

암발파 잠정지침 발파진동 추정식의 타당성

양형식^{1)*}, 최미진²⁾

Validity of the Attenuation Equation of MOCT Guide Line for Surface Rock Blasting

Hyung-Sik Yang and Mi-Jin Choi

Abstract Guide line for rock blasting design of the MOCT(Ministry of Construction and Transportation) adopts attenuation equation of du Pont company for blasting vibration. In this paper the validity of the equation is studied by comparing with several equations of Dowding, Devine and author's induced from the domestic vibration data. The equation is inadequately used and predicted values are proved to be underestimated and causes vibration problems.

KeyWords guide line for rock blasting design, prediction equation

초 록 건설교통부 암발파 잠정지침은 du Pont 사의 발파 진동 추정식을 적용하고 있다. 본 연구에서는 그 타당성을 검토하기 위하여 이 식과 Dowding, Devine 및 그동안 국내 자료로 발표한 식들을 비교·분석하였다. 그 결과 잠정지침의 기준식은 잘못 적용되어 전반적으로 최대 진동속도를 낮게 평가하고 있고 이에 의한 발파설계는 높은 진동을 유발할 가능성이 높은 것으로 나타났다.

핵심어 암발파 잠정지침, 발파진동 추정식

1. 서 론

대한화약발파공학회(2002)와 건설교통부(2003)에서는 발파공사의 난이도와 작업능률을 고려하여 원활한 공사를 진행하기 위하여 노천발파에 대한 표준공법을 제정하여 공포하였다. 특히 건설교통부의 암발파 설계 잠정지침은 발파진동 추정식에 근거하여 발파공법을 선택하도록 표준화 하였다. 그 동안 국내 발파 현장에서는 장약량의 산정만으로 설계하고 시공 중에서 무분별하게 공법 변경을 하는 등 난맥상이 있었다. 따라서 표준화를 통하여 적절한 장약량으로 각 공법을 구분하고 표준적인 시공 방법을 제시함으로써 산업계에 많은 영향을 미쳤다.

잠정지침에서 사용된 발파진동 추정식은 미광무국의 채석발파에 기초한 식(du Pont 사, 1977)이다. 그러나 이 식은 단위가 표시되지 않은 상태로 교재에 인용된 바 있고(김재국, 1986) 충분한 고찰 없이 이를 SI 단위로 그대로 적용하였기 때문에 결과적으로 잘못

적용되었으며 이로 인해 현장에서는 자주 진동 초과로 인한 민원 문제가 발생하고 있다. 본 연구에서는 Nicholas 등(1971)의 미광무국 식과 이로부터 유도된 du Pont의 식을 분석하고, Devine(1966), Dowding(1985) 등의 자료들과 국내 계측자료를 이용하여 발표된 식(양, 1992, 양 등, 2004)들을 비교·분석하여 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 입지상수

¹⁾ 전남대학교 건설지공환경공부 교수

²⁾ 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 박사과정

* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일 : 2006년 3월 7일

심사 완료일 : 2006년 4월 11일

Devine의 관측에 의하면 $K=0.675 \sim 4.04$ 로서 평균 1.85이며, $n=1.083 \sim 2.346$ 으로 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.

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

- V : 최대진동속도 (cm/s)
- D : 거리 (m)
- W : 지발당 장약량 (kg)

Devine에 의하면 지반의 최대 입자속도는 단당 최대 장약량 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 Nicholas 등(1971)의 진동전달법칙(propagation law)을 소개하고 재정리하여 다음의 식을 제시하였다.

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

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

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

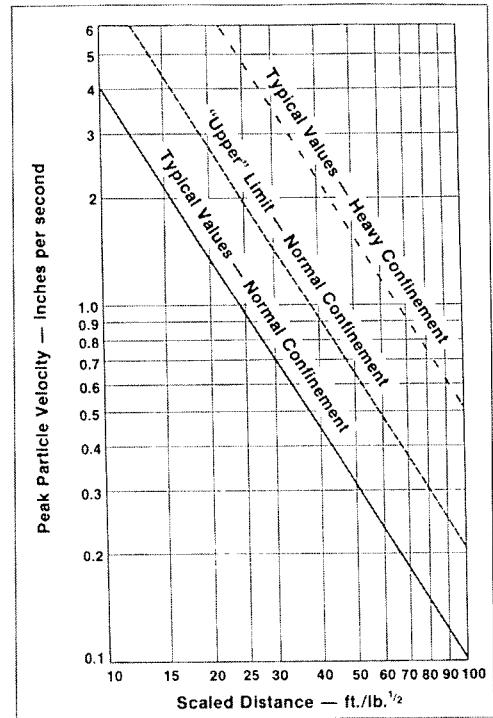


Fig. 1. Typical values of peak particle velocity as a function of scaled distance for blasting.(after du Pont, 1977)

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

Hendron과 Oriard(1972)는 기울기가 1.54인, 거의 유사한 그림을 발표하였다.

2.3 Dowding

Dowding(1985)은 미국 내에 있는 40개의 광산, 채석장, 건설발파의 자료를 이용하여 환산거리에 따른 진동속도의 감소관계를 나타내고 산업별 차이를 보였다.

Table 1은 이들 그림으로부터 구한 바, 자승근 환산 거리에 따른 95% 신뢰구간의 진동 추정식을 나타낸다.

표에서 제시된 식들은 미국에서 계속된, 더 많은 자료들로부터 유도했음에도 불구하고 du Pont의 식과는 크게 다르다. 결국 발파진동 추정식은 발파의 종류나 규모, 측정거리 등에 따라서 크게 달라지며, 특정한 K와

Table 1. Attenuation equations of blasting vibration for different industries(95 % confidence level)

Industry	Prediction equation (in/s)	Prediction equation (cm/s)
Total	$V=36.6(SD)^{-0.913}$	$V=45.1(SD)^{-0.913}$
Surface coal mining	$V=208(SD)^{-1.312}$	$V=187(SD)^{-1.312}$
Quarry	$V=56.0(SD)^{-1.014}$	$V=63.7(SD)^{-1.014}$
Construction	$V=24.2(SD)^{-0.810}$	$V=32.3(SD)^{-0.810}$

Table 2. Peak particle velocities(cm/s) calculated by various attenuation equations

Scaled Distance	Dowding				Yang et al.	MOCT guide
	Total	Surface coal mining	Quarry	Construction		
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

n의 값을 갖는 하나의 식으로 추정하는 것은 별도의 자료가 없는 상태에서 예비설계의 목적으로 사용할 때만 허용되어야 함을 보여준다.

2.4 국내의 추정식

우리나라의 계측 자료는 그 수행기관이 크게 학교와 연구소 등 연구기관과 기술사 사무소나 계측 회사 등 용역기관에서 계측한 자료들로 대별할 수 있다. 아직 규정이나 지침으로 확립된 일관된 방법이 없어서 계측 기관과 계측목적에 따라 계측의 신뢰도가 크게 다르다. 특히 외국의 계측 지침을 보면 발파외적인 요소를 해소하기 위해 다수의 계측기를 하나 또는 둘 정도의 계측선에 배열하도록 하는데 국내 대부분 용역 목적의 계측은 이를 지키지 못하고 있다.

이런 측면에서 본 연구에서는 필자에 의해 계측된 자료들과 추정식 만을 소개한다.

1992년 터널과 지하공간에 발표된 자료 중 5개 건설 사이트 142 측정점에 대한 계측결과로 구한 추정 식에서 95 % 신뢰구간의 K는 1163 (mm/s), n은 -1.348이었다. 한편 2004년 화약·발파에 발표된 1701개 자료에 대한 발파진동 계측결과 95 % 신뢰구간의 진동추정식은

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

이었다.

이 식은 대부분 건설공사 현장의 시험발파 및 시공중 계측으로 이루어진 것이며 27개 지역의 자료로부터 구

한 것이어서 1992년의 자료보다 더 대표성이 있는 것으로 생각된다. 식에서 K는 du Pont 식과 비교했을 때 크게 다르지 않으나, 감쇠지수는 다소 작은 값을 보이고 있다. 반면 건설발파에 대한 Dowding의 식과는 크게 차이를 보여준다.

3. 발파진동식 비교·분석

3.1 건설교통부 잠정지침 식 검토

건설교통부의 암발파 잠정지침에서 사용한 진동 추정식은 단위환산을 하지 않았다는 것과, 평균 예상식을 그대로 사용했다는 점에서 명백한 오류이다.

다행이 이 식을 SI 단위로 환산하였을 때 계수의 변화가 크지 않고 또 원래보다 작은 값으로 되기 때문에 환산하지 않은 식을 그대로 사용하면 안전 측으로 되고 결과적으로는 평균치 보다 40 % 높은 값이 추정된다. 이 값은 설계 목적으로 사용할 상한치에는 미치지 못하지만, 평균치를 그대로 사용하는 것보다는 안전한 설계가 된다.

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

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

식이랑 칭하고 이후의 계산에 적용하기로 한다.

Table 2는 Dowding과 필자의 자승근 환산거리 추정식들과 잠정지침 발파진동 추정식을 이용하여 계산한

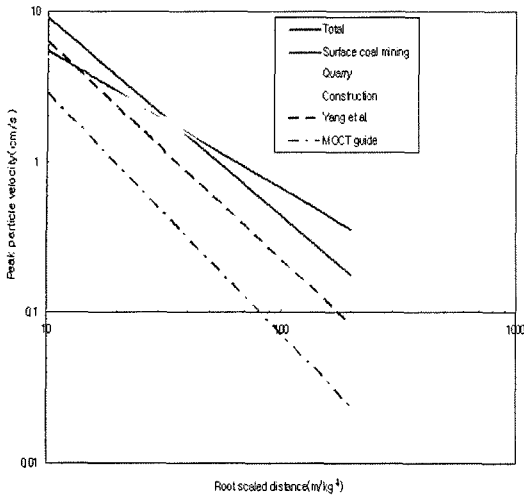


Fig. 2. Predicted upper bound of peak particle velocity

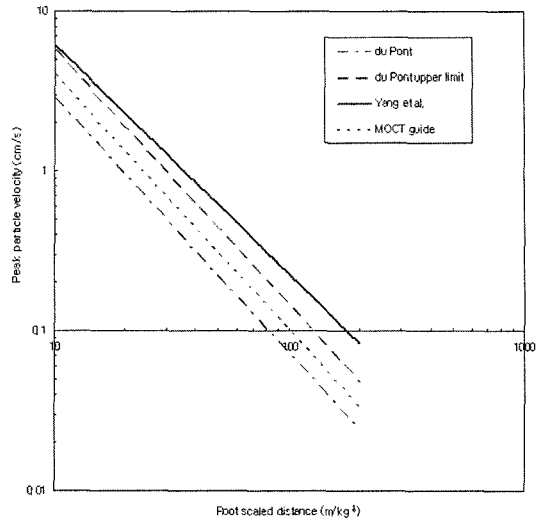


Fig. 3. Upper limits for blasting vibration

최대 진동속도를 비교한 것이다.

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 민원의 발생이 예상되고 설계의 변경이 불가피하다.

한편 양 등이나 잠정지침 식의 결과 공회 환산거리가 큰 경우에는 Dowding의 결과보다 적게 나오는 데, 이는 우리나라의 화약 사용 규모가 미국보다 작고 민원 위주로 계획되어 장거리가 아닌 단거리 계획이 주가 되었기 때문으로 생각된다.

그림 2는 추정식 들을 이용하여 환산거리로 계산한 최대 진동속도를 그래프로 작성한 것이다. 자승근 환산거리 10의 경우에는 최대진동속도 분포가 Dowding ≈ 양 등 > 잠정지침의 순으로 진동속도의 크기가 크게 추정되었다. Dowding의 추정식에 의하면 환산거리 10의 경우에는 채탄 > 채석 > 건설의 순서로 나타나며 환산거리가 35이상의 경우에는 건설 > 채석 > 채탄의 순서로 나타났다.

건설교통부 잠정지침 채택 식의 경우, 최대 진동속도가 현저하게 낮게 평가되고 있음은 그래프를 통해서도 확인할 수 있다.

결과적으로 건설교통부 암 발파 설계 잠정지침에 있어서 진동 추정식은 잘못 적용되어 항상 진동 수준이 적게 평가되므로 이에 따라 설계하여 시공하면 필연적으로 높은 진동이 같이 발생하게 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 du Pont 사에서 제시한 평균 예상식과 정상적인 저항선을 가진 발파에서 예측되는 진동 추정 상한식, 그리고 우리나라에서 계획된 자료로 산정한 추정식(양 등, 2004)을 같이 표시한 것이다. 그림에서 잠정지침 추정식은 원래의 du Pont 식보다 40 % 정도 상위에 있지만 du Pont 사의 정규발파 상한식이나 필자의 제안식 보다는 아래에 있음을 볼 수 있다. 필자의 식이 현장 실측 자료로부터 얻어진 것이라는 면에서 현실적으로 잠정지침 상한식 보다 높은 진동은 언제나 발생가능하다.

따라서 설계 지침의 개정이 절실하며 이에 적용되어야 할 진동 추정식은 우리나라에서 계획된 진동 추정식을 사용하여야 하고, 적용되는 식이 평균 추정식 또는 95 % 신뢰구간의 진동추정식임을 밝혀야 할 것으로 판단된다.

진동 피해의 가능성을 최소화하기 위해서는 95 % 신뢰구간의 진동추정식이나 적어도 정상적인 저항선으로 설계된 정상 발파에서 예상되는 상한치 진동 추정식 이상의 식을 적용하여야 할 것이며, 평균 추정식을 사용하는 경우에는 진동피해 문제가 고려되지 않았음을 명시하여야 한다.

4. 결 론

본 연구에서 건설교통부의 잠정지침에서 적용한 발파 진동 추정식을 Dowding과 필자의 환산거리 추정식과 비교·분석한 결과는 다음과 같다.

1. 건설교통부 잠정지침에서 채택한 식은 du Pont 사의 식으로 95 %의 신뢰구간이 아닌 평균 추정식이고 또 단위환산이 이루어지지 않은 채 잘못 적용되었기 때문에 이에 근거한 공법의 분류와 발파 시공설계는 초과 진동에 따른 민원 발생의 위험성이 있다.
2. Devine, Dowding, 필자 등의 발파진동 추정식을 건설교통부 잠정지침에서 채택한 발파진동 추정식과 비교한 결과 Devine의 식은 비현실적으로 낮은 값을 보이며, Dowding과 필자 등의 식은 근거리에서 서로 유사한 결과를 보였다. 잠정지침에서 채택한 식은 전 영역에 걸쳐서 낮은 값으로 추정되어진다.
3. 잠정지침에서 채택한 식은 우리나라의 사례로부터 구한 추정식으로 교체되어야 하며 진동피해를 예방하기 위해서는 95% 예상식이나 적어도 정규 발파에 대한 진동 상한식 이상의 식을 채택하여야 할 것이다.

김재국, 1986, 산업화약과 발파공학, 서울대학교 출판부, 서울, 375-379.

대한화약발파공학회, 2002, 발파표준공법

양형식, 1992, 지표발파의 진동특성에 관한 기초연구, 터널과 지하공간(한국암반역학회지) 2.2, 199-211

양형식, 김원범, 최미진, 장선종, 2004, 노천발파 표준공법의 진동추정식, 화약·발파(대한화약발파공학회지), 22.3, 27-33.

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

Dowding, C.H., 1985, Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, U.S.A., pp. 31-32.

Du Pont., 1977, Blaster's Handbook (16th Ed.), Wilmington, Delaware, 494p

Hendron, A.J. and L.L. Oriard, 1972, Specifications for controlled blasting in civil engineering projects, Proc. 1st American Rapid Excavation and Tunneling Conference, SME AIME, Littleton, Colo.

Nicholas, H.R., C.F. Johnson and W.I. Duvall, 1971, Blasting Vibrations and Their Effects on Structures, Bulletin No. 656, Washington DC, USBM

참고문헌

건설교통부, 2003, 암발파 설계 및 시험발파 잠정지침

양형식

1979 서울대학교 공과대학 자원공학과 학사

1981 서울대학교 대학원 자원공학과 석사

1987 서울대학교 대학원 자원공학과 박사

Tel: 062-530-1724

E-mail: hsyang@jnu.ac.kr

현재 전남대학교 건설지구환경공학부 교수



최미진

2003 조선대학교 공과대학 자원공학과 학사

2005 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 석사

Tel: 062-530-0824

E-mail: wangle@hanmail.net

현재 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 박사과정

