

이차원해석에 의한 서까래 도리 사이의 하중전달 메카니즘

Load Transfer Mechanism between Rafter and Cross-beam by 2-D Analysis

정성진* · 홍성걸** · 김남희*** · 이영욱**** · 황종국***** · 주석준*****

Jung, Sung-Jin · Hong, Sung-Gul · Kim, Nam-Hee · Lee, Young-Wook · Hwang, Jong-Kook · Joo, Seok-Jun

ABSTRACT

In the structural analysis of the Korean traditional wooden structure, while the understanding of the transfer mechanism of roof load is very important, there are few researches on this subject. So, some modeling methods considering the connecting methods of the Korean traditional wooden structure are suggested, the results using each modeling method are compared, and the most reasonable analytical model is presented in this study.

Keywords: the Korean traditional wooden structure, the Transfer Mechanism of Roof Load, Modelling Method, Analytical Model

1. 서론

한국의 전통목구조물에서는, 부재들이 만나는 절점들이 한 부재가 다른 부재 위에 단순히 얹히는 방법으로 구성되어 있다. 이에 따라 한국의 전통목구조 해석에서는 절점을 철근콘크리트 구조 또는 강구조물 해석에서와 같이 모멘트접합 또는 편접합으로 쉽게 가정할 수 없게 된다. 따라서 한국의 전통목구조물 해석에서는 부재들이 만나는 절점에서의 압축력과 마찰력에 의해 하중이 전달되는 것으로 보아 절점을 모형화해야 한다. 이와 같이 모형화할 경우, 부재들이 만나는 절점에서는 두 부재 사이의 접촉문제가 반드시 고려되어야 한다.

이러한 관점에서 볼 때, 한국의 전통목구조 설계 실무자들이 일반적으로 채택하고 있는 연속보 또는 단순보로 가정한 모형화 방법은 수직하중의 전달경로 및 각 부재에 작용하는 부재력들을 잘못 예측할 수 있는 위험성을 내포하고 있다.

따라서 본 연구에서는 한국의 전통목구조에서 수직하중의 전달경로를 정확히 파악하기 위한 방법의 일환으로 먼저 서까래와 도리 사이의 하중전달경로 및 구조거동을 분석하고자 한다.

* 정회원 · 한남대학교 건축공학과 부교수 Email: jsjarch@hannam.ac.kr

** 정회원 · 서울대학교 건축공학과 부교수 Email: sglhong@snu.ac.kr

*** 정회원 · 서울대학교 교량설계핵심기술연구단 Email: namheek@snu.ac.kr

**** 정회원 · 군산대학교 건축공학과 부교수 Email: leeyu@kunsan.ac.kr

***** 정회원 · 한국전통문화학교 전통건축학과 조교수 Email: jkhwang@nuch.ac.kr

***** 정회원 · (주)티이솔루션 부장 Email: sjjoo@tesolution.com

2. 구조해석 모형

본 연구에서 대상으로 삼고 있는 봉정사 대응전의 지붕가구는 다음 그림 1과 같다. 여기서 주목할 점은 단연과 장연은 연침을 통해 옆으로 연결되어 있으므로 이 두 부재는 서로 독립적으로 거동하는 것으로 보아야 한다. 한편, 단연과 도리로 구성되는 구조시스템은 도리가 단연을 지지하는 단순보이므로 여기에서의 하중전달경로는 장연과 도리로 구성되는 구조시스템에서의 하중전달경로에 비해 단순한 것으로 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 외목도리, 주심도리, 내목도리, 중도리에 의해 지지되고 있는 장연에서의 하중전달경로 및 구조거동을 분석하기로 한다.

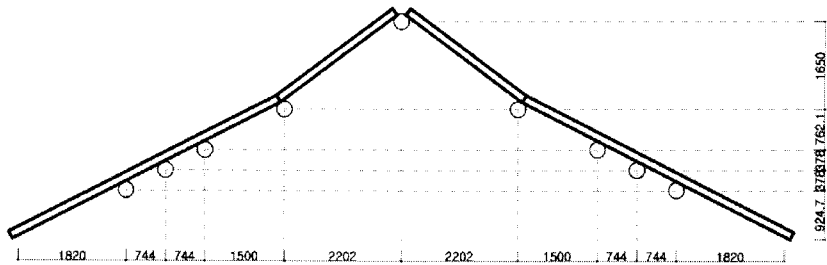


그림 1. 지붕의 전체 가구

그림 1과 같은 지붕가구 중, 구조해석적으로 특별히 고려할 사항이 많을 것으로 예상되는 장연과 외목도리, 주심도리, 내목도리 및 중도리로 구성되는 지붕가구에 대한 구조형상 및 재하형태는 다음 그림 2와 같다.

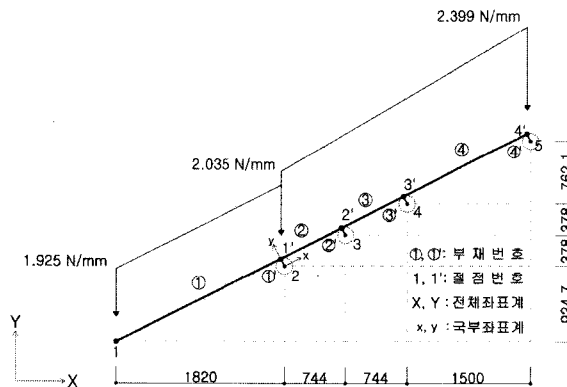


그림 2. 해석모형

그림 2와 같은 해석모형을 사용한 구조해석에서 특별히 고려해야 할 점은 각종 도리들과 서까래가 만나는 지점부분에 대한 해석모형을 어떻게 구성할 것인가의 문제로 볼 수 있다. 즉, 도리에 의해 지지되는 부분을 힌지 또는 롤로 지지한 것으로 모형화할 것인가, 아니면 이 부분에서의 하중전달이 압축과 마찰에 의해 지지되는 것으로 보아 이를 고려하여야 하는가의 문제로 볼 수 있다.

여기서 그림 2에 나타난 지점 부분의 구조적 특성을 좀 더 자세히 분석하여 보면, 서까래 부재 ①~④는

점선으로 표현된 도리 위에 단순히 얹혀있는 것으로 보아야 한다. 따라서 서까래와 도리를 연결하고 있는 ①'~④' 부재를 어떻게 가정하는 것이 합리적인 것인가의 문제가 발생하게 된다.

이러한 상황을 구조해석모형으로 나타내기 위해서는 여러 가지 모형화 기법을 생각해 볼 수 있는데, 먼저 가장 쉽게 생각해 볼 수 있는 방법은 그림 3과 같이 서까래가 도리에 의해 단순지지되고 있는 것으로 가정하는 방법(해석모형 broof_1)이다. 이 경우, 절점 2'~4'는 절점 2~4로 대체되어야 하며, 이 절점들의 변위는 국부좌표계 y 방향에 대하여 이동변위가 구속되어야 한다. 여기서 절점 2~4에서 국부좌표계 y 방향에 대한 이동변위만을 구속하였을 경우, 구조물이 불안정해지므로 어느 한 절점에서는 국부좌표계 x, y 방향 모두에 대한 이동변위가 구속되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 절점 5에서 국부좌표계 x, y 방향 모두에 대한 이동변위가 구속된 것으로 가정한다.

지점을 모형화하기 위한 두 번째 방법으로는 그림 3과 같이 부재 ①'~④'를 탄성스프링으로 가정하는 방법(해석모형 broof_2)이 있다. 이 경우, 스프링 상수를 어떻게 가정하느냐에 따라 구조거동이 달라질 것이므로 본 연구에서는 다음과 같이 두 가지방법에 의해 스프링상수를 구하고 이들 각각에 대한 해석을 수행한다. 즉, 서까래는 도리에 의해 지지되고 있으므로 집중하중을 받는 단순보의 처짐식 $\delta=PL^3/48EI$ 에 의해 도리의 길이를 단위 길이로 본 경우(jmat 1)와 실제의 도리 간격 4,400mm로 본 경우(jmat2)로 구분하여 스프링상수를 구한다. 이들 각각의 경우에 대한 국부좌표계 강성은 각각 $k_y=8.52709E+12N/mm$, $k_y=100.102N/mm$ 가 된다.

한편 여기에서도 국부좌표계 y 방향에 대한 수직방향 스프링만을 고려할 경우, 구조물이 불안정해질 것이므로 국부좌표계 x 방향에 대한 스프링상수를 고려하거나 또는 특정 절점에서 국부좌표계 x 방향에 대한 변위를 구속하여야 한다. 현재까지의 연구결과를 고찰하여볼 때 국부좌표계 x 방향에 대한 스프링상수를 구하기 위한 이론적 근거가 미약하므로 본 연구에서는 해석모형 broof_1에서와 같이 절점 5에서 국부좌표계 x 방향에 대한 이동변위가 구속된 것으로 가정한다.

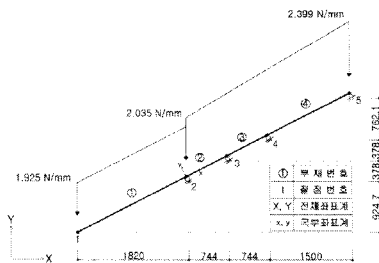


그림 3. 해석모형(broof_1)

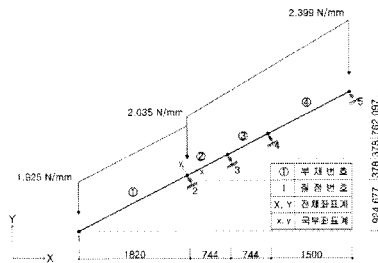


그림 4. 해석모형(broof_2, broof_5)

지점을 모형화하기 위한 세 번째 방법으로는 해석모형 broof_1, broof_2에 대한 해석을 수행한 다음, 인발력이 작용하는 지점을 제거한 후 나머지 지점들의 지지조건을 broof_1과 같이 가정하는 방법이 있다. 이에 대한 해석모형(broof_3)의 개념은 다음 그림 5와 같다.

지점을 모형화하기 위한 네 번째 방법으로는 그림 6과 같이 인발력이 작용하는 지점을 제거한 다음, 여기에 마찰스프링이 있는 것으로 가정하는 방법(broof_4)이 있다. 본 연구에서는 마찰스프링의 국부좌표계 y 방향에 대한 스프링강성은 broof_1 모형과 같은 것으로 가정하며, 마찰계수는 기존의 실험결과에 근거하여 0.4 인 것으로 가정한다.

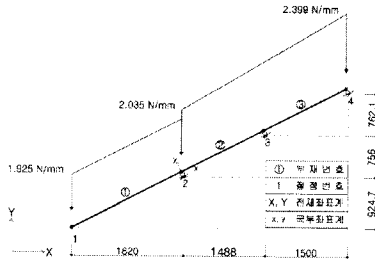


그림 5. 해석모형(broof_3)

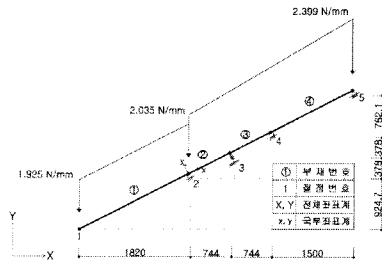


그림 6. 해석모형(broof_4)

지점을 모형화하기 위한 마지막 방법으로는 그림 4와 같은 해석모형에서 부재 ①~④를 마찰스프링으로 가정하는 방법(해석모형 broof_5)이 있다. broof_2 모형과 같이, 이 경우에도 스프링 상수를 어떻게 가정하느냐에 따라 구조거동이 달라질 것이므로 본 연구에서는 broof_2와 같은 스프링강성을 사용한다. 다만, 이 경우에 대한 해석은 비선형해석의 영역에 속하므로 이를 해석적으로 어떻게 나타낼 것인가의 문제가 발생한다. 지금까지 설명한 해석모형 및 이들의 의미들을 요약하여 정리하면 다음 표 1과 같다.

표 1. 해석모형의 구분

해석모형	내용	비고	
broof_1	롤러지지	일반적인 모형화 방법	
broof_2	jmat1	탄성스프링지지	$ky=8.52709E+12N/mm$
	jmat2		$ky=100.102N/mm$
broof_3	인발력이 작용하는 지점 제거	broof_1, broof_4와 비교	
broof_4	인발력이 작용하는 지점을	broof_1, broof_3과 비교	
	마찰스프링지지		
broof_5	압축스프링지지		$ky=8.52709E+12N/mm$
			$ky=100.102N/mm$

3. 구조해석 결과 및 분석

지금까지 한국의 전통목구조에 대한 구조해석 시 서까래와 도리 사이의 수직하중 전달경로를 파악하기 위해 고려 가능한 제반의 해석모형들을 제시하였다. 이들 각 해석모형에 대한 구조해석결과를 분석하여 보면 다음과 같다.

3.1 절점변위

전체좌표계에서 각 해석모형에 대한 절점변위들은 다음 표 2와 같다. 여기서 서까래와 도리 사이를 압축스프링으로 모형화한 경우는, 비선형해석의 영역에 속하므로 이에 대한 해석결과들은 최종해석단계에서의 값으로 나타내었다.

표 2에서 살펴볼 수 있는 것처럼, 해석모형 broof_1과 broof_2(jmat1), 해석모형 broof_2(jmat2)와 broof_5(com2), 해석모형 broof_3~broof_5(com1)이 같은 변위 양상을 보이고 있다. 또한 예측 가능한 바와 같이 해석모형 broof_6은 다른 해석모형과는 확연히 다른 해석결과를 보

여주고 있다. 따라서 본 연구에서는 해석모형 broof_1과 broof_2를 group1, 해석모형 broof_2와 broof_6를 group2, 해석모형 broof_3~broof_5를 group3로 구분하여 분석해 보기로 한다.

표 2. 절점변위

변위	절점	해석모형							
		broof_1	broof_2 (jmat1)	broof_2 (jmat2)	broof_3	broof_4	broof_5 (com1)	broof_5 (com2)	broof_6
DX	1	13.89009	13.89009	62.47565	17.65581	17.66966	17.66966	62.47565	71.70946
	2	-0.08245	-0.08245	22.02282	-	-0.08245	-0.08245	22.02282	-
	3	-0.06941	-0.06941	12.32614	-0.08273	-1.07850	-1.07850	12.32614	-0.06941
	4	-0.05154	-0.05154	7.60407	0.05154	-0.05154	-0.05154	7.60407	-
	5	0	0	3.67141	0	0	0	3.67141	0
DY	1	-27.57580	-27.57580	-123.2045	-34.98838	-35.01496	-35.01496	-123.2045	-141.3790
	2	-0.04189	-0.04189	-43.55068	-	-0.04189	-0.04189	-43.55068	-
	3	-0.03527	-0.03527	-24.43286	-0.04203	1.95087	-1.07860	-24.43286	-0.03527
	4	-0.02619	-0.02619	-15.09438	-0.02619	-0.02619	-0.02619	-15.09438	-
	5	0	0	-7.22628	0	0	0	-7.22628	0

한국의 전통목구조 구조해석 실무자들이 일반적으로 사용하고 있는 해석모형으로 볼 수 있는 group1은 group2, group3에 비해 구조물의 강성이 큰 것으로 평가하고 있다. 즉, 처짐이 가장 크게 발생하는 1번 절점에서의 처짐을 분석하여보면, group1에 의한 전체좌표계 X-방향 변위는 group2의 22.23%, group3의 78.67% 정도인 것으로 나타나고 있다. 또한 전체좌표계 Y-방향 변위는 group1이 group2의 22.38%, group3의 79.81% 정도인 것으로 나타나고 있다. 따라서 group2와 group3가 실제의 거동을 좀 더 잘 나타낼 수 있다는 점을 감안한다면 group1을 이용한 해석은 구조물의 거동을 과대평가할 수 있으므로 실제의 해석에서는 가급적 사용하지 않는 것이 좋을 것으로 판단된다.

3.2 반력

국부좌표계 y축에 대한 반력들은 다음 표 3과 같다. 여기서 서까래와 도리 사이를 압축스프링으로 모형화한 경우는, 비선형해석의 영역에 속하므로 이에 대한 여기서 서까래와 도리 사이를 압축스프링으로 모형화한 경우는, 비선형해석의 영역에 속하므로 이에 대한 해석결과들은 최종해석단계에서의 값으로 나타내었다.

표 3에서 볼 수 있는 것처럼 외목도리에서의 group1 반력은 group2 보다 195.85%, group3 보다 130.76% 를 더 받는 것으로 나타났으며, 주심도리에서는 group2의 경우 압축력을 받고 group3의 경우 하중을 받지 않는 것으로 나타난 반면 group1의 경우에는 인발력을 받아 일반적인 예측과는 상이한 것으로 나타났다. 내목도리에서의 group1 반력은 group2 보다 279.79%, group3 보다 500.79%를 더 받는 것으로 나타났으며, 중도리의 경우에는 group1이 group2 보다 167.05% 정도 더 큰 반력을 받는 반면 group3의 72.67% 반력을 받는 것으로 나타났다.

외목도리, 주심도리, 내목도리, 중도리에서 받는 반력의 크기를 분석하여보면, group1의 경우 외목도리->내목도리->중도리의 순으로 큰 반력을 받으며 주심도리에서는 인발력을 받는 것으로 나타났으며, group2의 경우 , group2의 경우 외목도리->주심도리->내목도리->중도리의 순으로 큰 반력을 받는 것으로 나타났다. 한편 group3의 경우에는 외목도리->중도리->내목도리의 순으로

로 큰 반력을 받으며 주심도리에서는 반력을 받지 않는 것으로 나타나 group1, group2와는 다른 양상을 보이고 있다.

표 3. 국부좌표계 y-방향 반력

절점	해석모형							
	broof_1	broof_2 (jmat1)	broof_2 (jmat2)	broof_3	broof_4	broof_5 (com1)	broof_5 (com2)	broof_6
2	9567.834	9567.834	4885.200	7363.497	7317.308	7317.308	4885.200	-
3	-5529.03	-5529.03	2739.381	-	-	-0.00001	2739.381	10375.20
4	4733.603	4733.603	1691.868	897.929	945.222	945.222	1691.868	-
5	1355.413	1355.413	811.372	1866.399	1865.290	1865.290	811.372	-247.381

외목도리, 주심도리, 내목도리에서 받게 되는 반력의 합은 기둥에서 받게 하중이므로 이들의 값을 분석하여 보면, 기둥에서는 group2->group1->group3의 순으로 큰 하중을 받게 되며, 이들의 비율은 group2에 작용하는 하중을 100%로 보았을 때 group1이 94.16%, group2가 88.69%인 것으로 나타났다.

4. 결론

서까래와 도리 사이의 하중전달경로를 파악하기 위하여 여러 가지 해석모형을 이용한 해석결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 연속보해석모형은 구조물의 강성을 과대평가할 수 있으므로 실제의 해석에서는 가급적 사용하지 않는 것이 좋을 것으로 판단된다.
- 2) 실제의 거동을 좀 더 잘 나타낼 수 있는 해석모형들과 연속보해석모형에 의한 해석결과 수직하중의 전달양상 및 기둥으로 전달되는 하중의 크기가 확연히 달라지는 것으로 나타났다.
- 3) 서까래와 도리 사이의 하중전달경로를 좀 더 정확히 파악하기 위해서는 본 연구에서 제시한 해석모형 group2, group3 및 삼차원해석에 대한 연구가 향후 추가로 수행될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 국립문화재연구소 연구비 지원과제 '목조문화재 구조성능평가 용역' 결과의 일부로써, 본 연구가 가능하도록 한 국립문화재연구소에 감사드립니다.

참고문헌

- 정성진, 홍성걸, 김남희, 이영욱, 황종국, 배병선 (2005) 전통목구조 해석을 위한 모형화기법, 대한건축학회 논문집(구조계), 21(12), pp. 77~84
- 문화재청 봉정사 대응전 실측보고서
- 국립문화재연구소 (2005, 6) 목조문화재 구조성능평가 연구용역 보고서
- 국립문화재연구소 (2005, 12) 목조문화재 구조성능평가 연구용역 보고서
- ROBERTS D. COOK, DAVID S. MALKUS, MICHAEL E. PLESHA, ROBERT J. WITT (2002) CONCEPTS AND APPLICATIONS OF FINITE ELEMENT ANALYSIS, FOURTH EDITION, 2002, WILEY