

# 지진격리교량의 지진해석을 위한 인공지진파의 작성

## Generation of artificial earthquake time histories for the seismic analysis of base-isolated bridges

김남식 \*                      김재민 †                      이계희 ‡                      강형택 §  
Kim, Nam-Sik                  Kim, Jae-Min                  Lee, Gye-Hee                  Kang, Hyeong-Taek

---

### ABSTRACT

In this study, a set of artificial earthquake time histories, which can be used for the earthquake-resistant design of seismically isolated highway bridges, was presented. In addition, adequateness of the generated ground accelerations was investigated. These were performed based on the seismic design standard for seismically isolated bridges. Total of 22 acceleration time histories were generated for each soil condition by the spectral method. The time histories were verified to meet the code provisions including (1) mean response spectrum at control frequencies, (2) EPGA (effective peak ground acceleration), and (3) correlation coefficient. Finally, the maximum response corresponding to four time histories and the mean response associated with seven time histories were computed using the generated acceleration time histories, which shows validity of the proposed artificial earthquake time histories.

---

### 1. 서론

구조물의 내진설계를 위한 목적으로 주어진 설계응답스펙트럼에 상응하는 지반가속도 시간이력을 정하는 문제는 다양한 방법으로 연구되어 왔다. 이들 방법은 크게 (1) 실측 지진기록의 크기를 조정하여 목표응답스펙트럼을 만족할 수 있도록 하는 방법과, (2) 목표응답스펙트럼을 만족하는 인공지진파를 작성하는 방법으로 구분할 수 있다.

인공지진파를 작성하는 이론은 비정상 랜덤과정(non-stationary random process)를 모사하는 방법이라고 할 수 있다. 그리고 목표응답스펙트럼을 만족하는 인공지진파를 작성하는 방법은 다시 크게 (1) 시간영역기법<sup>(1)</sup>과, (2) 진동수영역기법<sup>(2)</sup>으로 구분할 수 있다. 그러나, 우리나라에서 계측된 지진은 내진설계기준에 명시된 설계응답스펙트럼을 만족할 수 있을 정도로 큰 지진기록이 없었으며, 계측 지진

---

\*정회원, 부산대학교 토목공학과 조교수

†정회원, 여수대학교 건설환경공학부 부교수

‡목포해양대학교 해양시스템공학부 조교수

§정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원

의 강진지속시간과 진동수성분도 설계에 사용될 수 있을 정도가 아니므로, 현재의 내진설계를 위한 시간이력해석은 대부분 목표응답스펙트럼을 만족하는 인공지진파를 작성하여 수행되어 왔다.

본 연구에서는 인공지진파 작성방법 중에서 가장 널리 사용되는 진동수영역기법을 사용하여 기준<sup>(3)</sup>에 적합한 인공지진파를 생성하여 설계자가 선택할 수 있는 인공지진파 데이터베이스를 작성하였다. 그리고 이들 인공지진파가 실제 문제에 어떻게 적용되는지 예시하여, 설계자가 교량의 내진설계를 위하여 시간이력해석을 수행할 때 도움이 되도록 하였다.

## 2. 인공지진파 생성의 기준<sup>(3)</sup>

본 연구에서 사용된 인공지진파의 생성시 기준은 다음과 같다.

1. 지진격리받침의 비선형 특성을 고려하여야 한다.
2. 시간이력해석을 위한 지진입력 시간이력은 감쇠비 5%에 대한 설계지반응답스펙트럼에 부합되도록 실제 기록된 지진운동을 수정하거나 인공적으로 합성된 최소한 4개 이상의 지진운동을 작성하여 사용해야 한다.
3. 작성된 시간이력이 설계지반 응답스펙트럼에 부합되기 위해서는 작성된 시간이력의 평균 응답스펙트럼이 다음 요건을 만족해야 한다.
  - (a) 시간이력의 응답스펙트럼 값이 설계지반 응답스펙트럼 값 보다 낮은 주기의 수는 5개 이하이고 낮은 정도는 10%이내이어야 한다.
  - (b) 시간이력의 응답스펙트럼을 계산하는 주기의 간격은 인접한 주기 값의 변화가 10% 이상 되지 않을 정도로 충분히 작아야 한다.
4. 시간이력의 지속시간은 10~25초 또 강진구간 지속시간은 6~10초가 되도록 하여야 한다.
5. 두 방향 이상의 시간이력을 동시에 고려할 경우, 각 직교방향의 시간이력은 통계학적으로 독립되어야 한다. 여기서, 두 시간이력 사이의 시작시간 차이를 고려하여 계산된 상관계수함수의 최대절대값이 0.3을 넘지 않는다면 두 시간이력은 통계학적으로 독립이라고 간주할 수 있다.
6. 7쌍 미만의 지반운동시간이력에 의한 해석 결과로부터 얻어진 응답치의 최대값 혹은 7쌍 이상의 해석결과로부터 얻어진 평균값을 설계값으로 한다.

## 3. 인공지진파의 생성 및 검증

### 3.1 진동수 영역의 인공지진파생성

본 연구에서는 한 지점에 정의된 설계응답스펙트럼을 만족하기 위한  $n_{sample}$  개의 가속도시간이력( $\ddot{x}_j(t)$ )을 주파수영역기법의 일종인 Shinozuka 방법<sup>(4)</sup>에 따라 작성하였다.

$$\ddot{x}_j(t), \quad j = 1, 2, \dots, n_{sample} \quad (1)$$

비정상 랜덤과정인 이 시계열은 아래와 같이 정상 랜덤과정인  $\ddot{y}_j(t)$ 와 포락함수  $A_j(t)$ 의 곱으로 나타낼 수 있다고 가정하였다.

$$\ddot{x}_j(t) = A_j(t)\ddot{y}_j(t) \quad (2)$$

정상 랜덤과정  $\ddot{y}_j(t)$ 의 PSD 함수  $S_{\ddot{y}\ddot{y}}(f)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$S_{\ddot{y}\ddot{y}}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\ddot{y}\ddot{y}}(\tau)e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (3)$$

여기서  $R_{\ddot{y}\ddot{y}}(\tau)$ 는 자기상관함수로서 다음과 같이 정의된다.

$$R_{\ddot{y}\ddot{y}}(\tau) = E[\ddot{y}(t)\ddot{y}(t+\tau)] \quad (4)$$

여기서  $E[\cdot]$ 는 확률적 기대값으로 강진지속시간이  $T_D$  일 때 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{\ddot{y}\ddot{y}}(\tau) = \lim_{n_{sample} \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{n_{sample}T_D} \sum_{j=1}^{n_{sample}} \int_0^{T_D} \ddot{y}_j(t)\ddot{y}_j(t+\tau)dt \right) \quad (5)$$

식 (3)에 나타낸 PSD 함수  $S_{\ddot{y}\ddot{y}}(\omega)$ 에 대응하는 랜덤 시계열  $\ddot{y}_j(t)$ 는 평균값이 0이고 랜덤한 가우스 과정으로 가정하고, PSD 함수가  $0 \leq \omega \leq \omega_u$ 에서 정의된다면 다음과 같이 작성할 수 있다.

$$\ddot{y}_j(t) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N \sqrt{S_{\ddot{y}\ddot{y}}(f_k)2\pi\Delta f} \cdot \cos(2\pi f_k t + \theta_j(k)), \quad j = 1, 2, \dots, n_{sample} \quad (6)$$

여기서  $f_k = k \cdot \Delta f$ 이고,  $\Delta f = f_u/N$ 이며,  $\theta_j(k)$ 는 0과  $2\pi$ 사이에서 균일한 확률분포를 가지는 랜덤 위상각이다. 이때  $f_u$ 는 시뮬레이션에서 고려하는 최대주파수로서 본 연구에서는 50Hz를 사용하였다.

그리고 포락함수  $A_j(t)$ 는 그림 1과 같은 사다리꼴 형태의 함수를 사용하였다. 이때 포락함수의 특성을 나타내는 계수값을 결정하기 위하여 ASCE Standard<sup>(5)</sup>에 제시된 기준을 참조하였으며, 지진규모 6.0-7.0 사이의 기준에 따라 강진지속시간=8초, 총지속시간=20초로 결정하였다. 이에 따라  $t_1=3$ 초,  $t_2=11$ 초,  $t_3=20$ 초인 인공지진파를 작성하였다.

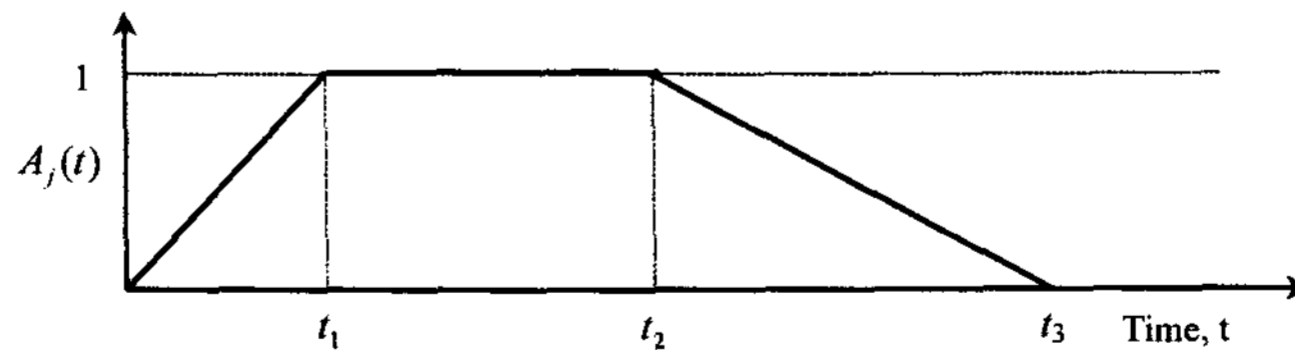


그림 1. 포락함수의 형상

### 3.2 응답스펙트럼을 만족하는 PSD 함수

지진파의 응답스펙트럼과 PSD 함수 사이의 관계는 지진에 의한 지반가속도의 비정상 랜덤특성 때문에 이론적으로 유도할 수는 없다. 그러나 감쇠비가 작고 강진지속시간이 구조물의 고유진동주기에 비

하여 충분히 긴 경우에는 같은 근사적인 관계를 얻을 수 있다.

$$PSA(f, \xi) \propto \sqrt{f} \sqrt{S_{\ddot{x}\ddot{x}}(f)} \quad (7)$$

한편, 지진가속도의 PSD 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{\ddot{x}\ddot{x}}(f) = \frac{1}{2\pi T_D} E[|\ddot{X}(f)|^2] \quad (8)$$

여기서  $\ddot{X}(f)$ 는  $\ddot{x}(t)$ 의 Fourier 변환이다. 감쇠비가 작고 강진지속시간이 구조물의 고유진동주기에 비하여 충분히 긴 경우에 다음과 같은 관계가 있다.

$$PSV(f, \xi) \propto |\ddot{X}(f)| \quad (9)$$

식 (7)과 식 (9)를 비교할 때, 감쇠비가 작고 강진지속시간이 구조물의 고유진동주기에 비하여 충분히 긴 경우에 유사속도응답스펙트럼은 PSD 함수의 제곱근과 같은 형상이 된다. 지진의 특성이 PSD 함수 대신에 응답스펙트럼으로 주어진 경우에도 식 (6)을 사용하여 비정상 랜덤과정인 지진가속도를 근사적으로 작성할 수 있다. 이 기법은 Gasparrini & Vanmarcke 에 의해 개발된 SIMQKE<sup>(6)</sup> 프로그램에 사용되었다. 본 연구에서도 이 기법을 적용하였으며 이에 따라 그림 2와 같은 방법으로 인공지진파를 작성하였다.

### 3.3 기준선의 보정과 작성된 지진파의 적합성

그림 2와 같이 작성된 인공지진파를 직접 적분하여 속도와 변위함수를 구할 경우 비정상적으로 발산하는 특성을 가진다. 이를 줄이기 위하여 일차적으로 다음과 같이 기준선 보정을 수행한다.

$$\ddot{z}(t) = \ddot{x}(t) - (\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2) \quad (10)$$

여기서  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 는 최소자승법에 의하여 결정되는 계수로서 매우 작은 값이다. 그리고 변위의 왜곡을 일으키는 저주파수성분을 제거하기 위하여 다음과 같은 고주파수통과필터를 적용한다.

$$H_{LC}(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^4}} \quad (11)$$

여기서  $f_c$ 는 필터의 corner 주파수로서 본 연구에서는  $0.04\pi$  ( $=0.02\text{Hz}$ )를 사용하였다. 식 (11)의 필터를 적용하더라도 20초 이하 주기의 응답스펙트럼 값에는 영향을 주지 않으므로 실제 해석결과에는 영향을 미치지 않는다. 최종적으로 기준선 보정을 완료한 지반가속도  $\ddot{x}_c(t)$ 는 다음과 같이 구하였다.

$$\ddot{x}_c(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H_{LC}(f) \ddot{Z}(f) e^{i2\pi ft} df \quad (12)$$

여기서  $\ddot{Z}(f)$ 는  $\ddot{z}(t)$ 의 Fourier 변환이다. 본 연구에서는 인공지진파의 작성과 Fourier 변환값을 구하기 위하여 고속 Fourier 변환기법 (FFT)을 사용하였다.

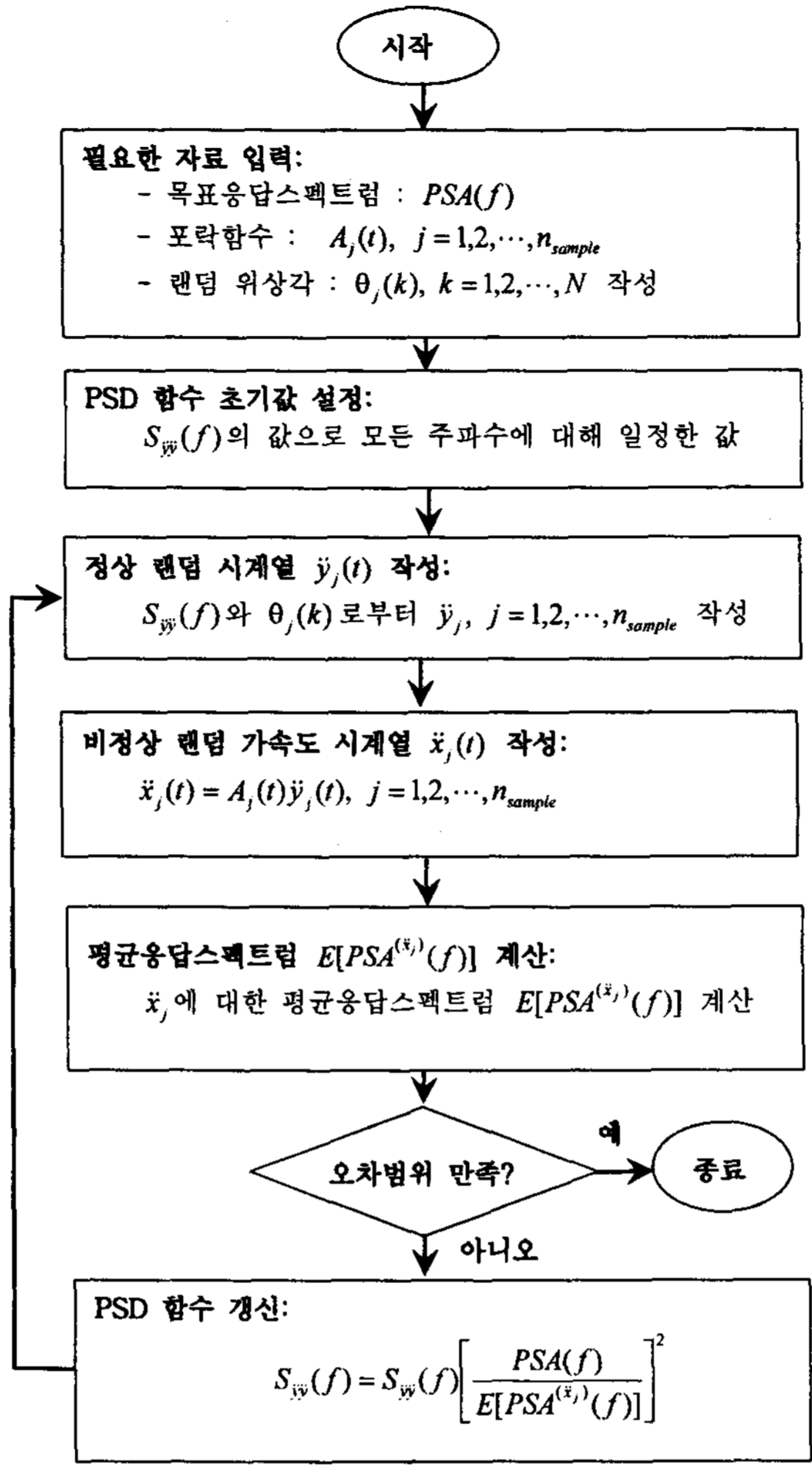


그림 2. 인공지진 생성과정

작성된 지진파의 적합성은 다음 네 가지의 기준에 의하여 평가하였다.

인공지진파의 평균응답스펙트럼 평가 단자유도계의 응답은 대부분 고유진동수  $f_k$ 로부터  $2\xi f_k$ 만큼 진동수범위 입력에너지에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다. 따라서 인공지진파에 의한 응답스펙트럼과 목표응답스펙트럼의 비교를 위한 통제진동수(control frequency),  $f_k$ 는 인접한 통제진동수 사이에는 다음 조건을 만족하도록 조밀하게 설정해야 한다.

$$f_k < f_{k+1} < f_k(1 + 2\xi) \quad (13)$$

유효최대지반가속도, EPGA 평가 EPGA는 응답스펙트럼에서 단자유도계의 응답이 증폭되는 구간(즉,  $A=1$ 인 정규 탄성지진응답계수가 2.5인 구간)에서 스펙트럴 가속도를 평균한 다음, 실제지반 응답스펙트럼의 증폭계수인 2.5로 나눈 값이다.

r-계수 평가 인공지진파의 적합성을 판단하는 또 다른 기준은 다음과 같은 r-계수를 평가하는 것이다. 실제 계측된 지진의 r-계수는 5와 15 사이의 값이다

$$r = \frac{PGA \cdot PGD}{PGV^2} \quad (14)$$

인공지반가속도 사이의 상관계수 평가 교량에 대한 우리나라 내진설계기준에 의하면, 수평 2방향 지진입력을 동시에 작용시켜 지진응답해석을 수행할 경우, 두 입력지진의 상관계수가 0.3 이하가 되도록 정하고 있다. 이 같은 기준은 내진설계가 가장 엄밀하게 수행되고 있다고 할 수 있는 원자력발전 시설물에도 적용되는 기준이다.<sup>(5)</sup>

본 연구에서는 이와 같은 과정에 의해 한 그룹이 3개 지진파로 구성되는 5개 그룹 인공지진파 작성하고, 1개 인공지진파가 목표응답스펙트럼을 만족하도록 하는 개별 인공지진파 7개를 작성하였다. 따라서 1개 설계응답스펙트럼에 총 22개 (=3\*5+7)의 인공지진파를 작성하였다. 이때 그룹의 평균응답스펙트럼(3개 평균)이 목표응답스펙트럼을 만족하도록 하였다. 이와 같이 생성된 지진파의 예를 그림 3에 나타내었다.

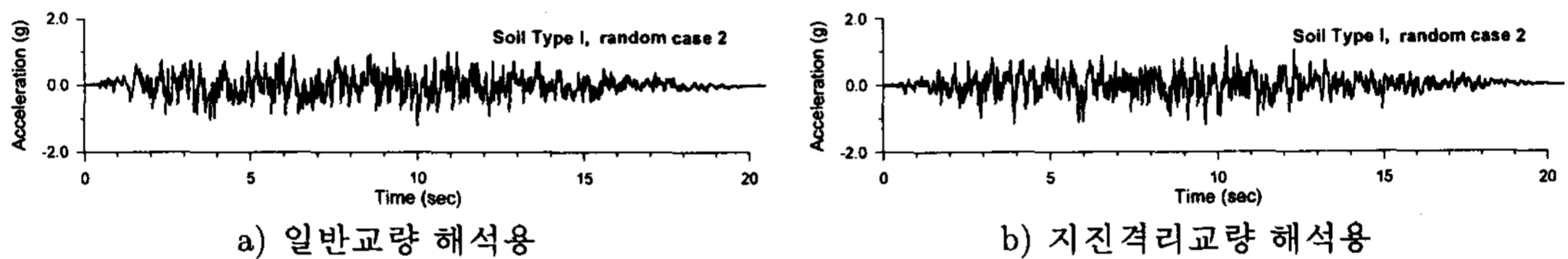


그림 3. 생성된 인공지진파의 형상

#### 4. 예제구조물의 해석

작성된 지진파의 적합성을 검증하기 위하여 실교량에 대한 예제 해석을 수행하였다. 예제 해석은 작성된 모든 지진파를 해석 모델에 수평 양방향(x, y)으로 각각 작용시켜 해석을 수행하고 주요 구조물응답의 최대값을 산정하는 방법으로 수행하였다.

##### 4.1 예제구조물의 모델링

대상구조물은 일반교좌장치를 채택한 N교와 LRB를 교좌장치에 설치한 S교이다. 각 교량은 모두 보요소를 이용하여 모델링되었다. 지진하중에 의한 하부구조물의 응답을 고려하기 위하여 교각도 동시에 모델링되었다. 그림 4는 두 교량의 해석모델을 나타낸다. N교의 경우는 일반교좌장치를 사용한 해석모델로 일반교량에 대해 작성된 지진파에 대해서 해석을 수행한다. S교는 LRB를 교좌장치에 설치하여 교량의 고유주기를 장주기화하고 지진에너지를 소산할 수 있도록 한 지진격리교량이다.

교좌장치에 설치된 LRB는 SAP2000/Nonlinear 프로그램<sup>(7)</sup>의 Isolator1 경계조건을 이용하여 모델링하였으며 해석시 경계에서의 비선형 거동특성을 이용한 경계비선형 해석을 수행하였다.

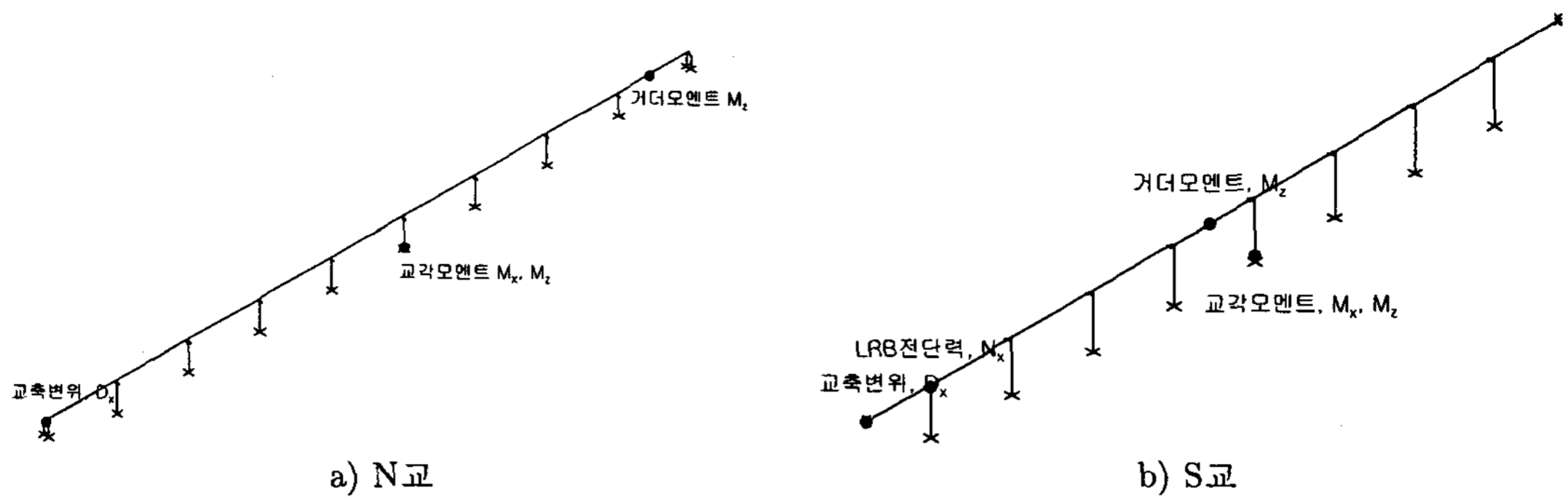


그림 4. 예제구조물의 해석모델

#### 4.2 예제구조물의 해석

지진하중의 산정을 위한 시간이력 해석을 수행하기 위하여 두 해석모델의 Ritz모드해석을 수행하였다. 각 모델의 경우 모두 50개의 Ritz모드를 이용하여 해석을 수행하였으며 50개의 Ritz모드가 구성하는 질량은 수평2개 방향에 대해서 각각 90%이상이다. 단 수직방향의 질량비는 이에 못 미치나 본 연구의 목적은 횡방향지진하중의 적정성을 고려하기 위한 것이므로 결과의 신빙성에는 큰 영향이 없을 것으로 보인다.

작성된 지진파의 검증을 위하여 작성된 모든 지진파를 두 해석모델의 x, y방향에 대하여 각각 작용시켰다. 이 때 발생하는 대표적인 응답에 대하여 최대값과 평균값을 취하여 설계기준에 따라 비교하였다. 지진입력은 고정된 지점에 동시에 작용하는 것으로 가정하였다. 각 해석모델에서 취한 대표적인 구조물응답은 그림 4에 보이는 바와 같다.

#### 4.3 해석결과

현 설계기준에는 7개 이상의 시간이력을 사용한 경우에는 각 응답의 평균값을 사용하고 7개 미만인 경우에는 각 응답 중 최대값을 사용하도록 되어 있다. 이러한 점을 고려하여 각 지진파 중 “지반종류 I”에 대한 응답 중 조합 가능한 최대응답과 최소응답을 표 1에 나타내었다.

7개 지진파를 사용한 경우에는 얻어진 응답에 대한 신뢰도가 7개 미만을 사용한 경우에 비해 크므로 7개지진파의 평균은 7개 미만을 사용한 경우에 비해 작은 설계응답을 보여야 한다. 이러한 점에서 두 종류의 지진파는 모두 조합 가능한 경우에 있어서 7개지진파 응답의 평균값이 4개 지진파응답의 최대값 보다 작은 값을 보여 이러한 점을 만족시키고 있다. 다만 검토한 조합 중 한 경우만 이러한 기본가정을 따르지 않았는데 이 때의 오차 또한 2% 미만이다. 따라서 경제적인 설계를 위해서는 7개 이상의 지진파를 사용하여 구조응답을 얻고 이를 평균하여 설계응답을 얻는 것이 바람직한 접근방법으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 교량 내진 설계자를 위하여 시간이력해석에 사용되는 인공지진파의 생성기법과 생성된 지진파의 타당성을 평가하였으며, 교량 예제를 통하여 시간이력해석 결과를 분석하였다.

표 1. 평균값과 최대값의 응답비교(지반종류I)

		일반교량		지진격리교량		
		거더모멘트 (t-m)	교각모멘트 (t-m)	거더모멘트 (t-m)	교각모멘트 (t-m)	LRB전단력 (t)
최대응답	평균응답*	3927	14078	2753	3613	92.5
	최대응답**	4610	18451	3596	3922	104.4
최소응답	평균응답*	3533	11701	2237	2865	84.6
	최대응답**	3748	11496	2387	3059	87.1

\* 7개 시간이력해석결과의 평균

\*\* 4개 시간이력해석결과의 최대값

- 현재 국내에서 작성된 지진격리교량의 내진설계기준(안)을 근거로 시간이력해석을 위한 인공지진파 작성을 수행하였다.
- 진동수영역기법의 일종인 Shinozuka기법에 따라 일반교량과 지진격리교량으로 구분하여 총 지진지속시간이 20초인 인공지진파를 작성하였으며, 얻어진 인공지진파에 대한 적합성이 양호한 것으로 평가되었다.
- 생성된 가속도시간이력을 이용하여 일반교량과 지진격리교량으로 구분하여 시간이력해석을 수행하였으며, 특히 4쌍의 지진파를 사용한 최대 응답과 7쌍의 지진파를 사용한 평균 응답을 비교-검토한 결과 7쌍의 지진파를 사용하여 지진응답의 평균값을 구하는 것이 경제적인 내진설계 방법으로 판단된다.

### 참고 문헌

1. Spanos, P.T.D. and Zeldin, B., "Random field simulation using wavelet bases", *Proc. ICASP-7 Conf.*, Paris, France, 10-13 July, 1995, pp1275-1283.
2. Deodatis, G., "Non-stationary stochastic vector processes: seismic ground motion applications", *J. Probabilistic Engng Mech.*, Vol. 11, 1996, pp149-168.
3. 도로교내진설계기준(안), 한국도로공사, 2004
4. Shinozuka, M. and Deodatis, G., "Stochastic process models for earthquake ground motion", *J. Probabilistic Engng. Mech.*, Vol. 3, 1996, pp 114-123.
5. ASCE Standard, *Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary*, ASCE 4-98, ASCE, 1999
6. Gasparini, D. and Vanmarcke, E.H., *SIMQKE : A Program for Artificial Motion Generation*, MIT, M.A.,1976
7. Computers & Structures, Inc., *SAP2000/Nonlinear User's Manual- Version 7.0*, 1997.