

순발 비전기식뇌관과 도폭선을 이용한 터널 여굴방지 발파공법의 현장적용 사례연구

원연호¹⁾ · 이현구²⁾ · 주원태³⁾ · 안봉도⁴⁾

1. 서 론

국내 대부분의 터널굴착은 발파에 의한 굴착공법을 적용하고 있으며 발파결과에 따른 효과는 천공장 비례 굴진장, 발파공해(진동, 소음 등)의 정도, 여굴 상태 등으로 나타낸다. 그러나 이들 인자 중, 여굴상태는 후속작업인 보강과 연결되어 경제적인 측면에서 터널굴착의 가장 중요한 부분을 차지하고 있다. 따라서 현재 터널 발파굴착에서 최외곽공은 여굴 저감 및 모암손상 방지를 위해 굴착예정선의 공간격은 일반 공간격에 비해 좁히고 폭약은 천공경보다 약경이 적은 정밀폭약을 이용하며 기폭방법은 통상적으로 뇌관의 기폭시차가 늦은 동일시차의 뇌관을 4-5공씩 배열한다. 즉, 조절발파의 일종인 Smooth Blasting을 적용하고 있다. 그러나 이와같은 조건에서 터널발파작업에 따른 여굴 발생의 원인은 천공상태, 막장의 암반상태 등 매우 많을 것으로 판단되나, 본 연구에서는 여굴 저감을 위해 기존의 발파패턴에서 최외곽공(굴착예정선/파단면)의 기폭방법인 밀리세컨드(MS) 뇌관으로 4-5공씩 배열하던 것을 발파이론상 굴착예정선의 균열 효과를 가장 크게 형성하기 위해 인접한 발파공 내의 폭약을 동시에 기폭시키는 기폭방법으로 뇌관의 시차범위가 가장 정밀한 순발 비전기식뇌관(0.1-0.2(ms))과 도폭선을 적용하였다. 그리고 현장실험 결과에 따른 막장의 여굴량측정, 터널천공자국길이, 막장의 파쇄도 등을 측정하여 공법적용에 따른 여굴저감 효과를 확인하였다.

2. 이론적 배경

2.1 터널 발파굴착에 따른 여굴의 발생원인

터널굴착에 따른 여굴 발생의 원인은 매우 다양하나, 작업과정별로 발생 원인을 간략 기술하면 표 1과 같다.

1) 원앤비기술사무소
2) 삼성건설
3) 동아지질
4) 고려노벨화약

표 1. 터널 여굴의 발생원인

항목	세부항목	발생원인
천공 (1)	외곽공	굴착예정선(파단면) 외곽공의 외향각(look-out)에 따른 여굴
	천공간격	외곽공 천공간격의 불일치에 따른 여굴
	천공경	대구경 천공경에 의한 여굴
	천공장	과대 천공장에 의한 여굴
	천공배치 표시	천공오차에 의한 여굴
	천공각도	천공각도에 의한 여굴
막장 암반상태 (2)	불연속면 절리성, 지하수 충전물 등	불연속면 등에 의한 여굴
사용화약류 (3)	사용화약류의 종류	발파위치와 막장 상태 등 화약류 적용에 따른 여굴
장약량 (4)	공(지발)당 장약량	과장약에 의한 여굴
기폭방법 (5)	기폭방법	부분 기폭에 의한 여굴

2.2 조절발파(Contour blasting) 원리

조절발파는 발파작업의 목적에 따라 이용되나 발파구역 외 잔존암반의 손상방지 및 여굴 방지에 이용되나 조절발파 중 Smooth Blasting은 잔존 암반의 피해를 줄이고, 터널에서 굴착 예정선의 여굴을 방지하기 위해 인접공간의 제발발파(일제발파) 효과와 인장력에 의한 균열을 형성하여 굴착단면을 미려하게 하는 방법이다. 원리는 smooth 발파의 공은 나머지 공과 함께 점화되는 점이다. Smooth 발파의 발파순서는 나머지 발파순서보다 높은 단수의 뇌관으로 기폭되어지며 주변공만 장약량을 적게 한다고 좋은 것은 아니고, 그 주변공 한줄 앞의 내측공의 장약량도 균형을 이루어야만 한다. 이것은 이 공이 과장약이 되면 주변공이 발파되기 전에 예정 굴착선 이상 파괴되어 주변공 면이 고르게 발파되지 않기 때문이다.

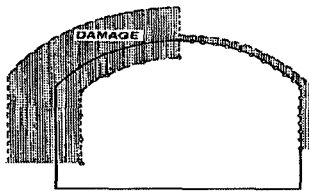


그림 1. Smooth Blasting 공법의 효과

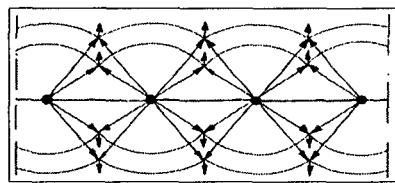


그림 2. 발파이론 모식도

발파의 이론은 그림 2와 같이 인접한 발파공 내의 폭약이 동시에 폭발하여 발생하는 충격파가 충돌할 때, 암석에 팽창이 일어나고 구멍 사이에 균열을 형성하는 것이다. 이런 이유

로 공과 공사 사이의 장약이 동시에 폭발되거나 가능한 한 초시차가 비슷하게 폭발되는 것이 중요하다. 가장 좋은 결과를 얻기 위하여 도폭선이나 순발뇌관을 기폭시켜야 하며, 소음이 나 지반진동으로 다른 방법의 기폭이 필요하다면 공간격을 줄여야 한다.

2.3 기폭 SYSTEM

폭약은 충격 및 화염에 대해 안전하도록 생산되고 있는 바, 장약공 내부에서 폭발현상을 일으키기 위해서는 별도의 외부 Energy를 필요로 하며, 이러한 과정을 기폭이라고 한다. 현재 주로 적용되고 있는 기폭구조는 원리에 의해 전기식과 비전기식 및 전자식으로 분류되며 뇌관 내 지연시차의 유무에 따라 순발뇌관과 지연(지발)뇌관으로 구분된다. 또한 지연시차의 초시간격(Delay Interval)에 따라 DS(Deci Second, 기본초시 200ms)뇌관과 MS(Milli Second, 기본초시 20ms)뇌관으로 구분된다.

- 1) 전기식 뇌관(Electric Detonator) : 점화장치로 전기를 이용하는 것으로 뇌관체 안에 있는 발열제(백금선)를 발열시켜 전기 에너지를 열에너지로 변형하여 뇌관을 폭발시킴.
- 2) 비전기식 뇌관(Non Electric Detonator) : 점화장치로 열(화염)을 이용하는 것으로 열에너지를 뇌관에 전달시켜 폭발을 기폭시키는 뇌관.
- 3) 전자 뇌관(Electronic Detonator) : 전자식뇌관은 화약을 이용한 기존의 뇌관에 지연제 부분과 점화장치부분을 마이크로 칩으로 대체한 뇌관으로 정밀한 지연시차를 임의로 조절할 수 있는 특성이 있다.

3. 실험관련 주요내용

3.1 실험내용 및 방법

실험은 단순히 기존의 설계 발파패턴과 기존의 설계 발파패턴에 최외곽공에 순발 비전기 뇌관+도폭선을 적용하여, 발파 후 최외곽공의 천공장 비례 굴진장에 대한 천공 자국 길이 측정, 측량에 의한 여굴량 측정, 그리고 이들 공법 적용에 따른 진동과 소음을 분석하였다.

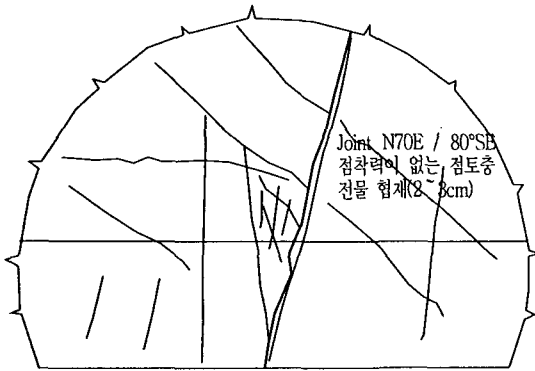
3.2 지질 및 암질

대상구간은 경상분지 동남부에 위치하며 유천층군(화산암류)이 분포하는 유천소분지에 해당되며 동래단층과 일광단층 사이에 위치한다. 암질은 백악기 유천층군의 석영안산암질 응회암과 이를 관입한 화강섬록암 및 세립질 화강암이 주로 분포하며 개좌터널 시종점부는 제4기층으로 기반암의 풍화잔류물 및 산록 퇴적물(붕적층)이 분포한다.

3.3 막장상태

대상구간의 막장상태는 그림 3과 같다.

□ 개좌터널(석대방향, 측점 Sta. 8+431m)



(a) 석대방향 Mapping

1. Rock Quality

기반암은 안산암(Andesite)으로 암색은 대부분 암(담)회색을 띄우나, 부분적으로 관입된 충전물에 의해 황갈색을 띤다. 암질은 대부분 풍화 변성 등으로 경면이 교차되거나 파쇄대 부분은 타격력이 없는 매우 약한 강도를 나타낸다.

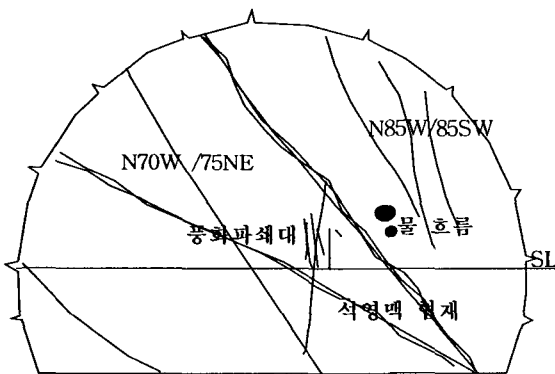
2. Joint

수평절리 우세, 주 절리의 방향성 N70E / 80SE, 대부분 많은 절리 set에 의해 수직절리와 수평절리가 교차함. 절리간격 0.2~1.0m 정도를 나타내며 파쇄대 부분은 방향성과 무관한 절리간격을 나타낸다.

3. Water

부분적인 용수와 포습상태 유지.

□ 개좌터널(정관방향, Sta. 8+432m)



(b) 정관방향 Mapping

1. Rock Quality

기반암은 안산암(Andesite)으로 암색은 대부분 암(담)회색을 띄우나, 부분적으로 관입된 충전물에 의해 황토색을 띤다. 암질은 대부분 신선한 상태로서 경암 이상의 강도로 추정되나 부분적으로는 풍화 파쇄부분도 상존한다.

2. Joint

수평절리 우세, 주 절리의 방향성 N70W / 75NE~N85W / 85SW, 대부분 많은 절리 set에 의해 절리군을 형성하나 규칙적인 절리의 방향성을 유지함. 절리간격 0.3~1.0m 정도를 나타내며 규칙적임. 주절리의 방향으로 석영 장석질의 2개의 dike가 형성됨.

3. Water

부분적인 용수와 포습상태 유지.

그림 3. 대상구간의 막장상태

3.4 사용화약류

발파작업에 따른 사용화약류는 에멀전 폭약, 정밀폭약, 공저 및 표면뇌관, 도폭선이며 화약류의 규격은 표 2와 같다.

순발 비전기식뇌관과 도폭선을 이용한 터널 여굴방지 발파공법의 현장적용 사례연구

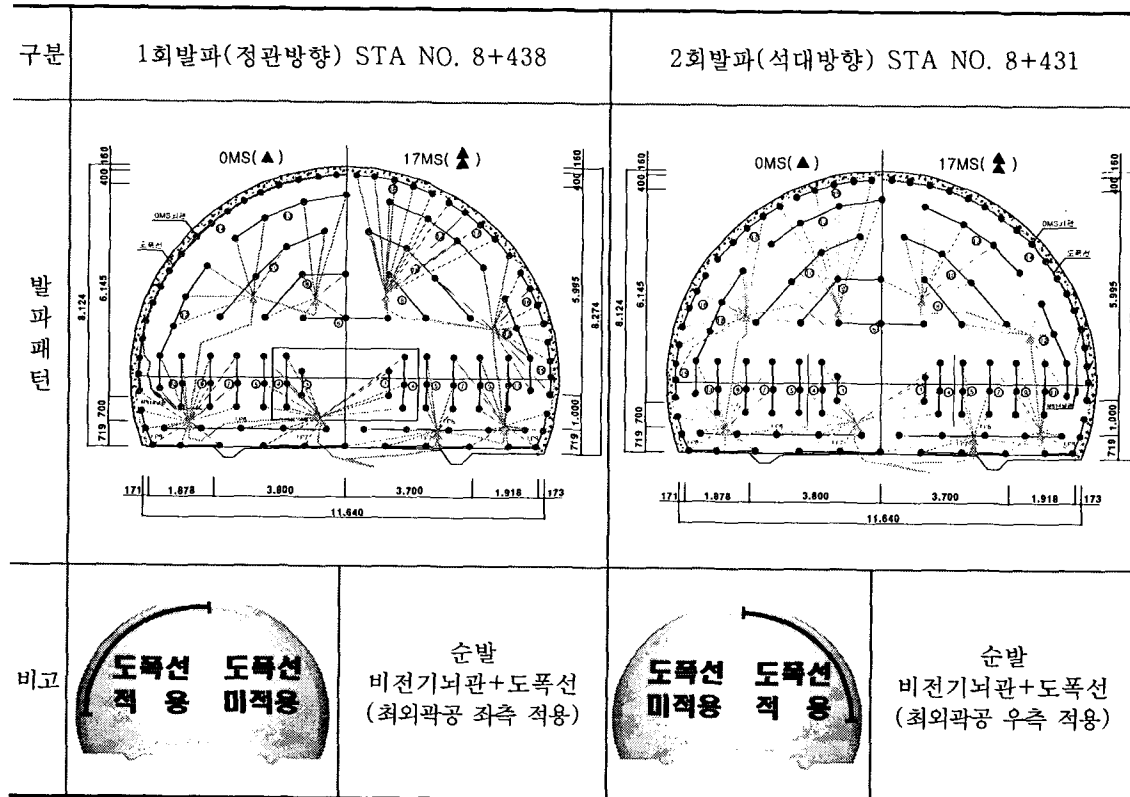
표 2. 사용 화약류의 규격

제품명	약경 (mm)	약장 (mm)	본당중량 (g/EA)	포장수량 (EA/Box)	순중량 (kg/Box)	포장형태
NEW Super Emulsion	32	400	375	60	22.5	지관
KINEX-I	17	500	125	160	20	Plastic Pipe
NONEL Detonator	MS Series (Millisecond Delay Detonator) - 초시간격 25ms LP Series (Long Period Delay Detonator) - 초시간격 100~500ms					
Detonating Cord	포장형태 및 규격(305m/roll×2, 5gr/m), 폭속 : 6000m/sec					

3.4 적용 발파패턴

시험발파패턴은 여굴저감 목적으로 굴착구간에 대한 보강 TYPE을 기준하였다. 전체적인 천공배치는 기존 발파패턴과 동일하나 최 외곽공의 뇌관배열은 순발 비전기뇌관과 도폭선 (5g/m)을 이용한 기폭방법을 적용하였으며, 장약량은 각 패턴 공히 에멀전 폭약(32mm×400mm ×0.375KG/EA) 207.375kg와 정밀폭약(17mm×500mm×0.125KG/EA) 4.5kg을 사용하였다.

도폭선+순발 비전기식뇌관과 기존의 발파패턴을 비교하기 위한 회차별 발파패턴은 그림 4와 같다.



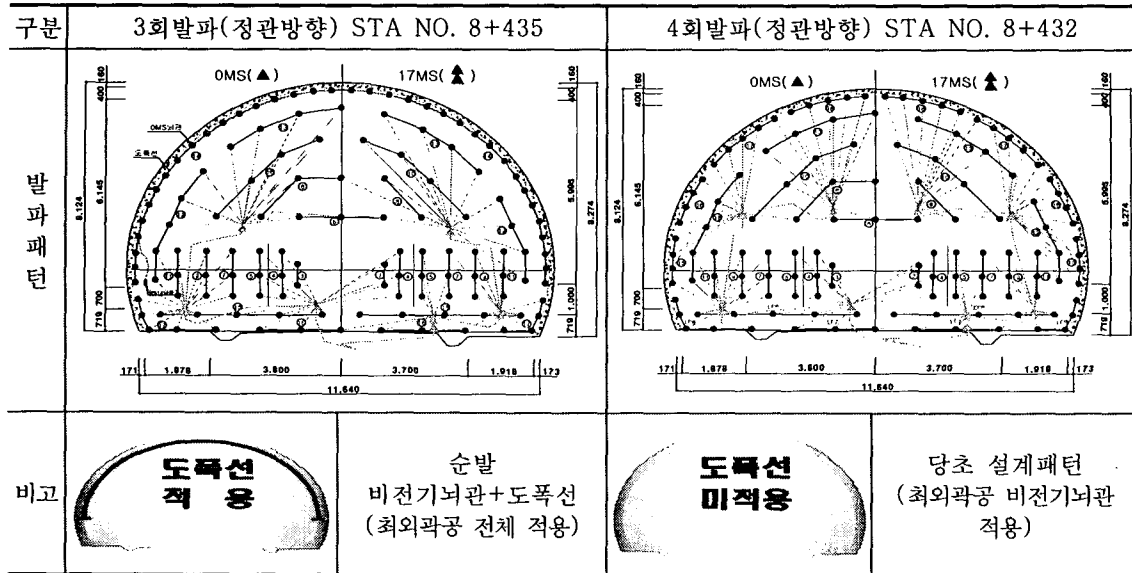


그림 4. 회차별 적용 발파패턴

4. 측정결과 및 분석

4.1 천공자국 길이

천공자국 길이의 측정방법은 발파 후, 최외곽공의 굴진장에 나타난 천공자국 전체에 대한 길이의 측정이며, 측정결과는 전체 굴진장 비례하여 천공자국을 기준하여 백분율로 표시하였다.

측정결과

표 3. 측정결과

발파회수	발파위치	적용방법	기폭공수 (공)		천공장/굴진장 (m)		굴진장/천공자국 (m)	
			좌측	우측	좌측	우측	좌측	우측
1	(정관방향) STA NO. 8+438	순발 비전기뇌관+도폭선 (최외곽공 좌측적용)	18	18	2.5/2.5 (100%)	3.3/3.2 (97%)	45/41 (91%)	58/40 (69%)
2	(석대방향) STA NO. 8+431	순발 비전기뇌관+도폭선 (최외곽공 우측적용)	18	18	3.3/3.0 (91%)	3.3/3.2 (97%)	54/38 (70%)	57/51 (89%)
3	(정관방향) STA NO. 8+435	순발 비전기뇌관+도폭선 (최외곽공 전체적용)	18	18	3.3/3.2 (97%)	3.3/3.2 (97%)	58/55 (95%)	58/55 (95%)
4	(정관방향) STA NO. 8+432	당초 설계패턴 적용 (도폭선 미적용)	18	18	3.3/3.0 (91%)	3.6/3.2 (89%)	54/38 (70%)	58/35 (60%)

분석결과

굴진장 길이 비례 천공자국 길이의 비는 도폭선+순발 비전기뇌관 적용시 평균 91.6%, 미 적용시 68%를 나타내었다. 따라서 도폭선+순발 비전기뇌관의 적용구간이 천공자국에 의한 굴착예정선(파단면)의 미려한 단면 형상을 나타낸 바, 여굴저감 효과는 물론 모암손상에도 영향이 적을 것으로 판단된다.

4.2 여굴량 측정

여굴량 측정은 동일 TYPE(TYPE-2, 3, 비상주차대 구간)을 기준하여 시점부와 종점부로 구분하여 비교하였다.

측정 자료는 측량에 의해 시공사(2개 협력사)에서 제공한 자료를 기준하였다. 따라서 막장 조건과 작업자의 작업방법에 따라 다소의 차이는 있을 것으로 판단되나 적용 발파패턴이 동일한 상태에서 다만, 최외곽공에 도폭선+순발 비전기뇌관의 적용과 미 적용결과(당초 설계 패턴 적용)만을 기준하여 여굴량을 비교하였다.

측정결과

표 4. 보강 TYPE에 따른 여굴량조사

구분		3TYPE (무지보, 굴진장 2.0m)		2TYPE (무지보, 굴진장 3.0m)		비상주차대 (무지보, 굴진장 2.0m)	
		평균여굴 (m)	여굴면적 (m ²)	평균여굴 (m)	여굴면적 (m ²)	평균여굴 (m)	여굴면적 (m ²)
시점부	정관방향	0.170	4.114	0.173	4.187	0.225	5.445
	석대방향	0.204	4.937	0.169	4.090	0.221	5.348
종점부	정관방향	0.084	2.033	0.088	2.130	0.121	2.928
	석대방향	0.130	3.146	0.093	2.251	0.131	3.170
여굴량 차이	정관방향	0.086	2.081	0.085	2.057	0.104	2.517
	석대방향	0.074	1.791	0.076	1.839	0.090	2.178

* 평균여굴은 지보패턴별 현재까지 측량된 여굴깊이의 평균값이며, 여굴면적은 단위굴진장(1m)에 대한 값임.

분석결과

동일 적용발파패턴(무지보 굴착구간)에서 최외곽공에 도폭선+순발 비전기뇌관을 적용한 종점부와 당초 설계패턴을 적용한 시점부의 여굴량 측정결과, 도폭선+순발 비전기뇌관을 적용한 종점부가 당초 설계패턴을 적용한 시점부보다 평균 여굴이 7.4-10(cm) 정도 작은 것으로 나타났다.

따라서 도폭선+순발 비전기뇌관을 적용한 종점부가 여굴저감 효과에 따라 버력량의 감소와 버력처리 시간감소, 보강작업에 따른 shot crete량 감소와 타설시간 단축, 부석처리 작업에 따른 안전성 효과가 큰 것으로 나타났다.

4.3 소음측정

소음측정은 발파위치로부터 터널 내부(약 330-400(m)), 터널 갱구부(약 430-500(m)), 터널 외부(약 530-550(m))에서 소음 전용 측정기(SC-15c, SC 310)을 사용하였다.

측정결과

표 5. 발파소음 측정결과

구분	이격거리	소음측정결과(dB(A))					비고	
		심발공	확대공	외곽공		바닥공		
				도폭선사용	도폭선미사용			
1회 발파	정관방향	약500m	122.7	106.5	118.8	101.0	96-119.3	
2회 발파	석대방향	약430m	115.7	115.3	111.4	112	100.3-105.8	
		약530m	93.1	104.8	100.1	93.7	84.8-88.9	
3회 발파	정관방향	약550m	118.6	103.7	116.4	-	85.1-99.0	
4회 발파	정관방향	약400m	115.6	109.9	-	102.2-106.4	99.5-104.7	
		약500m	106.7	122.4	-	112.0-121.2	110.3-116.2	

분석

측정결과와 분석은 소음전용 측정기(SC-310)의 전용 분석프로그램인 CESVA의 Capture studio를 사용하여 각각의 주파수 대역별로 분석하였다.

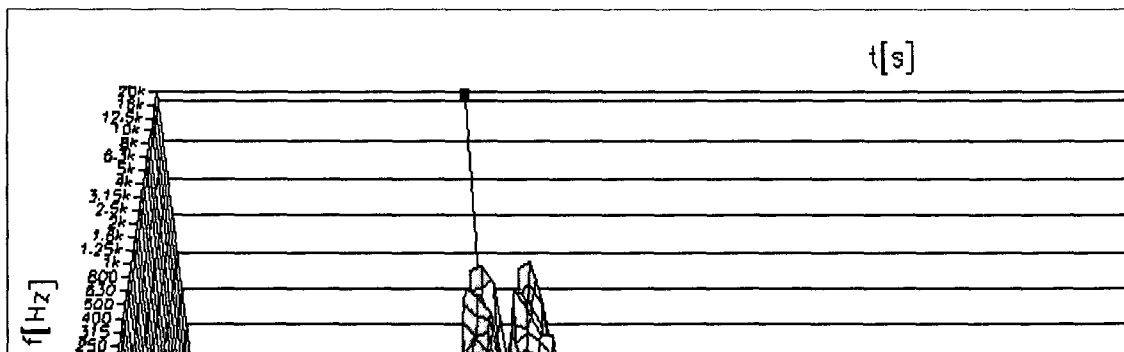
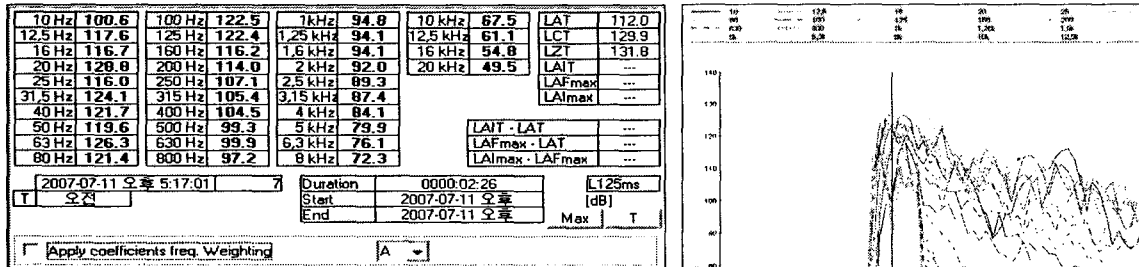


그림 5. Capture Studio를 사용한 파형분석

분석결과

일반적으로 심발부 소음보다 외곽공의 소음이 약 3~5(dB)정도 낮은 경향을 보이며, 갱문을 닫은 상태로 측정된 경우에는 발파 풍압에 의해 갱문이 열렸다가 닫힘으로써 소음이 증가한 경우도 발생하였으나, 도폭선을 사용하여 소음이 특별히 증가된 현상을 찾아보기 힘들었다. 그리고 거리가 증가함에 따라 소음은 터널내에서는 감소가 거의 없거나 약 5dB정도를 나타내었으나 터널 외부에서는 50~100(m) 정도 이격 시에 약 10dB이상 차이를 나타내었다.

4.4 진동측정

진동측정은 발파진동 전용측정기(blast mate series-2)를 사용하여 발파위치로부터 330~500(m) 사이의 후방측정과 약 150m 거리의 터널 직상부에서 측정하였다.

발파위치로부터 330~500(m) 사이의 후방측정

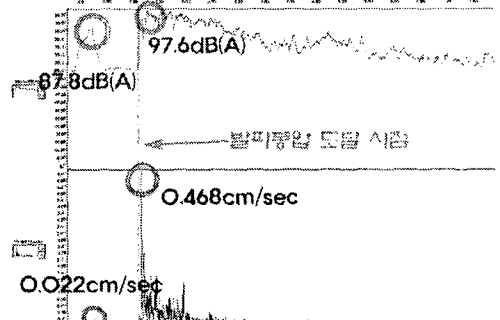
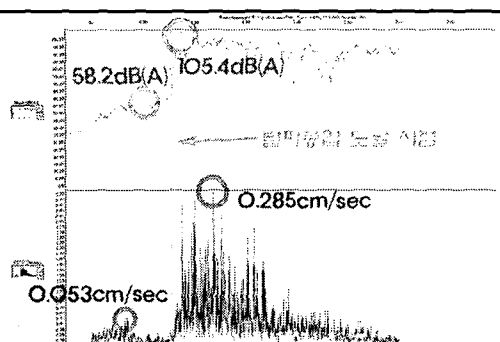
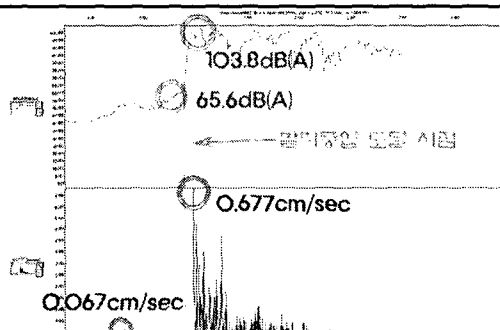
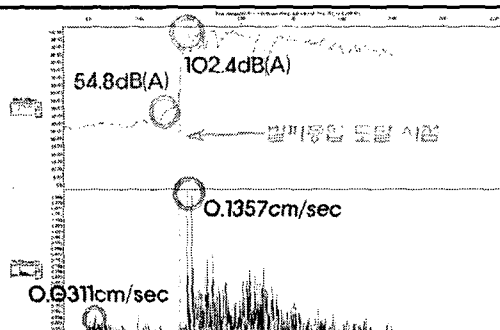
(1) 측정결과

표 6. 측정결과

발파회차	도폭선 적용 구간	터널 방향	갱문 개폐 여부	지발당 장약량	총 장약량 (kg)	진동측정				비고
						이격거리 (m)	계측기 S.N	진동 (cm/sec)	소음 (dB(A))	
1 회 발파	좌측 외곽공 (1회로)	정관 방향	갱문 닫음	심발부:13.5 확대부:9.375 외곽공:18 바닥(전열)공:9.375	211.875	500m (갱문앞)	2642	0.022	87.8	발파진동
								0.468	97.6	풍압유입
2 회 발파	우측 외곽공 (2회로)	석대 방향	갱문 열림	심발부 :13.5 확대부:9.375 외곽공:18 바닥(전열)공:9.375	211.875	330m (터널내)	2642	0.053	58.2	발파진동
								0.285	105.4	풍압유입
3 회 발파	전체 외곽공 (1회로)	정관 방향	갱문 열림	심발부:13.5 확대부:9.375 외곽공:36 바닥(전열)공:9.375	211.875	400m (터널내)	2642	0.067	65.6	발파진동
								0.677	103.8	풍압유입
4 회 발파	미적용	정관 방향	갱문 닫음	심발부 :13.5 확대부:9.375 외곽공:5 바닥(전열)공:9.375	211.875	400m (터널내)	2642	0.0311	54.8	발파진동
								0.1375	102.4	풍압유입
						500m (갱문앞)	2710	0.016	63.2	발파진동
								0.117	98.0	풍압유입

(2) 분석

Blast Ware program에 의한 파형분석(Advanced analysis) 결과는 그림 6과 같다.

<p>1회 발파 (정관방향-갱문 앞 약500m, 좌측외곽공 도폭선 사용)</p>		<p>* 최대소음도는 발파풍압의 유입 전 87.8dB(A), 풍압유입 후, 97.6 dB(A) ** 최대진동치는 발파풍압 유입 전, 0.022cm/sec, 발파풍압 유입 후 0.468 cm/sec.</p>
<p>2회 발파 (석대방향-터널내 약330m, 우측외곽공 도폭선 사용)</p>		<p>* 최대소음도는 발파풍압의 유입 전 58.2dB(A), 풍압유입 후, 105.4 dB(A) ** 최대진동치는 발파풍압 유입 전, 0.053cm/sec, 발파풍압 유입 후 0.285 cm/sec.</p>
<p>3회 발파 (정관방향-터널내 약400m, 전체외곽공 도폭선 사용)</p>		<p>* 최대소음도는 발파풍압의 유입 전 65.6dB(A), 풍압유입 후, 103.8 dB(A) ** 최대진동치는 발파풍압 유입 전, 0.067cm/sec, 발파풍압 유입 후 0.677cm/sec.</p>
<p>4회 발파 (정관방향-터널내 약400m, 도폭선 미사용)</p>		<p>* 최대소음도는 발파풍압의 유입 전 54.8dB(A), 풍압유입 후, 102.4 dB(A) ** 최대진동치는 발파풍압 유입 전, 0.031cm/sec, 발파풍압 유입 후 0.1357cm/sec.</p>

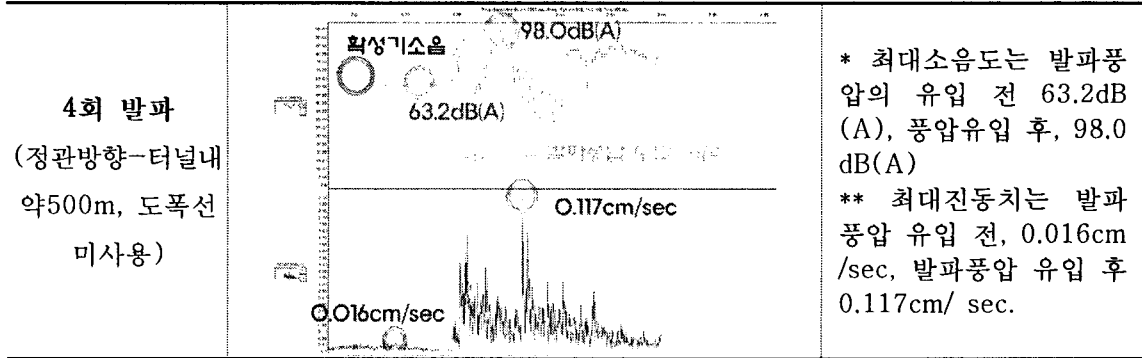


그림 6. Blast Ware program에 의한 Advanced analysis

(3) 분석결과

그림 6과 같이 계측기에 발파풍압이 유입되기 전에는 실제 진동과 소음이 측정되었으나 측정 중 발파풍압이 계측기에 도달하는 시간과 맞물려 진동과 소음이 급격히 증가하는 현상을 나타내었다. 따라서 측정 DATA의 파형분석은 불가능한 것으로 판단된다. 그러나 계측기에 발파풍압이 유입되기 전과 유입 후의 계측치의 차이는 유입 후가 약 10배 이상 증가된 것으로 나타났으며 계측된 자료만을 기준하면 순발 비전기식뇌관+도폭선의 적용과 미적용시의 진동과 소음의 변화는 크지 않은 것으로 나타내었다.

터널 직상부 약 150m(순발 비전기식뇌관+도폭선 사용)

본 계측 DATA는 순발 비전기식뇌관+도폭선의 발파패턴을 적용하여 발파풍압의 영향이 미치지 않도록 터널 직상부 약 150m에서 측정한 결과이다.

(1) 측정결과

표 7. 측정결과

도폭선 적용 구간	터널 방향	지발당 장약량				비고
			이격거리 (m)	S.N	측정결과 (cm/sec)	
전체 외곽공 (1회로)	석대 방향	심발공:13.5	150	BA11938	0.0137	
		확대공:9.375			0.0664	
		외곽공:36			0.0791	
		바닥(전열)공:9.375			0.0661	
	정관 방향	심발공:13.5	150	BA11938	0.0143	
		확대공:9.375			0.0571	
		외곽공:36			0.0610	
		바닥(전열)공:9.375			0.0410	

(2) 분석

Blast Ware program에 의한 파형분석(Advanced analysis) 결과는 그림 7과 같다.

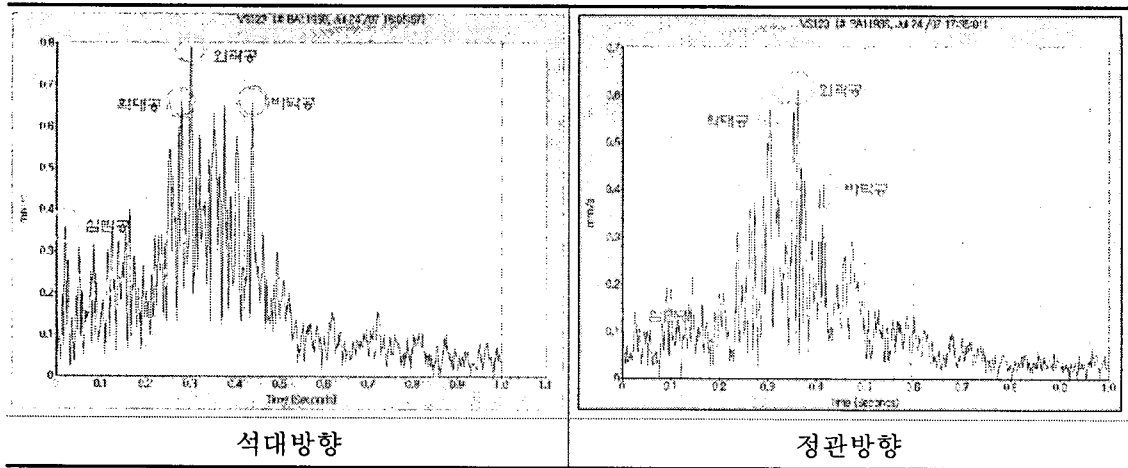


그림 7. Blast Ware program을 이용한 Advanced analysis(파형분석)

(3) 분석결과

발파영역별 기폭시차에 의한 진동파형 분석결과, 석대방향은 심발공 0.0137cm/sec, 확대공 0.0664cm/sec, 외곽공 0.0791cm/sec, 바닥공 0.0661cm/sec를 나타내었으며, 정관방향은 심발공 0.0143cm/sec, 확대공 0.0571cm/sec, 외곽공 0.0610cm/sec, 바닥공 0.0410 cm/sec를 나타내었다. 따라서 계측된 자료만을 기준하면 순발 비전기뇌관+도폭선의 적용시 외곽공에서 가장 큰 진동수준을 나타내었다.

6. 결론

- 1) 발파작업에 따른 여굴은 후속적인 보강작업과 연결되어 안전한 측면이나 경제적인 측면에서 가장 중요한 부분을 차지하고 있다. 그러나 국내 대부분의 여굴 저감을 위한 터널설계는 최외곽공 기폭방법을 4~5공의 분할기폭으로 기폭방법에 의한 부분적인 여굴이 발생되고 있다. 따라서 본 연구에서는 기폭방법에 의한 여굴 저감을 위해 최외곽공 내의 폭약을 도폭선과 뇌관의 시차범위가 매우 정밀한 순발 비전기뇌관(0.1~0.2(ms))을 이용하는 동시기폭 시스템을 적용하여 터널 발파 굴착에 따른 여굴을 저감시킬 수 있다.
- 2) 천공자국 길이 측정결과, 굴진장 길이 비례 천공자국 길이의 비는 최외곽공에 순발 비전기뇌관+도폭선의 적용이 평균 91.6%, 미적용(당초설계패턴)이 68%를 나타내었다. 따라서 순발 비전기뇌관+도폭선의 적용구간이 천공자국의 길이가 길고 굴착예정선(파단면)의 미

러한 단면 형상을 나타낸 바, 여굴 저감 효과는 물론 모암손상에도 영향이 적을 것으로 판단된다.

- 3) 여굴량 조사결과, 동일 적용발파패턴(무지보 굴착구간)에서 최외곽공에 순발 비전기식뇌관+도폭선을 적용한 종점부와 당초 설계패턴을 적용한 시점부의 비교결과, 순발 비전기식뇌관+도폭선을 적용한 발파패턴의 종점부가 당초 설계패턴을 적용한 시점부보다 평균 여굴이 7.4~10cm 정도 작은 것으로 나타났다. 따라서 순발 비전기식뇌관+도폭선을 적용한 종점부가 여굴저감 효과에 따라 버력량의 감소와 버력처리 시간감소, 보강작업에 따른 shot crete량 감소, 타설시간 단축, 부석처리 작업에 따른 안전성에 효과가 큰 것으로 판단된다.
- 4) 순발 비전기식뇌관+도폭선 적용에 의한 발파영역별(심발부, 외곽부, 바닥부 등) 소음의 크기 분석결과, 소음크기는 심발부가 가장 크게 나타났으며 외곽공은 심발부 보다 약 3~5(dB(A)) 정도 낮은 경향을 나타내었다.
- 5) 순발 비전기식뇌관+도폭선 적용에 의한 발파영역별(심발부, 외곽부, 바닥부 등) 진동파형 분석결과, 진동의 크기는 외곽공, 바닥공, 확대공, 심발공순으로 나타났으며 최외곽공이 확대공에 비해 약 10% 정도 크게 나타내었다.
- 6) 최외곽공의 순발뇌관+도폭선 사용에 따른 발파효과는 제발효과와 공과 공사이의 중첩효과를 이용하여 모암손상 방지와 여굴을 저감시킴으로서 여굴 발생에 따른 shot crete량의 감소와 타설 시간의 단축, 버력량의 감소와 버력처리 시간의 단축, 부석처리 작업에 따른 안전성 등을 감안하면 본 공법의 적용성은 매우 양호한 것으로 나타났다.

본 공법의 적용성 확대를 위해서는 다양한 암질조건과 단면크기에 따른 추가적인 연구가 더 이루어져야할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 삼성건설, 2007, 정관지방산업단지 진입도로 건설공사(제2공구) 개좌터널 여굴량 조사 결과.
2. 원앤비기술사사무소, 2007, 시험발파결과보고서.
3. 원앤비기술사사무소, 2006, 터널교육자료(터널여굴의 발생원인).
4. 강대우, 1995, 알기쉬운 응용발파기술, 구미서관, pp. 187-193.
5. 기경철, 김일중, 2002, 산학인을 위한 발파공학, 동화기술, pp. 63, pp. 171.
6. 이희근, 임한욱, 1997, 터널·지하공간 굴착공학, 구미서관, pp. 83-85.
7. 한국도로공사, 2000, 여굴최소화를 위한 최적 발파패턴 설계방안에 관한 연구, pp. 71-73.
8. 화약학회(일본), 2001, 발파공학 핸드북, pp. 237.

원연호, 이현구, 주원태, 안봉도

9. Atlas Powder Company, 1987, Explosives and rock blasting.
10. Olofsson, S.O., 1988, Applied Explosives Technology.
11. ISEE presents the 17th Edition of the Blasters' Hand Book, pp. 287, pp. 487.