

지게차 충돌 위치 및 보관물류 분포에 따른 선반구조물의 거동특성분석

옥승용[†] · 권오용 · 백신원
한경대학교 토목안전환경공학과
(2013. 7. 2. 접수 / 2013. 10. 17. 채택)

Behavioral Characteristics Investigation of Rack Structure Depending on Forklift Impact Scenarios and Storage Distributions

Seung-Yong Ok[†] · Oh-Yong Kwon · Shin Won Paik

Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University
(Received July 2, 2013 / Accepted October 17, 2013)

Abstract : The statistics of recent accidents in warehouses show that a heavy toll of lives were produced by various accidents, e.g. collision, overturn, fall, slip, exposure to harmful substances or environments, etc. Of significant concern amongst them is the collision, especially the collision between forklift and storage rack structure. Accordingly, this study focuses on behavioral characteristics of rack structure subjected to dynamic impact loading of a forklift. For this purpose, time-domain response analysis has been performed on a standard 2-bay six-story rack structure consisting of columns, beams and bracing members with perforated open section. In order to investigate the most critical scenario, the impact loads are applied in both down-aisle and cross-aisle directions, and the impact locations are also varied along the shelves of the palettes. In order to deal with storage distributions, three types of rack structures are further taken into account: original empty rack structure with no storage, half-loaded rack structure and fully-loaded rack structure. The numerical simulation results demonstrate that the dynamic characteristics of the rack structure are significantly dependent on the distribution of the storage goods and its natural period varies from 0.24sec to 1.06sec, approximately 4.4 times. Further, the parametric studies show that the forklift impact is most critical to the safety of the rack structure when it collides either at the base or at the top of the rack structure.

Key Words : forklift impact, dynamic response analysis, storage rack structure, energy-saving light-weighted rack, logistics facilities

1. 서론

Fig. 1에 제시한 최근 5년간 국내의 창고업 재해유형별 통계를 살펴보면, 사망자를 포함한 심각한 재해자 수가 충돌, 전도, 추락 등에서 높은 빈도를 보인다. 이 중 본 연구에서 다루고자 하는 보관시설물의 구조적 안전성에 영향을 미치는 가장 심각한 요인은 충돌로서 대부분 수동 운행되는 지게차에서 작업자의 부주의로 발생하며, 물류보관 선반(rack) 시설물 자체의 붕괴뿐만 아니라 보관되어 있던 물류의 낙하에 의한 2차 피해를 초래하게 된다. 최근에는 충돌사고를 미연에 방지할 수 있도록 AGV (Automatic guided vehicle) 시스템이 개발되고 있으나 여전히 많은 낙후된 물류창고에서는 유인 운행되는 지게차가 일반적이다.

특히, 최근에는 물류센터의 에너지 저감 및 물류이동의 효율성을 높이고자 물류보관 시설물은 점점 고층화, 밀집화 및 경량화 되는 추세이다. 이러한 경량화 및 고층화에 따라 물류보관 시설물은 진동에 취약해지며, 특히 물류장비의 고속주행으로 인하여 시설물에는 예기치 않은 하중

이 과도하게 작용할 수 있다. 이에 덧붙여, 물류 효율성을 높이고자 밀집하게 설치된 인접보관시설물간에는 과도한 진동으로 인하여 충돌 문제가 야기될 수 있으며, 중국에는 전체 시설물의 붕괴를 초래할 수 있다.

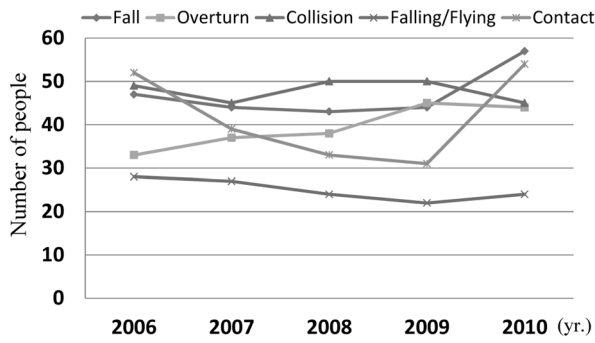
이에 본 연구에서는 지게차 충돌 위치, 방향, 크기 및 보관물류의 분포 등 다양한 시나리오에 대한 매개변수연구를 통하여 보관 시설물의 거동특성을 분석하고자 하며, 이로부터 물류보관 선반 시설물의 안전성 평가에 있어 주요 응답 및 주요 인자를 규명하고자 한다.

2. 지게차 충돌에 따른 선반구조물의 응답해석

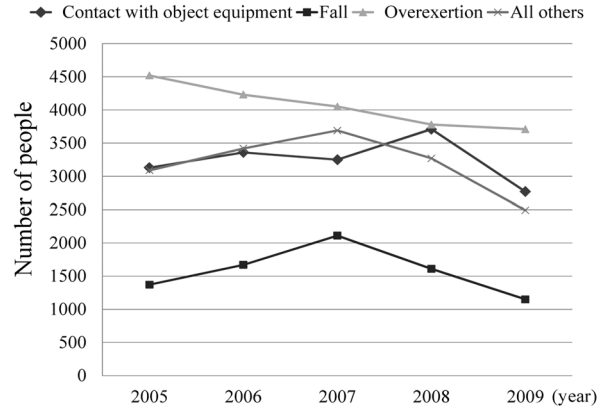
2.1 선반구조물의 구조해석 모델

지게차-선반구조물간 충돌응답해석을 수행하고자 Fig. 2와 같은 2-bay 6층 선반구조물을 고려하였다. 그림에서와 같이 선반은 수직부재, 수평부재 및 경사 브레이싱(bracing) 부재로 구성된다. 물류선반구조물에서 사용되는 부재는 균데균데 구멍이 뚫린 개방형 단면(perforated open section)이

[†]Corresponding Author: Seung-Yong Ok, Tel : +82-31-670-5282, E-mail : syok@hknu.ac.kr
Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University, 327, Jungang-ro, Anseong-si, Kyonggi-do 456-749, Korea



(a) Korea



(b) U.S.

Fig. 1. Statistics of fatalities and injuries in warehouses for recent 5 years.

일반적이다. 이러한 부재는 단면이 복잡한 형상을 띄므로 엄밀한 응답해석을 위해서는 기존 연구자들¹⁴⁾이 수행한 바와 같이 상세 유한요소법(Finite Element Method; FEM)이 요구되나, 본 연구에서는 전체 구조물의 동적 안전성 개선을 위한 거동 특성 및 경향성 평가를 목적으로 하므로 기존 연구들로부터 단순화된 등가 프레임 요소(equivalent frame element)를 사용하였다⁴⁾. 정밀해석을 통하여 등가 환산된 각 부재별 단면 물성치는 Table 1에 수록하였다. 여기서, 단면 2차모멘트의 축 y, z 는 Fig. 1에 나타난 각 부재별 국부좌표계(local coordinate)를 나타낸다.

2.2 지게차 충돌을 모사하는 하중모델

지게차의 충돌 하중을 수치모델로 모사하는 방법은 여러 가지가 가능하며, 충돌 효과도 지게차의 제원, 속도, 충돌위치, 충돌방향 등에 따라 달라지게 된다^{2,5,6)}. 본 연구에

로, 기존 선행연구²⁾에서 제시된 충격하중모델을 고려하고서는 시설물의 주요 응답과 그 경향성을 파악하고자 하므로 하였다. Fig. 3에 하중모델의 시간이력이 제시되어 있으며, 이 모델은 통로방향(down-aisle direction) 및 통로직각방향(cross-aisle direction)으로 작용하게 된다. 이 때 통로방향의 하중이 통로직각방향의 하중보다 절반수준으로 적용하였는데, 이는 실제 지게차의 충돌이 통로방향보다는 통로직각방향으로 크게 충돌하는 경향을 반영하고자 함이다. 작용하중에 따른 응답을 살펴보고자 하중의 작용방향과 크기 및 작용위치를 Table 2와 같이 총 60(=2×5×6)가지 경우로 고려하였다. Table 2에서 “down”은 통로방향(down-aisle direction)을 의미하며, “cross”는 통로직각방향(cross-aisle direction)을 의미한다.

2.3 보관 선반의 적재물 분포

선반에 적재되는 물품의 보관 위치와 무게는 종류에 따라 매우 다양하며, 또한 물류 이송에 따라 상시적으로 변하게 된다. 따라서 이러한 적재물의 모든 분포를 고려할 수는 없으므로, 이 연구에서는 선반에 적재될 수 있는 분포 중 가장 극단적인 적재물 분포에 대한 응답의 차이를 파악하기 위한 매개변수 연구를 수행하고자 하였다. 이에 따라 고려한 적재물의 유형은 적재물이 없는 경우 (Empty Case), 한 쪽에만 편재된 경우(Half-loaded Case),

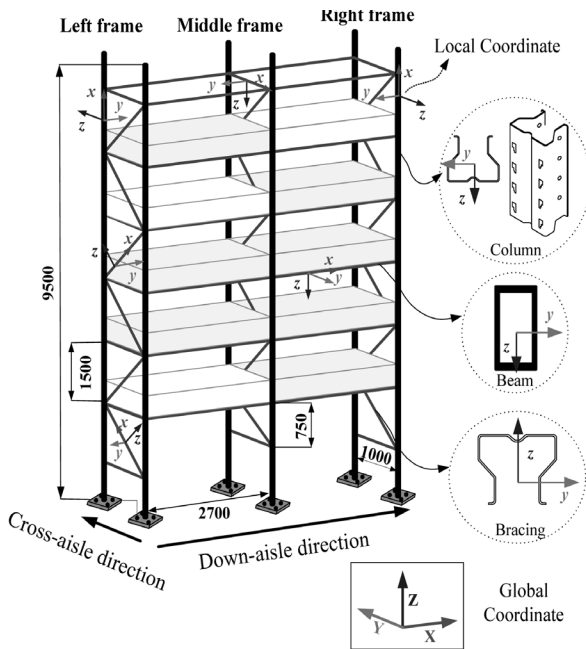


Fig. 2. Rack structure and member sections.

Table 1. Mechanical properties of materials and sections

Modulus of Elasticity E (GPa)	Density ρ (kg/m ³)	Yield Stress σ_y (MPa)	Ultimate Stress σ_u (MPa)
212	7,860	365	569
Sectional Properties		I_{yy} (cm ⁴)	I_{zz} (cm ⁴)
Column	6.12	43.24	40.56
Beam	13.14	463.24	55.40
Bracing	1.53	3.09	13.52

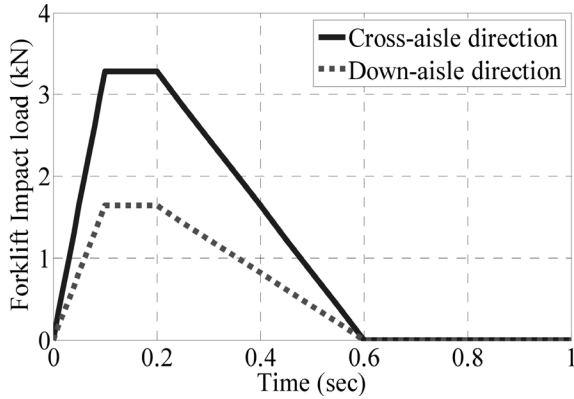


Fig. 3. Impact loads in down- and cross-aisle directions.

그리고 만재된 경우(Fully-loaded Case)의 3가지 사례를 고려하였으며, Fig. 4에 도시하였다. 적재물의 무게는 각 선반에 허용되는 최대 무게 1.5ton이 만재된 경우를 고려하였으며, 보관물류의 관성효과를 고려하기 위하여 각 선반에 부가질량으로 적재되도록 모델링하였다. 전절에서의 하중 적용 사례와 적재물의 분포 사례를 모두 고려할 때, 이 연구에서는 총 180가지의 해석을 수행하였다.

3. 지게차 충돌 응답해석

3.1 고유치 해석을 통한 모드분석

물류보관 선반시설물의 주요 변형형상(mode shape) 및 그에 따른 고유진동수(natural frequency)를 파악하기 위하여 고유치해석(eigenvalue analysis)을 수행하였다. 고유치해석은 구조물의 질량과 강성 행렬에 대하여 식 (1)을 풀어서 각 모드별 고유주파수(ω_j)와 그에 상응하는 모드 벡터(ϕ_j)를 구하게 된다.

$$(\mathbf{K} - \omega_j^2 \mathbf{M}) \phi_j = 0 \Leftrightarrow \det[\mathbf{K} - \omega_j^2 \mathbf{M}] = 0 \quad (1)$$

Table 2. Load cases: direction, location and magnitude

Location and Direction		Increase in load (kN)				
		0%	25%	50%	75%	100%
1 st fl.	down	3.28	4.10	4.92	5.74	6.56
	cross	1.64	2.05	2.46	2.87	3.28
2 nd fl.	down	3.28	4.10	4.92	5.74	6.56
	cross	1.64	2.05	2.46	2.87	3.28
3 rd fl.	down	3.28	4.10	4.92	5.74	6.56
	cross	1.64	2.05	2.46	2.87	3.28
4 th fl.	down	3.28	4.10	4.92	5.74	6.56
	cross	1.64	2.05	2.46	2.87	3.28
5 th fl.	down	3.28	4.10	4.92	5.74	6.56
	cross	1.64	2.05	2.46	2.87	3.28
6 th fl.	down	3.28	4.10	4.92	5.74	6.56
	cross	1.64	2.05	2.46	2.87	3.28

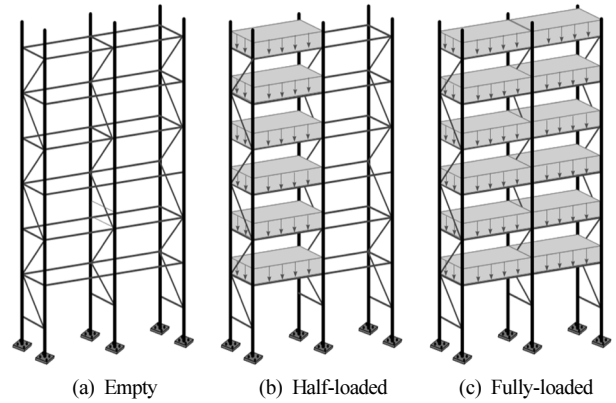


Fig. 4. Three extreme cases of storage distribution.

여기서, ω_j 의 단위는 [rad/sec]이며, ϕ_j 는 j -번째 모드벡터로서 선반시설물의 변형 형상을 나타낸다.

고유치해석의 결과로서 선반구조물의 응답에 가장 크게 기여하는 저차모드별 고유진동수와 주요 모드형상을 Tables 3-6에 정리·도시하였다. 고유진동수($f_j = \omega_j/2\pi$)의 단위는 [Hz]이며, 고유주기($T_j = 2\pi/\omega_j$)의 단위는 [sec]이다.

Table 3에서 알 수 있듯이 빈 선반구조물에서 반재 및 만재된 선반으로 갈수록 보관물류의 질량 증가로 인하여 고유진동수는 감소하며 고유주기는 길어진다. 빈 선반구조물의 1차 모드 고유진동수(고유주기)는 4.15Hz(0.241sec)인 반면, 만재된 선반구조물의 고유진동수(고유주기)는 0.94Hz(1.064sec)로서 약 4.4배 감소(증가)하였음을 확인할 수 있다. 이는 빌딩이나 교량 등의 사회기반시설물과 차별화되는 물류보관 선반구조물의 특성⁷⁾ 중 하나로서 경량 프레임부재에 비해 훨씬 무거운 활하중을 지지하는 구조물이기 때문이다. 즉, 빌딩 또는 교량 구조물은 구조물 자체가 매우 크고 무겁기(massive) 때문에 사람 또는 차량의 이동에 의한 질량 변동이 구조물의 질량과 비교할 때 미미하므로 고유진동수(고유주기)가 거의 변화하지 않는 반면, 선반구조물은 프레임에 비해 보관물류의 질량이 훨씬 크기 때문에 원 고유진동수(고유주기)로부터 수배의 차이를 보이게 되는 것이다. 이처럼 주파수 특성이 크게 변화하는 구조물은 외부하중의 가진주파수 특성에 따라 진동 특성도 크게 변화할 수 있다.

한편, Tables 4-6은 각 모드의 응답이 전체 구조물 응답을 구성하는 정량적 비율(기여도)이 크게 평가되는 주요 모드별 모드형상과 상응하는 모달질량비를 빈 선반구조물, 반재 선반구조물 그리고 만재 선반구조물에 대하여 각각 도시하고 있다. Tables 4-6에서 관측할 수 있듯이, 물류의 분포양상에 따라 주요 모드는 차이를 보인다. 즉, 빈 경우와 만재된 경우는 보관물류의 질량분포가 좌우 대칭적으로 균등하므로, 주파수특성은 다르지만 모드형상은 저차모드에서 서로 유사한 결과를 보인다. 이에 반해, 물류가 반재된 경우에는 주요 모드형상 자체는 빈 경우 및 만재된 경우와 전체적으로 유사하나, 비틀림(torsion) 모드가 보다 빨리 발현되는 결과를 보인다. 이는 반재 선반의 경우 질량의 분포가 한쪽으로 치우쳐 불균등하게 되므로

Table 3. The first 10 natural frequencies and mode shapes

Mode	빈(Empty) 선반		반재(Half-loaded)		만재(Fully-loaded)	
	f_n (Hz)	T_n (sec)	f_n (Hz)	T_n (sec)	f_n (Hz)	T_n (sec)
1 st	4.15	0.241	1.17	0.853	0.94	1.064
2 nd	6.50	0.154	1.74	0.576	1.45	0.689
3 rd	7.53	0.133	2.73	0.366	1.77	0.564
4 th	12.84	0.078	3.50	0.286	2.91	0.343
5 th	20.03	0.050	5.75	0.174	4.33	0.231
6 th	27.86	0.036	5.92	0.169	6.66	0.150
7 th	29.30	0.034	6.23	0.161	6.96	0.144
8 th	29.32	0.034	6.78	0.147	8.58	0.117
9 th	39.64	0.025	7.60	0.132	12.38	0.081
10 th	54.56	0.018	7.82	0.128	12.98	0.077

비틀림(torsion) 모드가 응답에 기여하는 정도가 증가하기 때문이다. 이상의 결과로부터 물류보관물의 분포에 따른 선반구조물의 응답에의 영향은 상이한 경향을 보일 수 있음을 확인할 수 있다.

3.2 시간이력해석에 따른 주요 응답분석

다음으로는 지게차 충격하중(Fig. 3)에 대한 시간이력해석결과에 따른 주요 응답들을 살펴보고자 한다. 시간이력해석(time history analysis)은 식 (2)의 2차 상미분방정식(2nd-order ordinary differential equation)을 시간영역에서 직접 적분하여 구조물의 시간이력응답(response)을 구하게 되며, Newmark-β방법⁸⁾등의 수치해석기법을 이용하게 된다.

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) = \mathbf{P}(t) \quad (2)$$

여기서, 행렬 M , C , K 는 각각 선반구조물의 질량, 감쇠 및 강성을 나타내며, $\ddot{\mathbf{x}}(t)$, $\dot{\mathbf{x}}(t)$, $\mathbf{x}(t)$ 는 이에 상응하는 가속도, 속도 및 변위 응답을 나타낸다. $\mathbf{P}(t)$ 는 지게차 충돌하중의 시간이력으로서 Fig. 3에 제시되어 있다.

선반구조물의 안전성은 시설물 자체의 붕괴 또는 보관물류의 낙하·비래 안전사고로 대변될 수 있다. 이 중 보관물류의 낙하·비래는 수평부재의 상대변위로 나타낼 수 있으며, 시설물의 붕괴는 수직부재의 층간상대변위 또는 바닥면의 전단력과 휨모멘트에 의하여 표현될 수 있다. Fig. 5는 지게차의 충돌효과가 가장 크게 발현되는 6층에서 충돌한 경우의 시간이력응답곡선을 도시하고 있다. Fig. 5(a)는 수직부재의 통로방향 층간상대변위를 도시하고 있으며, Fig. 5(b)는 바닥전단력의 통로방향시간이력곡선을 나타내고 있다. 그림에서 관측할 수 있듯이, 충격에 따른 응답의 경향은 보관물류의 분포에 따라 큰 차이를 보인다. 먼저 빈 선반의 경우는 보관물류가 없는 관계로 질량에 의한 관성효과가 작아서 평형상태에서 편중되어 진동하고

Table 4. Dominant mode shapes and modal mass ratios of empty rack structures

Empty rack structure	
Modes	Mode Shapes and modal mass ratios
1	Down-aisle 1 st bending Translation X-dir.: 87.30% Rotation Y-dir.: 7.84%
2	Cross-aisle 1 st bending Translation Y-dir.: 73.02% Rotation X-dir.: 25.66%
3	1 st torsion Rotation Z-dir.: 71.86%
5	Cross-aisle 2 nd bending Translation Y-dir.: 12.83% Rotation Y-dir.: 35.91%
6	2 nd torsion Rotation Z-dir.: 18.40%
7	Down-aisle 2 nd bending Translation X-dir.: 6.52% Rotation Y-dir.: 29.72%
8	Cross-aisle 3 rd bending Translation Y-dir.: 5.99% Rotation X-dir.: 12.84%

Table 5. Dominant mode shapes and modal mass ratios of half-loaded rack structures

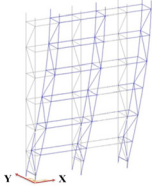
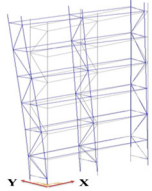
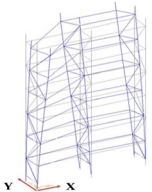
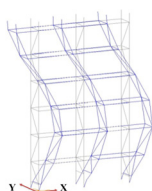
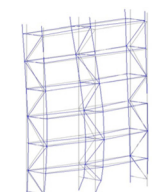
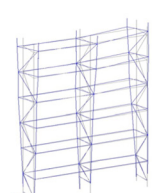
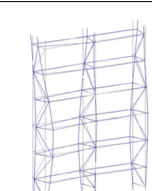
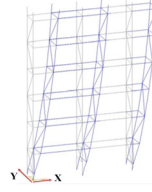
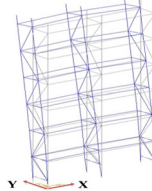
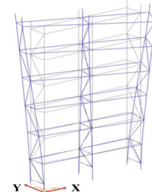
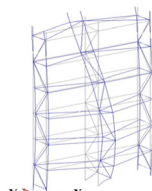
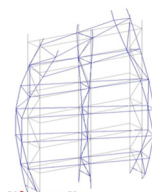
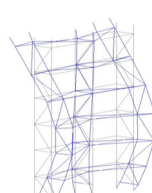
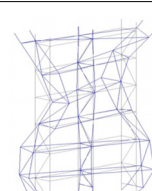
Half-loaded rack structure	
Modes	Mode Shapes and modal mass ratios
1	<p>Down-aisle 1st bending</p> <hr/> <p>Translation X-dir.: 85.95% Rotation Y-dir.: 10.24%</p> 
2	<p>Cross-aisle 1st bending + 1st torsion</p> <hr/> <p>Translation Y-dir.: 67.09% Rotation X-dir.: 22.66% Rotation Z-dir.: 7.11%</p> 
3	<p>2nd torsion + Cross-aisle 2nd bending</p> <hr/> <p>Translation Y-dir.: 7.43% Rotation Z-dir.: 62.15%</p> 
4	<p>Down-aisle 2nd bending</p> <hr/> <p>Translation X-dir.: 9.24% Rotation Y-dir.: 53.72%</p> 
6	<p>Cross-aisle 3rd bending</p> <hr/> <p>Translation Y-dir.: 13.82% Rotation X-dir.: 48.37%</p> 
7	<p>3rd torsion</p> <hr/> <p>Rotation Z-dir.: 5.08%</p> 
8	<p>Cross-aisle 4th bending + 4th torsion</p> <hr/> <p>Translation Y-dir.: 3.30% Rotation X-dir.: 6.30% Rotation Z-dir.: 12.80%</p> 

Table 6. Dominant mode shapes and modal mass ratios of fully-loaded rack structures

Fully-loaded rack structure	
Modes	Mode Shapes and modal mass ratios
1	<p>Down-aisle 1st bending</p> <hr/> <p>Translation X-dir.: 88.92% Rotation Y-dir.: 7.03%</p> 
2	<p>Cross-aisle 1st bending</p> <hr/> <p>Translation Y-dir.: 74.25% Rotation X-dir.: 23.76%</p> 
3	<p>1st torsion</p> <hr/> <p>Rotation Z-dir.: 73.73%</p> 
5	<p>Cross-aisle 2nd bending</p> <hr/> <p>Translation Y-dir.: 13.08% Rotation X-dir.: 40.22%</p> 
6	<p>2nd torsion</p> <hr/> <p>Rotation Z-dir.: 20.09%</p> 
7	<p>Cross-aisle 3rd bending</p> <hr/> <p>Translation Y-dir.: 7.65% Rotation X-dir.: 18.17%</p> 
10	<p>3rd torsion</p> <hr/> <p>Rotation Z-dir.: 4.14%</p> 

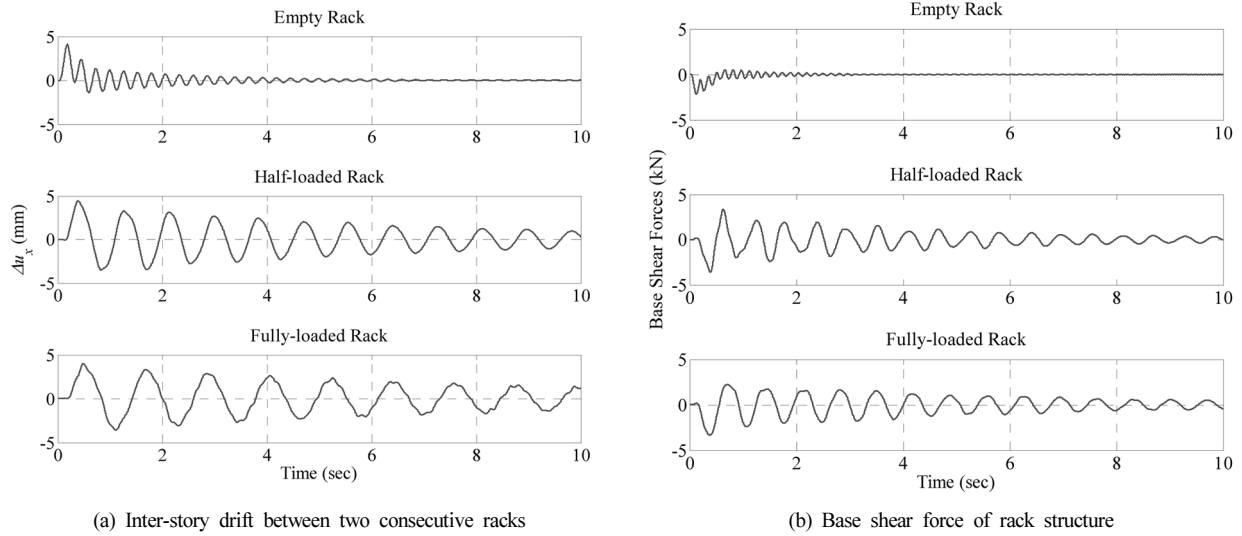


Fig. 5. Time histories of peak responses of empty, half-loaded and fully-loaded rack structures subjected to forklift impact loading.

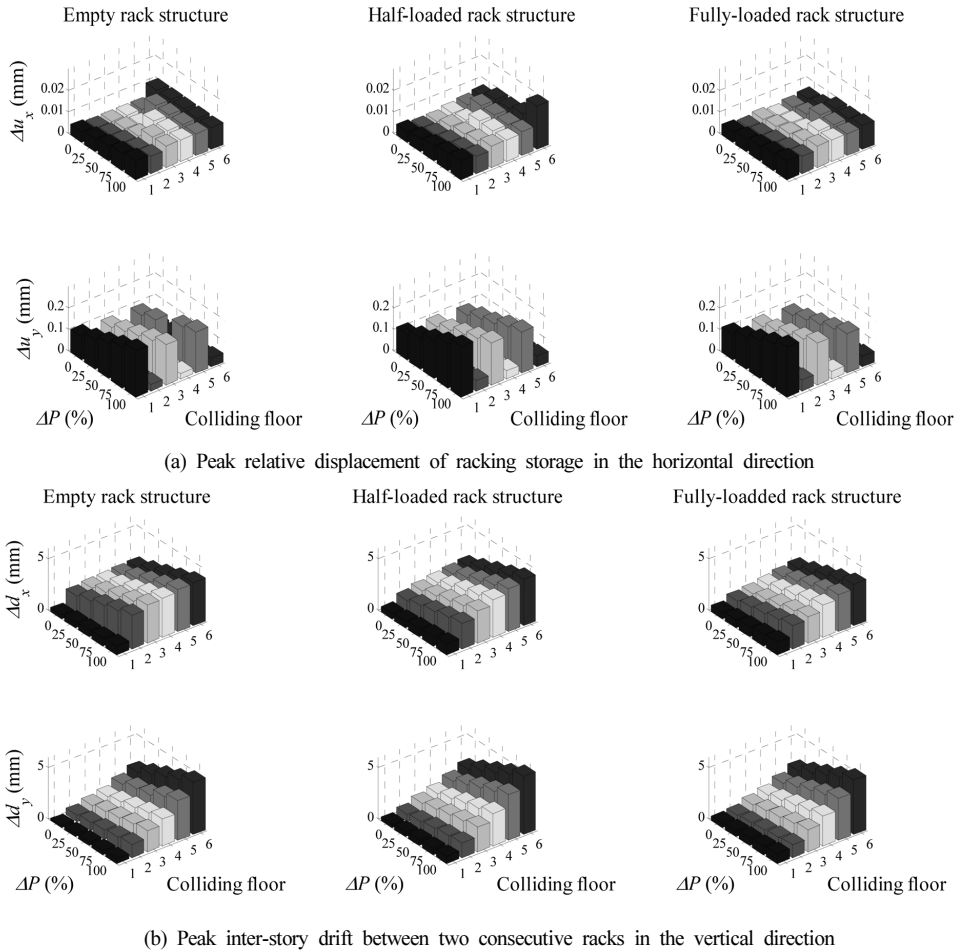
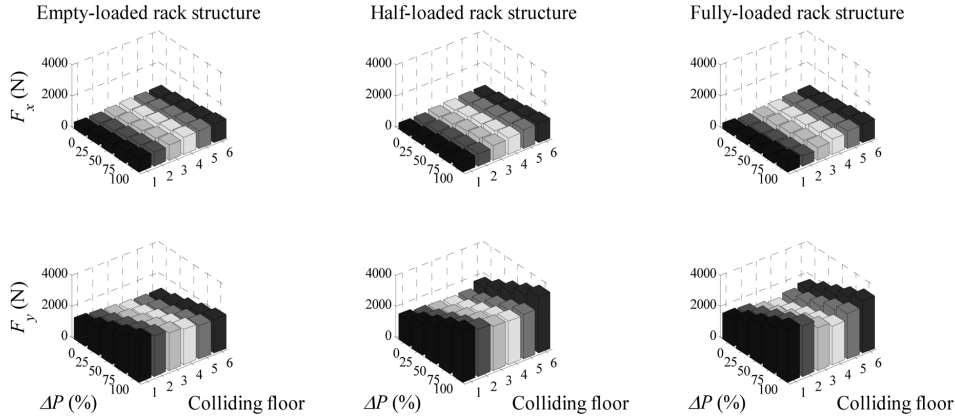


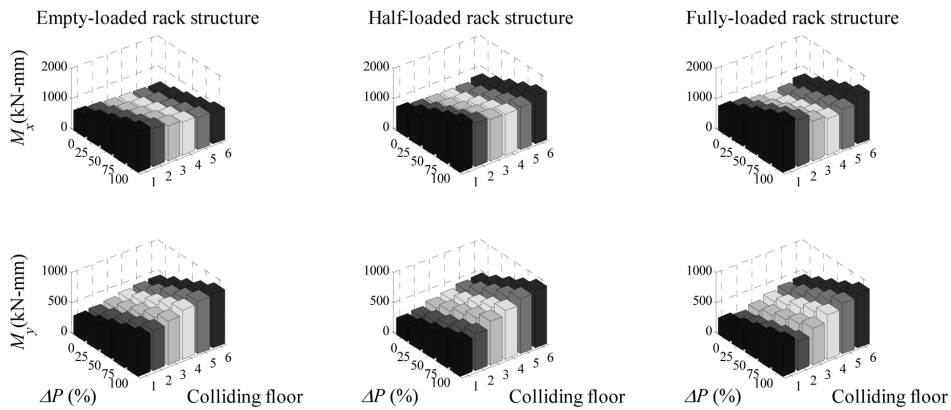
Fig. 6. Parametric results of loading distribution and colliding floor on the peak responses of three rack structures.

있으며, 진동 자체도 빠른 주파수로 이루어지고 있다. 한편, 보관물류가 있는 경우에는 전반적으로 평형상태를 기점으로 크게 진동하고 있으며 진동주기가 만재된 경우로

갈수록 증가하고 있음을 확연히 관측할 수 있다. 이러한 경향은 바닥 전단력에서도 유사하게 관측되고 있다. 최대 응답크기를 비교하면, 변위 응답에서는 모든 선반구조물



(c) Peak shear force at the base of the rack structure



(d) Peak bending moment at the base of the rack structure

Fig. 7. Parametric results of loading distribution and colliding floor on the peak responses of three rack structures.

에서 유사한 수준으로 최대값이 발생하고 있으나, 바닥 전단력은 반재 선반구조물에서 다소 큰 값이 발생하는 결과를 보였다. 이는 보관물류의 관성효과에 기인하는 것으로 판단된다. 다음으로는 지게차 충돌하중의 분포 및 크기와 보관물류분포에 따른 응답의 경향성을 살펴보았다.

4. 하중 및 보관물 분포에 따른 거동분석

매개변수로는 하중의 작용위치와 작용크기를 각각 1층~6층 및 0%~100%까지 증가시키는 총 30가지 경우를 고려하였다(Table 2 참조). 각 경우에 대한 최대 응답의 크기를 수직막대그래프로 Fig. 6과 Fig. 7에 비교·도시하였다. 먼저 주요 변위응답으로 선반의 낙하를 나타내는 선반 양단의 수평방향 상대변위(Δu_x , Δu_y)를 도시하였으며, 다음으로 수직부재의 파괴를 모사하는 층간 상대변위(Δd_x , Δd_y)를 나타내었다. 통로직각방향으로의 상대변위 응답(Δu_y)를 제외하고는 하중의 크기가 증가함에 따라 그리고 작용위치는 6층으로 갈수록 응답은 비례하여 증가하는 경향을 보인다. 통로직각방향으로의 수평상대변위(Δu_y)는 지게차가 1층에서 충돌할 때 가장 큰 응답을 보인다. 또한, 흡수 층에서 비교적 큰 응답을 보이며, 짝수

층에서는 거의 영향이 없음을 관측할 수 있다. 다음으로 바닥면에서의 전단력과 휨모멘트를 Fig. 7에 비교·도시하였다. 전단력과 모멘트는 변위응답과는 다소 상이한 경향을 보이지만, 전반적으로는 하중의 크기가 증가함에 따라 비례하는 경향은 동일하며 최대값이 1층 또는 6층에서 발생함으로써 유사한 결과를 보인다.

이상의 결과로부터 지게차 충돌에 따른 선반시설물의 거동특성을 살펴보았다. 이러한 결과로부터 지게차 충돌에 대하여 가장 critical scenario를 파악할 수 있었으며, 보다 유의미한 결과를 위해서는 충돌에 대한 파괴확률을 산정하는 신뢰성 해석연구가 필요할 것이라고 판단된다.

5. 결론

본 연구는 물류센터 내에 빈번하게 발생하는 안전사고의 하나로서 지게차 충돌에 대한 물류보관 선반구조물의 동적 거동특성을 분석하고 이로부터 선반구조물의 안전성에 가장 위협적인 충돌 시나리오를 파악하고자 하였다. 이를 위하여 실제 지게차의 충돌을 하중모델로 고려하였으며, 선반구조물을 유한요소모델로 모델링하였다. 또한, 다양한 하중시나리오를 모사하고자 하중의 크기 및 작용위치를 매

개변수로 고려하였으며, 빈번한 물류이동에 따른 선반구조물의 동적특성의 변화를 모사하고자 보관물류를 부가질량으로 모델링하였다. 먼저, 보관물류의 변화에 따른 선반구조물의 주파수특성을 살펴본 결과, 고유주기 또는 고유주파수가 최대 4.4배 정도 변화함을 확인할 수 있었으며, 그에 따른 모드변형형상도 분석함으로써 보관물류의 분포가 응답에 미치는 영향이 지대할 수 있음을 확인하였다. 다음으로, 하중 및 구조물의 변동에 따른 매개변수연구로부터 응답의 최대값을 평가한 결과, 하중의 크기는 최대응답에 비례하는 효과를 보인 반면 작용위치는 보관물류의 분포 및 대상 응답(변위 또는 바닥 전단력, 모멘트 등)에 따라 상이한 경향을 보였다. 그러나 전반적으로 1층 또는 6층에 작용하는 경우에 최대응답결과를 보임으로써 가장 위험한 충돌 시나리오를 확인할 수 있었다.

감사의 글: 이 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC)사업[GRRC환경2011-A02], 에너지저감에 따른 물류시설 및 설비의 안전성 및 신뢰성 연구의 일환으로 지원을 받았으며, 그 지원에 감사드립니다.

References

- 1) K. M. Bajoria, K. K. Sangle and R. S. Talicotti, "Modal Analysis of Cold-formed Pallet Rack Structures with Semi-rigid Connections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 66, pp. 428-441, 2010.
- 2) K. K. Sangle, K. M. Bajoria and R. S. Talicotti, "Stability and Dynamic Analysis of Cold-formed Storage Rack Structures with Semirigid Connections", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol. 11, No. 6, pp. 1059-1088, 2011.
- 3) C. Affolter, G. Piskoty, L. Wullschleger and B. Weisse, "Collapse of a High Storage Rack", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, pp. 1846-1855, 2009.
- 4) D. Koen, "Structural Capacity of Light Gauge Steel Storage Rack Uprights", Master Dissertation, School of Civil Engineering, The University of Sydney, Aug. 2008.
- 5) B. P. Gilbert and K. Jr. Rasmussen, "Determination of Accidental Forklift Truck Impact Forces on Drive-in Steel Rack Structures", *Engineering Structures*, Vol. 33, pp. 1403-1409, 2011.
- 6) B. P. Gilbert and K. Jr. Rasmussen, "Impact Tests and Parametric Impact Studies on Drive-in Steel Storage Racks", *Engineering Structures*, Vol. 33, pp. 1410-1422, 2011.
- 7) I. Rosin, L. Calado, J. Proenca, P. Carydis, H. Mouzakis, C. Castiglioni, J. C. Brescianini, A. Plumier, H. Degee, P. Negro and F. J. Molina, *Storage Racks in Seismic Areas*, Report EUR 23744 EN, European Commission, 2009.
- 8) N. M. Newmark, "A Method of Computation for Structural Dynamics", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 85, (EM3), pp. 67-94, 1959.