없이 홍예만 남아 있는 우리나라 홍예구조물 5개소에 대한 고유진동수 측정 결과는 Table 3과 같다. 그리고 이 결과를 무사석과 적심석이 있는 우리나라 홍예교량의 경간에 따른 고유진동수 자료와 비교하면 Fig. 13과 같다.

홍예석 사이 줄눈에 모르타르를 사용하지 않은 청도석빙고, 오천성 홍예문, 건봉사 입구 홍예교, 금산사 홍예문은 기존 홍예교보다 경간에 따른 고유진동수가 현저하게 낮은 것으로 나타났다. 이러한 사실을 통해 볼 때 적심석이 홍예의 강성을 높이는 역할을 하는 것을 알 수 있다. 특히 작년 보수공사 중 붕괴된 건봉사 능파교에 비해서도 고유진동수가 많이 낮은 것이나 무수히 많은 편마암으로 홍예를 구성한 진도 단홍교 및 쌍홍교보다도 고유진동수가 낮다는 사실은 적심석의 내부마찰각이 얼마인가를 떠나 적심석의 존재가 질량 증가보다는 강성증가에 더 크게 기여하고 있음을 알 수 있다. 그 원인에 대해서는 추가적인 연구가 있어야

하겠지만 기존의 연구 결과들을 참고할 때 다음의 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째는 적심석의 하중으로 인해 홍예석의 응력이 증가하고 따라서 불연속면의 전단 강성이 증가한다는 점과, 둘째는 적심석이 홍예의 변형을 구속함으로써 홍예교 전체의 강성을 증가시킨다는 점이다. 통도사 상류홍교의 경우 기계다듬을 하여 줄눈 틈이 거의 없는데다가 줄눈 사이를 시멘트로 채웠으므로 경간에 따른 고유진동수도 매우 높게 측정되었다. 홍예를 연속체모델로 가정하고 식(3)을 이용하여 홍예의 횡탄성계수를 계산한 결과 청도석빙고는 $1800\sim6500\text{kg/cm}^2$ 로서 일반 화강암의 횡탄성계수 $5.2\times 10^5\text{kg/cm}^2$ 보다 현저히 낮으며, 통도사 상류홍교는 $2.4\times 10^5\text{kg/cm}^2$ 로서 일반 화강암과 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 사실들을 통해 볼 때 홍예구조에서 홍예 줄눈의 강성이 홍예구조의 동적특성에 미치는 영향이 무엇보다도 크며, 여기에 적심석이 있음으로써 홍예교의 고유진동수를 증가시키기를 알 수 있다. 다만, 적심석이 홍예교의 고유진동수를 증가시키는 원인에 대해서는 보다 심층적인 후속연구가 계속되어야 할 것이다.

Table 3 측정대상 홍예구조의 1차 고유진동수

구조물 명칭	경간(m)	1차 고유진동수(Hz)
청도석빙고	4.1	5.9~11.0
금산사 홍예문	3.2	12.6~13.6
오천성 홍예문	3.08	12.2
건봉사입구홍예교	3.2	11.2
통도사상류홍예교	9.93	22.7

6. 결론

무사석과 적심석의 존재가 홍예교의 동적특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 무사석 및 적심석이 없는 순수한 홍예구조 5개소의 고유진동수를 측정하였다. 이렇게 측정된 고유진동수 자료를 기존에 측정된 우리나라 18개 홍예교의 고유진동수 자료와 비교함으로써 적심석이 홍예교의 동적특성에 미치는 영향 요인을 분석하였고 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 홍예석 줄눈에 모르타르를 사용하지 않은 순수 홍예구조의 경간에 따른 고유진동수는 우리나라 홍예교의 고유진동수보다 현저히 낮은 것으로 조사되었다. 이러한 사실을 통해 볼 때 무사석 및 적심석이 홍예교의 고유진동수를 높이는 역할을 함을 알 수 있다.
- 2) 줄눈을 정교히 시공하고 줄눈에 시멘트를 채워 넣은 통도사 상류 홍교의 경우 고유진동수가 우리나라 홍예교의 고유진동수에 비해 현저히 높게 나타

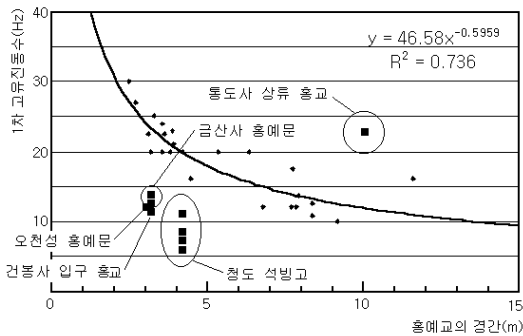


Fig. 13 홍예구조의 경간에 따른 고유진동수

났다. 이러한 사실을 통해 볼 때 무사석과 적심석이 홍예교의 고유진동수를 높이지만 홍예 자체의 강성이 가장 큰 요인이 됨을 알 수 있다.

- 3) 무사석과 적심석이 고유진동수를 증가시키는 원인으로서는 축력 증가에 따른 홍예석 접촉면 강성의 증가, 홍예의 변형을 구속함으로써 인한 강성증진 효과 등이 추정되며 이 부분에 대해서는 앞으로 심층적인 연구가 계속되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 손영식, "韓國 古 橋梁의 構造形式에 관한 研究", 한양대학교 박사학위 논문, 1992.
2. 이성민, 박현규, 김선우, 이수근, "석벽돌의 쌓기 단수에 따른 동적특성 변화에 대한 연구", 대한건축학회지 제17권 제5호 통권152호, 2001년6월.
3. 이성민, 박현규, 서만철, 이수근, "우리나라 홍예교의 동적특성에 관한 연구", 대한건축학회지 제17권 제9호 통권 155호, 2001년 9월, pp.107~106.
4. 이성민, 손호웅, 이수근, "석벽돌 적층모형의 압축응력과 동적특성", 지구물리, 제7권 제1호, 2004, pp.31~40.
5. 이성민, 손호웅, 이수근, "석탑문화재의 강성과 고유진동수에 관한 연구", 구조물진단학회지 제8권 제3호, 2004년 7월, pp.263~270.
6. 장기인, "韓國建築大系 VII, 石造", 보성각, 1997.
7. 정형식 외, "고대 석조아치교량의 내하력에 관한 연구", 한국지반공학학회지 제8권 제4호, 1992.
8. A. Bensalem, C. A. Fairfield & A. Sibbald, "Non-destructive Testing for Arch Bridge Assessment", Arch Bridges, Thomas Telford, London, 1995.
9. A. Brencich et al, "Load Carrying Capacity of Masonry Arch Bridges", Programma di Ricerca Scientifica di Rilevante Interesse Nazionale Anni 2002-2003, Italy
10. A. J. Pretlove & G. Brown, "Changes in the Dynamic Characteristics of a Masonry Arch Bridge Subjected to Monotonic Loading to Failure", Arch Bridges, Thomas Telford, 1995.
11. A. Thavalingam et al, "Computational framework for discontinuous modelling of masonry arch bridges", Computers and Structures 79, 2001.
12. A. M. Sowden, "The Maintenance of Brick and Stone Masonry Structures", E. & F.N. Spon, 1990.
13. C. Melbourne et al, "The Behaviour of Multi-span Masonry Arch Bridges", Arch Bridges, Thomas Telford, London, 1995.
14. Christopher H. Scholz, "The Mechanics of Earthquakes and Faulting", Cambridge University Press, pp88~89, 1990.
15. Daniel Schiff, "Dynamic Analysis and Failure Modes of Simple Structures", John Wiley & Sons, Inc., 1990.
16. N. Bićanić et al, "Discontinuous Modelling of Structural Masonry", Fifth World Congress on Computational Mechanics, July 7-12, 2002, Vienna, Austria.
17. Paolo Faccio, et al, "Load Carrying Capacity of Masonry Arch Bridges", Arch Bridges, Thomas Telford, London, 1995.
18. Paul J. Fanning, et al, "Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges". Computers & Structures 79, 2001.
19. <http://blog.empas.com/foreverhappy4u>.

(접수일자 : 2005년 3월 2일)