

KDS 41 17 00에 따른 철골모멘트 건축물의 동적해석

Dynamic Analyses of Steel Moment Buildings According to the KDS 41 17 00

박 찬 혁* 이 주 한* 김 현 일* 하 성 진**
 Park, Chan-Hyuk Lee, Ju-Han Kim, Hyun-Il Ha, Seongjin

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the seismic response of structures according to newly revised domestic seismic design standard. In the paper, major details of amendments are included such as seismic performance levels, site classifications, site amplification factors, etc. Also, time history analyses of 3-story steel moment building is conducted to assess the differences between existing and revised seismic design standard. The results show that the structural responses are reduced with newly revised seismic design standard.

키워드 : 내진성능수준, 지반분류, 설계가속도스펙트럼, 지진응답평가
 Keywords : Seismic Performance Level, Ground Classification, Design Acceleration Spectrum, Earthquake Response Assessment

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

과거에 비해 지진의 발생빈도가 점차 잦아지고 강도가 높아짐으로써 국민들의 불안감은 높아지고 있다. 대표적으로 5.0 이상의 강진이 2016년 9월 경주지진, 2017년 11월 포항지진이 발생하여 우리나라는 더 이상 지진의 안전지대가 아닌 것을 암시하였고, 국내 지진에 대한 국민들의 관심이 높아짐으로 정부 및 학계에서 지진 관련 연구를 강화하고 내진 대책을 마련하는 등의 여러 정책이 많아지는 추세이다.

건축구조기준(KBC 2016)에서 내진설계 일반(KDS 17 10 00 : 2019), 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)으로 개정됨으로써 국내 내진설계기준의 재정립은 한국지진공학회를 중심으로 국토교통부 국책과제를 통해 다루어졌으며, 경주지진과 포항지진 이후 국내 내진설계기준에 대한 재정립이 본격적으로 진행되었다. 2018년 12월 중앙건설기술심의위원회를 통과해 시설물별 공통으로 적용되는 내진설계기준(KDS 17 10 00)이 공시되었다. 따라서 개정된 기준에 맞추어 구조물 지진응답이 어떻게 달라지는지 평가한다.

1.2 연구의 방법 및 절차

본 연구에서 건축구조기준(KBC 2016)과 내진설계 일반(KDS 17 10 00), 건축물 내진설계(KDS 41 17 00)에서 내진성능수준, 내진성능목표, 지반의 분류, 등 신설 및 변경된 설계기준의 주요내용을 소개하고, 설계가속도스펙트럼의 설계 값을 비교분석하였다. 이를 기반으로 Midas Gen으로 모델링을 한 3층 철골 모멘트 골조를 대상으로 비선형 시간이력해석을 통해 현행 내진설계 기준과 기존의 내진설계기준에 차이를 분석하였고, Matlab으로 입력지진파를 선정하여 대입한 뒤 지진응답 평가를 진행한다.

2. 내진설계기준 개정사항

2.1 내진성능수준

건축구조기준에 명시된 내진성능수준은 기능수행(또는 거주가능),인명 안전 및 붕괴방지, 인명안전, 붕괴방지로 분류되며 Table 1과 같다.

반면에 내진설계 일반에 명시된 내진성능수준은 기능수행수준, 즉시복구수준, 장기복구/인명보호수준, 붕괴방지수준으로 장기복구, 즉시복구수준이 Table 2와 같이 추가됨을 확인할 수 있다.

2.2 내진성능목표

Table 3은 건축구조기준에 명시된 내진성능목표이다. 건축구조기준에서는 설계스펙트럼가속도의 배수를 비례하는 지진위험도와 내진성능수준의 조합으로 정의한다.

반면, 내진설계 일반은 Table 4와 같이 50년부터 4800년까지의 재현주기를 갖는 설계지진과 요구되는 내진성능수준의 조합으로 정의한다. 2.1과 같이 내진성능수준의

* 한국교통대 건축공학과, 공학학사

** 한국교통대 건축학부 교수, 공학박사 (sjha@ut.ac.kr)

이 연구는 2023년도 한국교통대학교의 지원을 받아 수행되었음.

Table 1. 내진성능수준 (KBC 2016)

| 성능수준 | 상태 |
|------|--|
| 거주가능 | 문제점이 없는 최상의 상태이다. 평가기준 지진작용 시 구조부재의 피해는 무시할만하며 비구조체에 손상이 있으나 거주에 안전하며 보수와 청소를 통해 기능을 수행할 수 있다. |
| 인명안전 | 평가기준 지진작용 시 구조물은 원래 횡강성과 강도를 손실하나 붕괴에 대해서는 여전히 여력을 보유하고 있다. 구조물은 영구변형이 발생한다. |
| 붕괴방지 | 평가기준 지진작용 시 구조부재에 큰 피해가 예상. |

Table 2. 내진성능수준 (KDS 17 10 00)

| 성능수준 | 상태 |
|-------------|---|
| 기능수행수준 | 설계지진하중 작용 시 구조물이나 시설물에 발생한 손상이 경미하여 그 구조물이나 시설물의 기능이 유지될 수 있는 성능수준 |
| 즉시복구수준 | 설계지진하중 작용 시 구조물이나 시설물에 발생한 손상이 크지 않아 단기간 내에 즉시 복구되어 원래의 기능이 회복될 수 있는 성능수준 |
| 장기복구/인명보호수준 | 설계지진하중 작용 시 구조물이나 시설물에 큰 손상이 발생할 수 있지만 장기간의 복구를 통하여 기능 회복이 가능하거나, 시설물에 상주하는 인원 또는 시설물을 이용하는 인원에게 인명손실이 발생하지 않는 성능수준 |
| 붕괴방지구준 | 설계지진하중 작용 시 구조물이나 시설물에 매우 큰 손상이 발생할 수는 있지만 구조물이나 시설물의 붕괴로 인한 대규모 피해를 방지하고, 인명 피해를 최소화하는 성능수준 |

Table 3. 내진성능목표 (KBC 2016)

| 내진 등급 | 성능목표 | |
|-------|----------------|-----------------|
| | 성능수준 | 지진위험도 |
| 특 | 기능수행 (또는 즉시거주) | 설계스펙트럼가속도의 1.0배 |
| | 인명안전 및 붕괴방지 | 설계스펙트럼가속도의 1.5배 |
| I | 인명안전 | 설계스펙트럼가속도의 1.2배 |
| | 붕괴방지 | 설계스펙트럼가속도의 1.5배 |
| II | 인명안전 | 설계스펙트럼가속도의 1.0배 |
| | 붕괴방지 | 설계스펙트럼가속도의 1.5배 |

Table 4. 내진성능목표 (KDS 17 10 00)

| 내진 성능수준 평균 재현주기 | 성능수준 | | | |
|--------------------|---------|---------|-----------|---------|
| | 기능수행 | 즉시복구 | 장기복구/인명보호 | 붕괴방지 |
| 50년 | 내진 II등급 | | | |
| 100년 | 내진 I등급 | 내진 II등급 | | |
| 200년 | 내진 특등급 | 내진 I등급 | 내진 II등급 | |
| 500년 | | 내진 특등급 | 내진 I등급 | 내진 II등급 |
| 1,000년 | | | 내진 특등급 | 내진 I등급 |
| 2,400년 | | | | 내진 특등급 |
| 4,800년 | | | | 내진 특등급 |

차이와 설계스펙트럼가속도의 배수를 비례하는 지진위험도와 재현주기를 갖는 설계지진을 정의하는 차이점이 있다.

2.3 지반분류

기존 건축구조기준(KBC 2016)에서의 경우 UBC(1997), IBC(2000)을 따라 해외 지반상황을 고려한 기준으로 국내 지반상황을 고려하지 않은 지반분류로 인하여 설계함에 있어서 어려움이 있지만 내진설계 일반(KDS 17 10 00)을 제정함으로써 국내 지반상황을 고려하는 지반분류로 변경되어 전체적인 내용이 변경되었다. 건축구조기준(KBC 2016)에서는 Table 5와 같이 지반종류의 분류(S_A, S_B, S_C, S_D, S_E), 지반종류의 호칭과 표준관입시험, 토층평균전단파속도의 분류기준으로 구성된다. 진설계 일반(KDS 17 10 00)에서는 Table 6과 같이 지반종류의 분류(S₁, S₂, S₃, S₄, S₅), 지반 종류의 호칭과 표준관입시험, 토층평균전단파속도의 분류기준으로 구성된다.

지반종류의 분류에서 호칭이 달라진 것을 확인할 수 있으며, 건축구조기준(KBC 2016)의 지반 종류의 호칭이 경암지반, 보통암지반, 매우 조밀한 토사지반, 단단한 토사지반, 연약한 토사지반과 같이 지반구성에 중심을 둔 분류이고, 내진설계 일반(KDS 17 10 00)에서는 암반지반, 얇고 단단한 지반, 얇고 연약한 지반, 깊고 단단한 지반, 깊고 연약한 지반으로 지반구성 보다는 지반 깊이에 중심을 둔 분류로 변경되었다. 분류기준에서도 표준관입시험의 기준이 사라지고, 기반암깊이의 기준이 추가되었으며, 토층평균전단파속도가 지반 종류의 변경으로 인하여 대폭 감소되었다.

Table 5. 지반분류 (KBC 2016)

| 지반 종류 | 지반 종류의 호칭 | 분류기준 | |
|----------------|-------------|----------------------|---------------------------------------|
| | | 표준관입시험 (타격회수 /300mm) | 토층 평균전단파속도, V _{s,soil} (m/s) |
| S _A | 경암지반 | - | 1500초과 |
| S _B | 보통암지반 | | 760~1500미만 |
| S _C | 매우 조밀한 토사지반 | > 50 | 360~760미만 |
| S _D | 단단한 토사지반 | 15~50 | 180~360미만 |
| S _E | 연약한 토사지반 | < 15 | 180미만 |

Table 6. 지반분류 (KDS 17 10 00)

| 지반 종류 | 지반 종류의 호칭 | 분류기준 | |
|----------------|------------------------------|-------------|---------------------------------------|
| | | 기반암깊이, H(m) | 토층 평균전단파속도, V _{s,soil} (m/s) |
| S ₁ | 암반지반 | 1미만 | - |
| S ₂ | 얇고 단단한 지반 | 1~20 이하 | 260이상 |
| S ₃ | 얇고 연약한 지반 | | 260미만 |
| S ₄ | 깊고 단단한 지반 | 20초과 | 180이상 |
| S ₅ | 깊고 연약한 지반 | | 180미만 |
| S ₆ | 부지 고유의 특성평가 및 지반응답해석이 필요한 지반 | | |

2.4 지반증폭계수

건축구조기준에서는 Table 5와 같이 지반을 S_A, S_B, S_C, S_D, S_E로 분류하며 S_A, S_B지반에서는 단주기영역과 장주기 영역의 증폭계수 값은 일정하지만 S_C, S_D지반에서는 보통 압까지의 깊이 20m이상과 20m미만으로 분류하였고, Table 7과 같이 단주기 계수보다 장주기 영역에서 증폭계수를 큰 값으로 적용하였다. S_E지반에서는 깊이에 따른 분류를 하지 않고 단주기 계수보다 장주기 영역에서 증폭계수를 큰 값으로 적용한다.

반면에 내진설계일반에서는 Table 8과 같이 지반을 S₁, S₂, S₃, S₄, S₅로 분류하며 보통압지반의 깊이에 따른 분류를 사용하지 않았고 S₁지반에서 단주기증폭계수를 장주기증폭계수보다 큰 값으로 사용하였고, S₂지반에서는 단주기와 장주기의 같은 값을 사용하고, S₃지반에는 S_s ≤ 0.1이하일 때만 같은 값을 사용하고 S_s > 0.1일 때 장주기를 단주기보다 큰 값을 사용하였고, S₄, S₅지반에서는 장주기를 단주기보다 큰 값을 적용하였다.

Table 7. 지반에 따른 증폭계수 (KBC 2016)

| 지반 종류 | 단주기 지반증폭계수(F ₂) | | | 1초주기 지반증폭계수(F ₁) | | |
|----------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|---------|---------|
| | S _s ≤ 0.25 | S _s = 0.50 | S _s = 0.75 | S ≤ 0.1 | S = 0.2 | S = 0.3 |
| S _A | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| S _B | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| S _C | 1.2 | 1.2 | 1.1 | 1.7 | 1.6 | 1.5 |
| S _D | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 2.4 | 2.0 | 1.8 |
| S _E | 2.5 | 1.9 | 1.3 | 3.5 | 3.2 | 2.8 |

Table 8. 지반에 따른 증폭계수 (KDS 17 10 00)

| 지반 종류 | 단주기 지반증폭계수 (F ₂) | | | 1초주기 지반증폭계수 (F ₁) | | |
|----------------|------------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|---------|---------|
| | S _s ≤ 0.1 | S _s = 0.2 | S _s = 0.3 | S ≤ 0.1 | S = 0.2 | S = 0.3 |
| S _A | 1.12 | 1.12 | 1.12 | 0.84 | 0.84 | 0.84 |
| S _B | 1.4 | 1.4 | 1.3 | 1.5 | 1.4 | 1.3 |
| S _C | 1.7 | 1.5 | 1.3 | 1.7 | 1.6 | 1.5 |
| S _D | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 2.2 | 2.0 | 1.8 |
| S _E | 1.8 | 1.3 | 1.3 | 3.0 | 2.7 | 2.4 |

3. 설계스펙트럼가속도

3.1 설계스펙트럼가속도 계산

본 장에서는 지진구역 및 지역계수, (2.3)의 계수들을 이용하여 지반별로 건축구조기준과 건축물 내진설계를 비교하여 2400년 주기기준, 지진구역과 지반별로 나누어 0

초부터 6초까지의 설계스펙트럼가속도를 비교분석하였다.

건축구조기준과 건축물 내진설계에 명시된 설계스펙트럼의 정의는 다음과 같다.

- ① T ≤ T₀일 때, 스펙트럼가속도 S_a는 식 (1)에 의한다.
 - ② T₀ < T ≤ T_S 일 때, 스펙트럼가속도 S_a는 (4)에 따라 산정되는 S_{DS}와 같다.
 - ③ T_S < T ≤ T_L일 때, 스펙트럼가속도 S_a는 식 (3)에 의한다.
 - ④ T > T_L일 때, 스펙트럼가속도 는 S_a식 (4)에 의한다.
- 여기서 건축구조기준의 경우에는 (3-1), (3-2), (3-3)만 해당한다.

$$S_a = 0.6 \frac{S_{DS}}{T_0} T + 0.4 S_{DS} \tag{1}$$

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \tag{2}$$

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \tag{3}$$

여기서, T : 구조물의 고유주기(초)

$$T_0 = 0.2 S_{D1} / S_{DS}$$

$$T_S = S_{D1} / S_{DS}$$

$$T_L = 5\text{초}$$

여기서 단주기와 주기 1초의 설계스펙트럼 가속도 S_{DS}, S_{D1}은 식 (4), (5)에 의하여 산정한다.

$$S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times \frac{2}{3} \tag{4}$$

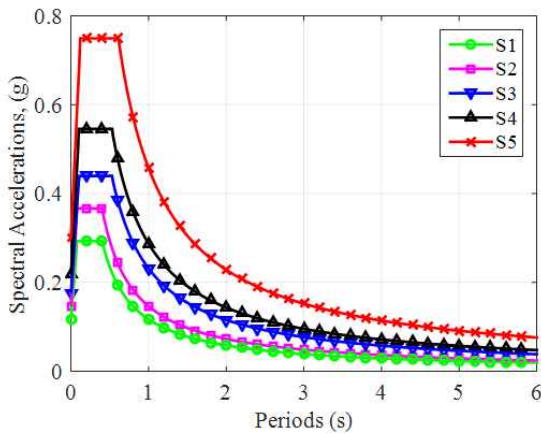
$$S_{D1} = S \times F \times \frac{2}{3} \tag{5}$$

여기서 F_a와 F_v는 각각 Table 7과 Table 8에 규정된 지반증폭계수이다.

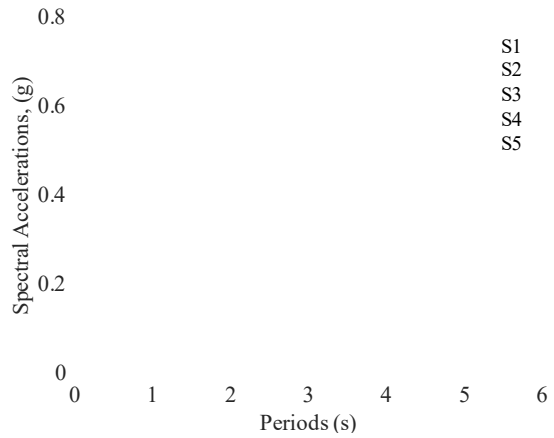
건축물 내진설계의 경우 기반암의 깊이가 20m를 초과하고 지반의 평균 전단파속도가 360m/s 이상인 경우, Table 9에 규정된 F_v의 80%를 적용한다. 또한 지반분류가 S₄이고 기반암의 깊이가 불분명한 경우, Table 9에 규정된 F_a와 F_v의 110%를 적용한다.

3.2 설계가속도스펙트럼 비교분석

건축구조기준과 건축물 내진설계의 설계스펙트럼가속도의 계산(3.1)을 바탕으로 Fig 1, Fig 2와 같은 값을 도출하였다. 건축구조기준의 경우에는 지반 종류에 따른 일정한 상승률이 보이는 형상이지만, 건축물 내진설계의 경우에는 지반에 대한 전체적인 편차가 적은 그래프를 확인할 수 있다.

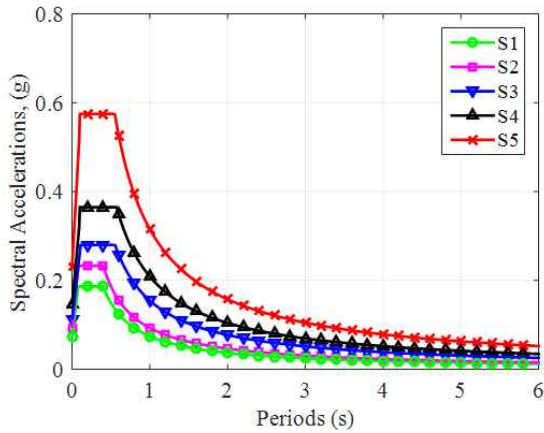


(a) KBC 2016

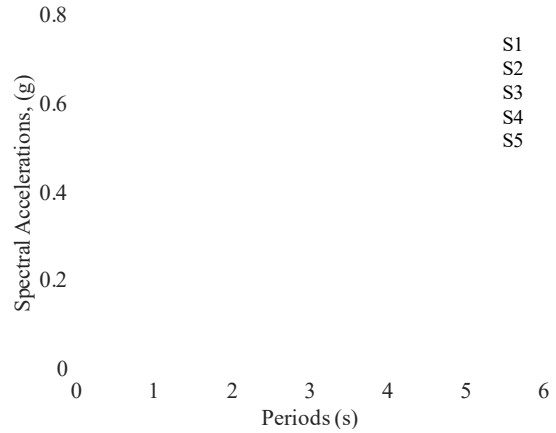


(b) KDS 17 10 00

Figure 1. Design spectral accelerations for seismic zone 1



(a) KBC 2016



(b) KDS 17 10 00

Figure 2. Design spectral accelerations for seismic zone 2

4. 지진응답평가

4.1 대상모델

본 연구에서 구조물을 대상을 비선형시간이력해석을 하였다. 대상 구조물은 SAC steel project(Gupta and Krawinkler)에서 사용된 LA 지역의 3층 철골 모멘트골조로써 Fig 3에 입면과 단면이 나타나있다. 대상 지역의 설계 지진력은 NEFRP 1997에 따라 $S_{DC}=1.07g$, $S_{D1}=0.53g$ 이고, 설계하중 및 자세한 단면정보는 Gupta and Krawinkler에 다음과 같이 제시되어 있다.

- 시스템

- 구조시스템 : 3층 철골 모멘트 골조
- 반응수정계수 (R) : 8
- 초과강도계수 (Ω) : 3
- 변위증폭계수 (C_d) : 5.5

- Risk category (내진등급) : II

중요도 계수 : 1

- 하중정보

- SAC project에서 사용된 연직하중 사용
- Floor DL : 4,117.702 N/m²
- Floor LL : 957.605 N/m²
- Roof DL : 3,974.06 N/m²
- Roof LL : 957.605 N/m²

대상 구조물의 해석 모델은 Midas Gen을 사용하여 모델링 하였다.

4.2 입력지진파

KBC 2016과 KDS 17 10 00으로 나누어 대상구조의 비선형시간이력해석을 위한 지반운동 선정을 위해, 지진라 이브리리는 설계지진력 또는 대상 지역의 설계스펙트럼과 유사한 크기를 갖는 7개의 지반운동으로 구성하였다. 수집된 지반운동들은 다음의 조건을 갖는다.

Fig 4(a)은 KBC 2016기준으로 Fig 4(b)은 KDS 17 10 00기준으로 대상 지역의 설계 스펙트럼과 함께, 수집된 7개 지반운동의 응답 스펙트럼 및 중앙값 스펙트럼을 나타낸 그래프이다. 본 절에서는 지진 라이브러리 내 7개 지반운동 응답 스펙트럼의 중앙값을 목표 스펙트럼으로 사용하였으며, 4.1절의 구조물에 대해서 해석하고 응답을 평가하였다.

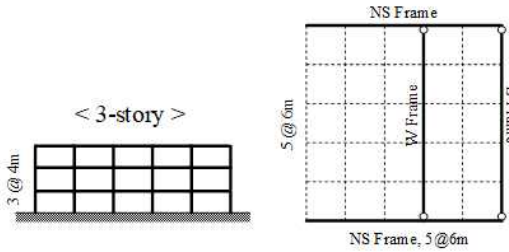
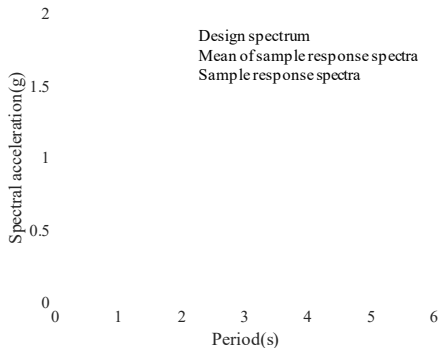
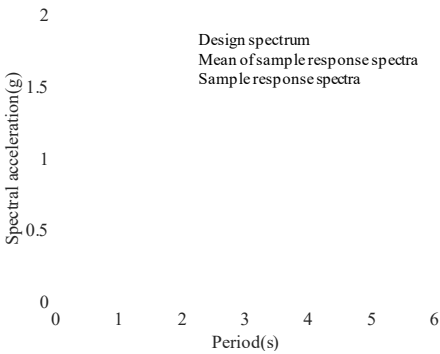


Figure 3. Plan and Elevation of model structure



(a) Design and Mean of select response spectra of KBC 2016



(b) Design and Mean of select response spectra of KDS 17 10 00

Figure 4. Design and Mean of select response spectra

4.3 지진응답

대상 구조물의 목표 응답은 KBC 2016기준과 KDS 17 10 00기준으로 7개의 모든 지반운동에 대해 비선형시간 이력해석을 수행한 뒤 얻은 층간변위비의 중간값으로써 Fig 7에 제시되어 있다. 그리고 Fig 6에서 선정된 지반운동으로 해석한 구조물 응답과 목표 응답에 대한 오차를 나타내고 있다. 이 그림에서, 1층에서 9%, 2층에서 11%, 3층에서는 21%정도 나타났다. 또한 KBC 2016과 KDS 17 10 00 기준 사이의 표준편차가 Fig 6에 제시되었다.

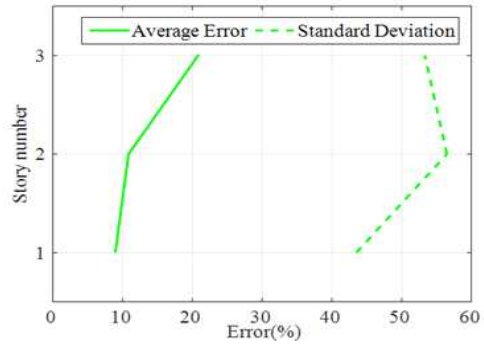
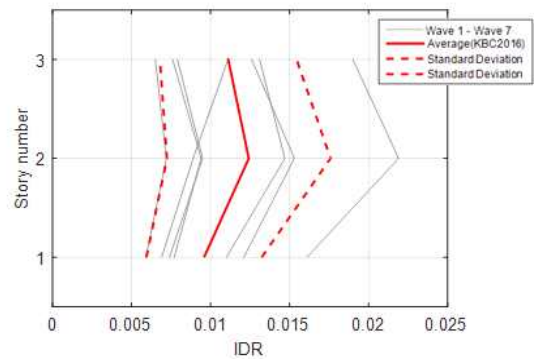
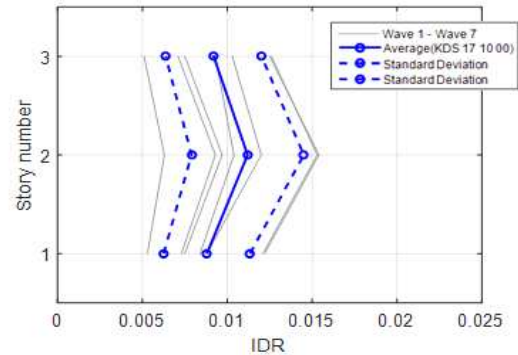


Figure 6. Average Error and Standard Deviation



(a) Inter-story Drift Ratio of KBC 2016



(b) Inter-story Drift Ratio of KDS 17 10 00

Figure 5. Inter-story Drift Ratio

Fig 6의 식은 다음과 같다.

$$Error = \frac{X - \theta^t}{\theta^t} \times 100 [\%], x = \theta^{max} \text{ or } \bar{\theta} \quad (6)$$

여기서, θ^t , θ^{max} , $\bar{\theta}$ 는 각각 층간변위비의 중간값, 각종 층간변위비의 최대값과 평균값이다.

5. 결론

본 연구에서는 개정 전인 KBC 2016 기준과 KDS 17

10 00 기준의 차이를 비교함으로써 동일한 구조물에 각각의 기준을 적용하여 구조물의 응답 스펙트럼 해석 및 시간이력해석을 수행했다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 내진성능수준의 즉시복구수준의 추가 및 목표의 정의 세분화되도록 변경되었음을 알 수 있다.

2) 기존 UBC(1997)와 IBC(2000)을 따라 해외 지반상황을 고려한 지반분류를 국내 지반상황을 고려하여 변경됨으로써 토층 전단파속도의 값이 감소했고, 지반증폭계수가 변경되었다.

3) 3층 철골 모멘트 골조의 시간이력해석을 한 결과, KBC 2016 기준에 비해 KDS 17 10 00 기준의 설계가속도스펙트럼의 값이 감소함에 따라 선정된 지반응답스펙트럼의 크기가 감소했고, 지진력도 감소함을 알 수 있다.

4) 층간변위비값이 감소함으로써 표준편차가 감소했고, 이로 인해 기존의 내진설계기준에 비해 불확실성이 감소함을 알 수 있었으며, 따라서 과다설계를 방지하여 합리적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. ASCE, Minimum design loads for building and other structures (ASCE 7-10). American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia. c2010
2. Gupta, Krawinkler H. Seismic demands for performance evaluation of steel moment resisting frame structures (SAC Task 5.4.3). Report No. 132. John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Standford, CA, USA. c1999.
3. HA SJ, Han SW. An efficient method for selecting and scaling ground motions matching target response spectrum mean and variance. Earthq Eng Struct D. 2016
4. ICBO, Uniform Building Code, International Conference of Building Officials, Whittier California, 1997
5. IBC 2000, International Building Code, International Code Council, Delmar Punlishes, 2000
6. 국가건설기술센터. 건축구조기준 (KBC 2016). 2016
7. 국가건설기술센터. 내진설계 일반 (KDS 17 10 00). 2019
8. 국가건설기술센터. 건축물 내진설계기준 (KDS 41 17 00). 2019

