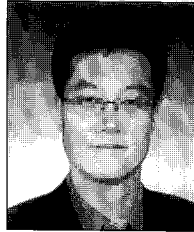
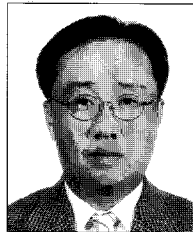


전통목구조에 대한 구조공학적 접근방법

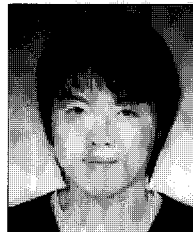
A Method on the Structural Approaches to the Korean Traditional Wood Structures



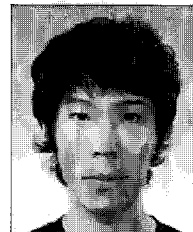
정성진*



배병선**



박찬수***



박세희****

* 한남대학교 건축학부 교수

** 국립문화재연구소 건축문화재연구실 실장

*** 한남대학교 건축학부 석사과정

**** 한남대학교 건축학부 학부과정

1. 서론

최근 들어 우리나라에서도 문화·예술에 대한 관심이 고조되어감에 따라 전통구조물에 대한 구조성능 평가와 보수·보강 및 보존에 대한 제반의 연구들이 시도되고 있다. 여기서 우리는 전통구조물을 크게 목조구조물과 석조구조물로 나누어 생각할 수 있는데, 본고에서는 전통목구조에 대한 구조적 접근방법에 대해 생각해 보기로 한다.

전통목구조에 대한 구조성능 평가와 보수·보강 및 보존 기술에 대한 공학적 토대를 마련하기 위해서는 크게 해석적 접근방법과 실험적 접근방법 두 가지를 취해야 하며, 이들은 서로 분리되어 있는 것이 아니라 서로 매우 밀접한 관계를 가지고 있는 것이라는 시각에서 출발하여야 한다. 따라서 본고에서는 전술된 두 가지의 접근방법에서 바라본 전통목구조에 대한 구조공학적 접근방법에 대해서 생각해 보기로 한다.

2. 기존연구의 분석

제한적 범위 안에서 조사한 바에 따르면, 우리나라 전통목구조에 대한 해석적 방법론을 종합적으로 생각해본 최초

의 연구는 김봉건¹⁾에 의한 연구일 것으로 판단된다. 따라서 본고에서는 김봉건¹⁾의 연구결과를 토대로 하여 전통목구조 해석에 관한 접근방법을 고찰하여 본 후 향후의 연구 방향에 대해 분석하여 보기로 한다.

김봉건¹⁾은 우선 우리나라의 전통목구조와 서양식 목구조 사이에 존재하는 역학적 특성을 비교·분석하였는데, 이를 정리하여 보면 표 1과 같다. 또한 김봉건¹⁾은 전통목구조 건물에 대한 골조해석 시 나타나는 구조해석상 문제점을 분석하여 제시하였는데, 그 내용을 정리하면 표 2와 같다.

표 1의 내용을 분석하여보면, 우리나라 전통목구조는 처녀 및 서까래 등의 존재로 인해 서양식 목구조에 비하여 의장 및 기능적인 측면에서 장점을 갖는 것으로 볼 수 있으며, 구조적으로는 유연한 결구부에 의한 하중재분배 능력 등의 장점을 갖는 것으로 볼 수 있다. 한편 표 1에 나타난 내용만을 놓고 보면, 우리나라 전통목구조가 서양식 목구조에 비하여 구조적으로 많은 단점을 지니고 있는 것처럼 보일 수 있으나, 이에 대한 판단은 유보하는 것이 좋을 것으로 보인다. 즉, 표 1의 내용은 접합부의 특성을 명확히 정의할 수 있는 구조물을 대상으로 이론적 근거를 확립하여 온 서양의 공학적 지식에 근거하여 분석한 것으로써, 아직까지 우리나라 전통목구조의 구조성능을 충분히 설명할

Table 1. Comparison of the Korean traditional wood structures and the western wood structures

전통목구조	서양식 목구조	전통목구조의 장단점	
		장점	단점
큰 단면을 사용	단면이 작은 여러 개의 부재를 사용	부재수가 적음.	자재 조달이 어려움.
기둥 사이에 대들보를 대고 그 위에 동자주·대공 등을 세운 후 종보를 걸친 다음 다시 대공을 수직으로 세우는 가구방식	트러스 구조를 이용한 지붕가구	-	트러스 내에 존재하는 사각형에 의한 불안정성
서까래, 추녀 등 켄틸레버 역할을 하는 부재가 존재 ¹⁾	켄틸레버 부재가 없음.	1) 햇볕과 비바람으로부터 건물을 보호 2) 건물의 미관을 형성	-
촉, 이음, 맞춤 등에 의해 목재를 연결하므로 원칙적으로 강재를 사용하지 않음	목재의 연결부위를 볼트와 같은 강재를 이용하여 연결	변형 시 하중의 재분배 능력에 따른 결구의 유연성	결구부 강성이 약함.
건물의 자중 특히 지붕하중이 상당히 큰 비중을 차지함	상대적으로 자중이 작음	1) 자중에 의한 결구강성의 보강 2) 횡력에 일차 저항	불균등자중에 의해 가구의 비틀림 및 쏠림 등이 발생할 수 있음.
가새를 사용하지 않음 ²⁾	가새를 사용하여 사각형 벽체의 변형을 방지	-	사각형 벽체가구의 변형이 많이 생김.
부재가 대부분 노출되어 구조재로서의 역할을 함과 동시에 의장재로 쓰임	부재가 대부분 감추어져 있음.	-	1) 부재형상에 변화를 주는 경우가 많아 부재의 역학적 특성을 계량하기 어려움. 2) 서양식 가구에 비해 불균일 요소가 많아짐.

* 켄틸레버 부재의 처짐을 방지하기 위하여 공포, 활주 등의 부재가 고안되어 역학적 및 의장적 목적으로 사용되고 있음.

** 간혹 조선 후기의 건물에서 가새를 사용하는 경우가 있으나, 이는 전통목구조 방식이 아님.

Table 2. Problems in the structure analysis

해석대상	현황	문제점	해결방안
하중	접처마인 경우, 흙의 자중을 460kgf/m ² 으로 가정	정확한 하중데이터를 알기 어려움.	-
단면특성	의장적 기능에 따른 단면의 변화	배흘림기둥, 추녀, 또는 서까래 말구 등 항아리형 단면을 갖는 보 ²⁾	최소단면 사용(또는 최소·최대 단면의 평균치) 춤은 원래의 치수를 사용하고, 폭을 항아리 단면적과 같아지도록 조정
	맞춤 형식에 따른 단면의 변화	첨차의 단면결손 소로, 주두, 또는 판대공: 하부가 상부보다 작은 단면을 가짐	외부에서 보이는 단면치수 사용(특히 위험할 경우 최소단면 사용) 평균단면이 아닌 하부단면의 치수 사용
골조	결구부의 모형화	결구의 성격이 불명확	-
	해석 프로그램	전통목구조에 대한 모형화의 한계	-
	공포	모형화 방법	공포를 기둥의 연장으로 보아 일차계산 후, 이차로 공포에 대한 삼차원 해석
결구부 ¹⁾	기둥과 초석	모형화 방법	큰 상부하중은 집합부의 마찰효과를 크게 해주므로 ³⁾ 힌지로 모형화
	공포	첨차와 소로의 모형화 방법 ⁴⁾	힌지접합으로 모형화
	첨차와 제공의 모형화 ⁵⁾	모형화 방법	힌지접합으로 모형화
	소로의 상하부 ⁶⁾	모형화 방법	일단강절, 타단힌지로 모형화
	대들보와 소로, 종보와 소로	모형화 방법	힌지접합으로 모형화
	솟을합장과 종보	모형화 방법	힌지접합으로 모형화
	부연	모형화 방법	-

1) 부재의 결합상태와 전체 구조물의 해석에 따른 제반 문제를 복합적으로 고려하여 결정

2) 고려시대 건축 양식을 판정하기 위한 중요 요소

3) 범어사 일주문은 마찰력만으로 지지되는 전통목구조의 극치를 보여줌

수 있는 이론 또는 실험적 도구들이 충분히 개발되어 있지 않다는 점을 감안한다면 우리나라 전통목구조의 구조성능이 서양식 목구조에 비하여 떨어진다고 선불리 예단하는 것은 매우 위험한 일이라고 판단된다.

표 2의 내용을 분석하여보면, 김봉건¹⁾은 전통목구조에 대한 구조해석 시 나타나는 문제점들이 크게 하중의 가정, 변단면 부재의 모형화방법, 해석프로그램들의 한계 및 결구부의 모형화방법 등에서 나타나는 것으로 보고 있다.

표 2 및 제반의 자료들^{2~7)}에 근거하여 판단해 볼 때, 우리나라 전통목구조에 대한 구조해석 시 나타나는 문제점들은 크게 오래된 목재에 대한 재료특성의 부재, 변단면 부재들에 따른 단면특성의 적용방법, 축·이음·맞춤 등에 따른 접합부 모형화의 난해성, 하중 산정의 난해성 등에 있는 것으로 보인다. 전술된 문제점들 중 재료특성 및 하중에서의 문제점들은 오래된 목재에 대한 실험데이터 확보 및 전통목조건물에 대한 정밀 실측 자료의 확보 등을 통해 해결할 수 있으며, 변단면 부재에 따른 해석상의 난점은 일차적으로 변단면 요소의 사용 등을 통하여 해결할 수 있다. 그러나 접합부의 모형화와 관련된 난점들은 여전히 마땅한 해결책이 제시되지 않은 채 상존하고 있다.²⁾

접합부 모형화와 관련된 문제점들을 해결하기 위해서는 전통목구조 해석에서 나타나는 접합부의 형식 및 모형화 방법 등을 살펴볼 필요가 있는데, 그 내용은 다음과 같다.

2.1 기둥과 초석의 접합부²⁾

기둥과 초석 사이의 마찰력만으로 하중을 지지하는 접합 방식으로, 통상 핀지지인 것으로 모형화된다. 기둥을 따라 전달되는 상부의 무거운 하중은 기둥과 초석 사이의 마찰력을 크게 해주는 효과가 있으므로, 기둥 하부에는 강성이 큰 수평방향 스프링이 있는 것으로 가정될 수 있다. 따라서 기둥 하부에서 핀지지되는 것으로 모형화하는 것은, 매우 큰 수평하중이 기둥 하단에 작용하지 않는 한 합리적인 모형화 방법이라 말할 수 있다.

2.2 공포²⁾

첨차와 소로 및 첨차와 제공은 핀접합, 소로의 상하부는 일단 핀접합, 타단 모멘트접합으로 모형화하는 것이 일반적이다. 이와 같이 모형화할 경우, 컴퓨터 프로그램을 이용한 해석 시 구조물이 불안정해지므로 이를 피하기 위해 핀접합인 곳에 매우 작은 강성을 갖는 스프링요소를 추가한다. 여기서 추가되는 스프링요소의 스프링상수를 임의로 가정한다는 것은 비논리적이며, 소로에서 모멘트접합으로 가정되는

곳은 실제로 핀접합에 가깝다는 문제점을 안고 있다.

2.3 부재간 접합부²⁾

대공과 보, 기둥과 창방 등과 같이 부재들이 이음이나 맞춤을 통해 만나는 부분을 모두 핀접합인 것으로 가정하는 것이 일반적이다. 이와 같이 모형화할 경우, 조건에 따라 구조물이 불안정해질 수 있어 이를 피하기 위해 공포에서와 같이 매우 작은 강성을 갖는 스프링요소를 추가한다. 이와 같은 모형화 방법은 공포에서와 마찬가지로 스프링상수와 관련된 문제점을 갖게 된다.

전통목구조 해석에서는 전술된 바와 같은 문제점들을 안고 있으므로, 이를 개선하기 위해서는 결구의 구조적 특성을 정립하고, 이를 근거로 접합부와 관련된 제반의 강성을 실험적으로 알아낸 다음, 실험으로부터 구한 휨강성을 적용하기 위한 다양한 해석모형의 개발 및 합리적인 모형화 기법을 정립할 필요가 있다는 판단 하에 국립문화재연구소에서는 2005년~2007년에 걸쳐 접합부강성에 관한 실험적 연구를 수행한 바가 있는데, 그 내용을 정리하면 표 3과 같다.

표 3과 같은 실험에서 나타난 결과 중 주목할 만한 것은, 전통목구조 결구부의 형식보다는 기둥 상단에 재하되는 수직하중의 크기가 기둥의 수평강성(또는 회전강성)을 증가시킨다는 사실이다.³⁾ 이와 같은 사실에 착안하여 정성진⁴⁾ 등은 그림 1, 그림 2와 같은 해석모델에 대해 기둥을 강체로 가정하고 기둥하부에서의 접촉면을 겹요소로 가정한 구조해석을 수행한 바가 있는데, 여기에서는 해석결과를 근거로 기둥의 수평강성(또는 회전강성)에 영향을 미치는 주요 요소들은 기둥 상부에 재하되는 수직하중의 크기와 기둥하부에서의 접촉면의 면적 이 될 것이라고 주장하였다.⁴⁾

여기서 만일 전통목구조시스템의 거동을, 기존의 구조해석에서 사용하였던 핀 또는 모멘트접합의 접근방법에서 탈피하여 kinematic approach(기하적인 형태로 결정되는 구조적 특성)로 규명하고자 할 때 전술된 두 가지 특성, 즉, 기

Table 3. Experimental researches for the evaluation of the connections

년도	연구내용	비고
2005년	1) 전통목구조시스템의 분류 2) 접합부 모형화 방안 3) 보방향 접합부 실험	-2D 축소모형 -핀지지
	1) 접합부 모형화 방안 2) 도리방향 접합부 실험	
2006년	1) 비틀림모멘트강성 및 허용기울기 2) 전통목구조골조의 동적특성 실험	-3D 축소모형
2007년	1) 접합부 형식 및 해석적 특성 분석 2) 맞춤, 이음, 축 등의 구조성능 실험	-결구부 구성요소의 구조성능

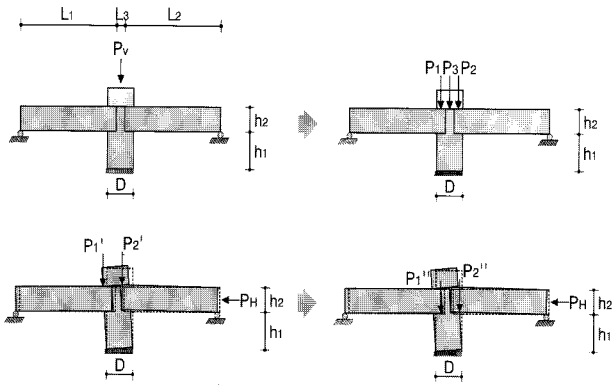


Fig. 1 Analytic model with capital

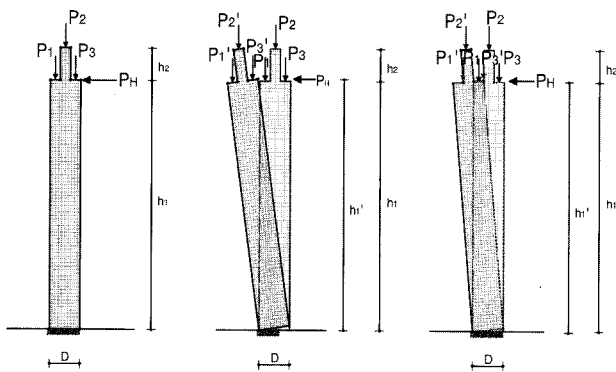


Fig. 2 General analysis model of column

등의 수평강성(또는 회전강성)에 영향을 미치는 주요 요소가 기둥 상단에 재하되는 수직하중의 크기와 기둥 하부의 접촉면이 될 것이라는 것은 매우 중요한 의미를 갖는데, 이에 대한 자세한 설명은 뒤에서 기술하기로 한다.

3. 전통목구조 사례조사 및 설문조사 결과 분석

전통목구조에 대한 구조공학적 접근방법을 구체적으로 생각해보기에 앞서 문제점이 있는 몇 가지의 전통목구조를 살펴보기로 하자. 먼저 그림 3과 같은 청룡사 대웅전의 상황을 분석하여보면 다음과 같다.

현재 안성 청룡사 대웅전은 중수 이후 주요 가구구조 대부분에 대한 보수가 이루어지지 않아 기둥과 창방, 평방 등 주요부재의 대부분이 심하게 갈라져 있고 주요결구부분이 이완된 상태이며 배면기둥의 안솔림 현상이 나타나 건물내부로 기울어지는 등, 장·단기적인 구조 변형 상태가 전반적으로 나타나고 있다. 이러한 상황을 좀 더 자세히 분석하여 보면, 먼저 초석, 기단과 계단간 축대로 이루어진 기초부의 경우, 그림 4와 같이 기둥 하부에서의 목재 부식으로 인해 지지부위가 불안정한 상태이다.

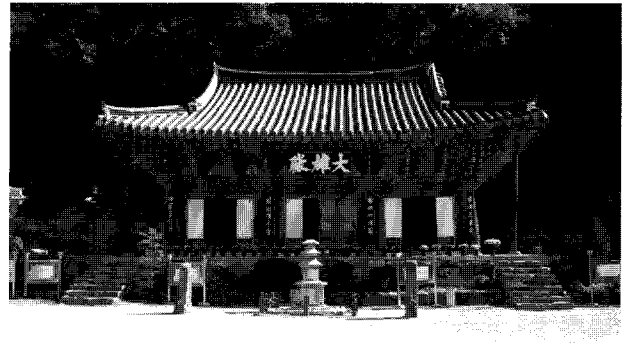


Fig. 3 The Chungryung-sa Daewoongjeon



Fig. 4 the state of the bottom of columns

기둥, 벽체, 창호로 이루어진 축부의 경우, 그림 5와 같이 기둥의 단면이 불규칙하고, 창방과 평방의 연결부가 어긋나 있으며, 평방은 공포의 집중하중으로 인해 처짐이 심하여 지지구조가 불안정한 상태임과 동시에 전면의 활주가 기울어진 상태이다.

공포대의 경우에는 그림 6과 같이 공포의 방향이 뒤틀어져 있으며, 공포와 공포사이의 흠박이 변형을 일으키고 있다.

보·도리·대공으로 구성되는 가구와 서까래·추녀·적심·기와로 구성되는 지붕가구의 경우, 그림 7과 같이 네모서리의 추녀 내부길이의 차이로 인해 하중의 불균형적인 분배의 문제점이 있으며, 서까래 주변의 양토가 부분적으로 탈락하였다.

청룡사 외에 그림 8과 같은 개심사 대웅전을 살펴보기로 하자.

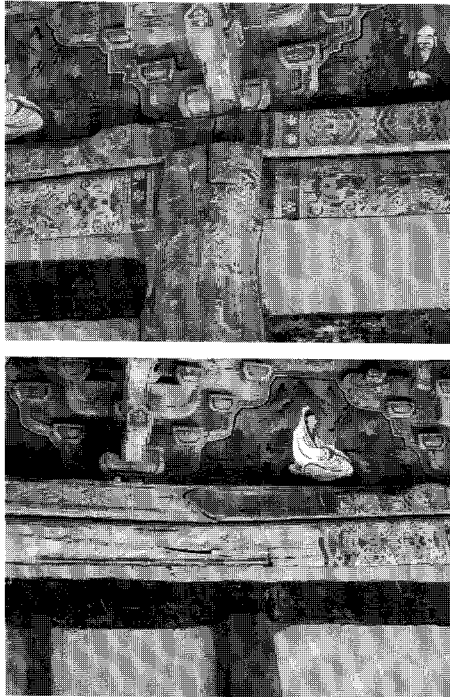


Fig. 5 the state of the connection and the Pyungbang



Fig. 7 the state of the roof

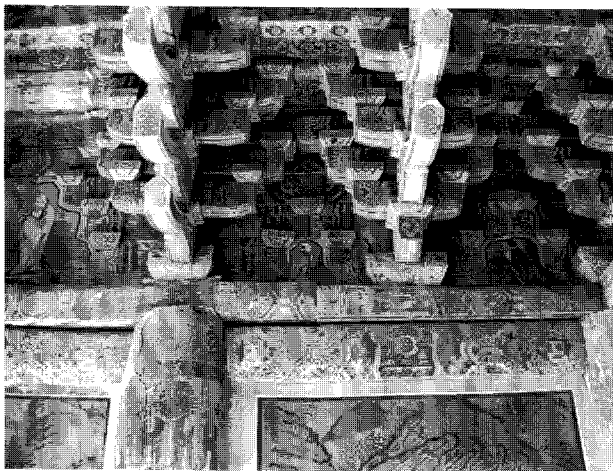


Fig. 6 the state of the Kongpo



Fig. 8 the Gaeshim-sa Daewoongjein

개심사 대웅전은 백제 의자왕 14년(651)에 창건된 것으로 추정되며, 여러 차례의 중건 및 중창을 걸쳐 1941년, 1955년, 1972년, 2005년에 보수되었는데, 1941년 보수 당시의 도면을 살펴보면 그림 9와 같다.

일반적으로 전통목구조를 다루는 구조실무자 또는 문화재 설계자들이 실무 현장에서 위와 같은 전통목구조 문화재들과 만나게 되었을 때 각각의 단위부재 또는 결구부가 주어진 하중에 저항할 수 있는가의 문제(그림 4~그림 7)와 전체구조시스템이 안정성(stability)을 유지할 수 있는가의 문제(그림 9)에 부딪히게 된다. 이러한 경우 전통목구조문화재에 대한 구조적거동을 분석하거나 또는 구조성능을 평

가하기 위해서는 접합부의 강성, 특히 휨강성을 먼저 알아내야 할 필요가 있다. 그러나 전통목구조의 결구부 양식이 너무나 다양하고 설령 결구부 양식이 같아하더라도 장인에 따라 결구부를 구성하고 있는 각 부재들의 치수가 다르므로 이들의 강성을 빠른 시간 내에 규명하는 것은 요원한 문제이다. 여기서 특히 주목할 점은 접합부의 휨강성을 실험 또는 역학적 연구에 의해 알아냈다고 하더라도 이를 전체구조시스템의 해석에 적용하는 것은 매우 어려운 것으로 보인다. 따라서 전술한 바와 같이 전통목구조에 대한 구조해석 시 기존의 구조해석에서 사용하였던 핀 또는 모멘트접합의 접근방법에서 탈피하여 kinematic approach 방법을 채택하

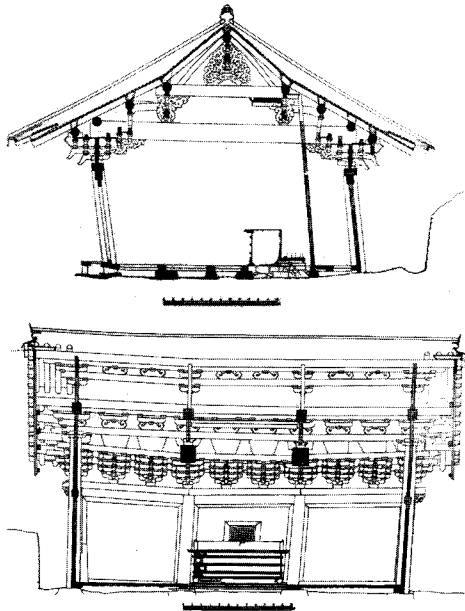


Fig. 9 Cross and longitudinal section in 1945

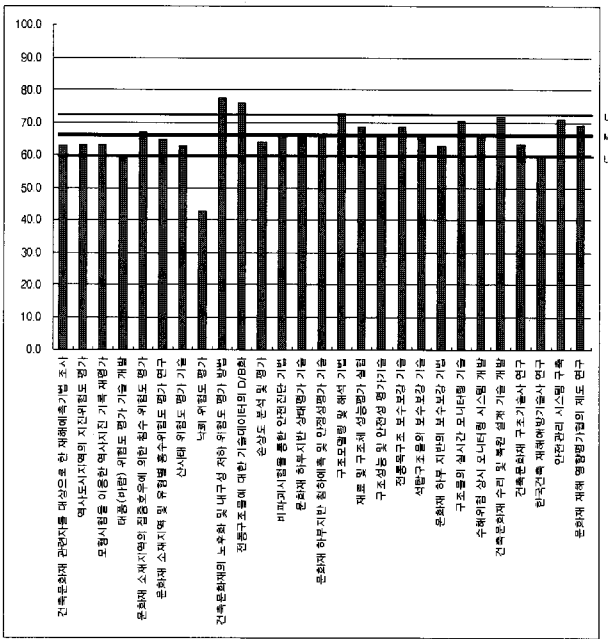


Fig. 10 Survey results of long term research subjects for the prevention of architectural heritage

는 것이 우선적으로 필요하다고 판단된다.

한편 국립문화재연구소에서는 2008년에 문화재전문가들을 대상으로 전통건축물의 재해를 예방하기 위해 필요한 세부연구과제들에 대한 설문조사를 실시한 바가 있는데, 그 내용을 요약하면 그림 10과 같다.

그림 10을 분석하여 보면, 모든 연구과제에 대한 점수의 평균이 100점 만점에 65.84로 나타났으며, 표준편차가 6.31로 나타나 전문가들은 낙뢰위험도평가를 제외한 모든 연구

과제들이 중요한 것으로 인식하고 있었다. 설문조사결과 중 전통구조물에 대한 기술데이터의 D/B화가 두 번째로 높은 점수를 받았는데, 이는 전문가들이 전통건축물에 대한 연구가 실제적으로 이루어지기 위해서는 전통건축물에 대한 기초데이터의 구축이 매우 중요하다고 보았기 때문인 것으로 보인다.

4. 결론

3장에서 고찰해본 안성 청룡사 대웅전과 개심사 대웅전에서 나타난 문제들을 해결하기 위해서는 각각의 부재들이 받는 하중은 얼마인가와 전체구조물이 안정성(stability)을 유지할 수 있는가의 문제일 것이다. 여기서 전자의 문제를 해결하기 위해서는 전체구조시스템에 대한 구조해석이 요구되는데, 이때에는 각 결구부에 대한 강성이 요구된다. 또한 후자의 문제를 해결하기 위해서는 수평하중이 작용하였을 때 기둥의 복원력이 얼마인지 알아야 할 필요가 있다.

전술된 두 가지의 문제 중 후자의 문제는 그림 9로부터 유출할 수 있는 바와 같이 지붕가구를 다이어프램(diaphragm)으로 가정할 후, 여기에 수평력이 가해졌을 때 전체구조시스템이 안정성을 유지할 수 있는가의 문제로 쉽게 접근할 수 있는 것으로 보인다. 이와 같은 접근방법을 택할 경우, 전통목구조에 대한 안전진단 또는 구조성능평가 시 건물전체의 기둥기를 측정하여 구조물의 안정성 유지 여부를 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

전술된 kinematic approach법, 즉, 지붕가구 전체를 다이어프램(diaphragm)으로 가정할 다음 기둥을 일종의 스프링으로 모형화하는 방법을 채택할 경우, 기둥의 복원내력을 알아내기 위한 실험 및 해석적 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이 경우 2장에서 전술한 바와 같이 기둥의 복원내력은 기둥상단에 작용하는 수직하중의 크기와 기둥하부 접촉면의 크기가 중요한 것으로 보인다. 여기서 기둥하부 접촉면의 크기는 특정 전통목구조에 따라 이미 결정된 것으로 볼 수 있으므로, 각각의 기둥에 작용하는 수직하중의 크기를 알아내기 위한 연구가 필요할 것으로 보인다.

한편 전통목구조시스템을 구성하고 있는 각 부재에 작용하는 하중의 크기를 정확히 파악하기 위해서는 전통목구조시스템을 구성하고 있는 각종 결구부의 역학적 특성을 파악할 필요가 있다.

본고에서 분석해본 여러 가지의 정황 및 근거에 따라 판단해 볼 때 전통목구조에 대한 구조공학적 접근방법은 다음과 같은 연구들이 우선적으로 진행되는 것이 좋을 것으로 판단된다.

- ① 전통목구조에 대한 기술데이터의 D/B 구축
- ② 전통목구조 건물의 수직하중 전달 메카니즘 분석
- ③ 수평하중 재하시 전통목구조 기둥의 복원내력을 평가하기 위한 실험
- ④ kinematic approach에 의한 구조해석방법 및 모형화방법

여기서 주목할 점은 전술된 네 개의 연구들은 전통목구조에 대한 구조성능평가 방법을 정립하기 위한 기초연구과제라는 것이다. 즉, 전술된 네 개의 연구 외에도 전통목구조의 구조성능평가와 관련된 연구과제들은 무수히 많이 존재하고 있다. 일례로 시간에 따른 목재의 역학적 특성변화의 예측방법 등은 전통목구조의 구조성능평가에서 필수불가결한 연구과제일 것이다.


따라서 전통목구조에 대한 실질적이고 실무에서 사용가능한 연구과제들을 도출하기 위해서는 향후에도 세부연구과제의 발굴 및 이들을 추진하기 위한 로드맵의 구축 등에 대해서 지속적으로 연구되어야 할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. 김봉진, 전통목구조건축의 구조해석, 대한건축학회지, 36권 4호, 통권 167호, 1992년 7월
2. 정성진, 홍성걸, 김남희, 이영욱, 황종국, 전통목구조 해석을 위한 모형화 기법, 대한건축학회논문집(구조계), 제21권(제 12호), 2005년 2월

3. 이영욱, 홍성걸, 황종국, 정성진, 도리방향 골조의 반턱이음 접합부의 횡하중 저항능력에 관한 실험, 제24권제7호(통권 237호), 2008년 7월
4. Sungjin Jung, Sungul Hong, Youngwook Lee, and Jongkook Hwang, An Analytic Model for Estimating the Flexural Stiffness of the Column-Changbang Connection of the Korean Traditional Wood Structures, the 7th ISATA conference, Beijing, October, 2008
5. 국립문화재연구소, 목조문화재 구조성능 평가 연구용역 최종보고서, 2005년 12월
6. 국립문화재연구소, 목조문화재 구조성능 평가 연구용역 최종보고서(3차원 비틀림 모멘트 강성 분석 및 허용기울기 연구), 2006년 12월
7. 국립문화재연구소, 안전점검 첨단시스템 연구개발 최종보고서, 2007년 12월
8. 국립문화재연구소, 건축문화재 재해예방 기획 연구, 2008년 12월

감사의 글

이 기사는 2008년도 국립문화재연구소의 지원에 의해 수행된 ‘건축문화재 재해예방 기획연구’ 내용의 일부를 발췌한 것이다. 

[담당 : 정성진, 편집위원]