

# 역사지진 및 인공지진의 물리적 특성에 관한 연구

## Study on Physical Characteristics of Historical and Artificial Ground Acceleration

이 대 형\*                      정 영 수\*\*                      전 환 석\*\*\*  
Lee, Dae Hyoung    Chung, Young Soo    Cheon, Hwan Seok

### 국문요약

최근의 중·소규모의 연이은 지진활동은 한반도도 지진에 대해서 안전지대는 아닌 것으로 생각되고 있으며, 1995년 일본의 Kobe 지진 때 참사는 국내에도 지진에 관한 많은 관심을 고조시키고 있다. 그러나, 국내의 구조물의 내진설계를 위해 사용되는 지진파에 대한 연구는 매우 미흡하며, 최근까지도 국내에서는 외국의 설계용 지진파를 그대로 사용하거나 설계응답스펙트럼을 이용하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 국내지진파의 물리적 특성, 즉, 주기-빈도 분포, 확률밀도분포, Fourier Spectrum 및 응답스펙트럼을 구하여 비교·분석하였다. 또한 이상화된 인공지진파를 산출하여 이를 현재 교통량의 폭발적인 증가와 도로의 선형성을 이유로 사각을 가진 교량구조물이 많이 건설되고 있는바, 70° 사각슬래브교에 대한 지진해석을 수행하여 인공지진의 합리적 해석 횟수를 규명하였다.

**주요어** : 주기-빈도분포, 확률밀도 분포, Fourier 스펙트럼, 인공지진파, 사각슬래브교

### ABSTRACT

Because of the continual occurrence of minor and moderate earthquakes in Korean peninsula, it is generally considered that Korean is not located in a safe region against probable earthquake any more, even though being recognized as a safe country in earthquake. It is in particular noted that nowadays there has been much concern about unexpected tragedy due to probable earthquake since the disaster of 1995 Kobe earthquake.

Thus, the objective of this research is to develop appropriate design spectrum which could be practicably used in seismic design of important structures taking into consideration of local physical characteristics. Particularly, we have to keep in mind the lessons from 1985 Mexico earthquake which had disregarded deep research on local ground conditions, being a possible magnification phenomena of ground motions in weak soil layer. Various spectra has been described based on the analysis of historical earthquakes, and generate the artificial ground acceleration. Also, rational numbers of artificial ground acceleration is investigated by the seismic analysis for skew slab bridges.

**Key words** : period-frequency distribution, probability density distribution, Fourier spectrum, artificial ground acceleration, skew slab bridge

## 1. 서      론

지진에 대하여 대체적으로 안전지대라고 생각되었던 우리나라에서도 1978년 10월 7일에 발생한 홍성지진, 1982년 2월 14일에 발생한 사리원지진, 최근의 1996년의 진도 약 4.0이상

의 경주, 영월지진등의 연이은 중·소규모의 지진발생으로 한반도도 지진에 대해서 안전한 지역이 아니라는 인식이 일어나고 있다. 따라서 우리나라에서도 시급하게 우리의 지진특성에 대한 연구를 통하여 지진에 대한 대비를 서둘러야 할 것이며, 지진의 연약지반에 대한 증폭현상을 국부적인 현상으로 가볍게 생각하여 심층적인 연구와 분석을 도외시한 결과인 멕시코지진에서의 교훈을 유념해야 할 것이다.

\* 정희원·경북도립 예천전문대학 전임강사

\*\* 정희원·중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

\*\*\* 중앙대학교 토목공학과 석사과정

하지만, 국내에서는 표준설계응답스펙트럼에 대한 자료나 그에 대한 연구가 미흡한 상황에서 세계 각국에서 많이 이용되고 있는 미국 UBC(1991)의 응답스펙트럼을 우리나라의 표준 응답스펙트럼으로 적용하고 있는 실정이며 관례적으로 주요 구조물은 댐과 교량 그리고 건축물로서 설계진도 0.12g를 적용한 급강댐이 있고 원자력 발전소는 설계진도 0.2g를 적용하고 있으며 1986년부터는 20층 이상의 고층아파트에 대하여 미국의 UBC에 근거하여 내진설계를 시행하고 있는 실정이다. 현재 국내에서도 건설교통부의 주관으로 지진 및 지반자료의 수집과 연구로 한국지반특성에 적합한 표준설계응답스펙트럼을 선정하기 위한 연구가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 국내에서 측정된 지진파의 물리적 특성(주기-빈도 스펙트럼, 확률밀도 스펙트럼, Fourier Spectrum)을 비교·분석하고 이러한 결과에 따른 새로운 인공지진파를 산출하고자 한다. 물론 본 연구에서 분석한 지진파가 한국의 지진파를 대표할 수는 없으나 추후 국내에서 관측된 지진파의 데이터가 축적되되면 이를 근거로한 한국 표준지진모델을 도출할 수 있으며 이를 근거로한 인공지진파를 산출하여 구조해석에 이용한다면 이상적인 내진해석이 될 수있으리라 사료된다. 또한 현대 교량의 상판(Slab)은 지형적 조건, 차량의 설계속도의 증가 및 통행 공간의 제한 등의 원인으로 사각슬래브를 사용한 구조물이 많이 등장하고 있으며, 이에 대한 해석방법도 점점 변화되고 있다. 이러한 인공지진은 상당한 불규칙성을 내포하고 있으므로 다수의 인공지진을 산출하여 해석 결과에 대한 평균값을 구하고 이들의 수렴정도를 조사하여야 할 것이다. 또한 이러한 평균값은 단일 지진에 대한 해석으로 간과하기 쉬운 물리적 특성을 고려할 수 있을 것이다.

## 2. 지진파의 물리적 특성

지진파가 갖는 특성 중 내진공학상 중요한

인자는 지진파의 최대진폭, 지속시간, 파의 수, 진동주기 및 에너지 등이다. 이러한 지진파의 중요한 인자들에 대한 심층적인 연구를 통하여 구조물의 건설 예정지에서의 특성을 비교하여 적절한 수정을 통한 적용이 필수적이라 하겠다. 일반적인 지진기록을 보는 것만으로도 최대진폭 및 지속시간은 쉽게 알 수 있으나 진동주기 및 에너지에 대해서는 스펙트럼 해석을 통하여 지진파가 구조물에 미칠 영향을 파악하여야 할 것이다. 본 논문에서는 지진파의 특성을 분석하고자 주기-빈도 스펙트럼, 확률 밀도스펙트럼, Fourier 스펙트럼 및 응답스펙트럼 해석을 수행하였으며, 경주지진(97.6.26), 양양지진(96.1.24) 및 학계리 지진(96.2.27)을 이용하였다. 그림 1은 경주지진을 월성원자력발전소의 지반에서 관측한 가속도 시간이력이다.

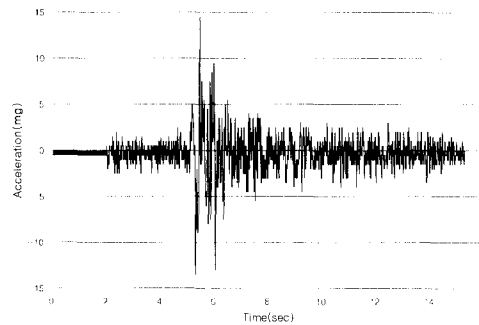


그림 1 경주지진파(지반)의 가속도 시간이력

### 2.1 주기-빈도 스펙트럼

주기-빈도 스펙트럼은 지진파가 가지고 있는 탁월주기(Dominant Period)를 분석하는 것으로서, 이러한 탁월주기를 구함으로써 지진파가 구조물에 미치는 영향을 예측할 수 있으리라 판단된다. 본 논문에서는 주기-빈도 스펙트럼의 해석에 Zero-Crossing Method 및 Peak Method를 이용하였다.

Zero-Crossing Method는 시간함수로부터 주기를 구하기 위하여 가장 일반적인 방법으

로서 곡선이 Zero선 즉, 횡축을 자르는 점을 취하는 방법이다. 이와 같이 곡선이 Zero선을 지나는 점들의 시간간격을 측정하여 이를 2배하여 주기를 구한다. 이에 반해 Peak Method는 지진파의 시간이력은 골과 골 혹은 산과 산사이의 시간간격도 역시 파의 주기를 나타내므로 피크와 피크사이의 시간과 이들이 각 계급간격 사이에 들어가는 횡수를 측정하여 파가 갖는 주기특성을 검출하는 방법으로서 복잡한 형태의 지진파도 통계적으로 적절히 분석할 수 있는 방법이다. 경주지진파(지반)에 대한 Peak Method에 의한 해석결과는 다음 그림 2와 같다.

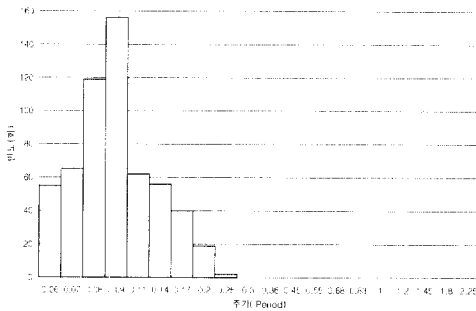


그림 2 경주지진파(지반)의 Peak법에 의한 주기-빈도 스펙트럼

표 1 각 지진파에 대한 탁월주기 해석결과

지진파 종류	관측위치	탁월주기(sec) 해석결과	
		Zero-Crossing Method	Peak Method
경주	지 반	0.09	0.09
	원자로	0.09	0.09
양양	덕경리	0.055	0.055
	매곡리	0.135	0.09
학계리	거제면	0.055	0.055
	김 해	0.055	0.055

## 2.2 확률밀도 스펙트럼

지진파에는 크기에 따라 여러 가지 진폭이 있다. 어떤 것에는 큰 진폭의 파가 반복적으로

대단히 많이 있는 것이 있는가 하면 또 다른 지진파에는 극히 진폭이 작은 지진파가 반복이 되는 경우도 있다. 이와 같이 지진파에 포함되어 있는 크고 작은 진폭의 분포가 구조물에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 확률밀도함수를 사용하여 분석할 수 있으며, 본 연구에서는 각 지진파에 대한 확률밀도함수를 구하고 이에 따른 평균 및 표준편차를 구하였다. 평균 및 표준편차는 식(2.1) 및 (2.2)과 같다.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m \quad (2.1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} (x_m - \bar{x})^2} \quad (2.2)$$

여기서, N은 데이터의 수,  $X_m$ 은 표본 값이며, 해석결과는 표 2에 나타내었다. 해석 지진파의 확률밀도스펙트럼은 그림 3과 같다.

표 2 지진파의 평균 및 표준편차

지진파의 종류	관측위치	평균값	표준편차
경주	지 반	-0.021	0.130
	원자로	-0.001	0.155
양양	덕경리	0.000	0.070
	매곡리	0.000	0.094
학계리	거제면	0.000	0.146
	김 해	0.000	0.113

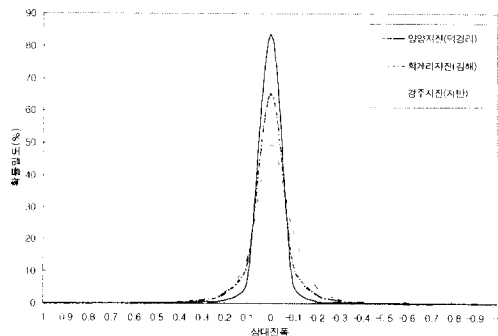


그림 3 해석 지진파의 확률밀도 스펙트럼

### 2.3 Fourier 스펙트럼

지진파의 성분을 분해하여 어떠한 성분과의 진폭이 크며 어느 성분과의 진폭이 작은가 하는 문제는 지진파의 성질로서 대단히 중요하다. 이를테면 진동수 2.5Hz 즉 주기 0.4sec의 성분과의 진폭이 대단히 크다면 이 지진파는 고유주기(Natural Frequency)가 0.4sec정도인 5,6층의 철근콘크리트구조물에 상당한 영향을 미칠 것이다. 이러한 Fourier스펙트럼의 해석은 지진파의 특성을 이해하는데 가장 중요한 것 중의 하나로서 구조물의 내진설계·해석을 위한 중요한 설계자료이다. Fourier스펙트럼의 중요한 의미는 시간이력에 포함되는 진동수성분의 검출과 시간영역에서 주파수영역으로의 변환이다.

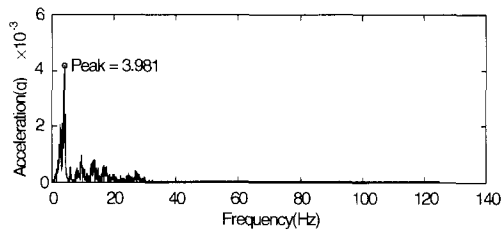


그림 4 경주지진파(원자료)의 Fourier Spectrum

표 3 해석 지진파에 대한 Fourier Transform 에 의한 탁월진동수

지진파의 종류	경주		양양		학계리	
관측위치	지반	원자로	덕평리	매곡리	거제면	김해
탁월진동수 (Hz)	3.102	3.981	38.05	7.775	20.86	32.3

### 2.4 응답스펙트럼

#### 2.4.1 설계응답스펙트럼

임의 지역에서의 내진설계는 해당 지역의 지진시간이력을 정확히 알 수 있으면 내진설계에 적용되는 안전율을 크게 고려하지 않고

도 경제적으로 설계할 수 있으나 실제로는 같은 지역이라도 발생하는 지진의 강도, 진앙, 깊이 등의 변수에 따라 지진의 특성이 다르기 때문에 해당지역에 발생하는 많은 지진자료를 평균하여 내진설계를 적용하게 된다. 그러나 해당지역의 평균시간이력을 구하는 것은 시간의 함수라는 특성 때문에 불가능할 뿐만 아니라 공학적인 아무런 의미가 없다. 따라서 모든 지진시간이력을 응답스펙트럼으로 구한 후 평균하여 평균응답스펙트럼을 구하면 각기 다른 지진들의 특성을 모두 고려하게 되어 내진설계의 신뢰성을 높일 수 있으며, 해당지역에서 어떤 하나의 특정지진을 사용하여 내진설계를 할 때의 위험성을 배제할 수 있다.

내진설계를 위한 설계응답스펙트럼의 설정은 해당지역에 발생한 지진기록이나 예상되는 지진의 동적특성 그리고 지반의 조건 등을 고려하여 결정할 수 있지만, 국내에서는 각 지진에 대한 공학적인 관점에서 정량적으로 분석한 자료는 전무한 실정이고, 지반에 대한 조사 연구도 미흡하다. 따라서 우리나라의 지반의 특성과 지진의 성향을 고려하여 설계지진 응답스펙트럼을 설정하는 것이 예기치 못한 지진에 대비한 시급한 과제의 하나로 생각된다.

#### 2.4.2 응답스펙트럼

단 자유도를 가지는 구조물의 지반운동에 대한 운동방정식은 다음 식(2.3)과 같다.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (2.3)$$

구조계가 정지된 상태에서 지진이 발생하였다면, 운동방정식 (2.3)의 해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x(t) &= \int_0^t (-) m\ddot{x}_g(\tau) h(t-\tau) d\tau \\ &= -\frac{1}{\omega_D} \int_0^t (-) \ddot{x}_g(\tau) e^{\xi\omega_n(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \end{aligned} \quad (2.4)$$

여기에서  $\omega_n$  은 구조물의 자유진동수,  $\xi$ 는 감

쇠비,  $\omega_D$ 는 감쇠자유진동수이다. 특정 가속도에 대한 구조물의 응답은 구조물의 자유진동수와 감쇠비가 주어진다면 식 (2.4)로부터 구간별 선형하중방법, Newmark방법, Wilson- $\theta$ 방법 등의 수치해석방법으로 쉽게 구할 수 있으며 이로부터 구조물의 최대거동을 구할 수 있다. 통상적인 토목·건축 구조물이나 산업설비들은 구조적 감쇠비가 0.2 보다 작으므로  $\omega_D \approx \omega_n$ 이다. 따라서 스펙트럼 속도응답(Spectral velocity Response)  $S_v(\omega_n, \xi)$  와 변위응답(Spectral displacement Response)  $S_d(\omega_n, \xi)$  및 가속도응답(Spectral acceleration Response)  $S_a(\omega_n, \xi)$ 는 식 (2.5) ~ 식 (2.7)과 같이 정의된다.

$$S_v(\omega_n, \xi) = \max | \dot{V}(t, \omega_n, \xi) | \quad (2.5)$$

$$S_d(\omega_n, \xi) = \max | x(t) | = \frac{1}{\omega_n} S_v(\omega_n, \xi) \quad (2.6)$$

$$S_a(\omega_n, \xi) = \max | \ddot{x}^i(t) | = \omega_n^2 S_d(\omega_n, \xi) \quad (2.7)$$

## 2.5 해석결과에 대한 분석

주기-빈도스펙트럼의 해석결과는 Zero-Crossing Method 및 Peak Method에 따라 약간의 차이를 보이고 있으나 탁월주기의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 지진기록의 분석결과는 모든 지진에서 상당히 작은 주기를 보이고 있으며 그 값은 약 0.09sec정도를 나타내고 있으며 확률밀도 스펙트럼해석의 결과는 양양지진과 학계리지진 및 경주지진이 각각 82%, 65%, 48%를 나타내었다.

Fourier Spectrum해석의 결과로는 경주지진의 경우는 4Hz정도의 값을 나타내고 있으나 양양지진 및 학계리지진의 경우에는 20Hz이상의 주파수를 보이고 있다. 또한, 동일한 지진파라 하더라도 지진파가 전달되는 지질의 특성이 다른 지역에서 각각 측정된 지진파의 물리적 특성도 다르다는 사실이 입증되었다. 본 연구는 경주지진을 모델로 하여 인공지진을

도출하고자 한다.

## 3. 인공지진파의 물리적 특성

### 3.1 인공지진파의 산출

비슷한 유형의 지진자료에 대한 구조물의 응답은 서로 큰 차이를 보이기 때문에 많은 수의 지진에 대한 평균지진이 구조물의 응답에 주는 의미는 크다. 평균지진의 의미는 각 지진의 응답스펙트럼을 평균한 값으로 나타낼 수 있다. 그러나 고층건물이나 비정형구조물의 경우 지진발생시에 비선형응답을 보여주기 때문에 응답스펙트럼을 적용하면 그 결과에 오차가 커서 적용할 수가 없다. 따라서 바람직한 설계지진을 얻기 위해서는 인위적으로 지진기록을 합성하여야 할 것이다. 구조물의 비선형-동적해석(Nonlinear-Dynamic Analysis)에서 지진에 의한 지반의 운동은 지반운동의 지속시간과 가속도 값의 최대치가 시간에 따른 함수이므로 상당히 제한적이다. 인공지진파(Artificial ground acceleration),  $\ddot{x}(t)$ 는 포락함수,  $s(t)$ 를 가우시안함수,  $g(t)$ 에 곱하여 구할 수 있으며, 본 논문에서 사용된 포락함수는 합성형(compound)으로서 식(3.1)과 같다.<sup>(1,4,5,6)</sup>

$$\begin{aligned} s(t) &= (t/T_b)^2 & 0 \leq t \leq T_b \\ s(t) &= 1 & T_b \leq t \leq T_c \\ s(t) &= e^{-\alpha(t-T_c)} & T_c \leq t \leq T_d \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\text{여기서, } T_b = [0.12 - 0.04(M-7)]T_d$$

$$T_c = [0.50 - 0.04(M-7)]T_d, \quad \alpha = -\ln \frac{0.1}{(T_d - T_c)}$$

이다.

지진의 지속시간은 지진의 매그니튜드에 따른 함수로 久田式을 이용하였으며 다음 식 (3.2)과 같다.<sup>(5)</sup>

$$T_d = 10^{0.31M - 0.774} \quad (3.2)$$

가우시안 함수,  $g(t)$  는 식 (3.3)과 같으며, Monte-Carlo Technique과 그림 5와 같은 Kanai-Tajimi 함수로부터 얻어진다.<sup>(9,10)</sup>

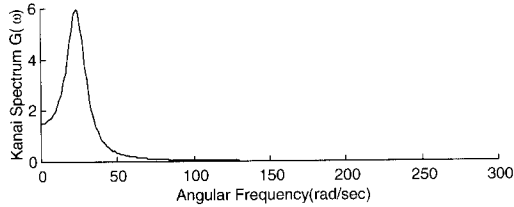


그림 5 Kanai-Tajimi Spectrum

$$g(t) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N \sqrt{G(\omega_k) \Delta\omega} \cdot \cos(\omega_k t - \phi_k) \quad (3.3)$$

여기에서  $\phi_k$ 는 위상각(Random phase angle)으로 0에서  $2\pi$  사이에 일정한 분포를 이루고 있다.  $\omega_k = k\Delta\omega$ , 이며  $\omega_u = N\Delta\omega$ 로 upper cut-off 주파수이다.  $G(\omega_k) = 2S(\omega_k)$ 이며 one sided 파워스펙트럼을 나타낸다. 인공지진파를 산출하기 위해서 Shinozuka는 파워스펙트럼 밀도함수,  $S_0$ 와 피크 지반가속도(Peak Ground Acceleration), PGA의 관계를 다음과 같이 제안하였다.<sup>(9)</sup>

$$\sigma_g^2 = E[x_g^2] = \int S(\omega) d\omega = \frac{S_0 \pi \omega_g (1 + 4\zeta_g^2)}{2\zeta_g} \quad (3.4)$$

또한 PGA는 다음과 같다.

$$PGA = \alpha_g S_0^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

여기에서  $\alpha_g = p_g [\pi \omega_g (\frac{1}{2\zeta_g} + 2\zeta_g)]^{\frac{1}{2}}$  이고,  $p_g$ 는 경험적으로 3을 사용하였다.<sup>(9)</sup>

본 논문에서 사용한 인공지진파 산출프로그램은 하나의 입력데이터를 이용하여 다수의 지진을 산출하게 되며 이때 각각의 지진에 대한 랜덤변수(random variable)는 자연 발생하는 Random Seed값을 이용하였으며 IMSL Subroutine을 사용하였다. 따라서 인공지진은 유사한 물리적 특징을 갖는 여러개의 지진파를 생성하게 된다.

### 3.2 인공지진파의 물리적 특성

인공지진파의 산출을 위한 PGA(Peak Ground Acceleration)는 현재 국내의 도로교시방서에서 제안한 가속도 계수 0.14g를 사용하였고 탁월진동수는 3.981(Hz) 즉, 25(rad/sec), Upper cut-off Frequency는 300(rad/sec)을 각각 사용하였다. 감쇠비는 암반적층토로 가정하여 0.3을 사용하였다.<sup>(10)</sup> 이는 미국의 UBC규정 가운데 견고한 지반(지반종류 1)의 설계지진특성과도 유사한 값이다.<sup>(4)</sup> 다음 그림 6은 인공지진파의 시간이력을 나타내고 있다. 또한 이러한 가속도 시간이력에 대한 주기-빈도 스펙트럼해석, 확률밀도 스펙트럼 및 Fourier Spectrum해석의 결과는 다음 그림 7 ~ 10에 나타내었다.

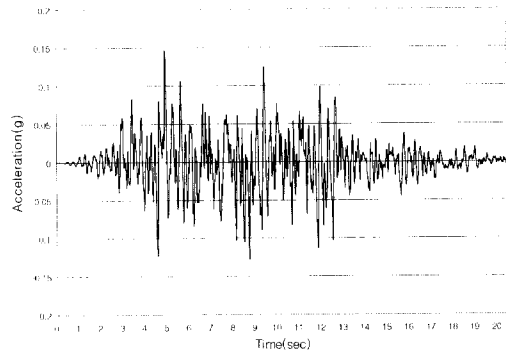


그림 6 인공지진파의 가속도 시간이력

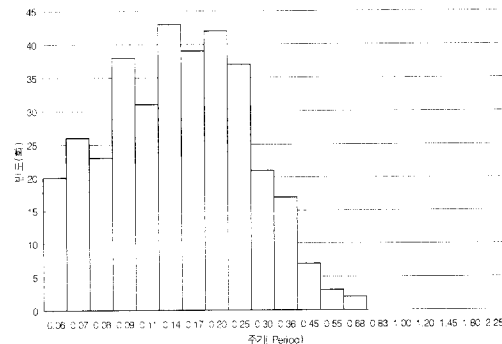


그림 7 인공지진파의 주기-빈도 스펙트럼 (Peak Method)

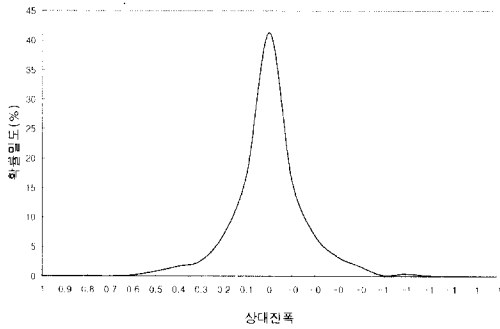


그림 8 인공지진파의 확률밀도 스펙트럼

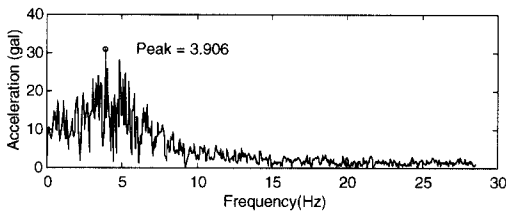


그림 9 인공지진파의 Fourier Transform Spectrum

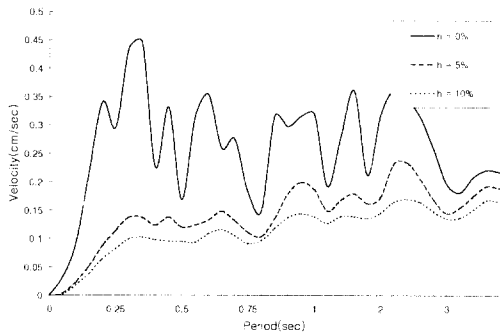


그림 10 인공지진파의 속도응답 스펙트럼

#### 4. 사교의 인공지진응답해석

일반적으로 직접 기초에 정형적(regular)이며 고유주기가 1.0 sec 이하인 슬래브교 및 PSC교는 단일 모드 스펙트럼 해석법을 사용하며, 고유주기가 1.0 sec 이상인 연약 지반 상의 깊은 기초 형식 교량과 같이 기초와 병행하여 해석되어야 할 연속교량에는 다중 모드 스펙

트럼 해석법을 일반적으로 적용한다. 한편, 비정형화(irregular)교량 또는 지반과 구조물의 상호 작용 및 기초 분리 장치 등의 면진 장치를 사용한 구조물에 대해 비선형 해석 및 피로 해석 등을 할 경우에 대한 해석 방법은 Time Domain 혹은 Frequency Domain 기법을 사용하고 있으며 본 연구에서는 Time Domain 기법을 이용하여 비정형 구조물인 사각슬래브교를 해석하였다.

#### 4.1 설계용 지진하중의 결정

지진에 의한 구조물의 안전 검토 또는 설계 시에는 그 지역의 지진 특성에 적합한 대표적인 지진 하중을 평가하여야 한다. 지진 하중은 일반 하중과는 달리 발생확률은 낮은 반면에 하중의 크기는 매우 큰 특성을 가지고 있다. 따라서 지진하중을 산정하기 위해서는 지역의 지진 발생 빈도와 크기 등을 고려한 확률론적 통계처리가 요구된다. 어떤 지역에서의 지진에 대한 위험도를 결정하는 방법으로는 지반 운동의 특성을 고려하여 작성된 유사한 구역들에 따라 지진 위험 구역을 나눈 지진 위험도와 그에 따른 최대지반가속도를 설정하는 방법을 사용한다. 일반적으로 지진하중은 지진 가속도의 시간 이력 곡선 또는 설계 응답스펙트럼으로 표현된다.

#### 4.2 지진응답해석

본 연구의 구조해석을 위한 구조물은 3경간 연속교(L=44m, B=12.145m, 3차로)를 선정하였으며, 해석용 프로그램은 SAP90을 사용하였으며 해석 대상구조물은 3경간 연속슬래브교로서 연장은 13.5m + 17.0m + 13.5m이고 전체 연장은 44m이다. 또한, 교량의 폭은 12.145m이며 서해안 고속도로건설예정인 구조물이며 교량등급은 1등급교량이다.

하중은 콘크리트와 아스팔트의 사하중을 고려하고 지진하중은 교대의 토압방향과 교축의 직각방향으로 작용시키고 각 단위중량은 각각





표 5 사각에 따른 고유값, 진동수 및 주기

사각	구분 모드	고유값, $\omega$	진동수, f	주기, T
		(rad/sec)	(Hz)	(sec)
90°	1	3.803	0.605	1.652
	2	4.400	0.700	1.428
	3	4.850	0.771	1.295
	4	153.4	24.415	0.041
	5	325.8	51.858	0.019
	6	338.6	53.893	0.019
	7	532.0	84.673	0.012
70°	1	3.762	0.598	1.670
	2	4.449	0.708	1.412
	3	4.850	0.771	1.295
	4	152.5	24.263	0.041
	5	102.1	51.478	0.019
	6	336.9	53.612	0.019
	7	520.1	82.784	0.012

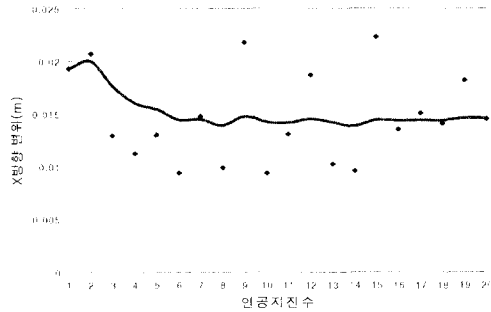


그림 14 둔각부에서의 지진횟수에 따른 변위 및 평균값

#### 4.4.2 지진하중에 의한 절점변위

지진하중에 의한 절점의 변위는 지진하중의 횡수에 따른 수렴을 알아보았다. 해석횟수는 해석시 수렴오차(Convergence Tolerance)가 식 (4.1)을 만족시키는 횡수로 가정하고 이 수렴 오차는 0.01로 하였다. 이는 현재 국내의 관측 지진기록이 미약한 실정이므로 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 다수의 지진하중을 이용하여 해석을 수행함으로써 하나의 지진하중만을 적용했을 경우의 위험성을 다소나마 줄이고자 하였다. 또한 인공지진의 내진설계적용시 해석 횡수를 제시하고자 한다. 다음 표 6은 인공지진에 의한 내진해석을 20회 실시한 결과의 평균값을 나타내었다.

$$\frac{x_{avg}^i - x_{avg}^{i-1}}{x_{avg}^i} \leq 0.01 \quad (4.1)$$

여기에서,  $x_{avg}^i, x_{avg}^{i-1}$ 는 각각  $i$ 번째 및  $i-1$ 번째까지의 해석결과의 평균이다. 그림 14는 둔각부(절점753)에서 각 해석횟수별 변위 결과와 평균값을 나타내고 있으며 이는 내진 해석의 횡수가 16회부터 수렴조건을 만족하고 있음을 보여주고 있다.

표 6 해석횟수별 변위결과, 평균값 및 수렴오차

해석 횡수	둔각부 절점753			
	변위해석결과 (m)	누계 평균 (m)	수렴오차	최대변위 시간 (sec)
1	0.019	0.019	-	8.88
2	0.021	0.020	0.036	11.84
3	0.013	0.018	0.133	13.68
4	0.011	0.016	0.099	13.24
5	0.013	0.015	0.040	9.92
6	0.009	0.014	0.070	7.64
7	0.015	0.014	0.004	4.64
8	0.010	0.014	0.041	8.28
9	0.022	0.015	0.059	7.68
10	0.009	0.014	0.038	7.64
11	0.013	0.014	0.007	9.44
12	0.019	0.015	0.026	7.84
13	0.010	0.014	0.023	7.76
14	0.010	0.014	0.024	7.44
15	0.022	0.014	0.039	5.68
16	0.014	0.014	0.003	6.84
17	0.015	0.014	0.003	12.44
18	0.014	0.014	0.001	12.92
19	0.018	0.015	0.001	12.68
20	0.015	0.015	0.000	6.04

## 5. 결론 및 추후연구과제

본 연구로서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 국내에서 관측된 지진파를 대상으로 지진파의 주기빈도 스펙트럼, 확률밀도 스펙트럼

및 Fourier Spectrum을 분석하였다.

- 2) 국내 주요구조물의 내진해석에 이용 가능한 국내에서 관측된 지진기록이 빈약하므로 이러한 문제점을 보완할 수 있는 인공지진파를 도출하였으며 국내지진기록을 추가로 분석하여 합리적인 인공지진파를 산출할 수 있는 프로그램을 개발하였다.
- 3) 이러한 인공지진파 및 해석 대상구조물 등은 상당한 불확실성을 내포하고 있으므로 내진해석시 해석 횟수를 증가시킴으로서 불확실성에 의한 위험성을 배제할 수 있다. 본 연구에서는 국내의 사슬래브교에 대한 합리적인 내진해석 횟수를 제안하였다.

아무리 정확한 인공지진을 도출한다고 하더라도 충분한 지반의 조건, 진앙으로부터의 거리, 지진의 특성을 정확하게 표현을 하는데는 한계가 있다. 따라서, 시급히 국내에서 발생하는 지진파를 측정하여 데이터베이스(Data Base)화 하여 주요 구조물의 건설현장에 적합한 설계용지진을 구조해석에 사용해야 할 것이다. 국내 지진기록이 아직 미흡한 상태이므로 본 논문에서 제안한 인공지진파는 이러한 문제점을 해결하는데 적절하리라 사료된다. 한편, 추후연구과제로서 일반적인 대상구조물에 대한 내진해석을 수행하여 각각의 구조물에 대한 내진해석 횟수를 규명하는 연구가 이루어져야 하리라 판단된다. 또한 대상구조물로 선택한 사각슬래브교량의 지진해석에서 지간과 교폭 및 사각 등을 변수로 택하여 사각슬래브교량의 낙교위험성과 사각에 따른 지진응답을 조사하고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금(과제번호 : 97K3-1301-04-02-3)에 의한 것으로 연구비를 지원해 준 한국과학재단에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 전형식, "내진설계연구", 건설교통부, 1996.
2. Chopra, *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, 1997.
3. PAZ, M., *Structural Dynamics*, VNR, 1992.
4. 한국지반공학회, 진동 및 내진설계, 구미서관, 1997.
5. 大崎順彦, "新・地震動のスペクトル解析入門", 鹿島出版會, 1994.
6. 理論地震動研究會, "地震動 その合成と波形處理", 鹿島出版會, 1995.
7. Newmark, Rosenblueth., *Fundamental of Earthquake Engineering*, PrenticeHall, 1971.
8. 한국전산구조공학회, "구조물의 내진설계", 한국전산구조공학회 기술강습회 자료집, 교재 15-1, 1997.
9. Chung, Y.S., Shinozuka, M., and Meyer, C., "SARCF User's guide seismic Analysis of reinforced concrete frames," NCEER, 88-0044, NewYork, 1988.
10. Steven, L. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 1996.