

# 건설 현장에서 안전성 향상을 위한 지반진동·소음 ·비산먼지 측정자료의 분석에 관한 연구

-영남지역의 퇴적암·화성암층에서 발파 및 항타작업을 중심으로-

안명석·류창하\*·박종남\*\*

동서대학교 응용공학부·\*한국자원연구소 제어발파연구실

\*\*동아대학교 지구환경공학부

## 1. 서론

본 연구는 영남지역일대의 주요암반을 대상으로 그 지질특성을 조사하고 암석 및 지질의 특성과 물성시험 자료를 토대로 하여 발파 및 항타진동이 지질과의 상관함으로서 관계를 파악하여 더욱 안전하고 경제성 있는 진동설계를 위한 기초자료를 제공함으로써 현장기술자들이 측정된 진동 자료를 이용하여 진동 추정식을 만들 때 발생하는 오차를 최소화시키고 적합도(=결정계수,  $R^2$ )가 비교적 높은 진동 추정식에 대한 상관성을 구하며, 또한 이에 따른 건설소음 및 비산먼지 측정자료의 통계적 처리방안에 대한 연구에 그 목적이 있다.

## 2. 이론

### (1) 진동측정자료의 회귀분석이론

충격진동 측정자료의 분석은 USBM 진동추정식을 사용하여 DS-550 회귀분석 프로그램으로 K와 n을 산출하였으며, 진동추정식은 다음과 같다.

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

V : 발파진동속도 (cm/sec)            n : 감쇠지수

D : 폭원으로 부터의 거리 (m)        b : 장약지수

W : 지발당 장약량 (Kg)

K : 자유면의 상태, 화약의 종류, 암질 등에 따른 상수

자승근 환산거리는 장약이 긴 봉상으로 분포된 것에 기초한 것이고, 삼승근 환산거리

는 장약이 구상으로 분포된 것에 기초한 것으로, 실제 자료처리에 있어서는 발파원의 특성에 관계없이 양자의 방법모두를 이용하여 통계적으로 처리하여 더 높은 적합도를 보이는 환산거리를 사용하였다.<sup>1)2)</sup>

## (2) 통계적 처리법

측정된 진동치를 상기 회귀분석방법으로 계산하였을 때 결정계수( $R^2$ )은 0.009~0.551로 매우 낮은 값을 보임으로서 진동상수 K 및 n의 추정에 있어 신뢰성에 문제가 있는 것으로 확인되었다.

그러므로 이러한 오차의 원인제거와 신뢰성 향상을 위해 결정계수를 높이는 여러가지 통계학적 방법을 연구하였다.<sup>3)4)</sup>

결정계수를 높여 신뢰를 향상하기 위하여 여러 가지 통계학적 방법을 연구한 결과 동일지발당 장약량을 가지는 동일유사거리군으로 5m, 15m로 나눈후 군별 평균진동속도로 회귀분석을 시행하였으며, 절사평균을 이용한 방법, 샘플수를 가중치로 적용하는 방법, 진동속도 표준편차의 영향을 가중치로 적용하는 방법, 진동속도 분산의 영향을 가중치로 적용하는 방법등을 이용하여 회귀분석을 시행하였다. 이때 동일장약량을 가지는 15m이내의 동일거리군에서의 진동 속도평균치에 가중치를 적용하여 얻은 회귀분석 결과가 가장 신뢰성이 높았다.

15m이내의 동일 거리군에서 진동속도 평균치에 가중치를 적용한 분산의 영향을 가중치에 적용하는 방법으로 분석하여 얻은 회귀분석결과는 최대심도 GL-18m, 평균심도 GL-12m일 때 퇴적암지역인 1공구의 경우, 자승근일 때 K는 56.3~561.3, n는 -1.19~1.85였으며, 삼승근일 때 K는 36.9~562.4, n는 -1.12~-1.89였다. 또한 화성암지역인 2공구의 경우 자승근일 때 K는 319.2~3.3, n는 -1.63~-0.55였으며 삼승근일 때 K는 594.1~2.7, n는 -1.8~-0.53이었다. 이때 결정계수( $R^2$ )는 퇴적암층(1공구)에서 0.122~0.945였으며, 화성암층(2공구)에서 0.098~0.709로서 매우 신뢰도가 높아졌음을 확인하였다.

## 3. 실험결과

### (1) 발파진동 측정자료의 심도 및 거리에 따른 변화추이

대구 주요 암반지역에서 수집한 진동 측정자료 4,856개중 15m이내의 동일거리군에서의 진동속도 평균치 4558개 데이터에 가중치를 적용한 경우의 회귀분석 결과는 1공구(퇴적암)와 2공구(화성암)의 경우 K와 n의 추세가 반대방향으로 나타났다. 즉, 퇴적암

지역에서는 심도가 증가함에 따라 K는 대수선형적으로 증가하는 반면, n는 감소하였으며, 화성암 지역에서는 이와반대로 K는 대수선형적으로 감소하고, n는 선형적으로 증가하였다. 이는 화성암지역은 심부로 진행함에 따라 암석이 점점 견고해지나, 퇴적암지역은 제한된 심도에서는 하부로 진행함에 따라 파쇄나 균열현상이 더 발달되는 지질적 특성에 기인한 것으로 생각된다.

**(2) 향타진동 측정자료의 거리에 따른 변화추이**

향타진동·소음의 거리별 변화추이는 Fig 1과 같이 선형적으로 감소하였다.

측정거리 5m에서 진동치는 1.862~5.650Kine이었으며, 10m에서 0.313~0.995Kine, 15m에서는 0.283~0.948Kine, 20m에서는 0.10~0.268Kine, 25m에서는 0.140~0.329Kine, 60m에서는 0.037~0.043Kine이었다. 즉 15m지점에서의 향타진동 평균치 0.432Kine은 충격진동 기준치 0.5Kine이내에 해당하므로 인근 구조물에 균열발생 등의 피해는 없는 것으로 판단되었으며 주파수는 5~34Hz로서 발파에 의한 충격진동에 비해 주파수가 낮아 동일한 진동크기에서는 발파보다 더 주의가 필요한 것으로 확인되었다.

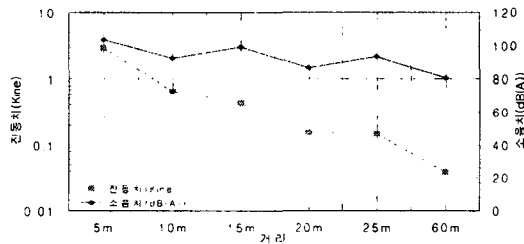


Fig 1. Vibration and noise of DKH Hammer in distance

**(3) 비산먼지 농도·침강 분진량 측정 및 유해성 검토**

약 1개월간 13회에 걸친 측정결과 중 부유분진의 농도는 12.63~78.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 측정 포집한 비산먼지에 대해 구성성분을 분석한 결과, 화학적 성분은 Table 1과 같이 분진속에 Pb, As, Mn 등 유해금속성분은 검출되지 않았다.

Table 1 Chemical composition of the airborne dust

Element	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Total
Weight	17.62	4.03	3.26	19.06	31.91	2.71	0.53	3.72	1.56	1.44	14.16	100
(%)	20.33	5.63	7.87	23.74	0.00	0.56	0.63	11.13	0.44	1.87	27.80	100

부유분진의 농도와 거리별 총 침강분진 농도 측정결과는 Table 2와 같이 총 침강분진의 경우 50m지점에서 0.75~7.85g/m<sup>2</sup>이나 거리에 따라 감소하여 150m지점에서는 0.06~2.25g/m<sup>2</sup>으로 낮게 나타나고 있다. 천공작업시에는 발파, 적재등의 경우와 같이 비산먼지가 많이 발생하고<sup>5)</sup> 분진발생시간이 다른 작업에 비해 상대적으로 길다고 하는 점이 발파작업에 비하여 침강분진의 농도가 상대적으로 높게 나타난 이유에 속한다.

Table 2 Summary of measurements for dust dispersion

구분	부유분진농도 (mg/m <sup>3</sup> )				총침강분진농도 (g/m <sup>2</sup> )						풍속 (m/s)	작업 종류
	100m			200m (+0.4m)	50m	75m	100m	125m	150m	200m		
	+8μm	0.4~8μm	+0.4μm									
1	2.52	0.52	3.04	1.70	0.76		0.69		0.52	0.15	0~3.37	발파
2	3.04	0.14	3.18	2.57	0.80	0.71	0.42	0.23	0.11		0~2.57	발파
3	1.75	0.07	1.82	1.22	0.75	0.28	0.19	0.13	0.06		0~3.08	발파
4	12.57	0.83	13.40	11.80	2.76	2.58	1.78	1.35	1.26		0~3.13	천공
5	1.46	0.18	1.64	0.43	1.29	0.93	0.63	0.67	0.15		0~3.28	발파
6	2.83	0.39	3.22	0.49	2.59	2.55	1.64	0.66	0.77		0~3.51	발파
7	13.44	0.72	14.16	13.61	7.85	6.90	6.59	4.42	2.25		0~3.00	천공
8	11.97	0.58	12.54	10.00	3.18	2.45	2.26	1.94	1.62		0~3.33	천공

#### (4) 암파쇄공법 적용기준 및 현장시공 표준안

영남지역의 경우 암발파설계 기준 및 도심지 미진동 제어발파에서 안전발파설계에 관한 연구<sup>6)7)</sup> 등을 종합할 때 발파공법 선정 기준으로써 Table 3를 제안·적용할 때 더욱 합리적이고 경제적인 공사가 가능한 것으로 판단된다.

Table 3 Proposed blasting method in the Youngnam area

보안물건과의 거리(m)	공법구분	시공방법
30m 이내	무진동파쇄	팽창성파쇄제사용법, 기계굴착법 HRS, SRS동할암공법 Breaker, Ripper, Road head 등
10~50m	미진동발파	CCR등 Ø17~25 mm 화약사용 pipe 완충제공법 Pre.Splitting 공법, 천공장0.6~2.0m LineDrilling공법, 장약량0.06~0.25kg
30~100m	제어안전발파	Ø 17~32mm 폭약사용 지발전기뇌관사용 SBM공법, 천공장0.9~3.0m NONEL공법, 장약량0.125~0.5kg
80~300m	소발파	Ø 25~50mm 폭약 사용 지발전기뇌관사용 SBM공법, 천공장3~6m NONEL공법, 장약량0.5~8.0kg
200m 이상	일반발파	Ø 50mm이상 폭약사용 ED및 지발 전기, 천공장 6~15m 뇌관사용, 장약량 8~25kg

**(5) 충격진동·소음·음압적용기준 제안**

발파로 인한 구조물의 피해는 대상구조물에 따라, 나라에 따라 다양하지만 충격진동에 대한 안전기준은 미광무국의 5cm/sec을 가장 보편타당하게 적용하고 있다. 우리나라의 경우 건교부 터널발파작업 기준 및 노동부의 발파작업 안전작업지침, 서울·부산·대구·광주·대전·인천등 지하철 건설진동안전기준에서는 0.5cm/sec를 설정하였으며 환경부의 분쟁조정 피해인정기준은 지반 및 건축물의 구조가 취약한 구조물이 많은 한국의 현실과 정신적인 피해를 감안하여 0.3cm/sec를 평가 기준으로 하고 있다.

소음 역시 건설소음규제기준에 의해 주간 70~75dB(A)를 적용하는데, 이때 보정치 + 5~10를 감안한다면 70~85dB(A)를 적용기준으로 할 수 있다.

또한 폭풍압에 의한 물리적 피해여부를 측정하거나 심리적 피해여부를 판단할 때 주변소음이 측정소음보다 더 큰 지역의 경우 음압기준을 적용할 수 있다.<sup>8)</sup> 이때 미국 Dupon사의 제안안전기준은 115dB이며, 일본의 인체에 불편(고통)을 호소하는 기준은 120dB이다. 우리나라의 경우 이러한 기준이 구체화 되어 있지 않음으로 이러한 내용을 종합할 때 120dB를 음압기준으로 하였을 때 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 이를 종합하면 Table 4와 같이 현장적용기준을 제안할 수 있다.

Table 4 Recommended sound level, pressure and vibration level

Section	Permitted standard value	Note
Vibration	0.5cm/sec	Apply to concrete structure which has crack
Sound pressure	120dB	
Sound	85dB(A)	

**4. 결론**

부산·대구를 중심으로 한 건설 현장에서 안전성 향상을 위한 지반진동·소음·비산먼지 측정자료의 분석에 관한 연구 결과는 다음과 같다.

1) 대구·경남·경북지역의 대표적인 암질로 볼 수 있는 퇴적암류는 함안층의 저색 실트스톤, 회색 셰일 및 반야월층의 암회색 실트질 슬레이트로 판명되었으며, 부산과 대구지역 하부지층에 많이 분포하는 대표적인 화성암류는 안산각력암, 안산반암, 화강암으로 나타났다.

2) 영남지역의 전형적인 퇴적암으로 판명된 저색 실트스톤과 회색 셰일이 호층을 이

루고 있는 지역, 대표적인 화성암류인 안산반암 지역에서, 10개월간 GL-12m까지 심부 굴착한 현장을 대상으로, 4,856개의 진동계측자료를 획득하였다. 발파진동 계측자료의 처리에 통상적으로 적용하고있는 회귀분석을 수행한 결과 신뢰수준이 매우 낮게 나타나서, 신뢰도를 높이기 위해 각종 통계적 기법을 적용하였다. 본 연구에서 적용한 여러 가지 통계적 기법중 동일장약량을 가지는 15m이내의 동일 거리군에서의 진동속도 평균치에 가중치를 적용하여 회귀분석을 수행하는 방법이 가장 신뢰도를 높이는 방법인 것으로 나타났다.

3) 대상암반중 퇴적암질 암반의 균열계수는 0.266~0.800(B~D등급)이었으며, 회귀분석 결과 자승근 환산거리식으로 표현할 경우에는  $K=56.33\sim 561.33$ ,  $n=-1.19\sim -1.85$ 의 범위에 분포하였고, 삼승근 환산거리식의 경우  $K=36.89\sim 562.37$ ,  $n=-1.12\sim -1.89$  범위에 분포하는 것으로 나타났다. 화성암질 암반의 균열계수는 0.797~0.650(C~D등급)이었으며, 회귀분석결과 자승근 환산거리식의 경우  $K=319.16\sim 3.27$ ,  $n=-1.63\sim -0.55$ , 삼승근 환산거리식의 경우  $K=594.05\sim 2.73$ ,  $n=-1.8\sim -0.53$ 으로 나타났다. 그러나 균열계수와 K, n과의 관계는 본 연구에서의 측정자료로부터 뚜렷한 상관관계를 나타내지 않았다. 균열계수는 현지 암반의 특성을 나타내는 편리한 지수중의 하나로서 발파진동 예측식에서 진동의 세기 및 감쇠를 나타내는 입지상수와 상호관계를 가질것으로 예상되나, 이에 대한 정량적인 관계를 규명하기 위해서는 향후 균열계수의 변화가 다양한 암반들을 대상으로 보다 조절된 시험발파 및 계측을 수행하여 입지상수를 구하고 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4) 실험대상 지역에서 심도별 K와 n의 변화추이를 조사하기 위하여 계측자료를 분석한 결과 다음과 같이 K, n을 굴착깊이 d의 함수로서 표현할 수 있었다.

구 분	b	K	n
퇴적암	1/2	$e^{2.0+0.125d}$	-1.19-0.055d
	1/3	$e^{1.8+0.125d}$	-1.12-0.066d
화성암	1/2	$e^{3.5-0.221d}$	-1.63-0.083d
	1/3	$e^{4.9-0.342d}$	-1.8-0.108d

인근지역에서의 시추조사 결과를 참조할 때 심도별로 나타난 K, n의 변화는 굴착깊이에 따라 변화하는 암반의 변화에 기인하는 것으로 판단할 수 있으며, 이 결과는 천부에서의 장약설계를 통하여 실시한 시험발파 결과로부터 도출한 예측식은 암반굴착 작

업이 심도로 진행됨에 따라 암반의 변화를 고려하여 수정 보완할 필요가 있음을 보여 준다.

5) 10ton의 DKH 유압해머를 사용하여 향타진동·소음을 측정된 결과 향타지점으로부터 측정지점간의 거리가 15m이상일 때 진동안전기준치 0.5Kine을 준수할 수 있었으며 소음은 60m이상 이격되었을 때 소음기준치 85dB(A)를 준수할 수 있었다.

이때 발생진동 주파수는 5~34Hz로써 발파충격 진동에 비해 주파수가 대체로 낮아 동일한 진동크기에서는 발파진동에 비해 구조물에 대한 진동피해의 우려가 더 크므로 주의해야 하는 것으로 판명되었다.

6) 국내에서 생산되는 화약류의 특성과 영남지역 암반특성 조사결과를 분석하여 대상지역에서의 암반굴착 설계시 필요한 적정 화약류는 퇴적암의 경우 발생 가스량이 많은 에멀존폭약 및 초유폭약의 더욱 경제적인 것으로 판단되고 화성암의 경우 암반 파괴시 높은 인성으로 인해 고폭속 폭약이 더욱 경제적인 것으로 판단된다. 또한 뇌관의 경우 정밀설계 및 시공인 경우 밀리세컨트 지발전기뇌관과 같은 낮은 단차가 진동저감 및 파쇄도에 유리할 것이며, 일반적인 발파에는 데시세컨트 지발전기뇌관과 같이 높은 단차의 지발뇌관이 증폭효과를 피하게 되므로 진동저감에 더욱 유리하다고 생각된다. 영남지역에서 암반파쇄 설계시 필요한 발파공법 선정을 위한 일반적인 지침으로 활용할 수 있는 데이터를 Table 2에 제시하였다.

7) 화강암 발파현장에서 1개월간 발파 및 공사로 인한 비산먼지의 농도를 측정된 결과 12.6~78.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며 입경은 20~50  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 인근주택의 주민이나 양계장, 우사등에 비산먼지로 인한 농도피해와 유해 금속성분에 의한 생체 유독성 피해등의 직접적인 피해는 없었다. 또한 안산암 발파현장에서 15일간 천공 및 발파작업장 부근에서 거리별 부유분진의 농도를 측정된 결과 100m지점에서 0.4 $\mu\text{m}$ 이상 부유분진은 천공작업의 경우 14.2~12.5 $\text{mg}/\text{m}^3$ , 발파작업의 경우 1.6~3.2 $\text{mg}/\text{m}^3$ 이었고, 200m이상 지점에서는 부유분진의 농도는 급격히 감소하여 각각 10.0~13.6 $\text{mg}/\text{m}^3$ , 0.4~2.6 $\text{mg}/\text{m}^3$ 이었다. 거리별 총 침강분진의 경우 50m지점에서 0.75~7.85 $\text{g}/\text{m}^3$ 이나 거리에 따라 감소하여 150m지점에서는 0.06~2.25 $\text{g}/\text{m}^3$ 으로 낮게 나타났다.

앞으로 더욱 다양한 암석종류를 대상으로하여 이러한 사례분석이 많이 이루어질 때 보다 신뢰성 있는 발파진동 추정식이 산출될 것이고, 이러한 연구결과가 축적될 때 현재보다 더욱 안전하고 경제성있는 암파쇄 작업에 기여할 것으로 기대된다. 또한 향후

비산먼지의 입도별 유형분석, 유해성 여부실험, 위치별 낙진량 조사분석 등의 물리적·과학적인 분석과 유해성 여부에 관한 생체실험 등으로 화학적·의학적인 원인규명이 이루어져야 할 것이며, 아울러 피해여부의 정도확인, 산출에 관해 보다 체계적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- 1) 이정인, 류창하, “발파작업에 의한 지반진동이 지상구조물에 미치는 영향에 관한 연구 “ 대한광산학회지, 대한광산학회, Vol. 16, pp. 41~50, 1977
- 2) Charles H. Dowding. “Blast vibration monitoring and control.” Northwestern University. 1984
- 3) 배상근, 박종남, 안명석 도심시 미진동 제어발파에서 진동분석을 통한 안전발파설계에 관한 연구(Ⅰ), 대한토목학회논문집, 제18권 제Ⅲ-3호, pp. 74~85, 1998
- 4) 박종남, 안명석 “대구규장암지역의 발파진동 측정자료에 의한 K 및 n의 변화 추이에 대한고찰 “한국자원공학회지, 한국자원공학회. Vol.36, pp.316, 1999
- 5) 안명석, 한국산업의 발파안전대책 -소음진동·비산분진 및 안전거리 설정을 중심으로- 산업안전학회지, 한국산업안전학회, Vol. 6, No.4, Dec. pp.99, 1991
- 6) 임한욱, 이정인 “암발파 설계기법에 관한 연구“ 한국토지공사, 1995
- 7) 영남건설기술교육원, 암반분류·파쇄공법과 계측관리, 건설기술자교육교재, pp.373~380, 1998
- 8) 목연수, 박종남, 최영천, 안명석, 민원발생시 발파진동·소음의 처리사례에 관한연구, 대한화약기술학회지. 제17권 제3호 pp. 15, 1999
- 9) Robert R. Compton; “Geology in the Field”, Jone Wiley & Sone Corp, 1985
- 10) ICI Explos’nes, “Safe and Efficient Blasting in Quarries”, 1994