

제어발파의 설계 및 관리 과정에서의 PPV와 PVS의 역할

최병희^{1)*}, 류창하²⁾, 황현주³⁾, 최용근⁴⁾, 안명석⁵⁾

The Role of PPV and PVS in Controlled Blasting

Byung-Hee Choi, Chang-Ha Ryu, Hyun-Joo Hwang, Yong-Kun Choi and Myung-Seog Ahn

Abstract The safe level for residential structures has usually been prescribed as just 'particle velocity' in various specifications in Korea. It implies that there is a possibility of interpreting the 'particle velocity' as the PPV (Peak Particle Velocity), PVS (Peak Vector Sum), or something else, depending on the interpreter. As a result, there have always been some difficulties in both designing a controlled blasting and controlling the blast-induced ground vibrations. This paper is intended to show what the role of the safe level criteria such as PPV or PVS is, and also how we should use the concept of the scaled distance equation in a controlled blast design. The paper also emphasizes the importance of the allowable level for various residential structures and its uses in each stage of the controlled blast design.

Key words Controlled blasting, Particle velocity, PPV, PVS, Allowable level

초록 우리나라에서는 제어발파와 관련된 대부분의 시방서 등에서 허용기준을 '입자속도'로만 규정하고 PPV나 PVS의 세부적인 잣대로는 구분하지 않고 있다. 그 결과, 이 '입자속도'는 PPV나 PVS 등의 어느 쪽으로든 해석이 가능하게 됨으로써 이들을 모두 고려하는 우리나라 특유의 관습적인 방법이 생겨나게 되었다. 원래 PPV나 PVS 등은 지반진동과 구조물 손상과의 인과관계에 대한 연구결과로부터 제안된 것으로, 일반적으로는 이를 가운데 어느 하나를 허용수준(허용치)의 잣대로 선택하여 사용하므로 우리나라의 관습적인 방법과 대비된다. 이런 맥락에서 본 논문에서는 제어발파의 설계 및 관리에 관한 기본개념을 허용기준을 중심으로 고찰함으로써 PPV나 PVS 가운데 어느 하나를 잣대로 사용하는 '일반적인 방법'과 양자를 모두 사용하는 '관습적인 방법'을 서로 비교해 보았다. 그 결과, 관습적인 방법은 허용수준을 설정하기에 따라 일반적인 방법과 다를 바가 없음에도 방법의 적용이 복잡하고, 잣대가 수시로 바뀌어 혼란의 소지가 높은 것으로 나타났다. 사실 관습적인 방법은 여러 가지 영향요소를 고려해야 하는 연구단계에서는 필요한 방법이지만 현장적용 단계에 들어가서는 '일반적인 방법'에 비해 단점은 있어도 장점은 발견하기 어렵다. 따라서 앞으로는 간편하고 합리적인 제어발파 방법으로서 '일반적인 방법'을 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

핵심어 제어발파, 입자속도, PPV, PVS, 허용수준

1. 서 론

제어발파에는 '제어'를 필요하게 만든 단초가 되는

¹⁾ 한국지질자원연구원 선임연구원

²⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원

³⁾ 협승엔지니어링 대표이사

⁴⁾ (주)지오제니컨설팅트 상무이사

⁵⁾ 동서대학교 겸임교수

* 교신저자 : bhchoi@kigam.re.kr

접수일 : 2008년 6월 30일

제재 승인일 : 2008년 7월 20일

보안물건이 있게 마련이다. 보안물건이 없다면 구태여 비경제적이고 비효율적인 제어발파를 사용할 필요가 없기 때문이다. PPV나 PVS를 가지고 발파를 설계한다는 것은 보안물건에 대한 허용기준(법적인 규제 기준 뿐만 아니라 개별 기술자가 설정한 설계 및 관리 기준 등을 종칭함)에 맞추어 제어발파를 설계한다는 것을 의미한다. 따라서 제어발파의 설계나 시공, 관리 등의 과정에서는 항상 보안물건에 대한 허용기준을 함께 고려하여야 한다.

일반적으로 여러 국가나 연구자들이 제안한 기준에서는 보안물건에 대한 허용수준(허용치)과 그 잣대(변위, 속도, 가속도 등)가 함께 규정되어 있다. 특히, 구조물의 손상평가에 많이 사용하는 입자속도의 경우에는 허용수준에 대한 잣대를 PPV 또는 PVS로 규정하고 있다. 입자속도를 PPV나 PVS로 구분하는 것은 구조물의 손상이 PPV와 관련이 있다는 USBM의 연구 결과들을 근거로 한다.

이에 비해, 우리나라의 경우 대부분의 시방서 등에서는 허용수준을 막연히 ‘입자속도’로만 규정하고 있으며, PPV나 PVS로는 세분하지 않고 있다. 그 결과, 이 ‘입자속도’는 사람에 따라 PPV나 PVS의 어느 쪽으로든 해석이 가능하게 됨으로써 양자를 모두 고려하는 우리나라 특유의 관습적인 설계방법이 생겨났으며, 방법의 적용과정에서는 적잖은 혼란이 야기되기도 하였다.

본 논문에서는 제어발파의 설계 및 관리 과정에서 허용기준이 어떠한 역할을 하는지를 PPV와 PVS를 중심으로 고찰하였다. 이를 통해 ‘일반적인 방법’과 국내의 ‘관습적인 방법’이 지니고 있는 특징을 서로 비교함으로써 제어발파 방법을 새로이 정립하는 데 도움이 되고자 하였다.

2. 관련용어의 정의

본 논문에서 용어는 실무적으로 정의한다. 학술적인 용어의 정의에 대해서는 참고문헌 등을 참조하면 된다. 먼저, PPV (peak particle velocity)란 ‘지반진동(ground vibration)을 입자속도(particle velocity)로 측정하였을 때 직교하는 세 방향의 측정성분($x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, $t=시간$)별 최대진폭’을 말하며, 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
- 연직성분: V

또, 이들 세 개의 PPV 값을 가운데 가장 큰 값을 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 n 은 샘플링 회수이다.

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

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

다음의 3절에서 자세히 기술한 바와 같이 실증적으로 구조물의 손상은 PPV 값 하나로 평가하므로 최대의벡터합에서 PPV 값을 3개까지 사용하는 것은 당위성이 없다. 반면, 최대실벡터합은 max PPV가 나타나는 시점에 얻어지는 경우가 많으므로 PPV와 마찬가지로 허용수준의 잣대로 사용할 수 있다. 단순히 PVS (peak vector sum)라 하면 최대실벡터합을 지칭한다.

PPV는 변환기 센서(transducer sensor)가 측정한 측정치인 반면, PVS는 측정치로부터 유도한 계산치이다. 즉, 식 (2)의 최대의벡터합은 PPV 값들(L , T , V)로부터 유도한 계산치이며, 식 (3)의 최대실벡터합도 각 방향의 변환기 센서가 측정한 실시간 성분값들($x(t_i)$, $y(t_i)$, $z(t_i)$)로부터 유도한 계산치이다. 따라서 주파수를 고려한 규제기준에서 PVS를 사용하고자 할 경우에는 당해 진동의 최대진폭에서의 주파수를 결정하기 어려운 문제가 발생한다.

근래 상용으로 많이 보급되어 있는 진동계측기(seismograph)는 지반진동의 입자속도를 측정하며, 그 결과를 PPV 및 PVS로 표시하고 있다. 이런 장비들이 표시하는 PPV는 L , T , V 이며, PVS는 최대실벡터합인 PVS_{TRUE} 를 말한다.

벡터합 관련용어에 대한 사용상의 유의점

벡터합(vector sum)에 대한 용어는 연구자들마다 약

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)
DIN 4150*	최대의벡터합 (peak pseudo vector sum)	최대실벡터합 (peak true vector sum)

*1986년 개정 이전의 DIN 4150을 말함.

간씩 서로 다르게 사용하고 있기 때문에 혼동을 피하기 위하여 사용상의 주의 사항을 간략히 요약하였다.

본 논문에서는 의미를 명확히 하기 위하여 최대의 벡터합과 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.

3. 허용수준의 잣대로서의 PPV와 PVS

산업발파로 발생되는 지반진동에 의한 구조물의 손상(damage)을 평가하는 데 입자변위(particle displacement)나 입자가속도(particle acceleration)가 아닌 입자 속도의 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. 실금이나 표면균열은 손상발생의 판단기준이 된다. RI 8507의 주요 연구결과들은 일부내용이 조정된 채로 1983년 미국 노천채광청(OSM)의 규제기준으로 수용되었으며, 이후 여러 나라의 규제기준이나 허용기준의 설정에도 커다란 영향을 끼쳤다.

OSM의 규제기준은 다음 세 가지 방법 중의 하나를 선택하게 함으로써 지반진동을 보다 유연하게 관리할 수 있도록 하고 있다(Atlas Power Company, 1987):

- (i) 절대거리별 PPV 규제수준에 의한 방법
- (ii) 절대거리별 PPV 규제수준에 따라 결정되는 환산거리(scaled distance) 식에 의한 방법
- (iii) 주파수에 따라 PPV 규제수준을 도시한 도표에 의한 방법

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 1970년대에 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 완화

하였다.

Dowding (1996)은 허용수준에 따른 지반진동의 관리문제와 관련한 가이드라인에서 현장에서 측정된 세 개의 PPV 값들 가운데 어느 하나라도 허용수준의 80%를 넘어서면 즉시 발파를 중단하고, 100%를 넘어서면 천공작업을 포함한 모든 발파관련 작업들을 중단하도록 권고하고 있다. 또 이런 상황이 발생하면 다음 발파 전에 적절한 조치를 취하고, 부득이한 경우에는 발파설계를 변경하도록 권고하고 있다.

우리나라의 경우에는 발파진동(blast vibration)의 관리를 위한 전문성 있는 규제법규가 없어 발주처별로 서로 다른 기준을 적용해왔다. 특히, 토목현장에서 설계기준으로 많이 적용하고 있는 입자속도 0.2~0.3 cm/s는 사람이 발만 굴러도 나타날 정도로서 1980년대 서울지하철 건설 당시 문화재급 건물에 대한 영향 평가를 위해 독일의 DIN 4150의 기준(*PVS_{PSEUDO}*를 채택하고 있었던 1970년대 DIN 4150을 말함)을 준용한 것이 시초가 되었다. 하지만 이후 이 기준이 국내의 여러 현장에서 일률적으로 적용되면서 발파작업에 많은 지장을 초래하기도 하였다.

기존에 알려져 있는 허용수준에 대한 잣대들로는 PPV, PVS, 가속도, 변위 등을 들 수 있으나 현재에는 가속도나 변위는 거의 사용되지 않는다. PPV는 지반 진동과 구조물 손상과의 관계에 대한 실험적인 근거가 있으면서 주파수를 잘 반영할 수 있는 특징이 있다. PVS는 지반의 운동을 실제에 가깝게 모사하려는 표현으로 제안되었지만 구조물의 손상관계에 대한 실험적인 근거가 부족하고 최대진폭에서의 주파수를 결정하기 어려운 문제를 안고 있다. 이런 이유 때문에 Siskind (2000)는 지반진동의 관리문제에서 PVS를 명시적으로 배제시키고 있다. 현재에는 주파수 대역 별로 PPV를 적용하는 방법이 세계적으로 많이 사용되고 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 의미하며, 이에 관한 사항은 다음의 4절에서 자세히 기술하였다.

4. 제어발파의 설계 및 관리 방법에 대한 고찰

지금까지 우리나라에서는 PPV를 기준으로 설계를 하면 PVS 설계에 비해 더 낮은 진동수준을 예측하므로 그만큼 장약량을 많이 쓰게 되어 발파 시 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. 아울러 근래 일각에서 일어나고 있는 PPV 및 PVS와 관련된 논란도 이와 비슷한 맥락에서 비롯된 것으로 보인다.

PPV 및 PVS와 관련하여 여러 가지 논란이 생기게 된 근본적인 원인의 하나를 꼽으라면 기존의 시방서 등에서 지반진동에 대한 허용수준을 막연히 ‘입자속도’로만 규정한 것을 들 수 있다. 우리보다 먼저 규제 기준을 제정하였던 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.

앞 절에서 각국의 규제기준에 대한 예를 들면서 PPV 뿐만 아니라 PVS, 변위 등도 규제기준의 잣대가 될 수 있다고 하였다. 하지만 이와 같은 잣대는 지반 진동과 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.

제어발파에는 ‘제어’를 필요하게 만든 단초가 되는 보안물건이 있게 마련이다. 보안물건이 없다면 구태여 비경제적이고 비효율적인 제어발파를 사용할 필요가 없기 때문이다. PPV나 PVS를 가지고 발파를 설계한다는 것은 보안물건에 대한 규제기준에 맞추어 제어발파를 설계함을 의미하며, 구체적으로는 앞에서 언급한 OSM의 발파 설계 및 관리 방법 (ii)의 환산거리식에 의한 방법을 사용하는 것을 가리킨다. 따라서 제어발파의 설계, 시공 및 관리 과정에서는 항상 보안물건에 대한 허용수준을 함께 고려하여야 한다.

일반적으로 각국의 규제기준에서는 허용수준의 잣대로서 PPV나 PVS를 명시하고 있으나 우리나라의 시방서 등에서는 이러한 잣대를 구체적으로 명시하지 않음으로 해서 독특한 설계방법이 생겨나게 되었다. 따라서 아래에서는 제어발파에 대한 (i) 일반적인 설계 및 관리 방법과 (ii) 국내의 관습적인 방법을 서로 비교하여 봄으로써 앞으로 제어발파의 설계 및 관리 방법을 정립하는 데 도움을 주고자 하였다.

4.1 일반적인 설계 및 관리 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] 어떤 현장에 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 $PVS = 1.2 \text{cm/s}$ 이하의 지반진동에 대해서는 안전하다는 것을 의미한다. 즉, PPV가 1.0cm/s 일 때 PVS가 정확히 1.2cm/s 인자는 모르지만 허용수준이 미리 결정되어 있다는 것은 PVS가 얼마인 듯 이 가옥은 $PPV = 1.0 \text{cm/s}$ 라는 조건을 전제로 이미 안전을 확보하고 있다는 것을 의미한다. 사실, 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 $\sqrt{3}$ 배 까지로 한정되며, 실제로는 이보다 더 작은 값으로 많이 나타난다.

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

시공 중에는 계측을 수행하므로 PPV가 항상 1.0 cm/s 이하가 되도록 관리해 준다면 PVS는 자동적으로 1.2 cm/s 이하로 유지될 수밖에 없다. 따라서 이 가옥에는 아무런 피해를 주지 않고 무사히 공사를 끝마칠 수 있게 된다.

위의 예는 허용수준을 $PVS = 1.2 \text{ cm/s}$ 로 설정하여

도 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 지반진동의 높고 낮음을 예측할 때에는 통계적으로 추정하는 방법을 사용한다. 즉, 지반진동의 측정치는 산포되는 특성을 보이므로 진동수준에 대한 참값은 통계적인 방법을 통해 추정해야 할 모수(parameter)가 되기 때문이다. 통계처리 과정에서는 규제기준의 잣대가 PPV인 경우에는 PPV 측정치(통계량(statistic))를, PVS인 경우에는 PVS 계산치(통계량)를 표본(sample)으로 사용하여 회귀분석을 수행함으로써 미래의 지반진동의 발생수준을 통계적으로 추정한다. 그런 다음, 이 추정된 수준이 허용수준을 넘지 않도록 하는 환산거리식을 얻어서 적정 장악량을 설계한다. 물론, 통계적 추정과정에서 예측 구간(prediction interval)을 넓게 설정함으로써 발파의 특성상 측정치가 산포되는 특성을 감안하여도 좋다.

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 1.2 cm/s 이하로 나타나는지만 관찰하면 되며, PPV 값은 신경 쓸 필요가 없다.

규제기준의 잣대를 PPV와 PVS로 각각 설정한 나라들이 있다면 이를 간에는 각국에서 설정한 잣대가 구조물의 손상정도를 얼마나 잘 설명해 주느냐의 차이만 있을 뿐이다. 이런 상황을 두고, 무조건적으로 PVS를 사용하는 나라가 PPV를 사용하는 나라보다 더 엄격한 허용수준을 설정하고 있다고 꼭 해해서는 안 된다.

한편, 위에서는 법이나 시방서에 규정된 규제기준에 대해서만 언급하였지만 이 방법은 일반적인 시험발파나 시공 등의 모든 제어발파의 설계, 시공 및 관리 과정에 마찬가지로 적용된다. 즉, 보안물건에 대한 허용기준이 법적기준이거나 아니면 개별 기술자가 설정한 기준이거나 차이만 있을 뿐 그 개념이나 적용방법은 완전히 동일하기 때문이다.

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.

이처럼 잣대의 선택에 개별 기술자의 주관이 들어간다 하더라도 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 이후의 모든 설계 및 관리 과정은 앞의 잣대가 명시된 일반적인 방법과 동일하다.

4.2 국내의 관습적인 설계 및 관리 방법

위의 ‘잣대가 설정되지 않은 경우’에서도 언급하였지만 우리나라의 시방서 등에서와 같이 허용수준은 되어 그 잣대가 막연히 ‘입자속도’로만 되어 있으면 사람에 따라 이 ‘입자속도’를 PPV나 PVS_{TRUE} , 심지어 PVS_{PSEUDO} 등으로도 해석할 수 있다. 또, 개별 기술자가 잣대를 결정하게 됨으로써 잣대를 결정하는 방법도 문제가 될 수 있다.

우리나라의 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 시방서 등에서 어떤 가옥에 대해 막연히 규정하고 있는 입자속도 허용치 $V_0 = 1.0 \text{ cm/s}$ 를 PPV 예측식과 PVS 예측식에 각각 적용하면 이들의 환산거리식이 서로 달라질

수밖에 없다. 환산거리식이 달라지면 설계장약량이 달라지므로 앞에서 언급한 바와 같은 보안물건의 안전에 대한 우려나 추가적인 설계변경의 필요성 등이 대두되는 것이다.

국내의 관습적인 방법에 대해 보다 자세히 알아보기 위해 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 용도로 사용되므로 PPV의 120%는 PVS의 100%와 마찬가지가 된다(이론적으로는 PVS는 PPV의 최대 $\sqrt{3}$ 배(170%)까지 가능하나 실제로는 이보다 더 작은 값으로 많이 관찰됨). 따라서 (a) PPV를 잣대로 선택하고 가옥에 대한 허용수준을 1.0 cm/s 로 설정하는 경우와 (b) PVS를 잣대로 선택하고 허용수준을 1.2 cm/s 로 설정하는 경우 사이에 별다른 차이가 없게 된다. 그러므로 복잡하게 PPV나 PVS를 선택해 보아도 결국에는 처음부터 한 개의 잣대를 사용하는 ‘일반적인 방법’과 다를 바가 없으며, 오히려 혼란을 일으킬 소지만 증가하게 된다. 즉, 잣대와 상관없이 결국에는 보안물건에 대한 허용수준을 어느 수준으로 설정하느냐의 문제로 귀결됨에도 불구하고 제어밸파의 설계, 시공 및 관리의 전체단계에 걸쳐 서로 다른 기준을 적용할 가능성을 열어둠에 따라 혼란의 소지가 증가하게 되는 것이다.

또한, 관습적인 방법에서는 PPV와 PVS를 모두 고려하기 때문에 구조물의 손상정도를 평가하는 허용수준의 잣대가 수시로 바뀌는 문제점이 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 연구단계에는 적합하겠지만 실제 현장에 적용하는 단계에 들어가서는 ‘일반적인 방법’에 비해 단점은 있어도 장점은 발견하기 어렵다. 따라서 앞으로는 간편하고 합리적인 제어밸파 방법으로서 ‘일반적인 방법’을 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

제어밸파의 관리문제와 관련하여, 국내의 관습적인

방법에서는 시방서 등에 규정되어 있는 ‘입자속도’를 주로 PVS_{TRUE} 로 해석하여 관리기준으로 많이 사용해 오고 있다. 이는 민원이 빈발하고 있는 국내의 발파현실을 반영한 것이라 하겠다.

4.3 환산거리식에 의한 비교

제어발파의 설계 및 관리에 대한 (i) 일반적인 방법과 (ii) 국내의 관습적인 방법 간의 차이를 환산거리식을 사용하여 비교하였다. 예의 가옥이 있는 현장에서 시험발파를 수행하여 얻은 자료를 처리한 결과 PPV 와 PVS 에 대한 예측식이 다음과 같았다고 가정하자.

$$PPV = K_1 (SD)^{-n_1} \quad (4)$$

$$PVS = K_2 (SD)^{-n_2} \quad (5)$$

여기서, 환산거리 $SD = D/\sqrt{W}$ 로 간주한다. 문제를 간단히 하기 위해 식 (4)와 (5)에서 지수 $n_1 = n_2 = n (> 0)$ 으로 가정하면 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$PPV = K_1 (SD)^{-n} \quad (6)$$

$$PVS = K_2 (SD)^{-n} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)에서 $PPV < PVS$ 이므로 계수들 간에는 $K_1 < K_2$ 의 관계가 성립한다.

아울러, 식 (6)과 (7)은 동일한 벌파조건(입지조건, 장약조건, 거리조건)에서 나온 예측식이므로 매개변수인 환산거리(장약조건, 거리조건) SD 를 소거하여 비매개변수 방정식(non-parametric equation)의 형태로 고쳐 쓰면 다음과 같이 된다.

$$SD = \left(\frac{PPV}{K_1} \right)^{-1/n} = \left(\frac{PVS}{K_2} \right)^{-1/n} \quad (8)$$

일반적인 설계방법

(허용수준이 $PPV_0 = 1.0 \text{ cm/s}$, 곧 $PVS_0 = 1.2 \text{ cm/s}$ 로 설정된 경우)

허용수준에 대한 잣대가 PPV 또는 PVS 로 명시되어 있는 경우를 살펴보자. 이 경우에는 발파설계를 위해 지반진동의 수준을 예측할 때나 발파관리를 위해

측정치가 규제기준을 만족하는지 감시할 때 공히 규정된 잣대를 사용한다.

즉, 허용수준이 $PPV = PPV_0$, 곧 $PVS = PVS_0$ 일 때 환산거리 $SD = SD_0$ 라고 하면 위의 식 (8)은 다음과 같이 된다.

$$SD_0 = \left(\frac{PPV_0}{K_1} \right)^{-1/n} = \left(\frac{PVS_0}{K_2} \right)^{-1/n} \quad (9)$$

(i) 허용수준이 PPV_0 이면 지반진동의 수준도 PPV 로 예측 및 관리하므로 식 (6) 또는 (8)에 의해 다음과 같은 환산거리식을 얻는다.

$$SD_1 = \left(\frac{PPV_0}{K_1} \right)^{-1/n} \quad (10)$$

(ii) 허용수준이 PVS_0 이면 지반진동의 수준도 PVS 로 예측 및 관리하므로 식 (7) 또는 (8)에 의해 다음과 같은 환산거리식을 얻는다.

$$SD_2 = \left(\frac{PVS_0}{K_2} \right)^{-1/n} \quad (11)$$

식 (10)과 (11)을 식 (9)에 대입하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$SD_0 = SD_1 = SD_2 \quad (12)$$

$$\therefore W_1 = W_2 \quad (13)$$

따라서 이 경우에는 지반진동의 예측에 어떠한 잣대를 사용하든지 지발당 장약량은 동일하게 설계되므로 발생하는 지반진동의 수준도 같아지게 된다.

국내의 관습적인 설계방법

(허용수준이 막연히 입자속도 $V_0 = 1.0 \text{ cm/s}$ 로 설정된 경우)

국내의 시방서 등에서와 같이 그 잣대를 명시하지 않은 경우에는 막연히 입자속도 $V_0 = 1.0 \text{ cm/s}$ 를 가옥에 대한 허용수준으로 설정하게 된다. 이 경우에는 벌파기술자가 자신의 경험에 따라 잣대를 결정하게 되는데, 지금까지 국내에서는 가옥의 상태와 주변 여

건이 양호하면 PPV를 적용하고, 가옥의 상태가 좋지 않으면 PVS를 적용하여 보다 높은 진동수준이 발생 할 상황까지 감안하는 방식을 사용하였다. 물론, 실무에서는 측정치들의 산포까지 고려하여 각 경우에 신뢰수준도 조절하여 적용하지만 여기서는 대표값(50%)만 고려해도 충분하다.

- (i) 지반진동의 발생수준을 PPV로 예측한다면 식 (6) 또는 (8)에 의해 다음과 같은 환산거리식을 얻는다.

$$SD_1 = \left(\frac{V_0}{K_1} \right)^{-1/n} \quad (14)$$

- (ii) 지반진동의 발생수준을 PVS로 예측한다면 식 (7) 또는 (8)에 의해 다음과 같은 환산거리식을 얻는다.

$$SD_2 = \left(\frac{V_0}{K_2} \right)^{-1/n} \quad (15)$$

그러면 환산거리식 (14)와 (15)에 따라 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$K_1 < K_2 \Rightarrow SD_1 < SD_2 \quad (16)$$

$$\therefore W_1 > W_2 \quad (17)$$

따라서 이 경우에는 지반진동의 발생수준을 PPV로 예측할 때가 PVS로 예측할 때보다 더 많은 지발당 장약량을 산출하게 됨으로써 지반진동이 증가할 여지가 있으므로 앞에서와 같은 가옥의 안전에 대한 우려나 설계변경에 대한 필요성이 제기될 수 있는 것이다.

허용수준 적용상의 유의점

위의 두 번째 방법은 지금까지 우리나라에서 규제 기준 내지 허용수준의 잣대가 없는 상태에서 발파기술자가 자신의 경험과 보안물건의 상태에 따라 적정 지발당 장약량을 계산하기 위하여 사용해 온 관습적인 방법이다. 하지만 규제기준 내지 허용수준의 잣대가 PPV나 PVS의 어느 하나로 결정이 된 상태에서는 제어발파의 설계 및 관리의 전체과정에서 규정된 잣대만을 일관되게 사용하면 된다.

4.4 허용수준의 중요성

현장에서 정말로 문제가 되는 것은 지침만으로는 허용수준을 결정하기 어려운 보안물건이 있는 경우이다. 우리나라의 관습적인 방법에서도 PPV를 택하든, PVS를 택하든 결국에는 허용수준을 어떻게 설정하느냐에 따라 장약량이 결정되는 것이다.

현장에 같은 종류의 가옥이 있다고 하더라도 각각의 상태는 천차만별일 수 있다. 건물이 오래 되어 벽돌들이 느슨한 상태이거나 회벽에 금이 많이 가고 일어나 있는 상태일 경우에는 온전한 상태의 집에 비해 진동에 대해 반응을 일으킬 감도(susceptibility)가 매우 높기 때문에 설계단계 내지 별파전 예비조사 단계에서 충분히 검토가 되어야 한다. 동물의 경우에도 새끼를 밴 소와 같은 경우는 허용수준을 판단하기 어렵다. 또, 정밀 기기류나 장비류와 같이 진동에 민감한 시설물이 있는 병원이나 공장 등의 경우에는 여기진동과 응답진동의 관계를 알기 어려우므로 이들의 안전을 별도로 고려하지 않으면 안 된다. 이와 같은 모든 경우에 있어 가장 중요한 것은 당해 보안물건에 적용할 허용수준을 결정하는 일이며, 그 잣대는 부차적인 문제이다. 즉, 허용수준만 올바로 설정된다면 변위든 속도든 어떠한 잣대를 사용하든 설정된 수준을 만족시키기만 하면 손상이나 피해는 발생하지 않을 것 이기 때문이다.

현재 국내의 각종 시방서나 지침 등에서는 인체나 동물을 대상으로 하는 가장 엄격한 허용수준에서부터 문화재급 유물, 기타 여러 가지 건물 등의 다양한 보안물건들에 대하여 허용수준에 대한 권고치를 나름대로 제안하고 있다. 따라서 위와 같은 난처한 상황이 아니라면 대부분의 현장에서는 발파기술자 스스로 적절한 허용수준을 설정할 수 있을 것이다. 하지만 시공 단계에 들어가면 지반조건의 급변과 같은, 설계단계에서는 예측하지 못했던 상황이 발생할 수도 있으며, 주민들이 민원을 제기할 가능성도 있다. 이와 같은 새로운 상황 하에서는 당초의 설계대로 발파하기 어려워질 것이다. 특히, 지반조건의 급변에 따른 지반진동의 증가현상이 나타날 경우에는 앞에서 인용한 Dowding의 가이드라인 등을 참조하는 것도 안전시공에 도움이 될 것이다.

5. 결론 및 제언

본 논문에서는 제어발파의 설계 및 관리 과정에서 허용기준이 어떠한 역할을 하는지를 PPV와 PVS를 중심으로 고찰함으로써 국내의 관습적인 방법이 지니고 있는 허실을 밝혀내어 제어발파 방법을 정립하는 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. 예를 들면, 일반적인 방법에서 허용기준은 $PPV=1.0\text{cm/s}$ 또는 $PVS=1.2\text{cm/s}$ 와 같이 설정한다.
- 3) 국내의 관습적인 설계 및 관리 방법은 허용치를 설정하기에 따라 ‘일반적인 방법’과 다를 바가 없음에도 설계 및 관리 과정에서 PPV와 PVS 양자를 모두 고려함으로써 잣대가 수시로 바뀌고 방법의 적용이 복잡한 단점이 있다. 지금까지 국내에서는 허용기준을 입자속도= 1.0cm/s 와 같이 설정하여 왔다.
- 4) 현재 국가적인 허용기준을 마련하고 있는 국외 여러 나라들의 경우 다양한 형태로 다양한 수준을 채택하고 있으며, 주파수 대역별로 PPV를 적용하는 방법이 많이 사용되고 있다. 우리나라에서도 국가적인 연구 등을 통해 우리 실정에 적합한 잣대와 허용치를 결정하는 것이 중요한 사안이라 할 수 있다.
- 5) 국내에서는 오랫동안 관습적인 방법이 사용되어

왔으므로 아직까지 대부분의 시방서나 지침 등에서는 허용수준의 잣대가 ‘입자속도’로 규정되어 있다. 하지만 앞으로는 허용수준에 대한 잣대를 PPV나 PVS 등의 어느 하나로 통일할 필요성이 있으며, 허용수준도 통일된 잣대에 맞추어 보안물건별로 새롭게 설정할 필요가 있다.

- 6) 향후과제로서 국가적인 차원에서 연구가 필요한 사항으로는 (i) 지반진동의 주파수 대역별 허용기준(잣대 및 허용치)의 설정문제, (ii) 통계처리를 위한 회귀모형의 선택문제, (iii) 지반진동 및 소음에 대한 보안물건별 허용[권고]치 수립문제가 있으며, 기타 사항으로서 (v) 관련 시방서 및 설계기준 등에서의 허용기준의 재설정 문제 등이 있다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부의 첨단도시개발연구사업인 ‘IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널 시공기술 개발(과제번호 : 05건설핵심 D03-01)’의 일환으로 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, 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.
6. Siskind, D.E., 2000, Vibrations from blasting, ISEE, pp.9-11.

최 병 희

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
선임연구원



Tel : 042)868-3237
E-mail : bhchoi@kigam.re.kr

류 창 하

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
책임연구원



Tel : 042)868-3236
E-mail : cryu@kigam.re.kr

최 용 근

(주) 지오제니컨설팅트 상무이사



Tel : 02)3472-2261
E-mail : ykchoi@geogeny.biz

황 현 주

협승엔지니어링 대표



Tel : 02)2675-0290
E-mail : hyupse@paran.com

안 명 석

동서대학교 응용/건설공학부 교수



Tel : 011)558-2593
E-mail : amspeoff@chol.com