

제주도 현무암에서 파쇄도 향상을 위한 최적 발파 설계 연구

양형식^{1)*}, 김남수²⁾, 장형두¹⁾, 김원범¹⁾, 고영훈¹⁾, 김승준¹⁾, 김정규¹⁾, 문희숙¹⁾

Study on Optimization of Blast Design for Improving Fragmentation in Jeju Basalt Rock Area

Hyung-Sik Yang, Nam-Soo Kim, Hyong-Doo Jang, Won-Beom Kim,
Young-Hun Ko, Seung-Jun Kim, Jeong-Gyu Kim and Hee-Sook Moon

Abstract Recently on Jeju island there has been a lot of development and construction. However random distribution of porous basalt and clinker seam generated from volcanic activities often interrupt and greatly reduce efficiency of blasting necessary for construction. Three test blasts were operated to solve the inefficiency problem and results indicated that a powder factor of 0.40-0.45 kg/cm³ is necessary to increase the efficiency of blasting. Also the blasting scheme should be concerned whether clinker seams exists in excavation levels or not.

Key words Blasting scheme, Jeju, Clinker, Basalt

초 록 최근 제주도 개발을 위한 많은 토목공사가 실시되고 있다. 하지만 화산활동 과정에서 생성된 클링커층과 다공질 현무암이 불규칙하게 분포된 제주도 암반은 그 구조적 특성으로 인해 발파효율이 매우 낮아 공사에 큰 지장을 주고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 3지역에서 실시된 시험발파결과를 분석한 결과 효과적인 발파를 위한 비장약량은 0.40-0.45kg/m³이 되어야 할 것으로 판단할 수 있었다. 또한 굴착심도 내에 클링커층의 존재유무로 나누어 발파설계를 해야 할 것으로 판단되었다.

핵심어 발파설계, 제주, 클링커, 현무암

1. 서 론

최근 제주도는 ‘제주특별자치도 설치 및 국제자유도시 조성을 위한 특별법’에 따라 국가차원에서 제주도를 국제자유도시로 개발하기 위해 설립된 제주국제자유도시센터(Jeju free international city development center)를 중심으로 제주도 전역에 걸쳐 대규모 토목공사가 설계되거나 계획 중에 있다. 그러나 이러한 토목공사를 진행하면서 실시되는 발파공사는 화산활동

으로 생성된 다공질 현무암 및 암반 중에 불규칙하게 분포하고 있는 클링커층(송이층)의 영향으로 매우 비효율적으로 이루어지고 있다. 이러한 문제점을 해결하고 제주도 암반의 발파특성과 최적 발파 설계를 제안하고자 서귀포시 안덕면에 위치한 제주 신화-역사공원조성사업 부지조성공사 현장 내 3개의 장소에서 총 15회에 걸쳐 시험발파가 이루어졌으며 제주에서 실시된 발파 설계 도서를 일반적인 암반에서의 발파결과와 비교 검토하였다. 시험발파를 통해 얻어진 총 128개의 진동데이터를 분석한 결과 현장의 발파진동 추정식은 자승근 환산거리를 적용시킬 경우 $V_{95\%} = 295(SD)^{-1.39}$ (상관계수 $R=0.88$, 표준편차 $\sigma=0.259$)로 추정되었다. 현장의 발파진동추정식을 도로공사 노천발파 설계시공요령(건설교통부, 2006)에서 제시

¹⁾ 전남대학교 에너지지원공학과

²⁾ NSB 기술사사무소 대표

* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일 : 2011년 12월 12일

심사 완료일 : 2011년 12월 21일

게재 승인일 : 2011년 12월 23일

한 설계 발파진동추정식($V_{95\%} = 200(SD)^{-1.6}$)과 비교함으로써 발파진동에 대한 현장암반의 반응 특성을 간단하게 비교할 수 있는데 현장 발파진동추정식의 n 값이 -1.39으로 작게 나타나므로 동일한 발파에 대해 진동이 멀리 전파되고 감쇠가 적다는 것을 알 수 있다. 기공을 포함한 현무암과 클링커층이 발달한 현장에서의 발파 진동 주파수는 10~20Hz의 저주파대역을 갖는 특징이 있으며 효과적인 발파를 실시하기 위해서 비장약량이 약 $0.40\sim 0.45\text{kg/m}^3$ 가 되어야 할 것으로 판단할 수 있었다.

2. 현장의 지질특성

제주도는 화산활동으로 형성된 순상화산체로서 전체 화산분출물 가운데 현무암질 용암류가 가장 많으며, 지화학적으로는 현무암에서 조면암까지 다양한 화산암류의 서귀포층, 성산층, 신양리층과 같은 퇴적암류, 그리고 기생화산 분출물 및 풍성사구층 등으로 구성되어 있으며 이 중 현무암류가 전체의 90% 이상을 차지하고 있다. 시험발파 구간에 대한 전반적인 지표지질 특성을 파악하기 위하여 모슬포·한림도폭 지질보고서(한국자원연구소, 2000)를 참조하였는데, 도폭보고서에 의하면 사업지구가 위치하는 곳은 왕이매 조면현무암(Qwtb)에 해당되는 지층이 폭 넓게 분포되고 있다. 회색 내지 암회색의 이 암석은 일반적으로 치밀 견고하며 부분적으로 기공이 함유되어 있는데 대부분은 길게 신장되어 있다. 반경으로는 2~3mm 크기의 감람석이 10cm^2 의 단위면적에 5~10개 정도 분포하는 특징이 있다. 사업지구의 전반적인 지층분포 특성은 상단부에 모래 섞인 자갈 정도에 해당되는 토층이 피복되고 있고, 이 하부에는 연암~보통암에 해당되는 암반층이 비교적 두껍게 형성되고 있으나, 암층 상하단 경계부에 스코리아로 이루어진 클링커층이 발달되고 있는 특징을 보인다.

2.1 스코리아와 클링커층의 특징

클링커층의 특성

화산활동과정에서 고온의 용암이 화국에서 사면을 따라 흐르면서 식어서 굳은 상태에 따라 파호이호용암과 아이용암으로 나누어지는데, 파호이호용암은 반

원형의 호를 만들거나 동심원상의 주름이 많은 형상을 하고 있으며, 아이용암은 표면이 아주 거칠어서 클링커를 쌓아올린 것과 같은 모양을 하고 있다. 여기서 아이용암이 이후 또 다른 화산작용으로 인하여 지층에 들어가서 다공성의 지층으로 발견되는데 이러한 지층을 일명 클링커층이라고 한다. 클링커층은 화산쇄설물과 같이 혼합되어 발견되기도 하며, 층의 높이가 수 미터에 이르기도 하며, 비교적 단단한 암반층사에 존재하며 화산활동의 반복으로 여러 층을 이루기도 한다.

스코리아의 특성

스코리아(scoria)는 용암의 분출시 압력의 급격한 감소로 인하여 갑자기 늘어나면서 Gas가 방출하여 생성된 화산쇄설물로서 화구를 중심으로 퇴적되며 조립 내지 세립질에 모가 난 형태이고 기공이 불규칙하게 발달한다. 스코리아의 주성분은 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 함량이 70~80% 정도이며 스코리아는 유리질의 현무암질 부석으로서 크기는 대부분 10cm 이하이고 각력상, 미고결층을 이루며, 기공의 함량이 70~80%로 높다. 스코리아의 형성은 휘발성분이 높은 압력의 마그마에 녹아 있다가 마그마가 상승하면서 압력이 낮아지면 마그마 속에 기포를 형성한다. 기포는 서로 합쳐져 커다란 기포를 만들어 압력이 높아지고 마그마보다 빠른 속도로 상승하면서 폭발한다. 이때 다소 굳은 마그마가 작은 크기로 깨져 나오면서 스코리아가 되고, 큰 덩어리로 뿔어 나오게 되면서 화산탄이 된다. 제주도에서는 이를 '송이'라고 칭하며 공사현장에서는 송이에 의해 어려운 문제에 봉착하게 되는 경우가 빈번하게 발생하고 있으며 이로 인해 건설공사의 공사기간이 많이 지연되고 있다. 송이는 지역에 따라 조금씩 차이를 보이고 있으나 색깔에 따라 적갈색, 황갈색, 흑색, 및 암회색으로 크게 4가지로 분류하고 이들은 화학적 분석과 공학적 특성에서 차이를 보이고 있다. 스코리아에 대한 최근 연구결과에 따르면 스코리아의 주성분 중 Fe_2O_3 와 Al_2O_3 의 함량이 많을수록 내부마찰각이 적어지는 것으로 나타났으며 삼축압축 시험으로 얻어진 내부마찰각은 시료에 따라 다르나 대부분 $25\sim 35^\circ$ 사이 인 것으로 밝혀졌으며 탄성계수는 약 $2\sim 9\text{kg/cm}^2$ 으로 나타났다(남정만 외, 2003).

3. 시험발파

신화역사공원조성사업 부지조성공사 현장 중 가능한 시험발파 장소로 5곳을 선정하고 그 중 인근 보안물건과의 영향범위 및 자유면 확보가 가능한 곳을 우선으로 3곳의 시험발파 위치를 다음의 Fig. 1과 같이 결정하였다.

또한 발파 소음 및 진동의 계측을 위하여 SD값을 고려하여 최저 40m에서 최고 240m까지 9대의 계측기를 일 열로 배치하였다. 각 위치에서 계측기는 발파 위치를 기점으로 최 근거리의 보안물건 방향으로 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 200, 240m 위치에 설치되었다. Area #1에서는 발파위치로부터 남서쪽 704m에 위치하는 서광종마장 방향으로 설치되었다. Area #2에서는 남서쪽 643m에 위치하는 고귀성씨 우사 방향으로 설치되었다. Area #3에서는 발파위치에서 남서쪽으로 350m 떨어져 있는 서광정수장 방향으로 계측기를 설치하였다.

3.1 클링커층의 확인

육안을 통한 클링커층 확인

신화역사공원조성사업 부지조성공사의 부지와 경계를 접하고 있는 석산의 절개지에서 육안을 확인한 클링커층은 다음의 Fig. 2와 같다.

토질조사보고서를 통한 클링커층 확인

2007년 실시된 당 현장의 토질조사보고서(오준호, 2007)에 수록된 시추공탐사 결과 중 시험발파를 실시하는 Area #1, #2, #3 인근의 결과를 검토함으로써 시험발파위치의 클링커층의 상태를 파악할 수 있다. 보고서에 의하면 현장의 클링커층은 시추공별로 1~5개의 층이 형성되어 있으며 두께 또한 0.3~8.4m로 매우 불규칙하게 나타나는 것으로 파악되었다.

Area #1 인근 시추주상도 NBH-1에 의하면 표토와 상부 클링커층을 제거한 후 상부로부터 4.5m 두께의 보통암이 형성되어 있으며 이후 1.8m 두께의 클링커층이 형성되어 있다. Area #2 인근 시추주상도 NBH-9에 의하면 표토와 상부 1m 두께의 클링커층을 제거한 후 상부로부터 3.9m 두께의 보통암이 나타난다. 보통암 하부로 0.8m의 클링커층, 1.1m의 연암층이 번갈아 나타나며 이후 4.3m 두께의 클링커층이 형성되어 있다. Area #3 인근 시추주상도 NBH-11에 의하면 표토와 상부 1m의 모래 및 자갈층을 제거한 후 상부로부터 2.1m 두께의 보통암과 2.5m 두께의 연암층이 형성되어 있다. 이 연암 하부로 6.0m 두께의 클링커층이 확인된다.

내시경을 이용한 공 내 클링커층 확인

Area #1, #2, #3의 시험발파 천공 후 공 내시경을 이용하여 클링커층을 확인하였다. 관찰된 공들은 천

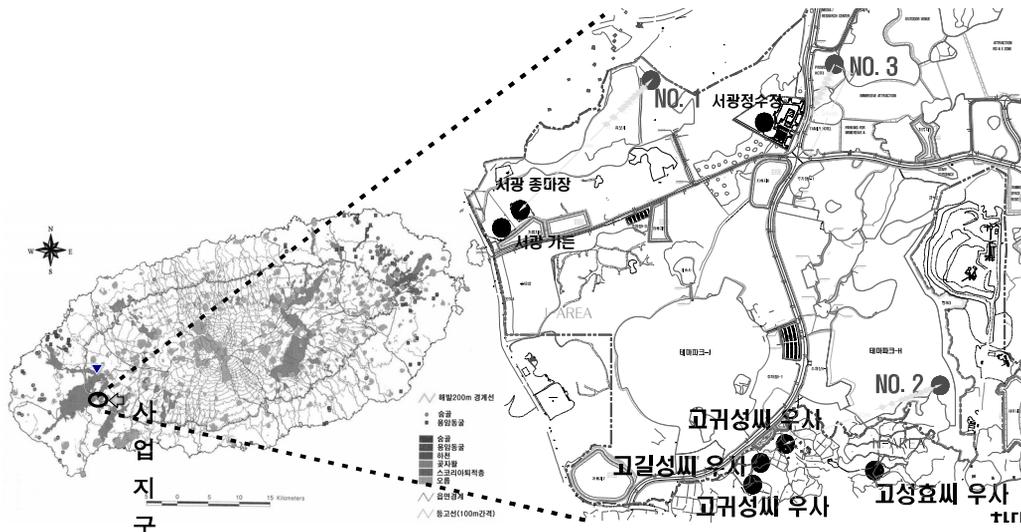


Fig 1. Positioning of test blasts.

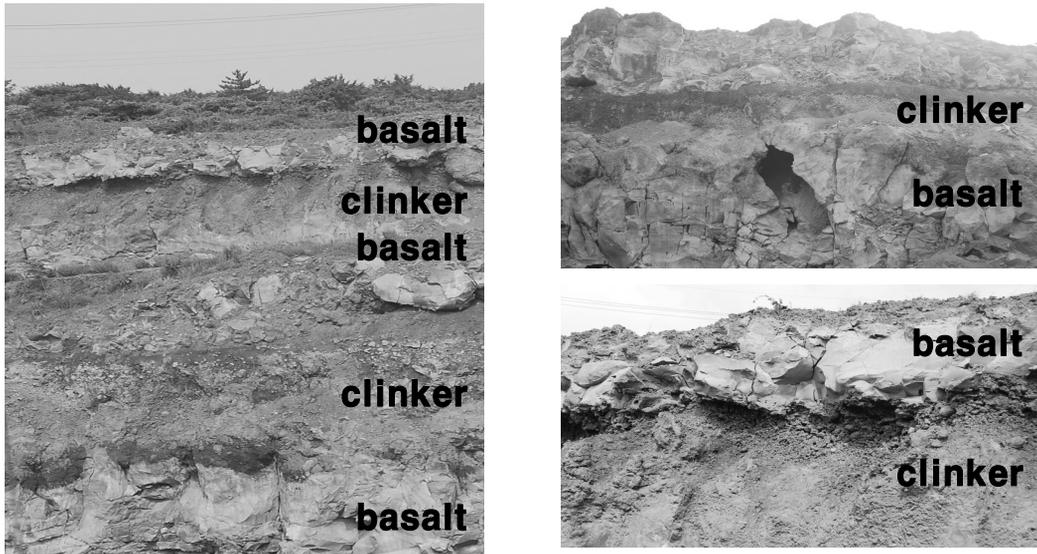


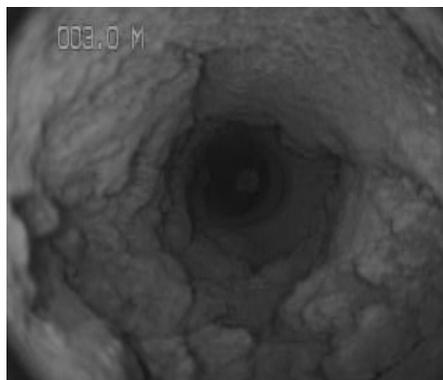
Fig. 2. Clinkers between basalt.



3.0m-clinker appear



3.6m-borehole clogging



3m-clinker appear



3.6m-borehole clogging

Fig 3. Captures of endoscope of boreholes in area #1.

공 시 최대한 클링커층을 통과하여 천공을 시도 하였다. Area #1에서 실시된 2공은 모두 3.0m에서 클링커층이 출현하여 공벽의 무너짐을 관찰할 수 있었으며 3.6m에서 클링커의 무너짐으로 인해 공이 막혔다.

Area #2에서 실시된 3공은 내시경을 관찰한 결과 모두 2.7m 근처에서 발생한 클링커층에 의해 3.3m에서는 공 막힘 현상이 관찰되었다. Area #3에서 관찰된 2공은 2.1~2.4m에서 시작된 클링커층에 의해 약 2.7m 근방에서 공벽이 무너지고 3.0~3.3m에서 공 막힘 현상이 관찰되었다. Fig. 3은 Area #1의 2공에 대한 내시경 촬영을 캡처한 사진이다.

천공데이터를 이용한 클링커층 확인

천공시 비트가 클링커층에 도달하면 천공 피드압력이 급격하게 떨어지고 공기압이 클링커층을 따라 빠져나감으로 인해 암분을 공 밖으로 배출하지 못하고 비트가 jamming된다. 유압 크롤러 드릴(9DS, furukawa)을 이용하여 시험발파 Area #2에서 천공시 데이터는 다음과 같다. 천공시 천공좌를 잡는 0.3m이후에 나타나는 정상 천공압은 타격압 약 15MPa, 회전압 약 4~5MPa, 피드압 약 4MPa 그리고 공기압은 약 0.5MPa이다. 정상압력으로 천공시 현장의 왕이때 조면현무암에서의 천공속도는 약 1.6m/min이며 천공장이 3.3m

에서 클링커층에 닿았다. 이때 타격압과 회전압에는 변화가 미미하나 피드압이 약 1MPa 정도로 급격하게 떨어지면서 공 밖으로 분출되던 암분의 분출이 멈추게 된다. 이와 같이 현장에서 심도에 따라 불규칙하게 나타나는 클링커층을 통과하여 천공하는 것은 거의 불가능한 것으로 판단되었다.

3.2 현장의 상황을 고려한 천공 및 장약

당 현장의 실시설계보고서(오준호, 2007) 및 도로공사 노천발파 설계시공요령에 제시되어 있는 Type별 표준발파를 기준으로 작성된 시험발파 계획에 따르면 Low bench(천공장 1.5m)부터 일반발파(천공장 5.7m)까지 계획되었으나 각 Area별로 굴착이 완료된 시점에서 시험발파를 위한 완전한 2자유면 확보의 어려움과 지표로부터 2.0~4.5m에서 발견되는 클링커층으로 인해 천공은 제한적으로 이루어졌다. Area 별 시험발파의 제원은 다음의 Table 1을 통해 확인할 수 있다.

4. 자료처리 및 분석

현장을 대표할 수 있는 3개의 장소에서 총 15회에 걸쳐 시험발파가 이루어졌다. 시험발파를 통해 얻어진 Table 2의 128개 진동데이터를 SRSD(square root

Table 1. Specifications of test blast

Area	types	blast orders	charge weight per delays (kg)	powder factor (kg/m ³)	(hole depth*space*burden)
Area #1	I	1	0.25	0.34	(1.5*0.7*0.7)
	II	2	1.00	0.31	(2.7*1.2*1.0)
	III	3	4.00	0.35	(2.5*1.9*1.6)
	III	4	3.00	0.28	(3.0*1.9*1.6)
Area #2	I	1	0.25	0.34	(1.5*0.7*0.7)
	II	2	1.00	0.31	(2.7*1.2*1.0)
	III	3	4.50	0.36	(3.4*1.9*1.6)
	III	4	4.00	0.32	(3.4*1.9*1.6)
	III	5	6.00	0.27	(4.5*2.0*2.5)
Area #3	I	1	0.25	0.34	(1.5*0.7*0.7)
	III	2	8.00	0.53	(3.4*1.9*1.6)
	III	3	4.00	0.45	(3.4*1.9*1.6)
	II	4	1.00	0.31	(2.7*1.2*1.0)
	III	5	8.00	0.37	(3.4*1.9*1.6)
	III	6	8.00	0.36	(3.4*1.9*1.6)

Table 2. Vibration predictive equations per blast sites (SRSD, 95% reliability)

Areas	Vibration predictive equations	R	σ	events
All	$V_{95\%} = 295.0 \times (SD)^{-1.39}$	0.88	0.259	128
Area #1	$V_{95\%} = 36.0 \times (SD)^{-1.11}$	0.87	0.177	30
Area #2	$V_{95\%} = 380.1 \times (SD)^{-1.59}$	0.97	0.132	44
Area #3	$V_{95\%} = 223.5 \times (SD)^{-1.26}$	0.90	0.225	54

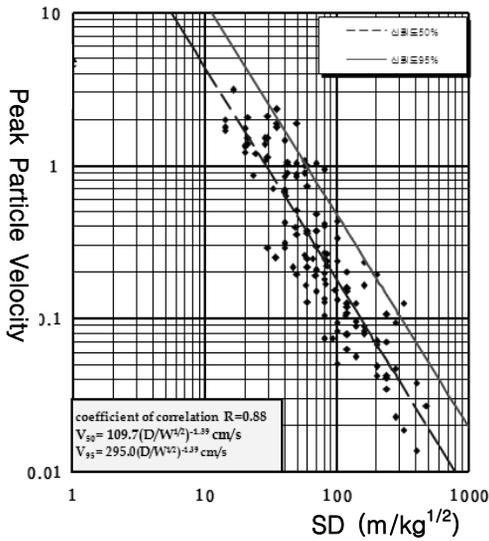


Fig. 4. Modeling of SRSD.

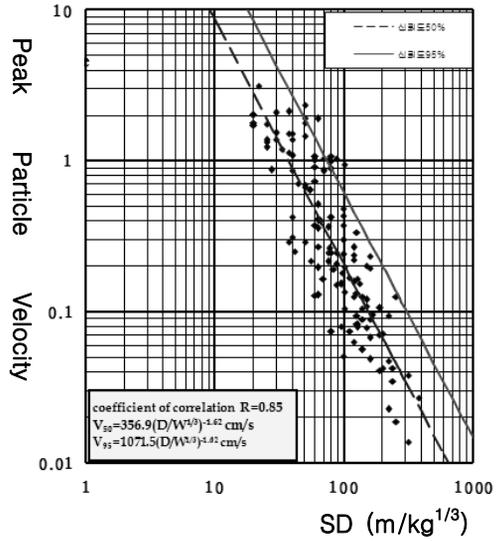


Fig. 5. Modeling of CRSD.

scaled distance)로 처리할 경우 95%의 신뢰수준 발파진동추정식은 $V_{95\%} = 295.0 \times (SD)^{-1.39}$ (상관계수 $R=0.88$, 표준편차 $\sigma=0.259$)이며 CRSD(cube root scaled distance)의 경우엔 $V_{95\%} = 1071.5 \times (SD)^{-1.62}$ 으로 추정되었다. Fig. 4와 Fig. 5는 SRSD와 CRSD로 처리한 결과를 보여준다.

시험발파로 얻어진 128개 자료의 회귀분석 결과 95%의 신뢰도를 갖는 현장 발파진동추정식의 상관관계는 $R=0.88$ (자승근)으로 비교적 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 현장의 발파진동추정식은 도로공사 노천발파 설계시공요령에서 제시한 설계 발파진동추정식 $V=200(SD)^{-1.6}$ 과 비교함으로써 발파 진동에 대한 현장 암반의 반응특성을 알아볼 수 있다. 현장 발파진동추정식의 n값의 절대값이 1.39로 작게 나타나므로 타 지반에 비해 발파진동이 멀리 전파되

고 감쇠가 적다는 것을 알 수 있다. 또한 n값의 절대값이 같을 때 입지상수 (K) 값이 커질수록 동일한 설계에서는 진동이 멀리 전파된다고 할 수 있다.

4.1 계측위치 별 현장 발파진동추정식 분석

Fig. 6과 Table 2은 시험발파 위치별 SRSD 모형과 발파진동추정식을 정리한 것이다. Area #1의 K값 36, n값 -1.11으로 다른 2지역에 비해 낮게 나온 이유는 클링커를 포함한 현무암 암반이라는 특성을 고려하지 않은 일반적인 발파설계를 적용한 결과로 효율적이지 못한 발파를 실시했기 때문으로 판단된다. Area #1에 비해 비교적 정상적인 발파가 이루어진 것으로 판단할 수 있는 Area #2, #3를 비교해 봄으로서 현장의 위치별 진동의 전파 특성을 파악할 수 있다. Fig. 6으로부터 동일한 발파조건일 때 발파위치로부터 근거리

Table 3. 전체 시험발파에 대한 발파 파쇄입경 분석

	30cm이하(%)	평균(%)	30~60cm(%)	평균(%)	60cm이상(%)	평균(%)
Area #1 (항공우주박물관)	24	33	43	27	33	41
	31		29		40	
	31		22		47	
	37		15		48	
	37		29		34	
	38		21		41	
Area #2 (테마파크H)	50	48	39	36	11	16
	49		40		11	
	30		32		38	
	38		45		17	
	64		33		3	
	56		29		15	
Area #3 (프로메이드호텔)	34	40	7	27	59	32
	42		29		29	
	35		29		36	
	43		41		16	
	44		22		24	
	41		33		26	

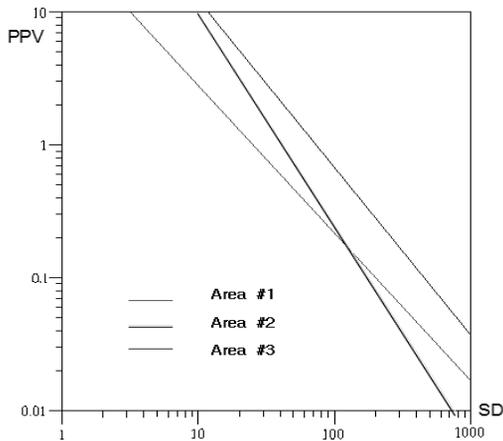


Fig. 6. Modelling of SRSD per sites(95% reliability).

에서는 Area #3 지역에서 진동이 적게 발생하며 보다 원거리에서는 Area #2 지역에서 진동의 발생이 작은 것으로 나타났다. 이는 Area #2 지역이 Area #3 지역에 비해 진동의 감쇠가 작고 진동을 멀리까지 전달함을 의미한다. 이런 결과는 같은 현장이라 할지라도 현장의 구역별로 암반의 특성, 클링커층의 분포 상황,

발파 패턴 등이 달라짐에 따라 진동 전달의 특성이 달라질 수 있음을 의미한다. Area #2 지역의 진동 감쇠가 적고 진동을 멀리까지 전달 할 수 있다는 결과는 자유면의 영향도 클 것으로 판단된다. Area #3 지역은 충분하지는 않지만 1.5m의 자유면이 형성된 상태에서 발파가 이루어 졌지만 브레이커에 의한 인공적으로 trench를 형성한 Area #2 지역에서 trench가 자유면으로서 역할을 제대로 수행하지 못하였다고 할 수 있다. 자유면이 충분하지 못함으로 화약의 폭발에 의한 화약의 힘이 저항선과 자유면 사이의 암반을 효과적으로 파쇄 하는데 쓰이지 못하고 암반으로 더 전달되었을 것이라 판단할 수 있다.

Table 3은 Split DeskTop 3.0을 통한 전체 시험발파에 대한 발파 파쇄입경 분석에서 60cm 이하의 파쇄입경은 전체의 70%로 나타났으나 입경 60cm이상의 대과발생 빈도가 높았다. 일반적인 노천 발파 설계를 적용했으나 발파효율이 매우 낮았던 Area #1의 평균 비장약량이 0.32kg/m³이며 비장약량이 0.40kg/m³을 적용해 비교적 효과적인 발파를 수행했던 Area #3의 결과로 비추어볼 때 클링커층을 포함한 현무암 암

반에서 효율적인 발파를 위해서는 클링커 상부암반 두께의 70~80% 심도에 대해서만 천공을 실시하고 0.40~0.45kg/m³의 비장약량이 필요한 것으로 판단된다.

4.2 진동 주파수 분석

Fig. 7의 주파수 분석결과 현장의 발파 주파수 대역이 대부분 5Hz부터 29Hz 사이에서 발생하였으며 대부분 7Hz~19Hz 사이의 저주파수 대역을 나타낸다. 이러한 현상은 현장에 불규칙하게 분포한 클링커층과 암석이 다공질의 현무암으로 지질적 특성에서 기인한 것으로 생각된다. 계측위치 별 주파수 분석과 발파패턴 별 주파수 분석에 의하면 발파위치 및 규모에 의한 주파수대역의 특별한 변화는 없는 것으로 판단되었다.

보안 구조물의 종류, 기초의 지반상태, 구조물 주변의 기하학적 배치, 구조물의 폭과 높이에 따라 구조물의 고유주파수는 다르게 나타나나 대부분의 구조물에서 FFT 분석을 통한 구조물의 응답 주파수를 분석한 고유 주파수는 대략 20Hz 미만의 저주파수 대역으로 알려져 있다. 이와 관련한 미광무국의 연구결과에 따르면 구조물의 고유진동수는 층수의 영향을 받으며 구조물의 동적 응답특성을 조사한 결과 벽의 고유진동수의 범위가 12~20Hz 사이로 평균 15Hz로 나타났

다(양형식, 1992). 발파진동으로 인한 주파수가 주변 구조물의 안정성 평가에 큰 영향을 미치는 사실로 미루어볼 때 당 현장의 발파로 생기는 진동은 에너지를 멀리까지 이동시키며 발파진동의 주 주파수 대역이 구조물의 고유주파수와 유사한 10~20Hz으로서 발파로 인한 진동이 지속적으로 발생될 경우 주변 구조물의 안정성에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

5. 제주도에서 수행된 시험발파 보고서 검토

신화역사공원조성사업 부지조성공사 사업장 내 3곳에서 실시된 시험발파를 통한 현장 발파진동추정식과 2008년 6월 실시된 1차 시험발파((주)대영지오발파엔지니어링, 2008)⁸⁾, 2008년 4월 실시된 제주 서귀포 혁신도시 개발사업 조성공사에서 실시된 시험발파(도올발파기술사사무소, 2008)²⁾ 및 제주 안덕-대정간 국도 확장 및 포장공사의 시험발파 및 발파영향평가보고서(신안화약기술사사무소, 2005)를 비교함으로써 제주도 암질에 대한 발파특성을 비교해 볼 수 있을 것으로 판단된다. Table 4를 통해 각 현장에서 도출된 95%의 신뢰도를 갖는 지승근의 발파진동추정식을 확

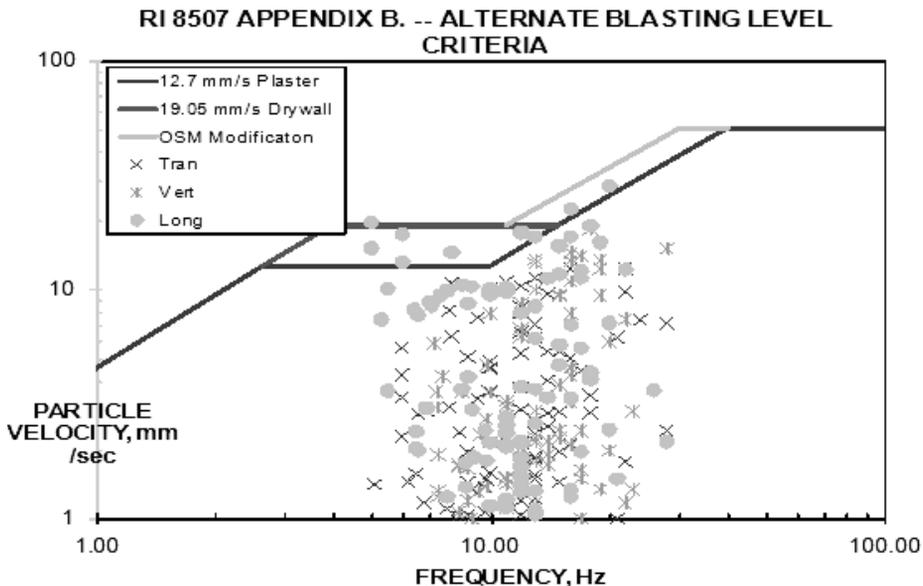


Fig. 7. Analysis of vibrations frequency.

Table 4. Vibration predictive equations on Jeju island

Section	Position	Rock type	Clinker	Vibration predictive equation	R	Events
시험발파 2010. 08	서귀포시 안덕면	왕이매 조면현무암	유	$V_{95\%} = 295(SD)^{-1.39}$	0.880	128
신화역사 시험발파 2008. 06	서귀포시 안덕면	왕이매 조면현무암	유	$V_{95\%} = 268.58(SD)^{-1.582}$	0.963	48
서귀포 혁신도시	서귀포시 서호동	응회암 조면현무암	유	$V_{95\%} = 1200.6(SD)^{-1.81}$	0.967	43
안덕대정 국도확장	남제주 대정읍	현무암질 화산암	무	$V_{95\%} = 41354.93(SD)^{-2.7929}$	0.949	15

제주도에서 실시된 4번의 시험발파로 얻어진 감쇠계수는 신화역사현장의 2차 시험발파($n=-1.39$) < 신화역사현장의 1차 시험발파($n=-1.582$) < 서귀포 혁신도시 시험발파($n=-1.81$) < 안덕-대정 국도확장공사($n=-2.7929$) 순으로 나타났다. 자료의 수가 부족한 안덕-대정 국도확장공사를 제외한 나머지 3곳의 감쇠계수를 비교해 볼 때 서귀포 혁신도시 시험발파의 경우 $n=-1.81$ 로 비교적 높은 감쇠지수를 갖는 것으로 추정되었으며 신화역사현장의 1, 2차 시험발파의 감쇠지수는 -1.582 , -1.39 로 비교적 낮은 감쇠지수를 보이는 것으로 추정되었다. 이러한 결과로 동일한 설계의 발파의 경우 타 지역보다 신화역사현장의 발파진동이 비교적 감쇠가 적고 멀리까지 이동하는 것으로 판단할 수 있다. 신화역사현장의 이러한 진동 감쇠 특성은 발파로 발생된 진동의 진동수가 대부분 10~20Hz 사이의 저주파인 것도 원인으로 작용했을 것으로 판단된다.

다공질 현무암질 화산암으로 이루어지고 클링커층에 대한 언급이 없는 안덕-대정간 국도확장공사의 시험발파의 주파수 특성은 30Hz 부터 100Hz 이상의 고주파수 대역을 형성하는 것을 확인할 수 있었으며 클링커층이 존재하는 암반 상태에서 시험발파를 실시한 3곳 모두 10~20Hz 사이의 저주파 대역을 보이는 것으로 보아 발파 진동이 저주파 특성을 갖는 것은 클링커층과 깊은 연관이 있을 것으로 판단된다.

6. 클링커층이 존재하는 현장 암반을 고려한 최적 발파방법 검토

당 현장 전체에 걸쳐 매우 불규칙하게 나타나는 클

링커층은 발파를 위한 천공 작업시 천공의 심도를 결정짓는 가장 큰 요인이다. 그러므로 기존의 진동허용속도와 보안물건과의 안전거리에 기준한 발파설계만으로는 효과적인 발파설계가 이뤄질 수 없으며 현장의 클링커층과 굴착심도를 확인하고 각각의 심도에 따라 굴착방법을 달리해야 할 것이다. 수회의 시험발파만으로 결론짓기 어려우나 굴착심도 내에 클링커층이 존재할 경우와 존재하지 않는 경우로 나누어 다음과 같이 대처할 수 있을 것으로 보인다.

6.1 굴착심도 내에 클링커층이 존재하지 않는 경우

- 1) 굴착심도가 2.5m 이상으로 당 현장의 실시설계보고서 표준발파공법 Type II 이상의 공법으로 발파가 가능한 지역은 최 근거리 보안물건의 허용진동속도와 보안물건 간의 안전거리에 기준한 발파설계를 준용하여 발파를 실시할 수 있다.
- 2) 굴착심도가 2.5m 이내인 지역 중 실시설계보고서의 Type I 에 해당하는 지역은 브레이커와 굴삭기를 이용하여 굴착할 수 있다. Type I 에 해당하는 지역 중, 천공심도 1.5~2.0m의 leveling 발파를 실시할 수 있으나 leveling 발파에서 빈번하게 나타나는 비산의 대책을 강구하여야 하며 중요 보안물건 인근에서는 실시하지 않는 것이 좋다.
- 3) 최근거리 보안물건의 허용진동속도와 보안물건 간의 안전거리에 기준한 발파설계에 관계없이 굴착심도가 1.5m 이하인 지역은 대부분 표토와 비교적 풍화가 심한 풍화암으로 이루어진 경우가 대부분이므로 발파보다는 브레이커공법을 실시하는 것이 타당해 보인다.

6.2 굴착심도 내에 클링커층이 존재하는 경우

- 1) 최 근거리 보안물건의 허용진동속도와 보안물건 간의 안전거리에 기준한 발파설계에 관계없이 클링커층이 심도 1.5m 이내에 존재할 경우엔 클링커층을 통과하여 천공하는 것이 불가능하므로 규모에 따라서는 발파공법보다 브레이커공법을 이용하는 것이 경제적이 될 수 있다.
- 2) 클링커층의 심도가 1.5m~2.5m 이내인 경우는 최소화약 단위의 leveling 발파를 실시할 수도 있으나 효과적인 발파를 위해 필요한 비장약량(0.4~0.45 kg/m³)을 고려해 발파 설계할 경우 비산의 우려가 크므로 발파규모와 주변 보안물건과의 상관관계를 고려하여 브레이커 공법을 실시하는 것도 타당하다 할 수 있다.
- 3) 클링커층의 심도가 2.5m 이상인 경우 클링커 상부 암반두께의 70%에 해당하는 깊이로 천공한 뒤 실시설계보고서 및 도로공사노천발파 설계실시요령의 Type II 이상의 공법에 0.40~0.45 kg/m³의 비장약량을 적용하여 발파를 실시할 수 있다. 또한 발파암과 클링커층을 제거하고 남은 암반에 대해서는 위의 (1), (2)의 방법을 고려하여 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

7. 결론

- 1) 시험발파를 통해 얻어진 총 128개의 진동데이터를 분석한 결과 현장의 발파진동추정식은 자승근 환산거리를 적용시킬 경우 $V_{95\%} = 295(SD)^{-1.39}$ (상관계수 R=0.88, 표준편차 $\sigma=0.259$)로 추정되었다.
- 2) 클링커층을 포함한 현무암 암반에서 발파진동 주파수는 대부분 10~20Hz의 저주파수 대역에 분포하는 것으로 나타났다.
- 3) 클링커를 포함한 다공질 현무암 암반에서 발파 진

동이 저주파 특성을 갖는 것은 현무암의 다공질 특성보다 클링커층과 깊은 연관이 있을 것으로 판단된다.

- 4) 클링커층을 포함한 현무암암반에서 효율적인 발파를 위해서는 클링커 상부암반 두께의 70~80% 심도의 천공과 0.40~0.45 kg/m³의 비장약량이 필요한 것으로 판단된다.

클링커층은 발파를 위한 천공작업시 천공의 심도를 결정짓는 가장 큰 요인이다. 그러므로 기존의 진동허용속도와 보안물건과의 안전거리에 기준한 발파설계만으로는 효과적인 발파설계가 이뤄질 수 없으며 현장의 클링커층과 굴착심도를 확인하고 굴착심도 내에 클링커층이 존재할 경우와 존재하지 않는 경우로 나누어 심도에 따라 굴착방법을 달리해야 할 것이다.

참고문헌

1. 남정만, 고희성, 오동일, 2003. 12, 제주도 화산쇄설물(송이)의 강도특성에 관한 연구, 한국도로포장공학회 논문집, pp. 37-47.
2. 도올발파기술사사무소, 2008. 04, 제주 서귀포 혁신도시 개발사업 조성공사 시험발파에 의한 발파영향권분석, 영진종합건설(주), pp. 95-106.
3. 건설교통부, 2006, 도로공사 노천발파 설계 시공 요령.
4. 신안화약기술사사무소, 2005. 7, 안덕-대정간 국도 확장 및 포장공사, 삼환기업(주), pp. 29-106.
5. 양형식, 1992, 발파진동학, 구미서관, 서울, pp.91-93.
6. 오준호, 2007, 신화-역사공원조성사업 토질조사보고서, 제주국제자유도시개발센터, pp. 33-47.
7. 오준호, 유병호, 2007. 9, 신화역사공원 조성사업 실시설계보고서, 제주국제자유도시개발센터, pp. 117-124.
8. (주)대영지오발파엔지니어링, 2008.06, 신화역사공원 조성사업 부지조성공사 시험발파 결과 보고서, (주)중도건설, (주)동양건설산업, 용우종합건설(주), pp. 54-62.
9. 한국자원연구소, 2000, 모슬포 한림도폭 지질보고서, 제주특별자치도.



양형식

전남대학교 에너지자원공학과 교수

Tel: 062)530-1724

E-mail: hsyang@jnu.ac.kr



김남수

NSB 기술사사무소 대표

Tel: 02)458-2646

E-mail: nsbpro@hanmail.net



장형두

현재 전남대학교 대학원
에너지자원공학과 박사과정

Tel: 062)-530-0824

E-mail: hdjang75@gmail.com



김원범

현재 전남대학교 대학원
에너지자원공학과 박사

Tel: 062)530-0824

E-mail: janus@jnu.ac.kr



김정규

전남대학교 대학원
지구시스템공학과 석사

Tel: 062)530-0824

E-mail: evangelong@hanmail.net



고영훈

현재 전남대학교 대학원
에너지자원공학과 석사과정

Tel: 062)530-0824

E-mail: dddd8401@nate.com



김승준

현재 전남대학교 대학원
에너지자원공학과 석사과정

Tel: 062)530-0824

E-mail: jangdog99@nate.com



문희숙

현재 전남대학교 대학원
에너지자원공학과 석사과정

Tel: 062)530-0824

E-mail: dripiest@nate.com