

지진동의 위상 특성과 비선형 응답 Nonlinear Response and Phase Angle Characteristics of Earthquake Ground Motions

우운택** 박태원*** 정란*
Woo, Woon-Taek Park, Tae-Won Chung, Lan

ABSTRACT

The characteristics of harmonic phase angles and phase angle differences contained in earthquake ground motions such as El Centro 1940 NS, Taft1 1952 NS, Hachinohe 1968 NS and Mexico 1985 are figured, which have been mostly overlooked in contrast with the importance placed on harmonic amplitudes. Recently, performance based design method is used for seismic design and seismic retrofitting, which needs nonlinear response analysis, there must be earthquake ground accelerations which contain the phase angle and the phase angle difference characteristics of the zone considered to be constructed building structures.

To make clear the importance of phase angle differences, 4-earthquake ground motions are normalized by 200 gal and nonlinear response characteristics of normalized 4-earthquake ground motions are compared.

1. 서론

최근의 내진설계 및 내진성능 평가 시 성능에 기초한 설계(Performance Based Design)방법이 시도되고 있으며, 이를 위해서는 비선형 해석을 해야 한다. 이 때 지진동 가속도 기록이 필요한데 비선형 해석 시에 많이 이용되고 있는 지진동 가속도로서 El Centro 1940 NS, Taft1 1952 NS, Hachinohe 1968 NS and Mexico 1985 등이나, 인공지진가속도가 있다. 인공지진가속도로서는 설계용 스펙트럼에 상응하는 지진동 가속도를 만들거나 기존 지진동 가속도에 최대값을 정하여 조정하는 방법으로 지진동 가속도를 만들어 이용하게 된다. 인공지진가속도를 만드는 대부분의 연구에서 위상각은 일반적으로 특성이 없는 $0 \sim 2\pi$ 사이에서 분포가 일정한 난수로서 가정되어 왔다. 즉 위상각 특성에 초점을 맞춘 연구는 거의 없고, 위상각 특성이 대부분의 지진공학 연구에서 무시되어 왔다. 이러한 방법들은 건축물이 건축될 혹은 건축되어진 지역의 위상특성 특히 위상각 차

* 정희원 · 단국대학교 건축공학과 교수

** 단국대학교 건축공학과 초빙교수

*** 단국대학교 대학원 박사과정

이 특성이 고려된 지진동 가속도라고는 할 수 없다.

따라서 위상각 특성에 따른 비선형 응답 특성을 검토하기 위해서 내진설계 시에 많이 이용되고 있는 대표적인 4개의 지진동 가속도 특성을 분석하고, 최대가속도를 200 gal로 조정된 지진동 가속도를 이용하여 비선형 응답 해석을 하였다.

2. 위상각과 위상각 차이

지진동 가속도와 같은 이산 시각력은 근사적으로 (1)식과 같이 유한 푸리에 급수로서 나타낼 수 있다.

$$f(t) = \sum_{k=0}^n (A_k \cos k\omega_0 t + B_k \sin k\omega_0 t) = \sum_{k=0}^n X_k \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (1)$$

$$X_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}, \quad \phi_k = \arctan(-B_k/A_k)$$

여기서 $X_k = k$ 차 푸리에 진폭, $\phi_k = k$ 차 푸리에 위상각, $\omega_k = k$ 차 원진동수, $n = T_d/(2\Delta t)$, $T_d =$ 시각력 길이, $\Delta t =$ 시각력에서 시간 증분이다. (1)식을 복소수 푸리에 급수로 나타내면

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{ik\omega_0 t} \quad (2)$$

여기서
$$\left. \begin{aligned} C_k &= \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-ik\omega_0 t} dt \\ \omega_0 &= \frac{2\pi}{T} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

로 되고, Fourier계수 A_k, B_k 는

$$\left. \begin{aligned} A_k &= 2R(C_k) \\ B_k &= -2I(C_k) \end{aligned} \right\} k=0,1,2,\dots \quad (4)$$

두 개의 연속적인 진동수에 대한 푸리에 위상각 차이는

$$\Delta\phi_k = \phi_{k+1} - \phi_k, \quad k=0,1,2,\dots,n-1 \quad (5)$$

로서 위상각 차이라 부른다. 여기서 $\Delta\phi_k$ 는 ϕ_k 부터 ϕ_{k+1} 까지 시계방향으로 측정하는 것으로 하며, 0에서 -2π 사이에서의 값을 갖게 된다.

그림2,5,8,11에서 알 수 있는 것처럼 각 지진동 가속도의 위상각은 특성이 없이 $0 \sim 2\pi$ 사이에서 분포가 일정함을 알 수 있다. 그러나 그림3,6,9,12에서 알 수 있는 것처럼 각 지진동 가속도는 서로 다른 위상각 차이 특성을 갖고 있으며, 위상각 차이의 분포 특성과 지진동 가속도의 분포 특성이 유사함을 알 수 있다. 즉 위상각 차이에서의 피크 위치 및 뾰족함 정도가 지진동 가속도의 피크 위치 및 뾰족함 정도가 어느 정도 일치함을 알 수 있다.

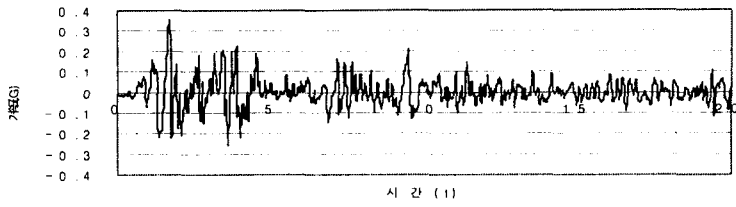


그림 1 EI CENTRO 1940 NS

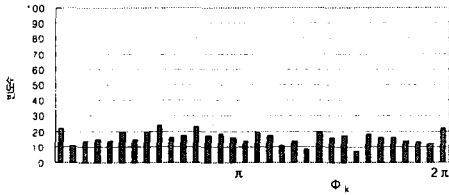


그림 2 위상각 분포

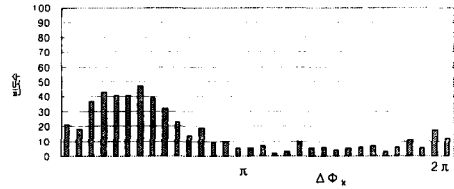


그림 3 위상각 차이 분포

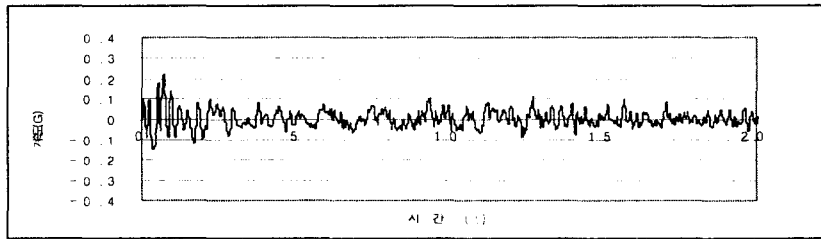


그림 4 HACHINOHE 1968 NS

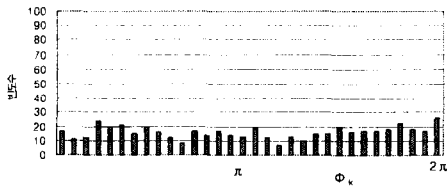


그림 5 위상각 분포

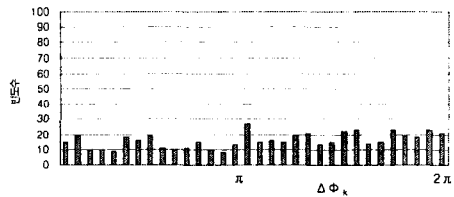


그림 6 위상각 차이 분포

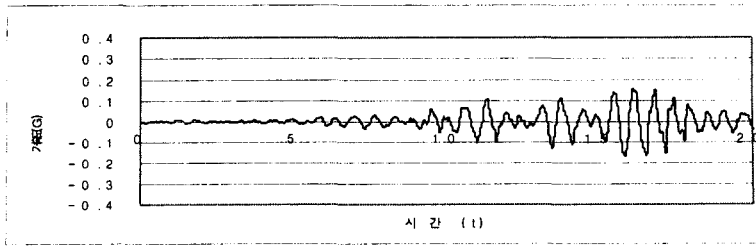


그림 7 MEXICO 1985

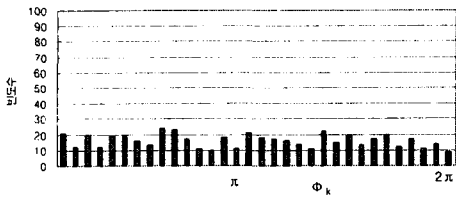


그림 8 위상각 분포

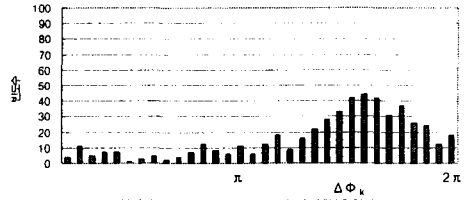


그림 9 위상각 차이 분포

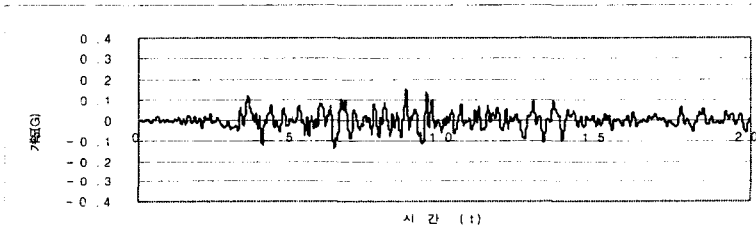


그림 10 TAFT 1952 NS

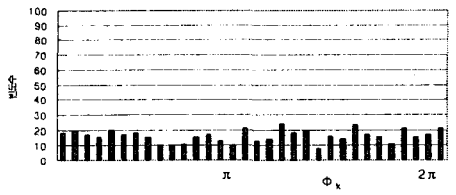


그림 11 위상각 분포

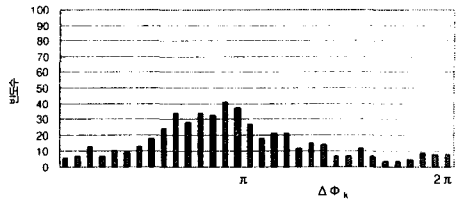


그림 12 위상각 차이 분포

3. 응답 스펙트럼

지진동의 기록을 보면, 최대진폭, 계속시간, 주요한 파수 등은 직접 읽을 수 있지만 지진동이 갖는 주파수 특성, 에너지 등에 대해서는 꼭 확인하지만은 않다. 이와는 달리 응답스펙트럼은 1질점 감쇠계에 의해서 대표되는 구조물에 대해 지진동이 주는 최대의 영향을 표현하고 있는 것이다. 따라서 응답스펙트럼에 의하면 지진동이 갖는 특성을 특히 구조물에서의 영향이라고 하는 관점에서 분명히 할 수 있고, 이 의미에서 응답스펙트럼은 구조물의 내진설계와 밀접한 관련을 갖는다. 특히 속도응답스펙트럼은 응답속도의 최대치를 나타내는 것이지만 지진동이 계에 주는 최대의 에너지와 밀접한 관계가 있다. 즉 계의 스프링상수 k , 최대상대변위를 x_{\max} 로 하면, 최대 위치 에너지는 $\frac{1}{2} kx_{\max}^2$ 이지만, $x_{\max} = S_d$ 인 것과 $\bar{\omega} S_d \approx S_v$ 인 것을 고려하면 단위질량당 최대에너지는 $\frac{1}{2} (k/m)x_{\max}^2 = \frac{1}{2} S_v^2$ 로 된다. 이 관계를 고려하면 속도응답스펙트럼은 지진동이 구조물에 대해서 그 고유주기에 따라서 주는 일종의 에너지 스펙트럼이라고 풀이할 수 있고, 따라서 지진동이 갖는 파괴력과 밀접한 관련을 갖는 것으로 생각된다. 그러나 예를 들어 한 지역을 취해도 지진동을 받는 구조물의 고유주기는 일정하지 않다. 또한 1개의 구조물에서도 국부적인 손상을 입으면 고유주기가 변화한다. 그래서 보편적인 구조물의 주된 고유주기는 대체로 0.1sec에서 2.5sec 사이에 있는 것으로 생각하고, 이 사이의 에너지의 총합에 상당하는 적분치

$$I_h = \int_{0.1}^{2.5} S_v(h, \bar{T}) d\bar{T} \quad (1)$$

를 갖고서 지진동의 세기를 나타내는 하나의 지표로 하는 것이 제안되었다 (Housner, 1952). 표1에 각 지진동의 스펙트럼 세기를 나타내었다. 표1의 Housner 스펙트럼 세기 중 (1)은 기존의 지진 가속도를 그대로 이용하여 구한 값이고, (2)은 최대 가속도값을 200 gal로 조정하여 구한 값이다. 표1에서 알 수 있는 것처럼 입력 최대가속도 값이 같을지라도 스펙트럼 세기 즉 구조물에 가해지

지진종류	최대값(gal)	지속시간(sec)	시간간격(sec)	(1)Housner 스펙트럼 세기	(2)Housner 스펙트럼 세기
EL CENTRO 1940 NS	349.42	20.48	0.02	155.64	89.09
TAFT 1952 NS	148.78	20.48	0.02	76.74	103.85
HACHINOHE 1968 NS	221.72	20.48	0.02	113.81	102.66
MEXICO 1985	154.84	20.48	0.02	92.18	119.06

표 1 지진동 가속도 특성

는 에너지의 크기가 다름을 알 수 있다.

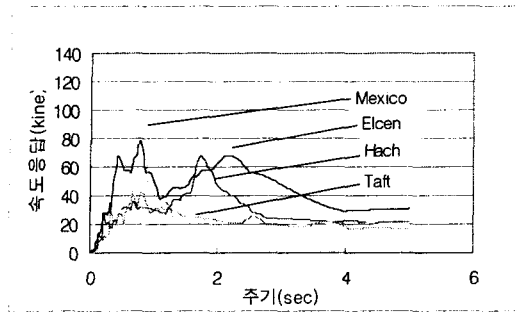


그림 13 응답스펙트럼 1

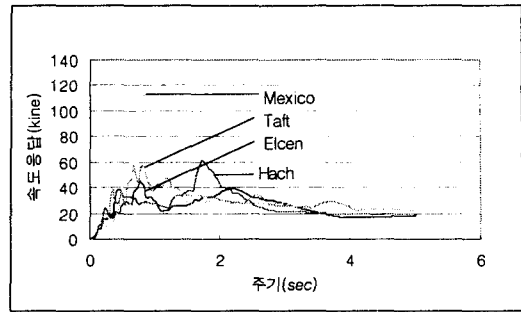


그림 14 응답스펙트럼2

그림13은 기존 지진가속도로 5% 감쇠율을 갖는 응답스펙트럼을 구한 결과이고, 그림14는 최대 가속도 값을 200 gal로 조정한 지진가속도로 구한 5% 감쇠율의 응답스펙트럼이다. 그림13에서 알 수 있는 것처럼 기존 지진가속도로 내진설계 및 내진성능을 평가하는 경우 지진의 종류에 따라 응답 특성에 큰 차이가 있으므로 주의해야 한다. 특히 멕시코 지진의 경우 주기가 0.5~1초 사이에는 매우 큰 응답특성을 갖지만 장주기 부분에서는 응답이 매우 작다. 또한 최대가속도 값도 다른 지진가속도 보다 작다. 따라서 이러한 지진동 가속도를 내진설계 및 내진성능 평가에 그대로 적용하면, 단주기 건축구조물에 대해서는 과다한 내진성능을 요구하게 되고, 장주기 건축구조물에 대해서는 상대적으로 낮은 내진성능을 요구하게 된다. 그림14에서 알 수 있는 것처럼 지진동 가속도의 최대값을 조정하여 내진성능 평가 및 내진설계에 이용하는 경우, 응답의 특성은 바뀌지 않고 응답의 배율만이 조정되고 있음을 알 수 있다. 즉 국내의 내진설계 규준에 최대가속도 값이 0.11g 라고 해서 기존 지진가속도의 최대값을 0.11g로 조정한 값이 국내의 지진동 특성을 대표한다고 할 수는 없다.

4. 비선형 응답

4.1 해석 모델 및 입력 데이터

그림15에 나타낸 질량과 강성을 갖는 5층 모델이 그림16의 tri-linear 복원력 특성을 갖는 계의 비선형 응답 특성을 검토하기 위해서 최대 가속도 값을 200 gal로 조정한 표1의 지진동 가속도 데이터를 이용한다. 해석 모델의 감쇠는 모두 감쇠율이 일정하게 5%인 모우드별 감쇠율형, 제1항복점, 제2항복점의 층간변위를 u_1 및 u_2 , 제1, 제2 및 제3 강성을 각각 k_1 , k_2 및 k_3 로 하고, 이들의 특성치는 표2과 같다. 또한 복원력이 변위 및 속도에 의존하므로 비선형 미분방정식이 되어 변위의 증분을 미지함수로 하는 증분방정식으로 바꾸어 미소시간내의 국소강성이 상수인 선형미분방정식으로 변환하여 Wilson- θ 법을 준용하여 해석하였다.

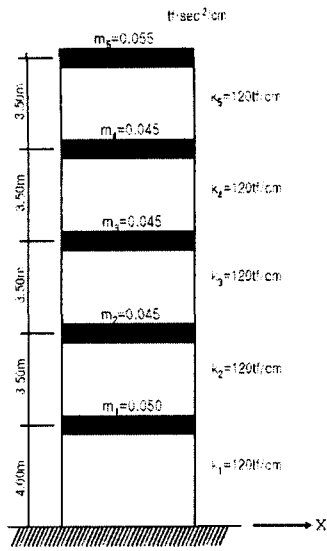


그림 15 해석 모델

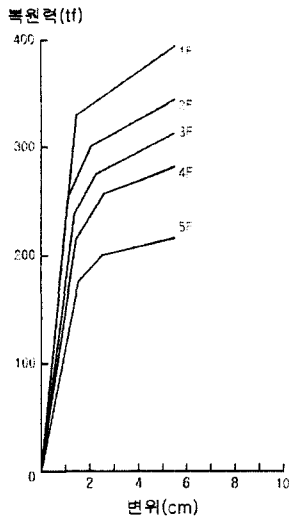


그림 16 복원력 특성

특성치	5층	4층	3층	2층	1층
u_1 (cm)	1.5	1.4	1.3	1.2	1.5
u_2 (cm)	2.2	2.0	1.7	1.7	1.8
k_1 (tf/cm)	120	150	180	210	210
k_2 (tf/cm)	40	60	80	100	120
k_3 (tf/cm)	6	8	9	10	12

표 2 복원력 특성치

4.2 해석 결과

그림17~20에서 알 수 있는 것처럼 최대 가속도값을 같게 조정한 4개의 지진동 가속도를 이용하여 비선형 해석을 한 결과 응답 특성이 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 표1에 나타난 스펙트럼 세기는 멕시코 지진이 가장 컸으나 소비되는 에너지는 가장 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉 각 지진동의 응답 특성이 다르게 나타나고 있으므로 내진설계 및 내진성능 평가를 위한 기준 지진동 가속도가 필요함을 알 수 있다.

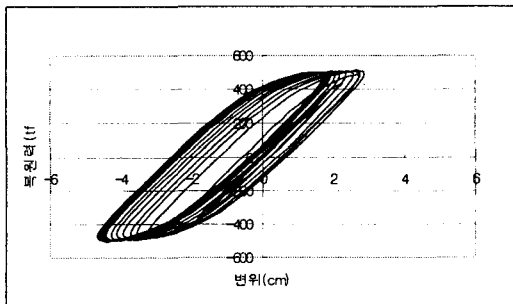


그림 17 TAFT 1952 NS

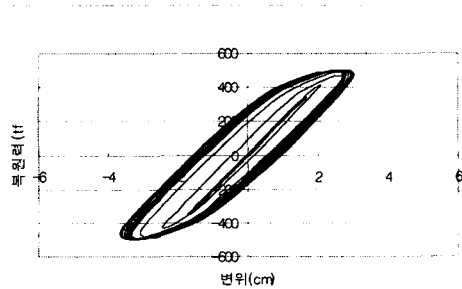


그림 18 MEXICO 1985

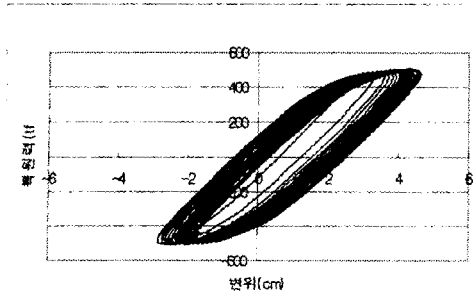


그림 19 HACHINOHE 1968 NS

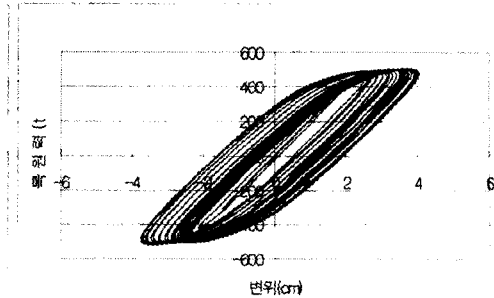


그림 20 EL CENTRO 1940 NS

5. 결론

본 연구에서는 지진동 가속도의 위상각 차이 특성과 비선형 응답 특성을 검토하였다. 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 지역 특성을 고려한 지진동 가속도의 스펙트럼 세기 및 위상각 특성이 고려된 인공지진동 가속도가 만들어져 내진설계 및 내진성능 검토에 이용되어야 할 것으로 사료된다.
- 2) 각 지역의 미진동 특성을 분석하여 위상각 및 위상각 차이 특성을 파악하고 내진규정으로부터 스펙트럼 세기를 구하여 각 지역에 적합한 지진동 가속도가 만들어져야 할 것으로 사료된다.
- 3) 추후 연구과제로서 이상의 특성을 반영한 인공 지진가속도를 만들어 응답 특성을 검토할 계획이다.

참고문헌

1. ATC-40, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", California Seismic Safety Commission Report SSC 96-01
2. FEMA-273, "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Building Seismic Safety Council, Washington, D.C., 1997
3. Mario Paz, "Structural Dynamics", Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1985
4. 大崎順彦, "地震動解析入門", 鹿島出版會, 1991
5. 大崎順彦, "建築振動理論", 彰國社, 1996
6. Ohsaki, Y., "On the Significance of Phase Content in Earthquake Ground Motions", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 7, 1979, pp.427~439

감사의 글

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업(과제번호 : M1-0203-00-0068)의 연구비 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.