

## 석벽돌 적층모형의 압축응력과 동적특성

이성민\* · 손호용\*\* · 이수곤\*\*\*

\*한국건설품질연구원

\*\*배재대학교 토목환경공학과 지반조사공학연구소

\*\*\*전남대학교 건축학부

## Dynamic Characteristics and Compressive Stress of Multi-Layered Stone Masonry Model

Sung-Min Lee · Howoong Shon · Soo-Gon Lee

**요 약** 문화재, 특히 석조구조물을 조사 할 경우에 원형 및 상태를 보존하는 것은 매우 중요하다. 석조구조물에 대한 조사 결과의 효율적인 평가를 위해서는 동적특성을 고려하여야만 한다. 석조구조물의 동적특성을 마찰, 접촉조건, 석층 수 등의 요인에 의한다. 이러한 요소는 동적해석결과로부터 추정할 수 있다. 본 연구는 압축력을 받고있는 전통적인 홍예교의 고유 진동수 결정 방법에 관한 연구결과이다.

**주요어** 홍예교, 동적해석, 고유진동수, 석조구조물

### ABSTRACT

When surveying the cultural heritages especially in the case of stone structures, preserving their original state is of primary importance. For the effective assessment of survey results of stone structure, the dynamic characteristics of that system should be considered. Dynamic characteristics of stone masonry structures depend on several factors such as coefficients of friction, contact conditions, and number of layers of bonding stones. These factors can be estimated by using the dynamic analysis results. This paper describes a method for natural frequency determination of traditional stone arch bridge subjected to compressive force. For this purpose, multi-layered granite brick models of for arch bridge were made and fundamental frequencies corresponding increasing axial forces were measured.

**Key words** arch bridge, dynamic analysis, natural frequency, stone structures

### 1. 서 론

지금까지 석조문화재에 관한 연구는 주로 사화적인 측면이나 형태 미학적인 측면에서 이루어져 왔으며 구조적 특성에 대한 연구는 미진한 상태였다. 문화재 관리방식에서도 보수·복원 위주의 방식이 주로 원형의 완전한 보존과는 거리가 먼 방법으로 이루어져 왔다. 그러나 문화재 보호에 대한 인식이 변하면서 원형보존에 대한 필요성이 대두되었다. 원형보존의 최대 방안은 현 상태를 유지하는 것이다. 문화재를 현 상태로

보존하기 위해서는 먼저 그 구조적 특성을 정확하게 파악하여야 할 것이다. 이때에 원형을 훼손하지 않고 그 구조적 특성을 파악하기 위해서는 비파괴 조사가 필수적이다. 그러나 이러한 목적으로 비파괴진단을 하기에는 많은 제약이 있다. 구조체의 동적 특성에 영향을 미치는 가장 큰 요인은 부재 강성이다. 균열이나 공동이 발생하여 구조체에 변화가 발생하면 동적 특성이 변화하게 된다. 또한 쌓기 방법이나 줄눈 처리, 재료의 마찰계수 등도 동적 특성에 영향을 미친다. 이러한 점을 고려하면서 고유진동수의 측정 결과를 이용하

Corresponding Author : 이성민(safecity@kcqr.co.kr)

원고접수일 : 2004년 1월 5일 게재승인일 : 2004년 2월 16일

면 문화재 자체의 동적특성을 파악할 수 있을 뿐 아니라 문화재의 축조특성 및 구조적 견고성 등을 역으로 추정할 수 있다.

문화재는 구조형식에 따라 세 가지로 분류할 수 있다. 첫째는 축력을 받는 홍예형 구조물이다. 둘째는 외부의 벽석과 내부의 적심석이 상호간에 맞물릴 수 있도록 축조하는 석축형식의 구조물이다. 끝으로 다듬은 석재를 적층식으로 쌓아 올린 탑형 구조물이다. 이러한 석조구조물들의 동적특성은 석재사이 접합면의 특성에 의해 크게 영향을 받는다. 또한 구조해석을 할 경우에도 석재사이 접합부의 강성을 고려하지 않으면 구조물의 거동을 제대로 파악할 수 없다.

그러나 아직까지 석조문화재에 대한 구조공학적인 연구는 저변이 확립되어 있지 않아 체계적이고 조직적인 연구로 이루어지지 못하고 있다. 지금까지 이성민 등은 석벽돌을 이용한 실험과 분석을 통하여 석재와 석재가 만나는 면의 동적특성 및 강성을 고유진동수 측정 결과로부터 추정하는 연구를 수행한 바 있으며, 진동실험을 통하여 석축형 문화재, 탑형 문화재, 홍예형 문화재의 동적 거동특성도 연구한 바 있다.

대표적 홍예형 구조물인 홍예교는 주요 구조부재인

홍예석이 Fig. 1과 같이 축응력을 받는 구조이다. 홍예형 구조물의 동적특성은 홍예석의 강성에 따라 영향을 받는 것으로 연구된 바 있다. 본 연구는 축력을 받는 홍예형 구조물의 동적특성을 파악하기 위한 기초연구로 수행되었으며 이를 위해 만능시험기를 이용하여 석벽돌 적층모델에 축력을 가하면서 축응력의 증가에 따른 고유진동수 및 동적 거동의 변화를 관찰하였다.

## 2. 석재의 마찰과 동적특성

### 2.1 들기(Asperity)

#### (1) 접촉면과 asperity

석재의 실제 접합부는 평면으로부터 돌출된 일부분에서만 접촉하게 된다. 이렇게 돌출된 부분을 asperity라 하고, 접촉되는 부분의 합을 실 접촉면적(real area of contact)  $A_r$ 라고 하는데, 마찰에 관련이 되는 면적은 투영 또는 기하학적 접합면적  $A_a$ 가 아니고  $A_r$ 이다. 실 접촉면적  $A_r$ 는 마찰의 특성뿐만 아니라 동적특성에도 큰 영향을 미친다(Fig. 2).

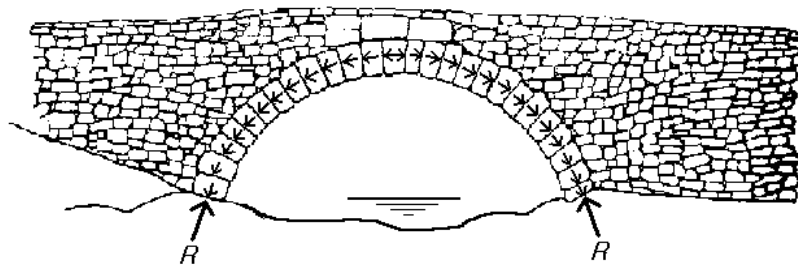


Fig. 1 홍예교의 구조개념도(선암사 하승선교)

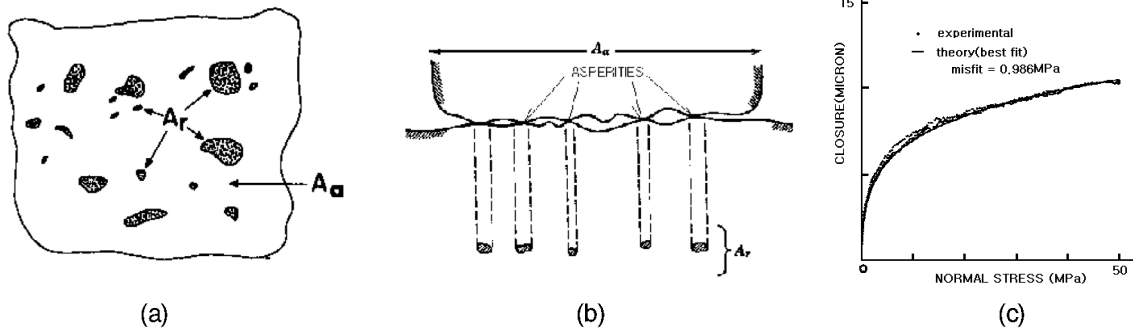


Fig. 2 석재 표면의 들기(asperity)와 실접촉면 및 (c) 응력에 따른 두 석재 간 간격의 변화

(2) 응력에 따른 간격수축(closure)

Brown과 Scholz는 두 거친 면에 대해서 수직하중에 의한 응력  $\sigma_n$ 에 의한 표면 틈새의 간격 수축(closure)  $\delta$ 를 다음 식으로 표현하였다.

$$\delta = B + D \log \sigma_n \quad (1)$$

여기서 B와 D는 탄성계수와 표면의 형태에 따른 상수이다. Fig. 2는 실험결과로써 식(1)의 적합성을 증명해 주고 있다. 처음 하중을 가했을 때는 얼마간의 영구변형이 발생하는데, 이는 asperity 돌기부의 취성파괴 및 소성흐름(plastic flow) 때문이다. 몇 번의 재하를 반복하면 closure는 완전히 회복되는 단계에 이르고, 접촉면은 탄성적으로 된다.

(3) 응력에 따른 접촉면적의 변화

암석간 새로운 접촉면 사이의 전단강도는 시간(=t)이 증가함에 따라 대략  $\log t$ 의 비율로 증가하는데 이는 asperity 선단의 소성변형 때문이다. 이러한 소성변형은 두 asperity 사이의 접촉면적을 증가시키고 동시에 두 조면(rough face) 사이의 틈이 줄어들어 인하여 새로운 접촉면이 형성되도록 한다. 응력에 따른 접촉면적은 석재의 경도에 따라 차이가 있다. Fig. 3은 사암, 석회암과 석회암, 사암과 석회암의 응력에 따른 실접촉면의 변화를 보여주고 있다.

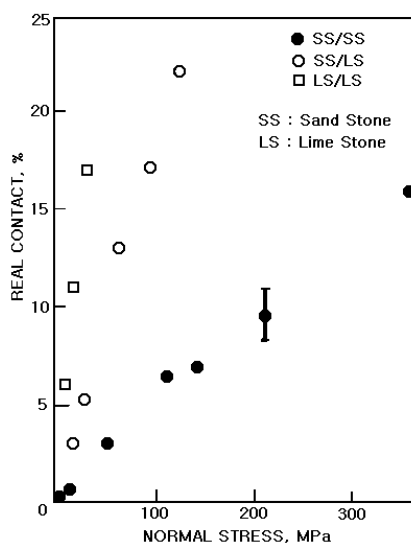


Fig. 3 응력과 접촉면적의 변화

3. 축력을 받는 양단 보의 고유진동수

양단이 고정인 세장한 보에 축력이 작용하지 않는 상태일때 보의 횡방향 휨 고유진동수  $F_i(P=0)$ 은 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$F_i(P=0) = (\lambda_i/2\pi L^2)(EIg/\rho)^{1/2} \text{ (Hz)} \quad (2)$$

여기서,  $i$  = 진동모드 수 (=1, 2, 3, ...)

$\lambda_i$  = 계수로서,

$\lambda_1 = 22.373, \lambda_2 = 61.673, \lambda_3 = 120.90$

$L$  = 보의 경간 (Span)

$E$  = 재료의 Young 탄성계수

$I$  = 보의 중립축에 대한 단면 이차모멘트

$\rho$  = 보의 단위 길이당 중량

$g$  = 중력가속도

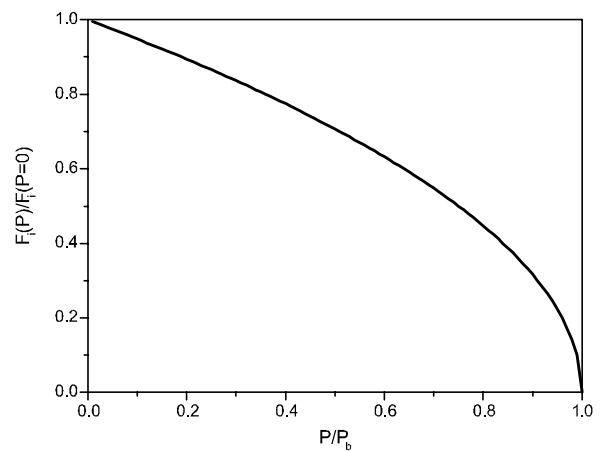


Fig. 4 양단 고정보의 축하중에 따른 고유진동수

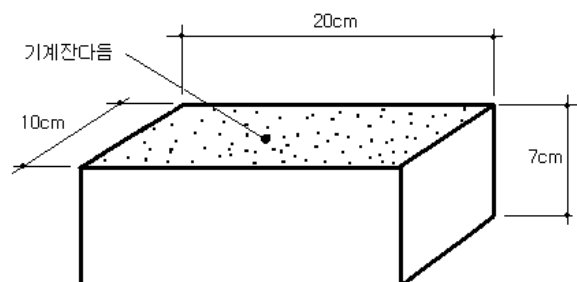


Fig. 5 석벽돌 시료의 제원

축력을 받는 연속체 모델의 고유진동수  $F_i(P)$ 는 다음과 같다.

$$F_i(P) = F_i(P=0)[1 + (P/P_b)(\lambda_1/\lambda_i)]^{1/2} \quad (3)$$

여기서,  $P$  = 축방향력의 크기로 인장일 경우 양의 부호이고, 압축일 경우 음의 부호임

$P_b$  = 탄성임계하중으로 양단고정일 경우

$$P_b = 4\pi^2 EI/L^2$$

상기 식으로부터 인장력은 고유진동수를 증가시키고 압축력일 경우 그 반대로 됨을 알 수 있다. 본 실험에서는 압축력을 가한 상태에서 고유진동수가 점차 증가 현상을 보였는데 최대 가력 하중이 10ton이었으므로 식(3)에 따른 축하중에 따른 고유진동수의 감소는 무시해도 될 것이다. 즉, 다른 요인으로 진동수가 증가한 것으로 추정된다.

#### 4. 시험체 제작 및 시험 방법

석벽돌은 10 cm(마구리) × 20 cm(길이) × 7 cm(높이)로서 익산 지역에서 생산되는 화강암으로 제작하였다. 익산 석의 비중은 2.6 ton/m<sup>3</sup>, P파 속도는 3,893 m/sec, 압축강도는 1,510 kg/cm<sup>2</sup>이다. P파 속도로부터 추정된 Young 탄성 계수는 3.464×10<sup>5</sup> kg/cm<sup>2</sup>이므로, 화강암의 프와송비를 0.23으로 가정할 때 전단탄성계수는 1.408×10<sup>5</sup> kg/cm<sup>2</sup>가 된다. 마감재의 거칠기 정도에 따른 고유진동수 변화를 알아 보기위해 석벽돌의 마감재를 톱꺼기, 버너마감, 기계잔다듬의 세 가지 종류로 하여 제작하였다. 거칠기 정도의 순서로 보면 톱꺼기 < 버너마감 < 기계잔다듬이다.

실험방법은 석벽돌 9장을 100톤급 디지털 만능시험기에 Fig. 7과 같이 포개어 얹어 놓고 지속적으로 하중을 증가시켜가면서 고유진동수를 측정하는 방법이

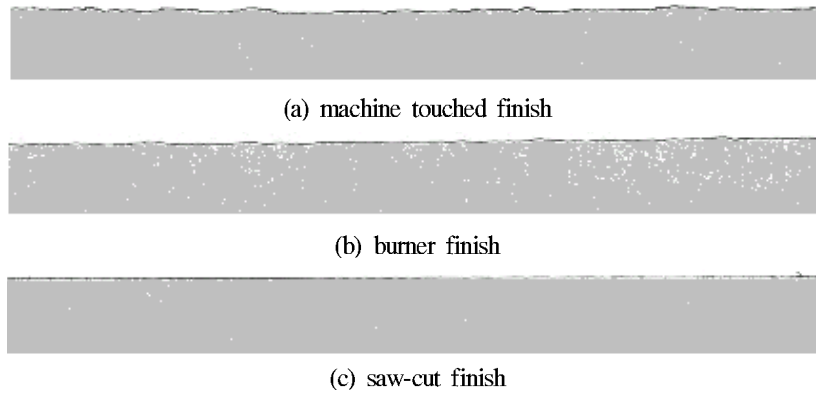


Fig. 6 석벽돌 표면의 Profile

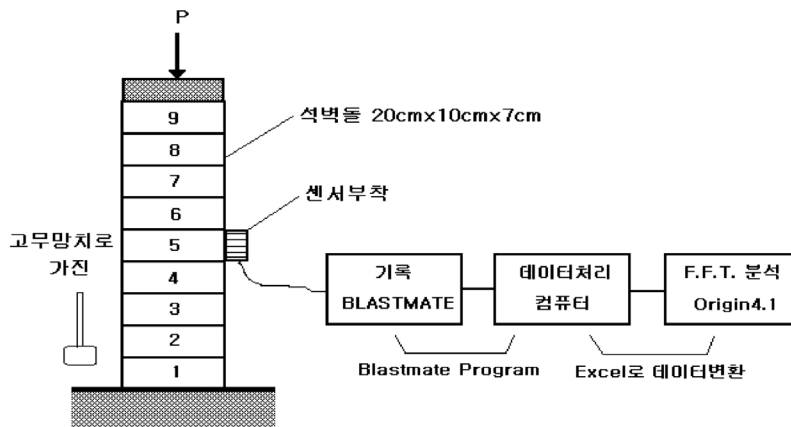
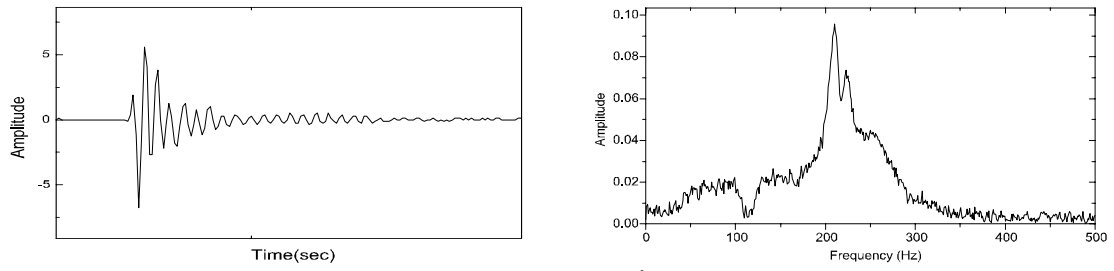
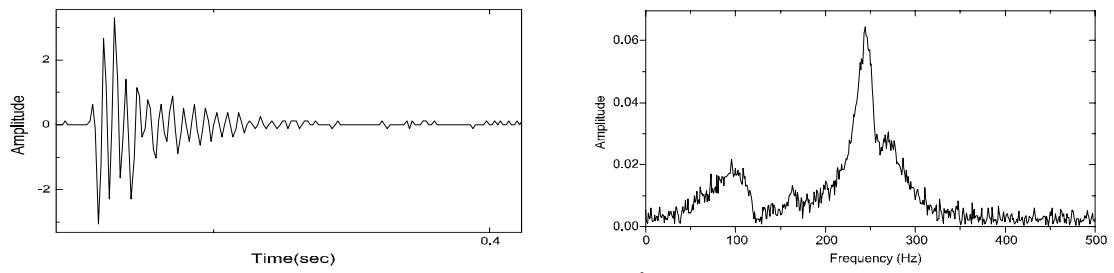


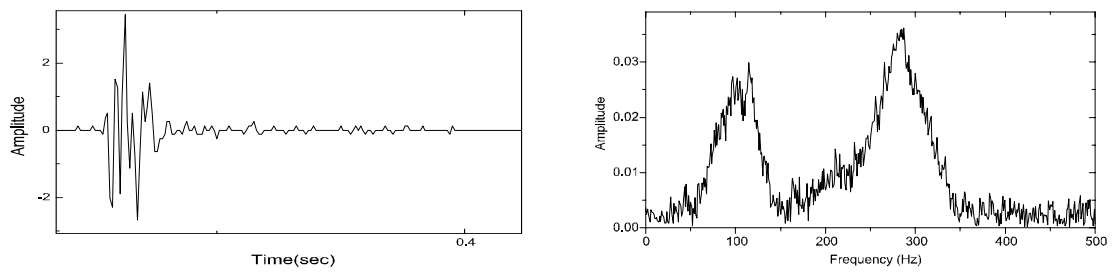
Fig. 7 실험 개념도



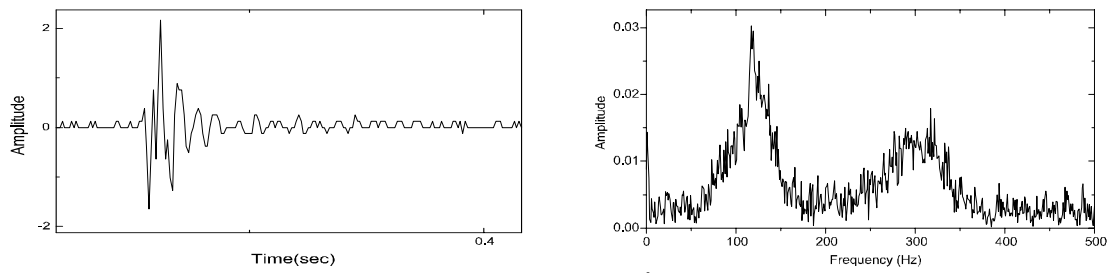
(a)  $\sigma = 5 \text{ kg/cm}^2$



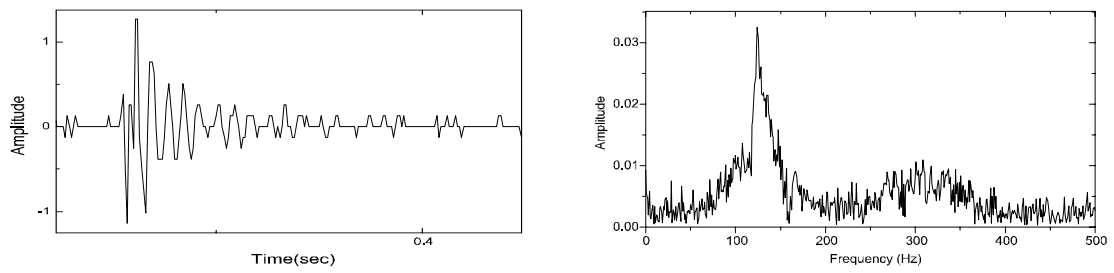
(b)  $\sigma = 9 \text{ kg/cm}^2$



(c)  $\sigma = 16 \text{ kg/cm}^2$



(d)  $\sigma = 22 \text{ kg/cm}^2$



(e)  $\sigma = 29 \text{ kg/cm}^2$

Fig. 8 축하중 증가에 따른 석벽돌 적층모형의 1차 고유진동수 변화

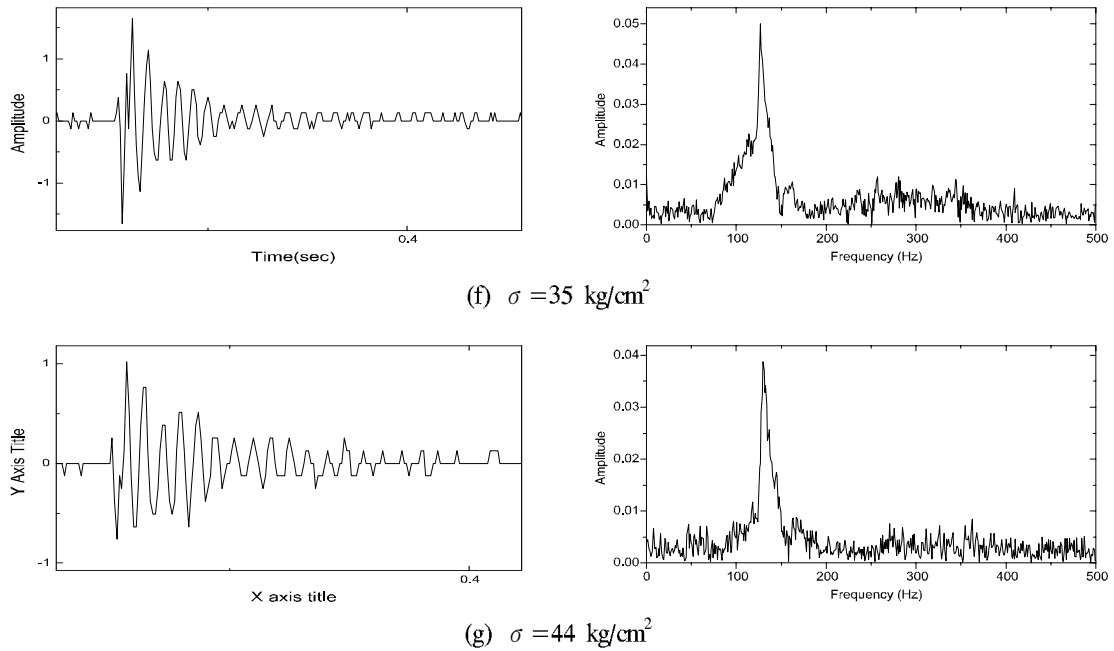


Fig. 8 Continued.

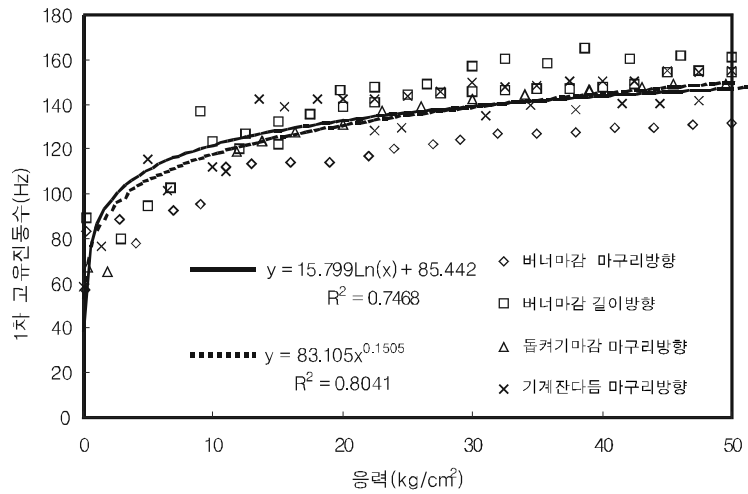


Fig. 9 축응력-1차 고유진동수 측정결과(종합)

다. 가진 축력이 약 500~600 kg(응력으로 환산하면 2.5~3.5 kg/cm<sup>2</sup>) 증가할 때마다 고무망치를 사용하여 시험체에 충격을 준 다음 진동수 측정을 실시하였다.

### 5. 실험결과

Fig. 8은 버너마감을 한 석벽돌의 마구리방향 진동

측정결과를 보여주고 있다. 본 논문에는 삽입 시키지 않았으나 다른 마감의 벽돌이나 다른 방향의 진동 측정결과도 Fig. 8과 유사하게 나타났다. 그림을 보면 우세진동수가 두개가 형성되는데 응력이 점차 증가하면서 우측의 고진동수 성분은 진동수가 점점 높아지면서 진폭은 감소한다. 반면 좌측 저진동수 성분은 저응력 상태에서는 거의 형성되지 않았다가 응력이 증가함에 따라 점차 뚜렷하게 형성되면서 진폭도 증가한다.

이러한 결과는 석벽돌의 진동성분과 표면 돌기(asperity)의 영향 때문인 것으로 판단된다. 축응력이 거의 없는 상태에서는 단위 부재의 진동 영향이 진동계를 지배하는데, 위아래 벽돌과 접하고 있는 석벽돌 표면의 돌기(asperity)가 소성 변형되면서 점차 지점 상태가 연속체로 변하는 과정에서, 날개 부재의 지점 고정도가 증가함에 따라 고유진동수가 높아지는 것으로 생각된다. 반면 응력이 증가함에 따라 각 석벽돌의 돌기부분이 소성화되면서 석벽돌 적층모델 전체가 하나의 연속체로 거동을 하기 때문에 이러한 단위 석벽돌의 진동성분은 점차 소멸 되고 계 전체의 진동이 우세해진다. 따라서 Fig. 8의 진동수 스펙트럼에서 좌측 저진동수 성분이 계 전체의 고유진동수인 것으로 판단할 수 있다.

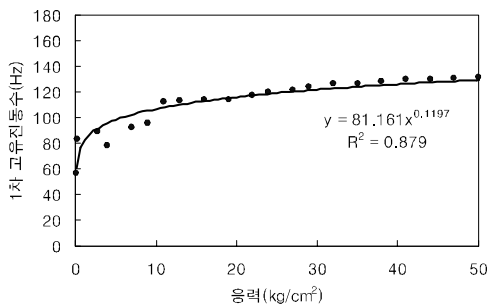
석벽돌 적층모델의 1차 고유진동수는 응력이 증가함에 따라 점차 증가한다. Fig. 9는 측정된 응력-1차 고유진동수 관계를 종합하여 하나의 도표로 나타낸 것이다. 응력-1차 고유진동수의 추세선은 식(4)와 같이

로그함수 또는 누승함수의 형태로 나타내는 것이 적합할 것으로 생각된다. 특히 누승함수가 로그함수에 비해 더 접합한 것으로 판단이 된다. 그러나 로그함수의 형태는 식(1)과 같이 응력-틈새간격의 관계식과 같은 형태가 됨을 염두에 두고 향후 연구시 참고하여야 할 것이다. Fig. 10은 마감의 종류 및 진동방향에 따라 경우별로 응력-1차 고유진동수 관계를 표현한 것이다. 모든 경우를 로그함수 또는 누승함수의 형태로 표현할 수 있는데, 본 논문에서는 식(4b)와 같은 누승함수를 택하였다.

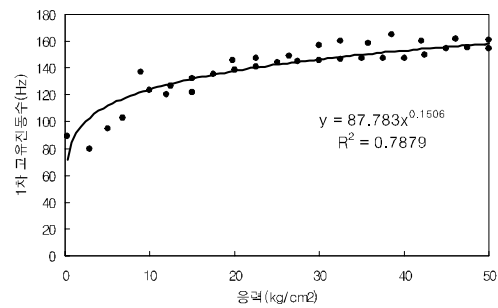
$$f_1 = A + B \log \sigma \tag{4a}$$

$$f_1 = A \sigma^B \tag{4b}$$

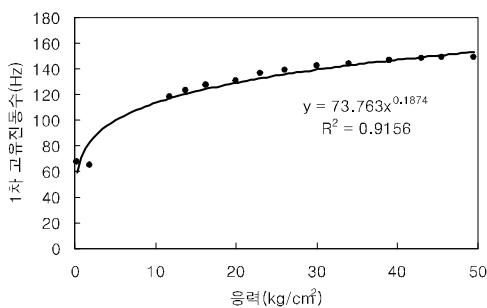
석벽돌 적층모델이 전단진동이나 스웨이잉(swaying) 진동을 한다면 진동계의 폭에 관계없이 진동수는 일정해야 한다. 버너마감 석벽돌을 이용한 시험 결과를 보



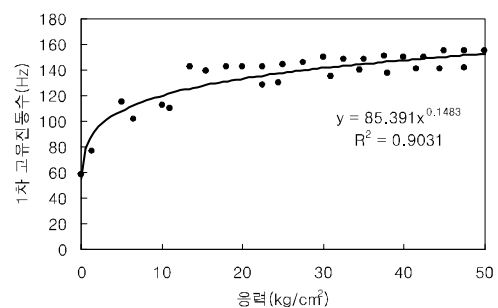
(a) 버너마감 길이방향 진동



(b) 버너마감 마구리방향 진동



(c) 톱겨기마감 마구리방향 진동



(d) 기계잔다듬 마구리방향 진동

Fig. 10 석벽돌 적층모델의 마감과 진동방향에 따른 1차 고유진동수

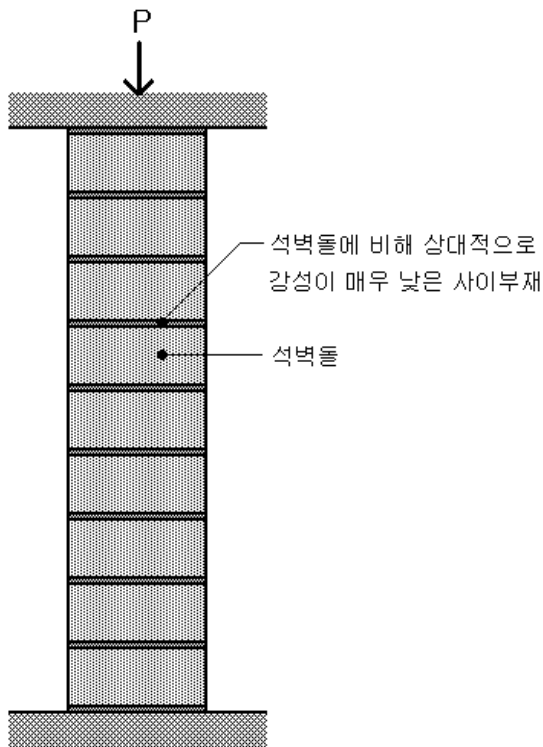


Fig. 11 모델의 이상화

면 마구리방향의 1차 고유진동수가 길이방향의 1차 고유진동수보다 높게 나타나는데 이로 미루어 볼 때 진동계의 진동성분에는 휨이나 로킹 성분이 포함된 것으로 판단할 수 있다.

### 6. 접측면의 강성 검토

석벽돌의 줄눈 부위는 석벽돌 자체에 비해 상대적으로 강성이 매우 낮기 때문에 Fig. 11과 같이 탄성 계수가 매우 낮은 끼움부재가 석벽돌 사이에 존재하는 것으로 가정할 수 있다. 이러한 끼움부재의 강성은 측정된 고유진동수를 이용하여 구할수 있다. 즉, 고유진동수와 축응력 간의 회귀함수식으로부터 함수값을 구한 다음 컴퓨터 프로그램을 이용하여 석벽돌 사이 끼움부재의 강성을 계산하는 것이다. 이번 연구에서는 컴퓨터 프로그램으로 MIDAS GENw Ver.4.3.2를 사용하였고, 높이 70 mm의 석벽돌 기둥 사이에는 탄성 계수가 매우 낮은 높이 2 mm의 가상 끼움 기둥이 교대로 존재하는 것으로 가정하였다. 컴퓨터 해석결과와 측정치가 일치할 때까지 trial & error 방법에 의

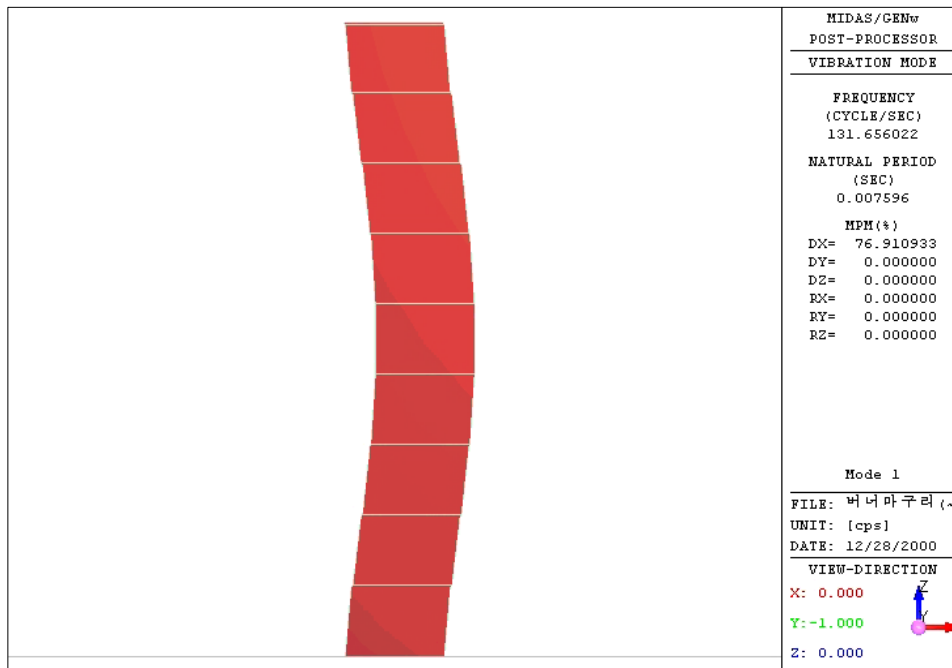


Fig. 12 컴퓨터 시뮬레이션 결과



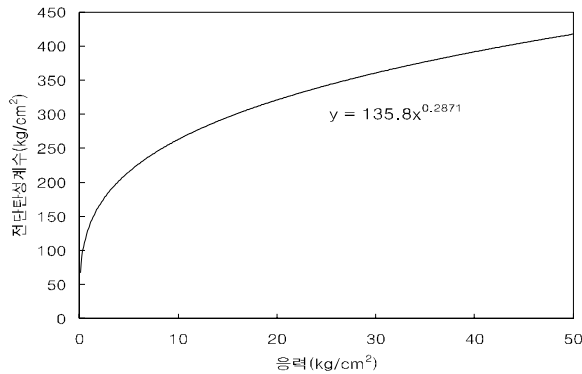


Fig. 13 끼움 기둥 부재의 축응력에 따른 전단탄성계수

해 끼움 기둥의 탄성계수를 변경해 가며 컴퓨터 모델링을 하였다. Fig. 12는 버너마감 마구리방향 진동측정결과를 이용하여 컴퓨터 해석을 실시한 결과이다.

Fig. 13은 버너마감 시험체의 마구리방향진동 측정결과(Fig. 10b) 자료를 이용, 앞에서 설명 방법에 의하여 접합부의 강성을 추정한 결과인데, 접합부의 탄성계수-축하중간의 관계역시 고유진동수-축하중의 관계와 유사한 누승함수의 형태로 나타났다. 이는 고유진동수 측정 결과치를 누승함수로 가정하여 회귀분석하였기 때문인데, 만약 로그함수로 가정하였다면 탄성계수 그래프도 로그함수 형태가 되어야 할 것이다. 이 곡선은 식(1) 및 Fig. 2 및 3을 참고할 때 축하중을 받는 두 거친면의 간격수축(closure)-축응력간 관계와 비슷한 형태를 보이고 있다.

## 7. 결론

축력을 받는 홍예형 구조물의 동적특성을 파악하기 위한 기초적 연구로서 석벽돌 적층모델에 축력을 가하면서 축응력의 증가에 따른 고유진동수 및 동적 거동의 변화를 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 석벽돌 적층모델에 축력을 증가시키면서 고유진동수의 변화를 관찰한 결과 우세진동수가 두개가 형성되었다. 이중 고진동수 성분은 날개 석벽돌의 진동성분이고 저진동수 성분은 진동계 전체의 1차 고유진동수인 것으로 판단이 된다.

(2) 저응력 상태에서는 날개 석벽돌의 진동이 우세하나, 응력이 증가함에 따라 석벽돌 표면사이의 돌기(asperity)가 소성 변형되면서 날개 석벽돌의 지점 고정도가 증가한다. 이에 따라 진동수는 증가하지만 계가 연속체로 변해감에 따라 점차 소멸한다.

(3) 석벽돌의 돌기가 소성 변형되면서 석벽돌 적층모델의 강성이 증가하고, 이에 따라 진동계의 1차 고유진동수도 증가하게 되는데 응력과 1차 고유진동수의 관계는  $f_1 = A + B \log \sigma$  또는  $f_1 = A \sigma^B$ 의 식으로 나타낼 수 있다.

(4) 석벽돌 적층모델이 전단진동이나 sway진동을 한다면 진동계의 폭에 관계없이 진동수가 일정해야 하지만 마구리방향과 길이방향의 진동수가 다른 것으로 보아 진동계의 진동성분에는 휨이나 로킹이 포함된 것으로 판단할 수 있다.

(5) 본 연구는 향후 축력을 받는 아치형 석조구조물의 동적특성을 연구하는 데에 도움이 될 것으로 기대된다. 또한 본 연구와 같이 석재와 석재가 만나는 면의 동적특성 및 강성을 고유진동수 측정을 통해 규명하면 석조문화재의 고유진동수, 감쇠율, 모드형상 등의 동적특성, 지진에 대한 안전성 예측 및 주변 진동환경으로부터 지동분석 등이 가능하여 석조문화재의 건정성 평가, 구조해석, 유지관리 등에 매우 효율적으로 활용될 것으로 판단된다.

## 참고문헌

손호웅, 이성민, ‘고밀도 레이저 측량, 지반조사 및 고유진동수 측정에 의한 첨성대 구조물의 안전성 평가’, 한국구조물진단학회 가을학술발표논문집, 제7권 2호(통권 12집), 2003.

이성민, ‘석조문화재의 동적특성에 관한 연구’, 전남대학교 박사학위 논문, 2002.

이성민, 강신복, 박현구, 이수곤, ‘석벽돌의 거칠기와 석조구조물의 동적특성간의 관계’, 한국구조물진단학회 봄학술발표 논문집, 제5권 1호(통권 7집), 2001.

이성민, 김광재, 손호웅, 이수곤, ‘석탑문화재의 고유진동수를 이용한 구조해석 방법 연구’, 한국구조물진단학회 가을학술발표 논문집, 제5권 2호(통권 8집), 2001.

이성민, 김광재, 이수곤, 석벽돌 적층모델의 고유진동수와 접합부의 강성, ‘한국구조물진단학회 봄학술발표논문집, 제6권 1호(통권 9집), 2002.

이성민, 박현구, 김선우, 이수곤, ‘석벽돌의 쌓기 단수에 따른

- 동적특성의 변화에 관한 연구', 대한건축학회 논문집, 제17권 6호(통권 제152호), 2001.
- 이성민, 박현규, 서만철, 이수곤, '우리나라 홍예교량의 동적특성에 관한 연구', 대한건축학회논문집, 제17권 9호(통권 제155호), 2001.
- 이성민, 서만철, 권경원, 백용진, 이수곤, '충주미륵리사지내 석굴 석축의 구조', 문화재과학기술, Vol. 1, No. 1, pp97-111, 2002.
- 이성민, 이중호, 박현규, 이수곤, '석축의 고유진동수에 관한 연구 (낙안읍성을 대상으로 하여) 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집, 제19권 2호(통권 38집), 1999.
- G. Brown & A. J. Pretlove, 'Changes in the Dynamic Characteristic of a Masonry Arch Bridge Subjected to Monotonic Loading to Failure', Arch Bridges, Thomas Telford, London, 1995.
- Chris Marone & S. J. Cox, 'Scaling of Rock Friction Constitutive Parameters; The Effects of Surface Roughness and Cumulative Offset on Friction of Gabbro', Pure and Appl. Geophys., Vol.143, No.1/2/3, 1994.
- Christopher H. Scholz, 'The Mechanics of Earthquakes and Faulting', Cambridge University Press, pp88~89, 1990.
- Daniel Schiff, 'Dynamics Analysis and Failure Modes of Simple Structures', John Wiley & Sons,
- James H. Dieterich and Brian D. Kilgore, 'Direct Observation of Frictional Contact; New Insight for State-dependent Properties', Pure and Appl. Geophys., Vol.147, No. 1/2/3, 1994.
- Roca, D. Oliveira, P. Lourenço, I. Carol, 'Mechanical Responce of Dry Joint Masonry', Studies in Ancient Structures, Proceedings of 2nd International Congress, Vol.2, July, 2001. Turkey.
-