

바닥발파에서 암질지수(RQD)와 발파진동상수 K, n의 관계

Relationship between Rock Quality Designation and Blasting Vibration
Constant "K" & Decay Constant "n" by Bottom Blasting Pattern

천 병 식*1

Chun, Byung - Sik

오 민 열*2

Oh, Min - Yeoul

Abstract

This paper is the analysis of the relationship between RQD and decay constant, blasting vibration constant of cube root scaling and square root scaling, through experimental blasting test in subway construction for excavation of shaft hole by bottom blasting.

The magnitude of particle velocity is largely effected by the distance from blasting source, the maximum charge per delay and the properties of ground.

In order to verify the effects of ground properties on blast-induced vibration, the relationship between magnitude of blasting vibration and Rock Quality Disignation which stands for joint property was studied.

The results of test are verified that blasting vibration constant "K" and the absolute value("n") of decay constant relatively increase as R Q D increased. According to the result, it can be predict the particle velocity by the blast-induced vibration in bottom blasting pattern.

요 지

본 연구는 수직구의 바닥굴착을 위한 바닥발파시 삼승근환산식과 자승근환산식의 발파진동상수 및 감쇠지수와 암질지수(RQD)와의 관계를 시험발파계측을 통하여 정리 분석한 것이다.

각종 발파시 발파진동의 크기는 장약량, 발파원과 발파진동 측정지점과의 거리, 지반의 특성에 따라 크게 좌우되며 본 논문에서는 지반의 특성이 발파진동에 미치는 영향을 규명하기 위하여 암반의 절리특성을 대표하는 RQD와 발파진동 크기와의 관계를 연구한 것이다. 시험결과 RQD의 증가에 따라 발파진동상수 K와 감쇠지수 n의 절대치는 상대적으로 증가하는 것으로 나타났으며 본 연구결과에 의하여 향후 암질지수에 따른 바닥발파의 발파진동속도를 예측할 수 있다.

*1 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정희원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

1. 서 론

최근 대도시 교통난 해결을 위한 지하철 건설공사와 지하공간의 활용을 위한 압반의 굴착이 계속 증가되고 있는 추세이다. 도심지 근접시공에서 굴착을 위한 발파작업은 주요 구조물의 하부 10~30m 지점에서도 각종 지하구조물 건설등을 위하여 실시되고 있다. 따라서 발파작업으로 인한 진동, 소음의 문제를 해결하기 위한 연구가 필요한 실정이다.

건설공사에서 발생하는 환경공해는 지반굴착을 위한 발파진동 및 소음 외에도 지반굴착 및 건물해체등을 위한 건설기계류의 사용이 급증함에 따라 진동발생원이 점차 다양해지고 각종 굴착에 이용되는 굴착기계, 천공기계 등으로 인하여 타격소음, 타격진동 등도 문제점으로 대두되고 있다. 건설기계에 의해 발생하는 지반진동 속도와 진동주파수는 발파진동의 특성과 거의 유사하여 전파경로, 전파방식이 동일한 특징을 지니고 있는 것으로 알려져 있으므로 정확한 진동의 크기 예측 및 대책수립을 위한 연구 또한 필요한 실정이다.

최근 발파진동으로 인한 진동 및 소음을 제어하기 위하여 화약의 종류, 발파방법, 장약량에 따른 발파효과의 개선, 진동의 상호간섭, 자유면의 활용 등 발파방법의 개선에 의한 발파진동경감과 라인드릴링공법(line drilling), 프리스플릿팅(presplitting) 등 발파진동 경감을 위한 인위적인 여러가지 공법의 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

현재 이용하고 있는 발파진동의 크기 예측을 위한 발파진동 크기의 추정식은 비교적 큰 오차를 수반하고 있을 뿐만 아니라 연구결과가 일정 지역, 일정 방법에 국한된 사례 연구로서 범용적 이용에 어려움이 있으며, 건설현장에서 발파형식의 적용을 위해서는 반드시 시험발파를 실시하여 허용진동치 범위 내에서 발파패턴을 결정한 후 발파작업을 시행하고 있는 실정이다.

발파진동의 크기는 특히 대상압반의 질리요소와 자유면에 의해 크게 영향을 받으며 특히

자유면과 밀접한 관계를 갖고 있는 암질지수(RQD)와 자승근법, 삼승근법에 의한 발파진동상수 K, 감쇠지수 n의 관계를 현장에서 실시한 시험결과를 이용하여 분석한 것이며 지하철 건설등을 위한 수직구 굴착에서 바닥발파의 경우에 한하여 본 연구 결과를 적용할 수 있도록 한 것이다.

2. 시험지반의 지층 개요

본 연구는 지하철 건설구간에서 수직구 굴착을 위한 시험발파작업시 측정된 측정자료를 이용 분석하였다. 시험발파의 대상지층은 매립층, 풍화대층을 굴착한 후 노출된 기반암(연암, 보통암 및 경암)층으로 각 지층의 개략적인 공학적 특성은 다음과 같다.

매립층은 인위적으로 매립한 층으로 지역에 따라 불규칙하게 분포하고 있다. 본 층의 구성은 사질토가 주류를 이루고 있으며 부분적으로 실트, 자갈, 전석이 포함된 혼합층이다.

풍화대층은 오랜 기간 동안 기반암이 풍화작용을 받아 본래의 조직 및 강도를 상실하여 형성된 풍화토, 풍화암층으로 풍화 정도에 따라 암석들이 완전 분해되어 토립자들의 재구성하여 이루어진 풍화잔류토와 조직의 분해는 완료되지 않으나 암석의 내부까지 풍화가 진행되어 약한 충격에 의해 쉽게 부서지는 풍화암층으로 구분한다.

연암층은 기반암의 상부층부로서 대체로 수미터의 두께를 보이고 있으며, 기계적, 화학적 풍화작용이 진행되고 있다. 코아 회수율은 60% 정도이고 RMR 값은 0~14로 불량한 암질상태를 나타낸다. Q값은 0.002~0.005의 범위로 매우 불량한 상태를 보인다.

보통암층 및 경암층은 연암층 하부에 분포하며 기반암인 화강암 및 편마암 지역으로서 보통암층은 코아 회수율 60% 정도이며 RQD는 34~58%로서 불량-보통의 상태를 나타낸다. 경암층은 코아 회수율이 80% 이상, RQD는 15~48%로서 불량한 상태에서부터 RQD 70% 이상의 매우 양호한 상태를 나타내는 층으로 분포되어 있으며 대표단면의 지층현황은

다음과 같다.

깊이 (DEPTH) (M) (고도) (ELEVATION)	두께 (THICKNESS)	관형 (CASING TYPE)	기호 (SYMBOLIC LOG)	지층설명 (DESCRIPTION OF MATERIAL)	파괴 (T.C.R./R.Q.D.)
0.30 (142.04)	0.3	Nx		CONCRETE	
2.00 (140.34)	1.7	OP	++++	Very dense, moist, light brown, silty fine to coarse SAND with rock fragments : C W Granite (화강암 풍화암)	
6.40 (135.94)	4.4		++++	Light brown to yellowish brown, very broken to broken, H W to M W GRANITE, very weak to weak(화강암 연암)	5/10 10/0 33/0
			▲▲	Light brown to yellowish brown, broken to slightly broken, M W GRANITE, moderately strong to strong ; 8.0~8.7m, 9.0~9.3m, 15.4~16.8m very broken (화강암 경암)	66/27 33/10
			▲▲		67/33
			▲▲		67/47
			▲▲		73/60
			▲▲		100/80
			▲▲	(Continued to 36.0)	60/15

그림1. 대표 시추 주상도

3. 암질지수(RQD)

암질지수(RQD)는 암반의 특성을 나타내는 지수로 쓰이는데, 암질지수 자체로서 암반

의 특성을 정량화하기에는 불충분하지만, 터널 공사에 적용시 터널 지보의 선택에 대한 판단 기준으로 최근에 유용하게 이용되고 있다. RQD는 미국과 유럽에서 널리 쓰이고 있으며

최근 우리나라의 지하철에서 지반조사시 암질을 평가하는데 이용하고 있다.

RQD의 정량적인 지수는 변형된 코아회수율로 볼 수 있는데 그 길이가 100mm이거나 그보다 큰 코아조각의 길이를 합산하여 구하므로 100mm 미만의 코아는 무시된다. 코아 조각의 길이는 암반내에서 근접하게 발달한 전단, 절리, 풍화에 기인한 것이며 RQD는 불연속면의 견고도, 방향, 연속성, 충전물 등의 영향이 암질에 고려되지 않는다는 것이다.

RQD는 수십년 전 보통암질에 관한 설명을 코아 회수율로만 이용할 때 암질을 나타내는 지수로 도입하였다. 이 정량적인 지수는 추가 보링이나 다른 탐사작업이 요구되거나 정밀조사를 해야 하는 암질이 나쁜 지역에서의 암질의 판단기준으로 널리 이용되고 있다.

RQD의 결정을 위하여 ISRM(International Society for Rock Mechanics)에서는 더블코아바렐로 천공하여 적어도 NX의 코아 크기로 시추하도록 하고 있다. RQD와 공학적인 암질의 분류는 Deere에 의해 제안되었으며 표1에 나타낸 바와 같다.

표 1 RQD와 암질의 관계

RQD(%)	암 질
0~25	아주 불량
25~50	불 량
50~75	보 통
75~90	양 호
90~100	아주 양호

RQD는 100mm 보다 길이가 길고 깨끗한 코아 조각의 길이를 더하여 전체 코아의 길이로 나눈 것이어서 아주 풍화가 심하거나 절리가 많은 암석은 RQD 값이 0에 가깝다.

코아 길이에 관련한 RQD의 계산은 현장의 실제 시추길이에 관련하며, 코아의 길이는 중심선을 따라 측정한다. 최적의 코아직경은 NX이나 만일 조심스럽게 드릴링을 해서 코아 파괴가 일어나지 않는다면 코아의 직경이 36.5mm에서 85mm의 크기가 쓰이기도 한다.

또한 코아의 RQD를 추정하기가 불가능한 경우 단위체적당의 절리의 수로부터 추정하는 방법을 제안하였는데, 각각의 절리군 1.0m당 절리수를, 모든 절리군에 대해 합하여 나타낸다.

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad (1)$$

여기서,

$$J_v = \text{단위 } m^3\text{당 총 절리수}$$

실제 RQD를 측정하지 않을 경우 J_v 값의 측정이 가능하다면 RQD와 관련하여 현장에서 유용하게 적용할 수 있다. RQD는 그 자체만으로 암반에 대해 충분한 기술을 할 수 없는 단점이 있는데 이는 절리의 방향, 견고도, 충전물 등을 고려하지 않기 때문이다. 따라서 RQD는 한 시추공에서 양호한 암석과 불량한 암석의 비를 나타내기 위한 기초적인 실용 변수이다.

4. 발파진동

4.1 발파진동 이론

폭약이 발파내에서 폭발하면 강력한 폭발충격이 주변 암반에 가해지게 되며 이때 발생하는 에너지는 전체의 5~20%가 탄성파로 변환되어 지반에 전파되어 발파진동으로 소비되는 것으로 알려지고 있다.

발파에 의해서 발생하는 탄성파가 암반층을 전파하는 형태는 입체파와 표면파로 나누어지며 더욱 세분하면 P파, S파, R파, Q파, H파 등으로 분류한다. 여기서 발파진동에 영향을 크게 미치는 파의 형태는 표면파인 R파이다. 그러나 발파진동을 측정하는 지점과 발파원과의 거리가 가까우면 파가 합성되어 복합파의 형태로 나타난다. 실제 지하철 공사에서의 발파는 발파지점과 발파진동의 측정지점과의 거리가 수십미터이므로 여러파의 도달시간이 거의 같아 복합파의 형태로 나타난다고 볼 수 있다.

발파에 의한 지반운동은 변위(displacement), 속도(particle velocity), 가속도(accel-

eration)의 3가지 방법으로 표시되며 수학적 관계의 성립은 식 (2), (3)과 같고 변환이 가능하다.

$$D = \int V \cdot dt \quad V = \frac{dD}{dt} \quad (2)$$

$$V = \int A \cdot dt \quad A = \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

여기서, t : 시간

D : 변위

V : 속도

A : 가속도

지반운동은 여러가지 주파수를 갖는 파형이 중첩된 것이지만 지반의 단순진동(simple sinusoidal harmonic motion)으로 볼때 최대 진폭에서 변위, 속도, 가속도 사이에 다음의 식 (4), (5), (6)의 관계식이 성립된다.

$$D = \frac{V}{2\pi f} \quad V = 2\pi f \cdot D \quad (4)$$

$$V = \frac{A}{2\pi f} \quad A = 2\pi f \cdot V \quad (5)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (6)$$

여기서, D : 최대변위

V : 최대진동속도

f : 최대변위에서 진동주파수

T : 최대변위에서 진동주기

상기의 발파진동 이론에 근거하여 현장에서 현실적으로 이용하기 위한 발파진동 크기 추정치에 대한 연구 결과는 식 (7), (8), (9)와 같으며, 이와 같은 연구결과에서 발파진동크기는 발파원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 진동치가 작아지고 장약량이 증가함에 따라 발파진동 크기가 커지는 경향을 나타내는 것으로 대표되는 발파진동 추정식을 발표하였다.

(1) 자승근 환산식(square root scaling)

$$V = K_s(D/W^{1/2})^{-n_s} \quad (7)$$

여기서, K_s : 자승근 환산식의 발파진동 상수

n_s : 자승근 환산식의 감쇠지수

(2) 삼승근 환산식(cube root scaling)

$$V = K_c(D/W^{1/3})^{-n_c} \quad (8)$$

여기서, K_c : 삼승근 환산식의 발파진동 상수

n_c : 삼승근 환산식의 감쇠지수

(3) 입지 특성 환산식(site specific scaling)

$$V = K \cdot D^{-n} \cdot W^b \quad (9)$$

여기서, V : 발파진동속도(cm/sec)

D : 발파원과의 거리(m)

W : 지발당 장약량(kg)

K : 발파진동상수

n : 감쇠지수

b : 장약지수

상기의 식 중에서 장약지수는 미국 광무국(U.S.B.M)의 경우 실험적으로 1/2을 제안하였으며 이를 square root scaling이라 한다. 또한 1/3을 제안하여 적용한 식은 cube root scaling이라 하며 차원해석의 이론을 근거로 하고 있다.

발파진동의 추정식은 도심지터널 및 공사장 주변지반, 건물, 인명에 미치는 영향을 최소화 하기 위함은 물론 발파계획 단계에서 발파진동 크기의 예측을 위한 수단으로 이용되고 있다.

4.2 발파진동에 영향을 미치는 요소

발파에 의해 지반진동수준에 영향을 주는 변수들중, 가장 중요한 변수가 폭약의 장약량, 대상암반의 조건, 지반진동의 전파경로 등이다. 이들을 세분하여 보면 자유면의 수와 크기, 암석의 강도, 암반의 구조, 폭약의 종류 및 특성, 뇌관의 종류, 천공 길이와 최소저항선의 비, 장약량과 장약방법, 지발당 장약량, 발파공의 배치등이다.

최근의 발파개념은 굴착면 주변의 암반에 각종 지보재를 설치하여 원지반을 이용하므로 굴착면 주변의 암반손상을 줄임은 물론 발파로 인하여 발생한 진동이 주변지반에 미치는 영향을 최소화하는 공법을 채택하고 있다.

발파진동에 미치는 영향과 대상지역의 암반 조건에 따른 감쇠특성, 진동주파수 특성, 지반진동의 전파특성을 조사, 분석하여 발파패턴의 계획에 이용하여야 한다. 암석의 강도 및 암반에 발달해 있는 절리에 따라서 암반중에 탄성

파로 전달되는 에너지 비율이 진동특성에 큰 영향을 미친다.

특히, 본 연구에서와 같이 발파진동의 크기는 암반의 절리특성이 크게 좌우하므로 암반의 절리특성이 대표되는 RQD와 J, 값등에 의해 발파진동을 추정할 수 있다면 각종 건설현장, 광산자원개발 현장에서 유효하게 이용할 수 있다.

5. 발파진동의 측정

5.1 발파진동 측정기구

본 연구에서 사용된 발파진동 측정기는 SSU 2000 DK로 monitor는 6개를 동시에 측정할 수 있고 디지털과 아날로그 형태로 나타낼 수 있으며 진행방향, 수직방향, 접선방향을 측정하여 벡터합을 구할 수 있다.

SSU 2000 DK의 제원 및 특징은 다음과 같다.

Trigger Level : 0.6~30mm/s

Resolution : 0.1mm/s

Record time : 5, 10 or 15 seconds

Continuous mode range : 32~260mm/s

Graph Length : 50~1727mm

Print - USBM, OSMRE

Internal Memory : 1 full waveform and 20 summary events

Internal calibration : Dynamic response of geophone

Accuracy : 3%

추가로 blastmate 477,677을 이용하였고 두 측정기의 자료를 종합하여 상관관계를 구하였다.

발파시 지반을 통하여 전달되는 진동은 발파원과 발파진동 측정지점간의 거리와 지반의 상태에 따라서 어느 한 방향이 우세하게 나타나며 3방향 성분이 동시에 작용하게 된다. 따라서 3방향의 성분을 동시에 서로 다른 거리에서 측정할 수 있는 센서에 의해 각각의 방향에 대한 성분을 측정하고 이들 벡터의 합성치를 그 지점의 최대진동치로 한다.

일반적으로 지반을 통하여 전달된 지반진동은 3방향의 합성성분이 최대인 벡터합이다. 발

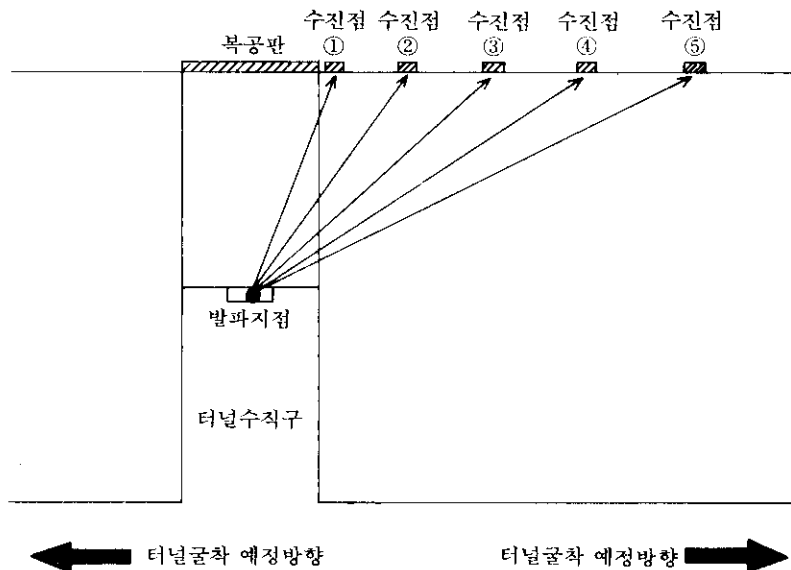


그림2. 발파진동의 크기 측정 일반도

파진동의 크기는 계측기 센서의 설치방법에 따라 계측결과에 많은 영향을 미치게 된다. 그러므로 측정하고자 하는 지점의 지반에 충분히 밀착시키고 센서 자체의 수평도에 따른 계측오차를 줄이기 위해 센서는 수평을 유지하였다.

폭약의 폭발로 인하여 폭원으로부터 발생된 지반진동속도는 3방향으로 분류한다. 즉 발파원과 측정점간의 거리방향(진행방향) longitudinal component L과 동일평면으로서 90°방향인 transverse component T, L과 T평면에 수직방향인 vertical component V로 구분한다.

따라서 3방향의 성분을 정확하게 측정할 수 있도록 발파원 방향으로 센서의 방향을 일치시켜야 한다.

5.2 발파진동 측정방법

각 지반의 공학적 특성과 그 지반에서의 진파특성을 대표할 수 있는 관계식을 구하기 위하여 여러 장소를 선택하여 발파진동을 측정하였으며 장약량을 변경시키면서 발파거리, 장약량에 따른 발파진동의 영향이 충분히 반영되도록 하였다.

발파지점에서의 RQD 측정은 발파지점에서 이미 시행한 NX시추 샘플에서 암편의 길이를 측정하여 시험발파 부근의 RQD를 구하였다.

발파진동의 측정위치 및 방법은 그림2와 같다.

6. 측정결과 및 분석

발파진동의 측정결과 분석은 발파진동식의 일반식 (10)에서

$$V = K \cdot \left(\frac{D}{W^b} \right)^n \quad (10)$$

여기서, V : 진동속도

D : 폭원으로부터 거리

W : 지발당 장약량

K : 발파진동상수

b : 장약지수

n : 감쇠지수

b=1/2인 경우 즉 $\frac{D}{\sqrt{W}}$ 를 지승근 환산거리, b=1/3인 경우 $\frac{D}{\sqrt[3]{W}}$ 를 삼승근 환산거리라 한다. 이때 장약량 및 거리에 따른 감쇠지수와 발파진동상수를 구하기 위하여 임의의 거리와 장약량에 대한 진동치를 측정, square root scaling과 cube root scaling에 대한 회귀선을 구하였다. 위 식(10)의 양변에 log를 취하여 직선식으로 바꾸어 쓰면 아래 식(11)과 같다.

$$\log V = A + B \log D + C \log W \quad (11)$$

여기서, A = log K

B = -n

C = bn

식(11)은 다시 식(12)로 표시할 수 있다.

$$Y_i = A + BX_{i1} + CX_{i2} + \varepsilon^i \quad (12)$$

여기서, X_{i1}, X_{i2} : 두 독립변수, log D, log n
의 i번째 측정치

Y_i : (X_{i1}, X_{i2})에 대한 log V의 측정치

ε^i : error term

$S = \sum [Y_i - (A + BX_{i1} + CX_{i2})]^2$ 을 최소로 하는 A, B, C의 값은 식(13)으로 표시된다.

$$\frac{\partial S}{\partial A} = 0, \frac{\partial S}{\partial B} = 0, \frac{\partial S}{\partial C} = 0, \quad (13)$$

위 식을 Matrix form으로 나타내면 식(14)와 같다.

$$\begin{bmatrix} n & \sum X_{i1} & \sum X_{i2} \\ \sum X_{i1} & \sum X_{i1}^2 & \sum X_{i1} \cdot X_{i2} \\ \sum X_{i2} & \sum X_{i2} \cdot X_{i1} & \sum X_{i2}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Y_i \\ \sum X_{i1} \cdot Y_i \\ \sum X_{i2} \cdot Y_i \end{bmatrix}$$

square root scaling과 cube root scaling의 경우 각각

$$\log V = A + B(\log D - \frac{1}{2} \log W) \quad (15)$$

$$\log V = A + B(\log D - \frac{1}{3} \log W) \quad (16)$$

식(15), (16)은 식(11)의 특별한 형태이며, log-log좌표에서 직선으로 표시되고 이때 A는 절편, B는 기울기를 나타낸다.

지금까지 많은 측정자료들의 회귀분석 결과는 삼승근 환산과 자승근의 환산의 경우 큰 차이는 없으나 적합도가 약간 더 높은 삼승근 환산방법으로 측정자료의 대표식을 표시하는 경우가 많다.

본 연구에서 측정 발파진동 자료를 회귀분석한 결과는 표2와 같고, 그 중 한 개소의 사례를 회귀분석한 결과는 표3 및 그림 3, 4와 같다.

발파진동속도 추정식 $V = K(D/W^{1/2-1/3})^{-n}$ 에서 발파진동속도 V와 발파진동상수 K의 관계는 암질지수(RQD)가 증가함에 따라 삼승근환산식의 경우 발파진동상수 K_s는 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고, 감쇠지수 n_s의 절대치는 비선형적인 형태로 증가하는 경향을

표2 발파진동 측정치의 회귀분석 결과

No.	천공장 (m)	천공경 (mm)	공간격 (m)	지발당 장약량 (kg)	삼 승 근			자 승 근			R.Q.D
					K	n	γ^2	K	n	γ^2	
1	1.0~1.5	38	0.6~1.1	1.5	99.3	1.55	0.36	39.65	1.283	0.34	20~30
2	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.15	206.2	1.83	0.65	355.3	1.83	0.65	25~35
3	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.25	215.0	2.02	0.69	343.5	2.02	0.69	31~44
4	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.8~1.0	17.63	1.19	0.72	11.05	1.05	0.80	20~30
5	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.25~1.125	47.55	1.49	0.34	50.46	1.47	0.47	20~25
6	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.25~0.5	154.6	1.56	0.68	356.2	1.716	0.70	30~35
7	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.125~0.50	18.93	1.05	0.55	23.85	1.02	0.57	5~10
8	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.25~1.125	743.0	2.34	0.79	493.0	2.13	0.61	50~60
9	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.125~0.5	4.65	0.67	0.65	5.1	0.67	0.59	0~5
10	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.5~1.0	10.20	0.74	0.57	10.1	0.75	0.57	5~10
11	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.5~1.0	164.0	1.88	0.65	76.0	1.58	0.67	25~35
12	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.5~1.0	99.90	1.79	0.87	78.8	1.88	0.85	25~30
13	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.5~1.0	112.90	1.55	0.85	102.89	1.60	0.87	25~30
14	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.25~1.0	464.0	1.70	0.73	471.6	1.65	0.66	40~45
15	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.25~1.0	854.6	2.29	0.56	516.4	2.11	0.53	60~70
16	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.5~1.0	29.70	1.07	0.69	32.35	1.07	0.69	10~15
17	1.0~1.5	38	0.6~1.1	1.0	44.95	1.22	0.51	41.01	1.23	0.50	20~25
18	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.44~1.5	20.29	1.15	0.41	14.54	1.06	0.42	10~15
19	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.5~2.0	17.63	1.19	0.72	11.05	1.05	0.80	10~15
20	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.87~2.60	47.99	1.70	0.70	15.16	1.38	0.71	15~25
21	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.187~0.563	14.80	1.04	0.47	42.10	1.27	0.51	10~15
22	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.75~1.0	11.80	1.08	0.64	21.15	1.25	0.63	10~15
23	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.375	93.0	1.60	0.46	86.10	1.46	0.38	25~30
24	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.187~0.94	24.16	1.26	0.77	15.90	1.07	0.76	10~15
25	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.125~0.50	852.9	2.23	0.64	324.15	1.83	0.614	45~55
26	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.8~1.0	125.88	2.03	0.93	113.90	2.04	0.92	35~40
27	1.0~1.5	38	0.6~1.1	0.25	21.47	1.19	0.49	6.90	0.81	0.35	10~15

표3 발파진동속도와 환산거리에 관계

NO	발파진동속도	자승근 환산거리	삼승근 환산거리
1	0.4	52.50000	38.68233
2	0.43	46.75000	34.44569
3	0.2	48.25000	35.55090
4	0.25	50.00000	36.84031
5	0.3	45.00000	33.15628
6	0.58	35.00000	25.78822
7	0.2	54.00000	39.78754
8	0.3	45.00000	33.15628
9	0.48	37.50000	27.63024
10	0.2	54.75000	40.34014
11	0.2	55.51276	40.46455
12	0.17	67.64811	49.31094
13	0.35	36.92244	26.91363
14	0.35	61.19314	44.60511
15	0.2	50.34878	36.70041
16	0.2	61.94773	45.16973
17	0.53	37.43884	27.29004
18	0.22	49.05779	35.75937
19	0.2	59.38574	43.28766
20	0.5	38.72983	28.23108
21	0.22	45.18481	32.93626
22	0.33	54.22177	39.52351
23	0.3	47.50000	34.99830
24	0.17	62.50000	46.05039
25	0.45	40.00000	29.47225
26	0.99	32.50000	23.94620
27	0.25	57.50000	42.36636

나타냈다. 자승근환산식의 경우 발파진동상수 K_v는 포물선 형태로 증가하는 형태를 보였고, 감쇠지수 n_v의 절대치는 선형적으로 증가하는 형태를 보였다. 감쇠지수 n의 절대치는 2.5 부근에서 증가가 둔화되는 경향을 나타내고 있으나 RQD가 양호한 지반에서 추가시험을 실시한 후 본 연구와 비교분석 종합하면 향후 발파계획시 발파진동 추정에 유용하게 이용할 수 있다.

본 연구는 터널수직구등의 바닥발파에 있어

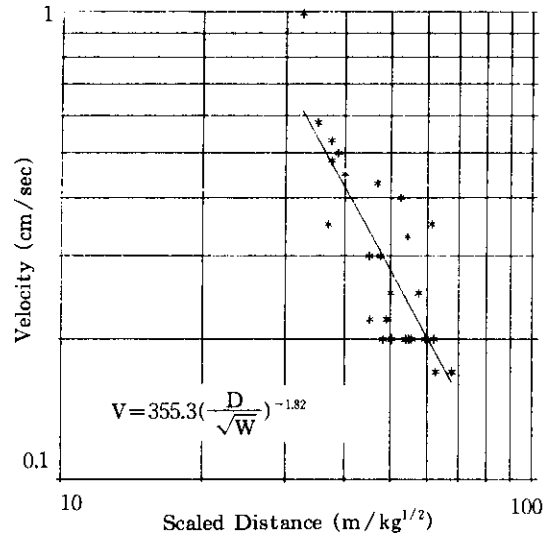


그림 3 자승근환산식과 발파진동속도의 회귀분석 결과

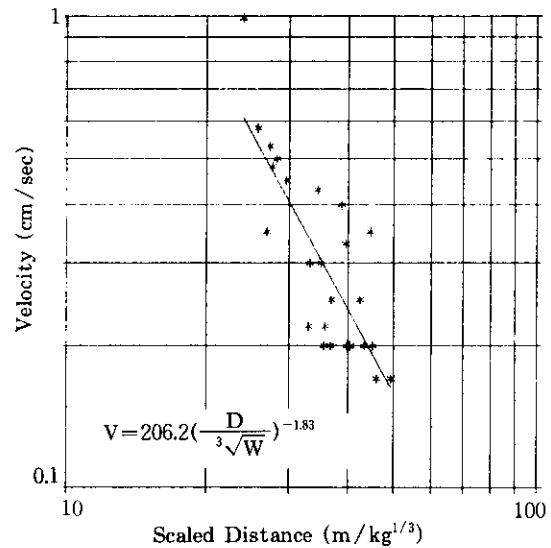


그림 4 삼승근환산식과 발파진동속도의 회귀분석 결과

서 사전에 시추하여 측정된 RQD에 의해서 장약량, 거리에 따른 삼승근법, 자승근법의 발파진동상수 K, 감쇠지수 n값을 추정할 수 있는 방법에 관하여 연구한 것이다. 연구결과에 의하여 발파진동상수 K, 감쇠지수 n을 현장에서 용이하게 활용하기 위하여 발파지점으로 부터의 거리, 지발당 장약량으로부터 예상진동치를 추정할 수 있다. 또한 발파진동의 허용 수준 평가에 있어서 발파진동속도의 추정이 가능하

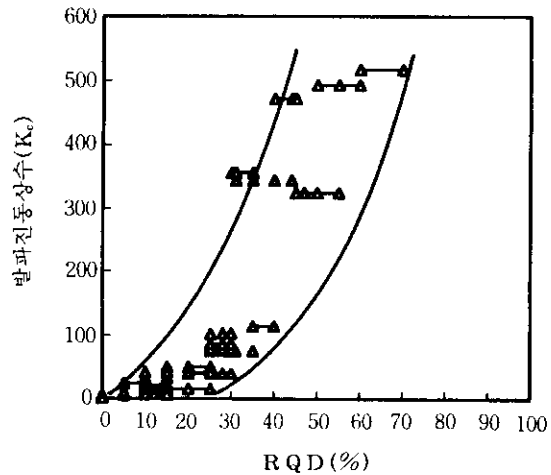
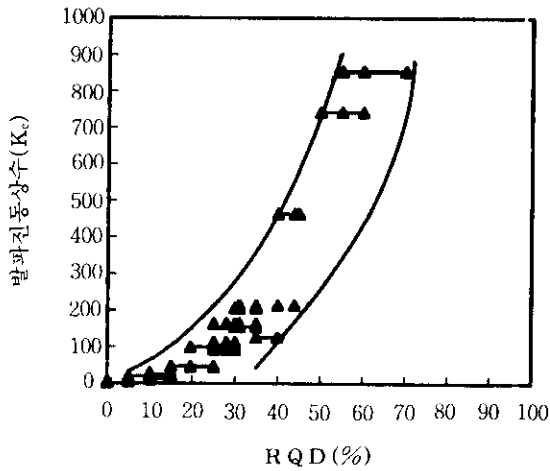
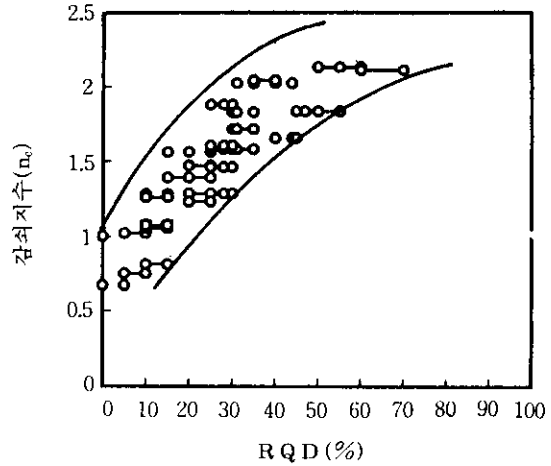
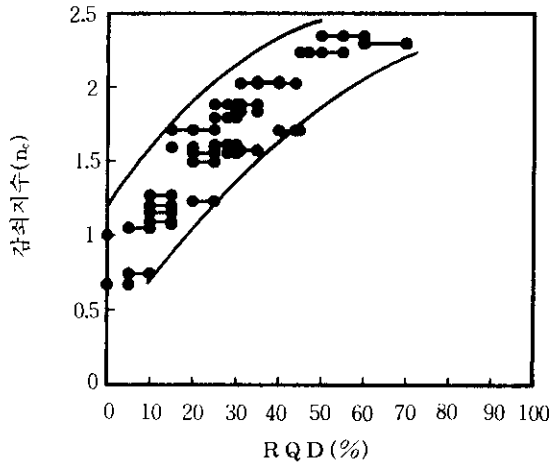


그림 5 R Q D와 삼승근환산 K_c , n_c 와의 관계

그림 6 R Q D와 차승근환산 K_c , n_c 와의 관계

므로 구조물, 인명에 미치는 영향을 평가할 수 있다.

따라서 본 연구결과와 이미 제안된 식들을 이용하여 허용기준을 만족시킬 수 있는 장약량, 안전거리를 산출할 수 있으며 현장에서의 용이한 활용을 위하여 발파지점으로 부터의 거리, 지발당 장약량, 예상진동치를 표로 만들어 사용할 수 있다.

7. 고찰

지금까지 연구된 바에 의하면 발파진동 크기는 주로 지발당 장약량, 발파원과 발파진동 측

정지점과의 거리, 지반의 성질과 발파조건에 의해 결정된다. 따라서 발파설계를 위해서는 대상지역에서 시험발파를 통한 발파진동상수 K , 감쇠지수 n 을 정의하는 것이 매우 중요하다. 그러나 시험발파를 통한 발파진동식에서의 발파진동상수, 감쇠지수는 사용범위가 제한적이다. 특히 발파진동이 구조물에 미치는 영향은 발파진동의 특성과 대상 구조물의 반응 특성에 따라 달라지며 발파조건과 진동의 전파매체인 대상지반 조건에 따라 큰 변화를 나타내기 때문이다.

지금까지 발파진동에 관한 국내 연구^(1, 2, 5, 4) 및 외국의 연구^(11, 13)는 크게 자원개발을 위한

광산, 채석장에서, 또는 전국 각지 대도시에서 지하철 건설을 위한 터널 굴착작업 현장에서 연구가 수행되었다. 이러한 연구의 주된 목표는 효율적인 발파를 위한 장약량 산정, 발파방법 등에 관한 연구이며 발파진동이 인근 구조물에 영향을 미치는가에 대한 분석, 연구이다. 지하철 건설에 따른 도심지 근접시공에서 발파의 경우 장약량, 암석의 강도, 발파형태가 발파진동에 미치는 영향 등에 대하여 연구가 이루어졌다. 이와 같은 경우 국내의 연구결과를 보면 자승근 환산거리와 삼승근 환산거리 중에서 자승근 환산거리보다 삼승근 환산거리를 채택하는 경우가 더 적합도가 높다는 연구결과가

이미 발표되었고 이때 측정한 발파진동상수 K, 감쇠지수 n값 및 신뢰도는 표 4, 5와 같다.

발파진동의 전파특성을 이론적으로 파악하려는 여러 학자들에 의해서 발파현상에 관련된 변수의 차원해석과 발파진동의 측정경험을 토대로 발파진동식을 제안하고 있으며 현재 국내에서 가장 많이 이용하고 있는 식은 자승근 환산거리 및 삼승근 환산거리에 의한 방법이다.

현재 국내에서 도심지 터널굴착, 수직구 굴착등에서 대상지역에서 시험발파를 통해서 발파진동상수 K, 감쇠지수 n을 결정하고 있으며 지반의 상황을 정확히 파악한 자료에 의한 발파진동추정식은 소수에 불과하다.

표 4 삼승근 환산거리에 대한 K, n 값의 측정 사례⁽⁹⁾

	암석 종류	K	n	신뢰도	최대속도성분	연구자
1	화강암	138	-1.700	50%	M	이경운 등(1984)
	편마암	87	-1.500		M	
2	석회석	648	-1.640	50%	M	이경운 등(1984)
3	석회석	103.2	-1.640	50%	P	양형식 등(1990)
		272.0	-1.640	95%	P	
		406.3	-1.640	99%	P	
4	화강편마암	128.02	-1.754	50%	V	이정인 등(1991)
		367	-1.754	100%	V	
		260	-1.754	95%	V	
5	화강암	44.9	-1.350	50%	P	임한욱 등(1992)
	편마암	149.9	-1.350	95%	P	
	사암	256.8	-1.350	99%	P	

* 최대속도성분 : P : 세 성분의 벡터합, V : 수직성분, M : 각 성분 중 최대값.

표 5 자승근 환산거리에 대한 K, n 값의 측정 사례⁽⁴⁾

	암석 종류	K	n	신뢰도	최대속도성분	연구자
1	석회석	45.24	-1.803	50%	V	이정인 등(1979)
2	석회석	48.00	-1.46	50%	M	이경운 등(1987)
3	석회석	26.18	-1.492	50%	P	양형식 등(1990)
4	화강암	7.9	-0.960	50%	P	임한욱 등(1992)
	편마암	28.9	-0.960	95%	P	
	사암	49.6	-0.960	95%	P	

* 최대속도성분 : P : 세 성분의 벡터합, V : 수직성분, M : 각 성분 중 최대값.

한편 이용화약에 따른 발파진동상수의 변화에 대한 연구로서 함수폭약은 다이나마이트에 비하여 발파진동속도의 크기가 80% 정도인 것으로 발표하였다.

서울화강암의 경우 천공경 38mm로 천공하여 발파할 경우 발파진동추정식 $V = KW^{0.57}D^{-1.7}$ 을 적용할 때 바닥발파 진동상수 K는 표6과 같다.

표 6 발파진동상수 K

화 약 류	압축강도 (kg/cm ²)	바닥 발파의 발파진동상수 (K)
다이나마이트	1800~1500	147
	1500~1200	136
	1200~900	125
	900~600	114
	600 이하	103
습 수 폭 약	1800~1500	117
	1500~1200	109
	1200~900	100
	900~600	91
	600이하	82
硝 油 폭 약	1800~1500	96
	1500~1200	87
	1200~900	80
	900~600	73
	600이하	66

오재용⁽³⁾ 등은 암질에 따른 발파진동의 특성에서 이미 발표된 각종 암반분류에 의해서 풍화암, 연암, 경암을 구분하여 이에 따른 환산거리와 발파진동속도와의 관계식을 회귀분석한 결과 풍화암, 연암, 경암순으로 발파진동크기가 크게 나타난 것으로 발표하였다.

따라서 본 연구와 지금까지 발표된 연구결과들을 비교해 보면 발파진동의 크기는 풍화암, 연암, 경암 순으로 크게 나타나며 또 식(17), (18), (19)에 의하면 암석의 일축압축강도의 크기가 클수록 발파진동상수 K값이 커지므로

발파진동속도의 크기도 커짐을 알 수 있다. 일반적으로 R.Q.D는 보통암, 연암, 경암 순으로 양호하게 나타나며 본 연구에서도 R.Q.D값이 증가함에 따라서 발파진동상수 및 n의 절대치가 커지는 경향을 나타내므로 지금까지 발표된 연구결과와 유사함을 알 수 있었다.

8. 결 론

본 연구에서 바닥발파의 발파진동속도는 암반의 절리의 발달 및 자유면과 밀접한 관계가 있으며, 암반의 절리 발달상태를 나타내는 암질지수(R.Q.D)와 발파진동상수 K, 감쇠지수 n의 관계를 규명한 연구로서 결론은 다음과 같다.

1. 발파진동속도 추정식 $V = K(D/W^{1/2-1/3})^{-n}$ 에서 발파진동속도 V와 발파진동상수 K의 관계는 암질지수(R.Q.D)가 증가함에 따라 삼승근환산식과 자승근환산식의 발파진동상수 K₁, K₂는 포물선형으로 증가하는 경향을 나타냈다. 삼승근환산식과 자승근환산식의 감쇠지수 n₁, n₂의 절대치는 선형적인 형태로 증가하다가 2.5 부근에서 더 이상 증가하지 않는 형태로 나타났다.
2. 본 연구결과를 이용하여 바닥발파진동의 크기를 추정시 시추조사에 의한 암질지수(R.Q.D)값 또는 현장관측결과 J₁값을 얻고 발파진동상수 K와 감쇠지수 n의 값을 구하여 삼승근법과 자승근법을 이용하여 발파진동속도를 정량적으로 구할 수 있다.
3. 본 연구와 지금까지 발표된 연구결과들을 비교해 보면 발파진동의 크기는 풍화암, 연암, 경암 순으로 크게 나타나는 것으로 연구 발표되었다. 또 암석의 일축압축강도의 크기에 따라서 발파진동상수 K값이 커지므로 발파진동속도의 크기도 커짐을 알 수 있다. 일반적으로 암질지수(R.Q.D)는 보통암, 연암, 경암 순으로 양호하게 나타나며 본 연구에서도 암질지수(R.Q.D)값이 증가함에 따라서 발파진동상수 K 및 감

쇠지수 n의 절대치가 커지는 경향을 나타냈으며 지금까지 발표된 연구결과와 유사한 경향이 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김수일, 정상섭, 조후연(1994), "발파진동식의 신뢰성", 대한토목학회 논문집, 제14권, 3호, 573~582
2. 감용수 등(1983), "발파진동식 확립과 제어발파 지침결정을 위한 연구보고서", 서울지하철공사
3. 오재용, 윤대진(1992), "암질에 따른 발파진동의 특성 및 발파진동이 건축물에 미치는 영향에 관한 연구", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp.133~138
4. 이정인(1993. 2), "발파진동, 발파풍압 및 비석의 조절을 통한 안전발파", 대한토목학회지, 제41권, 1호, pp99~139
5. 임한욱, 김재동(1992), "발파진동크기와 주파수 특성에 관한 연구", 한국자원공학회지, 제29권, 3호, pp.146~157
6. (주)대우(1984), "터널공법 연구개발 보고서", pp.203~259
7. 허진(1990. 3), "S 화력발전소 3, 4호기 증설에 따르는 정밀발파작업으로 인한 인접 가동발전소 및 구조물에 미치는 진동 영향 조사", 화약발파 8권 1호, pp.3~14
8. 스테이그 오프송(1993), "最新 發破技術ハンドブック", 山海堂, pp.163~176
9. Bieniawski, Z. T.(1989), "Engineering Rock Mass Classifications", John Wiley & Sons, pp.37~47
10. Brown, E. T. (1981), "Rock Characterization Testing & Monitoring", Pergamon Press, 44~46
11. Hagimori, K., Terada, M., Quchterlony, F., Furucawa, K., Nakagawa, K.(1993)
12. Hoek, E., Brown, E. T(1980), "Underground Excavation in Rock", The Institution of Mining and Metallurgy, pp.18~35
13. Singh, P. Pal Roy(1993), "Blasting in Ground Excavation and Mines", pp.85~133

(접수일자 1995. 3. 10)