

## 발파에 의한 지반진동의 응답스펙트럼 분석

김준경\*

### Analysis of Response Spectrum of Ground Motions from Mine Blasting

Jun Kyoung Kim

**Abstract** This study analysed response spectrum using the observed ground motion from the mine blasting and, then compared the results to the seismic design response spectra applied domestic nuclear power plants. The results showed that the resultant response spectra above 20 Hz revealed higher values than the design response spectra and those below 20 Hz revealed much lower values. These facts suggest that the analysis of response spectrum should be applied to the analysis of impacts to frequency dependent structures in addition to the analysis of peak values of ground motions.

**KeyWords** Blasting ground motion, Response spectrum, Reg. Guide 1.60, MPOSD, Control point

**초 록** 본 연구는 가행중인 석회석광산에서 측정된 발파진동을 이용하여 응답스펙트럼을 분석하였으며 국내 원자력 관련 구조물의 내진설계 기준과 비교하였다. 연구에 이용된 발파진동 개수는 수평성분 및 수직성분 각각 43개이다. 국내 원자력시설물의 내진기준인 Reg. Guide 1.60과 비교한 결과 약 20Hz를 중심으로 고주파 영역에서 발파진동에 의한 MPOSD 스펙트럼 및 Mean 스펙트럼 값이 Reg. Guide 1.60보다 값이 높게 나타나고, 약 20Hz를 중심으로 저주파수 영역에서는 값이 현저하게 낮게 나타나고 있다. 구조물 피해를 최소화할 위한 시험발파를 통한 최대 지반진동값을 적용하는 것도 중요하지만 각종 구조물에 대한 영향을 복합적으로 해석하기 위해 응답 스펙트럼 특성을 부가하여 적용할 필요가 있다.

**핵심어** 발파지반진동, 응답스펙트럼, Reg. Guide 1.60, MPOSD, Control point

## 1. 서 론

일반적으로 자연지진으로부터 발생하여 측정된 지반진동을 처리하여 응답스펙트럼을 분석하고 이를 이용하여 내진설계에 이용하고 있다. 최근 충북북부 및 강원남부 지역에서 활발하게 활동하고 있는 석회석광산은 석회석을 개발하기 위해 다이너마이트를 불가피하게 사용하고 있고, 주변에 발생가능한 지반진동과 관련된 문제가 심각하게 대두되고 있다. 최근 국내에서 광산개발은 환경에 대한 의식이 점차 높아짐에 따라 급격하게 입지가 좁아지고 있어서 광산 주변에 위치하고 있는 구조물 및 건축물에 대한 영향을 최소화시키고 환경친화적인 광산개발을 적극적으로 유도할 필요가 있다. 따라서 자연지진이 아닌 광산 활동으로부터 야기되는 관측지반진동을 이용하여 응답스펙트럼을 분석하였고

이를 국내에서 가장 엄격하게 적용하고 있는 원자력 시설물에 관한 내진설계 기준과 비교하였다. 특히 우리나라 원전구조물의 내진설계 기준은 미국 원전구조물의 내진설계기준 가운데 하나인 US NRC (Nuclear Regulatory Commission)에서 제시한 Reg Guide 1.60의 표준응답스펙트럼이고 이를 과학기술부 고시로서 현재까지 적용하여 왔다.

응답스펙트럼은 Benioff(1934)에 의해 적용되어 Biot(1941)가 지진공학에 적용하였으며, Housner가 본격적인 연구 및 응용을 시작해 1959년에 발생한 강진의 수평성분을 이용하여 최초로 내진설계에 이용한 스펙트럼을 작성하였다.

Housner(1959) 4건의 강진에서 기록된 8개 수평성분 기록자료를 이용하여 스펙트럼을 작성하였고, 이것이 내진설계에 이용된 최초의 스펙트럼이며, Newmark et. al(1973a, 1973b, 1973c), Boore & Joyner (1994)등에 의하여 활발하게 응답스펙트럼에 대한 연구가 수행되어왔다. 국내에서 수행된 연구는 주로 원자력 분야와 관련하여 수행되어 왔으며 양형식(1992)

<sup>1)</sup> 정희원, 세명대학교 자원환경공학과 교수  
\* 교신저자 : kimjk1@untel.co.kr  
접수일 : 2005년 7월 27일  
심사 완료일 : 2005년 8월 24일

및 김준경(2003) 등이 있고 최근 국내외 지역에서 잦은 지진 발생 등으로 인하여 향후 이 분야에 대해 인식이 제고되어 많은 연구가 수행될 예정이다.

## 2. 지반진동 응답스펙트럼 지배방정식

일반적으로 지반진동을 이용한 응답스펙트럼은 지진 등에 의한 동적하중을 받는 탄성 단자유도계 구조물의 최대반응을 그래프로 나타낸다. 그래프의 가로축은 진동수 또는 주기, 세로축은 구조물의 상대변위, 상대속도 및 절대가속도 각각의 최대반응을 나타낸다.

지진하중을 받는 단자유도계 구조물의 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} m \ddot{x}(t) + c \dot{u}(t) + ku(t) &= 0 \\ m \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + k u(t) &= -m \ddot{x}_b(t) \\ \ddot{u}(t) + 2\zeta w \dot{u}(t) + w^2 u(t) &= -\ddot{x}_b(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $u(t) = x(t) - x_b(t) =$  상대변위,

$w =$  고유진동수 (rad/sec),

$\zeta =$  감쇠비,

$\dot{u}(t) = \dot{x}(t) - \dot{x}_b(t) =$  상대속도,

$x_b(t) =$  지반변위,

$\ddot{u}(t) = \ddot{x}(t) - \ddot{x}_b(t) =$  상대가속도,

$\dot{x}_b(t) =$  지반속도,

$x(t) = u(t) + x_b(t) =$  절대변위,

$\ddot{x}_b(t) =$  지반가속도,

$\ddot{x}(t) = \ddot{u}(t) + \ddot{x}_b(t) =$  절대가속도

식(1)로부터 초기조건 ( $u_0 = u(0), v_0 = \dot{u}(0)$ )을 0 으로 가정하여 상대변위와 상대속도를 계산하면 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} u(t) &= -\frac{1}{w_d} \int_0^t \ddot{x}_b(\tau) \exp[-\zeta w(t-\tau)] \sin w_d(t-\tau) d\tau \quad (2) \\ \dot{u}(t) &= \frac{w}{w_d} \int_0^t \ddot{x}_b(\tau) \exp[-\zeta w(t-\tau)] \sin[w_d(t-\tau) - \theta] d\tau \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $w_d = w\sqrt{1-\zeta^2} =$  감쇠진동수 (rad/sec)

$\theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} =$  위상각 (Phase Angel)

응답스펙트럼은 특정한 지반가속도, 고유진동수, 감쇠비에 대한 단자유도계의 시간이력 중에서 상대변위,

상대속도 및 절대가속도의 최대반응으로부터 얻어지는 값이다. 따라서 변위스펙트럼(SD)과 속도스펙트럼(SV)을 식(2)와 식(3)으로부터 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} S_D(\zeta, w) &= |u(t)|_{\max} \\ &= \left| \frac{1}{w_d} \int_0^t \ddot{x}_b(\tau) \exp[-\zeta w(t-\tau)] \sin w_d(t-\tau) d\tau \right|_{\max} \\ S_V(\zeta, w) &= |\dot{u}(t)|_{\max} \\ &= \left| \frac{w}{w_d} \int_0^t \ddot{x}_b(\tau) \exp[-\zeta w(t-\tau)] \sin[w_d(t-\tau) - \theta] d\tau \right|_{\max} \end{aligned} \quad (4)$$

마지막으로 질량체의 관성력은 상대가속도가 아니라 절대가속도와 관련이 있으므로 가속도 스펙트럼(SA)은 식(1)에서 절대가속도를 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= \ddot{u}(t) + \ddot{x}_b(t) \\ &= -2\zeta w \dot{u}(t) - w^2 u(t) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} S_A(\zeta, w) &= |\ddot{x}(t)|_{\max} \\ &= |[-2\zeta w \dot{u}(t) - w^2 u(t)]|_{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

일반적으로 건축 및 토목 구조물의 감쇠율은 3% ~ 7% 정도로서 비교적 작은 값이다. 따라서 근사적으로는  $\sqrt{1-\zeta^2} \approx 1$  이고,  $w_d = w\sqrt{1-\zeta^2}$  에 의해  $w_d \approx w$  로 보고 위상각  $\theta$ 를 무시할 경우에 얻어지는 결과는 속도 반응스펙트럼(SV)과 유사한 값이 된다. 이것을 유사 속도응답스펙트럼(PSV)이라 하며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} PS_V(\zeta, w) &= \left| \int_0^t \ddot{x}_b(\tau) \exp[-\zeta w(t-\tau)] \sin w(t-\tau) d\tau \right|_{\max} \\ PS_D(\zeta, w) &= \left| \frac{1}{w} \int_0^t \ddot{x}_b(\tau) \exp[-\zeta w(t-\tau)] \sin w(t-\tau) d\tau \right|_{\max} \\ &= \frac{1}{w} PS_V(\zeta, w) \end{aligned} \quad (7)$$

식(5)에서  $\zeta$  값이 작은 경우에  $2\zeta w \dot{u}(t)$ 항은 무시될 수 있으므로 유사 가속도 스펙트럼(PA)을 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} PS_A(\zeta, w) &= |\ddot{x}(t)|_{\max} \\ &= |[-2\zeta w \dot{u}(t) - w^2 u(t)]|_{\max} \\ &= |w^2 u(t)|_{\max} \\ &= w^2 PS_D(\zeta, w) \\ &= w PS_V(\zeta, w) \end{aligned} \quad (8)$$

따라서, 유사 변위, 속도 및 가속도 스펙트럼 관계는 다음과 같다.

$$PS_V = w PS_D, \quad PS_A = w PS_V = w^2 PS_D \quad (9)$$



리 감쇠할 뿐만 아니라 구조물에 거의 영향을 미치지 않는다. 또한 비교의 대상인 국내 원자력시설물의 내진 기준에 해당하는 Reg. Guide 1.60에서도 약 33Hz까지 제시되어 있다. 따라서 주파수 영역에 대한 여유를 감안하여 본 연구에서는 최대 주파수 50Hz까지 분석하여 비교하였다.

### 4.3 정규화 과정

각 지진자료들은 측정거리의 변화에 따라서 서로 다른 최대 지반가속도를 가지고 있는데, 서로 다른 최대 지반가속도에 대한 각각의 응답스펙트럼값을 구하고 이들의 평균값을 구하는 것은 의미가 없다. 따라서 동일한 최대 지반가속도에 대해 스펙트럼을 정규화한 후에 mean 스펙트럼을 구하는 것이 일반적이며, 이를 최대 지반가속도에 의한 정규화 과정이라 한다. 다른 방법으로 유효 최대가속도(effective peak acceleration), 스펙트럼 강도(spectral intensity) 등에 의한 방법도 있으나, 본 연구에서는 최대지반가속도에 의한 정규화 과정을 적용하였다.

최대 지반가속도에 의한 정규화 과정을 적용하는 방법으로서 다음과 같은 세 가지 방법이 제시되어 있다. 우선, 각 지진자료의 최대 지반가속도가 동일한 값이 되도록 지진자료를 비례적으로 조정하여 응답스펙트럼을 구하는 방법이 있다. 그리고 두 번째 방법으로 각 지진자료에 대한 응답스펙트럼을 구한 후에, 동일한 최대 지반가속도에 대한 응답스펙트럼이 되도록 스펙트럼 값을 비례적으로 조정하는 방법이 있다. 마지막으로, 각 지진자료에 대한 응답스펙트럼을 구할 때, 그 단위를 최대 지반가속도에 대한 배율로 사용하는 방법이 있다. 위에서 서술한 방법 중에서 세 번째 방법이 가장 널리 적용되고 있고 본 연구에서도 세 번째 방법을 적용하였다.

## 5. 연구 결과

각각의 성분에 대해 응답스펙트럼값을 표 2 및 그림

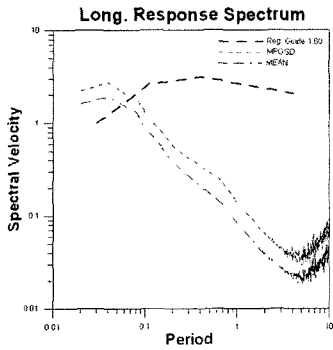
1에서 제시하였다. 충북 단양지역에서 측정된 지반진동 자료를 이용하여 응답스펙트럼을 5% damping에 대해 계산하였으며, 결과를 국내 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계기준으로 사용되고 있는 5% damping에 대해 Reg. Guide 1.60(표 3)에서 제시하고 있는 값과 비교하였다. 그림 1에서 세로축은 주기(sec)를 나타내고 세로축은 정규화과정을 거친 응답스펙트럼값을 나타내고 지반최대값에 대해 정규화한 결과이기 때문에 무차원이다. 표 2에서 몇 개의 대표되는 주파수에 대해 응답스펙트럼값을 제시하였다. 표 3에서 알 수 있는 바와같이 control point에 해당하는 주파수값은 수평 및 수직성분 모두 동일하나 응답스펙트럼 값이 서로 다르며 수직성분의 값이 다소 작은 값으로 제시되어 있다. 이러한 현상은 여러 가지 요인이 있으나 일반적으로 진앙거리 요인 등에 의해 수평성분의 S 파 혹은 표면파의 진폭이 크기 때문이다. 실제 지반진동에 의한 값과 기준값을 효과적으로 비교하기 위해 각 주파수에서 지반진동의 응답스펙트럼 값을 평균한 평균응답스펙트럼 뿐만 아니라 표준편차를 더한 응답스펙트럼 값(MPOSD; mean plus one standard deviation)과 각각 비교하였다. 국내 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계기준으로 사용되고 있는 Reg. Guide 1.60 역시 정규화한 후 결과되는 평균값에 다시 표준편차값을 더한 응답스펙트럼 값으로 이루어져 있다.

그림 2에서 제시된 바와 같이 약 20Hz 부근에서 시작하여 저주파수 영역으로 갈수록 저주파 영역에서는 Reg. Guide 1.60보다 발파진동에 의한 응답스펙트럼 결과 값이 현저하게 낮게 나타나고 있다. 그리고 약 20Hz 이상에의 고주파수 영역에서는 발파진동에 의한 응답스펙트럼 값이 Reg. Guide 1.60보다 값이 높게 나타나고 있음을 보여주고 있고 50Hz를 넘어서는 부분에서도 수직성분의 경우 다소 증가하거나 수평성분 2개의 경우 감소하고 있음을 보여주고 있다.

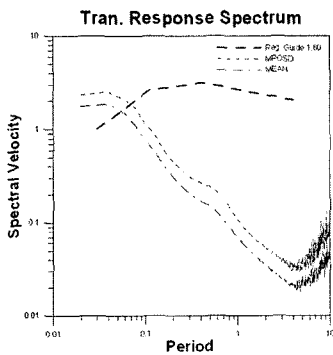
또한 약 0.2Hz 보다 작은 저주파 영역으로 갈수록 3성분 모두 공통적으로 응답스펙트럼 값이 작아지다가 갑

표 2. 진행방향에 따른 주기별 응답스펙트럼 값(5% damping)

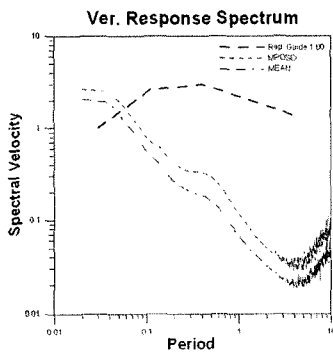
기준 주기		0.02sec(T)	0.1sec(T)	0.4sec(T)	4sec(T)
T	Mean	1.758268081	0.741350216	0.168136019	0.0222576
	MPOSD	2.324192551	1.122242565	0.267261394	0.034936128
L	Mean	1.623770697	0.900919554	0.2103633	0.023633208
	MPOSD	2.199356029	1.259733968	0.343331905	0.040899797
V	Mean	2.038149989	0.552897595	0.184754273	0.019887
	MPOSD	2.626979801	0.782415396	0.329584497	0.032119839



(a) Long. response spectrum



(b) Tran. response spectrum



(c) Ver. response spectrum

그림 1. 각 성분에 대한 응답스펙트럼(Mean & MPOSD) 과 Reg. Guide 1.60 비교

자기 증가하는 현상을 보여주고 있다. 이는 측정기계의 저주파수 영역에 대한 측정한계 등이 존재하나 인위적

인 주파수 영역의 연장 등으로 인한 영향으로 해석되며 구조물의 해석에 대해서는 영향을 주지 않고 자료 전처리과정에서 liner correction 작업으로 제거 가능하다.

## 6. 결 론

발파 진동원으로부터 결과되는 응답스펙트럼은 2가지의 특징을 보여주고 있다. 첫 번째 특징은 약 20Hz 이상에의 고주파수 영역에서는 발파진동에 의한 결과값이 Reg. Guide 1.60보다 값이 높게 나타나고 있음을 보여주고 있고 20Hz를 넘어서는 부분에서도 계속 증가하고 있음을 보여주고 있다. 고주파수 영역에서 상대적으로 높은 값을 보이는 현상은 다이내마이트라는 발파원의 주파수적인 특성이 자연지진 진동원에 비하여 고주파수 영역을 상대적으로 많이 포함 즉 white noise 특성에 상대적으로 가까운 특성을 갖고 있기 때문이라고 해석된다. 또한 본 연구에서 측정된 지반진동의 경우 측정거리가 수십 m에서 수백 m의 단위이나 비교대상의 기준거리가 수십 km에서 수백 km의 단위이다. 따라서 근거리 영향에 의해 고주파수 성분이 감쇠되지 않고 상대적으로 많이 포함되어 있어 자연지진 진동원에 의한 응답스펙트럼에 비하여 고주파수 영역에서 훨씬 높은 값을 보이고 있다.

또한 고주파수에서의 상대적으로 높은 값은 지반공학적으로 지반 및 구조물에 상호작용(SSI; Soil Structure Interaction)에 의한 효과에 의한 가능성도 있다. 하지만 본 연구에서는 기반암이 노출되어 있는 지역에서 측정된 자료를 이용하였기 때문에 토양층이 수 m 이상일 경우 발생하는 증폭효과는 자료에 포함되지 않은 것으로 해석된다. 따라서 고주파수에서의 상대적으로 높은 값은 앞서 제시한 2가지 주된 요인에 의한 것으로 해석된다.

위에서 제시한 고주파 영역의 응답스펙트럼 특성은 고층 아파트 등을 제외한 국내의 일반가옥과 같은 구조물의 공명주파수를 고려할 때 일반 건축물에 상대적으로 커다란 영향을 주지 않는다. 하지만 일반 건축물에 부착되어 있는 보조물체이거나 건축물의 일부분을 이루고 있는 부재는 공명주파수가 상대적으로 높기 때문에 이에 대한 영향은 상대적으로 훨씬 크다는 것을 의미한다.

표 3. Reg Guide 1.60에서 제시한 응답스펙트럼값(5% damping)

성분 및 control point	33Hz	9Hz	2.5Hz	0.25Hz
수평성분	1.0	2.61	3.13	2.50
수직성분	1.0	2.61	2.98	1.37

두 번째 특성은 약 20Hz 부근에서 시작하여 저주파 수 영역으로 갈수록 저주파 영역에서는 Reg. Guide 1.60보다 발파진동에 의한 결과 값이 현저하게 낮게 나타나고 있다. 측정거리가 최대 수백 m 단위이기 때문에 저주파수의 진동에너지가 발달되어 관측될 만큼 거리가 충분하지 못하기 때문인 것으로 해석된다.

따라서 일반적으로 발파공학에서 적용하고 있는 측정된 최대값을 기준으로 구조물 전체에 대한 영향을 고려하는 것도 대단히 중요하다. 하지만 본 연구에서 제시한 응답스펙트럼의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 각종 구조물의 전체 및 부분부재에 대한 영향을 복합적으로 해석하기 위해 구조물의 내진설계 기준에서 일반적으로 제시하고 있는 응답스펙트럼 특성을 부가하여 적용할 필요가 있다.

**감사의 글**

본 연구는 전남대학교 양형식 교수 및 세명대학교 윤용균 교수의 연구실 장비를 이용하여 지반진동을 측정하여 연구를 가능케 한데에 대해 감사드립니다.

**참고문헌**

1. 김준경외, 2003, 국내 지진의 응답스펙트럼 특성 분석, 한국원자력안전연구원 연구보고서, 한국원자력안전기술원
2. 양형식, 1992, 지표발파의 진동특성에 관한 기초연구, 터

- 널과 지하공간, 한국암반공학회지, vol2, pp.199-211.
3. A.M. Converse and A.G., 1992, Brady, BAP(Basic Strong Motion Acceleration Processing) Software (V1.0), Open-File Report, USGS
4. Benioff, H., 1934, The Physical Evaluation of Seismic Destructiveness, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 24, No. 2.
5. Biot, J. A., 1941, A Mechanical Analyzer for the Prediction of Earthquake Stresses, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 31, No. 2.
6. Boore, D. M., Joyner, W. B., and Fumal, T. E., 1994, Estimation of Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: An Interim Report, Part 2, USGS Open File Report 94-127, Menlo Park, California, United States Geological Survey.
7. Housner, G. W., 1959, Behavior of Structures during Earthquakes, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 85, No. EM4.
8. Newmark, N. M., Blume, J. A., and Kapur, K. K., 1973a, Seismic Design Spectra for Nuclear Power Plants, Journal of Power Division, ASCE, Vol. 99, No. P02, pp. 287-303.
9. Newmark, N. M., and Hall, W. J., 1973b, Procedures and Criteria for Earthquake Resistant design, Building Research Series 46, Building Practices for Disaster Mitigation, National Bureau of Standards, U. S. Department of Commerce.
10. Newmark, N. M., Hall, W. J., and Mohraz, B., 1973c, A Study of Vertical and Horizontal Earthquake Spectra, Report WASH-1255, Directorate of Licensing, U. S. Atomic Energy Commission.
11. Regulatory Guide 1.60, 1968, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Pans, USNRC.

**김 준 경**

1978년 서울대학교 자원공학과 학사  
 1980년 서울대학교 자원공학과 석사  
 1989년 미국 University of Arizona, 이학 박사  
 1989년 Dept of Geoscience 지구물리전공

Tel: 기재요망  
 E-mail: 기재요망  
 현재 세명대학교공과대학 자원환경공학과 교수

