터널과 지하공간, 한국암반공학회
Vol. 5, 1995, pp. 89~94

TUNNEL & UNDERGROUND Vol. 5, 1995, pp. 89-94
J. of Korean Society for Rock Mech.

발파진동 예측식을 이용한 안전장약량 산정문제에 관하여

김일중[1] · 김영석[2]

On the Determination of Safe Charge Weight from the Several Predictive Equations of Blast Vibration

IL-Jung Kim, Young-Seuk Kim

ABSTRACT Regression analysis and a comparative study were carried out for 52 blast vibration data which were monitored by changing the monitoring distance and charge per delay. The results are as follows:

1) The square and cube root scalings and general equation which have a confidence level at the point of 90% and 99% are $V_{90}=33300(SD)^{-2.026}$, $V_{90}=23600(SD)^{-1.993}$, $V_{90}=26300W^{0.755}R^{-2.007}$ and $V_{99}=48400(SD)^{-2.026}$, $V_{99}=34000(SD)^{-1.993}$, $V_{99}=38100W^{0.755}R^{-2.007}$, respectively.

2) There is need to decide the allowable max. charge weight per delay considering the cross points comparatively of the nomogram constructed using several predictived equations.

3) It is necessary to derive the predictive equation on the basis of blast vibration level monitored in field and to decide safe vibration level and the confidence level.

1. 서 론

발파에 의한 암반의 굴착은 지상과 지하에서 다양한 목적으로 실시되고 있으며 앞으로 좁은 국토의 효율적인 이용차원에서 발파작업장의 규모와 수는 증가할 것으로 예측된다. 각종 건설현장에서 발파작업으로 인해 발생하는 공해는 안락한 시민생활과도 밀접한 관계가 있을 뿐 아니라 발파공해로 인한 재산상의 피해 또한 큰 문제로 대두되고 있다. 그러나 발파현장주변에서 발생할 수 있는 민원을 예상하여 발파진동을 측정하고 분석한 결과를 발파설계에 이용하고 있으나 발파작업을 설계서 대로 실시하기는 어렵기 때문에 민원발생 후 그 수습에 많은 시간을 보내는 일은 발파현장에서 흔히 볼 수 있다. 암반발파에 대한 여러 연구[1-5]가 진행되어 왔으며 향후 암반발파설계를 위한 발파진동 계측자료의 합리적인 분석과 그 결과를 상호 비교 검토한 후 발파현장상황에 적합하도록 이용하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 발파현장에서 시험발파를 통하여 계측한 지반진동치를 근거로 신뢰수준을 부여한 자승근 환산식, 삼승근 환산식 및 일반식을 도출하여 한계진동치에 적합한 구조물과 폭원과의 거리에 따른 지발당 최대허용장약량을 산출하는 방법과 이들을 안전성의 측면에서 상호 비교 검토하여 발파설계에 적용할 수 있는 발파 진동식의 적용범위에 대하여 고찰하였다.

2. 지반진동 측정대상지역 주변환경

본 연구에서 지반진동 측정대상지역은 택지조성단지로서 발파 대상암반이 주변지역의 표고보다 약 10 m 높았고, 30여채의 가옥이 발파대상암반에 인접하여 위치하고 있다. 본 발파지역 암석의 일축압축강도는 약 1365 kg/cm^2, 인장강도는 126 kg/cm^2, 탄성계수는 4.01×10^5 kg/cm^2, 포와손비는 0.24 이었으며 약 0.6~3.0 m간격의 불규칙한 균열이 암반내에 존재하고 있다.

* 1995년 2월 5일 접수
1) 정회원, 전북대학교 공업기술연구소 연구원
2) 정회원, 전북대학교 공과대학 자원공학과 교수

3. 천공 및 장약

천공장과 최소저항선(B) 및 공간격(S)은 비장약량이 일정하게 유지될 수 있도록 유압식 드릴에 직경 45 mm의 "X"비트를 사용하여 120개의 공을 갈지자형으로 배열하여 수직 하향천공하였다.(Fig.1참조) MS전기뇌관을 사용하여 1회 발파당 4~5지발을 기폭하였다. 지발당 장약량은 Himite-5000(직경32 mm, 0.375 kg/개)을 0.375~1.05 kg범위에서 다양하게 변화시켰다.

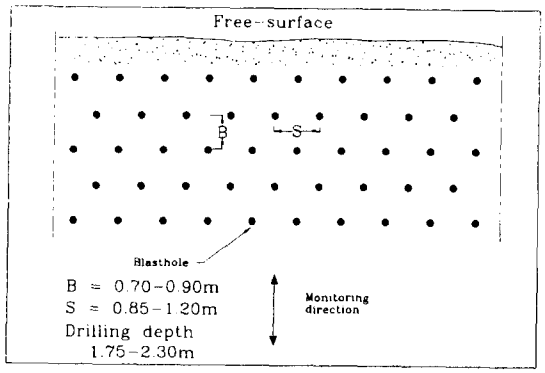

Fig. 1. Plan view of blasthole array for test blast

4. 지반진동측정

발파에 의한 지반진동은 자유면 후방에서 측정하였다. 폭원으로부터 계측점 사이의 거리를 10.1~80.0 m 범위로 변화시키면서 52개의 지반진동을 측정하였다. 발파진동측정기는 계측기 자체내에 진동 감지센서가 내장된 Canada Instantel사 제품인 Minimate(모델 DS-077)2대를 사용하였다. 본 발파진동 측정기는 각 방향(V,L,T)의 발파진동 및 벡터합, 폭풍압, 주주파수 등 전체 파형이 기록된다. 계측기에 저장된 이들 자료를 다시 DS-467프로그램을 이용하여 출력하였다. 출력된 자료중 시험발파시 측정거리, 지발당 장약량에 따른 지반진동치를 Table 1에 나타냈다. 여기서 지반진동치는 실벡터합[6]을 이용하였다.

5. 발파설계용 진동식

5.1 통계적입지상수 결정

구조물피해에 영향을 주는 것은 입자의 변위, 속도, 가속도 및 주파수 등의 종속변수인데 여러 계측결과에 의하면 구조물 피해와 입자속도는 밀접한 관계가 있다. 이론적으로 입자속도는 지발당 장약량과 비례하고 폭원과의 거리에 역비례관계가 있다. 이들을 지발당 장약량 W와 거리 R의 관계로서 자승근 환산거리($R/W^{1/2}$) 또는 삼승근 환산거리($R/W^{1/3}$)로 나타내고 있으며 입자속도는 이들과 역비례 관계에 있다.

또 일정 주파수대역의 입자속도 분포는 로그 정규분포를 이루고 있으며 이러한 분산은 지질조건, 화약종류, 파형, 장약배열, 기폭 및 계측오차 등이 그 원인으로 알려져있다.

따라서 발파진동은 경험적으로 예측하기 어려우므로 발파진동피해가 우려되는 지역에서 여러개의 계측자료(약30개 이상)[7]를 근거로 회귀분석을 실시하여 발파현장에 적합한 발파진동식을 도출하여야 하며 이를 기준으로 한계진동속도와 폭원과의 거리로 부터 지발당 최대허용장약량을 산출하게 된다.

종래의 발파진동식은 원거리에서 적합성이 좋은 것으로 알려진 입자속도와 자승근 환산거리 또는 근거리에서 적합성이 좋은 것으로 알려진 입자속도와 삼승근 환산거리와의 관계[1]를 단순 선형회귀분석을 실시하여 입지상수를 결정하였으나 지발당장약량과 폭원과 측점간의 거리를 독립변수로한 다중 선형회귀분석을 실시한 입지상수도 결정하여 사용할 필요성이 있을 것으로 본다.

본 연구에서는 입자속도와 자승근, 삼승근 환산거리를 독립변수로 한 (1)식[8]과 같은 형태의 단순 선형회귀분석을 실시하여 입지상수를 결정하고, 폭원과 측점간의 거리와 지발당 장약량을 각각 독립변수로 한 (2)식[9]과 같은 형태의 다중 선형회귀분석을 실시하여 입지상수를 결정하였다.

$$V = K_1(SD)^n \quad (1)$$

$$V = K_2 W^a R^b \quad (2)$$

여기서 V : 입자속도(mm/sec)

K_1, K_2 : 발파진동상수

SD : 환산거리($m/kg^{1/2}$, $m/kg^{1/3}$)

W : 지발당장약량(kg)

R : 폭원과 계측점간의 거리(m)

n : 감쇠지수

a : 장약지수

b : 거리지수

Table 1의 자료를 대상으로 회귀분석한 (3), (4) 및

Table 1. Blasting conditions & ranges of measured vibration data

Distance (m)	Charge (kg)	Velocity (mm/sec)
10.1~20.0	0.375~0.500	22.84~39.69
20.1~30.0	0.375~0.875	7.52~27.53
30.1~40.0	0.375~0.562	5.24~15.62
40.1~50.0	0.375~0.875	3.00~12.49
50.1~60.0	0.625	4.10
60.1~70.0	0.500~1.050	1.38~4.18
70.1~80.0	0.500~1.050	1.65~2.35

(5)식은 각각 본 발파지역의 자승근 환산식, 삼승근 환산식 및 일반식이다. (3), (4) 및 (5)식의 R값은 각각 0.9057, 0.9089 및 0.9094로서 일반식의 상관계수가 크게 나타났다.

$$V_{50} = 21600(SD)^{-2.026} \quad (3)$$

$$V_{50} = 15400(SD)^{-1.993} \quad (4)$$

$$V_{50} = 17100W^{0.755}R^{-2.007} \quad (5)$$

5.2 신뢰수준을 부여한 발파진동식

상기 (3),(4) 및 (5)식은 대상자료들의 평균적인 예상치 이므로 안전한 발파설계가 이루어지기 위해서는 적절한 안전율이 필요하다. 그러므로 입자속도와 로그분포특성을 이용한 로그 표준편차를 구하여 90%와 99%의 신뢰수준을 갖는 식을 구하였다.

- 90%의 신뢰수준을 갖는 발파진동식

$$V_{90} = 33300(SD)^{-2.026} \quad (6)$$

$$V_{90} = 23600(SD)^{-1.993} \quad (7)$$

$$V_{90} = 26300W^{0.755}R^{-2.007} \quad (8)$$

- 99%의 신뢰수준을 갖는 발파진동식

$$V_{99} = 48400(SD)^{-2.026} \quad (9)$$

$$V_{99} = 34000(SD)^{-1.993} \quad (10)$$

$$V_{99} = 38100W^{0.755}R^{-2.007} \quad (11)$$

Fig. 2, Fig. 3은 각각 입자속도와 자승근 환산거리, 삼승근 환산거리와의 관계를 나타내는 것으로서 실선은 (3),(4)식, 점선은 각각 (6),(7)식과 (9),(10)식을 나타내고 있다.

6. 노모그램작성 및 고찰

발파현장에 적합한 발파 진동식을 구하는 것은 발파

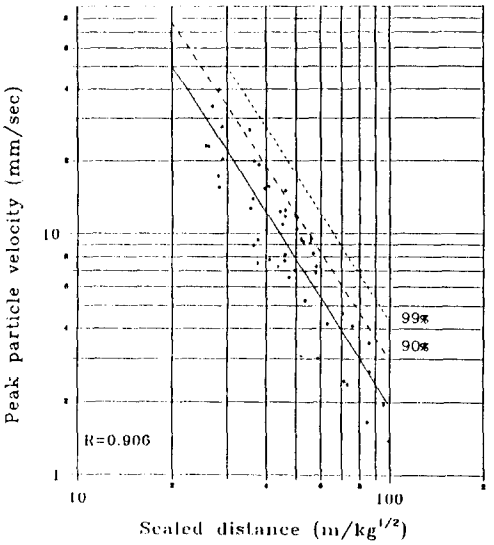

Fig. 2. Relationship between PPV and square root SD

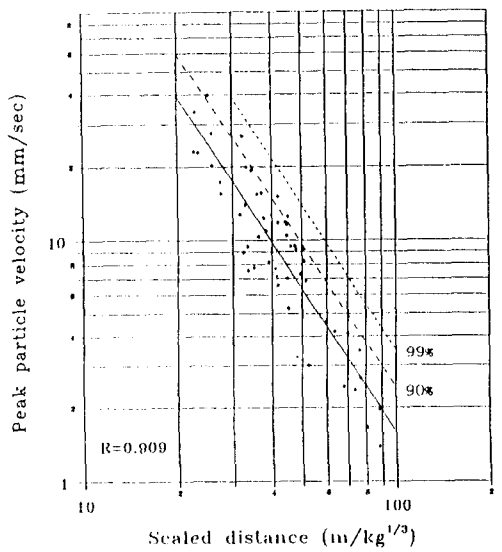

Fig. 3. Relationship between PPV and cube root SD

작업장의 주변구조물에 피해를 발생시키지 않는 범위에서 발파작업이 안전하게 이루어질 수 있도록 지발당 장약량을 합리적으로 조절하기 위한 것이다. 발파현장에 적합한 발파 진동식을 도출하고 발파작업장의 주변구조물에 피해를 발생시키지 않을 한계진동치를 결정한 후, 이를 기준으로 폭원과 구조물간의 거리에 따라 지발당 최대허용장약량을 구할 수 있다. 발파작업이 진행됨으로써 발파작업장주변의 구조물과 폭원과의 거리

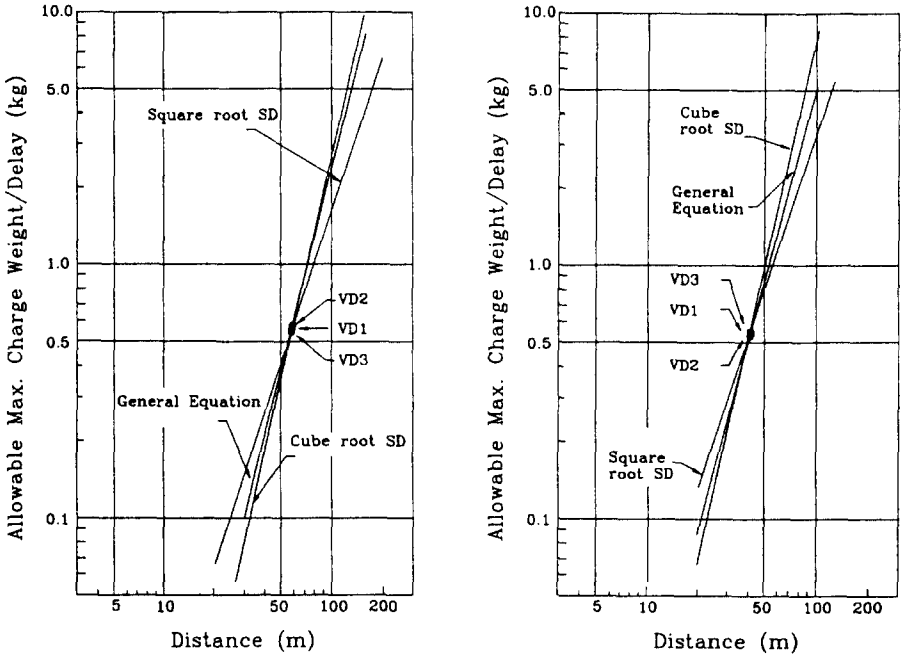

Fig. 4. Nomogram (a) 5 mm/sec, (b) 10 mm/sec (confidence level 90%)

가 변하게되고 발파 진동식에서 산출한 지발당 최대허용장약량도 변하게 된다.

본 연구를 위해서 발파현장의 주변구조물에 피해를 발생시키지 않을 안전진동치는 5 mm/sec와 10 mm/sec로 가상하여 결정하였다. 이를 기준으로 90%와 99%의 신뢰수준을 갖는 식을 이용하여 폭원과 구조물 간의 거리에 따른 지발당 최대허용장약량을 산출하였으며, 이를 발파현장에서 편리하고 간단하게 사용할 수 있는 노모그램을 Fig. 4, Fig. 5와 같이 작성하였다.

6.1 교차점의 변화

Fig. 4(a)는 신뢰도수준 90%에서 안전진동치를 5 mm/sec로 했을 때 "VD1"은 자승근 환산식과 삼승근 환산식에 의한 결과가 교차되는 점으로서 거리 57.00 m, 지발당 최대허용장약량 0.546 kg, "VD2"는 자승근 환산식과 일반식에 의한 결과가 교차하는 점으로서 거리 57.53 m, 지발당 최대허용장약량 0.562 kg, "VD3"는 자승근 환산식과 일반식에 의한 결과가 교차되는 점으로서 거리 56.74 m, 지발당 최대허용장약량 0.541 kg을 나타내고 있다. Fig. 4(b)는 신뢰도 수준 90%에서 안전진동치를 10 mm/sec로 했을 때 "VD1"은 자승근 환산식과 삼승근 환산식에 의한 결과가 교차되는 점으로서 거리 39.80 m, 지발당 최대허용장약량 0.528 kg, "VD2"는 자승근 환산식과 일반식에 의한 결과가 교차하는 점으로서 거리 39.86 m, 지발당 최대허용장약량 0.530 kg, "VD"3는 자승근환산식과 일반식에 의한 결과가 교차되는 점으로서 거리 39.77m, 지발당 최대허용장약량 0.527 kg을 나타내고 있다.

Fig. 5(a)는 신뢰도수준 99%에서 안전진동치를 5 mm/sec로 했을 때 "VD1"은 자승근 환산식과 삼승근 환산식에 의한 결과가 교차되는 점으로서 거리 68.28 m, 지발당 최대허용장약량 0.542 kg, "VD2"는 자승근 환산식과 일반식에 의한 결과가 교차하는 점으로서 거리 68.31 m, 지발당 최대허용장약량 0.543 kg, "VD3"는 자승근 환산식과 일반식에 의한 결과가 교차되는 점으로서 거리 68.26 m, 지발당 최대허용장약량 0.542 kg을 나타내고 있다.

Fig. 5(b)는 신뢰도 수준 99%에서 안전진동치를 10 mm/sec로 했을 때 "VD1"은 자승근 환산식과 삼승근 환산식에 의한 결과가 교차되는 점으로서 거리 47.67 m, 지발당 최대허용장약량 0.523 kg, "VD2"는 자승근 환산식과 일반식에 의한 결과가 교차하는 점으로서 거

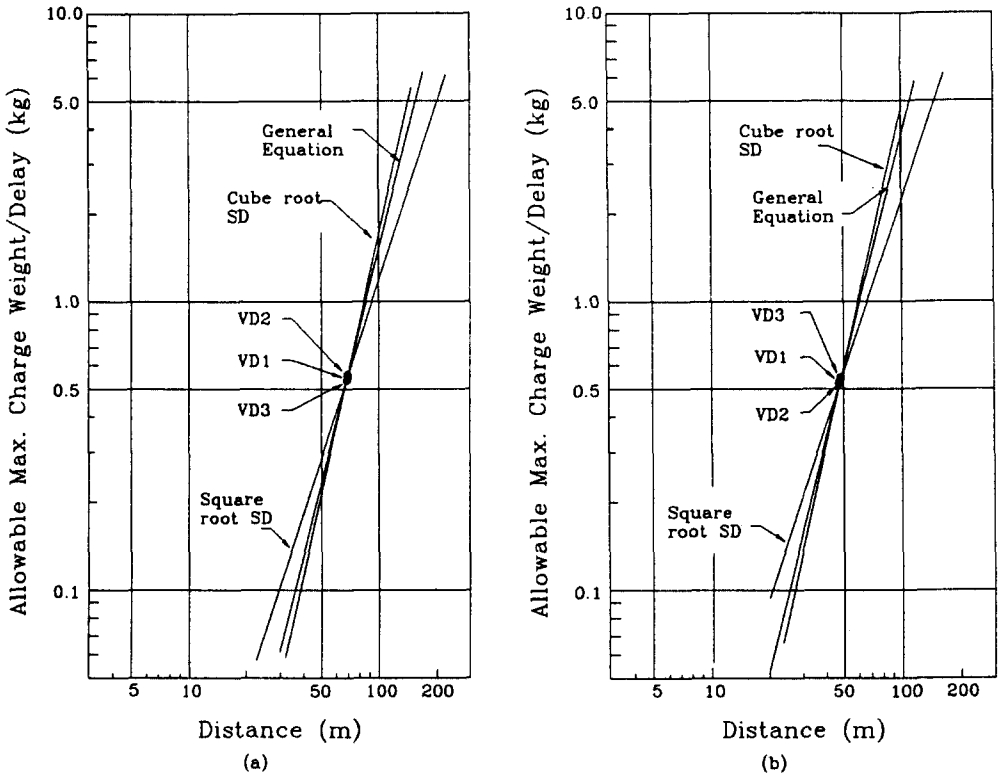

Fig. 5. Nomogram (a)5 mm/sec, (b)10 mm/sec (confidence level 99%)

리 47.31 m, 지발당 최대허용장약량 0.512kg, "VD3"는 자승근 환산식과 일반식에 의한 결과가 교차되는 점으로서 거리 47.85 m, 지발당 최대허용장약량 0.527 kg을 나타내고 있다.

여기서 각 식의 결과는 서로 교차점을 갖게 된다. 이는 독립변수를 처리하는 방법이 다르기 때문이다. 이 점들을 경계로 각 식의 거리에 따른 지발당 최대허용장약량의 값이 상대적으로 변하게 되므로 각각의 교차점을 경계로 안전성을 고려한 발파설계에 하나의 발파 진동식을 적용하는 것은 고려되어야 할 문제다. 또 같은 신뢰구간을 갖는 식에서 안전진동치가 커짐에 따라 교차점의 거리는 작아짐을 알 수 있다. 교차점의 거리는 신뢰구간과 안전진동치에 따라 다르게 나타나지만 이들 거리에 해당하는 지발당 최대허용장약량은 큰 변동이 없음을 알 수 있다.

6.2 90% 신뢰수준을 갖는 발파진동식

안전진동치를 5 mm/sec로 하고 폭원과 구조물간의 거리가 40 m일때 지발당 최대허용장약량은 자승근 환산식의 경우 0.269 kg, 삼승근 환산식의 경우 0.189 kg, 일반식의 경우 0.214 kg이고, 100 m일때 자승근 환산식의 경우 1.681 kg, 삼승근 환산식의 경우 2.949 kg, 일반식의 경우 2.441 kg이다.

안전진동치를 10 mm/sec로 하고 폭원과 구조물간의 거리가 40 m일때 지발당 최대허용장약량은 자승근 환산식의 경우 0.533 kg, 삼승근 환산식의 경우 0.536 kg, 일반식의 경우 0.535 kg이고, 100 m일때 자승근 환산식의 경우 3.332kg, 삼승근 환산식의 경우 8.373kg, 일반식의 경우 6.113 kg이다.

6.3 99%신뢰수준을 갖는 발파진동식

안전진동치를 5 mm/sec로 하고 폭원과 구조물간의 거리가 40 m일때 지발당 최대허용장약량은 자승근 환산식의 경우 0.186 kg, 삼승근 환산식의 경우 0.109 kg, 일반식의 경우 0.131 kg이고, 100 m일때 자승근 환산식의 경우 1.162 kg, 삼승근 환산식의 경우 1.702

kg, 일반식의 경우 1.494 kg이다.

안전진동치를 10 mm/sec로 하고 폭원과 구조물간의 거리가 40 m일때 지발당 최대허용장약량은 자승근 환산식의 경우 0.369 kg, 삼승근 환산식의 경우 0.309 kg, 일반식의 경우 0.328 kg이고, 100 m일때 자승근 환산식의 경우 2.304 kg, 삼승근 환산식의 경우 4.833 kg, 일반식의 경우 3.874 kg이다.

6.2, 6.3에서와 같이 동일한 거리에서도 각각의 발파진동식에 따라 지발당 최대허용장약량이 다르게 산출되고 한계진동치가 커짐에 따라 지발당 최대허용장약량이 증가하여 경제성은 향상되나 안전성의 문제는 여전히 남아 있다. 또한 각각의 발파 진동식에서 신뢰구간이 예를 들어 90%에서 99%로 넓어짐에 따라 동일한 거리에서도 지발당 최대허용장약량이 적어지므로 안전성은 향상되나 경제성이 문제로 남게된다.

따라서 발파현장주변의 구조물들에 피해를 발생시키지 않는 지발당 최대허용장약량을 산출하기 위해서는 지반진동 계측자료를 근거로 신뢰구간을 부여한 자승근 환산식, 삼승근 환산식 및 일반식을 도출하고 안전진동치를 설정하여 노모그램을 작성한 후 교차점을 상호 비교 검토하여 안전성을 고려한 지발당 최대허용장약량을 결정하여야 할 것이다.

7. 결 론

발파현장에서 계측거리와 지발당장약량을 변화시키면서 실측한 52개의 발파진동치를 회귀분석하여 비교검토한 결과는 다음과 같다.

1) 본 발파지역의 90%, 99%의 신뢰수준을 갖는 자승근 환산식, 삼승근 환산식 및 일반식은 각각 다음과 같이 표시된다. $V_{90}=33300(SD)^{-2.026}$, $V_{90}=23600(SD)^{-1.993}$, $V_{90}=26300W^{0.755}R^{-2.007}$, $V_{99}=48400(SD)^{-2.026}$, $V_{99}=34000(SD)^{-1.993}$, $V_{99}=38100W^{0.755}R^{-2.007}$이다.

2) 여러형태의 발파진동식에 의해 노모그램을 작성하여 교차점들을 상호 비교 검토한 후 폭원과 주변구조물과의 거리에 따라 안전성을 고려한 지발당 최대허용장약량을 결정할 필요가 있다.

3) 발파현장에서 측정한 발파진동치를 근거로 발파진동식을 도출하여 안전성을 고려한 안전진동치와 신뢰수준을 결정할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1) 이경운, 김민규, 신희순, 1984, "화약, 암석강도 및 발파유형이 발파진동에 미치는 영향", 대한광산학회지, 제21권, 제4호, pp.334-339.

2) 이경운, 김민규, 1987, "석회석채석장의 대규모발파에대한 발파진동", 대한광산학회지, 제24권, 제5호, pp.320-327.

3) 양형식, 주재성, 1990, "노천굴발파의 진동특성과 입지상수결정에 관한 연구", 한국자원공학회지, 제27권, 제5호, pp.316-323.

4) 김대상, 이정인, 이희근, 1991, "발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용진동치 결정에 관한연구", 한국자원공학회지, 제28권, 제4호, pp.444-455.

5) 류창하, 선우춘, 신희순, 정소걸, 최병희, 1994, "구조물 및 시설물인접 구릉지의 암반굴착발파설계", 한국암반역학회지, 제4권, 제1호, pp.38-46.

6) Dowding, C. H., 1985, "Blast Vibration Monitoring and Control", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp.20-21.

7) Rosential, M. F. and Marlock, G. L., 1987, "Blasting Guidance Manual", Vibra-Tech Engineers, p.77.

8) Konya, C. J. & Walter, E. J., 1990, "Surface Blast Design", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp.240-244.

9) 임한욱, 김재동, 1992, "발파진동의 크기와 주파수특성에 관한연구", 한국자원공학회지, 제29권, 제3호, pp.146-157.