

제주 남부지역의 시험발파에 의한 지반진동 특성 분석

김승현* · 이동욱**

Kim, Seung Hyun* · Lee, Dong Wook**

Analysis of Ground Vibration Characteristics by Test Blasting in Southern Region of Jeju

ABSTRACT

The characteristics of ground vibration have been analyzed by test blasting in southern region of Jeju (layered ground consisting of basalt and clinker). By grasping the principal component of ground vibration and depriving the prediction equations of ground vibration, the propagation characteristics of ground vibration have been compared to the domestic design guidelines. Ground vibration in layered ground has a small amplitude at a short distance. However, it has been confirmed that the vibration energy is transmitted further by virtue of the low attenuation of the ground vibration as it goes to a longer distance. Moreover, the frequency has been confirmed to be low frequency band. The outcome has been defined that it resulted because the clinker layer with a large pore transforms the blasting energy seismic wave with high frequency into a low frequency wave having a long waveform period. In addition, the limits of design guidelines were identified by comparing the ground vibration of Jeju and other bedrock areas. Thus, the necessity of the development of the prediction equations of ground vibration utilized in design that reflect the characteristics of the area has been suggested.

Key words : Test blasting, Ground vibration, Clinkers, Attenuation, Low frequency

초 록

시험발파를 통해 제주 남부지역(현무암과 클링커 층상구조 지반)의 지반진동 특성을 분석하였다. 지반진동의 주요 성분을 파악하고 지반진동추정식을 도출함으로써 제주 남부지역의 지반진동의 전파 특성을 국내 설계지침과 비교하였다. 층상구조 지반에서의 지반진동은 근거리에서는 진동의 크기가 작으나 원거리로 갈수록 지반진동의 감쇠가 적어 진동에너지가 멀리까지 전달하는 것으로 나타났다. 그리고 주파수는 저주파수 대역으로 확인되었다. 이는 공극이 큰 클링커층이 고주파의 발파에너지 탄성파를 파형의 주기가 긴 저주파 형태로 바꿔 전달하기 때문으로 판단된다. 또한, 기반암이 다른 지역과의 지반진동을 비교하여 설계지침의 한계를 확인함으로써, 지역 특성이 반영된 설계 지반진동추정식 개발의 필요성을 제시하였다.

검색어 : 시험발파, 지반진동, 클링커층, 감쇠, 저주파수

1. 서론

지반진동은 지반을 전파매체로 하기 때문에 지반 및 지형 등의 다양하고 복잡한 조건에 따라 전파되는 진동의 크기가 달라진다. 따라서 관련 변수를 분석하고 적용상의 오류를 개선하는 등의 보안을 통하여 지속적으로 진동 추정치의 신뢰성을 높이는 것이 필요하다 (Son et al., 2015).

* 중신회원 · 제주대학교 토목공학과 박사후연구원 (Jeju National University · ksh@jejunu.ac.kr)

** 중신회원 · 교신저자 · 제주대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Jeju National University · dwlee@jejunu.ac.kr)

Received May 13, 2019/ revised May 16, 2019/ accepted May 23, 2019

제주지역의 지반은 현무암층과 화산쇄설층(클링커층으로 공극이 크고 압력이 조밀하지 않은 특성)이 불규칙하게 반복되는 이질적인 층상구조를 이루는 매질특성을 가지고 있다. 이처럼 진동매질 특성이 내륙지역과는 전혀 다름에도 불구하고 국내 노천의 설계 지반진동추정식을 그대로 계획 단계에서 사용하는 문제로 인해 현장의 발파실무자들은 지반진동 해석 및 적용에 어려움을 겪고 있다.

최근 제주지역은 급격한 유입인구의 증가와 각종 개발사업으로 인한 대규모 건설공사가 진행되고 있는 반면, 발파로 인한 지반진동의 기술적 연구 및 검토는 매우 부족한 실정이다. Yang et al.(2011)은 클링커층과 다공질 현무암의 불규칙한 분포 특성으로 인해 발파 효율이 낮아 효과적인 발파를 위해 비장약량을 높일 필요가 있다고 판단하였다. Kim and Lee(2016)는 제주도의 생성기원에 의한 층상구조 지반 특성을 설명하고, 제주 서부지역에서 실시된 시험발파 결과를 국내 설계지침과 비교함으로써 지반진동의 감쇠가 상대적으로 작아 진동을 멀리까지 전파하는 특성을 제시하였다.

지반진동의 진폭과 주파수 특성을 결정하는 인자는 크게 발파 폭원조건과 입지적 지반조건으로 나눌 수 있다. 폭원조건은 발파패턴을 조절함으로써 제어가 가능하지만, 지반조건은 지형의 기하학적 형태, 지질학적 특성(암의 기질, 이질적 층서 등) 그리고 매질의 역학적 특성(기압반의 종류 및 상태, 불연속면의 유무 및 상태 등)으로 인해 인위적인 제어가 불가능한 요소이다. 따라서 발파로 인한 지반진동 해석 및 적용은 현장의 포괄적인 지반조건에 대한 이해를 바탕으로 영향 인자들간의 관계를 파악하여 이루어져야 하며, 본 연구도 이에 대한 연장선상에서 이루어졌다.

본 연구에서는 이질적 층상구조 지반에서 실시된 시험발파 자료를 이용하였다. 시험지의 폭원조건 및 지반조건을 면밀히 파악하고 지반진동의 진폭 특성과 주파수 특성을 설계지침 및 연구결과들과 비교하여 그 정도를 객관적으로 제시함으로써 제주지역의 지반진동 특성에 대한 신뢰성 있는 정보를 제공하고자 하였다.

2. 지반진동추정식

발파로 인한 진동의 크기 즉, 속도성분을 표시하는 방법은 아직 이론적 전제가 완전하다고 보기는 어렵지만, 현재 국내외에서 가장 많이 적용하고 있는 방법은 미광무극(USBM)에서 발표한 Eq. (1)이다(ME, 2010). MOCT(2006)에서도 이를 인용하여 국내 노천의 설계 발파진동추정식 즉, 지반진동추정식을 Eq. (2)와 같이 제시하였다.

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

$$V = 200 \left(\frac{D}{W^b} \right)^{-1.6} \quad (2)$$

여기서, V : 진동속도(cm/s), D : 폭원으로부터의 거리(m), W : 지발당 장약량(kg), K : 발파진동상수, b : 장약지수, n : 감쇠지수, SD : 환산거리(Scaled Distance)이다.

K, n은 정량적으로 평가할 수 없는 인자에 의한 영향을 대표하는 값으로서, 지질조건, 발파방법, 화약류의 종류에 따라 변화한다(MOCT, 2006). 환산거리(Scaled distance, SD)는 b의 값이 1/2인 자승근 환산거리(Square root scaled distance, SRSD)와 1/3인 삼승근 환산거리(Cube root scaled distance, CRSD)가 있다. 일반적으로 국내에서는 계측자료를 SRSD 및 CRSD 기법으로 처리하여 각각의 전파식을 구한 후 그 가운데 적합도가 높은 식을 대상지역에서의 진동수준 예측식으로 채택하는 방법을 많이 사용하고 있다. 하지만 MOCT(2006)에서는 실무적인 편의를 위해 고저차가 크지 않은 노천발파에서 상관도가 높은 것으로 알려져 있는 SRSD 기법 사용을 추천하고 있다(Choi and Ryu, 2012).

측정된 발파 진동치는 회귀분석(Regression analysis)을 실시하여 지반진동추정식을 산출한다. 표본회귀식에 양변 Log를 취하여 변환하고 최소자승법(Least square method)을 사용하여 입지상수를 구한 후 안전성 및 신뢰성을 높이기 위해 신뢰도 95 %의 지반진동식을 산출한다(MOCT, 2006).

3. 시험지역의 지반 특성

제주도는 화산활동이 수차례 반복되어 형성된 생성기원을 가지고 있다. 따라서, 제주도의 지층은 화산 분출에 따른 마그마로 형성된 화산암층 위에 오랜 시간 동안 화산쇄설물 등 퇴적물이 쌓이는 반복적인 활동에 따라, 암반층과 암반층 사이에 퇴적층이 놓이게 되는 층상구조를 가지고 있다(Koh, 1997).

이러한 이질적 층상구조의 퇴적층(화산쇄설층(클링커층)과 암반층이 불규칙하게 반복되는 이질적 층상구조)으로 인해 동일지역에서도 지층변화에 대한 예측이 매우 어렵고, 지반 공학적 특성 또한 내륙부의 지반과는 다르다. 그리고 제주도의 암반은 화산활동에 의한 용암분출로 형성된 화산분출암인 현무암류(Basalts)가 제주지역 전체면적의 90 % 이상을 점유하고 있다. 표토층은 고기층에서 풍화·침식·퇴적 작용에 의한 풍화토보다는 현무암에서 기원된 화산회토로 구성되어 있다(Kim and Lee, 2016).

Fig. 1(a)는 제주지역의 석산 절개지 노출 단면으로 층상구조 지층을 보여주고 있으며, Figs. 1(b) and 1(c)는 노천 표토제거 후 노출되는 일반적인 암반층과 클링커층의 불규칙한 분포 양상이다.

시험지역은 제주특별자치도 서귀포시 남부에 해발고도 약 300 m 내외의 중산간 일원이다. 기반암의 특징을 파악하기 위해 지질도를 확인한 결과 Fig. 2와 같이 후기 화산활동 시기 화산암인 시오름 조면현무암(Qstb)으로 조사되었다.

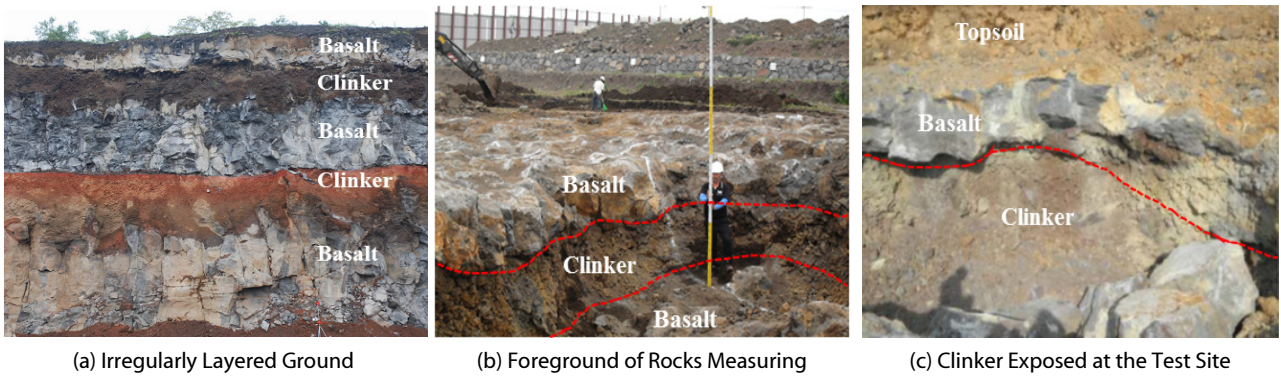


Fig. 1. Irregularly Layered Ground of the Cutting Area and Distribution of Rock and Clinker Layers in Jeju

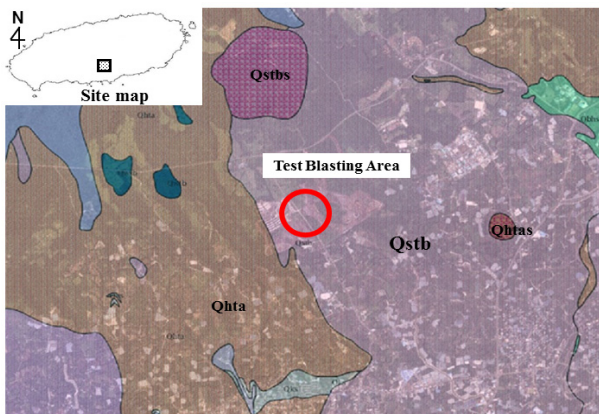


Fig. 2. Geologic Map of Test Blasting Site

시오름조면현무암(Qstb)은 회색 내지 암회색이며, 이 암석은 1~10 mm 크기의 기공을 20 % 정도 함유하고 있다. 기공의 함량은 노두에 따라 변화가 크며, 기공없이 치밀하게 산출되기도 한다. 반정으로는 장석이 우세하고 5~10 mm 크기이며 함량은 10 cm²의 단위면적에 약 20개의 함량을 보이고, 휘석은 5 mm 크기로 약 3~5개의 함량을 보이는 특징이 있다(JPG, 2000).

Table 1. Results of Laboratory Test according to Rock Types

| Classification | Unit | Soft rock | Moderate rock | Hard rock | |
|-------------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| Specific gravity | - | 1.79~2.52 | 2.67~2.72 | 2.67~2.75 | |
| Absorption | % | 2.67~12.46 | 1.51~3.04 | 1.09~1.78 | |
| Unit mass | g/cm ³ | 1.79~2.43 | 2.64~2.70 | 2.67~2.73 | |
| Uniaxial compressive strength | MPa | 11.4~51.9 | 61.9~75.7 | 126.5~128.5 | |
| Elastic wave velocity | P | m/sec | 1,452~2,369 | 1,681~2,845 | 3,331~3,999 |
| | S | m/sec | 889~1,475 | 1,169~1,629 | 2,010~2,077 |
| Young's modulus | MPa | 7.62E+02 ~9.48E+03 | 6.98E+03 ~1.02E+04 | 1.73E+04 ~2.70E+04 | |
| Poisson's ratio | - | 0.31~0.34 | 0.26~0.28 | 0.23~0.24 | |

시험지역 암석의 실내시험결과를 연암, 보통암, 경암으로 구분하여 정리한 결과는 Table 1과 같다. 비중, 단위중량, 일축압축강도, 탄성파속도, 탄성계수는 연암 < 보통암 < 경암 순이며 흡수율, 포아송비는 그 반대인 역순의 결과를 보이고 있다.

그리고 암반과 암반 사이에 좁게 분포되어 있는 화산쇄설층(클링커층)의 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT) N값은 4회/30 cm~50회/5 cm로 매우 넓은 범위의 결과를 보인다. 이처럼 클링커층의 SPT N값은 암편들의 공극 차이에 따라 극단적으로 매우 크거나 매우 작은 값으로 측정되기 때문에, 이론적·경험적인 방법에 따라 N값으로부터 클링커층의 역학적 특성을 정량화하기 어렵다(Kim and Lee, 2016).

4. 폭원조건과 지반조건

4.1 폭원조건

시험발파(Test blasting)는 Fig. 3과 같이 계획하여 실시되었다. 편도 1차선 도로를 경계로 서측(TB. 1)에서 70공 그리고 동측(TB. 2) 76공이 각각 실시되었다. 발파패턴은 ‘도로공사 노천발표 설계 시공지침’에 의한 표준발파공법 Type II(정밀 진동제어발파),

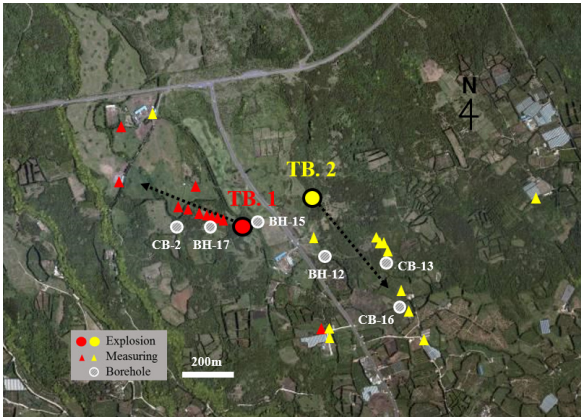


Fig. 3. Composition of Test Blasting

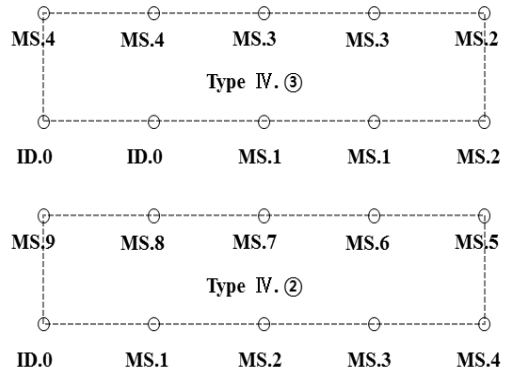


Fig. 4. Blasting Pattern Plan of Type IV (TB. 2)

Table 2. Applied Design Parameter for Test Blasting

| Description | Type | Unit | TB. 1 | | | | TB. 2 | | | | | | | |
|-----------------------|------|-------------------|----------------------------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | II | | III | | IV | | II | | III | | IV | |
| Drilling length | | m | 2.0 | 2.7 | 3.4 | | 2.2 | 2.5 | 2.7 | | | | | |
| Burden | | m | 0.7 | 1.0 | 1.5 | | 0.6 | 1.0 | 1.5 | | | | | |
| Spacing | | m | 0.7 | 1.0 | 1.6 | | 0.7 | 1.0 | 1.6 | | | | | |
| Drilled hole diameter | | mm | 51 | 51 | 76 | | 51 | 51 | 76 | | | | | |
| Charge per hole | | kg | 0.375 | 1.0 | 3.0 | | 0.375 | 1.0 | 2.5 | | | | | |
| Charge per delay | | kg | 0.375 | 1.0 | 3.0 | 6.0 | 6.0 | 3.0 | 0.375 | 1.0 | 2.5 | 2.5 | 5.0 | 5.0 |
| Powder factor | | kg/m ³ | 0.450 | 0.417 | 0.417 | | 0.446 | 0.435 | 0.434 | | | | | |
| Holes | | - | 4 | 6 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Explosive diameter | | mm | 32 | 32 | 50 | | 32 | 32 | 50 | | | | | |
| Explosive | | - | Emulsion | | | | | | | | | | | |
| Detonator | | - | ID & MS electric detonator | | | | | | | | | | | |

Type III(소규모 진동제어발파), Type IV(중규모 진동제어발파)를 준용하고 현장여건을 고려해 Table 2와 같이 구성하였다.

TB. 1은 8회의 시험발파가 Type II(4공→6공) → Type III(10공→10공) → Type III(10공→10공→10공→10공)의 순으로 실시되었고, Type IV의 두 번째 10공과 세 번째 10공은 2지발 발파가 이루어졌다. 진동 계측을 위하여 11대의 계측기가 설치되었고 폭원으로부터 각 계측기까지의 이격거리는 최소 53 m에서 약 20 m씩 등간격으로 8대를 설치하고 보안물건에 3대를 설치하여 최대 638 m이다. 에멀전 폭약은 총 143.75 kg이 사용되었다.

TB. 2도 8회의 시험 발파가 Type II(8공→8공) → Type III(10공→10공) → Type III(10공→10공→10공→10공)의 순으로 실시되었고, Type IV의 세 번째 10공과 네 번째 10공은 2지발 발파가 이루어졌다. Fig. 4는 TB. 2의 Type IV에 대한 두 번째(1지발)와 세 번째(2지발) 발파패턴 평면도이다. 진동 계측을 위하여 12대의 계측기가 설치되었고 폭원으로부터 각 계측기까지의 이격거리는

130 m에 1대, 336 m부터 약 15 m씩 등간격으로 4대를 설치하고 보안물건에 나머지 7대를 설치하여 최대 997 m로 폭원으로부터의 이격거리가 비교적 멀다. 그리고 에멀전 폭약은 총 126.0 kg이 사용되었다.

4.2 지반조건

폭원에서 발생한 지반 진동을 전달하는 매질 특성을 파악하기 위해 Fig. 5와 같이 지반조사보고서의 지층단면도를 검토하였다. TB. 1은 폭원으로부터 계측 방향이 북서 방향이며 지반고가 계측 방향으로 증가하였고 인접한 시추공은 CB-2, BH-17, BH-15로 확인되었다. 그리고 TB. 2는 폭원으로부터 계측 방향이 남동 방향이며 지반고가 계측 방향으로 감소하였고 인접한 시추공은 BH-12, CB-13, SB-16으로 확인되었다.

시추공명 CB, SB는 기본설계에서 조사된 시추공으로 시추주상도 자료를 확보하지 못해 BH-12, 15, 17에 대해서만 검토하였다.

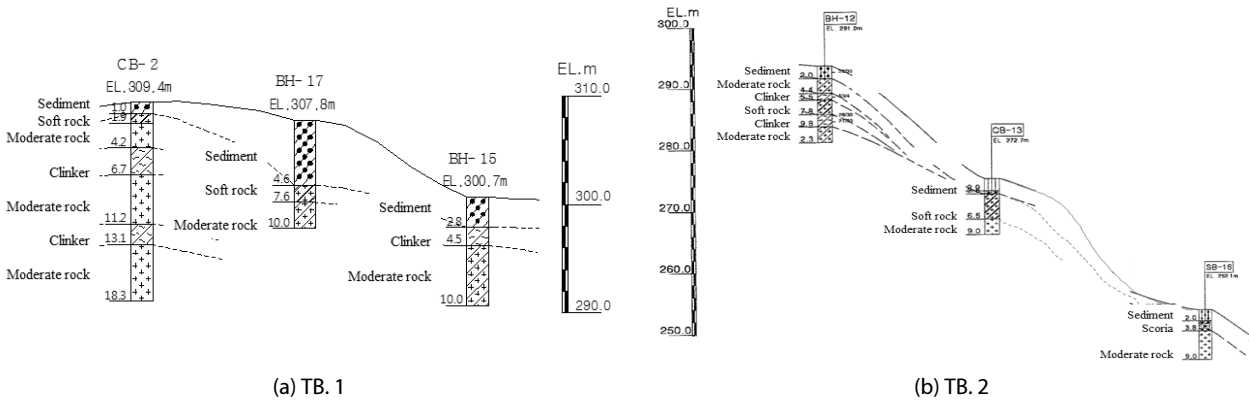


Fig. 5. Geological Profile of TB. 1 and TB. 2

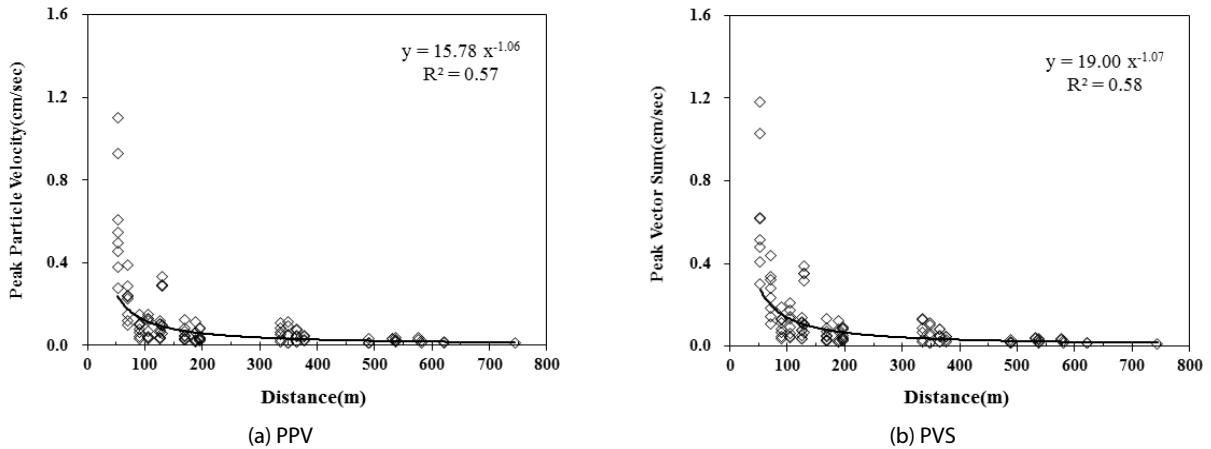


Fig. 6. Relationship between Distances and Velocities (PPV & PVS)

시추공 BH-12는 표층에 화산쇄설층 실트, 점토가 2.0 m 있고 이후 치밀한 보통암 2.4 m (TCR: 100 %, RQD: 100 %), 암층 경계부 파쇄대 클링커층 1.1 m(N치 50/4 회/cm), 소량의 기공이 있는 연암 2.3 m (TCR: 91 %, RQD: 76 %) 이후 다시 클링커층이 2.0 m(N치 26/30, 21/30 회/cm), 보통암 2.5 m (TCR: 98 %, RQD: 94 %)로 조사되었다. 시추공 BH-15는 표층에 화산쇄설층이 2.8 m(상부에 실트, 점토가 0.6 m, 반고결 상태로 암편상-단주상 코아가 소량회수된 스크리아층이 2.2 m) 있고 이후 암층 경계부 파쇄대 클링커층 1.7 m(N치 14/30, 50/7 회/cm), 치밀한 보통암 5.5 m (TCR: 100 %, RQD: 100 %)로 조사되었다. 시추공 BH-17은 표층에 실트, 모래, 자갈이 혼재된 화산쇄설층이 4.6 m로 비교적 깊고 이후 소량의 기공이 있는 연암 3.0 m (TCR: 96 %, RQD: 88 %), 치밀한 보통암 2.4 m (TCR: 100 %, RQD: 100 %)로 조사되었다.

Fig. 5의 지층단면도 상에서 시추공 CB-2, BH-12, BH-15에서는 암반층 사이에 클링커층이 1회 또는 2회 출현하고 층의 두께가

1.1~2.5 m 사이에 형성되어 있어 층서적으로 불규칙한 분포 특성을 보이고 있다. 그리고 클링커층이 없는 것으로 조사된 CB-13, SB-16, BH-17은 지표에서 가까운 심도에 암반층이 4 m 이상 출현 하면서 시추조사를 마무리한 것으로 보이나 제주도의 생성기원에 의해 암반층 하부에서는 클링커층이 출현할 것으로 판단된다.

5. 지반진동 분석

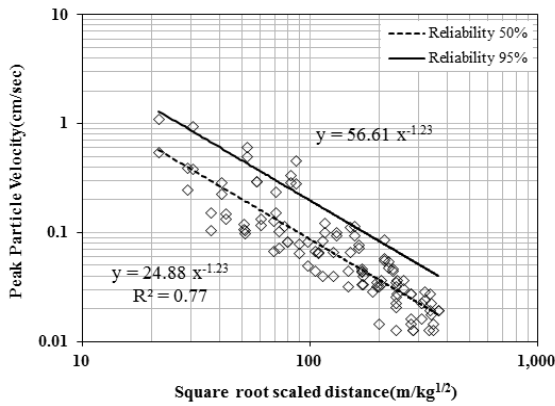
5.1 지반진동추정식 도출

지반진동추정식은 TB. 1과 TB. 2의 데이터를 합하여 산정하였다. 8회 70공의 시험발파가 이루어진 TB. 1에서는 68개의 데이터, 8회 76공의 시험발파가 이루어진 TB. 2에서는 40개의 데이터가 취득되어 총 108개의 데이터가 활용되었다. TB. 2의 경우 폭원으로 부터 거리가 먼 계측기에서 결측이 많이 발생 되었다.

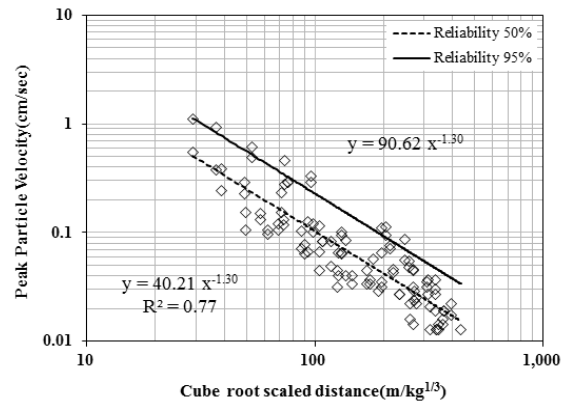
Fig. 6은 폭원으로부터 거리에 따른 지반진동속도 PPV (Peak Particle Velocity) 및 PVS (Peak Vector Sum)의 관계를 보여주고

Table 3. Prediction Equations of Ground Vibration

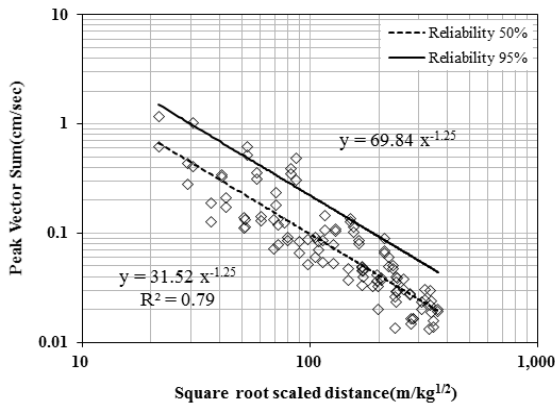
| Vibration velocity | Scaled distance | R ² | S.E | Prediction equations of ground vibration | Reliability |
|--------------------|-----------------|----------------|-------|--|-------------|
| PPV | SRSD | 0.768 | 0.217 | $V_{50\%} = 24.88 (SD)^{-1.23}$ | 50 % |
| | | | | $V_{95\%} = 56.61 (SD)^{-1.23}$ | 95 % |
| | CRSD | 0.774 | 0.215 | $V_{50\%} = 40.21 (SD)^{-1.30}$ | 50 % |
| | | | | $V_{95\%} = 90.62 (SD)^{-1.30}$ | 95 % |
| PVS | SRSD | 0.787 | 0.210 | $V_{50\%} = 31.52 (SD)^{-1.25}$ | 50 % |
| | | | | $V_{95\%} = 69.84 (SD)^{-1.25}$ | 95 % |
| | CRSD | 0.788 | 0.209 | $V_{50\%} = 50.67 (SD)^{-1.32}$ | 50 % |
| | | | | $V_{95\%} = 111.86 (SD)^{-1.32}$ | 95 % |



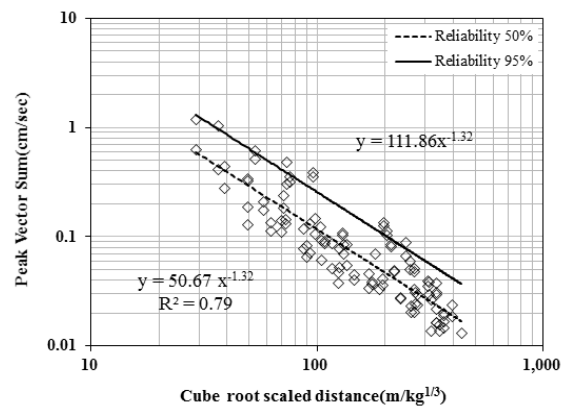
(a) PPV/SRSD



(b) PPV/CRSD



(c) PVS/SRSD



(d) PVS/CRSD

Fig. 7. Ground Vibration Velocity according to Scaled Distance

있다. 동일거리에서 지반진동속도 PVS가 PPV 보다 조금 높은 수준으로 확인되며, PPV와 PVS 모두 폭원으로부터 거리가 멀어질 수록 거듭제곱형태로 지반진동이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 폭원과 계측기들과의 거리도 개략적으로 파악할 수 있다.

신뢰도 50 %와 95 %에 대한 지반진동추정식들은 Table 3과 같이 추정되었다. 지반진동속도 PPV에 대한 SRSD와 CRSD 추정식을 구하고 지반진동속도 PVS도 동일한 방법으로 각각 구하여 비교하였다. 그 과정은 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

5.2 지반진동 성분 분석

지반진동의 세 가지 성분인 진행성분(Longitudinal component, V_L)과 수직성분(Vertical component, V_V) 그리고 접선성분(Transverse component, V_T)에 대한 지반진동추정식(신뢰도 95%)을 구하여 Fig. 8과 같이 성분별 지반진동 전파특성을 파악하고, 시험지 지반진동의 탁월 성분을 확인하였다.

지반진동속도 추정 시 환산거리 방식으로 구분된 Fig. 8(a) SRSD와 Fig. 8(b) CRSD에서 보이는 세 가지 성분(V_L , V_V , V_T)의 지반진동 감쇠 양상은 유사한 것으로 확인되었다. 진동속도의 크기는 진행성분 $V_L >$ 접선성분 $V_T >$ 수직성분 V_V 순으로 나타났다. 이는 진동원으로부터 일정한 거리가 떨어진 지점에서는 전달된 파동에 의해 수직 변위가 지표에서 발생한다. 이때 P파(Primary wave, Compressional wave)가 가장 빠른 전달속도로 먼저 도달하고 다음이 S파(Secondary wave, Shear wave), R파(Rayleigh wave)의 순서로 도달한다는 기존 연구내용(Ryu, 2014)과 다르지 않다.

그리고 성분별 지반진동의 감쇠는 $V_V > V_L > V_T$ 순으로 파악되며, 이는 시점의 진동속도가 동일하다고 가정했을 때 기울기의 차이로

확인해 보면 명확히 알 수 있다. 진동 성분별로 V_V 와 V_L 은 근거리에서는 감쇠가 유사하나 원거리로 갈수록 V_V 의 감쇠가 V_L 보다 커지는 것으로 확인되며, V_T 는 원거리로 갈수록 V_V 와 V_L 보다 감쇠가 작다는 것을 의미한다.

또한, Fig. 8을 통해 PPV를 이용한 현장의 지반진동추정식에 주된 영향을 미치는 진동속도 주요 성분은 P파 성분이 우세한 진행방향 성분 V_L 인 것으로 확인되었다.

5.3 지반진동 특성 분석

지반진동추정식들(신뢰도 95%)과 발파진동상수 $K=200$, 감쇠지수 $n=1.6$ 인 Guideline (G.L)을 비교하여 지반진동의 전파특성을 파악하였다. G.L에 위한 지반진동추정식은 국내 도로 건설현장에서 취득된 실제측자료를 이용하여 제시된 설계식이며 실제 시험 발파에 의한 현장의 지반진동추정식을 산정하기 전 단계에서는 국내 모든 노천 발파공사에 적용되고 있다.

비교를 위해 지발당 장약량을 1 kg으로 가정하여 환산거리(SD)를 적용하였다. 이 경우 Eq. (1)에서 알 수 있듯이 환산거리가 실제거리와 같아져 비교가 용이해 진다. 지반진동 특성을 비교한 결과는 Fig. 9 및 Table 4와 같다.

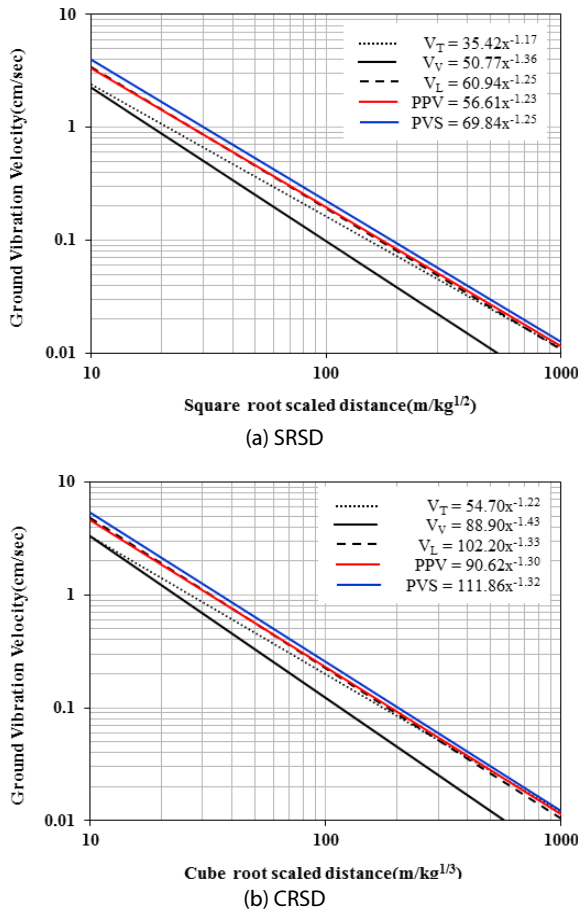


Fig. 8. Comparison of Three Components and Ground Vibration Velocity

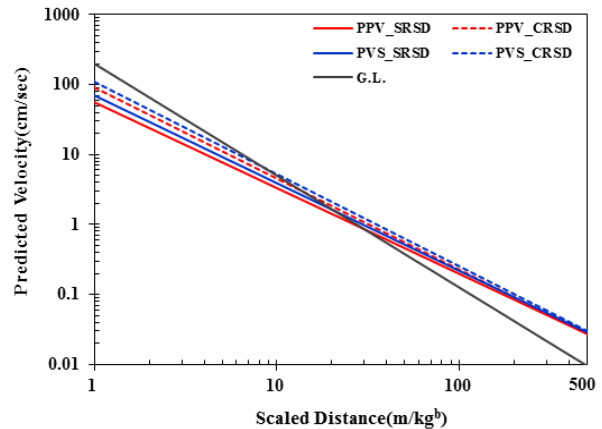


Fig. 9. Comparison of Ground Vibration Characteristics

Table 4. Comparison of Ground Vibration Characteristics according to SD

| SD | Clas. | PPV | | PVS | | G.L |
|-----|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | | SRSD | CRSD | SRSD | CRSD | SRSD |
| 1 | | 56.61 | 90.62 | 69.84 | 111.86 | 200.00 |
| 10 | | 3.33 | 4.54 | 3.93 | 5.35 | 5.02 |
| 20 | | 1.42 | 1.84 | 1.65 | 2.14 | 1.66 |
| 50 | | 0.46 | 0.56 | 0.53 | 0.64 | 0.38 |
| 100 | | 0.20 | 0.23 | 0.22 | 0.26 | 0.13 |
| 200 | | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.10 | 0.04 |

폭원과 근접한 SD=1의 경우 발파진동 상수 K만큼의 진동속도를 보여 진동속도의 크기는 G.L. > PVS_CRSD > PPV_CRSD > PVS_SRSD > PPV_SRSD 순으로 나타났다. SD=10에서는 PVS_CRSD가 가장 크고 그다음 G.L로 바뀌고 나머지는 순서는 동일하다. SD=20에서는 PVS_CRSD > PPV_CRSD > G.L. ≃ PVS_SRSD > PPV_SRSD 순을 보이고, SD=50부터는 PVS_CRSD > PPV_CRSD > PVS_SRSD > PPV_SRSD > G.L 순을 보이고 현장의 지반진동추정식들의 진동속도 차이가 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한, 지반진동추정식들의 감쇠지수 n의 절대값을 비교해 보면 G.L: 1.60 > PVS: 1.25 > PPV: 1.23 순이며 감쇠지수가 작을수록 지반진동의 감쇠가 작아 원거리로 진동을 더 멀리 전파하는 것으로 나타났다.

이처럼 G.L과 비교한 지반진동 특성은 약 SD=30 이내의 근거리에서는 지반진동의 크기가 작으나 원거리로 갈수록 지반진동의 감쇠가 적어 발파로 인한 진동에너지를 더 멀리까지 전달하는 것으로 파악된다. 제주 서부지역에서 실시된 시험발파의 지반진동 특성을 분석한 Yang et al.(2011)과 Kim and Lee(2016)도 같은 현상을 파악하였고 이는 제주지역의 현무암과 클링커층 층상구조 지반 특성과 무관하지 않은 것으로 분석하였다.

폭원 TB. 1과 TB. 2를 본 연구에서는 하나의 폭원으로 간주하였다. Fig. 3에서 계측기의 위치가 폭원을 중심으로 북서남동 방향에 위치하게 되며, Fig. 5의 지층단면도로부터 폭원을 기준으로 지반고가 북서고 남동저를 이루고 있어 지형의 고저에 의한 영향은 계측데이터의 취합으로 어느 정도 상쇄된 것으로 판단된다. 그리고 Fig. 5의 지층단면도에서 확인되는 바와 같이 본 시험지에서도 화산쇄설층인 클링커층이 1회내지 2회 층서적으로 매우 불규칙하게 출현하고 있다.

암반층과 암반층 사이에 혼재되어 있는 클링커층은 공극이 크고 밀실하지 않은 매질층으로 암반 내부로 전파되어야 하는 고주파의 발파에너지 탄성파를 저주파 형태로 바꿔 지반진동을 멀리까지 전달하는 역할을 하는 것으로 판단된다.

5.4 지발당 장약량 비교

지반의 진동 허용기준을 ‘도로공사 노천발포 설계시공지침’에서 제시하고 있는 주택 및 아파트의 최소치인 0.3 cm/s와 최대치인 0.5 cm/s 두 가지로 가정하고, 표준발파공법 II, III, IV, V별 설계 표준 지발당 장약량(kg)을 적용하여 지반진동추정식들(신뢰도 95 %)에 대한 ‘거리-지발당 장약량 조건표’를 작성하였다. G.L과 비교한 결과는 Fig. 10 및 Table 5와 같다.

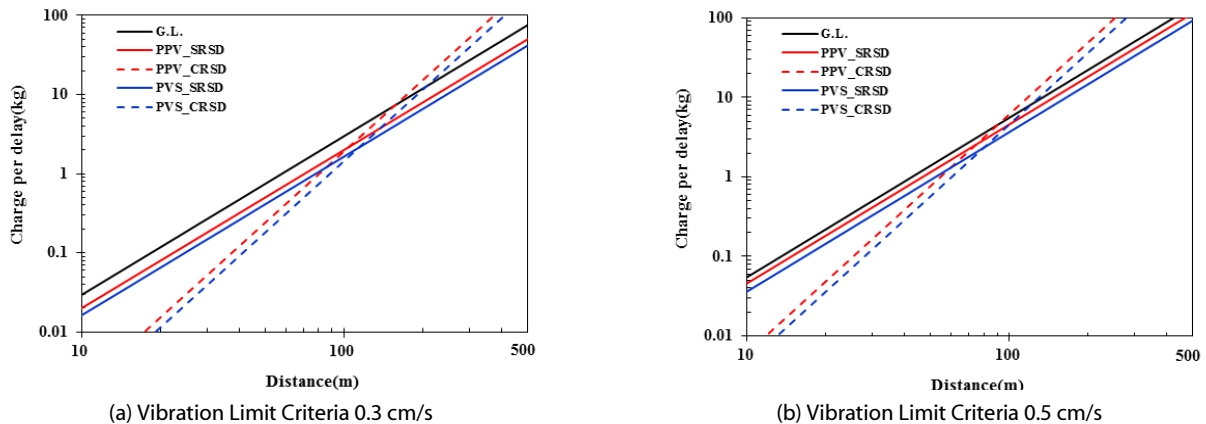


Fig. 10. Comparison of allowable Charge per Delay according to Distance

Table 5. A Chart for Distance according to Charge per Delay (SRSD)

| Type | Charge per delay kg | G.L | | PPV | | PVS | |
|-----------------------------------|------------------------|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
| | | m | % | m | % | m | % |
| Vibration limit criteria 0.3 cm/s | | | | | | | |
| II | 0.25 | 29.1 | 100 | 35.4 | 122 | 39.1 | 134 |
| III | 1.00 | 58.2 | | 70.8 | | 78.3 | |
| IV | 3.00 | 100.8 | | 122.7 | | 135.6 | |
| V | 7.50 | 159.4 | | 194.0 | | 214.4 | |
| Vibration limit criteria 0.5 cm/s | | | | | | | |
| II | 0.25 | 21.1 | 100 | 23.4 | 111 | 26.0 | 123 |
| III | 1.00 | 42.3 | | 46.8 | | 52.0 | |
| IV | 3.00 | 73.3 | | 81.0 | | 90.1 | |
| V | 7.50 | 115.8 | | 128.1 | | 142.4 | |

SRSD 또는 CRSD 방식에 따른 지발당 장약량은 함수관계에 의해서 하나의 교점을 가지게 되며, 교점에 준하여 근거리에서는 CRSD가 원거리의 SRSD가 보수적인 결과를 보인다(Choi and Won, 2010). 하지만 CRSD 방식의 경우 폭원과 측점 간 거리가 교점거리 보다 멀어지면 지발당 장약량이 기하급수적으로 증가하는 문제(Choi et al., 2010)를 가지고 있어 합리적인 적용에 한계가 있다.

Fig. 10에서와 같이 SRSD와 CRSD 방식의 지발당 장약량 교점은 진동 허용기준 0.3 cm/s에서는 거리 약 100 m, 0.5 cm/s에서는 약 80 m에서 확인된다. 그리고 Table 5에서 동일한 설계 표준 지발당 장약량에 대한 허용 거리는 진동 허용기준이 커지면 감소하는 것으로 확인되고, 진동 허용기준 0.3 cm/s에서는 G.L 대비 PPV는 22 % 크고 PVS는 34 % 크며, 허용기준 0.5 cm/s에서는 G.L 대비 PPV는 11 % 크고 PVS는 23 % 크게 나타났다.

PPV 및 PVS 지반진동추정식에 의한 표준발파패턴별 적용 이격 거리가 G.L 보다 멀다(Table 5). 즉 동일거리에서 허용되는 지발당 장약량이 작다는 의미(Fig. 10)가 되며, 이는 G.L에 비해 상대적으로 공당 압파쇄량이 작은 발파공법을 적용해야하는 보수적인 발파 설계가 된다. Table 5의 진동 허용기준 0.3 cm/s에서 지발당 장약량이 1 kg인 표준발파공법 III(소규모 진동제어발파)의 적용 이격거리를 비교해 보면 G.L: 58.2 m < PPV: 70.8 m < PVS: 78.3 m 순으로 나타났다. 이는 보안물건에서 산정된 거리까지는 지발당 장약량이 1 kg 이내의 발파를 실시해야 한다는 의미이다.

5.5 진동 주파수 분석

지반진동의 세 가지 성분인 접선성분(FT), 수직성분(FV), 진행 성분(FL)에 대한 주파수를 미광무국의 USBM RI 8507 (Siskind et al., 1980)에서 제시한 발파진동 주파수 도표 위에 Fig. 11과 같이 도시하였다. 세 성분의 주파수가 모두 5~30 Hz 사이의 저주파수 대역에 집중되어 있는 것으로 나타났다. 주파수 빈도가 80 % 이상 집중된 주파수 대역을 찾기 위해 Fig. 12와 같이

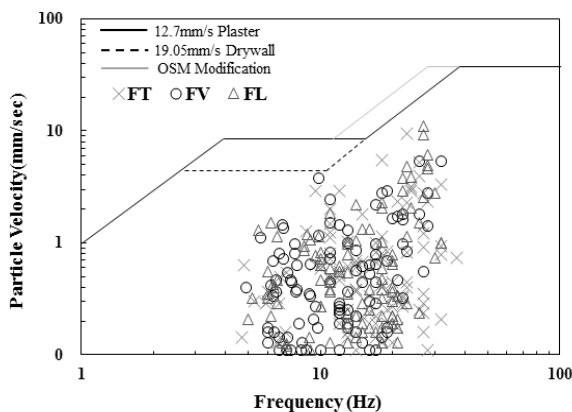


Fig. 11. Analysis of Vibrations Frequency

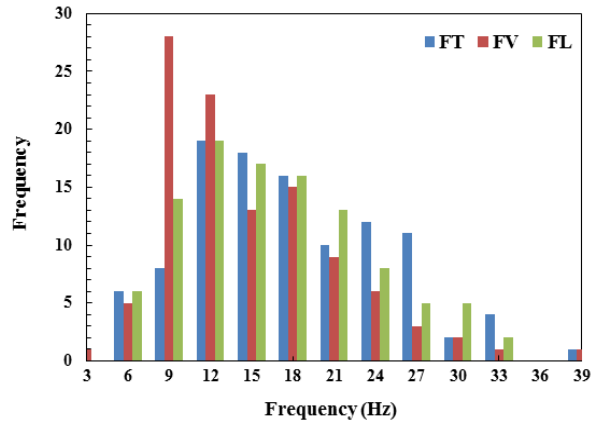


Fig. 12. Frequency Distribution

Table 6. Statistics of Frequency

| Division | FT | FV | FL |
|----------|------|------|------|
| Mean | 17.0 | 13.4 | 16.1 |
| Median | 16.0 | 12.0 | 15.0 |
| Mode | 27.0 | 12.0 | 18.0 |

도수분포표를 활용한 결과, FT와 FL은 10~12 Hz 사이에서 각각 19회의 가장 높은 빈도를 보였고 FV는 7~9 Hz 사이에서 28회의 빈도를 보였다. 그리고 FT는 10~27 Hz 사이에 80 %, FV는 7~21 Hz 사이에 82 %, FL은 7~24 Hz 사이에서 82 %의 빈도를 보여 주 주파수 대역이 저주파 특성을 보이는 것으로 판단된다. 또한, Table 6의 기술통계량에 의하면 세 성분의 주파수 중앙값은 FT : 16 Hz, FV : 12 Hz, FL : 15 Hz로 확인되었다.

이러한 결과는 제주지역의 지반진동에 대한 기존 연구결과 (Yang et al., 2011; Kim and Lee, 2016)와 유사하다. 이들은 내륙지역의 시험발파에서 보이는 80~100 Hz 내외의 일반적인 주파수 대역에 비해 매우 저주파수 특성을 보인다고 하였고, 그 원인으로 다공질 현무암과 암반층 사이에 혼재된 공극이 큰 화산쇄설층(클링커층)으로 인해 발파에너지 파형의 주기가 커져 주파수 대역이 저주파수 대역으로 나타나는 것으로 판단하였다.

그리고 Kim and Lee(2016)는 지반진동의 저주파수 특성은 10 Hz 전후의 고유주파수를 갖는 저층가속의 공진(Resonance)을 유발할 수 있고, 저주파 진동이 잠재적 사면블록의 질점운동을 유발시켜 사면파괴를 야기할 수 있기 때문에 지속적으로 발생하는 저주파 진동에 대한 주의를 요구하였다.

5.6 기반암에 따른 지반진동 특성 비교

본 연구에 의한 제주 남부지역 현무암과 클링커(Basalt & Clinker) 층상구조 지반에서의 지반진동 특성과 화강암(Granite),

편마암(Gneiss), 석회암(Lime stone)을 기반암으로 하는 내륙지역 지반에서의 지반진동 특성을 비교하였다.

내륙지역 3종의 기반암에 대한 진동상수 K, 감쇠지수 n은 Son et al.(2015)의 연구결과에서 터널발파를 제외한 벤치 발파 결과들 중 데이터 수가 100개 이상인 분석결과를 활용하였다. 동일한 비교를 위해 PPV를 이용한 SRSD 방식(신뢰도 95 %)의 결과들을 사용하였다.

Table 7은 기반암별 입지상수 K, n을 비교하였다. 기본적으로 지반진동추정식은 n의 절대값이 작을수록 지반진동 감쇠가 적어 진동이 멀리 전파되고, n의 절대값이 같으면 K값이 클수록 진동이 멀리 전파된다. 기반암별 n의 절대값은 G.L: 1.60 > 석회암: 1.50 > 화강암: 1.47 > 편마암: 1.39 > 현무암과 클링커: 1.23 순이다.

Fig. 13에서 지반진동의 감쇠 정도를 살펴보면 진동 감쇠는 n의 절대값이 큰 순서와 같다. 그리고 내륙지역 3종의 기반암들은 G.L 보다 더 큰 지반진동 값을 가지며 진동 감쇠도 작은 것으로 확인된다. 이는 G.L이 적어도 3종의 기반암에 대한 지반진동 보다 는 안전측에서 제시된 것으로 유추해 볼 수 있다.

하지만 표준 설계 지반진동추정식인 G.L은 현무암과 클링커층의 층상구조 지반과 같은 특이한 지반에서의 지반진동 감쇠 특성은 반영하지 못하는 것으로 판단된다. 따라서 제주지역과 같이 특이한 지반에 대해서는 별도의 설계 지반진동추정식을 개발하여 설계 시 반영될 수 있도록 하는 방안이 필요하다. 본 연구의 결과들이

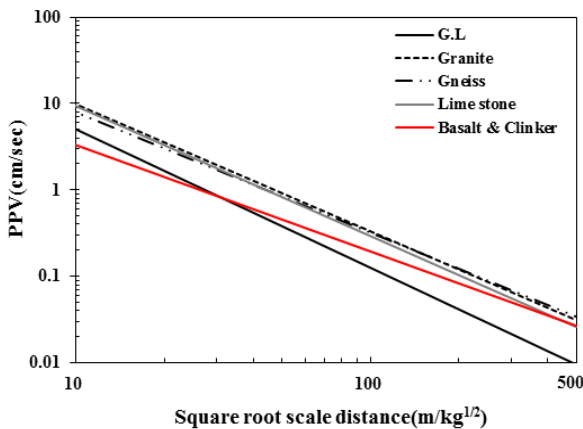


Fig. 13. Comparison of Ground Vibration Characteristics by Bedrocks

Table 7. Comparison of Blasting Vibration Constant K and Attenuation Index n by Bedrocks

| Test Blast | K | n | R ² | Data |
|------------------|-------|-------|----------------|------|
| G.L | 200.0 | -1.60 | - | - |
| Basalt & Clinker | 56.6 | -1.23 | 0.79 | 108 |
| Granite | 293.0 | -1.47 | 0.66 | 437 |
| Gneiss | 196.0 | -1.39 | 0.50 | 283 |
| Lime stone | 294.0 | -1.50 | 0.62 | 185 |

이를 위한 기초자료로 활용 가능할 것으로 사료된다.

그리고 3종의 기반암은 지반진동 특성이 매우 유사한 것으로 파악되나, 이 결과만으로 폭원 특성과 암반매질 특성이 유사할 것이라는 단편적인 유추에는 무리가 있다. 발파로 인한 지반진동은 제어 가능한 폭원 특성(폭약의 종류, 지발당 장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면의 수, 발파패턴 등)과 제어 불가능한 암반 특성(매질의 역학적 특성, 불연속면, 지층 특성 등) 및 입지 특성(기하학적 지형, 암석 기질 등)의 복합적인 메커니즘에 의해 결정되며 아직까지 이 요소들간의 관계 규명은 명확하지 않기 때문이다.

6. 결론

제주 남부지역의 현무암과 화산쇄설층(클링커층) 층상구조 지반에 대한 지반진동을 분석하였다. 지반진동추정식들을 도출하고 지반진동의 탁월 성분 파악하였으며, 지반진동의 전파 특성을 분석하고 주주파수 대역을 제시하였다. 그리고 3종의 기반암과 국내 설계지침(G.L)의 지반진동을 본 연구결과와 비교하였다.

- (1) 시험지의 지반진동추정식은 자승근 환산거리(SRSD) 방식에 의하면 $PPV: V_{95\%} = 56.61 (SD)^{-1.23} (R^2=0.77, S.E=0.22)$, $PVS: V_{95\%} = 69.84 (SD)^{-1.25} (R^2=0.79, S.E=0.21)$ 로 추정되었고, 삼승근 환산거리(CRSD) 방식으로는 $PPV: V_{95\%} = 90.62 (SD)^{-1.30} (R^2=0.77, S.E=0.22)$, $PVS: V_{95\%} = 111.86 (SD)^{-1.32} (R^2=0.79, S.E=0.21)$ 로 추정되었다.
- (2) PPV 지반진동추정식(신뢰도 95 %)의 성분별 진동속도 크기는 진행성분 $V_L >$ 접선성분 $V_T >$ 수직성분 V_V 순이며, 성분별 지반진동의 감쇠 크기는 $V_V > V_L > V_T$ 순으로 파악되었다. 현장의 PPV 지반진동추정식에 주된 영향을 미치는 진동속도 탁월 성분은 P파 성분이 우세한 진행방향 성분(V_L)인 것으로 확인되었다.
- (3) 지반진동 전파특성을 G.L과 비교한 결과, 환산거리(SD)=30 이내의 근거리에서는 지반진동의 크기가 작으나 원거리로 갈수록 지반진동의 감쇠가 적어 진동에너지가 더 멀리까지 전달하는 것으로 나타났다. 이는 암반 내부로 전파되어야 하는 고주파의 발파에너지 탄성파를 암반층 사이에 불규칙하게 혼재되어 있는 공극이 크고 밀실하지 않은 매질층인 클링커층이 저주파 형태로 바꿔 지반진동을 멀리까지 전달하는 역할을 하는 것으로 판단된다.
- (4) 진동 규제기준 0.3 cm/s에서 현장의 표준발파패턴별 이격거리는 G.L 대비 PPV는 22 %, PVS는 34 % 크며, 규제기준 0.5 cm/s에서는 G.L 대비 PPV는 11 %, PVS는 23 % 크게 나타났다. 동일한 지발당 장약량에 대한 허용 거리는 진동 규제기준이 커지면 감소하는 것으로 나타났다.

- (5) 각성분별 주 주파수 대역은 접선성분(FT) 10~27 Hz, 수직성분(FV) 7~21 Hz, 진행성분(FL) 7~24 Hz 사이로 나타나, 시험지의 주주파수는 7~24 Hz 사이의 저주파수 대역으로 확인되었다. 이처럼 저주파 특성을 보이는 이유는 공극이 큰 화산쇄설층(클링커층)으로 인해 발파에너지 파형의 주기가 커져 주파수 대역이 저주파수 대역으로 나타나는 것으로 판단하였다.
- (6) 기반암이 다른 내륙지역의 지반진동과 비교한 결과, 입지상수 K, n이 작아 지반진동의 크기는 작으나 상대적으로 감쇠율이 작은 지반진동을 멀리까지 전파하였다. 그리고 G.L은 적어도 3종의 기반암에 대한 지반진동을 포함하여 안전측에서 제시된 것으로 파악되나, 제주지역의 층상구조 지반과 같은 특이한 지반에 대한 지반진동 특성은 반영하지 못하는 것으로 판단된다. 따라서 제주지역과 같이 특이한 지반에 대해서는 지역 특성이 반영된 설계 지반진동추정식을 개발하여 설계 시 반영될 수 있도록 하는 방안이 필요하다. 본 연구의 결과들이 이를 위한 기초자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2018학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Choi, B. H. and Ryu, C. H. (2012). "Consideration on the relation between vibration level and peak particle velocity in regulation of ground vibration." *J. of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 1-8 (in Korean).
- Choi, H. B. and Won, Y. H. (2010). "Comparative study on the characteristics of ground vibrations produced from borehole blast tests using electronic and electric detonators." *J. of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering*, Vol. 28, No. 2, pp. 37-49 (in Korean).
- Choi, H. B., Ryu, C. H. and Jeong, J. H. (2010). "Consideration on limitations of square and cube root scaled distances in controled blast design." *J. of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering*, Vol. 28, No. 1, pp. 27-39 (in Korean).
- Jeju Provincial Government (JPG) (2000). *Geologic report of the seogwipo-hahyori sheet (Scale 1:50,000)*, pp. 50-51 (in Korean).
- Kim, S. H. and Lee, D. W. (2016). "Analysis of blasting vibration at the irregular layered structure ground." *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, Vol. 36, No. 5, pp.891-901 (in Korean).
- Koh, G. W. (1997). *Characteristics of the groundwater and hydrogeology implications of the Seogwipo formation in Cheju island*, Ph.D. Dissertation, Pusan National University, Pusan, Korea, pp. 39-61 (in Korean).
- Ministry of Construction Transportation (MOCT) (2006). *Blasting design and construction guidelines to road construction*, No. 11-1500000-001841-01 (in Korean).
- Ministry of Environment (ME) (2010). *A study on the correlation analysis between vibration level and vibration velocity*, pp. 6-9 (in Korean).
- Ryu, B. H. (2014). *Influence of delay time and priming location on the blast-induced ground vibration*, Ph.D. Dissertation, Chosun University, Korea, pp. 6-30 (in Korean).
- Siskind, D. E., Stagg, M. S., Kopp, J. W. and Dowding, C. H. (1980). *Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting*, Report of Investigations 8507, United States Bureau of Mines (USBM RI 8707), Pittsburgh, PA.
- Son, M. R., Ryu, J. H., Ahn, S. S., Hwang, Y. C., Moon, D. H., Park, D. H. and Moon, D. H. (2015). "Analysis on the characteristics of rock blasting-induced vibration based on the analysis of test blasting measurement data." *J. of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 16, No. 9, pp. 23-32 (in Korean).
- Yang, H. S., Kim, N. S., Jang, H. D., Kim, W. B., Ko, Y. H., Kim, S. J., Kim, J. G. and Moon, H. S. (2011). "Study on optimization of blast design for improving fragmentation in Jeju basalt rock area." *J. of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering*, Vol. 29, No. 2, pp. 89-99 (in Korean).