

# 전통 목조 건축물의 구조해석에 의한 안전성 평가

Evaluation of Safety by Structural Analysis of Traditional Wooden Building

조 성 산\*                      김 형 기\*\*                      박 복 만\*\*\*  
Jo, Sung-San                  Kim, Hyong-Kee                  Park, Bok-Man

## Abstract

In order to grasp and evaluate the characteristics and the safety of traditional wooden building, we select one of the representative traditional wooden building, Buseoksa Muryangsujeon in this study. After the two and three-dimensional structural analysis of this building are performed, the results are compared and analyzed. Following main conclusion are obtained: 1) By comparison between the results of two and three-dimensional structural analysis, they show that the exterior members of this building tend to transfer more load in the three-dimensional analysis. 2) The result of three-dimensional structural analysis shows that the every member stress of Buseoksa Muryangsujeon except Chobang and Jangyon is below allowable stress. 3) For exact modelling of joints of members in traditional wooden building such as Gongpo, it is necessary to accumulate and analyze the technical data through structural test and systematic analysis study.

## 요 지

본 논문에서는 전통 목조 건축물의 보다 실제에 가까운 구조특성을 파악하고 건물에 대한 안전성을 평가하기 위하여 현존하는 대표적인 전통 목조 건축물인 부석사 무량수전을 대상으로 하여 최대한 실제와 유사한 거동상태가 되도록 건축물을 3차원 및 2차원으로 모델링하여 범용 구조해석 프로그램을 통한 구조해석을 실시한 후에 해석결과를 비교, 분석하고 검토하였다.

**Keywords :** Traditional Wooden Building, Three-dimensional Structural Analysis, Modelling

**핵심 용어 :** 전통 목조 건축물, 3차원 구조해석, 모델링

\* 정희원, (주)정인건축엔지니어링 대리

\*\* 정희원, 삼척대학교 건축공학과 조교수

\*\*\* 정희원, 명지대학교 건축학부 교수

E-mail: hyongkee@samcheok.ac.kr, 033-570-6521

•본 논문에 대한 토의를 2005년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2006년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

우리나라에서는 예로부터 가공성이 뛰어나고 아름다운 미관과 부드러운 질감을 가지면서도 쉽게 구할 수 있는 나무를 이용한 건축물을 많이 지어왔다. 이러한 목조 건축물은 여러 시대를 거치면서 다양한 형식으로 변화하고 발전되어서 오늘날에 이르고 있다. 우리 조상들의 목조 건축물을 축조하는 과정은 현재와 같은 설계 및 시공과정을 거치는 것이 아니라 대상 건축물의 규모와 칸수가 정해지면 목수는 자기의 경험과 직관에 의존하여 부재의 치수와 가구방식을 결정하여 건물을 지었다.<sup>(1)</sup> 이러한 전통 목조 건축물의 축조방법은 오랜 기간 동안 수많은 시행착오를 거치면서 축적된 경험과 담당목수의 창의성에 주로 의존하였고 목수들의 계보를 통하여 입에서 입으로 전해지는 전달체계의 특수성으로 인하여 전달과정에서 변질되거나 단절되기도 하였다.<sup>(1)</sup> 오늘날 한국 전통 목조 건축물을 유지하고 보존하기 위해서 노후화된 전통 목조 건축물을 대상으로 안전진단 및 보수, 해체수리, 복원이 빈번하게 시행되고 있으나 상기와 같은 이유로 기술적으로 많은 어려움을 겪고 있다.

전통 목조 건축물에 대한 이해를 높이고 경험적인 전통 건축기술을 보존하고 계승하기 위해서는 기존 전통 목조 건축물에 대한 조사와 연구를 통한 기술 자료의 축적과 체계적인 정리뿐만 아니라 현재의 과학적 해석방법을 적용하여 전통 목조 건축물에 대한 특성을 객관적으로 검토해 볼 필요가 있다. 이러한 흐름을 인식하고 1992년에 김봉건<sup>(1)</sup>은 부석사 조사당을 대상으로 2차원 구조해석을 실시한 후에 해석결과를 검토한 결과를 발표하였다. 그러나 전통 목조 건축물은 기둥과 보가 만나는 접합부가 대단히 복잡하고 3차원적인 구조특성을 가지고 있다. 이에 전통 목조 건축물의 보다 실제에 접근한 구조해석을 하기 위해서는 2차원보다는 3차원으로 건축물을 적절하게 모델링한 구조해석이 필요하다고 판단된다.

이에 본 논문에서는 전통 목조 건축물의 보다 실제에 가까운 구조특성을 파악하기 위하여 현존하는 대표적인 전통 목조 건축물인 부석사 무량수전을 대상으로 하여 범용 구조해석 프로그램을 통한 3차원 해석을 실시한 후에 해석결과를 분석하고 검토함으로써 전통 목

조 건축물의 구조적 특성과 안전성을 파악하고 평가하고자 하였다. 또한 본 논문에서는 3차원 해석 이외에 2차원 해석도 실시하여 이 결과를 비교, 분석함으로써 전통 목조 건축물에 대한 합리적인 구조해석방법을 모색하고자 하였다.

## 2. 전통 목조 건축물의 3차원 구조해석

본 연구의 해석대상 건물은 13세기에 지어진 현존하는 목조 건축물 중에서 두 번째로 오래된 부석사 무량수전으로 이 건물은 비교적 보존이 양호하고 전통 목조 건축물로서 큰 의미가 있으며 한국 전통 목조 건축물의 대표성을 충분히 지니고 있다고 판단되어서 선정하였다. Fig. 1에 부석사 무량수전의 전경<sup>(2)</sup>을 나타내었다. 또한 본 연구에서는 범용 구조해석 프로그램인 SAP 2000<sup>(18)</sup>을 사용하였다.

### 2.1 해석대상 건물

Fig. 2와 Fig. 3에 부석사 무량수전의 종방향<sup>(4)</sup>과



Fig. 1 부석사 무량수전의 전경<sup>(2)</sup>

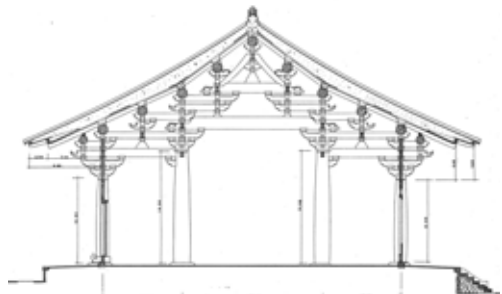


Fig. 2 부석사 무량수전의 종방향 단면도<sup>(4)</sup>

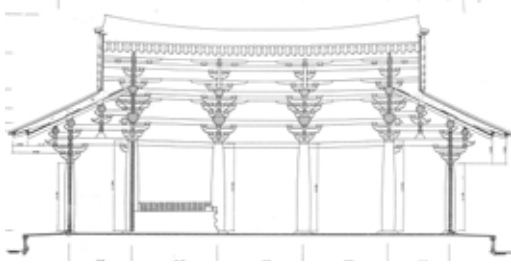


Fig. 3 부석사 무량수전의 횡방향 단면도<sup>(4)</sup>

횡방향의 단면도<sup>(4)</sup>를 나타내었다. 이 건물은 정면 5칸, 측면 3칸의 단층 팔작지붕으로 구성된 건물로서 평면에서 정면의 길이가 18.76m이고 측면의 길이가 11.57m이며 건물의 최고높이가 10.08m이고 구조형식은 2고주(高柱) 9량가(樑架)의 주심포계(主心包系)이다. 여기서 무량수전의 주요 구성요소를 살펴보면 다음과 같다. 기둥은 배흘림이 뚜렷하며 치목(治水)이 고르게 되어있고 우주(隅柱)가 어간(御間)평주(平柱)보다 높게 솟아있는 귀솟음이 뚜렷하다.<sup>(5)</sup> 내부고주(內部高柱)의 주신(柱身)에는 헛침차를 달아 퇴보를 받쳐주고 있고 창방은 16개의 외진주와 8개의 내진고주의 상부를 연결하여 잡아매는 역할을 하며 기둥과 주먹장맞춤으로 연결하고 있기 때문에 옆으로 빠지지 않는다. 고주와 고주 사이에는 대들보와 종보가 4개씩 놓여져 있고 모서리마다 퇴보 2개, 킷보 1개가 있다. 대들보는 종도리와 상중도리의 하중을 종보로부터 받아서 내부고주에 전달한다. 퇴보는 대들보보다 1단 낮게 걸리며 외진평주와 내진고주 사이를 가로질러 기둥에 연결하고 하중도리의 하중을 외진평주와 내진고주에 전달한다. 공포형식은 주심포식으로 공포를 형성하는 부재는 크게 주두(柱頭) 위에 초제공(初齊工), 이제공(二齊工), 삼제공(三齊工) 및 사제공(四齊工)으로 차례대로 짜 올라가고 그 위에 초방과 단장여 그리고 도리가 결합된다.<sup>(6)</sup> 제공마다 각각 순차적으로 도리방향 부재는 받음장, 보방향 부재는 업힐장 형식의 반턱맞춤인 십자(十字)형태로 결구된다.<sup>(6)</sup> 그 위에 소로(小累)가 놓이는데 부재의 위치에 따라서 양갈소로, 네갈소로가 놓이고 소침차(檐遮)는 도리방향으로 받음장 결합, 살미(山彌)소침차는 보방향으로 업힐장으로 결합되며 그 위에 다섯 개의 소로가 놓이게 된다.<sup>(6)</sup>

## 2.2 해석대상 건물의 재료특성과 허용 응력도

무량수전의 주요 구조부재에 사용되는 재료는 적송으로 이 재료 특성은 Table 1과 같다. 또한 주요 구조부재에 대한 허용응력도는 Table 2에 나타내고 있는 건축물의 구조기준 등에 관한 기준<sup>(7)</sup>에 따른다. 한편, 경북궁 근정전 구조안전진단보고서<sup>(8)</sup>와 속리산 범주사 대웅보전의 정밀안전진단보고서<sup>(9)</sup>의 구조해석과 단면검토에서 구조부재에 대한 재료 특성과 허용응력도는 건축물의 구조기준 등에 관한 기준<sup>(7)</sup>을 그대로 사용하였다. 경북궁 근정전은 목재의 강도를 비롯한 물성시험의 결과에, 범주사 대웅보전은 부재의 함수율 상태를 측정한 결과에 근거한 것이다. 해석대상 건축물의 구조부재에 대한 열화현상을 정확하게 파악하여 이것을 구조해석에 반영시키는 것이 바람직하지만 이 부분이 현 상황에서는 어렵기 때문에 본 논문에서는 상기의 안전진단보고서와 같이 부득이하게 부재의 열화현상을 고려하지 않았다.

## 2.3 주요 구조 부재의 단면

해석대상 건물에 대한 구조부재의 단면치수는 기존 도면자료<sup>(4)</sup>에 근거하여 구하였다. 주요 구조부재의 단면치수를 Table 3에 나타내었다. 기둥의 단면은 배흘림 차이를 무시하고 최소단면인 주두와 접하는 면을 택하였고 향아리 형상의 보는 원형의 단면으로 등가 환산하였다. 그리고 길이방향에 따른 단면의 변화가 큰 부재인 부연, 대공, 소로는 최소단면을 채택하였고

Table 1 적송의 재료 특성

기건 비중	영계수(kgf/cm <sup>2</sup> )
0.53	85,000

Table 2 적송의 장기 허용응력도

압축응력도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	인장 및 휨응력도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	전단응력도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
80	90	7

Table 3 주요 구조부재의 단면치수

주요 구조부재		단면 <sup>*(1)</sup>
기둥	고주	Φ43
	평주	Φ38
	우주	Φ38
	활주 <sup>*(2)</sup>	Φ25
보	대들보 <sup>*(3)</sup>	Φ50
	중보 <sup>*(3)</sup>	Φ41.5
	퇴보 <sup>*(3)</sup>	Φ33.8
도리	중도리 상중도리 중중도리 하중도리 주심도리	Φ40
	출목도리	Φ33.3
서까래	단연	Φ20
	장연	Φ20
	부연	□15×15
	창방	□14×30
	장여, 초방	□14×25.8
	추너	□36×40
	대공	□20×30
	소슬	□14×20
	첨차	□14×21.8
	소로	□21.2×21.2

(비고)<sup>\*(1)</sup>: 단위는 cm

<sup>\*(2)</sup>: 8각형단면을 원형단면으로 환산

<sup>\*(3)</sup>: 향아리형상 단면을 원형단면으로 환산

이것을 제외한 부재들은 단면의 평균값으로 하였다.

## 2.4 하중의 가정

본 해석에서 고려한 하중은 고정하중, 적재하중, 적설하중, 지진하중이다. 그리고 하중조합은 (1) 고정하중+적재하중, (2) (고정하중+적재하중+적설하중)/1.5, (3) (고정하중+적재하중+지진하중)/1.5의 3가지 경우에 대하여 검토하였다. Table 4, 5에 해석대상 건물의 고정하중의 일부인 지붕하중을 위치별로 산정하여 나타내었다. 여기서 장연과 단연 위의 보토 두께는 중중도리 위가 가장 두꺼우나 밑부분에 적심이 있어서 전체적으로 평균두께로 산정하여도 큰 오차가 없는 것으로 판단되었다. 적심은 장연과 단연에 등분

Table 4 장연과 단연의 하중 가정

구분	작용하중 (kgf/m <sup>2</sup> )	비고
기와	150	중와 3겹이음
보토	480	1.6tf/m <sup>3</sup> <sup>*(1)</sup> × 0.3m <sup>*(2)</sup>
적심	133	0.53tf/m <sup>3</sup> <sup>*(1)</sup> × 0.25m <sup>*(2)</sup>
개관	30	
합계	793	

(비고) <sup>\*(1)</sup>: 해당재료의 비중, <sup>\*(2)</sup>: 해당재료의 평균두께

Table 5 부연의 하중 가정

구분	작용하중 (kgf/m <sup>2</sup> )	비고
기와	150	중와 3겹이음
보토	320	1.6tf/m <sup>3</sup> <sup>*(1)</sup> × 0.2m <sup>*(2)</sup>
개관	30	
합계	500	

(비고) <sup>\*(1)</sup>: 해당재료의 비중, <sup>\*(2)</sup>: 해당재료의 평균두께

포로 작용한다고 가정하여 환산하였다. 한편 적재하중, 적설하중, 지진하중은 건축물 하중기준 및 해설<sup>(10)</sup>에 의거하여 산정하였다. 여기서 적재하중은 접근이 어려운 지붕이라고 간주하여 100kgf/cm<sup>2</sup>로 하였고 적설하중은 50kgf/cm<sup>2</sup>로 하였다. 또한 지진하중은 등가정적해석법에 의하여 산정하였다.

## 2.5 주요 구조부재의 모델링, 하중입력 방법 및 구조해석 변수

해석대상 건물이 최대한 실제와 유사하게 거동상태가 되도록 각 이음부 및 접합부를 힌지와 고정으로 적절하게 가정하여 모델링하였다. 먼저 건축물의 지점은 기둥이 그랭이질한 이후에 초석에 올려져 있으므로 이동은 제한되나 회전은 허용하는 회전단으로 가정하였다. 기둥을 비롯한 모든 부재는 선 요소로 모델링하였다. 주두는 단면의 폭만큼 4개의 부재로 가정하여 첨차와 살미에 힌지로 연결하였다. 그리고 아래 첨차와 윗 첨차, 아래 살미와 윗 살미를 소로로 연결하였다. 여기서 양쪽의 소로를 힌지로 가정한 경우와 고정으로 가정한 경우에 대하여 각각 구조해석을 실시하였다. 상중도리 위치의 소로와 대들보의 접합은 좌우턱의 마찰에 의하여 지지되므로 힌지로 가정하였다. Fig. 4에 해석대상 건물의 외진주부분 공포를 보여주고 있다.



Fig. 4 무량수전의 외진주 공포

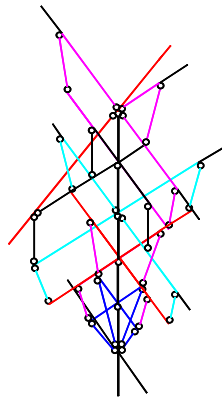


Fig. 5 외진주 공포의 모델링



Fig. 6 무량수전 내진주 공포<sup>(1)</sup>

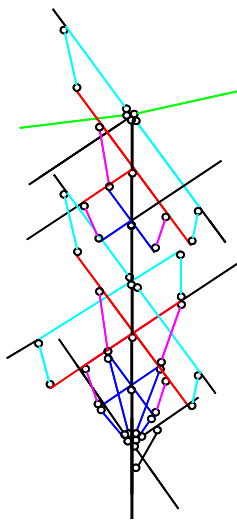


Fig. 7 내진주 공포의 모델링

Fig. 5에서는 외진주부분 공포의 소로 양단을 힌지로 가정하여 3차원으로 모델링한 것을 나타내었다. 또한 Fig. 6에 해석대상 건물의 내진주부분 공포를 보여주고 있다. Fig. 7에서는 내진주부분 공포의 소로 양단을 힌지로 가정하여 3차원으로 모델링한 것을 나타내었다. 그리고 서까래는 단연과 장연으로 나눌 수 있는데 단연은 상부에서 연침으로 반대편의 단연과 서로 연결되어 있고 단연과 장연의 연결에도 연침으로 되어 있으므로 그 부분을 힌지로 가정할 수 있다. Fig. 8에서는 상기와 같이 실시한 해석대상 전체 건물의 3차원

Table 6 3차원 구조해석의 변수

모델명	공포 소로 양단의 지지조건	외진평주 사이의 간막이벽 고려 여부	바닥 마루의 고려 여부
1 <sup>*(1)</sup>	힌지	고려하지 않음	고려하지 않음
2	힌지	고려함	고려함
3	힌지	고려함	고려하지 않음
4	힌지	고려하지 않음	고려함
5	고정	고려하지 않음	고려하지 않음
6	고정	고려함	고려함

(비고) <sup>\*(1)</sup>: 표준모델

모델링을 보여주고 있다. 한편, 건물에 대한 하중의 입력으로 지붕하중은 서까래 간격을 곱하여 선 하중으로 각각의 서까래에 입력하였고 용마루 부분의 하중은 종도리에 선 하중으로 입력하였다. Table 6에 상기와 같은 방법으로 모델링한 표준모델을 비롯한 3차원 구조해석의 변수를 정리하였다. 여기서의 변수는 공포 소로 양단의 지지조건을 비롯하여 건물의 외곽에 있는 외진평주 사이의 간막이벽과 바닥 마루의 모델링 여부로 하였다. 본 해석대상 건축물의 외진평주 사이의 간막이벽은 보방향과 도리방향의 건물 외곽에 존재한다. 그리고 바닥 마루는 건축물의 지점에서 0.5m 높은 위치로 하여 바닥 전체에 대하여 모델링을 하였다.

### 3. 전통 목조 건축물의 2차원 구조해석

해석대상 건물의 2차원 구조해석은 3차원 해석과 비교를 위한 것으로 건물 종방향(보방향)의 중앙부를 비롯한 대표적인 위치에 대해서만 실시하였다. Table 7에서 2차원 구조해석의 변수를 나타내었다. 여기서 2차원 표준모델에 대한 부재의 모델링 방법, 부재의 재료특성, 구조부재의 단면은 3차원 구조해석의 표준

Table 7 2차원 구조해석의 변수

모델명	서까래 단면	공포 소로 양단의 지지조건
1 <sup>*(1)</sup>	보 상부의 서까래만 고려	힌지
2	보 상부의 서까래 단면성능 조정	힌지

(비고) <sup>\*(1)</sup>: 표준모델

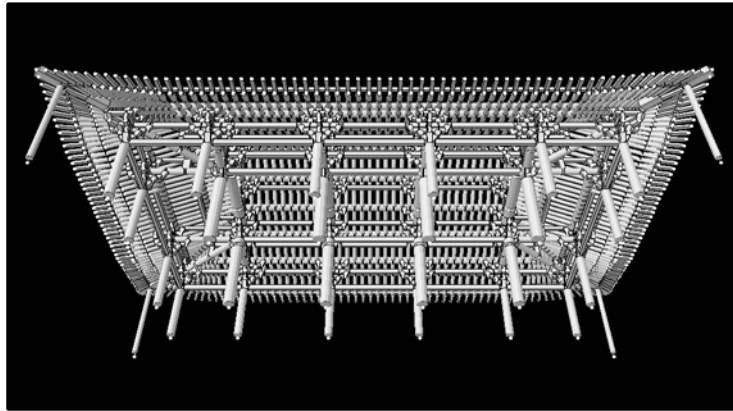


Fig. 8 해석대상 건물의 3차원 모델링

모델과 동일하지만 건물의 도리방향의 부재가 고려되지 않았다는 차이점이 있다. 또한 지붕하중은 어칸 간격과 도리 간격을 곱하여 집중하중으로 산정하여 도리와 서까래의 교점에 입력하였다. 용마루의 하중은 대공에 집중하중으로 입력하였다. 또한 2차원 구조해석에서 표준모델 이외에도 서까래의 단면성능을 표준모델의 2배, 3배, 5배, 10배로 증가시켜서 모델링한 구조해석도 실시하였다. 이것은 3차원 구조해석에 비하여 2차원 해석에서 적절하게 모델링이 어려운 서까래 부분의 건물 구조거동에 미치는 영향을 알아보기 위한 것이다.

#### 4. 해석결과의 검토

여기서는 먼저 앞에서 설명한 3차원 구조해석의 변수에 대하여 건물의 고유치 해석 및 지진하중에 대한 3차원 구조해석을 실시하여 그 결과를 비교하였다. 그리고 해석대상 건축물에 대한 각 부재의 안전성에 대하여 3차원 구조해석과 2차원 구조해석의 결과를 비교, 분석하였다.

##### 4.1 고유치 및 지진하중에 대한 3차원 구조해석

고유치 및 지진하중에 대한 3차원 구조해석의 결과를 Table 8에 나타내었다. 여기서는 공포 소로 양

단의 지지조건이 고정인 경우가 힌지인 경우에 비하여 고유주기는 10~20% 정도, 지진하중에 의한 수평변위가 20~40% 정도 감소하였다. 또한 외진평주 사이의 간막이벽을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비하여 고유주기는 1/3~1/4, 지진하중에 의한 수평변위는 1/10~1/20 수준으로 감소한 것을 알 수 있고 마루 바닥은 고유주기나 수평변위에 크게 영향이 없는 것으로 나타났다. 또한 본 해석결과로부터 본 해석대상 건축물의 외진평주 사이에 간막이벽이 실제로 존재한다는 점을 고려한다면 본 건물은 지진하중으로 인한 수평변위 제한치인 층고의 1.5% 규정을 여유있게 만족하여 충분히 안전하다고 판단된다.

Table 8 3차원 구조해석의 결과

모델명 <sup>*(1)</sup>	고유주기(sec)			지진하중에 의한 수평변위 건물 층고에 대한 비(%)	
	1차	2차	3차	도리방향	보방향
1	0.692	0.689	0.653	2.69	2.43
2	0.206	0.168	0.152	0.13	0.20
3	0.215	0.171	0.155	0.14	0.22
4	0.676	0.666	0.647	2.60	2.40
5	0.611	0.593	0.577	2.05	1.91
6	0.183	0.146	0.122	0.08	0.14

(비고) <sup>\*(1)</sup>: Table 6 참조

## 4.2 부재에 대한 안전 검토

여기서는 해석대상 건축물의 각 부재에 대하여 3차원 구조해석과 2차원 구조해석의 결과를 비교, 분석하고 각 부재에 작용하는 단면력을 해당부재의 허용응력과 비교하여 건축물의 안전성에 대한 검토를 하고자 하였다. 그리고 본 논문의 각 해석방법에 따른 단면력은 위치가 상이한 해당부재들 중에서 최대의 단면력이 작용하는 경우만으로 하였다. 그리고 부재의 안전 검토를 위한 해석결과는 앞에서 설명한 3가지의 하중조합 중에서 (1) 고정하중+적재하중인 경우에 지배되었다. 또한 공포의 소로 양단의 지지조건에 따른 주요 부재의 부재력의 차이는 크게 나타나지 않았지만 부재력이 보다 크게 나타난 공포의 소로 양단을 힌지로 모델링한 경우에 대하여 부재의 안전성을 검토하였다. 그리고 2차원 구조해석에서는 Table 7에 나타내고 있는 표준모델과 서까래의 단면성능을 표준모델의 3배로 증가시켜서 모델링한 경우에 대하여 검토하였다. 여기서 서까래의 단면성능을 3배로 증가시켜서 모델링한 경우만을 검토한 이유는 3차원 해석결과에 비교적 가장 근접하는 결과를 보였기 때문이다.

### 4.2.1 기둥

본 해석대상 건축물의 모든 기둥의 세장비는 모두 100 이하로 나타났다. 기둥에 작용하는 압축력은  $\omega$  (좌굴계수)를 다음 식으로 산정한 후에 이 값을 곱하여 구하였다.

$$\omega = 1 / (1 - 0.007\lambda) \quad (1)$$

여기서,  $\lambda$  : 기둥의 세장비

상기의 방법으로 산정한 기둥 부재에 대한 해석결과를 Fig. 9에서 비교하였다. 여기서 3차원 구조해석에 의한 고주, 평주, 우주, 활주의 압축응력과 휨응력을 동시에 고려하여 기둥에 작용하는 응력도를 각각 산정하면 허용응력도의 29%, 51%, 47%, 26%로 나타났다. 특히 Fig. 9에 나타난 것과 같이 건축물의 중중도리방향으로 제일 외곽에 위치한 평주에서는 다

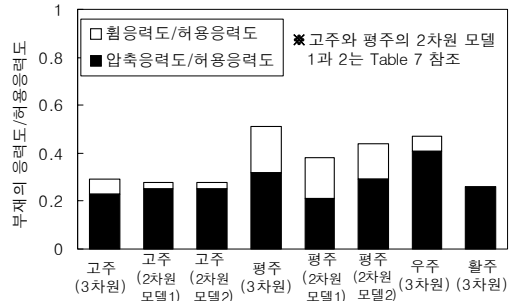


Fig. 9 기둥에 대한 해석결과의 비교

른 위치의 기둥에 비하여 휨모멘트가 크게 작용하였다. 한편 기둥에 작용하는 전단응력도는 허용응력도의 5% 미만으로 거의 무시할 수 있는 정도로 나타났다.

3차원과 2차원 구조해석의 결과를 비교해보면 3차원 구조해석에서는 2차원 해석인 경우보다 외부의 평주가 내부의 고주보다 상대적으로 부담하는 응력은 증가하는 반면에 고주가 부담하는 응력은 감소하는 결과를 나타내었다. 한편 여러 트러스의 형상 중에서 편평한 트러스는 경간의 중앙부에서, 박공형 트러스는 지지점에서 최대 부재력이 발생하는 특성을 가지고 있다.<sup>(12)</sup> 본 구조해석 중 3차원 구조해석에서는 건축물의 모든 서까래가 모델링이 되었지만 2차원 해석은 보방향의 서까래만이 모델링이 되었다. 이상과 같이 서까래가 해석대상 건축물과 동일하게 모델링된 3차원 구조해석이 2차원 구조해석보다는 박공형 트러스 효과의 영향이 크게 나타나서 외부의 평주가 내부의 고주보다 하중을 상대적으로 더 부담하는 결과로 나타났다고 판단된다. 한편 2차원 구조해석에서 서까래의 단면성능을 표준모델의 3배로 증가시키면 2차원 표준모델에 비하여 외부 평주의 압축응력도는 증가하여 3차원 구조해석결과에 근접하지만 휨응력도는 오히려 감소하는 결과를 보였다. 이것은 2차원 구조해석에서 서까래의 단면성능을 증가시켰기 때문에 박공형 트러스 효과의 영향이 증가하여 외부 평주에 작용하는 압축하중은 증가하였지만 기둥에 대한 수평부재 휨강성의 상대적인 증가로 기둥으로 전달되는 휨모멘트가 감소한 결과로 판단된다.

### 4.2.2 보

Fig. 10에 보에 대한 해석결과를 비교하였다. 여기

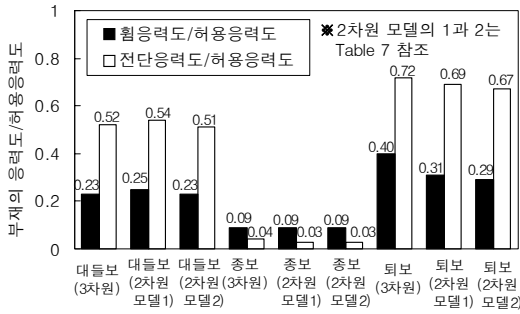


Fig. 10 보에 대한 해석결과의 비교

서 해석결과를 전체적으로 보면 대들보와 퇴보는 전단 응력, 종보는 휨응력이 상대적으로 크게 작용하는 것으로 나타났다. 3차원 구조해석에 의한 대들보의 최대 휨응력도는 경간의 중앙에서 허용응력도의 23%, 최대 전단응력도는 중중도리와 상중도리 사이에서 허용응력도의 52%로 나타났다. 한편 퇴보의 최대 휨응력도는 허용응력도의 40%, 최대 전단응력도는 허용응력도의 72%로 나타났으며 최대응력도의 위치는 중심도리와 하중도리 사이에서 발생하였다. 그리고 종보는 휨응력도와 전단응력도가 허용응력도의 10%에도 못 미치는 결과를 보였다. 한편 3차원과 2차원 구조해석의 결과를 비교해보면 3차원 해석이 2차원 해석에 비하여 평주와 고주를 연결하는 퇴보가 부담하는 응력이 상대적으로 크게 나타난 반면에 고주와 고주를 연결하는 대들보가 부담하는 응력은 다소 낮게 나타난 것을 보여주었다. 이런 결과가 나타난 것은 앞에서 언급한 기둥의 경우와 같은 맥락으로 설명할 수 있다. 한편 2차원 구조해석에서 서까래의 단면성능을 2차원 표준모델의 3배로 증가시키면 2차원 표준모델에 비하여 대들보는 3차원 구조해석 결과에 근접하였지만 퇴보는 반대의 결과가 나타났다. 여기서 대들보와 퇴보의 응력이 2차원 표준모델에 비하여 감소하는 결과를 보인 것은 서까래의 단면성능을 증가시키므로 인하여 서까래에서 부담하는 응력이 증가한 만큼 대들보와 퇴보에서 부담하는 응력이 감소했기 때문으로 판단된다. 이상의 기둥과 보의 구조해석 결과는 2차원 구조해석에서 3차원 구조해석과 같이 실제 구조물의 응력분포상향과 유사하도록 본 해석대상 건축물을 적절하게 모델링하는 것은 어렵다는 것을 보여준다.

### 4.2.3 도리

Fig. 11에 도리의 3차원 구조해석에 의한 휨응력도와 전단응력도에 대한 해석결과를 나타내었다. 출목도리를 제외한 5종류의 도리에 작용하는 휨응력도는 허용응력도의 22~57%, 전단응력도는 허용응력도의 25~53%로 나타나 다소 여유가 있었다. 반면에 출목도리의 휨응력도는 허용응력도의 67%, 전단응력도는 허용응력도의 92%로 나타났다. 이 출목도리는 다른 도리 단면적의 70% 정도로 작고 장연이 처마에서 캔틸레버 보로 작용하기 때문에 하중이 출목도리에 집중되기 때문이다.

### 4.2.4 서까래

Fig. 12에 서까래의 3차원 구조해석 결과를 나타내었다. 서까래 중에서 단연과 부연에 작용하는 휨응력도는 허용응력도의 14~16%, 전단응력도는 허용응력도의 16~17%로 나타나서 상당한 여유가 있었다. 그러나 장연에 작용하는 휨응력도는 허용응력도의 108%, 전단응력도는 허용응력도의 68%로 나타나서 재료의

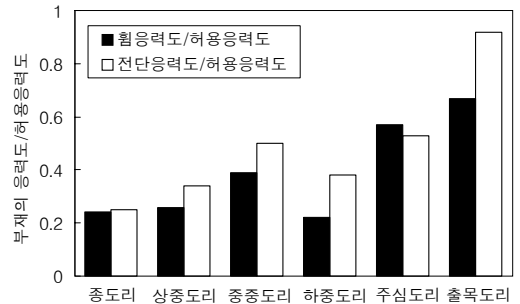


Fig. 11 서까래, 초방 등에 대한 해석결과의 비교

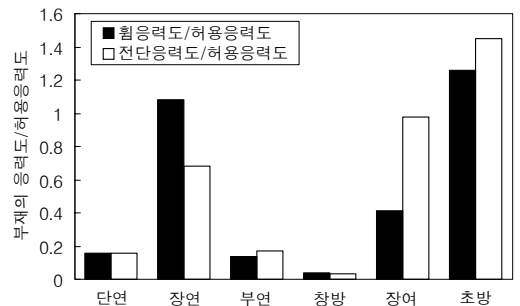


Fig. 12 서까래, 초방 등에 대한 해석결과의 비교



허용응력도를 초과하거나 근접하였다. 이와 같이 장연은 처마의 영향으로 중심포 위치에서 큰 전단력과 부모멘트가 작용하여 큰 단면력이 작용하는 것으로 나타났다. 여기서 기둥과 기둥 사이의 어칸 하나에 있는 11개의 장연 중에서 휨응력도가 허용응력도를 초과한 것은 보 상부 1개와 이것의 바로 양쪽에 있는 2개의 장연이었다.

#### 4.2.5 창방, 장여, 초방

Fig. 12에 창방, 장여, 초방의 3차원 구조해석 결과를 나타내었다. 창방에 작용하는 전단응력도, 휨응력도는 허용응력도의 10% 이하로 나타나서 단면에 상당한 여유가 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 본 해석대상 건물의 창방은 다포양식과 달리 간포가 없어서 지붕의 하중을 직접 받지 않고 중심포 사이의 포벽 하중만을 받기 때문에 전단력과 모멘트에 여유가 있었다. 그리고 장여는 단부에서 단장여와 소로를 타고 내려온 도리의 하중을 받기 때문에 휨모멘트보다는 전단력이 크게 작용하는 부재이다. 여러 장여 중에서 종보의 하부에 있는 장여가 가장 큰 전단력을 받아서 허용응력도의 99%에 이르는 것으로 나타났다. 한편 건축물의 외곽인 중심도리와 출목도리를 연결하는 초방에서는 휨응력도가 허용응력도의 126%, 전단응력도는 허용응력도의 145%로 크게 나타났다. 이 부재는 건축물의 처마부분과 같이 캔틸레버 보로 거동함으로 큰 부모멘트와 전단력이 발생하였다. 상기의 초방을 제외한 다른 위치의 초방에 작용하는 휨과 전단응력도는 허용응력도에 못 미쳐서 부재에 여유가 있는 것으로 나타났다.

한편, 내력이 부족한 초방과 장연에 대해서는 해당 부재를 보다 큰 단면으로 교체하거나 상부 지붕하중을 경감시킨다든지 하는 부재에 작용하는 응력을 줄일 수 있는 적절한 방안이 필요하다고 사료된다. 그리고 위에서 언급한 허용응력도를 초과하는 초방과 장연과 같은 부재를 부재 모델링에서 제거한 후에 이 건축물에 대한 재해석을 실시한 결과, 기둥, 보, 도리와 같은 본 건축물의 주요 구조부재는 안전한 것으로 나타났다. 그러나 본 목조 건축물에서 발생할 수 있는 부식, 풍화, 변형 등의 열화현상과 같은 구조물의 안전에 직접

적으로 미치는 영향을 파악하고 건축물의 정확한 안전 상태를 평가하기 위해서는 본 건축물에 대한 구조 안전진단을 실시할 필요가 있다고 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 전통 목조 건축물의 보다 실제에 접근한 구조특성을 파악하고 건물의 안전성을 평가하기 위하여 현존하는 대표적인 전통 목조 건축물인 부석사 무량수전을 대상으로 최대한 실제와 유사한 거동상태가 되도록 건축물을 3차원 및 2차원으로 모델링하여 범용 구조해석 프로그램을 통한 구조해석을 실시한 후에 해석결과를 비교, 분석하고 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 3차원과 2차원 구조해석의 결과를 비교해보면 3차원 구조해석에서는 2차원 해석인 경우보다 외부에 있는 부재가 내부의 부재보다 상대적으로 부담하는 응력은 증가하는 반면에 내부의 부재가 부담하는 응력은 감소하는 결과를 나타내었다. 이러한 결과가 나타난 것은 지붕의 서까래와 같은 실제 구조물 조건을 충분히 모델링하지 못한 2차원 구조해석에서 박공형 트러스 효과의 영향이 적게 나타났기 때문이다. 따라서 본 연구에서와 같은 전통 목조 건축물의 보다 적절한 구조해석을 위해서는 본 건축물의 구조특성을 반영하여 모델링이 가능한 3차원 구조해석이 바람직하다고 판단된다.
- 2) 본 해석대상 건물의 3차원 구조해석을 실시한 결과, 본 건물은 지진하중에 대하여 안전한 것으로 나타났다.
- 3) 3차원 구조해석을 실시한 결과, 기둥, 보, 도리와 같은 주요 구조부재는 충분한 내력을 가지고 있는 것으로 나타났다. 그러나 건물의 외부에 있는 일부의 초방과 서까래의 장연은 내력이 부족한 것으로 나타나서 이것에 대한 적절한 조치가 요구된다.
- 4) 전통 목조 건축물의 보다 정확한 구조특성을 파악하기 위해서는 특히 공포부분의 적절한 모델링이 필요하다. 이 공포부분의 보다 적절한 모델링을 위해서는 모형을 이용한 구조실험과 체계적이고 지속적인 해석적인 연구에 의한 기술자료의 축적이 필요하다.

## 참고 문헌

1. 김봉건, “傳統木造建築의 構造解析,” 大韓建築學會誌, 36권 4호, 1992. 7월, pp.66~72.
2. 이현수 외 2인, “디지털 무량수전,” 이센스피아, 2001.
3. 김동현, “木造建築의 部材와 結構,” 중앙일보사, 1983.
4. 문화재연구소 편, “韓國의 古建築 3,” 문화재관리국 문화재연구소, 1976.
5. 김덕문 외 1인, “浮石寺 無量壽殿의 建築的 構成要素 解析,” 大韓建築學會學術發表論文集, 9권 2호, 1989. 10월, pp.233~238.
6. 최지원, 황지은, “한국전통건축 목구조의 분석과 자료 모델링에 관한 연구 -부석사 무량수전 평주 공포를 중심으로-,” 大韓建築學會論文集 計劃系, 18권 2호, 2002. 2월, pp.81~88.
7. 대한건축학회, “건축재료,” 기문당, 1997.
8. 한국건설안전기술원, “경복궁 근정전 구조 안전진단 보고서,” 2001. 6.
9. 한국재난연구원, “속리산 법주사 대응보전 정밀안전진단 보고서,” 2000. 6.
10. 대한건축학회, “건축물 하중기준 및 해설,” 태림문화사, 2000.
11. 김보현 외 4인, “부석사,” 대원사, 1996.
12. 전봉수 외 5인, “건축구조설계의 이해,” 기문당, 2003. 8, pp.29.
13. 김왕직, “그림으로 보는 한국건축용어,” 도서출판 발언, 2000.
14. 문화재청, “慶會樓 實測調査 및 修理工事報告書,” 2000. 8.
15. 양재성, 주남철, “조선시대 다포건축의 출몰과 도리배치에 관한 연구,” 大韓建築學會論文集 計劃系, 19권 10호, 2003. 10월, pp.129~136.
16. 장경호, “建造物 文化財의 補修·復元方向,” 문화재관리국, 1977.
17. 장기인, “木造,” 普成閣, 2001.
18. Computers and Structures, Inc, “SAP2000 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures,” Analysis Reference Volume 1, 1995.

(접수일자 : 2004년 9월 23일)