

쌍계사 오층석탑 실물 크기 모델의 동적 거동 시험

Dynamic Test of a Full Scale Model of Five-Story Stone Pagoda of Sang-Gye-Sa

김재관* 류혁**
Kim, Jae Kwan Ryu, Hyeuk

국문요약

1936년 7월 4일 경상남도 하동군 화개면을 진앙지로 하는 규모 5의 지진이 발생하였다. 이 지진으로 인하여 쌍계사 경내 건물과 문화재가 손상을 입었으며 금당 앞에 위치한 오층석탑의 탑두(중형석)가 추락하였다. 쌍계사 지진의 세기를 정량적으로 평가하기 위하여 철저한 고증을 거쳐서 실물크기의 석탑 모델을 제작하였다. 제작된 석탑모델을 진동대에 탑재하여 낮은 진폭에서 석탑모델의 동특성을 확인하는 예비시험과 지진파의 지진가속도를 증가시켜 가면서 석탑모델의 거동 특성을 규명하는 본 시험을 실시하였다. 석탑모델의 제작과정과 시험 절차에 관하여 상세히 기술하였고 진동대 시험 결과를 제시하고 그 결과에 관하여 논하였다.

주요어 : 진동대 시험, 석탑, 적층 구조물, 지진응답, 문화재, 축소모델

ABSTRACT

There occurred a moderate size earthquake of Magnitude 5 in Whagae-Myun, Hadong-Gun, Kyongsangnam-Do on July 4, 1936. It caused severe damage to the buildings and other structures in Sang-Gye-Sa, a Buddhist Temple. The top component of a five-story stone pagoda was tipped over and fell down to the ground during the earthquake. In order to have accurate and quantitative estimate of the peak acceleration level of that earthquake, a full-scale model was constructed through rigorous verification process. The completed model was mounted on a shaking table and subjected to the dynamic tests. Two kinds of tests were performed: exploratory test and fragility test. The exploratory test was done with low acceleration level. In the fragility test, the behavior of the model was carefully monitored while increasing the acceleration level. The construction details of the model are provided and test procedures are reported. Finally important test results are presented and their implications are discussed.

Key words : shaking table test, stone pagoda, piled multi-blocks, seismic response, cultural heritage, scale model

1. 서론

우리나라에서는 유사 이래 강한 지진이 여러 차례 발생하여 피해를 초래하였다는 사실이 조선왕조실록과 같은 역사서에 수록되어 있다.^{(1),(2)} 현재 내진설계를 위한 설계지진의 세기는 주로 역사기록에 나타나 있는 피해상황으로부터 추정된 지반운동의 세기나 또는 지진규모에 의거하여 확률론적으로 결정되고 있다.⁽³⁾ 그러나, 심각한 지진피해를 현재대가 직접 경험하지 못하였고 과거에 발생한 지진의 진앙지에서의 가속도 기록도 확보하지 못하여 현재 설정되어 적용되고 있는 지반운동의 세기에 대하여 일부 설계자들이나 연구자 나아가 정책 입안자들은 회의적인 견해를 갖기도 하였다. 이러한 회의적 견해는 나아가 우리나라에서 내진설계의 필요성에 의문을 제기하는 수준으로 발전하기도 하였다. 이러한 실정은 다르게 표현한다면 현재 우리나라의 지진세기의 평가에는 높은 불확실성이 존재한다는 것을 의미한다고 할 수 있을 것이다.

만약 과거의 지진피해상황을 재현할 수 있다면 그 피해를 일으킨 지반운동의 세기도 역으로 추정할 수 있을 것이다. 물론 여기에서도 불확실성은 있을 것이다. 그러나, 피해구조물을 고증을 통하여 충실하게 복원하여 여러 가지 종류의

지반운동에 대하여 취약도 시험을 수행한다면 지반운동의 세기와 피해수준과의 관계가 정량적으로 표현될 수 있을 것이고 동시에 신뢰성도 수치로 산출될 수 있을 것이다. 이러한 방향으로의 국내 최초의 연구는 서정문 등^{(4),(7)}이 실시한 전통 초가삼간 가옥 축소모델의 지진응답 특성 실험이 있다. 이 실험은 과거 신라시대에 경주에서 발생한 역사지진의 세기를 정량적으로 규명하려고 시도한 연구로서 그 가치가 매우 높다고 하겠다. 본 연구는 실제 피해구조물이 남아 있는 지진을 대상으로 하여 지반운동세기와 피해양상과의 관계를 모델 실험을 통하여 찾아내고 이에 근거하여 과거에 발생한 지진의 세기를 정량적으로 평가하고자 하는 노력의 일환이며, 서정문 등^{(4),(7)}이 수행한 연구와 동일한 성격의 연구로 분류될 수 있을 것이다.

1936년 7월 4일 경상남도 하동군 화개면을 진앙지로 하는 규모 5의 지진이 발생하였다. 이 지진은 지리산 지진 또는 쌍계사 지진으로 불리고 있다. 이 지진으로 인하여 화개면의 삼신리, 정금리, 용강리, 그리고, 쌍계사 일대에서는 산사태와 낙석이 발생하고, 도로가 붕괴되고, 민가가 완파되거나 또는 반파되는 피해가 초래되었으며 특히 쌍계사에 피해가 심하여 건물과 문화재가 손상을 입었다.⁽⁸⁾ 참고문헌⁽⁸⁾에 기록되어 있는 쌍계사 경내에서 발생한 지진피해를 요약하면 다음과 같다.

• 산문(금강문)이 북쪽으로 기울어져서 기와지붕이 파손되

* 정회원 · 서울대학교 토목공학과 교수(대표저자 : jkwankim@plaza.snu.ac.kr)

** 학생회원 · 서울대학교 토목공학과 박사과정

본 논문에 대한 토의를 2001년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2001. 5. 11 / 심사종료일 : 2001. 7. 12)

고 벽이 손상되었다.

- 종무소의 천장이 추락하여 파손되었다.
- 경내의 돌담이 붕괴하였다.
- 대웅전 앞 지반에 균열이 발생하였다.
- 금당 앞에 있던 오층석탑의 탑두(종형석)가 추락하였다 (그림 1).
- 진감선사 대공탑비에 기존의 균열이 성장하였다.

쌍계사 지진은 피해상황이 사진으로 남아 있는 가장 오래된 지진이며, 우리나라의 원자력시설의 설계지진가속도 수준을 설정하는데 있어서 매우 중요한 위치를 점하고 있다. 참고문헌⁽⁸⁾에는 대구, 부산, 인천 등의 관측소에서 기록된 지진기록이 사진으로 제공되어 있으나, 진앙지인 쌍계사 경내에서의 지반가속도는 계측이 되지 못하였다. 따라서 당시 지진으로 인한 지반운동세기는 피해상황에 근거하여 주관적으로 평가될 수 밖에 없었다.

그러나, 다행하게도 오층석탑은 아직 쌍계사 경내에 잘 보존되어 있었으며 이를 근거로 하여 공학적으로 대표성 있는 실험모델을 제작할 수 있을 것으로 판단하였다. 탑의 규모가 작기 때문에 고층을 거쳐서 실물크기의 모델을 제작할 수 있었으며 이를 진동대에 탑재하여 동특성 확인시험과 취약도 시험을 수행하였다. 앞서 언급한 바와 같이 지진손상에 대한 기록이 사진으로 명확하게 남아있으므로 실험결과를 이와 비교하여 당시 쌍계사 경내에서의 지반운동의 세기를 정량적으로 평가해 보고자 하였다.

본 연구는 다음과 같이 진행되었다.

- 쌍계사 오층석탑 해체 및 정밀 계측 : 탑의 구조 확인
- 탑에 대한 건축사적 고증
- 쌍계사 지반조사 : 부지의 영향평가
- 원형에 충실한 시험 모델제작
- 진동대 시험 및 결과의 분석

본 연구에는 건축학, 지진학, 지반공학, 암반공학, 구조공학 분야의 여러 전문가가 적극 참여하여 최종 목표를 달성할 수 있었다. 또한, 일본의 전문가 그룹이 실험 계획과 진행에 중요한 자문을 제공하였다. 현장조사와 해체복원, 지반조사 및 석탑 제작과정은 참고문헌⁽⁹⁾에 수록하였으므로 본문에서는 실험과정과 결과에 대하여 중점적으로 기술하고자 한다. 본 연구결과는 우리나라의 지진재해도의 불확실성을 저감하는데 기여할 것으로 기대된다.

2. 쌍계사 오층석탑의 실물크기 시험 모델 제작

2.1 쌍계사 오층석탑의 구조 조사

참고문헌⁽⁹⁾에서 언급한 바와 같이 현재 쌍계사 경내에는 오층석탑이 대웅전 앞에 서 있다(그림 2). 이 석탑의 실측도는 그림 3에 주어져 있다. 그림 2와 3에서 탑 정상부의 탑두(종형석)는 그림 1과 다른 것을 제외하고는 전체적으로 원형을 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 전문가의 자문에 의하면 이러한 형태의 탑은 신라 말기에서 고려 초(약 800-1100AD)에 건립된 것으로 추정된다.⁽¹⁰⁾

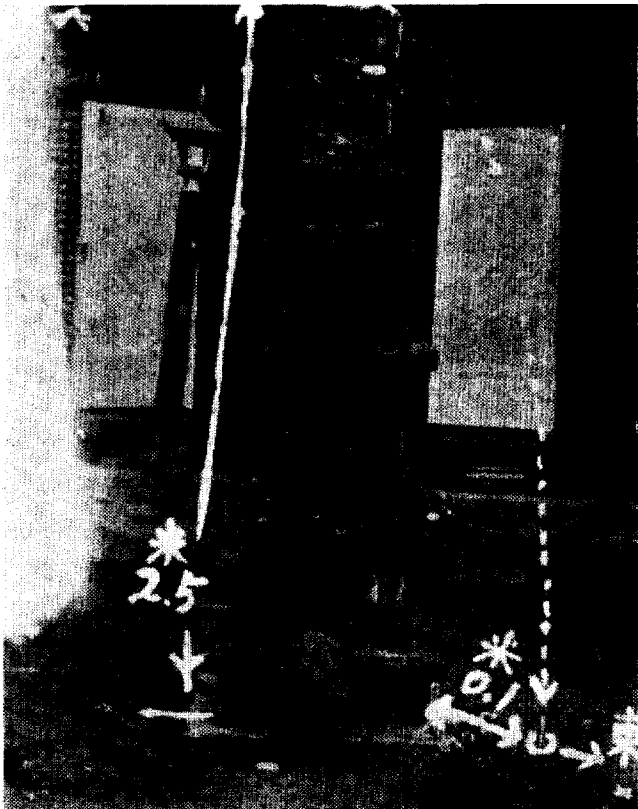
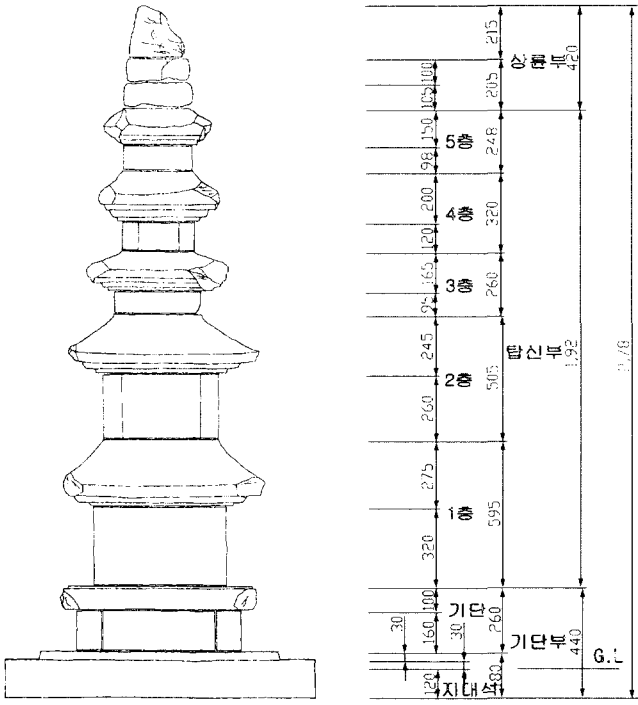


그림 1 금당 앞에 있던 오층석탑의 탑두(종형석) 추락 피해 사진



그림 2 쌍계사 경내 대웅전 앞에 위치한 오층석탑 전경



하동쌍계사 오층석탑 현황도(남측)

그림 3 쌍계사 오층석탑 실측도

참고문헌⁹⁾에 상술한 바와 같이 탑을 해체한 후 탑의 구조와 구성요소간의 연결 및 접촉면의 특성을 조사하였고 다시 복원하였다. 탑의 기초 역할을 하는 지대석이 지면과 접하고 그 위에 기단부가 놓인다. 그 위에는 기단이 놓이고 일층탑신부, 일층옥개석, 이층탑신부, 이층옥개석, 삼층탑신부, 삼층옥개석, 사층탑신부, 사층옥개석, 오층탑신부, 오층옥개석이 차례로 놓여 있다. 그 위는 두개의 환륜석이 놓이고 정상에는 탑두(종형석)가 얹혀있다. 기단부(그림 4)와 일층탑신부(그림 5)는 별매석으로 구성되어 있었으며 나머지 구성요소(그림 6)는 일매석 또는 일괴석(한덩어리)으로 되어있었다. 삼층옥개석 저면에는 반구형상의 사리공(그림 7)이 있었다. 두개의 환륜석(그림 8)은 이름 그대로 중앙을 구멍이 관통하고 있었고 오층옥개석(그림 9)에는 윗면에서 두개의 중간에 이르는 깊이까지 환륜석과 동일한 직경의 구멍이 파여져 있었다. 고층에 의하면 탑의 상층부에 놓인 환륜석에는 주철로 만든 찰주가 삽입되어 있었을 가능성이 높다고 한다. 그러나 해체 시에 찰주는 발견되지 않았다. 탑의 상하구성요소가 맞닿는 접촉면은 수평면으로 매끈하게 마무리되어 있었으며 상대운동을 억제하기 위한 턱이나 홈은 없었다. 즉, 이 석탑은 대표적인 적층구조를 취하고 있다고 하겠다. 그리고 해체 당시에는 얇은 두께의 고운 먼지가 접촉면에 쌓여 있었다. 그림 10에는 계측된 각 층별 형상이 치수와 함께 제공되어 있다. 탑은 그 지역에서 쉽게 구할 수 있는 재료로 제작된 것으로 보여지며 사암과 화강암 두 가지 재질의 암석이 사용된 것으로 판명되었다. 외관은 풍화가 심하였으며, 접촉면은 비교적 양호한 상태를 유지하고 있었다. 상하 구성요소의 접촉면의 요철이 마찰거동에 미치는 영향이 클 것으로 판단되어 제작 시 참고하기 위하여 탑 구성요소 간의 접촉면에 대한 석고형을 제작하였다.

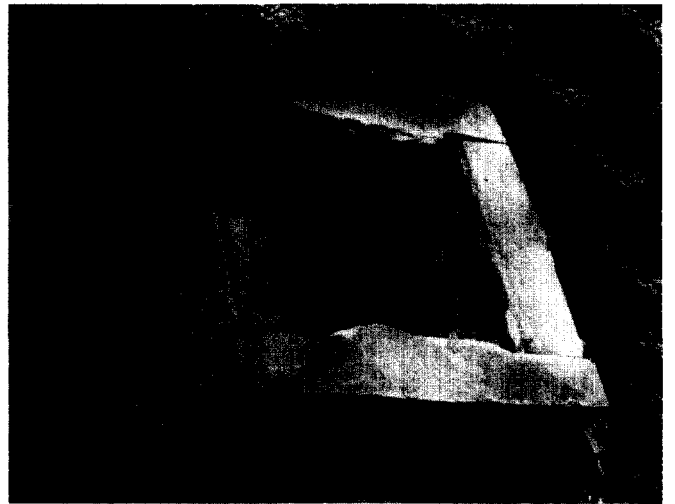


그림 4 기단부 전경

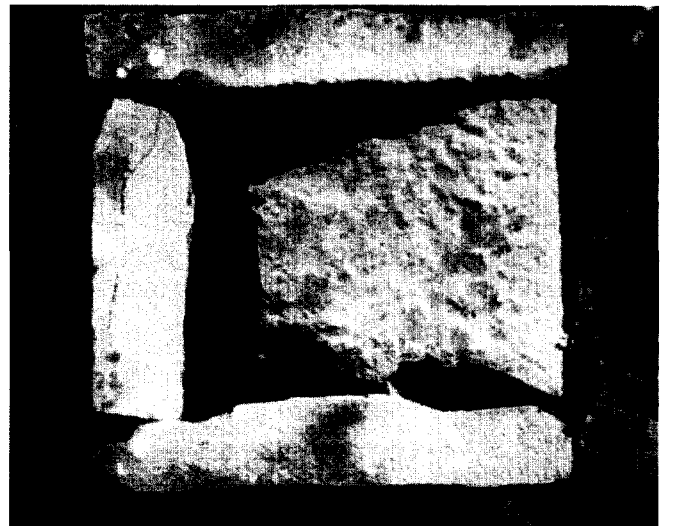


그림 5 일층탑신부 전경



그림 6 일매석으로 구성된 옥개석과 탑신부(2층-5층) 전경

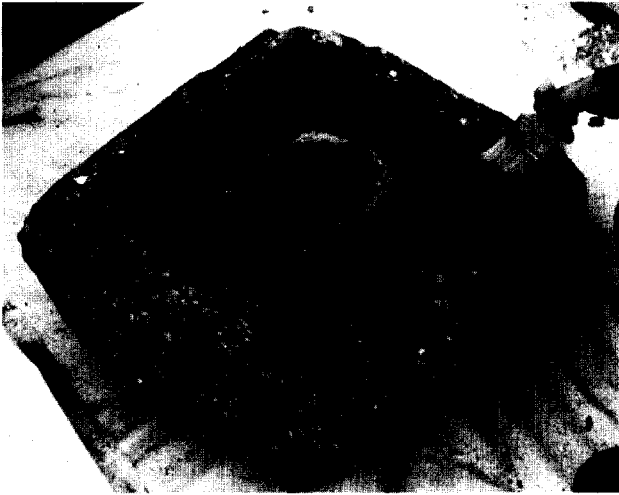


그림 7 반구형상의 사리공이 있는 삼층옥개석 전경

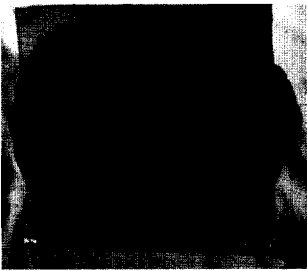


그림 8 환륜석 전경

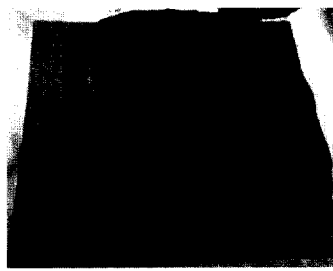


그림 9 오층옥개석 전경

2.2 쌍계사 오층석탑의 실물크기 모델제작

해체복원에 직접 참여한 석공예 명장이 실측 자료에 근거하여 오층석탑의 실물크기 모델을 직접 제작하였다.⁽⁹⁾ 석탑 모델을 장기간 보존하고 노화과정을 관찰할 목적으로 석탑의 외관도 실물과 가깝게 마감하였다.

탑의 일부 구성 요소는 사암으로 되어있었으나 사암을 구할 수가 없었기 때문에 대신 유사한 특성의 화강암으로 대체하였다. 표 1에는 두 가지 종류의 화강암에 대한 역학적 특성이 수록되어있다. 표 2에는 각 구성요소별로 중량과 재료의 종류가 수록되어있다. 피해 사진에서의 탑두(종형석)(그림 1)는 현재 탑에 얹혀 있는 탑두(종형석)(그림 2)와는 그 형상이 다르다. 밝혀지지 않은 이유에 의해서 원래의 탑두(종형석)가 현재의 것으로 대체되었다고 판단하고 사진(그림 1)에서 그 형상비를 계산하였다. 앞서 언급하였듯이 탑두(종형석)에는 찰주가 삽입될 수 있는 구멍이 일정 높이까지 뚫려져 있을 가능성이 높았기 때문에 전문가의 지문에 근거하여 그 높이를 결정하였다. 구멍의 직경은 환륜석과 동일하게 정하였다. 제작된 탑두(종형석)의 형상과 치수는 그림 11에 나타내었다.

고층에 의하면 찰주는 일반적으로 주철로 제작된다고 한다. 신라시대의 주철의 구성성분에 대한 연구결과⁽¹¹⁾에 의거하여 표 3에 제공된 성분비의 평균값을 갖도록 찰주를 주문



그림 10 각 층별 평면도(단위 : mm)

표 1 화강암에 대한 역학적 특성

종류	비중	공극률 (%)	압축강도 (kg/cm ²)	탄성계수 (kg/cm ²)	포아송비	인장강도 (kg/cm ²)
조립질 화강암(GC)	2.66	0.67	1470	4.49	0.33	160
세립질 화강암(GF)	2.62	0.95	2810	6.29	0.26	380

표 2 각 구성요소별 중량 및 암석의 종류

구성 요소	중량(kgf)	원형 탑의 재료	모델 탑의 재료
탑두(종형석)	38	사암	GF
윗 환륜석	11	화강암	GC
밑 환륜석	15	화강암	GC
5층	옥개석	44	사암
	탑신부	15	화강암
4층	옥개석	72	사암
	탑신부	20	화강암
3층	옥개석	102	사암
	탑신부	21	사암
2층	옥개석	172	화강암
	탑신부	98	사암
1층	옥개석	312	화강암
	탑신부	165	사암
기단	갑석	118	사암
	면석	101	사암
총중량	1304	-	-

주) GC : 조립질 화강암, GF : 세립질 화강암

제작하였다. 그림 12에는 제작된 찰주의 사진이 주어졌 있는데, 그 직경은 3cm이고 길이는 30cm이다.

모델 구성요소 간의 접촉면의 형상을 원형에 가깝게 재현하기 위해서 탑의 해체 시에 뜬 부조를 참고하여 모델의 상하 접촉평면의 가공을 마무리하였다. 그림 13에서는 오층탑신부 표면의 Profile이 제시되어 있다.

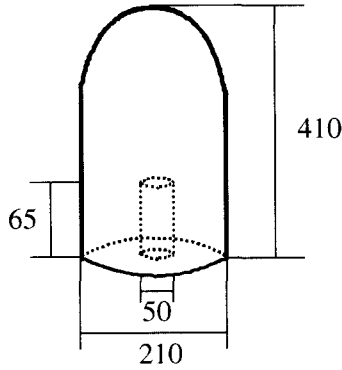


그림 11 제작된 탑두(종형석)의 형상과 치수(단위 : mm)

표 3 주철의 성분비(월성해자(月城垓字) 출토 철기)(단위: %)

구분	C	Si	Mn	P	S	Fe
쇠스랑	1.630	0.480	0.010	0.066	0.057	97.757
철제용기	3.580	1.070	0.040	0.379	0.019	94.912
철편	0.240	4.520	-	0.395	0.026	94.819
평균값	1.817	2.023	0.025	0.280	0.034	95.821

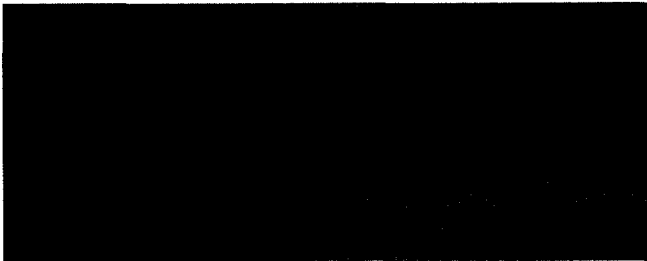


그림 12 제작된 찰주

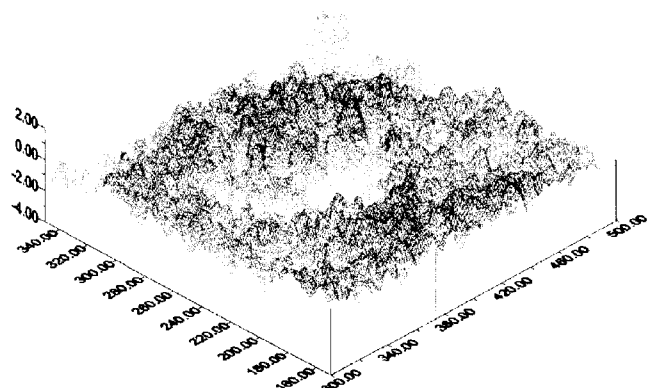


그림 13 오층탑신부 원형 표면의 profile(단위 : mm)

2.3 마찰계수 측정

제작된 모델의 일부에 대하여 마찰계수를 측정하였다.

그림 14는 마찰계수 측정장치를 보이고 있다. 수직방향으로는 자연 상태에서의 탑의 각 구성요소에 작용하는 상재하중과 동일한 크기의 수직하중이 작용하도록 하였다. 그림 15는 변위와 마찰계수와의 관계도의 한 예이다. 이 방법에 의해서 얻어진 마찰계수는 표 4에 요약하였다.

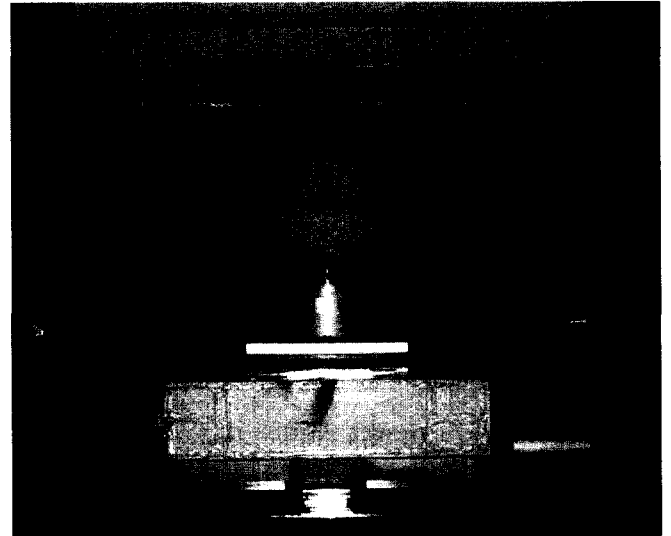


그림 14 마찰계수 측정장치

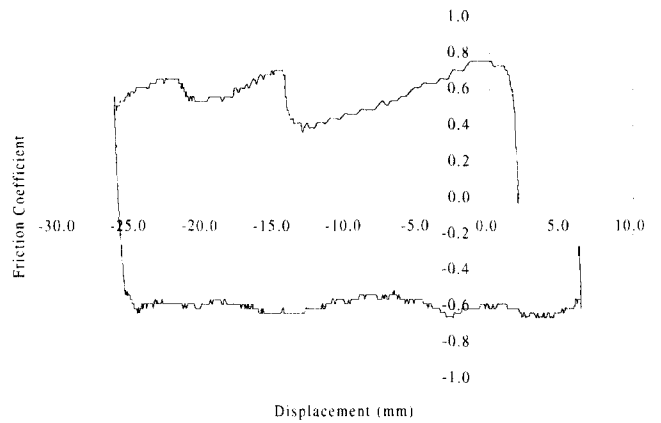


그림 15 변위와 마찰계수 관계도(상부 : 윗 환륜석, 하부 : 밑 환륜석)

표 4 마찰계수

상부	하부	마찰계수
윗 환륜석	밑 환륜석	0.70
밑 환륜석	오층옥개석	0.67
오층옥개석	오층탑신부	1.02
오층탑신부	사층옥개석	0.59
사층옥개석	사층탑신부	0.52
사층탑신부	삼층옥개석	0.91
삼층옥개석	삼층탑신부	0.61

2.4 찰주의 유무에 따른 시험 모델

앞서 언급한 바와 같이 지진당시 찰주의 존재 여부가 불명확하므로 오층옥개석에서 환륜석을 관통하여 탑두(종형석)까지를 연결시키는 찰주가 삽입된 경우(그림 16(a))와 제거

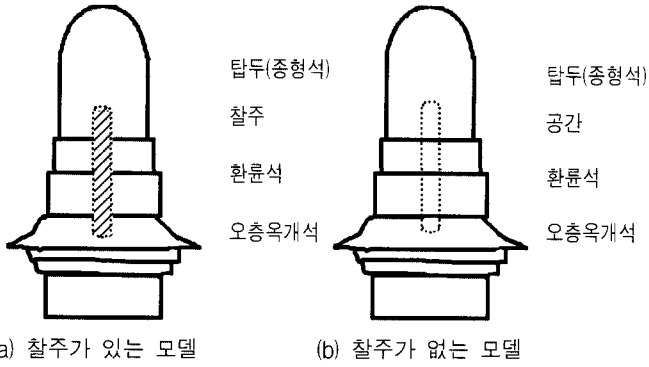


그림 16 실험 모델

된 경우(그림 16(b))의 두가지 모델에 대하여 동일한 실험을 수행하였다. 두 실험 모델은 동일한 구성요소에 의해서 축조된다.

3. 실험 장치와 data 획득 시스템

3.1 진동대와 시험 모델 탑재

시험은 한국기계연구원이 보유한 30톤 용량의 6자유도 진동대에서 실시되었다. 표 5에는 이 진동대의 규격과 성능이 요약되어 있다. 시험 모델은 그림 17에서와 같이 진동대에 탑재되었다. 지대석은 병진운동과 비틀림, 회전운동이 발생하지 않도록 진동대 바닥에 고정되었다. 손상을 방지하기 위해서 보조 철물과 석재의 접촉면에는 고무판을 삽입하였다. 석탑모델의 건축과 시험시 모델의 재정비 및 계측기 부착 작업의 편의를 도모하기 위해서 보조 프레임(그림 18)을 제작하여 모델을 그 내부에 설치하였다. 프레임의 제 1차 고유진동수는 100Hz로 계산되었고 그림 18에서 확인할 수 있는 바와 같이 2층으로 설계되어 높은 곳에서의 작업이 용이하게 하였다. 실험방법에서 상술한 바와 같이 본 시험인 취약도 시험(fragility test)에서는 탑두(종형석)가 추락할 때까지 입력

운동의 세기를 증가 시킬 예정이므로 탑두(종형석)가 전도되더라도 추락하는 것을 방지하기 위해서 탑두(종형석)에 빗줄을 연결하고 도르레를 이용하여 실험보조자가 전도시 탑두(종형석)를 들어 올릴 수 있는 장치를 그림 19와 같이 설계하였다.

표 5 한국기계연구원 보유 진동대의 규격과 성능

규격	성능
최대적재하중(ton)	30(ton)
진동대 규모(m)	4.0(m)×4.0(m)
진동 방향	3축 병진, 3축회전
최대 변위(mm)	H=±100, V=±67
최대 속도(cm/s)	H=75, V=50
최대 가속도(g)	H=1.5, V=1.0
최대 허용편심(m)	H=0.5, V=2.5
최대 진동주파수(Hz)	50
구동방식	Electrohydraulic Servo
제어방식	Analog/Digital Control
채널수	56

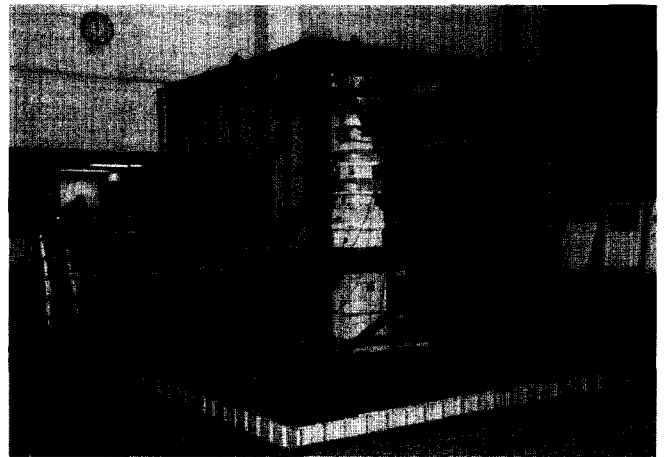


그림 17 진동대에 탑재된 석탑 모델 전경

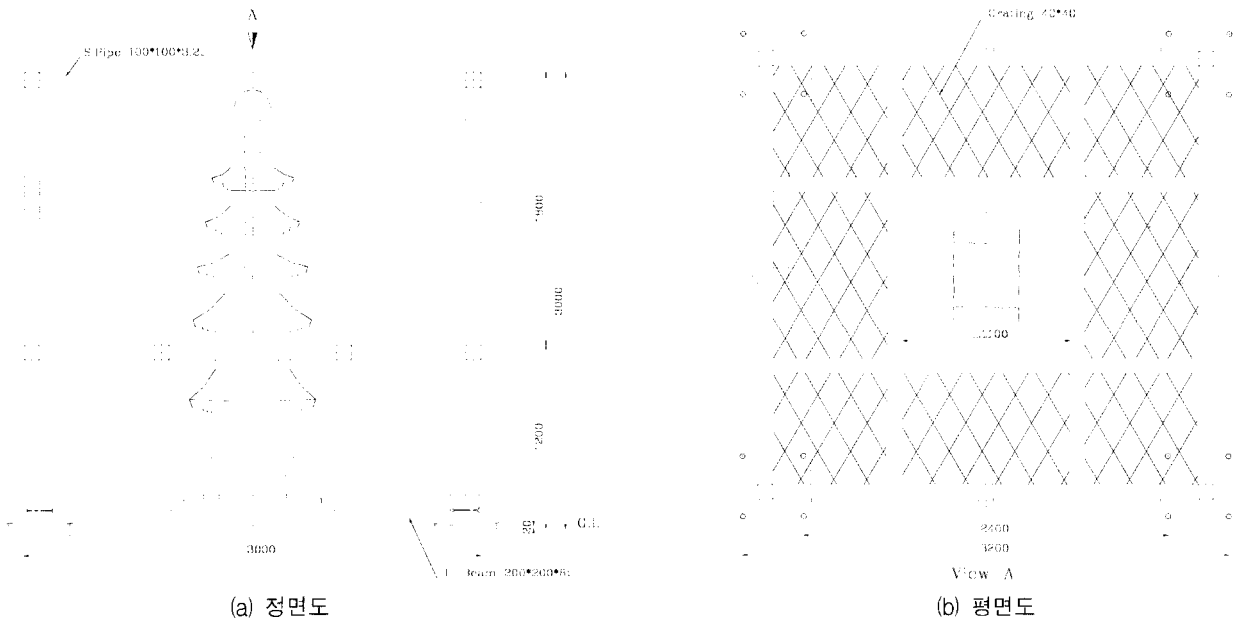


그림 18 보조 프레임

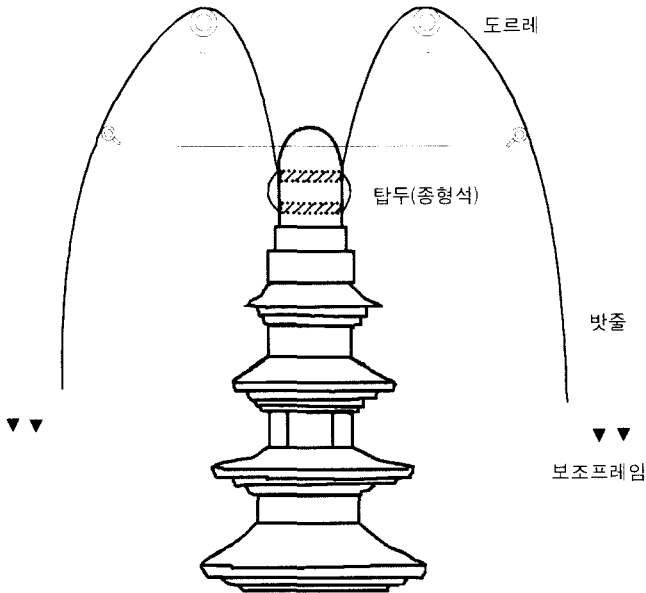


그림 19 탑두(중형석)를 들어올릴 수 있는 장치

변위계는 탑의 하부에서만 유지하고 계측하였다. 계측기의 종류와 성능은 표 6에 요약하였다. 그림 21에는 응답의 측정 위치와

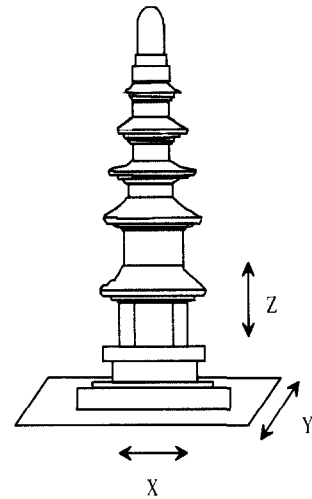


그림 20 평면 직교 좌표계 설정

3.2 계측과 data 획득 계획

석탑은 직교하는 두 주축에 대해서 대체로 대칭적인 구조를 갖고 있다. 그러나, 기단부와 일층탑신부가 별매적으로 구성되어있기 때문에 수평 두 주축 방향으로 역학적 특성이 서로 같지 않을 것으로 예상된다. 가진과 응답의 방향이 중요할 것으로 판단되므로 탑신부의 구조를 기준으로 하여 그림 20과 같이 평면직교 좌표계를 설정하였다. 응답은 가속도계와 변위계를 이용하여 측정하였다. 진동대 수평일축 가진, 수평일축과 수직축 동시 가진의 경우에는 가속도와 변위를 모두 측정하였다. 그러나, 수평이축방향으로 동시에 가진 할 경우에는

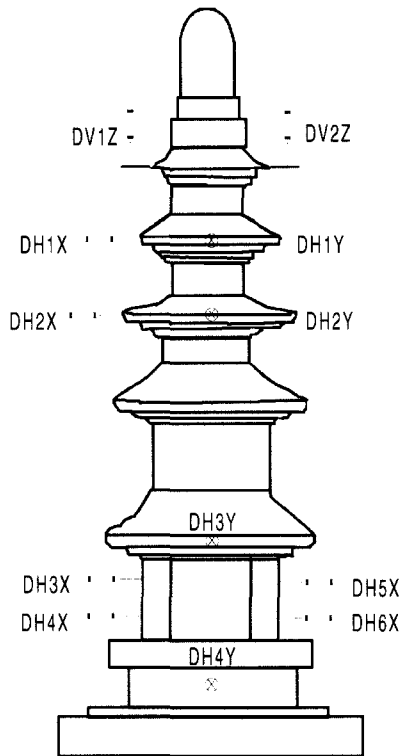
표 6 계측기 종류와 규격

(a) 변위계

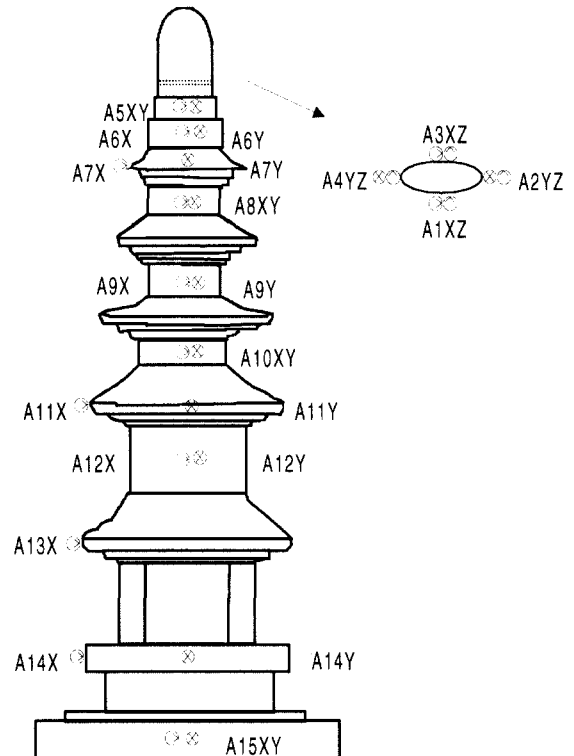
모델	규격 (mm)	정격출력 (mV/V)	허용주파수(Hz)	제조회사
WA20	20	80	10	Hottinger Baldwin Messtechnik
WA50	50	80	5	Hottinger Baldwin Messtechnik

(b) 가속도계

모델	규격 (g)	감도	주파수 범위(Hz)	공진 주파수(kHz)	제조회사
4370	20	98(pC/g)	0.3-4800	16	Bruel & Kjaer
4508	70	100(mV/g)	1-8000	25	Bruel & Kjaer



(a) 변위계



(b) 가속도계

그림 21 응답측정위치와 종류

표 7 응답 측정위치와 계측기

명칭	계측 위치	계측기 종류	계측기 모델	측정응답 성분
DV1Z	오층옥개석	변위계	HBM WA50	Z 방향 연직 변위
DV2Z	오층옥개석	변위계	HBM WA50	Z 방향 연직 변위
DH1X(Y)	사층옥개석	변위계	HBM WA50	X(Y) 방향 수평 변위
DH2X(Y)	삼층옥개석	변위계	HBM WA50	X(Y) 방향 수평 변위
DH3X(Y)	일층탑신부	변위계	HBM WA20	X(Y) 방향 수평 변위
DH4X(Y)	일층탑신부	변위계	HBM WA20	X(Y) 방향 수평 변위
DH5X	일층탑신부	변위계	HBM WA20	X 방향 수평 변위
DH6X	일층탑신부	변위계	HBM WA20	X 방향 수평 변위
A1XZ	탑두(종형석)	가속도계	B&K 4508	X 및 Z 방향 가속도
A2YZ	탑두(종형석)	가속도계	B&K 4508	Y 및 Z 방향 가속도
A3XZ	탑두(종형석)	가속도계	B&K 4508	X 및 Z 방향 가속도
A4YZ	탑두(종형석)	가속도계	B&K 4508	Y 및 Z 방향 가속도
A5XY	윗 환륜석	가속도계	B&K 4370	X 및 Y 방향 가속도
A6X(Y)	밑 환륜석	가속도계	B&K 4508	X(Y) 방향 가속도
A7XY	오층옥개석	가속도계	B&K 4508	X 및 Y 방향 가속도
A8XY	오층탑신부	가속도계	B&K 4370	X 및 Y 방향 가속도
A9X(Y)	사층탑신부	가속도계	B&K 4508	X(Y) 방향 가속도
A10XY	삼층탑신부	가속도계	B&K 4370	X 및 Y 방향 가속도
A11X(Y)	이층옥개석	가속도계	B&K 4508	X(Y) 방향 가속도
A12X(Y)	이층탑신부	가속도계	B&K 4370	X(Y) 방향 가속도
A13X	일층옥개석	가속도계	B&K 4508	X 방향 가속도
A14X(Y)	기단	가속도계	B&K 4508	X(Y) 방향 가속도
A15XY	지대석	가속도계	B&K 4370	X 및 Y 방향 가속도

주) 응답명칭 및 위치는 모델의 x축 방향으로 가진한 경우를 기준으로 작성.
 모델의 y축 방향으로 가진한 경우에는 괄호 안의 명칭을 사용.

종류가 표기되어 있고 표 7에서 정리하였다. 표에 기술한 응답명칭 및 위치는 모델의 x축 방향으로 가진한 경우를 기준으로 작성하였으며 모델의 y축 방향으로 가진한 경우에는 괄호 안의 명칭을 사용하였다. Data 취득에는 HBM사의 MGC Plus가 사용되었고 sampling rate는 100Hz가 적용되었다.

4. 실험 방법과 절차

4.1 실험 방법

실험은 예비시험과 본시험으로 구분하여 실시되었다. 예비시험은 낮은 진폭 가진 상태에서 석탑의 동특성을 확인하기 위함이었으며(exploratory test), 본시험은 특성이 다른 지진파의 지진가속도를 증가시켜 가진함으로써 석탑의 응답 특성의 변화와 피해 형태 및 수준을 밝혀내기 위하여 실시되었다(fragility test).

4.2 예비시험

예비시험은 수평 이축방향에 대하여 각 방향별로 개별적으로 시행되었다. White noise로 가진한 시험과 sine sweep 시험의 두 가지가 모두 사용되었다. Sine sweep 시험에서 sweep rate은 0.5 octave/min 이하로 유지하였다. 예비시험의 경우는 표 8에 입력방향 및 가속도 수준을 요약하여 정리하였다.

표 8 예비시험의 입력 운동 별 방향 및 가속도 크기

입력운동	입력방향	가속도 크기(g)		Frequency Range(Hz)
		찰주 유(W)	찰주 무(O)	
Random white noise	XX	0.04, 0.08	0.04, 0.08	0.5-30.0
	YY	-	0.04, 0.08	
Sine sweep	XX	0.02	0.02	0.5-20.0
	YY	-	0.02	

주) XX : 모델 x축 방향 가진
 YY : 모델 y축 방향 가진
 - : 실험하지 않았음

4.3 본시험

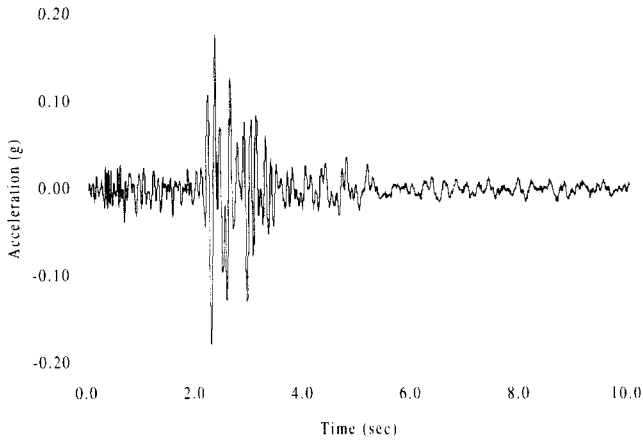
본시험은 fragility 시험으로서 정해진 입력 성분의 가속도를 증가 시켜가면서 응답의 특성을 관찰하는 시험으로 정의될 수 있다. 지반운동은 수평 성분과 수직 성분이 조합되어 동시에 가진 되는 여러 가지 경우에 대해서 응답을 조사하였다. 우리나라 지진특성과 석탑이 위치하고 있던 곳의 지반특성을 고려하여 제작된 인공가속도시간이력의 사용을 고려하였으나 일반적인 생성방법에 의해서는 도달시간의 차이와 주파수 성분의 특성을 실제와 유사하게 재현하기 어렵다고 판단되어서 실제 지진기록을 입력운동으로 사용하였다.

실제 지진기록은 기대되는 지진규모와 진앙거리 그리고 지반조건을 고려하여 표 9에 제시된 바와 같이 1983년 Coalinga 지진, 1987년 Whittier Narrows 지진 그리고 1940년 El Centro 지진기록을 사용하였다. 이 세가지 지진기록의 시간이력과 응답스펙트럼은 그림 22, 23, 24에 보여지듯 다양한 지진 특성을 보인다. Fragility 시험에서 지진의 가속도는 유효지반가속도(EPGA, effective peak ground acceleration) 개념을 도입하여 크기를 정의하였다. 유효지반가속도는 각 지진기록의 N-S 성분을 기준으로 응답 스펙트럼을 구하여 스펙트럼의

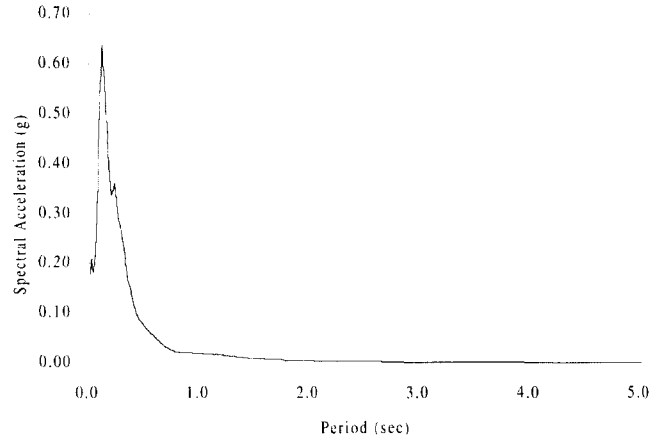
평활한 구간을 적분한 후 2.5로 나눈 값이다. 각 지진 기록의

표 9 입력지진의 지진규모, 진앙거리 및 지반조건

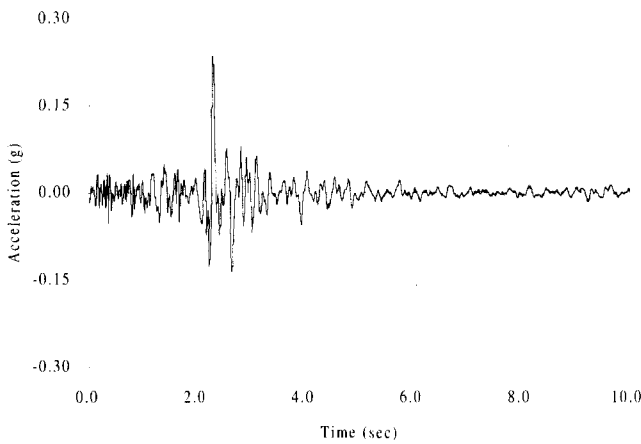
입력지진	지진규모	진앙거리(km)	지반조건
Coalinga (1983. 5. 9)	5.3	1.4	Sedimentary rock
Whittier Narrows (1987. 10. 1)	6.1	8.6	Alluvium
El Centro (1940. 5. 18)	6.9	8.2	Alluvium



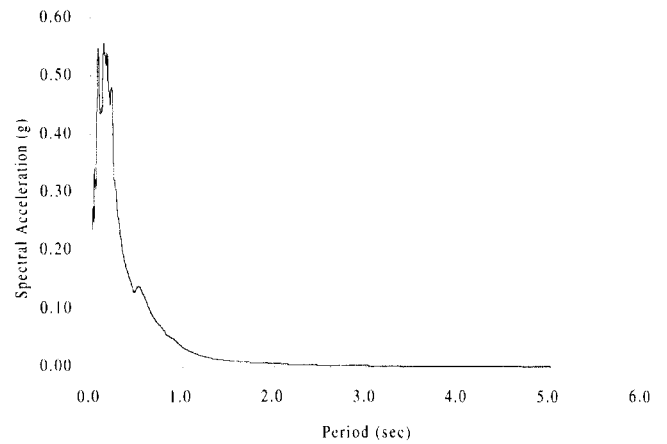
(a) N-S 성분(Component 360) 가속도 시간 이력



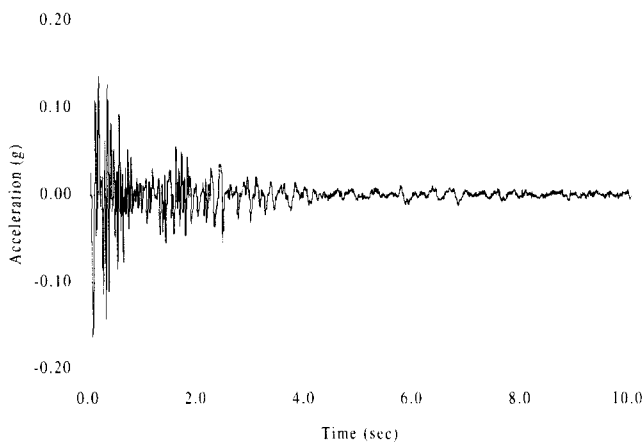
(b) N-S 성분(Component 360) 응답 스펙트럼(5% 감쇠비)



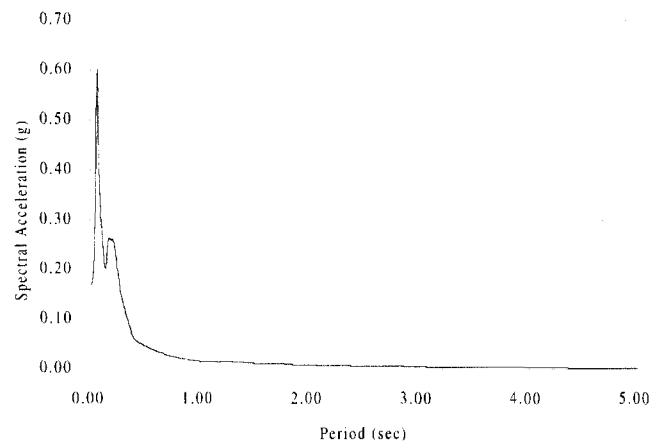
(c) E-W 성분(Component 270) 가속도 시간 이력



(d) E-W 성분(Component 270) 응답 스펙트럼(5% 감쇠비)

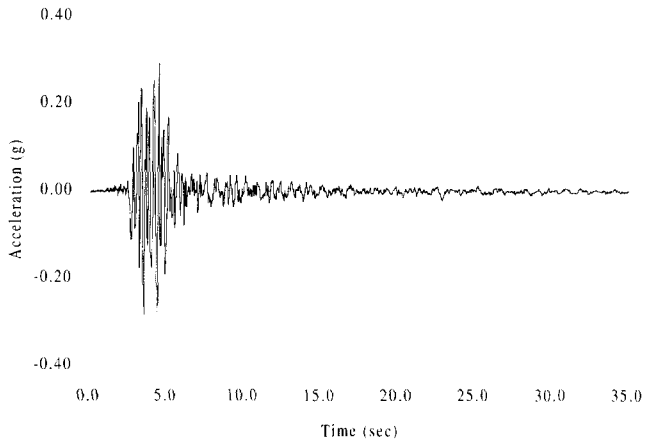


(e) U-D 성분 가속도 시간 이력

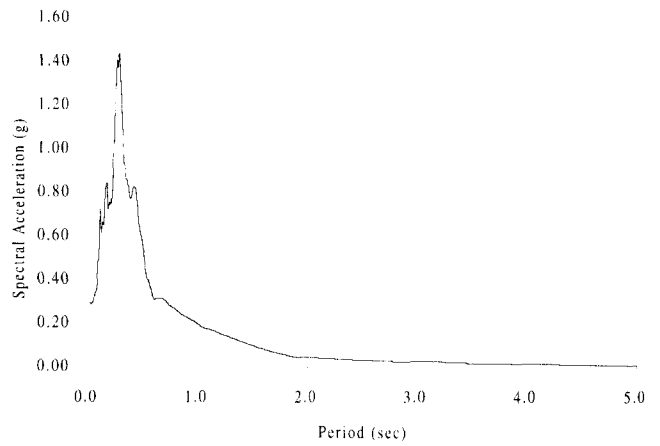


(f) U-D 성분 응답 스펙트럼(5% 감쇠비)

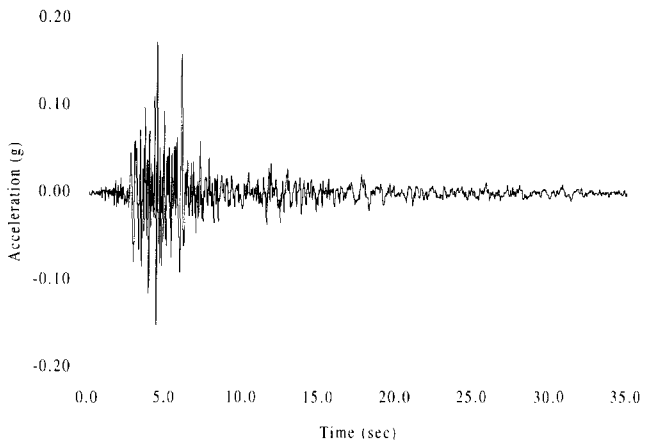
그림 22 Coalinga 지진(1983)



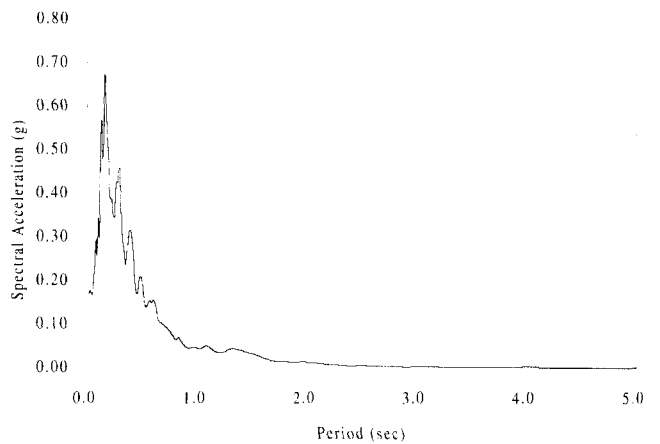
(a) N-S 성분(Component 9) 가속도 시간 이력



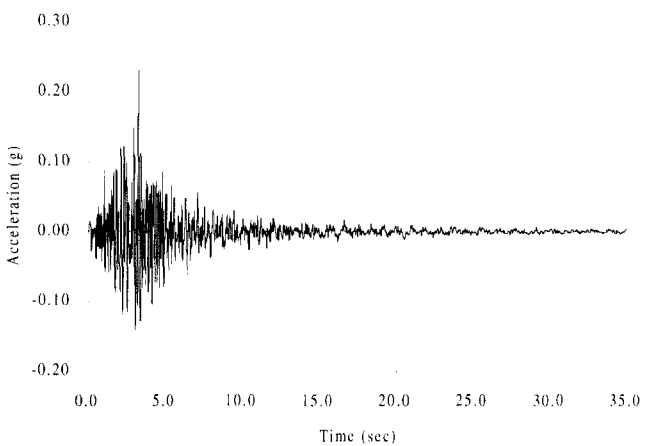
(b) N-S 성분(Component 9) 응답 스펙트럼(5% 감쇠비)



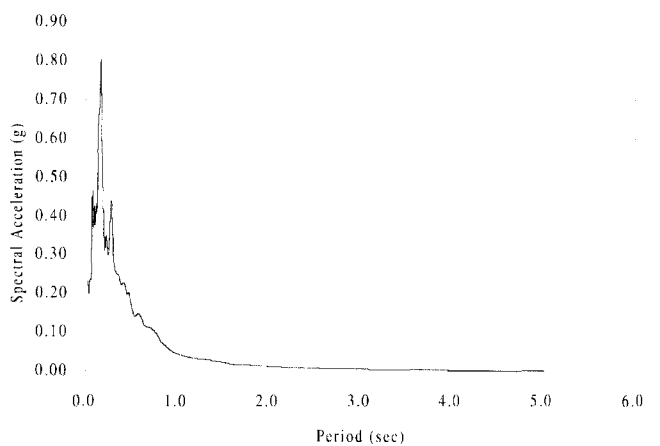
(c) E-W 성분(Component 279) 가속도 시간 이력



(d) E-W 성분(Component 279) 응답 스펙트럼(5% 감쇠비)



(e) U-D 성분 가속도 시간 이력



(f) U-D 성분 응답 스펙트럼(5% 감쇠비)

그림 23 Whittier Narrows 지진(1987)

응답 스펙트럼의 적분 구간은 표 10에 정리하였다. 본시험의 가속도 증분은 0.04g를 기본으로 채택하였다. 본시험의 종류는 표 11에 요약하여 정리하였다.

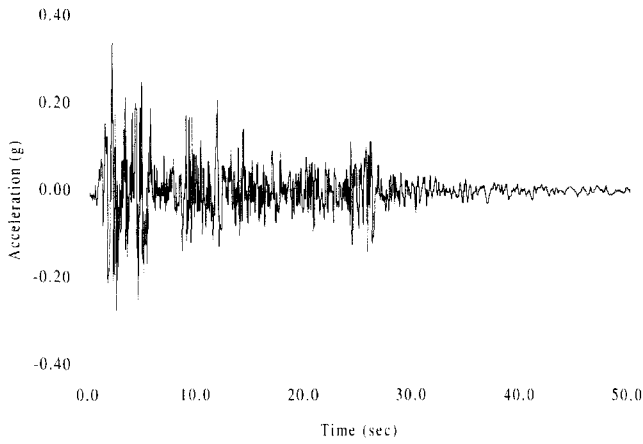
5. 실험 결과

5.1 예비시험

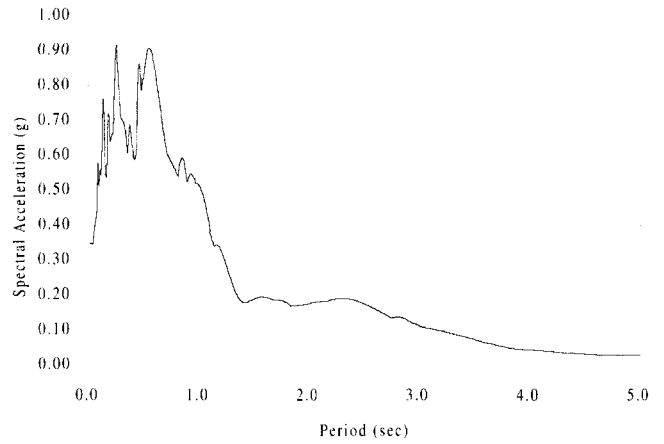
예비시험의 각 실험의 이름은 예를 들어서 설명하기로 한다. RM04XXW의 경우 첫 두 글자는 random white noise 입력

을 의미하고 “04”는 amplitude가 0.04g로 규정된다는 것을 뜻하며, “XX”는 모델의 x축 방향으로 가진 된다는 것을 나타내고, “W”는 찰주가 있는 모델을 가리킨다. Sine sweep의 경우에는 첫 문자가 “SS”로 시작된다. Y축 방향 가진 시에는 중간 문자가 “YY”로 표기된다. 찰주가 없는 모델에서는 끝 문자 “W”대신 “O”를 사용하게 된다.

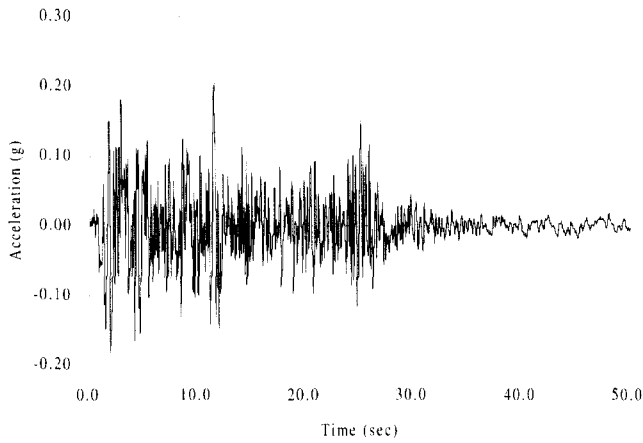
그림 25는 찰주가 있는 모델의 RM08XXW 시험에 대한 오층옥개석 응답의 x방향 전달함수이다. 찰주가 없는 모델의 RM08XXO와 RM08YYO 두 시험에 대한 오층옥개석 응답의



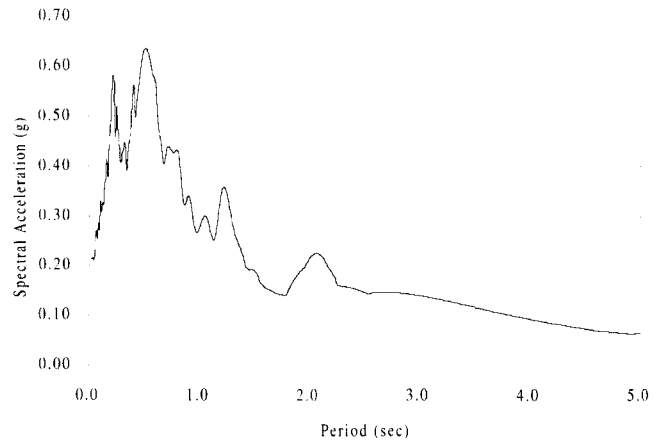
(a) N-S 성분(Component 180) 가속도 시간 이력



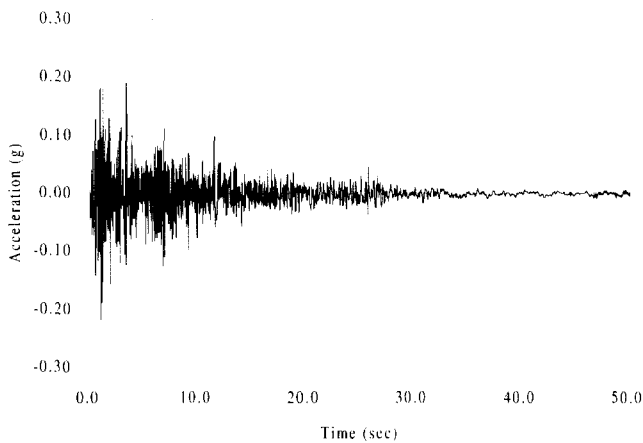
(b) N-S 성분(Component 180) 응답 스펙트럼(5% 감쇠비)



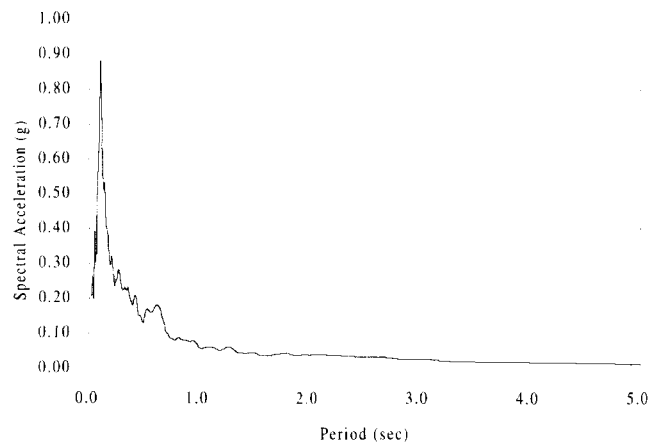
(c) E-W 성분(Component 270) 가속도 시간 이력



(d) E-W 성분(Component 270) 응답 스펙트럼(5% 감쇠비)



(e) U-D 성분 가속도 시간 이력



(f) U-D 성분 응답 스펙트럼(5% 감쇠비)

그림 24 El Centro 지진(1940)

전달함수는 그림 26에 보였다. 동일한 모델에 대한 sine sweep 시험 결과는 그림 27과 28에 각각 주어져 있다. 전달 함수 곡선은 계측된 data의 구간별 전달함수를 평균하는 Welch법을 이용하여 얻은 것이다. 표 12에는 각 경우의 시험 결과로부터 1차모드와 2차모드의 고유진동수와 half power band width 방법을 사용하여 계산된 감쇠비를 수록하였다. 단 찰주가 있는 모델의 경우 2차모드를 식별하기가 어려웠다. RM08XXW, RM08XXO, RM08YYO 시험 결과로부터 계산된 모드 형상은 그림 29(a), 29(b), 29(c)에 각각 나타내었

다. X축 방향으로서는 찰주가 있는 모델의 경우 찰주가 없는 모델에 비하여 1차 모드의 고유진동수가 낮지만 모드 형상은 그림 29(a), 29(b)에서 확인할 수 있듯이 유사하다. 또한

표 10 입력지진별 응답스펙트럼의 적분구간

입력지진	응답스펙트럼의 적분 구간
Coalinga(1983.5.9)	0.08-0.4 sec
Whittier Narrows(1987.10.1)	0.1-0.6 sec
El Centro(1940.5.18)	0.125-0.8 sec

표 11 본시험의 실험 종류

입력 방향	CG (Coalinga)		WN (Whittier Narrows)		EC (El Centro)	
	찰주 유 (W)	찰주 무 (O)	찰주 유 (W)	찰주 무 (O)	찰주 유 (W)	찰주 무 (O)
XX	✓	✓	✓	✓	✓	✓
YY	-	✓	✓	✓	✓	✓
XZ	-	✓	✓	-	✓	✓
YZ	-	-	-	✓	-	✓
XY	-	✓	-	✓	✓	✓
YX	-	-	-	-	✓	✓

주) XX : 모델 x축 방향 입력지진의 N-S 성분 가진
 YY : 모델 y축 방향 입력지진의 N-S 성분 가진
 XZ : 모델 x축 방향 입력지진의 N-S 성분 가진
 모델 z축 방향 입력지진의 U-D 성분 가진
 YZ : 모델 y축 방향 입력지진의 N-S 성분 가진
 모델 z축 방향 입력지진의 U-D 성분 가진
 XY : 모델 x축 방향 입력지진의 N-S 성분 가진
 모델 y축 방향 입력지진의 E-W 성분 가진
 YX : 모델 y축 방향 입력지진의 N-S 성분 가진
 모델 x축 방향 입력지진의 E-W 성분 가진
 ✓ : 실험하였음
 - : 실험하지 않았음

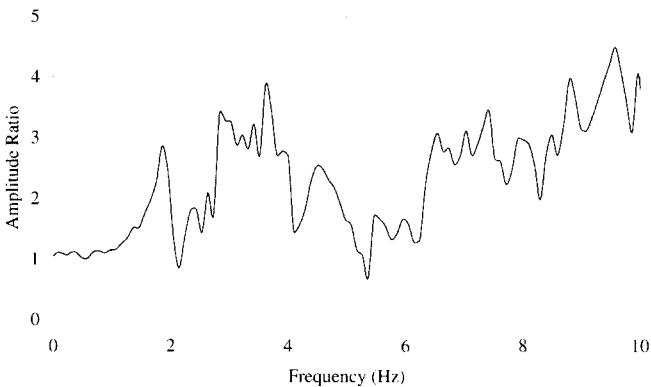


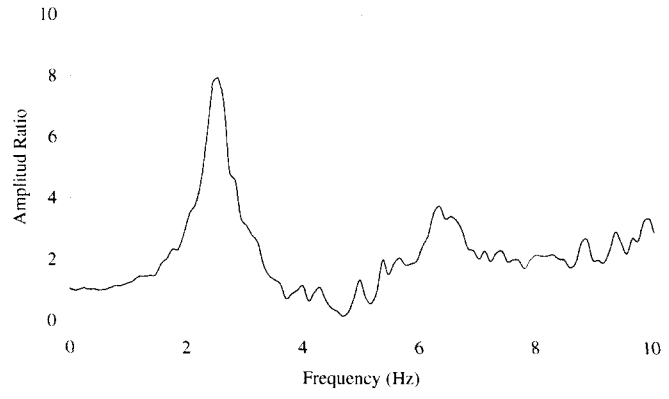
그림 25 오층옥개석 응답의 전달함수 : 찰주가 있는 모델, white noise x축 방향 가진(RM08XXW)

그림 29(b)의 x축 방향의 모드 형상은 보의 모드 형상과 유사하며 파르테는 신전의 기둥에 대한 연구⁽¹²⁾의 결과와도 유사함을 보였다. 그러나 y축 방향의 모드형상은 x축 방향의 모드형상과는 전혀 다른 형태를 보였으며 x축 방향보다는 고유진동수가 낮다는 것을 알 수 있다.

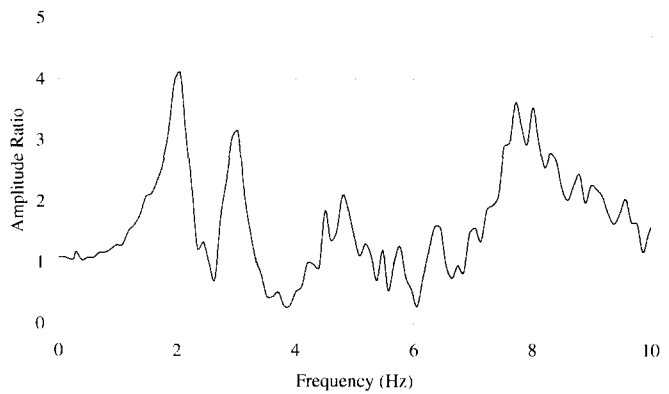
탑의 정상부는 일축방향 가진 시에 직교하는 다른 축으로도 흔들리는 거동을 보여 주었다. 특히 탑두(종형석)는 rocking 하면서 동시에 연직축을 중심으로 회전하는 거동을 보여 주었다.

5.2 본시험

본시험의 이름은 예를 들어서 설명하기로 한다. 첫 두 글자는 지진의 이름을 나타내며 CG는 Coalinga 지진, WN은 Whittier Narrows 지진, EC는 El Centro 지진을 각각 의미한다. 다음 두자리 숫자는 유효지반가속도의 크기를 나타내며 "20"은 0.20g를 뜻한다. "XX"는 모델의 수평 x축 방향으



(a) RM08XXO



(b) RM08YYO

그림 26 오층옥개석 응답의 전달함수 : 찰주가 없는 모델, white noise (a) x축 방향, (b) y축 방향 가진

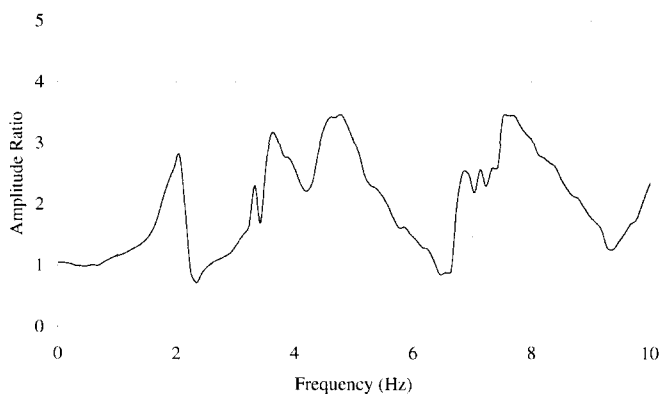


그림 27 오층옥개석 응답의 전달함수 : 찰주가 있는 모델, sine sweep x축 방향 가진(SS02XXW)

로, "YY"는 모델의 수평 y축 방향으로 입력지진의 N-S 성분이 가진되는 것을 의미한다. "XZ"와 "YZ"는 수평과 수직방향 동시 가진을 의미하는데 "XZ"는 x축 방향으로 N-S 성분, z축 방향으로 U-D 성분을 동시에 가진하는 것을 말하며 "YZ"는 y축 방향으로 N-S 성분, z축 방향으로 U-D 성분을 동시에 가진하는 것을 말한다. "XY"는 수평이축방향을 나타내는데 x축 방향으로 N-S 성분, y축 방향으로 E-W 성분을 동시에 가진하는 것을 말한다. "YX"도 수평이축방향을 나타내는데 x축 방향으로 E-W 성분, y축 방향으로 N-S 성분을 가진하는 경우를 말한다. 마지막 문자 "W"와 "O"는 각각 찰주가 있는 모델과 찰주가 없는 모델을 의미한다.

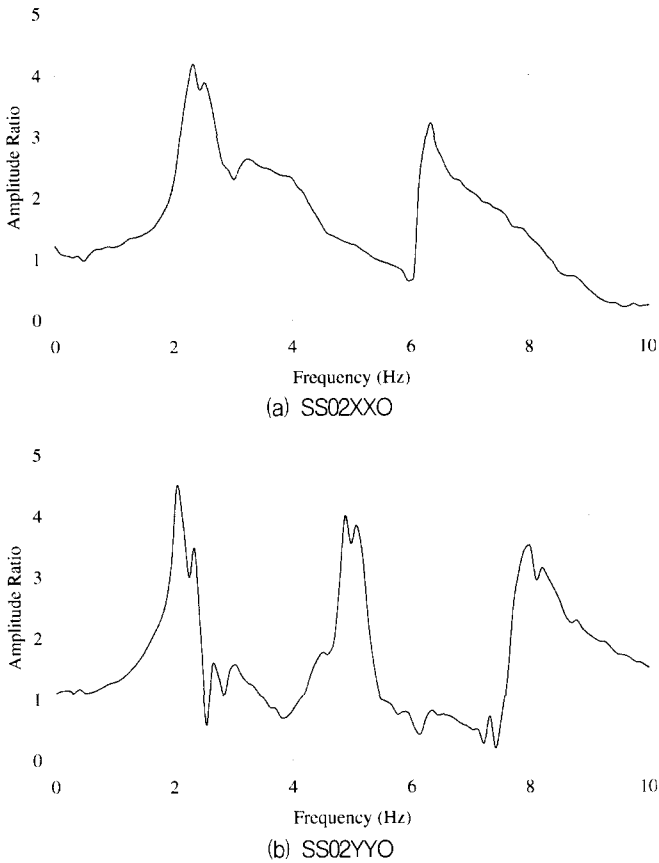


그림 28 오층옥개석 응답의 전달함수 : 찰주가 없는 모델, sine sweep (a) x축 방향, (b) y축 방향 가진

표 12 예비시험 결과 석탑의 1차모드와 2차 모드 고유진동수, 감쇠비

시험명칭	1 차모드		2차모드	
	고유진동수(Hz)	감쇠비(%)	고유진동수(Hz)	감쇠비(%)
RM08XXW	1.9	7.6	-	-
RM08XXO	2.5	7.8	6.3	5.3
RM08YYO	2.0	7.3	3.0	4.9
SS02XXW	2.0	9.7	-	-
SS02XXO	2.4	12.1	6.3	6.2
SS02YYO	2.1	7.1	3.0	9.7

5.2.1 찰주가 있는 모델

먼저 찰주가 있는 모델의 경우에는 주된 피해 형태는 입력 운동의 가속도가 증가되면서 일층탑신부를 구성하는 별매석에 큰 변형이 발생하는 것으로서, 탑 전체의 붕괴를 초래할 수 있는 대단히 위험한 피해형태이다. 그러나 EI Centro 지진의 경우에는 수평 일층방향 입력시 찰주가 있는 모델에서도 탑두(중형식)가 추락하는 피해 형태가 관찰 되었다. 표 13에는 찰주가 있는 모델에서 일층탑신부가 불안정해지는 순간(피해 형태 I)이나 탑두(중형식)가 추락하는 순간(피해형태 II)에서의 유효지반가속도 및 피해형태를 수록하였다. 그림 30은 CG32XXW의 경우 일층탑신부 별매석에 큰 변형이 발생하였을 때의 변형 형상과 좌측상단의 변위계(DH3X)에서 측정된 응답 변위 시간이력을 보여준다. 찰주가 있는 모델에 Whittier Narrows 지진이 작용하여 일층탑신부가 불안정해지는 시점에서의 x축 방향 오층옥개석의 응답가속도 시간이력과 전달함수가 그림 31에 주어져 있다.

5.2.2 찰주가 없는 모델의 경우

찰주가 없는 모델의 주된 피해형태는 지진파에 따라 크게 두 가지로 구분될 수 있었다. 하나는 찰주가 있는 모델에서와 같이 일층탑신부의 별매석에 큰 변형이 발생하는 경우로서

표 13 찰주가 있는 모델의 지진파별 피해 형태

입력 방향	CG (Coalinga)		WN (Whittier Narrows)		EC (EI Centro)	
	EPGA	피해형태	EPGA	피해형태	EPGA	피해형태
XX	0.32	I	0.28	I	0.20	I, II
YY	-	-	0.28	I	0.22	II
XZ	-	-	0.24	I	0.22	I
YZ	-	-	-	-	-	-
XY	-	-	-	-	0.20	I
YX	-	-	-	-	0.20	I
평균	0.32	-	0.27	-	0.21	-

주) 피해형태 I : 별매석 큰 변형 발생, 피해형태 II : 탑두 추락

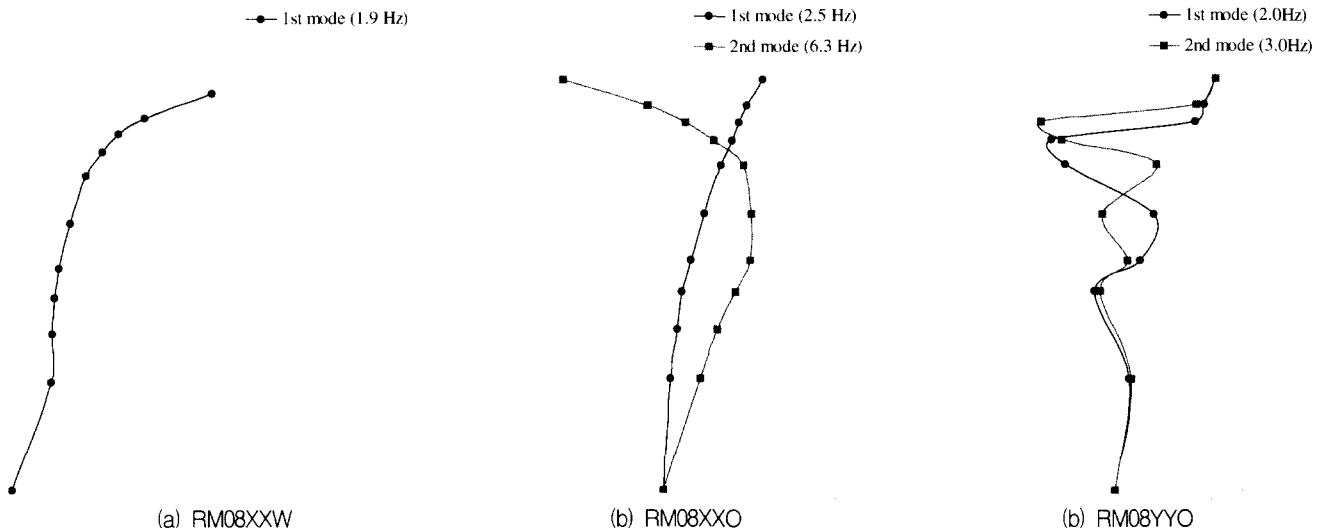
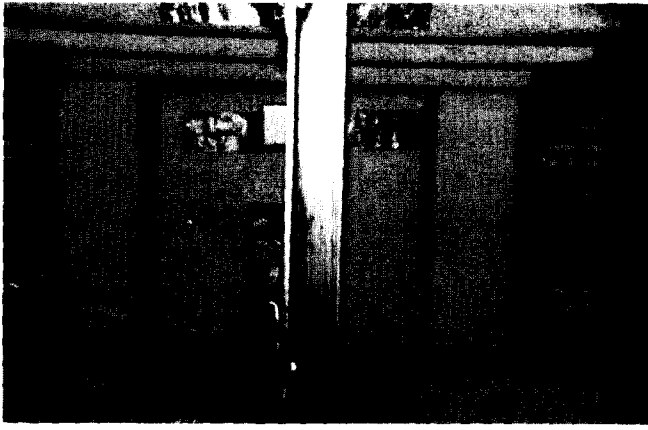
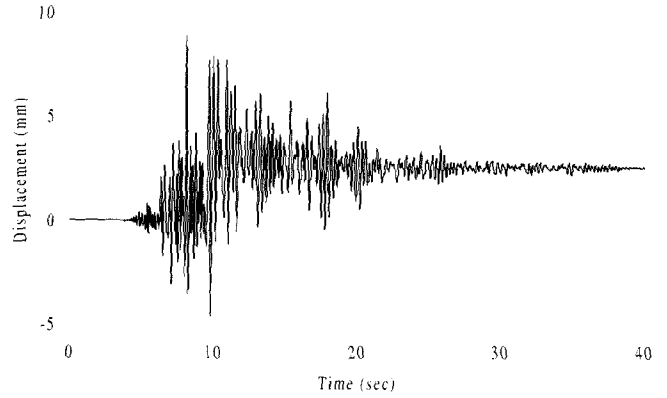


그림 29 예비시험 결과로부터 식별된 모드

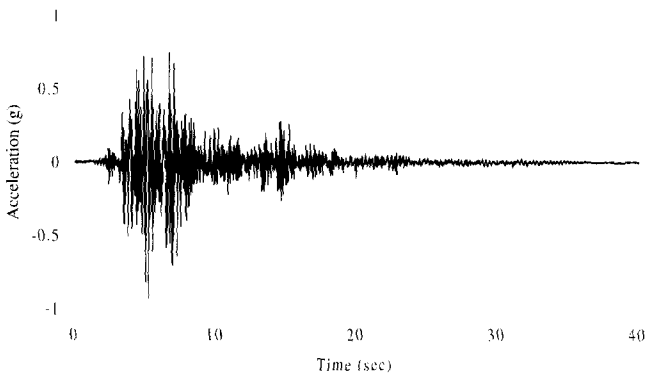


(a) 일층탑신부(별매석) 변형 형상

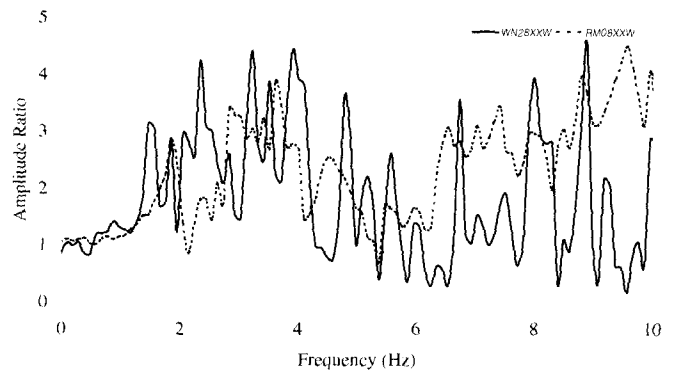


(b) 일층탑신부(별매석) 응답 변위 시간이력

그림 30 찰주가 있는 모델의 일층탑신부 변형(CG32XXW)



(a) 응답 가속도 시간이력



(b) 전달함수

그림 31 찰주가 있는 모델의 일층탑신부 변형시 오층옥개석 응답가속도 시간이력과 전달함수(WN28XXW)

Coalinga 지진과 Whittier Narrows 지진에서 주로 관찰되었다. 다른 한 형태는 탑두(종형석)가 추락하는 경우로서 EI Centro 지진 입력에서 일관되게 관찰되었다. 표 14에는 찰주가 없는 모델에서 일층 탑신부가 불안정해지는 순간(피해형태 I)이나 탑두(종형석)가 추락하는 순간(피해형태 II)에서의 유효지반가속도 및 피해형태를 수록하였다. 그림 32에는 EC16XXO의 경우 탑두(종형석)가 추락하는 사진을 보여주고 있다. 찰주가 없는 모델의 경우 EI Centro 지진이 작용하여 탑두(종형석)가 추락하기 전 단계(EC14XXO)의 x축 방향 오층옥개석의 응답가속도 시간이력과 전달함수가 그림 33에

주어져 있다. 그리고 찰주가 없는 모델에 Whittier Narrows 지진이 작용하여 일층탑신부가 불안정해지는 시점에서의 x축 방향 오층옥개석의 응답가속도 시간이력과 전달함수가 그림 34에 주어져 있다.

5.3 실험 결과 분석

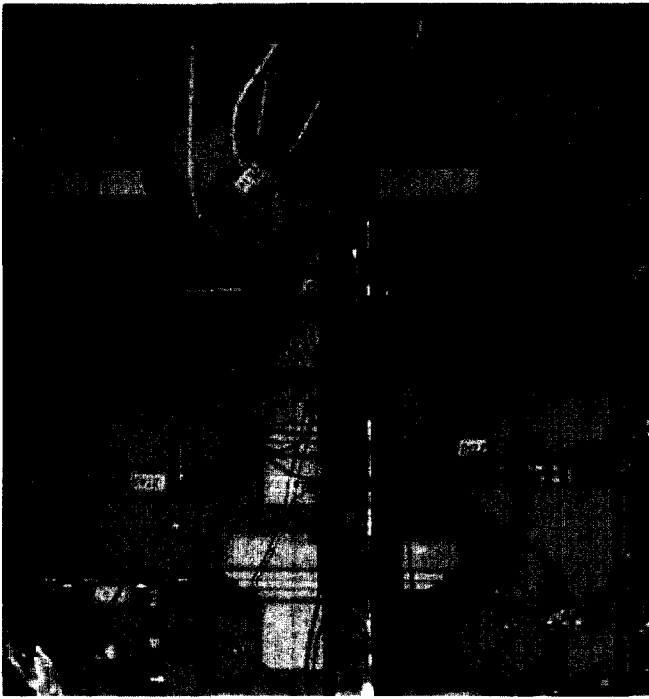
본시험인 취약도(fragility) 시험에서는 입력운동의 종류와 가속도 수준에 따라서, 또 찰주의 유무에 따라서 탑의 동적 거동에 현저한 차이를 보였다. 예비 실험 결과를 함께 도시한 그림 31(b), 33(b), 34(b)의 결과를 볼 때 전체 구조의 역학적 특성은 입력 가속도 수준에 따라 크게 달라짐을 확인할 수 있다. 이는 적층구조물과 같은 경계비선형 구조물의 경우 낮은 진폭에서의 구조물의 특성을 이용하여 높은 진폭에서의 구조물의 동적 거동을 예측하기가 어려움을 보여준다고 할 수 있겠다.

1936년 쌍계사 지진에서는 그림 1에서 확인할 수 있는 바와 같이 탑 전체는 안정되어 있고 탑두(종형석)만 추락하였다. 이 사실과 표 13의 결과로부터 1936년 지진당시에는 찰주가 삽입되어 있지 않았을 것으로 추정된다. 한편 표 14의 결과로부터는 당시 지진 가속도의 범위를 알 수 있을 것으로 생각된다. 비록 지반운동의 특성에 따라서 거동특성은 다르지만 EI Centro 지진기록과 같이 장주기 성분이 많은 지진의

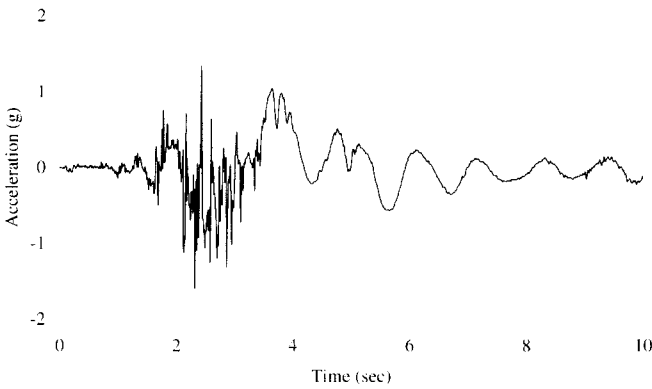
표 14 찰주가 없는 모델의 지진파별 피해 형태

입력 방향	CG (Coalinga)		WN (Whittier Narrows)		EC (EI Centro)	
	EPGA	피해형태	EPGA	피해형태	EPGA	피해형태
XX	0.32	I	0.24	I	0.16	II
YY	0.32	I	0.28	I	0.16	II
XZ	0.28	I	-	-	0.16	II
YZ	-	-	0.28	II	0.14	II
XY	0.28	I	0.24	I	0.12	II
YX	-	-	-	-	0.16	II
평균	0.30	-	0.26	-	0.15	-

주) 피해형태 I : 별매석 큰 변형 발생, 피해형태 II : 탑두 추락



(a) 탑두(중형석) 추락 사진



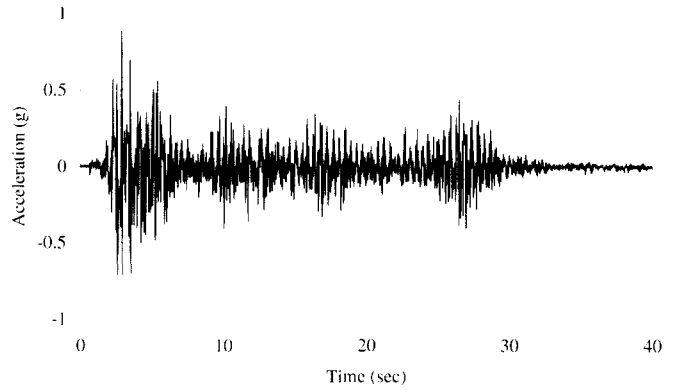
(b) 탑두(중형석) 응답 가속도 시간이력

그림 32 찰주가 없는 모델의 탑두(중형석) 추락(EC16XXO)

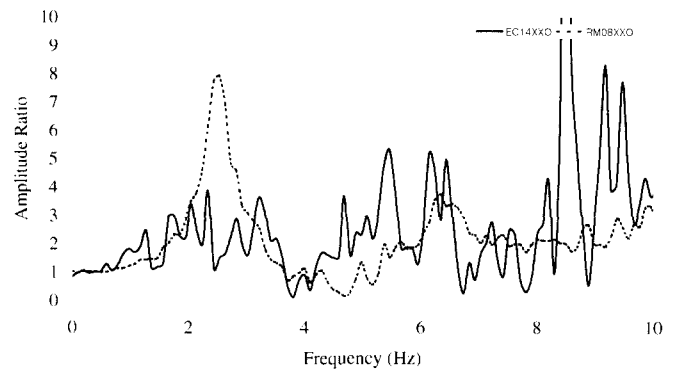
경우에는 평균 0.15g에서 탑두(중형석)가 추락하였다. 반면 단주기 성분이 많은 지진의 경우에는 평균 0.26g에서 0.30g 범위에서 일층 탑신부가 불안정해진다. 그러므로 지반운동은 0.15g보다 높았을 가능성은 있지만 0.30g를 초과하지 않았을 것으로 판단된다. 이는 MMI 7 또는 8에 해당한다고 판단되며⁽¹³⁾, 1936년 지진의 전반적인 피해 상황으로부터 추정할 수 있는 MMI 값과도 잘 일치한다. 그리고 표 13과 14의 시험결과를 볼 때 구조물의 거동에 대한 지반운동성분의 조합의 영향을 확인할 수 있는데 수평 일축방향 가진, 수평과 수직 방향 동시 가진, 수평 이축방향 가진 순으로 영향이 커짐을 알 수 있다.

6. 결 론

1936년 쌍계사 지진의 지진세기를 정량적으로 평가하기 위해서 오층석탑의 실물크기 모델을 제작하였다. 낮은 진폭에서의 동특성 확인 실험을 수행하였고 입력가속도의 세기를

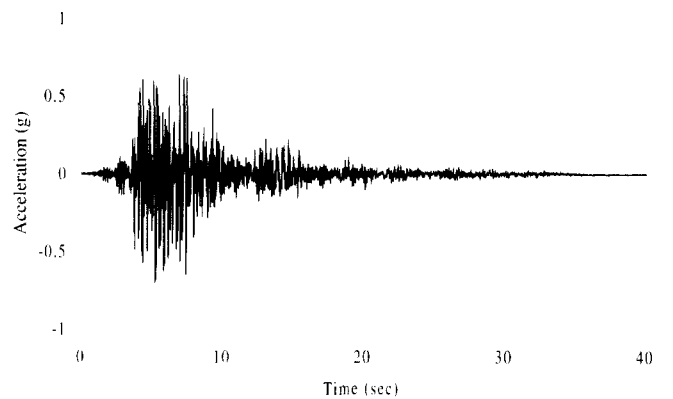


(a) 응답 가속도 시간이력

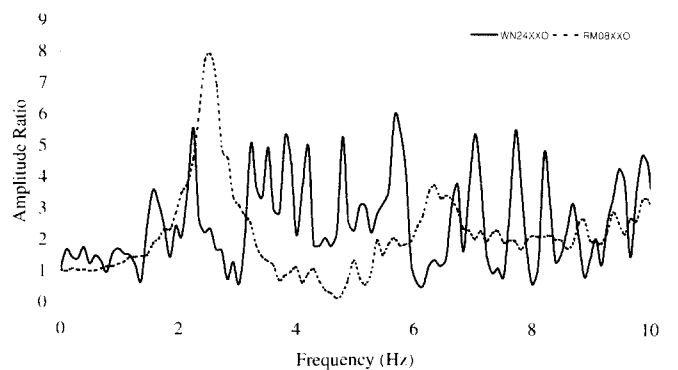


(b) 전달함수

그림 33 찰주 없는 모델의 탑두(중형석) 추락 전 단계의 오층육개석 응답가속도 시간이력과 전달함수(EC14XXO)



(a) 응답 가속도 시간이력



(b) 전달함수

그림 34 찰주 없는 모델의 일층탑신부 변형시 오층육개석 응답가속도 시간이력과 전달함수(WN24XXO)

증가 시켜 가면서 탑의 거동특성 변화를 관찰하였다.

낮은 진폭의 동특성 확인 실험의 결과 탑은 마치 cantilever beam처럼 거동하는 것을 알 수 있었다. 즉, 적층구조물의 거동은 강체 구조물의 rocking 거동과는 다른 것을 알 수 있었다. 그러나 이 같은 특성은 입력가속도가 증가됨에 따라서 점차로 사라지는 것을 볼 수 있었다.

실제 지진기록을 입력운동으로 사용한 지진취약도 시험에서는 탑의 거동이 지진기록의 특성에 매우 민감함이 관찰되었다. Broad spectrum의 대표적인 지진인 El Centro 지진의 경우에 찰주가 없는 모델은 유효지반가속도 0.15g 근처에서 사진에 보인 피해와 동일한 피해가 발생함을 보여주었다. Whittier Narrows 지진의 경우에는 탑두(중형석)가 전도되는 유효가속도의 세기가 한층 높았고 Coalinga 지진기록의 경우에는 탑두(중형석)가 전도되지 않고 그전에 일층탑신부가 불안정해졌다.

찰주가 있는 모델에서는 El Centro 지진기록이 사용되었을 때만 0.2g 이상에서 탑두(중형석)가 전도되었다. 다른 지진기록의 경우에는 탑두(중형석)가 전도되기 전에 일층탑신부가 불안정해졌다. 이로부터 1936년 당시 탑에는 찰주가 삽입되어 있지 않았을 가능성이 높다고 판단된다.

찰주가 없는 모델의 실험결과로부터 1936년 쌍계사 지진 시 지반운동의 세기는 0.15g에서 0.30g 범위에 있었을 것으로 추정할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 성과이전사업의 일환으로 지원된 연구비에 의하여 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)와 한국전력연구원(KEPRI)이 공동으로 수행하였다. 실험은 한국기계연구원(KIMM)에서 실시되었다. 탑의 실측은 전남대학교 천득염 교수 연구실에 의해서 수행되었고 서울대학교 전봉희 교수가 고증을 담당하였다. 탑의 해체 및 제작은 대한석상조각원의 이재순 대표가 책임 수행하였고 서울대학교 전석원 교수 연구실에서 재료특성에 대한 자문을 제공하였다. 이 연구의 추진은 한전연구원 이종림 박사의 후원이 큰 역할을 하였다. 실험계획을 수립함에 있어서는 동경대 Isao Sakamoto 교수, 동경도립대학 Kaori Fujita 박사, Tajimi Engineering의 Toshikazu Hanazato박사의 자문이 큰 도움이 되었다. 저자 일동은 과학기술부의 연구비 지원과, 자문위원의 귀중한 조언 및 한국기계연구원 구조시스템연구부 진동연구그룹의 협력에 깊이 감사드리는 바

이다. 끝으로 석탑의 해체를 허가하여주고 편의를 제공하여준 대한불교조계종 총무원과 쌍계사에 감사 드리는 바이다.

참고 문헌

1. 이기화, "한반도의 역사지진자료", 지구물리, 제1권, 제1호, 1998, pp. 3-22.
2. 추교승, 이정민, "한반도의 지진재해도 작성을 위한 역사 피해지진의 평가 및 종합정리", NIDP-99-13, 행정자치부 국립방재연구소, 1999, p. 192.
3. 건설교통부, 내진설계기준연구(II), 1997.
4. 서정문, 최인길, 전영선, 이종림, 신재철, "전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가 실험(I) : 암반지반 조건", 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제4호, 1997, pp. 11-20.
5. 서정문, 최인길, 전영선, 이종림, 신재철, "전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가 실험(II) : 연약지반 조건", 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제4호, 1997, pp. 21-28.
6. Seo, J. M., Choi, I. K., and Lee, J. R., "Static and cyclic behavior of wooden frames with tenon joints under lateral load," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 3, 1999, pp. 344-349.
7. Seo, J. M., Choi, I. K., and Lee, J. R., "Experimental study on the aseismic capacity of a wooden house using shaking table," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, 1999, pp. 1143-1162.
8. 俵田公地, "昭和十一年七月四日智異山南嶺 雙溪寺強震報告", 氣象講話會報, 朝鮮總督府觀測所, 第十卷 第四號 別刷, 1936.
9. 김재관, 박창업, 정충기, 류혁, Kaori Fujita, "쌍계사 오층석탑 실물 크기 모델의 지진시험", 한국지진공학회 추계학술발표회 논문집, 제3권, 제2호, 1999, pp. 388-395.
10. 전봉희, "쌍계사 석탑(금당 앞 석탑)의 진동대 실험을 위한 복원적 고찰", 개인자문, 1999.
11. 윤동석, 삼국시대 철기유물의 금속학적 연구, 고려대학교 출판부, 1989.
12. Hanazato, T., Theofanopoulos, N., and Watabe, M., "Seismic response analysis of parthenon columns," *Proc. of STREMA89*, 1989, pp. 339-348.
13. Bolt, B. A., *Earthquakes*, W. H. Freeman and Company, New York, 1993.