

다변량 통계기법을 이용한 K 및 n 의 산정에 관한 연구

A Study on the Estimation of Coefficients K and n Using Multivariate Data Analysis

백 용 진[†] · 최 재 성* · 배 동 명** · 김 경 진***

Yong-Jin Baek, Jae-Sung Choi, Dong-Myung Bae and Kyung-Jin Kim

(2002년 10월 31일 접수 : 2003년 7월 9일 심사완료)

Key Words : Blasting(발파), Blasting Vibration(발파진동), Multivariate Statistical Analysis(다변량 통계분석), Blasting Constant(발파상수), Attenuation Exponent(감쇠지수)

ABSTRACT

For the preestimate of the vibration level of the ground next to a dwelling, a multivariate statistical analysis on the experiment data acquired from a variety of construction sites was performed, and then a new estimate model for the value of K and n that can be applied in the diagnosis of the damage was offered. The results maybe summarized as follows : First, the K_{95} and n showed high correlation at $P \leq 0.05$. Specially the correlation coefficient about W_{max} , S were higher in K_{95} than in n , indicating that K_{95} is generally associated with source conditions. Second, the factor analysis permitted to identify two major sources in each fraction. These sources accounted for at least 73 % of variance of K_{95} . Third, the multiple regression model for the estimate of K_{95} was developed from Fac1 which depend upon the source conditions and Fac2 which depend upon the transmission conditions. The n value is able to determine from the correlation relationship associated with K_{95} .

1. 서 론

발파진동을 추정하기 위한 경험적인 관계식을 살펴보면 주로 지반의 진동속도를 지발당 장약량과 폭원으로부터의 거리를 매개변수로 하여 나타내고 있다. 그외 매질로서의 지반의 특성이나 발파원과 같은 변수들의 영향은 모두 발파상수와 감쇠지수라 일컫는 K 와 n 이라는 상수에 반영되는데 정확한 진동예측을 위해서는 대상지역에서의 시험발파를 통해 K 및 n 의 상수값을 결정하는 것이 바람직하다. 하지만 발파가 종료된 후 야기된 피해민원의 인과관계 규명을 위한 진동예측의 경우나 시공중 민원으로 발파조건을 모두

반영하여 시험발파를 실시하는 것이 불가능할 경우에는 현장에 적합한 K 와 n 값을 산정하기가 더욱 어렵다.

최근 국내의 관련연구를 살펴보면 K , n 값 산정에 대한 연구^(1~5)가 몇몇 변수들과 상관되어 진행되어 왔는데 대부분 설계적 관점에서 다루고 있다. 즉 발파상수 K 는 주로 파쇄대상 암석의 일축압축강도와 발파형태에, n 은 발파 대상지역의 암중에 관련 짓고 있음을 알 수 있다.

하지만 발파진동과 관련된 피해진단과 같이 보다 세밀한 진동예측이 요구되는 경우에는 K 와 n 값 산정에 더욱 신중해야 하는데 발생원측 조건, 즉 발파지점에서의 설계인자의 발파지점과 수신점 사이의 전달 매질 특성에 관련된 파라미터 연구가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 K , n 값 산정에 관련된 여러 인자들에 대한 상관분석 및 요인분석을 실시하여 K 와 n 값에 기여하는 인자의 특성을 파악하고 합리적인 K , n 값 산정 모형을 연구하였다.

[†] 책임저자, 정희원, (재)한국건설안전기술원

E-mail : gimini@hanafos.com

Tel : (02) 571-1851, Fax : (02) 577-7976

* 정희원, (재)한국건설안전기술원

** 정희원, 부경대학교 조선해양시스템공학과

*** (재)한국건설안전기술원

2. 이론적 배경

2.1 발파진동 추정식

이론적으로 진동은 진동원이 가진 에너지에 비례하고 거리에 반비례한다. 그러나 충격에 의한 진동의 발생은 지반의 성질에 따라 크게 좌우될 것이며, 더구나 그 전달특성은 지반의 충격 흡수성이나 탄성과 속도 및 매질의 밀도로서 표시되는 임피던스에 따라 크게 달라질 것이다.

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 측정간의 거리 등이다.

이와같이 발파변수의 복잡성으로 인하여 진동전파에 관한 이론적인 접근에는 많은 어려움이 뒤따르게 되며, 같은 암반에서도 현장의 발파조건 등에 따라 전파특성이 달라지므로 경험적인 연구의 중요성이 부각되었다.

Hendron, Devine, Oriad 등 많은 연구자들은 발파현상에 관련된 변수의 차원해석과 많은 발파진동의 측정경험을 토대로 지발당 최대 장약량과 폭원으로 부터의 거리를 주요 변수로 하여 구조물 피해의 기준이 되는 최대진동속도를 아래와 같이 제시하였다.

$$V = K \left(\frac{D}{W^b} \right)^n \quad (1)$$

여기서,

- V : 지반의 진동속도(cm/s)
- D : 발파원으로 부터의 거리(m)
- W : 지발당 장약량(kg)
- K, n : 지질암반조건, 발파조건 등에 따르는 상수
- b : 1/2 또는 1/3

식 (1)에서 거리와 지발당 최대장약량의 비인 D/W^b 를 환산거리(scaled distance, SD)라 하며, $b=1/2$ 이면 자승근 환산거리(square root scaled distance), $b=1/3$ 이면 삼승근 환산거리(cube root scaled distance)라 한다.

K, n 값은 전술한 바와 같이 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하여 결정되나 특히 K 값은 암질 및 발파조건에 주로 영향을 받아 폭원의 위력이 커질수록 증가하는 경향이 있으며 n 값은 감쇠지수로 지질조건 및 전달특성에 지배적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다.^(1, 5)

2.2 통계학적 고찰

각기 다른 현장에서 측정한 실험 데이터로부터 도출한 K, n 값이 여러 변수 인자와 갖는 상관성을 분석하고 특히 K 값 산정에 영향을 미치는 요인을 추출한 뒤 K, n 값 산정 모형을 구하기 위해 회귀 분석을 수행하였다.

요인추출방법은 주성분분석(principal component analysis) 방법을 선택하였는데 주성분 분석은 여러 가지 반응변수에 대하여 얻어진 다변량 자료를 분석 대상으로 하여 다차원적인 변수들을 축소, 요약하여 단순화하고 서로 상관도가 있는 반응변수들간의 복잡한 구조를 분석하는데 사용된다.

주성분분석의 과정은 변수 및 표본수의 설정, 상관관계 행렬의 계산, 주성분수의 결정, 주성분적 재량 산출, 주성분의 회전 및 해석의 순으로 이루어진다.

추출된 요인행렬로부터 단순구조를 얻기 위한 요인회전은 Kaiser에 의해 제안된 주성분 패턴행렬의 각 열을 중심으로 각 열에서 각 계수제곱의 분산의 합이 최소가 되는 varimax회전을 사용하여 K 값에 미치는 요인을 해석하고 특성을 밝혔다. 요인분석의 기본 모형은 다음과 같다.^(10, 11)

$$Z_i = l_{i1} F_1 + l_{i2} F_2 + \dots + l_{im} F_m + \epsilon_i \quad (2)$$

여기서,

- Z_i : i 번째 표준화된 변수
- l_{ij} : i 번째 변수와 j 번째 요인에 대한 가중치로 인자부하량(factor loading)
- F_j : j 번째 공통요인(common factor)로서 전체변수에 공통으로 사용되는 변수
- ϵ_i : m 개의 인자에 의해 설명되지 않는 i 번째 변수의 유일요인(specific factor), Z_i 에만 기여하는 변수

이며, 변수 Z_i 의 분산은

$$\text{Var}(Z_i) = h_i^2 + \psi_i, h_i^2 = l_{i1}^2 + \dots + l_{im}^2 \quad (3)$$

이 된다. 여기서 h_i^2 은 Z_i 의 분산 가운데에서 m 개의 요인 F_1, F_2, \dots, F_m 들이 기여하는 정도를 의미하므로 "공통분산(common variance)" 또는 "공통성(communality)"이라고 하고, ψ_i 는 Z_i 자체의 분산을 나타내는 유일분산(unique variance)이다. (Z_1, \dots, Z_m)들의 분산을 가장 많이 설명할 수 있는 요인 순서대로 F_1, \dots, F_m 을 찾는다.

요인분석모형에서 변수 Z_1, Z_2, \dots, Z_i 의 상관행렬을 R , 공통요인점수의 변량-공변량행렬을 Λ , Eigenvector 행렬을 L 이라 하고, Ψ 는 특수요인점수의 변량-공변량행렬로 대각선의 원소가 ψ_i 인 대각행렬이라고 하면,

$$R = L \Lambda L' + \Psi \quad (4)$$

를 만족한다. 고유치가 1.0이상, 누적기여율이 75% 이상 선에서 인자수를 결정하였으며, 고유치는 식 (5)에 의해 얻어질 수 있다.

$$|R - \lambda I| = 0 \quad (5)$$

여기서, R : 상관행렬, I : 단위행렬, λ : 고유치

3. 발파진동 계측

3.1 시험조건

발파진동 계측 자료는 국내 도로건설현장의 노천발

파시 획득한 것으로 대부분 실제 발파작업 조건에 의한 결과이다. 총 11개소 현장의 17개 지점에서 지점별로 8~12회 발파에 대한 계측을 실시하여 총 425개의 데이터를 획득하였다. Table 1은 파쇄대상암 및 발파조건에 대해 요약한 것이다.

지역별로 살펴보면 A는 충남지역, B~F는 충북지역이고, F는 충남지역, G는 경남지역, H는 전남지역, I~J는 경기지역, K는 인천지역의 도로건설현장이며 A1, A2와 같이 알파벳 철자가 같은 표기는 동일 현장에서 발파지점이 다른 구역을 의미한다. 파쇄대상암은 B지역의 경우 석회암, I지역은 응회암, E, I, J지역은 편마암이고 그 외 지역은 화강암이다.

천공작업은 주로 크로라 드릴 및 유압식 천공기가 사용되었으며 천공경은 45~90 mm, 천공깊이는 2~6 m, 천공간격은 1~2 m 범위임을 알 수 있다. 사용된 폭약은 대부분 에멀전(emulsion) 폭약인 Newmite와 Emulite 제품인데 I지역의 경우만 초유폭약(AN-FO)과 에멀전 폭약이 병용되었다. 제품마다 약간의 차이는 있으나 에멀전 폭약의 폭속은 4,200~5,900 m/sec 범위이고 초유폭약의 폭속은 3,300 m/sec 정도이다. 뇌관은 MSD(milli second detonator) 뇌관이 주로 사용되었고 지발당 장약량 수준은 0.5~25 kg 정도이다.

3.2 계측방법

본 계측에 사용된 장비는 진동속도 측정용으로 발생 진동원에 대하여 서로 직교하는 3축 방향 성분(Longitudinal : 종수평 성분, Vertical : 수직 성분, Transverse : 횡수평 성분)을 측정할 수 있고 측정되는 진동성분은 최대입자속도(peak particle velocity) 값이며 피크치의 진동수, 최대가속도 및 변위와 함께

Table 1 Blasting conditions

Location	No. of data	Rock type	Drill diameter (mm)	Drill depth (m)	Drill interval (m)	Charge range (kg/delay)
A1, A2	48	granite	45~75	1.6~3.0	0.8~1.0	0.5~1.8
B1, B2	66	granite	75~90	2.7~6.0	1.1~2.0	1.25~6.25
C	64	limestone	75	2.7	1.2~1.3	1.0
D1, D2	30	granite	45	3.0~3.3	0.9~1.0	0.75~2.25
E1, E2, E3	68	granite	75	3.0~6.0	1.0~3.5	1.25~2.25
F	27	gneiss	65	2.5~2.5	0.8~1.0	0.75~2.25
G	24		70	2.3~2.4	1.3~1.4	1.0~1.6
H1, H2	55	tuff	75	5.3~5.5	1.7~2.0	4.0~8.4
I	21	gneiss	45	3.0	0.8~0.9	1.08
J	54	gneiss	45	2.7	0.8~1.1	0.67~1.0
K	29	granite	65	4.0~4.7	1.2~1.8	3.0~4.0

측방향 성분 및 벡터합 진동속도를 출력한다. 측정값은 모니터 상에 나타나거나 프린트 할 수 있고 속도계의 감지 가능한 진동레벨 범위는 0.127~254 mm/s이다.

계측지점은 Fig. 1과 같이 발파지점으로부터 대상 구조물 방향으로 측선을 설정한 뒤 진동픽업 3개를 유사한 간격을 유지한 채 설치하는데 이때, 측정지점이 대부분 토사층이었기 때문에 연약지반 설치용 spike로 진동픽업을 고정하였다.

계측조건은 일정시간 연속적으로 기록하는 continuous 모드에 측정시간은 발파진동의 지속시간이 2 sec 내외임을 감안하여 3 sec로 하고, 트리거 레벨(trigger level)은 현장의 암진동 수준 이상으로 하였다. 또한 샘플링은 1024 sps 혹은 2048 sps로 설정하였다.

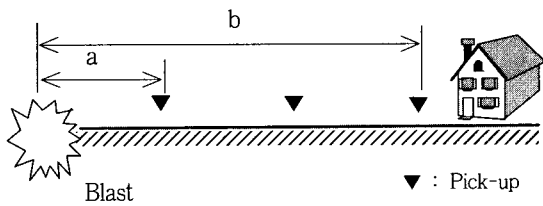


Fig. 1 Cross sectional view on the measuring points

Table 2 Measured vibration data

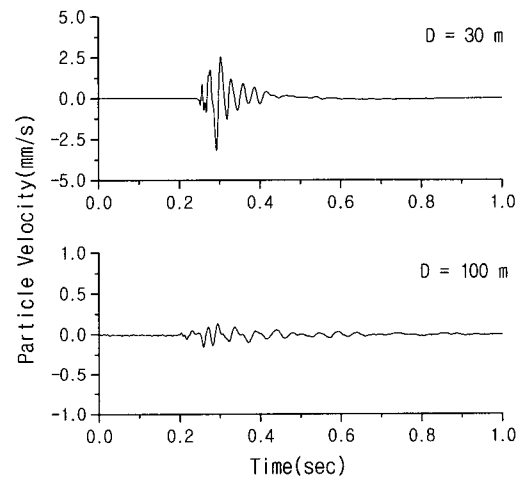
Location	a (m)	b (m)	Mode of charge (kg/delay)	Velocity range ¹⁾ (mm/s)	Natural freq. of ground(Hz)
A1	28	97.2	1.65	0.24~7.56	7.8
A2	27	69	0.68	0.368~4.8	18
B1	73.9	202.3	1.85	0.24~1.68	7.2
B2	83.4	237	3.75	0.24~5.66	10.6
C	94	153	1	0.24~1.17	10.1
D1	50	174	2.25	0.25~6.1	12.5
D2	50	148	1.5	0.27~2.17	10.2
E1	91	179.8	13	0.246~5.48	7.8
E2	100	187.7	13	0.328~10.3	10.6
E3	74	175.7	13	0.196~4.65	10.7
F	40	122	1.5	0.75~2.25	18
G	42.6	171.4	1.2	0.2~6.01	14.1
H1	68	207	8.4	1.34~27.5	14
H2	54	141	4	2.44~17	14.4
I	24.7	148	1.08	0.392~5.08	10.8
J	37.4	125.5	1	0.328~6.43	15
K	87.3	159.5	4	0.7~4.63	8

1) Data of all measuring points

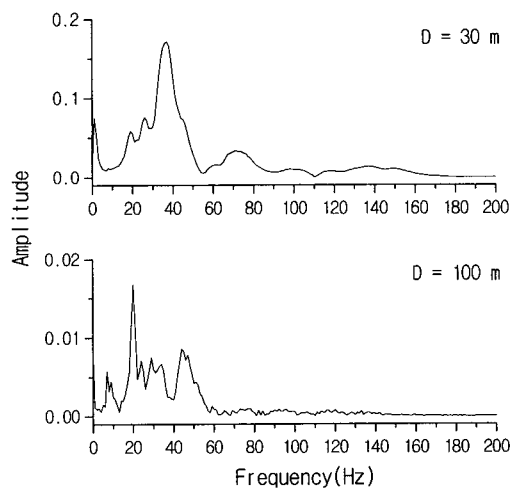
3.3 계측결과

각 발파현장에서 측정시 발파지점과 진동픽업간 이격거리, 최빈 지발당 장약량 수준, 계측된 지반진동속도 범위, FFT분석 결과 얻은 지반의 추정 고유진동수를 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서 지반진동속도는 최대벡터합(peak vector sum)을 나타내고 지반의 고유진동수는 FFT 분석을 통해 얻은 주파수 응답스펙트럼으로부터 전달 함수를 산정하여 추정하였다. Fig. 2는 A현장에서 계측된 발파진동의 진행방향 성분에 대한 시간이력 및 주파수 응답특성을 보인 것이다. 그림에서 보면 비교적 근거리에서는 가진원 특성으로 인해 25 Hz 이상의



(a) Time domain



(b) Frequency domain

Fig. 2 Time history and frequency response spectrum of blast vibration

주파수 성분이 탁월하나 지반을 전달하여 가는 과정에서 감쇠하는 특성을 뚜렷이 볼 수 있다. 하지만, 25 Hz 이하의 성분은 오히려 증폭되거나 상대적으로 낮은 감쇠율을 보여 대상 진동원-지반의 진동전달 특성을 알 수 있으며 지반의 고유진동수도 이 영역에 있을 것으로 추정된다.

지반의 고유진동수는 식 (6)과 같이 발파지점으로부터 근거리 위치에서의 응답스펙트럼과 원거리에서의 응답스펙트럼의 비, 즉 전달함수를 구하면 보다 쉽게 추정할 수 있다.

$$H_i(f) = \frac{Y_i(f)}{X_i(f)} \quad (6)$$

여기서,

$H_i(f)$: i 번째 발파시 전달함수

$X_i(f)$: 발파지점으로부터 근거리(이격거리: (a)에서 i 번째 발파시 주파수 응답함수

$Y_i(f)$: 발파지점으로부터 원거리(이격거리: (b)에서의 i 번째 발파시 주파수 응답함수

이고, 평균화된 전달함수(averaging of transfer

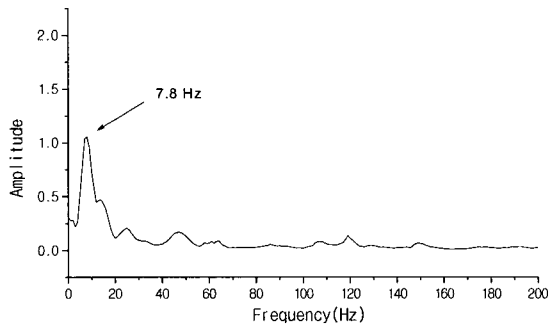


Fig. 3 Averaging of transfer function

function)는 식 (7)으로부터 얻을 수 있다. Fig. 3은 Fig. 2로부터 구한 평균화된 전달함수의 예이며, 7.8 Hz에서 탁월한 성분을 보임을 알 수 있다.

$$H(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i(f) \quad (7)$$

4. 결과 및 분석

4.1 발파진동 추정식 산정

Table 2에서 제시된 계측자료를 토대로 Fig. 4와 같이 회귀분석을 실시하여 최소자승법(least square method)에 의해 회귀계수를 추정하고 이로부터 K와

Table 3 Coefficients K and n from regression analysis

Location	K_{50}	K_{95}	n
A1	787.1	1865.5	-1.70
A2	5551.2	7713.6	-1.82
B1*	83.79	151.13	-1.06
B2	4702.0	11977.9	-1.86
C	1023.1	1865.5	-1.65
D1	524.8	1479.4	-1.40
D2	758.6	1023.4	-1.64
E1	4827.6	6710.6	-1.96
E2	38426.4	79353.3	-2.29
E3	17447.0	28634.0	-2.50
F	147.9	288.4	-1.26
G	23566.0	32714	-2.39
H1	3155.9	5586.7	-1.59
H2	4529.8	7402.6	-1.68
I*	264.4	379.08	-1.26
J	6235.0	11320.0	-2.00
K	1104.3	1919.8	-1.53

* : 자승근 환산거리가 채택된 경우

Table 4 Correlation between K, n and blast condition factors

	K_{95}	n	W_{max}	W_{unit}	f_1	D_1	S	geo1	geo2
K_{95}	1.000								
n	-.708*	1.000							
W_{max}	.621*	-.584*	1.000						
W_{unit}	.322	-.336	.556*	1.000					
f_1	-.054	.083	-.320	-.007	1.000				
D_1	.370	-.219	.605*	.350	-.347*	1.000			
S	.595*	-.537*	.951*	.612*	-.370	.730*	1.000		
geo1	-.259	.239	-.373	-.069	.269	-.408	-.382	1.000	
geo2	.321	-.224	.634*	.277	-.220	.787*	.725*	-.618*	1.000

* Correlation is significant at the 0.05 level (1-tailed)

n 을 구하면 Table 3과 같다. B1과 J의 경우를 제외하고는 삼승근 환산거리에 의한 것이 상관계수가 더 높게 나타났다.

Fig. 4는 B현장에 대한 회귀분석 결과인데 로그-로그 스케일 상에서 진동속도와 환산거리의 상관관계를 나타내고 있다. 유의수준 $p < 0.05$ 에서, B1은 -0.730 , B2는 -0.875 등의 상관계수를 얻어 만족할 만한 상관성을 확인하였다.

회귀식의 유의성 검증과 회귀식의 기울기를 의미하는 회귀계수의 검정을 위해 각각 F-검정과 t-검정을 실시하여 유의수준 $p < 0.05$ 에서 신뢰성이 인정되었고 회귀식의 설명력을 의미하는 결정계수 R^2 은 B1이 0.533 , B2가 0.766 을 얻었다.

나머지 현장도 동일한 방법으로 K, n 값을 구할 수 있으나 측정자료 중 정규분포 성향을 크게 벗어난 자료는 통계적 처리과정에서 제외시켰다. Table 3에서

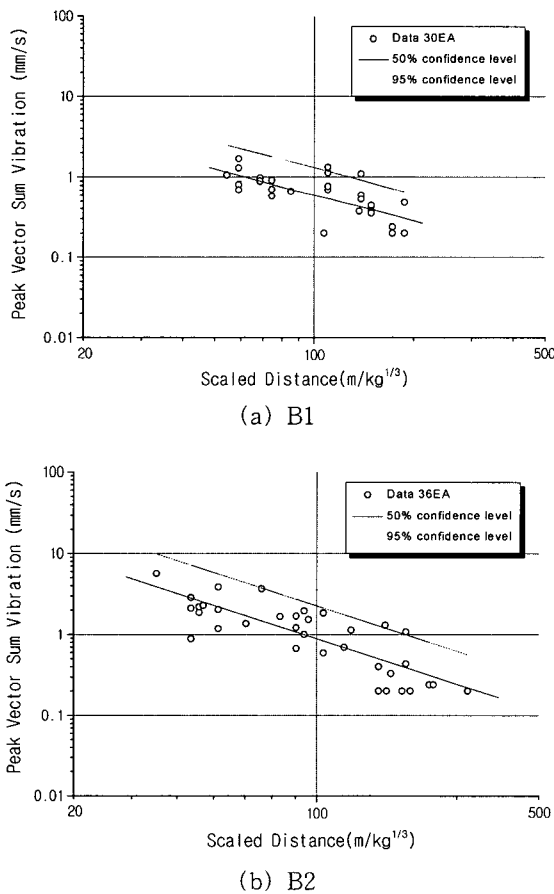


Fig. 4 Relationship between cube root SD and PVS of B site

K_{50}, K_{95} 는 측정된 자료의 50%와 95%를 포함하는 발파진동상수값을 나타낸다.

4.2 상관성 분석

K, n 값과 발파 조건(즉 발생원측 조건, 전달매질 상에서의 조건) 요인들 간에 상관성 분석 결과를 Table 4에 나타내었다. 표에서 W_{max} 는 지발당 최대 장약량, W_{unit} 는 단위 길이당 장약량, f_1 은 지반의 추정 1차 고유진동수를 나타내고, D_1 은 Fig. 1에서의 발파지점과 첫 번째 진동피업간의 이격거리 a , S 는 공간격, $geo1$ 과 $geo2$ 는 지형의 고저차 조건의 통계치리를 위해 수량화한 더미변수(dummy variable) 등을 의미한다.

우선, K_{95} 와 n 은 높은 음(-)의 상관성($p < 0.05$)을 보임을 알 수 있고, 발파 및 지반조건과 관련된 각 요인별 상관성 분석 결과를 보면 발파상수 K_{95} 는 감쇠지수 n 보다 W_{max}, S 에 높은 상관성($p < 0.05$)을 보여 예상대로 발생원측 조건에 크게 좌우됨을 알 수 있었고, 감쇠지수 n 은 예상과 달리 $f_1, D_1, geo1$ 및 $geo2$ 와 같은 전달매질의 조건에 그다지 높은 상관

Table 5 Result of factor analysis for data from K_{95}

	Component	
	Fac1	Fac2
W_{max}	.827	.387
W_{unit}	.879	-.199
f_1	-2.4E-02	-.651
D_1	.586	.612
$D.I$.864	.440
$geo1$	-.114	-.782
$geo2$.532	.698
Eigenvalue	2.842	2.281
% of variance	40.597	30.579
Cumulative %	40.597	73.176

Table 6 Component score coefficient matrix

	Component	
	Fac1	Fac2
W_{max}	.294	-.005
W_{unit}	.491	-.380
f_1	.180	-.392
D_1	.108	.204
S	.296	.017
$geo1$.174	-.446
$geo2$.057	.272

성을 보이지 않았는데, 보다 정확한 결과를 위해서는 충분한 표본 자료가 있어야 할 것이다.

또한 각 요인별 상관성 분석 결과 W_{max} , W_{unit} 은 S 와 0.951, 0.612로 높은 상관성($p < 0.05$)을 보였고, f_1 과 $geo1$ 및 $geo2$ 는 D_1 와 상대적으로 높은 상관성($p < 0.05$)을 나타내었다.

4.3 다변량 분석을 이용한 변수별 기여도 평가

각 요인별에 대한 분석자료를 이용하여 발파상수 K_{95} 에 대한 기여 정도를 파악하기 위해 요인분석을 실시하였고, 그 결과를 Table 5, 6에 나타내었다.

산출된 요인적재행렬을 해석이 용이하도록 Varimax 회전을 시킨 후, 2개의 주성분과 각 주성분에 높게 적재된 변수를 주성분의 적재치로 나타내었다. Eigenvalue 값이 1이상인 것을 요인으로 선택하였고, 2개의 주성분은 총 분산의 75.42%를 설명할 수 있었다.

첫번째 요인(Fac1)은 W_{max} , W_{unit} , S 로 총 분산의 40.60%를 설명하고 부하량은 0.879~0.827로 매우 높게 적재되어 있어 발생원측 요인임을 알 수 있다. 두번째 요인(Fac2)은 f_1 , D_1 , $geo1$ 및 $geo2$ 로 총 분산의 30.58%를 설명하며 요인 부하량은 0.782~0.612로 높게 적재되었고, 이는 전달매질상의 요인으로 추정할 수 있다.

K_{95} 를 종속변수, 두 요인을 독립변수로 하여 중회귀분석을 실시하면 식 (8)과 같은 회귀모형을 얻을 수 있고, 유의수준 $p < 0.05$ 에서 상관계수 0.784를 얻었다. 회귀계수의 유의성을 보는 t 값은 Fac1이 3.362, Fac2가 0.518로 나타나 K_{95} 는 Fac1에 더 영향을 받음을 알 수 있다.

$$K_{95} = 18876.198 + 18754.874 \text{ Fac1} + 3297.350 \text{ Fac2} \quad (8)$$

끝으로 K_{95} 와 n 과의 회귀분석 결과는 식 (9)과 같고, 식 (8)에 의해 K_{95} 값이 결정되면 n 값은 식 (9)에 의해 추정할 수 있다.

$$n = -1.597 - 0.000013 K_{95} \quad (9)$$

5. 결 론

발파진동 추정식의 K , n 값 특성을 규명하기 위해, 11개소 현장에서 수집한 발파 진동계측자료를 분석하

고 요인분석 및 회귀분석등 다변량 통계기법을 이용하여 K , n 값 산정모형을 추정하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) K_{95} 와 n 은 높은 음(-)의 상관성을 나타내었고, 특히 발파상수 K_{95} 는 지발당 장약량(W_{max})과 공간격(S)과 같은 발생원측 조건(즉, 발파조건, Fac1)에 상당히 높은 상관성을 보였다. 하지만 감쇠지수 n 은 예상과 달리 전달매질상의 조건(Fac2)에 그다지 높은 상관성을 보이지 않았는데, 이는 추후 충분한 표본자료에 의해 검증이 필요한 것으로 판단된다.

(2) 요인분석을 이용하여 K_{95} 에 기여하는 2가지 주성분들을 축약하여 도출하였다. 2가지 주성분은 발생원측 요인(Fac1)과 전달매질상의 요인(Fac2)이므로 K_{95} 변동의 75.42%를 설명할 수 있었다. 두 요인을 독립변수로 하여 K_{95} 산정을 위한 회귀모형을 도출하였으며 두 요인에 대한 t 값은 Fac1이 3.362, Fac2가 0.518로 나타나 K_{95} 는 Fac1에 더 영향을 받는 것으로 나타났다.

(3) 따라서 공사가 중지되어 현장 여건상 발파를 수행할 수 없거나 특히 민원과 관련된 발파 피해진단 업무에서 발파진동 추정식 산정을 위한 K , n 값 결정은 다음과 같은 절차로 수행함이 타당할 것이다. 즉, 현장에서 통상적으로 기록유지되고 있는 발파조건에 대한 자료로부터 K_{95} 값을 추정하고, n 값은 K_{95} 와의 상관관계식으로부터 산정함이 보다 합리적일 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) 안명석, 박종남, 1999, "대구 규장암 지역의 발파진동 측정자료에 의한 K 및 n 의 변화추이에 대한 고찰, 한국자원공학지," 제 36 권, pp. 313~318.
- (2) 박연수, 박선준, 강성후, 1998, "발파 진동추정식의 신뢰성에 관한 연구," 대한토목학회논문집, 제 18 권, 제 I-1호, pp. 143~152.
- (3) 천병식, 오민열, 1995, "R.Q.D에 의한 발파진동 속도 추정에 관한 연구," 대한토목학회논문집, 제 15 권, 제 4 호, pp. 983~990.
- (4) 김수일, 정상섭, 조후연, 1994, "발파진동식의 신뢰성, 대한토목학회논문집," 제 14 권, 제 3 호, pp. 573~582.
- (5) 정철호, 정상문, 이철, 1993, "암발파 진동추정

사례분석," KGS Sprims '93 National Conference, Geotechnical and Tunneling Technology.

(6) 양형식, 전양수, 정지문, 1998, "측정수가 발파 계수와 허용환산거리의 산정에 미치는 영향," 한국소음진동공학회논문집, 제 8 권, 제 5 호, pp. 814~820.

(7) 임한욱, 김재동, 1992, "발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구," 한국자원공학회지, 제 29 권, pp. 146~157.

(8) 허명희, 양경숙, 2002, "SPSS 다변량 자료분석," SPSS 아카데미, pp. 19~64.

(9) 노형진, 1999, "한글 SPSSWIN에 의한 다변량 데이터의 통계분석," 석정.

(10) 박광배, 2000, 다변량분석, 학지사, pp. 65~124.

(11) Pearson Statistics Consulting, Homepage, 2000 <http://www.pvalue.co.kr/tong/many/many_07.html>.

(12) Dowding, C. H., 1996, Construction Vibrations, Prentice-Hall, Inc.

(13) Cyril, M. Harris, Shock and Vibration Handbook, 4th ed., McGraw-Hill.

(14) Brigham, E. O., 1988, The Fast Fourier Transform and Its Application, Prentice-Hall, Inc.

(15) Randal, R. B. Tech. B., B. A., 1987, Frequency Analysis, 3rd ed., B&K Korea Ltd.

(16) Dowding, C. H., 1985, Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice-Hall, Inc.