

## 2단 적재선반의 지진시 거동에 관한 실험 연구

### Experimental Assessment on Seismic Behavior of Steel Storage Racks

백 은 립\* · 최 형 석† · 서 영 득\*\* · 김 충 길\*\*\*

Eun-Rim Baek\*, Hyung-Suk Choi†, Young-Deuk Seo\*\* and Chung-Gil Kim\*\*\*

(Received September 24, 2020 ; Revised October 19, 2020 ; Accepted October 20, 2020)

**Key Words :** Storage Rack(적재선반), Friction Coefficient(마찰실험), Static Lateral Cyclic Loading Test(정적수평 반복가력실험), Shake Table Test(진동대 실험), Seismic Performance Level(내진성능수준)

#### ABSTRACT

Storage racks are usually damaged due to earthquakes. Storage racks which are accessible by public should be designed according to the Korean Design Standards (KDS) such that it can bear earthquake load. However, existing research on the dynamic behavior and structural performance of storage racks are insufficient to develop a method to determine the seismic performance level of storage racks. In this study, various experiments for common pallet racks subjected to the earthquake load were carried out to investigate their dynamic behavior and seismic performance. The friction coefficient between pallet and steel rack was evaluated. In addition, the structural performance under static lateral cyclic loading and real earthquake excitation conditions were evaluated.

#### 기 호 설 명

- $a$  : 적재선반에 발생하는 가속도
- $a_g$  : 지반 가속도
- $F$  : 적재물에 작용하는 지진하중
- $F_s$  : 경사면에서 마찰력
- $g$  : 중력 가속도
- $m$  : 적재물의 질량
- $\theta$  : 경사각
- $\mu_s$  : 정적 마찰계수

#### 1. 서 론

물류산업의 지속적인 발전으로 관련 설비의 안전

에 대한 중요성이 부각되고 있다. 많은 국외 지진에서 물류창고 또는 일반 대중에 노출된 대형 창고형 매장 등에서 적재물이 낙하하거나 적재선반이 붕괴되는 피해가 다수 발생한 바 있다<sup>(1)</sup>. 또한, 국내에서도 경주, 포항 지진시 적재물 낙하로 인한 경제적 피해가 발생하기도 하였다<sup>(2)</sup>.

적재선반은 설치 및 해체의 용이성을 고려하여 기둥(upright)과 로드빔(load beam), 크로스빔(cross beam), 브레이스(brace)를 조립하는 간단한 구조로 구성된다. 특히 기둥과 로드빔은 적재물의 크기에 따른 가변성을 확보하기 위해 후크(hook)를 체결하는 방식으로 조립되며 장변방향(down-aisle direction)으로 횡하중에 저항할 수 있는 지지구조가 미비하여 지

† Corresponding Authors; Member, Korea Construction and Transport Engineering Development Collaboratory Management Institute, Principal Researcher

\* Member, Korea Construction and Transport Engineering Development Collaboratory Management Institute, Senior Researcher

\*\* Member, Korea Construction and Transport Engineering Development Collaboratory Management Institute, Research Engineer

\*\*\* Public Safety Research Center, Konyang University, Research Professor

‡ Recommended by Editor Hong Seok Yang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

진에 매우 취약한 구조적 특성을 보인다.

2019년 국가건설표준으로 건축물의 내진설계기준<sup>(3)</sup>이 개정되면서 비구조요소에 대한 내진설계가 강화되었으며, 특히 내진설계의 범위에서 일반 대중에 노출된 적재선반은 중요도 1.5로 지정되어 반드시 내진설계가 요구된다. 국내에서 적재선반의 설계에 관한 규정은 국가표준<sup>(4)</sup> 및 내진설계기준에 일부 제시되어 있으나 적재선반에 특화된 전문 내진설계기준은 마련되어 있지 않다. 국외에서는 적재설비에 대한 다양한 실험적, 해석적 연구<sup>(5-7)</sup>가 활발히 진행되고 있으나, 국내에서는 3층 파렛트 랙의 진동대 실험<sup>(8)</sup>, 구조 부재의 요소 성능 실험<sup>(9)</sup> 등 매우 제한적 연구가 수행되었을 뿐 적재선반의 거동 특성 및 내진설계 기준을 정립하기 위한 기초 자료는 여전히 부족한 실정이다.

이 연구에서는 국내의 설치여건 및 제품 특징을 고려한 적재선반의 내진설계 및 성능평가 기준의 기초 자료를 확보하기 위하여 지진시 거동 및 손상특성, 수평하중 작용시 구조적 특성 등을 파악하고자 한다. 이를 위해 국내에서 대표적으로 사용되는 강재 파렛트 랙을 대상으로 마찰실험, 수평반복가력실험, 진동대 실험을 수행하여 지진하중에 대한 적재선반의 거동 및 구조적 특성을 파악하였다.

## 2. 파렛트 랙 마찰실험

### 2.1 실험 개요

적재선반에 파렛트를 이용하여 보관되는 물품에 별도의 고정 장치가 설치되지 않는 경우 지진하중이 작용할 때 미끄러짐이 발생하고 과도한 경우 적재물이 낙하하게 된다. 적재물의 낙하 메커니즘은 적재물의 중량, 높이, 적재 위치 등에 따라 달라지지만, 적재물이 파렛트와 일체로 거동한다고 가정한다면 파렛트

와 적재선반의 마찰력에 따라 미끄러짐 또는 전도 등에 의해 낙하 메커니즘이 결정될 수 있다.

이 연구에서는 국내에서 화물 적재용으로 주로 사용되는 목재 및 플라스틱 재질의 파렛트와 강재 적재선반을 대상으로 마찰실험을 수행하여 정적마찰계수를 평가하고, 지진시 적재물의 미끄러짐이 발생하는 적재선반의 응답 가속도를 추정하였다.

Fig. 1에 마찰실험의 구성을 나타내었다. 마찰실험을 위해 일반적인 형상, 재질의 강재 파렛트 랙을 선정하였으며, 로드빔, 크로스빔 및 파렛트 설치조건을 실제와 동일하게 구성하였다. 파렛트는 적재용으로 주로 사용되는 목재와 플라스틱재를 이용하고, 파렛트에 적재물을 대신하여 1.2 tonf(적재 용량 1.5 tonf의 80%)의 강재 하중체를 설치하였다. 파렛트의 정적 마찰계수를 측정하기 위해 로드빔이 설치된 기초 프레임의 한쪽 단부에 회전단을 적용하고 다른 단부는 자유단으로 구성하여 자유단에서 크레인을 이용하여 로드빔에 경사를 발생시키며 파렛트가 미끄러지는 순간의 경사각을 측정하였다. 마찰실험은 장변(down-aisle) 및 단변(cross-aisle) 방향에 대하여 기둥의 설치 여부, 파렛트 재료를 변수로 하여 대상 파렛트당 3회 반복 실험하여 데이터를 수집하였다.

### 2.2 실험 결과

정적 마찰계수는 식 (1)과 (2)에 따라 산정하였으며, 재료별로 목재의 경우 0.22~0.33, 플라스틱재의 경우 0.17~0.21의 분포를 보여 목재의 마찰계수가 다소 큰 것으로 나타났다. Table 1과 Table 2에 재료별 마찰계수의 평균을 정리하였다. 기둥의 설치 유무는 마찰계수에 큰 영향을 미치지 않았으며 재료 및 방향에 따라 경향성을 나타내지 않았다. 플라스틱 파렛트

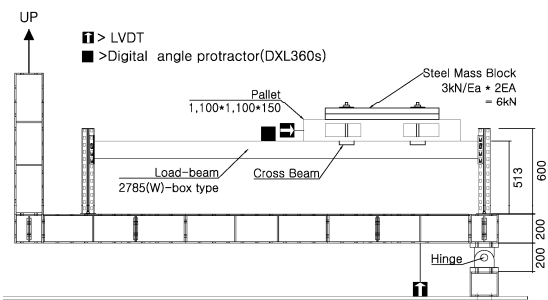


Fig. 1 Friction test setup of rack model with column

Table 1 Friction test result : down-aisle direction

	Column		Mean	Standard deviation
	×	○		
Plastic	0.196	0.186	0.191	0.012
Wood	0.237	0.248	0.242	0.022

Table 2 Friction test result : cross-aisle direction

	Column		Mean	Standard deviation
	×	○		
Plastic	0.170	0.188	0.179	0.009
Wood	0.303	0.295	0.299	0.020

의 경우 0.18~0.19 수준으로 방향별 큰 차이가 발생하지 않았으며, 목재의 경우 장변 방향 0.24, 단변 방향 0.30으로 단변 방향의 마찰계수가 다소 크게 분석되었다. 이는 목재의 경우 결에 따라 거칠기 및 마찰 요철이 달라 마찰계수에 영향을 주었기 때문으로 판단된다.

적재물에 작용하는 지진하중은 적재선반에 발생하는 가속도와 적재물 질량의 곱으로 정의할 수 있다. 지진력이 마찰력을 초과할 때 미끄러짐이 발생한다고 가정하면 식 (3)과 같이 적재물이 미끄러지기 직전의 가속도( $a/g$ )는 마찰계수와 동일하게 가정할 수 있고, 적재선반의 응답가속도가 0.18 g, 0.24 g를 초과할 경우 각각 플라스틱 및 목재 파렛트의 미끄러짐이 발생할 것으로 예상할 수 있다. Fig. 2에 식 (1)~(3)을 도식화하여 나타내었다.

$$F_s = mg \sin \theta = \mu_s mg \cos \theta \tag{1}$$

$$\mu_s = \sin \theta / \cos \theta = \tan \theta \tag{2}$$

$$F = ma = \mu_s mg; \mu_s = a/g \tag{3}$$

### 3. 2단 적재선반의 정적반복가력 실험

#### 3.1 실험 개요

적재선반의 수평하중에 의한 면내 방향 저항 성능 및 부재 거동 특성을 파악하기 위해 정적반복가력 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 적재선반은 냉간성

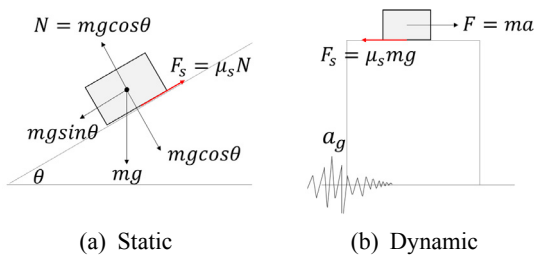


Fig. 2 Frictional mechanism

Table 3 Size of the specimen

	Size (mm)		
	Length	Width	Height
Rack	2785	1000	3300
Column	Section : 85 × 80 × 2.3(t)		
Load beam	Section : 125 × 100 × 2.0(t)		

형된 2단 강제 파렛트 랙으로 실험체 규격을 Table 3에 나타내었다.

파렛트 랙은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 실제 사용 상태와 동일하게 조립하였으며, 기초 플레이트는 일반적으로 콘크리트 슬래브에 후설치 앵커를 이용하여 설치하나 실험실 여건을 고려하여 강제 플레이트에 M12 고장력볼트를 이용하여 고정하였다. 적재하중을 고려하기 위해 플라스틱재 파렛트에 1.2 tonf (적재

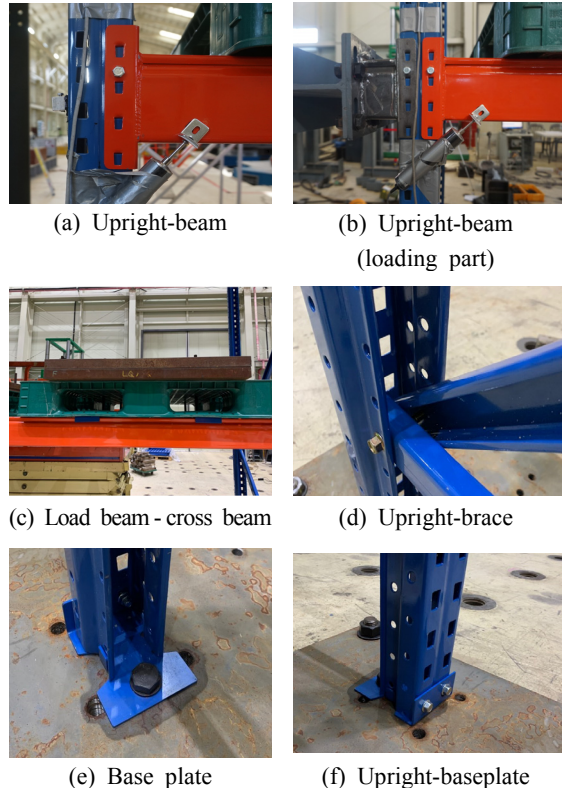


Fig. 3 Details of member connection

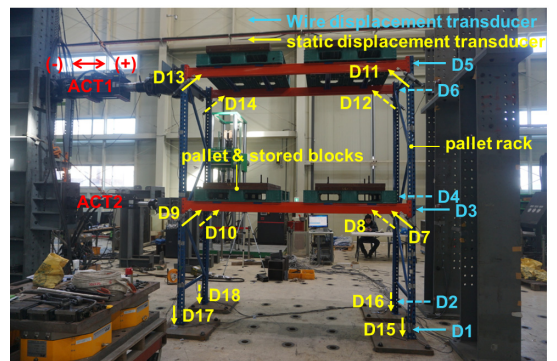


Fig. 4 Specimen setup and sensor location

용량 1.5 tonf의 80%)의 강재 하중체를 설치하였다. 수평하중은 질량 중심에 지진하중이 작용하는 것을 고려하여 하중체가 설치된 각 단의 중심 위치에서 유압가력기(actuator)를 이용하여 수평 변위를 가하였으며, 1단(Level I, H=1.5 m)과 2단(Level II, H=3.3 m)의 재하 변위는 높이에 비례하여 선형 증가하는 수직분포로 가정하였다. 재하 변위는 Fig. 5와 같이 2단을 기준으로 변형각 0.5%부터 5%까지 증가시켰으며 각 단계별로 2회 반복 가력하였다. 부방향의 경우 가력기 용량 관계상 최대 3% 변형각까지 재하하였다. 가력 중 수평변형 및 기둥-로드빔 접합부의 변형, 들뜸 변형을 측정하기 위해 변위계(displacement transducer)를 설치하였으며, Fig. 4에 실험체 조립 및 센서 위치를 나타내었다.

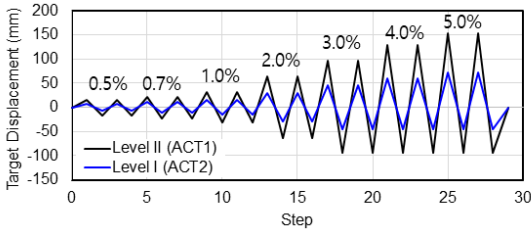


Fig. 5 Loading protocol

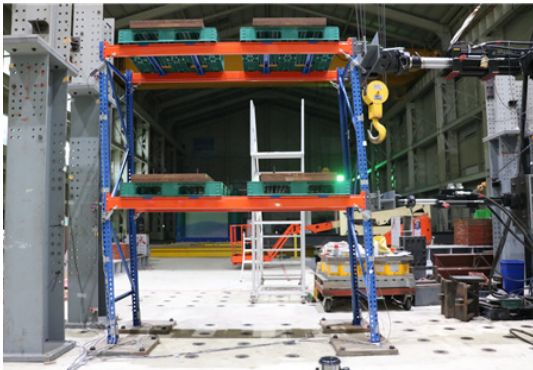


Fig. 6 Deformation shape at 5% of story drift



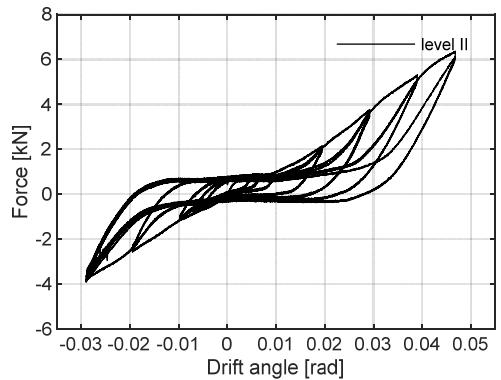
(a) Hook & perforation (b) Uplift

Fig. 7 Damage of steel storage rack

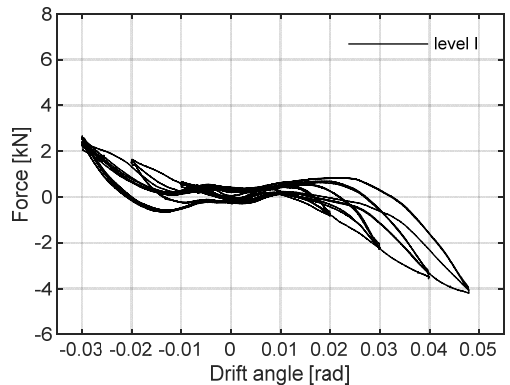
3.2 실험 결과

(1) 거동 및 손상상태

Fig. 6과 Fig. 7에 최종 가력단계의 변형형상과 손상상태를 나타내었다. 철골 구조물의 붕괴방지 수준에 해당하는 5% 변형각 단계까지 주요 부재의 좌굴 등 손상은 발생하지 않았으나 기둥과 로드빔 접합부에서 후크의 손상(영구변형)이 발생하였다. 또한, 기초 플레이트가 하나의 볼트로만 고정됨에 따라 일부 들뜸 변형이 발생하였다. 따라서 적재선반이 면내방향으로 수평하중을 받을 경우, 손상은 기둥과 로드빔의 접합부와 기초 플레이트 앵커부에 집중되는 것으로 추정할 수 있다. 적재선반은 5% 수준의 변형각에도 심각한 구조적 손상이 발생하지 않았지만, 동적하중이 작용하는 경우 적재물의 고정상태에 따라 적재선반의 거동 및 손상상태에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되며 이를 위해 실제 지진과를 이용한 동적 실험을 통해 검증하였다.



(a) Level II (H = 3.3 m)



(b) Level I (H = 1.5 m)

Fig. 8 Force - drift angle relation curve



(2) 하중-변형 관계

Fig. 8에 각 단의 하중-변형각 관계곡선을 나타내었다. 변형각은 수평 변위를 각 단의 높이로 나눈값이다. 2단의 경우 0.5% 변형각까지 하중이 미소하게 증가하였으나 1% 변형각까지 하중이 증가하지 않고 변형만 증가하는 경향이 나타내었다. 이후 목표 변형각 5%까지 가력시에는 목표 변형각의 약 1/2 수준까지 변형만 증가하다가 점차 하중이 다시 증가하는 경향을 보였는데, 이는 기둥과 로드빔의 후크형 접합부에 존재하는 유격으로 인해 하중을 지지하지 못하다가 기둥의 변형각이 증가하면서 후크가 맞물려 하중을 지지하였기 때문으로 판단된다.

1단의 경우, 2단과 반대 방향의 하중-변위 관계 곡선을 나타내었다. 이는 가력 계획 시 높이에 따른 수평 재하 변위 분포를 선형 비례 증가형으로 가정하였으나, 실제로는 적재 선반의 주된 변형 거동이 1단부에 변형이 집중되는 연약층 메커니즘(soft-weak story mechanism)에 지배됨을 의미하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 2단에 재하된 변위로 인해 1단부에 더 큰 변형이 유발되지만 가력기를 변위 제어함에 따라 역하중이 발생한 것으로 판단된다. 이 실험에서 유추할 수 있는 적재선반의 연약층 메커니즘은 기존의 실험

연구<sup>(10)</sup> 결과에서도 관찰된 바 있다.

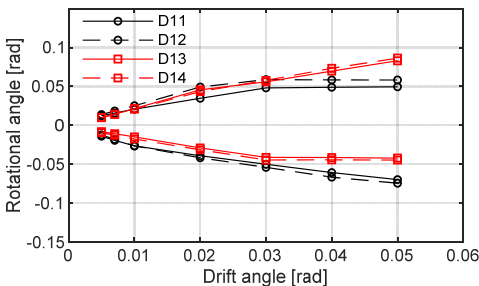
(3) 접합부 회전각

Fig. 9는 각 단의 위치에서 수평 변형각에 따른 접합부 회전각을 나타낸다. 1층의 경우 가력 단계별로 접합부 회전각이 층 변형각에 비해 약 2배 크게 발생하였으며, 2단의 경우에도 1단보다는 회전각이 다소 작게 발생하였지만 유사한 경향을 나타내었다. 이는 적재선반의 기둥과 로드빔 연결부가 후크를 천공부에 걸치는 형태로 구성됨에 따라 일부 유격이 존재하는데, 적재선반에 수평 변위가 작용할 때 유격으로 인해 접합부에 더 큰 회전각이 발생한 것이다.

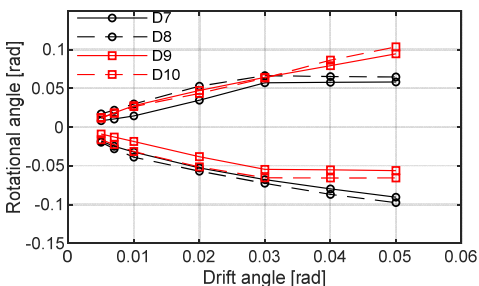
4. 2층 적재선반의 진동대 실험

4.1 실험 개요

국내 지진하중에 대한 2단 적재선반의 동적 거동 및 내진 성능을 파악하기 위하여 진동대 실험을 수행



(a) Level II (H = 3.3 m)



(b) Level I (H = 1.5 m)

Fig. 9 Joint rotational angle by story drift angle

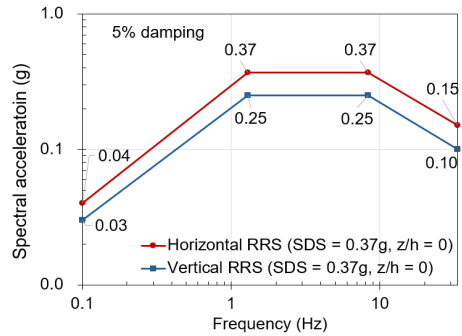


Fig. 10 Required response spectrum

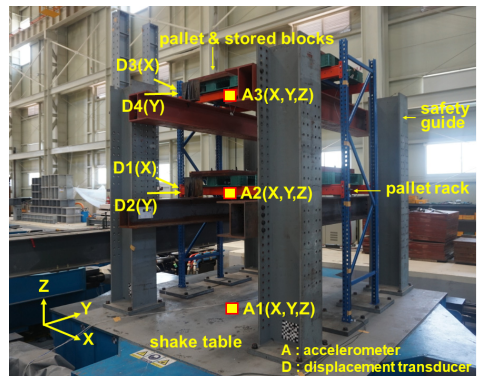


Fig. 11 Shake table test setup and sensor location

하였다. 실험체는 정적실험과 동일한 실험체를 사용하였으며 동일한 조건으로 설치하였다. 실험에 요구되는 지진의 응답스펙트럼은 지진구역 1의 보통암지반에 위치한 건물의 1층에 설치되는 것으로 가정하여 SDS(=0.37)를 산정하였으며, 지진파는 비구조요소의 진동대 실험규정인 AC156<sup>(11)</sup>에서 제시하고 있는 방법에 따라 가속도 요구응답스펙트럼(Fig. 10) 및 시간 이력을 작성하였다. 진동대 실험은 적재설비의 동특성을 확인하기 위하여 임의진동(random wave)을 가진하여 수평 2방향(X, Y) 및 수직(Z) 방향에 대해 각각 공진 탐색 실험을 수행하였으며, 지진실험은 상기 지진파의 최대가속도(0.15 g)를 기준으로 50 % 수준에서 300 % 수준까지 점증하면서 3축 방향으로 동시 가진하였다. 진동대 설치 현황 및 센서 설치 위치는 Fig. 11에 나타내었다.

4.2 실험 결과

(1) 공진진동수 및 감쇠비

임의진동을 이용한 공진 탐색 시험결과를 Table 4에 나타낸다. 공진진동수는 입력가속도에 대한 최상단 가속도 응답의 전달함수를 산정하여 결정하였다. 장변 방향(down-aisle direction, X)은 1.0 Hz, 4.75 Hz, 단변 방향(cross-aisle direction Y)은 3.0 Hz로 저진동수 특성을 나타내었으며, 상하 방향(Z)으로는 9.0 Hz를 나타내었다.

Table 5는 각 가진 단계별로 장변 방향의 변위 응답을 이용하여 로그 감쇠비를 추정한 결과를 나타낸다. 이는 기존 연구<sup>(9)</sup>에서 수행한 국내 3층 적재 선반의 감쇠비와 유사한 수준이며, 기존 연구<sup>(10)</sup>에서 현장 실험(RMS 0.01 g ~ 0.02 g) 결과로 2 % ~ 3 %의 감쇠비를 추정하고, 더 큰 지진하중에 대해 5 % 감쇠비를

제안한 것과도 유사한 결과이다. FEMA 460<sup>(11)</sup>에서는 설계 시 지진가속도의 크기에 따라 감쇠비를 3 %에서 최대 30 %까지 고려하고 있지만, 국내의 중약진 특성을 고려하면 설계 지진에서 2 % 정도의 감쇠비를 적용하여야 할 것으로 판단된다.

(2) 변형 모드 및 응답 거동

Fig. 12에 지진파 100 % 가진 시 높이에 따른 최대 변위 및 변형각(각 단의 높이에 대한 수평 변위비)을 나타낸다. 최대 변위 응답은 장변 방향으로 1단과 2단에서 각각 약 19 mm, 32 mm 발생하였으며 변형각으로 환산 시 0.013 rad, 0.01 rad으로 1단에서 약 30 % 정도 더 큰 변형이 발생하였다. 이와 같은 결과는 정적실험에서 유추하였던 연약층 메커니즘을 뒷받침하는 것으로 볼 수 있다. 단변 방향은 장변 방향에 비해 30 % ~ 50 % 수준으로 변형이 작게 발생하였으며, 이는 단변 방향으로 기둥이 강축으로 배치되었으며 브레이스로 연결되어 장변 방향에 비해 비교적 큰 강성을 보유하고 있기 때문이다.

Fig. 13은 가진 단계별 층간 변형각과 성능목표 수준을 비교하여 나타낸 것이다. 가진 단계별 층간 변형각은 장변 방향의 경우 200 %까지 증가하였으나 300 %에서는 200 %와 유사한 수준으로 나타났다. 이는 300 % 가진 시 적재물의 미끄러짐이 발생함에 따라 변형 거동에 영향을 미치는 참여 질량이 감소하였기 때문으로 판단된다. 반면 단변 방향의 경우 가진 단계가 증가함에 따라 비례적으로 층간 변형각이 증가하는 경향을 나타내었다.

적재설비의 성능목표 수준은 FEMA356<sup>(12)</sup>에서 제시하고 있는 철골 구조물의 성능목표 수준과 비교하였다. 장변 방향의 경우 100 % 가진 단계 시 즉시 사용, 200 % 가진 시 인명보호 수준을 초과하는 변형이 발생하였으나, 300 % 가진 단계에서도 붕괴방지 수준의 한계 변형은 발생하지 않았다. 단변 방향의 경우에는 100 % 가진 단계 시 즉시 사용 한계를 초과하였으나 300 % 가진 시까지 인명보호 수준 한계 이하의 변형이 발생하였다.

(3) 파렛트의 미끄러짐 거동 및 한계 가속도

진동대 실험에서 지진파 300 % 단계 가진 시까지 육안으로 관찰 가능한 적재선반의 손상은 발견되지 않았다. 다만 100 % 가진 시부터 적재 파렛트의 미끄

Table 4 Resonant frequency result

	Frequency (Hz), df = 0.25 Hz		
	X	Y	Z
Before	1.0, 4.75	3.0	9.0

Table 5 Damping estimation result

	Excitation scale		
	EQ 100 % (0.15 g)	EQ 200 % (0.30 g)	EQ 300 % (0.44 g)
Damping ratio (%)	1.95	4.51	3.45

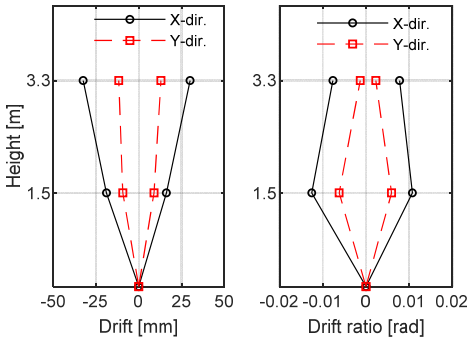
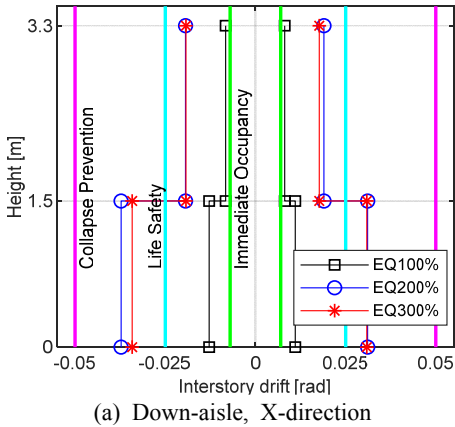


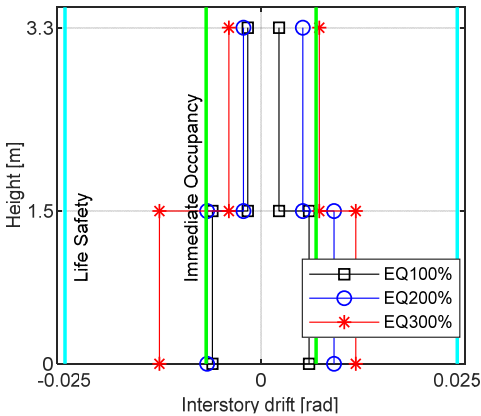
Fig. 12 Maximum drift along the height (EQ 100 %)



Fig. 14 Sliding of pallets after EQ 300 % test



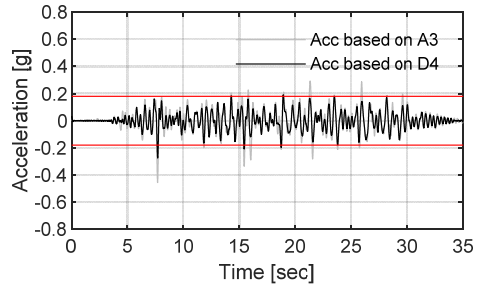
(a) Down-aisle, X-direction



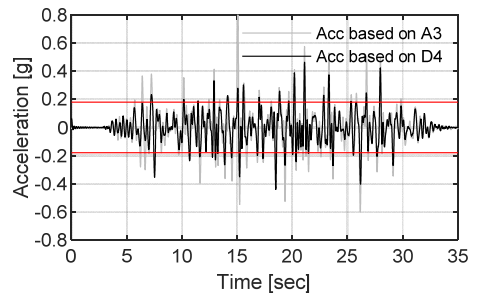
(b) Cross-aisle, Y-direction

Fig. 13 Inter-story drift ratio

러짐이 발생하기 시작하였으며, 가진 단계가 증가할수록 미끄러짐 양이 증가하여 300% 가진 중에는 파렛트의 낙하방지용 와이어에 제동될 정도로 적재 파렛트의 이동이 크게 발생하였다. Fig. 14는 최종 가진 후 적재 파렛트의 이동 상태를 보여준다.



(a) EQ 100 %



(b) EQ 200 %

Fig. 15 Acceleration response occurred the sliding of pallets (cross-aisle direction)

Fig. 15는 100%와 200% 가진 시 가속도 응답과 미끄러짐 한계 가속도(빨간색 직선)를 비교하여 나타낸 것이다. 적재물의 미끄러짐이 발생하는 한계 가속도는 2.2절에서 전술한 바와 같이 플라스틱 파렛트의 마찰계수에서 0.18 g로 추정하였다. 진동대 실험에서 측정된 가속도 응답 신호는 적재선반의 일체화되지 않은 구조 특성으로 인해 고주파 대역의 노이즈 성분이 다량 포함되어 직접 비교가 어려웠다. 따라서 노이즈 응답 및 불필요한 고주파 대역 응답 성분을 필터링(fft band-pass filtering)하여 1차 모드 성분의 가속도 응답과 시험 중 측정된 변위 응답을 가속도로

변환하여 미끄러짐 거동과 비교 평가하였다. 적재 파렛트의 미끄러짐이 발생하기 시작한 지진파 100% 단계에서 2단부의 가속도 응답이 0.18 g를 초과함에 따라 마찰 계수에서 도출한 미끄러짐 한계 가속도의 타당성을 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 물류창고 및 대중에게 노출되는 대형 창고형 매장 등에 일반적으로 사용되는 적재선반의 지진시 거동 및 내진성능을 평가하기 위해 다양한 실험적 연구를 수행하였다.

적재물의 미끄러짐 거동을 평가하기 위해 파렛트 랙과 목재 및 플라스틱 파렛트의 마찰실험을 통해 정적 마찰계수를 평가하고, 이로부터 지진 시 적재 파렛트의 미끄러짐이 발생할 수 있는 한계 가속도를 0.18 g로 도출하였으며 진동대 실험을 통해 타당성을 확인하였다.

국내 적재 선반의 동적거동과 내진성능을 평가하기 위해 2단 파렛트 랙을 대상으로 정적 수평 반복 가력 실험과 국내 지진하중 수준의 지진파를 이용한 진동대 실험을 수행하였다. 실험 결과, 상단부에 비해 1단부 변형이 크게 발생하는 연약층 메커니즘 거동을 확인하였으며, 실험을 수행한 대상 적재선반은 기둥과 로드빔 접합부에서 후크 위치 및 기초 플레이트부에 손상이 발생함을 확인하였다.

국내 설계기준에 의한 지진력이 작용하는 경우 고정되지 않은 파렛트는 적재선반 상부에서 미끄러짐 및 활동(이동)할 수 있는 것으로 확인되었으며, 그 크기는 가진력이 클수록 증가하는 양상을 나타내었다. 다만, 파렛트의 미끄러짐이 발생한 이후에는 가진력의 증가에도 파렛트 랙의 변형증가는 크지 않았으며, 설계기준 대비 300% 수준 가진 시에도 구조적 붕괴가 발생하지 않는 인명안전수준을 유지하였다.

물류시설 등에 파렛트 랙을 사용하는 경우 지진발생에 대비하여 파렛트를 구조체에 고정할 수 있는 방안이 강구되어야 할 것으로 판단되며, 향후 파렛트 랙 고정에 따른 적재설비의 지진 안전성 및 한계성능에 대한 추가적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 후 기

이 연구는 국토교통부 도시건축 연구개발사업

의 연구비지원(20AUDP-C146352-03)에 의해 수행되었습니다.

## References

- (1) Building Seismic Safety Council, 2005, FEMA 460 Seismic Considerations for Steel Storage Racks Located in Areas Accessible to the Public, National Institute of Building Sciences, Washington, D.C.
- (2) Yun, D. W., Jeon, J. S., Kim, C. G. and Kim, M. U., 2017, Static Tests for the Seismic Design of the Steel Storage Racks, Proceedings of Earthquake Engineering Society of Korea Conference 2017.
- (3) Korea Construction standards Center, 2019, Seismic Design Standards for Buildings, KDS 41 17 00.
- (4) Korea Agency for Technology and Standards, Industrial Racks, KS T 2027:2009.
- (5) Eriten, M., Kurt, M., Luo, G., AcFarland, M. D., Bergman, L. A. and Vakakis, A. F., 2013, Nonlinear System Identification of Frictional Effects in a Beam with a Bolted Joint Connection, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 39, No. 1-2, pp. 245~264.
- (6) Bernuzzi, C. and Castiglioni, C. A., 2001, Experimental Analysis on the Cyclic Behavior of Beam-to-column Joint in Steel Storage Pallet Racks, Thin-walled Structures, Vol. 39, No. 10, pp. 841~859.
- (7) Filliatrault, A., Higgins, P. S., Wanitkorkul, A. and Courtwright, J., 2007, Experimental Stiffness of Pallet Type Steel Storage Rack Tear Drop Connectors, Practice Periodical on Structural Design and Construction, Vol. 12, No. 4, pp. 210~215.
- (8) Seo, Y. D., Jeon, J. S., Choi, H. S. and Baek, E. R., 2018, Seismic Fragility Evaluation of Steel Storage Racking in Warehouse, Proceeding of KSNVE Annual Spring Conference, p. 308.
- (9) Jeon, J. S., Choi, H. S., Seo, Y. D., Kim, C. G. and Heo, G. H., 2018, Seismic Performance of Steel Industrial Storage Racks Subjected to Korea Earthquakes, Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 22, No. 3, pp. 149~160.
- (10) Castiglioni, C. A., 2015, Seismic Behavior of Steel Storage Pallet Racking Systems, Springer, Milan, Italy.
- (11) ICC-ES, 2015, Acceptance Criteria for Seismic Certification by Shake-Table Testing of Nonstructural



Components, International Code Council.

(12) American Society of Civil Engineers, 2000, FEMA 356 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.



**Eun-Rim Baek** is a senior researcher of Korea Construction and Transport Engineering Development Collaboratory Management Institute. She received a Ph.D. from the Department of Architectural Engineering in Pusan National University. Her research interests are seismic behavior of structures and prevention of earthquake disasters.



**Hyung-Suk Choi** is a principal researcher of Korea Construction and Transport Engineering Development Collaboratory Management Institute. He received a structural engineering Ph.D. from Pusan National University and his research interests are seismic design of structures and non-structural components in infrastructure.



**Young-Deuk Seo** is a research engineer of Korea Construction and Transport Engineering Development Collaboratory Management Institute. He received a M.D. from the Department of Civil Engineering in Pusan National University. His research interests are seismic performance of non-structural components by shake table testing.



**Chung-Gil Kim** is a research professor in Public Safety Research Center at Konyang University. He received a Ph.D. from the Civil Engineering in Chungnam National University. His research interests are damage detection and vibration control of structures for preventing disasters.