

# 현행 국내 철도내진설계기준(KDS 47 10) 분석 및 고찰

## A Review of the Korean Railway Seismic Design Standard

이한울<sup>3)</sup> 김기주<sup>4)</sup> 하성진<sup>5)</sup>

Lee, Han Ul Kim, Ki Joo, Ha, Seong Jin

### Abstract

Recently, as earthquakes of scales 5.0 or greater frequently occurred in Korea, the interest in seismic design has increased. In other words, Korea is no longer an earthquake safety zone, the field of railway structures as well as the construction and civil engineering field is gradually expanding. Railway structures, however, is using the Building Structure Standard and the Bridge Design Standard of the past. Thus, this study compared current domestic Railway Seismic Design Standard with the Building Structure Standard and the overseas Civil Engineering standard (AASHTO). First, in order to compare and analyze the design spectral acceleration coefficient with the Building Structure Standard, we compared with the Seismic Zone Factors according to Recurrence Period, Importance Factors(Risk Factor) and Site Classifications. Then, Analyzed the Recurrence Period and Site Classifications of AASHTO. Finally, we compared and analyzed the Design Response Spectrum of Building Structure Standard, AASHTO and Railway Seismic Design.

키워드 : 철도내진설계, 스펙트럼가속도, 설계응답스펙트럼

Keywords : Railway Seismic Design, Spectral Acceleration, Design Response Spectrum

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 목적

최근 2016년 9월 경주지진, 2017년 포항지진 등 규모 5.0이상의 강진이 연속적으로 발생함에 따라 국민들의 불안이 크게 확산되었고, 내진설계에 대한 관심이 증가되고 있다. 더 이상 지진 안전지대가 아닌 우리나라도 건축과 토목분야 뿐만 아니라 철도교 및 지하시설물을 포함한 철도 구조물 등의 분야 또한 인적, 물적 자원을 수송하여 지진 시 피해를 입게 되면 국가경제에 지대한 영향을 미치기 때문에 내진설계 및 내진성능평가와 관련한 연구가 점차 확대되고 있다.

그러나 철도시설물의 경우 현재 고속철도에서 1993년 내진설계가 처음으로 수행되었고, 현재 국내 철도 기준은 과거 국내 내진설계기준(건설교통부, 1997)과 도로교 설계기준을 그대로 사용하고 있어 타 산업분야의 설계기준과 달리 철도교의 내진설계기준은 개정 되어있지 않다. 이에 따라, 본 논문에서는 현행 국내 철도의 내진설계기준을 국내 건축구조기준 및 미국의 도로교 설계기준(AASHTO, 2017)과 비교분석하였다.

### 1.2 연구의 방법 및 절차

3) 한국교통대학교 공과대학 건축공학과 학사과정

4) 한국교통대학교 공과대학 건축공학과 학사과정

5) 한국교통대학교 건축공학과 교수, 공학박사

(Corresponding author : School of Architecture Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, sjha@ut.ac.kr)

우선 현행 국내 철도내진설계기준(KDS 47 10 15)과 국내건축구조기준(KDS 41 10 15)을 비교분석하였다. 먼저, 철도내진설계기준과 건축구조기준에 제시된 지진 재현주기, 중요도계수, 지반증폭계수 등을 비교하였다. 그리고 이를 기반으로 구조물의 등가정적해석을 위해 사용되는 지진응답계수를 표와 그래프를 통해 비교분석하였다.

또한, 해외 구조선진국인 미국의 도로교설계기준과 함께 구조물의 동적해석에서 지진하중을 결정하기 위해 사용되는 설계가속도스펙트럼을 작성하여 국내 건축구조기준 및 철도교설계기준과 함께 비교하여 현재 철도 내진설계기준의 한계점을 명시하였다.

## 2. 현행 국내철도내진기준 분석

### 2.1 설계스펙트럼가속도 비교분석

설계스펙트럼가속도는 설계지진에 대한 응답스펙트럼으로써 국내건축구조기준(KDS 41 10 15 : 2016. 6.3.3)은 지진응답계수를 산정하기 위하여 단주기 설계스펙트럼가속도( $S_{DS}$ )와 1초주기 설계스펙트럼가속도( $S_{D1}$ )를 사용하였고, 철도내진설계(KDS 47 10 15 : 2017, 4-4)에서는 지진응답계수를 산정하기 위하여 가속도계수( $A$ )에 지반증폭계수( $S$ )를 곱한 값을 사용하고 있다.

건축구조기준(KDS 47 10 15 : 2016. 6.3.3)에 명시된 단주기 설계스펙트럼가속도( $S_{DS}$ )와 1초주기 설계스펙트럼가속도( $S_{D1}$ )의 식은 다음 (1)과 같다.

$$S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times 2/3$$

$$S_{D1} = S \times F_v \times 2/3$$

(1)

여기서,  $S_{DS}$  = 단주기 설계스펙트럼 가속도  
 $S_{D1}$  = 1초주기 설계스펙트럼 가속도  
 $S$  = 재현주기 2400년의 예상되는 최대지진의 유효지반 가속도  
 $F_a$  = 단주기 지반증폭계수  
 $F_v$  = 1초주기 지반증폭계수

철도내진설계(KDS 47 10 15 : 2017, 4-4)에 명시된 가속도 계수(A)의 식은 다음 (2)와 같다.

$$A = Z \times I \quad (2)$$

여기서,  $Z$  = 재현주기 500년에 해당하는 최대지진의 유효지반 가속도  
 $I$  = 지진 위험도계수

본 연구에서는 각각의 설계스펙트럼가속도를 결정하기 위해 사용되는 계수(재현주기에 따른 유효지반가속도, 지반증폭계수, 지진 위험도계수)를 비교분석하였다.

### 2.1.1 지진위험도 분석

건축구조기준에 명시된 지역계수(S)는 재현주기 2400년에 해당하는 최대지진의 유효지반 가속도이며, 철도내진설계에 명시된 지역계수(S)는 재현주기 500년에 해당하는 최대지진의 유효지반 가속도로 각각의 지진구역 및 이에 따른 지진구역계수 값은 Table 1과 같다. 행정구역은 같은 지역으로 구분하고 있으며, 건축구조기준은 지진구역 (1)과 (2)는 철도내진설계에 2배가 높은 지역계수를 사용하고 있다.

Table 1. 지진구역 및 지역계수 비교

지진구역	행정구역	건축구조기준	철도내진설계
1	지진 2구역을 제외한 전 지역	0.22g	0.11g
2	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도	0.14g	0.07g

Table 2. 내진등급에 따른 위험도계수(I)와 중요도계수(I<sub>E</sub>)

내진 등급	건축구조기준		철도내진설계	
	중요도계수 (I <sub>E</sub> )	건축물의 중요도	위험도계수 (I)	설계지진평균재현주기
특	1.5	중요도 (특)	-	-
1	1.2	중요도 (1)	1.4	1000년
2	1	중요도(2),(3)	1	500년

철도내진설계에 명시된 위험도계수(I)는 평균 재현주기 별 지진의 위험도를 나타내는 계수로써 가속도계수(A)를

구하기 위해 사용되는 계수이다. 내진등급에 따른 건축구조기준에 명시된 중요도계수(I<sub>E</sub>)는 건물 용도의 중요도에 따라 설계 하중을 할증하는 계수로써 Table 2에 제시되어 있다. 철도내진설계는 설계지진의 평균재현주기에 따라 1등급은 설계지진 평균재현주기 1000년, 2등급은 설계지진 평균재현주기 500년으로 총 2가지 등급으로 분류하고 있는 반면 건축구조기준은 건축물의 중요도에 따라 특등급, 1등급, 2등급 총 3가지 등급으로 더 세분화하여 분류하고 있다. 즉, 이는 일반적으로 철도교를 포함한 토목구조물이 건축구조물보다 지진에 대해 덜 보수적으로 설계하기 때문인 것으로 이해할 수 있다. 하지만 지진 발생 시 지반의 동특성을 반영하기 위한 지반증폭계수의 경우, 건축구조기준에서는 S<sub>A</sub>~S<sub>E</sub>까지 5가지로 분류하고 있는 반면, 철도기준에서는 4가지로 분류하고 있다. 이는 내진설계철학의 여부와 관계없이 철도기준에서는 건축구조기준과 같이 개정이 시급할 것으로 판단된다.

### 2.2 지진응답계수 비교분석

지진응답계수(C<sub>S</sub>)는 등가정적해석법을 이용하여 지진의 응답계수를 산정하는 방법이다. (2.1.1)절, (2.1.2)절의 계수들을 이용하여 각 구조기준별로 같은 지반조건과 같은 계수조건을 이용하였으며 이를 Table 3에 제시하였다. 계수조건은 지진구역1에 해당하는 계수들을 사용하였다. 반응수정계수(R)는 각각의 구조물이 철골중간모멘트골조인 것으로 가정하여, R=4.5의 값을 사용하였다.

건축구조기준은 식 (3)을 통하여 지진응답계수(C<sub>S</sub>)를 결정하고(KDS 41 10 15:2016. 6.5.2), 철도내진설계(KDS 47 10 15:2017. 4.4-2)은 식 (4)를 통하여 지진응답계수를 결정한다. 식 (3)과 (4)에, 각 기준은 유사한 계수들을 사용하고 있으나 식의 형태가 다소 차이가 있으며, 특히 철도기준에서는 구조물의 반응수정계수를 사용하고 있지 않다.

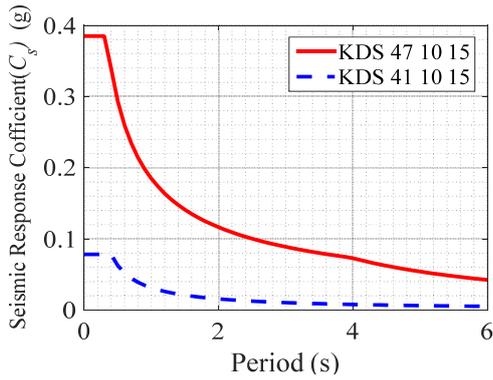
$$C_s = S_{D1}/([R/I_E] \times T) \leq S_{DS}/([R/I_E] \times T) \quad (3)$$

$$C_s = 1.2 \times A \times S / T^{2/3} \leq 2.5 \times A \quad (4)$$

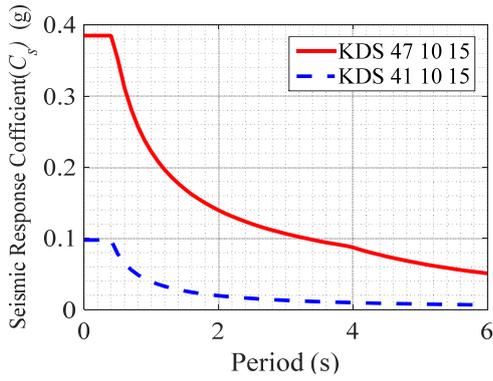
식 (3)의 지진응답계수는 AASHTO와 유럽의 설계기준, 캐나다의 설계기준과 모두 동일한 식으로 사용되고 있다. Figure 2는 식 (3)과 (4)에 따른 지진응답계수로써, 철도기준이 건축구조기준보다 더 큰 지진응답계수를 갖는 것으로 나타났다.

Table 3. 지진응답계수를 결정하기 위한 계수

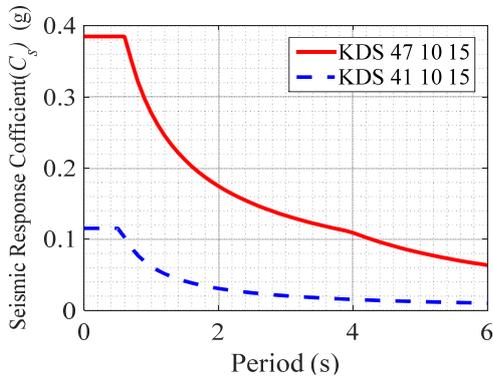
계수조건	지진구역	지진계수	위험도 계수	반응수정계수	
건축구조기준	1	0.22	1.2	철골조	4.5
철도설계기준		0.11	1.4	-	



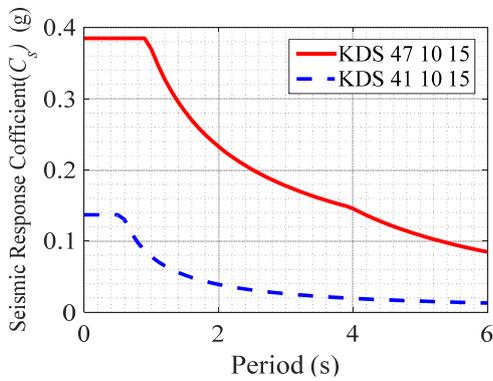
(a) S<sub>A</sub>지반



(b) S<sub>B</sub>지반



(c) S<sub>C</sub>지반



(d) S<sub>D</sub>지반

Figure 2. 지반별 지진응답계수 비교 (R=4.5)

이는 철도기준에서 지진응답계수를 결정하기 위해 사용되는 식 (4)에서 반응수정계수가 적용되지 않기 때문이다. 즉, 앞에서 서술했던 것과 같이 일반적으로 토목구조물이 건축구조물에 비해 지진에 대해 덜 보수적으로 설계되는 철학과는 부합하지 않는 결과이며, 기존의 기준으로 철도교를 설계할 경우, 과다설계로 이어질 가능성이 있다.

2.3 설계응답스펙트럼 비교분석

설계응답스펙트럼은 국내건축구조기준(KDS 41 10 15)과 해외토목기준(AASHTO, 2017)와 철도내진설계(KDS 47 10 15)을 비교하였다.

가장 먼저, 지진위험도를 결정하기 위한 각 기준별 지진 재현주기를 Table 4에 나타냈다. 기본 지진 재현주기는 건축구조기준과 철도기준, AASHTO가 각각 2400년, 500년, 1000년으로 세 기준이 모두 다른 값을 사용하고 있는 것으로 나타났다. 지반증폭계수의 경우, 국내의 건축구조기준과 마찬가지로 5가지의 종류로 세분화하고 있을 뿐만 아니라, 지진지역계수의 크기에 따라 더욱 세분화하고 있다.

AASHTO는 국내건축구조기준(KDS 47 10 15 :2016.6.3.4)에 명시되어 있는 식과 같은 식을 이용하여 설계응답스펙트럼(S<sub>a</sub>)을 산정하였고, 그 식은 (5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 & i. T \leq T_O \text{ 일 때, } S_a = 0.6 \times S_{DS} / T_O \times T + 0.4 \times S_{DS} \\
 & ii. T_O \leq T \leq T_S \text{ 일 때, } S_a = S_{DS} \\
 & iii. T > T_S \text{ 일 때, } S_a = S_{DI} / T
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

여기서, T : 고유물의 고유주기(초)

$$T_O : 0.2 \times S_{DI} / S_{DS}$$

$$T_S : S_{DI} / S_{DS}$$

철도내진설계(KDS 41 10 15: 2017, 4-4)는 설계하중에 탄성지진응답계수(C<sub>s</sub>)를 사용하고 있으며, 식 (4)와 같은 식을 이용하여 산정하였다. 각각 세 기준의 설계응답스펙트럼(S<sub>a</sub>) 산정식을 비교하기 위하여 모든 계수와 재현주기를 같은 조건으로 적용시켜 Table 5와 같은 계수조건과 지반조건을 사용하였다. 지반은 S<sub>D</sub>지반으로 적용시킨 후, 재현주기 2400년과 지역계수(s)를 0.22로 같다는 가정을 적용시켜 설계응답스펙트럼 산정식만을 비교하기 위하여 단주기 증폭계수(F<sub>a</sub>)와 1초주기 증폭계수(F<sub>v</sub>), 지반계수(s)를 식(5)와 식(4)에 적용시켰다.

Table 4. 재현주기 비교

	건축구조기준 (KDS 41 10 15)	철도설계기준 (KDS 47 10 15)	AASHTO
재현주기	2400년 (50년 내 초과확률 2%)	500년 (50년 내 초과 확률 10%)	1000년 (50년 내 초과확률 5%)

Table 5. 지반 조건 및 계수 조건

	건축구조기준	AASHTO	철도내진설계
지반종류	$S_D$		
지역계수	0.22		
증폭계수	$F_a : 1.4$ $F_V : 2.0$	2.0	

Table 5에 따라 지진 지역계수와 지반종류를 모두 동일한 값을 이용하여 설계응답스펙트럼을 작성한 결과가 Figure 5에 제시되어 있다. 여기서, AASHTO(2017)와 국내 건축구조기준은 동일한 식을 사용하여 설계스펙트럼을 작성하기 때문에, Figure 5와 같이 동일한 결과를 도출한다. 하지만, 철도설계기준의 경우 설계가속도스펙트럼으로써 Figure 2의 지진응답계수를 그대로 사용하도록 제시되어 있다. 따라서 건축구조기준 또는 AASHTO와 비교하여 상당히 큰 설계가속도스펙트럼을 갖는다. 이는 곧, 철도 구조물의 경우 동일한 지역계수와 지반종류, 같은 지진해도를 사용하더라도 상당히 보수적인 설계결과를 도출할 가능성이 매우 크다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 국내 건축구조기준과 철도내진설계기준의 차이를 비교분석하였고, 국내와 해외 토목시설물의 내진설계기준을 비교하여 그 한계점을 서술하였다.

국내 건축구조기준의 경우, 국가차원에서 지속적으로 개정하고 있는 지진위험도가 잘 반영되어 있으며 설계지진력을 산정하기 위한 계수와 설계식을 개정하고 있다. 반면, 철도설계기준은 과거 건설교통부에서 제정된 내진설계기준연구II를 현재까지 사용하고 있으므로 토목구조물의 지진위험도에 대해 비교적 보수적으로 평가되고 있다. 또한 지진력 산정을 위한 설계 계수들과 지반증폭계수 등이 다소 단순화 되어 있으므로 지반의 동특성을 정확히 반영하는 데에 한계가 있다.

따라서 현재 철도설계기준으로 철도교 등의 철도시설물의 내진설계를 수행할 경우, 구조물을 필요이상으로 과다 설계할 가능성이 매우 클 것으로 판단된다.

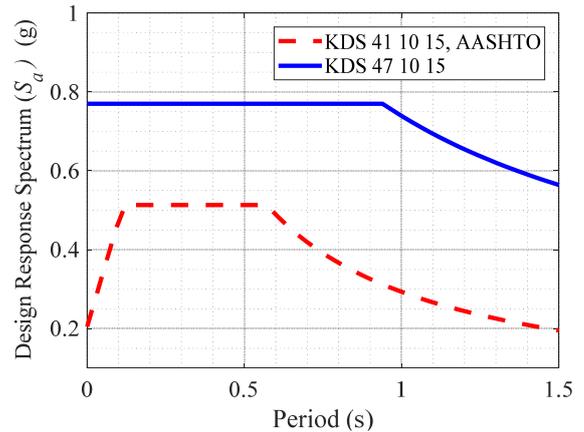


Figure 5. 설계응답스펙트럼 비교

### 감사의 글

본 연구는 한국연구재단(No. 2017R1C1B5076937)과 국립한국교통대학교의 지원에 의해 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 건설교통부. (1997). 내진 설계 기준 연구 (II).
2. AASHTO, L. (2017). AASHTO LRFDF bridge design specifications. Transportation (Amst). American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc.: Washington, DC.
3. 국가건설기준센터. (2016). 교량 일반사항, Korean Design Standard, KDS 47 10 45:2018.
4. 국가건설기준센터. (2016). 건축구조기준 설계하중, Korean Design Standard, KDS 41 10 15:2016.
5. Code, P. (2005). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization.
6. CSA (Canadian Standards Association). (2014). Canadian highway bridge design code. CAN/CSA-S6-14.