천장시스템의 동특성 식별 및 인접 구조물과의 충돌을 고려한 동적응답해석

전민준¹ · 주보근¹ · 조봉호² · 이상현^{1*}

¹단국대학교 건축공학과, ²아주대학교 건축공학과

Identification of Dynamic Characteristics and Numerical Analysis of Ceiling System Considering Collision Adjacent Structures

Min-Jun Jeon¹, Bo-Geun Ju¹, Bong-Ho Cho² and Sang-Hyun Lee^{1*}

¹Department of Architectural Engineering, Dankook Univ., Yongin, 16890, Korea

²Department of Architectural Engineering, Ajou Univ., Suwon, 16500, Korea

Abstract

In the Pohang Earthquake in 2017, considerable damage to non-structural elements, such as ceiling systems, exterior finishes, and curtain walls, was reported; thus, the seismic designs of non-structural elements are important. In this study, the modal characteristics of a ceiling system were investigated through the impact hammer test. The frequency and damping ratio according to the length of the hanger bolt were identified. In addition, collision experiments were conducted to obtain the impact duration for exactly considering the impact effects of the ceiling against a wall or other adjacent elements. Based on the identified dynamics and impact duration of the ceiling system, the seismic responses of the ceiling system were obtained numerically in case of collision. Numerical simulation results show that the impact load tends to increase with the clearance between the ceiling and adjacent elements, and is not correlated with the length of the hanger bolt.

Keywords : ceiling system, non-structural elements, length of hanger bolt, clearance, impact force

1. 서론

2017년 11월 15일 포항시 북구 북쪽 6km에서 규모 5.4의 지진이 발생하였다. 지진으로 인한 인적·물적 피해는 총 57,039 개소이며, 피해금액은 850억에 달했다. 2016년 일어난 경주지진의 경우 110억원에 달하는 재산피해를 입혔다(Architectural Institute of Korea, 2018).

포항지진은 진앙지 부근의 최대가속도(EI Centro 지진 NS성분의 약 76% 수준)는 매우 큰 반면 유효지반가속도(EI Centro 지진 NS성분의 약 34% 수준)는 다소 작아 구조체의 피해보다는 가속도로 인한 천장재, 치장벽돌, 조적기움벽체 등 비구조체의 피해가 많이 발생하였다. 지진으로 인한 천장재에 대한 피해사례의 경우, Fig. 1과 같이 KTX 포항역사, 포항방

송국, S대학교, H대학교 등 천장시스템 전체가 붕괴되거나 일부가 파괴되는 피해들이 발생하였다. 천장재는 탈락된 부재의 낙하로 인한 2차적인 재산피해와 인명피해를 발생시킬 수 있다.

(a) S. university

(b) Pohang station

Fig. 1 Damaged ceiling system by Pohang earthquake (Architectural Institute of Korea, 2018)

* Corresponding author:

Tel: +82-31-8005-3735; E-mail: lshyun00@dankook.ac.kr

Received March 12 2019; Revised May 2 2019;

Accepted August 9 2019

©2019 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.

국외에서도 지진으로 인한 천장재의 파괴사례가 많이 보고되고 있다. Fig. 2와 같이 국외의 피해사례도 국내와 마찬가지로 천장재의 파손으로 인한 낙하물이 매우 많기 때문에 이로 인한 추가적인 피해는 충분히 예측할 수 있다.

Fig. 2 Suspended ceiling system failure in Indonesia (Left : BusinessLIVE, Right : VOA News)

이전 한국건축구조기준(KBC2016)은 천장재 등 비구조요소 관련 내진설계기준이 정비된 미국(ASCE 7-16)과 일본(국토교통성 고시 제771호) 등과 비교할 때 세부적인 규정을 정립하지 못하고 있었다. KBC2016에서는 천장재의 내진설계기준으로 천장 무게가 200N/m^2 이상인 경우에 대해서만 천장재가 설치된 높이와 구조물의 높이에 의해 증폭된 등가정적하중을 적용하도록 제시되어 있다. 반면 미국 ASCE 7-16 및 일본 국토교통성 고시 제771호에서는 수직지진하중에 대하여 추가적으로 고려하고 있으며 행어볼트, 브레이스, 몰딩부, 주부재간 접합부에 대한 상세한 시공기준이 제시되어 있다. 또한 천장재와 주변 구조체 사이의 간격인 이격거리(clearance)에 관한 규정도 제시되어 있다.

Fig. 3 Clearance and Ceiling system

천장재에 브레이스를 설치하는 경우, ASCE 7-16(2010)에서는 천장시스템이 주변 구조물과 충돌이 발생하지 않도록 주변 구조물과의 이격거리를 최소 9.5mm 이상 확보해야 한다는 내용이 포함되어 있고, 국토교통성 고시 제771호(2013)에서는 천장시스템과 벽 사이의 이격거리를 60mm 이상 확보해야 한다고 명시하고 있다. 즉, 미국과 일본에서는 브레이스가 설치된 천장재가 주변 구조체와의 충돌이 발생하지 않도록 설계 및 시공 기준을 제시하고 있다.

우리나라 국토교통부에서 고시한 건축물 내진설계기준 KDS 41 17 00(2019)에서는 ASCE 41-16을 근간으로 비구조요소에 대한 내진설계기준을 강화하여 수직방향 설계지진력, 천장재의 상대변위 수용성능에 대한 기준을 추가하였다. 또한 횡지지가 되지 않은 천장시스템에 대하여 구성 요소에 대한 최소 성능 요구조건의 제시 및 주변 설비시설과의 상호작용 등을 고려하여 설계 후 내진설계책임구조기술자에게 승인을 득하여 사용하도록 하고 있다.

Gilani 등(2014)은 실제 ASCE 41-16을 적용한 천장시스템은 내진설계기준의 성능기준과 동등이상의 성능을 보유하고 있음을 정적 및 동적실험을 통해 증명하였다. 또한 Sato 등(2011)은 일본기준이 적용된 M-bar 시스템의 파괴모드를 규정하고, 실험을 통해 파괴모드를 증명한 연구 결과를 보고하였다. 동 연구에서 수치해석을 통하여 천장재가 연결된 슬래브의 가속도 수준을 기준으로 천장재의 파괴모드를 확률로써 정의하여 제시하고 있다.

본 연구에서는 천장재의 동적수치해석 평가를 위한 진동수, 감쇠비 등 기본 데이터 확보 및 지진하중에 대한 충돌을 포함한 천장재의 시간이력 해석을 수행하였다. 대상 시스템은 T-bar 시스템으로 천장재의 기본적인 동특성인 고유진동수와 감쇠비를 실험을 통하여 식별하였으며, 이를 바탕으로 천장시스템의 충돌을 포함한 시간이력 해석을 통해 천장재에 발생하는 변위, 속도, 가속도 응답을 계산하였다. 이를 통해 달대길이와 이격 거리에 따른 천장시스템의 응답특성변화 특성을 분석하였다.

2. 천장재 동특성 식별

2.1 실험개요

본 연구에 사용된 천장시스템은 T-bar 시스템으로 골조의 주요 구성요소는 Fig. 4와 같이 Main T-bar, Cross T-bar, Carrying channel, Hanger bolt 등이며 Steel panel이 추가된다. 각 부재의 상세는 Table 1에 나타내었다.

Fig. 4 Details of T-bar ceiling system

Table 1 Elements Information of T-bar ceiling system

	Size	Weight
Steel Panel	600mm×600×mm(0.5T)	3.925kg/m ²
Main T-BAR	25×38×0.4T	0.746kg/m ²
Cross T-BAR	25×25×0.4T	0.593kg/m ²
Carrying Ch.	12×38×1.2T	0.468kg/m ²
Hanger bolt	2.0T-@1,000mm	0.066kg/m ²

천장재는 패널의 탈락 등 파괴가 발생하기 전까지는 모든 요소가 일체화거동을 하는 단자유도 모델로 단순화할 수 있다. 천장재의 단자유도 수치해석모델을 구축하기 위하여 식별해야 하는 요소는 기본적으로 고유진동수와 감쇠비이며, 추가적인 요소로 주변 구조물과의 충돌 시 충격하중을 고려하기 위한 충격지속시간이 있다.

먼저 천장재의 고유진동수와 감쇠비를 식별하기 위해 임팩트해머 테스트를 수행하였고 시험체 전경은 Fig. 5와 같다.

Fig. 5 Floor plan of impact hammer test

천장재의 일체화 거동을 검증하기 위해 Fig. 6과 같이 천장재의 중앙부(B지점)와 단부(C지점)에 가속도계를 같은 방향으로 설치하고, A지점에 임팩트해머로 가력하여 천장재의 가속도응답을 계측하였다. 천장재의 고유진동수를 결정하는 요인은 행어볼트의 길이와 천장패널 및 프레임의 질량인데, 본 연구에서는 행어볼트 길이에 의한 영향만 고려하기 위하여 실험변수를 행어볼트 길이로 설정하고 550mm부터 850mm

Fig. 6 Front view of impact hammer test

까지 100mm씩 변화시키며 실험하였다. 또한, 임팩트해머로 가력한 충격하중의 수준에 따른 동특성에 변화를 분석하였다.

두 번째로 충돌 시 충격지속시간을 측정하였다. 충격지속시간은 천장재에 초기변위를 발생시킨 후 자유진동 상태에서 천장재가 구조물에 충돌하도록 한 후 이로 인해 발생하는 천장재 가속도응답의 변화지속시간을 측정하여 Fig. 7과 같이 충격지속시간을 계측하였다.

Fig. 7 Impact duration

2.2 천장재의 고유진동수 식별

먼저, 천장재의 고유진동수는 주파수 응답 함수(frequency response function, FRF)를 이용하여 산정하였다. 주파수 응답 함수($H(\omega)$)는 진동수영역에서 출력신호를 입력신호에 대하여 정규화하여 나타낸 함수로 주파수 응답이 크게 증폭되는 주파수를 시스템의 고유진동수로 결정할 수 있으며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$H(\omega) = \frac{FFT_{output}(\omega)}{FFT_{input}(\omega)} \quad (1)$$

여기서, FFT_{data} 는 계측된 *data*(input or output)의 푸리에 변환(FFT spectrum)이다.

Fig. 8 Time history and FFT spectrum of Measured Data (hanger bolt : 550mm)

계측된 임팩트해머의 하중과 천장재 가속도응답의 시간이력 및 FFT 스펙트럼의 예시를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서 출력값의 FFT 스펙트럼을 주파수별로 입력값의 FFT 스펙트럼으로 정규화시킨 FRF는 Fig. 9와 같다.

Fig. 9 Frequency Response Function (hanger bolt : 550mm)

Fig. 9를 통해 행어볼트의 길이가 550mm인 경우, 천장재의 고유진동수는 2.10Hz로 산정할 수 있다.

동일한 과정을 행어볼트 길이를 변화시키며 수행하였고, 최종적으로 행어볼트 길이에 따라 식별된 고유진동수는 Table 2와 같다.

Table 2 Identified natural frequencies of ceiling system

Length of hanger bolt (mm)	Natural frequency (Hz)
550	2.10
650	1.71
750	1.45
850	1.28

천장재의 고유진동수는 행어볼트의 횡강성과 천장재의 무게에 의하여 결정되는데, 고유진동수 식별결과 행어볼트의 길이가 증가함에 따라 횡강성이 감소하여 고유진동수가 작아지는 경향을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

2.3 천장재의 감쇠비 식별

다음으로 천장재의 감쇠비(ξ)는 임팩트해머 테스트를 통해 발생한 자유진동응답을 계측하고, 식 (2)와 같이 대수감소법을 이용하여 식별하였다.

$$\xi = \frac{1}{2\pi \times n} \times \ln\left(\frac{u_j}{u_{j+n}}\right) \quad (2)$$

여기서, u_j 는 자유진동응답의 j 번째 사이클의 피크값, n 은 j

번째 사이클 이후 n 번째 사이클을 의미한다.

Mun 등(2018)은 구조물의 감쇠비가 구조물의 응답수준에 따라 증가한다는 것을 실제 구조물 응답을 계측함으로써 증명하였다. 본 연구에서는 천장재의 응답크기에 따른 감쇠비 변화 추이를 분석하기 위해 임팩트해머의 충격하중을 100N, 200N, 300N으로 가력하고 계측된 데이터에 대한 감쇠비 계산 시 식 (2)의 n 값을 1, 2, 3으로 설정하였다. 행어볼트 길이가 550mm이고 임팩트해머의 가력수준이 100N인 경우 자유진동응답 크기감소에 따른 감쇠비 변화추이를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10 Tendency of damping ratio decrease (Hanger bolt : 550mm, Impact force : 100N)

Fig. 10에서 자유진동횟수가 증가하면서 감쇠비가 줄어드는 경향을 확인할 수 있다. 즉 천장시스템은 응답크기에 비례한 감쇠비를 갖는다. 행어볼트 길이가 550mm이고 임팩트해머의 가력수준이 100N인 경우, 감쇠비 분석 사이클 간격(n)에 따라 계산된 감쇠비의 평균값과 자유진동구간의 시작과 끝 데이터를 통해 계산한 결과는 Table 3과 같다.

Table 3 Damping ratio according to analysis interval

Interval of analysis cycles	Mean of damping ratio
1 Cycle	1.04%
2 Cycle	1.05%
3 Cycle	1.10%
Whole data	1.04%

감쇠비는 분석 시 사용되는 사이클 간격이 클수록 크게 평가되며, 매 사이클마다($n=1$) 계산한 감쇠비의 평균값은 전체 자유진동구간에서 처음과 마지막 데이터를 이용하여 계산한 값과 일치함을 확인하였다. 본 연구에서는 천장시스템의 보수적인 평가를 위해 감쇠비가 가장 작게 평가된 값을 수치모델로 선정하였다.

동일한 과정을 행어볼트 길이와 임팩트해머의 가력수준을 변경하며 수행하였고, 이에 따라 식별된 감쇠비는 Table 4와 같다.

Table 4 Identified damping ratio

Hanger length (mm)	Damping ratio according to impact force level(%)		
	100N	200N	300N
550	1.04	1.46	1.78
650	1.35	1.68	1.82
750	1.17	1.33	1.48
850	1.02	1.38	1.56

감쇠비 식별결과 천장재의 감쇠비는 응답 또는 외력수준에 비례하며, 행어볼트의 길이에 따른 경향성이 뚜렷하지 않아 행어볼트 길이와는 상관성이 없는 것으로 판단된다.

천장시스템은 평균적으로 1.42%의 감쇠비를 가진 것으로 나타났지만 감쇠비에 대한 수치모델은 보수적인 평가를 위해 최소값인 1%를 사용하였다.

2.4 충격지속시간 측정 결과

충격지속시간은 2.1절(Fig. 7 참조)에서 언급한대로 충돌 발생 시 발생한 가속도 변화시간을 측정하여 산정하였다. 즉 가속도가 증폭하기 시작한 지점과 끝나는 지점 사이의 시간이 충격지속시간이다. 천장재 충돌실험은 총 24회 진행하였으며, 이때 계측된 가속도 응답은 Fig. 11과 같다.

Fig. 11 Measured acceleration in impact test

측정된 충격지속시간의 평균은 0.015초이며, 표준편차는 0.0035초이다.

3. 식별된 동특성을 이용한 충격하중 시뮬레이션

3.1 천장시스템의 수치해석 모델

천장시스템의 수치해석 모델에는 고유진동수, 감쇠비, 충격 지속시간이 포함되며 이는 실험을 통해 결정되었다.

또한 천장시스템이 포함된 n 층 건물은 Fig. 12와 같은 다자유도 시스템으로 나타낼 수 있다.

Fig. 12 MDOF model including ceiling system

이를 다자유도 운동방정식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{x}_g \quad (3)$$

여기서, M , C , K 는 각각 전체 시스템의 질량, 감쇠, 강성행렬이며 M , K 는 아래와 같다.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{2n} \end{bmatrix} \quad (kg)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_3 & -k_2 & -k_3 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_3 & 0 & k_3 + k_4 & -k_3 & -k_4 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & 0 & \ddots & 0 \\ & & & & 0 & k_{2n} \end{bmatrix} \quad (N/m)$$

천장시스템을 포함한 다자유도 시스템의 감쇠행렬 C 는 모드 해석 시 대각화가 되지 않는 비고전적 감쇠행렬로 천장시스템을 제외한 건물의 감쇠행렬을 이용하여 구성할 수 있다.

먼저 Fig. 12에서 천장시스템이 없다고 가정하고, 건물의 모든 모드에 대한 모드감쇠비를 ξ 로 설정하면 식 (4)와 같은 모드감쇠행렬을 구성할 수 있다. 모드감쇠비는 각 모드별로 다르게 설정할 수도 있다. 이 때 n 층 건물에 대하여 간략히 치환된 모델이기 때문에 $n \times n$ 행렬로 구성된다.

$$\Phi^T C_s \Phi = C_n = \begin{bmatrix} 2\xi m_1^* \omega_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 2\xi m_3^* \omega_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 2\xi m_{2n-1}^* \omega_{2n-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, 첨자표기는 Fig. 12에 나타난 자유도를 따른 것으로 m_{2n-1}^* 은 n 차 모드의 참여질량, ω_{2n-1} 은 n 차 모드 고유진동수를 의미한다. Φ 는 건물의 모드형상, T 는 전치행렬, C_s 는 구조물의 실제 감쇠행렬이다.

식 (4)를 통해 구조물의 실제 감쇠행렬인 C_s 는 식 (5)와 같이 산정할 수 있다.

$$C_s = (\Phi^T)^{-1} C_n (\Phi)^{-1} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)에 천장시스템의 자유도를 추가하여 전체시스템의 감쇠행렬 C 는 식 (6)과 같이 구성할 수 있다.

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} + c_c & -c_c & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -c_c & c_c & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ c_{21} & 0 & c_{22} + c_c & -c_c & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & -c_c & c_c & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & c_{nn} + c_c & -c_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_c & c_c \end{bmatrix} \quad (6a)$$

$$c_c = 2\xi_c m_c w_c (N \cdot s/m) \quad (6b)$$

여기서, c_c 는 천장시스템의 감쇠상수로 실험을 통해 식별된 고유진동수와 감쇠비를 적용하여 결정할 수 있다.

천장시스템은 지진하중과 같은 횡하중 작용 시, 횡변위가 발생하며 주변의 벽 또는 기타 구조물과 충돌이 발생할 수 있다. 이를 모사하기 위해 충돌에 대한 수치모델이 필요하다. 본 연구에서는 천장시스템이 주변 구조물과 충돌하는 경우 완전탄성 충돌이 발생한다고 가정하여 수치모델을 수립하였다.

Fig. 13 Crashing between ceiling system and structural element

Fig. 13과 같이 천장시스템이 주변 구조물과 완전탄성충돌할 경우 천장시스템의 속도는 충돌 직전과 같은 속도로 방향만 반대방향으로 바뀌게 된다. 이때 충격하중(F_i)은 운동량보전 법칙에 의해 식 (7)과 같이 충격지속시간에 반비례하여 발생한다.

$$F_i = \frac{m_c v_c}{\Delta t} \quad (7)$$

여기서, m_c 와 v_c 는 각각 천장시스템의 질량과 충돌 시의 속도이며 Δt 는 충격지속시간이다.

3.2 충돌해석 전 수치해석 시뮬레이션 검증

천장시스템의 지진하중에 대한 수치해석 시뮬레이션에 앞서 본 연구에서 MATLAB을 이용하여 수행하는 시뮬레이션에 대한 정확성을 검증하기 위해 Table 5의 상세를 갖는 예제 건물에 대하여 상용구조해석 프로그램인 MIDAS Gen을 통해 동적해석을 수행한 결과와 비교하였다. 예제 건물의 1차모드 고유주기는 0.47초로 이는 KDS 41 17 00의 철근콘크리트와 철골 모멘트저항골조에서 12층을 넘지 않고 층의 최소높이가 3m이상일 때의 근사고유주기산정법($T=0.1N$, N 은 층수)을 통해 계산되는 0.5초와 유사한 결과이며, 일반적인 5층 건물의 동적응답을 모사하는데 적절한 동특성을 가지고 있다고 판단되어 해당 모델을 수치해석 시뮬레이션의 타당성 검증용으로 사용하였다.

Table 5 Structural information of example building

Floor	Height	Column size	Girder size	Thk. of slab
5	3m × 5 = 15m	300mm × 300mm	300mm × 400mm	200mm

예제 건물에 적용한 지진파는 개정된 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)을 기준으로 스케일링된 El Centro(1942, NS성분) 지진파를 사용하였다. 스케일링 시 사용된 값들은 Table 6과 같으며 2차원 해석 시의 스케일링 방법에 따라 스케일링하였다.

Table 6 Factors for earthquake scaling

Seismic zone	1
Zone factor	0.22
Site class	S_A
Natural period of structure	0.47 sec
S_{DS}	0.4987g

가정한 요소들에 대한 El Centro 지진파의 스케일링 팩터는 0.6209이며, 스케일링된 El Centro 지진파의 시간이력 및 응답스펙트럼은 Fig. 14와 같다.

스케일링된 El Centro 지진파를 적용하여 예제 건물의 응답을 MIDAS Gen과 MATLAB을 통하여 계산한 결과는 Fig. 15와 같다.

Fig. 15를 통해 두 가지 프로그램을 이용하여 계산한 결과가 거의 일치함을 확인할 수 있다.

또한 KDS 41 17 00에서는 비구조재에 작용하는 등가수평지진력(F_p)을 식 (8)과 같이 제시하고 있다.

$$F_p = \frac{0.4\alpha_p S_{DS} W_p}{\left(\frac{R_p}{I_p}\right)} \left(1 + 2 \frac{z}{h}\right) \quad (8)$$

(a) Time history

(b) Response spectrum

Fig. 14 Scaled El Centro earthquake

(a) Responses of ceiling system - 1F

(b) Responses of slab - 1F

Fig. 15 Comparing the analysis results between MIDAS Gen and MATLAB

여기서, S_{DS} 는 단주기 설계스펙트럼가속도, W_p 는 비구조요소의 가동중량, z 와 h 는 각각 비구조요소가 부착된 높이, 건물의 지붕층 평균높이를 의미한다. I_p 는 비구조요소의 중요도계수, R_p 는 비구조요소의 반응수정계수, α_p 는 비구조요소의 증폭계수이다. KDS 41 17 00에서 유연한 요소의 경우 $\alpha_p=2.5$ 를

적용하도록 하고 있다. 이를 식 (8)에 대입하면 비구조재에 발생하는 가속도는 $S_{DS}(1+2z/h)$ 임을 알 수 있다. 즉 비구조재가 설치된 높이와 건물의 높이에 따라 증폭비가 결정된다. 예제 건물에 행어볼트 길이가 550mm로 설치된 경우에 대하여 식 (8)을 적용한 결과와 시간이력해석결과를 비교한 결과는 Fig. 16과 같으며, 두 결과가 유사한 수준임을 확인하였다. Fig. 16(a)는 2차원 해석 시의 스케일링 방법을 적용한 경우이고, Fig. 16(b)는 3차원 해석 시의 스케일링 방법을 적용한 경우이다.

(a) 2D analysis

(b) 3D analysis

Fig. 16 Comparing equivalent static load and analyzed results(5F ceiling)

이러한 결과에 근거하여 MATLAB을 통한 수치해석 모델 및 해석과정이 타당하다고 판단되어, 이후 충돌을 포함한 해석은 MATLAB만 이용하여 수행하였다.

3.3 천장재의 충돌을 포함한 수치해석 시뮬레이션

실험을 통해 식별된 천장재의 동특성과 충격지속시간 및 완전탄성충돌을 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다. 입력지진파는 앞에서 언급한 스케일링된 El Centro 지진파이며, 시뮬레이션 시 설정한 변수는 행어볼트 길이와 이격거리이다. 행어볼트의 길이는 550mm~850mm, 천장재와 구조물 사이의 이격거리는 실제 시공 시 발생하는 수준인 1~20mm로 가정하였다. 행어볼트 길이 550mm, 이격거리 13mm인 경우에 5층 천장재 대한 해석예시를 Fig. 17에 나타내었다.

Fig. 17 Simulation results of ceiling system installed in example building (hanger bolt : 550mm, clearance : 13mm)

Fig. 17의 변위 응답이력(첫 번째 그래프)에서 천장재의 변위가 이격거리(13mm)에 도달하면 충돌이 발생하며, 완전탄성충돌을 가정하였기 때문에 충돌 후에는 속도의 방향이 반대로 바뀌게 된다. 충돌이력은 Fig. 17의 네 번째 그래프에 나타내었으며, 충격하중은 앞서 언급한 식 (7)에 의해 산정되었다.

Fig. 17의 가속도 응답이력(세 번째 그래프)에서 충돌에 의해 가속도가 증폭되어 KDS 41 17 00의 가속도 기준값을 초과하는 것을 볼 수 있는데, 초과하는 정도는 건물마다 다르게 나타날 수 있으며 실제 천장재 시공 시 발생하는 주변 구조체와 천장 사이의 이격거리에 의해 설계하중보다 큰 하중이 작용할 수 있음을 의미한다.

Fig. 18 Simulation results of ceiling system installed in example building (hanger bolt : 550mm, clearance : 20mm)

Fig. 18은 행어볼트 길이 550mm이고, 이격거리가 20mm인 경우에 대한 해석결과이다. Fig. 17~18의 두 번째 그래프인 속도를 비교해 보면, 이격거리가 큰 경우에 천장재의 속도응답이 전체적으로 커짐을 알 수 있다. 이에 따라 충격하중이 커지게 되며, 천장재에 발생하는 가속도 수준 또한 증가함을 확인하였다.

Fig. 19는 행어볼트 길이와 이격거리에 따른 층별 최대충격하중을 분석한 결과이다.

(a) Variable : Length of hanger bolt

(b) Variable : Separation distance

Fig. 19 Maximum impact force

Fig. 19를 통해 천장재에 발생하는 최대충격하중은 행어볼트 길이와는 무관하며, 이격거리에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 이는 충격하중을 발생시키는 요인이 천장재의 속도이며, 같은 지진하중 하에서 더 큰 속도를 발생시키기 위해서는 충분한 이동거리가 필요하다는 추론과 일치하는 결과이다. 즉, 천장재 시공 시 이격거리를 최소화하여 시공하는 것이 천장재에 발생하는 하중을 최소화하는 방법이라고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 실험을 통해 천장시스템의 동특성 및 충격지속시간을 식별하고, 식별된 결과를 바탕으로 5층 건물에 설치

된 천장재의 응답을 수치해석 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

천장재의 감쇠비 식별결과, 감쇠비는 행어볼트의 길이와는 무관하였고 천장재는 평균적으로 1.43%의 감쇠비를 갖는 것으로 확인되었지만 보수적인 평가를 위해 최소값인 1%를 수치해석 모델에 적용하였다.

천장재에 작용하는 충격하중을 수치해석 시뮬레이션을 통해 분석한 결과, 천장재에 발생하는 최대충격하중은 행어볼트 길이와는 무관하였으며 이격거리에 비례하여 증가함과 설계기준에서 제시한 하중을 초과할 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 천장재에 발생하는 하중을 최소화하기 위해서는 시공 시 발생하는 이격거리를 최소화하는 노력이 필요하다고 사료된다.

본 연구는 천장재 시스템의 내진설계를 위한 초기단계로, 추후 동적실험 및 유한요소모델을 통한 연구결과검증 및 천장시스템 내부의 파괴메커니즘 등에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업(19AUDP-B1063 27-05) 및 한국연구재단의 대학중점연구소지원사업(NRF-2018R1A6A1A07025819)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Architectural Institute of Korea (2018) Site Inspection and Damage Investigation of Buildings by

Earthquakes in Gyeongju and Pohang, Architectural Institute of Korea.

Architectural Institute of Korea (2016) Korean Building Code, Architectural Institute of Korea.

American Society of Civil Engineers (2010) Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures(ASCE/SEI 7-16), ASCE.

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan (2013) Public Notice No.771, MLIT.

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (2019) KDS 41 17 00, Korea Construction Standards Center.

Gilani, A.S.J., Takhirov, S.M., Tedesco, L.M. (2013) Seismic Evaluation of Suspended Ceiling Systems using Static and Dynamic Procedures, *Struct. Congr. 2013: Bridging Your Passion with Your Profession*, pp.1523~1532.

Sato, Y., Motoyui, S., MacRae, G.A., Dhakal, R.P. (2011) Ceiling Fragility of Japanese Ceiling Systems, *Pro. Ninth Pacific Conf. Earthq. Eng.*

Mun, D.H., Hwang, J.S., Lee, S.H. (2018) Comparison of Modal Parameters According to the Magnitude of Wind-induced Dynamic Response of the 5-story Structure, *Proc. WEIK Symp.*, 21, pp.53~55

요 지

2017년 발생한 포항 지진으로 인하여 천장재, 외장재, 커튼월 등 비구조재의 파괴에 의한 피해가 다수 보고되었으며 비구조재의 내진설계가 중요해지고 있다. 본 연구에서는 임팩트해머 테스트를 통해 행어볼트 길이에 따른 천장재의 고유진동수와 감쇠비를 식별하였다. 또한 천장재가 벽 또는 다른 구조체에 충돌하는 경우 발생하는 충격효과를 정확히 고려하기 위해 충돌실험을 수행하였다. 식별된 천장재의 동특성과 충격지속시간을 바탕으로 실제로 천장재가 지진하중으로 인하여 주변 구조물과 충돌이 발생하는 경우에 대한 천장재 응답특성을 수치해석을 통하여 분석하였다. 수치해석 시뮬레이션 결과, 충격하중은 이격거리에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 달대길이와는 무관한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 천장재, 천장시스템, 비구조재, 달대길이, 이격거리, 충격하중, 충격하중 시간이력 해석