

## [KDS 17] 4.2.1 지반운동

## 4. 설계

## 4.2 지진재해

## 4.2.1 지반운동

## 4.2.1.4 설계지반운동의 특성 표현

(1) 설계지반운동의 세기 및 진동수성분은 기본적으로 응답스펙트럼으로 표현한다.

## [해설]

(1) 내진설계를 수행함에 있어서 가장 중요한 단계 중 하나는 지진에 의해 구조물에 적용하는 하중을 정량적으로 산출하는 것이다. 지진에 의한 흔들림은 지반운동 가속도 시간이력으로 제시될 수 있으나 이에 대한 세기는 다양한 주기를 갖는 구조물에 미치는 영향을 정확히 표현하기 어렵기 때문에 진동수에 따른 세기로 제시되어야 한다. 이러한 스펙트럼 형식의 표현 중에 구조물에 작용하는 하중을 직접적으로 산출할 수 있는 방법은 응답스펙트럼이며, 특히 일반적인 구조물의 감쇠조건과 유사한 5% 감쇠비(일반적으로 콘크리트 구조물이 이에 해당하며 강구조물은 2~3% 정도로 알려져 있다)의 유사가속도(pseudo-acceleration) 단자유도 탄성응답스펙트럼을 기본으로 한다.

(2) 암반지반( $S_1$  지반) 설계지반운동의 가속도표준설계응답스펙트럼은 다음과 같다.

- ① 5% 감쇠비에 대한 수평설계지반운동의 가속도표준설계응답스펙트럼은 그림 4.2-1 및 표 4.2-5로 정의되며, 각 주기영역에 대한 설계스펙트럼가속도( $S_a$ )는 표 4.2-6과 같다.

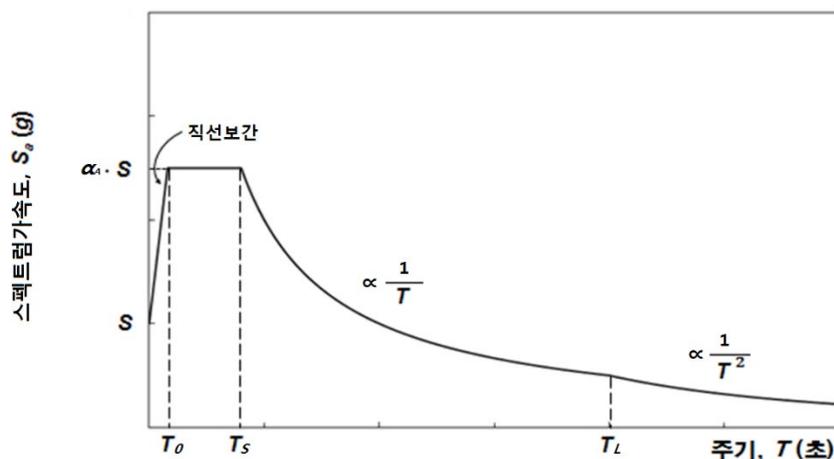


그림 4.2-1 가속도표준설계응답스펙트럼(암반지반)

표 4.2-5 가속도표준설계응답스펙트럼 전이주기 (생략)

표 4.2-6 주기영역별 설계스펙트럼가속도( $S_a$ ) (생략)

- ② 5% 감쇠비에 대한 수직설계지반운동의 가속도표준설계응답스펙트럼은 ①에 있는 수평설계지반운동의 가속도표준설계응답스펙트럼과 동일한 형상을 가지며, 최대 유효수평지반가속도에 대한 최대 유효수직지반가속도의 비는 0.77이다.
- ③ 수평 및 수직 설계지반운동의 가속도표준설계응답스펙트럼의 감쇠비( $\xi$ , %단위)에 따른 스펙트럼 형상은 표 4.2-7에 제시한 감쇠보정계수  $C_D$ 를 표준설계응답스펙트럼에 곱해서 구할 수 있다. 단, 감쇠비가 0.5%보다 작은 경우에는 적용하지 않으며 해당 구조물의 경우 응답이력해석(=시간이력해석)을 권장한다.

표 4.2-7 감쇠보정계수( $C_D$ ) (생략)

[해설]

- (2) 암반지반과 토사지반의 가속도표준설계응답스펙트럼 작성법이 구분되었다. 지반에 의한 증폭을 고려하지 않는 암반지반의 단주기 스펙트럼 증폭계수( $\alpha_A$ )가 국내에서는 2.8에 대응한다는 연구 결과가 도출되었고, 토사지반의 증폭계수는 기존 2.5의 단주기 스펙트럼 증폭계수에 연동되어 결정된 까닭이다. <그림 4.2-2>에 제시된 토사지반의 가속도표준설계응답스펙트럼 작성법에 기반하고 암반지반에 대응하는 단주기, 장주기 증폭계수를 부여하는 방법, 혹은 단주기 스펙트럼 증폭계수 2.8에 대응하는 토사지반 증폭계수를 결정하는 방법 등으로 단일의 가속도표준설계응답스펙트럼 작성법을 제시할 수 있다.
- ① 수평 설계지반운동의 가속도표준설계응답스펙트럼 지진세기와 관계없이 일정한 형상을 갖는다. 이는 국내외 판내부지진에 대한 실지진기록의 응답스펙트럼을 통계적으로 분석하여 얻은 결과이며 최대지반가속도로 정규화하였을 때 평균+표준편차에 해당하는 형상을 나타낸 것이다. 기본적으로 지반운동의 응답스펙트럼은 단주기에서 장주기로 이동할수록 가속도 평활구간, 주기에 반비례하는 구간, 주기의 제곱에 반비례하는 구간으로 나뉠 수 있으며 표준설계응답스펙트럼 또한 이와 같은 형태로 제시하였다. 각 구간별 전이주기는 <표 4.2-5>에 제시되어 있다. 이를 적용하여 각 구간별 표준설계응답스펙트럼 값을 유효수평지반가속도( $S$ )주기에 대한 함수로 표현하면 <표 4.2-6>과 같다. 즉 전이주기로 표현하는 방식과 스펙트럼가속도 수식으로 표현하는 방식은 일치한다.
- ② 암반지반에 대한 수직 설계지반운동의 가속도표준설계응답스펙트럼은 수평방향과 형태는 동일하고 크기만 0.77배로 감소시켜서 적용한다. 이는 국내외 판내부지진에 대한 실지진기록의 응답스펙트럼을 통계적으로 분석하여 얻은 결과이며, 마찬가지로 수직방향의 최대지반가속도로 정규화하였을 때 평균+표준편차에 해당하는 수직방향 응답스펙트럼 형상이 수평방향에 대한 형상과 큰 차이가 없었으나 수평 대비 수직 비( $V/H$  비)가 평균적으로 0.77로 산출되었기 때문이다. 따라서 전이주기도 <표 4.2-5>의 수평방향의 값과 동일하고 유효수직지반가속도를 유효수평지반가속도의 0.77배로 하였을 때 이를  $S$ 로 하였을 경우 <표 4.2-6>의 스펙트럼가속도 수식으로도 표현이 가능하다.

- ③ 암반지반의 감쇠보정계수를 산출하기 위하여 국내외 판내부지진에 대한 실지진기록의 응답스펙트럼을 감쇠비를 달리하여 산출한 뒤 회귀분석을 통해 감쇠비에 대한 함수로 표현하였다. 감쇠비에 따른 스펙트럼가속도의 감쇠보정계수는 일반적으로 주기에 따라서, 수직 및 수평 방향에 따라서 다를 수 있다. 하지만 통계적으로 분석하여 얻은 결과가 유의미한 차이가 발생하지 않아서 설계기준의 간편성을 위해 단주기 및 장주기 영역과 방향에 관계없이 동일한 수식으로 제시하였다. 다만 0주기에서는 감쇠보정계수가 1이 되어야 하므로 <표 4.2-7>과 같이 0주기부터 가속도평활구간의 시작점인  $T_0$ 까지는 선형보간하도록 한다.

(3) 토사지반( $S_2 \sim S_5$ 지반) 설계지반운동의 가속도표준설계응답스펙트럼은 다음과 같다.

- ① 5% 감쇠비에 대한 수평설계지반운동의 가속도표준설계응답스펙트럼은 그림 4.2-2로 정의한다.

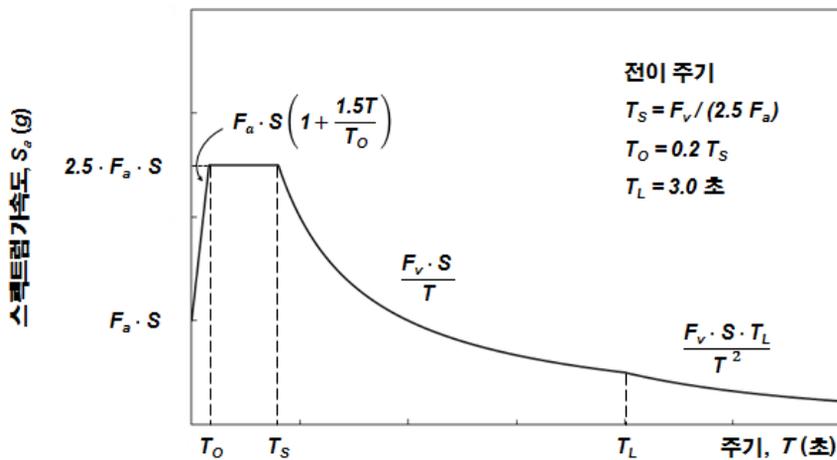


그림 4.2-2 가속도표준설계응답스펙트럼(토사지반)

- ② 유효수평지반가속도( $S$ )에 따른 단주기지반증폭계수( $F_a$ )와 장주기지반증폭계수( $F_v$ )는 표 4.2-8을 이용하여 결정한다. 유효수평지반가속도( $S$ )의 값이 중간 값에 해당할 경우 직선 보간하여 결정한다.

표 4.2-8 지반증폭계수( $F_a$  및  $F_v$ ) (생략)

- ③ 감쇠비에 따른 스펙트럼 형상은 해당 토사지반에 적합한 가속도시간이력을 이용하여 공학적으로 적절한 분석과정을 통해 결정할 수 있다.
- ④ 5% 감쇠비에 대한 수직설계지반운동의 가속도표준설계응답스펙트럼은 ①에 있는 수평설계지반운동의 가속도표준설계응답스펙트럼과 동일한 형상을 가지며, 최대 유효수평

지반가속도에 대한 최대 유효수직지반가속도의 비는 공학적 판단으로 결정할 수 있다.

[해설]

(3) 국가지진위험지도나 행정구역에 의한 방법으로 설계부지와 재현주기에 따라 결정된 유효수평지반가속도( $S$ )를 활용하여 지반의 종류에 따른 가속도표준설계응답스펙트럼을 <그림 4.2-2>와 같이 작성할 수 있다. 전이주기  $T_s$ 를 기준으로 단주기 영역과 장주기 영역으로 구분되는 스펙트럼 가속도의 정량적인 증폭정도를 각각 단주기 지반증폭계수( $F_a$ ), 장주기 지반증폭계수( $F_v$ )를 활용하여 결정한다. 단주기, 장주기 증폭계수는 유효수평지반가속도 및 지반종류에 따라 결정할 수 있는데, 1997년 「내진설계기준연구(II)」에서 지반종류 별 단일 단주기, 장주기 증폭계수를 고려하였던 반면, 「내진설계기준 공통적용사항(행안부, 2017)」에서는 유효수평지반가속도의 수준에 따라 증폭계수를 제시하여 설계지반운동 수준이 증가함에 따라 나타나는 비선형적 증폭특성이 반영되었다. 부지고유의 증폭계수는 다음 <해설 식 4.2-3>을 통해 결정할 수 있다.

$$F_{a,v}(RRS) = \frac{F_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{b-a} \int_a^b \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad \text{<해설 식 4.2-3>}$$

Borcherdt(1994)에 의해 제안된 위 식을 활용한 증폭계수 산정법은 1994년 이후 기준에 적용되고 있다. Borcherdt는 진동수 구간 별 암반노두와 토사지반 응답스펙트럼 비(Ratio of Response Spectra, RRS)의 평균을 구하기 위해 <해설 식 4.2-3>의 적분구간  $a$ 와  $b$ 를 달리하여 증폭계수를 산정하였다. 단주기 증폭계수의 경우  $a = 0.1$ ,  $b = 0.5$ (0.1초에서 0.5초 주기 구간)가 일반적으로 적용된다. 장주기 증폭계수는 0.4초~2.0초의 적분구간이 국제적으로 통용된다. 그러나 국내 지반은 기반암이 얇은 깊이에 존재하는 단주기적 증폭 특성으로 인해 2.0초 주기 이내에서 증폭이 거의 발생하지 않는 구간, 즉 RRS가 1로 수렴하는 주기 대역이 등장하게 된다. 때문에 기존 적분구간은 국내 지반의 증폭특성에 비해 과소한  $F_v$ 를 산정하게 하고, 이는 설계응답스펙트럼 작성 시 장주기 대역에서 지반응답해석의 평균을 포괄하지 못하는 결과를 도출하게 된다. 이를 고려하여 국내는 0.4~1.5초의 적분구간을 고려하는 것이 바람직하다. ASCE 7-16에서는 수직 가속도표준설계응답스펙트럼 결정 시 유효수평지반가속도 수준과 지반종류에 따라 수평 대비 비율을 결정하고 있다. 이에 대한 국내 연구는 아직 부족하므로, 국외 관련 기준을 참고하여 그 비율을 결정할 수 있다.

(4) 그림 4.2-1 및 그림 4.2-2에서 유효수평지반가속도( $S$ )는 지진하중을 산정하기 위한 지반운동수준으로 국가지진위험지도 또는 행정구역에 따라 결정한다. 다만, 국가지진위험지도를 이용하여 결정하는 경우, 행정구역에 따라 결정한 값의 80%보다 작지 않아야 한다.

[해설]

(4) 행정구역에 의한 방법으로 유효수평지반가속도( $S$ )를 결정할 경우 지진구역계수( $Z$ )가 활용된다. 앞서 설명한 것과 같이 지진구역계수는 국가지진위험지도의 동일 지진구역 내에서 가장 큰 값을 활용하여 결정된 값이다. 따라서 국가지진위험도를 통해 결정한 유효수평지반가속도가

행정구역에 의한 방법으로 결정된 유효수평지반가속도보다 작을 수밖에 없다. 행정구역에 의한 방법과 국가지진위험 지도를 활용하여 결정한 유효수평지반가속도의 차이가 과도하지 않도록 유지하며, 국가지진위험지도를 활용한 방법의 보수성을 유지하기 위하여 80%라는 비율이 결정되었다.

- (5) 행정구역에 의한 방법으로 평균재현주기에 따른 유효수평지반가속도( $S$ )를 결정할 때는 식(4.2-2)와 같이 지진구역계수( $Z$ )에 각 평균재현주기의 위험도계수( $I$ )를 곱하여 결정한다.

$$S = Z \times I \quad (4.2-2)$$

[해설]

- (5) 위험도계수( $I$ )는 기준이 되는 재현주기 500년 국가지진위험지도와 다른 재현주기의 국가지진위험지도에 나타난 지진구역 별 유효최대지반가속도(유효수평지반가속도,  $S$ )의 정량화된 비율로 정의된 바 있다. 따라서 설계부지의 지진구역계수와 고려하고자 하는 재현주기(위험도계수)가 결정되면 유효수평지반가속도를 쉽게 결정할 수 있다. <해설 표 4.2-1>은 행정구역에 의한 방법으로 지진구역과 재현주기에 따라 결정된 유효수평지반가속도이다.

<해설 표 4.2-1> 재현주기에 따른 지진구역 별 유효수평지반가속도( $S$ ) (생략)

- (6) 시설물이 설치될 부지의 특성, 시설물의 구조특성과 설계법을 고려하여 작성된 설계응답스펙트럼이 있는 경우 전문가 그룹의 검증을 거쳐 사용할 수 있다.

[해설]

- (6) 최근의 성능기반 설계 기법의 확대와 중요 특수 구조물의 설계를 위하여 독립적으로 산출된 지진하중을 설계에 사용할 수 있다. 기반암(암반지반)에서의 재현주기별 설계응답스펙트럼을 산정하는 경우 지진재해도 분석 과정을 거쳐서 사용하여야 하며, 이때 지진원에 대한 입력자료는 지진학 분야에서 충분히 합의된 자료를 사용하여야 한다. 부지의 지반특성을 반영하여 설계응답스펙트럼을 산정하는 경우 충분한 지반조사를 수행하고 지반의 동적 물성치의 불확실성을 반영하여야 한다. 이때 방법론 및 결과물은 해당 전문가 그룹의 검증을 거치도록 한다.

(7) 파워스펙트럼

- ① 설계지반운동의 파워스펙트럼은 (2) 및 (3)에서 규정한 표준설계응답스펙트럼과 일관성을 유지하여야 한다.

[해설]

(7) 설계지진 산정시 파워스펙트럼이 필요한 경우 이는 표준설계응답스펙트럼의 파워스펙트럼과 일관성을 유지하여야 한다. 암반지반인 경우 아래와 같이 수정 Kanai-Tajimi 모델로 정해지는 파워스펙트럼 형상을 사용할 수 있다.

<해설 그림 4.2-3> 수정 Kanai-Tajimi 모델의 형상

<해설 표 4.2-2> 수정 Kanai-Tajimi 모델 파라미터 (제공평균제곱근 가속도 0.5 g)

(8) 설계지반운동 시간이력

- ① 지반 가속도, 속도, 변위 중 하나 이상의 시간이력으로 지반운동을 표현할 수 있다.
- ② 3차원 해석이 필요할 때 지반운동은 동시에 작용하는 3개의 성분(수평 2축운동과 수직운동)으로 구성하여야 한다.
- ③ 설계지반운동 시간이력은 기반암에 대해 작성된 시간이력을 사용하여 지반응답해석을 통해 결정한다.
- ④ 기반암의 설계지반운동 시간이력은 (9)에 기술된 실지진기록을 활용한 지반운동 시간이력 또는 (10)에 기술된 인공합성 지반운동 시간이력을 사용한다.
- ⑤ 지반응답해석으로 계산된  $S_2 \sim S_6$  지반의 설계지반운동의 가속도 시간이력의 평균 응답 스펙트럼은 4.2.1.4(3)에 따라 결정된 가속도표준설계응답스펙트럼의  $T_0$ 부터  $2T_L$  주기 영역에서 80% 이상이어야 한다.

[해설]

(8) 지반운동의 시간이력은 가속도, 속도, 변위 등으로 표현 가능해야 하며 서로 수치적 미분 혹은 적분에 의해 왜곡이 발생하지 않도록 충분히 작은 시간간격으로 제시되어야 한다. 3차원 해석시 3개의 지반운동 시간이력은 4.2.1.3의 (4)에서 규정하는 통계학적 독립을 위해 4.2.1.4 (10)의 상관계수 기준을 만족해야 한다. 토사지반의 지반운동 시간이력은 기반암에 대해 작성된 시간이력을 사용하여 지반응답해석을 통해 결정하는 것을 원칙으로 하지만 보수성이 검증된 경우 토사지반의 설계응답스펙트럼에 적합하도록 인공합성 지반운동 시간이력을 작성하여 사용할 수 있다.

(9) 실지진기록 활용 지반운동 시간이력

- ① 실지진 기록은 국내 지진환경과 유사한 관내부 지역에서 계측된 기록을 선정한다. 다만, 계측기록 개수 등의 제한이 있는 경우 관련 전문가의 판단하에 관경계에서 계측된 기록을 선정할 수 있다.
- ② 실지진 기록은 관측소 하부지반이  $S_1$  지반 혹은 이에 준하는 보통암 지반에서 계측된 지

진기록 이어야 하며, 목표하는 설계지진과 유사한 지진규모특성에 부합하도록 선정하여야 한다.

- ③ 선정된 지진기록은  $S_1$  지반의 표준설계응답스펙트럼에 맞추어 수정 적용한다. 수정 시 원본파형의 왜곡을 최소화하기 위해 기존파형의 응답스펙트럼을 설계응답스펙트럼에 맞추어 보정(스펙트럼보정)할 수 있다. 이때, 설계 대상구조물의 탁월주기를 주 대상으로 보정할 수 있다.
- ④ 다수의 입력 지진기록 가속도시간이력으로부터 계산된 5% 감쇠비 응답스펙트럼의 평균은  $T_0$ 부터  $2T_L$  주기 영역에서 표준설계응답스펙트럼의 90% 이상이어야 한다. 또한 지진 기록의 평균 최대지반가속도는 유효수평지반가속도( $S$ )의 90% 이상이어야 한다.

#### [해설]

- (9) 설계지진으로 사용하기 위한 실지진 기록은 설계에서 목표로 삼고 있는 우리나라와 지진환경이 유사한 지역에서 계측된 기록이면서 재현주기에 가장 기여도가 큰 지진규모-거리에 대한 기록을 우선적으로 선택해야 한다. 실지진 파형의 응답스펙트럼을 설계응답스펙트럼에 맞추어 보정할 경우 최대한 설계응답스펙트럼과 유사한 응답스펙트럼을 가지는 기록을 우선적으로 선택해야 한다. 보정하는 방법은 주파수영역에서 진동수별 진폭을 조정하여 설계응답스펙트럼에 맞추는 방법과 시간영역에서 특정 파형을 증감시켜 설계응답스펙트럼에 맞추는 방법이 있으며 대상 시설에서 추천하는 방법을 적용한다. 대상구조물의 탁월주기는 모드참여도가 큰 고유주기를 대상으로 하며 구체적으로 제시되어있지 않은 경우 1차모드 주기의 0.2배부터 2배에 해당하는 고유주기 구간을 대상으로 보정한다.

#### (10) 인공합성 지반운동 시간이력

- ①  $S_1$  지반의 표준설계응답스펙트럼에 부합되도록 인공적으로 합성하여 생성한다.
- ② 지반운동의 장주기 성분이 구조물의 거동에 미치는 영향이 중요하다고 판단될 경우에는 지진원의 특성과 국지적인 영향을 고려하여 시간이력을 생성하여야 한다.
- ③ 시간이력의 차단진동수는 최소 50Hz 이상이어야 한다.
- ④ 인공합성 지반운동의 지속시간은 지진의 규모와 특성, 전파경로 및 부지의 국지적인 조건이 미치는 영향을 고려하여야 하며, 지진규모에 따른 구간선형 포락함수의 형상과 지속시간은 그림 4.2-3 및 표 4.2-9와 같다. 이 때 강진동지속시간( $t_m$ )의 한쪽 파워스펙트럼 밀도는 식(4.2-3)과 같이 구할 수 있다.

$$S(f) = \frac{|F(f)|^2}{\pi t_m} \quad (4.2-3)$$

여기서,  $F(f)$ 는 강진동지속시간 구간에 해당되는 가속도시간이력의 푸리에진폭이다.

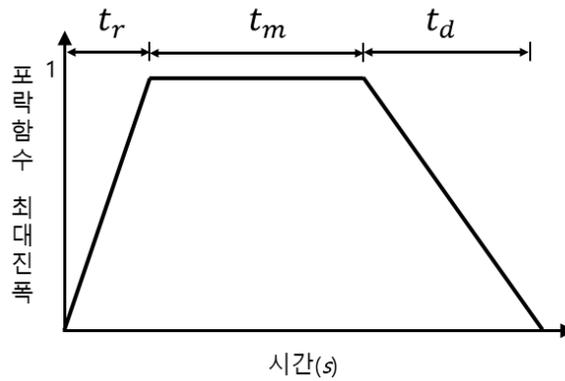


그림 4.2-3 가속도시간이력의 구간선형 포락함수

표 4.2-9 가속도시간이력 구간선형 포락함수에 대한 지진규모별 지속시간(단위: 초) (생략)

- ⑤ 그림 4.2-3의 포락함수가 적용되지 않은 경우 강진동지속시간( $t_m$ )은 가속도시간이력의 누적에너지가 5%에서 75%에 도달하는 구간으로 정의된다. 누적에너지는 식(4.2-4)와 같이 정의된다.

$$E(t) = \int_0^t a^2(\tau) d\tau \quad (4.2-4)$$

여기서,  $a(\tau)$ 는 지반가속도시간이력이다.

- ⑥ 다수의 인공합성가속도시간이력으로부터 계산된 5% 감쇠비 응답스펙트럼의 평균은  $T_0$  부터  $2T_L$  주기 영역에서 표준설계응답스펙트럼의 90% 이상이어야 한다. 또한 시간이력의 평균 최대지반가속도는 유효수평지반가속도( $S$ )의 90% 이상이어야 한다.
- ⑦ 다수의 인공합성가속도시간이력으로부터 계산된 5% 감쇠비 응답스펙트럼의 평균은  $T_0$  부터  $2T_L$  주기 영역에서 표준설계응답스펙트럼의 130% 이하여야 한다.
- ⑧ 어떤 두 개의 가속도시간이력 간의 상관계수는 0.16을 초과할 수 없다.

[해설]

(10)

- ② 근거리에서 발생한 지진(near-fault ground motion)이나 분지효과(basin effect) 등 장주기성분이 탁월한 지반운동이 발생할 수 있는 조건이 있으며 이에 대한 고려가 필요한 경우 적합한 방법으로 시간이력을 생성한다.
- ③ 시간이력은 최소 50 Hz에서 유의미하도록, 즉 시간간격이 0.01초 이하가 되도록 작성한다. 우리나라 지진의 특성이 고진동수 성분이 강하기 때문에 단주기 구조물인 경우는 절단진동수를 최소 100 Hz 이상으로 할 것을 추천한다.

- ④ 인공합성 지반운동의 시간이력 작성시 파워스펙트럼 기준을 만족시키는 것은 필수는 아니지만 해당 시설물을 설계기준에서 파워스펙트럼을 요구하는 경우에는 인공합성 지반운동의 시간이력은 4.2.1.4의 (7)에서 제시된 기준을 만족시켜야 한다. 또한 설계시 충분한 개수의 시간이력을 사용하지 않거나 지반의 고유주기가 뚜렷한 부지해석과 같이 특정 진동수의 부족이 해석결과에 큰 영향을 미치는 경우는 파워스펙트럼 기준을 만족시킬 것을 추천한다. 지반운동 시간이력의 포락곡선을 사다리꼴 함수로 적용할 경우는 <표 4.2-9>를 만족시켜야 한다. 다만 사다리꼴 함수가 아닌 다른 형태의 시간이력 포락곡선을 사용할 경우 ⑤에서 제시된 누적에너지 방법에 의해 구해진 강진동지속시간이 값이 <표 4.2-9>를 만족하도록 한다.
- ⑥, ⑦ 다수의 시간이력을 사용하는 경우 기본적으로 각 시간이력에 대한 응답스펙트럼의 평균값이 설계응답스펙트럼과 거의 일치하도록 한다(mean based fit).

#### (11) 지반운동의 공간적 변화 특성 고려

- ① 해석 시 지반운동의 공간적 변화 특성이 응답에 큰 영향을 주는 경우에는 이를 반영하여야 한다.

#### [해설]

- (11) 장대교량과 같이 구조물의 지점이 멀리 떨어진 경우나 매우 큰 기초에 고진동수 지진이 입력되는 경우는 구조물에 입력되는 지반운동 시간이력이 위치마다 다를 수가 있다. 이러한 경우 지반운동의 공간적 상관성을 고려할 수 있어야 한다.