

미진동화약을 적용한 터널발파 사례 연구

이동훈¹⁾, 박윤석^{1)*}, 이동희¹⁾, 유정훈²⁾

A Case Study on the Application of Low Vibration Explosives(LoVEX) in Tunnel Blasting

Dong-Hoon Lee, Yun-Seok Park, Dong-Hee Lee and Joung-Hoon Yoo

Abstract This study improved constructability and cost efficiency that are disadvantages of existing a mechanical excavation & similar blasting methods(plasma, gel, etc) and introduced cases of development and practical applications of Low vibration explosives(LoVEX) that minimizes blast vibration. The low vibration explosives(LoVEX) is suitable to Type-1 in standard blasting patterns of Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(MLTM) and delay blasting is possible. Moreover, the low vibration explosives improve construction and work efficiency while the level of vibration is reduced to about 60~70% of normal emulsion explosives. Additionally, this study suggested standard blasting patterns, the prediction equation of blasting vibration, and construction methods.

Key words Low vibration explosives(LoVEX), Mechanical excavation, Plasma, Blast vibration

초 록 본 고에서는 기존 기계식 굴착공법 및 암파쇄공법(플라즈마, 겔파쇄 등)의 단점인 시공성 및 경제성을 개선하고, 발파진동을 최소화한 미진동화약(LoVEX)의 개발 및 현장적용 사례를 소개하였다. 이 미진동화약은 국토해양부 표준발파패턴中 Type-1(미진동굴착공법, 125g 미만의 폭약 사용)에 부합하며, 지발발파가 가능하고, 시공성 및 작업효율을 대폭 개선하는 반면 진동수준은 일반 에멀전폭약의 약 60~70% 수준으로 나타났다. 추가적으로 현장 적용시 표준발파패턴, 발파진동추정식, 시공방법 등을 본 연구에 제시하였다.

핵심어 미진동화약(LoVEX), 기계식 굴착, 플라즈마, 발파진동

1. 서 론

일반적으로 터널굴착에 적용되는 발파공법은 다른 공법에 비해 시공성과 경제성이 우수한 반면 발파시 발생하는 폭굉압력에 의해 진동, 소음 등의 공해를 유발시키는 단점이 있다. 이에따라 도심지 터널 발파에서 진동을 최소화하기 위한 여러가지 미진동굴착공법

들이 제안되어 왔으나, 이러한 공법들은 대부분 기계를 사용하거나, 암파쇄공법(플라즈마, 겔파쇄 등)을 응용하는 경우가 대부분이다. 그러나 현장 시공시 공기 증가, 시공성 저하 등의 문제점이 있다(박과 정, 2010; 유정훈 외, 2012).

따라서 본 고에서는 기존 기계식공법 및 암파쇄공법의 단점인 시공성 및 경제성을 개선하고, 발파진동을 최소화한 미진동화약(LoVEX)의 현장적용 사례를 소개하였다. 이 미진동화약은 국토해양부 표준발파패턴中 Type-1(미진동굴착공법, 125g 미만의 폭약 사용)에 부합하며(국토부, 2006), 지발발파가 가능하고, 시공성 및 작업효율을 대폭 개선하는 반면 진동수준

¹⁾ (주)한화 Blasting사업팀

²⁾ 코오롱글로벌(주) R&BD Center

* 교신저자 : parkys@hanwha.co.kr

접수일 : 2012년 12월 2일

심사 완료일 : 2012년 12월 15일

게재 승인일 : 2012년 12월 21일

은 일반 에멀전폭약의 약 60~70% 수준으로 나타났다. 추가적으로 현장 적용시 발파패턴, 발파진동추정식, 시공방법 등을 본 연구에 제시하였다.

2. 제품성능 및 규격

미진동화약의 규격 및 성능은 표 1 및 2와 같다. 화약의 동적위력을 나타내는 폭발속도는 일반 에멀전폭약 대비 60% 수준이며, 정적위력을 나타내는 탄동구포는 66% 수준이다. 노천굴착용으로 개발된 기존 미진동화약(NewFINECKER)은 암반의 균열만을 발생시킬 목적으로 개발되어(저위력 및 22mm PE 튜브포장) 터널 굴착시 적용은 곤란하였다. 이 연구에 적용된 미진동화약(LoVEX)은 조성을 변경하고, 포장을 지포장으로 변경하여 터널 굴착시 적용 가능하도록 하였다(주)한화, 2012).

3. 현장시험개요

3.1 현장개요

현장 시험발파는 인천도시철도 2호선 ○○공구, 부산지하철 1호선 연장 ○○공구 및 우이~신설 경전철 ○○공구 건설공사에서 실시하였다. 우선 시험대상 현장인 인천도시철도 2호선 ○○공구 건설공사는 주변환경과 인천시 도시철도망 연계성 증대를 위해 건설되는 공사로 총연장 1.36km이며 이중 터널이 0.998km로 설계되었다. 과업구간 지질특성을 살펴보

면 시점부는 염리상화강암, 종점부는 호상편마암이 나타나며, 본 시험구간 터널은 암종이 호상편마암으로 상층부에 일부 토사층이 분포하고 있지만 터널구간은 전반적으로 보통암 이상 경암으로 나타난다.

부산지하철 1호선 연장 ○○공구 건설공사는 지역 여건에 적합한 교통망 구축을 위해 건설되는 공사로 사업구간 총연장은 1.71km 이며 본선은 터널 1.51km로 구성되어 있다. 사업지역에 분포하는 주요 암종은 백악기 유천층군내 다대포층의 퇴적암류로 구성되어 있으며 NW방향성을 보이는 저각의 층리가 발달되어 있다. 시험구간 터널은 전반적으로 저토피 구간으로 대부분 연암 이상이며 일부 파쇄대가 존재한다.

우이~신설 경전철 ○○공구 건설공사는 서울 동북부 지역의 대중교통 접근성 향상과 지역 균형발전을 도모하기 위해 시행되는 민간투자사업으로 총연장 11.4km에 달하는 대규모 공사이다. 주요 암종은 화강암이며, 토피고가 12m로 암반상태는 연암 이하로 나타난다. 세 현장 모두 터널 굴착방법은 NATM 공법이며 공사구간에는 주변에 다수의 보안건물(12~25m 이격)이 존재하여, 기계식 굴착공법 및 암파쇄공법(플라즈마 등)으로 설계가 이루어진 곳이다. 표 3은 시험 현장 현황을 나타낸 것이다.

3.2 시험방법

현장시험은 심발부 패턴을 일반 105mm 무장약공을 심발중심에 일렬로 배치하고 V-Cut을 실시한 경우, 362mm 선대구경을 시공했을 경우, 그리고 105mm

Table 1. Comparison of Specifications

제품명	약경 (mm)	약장 (mm)	본당중량 (g/ea)	상자당 포장수량 (ea/box)	상자당 순중량 (kg/box)	포장방법
미진동화약	32	200	120	100	12	지포장
일반 에멀전폭약	32	295	250	80	20	지포장
고성능 에멀전폭약	32	420	400	50	20	지포장

Table 2. Comparison of Performance

제품명	평균폭발속도 (m/sec)	평균탄동구포 (%)	가비중 (g/cc)	폭발열 (kcal/kg)	가스량 (l/kg)	낙추감도 (cm)
미진동화약	3,400	80	0.78	630	886	100이상
일반 에멀전폭약	5,700	120	1.1~1.2	880	950	100
고성능 에멀전폭약	6,000	160	1.2~1.3	1,300	865	100

Burn-hole을 이용하여 Burn-Cut을 실시한 경우에 나타나는 발파효율을 비교 분석하였으며, 천공장과 장약량 변화에 따라 시험발파후 그 결과를 비교해 보았다. 발파시 발생하는 진동측정은 계획노선상에서의 발파지점에서 가장 근접해 있는 지상부 보안건물 주변에 진동기를 설치하여 측정하였다. 다음 표 4는 현장 시험방법을 나타낸 것이다.

4. 현장적용 시험

4.1 발파패턴

시험현장 모두 터널굴착시 상·하반 분할하여 굴착을 진행하고 있는데 발파패턴 설계에서 인천도시철도 현장은 하부반단면에 천공장 1.2m, 지발당 0.25kg로 설계하였으며, 상부반단면 적용시에는 심발부에 105mm 무장약공을 일렬로 배열하고 심발부에 V-Cut를 배치

하였으며, 부산지하철 현장은 현재 시험구간 설계가 미진동 발파패턴 구간으로 막장면에서 약 50m 전방까지 직경 362mm 선진보링이 된 상태로서 미진동 화약에 적합한 패턴으로 천공간격을 조절하고 천공장을 고려하여 장약량을 계산하였다. 우이경전철 현장은 105mm 무장약공을 Burn-hole로 활용하여 심발부에 Burn-Cut를 배치하였다. 다음 표 5 및 6은 시험현장별 발파패턴을 나타낸 것이다.

4.2 시험결과 분석

시험발파 결과, 굴진효율(굴진율, 파쇄입도, 요철 등)을 분석해 보면 인천도시철도 현장에서 실시한 하부반단면 발파에서는 굴진효율이 양호한 수준으로 나타났지만, 상부반단면 발파에서는 발파 후, 막장면 일부에 걸쳐 미굴착으로 인한 요철이 발생하였고, 잔류공을 실측한 결과 굴진율은 60-70% 이상이며 파쇄입

Table 3. Conditions of test area

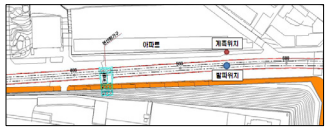

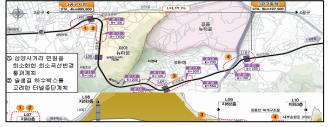
수행일자	현 장 명	터널공법	암 종	암반강도	R.M.R	현장위치도
2011. 12	인천도시철도 2호선 ○○공구	NATM (기계식 구간)	호상 편마암	보통암 ~ 경암	III~IV	
2012. 05	부산지하철 1호선 연장 ○○공구	NATM (기계식 구간)	쇄설 퇴적암	연암 ~ 보통암	IV~V	
2012. 10	우이~신설 경전철 ○○공구	NATM (기계식 구간)	홍장석 화강암	연암 ~ 풍화암	V~VI	

Table 4. Test methods for center-cut





구 분	인천도시철도 현장	부산지하철 현장	우이~신설 경전철 현장	진동 계측
심발 사진				
시험 내용	V-Cut (심발부에 일렬로 무장약공 배치)	PLHBM 공법 (심발부에 선대구경 배치)	Burn-Hole (심발부에 Burn-Hole 무장약공 배치)	보안물건 주변에 일렬로 배치 (BlastMATE, PMT)

Table 5. Comparisons of Center-cut pattern

a. 인천도시철도	b. 부산지하철	c. 우이경전철	d. 시공전경

Table 6. Blasting patterns of each site

구 분	터널조건	천공장 (m)	천공수 (ea)	장약량(kg)		공간격 (cm)
				공당	지발당	
인천도시철도	터널-하반	1.2	52	0.24	0.24	50~60
	터널-상반	1.2	148	0.48	0.48	50~65
부산지하철	터널-상반	0.9	177	0.36	0.72	50~65
	터널-하반	1.3	177	0.48	0.96	50~65
우이경전철	터널-상반	0.8	200	0.24	0.24	50~60
	터널-하반	1.1	200	0.24	0.24	60~70

도는 전반적으로 양호한 수준으로 나타난다(표 7a).

부산지하철 현장에서 실시한 두 번의 상부단면 발파에서는 발파 파쇄암은 막장면을 중심으로 약 10m 이내 지역에 집중되었고 평균 파쇄입도가 약 30cm로 확인되었다. 또한 발파 후 요철은 발생되지 않았으며, 잔류공은 막장면 일부에 나타나며 실험결과 5~10cm로 굴진율은 약 89~95% 이상으로 나타났다(표 7b). 우이경전철 현장의 경우, 굴진율은 약 70~90%로 나타났다며, 파쇄도는 양호하였다(표 7c). 따라서 상기 3개 현장에서 실시된 시험발파 발파효율을 비교해 보면, 미진동화약과 선대구경 적용시가 굴진율, 파쇄입도 등의 발파효율 측면에서 가장 유리하게 나타났으

며, 대구경 무장약공을 이용한 Burn-Cut은 양호한 수준으로 나타났고, V-Cut을 실시할 경우, 굴진율은 가장 저조한 것으로 나타났다.

현장 시험발파에 따른 발파진동 수준에서는 인천도시철도 현장에서 실시한 진동측정결과, 기준치 0.3cm/sec 이내로 측정되었으며 하부단면보다 상부단면에서 발파진동이 약 2배 정도 크게 발생하였다. 이는 지발당 장약량 차이와 하부단면 2자유면 형성에 인한 요인으로 추측된다. 부산지하철 현장에서 실시한 상부발파 진동 측정결과, 1회 발파보다 2회 발파시 진동이 다소 높게 나타난다. 이는 천공장에 따른 지발당 장약량 차이에 기인한 것으로 판단된다. 또한 우이경

Table 7. Blasting effects and fragmentations after test blasting

a. 인천도시철도 발파 후 파쇄상태	b. 부산지하철 발파 후 파쇄상태	c. 우이경전철 발파 후 파쇄상태

Table 8. Results of Blast vibration

구 분	터널조건	이격거리 (m)	장약량(kg)		PPV (cm/sec)	굴진율 (%)	파쇄상태
			공당	지발당			
인천도시철도	터널-하반	26	0.24	0.24	0.117	80~90	양호
	터널-상반	26	0.48	0.48	0.238	60~70	양호
부산지하철	터널-상반	29	0.36	0.72	0.337	89~95	양호
	터널-상반	28	0.48	0.96	0.356	89~95	양호
우이경전철	터널-상반	12	0.24	0.24	0.154	80~90	양호
	터널-하반	12	0.24	0.24	0.203	70~80	양호

전철 현장의 진동수준은 지발당 장약량 0.24kg일 경우, 터널 직상부 12m 지점에서 최대 0.203cm/sec으로 나타났다. 표 8은 시험발파시 자유장에서 측정된 진동수준중 각각의 최대치 만을 표시한 결과이다(박윤석 외, 2012).

4.3 진동수준

시험에 사용된 미진동화약(LoVEX)는 기존의 노천용 미진동화약(NewFINECKER)을 터널용으로 개량한 것이며, 폭약의 대표적인 동/정적 위력의 지표인 폭속 및 탄동구포치가 동일하므로((주)한화, 2012), 기존 연구결과(박과 정, 2010)를 준용하여도 무방할 것으로 생각된다. 따라서 동일한 장약량 적용시 미진동화약의 진동속도는 일반 에멀전폭약의 60~70% 수준으로 판단해 볼 수 있다.

4.4 진동추정식

미진동화약(LoVEX) 적용시 진동추정식을 도출하기 위해 현장 시험발파시 측정된 총 82개의 진동data를 자승근 및 삼승근의 환산거리를 적용하여 회귀분석하였으며(표 9), 그중 신뢰도가 높은 자승근 환산거리 적용시 결과를 그림 1 및 식 (1)에 나타내었다.

$$V_{(mm,95\%)} = 660 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.5}, \quad r = 0.830 \quad (1)$$

Table 9. Range of Vibration Data

측정항목 제품명	측정Data (ea)	측정거리 (m)	지발당 장약량 (kg/delay)	진동속도 (PPV, mm/sec)	환산거리 (m/kg ^{1/2})
LoVEX 32mm	82	13~81	0.12~1.0	0.13~4.12	27.7~180

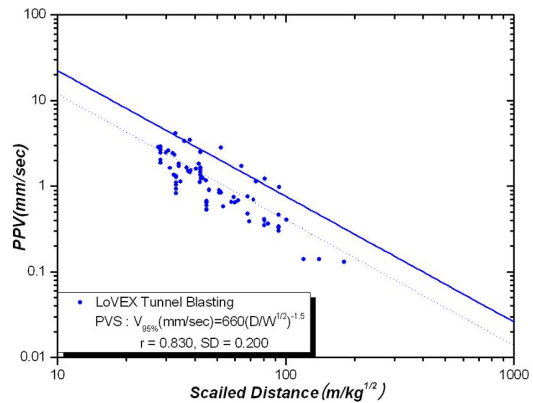


Fig. 1. Vibration prediction equation for low vibration explosives (LoVEX).

4.5 허용 최대 지발당 장약량 및 발파패턴

상기 3.4항에서 제시된 진동추정식 적용시 허용 지발당 장약량 및 발파공법을 국토부 표준발파패턴과 간접적으로 비교한 결과, 미진동화약(LoVEX) 적용시 Type-1구간을 감소시켜, 보안물건으로부터 15m내외 까지 적용이 가능(일반폭약 : 25m)한 것으로 판단된다. 표 10은 국토해양부 표준발파패턴 구분을 나타낸 것이며(국토부, 2006), 표 11은 미진동화약(LoVEX) 적용시 최대 거리별 지발당 장약량 및 발파패턴 구분을 나타낸 것이다.

Table 10. Standard Blast Patterns by the Korean Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs

구 분	TYPE I 미진동 굴착공법	TYPE II 정밀진동 제어발파	TYPE III-IV 진동제어발파		TYPE V 일반발파	TYPE VI 대규모 발파
			소규모	중규모		
지발당 장약량범위(kg)	폭약기준	0.125 이상	0.5 이상 1.6 미만	1.6 이상 5.0 미만	5.0 이상	15.0 이상
	0.125 미만	0.5 미만			15.0 미만	

Table 11. Charge per Delay by Maximum Distances for Low Vibration Explosives(Allowable vibration velocity 0.3cm/sec)

거리(m)	국토해양부 Guide line	NewFINECKER
10	0.030	0.075
15	0.066	0.169
20	0.118	0.301
25	0.184	0.471
30	0.266	0.678
40	0.472	1.205
50	0.738	1.882

5. 결 론

본 연구에서는 보안물건들이 인접한 도심지 터널발파시 발생하는 발파진동의 저감방안으로 미진동화약(LoVEX)을 적용하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 굴진효율(굴진율, 파쇄입도, 요철 등)을 분석한 결과, 미진동화약과 선대구경 적용시가 굴진율, 파쇄입도 등의 발파효율 측면에서 가장 유리하게 나타났다. 대구경 무장약공을 이용한 Burn-Cut은 양호한 수준으로 나타났고, V-Cut을 실시할 경우, 굴진율은 가장 저조한 것으로 나타났다.
- 2) 시험 현장 모두에서 현장관리 진동수준(0.2~0.3cm/sec)을 초과하지 않고 시공이 가능하였으며, 미진동화약(LoVEX) 터널발파 진동추정식을 아래와 같이 산출하였다. 또한 아래 식을 근거로 거리별 지발당 최대장약량을 산출해보면 보안물건으로부터 15m내외의 거리에서도 발파굴착이 가능할 것

으로 판단된다.

$$V_{(mm, 95\%)} = 660 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.5}, \quad r = 0.830$$

- 3) 향후 터널발파에서 진동저감 목적으로 미진동화약을 적용할 경우, 발파공해 측면에서 매우 유리할 것으로 판단되며, 선대구경 심발공법과 병행시 굴진효율 등에서 효과적일 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 국토해양부, 2006, 도로공사 노천발파 설계·시공 지침, pp. 9-10.
2. 박윤석, 정민수, 2010, 미진동 화약(NewFINECKER) 개발 및 현장 적용에 관한 연구, 화약발파(대한화약발파공학회지) Vol. 28, No. 1, pp. 11-18.
3. 박윤석, 2012, 우이~신설 경전철 ○○공구 미진동화약 현장적용성 검토 보고서.
4. 유정훈, 이동훈, 박윤석, 한동훈, 2012, 도심지터널 굴착시 미진동 발파 현장적용 사례연구, 대한토목학회 정기학술회 논문집, 서울, pp. 93.
5. (주)한화, 2012, 산업용화약 제품설명서, 서울, pp. 18-19.



이 동 훈

(주)한화
Blasting사업팀 팀장

Tel: 02)729-1574
E-mail: leego@hanwha.co.kr



박 윤 석

(주)한화
Blasting사업팀 매니저

Tel: 02)729-1508
E-mail: parkys@hanwha.co.kr



이 동 희

(주)한화
Blasting사업팀 매니저

Tel: 02)729-1717
E-mail: flyldh@hanwha.co.kr



유 정 훈

코오롱글로벌
R&BD센터 차장

Tel: 031)329-0639
E-mail: jhy9570@kolon.com