

# 다꾸치법에 의한 암반물성의 발파진동 영향요소 분석

김남수<sup>1)</sup> · 김보현<sup>2)</sup> · 양형식<sup>3)</sup>

## Effect of Rock Mass Properties on the Blast Vibration by Taguchi method

Nam-Soo Kim, Bo-Hyun Kim and Hyung-Sik Yang

**ABSTRACT** The propagation of blast vibration and the damping characteristics depend on both the mechanical properties of rock mass and weight charge. In this study, the characteristics of propagation and damping were analyzed by FLAC. The construction site was the second Kwang-ju circulating road. Taguchi method which is one of experimental design methods was used for determination of input data and parameter levels. The results showed that rock density was the most dominant of variables being concerned in this study, which affect the propagation of blast vibration.

**Key words** : Blasting Vibration, FLAC, Taguchi method

**초 록** : 발파진동의 전달과 감쇠 특성에는 대상 암반의 특성과 장약량 등이 영향을 미친다. 본 연구에서는 암반의 물성과 장약량의 변화가 발파진동의 전파에 미치는 영향을 파악하기 위해 유한차분 해석프로그램(FLAC)을 이용하여 해석하였다. 대상 지역은 광주시 제2순환도로 공사장이며 설계시 조사된 암반 물성치를 토대로 하였고, 주된 방법으로는 해석의 최대 주요인자를 추정할 수 있는 실험계획법 중 하나인 Taguchi 법을 사용하였다. 해당 지반의 각 물성치와 장약량의 변수 레벨을 결정하였고, 이에 의거하여 거리별 발파진동의 전파과정을 고찰하였다. 그 결과 본 연구에서 고려된 암반의 물성치 중에서 발파진동 전달에 가장 영향을 크게 주는 인자는 밀도인 것으로 나타났다.

**핵심어** : 발파진동, FLAC, Taguchi 법

### 1. 서 론

발파진동에 영향을 미치는 요인에는 발파장소와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상 지반의 지질학적 특성 및 역학적 성질 등의 입지 조건과 폭약의 종류, 장약량, 장약밀도, 기폭방법, 전색정도, 자유면 수, 거리 등의 발파 조건이 있다. 많은 인자 중에서 장약량과 계측지점까지의 거리가 가장 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

발파 조건을 제외한 진동 전파에 큰 영향을 미치는 변수들은 암반의 동적 특성이나 또는 구조적 특성을 반영하는 탄성과 속도, damping 상수 등과 같은 변수들이 일반적으로 알려져 있는 큰 영향 인자이다.

암반 굴착을 할 때 보통 압축강도와 탄성과 속도에 따라 리핑암과 발파암으로 구분하고 있으나 같은 발파암이라 할지라도 암반의 물성치 등이 지역에 따라 다르므로 진동 전달을 특성화 하기가 어렵다. 그래서 본 연구에서

는 암반의 구조적인 특징을 제외하고 순수하게 암반의 물성과 장약량의 변화가 발파진동의 전달과 감쇠에 미치는 영향을 파악하기 위하여 유한차분 해석프로그램(FLAC)을 이용하여 해석하였다.

대상 지역은 광주시 제 2순환 도로 공사장이며 설계시 조사된 암반 물성치를 토대로 하였고, 주된 방법으로는 해석의 최대 주요인자를 추정할 수 있는 실험계획법 중 하나인 Taguchi<sup>1)</sup> 법을 사용하였다. 그래서 암반의 물성치 중에서 발파진동 전달에 가장 영향을 크게 주는 인자를 파악하고, 장약량의 변화에 따른 진동의 거리감쇠 수준을 구하였다.

1) 정회원, 전남대학교 공과대학 자원공학과 강사

2) 정회원, 대한광업진흥공사 석재자원처

3) 정회원, 전남대학교 자원공학과 교수

원고 접수일 : 2000년 8월 7일

원고 심사완료일 : 2000년 8월 22일

Table 1. Mechanical properties of assumed site

Properties	unit weight (MN/m <sup>3</sup> )	Young's modulus	bulk modulus	shear modulus	friction angle	cohesion	tensile strength	dilation angle
data	0.0262	5.7 GPa	3.8 GPa	2.28 GPa	30°	4.1 MPa	0.58MPa	11°

Table 2. Factor levels for analysis

Factors Levels	unit weight (MN/m <sup>3</sup> ) (1)	Young's modulus (GPa) (2)	cohesion (MPa) (3)	dilation angle (°) (4)	tensile strength (MPa) (5)
1	0.02620	5.70	4.10	11	0.580
2	0.02096	4.56	3.28	8.8	0.464
3	0.01572	3.42	2.64	6.6	0.348
4	0.01048	2.28	1.64	4.4	0.232

## 2. 해석자료

### 2.1 입력 물성치

해석은 광주광역시 제 2순환도로(동광주 I.C-소태간)의 설계 조사된 암반물성치 중에 가장 기본적인 물성을 평균 공극율 1.34%로 설정하고 다른 물성치를 신과 권<sup>2)</sup>, 장과 양<sup>3)</sup>의 문헌을 이용하여 Table 1과 같이 대표값을 결정하였다. 물성의 변화가 발파진동의 전파에 미치는 영향을 파악하기 위해 Table 1의 값을 기준으로 하여 각 물성치별로 80%, 60%, 40%씩 감소시켜

진동의 전파에 가장 영향을 주는 인자를 찾고자 하였다. Table 2는 수치해석을 위한 입력 물성치이다.

### 2.2 Taguchi 법

로버스트 설계(강건설계, Robust Design)는 1950년 초에 다구찌 진이찌(田口玄一) 박사가 제안한 다구찌 기법의 발전된 형태로서 다구찌 품질공학은 제품의 기획 단계에서 생산단계까지 성능, 품질, 가격을 위한 설계 최적화 방법이다. 공학실험에 있어서 많은 수의 인자가 있을 때 중요한 인자를 결정하기 위해서는 한 개씩 시행 착오적으로 구하는 것이 통상적인 방법이다. 이렇게 하면 너무 많은 시간과 경비가 소요되어 제품 설계가 최적상태에 미치지 못하게 된다.

강건설계에서는 적은 수의 실험으로 많은 수의 인자들에 대하여 최적의 인자를 결정하기 위해 직교배열(orthogonal arrays)의 수학적 방법을 사용한다. 또 신호대 잡음비(S/N ratio)라는 품질측정법을 사용하여 품질을 예측하는 방법을 사용한다.

본 연구에서는 물성치의 변화가 발파진동의 전파에 영

Table 3. Orthogonal array for analysis

Experiment No.	Factors				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

향을 미치는 최대 인자를 결정하기 위하여 Table 3의 L<sub>16</sub>(4<sup>5</sup>) 직교배열을 사용하였다. 물성치는 밀도, 영률, 점착력, 팽창각(dilation angle), 인장강도 등 5개의 인자이며 각 물성치별로 Table 2와 같이 4개의 수준(level)을 주어서 직교배열을 결정하였고 교호작용은 고려하지 않았다. 이는 원래는 4<sup>5</sup>만큼의 실험을 하여야 최적 인자를 구할 수 있으나 직교배열법을 이용하면 16번의 실험만으로도 구할 수 있는 장점이 있는 방법이다.

## 3. FLAC 해석

### 3.1 Model설정

해석에 필요한 경계조건으로서 비반사경계(quiet

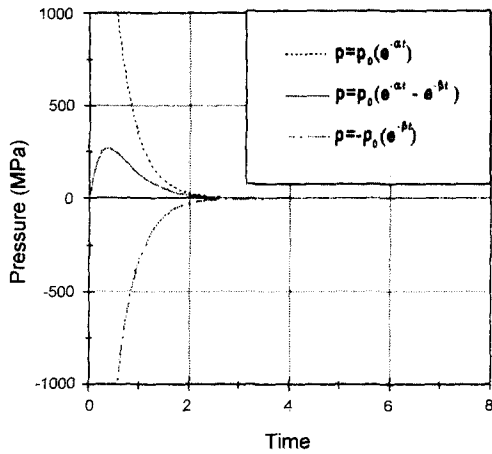


Fig. 1. Pressure vs. time curve for explosive detonation.

boundary)를 사용하였으며 탄성모델을 적용하였다. 감쇠 특성으로서 Rayleigh 감쇠가 적용되었으며 지반의 감쇠율과 진동수가 적용되었다. 충격하중은 반정현파 충격하중과 유사한 파형으로서 압력이 순간적으로 증가하다 최대치에서 비교적 서서히 감소하는 형태의 하중이력을 이용하였다. 식 (1), Fig. 1은 적용된 하중함수이다.

$$\begin{aligned}
 p &= p_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \\
 \alpha &= n\omega\sqrt{2} \\
 \beta &= m\omega\sqrt{2}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 n, m은 충격파의 형태와 관련된 변수로서 거리에 따라서 Table 4와 같이 결정된다. w는 원고유진동수로서 탄성파속도  $C_p$ 와 등가공반경(equivalent borehole radius) a에 의해서 식 (2)와 같이 결정된다

$$w = \frac{2\sqrt{2}C_p}{3a}
 \tag{2}$$

하중함수의 증가시간  $t_R$ 은 다음 식으로 결정하였다.

$$t_R = \frac{\sqrt{2}\ln(n/m)}{(n-m)w}
 \tag{3}$$

Table 4. Input data for dynamic analysis

Parameters	Values
n	Coefficient of damping $0.038e^{1.5Mr}$
m	Coefficient of damping $0.165e^{0.67n}$
v	Poisson's ratio 0.2

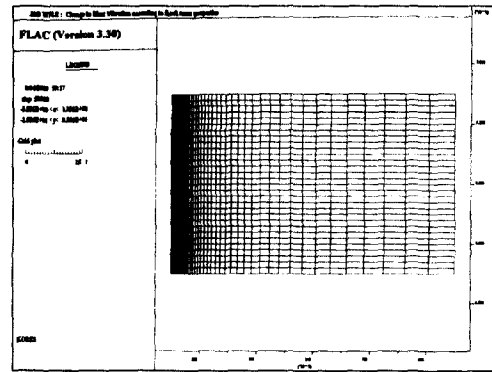


Fig. 2. Finite difference model and loading points of pressure pulse.

Fig. 2는 수치해석 모델로서 상부경계는 자유면으로 하였으며 좌우측과 하단 경계는 quiet boundary로 지정하였다. 발파하중의 입력지점은 모델의 좌측상단으로서 수직천공이 일렬로 배열된 발파공을 측면에서 자른 형태이다. 수치해석의 입력 물성치 변화에 따른 응답수준을 평가하기 위해서 5개의 물성치와 장약량을 변화시키면서 총 80회 해석을 하였다.

기본 입력값으로서 감쇠율은 0.05, 진동수는 20 Hz, 등가공반경은 0.15 m, 등가장약장은 1 m이다. 여기 감쇠율 0.05는 거리감쇠지수 1.6에 해당한다.

### 3.2 해석 결과

Taguchi 표준 직교배열법에 의하여 물성치를 변화시킬 경우 16개의 행렬실험을 장약량을 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0 kg 5가지로 변화하여 총 80회의 수치해석을 하였다. 이를 발파진동의 전파에 영향을 미치는 최대 인자를 파악하기 위하여 행렬실험 결과를 다음과 같은 방법으로 분석하였다.

Table 5는 장약량 1 kg일 때 16개의 실험을 하여 50 m에서 측정된 y 속도치를 정리한 행렬분석표이다. S/N비는 해석 지점에서의 y 속도치를 식 (4)에 입력하여 구하였고,

$$\eta_i = 10 \log(y \text{ velocity})
 \tag{4}$$

인자수준에 의해 정의되는 실험영역에 대한  $\eta$ 의 전체 평균은

$$m = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} \eta_i
 \tag{5}$$

Table 5. Matrix experiment

Experiment No.	Factors					S/N ratio $\eta$ (dB)
	1	2	3	4	5	
1	1	1	1	1	1	-68.48
2	1	2	2	2	2	-71.62
3	1	3	3	3	3	-71.16
4	1	4	4	4	4	-70.54
5	2	1	2	3	4	-71.42
6	2	2	1	4	3	-71.03
7	2	3	4	1	2	-70.55
8	2	4	3	2	1	-69.91
9	3	1	3	4	2	-70.68
10	3	2	4	3	1	-70.32
11	3	3	1	2	4	-69.78
12	3	4	2	1	3	-69.24
13	4	1	4	2	3	-69.71
14	4	2	3	1	4	-69.24
15	4	3	2	4	1	-68.73
16	4	4	1	3	2	-68.01

Table 6. Average values according to various factor levels

Factors	Levels			
	1	2	3	4
U. W.	-70.45	-70.73	-70.00	-68.92
Y. M.	-70.07	-70.55	-70.06	-69.43
cohesion	-69.32	-70.25	-70.25	-70.28
D. A.	-69.38	-70.26	-70.23	-70.25
T. S.	-69.36	-70.22	-70.29	-70.24

주) U.W. : unit weight, Y.M. : Young's modulus, D.A. : dilation angle, T.S. : tensile strength

이고, 각 인자수준의 효과를 평균분석(ANOM)을 이용하여  $m_{A1} \sim m_{E4}$ 를 구하면 Table 6과 같다.

서로 다른 인자들이 진동 전파에 영향을 주는 정도를 파악하기 위하여 분산분석(ANOVA)을 하였다. S/N비의 전체 총 제곱합은

$$\text{grand total sum of square} = \sum_{i=1}^{16} \eta_i^2 \quad (6)$$

로 구하여, 각 인자들에 대한 제곱합은 밀도 인자인 경우

$$4(m_{A1} - m)^2 + 4(m_{A2} - m)^2 + 4(m_{A3} - m)^2 + 4(m_{A4} - m)^2 \quad (7)$$

과 같은 방법으로 구하고, 자유도는 수준-1, 제곱평균은 제곱합을 자유도로 나눈 것이고, 기여도는 해당 인자의 제곱평균을 총 제곱평균으로 나눈 것으로 Table 7과

Table 7. Results by ANOVA

factors	DOF	Sum of square	Ave. of square	F(%)
Density	3	7.56	2.52	43.51
E.M.	3	2.57	0.86	14.77
cohesion	3	2.63	0.88	15.11
D.A.	3	2.25	0.75	12.93
T.S	3	2.38	0.79	13.68

주) F : Factor of Contribution

Table 8. Total factor of contribution

charge (kg)	distance (m)	F (%)				
		U.W.	Y.M.	Co.	D.A.	T.S.
1	10	98.6	1.0	0.2	0.1	0.2
	30	84.8	4.9	3.5	3.3	3.7
	50	43.5	14.8	15.1	12.9	13.7
	70	39.3	9.8	18.1	15.9	16.9
1.25	10	98.6	1.0	0.2	0.1	0.2
	30	84.8	4.9	3.4	3.2	3.7
	50	43.6	14.5	15.1	12.9	13.9
	70	39.5	9.8	18.0	15.8	16.9
1.5	10	97.2	1.0	0.5	1.01	0.3
	30	82.6	3.4	5.2	6.0	2.9
	50	41.1	11.5	18.6	17.2	11.6
	70	37.9	7.7	20.7	19.0	14.8
1.75	10	95.6	2.2	1.3	0.8	0.2
	30	77.9	7.4	7.5	6.4	0.8
	50	34.3	18.4	21.4	18.5	7.5
	70	32.9	12.9	22.5	20.0	11.7
2.0	10	98.6	0.9	0.2	0.1	0.2
	30	84.8	4.9	3.4	3.2	3.7
	50	43.6	14.7	15.1	12.7	14.0
	70	39.5	9.8	18.0	15.8	16.9

주) Den. : density, Co. : cohesion

같다.

Table 7을 보면 5개의 물성치 중에서 암반의 밀도가 진동의 전파에 가장 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있고 이는 공극률의 영향을 가장 많이 받음을 알 수 있다.

Table 8은 이와 같은 방법으로 물성치와 장약량을 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0 kg으로 변화하였을 때 발파지점에서부터 10, 30, 50, 70 m 떨어진 지점에서의 진동 전파의 기여도를 나타내는 표이고, Fig. 3은 이를 나타내는 그림이다. 전체적으로 발파진동의 전파에는 밀도의 변화가 64.9%로 가장 많은 영향을 받고, 탄성계수 7.7%, 점착

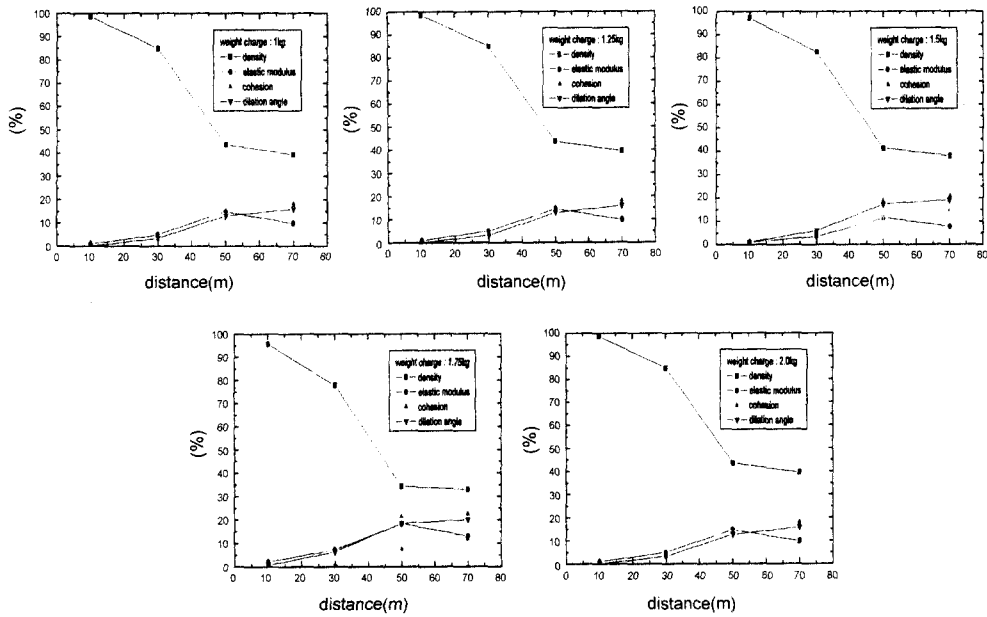


Fig. 3. Change in characteristics of propagation of blast vibration according to various weight charge and distance.

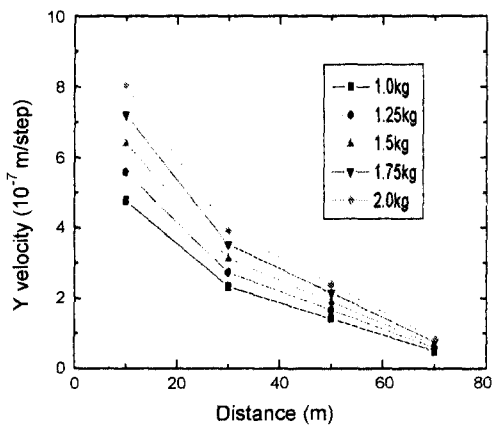


Fig. 4. Attenuation by distance.

력 10.4%, 팽창각 9.3%, 인장강도 7.7%의 영향을 미치고 있다. 그리고 근거리일 경우에는 다른 요인보다는 밀도의 영향이 아주 크게 작용하나 거리가 멀어질수록 다른 인자의 영향이 증대하는 경향을 보인다. 또 5개의 그림을 비교하면 장약량이 증가해도 진동의 전파에 영향을 미치는 물성치의 영향은 일정하다는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 장약량이 변화하였을 때 각 1번 실험에서 구한 거리별 진동 감쇠 관계로 10 m를 기준으로 30 m에서는 49%, 50 m는 29.7%, 70 m는 10.4%의 진동 수준을 보

였고, 장약량이 증가하면 진동 수준도 증가하였으나 거리 별로 감쇠하는 정도는 일정하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 지반의 역학적 특성과 장약량의 변화가 발파진동의 전파에 미치는 영향을 분석하기 위하여 FLAC 해석을 하고 그 결과를 Taguchi 법으로 분석하였다. 주요 결과들은 다음과 같다.

- 1) Taguchi 법으로 분산분석을 실시한 결과 변수로 채택한 암반의 물성 중 발파진동의 전파에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 밀도였으며 다음으로 점착력, 팽창각, 인장강도, 탄성계수의 순으로 나타났다.
- 2) 수치해석 결과 발파진동은 근거리일 경우에는 밀도의 영향이 아주 크게 작용하나 거리가 멀어질수록 다른 인자의 영향이 증가하는 경향을 보였고, 장약량이 증가해도 진동의 전파에 영향을 미치는 물성치의 영향은 일정하다는 것을 알 수 있었다.
- 3) 동일한 장약량으로 발파를 하여도 대상지역의 역학적 특성치에 따라 발파진동의 전파특성이 달라질 것으로 생각되며 이는 예기치 못한 발파진동 피해를 보다 효과적으로 제어할 수 있는 기본 데이터가 될 수 있을 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. 김호성, 양형식 외, 1992, 강건설계를 이용한 품질공학, 민영사, 343p.
2. 신희순, 권광수, 1998, 국내 화강암의 역학적 성질간의 상관성, 한국자원공학회지, 21. 4, 159-165.
3. 장명환, 양형식, 1999, 암반구조물의 수치해석을 위한 입력자료의 비교분석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 9, 221-229.
4. Duvall W.I, 1953, Strain-wave shapes in rock near explosions, Geophysics 0016-8033, 18. 2, 310-323.
5. 조상호, 2000, 발파하중에 의한 지반·구조물 동적응답의 예측 연구, 전남대학교 대학원 석사학위논문, 61p.

#### 김 남 수



1994년 전남대학교 공과대학 자원공학과, 공학사  
 1996년 전남대학교 대학원 자원공학과, 공학석사  
 1999년 전남대학교 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel : 062-530-0824

E-mail : nskim@chonnam.ac.kr

현재 전남대학교 강사

#### 김 보 현



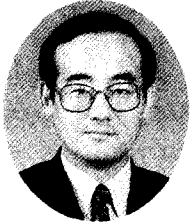
1996년 전남대학교 공과대학 자원공학과, 공학사  
 1998년 전남대학교 대학원 자원공학과, 공학석사

Tel : 02-840-5887

E-mail : zicman@hanimail.com

현재 대한광업진흥공사 석재자원처 근무

#### 양 형 식



1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사  
 1981년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사  
 1987년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel : 062-530-1724

E-mail : hsyang@chonnam.ac.kr

현재 전남대학교 자원공학과 교수