Journal of the Society of Cultural Heritage Disaster Prevention
ISSN : 2508-2825
Vol. 8, No. 3, pp. 243-250, December 2023

ARTICLE

# 서까래 원형보존을 위한 부분보수안 휨성능 실험결과 분석

신은미* · 김형준** · 하태욱*** · 김원종**** · 김석현***** · 오규성******

# Analysis of Experimental Results on Bending Performance of Partial Reinforcement Method for Preservation of Rafters

Shin, Eunmi* · Kim, Hyungjun** · Ha, Taeuk*** · Kim, Wonjong**** · Kim, Sukhyun***** · Oh, Kyusung******

## 요 지

목조건축유산은 다양한 열화·손상에 대하여 적절한 수리가 이루어지게 된다. 가치 보존을 위해서는 원래 사용된 부재를 재사용하는 방법이 고안되어야 하며, 지금까지 다양한 방법을 통해 보수·보강되고 있다. 하지만, 이러한 보수·보강법은 경험에 기인하여 정략적 효율적으로 적용되기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 실험과 구조검토를 통하여 보강법의 정량적 평가를 수행하고, 현장 적용을 위한 신뢰성을 확보하고자 한다.

**핵심용어:** 서까래, 보강법, 결합단면, 구조평가

## Abstract

Heritage of wooden structure is subject to appropriate repairs for various deterioration and damages. In order to preserve value, a method of reusing the old members must be devised, and they have been repaired and reinforced through a variety of methods. However, these repair and reinforcement methods are difficult to apply strategically and efficiently because they depend on experience. Therefore, we intend to perform quantitative evaluation of the reinforcement method through experiment and structural review, and want to secure reliability for field application.

**Keywords:** Rafter, Reinforcement method, Combination section, Structural evaluation

* 정회원, 국립문화재연구원 안전방재연구실 연구원(E-mail:emshin33@korea.kr)
Member, Researcher, Safety and Disaster Prevention, National Research Institute of Cultural Heritage

** **교신저자**, 정회원, 국립문화재연구원 안전방재연구실 학예연구사(E-mail: hjk99@korea.kr)
**Corresponding Author**, Member, M.S. Researcher, Safety and Disaster Prevention, National Research Institute of Cultural Heritage

*** 정회원. 국립문화재연구원 안전방재연구실 학예연구사
M.S.Researcher, Safety and Disaster Prevention, National Research Institute of Cultural Heritage

**** 정회원. 국립문화재연구원 안전방재연구실 연구원
Researcher, Safety and Disaster Prevention, National Research Institute of Cultural Heritage

***** 명지대학교 건축대학 객원교수
Visiting Professor, College of Architecture, Myongji University

****** 현창문화재기술단
Heritage Techonology Group

Received | December 13, 2023 Revised | December 25, 2023 Accepted | December 27, 2023

© 2023 Society of Cultural Heritage Disaster Prevention All rights reserved.
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

# 1. 서 론

목조건축물은 생애주기동안 주변환경과 작용하는 여러 하중에 의하여 열화되며, 열화된 부분은 안전성을 확보하기 위하여 적절한 시기에 교체되거나 수리된다. 그 가운데 문화유산의 경우에는 가치 보존을 위하여 부재 재사용에 대하여 보다 적극적으로 고려되어야 하며, 재사용률을 높이기 위한 여러 방법이 고안되고 현장에 적용되고 있다.

문화유산의 수리에 관한 여러 사례는 「목부재 재사용을 위한 보수·보강 사례」에 정리되어 있다(전통건축수리기술진흥재단(Korea Foundation for the Traditional Architecture and Technology), 2021). 여기서 수리 방법에는 신재보강, 목재보강, 철물보강, 수지보강, 복합보강 등으로 정리되어 있다. 문화유산에 적용되는 수리 기법은 이와 같이 다양하며, 보수(補修)와 보강(補强)으로 크게 분류될 수 있다. 보강은 보수에 비하여 역학적 구조적 역할을 높이기 위한 것으로 동일한 수리방법 안에서도 보수 목적과 보강 목적에 따라 달리 평가되고 적용되어야 한다. 하지만, 본 사례분석에서는 보강과 보수의 의미를 구분하지 않고 모두 보강법으로 분류되어 있다. 또한, 창방, 평방, 도리, 장여와 같이 휨모멘트에 주로 저항하는 부재의 전체 길이에 걸쳐 휨모멘트 저항성능을 보강하는 방법은 탄소섬유시트에 의한 방법만이 확인되었다. 보강법에 따른 향상된 성능이 정략적으로 평가되지 않고 있으며, 그 외 다양한 보수·보강 방법 또한 경험에 기인하여 효율적으로 적용하기에 한계가 있다.

(1) Collapse case

(2) Collapse and damage case

Fig. 1. Case of Collapse in traditional wooden roof

특히, 서까래는 목조건축물에서 부후·부식의 가능성이 높은 부재로, 재사용을 위하여 효과적·효율적 수리 방법이 필요하다. 하지만, 기존에 서까래를 대상으로 보수·보강된 사례가 확인되지 않는바, 본 연구에서는 특정 목조건축유산의 수리현장에서 검토된 서까래를 대상으로 부재 재사용률을 높이기 위한 방법에 대한 역학적 성능을 평가하고자 한다.

# 2. 서까래 보강안 개요

## 2.1 실험체 구성

앞서 기술한 바와 같이 서까래는 사용되는 기간동안 다양한 원인으로 부식·열화된다. 이러한 서까래의 부식·열화는 종도리 상부, 서까래 상면, 당골막이에서 다수 나타나며, 그 외 부분은 재사용 가능한 부분이다. 따라서 문화유산의 다양한 가치 보존을 위하여 재사용률을 높이고자 서까래의 완전한 교체 뿐만이 아니라 열화된 부분만을 도려내고 교체하는 구재-

신재 결합 방법을 제시하고 그 구조적 성능을 검증하고자 한다.

Table 1. Specimen

| | Diameter of rafter [mm] | | | Length of rafter [mm] | | Weight [kg] | Density [g/cm$^3$] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | tip | center of column | roots | upper | bottom | | |
| A_1 | 192 | 207 | 195 | 3,980 | 3,970 | 45 | 0.368 |
| A_2 | 188 | 213 | 205 | 3,980 | 3,980 | 70 | 0.549 |
| A_3 | 200 | 211 | 190 | 3,985 | 3,980 | 55 | 0.438 |
| B_1 | 178 | 197 | 202 | 4,290 | 4,273 | 60 | 0.482 |
| B_2 | 190 | 195 | 203 | 4,283 | 4,271 | 60 | 0.465 |
| B_3 | 175 | 198 | 215 | 4,254 | 4,235 | 60 | 0.469 |

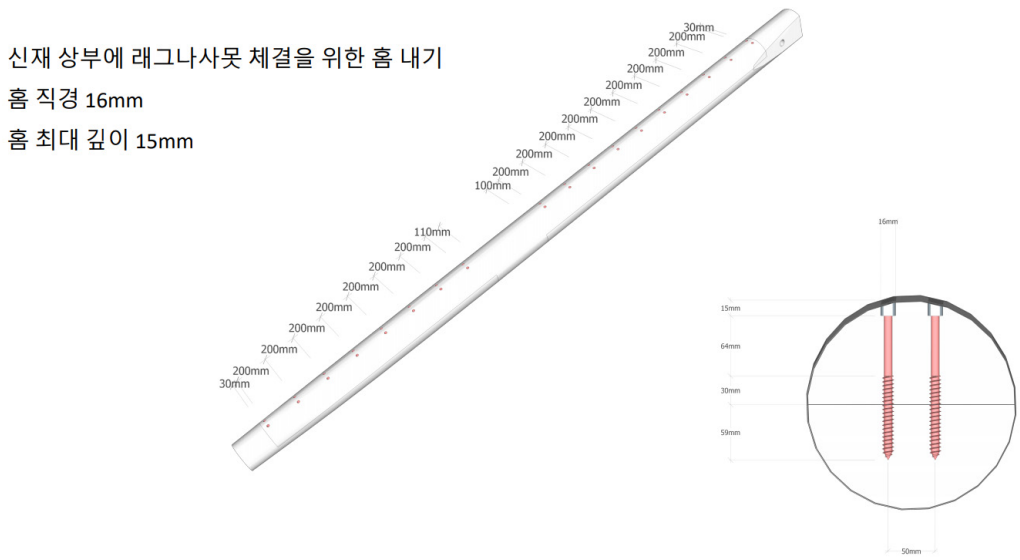



Fig. 2. Fixation method of Specimen B

따라서, 본 연구에서 고려된 실험체는 단일 목재의 무보강 서까래(Specimen A)와 Fig. 2와 같이 열화부분을 신재로 교체한 부분 교체 서까래(Specimen B)를 대상으로 한다.

서까래의 기본 치수는 직경 약 200mm, 길이 약 4,000mm를 기본으로 하며, 실험체별 그 상세치수와 무게는 Table 1과 같다. 실험체의 부피와 무게를 통하여 가력 시 밀도를 확인한 결과 실험체 A는 그 차이가 0.368~0.549로 편차가 있지만, 실험체 B는 비교적 유사한 밀도를 보인다. 밀도는 목재의 강도에 밀접한 관계를 가지므로 향후 분석에 중요한 참고 사항이 된다.

구재와 신재를 결합하는 부분 교체 서까래의 경우, 단면의 높이가 유사한 구재 단면을 1/2 남기는 경우를 기본으로 하였다.

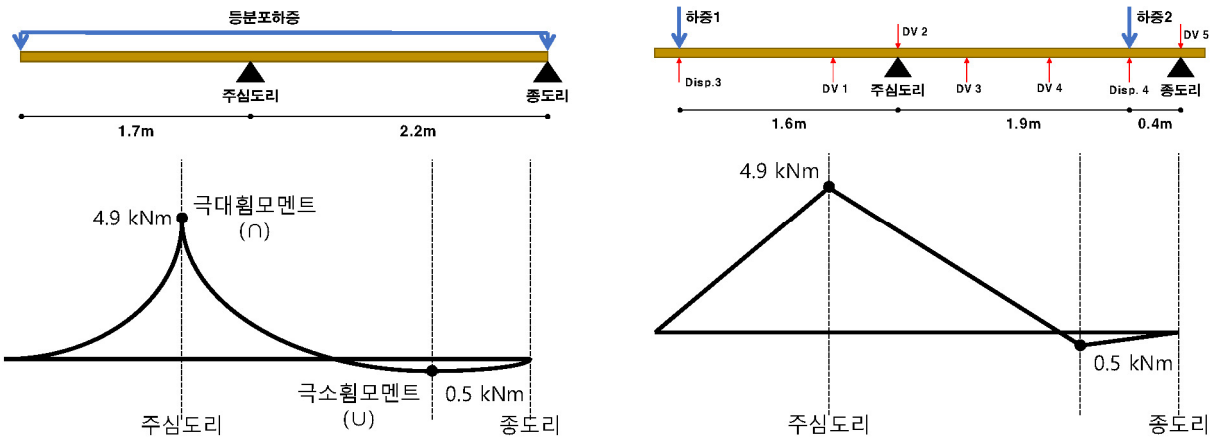
부재 결합을 통하여 구축하는 경우, 구재 부분과 신재 부분이 완전히 일체화 되지 않으면 두 단면이 적층된 보다 낮은 성능을 가지는 단면이 된다. 따라서 구재와 신재의 일체화는 단일 목재 서까래의 성능과 유사한 결과를 얻기 위한 중요 부분이다. 본 실험체에서는 두 가지 방법을 병행하여 구재와 신재의 일체화를 도모하였다. 먼저, 수지접합을 이용하여 맞댐면을 부착하고, 래그 나사못을 이용하여 보다 견고하게 일체화를 얻고자 하였다. 사용된 수지는 Araldite AW106과 Araldite HV953U를 0.8:1의 비율로 혼합하여 사용되었으며, 래그 나사못은 직경 9mm의 길이 150mm를 사용하였다.

### 2.2 실험의 가력 및 계측 계획

서까래는 현장에서 지붕의 분포하중을 지지하게 된다. 하지만, 실험에서는 분포하중으로 가력하는 것이 어려운 상황으로 Fig. 3과 같이 실제와 유사한 휨모멘트도를 가지는 집중하중의 형태로 가력이 이루어 졌다. 또한, 실험 장비의 한계로 인하여 하중제어가 아닌 변위제어로 가력되었다. 두 가력점의 변위제어 기준은 집중하중 시 변위(처짐)의 비를 이용하였다. 그 결과, 하중1은 0.175mm/s, 하중2는 0.025mm/s의 속도로 변위제어 하였다.

실제 건축물의 지붕하중에 의하여 주심도리에 발생되는 휨모멘트는 4.9kNm으로 서까래 단면이 지지하여야 하는 설계하중을 이로 정한다.

가력된 하중의 응답으로 변위를 측정하여 각 측정위치는 서까래 끝단부터 종도리까리 7곳의 수직변위이다. 이 가운데, Disp3과 Disp4는 하중점인 액츄에이터에서 하중과 변위가 계측되어 별도의 변위계를 설치하지 않았다. 또한, 지지점에 해당하는 DV2와 DV5는 지지점의 부분압축량을 측정하기 위하여 설치되었다. 이러한 각 변위계의 설치 위치는 Fig. 3 (2)과 같다.




(1) Entity (2) Experiment

Fig. 3. Bending moment of rafter

(1) Plan (2) Front view (3) Side view (4) Perspective view

Fig. 4. oading system

## 3. 서까래 휨실험 결과

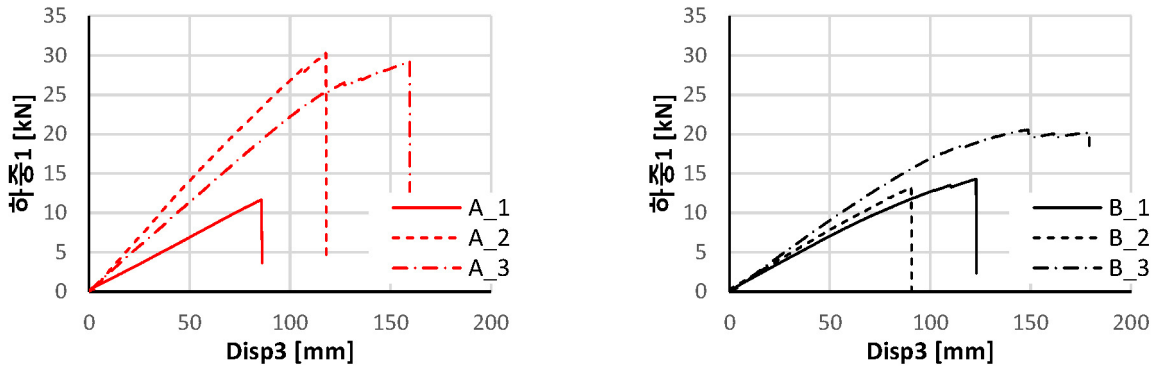
### 3.1 하중-변위 관계

실험 결과의 중요 부분은 최대휨모멘트가 발생되는 주심도리 상부의 분석이다. 따라서 먼저 하중1과 Disp3의 관계를 중심으로 그 결과를 기술한다.

Fig. 5와 같이 실험체 A와 실험체 B의 결과는 초기 일정한 기울기를 가지며 하중과 변위가 증가하며, 기울기 변화가 크

지 않은 상황에서 급격한 부재 파단으로 하중이 감소하는 경향이 일반적으로 나타났으며, 단일 목재인지 결합된 형태인지에 따른 차이는 확연한 차이를 보이지 않는다. 즉, 서까래의 휨모멘트 저항에서는 탄성 범위 후 급격한 취성 파괴로 저항능력을 잃었으며, 파단 위치는 주심도리 상부에서 모두 나타났다.

실험체 A는 3개가 결과가 상이하며 실험체 B는 유사한 결과를 보인다. 이는 실험체의 무게·밀도와 유사하며, 밀도가 높은 실험체 일수록 동일 변위에서 높은 하중을 보이고 있다. 또한, 실험체 B의 밀도가 실험체 A-1과 A-3 사이에 분포하고 있는 것과 같이 하중-변위 곡선 또한 실험체 B 3개는 A-1과 A-3 사이에 놓여있다.




(1) Specimen A (2) Specimen B

Fig. 5. Load-Displacement curve

Table 2. Initial Stiffness and Maximum Load

| | Initial Stiffness [kN/mm] | | Maximun Load [kN] | | Deformation at design load [mm] |
|---|---|---|---|---|---|
| | each | Ave. | each | Ave. | |
| A_1 | 0.14 | 0.21 | 11.69 | 23.73 | 22.20 |
| A_2 | 0.28 | | 30.30 | | 11.46 |
| A_3 | 0.23 | | 29.20 | | 13.09 |
| B_1 | 0.13 | 0.15 | 14.27 | 16.02 | 21.27 |
| B_2 | 0.15 | | 13.23 | | 18.75 |
| B_3 | 0.18 | | 20.55 | | 17.53 |

### 3.2 초기강성과 최대하중

Fig. 5의 하중-변위 곡선에서 초기 기울기와 최대 하중을 정리하면 Table 2와 같다. 초기강성은 앞서 기술한 하중-변위 관계와 유사하게 실험체의 밀도가 증가하면 초기강성도 증가하는 결과를 보인다. 밀도가 가장 높은 A-2에서 가장 높은 초기강성을 보이고, 다른 실험체는 밀도가 유사하며 유사 범위에서 초기강성을 나타낸다. 하지만, 최대하중은 밀도와 일관된 경향을 보이지 않는다. A-2와 A-3, B-1과 B-2에서와 같이 초기강성에서는 차이를 보이지만 최대하중은 유사한 결과를 보이며 최대 파괴 변위에 차이를 나타낸다. 이는 파괴까지의 휨저항에너지(하중-변위 곡선의 아래 면적) 유사성으로 보인다.

### 3.3 처짐

처짐 검토에서는 국가건설기준(KDS 41 33 04)을 바탕으로 하였다.

주심도리에서 서까래 단부까지는 내민보(캔틸레버보)와 유사하며, 실험 조건에서의 처짐 한계는 내민 길이 1,600mm에 대한 유효길이(캔틸레버보, 집중하중) 2,856mm 기준으로 1/240에 해당하는 11.9mm이다. 대부분의 실험체에서는 기

준이 되는 변형량을 초과하고 있으나, 본 실험에서는 주심도리의 휨모멘트값을 동일하게 한 하중 설정이므로 이를 고려하여 동일 휨모멘트의 등분포하중에서의 기준을 15.8mm로 적용 가능할 것으로 보인다. 또한, 실험의 지지부와 가력점에서 지그 힌지에 의한 목재의 부분압축이 포함되어 처짐이 크게 측정되었으며, 주심도리 상부에서 부재의 회전이 발생하므로 이 또한 처짐의 증가를 유발시킨다. 지지부 및 가력점의 부분압축량은 1~2mm로 이를 고려하면, A_1, B_1의 실험체가 허용 처짐 이상의 변위를 보이는 것으로 판단된다.

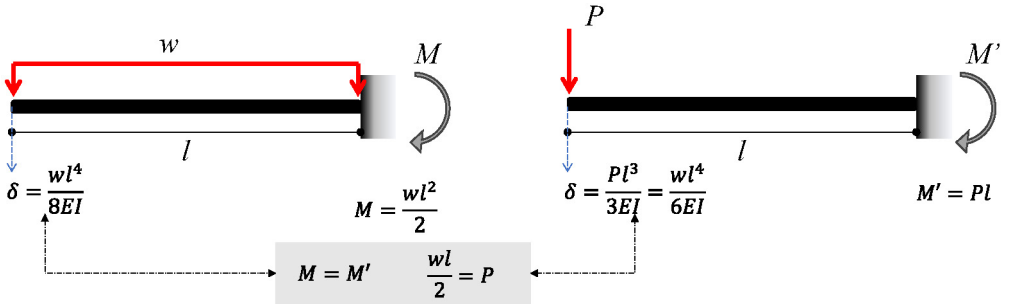
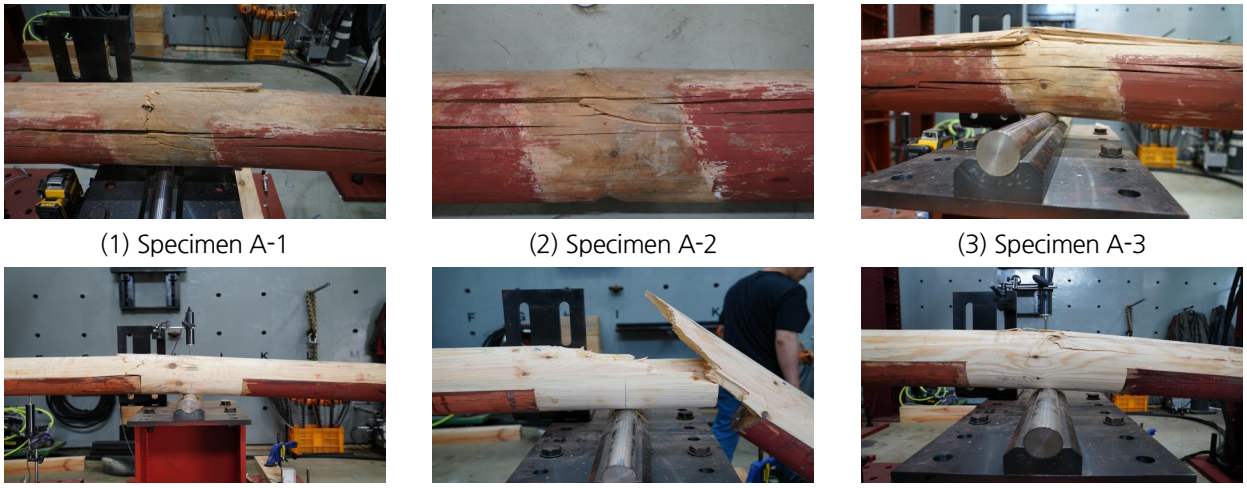



Fig. 6. Displacement of Load case



(1) Specimen A-1 (2) Specimen A-2 (3) Specimen A-3

(4) Specimen B-1 (5) Specimen B-2 (6) Specimen B-3

Fig. 7. Fracture mode

### 3.4 파괴모드

각 실험체의 파괴 시 형상은 Fig. 7과 같다. 대부분의 실험체는 파단 시 주심도리 상부의 인장 할열이 동반되면서 급격한 단면파단을 보인다. 더욱이, 부분교체 실험체 B의 경우 인장부 할열의 시작이 대부분 래그 나사못이 체결된 위치로, 래그 나사못 체결을 위한 나사구멍이 존재하며 이러한 나사구멍은 단면결손으로 이어진다. 더욱이, 상면에 나사구멍의 마감된 부분과 원래 부재가 완전히 결합되지 않아 취약점이 된 것으로 보인다.

## 4. 국가건설기준을 통한 구조 검토

### 4.1 무보강 서까래의 검토

국가건설기준(KDS 41 33 04)을 바탕으로 단일 목재로 구성된 서까래의 휨 저항능력을 평가하면 다음과 같다.

기준에 적용한 서까래의 단면은 직경 200mm이며, 재료는 육안등급 소나무류 1등급을 기준으로 하였다. 또한, 재료강도의 보정을 위한 계수는 하중기간계수 0.9 이외에 보정계수는 모두 1.0으로 적용하였다. 설계휨모멘트 4.90kNm, 설계전단력 6.07kN에 대하여 발생되는 휨응력 6.24MPa, 0.29MPa이다. 가정된 재료의 기준강도와 보정계수를 고려하면 허용휨응력은 7.97MPa, 0.99MPa로 작용하는 하중 범위 이상의 저항능력을 확인하였다. 따라서 서까래가 단일부재(무보강)인 경우에는 작용하는 하중에 대하여 필요한 단면과 재료적 기계특성을 만족한다.

### 4.2 부분 교체 서까래의 검토

구재의 부식 부분만을 도려낸 후 신재를 부분적으로 적용한 서까래의 경우 기본적으로 구재와 신재가 완전히 일체화되어 거동하는 것이 필요하다. 일체화가 확보되지 않을 경우에는 두 개의 반달형 단면이 적층된 형식으로 원래 원형의 단면보다 낮은 성능을 가질 수 밖에 없다.

따라서 일체화를 위해 적용된 래그 나사못의 성능을 국가건설기준(KDS 41 33 05)에 따라 검토하였다. 사용된 래그 나사못은 직경 9 mm, 길이 150 mm이며 구재와 신재의 전단력 전달에 저항되도록 하였다. 이로써, 목재와 목재간의 1면 전단에 해당되며, 검토에 적용된 목재는 소나무류 1등급을 기준으로 하였다.

서까래에 등분포 하중이 작용하는 경우 발생되는 전단력은 주심도리 상부에서 가장 크게 나타나며, 검토된 등분포하중에서는 최대 6.07kN의 전단력에 대하여 저항할 필요가 있다. 래그 나사못의 치수와 목재 치수를 바탕으로 산정된 기준허용전단내력(래그 나사못 2개)은 4.56kN로 필요 설계하중 6.07kN의 75%의 저항성능을 가진다. 하지만, 종국상태까지의 가력 상황에서 원부재(구재)와 교체부재(신재) 사이에서 전단 파단이 발생된 부분은 확인되지 않았다. 이는 실험 조건(집중하중)에서의 전단력은 실제보다 낮은 약 3kN로 래그 나사못의 저항만으로 충분하기 때문이다. 더욱이, 본 실험에서는 목재의 래그 나사못을 200mm 간격의 반복적 설치와 합성수지 접합이 전체 저항에 영향을 미치며 파단이 일어나지 않았을 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 여러 개의 래그 나사못이 설치된 경우의 전단저항에 관한 보다 효율적 배치 및 수량 산정에 관한 정략적 평가 연구가 필요함을 시사한다.

3장과 4.1.과 4.2의 분석을 바탕으로 부분교체 서까래의 적용성을 확인한 결과, 설계 하중 범위에서 단일목재 서까래의 저항과 다르지 않은 경향과 강성을 보이고 있으며, 다소의 강성 차이는 부재의 결합에 의한 영향보다는 사용 목재의 밀도에 영향을 받는 것으로 판단되었다. 따라서 양질의 목재를 사용할 경우 철물(래그 나사못)과 합성수지 접합을 통하여 원부재의 재사용 가능성을 높일 수 있음을 확인하였다.

## 5. 결 론

전통목조건축물은 여러 요인에 의하여 열화와 손상을 입게 된다. 이러한 열화와 손상은 안전성 확보를 위하여 수리가 이루어지며, 효율적 수리 방법을 고려하여야 한다. 본 논문에서는 목조건축물의 보수보강에 적용되는 다양한 방법에 대하여 실험을 통하여 구조적 성능을 평가하고자 하였다.

실험에 적용된 실험체는 직경 약 200mm, 길이 약 4,000mm를 기준으로 하며, 단일 목재의 서까래(실험체 A)와 구재-신재 결합 서까래(실험체 B)를 각 3개씩 구성하였다. 구재-신재 일체화 방법은 접촉면의 합성수지와 래그 나사못을 적용하

였다.

그 결과, 두 실험체 모두 유사하게 초기 하중 증가에 따른 변위 증가 구간(탄성영역)을 가진 후, 급격한 하중 감소를 보이는 취성파괴 거동을 보였으며, 초기 강성은 단일목재 또는 결합 형태 여부보다는 사용된 목재의 밀도와 관계성이 두드러졌다.

또한, 국가건설기준을 적용하여 단일목재와 결합 서까래의 구조성능을 검토한 결과, 실험에서 확인된 파괴형상과 유사한 평가값을 보이며, 구재-신재 결합 형태를 가지더라도 서까래의 저항성능을 확보 할 수 있음을 정략적으로 검토하였다.

이러한 실험과 기준을 통한 검토를 바탕으로 서까래 보강법(구재-신재 결합)의 적용 가능성을 검토하였으며, 향후 휨모멘트 저항뿐만이 아니라 다양한 보강법에 관하여 실험을 통하여 구조성능을 확보하고, 적재적소에 효율적으로 보강법을 적용하는 것이 가능하다.

## 감사의 글

이 연구는 2023년도 국립문화재연구원 안전방재연구실에서 수행된 「목조 건축문화재 내진성능 연구」 과제의 연구비 지원에 의한 결과의 일부임(과제번호:NRICH-2305-A64F-1).

## References

Korea Foundation for the Traditional Architecture and Technology. (2021). Case of repair and reinforcement for reuse of wooden members.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016). Korea construction standards (KDS 413305:2016).

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019). Korea construction standards (KDS 413304:2019).