Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 36, No. 5: 891-901/ October, 2016
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2016.36.5.0891

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Construction Management **시공관리**

불규칙한 층상구조 지반에서의 발파진동 분석

김승현* · 이동욱**
Kim, Seung Hyun*, Lee, Dong Wook**

Analysis of Blasting Vibration at the Irregular Layered Structure Ground

ABSTRACT

By comparing test blasting data experimented in three layered-structure polymorphic grounds to a geological profile, influence of blast vibration with respect to uncontrollable ground characteristics was analyzed. Inefficient blast have been performed without sufficient verifications or confirmations because insufficiencies with regard to experiments and data of blasting engineering on the layered structures to be irregularly repeated clinker layer consisted of volcanic clastic zones. It is difficult to quantify N values of clinkers within test blasting region because they have diverse ranges, or coverages. An absolute value of attenuation coefficient N in a field, estimated by blasting vibration predictive equation (SRSD), are lesser than criteria of a design instruction, meaning that vibrations caused by blast can spread far away, and the vibrational characteristics of blasting test No.1, indicating relatively small values, inferred by the geological profile, pressures of gas by the explosion may be lost into a widely distributed clinker layers by penetrating holes resulted from blast into vicinity of clinker layers located in bottom of soft rock layers at the moment of blast. As a result, amounts of spalling rocks are decreased by almost half. Also, ranges of primary frequencies in the fields are identified as similar to those of natural frequency of typical structures.

Key words : Layered structures, Clinkers, Blasting vibration, Geological profile

초 록

측상구조를 갖는 다변성 지반에서 시행된 3개소 24회의 시험발파로부터 획득한 발파진동 데이터를 지층단면도와 연계하여 제어가 불가능한 지반 특성으로 인한 발파진동 영향을 분석하였다. 화산쇄설층인 클링커층이 불규칙하게 반복되는 층상구조에 대한 발파공학적 경험과 자료의 부족 등으로 충분한 검토가 이루어지지 않은 비효율적인 발파가 이루어지고 있다. 시험발파 지역 내 클링커층의 N값은 매우 다양한 범위로 나타나 정량화하기 매우 어렵다. 그리고 현장의 전체 발파진동 추정식(SRSD)은 감쇠지수 n의 절대값이 설계지침보다 작게 나타나 발파진동이 멀리 전파되었으며, 발파진동상수 K와 감쇠지수 n이 상대적으로 매우 작은 값을 보인 시험발파. 1의 진동특성을 지층단면도로부터 유추한 결과, 연암층 하부에 접한 클링커층 인근까지 발파천공이 진행되어 발파 시 하부에 넓게 분포하고 있는 클링커층으로 폭발 가스압이 손실되었을 것으로 판단된다. 이로 인해 암파쇄량도 절반정도로 감소하였다. 그리고 현장의 주주파수 대역은 일반적인 구조물의 고유 주파수 대역과 유사한 저주파수 대역으로 확인되었다.

검색어 : 층상구조, 클링커층, 발파진동, 지층단면도

* 제주대학교 토목해양공학과 박사과정 (Jeju National University · ksh@jejunu.ac.kr)
** 종신회원 · 교신저자 · 제주대학교 토목공학과 부교수 (**Corresponding Author** · Jeju National University · dwlee@jejunu.ac.kr)

Received April 21, 2016/ **revised** August 22, 2016/ **accepted** September 5, 2016

Copyright ⓒ 2016 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

발파는 발파진동, 발파소음, 파쇄암의 비산 등과 같은 공해를 필연적으로 수반하는 작업이지만 이는 또한, 많은 연구자들의 연구 대상이 되어 발파메커니즘 및 컴퓨터 모델링 기술, 화약류 성능에 대한 평가기술, 계측기술 분야 등에 기술적 성장을 가져오고 있다.

최근 제주지역에서는 국제자유도시 조성을 위한 정책적 지원에 힘입어 급격한 인구의 증가와 대형 자본이 유입되고 있어 종래에 없던 대규모 개발 사업이 그 어느 때보다 활발하지만, 제주지역의 지반에 대한 기술적 연구 및 검토가 매우 부족한 실정이다. 특히 대규모 건설공사에서 필연적으로 수반되는 토공사 시 경제성과 효율성을 동시에 만족시키기 위한 발파가 계획되고 실시되었지만, 제주지역의 다변성 지반특성 즉, 수십 차례에 걸친 화산분출에 의해 현무암층과 화산쇄설층인 클링커층 또는 스코리아층이 불규칙하게 반복되는 층상구조에서 발파특성에 대한 충분한 검토가 이루어지지 않아 분쟁과 같은 많은 문제들이 발생하고 있다.

이러한, 제주지역의 다변성 지반에서 발파진동과 관련된 연구에서 Yang et al. (2011)은 클링커층과 다공질 현무암의 불규칙적인 분포 특성으로 인해 발파 효율이 낮아 공사에 지장을 주고 있고, 시험발파 결과 효과적인 발파를 위한 비장약량은 0.40 kg/m^3~0.45 kg/m^3 정도는 되어야 할 것으로 판단하였다. 또한 굴착심도 내에 클링커층의 존재유무로 나누어 발파설계를 해야 한다고 하였다. Lee and Kim (2016)은 생성기원에 의해 현무암층과 클링커층이 불규칙하게 반복되는 층상구조인 다변성 지반에 대해 설명하고, 시험발파 결과를 국내 설계지침과 비교하여 평가하였다. 본 연구에서는 이 연구를 보다 더 세밀하게 보완하고 확장하였다.

발파와 관련하여 지반진동의 대표적인 특성인 진폭특성과 주파수특성(Persson et al., 1994)을 결정하는 요소에는 크게 두 가지가 있다(ISEE, 1998). 첫 번째는 폭원특성으로서 이는 지반진동을 일으키는 요인에 해당하는 소스(source)와 관련된 성질을 말한다. 두 번째는 암반특성으로서 이는 폭원이 일으킨 지반진동을 전달하는 매질, 즉 암반과 관련된 성질을 말한다. 폭원의 특성을 결정짓는 중요한 요소로는 폭약의 종류, 장약의 위치, 지발시간 및 순서 등이 있다. 암반의 특성을 결정짓는 중요한 요소로는 암반의 종류 및 상태, 전파경로 상의 불연속면의 상태 및 조건 등이 있다. 이와 같이 지반진동의 특성은 폭원과 암반, 즉 소스와 매질이라는 두 가지 요소의 특성에 의해 결정되며, 어느 한 가지에 의해 결정되는 성질이 아니다(Choi and Ryu, 2012).

폭원의 특성을 결정짓는 요인들은 인위적으로 제어가 가능한 범주로서 기술자의 역량에 의해 발파패턴을 응용함으로서 조절이 가능하지만, 발파 시 암반의 특성을 결정짓는 요인들은 제어가 불가능한 범주로 실제 시험발파에 의한 발파 진동 특성을 파악하기 전에는 예단하기 어렵다.

본 연구에서는 생성기원에 의해 불규칙한 층상구조를 가지고 있는 제주지역의 다변성 지반에서 시행된 3개소의 시험 발파 진동특성을 동일 사업지구의 지층단면도와 연계하여 다변성 층상구조로 인한 발파진동추정식의 발파진동상수 K와 감쇠지수 n에 대한 영향과 발파진동 주파수 그리고 발파의 목적인 암파쇄에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 발파진동 추정식

국내의 발파 관련 연구는 1990년 이후부터 한국지질자원연구원을 중심으로 국가차원에서 전략적으로 육성 지원하였으며 해외의 연구내용을 많이 차용하고 있는 상태이나, 국내 실정에 맞는 성과를 도출하기 위한 연구가 꾸준히 진행 중이다.

현행 국내의 노천발파 설계는 건교부(2006)의 『도로공사 노천발파 설계·시공 지침』에 의해 설계가 이루어지고 있으며 설계발파진동 추정식을 Eq. (1)과 같이 제시하여 설계단계에서 발파영향권, 시험발파 및 본 발파에 이루기까지 비교적 상세한 가이드라인을 제시하였다. 시험발파에 의한 30개 이상의 발파진동 계측결과를 분석하여 현장여건을 반영한 신뢰도 95% 수준의 발파진동 추정식을 Eq. (2)로부터 도출하여 발파영향권을 분석하고 이격거리별 표준발파패턴과 응용패턴을 제시하여 적용하도록 하고 있다.

$$V = 200\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.6} \tag{1}$$

$$V = K\left(\frac{D}{W^b}\right)^n = K(SD)^n \tag{2}$$

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

거리와 지발당 장약량의 관계로부터(D/W^b)를 환산거리(Scaled Distance, SD)라고 하며 b의 값이 1/2이면 자승근 환산거리(Square root scaled distance, SRSD), 1/3이면 삼승근 환산거리(Cube root scaled distance, CRSD)라 한다. 일반적으로 근거리에서는 삼승근 환산거리가, 그리고 원거리에서는 자승근 환산거리가 잘 맞는 것으로 알려져 있다.

발파진동상수 K와 감쇠지수 n은 정량적으로 평가할 수 없는

인자에 의한 영향을 대표하는 값으로, K는 발파부지와 인접구조물의 기하학적 형태 그리고 대상암반의 지질학적 특징 및 역학적 특징을 나타내는 정수이고 n은 발파조건에 따르는 상수로 폭약의 종류, 장약량, 기폭방법. 전색상태, 자유면수, 발파유형, 폭원과 측점간의 거리를 나타내는 지수를 말한다(Kang, 2014).

그리고 n값의 절대값이 같을 때 발파진동상수 K값이 커질수록 동일한 설계에서는 진동이 멀리 전파된다고 하였으며(Yang et al., 2011), K값은 거리가 길어질수록, 폭원의 위력이 커질수록 증가하는 경향을 보인다고 하였다(Kang, 2014).

3. 실험지역의 지반 특성

3.1 지형 · 지질

제주도는 신생대 제3기말~제4기초까지 수십 회에 걸쳐 일어난 화산활동에 의해 초기에는 유동성이 작은 조면암의 분출로 종상화산이, 후기에는 유동성이 큰 현무암의 분출로 순상화산이나 용암대지가 만들어졌으며 형성시기가 비교적 젊고 개석(開析)의 정도가 얼마 되지 않아 화산원지형이 잘 보존되어 있다.

동서 길이는 74 km이고, 남북은 32 km로 면적은 1,829 km^2이다. 제주도 중앙부에는 1,947 m 높이의 한라산이 있고 화산 활동이 정지된 후 그 주변의 틈으로 분출 생성된 360여개의 기생화산(제주방언: 오름)이 한라산 주변에 분포해 있다. 한라산을 정점으로 동서사면은 5~9%의 완만한 경사이고, 남북사면은 9~12%의 약간 급한 사면으로 형성되어 전체적으로 순상화산에서 흔히 볼 수 있는 아스피테(Aspite)형이다(Kim, 2007).

제주지역의 암반은 화산활동에 의한 용암분출로 형성된 화산분출암과 화산폭발에 의해 형성된 화산쇄설암이 있으며, 용암과 용암 사이에 퇴적암도 나타난다. 시추조사에 의하면 제주도 동부는 해수면 하부로 150 m까지, 서부지역은 해수면 하부 50~70 m까지 현무암이 차지하고 있고, 그 밑으로는 서귀포층과 미고결퇴적층(U층)이 더 깊은 곳에는 중생대 화강암과 용결응회암(Welded tuff)이 분포하고 있다. 화산분출암으로는 현무암, 조면현무암, 현무암질 조면안산암, 조면안산암, 그리고 조면암이 있으며, 현무암류는 침상장석감람석현무암, 반상휘석현무암, 비현정질현무암, 장석현무암 등으로 나타나며 이들은 제주지역 전체면적의 90%이상을 점유하고 있다. 또한 지표의 토양은 고기층에서 풍화 · 침식 · 퇴적 작용에 의한 풍화토보다는 현무암에서 기원된 화산회토로 구성되어 있어 배수성이 좋다.

본 연구의 시험발파 지역은 제주특별자치도 서귀포시 안덕면 일원이며, 기반암의 특징을 파악하기 위해 한국지질자원연구원 지질정보시스템에서 제공하는 지질도를 확인한 결과 Fig. 1과 같이 후기 화산활동시기 화산암인 왕이매조면현무암(QwBT)으로 조사

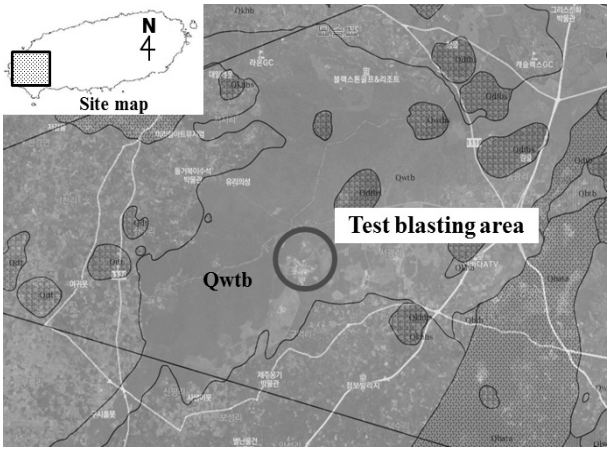


Fig. 1. Geologic Map of Blasting Test Area

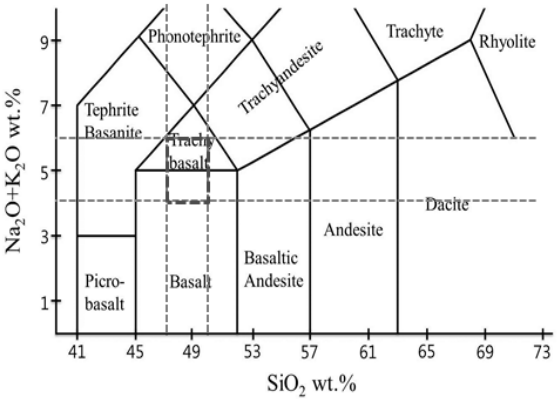


Fig. 2. Classification of the Basalt According to TAS Diagram

되었다.

왕이매조면현무암(QwBT)은 회색 내지 암회색이며, 이 암석은 일반적으로 치밀 견고하고 부분적으로 기공이 함유되어 있는데, 대부분은 길게 신장되어 있고 반정으로는 2~3 mm 크기의 감람석이 10 cm^2의 단위면적에 5~10개 정도 분포하는 특징이 있다. 화학적 조성은 SiO_2는 47.5wt%~49.90wt%, Na_2O는 2.76wt%~3.75wt%, K_2O는 1.07wt%~2.01wt%의 범위이고 Na_2O+K_2O는 4.07wt%~5.76wt%의 범위에 해당한다(Park et al., 2000). SiO_2와 Na_2O+K_2O의 조성비를 이용한 화산암류 분류법인 TAS도(Total Alkali-Silica diagram; Le Maitre, 1984)에 도시한 결과는 Fig. 2와 같이 현무암내지 조면현무암으로 분류되었다.

3.2 불규칙한 층상구조 지반

제주지역의 지반 특성은 내륙 지반과는 다르게 화산활동으로 인한 화산쇄설물 등의 퇴적물들이 암층 사이에 분포하는 층상구조를 가지고 있다. 즉 화산이 분출되어 흐른 마그마에 의해 형성된

화산암층 위에 오랜 시간 동안 화산쇄설물 등 퇴적물이 쌓이고 그 뒤에 다시 화산이 분출되어 퇴적물 위에 화산암층이 형성된 경우로서 암반층과 암반층 사이에 퇴적층이 놓이게 되는 층상구조를 나타내고 있다(Koh, 1997).

이러한 퇴적층 즉, 화산쇄설층이 암반층과 암반층 사이에 불규칙하게 반복적으로 혼재돼 있어 다양한 형태의 층상구조를 이루고 있기 때문에 동일지역에서도 지층변화에 대한 예측이 매우 어렵고, 지반 공학적 특성 또한 내륙부의 지반과는 달라 해석 시 주의가 요구된다.

또한, 화산쇄설층을 이루고 있는 클링커(Clinker) 또는 스코리아(Scoria)층의 층상구조는 수차례의 화산활동에 의한 결과이며, 제주지역의 층상구조에 의한 다변성 지반 특성을 파악하기 위해서는 클링커와 스코리아의 특성 대한 이해가 필요하다. Fig. 3은 시험발파지역 인근에 위치한 석산의 절개지에서 육안으로 확인한 지반의 층상구조이며, 층상구조로 이루어진 제주지역의 다변성 지반 특성을 보여주고 있다. 종종 클링커층과 암반층의 경계면에 스코리아층이 출현하기도 한다. Fig. 4는 시험발파 현장에서 시행된 시추조사

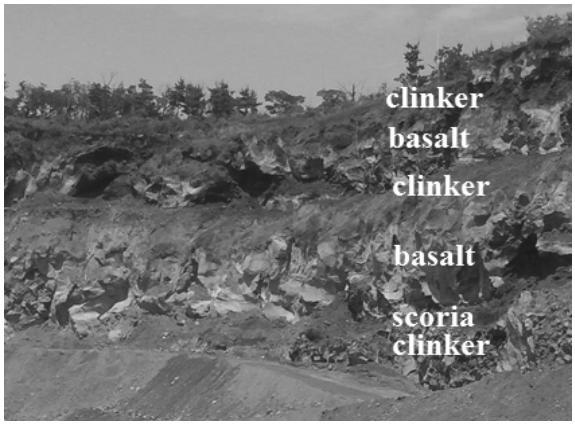


Fig. 3. Layer Structure in Jeju

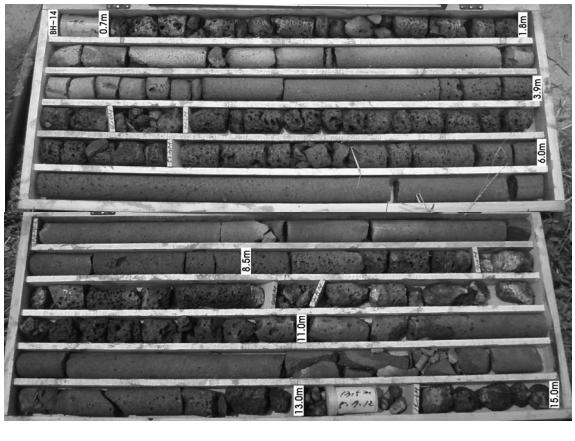


Fig. 4. Core Drilling Box of Polymorphic Ground

의 코아 박스이며, 산화되어 갈색 계열의 색을 띠고 있는 클링커층이 암반층과 암반층 사이에서 나타나고 있다.

화산활동으로 분출된 용암이 서서히 식어 고결되면 암반을 형성하게 되는데, 차가운 공기 또는 지표면과 접하는 상·하단 경계부에서는 용암이 급격하게 냉각되면서 파쇄 된다. 이들 파쇄구간을 클링커(Clinker)라 한다. 따라서 클링커층은 대부분 암반층과 접하면서 나타나고 암반층에 비해 역학적 특성이 매우 불량한 상태이나, 암반이 오랜 시간 풍화되어 형성되는 풍화암과는 상이한 층이다. 파쇄가 심한 구간은 자갈 형태로 나타나고 부분적으로 암층과 연속체를 형성하면서 풍화암 정도의 역학적 특성을 나타내기도 하지만, 인접지점에서도 형태의 차이를 보인다. 또한, 고결되는 용암의 말단부 또는 상·하단 경계부에 불규칙하게 형성되므로 대부분 수평적 연속성이 미약하고, 암반층과 암반층사이에 나타나면서 불규칙한 층서를 이룬다. 그리고 클링커층은 다른 화산쇄설물들과 같이 혼재된 상태로 나타나기도 하고, 층의 높이가 수 미터에 이르기도 한다.

Fig. 5는 시험발파가 이루어진 현장에서 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)에 의한 클링커층의 N치 값으로서, 2회/30 cm~50회/5 cm 범위를 나타내고 있는데, 암괴로 구성된 구간은 시험이 실시되지 않았다. 측정된 N값은 암편들 간의 공극 차이에 따라 매우 높은 값을 나타내거나 매우 낮은 값으로 측정되기도 하므로 표준관입시험에 의한 N값으로부터 이론적·경험적인 방법으로 클링커층의 역학적 특성을 정량화하기에는 무리가 있다.

스코리아(Scoria)는 화산이 폭발할 때 고체 상태로 분출되는 물질인 화산쇄설물의 일종으로 마그마가 대기 중으로 방출되어 그 속의 휘발성 성분이 빠져나가 많은 기공(氣孔)이 생긴 것으로, 부석(浮石)보다 다소 무겁고, 염기성 또는 중성의 마그마에서 유래된다. 주성분은 $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$의 함량이 70~80%에 달하고 또한 쇄설물의 안식각이 커 30~40°의 지형을 이루는 것이 특징이며, 크기는 약 6 cm 이하이고 제주지역에서는 '송이'라 부른다.

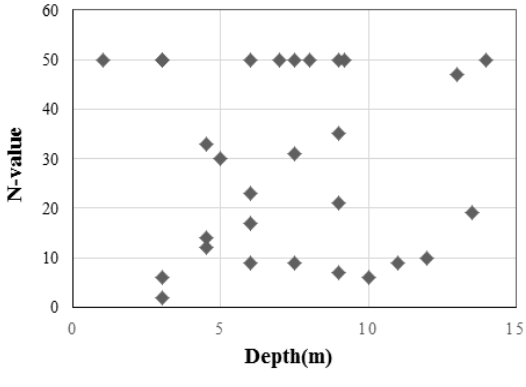
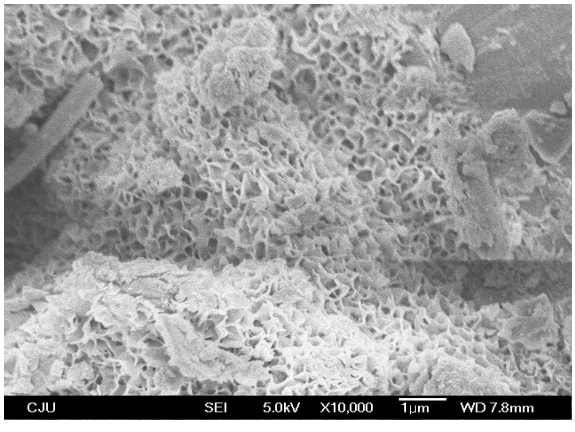


Fig. 5. Clinkers N-value by the SPT

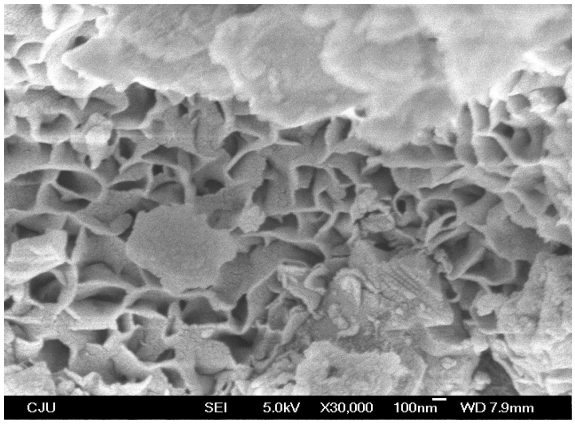
또한 스코리아는 지역에 따라 조금씩 차이를 보이고 있으나, 색깔에 따라 적갈색(Redish-Brown), 황갈색(Yellow-Brown), 흑색(Black) 및 암회색(Dark-Grey)의 4가지로 크게 분류하며, 이들은 화학적 조성과 공학적 특성에서 차이를 보이고 있다. 내화도는 1120~1210°C이고, 흡수율은 17.7~32.5%로 높은 흡수율을 보이며, 마모율은 47.3~67.2%로 일반 자갈이나 모래에 비해 매우 높다. 단위중량은 0.65 g/cm^3~0.75 g/cm^{3}의 범위이고, 스코리아의 기공 내 수분함유량에 기인하는 절대건조비중은 1.31~1.90의 범위를 보이며, 표면 건조 비중 1.85~2.45이다(Youn, 1995).

스코리아의 표면을 장방출주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM)으로 비교적 배율을 높여 ×10,000, ×30,000로 촬영하고 관찰한 결과는 Figs. 6(a) and 6(b)에서와 같이 표면이 매우 거칠며 날카롭고, 아주 조밀한 기공부터 비교적 넓은 기공까지 다량의 기공을 가지고 있다.

Nam et al. (2003)은 스코리아(송이)에 대한 역학적 특성을 연구하여, 삼축압축시험을 통해 송이의 내부마찰각은 26.8~37.8° 사이이고 탄성계수가 사질토에 비해 작고 파괴 시 변위가 많이 발생하는 것을 송이의 역학적 특성으로 보았다. 그리고 SiO_2는 원자구조가 사면체구조를 띠며 Al_2O_3와 Fe_2O_3는 팔면체구조를 갖는다. 일반적으로 사면체구조는 결합성이 양호하고 그 양이 많을수록 안정된 결합구조를 보인다고 할 수 있으며, 이들 결합구조에 팔면체구조가 많이 함유될수록 불안정한 결합을 하게 된다(Lambe and Whitman, 1979)는 연구결과를 송이 대한 내부마찰각으로 입증하여, SiO_2의 함량이 많을수록 내부마찰각이 커지고 Al_2O_3와 Fe_2O_3의 함량이 많을수록 내부마찰각이 작아지는 경향을 파악하였다.



(a) ×10,000 Magnification



(b) ×30,000 Magnification

Fig. 6. FE-SEM Observations

4. 시험발파 및 발파진동 분석

4.1 실험방법

본 시험발파 위치는 제주 서부지역에 위치한 현장으로서 인근 보안물건의 영향범위를 고려한 3개의 시험발파(BT. 1, 2 3) 위치에서 각각 8회의 발파를 실시하여 총 24회의 시험발파를 진행하였으며, 발파진동 계측을 위하여 11기의 계측기를 설치하였다. 시험발파는 Fig. 7과 같이 구성되었으며, 시험발파 폭원으로부터 각 계측기까지의 이격거리는 BT. 1의 경우 최소 50 m에서 최대 580 m이고 BT. 2의 경우 최소 50 m에서 최대 800 m이며, BT. 3의 경우 최소 40 m에서 최대 1,000 m이다.

시험발파는 표준발파공법 Ⅱ(정밀진동제어발파), Ⅲ(소규모진동제어발파), Ⅳ(중규모진동제어발파), Ⅴ(일반발파)를 적용하였으며 시험발파 제원은 Table 1과 같다. 그리고 시험발파 수행순서는 BT. 1 : 정밀진동제어발파(10공→6공) → 소규모진동제어발파(10공→6공) → 중규모진동제어발파(10공→6공) → 일반발파(6공→10공), BT. 2, 3 : 일반발파(10공→6공) → 중규모진동제어발파(10공→6공) → 규모진동제어발파(10공→6공) → 정밀진동제어발파(10공→6공)의 순으로 진행되었으며, 일반발파는 발파 시 클링커층을 피하기 위해 응용패턴-1을 적용하여 천공장 4.5 m로 경사천공(70°)을 실시하였다.

발파진동의 영향요인인 지반조건을 확인하기 위해 시험발파 현장의 지반조사보고서를 검토하였다. Fig. 8의 지층단면도(Section

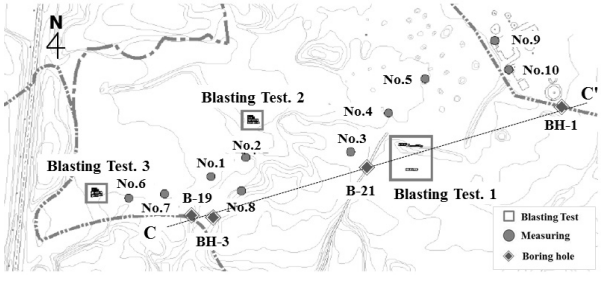


Fig. 7. Composition of Blasting Test

Table 1. Specifications of Blasting Test

Type	Blast Orders			Charge per delay (kg)	Powder factor (kg/m^3)	D×S×B (m)	Explosive	Remark
	BT.1	BT.2	BT.3					
Ⅱ	1	4	4	0.25	0.25	2.0×0.8×0.7	Emulsion (New Emulite 150)	
Ⅲ	2	3	3	0.96	0.35	2.7×1.2×1.0		
Ⅳ	3	2	2	3.00	0.33	3.4×1.9×1.6		
Ⅴ	4	1	1	5.00	0.35	4.5×2.1×1.8		Applied pattern-1

*Type : Standard Blast Pattern, BT : Blasting Test, D : Drilling length(m), S : Spacing(m), B : Burden(m)

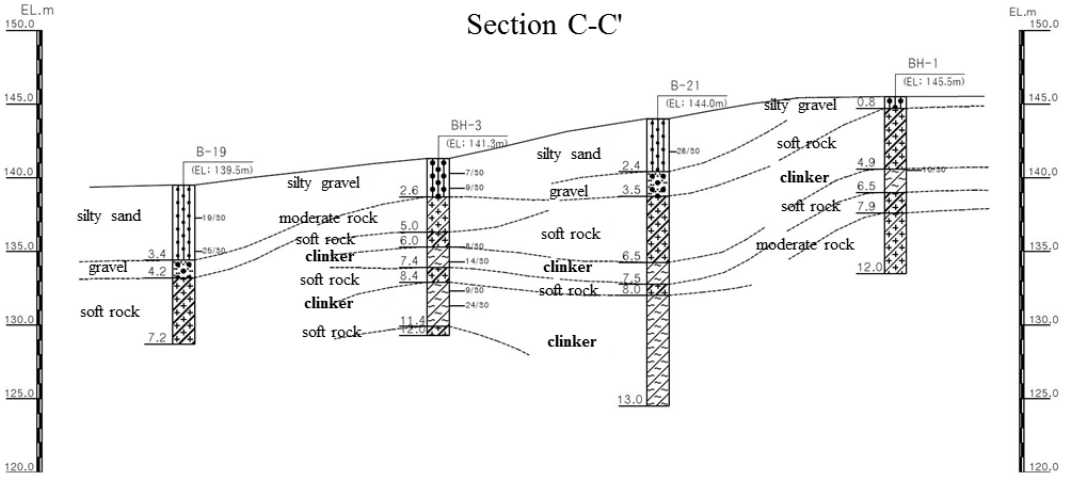


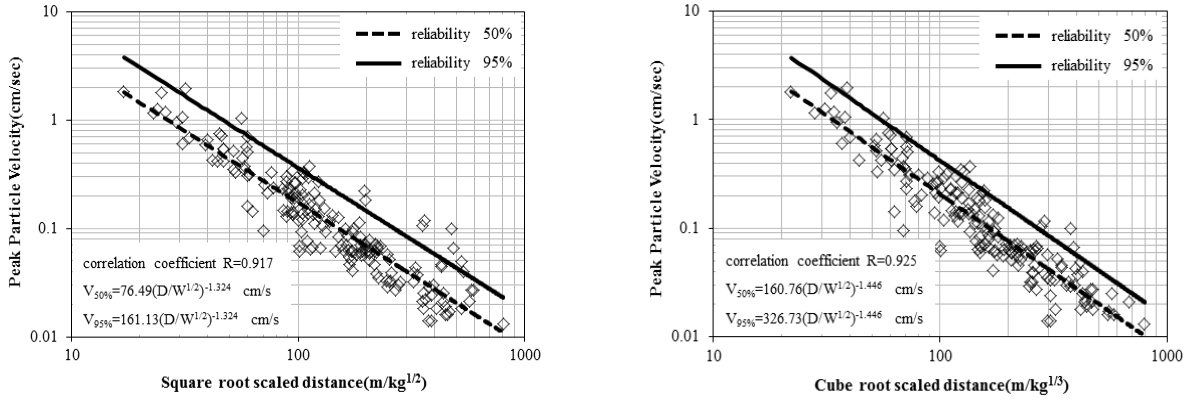
Fig. 8. Geological Profile (C-C′)

C-C′)를 시험발파 지역의 대표 지층단면으로 설정하여 검토한 지반특성은 시추주상도 B-19에서는 표층에 실트질모래가 3.4 m를 이루고 있고 자갈층이 0.8 m 형성되어 있으며 이후 연암층이 형성되어 있다. 시추주상도 BH-3은 표층에 실트섞인자갈층이 2.6 m를 이루고 이후 보통암 2.4 m (TCR: 83%, RQD: 80%), 연암 1.0 m (TCR: 55%, RQD: 20%)가 형성되어 있고 클링커층 1.4 m, 연암 1.0 m (TCR: 90%, RQD: 30%) 이후 다시 클링커층이 3.0 m 형성되고 이후 연암(TCR: 83%, RQD: 60%)으로 형성되어 있다. 시추주상도 B-21은 실트질모래 2.4 m, 자갈층 1.1 m 이후 연암이 3.0 m 형성된 이후 클링커층 1.0 m, 연암 0.5 m 형성된 이후 다시 클링커층이 5.0 m이상 깊게 형성되어 있다. 그리고 시추주상도 BH-1은 실트섞인자갈층이 0.8 m로 얕게 형성되어 있고 연암 4.1 m (TCR: 83%, RQD: 75%) 이후 클링커층 1.6 m, 연암 1.4 m (TCR: 85%, RQD: 60%) 후 보통암(TCR: 90%, RQD: 85%)이 형성되어 있다. 결과적으로 시추공 B-19를 제외하고 나머지 시추공에서 클링커층이 확인되었으며 심도 13 m이내에서 1회 또는 2회가 출현하고 층의 두께가 1.0~5.0 m이상으로 형성되어 있어 층서적으로 매우 불규칙한 분포 특성을 보이고 있다.

4.2 현장의 발파진동 추정식

시험발파 현장 내 3개의 장소에서 24회에 걸쳐 시행된 시험발파를 통해 얻어진 총 177개의 발파진동데이터를 전산 처리한 결과, 자승근 환산거리(SRSD)를 적용한 경우 $V_{95\%} = 161.13(SD)^{-1.324}$(상관계수 R: 0.917, 표준오차 S.E: 0.197)로 신뢰수준 95%에서 추정되었고, 삼승근 환산거리(CRSD)를 적용한 경우는 $V_{95\%} = 326.73(SD)^{-1.446}$ (R: 0.925, S.E: 0.188)로 신뢰수준 95%에서 추정되었다. Figs. 9(a) and 9(b)는 진동데이터를 SRSD와 CRSD로 처리한 결과이다.

발파진동 추정식의 SRSD와 CRSD의 선택 문제와 관련하여 Siskind (2000)는 발파진동의 수준을 실무적으로 예측하는 데에는 SRSD나 CRSD 어느 쪽을 사용해도 무방하다고 보았으며, Snodgrass and Siskind (1974)는 특정 현장에 적합한 것이라면 이들 두 가지 방법 외에 어떠한 추정식을 사용하여도 좋은 것으로 보았다. 따라서 수식을 사용하여 진동수준을 예측하는 문제는 어떠한 추정식을 사용하느냐의 문제라기보다는 주어진 추정식을 사용했을 때 나타나는 결과의 산포도, 곧 적합도가 얼마나 높으냐의 문제라 할 수 있다(Siskind, 2000). 일반적으로 국내에서는 계측자료를 SRSD 및 CRSD 기법으로 처리하여 각각의 전파식을 구한 후 그 가운데 적합도가 높은 식을 대상지역에서의 진동수준 예측식으로 채택하



(a) SRSD (b) CRSD

Fig. 9. Blast Vibration Data Processing Results

Table 2. Vibration Predictive Equations(SRSD, Reliability 95%)

Blasting Test	Vibration Predictive Equations	R	S.E	Events
BT. All	$V_{95\%} = 161.13(SD)^{-1.324}$	0.917	0.197	177
BT. 1	$V_{95\%} = 29.13(SD)^{-0.931}$	0.809	0.240	58
BT. 2	$V_{95\%} = 471.17(SD)^{-1.584}$	0.964	0.148	66
BT. 3	$V_{95\%} = 129.36(SD)^{-1.355}$	0.976	0.116	55

는 방법이 많이 사용되고 있다. 하지만 건설교통부(2006)의 지침에서는 실무적인 편의를 위해 고저차가 크지 않은 노천발파에서 상관도가 높은 것으로 알려져 있는 SRSD 기법 사용을 추천하고 있다(Choi and Ryu, 2015).

본 현장에서 SRSD로 추정된 진동식의 결정계수(Coefficient of Determination) R^2은 0.842이고 CRSD로 추정된 진동식의 R^2은 0.855로 유사한 수준이며, 당 시험발파 현장은 부지정지 작업으로 인해 암반이 노출된 상태이며 지반조사 시와 조금 다르게 지형고가 약 4 m내외로 고저차가 크지 않고, 건설교통부(2006)의 설계 발파진동 추정식($V = K(SD)^n = 200(D/\sqrt{W})^{-1.6}$)과 비교하기 위해 SRSD 기법으로 추정된 발파진동 추정식을 사용하였다. 세 개의 시험발파에 의한 신뢰수준 95%의 발파진동 추정식들은 Table 2와 같다.

24회의 시험발파로부터 획득한 자료를 SRSD 기법으로 분석한 현장 발파진동 추정식의 상관계수는 R=0.917로 높은 상관관계를 갖는 것으로 분석되었고, 건설교통부(2006)의 지침에 의한 설계 발파진동 추정식과 비교하여 시험발파 현장의 발파진동 반응특성을 확인하였다. 현장 발파진동 추정식의 감쇠지수 n값의 절대값이 1.324로 1.6보다 작게 나타나므로 건설교통부(2006)의 지침에 의한 설계 발파진동 추정식에 비해 발파진동이 멀리 전파되고 감쇠가 적다는 것을 알 수 있다.

4.3 계측 위치별 발파진동추정식 분석

Figs. 10(a), 10(b) and 10(c)는 세 개의 시험발파 위치별 발파진동 데이터를 처리한 결과이다. Fig. 10(d)에서는 Table 2에서 제시한 세 개의 시험발파 위치별 발파진동 추정식들과 177개의 발파진동 데이터를 하나로 합한 현장의 발파진동 추정식을 건설교통부(2006) 지침에 의한 설계 발파진동 추정식(MOCT Guide Line)과 비교하여 발파진동의 전파특성을 파악하였다.

BT. 1의 경우 동일 사이트 내 다른 발파진동 추정식에 비해 K값(29.13)과 n의 절대값(0.931)이 BT. 2, 3에 비해 작고, Fig. 10(a)에서도 알 수 있듯이 데이터의 분산이 커 표준오차 S.E도 0.24로 크다. 이는 시험발파가 횡방향으로 진행되면서 일부 2자유면 확보가 용이하지 않았고, 현장의 실시설계 당시 지반조사에 의한 Fig. 8의 지층단면도(Section C-C′)로부터 유추해보면 가장 인근 시추공 B-21의 지표 지반고가 EL. 144 m이었고 시험발파 BT. 1방향으로 지형은 높아지고 클링커층의 심도는 낮아지고 있기 때문이다. 즉 시험발파 시 BT. 1의 지표 지반고가 EL. 142 m로 지표가 약 2 m 이상 낮아졌고, 본 연구의 시험발파 패턴에 의한 수직 천공길이는 2.0~4.2 m로 실시되어 심도 약 4.5 m의 연암층과 하부 클링커층의 경계면에 인접한 지점까지 천공이 이루어졌을 것으로 예상되며 이로 인해 연암층 아래 넓게 분포하는 클링커층으로 폭발 가스압이 손실되어 비효율적인 발파가 이루어진 것으로

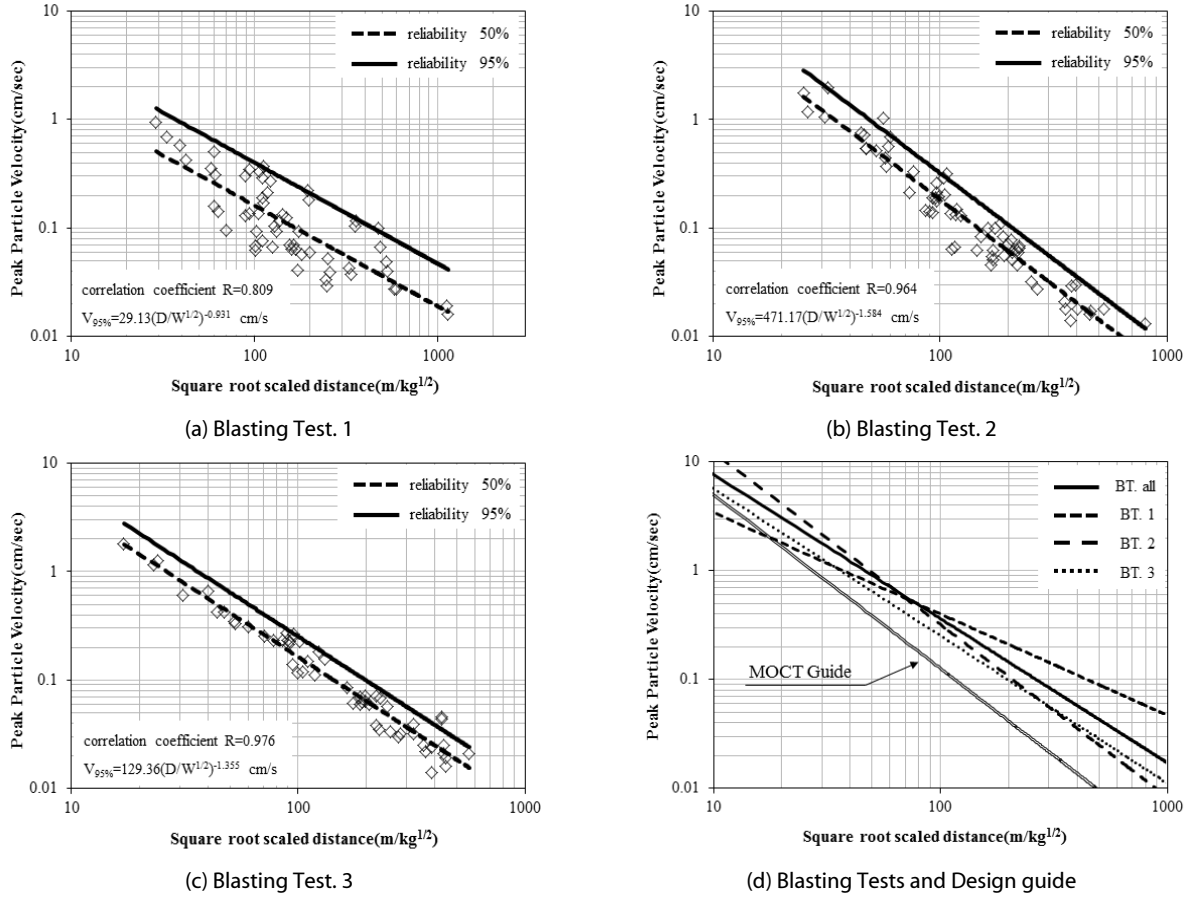


Fig. 10. Comparison of Blasting Vibration Characteristics

판단된다.

비교적 정상적인 시험발파가 이루어져 현장의 지반 특성이 반영된 발파진동 특성을 보이고 있는 것으로 판단되는 BT. 2, 3의 발파진동 전파특성을 Fig. 10(d)에서 비교해보면, 근거리에서는 BT. 2의 추정식이 BT. 3의 추정식보다 위에 있어 동일거리에서 진동속도가 크나, 환산거리 SD=300을 교점으로 원거리로 갈수록 역전되어 BT. 3의 추정식이 BT. 2의 추정식보다 진동속도가 약간 크게 산출된다. 이는 BT. 3가 BT. 2에 비해 발파원으로부터 감쇠가 적고 진동을 멀리까지 전달하는 것으로 볼 수 있다.

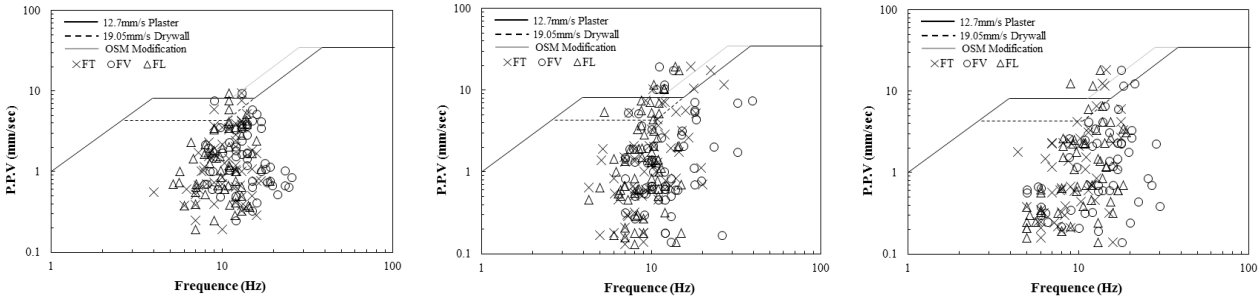
이처럼 동일 조건을 가지고 같은 현장 내에서 시행된 시험발파에서도 현저히 다른 경향을 보이는 결과들은 제주지역 지반의 불규칙한 층상구조 때문인 것으로 판단된다. 제주의 생성기원에 의해 암반층이 얇고 화산지형에서 확인할 수 있는 클링커층이 암반층과 불규칙한 반복패턴을 보이는 층상구조로 인해 비교적 크지 않은 현장 내라 할지라도 발파로 인한 지반진동의 특성을 예측하기는 매우 어렵다.

현장을 대표하는 BT. All과 MOCT Guide의 추정식을 비교해 보면 환산거리 SD=10에서 현장의 발파진동 추정식인 BT. All이 MOCT Guide Line 보다 약 40% 상위에 있고 환산거리가 커질수록 두 추정식의 진동속도 차가 조금씩 더 커진다. 이는 진동속도를 작게 예측한 MOCT Guide Line에 의한 장약량이 BT. All의 추정식으로 구한 최적 장약량보다 많은 양을 사용하는 것으로 분석되고 있다. 또한 제주지역의 다변성 층상구조 지반에서는 현장 발파진동 추정식에 의한 발파 패턴설계와 더불어 발파에너지를 저감시켜버리는 클링커층의 분포 특성을 파악하여 면밀한 발파공법 적용이 이루어져야 한다.

4.4 진동주파수 분석

시험발파 BT. 1, 2, 3에 의한 세 성분 즉, 접선방향 성분(Transverse), 수직방향 성분(Vertical), 진행방향 성분(Longitudinal)에 대한 주파수 분석 결과를 미광무국 보고서(Siskind et al., 1980)인 『USBM RI 8507』에서 제시한 발파진동 주파수 도표 위에 Figs. 11(a), 11(b) and 11(c)와 같이 도시하였다.

BT. 1의 주파수 대역은 4~30 Hz사이로 나타났으며, BT. 2의



(a) Blasting Test. 1 (b) Blasting Test. 2 (c) Blasting Test. 3

Fig. 11. Analysis of Vibrations Frequency

주파수 대역은 4~40 Hz, 그리고 BT. 3의 주파수 대역은 4Hz~30Hz 사이에서 발생하였다. 시험발파의 현장의 주 주파수 대역은 5~20 Hz사이 저주파수 대역으로 분석되며, 특히 발파 패턴별로는 지발당 장약량이 작은 정밀진동제어발파(Type.Ⅱ)와 소규모진동제어발파(Type.Ⅲ)의 경우 10~20 Hz의 주파수 대역에 집중되어 있다.

내륙지역의 지질구조를 이루고 있는 퇴적암, 변성암 등에서 시험발파에 의한 발파진동 주파수는 일반적으로 80~100 Hz내외로 보고되고 있는 것에 비해, 제주지역에서 실시된 본 연구의 시험발파에 의한 발파진동 주파수는 5~20 Hz사이에서 주파수 대역을 형성하고 있어, 상대적으로 저주파수 특징을 갖는다. 이러한 제주지역 지반에서 발생하는 발파진동의 저주파수 특징은 다공질 현무암과 지반의 층상구조 즉, 암반층과 암반층사이에 존재하는 클링커층에 의한 영향으로 발파진동이 암반 → 클링커 → 암반 → 표토층 또는 암반 → 클링커 → 암반 → 클링커 → 암반 → 표토층을 거치면서, 발파 파형의 주기가 크게 나타나 주파수 대역이 저주파수 대역으로 나타나는 것으로 판단된다.

주파수와 관련한 미광무국의 연구결과에 따르면 구조물의 고유진동수는 층수의 영향을 받으며 구조물의 동적 응답특성을 조사한 결과 중앙벽의 고유진동수의 범위가 12~20 Hz사이로 나타났으며, 이론적으로 지반진동의 주파수가 구조물의 고유주파수와 같아질 때 응답진동은 무한대로 증폭된다(Inman, 1996). 이런 현상을 공진(Resonance)이라 하며, 일반적인 단층 내지 이층 가옥의 경우에는 10 Hz 전후의 고유주파수를 보이는데(Dowding, 1996), 이보다 높은 주파수의 지반진동에 대해서는 진폭이 크다 해도 가옥은 큰 영향을 받지 않을 수 있다. 대규모 사면의 경우에는 대체로 저주파(장파장)의 지반진동이 잠재적 사면블록의 질점운동을 유발시켜 불안정성을 증가시키고 종국에는 사면파괴를 일으킬 수 있다(Chi and Ryu, 2012). 또한 보안 구조물의 종류, 기초의 지반상태, 구조물 주변의 기하학적 배치, 구조물의 폭과 높이에 따라 구조물의 고유주파수는 다르게 나타나지만 대부분의 구조물에서 FFT (Fast Fourier Transform) 분석을 통한 구조물의 응답 주파수를 분석한 고유 주파수는 대략 20 Hz 미만의 저주파수 대역으로 알려져 있다(Yang et al., 2011).

따라서, 시험발파에 의한 제주지역의 주파수가 비교적 저층 구조물의 고유주파수와 유사한 5~20 Hz의 범위의 저주파수 대역에서 주로 발생하고 있어 발파로 인한 진동이 지속적으로 발생될 경우 주변 구조물들에 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되어 주의가 요구된다.

4.5 발파 파쇄입경 분석

Split desktop을 이용해 횡방향으로 표준발파패턴 Ⅱ(정밀진동제어발파)에서 Ⅴ(일반발파)순으로 시험발파가 이루어진 BT. 1과 종방향으로 표준발파패턴 Ⅴ(일반발파)에서 Ⅱ(정밀진동제어발파)순으로 시험발파가 실시된 BT. 3에 대한 발파 파쇄 입경을 Table 3에서와 같이 검토하였다.

BT. 1의 경우 비장약량이 0.25 kg/m^{3}인 정밀진동제어발파(Type.Ⅱ)로 인한 암파쇄 입경은 최소입경이 100 cm를 넘는 것으로 평가되었으나, 가장 먼저 진행된 Type.Ⅱ발파도 Type.Ⅴ까지 순차적으로 진행되는 발파로 인한 암파쇄에 발파에너지가 어느 정도는 기여를 했을 것으로 사료되어 네 가지 타입의 시험발파에 대한 파쇄입경별 암파쇄량비를 산출하는 산술평균에 적용하였다. 따라서 BT. 1의 전체발파에 의한 파쇄입경 30 cm이하의 암파쇄량은 15%로 비교적 작고 파쇄입경 80 cm이하의 암파쇄량은 69%로 분석된다. 그리고 BT. 3는 노천발파에서 일반적으로 실시되는 벤치발파(Betch blast)가 종방향으로 Type.Ⅴ에서 Type.Ⅱ까지 이루어졌다. 네 가지 타입의 시험발파에 대한 전체 파쇄입경별 암파쇄량비는 파쇄입경 30 cm이하에서는 암파쇄량이 43%이고 파쇄입경 50 cm이하의 암파쇄량은 86%로 나타났다.

BT. 1과 BT. 3에서 시험발파 설계 시 비장약량 0.35 kg/m^{3}로 동일한 일반발파(Type.Ⅴ)의 발파로 인한 실제 암파쇄량을 비교해 보면, BT. 1은 파쇄입경 30 cm이하는 암파쇄량이 13%, 파쇄입경 50 cm이하는 암파쇄량이 43%로 분석되었고 BT. 3의 경우 파쇄입

Table 3. Rock Fragmentation Ratio (unit : %)

Blasting Test	BT. 1				BT. 3			
Fragmentation size (cm) / Blasting type	20	30	50	80	20	30	50	80
Ⅱ	0	0	0	0	30	60	100	100
Ⅲ	10	35	76	94	21	52	92	100
Ⅳ	7	12	46	93	13	28	71	100
Ⅴ	4	13	43	90	8	31	82	100
Mean	5	15	41	69	18	43	86	100

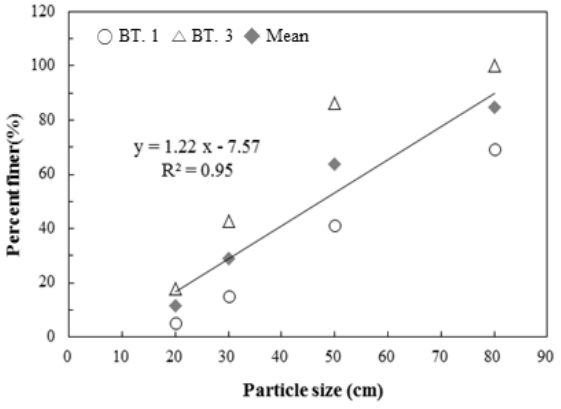


Fig. 12. Analysis of Rock Fragmentation

경 30 cm이하는 암파쇄량이 31%, 파쇄입경 50 cm이하는 암파쇄량이 82%로 BT. 1 대비 파쇄입경 30 cm이하는 암파쇄량이 약 2.4배 많고 파쇄입경 50 cm이하는 암파쇄량이 약 1.9배 많은 것으로 분석되는데, 이는 폭원의 특성을 결정짓는 폭약의 종류, 장약의 위치, 지발시간 및 순서 등의 통제 가능한 영향요인들이 동일하였다는 조건에서 제어 불가능한 암반의 종류 및 상태, 전파경로상의 불연속면 등과 같은 암반의 특성으로 설명될 수 있다. 즉, 발파진동상수 K가 29.13으로 상대적으로 작았던 BT. 1의 주변 지반상태를 인접한 시추공 B-21로부터 유추해보면 클링커층과 암반층이 불규칙한 패턴으로 반복된 층상구조로 인해 발파에너지가 감쇄된 것으로 판단된다.

그리고 Fig. 12에서와 같이 BT. 1과 BT. 3의 입경별 파쇄량을 평균값으로 적용한 결정계수 R^2=0.95인 직선 회귀식으로부터 현장의 암반유용을 위한 2차 소할물량을 암파쇄입경 30 cm를 초과하는 암으로 정하여 산출해 보면 암파쇄입경 30 cm이하는 29%이고 2차 소할물량은 71%가 된다. 다시 이중 암파쇄입경 30~60 cm는 36%이고 대괴에 해당하는 암파쇄입경 60 cm이상은 35%로 추정된다. 단순히 암파쇄량을 높이는 방법으로 비장약량을 높일 수 있으나 이는 발파진동속도에 직접적인 영향을 주기 때문에 신중한 검토가 필요하다.

4. 결 론

다변성 지반에서의 발파 진동 특성을 파악하기 위해 형성기원에 의해 클링커층과 암반층이 불규칙한 패턴으로 반복되는 층상구조를 갖는 지반에서 시행된 3개소 24회의 시험발파로부터 발파진동데이터를 획득하고 주변지역의 지층단면도를 참조하여 발파진동의 전파특성을 분석하였다.

(1) 시험발파 지역 내 클링커층의 N치 값은 2회/30 cm ~ 50회/5 cm 범위를 보이는데, 암괴로 구성된 구간을 제외하고 측정된 N값은 암편들 간의 공극 차이에 따라 매우 높은 값을 나타내거나 매우 낮은 값으로 측정되기도 하므로 표준관입시험(SPT)에 의한 N값으로부터 이론적 · 경험적인 방법으로 클링커층의 역학적 특성을 정량화하기에는 무리가 있다.

(2) 시험발파를 통해 얻은 총 177개의 발파진동데이터를 분석한 결과, 현장의 발파진동 추정식은 자승근 환산거리(SRSD)를 적용시킨 경우 $V_{95\%} = 161.13(SD)^{-1.324}$(R=0.917, S.E=0.197)로 추정되어, 감쇠지수 n의 절대값이 1.32로 설계지침 1.6보다 작게 나타나 발파진동이 멀리 전파되고 감쇠가 적다는 것을 알 수 있다.

(3) 발파진동상수 K와 감쇠지수 n이 세 개소의 시험발파(BT. 1, 2, 3)에서 상대적으로 매우 작은 값은 보인 BT. 1(K: 29.13, n: 0.93)의 진동특성을 지층단면도로부터 유추한 결과, 연암층 하부에 접한 클링커층 인근까지 발파천공이 진행되어 발파 시 하부에서 넓게 분포하고 있는 클링커층으로 폭발 가스압이 손실된 것으로 판단된다.

(4) 다공질의 현무암과 층상구조를 갖는 다변성 지반에서의 발파진동 주 주파수 대역은 5~20 Hz사이 저주파수 대역으로 분석되며, 특히 발파 패턴별로는 Type.Ⅱ와 Type.Ⅲ의 경우 10~20 Hz의 주파수 대역에 집중되어 있었다. 이는 가옥과 같은 저층구조물의 고유주파수 대역과 유사한 범위에 해당돼 발파 시 인근지역 보안물건에 대한 영향 검토가 필요하다.

(5) 동일한 조건의 일반발파에 의한 발파 파쇄량은 BT. 3의 경우 BT. 1 대비 파쇄입경 30 cm이하는 암파쇄량이 약 2.4배 많고 파쇄입경 50 cm이하는 약 1.9배 많은 것으로 분석되었으며 이 역시, 클링커층을 인한 발파에너지 감쇠로 설명된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업의 연구비지원(NRF-2014R1A1A4A01007087)에 의해 수행되었습니다.

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, B. H. and Ryu, C. H. (2015). “Measurements and data processing for blast vibrations and air-blasts.” *J. of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering*, Vol. 33, No. 3, pp. 29-50 (in Korean).

Dowding, C. H. (1996). Construction vibrations, Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, NJ 07458, US, p. 84.

Inman, D. J. (1996). Engineering vibration, Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, NJ 07458, US, pp. 69-70.

ISEE, 1998, Blaster's Handbook, 17th ed., International Society of Explosives Engineers, Cleveland, Ohio, USA, p. 594.

Kang, C. W. (2014). Blasting Engineering A to Z 3th, Goomibook, pp. 403-425 (in Korean).

Kim, J. H. (2007). A study on the mechanical characteristics and the strength in pyoseonri basalt, Master's thesis, Jeju National University, p. 3 (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, pp. 39-61 (in Korean).

Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1979). Soil Mechanics SI Version, J, Willey & Sons, New York, pp. 97-136.

Le Maitre, R. W. (1984). “A proposal by the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks for a chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica (TAS) diagram.” *Australian J. of Earth Sci*., Vol. 31, pp. 243-255.

Lee, D. W. and Kim, S. H. (2016). “Development of blast vibration equation considering the polymorphic characteristics of basaltic ground.” *Proc. of 18th Int. Science Academy, Geological and Environmental Engineering, WASET*, London, U.K., pp. 979-982.

MOCT (Ministry of Construction and Transportation of Korea). (2006). Blasting design and construction guidelines to road construction. No. 11-1500000-001841-01 (in Korean).

Nam, J. M., Ko, H. S. and Oh, D. I. (2003). “A study on strength characteristics of Jeju - island's Scoria (Song-E).” *J. of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 5, No. 4, pp. 37-47 (in Korean).

Park, G. H., Cho, D. L. and Kim, J. C. (2000). Geological Report of Moseulpo-Hanlim Sheet, Korea Institute of Geology, Mining and Materials (in Korean).

Persson, P. A., Holmberg, R. and Lee, J. (1994). Rock blasting and explosives engineering, CRC Press, pp. 337-338.

Siskind, D. E. (2000). Vibrations from Blasting, ISEE, Cleveland, OH USA, pp. 14-15, pp. 17-28.

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 8507).

Snodgrass, J. J. and Siskind, D. E. (1974). Vibrations from Underground Blasting, Report of Investigations 7937 United States. Bureau of Mines (USBM RI 7937), p. 31.

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).

Youn, J. S. (1995). “A study on parasitic cones of the northern parts of Cheju island, Korea.” *Cheju National University, Marine Science Institute*, Vol. 19, pp. 25-38 (in Korean).