

마찰거동을 고려한 이중질량시스템의 지진응답해석

박관순¹ · 옥승용² · 이지호^{3*}

¹동국대학교 건축공학부, ²한경대학교 토목안전환경공학과, ³동국대학교 건설환경공학과

Seismic Response Analysis of a Two-Mass Rack System Considering Frictional Behavior

Kwan-Soon Park¹, Seung-Yong Ok² and Jeeho Lee^{3*}

¹Division of Architectural Engineering, Dongguk University, Seoul, 04620, Korea

²Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University, Anseong, 17579, Korea

³Department of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University, Seoul, 04620, Korea

Abstract

This study proposes seismic response analysis technique of a two-mass rack system which sustains heavy loads with frictional behavioral characteristics. In order to deal with the nonlinear frictional characteristics of the mass on the rack system, the equations of motion of the system has been derived and the appropriate numerical simulation technique has been developed. In order to examine the seismic performance of the proposed system, we consider two parameters that are expected to have great influence on the seismic performance of the system. One is the ratio of the two masses of the load and the rack structure, and the other is the friction coefficient between rack and loaded mass. A number of numerical simulations of the seismic response of structures with various natural frequencies for both parameters have been performed in order to investigate the seismic safety of the rack structures. From the simulated results, it is observed that the maximum displacement of the rack system tends to decrease drastically as the natural frequency of the structure increases regardless of the two parameters of mass ratio and friction coefficient. The proposed study provides important reference data to guarantee the seismic safety of the rack system by considering nonlinear frictional behavior of the loaded mass.

Keywords : rack system, frictional behavior, nonlinear time history analysis, seismic response analysis

1. 서 론

최근 국내에서는 다양한 산업의 발달로 인하여 랙시스템 (rack system)의 사용이 증가하고 있다. 랙시스템은 컴퓨터 또는 통신 장비의 운영, 각종 기기 및 장비 등의 설치뿐만 아니라, 창고 내에서 여러 종류의 물류를 보관하는 용도 등으로 사용되며, 점차 고층화되어 가는 추세이다. 이러한 랙형태의 구조물은 일반적인 토목 또는 건축 구조물과는 달리, 구조물 자체는 경량 구조로 구성되는 반면에 구조물 중량보다 비교적 큰 중량을 갖는 물품 또는 기기 등을 적재하게 되는 경우가 대부분이라고 할 수 있다.

특히, 이러한 랙시스템은 중량의 수직 하중으로 인한 부재의 좌굴 현상이나 적재질량의 편재 또는 이동 중 충돌 등으로 인한 바닥 앵커리지의 이동 및 비틀림 현상이 발생할 수 있으며, 이로 인하여 갑작스런 붕괴가 초래되기도 한다(Affolter *et al.*, 2009). 따라서 이러한 중량의 보관물을 지지하는 랙시스템의 구조적 안정성 및 저항력을 정확하게 평가하기 위한 방법 및 정밀한 응답을 예측하기 위한 유한요소해석 기반의 연구가 수행된 바가 있다(Bajoria *et al.*, 2010; Koen, 2008; Sangle *et al.*, 2011). 국내 연구로는 선반형 구조물의 지게차 충돌에 대한 거동 분석 연구(Ok *et al.*, 2013) 및 신뢰성 해석 연구(Ok, 2013; Ok *et al.*, 2014)가 수행된 바가 있다.

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2260-3352; E-mail: jeeholee@dgu.edu
Received October 12 2018; Revised October 26 2018;
Accepted October 29 2018

©2018 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한편, 무거운 중량의 물품을 적재하고 있는 경량의 구조물이 수평 방향의 지진하중을 받게 될 때 적재질량들이 마찰로 인한 과도한 수평력을 구조물에 전달하게 되며, 이는 구조물의 수직 부재에 국부적 손상을 초래할 수 있을 뿐 아니라, 경우에 따라서는 전체 랙시스템의 파괴를 초래할 수도 있다. 또한, 적재 질량체들은 일반적으로 랙과의 고정장치 없이 그대로 놓여 있는 상태이므로 자체의 관성력으로 인하여 미끄러지는 거동을 보인다. 따라서, 비록 구조물의 파괴가 발생하지 않더라도 질량체의 낙하·비대 등으로 인하여 고가의 장비 또는 물품 등이 파괴된다든지 또는 인접한 구조체에 부딪힘으로써 2차 피해를 유발하는 안전사고가 발생할 수도 있게 된다(Yee *et al.*, 2003; Degee *et al.*, 2006; Degee *et al.*, 2007).

따라서, 이 연구에서는 랙시스템을 단순화하여 2개의 질량과 강성, 감쇠 및 마찰을 갖는 이중질량시스템(two-mass system)으로 모델링하였으며, 마찰 거동을 모사할 수 있는 비선형 동적 시간 이력 해석 알고리즘을 개발하였다. 그리고 지진이 발생할 경우, 랙시스템의 동적응답에 대한 매개 변수 연구를 수행하였다. 이는 지진에 의한 랙시스템의 피해를 평가하기 위한 기초연구로서의 의미를 갖는다. 여기서, 연구의 대상이 되는 랙시스템의 피해는 지진 시 발생하는 최대변위응답과 밀접한 연관이 있으므로 이에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 주요 인자로 구조체 질량에 대한 적재질량체의 질량비와 랙과 적재 질량체 사이의 마찰 계수를 고려하였으며, 질량비와 마찰계수를 변화시켜 가면서 최대변위응답의 경향성을 분석하였다.

2. 시스템모델링

2.1 운동방정식

연구에서 다루고자 하는 지진하중이 작용하는 이중질량 시스템의 역학적 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 구조물은 단자유도(SDOF: single degree of freedom)의 1층 구조물로 모델링하였으며, 적재되는 질량체(m_2)와 구조체(m_1)의 접촉면 사이에는 마찰력이 작용하는 것을 가정하였다. 즉, 지진과 같은 횡방향 진동에 의하여 정지 마찰력을 초과하는 순간 미끄러지는 거동을 보이게 된다. 마찰 거동을 고려한 전체 시스템의 운동방정식은 미끄러짐 발생 여부에 따라 Stick Phase와 Sliding Phase로 나뉘며, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

- Stick Phase (1a)
$$m_T \ddot{x}_1(t) + c_1 \dot{x}_1(t) + k_1 x(t) = -m_T \ddot{x}_g(t) - m_2 (\ddot{x}_2(t) - \ddot{x}_1(t))$$

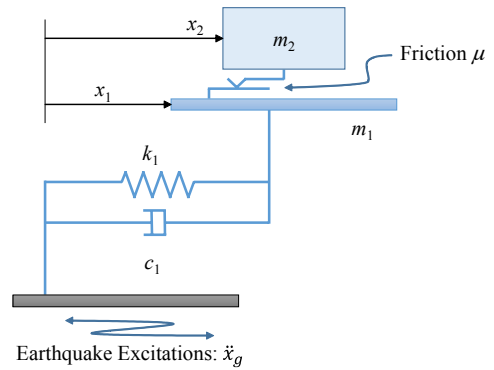


Fig. 1 Mechanical model of storage rack system with frictional features subject to earthquakes

- Sliding Phase

$$m_1 \ddot{x}_1(t) + c_1 \dot{x}_1(t) + k_1 x(t) = -m_1 \ddot{x}_g(t) + f_c(t) \quad (1b)$$

$$f_c(t) = -m_2 (\ddot{x}_2(t) + \ddot{x}_g(t)) \quad (1c)$$

여기서, $x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i$ 는 각각 하부 질량($i=1$)과 상부 질량($i=2$)의 지반에 대한 상대 변위, 속도 및 가속도이다. 식 (1a)는 두 질량이 함께 움직이는 Stick Phase에 대한 운동방정식이며, m_1, c_1, k_1 는 각각 하부질량, 감쇠계수, 강성도계수이다. m_2 는 상부적재질량이며, $m_T = m_1 + m_2$ 는 두 질량체가 함께 움직이므로 두 질량의 합이 된다. 식 (1b), (1c)는 상부질량체가 미끄러지는 Sliding Phase에 대한 운동방정식으로, f_c 는 선반과 물품 사이의 마찰력이다. 각 질량별 독립적인 운동 방정식으로 구성되며, 식 (1b)은 랙 구조물의 운동을 나타내며 식 (1c)는 상부질량체의 미끄러지는 운동을 나타낸다. 시간이력 해석에서는 각 시점에서 식 (1)의 운동방정식을 선택적으로 적용하여야 하므로, 해석 시간영역에서 상부질량의 운동이 Stick Phase인지 Sliding Phase인지를 판별하여야 한다. 이를 판별하기 위한 조건식은 마찰력의 포락선식, $|f_d| \leq 0$ 으로부터 파생된 식 (2)로 표현될 수 있다.

- Stick Phase: $|m_2 (\ddot{x}_2(t) + \ddot{x}_g(t))| \leq \mu m_2 g \quad (2a)$

- Sliding Phase: $|m_2 (\ddot{x}_2(t) + \ddot{x}_g(t))| \geq \mu m_2 g \quad (2b)$

여기서, μ 는 마찰계수, g 는 중력가속도이다.

2.2 해석알고리즘

주어진 운동방정식의 수치해석을 위하여: 1) 현재 Phase를 결정하기 위한 Predictor-Corrector법과 2) 수치적분 기법으로 Newmark- β 방법(Chopra, 1995)을 사용하였다. 우선, 수치

해석알고리즘을 적용하기 위하여 다음과 같이 두 질량체 사이의 상대 변위를 정의한다.

$$u_2(t) \equiv x_2(t) - x_1(t) \quad (3)$$

식 (1)과 (2)로 정의된 운동방정식을 기반으로 이산화된 각 시간영역을 전진하여 현재 시각 t_{n+1} 에서 물품과 선반의 위치, 속도, 가속도를 계산하는 시간이력해석 알고리즘을 다음과 같은 4개 STEP으로 구현하였다.

STEP 1) 현 시간영역 $[t_{n+1}, t_n]$ 에서 물품과 선반이 일체화 되어 운동하는 Stick Phase로 예상하여 두 질량체 사이의 상대 변위의 변화, $\Delta u_2 \equiv u_2(t_{n+1}) - u_2(t_n) = 0$ 으로 가정하고 식 (1a)를 Newmark- β 방법으로 수치 적분한다. 이를 통하여 현재 하부질량의 변위($x_1(t_{n+1})$), 속도($\dot{x}_1(t_{n+1})$), 가속도($\ddot{x}_1(t_{n+1})$)를 계산한다.

STEP 2) 두 질량체 사이의 요구 마찰력이 최대 마찰력을 초과하는지 여부를 확인한다. 즉, 식 (2a)를 만족하는 경우, 현재 시간영역이 Stick Phase라는 예상이 맞는 것으로 판정하고 다음 시각으로 전진하여 STEP 1 과정을 계산한다. 식 (2a)를 만족하지 못하는 경우 현재 시간영역이 Sliding Phase가 되며 다음 STEP을 계산한다.

STEP 3) Sliding Phase에서 $\Delta u_2 > 0$ 조건을 가정하여 아래 식을 계산한다.

$$m_1 \ddot{x}_1(t) + c_1 \dot{x}_1(t) + k_1 x(t) = -m_1 \ddot{x}_g(t) + \text{sgn}(\Delta u_2) \mu m_2 g \quad (4a)$$

$$m_2 (\ddot{x}_2(t) + \ddot{x}_g(t)) = -\text{sgn}(\Delta u_2) \mu m_2 g \quad (4b)$$

계산된 두 질량체의 위치, 속도, 가속도 결과로부터 식 (3)을 계산하여 $\Delta u_2 > 0$ 만족되면 다음 시각으로 전진하여 STEP 1 과정을 계산한다.

STEP 4) Sliding Phase에서 $\Delta u_2 < 0$ 조건을 가정하여 식 (4)를 계산하고 다음 시각으로 전진하여 STEP 1 과정을 계산한다.

3. 지진응답해석

지진 하중에 대한 랙시스템의 응답 특성을 알아보기 위하여 시간이력해석을 수행하고 응답을 분석하였다. 예제로 사용된

Table 1 Dynamic properties of the rack system

Rack mass m_1	200kg
Damping ratio ζ	1.0%
Natural frequency f_n	0.5~11.3Hz
Upper mass m_2	200kg, 600kg, 1400kg, 2000kg
Friction coefficient μ	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9

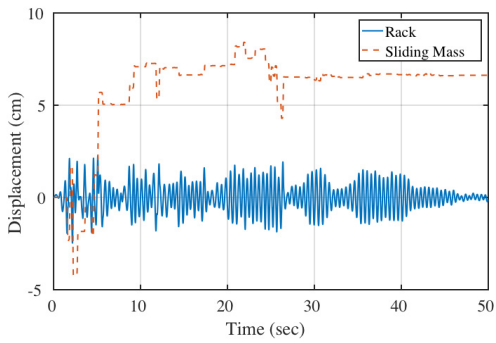
구조물의 물성을 포함한 특성값은 Table 1에 나타내었다.

지진응답해석을 위한 지반의 입력 가속도는 실제 계측된 역사 지진인 El Centro 지진(1940), Northridge 지진(1994) 및 Kobe 지진(1995)을 사용하였으며, 최대가속도(PGA: peak ground acceleration)를 0.4g로 스케일링하여 정규화하였다.

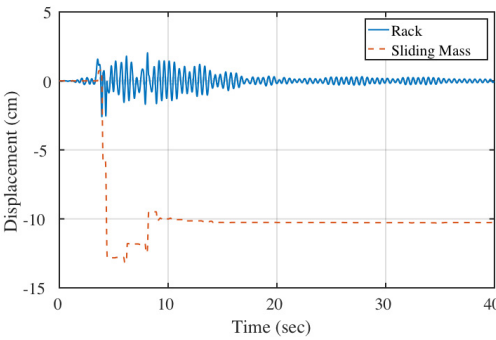
구조물의 다양한 주파수 특성에 따른 거동 특성을 살펴보기 위하여 하부질량은 200kg으로 고정하고, 강성을 변화시켜 0.5~11.3Hz 범위의 1차 고유 진동수를 갖는 총 500개의 경우를 고려하였다. 상부의 적재질량은 100~2,000kg의 범위 내에서 총 20개 케이스를 고려하였으나, 지면 관계상 질량비 4.0에 대한 시간이력해석 결과를 Fig. 2에 도시하고 질량비 (r_{mass})에 대한 영향성을 살펴보기 위한 매개 변수 연구의 결과는 200kg($r_{\text{mass}}=1.0$), 600kg($r_{\text{mass}}=3.0$), 1400kg($r_{\text{mass}}=7.0$), 2000kg($r_{\text{mas}}=10.0$)의 4가지 경우만을 Fig. 3에 수록하였다. 또한, 마찰 계수도 지면 관계 상 0.2인 경우 Fig. 2에 도시하였으며, 이후 매개 변수 연구의 결과는 Fig. 4에 0.3, 0.5, 0.7, 0.9의 4가지 경우의 결과를 제시하였다.

Fig. 2는 구조물의 강성이 175kN/m(고유 진동수 4.71Hz), 상부의 질량이 800kg(질량비 4.0), 마찰 계수가 0.2일 때, El Centro 지진 및 Northridge 지진에 대하여 수치 모사를 수행하여 얻은 시간이력 변위응답을 나타낸다. 여기서, 실선으로 표시된 하부 질량에 대한 변위는 지반으로부터의 상대 변위를 의미하며, 점선으로 표시된 상부 질량 변위는 미끄러진 거리, 즉, 초기 위치에서의 지반에 대한 상부 질량의 상대 변위를 의미한다.

Fig. 2(a)의 El Centro 지진의 경우, 하부 구조는 지진파가 전달됨에 따라 최대 3cm이하의 진폭을 가지고 진동하고 있으며, 감쇠의 영향으로 서서히 진폭이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 반면, 상부 질량은 약 1.5초 후에 미끄러지기 시작하여 음의 방향으로 치우치다가 약 5초 후에는 반대 방향으로 7cm 정도 움직였다. 이후로는 양 또는 음으로 방향을 바꾸며 미끄러지기를 반복하였으며, 26초 무렵부터는 거의 정지한 채로 움직이지 않았다. 지진이 끝날 무렵에는 원래 위치인 영점으로 돌아오지 못한 채, 양의 방향으로 약 7cm 정도의 미끄러짐이 남아 있는 상태가 되었다. 반면, 하부 질량의 경우는 진동 시작 이후로 진동 변위가 어느 한쪽으로 편향되거나 치우치지 않고 영점을 유지함을 알 수 있다. Fig. 2(b)의 Northridge 지진의 경우에도 지진이 크게



(a) El centro earthquake



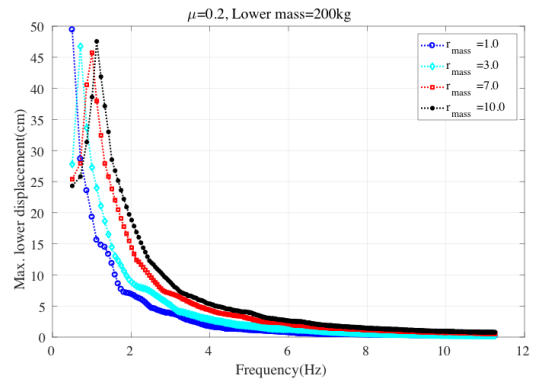
(b) Northridge earthquake

Fig. 2 Time history curves of rack displacements coupled with friction

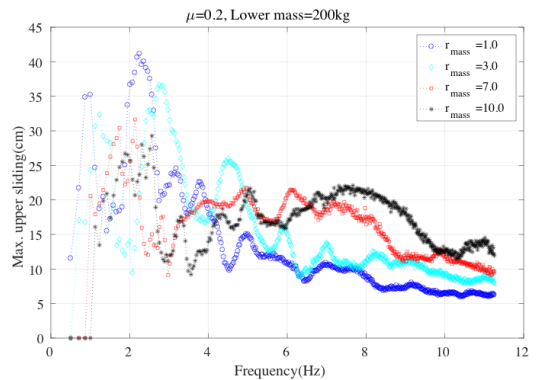
작용하는 5~10초 구간에서 미끄러지는 거동을 보이다가 이후의 여진 구간에서는 상부질량이 랙구조물에 고착되는 Stick Phase로 진동이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 실제 현상과도 부합하는 결과로서 수치해석을 통하여 마찰 시스템의 응답 특성을 적절히 모사한 것으로 판단된다.

Fig. 3은 구조물의 고유 진동수와 상부 보관 물류 질량의 변화에 따른 응답 특성을 알아보기 위하여 고유 진동수를 0.5Hz ~ 11.3Hz 사이로 변화시켜 가면서 최대 변위응답을 도신한 결과이다. 여기서, y 축에 표시된 최대 변위응답은 0.4g로 스케일링된 El Centro 지진, Northridge 지진 및 Kobe 지진 등 서로 다른 주파수 성분을 가지는 3가지 경우의 역사 지진에 대하여 각각 수치 모사를 실시하여 얻은 시간이력 변위응답들 중에서의 최대값을 의미한다. 이는 수치모사에서 고려된 3개 지진에 대한 변위응답스펙트럼이라는 의미를 갖는다고 할 수 있다. 마찰 계수는 0.2를 적용하였다.

Fig. 3(a)를 살펴보면, 랙구조물의 최대 변위는 상부질량에 따라 다소 변화를 보이지만 대략적으로 고유 주파수가 1Hz 근방의 저진동수 영역일 때 가장 크게 증폭되며 이 경우 최대 변위 값은 질량비에 큰 영향을 받지 않으며 유사한 수준으로 발생함을 알 수 있다. 반면, 2Hz 이후 고유 진동수가 커질수록 따라 최대 응답은 크게 감소하며, 하부질량에 대한 상부질량의 질량비가 클수록 랙구조물의 응답은 커지는 것으로 나타났다. 따라서 비록



(a) Maximum displacement of rack structure



(b) Maximum sliding displacement of moving storage goods

Fig. 3 Comparative results of maximum displacement responses with respect to mass ratio

질량비에 따라 차이는 가지지만 최대 변위 크기의 측면에서 랙구조물을 고주파수 영역의 고유 진동수를 가지도록 설계하는 것이 내진 성능에는 유리할 것으로 판단된다.

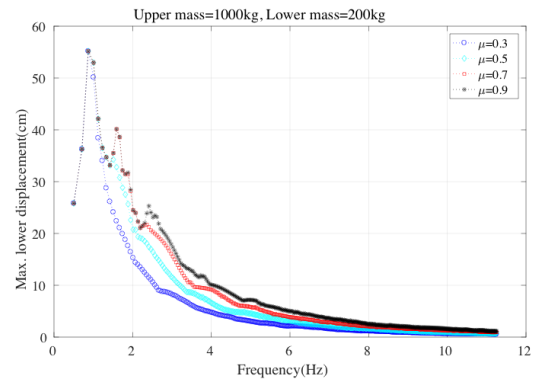
한편, 랙구조물이 진동수 및 질량비의 변화에 대하여 명확한 경향을 보이는 데 비하여, Fig. 3(b)를 살펴보면, 상부의 적재 질량체의 최대 이동 거리는 다소 복잡한 경향을 보인다. 전반적으로는 랙구조물의 고유 진동수가 커짐에 따라서 최대 변위 응답이 감소하는 경향이 관측되나, 단조 감소 경향을 보이지는 않으며 고유 진동수의 변화에 따라 민감하게 변동하는 것으로 나타났다. 즉, 구조물의 고유 진동수와 3가지 지진 하중의 가진 주파수 간 상호 작용에 따라 최대 변위응답이 민감하게 변화하는 결과를 보인다. 비록 최대 변위응답이 질량비의 변화에 다소 복잡한 경향을 나타내기는 하지만 상부적재질량의 최대 변위는 고유 진동수 2Hz 근방에서 가장 크게 발생하며, 그 크기에 있어서도 질량비에 반비례하는 결과를 보인다. 7Hz 이후 영역에서는 반대로 질량비에 비례하여 최대 변위응답이 발생하는 것으로 나타났으며, 3~7Hz 사이에서는 최대 변위응답과 질량비의 관계가 전도되는 일종의 천이(transition) 구간으로 보인다. 또한, 전체 주파수 영역을 전반적으로 살펴보면, 질량비가 클수록 상대적으로 하부 랙구조물의 고유 진동수 변화에

대한 응답의 변동성이 작은 것으로 판단된다. 즉, 고유 진동수의 변화(0.5~11.3Hz)에 대하여 최대 변위응답의 변화 폭이 질량비 1.0(파란 색)에 비해 질량비 10.0(검은 색)에서 더 작게 발생하였다. 이상의 결과로부터, 랙구조물의 고유 진동수가 1~2Hz의 저주파 영역으로 설계된다면 최대 변위가 매우 큰 수준으로 발생하면서 질량비에 무관하게 유사한 수준으로 발생하는 반면, 7Hz 이상의 고주파 영역으로 설계된다면 질량비가 증가할수록 큰 응답이 발생할 수 있으나 그 크기에 있어서는 저주파 영역에서 발생하는 최대 응답보다는 작은 수준의 응답을 보일 것으로 예측된다.

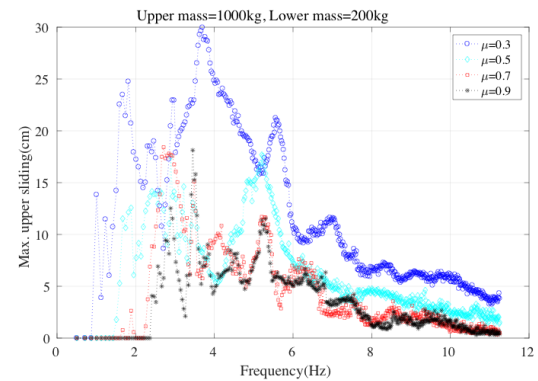
다음으로, Fig. 4에는 고유 진동수(0.5Hz~11.3Hz)와 마찰 계수(0.3~0.9)의 변화에 따른 3개 지진에 의한 최대 응답을 비교하여 도시하였다. 상부 질량은 1,000kg을 적용하여 질량비 5.0인 경우에 해당한다. Fig. 4(a)에서 랙구조물의 고유 진동수에 대한 최대 응답은 Fig. 3(a)와 유사하게 1Hz 근방에서 가장 크게 발생하고 있으며 고주파 영역으로 갈수록 최대 응답이 급격하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한, 1Hz 근방에서의 최대 응답은 마찰 계수 변화에 큰 영향을 받지 않고 유사한 수준으로 발생하고 있으나, 고주파 영역으로 갈수록 마찰 계수에 비례하여 랙구조물의 최대 변위 응답이 증가하는 경향을 뚜렷이 보이고 있다. 이는 상부 질량의 마찰력이 증가함으로써 Stick Phase가 보다 빈번하게 발생하고 이로부터 두 질량이 함께 움직임으로써 지진 관성력이 증가하기 때문이라고 판단된다.

한편, Fig. 4(b)는 상부 질량의 최대 변위응답 결과를 도시하고 있다. Fig. 3(b)에서 마찰 계수가 0.2인 경우에는 상부 질량의 미끄러지는 변위가 2Hz 근방에서 가장 크게 발생한 반면, Fig. 4(b)에서 마찰 계수 0.3~0.9 이상의 경우에는 3~5Hz 영역에서 최대 변위가 발생함으로써 주파수 응답이 고주파 영역으로 약간 편이되는 현상을 관측할 수 있다. 또한, 마찰 계수가 증가할수록 앞서 언급한 대로 Sliding Phase가 보다 덜 발생함으로써 미끄러지는 변위 응답이 전반적으로 감소하는 결과를 보인다.

Fig. 3과 Fig 4와 같이, 제시하는 마찰 시스템의 최대 지진 응답을 평가한 결과는 향후 랙시스템의 내진 설계 및 내진 안전성 확보를 위한 적절한 적재질량 설정 등에 활용될 수 있다. 주어진 시스템의 경우 과도한 하부 구조의 변위가 발생하면, 시스템의 바닥이 전도(overturning)되거나 수직 부재의 전단 파괴(shear failure) 등을 초래할 수 있다. 또한 상부 질량의 미끄러짐이 지나치면 질량체의 낙하로 인하여 물품의 파손뿐만 아니라 이로 인한 2차적인 피해 등을 초래할 수도 있다. 따라서 주어진 한계상태에 대하여 제작, 설치 등의 비용을 고려하여 최적의 시스템을 구현하는데 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 예를 들어 하부 질량이 200kg인 선반 구조물의 최대 허용 변위



(a) Maximum displacement of rack structure



(b) Maximum sliding displacement of moving storage goods

Fig. 4 Comparative results of maximum displacement responses with respect to friction coefficient

값이 15cm, 상부질량의 적재범위가 300~600kg, 허용 미끄러짐이 20cm 라고 하면, 고유 진동수는 5Hz보다 크며, 마찰 계수는 최소 0.2보다 큰 시스템을 고려하여야 할 것이다. 만약 마찰 계수를 증가시킬 수 있다면 고유 진동수의 범위를 조절할 수 있는 여유가 더욱 생긴다고 할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 이중질량으로 모델링된 랙시스템의 지진 응답 해석을 수행하고 내진 성능에 영향을 미치는 랙구조물과 적재 질량의 질량비, 둘 사이의 마찰 계수에 대한 매개 변수 연구를 수행하였다. 지진 하중으로는 3개의 실제 발생한 역사 지진을 고려하였으며, 해당 지진들에 대하여 발생할 수 있는 최대 응답 결과로부터 유사 응답 스펙트럼의 경향성을 살펴보았다. 상부에 적재된 질량체의 미끄러짐 현상을 고려하기 위하여 비선형 마찰 모델을 이용하였으며, 이를 효과적으로 시뮬레이션하기 위하여 Predictor-Corrector법을 도입하고, 수치적분에서는 Newmark-β방법을 사용하였다. 수치해석 결과, 이중질량으로 모델링된 랙시스템의 변위 응답은 구조물의 고유 진동수가 커질수록 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 이로부터 랙시스템

구조물은 강성이 높은 고주파 영역의 고유 진동수를 갖도록 설계하는 것이 유리하다는 결과를 도출할 수 있었다. 또한, 고주파 영역에서, 랙시스템 구조물은 최대 변위응답이 질량비와 마찰 계수에 비례하는 결과를 확인할 수 있었으며, 상부적재 질량의 미끄러지는 이동 거리는 질량비에 비례하고 마찰 계수에 반비례하는 경향을 보임을 확인할 수 있었다. 이러한 결과들로부터 제시하는 방법은 랙시스템의 마찰과 미끄러짐 거동을 적절히 모사할 수 있으며, 실험 등의 검증을 거쳐 내진성능 평가를 위한 효율적 수치해석 기법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 매개 변수 연구로부터 제시된 결과들은 다양한 랙시스템에 있어서, 지진 안전도 평가를 통하여 내진 안전성을 확보할 수 있는 기초 설계 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 나아가 개발된 이중질량 마찰 시스템의 지진응답해석 알고리즘은 수평조인트로 분리되어 강진에서 수직으로 분리된 거동을 보일 수 있는 콘크리트 덩체 monolith의 동적 활동 (sliding) 안정성 분석에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문에서 두 번째 공동저자는 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원(2017R1D1A1B04031418)을 받아 연구를 수행하였습니다. 이 논문에서 사용된 해석알고리즘 개발은 교신저자가 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2018R1D1A1B07051141)으로 이루어졌습니다.

References

Affolter, C., Piskoty, G., Wullschlegler, L., Weisse, B. (2009) Collapse of a High Storage Rack, *Eng. Fail. Anal.*, 16, pp.1846~1855.
 Bajoria, K.M., Sangle, K.K., Talicotti, R.S. (2010) Modal Analysis of Cold-Formed Pallet Rack

Structures with Semi-Rigid Connections, *J. Constr. Steel Res.*, 66, pp.428~441.
 Chopra, A.K. (1995) Dynamics of Structures - Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Inc., NJ.
 Degee, H., Denoël, V. (2006) An Investigation on the Sliding of Pallets on Storage Racks subjected to Earthquake, In *Proc. 7th Nat. Congress on Theoretical & Applied Mechanics*, p.8.
 Degee, H., Denoël, V. (2007) Numerical Modelling of Storage Racks subjected to Earthquake, ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Crete, Greece, pp.13~16.
 Koen, D. (2008) Structural Capacity of Light Gauge Steel Storage Rack Uprights, Master Thesis, School of Civil Engineering, University of Sydney.
 Ok, S.-Y. (2013) Reliability Assessment and its Tendency Investigation of Rack Structure for Failure Modes under Uncertainties in Load and Model Parameters, *J. Korean Soc Saf.*, 28(7), pp.44~51.
 Ok, S.-Y., Kim, D.-S. (2014) System Reliability Analysis of Rack Storage Facilities, *J. Korean Soc Saf.*, 29(4), pp.116~122.
 Ok, S.-Y., Kwon, O.-Y., Paik, S.W. (2013) Behavioral Characteristics Investigation of Rack Structure Depending on Forklift Impact Scenarios and Storage Distribution, *J. Korean Soc Saf.*, 28(6), pp.49~56.
 Sangle, K.K., Bajoria, K.M., Talicotti, R.S. (2011) Stability and Dynamic Analysis of Cold-Formed Storage Rack Structures with Semirigid Connections, *Int. J. Struct. Stab. & Dyn.*, 11(6), pp.1059~1088.
 Yee, R.K., Chan, D.H. (2003) Structural Behavior of Storage Rack under Seismic Ground Motion, *Proc. 3rd Annual Disaster Resistant California Conf.*, pp.21~23, April 2003.

요 지

본 논문에서는 이중질량을 갖는 랙시스템의 마찰거동을 고려한 지진응답해석 기법에 관하여 연구하였다. 마찰 거동을 모사할 수 있는 비선형 동적 시간이력해석 알고리즘을 개발하였다. 이중질량체 간의 미끄러짐과 일체화거동은 비선형 마찰모델로서 고려하였으며, 이를 적절히 모사하기 위한 수치해석기법을 개발하였다. 개발된 알고리즘을 이용하여 랙시스템의 지진응답에 대한 매개변수연구를 수행하였다. 랙시스템의 피해에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 주요 인자로 랙구조체 질량에 대한 적재질량체의 질량비와 두 질량체 사이의 마찰 계수를 선정하고, 질량비와 마찰계수를 변화시켜 가면서 최대 변위응답의 경향성을 분석하였다. 수치 모사 결과로부터, 이중질량으로 모델링된 랙시스템의 변위응답은 구조물의 고유진동수가 커질수록 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 이 연구를 통하여 제시하는 방법은 랙시스템의 마찰거동을 미끄러지는 거동을 적절히 모사할 수 있으며, 이로부터 내진 성능평가를 위한 효율적 수치해석 기법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 랙시스템, 마찰거동, 비선형 시간이력해석, 지진응답해석