

내진천장시스템 개발을 위한 실험대형 2층 철골모멘트골조 진동대 실험

전수찬¹ · 이철호^{2*} · 배창준³

¹박사후연구원, 서울대학교, 건축학과, ²교수, 서울대학교, 건축학과, ³박사과정, 서울대학교, 건축학과

Development of Seismic Ceiling System Based on Shake Table Test of Full-Scale 2-Story Steel Moment Frame

Jun, Su Chan¹, Lee, Cheol Ho^{2*}, Bae, Chang Jun³

¹Postdoctoral Researcher, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

²Professor, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

³Graduate Student (Ph.D. Course), Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

Abstract - This study presents shake-table testing of ceiling systems installed on a full-scale 2-story steel moment frame, conducted to develop an effective seismic design method for large-area suspended ceiling systems and also evaluate the seismic demand on nonstructural elements. First, nonstructural seismic demand was evaluated based on the measured peak floor acceleration (PFA) of the test frame. Especially, the effects of structural nonlinearity on PFA were analyzed. Then, the seismic performance evaluation on a non-seismic ceiling specimen was conducted, where partial-height partitions, pipes, and fire sprinklers were installed to evaluate their interaction with the ceiling specimen. A braced ceiling system having grid reinforcements was newly proposed for this testing program. The grid reinforcement was introduced to increase the in-plane stiffness of ceiling grid systems, which was insufficient in conventional ceiling bracing systems. Test results showed that PFA reduction suggested by ASCE 7-22 to account for structural nonlinearity was shown to be larger than the experimental results for low-to-moderate ductility levels. The partition-attached non-seismic ceiling specimen showed inferior seismic performance compared to the bare ceiling specimen due to the highly adverse interaction effects between the partitions and ceiling specimen. A seismic strengthening method using lateral bracing combined with ceiling grid stiffening was shown to be very effective in improving the overall ceiling seismic performance.

Keywords - Nonstructural element, Shake table test, Steel moment frame, Suspended ceiling system, Seismic demand

1. 서론

건축물의 내진성능 확보에 비구조요소의 역할이 중요해지면서 비구조요소의 내진설계에 대한 관심이 증대되고 있다. 비구조요소는 구조물의 동적거동에 의해 증폭된 지반가속도의 영향을 받기 때문에 구조물의 손상을 발생시키지 않는 낮은 강도의 지진에서도 쉽게 파괴가 발생하는 특징이 있다.

건축물의 내진성능에 직접적으로 영향을 미치는 비구조요소는 중량간막이벽, 소화 배관, 스프링클러 시스템 등 인명안전을 위해 지진 후에도 반드시 기능해야 하는 다양한 요소가 포함되며, 천장시스템과 같이 건축물의 넓은 면적에 걸쳐 설치되는 비구조요소는 파괴시 인명안전뿐만 아니라 건축물의 기능마비를 야기하여 막대한 경제적 손실을 유발하기 때문에 내진성능에 대한 엄격한 평가와 효과적인 설계방법이 필요한 상황이다(Fig. 1 참고).

국내 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)^[1]에서는 천장시스템에 대해 ASCE 7-16^[2] 및 ASTM E580^[3]에 근거한 내진설계법을 제시하고 있으며, 천장시스템의 면적 및 설치되는 구조물의 내진설계범주에 따라 가장자리 이격, 내진클립, 또는 가새를 설치할 것을 요구하고 있다. 이는 천장의 주요 파괴원인인 벽체와의 충돌을 억제하기 위한 목적으로 제안된 것이다.

Note.-Discussion open until June 30, 2023. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 06, 2022; revised on November 02, 2022; approved on November 02, 2022.

Copyright © 2022 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-880-9061 Fax. +82-2-880-9061

E-mail. ccholee@snu.ac.kr



(a) 2011 Tohoku earthquake ($M_w = 9.0$) (b) 2016 Gyeongju earthquake ($M_w = 5.4$)

Fig. 1. Building functionality interruption caused by earthquake damage of suspended ceiling systems

천장시스템의 내진설계법 정립을 위해 다수의 선행연구에서 진동대 실험을 통해 비내진 및 내진천장에 대한 내진성능평가를 수행한 바 있다^{[4],[7]}. 하지만, 실험 규모의 한계로 인해 천장시스템의 내진성능에 영향을 미칠 수 있는 주요 비구조요소들 간의 상호작용을 고려하지 못한 한계가 있으며, 특히 대공간 천장시스템에 대해 요구되는 천장가새는 천장프레임의 낮은 면내강성으로 인해 천장의 내진성능에 제한적인 영향만을 미치는 한계가 있는 상황이다^[8]. 따라서, 효과적인 내진천장시스템 개발을 위해서는 먼저 천장시스템과 상호작용하여 내진성능에 영향을 미치는 비구조요소들을 고려한 종합적 실험이 수행될 필요가 있다. 또한, 가새천장의 한계를 보완할 수 있는 새로운 보강방법이 필요한 상황이며, 이를 설계하기 위해 천장에 작용하는 지진하중에 대한 분석이 선행될 필요가 있다.

비구조요소의 설계가속도의 특성을 이해하기 위해서는 지반-구조물-비구조요소 간의 상호작용에 대한 종합적인 분석이 필요하며, 다수의 선행연구에서 구조물 및 비구조요소의 주요 동특성이 가속도 증폭에 미치는 영향에 대한 연구를 수행한 바 있다^{[9],[11]}. 최근 개정된 ASCE 7-22^[12]는 기존에 지나치게 간략화된 비구조요소 설계식의 한계를 보완하기 위해 새로운 등가정적설계하중을 제안하였으며, 이는 구조물과 비구조요소의 연성도를 고려하여 비선형거동에 의한 가속도 저감효과를 반영할 수 있는 특징이 있다. 두 요소의 비선형거동은 설계하중을 감소시킴으로써 합리적인 내진설계를 가능하게 하는 장점이 있으나 동시에 설계하중을 지나치게 과소평가하게 될 우려도 있으므로 충분한 해석과 실험을 통해 검증하여 적용할 필요가 있다. 하지만 실대형 구조물에 대한 진동대 실험은 규모의 한계로 인해 제한적으로 진행되었으며^{[6],[13]} 이 중에서도 구조물의 동적거동이 비구조요소 설계하중에 미치는 영향을 분석한 연구는 극히 소수에 불과한 상황이다.

본 연구의 실대형 2층 철골모멘트골조 진동대 실험은

비구조요소 내진성능평가 및 내진기술개발을 위해 6개의 연구기관 및 13개의 산업체가 참여한 협동실험으로 진행되었으며, 각 연구기관이 담당하는 총 10종류의 비구조요소를 설치하여 실험을 수행하였다. 본 실험에서 저자는 비구조요소 설계지진하중 평가 및 내진천장시스템 개발에 대한 연구를 담당하였다. 본 연구에서는 실험프레임의 계층가속도를 기반으로 비구조요소 설계하중에 대한 평가를 수행하였으며, 특히 구조물의 비선형거동이 최대층응답가속도에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 2층에 설치된 비내진 천장시스템에 대한 내진성능평가를 수행하였으며, 대공간 천장시스템의 내진성능을 효과적으로 향상시킬 수 있는 면내강성 보강재를 활용한 가새천장시스템을 제안하여 성능을 평가하였다.

2. 비구조요소의 설계지진하중

본 장에서는 새로 개정된 ASCE 7-22의 비구조요소 설계식에 대한 분석을 수행하였다. 비구조요소의 설계지진력은 일반적으로 가장 실용적인 등가정적해석법을 통해 산정되며 기존의 ASCE 7-16 및 KDS 41 17 00은 구조물의 동특성과 비선형 거동을 고려하지 않았지만, ASCE 7-22에서는 주요 구조 동특성을 반영하여 설계지진하중을 산정할 수 있도록 설계식을 제안하고 있다.

ASCE 7-22에 의한 등가정적하중은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$F_p = 0.4S_{DS} \left(\frac{H_f}{R_\mu} \right) \left(\frac{C_{AR}}{R_{po}} \right) W_p I_p \quad (1)$$

여기서, F_p = 비구조요소 질량 중심에 작용하는 설계지진력, S_{DS} = 단주기 설계스펙트럼가속도, H_f = 구조물 높이에 따른 증가속도증폭계수, R_μ = 구조물의 연성도를 고려한 증가속도 감소 계수, C_{AR} = 비구조요소의 연성도를 고려한 비구조요소 공진 증폭계수, R_{po} = 비구조요소 초과강도계수, W_p = 비구조요소의 작동상태를 고려한 중량, I_p = 비구조요소의 중요도계수를 나타낸다.

식 (1)에서 볼 수 있듯이 구조물의 지층에 작용하는 지반가속도는 $0.4S_{DS}$ 로 지반조건을 고려한 구조물에 작용하는 설계지진력 즉, 유효지반최대가속도(EPGA, effective peak ground acceleration)을 나타낸다. 이때, 구조물의 동적거동에 의한 지반가속도의 층증폭은 다음과 같이 산정된다.

$$H_f = 1 + 2.5 \left(\frac{z}{h} \right) \quad (2)$$

$$H_f = 1 + a_1 \left(\frac{z}{h} \right) + a_2 \left(\frac{z}{h} \right)^{10} \quad (3)$$

여기서, z = 구조물의 밑면으로부터 비구조요소가 부착된 높이, h = 구조물의 밑면으로부터 지붕층의 평균높이, $a_1 = 1/T_a \leq 2.5$; $a_2 = [1 - (0.4/T_a)^2] > 0$, T_a = 구조물의 근사고유주기를 나타낸다.

식 (2)는 구조물 동적거동에 의한 층증폭을 선형으로 가정한 KDS 41 17 00의 등가정적설계식과 동일하며 구조물의 지붕층에서 EPGA의 3.5배까지 증폭되도록 설정되어있다. 이미 다수의 선행연구^{[9]-[11]}에서 언급되었듯이 식 (2)에서 가정한 층가속도의 선형증폭은 단주기(저층) 구조물에 대해 제한적으로 유효하며, 구조물의 주기가 길어질수록 증가하는 구조물의 고차모드 영향을 반영하지 못하는 한계가 있다. 고차모드의 영향이 증가할수록 층증폭은 수직에 가까운 프로필을 갖기 때문에 식 (2)는 장주기 구조물에 대해 설계지진력을 지나치게 보수적으로 평가하는 단점이 있다(Fig. 2 참고).

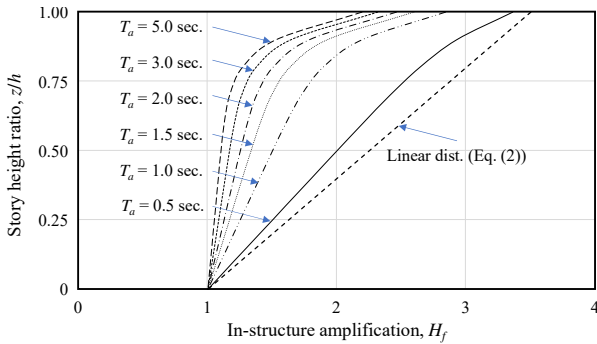


Fig. 2. In-structure amplification according to ASCE 7-22 depending on structural period (T_a)

구조물 동특성에 의한 층증폭 프로필의 변동을 반영하기 위해 ASCE 7-22에서는 구조물의 근사고유주기(T_a)를 기반으로 층증폭을 산정할 수 있도록 식 (3)을 제안하고 있으며 구조물의 주기가 증가할수록 층증폭 프로필이 수직에 가까워지는 프로필을 갖게 된다.

ASCE 7-22는 구조물의 비탄성거동으로 인한 층가속도의 감소 영향을 반영하기 위해 다음과 같이 산정되는 층가속도 감소계수(R_μ)를 제안하고 있다.

$$R_\mu = \left[\frac{1.1R}{I_e \Omega_0} \right]^{1/2} \geq 1.3 \quad (4)$$

여기서, R = 구조물 반응수정계수, I_e = 구조물 중요도계수, Ω_0 = 구조물 초과강도계수를 나타낸다.

식 (4)에서 볼 수 있듯이 R_μ 는 구조물의 반응수정계수와 초과강도계수의 함수로 정의되는 것을 확인할 수 있다. 이때, R 은 다음과 같이 정의할 수 있다^[13].

$$R = R_D \times R_o = R_D \times \left(\frac{\Omega_0}{1.1} \right) \quad (5)$$

여기서, R_D = 설계지진수준에서 구조물의 연성계수, R_o = 구조물 초과강도계수의 하한값, Ω_0 = 구조물 초과강도계수의 상한값을 나타낸다.

식 (4)는 식 (5)의 관계식과 구조물 중요도계수(I_e) 1.0을 사용하여 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$R_\mu = \left[\frac{1.1R}{I_e \Omega_0} \right]^{1/2} = [R_D]^{1/2} \approx [u_m/u_y]^{1/2} \quad (6)$$

여기서, u_m = 구조물 최상단의 최대변위, u_y = 구조물 최상단의 항복변위를 나타낸다.

즉, 식 (6)에서 볼 수 있듯이 구조물의 비선형거동에 의한 층가속도 감소는 구조물 최상단에서의 최대변위와 항복변위의 비로 정의되는 구조물 연성도(R_D)의 제곱근에 비례하는 것을 확인할 수 있다.

기존 설계기준에서 정의된 비구조요소 가속도증폭계수(a_p)는 ASCE 7-22에서 비구조요소의 연성능력을 반영할 수 있도록 새로 정의되었다(C_{AR} , component resonance ductility factor). 비구조요소가 보유한 연성도(μ_{comp})에 따른 C_{AR} 이 할당되었으며 탄성요소($\mu_{comp} = 1.00$)의 경우 4.0, 낮은 연성도를 갖는 요소($\mu_{comp} = 1.25$)는 2.80, 중간 연성도를 갖는 요소($\mu_{comp} = 1.50$)는 2.20, 높은 연성도를 갖는 요소($\mu_{comp} = 2.00$)에 대해서는 1.40으로 제안하고 있다.

비구조요소 초과강도계수(R_{po})는 비구조요소 자체와 정착부가 보유한 초과강도를 나타내는 계수로, 구조물 초과강도계수와 마찬가지로 설계지진하중을 저감시키는 역할을 한다.

3. 실험형 2층 철골모멘트골조의 진동대 실험

본 연구는 비구조요소의 내진성능평가 및 기술개발을 위해 다양한 연구기관 및 산업체가 참여한 연구단 프로젝트의 일환으로 진행되었으며, 실험형 2층 철골모멘트골조

진동대 실험은 Fig. 3와 같이 총 10종류의 비구조요소를 설치하여 진행하였다. 비구조요소 실험체는 석재 및 금속 외장재, 금속 및 경량 천장, 파티션, 이중마루, 배관, 수조, 스프링클러, 무정전전원장치로 구성되어 있다. 본 연구에서는 구조물 각 층에서 계측된 증가속도 기록을 바탕으로 구조물의 비선형거동이 최대층응답가속도(PFA, peak floor acceleration)에 미치는 영향에 대한 분석과 2층에 설치된 경량 천장시스템의 내진성능평가를 수행하였다.

3.1 실험형 2층 철골모멘트골조

진동대 실험은 2×1 베이를 갖는 철골모멘트골조를 활용하여 수행하였으며 골조의 단면은 4.5 m × 9.0 m, 총 높이는 6.75 m를 갖도록 제작하였다. 철골모멘트골조의 도면과 가속도 및 변위 계측계획은 Fig. 4에 정리하였다. 실험은 총 두 개의 진동대 위에 모멘트골조를 설치하여 동시가진하여 진행하였으며, 구조물의 장변 방향으로 단축가진하여 진동대 실험을 수행하였다.

White-noise 입력파를 통해 수행한 모멘트골조의 공진 탐색 실험 결과 비구조요소 실험체가 설치된 철골모멘트골조의 1차 및 2차 주기는 각각 0.67초, 0.22초로 나타났으며, 구조물 1차 모드 감쇠비는 임계감쇠비의 1.5 %로 계측되었다.

3.2 천장실험체 설계 및 제작

본 연구에서는 직접현수 비부착식 T-bar 천장에 대한 진동대 실험을 수행하였다. 실험은 두 번에 걸쳐 진행하였으며 각각 비내진 및 내진 천장에 대한 진동대 실험을 수행하였다.

비내진 천장실험체는 ASTM E580 내진설계범주 C의 요구조건에 따라 모든 가장자리에 15 mm의 이격을 설치하여 천장시스템이 자유롭게 거동할 수 있도록 제작하였다(Fig. 5(a) 참고). 본 실험은 부분높이 파티션, 배관 및 스프링클러를 함께 설치하여 실험을 수행하였다. Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이 두 가지 단면의 부분높이 파티션이 설

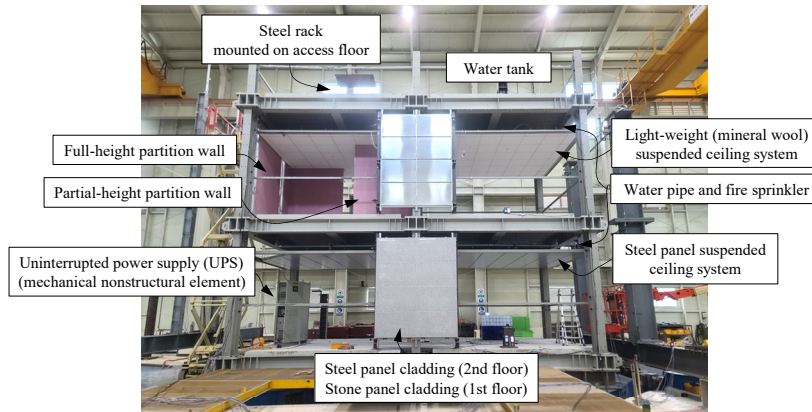


Fig. 3. Full-scale 2-story steel moment frame for shake table testing of comprehensive nonstructural elements

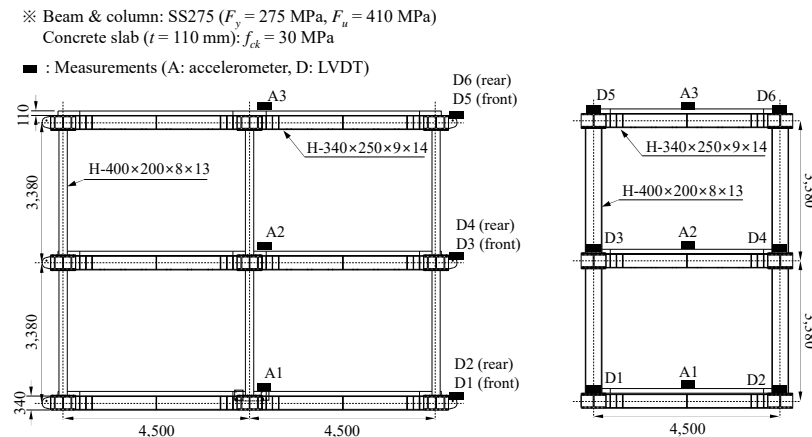


Fig. 4. Dimension of 2-story steel moment frame and location of measurements

치되었으며 시공관행에 따라 파티션의 상부는 스크류($d = 3.0 \text{ mm}$)를 통해 천장프레임에, 하부는 콘크리트 못($d = 3.5 \text{ mm}$)를 통해 슬래브에 고정시켰다. 배관 및 스프링클러는 천장 상부에 설치하였으며, 스프링클러는 Fig. 5(c)에서 볼 수 있듯이 천장을 통과하여 설치되었고 스프링클러 헤드는 유연한 호스(flexible sprinkler drop)를 통해 배관과 연결되도록 설치하였다.

내진 천장실험체는 ASTM E580 내진설계범주 D의 요구조건에 따라 가장자리에 20 mm의 이격을 도입하였고 가새를 설치하여 천장의 거동을 구속하였다. 본 연구에서는 선행연구^[8]에서 확인된 기존 가새천장시스템의 단점인 낮은 천장프레임 면내강성을 보완하고자 면내강성 보강재를 제작하여 가새와 함께 설치하였다(Fig. 6 참고). 면내강성 보강재는 등분포하중을 받는 캔틸레버로 이상

화하여 설계하였으며 면내강성 보강재는 설계하중에 대해 가장자리에 도입된 이격보다 더 적은 변위를 갖도록 충분한 강성을 갖도록 설계하였다(Fig. 6 참고). 본 연구에서 면내강성 보강재는 KDS 41 17 00의 등가정적하중에 대하여 설계하였으며, 국내에서 가장 불리한 지진환경(지진구역 I, 지반조건 S₄)을 고려하여 설정한 설계가속도와 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 면내강성 보강재의 분담면적을 고려한 질량에 대하여 설계하였다. $c-100 \times 20 \times 2$ (mm) 부재를 사용했으며 시공성을 위해 세 등분으로 제작하여 조립 설치하였다. 부재는 경량화를 위해 알루미늄 부재를 사용하였다.

내진 비구조요소 진동대 실험에서는 각 비구조요소 간의 상호작용을 최소화하기 위해 파티션, 배관 및 스프링클러에 개별 가새를 설치하여 실험을 진행하였다.

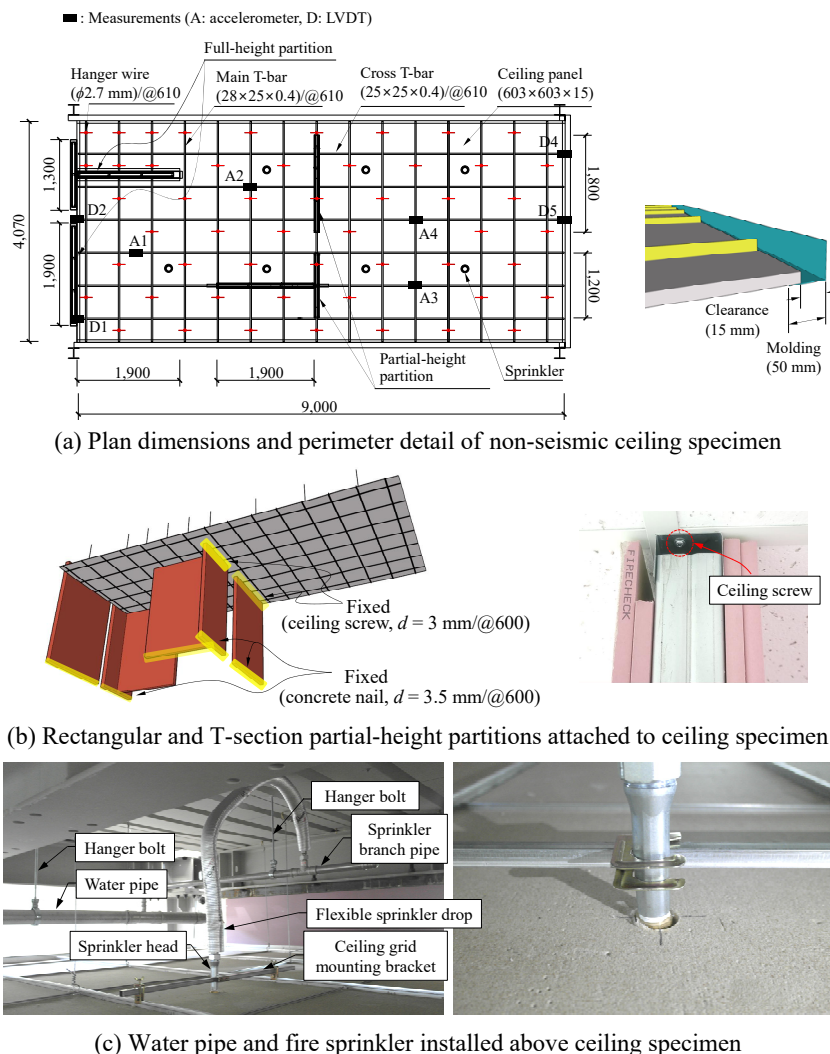


Fig. 5. Overall configuration of non-seismic ceiling specimen installed on the 2nd floor of test frame

3.3 입력 지진파

진동대 실험은 비구조요소 내진성능평가에 대표적으로 활용되는 ICC-AC156^[15] 프로토콜에 따라 수행하였다. AC156은 ASCE 7-16의 등가정적해석법에 기반을 둔 요구응답스펙트럼(RRS, required response spectrum)을 포락하는 인공지진파를 생성하여 진동대 실험을 수행하도록 제안하고 있다. Figs. 8-9과 같이 RRS는 대부분의 비구조요소의 고유진동수를 포락하는 대역(1.3 Hz - 8.3 Hz)의 주파수성분을 포함하고 있어 효과적으로 비구조요소의 내진성능을 평가할 수 있는 장점이 있다. RRS는 앞서 가새 및 면내강성 보강재 설계와 동일하게 KDS 41 17 00

에 기반하여 가장 불리한 국내 지진환경을 고려하여 설정하였으며, 실험은 RRS의 50%를 시작으로 최대 180%까지 증가시켜 진행하였다.

4. 진동대 실험을 통한 최대응답가속도 평가

4.1 철골모멘트골조의 탄성 응답

Fig. 10은 실험프레임의 탄성응답과 식 (2) - 식 (3)을 통해 산정한 응답가속도를 비교하였다. 실험결과는 최대응답가속도(PFA)를 입력가속도(PGA)로 정규화한 응

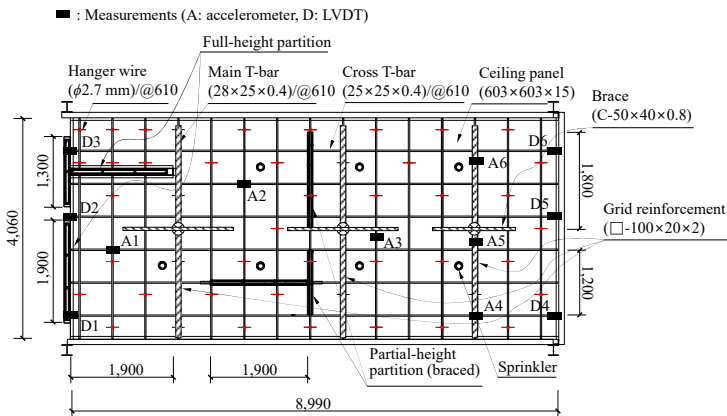
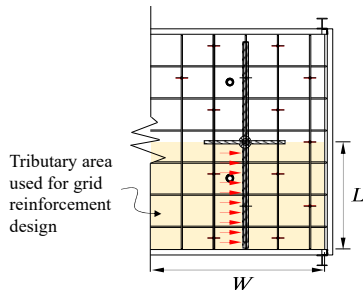
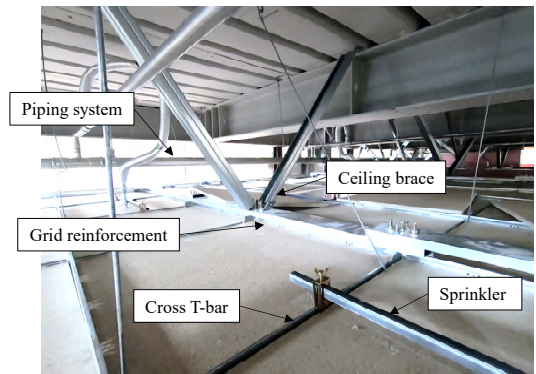


Fig. 6. Plan dimensions and detail of braced ceiling specimen installed with grid reinforcements



$$w = m \times F_p / W_p \times W$$

$$\delta = \frac{wL^4}{8EI} \leq \text{clearance (20 mm)}$$

where
 δ = maximum allowable deflection to avoid pounding
 w = uniform load act on grid reinforcement
 m = mass per unit ceiling area
 L = length of grid reinforcement
 W = width of tributary area
 F_p/W_p = peak component acceleration determined from Eq. (1)

Fig. 7. Cantilever beam model employed for grid reinforcement design

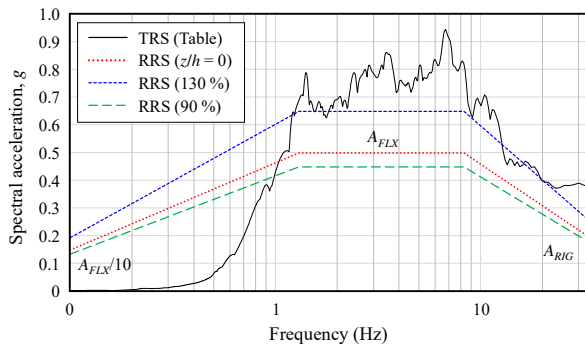


Fig. 8. Test response spectrum (TRS) enveloping AC156 RRS

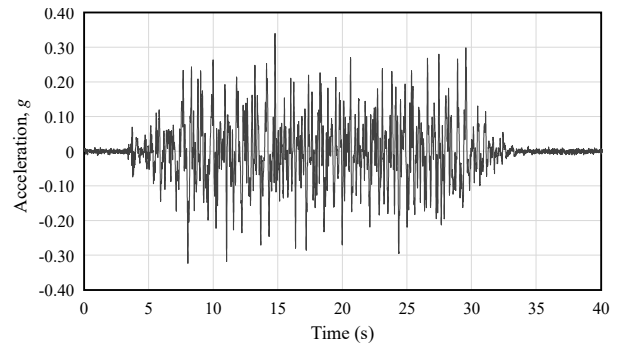


Fig. 9. Test input motion generated to match 100% RRS

증폭으로 나타났다. 식 (3)에 의한 증폭 프로파일은 실험 프레임의 계층 고유진동수를 적용하여 산정하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 실험프레임은 단주기 저층 구조물임에도 불구하고 선형에서 벗어난 증폭 프로파일을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 실험프레임의 2차 모드에 의한 영향으로 판단되며 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 ETABS^[16]를 통해 수행한 실험프레임에 대한 고유치 해석 결과 본 실험에 사용된 프레임은 1차 및 2차 모드에 대해 각각 약 94 %, 6 %의 유효질량을 갖는 것으로 확인되었다. 따라서, 최상층에서의 증응답가속도는 두 식에 의해 합리적으로 예측 가능하나 저층에서는 프레임 2차 모드 영향으로 증응답가속도가 전반적으로 과소평가되었으며, 특히 실험프레임은 식 (3)에 가정된 증폭 분포와 반대 곡률의 프로파일을 형성하면서 식 (3)에 의해 지나치게 과소평가되는 것을 확인하였다.

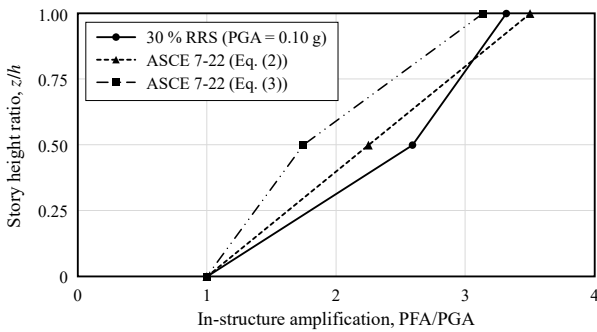
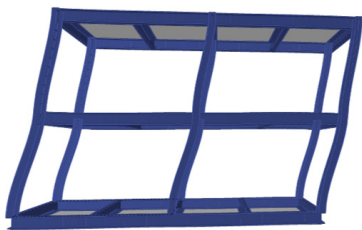
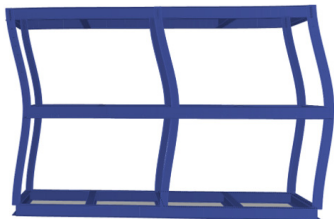


Fig. 10. Evaluation of elastic in-structure amplification (PFA/PGA) of test frame



(a) 1st-mode shape ($T_1 = 0.61$ second)



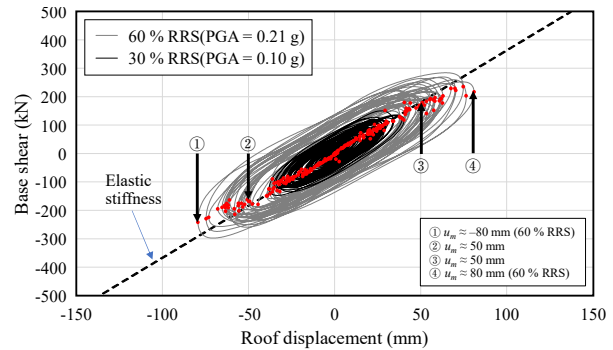
(b) 2nd-mode shape ($T_2 = 0.22$ second)

Fig. 11. Mode shapes and modal periods of 2-story test frame

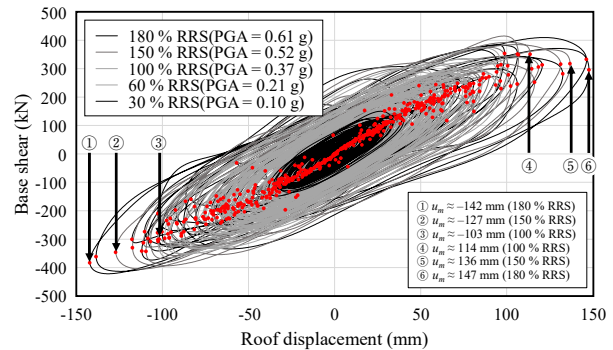
4.2 구조물 비선형거동이 최대증응답가속도에 미치는 영향

본 장에서는 실험프레임의 비선형거동이 최대증응답가속도에 미치는 영향에 대한 분석을 수행하였다. 앞서 언급되었듯이 ASCE 7-22에서는 구조물 비선형거동-증응답가속도 감소의 관계를 구조물 연성도($R_D = u_{max}/u_y$)를 통해 정의하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 구조물 비선형거동이 증응답가속도에 미치는 영향을 실험을 통해 계측된 R_D 를 기반으로 평가하였다.

Fig. 12는 진동대 실험을 통해 계측한 실험프레임의 밑면 전단력에 대한 최상단 변위 이력을 보여주고 있으며, 프레임의 항복(u_y) 및 최대변위(u_{max}) 계측을 위해 모든 사이클에서의 최대변위를 중첩하여 도시하였다. Fig. 12(a)에서 볼 수 있듯이 프레임은 30 % RRS(PGA = 0.10 g)에서 탄성거동하였으며, 60 % RRS(PGA = 0.21 g) 수준에서 항복하며 ($u_y = 50$ mm) 비선형거동을 하였다. 최대 입력수준인 180 % RRS(PGA = 0.61 g)에서 약 147 mm의 최상층 변위가 계측되었으며 실험프레임에 최대 2.94의 구조물 연성도가 발현된 것을 확인하였다.



(a) Test frame roof yield displacement measured at 60 % RRS



(b) Maximum roof displacement measured during shake table tests

Fig. 12. Determination of structure ductility (R_D) through measured roof yield and maximum displacement

Fig. 13은 구조물의 비선형거동에 의한 증가속도의 감소를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 층증폭은 60 % RRS 수준에서 구조물의 비선형거동에 의해 감소하는 것을 확인할 수 있다. 실험 초기 2층 및 최상층에서 각각 2.59배, 3.32배 증폭하던 증가속도는 비선형 정도가 가장 큰 180 % RRS에서는 각각 1.54배, 1.63배 수준으로 감소하였다.

Fig. 14은 구조물 연성도(R_D)와 층증폭의 관계를 도시한 결과이다. 전반적으로 구조물의 비선형거동에 의한 층증폭 감소는 최상층에서 두드러지게 발생하였으며, 각 층간의 층증폭 감소량의 차이는 프레임 각 층에서의 연성도가 동일하게 발현되지 않았기 때문에 발생한 것으로 판단된다. ASCE 7-22의 식 (6)은 비선형거동에 의한 층증폭감소를 낮은 구조물 연성도 수준($1.0 \leq R_D \leq 2.0$)에서는 다소 과대평가하는 경향이 있으며 특히 층증폭의 감소가 상대적으로 적게 발생한 2층에서는 층증폭감소를 지나치게 과대평가하는 것을 확인하였다. 구조물이 중간 수준의 연성도($R_D = 2.94$) 발현시 모든 층에서의 층증폭감소가 ASCE 7-22에 의해 합리적인 수준으로 예측되는 것이 확인되었으며, 이때 2층 및 최상층의 층증폭은 탄성대비 각각 41 %, 51 % 수준으로 감소하였다.

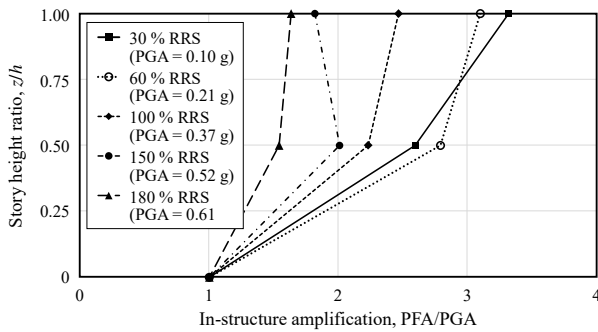


Fig. 13. In-structure amplification decreased by structural nonlinearity

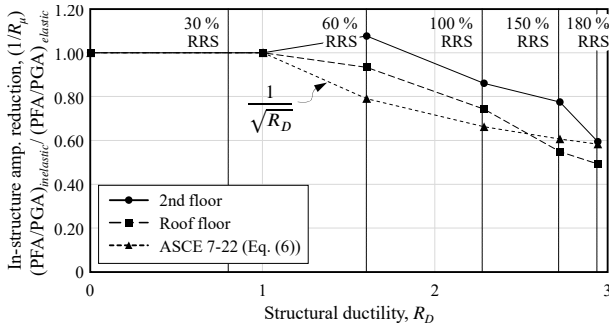


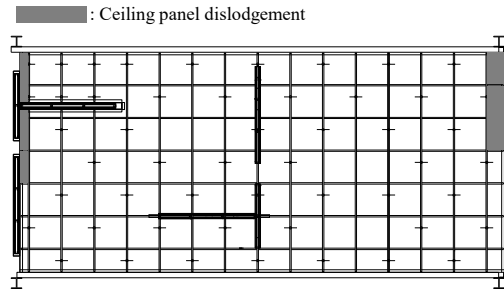
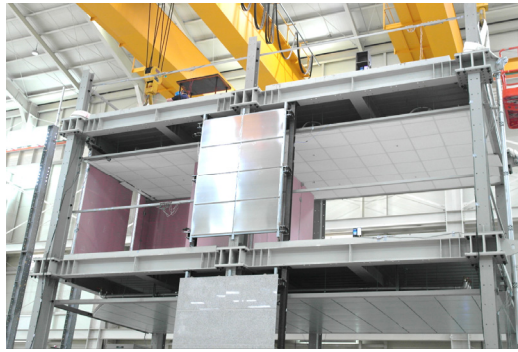
Fig. 14. Comparison of measured and ASCE 7-22 in-structure amplification reduction depending on R_D level

5. 천장시스템의 내진성능평가

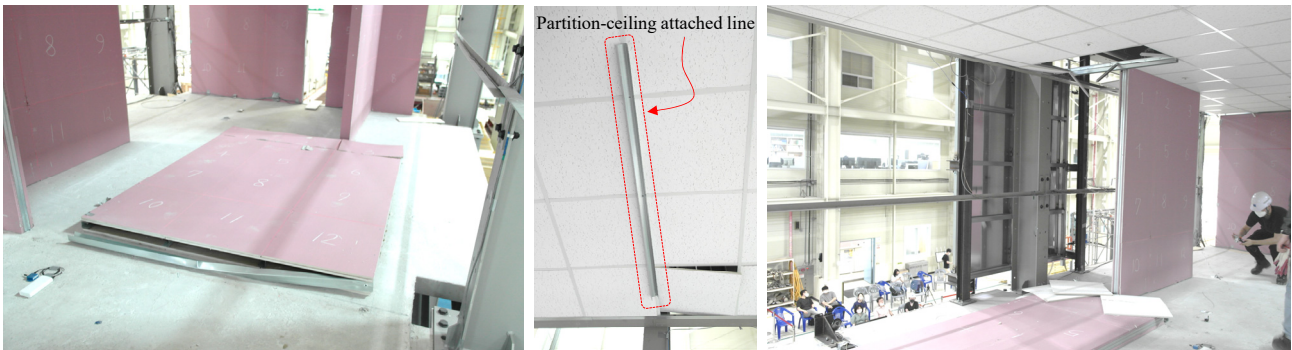
본 장에서는 실험프레임 2층에 설치한 내진 및 비내진 천장시스템의 실험결과에 관하여 기술하였다.

Fig. 15은 비내진 천장시스템의 실험결과를 보여준다. 30 % RRS(PFA = 0.36 g)에서 가장자리 천장패널이 탈락하기 시작하였으며 50 % 정도의 패널이 탈락하였다. 이는 주로 일자형 부분높이 칸막벽이(Fig. 15(a) 참고)가 설치된 선상에서 발생하였으며 T형 파티션과 달리 일자형 파티션은 가진 방향으로 흔들리면서 천장 가장자리에 큰 충돌하중을 유발하였기 때문에 판단된다. 60 % RRS, 100 % RRS 실험에서 각각 일자형 및 T형 파티션이 전도되면서 광범위한 천장패널의 탈락이 관찰되었다. 설계지진가속도 수준인 100 % RRS(PFA = 0.9 g)에서는 전체면적의 21.12 %의 천장패널이 탈락하였다. 대부분의 천장패널은 천장 가장자리에 집중되어 탈락하였고 부분높이 파티션은 천장프레임과 소수의 스크류로 고정되어있었기에 전도 발생시 천장프레임의 면외방향으로 끌어당기는 힘이 크지 않아 파티션의 부착지점에서는 주목할 만한 천장패널의 탈락이 발생하지 않았다(Fig. 15(b) 참고). 또한, 천장에 설치된 배관 및 스프링클러는 천장시스템과 일체거동하진 않았지만, 천장에 직접적으로 영향을 미치는 스프링클러가 유연한 호스(flexible sprinkler drop)을 통해 연결되었기 때문에 천장의 내진성능에는 크게 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 비내진 진동대 실험 최대 입력 수준인 150 % RRS에서는 55.62 %의 천장패널이 탈락하며 실험이 종료되었다(Fig. 15(c) 참고).

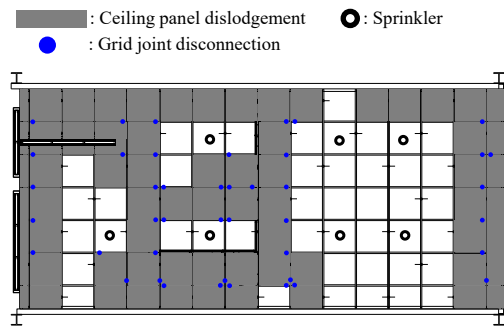
부분높이 파티션에 의한 상호작용이 천장시스템의 내진성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 선행연구의 실험결과를 참고하여 비교분석을 수행하였다(Fig. 16 참고). 범례의 괄호 안에는 각 실험에 사용된 천장의 면적을 기술하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 넓은 면적의 천장의 경우 더 높은 관성력의 영향을 받기 때문에 천장패널의 탈락이 더 낮은 입력수준에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에 사용된 천장실험체의 면적은 가장 면적이 큰 실험체^[4]와 비교하였을 때 상대적으로 작은 면적임에도 불구하고 비슷한 내진성능을 갖는다는 것을 확인할 수 있으며, 비슷한 규모의 실험결과^{[5]-[7]}와 비교하였을 때 내진성능이 상당히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 천장시스템의 내진성능에 파티션과 같은 비구조요소



(a) Perimeter ceiling panel dislodgement along the rectangular partition line



(b) Overturned rectangular and flange of T-section partition



(c) Fallen ceiling area observed at end of tests

Fig. 15. Damage propagation of partition-attached non-seismic ceiling specimen

는 상호작용에 의해 무시할 수 없는 영향을 미치는 것을 확인할 수 있으며 설계시 복합적 비구조요소의 거동에 대한 고려가 필요하다. 하지만, 비구조요소의 동적거동의 복잡성 및 불확실성을 고려한다면 본 연구의 내진 천장실험체와 같이 개별 비구조요소를 분리하여 서로 상호작용이 발생하지 않도록 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

내진 천장실험체는 실험종료 시까지 천장패널이 탈락하지 않는 우수한 내진성능을 보였다. 천장 프레임 면내강성 보강재의 영향을 평가하기 위하여 동종의 천장시스템에 가새만 설치한 선행연구^[8]의 실험결과를 참고하여

비교분석하였다(Fig. 17 참고). 두 실험체에서 단일 가새가 분담하는 천장의 면적은 약 14 m²로 비슷한 수준이다.

Fig. 17(a)에서 볼 수 있듯이 천장의 전·후, 중앙에서 서로 동일한 수준의 변위가 발생하며 우려되던 면내 상대 변위는 발생하지 않았다. 또한, 전반적으로 입력가속도가 증가하면서 변위가 증가하였으나 면내강성 보강재가 설치되지 않은 실험체^[8] 대비 천장의 전반적인 변위는 약 80 % 감소하였으며 최대변위 또한 천장 가장자리에 도입한 이격(20 mm)보다 작게 발생하여 천장파괴의 주요 원인인 가장자리 충돌 또한 효과적으로 억제되는 것을 확인하였다(Fig. 17(b) 참고).

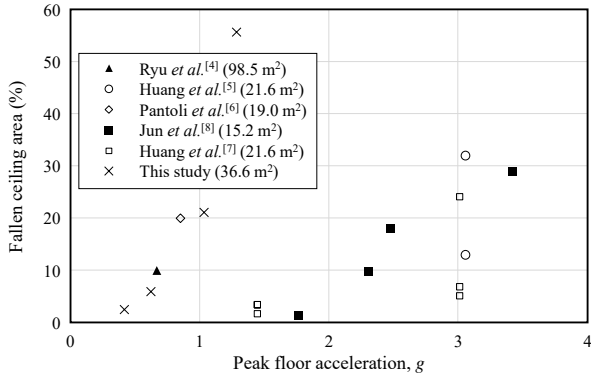
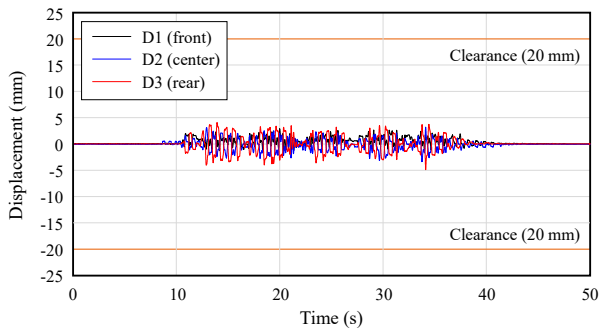
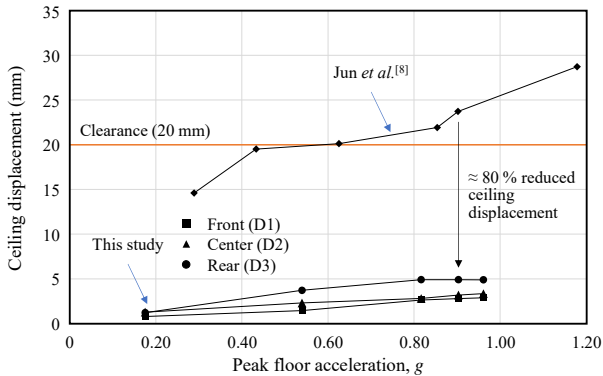


Fig. 16. Effect of partition-induced interaction on ceiling fragility



(a) Displacement time history showing reduced in-plane relative displacement



(b) Comparison of braced-ceiling specimen with and without grid reinforcement

Fig. 17. Effect of grid reinforcement on displacement response of braced ceiling specimen

6. 결론

본 연구에서는 실험형 2층 철골모멘트골조를 활용한 종합 비구조요소에 대한 진동대 실험 가운데 저자들이 담당한 연구내용을 소개하였다. 실험프레임의 계층가속도를 통해 비구조요소 설계하중을 평가하였으며, 특히 구조

물의 비선형거동이 최대층응답가속도에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 2층에 설치된 경량 천장시스템에 대한 내진성능평가를 수행하였으며, 대공간 천장시스템에 대한 새로운 내진보강법을 제안하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 실험프레임 탄성 상태에서의 최대층응답가속도 분석결과 ASCE 7-22에 의해 최상층에서의 층응답가속도는 합리적으로 예측 가능하나 저층에서의 층응답가속도는 구조물의 2차 모드 영향으로 인해 과소평가되는 것을 확인하였다. ASCE 7-22의 구조물 주기의존 층가속도 산정식(식 (3))의 경우 실험결과와 서로 반대의 곡률로 층응답가속도 분포를 가정하고 있어 과소평가의 정도가 증가하는 것이 확인되어 중·저층 구조물에서의 고차모드 영향이 ASCE 7-22에 의해 적절하게 평가되는지 추가적인 분석이 필요하다고 판단된다.
- (2) 구조물의 비선형거동에 따른 최대층응답가속도의 감소는 구조물의 비선형 정도, 구조물 각 층에서의 비선형 분포에 영향을 받는 것을 확인하였다. 본 실험에서는 탄성시 최상층과 2층에서 각각 2.59배, 3.32배 증폭하는 층응답가속도는 구조물 연성도(R_D) 2.94 수준에서 각각 40%, 50% 수준으로 감소하였다. ASCE 7-22의 구조물 연성도-층응답가속도 감소의 관계는 실험프레임의 $R_D = 2.94$ 도달시 각 층에서의 최대층응답가속도를 합리적인 수준으로 예측하였으나, 이보다 낮은 연성도 수준에서는 전반적으로 층응답가속도의 감소를 과대평가하는 것으로 나타났다. 특히, 프레임 각 층에서 비선형정도가 균일하게 발생되지 않기 때문에 저층에서의 층응답가속도 감소는 최상층 대비 적게 발생하므로 비구조요소 설계시 저층에 설치되는 비구조요소의 경우 구조물의 비선형거동의 영향을 반영하는 데 있어 주의가 필요하다.
- (3) 천장시스템의 내진성능은 비구조요소 간의 상호작용에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구와 같이 천장시스템에 파티션이 연결되는 경우 매우 낮은 입력수준(30% RRS, PGA = 0.10 g)에서도 파괴가 발생 가능성이 확인되었다. 국내 설계기준가속도 수준인 100% RRS(PGA = 0.37 g)에서는 전체면적의 약 20% 수준의 천장패널이

탈락하였으며, 최대입력수준(150 % RRS, PGA = 0.52 g)에서는 약 55 %의 천장패널이 탈락하였다. 천장상부에 설치되는 배관 및 스프링클러는 천장 실험체와 일체거동하지 않았지만, 천장에 직접적으로 영향을 미치는 스프링클러가 유연한 호스 (flexible sprinkler drop)를 통해 배관과 연결되어 천장의 내진성능에 크게 영향 미치지 않는 것으로 확인되었다.

- (4) 본 연구에서 제안한 면내강성 보강재는 가새천장 시스템의 내진성능을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 가새천장실험체는 실험 종료시 까지 주목할만한 손상이 발생하지 않았다. 면내강성 보강재를 통해 천장프레임의 상대변위를 제어할 수 있음을 확인하였고, 천장실험체의 전반적인 변위 또한 보강재를 설치하지 않은 실험체 대비 80 % 수준으로 감소시킴으로써 천장시스템의 주요 파괴원인인 가장자리 충돌을 효과적으로 억제할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축 연구개발사업의 연구비지원(21AUDP-C146352-04)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) *Seismic Design Standard for Buildings* (KDS 41 17 00: 2019), Korea (in Korean).
- [2] American Society of Civil Engineers (2017) *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (ASCE/SEI 7-16), USA.
- [3] American Society for Testing and Materials (2017) *Standard Practice for Installation of Ceiling Suspension Systems for Acoustical Tile and Lay-in Panels in Areas Subject to Earthquake Ground Motions* (ASTM E580/E580M-17), USA.
- [4] Ryu, K.P., and Reinhorn, A.M. (2019) Experimental Study of Large Area Suspended Ceilings, *Journal of Earthquake Engineering*, Taylor & Francis, Vol.23, No.6, pp.1001-1032.
- [5] Huang, W.-C., McClure, G., and Hussainzada, H. (2013) Experimental Study on the Suspended Ceiling Systems in Interaction with Partition Walls, *Proceedings of the 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics*, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea, pp.2304-2323.
- [6] Pantoli, E., Chen, M.C., Wang, X., Astroza, R., Ebrahimian, H., Hutchinson, T.C., Conte, J.P., Restrepo, J.I., Marin, C., Walsh, K.D., Bachman, R.E., Hoehler, M.S., Englekirk, R., and Faghihi, M. (2016) Full-Scale Structural and Nonstructural Building System Performance During Earthquake: Part II – NCS Damage States, *Earthquake Spectra*, Sage, Vol. 32, No.3, pp.771-794.
- [7] Huang, W.-C., Hussainzada, N., and McClure, G. (2013) Experimental Study on the Seismic Behavior of Suspended Ceilings, *Proceedings of the 3rd Specialty Conference on Disaster Prevention and Mitigation*, Canada.
- [8] Jun, S.C., Lee, C.H., and Bae, C.J. (2021) Analysis of Dynamic Behavior of Seismic and Non-Seismic Suspended Ceiling Systems Based on Shake-Table Testing, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.2, pp.63-74 (in Korean).
- [9] Sullivan, T.J., Calvi, P.M., and Nascimbene, R. (2013) Towards Improved Floor Spectra Estimates for Seismic Design, *Earthquakes and Structures*, Techno-Press, Vol.4, No.1, pp.109-132.
- [10] Singh, M.P., Moreschi, L.M., Suárez, L.E., and Matheu, E.E. (2006) Seismic Design Forces. II: Flexible Nonstructural Component, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.123, No.10, pp.1533-1542.
- [11] Chaudhuri, S.R., and Villaverde, R. (2008) Effect of Building Nonlinearity on Seismic Response of Non-structural Components: A Parametric Study, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.134, No.4, pp.661-670.
- [12] American Society of Civil Engineers (2022) *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (ASCE/SEI 7-22), USA.
- [13] Oh, S.H., Park, H.Y., and Park, J.H. (2020) Connection Detail of Cladding Support System for Seismic Performance Improvement, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol.32, No.5, pp.285-295 (in Korean).

- [14] Seismology Committee of Structural Engineers Association of California (1999) *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary* (7th Ed.), USA.
- [15] International Code Council (2010) *Acceptance Criteria for Seismic Certification by Shake-Table Testing of Nonstructural Components* (ICC-ES-AC156), USA.
- [16] Computer and Structures, Inc. (2017) *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge*, USA.

요약: 본 연구에서는 대공간 천장시스템에 대한 내진보강기술 개발과 이에 작용하는 지진하중에 대한 평가를 위해 실대형 2층 철골모멘트골조를 활용한 진동대 실험을 수행하였다. 먼저, 비구조요소에 작용한 설계하중에 대한 평가를 수행하기 위해 실험프레임의 각 층에서 계측된 가속도기록을 바탕으로 최대층응답가속에 대한 평가를 수행하였다. 특히, 구조물의 비선형거동이 층응답가속에 미치는 영향에 대한 분석을 수행하였다. 2층에 설치된 경량 천장실험체에 대한 내진성능평가를 수행하였으며, 천장시스템의 내진성능에 영향을 미칠 수 있는 비구조요소 간의 상호작용 영향을 평가하기 위해 부분높이 파티션, 배관 및 스프링클러를 함께 설치하여 실험을 수행하였다. 실험 결과 구조물의 비선형거동에 의한 최대층응답가속도의 감소는 ASCE 7-22에 의해 전반적으로 과대평가되었음을 확인하였다. 비내진 천장실험체의 경우 파티션의 전도 영향으로 낮은 입력수준에서 파괴가 진행되었으며 파티션에 의한 상호작용은 천장시스템의 내진성능에 상당히 불리하게 작용함을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 면내강성 보강재를 활용한 가새천장시스템은 천장시스템의 내진성능을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

핵심용어: 비구조요소, 진동대 실험, 철골모멘트골조, 천장시스템, 비구조요소 설계하중
