

도심지 미진동 제어발파에서 진동분석을 통한 안전 발파설계에 관한 연구(Ⅱ)

- 진동측정 자료의 통계적 분석을 위주로 -

김영환¹⁾ 안명석²⁾ 박종남³⁾ 강대우⁴⁾ 이창우⁵⁾

A Study on the Safe Blasting Design by Statistical Analysis of Ground
Vibration for Vibration Controlled Blasting in Urban Area(Ⅱ)

Young-Hwan Kim, Myung-Seog Ahn, Jong-Nam Park, Dae-Woo Kang and Chang-Woo Lee

Abstract The characteristics of bed rock in the study area was classified by means of the crack coefficient estimated from the seismic velocities of in-situ and intact rocks. Various statistical methods were investigated in order to minimize the possible errors in estimating the predictive equation of blasting vibration and to enhance the determination coefficient, R^2 , for more reliable estimation.

The determination coefficient showed the highest reliability in the analysis for those groups using weighting function with the number of samples. The analysis for the weighting function employed with standard coefficient and variance also enhanced the determination coefficients significantly compared to the others, but the reliability was slightly lower than the results obtained from the former method. Therefore the most reliable predictive equation of blasting vibration was found to be obtained from a regression analysis of the mean vibration level using the weighting of same distance groups within 15m with the same explosive charge weight per delay. The coefficients, K and n were 317.4 and -1.66, respectively, when using the square root scaling, and 209.9 and -1.60 when using the cube root scaling.

The analysis also showed that the square root scaling may be used in the distance less than 31 m from the blast source, and the cube root scaling in the distance more than 31 m for safe design.

Key words : Andesite, Crack coefficient, Same distance groups, Square root against distance

- 1) 동아대학교 대학원 자원공학과 공학석사
- 2) 정회원 · 동서대학교 응용공학부, 화약류관리기술사
- 3) 정회원 · 동아대학교 자원공학과, 공학박사
- 4) 정회원 · 동아대학교 자원공학과, 공학박사
- 5) 동아대학교 자원공학과 교수, 공학박사

원고접수일 : 2000. 2.15

심사완료일 : 2000. 6.17

초 록 본 연구지역은 안산암지역으로 지반의 구조특성을 잘 나타내는 균열계수로서 압반특성을 표현하였고 발파진동식을 추정하는데 있어서 결정계수를 높여 오차를 최소화하였다. 측정자료를 누적분석하였을 때 결정계수가 0.002~0.531로서 신뢰하기 어려웠으며 동일장약량을 가진 동일거리군의 군별 평균진동속도로서 회귀분석한 경우 결정계수는 0.323~0.493으로 그다지 높지 않은 결과가 나왔고, 절사평면을 이용한 결정계수는 0.307~0.487로서 역시 신뢰하기 어려운 결과를 도출했다. 또한 샘플수를 가중치로 적용하는 방법의 결정계수는 0.644~0.752로서 본 연구의 적용 통계적 방법중 가장 높은 결과를 도출하였으며, 진동속도 표준편차의 영향을 가중치로 적용하는 방법의 결정계수는 0.516~0.668이었고 진동속도 분산의 영향을 가중치로 적용하는 방법의 결정계수는 0.513~0.685이었다. 그러므로 발파진동추정식을 산출할 때 동일장약량을 가지는 15m이내의 동일거리군에서의 진동평균속도에 가중치를 적용하여 얻은 회귀분석 결과가 가장 신뢰성이 높았다. 이 때 자승근일 때의 발파진동상수 K_{95} 는 317.4, n 은 -1.66이었고, 삼승근일 때의 발파진동상수 K_{95} 는 209.9, n 은 -1.60이었고, 자승근과 삼승근의 교차점분석시 허용진동속도 4cm/sec에서 교차점은 31m이므로 발파지점으로부터의 거리가 31m이내인 삼승근 적용이 신뢰성이 높고, 31m이상일 때는 자승근 적용이 신뢰성이 높은것으로 판단되었다.

핵심어 : 안산암, 균열계수, 동일거리군, 자승근, 교차점 분석

1. 서론

IMF 국가관리체제로 우리 건설업계는 특히 많은 어려움을 이겨내야만 했다. 이제 경제위기를 벗어나는 시점에 모든 공사비용과 관리체계가 급속도로 매우 합리적으로 변모하였다. 그러나 아직도 도심지 재개발, 택지조성, 지하철건설, 지하상가구축 등이 활발해지면서 도시·농촌 할 것 없이 민원이 없는 지역이 거의 없는 실정이다. 이러한 민원과 주변피해를 최소화하기 위해서는 안전 정밀발파가 필수적이다. 이러한 안전성과 함께 시공성·경제성을 동시에 고려하고 해결하기 위해서는 보다 합리적인 계획수립이 필요하다. 이를 위해서 본 연구는 부산시 사하구 구평동지역에 대한 진동측정데이터 210개를 일반회귀분석 및 각종 통계학적인 분석을 시도하여 매우 신뢰도가 높은 방법을 도출하였다. 본 연구 결과에 의한 방법을 적용하여 진동측정결과를 분석 할 때 보다 정확한 K와 n의 산출이 가능하고 안전시공을 위한 설계 자료제공이 가능할 것으로 기대된다.

2. 측정대상지역의 지질현황과 발파방법

본 연구대상지역의 기반암은 중생대 백악기의 경상계 안산암(Andesite)이다. 건설부표준품셈을 기준으로 Universal Testing Machine을 사용하여 시추코아의 일축압축강도 2081.3Kg/cm² 와 삼축압축강도 2781.23 Kg/cm²의 결과치를 얻었다. 그리고 시추코아의 P파 전파속도(Vp)는 5.87Km/sec이며, 현지암반의 P파전파속도(Vf)는 2.627Km/sec로서 관열계수(Cv)를 구한 결과 0.55였으며, 대상암반은 C등급으로 분류되었다. 또한 암반분류표에 의해 절리·관열이 상당히 있고 절리 충전물이 약간 존재하며 관열부가 풍화되었음을 알 수 있다.

$$C_v = 1 - \left(\frac{V_f}{V_p} \right) = 1 - \left(\frac{2.627}{5.87} \right) = 0.55 \quad (1)$$

대상지역 주변은 도로, 공장등이 43~50 m지점에 밀집해 있으므로 발파안전을 위하여 제어안전발파공법과 소발파공법을 적용 시공하였다.²³⁾ 발파에 사용한 화약류는 다이너마이트와 에멀전폭약을 사용하였고, MS지발전기뇌관을 사용하였으며, 진동측정에 사용된 측정기는 Instantel사의 Blastmate II DS-677을 사용하였다.

3. 측정 및 회귀분석결과

3.1 회귀분석 적용을 위한 이론적 배경

측정자료처리는 최소자승법에 의해 신뢰도 50%(K₀), 95%(K₁), 99%(K₂)의 한계치를 구하면 아래와 같다.

$$K_0 = \exp A_0$$

$$K_1 = \exp (A_0 + 1.645 \sigma) \quad (2)$$

$$K_2 = \exp (A_0 + 2.326 \sigma)$$

여기서 σ 는 표준편차이다

또한 K₀ 즉, 신뢰도 50%는 평균진동의 수준을 예측하는 식으로서 이 식을 이용하여 안전장약량 또는 안전거리를 추정하는 것은 매우 위험하다. 그러므로 본 연구에서는 측정된 자료들이 그 지역 및 사용발파패턴의 영향을 충분히 반영한다고 판단되는 95%(K₁)신뢰구간의 적용을 사용하기로 하였다.

3.2 일반회귀분석 결과 및 문제점

본 연구에서는 먼저 안전발파설계를 위해 3개월간의 데이터 210개를 일반적으로 발파전문가들이 사용하고 있는 회귀분석법을 사용한 결과 표 1.과 같이 산출되었다.

Table 1.에서 K은 진동상수, n은 감쇄지수, R²은 결정계수이며 SD는 표준편차이다.

여기서 결정계수(R²)란 회귀분석에서 회귀직선

Table 1. 4회 누적분석 결과

갯수	삼승근적용				자승근적용			
	K	n	R ²	SD	K	n	R ²	SD
85	23.5	-1.09	0.20	0.184	12.8	-0.95	0.22	0.184
130	1014	-1.87	0.44	0.254	899.1	-1.82	0.37	0.269
172	979.2	-1.85	0.48	0.263	1404.3	-1.91	0.42	0.276
210	349.2	-1.56	0.41	0.283	506.3	-1.63	0.37	0.293

의 유의성 검정과 더불어, 회귀분석에 의한 종속변수가 설명되어지는 정도를 나타내는 것이다. 결정계수(R²)값이 0에 가까울수록 추정된 회귀직선은 신뢰성이 낮고 1에 가까울수록 신뢰성이 높은 회귀직선이 된다.⁴⁾

그러므로 상기 결과는 4회 누적분석시, 삼승근 및 자승근 분석에서 결정계수가 0.475 및 0.42이하를 나타냄으로서 자료의 신뢰도 측면에서 충분치 않은 값을 알 수 있다

Table 2. 동일지발당장약량을 가지는 5m이하의 동일거리의 진동속도의 평균에 샘플수를 가중치로 적용한 경우

No.	동일거리군(m)	지발당장약량(Kg)	진동속도의 평균 V _m	진동속도의 표준편차 V _s	샘플수
1	25	0.6	0.435	0.1841	11
2	30	0.6	0.293	0.1364	21
3	35	0.6	.302	0.2716	47
4	40	0.6	0.336	0.0678	8
5	40	0.5	0.387	0.2598	10
6	45	0.6	0.345	0.0753	11
7	45	1.2	0.116	0.0309	4
8	60	0.9	0.124	0.0228	17
9	70	0.9	0.074	0.0200	5
10	75	1.2	0.162	0.0964	22
11	75	2.4	0.127	0.0445	8
12	80	0.9	0.102	0.0767	28
				계	192

3.3 결정계수를 상승시키기 위한 통계적 분석 결과

3개월간의 데이터 210개를 회귀분석한 결과는 Table 1에서와 같이 결정계수가 삼승근의 경우 0.2~0.465, 자승근의 경우 0.224~0.42로 매우 낮았다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기 위하여 “환산관계는 SD의 비가 비슷한 때가 아니라 거리와 지발당장약량이 비슷한 경우로부터 얻어졌을 때 가장 정확한 것” 이므로⁵⁾, 본 연구에서는 결정계수를 상승시키기 위하여 몇가지 통계적 분석을 시도하였으며 그 중 신뢰도가 가장 높은 결과를 다음과 같이 정리하였다. 측정된 발파진동 데이터는 동일지발당장약량을 가지는 동일유사거리군으로 나눈 후 군별로 회귀분석을 시행하였으며, Table 2에서와 같이 5m이하의 거리차이를 가지고 동일장약량을 가지는 거리군을 동일거리군으로 산정하였으며 동일 지발당장약량을 가지는 동일거리군의 샘플이 2개 이하인 경우는 분석에서 제외하였다. 또한 15m이하의 차이를 가지는 동일장약량을 가지는 동일거리군에서 25m군은 미국의 분석사례에 따르면 근거리(5~31m)에 해당된다.⁶⁾ 그러므로 근거리와 원거리의 진동 전파특성의 차이를 고려하여 30m부터 15m씩 군으로 분류하였다.

상기와 같이 군별로 집단을 나눈 후 그때의 평균 진동속도와 표준편차를 구하고 각 군별 진동속도의 평균 V_m으로 회귀분석한 결과는 Table 3과 같다. 또한 15m 미만의 거리차이를 가지고 동일장약량을

가지는 거리군을 동일거리군으로 산정하여 전기한 바와 같이 각 군별 진동속도의 평균에 샘플수를 가중치로 적용하여 회귀분석한 결과는 Table 4 및 Table 5 와 같다. 이때 결정계수는 삼승군의 경우 0.75, $K_{95}=219.9$, $n=-1.60$, 자승군의 경우 결정계수는 0.64 $K_{95}=317.4$, $n=-1.66$ 으로 신뢰수준이 크게 향상되었으며 진동속도의 평균은 0.074 ~ 0.435였으며 진동속도의 표준편차는 0.020005 ~ 0.27163이었다.

Table 3. 군별 진동속도의 평균(V_m)으로 회귀분석한 결과

갯수	삼승군적용				자승군적용			
	K	n	R ²	Sd	K	n	R ²	Sd
12	79.6	-1.36	0.69	0.127	102.6	-1.38	0.59	0.146

3.4 자승군 및 삼승군의 교차점 분석

대상지역의 보안물건인 K냉동공장은 철근콘크리트구조의 공장에 해당하므로 건물기초에서의 허용진동속도를 4cm/sec로 고정한 후 거리별 지발당장약량을 자승군과 삼승군으로 비교해 분석해보면 다음의 Fig. 1 과 같다. 여기에서 보듯이 31m이하에서는 삼승군환산거리가 더 신뢰도가 높고, 31m이상에서는 자승군환산거리가 더 신뢰도가 높은 것임을 알 수 있다. 그러므로 결정계수(R^2)를 고려하지 않는다면 31m이상에서는 자승군환산거리를, 31m이하에서는 삼승군 환산거리를 적용하는 것이 더욱 정확하다고 판단된다.

한편, 미국의 연구사례를 보면 6~31m이하에서는 삼승군환산거리가 보수적이며, 6~31m이상에서는 자

Table 4. 동일지발당장약량을 가지는 15m 이하의 진동속도의 평균에 샘플수를 가중치로 적용한 경우

No.	동일 거리군(m)	지발당 장약량(Kg)	진동속도의 평균 V_m	진동속도의 표준편차 V_s	샘플수	비 고
1	25	0.6	0.435	0.1841	11	
2	30~45	0.6	0.308	0.2225	87	30m:21개,35m:47개 40m:8개,45m:4개
3	40	0.5	0.387	0.2598	10	
4	45	1.2	0.116	0.0309	4	
5	60~70	0.9	0.092	0.0305	22	60m:17개,70m:5개
6	75	1.2	0.162	0.0964	22	
7	75	2.4	0.127	0.0445	8	
8	85	0.9	0.102	0.0757	28	
9	75~90	1.5	0.142	0.0314	8	75m:2개,80m:2개 85m:2개,90m:2개

Table 5. 군별 진동속도의 평균(V_m)으로 회귀분석한 결과

갯수	삼승군적용				자승군적용			
	K	n	R ²	Sd	K	n	R ²	Sd
9	209.9	-1.60	0.75	0.118	317.4	-1.66	0.64	0.141

승군환산거리가 보수적이다.³⁾

이러한 미국의 연구사례와 본 연구사례를 비교해 볼 때 본 연구대상지역은 미국의 상한선 31m와 일치함을 알 수 있다.

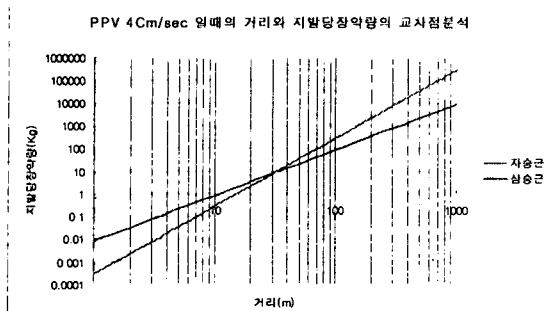


Fig 1. 자승근과 삼승근의 교차점 분석

4. 결론

부산지역의 양대 암질인 중생대 백악기에 형성된 구평동의 안산암류(Andesites, Kan)에 대한 3개월간의 발파진동추정 데이터를 분석 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 발파개시 1개월간의 데이터 85개에 대한 자승근회귀분석 결과 $K_{R5}=8.34$ 이었고, $n=-0.848$ 이었다. 이들 분석데이터는 2차 누적데이터 130개에 대한 회귀분석시부터 안정되기시작하여 마지막 4회 누적분석결과(1.22~4.13, 210개)는 삼승근환산거리에서 $K_{R5}=349.2$, $n=-1.56$ 이었고, 자승근 환산거리에서 $K_{R5}=506.3$, $n=-1.63$ 이 었다.

기존의 회귀분석결과로 얻은 상기 K, n 결과치에서의 결정계수는 삼승근 환산거리에서 0.41, 자승근환산거리에서 0.37로 비교적 낮은 편으로 분석결과에 대한 신뢰도가 낮다고 본다.

2. 본 연구에서 적용한 동일장약량을 가지는 동일거리군의 평균진동속도에 대한 4가지의 통계학적인 분석법을 적용 산출해 본 결과 샘플수 가중치를 적용하여 분석한 경우 삼승근 환산거리에서 $K_{R5}=209.9$, $n=-1.6$, $R^2=0.75$ 이었고, 자승근 환산거리에서 $K_{R5}=317.4$, $n=-1.66$, $R^2=0.64$ 으로 그중 결정계수가 크게 증가한 가장 양호한 결과가 도출 되었다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

삼승근을 적용하였을 때 대상지역의 발파진동추정식은

$$V(\text{cm/sec}) = 209.9 \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.60}$$

$$\text{결정계수}(R^2) : 0.75 \quad (6)$$

자승근을 적용하였을 때 대상지역의 발파진동추정식은

$$V(\text{cm/sec}) = 317.4 \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-1.66}$$

$$\text{결정계수}(R^2) : 0.64 \quad (7)$$

3. 당 지역의 발파지점과 측정지점간의 거리는 25~90m지점에 위치하였으며 이를 자승근과 삼승근의 교차점을 분석한 결과 31m가 산출되었다. 본 연구대상지역에서는 31m이내에서는 삼승근 환산거리를 적용하고 31m이상에서는 자승근환산거리를 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 1). 안명석등(1998), "도심지 미진동 제어발파에서 진동분석을 통한 안전발파설계에 관한 연구", (I)大韓土木學會 論文集, 대한토목학회 제18권 제 III-3호 p373~380
- 2). 임한욱등(1993), "암발파 설계기법에 관한 연구", 한국토지개발공사 p85~107
- 3) 안명석(1998) "암반 분류·파쇄공법과 계층 관리", 영남건설기술교육원 건설기술 인력교육자료 p.74

- 4) 류창하 등(1993)“발파영향 평가 및 발파공법 연구” 한국자원연구소 p.13~31, p.51~58 p467~468
- 5) 양형식(1992), “발파진동학” 구미서관 p.28~30
- 6) 이정인등(1979) “발파작업에 의한 지반진동이 지상구조물에 미치는 영향에 관한 연구”, 대한광산학회지, 대한광산학회 제 16권, p41~50
- 7) 양형식등(1997) “측정수가 발파계수와 허용환산거리의 산정에 미치는 영향,” 1997년도 제 68회 학술 발표회 논문집, 한국자원공학회 p320~326
- 8) 천병석등(1993),“건설기술자를 위한 지반진동영향과 대책”, 건설연구사 p285~290
- 9) 민경덕등(1996),“응용지구물리학”, 도서출판 우성
- 10) 기경철 등(1999) “발파공학” 기공사 p.248~255
- 11) 서울대학교 자연과학대학 계산통계학과, (1996) “현대통계학” 영지문화사 p.216~239
- 12) 김재극(1988), “산업화약과 발파공학” 서울대학교 출판부 p.369~239
- 13) 이정인(1999), “국내 발파진동 전파식의 평가 및 심발발파의 진동저감사례” 비축기지 건설기술 세미나 논문집 p.77~82
- 14) 류창하등(1995), “발파진동이 구조물에 미치는 영향 평가(Ⅱ)” 한국전력공사 및 한국자원연구소 p.269~292