

PPV, PVS에 의한 지반진동 허용기준의 설정에 관한 고찰

최병희 · 류창하¹⁾ · 이경진 · 양형식²⁾

1. 서론

제어발파에는 '제어'를 필요하게 만든 단초가 되는 보안물건이 있게 마련이다. 보안물건이 없다면 구태여 비경제적이고 비효율적인 제어발파를 사용할 필요가 없기 때문이다. PPV나 PVS를 가지고 발파를 설계 및 관리한다는 것은 보안물건에 대한 규제기준에 맞추어 제어발파를 설계 및 관리한다는 것을 의미한다. 따라서 제어발파의 전체과정에서는 항상 보안물건에 대한 허용기준을 함께 고려하여야 한다.

구조물에 대한 지반진동 허용기준과 관련하여 여러 국가나 연구자들이 제안하고 있는 '일반적인' 기준에서는 보안물건에 대한 허용수준(허용치)과 그 잣대(입자변위, 입자속도, 입자가속도 등)가 함께 규정되어 있다. 특히, 구조물 손상에 대한 평가척도로 많이 사용되는 입자속도의 경우에는 허용수준에 대한 잣대를 PPV 또는 PVS로 세분하여 규정하고 있다. 입자속도를 PPV나 PVS로 세분하는 것은 구조물의 손상이 PPV와 관련이 있다는 USBM의 연구결과들을 근거로 한다.

이에 비해 우리나라의 경우에는 대부분의 지방서 등에서 허용기준을 막연히 '입자속도'로만 규정하고, PPV나 PVS로는 세분하지 않고 있다. 그 결과, 이 '입자속도'는 사람에 따라 PPV나 PVS의 어느 쪽으로든 해석이 가능하게 됨으로써 발파의 설계나 관리과정에서 양자를 모두 고려하는 우리나라 특유의 '관습적인' 방법이 생겨났으며, 방법의 적용과정에서는 적지 않은 혼란이 일어나기도 하였다.

본 논문에서는 PPV와 PVS가 제어발파의 설계 및 관리과정에서 어떻게 활용되는지를 '일반적인' 방법과 국내의 '관습적인' 방법으로 나누어 살펴봄으로써 구조물에 대한 지반진동 허용기준을 올바르게 설정하는데 도움을 주고자 하였다.

2. 용어의 정의

본 논문에서 용어는 실무적으로 정의한다. 먼저, PPV(peak particle velocity)란 '지반진동(ground vibration)을 입자속도(particle velocity)로 측정하였을 때 직교하는 세 방향의 측정 성분($x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, t =시간)별 최대진폭'으로 정의하며, 이들을 각각 L , T , V 로 표시한다. 따라서 3축 진동계로 측정하면 다음과 같은 3개의 PPV 값을 얻게 된다:

- 진행방향[반경방향] 수평성분: L
- 진행방향에 직교하는 수평성분: T

1) 한국지질자원연구원

2) 전남대학교

- 연직성분: V

또, 이들 세 개의 PPV 값들 가운데 가장 큰 값은 다음 식 (1)과 같이 정의하며, 이를 간단히 $\max PPV$ (maximum PPV)라 부르기로 한다.

$$\max PPV = \max(L, T, V) \quad (1)$$

최대의벡터합(peak pseudo vector sum)은 '지반진동의 세 측정성분들($x(t)$, $y(t)$, $z(t)$)의 PPV 값들(L , T , V)의 벡터합(vector sum)'을 말한다.

$$PVS_{PSEUDO} = \sqrt{L^2 + T^2 + V^2} \quad (2)$$

최대실벡터합(peak true vector sum)은 '지반진동의 세 측정성분들($x(t)$, $y(t)$, $z(t)$)을 샘플링 시간간격 단위로 실시간(real-time) 벡터합한 값들 중에서 최대값'으로 정의한다. 다음 식 (3)에서 m 은 샘플링 회수이다.

$$PVS_{TRUE} = \max(\sqrt{x(t_i)^2 + y(t_i)^2 + z(t_i)^2}) \quad (3)$$

$(i = 1, 2, \dots, n)$

Dowding(1996)이 지적한 바와 같이 실험적으로 구조물의 손상은 PPV 값 하나로 평가하므로 최대의벡터합에서 PPV 값을 3개까지 사용하는 것은 당위성이 없다. 반면, 최대실벡터합은 $\max PPV$ 가 나타나는 시점에 얻어지는 경우가 많으므로 PPV와 마찬가지로 허용수준의 잣대로 사용할 수 있다. 단순히 PVS(peak vector sum)라 하면 최대실벡터합을 지칭한다.

벡터합 관련용어에 대한 유의사항

벡터합(vector sum)에 대한 용어는 연구자들마다 약간씩 서로 다르게 사용하고 있기 때문에 혼동을 피하기 위하여 사용상의 주의 사항을 간략히 요약하였다.

본 논문에서는 의미를 명확히 하기 위하여 최대의벡터합과 최대실벡터합이란 용어를 사용하였으나 다음 표 1에 보인 바와 같은 다른 연구자들의 용어도 모두 같은 뜻으로 사용할 수 있다. 또, 연구자에 따라서는 최대실벡터합도 PPV의 일종으로 보는 견해도 있으며, 영국의 국가표준서(BS 7385, 1993)에서는 성분별 최대속도를 'peak component particle velocity'로 정의하고, 최대실벡터합을 PPV로 정의하고 있다. 이는 최대실벡터합도 지반운동의 속도(그것이 측정치이든 계산치이든 상관하지 않고)의 시간이력(time history)으로 표시할 수 있으므로 그 피크치는 역시 PPV라는 견해이다. 이 외에도 여러 가지 용례와 해석이 있겠으나 본 논문에서는 의미를 명확히 하기 위해 벡터합과 PPV는 서로 구분되는 것으로 정의하였다.

표 1. 벡터합에 대한 용어의 정리

제안자	PVS_{PSEUDO}	PVS_{TRUE}
Siskind	의벡터합 (pseudo vector sum)	실벡터합 (true vector sum)
Dowding	최대벡터합 (maximum vector sum)	실벡터합 (true vector sum) 최대실벡터합 (peak true vector sum)
DIN 4150*	최대의벡터합 (peak pseudo vector sum)	-

*1986년 개정 이전의 DIN 4150을 말함.

3. 국내외 허용기준에서의 PPV와 PVS

산업발파로 발생하는 지반진동에 의한 구조물의 손상(damage) 평가에 입자속도의 사용을 처음으로 제안한 것은 Duvall과 Fogelson(1962)에 의한 미광무국 조사보고서 5968(USBM RI 5968)이다. RI 5968은 또한 안전수준(safe level)으로서 PPV 2 in/s (5 cm/s)를 제안하였으며, 이후 오랫동안 이 기준이 적용되었다.

하지만 RI 5968의 획일적인 2 in/s 기준은 적용과정에서 논란이 되었으며, 이를 보완하여 나온 것이 Siskind 등(1980)의 USBM RI 8507이다. RI 8507은 지반진동과 구조물 손상에 관한 실험적인 연구보고서로 널리 알려져 있으며, '실금이나 표면균열'(hairline or cosmetic cracks)의 발생을 방지하는 데 지반진동의 주파수(frequency)를 토대로 한 제어를 권고하고, 저주파로 갈수록 규제정도를 더 엄격하게 설정한 것을 특징으로 한다.

RI 8507의 주요 연구결과들은 일부내용이 조정된 채로 1983년 미국 노천채광청(OSM)의 규제기준으로 수용되었으며, 이후 여러 나라의 규제기준이나 허용기준의 설정에도 커다란 영향을 끼쳤다. OSM은 절대거리별 PPV 규제수준이나 이를 토대로 한 환산거리식에 따른 규제기준을 제정함으로써 지반진동을 보다 유연하게 관리할 수 있도록 하고 있다(Atlas Power Company, 1987).

독일의 표준인 DIN 4150은 건물 내의 사람이 느끼는 진동에 대한 기준과 구조물에 대한 기준으로 구분되어 있다. DIN 4150은 당초에는 PVS_{PSEUDO} 를 채택하고 있었으나 1986년에 주파수 대역별로 허용수준을 새롭게 규정하면서 PPV를 채택하였다. DIN 4150은 1970년대에는 최대의벡터합 기준으로 0.2 cm/s 정도로 허용수준을 매우 낮게 설정함으로써 발파작업에 많은 지장을 초래한 것으로도 유명하며, 1986년도의 개정된 기준에서는 PPV 기준으로 0.3 cm/s까지 완화하였다.

Dowding(1996)은 허용수준에 따른 지반진동의 관리문제와 관련한 가이드라인에서 현장에서 측정된 세 개의 PPV 값들 가운데 어느 하나라도 허용수준의 80%를 넘어서면 즉시 발

파를 중단하고, 100%를 넘어서면 천공작업을 포함한 모든 발파관련 작업들을 중단하도록 권고하고 있다.

우리나라의 경우에는 발파진동(blast vibration)의 관리를 위한 전문성 있는 규제법규가 없어 발주처별로 서로 다른 기준을 적용해왔다. 하지만 국내에서 제안된 거의 모든 기준에서는 PPV나 PVS의 구분이 없이 단순히 '입자속도'로만 규정하고 있다.

이상과 같이 세계적으로는 PPV를 규제기준으로 많이 사용하고 있으며, 국가에 따라서는 PVS나 변위를 사용하기도 한다. 이처럼 여러 나라들에서 PPV나 PVS 등이 규제기준으로 사용되고 있음은 이들 중 어느 하나만을 사용하여도 제어발파의 설계 및 관리가 가능함을 의미한다. 그런데 우리나라의 경우에는 유독 '입자속도'로만 규정함으로써 발파의 설계나 관리 과정에서 PPV와 PVS를 모두 고려하는 특유의 '관습적인' 방법이 생겨나게 되었다.

4. 제어발파의 설계 및 관리과정에서의 PPV와 PVS

지금까지 우리나라에서는 PPV를 기준으로 설계를 하면 PVS 설계에 비해 더 낮은 진동수준을 예측하므로 그만큼 장약량을 많이 쓰게 되어 발파시 지반진동이 크게 나타남으로써 보안물건의 안전이 우려되는 상황이 발생하거나 경우에 따라서는 설계변경도 필요한 것으로 이해하여 왔다. 통상 PVS가 PPV보다 값이 크면서도 지반의 실제적인 운동을 잘 묘사한다고 생각하기 때문에 많은 사람들이 이렇게 생각하고 있는 듯하다.

근래에는 PPV 및 PVS와 관련한 여러 가지 논란이 있기도 하였지만 이와 같은 논란이 생기게 된 근본적인 원인의 하나를 꼽으라면 기존의 지방서 등에서 지반진동에 대한 허용수준을 막연히 '입자속도'로만 규정한 것을 들 수 있다. 우리보다 먼저 규제기준을 제정한 미국이나 독일 등에서는 허용수준을 입자속도로 규정하되, PPV나 PVS 등의 구체적인 잣대로 구분하고 있다. 입자속도를 PPV나 PVS 등으로 구분하는 것은 구조물의 손상이 PPV와 관련이 있다는 USBM의 연구결과들을 근거로 한다.

앞에서 각국의 규제기준에 대한 예를 들면서 PPV 뿐만 아니라 PVS, 변위 등도 규제기준의 잣대가 될 수 있다고 하였다. 하지만 이와 같은 잣대는 지반진동과 구조물 손상과의 인과관계를 가늠하는 척도가 되므로 매우 중요한 의미를 지닌다. 따라서 각국에서는 보다 나은 잣대를 찾기 위하여 국가적인 차원의 연구들을 수행하였으며, 그 대표적인 성과가 미광무국에서 제안한 PPV이다. 다른 예로서, 정밀장비의 경우에는 내진기준으로 가속도를 많이 사용하고 있다.

4.1 일반적인 방법

지반진동에 의한 구조물의 손상을 취급하는 일반적인 규제기준에서는 허용수준과 그 잣대(PPV 또는 PVS)를 명시한다. 그러면 PPV나 PVS의 어느 하나만 가지고도 제어발파의 설계 및 관리가 가능한지를 PPV를 잣대로 사용하는 규제기준의 예를 들어 살펴본다.

[예] 발파현장에 한 채의 가옥이 있는데, 규제기준에서는 이런 가옥에 대하여 지반진동의 허용수준을 $PPV = 1.0 \text{ cm/s}$ 로 규정하고 있다고 가정하자. 그러면 이 가옥은 $PPV = 1.0 \text{ cm/s}$,

곧 PVS = 1.7 cm/s 이하의 지반진동에 대해서는 안전하다는 것을 의미한다. 즉, PPV가 1.0 cm/s일 때 PVS가 정확히 1.7 cm/s 인지는 모르지만 허용수준이 미리 결정되어 있다는 것은 PVS가 얼마이든 이 가옥은 PPV = 1.0 cm/s라는 조건을 전제로 이미 안전을 확보하고 있다는 것을 의미한다. 실제로 PPV와 PVS는 항상 순서쌍과 같이 연동하며, 식 (2)나 (3)과 같이 PVS는 PPV의 함수이다. 따라서 PVS가 취할 수 있는 이론적인 최대값은 PVS_{PSEUDO} 이므로 그 크기는 PPV의 $\sqrt{3}$ 배까지로 한정된다.

이제 이 현장에서 소규모 시험발파를 통해 K 및 n 값(이 값들은 자승근 또는 삼승근 환산거리를 이용한 회귀모형에서 절편 및 기울기를 말함)을 얻었다고 하면 주어진 허용수준인 PPV = 1.0 cm/s를 대입하여 환산거리식($D/\sqrt{W} = const$)을 구할 수 있다. 환산거리식이 구해지면 거리(D)에 따라 사용할 수 있는 최대 지발당 장약량(W)이 결정되므로 제어발파의 설계와 시공이 가능해진다.

시공 중에는 계측을 수행하므로 PPV가 항상 1.0 cm/s 이하가 되도록 관리해 준다면 PVS는 자동적으로 1.7 cm/s 이하로 유지될 수밖에 없다. 따라서 이 가옥에는 아무런 피해를 주지 않고 무사히 공사를 끝마칠 수 있게 된다.

위의 예는 허용수준을 PVS = 1.7 cm/s로 설정하여도 마찬가지로 성립한다. 즉, 어느 것을 선택하든 둘은 (PPV, PVS) 꼴의 순서쌍과 같이 항상 연동하기 때문에 규제기준으로 선택된 잣대만을 가지고 발파를 설계 및 관리한다면 아무런 문제가 없다.

제어발파의 설계를 위하여 지반진동을 예측할 때에는 통계적으로 추정하는 방법을 사용한다. 통계처리 과정에서는 규제기준의 잣대가 PPV인 경우에는 PPV 측정치를, PVS인 경우에는 PVS 계산치를 표본으로 사용하여 회귀분석을 수행함으로써 미래의 지반진동의 발생수준을 통계적으로 추정한다. 그런 다음, 이 추정된 수준이 허용수준을 넘지 않도록 하는 환산거리식을 얻어서 적정 장약량을 설계한다.

발파의 관리를 위하여 지반진동의 발생수준이 적법한가를 판단할 때에도 규제기준의 잣대가 PPV이면 PPV 측정치를, PVS이면 PVS 계산치를 읽어서 그 값이 규정된 허용수준을 만족하는지를 판단하면 된다. 예를 들어, 잣대가 PPV인 경우에는 PPV 측정치가 항상 1.0 cm/s 이하로 나타나는지만 관찰하면 충분하며, PVS 값은 신경 쓸 필요가 없다. 반대로 잣대가 PVS인 경우에는 PVS 값이 항상 1.7 cm/s 이하로 나타나는지만 관찰하면 되며, PPV 값은 신경 쓸 필요가 없다.

잣대가 설정되지 않은 경우

만일 규제기준의 입자속도 허용치에 잣대(PPV 또는 PVS)가 붙어 있지 않다면 발파기술자가 잣대를 결정할 수밖에 없다. 따라서 기술자는 자신의 주관에 따라 시방서의 '입자속도'를 PPV, PVS_{TRUE} 또는 PVS_{PSEUDO} 등으로 해석할 것이다. 예를 들면, 가옥의 손상이 PPV와 연관이 깊다고 생각하는 사람은 PPV를, PVS라고 생각하는 사람은 PVS를 각기 잣대로 선택할 것이다.

따라서 일반적으로는, (i) 가장 먼저 잣대부터 정하고, (ii) 정해진 잣대로 지반진동을 측정하고, (iii) 측정된 자료를 통계적으로 처리하여 지반진동의 발생수준을 예측하고, (iv) 정해진 잣대로 측정된 측정치가 허용수준을 넘지 않도록 관리하면 된다. 여기서, (i) 내지 (iii)은

발파의 설계단계, (iv)는 관리단계를 말한다.

그러므로 이런 경우에는 잣대를 법규가 아니라 사람이 결정하지만 일단 잣대만 결정된다면 그 후의 모든 설계 및 관리 과정은 잣대가 명시된 '일반적인' 방법과 동일해진다.

4.2 국내의 관습적인 방법

우리나라의 각종 지방서 등에서는 허용수준은 있지만 그 잣대가 막연히 '입자속도'로만 되어 있기 때문에 사람에 따라 이 '입자속도'를 PPV나 PVS_{TRUE} 심지어 PVS_{PSEUDO} 등으로도 해석할 소지가 있다. 또, 개별 기술자가 잣대를 결정하게 됨으로써 잣대를 결정하는 방법도 문제가 될 수 있다.

국내의 관습적인 방법에서는 PPV와 PVS 중에 어느 쪽이 구조물 손상과 더 깊은 관계가 있는지를 판단하기 보다는 가옥의 상태나 현장조건에 따라 지반진동의 발생수준을 낮게 예측하느냐 높게 예측하느냐에 따라 PPV나 PVS를 선택한다. 예를 들어, 발파를 설계할 때 가옥의 상태가 좋으면 PPV 예측식을 적용하고, 가옥의 상태가 좋지 않으면 보수적인 견지에서 PVS 예측식을 적용함으로써 보다 높은 수준의 진동이 발생할 상황까지도 감안한다. 따라서 지방서 등에서 어떤 가옥에 대해 막연히 규정하고 있는 입자속도 허용치=1.0 cm/s를 PPV 예측식과 PVS 예측식에 각각 대입하면 이들의 환산거리식이 서로 달라질 수밖에 없다. 환산거리식이 달라지면 설계장약량이 달라지므로 앞에서 언급한 바와 같은 보안물건의 안전에 대한 우려나 추가적인 설계변경의 필요성 등이 대두되는 것이다.

예를 들어, 국내의 관습적인 설계방법에서 가옥과 같은 보안물건에 허용수준을 설정하는 경우를 고려해보자. 즉, (i) PPV나 PVS 중 어느 하나를 선택하고, (ii) 가옥에 대한 허용수준을 설정한다. 그런데 관습적인 방법에서는 PPV나 PVS가 단순히 지반진동의 높고 낮음을 예측하는 용도로만 사용되므로 PPV의 170%는 PVS의 100%와 마찬가지로 된다(이론적으로 PVS는 PPV의 최대 $\sqrt{3}$ 배까지 가능하나 실제로는 물론 이보다 훨씬 작은 값으로 관찰됨). 따라서 (a) PPV를 잣대로 선택하고 가옥에 대한 허용수준을 1.0 cm/s로 설정하는 경우와 (b) PVS를 잣대로 선택하고 허용수준을 1.7 cm/s로 설정하는 경우 사이에 별다른 차이가 없게 된다.

그러므로 복잡하게 PPV나 PVS를 선택해 보아도 결국에는 처음부터 한 개의 잣대를 사용하는 '일반적인' 방법과 다를 바가 없으며, 오히려 혼란을 일으킬 소지만 증가하게 된다. 즉, 잣대와 상관없이 결국에는 보안물건에 대한 허용수준을 얼마로 설정하느냐의 문제로 귀결됨에도 불구하고 제어발파의 설계, 시공 및 관리의 전체단계에 걸쳐 서로 다른 기준을 적용할 가능성을 열어둠에 따라 혼란의 소지만 증가하게 되는 것이다.

또한, 관습적인 방법에서는 PPV와 PVS를 모두 고려하기 때문에 구조물의 손상정도를 평가하는 허용수준의 잣대가 수시로 바뀌는 문제가 있다. 즉, 같은 종류의 가옥이라 하더라도 어떤 경우에는 PPV를, 다른 경우에는 PVS를 적용하게 되는 것이다. 달리 말하면, 같은 종류의 보안물건임에도 어제는 OSM의 잣대를, 오늘은 DIN 4150의 잣대(물론, 1970년대 DIN 4150의 잣대인 PVS_{PSEUDO} 를 말함)를 적용하는 셈이 된다. 그러므로 관습적인 방법은 여러 가지 영향요소를 고려해야 하는 연구단계에서는 적합하지만 사용단계에서는 '일반적인' 방법에 비해 단점은 있어도 장점은 발견하기 어렵다. 따라서 앞으로는 간편하고 합리적인 제어발파 방법으로서 '일반적인' 방법을 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

제어발파의 관리문제와 관련하여, 국내의 관습적인 방법에서는 시방서 등에 규정되어 있는 '입자속도'를 주로 PVS_{TRUE} 로 해석하여 관리기준으로 많이 사용해오고 있다. 이는 민원이 빈발하고 있는 국내의 발파현실을 반영한 것이라 하겠다.

5. 결론 및 제언

본 논문에서는 제어발파의 설계 및 관리 과정에서 허용기준이 어떠한 역할을 하는지를 PPV와 PVS를 중심으로 간략히 고찰함으로써 국내의 관습적인 방법이 지니고 있는 허실을 밝혀내어 올바른 허용기준을 수립하는 데 도움이 되고자 하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다:

1) PPV와 PVS는 동전의 양면과도 같이 항상 연동하는 것이므로 적절한 허용수준(허용치)만 설정된다면 원칙적으로는 어느 것이든 기준으로 사용할 수 있다.

2) 일반적인 제어발파의 설계 및 관리 방법에서는 법규나 시방서 등에 허용수준과 그 잣대(PPV 또는 PVS)를 명시하게 되며, 이런 경우에는 제어발파의 설계 및 관리의 전체 과정을 통하여 규정된 잣대만을 일관되게 사용하면 된다. 법규나 시방서에 잣대가 명시되지 않은 경우나 법규나 시방서가 없는 경우에는 발파기술자가 잣대를 설정한다. 일반적인 방법에서는 허용기준을 $PPV=1.0$ cm/s 또는 $PVS=1.7$ cm/s와 같이 설정한다.

3) 국내의 관습적인 설계 및 관리 방법은 허용치를 설정하기에 따라 일반적인 방법과 다를 바가 없음에도 설계 및 관리 과정에서 PPV와 PVS 양자를 모두 고려함으로써 잣대가 수시로 바뀌고, 방법의 적용이 복잡해지는 단점이 있다. 지금까지 국내의 관습적인 방법에서는 허용기준을 입자속도= 1.0 cm/s와 같이 설정하여 왔다.

4) 국내에서는 오랫동안 관습적인 방법이 사용되어 왔으므로 아직까지 대부분의 시방서나 지침 등에는 허용수준의 잣대가 '입자속도'로만 규정되어 있다. 하지만 앞으로는 허용수준에 대한 잣대를 PPV나 PVS 등의 어느 하나로 통일할 필요성이 있으며, 허용수준도 통일된 잣대에 맞추어 보안물건별로 새롭게 설정하는 것이 바람직할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Atlas Power Company, 1987, Explosives and rock blasting, Atlas Power Company,

- pp.344-348.
2. BS 7385 Part 2, 1993, Guide to damage levels from groundborne vibration.
 3. Dowding, C.H., 1996, Construction vibrations, Prentice Hall, p.37, pp.437-441.
 4. Duvall, W.I. and D.E. Fogelson, 1962, Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations, USBM RI 5968, pp.13-16.
 5. Siskind, D.E., M.S. Stagg, J.W. Kopp, and C.H. Dowding, 1980, Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting, USBM RI 8507, pp.58-60.