



## 한옥기술개발 3단계 실증구축사업(홍성 아동 숲 체험관)의 신한옥형 하양 트러스 구조 및 특징 분석

### *Analysis of the Structure and Characteristics of Shinhanok-type Xia-ang Truss in the Third Stage of Hanok Technology Development*

- Focused on Hongseong Children's Forest Experience Center -

백유정\* · 김영훈\*\*

Yoo-Jung Peck\* · Young-Hoon Kim\*\*

\* Lecturer; Instructor; Dept. of Architecture, Daejin Univ., South Korea (givu@naver.com)

\*\* Corresponding author; Professor, Dept. of Architecture, Daejin Univ., South Korea (kymyh@daejin.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** The Hongseong Children's Forest Experience Center, built as part of the project to build a new hanok-style empirical social welfare facility, was designed as a public building that combines the modern interpretation of traditional wood structures and new construction methods based on Shinhanok R&D application technology. In particular, new interpretations of traditional architecture are being made by applying new experiments such as spiral plan and Xia-ang structure, which are the only public buildings in Shinhanok. This study aims to analyze the mechanics delivery method, design, and construction rationality of the helical roof through structural analysis, paying attention to the Xia-ang truss method applied to the Hongseong Children's Forest Experience Center, an empirical construction three-step project of new-Hanok style technology development.

**Method:** Research on the constituent principles and design background of Xia-ang Truss was preceded, and based on this, the development principles of Xia-ang Truss designed in the form of truss were reviewed. Structural analysis of the entire building and Xia-ang truss were conducted, and epidemiological correlation and safety and usage performance evaluation of the stability and moment of the new hanok-type Xia-ang style girder were analyzed.

**Result:** It is also meaningful in that it can be used as an alternative to the future direction for structural analysis and various span designs of new hanok-type buildings as a form of Xiaang Truss that can verify structural stability through the application of Structural glued laminated and developed connectors.

© 2021. KIEAE all rights reserved.

#### KEYWORD

신한옥형 사회복지시설  
비경형의 나선형 신한옥형 건축물  
신한옥형 건축물의 구조해석  
하양트러스

New Han-Ok Style Social Welfare Facility  
An Atypical Spiral-shaped New-Hanok  
Structural Analysis of a New-Hanok  
Xia-ang Truss

#### ACCEPTANCE INFO

Received Sep. 13, 2021

Final revision received Oct. 8, 2021

Accepted Oct. 13, 2021

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

신한옥형 사회복지시설의 실증구축 사업의 일환으로 건립된 홍성 어린이 숲 체험관은 신한옥 R&D 적용기술을 바탕으로 전통 목구조 양식의 현대적 해석과 새로운 시공방식이 융·복합된 사례이다. 특히 신한옥형 공공건축물 중 유일하게 나선형 평면으로 계획되어 하양식 구조와 같이 실험적 시공 기술들을 적용함으로써 전통 건축에 대한 선도적 해석의 의지가 반영되었다.

최초 계획 단계의 홍성 어린이 숲 체험관은 중앙의 몸체로부터 양익사를 회랑으로 구성한 ㄷ자형 평면으로 설계되었으나 전통한옥이 지니는 직선형 공간 형태의 한계를 극복하고 외부공간과의 연계성을 높이기 위해 나선형의 평면과 처마선이 둥글게 굽어진 지붕 구조를 채택하게 된다[1]. 그 과정에서 전통 목구조의 '하양' 부재를 응용한 트러스 형태를 고안함으로써 다양한 경간에 대해 대응 가능한 유연한 구조 방식을 반영하게 되었고 최종 설계안에서 보다 능동적 시

야 확보와 자유로운 경간 모듈 반영에 유리한 비경형 타원의 평면으로 수정되었다.

본 연구는 한옥기술개발 3단계 실증구축사업인 홍성 어린이 숲 체험관에 적용된 하양 트러스 방식에 주목하여, 구조 해석을 통한 나선형 지붕부 응력의 역학적 전달 방식과 설계 및 시공에 대한 구조적 합리성에 대하여 분석하고자 하였다. 이는 전통 하양의 구조적 기능을 계승한 하양 트러스가 나선형 평면에 대응 가능하다는 사실을 밝힘과 동시에 전통 목조건축의 비례 체계에 대한 현대적 해석을 바탕으로 전통 목조의 구조적 확장성을 위해 필요한 연구라는 점에서 그 의미가 크다. 나아가 하양 트러스를 구성하는 구조용 집성목재와 결합 커넥터의 적용 방식 등을 토대로 구조적 안정성에 대해 검증 가능한 접합부를 구성함으로써[2] 향후 신한옥형 건축물의 구조해석을 위한 방향과 지침을 마련함과 동시에 다양한 경간 설계를 위한 대안을 제시하고자 한다.

### 1.2. 연구의 방법 및 범위

전통목구조는 중대단면 목재 프레임이 주요 수직하중과 수평하중을 저항하는 형식을 취하기 때문에 구조검토를 수행하기 위해서

는 전통 목구조의 가구 구성 방식과 목재의 구조적 특성에 대한 이해가 선행되어야한다[3]. 반면 ‘홍성 어린이 숲 체험관’은 신한옥형 R&D 적용 기술 연구를 통해 제안된 집성목 결합 구조체로 전통목 구조에 기준한 모형 해석 방식과는 구별된다. 면밀한 분석을 위해 2장에서는 각 부재가 결합되어 구성되는 하양(下昂)에 대한 이론적 고찰과 하양 트러스의 구성 원리 및 설계 배경에 대한 연구를 선행하였고 이를 바탕으로 하양 트러스의 개발 원리를 검토하였다.

3장에서는 하양트러스의 구조 해석과 건물 전체에 대한 구조적 검토를 진행하였으며, 신한옥형 하양트러스의 안정성 및 모멘트에 대한 역학적 상관관계와 사용성능 평가를 분석하였다. 이때 구조기준에 따른 수직하중 및 수평하중에 대한 안전성과 사용성능 검토 등을 진행하기 위해 실무현장에서 사용되는 구조해석 소프트웨어 중 3차원 구조해석 프로그램인 MIDAS GEN<sup>1)</sup>을 이용하였다.

마지막으로, 구조 해석 결과를 바탕으로 나선형 평면에 반영된 하양 트러스 규격의 최적화 및 성능 분석을 통한 합리적 시공방식과 설계안을 제시한다. 상기 분석은 실증구축 관련 연구보고서[4] 및 논문을 참고하였으며 홍성 어린이 숲 체험관의 실시 설계 도면[5]과 목재 치목 상세 제작도를 바탕으로 하였다.<sup>2)</sup>

## 2. 주요 구조부재의 개념과 이론

### 2.1. 하양下昂

하양 구조는 공포와 장여를 포함한 수평 부재와 사선부재인 하양이 결구되어 지지점을 중심으로 지렛대 원리를 이용하여 지붕 하중을 기둥에 전달하는 방식이다[6]. 즉 하양은 두공을 중심으로 지렛대 역할을 하면서 지붕 처마부와 지붕 내부의 하중을 받쳐주는 경사재로 볼 수 있다[7]. 중국 목조건축에서 확인되는 초기 하양은 구조적인 기능에 충실한 구조부재로 사용되다가 후대에는 장식적인 기능으로 그 역할이 달라진 것[8]으로 연구된 바 있으나, 기본적으로는 하양을 이용한 구조형식은 고대건축으로부터 지붕의 하중을 지탱하는 구조적인 기능과 의장적인 기능을 동시에 충족시키기 위한 건축기법으로 알려져 있다(Fig. 1). 영조법식(營造法式)이 반포되기 이전<sup>3)</sup> 건물의 주심포작 하양 결구 기법은 퇴보의 위치에 따라 중요한 기법의 차이가 나타나며 하양의 뒷뿌리가 하중도리까지 길게 올라간 형식 또한 법식 반포이전 양식[9]으로 파악된다.

하양의 일반적인 기능 가운데 처마를 깊게 구성하는 역할 외에도 지

붕의 하중을 하양이 받아 공포에 전달함으로써 보의 역할을 대신할 수 있으며 보의 생략과 더불어 하양의 경사도를 조정함에 따라 충고를 높일 수 있어 대 공간 구성도 가능하다.<sup>4)</sup> 그러나 남한에 현존하는 하양식 공포계의 유일한 사례인 완주 화암사 극락전의 경우는 지렛대의 원리 및 처마 내밀기를 길게 하려는 일반적 의도만으로 하양이 사용되었다고 보긴 어려우며, 하양의 구조적 역할을 하는 형태가 여러 시대의 양식이 혼재되었을 것으로 보이지만 비교의 대상이 없으므로 하양 구조 연구의 한계로 여겨져 왔다[10].

### 2.2. 하양 트러스

홍성 어린이 숲 체험관 지붕 가구는 A~P 구간, 16개의 하양 트러스로 구성되고 각 구간의 경간과 하양재의 높이가 다르게 반영되어 건물 단부로부터 중앙을 거쳐 반대편으로 길게 휘감아 이어지는 형태로 내부가 점층적으로 확장된 공간감을 느낄 수 있도록 설계되었다.

하양 트러스는 하양 단일부재의 조합과 경간 확장에 따라 첨가되는 상부 경사재(중도리로부터 합장의 형태로 하양을 눌러주는 형식)로 구성되며 좌굴을 방지를 위한 하부 곡재가 일부 보장된다. 이때 하양이 상부 경사재와 X자 형태로 교차되어 결합된다.

각 구간에 따른 하양 상·하부 부재의 긴결 위치와 높이는 모두 다르게 적용되며 하양이 아닌 상부재의 경사각이 지붕 물매를 결정하기 때문에 하양은 지붕의 형태에 직접적인 영향을 주기보다 다양한 경간에 대응할 수 있는 구조적 기능에 집중하도록 설계되었다. 이는 일반적으로 트러스가 지붕의 기울기와 형태를 결정하는 시저 트러스 방식과는 구별되는 구조이다. 지붕을 구성하는 16개의 하양트러스는 중도리를 기준으로 내·외측 평주를 숫자와 기호로 구분하여 각 구간별 경간의 변화를 살펴보면 양단에 위치한 A-1과 P-16 구간 폭이 3,410m로 가장 좁으며 중앙부까지 연속적으로 확장되다 I-9 구간에서 7,310m로 2배 이상 긴 경간을 구성하고 있음을 알 수 있다.

비정형의 나선형 형태로 구부러진 지붕은 두 번의 커브 구간을 형성하는데, A~I 구간은 경간 수축의 완급이 반복된 패턴을 띠는 반면에 I~P 구간은 커브의 방향이 전환되는 위치이며, 구간의 수가 적어 특히 L~O 구간에서 급격한 경간 조정이 두드러진다(Table 1).

이에 따라 내측 주심도리의 길이도 수정되어 L-12 구간까지 1,938m의 일정한 폭을 유지하다가 M-13 구간 이후 큰 폭으로 확장된 모습을 보인다(Table 2.). 또한 경간이 길어짐과 함께 하양 상부 경사재의 높이도 증가하여, A구간 트러스의 높이가 410m 일 때, I구

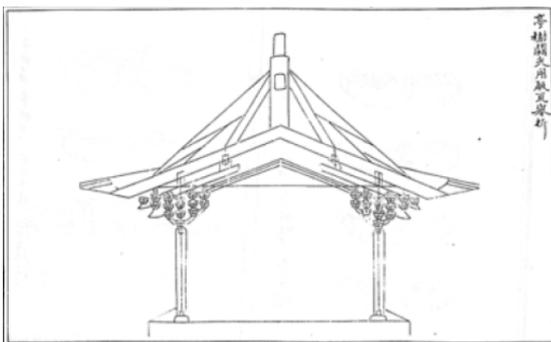


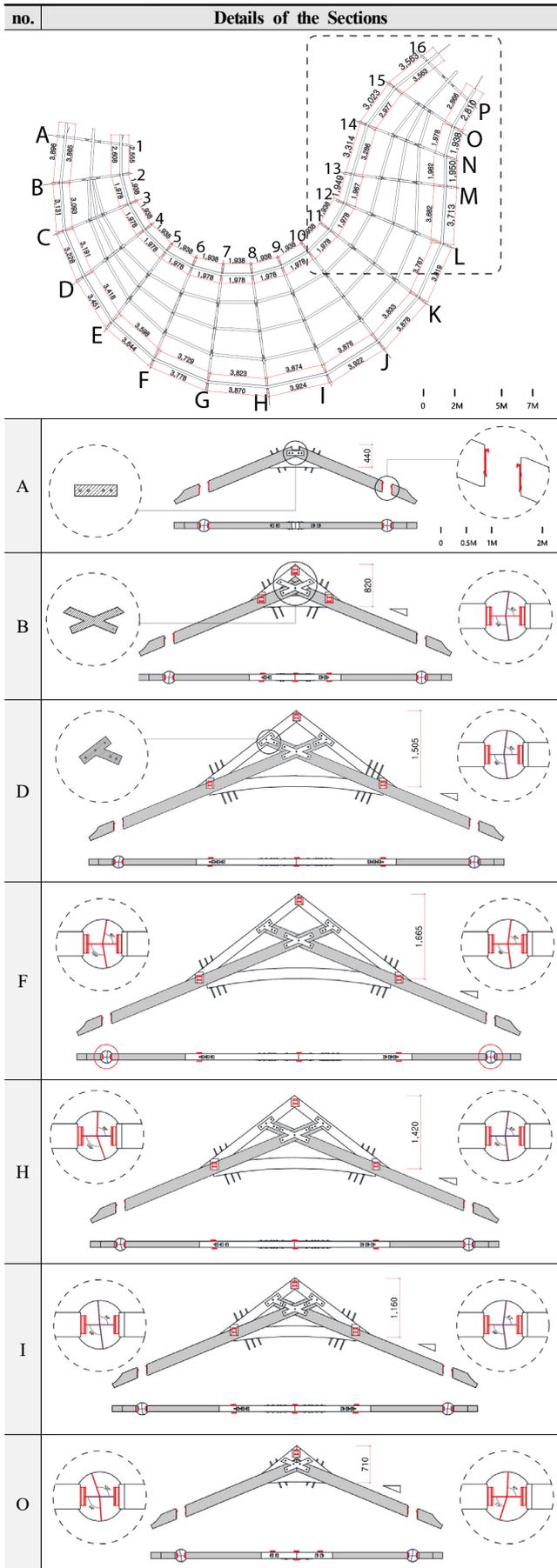
Fig. 1. Xia-Ang Structure based on Yingzaofashi<sup>4)</sup>

Table 1. Span and increase/decrease rate by section

Section	A	B	C	D	E	F	G	H
Distance(m)	3,410	3,710	4,310	4,710	5,510	6,260	6,810	7,160
Increase/decrease rate.*	-	300m 8% ↑	600m 14% ↑	400m 8% ↑	800m 15% ↑	750m 12% ↑	550m 8% ↑	350m 5% ↑
Section	I	J	K	L	M	N	O	P
Distance(m)	7,310	7,160	6,960	6,560	5,810	5,210	4,310	3,410
Increase/decrease rate.*	150m 2% ↑	150m 5% ↓	200m 3% ↓	400m 6% ↓	750m 11% ↓	600m 10% ↓	90m 17% ↓	900m 21% ↓

\*rate of increase or decrease from the end (A,P) of the building

Table 2. Details of Xia-ang Truss sections



간은 1,665m로 4배 이상 높아짐으로써 연속된 실내의 공간감이 극대화되도록 계획된 특징을 보인다.

### 2.3. 결합 커넥터

홍성 어린이 숲 체험관은 전통적 맞춤 방식을 통한 목재의 접합이 아닌 보강 및 연결 철물 또는 커넥터를 사용한 강접합 구조를 구현한다. 기존의 목구조에서 사용되는 볼트나 드리프트핀을 이용한 기계적 결합은 접합부를 삽입하여 플레이트 등이 노출됨과 동시에 접합부의 역학적 성질이 불분명하고, 하중을 전달하는 지압면적이 작아지는 등 목재에 균열발생과 함께 볼트구멍의 간극으로 인해 초기강성이 저하되는 등 문제점[11]이 보고되어 왔다. 이를 보완하기 위해 고안·개발된 판형 커넥터는 선형 실증구축 현장을 통해 검증된 접합 방식을 바탕으로 발전시킨 접합 부재로써 홍성 어린이 숲 체험관에서 전면 확대·수용되었다.

특히 R&D 시공 적용 기술로써 연구·개발된 철물 커넥터는 주요 접합부인 기둥 상·하부를 비롯하여 횡력을 보강하기 위한 결합 방식으로써 기둥과 주심도리의 접합 위치에 따라 커넥터의 유형이 개발되었다. 결과적으로 목구조 건물임에도 강접합 구조체로 구조해석이 가능하도록 강성을 검증받아 적용된 기술이다. 현장에 사용된 접합 철물은 부재가 결합되는 각도에 따라 용도에 맞는 커넥터가 사용되며 하나의 부재에 다면이 동시에 접합되는 경우 집성목재에 커넥터가 볼트를 이용해 고정되는 형태이다(Fig. 2).

특히 기둥머리에는 두 방향의 주심도리와 뿔목 그리고 하양 트러스가 결합되는데, 나선형의 평면을 구현하기 위해 분절된 각 부재는 회전 방향에 따라 커넥터로 결합된다. 이 때 하양트러스가 뿔목으로 이어져 부재의 연속성이 드러나도록 결합되며 대부분의 경우 도리 방향과 무관하게 접합부가 결정된다. 특히 D~F, L~P 커브 구간에서는 도리와 뿔목이 대부분 예각으로 만나 N 구간에서는 68°로 결합되는 모습을 보인다(Table 3.). 일반적으로 도리와 보가 직교하여 결구되는 전통방식의 맞춤 형식에서 벗어나 보머리에서 도리의 방향을 자유롭게 설정할 수 있게 됨으로써 보다 자유로운 평면에 대응할 수 있는 시공성을 확보한 것이다.

홍성 현장에 최초 적용된 판형 커넥터는 철근콘크리트용 이형방강 SD400의 강도(σ)를 충족하고 600° 이상의 온도에서 소성변형이 일어나는 소재를 사용하며 아연도금을 통해 전기 자극에 대한 대처가 가능하도록 설계되었다. 이 외 하양과 상부 경사재 접합부의 보강을 위해 사용된 -, x, s 피형 철물은 듀벨 접합을 응용한 결합방식으로 전단력을 받아 접합재 상호간의 변위를 방지하는 강한 이음을 얻기 위해 시공되었으며 긴결 철물의 최소 강도와 강성을 띤 아연도

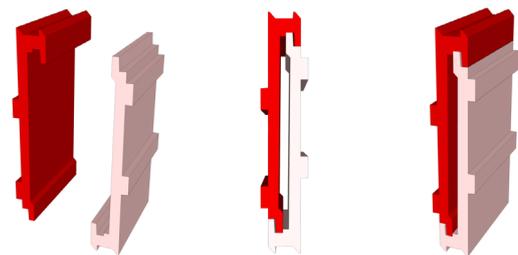
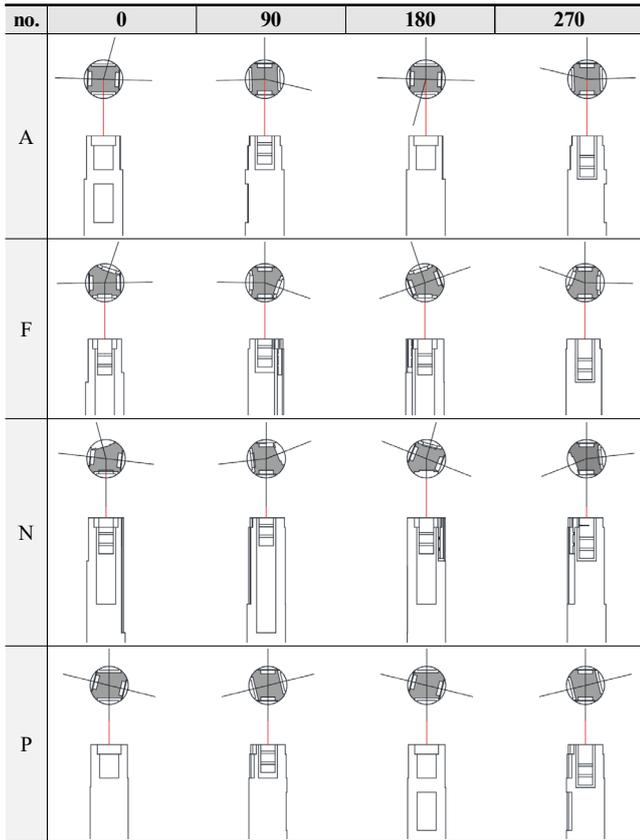


Fig. 2. 3D model of the developed connectors

Table 3. Details of the column joint



금철판을 가공하여 제작되었다. 이들은 구조체에 그대로 노출하여 시공함으로써 현대적 의장 요소로 장식적 기능을 기대하였다.

2.4. K-Wood 개발과 구조용 집성목재의 적용

하양 트러스와 판형 커넥터를 적용하는데 있어 가장 중요하게 작용한 목재의 종류는 원목과 비교하였을 때 강도 성능이 보증되고 구조계산이 가능한 구조용 집성목의 개발과 제작을 통해 구현되었다.

구조용 집성재는 규정된 강도등급에 따라 선정된 제재목 또는 목재 층재를 섬유방향이 서로 평행하게 집성·접착하여 공학적으로 특정 응력을 견딜 수 있도록 생산된 제품이다.[12]

홍성 어린이 숲 체험관에서 사용된 집성목은 국산 나엽송을 선별, 건조하고 국내 기술을 통해 적층 및 가공하여 KS F3021 기준 응력에 견딜 수 있도록 제조된 K-Wood의 시범적 모델이라 할 수 있다. 구조용 집성재는 자유로운 구조형태와 표현이 가능한 건축 재료로 정밀도가 높아 창의적 공간을 연출하기 위해 매우 적합한 소재이며 내화구조 성능이 인정되는 목재이다. 홍성 현장에 사용된 구조용 집성재는 '목제품의 규격과 품질기준'에 따라 종류 및 등급별 장기허용응력을 만족하기 위해 같은 등급구성 집성재의 기준허용 응력을 충족하고 있으며 상세 허용 응력은 다음의 Table 4.와 같다.

자체 실험 및 검사를 통과한 10S-34B 등급의 구조용 집성재는 층재 4매 이상을 적층시켜 가공하여 휨 탄성계수( $10^3$  MPa) 평균값 10,000MPa과 허용 응력 11MPa 이상을 확보하도록 제작되었다.

홍성 어린이 숲 체험관에서는 구조용 집성목을 통해 목재 강성의

Table 4. Specifications and quality standards of wood products - Structural Glued Laminated Timber

number of Layer	Permissible stress on the grade 10S-34B (MPa)						
	Bending A of X-X axis		Bending B of X-Y axis		Axial Loads		
	Fbxxc	Exxd	Fbyye	Eyyf	Ftg	Fch	Ei
Four or more.	11	9,000	7.5	8,000	8	9.5	8,000

신뢰도를 높이고 보다 정밀한 구조해석이 가능하게 되었으며, 비정형의 평면 구현을 위해 최적화된 목재를 개발하게 됨으로써 시공의 효율성을 높일 수 있었다. 특히 국내에서 유통되는 구조용 집성목은 수입재의 의존도가 높았던데 반해 국산 원목을 사용하여 국내 기술로 치목·재제하여 사용된 첫 번째 현황으로서 매우 고무적인 일이라 할 수 있다.

3. 구조해석 및 나선형 배치 구성 분석

전통목구조의 구조 해석에 있어 보다 합리적인 결과를 도출하기 위해 기둥과 보로 구성되는 하부골조와 그 위에 얹히는 상부 지붕 골조를 분리하여 분석하며, 기둥과 창방 등과 같이 부재들이 결구되는 접합부를 모멘트가 해제된 보 요소로 모형화하거나 서까래와 도리 등과 같이 부재들이 적층되는 부분을 압축전담 요소로 모형화 하는 등 골조해석모형(Frame Model)을 기반으로 전체 구조물의 형상을 모델링[13]하는 일반적인 분석 방법을 토대로 진행하였다.

3.1. 적용하중 및 하중조합

접합부의 합리적인 설계를 위해서 접합부의 강성에 기인한 작용 하중을 산정하는 것이 우선되어야 하는데, 이는 일반적으로 목조 구조물에서 강접합 접합부는 작용하는 하중이 너무 커서 과대 설계가 되기 쉬운 반면 핀 접합으로 가정할 경우에는 접합부에 실제로 작용하는 하중보다 과소평가함으로써 접합부가 취약해지기 때문이다.[14]

하양트러스의 구조 해석을 위한 지붕 구조부의 적용하중은 1. 고정하중과 활하중 및 2. 풍하중 3. 지진하중이 반영되었으며, 설계 기본 풍속과 지진 지역계수는 충청남도 홍성의 기준 값<sup>6)</sup>이 반영되었다. 설계 단계에서 하양트러스를 구성하는 기둥과 보의 비례적 규모를 반영한 단면 치수를 구하기 위해 기둥의 경우 지름 240~300mm 범위, 하양은 상·하부 부재를 구분하여 상부는 120×180mm~180×250mm, 하부는 120×210~150×240mm의 범위 내의 규격을 다양하게 추출·조합하여 부재 크기를 산정한다.

이를 통해 가정된 부재 단면 치수에 경간의 폭이 가장 큰 H~I 구간의 축 방향력과 휨모멘트 및 전단력을 고려하여 허용 응력 설계법을 바탕으로 구조 안전성을 검토하였다.

그 결과 하양트러스 구간별 허용 응력에 대한 부재 치수의 범위 값을 구해 낼 수 있었으며 가장 짧은 경간인 A-1 구간과 가장 긴 경간인 I-9 구간의 구조 성능을 확보한 경우의 부재 설계안을 중심으로 하양트러스의 구조적 적정성을 분석하였다.

Table 5. Structural Analysis of Children's Forest Experience Center in Hongseong - Case of Standard B

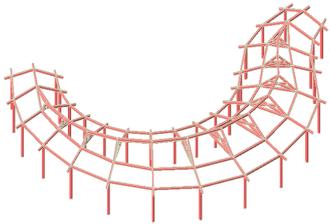
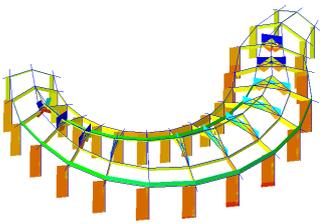
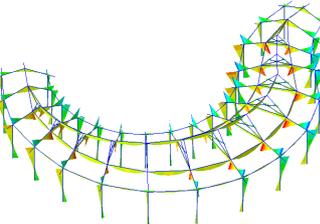
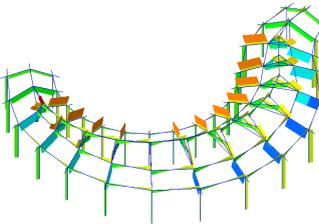
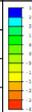
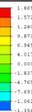
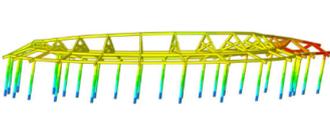
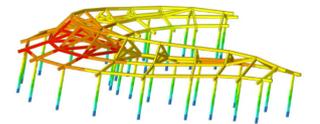
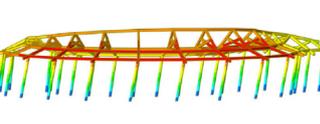
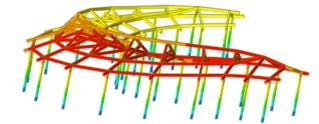
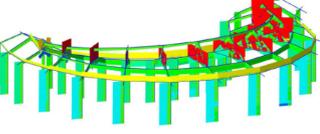
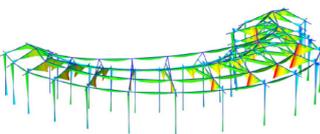
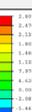
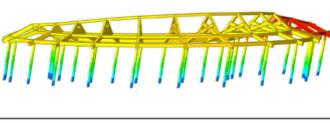
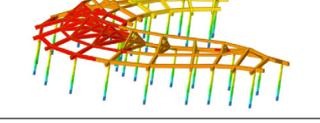
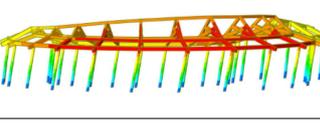
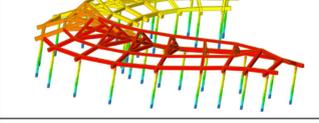
3-D MODELING	AXIAL FORCE DIAGRAM				BENDING MOMENT DIAGRAM				SHEAR FORCE DIAGRAM			
												
component size (mm)	Stress generated (kg/cm <sup>2</sup> )	Permissible stress (kg/cm <sup>2</sup> )	legend	result of the review	Stress generated (kg/cm <sup>2</sup> )	Permissible stress (kg/cm <sup>2</sup> )	legend	result of the review	Stress generated (kg/cm <sup>2</sup> )	Permissible stress (kg/cm <sup>2</sup> )	legend	result of the review
column Ø210	90.04	110.00		0.82 O.K	1.87	10.00		0.19 O.K	8.93	61.17		0.15 O.K
Xia-ang(Upper component) 120×180	115.96	110.00		1.05 N.G	7.28	10.00		0.73 O.K	19.03	47.01		0.40 O.K
Xia-ang(Lower component) 120×210	211.54	110.00		1.92 N.G	8.70	10.00		0.87 O.K	14.90	56.61		0.26 O.K
Purlin 150×210	54.75	110.00		0.50 O.K	2.24	10.00		0.22 O.K	4.61	64.28		0.07 O.K
Wind load displacement review				Earthquake load displacement review								
X direction	Y direction				X direction	Y direction						
												
The largest displacement occurs in the M-P section. (x direction = 1.74mm)	Displacement concentrated in the central G-J section. (y direction = 2.32mm)				Displacement concentrated in the central G-J section. (x direction = 3.15mm)	The largest displacement occurs in the M-P section. (y direction = 2.81mm)						

Table 6. Structural Analysis of Children's Forest Experience Center in Hongseong - Case of Standard A.

3-D MODELING	AXIAL FORCE DIAGRAM				BENDING MOMENT DIAGRAM				SHEAR FORCE DIAGRAM			
												
component size (mm)	Stress generated (kg/cm <sup>2</sup> )	Permissible stress (kg/cm <sup>2</sup> )	legend	result of the review	Stress generated (kg/cm <sup>2</sup> )	Permissible stress (kg/cm <sup>2</sup> )	legend	result of the review	Stress generated (kg/cm <sup>2</sup> )	Permissible stress (kg/cm <sup>2</sup> )	legend	result of the review
column Ø210	54.21	110.00		0.49 O.K	1.11	10.00		0.11 O.K	9.91	61.17		0.16 O.K
Xia-ang(Upper component) 150×210	57.15	110.00		0.52 O.K	3.55	10.00		0.36 O.K	13.43	56.61		0.24 O.K
Xia-ang(Lower component) 200×300	93.66	110.00		0.85 O.K	4.38	10.00		0.44 O.K	7.71	71.96		0.11 O.K
Purlin 150×210	54.75	110.00		0.50 O.K	2.24	10.00		0.22 O.K	6.66	64.28		0.10 O.K
Wind load displacement review				Earthquake load displacement review								
X direction	Y direction				X direction	Y direction						
												
The largest displacement occurs in the M-P section. (x direction = 1.20mm)	Displacement concentrated in the central G-J section. (y direction = 1.69mm)				Displacement concentrated in the central G-J section. (x direction = 2.47mm)	The largest displacement occurs in the M-P section. (y direction = 2.25mm)						

3.2. 부재 치수에 따른 구조해석 비교

하양트러스의 구조적 안정성을 고려하고 합리적 설계의 최적화 모델을 산정하기 위해 허용 범위 내 부재 규격을 모두 검토한 결과 두 가지 설계안의 부재 조합으로 상세 치수를 추출해낼 수 있었다.

우선, 첫 번째 기준안 A의 부재 사양은 기둥 지름 210 / 하양(상부) 150×210 / 하양(하부) 200 × 300 의 단면 치수로 구성되고, 두 번째 기준안 B는 기둥 지름 210 / 하양(상부) 120×180 / 하양(하부) 120 × 210의 부재 구성으로 기준안 A의 부재보다 약 30% 가량 단면적을

줄인 경우이다(Tables 5.~6.).

두 기준안을 토대로 3D 모델링을 이용한 구조 해석을 바탕으로 축력과 휨모멘트 및 전단력을 구하고 휨응력(fb) 과 전단응력 및 좌굴 압축하중(Fk)에 의한 압축응력(fc)을 검토하여 합성응력(Eq. 1)을 계산하였다. 이에 따른 결과 값이 1과 같거나 작다면 부재로서 적합하나 1보다 크다면 부적합하다고 판정한다(Table 7.)

$$fb \div Fb + fc \div Fk = x \leq 1.0 \text{ O.K} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$> 1.0 \text{ N.G}$$

Table 7. Review of synthetic stress by case

component size (mm)	synthetic stress result of the review		component size (mm)	synthetic stress result of the review	
	column $\varnothing$ 210	0.65		O.K	column $\varnothing$ 210
X-Upper 150×210	0.76	O.K	X-Upper 120×180	1.46	N.G
X-Lower 200×300	0.96	O.K	X-Lower 120×210	2.19	N.G
Purlin 150×210	0.60	O.K	Purlin 150×210	0.57	O.K

검토결과 합성응력 값은 하양 부재의 규격에 따라 큰 차이를 보이는데 하양 상하부 부재가 120×180mm/120×210mm 일 때, 단면에 발생하는 응력이 허용 내력을 초과하여 구조적 안전성을 확보하지 못하였으나 150×210mm/200×300mm로 규격을 키우게 되면 작용 하중에 대한 응력이 부재 허용 내력을 충족하여 안정성이 확보되었다. 최종적으로 기준안 A는 I-9 구간을 비롯한 모든 부재에서 적용하중에 대해 내력을 만족하며, 다만 경간 폭이 4300mm 미만의 작은 하양트러스 A,B,O,P 구간에서는 과대 설계가 될 우려가 있다.

반면 기준안 B는 A,B,C,O,P 구간에 대한 구조 성능은 확보되었으나, 4,500mm 이상 경간의 일부 부재에서 수직하중에 따른 적용하중에 대해 내력이 다소 부족한 것으로 검토 되어(Table 7.) 이런 경우 보강 부재를 사용하여 부족한 내력을 보충하는 방법이 고려될 수 있다. 더불어 건물의 풍하중과 지진하중 변위 값은 두 기준안 모두 수평 하중에 대한 변위의 발생 허용 범위 h/500 이내로 확인되어 구조적인 안전성을 확보하고 있는 것으로 검토되었다.

최종적으로 구조 해석을 통해 작용 하중에 대한 변위의 안전성과 경간에 따른 하양 트러스의 최소 단면 규격의 범위를 확인할 수 있어 향후 하양 트러스의 규격과 시공 가능 경간을 일반화할 수 있는 자료로 의미를 부여할 수 있다. 하지만 목재의 가공과 시공성을 고려할 때 각 경간을 충족하는 모든 경우의 트러스 규격을 반영하는 것은 비효율적이기 때문에 표준 규격을 설정하여 단일 부재로 하양 트러스를 통일하는 것이 합리적일 수 있다고 판단되었다. 따라서 최소 설계안을 기준으로 보강 방법에 대한 대안과 이를 원안과 비교·분석하여 구조 설계안을 제시하고자 한다.

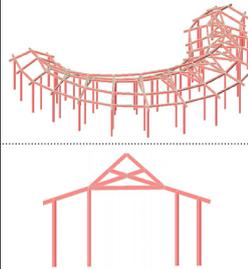
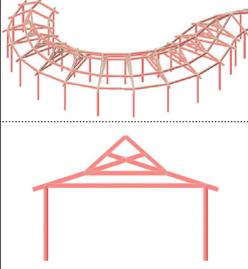
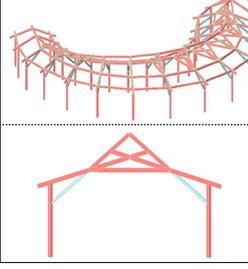
#### 4. 하양트러스의 시공 유형 및 성능 분석

선행된 하양 트러스의 구조 해석 결과를 바탕으로 부재 치수와 재질, 결합 방식 등의 소요성능을 확보하고 요구된 내구성과 안정성을 만족할 수 있는 모델 유형을 제시하여 이를 바탕으로 경제성에 대한 검토를 진행하였다.

##### 4.1. 구조적 안정성과 형태적 심미성

현장 적용성은 물론 구조부의 과대설계가 발생하는 것을 미연에 방지하고 다양한 조건에서 응용 가능한 구조적 기능의 효율성이 고려된 하양 트러스의 표준안을 모색하기 위해 최소 설계안을 기준으로 구조적 안정성과 시공의 합리성을 확보한 형태를 다음의 Table 8. 과 같이 제안하고자 한다. 최소 설계안으로 제시된 부재는 하양

Table 8. Reinforcement design plan

component	3D Model	size (mm)	synthetic stress	
A' high column		column $\varnothing$ 210	0.37	O.K
		high column $\varnothing$ 180	0.29	O.K
		Xia-ang-Upper 120×180	0.68	O.K
		Xia-ang-Lower 120×210	0.95	O.K
		Purlin 150×210	0.58	O.K
B' Horizontal beam		column $\varnothing$ 210	0.43	O.K
		Xia-ang-Upper 120×180	0.40	O.K
		Xia-ang-Lower 120×210	0.98	O.K
		Horizontal beam 120×210	0.89	O.K
		Purlin 150×210	0.51	O.K
C' Braced Design		column $\varnothing$ 210	0.89	O.K
		Xia-ang-Upper 120×180	0.73	O.K
		Xia-ang-Lower 120×210	0.99	O.K
		Purlin 150×210	0.53	O.K
		Brace 100×100	0.71	O.K

(상부) 120mm×180mm 와 하양(하부) 120mm×210mm 규격으로 선행 연구를 통해 검토된 하양트러스의 부족한 내력은 고주, 수평보, 가새를 응용한 설계안을 통해 응력을 확보하도록 계획되었다. 더불어 하양트러스는 실내에 노출되어 심미적 효과가 크게 작용하기 때문에 의장적 특성을 반영하여 디자인 요소로서 시각적 효과를 고려할 필요가 있기 때문에 구조적 안정성과 심미성을 동시에 고려하여 설계안을 평가하도록 한다.

첫 번째 응용 설계안(A')으로써 내부에 고주를 설치하여 하양 하부에 집중된 축 방향의 인장력을 해소하고 구조적 안정성을 확보하는 방식이다. 이때 고주를 통해 형성된 주량은 높은 천정 공간을 부각시키고 각 영역을 연결하는 복도로 활용되어 동선을 분리하고 내부를 아늑하게 감싸는 효과를 기대할 수 있다.

두 번째 응용안(B')은 기둥 간을 잇는 수평보가 하양 트러스 하부를 가로지르는 형태로 부족한 내력을 보완하고 전통적 대들보의 모습을 재현함으로써 친숙한 전통 공간을 연출하는 효과가 있다.

다만, 이 경우에는 하양 트러스의 상징적 의미가 퇴색될 수 있고 수평보로 인해 천정 높이가 전체적으로 내려앉아 시야를 저해할 수 있는 단점이 있다.

마지막 세 번째 설계안(C')은 가새를 두는 방식으로 기둥머리로부터 1m 하부 지점에서 중도리까지만 연결되는 형태로 가새를 설치하여 상부 경사재의 응력을 전달 받음으로써 하양 하부에 걸리는 부하를 줄이는 방법이다(Table. 9.).

Table 9. Structural analysis of the standard A and application plan

case	AXIAL FORCE	BENDING MOMENT	SHEAR FORCE
Standard A			
Application C			



Fig. 3. Braced Application Design Modeling Internal birdview

세 가지 응용대안 중 가새를 반영한 설계안이 원안의 디자인 효과를 크게 훼손하지 않으면서 가새 부재가 의장 요소로 응용될 수 있는 여지가 높아 구조적 안정성과 형태적 심미성을 동시에 고려한 최적의 모델유형이라 평가할 수 있다(Fig. 3.).

#### 4.2. 시공의 경제성

모든 부재의 구조적 안정성은 부재의 크기와 결합 방식을 통해 확보될 수 있는 재고의 여지가 있기 때문에 합리적이고 공학적인 해석 방법을 통해 시공의 경제성이 고려된 설계안이 요구된다. 하지만 설계 계획 단계에서 시공과정의 변수를 예측하는 것은 제한적이기 때문에 설계안을 바탕으로 구조부의 목재 물량을 비교하여 경제적 측면을 분석하고자 한다.

앞선 구조 해석을 통해 분석한 설계 기준안 A와 B에 대한 기둥, 하얏, 도리를 중심으로 목재 소요 물량을 단순 비교하면 약 7.47ton 가량의 물량 차이가 나는 것으로 확인되었다. 기준안 B는 A설계에 비하여 물량 소요량이 약 62%에 불과하며 특히 하얏트러스는 2.4배의 물량 차이를 보인다(Table. 10.). 그러나 설계안 B는 일부 구간의 내력 부족으로 인해 대안 설계가 적용되어야 했기 때문에 고주, 수평보, 가새를 응용한 설계안의 물량으로 비교되어야 할 것이며, 각 응용 방식에 따라 다음 Table 11. 의 결과를 얻어 낼 수 있었다.

그 결과 기둥을 통한 응용방안에서 가장 많은 물량이 소요되는 것을 확인할 수 있었으며 다음으로 수평보, 가새 순으로 값이 큰 것으로 나타났다.

특히 가새 응용안은 기둥과 수평보 응용안의 11% 내지 8% 이상이 적게 소요되며 최초 기준 설계안 A와 비교하였을 때 36%의 목재를 절감할 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서 기준 설계안 B의 응용대안으로 제시된 하얏 트러스와 가새의 시공 조합은 구조 내력을 확보하여 안정성을 갖추는 동시에 부재 사용량의 30%를 절감할 수 있는 방안이라 할 수 있다.

Table 10. Compare the amount of wood

component	Standard A		Standard B	
	size	weight (ton)	size	weight (ton)
column	Ø210	3.15	Ø210	3.15
Xia-ang(Upper)	150×210	1.16	120×180	0.79
Xia-ang(Lower)	200×300	12.26	120×210	5.15
Purlin	150×210	2.95	150×210	2.95
total weight(ton)	19.51		12.04	

Table 11. Compare the amount of wood by application Design

Standard B		application of Horizontal beam	application of Braced Design	application of high column
component	size	120×210	100×100	Ø180
column	Ø210	3.15	3.15	3.15
Xia-ang(Upper)	120×180	0.79	0.79	0.79
Xia-ang(Lower)	120×210	5.15	5.15	5.15
Purlin	150×210	2.95	2.95	2.95
Reinforcement component		1.56	0.47	1.95
total		13.60	12.51	13.99

#### 5. 결론

본 연구는 신한옥 공공건축물에서 처음으로 시도된 비정형의 나선형 평면에 구현된 하얏트러스의 구조적 안정성과 시공의 합리성에 대한 설계안을 제시하고자 수행되었다. 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

첫째, 하얏 트러스는 전통 하얏의 구조적 기능을 계승하여 현대적으로 재해석된 구조체로 대 경간에 대응 가능한 모듈의 형태를 완성하며 제작, 공급, 조립 등의 시공의 합리성과 힘의 역학적 전달 형식을 고려하여 안정성을 확보한 구조체이다.

둘째, 하얏 트러스에 사용된 구조용 집성목과 판형 커넥터는 신한옥 R&D 연구를 통해 개발된 시공 제안 적용기술로서 홍성 어린이 숲 체험장에 최초로 도입되었다. 또한 국산 낙엽송을 사용하여 국내 기술을 바탕으로 집성·접착된 집성목은 현장 규모와 특성을 반영하여 최적 설계로 제작되었으며 동시 개발된 판형 커넥터를 통해 목조 가구의 부재 간 결합의 새로운 시도로서 중요한 가치를 실현하였다.

셋째, 구조용 집성재와 금속 긴결재를 통한 부재간의 결합 방식은 강접합 접합부로서 보다 명쾌한 구조 해석이 가능할 수 있는 기반을 마련하였다. 이는 향후 비정형 한옥 또는 대규모 신한옥 건축물에 적용될 수 있는 하얏트러스 설계에 지침 자료로서 구조적 안전성과 시공의 합리성을 고려한 기준안의 규범을 제공한다.

넷째, 하얏재는 지붕 물매에 직접적인 영향을 주지 않고 보의 기능을 대신하며 온전하게 구조적 역할에 집중하도록 설계되었다. 이러한 하얏트러스의 구조 검토 결과 하얏재 하부 응력에 대한 부하가 높은 특징을 확인할 수 있었다. 따라서 부재 단면을 키우거나 보안 설계를 통해 구조적 안정성을 확보할 수 있는 방안을 모색하였으며

분석 결과 수평보, 고주, 가새 등을 반영한 응용안을 통해 부족한 내력을 확보 할 수 있는 것으로 나타났다.

다섯째, 나선형 지붕을 구성하는 하앙 트러스의 구간별 부재 규격은 구조적 안전성과 시공의 합리성에 기인하여 다양한 대안으로 제시될 수 있다. 특히 가새를 응용한 하앙 트러스 설계안은 원안에 비하여 약 30% 이상 목재 물량을 절약할 수 있어 경제성과 심미성을 동시에 만족할 수 있는 설계안이라 할 수 있다.

### Acknowledgement

본 연구는 2021년 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원 과제(21AUDP-B128638-05)에 의해 수행되었습니다.

### Reference

[1] 백영정, 김영훈, 홍성 어린이 숲 체험관 실증구축 설계안 분석, 한국: 한국생태환경건축학회 논문집, 제21권 제1호, 2021, pp.56-58. // (Y.J. Peck, Y.H. Kim, An Empirical Building Analysis of Children's Forest Experience Center in Hongseong, Korea: KIEAE Journal, 21(1), 2021, pp.56-58.)

[2] Y.J. Peck, Y.H. Kim, Application Technology of New Hanok Style R&D in Demonstration Project Verification, Korea: KIEAE Journal, 21(3), 2021, pp.5-16.)

[3] 정성진 외 5인, 축조방법을 고려한 전통 민도리목구조의 구조해석모형에 관한 고찰, 한국: 대한건축학회논문집 구조계, 제28권 제11호, 2012, p.81. // (S.J. Jung et al., An Investigation on the Structural Analytical Model of Traditional Mindori Wood Structure Considering Construction Method, Korea: Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 28(11), 2012, p.81.)

[4] 한옥기술개발연구단, 한옥기술개발 최종보고서, 국토교통과학기술진흥원, 2016 // (Han-ok Technology Development Institute, Han-ok Technology Development Final Report, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, 2016)

[5] 참우리 건축사사무소, 홍성 신한옥형 아동 숲 체험관 신축공사, 한국: 인허가 도면집, 2020. // (Chamooree architecture firm, New Han-ok style Children's Forest Experience Center in Hongseong, Korea: Drawings for Authorization, 2020.)

[6] 임대성, 황종국, 하앙 구조로 된 5층 목탑 재현과 풍동실험, 한국: 대한풍공학회지, 제10권 제2호, 2006, p.147. // (D.S. Lim, J.K. Hwang, The Five-story Wooden Stupa Reconstruction of the Ha-ang (Down Pointing Cantilever) Structure and Wind Tunnel Test, Korea: Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, 10(2), 2006, p.147.)

[7] 완주군, 완주 화암사 극락전 실측 및 수리보고서, 한국, 문화재청, 1997, p.292. // (Wanju-gun, Actual Measurement and Repair Report the Geukrak-jeon of Hwaamsa Temple in Wanju, Korea: Cultural Heritage Administration, 1997, p.292.)

[8] 주남철, 박대준, 하앙에 관한 연구, 한국: 대한건축학회논문집, 제5권 제4호, 1989, p.115. // (N.C. Joo, D.J. Park, A Study on The XIA-ANG(Down Pointing Cantilever, Korea: Journal of the architectural institute of Korea, 5(4), 1989, p.115.)

[9] 장헌덕, 중국 당(唐).송(宋) 목조건축의 하앙 결구기법 변천 연구, 한국: 건축역사연구, 제20권 제6호, 2011, pp.115-116. // (H.D. Chang, The Study of the Techniques of the Xia-ang Structure in China during the Tang and Song Dynasty, Korea: Journal of Architectural History, 20(6), 2011, pp.115-116.)

[10] 완주군, 완주 화암사 극락전 실측 및 수리보고서, 한국: 문화재청, 1997, p.292. // (Wanju-gun, Actual Measurement and Repair Report the Geukrak-jeon of Hwaamsa Temple in Wanju, Korea: Cultural Heritage Administration, 1997, p.292.)

[11] 김순철 외 3인, 접합철물과 접착제로 구성된 목재 접합법의 구조 성능, 한국: 대한건축학회 논문집 - 구조계, 제26권 제5호, 2010, p.19. // (S.C. Kim et al., Structural Performance of Joints Composed by Metal Connector and Adhesive in Wooden Structures, Korea: Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 26(5), 2010,

p.19.)

[12] 이기조 외 4인, H형강과 구조용집성재로 구성된 합성 목구조 접합부 개발, 한국: 한국복합신소재구조학회논문집, 제9권, 제3호, 2018, p.99. // (G.J. Lee et al., Development of Composite Joint Consisting of H Section Steel and Structural Glued Laminated Timber, Korea: Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures, 제9권 제3호, 2018, p.99.)

[13] 김영민, 전통목구조의 3차원 구조해석을 통한 구조검토, 한국: 한국구조물진단유지관리공학회 학술발표대회 논문집, 제24권 제2호, 2020, p.13. // (Y.M. Kim, Structural Check of Korean Traditional Timber Structure by Three-Dimensional Structural Analysis, Korea: Korean Society of Structural Diagnosis and Maintenance Engineering - Academic Presentation Conference, 24(2), 2020, p.13.)

[14] 조소훈 외 4인, 목조 구조물 접합부의 강성에 대한 근사평가를 위한 해석모델, 한국: 한국전산구조공학회 논문집, 제28권 1호, 2015, p.93. // (S.H. Joe et al., Analysis Model for Approximate Evaluation of Stiffness for Semi-Rigid Connection of Wooden Structures, Korea: Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, 28(1), 2015, p.93.)

1) midas Gen으로 선형해석법을 적용한 3D 응력해석 프로그램이며, 건축 분야의 범용구조해석 설계시스템으로 범용된다.

2) 본 연구는 현장 시공에 참고를 위한 제언으로써 현장상황과 다를 수 있음을 명시하는 바이다.

3) 중국 唐·宋 목조건축의 하앙 결구기법 변천 연구에서는 「法式」이 반복되기 이전 건물의 중심포작 하앙결구 기법은 퇴보의 위치에 따라 중요한 기법의 차이를 분석하였으며 중심포작의 경우 내진주에서 길게 뻗어 나온 퇴보머리 하부가 하앙을 받치고 있는 기법과 퇴보가 외부로 돌출되지 않고 단지 하앙만을 받치는 기법으로 나누어 볼 수 있다고 정리한다.

4) 완주 화암사 극락전 실측 및 수리보고서(1997)를 통해 하앙의 일반적인 기능을 다음과 같이 정리하고 있다. 1. 출공으로서의 기능 2. 보가 없는 특수한 구조 3. 층고의 증대 4. 장식재

5) SD400은 토목·건축현장에서 가장 일반적으로 쓰이는 철근콘크리트용 이형 봉강(철근)으로 mm<sup>2</sup> 당 40kg의 하중을 견딘다.

6) 풍하중은 설계기본 풍속을 30m/sec (충청남도 홍성)에 두고 중요도계수는 1.00 (중요도 1)으로 한다. 지진하중은 지역계수 0.22 (충청남도 홍성)을 반영하며 지반종류는 S4, 중요도계수는 1.2 (중요도 1)으로 내진 I 등급을 반영한다.

7) 수평 하중에 대한 변위의 발생 허용 범위를 h/500 이하로 설정할 것을 권장하며 이때, H는 건물 높이이다.