발파공수에 따른 진동속도 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Vibration Velocity by the Number of Blasting Hole

이 창훈, 강 추원, 김 종인
Chang-Hoon Lee, Choo-Won Kang, Jong-In Kim
조선대학교 자원공학과

초 록

발파진동에 영향을 미치는 여러 매개변수들 중에서 현재 발파진동 예상식을 도출하기 위해 장약량과 거리를 매개변수로 하여 발파진동을 예측하고 있다. 여기에 사용되는 장약량은 지발당 최대장약량으로, 발파당 장약량과의 관계는 언급하고있지 않다. 따라서 본 연구에서는 지발당 최대장약량이 동일한 상태에서 발파공수를 변화시키는 방법으로 발파당 장약량이 변화할 때 발파진동속도의 변화를 비교·분석하였다.

발파공수를 5공에서 10공까지 변화시켜가며 발파진동을 측정하고 분석한 결과 지발당 장약량이 동일함에도 불구하고 공수가 증가함에 따라 환산거리 60~90 구간에서 진동속도가 높게 측정되었다.

핵심어 : 발파진동, 발파진동예상식, 지발당 최대장약량, 발파당 장약량

1. 서 론

발파진동의 전파특성을 결정짓는 조건은 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있다. 입지조건은 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특징 및 역학적 성질 등을 말하고, 발파조건은 사용하는 폭약의 종류, 장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면의 수, 발파유형, 폭발원과 측점간의 거리 등이다.

이상의 요인들 모두가 발파진동의 크기와 전파특성에 상당한 영향을 미치게 되지만 이들 중에서 암반중의 불연속면의 발달상황, 암반강도 등과 같은 탄성파의 전파와 관계가 깊은 지반의 지질특성, 지발뇌관의 사용으로 일정한 시간간격으로 분할 점화되는 지발당 최대장약량과 폭원으로부터 거리 등이 발파진동의 크기와 전파특성에 영향을 미치는 가장 중요한 요인이 된다.

많은 학자들이 발파현상에 관련된 변수의 차원해석을 근거로 다수의 발파진동 측정경험을 토대로 지상 구조물의 피해의 척도가 되는 지반의 진동속도를 지발당 최대장약량

으로 본 것이며, 삼승근 환산거리는 전파경로 위의 한 점에서 보는 장약 형태를 구형으로 가정한 경우이므로 둘 다 모두 사용되고 있다. 일반적으로 가까운 거리에서는 삼승근 환산거리가, 먼 거리에서는 자승근 환산거리가 지발당 장약량이 훨씬 작게 결정되어 안전율이 높게 나타나는 것으로 알려져 있다.

3. 발파조건 및 진동측정

3.1 발파조건

본 연구의 발파조건은 표 1과 같으며 2자유면 상태의 수직 천공 벤치발파로 시험을 시행하였다.

표 1. 발파조건

공 경	45mm
약 경	32mm
천 공 장	2.2~2.5m
공 간 격	0.6~0.8m
최소저항선	0.6~0.8m
공당장약량	0.5~0.75kg
지발당장약량	0.5~0.75kg
사 용 뇌 관	MS #0~#9

3.2 발파진동의 측정

연구에 사용된 발파진동 측정기는 Thomas Instruments사의 VMS200, Instantel사의 MiniMate와 DS477, Nomis사의 NS5400, 그리고 Nitro Consult사의 UVS1504 등 매회 발파시 4~5대의 기기를 사용하였다.

발파진동 측정기는 서로 다른 거리에 일직선으로 설치하였으며, 계측기의 센서는 지반에 고정하였다. 또한 보다 정확한 발파진동을 측정하기 위하여 발파작업이 이루어지는 암반과 동일한 암반 위에 측정기를 설치하였다.

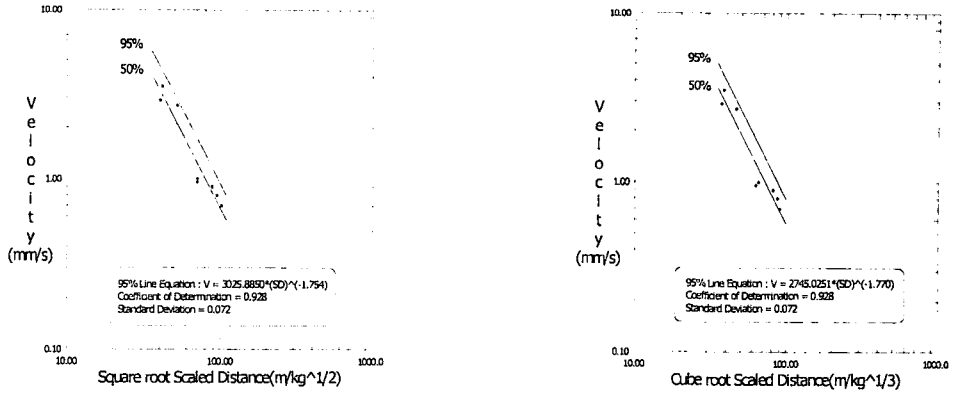
4. 측정결과 및 분석

발파공수의 변화로 발파당 장약량의 증감에 따른 진동속도의 변화를 관찰하고자 발파공수를 5~10공으로 조절하여 총 201개의 진동 data를 수집하였다. 입지상수 K와 n값을 구하기 위해 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산 처리하여 도출한 발파공수별 K, n 및 결정계수 r^2은 표 2와 같다.

표 2. 발파공수별 K, n, r^2

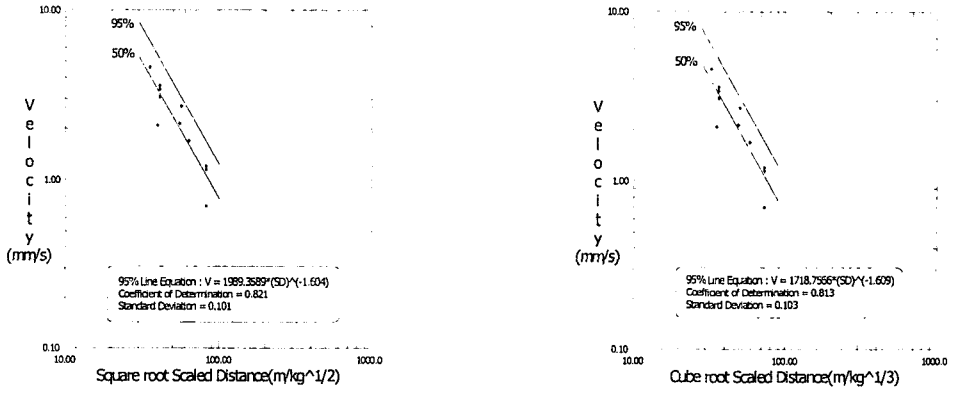
발파공수		K	n	r^2
5	자승근	3025.8850	1.754	0.928
	삼승근	2745.0251	1.770	0.928
6	자승근	1989.3589	1.604	0.821
	삼승근	1718.7566	1.609	0.813
7	자승근	345.7726	1.123	0.807
	삼승근	303.7196	1.123	0.807
8	자승근	1216.5779	1.387	0.741
	삼승근	1159.1633	1.404	0.742
9	자승근	637.2552	1.224	0.761
	삼승근	532.2254	1.204	0.748
10	자승근	1239.2748	1.275	0.729
	삼승근	1096.7062	1.272	0.723

또한 이들 발파공수별 자승근 및 삼승근 환산거리와 진동속도의 관계는 각각 그림 1~그림 6과 같다.



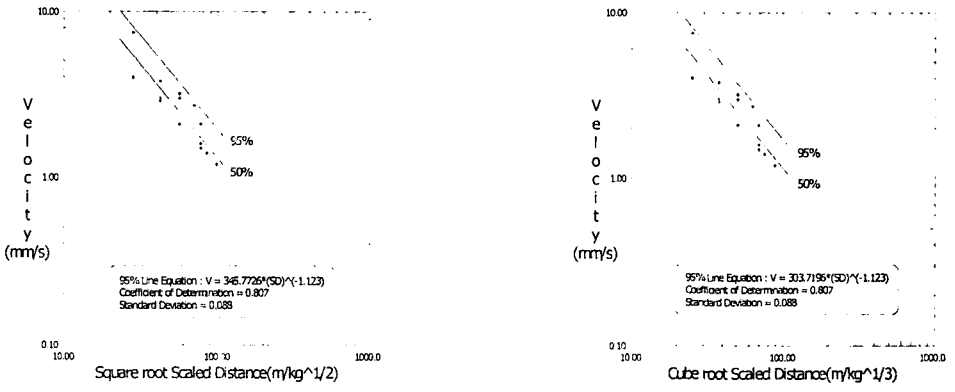
(a) (b)

그림 1. 5공 발파시 자승근(a) 및 삼승근(b) 환산거리와 진동속도의 관계



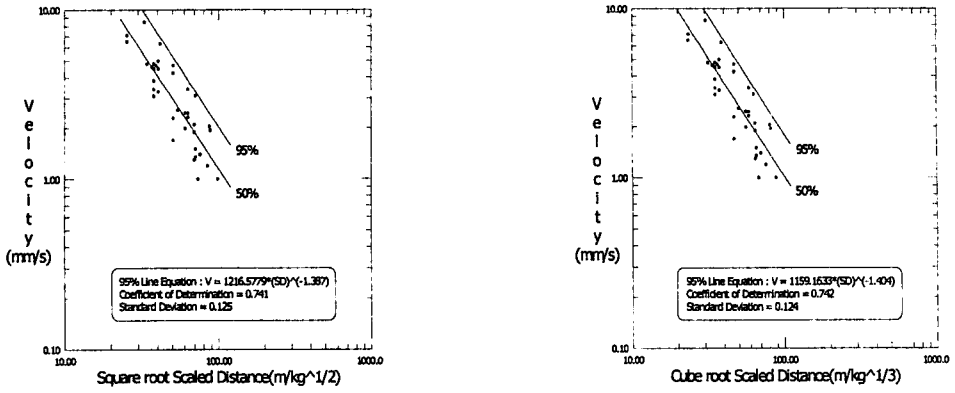
(a) (b)

그림 2. 6공 발파시 자승근(a) 및 삼승근(b) 환산거리와 진동속도의 관계



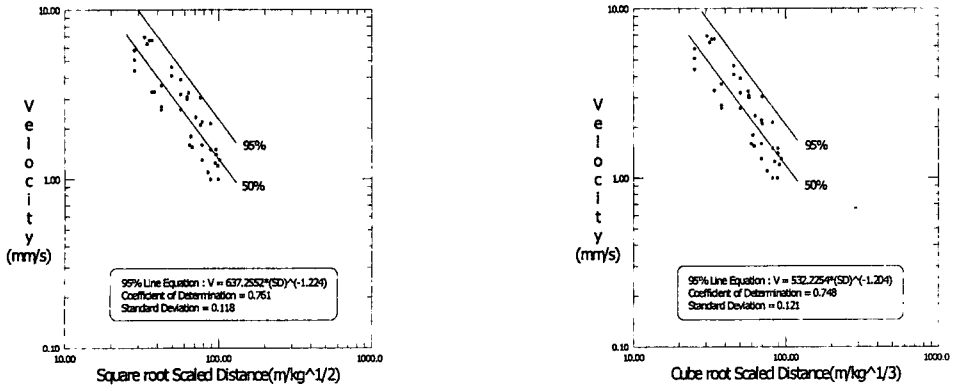
(a) (b)

그림 3. 7공 발파시 자승근(a) 및 삼승근(b) 환산거리와 진동속도의 관계



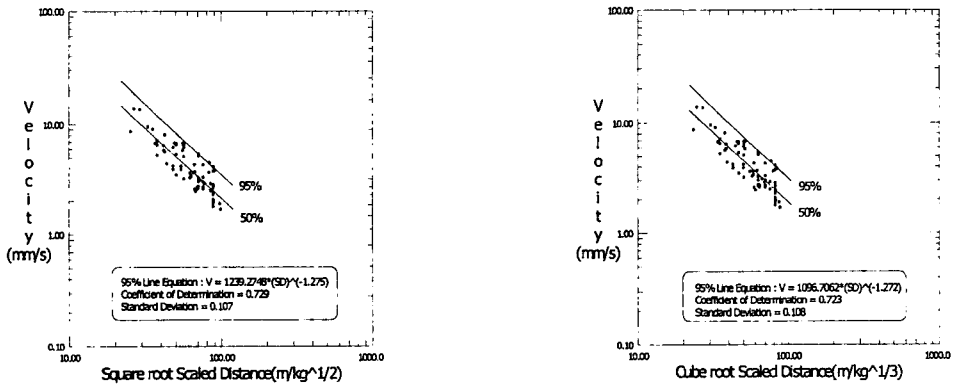
(a) (b)

그림 4. 8공 발파시 자승근(a) 및 삼승근(b) 환산거리와 진동속도의 관계



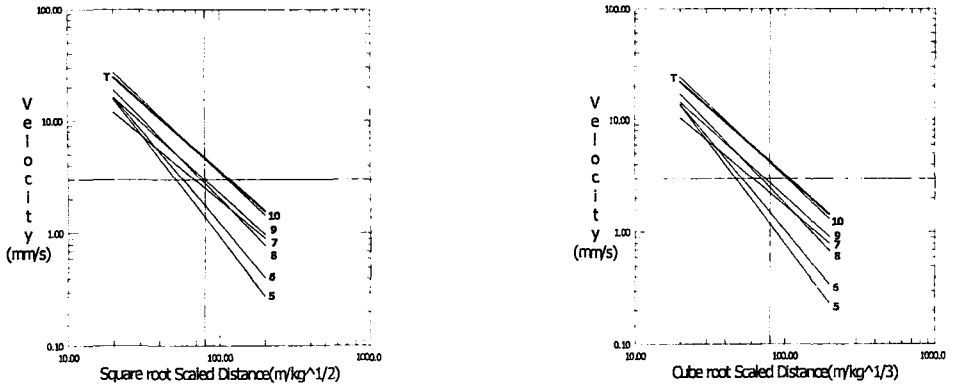
(a) (b)

그림 5. 9공 발파시 자승근(a) 및 삼승근(b) 환산거리와 진동속도의 관계



(a) (b)

그림 6. 10공 발파시 자승근(a) 및 삼승근(b) 환산거리와 진동속도의 관계



(a) (b)

그림 7. 발파공수별 자승근(a) 및 삼승근(b) 환산거리와 진동속도의 관계

5. 결과 해석

5.1 환산거리와 진동속도의 비교

발파공수를 변화하면서 측정한 자료를 통한 회귀분석 결과를 토대로 공수변화에 따른 발파공수별 자승근 및 삼승근의 환산거리와 진동 속도의 관계를 보인 것이며 각 공수별 95% 신뢰 구간은 그림7과 같다. 숫자로 표시된 부분은 각각의 공수를 나타낸 것이며 대문자 T로 표시된 것은 이들 전체 시험 데이터의 95% 신뢰 구간을 나타낸 것이며 거의 10공 발파시의 95%신뢰 구간과 일치한다. 그림에서와 같이 SD 60 ~ 90구간에서 자승근 및 삼승근 모두 공수가 증가할수록 K 값이 증가하고 있다. 그러나 환산거리 100 부근에서 7과 8공의 95% 신뢰구간이 교차되는 양상을 보인다. 이것은 지질 조건 등의 변화에 의한 것으로 판단된다.

표 3은 허용 진동 속도를 3 mm/sec로 제한했을 때 각 공수별 자승근 및 삼승근 환산거리, 환산거리 80에서 진동속도를 나타내고 있다. 자승근 및 삼승근환산거리는 공수의 증가와 함께 커지고 있으며, 자승근 및 삼승근 환산 거리 80일 때의 진동속도 또한 커지는 양상을 보인다. 이것은 허용 진동 속도를 3 mm/sec로 제한했을 때 지발당 장약량의 감소를 의미한다.

결론적으로 그림 7과 같이 자승근 환산거리 80에서 진동속도는 5 ~ 10공에 대해 각각1.39, 1.76, 2.52, 2.79, 2.98, 4.64로 증가하여 1 : 1.27 : 1.81 : 2 : 2.14 : 3.34의 비율로 나타났다. 또 삼승근 환산 거리의 경우에는 1.18, 1.49, 2.21, 2.47, 2.72, 4.16으로 증가하여 1 : 1.26 : 1.87 : 2.09 : 2.31 : 3.53의 비율로 나타났다.

본 시험이 공수의 변화가 5~10공으로 비교적 협소한 구간에 국한되어 진행되어서 공수 변화에 따라 무한대로 발파진동이 커진다거나 혹은 어떤 구간에서 어떤 진동속도에 수렴한다는 결론을 도출하는 데는 다소 무리가 따르지만 민원지역에서 본 연구에서 진행된 방법으로 발파진동 자료를 처리하여 일정 허용진동 속도에서 지발당 장약량만을 설정하는 것은 더 큰 민원의 소지를 안고 있는 것이라 하겠다.

5.2 거리별 지발당 장약량의 비교

측점과의 거리 및 작업 조건을 고려하여 허용진동속도를 3mm/sec로 제한할 때의 자승근과 삼승근 환산거리를 이용하여 지발당 최대장약량과 폭원으로부터 거리의 관계를 나타내는 노모그램을 log-log 좌표상에 그림 8과 같이 나타내었다. 각각 자승근 환산거리와 삼승근 환산거리를 적용하였을 때 발파공수에 따른 지발당 최대장약량과 거리의 관계를 나타낸다. 그리고 그림 9에서 발파공수의 변화에 따른 거리별 자승근 및 삼승근 지발당 장약량의 변화를 비교하였다.

그림 9와 같이 각 발파공수별 자승근 및 삼승근의 회귀분석 결과인 발파진동 예상식을 이용하여 안전율을 고려한 최대 허용진동속도 3mm/sec에 대한 환산거리를 구하면 자승근의 경우는 51.54, 57.36, 68.66, 75.96, 79.62, 112.73이고, 삼승근의 경우는 47.09, 51.77, 61.16, 69.66, 73.66, 103.46으로 나타났으며, 자승근 환산거리와 삼승근 환산거리 모두 발파공수가 증가함에 따라 환산거리도 증가한 것으로 나타났다.

표 3. 발파공수에 따른 환산거리 및 진동속도 (3mm/sec 기준)

발파 공수	5	6	7	8	9	10
자승근환산거리(m/kg$^{1/2}$)	51.54	57.36	68.66	75.96	79.62	112.73
삼승근환산거리(m/kg$^{1/3}$)	47.09	51.77	61.16	69.66	73.66	103.46
자승근환산거리 80일때의 진동속도(mm/sec)	1.39	1.76	2.52	2.79	2.98	4.64
삼승근환산거리 80일때의 진동속도(mm/sec)	1.18	1.49	2.21	2.47	2.72	4.16

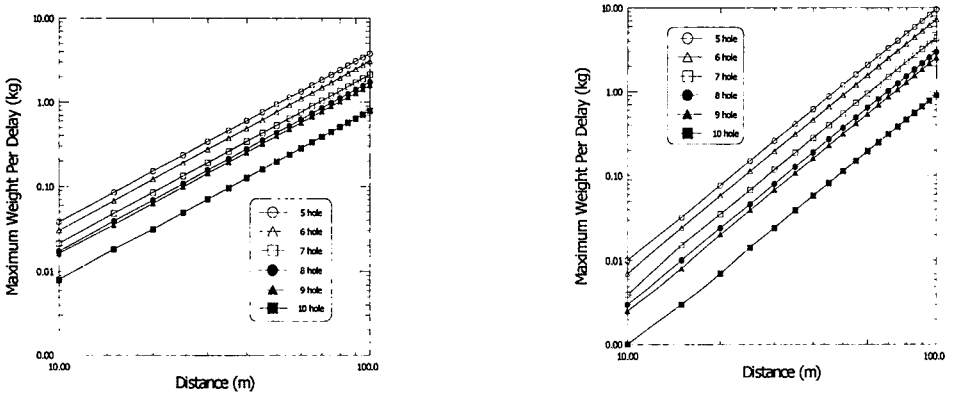
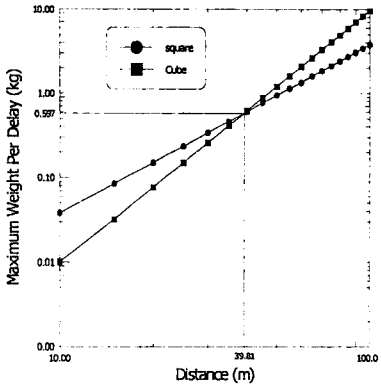
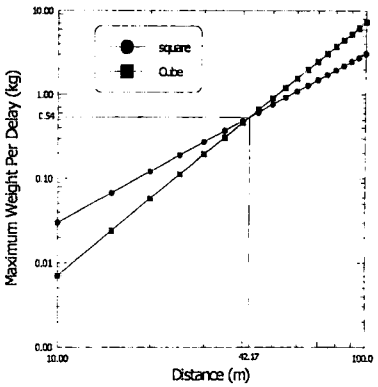


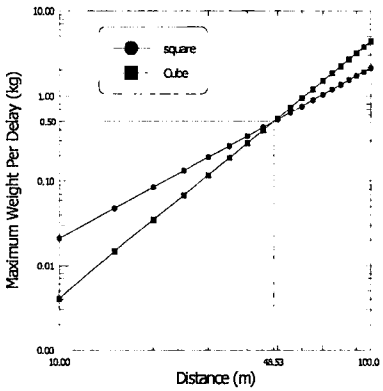
그림 8. 자승근(a) 및 삼승근(b)환산거리의 지발당 장약량과 거리와의 관계



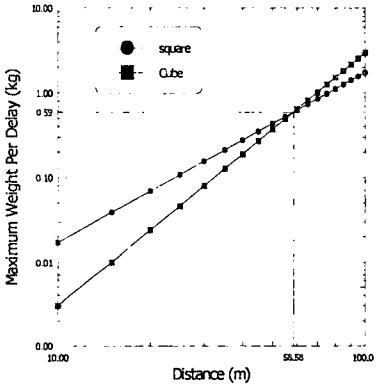
5공



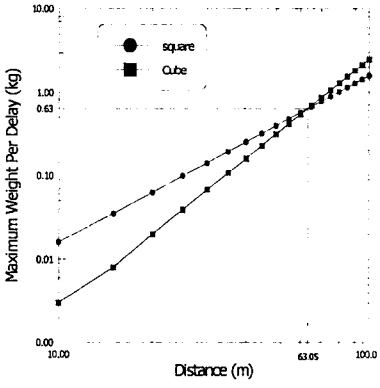
6공



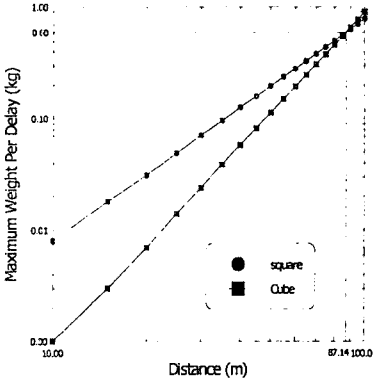
7공



8공



9공



10공

그림 9. 발파공수별 자승근 및 삼승근 지발당 장약량과 거리의 관계

6. 결 론

본 연구는 지발당 장약량이 동일한 경우 발파공수의 증가에 따른 발파당 장약량의 변화와 진동속도의 관계를 규명하기 위하여 1회 발파당 발파공수를 5공부터 10공까지 변화시켜가며 발파진동속도를 측정하였다.

정확한 Data를 얻기 위하여 발파진동 측정기는 지반에 고정시키고 서로 다른 거리에 일직선으로 설치하였으며, 측정된 총 201개의 Data를 회귀분석하여 입지상수 K와 감쇠상수 n을 결정하고, 진동속도를 동일하게 설정한 경우 지발당 장약량의 변화를 비교 분석한 결론은 다음과 같다.

1) 자승근 환산거리 80에서 진동속도는 5 ~ 10공에 대해 각각1.39, 1.76, 2.52, 2.79, 2.98, 4.64로 증가하여 1 : 1.27 : 1.81 : 2 : 2.14 : 3.34의 비율로 나타났다. 또 삼승근 환산 거리의 경우에는 1.18, 1.49, 2.21, 2.47, 2.72, 4.16로 증가하여 1 : 1.26 : 1.87 : 2.09 : 2.31 : 3.53의 비율로 나타났다. 민원지역에서 본 연구에서 진행된 방법으로 발파진동 자료를 처리하여 일정 허용진동 속도에서 지발당 장약량만을 설정하는 것은 더 큰 민원의 소지를 안고 있는 것이라 하겠다.

2) 각 발파공수별 자승근 및 삼승근의 회귀분석 결과인 발파진동 예상식을 이용하여 안전율을 고려한 최대 허용진동속도 3mm/sec에 대한 환산거리를 구하면 자승근의 경우는 51.54, 57.36, 68.66, 75.96, 79.62, 112.73이고, 삼승근의 경우는 47.09, 51.77, 61.16, 69.66, 73.66, 103.46으로 나타났으며, 자승근 환산거리와 삼승근 환산거리 모두 발파공수가 증가함에 따라 환산거리도 증가한 것으로 나타났다.

3) 연구 결과와 같이 지발당 장약량이 동일하더라도 발파공수의 증가에 따라 진동속도가 다르게 나타나므로 더 폭넓은 구간에 대한 연구를 통하여 발파당 장약량과 진동속도의 관계를 규명해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 임한욱, 김재동, 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 29, pp. 146~157
2. 김대상외, 발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용 진동치 결정에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 28, 1991, pp. 444~454
3. 이정인, 발파진동, 발파풍압 및 비석의 조절을 통한 안전발파, 대한토목학회지, Vol. 41, 1993, pp99~116
4. Per-Anders Persson, Roger Holmberg, Jaimin Lee, Rock Blasting And Explosives Engineering, 1994, pp. 351~361.