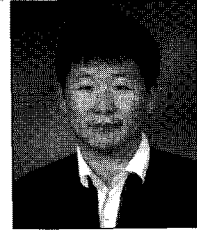


진동 폭에 따른 전통목구조의 고유진동수 특성

Natural Frequency Characteristics of Traditional Wooden Structure for Vibration Amplitude



황종국*

* 한국전통문화학교 전통건축학과 부교수

1. 서론

분명한 것은 대한민국의 전통건축물은 과거의 시간 동안 언제나 이곳에 있었다는 사실이다. 전통건축물의 입장에서 보면 '나는 항상 그 자리에 있었을 뿐이고 등을 돌렸던 것은 사람들인데 이제 와서 호들갑 떨고 있는 것을 보니 옛날 생각 많이 난다.'라고 할 만하지 않은가? 어쨌든 나 자신도 전통건축물에 인연을 맺고 전통건축물 구조특성에 대한 연구를 진행하고 있기 때문에 호들갑을 떨고 있는 한 부류에 속하는 것 같다는 점과 지금까지의 연구과정 중 적지 않은 시행착오가 있었다는 점을 인정하면서 수행된 연구내용과 전통건축물의 고유진동수 특성에 대한 내용을 소개하고자 한다.

국가지정문화재의 현황을 보면 국보는 308건, 보물은 1,508건이고, 이 중에서 목조문화재는 국보 22건, 보물 122건으로 각각 7.14%, 8.09%를 차지하고 있는 상황이다. 목조문화재 유지관리를 위한 노력은 꾸준히 진행되어 왔으며, 반도체 기술처럼 산뜻하지는 않지만 유지관리 기법에 대한 개발도 진행되어 왔다. 문화재청에서 진행한 건조물문화재 안전점검방안, 국립문화재연구소에서 진행한 구조성능 평가 연구 등이 여기에 포함된다고 볼 수 있다. 요즘은 소방방재청 방재연구소에서도 한옥의 내진안정성에 대한 연구를 진행하고 있고 국토해양부에서도 관심을 갖고 있으니,

많은 연구자가 탄생하는 것과 머지않은 장래에 좋은 결과가 있기를 기대해 본다.

2. 기존연구의 분석

건조물문화재 안전점검방안에 대한 연구는 전통건축물을 구성하는 재료를 중심으로 일반적으로 발생할 수 있는 문제의 원인과 대처 방안에 대해서 설명하고 있다. 좀 더 구체적인 안전점검의 방안에 대한 연구결과를 제시하지 못한 한계를 지니지만 전통건축물에서 발생할 수 있는 원인에 대해 전반적인 설명을 하고 있다는 점에서 의미가 있다고 볼 수 있겠다. 목조문화재 구조성능평가 연구에서는 힘의 흐름 특성을 반영한 방법에 의해 전통목조 가구법을 구분하였다. 이 방법 중 2점하중반력일체식인 봉정사 대응전을 연구대상으로, 보방향 프레임에 대한 접합부 강성과 거동 분석(Fig. 1), 도리방향 프레임에 대한 접합부 강성과 거동 분석(Fig. 2), 3차원 모델에 대한 비틀림 특성 분석과 접합부 파괴모드 및 내력에 대한 연구가 진행되었다. 접합부 특성에 대해서 부재의 크기와 하중의 변화에 대응할 수 있는 일반화된 식을 제시하지 못한 한계를 지니고 있지만 전통목구조 접합부에 대한 연구의 방향을 제시하였다는 점에 의미가 있다고 볼 수 있다.

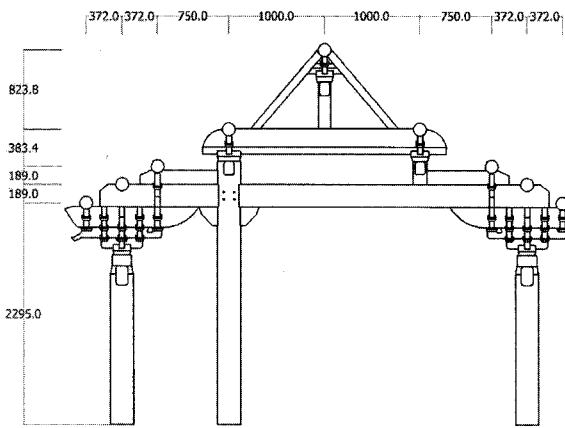


Fig. 1 봉정사 대웅전 보방향 프레임

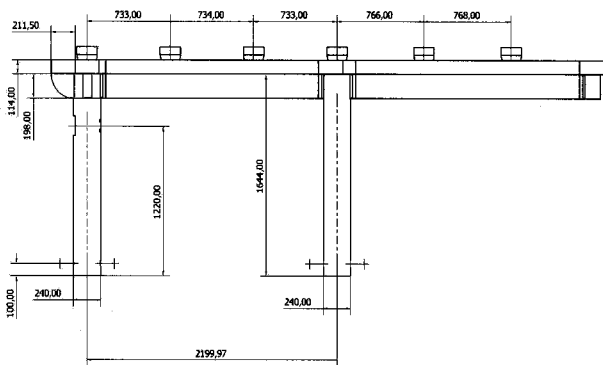


Fig. 2 봉정사 대웅전 도리방향 프레임

3. 3차원모델 고유진동수 특성

전통목구조물의 접합부는 맞춤과 이음으로 대별할 수 있다. 접합부를 구속하기 위한 목적으로 철물을 사용하지 않으며, 오로지 구속력과 재료의 마찰계수에 의해서 유발되는 마찰력으로 유지된다는 특징이 있다. 선행 연구결과를 보면 접합부에서 큰 회전각을 허용하고 비교적 높은 에너지 흡수 능력을 갖고 있음으로 인해, 진동에너지 흡수 능력이 상당히 있을 수 있음을 추정해 볼 수 있지만, 현재는 전통목구조물에 대해 진동에너지 흡수 능력을 판단할 수 있을 정도로 연구결과가 충분하지 않은 상황이다.

선행 도리방향 접합부연구에서 접합부 강성은 변위와 밀접한 관련이 있음이 밝혀졌다. 즉, 초반에는 균일한 강성값을 유지하지만 일정 변위를 넘어서면 강성이 급격히 떨어지는 현상을 확인하였다. 이러한 성격의 접합부가 여러 개 모여서 만들어지는 전통목구조물의 동적 특성은 독특한 특성을 나타낼 가능성이 있다. 본 연구는 전통목구조물의 진동에너지 흡수 능력과 관련한 객관적 자료를 확보하기

위한 목적으로 동적 특성 중 고유진동수에 관련한 특성을 분석하였다.

전통목구조물의 고유진동수 특성 분석 연구에 필요한 임의의 진동변위를 발생시킬 수 있도록 하기 위해, 건물 전체와 각 부재의 크기가 길이를 기준으로 실제 크기의 1/3이 되도록 봉정사 대웅전 실험체를 제작하여 슬라이딩 테이블 위에 설치하였다. 진동변위는 무작위 진동변위와 사인파 진동변위를 사용하여 진동실험을 수행하였다.

무작위 진동변위를 이용한 진동실험에서는 서로 다른 RMS 진폭을 갖는 무작위 진동변위를 슬라이딩 테이블에 발생시킨 후 슬라이딩 테이블과 평방 사이의 전달함수를 구하였고, 서로 다른 RMS 진폭에 따라 전달함수에 차이가 발생하는지를 분석하였다. 사인파 진동변위를 이용한 진동실험에서는 세밀하게 나누어진 진폭과 진동수를 갖는 진동변위를 슬라이딩 테이블에 발생 시킨 후 슬라이딩 테이블과 평방 사이의 전달함수를 구하였으며, 이 실험을 통해서 전통목구조물 고유진동수 변화의 경향을 명확히 확인하였다. 충격변위에 의한 자유진동 실험을 통해 전통건축구조물의 감쇠비를 확인하였다.

본 연구에서 고려하지 못한 사항은 다음과 같다. 하나는 전통목구조물 이음, 맞춤 접합부 강성특성이 전체 구조물의 고유진동수 특성에 미치는 영향을 분석하고자 하는 것이 주요 목적이었다는 점과 특성을 모르는 변수가 포함될 경우 결론을 도출하기 어려울 수 있다는 점을 고려하여 상인방, 하인방, 벽선, 문틀 등 벽체를 구성하는 요소는 실험체 구성에 반영하지 않았다는 점이다. 벽체에 관한 사항은 벽체의 특성에 대한 연구를 독립적으로 진행하여 벽체 강성 값 등의 특성을 파악한 후에, 벽체의 효과를 고려하는 것이 순서일 것으로 판단하였다. 또 다른 하나는 실험체의 스케일에 적합한 지붕 질량의 크기를 판단하기 어려웠고, 이 부분에 불확실성이 포함되어 있다는 점이다. 본 연구는 벽체의 효과는 고려하지 않았다는 점과 질량의 크기에 대한 확신이 없어, 본 연구결과 중 고유진동수는 전통목구조물 고유진동수의 일반적 특징을 의미하는 것은 아니며, 본 연구에 적용된 모델에 국한되는 한계를 가진다.

4. 실험체 준비 및 실험 환경

4.1 실험체 설계

실험체는 봉정사 대웅전 실제 크기의 1/3을 유지할 수 있도록 설계하였으며, 기둥 중심 간격으로 정면 4,450mm, 측면 2,910mm를 갖는다(Fig. 3). 기둥 윗면까지의 높이는 1,096mm로 하였고 평방 높이 76mm를 포함한다면 1,172mm를 갖는

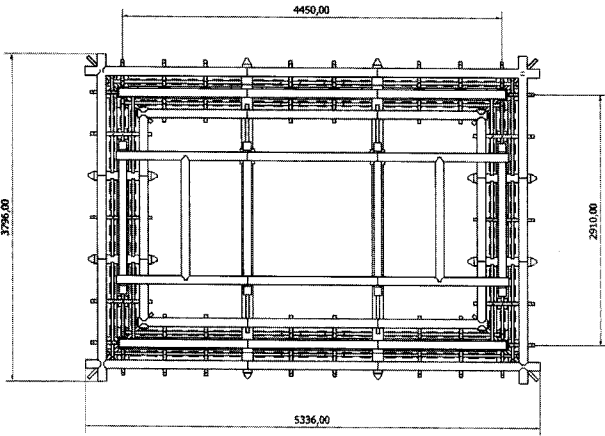


Fig. 3 봉정사 대웅전 1/3 실험체 평면

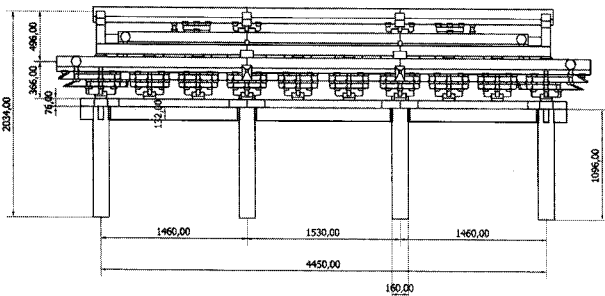


Fig. 4 봉정사 대웅전 1/3 실험체 정면

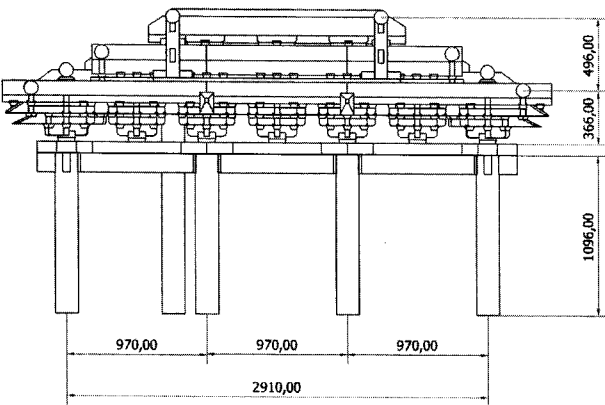


Fig. 5 봉정사 대웅전 1/3 실험체 측면

다. 평방 윗면에서부터 중도리 중심까지의 높이는 862mm로 하였다(Fig. 4). 측면 기둥 중심 간격은 970mm로 동일하게 하였다(Fig. 5). Fig. 1에서 볼 수 있는 중도리 위에서 마룻대까지, 즉 솥을합장, 대공, 마룻대에 의해서 구성되는 면은 하중체로서의 역할이 크고 전통목구조물 강성에 기여하는 정도가 작을 것이라는 판단과 경사가 급해서 하중을 적재하기가 어려울 수 있다는 점을 고려하여 실험체 설계에 포함시키지 않았다.

4.2 실험체 설치

기둥에서부터 중도리까지 미리 제작된 부재들을 반력상에 고정된 슬라이딩 테이블 위에 설치하였다.

기둥 하부 기초와의 접촉면은 실제와 동일한 조건을 유지할 수 있도록 슬라이딩 테이블 위에 올려놓고 오로지 상부의 하중에 의해서만 균형을 유지할 수 있도록 하였다.

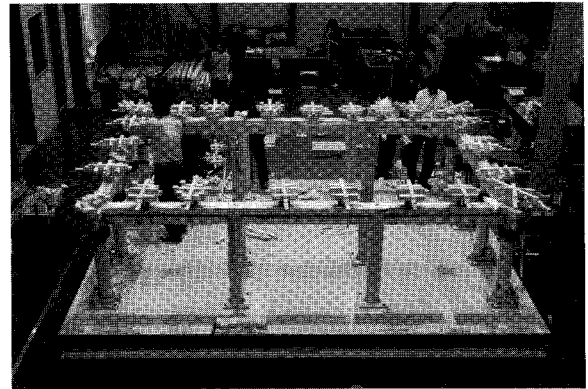


Fig. 6 실험체 조립과정 (평방 위 공포)

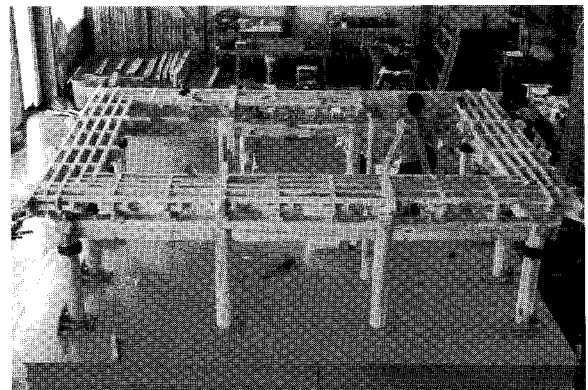


Fig. 7 실험체 조립과정 (공포 윗면)

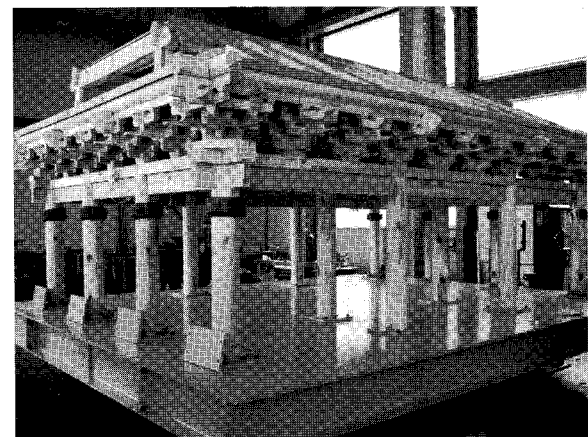


Fig. 8 실험체 조립 완료

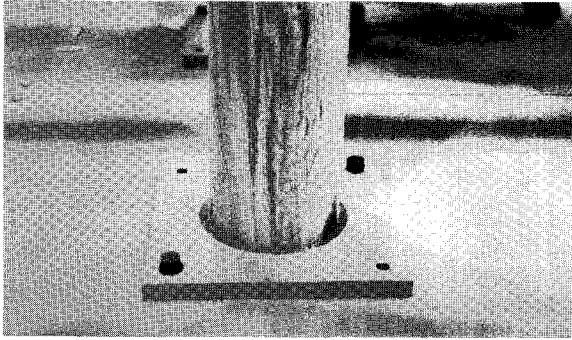


Fig. 9 기둥 하부 이동 방지턱

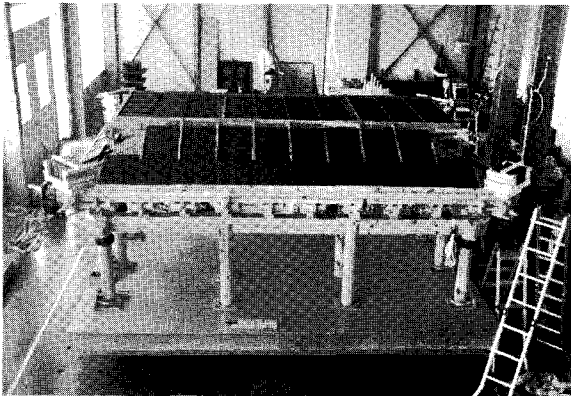


Fig. 10 지붕하중 적재 완료 모습

단지, 슬라이딩 테이블 상부 표면에 페인트 피복이 있는 관계로 마찰계수가 작아질 수 있는 점을 우려하여 기둥 하부에 얇은 고무패드를 깔았다. 또한 슬라이딩 테이블 상부에 진동변위를 발생시켰을 때 기둥 하부가 지나치게 이동할 수 있다는 점을 염려하여, 지점 하부를 구속하지 않으면서 이동만을 방지할 수 있는 이동 방지턱을 설치하였으며, 이동방지턱이 고무패드를 눌러 슬라이딩 테이블 상부에 고정시킬 수 있도록 하였다.

지붕무게에 상응하는 하중 효과와 질량을 구현하기 위하여 실험체 지붕에 질량체를 실었다. 지붕에 실어야 하는 질량체의 적정 무게가 어느 정도인지에 대해 판단하기가 어려웠기 때문에 본 연구에서는 질량체를 안정적으로 지붕에 적재할 수 있도록 적재용 틀을 설치한 후 준비된 질량체의 최대량을 적재하였다. 질량체는 두께 10mm의 철판으로 제작하였다. 한 장당 무게가 70.56N인 질량체 662장을 지붕에 적재하여, 실험체 지붕에 실린 무게의 총량은 46,710N이 되었다 (Fig. 10). 봉정사 수리보고서¹³⁾를 근거로 실제 지붕 무게를 계산해보면 약 2,500,000N 정도로 추정할 수 있다. 실험체 축소비율(1/3)에 근거했을 때, 실험체 지붕 무게는 실제 지붕무게의 1/27인 약 92,590N 정도로 추정할 수 있는데, 만약 이러한 단순계산이 타당한 의미를 갖는다면 실험체의 지붕에는

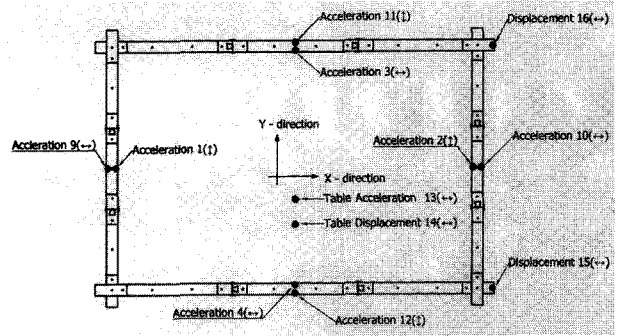


Fig. 11 테이블, 평방 가속도센서와 변위센서 위치

적정량의 약 1/2 정도가 실렸다고 볼 수 있다. 연구범위에서 언급한 것처럼 이러한 이유로 인해 고유진동수 절대값의 의미는 약화되고 상대적 특성 비교가 의미를 갖게 되었다.

4.3 센서 배치

실험체의 동적 특성을 분석하기 위해 13개의 가속도 센서와 3개의 변위센서, 모두 16개의 센서를 적용하였다. 가속도 센서와 변위센서 1개씩을 슬라이딩 테이블의 가속도와 변위를 계측하기 위해 배치하였다. 각 변의 중간에서 x, y 방향의

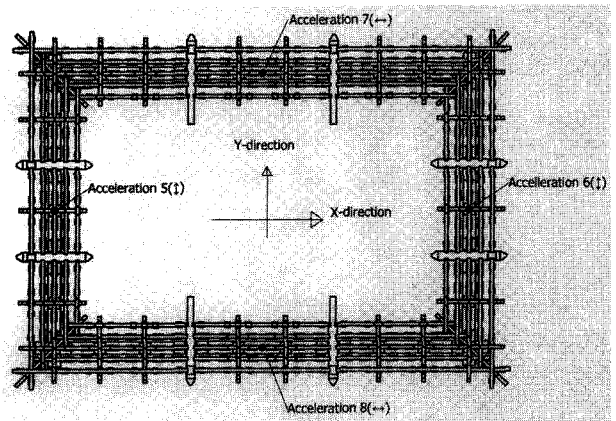


Fig. 12 공포 윗면 가속도센서 배치

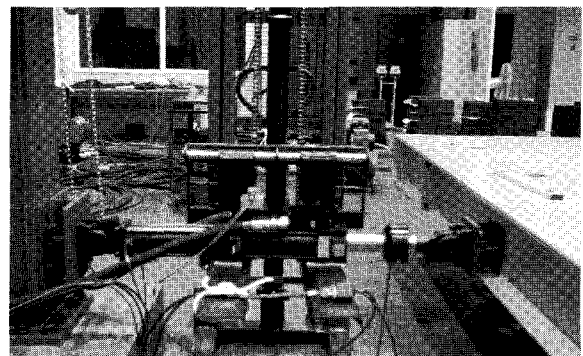


Fig. 13 유압식 동적가력기에 의한 변위제어

가속도를 계측할 수 있도록 2개씩 모두 8개의 가속도센서를 평방 윗면에 배치하였다. 또한 2개의 변위센서를 평방 끝단에 배치하여 평방의 X-방향 변위를 계측할 수 있도록 하였다. 나머지 4개의 가속도 센서를 공포 윗면에 배치하였다.

4.4 변위제어

슬라이딩 테이블의 변위는 유압식 동적가력기를 이용하여 발생시켰다. 유압식 동적가력기에 의해서 움직여지는 무게는 슬라이딩 테이블 상부 무게 약 46,000N에 지붕무게를 포함한 실험체 무게 약 50,000N을 합하여 약 96,000N이었으며, 여기에 변위를 발생시키기 위해 50,000N 용량의 유압식 동적가력기를 슬라이딩 테이블 상부에 부착하여 사용하였다(Fig. 13).

5. 진동실험 및 고찰

5.1 무작위 진동

무작위 진동실험은 1Hz에서 3Hz까지의 진동수 성분을 포함하는 무작위 변위신호를 발생시켜 슬라이딩 테이블에 작용시켰다. 진동수의 영역은 예비실험을 통해 실험체의 고유진동수가 2Hz 근처에 있음을 확인한 후 결정하였다. 무작위 변위신호는 0.2mm, 0.3mm, 0.5mm, 1.0mm의 RMS 변위 값을 갖는 4개의 신호를 사용하였으며, 각 신호를 100Hz로 계측하여 분석하였다. 진동변위는 실험체의 장변 방향 즉, Fig. 13에서 X-direction에 대해서 발생시켰다. 진동발생 시간은 90초 이상이 될 수 있도록 하였으며, RMS 변위 0.2mm의 신호에 대해서 슬라이딩 테이블에서 계측한 진동가속도 중 일부를 나타내면 Fig. 14와 같다.

0.2mm, 0.3mm, 0.5mm, 1.0mm의 RMS 변위 값을 갖는 무작위 진동변위를 작용시킨 후 가속도 센서 3, 4번에서의 계측 결과를 이용하여, 실험체의 X-방향 고유진동수를 0.2mm, 0.3mm, 0.5mm, 1.0mm의 RMS 변위 값에 대하여 구하면 Table 1과 같다. Table 1에서 보면 무작위 신호의 RMS 진폭이 커짐

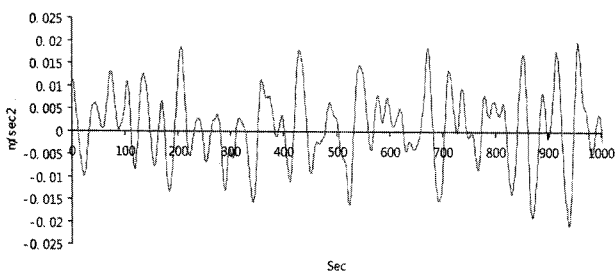


Fig. 14 RMS 변위 0.2mm 슬라이딩 테이블 진동가속도

Table 1 무작위 신호의 진폭에 대한 고유진동수

무작위 신호의 RMS 진폭 (mm)	고유진동수 (Hz)
0.2	2,606
0.3	2,576
0.5	2,258
1.0	1,962

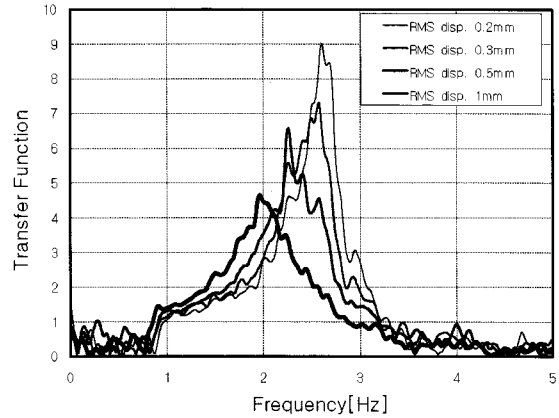


Fig. 15 슬라이딩 테이블과 평방 가속도 전달함수의 변화

에 따라 고유진동수가 낮아지는 경향이 있음을 알 수 있다.

3번과 13번 가속도센서 사이의 전달함수를 Fig. 15에 나타내었으며, 이것은 슬라이딩 테이블과 평방 사이의 전달함수를 의미한다. RMS 진폭이 커지면서 전달함수 값의 최고점이 낮아지면서 전달함수 값 최고점의 진동수가 작아지고 있는 것을 확인할 수 있다. Table 1과 Fig. 17을 통해서 추론해 볼 수 있는 현상은 다음과 같다.

- 1) 진동변위의 크기에 따라 고유진동수가 일정하게 유지되지 않고 변동하는 것으로 보아 전통목구조물의 고유진동수는 진동변위의 크기와 밀접한 관련이 있다. 변위가 커지면서 고유진동수는 작아지고 있고, 실험체의 질량이 변화하는 것은 아니기 때문에 실험체의 강성이 작아지고 있다는 것을 추론할 수 있다. 즉, 진동실험체의 강성의 대부분이 기둥-창방 접합부에 있다고 가정한다면 접합부 강성값이 변위에 따라 변화한다는 판단이 가능하다. 이러한 현상에 관한 것은 선행연구에서 부분적으로 입증된 적이 있다.
- 2) 슬라이딩 테이블에 발생하는 진동변위가 커짐에 따라 슬라이딩 테이블과 평방 사이의 전달함수 값이 점진적으로 작아지는 것으로부터 전통목구조물에 발생하는 진동변위가 커지면 전통목구조물의 강성을 형성하는 부분의 비선형성이 강해지면서 에너지 흡수 능력이 증가하게 되고, 결과적으로 에너지 전달 비율이 작아진다는 것을 알 수 있겠다.

3) 슬라이딩 테이블에 발생하는 진동변위가 커짐에 따라 슬라이딩 테이블과 평방 사이의 전달함수 최고값의 진동수가 작아지는 것으로부터, 전통목구조물의 고유진동수가 변위가 커짐에 따라 변화하는 현상을 분명하게 확인할 수 있겠다.

5.2 사인파 진동

무작위 진동실험의 결과에서 진동변위가 증가하면서 전통목구조물의 고유진동수가 작아지는 경향이 있는 것을 확인하였다. 이러한 현상을 좀 더 명확히 파악하기 위해 사인파를 이용한 진동실험을 수행하였다. 실험에 사용한 사인파의 진폭은 0.2mm, 0.5mm, 0.7mm, 1.0mm, 1.2mm, 1.5mm, 1.7mm, 2.0mm, 2.5mm이다. 각 사인파의 진동수는 1.0Hz에서 3.0Hz까지 0.05Hz 간격으로 변동하도록 설계하였다. 약 360개의 신호를 발생시켜 슬라이딩 테이블을 구동시켰으며, 16개의 센서에서 나오는 신호를 100Hz의 간격으로 계측하여 분석하였다. 각 진폭에 대해서 전달함수를 구하면 Fig. 16과 같다. Fig. 16을 통해서 추론해 볼 수 있는 현상은 다음과 같다.

1) 슬라이딩 테이블에 작용하는 진폭 0.2mm의 사인파에서 가장 큰 전달함수 값이 나타나는 것을 Fig. 17에서 확인할 수 있다. 슬라이딩 테이블에 작용하는 사인파의 진폭이 0.2mm에서 1.0mm로 증가할 때까지는 전달함수의 최대값이 급격하게 작아지는 것을 확인할 수 있다. 그렇지만 사인파의 진폭이 1.0mm 이상인 경우에는 전달함수의 최대값이 거의 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이것으로부터, 슬라이딩 테이블에 진폭 0.2mm에서 1mm 이하의 진동변위가 가해질 경우에는 접합부의 진동에너지 흡수 능력이 변위에 따라서 변동하지만, 슬

라이딩 테이블에 진폭 1mm 이상의 진동변위가 가해질 경우에는 접합부의 진동에너지 흡수 능력이 거의 일정하게 유지된다는 추론이 가능할 것으로 판단한다.

2) 슬라이딩 테이블에 작용하는 진폭 0.2mm의 사인파에서 가장 큰 진동수 값이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 슬라이딩 테이블에 작용하는 사인파의 진폭이 0.2mm에서 1.0mm로 증가할 때까지는 진동수가 상당히 큰 폭으로 줄어들지만, 사인파의 진폭이 1.0mm 이상인 경우에는 진동수가 비교적 일정한 폭으로 감소하고 있는 것을 확인할 수 있다. 전달함수 최대값의 경우에는 사인파의 진폭이 1.0mm 이상인 경우, 거의 일정하게 유지되었지만 고유진동수는 지속적으로 감소하는 모습을 보여주고 있다. 이것으로부터 진동변위가 커지면 전통목구조의 강성은 지속적으로 줄어들 수 있다는 추론이 가능할 것 같다.

5.3 자유진동

전통목구조 실험체의 감쇠비를 결정할 목적으로 충격변위에 의한 자유진동실험을 수행하였다. 5, 10, 15, 20, 25, 30mm의 충격변위를 슬라이딩 테이블에 발생시켰으며, 목표변위에 도달하는 시간은 0.1초를 유지하도록 하였다. 자유진동실험 결과는 로그 감소법(Logarithmic Decrement Process)에 의해 감쇠비를 구하면 Table 2와 같이 정리할 수 있다.

Table 2에서 확인할 수 있는 특이사항은 슬라이딩 테이블의 충격변위가 10mm 이상인 경우 평균 10.19%, 표준편차 0.10%의 감쇠비를 보여준다. 충격변위가 5mm인 경우 이보다 작은 값을 보이지만 사례가 적어 경향에 대한 판단은 어렵겠다. 감쇠비가 일정한 값을 보인다는 것은, 질량이 변하지 않기 때문에 슬라이딩 테이블에 10mm 이상의 충격변위가 가해지는 경우 전통목구조 실험체의 강성값이 거의 일정하게 유지된다는 것을 의미하는 것으로 추론할 수 있다.

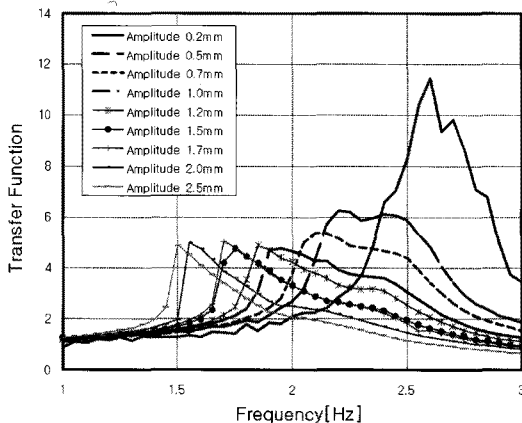


Fig. 16 사인파 진폭에 대한 전달함수

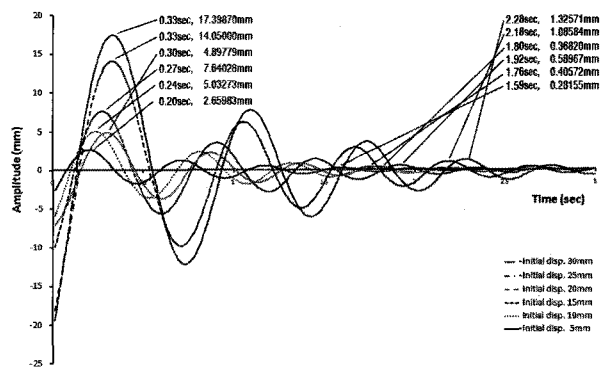


Fig. 17 자유진동 실험결과

Table 2 감쇠비

X-방향 충격변위 (mm)	감쇠비 (%)
5	8.94
10	10.02
15	10.19
20	10.30
25	10.19
30	10.24

6. 결 론

본 연구에서는 전통목구조물의 동적특성에 대해서 분석하였다. 연구 대상은 봉정사 대응전을 모델로 하여 1/3 크기의 실험체를 제작하였고, 1축 방향으로 움직일 수 있는 슬라이딩 테이블 위에서 무작위 진동실험, 사인파 진동실험과 자유진동실험을 수행하였다. 연구내용 및 범위에서 언급한 것처럼, 벽체를 포함하지 않았다는 점, 실험체에 적재된 지붕의 무게가 불분명하다는 점 등으로 인해 실험결과 값에 대해서 절대적인 의미를 부여하기는 어렵다는 한계를 고려하여 본 연구결과를 정리하면 다음과 같다.


- 1) 전통목구조물은 진동변위의 크기에 따라서 고유진동수가 변화한다. 접합부 부위의 진동변위가 커지면서 접합부 강성이 작아지고, 이것은 구조체 전체 강성이 작아지는 결과를 유도하여 고유진동수는 작아지게 된다.
- 2) 전통목구조물의 진동변위가 커짐에 따라 접합부 강성의 비선형성이 강해지면서, 구조체 전체 강성의 비선형성이 강해지는 방향으로 유도된다. 이것은 에너지 흡수능력이 증가되는 방향으로 작용하게 된다.
- 3) 에너지 흡수 능력은 진동변위가 커지면서 증가하게 되지만 지속적으로 커지는 것은 아니며, 일정 변위 이상이 되면 에너지 흡수 능력은 더 이상 증가하지 않는다.
- 4) 에너지 흡수 능력과 달리 전통목구조의 강성은 진동변위가 커짐에 따라 일정 진동변위에 도달할 때까지는 지속적으로 줄어든다.
- 5) 감쇠비는 일정 진동변위 이상에서는 균일한 값을 유지하는데, 이것은 일정 진동변위 이상이 되면 강성값이 거의 일정하게 유지된다.

이미 언급된 본 연구에 대한 한계사항 이외에 추가로 언급할 수 있는 부분은 진동실험을 Y방향에 대해서는 수행하지 못해서, Y 방향에 대한 결과가 없다는 점과 감쇠비 실험에서 작은 값의 충격진동변위에 대한 사례가 적어서 감쇠비에 대한 일관적인 기술을 하기가 어려웠다는 점, 여러 가지의 현상에 대해서 개별적으로 열거 하고는 있지만 통합된 결론을 도출해내지 못했다는 점을 들 수 있다.

감사의 글

이 기사는 2009년도 건설교통기술평가원 지원 한옥건축통합정보시스템 및 3차원 라이브러리 구축 중 내력기반 표준접합부 DB 구축과 한옥 구조기준 연구의 일환으로 작성된 것입니다.

참고문헌

1. J.K.Hwang, S.G.Hong, N.H.Kim, Y.W.Lee, S.J.Jeong & S.J.Joo, The effect of friction joint and Gongpo(bracket set) as an energy dissipation in Korean traditional wooden structure, Proceedings of the sixth International Conference on Structural Analysis of Historic Construction, pp.861-866, 2008
2. 문화재청, 문화재연감, 2007
3. 문화재청, 건조물 문화재 안전점검방안 연구보고서, 2000.12
4. 국립문화재연구소, 목조문화재 구조성능 평가 연구, 2004.12
5. 국립문화재연구소, 다포식 목조문화재 도리방향 강성모델링 및 안정성 연구, 2005.12
6. 국립문화재연구소, 3차원 비틀림 모멘트강성 분석 및 허용기울기 연구, 2006.12
7. 국립문화재연구소, 목조문화재 구조성능 평가 연구, 2007.12
8. 황종국, 홍성걸 외 4인, 힘의 흐름을 고려한 전통목조가구의 구조형식 분류에 관한 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 제22권 제2호, pp.35-41, 2006
9. 이영욱, 홍성걸 외 4인, 전통목구조 시스템의 보 방향 프레임의 해석 모델링, 대한건축학회논문집 구조계, 제22권 제3호, pp.29-36, 2006
10. 정성진, 홍성걸 외 4인, 전통목구조 해석을 위한 모형화 기법, 대한건축학회논문집 구조계, 제21권 제12호, pp.77-84, 2005
11. 이영욱, 홍성걸 외 2인, 전통목구조 시스템에서 장부이음을 가진 도리방향 골조의 수평하중 저항능력, 대한건축학회논문집 구조계, 제23권 제2호, pp.35-42, 2007
12. 이영욱, 홍성걸 외 2인, 도리방향 골조의 반턱이음 접합부의 횡하중 저항능력에 관한 실험, 제24권 제7호, pp. 29-36, 2008
13. 안동시, 봉정사 대응전 해체수리공사보고서, 2004 

[담당 : 정성진, 편집위원]