

# 수평 교변하중에 대한 초가삼간 목조 프레임의 이력특성 평가

## Hysteretic Characteristics of Wooden Frames of Three-Bay-Straw-Roof House under Lateral Cyclic Load

서 정 문\* 최 인 길\*\* 전 영 선\* 이 종 립\*\*\* 신 재 철\*\*\*\*  
Seo, Jeong Moon Choi, In Kil Choun, Young Sun Lee, Jong Rim Shin, Jae Chul

### 국문요약

본 논문에서는 사개맞춤으로 제작된 우리 나라 전통 초가삼간 목조 프레임의 수평방향 교변하중에 대한 이력특성을 실험을 통하여 규명하였다. 실험에는 1:1 모델을 제작하여 사용하였다. 사개맞춤 목조 프레임의 이력특성은 못이나 사재를 사용한 목조 프레임의 이력특성과는 매우 상이하다. 프레임의 등가 점성감쇠비는 평주 프레임의 경우 약 27%, 고주 프레임의 경우 약 13%이다. 개량형 Double Target 모델을 이용하여 비선형 이력특성을 모사하였다.

**주요어** : 전통 목조 프레임, 이력 특성, 등가 점성감쇠비, Double Target모델

### ABSTRACT

In this paper, the hysteretic characteristics of traditional wooden house frame, which is fabricated by Sagaemachum, under cyclic lateral load are presented. Full scale frame models are used in the tests. The skeleton curves of traditional wooden frame are quite different from those of wooden frames which are fabricated using nails or bracings. The equivalent viscous damping ratios of the frame system are about 27% and 13% for ordinary and high-column frames, respectively. The nonlinear hysteretic characteristics of the frame is modeled by the so called Modified Double Target model.

**Key words** : traditional wooden frame, hysteretic characteristics, equivalent viscous damping ratio, Double Target model

## 1. 서 론

각종 구조물의 내진설계시 설계 기준 지반운동은 지진재해도 수준 및 구조물의 중요도 등에 따라 결정된다. 우리 나라의 경우 지진재해도는 강진기록이 전무하기 때문에 대부분 역사지진 기록에 의존하여 산출된다.

따라서 역사지진 평가상의 불확실성을 저감하여 지진재해도의 신뢰성을 향상시키는 노력은 매우 중요하다. 본 연구는 민가의 파괴에 관한 역사지진 기록을 공학적 측면에서 평가하여 해당 역사지진의 크기를 정량적으로 재평가하기 위한 일련의 연구의 일환으로 수행되었다.

고대 우리 나라 민가의 가장 일반적인 형태였던 초가삼간의 목조 프레임에는 사개맞춤이 보편적으로 사용되었으며, 사개맞춤 목조 프레임에 대한 정적 수평내력은 매우 작고 큰 비선형성을 보인다.<sup>(1)</sup>

\* 정회원, 한국원자력연구소·책임연구원

\*\* 정회원, 한국원자력연구소·선임연구원

\*\*\* 정회원, 전력연구원 부장

\*\*\*\* 충남대학교 토목공학과 교수

따라서 지진시 초가삼간의 거동을 정확히 평가하기 위해서는 비선형해석이 필수적이다. 이를 위해서는 목조 프레임의 이력특성, 감쇠비 등을 평가하여야 하며 이력특성을 적절히 모사할 수 있는 모델이 개발되어야 한다. 그러나, 우리 나라의 경우 이들에 대한 연구가 현재까지 전무한 실정이다. 우리 나라에는 현재에도 사개맞춤으로 지어진 목조 가옥이 많이 존재한다. 따라서 지진 시 피해예측 등을 위해서도 우리 나라 목조 가옥에 관한 연구가 보다 많이 이루어져야 할 것이다.

본 논문에서는 초가삼간을 구성하는 사개맞춤으로 제작된 평주 프레임과 고주 프레임의 실물 모델에 대한 실험을 통하여 수평 교변하중이 작용할 경우의 이력특성 및 등가 점성감쇠비를 평가하였다.

그리고, 개량형 Double Target 모델을 이용하여 이력특성 실험결과를 모사하였다.

## 2. 목조 프레임의 실험

### 2.1 실험 모델의 제작 및 설치

이력특성 실험을 위해서 평주 프레임 2개 및 고주 프레임 1개를 제작하였다. 이들의 구조는 수평내력 실험 시 사용하였던 프레임과 동일하다.<sup>(1)</sup>

평주 프레임의 기둥 상부 조인트는 (1)완전한 사개맞춤 (2) 4/5 결합된 사개맞춤의 2가지로 나누어 제작하였다. 이는 조인트의 형태에 따른 이력특성을 분석하기 위한 것이다. 그림 1에 평주 프레임의 구조를 보였다. 고주 프레임은 평주 상단 부분이 완전한 사개맞춤으로 이루어져 있으며, 고주와 들보의 연결은 장부맞춤으로 연결되어 있다(그림 2).

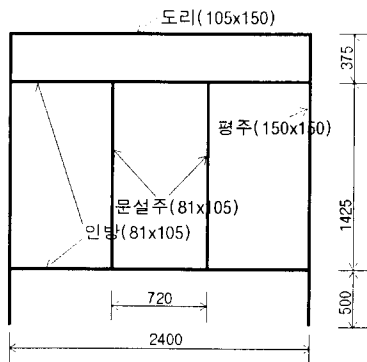


그림 1 초가삼간의 평주 프레임

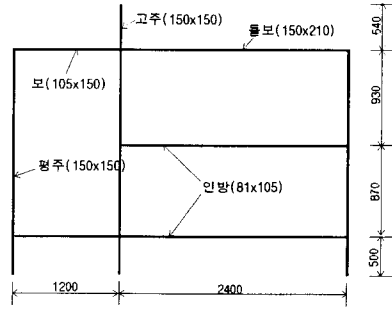


그림 2 초가삼간의 고주 프레임

제작된 실험체를 그림 3과 같이 수직으로 설치하였다. 기둥의 하단은 바닥에 고정된 철제 프레임과 별도로 제작한 힌지 장치를 이용하여 연결하였다.<sup>(1)</sup>

기둥의 비틀림을 방지하기 위하여 목재 프레임의 좌우에 철제 프레임을 설치하였다. 목재 프레임의 상단은 반력벽에 설치된 유압가력기와 수평으로 연결되어 있다. 교변하중을 재하시키기 위하여 두께 30 mm의 강판으로 제작된 철구를 유압가력기와 허두 사이에 설치하고, 직경 40 mm의 강봉 2개를 이용하여 그림 3과 같이 철구와 프레임의 허두를 연결하였다. 따라서 유압가력기를 밀 때는 하중이 직접 프레임에 전달되나 유압가력기를 당길 때에는 강봉과 허두를 통하여 하중이 전달된다. 고주 프레임의 경우에는 강봉을 반대편 평주의 허두까지 연장하여 연결하였다. 변위계는 보 또는 도리의 하단 200 mm 지점에 설치하였다.

실험에는 MTS사의  $\pm 50$  KN,  $\pm 100$  mm 범위의 유압가력기와 이를 제어하는 Flex-Test II m 시스템이 사용되었다. 변위 측정에는 Tokyo Sokky사의  $\pm 100$  mm 범위의 변위계를 사용하였다.

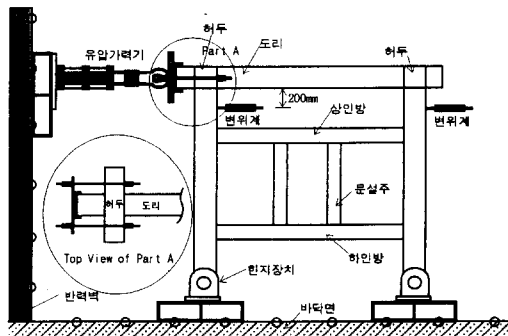


그림 3 평주 프레임의 이력실험 장치도

## 2.2 실험 방법

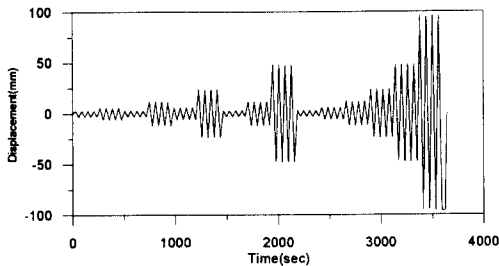
이력실험에는 변위제어 방식을 사용하였다. 실험에 사용한 변위량은 표 1에서와 같이 최소  $\pm 0.25 d_c$  ( $\pm 3$  mm)에서 최대  $\pm 8.0 d_c$  ( $\pm 96$  mm)까지 6 단계로 구분하였다. 여기서,  $d_c$ 는 변위제어를 위해 변위계의 성능을 고려하여 임의로 설정한 값이다.

재하 순서는 표 1과 같으며, 각 단계마다 동일한 변위량으로 4회 반복하여 이력실험을 수행하였다(그림 4). 각 재하 사이클은 분당 1 회로 하였다. 이력실험 종료 후에는 파괴시 변위 및 파괴모드를 분석하기 위하여 유압가력기 및 변위계를 제거하였으며, 와이어로프를 허두에 수평으로 연결하여 파괴에 도달할 때까지 변위를 가하였다.

표 1 이력특성 실험 단계 및 순서

변위량	$\pm 0.25d_c$	$\pm 0.5d_c$	$\pm 1.0d_c$	$\pm 2.0d_c$	$\pm 4.0d_c$	$\pm 8.0d_c$
재하 순서	1	2				
	3		4			
		5		6		
	7		8		9	
	10	11	12	13	14	15

\*  $d_c = 12\text{mm}$



## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 평주 프레임

조인트가 4/5 결합된 사개맞춤의 평주 프레임은

실험결과가 부적당하여 분석대상에서 제외하였다. 완전히 결합된 사개맞춤의 평주 프레임에 대한 하중-변위 이력곡선을 그림 5에 보였다. 그림에서 이력곡선은 매우 큰 비선형성을 나타낸다. 그림과 같은 이력곡선은 못을 사용한 프레임이나 사재로 보강된 프레임의 이력곡선 등<sup>(2)~(5)</sup>과는 그 형태가 매우 다르다.

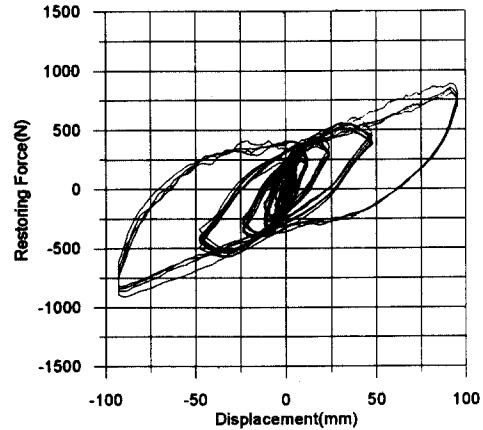


그림 5 평주 프레임의 하중-변위 이력곡선

표 2는 각 재하단계의 재하 사이클별 씨컨트강성(Secant Stiffness)을 나타낸다. 그림 6은 각 변위단계에서 최초 재하 사이클의 씨컨트강성을 대표적으로 나타낸 것이다. 표 및 그림에서 변위가 증가함에 따라 강성이 저하됨을 알 수 있다. 그리고, 동일한 크기의 변위에 대한 이력에서 각 사이클의 씨컨트강성이 증가 또는 감소하는 불규칙한 경향을 보여주고 있다.

표 2 재하 사이클별 평주 프레임의 씨컨트 강성

구 분	Secant Stiffness(N/mm)					
	$\pm 0.25d_c$	$\pm 0.5d_c$	$\pm 1.0d_c$	$\pm 2.0d_c$	$\pm 4.0d_c$	$\pm 8.0d_c$
Cycle 1	42.28	26.89	21.06	15.51	7.93	8.07
Cycle 2	40.33	29.81	19.53	15.09	8.37	7.74
Cycle 3	43.41	30.45	19.13	14.35	7.71	8.51
Cycle 4	39.87	33.42	22.28	15.76	9.21	7.83

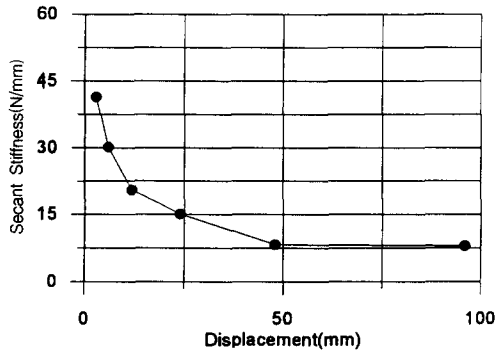


그림 6 변위량에 따른 평주 프레임의 씨컨트 강성의 변화

이력곡선으로부터 이력당의 일량과 에너지 소비량과의 관계를 이용한 다음의 식 (1)로 부터 프레임의 등가 점성감쇠비,  $H_{eq}$ 를 산출하였다.<sup>(6)</sup>

$$H_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi \cdot P_{max} \cdot X(P_{max})} \quad (1)$$

여기서,  $\Delta W$ ,  $P_{max}$ ,  $X(P_{max})$ 는 각각 이력곡선의 면적, 최대하중 및 최대하중 하에서의 변위를 나타낸다. 이 식을 이용하여 각 재하단계에서의 등가 점성감쇠비를 계산한 결과 약 27%로서 비교적 큰 값을 나타내고 있다. 이는 사개맞춤이 끼워맞춘 형태로 되어 있어 유연성이 크며, 연결부에서의 조임과 마찰 등에 의해 감쇠가 크게 나타난 것으로 판단된다.

평주 프레임의 파괴모드는 수평내력 평가실험 결과<sup>(1)</sup>와 동일하게 화통가지의 전단파괴 양상을 보였다.

### 3.2 고주 프레임

앞서 기술한 실험결과로부터 구한 고주 프레임의 이력곡선을 그림 7에 나타내었다. 그림에서 고주 프레임의 이력곡선은 평주 프레임의 경우와 매우 유사하다. 표 3은 각 재하단계의 재하 싸이클별 씨컨트 강성을 나타내며, 그림 8은 각 변위단계에서 최초 재하 싸이클의 씨컨트 강성을 대표적으로 나타낸 것이다. 표 및 그림에서 평주 프레임과 유사한 이력특성을 갖는 것을 알 수 있다. 큰 변위상태에서는 최초 재하 싸이클에 비해 2회차 이후의 재하 싸이클에서 씨컨트 강성이 저하되는 경향이 나타난다.

또한 변위가 증가함에 따라 강성이 저하되는 비율은 평주 프레임에 비해 적다. 일례로 고주 프레임

에서는 15단계에서의 강성이 1단계 강성의 약 28%이지만 평주 프레임에서는 약 19%이다.

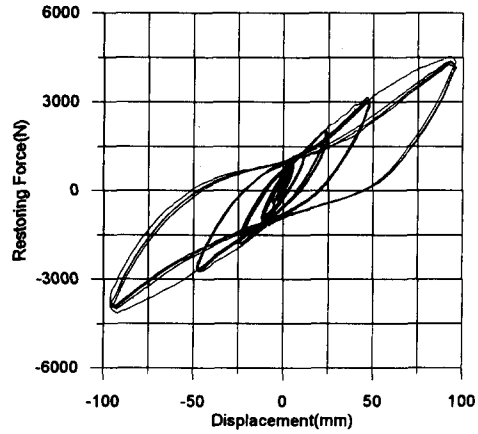


그림 7 고주 프레임의 하중-변위 이력곡선

표 3 재하 싸이클별 고주 프레임의 씨컨트 강성

구 분	Secant Stiffness(N/mm)					
	$\pm 0.25\alpha_c$	$\pm 0.5\alpha_c$	$\pm 1.0\alpha_c$	$\pm 2.0\alpha_c$	$\pm 4.0\alpha_c$	$\pm 8.0\alpha_c$
Cycle 1	147.65	117.85	98.11	73.65	56.35	41.82
Cycle 2	148.55	119.33	95.62	70.66	54.46	39.52
Cycle 3	149.80	117.59	97.48	72.17	54.87	39.63
Cycle 4	147.34	116.91	96.02	72.81	54.07	40.99

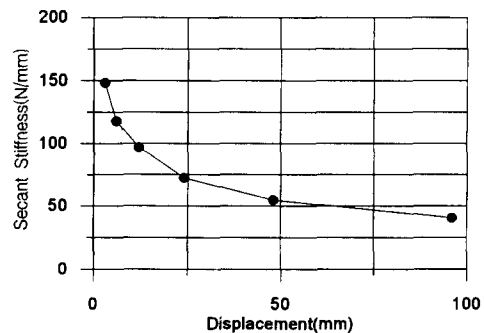


그림 8 변위량에 따른 고주 프레임의 씨컨트 강성의 변화

프레임 강성의 최대 경험변위 의존성을 파악하기 위하여 4, 8 및 12번째 재하단계에서의 하중-변위 이력을 그림 9에 나타내었다. 4단계 이력은 최초로 12 mm 변위에 이른 단계이며 8단계는 최대 24 mm의 변위를 경험한 후 12 mm 변위에 대한 이력 곡선을 나타내고 있으며 12단계는 48 mm의 변위를 경험한 후의 12 mm 변위에 대한 이력을 나타낸다.

그림에서와 같이 경험변위의 크기가 증가함에 따라 프레임의 강성이 저하됨을 알 수 있다. 이는 목조 프레임이 동일한 크기의 지진하중을 받을 경우 경험변위의 크기에 따라 거동이 다름을 의미한다.

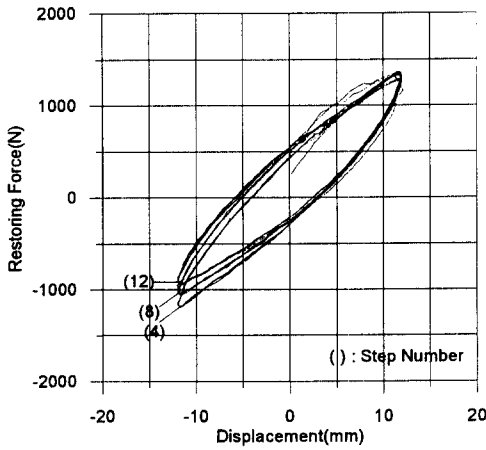


그림 9 이력곡선의 최대 경험변위 의존성

고주 프레임의 각 재하단계에서의 등가 점성감쇠비를 계산한 결과 약 13%로서 평주 프레임보다 적은 값을 나타내고 있다. 이는 고주에서 사개맞춤의 조임과 마찰 등에 의한 감쇠가 상대적으로 적은 것으로 판단된다.

고주 프레임의 파괴모드는 수평내력 평가실험 결과<sup>(1)</sup>와 동일하게 화통까지의 휨파괴 양상을 보였다.

#### 4. 이력거동 모사

일반적인 Bi-linear, Tri-linear, Ramberg-Osgood 모델 등은 비선형 이력거동을 나타내는데 많이 사용되고 있으나 이들 모델은 강성 저하 특성을 나타내지 못하는 단점을 가지고 있다. 그리고, 현재까지

제시된 목조 프레임에 대한 비선형 이력모델<sup>(2)~(5)</sup>은 조인트의 형태에 따라 다르며, 사개맞춤으로 제작된 우리나라 목조 프레임의 이력특성을 나타내는 데에는 적합하지 않다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 목조 프레임과 같이 이력에 의한 강성 저하와 경험변위 증가에 따른 강성 저하 특성 등을 잘 나타낼 수 있는 모델로서 Ohotori<sup>(7),(8)</sup>에 의해 제안된 개량형 Double-Target 모델을 선정하였다. 이 모델은 면진장치(Seismic Isolator)의 이력거동을 평가하기 위하여 개발된 것이다. 개량형 Double-Target 모델의 이력 형태를 그림 10에 나타내었다.

개량형 Double-Target 모델에서 이력곡선은 Tri-linear로 설정된다. 골격곡선(Skeleton Curve)을 규정하는 각 파라메타는 이력곡선으로부터 용이하게 구할 수 있다.

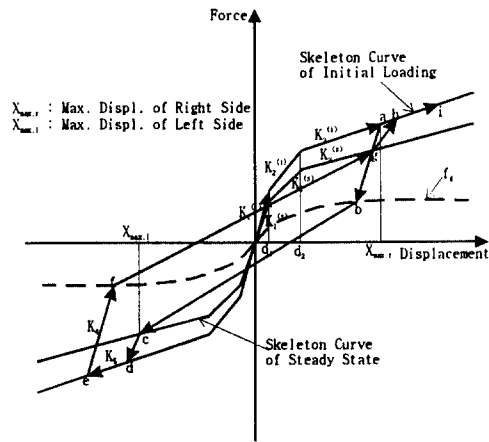


그림 10 개량형 Double-Target 모델

개량형 Double-Target 모델을 이용하여 평주 프레임 및 고주 프레임의 실험결과를 모사 하였으며 각각 그림 11과 그림 12에 나타내었다. 모사에 사용된 평주 및 고주 프레임에 대한 각 파라메타는 표 4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 모사 결과가 실험결과의 궤적을 비교적 잘 나타내 주고 있으며 특히 이력에 의한 강성 저하 및 경험변위에 따른 강성 저하 특성을 잘 나타내고 있다.

표 4 프레임별 Double Target 모델 파라메타의 값

	$K_1^{(i)}$ (N/mm)	$K_2^{(i)}$ (N/mm)	$K_3^{(i)}$ (N/mm)	$K_1^{(s)}$ (N/mm)	$K_2^{(s)}$ (N/mm)	$K_3^{(s)}$ (N/mm)
평주프레임	33.75	8.19	5.0	30.0	6.82	4.29
고주프레임	129.95	50.38	30.27	129.95	38.52	30.27
	$K_4$ (N/mm)	$K_5$ (N/mm)	$d_1$ (mm)	$d_2$ (mm)	$f_a$	$f_b$
평주프레임	33.75	8.0	11.11	30.5	4.33	0.51
고주프레임	129.95	41.15	10.53	46.05	233.78	-8.84

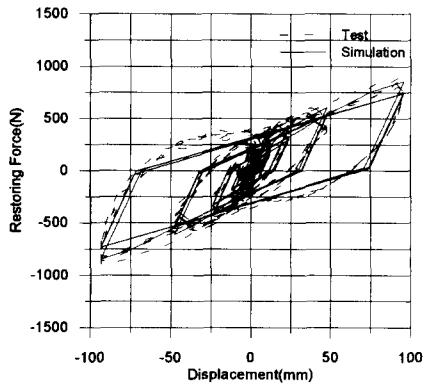


그림 11 평주 프레임의 이력거동 비교

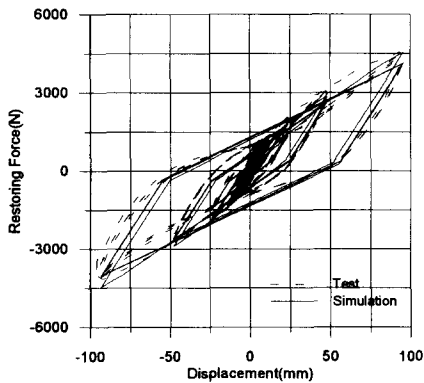


그림 12 고주 프레임의 이력거동 비교

#### 4. 결 론

본 연구에서는 우리 나라 초가삼간을 구성하고 있는 사개맞춤으로 된 평주 프레임 및 고주 프레임의 수평 교번하중에 대한 이력특성을 실험을 통하여 규명하였다. 이력특성의 분석 및 모사를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 목조 프레임의 이력거동 실험결과 큰 비선형성을 나타내며 변위가 증가함에 따라 강성이 감소하는 경향을 보인다. 재하 사이클의 증가에 따라 씨컨트강성이 증가 또는 감소하는 불규칙한 경향을 보인다. 또한 경험변위가 증가함에 따라 강성이 저하되는 경향을 보인다.
- (2) 우리 나라 목조 프레임의 등가 점성감쇠비는 평주 프레임의 경우 약 27%, 고주 프레임의 경우 약 13%로서 비교적 크다.
- (3) 개량형 Double Target 모델은 우리 나라 전통 목구조물의 비선형 이력을 나타내기에 비교적 적합한 것으로 판단된다.

지진재해도의 불확실성 저감 및 현존하는 많은 목조가옥에 대한 신뢰성 있는 내진성 평가를 위해서는 추후 조인트의 종류, 노후도, 숙련도, 하중 재하속도 등의 변수를 고려한 다양한 실험을 수행하여 데이터를 확보하고 적합한 모델을 개발하여야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, 허택영, "고대 민가의 구조 및 목조 프레임의 수평내력에 관한 연구", 한국지진공학회 논문집 제1권 제2호, 1997.
2. Ewing, R. D., Healey, T. J., and Agbalian, M. S., "Seismic Analysis of Wood Diaphragms in Masonry Buildings," *Proc. Workshop on Design of Horizontal Wood Diaphragms*, Applied Technology Council, Berkeley, CA, 1980.
3. Sakamoto, I., and Ohashi, Y., "Seismic Response and Required Lateral Strength of Wooden Dwellings," *Proc. 1988 International Conference on Timber Engineering*, Seattle, 1988.
4. Kamiya, F., "Nonlinear Earthquake Response Analysis of Sheated Wood Walls by a Computer-actuator On-line System," *Proc. 1988 International Conference on Timber Engineering*, Seattle, 1988.
5. Miyazawa, K., "Study on Nonlinear Static and Dynamic Structural Analysis of Wooden Wall Frame Buildings Subjected to Horizontal Force," *Proc. Thirteenth Symposium on Computer Technology of Information, Systems and Applications*, A.I.J., Japan, 1990.
6. Clough, R. W., and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, Inc., 1982.
7. 大鳥靖樹, "高減衰積層ゴムお用いた免震構造物の地震応答評價に關する研究", 博士學位論文, 長岡技術科學大學 工學部, 1996.
8. 大鳥靖樹, 松田泰治, 石田勝彦, "改良型 Double Target モデルによる免震構造物の地震應答解析", *日本建築學會大會學術講演梗概集*, 1994.