

발파 진동식의 신뢰성

The Reliability of Blast Vibration Equation

김수일* · 정상섭** · 조후연***

Kim, Soo Il · Jeong, Sang Seom · Cho, Hoo Youn

Abstract

Blast vibration equations proposed previously are investigated. Special attention is given to the blast vibration equation which shows the best fitting to the geologic condition of Korea. The fitness of proposed blast vibration equation is analyzed and examined using many field data measured in Korea. The prediction of blast vibration equation using field data was performed by linear regression analysis. Moreover, after the prediction of each blast vibration equation, vibration velocity is recalculated on the basis of scaled distance at each equation. Reliability of regressioned blast vibration equation is observed by comparing predicted and measured velocity, which is divided into small-scale blasting of city and large-scale blasting of quarry. Based on this study, the best fitting equation to the Korean geologic condition is ROOT SCALING & CUBE ROOT SCALING proposed by USBM(United Nations Bureau of Mines). Also representative blast vibration equations depending on the different kinds of rock mass are proposed using measured and existing field data.

요 지

본 논문에서는 이미 제안된 발파진동식 중에서 국내의 지질조건에 가장 적합한 식을 연구하였다. 국내에서 측정된 여러 현장의 자료를 이용하여 제안된 발파진동식의 적합성을 분석 검토하였다. 실측자료를 이용한 발파진동식의 산정은 선형회귀분석을 적용하였다. 또한 실측자료로 각 발파진동식을 산출한 후에는 이 발파진동식에 다시 환산거리를 대입하여 진동속도를 산출하였다. 산출한 진동속도와 측정된 진동속도를 비교함으로써 회귀분석한 발파진동식의 신뢰성을 도심지의 소규모발파와 채석장의 대규모발파를 나누어서 살펴보았다. 그 결과 국내의 지질조건에 가장 적합한 식은 미광무국에서 제안한 ROOT SCALE과 CUBE ROOT SCALE 임을 밝혔다. 또한 본 논문에서는 실측자료와 기존의 현장자료를 이용하여 각 암종을 대표할 수 있는 발파진동식을 제안하였다.

* 정희원 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정희원 · 연세대학교 산업기술연구소 선임연구원

*** 정희원 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

1. 서 론

최근 도심지에서 각종 토목공사에 빈번하게 사용되고 있는 건설장비에 의한 진동이나 발파에 의한 발파진동은 인접시설물에 심각한 피해를 일으킬 수 있다는 점에서 문제가 되고 있다. 특히 사람이 불쾌감을 느끼거나 고통을 호소하는 발파진동의 한계치는 건물이 피해를 받는 발파진동의 한계치보다 낮으며 진동에 민감한 정밀전자제품 및 기계류들은 정상가동을 위한 상한진동한계치를 갖고 있다. 그러므로 각종 발파작업시 인접한 시설물, 구조물, 인체 및 발파진동에 민감한 기계류에 따라서 그 발파진동의 크기를 제한해야 할 것이다.⁽¹⁰⁾ 그러나 전 지역에 걸쳐 인체, 시설물, 기계류등에 피해를 주지 않는 안전한 상한한계치를 정하면 발파진동의 피해를 막을 수는 있지만 효과적인 발파작업을 수행할 수 없어 공정이 늦어지므로 경제적으로 불리할 수 있다. 그러므로 발파작업이 진행되고 있는 장소마다 그 장소에 적합한 발파진동식을 개발하여 여기에 맞춰서 발파작업을 진행하는 것이 효율적일 것이다.

발파진동 및 그 피해수준에 관한 연구는 1927년 미국의 Rockwell⁽⁶⁾에 의하여 측정연구된 이래 미광무국을 중심으로 1940년부터 최근까지 집중적으로 활발히 연구되어 왔고 스웨덴, 일본, 서독, 영국 등에서 공해문제와 관련하여 광범위하게 연구되어 온 과제이다.^(1,2,3,4,5,10) 우리나라에서도 1967년 이정인, 유창하⁽¹¹⁾의 석회석 광산에서 발파진동이 시설물에 미치는 영향연구, 1983년 지하철공사⁽¹⁰⁾의 발파진동 측정, 1984년 이경운⁽¹²⁾ 등의 연구자에 의해 지하철공사를 중심으로 수행된 발파진동 측정연구가 있었다.

본 연구에서는 국외의 여러 학자들이 제안한 발파진동식을 국내 여러 현장에서 수행한 측정자료와 실제 측정된 발파진동 자료에 적용하여 국내의 지질조건에 가장 적합한 발파진동식을 찾는데 그 목적을 두었다. 또한 이 식에 실제로 발파진동을 측정하여 얻은 결과를 연관시켜 그 타당성을 검토하였다.

2. 발파진동 추정식

발파에 의한 지반진동의 크기를 결정하기 위해서

는 발파진동의 강도를 나타낼 수 있는 매개변량, 즉 최대 지반변위, 최대 지반 진동속도, 최대 지반 진동가속도, 지반 진동주파수 등이 산정되어야 한다. 일반적으로 지반의 변형률은 지반의 최대 진동속도에 비례하므로⁽²⁾ 속도성분을 측정하고 이를 바로 구조물에 미치는 피해의 척도로 삼는 것이 실용적이며 가장 신뢰성 있는 방법이다.⁽¹⁰⁾ 발파진동 속도에 영향을 미치는 여러 요인들 중에서 가장 중요한 변수는 장약량 및 폭원과 측정과의 거리이고 나머지는 이 변수에 영향을 미치는 상수로 종래 발파진동의 크기는 약량과 거리의 관계에 관하여 많은 이론이 대두되고 있으나 일반적인 식은 다음과 같이 표시된다.

$$V = K \cdot W^m \cdot D^{-n} \quad (1)$$

여기서,

- V = 진동속도
- W = 폭약량
- D = 폭원에서 거리
- K = 폭약의 종류, 발파조건, 지질조건 등에 의해 결정되는 상수
- m, n = 폭약의 종류, 발파조건, 지질조건 등에 의해 결정되는 상수

3. 발파진동식

3.1 적용된 각종 발파진동식

발파진동식을 제안한 학자는 매우 많고 그들이 제안한 식도 여러가지이다. 그러나 본 연구에서는 이 중 대표적인 7개를 선택하여 자료분석에 적용하였다. 사용한 제안식들은 다음과 같다.

(1) Devine의 제안식

$$V = K \cdot W^{0.75} \cdot D^{-1.5} \quad (2)$$

여기서 V = 최대진동속도

K = 발파진동상수

W = 장약량

D = 폭원으로부터의 거리

(2) Langefors의 제안식

$$V = K \cdot \sqrt{W/D^{3/2}} = K \cdot W^{0.5} \cdot D^{-0.75} \quad (3)$$

(3) 伊藤의 제안식

$$V=K \cdot W^{0.67} \cdot D^{-2.0} \quad (4)$$

(4) 吉川の 제안식

$$V=K \cdot W^{0.75} \cdot D^{-2.0} \quad (5)$$

(5) 미광무국의 제안식

미광무국에서는 발파진동상수 K와 감쇄지수 n의 개념을 사용했는데 그 제안식은 다음과 같다.

$$V=K \cdot \left(\frac{D}{W^b} \right)^n \quad (6)$$

n=감쇄지수, b=장약지수=1/2

(6) CUBE ROOT SCALE

이것은 미광무국에서 제안한 ROOT SCALE에서 장약지수 b를 1/3을 쓴 것이다. 1/3을 쓰는 이유는 차원해석에 의한 것이다. 그 일반식은

$$V=K \cdot \left(\frac{D}{W^b} \right)^n \quad (7)$$

(7) ATTEWALL의 제안식

ATTEWALL은 최대진동속도 V 대신 V의 약 2배값인 V'를 사용한다. 그 일반식은

$$V'=K \cdot \left(\frac{W}{D^2} \right)^n \quad (8)$$

기존 Langefors의 제안식은 북유럽인 스웨덴에서 얻은 식인데, 스웨덴의 단단한 기반암에서 발파진동상수의 범위를 30~70의 값을 취하였다. 伊藤은 습질 Dynamite를 사용했을 경우 발파진동상수 K값을 250~1,000 사이의 것을 취하였고, 흑색화약을 사용했을 경우 15~21 사이를 취하였다. 吉川은 발파진동상수 K값을 100~700을 취했다.

3.2 각 발파진동식에 대한 측정치 처리 방법

본 연구에 적용된 각 발파진동식들에 대한 측정 자료의 처리방법은 크게 보면 회귀분석이다. 7개의 식 중 (1)~(4)는 발파진동상수 K만이 변수이므로 속도와 환산거리에 대하여 선형회귀분석을 실시하였고, (5)~(7)까지는 K와 n가 변수이므로 속도와 환산거리의 대수축상에서 최소자승법을 적용해 결

과를 정리하였다.

3.3 사용된 발파진동 측정치

본 연구에서 사용한 발파진동 측정치는 실제 측정한 발파 진동자료와 지금까지 우리나라의 여러 곳에서 실측한 발파진동자료를 수집한 것으로서 크게 서울 도심지에서 측정한 자료와 채석장(삼척, 동해)에서 측정한 자료로 나누어 진다. 두 가지의 경우로 나눈 이유는 도심지에서 측정한 발파진동은 인근 건물에의 영향을 고려해서 소규모 발파를 수행하고, 채석장에서는 대규모 발파를 수행하기 때문이다.

본 연구에서 실지 측정된 자료의 내용을 살펴보면 다음과 같다.

① 본 연구의 측정대상 지역은 서울시 서초구 서초동 1329-2.3 아주산업(주) 신축공사 현장이었으며 이 지역의 지하지질은 매립층, 충적층 및 풍화토층이 지표하 16.0~17.6m까지, 풍화암이 22.9~24.4m까지 발달되어 있고 자연수위는 지표하 평균 13.6m로 풍화토 중하단부에 형성되어 있다.

수집한 기존자료의 내용을 살펴보면 다음과 같다.

도심지에서의 측정

① 1983년 서울시 지하철 공사⁽¹⁰⁾에서 지하철 2~4호선 건설시 10개의 공구에서 측정한 자료가 있으며 이 10개의 공구는 암질면에서 경암, 준경암, 연암을 대표할 수 있는 구간으로 하여 각 공구를 암반의 압축강도로 대표시켰다.

② 1986년 이원제⁽⁹⁾가 고려대학교 의과대학 및 부속병원 신축 부지 공사 지역에서 발파진동을 측정한 자료를 수집하였으며 이 지역의 지질은 화강암 저반의 일부로서 대보화강암인 흔히 서울 화강암으로 불리는 암석이 분포되어 있었다. 역시 압축강도가 다른 여러 지역에서 발파진동을 측정하였다.

③ 1984년 이상원⁽¹³⁾이 동대문과 남대문(D-지구)에서 문화재 보호를 위한 진동속도의 허용치를 결정하기 위하여 발파진동을 측정하였다.

채석장에서의 측정

① 1979년 유창하, 이정인⁽¹¹⁾의 삼척 노천채석장에서 측정한 자료

② 1987년 이경운, 김민규⁽¹²⁾가 동해 노천채석장에서 측정한 자료

3.4 발파진동의 측정

아주산업(주) 신축공사 현장지역에서의 발파진동은 한국건설기술연구원에서 보유하고 있는 미국 SI-NCO사 제품인 S-6 Peak Vibration Monitor로서 측정기기의 특성에 따라 최대진동속도치만을 기록하였다. 현장에 발파계획에 맞추어서 총 47회의 발파진동을 측정하였으며 현장에서 장약량을 일률적으로 0.21 kg으로 하기 때문에 측정기기에 있는 센서의 위치를 변화시켜 가면서 발파진동을 측정하였다. 종래의 발파진동 측정은 3방향 성분중 가장 우세하다고 생각되는 수직 성분만을 고려하였으나 본 연구에서 사용한 측정기는 이들의 vector 합을 측

정할 수 있으므로 여기서는 3성분의 vector 합으로 속도를 고려하였다. 발파에 사용된 폭약은 Gelatin Dynamite였고 폭약량은 폭약 1개당 0.105 kg으로 2개씩 결선을 하여 지발당 0.21 kg이다. 뇌관은 D.S 전기 뇌관이며 뇌관을 직렬로 연결하였다.

4. 결과분석

4.1 기존 자료의 분석

본 연구에서 수집한 자료들은 소개한 기존 7개의 방법으로 분석하였다. 각 자료에 대한 회귀 분석은 압축강도를 기준으로 공구마다 처리를 하였으며 그

표 1. 서울시 지하철 공구에서의 발파진동 분석

| 압축강도 (kg/cm ²) | Devine | Langefors | 伊 藤 | 吉 川 | Cube root Scale | Root Scale | Attewall |
|----------------------------|---------|-----------|---------|---------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 880 | K=37.05 | K=3.299 | K=251.2 | K=223.5 | K=90.00 n=-1.67 | K=37.05 n=-1.94 | K=2.456 n=0.97 |
| 1450* | K=147.2 | K=9.22 | K=592.9 | K=681.8 | K=138.0 n=-1.6 | K=132.0 n=-1.4 | K=2.629 n=0.97 |
| 1190 | K=26.02 | K=4.68 | K=110.2 | K=98.66 | K=56.00 n=-1.6 | K=21.27 n=-1.41 | K=0.425 n=0.72 |
| 1380 | K=79.97 | K=8.86 | K=309.4 | K=317.9 | K=107.0 n=-1.63 | K=47.4 n=-1.3 | K=1.962 n=0.76 |
| 1450* | K=33.06 | K=3.87 | K=207.3 | K=181.5 | K=85.00 n=-1.7 | K=12.6 n=-1.13 | K=0.252 n=0.57 |
| 780 | K=29.66 | K=2.69 | K=145.1 | K=145.3 | K=60.00 n=-1.67 | K=0.88 n=-0.44 | K=0.018 n=0.22 |
| 350 | K=50.99 | K=5.54 | K=171.4 | K=184.5 | K=48.00 n=-1.54 | K=286.2 n=-2.11 | K=5.72 n=1.05 |
| 290 | K=75.04 | K=6.88 | K=270.9 | K=295.2 | K=94.00 n=-1.64 | K=12.4 n=-0.98 | K=0.248 n=0.49 |
| 345 | K=50.38 | K=4.767 | K=176.6 | K=194.8 | K=87.00 n=-1.78 | K=5.11 n=-0.84 | K=0.102 n=0.42 |
| 120 | K=79.97 | K=8.86 | K=309.4 | K=317.9 | K=107.0 n=-1.63 | K=47.4 n=-1.32 | K=1.962 n=0.76 |

*공구내에서 압축강도는 같지만 위치는 다름.

표 2. 고려대학교 부속병원 신축부지에서의 발파진동 분석

| 압축강도 (kg/cm ²) | Devine | Langefors | 伊 藤 | 吉 川 | Cube root Scale | Root Scale | Attewall |
|-------------------------------|---------|-----------|---------|---------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 364 | K=53.70 | K=3.83 | K=400.6 | K=364.9 | K=250.0 n=-1.84 | K=80.9 n=-1.62 | K=1.619 n=0.82 |
| 421* | K=69.07 | K=6.20 | K=510.6 | K=447.7 | K=239.0 n=-1.76 | K=76.4 n=-1.54 | K=1.528 n=0.77 |
| 800 | K=121.0 | K=10.9 | K=786.1 | K=706.6 | K=380.0 n=-1.76 | K=529.7 n=-2.01 | K=10.59 n=1.01 |
| 392 | K=10.29 | K=0.74 | K=104.4 | K=85.99 | K=174.0 n=-2.12 | K=147.8 n=-2.39 | K=2.96 n=1.20 |
| 421* | K=17.84 | K=1.25 | K=145.9 | K=129.1 | K=204.0 n=-2.10 | K=157.1 n=-2.18 | K=3.146 n=1.09 |
| 722 | K=94.44 | K=7.44 | K=750.2 | K=662.3 | K=428.0 n=-1.83 | K=314.7 n=-1.88 | K=1.619 n=0.82 |
| 684 | K=89.88 | K=5.49 | K=830.9 | K=734.8 | K=294.0 n=-1.71 | K=117.2 n=-1.58 | K=2.349 n=0.79 |
| 578 | K=22.79 | K=1.53 | K=208.5 | K=181.2 | K=199.0 n=-1.91 | K=123.7 n=-2.02 | K=2.48 n=1.01 |
| 613 | K=31.75 | K=2.02 | K=226.9 | K=237.9 | K=229.0 n=-1.97 | K=120.1 n=-1.92 | K=2.412 n=0.96 |
| 481 | K=15.41 | K=1.21 | K=112.5 | K=102.2 | K=169.0 n=-2.12 | K=120.3 n=-2.16 | K=2.407 n=1.08 |

*공구내에서 압축강도는 같지만 위치는 다름.

표 3. D-지구에서의 발파진동 분석

| 공구명 | Devine | Langefors | 伊 藤 | 吉 川 | Cube root Scale | Root Scale | Attewall |
|-----|---------|-----------|----------|---------|---------------------|-------------------|--------------------|
| D 1 | K=16.22 | K=1.25 | K=65.59 | K=70.58 | K=3.2 n=-1.11 | K=2.31 n=-0.97 | K=0.046 n=0.49 |
| D 2 | K=96.53 | K=5.58 | K=456.89 | K=501.7 | K=6.05 n=-0.86 | K=4.48 n=-0.74 | K=0.09 n=0.37 |
| D 3 | K=52.22 | K=3.51 | K=252.1 | K=268.6 | K=0.132 n=-10.07 | K=0.13 n=-0.01 | K=0.003 n=-0.03 |

표 4. 채석장에서 발파진동 분석

| 공구명 | Devine | Langefors | 伊 藤 | 吉 川 | Cube root Scale | Root Scale | Attewall |
|----------|---------|-----------|----------|----------|--------------------|-------------------|------------------|
| SAMCHUCK | K=48.73 | K=3.55 | K=732.4 | K=513.4 | K=93.5 n=-1.48 | K=33.7 n=-1.71 | K=0.6 n=0.71 |
| DONGHAE | K=49.62 | K=2.80 | K=2226.8 | K=1164.1 | K=416.9 n=-1.61 | K=31.1 n=-1.44 | K=0.62 n=0.72 |

표 5. 아주산업(주)현장에서의 발파진동 분석

| 공구명 | Devine | Langefors | 伊 藤 | 吉 川 | Cube root Scale | Root Scale | Attewall |
|-----|---------|-----------|---------|---------|--------------------|--------------------|------------------|
| AJU | K=79.81 | K=7.514 | K=237.5 | K=269.1 | K=134.1 n=-1.76 | K=215.2 n=-1.75 | K=4.09 n=0.87 |

결과식을 다음의 표 1~표 4에 나타내었다. 또한 실제 측정된 발파진동의 분석도 표 5에 나타내었다.

앞의 표들로부터 알 수 있듯이 Devine의 경우 K값은 10~150 사이의 값을 가지며 Langefors의 경우 K값은 0.7~10, 伊藤의 경우는 K값이 약 100~1000의 값을 가지며 2000 이상의 것도 있었다. 또한 吉川의 경우 K값이 100~1000 정도로 伊藤의 값과 비슷한 범위를 가지고 있었다. CUBE ROOT SCALE의 경우 K값이 50~400 사이에서 변하고 작은 것은 0.7 정도되는 것도 있었다. n값은 -2.1~-1.4의 범위에 있었고 큰 것은 -0.07인 것도 있었다. ROOT SCALE 에서는 K값이 20~400 정도의 범위를 가지고 있었으며 n값은 -2.1~-0.4의 범위로 큰 것은 -0.01까지도 있었다. 마지막으로 Attewall의 경우는 속도대신 속도의 약 두배치를 사용한다고 되어 있는데 여기서는 두배치를 사용하여 분석하였다. 그 결과 K값의 범위는 0.01~10 정도이고 n값은 0.2~1.2의 범위를 가졌고 음(-)의 값을 가지는 것도 있었다. 문헌조사에 의하면 Langefors는 K값이 30~70의 범위를 가진다고 하였는데 본 연구의 0.7~10과 차이가 나는 것은 스웨덴의 단단한 기반암과 우리나라 암질의 역학적인 특성차이로 인한 것이라고 생각된다. 미광무국의 ROOT SCALE에서 K값을 보면 12~550을 제안했는데 이는 본 연구의 범위와도 비슷하다. 하지만 n값은 다소 큰

범위를 갖고 있었다. 우리나라 자료의 분석결과는 伊藤과 吉川의 연구결과와 비교적 비슷한 범위를 갖고 있었고 Attewall의 연구결과와는 다소 차이가 있었다. 이와같이 발파진동상수는 일반식을 여러 학자가 자신들이 제안한 식에 따라 변형하였기 때문에 각각 다른 값의 범위를 갖고 있다. 또한 발파진동상수는 비례상수이므로 그 값이 크면 클수록 진동속도는 크게 되므로 발파진동상수가 큰 지역은 상대적으로 발파진동의 피해가 크다고 할 수 있다.

4.2 계산속도와 실측속도의 비교

본 연구에서는 제안된 발파진동식의 국내자료에 대한 적용성을 알아보기 위해 회귀분석한 각 식에 환산거리를 대입하여 속도를 역으로 구해서 이 결과와 측정속도를 비교하였다. 역산된 발파진동속도와 측정된 발파진동속도의 적합도는 바로 역산된 발파진동 속도의 계산에 사용된 회귀분석식의 정확도를 나타낸다. 그런데 이들 7개의 제안식은 각 나라의 지질조건에 따라 제안된 식이므로 이들 식 중 가장 좋은 적합도를 나타내는 식이 우리나라의 지질조건에 가장 적합한 식이라 생각할 수 있다. 계산속도와 실측속도의 비교를 위하여 도심지와 채석장 발파를 구분하여 도시한 전형적인 예는 그림 1(ROOT SCALE-도심지)과 그림 2(ROOT SCALE-채석장)와 같으며 이와같은 방법에 의하여 구한 7개의 제안식의 적합도는 표 6과 같다.

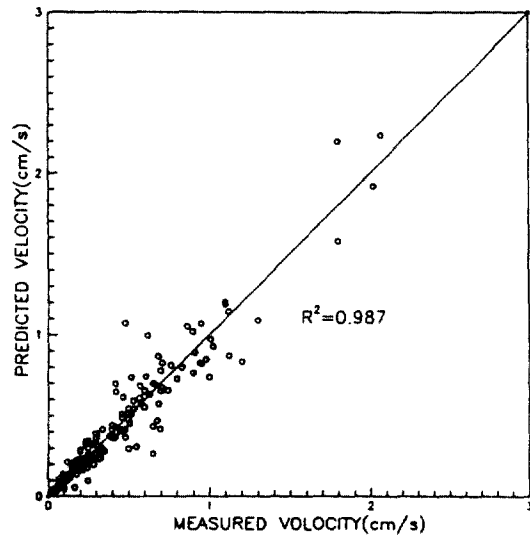


그림 1. ROOT SCALE에 의한 발파진동속도 계산값과 측정값과의 비교(도심지).

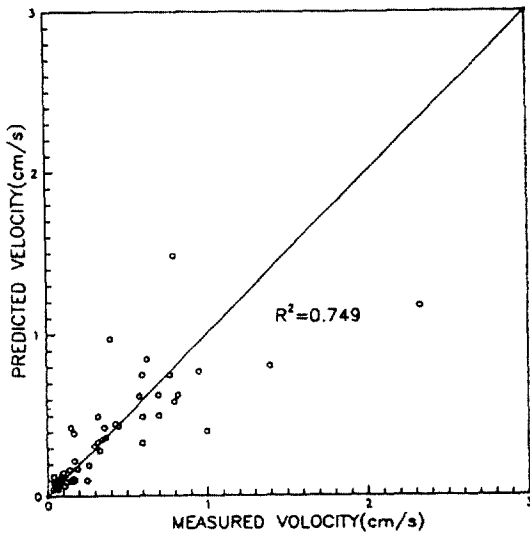


그림 2. ROOT SCALE에 의한 발파진동속도 계산값과 측정값과의 비교(채석장).

표 6에서 이들 7개의 제안식 중 가장 좋은 적합도를 보이는 식은 R^2 값이 가장 높은 미광무국의 ROOT SCALE과 CUBE ROOT SCALE인 것을 알 수 있다. 따라서 우리나라의 지질조건에 가장 적합한 식은 ROOT SCALE과 CUBE ROOT SCALE인 것을 알 수 있었다. 또한 도심지와 채석장의 발파를 구분하여 비교하여 본 결과 위의 식들 모두가 도

표 6. 기존 제안식의 적합도

| 제안식 | 회귀직선의 결정계수(R^2) | |
|-----------------|---------------------|-------|
| | 도심지 | 채석장 |
| Devine | 0.949 | 0.741 |
| Langefors | 0.928 | 0.705 |
| 伊藤 | 0.946 | 0.800 |
| 吉川 | 0.944 | 0.801 |
| Root Scale | 0.987 | 0.749 |
| Cube Root Scale | 0.989 | 0.751 |
| Attewall | 0.917 | 0.711 |

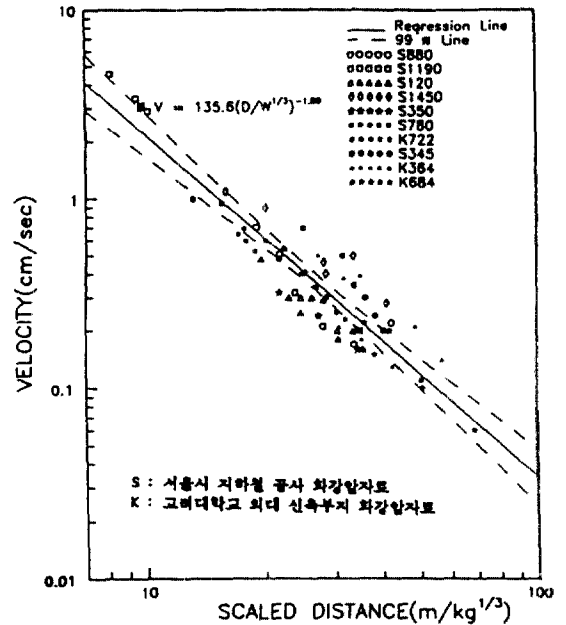


그림 3. 화강암에 대한 발파진동식.

심지의 소규모 발파에 대하여는 좋은 적합도를 나타내었으나 채석장의 대규모 발파에는 좋은 적합도를 나타내지 못하는 것을 알 수 있었다.

4.3 발파진동식의 제안

본 연구에서는 수집된 기존의 측정자료와 실측자료를 이용하여 암석의 종류를 기준으로 하여 각 암석을 대표할 수 있는 발파진동식을 산출하였다. 구분된 암석의 종류는 화강암, 편마암, 그리고 석회암이었으며 제안된 발파진동식중 국내의 지질조건에

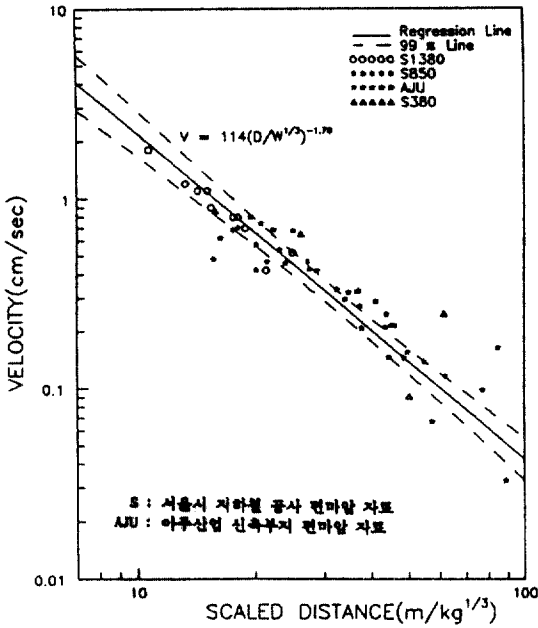


그림 4. 편마암에 대한 발파진동식.

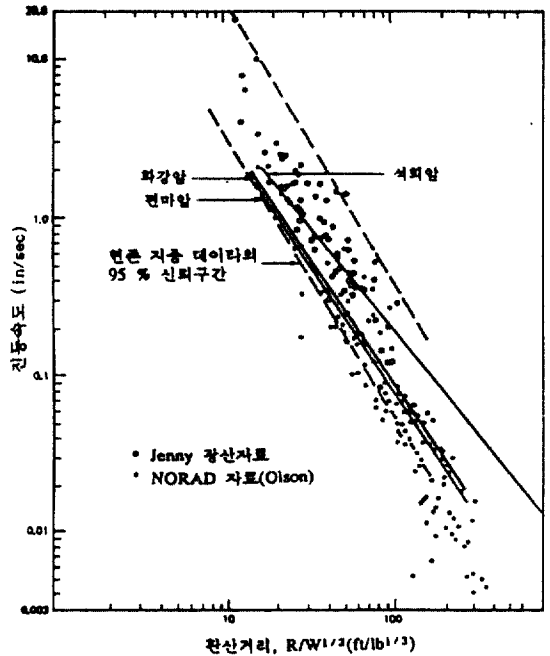


그림 6. 각 암종에 대한 발파진동식과 Jenny 광산 연구의 비교.

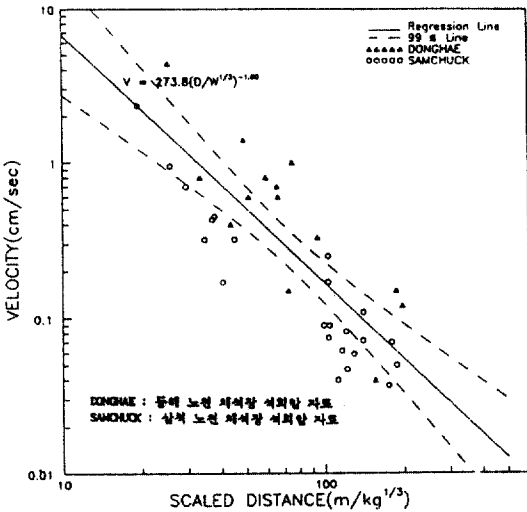


그림 5. 석회암에 대한 발파진동식.

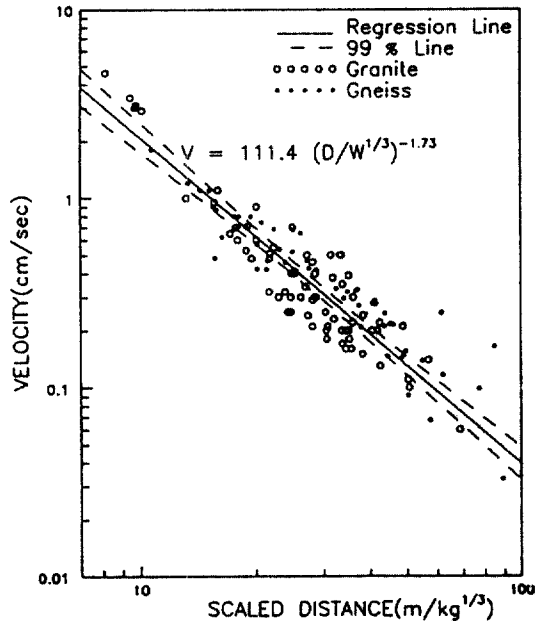


그림 7. 화강암과 편마암의 발파진동식.

가장 적합하다고 판단된 미광무국의 ROOT SCALING과 CUBE ROOT SCALING 중 CUBE ROOT SCALING을 사용하여 분석하였다. 또한 자료의 회귀분석시 이들 자료의 99% 신뢰구간을 설정하여 회귀선과 함께 다음 그림 3~그림 5에 도시하였다.

분석결과, 화강암에서는 $V = 135.6(D/W^{1/3})^{-1.80}$ (cm

/sec)의 식을, 편마암에서는 $V = 114(D/W^{1/3})^{-1.70}$ (cm/sec)의 식을, 석회암에서는 $V = 278.3(D/W^{1/3})^{-1.60}$ (cm/sec)의 식을 얻을 수 있었다.

분석에 사용된 각 암종에 대한 자료들 중 화강암과 편마암의 자료는 서울 지역에 분포되어 있는 것에만 국한되었고, 석회암은 동해와 삼척, 즉 강원도 지역에 국한되었다. 따라서 어느 정도는 지역의 특성을 반영하였다고 생각된다.

또한 앞에서 제안된 각 암종에 대한 발파진동식의 타당성을 검토하기 위하여 그림 6과 같이 Jenny 광산(Jensen, 1980)¹⁵⁾에서의 비슷한 연구결과와 비교하였다. 비교 결과 제안된 각 암종에 대한 발파진동식이 Jenny 광산에서의 연구와 비슷한 결과를 나타내 타당성이 있다고 판단되었다.

또한 앞의 그림에서 알 수 있듯이 화강암과 편마암의 발파진동 회귀선이 거의 비슷한 결과를 나타내므로 이 두 암종의 자료를 같이 분석해 보았다. 다음 그림 7과 같이 분석해 본 결과 $V=111.4(D/W^{1/3})^{-1.73}$ (cm/sec)의 식을 얻을 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 우리나라의 지질조건에 알맞는 발파진동식을 결정하기 위하여 외국의 여러 학자가 제안한 7개의 식을 이용하여 발파진동의 측정자료를 분석하였다. 분석에 사용된 자료는 우리나라의 여러 현장에서 지금까지 측정된 발파진동자료이며, 또한 본 연구를 위해 아주산업(주) 신축공사현장에서 발파진동의 측정을 통해서 분석 검토하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제안된 7개의 식에 따라 각 자료를 회귀분석한 결과 우리나라의 지질조건에 비교적 잘 맞는 식은 역산된 속도와 실측된 속도가 가장 근접하는 미광무국의 ROOT SCALE과 CUBE ROOT SCALE이었다.
2. 소규모발파와 대규모발파를 구분하기 위하여 우리나라 도심지의 발파진동과 채석장의 발파진동 자료를 따로 분석한 결과 여러 제안식들이 도심지의 발파진동에는 잘 맞았으나 채석장에서의 발파진동에는 그다지 잘 맞지 않음을 알 수 있었다.
3. 각 암종을 대표할 수 있는 발파진동식을 화강암, 편마암, 그리고 석회암에 대해 각각 제안하였다. 그 결과 화강암과 편마암에서는 매우 비슷한 발파진동식을 나타내므로 화강암과 편마암 모두에 적용될 수 있는 발파진동식을 제안하였다. 제안식은 다음과

같다.

$$1) \text{ 화강암에서는 } V=135.6(D/W^{1/3})^{-1.80}(\text{cm/sec}),$$

$$2) \text{ 편마암에서는 } V=114.0(D/W^{1/3})^{-1.70}(\text{cm/sec}),$$

$$3) \text{ 석회암에서는 } V=273.8(D/W^{1/3})^{-1.60}(\text{cm/sec}).$$

이고,

$$4) \text{ 화강암과 편마암 모두에 대해서는 } V=111.4(D/W^{1/3})^{-1.73}(\text{cm/sec}).$$

참고문헌

1. Crandell, F.J., "Ground Vibration Due to Blasting and its Effects on Structures", *J. Boston Soc. Civil Engineers*, Vol. 36, No. 2, 1949, pp.222-245.
2. Duvall, W.I., Devine, J.F., "Avoiding Damages by Air Blasts and Ground Vibrations from Blasting", *Surface Mining, AIME*, 1968, pp. 398-412.
3. Duvall, W.I., Fogelson, D.E., "Review of Criteria for Estimating Damages to Residence from Blasting Vibrationse", U.S.B.M., RI 5968, 1961.
4. Edwards, A.T., and Northwood, T.D., "Experimental Studies of the Effects of Blasting on Structures", *The Engineer*, Vol. 210, Sept., 1960.
5. Langefors, Ulf et al., "Ground Vibrations in Blasting", *Water Power*, 1958, pp. 335-338, 390-395.
6. Rockwell, E.H., "Vibration Caused by Quarry Blasting and Their Effect on Structures", *Rock Products*, Vol. 30, 1927, pp. 58-61.
7. Wiss, J.F., "State of the Art", *ASCE*, Vol.107, No. GT2, 1981.
8. "발파작업에 의해 발생되는 지반진동이 건물구조에 미치는 영향에 관한 조사연구", 한국과학기술원 연구보고서, 1981.
9. 이원재, "발파에 의한 진동 및 지반특성이 지반진동에 미치는 영향에 관한 연구", 고려대학교 대학원, 석사학위 논문, 1987.
10. "발파진동식 확립과 제어발파 지침 결정을 위한 연구보고서", 서울시 지하철공사, 1984.
11. 이정인, 유창하, "발파작업에 의한 지반진동이 지상구조물에 미치는 영향연구", *대한광산학회지*, Vol. 16, 1979, pp. 41-50.
12. 이경운, 김민규, 신희순, "화약, 암석강도 및 발파 유형이 발파진동에 미치는 영향", *대한광산학회지*, Vol. 21, 1984, pp. 334-339.

13. 이상원, “발파로 인한 진동이 D-지구 문화재에 미치는 영향에 관한 실험적 연구”, 연세대학교 산업대학원, 석사학위 논문, 1984.
14. “아주산업(주) 신축사옥 지질조사 보고서”, 삼림산업, 1991.
15. 양형식 역, 발파진동학, 구미서관, 1992. 16. “露天

堀鑛山における 爆破振動 測定”, 일본광업회지, No.95, 1979, pp. 393-398.

17. “發破振動 測定 指針について”, 일본광업회지, No. 92, 1976, pp. 637-642.

(接受 : 1994. 1. 10)