

位相差分을 이용한 模擬地震動 작성법

차정식, 전규식, 연관희, 김성택
전력연구원

요 약

우리나라와 같이 강진의 발생이 거의 없는 지역에서, 가까운 장래에 예상되는 지진동 파형을 추정하는 기법으로서는 설계응답스펙트럼에 위상정보를 가미하는 모의지진동에 의한 작성방법을 흔히 사용하고 있으며, 이에 사용되는 위상스펙트럼의 특성을 랜덤으로 가정하는 경우가 대부분이다. 그러나 본 논문에서는 우리들이 일반적으로 랜덤으로 취급하는 위상스펙트럼에도 지진의 특성이 반영되어 있을 것이라는 가정하에 위상차분의 특성과 포락파형의 상관관계를 도출하고 위상차분을 고려한 모의지진동 작성방법을 제안하였다. 지진파형의 포락곡선을 확률분포로 사용하여 계산한 위상차분스펙트럼의 형상은 지진파형의 포락곡선과 거의 유사함을 확인하였고, 지금까지는 랜덤으로 취급한 위상스펙트럼에 물리적인 의미를 부여하는 계기가 되었다. 그러므로 앞으로 한반도에서 지진관측자료가 축적되어 한반도에서의 특징적인 위상차분스펙트럼이 정의된다면 우리나라의 지형조건이 고려된 진일보된 설계지진동을 작성할 수 있을 것이다.

1. 서 론

구조물의 내진설계란 가까운 장래에 특정 장소에서 발생할 것이라고 추정되는 지진동을 설계지진동으로하여 구조물의 응답을 계산하고 이에 따라 구조물의 부재를 설계하는 과정을 말한다. 그러므로 설계지진동의 크기가 변하면 구조물의 응답치도 달라짐으로 설계지진동을 어떻게 결정하느냐는 내진설계에 있어서 가장 중요한 문제가 되며, 설계지진동의 특성은 파형의 시간이력상에 나타나는 최대가속도, 지진의 계속시간 및 포락곡선, 파형에 포함된 주파수특성으로 크게 나눌 수 있다. 여기서 최대가속도 및 포락곡선의 형태는 발생지진의 규모에 크게 좌우되며 주파수 특성은 관측지역의 국부적인 지반의 영향에 크게 의존한다. 그러므로 설계지진동은 지진의 발생 메카니즘이 정확히 반영되고 대상지역의 지반특성을 적절히 반영하고 있느냐가 가장 중요한 문제가 된다. 그러나 현재의 과학으로서는 지진의 발생메카니즘을 명확히 규명할 수 없고, 매질의 비선형성 때문에 전파경로의 영향이나 지반의 영향을 정확히 파악할 수 없는 상태에서 설계지진동의 산정은 지진관측자료에 의존할 수 밖에 없는 한계가 있다. 그러므로 강지진의 발생이 거의 없는 우리나라에서는 불가피하게 외국에서 발생한 지진을 근거로 원자력발전소의 설계지진동으로 산정하고는 있으나, 지반조건이 다른 지역에서 발생한 지

진동을 우리나라의 설계지진동으로 사용하는 것은 근본적으로는 타당한 방법이 아니다. 그러므로 본 논문은 지진파형의 주파수특성을 나타내는 설계응답스펙트럼은 결정된 것으로 가정하나, 설계응답스펙트럼을 만족하는 시간이력을 생산하는 과정에 있어서 지금까지는 랜덤으로 취급되고 있는 위상스펙트럼이 특정지역의 특성을 반영하고 있을 것이라는 가정하에 위상차분이라는 개념을 도입하여 지진파형을 생성하는 방법을 제안하고 있으며, 한반도지역에서 발생한 미소지진에서 구한 위상차분의 형태가 정의되면 보다 실제파형에 가까운 모의지진동을 구현할 수 있는 장점이 있다.

2. Fourier 位相스펙트럼

임의의 시간이력 $x(t)$ 를 근사적으로 삼각함수의 합으로 표현한 Fourier급수에 의하면

$$x(t) \approx \frac{X_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} X_k \cos(2\pi f_k t + \phi_k) + \frac{X_{N/2}}{2} \cos 2\pi f_{N/2} t \text{ 로 된다.}$$

여기서, X_k ($k=0, 1, 2, 3, \dots, N/2$)는 각성분파의 진폭을, ϕ_k ($k=1, 2, 3, \dots, N/2-1$)는 각성분파를 산술적으로 합산하여 원파형으로 재현하는데 필요한 시간축상에서 어긋남의 정도를 나타내는 위상각을 나타낸다. 진폭 X_k 을 진동수 f_k 에 대하여 표현한 그림을 진폭스펙트럼이라 하고, 위상각 ϕ_k 를 진동수 f_k 에 대하여 표현한 것을 위상스펙트럼이라 한다. 즉 동적해석에 사용되는 설계지진의 파형은 진폭에 대한 정보와 위상각에 대한 정보를 합한 경우에만 一元적으로 결정되는 시간이력으로 표현할 수 있다. 그러나 일반적으로 구조물의 내진설계에 사용하도록 정의된 설계응답스펙트럼이란 진폭에 관한 정보만을 의미하며 위상각에 관한 정보는 제공하지 않고 있다. 그러한 이유로서는 대부분의 지진파형의 위상각을 분석하면 일정한 특성을 갖지 않는 랜덤적인 성질이 강하기 때문에 파형의 재현에 필요한 위상각은 설계자의 임의로 난수를 발생하여 사용하고 있는 경우가 대부분이다. 또한 시간이력에 의해 반응한 일질점계의 최대응답치로 표현하는 응답스펙트럼과 시간이력의 각성분파 크기를 나타내는 Fourier진폭스펙트럼의 물리적인 의미는 전혀 상이하나, 양자의 관계를 수식으로 표현하면⁽¹⁾ 감쇠가 없는 속도응답스펙트럼은 푸리에 진폭스펙트럼의 상한치를 갖는 관계가 있으므로, 양자를 동일한 물리량으로 취급하여 설계응답스펙트럼으로부터 모의지진파를 재현한다.

3. 位相差分 스펙트럼

실제의 지진파형에서 구한 위상각의 랜덤적인 성질과 더불어 두 인접한 위상각의 산술적인 차에 대한 확률분포도를 고찰하기로 하였다. 진행에서 기술한 것처럼 지진파를 구성하는 각성분파의 위상각은 1차에서 $(N/2-1)$ 차까지 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{N/2-1}$ 의 수열로 나열될 수 있으며, 연속된 두 위상각의 차인 $\Delta\phi_k = \phi_{k+1} - \phi_k$ 를 위상차분(phase difference)이라고 하고 그 분포를 위상차분스펙트럼이라고 정의한다. 먼저 지진파의 시간이력과 위상차분의 상관관계를 도출하기 위하여 그림 1.(a)와 같이 시간이력에 대한 포락곡선의 형태를 확률밀도분포도로 간주하고, 그림 1.(b)와 같이 누적확률밀도분포도를 계산하였다. 다음으로 그림 1.(b)의 종축상의 0-1사이에 있는 난수(Random Number)를 N 개

발생하여 포락곡선의 형태가 누적확률밀도분포도로 반영된 횡축상의 확률변수를 구한다. 이러한 확률변수를 위상차분값으로 표현하기 위해 확률변수값에 -2π 을 곱한 값을 위상차분이라 하고 N개의 위상차분에 대한 밀도분포도를 계산한 그림 1.(c)와같은 위상차분스펙트럼을 구할 수 있다. 그리고 위상각은 위상차분을 역산하는 $\phi_{k+1} = \Delta \phi_k + \phi_k$ 에 의해 순차적으로 결정되며, N개의 위상각의 분포도를 그림 1.(d)에 나타낸다. 여기서 위상차분을 계산하는 과정에서 포락곡선을 확률밀도로 사용하였으므로, 그림 1.(a)의 포락곡선과 그림 1.(c)의 위상차분스펙트럼이 유사한 형태를 띠고 있다는 사실은 너무도 당연하다. 그러나 특성이 있는 위상차분으로 계산한 그림 1.(d)의 위상각의 분포를 살펴보면 아무런 특성을 나타내고 있지 않는 랜덤적인 형상을 나타낸다. 그리고 어떠한 특성을 갖는 위상차분스펙트럼을 가정하더라도 위상각의 분포는 랜덤적인 형상을 갖는 사실에는 변함이 없다.

4. 위상차분스펙트럼과 파형과의 관계

어떠한 특성이 있는 위상차분스펙트럼을 사용하더라도 위상차분에서 도출한 위상각의 분포는 랜덤적인 형상을 갖고 있으며, 위상차분에서 구한 랜덤적인 위상각으로부터 계산한 파형의 형태는 위상차분스펙트럼과 유사한 형태를 갖는다는 다음과 같은 특이한 사실을 발견하였다. 즉 위상차분스펙트럼과 파형의 포락곡선이 유사함을 입증하기 위하여 그림 2. 와 같이 서로 다른 모양을 갖는 위상차분스펙트럼을 가정하고 위상차분으로부터 구한 위상각을 역푸리에 변환하여 파형을 계산하였다. 그림 2.(a)와 같이 횡축의 중앙부에 밀집되어 있는 위상차분스펙트럼의 형태는 파형에서도 중앙부에서 큰 진폭의 크기를 갖는 파형을 얻을 수 있으며, 그림 2.(b)와 같이 위상차분의 밀도가 전반부에 집중되어 있는 경우에는 파형도 전반부에서 진폭의 크기가 크다. 또한 그림 2.(d)와 같이 등분포의 경우에는 파형의 형태도 등분포의 형태를 갖는다. 단 이러한 네가지의 경우에 대한 위상스펙트럼의 형태는 모두가 랜덤적인 특징을 갖고 있다는 사실에는 변함이 없다. 이러한 특이한 성질을 좀더 자세히 고찰하기 위하여 그림 3.(a)와 같이 지진규모에 따른 포락곡선의 형태를 경험적으로 구한 기준식을 사용하여 그림 3.(b)와 같은 위상차분스펙트럼을 계산하고, 大崎스펙트럼⁽¹⁾을 진폭스펙트럼으로 사용하여 계산된 파형의 결과를 그림 3.(c)에 나타낸다. 그림에서 나타난 것처럼 포락곡선과 위상차분스펙트럼은 유사한 형태를 나타내며 파형의 형태도 포락곡선과 유사함을 나타낸다는 사실에는 변함이 없다. 이와 같이 위상차분스펙트럼과 파형의 형태가 어떤 물리적인 의미를 갖고 유사한 것인지에 대한 검토를 위하여 지진규모와 지반의 종류에 따라 경험적으로 구한 Jennings⁽²⁾형의 포락곡선을 사용한 결과를 그림 4. 에 나타내며, 본 연구에서 두 개의 큰 피크를 갖는 임의적인 포락곡선을 사용한 결과를 그림 5. 에 나타낸다. 그림 5. 에서 나타난 것처럼 극단적인 포락형태를 가정한 경우에 위상차분스펙트럼의 형상은 포락곡선과 유사하나, 파형의 형태는 두 개의 진폭이 분리되는 현상은 발견할 수 없다. 그러므로 위상차분스펙트럼의 형태와 파형 포락곡선의 유사성은 물리적으로 설명될 수 있는 현상이 아니라, 우연히 일치하게 되는 불가사의한 현상으로 밖에 설명될 수 없다.

5. 결론

설계응답스펙트럼을 만족하는 시간이력을 생성하는 과정에는 반드시 위상각에 대한 정보가 필요하고, 지금까지는 위상각에 대한 정보를 단순히 랜덤적인 성질로 간주하고 파형의 포락곡선에 접근하게 하는 반복적인 수치계산 방법을 사용하고 있다. 그러나 본 논문은 실제 파형에서 랜덤적인 특성을 갖는 위상스펙트럼에서 위상각의 차분을 구한 위상차분스펙트럼의 형상이 원파형의 포락형태와 유사한 성질을 밝혀내고, 또한 특정한 형태의 위상차분스펙트럼을 사용하여 계산한 파형의 형태도 위상차분스펙트럼의 형상과 유사하다는 결과를 얻었다. 그러므로 앞으로 한반도에서 관측되는 미소지진으로부터 구한 위상차분스펙트럼을 사용하여 모의지진동을 생성하면 포락곡선을 사용하지 않고도 실제의 지진파형과 유사한 模擬지진파를 생성할 수 있다.

[참고문헌]

1. 新·地震動のスペクトル解析入門, 大崎順彦著, 鹿島出版會
2. Jennings, P.C., Housner, G.W., and Tsai, T.C., *Simulated earthquake motions*, California Institute of Technology, April, 1968.

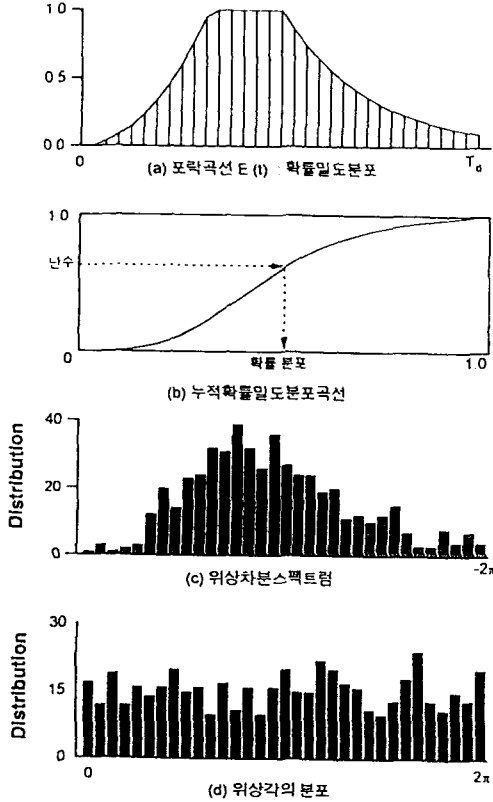


그림 1. 포락곡선과 위상차분스펙트럼

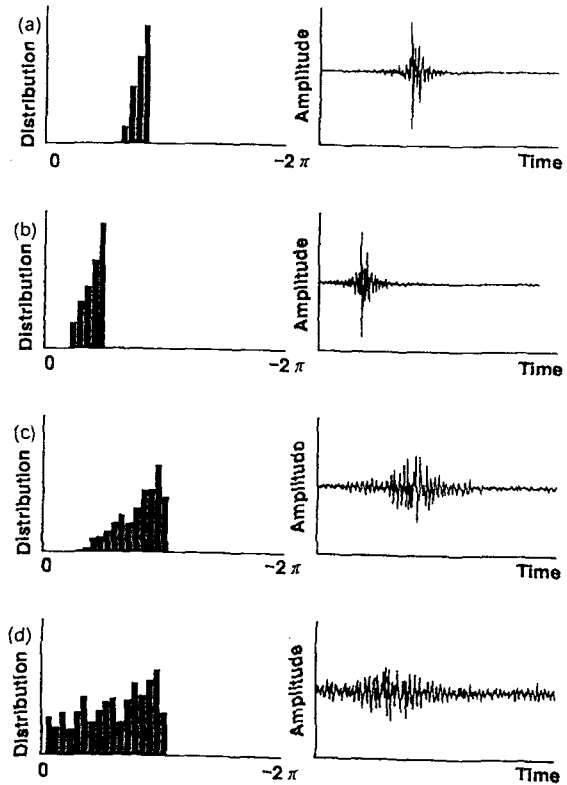
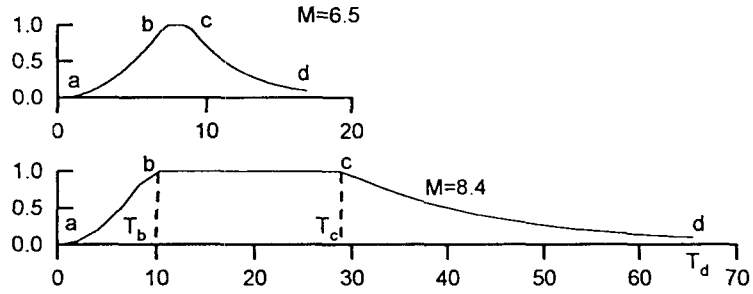
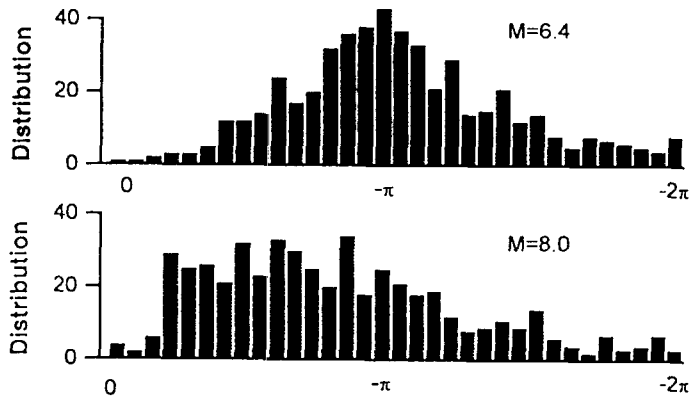


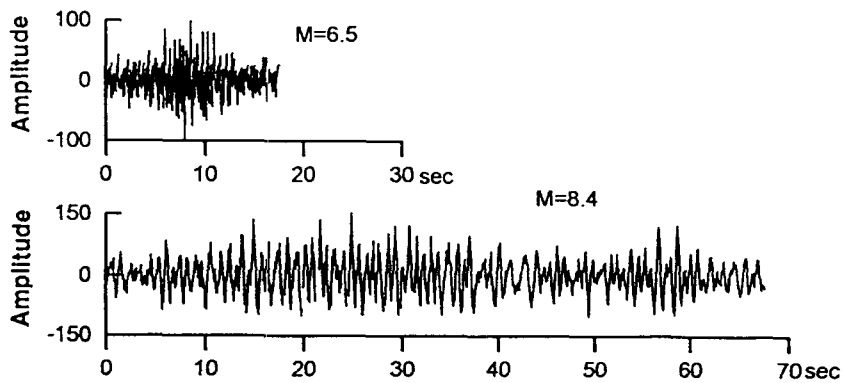
그림 2. 위상차분스펙트럼과 파형과의 관계



(a) 규모에 따른 포락곡선형

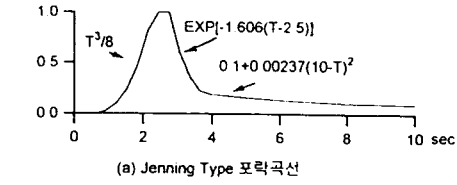


(b) 규모에 따른 위상차분스펙트럼

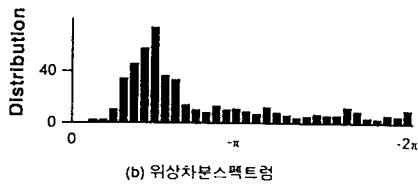


(c) 가속도 시간이력

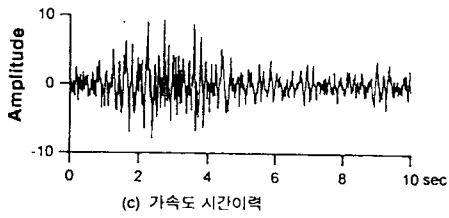
그림 3. 지진규모에 따른 포락곡선의 형태와 파형



(a) Jenning Type 포락곡선

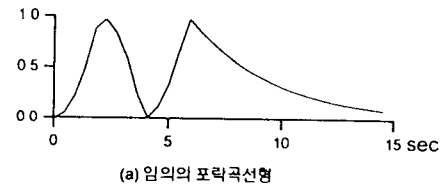


(b) 위상차분스펙트럼

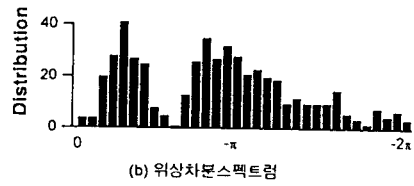


(c) 가속도 시간이력

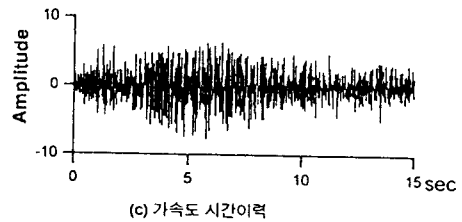
그림 4. Jenning형 포락곡선의 형태를 따른 위상차분스펙트럼과 파형



(a) 임의의 포락곡선형



(b) 위상차분스펙트럼



(c) 가속도 시간이력

그림 5. 임의의 포락곡선의 형태를 따른 위상차분스펙트럼과 파형