

도심지 터널 건설에 따른 굴착 진동의 영향 연구

-편마암 지역 터널 사례를 중심으로-

이 수 곤 · 이 재 문 · 양 홍 석

(서울시립대학교 토목공학과)

The effect of excavation vibrations
on urban tunnel construction

Lee, Su Gon · Lee, Jae Mun · Yang, Hong Suk

ABSTRACT

In this paper, to select excavation method of the tunnel which is constructed in Gneiss area, the effect of vibration, which various excavation methods affected around important structure, was estimated. For that, we studied on the measured vibration data which acquired in test blasting and construction at the tunnel field, and the field application of the excavation method controlled vibration. In result, the powder and plasma blasting was difficult to apply because of the excess of the permitted vibration velocity for around structure, and the instrument excavation was difficult to apply with field condition. Consequently, the suitable excavation method is non-vibration and non-noise method using of hydraulic instrument for the observance of the permitted vibration velocity.

Key Words : excavation method, vibration, powder blasting, plasma blasting, permitted vibration velocity

1. 서론

현재 서울시의 토지 이용 상황으로 볼 때 지상에 신규도로를 신설한다는 것은 거의 불가능에 가까우며 부득이한 경우에 한하여 지하공간을 이용한 터널, 혹은

지하차도를 건설하고 있는 실정이 다. 그러나 이들 터널과 지하도 역시 기존의 도로나 건물, 가옥 등의 하부를 지나기 때문에 이들 구조물들의 건설에 필연적으로 발생하는 진동에 의한 민원 이 문제시 되고 있다. 일반적으로 터널 등의 암반구조물 공사에서는 굴착 작업 시 주변 건물에

피해를 발생시킬 수 있는 가장 큰 진동과 소음이 발생하기 때문에, 기존의 도로나 건물, 가옥 등이 인접한 지역에서 암반굴착 공법의 선 정을 위해서는 시공성과 경제성, 현장 적용성 뿐만 아니라 진동 및 소음에 대한 영향을 반드시 고려하여야 한다. 특히 본 연구지역과 같이 일반 도로, 건물이나 가옥 이외에 진동에 대하여 매우 민감한 공연 공간의 하부를 지나게 되는 경우에는 건설 공사시 진동 및 소음에 대한 특별한 주의를 기울여야 한다. 이러한 굴착진동이 기존의 구조물에 미치는 영향에 대하여 많은 연구가 수행되어 왔다. 특히 황현주(1996)는 발파와 관련된 민원사례를 통하여 도심지 발파의 문제점에 대한 대책을 제시하고자 하였다.¹³⁾ 이러한 발파 진동이 주변 건물에 미치는 영향을 고려하기 위하여 류창하 등 (1994a, b)은 현장의 지반조사 및 발파 계측을 통하여 주요구조물과 진동 에 민감한 시설물이 인접한 지역에서의 발파 설계 기준의 마련과 발파패턴을 선정하기 위한 연구를 수행하였고, 국내 구조물의 허용수준에 대한 문제점을 지적하여 광범위한 계측자료 처리결과의 이용 및 응답특성 해석을 이용한 보완의 필요성을 제시하였다.^{1,2)} 그러나 대부분의 굴착 진동에 관한 연구들은 화약을 이용한 발파에만 국한되어 있고 기계굴 착에 의한 진동의 영향을 연구한 자료는 문흥득 등(1994)이 수행한 화강암, 편마 암 지역에서의 TBM 굴착 진동특성에 대한 연구를³⁾ 제외하고는 아직 미비한 실정이다. 암중에 따른 진동특성에 대한 연구도 진행되었는데 특히 정덕훈 등(19 98)이 본 연구지역의 지질과 비슷한 편 마암 지역에서의 발파 진동특성을 연구 하여, 화강암과 편마암에서 서로 진동 특성이 다를 것을 알아내었고,⁹⁾ 감쇠지 수는 암반의 상태에 따라 차이를 보인다는 것을 파악 하였다. 따라서 본 논문에서는 도심지 터널굴착시 주변건물 에 대한 진동영향을 파악하기 위하여, 먼저 편마 암 지역에서 시공되는 터널 구간의 암반 굴착 작업에 대한 자료를 바탕으로, 이 구간에 대해 선정된 암반 굴착 공법의 주변 공연 건물들에 대한 진동 영향 평 가 내용과 현장 적용성에 관한 자료 등 을 현재의 현장 상황을 고려하여 연구 하였다. 또한 이들 평가 자료와 터널 현 장 암반에서의 시험발파 및 시험 시공 시 계측한 진동

측정 자료의 해석을 통 한 진동 영향 평가 결과, 그리고 여러 진동제어 암반 굴착 공법의 현장 적용 성을 검토하여 최적의 터널 굴착 방법을 선정하고자 하였다.

II. 연구지역의 지형 및 지질 특성

2.1 지형특성

본 연구 지역의 지형은 그림 1 과 같이 우면산이 남서방향에서 북서방향으로 그 능선이 형성되어 있으며 동쪽으로 비교적 완만한 구릉의 산세를 형성하고 있다. 본 연구 지역의 주위에 소규모 계곡천이 형성되어 있으며 터널 시점부 및 종점부 일부 계곡은 갈수기에 고갈되 는 형상을 보인다¹¹⁾.

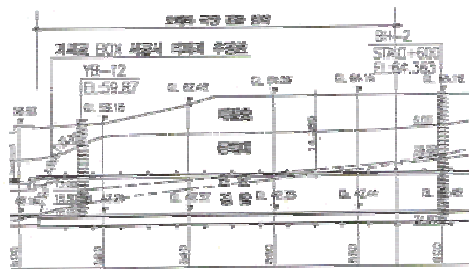


그림 1. 연구지역 지형도(1: 25,000)

2.2 지질특성

본 연구지역 일대의 지질은 선캄브리아기에 형성된 편마암류가 기반암으로 넓게 발달되어 있으며, 신생대 제 4 기에 형성된 충적층이 계곡 및 하천을 따라서 분포하고 있다. 호상 흑운모 편마암은 석영, 정장석, 미사장석, 사장석, 흑운모 등으로 구성되어 있으며, 편마암의 특징 인 엽리가 발달되어 있고 괴상의 형태를 보인다.¹¹⁾ 화강암질 편마암은 석영, 정장 석, 미사장석, 사장석, 흑운모, 백운모, 석류석 등으로 구성되어 있으며, 역시 뚜렷한 엽리구조를 보이는데 이 엽리 구조의 방향은 지표 지질조사 결과

주 절리의 방향과 거의 일치하는 것으로 나타났다. 터널 시점 부인 YB-12 와 BH-2 에서의 시추 조사 결과를 바탕으로 각종 암반분류 방법을 통하여 지반특 성을 살펴 보면,⁸⁾ 매립층, 붕적층, 풍화 토층은 10 ~ 12m 정도의 두께를 가지며 비교적 조밀한 상태를 나타내는 것으로 조사되었다. 연암층은 RQD 값이 7 ~ 20% 정도로 매우 불량한 암반상태를 나타내고 있고, 보통암층은 RQD 값이 30 ~ 46% 정도로 매우 심한 균열 내지 보통 균열된 상태로써 절리 및 균열이 발달되어 있다. 반면 그림 2.와 같이 갱구부와 일부 구간을 제외한 대부분의 터널이 통과하는 경암층은 위치에 따라 절리 및 균열이 약간 발달되어 있고, RQD 값이 63-89% 범위인 보통내지 양호한 암질상태를 보이는 것으로 조사되었다.⁴⁾

그림 2. 터널 단면도⁴⁾

III. 터널 노선과 인접 구조물 간의 위치

본 연구 터널 시점부 구간 주변의 주요 건물로는 오페라극장, 음악당, 서예관, 미술관, 자료관이 있다. 그림 3.은 시점 부근의 평면도상에 굴착예정 터널과 주변 주요 건물들을 나타낸 그림이다. 표 1.은 각 보안물건으로부터 암반 굴 착이 이루어질 터널까지의 최단 이격 거리를 정리한 표이다.⁶⁾

표 1.에서 평면도상의 최단 이격거리란, 각 보안물건에서 암반굴착 작업이 수행 될 터널까지의 최단 수평거리를 의미 하고, 단면도상의 최단 이격거리는 각 보안물건과 터널의 심도 차이까지를 고려한 최단 진동전파 거리를 의미한다. 시점부 구간에 인접한 예술의 전당 주변 건물들 중에서 특히 진동이나 소음의 제 어가 요구되는 건물인, 음악 공연이 이 루어지는

음악당과 오페라극장에 대해서 는 공연이 이루어지는 시간대의 경우 건 물의 피해 방지를 위한 허용수준뿐만 아니라 인체가 진동을 인지하지 못하는 수준의 허용 진동가속도를 준수하여야 한다.

그림 3. 터널구간과 주변건물의 평면도⁴⁾

표 1. 주변 건물과 터널간의 최단거리⁴⁾
(그림 3 참조)

번호	주변 건물	인접 터널	평면도상의 최단 이격거리(m)	단면도상의 최단 이격거리(m)
①	자료관	하행선	4.32	4.76
②	미술관	상행선	75.6	78.3
③	오페라극장	상행선	9.3	12.7
④	음악당	하행선	25.4	26.5
⑤	서예관	하행선	6.9	17.4

IV. 터널굴착 공법 선정을 위한 조사 및 실험

4.1 기계굴착(T.B.M., T.T.M. 공법)

일반적으로 TBM 으로 암반을 굴착할 경우 30m 이하 거리에서 예상되는 진동 수준이 0.05cm ~ 0.2cm/sec 이고 30m 이상 거리에서는 0.05cm/sec 로 나타므 로,³⁾ TBM 에 비해 파워양을 기준으로 용 량이 1/3 수준인 TTM 장비에 의한 굴 착 작업시 예상 되는 진동수준은 10m 내외의 이격거리에서 0.2cm/sec 이하 가 되는 것으로 나타났다.

암반상태가 다른 국내 현장의 경우에는 TBM 이나 TTM 장비에 의한 굴착작 업시 이격거리별로 예상되는 진동 수준 을 정량적으로 평가한 연구자료가 거의 없을

뿐만 아니라, 일부 현장에서의 제한된 측정자료도, 본 연구 터널 현장과는 진동전파 및 감쇠에 영향을 미치는 암반 상태에서 차이를 보이는 현장의 자료이므로 그대로 적용하기는 어렵다.

따라서 시공과정에서 지속적인 진동계 측이 이루어져야 하지만 일반적으로 무진동 공법으로 분류되는 이러한 기계식 굴착 공법을 적용하는 경우 실시설계 보고서에 제시된 바와 같이 현장 주변 주요 건물에서 예상되는 진동수준이 0.2cm/sec를 초과하지는 않을 것으로 사료된다. 그러나 TBM 및 TMM 장비와 같이 기계를 이용한 암반굴착 작업은, 짧은 시간에 최대치의 진동이 발생하고 소산되는 발파공법과는 달리, 일정한 진동이 계속적으로 발생하고³⁾ 현장 적용시 여러 문제점이 발견되어 본 현장의 굴착공법으로는 부적절한 것으로 판단된다.

4.2 발파공법

발파공법에 의한 암반 굴착 작업시 주변 예술의 전당 건물들에서 예상되는 진동수준을 평가하기 위해 암반 조건이 유사한 연구지역 터널 종점부 현장에서 총 7회의 시험발파를 실시하였다. 현장의 발파진동 전파식을 구하기 위한 측정 자료의 회귀분석은 자승근 환산거리와 삼승근 환산거리를 이용한 각각의 경우에 대해 수행하였는데, 그림 5.는 자승근 환산거리에 따른 진동속도 벡터합 측정 자료의 회귀분석 결과이고, 그림 6.은 삼승근 환산거리에 따른 진동속도 벡터합 측정 자료의 회귀분석 결과이다.

측정한 자료의 회귀분석 결과 결정계수는 자승근 환산거리를 사용한 경우 $R = 0.891$, 삼승근 환산거리를 사용한 경우 $R = 0.885$ 로 나타나 비교적 높은 상관관계를 보이는 것으로 해석되었다.

다음의 발파진동 전파식들은 사용 환산거리별 회귀분석 결과로부터 도출된 50% 평균식과 95% 신뢰식들이다.

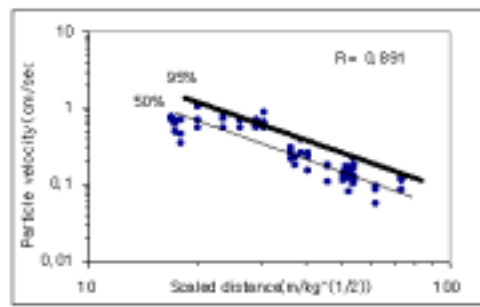


그림 5. 자승근 환산거리에 따른 진동속도 벡터합

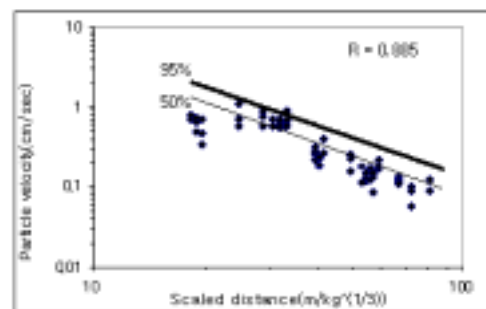


그림 6. 삼승근 환산거리에 따른 진동속도 벡터합

(자승근 환산거리를 사용한 경우)

$V = 77.9 (D/W^{1/2})$ ---- 50% 발파진동전파식

$V = 139.2(D/W^{1/2})$ ---- 95% 발파진동전파식

(삼승근 환산거리를 사용한 경우)

$V = 89.2 (D/W^{1/3})$ ---- 50% 발파진동전파식

$V = 161.3 (D/W^{1/3})$ ---- 95% 발파진동전파식

실험결과를 분석해 보면 삼승근 환산거리를 사용한 경우가 본 연구 터널 현장 주변 주요 건물들에 대한 허용진동속도 0.2cm/sec에 대해 10~60m 범위의 비교적 가까운 이격거리에서 사용가능한 최대 지발당 장약량이 더 작게 나타나는데, 이는 일반적인 발파진동해석시 가까운 거리에서는 삼승근 환산거리를 사용하는 경우가 더 안전율이 높게 나타난다는 연구결과와⁵⁾ 부합된다. 이러한 분석결과를 볼때 개당 중량이 0.375 kg 인 화약 1 개를

최대 지발당 장약량 으로 하는 최소한의 발파 작업시 발생 하는 발파진동을 건물에 대한 허용진 동속도 0.2cm/sec 이하로 제어하기 위해서는 주요 건물로부터 거리가 55m 이상이 되어야 하는 것으로 분석되었다. 그러나 주변 주요 건물로부터 최단 이격 거리는 시점부 터널 굴착 예정구간에서 약 5m 정도에 불과하기 때문에, 본 연구 터널 시점부 구간에 대한 화약을 이용한 발파공법의 적용은 어려운 것으로 판단 된다.

4.3 플라스마 파암공법

축전기에 충전된 전기에너지를 암반 속의 공내에 삽입된 전극선에 순간 방전 시키므로써, 전극선 사이에 있는 알루미늄과 금속산화물간에 골드슈미트 환원법 에 의해 발생된 고온, 고밀도의 플라스마로 구성된 충격파 및 팽창력에 의한 급격한 타격력으로 암반을 파쇄시키는 파암기술이다.¹¹⁾

또한 플라스마에 의한 진동은 그 특성 상 감쇠 지수가 화약 발파에서보다 커서 진도의 감쇠현상이 더욱 빠르게 나타난다.⁷⁾

플라스마 공법 적용시 이격거리별 사용 가능한 최대 지발당 전해질량은 허용 진동속도가 0.2cm/sec 일 때 해당 삼 승근 환산거리가 17m/kg^{1/3} 이므로 $D/W^{1/3} = 20 \rightarrow W(\text{전해질량}) = (D^3/20^3)$ 가 되고 발파 공법 적용시 이격거리별 사용가능한 최대 지발당 장약량은 허용진동속도가 0.2cm/sec 일 때 해당 삼승근 환산거리가 45m/kg^{1/3} 이므로 $D/W^{1/3} = 45 \rightarrow W(\text{화약량}) = (D^3/45^3)$ 가 된다.

이 두 식을 이용하여, 0.2cm/sec 의 진동이 예상되는 지발당 최대 플라스마 전해질량과 화약량의 비를 구하면 $(D^3/20^3) : (D^3/45^3) = 11.39 : 1$ 이 된다. 이 결과는 본 연구 터널 현장에서 플라스마 파암공법으로 암반굴착을 하는 경 우에는 본 연구 터널에 대한 시험발 파를 통해 구해진 허용진동속도와 이격 거리별 사용 가능한 최대 지발당 장약 량보다 11.39 배 많은 지발당 전해질 량을 사용할 수 있음을 뜻한다.

표 2 는 허용진동속도가 0.2cm/sec 인 본 연구 터널 현장 암반굴착 공법으로 플라스마 파암공법을 선정하는 경우 이

격거리별로 사용가능한 최대지발당 전해질량을 나타낸 것이다.

표 2. 이격거리별 사용가능한 최대 지발당 전해질량 (본 연구 터널 현장, 허용진동속도 0.2cm/sec)

이격거리(m)	10	20	30	35	40	45
최대 지발당 전해질량 (kg)	0.034	0.251	0.855	1.357	20.108	2.873

플라스마 파암공법에 의한 암반굴착시 일반적으로 요구되는 최소 지발당 전해질량(공당 장약량 500g 기준으로 3 공씩 기폭)이 약 1.5kg 정도임을 고려할 때, 플라스마 파암공법에 대한 상기의 진동 영향평가 결과만으로 판단한다면, 본 연구 터널 시점부 현장에서는 폭원으로 부 터의 거리가 약 36m 이상되는 위치에 서만 공연시간을 제외한 시간대에 플라스마 파암공법을 적용할 수 있는 것으로 판단된다. 그러나 이러한 제한 적인 작업은 실제 시공성이 없기 때문에 적용 이 어려운 암반 굴착방법으로 판단된다.

VI. 결 론

본 논문에서는 도심지 터널굴착시 발생하는 진동이 주변 건물에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 먼저 현장 주변 상황에 대한 자료를 분석한후 여러 가지 굴착공법의 현장 적용성을 평가하고 기존에 수행한 진동 및 소음 영향 평가 내용을 검토하여, 이들 결과를 바탕으로 본 연구 터널 시점부 구간의 암반 굴착 공법을 제안하였다.

1. T.B.M. 및 TTM 장비 등의 기계장 비를 이용한 암반굴착 작업은 진동에 의 한 인접 구조물에 큰 영향을 미치지 않 는 것으로 판단되나, 현실적으로 현장적 용상의 여러 문제점이 발견되어 이 현장 의 굴착공법으로는 부적절한 것으로 판 단된다.

2. 암반 상태가 유사한 본 연구 터널 종점부 구간에서의 시험발파 결과, 발파작업시 발생하는 발파진동을 건물에 대한 허용진동속도 0.2cm/sec 이하로 제어하기 위해서는 주요 건물로부터 거리가 55 m

이상이 되어야 하는 것으로 분석되었다. 그러나 주변 건물로부터 최단이 격거리가 약 5m 정도에 불과한 것으로 나타나, 본 연구 터널 시점부 구간에 대한 발파공법의 적용은 어려운 것으로 판단된다.

3. 인접 구조물에 대한 허용진동치 0.2 cm/sec 를 만족시키기 위해서는 유압을 이용한 할암 공법이 가장 적절한 것으로 판단되고, 유압을 할암 공법에서 사용되는 천공기 및 브레이커 등에서 발생하는 진동수준은 시공중 세밀한 관리가 이루어진다면 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

4. 본 연구에서는 편리에 의해서 이방성 특성이 나타나고 단층이 굴착진동의 전파를 감쇠시킬 수 있는 편마암지역에 대하여 국한적으로 굴착의 영향을 고려하기 위하여 여러 가지 시험과 분석을 거쳐 굴착시 발생할 수 있는 진동치와 인접 구조물에 미치는 영향을 상호 비교하여 연구를 수행하였다. 그러나 굴착에 의한 진동의 영향은 지질종류별로 다양한 양상을 보일 것으로 판단되므로 차후에 화성암, 변성암, 퇴적암 등의 각 지질에 따른 굴착 진동 및 굴착 능력의 영향에 대한 연구가 진행된다면 우리나라 지질 특성에 맞는 굴착 방법 및 진동의 영향을 더욱 명확하게 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

<참고문헌>

1. 류창하 외 4 인, 1994a, “구조물 및 시설물 인접 구릉지의 암반굴착 발파설계”, 터널과 지하공간, 한국암반역학회, vol. 4, pp. 38 ~ 46
2. 류창하 외 5 인, 1994b, “안전 관련 구조물 근접시공시 발파진동 허용기준의 적용성에 대하여”, 터널과 지하공간, 한국암반역학회, vol. 4, pp. 287 ~ 297
3. 문홍득 외 4 인, 1994, “TBM 가동 시 지반진동에 관한 연구”, 대한 토목학회 학술발표회 논문집, PP.759 ~ 762
4. (주)삼보기술단, 1998. “우면산 터널 축조공사 민자유치 시설사업 조사 및 실시설계 보고서 최종본”, pp. 205 ~ 210
5. 신희순 외 2 인, 1984, “화약, 암석강도 및 발파유형이 발파진동에 미치는 영향 -

- 서울 도심지 발파를 중심으로 - , 한국자원공학회지, vol.21, No.4, pp.334 ~ 339
6. 우면산개발 주식회사, 2001. “○ ○의 ○○ 하부 터널굴착공법 검토서”, pp.64 ~ 119
7. 이경운 외 3 인, 1997, “플라즈마 발파의 폭력과 지반진동특성”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, pp. 267 ~ 273
8. 이수곤, 1994. “암석과 불연 속면의 분류 및 공학적 특성” 토목시공 고등기술강좌 (series III), 대한토목학회, pp.253 ~ 338
9. 정덕훈 외 1 인, 1998, “서울화강암 및 편마암에서 바닥발파시 발파진동상수와 감쇠지수의 관계에 관한 연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, PP.53 ~ 56
10. 한국자원연구소, 1982, “지질도 폭설명서 - 둔전”
11. 한국자원연구소, 1995, “Plasma blasting에 의한 암석파괴특성 연구보고서”
12. 호상테크노베이션, 1995 “무진동 유압암반절개공법 편람”
13. 황현주, 1996, “발파 관련 민원 사례 분석을 통한 현행 소음진동 기준의 문제점과 대책”, 대한 토목학회, vol.44, no.11, pp. 36 ~ 42