

## 터널 진동제어구간 공기단축을 위한 더블데크 발파의 현장 적용성 검증

토목연구지원팀  
신승용 대리



### 1 서론

최근 도심지에 철도, 지하철 및 도로의 지하화 등 지하공간 개발이 활성화되고 있으며, 이에 따라 지하구조물 시공시 인접 구조물과 지장물의 안정성 확보에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 발파굴착공법을 적용하여 터널을 시공하는 경우 발파로 인한 진동이 주변 구조물에 피해를 주지 않도록 구조물에 따른 허용진동 기준이 산정되어있으며, 현장에서는 허용진동 기준을 만족시키기 위하여 양질의 암반에서도 굴진장을 축소하거나 무진동 암파쇄공법과 같은 진동제어공법을 적용하여 굴착을 진행하고 있다. 그러나 이러한 진동제어공법은 공기를 지연시키고, 공사비를 증가시키는 주요한 원인이 되고 있다.

당사에서는 이러한 진동제어공법 적용시 발생하는 공기지연과 공사비 증가를 방지하기 위하여 발파공에 폭약을 이중장약하여 1회 발파에 2회 굴진장을 굴착하는 더블데크 발파를 터널 진동제어구간에 적용하는 방안을 검토하였다. 더블데크발파는 한번에 발파되는 장약량이 감소하여 발파진동을 저감시키는 동시에 공기를 확보할 수 있는 공법이다. 그러나 더블데크발파 공법이 터널에 적용된 사례는 홍콩과 일본에 일부 있을 뿐이며, 국내에서는 적용된 사례가 없으므로, 본 연구에서는 더블데크발파 공법의 터널현장 시험발파를 통하여 현장 적용성 검증 및 공기단축 효과를 확인하고자 하였다.

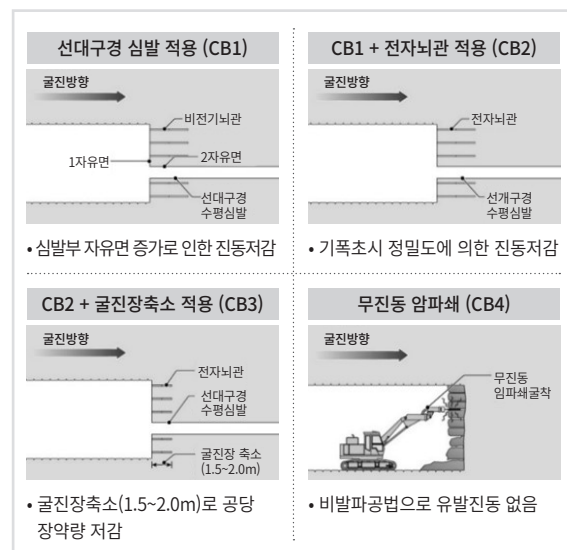
### 2 더블데크 발파 공법 개요

#### 2.1 제어발파 굴착 공법

터널시공시 발파굴착으로 인한 허용진동기준을 만족시키기 위하여 적용되는 진동제어공법은 터널막장에 추가 자유면을 형성하는 방법, 전자뇌관을 사용하여 발파 진동 중

첩으로 인한 발파진동 증가를 방지하는 방법, 굴진장을 축소하여 지발당장약량을 감소시키고 발파진동을 저감하는 방법, 최종적으로 발파를 하지않는 무진동 암파쇄공법 등이 있다. 여기서, 지발당 장약량이란 동시(발파의 시차가 0.008초 이내)에 발파되는 폭약의 무게를 의미하며, 발파진동치는 일반적으로 이러한 지발당장약량에 비례한다. 그러나 터널발파에서 지발당장약량을 감소시키면 1회 굴진장도 감소하게 되므로 진동제어를 위해 지발당장약량을 감소시킬 경우 굴진장 감소로 인하여 공기증가의 요인이 된다. 아래 [표 1]은 터널 현장에서 일반적으로 적용되는 제어발파의 적용단계 예시를 나타내었다.

[표 1] 단계별 제어발파 굴착공법

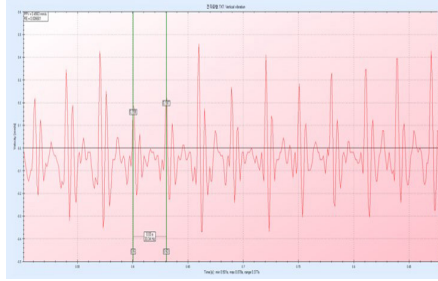


#### 2.2 전자뇌관을 이용한 더블데크 전자발파 공법

##### 2.2.1 전자뇌관

뇌관은 폭약의 기폭장치로서 전기식, 비전기식, 전자식 뇌관으로 분류되며 이중 전기식, 비전기식 뇌관은 뇌관 내

[표 2] 뇌관종류별 특성 비교

구 분	전기뇌관	비전기뇌관	전자뇌관
점화방식	전기전류	충격파	ASIC(전자회로 통제)
시차 정밀도	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 0.01\%$
시차 결정요소	지연화약의 길이	지연화약의 길이	전자 집적회로통제
안전성	전기적 충격에 민감	외부 전기 요인에 안전(전용발파 신호체계에서만 작동)	
설정초시	0~7,000ms	0~7,000ms	0~20,000ms
사용단수	MS: 20단/LP: 22단, MS & LP조합: 약42단		800단(무한단차 효과)
장 점	가격 저렴	전기적 안전	진동 분해능력 우수
단 점	뇌관오차로 진동증가 전기적 위험	뇌관오차로 진동증가 가격 다소 높음	가격 고가
발파 진동파형			

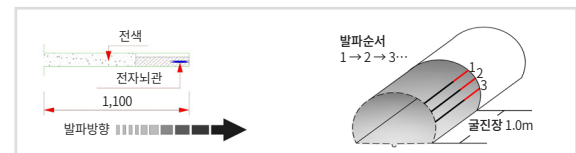
지연화약을 통하여 시차를 제어하기 때문에 기폭시차 오차(약  $\pm 10\%$ )가 존재하며, 기폭시차가 한정될 수밖에 없다는 단점이 있다. 반면에 전자뇌관은 전자집적회로를 통하여 뇌관의 시차를 제어하므로 시차 정밀도(약 0.01%)가 우수하여 발파진동 파형중첩에 의한 진동증가 현상이 발생할 가능성이 낮으며, 무한단차 설정이 가능하므로 발파현장에 적합한 발파설계가 가능하고 발파 및 파쇄효율을 높일 수 있다는 장점이 있다. 또한 전자뇌관 발파는 발파공 장악완료, 전자 집적회로 충전, 발파 순으로 발파가 진행되므로 충전이 완료된 후에는 뇌관의 도선이 절단되어도 정확한 시차에 발파가 가능하다. 뇌관종류별 특성 비교표는 [표 2]에 나타내었다.

### 2.2.2 더블데크(Double Deck) 발파 공법

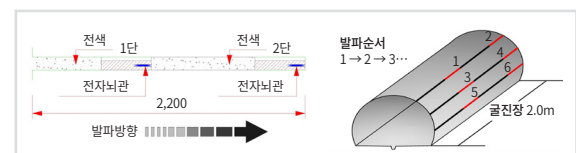
더블데크(Double Deck) 발파 공법은 한 발파공에 2단의 장약(폭약+뇌관)을 설치하고 각 장약의 기폭시간을 달리하여 분할 발파하는 공법을 말한다. 이러한 더블데크(Double Deck) 발파 공법은 분할한 장약이 단차별로 기폭되어 지발당장약량을 감소시킬 수 있으므로 진동과 소음 저감에 효과가 있다. 노천발파 현장에서는 더블데크(Double Deck) 발파 공법을 포함한 다단 장약(Deck

Charge) 공법이 사용되었지만, 터널발파 현장에서는 좁은 공간에서 다수의 발파공을 한번에 발파하며 발생하는 문제점(시차중첩, Cut-off 등)으로 인하여 기존 전기 및 비전기뇌관으로는 적용할 수 없었다. 그러나 전자뇌관은 정밀한 시차 제어가 가능하고 전기집적 회로가 충전된 후에는 도선이 단선되어도 발파가 가능하므로, 터널발파에서도 전자뇌관을 활용하여 더블데크발파 적용이 가능하게 되었다. [그림 1] 일반적인 미진동 전자발파 모식도이며, [그림 2]는 더블데크 전자발파 모식도이다.

[그림 1] 일반적인 미진동 전자발파 모식도



[그림 2] 더블데크 발파 모식도



### 3 더블데크 발파 공법 현장 시험발파

#### 3.1 시험발파 개요

시험발파는 세종~포천 고속도로 안성~구리 건설공사 제11 공구 현장의 남한산성터널 종점부에서 시험발파를 수행하였으며, 더블데크 전자발파 2회, 일반 미진동 전자발파 2회를 수행하였다. 시험발파의 목적은 더블데크 전자발파와 일반 미진동 전자발파공법의 비교시험을 통하여 진동크기 분석, 굴착효율, 파쇄입도 크기 분석 등 현장 적용성 파악이다. 시험발파 위치는 [그림 3]과 같으며, 현장에 적용패턴 굴진장을 고려하여 시험을 수행하였다.

[그림 3] 남한산성터널 종점부 시험발파 수행 위치도

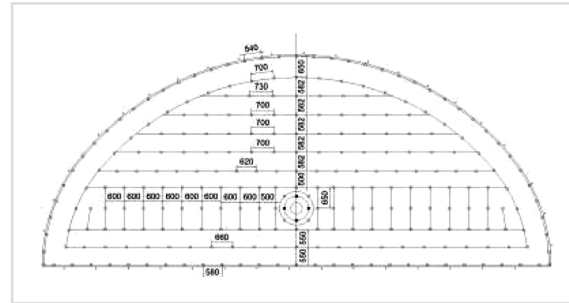


#### 3.2 시험발파 적용패턴

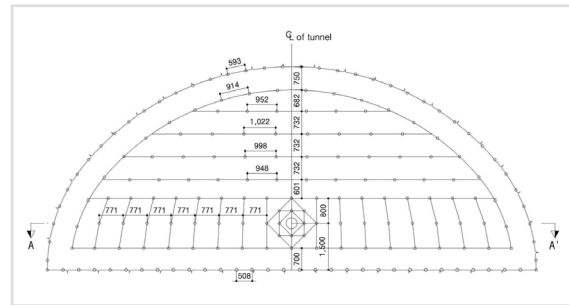
시험발파 구간은 종점부 B-2(CB3, 선대구경, 전자뇌관, 굴진장 축소 적용)패턴으로 굴진장이 1.5m인 일반 미진동 전자발파와 굴진장 1.5m+1.5m의 더블데크 전자발파를 비교 시험하였다. 굴진장의 차이로 인하여 더블데크 전자발

파(1.5m+1.5m)시 일반 미진동 발파(1.5m)대비 장약공 수를 약 5% 증가 시켜 시험발파를 수행하였다. 시험발파 패턴 제원표는 [표 3]이며 발파패턴도는 [그림 4~5]와 같다.

[그림 4] 더블데크 전자발파(1차, 3차)



[그림 5] 일반 미진동 전자발파(2차, 4차)



[표 3] 시험부 시험발파 패턴 요약

구 분	1차	2차	3차	4차
발파패턴	B-2(CB3)	B-2(CB3)	B-2(CB3)	B-2(CB3)
시험발파 공법	더블데크 전자	일반 미진동 전자	더블데크 전자	일반 미진동 전자
굴진장/천공장(m)	1.5+1.5 / 3.3	1.5 / 1.6	1.5+1.5 / 3.3	1.5 / 1.6
장약공(mm)	Φ 45	Φ 45	Φ 45	Φ 45
무장약공(mm)	Φ 365	Φ 365	Φ 365	Φ 365
장약공(공수)	194	186	195	184
단면적(㎡)/파쇄량(㎡)	79.921 / 239.763	79.921 / 119.882	79.921 / 239.763	79.921 / 119.882
지발당 장약량(kg/delay)	0.50~0.80	0.50~0.80	0.50~0.80	0.50~0.80
총장약량(kg/total)	286.6	135.8	288.2	134.2
비장약량(kg/m³)	1.195	1.133	1.202	1.119
사용 폭약류	에멀전, 정밀폭약	에멀전, 정밀폭약	에멀전, 정밀폭약	에멀전, 정밀폭약
사용 뇌관류(전자뇌관)	388 EA	186 EA	390 EA	184 EA

[표 4] 시험발파 계측기별 이격거리

구 분	중점부 시험발파 계측기별 이격거리(m)				계측기 설치위치도
	1차	2차	3차	4차	
계측기 #1	90	93	93.5	96.5	
계측기 #2	100	103	103.5	106.5	
계측기 #3	130	133	133.5	136.5	
계측기 #4	160	163	163.5	166.5	
계측기 #5	190	193	193.5	196.5	
계측기 #6	200	203	203.5	206.5	
계측기 #7	210	213	213.5	216.5	
계측기 #8	220	223	223.5	226.5	

### 3.3 시험발파 결과

#### 3.3.1 발파진동 분석

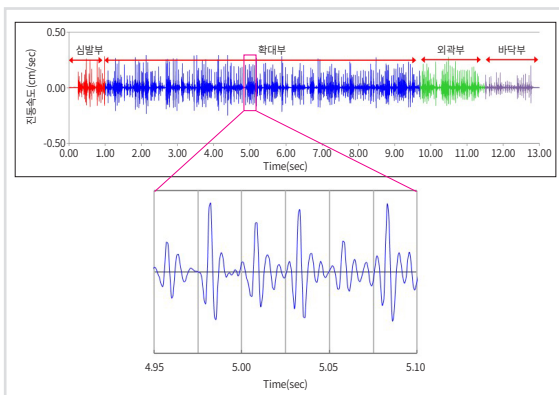
시험발파시 매 발파마다 계측기를 설치하여 진동을 계측하였으며, 발파진동 계측위치와 위치별 계측거리는 [표 4]와 같다.

더블데크 전자발파는 목표 굴진장을 2단으로 분할하여 발파하는 공법으로 공법 특성상 1단에 장약된 폭약이 발파되며 2단에 장약된 폭약이 같이 발파되는 유폭현상이 발생할 수 있다. 이러한 이유로 시험발파 수행시 유폭현상을 방지하기 위한 장치(데크플러그)를 개발하였으며 더블데크 전자발파시 적용하여 유폭 방지 효과를 확인하였다. 시험발파 후 뇌관 시차 오차에 의한 진동 파형 중첩에 관하여 분석

을 수행하였으며, 분석결과 모든 발파에서 입력된 시차에 정확히 기폭되었고, 유폭으로 인한 진동 증폭현상은 발생하지 않았다. [그림 6]은 발파의 시차분석 결과 그래프이다.

더블데크 전자발파 수행시 일반 미진동 전자발파 굴진장(L=1.5m)대비 2배의 굴진장을 2단(1.5m+1.5m)으로 나누어 발파함으로써 동일한 지발당장약량 조건에서 진동의 크기변화를 분석하였다. 동일한 지발당장약량을 사용할 경우 더블데크 전자발파는 일반 미진동발파 보다 진동이 작거나 비슷한 경향을 보였다. [표 5]는 발파진동 계측결과표이며, 계측기 #1의 경우 계측위치가 갭문과 근접하여 발파시 발파 폭풍압에 의하여 진동이 과다하게 측정되었다. [그림 7]은 동일한 지발당장약량이 적용된 시험발파의 진동 크기를 비교하였다.

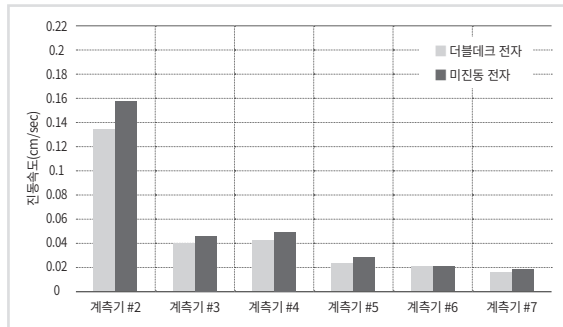
[그림 6] 더블데크 발파시 유폭여부확인



[표 5] 발파진동 계측 결과

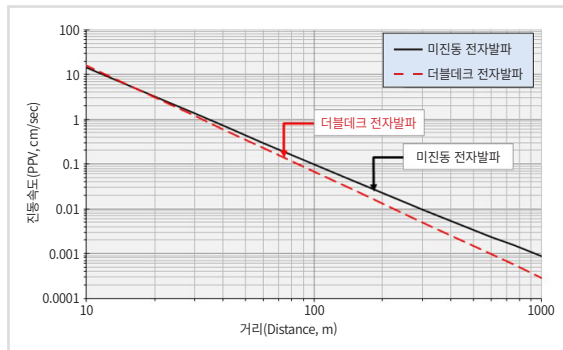
구 분	시험발파별 발파진동 계측결과(cm/sec)			
	1차 (더블데크 전자)	2차 (일반 미진동 전자)	3차 (더블데크 전자)	4차 (일반 미진동 전자)
계측기 #1	0.873	0.924	0.952	1.060
계측기 #2	0.130	0.130	0.137	0.186
계측기 #3	0.038	0.038	0.041	0.054
계측기 #4	0.051	0.063	0.033	0.036
계측기 #5	0.019	0.021	0.028	0.034
계측기 #6	0.017	0.017	0.024	0.025
계측기 #7	0.012	0.014	0.020	0.022
계측기 #8	0.01 미만	0.01 미만	0.01 미만	0.01 미만

[그림 7] 더블데크 전자발파와 일반 미진동 전자발파의 진동속도 비교 그래프



시험발파에서 수행한 더블데크 전자발파와 일반 미진동 전자발파의 진동데이터를 바탕으로 회귀분석을 수행하여 발파진동의 경향성을 분석하였으며, 시험발파 시 동일한 지발당장약을 적용하였으므로 발파진동의 객관적인 비교분석이 가능하였다. 분석결과 일반 미진동 전자발파에 비해 더블데크 전자발파공법의 발파진동이 작게 측정되었으므로 더블데크 전자발파 적용시 발생하는 발파진동은 일반 미진동 발파와 유사할 것으로 판단된다. [그림 8]은 발파진동 추정식별 비교 그래프이다.

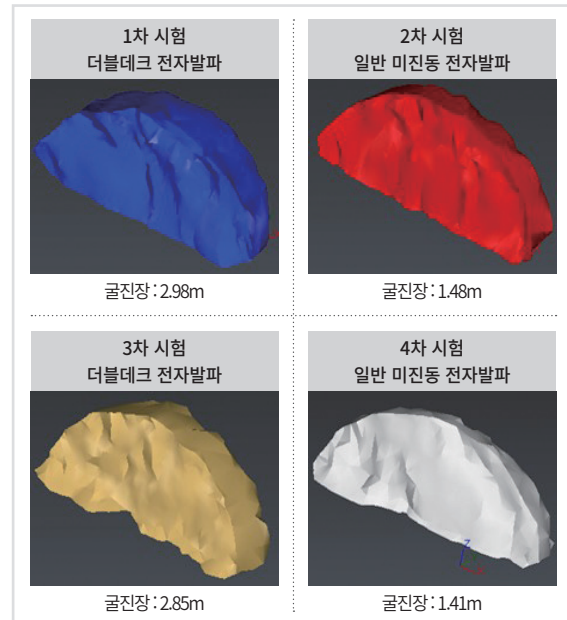
[그림 8] 종점부 발파진동 추정식 비교그래프



### 3.3.2 발파효율 분석

각 차수의 시험발파 후 막장면에 대하여 3D 스캔과 파쇄입도 분석을 실시하였으며, 발파 종료 후 버력만 처리 한 상태에서 3D 스캐너 작업을 수행하였다. [표 7, 8]은 3D 스캔을 통한 굴진장과 여굴 분석 결과이며, [표 9]은 파쇄입도 분석 결과이다. 추가적인 발파효율 분석결과는 [표 10]에 정리하였다.

[표 7] 3D 스캐너를 이용한 굴진장 분석 결과

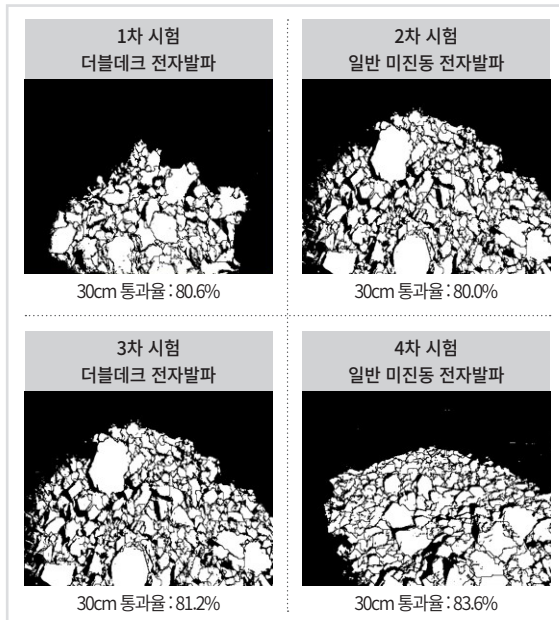


[표 8] 최대 여굴길이 분석 결과





[표 9] 파쇄입도 분석 결과



[표 10] 발파효율 분석 결과 정리

구 분	1차 (더블데크 전자)	2차 (일반 미진동 전자)	3차 (더블데크 전자)	4차 (일반 미진동 전자)
굴진장 및 굴진효율	2.98m (99.3%)	1.48m (98.7%)	2.85m (95.0%)	1.41m (94.0%)
평균 여굴길이 (최대 여굴길이)	19.8cm (23.2cm)	14.1cm (15.1cm)	15.2cm (16.4cm)	12.5cm (14.3cm)
파쇄 입도	30cm	30cm	30cm	30cm
통과율	80.6%	80.0%	81.2%	83.6%
분석 결과	최대	545.6mm	589.5mm	572.9mm
		539.9mm		

## 4 요약 및 결론

본 고에서는 일반 미진동 전자발파와 더블데크 전자발파의 시험발파를 통하여 발파진동 크기분석, 진동속도 회귀분석, 굴진효율 및 여굴량, 파쇄입도 크기 분석 등을 비교하고 더블데크 전자발파의 시공성을 확인하고자 하였으며, 연구 내용 및 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 “세종~포천 고속도로 안성~구리 건설공사 제11공구” 남한산성터널 종점부에서 시험발파를 수행하였으며, 일반 미진동 전자발파(굴진장 1.5m) 기준으로 더블데크 전자발파는 굴진장을 2배(1.5m+1.5m)로 증대하고 동일한 지발당 장약량을 적용하여 시험을 수행하였다.
- 2) 시험발파 결과, 일반 미진동 전자발파와 지발당장약량이 동일한 조건에서 굴진장을 2배(1.5m+1.5m)로 증가시킨 더블데크 전자발파의 진동수준이 더 적거나 비슷하게 발생하였으며 유폭현상은 발생하지 않았다. 또한, 굴진장을 2배로 증대시킨 결과 천공장의 길이 증가로 더블데크 전자발파가 일반 미진동 발파에 비하여 여굴이 다소 크게 발생되었고, 3m 이상 장공발파시에도 파쇄입도는 30cm 미만의 파쇄석 비율이 80% 이상 발생하는 것을 확인하였다. 그러므로 더블데크 전자발파 적용시 굴진장을 2배로 증대시켜도 발파진동 및 굴진효율은 일반 미진동 전자발파와 유사할 것으로 판단된다.
- 3) 더블데크 전자발파 시험결과 진동크기, 발파효율, 파쇄입도, 여굴량 등 일반 미진동 전자발파와 비슷한 수준으로 평가되어 현장 적용시 굴진장 증대로 인한 공사기간 단축 및 시공비 절감이 가능할 것으로 판단된다. 단, 본 연구의 결과는 부족한 데이터와 제한된 조건에서 도출된 결과이며, 추후 다양한 현장 및 조건에서 더블데크 전자발파를 적용하여 추가적인 자료축적이 필요하다.