

전통 문화재 목조 프레임의 횡하중에
대한 거동 및 이력특성
Behavior and Hysteresis Characteristics of
Traditional Timber Frames under Lateral Load

이필성*
Lee, Pil-Sung

홍성걸**
Hong, Sung-Gul

ABSTRACT

This experimental study investigates the hysteretic behavior of traditional timber frames subjected to lateral loads. Prototype frames for this study were selected from one of typical national treasures for timber structures in Korea. For simplicity, roof structures and braket systems were excluded from specimens and the joint behavior of beam-to-column system were presumed to have crucial effect on their global behavior. The experimental observation showed stiffness degradation and slip after experiencing initial yield and the first cycle at a new larger displacement due to inherent gaps in traditional timber connection and gradual indentation of interfaces. The cyclic behaviors of all specimens were similar to those of modern timber frames with bolt and nail connections. Additional structural members such as an upper beam and clay-filled wall increased the initial stiffness, strength and energy dissipation. It is expected that collapse of Korean traditional timber frames under lateral load is mainly caused from P- Δ effects rather than local member failure.

1.서론

건축문화재는 당시의 사회 문화와 과학기술을 반영하는 사료로서 중요한 역사적 가치를 갖는다. 건축문화재는 유례가 드문 고유한 가치를 갖는 것으로서 일단 훼손되면 완전한 복원이 사실상 불가능하기 때문에 보존에 많은 주의가 요구된다. 문화재의 여러 가지 훼손의 요인 중에서도 단기간에 급격한 훼손을 줄 수 있는 지진이나 태풍같은 요인에 대해서는 충분한 주의를 요한다.

그러나 목조건축물이 지진에 대해 어느 정도의 대응력을 가지고 있다고 인식하고 있을 뿐 내진 성능에 대한 연구는 매우 드문편이다. 또한 목조건축의 내진성능에 대한 연구가 이루어지고 있는 일본의 연구결과를 수용하는데도 일정한 한계가 있다. 우리나라의 목조건축양식은 일본과 함께 중국 건축문화권에 속해 있어서 전체적인 면에서는 유사한 측면을 많이 가지나, 재료의 결구 및 세부의장에 있어서는 각기 다른 차이를 보이기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 우리나라의 문화재 중에서 대표적인 유형을 추출하여, 그에 대한 내진 성능 평가를 위해 목조프레임의 수평내력 및 이력특성을 실험을 통하여 조사하였다.

* 서울대학교 건축학과 석사과정

** 서울대학교 건축학과 조교수, 정회원

2. 목조 문화재 건물의 구조

우리나라의 목조 문화재 건물은 평면의 구성 방식에 따라 건물전체가 외부의 기둥에 의해서만 지지되는 외진형과 2열 이상의 내부 기둥이 상부 가구를 받치는 2고주형으로 구분할 수 있다. 두 가지의 유형 중 2고주형은 외진형의 형태에 내부의 기둥이 부가되어 있는 형태이므로 목조 건물에 대한 횡강성을 알기 위해서는 외진형의 건물에 대한 연구가 선행되어야 한다.

외진형의 건물은 기둥과 창방의 하부구조를 이루고 그 위에 공포, 도리, 보, 지붕이 양식에 따라 다양하게 놓여진다. 따라서 목조 건물의 해석을 위해 하부구조인 기둥과 창방의 구조적인 특성에 대한 실험적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 기둥과 창방의 접합부를 전통 목구조의 횡하중 특성파악을 위한 기본적인 모델로 설정하고 이러한 접합부의 횡하중에 대한 수평내력 및 이력특성을 조사하였다. 또한 기본 프레임에 다른 주요한 구조적 부재가 추가될 때 이력곡선 변화를 조사하였다.

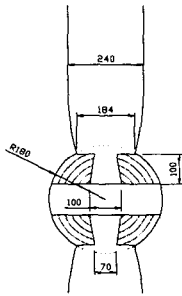


그림 1
주먹장 맞춤의
형태

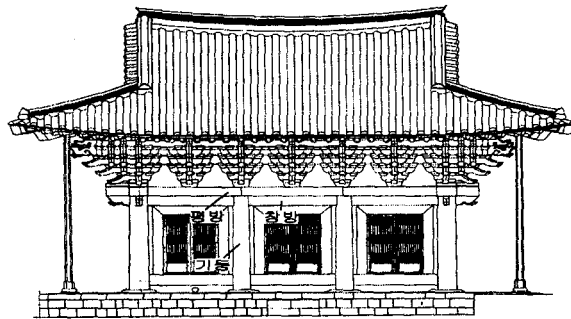


그림 2 영산전의 정면도

3. 목조프레임의 실험방법

모형 실험을 위하여 우리나라에서 현재 지정된 보물이상의 문화재에 대해 구조적인 분류를 하여 외진형으로서 기본형태에서 가장 변화 형태가 적은 송광사의 영산전을 분석대상으로 결정하였다. 모든 부재의 치수를 실제의 치수를 사용하였고 분석대상 이외의 부분은 등가의 양으로 바꾸었다. 그러나 직접적으로 알 수 없는 주먹장의 크기에 대해서는 해체된 다른 목조의 건물과 상사하여 결정하였다. 전체의 건물 중에서 기둥-창방의 프레임에 대한 실험은 전면의 중앙부를 심벽의

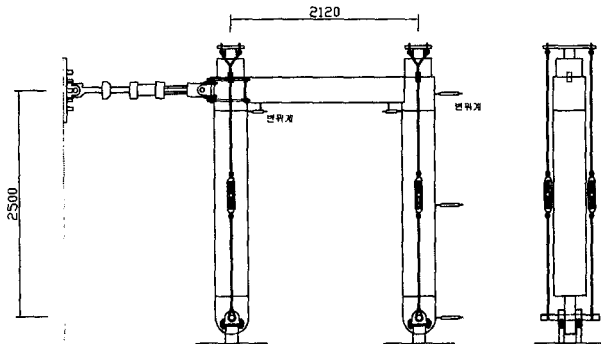


그림 3 CBS-시험체의 설치형태

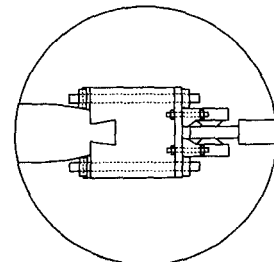


그림 4 가력부의 상세도

효과에 대한 실험은 배면의 중앙부를 이용하였다.

실제의 기둥은 볼록한 추춑돌위에 그려질하여 올려지는데 이를 단순지지의 형태로 적용하였다. 기둥과 창방은 주먹장맞춤으로 양쪽으로 연결되고 그 위에 평방이 축의 연결에 의해 올려진다.¹¹⁾ 그러나 일반적인 가옥이나 일부의 문화재의 경우는 평방이 사용되지 않는 경우가 있으므로 평방이 있는 경우와 없는 경우로 나누어 실험하였다. 창방이나 평방 위에는 공포재가 없어지는데 이를 포함할 경우 실험의 해석에 복잡함을 가중시키므로 공포이상의 부재는 단순히 축하중만을 주는 부재로 가정하였다.

전면과 같이 프레임의 내부에 문이나 창이 있는 경우는 구조적인 역할을 하지 못하나 배면과 같이 내부에 심벽으로 채워지는 경우는 그 영향을 무시할 수 없으므로 심벽이 존재하는 경우에 대해 추가의 실험을 하였다. 심벽은 내부에 통나무와 수수깡, 대가지등을 이용하여 벽의 틀을 구성하고 그 위에 양쪽으로 흙을 발라서 만들어진다. 일본식의 심벽과는 달리 구조적인 역할을 할 만한 가로재가 없다. 실험에서 내부에 각재로서 틀을 세우고 그 위에 황토흙을 바른 심벽을 이용하였다.

실험의 방법으로는 기둥과 창방의 접합부에 횡력을 주어 그에 따른 수평변위를 측정하였다. 시험체 1(CBS)은 기둥과 창방만으로 구성되어진 시험체를 한 방향으로 하중을 주었고, 시험체 2(CBD)는 1과 같은 시험체에 반복하중을 가했다. 시험체 3(CBBB)은 1의 시험체에 평방을 얹은 상태로 반복하중을 주었고, 시험체 4(CBWD)는 1의 시험체에 심벽을 추가하여 반복하중을 주었다. 지붕의 부재에 대해서는 실제 하중을 계산하여 주두의 밑면적에 등가의 압축력을 주었다.

횡방향의 가력장치는 10 ton 용량에 ± 125 mm의 최대변위를 가진 dynamic actuator를 최대 5 ton으로 보정하여 사용하였다. 지붕의 하중은 기둥위에 로드셀을 올리고, 그 위의 부재를 기둥지지축과 연결한 와이어에 턴버클을 부착하여 실제 크기의 하중을 주었다.

시험체 1의 경우는 예상 항복 변위인 10 mm까지 10 mm/분의 속도로 가력하고 그 이후는 20 mm/분의 속도로 최대변위까지 가력하였다. 시험체 2, 3, 4의 경우는 그림 5와 같은 순서로 가력하였다.

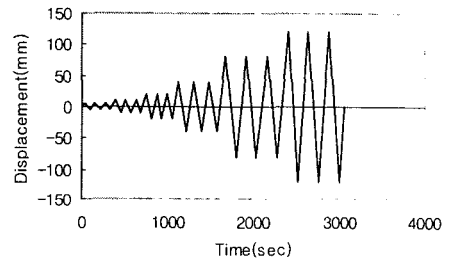


그림 5 이력특성 실험의 가력 순서

4. 실험 결과 및 분석

4.1 기둥-창방으로 구성된 프레임(CBS)의 정적 해석

실험 1의 횡력에 대한 수평변위의 변화는 그림 6과 같이 나타났다. 시험체 1의 경우 220 mm의 변위에서도 파괴되지 않고 지속적으로 변위의 증가에 대해 하중이 일정하게 증가한다. 시험체의 특정부분이 항복하거나 파괴되지 않고 창방의 주먹장부분이 변형되면서 기둥의 흠에서 미끌려 나오

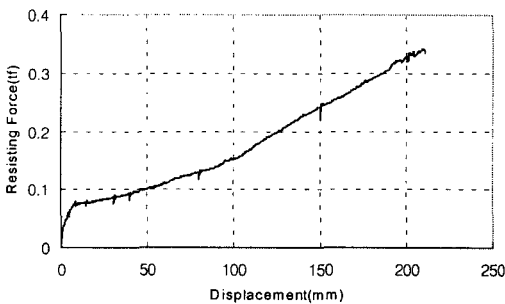


그림 6 CBS-시험체의 변위 하중곡선

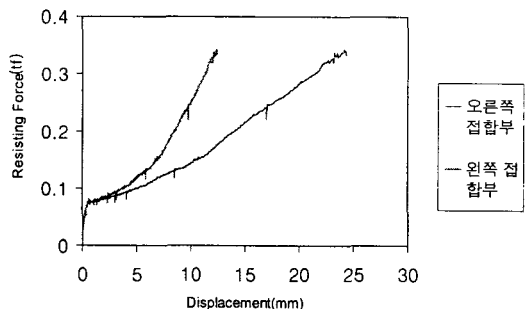


그림 7 CBS-시험체의 접합부의 변위 변화

기 때문에 이러한 현상이 일어난다. 하중의 증가에 대해 수평변위가 선형적으로 증가되는 구간이 100 mm의 변위에서 시작되는데 이는 주먹장이 밀려나오는 것에 의해 발생하게 된다. 시험범위 이상의 하중에 대해 같은 현상이 지속될 경우, 완전히 주먹장이 빠져 건물이 붕괴하는 변위는 1700 mm 정도가 되는데, 이 상태는 프레임이 대략 40° 가량 기운 상태가 되어 지붕하중을 고려한다면 이러한 상태에 도달하는 것은 비현실적이다. 비슷한 형태의 다른 실험에서는 대략 400 mm의 변위에서 기둥의 흠이 전단파괴를 일으키며 파괴되었다.¹²⁾ 따라서 프레임의 극한하중은 구조체 자체의 변형에 의해서가 아닌 연직하중과 변위에 의한 $P-\Delta$ 효과로 인하여 붕괴될 가능성이 높다.

프레임의 거동중에서 첫 번째 구간은 부재가 응력을 받으면서 변위가 증가되는데 이 때 주먹장의 경사면이 기둥의 흠과 완전히 맞닿을 때까지 지속된다. 이 순간에는 회전중심이 창방의 중앙부분에 존재한다. 두 번째 구간은 압축되어진 부분이 힘을 받지 않은 채로 미끌려 나가는 반응에 의해 발생되고, 이 때는 회전중심의 위치가 왼쪽의 접합부 위로 올라가고 오른쪽은 내려가게 된다. 이러한 현상은 왼쪽 접합부의 상부와 오른쪽 접합부의 하부로 회전중심이 이동될 때까지 계속된다. 회전중심이 끝부분까지 이동하면 그 이후부터는 회전에 의해 주먹장이 빠지는 반응이 발생하는데 세 번째 구간을 형성한다.

일반 초가산간의 건물에 대한 연구의 결과와 비교하면 할선 강성(Secant Stiffness)이 약 1.5배의 크기를 가지고 변위-하중 곡선도 좀 더 뚜렷한 변화의 양상을 보인다.¹²⁾ 이러한 값과 곡선의 형태의 차이는 창방에 해당하는 부재의 크기가 조금 작은 것에 의한 영향과 함께 축하중을 고려하지 않은 상태, 즉 주먹장이 상하로 고정되어있지 않은 상태에 의한 차이로 볼 수 있다. 일반 초가산간의 경우는 뚜렷하게 항복점이 존재하지 않고 비선형성을 나타내는데 이러한 거동의 차이는 축하중의 유무에 의한 영향과 기본적인 프레임 외에도 인방과 같은 추가의 부재가 존재하기 때문에 발생하는 현상에 의한 것으로 예상된다.

4.2 기둥-창방으로 구성된 프레임(CBD)의 이력거동

시험체 2의 반복하중에 대한 이력곡선은 그림 8에 나타내었다. 그림에서 이력곡선의 각 최고점을 연결한 곡선은 시험체 1의 하중-변위 곡선과 거의 일치한다. 그림에서 나타난 것처럼 같은 변위를 경험한 후의 이력곡선은 강성의 저하가 발생하고 편칭이 발생한다. 목재의 접합부 중에서 볼트에 의해 연결되어 볼트가 항복이 일어나는 경우, 초기와 경험 하중에 의해 발생한 결합부의 느슨해짐으로 발생하는 강성 저하와 편칭이 존재하는 이력곡선의 형태를 가지게 된다.¹³⁾ 형태상의 차이가 존재하지만 기둥-창방의 결합부도 비슷하게 주먹장의 느슨해짐에 의해 유사한 형태의 이력곡선을 나타낸다.

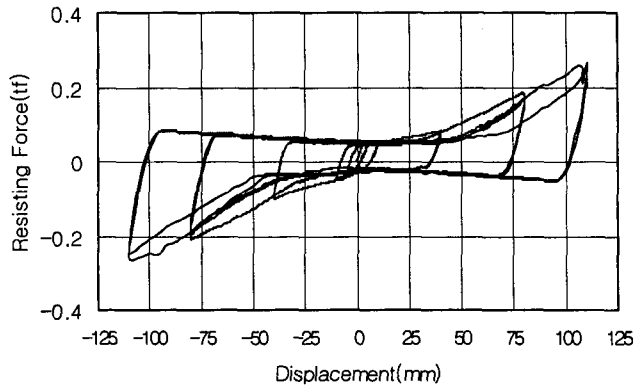


그림 8 CBD-시험체의 하중-변위 이력곡선

그림 10-a)와 표 3-a)는 각 변위와 사이클에 대한 할선 강성을 나타낸다. 변위가 작은 범위에서는 변위가 증가함에 따라 급격히 강성이 저하됨을 알 수 있다. 사이클이 증가에 대해서는 변위가 작은 범위에서는 강성의 변화가 없지만 변위가 클 때는 두 번째 이후의 사이클에서는 약간의 강성의 저하가 발생함을 알 수 있다.

이력곡선으로부터 각 이력에 대한 일과 에너지 소비량과의 관계를 이용한 다음의 식으로부터 등가점성감쇠비를 산출하였다.¹⁴⁾

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{S_0}}$$

(E_D ; 실제 구조물의 소산에너지,

E_{S_0} ; 변형에 의한 에너지)

강성이 감소하는 구간에서 급격하게 등가점성감쇠비가 증가한다. 이는 이 구간에서 더 이상 부재가 항복하지 않고 회전중심이 바뀌면서 미끄러는 과정에서 발생하는 것으로 볼 수 있다. 전체적인 평균값은 약 25 % 정도가 되지만 이력곡선의 형태상 변형이 계속 증가되면 더욱 감소 할 것이다.

표 1 CBD-시험체의 등가점성감쇠비(%)

	변위(mm)					
	±5	±10	±20	±40	±80	±110
Cycle 1	20.9	35.7	35.2	34.4	22.3	18.3
Cycle 2	24.4	34.8	33.3	31.1	20.5	17.3

4.3 기둥-창방-평방으로 구성된 프레임(CBBDD)의 이력거동

시험체 3의 반복하중에 대한 이력곡선을 그림 9와 같이 나타내었다. 그림에서 이력곡선의 각 최고점을 연결한 곡선은 초기 강성이 크고 강성의 감소 비율은 상대적으로 크다. 또한 하중감소에 대한 강성은 시험체 2와 비슷하지만 반대방향하중에 대해서는 시험체 2와 달리 약간의 강성을 갖기 때문에 핀칭의 정도는 약간 약해진다. 이는 시험체 2의 경우는 접합부의 변형이 증가되면서 하중을 받지 못하고 접합부가 회전하면서 좌우의 변위의 차가 커지게 되는데, 평방이 존재할 때는 기둥과의 연결재이 축이 대신 하중을 부담하게 되어 강성 감소의 비율이 작아지게 된다.

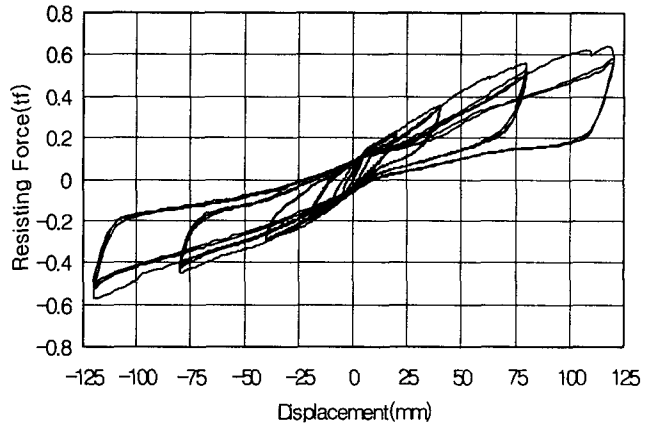


그림 9 CBBDD-시험체의 하중-변위 이력곡선

그림 10-b)와 표 3-b)는 각 변위와 싸이클에 대한 할선 강성을 나타낸다. 할선 강성의 변화의 형태는 시험체 2와 비슷하지만 변위가 커질수록 하중경험후의 강성저하의 비율이 커짐을 알 수 있다. 각 변위에서의 할선 강성이 시험체 2에 비해 약 3~4배 정도의 값을 가지는데, 변위가 100 mm 이상으로 증가될 때는 그 비율이 감소된다. 이는 창방과 기둥의 접합부에 의한 강성의 증가에 큰 역할을 하지만 변위가 계속 증가하면 축의 변형이 증가하여 그 역할이 감소됨을 알 수 있다.

표 2 CBBDD-시험체의 등가점성감쇠비(%)

	최대 변위(mm)					
	±5	±10	±20	±40	±80	±110
Cycle 1	8.0	13.2	15.2	11.9	11.0	11.7
Cycle 2	9.2	13.2	13.1	10.5	9.6	10.6

평방을 추가한 프레임의 각 단계별 등가점성비감쇠비는 시험체 2에 비해 전체적으로 11~13 % 정도의 비슷한 값을 갖는다. 평방과의 연결부에서 분담하는 하중이 큰 반면 상대적으로 평방 연결부의 마찰등이 작기 때문에 전체적으로 시험체 2에 비해 작은 값을 갖는 것으로 판단된다.

표 3 각 시험체의 Secant Stiffness (kgf/mm)

	최대 변위(mm)					
	±5	±10	±20	±40	±80	±110
Cycle 1	9.54	5.08	2.96	2.08	2.32	2.42
Cycle 2	9.50	4.99	2.84	1.93	2.12	2.19
Cycle 3	9.52	4.98	2.81	1.92	2.00	2.12

a)기둥-창방으로 구성된 프레임(CBD)

	최대 변위(mm)					
	±5	±10	±20	±40	±80	±110
Cycle 1	26.66	17.14	11.44	8.91	7.03	5.37
Cycle 2	25.00	16.94	11.37	8.77	6.65	4.83
Cycle 3	24.74	16.79	11.27	8.68	6.36	4.72

b)기둥-창방-평방으로 구성된 프레임(CBBD)

	최대 변위(mm)					
	±5	±10	±20	±40	±80	±110
Cycle 1	60.22	41.96	24.74	13.98	8.15	6.25
Cycle 2	58.70	38.04	21.16	11.14	6.31	4.92
Cycle 3	56.82	36.27	20.80	10.31	5.59	4.52

c)기둥-창방-심벽으로 구성된 프레임(CBWD)

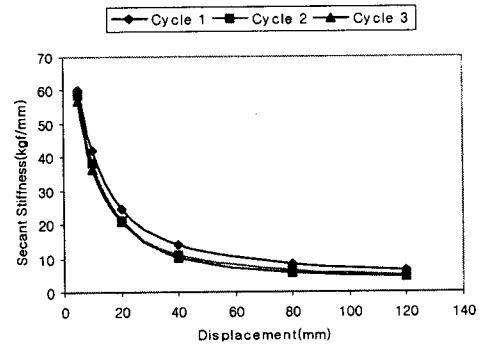
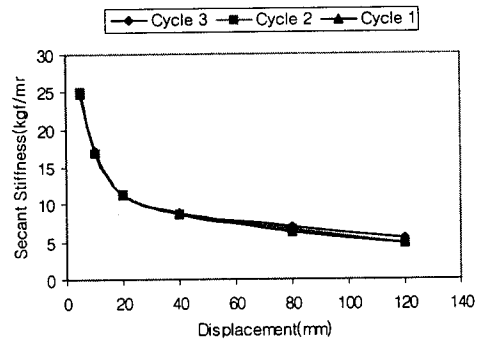
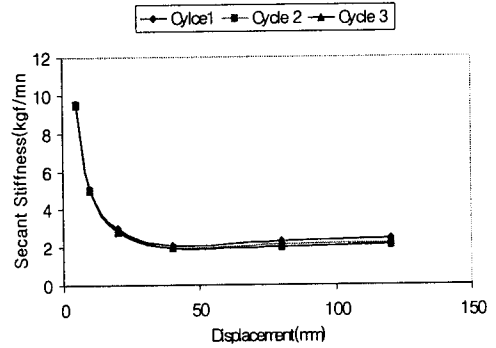


그림 10 각 시험체의 Secant 강성값

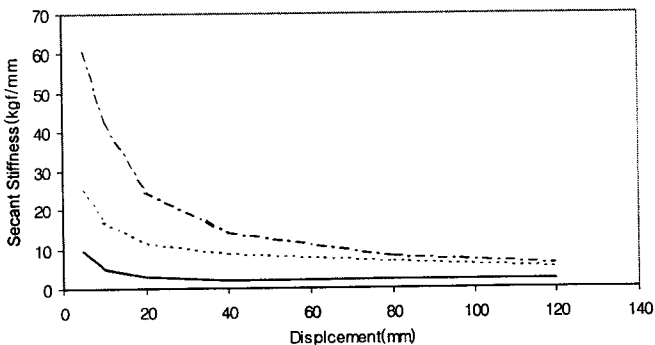


그림 11 각 시험체의 Secant Stiffness의 비교

4.4 기둥-창방-심벽으로 구성된 프레임(CBWD)의 이력거동

시험체 3의 반복하중에 대한 이력 곡선을 그림 12 과 같이 나타내었다. 그림에서 이력곡선의 각 최고점을 연결한 곡선은 시험체 2의 형태와는 달리 급격하게 강성이 감소되는 구간이 존재하지 않고 전체적으로 비선형적인 곡선을 형성한다. 또한 하중감소에 대한 강성은 시험체 2와는 달리 완만한 곡선을 나타내기 때문에 핀칭 효과가 약해진다.

목재의 접합부 중에서 못에 의해 연결되어 못의 항복이 일어나는 경우, 볼트의 항복에 의한 이력곡선이 비슷하지만 변위의 증가에 대한 강성 저하의 비율이 크다.¹⁵⁾ 또한 경험 하중에 의해 발생된 결합부의 느슨해짐으로 인한 강성 저하의 비율은 크게 증가하고 오히려 핀칭은 감소한다.

그림 10-c)와 표 3-c)는 각 변위와 사이클에 대한 할선 강성을 나타낸다. 할선 강성 변화의 형태는 다른 실험과 비슷하지만 변위가 커질수록 하중경험후의 강성저하의 비율이 20 % 정도의 큰 값을 가진다. 큰 변위에 대해서 강성 저하의 비율이 상대적으로 큰 이유는 심벽의 변형이 부재의 탄성변형을 나타내지 않고 타설 후 건조수축에 의한 간극이나 내부 결합재인 쥘의 압축 등에 의해 일어나기 때문으로 예상된다. 각 변위에서의 할선 강성이 시험체 2에 비해 약 7~8배 정도의 값을 가지는데, 변위가 100 mm 이상으로 증가될 때는 시험체 3과 마찬가지로 그 비율이 감소된다. 이는 심벽에 의해 프레임의 전체 초기 강성이 증가되지만 하중이 증가되면 심벽에 대각선의 균열이 발생하면서 전단변형을 일으키고 기둥과 분리되면서 그 역할이 감소됨을 알 수 있다.

일본식 심벽의 효과에 대한 연구에서는 심벽이 추가되었을 때 전체적인 강성이 대략 7배 정도 증가되는 결과를 보였다.¹⁶⁾ 그러나 우리나라의 심벽은 수직의 부재가 내부의 틀을 이룬 반면 일본식 심벽은 횡강성을 받을 수 있는 수평의 부재가 존재하기 때문에 심벽의 효과가 크게 증가하는 것으로 볼 수 있다.

심벽을 추가한 프레임의 각 단계별 등가점성감쇠비는 전체적으로 20 % 정도의 비슷한 값을 갖는다. 각 변위별 등가 점성비를 시험체 2와 비교하면 아주 작은 변위와 아주 큰 변위에서는 비슷한 값을 나타내는데 10~50 mm의 변위에서는 훨씬 작은 값을 나타낸다. 이는 심벽이 없을 경우 앞의 변위에서 하중을 받지 못하고 미끄러지는데 비해 심벽이 있을 때는 심벽이 그 하중을 받는 것으로 추측된다.

5. 결론

본 연구에서는 우리나라 목조 문화재 건물의 형태에서 가장 기본적이고 중요한 부분인 건물의 하부구조, 기둥과 평방등으로 구성된 프레임에 대하여 실험을 수행하였다. 1:1의 실험 모델을 제작하여 수평내력과 이력특성에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

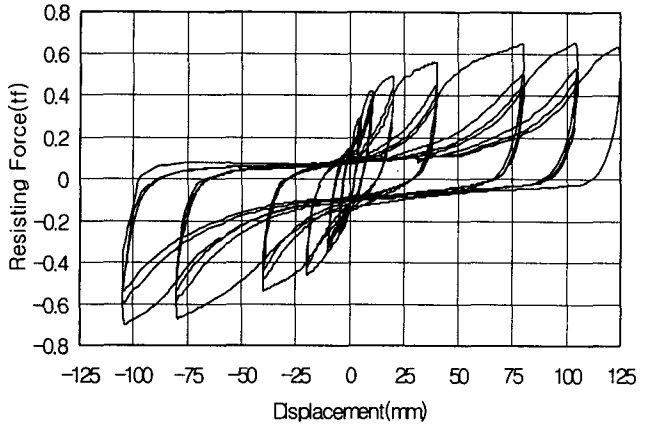


그림 12 CBWD-시험체의 하중-변위 이력곡선

표 4 CBDW-시험체의 등가점성감쇠비(%)

	최대 변위(mm)					
	±5	±10	±20	±40	±80	±110
Cycle 1	20.4	20.6	21.0	21.5	19.9	15.3
Cycle 2	18.2	18.0	17.6	17.7	16.4	15.2

1) 목조의 강성과 강도는 부재의 강도에 의해서가 아닌 부재의 형태와 제작의 숙련도 등에 의해 결정되어진다. 지붕하중을 고려한 경우 그렇지 않은 경우보다 그 강성이 증가하는 경향을 보인다.

2) 기둥-창방으로 구성된 프레임의 변위에 대한 수평내력은 접합부의 미끌림에 의해 결정된다. 창방이 추가될 때는 이러한 미끌림이 감소하여 더 큰 강성을 가지게 된다.

3) 심벽이 추가된 프레임은 전체적인 강성의 증가를 발생시키고 하중을 받지 못하고 변형되는 범위에 강성을 증가시킨다.

4) 기둥-창방 프레임, 평방이 추가된 프레임, 심벽이 추가된 프레임의 각각 100mm 변위에서의 수평내력은 236.2 kgf, 605.8 kgf, 632.4 kgf이고, 사용 한계($1/120 \text{ rad}$)⁶⁾시의 수평내력은 57.3 kgf, 212 kgf, 480 kgf이다. 또한 각 경우의 평균 등가점성 감쇠비는 27 %, 11 %, 18 %를 나타내었다.

5) 세가지 경우 모두 강성 저하와 편칭이 발생하였고, 기둥-창방으로 구성된 프레임은 편칭이 심벽이 추가된 프레임은 강도와 강성의 저하가 크게 발생하였다.

6) 기둥-창방으로 구성된 프레임의 이력곡선은 현대적인 목조건물의 접합부 중 볼트가 항복하는 접합부의 이력곡선과 유사함을 보였고, 심벽이 추가된 프레임의 경우 못이 항복하는 접합부의 이력곡선과 유사한 형태를 나타내었다.

본 연구는 추후에 계속될 목조 건물 전체의 내진성능 평가에 활용될 수 있으며 또한 문화재의 보수, 보강 등의 작업의 기초자료로서 활용될 수 있을 것이다.

그러나 현존하는 목조문화재 건물의 다양한 양식과 형태의 접합부에 대해 더 많은 실험과 연구가 앞으로 계속되어야하고, 또한 하부 프레임이 아닌 공포부재와 지붕 등의 내진성능에 대한 연구가 추가되어야할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 STEPi의 지진대응기술 개발과제의 소과제의 일부로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1) 장기인(1993), “木造”, 보성각.

2) 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, 허택영(1997), “고대 민가의 구조 및 목조 프레임의 수평내력에 관한 연구”, 한국지진공학회 논문집 제1권 제2호, pp.31-37.

3) Dowrick, D. J.(1986), "Hysteresis Loops for Timber Structures", Bull of New Zealand Nat. Soc. of Earthquake Engrg., 19(20), 143-152.

4) Chopra, A. K.(1995), "Dynamics of Structures", Prentice Hall.

5) Fujita, K. and Sakamoto I.(1998),"Shaking Table Test and Earth Response Analyses of Traditional Timber Elements in Japan"

6) 日本建築學會(1981), “建築耐震設計における保有耐力と變形性能”

7) Seo, J., Choi, I. and Lee, J.(1999),"Static and Cyclic Behavior of Wooden Frames with Tenon Joints under Lateral Load",J. Struct. Engrg, ASCE, Vol. 125, No. 3, pp.344-349

8) Foliente, G. C.(1995), "Hesteresis Modeling of Wood Joints and Structural Systems," J. Struct. Engrg. , ASCE, Vol 121, No. 6, pp.1013-1022.

9) 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철(1997), “수평 교번하중에 대한 초가삼간 목조 프레임의 이력특성 평가”, 한국지진공학회 논문집 제1권 제3호, pp.21-27.