

국내 지진데이터를 이용한 인공지진가속도 특성

Characteristics of Artificial Earthquake using Recorded Earthquake Data in Korea

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, the phase angle difference and energy input spectrum characteristics of the zone considered to be constructed building structures.

To make clear the importance of phase angle differences, responses of 4 recorded earthquake ground motions, 4-earthquake ground motions normalized by 110 gal and 4 artificial earthquake motions compatible to the seismic building code of Korea are compared.

1. 서론

지진하중은 구조물의 동적응답으로서 받아들여지는 하중이기 때문에, 지진입력 가속도뿐만 아니라 구조물의 동적특성에도 지배되는 하중이다. 지진하중은 다른 하중, 예를 들어 고정하중, 적재하중, 설하중, 풍하중 등과 같이 구조특성에 관계없이 정해지는 하중과는 전혀 다른 하중이라고 하는 것이 일반적인 인식이다. 구조물의 동적특성이란, 고유주기, 감쇠율, 항복전단력계수, 복원력 특성 등을 말하고, 지진입력 가속도의 불확정성과 더불어 복잡하게 관계하고 있는 것이 설계용지진하중 결정을 곤란하게 하고 있다고 생각되고 있다.

즉, 건축물의 내진설계에서 지진하중의 설정은, 건축물이 세워지는 지역의 지반조건, 장래 발생될 것으로 예상되는 지진동의 종류 및 강도, 건축물의 구조종류, 구조형식 등으로 주어지는 진동특성, 즉 강성분포, 복원력 특성, 감쇠 등 여러 요소가 복잡하게 관련되어 있다. 이러한 여러 가지 요소들의 관련을 일반화하여 세계 여러 나라에서 간략화한 건축물의 정적내진설계규정이 만들어져 있다. 이 지진하중과 함께 경우에는 따라서는 동적응답해석에 의한 검토를 하는데, 이를 위해서는 입력 지진동 파형이 필요하다. 특히 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 가속도로써 El Centro 1940 NS, Taft1 1952 NS, Hachinohe 1968NS and Mexico 1985 등이나, 인공지진가속도가 있다. 인공지진가속도로서는 설계용 스펙트럼에 상응

* 정희원 · 단국대학교 건축공학과 교수

** 단국대학교 건축공학과 초빙교수

*** 단국대학교 대학원 박사과정

하는 지진동 가속도를 만들거나 기존 지진동 가속도에 최대값을 정하여 조정하는 방법으로 지진동 가속도를 만들어 이용하게 된다. 인공지진가속도를 만드는 대부분의 연구에서 위상각은 일반적으로 특성이 없는 $0 \sim 2\pi$

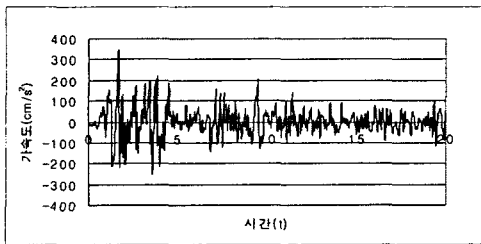
지진 종류	최대값 (gal)	지속시간 (sec)	시간간격 (sec)
EL CENTRO 1940 NS	349.42	20.48	0.02
TAFT 1952 NS	148.78	20.48	0.02
HACHINOHE 1968 NS	221.72	20.48	0.02
MEXICO 1985	154.84	20.48	0.02
흑산도 2002	46.30	40.96	0.02
고흥 2002	25.76	40.96	0.02
서울 2002	54.59	40.96	0.02
원주 2002	3.89	40.96	0.02

표 1 지진동 가속도 특성

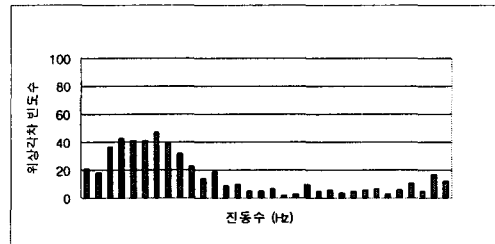
사이에서 분포가 일정한 난수로서 가정되어 왔다. 즉 위상각 특성에 초점을 맞춘 연구는 거의 없고, 위상각 특성이 대부분의 지진공학 연구에서 무시되어 왔다. 이러한 방법들은 건축물이 건축될 혹은 건축되어진 지역의 위상특성 특히 위상각 차이 특성이 고려된 지진동 가속도라고는 할 수 없다. 본 연구는 동적내진설계시에 많이 이용되고 있는 지진동가속도의 특성을 검토하고, 국내에서 기록된 지진동특성을 검토하여 국내 내진규정에 상응하는 인공지진가속도 파형의 작성과 지진응답의 검토를 하였다.

2. 기록된 지진동의 특성

기록된 지진동 가속도의 특성을 검토하기 위해서 내진설계에서 많이 이용되고 있는 대표적인 강진기록 4개와 국내에서 기록된 지진동 파형 4개를 표1에 나타냈다.

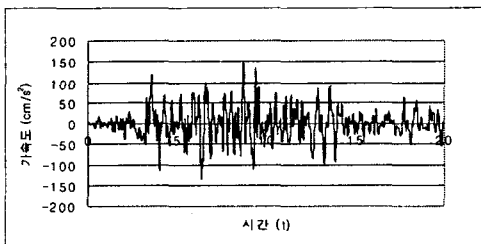


(a) 가속도 파형

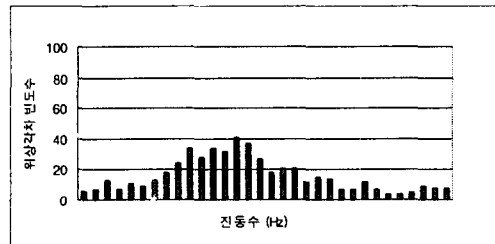


(b) 위상각 차이

그림 1 EL CENTRO 1940 NS

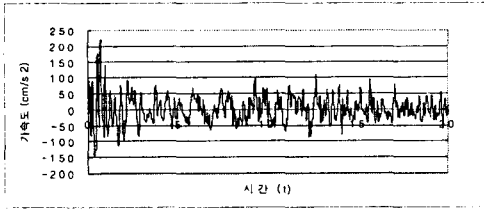


(a) 가속도 파형

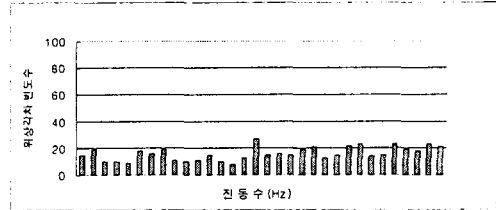


(b) 위상각 차이

그림 2 TAFT 1952 NS

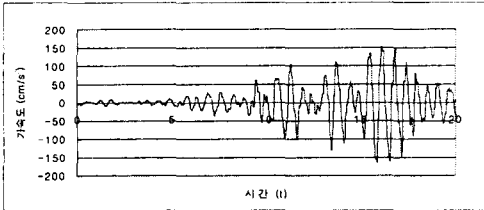


(a) 가속도 파형

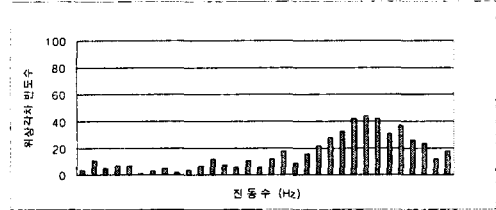


(b) 위상각 차이

그림 3 HACHINOHE 1968 NS

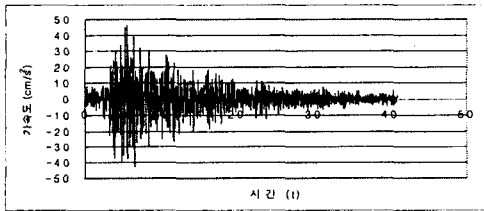


(a) 가속도 파형

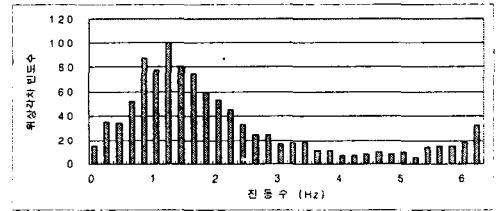


(b) 위상각 차이

그림 4 MEXICO 1985

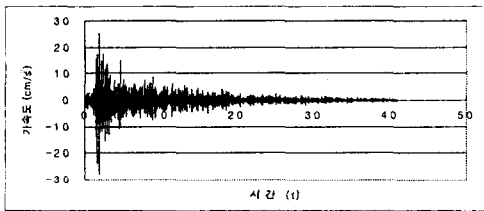


(a) 가속도 파형

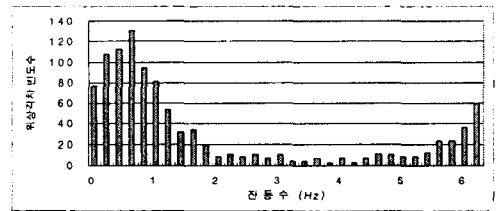


(b) 위상각 차이

그림 5 흑산도 NS 2002

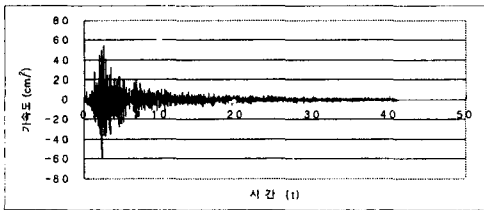


(a) 가속도 파형

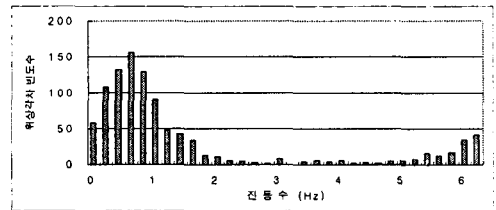


(b) 위상각 차이

그림 6 고흥 NS 2002

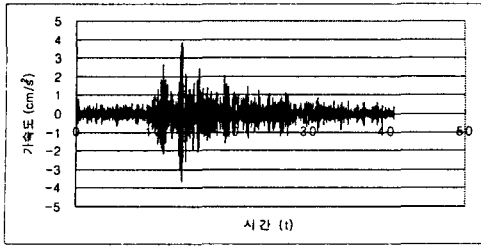


(a) 가속도 파형

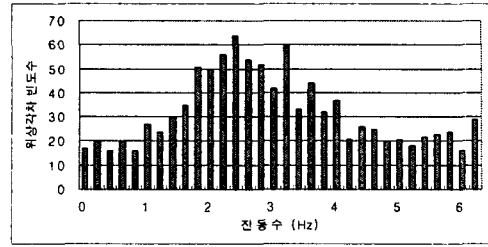


(b) 위상각 차이

그림 7 서울 NS 2002



(a) 가속도 파형



(b) 위상각 차이

그림 8 원주 NS 2002

이와 같은 지진동 가속도는 이산 시각력으로서 (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.

두 개의 연속적인 진동수에 대한 푸리에 위상각의 차이는

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

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. 각 지진동 가속도의 위상각 차이 특성을 그림1~그림8에 나타냈다.

3. 인공지진가속도 파형 작성

여기서 작성하는 인공지진가속도 파형은 과거의 지진동 파형의 특성을 남기기 위해서, 표1에 나타난 지진동 파형으로부터 위상각 차이($\Delta\phi_k$)를 취하고, 설계응답스펙트럼에서 얻어진 속도응답스펙트럼을 푸리에진폭스펙트럼으로 간주하여 (3)식과 같이

$$\dot{x}(t) = \sum_{k=0}^{n-1} a_k \cos(\omega_k t - \phi_k) \quad (3)$$

역푸리에변환으로 지진동 파형을 작성할 수 있다. 즉 국내의 내진규정에서 전단력계수 곡선은 진동계 모델의 1차진동모우드를 중시하는 것으로 하면 1자유도계 가속도응답스펙트럼을 나타낸다고 생각할 수 있고, 속도응답스펙트럼을 구할 수 있다. 이 속도응답스펙트럼을 목표속도응답스펙트럼(TSV)로 설정하고, 주기영역 0.1~5.0초 사이의 속도응답스펙트럼(CSV)이 TSV에 적합하도록 반복 조정하여 얻어지는 가속도 파형을 인공지진가속도 파형으로 한다. 즉, 반복계산시의 푸리에 진폭 a_k 는 (4)식으로 주어진다.

$$a_k' = (TSV/CSV)a_k \quad (4)$$

이와 같이 수정된 푸리에 진폭(a_k')을 이용하여 역푸리에 변환을 하면, 수정된 가속도 파형이

얻어진다. 그리고 이 과정을 이용하여 속도응답스펙트럼을 계산하고, 목표로 한 속도응답스펙트럼 (TSV)와의 적합도를 판정하고, (5)식에 나타난 수렴조건을 만족시키면 종료하는 것으로 한다.

$$\epsilon_i \geq 0.85 \quad (i=1,2,\dots,N)$$

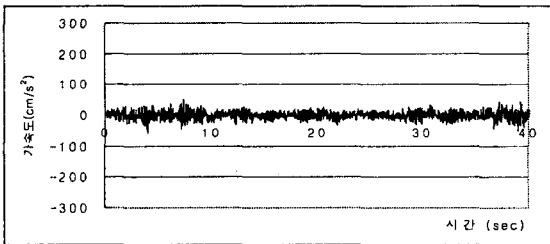
$$|1 - \bar{\epsilon}| \leq 0.02 \quad (5)$$

$$\sigma \leq 0.05$$

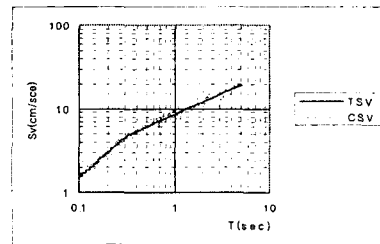
이상과 같은 인공지진동 파형의 작성 순서는 다음과 같다.

- ① 대상으로 하는 진동수 범위와 목표응답스펙트럼(TSV)를 설정한다.
- ② 기록된 지진동 가속도 파형의 시계열 데이터로부터 위상각 차이($\Delta\phi_k$)를 계산한다.
- ③ 수정 파형에 의한 속도응답스펙트럼을 구하고, 이것을 목표로 하는 속도응답스펙트럼과의 비를 각 진동수별로 구한다.
- ④ 각 진동수별 속도응답스펙트럼비를 이용하여 각 진동수별 푸리에 진폭을 수정한다.
- ⑤ 수정된 진폭을 이용하여, 역푸리에변환을 하고, 수정된 가속도 파형을 얻는다.
- ⑥ 수정된 가속도 파형에 의한 속도응답스펙트럼을 구하고, 목표응답스펙트럼과의 적합도를 판단한다.
- ⑦ 수렴조건을 만족하지 못하면 ②로 돌아가 반복계산을 한다.

이와 같이 내진규정에 기초한 인공지진가속도 파형 작성의 수렴도를 그림9~12에 나타낸다.

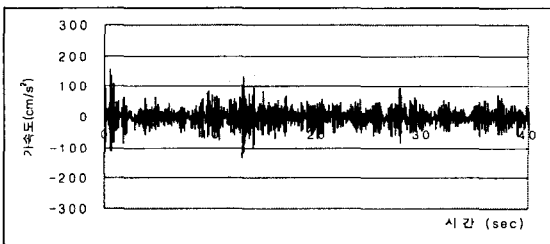


(a) 가속도 파형

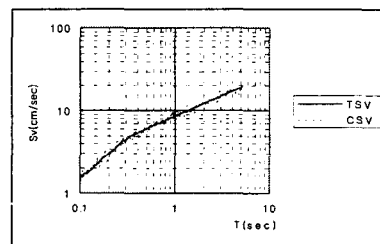


(b) 수렴 결과

그림9 EL CENTRO 위상각 차이 이용

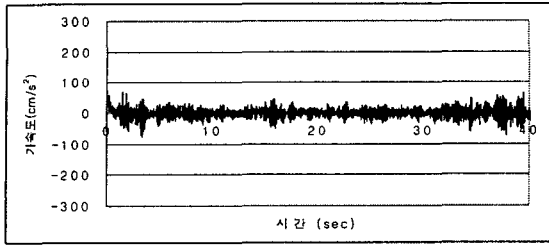


(a) 가속도 파형

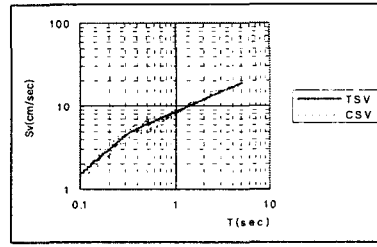


(b) 수렴 결과

그림10 HACHINOHE 위상각 차이 이용

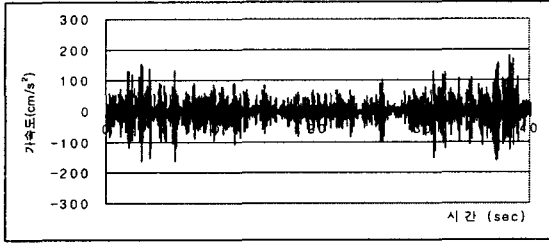


(a) 가속도 파형

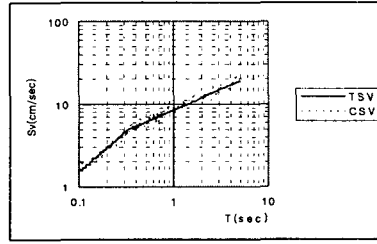


(b) 수렴 결과

그림11 고흥 위상각 차이 이용



(a) 가속도 파형



(b) 수렴 결과

그림12 서울 위상각 차이 이용

4. 응답 특성

4.1 해석 모델

그림13에 나타낸 질량과 강성을 갖는 5층 모델에 대한 선형 응답 특성을 검토하기 위해서 표1의 지진동 가속도 데이터를 이용한다. 또한 최대 가속도 값을 110 gal로 조정된 가속도 파형과 3절에서 작성한 인공지진동 가속도 파형을 이용하여 응답특성을 검토한다. 해석 모델의 감쇠는 모두 감쇠율이 일정하게 5%인 모우드별 감쇠율형으로 하고, 모우드 중첩법을 이용하여 해석하였다. 각 모우드별 고유주기 및 모두들 표2에 나타냈다.

모우드	1차	2차	3차	4차	5차
고유주기	0.355sec	0.132sec	0.084sec	0.064sec	0.052sec
5층	0.6426	-0.5529	-0.3689	-0.1749	0.0349
4층	0.5502	0.0175	0.5883	0.6096	-0.1979
3층	0.4245	0.4620	0.3549	-0.5522	0.4811
2층	0.2864	0.5724	-0.3419	-0.1695	-0.7054
1층	0.1487	0.3910	-0.5244	0.5140	0.4802

표 2 모델의 모우드

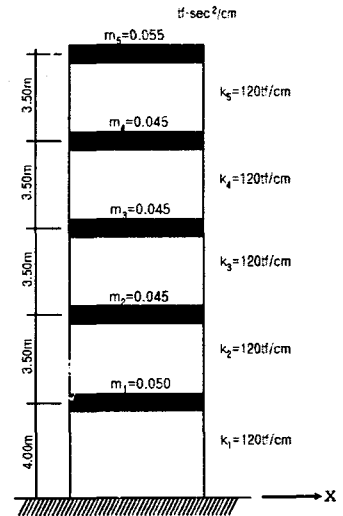


그림 13 해석 모델

4.2 모우드 중첩법

지진동 가속도 $\ddot{y}(t)$ 를 받는 다질점 감쇠계의 운동방정식은

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -\dot{y}[M]\{1\} \quad (6)$$

이고, 여기서 $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 질량메트릭스, 감쇠메트릭스, 강성메트릭스, $\{x\}$ 는 상대변위 벡터이며, 계의 자유도를 n 으로 한다.

계의 모우드 메트릭스를 $[U]$ 로 했을 때, (6)식에 대해서 변수변환

$$\{x\} = [U]\{q\} \quad (7)$$

를 행한 다음에 $[U]$ 의 전치메트릭스를 앞에서 곱하면, (6)식은 비연성화되어, 각각 독립인 모우드별 운동방정식 식(8)로 된다.

$$\ddot{q}^{(j)} + 2h^{(j)}\omega^{(j)}\dot{q}^{(j)} + (\omega^{(j)})^2q^{(j)} = -\beta^{(j)}\dot{y} \quad j=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

(8)식에서 우변의 계수 $\beta^{(j)}$ 를 일단 생략하면

$$\ddot{q}^{(j)} + 2h^{(j)}\omega^{(j)}\dot{q}^{(j)} + (\omega^{(j)})^2q^{(j)} = -\dot{y} \quad (9)$$

로 되고, 이 식은 1질점 감쇠계의 운동방정식과 똑같다. 따라서 (9)식의 해 즉 모우드 기본해를 $q_0^{(j)}(t)$ 로 하면, $q_0^{(j)}(t)$ 를 구하는 데는 1질점 감쇠계의 해를 구하는 방법을 사용할 수 있다.

모우드 기본해가 구해지면, (8)식의 해는

$$q^{(j)}(t) = \beta^{(j)}q_0^{(j)}(t)$$

로 되고, (7)식으로부터 계의 변위응답 시각력

$$\{x\} = [U]\{q\} = [U]\{\beta^{(j)}q_0^{(j)}\}$$

즉

$$\{x(t)\} = \sum_{j=1}^n \{\beta^{(j)}u^{(j)}\}\{q_0^{(j)}(t)\}$$

를 얻는다.

4.3 해석 결과

그림13에 나타낸 모델의 해석 결과 중에서 최상층의 가속도 응답결과를 그림14~17에 나타냈다.

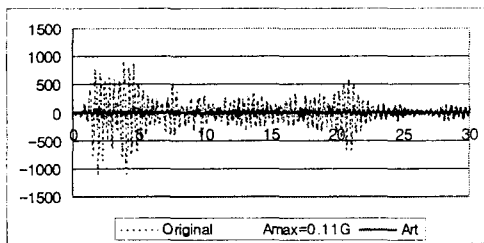


그림 14 가속도응답이력(EL CENTRO)

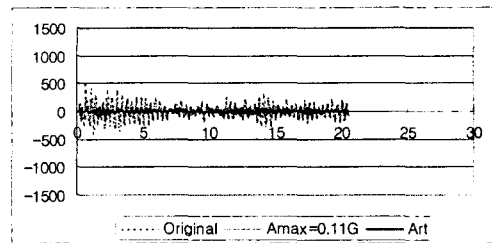


그림 15 가속도응답이력(HACHINOHE)

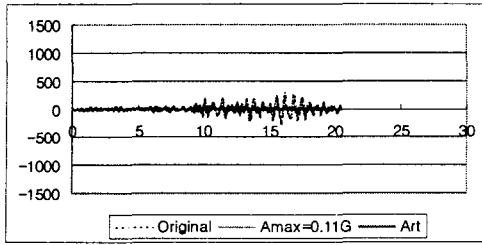


그림 16 가속도응답이력(MEXICO)

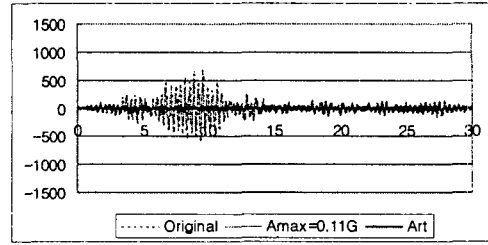


그림 17 가속도응답이력(TAFT)

5. 결론

본 연구에서는 기록된 가속도 파형의 위상각 차이 특성과 내진규정에서 얻어진 속도응답스펙트럼을 이용하여 인공지진가속도 파형을 제작하였다. 기록된 파형 특성 및 인공지진가속도 파형으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 각 지진동 파형의 특성은 위상각 차이 특성으로 표현할 수 있으며, 따라서 인공지진가속도 파형 제작 시에는 위상각 차이 특성이 반영되어야 함을 알 수 있다.
- 2) 본 연구에서는 한 개의 모델에 대한 해석을 수행하였으나, 추후 고유주기가 다른 여러 가지 모델에 대한 해석을 수행하여 지진동 특성이 건축물의 지진응답에 미치는 영향을 검토하여야 할 것으로 판단된다.

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. 田治見宏, "建築物のスペクトル解析入門", コロナ社, 1973.
5. 大崎順彦, "地震動解析入門", 鹿島出版會, 1991.
6. 大崎順彦, "建築振動理論", 彰國社, 1996.
7. Ohsaki, Y., "On the Significance of Phase Content in Earthquake Ground Motions", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 7, 1979, pp.427~439.
8. 岡本博通, 石丸辰治, "擬似速度應答スペクトルとエネルギー入力率との相關性について", 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1997, pp.453-454.

감사의 글

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