

터널 하부단면 발파의 진동전달 특성분석 연구사례



김 명 우
현대건설 기술개발원 설계실
차장
(madcivil@lycos.co.kr)



이 필 영
현대건설 기술개발원 설계실
과장
(lpg@hdec.co.kr)



문 흥 년
주)에스코컨설턴트 이사



이 태 노
(주)성보지오텍 대표이사
(trlee@sbgeo.co.kr)

1. 서론

최근 복잡한 도심지내에서 보다 신속하고 편리한 교통수단이 요구되면서 지하공간을 이용한 다양한 형태의 지하철, 지하도로 건설이 더욱 활성화되고 있다. 이러한 건설 사업은 지하 저심도 임반구간에 터널형태로 건설되므로 도심지 특성상 인구가 밀집되어 있는 아파트 단지나 민감한 전기·전자시설을 갖추고 있는 주요 보안물건 등 기존 구조물에 근접하여 통과하는 경우가 대부분이다. 또한, 현재 터널공사에서 임반구간 굴착공법은 화약을 이용한 발파공법이 경제성, 시공성면에서 우수하여 가장 효과적인 공법으로 시행되고 있다. 그러나 터널 발파작업은 암반을 용이하게 파쇄 시키고 굴착효율을 증대시키는 데는 매우 효과적이거나 발파시 발생하는 지반진동이 주변 민원으로 이어져 실제 도심지 터널현장에서는 굴착작업에 많은 지장이 초래되기도 한다.

그러므로 터널발파시 진동을 저감시키기 위해 특수한 공법들을 적용하게 되는데, 이와같은 특수한 공법은 소규모 현장과 짧은 통과구간에서는 적용가능하나 대규모 현

장에서는 대부분 공사비용을 증대시키고 공기를 지연시키는 등의 역효과가 발생함으로 부적합하다. 현재 이와같은 문제점을 해결하기 위해서 터널 심발발파 공법과 터널 굴착선에 설치되는 외곽공을 이용한 제어발파 공법 등 지중내 발파진동 전파경로 상에서 터널 전단면을 대상으로 한 연구개발이 많이 진행 되고 있으나 도심지 터널에서 많이 적용되는 상,하반 굴착 터널에서 상반굴착 선행 후 하반발파시 발생하는 진동영향에 대한 연구는 미비한 편이다.

이에 본 연구에서는 터널 상반굴착 후 상반의 빈공간이 하반발파시 발생하는 진동에 대한 차폐가 어느 정도인지 직접 현장에서 발파시험을 수행하여 진동저감 효과를 분석하고 정량화 된 그 방진효과를 활용하여 진동제어가 필요한 상,하반 굴착터널에서 상반굴착 후 효과적으로 하반 굴진장을 증대시켜 공기를 절감할 수 있는 방법을 소개하고자 한다.

2. 발파진동에 영향을 주는 요소와 저감 방법

터널발파 진동에 영향을 주는 주요한 요소로는 사용약의 종류 및 성능, 기폭방법, 발파지점과 진동 측정 간의 거리, 전파경로의 지반상태 등이 있다. 발파진동을 저감시킬 수 있는 방법은 기폭 시스템 개선 및 제어발파공법으로 분류할 수 있다.

기폭 시스템 개선방법은 다단식발파기에 의한 전기뇌관의 분할기폭 방법과 번치 커넥터와 연결구를 이용한 비전기식 뇌관의 분할기폭 방법으로 지발당 장약량을 최소화시키는 것이다. 제어발파공법은 크게 심발 발파공법과 굴착공 조절발파공법이 있는데, 심발부 발파공법으로는 경사공과 수직공을 조합한 혼합형 V-cut 발파공법과 대구경(Large hole) 수평천공 발파공법을 주로 적용하며, 굴착공 조절발파공법으로는 Pre-splitting 발파공법, Line drilling 발파공법, 조합형 발파공법(Complex Blasting) 등이다.

또한, 터널발파의 진동을 저감시킬 수 있는 방법으로 상부단면 굴착패턴의 굴진장을 절반으로 단축하여 발파하고 하부단면은 당초 굴착패턴 굴진장 또는 그 이상으로 발파하는 방법이다. 터널발파에서 상부단면과 하부단면 발파의 매커니즘은 다르다. 터널 상부단면 발파는 1자유면 발파작업이기 때문에 먼저 심발부 발파를 통해 2자유면을 확보한 후 순차적으로 발파작업이 진행되는 반면에 터널 하부단면 발파는 처음부터 2자유면이 확보된 상태에서 발파작업이 진행되어 암반의 파괴 구속력이 상부단면 터널발파에 비해 상당히 작다. 다시 말해서 터널발파 심발공의 공당 장약밀도는 0.4kg/m인 반면에 하부단면 발파공의 공당 장약밀도는 0.25kg/m 내외에 불과하다. 또한, 터널 상부단면의 파쇄석 이동방향은 터널 전방인 반면에 하부단면의 파쇄석 이동방향은 터널 상부방향이다. 따라서 터널발

파에서 상부단면 발파는 하부단면 발파에 비해 진동 및 소음이 크게 발생할 수밖에 없다. 상부단면 굴진장을 축소하게 되면 공당 장약량을 줄일 수 있기 때문에 진동을 저감시킬 수 있으나, 터널 굴착효율이 저하되기 때문에 공기가 지연될 수 있다. 그러므로 터널 하부단면 굴진장을 터널의 안정성과 보안물건에 영향이 없는 범위 내에서 최대로 증대시켜 상부단면의 굴진장 축소로 인한 공기지연 문제점을 극복할 수 있다.

3. 무장약공을 이용한 진동저감 공법의 종류 및 특징

무장약공을 이용한 진동저감공법은 노천발파나 지하터널발파에서 지발당 장약량을 최소화하고 진동이 폭원으로 부터 직접 전파되는 것을 방지하여 진동을 저감하는 공법이다. 무장약공을 이용한 진동저감공법으로는 라인드릴링(Line Drilling)과 선대구경(PLHBM) 등이 있다.

3.1 Line Drilling 발파공법 (LD 발파공법)

LD 발파공법은 굴착 예정선을 따라 무장약공을 조밀하게 천공하여 본 발파시 굴착선을 파단면의 형태로 유도하는 발파공법이다. 적정한 간격으로 천공된 무장약공들은 장약공들이 발파될 때 발생한 균열들이 라인드릴링이 된 면을 따라 파쇄되고, 그 바깥쪽으로는 균열이 미치지 못한다. LD 발파공법의 효과는 절리등이 적은 균일한 암반일 때 우수하다.

표 1. LD 발파공법 설계기준

구 분	발파설계 및 기술	개념도
LD 발파공	<ul style="list-style-type: none"> • 간격(S) : 공경의 2 ~ 4배 • 최저저항선(B1) : 0.1m 	
LD 인접공	<ul style="list-style-type: none"> • 사용 화약량 : 주 발파공의 50% • 최저저항선(B2) : 주 발파공 최저저항선(B3)의 0.5 ~ 0.75배 	

3.2 선대구경수평보링(PLHBM) 발파공법

선대구경수평보링(PLHBM) 발파공법은 대형 수평 보링 장비를 이용하여 직경 362mm 또는 445mm의 무장약 공을 터널 막장면 약 50m 전방까지 선진 보링한 후 발파작업을 수행하는 터널발파공법으로 심발부분에 대한 발파작업시 발생하는 발파진동을 허용 발파진동 이하로 제어할 수 있는 공법이다.

이 공법은 기존의 터널 굴착 작업공정 이외에 별도의 장비와 공정이 추가되는 공법이다.

4. 진동 저감을 적용 사례

기존의 설계에서는 발파진동의 저감을 위하여 여러 진동저감공법을 적용하여 왔으나 감소율의 적용에 있어서는

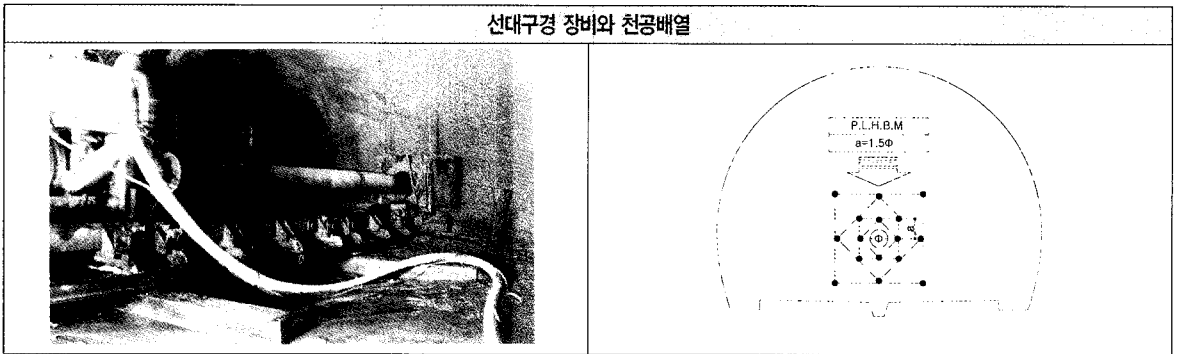


그림 1. 선대구경 장비 및 천공배열

표 2. 발파진동 감소를 적용 기존 사례

프로젝트명	시공사	암종	제어발파	감소율
전라선 성산~신봉간 철도 개량 건설공사 기본설계	현대산업개발	안산암, 응회암, 유문암	라인드릴링	13%
분당선 왕십리~선릉간 복선 전철 제3공구 노반신설공사 대안설계	대우건설	편마암	선대구경	30%
중앙선(덕소~양수간) 복선 전철 건설공사 실시설계	삼성물산	편마암	라인드릴링	33% (수치해석결과)
부산신항만 배후철도 제4공구 건설공사 기본설계	대우	화강섬록암, 안산암, 각력암	심발부 방진공	15~20%
분당선 왕십리~청담간 복선전철 노반 보완실시설계	철도청	화강암, 편마암	라인드릴링	30%
경주~김포2 국도건설공사 설계보고서	-	화강섬록암, 미고결 각력층	선대구경	20~30%
평택~음성간 고속도로 안성~음성간 건설공사(제7공구) 설계보고서(금광~광혜원)	두산, 고려개발	편마암, 화강암	선대구경	30%
'선대구경 수평 보링공법에 관한 연구'	서울대학교 에너지자원기술연구소	편마암, 안산암	선대구경	30%
광양항 서측 인입철도 건설공사 기본설계	SK건설	퇴적암	라인드릴링한 선진도강	30%

다소 차이를 보여왔다. 이는 진동저감을 구하기 위한 방법이 통일 되지 못하거나 각 현장에서 경험적으로 감소율을 적용하였기 때문인 것으로 사료된다. 현장 설계에서 주로 많이 사용하고 있는 진동저감 발파공법으로는 라인드릴링, 선대구경등을 사용하고 있으며, 발파진동 감소율로는 라인드릴링은 13~33%, 선대구경은 20~30%까지 적용한 사례가 있다. 표 2는 기존 설계자료의 발파진동 감소율 적용 사항을 나타낸 것이다.

5. 시험발파

5.1 시험발파 현황

현재 터널공법으로 시공중이며 터널굴착시 상부단면 및 하부단면으로 분할하여 작업이 진행되고 있는 인천국제공항철도 현장을 시험발파 대상으로 선정하였으며, 그림 2는 본 현장의 노선과 시험발파가 수행된 위치를 나타낸 것이다.

본 현장은 서울시 중구 갈원동 일원에 위치해 있으며, 막

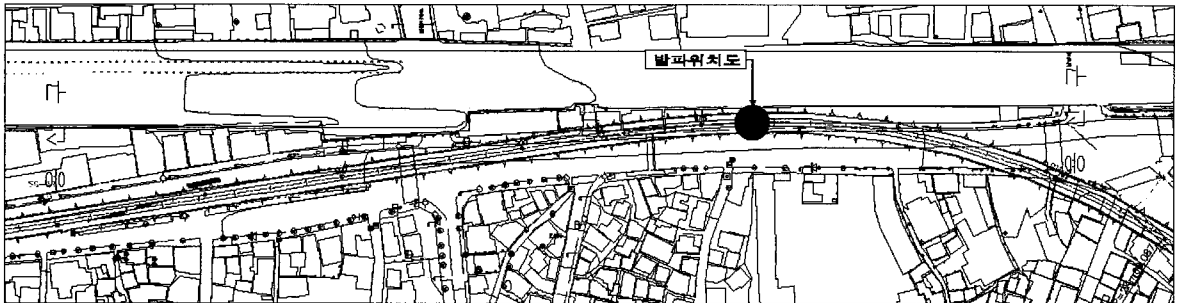


그림 2. 본 현장의 노선과 시험발파가 수행된 위치

표 3. 시험발파 현황


구 분	내 용	터널모습
현 장 명	인천국제공항철도 2-1공구 현장	
위 치	서울시 중구 갈원동 일대	
수행 일자	'07. 10. 30 ~ 11. 29	
시 공 사	현대건설(주)	
기 반 암	호상 편마암	

표 4. 시험발파에 적용된 발파패턴과 수량


구 분	상부단면	하부단면	천공모습
천 공 장	1.6m	3.2m	
굴 진 장	1.5m	3.0m	
공당장약량	0.75kg	1.5kg	
지발당장약량	1.5kg	1.5kg	
사용화약	Newmite 32mm	Newmite 32mm	

표 5. 발파지점과 진동측정 위치

구 분		상부단면	하부단면	진동측정기 설치모습
발파위치	1회	STA. 1+883.0	STA. 1+883.0	
	2회	STA. 1+881.5	STA. 1+881.5	
이격거리(직상부)		43.5 m	45.7m	

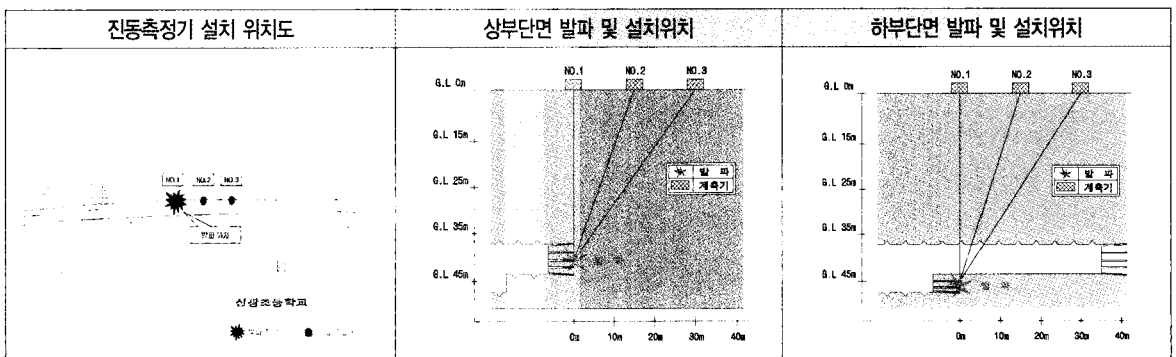


그림 3. 진동측정기 위치도

장기반암은 호상 편마암으로 구성되어 있다. 터널 굴착은 상,하반을 분할하여 발파작업이 진행되는데 심발부에서 지표까지 이격거리는 43.5m 정도이다. 표 3은 시험발파 현황을 나타낸 것이다.

5.2 터널 상, 하부단면 적용 발파패턴

본 현장 터널의 상부단면과 하부단면에 적용된 발파패턴은 정확한 비교분석을 위해서 천공장 및 공당장약량은 다르지만 지발당 장약량을 동일하게 하여 발파작업이 이루어졌다. 표 4는 시험발파에 적용된 발파패턴과 수량이다.

5.3 터널발파시 발파진동 계측현황

본 현장 터널 상,하부단면 발파시 발파진동 측정위치는 터널 직상부를 비롯해서 3지점이며 상,하부단면 발파는 각각 2회에 걸쳐 진행 되었으며, 매 발파시 진동을 측정하였다. 표 5는 터널 계획노선 상에서의 발파지점과 직상부 지

상에서의 진동측정 모습을 나타낸 것이며, 그림 3은 진동 측정기 위치를 나타낸 것이다.

6. 시험결과 및 결과분석

6.1 터널 상,하부단면 발파시의 진동 측정결과

터널 발파작업시 진동측정은 상,하반에서 각각 2회에 걸쳐 이루어 졌으며, 터널 직상부 도로변 3지점에서 동시에 진동을 측정하였다. 측정한 진동값을 보면 표 6, 표 7과 같다.

6.2 발파진동 측정 결과분석

터널발파시 3지점에서 수집된 진동 데이터를 보면, 동일한 지발당 장약량임에도 불구하고 상부단면 발파진동이 하부단면 발파진동 보다 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.

표 6. 터널 상부단면 발파패턴 및 진동측정 현황

일시	발파위치	천공장 (m)	사용 화약량(심발부, kg)		계측값(PPV)	
			공당	지발당	거리(m)	진동속도(cm/sec)
10/30	STA.1+883.0	1.6	0.75	1.5	43.50	0.273
					47.88	0.187
					59.10	0.124
10/31	STA.1+881.5	1.6	0.75	1.5	43.50	0.256
					47.88	0.191
					59.10	0.188

표 7. 터널 하부단면 발파패턴 및 진동측정 현황

일시	발파위치	천공장 (m)	사용 화약량(확대부, kg)		계측값(PPV)	
			공당	지발당	거리(m)	진동속도(cm/sec)
11/29	STA.1+883	3.2	1.5	1.5	45.70	0.1550
					49.88	0.0950
					60.73	0.0519
	STA.1+881.5	3.2	1.5	1.5	45.70	0.1410
					49.88	0.0967
					60.73	0.0650

표 8. 발파횟수별 터널 상하부단면 발파진동 비교분석표

측정 횟수	진동측정결과(cm/sec)		감소율(%) (B/A)	측정위치	진동속도 감소율 그래프
	상부단면(A)	하부단면(B)			
1회	0.273	0.155	43.2	직 상 부	
	0.187	0.0950	49.2	15m 후방	
	0.124	0.0519	58.1	30m 후방	
2회	0.256	0.141	44.9	직 상 부	
	0.191	0.0967	49.3	15m 후방	
	0.188	0.0650	65.4	30m 후방	

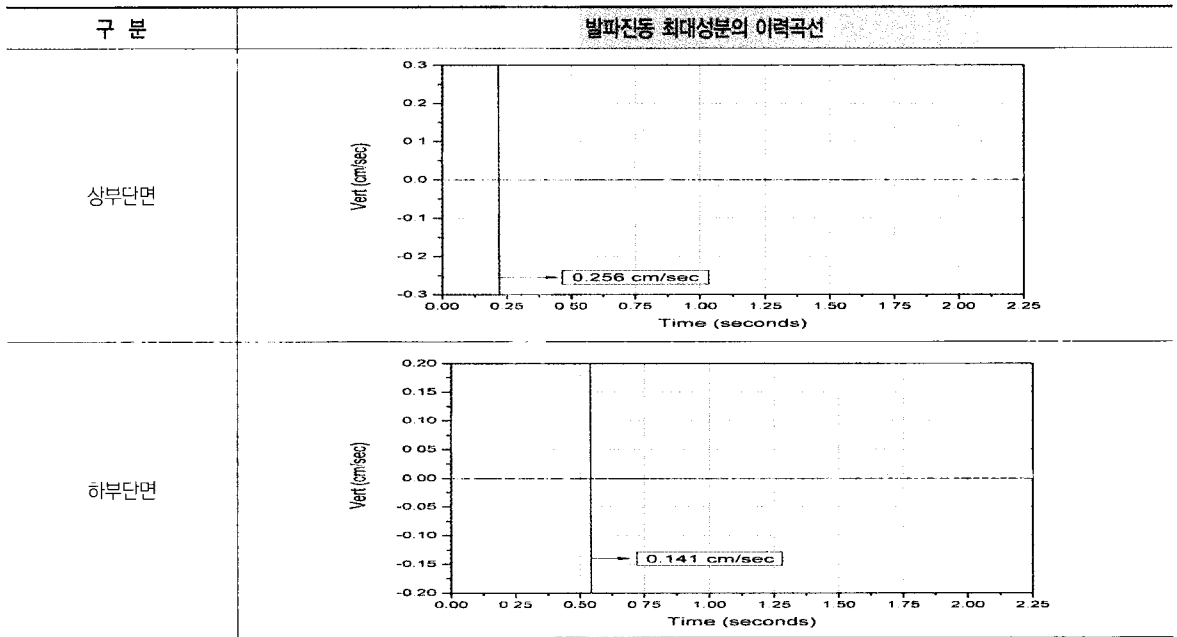
표 8에서 보는바와 같이 상부단면 발파시보다 하부단면 발파시 진동값이 평균적으로 약 50.1% 정도 감소하여 측정되고 있음을 알 수 있다. 이는 상부단면 발파 후 하부단면 발파시 상부단면이 방진(Trench)역할을 하고 있으며, 하부단면 자유면수 증가로 인한 파쇄저항 감소요인으로 추측된다.

그러나, 터널막장 직상부에서 측정된 진동값을 비교하면 상부단면 발파시 보다 하부단면 발파시 진동값 저감율이 44% 정도 밖에 나타나지 않고 있는데, 이는 이격거리 때문에 터널막장 후방에서 진동을 측정하는 것보다 저감효과가 다소 적은 것으로 보인다.

6.3 발파진동 이력곡선 분석

시험발파시 수집된 진동데이터 중 발파진동 최대값으로 나타난 수직성분의 진동 이력곡선을 분석한 결과, 진동값이 상부단면 발파시는 가장 먼저 기록되는 심발부 발파공에서 가장 크게 나타났으며, 하부단면 발파시는 가장 먼저 기록되는 확대공 보다 바닥부 발파공에서 가장 크게 나타났다. 이는 바닥부 발파공은 하향천공으로 인해 최소저항선이 증가하여 파쇄저항이 커지기 때문인 것으로 보인다. 또한, 동일한 지발당 장약량으로 발파했음에도 불구하고 표 9와 같이 상부단면 심발부에서 0.256cm/sec, 하부단면

표 9. 상부단면 및 하부단면의 발파진동 이력곡선 비교



바닥부에서 0.141cm/sec로 측정되었다. 이와같은 현상은 터널 상단부 심발부 발파시 파쇄저항이 크기 때문에 2자유면 발파가 이루어지는 하부단면 발파시 보다 상대적으로 진동이 크게 감지된 것으로 파악된다.

7. 터널 하부단면 진동저감 효과를 반영한 굴진장 증대 및 시공성 개선

철도터널 현장에서 시험발파를 통해 분석된 발파진동의 전달특성을 감안하여 하부단면의 굴진장을 증대시킬 수 있었고, 이와같은 지보패턴으로 설계한 사례는 표 10과 같다.

서울지하철 00 공구 터널발파 굴진장을 2.0m로 발파할 경우 상부단면 발파시 보안물건에서 0.45cm/sec 정도로 감지될 것으로 예상되어 허용치(0.3cm/sec)를 초과하는 것으로 나타났다. 그래서 상부단면 발파는 굴진장을 1.0m으로 축소하여 설계하였으며, 하부단면은 굴진장을 증대시켜 2.0m으로 설계하였는데, 보안물건에서 예상되는 진동값은 0.3cm/sec 이하로 감지될 것으로 예상된다. 또한, 하부단면을 2.0m로 증대시키므로써 굴착공정 사이클 시간을 21% 정도 감소시키고 공기를 2개월 정도 단축할 수 있는 것으로 분석 되었다. 표 11은 터널 하부단면 굴진장 증대에 따른 굴착효과를 나타낸 것이다.

표 10. 지보패턴 설계사례 및 개선사항

구 분		서울지하철 00공구 설계사례					개선사항
		PD-2B	PD-3A	PD-3B	PD-3C	PD-4	
지반 조건	0.5D	풍화토	풍화암	풍화암	풍화암	연암	연암
	막장면	풍화암	풍화암(파쇄)	풍화암	연암	연암이상	연암이상
굴착공법		링컷	상하분할	상하분할	상하분할	상하분할	상하분할
굴진장	상반	0.8m	1.0m	1.0m	1.0m	1.0m	1.0m
	하반	0.8m	1.0m	1.0m	1.0m	1.0m	2.0m

표 11. 터널 하부단면 굴진장 증대에 따른 굴착효과

구 분	지보패턴 P-4		하반 발파 진동치 분석	굴착공정 사이클 시간분석
내 용	상반굴진장	1.0m		
	하반굴진장	2.0m		

8. 결론

터널발파시 발파진동 저감효과를 얻기 위해 적용되는 여러 방안 중 발파당 굴진장 축소는 지발당장약량을 줄일 수 있기 때문에 발파진동을 저감시키는 데는 매우 효과적이다. 그러나 발파당 굴진장을 축소 하므로서 발파비용이 증가하고 굴착공기가 연장되는 문제점을 가지고 있다. 그래서 본고에서는 터널 상부단면의 굴진장을 축소하는 대신 하부단면의 굴진장을 증대시켜 상부단면 굴진장 축소로 인한 공기지연, 공사비 증액 등 문제점을 해결하기 위해 실제 터널현장에서의 상,하부단면 발파시의 진동전달 특성을 분석하였다.

시험발파는 시공중인 인천공항철도 터널현장에서 수행 하였으며, 시험조건으로 터널 상부단면과 하부단면 발파시 굴진장과 지발당 장약량을 동일하게 적용하고 발파진동 측정을 터널 직상부를 비롯해서 3지점에서 측정하여 상,하반 발파진동 전달경로와 효과를 살펴보았다. 그 결과, 상부단면 발파시보다 하부단면 발파시 진동값이 평균적으로 약 50.1% 정도 감소하여 측정되었다. 이는 상부단면 발

파 후 하부단면 발파시 상부단면이 방진(Trench)역할을 하고 있으며, 하부단면 자유면수 증가로 인한 파쇄저항 감소 요인으로 추측된다.

따라서, 이와같은 하부단면의 진동저감 효과는 앞으로 터널발파 설계시 중요한 자료로 활용 될 수 있을 것으로 보인다. 그러나 이번 시험발파는 특정현장과 암반에서 수행 되었을 뿐만 아니라 수집된 데이터수가 적기 때문에 하부 단면 진동 저감율의 신뢰도를 높이기 위해서는 향후 다양한 지보패턴과 암반층에서 시험발파가 수행되어야 할 것으로 보인다.

참고문헌

1. 한국지반공학회, "지반공학 시리즈 7 터널편", 구미서관
2. 김용수(1994), "발파핸드북" 구미서관
3. 강추원(2005), "발파공학 A to Z"
4. 서울지하철(2008) "915공구 기본설계 보고서"(현대건설)