

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

-영남지역의 퇴적암·화성암층에서의 발파 및 항타작업을 중심으로-

A Study on Data Analysis of Ground Vibration · Noise Dust Dispersion
Measurement for Enhancing Safety at the Construction Sites

- Focussed on Blasting and Piling in Sedimentary and Igneous
Rocks in the Youngnam Area -

안 명석¹⁾, 류 참하²⁾, 박 종남³⁾

Myung-Seog Ahn, Chang-Ha Ryu, Jong-Nam Park

¹⁾동서대학교, ²⁾한국지질자원연구원, ³⁾동아대학교

ABSTRACT

As in Korean environments with mountainous and hilly areas, the rock generally has to be removed in construction or civil engineering work in tunnelling or excavation for development in urban area. Explosives should be used for blasting, which may cause serious problems on local people for their claim for compensation due to ground vibration, noise. For safe and economic blasting, geology and engineering characteristics of rocks such as discontinuities of rock or weathering are very important factors, together with site characteristics for prediction of ground vibration. In this study, conducted were the detailed study for major rocks most widely distributed in the South-east area, in-situ geological survey, geological and geochemical analysis, and further laboratory uniaxial rock stress, seismic velocity of core samples together with in-situ seismic velocity measurements. Regulations on ground vibration and noise were reviewed for assessing their adaptabilities, and a total of 4,856 measured blasting vibration data were examined for enhancing the confidence level in estimating the predictive formulation using scaled distance statistically.

Key words: ground vibration, noise, safe and economic blasting, excavation safety, regression

1. 서론

우리 나라의 지층은 고생대에서 중생대의 견고한 암반이 지표 가까이 노출되어 있는 경우가 많고 지형적으로는 산악과 구릉지대가 발달하고 있어 암 절취는 대체로 발파를 이용하여 공사가 이루어지고 있는 실정이며, 더욱이 최근에는 도심지 부근에서의 재건축공사, 도로 확장공사, 지하철공사 등과 관련하여 진동·소음·분진공해에 의한 물질적 보상 뿐만 아니라 정신적 피해 주장으로 법정소송이 제기되는 등 민원의 수준이 매우 심각한 실정이다. 따라서, 본 연구는 부산·대구 등의 영남지역일대의 주요암반을 대상으로 그 지질특성을 조사하고 물성시험 자료를 토대로 하여 발파상관 계수와의 관계를 파악함으로써 안전하고 경제성 있는 발파설계를 위한 기초자료를 제공하기 위해 균열계수를 적용하여 암반특성을 파악하고 분류하였다.

이때 사용한 균열계수는 현장탄성과 P파 속도치와 암반의 탄성과 P파 속도치와의 비를 말하며, 암반의 풍화도, 균열, 단층, 절리등 지반진동 전달에 대한 암반의 특성을 가장 잘 나타내는 지수이다. 그리고 현장기술자들이 해당현장의 발파진동 측정자료를 이용하여 발파진동 추정식을 만들 때 발생하는 오차를 최소화시키고 적합도(=결정계수, R^2)가 비교적 높은 발파진동 추정식을 구하여 암반의 지질학적, 공학적 특성과 발파진동 추정식의 상수의 상관성을 구하였다.

2. 연구대상지역의 지질 및 암석공학적 특성

본 연구대상지역의 기반암은 Fig. 1에서 보는바와 같이 중생대 백악기 경상계 퇴적암이 대부분이며 화성암(분출암 및 심성암)이 주로

분포한 영남지역 일대를 주 대상으로 하였고, 화강암은 물성이 비슷한 충청지역도 일부 포함되었다.

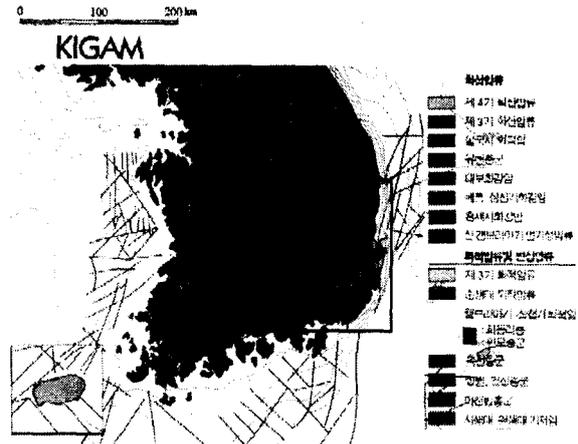


Fig 1 Geology map of Korea

영남지역의 퇴적암은 서부경남 지역의 진주층으로 부터 경북 북부지역까지 분포한 함안층, 칠곡층, 반야월층, 유천층 등으로 대별 할 수 있으나 대표적인 퇴적암으로써 함안층·반야월층의 저색셰일, 회색셰일, 암회색 슬레이트를 대상으로 하였으며, 이를 서부경남 및 대구지역, 경북지역의 대표암반으로 표현하였다. 또한 영남지역의 화성암은 불국사 화강암 및 안산암이 대부분이므로 부산지역의 안산각력암과 대구지역의 안산반암을 대표암반으로 표현하였고, 영남지역의 특징적인 화성암인 불국사 화강암을 조사하였으나 부산 해운대와 화명동 및 대구 북부지역 일부에 분포할 뿐이므로 대상 암반을 구하기 어려워 큰 차이가 없는 조치원 화강암 데이터를 참조하였으며, 이들 암질의 변화와 발파와의 상관관계를 조사 연구하였으며 암석강도시험 결과는 Table 1과 같다. 그리고 지구화학적 분석결과와 CIPW방법으로 산출한 광물조성은 Table 2와 같다.

Table 1 Results of uniaxial compressional test

| Section Rock type | dia (mm) | Length (mm) | uniaxial compression (kg/cm ²) | P-wave velocity (km/s) | rock classification | remarks | |
|---------------------------|-------------|----------------|--|------------------------------|------------------------|----------------|----------------------------|
| Purple silt stone | A | 55.40 | 66.50 | 730.2 | 4.37 | soft rock | longitudina l direction |
| | B | 55.40 | 56.17 | 780.5 | 3.99 | soft rock | |
| | C | 55.40 | 81.52 | 780.5 | 2.18 | soft rock | |
| | D | 55.40 | 64.95 | 1056.1 | 5.80 | medium rock | |
| Gray shale | E | 55.40 | 73.50 | 332.5 | 5.51 | medium rock | transverse direction |
| Dark gray siltstone | A | | | 667.3 | 5.80 | medium rock | Point load pressure |
| | B | | | 1128.2 | | medium rock | |
| | C | | | 950.1 | | soft rock | |
| Andesite porphyry | A | 55.40 | 57.28 | 1418.2 | 5.44 | hard rock | |
| | B | 55.40 | 75.37 | 1485.1 | 5.65 | hard rock | |
| | C | 55.40 | 90.73 | 2416.6 | 5.59 | very hard rock | |
| Andesite porphyry | A | 55.35 | 108.21 | 2819.7 | 5.63 | very hard rock | |
| | B | 55.40 | 109.40 | 2732.1 | 5.68 | very hard rock | |
| | C | 55.60 | 110.08 | 3374.9 | 5.57 | very hard rock | |
| Andesite porphyry | A | 55.30 | 93.10 | 2517.6 | 4.74 | very hard rock | |
| | B | 55.30 | 88.75 | 1946.2 | 4.65 | very hard rock | |

Table 2 Chemical analysis and CIPW NORM Calculation of samples from 4 major rock types distributed around the Taegu area.

| Type | Microphotg raph No. (node No.) | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | Loi | Total |
|------------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|-------|------------|
| Purple siltstone | 1 | 56.30 | 15.63 | 5.67 | 0.06 | 2.97 | 7.28 | 2.30 | 3.55 | 0.60 | 0.17 | 0.7 | 103.2 3 |
| Gray shale | 2 | 51.90 | 15.86 | 6.07 | 0.13 | 4.10 | 11.60 | 2.34 | 2.71 | 0.51 | 0.22 | 12.00 | 107.4 4 |
| Gray shlae | 3 | 52.77 | 15.44 | 5.44 | 0.11 | 5.10 | 11.72 | 1.61 | 2.92 | 0.47 | 0.21 | 13.37 | 109.1 5 |
| Dark gray siltstone | 4 | 58.32 | 15.97 | 6.63 | 0.06 | 3.71 | 6.47 | 1.85 | 3.31 | 0.59 | 0.19 | 9.480 | 106.5 8 |
| Andesite porphyry | 5 | 53.47 | 114.39 | 8.48 | 0.15 | 2.18 | 4.42 | 5.73 | 1.84 | 1.17 | 0.47 | 5.790 | 98.07 |
| Andesite pophyry | 6 | 58.15 | 13.82 | 5.81 | 0.04 | 2.24 | 2.78 | 7.29 | 1.6 | 0.61 | 0.27 | 1.20 | 93.81 |
| Andesite pophyry | 7 | 62.01 | 14.39 | 3.62 | 0.03 | 1.16 | 3.01 | 7.83 | 1.48 | 0.37 | 0.26 | 0.90 | 95.06 |
| Andesite pophyry | 8 | 61.38 | 13.85 | 3.41 | 0.04 | 1.69 | 2.61 | 8.81 | 1.23 | 0.44 | 0.23 | 1.3 | 94.99 |

또한 대구 성서지역 퇴적암에 대해 현장탄성 파속도 측정결과를 contour map으로 작성한 결과는 Fig 2와 같다.

3. 화약류의 특성과 적용 발파공법

3.1 화약류의 특성 및 적용에 대한 검토

발파진동은 폭약에너지의 충격파에 의한 동

적파괴의 경우에 발생되며, 이 충격파가 지반에 전달되어 탄성파의 형태로 지표면이나 구조물 에까지 전파되어진다. 일반적으로 진동수준은 비탄성적 감쇠를 고려하면 경암에서의 발파가 연암 및 보통암에서의 발파에 비해 더 높은 경 향을 보일것으로 예상되지만 정량적인 수준비 교는 용이하지 않다.¹⁶⁾ 본 연구대상인 영남지역 암반의 경우 균열계수 등급이 C등급이하인 퇴 적암지역에서의 파쇄효과에는 큰 차이가 없는

것으로 판단된다.

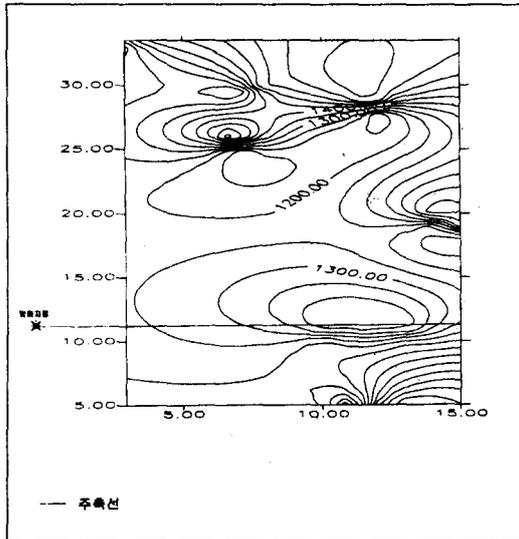


Fig 2 Contour map of in-situ seismic velocity

연구대상지역중 연암 내지 보통암 분포지층 암반에는 예멀전 폭약 사용이 적합하며, 뇌관은 진동을 최소화하기 위한 장약분산 방법의 지발 전기뇌관을 사용한다. 보통 순발발파에서 측정된 발파진동파의 진동지속시간은 약 100~200 ms에 해당하므로 25 ms 단차의 MSD뇌관 사용시에는 증폭 또는 감쇠효과를 가져올수 있으므로 25 ms 혹은 20 ms 단차의 MSD뇌관 사용시에는 진동감소 및 정밀 시공에 더욱 유효할 것이지만 그렇지 못한 경우는 250 ms 단차의 DSD뇌관을 사용함이 더욱 안전할 것이다. 또한 1회에 최대 발파량은 20공 발파가 일반적이며, 1회 발파량을 20공 내지 600공의 발파설계 및 시공계획인 경우 다단식발파기¹⁷⁾ 혹은 비전기식 뇌관을 사용하는 SBM공법이나 NONEL 발파공법을 사용할 때 더욱 안전한 발파가 가능할 것이다. 폭속이 큰 폭약은 그 압력이 최고치에 달하는 시간이 짧아 진동값과 주파수가 크지므로 암반의 강도가 강한 안산암, 화강암등 화성암류의 경우는 고폭속 화약을 사

용해야 할 것이며 강도가 적은 셰일·슬레이트 등 퇴적암류에는 저폭속화약을 선정함이 더합리적이다.

3.2 발파공법 적용기준 및 현장시공 표준안

영남지역의 경우 암발파설계 기준 및 도시 미진동 안전발파설계에 관한 연구 등을 종합할 때 발파공법 선정 기준으로써 Table 3을 제안·적용할 때 더욱 합리적이고 경제적인 시공이 가능할 것이다.⁵⁾

Table 3 Proposed blasting method in the Youngnam area

| 보안물건과의 거리(m) | 공법구분 | 시공방법 |
|--------------|--------|--|
| 30m 이내 | 무진동파쇄 | 팽창성파쇄제사용법 HRS, SRS등합암공법 Breaker, Ripper, Road head 등 기계굴착법 |
| 10~50m | 미진동발파 | CCR등 $\phi 17\sim 25$ mm 화약사용 pipe 완충재공법 Pre-Splitting 공법 Line-Drilling 공법 천공장 0.6~2.0m 장약량 0.06~0.25kg |
| 30~100m | 제어안전발파 | $\phi 17\sim 32$ mm 폭약사용 지발전기뇌관사용 SBM공법 NONEL공법 천공장 0.9~3.0m 장약량 0.125~0.5kg |
| 80~300m | 소발파 | $\phi 25\sim 50$ mm 폭약 사용 지발전기뇌관사용 SBM공법 NONEL공법 천공장 3~6m 장약량 0.5~8.0kg |
| 200m 이상 | 일반발파 | $\phi 30$ mm 이상 폭약사용 ED릿 지발 전기 뇌관사용 천공장 6~15m 장약량 8~25kg |

dB를 초과하면 창문 등이 흔들리고 그 수준이 장기간 계속되면 기구가 손상되고 벽에 균열이 발생하는 등 물적피해가 나타날 수 있기 때문에 방진대책이 강구되어야 한다고 보고되고 있다.

진동을 느끼는 최소진동레벨을 진동의 역치라고 하며 55 ± 5 dB가 된다. 진동레벨의 수준에 따라 불쾌감 및 진정을 호소하는 비율은 60 dB일 때 30%, 65 dB일 때 40%, 70 dB일 때 50%에 이른다고 한다. 이 중 가장 많은 진정내용은 수면방해로서 40~50%에 이르고 있으며, 그 다음으로 약 20%정도는 정신적 장애와 가옥손상에 대한 것으로 알려져 있다.

진동이 인체에 미치는 영향으로는 수면방해, 진동으로 인한 통증 그리고 순화기계나 내분비계 등 생리적인 영향을 들 수 있다.

나) 소음

소음이 인체에 미치는 영향으로는 일시적인 난청을 포함한 청력손실 외에 회화나 작업, 수면방해 그리고 생리적 영향을 들 수 있다. 95% 이상의 만족한 회화를 위한 사무실 및 교실 내의 소음수준은 통상 50 dB(A)이하가 바람직하며 원활한 전화통화를 위해서는 적어도 주변소음이 65 dB(A)이하의 되어야 한다. 또한 침실 내의 소음도가 40 dB(A)을 넘을 때는 대부분이 불만을 호소한다고 하며 피크소음도 대비, 잠을 깨는율은 70 dB(A)일 때는 30%로 증가되고 100~120 dB(A)일 때는 100%에 이른다고 한다.

소음에 의한 생리적 영향으로는 소음에 의해 교감신경계의 흥분에 의해 아드레날린의 분비가 증대되며 이에 따라 맥박의 증가, 혈압상승, 동공의 확대, 수액의 분비감소, 소화운동의 억제, 말초혈관의 수축 및 호흡운동 촉진 등의 현상이 일어난다. 이러한 원인으로 계속적인 소음에 노출될 경우 상대적으로 위장병, 소화기 및

순환기 질환이 높게 나타남을 확인할 수 있다.

다) 가축에 미치는 영향

사람은 공사로 인하여 소음이 발생될 것을 예측하나 동물은 상황을 예측하지 못하기 때문에 더욱 몰라게 된다. 특히 우리에 갇혀 있는 경우 더 심한 공포와 스트레스를 받게 된다. 동물이 과도한 소음진동에 노출되면 부신피질호르몬의 분비가 많아지고 말초혈관이 축소되어 배란횟수가 줄어들게 된다. 또한 소음에 대한 가축의 반응은 행동상의 변화가 많고 중추신경계의 변화도 일어난다. 따라서 가축은 사람보다 소음과 진동에 매우 민감하고 예지능력이 떨어질 뿐만 아니라 발파시 소음과 진동이 동시에 발생하고 연속적이지 않기 때문에 놀라는 정도가 심할 것으로 예상된다. 아울러 소음과 진동이 동시에 발생할 때에는 상승적 영향을 끼치게 된다.

일반적으로 알려진 소음에 대한 가축의 반응은 다음과 같으며 축종별 특성 및 알려져 있는 영향은 아래의 상세 내용과 같다.

- 가축의 일시적 먹이섭취 부진현상 초래
- 경기와 공포스런 행동이 일시적으로 나타나고 호흡수, 심장박동수가 변화함
- 소와 돼지의 경우 조산, 유산 발생사례가 있음
- 돼지의 경우 수태율, 새끼수의 감소 예가 있음
- 소의 경우 우유량과 체중 증가량의 감소 사례가 있음.

라) 가축에 있어서의 진동·소음 허용 기준

우리나라의 소음·진동 규제법에서 정한 소음진동 기준에서는 가축사육지역에 대한 별도 기준이 정하여진 바 없으며, 이러한 내용은 우리나라 뿐 아니라 세계 어느 나라에도 가축의

축종별, 품종별 소음 및 진동 허용기준이 제정되어 있지 않다.

그러나 사람에게 적용되는 소음 및 진동기준을 사람보다 훨씬 예민한 가축에게 그대로 적용하는 것은 문제가 있으며, 미국 연방연합위원회의 경우, 그 대안으로 가축 사육지역의 소음 권고기준을 65~75 dB(A)이하로 유지하도록 제안하고 있다.

또한 우리나라의 경우 1996년 환경부 중앙환경분쟁조정위원회에서 외부 연구소에 의뢰한, 진동피해에 관한 연구용역 내용 중에 제안된 축종별 권고기준을 인용하면 Table 5와 같다.

Table 5. Recommended standard of sound level and vibration level for domestic animals

| 가축 종류 | 권고기준 | | 암소음dB(A) ¹ | | 암진동dB(V) ² | |
|----------|-------------|-------------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|
| | 소음 dB(A) | 진동 dB(V) | Leq | L max | L 10 | L max |
| 소 | 70이하 | 70이하 | 69 | 77 | 30 | 52 |
| 돼지 | 70이하 | 70이하 | 75 | 86 | 27 | 68 |
| 닭 | 70이하 | 70이하 | 70 | 78 | 67 | 74 |
| 사슴 | 70이하 | - | 69 | 85 | 29 | 83 |

(주)

1. 낮 동안의 기준임. 야간에는 건설진동 발생을 원칙적으로 배제함

2. 암소음, 암진동이 대단히 낮은 경우에는 세심한 관찰이 요구됨

※ 참고자료 : 환경부 중앙환경분쟁조정위원회, 진동으로 인한 피해의 인과관계 검토 및 피해액산정 방법에 관한 연구, 1996. 12.

(3) 문제점

소음·진동규제법에서 건설 소음·진동은 개정전에는 제23조(건설소음·진동규제 지역의 거점)으로 규제가 되었으나, 현재는 제23조(생활소음·진동의 규제)에 사업장 및 공사장에서

발생되는 소음·진동으로 규제된다. 즉 개정법률은 건설의 공익성이나 건설진동이나 소음의 한시성, 단속성 등의 특성은 무시한 채 생활진동, 생활소음의 연장선에서 규제하고 있다. 소음·진동규제법에 의하면 발파진동이나 소음의 계속시간이 2시간이하이므로 주거지에서 주간에 발파하는 경우 +10 dB을 보정하여도 소음은 80 dB(A), 진동은 75 dB(V)가 규제치가 된다.

건설진동이나 소음 특히 발파진동이나 소음은 결코 상시적인 일반 진동과 소음에 동일시될 수 없다. 환경부에서는 발파진동과 소음을 계측하는 방법(소음·진동 공정시험방법)도 별도로 정해 놓았으면서도 규제기준(소음진동규제법)에서는 이를 반영하지 않은 모순을 범하고 있다. 즉 발파진동이나 소음은 1회 발파에 30초도 지속되기 어려우므로 적어도 5분이 소요되는 등가(Equivalent)값을 구하지 않고 최대치를 계측하도록 정의해 놓았으면서도 다른 진동이나 소음과 마찬가지로 Equivalent값에 기초한 진동레벨 또는 소음레벨로 규제해 놓은 것이다. 이런 문제점을 해소하기 위하여 충격성 진동에 대한 규제기준은 여러 학자들이 제안한 바 있으나 아직 법규제치에 이르지 못하고 있다.

(4) 충격진동·소음·음압적용기준 제안

발파로 인한 구조물의 피해는 대상구조물에 따라, 나라에 따라 다양하지만 충격진동 즉 미광무국의 5 cm/sec가 가장 정설로 받아들여진다. 또한 우리나라의 경우 건교부 터널발파작업 기준 및 노동부의 발파작업 안전작업지침, 서울·부산·대구·광주·대전·인천등 지하철 건설기준에서는 0.5 cm/sec를 설정하였으며 환경부의 분쟁조정 피해인정기준은 지반 및 건축물의 구조가 취약한 구조물이 많은 현실을 감안하여 0.3 cm/sec를 평가 기준으로 하고 있다.

소음 역시 건설소음규제기준에 의해 주간 70~75 dB(A)를 적용하는데, 이때 보정치 +5~

10를 감안한다면 70~85 dB(A)를 적용기준으로 할 수 있다.

또한 폭풍압에 의한 물리적 피해여부를 측정하거나 심리적 피해여부를 판단할 때 주변압소음이 측정소음보다 더 큰 지역의 경우 음압기준을 적용할 수 있다. 이때 미국 Dupon사의 제안안전기준은 115 dB(L)이며, 일본의 인체에 불편(고통)을 호소하는 기준은 120 dB(L)이다. 우리나라의 경우 이러한 기준이 구체화 되어 있지 않음으로 이러한 내용을 종합할 때 120 dB(L)를 음압기준으로 하였을 때 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 이를 종합하면 Table 6과 같이 현장적용기준을 제안할 수 있다.

Table 6. 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(L) | |
| Sound | 85dB(A) | |

4.2 충격진동 추정식의 신뢰도 검토

발파진동의 전파특성을 결정짓는 K, n 값은 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있다. 입지조건은 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상 암반의 지질학적 특성 및 물리적 성질 등이고, 발파조건은 사용하는 폭약의 종류, 장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면의 수 및 폭원으로부터 측정지점까지의 거리등이 발파진동의 크기와 전파특성에 영향을 미치는 가장중요한 요인이 된다.

한편 진동의 전파특성은 이론적으로 파악하려는 노력이 많은 연구자들에 의해 계속되어 왔다. 그러나 지반내의 불연속면과 지질적 구조

의 복잡성으로 인하여 진동전파에 관한 이론적인 접근에는 많은 어려움이 뒤따르게 되며 같은 암반에서도 현장의 발파조건등에 따라 전파특성이 크게 달라하므로 오히려 경험적인 연구가 필요하기 때문에 대개의 경우 여러차례 시험발파를 통하여 그 값을 얻고 있다. 이경운 등은 암석의 압축강도, 화약의 종류, 발파유형등이 발파진동상수 K값에 미치는 영향을 다음과 같이 연구, 발표하였다.

- ① 폭원으로부터 근접한 발파진동식은 Root scaled distance 보다 Cube root scaled distance를 적용한 경우의 식이 적합도가 높았다.
- ② 동종의 암반으로 구성된 지반에서 감쇠지수의 값은 거의 일정하다.
- ③ 발파진동상수는 사용화약 종류에 따라 일정한 비율로 변한다.
- ④ 발파진동상수는 지반의 압축강도에 비례하는 경향이 있다.
- ⑤ 발파진동상수는 발파유형에 따라 일정한 값의 오차가 있다. 개착식의 지표상에서의 발파는 터널식의 지하에서의 발파보다 발파진동값이 높고 자유면이 증가할수록 그 값은 감소한다.

이상에서 발파진동상수 K는 아래의 식으로 표현될 수 있다.

$$K = Et (Rt \times Sc \times Qt)$$

E : 화약에 따른 보정율

젤라틴 다이ना마이트 : 1.0

함수폭약 : 0.8

초안폭약 : 0.65

Rt : 암종에 따른 상수

서울의 화강암 : 0.037

서울의 편마암 : 0.021

Qt : 발파유형에 의한 상수

개착식 바닥발파 : 80

개착식 계단발파 : 50

터널식 심발발파 : 60

위의 연구에서 표토층이 발파진동에 미치는 영향은 조사하지 못하고 동종암반지역에서 경미한 감쇠지수의 오차가 발생하는 것은 표토층의 영향일 것이라고 지적하였으나 실제 식의 유도에 사용된 자료의 수가 적기 때문에 통계적인 의미에는 문제가 있으며 암석의 특성에 따른 입지상수 검토를 위해서는 향후 많은 자료들이 축적되어야 할 것이다. 대상암반의 지질조건을 암석의 압축강도로서 정량화하기 위한 시도와 함께 균열계수와 같이 좀더 정확한 현지 암반 및 지질조건을 고려한 발파진동식을 도출하는 연구가 꼭 이루어져야 할 것이라고 강조된 바 있다.

5. 지반진동 · 음압 · 소음치의 측정방법

건설공사장에서 발생하는 발파충격 진동 · 소음을 측정하기 위하여 대구 도심지의 아파트부 지정지 공사장에서 10개월간 4,856개의 진동측정 데이터를 수집하였으며, 이를 DS-550 회귀분석 프로그램으로 분석하였다. 발파방법은 착암기로 1.2~2.4 m 천공한 제어안전발파공법을 사용하였으며, 발파진동 측정기기는 CANADA InstanTel사의 DS 677을 이용하였고, 화약은 에밀존 폭약 및 MS 지발전기뇌관을 사용 하였다.

또한 향타 충격진동 · 소음을 측정하기 위해 향타기계류 중 직타공법인 유압식 향타기를 사용하였으며, 이때 발생하는 지반진동을 측정하였다. 향타진동은 발파진동과 유사하게 지속시간이 매우 짧고 충격적이고 일시진동이며, 특히 거리가 멀어질수록 급격히 감쇠하는 경향이 있다.11) 본 연구는 이러한 향타작업시 발생하는

건설진동의 전달 메카니즘과 감쇠특성을 알기 위하여 기존의 디젤햄머를 개량한 DKH 유압해머를 사용하여 고속철도 현장에서 향타진동 · 소음을 측정하고 분석하였다.

6. 충격성진동 측정자료의 통계적 처리 및 분석

6.1 발파진동 측정자료의 통계적 처리

(1) 측정자료의 회귀분석방법

충격진동 측정자료의 분석은 USBM 진동추정식을 사용하여 DS-550 회귀분석프로그램으로 K와 n을 산출하였다.

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

V : 발파진동속도 (cm/sec)

D : 폭원으로 부터의 거리 (m)

W : 지발당 장약량 (Kg)

K : 자유면의 상태, 화약의 종류, 암질 등에 따른 상수

n : 감쇠지수

b : 장약지수

여기서 자승근 환산거리는 장약이 긴 봉상으로 분포된 것에 기초한 것이고, 삼승근 환산거리는 장약이 구상으로 분포된 것에 기초한 것으로서 실제 자료처리에 있어서는 발파원의 특성에 관계없이 양자의 방법 모두를 이용하여 통계적으로 처리하고 더 높은 적합도를 보이는 환산거리를 채택하는 것이 정밀도가 높다.

(2) 측정자료의 통계적처리 이론 및 결과

측정된 진동측정치를 일반적인 방법으로 분석한 결과 퇴적암층(1공구)에서의 K는 7.1~2302.01이었으며 n은 0.20~1.666이었고 이때 결정계수(R²)은 0.009~0.551이었다. 그리고 화성암층(2공구)에서의 K는 13.8~17156.9이었으며 n은 0.162~1.953이었고, 결정계수(R²)은 0.023~

0.274였다. 이와 같이 일반적인 회귀분석 방법은 대체로 매우 낮은 결정계수값을 보임으로서 진동상수 K 및 n의 추정에 있어 신뢰성이 매우 낮은 것으로 확인되었다. 그러므로 이러한 오차의 원인과 신뢰성 향상을 위해 결정계수를 높이는 여러가지 통계학적 방법을 연구하였다.

여기서 통계학적 처리 기본이론은 진동속도의 환산관계는 “SD의 비가 비슷한 때가 아니라 거리와 지발당장약량이 비슷한 경우로부터 얻어졌을 때 가장 정확한 것이다.”고 하는 Dowding의 저서에¹²⁾ 근거하여 진동측정 데이터를 군별로 동일 지발당 장약량을 가지는 동일유사 거리군으로 나눈 후, 5 m 미만의 측정거리 차이를 가지는 동일 거리군과 15 m 미만의 측정거리 차이를 가지는 동일 거리군으로 구분하여 회귀분석을 시행하였으며, 절사평균을 이용한 방법, 샘플수를 가중치로 적용하는 방법, 진동속도 표준편차의 영향을 가중치로 적용하는 방법, 진동속도 분산의 영향을 가중치로 적용하는 방법등을 모두 적용하여 회귀분석을 시행하였을 때 동일장약량을 가지는 15 m 이내의 동일거리군에서의 진동 속도 평균치에 가중치를 적용하여 얻은 회귀분석결과가 가장 신뢰도가 높았다.

15 m 이내의 동일 거리군에서의 진동속도 평균치에 가중치를 적용하여 분산의 영향을 가중치에 적용하는 방법으로 분석하여 얻은 회귀분석결과는 최대심도 GL-18 m, 평균심도 GL-12 m일 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(R²)는 퇴적암층(1공구)에서 0.122~0.945였으며, 화성암층(2공구)에서는 0.098~0.709로써 Table 7에서와 같

이 일반적인 방법으로 회귀분석한 경우에 비해 동일 거리군별 회귀분석의 경우 신뢰도가 훨씬 높아졌음을 알 수 있었다.

Table 7 R² result of general regression and regression with 15 m equi-distance

| Rock type Month | Sedimentary rocks | | Igneous rocks | |
|--------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|
| | General regression | Same distance regression | General regression | Same distance regression |
| 96.11 | 0.196 | 0.556 | 0.158 | 0.617 |
| 96.12 | 0.121 | 0.580 | 0.140 | 0.462 |
| 97.01 | 0.009 | 0.599 | 0.274 | 0.525 |
| 97.02 | 0.074 | 0.877 | 0.188 | 0.502 |
| 97.03 | 0.138 | 0.496 | 0.107 | 0.098 |
| 97.04 | 0.077 | 0.915 | 0.023 | 0.594 |
| 97.05 | 0.551 | 0.778 | 0.123 | 0.275 |
| 97.06 | - | - | 0.259 | 0.359 |
| 97.07 | - | - | 0.133 | 0.411 |
| 97.08 | - | - | 0.153 | 0.310 |

(3) 통계적 분석자료의 심도 및 거리에 따른 변화추이

대구소재의 주요 암반지역에서 수집한 진동 측정자료 4,856개중 15 m 이내의 동일거리군에서의 진동속도 평균치 4,558개 데이터에 가중치를 적용한 경우의 회귀분석 결과는 1공구(퇴적암)와 2공구(화성암)의 경우 K와 n의 추세가 반대방향으로 나타난다. 즉, 퇴적암 지역에서는 Fig 3, 4와 같이 심도가 증가함에 따라 K는 대수선형적으로 증가하는 반면, n는 감소한다.

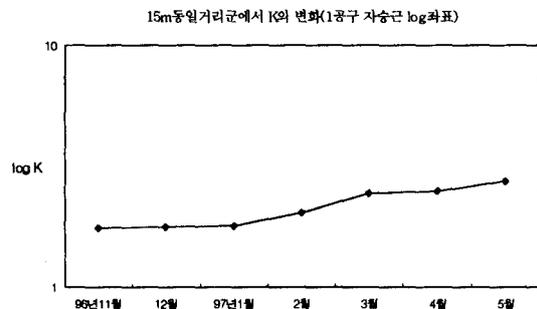


Fig 3. Variation of K with respect to depth (Section of works-1, square root scaling)

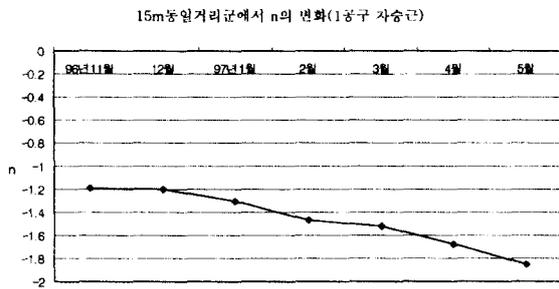


Fig 4. Variation of n with respect to depth
(Section of works-1 , square root scaling)

그러나 화성암 지역에서는 Fig 5.6과 같이 K는 대수선형적으로 감소하고, n는 선형적으로 증가하는 경향을 보인다.

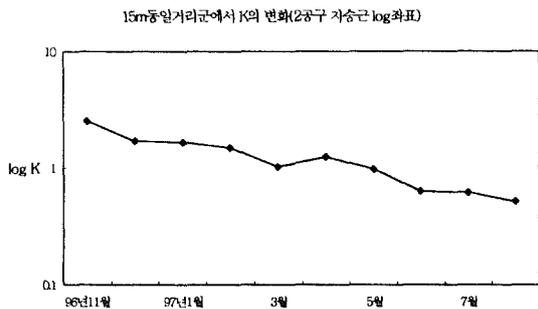


Fig 5. Variation of K with respect to depth
(Section of works-2 , square root scaling)

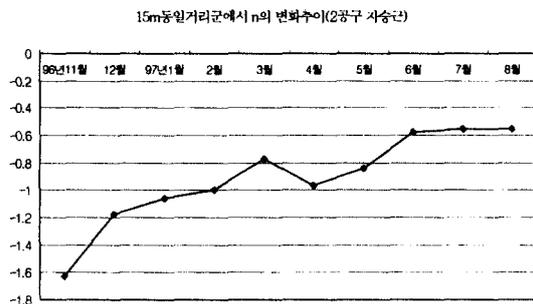


Fig 6. Variation of n with respect to depth
(Section of works-2 , square root scaling)

이는 화성암지역은 심부로 진행함에 따라 암석이 점점 견고해지나, 퇴적암지역은 제한된 심도에서는 하부로 진행함에 따라 파쇄나 균열현상이 더 발달되는 지질적 특성에 기인한 것으로 생각된다. 이때 심도에 따른 감쇠지수(n)를 수식으로 나타내면

$$n = n_0 + ad$$

여기서, n : 심도에 따른 함수 (감쇠지수)

n_0 : 지표면에서의 n값

d : 심도(m)

a : 상수

또한 심도에 따른 진동상수(K)와의 관계를 식으로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$\log K = K_0 + ad$$

즉 $K = e^{K_0 + ad}$ 가 된다.

여기서 K : 심도에 따른 함수 (진동상수)

K_0 : 지표면에서의 log K값

d : 심도

a : 상수

상기결과를 정리하면 Table 8과 같다.

Table 8 Transition equation of K and n with respect to depth.

| 구분 | 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 | $e^{4.9 - 0.342d}$ | $-1.8 + 0.108d$ |

6.2 향타진동측정자료의 통계적 처리

(1) 향타진동·소음 측정자료의 거리별 변화 추이는 Fig 7과 같이 선형적으로 나타났다.

여기서 측정거리 5 m에서 진동치는 1.862

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

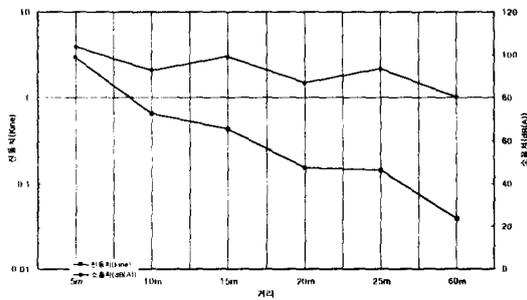


Fig 7. Vibration and noise of DKH Hammer in distance

7. 결 론

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 퇴적암류 3종류는 함안층의 저색 실트스톤, 회색 셰일 및 반야월층의 암회색 실트질 슬레이트로 판명되었으며, 부산과 대구지역 하부지층에 많이 분포하는 대표적인 화성암류 3종류는 안산각력암, 안산반암, 화강암으로 나타났다. 영남지역의 대표암반지역에서 10개월간 GL-12 m까지 심부 굴착한 현장을 대상으

로, 4,856개의 진동계측자료를 획득하여 본 연구에서 적용한 여러 가지 통계적 회귀분석 기법중 동일장약량을 가지는 15 m이내의 동일 거리군에서의 진동속도 평균치에 가중치를 적용하여 회귀분석을 수행하는 방법이 가장 신뢰도를 높이는 방법인 것으로 나타났다.

2) 대상암반중 퇴적암질 암반의 균열계수는 0.266~0.800(B~D등급)이었으며, 회귀분석 결과 자승근 환산거리식으로 표현할 경우에는 $K=56.33\sim561.33$, $n=-1.19\sim-1.85$ 의 범위에 분포하였고, 삼승근 환산거리식의 경우 $K=36.89\sim562.37$, $n=-1.12\sim-1.89$ 범위에 분포하는 것으로 나타났다. 화성암질 암반의 균열계수는 0.797~0.650(C~D등급)이었으며, 회귀분석결과 자승근 환산거리식의 경우 $K=319.16\sim3.27$, $n=-1.63\sim-0.55$, 삼승근 환산거리식의 경우 $K=594.05\sim2.73$, $n=-1.8\sim-0.53$ 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.

3) 실험대상 지역에서 심도별 K와 n의 변화 추이를 조사하기 위하여 계측자료를 분석한 결과 K, n을 굴착깊이 d의 함수로서 표현할 수 있었다. 이러한 결과는 인근지역에서의 시추 조사치를 참조할 때 심도별로 나타난 K, n의 변화는 굴착깊이에 따라 변화하는 암반의 변화에 기인하는 것으로 판단할 수 있으며, 이 결과는 천부에서의 장약설계를 통하여 실시한 시험발

과 결과로 부터 도출한 예측식은 암반굴착 작업이 심도로 진행됨에 따라 암반의 변화를 고려하여 수정 보완할 필요가 있음을 보여준다.

4) 10 ton의 DKH 유압해머를 사용하여 향타 진동·소음을 측정된 결과 향타지점으로부터 측정지점간의 거리가 15 m이상일 때 진동안전기준치 0.5 Kine을 준수할 수 있었으며 소음은 60 m이상 이격되었을 때 소음기준치 85 dB(A)를 준수할 수 있었다. 이때 발생진동 주파수는 5~34 Hz로써 발파충격 진동에 비해 주파수가 대체로 낮아 동일한 진동크기에서는 발파진동에 비해 구조물에 대한 진동피해의 우려가 더 크므로 주의해야 하는 것으로 판명되었다.

5) 국내에서 생산되는 화약류의 특성과 영남 지역 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 너판의 경우 정밀설계 및 시공인 경우 밀리세컨드 지발전기너판과 같은 낮은 단차가 진동저감 및 파쇄도에 유리할 것이며, 일반적인 발파에는 데시세컨트 지발전기너판과 같이 높은 단차의 지발너판이 증폭효과를 피하게 되므로 진동저감에 더욱 유리하다고 생각된다. 영남지역에서 암반파쇄 설계시 필요한 발파공법 선정을 위한 일반적인 지침으로 활용할 수 있는 데이터를 Table 3에 제시하였다.

참 고 문 헌

- 이경운, "화약, 암석강도 및 발파유형이 발파 진동에 미치는 영향 -서울도심지발파를 중심으로-"대한광산학회지, 대한광산학회, Vol. 21, pp. 335~336 (1984)
- 이정인, 류창하, "발파작업에 의한 지반진동이 지상구조물에 미치는 영향에 관한 연구 -동양 시멘트 삼척공장 석회석 노천채석장을 중심으로-" 대한광산학회지, 대한광산학회, Vol. 16, pp. 41~50 (1977)
- 임한욱, 이정인 "암발파 설계기법에 관한 연구" 한국토지공사, (1995)
- 최영천, 최원규, 안명석, 1997, 구조물 발파 효율개선방안, 한국소음진동공학회지 제7권 2호 PP.179~188
- 박종남, 안명석 "대구규장암지역의 발파진동 측정자료에 의한 K 및 n의 변화 추이에 대한고찰 "한국자원공학회지, 한국자원공학회, Vol.36, pp.316 (1999)
- 목연수, 안명석 "민원발생시 발파진동·소음의 처리사례에 관한연구" 화약발파, 대한화약기술학회 제 17권 3호, p. 15 (1999)
- 영남건설기술교육원, "암반분류법·파쇄공법 및 계측관리", p.58 (1998)
- 이영대, 박종남, 안명석, 1999, 지반진동이 건물의 균열에 미치는 영향에 관한 연구, 한국소음진동학회지 제 9권 6호 pp.1173~1179
- 대구방송총국 건설공사 지반조사 보고서, 평원엔지니어링 (1997)
- 김하근·김명준·김홍식, "소음저감을 위한 발파 파쇄암의 입도 예측에 관한 연구" 한국소음진동공학회. 2000. p.961
- 박재영·곽광수·윤해동·김재수, "건설현장에서 발생하는 유압식 향타진동의 특성에 관한연구", 한국소음진동공학회 창립 10주년 기념 학술대회 논문집Ⅱ p. 921~926 (2000)
- Charles H. Dowding. "Blast vibration monitoring and control." Northwestern University. (1984)
- National Highway Institute, "Rock Blasting and Overbreak Control, pp 55~77 (1991)

- 이경운, "화약, 암석강도 및 발파유형이 발파 진동에 미치는 영향 -서울도심지발파를 중심으로-"대한광산학회지, 대한광산학회, Vol. 21, pp. 335~336 (1984)

14. Stig. O. Olofsson, Applied Explosives Technology for Construction and Mining, pp. 33~199 (1988)
15. 김재극 “산업화약과 발파공학” 서울대학교 출판부 (1985)
16. 류창하, 시흥지구 택지개발 사업장의 발파 영향평가 및 발파공법연구, 한국자원연구소, p. 105 (1993)
17. 안명석, “다단식 발파기에 의한 노천발파실험” 화약발파, 대한화약기술학회지, Vol.13 제4호 p. 39~46 (1995)
18. 소음진동편람, (사)한국소음진동공학회, (1995)