

원자력발전소 OBE 초과기준 변경에 따른  
발파진동 허용수준 고찰  
Review of the Blasting Limit Criteria  
in the Aspect of Revised OBE Exceedance Criteria

연 관 회, 김 성 주, 박 동 희, 장 천 중

한전 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원전부지 인근 발파시 적용해오던 발파진동 허용기준은 원전 OBE 초과기준 중 최대지반가속도를 고려하여 설정되었으나, 최근 미국에서 제정된 원전 OBE 초과기준은 최대지반가속도를 고려하지 않고 10Hz 이하의 응답스펙트럴 값과 CAV(cumulative Absolute Velocity)를 기준으로 하고 있어, 본 연구를 통해 기존의 발파기준을 개정된 OBE 초과기준의 관점에서 고찰하였다. 개정된 OBE 초과기준 중 하나인 OBE 초과응답스펙트럼을 만족하는 새로운 발파진동 허용수준으로는 10Hz에서의 5% 감쇠 응답스펙트럴 가속도 0.2g에 대한 최대응답스펙트럴 속도(maximum pseudo response velocity) 31.2 mm/sec가 제시되었으며 영광 5,6호기 비상원수조 축조 공사 시험발파시 측정된 발파진동의 응답스펙트럼과 비교하였다.

한편 현재 현장에서 운용되고 있는 발파장비는 최대응답스펙트럴 속도 계산이 불가능하므로 경험적으로 알려진 환산거리에 따른 응답스펙트럴 속도경계 증폭계수값을 이용하여 간접적으로 계산할 수 있는 방법을 제시하였으며 이 방법을 이용하여 최대지반속도로부터 최대응답스펙트럴 속도를 예측한 결과 실제 최대응답스펙트럴 속도치와 매우 유사한 것으로 나타났다.

ABSTRACT

Because of limited sites available for construction, it is becoming a common practice to conduct controlled-blasting before construction blasting work adjacent to existing nuclear power plants. In this case, to maintain operation of the nuclear power plants, level of blast-induced ground motion should be kept below a specified blasting limit criterion. For now, peak ground motion of 0.07g was established and applied as a blasting limit criterion based on consideration of Operating Base Earthquake, which is the spectrum of U.S. NRC Regulatory Guide 1.60 scaled with peak ground acceleration of 0.1g. However, this criterion has been considered to be too conservative and it causes delay in construction schedule because of limited use of blast charge. In the mean time, less severe OBE exceedance criteria for NPPs were developed by Electric Power Research Institute, which is spectral acceleration of 0.2g below 10Hz and Cumulative Absolute Velocity of 0.16g · sec. In this study, a less conservative blasting limit criterion was developed based on response spectral velocity as a result of comparative study of various ground motion measures. In addition, a converting formula from peak ground velocity to spectral velocity is suggested for efficient application of new blasting limit criteria.

## 1. 서 론

최근 국내에서는 원자력발전소(이하 원전) 건설부지 확보의 어려움으로 후속 원전 호기는 가동 중인 원전 인근 부지에 건설되고 있어서 굴착 공사중 발파작업이 빈번하게 발생하고 있는데, 발파 작업으로 인해 엄격한 운영절차에 의해 운전되고 있는 발전소에 피해를 줄 수 있으므로 발파에 의한 피해를 방지하기 위하여 엄격하게 규제하고 있다. 그러나 과도한 발파진동 허용수준에 대한 규제는 실제 발파시 사용될 수 있는 폭약량을 너무 적게 설계하여 건설공기를 지연시킬 수 있으므로 이에 따라 원전 운전에 영향을 끼치지 않으면서도 건설공기를 최대한 단축시킬 수 있는 합리적인 발파진동 규제기준이 필요하다. 현재 가동 중인 원전 인근 부지의 공사장 발파작업시 적용되고 있는 발파진동 허용수준은, 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, Peak Particle Acceleration) 0.2g에 대한 미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission) Regulatory Guide 1.60의 SSE(Safety Shutdown Earthquake, 안전정지지진) 설계지반 응답스펙트럼(Design Ground Response Spectrum)<sup>4)</sup>을 SSE의 1/2인 최대지반가속도 0.1g로 하향 조정하여 결정된 OBE(Operating Basis Earthquake, 운전정지지진) 설계지반 응답스펙트럼을 기반으로 하고 있다. 발파진동 허용수준 값은 최대지반가속도 0.07g로서<sup>1)</sup> 이 값은 원전 OBE 설계지반 응답스펙트럼의 최대지반가속도 0.1g에 안전율 약 1.3을 고려하여 제시되었다. 한편 한전 전력연구원에서는 광범위한 계측자료의 통계처리 결과를 기본으로 하여 가동 중인 원전 인접 부지 발파진동 허용수준으로서 40Hz를 기준으로 건물에 손상확률이 5% 이하인 최대지반속도(Peak Ground Velocity, Peak Particle Velocity) 1.2 cm/sec를 저주파 대역에 적용하고 40Hz 이상의 주파수 대역에서는 최대지반속도 2.0 cm/sec의 보수적인 수준을 제시한 바 있다<sup>2)</sup>. 이상과 같이 현재까지 제시된 가동 중인 원전 인접 부지의 발파진동 허용수준은 일반구조물에 적용되는 발파진동 허용수준과 구분 없이 최대지반가속도나 최대지반속도와 같이 순수 지반운동만으로 허용수준을 적용하고 있어, 원전 설계시 적용한 내진설계 응답스펙트럼 기준과 부합되지 않고 있어서 내진설계 기준을 기반으로 한 합리적인 발파진동 허용수준이 운용되지 않고 있다. 이에 따라 현재의 발파진동 허용수준은 과도하게 보수적인 값으로 평가되고 있다. 실제로 원전의 지진 안전성은 지진에 대한 응답스펙트럼 값으로 규제되고 있는데, 만약 현장에서도 간편하게 응답스펙트럼 값을 추정할 수 있다면 지진과 마찬가지로 발파진동에 대해서도 내진설계 기준과 부합되는 응답스펙트럼 값으로 제한하는 것이 훨씬 합리적이라고 할 수 있다. 현재 가동 중인 원전 인접 부지에서 발파작업을 수행할 경우 발파진동에 의한 원전의 운전정지를 예방하기 위해서는 이상에서 언급한 발파진동 허용수준을 설정하고 발파패턴 및 거리, 장약량에 따른 지반운동 예측식을 이용해 원전 기기에 피해를 주지 않는 사용 가능한 최대허용장약량을 평가하여야 한다.

한편 미국 전력사(Electric Power Research Institute)는 원전의 OBE 초과기준으로서 최대지반가속도 및 발전소 고유의 OBE 설계지반 응답스펙트럼을 적용할 경우 10Hz이상의 고주파 성분을 많이 포함한 미소지진에도 발전소를 자주 정지시켜야 하는 문제를 해결하기 위해 고주파 지진에 의한 원자력발전소의 영향에 대해 연구<sup>5)</sup>하고 새로운 OBE 초과기준을 제시하였으며 미국 NRC는 이를 인증하였다. 새로 개정된 OBE 초과기준에서는 최대지반가속도와 발전소 OBE 설계지반 응답스펙트럼 만으로 규제하지 않고 있으며 특정한 응답스펙트럼 값과 누적절대속도(Cumulative Absolute Velocity)로 규제하고 있다. 이상과 같이 새로운 OBE 초과기준은 고주파수 미소지진에 대한 발전소의 지진 안전성을 합리적으로 확보하기 위해 제시되었다. 한편 발파진동도 미소지진과

마찬가지로 고주파 지진동 성분을 갖고 있으므로 동일한 규제기준으로 적용될 수 있다.

본 연구에서는 원전의 OBE 초과기준 변경에 따라, 매우 보수적인 것으로 알려져 있는 기존의 최대지반가속도 0.07g 발파 허용수준의 규제기준을 새롭게 고찰하기 위해 '98.12월에 영광원자력 5,6호기 건설현장 부지에서 계측된 발파진동 자료를 분석하여 합리적인 규제기준을 제시하고 이와 부합되는 실질적인 발파진동 예측방법을 소개코자 한다.

## 2. 원자력발전소 OBE 초과기준

현재 우리 나라에서 가동 중인 원전에는 지진발생시 이를 감지할 수 있는 지진감시시스템이 설치되어 있으며 현행 원전 운영 규정에 따르면, 지진에 의해 자유장의 지반운동이 최대지반가속도 0.1g를 초과하거나 OBE 설계지반 응답스펙트럼을 초과할 경우 운전을 정지하도록 규제하고 있다. 그러나 최근 개정된 미국 NRC 기술기준 Regulatory Guide 1.166<sup>(6)</sup>에 따르면, 새로운 OBE 초과(기준)응답스펙트럼으로는 1~2Hz에서 6 inch/sec, 2~10Hz에서는 기존의 OBE 설계지반 응답스펙트럼과 응답스펙트럼가속도 0.2g 중 큰 값으로 설정되었고, 10Hz이상의 지진 응답스펙트럼에 대해서는 별도의 OBE 초과응답스펙트럼 기준 값을 설정하지는 않았으며 운전정지 조건에 새로운 지진피해 평가 인자인 누

적절대속도(Cumulative Absolute Velocity) 값의 초과 여부도 점검하게 되어 있다. (그림 1 참조) 여기서, CAV의 OBE 초과기준 판단 기준값은  $0.16g \cdot sec$ 이며 향후 이 기준에 대한 국내 원전 규제기관의 타당성 검토후 국내 원전의 OBE 초과기준으로 적용할 예정이다. 이 OBE 초과기준 제정을 위해 EPRI에서는 지금까지 발생한 전세계 지진 중 기록이 존재하고 손상규모가 큰 약 300개의 지진을 대상으로 제시된 여러 손상인자 중 어느 인자가 「잠재적 손상」 규모를 가장 잘 나타내는지 해석한 결과 CAV가 제일 적합한 것으로 밝혀내었다<sup>(5)</sup>. CAV는 고주파수 지진동보다 저주파수 지진동 성분에 민감한 것으로 알려져 있다. 한편 CAV가 계산될 수 없을 때에는 OBE 초과 응답스펙트럼 비교만으로도 OBE 초과 여부를 판별하게 되어 있다. 새로 제시된 OBE 초과기준은 구조물 및 기기에 대해 충분한 안전성을 고려하여 제시되었으며 발파진동 및 지진경험자료를 이용해서 제시된 합리적인 값이다. 이때 누적절대속도 CAV는 다음과 같이 정의되며 적분은 0.025g를 초과하는 부분에 대해서만 수행된다<sup>(7)</sup>.

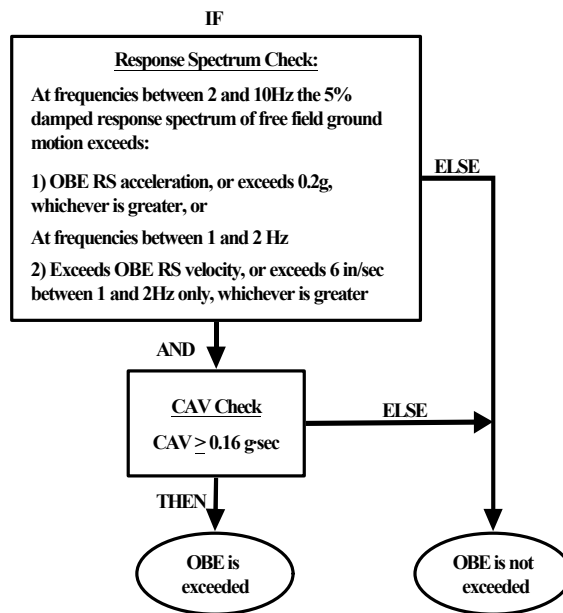


그림 1. Flow chart of revised regulation to determine OBE exceedance in nuclear power plants

$$CAV = \int_0^{t_{\max}} |a(t)| dt \quad (1)$$

여기서  $a(t)$  = 가속도 시간-이력,  $t_{\max}$  = 기록된 최대시간

### 3. 발파진동 계측

시험발파는 현재 가동중인 영광원자력 4호기 터빈발전기 및 격납건물의 진동수준을 규제하기 위해, 터빈발전기 기초로부터 약 310m 떨어진 비상원수조 축조 공사장 내에서 Bench-Cut형 발파로서 6회 실시되었으며 발파 진동은 3개 위치에서 3성분 지반진동 시간-이력으로 동시에 측정되었다. (표 1)

발파에 의한 지반진동은 가속도로 측정되었으며 계측된 가속도는 최대지반속도를 알기 위해 수치적으로 적분하여 속도로 환산되었으며 이때 사용된 진동센서로는 측정주파수 범위 0 ~ 200Hz의 서보형 지진동 가속도계를 이용하였다.

표 1. Outline of the performed controlled blasting

센서 ID	시험발파 차수	지발당 최대 장약량(kg)	폭원으로부터 거리(m)
1	1	0.8	41
1	2	1.6	41
1	3	0.8	41
1	4	1.6	41
1	5	1.25	30
2	3	0.8	65
2	4	1.6	65
2	5	1.25	54
3	1	0.8	114
3	2	1.6	114
3	3	0.8	114
3	4	1.6	114
3	5	1.25	103

### 4. 발파진동 계측자료 분석

#### 4.1 발파진동 응답스펙트럼 분석

그림 2는 폭원으로부터의 거리와는 무관하게 모든 진동센서에서 계측된 발파진동의 방향성분별 5% 감쇠에 대한 응답스펙트럼<sup>8)</sup>을 보여주고 있다. 그림 2로부터 본 시험발파를 통해 계측된 발파진동이 갖는 주파수 성분은 일반적으로 알려져 있듯이 주파수 20Hz 이상의 성분을 갖고 있음을 알 수 있으며 상대적으로 저주파 성분을 갖는 큰 규모의 지진특성과 구분된다. 그림 2의 선 A

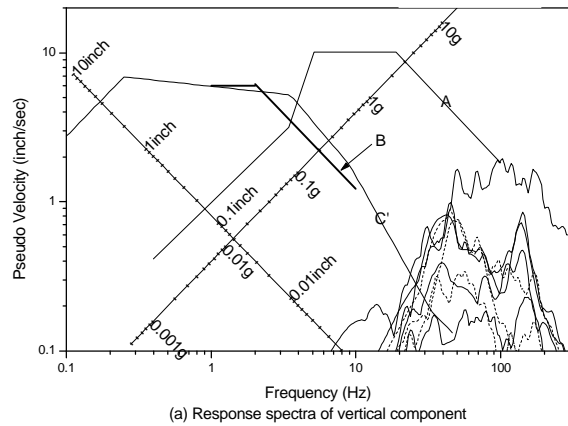
는 발파시 연약한 구조물(rubble and unreinforced masonry basemat walls)에 대해 경험적으로 얻어진 한계균열 응답스펙트럼(threshold cracking spectrum)으로 Dowling 박사에 의해 제시되었으며 대형구조물 및 기기에 대한 손상평가 판단기준으로 적용될 수 있는 보수적인 값으로 알려져 있다<sup>5)</sup>. 개정된 규정인 미국 NRC Regulatory Guide 1.166에 따르면 새로운 OBE 초과응답스펙트럼으로는 그림 2의 선 B(1~2Hz에서는 응답스펙트럼 속도 6 inch/sec, 2~10Hz에서는 응답스펙트럼 가속도 0.2g)와 Regulatory Guide 1.60의 최대지반가속도 0.1g에 대한 OBE 설계지반 응답스펙트럼 중 큰 것을 사용하는 것으로 되어있는데, 수평성분의 경우에는 OBE 설계지반 응답스펙트럼 선 C와 선 B값은 거의 유사하나(그림 2(b), (c)) 수직성분의 경우에는 OBE 설계지반 응답스펙트럼 선 C'가 선 B를 포괄한다. (그림 2(a)) 따라서 선 B는 성분에 관계없이 지반진동을 규제할 수 있는 보수적인 OBE 초과응답스펙트럼으로 간주될 수 있다. 한편 선 B는 일반적인 발파진동

이 갖는 10Hz이상의 주파수에 대한 허용수준 값을 제공하지 않고 있다. 그러나 전 주파수대역에 대해 선 B의 응답스펙트럴 가속도 0.2g에 대한 10Hz의 응답스펙트럴 속도값 31.2 mm/sec(1.23 inch/sec)을 새로운 발파진동 허용수준 값으로 제시하게 되면 새로운 OBE 초과응답스펙트럼인 선 B를 충분히 보수적으로 만족시킴을 알 수 있다. 전 주파수대역에 대한 응답스펙트럴 속도 발파진동 제한은 발파에 의한 지반진동의 최대응답스펙트럴 속도(maximum pseudo response velocity)를 제한함을 의미한다.

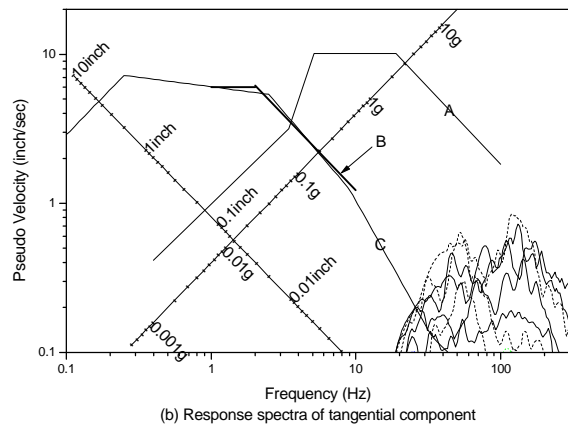
가동중인 원전 인접 발파작업시 고려해야할 중요한 구조물 사항으로는 원전의 터빈-발전기 진동의 허용변위이다. 대부분의 원전 경우 터빈-발전기 진동의 허용변위는 0.203 mm로 규제되고 있는데 터빈-발전기 구조물 기초에서의 5% 감쇠 최대응답스펙트럴 속도 31.2 mm/sec의 발파진동 허용수준 규제는 10Hz이상인 발파진동에 대해 대략 터빈-발전기 기초부의 진동변위가 0.1 mm<sup>1)</sup>이하의 제한치로 추정될 수 있으므로 5% 응답스펙트럴 속도 31.2 mm/sec 허용수준은 터빈진동 허용변위에 대해서도 충분히 보수적인 규제기준으로 평가된다. 여기서는 터빈-발전기 기초부의 진동변위 추정 시 고주파 구조물 증폭계수 2.0과 단순조화운동에 대한 응답스펙트럼 증폭계수  $1/(2 \cdot \beta)$  ( $\beta$ =감쇠=5%)가 사용되었다.<sup>5)</sup>

#### 4.2 발파진동 계측자료 회귀분석

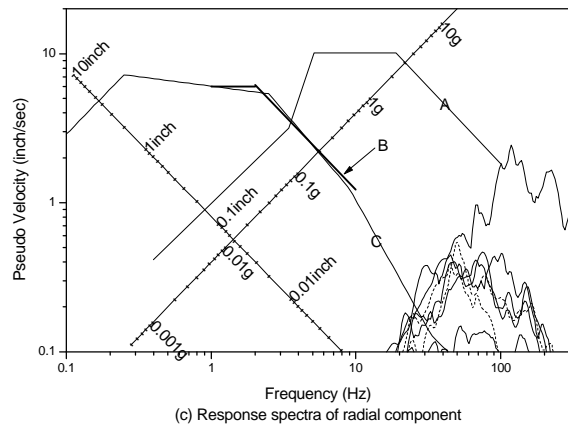
그림 3은 최대지반가속도, 최대지반속도, CAV 및 최대응답스펙트럴 속도(5% 감쇠)에 대한 제곱근( $m/kg^{1/2}$ ) 및 세제곱근( $m/kg^{1/3}$ ) 환산거리에 대한 회귀분석 결과이다. 지진공학 분야에서는 광대역 주파수를 갖는 지진파에 대해 주파수 별로 지진원으로부터의 거리에 따른 주파수에 무관하게 환산거리에 따라 응답스펙트럴



(a) Response spectra of vertical component



(b) Response spectra of tangential component



(c) Response spectra of radial component

그림 2. Response spectra of blast-induced ground motion with 5% damping

응답스펙트럴 속도를 추정하나 본 연구에서는 주파수의 최대값인 최대응답스펙트럴 속도를 예측

주)  $\frac{\text{구조물증폭}(2) \times 31.2 \text{ mm/sec}}{\text{응답스펙트럼증폭계수}(10) \times (2\pi 10 \text{ Hz})}$

하였다. 여기서는 CAV, 최대지반가속도 및 속도는 발파진동 시간-이력의 수평성분 벡터합을 이용하여 계산하였다. 또한 CAV는 2절에 서술된 바와 같이 0.025g 이상의 지반운동가속도에 대해서만 계산되어야 하나 본 연구에서는 최저 한계치를 정하지 않고 모든 시간-이력을 사용하였다. 이렇게 계산된 CAV 자료를 이용한 환산거리별 회귀분석 결과는 다른 지반운동 인자와 비슷하게 높은 상관계수(0.9 이상)를 갖는 것으로 나타났다.

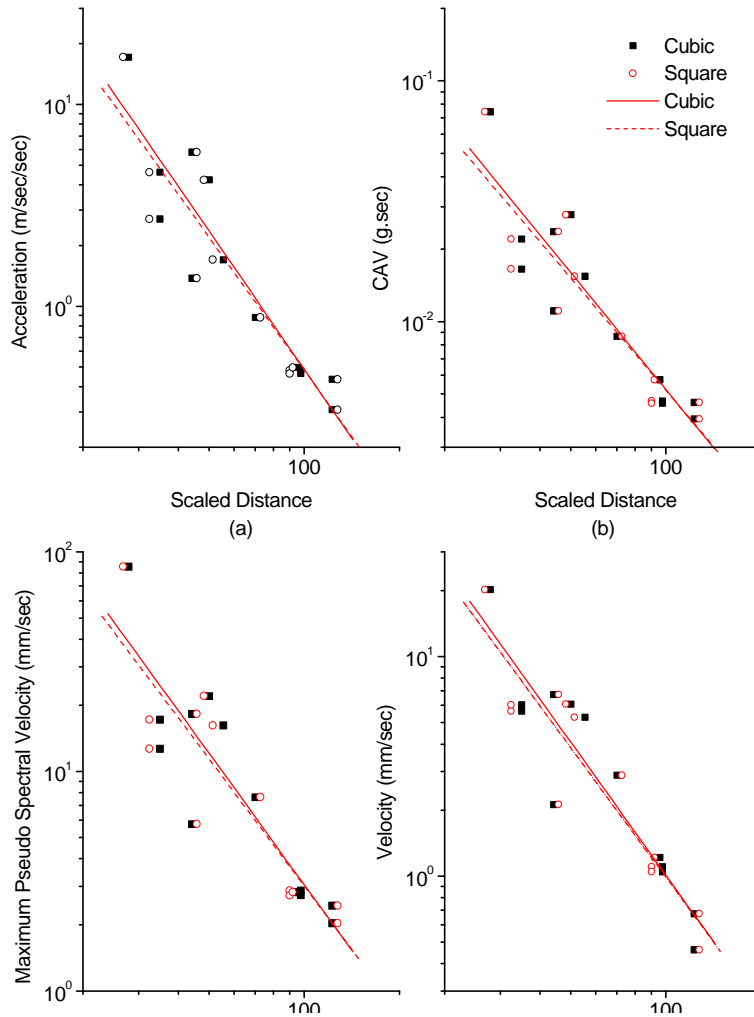


그림 3. Results of regression analyses for various ground motion measures

#### 4.3 발파진동 최대응답스펙트럴 속도 추정

그림 4의 ■는 발파진동 계측자료를 이용하여 계산된 환산거리에 따른 5% 감쇠 최대응답스펙트럴 속도의 최대지반가속도에 대한 비로 정의되는 속도경계 증폭계수(amplification factor for pseudo response velocity)를 도시한 그림이다. 이때 환산거리(SD)는 다음 식으로 정의된다<sup>3)</sup>.

$$SD = \frac{R(\rho c^2)^{1/3}}{W^{1/3}} \times 10^3 \quad (ft^{1/3}) \quad (2)$$

여기서  $R$ 은 폭원으로부터의 거리(ft),  $\rho$ 는 암반의 밀도(lb/ft<sup>3</sup>),  $c$ 는 암반의 속도(ft/sec),  $W$ (lb)는 장약량을 의미한다. 본 연구의 시험발파가 수행된 현장 암반의 밀도( $\rho$ )는 2.54 g/cm<sup>3</sup>로 가정하고 속도는 계측된 발파진동 시간-이력의 센서간 초동시간 차를 이용하여 추정된 5,020 m/sec<sup>2</sup>값을 사용하였다. 그림 4의 선 A, B는 각각 경험적으로 제시된<sup>3)</sup> 속도경계 증폭계수의 상한치와 하한치를 의미한다. 그림 4에서 나타난 바와 같이 계측된 자료의 속도경계 증폭계수가 경험적으로 제시된 속도경계 증폭계수의 상한치(그림 4 선 A) 이하에 분포하고 있음을 알 수 있다. 이때 상한치는 지발 발파에 대한 적합 곡선이다. 일반적인 발파진동 계측 장비에는 최대응답스펙트럴 속도를 표시하지 못하나 경험적으로 제시된 속도경계 증폭계수의 상한치를 최대지반속도에 적용함으로써 보수적인 최대응답스펙트럴 속도의 값을 추정할 수 있다. 속도경계 증폭계수의 상한치(그림 4 선 A)는 (3)식과 같이 나타난다. 그림 5는 계측된 발파진동 자료를 이용하여 얻어진 최대응답스펙트럴 속도 예측식(그림 5 실선)과 경험적으로 제시된 속도경계 증폭계수(3)식을 최대지반속도에 곱하여 추정된 최대응답스펙트럴 속도 자료를 이용하여 도출된 발파진동 예측식(그림 5 점선)을 비교한 그림이다.

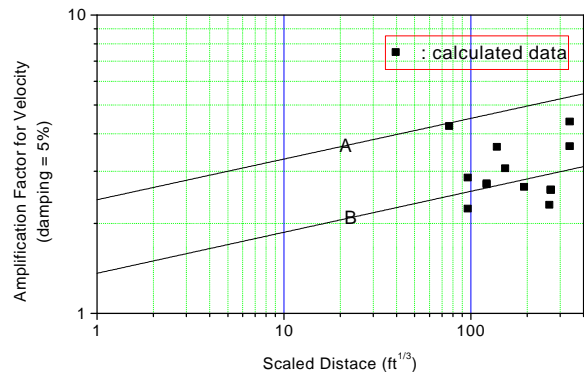


그림 4. Calculated amplification factor for pseudo response velocity based on measured data

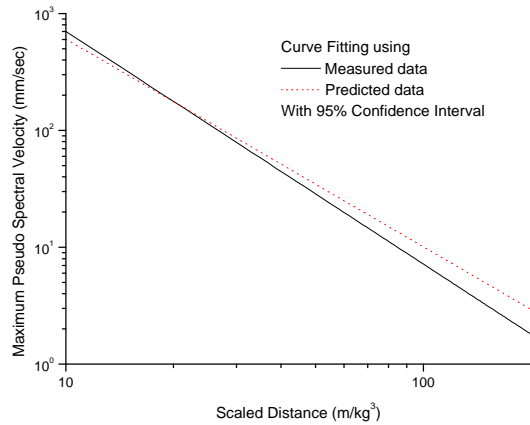


그림 5. Comparison of predictive equations based on field and calculated maximum pseudo velocity data

$$\log_{10} Av = 0.3814 + 0.1364 \log_{10} SD(ft^{1/3}) \quad (3)$$

여기서  $Av$ 는 속도경계 증폭계수이며,  $SD$ 는 (2)식의 환산거리 ( $ft^{1/3}$ )이다.

그림 5에서 알 수 있듯이 (3)식의 속도경계 증폭계수를 최대지반속도에 곱하여 간접적으로 추정된 최대응답스펙트럴 속도자료를 이용한 발파진동 예측식과, 발파진동 시간-이력을 이용하여 계산된 최대응답스펙트럴 속도자료에 기반한 발파진동 예측식이 매우 근사함을 알 수 있다. 이것은 실제 시험발파시 최대지반속도 값만으로도 최대응답스펙트럴 속도 값으로 보수적으로 환산할 수 있음을 나타내고 있는 것이다.

#### 4.4 발파진동 허용수준 분석

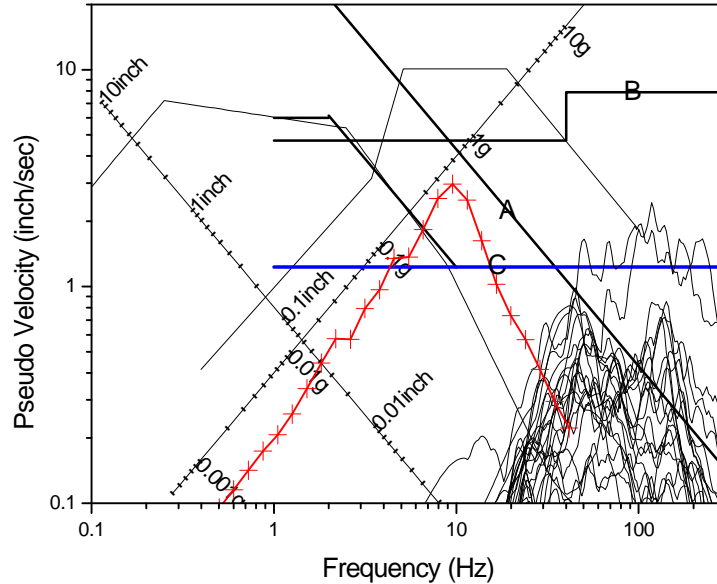


그림 6 Comparison of various criteria limiting the level of blast-induced ground motion

그림 6은 계측된 발파진동의 구조물 응답스펙트럼과 원전에 대해 제시된 발파진동 허용수준 규제기준들을 비교한 그림이다. 기존에 제시된 발파진동 허용수준은 최대지반가속도 및 최대지반속도에 대해 제시되었는데 응답스펙트럼으로 비교하기 위해 발파진동을 단순조화운동으로 가정하고 5% 감쇠에 대한 응답스펙트럼 증폭계수 10을 곱하여 추정하였다. 일반적으로 발파진동은 지진에 비해 주파수 성분이 협대역이므로 발파진동에 대한 단순조화운동 가정은 타당하다. 그림 6에서 선 A는 최대지반가속도 0.07g의 발파진동 허용수준 규제기준, 선 B는 기존에 전력연구원에서 제시된 발파진동 규제기준이며, 선 C는 10Hz의 최대응답스펙트럴 속도로 규제한 발파진동 허용수준이다. 이와는 역으로 선 C에 상응하는 최대지반속도는  $3.12 \text{ mm/sec} (=31.2/\text{단순조화운동증폭}(10))$ 로 대략적으로 환산될 수 있으며 진동에 예민한 중요구조물에 적용되는 발파진동 속도 규제값  $2.54 \text{ mm/sec}$  보다 약간 큰 값을 알 수 있다. 그림 6으로부터 기존의 발파진동 허용수준 규제기준(선 A, B)은 OBE 설계지반 응답스펙트럼(그림 2 선 C, C')과 새로 개정된 OBE 초과응답스펙트럼(그림 2 선 B)을 초과하는 불충분한 규제기준을 의미하나 선 C는 새로 개정된 OBE 초과응답스펙트럼 기준을 만족하는 규제기준임을 알 수 있다. 또한 규제기준선 B는 지반운동의 주요주파수를 40Hz를 기준으로 분리되는 발파진동 규제기준으로 제시되었는데 그림 6에서 나타나 듯이 지반운동이 40Hz를 전후로 전반적으로 분포되므로 시험발파시 이중화된 기준으로 인해 발파진동 예측식을 추정하기 어려운 단점이 있었다. 또한 그림 6에는 1999년 6월 2일 경주변전소에서 계측된 지진기록에 대한 응답스펙트럼이 표시되어 있다(그림 6 +). 이 지진은 그림 6에서 알 수 있듯이 개정된 OBE 초과응답스펙트럼(그림 2 선 B)을 초과하나 CAV 값이  $0.05\text{g} \cdot \text{sec}$ 로서 그림 1의 기준에 따라 OBE를 초과하지 않는 지진으로 분류된다.<sup>9)</sup> 실제로 지진발생후 이루어진 현장조사에



서 변전소에 전혀 피해가 보고되지 않았는데, 발파기준 선 C에 의하면 초과한 것으로 나타나 선 C가 충분히 보수적인 것으로 판단된다. 또한 그림 6에서 경주 지진의 응답스펙트럼이 이상에서 언급한 Dowing의 한계균열 응답스펙트럼(그림 2 선 A)을 초과하지 않음을 알 수 있다.

그림 7은 본 시험발파를 통해 도출된, 발파진동 허용수준 규제기준의 종류에 따른 거리별 지발당 최대허용장약량을 비교한 그림이다. 지발당 최대허용장약량은 발파진동 예측자료의 회귀분석 결과로부터 신뢰도 95%의 안전율을 적용하여 발파진동 허용수준을 초과하지 않도록 결정하였다. 또한 최대허용장약량은 자승근과 삼승근 환산거리 추정식에서 구해진 값 중에서 작은 값으로 결정하였다. 그림 7에서 보여주는 바와 같이 CAV 0.16g·sec 발파진동 허용수준의 규제기준이 가장 비제한적인 것으로 나타났으며 그림 6의 B, C, A 발파진동 허용수준 규제기준 순서로 비제한적이었다. 예로서 폭원으로부터 터빈빌딩까지의 거리인 310m에 대한 사용가능 최대허용장약량은 CAV 0.16g·sec로 제한한 경우 365kg이며 기존에 전력연구원이 제시한 최대지반속도 20 mm/sec(그림 6 선 B)로 규정한 경우 102kg, 최대응답스펙트럴 속도 31.2 mm/sec(그림 6 선 C)로 규정한 경우 44.1kg이었으며 최대지반가속도 0.07g(그림 6 선 A)로 제한한 경우는 6.17kg로서 제일 작았다. 특히 (3)식을 이용하여 간접적으로 계산된 최대응답스펙트럴 속도 자료를 이용하여 발파진동 예측식을 추정하고 사용가능 최대허용장약량 계산에 적용한 경우 실제 최대응답스펙트럴 속도 자료를 이용하여 얻어진 최대허용장약량 44.1kg과 유사하나 이보다 보수적인 값인 36.6kg으로 추정되었다.

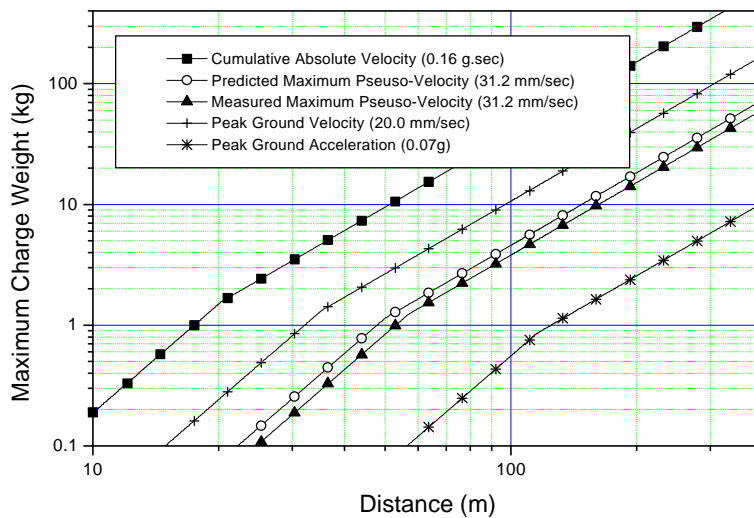


그림 7. Comparison of maximum charge weights according to ground motion vibration limit criteria

개정된 OBE 초과응답스펙트럼(그림 2 선 B 참조)은 10Hz이하의 주파수에 대해서만 규제를 하고 있는데 발파진동은 대개 10Hz 이상의 주파수를 갖고 있으므로 새로운 OBE 초과응답스펙트럼은 발파진동 규제시 고려할 필요가 없으며 또다른 OBE 초과기준인 CAV 0.16g·sec의 발파진동 허용수준 만으로 규제하면 충분하다. 그러나 그림 6의 선 C와 같이 새로운 OBE 초과응답스펙트럼을 보수적으로 만족하며, CAV 허용수준 보다는 제약적인 최대응답스펙트럴 속도로 규제함으로

써 그림 7의 ■ 선과 ▲선의 비교로 나타난 바와 같이 최대허용장약량 사용 측면에서 충분한 안전율을 갖고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

지금까지 원전에 적용된 발파진동 허용수준은 구조물의 특성과 관련된 응답스펙트럴 값으로 규정되지 않고 있어, 내진설계 기준과 부합되지 않는 비합리적으로 보수적인 값이 설정되었으나, OBE 초과기준이 미국에서 개정되고 국내에서도 제정이 예고됨에 따라 최대응답스펙트럴 속도(maximum pseudo response velocity)로 합리적으로 규제할 수 있게 되었다. 개정된 OBE 초과기준 중 하나인 OBE 초과응답스펙트럼(그림 2 선 B)을 만족하는 새로운 발파진동 허용수준으로는 10Hz에서의 5% 감쇠 응답스펙트럴 가속도 0.2g에 대한 최대응답스펙트럴 속도 31.2 mm/sec(그림 6 선 C)가 제시되었으며 영광 5,6호기 비상원수조 축조 공사 시험발파시 계측된 발파진동의 응답스펙트럼과 비교하였다. 시험발파시 얻어진 발파진동 계측자료를 이용하여 최대응답스펙트럴 속도와 또다른 OBE 초과기준 지반운동 인자인 CAV에 대해 환산거리에 따른 발파진동값을 회귀분석한 결과 최대지반가속도, 최대지반속도와 마찬가지로 높은 상관계수를 나타내었다. 회귀분석을 통해 얻어진 상기 발파진동 예측식을 이용해 CAV 0.16g·sec 발파진동 허용수준과 최대응답스펙트럴 속도 발파진동 허용수준 31.2 mm/sec에 대해 거리별 지발당 최대허용장약량을 비교한 결과, 발파시 CAV 허용수준은 큰 제약조건으로 작용하지 않았고 OBE 초과응답스펙트럼을 만족하는 최대응답스펙트럴 속도 규제 만으로도 CAV 허용수준을 만족하는 충분히 보수적인 발파진동 제한 기준으로서 새로 개정된 OBE 초과기준에 부합됨을 알았다.

한편 현재 현장에서 운용되고 있는 발파장비는 최대응답스펙트럴 속도 계산이 불가능하므로 실험적으로 알려진 환산거리에 따른 응답스펙트럴 속도 증폭계수값을 이용하여 간접적으로 계산할 수 있는 방법을 제시하였으며 이 방법을 이용하여 최대지반속도로부터 최대응답스펙트럴 속도를 예측한 결과 실제 최대응답스펙트럴 속도치와 매우 유사한 것으로 나타났다.

이상에서는 발파진동과 지진에 의한 지반진동을 동일하게 가정하였으나, 발파진동은 지진과 달리 반복하중의 특성을 갖고 있어 실제 발파자료를 통해 본 연구에서 제시된 발파진동 허용기준에 대한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 기술시방서 CP-C1, D.7 Blasting and Blast Monitoring.
2. 전력연구원, 발파진동이 구조물에 미치는 영향평가(I), 1995,
3. 양형식, 발파진동학, 구미서관, pp. 78-88, 1992.
4. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants", 1973.
5. Jack R. Benjamin and Associates, Inc., Electric Power Research Institute, A Criterion for Determining Exceedance of the Operating Basis Earthquake, 1988.

6. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Pre-Earthquake Planning and Immediate Nuclear Power Plant Operator Postearthquake Actions", 1997.
7. T.F. O'Hara and J.P. Jacobson, *Electric Power Research Institute, Standardization of the Cumulative Absolute Velocity*, 1991.
8. Anil K. Chopra, *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, 1995.
9. 신진수, 이종립, 장천중, "1999년 6월 2일 경주 지진의 스펙트럼 특성", 한국지진공학회 추계학술발표회 논문집, pp.37-43, 1997.