

발파진동 추정식의 비교분석

양형식¹⁾ · 최미진²⁾

1. 서 론

대한화약발파공학회(2002)와 건설교통부(2003)에서는 발파공사의 난이도와 작업능률을 고려하여 원활한 공사를 하기 위하여 노천발파에 대한 표준공법을 제정하여 공포하였다. 건설교통부는 암발파 잠정지침에서 발파진동 추정식을 이용하여 표준공법을 선택하도록 하였는데 식으로는 미광무국의 채석발파에 기초한 식(du Pont 사, 1977)을 적용하고 있다. 그러나 이 식은 충분히 검토되지 않은 채 적용되었고 결과적으로 현장에서는 자주 진동 초과로 인한 민원 문제를 일으키고 있다. 본 연구에서는 Devine(1966), Dowding(1985) 등의 추정식들과 국내 계측자료를 이용하여 발표된 식(양 외, 2004)을 비교·분석하고 그 타당성을 검토하였다.

2. 발파진동식

2.1 Devine

Devine(1966)은 채석장의 실험관측 결과를 토대로 식 (1)을 제안하였다.

$$V = K \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-n} \quad (1)$$

여기서, V : 최대진동속도 (in/s), D : 거리 (ft), W : 지발당 장약량 (lbs), K, n : 각 채석장의 지반조건에 의해 결정되는 입지상수이다. Devine의 관측에 의하면 K=0.675~4.04로서 평균 1.85이며, n=1.083~2.346으로 평균 1.536의 값을 가지고 있다.

그러므로 Devine의 식은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V = 1.85 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.536} \quad (2)$$

이 식의 단위는 in/s이므로 cm/s로 환산하면 식(3)과 같다.

1) 전남대학교 건설지구환경공학부

2) 전남대학교 대학원 지구시스템공학과

양형식, 최미진

$$V = 1.390 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.536} \quad (3)$$

단, V : 최대진동속도 (cm/s), D : 거리 (m), W : 지발당 장약량 (kg)이다.

Devine에 의하면 지반의 최대 입자속도는 단위 최대장약량 W, 즉 정해진 시간 간격 내에 기폭되는 폭약의 양과 밀접한 관계가 있다. 여기서 최대 장약량은 8 ms 내에 기폭된 장약량 W로 간주한다. 그러나 매질의 전파속도, 장약간의 거리, 기폭 진행방향과 같이 다른 인자와 함께 구조적으로 파가 강화되어 유효 장약량 W를 변화시킬 수 있다.

Devine의 식은 환산거리를 이용하여 발파진동 추정식을 제안함으로써 이후 많은 연구를 촉발하였고, 장약량 산정에 의한 발파설계를 용이하게 한 공로가 있지만, 추정식에 의해 얻어지는 진동치 자체는 지나치게 작아서 사용할 수 없다. 이는 이후 발표된 여러 식들에 비해서 거의 1 % 정도에 불과하다.

2.2 du Pont 식

du Pont 사는 발파 핸드북에서 다음의 식을 제시하였다.

$$V = 160 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.60} \quad (\text{in/s}) \quad (4)$$

여기서 D는 ft, W는 lb 단위이다. 이를 SI 단위로 환산하면 다음 식으로 된다.

$$V = 114 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.60} \quad (\text{cm/s}) \quad (5)$$

이 식들은 그 전의 식들에 비하면 보수적인 식으로 간주되기도 하였으나, 실제로는 평균적인 진동 추정식으로서 보통의 저항선을 가진 발파에서 그 상한은 약 2배가량, 발파 저항이 큰 1자유면 발파나, 선분할 발파(pre splitting)의 경우는 5배가량 더 높은 수준의 진동이 나타난다고 보고하였다.

2.3 Dowding

Dowding(1985)은 미국 내에 있는 40개의 광산, 채석장, 건설발파의 자료를 이용하여 환산거리에 따른 발파진동의 분산 정도를 보였다.

표 1은 95 % 신뢰구간의 자승근 환산거리 식으로 구한 산업별 진동 추정식이다.

2.4 국내 자료

양 등(2004)이 27개 지역 건설공사 현장의 시험발파 및 시공중 계측으로 이루어진

표 1. 산업별 발파진동 추정식(95 % 신뢰수준)

산업	추정식 (in/s)	추정식 (cm/s)
전체	$V = 36.6(SD)^{-0.913}$	$V = 45.1(SD)^{-0.913}$
지표채탄	$V = 208(SD)^{-1.312}$	$V = 187(SD)^{-1.312}$
채석	$V = 56.0(SD)^{-1.014}$	$V = 63.7(SD)^{-1.014}$
건설	$V = 24.2(SD)^{-0.810}$	$V = 32.3(SD)^{-0.810}$

1701개 자료에 대한 발파진동 계측결과를 분석하여 발표한 95 % 신뢰구간의 진동추정식은 다음과 같다.

$$v = 172 \left(\frac{U}{\sqrt{W}} \right)^{-1.44} \text{ (cm/s)} \quad (6)$$

3. 발파진동식 비교·분석

3.1 건설교통부 잠정지침 식 검토

건설교통부의 암발파 잠정지침에서 사용한 진동추정식은 단위환산을 하지 않았고, 평균 예상식을 그대로 사용했다는 점에서 명백한 오류이다.

본 연구에서는 잠정지침식의 근거가 잘못 되었음에도 불구하고, 현재 실무에서 사용하고 있는 식

$$V = 160 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.60} \text{ (cm/s)} \quad (7)$$

을 잠정지침 식이라 칭하고 이후의 계산에 적용하기로 한다.

표 2는 Dowding과 필자의 자승근 환산거리 추정식 들과 잠정지침 발파진동 추정식을 이용하여 계산한 최대 진동속도를 비교한 것이다.

표 2. 여러 가지 추정식으로 계산한 최대진동치 (cm/s)

환산거리	Dowding				양 등	잠정지침
	전체	지표채탄	채석	건설		
10	5.51	9.12	6.16	5.00	6.24	4.01
20	2.93	3.67	3.05	2.85	2.30	1.32
50	1.27	1.10	1.21	1.36	0.62	0.30
100	0.67	0.44	0.60	0.77	0.23	0.10
200	0.36	0.18	0.30	0.44	0.08	0.03

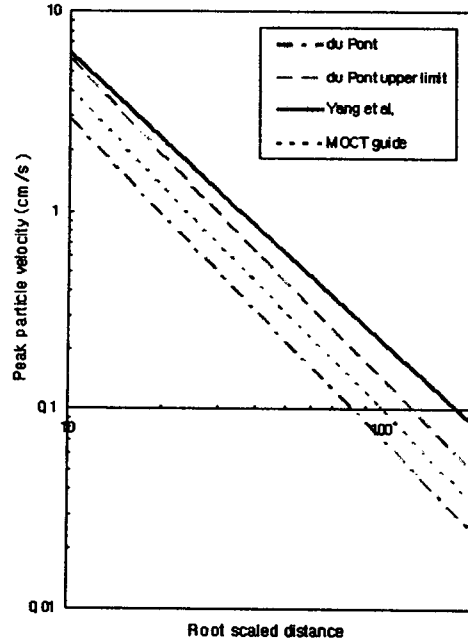


그림 3. 발파진동 추정식 비교

표에서 Dowding의 식들에 의한 추정값 들이 가장 높게 나타나며 환산거리 10 부근에서는 양 등의 결과와 유사하다. 잠정지침 추정식에 의한 결과는 전 영역에 걸쳐서 작은 값으로 계산되며 따라서 이 식에 의한 설계의 결과는 언제나 진동이 기대치보다 크게 나타나므로 설계의 변경이 불가피하다. 양 등이나 잠정지침 식의 결과 공히 환산거리가 큰 경우에는 Dowding의 결과보다 적다. 결과적으로 암 발파 설계 지침에 있어서 진동 추정식은 잘못 적용되어 항상 진동 수준이 적게 평가되므로 이에 따라 설계하여 시공하면 필연적으로 높은 진동이 발생하게 된다는 것을 알 수 있다.

그림 1은 du Pont 사에서 제시한 평균 예상식과 정상적인 저항선을 가진 발파에서 예측되는 진동 추정 상한식과 우리나라에서 계측된 자료로 산정한 추정식(양 등, 2004)을 같이 표시한 것이다. 그림에서 잠정지침 추정식은 원래의 du Pont 식보다 상위에 있지만 정규발파 상한식이나 필자의 제안식보다는 아래에 있음을 볼 수 있다.

따라서 설계 지침의 개정이 절실하며 이에 적용되어야 할 진동 추정식은 우리나라자료로 구한, 95 % 신뢰구간 이상의 진동추정식으로 개정되어야 할 것이다.

4. 결 론

건설교통부 잠정지침안에서 적용한 발파진동 추정식과 Dowding 및 필자의 환산거리 추정식을 비교·분석한 결과는 다음과 같다.

1. 건설교통부 잠정지침에서 채택한 식은 du Pont 사의 식으로 평균 추정식이고 단위 환산 없이 잘못 적용되었다.
2. Devine의 식은 비현실적으로 낮은 값을 보이며, Dowding과 필자 등의 식은 근거리에서 서로 유사한 결과를 보였다. 잠정지침에서 채택한 식은 상대적으로 낮은 값으로 추정이 이루어진다.
3. 잠정지침에서 채택한 식은 우리나라의 사례로부터 구한 95 % 신뢰구간 이상의 진동추정식으로 개정되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 건설교통부, 2003, 암발파 설계 및 시험발파 잠정지침.
2. 대한화약발파공학회, 2002, 발파표준공법.
3. 양형식, 김원범, 최미진, 장선종, 2004, 노천발파 표준공법의 진동추정식, 화약·발파 (대한화약발파공학회지), Vol. 22, No. 3, pp. 27-33.
4. Devine, J. R., R. H. Beck, A.V.C. Meyer and W. I. Duval, 1966, Effect of Charge Weight on Vibration Levels from Quarry Blasting, USBM RI 6774, 37p.
5. Dowding, C. H., 1985, Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, U.S.A., pp. 31-32.
6. Du Pont., 1977, Blaster's Handbook (16th Ed.), Wilmington, Delaware, 494p.