

# 고유진동수를 이용한 정림사지 5층석탑의 구조모델링

## Computational Modelling Method by Using the Natural Frequencies of Five-Story Stone Pagoda in Chongnimsa Site

이 성 민\*  
Lee, Sung-Min

이 기 학\*\*  
Lee, Ki-Hak

박 선 우\*\*\*  
Park, Sun-Woo

서 만 철\*\*\*\*  
Suh, Man-Chul

이 찬 회\*\*\*\*\*  
Lee, Chan-Hee

### 요 약

요즘은 비선형해석과 유한요소해석이 가능하며 또 불연속면을 모델링을 통해 구현할 수 있도록 개발된 컴퓨터 프로그램이 개발되어 사용되고 있다. 그러나 석조구조물의 물성을 파악하지 않고서는 이러한 프로그램을 이용하여 실제거동을 예측하기가 매우 곤란하다. 이를 위해 석재와 석재의 접촉부의 강성의 변수를 사이부재를 가정하는 방식으로 수행하였으며, 실제 고유진동수를 측정하고, 석탑을 다자유도계 구조물로 가정하여 고유치해석을 한 다음 이론상 고유진동수와 실제고유진동수가 일치하도록 접촉면의 강성을 조절하는 방식으로 모델링을 수행하였다. 연구를 위해 정림사지 오층석탑을 대상으로 구조모델링을 실시하였다. 본 연구결과는 석탑형 문화재에 대해 범용 프로그램을 이용한 구조모델링을 가능하도록 함으로써 주요 석탑형 문화재의 연직하중 뿐 아니라 진동이나 횡력에 대한 구조안전성 평가를 하는 과정에서도 유용할 것으로 기대된다.

### Abstract

Multi-layered stone masonry monuments, such as stone pagoda can be modeled as a multi-degrees of freedom system. The dynamic behavior of these structures are mainly influenced by contour condition of contacting surface of stones. In this case the mass of the system can be easily estimated, mean while the estimation of stiffness at junction is not simple. In this paper a method for estimating the spring constant at the contacting surface of stone in proposed. This paper describes a method of computational modelling technique for structural analysis of stone pagodas using measurement of natural frequency and eigenvalue analysis. For this purpose Five story stone pagoda in Chongnimsa site was selected as a model.

키워드 : 석탑, 석조, 문화재, 고유진동수, 동적특성, 고유치해석, 불연속면, 접촉면

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

## 1. 서 론

석탑의 구조안전성은 크게 정적안전성과 동적안전성으로 나누어 생각할 수 있다. 정적안전성은 석재의 연직방향 하중, 석재의 강도 및 구조형식이 중요한 요소가 되며, 여기에 석재와 석재사이의 상하간 접촉면의 상태도 매우 큰 변수가 된다<sup>3)</sup>. 동적인

전성은 지진, 바람 등의 영향에 대한 안전성을 의미한다. 석탑이나 부도와 같이 주로 치석된 석재를 다층으로 쌓아 올려 구축한 구조물에서는 석재와 석재 사이의 마찰력, 가력 속도, 전단강성 등이 그 동적특성에 가장 큰 영향을 미친다<sup>2,9)</sup>.

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<sup>7,8,13)</sup>. 그러나 불연속면의 전단강성과 같은 석조구조물의 물성을 파악하지 않고서는 이러한 프로그램을 이용하여 실제거동을 예측하기란 매우 곤란하다. 또 석탑을 컴퓨터 모델링을

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

E-mail : safecity@hanmail.net

\*\* 정회원 · 세종대학교 교수, 공학박사

\*\*\* 정회원 · 한국예술종합학교 미술원 교수, 공학박사

\*\*\*\* 공주대학교 지질환경과학과 교수, 공학박사

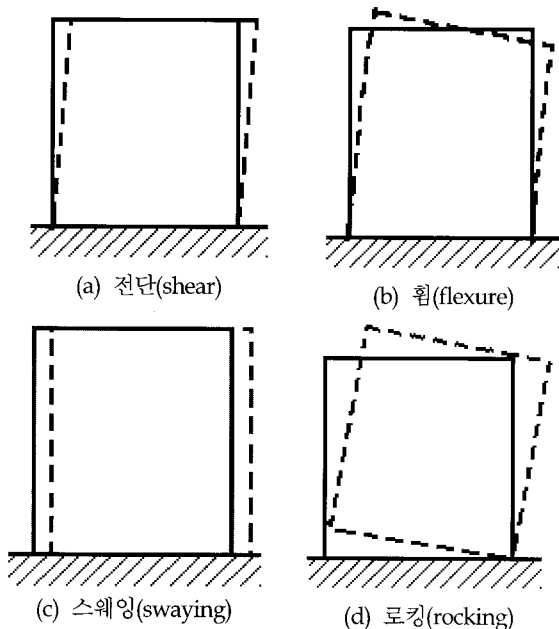
\*\*\*\*\* 공주대학교 문화재보존과학과 교수, 공학박사

하기 위해 ANSYS와 같은 비선형 유한요소해석 프로그램을 사용하면 좋겠지만 대개는 프로그램을 다루기가 어렵고 고가이며 큰 용량이 소요되는 등 여러 가지 현실적인 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 범용 프로그램을 사용해서 실무자가 간편하게 석탑구조물을 구조 해석을 할 수 있는 방안을 연구하였다. 석탑구조물을 모델링할 때 석재와 석재 사이 불연속면의 물성을 어떻게 정의하느냐가 가장 큰 변수가 된다. 본 연구에서는 석재와 석재 간 불연속면의 강성 변수를 마찰계수로 하지 않고 가상의 사이부재로 가정하였으며, 실제 고유진동수를 측정하고, 석탑을 다자유도계 구조물로 가정하여 고유치해석을 한 다음 이론상 고유진동수와 실제 고유진동수가 일치하도록 불연속면의 강성을 조절하는 방식으로 모델링을 수행하였다. 연구를 위해 국보 9호인 정림사지 5층석탑을 모델로 하였다.

## 2. 적층식 석구조물의 동적 거동 특성

### 2.1 적층식 구조물의 진동 유형

석벽돌 적층모델을 이용한 실험으로부터 석벽돌 접촉면의 강성 변화를 연구한 바로는 석벽돌 적층모델의 동적거동에 있어서는 주로 스웨이진동과 로킹진동의 영향을 받는 것으로 판단되었다<sup>2,5)</sup>.

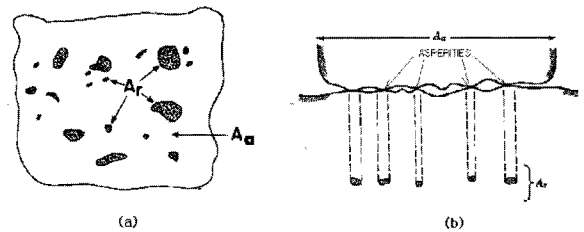


〈그림 1〉 석재의 진동 유형

### 2.2 불연속면의 구조적 특성

석재의 접합부는 실제로 평면으로부터 돌출된 일부분만 접촉하게 된다. 이렇게 돌출된 부분을 돌기(asperity)라 하고, 접촉되는 부분의 합을 실접촉면  $A_r$  이라고 하는데, 투영 또는 기하학적 접합면  $A_a$  보다는 매우 적다. 실접촉면  $A_r$  는 마찰의 특성을 반영할 뿐 아니라 동적특성에도 큰 영향을 미친다.

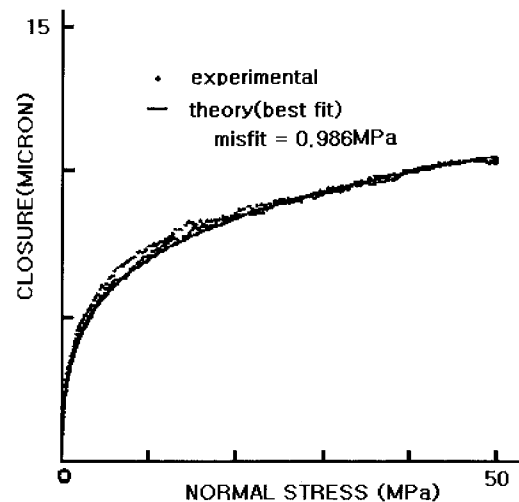
Brown과 Scholz는 두 거친 면에 대해서 수직하중에 의한 응력  $\sigma_n$  에 따른 표면 틈새의 간격 수축(closure)  $\delta$  를 다음 식으로 표현하였다<sup>9)</sup>.



〈그림 2〉 석재 표면의 돌기(asperity)와 실접촉면

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

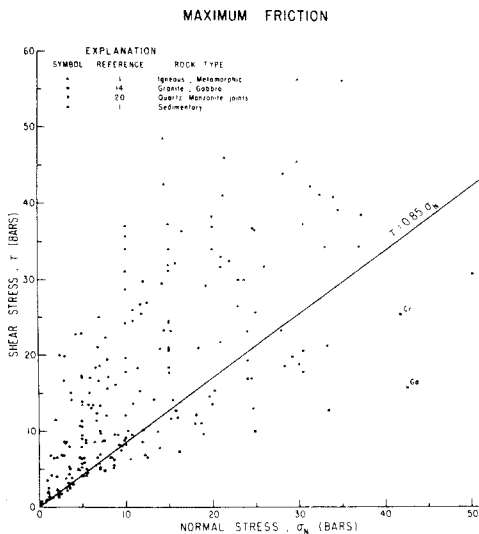
여기서 B와 D는 탄성계수와 표면의 형태에 따른 상수이다. <그림 3>은 실험결과로써 식(1)을 증명해 보여주고 있다. 처음 하중을 가했을 때는 얼마간의 영구변형이 발생하는데, 이는 돌기 단부의 취성과 파괴



〈그림 3〉 축력을 받는 두 석재 접촉면의 간격

및 소성흐름(plastic flow) 때문이다. 대리석과 같은 연성물질은 영구변형이 더욱 현저하며 소성흐름으로 인한 돌기의 눌림(flattening)이 관찰된다<sup>11)</sup>.

또한 응력은 마찰력에도 매우 밀접한 영향을 주는데, <그림 4>를 통해 볼 때 낮은 응력에서는 응력과 최대마찰력의 관계가 선형이지만 분포상태는 매우 산만한 것을 알 수 있다. 이러한 분포상태는 대개 석재 표면의 거칠기에 기인한 것인데, 이때의 마찰계수는 석재의 종류와 표면상태에 따라 많은 차이를 보여 0.2부터 2사이의 범위가 된다. 반면 높은 응력 하에서는 암석의 종류, 표면의 거칠기 등에 거의 영향을 받지 않는다<sup>9,14)</sup>.



<그림 4> 저응력상태에서 응력과 마찰력

### 2.3 불연속면의 전단강성

석축형구조물은 성돌의 불규칙성이 크고 그 내부가 적심석 또는 토사로 뒷채움 되어 있기 때문에 연속계 모델로 해석을 하는 것이 바람직한 반면 석탑형 구조물은 불연속 다질접계 모델로 가정을 하여 동적해석을 할 수 있다<sup>4)</sup>. 이 경우 석조 부재의 질량은 쉽게 파악할 수 있으나, 석재 접촉면에서의 전단강성은 판단하기가 곤란하다. 따라서 전단강성을 파악하기 위한 연구가 필요하다.

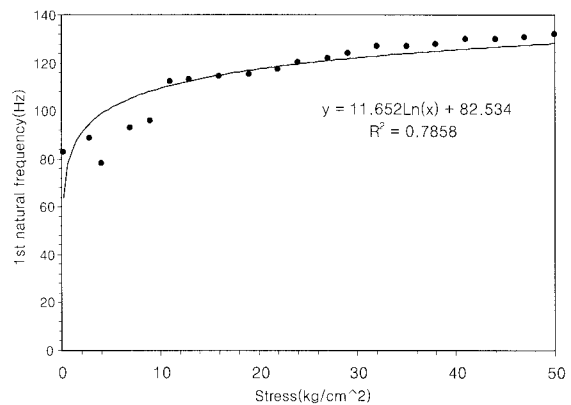
기존에 수행된 석조구조물 모델링 연구에서는 주로 암석 불연속면의 응력과 전단강성에 대한 연구결과를 참고하여 전단강성을 가정하였는데, 이를 정리

하면 <표 1>과 같다<sup>6)</sup>. 그러나 이러한 수치는 대형토목구조물이나 암사면 해석 등을 염두에 둔 것이기 때문에 고응력 상태에서의 전단강성으로 볼 수 있다. 정립사지 5층석탑의 경우 최대 응력은 10tonf/m<sup>2</sup>에 불과하므로 이러한 수치를 그대로 적용하기는 곤란하며 단지 참고자료로 비교하여야 할 것이다.

<표 1> 연직응력에 따른 암 불연속면의 전단강성

연구자	연직응력 $\sigma_n$	전단강성 $K_s$
Karpuz etc.	$6.0 \times 10^2 \text{ tonf/m}^2$	$1.0 \times 10^5 \text{ tonf/m}^3$
	$1.5 \times 10^2 \text{ tonf/m}^2$	$3.0 \times 10^5 \text{ tonf/m}^3$
	$2.0 \times 10^2 \text{ tonf/m}^2$	$5.0 \times 10^5 \text{ tonf/m}^3$
Yoshinaka etc.	$6.0 \times 10^2 \text{ tonf/m}^2$	$5.0 \times 10^5 \text{ tonf/m}^3$
Esaki etc.	$1.0 \times 10^3 \text{ tonf/m}^2$	$1.2 \times 10^6 \text{ tonf/m}^3$
	$2.0 \times 10^3 \text{ tonf/m}^2$	$1.5 \times 10^6 \text{ tonf/m}^3$
정형식 등	$2.5 \times 10^2 \text{ tonf/m}^2$	$1.0 \times 10^5 \text{ tonf/m}^3$
	$4.5 \times 10^2 \text{ tonf/m}^2$	$1.5 \times 10^5 \text{ tonf/m}^3$
	$7.5 \times 10^2 \text{ tonf/m}^2$	$2.3 \times 10^5 \text{ tonf/m}^3$
	$1.0 \times 10^3 \text{ tonf/m}^2$	$6.0 \times 10^5 \text{ tonf/m}^3$

만면, 응력과 전단강성의 관계는 직선이 아닌 로그함수 형태가 되는 것으로 연구되었다. 석벽돌 적층모형에 축력을 가하면서 응력과 1차 고유진동수의 관계를 분석한 바에 의하면 <그림 5>와 같이 로그함수의 형태로 나타났다<sup>1)</sup>. 특히 석탑구조물은 저응력 상태이기 때문에 상황에 따라 전단강성이 크게 달라질 것으로 예상된다. 따라서 이러한 모든 상황들을 고려할 때 석탑구조물은 하부로 갈수록 석재 접촉면의 응력이 커지므로 접촉면의 강성이 증가할 것으로 판단되지만, 응력-강성간의 관계에 대



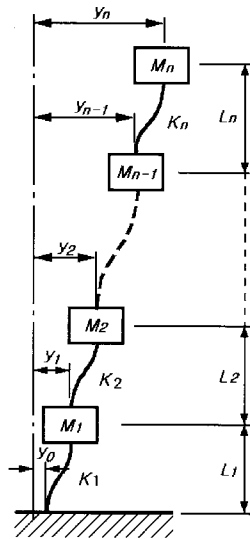
<그림 5> 석벽돌 적층모형의 응력-고유진동수 관계

한 연구가 아직은 부족하므로 본 연구에서는 응력-강성의 차이는 고려하지 않기로 한다.

### 3. 적층식 석구조물의 고유치해석

#### 3.1 적층식 석구조물의 운동방정식

석탑은 <그림 6>과 같이 다질점계 모델로 가정할 수 있다. 비감쇠 n자유도계 모델의 자유진동을 생각해 보면, 그 운동방정식은 식(2)와 같다.



<그림 6> 다자유도계 구조물

$$[M] \{\ddot{y}\} + [K] \{y\} = \{0\} \quad (2)$$

여기서 질량행렬  $[M]$ 과 강성행렬  $[K]$ 은 각각 식(3) 및 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

대상 모델의 고유진동수는 식(2)의 해를 구하는 과정에서 고유치해석을 함으로써 구할 수 있다. 그런데 대부분의 석탑구조물은 자유도계의 차수가 높기 때문에 이 다항식의 해를 구하기 위한 고유치 해석을 하기가 매우 복잡하다. 따라서 컴퓨터 프로그램을 사용하여야 한다.

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & M_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & M_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_1+K_2 & -K_2 & \cdots & 0 & 0 \\ -K_2 & K_2+K_3 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -K_3 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & 0 & \cdots & K_{n-1}+K_n & -K_n \\ 0 & 0 & \cdots & -K_n & K_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

#### 3.2 고유치해석과 불연속면의 스프링상수

석재 접촉부의 스프링상수는 응력 크기에 따라 변화하는 것으로 연구된 바 있으나<sup>4)</sup> 본 연구에서는 각 층 석재 접촉부의 스프링상수 및 각 층 석재의 질량밀도는 동일한 것으로 가정하고 진동성분으로는 전단진동만 고려한다. 단위 면적당 스프링상수를  $k$  (kg/cm<sup>2</sup>/cm)라고 하고, 단위 체적당 질량을  $m$  이라고 하면  $i$  층의 스프링상수  $K_i$  및 질량  $M_i$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_i = k \cdot A_i \text{ (kg/cm}^2\text{/cm)} \quad (5a)$$

$$M_i = m \cdot V_i \text{ (kg)} \quad (5b)$$

여기서  $A_i$ 는 각 층 석재 접촉면의 투영면적,  $V_i$ 는 각 층 석재의 부피이다.

고유치해석을 통해 계산된 1차 고유진동수  $f_1$ 과 측정된 고유진동수  $f_{act}$ 로부터 스프링상수를 구하는 식은 다음과 같다.

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = f_{act} \text{ (Hz)} \quad (6)$$

### 4. 정림사지 5층석탑의 동적특성

#### 4.1 정림사지 5층 석탑의 고유치해석

정림사지 5층석탑은 <그림 10>과 같은 29개의 질량을 갖는 다자유도계 구조체로 가정하며, <그림 6>과 같은 형태의 다자유도계 물체도로 표현할 수 있다. 여기서 탑신, 옥신, 옥개석과 같은 석재는 질량이 되고 각 석재 사이의 접촉면은 강성이 된다.

대상 석탑에 대해 식(5)를 이용하여 각 층별 질량과 강성을 계산한 결과는 <표 2>와 같다. 또한 질량 매트릭스와 강성매트릭스는 <표 2>의 수치를 식(3)과 식(4)에 대입함으로써 계산할 수 있다.

<표 2> 대상 진동계 모델의 층별 질량과 스프링상수

구분 \ 층별	1층	2층	3층	4층	5층	6층	7층	8층	9층	10층
$K_i$ ( $\times kkg/cm$ )	139129	107584	87025	87025	59049	59049	62500	78961	37249	32041
$M_i$ ( $\times mkg$ )	5431851	2620671	4081057	1551058	9314910	1204534	2436992	4369353	786409	1253791
구분 \ 층별	11층	12층	13층	14층	15층	16층	17층	18층	19층	20층
$K_i$ ( $\times kkg/cm$ )	32041	35721	53361	23716	18496	18496	22500	38025	14641	10816
$M_i$ ( $\times mkg$ )	477143	1301402	2932605	300802	570515	355845	1002851	1531358	164624	338741
구분 \ 층별	21층	22층	23층	24층	25층	26층	27층	28층	29층	
$K_i$ ( $\times kkg/cm$ )	10816	13456	25600	8464	5625	5625	6889	17161	5776	
$M_i$ ( $\times mkg$ )	142388	562471	1597344	111838	119413	77283	349264	843094	217128	

본 연구와 같이 자유도계의 차수가 높을 경우에는 이 다항식의 해를 구하기 위한 고유치 해석을 하기가 매우 복잡하다. 따라서 수학적 프로그램을 사용하는 것이 현실적인 방안이며 본 연구에서는 'Maple 8'을 사용하여 고유치 해석을 수행하였다. 본 프로그램은 Canada의 Waterloo Maple사가 제작한 것으로서 미분, 적분, 선형대수학 등 많은 수학적 문제들을 컴퓨터로 간편하게 해석할 수 있도록 만든 것이다<sup>12)</sup>. 이러한 자료를 가지고 3장에 기술된 과정에 의하여 고유치해석을 수행한 결과 계산된 고유진동수를 3차까지만 나타내면 다음과 같다.

$$\omega_1 = 0.013 \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7a)$$

$$\omega_2 = 0.085 \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7b)$$

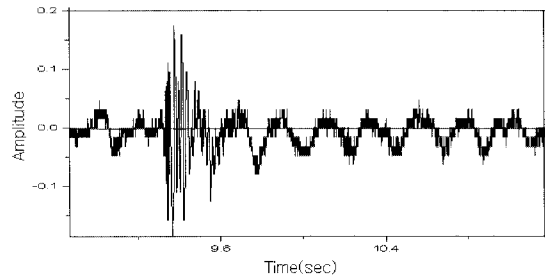
$$\omega_3 = 0.136 \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7c)$$

### 4.3 진동측정 및 분석

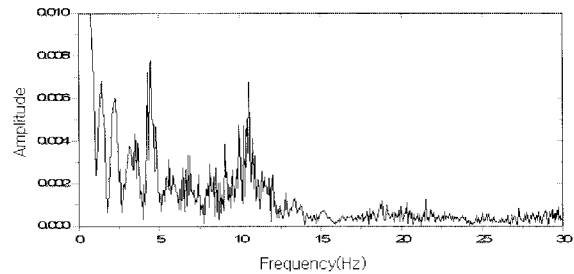
진동측정 장비로는 Blastmate III를 사용하였고, 센서는 상단 탑신석과 옥개석에 설치하였으며 고무망치로 가진을 하였다. 기록자료는 BlastWave Series III-Release: 3.5 및 Microsoft Excel 2000 프로그램을 이용하여 데이터 변환을 한 후 Origin 4.1 프로그램을 이용하여 시간이력분석과 F.F.T. 분석을 함으로써 고유진동수를 파악하였다.

측정결과 1차 고유진동수는 4.47Hz로 나타났다. <그림 7>과 <그림 8>은 측정된 시간이력곡선 및 진

동수 스펙트럼을 보여주고 있다.



<그림 7> 시간이력곡선



<그림 8> 진동수 스펙트럼

### 4.4 접촉면의 강성 산정

1차 고유진동수를 알면 식(6)을 이용하여 석재 접촉면의 단위면적당 스프링상수를 계산할 수 있다.

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{0.013}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = 4.47 \text{ (Hz)}$$

$$\therefore k = 9.89kg/cm/cm^2 \quad (8)$$

이렇게 계산된 단위 면적당 스프링상수에 접촉면의 투영면적을 곱하면 각 층의 스프링상수를 추정할 수 있다. 이때 스프링상수는 정지마찰상태에서의

값을 의미한다. 미끄럼이 발생하게 되면 그 속도 및 거리에 따라 마찰계수가 변하게 되기 때문이다<sup>10)</sup>. 또 앞에서 기술하였듯이 응력에 따라 접촉면의 강성이 변할 것으로 추정되지만 여기서는 강성의 평균치를 활용하기로 한다.

〈표 3〉 정림사지 5층석탑의 제원 데이터

구분	부재(cm)	높이(cm)	Li(cm)	b4(cm4)	b(cm)
1	370	39	20	29,454	13.1
2	330	24	32	96,006	17.6
3	295	47	36	111,160	18.3
4	310	17	32	81,416	16.9
5	240	158	88	1,129,419	32.6
6	245	21	90	1,208,649	33.2
7	260	33	27	35,123	13.7
8	390	41	37	114,192	18.4
9	190	21	31	31,682	13.3
10	180	39	30	24,700	12.5
11	190	14	27	17,024	11.4
12	230	28	21	9,445	9.9
13	345	37	33	52,299	15.1
14	155	13	25	10,580	10.1
15	135	31	22	5,623	8.7
16	150	16	24	6,853	9.1
17	195	29	23	7,317	9.2
18	300	28	29	25,132	12.6
19	120	11	20	3,100	7.5
20	105	32	22	3,069	7.4
21	115	11	22	3,069	7.4
22	160	25	18	2,241	6.9
23	260	35	30	19,734	11.9
24	90	13	24	3,341	7.6
25	75	21	17	789	5.3
26	80	11	16	658	5.1
27	130	24	18	1,054	5.7
28	220	20	22	5,217	8.5
29	28	50	35	7,070	9.2

## 5. 컴퓨터 모델링

### 5.1 컴퓨터 모델링 방법

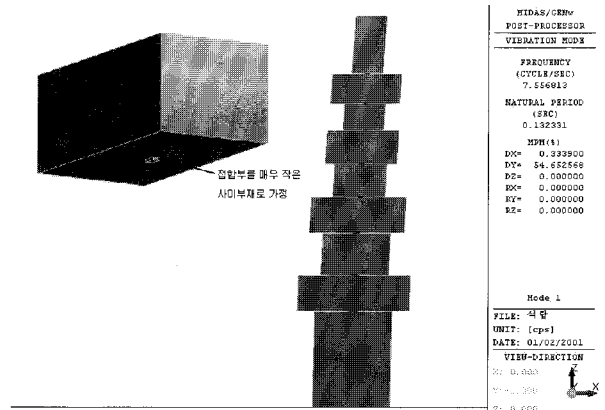
대상 석탑은 석재 사이가 두께 5mm의 사이부재로 연결된 것으로 가정하였다. 이는 석재의 돌기에 의한 간격이 약 5mm임을 의미한다.

식(7)에 의해 단위면적당 스프링상수를 구하고 여기에 석재의 접촉면적을 곱하면(〈표 4〉참고) 석재

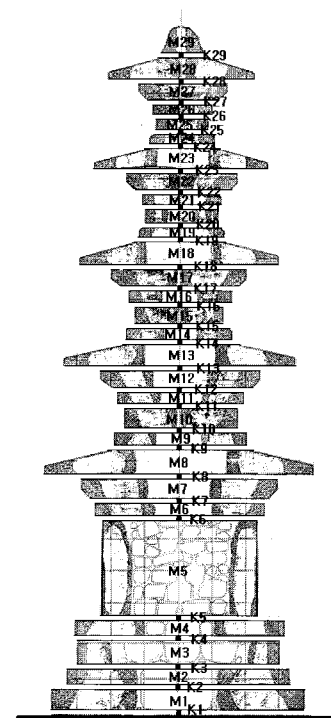
와 석재사이의 강성 K를 계산할 수 있다. 양단이 고정인 기둥의 강성 K는 식(9)와 같으며, 이 식을 이용하면 사이부재 단면의 크기를 구할 수 있다.

$$K_i = \frac{12EI_i}{L_i^3} \quad (9)$$

이때 사이부재는 정사각형으로, 석재의 비중은 2.6ton/m<sup>3</sup>으로 가정하였다. 화강암의 프와송비를 0.23, 휨탄성계수를 3.464×10<sup>5</sup>kg/cm<sup>2</sup>이라고 가정하면 전단탄성계수는 1.408×10<sup>5</sup>kg/cm<sup>2</sup>가 된다. 이렇



〈그림 9〉 불연속면을 사이부재로 가정한 상태

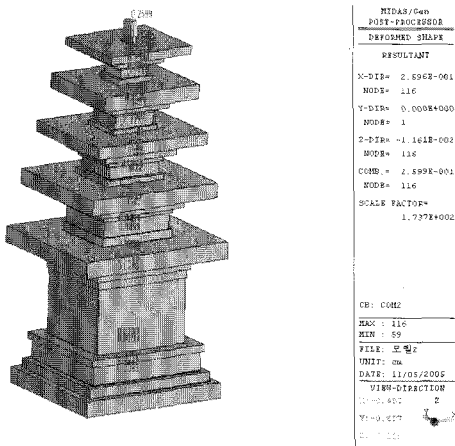


〈그림 10〉 정림사지 5층석탑의 동적구조 모델

계 계산된 사이부재의 단면과 이상화한 석탑을 컴퓨터에 입력하여 모델링을 하였으며 사이부재의 모양과 모델링 개념은 <그림 9>와 같다<sup>4)</sup>. 이때 프로그램으로는 Midas Gen Ver.6.9.0을 사용하였다.

### 5.2 모델링에 의한 해석결과

석탑 부재와 사이부재의 단면을 이상화시켜 컴퓨터 모델링 하였으며, 자중 및 풍하중만을 적용하여 검토한 결과, 기본풍속 25m/sec에 의한 횡방향 변위는 최대 2.66mm, 중력방향 변위는 1.16mm로 분석되어 구조안전에 영향을 줄 정도는 아닌 것으로 검토되었다. 또 자중 및 설계 지진하중을 적용하여 검토한 결과, 횡방향 변위는 최대 0.77mm, 중력방향 변위는 0.78mm로 분석되어 매우 미세한 변위가 발생하는 것으로 검토되었다. 이렇게 범용 프로그램을 이용해서 횡력에 대한 변위를 분석하면 바람, 지진 등에 대한 안정성을 예측할 수 있을 것으로 생각된다.



<그림 11> 풍하중 적용 시 Deformed Shape

석재 자중에 의한 연직방향 하중만을 적용하여 검토한 결과, 자중에 의한 변위는 중력방향으로 최대 0.12mm 정도로 극히 미세한 하였다. 석탑 석재의 실 접촉면은 투영접촉면보다 훨씬 면적인 적은 돌기(asperity)의 접촉면이며 이 실접촉면의 면적과 작용하는 외력의 크기에 따라 발생하는 응력이 달라진므로, 이 실접촉면이 구조적 특성에 절대적인 영향을 미친다. 모델링 결과 가장 하단부 실접촉면의 응력은 558kgf/cm<sup>2</sup>로서, 비파괴시험에 의한 추정압축강도 210kgf/cm<sup>2</sup>를 초과하며, 다른 여러 부재에서도

발생 응력이 추정압축강도를 초과하는 것으로 나타났다. 이렇게 실접촉면의 응력을 추정함으로써 구조물의 중력방향 하중에 대한 안전성을 평가할 수 있을 뿐 아니라 석재의 파손, 균열 등 손상의 원인을 추정하는 데에도 도움이 될 것으로 사료된다.

그러나 구조적 안전성을 판단하기 위해서는 다음과 같은 측면을 고려해야 할 것이다.

첫째, 초음파 조사에 의한 추정압축강도는 석재의 풍화된 표면에서 이루어졌으므로 석재 내부의 강도까지 대표할 것으로 단정하기는 곤란하다.

둘째, 대상 문화재는 천수백년이 흐르도록 원형이 유지되고 있다. 따라서 수치상 응력이 과하다고 해서 바로 구조적 불안정으로 판단하기는 곤란하다.

또한 고유진동수를 측정된 자료를 근거로 고유치 해석을 통해 산출한 정립사지 오층석탑 석재 접촉면의 평균 강성  $k=9.89\text{kgf/cm/cm}^2$ 으로서 무량사 오층석탑의 평균 강성  $k=26.7\text{kgf/cm/cm}^2$ 에 비해 상당히 낮음을 알 수 있었다. 이는 오랜 기간 원형을 유지해 온 정립사지 오층석탑과 1971년에 해체 복원한 무량사 오층석탑 간 구조적 견고성의 차이로 볼 수 있다. 다시 말해 오랜 세월을 지나오는 동안 정립사지 오층석탑의 짜임새가 많이 느슨해진 것으로 평가할 수 있다는 것이다.

본 연구결과를 실무에 적용하기 위해서는 저층 탑 신부 내부의 적심석 유무, 통석인지 분할된 석재인지 여부, 접합부에 사용된 철물의 영향 등 여러 변수에 따라 동적특성이 변할 수 있음을 염두에 두어야 하며, 따라서 앞으로 많은 실측과 실험을 통해 석탑형 문화재에 대한 기초 자료를 수집할 필요가 있을 것이다.

## 6. 결론

본 논문은 지금까지 불연속면의 강성 산정 문제와 컴퓨터 프로그램의 활용상 어려움의 이유로 구조모델링이 용이하지 않았던 우리나라 석탑구조물에 대해 범용 구조해석 프로그램을 이용하여 구조모델링을 하는 방법을 연구한 것이다. 구조모델링은 석탑문화재의 고유진동수를 측정하고 이 고유진동수를 이용하여 불연속면의 전단강성을 산정한 다음, 접촉면의 돌기(asperity)를 사이부재로 가정하여 연속체로 이상화함으로써 실제거동을 최대한 반영하

는 과정으로 이루어졌으며, 대상 구조물은 국보 9호 정림사지 5층석탑으로 하였다. 연구 결과 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 정림사지 5층석탑의 1차 고유진동수는 4.47Hz로 측정되었으며, 대상 구조물을 29 자유도계로 가정하여 고유치해석을 한 결과를 이용해서 구한 석재 접촉부의 전단강성은  $k=9.89\text{kg/cm/cm}^2$ 으로 계산되었다.

(2) 석재 접촉면의 돌기(asperity)를 연속체인 사이부재로 가정하여 컴퓨터 모델링을 한 결과 바람이나 지진 등 횡력에 대한 구조물의 횡변위를 추정할 수 있었으며, 이는 구조모델링을 통해 횡력에 대한 안정성을 추정할 수 있다는 의미가 될 것이다.

(3) 또한 컴퓨터 모델링을 통해 기단부 등 여러 부재의 연직하중에 대한 실접촉면의 응력을 추정할 수 있어, 연직하중에 대한 부재의 안전성 및 응력집중에 따른 부재의 균열 원인 등을 분석할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 앞으로 석탑문화재의 안전 진단을 할 때 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

(4) 본 연구 결과는 정림사지 5층석탑에 국한되는 것이 아니라 석탑과 같은 우리나라의 적층식 문화재 구조물에 널리 활용할 수 있을 것이다.

(5) 본 연구 결과가 실제 석탑구조물 해석에 반영되기 위해서는 매우 다양한 변수에 따라 동적특성이 변하는 석탑구조물에 대한 관련 자료가 확보되어야 할 것이며, 따라서 많은 실측과 실험을 통해 기초 자료를 수집할 필요가 있을 것이다.

### 참고문헌

1. 이성민, '축력을 받는 석벽돌 적층모형의 고유진동수', 한국구조물진단학회 2004년도 봄 학술발표논문집, pp. 231~236.
2. 이성민, '석조문화재의 동적특성에 관한 연구', 전남대학교 박사학위 논문, 2002.
3. 이성민, 김광재, 이수곤, '석벽돌 적층모형의 고유진동수와 접합부의 강성', 한국구조물진단학회 2002년도 봄 학술발표논문집, pp. 79~84.
4. 이성민, 손호웅, 이수곤, '석탑문화재의 강성과 고유진동수에 관한 연구', 한국구조물진단학회지, 제8권 제3호, 2004, pp. 263~265.
5. 이성민, 박현구, 김선우, 이수곤, '석벽돌의 쌓기 단수에 따른 동적특성 변화에 대한 연구', 대한건축학회 논문집, 제17권 제5호, 통권 152호, 2001, pp. 3~10.
6. 정형식 외, "고대 석조아치교량의 내하력에 관한 연구", 한국지반공학회지 제8권 제4호, 1992, pp. 31~39.
7. 홍석일, 김호수, '개별요소법을 이용한 조적식 석탑의 구조해석', 대한건축학회 논문집, 구조계, 제23권 제2호, 통권 220호, 2007, pp. 43~50.
8. A. Thavalingam et al, "Computational framework for discontinuous modelling of masonry arch bridges", Computers and Structures 79, 2001.
9. Christopher H. Scholz, 'The Mechanics of Earthquakes and Faulting', Cambridge University Press, 1990, pp. 88~89.
10. Dmitri Pisarenko & Peter Mora, 'Velocity Weakening in a Dynamical Model of Friction', Pure and Appl. Geophys., Vol.143, No.3, 1994, pp. 447~484
11. John M. Logan and L. W. Teufel, 'The Effect of Normal Stress on the Real Area of Contact During Frictional Sliding in Rocks', Pure and Appl. Geophys., Vol.124, No.3, 1986, pp. 471~485.
12. K. M. Heal, etc. 'Maple V Learning Guide', Waterloo Maple Inc., Canada, 1998.
13. N. Bićanić et al, "Discontinuous Modelling of Structural Masonry", Fifth World Congress on Computational Mechanics, July, 2002, Vienna, Austria, pp. 7~12.
14. Terry E. Tullis & John D. Weeks, 'Constitutive Behavior and Stability of Frictional Sliding of Granite', Pure and Appl. Geophys., Vol.124, No.3, Basel, 1986, p385.

접수일자 : 2008년 1월 10일

심사완료일자 : 2008년 9월 10일

게재확정일자 : 2008년 10월 10일