

진동대 실험을 통한 내진 및 비내진 천장시스템의 동적거동 분석

전수찬¹ · 이철호^{2*} · 배창준³

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

Analysis of Dynamic Behavior of Seismic and Non-Seismic Suspended Ceiling Systems Based on Shake-Table Testing

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

¹Graduate Student (Doctor Course), 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 (Integrated Doctor Course), Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

Abstract - Suspended ceiling systems are among the most frequently reported earthquake-vulnerable nonstructural elements. Despite their importance, current design standards provide only limited design guidance because of complicated behavior of suspended ceilings and lack of reliable test data. In this study, their seismic performance and dynamic characteristics were evaluated based on a series of shake table tests on large-size suspended ceiling systems. A total of seven specimens having typical ceiling configurations were tested with including a rigidly braced ceiling specimen as recommended by current design standards. Based on test results, some of the key engineering parameters such as the acceleration amplification factor and the natural frequency were identified, and overall seismic performance was evaluated. The test results showed large differences in dynamic characteristics between ceiling systems hung by hanger wires and hanger bolts because of the difference in boundary conditions formed by the connection details used in each system. A ceiling specimen strengthened by rigid brace exhibited only slightly improved seismic performance mainly due to the low in-plane stiffness of ceiling grids; the degree of damage observed was comparable to non-seismic ceiling specimens. The limitation and side effects resulting from rigid brace were also discussed.

Keywords - Nonstructural element, Seismic design, Shake table test, Component amplification factor, Suspended ceiling system

1. 서론

최근 국내의 지진에서 발생한 광범위한 비구조요소의 피해사례는 건축물의 내진성능확보에 있어 비구조요소 내진 설계의 중요성을 명백하게 보여주었다^{[1],[2]}. 일반적으로 비구조요소는 구조물의 동적거동에 의해 한 번 더 증폭된 가속도의 영향을 받고, 비구조요소를 구성하는 구조 및 재료 자체가 내진에 이상적이지 않은 경우가 많기 때문에 구조물

에는 손상을 발생시키지 않는 낮은 강도의 지진에 의해서도 피해가 발생한다^{[3],[4]}.

천장시스템은 대표적으로 보고되는 지진취약 비구조요소로, 최근 발생한 2016년 경주 및 2017년 포항의 중약진급 지진에 의해 상당한 피해가 발생하여 건물의 구조적 피해가 발생하지 않았음에도 불구하고 건물의 기능손실을 유발함으로써 막대한 경제적 손실을 유발한 바 있다(Fig. 1).

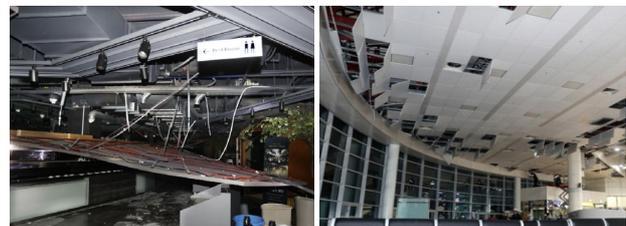


Fig. 1. Suspended ceiling failure during 2016 Gyeongju (left) and 2017 Pohang (right) earthquakes

Note.-Discussion open until October 31, 2021. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 11, 2020; revised January 20, 2021; approved on January 20, 2021.

Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-880-8735 Fax. +82-2-871-5518

E-mail. ceholee@snu.ac.kr

개정된 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)^[5]에서는 인명 안전에 위협이 되는 피난경로상의 천장시스템에 대한 내진설계를 의무화하고 있으며, ASCE 7-16^[6] 및 ASTM E580^[7]에 근거한 설계법을 제시하고 있다. 천장시스템에 대한 현행 내진설계기준은 1980년대 수행된 연구에 기반한 경험적 설계법으로, 최근 본격적인 연구가 진행되면서 현행 기준에 의한 설계법의 효용성에 대한 의문이 제기되고 있다. 하지만, 천장시스템의 복잡한 상세와 거동특성으로 인해 여전히 경험적으로 제시된 설계법에 의존하고 있는 상황이다.

본 연구에서는 천장시스템의 동적거동을 분석하여 향후 체계화된 설계법을 제안할 목적으로 국내의 대표적 천장시스템에 대한 총 일곱 개의 천장실험체를 제작하여 진동대 실험을 수행하였다. 실험체는 두 개의 실물크기 일축가진 대형실험체와 다섯 개의 삼축가진 소형실험체로 구성되어 있으며, 진동대 실험결과를 통해 각 시스템에 대한 주요 동특성과 파괴모드를 분석하였다.

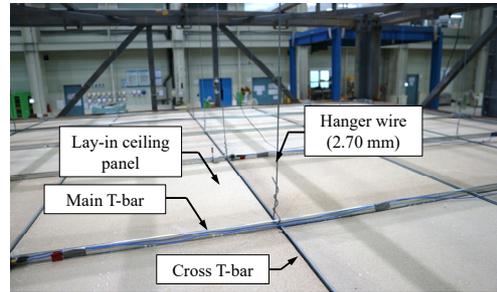
2. 천장시스템의 특성 및 현행설계기준

본 장에서는 대표적 천장시스템에 대한 주요 특성에 대하여 기술하고 ASTM E580에서 제시하는 천장시스템에 대한 내진설계 요구조건을 정리하였다. ASTM E580은 천장시스템에 대한 내진시방서로 KDS 41 17 00 및 ASCE 7-16은 이에 기반한 천장시스템의 내진설계를 제안하고 있다.

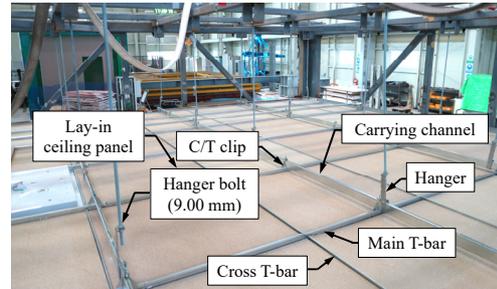
Fig. 2는 국내 사용되는 대표적 천장시스템의 상세를 보여주고 있다. 천장시스템은 천장재를 지지하고 있는 천장프레임, 천장프레임을 지지하는 행어로 구성되어 각각 천장시스템의 면내강성과 횡강성을 제공하고 있다.

Fig. 2(a)는 국외에서 대표적으로 사용되고 있는 천장시스템으로 ASTM E580에서는 본 시스템에 대한 실험결과를 근거로 설계법을 제시하고 있다. 천장시스템은 지름 2.7 mm의 행어 와이어가 천장프레임을 지지하고 있으며, 천장프레임은 크로스 티바(cross T-bar)와 메인 티바(main T-bar)로 구성된 격자로 구성되어 있다. 따라서, 이는 직접현수 T-bar 천장시스템으로 분류되며 천장재는 주로 비부착식(lay-in)으로 설치된다.

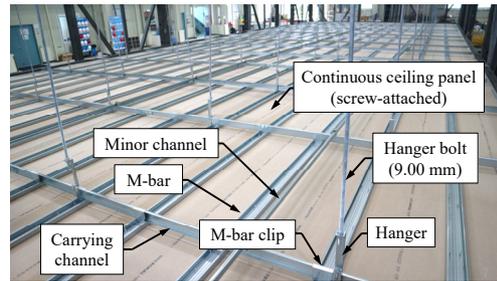
국내에서는 직접현수 T-bar 천장과 더불어 다양한 천장시스템이 사용되고 있다. Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 국내에서는 9 mm 행어 볼트가 사용되며 천장프레임은 캐링 채널을 통해 행어 볼트에 의해 지지된다. 따라서 이는 간접현수



(a) Direct-hung T-bar suspended ceiling (lay-in)



(b) Indirect-hung T-bar suspended ceiling (lay-in)



(c) Indirect-hung M-bar suspended ceiling (continuous)

Fig. 2. Typical suspended ceiling configurations

T-bar 천장시스템으로 분류되며 국내에서는 간접현수식 천장이 대중을 이룬다. Fig. 2(c)는 부착식(continuous) 천장시스템을 보여주고 있다. 부착식 천장시스템에서 천장재는 피스를 통해 천장프레임에 고정되며 프레임은 엠바(M-bar)를 사용하여 간접현수식으로 지지된다.

ASTM E580에서는 천장시스템에 대한 설계요구조건을 천장이 설치되는 구조물의 내진설계범주로 분류하여 제시하고 있다. ASTM E580에서 제안하고 있는 요구조건의 핵심은 천장시스템의 횡변위가 유발하는 벽체와의 충격력을 최소화하는 데 있다. 내진설계범주 C의 중약진에 대해서는 천장의 변위를 흡수하여 벽체와의 충격력을 최소화할 수 있도록 천장시스템의 모든 면에 벽체와 10 mm 이상의 이격을 확보해야 한다(Fig. 3(a)). 내진설계범주 D의 경우 천장시스템의 연속된 두 면은 주변지지클립을 통해 벽체에 설치된 몰딩과 기계적 결합되어야 하며, 나머지 두 면은 벽체와의 최

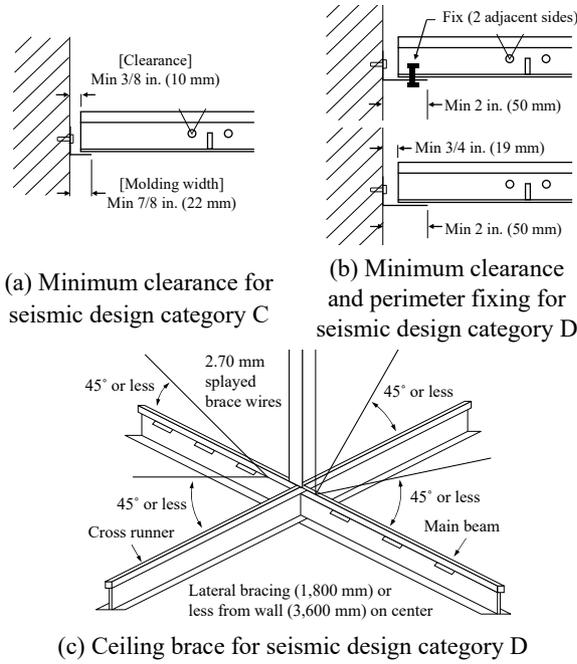


Fig. 3. Seismic requirements for suspended ceilings according to ASTM E580

소 이격거리 19 mm를 확보해야 한다(Fig. 3(b)). 이때, 천장 시스템의 면적이 100 m²를 초과하거나 주변지지클립을 통해 천장시스템이 벽체에 의해 횡지지되지 않는 경우, 천장가새를 설치해 천장의 횡거동을 구속시켜야 한다(Fig. 3(c)).

천장시스템에 대한 연구는 시스템의 복잡성과 수치적으로 모사하기 어려운 부재의 접합상세로 인해 주로 진동대 실험을 통해 수행되며, 비내진 및 ASTM E580을 통해 보강된 천장시스템에 대한 다양한 연구가 수행된 바 있다. Ryu and Reinhorn^[8] 등은 진동대 실험을 통해 주변지지클립의 효율성을 평가하였으며, Yao^[9] 등은 가새보강 천장시스템의 내진 성능평가를 수행하였다.

Table 1. Key properties of ceiling specimens

Specimen*	Ceiling type	Panel Type	Ceiling size (m)	Input direction	Boundary type (clearance)	Plenum height (m)
DTL	Direct hung suspended T-bar ceiling	Lay-in	3.79 × 3.79	3d	Free (15 mm)	0.80
DTL-B				3d	Braced (25 mm)	0.80
ITL	Indirect hung suspended T-bar ceiling			3d	Free (15 mm)	0.65
ITL-R				1d	Free (410 mm)	0.65
IMC-M	Indirect hung suspended M-bar ceiling	Continuous (screw-attached)	12.8 × 4.85	1d	Free (15 mm)	1.00
IMC-C				1d	Free (15 mm)	1.00
IMC				3d	Free (15 mm)	0.65

*Letters in specimen name specifies (1) panel type (1st letter; lay-in/continuous), (2) frame type (2nd character; T-bar/M-bar), and (3) hanger type (3rd character; direct-hung/indirect-hung).

선행연구는 천장시스템의 전반적인 거동 및 내진성능에 대해서 유용한 정보를 제공하나 천장시스템의 진동대 실험은 실험체의 면적(즉, 질량)에 민감하기 때문에 실험조건이 서로 다른 상기의 선행연구에서는 현행내진설계기준에 의한 내진보강의 효율성에 대해 일관된 결론을 도출하지 못하였으며, 대부분 파괴모드와 취약도 분석(fragility analysis)에 집중되어 천장시스템의 주요 동특성에 대한 정보는 여전히 부족한 상황이다. 또한, 앞서 언급되었듯이 국내에서는 국외와 구별되는 자체적인 상세를 사용하기 때문에 이에 대한 현행 내진설계기준의 검증이 필요한 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 대표적 국내의 대표적 천장시스템에 대한 진동대 실험을 수행하여 각 시스템의 거동과 동특성을 비교·분석하여 설계법 정립에 필요한 기초자료를 얻고자 하였다.

3. 천장시스템의 진동대 실험

본 연구에서는 앞서 언급된 국내의 대표적 천장시스템에 대한 총 일곱 개의 실험체를 제작해 진동대 실험을 수행하였다. 본 장에서는 실험체, 실험프레임의 설계 및 제작 그리고 진동대 실험에 사용된 입력지진파의 생성에 대하여 기술하였다.

3.1 실험체 설계 및 제작

Table 1에 본 실험에 사용된 실험체의 주요정보를 요약하였다. 실험체는 두 개의 대형실험체(12.8 m × 4.87 m)와 다섯 개의 소형실험체(3.87 m × 3.87 m)로 구성되어 있다(Figs. 4-5). 비내진 실험체(DTL, ITL, IMC, IMC-M, IMC-C)는 ASTM

E580 내진설계범주 C의 요구조건에 따라 모든 면에 15 mm의 이격을 확보하여 천장시스템이 자유롭게 거동할 수 있도록 제작하였다. 가세보강 천장시스템(DTL-B)는 내진설계범주 D의 요구조건에 따라 모든 면에 25 mm의 이격을 확보하도록 제작하였다.

천장시스템의 동특성 분석을 목적으로 0.1 ± 0.05 g의 정현파 소인 실험(sine sweep test)을 수행시 천장시스템을 둘러싸고 있는 몰딩과의 마찰로 인해 충분한 응답이 발생하지 않고, 입력가속도의 크기를 증가시키면 좁은 이격거리(15 mm)로 인해 벽체와의 충돌로 인해 계측기록에 다량의 스파이크가 형성되어 정확한 동특성 분석이 어렵다. 따라서, 본 실험에서는 양방향에 충분한 이격(410 mm)을 확보한 실험체(ITL-R)를 제작, 천장시스템의 동특성을 분석하였다.

부착식 천장시스템은 천장재와 천장프레임이 피스로 고정되어 비부착식 시스템 대비 상대적으로 천장시스템의 면내 강성이 높다. 따라서 부착식 천장실험체(IMC-M, IMC-C)에 대해서는 실험체를 실물 규격으로 제작하여 천장시스템에 유도되는 충돌하중을 극대화하고자 하였다. 천장시스템의 면적(즉, 질량)이 커지면 더 높은 관성력이 유발되기 때문에 소형 천장실험체 대비 더 실질적인 조건으로 실험할 수 있다. Fig. 5는 부착식 M-bar 천장시스템 실험체의 도면을 보여주고 있다. 부착식 M-bar 천장시스템은 각 방향에 대해서 벽체와의 충돌하중이 M-bar(Fig. 5 수직 실선) 또는 캐리징 채널(Fig. 5 파란색 수평 실선)에 전달되므로, 각 방향에 대한 파괴모드와 내진성능이 다르다. 따라서, 두 개의 실험체를 제작하여 각 방향에 대한 일축가진실험을 수행하였으며,

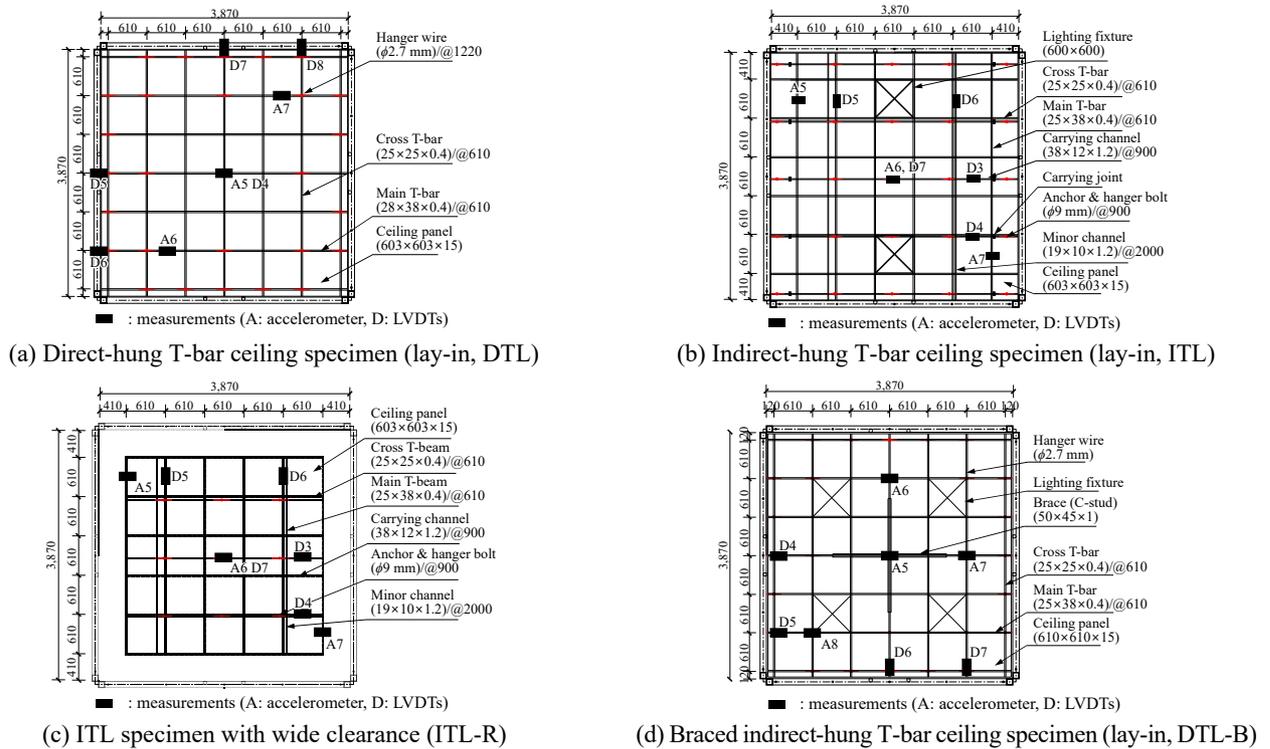


Fig. 4. Details of triaxial shake table ceiling specimens

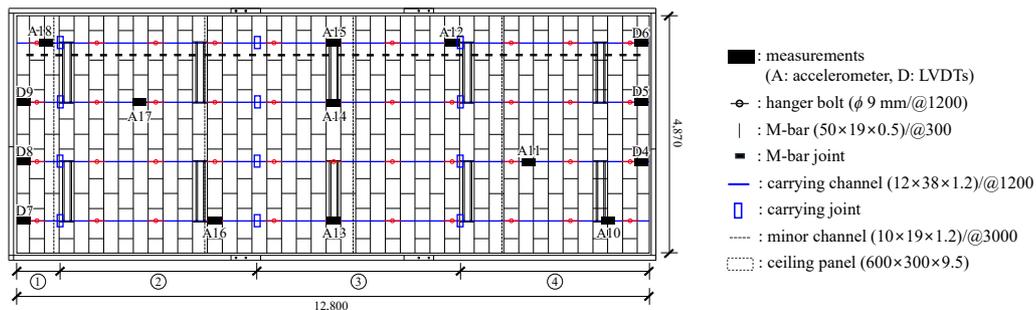


Fig. 5. Indirect-hung M-bar ceiling specimen for carrying channel direction excitation (IMC-C)

M-bar 방향 가진 실험체(IMC-M)는 Fig. 5를 90° 회전시켜 설치하였다. IMC는 소형 부착식 M-bar 천장실험체로 삼축가진의 영향을 평가하기 위해 제작하였다.

Fig. 6은 DTL-B 실험체의 천장가새를 보여주고 있다. 가새는 ASCE 7-16의 비구조요소 등가정적하중에 따라 산정된 하중에 대하여 저항할 수 있도록 설계하였다. 가새는 ASTM E580에서 제안하는 설치 간격(3,600 mm)을 고려하여 한 개를 설치했으며, 편심이 발생하지 않도록 중앙을 기점으로 2축대칭이 되도록 배치하였다(Fig. 4(d)).



Fig. 6. Installation of rigid ceiling brace

3.2 천장시스템 진동대 실험을 위한 실험 프로토콜

진동대 실험은 비구조요소의 대표적 내진실험 프로토콜인 ICC-ES AC156(이하 AC156)^[10]에 따라 수행하였다. AC156은 ASCE 7-16의 등가정적해석법에 기반을 둔 요구 응답스펙트럼(RRS, required response spectrum)을 포락하는 인공지진파를 생성하여 진동대 실험을 수행하도록 제안하고 있다. 수평방향 RRS는 다음과 같이 결정된다.

$$A_{RIG-H} = 0.4S_{DS} \left(1 + 2\frac{z}{h}\right) \quad (1)$$

$$A_{FLX-H} = S_{DS} \left(1 + 2\frac{z}{h}\right) \leq 1.6S_{DS} \quad (2)$$

여기서, S_{DS} = 단주기 설계스펙트럼가속도, z = 구조물의 밑면으로부터 비구조요소가 부착된 높이, h = 구조물의 밑면으로부터 지붕층의 평균높이를 나타낸다.

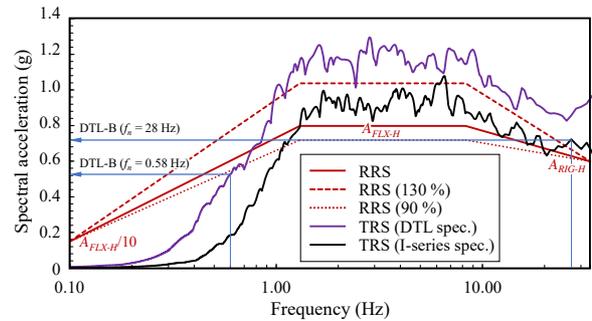
AC156의 RRS는 구조물의 응답스펙트럼을 나타내고 있다. 식 (1)에서 볼 수 있듯이 강체 비구조요소에 대해 RRS는 구조물의 지층에 작용하는 유효지반최대가속도($0.4S_{DS}$)에 구조물의 동적거동에 의한 증폭($1 + 2z/h$) 영향을 고려하여 설정되어 있으며, 가속도증폭구간(1.3 Hz - 8.3 Hz)은 비구조요소의 가속도증폭계수($a_p = 2.5$)를 고려하여 식 (2)와 같이 설정되어 있다.

인공지진파의 응답스펙트럼(TRS, test response spectrum)은 RRS의 1.3 Hz - 33.3Hz 구간을 포락해야되며, 가속도증

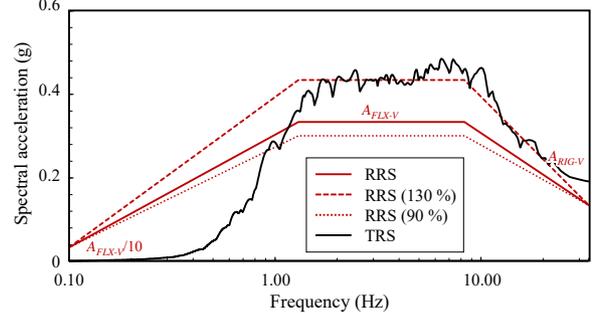
폭구간(1.3 Hz - 8.3 Hz)에서 RRS의 90% 이상, 130% 이내에 위치하여야 한다. 인공지진파의 총 지속시간은 30초이며, 강진 지속시간은 20초 이상이어야 한다.

본 실험에서는 국내 지진환경을 고려하여 가장 불리한 조건인 지진구역 I($S = 0.22 g$) 지반조건 S_4 를 사용하였으며, 비구조요소의 설치위치는 지붕층($z/h = 1.0$)으로 설정하여 RRS를 생성하였다. Fig. 7은 생성된 RRS와 TRS를 보여주고 있다. DTL 실험체의 경우 고유진동수가 매우 낮기 때문에 별도의 인공지진파를 생성하여, Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 TRS가 저주파대역을 최대한 포락할 수 있도록 하였다. TRS를 저주파대역에 포락시키기 위한 스펙트럼 매칭 과정에서 가속도증폭구간(1.3 Hz - 8.3 Hz)에서 TRS가 RRS의 130%를 초과하였지만, 실험결과에서 볼 수 있듯이 DTL 실험체는 낮은 고유진동수를 갖기 때문에 증폭구간에서의 높은 가속도의 영향이 실험체에 미치는 영향은 미미하였다.

수직방향 RRS는 AC156에 따라 수평방향 RRS의 2/3배를 적용하여 생성하였다.



(a) Horizontal RRS & TRS



(b) Vertical RRS & TRS

Fig. 7. Horizontal and vertical RRS & TRS for shake table test of suspended ceiling specimens

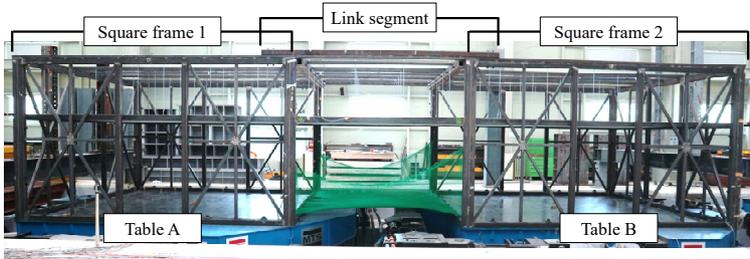
3.3 실험 프레임 설계 및 제작

Fig. 8은 천장시스템 진동대 실험을 위한 실험프레임을 보여주고 있다. 앞절에서 언급되었듯이 진동대에 입력되는 인공지진파는 구조물의 동적거동에 의한 가속도 증폭영향을

고려하여 생성되었으므로, 실험프레임의 동적거동에 의해 진동대에 입력된 지진파가 증폭되지 않도록 실험프레임은 충분한 강성을 갖도록 설계하였다.

Fig. 8(a)는 대형 실험프레임을 보여주고 있다. 대형 진동대 실험은 두 개의 진동대를 동시 가진하여 실험하였다. 실험프레임의 총 규격은 13.1m×5.1m×3m로 진동대에 설치되는 두 개의 정사각형 프레임과 이를 연결해주는 링크 세그먼트로 구성되어 있다. 각 정사각형 프레임은 24 Hz의 고유진동수를 갖도록 설계하였으며, 결합된 실험프레임은 17 Hz를 갖도록 설계하였다. 공진탐색 실험결과 대형 실험프레임의 고유진동수는 16.8 Hz로 충분한 강성을 갖는 것으로 확인되었다.

삼축가진 실험은 소형 실험프레임(4.1 m×4.1 m×3.2 m)을 사용하여 수행하였으며, 수평 및 수직방향에 대해 23 Hz, 9.4 Hz의 고유진동수를 갖도록 설계하였다(Fig. 8(b)).

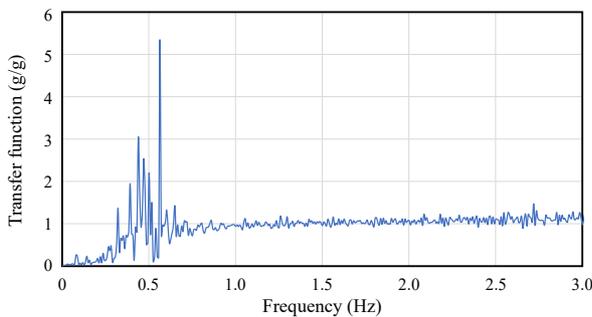


(a) Large-size test frame for uniaxial shake table test

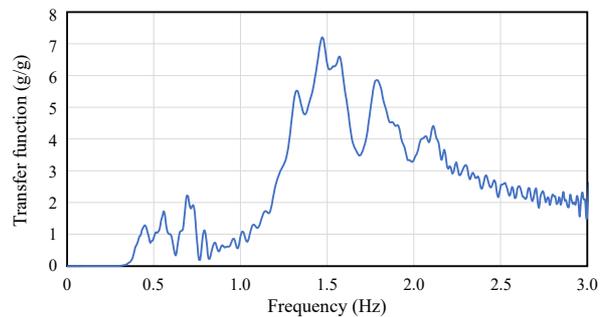


(b) Small-size test frame for triaxial shake table test

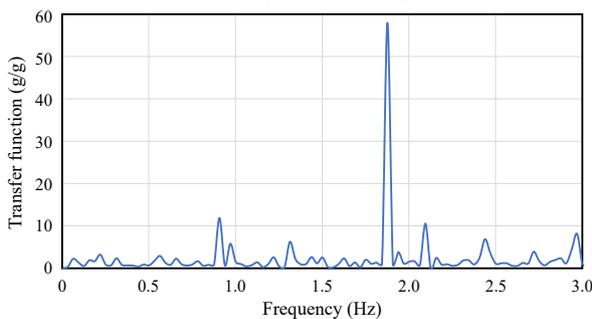
Fig. 8. Overview of test frames for shake table test of suspended ceiling specimens



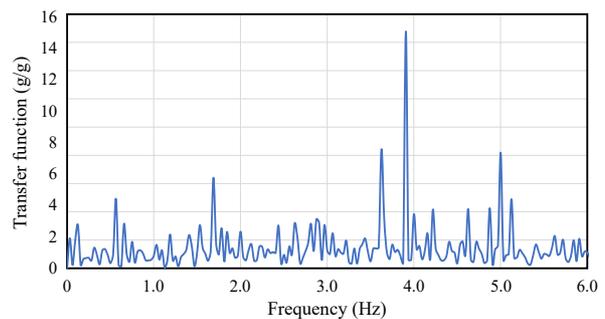
(a) Direct-hung T-bar ceiling (DTL)



(b) ITL with unidirectional wide clearance (ITL-R)



(c) Indirect-hung T-bar ceiling (ITL, single curvature direction)



(d) Indirect-hung T-bar ceiling (ITL, double curvature direction)

Fig. 9. Transfer function measured from resonance tests

4. 천장시스템의 고유진동수와 감쇠비

Fig. 9는 각 실험체의 공진실험을 통해 산정한 전달함수 결과를 보여주고 있다. 전달함수 결과를 통해 각 실험체의 고유진동수를 분석하였다. 또한, 단부에 충분한 이격을 확보하여 벽체와 충돌이 발생하지 않는 ITL-R 실험체의 전달함수로부터 천장시스템의 감쇠비를 분석하였으며, 감쇠비는 반일률대역폭(half-power bandwidth) 방법을 통해 분석하였다.

DTL 실험체의 고유진동수는 0.56Hz로 나타났다(Fig. 9(a)). 이는 선행연구⁶⁾에서도 언급되었듯이 천장시스템이 진자운동을 하기 때문이다. 반면에, 간접현수 천장실험체(ITL)의 경우 DTL 실험체 대비 높은 고유진동수가 계속되었으며, 각 방향에 대해 고유진동수는 1.88 Hz와 3.91 Hz로 나타났다. 동특성 분석을 목적으로 제작한 ITL-R 실험체에 대해서도

1.47 Hz의 DTL 대비 상대적으로 높은 고유진동수가 확인되었다(Figs. 9(b)-9(d) 참고).

천장시스템의 고유진동수는 천장시스템의 현수방식에 의존하며, Fig. 10(a)와 같이 직접현수 천장시스템의 행어 와이어의 양단은 회전구속력이 없는 힌지를 형성하기 때문에 시스템은 장주기 진자거동을 하게 된다. 반면, Fig. 10(b)에서 볼 수 있듯이 간접현수 천장시스템의 행어 볼트 상부는 천장프레임에 고정되어 있어 회전구속력을 갖는다. 또한, 천장프레임과의 접합부는 행어(hanger)의 상부로 인해 일축에 대해서만 회전구속력을 가지며 직교 방향에 대해서는 힌지거동을 한다(Fig. 11 참고). 따라서, 간접현수 천장시스템은 직접현수 천장시스템 대비 전반적으로 높은 고유진동수를 가지며 각 방향에 대해서 단·복곡률 거동을 하여 서로 다른 고유진동수를 갖는 것으로 확인되었다.

직접현수 천장시스템의 단순해석모델은 다음과 같이 행어 볼트의 단·복곡률 거동을 고려한 횡강성을 계산하여 구축할 수 있다.

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (\text{단곡률 휨거동}) \quad (3)$$

$$k = \frac{12EI}{L^3} \quad (\text{복곡률 휨거동}) \quad (4)$$

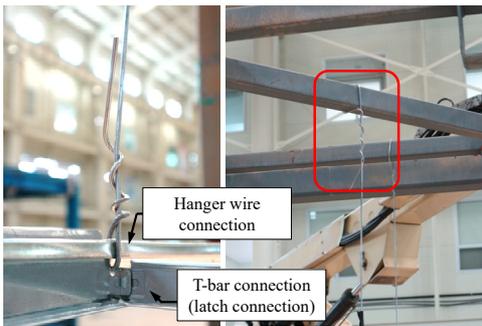
간접현수 천장시스템의 고유진동수는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\sum k}{m_T}} \quad (5)$$

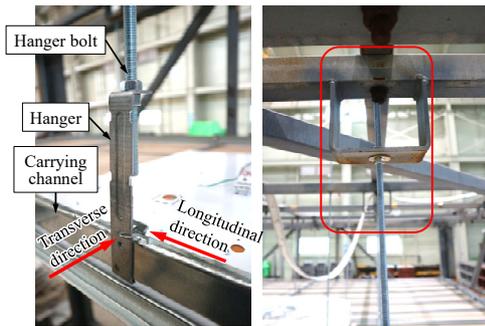
여기서, k = 행어 볼트의 단·복곡률 휨거동을 고려하여 계산한 횡강성, m_T = 천장시스템의 총 질량을 나타낸다.

Table 2에 제안된 고유진동수 산정식으로 계산한 각 실험체의 고유진동수와 실험으로부터 측정된 고유진동수를 비교한 결과를 비교하였다. 천장시스템의 질량을 등분포로 가정하여 단일 행어 볼트의 횡강성과 분담 면적에 대한 질량을 계산하여 산정하였다. Table 2에서 볼 수 있듯이 제안된 산정식을 사용한 결과와 실험결과는 유사한 값을 갖는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 천장시스템의 가속도 및 변위 응답을 비교적 간단하게 예측할 수 있다.

Fig. 9(b)를 통해 산정한 간접현수 천장시스템의 감쇠는 7%로 나타났다. 이는 선행연구에서 보고된^[11] 직접현수 천장시스템의 감쇠비(약 1%) 대비 높은 값으로, Fig. 10(b)에서 볼 수 있듯이 간접현수 시스템에 사용되는 접합부(C/T clip, hanger)에 작용하는 마찰의 영향으로 판단된다.

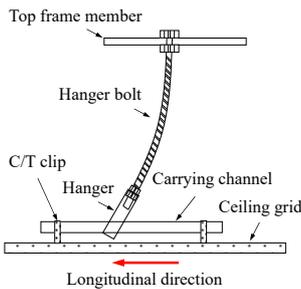


(a) DTL connection details (hanger wire)

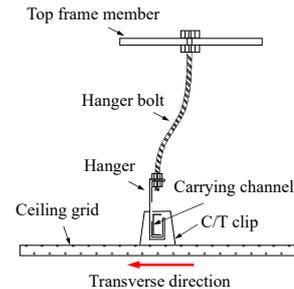


(b) ITL connection details (hanger bolt)

Fig. 10. Comparison of connection details between hanger wire and hanger bolt



(a) Single curvature bending in rotation free direction



(b) Double curvature bending in rotation restrained direction

Fig. 11. Deformed behavior of hanger bolt

5. 천장시스템의 가속도증폭계수

Fig. 12는 각 실험체의 가속도증폭계수를 요약하고 있다. 가속도증폭계수는 천장에서 측정된 최대가속도를 실험프레임 상부의 최대가속도로 정규화하여 산정하였다.

비내진 직접현수 천장실험체(I-series)에 대한 수평 가속도증폭계수의 중앙값은 1.71로 DTL 실험체($a_{hor,median} = 1.91$)와 유사한 수준으로 확인되었다. 반면, 수직방향에 대한 DTL 실험체의 가속도증폭계수는 2.31로 직접현수 천장실험체(I-series, $a_{vert,median} = 1.34$) 대비 높은 값을 갖는 것으로 나타났다. 현수방식과 무관하게 각 방향에 대해 측정된 가속도증폭계수를 모두 고려한다면, 천장시스템의 가속도증폭계수의 중앙값은 각 수평 및 수직방향에 대해 1.78, 1.66으로 나타났으며 이는 현행 내진설계기준에서 천장시스템의 가속도증폭계수($a_p = 1.0$)를 과소평가하고 있음을 보여준다.

DTL-B 실험체는 가새에 직접 지지된 천장부재(Fig. 4(d), A5 측정기록, restrained)와 가새에서 떨어진 지점(Fig. 4, A6-A8 측정기록, unrestrained)에서 측정된 가속도증폭계수를 별도로 도시하였다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이 가새로 인

한 천장의 강체거동으로 인해 A5에서 측정된 가속도증폭계수의 중앙값은 1.68로 동종의 비내진 실험체인 DTL 대비 낮게 측정되었으나, A6-A8 지점에서는 DTL 실험체와 유사한 가속도증폭계수($a_{hor,median} = 2.25$)가 확인되었다. 이는 천장프레임의 낮은 면내강성으로 인해 가새의 구속효과가 직접 지지된 부재에 대해 국부적으로 발생하였기 때문이다. DTL-B 실험체의 상세한 거동은 다음 절에서 다루었다.

6. 천장시스템의 파괴모드

가속도 증분 진동대 실험을 통해 확인된 천장실험체의 주요 파괴모드에 대해서 기술하였다. 실험체의 주요 파괴시점은 실험프레임 상부에서 측정한 최대가속도(PFA, peak floor acceleration)로 표시하였다. 진동대 실험은 RRS의 50% 수준(PFA=0.3g)을 기준으로 25%씩 증가시켜 천장시스템에 충분한 파괴가 발생할 때까지 진행하였다. 삼축가진 실험체에 대해서는 RRS의 275%(PFA=1.65g), 일축가진 실험체에 대해서는 RRS의 350%(PFA=2.1g)까지 증가시켜 수행하였다.

Table 2. Comparison of measured and predicted natural frequencies

Specimen	$f_{n,measured}$ (long.)*	$f_{n,measured}$ (trans.**)	$f_{n,calculated}$ (long.)	$f_{n,calculated}$ (trans.)	Plenum depth (mm)	Mass per hanger (N)	Remark
DTC	0.56 Hz	0.55 Hz	0.56 Hz	0.56 Hz	800	44.0	Pendulum
ITC	1.88 Hz	3.91 Hz	2.02 Hz	4.03 Hz	650	44.0	Double (long.) & single (trans.) curvature bending
ITC-R	1.47 Hz	-	1.54 Hz	-	650	76.0	Single curvature bending
IMC-M	-	2.58 Hz	-	2.49 Hz	1,000	43.4	Double curvature bending
IMC-L	0.97 Hz	-	0.84 Hz	-	1,000	69.1	Single curvature bending

*Longitudinal: perpendicular to direction of carrying channel

**Transverse: parallel to direction of carrying channel

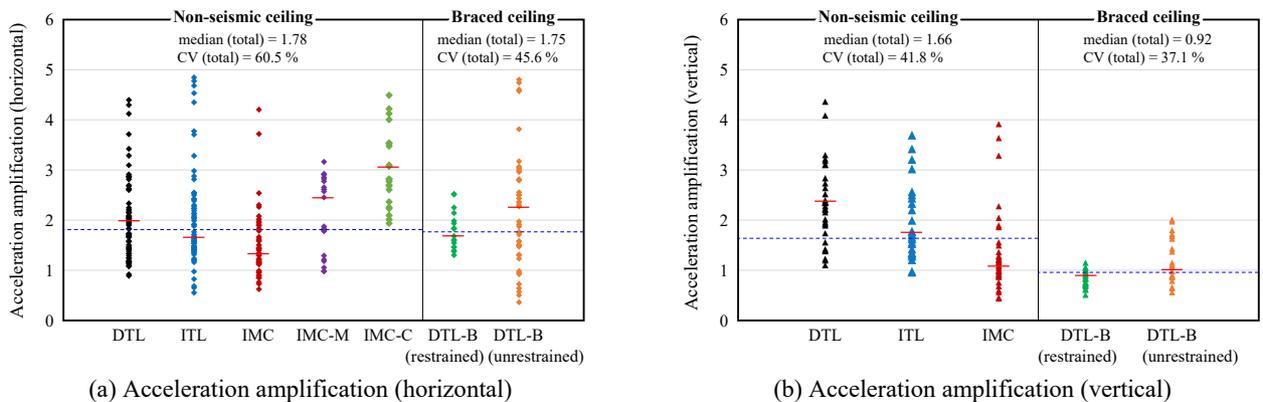


Fig. 12. Measured acceleration amplification factor

6.1 직접현수 T-bar 천장실험체(DTL)

Fig. 13은 DTL 실험체의 주요 파괴모드를 보여주고 있다. 천장실험체 파괴의 주요 원인은 천장과 벽체 간에 발생하는 충돌하중으로 DTL 실험체의 경우 RRS75%(PFA = 0.48 g)에서 횡변위가 단부이격 15 mm를 초과하며 발생하였다(Fig. 14참고). Fig. 13에서 볼 수 있듯이 충돌하중으로 인해 천장프레임 가장자리에 설치된 cross T-bar 접합부가 손상되면서 천장재가 탈락하기 시작하였다. 천장프레임의 격자를 구성하는 T-bar의 접합부는 결쇠접합(latch connection, Fig. 10(a)참고)으로 구성되어 있어 충격에 매우 취약한 것으로 확인되었다. 실험체 가장자리 천장재의 국부적인 탈락으로 인해 유발된 실험체의 질량 불균등은 천장의 비틀림 거동을 유발하였다. 따라서, 실험체는 Fig. 13에서 볼 수 있듯이 가장자리 천장재 탈락과 더불어 내부 천장재의 탈락이 발생하였다.

실험체는 RRS75%에서 벽체와 충돌하여 PFA = 0.65 g (RRS100%)에서는 실험체 단부의 cross T-bar 접합부 손상만이 확인되었다. PFA = 1.05 g(RRS150%)부터 천장재가 탈락하였으며(전체면적의 10%), 최종적으로 PFA = 1.43 g (RRS225%)에서는 전체면적의 30%에 해당하는 천장재의 탈락이 확인되었다.

6.2 간접현수 T-bar 천장실험체(ITL)

Fig. 15은 ITL 실험체의 변위이력을 보여주고 있다. ITL은 DTL 실험체 대비 높은 입력강도(RRS100%, PFA = 0.56 g)에서 벽체와의 충돌이 시작되었으며(Fig. 15(a)), 이때 직교 방향에 대해서는 충돌이 발생하지 않았다(Fig. 15(b)). 이는 앞장에서 언급되었듯이 ITL 실험체는 DTL 실험체 대비 고유진동수가 높고 각 방향에 대한 고유진동수가 달라 발생한 것으로 판단된다. Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 가속도증폭구간(1.3 Hz - 8.3 Hz)에 위치하는 ITL 실험체는 동일 강도의 지진입력에 대해 DTL 대비 높은 가속도의 영향을 받지만 변위 응답은 작기 때문이다($S_d = S_a/\omega_n^2$).

ITL 실험체는 PFA = 0.84 g(RRS150%)에서 실험체 단부에 설치된 cross T-bar 접합부 손상이 발생하였으나, PFA = 1.48 g(RRS250%)까지 주목할만한 천장재의 탈락 및 손상은 발생하지 않았다. Fig. 16에서 볼 수 있듯이 실험체는 PFA = 1.54 g(RRS275%)에서 천장면적의 5% 수준만이 탈락하여 DTL 실험체 대비 적은 손상이 발생하였다. 이는 직접 현수천장시스템에 사용되는 캐링 채널이 main T-bar에 직교로 설치되어 천장프레임의 면내강성을 증가시키고, 충돌하중에

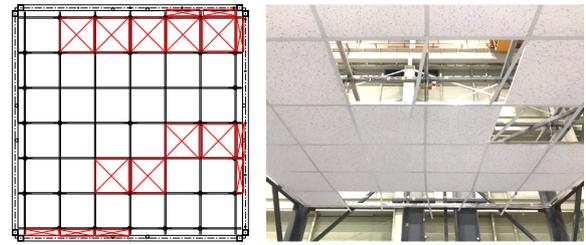


Fig. 13. Failure pattern of DTL specimen at the end of test

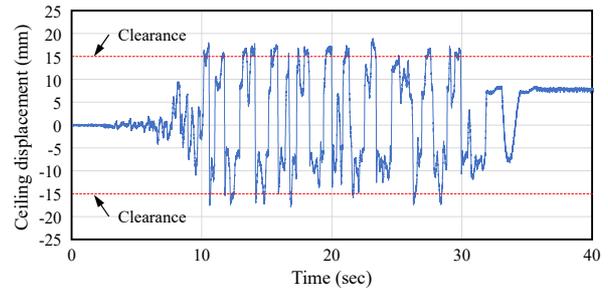
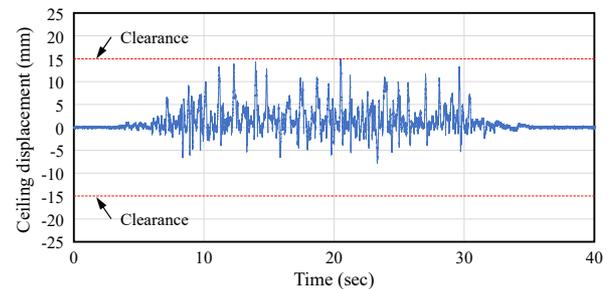
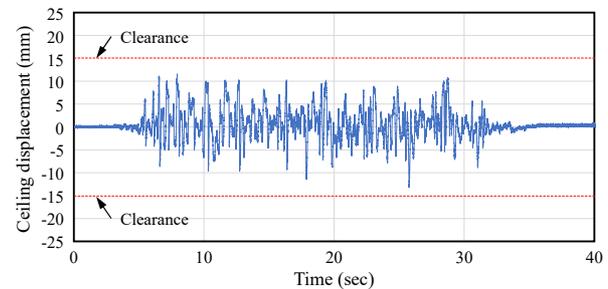


Fig. 14. Measured ceiling displacement at PFA = 0.48 g



(a) Measured ceiling displacement in single curvature bending direction



(b) Measured ceiling displacement in double curvature bending direction

Fig. 15. Measured ceiling displacement in each orthogonal direction at PFA = 0.56 g



Fig. 16. Failure pattern of ITL specimen at the end of test

의해 T-bar 접합부가 파괴되어도 T-bar 간의 분리를 억제하기 때문에 판단된다.

6.3 간접현수 M-bar 천장실험체(IMC)

부착식 천장실험체는 벽체와의 충돌 방향에 따라 극명한 내진성능의 차이를 보여주었다. IMC-M 실험체의 경우 PFA = 1.98 g(RRS350%)에서도 주목할만한 파괴는 발생하지 않았다. 이는, 천장재와 피스 고정되어 강한 면내강성을 갖는 M-bar에 대하여 하중이 작용하였기 때문에 판단된다.

반면, IMC-L 실험체에 대해서는 Fig. 17(a)에서 볼 수 있듯이 캐링 채널 간의 접합부(carrying joint)가 파괴되면서 캐링 채널과 M-bar, 캐링 채널과 행어 볼트 간의 접합부(M-bar clip, hanger)가 파괴되어 M-bar와 천장재가 같이 탈락하였다.

Fig. 17(a)에서 볼 수 있듯이 캐링 조인트가 파괴되면서, M-bar clip과 행어는 충돌하중이 캐링 채널에 유발하는 모멘트의 영향을 받는 것을 확인하였다(PFA=0.85 g, RRS150%). 이때, 캐링 채널 단면의 형상 및 M-bar clip의 상세로 인해 캐링 채널의 비틀림이 수반되는 것을 확인하였다(Fig. 17(b)). PFA = 1.41 g(RRS250%)에서 M-bar clip과 행어가 파괴되면서 단일 캐링 채널이 지지하고 있던 천장면적에 대한 전반적인 탈락이 확인되었다(Fig. 17(c)).

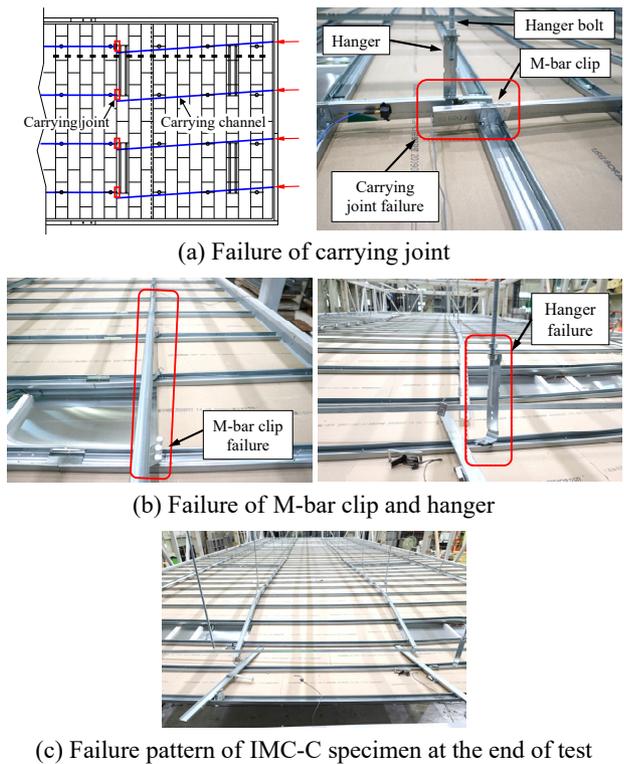


Fig. 17. Observed damage of IMC-C specimen

실험체는 총 네 개의 캐링 채널이 사용되었으며(Fig. 5 참고) 캐링 채널의 휨 및 비틀림에 의한 접합부(m-bar clip, hanger)의 파괴는 주로 충돌하중이 직접 전달되는 양단에 설치된 캐링 채널(Fig. 5, ①·④ 부재)에 대해서만 발생하였다. 이는 캐링 조인트가 파괴되면서 충돌하중이 내부 캐링 채널로 전달되지 않기 때문에 판단된다.

따라서, 캐링 채널을 사용하는 간접현수 시스템은 두 개의 천장 프레임(M-bar 프레임, carrying channel 프레임)으로 구성된 시스템으로 생각할 수 있으며, 부착식 천장재가 제공하는 높은 면내강성 효과는 엠바 프레임에 대해서만 유효하며, 캐링 프레임은 접합부(M-bar clip, hanger)가 취약하여 상대적으로 큰 손상이 나타나는 것으로 판단된다.

6.4 가새보강 직접현수 T-bar 천장실험체(DTL-B)

본 절에서는 가새보강 천장실험체(DTL-B)의 거동을 동종의 비내진 실험체(DTL)와 비교 분석하였다. DTL-B 실험체는 DTL 실험체와 유사한 정도의 파괴가 발생하여, 가새로 인한 유의미한 내진성능의 차이는 확인되지 않았다.

Fig. 18에 DTL 및 DTL-B 실험체의 가속도 응답을 분석할 목적으로 각 실험체에서 계측한 가속도값을 도시하였다. DTL-B 실험체는 앞서 가속도증폭계수 분석에서 언급되었듯이 두 계측지점(restrained, unrestrained)에서 계측된 가속도를 별도로 표시하였다.

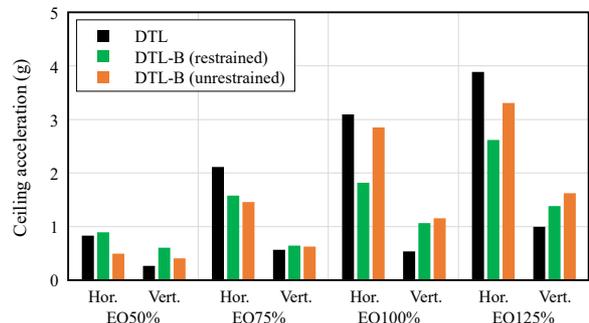


Fig. 18. Comparison of measured acceleration between DTL & DTL-B specimens

충돌이 발생하지 않는 RRS50% 수준에서는 두 실험체가 모두 비슷한 크기의 수평가속도의 영향을 받는 것으로 확인되었다. 이는 Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 두 실험체의 고유진동수에 해당하는 스펙트럼가속도에 큰 차이가 없기 때문이다. 하지만, 수직가속도 응답에서 볼 수 있듯이 DTL-B는 가새로 인한 높은 축강성으로 인해 DTL 대비 더 큰 가속도의

영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 입력지진의 크기가 증가함에 따라 DTL-B(restrained)는 가새로 인한 구속효과로 인해 PFA와 동일한 응답을 보이며 강체거동을 하나, DTL-B(unrestrained)는 실험체 가장자리에서 벽체와의 충돌이 발생하여 DTL 실험체와 유사한 정도의 가속도영향을 받는 것으로 나타났다. DTL-B 실험체의 가새에 연결된 부재와 가장자리 부재(각각 D4, D5, Fig. 4(d) 참고)에서 측정된 변위 기록에서 볼 수 있듯이 두 지점 간에 상당한 상대변위가 발생하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 19).

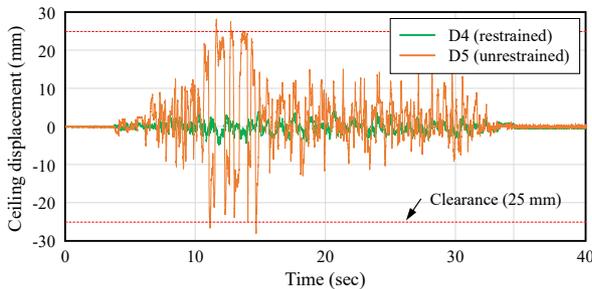


Fig. 19. Measured displacement between restrained and unrestrained frame members

따라서, DTL-B 실험체는 가새로 인한 구속 효과보다는 가새로 인해 유발되는 높은 수직가속도와 천장프레임의 낮은 면내강성으로 인한 프레임부재 간 상대변위 및 가장자리 부재의 충돌 영향이 더 크게 작용하여 DTL 실험체와 비교하여 큰 성능차이가 확인되지 않은 것으로 판단된다.

DTL-B 실험체는 PFA = 0.84 g(RRS150%)에서 실험체 가장자리 cross T-bar 접합부의 파괴가 확인되었다. 천장재의 탈락은 PFA = 0.92 g(RRS175%)에서 시작되어(전체면적의 2.5%) DTL 실험체의 최대 입력강도인 RRS225%(PFA = 1.28 g)에서 전체면적 20%의 천장재가 탈락하였다. Fig. 20에서 볼 수 있듯이 천장프레임의 부재 간 상대변위로 인한 접합부 손상으로 인해 천장재의 탈락은 주로 가새가 설치된 실험체 중앙부에 집중되어 DTL 실험체(Fig. 13)와 다른 파괴모드를 갖는 것을 확인할 수 있다.

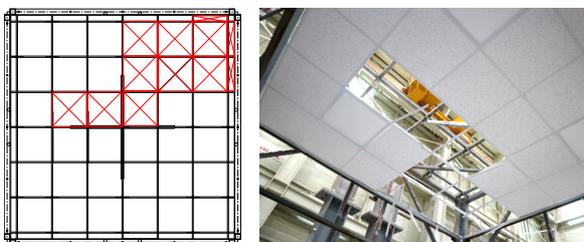


Fig. 20. Failure pattern of DTL-B specimen at the end of test

7. 결론

본 연구에서는 국내의 대표적 천장시스템에 대한 진동대 실험을 통해 각 시스템의 내진성능과 동특성을 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 천장실험체의 고유진동수는 천장시스템을 지지하는 행어 접합부 상세의 영향을 받으며, 행어 와이어를 사용하는 직접현수 천장시스템에서는 양단의 힌지거동으로 인한 진자운동을 확인하였다. 반면, 행어 볼트를 사용하는 간접현수 천장시스템은 행어 볼트 상부 접합상세가 갖는 회전구속력으로 인해 더 높은 고유진동수를 가지며, 하부에서는 천장프레임과 접합부의 상세가 제공하는 일축 회전구속력으로 인해 각 직교 방향에 대해 단·복곡률 휨거동을 하는 것을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 단·복곡률 휨거동 모델을 기반으로 산정한 천장시스템의 고유진동수는 실험으로부터 측정된 고유진동수와 잘 부합됨을 확인하였다.
- (2) 진동대 실험을 통해 측정한 천장시스템의 가속도증폭계수 중앙값은 각 수직 및 수평방향으로 1.78, 1.66으로 확인되었다. 이는 현행 내진설계기준에서 제시된 가속도증폭계수($a_p = 1.0$)을 상회하는 값으로, 측정된 가속도증폭계수의 높은 변동계수($CV \approx 60\%$)를 고려한다면 천장시스템에 대한 가속도증폭계수가 더 보수적으로 설정되는 것이 적절하다고 판단된다.
- (3) 직·간접현수 T-bar 천장시스템에 대한 진동대 실험 결과, 직접현수 실험체는 간접현수 실험체 대비 더 낮은 강도에서 충돌하중의 영향을 받으며, 천장프레임의 낮은 면내강성으로 인해 다수의 천장재 탈락이 발생하였다. 반면, 간접현수 천장시스템은 더 높은 입력지진에 대해서도 국부적인 천장재 탈락만이 발생하였다. 이는 간접현수 시스템의 캐링 채널의 영향으로 판단되며, 캐링 채널은 T-bar 부재의 분리를 억제하여 천장재의 탈락을 방지하는 것으로 확인되었다.
- (4) 부착식 M-bar 천장실험체는 지진하중의 작용방향에 따라 내진성능의 극명한 차이를 보여주었다. M-bar 방향 가진시, M-bar와 천장재의 피스 고정을 통해 확보된 강한 엠바프레임의 면내강성으로 인해 실험체 단부에 미미한 손상만이 확인되었다. 반면, 캐링 채널(carrying channel) 방향 가진시, 캐링 채널 조인트의 조기 파괴로 인해 캐링 채널과 M-bar, 행어 볼트 간의 접합부(M-bar clip, hanger)의 파괴가 발생하여 캐링

채널이 분담하고 있는 천장면적에 대한 전면적인 탈락이 발생하였다. 직접현수 천장시스템은 각 직교방향에 대해 고유진동수와 내진성능의 극명한 차이가 확인되므로, 이를 고려하여 각 방향에 대한 적절한 내진설계가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

- (5) 가새보강 직접현수 T-bar 천장실험체는 동종의 비보강 천장실험체와 유사한 내진성능을 보여주었다. 이는 가새로 인해 천장시스템이 강체요소가 되면서 장주기 진자거동을 하는 비보강 실험체 대비 더 높은 수평 및 수직가속도의 영향을 받고, 천장프레임의 낮은 면내강성으로 인해 발생하는 천장프레임의 부재 간 상대변위의 영향으로 확인되었다. 천장시스템의 가새보강은 천장프레임의 상대변위를 고려한 적절한 배치간격을 설정하여 설계되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌(References)

[1] Applied Technology Council (2011) *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage - A Practical Guide* (FEMA E-74), Federal Emergency Management Agency, USA.

[2] 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*, KSSC, Vol.32, No.5, pp.285-295 (in Korean).

[3] Kang, T.-W., Yun, J.-H., Yang, H.-I., and Jeon, J.-S.

(2020) Fluid Pressure Response of Steel Water Tanks Accounting for the Effect of Vertical Ground Motion, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.3, pp.149-159 (in Korean).

[4] Shin, H.-M., Lee, H.-D., Lee, S.-W., and Shin, K.-J. (2020) Shaking Table Test of Reinforced Concrete Frame with Friction Damper Using Short-Cycle Response, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.3, pp.169-178 (in Korean).

[5] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) *Seismic Design Standard for Buildings* (KDS 41 17 00: 2019), Korea (in Korean).

[6] American Society of Civil Engineers (2017) *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (ASCE/SEI 7-16), USA.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Yao, G.C. (2000) Seismic Performance of Direct Hung Suspended Ceiling Systems, *Journal of Architectural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.6, No.1, pp.6-11.

[10] International Code Council (2010) *Acceptance Criteria for Seismic Certification by Shake-Table Testing of Nonstructural Components* (ICC-ES AC156), USA.

[11] Pourali, A., Dhakal, R.P., MacRae, G., and Tasligedik, A.S. (2017) Fully Floating Suspended Ceiling System: Experimental Evaluation of Structural Feasibility and Challenges, *Earthquake Spectra*, Sage, Vol.33, No.4, pp.1627-1654.

요약: 본 연구에서는 국내외 대표적 천장시스템과 현행 내진설계기준에 의한 가새보강 천장시스템에 대한 진동대 실험을 통해 각 시스템의 내진성능과 주요 동특성을 분석하였다. 실험결과, 천장시스템의 고유진동수는 행어 접합부 상세의 영향을 받으며, 행어 와이어와 행어 볼트를 사용하는 직·간접 현수 천장시스템 간에는 상당한 고유진동수의 차이가 확인되었다. 천장실험체의 가속도증폭계수 분석결과 현행 내진설계기준에서 천장시스템의 가속도증폭계수를 과소평가하고 있음을 확인하였다. 부착식 천장시스템은 지진하중의 작용방향에 따라 극명한 내진성능의 차이를 보여주었으며, 지진하중이 캐링 채널에 작용시 캐링 채널 조인트의 조기파괴로 인한 천장시스템의 파괴가 확인되었다. 가새보강 천장시스템은 비내진 천장시스템과 비슷한 정도의 파괴를 보여, 유의미한 내진성능의 차이는 확인되지 않았다. 이는 가새로 인해 천장에 작용하는 높은 수평·수직 가속도의 영향과 천장프레임의 낮은 면내강성에 의해 발생하는 부재 간의 상대변위의 영향으로 확인되었다.

핵심용어: 비구조요소, 내진설계, 대형 진동대 실험, 가속도증폭계수, 천장시스템