

전자뇌관을 이용한 수평방향 데크차지 발파공법의 효율성검토 연구

A Study on the Efficiency of Horizontal Direction Deck-charge Blasting Method Using Electronic Detonator

윤 지 선¹ Yoon, Ji-Sun
한 석 주² Hahn, Suk-Ju
배 상 훈³ Bae, Sang-Hun

Abstract

In close to downtown construction, the main problem is complaints caused by blasting vibration and noise. To reduce blasting vibration and noise, deck-charge blasting method using electronic detonator can be more secure because there is no cut-off problem. And in this method it is possible to blast in horizontal direction. In this study, the efficiency of horizontal direction deck-charge blasting method using electronic detonator is compared to that of the existing blasting method. And the possibility of applying the construction site is evaluated. As a result, the reduction of blasting vibration, noise and secondary breaking has been determined, as well as large-scale blasting in the vibration criterion can be regulated by the overall increase in blasting efficiency.

요 지

도심지 근접시공 발파에는 진동·소음에 따른 민원의 문제가 주요시된다. 발파 진동·소음을 줄이기 위해 최근에 국내에 도입된 전자뇌관을 사용하여 데크차지 공법에 적용하면 cut off 등과 같은 현상이 없어져서 안전한 시공이 가능하고, 또한 수평방향으로 발파가 가능해져서 대규모 발파가 가능해진다. 본 연구에서는 전자뇌관을 사용한 수평방향 데크차지 공법의 효율을 기존 공법의 것과 비교해보고, 현장적용 가능성을 평가해보았다. 그 결과 발파 진동·소음과 2차 파쇄량의 감소를 확인하였고, 뿐만 아니라 전반적으로 발파 효율이 증가하여 진동 규제 기준치 내에서 대규모 발파가 가능함을 확인하였다.

Keywords : Horizontal direction deck-charge, Electronic detonator, Blast-vibration

1. 서 론

최근 도심지 재개발이 많아지고 있지만 주변 부지매

입비용이 만만치 않음에 따라, 경제적인 이유에서 차라리 지하로 깊게 파내려가려는 시도가 많아 졌다. 과거에 주로 광산업에서 주로 사용되던 발파 작업을 이제는 도

1 정희원, 인하대학교 토목공학과 명예 교수 (Member, Emeritus Professor, Dept. of Civil Engineering, Inha Univ., Tel: +82-32-860-7560, Fax: +82-32-873-7560, jyoan@inha.ac.kr, 교신저자)

2 비회원, 인하대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil Engineering, Inha Univ.)

3 정희원, SH블래스텍(주) 대표 (Member, President, SH BLASTech Co., Ltd.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

심지에서 주로 하게 되었는데, 발파작업 특유의 굉음과 진동은 ‘위험하다’는 인식을 쉽게 갖게 한다, 이런 이유 등으로 다른 작업에 비해 인근 거주민들이 민감하게 반응하게 되어 민원 및 소송이 증가하는 것과 같은 사회적 문제로 되고 있다. 계속되는 민원 및 소송은 최악의 경우 공사 중단으로도 이어질 수 있기에, 이를 줄이기 위한 기술적인 노력을 계속 하고 있다.

발파 진동과 소음에 관련된 민원 및 소송을 줄이기 위한 노력으로, 현재 도심지나 민가와 같은 진동·소음에 예민한 지역에 대해서는 미진동공법 혹은 무진동공법을 적용하고 있다. 하지만 이러한 공법들은 소음과 진동을 저감하는 데는 탁월하지만 공기가 증가한다던가, 작업량이 증가하는 것과 같은 시공성 및 경제성이 크게 떨어진다 단점이 있다(Won et al., 2008). 지난 굴착시 작업효율의 측면에서 발파를 통한 굴착공법 만큼 고효율의 다른 공법은 없으므로, 발파로 인한 발파 진동 및 소음을 직접적으로 줄일 수 있는 공법을 연구하는 것에 초점을 맞추었다.

소음진동관리법 시행규칙(환경부령 제409호)의 ‘생활소음·진동의 규제기준’을 살펴보면 발파에 대하여 진동 75dB(V), 소음 75dB(A)의 규제기준을 적용할 수 있으며, 소음진동공정시험 방법(환경부, 제2003-221호 진동편 제3장 제2절)에 관한 법률에서 발파횟수를 $10\log N$ (N은 시간대별 평균발파횟수, 단 지발발파는 발파횟수를 1회로 간주)만큼 보정함에 따라, 당일 측정 진동치가 규제기준을 넘지 않았다 하더라도 발파횟수가 많으면 기준치를 초과하는 경우가 생길 수 있다. 따라서 최대한 적은 횟수와 작은 소음으로 많은 양의 암을 대규모 발파해야하는 것이 주요 관건이 되고 있다.

이러한 관점에서, 데크차지 발파공법은 기존 공법의 대안으로 생각할 수 있다. 최근에 도입된 전자뇌관을 사용하면 기존의 데크차지 발파공법이 가진 단점(Cut Off 현상 발생, 뇌관시차의 한계로 현실적으로 적용불가능)을 최소화 시킬 수 있으며, 전자뇌관이 가진 장점을 통해 기존에 데크차지 발파공법이 가지고 있던 장점을 더욱 극대화 시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전자뇌관을 이용한 수평방향 데크차지 공법(HDDM)의 효율을 기존 공법의 것과 비교해보고, 현장적용 가능성을 평가하였다.

2. 수평방향 데크차지 공법의 원리

데크차지(deck-charge)란 발파공내 주상장약을 분할

하는 것을 의미한다. 분할한 주상장약의 일부가 다른 부분의 폭약을 전폭시키지 않게 분할된 폭약 사이를 전색물로 충전하여야 한다. 발파진동값은 일반적으로 지발당장약량에 비례하는데, 분할해서 장약하는 이유는 공당장약량을 일정하게 한 상태에서 지발당장약량을 감소시키기 위함이다.

기존 전기뇌관 및 비전기뇌관과는 달리 전자뇌관은 초시설정이 자유롭고 무한단차구현이 가능하여 진동 및 소음저감은 물론 1회 발파시에 보다 많은 공을 기폭시킬 수 있다(Lee et al., 2004). 데크차지 공법에서 전자뇌관이 주목받는 이유는 기존의 데크차지 공법에서는 cut off 현상(선발파의 영향으로 뇌관의 각선이나 암반체 내에서 뇌관의 단선 등에 따라 후속발파가 불발이 되는 현상 등)에 대한 우려 때문에 안전성에 큰 문제가 생기기 때문이다. 하지만 전자뇌관 고유의 기폭시스템에서는 cut off로 불발되는 경우가 없다. 또한 전자뇌관을 사용함으로써 수평방향으로 데크차지 발파가 가능하다는 점이다. Fig. 1에서와 같이 기존방식의 데크차지는 순서에 따라 수직으로 발파하고 다음 공으로 옮겨간다. 하지만 수평방향 데크차지는 순서에 따라 수평으로 우선 발파한 후 다음 단으로 옮겨 간다. 수평방향으로 우선 발파를 시도하면 자유면 확보가 용이해지는데, 기

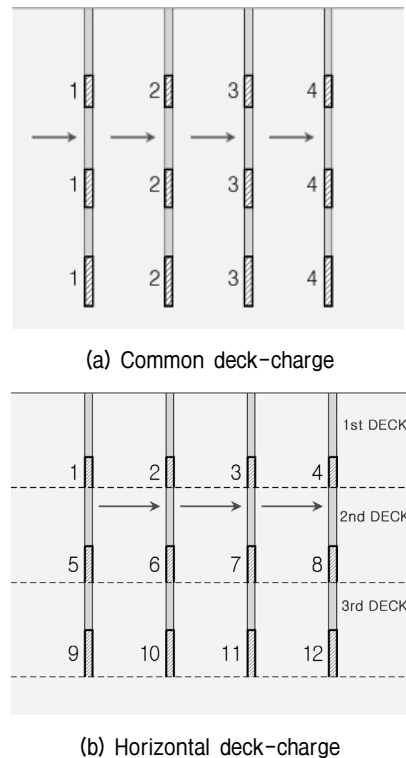


Fig. 1. Schematic diagram of deck-charge blasting method

존의 전기식 혹은 비전기식 뇌관을 이용한 데크차지는 수평방향으로의 발파가 불가능하다. 이러한 수평방향 데크차지 공법은 발파공 수에 제한을 받지 않는다는 점, 소할율이 적다는 점, 비산 염려가 없다는점, 장공 천공이 가능하여 1회 발파에 생산량을 극대화 할 수 있다는 점과 같은 장점 들을 기대할 수 있다.

3. 현장실험

3.1 현장개요 및 지질현황

전자뇌관을 이용한 수평방향 데크차지 공법의 현장 실험을 위해 시험발파를 실시한 지역은 Fig. 2에서 보이는 서울 마포구 아현동 635번지 일원으로, 현장의 주변으로 삼환아파트, 공덕 삼성 래미안 아파트 등의 거주지 및 상가, 마포경찰서, 한서초교, 한세전산고 등의 보안 물건들이 위치해 있어 발파 시 진동제어가 필요한 지역이다. 본 지역에 분포하는 지질은 선캠브리아기의 호상 흑운모편마암과 흑운모화강암이 주 기반암으로 이루어져 있고, 또한 일부 지역에 산성암맥인 규장암이 관입한 상태이며, 그 위에 신생대 제 3기의 충적층이 부정합으로 자리 잡고 있어 전반적으로 심한 풍화상태를 띄며 절리와 부분적으로 파쇄대가 발달하는 양상을 보이는 지역이다.

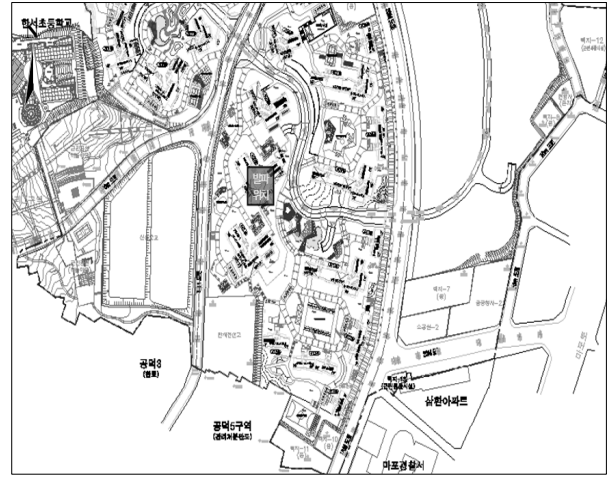


Fig. 2. Location of test site

3.2 실험방법

위 현장에서 총 3회의 시험발파를 수행하였다. 총 3회 중에서 전기뇌관을 이용한 정밀진동제어발파방식 (표준발파패턴 TYPE II)으로 1회, 전자뇌관을 이용한 수평방향 데크차지 발파공법으로 2회를 수행하였다. 두 차례의 수평방향 데크차지공법은 각각 40공과 60공의 발파공 수에 차이를 두었으며, 시험발파 제원과 각 발파 패턴의 평면도 및 단면도를 Table 1, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에 나타내었다.

수평방향 데크차지 발파공법에서는 초시의 자율성이

Table 1. Spec. of trial blasting

Classifications (unit)	TYPE II	HDDM
Drilling diameter (mm)	∅51	∅51
Drilling direction	Vertical	Vertical
Drilling length (m)	1.5	4.5
Burden (m)	0.6	0.7
Spacing (m)	0.7	0.8
Charge per hole (kg)	0.250	2.625
Maximum charge per delay (kg)	0.250	1.25
Number of detonator per hole (EA)	1	3
Amount of crushing per hole (m ³)	0.63	2.268
Number of holes by trial blasting	10	60 / 40
Total amount of charge by trial blasting (kg)	2.5	156.75 / 100
Total amount of crushing by trial blasting (m ³)	6.3	226.8
Detonator	HiDETO Plus (Electric detonator)	Uni Tronic 500 (Electronic detonator)

뛰어난 전자뇌관을 사용함에 따라, 0~10000ms까지 1ms 단위로 초시적용이 가능하다. 최적초시에 관한 연구는 최근 다양하게 연구되고 있는데, 최근의 단공발파 시험에서 가장 적합한 최적초시로 34ms가 제시된 바 있다(Yoon et al., 2008). 따라서, 본 현장실험에서는 초시 입력의 용이성과 오차 등을 감안하여 이에 가까운 35ms를 최적초시로 선정하였다.

본 시험발파의 진동에 관련된 회귀분석 데이터를 확

보하기 위해, 발파지점으로부터 가장 근접한 보안물건인 한세전산고(대략 110~120m)와 다른 보안물건들을 포함하여 10개의 계측지점을 선정하였고, 현장내 이격거리별로 계측기를 설치하였다. 계측기의 진동센서는 스파이크를 활용하여 지반에 고정시켰다. 계측기의 trigger level을 0.03cm/sec로 최소 진동치를 설정하였는데, 이는 해당지역의 암진동 및 기타 잡진동이 측정되지 않게 하기 위함이다.

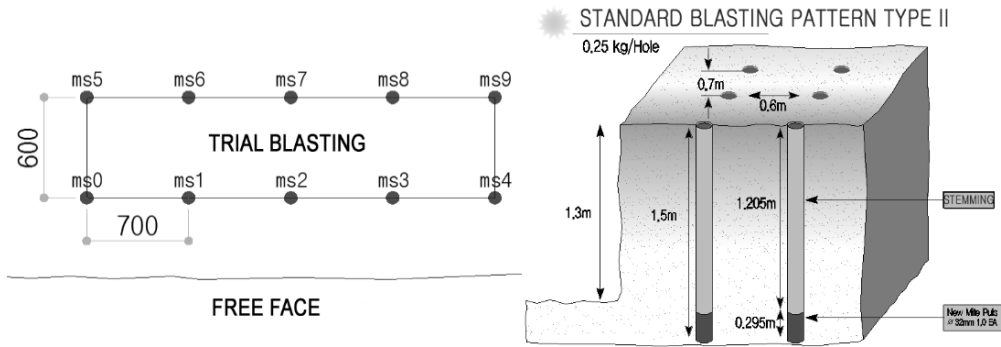


Fig. 3. Standard blasting pattern type II for 10 holes

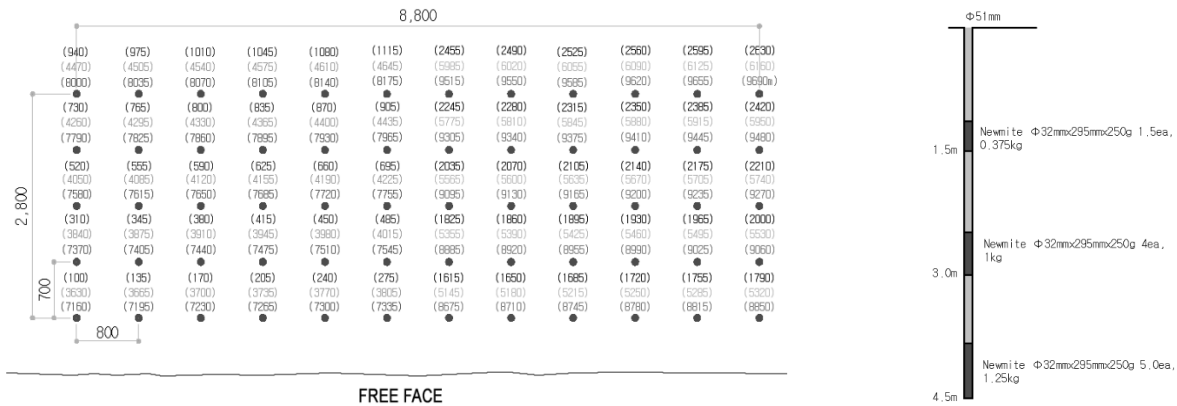


Fig. 4. Blasting pattern of horizontal deck-charge blasting method (60 holes)

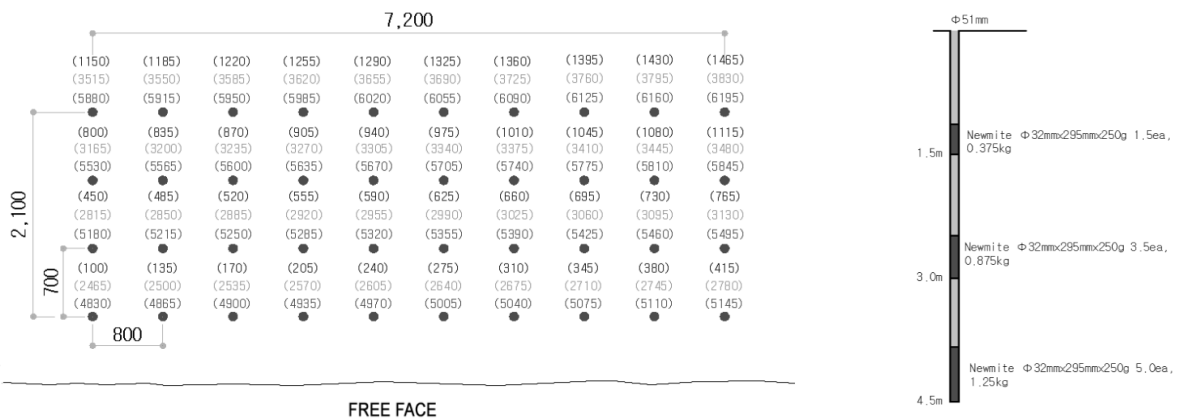


Fig. 5. Blasting pattern of horizontal deck-charge blasting method (40 holes)

4. 현장실험 결과 및 분석

전자뇌관을 이용한 정밀진동제어발파와 전자뇌관을 이용한 수평방향 데크차지 60공/40공 시험발파의 측정 결과가 Table 2 와 같다. 여기서 측정지점 #6~#10의 측정결과는 측정기의 trigger level이 0.03cm/sec, 즉 측정기가 측정할 수 있는 최소진동치 미만으로 측정되지 않았다.

이들 측정데이터를 이용해 각각의 발파에 대해서 회귀분석을 한 결과, Fig. 6과 같이 자승근 그래프가 얻어

지며 자승근 환산거리 식 (1)의 K 상수와 n 상수를 결정할 수 있다.

$$V = K \left[\frac{D}{W^{1/2}} \right]^{-n} \quad (1)$$

여기서, V 는 최대 입자 속도를 의미하며 단위는 cm/sec 이고, 이 값이 클수록 진동이 크다. K 와 n 은 발파조건이나 암반 특성에 의해 변화하는 계수이며, D 는 발파지점에서 측정지점까지의 거리이고 단위는 m이다. W 는 지

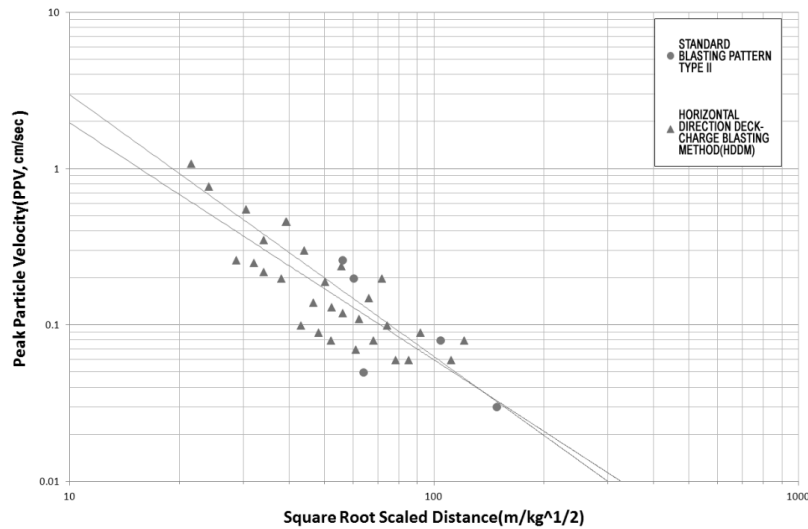


Fig. 6. Comparison for regression analysis of each trial blasting

Table 2. Result of trial blasting

Locations	Type II					HDDM(60 holes)				HDDM(40 holes)			
	PPV(cm/sec)			Distance	PPV(cm/sec)			Distance	PPV(cm/sec)			Distance	
	Tran	Vert	Long		Tran	Vert	Long		Tran	Vert	Long		
1	1st deck	0.04	0.04	0.05	32m	0.07	0.05	0.11	38m	0.04	0.05	0.06	52m
	2nd deck					0.12	0.10	0.20		0.07	0.07	0.08	
	3rd deck					0.14	0.16	0.22		0.10	0.12	0.14	
2	1st deck	0.13	0.19	0.20	30m	0.34	0.46	0.32	24m	0.20	0.19	0.18	44m
	2nd deck					0.56	0.77	0.52		0.27	0.27	0.30	
	3rd deck					1.08	0.99	1.05		0.46	0.39	0.37	
3	1st deck	0.20	0.16	0.26	28m	0.12	0.09	0.13	32m	0.24	0.12	0.16	34m
	2nd deck					0.19	0.20	0.25		0.35	0.18	0.21	
	3rd deck					0.24	0.26	0.25		0.55	0.29	0.33	
4	1st deck	0.04	0.08	0.07	52m	0.04	0.06	0.06	48m	0.07	0.09	0.09	56m
	2nd deck					0.07	0.09	0.08		0.12	0.09	0.11	
	3rd deck					0.08	0.10	0.10		0.14	0.14	0.19	
5	1st deck	0.03	0.03	0.03	74m	0.06	0.03	0.04	68m	0.09	0.04	0.04	74m
	2nd deck					0.07	0.08	0.08		0.10	0.05	0.05	
	3rd deck					0.05	0.06	0.07		0.15	0.08	0.08	
6~10	Not Measured			90m~	Not Measured			85m~	Not Measured			95m~	

Table 3. Comparison for fractured particle size of each trial blasting

Blasting method	Ratio of fractured particle size	Secondary blasting requirement ratio		Remarks
Type II	35%	65%		∅ 300mm (For embankment)
HDDM(60 holes)	89%	11%	about 15%	
HDDM(40 holes)	81%	19%		

발당 장약량을 의미하며 단위는 kg이다. 여기서 발파후의 진동 V 를 감소시키기 위해서 보안물건까지의 거리 D 는 현실적으로 변화를 줄 수 없으므로, 일반적으로 지발당 장약량 W 를 작게 해서 진동을 감소시키게 된다(Gi et al. 1999).

다음은 각 발파의 95% 신뢰도를 기준으로 제시된 상승근 환산거리 식이며, 식 2는 정밀진동제어발파의 상승근 환산거리 예측식이고, 식 3은 수평방향 데크차지 60공인 경우와 40공인 경우를 합쳐 표현한 예측식이다.

$$V_{95\%} = 360 \left[\frac{D}{W^{1/2}} \right]^{-1.65} \quad (2)$$

$$V_{95\%} = 150 \left[\frac{D}{W^{1/2}} \right]^{-1.50} \quad (3)$$

위와 같이 각 발파의 회귀분석을 통해 얻어진 예측식들을 비교해보았다. K 값 즉 식 2와 식 3에서 각각 360과 150으로 제시된 것은 Fig. 6과 같은 log-log 그래프의 y축에 맞는 값을 의미한다. K 값이 크면 보다 큰 진동이 보다 멀리 전파된다. n 값 즉 식 2와 식 3에서 각각 1.65와 1.50으로 제시된 것은 log-log 그래프의 직선 기울기를 의미한다. n 값이 크면 진동의 영향범위가 보다 작아진다. 국토해양부는 일반적인 발파 설계시에 K 값을 200, n 값을 1.6으로 제시하고 있다(건설교통부 2006). Fig. 6에서 나타나듯 수평방향 데크차지의 95% 신뢰도 예측식은 정밀진동제어발파의 95% 신뢰도 예측식 보다 하단(혹은 좌측)에 위치한다. 이는 동일한 지발당 장약량으로 비교하였을 때 정밀진동제어발파에 비해 수평방향 데크차지 방식이 진동의 크기가 작고, 진동이 퍼지는 범위도 더 작다는 것을 의미한다.

국내의 주요 발주처에서 통상적으로 적용되는 0.3 cm/sec(주택, 아파트) 기준으로 회귀분석결과를 검토하였다. 그 결과 동일한 지발당 장약량 250g을 기준으로 비교하였을 때 정밀진동제어발파는 보안물건과 최소 40m 이격이 필요하였고, 수평방향 데크차지 발파공법은

30m 정도의 최소 이격거리가 필요하다고 분석되었다.

또한 굴착 깊이의 차이도 고려해볼 필요도 있다. 수평방향 데크차지 발파공법의 굴착 깊이 4.5m에 대응하는 발파패턴으로 국토해양부에서는 표준발파패턴 V 일반 발파를 제시하고 있다(건설교통부 2006). 이 경우 지발당 장약량으로 5kg를 사용하라고 제시되며 0.3cm/sec 조건에 만족시키기 위해 최소 140m를 이격시키라고 하고 있다. 이를 통해 전자뇌관을 사용한 수평방향 데크차지 발파공법은 기존의 발파공법과 비교해보았을 때 진동감소 측면에서 탁월한 효과가 있음을 알 수 있다.

다음으로 각 시험발파의 결과를 파쇄입도의 측면에서 검토해 보았다. 발파암의 파쇄입도 분석에는 Wipfrag라는 프로그램을 사용하였고, 그 결과를 종합하여 Table 3에 정리하였다. 이에 따르면 성토용 ∅300mm 기준으로 정밀진동제어발파는 65%의 소할이 필요하며, 수평방향 데크차지는 대략 15% 소할이 필요하다고 분석되었다. 따라서 정밀진동제어발파와 비교했을 때 수평방향 데크차지 공법을 사용하면 2차 파쇄량이 감소하므로 기존의 정밀진동제어발파에 비해 유리하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 발파로 인하여 발생하는 진동을 감소시키기 위한 방법으로 데크차지 발파 원리를 이용하였고, 기존의 데크차지 발파공법의 단점이 전자뇌관을 사용함으로써 상당 수 보완된다는 점에 착안하여 수평방향 데크차지 발파공법을 사용하였을 때 기존의 방법과의 차이를 비교 분석해보았다. 위와 같은 현장적용실험을 통해 얻어진 결론은, 수평방향 데크차지 방식은 정밀진동제어발파에 비해 진동의 크기가 작고, 진동이 퍼지는 범위도 더 작게 나타났으며, 회귀분석을 통해서 분석된 거리별 허용 지발당 장약량은 30m~40m까지의 근거리 장약량은 차이가 없지만 동일폭원에서 발파할 경우 원거리에서의 계측시 수평방향 데크차지 발파공법은 정밀진동제어발파에 비해 많은 장약량이 허용된다

는 것을 알 수 있었다. 즉 보다 많은 장약량으로 규제기준치 이내에서 대규모의 발파가 가능하여 공기단축 등의 효과가 있어 경제적인 뿐 아니라, 0.3cm/sec 조건을 만족시키기 위해 동일한 지발당 장약량과 동일한 굴착깊이로 각각의 최소 이격거리를 비교해 보았을 때 수평방향 데크차지 방식은 다른 발파공법 정밀진동제어발파 혹은 일반발파에 비해 가장 작은 최소 이격거리를 필요로 하였다.

따라서 수평방향 데크차지 공법의 현장실험을 통해서 1회 발파로 인한 굴착 효율성 확인과 비산의 안정성, 또한 기존의 데크차지 발파에서 문제가 되었던 cut off 현상의 위험이 없다는 것과수평방향 데크차지 공법을 사용하면 정밀진동제어발파와 비교하여 2차 파쇄량이 감소한다는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산(주)건설부문의 ‘도심지 근접시공 암반발파공법의 개발’에 대한 연구과제로부터 지원되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부 (2006), *도로공사 노천발파 설계·시공 지침*, pp.7-8.
2. 기경철, 김일중 (1999), *산학인을 위한 발파공학*, 기공사, pp.306-310.
3. Won, Y. H., Kang, C. W., and Kim, J. I. (2008), “A Blasting Experience in a Shallow Tunnel Section Overlain by Residential Structures”, *EXPLOSIVES & BLASTING*, Vol.26, No.2, pp.99-107.
4. Yoon, J. S., Choi, S. H., and Bae, S. H. (2008), “A Basic Study on Development of Orchestra Blasting Method -About the Application of Rhythm-”, *EXPLOSIVES & BLASTING*, Vol.26, No.1, pp.45.
5. Lee, S. H., Yoon, J. S., Cho, Y. G., and An, B. D. (2004), “A Case Study on the Application of the Electronic Detonator System in Tunnel Blasting”, *EXPLOSIVES & BLASTING*, Vol.22, No.1, pp.23-32.

(접수일자 2011. 12. 1, 심사완료일 2012. 6. 29)