

전통목구조 시스템의 도리방향 골조의 횡저항 성능에 대한 실험

Experiment of Lateral Load Resistance of Dori-Directional Frame in Traditional Wood Structure System

이 영 욱* · 홍 성 곁** · 김 남 희*** · 정 성 진**** · 황 중 국***** · 배 병 선*****

Lee, Young-Wook · Hong, Sung-Gul · Kim, Nam-Hee · Jung, Sung-Jin · Hwang, Jong-Kook · Bae, bong-sun

ABSTRACT

The capacity of a lateral load resistance of a joint with Jangbu-connection of Dori-directional frame in traditional wood structure system was studied, through experiments of 1/2 scaled and T-shaped 7 subassemblies of joint of Dori directional frame for Deawoongjeon of Bongjungsa. From the experiment, it was shown that the capacity of a lateral load resistance was influenced by the vertical load confining joint and not influenced by the number of Chok and the depth of Changbang. And lateral load resistance mechanism is developed by the restraint between the vertical load and the contacting edge of column: if structure is pushed to the left, the top-right end of Pyeongju contacts with Changbang and left Changbang loses the contacts with Pyeongju and therefore only right Changbang can resist to lateral load.

Keywords: *raditional wood structure, frame, lateral load resistance, Dori-directional Frame, Deawoongjeon of Bongjungsa, Jangbu-connection, Changbang, Pyeongbang, Pyeongju*

1. 서 론

국내 목구조와 유사한 형태를 갖는 중국의 경우도 공포 프레임의 동적거동에 대한 실험과 수치해석 연구가 수행되었으나 국내 전통 목구조의 내력 특성 파악을 위한 참고자료로 활용하기에는 충분하지 못한 상황이다.

일반적으로 전통 목구조 시스템에서 보방향의 골조와 도리방향의 골조의 구조적 짜임새는 다르다. 그림 1과 같이 건물의 외부로 보이는 평방과 창방(그림 2 참조) 및 기둥으로 이루는 도리방향 골조의 보-기둥 접합부가 수평하중 저항능력의 주요 요소이다.

본 연구에서는 그림 1에서 점선으로 표시되어 있는 평주상부의 창방과 평방의 접합부의 내력 특성을 실험을 통하여 규명하고자 하였다. 일반적으로 평주와 컷기둥 상부의 접합이음 방법이 상이하므로, 도리방향 전 골조에 대하여 실험을 수행하면 평주와 컷기둥 상부 이음 내력 특성이 혼재하게 되어 분석이 곤란하게 된다. 따라서 본 연구에서는 평주 상부의 접합부만을 대상으로 하는 T형 부분골조를 제작하여 실험을 통하여 내력 특성을 연구하고자 한다.

- * 정희원 · 군산대학교 건축공학과 부교수 Email: leeyu@kunsan.ac.kr
- ** 정희원 · 서울대학교 건축공학과 부교수 Email: sglhong@snu.ac.kr
- *** 정희원 · 서울대학교 교량설계핵심기술연구단 Email: namheek@snu.ac.kr
- **** 정희원 · 한남대학교 건축공학과 부교수 Email: jsjarch@hannam.ac.kr
- ***** 정희원 · 한국전통문화대학교 전통건축학과 조교수 Email: jkhwang@nuch.ac.kr
- ***** 비희원 · 국립문화재연구소 건조물연구실장 Email: bsbae@nricp.go.kr

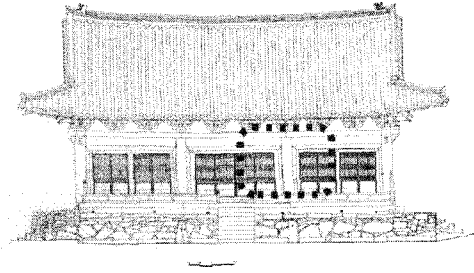


그림 1 봉정사 대웅전의 정면도와 실험대상 부위

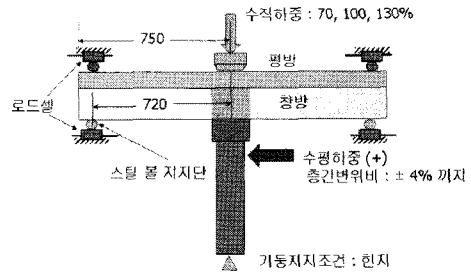


그림 2 설정된 실험모델 개념도

2. 실험

2.1 실험체와 실험시편

평기둥 상부의 주먹 장부 이음 실험체의 종류는 표 1과 같으며, 다음은 각 시험체 변수에 대한 상세 설명이다.

- (1) 하중의 변화 : 주두에는 지붕의 하중이 전달되므로 이를 모사하기 위하여 질량 추를 이용하여 수직하중을 적재하였다. 1/2 스케일 모형에 대하여 해석(정성진)에 따르면 중심에 작용하는 수직하중이 8.9kN이었으며 수평투영 면적에 따른 하중보다는 작다. 표 1에서 수직하중 100%는 정성진의 해석 결과보다 약간 큰 1tonf(9.8 kN)을 기준으로 하였다.
- (2) 축의 변화 : 창방과 평방사이를 연결하는 축은 수직하중에 의한 휨변형시 발생하는 전단력을 전달한다. 이러한 축에 의한 전단력의 영향을 고찰하기 위하여 축이 1개인 경우와 3개인 시험체 W6을 제작하여 비교하고자 하였다.
- (3) 장부 단부 조건의 변화 : 주먹장 이음은 장부머리의 지압과 장부 측면의 마찰에 의하여 내력특성이 발휘되므로 이를 구별하여 내력 특성을 확인하기 위하여 주먹장의 단부가 점접촉과 비점접촉인 경우로 구분하였다. 숫장부의 머리가 비점접촉하는 W4의 시험체와 암장부의 머리가 비점접촉인 W5로 하여 내력의 변화를 고찰하고자 하였다.
- (4) 창방 축의 변화 : 창방의 축의 크기와 내력과의 연관성을 고찰하기위하여 기존 실험체인 W2-1에 비하여 창방의 축의 높이가 4/3배가 되는 W8 실험체를 제작하였다.

표 1 실험체의 종류

실험체명	장부길이	평방 (mm)		창방 (mm)			수직하중 (%)	장부 단부 공극	축 개수	비 고
		폭	장부길이	폭	장부길이	축				
W2-1	1/2B	204	102	78	39	198	100	무	1	장부이음 기준시험체
W2-2	1/2B	204	102	78	39	198	70	무	1	수직하중을 W2-1의 70%
W2-3	1/2B	204	102	78	39	198	130	무	1	수직하중을 W2-1의 130%
W4	1/2B	204	102	78	39	198	100	유	1	숫장부 머리 비점접촉
W5	1/2B	204	102	78	39	198	100	유	1	암장부 머리 비점접촉
W6	1/2B	204	102	78	39	198	100	무	3	평방과 창방의 축이 3개
W8	1/2B	204	102	78	39	264	100	무	1	창방의 축을 W2-1의 1/3배 증가

2.2 실험방법

보의 중심에서 수평하중을 가력 하는 경우 창방에만 하중이 전달되는 문제와, 액츄에이터의 가력길이의

제한에 따라 기둥의 하부에 철골 기둥을 연장하여 기둥 힌지로부터 915mm 높이에서 수평하중을 가력 하였다. 하중가력은 액츄에이터를 이용한 수평하중으로 표 3과 같이 층간변위비가 0.5%부터 시작하여 4%가 될 때까지 각 단계마다 0.5%씩 증가하였으며, 각 단계마다 3회의 반복하중을 가력 하였다.

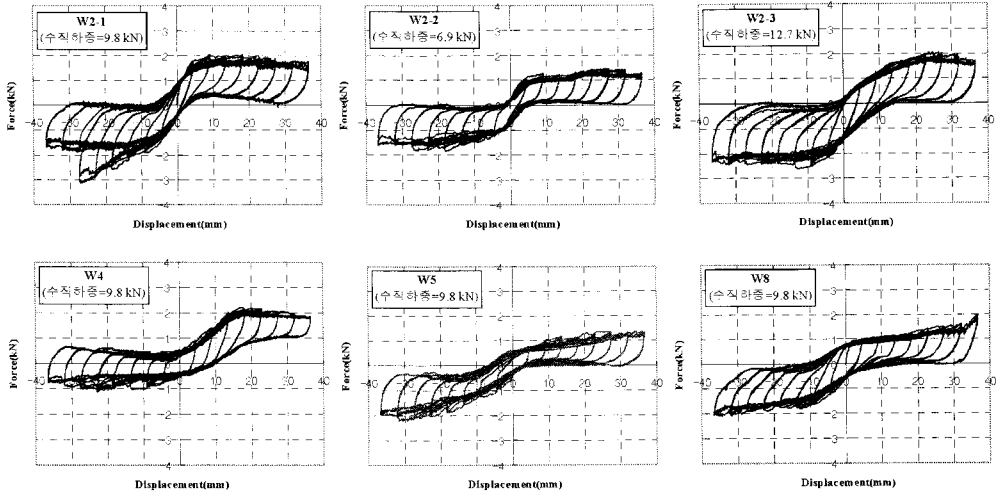


그림 3 실험체의 하중-변위 이력(하중가력 위치)

3. 실험결과

3.1 하중-변위 이력곡선

가력하중과 변위의 이력곡선을 그림 3에서 보듯이 모든 실험체는 항복후 강도가 유지되는 현상을 보여 주고 있다. 또한 모든 시험체는 보와 기둥 부재의 접촉면의 이격거리 때문에 핀칭(pinching) 현상을 보여주고 있다.

표 2에서 수평내력과 연성도를 계산하였다. 항복점은 최대강도의 75%를 지나는 할선(secant) 강도 직선과 극한강도점을 지나는 수평선의 교점으로 정의하였다. 이에 따라 계산된 항복변위의 절대값은 최소 4.37부터 최대 27.7mm까지 나타나 편차가 심하였다. 이는 부재간의 이격 오차에 따른 이력거동이 상이하기 때문이다. 연성도는 극한강도의 변위를 항복변위로 나눈 값으로 정의하였으며, 항복변위와 동일하게 1.2부터 최대 3.9까지 편차가 크게 나타났다.

보의 굵이 큰 W8 시험체만 극한하중 도달후 강도가 지속적으로 증가하는 현상을 보였으나, 다른 시험체는 극한하중 도달 후 강도의 변화가 크게 감소하지 않고 유지되었다. 표 2에서 극한 강도에 대한 층간변위비 4%의 강도 비는 W4의 부방향과 W6의 양방향의 경우만을 제외하고 모두 80%이상으로 나타났다. W6의 경우도 극한강도 도달 이후 최대하중의 80%를 나타내는 층간변위비가 정방향의 경우 3.57%이고 부방향의 경우 3.60%로 나타났다. 따라서 층간 변위비가 3.5%까지 증가하여도 골조 강도의 감소가 극한값의 80% 미만임을 알 수 있다.

W2-1 실험체의 부방향 시험체를 제외하고는 원점대칭의 이력거동을 보여주고 있으므로 W2-1의 부방향의 내력증가현상은 실험의 오차로 추정되며 최대내력 산정시 층간변위비 3.5%의 이력곡선을 이용하였다.

W4와 W5는 원점에 대하여 비대칭의 이력거동을 보이고 있는데, 이러한 원인은 W4와 W5의 주벽장부가

비대칭으로 제작되었기 때문이다. 그림 9의 W2-1의 경우와 동일하게, 정방향 가력시 W4는 우측의 보가 내력을 발휘하고 부방향 가력 시는 좌측의 보가 주로 하중을 전달하게 된다. 그러나 부방향시는 회전 변위가 큰 장부머리가 접촉하지 않으므로 마찰력이 작게 되어 수평내력이 정방향보다는 작게 된다. W5의 경우는 우측 암장부가 접촉되지 않으므로 정방향 가력할 때에 기준 시험체보다 내력이 작게 나타나고 있다.

3.2 최대내력

(1) 수직하중의 영향

각 시험체의 극한강도에 대한 정리는 표 2와 같다. 표에서 평균치는 정방향과 부방향 극한강도의 평균값이다. 장부이음 실험체의 W2-1의 평균 수평내력을 기준으로 할 때, W2-2에는 83%로 감소하였고 W2-3에는 119%로 증가하였다. 따라서, 수직하중의 증가에 따라 내력이 증가함을 알 수 있었다.

(2) 축수의 영향

W6 시험체는 창방과 평방을 3개의 축으로 연결하여 전단저항성능을 향상시킴으로 창방과 평방의 휨내력 증진 효과를 고찰하고자 한 시험체이었으나, 평균 강도는 W2-1에 비하여 93%로 나타나 축수의 증가는 휨 내력의 증가에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있었다.

(3) 보 춤의 영향

W8 시험체는 창방의 춤을 264mm로 증가시킴으로 그 효과를 고찰하고자 한 모델이었으나, W2-1 모델에 비하여 평균내력은 104%로 나타나 큰 변화가 없었다. 이는 접합부의 강도가 골조의 극한 내력을 결정하기 때문에 보의 춤은 영향이 없음을 알 수 있었다.

표 2 수평내력과 항복변위(하중단위 kN)

시편	W2-1	W2-2	W2-3	W4	W5	W6	W8
정 방 하 중	①P _{max}	2.02	1.43	2.04	2.19	1.34	1.77
	②P _{D4%}	1.68	1.21	1.68	1.84	1.26	0.24
	②/①	83%	85%	82%	84%	94%	13%
	Δ _y (mm)	4.67	5.41	16.99	15.33	14.13	6.40
연성도	3.9	5.1	1.4	1.2	1.9	2.8	1.3
부 방 하 중	①P _{max}	-1.88	-1.81	-2.62	-1.10	-2.20	-2.00
	②P _{D4%}	-1.62	-1.58	-2.32	-0.72	-1.97	-1.45
	②/①	86%	87%	89%	65%	90%	73%
	Δ _y (mm)	-12.13	-8.53	-4.37	-7.07	-18.27	-5.47
연성도	2.3	3.1	2.9	3.2	1.7	1.9	3.1
평 균	P _{max}	2.0	1.6	2.3	1.6	1.8	1.9
	상대비	100%	83%	119%	84%	91%	97%

(P_{max}=극한강도, P_{D4%}=층간변위비 4%의 강도, Δ_y=항복변위)

3.3 보의 회전각과 모멘트의 관계

평주와 보가 강체거동을 가정하면 장부를 포함한 접합부는 비선형 거동을 하는 스프링으로 모형화할 수 있다. 즉, 기둥과 보가 만나는 곳은 강절점이고 이 절점의 밖의 부분에 회전스프링이 위치한다. 이 경우 보와 기둥의 상대적인 회전각의 차이가 스프링에 발생하게 된다. 따라서 정방향 하중이 가력된 경우 좌측의 스프링에는 시계방향의 회전이 발생하게 된다. 단, 모멘트는 보의 단부에서 측정된 반력과 중심까지의 거리의 곱으로 정의하였다. 그림 4에서 보이는 뚜렷한 현상은 정방향시는 우측 보의 내력이 크며, 부방향시는 좌측 보의 내력이 큼을 알 수 있다. 정방향과 부방향시 보에 발생하는 최대 내력은 1.5부터 2.0kN-m 사이에 있음을 볼 수 있다.

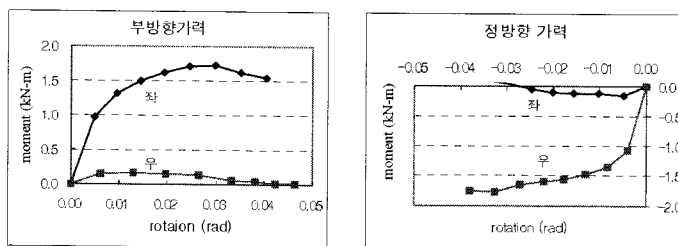


그림 4 W2-1 실험체의 휨모멘트-회전의 관계

4. 분석 및 내력추정식

그림 5는 전체의 시스템을 나타내는 것으로 수평력 P에 저항하는 반력이 아래의 힌지에서 발생하고 있으며 수직하중 W에 대하여서는 반력 R이 작용하고 있다. 수평력이 작용함에 따라 편심 e가 발생하고 이에 따라 수직하중은 시스템을 반시계방향으로 돌리는 모멘트의 힘으로 작용하게 된다. 이러한 회전력에 따라 창방의 좌측 하단과 평방의 우측 상단에 반력이 발생하는 것으로 가정하였다.

모든 시험체의 경우 정방향 가력시에 우측 보에서 측정된 강도가 좌측 부재보다 크게 나타나고 있다. 따라서, 정방향 가력시 수직하중과 반력 하중의 전달 경로를 도시하면 그림 5와 같이 된다.

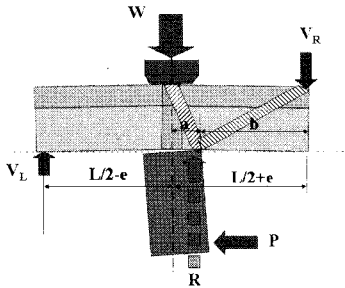


그림 5 부분골조 시스템의 힘의 평형상태

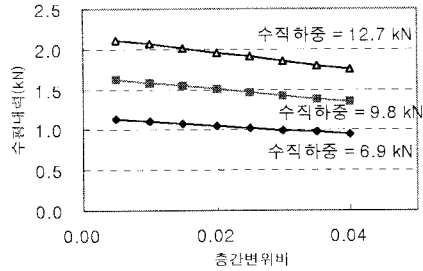


그림 6 이론식의 수평내력과 층간변위의 관계

그림 5의 가정에 따르면 정방향 가력시에는 평방상부에 변형도는 음의 값이 예측되는데 실제 측정된 값이 2단계에서는 음으로 나타나고 있지만 6단계에서는 비규칙적인 값으로 나타나고 있다. 따라서 정방향 가력시 좌측 평방은 일정하게 구속되어 있지 않음을 확인할 수 있다. 또한 창방의 상부는 하중의 방향과 상관없이 항상 양의 값을 나타내고 있다. 이러한 현상들을 종합하면 창방과 평방이 일체화된 거동을 하지 않고 비끄러짐을 포함한 복잡한 거동을 한다고 추정할 수 있다.

앞에서 가정된 그림 5의 전체 시스템에서 기둥 힌지에 대한 모멘트의 평형조건으로부터

$$PH + We = V_L \left(\frac{L}{2} - e \right) + V_R \left(\frac{L}{2} + e \right) \quad (3)$$

기둥의 회전에 따라 기둥의 우단부와 창방의 접점으로 상부 수직력이 집중된다고 가정하였다. 실제로 기둥과 창방 사이에 마찰이 존재하지만 이것은 무시하였다. 이때 보와 기둥의 접촉면에 대한 모멘트의 평형조건은 다음과 같다.

$$Wa = V_L \left(\frac{L}{2} - e + a \right) + V_R b \quad (4)$$

여기서 a는 수직하중의 작용 중심으로부터 기둥과 평방의 접촉면까지의 거리이다(그림 5). 보의 좌우측 반력이 다르므로 좌우측의 관계를 다음의 식 (5)과 같이 가정하고, 이것을 식 (4)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$V_L = \beta V_R, \quad (\text{단}, 0 \leq \beta \leq 1) \quad (5)$$

$$W = \left[\beta \left(\frac{L}{2} - e + a \right) + b \right] \frac{V_R}{a} = \lambda V_R \quad (6)$$

단, β 는 좌측 수직반력에 대한 우측 반력의 비를 나타내는 상수이며, $\lambda = \beta \left(\frac{L}{2} - e + a \right) + b$ 이다. 최종적으로 식 (5)와 식 (6)을 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음의 식 (7)과 (8)을 얻게 된다.

$$P = \left[\frac{1}{2} \frac{L}{H} (1 + \beta) + \frac{e}{H} (1 - \beta - \lambda) \right] V_R \quad (7)$$

$$P = \left[\frac{1}{2} \frac{L}{H} (1 + \beta) + \frac{e}{H} (1 - \beta - \lambda) \right] \frac{W}{\lambda} \quad (8)$$

식 (6)을 편심거리 e 에 대하여 수평내력의 변화를 나타낸 것이 그림 6이다. 단, a 는 130mm, β 는 그림 4의 좌측과 우측 보의 최대 모멘트의 비에 근사한 0.1을 사용하였다. 층간변위비의 증가에 따라 내력이 감소하게 나타나는데 이는 수직하중의 영향이다. 수직하중이 6.9kN인 경우에는 69.5%, 10kN인 경우에는 83.6%, 13kN인 경우는 91.4%의 정확도를 보이고 있다. 수직하중이 증가할수록 마찰의 영향이 작아지므로 정확도가 높아지는 것으로 분석되었다.

5. 결론

봉정사 대응전 도리방향의 골조 중 평주와 창방과 평방으로 구성되는 1/2 스케일의 T형 부분골조 실험체 7개에 대하여 수평 내력 실험을 수행하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 주벽 장부 부분골조 시험체에서 평방과 창방을 연결하는 축의 수를 1개에서 3개로 증가한 경우의 내력의 증가는 없었다. 창방의 춤을 기준 시편의 4/3배 한 경우의 내력에도 증가가 없었다.
- (2) 본 실험에서 장부이음 접합부의 주요 내력은 평방과 기둥의 접촉에 의한 보의 구속력에 기인함을 알 수 있었다. 즉, 정방향 가력의 경우, 평주 상부의 우단은 창방과 접촉하나 좌측의 평주 상부에는 접촉면이 없게 되므로 좌측 보의 수직하중에 의한 구속을 받지 못하게 되고 대부분의 수직하중이 평주 우측으로 전달되면서 우측 보를 구속하게 된다(그림 5참조). 본 실험에서 구속된 보가 전체 횡력의 90% 정도를 담당하는 것으로 나타났다.
- (3) 장부이음 실험체에서 주두 상부의 수직하중이 증가할수록 수평내력이 증가함을 알 수 있었다. 이러한 경향은 유도된 식 (7)과 일치하였으며, 수직하중이 12.7kN인 경우 이론의 계산 값이 실험결과와의 차이가 8.6%로 나타나는 정확성을 보여주었다.

감사의 글

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

참고문헌

- Fang, D. P., Iwasaki S., Yu M. H., et al (2001) Ancient Chinese Timber Architecture I: Experimental Study, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 127(11), pp.1348~1357
- Fang, D. P., Iwasaki S., Yu M. H., et al (2005) Ancient Chinese Timber Architecture II: Dynamic Characteristics, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 127(11), pp.1358~1364
- 국립문화재 연구소 (2005) 목조문화재 구조성능 평가 연구 보고서
- 정성진 외 5인 (2005) 전통목구조 해석을 위한 모형화 기법, *대한건축학회논문집(구조계)*, 21(12), pp.77~84,
- 이영욱 외 5인 (2006) 전통 목구조 시스템의 보 방향 프레임의 해석 모델링, *대한건축학회 논문집(구조계)*, 22(3), pp.29~36,
- 한재수, 김창준 (2005) 전통목조건축 구조해석과 현대화를 위한 장부접합의 구조적 성능에 관한 연구, *대한건축학회논문집 계획계*, 21(4), pp.121~128