

# 도심지 터널에서의 암반 굴착공법 선정 및 적용에 관한 사례연구

## A Case Study on the Selection and Apply of Rock Excavation Method at Urban Tunnel

원 연호<sup>1)</sup>, 신 일재<sup>2)</sup>, 기 경철<sup>3)</sup>, 이무희<sup>4)</sup>, 손영복<sup>1)</sup>

Yoen-Ho Won, Il-Jae Shin, Kyoung-Chul Ki, Mu-Heui Lee, Young-Bok Son

<sup>1)</sup>1&B기술사사무소, <sup>2)</sup>현대건설, <sup>3)</sup>한국산업인력공단, <sup>4)</sup>일해토건

### 초 록

일반적으로 도심지에서 터널 시공을 위한 암반굴착 작업은 주변 보안물건에 대해 직접적인 피해를 유발시킬 수 있는 공해요소인 진동을 허용기준값 이하로 제어할 수 있으면서 상대적으로 시공성과 경제성이 뛰어난 공법으로 수행되어야 한다. 본 사례에서는 국내의 대표적인 문화시설인 예술의 전당 하부를 통과하는 우면산 터널 공사 현장에서 암반굴착공법으로 고려한 TBM 장비를 이용한 기계굴착, 플라즈마 공법, 유압 장비를 이용한 할암공법, 켈파쇄 공법, 미진동파쇄기를 이용한 공법, 진동제어발파공법에 대한 현장 적용성을 시험시공 등을 통해 평가한 내용과 결과를 제시하였다. 비록 각 도심지 터널의 현장 상황이나 주변 여건에 따라 이 현장에서의 시험시공 내용이나 적용 결과를 그대로 적용할 수는 없겠지만, 진동제어 암반굴착 공법에 대한 시험시공이나 선정 과정에 이 사례연구가 개략적인 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

**핵심어** : 진동제어발파공법, 할암공법, 플라즈마, 미진동파쇄기

### 1. 서 론

전 국토의 70% 이상이 산지인 우리나라의 지형상 사회간접시설인 많은 고속도로, 국도, 철도 등의 도로시설에 터널 구간이 차지하는 비중이 점점 더 높아지고 있다. 또한 자동차 보유대수가 급격히 증가하면서 기존의 도로망으로는 원활한 교통 소통에 많은 어려움을 겪

고 있는 도심지의 경우에도 기존 도로망의 확장 및 정비만으로는 한계가 있어 새로운 도로 건설이 이루어지고 있는데, 이런 도로들 또한 많은 구간이 터널로 건설되고 있다. 지하 암반을 굴착하여 예정한 구간에 새로운 도로를 건설하는 도로터널공사에서 가장 중요한 내용은 얼마나 효율적으로 암반을 굴착하는가와 어떤 방법으로 굴착한 터널의 안정성을 확보

하느냐이다. 암반굴착공법으로는 화약의 폭발력을 이용하는 발파공법이 현재까지도 가장 널리 적용되고 있는데, 이는 일반적으로 다른 공법들에 비해 발파공법에 의한 암반굴착작업이 가장 빠르고 경제적이란 이유에 기인한다. 그러나 발파공법에 의한 암반굴착 작업은 필연적으로 발파진동, 발파소음과 같은 발파공해를 동반하게 되는데, 특히 주변에 건물들이 밀집한 도심지 터널 공사에 발파공법을 적용하기 위해서는 건물에 직접적인 피해를 유발시킬 수 있는 발파진동을 허용기준값 이하로 제어하는 일이 무엇보다도 중요하다. 이러한 발파공법의 한계를 극복하고자 현재 다양한 미진동 암반굴착 공법들이 개발되어 적용되고 있으나, 실제 도심지 터널 공사현장에서는 진동, 소음과 같은 환경공해를 허용기준값 이하로 제어할 수 있으면서 시공성과 경제성 측면에서 상대적으로 뛰어난 암반굴착 공법을 선정하여 적용하여야 한다. 본 사례연구에서는 도심지 도로터널 현장인 우면산 터널 현장에서 암반굴착 공법의 선정을 위해 고려한 TTM 장비를 이용한 기계굴착, 플라즈마 공법, 유압장비를 이용한 할암공법, 미진동파쇄기를 이용한 공법, 진동제어발파공법에 의한 시험굴착 내용과 결과에 대해 기술한다.

## 2. 현장 상황

### 2.1 현장 개요

우면산 터널은 서울 서초구 서초동 예술의전당 입구에서 서초구 우면동 선암로에 이르는 도로 터널로 터널 연장이 지하차도의 박스 구간을 포함하여 1,900 m인 쌍굴터널 현장이다. 이 현장의 시점부 터널 구간은 국내의 대표적인 문화예술공간인 예술의전당 하부를 통과하게 되므로, 암반굴착작업시 주변 건물에 대해 피해를 유발시킬수 있는 진동을 허용

수준 이하로 제어하는 것이 매우 중요한 사안이다. 그림 1은 우면산 터널 현장의 시점부 구간 평면도로 상행선의 경우 STA. 0+504부터 그리고 하행선의 경우는 STA. 0+512부터 터널 시공을 위한 암반굴착 작업이 수행되었다.

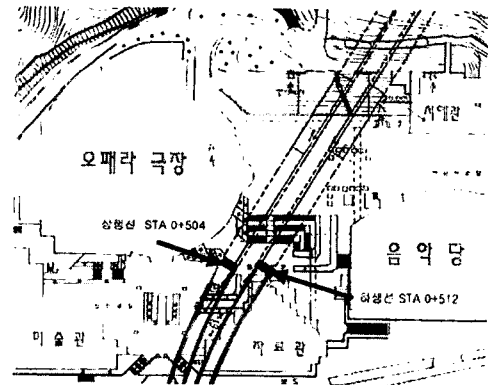


그림 1. 우면산 터널 시점부 구간 평면도

### 2.2 지질 및 암반

우면산 터널 일대의 지질은 선캠브리아기에 형성된 편마암류가 기반암으로 넓게 발달되어 있으며, 신생대 제 4기에 형성된 충적층이 계곡 및 하천을 따라서 분포하고 있다. 호상 흑운모 편마암은 석영, 정장석, 미사장석, 사장석, 흑운모 등으로 구성되어 있으며, 편마암의 특징인 엽리가 발달되어 있고 피상의 형태를 보인다.

화강암질 편마암은 석영, 정장석, 미사장석, 사장석, 흑운모, 백운모, 석류석 등으로 구성되어 있으며, 역시 뚜렷한 엽리구조를 보이는데 이 엽리구조의 방향은 지표지질조사 결과 주절리의 방향과 거의 일치하는 것으로 나타났다.

표 1은 현장의 지반조사시 터널 시점부에서의 시추공 시료에 대한 암석물성시험 결과를 정리한 것으로 암석의 일축압축강도는 490~1,200 kgf/cm<sup>2</sup>의 범위를 보이고 있다.

표 1. 시점부 부근 시추공 암석시료에 대한 실험실 시험 결과

시추공	심도 (m)	비중 (t/m <sup>3</sup> )	일축압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	포아송비	내부마찰각 (°)	점착력 (kgf/cm <sup>2</sup> )
BH-1	11.5~11.8	2.65	800	0.19	44.3	170
	16.0~16.5	2.63	1,200	0.26	47.0	230
BH-2	18.0~18.5	2.81	490	0.20	42.6	270
	20.5~20.9	2.79	760	0.25	44.2	170
BH-3	31.3~31.6	2.71	1,200	0.25	42.1	220
	37.5~38.0	2.75	490	0.22	43.5	220

### 2.3 주변 보안 물건

우면산 터널 시점부 구간 주변의 주요 보안 물건으로는 예술의 전당 건물들인 오페라극장, 음악당, 서예관, 미술관, 자료관이 있다. 표 2는 각 보안물건으로부터 암반굴착이 이루어질 터널까지의 최단 이격거리를 정리한 표이다.

표 2. 각 보안물건까지의 최단 이격거리

보안물건	평면도상의 최단 이격거리(m)	단면도상의 최단 이격거리(m)
자료관	75.6	78.3
미술관	4.32	4.76
오페라극장	9.3	12.7
음악당	25.4	26.5
서예관	6.9	12.4

표 2에서 평면도상의 최단 이격거리란 각 보안물건에서 암반굴착 작업이 수행될 터널까지의 최단 수평거리를 의미하고, 단면도상의 최단 이격거리는 각 보안물건과 터널의 심도 차이까지를 고려한 최단 진동전파 거리를 의미한다.

예술의 전당 건물들에 대한 진동허용기준값으로는 문화재나 유적과 같은 건물들에 대한 기준값인 0.2 cm/sec를 적용하였다.

### 3. 미진동 암반굴착공법

#### 3.1 TTM을 이용한 기계굴착

TTM(Tracked Tunnel Machine)은 로드헤드와 TBM의 단점들은 보완하면서 장점들만을 활용하기 위하여 개발된 장비로서, 그림 2는 TTM 장비로는 유일하게 현재 국내에 도입되어있는 영국 Dosco사 TTM100의 전체 모습을 보여주는 그림이고, 그림 3은 TTM 장비의 구성도이다.

Cutting Head는 분당 3.5~10.5회 사이의 회전력과 Head에 장착된 각종 Pick들의 압축력으로 암석을 압쇄시켜 파쇄하는 부분으로 TTM100의 경우 커트헤드의 직경은 1.5 m 이다.

Track을 이용해 TTM의 전진, 후진, 방향 조절이 이루어지고, 본체의 측면과 상부 좌우에 각 4개씩 총 16개로 구성된 Staker는 터널내부의 벽면과 천장부를 지지점으로 하여 TTM을 고정시키는 역할을 한다.

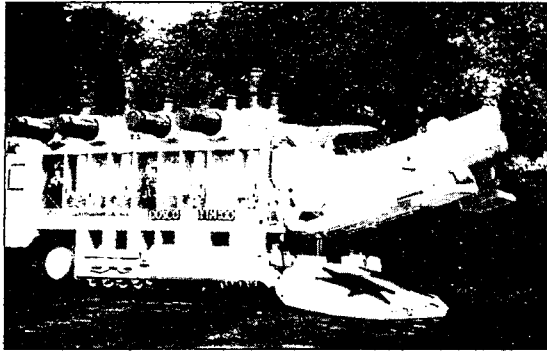


그림 2. 영국 Dosco사의 TTM 100

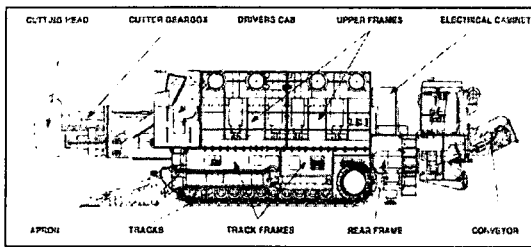


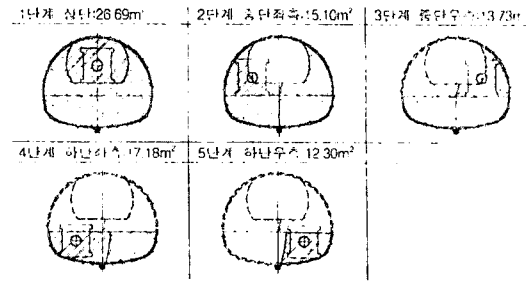
그림 3. TTM 장비의 구성도

TTM 100 장비의 최대 작업 범위는 터널 천장의 곡률반경이 3.35 m 이하일 때, 터널 폭 6.74 m, 터널 높이 5.37 m, 단면적 30.5 m<sup>2</sup>이지만, 우면산 터널과 같이 터널 천장부의 곡률반경이 큰 대단면 터널의 경우에는 작업이 가능한 최대 터널 높이가 4.5 m 이하로 제한되고 그만큼 굴착 가능한 단면적도 줄어들게 된다.

그림 4는 이 현장의 실시설계 보고서에서 채택한 TTM 100을 이용한 상단 중앙부 선 굴착을 통한 5단계 굴착방법의 굴착 단면과 각 단계별 굴착 순서를 보여주는 그림이다.

그러나 이와같이 5단계에 걸친 TTM을 이용한 굴착 방법은 실제 현장 적용시 여러가지 문제점들이 발생할 수 있을 것으로 나타났다.

우선 각 굴착 단계별로 TTM 장비의 바닥 레벨이 차이를 보이므로, 추가적인 바닥 레벨을 맞추기 위한 정지작업이 필요하다.



또

그림 4. TTM에 의한 굴착 단면 및 순서

한 1단계를 제외한 나머지 단계에서는 장비의 측면과 윗부분 좌우측에 있는 Staker를 터널 벽면과 천장부에 모두 고정시키거나 측면부 또는 윗부분에 있는 좌우측 Staker를 함께 이용하기가 어려운 것으로 나타났다. 따라서 추가적인 바닥부 굴착이나 배수구 굴착이 필요할 뿐만 아니라, 최초의 장비 설치 공간 마련을 위한 10 m 정도의 Pilot 터널이 요구된다.

국내에서의 시공실적인 지하철 터널에 대한 시공 사례도 전체 단면에 대해 TTM 장비를 적용한 것이 아니라, TTM 장비로 굴착 가능한 단면을 굴착한 후 나머지 부분은 확대발파 공법을 병행하여 시공한 것이다.

실제 우면산 터널 시점부 현장의 경우 상행선 및 하행선 양쪽 터널에서 굴착작업이 수행되어야 하나, 현재 국내에 도입되어 있는 단 1대만의 TTM 장비를 현장에 투입하여 상행선 터널 현장에서의 굴착 작업과 하행선 터널에서의 굴착작업을 함께 수행하기 위해서는 한쪽 터널에서의 암반굴착 작업을 수행한 TTM 장비를 지하 박스구간을 포함한 반포로 방향으로 후진시켜 옆쪽 터널로 투입시켜야 하는데, 이런 공정은 현장의 조건을 고려할 때 거의 불가능한 작업 공정으로 나타나, 실시설계에서 채택한 이 암반굴착공법은 변경이 불가피하였다.

### 3.2 유압을 이용한 할암공법

유압을 이용한 할암공법은 주로 노천 암반 굴착에 많이 적용되는 미진동 굴착공법으로 암반내에 천공된 공들에 대해 유압을 가할 수 있는 장비를 삽입한 후, 각 공들 사이로 유압을 이용해 암반에 균열을 발생시키는 공법이다.

이러한 할암공법에 사용되는 유압장비들은 지속적으로 발전해왔는데, 암반에 균열을 발생시키는 원리 및 장비명에 따라 HRS, Bigger, Power Splite, DARDA 공법 등이 있다.

할암공법을 이용한 터널내에서의 암반굴착은 일반적으로 천공, 1차 파쇄, 2차 파쇄의 공정을 거치게 되는데, 천공경과 천공수는 적용 할암공법과 사용 장비에 따라 차이를 보이며, 1차 파쇄는 유압을 이용한 장비에 의해, 그리고 2차 파쇄는 주로 리퍼나 브레이커에 의해 이루어진다.

그림 5는 할암공법의 적용성을 평가하기 위해 우면산 터널 시점부에서 수행한 HRS 시험시공 천공 패턴도이다. 천공직경은 105 mm이고, 천공장은 1.2 m, 천공간격은 300 mm이며, 1회에 유압장비가 삽입된 공의 수는 5공이다.

천공된 공과 평행한 자유면을 형성시켜주기 위해 200 mm 직경의 공을 3공 천공하여 자유면으로 활용하였다.

이러한 시험시공 결과 공과 공사이 그리고 공과 자유면 사이에 새로 형성된 균열들을 확인할 수 있었고, 브레이커에 의한 2차 파쇄작업으로 균열이 형성된 암석을 모암으로부터 분리할 수 있는 것으로 나타났다.

그림 6은 이 현장에서의 할암공법 시험시공에 적용된 장비인 HRS의 모습을 보여주는 그림으로 공내부에 삽입되는 장치는 한번에 최대 5개까지 가능하고 최대 팽창압은 약 1250

kg/cm<sup>2</sup> 이다.

그림 7은 할암공법 시험시공을 위해 천공된 막장면의 모습을 보여주는 그림이고, 이러한 시험 시공 결과 충분한 암반파쇄가 확인되어 시점부 구간의 암반 굴착 공법으로 할암공법을 적용할 수 있는 것으로 나타났다.

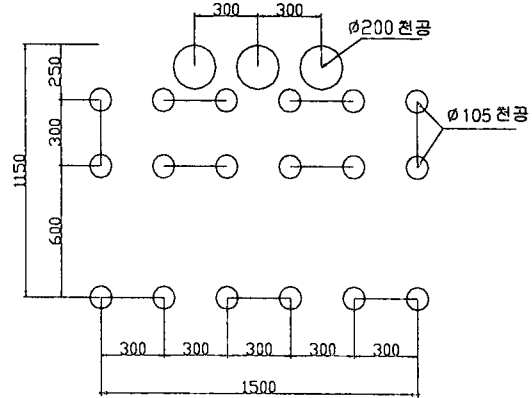


그림 5. 할암공법에 의한 시험시공 패턴도

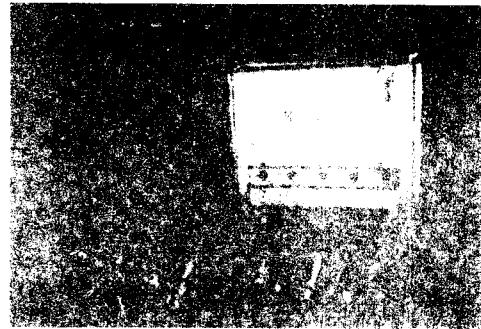


그림 6. 할암공법 시험시공에 적용된 장비



그림 7. 할암공법 시험시공을 위해 천공된 막장면 모습

### 3.3 플라즈마 파암공법

플라즈마 파암공법이란 발파공과 같은 형태로 천공된 공들에 넣은 전해액에 전기에너지를 가할 때 순간적으로 발생하는 고온고압의 플라즈마 팽창압력을 이용하여 암반을 파쇄하는 공법이다.

이 공법은 노천 암반굴착 현장에 적용하는 경우, 발파공법에 비해서는 암반 굴착작업시 발생하는 진동이 작고, 유압을 이용한 할암공법에 비해서는 상대적으로 공사시간을 단축시킬 수 있고 더 저렴한 것으로 알려져 있다.

따라서 주변 보안물건에 대한 진동 영향평가 결과 발파작업의 적용은 불가능하나 이 공법에 의한 굴착작업으로는 진동 제어가 가능한 일부 구간에 대해 적용이 가능할 수 있다.

플라즈마 파암공법의 경우 현재 벤치현장에서는 여러 차례의 시공사례가 있어 자유면이 확보된 이후의 주변공이나 최외곽공 부분에 대한 굴착 작업은 가능한 것으로 나타나지만, 심발부분을 포함하는 터널 전단면에 대한 적용사례는 거의 없는 상황이다.

현재까지 플라즈마 파암공법에 의한 암반굴착 작업시 발생하는 진동을 현장의 암반상태, 굴착 패턴에 따라 정량적으로 평가한 자료는 매우 부족하다.

따라서 본 사례연구에서는 같은 암반상태를 가지는 성남 하대원동의 노천 암반 굴착 현장에서 발파작업과 플라즈마 파암공법시 발생하는 진동 측정 자료를 각각 해석하여 비교해 보았다.

그림 8은 노천 암반굴착 현장에서 측정한 발파진동과 플라즈마 파암공법시 발생하는 진동 측정자료의 해석결과를 비교한 그림이다.

발파진동의 경우 삼승근 환산거리가 약 45 m/kg<sup>1/3</sup>인 경우에 예측되는 진동수준이 0.2

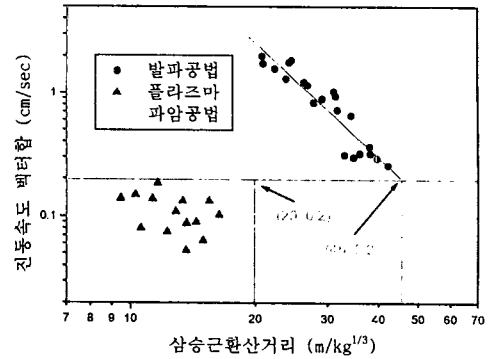


그림 8. 발파공법과 플라즈마파암공법 적용시 발생하는 진동 비교 사례

cm/sec로 나타난 반면에 플라즈마 파암공법 적용시는 삼승근 환산거리 약 9~17 m/kg<sup>1/3</sup> 범위에서 측정한 진동속도가 모두 0.2 cm/sec 이하로 나타나 발파작업보다 훨씬 작은 진동이 발생하고 있음을 알 수 있다.

그러나 플라즈마 파암공법 적용시의 진동 측정 자료가 분산이 심하다는 점과 두 공법을 통해 측정한 진동자료가 각기 다른 환산거리 범위에서 측정되었기 때문에 이 자료를 바탕으로 정량적인 두공법의 진동비교는 어렵다.

이 현장에 대한 플라즈마 파암공법의 적용성을 평가하기 위해 시점부와 암반상태가 유사한 종점부 막장면 심발부에 대해 시험시공을 수행하였다.

그림 9는 플라즈마 파암공법에 의한 시험시공시의 천공패턴으로 천공경은 51 mm, 천공장은 1.6 m, 공간격은 400 mm이고, 2공의 무장약공이 천공된 V-Cut 형태의 굴착패턴이다. 공당 500g의 전해질을 장약하여 기폭한 결과 암반파쇄가 이루어지지 않았다.

즉 플라즈마의 경우 화약에 비해 위력이 상대적으로 작기 때문에 하나의 자유면을 가지는 심발부분에서 비록 2공의 무장약공

을 적용하였지만, 기존의 V-Cut과 같은 패턴으로는 경압구간에서의 암반 파쇄가 어려운 것으로 나타났다.

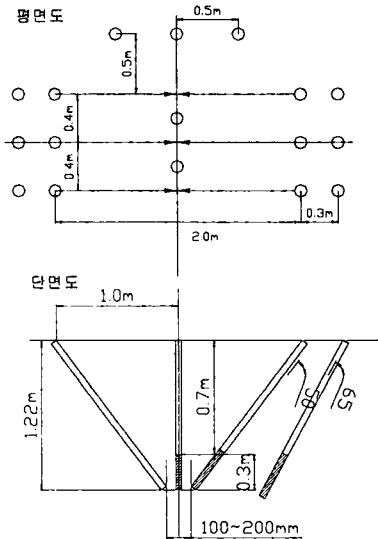


그림 9. 플라즈마 파압공법 시험시공 패턴

### 3.4 미진동 파쇄기

미진동 파쇄기에 의한 굴착공법의 현장 적용성을 평가하기 위해 제품명이 뉴화이넥카 180인 미진동 파쇄기를 사용한 시험굴착을 수행하였다. 뉴화이넥카는 고열 반응에 의한 순간적인 열팽창으로 암석에 균열이 발생하는 원리를 이용한 제품으로서 화이넥카 전용의 점화구를 사용하고, 최근 도심이나 보안건물이 있는 곳에서 콘크리트, 암반 및 교각 등의 파쇄 시 진동, 소음제어와 비산물 방지를 위한 공사시 적용되는 미진동 파쇄기로서 화공품의 일종이다. 이러한 미진동 파쇄기는 화약에 비해 발생 가스량이 적고, 반응온도가 높으며 반응속도가 늦은 특수한 물질로 제조된다.

뉴화이넥카 180의 약경은 30 mm, 약장은 330 mm, 중량은 180g이고, 전용 점화구의 관경은 6.5 mm, 관장은 25 mm, 각선길이

는 2.0 m이다.

그림 10은 미진동 파쇄기를 이용한 시험굴착에 사용된 뉴화이넥카 180의 모습이고, 그림 11은 시험굴착시 막장면에 대한 파암 패턴도이다.

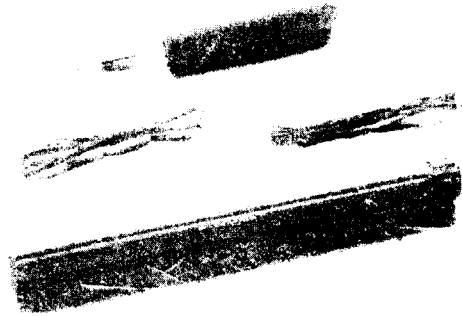


그림 10. 시험굴착에 사용된 미진동 파쇄기

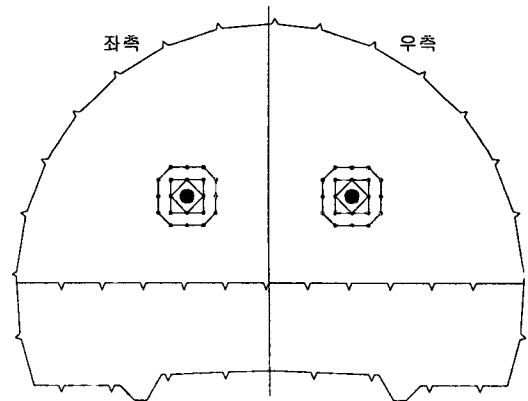


그림 11. 미진동 파쇄기에 의한 시험굴착 패턴

심발부분에 직경이 360 mm인 수평공을 선진 보링하여 자유면으로 활용하도록 하였고, 직경이 38 mm인 각 공간의 간격은 40 cm, 최소저항선은 30~40 cm, 천공장은 전색장 1 m를 고려하여 1.3 m로 하였다. 전색물로는 급결제가 첨가된 시멘트 모르타르를 사용하였고, 무장약공 주변 4공을 먼저 기폭시켰다.

미진동 파쇄기에 의한 시험굴착 결과 자

유면인 무장약공 방향으로의 암반 파쇄가 이루어지지 못하였다. 이같은 결과는 경암 구간인 시험굴착 구간에서의 그림 11에 나타난 굴착 패턴으로는 미진동 파쇄기의 정적 파괴 효과가 암반을 파쇄시키기에는 충분하지 못하였기 때문으로 판단된다.

### 3.5 진동제어 발파공법

진동제어 발파공법에 의한 시험 굴착은 주변 예술의 전당 건물로부터 40 m 이상 떨어진 위치인 시점부 하행선 터널 STA. 0+598 상부 막장면에 대해 수행하였다.

막장면 심발부분에 천공된 직경 362 mm의 대구경 무장약공을 자유면으로 활용하는 발파공법인 PLHBM 공법에 의한 심발부분 시험 발파를 수행하였다.

시험 굴착에 사용한 화약은 한화 제품인 Newmite I (에멀전폭약, 0.25 kg/EA, 직경 32 mm)과 Finex I (정밀폭약, 0.1 kg/EA, 직경 17 mm)이다. 시험 굴착에 사용한 뇌관은 지발전기뇌관으로 1회 발파시 총 발파공수가 20공 미만인 경우는 MS 뇌관만을 사용하였고, 20공 이상인 경우는 MS 뇌관과 LP 뇌관을 함께 사용하였으나, 1초내에 모든 발파공이 기폭되도록 하기 위해 LP 11번 이후의 뇌관은 적용하지 않았다.

각 시험 발파시 최대 공당 장약량을 최대 지발당 장약량으로 설정하기 위해 각 발파공에 서로 다른 번호의 MS 뇌관을 사용하였고, 최대 3공까지 같은 번호의 LP 뇌관을 사용한 경우는 다단식 발파기를 적용하여 서로 다른 시차에서 기폭되도록 하였다.

각 발파공에 대한 장약작업에서는 에멀전폭약을 공저부분에 장약하였고, 충분한 장약길이의 확보 및 진동저감을 위해 정밀폭약을 적용하였으며, 공당 장약량은 천공장과 최소저항선 등을 고려하여 결정하였으

나, 평균적으로 천공장 1.2 m인 경우 공당 장약량으로 에멀전폭약 0.167 kg + Finex 1 0.1 kg을 적용하였고, 첫 번째 심발공들의 최소저항선은 20 cm로 천공하였다.

그림 12는 우면산 터널 시점부 막장면 심발부분에 대한 4회의 시험발파를 위해 천공한 대구경 수평 보링공과 총 발파공들의 모습을 보여주는 그림이고, 그림 13은 그림 12에 나타난 발파공들 중에서 무장약공으로부터 2번째 열까지의 발파공들을 2회에 걸쳐 발파한 후의 파쇄된 암반상태를 보여주는 그림으로 시험발파에 적용된 발파패턴으로의 암반굴착이 충분히 이루어졌음을 확인할 수 있다.

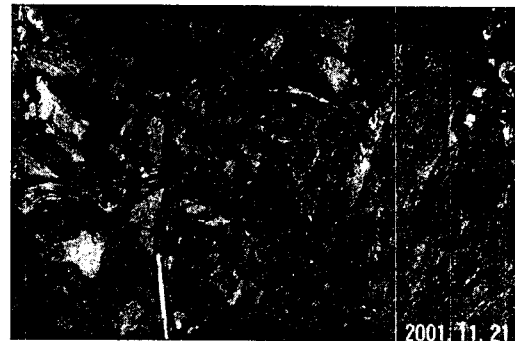


그림 12. 시험발파 천공패턴도



그림 13. 시험발파후의 암반파쇄 모습



총 16회에 걸친 시험발파 결과 1회 발파시 굴진장을 1.2 m로 하기 위한 적절한 공당 장약량은 개당 중량이 0.25 kg인 Newmite I 2/3개 + 개당 중량이 0.1 kg인 Finex-I 1개 (총 0.267 kg) 인 것으로 나타났다.

천공장이 1.5m 이상 되거나 첫 번째 심발 공들 중에서 무장약공까지의 최단 거리가 10 cm 정도에 불과한 공들에는 필요한 화약량 확보 및 장약길이 확보를 위해 Newmite I을 1/3개 더 장약하거나 Finex를 1개 더 장약하는 방법이 효과적인 것으로 나타났다.

우면산 터널 시점부 하행선 현장에서의 총 16회에 걸친 진동제어 시험발파 과정 동안 상행선 터널 바닥부와 예술의 전당 공동 구내부에서 발파진동을 측정하여 해석하였다. 그림 14와 그림 15는 시험발파시 계측한 총 59개의 벡터합 진동속도 자료를 각각 자승근환산거리와 삼승근환산거리에 따라 해석한 그림이다.

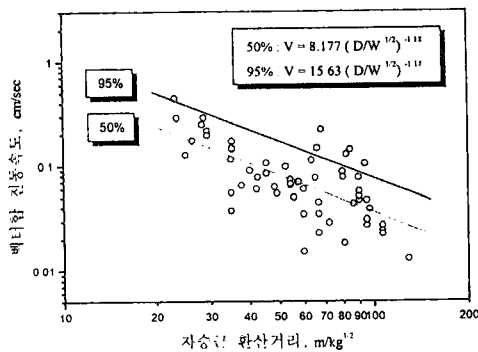


그림 14. 자승근 환산거리에 따른 벡터합 진동속도 해석 결과

보안물건에서의 최단 이격거리가 21 m 이하인 경우에는 삼승근 환산거리를 적용한 경우가 안전율이 더 높은 것으로 나타났고, 22 m 이상에서는 자승근 환산거리를 적용한 경우가 안전율이 더 높은 것으로 나타났다.

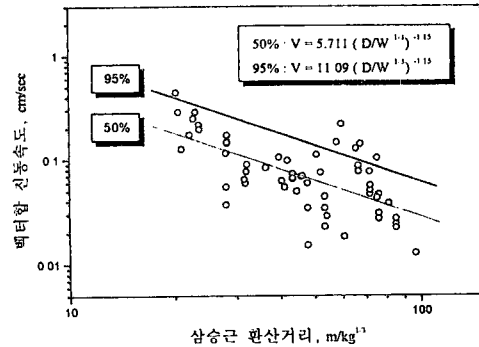


그림 15. 삼승근 환산거리에 따른 벡터합 진동속도 해석 결과

95% 발파진동 전파식을 이용하여 해석한 결과 보안물건에서의 최단 이격거리가 19m 인 경우 사용가능한 최대 지발당 장약량은 0.194 kg, 21 m인 경우는 0.268 kg, 25 m인 경우는 0.387 kg으로 나타났다.

#### 4. 현장 적용 암반굴착공법

3장에 소개한 여러 암반굴착공법에 대한 시험굴착 결과를 바탕으로 우면산 터널 시점부 예술의 전당 통과구간에 대해서는 유압을 이용한 할암공법과 진동제어발파공법으로 암반굴착 작업을 수행하였다.

유압을 이용한 할암공법은 상행선의 경우 STA. 0+525에서 0+720까지, 하행선의 경우 0+530에서 0+720까지의 암반굴착작업에 적용되었다. STA. 0+720 이후 구간의 경우 이전 구간에 비해 암반이 더 신선한 상태로 할암공법에 의한 암반굴착이 원활히 이루어 지지 않았으므로, 진동제어발파공법에 대한 시험굴착 결과를 토대로 발파작업으로 암반굴착을 수행하였다. 2002년 3월 현재 우면산 터널 시점부 예술의 전당 통과구간에 대한 암반굴착 작업은 상부 반단면은 완료된 상황이다.

## 5. 결 론

본 사례연구에서는 도심지 도로터널 현장인 우면산 터널의 예술의 전당 통과구간에 서의 암반굴착작업을 위해 수행한 미진동 굴착공법들과 진동제어발파공법의 시험굴착 내용과 결과에 대해 소개하였다. 이러한 시험굴착 결과는 시험이 수행된 구간의 암반 상태와 사용 장비, 천공장, 천공간격 등과 같은 시험굴착 내용에 따라 차이를 보이게 된다. 따라서 우면산 터널 현장에서는 암반 굴착이 이루어지지 않은 공법이라도 해당 현장의 암반상태에 적절한 방법으로 시험굴착을 통해 최적의 암반굴착 공법이 될 수 있을 것이다.

다만 진동제어가 필요한 도심지 터널현장에서 암반굴착 공법을 선정 또는 변경하여 적용하고자 하는 경우 본 사례연구에 제시된 각 공법별 시험굴착내용과 결과들이 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 대한건설터트, 1998, 우면산 터널 축조공사 민자유치 시설사업 조사 및 실시설계
2. 한국자원연구소, 1995, Plasma Blasting에 의한 암석파괴특성 연구보고서
3. TTM 공법 소개서
4. (주)호상테크노베이션, 무진동 유압 암반 절개공법 편람
5. 서울대학교 에너지자원신기술연구소, 1995, 서울 지하철 6-10공구(1공구) 굴착 공사의 발파진동 영향평가 및 안전발파 설계
6. 한국지반공학회, 1998, 불광터널 배수지 남측 터널 주택지 통과구간 터널 발파패턴 결정에 관한 연구

7. 양형식, 1992, 발파진동학

8. 천병식, 오재응, 1993, 건설기술자를 위한 지반진동 영향과 대책