

터널발파에서 체적 디커플링을 고려한 발파 효과 개선에 관한 연구

김동균^{1)*}, 김희도¹⁾, 이민수¹⁾

A Study on the Improvement of Blasting Effect Considering Volume Decoupling in Tunnel Blasting

Dong-Kyun Kim, Hee-Do Kim, Min-Su Lee

Abstract Recent trends in overseas explosive technology are paying attention to bulk emulsion and automated charging technology. This is because when using bulk emulsion, the volume decoupling index can be made to 1 by fully coupled explosive charging, resulting in the most effective blasting effect. However, in the case of Korea, it is currently difficult to use bulk emulsion due to legal regulations and field environmental characteristics. Accordingly, as a result of the study to increase the diameter of the cartridge explosive to bring the volume decoupling index close to 1, the $\Phi 39\text{mm}$ explosive was manufactured considering that the blast-hole diameter in domestic tunnel blasting site is $\Phi 45\text{mm}$, but as a result of field application, it was difficult to load. As an additional test, $\Phi 36\text{mm}$ explosive was produced, and the test results were most suitable. Therefore, we would like to introduce examples of improved blasting effects and future application directions at tunnel sites where $\Phi 36\text{mm}$ explosives are applied considering volume decoupling.

Keywords Blasting effect, Diameter of explosive, Dense loading, Volume decoupling, Excavation rate

초 록 최근 해외의 폭약 기술 동향은 벌크에멀전과 자동화 장전 기술에 주목하고 있다. 벌크에멀전 사용 시 밀장전을 통해 체적 디커플링 지수를 1로 만들 수 있어 가장 효과적인 파괴 효과를 낼 수 있기 때문이다. 그러나 국내의 경우 법적 규제 및 현장 환경 특성에 의해 벌크에멀전을 사용하기 힘든 것이 현재 실정이다. 이에 카트리지 폭약의 약경을 늘려 체적 디커플링 지수를 1과 가깝게 만들고자 연구한 결과, 일반적인 현장의 천공경이 $\Phi 45\text{mm}$ 임을 고려하여 $\Phi 39\text{mm}$ 폭약을 제작하였으나 현장 적용 결과 장전 작업에서 어려움이 발생하였다. 추가적인 시험으로 $\Phi 36\text{mm}$ 폭약을 제작하였고 시험결과 가장 적합하였다. 이에 체적 디커플링을 고려한 $\Phi 36\text{mm}$ 폭약을 적용한 터널 현장에서 발파 효과가 개선된 사례와 추후 연구 방향을 소개하고자 한다.

핵심어 발파 효과, 폭약 직경, 밀장전, 체적 디커플링, 굴진율

1) (주)고려노벨화약

* 교신저자 flatform27@gmail.com

접 수 일 : 2023년 6월 7일

심사완료 : 2023년 6월 22일

게재승인 : 2023년 6월 23일

1. 서론

국내 암반 특성상 화강암과 변성암 등 발파 현장의 암질분포가 경암~극경암이 많기 때문에 이로 인한 장대 터널에서의 굴진저하는 발파공사에서의 주된 문제이다. 미주나 서구 유럽 등지에서는 벌크에멀전의 사용을 통해 굴진 저하문제를 해결하는 것이 보편화되어 있지만(윤지선 등, 2009), 국내의 경우 사용장소에서 제조 시 자동혼합 차량이 필수적이며, 제조 후 차량은 제조소 안에 보관해야 하므로(총포·도검·화약류 등의 안전관리에 관한 법률 시행령, 2023) 현재 국내 제조소가 3개인 현실상 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 벌크에멀전의 이점인 공내 밀장전 효과를 국내현장에서도 적용하기 위하여 약경을 증대시킨 $\Phi 36\text{mm}$ 폭약에 주목하여, ○○~○○ 철도공사 현장에서 적용한 효과를 비교해 체적 디커플링을 통한 발파 효과의 개선을 살펴보고자 한다.

2. 기초 이론

2.1 체적 디커플링 효과

그림 1은 디커플링 지수와 체적 디커플링 지수의

공내 생성 폭발압력과 상관관계를 나타내는 그림이고, 식 (1)과 식 (2)는 각각 디커플링과 체적 디커플링을 나타내는 상관식이다. 디커플링 지수가 1에 가까울수록 공내 작용 폭압은 급격하게 증가하며, 이는 단위 천공당 암석 파괴에 이용되는 유효 에너지의 총량이 커진다는 것을 의미한다. 체적 디커플링 지수(Dv)는 공내 폭약의 충전율과 같은 의미로 그 값이 커질수록 굴진 효율 증대의 결과를 나타낸다. (조영곤 등, 2002) 국내 상용되는 카트리지 폭약 중 $\Phi 36\text{mm}$ 폭약은 천공경 $\Phi 45\text{mm}$ 에 대하여 체적 디커플링 지수가 1.56으로 1에 가장 근접한 폭약으로(표 1) 암반의 구속이 매우 강한 장공발파에서 최적의 효율을 낼 수 있는 폭약이라 할 수 있다. (기와 김, 2002)

$$\text{디커플링 지수}(De) = \frac{\text{발파공의 직경}}{\text{폭약의 직경}} \quad (1)$$

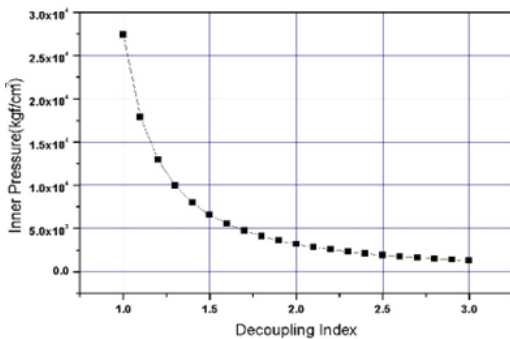
$$\text{체적 디커플링 지수}(Dv) = \frac{\text{발파공의 체적}}{\text{폭약의 체적}} \quad (2)$$

2.2 36mm 사용 현장

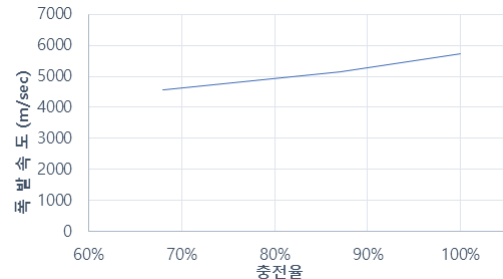
체적 디커플링 효과를 적용하여 굴진 효율이 향상된 현장은 표 2와 같고, 본 연구에서는 ○○~○○ 철도공사 8공구 현장의 시험발파 및 본 발파의 결과를

표 1. 폭약 직경에 따른 De, Dv와 공내 폭압

폭약 직경	De	Dv	공내 폭압(kgf/cm ²)
$\Phi 45\text{mm}$	1.00	1.00	2.75×10^4
$\Phi 32\text{mm}$	1.40	1.98	0.90×10^4
$\Phi 36\text{mm}$	1.25	1.56	1.50×10^4



디커플링 지수 (De)



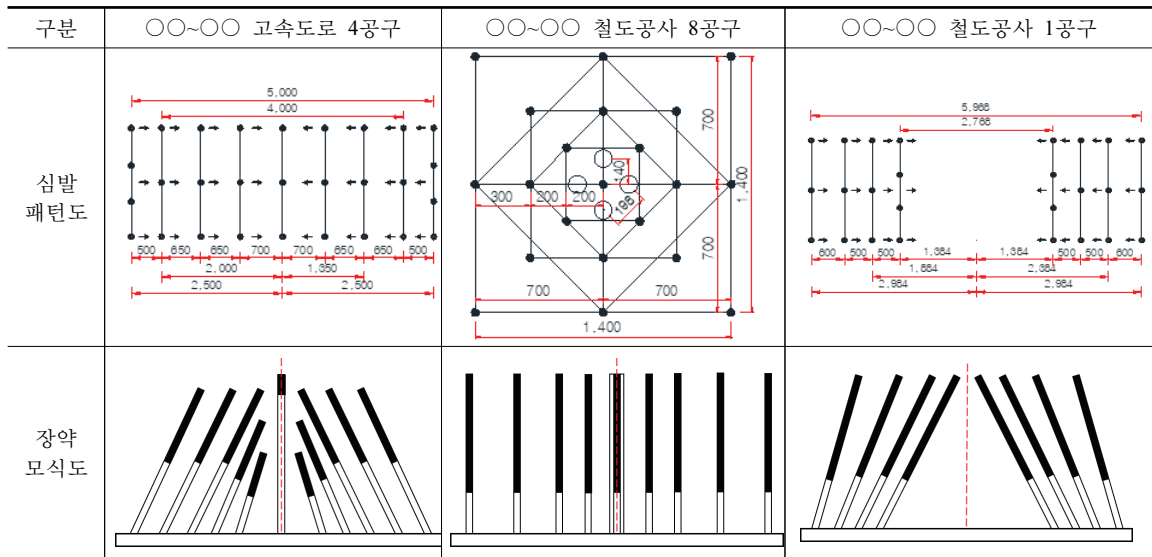
체적 디커플링 지수 (Dv)

그림 1. De와 Dv의 공내 작용 폭압과의 관계

표 2. 적용현장

No.	현장명	압반 분류	내용
1	○○-○○ 철도공사 8공구	극경암	굴진 저하 (심발 + 확대 2열)
2	○○-○○ 국도대체 우회도로	보통암~경암	굴진 저하 (심발)
3	○○-○○ 고속도로 2공구	경암	굴진 저하 (심발 + 확대 1열)
4	○○-○○ 고속도로 4공구	경암	굴진 저하 (심발 + 확대 2열)
5	○○-○○ 철도공사 1공구	보통암~경암	굴진 저하 (심발 1열)

표 3. 심발부 패턴도



비교하여 체적 디커플링 적용 시 굴진율 증대 효과를 확인하고자 하였다.

2.3 심발부 패턴

표 3은 체적 디커플링 효과를 극대화할 수 있도록 사용한 심발부 패턴으로 표 2의 경암~극경암 현장들에서 적용하여 그 효과를 입증한 패턴들로 현장에 따라 변경 적용하여 터널 현장에서의 심발부 굴진 저하 문제를 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 현장 개요

본 현장은 충청북도 괴산군 연풍면 인근에 있으며, 단선철도의 소단면 터널로서 총연장 약 3.6km 이상의 장대 터널이다. 현장의 위치도는 그림 2와 같고, 현장 압반의 특성으로 인해 굴진율의 확보가 어려웠던 지

역으로 초기 시험발파 시 패턴변경을 수차례 진행하였으나 50~60% 정도의 굴진율로 발파결과가 매우 미흡하였다. 따라서 패턴을 고정한 후 천공수 및 천공장을 조절하여 시험발파를 7회 진행하였고, 굴진 효율이 향상되지 않아 추가적인 방안으로 체적 디커플링 효과를 이용하기 위해 $\Phi 36\text{mm}$ 폭약을 적용한 현장이다.

3.1 지질 개요

본 현장의 지질은 선캄브리아기의 변성암 복합체, 시대 미상의 옥천 누층군, 전기 고생대의 노선 누층군, 전기 중생대의 대동층군 등과 이들을 관입한 중생대 화성암류 등이 다양하게 분포하고 있으며, 해당 현장의 지질도는 그림 3과 같다.



그림 2. 현장 위치도



그림 3. 현장 지질도

3.2 암질 수준

본 현장의 암반은 표 4와 같으며, 현장시험 시 암

석항력계수(g) 1.5~1.75, RQD 90%로 상당히 단단한 암질특성을 가지고 있다.

표 4. 현장 암질 수준

내 용		터널 사진
암반 종류	I TYPE (화강암질)	
RMR	87	
RQD	90%	
절리면 간격	0.6~2m	
암석항력계수(g)	1.5~1.75	
단면적	51.2m ² (단선철도, 소단면)	

4. 시험발파 및 본 발파

제원은 표 5, 6, 7과 같다. ((주)고려노벨화학, 2021)

4.1 사용 화약류

본 현장에 사용된 화약류와 뇌관류의 성능 및

표 5. 사용 화약류 및 뇌관류

고성능 폭약	정밀 폭약	비전기 뇌관
		
New Super Emulsion STAR	KINEX - I, III	KONEL - N

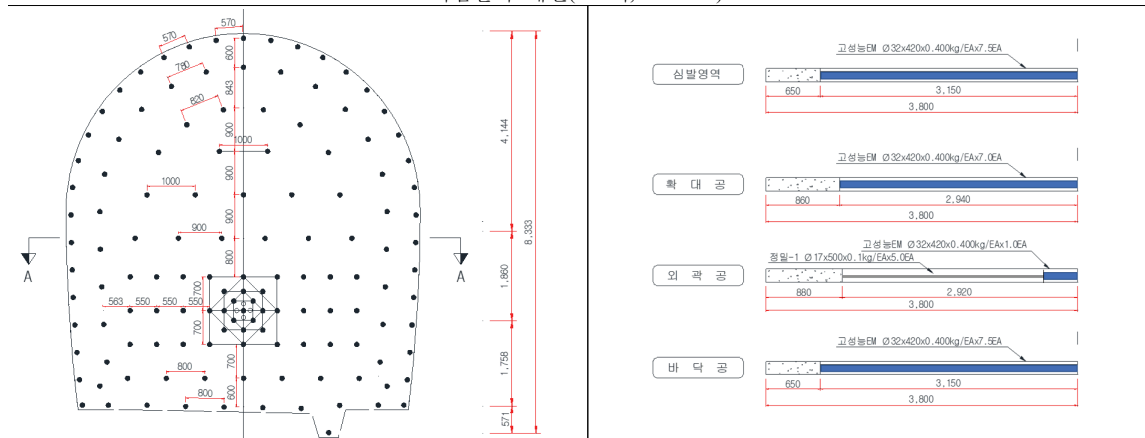
표 6. 화약류 제원

제품명	폭속(m/sec)	폭발열(kcal/kg)	가스량(l/kg)	제원 (직경, 길이, 중량)
New Super Emulsion STAR	6,000	1,398	675	Φ32x420x400
				Φ36x400x500
KINEX- I	4,200	830	880	Φ17x500x100
KINEX- III	4,000	735	870	Φ17x500x100

표 7. 뇌관류 제원

제품명		뇌관번호	튜브 길이	Type
KONEL - N	MS	#3 ~ #20	4.8m	공저뇌관
	LP	#5 ~ #60		
	Bunch Connector	#0, #17		표면뇌관

시험발파 패턴(1~7회, Φ32mm)



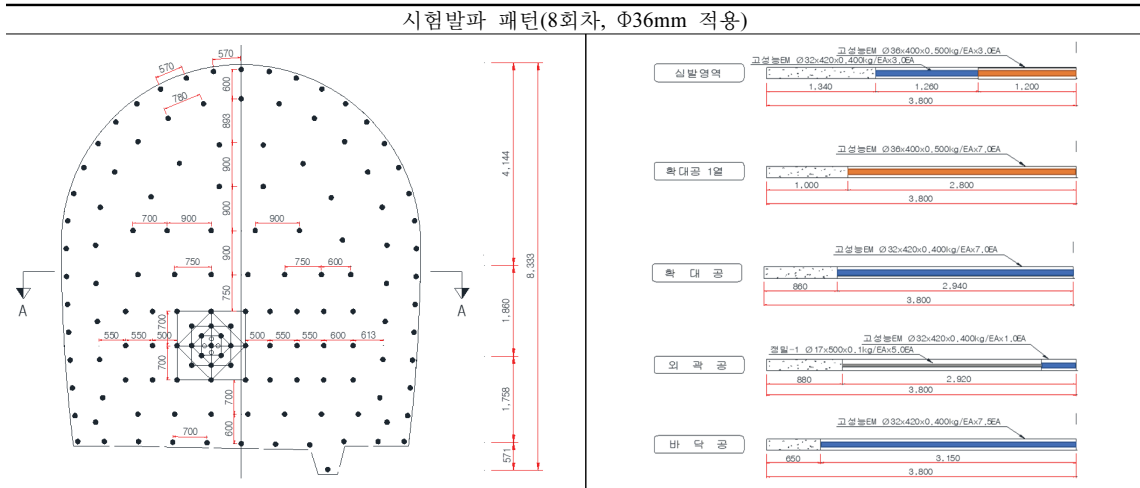


그림 4. 시험발파 패턴 및 장약 모식도

4.2 시험발파 패턴

본 현장에서는 굴진을 향상을 위한 시험발파를 총 8회(천공 패턴변경 : 7회 / $\Phi 36\text{mm}$ 폭약 적용 1회)에 걸쳐 실시하였으며 시공 패턴과 제원은 그림 4, 표 8, 9과 같다.

4.3 시험발파 결과

본 현장에서 실시한 시험발파 결과는 표 10과 같고 굴진을 90% 이상을 목표로 설정하였다. 시험발파 수행 결과 1~7회차의 경우 지속적인 불량과 양호가 반복되어 천공수 및 천공장의 조절만으로 굴진율의 확보가 이루어지지 않았으며, 3회차의 경우 굴진율이

표 8. 시험발파($\Phi 32\text{mm}$) 제원표(1~7회 평균, 2회차(공발) 제외)

단면적	천공장	굴진장	천공수	총장약량	총파쇄량	비장약량	비천공장	사용폭약		
m^2	m	m	공	Kg	m^3	Kg/m^3	m/m^3	$\Phi 32\text{mm}$	$\Phi 36\text{mm}$	정밀폭약
52.5	3.7	3.0	136.2	321.6	157.5	2.11	3.33	297.2	-	16.5

※ 최대 지발당 장약량 : 30.8 kg

표 9. 시험발파($\Phi 36\text{mm}$) 제원표(8회차)

단면적	천공장	굴진장	천공수	총장약량	총파쇄량	비장약량	비천공장	사용폭약		
m^2	m	m	공	Kg	m^3	Kg/m^3	m/m^3	$\Phi 32\text{mm}$	$\Phi 36\text{mm}$	정밀폭약
53	3.8	3.5	141	340	185.5	1.83	2.89	271	52.5	16.5

※ 최대 지발당 장약량 : 38.5 kg

표 10. 시험발파 결과

회차	천공장(m)	굴진장(m)	천공수(m)	화약량(kg)	비장약량(kg/m^3)	결과
1	3.3	3.0	132	312.4	1.98	91%
2	3.8	0.5(공발)	134	314	11.96	13%
3	3.8	3.5	141	332	1.80	92%
4	3.4	3.0	134	316	2.00	88%
5	4.0	2.0	136	320.5	3.05	50%
6	4.0	3.5	132	313.7	1.70	88%
7	3.7	3.0	142	335	2.12	81%
8	3.8	3.5	141	340	1.83	92%

※ 8회차 패턴변경 및 $\Phi 36\text{mm}$ 폭약 적용

92%로 양호한 것으로 보이나 전회 발파의 잔류공에 의한 굴진을 상승으로 판단되었다. 따라서 천공장 3.5m 이상의 조건에서 양호한 결과를 얻은 것은 36mm 폭약을 적용한 8회차가 유일함을 확인할 수 있다.

4.4 본 발파 패턴

시험발파 이후 체적 디커플링 효과를 이용한 Φ 36mm 폭약의 효과를 확인하여 본 발파 시 Φ 36mm 폭약을 확대공 영역에 추가 적용하여 60회 이상 발파

를 진행하였다. 발파결과 굴진을 90% 이상을 지속적으로 확보하였으며 그 패턴은 그림 5, 표 11과 같다.

5. 발파결과 분석 및 고찰

표 12는 시험발파와 본 발파의 평균 굴진을 나타낸 자료로, 신뢰성을 위하여 시험발파 시 공발이 발생한 2회차는 제외하였다. Φ 32mm 폭약 사용 시 굴진은 81% Φ 36mm 폭약 적용 시 92% 본 발파 평

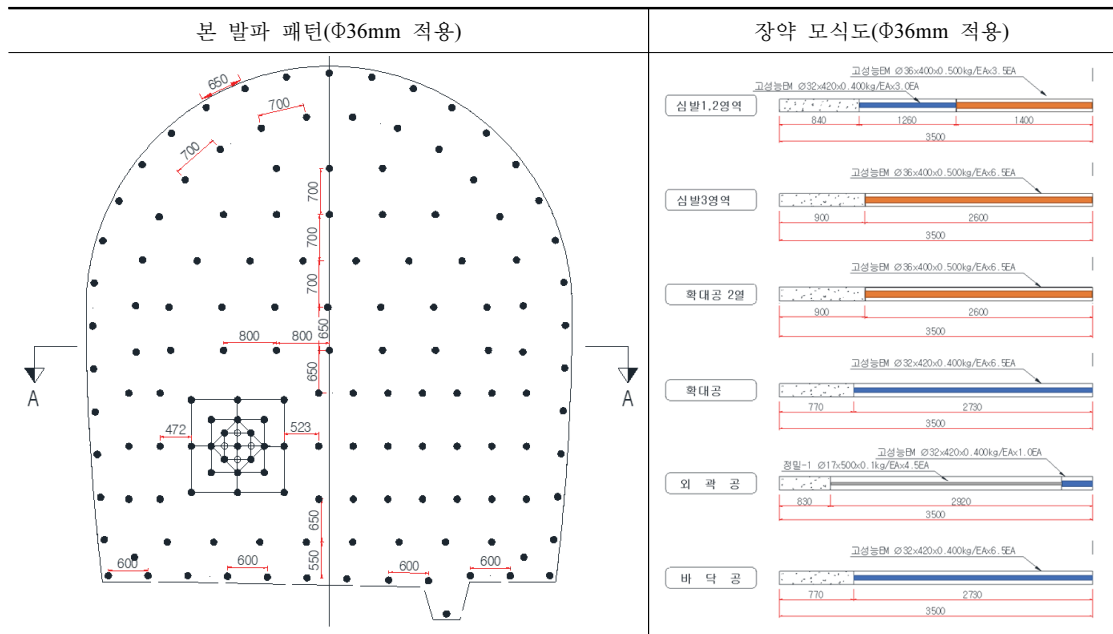


그림 5. 본 발파 패턴 및 장약 모식도

표 11. 본 발파 제원표(60회 평균)

단면적	천공장	굴진장	천공수	총장약량	총파쇄량	비장약량	비천공장	사용폭약		
								Φ 32mm	Φ 36mm	정밀폭약
m ²	m	m	공	kg	m ³	kg/m ³	m/m ³			
52.5	3.5	3.3	133	326.8	173.25	1.89	2.69	212	99.5	14.5

표 12. 시험발파 및 본 발파 굴진을 자료

내 용	천공장(m)	굴진장(m)	천공수(공)	화약량(kg)	굴진율(%)
시험발파(Φ 32mm) 6회 평균 (공발 제외)	3.7	3.0	136	321.6	81%
시험발파(Φ 36mm 적용)	3.8	3.5	141	340	92%
본 발파 60회 평균 (Φ 36mm 적용)	3.5	3.3	133	326.8	94%

※ 시험발파(Φ 36mm 폭약 적용) - 심발부 3ea, 확대 1열 7ea

※ 본 발파(Φ 36mm 폭약 적용) - 심발부 3ea, 확대 2열 10~13ea

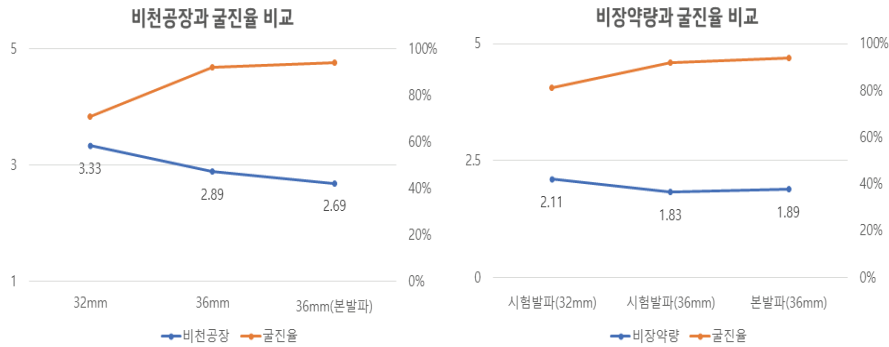


그림 6. 패턴별 비천공장과 비장약량

표 13. Φ32mm 패턴 기준 패턴별 변화율

내 용	비천공장(m/m ³)	비장약량(kg/m ³)	굴진율(%)
시험발파(Φ32mm)	3.33	2.11	81%
시험발파(Φ36mm)	2.89 (13% 감소)	1.83 (13% 감소)	92% (11% 증가)
본 발파(Φ36mm)	2.69 (19% 감소)	1.89 (10% 감소)	94% (13% 증가)

굴진율은 94%로 11~13% 향상을 확인하였다.

그림 6과 표 13은 패턴별 비천공장과 비장약량을 굴진율과 비교하여 나타낸 자료로, 유의미한 비교를 위해 실제 발파결과를 토대로 작성하였다. Φ32mm 패턴의 발파결과를 기준하여 Φ36mm 패턴의 비장약량과 비천공장이 각각 10~13%, 13~19% 감소하여 폭약의 약경의 증가에 따른 체적 디커플링의 효과를 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 체적 디커플링 효과를 확인하기 위해 실제 터널현장에 Φ36mm 폭약을 적용하여 발파결과를 비교 분석하였다. 체적 디커플링에 효과에 의한 굴진율 및 발파 효과의 개선에 대한 검토를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존 Φ32mm 폭약 대비 체적 디커플링 지수가 21% 감소하여 극경암 등의 암질 변화에 따른 적용성이 용이했으며, 특히 암반 구속이 심한 장공발파에서 효율이 뛰어났다.
- 2) 발파결과 굴진율은 Φ32mm 폭약의 시험발파 평균 81%, Φ36mm 폭약 적용 후 시험발파에서 92%, 이후 본 발파에서 평균 94% 수준을 보였다.

- 3) 체적 디커플링 효과에 의해 굴진 능력에서 11~13%의 개선 효과가 있음을 확인했다.
- 4) 체적 디커플링 효과에 의해 비장약량, 비천공장이 10~13%, 13~19% 감소하였다.
- 5) Φ36mm 폭약 적용 시 체적 디커플링 효과에 의해 발파 효과 개선을 확인하였고, 추후 암반의 구속이 심한 현장이나, 암질이 경암~극경암 수준인 현장에서 굴진 저하 발생 시 Φ36mm 폭약을 다양하게 적용하여 발파 효과 개선을 할 수 있을 것으로 판단된다.
- 6) 향후 폭약 직경에 따른 폭약의 체적변화에 대한 공내 폭속 계측을 통해 체적 디커플링에 의한 폭약의 위력변화를 비교하여 발파 효과의 개선 방향에 관한 연구를 할 필요가 있다고 판단된다.

참고문헌

1. 윤지선, 장영민, 이상현, 2009, Bulk Emulsion 기계화 장전시스템을 이용한 대단면 장대터널 시공사례연구. 한국터널공학회는논문집, Vol. 11, No. 2, pp. 107-115.
2. 대통령령 제 33471호, 2023, 총포·도검·화약류 등의 안전관리에 관한 법률 시행령. (제8조 25호 관련)
3. 조영근, 김희도, 안봉도, 2002, 장약조건에 따른 폭속 변화 연구. 화약·발파(대한화약발파공학회지), Vol. 20,

No. 1, pp. 61-66.

4. 기경철, 김일중, 2002, 산화인을 위한 발파공학, 동화기술, pp. 168.
5. 고려노벨화약, 2021, 제품카탈로그.



김 동 균

(주)고려노벨화약 기술영업팀 사원

Tel : 02-756-2863

E-mail : flatform27@gmail.com



김 희 도

(주)고려노벨화약 기술영업팀 상무

Tel: 02-756-2863

E-mail: nonelgim@hanmail.net



이 민 수

(주)고려노벨화약 기술영업팀 차장

Tel: 02-756-2863

E-mail: attom1234@daum.net