

# 도심 터널 발파에서 진동과 폭음의 저감대책



황현주  
협승엔지니어링 대표

## 1. 서론

최근 도심지에서 지하철과 도로확충을 위하여 터널공사가 증가추세에 있으나, 지상의 밀집된 건물과 이격거리가 짧아 터널발파시 발생하는 진동과 폭음의 영향으로 상부건물에피해 및 주민들의 집단민원 발생으로 사업수행에 막대한 지장을 초래하는 경우가 많다.

이에 따라 터널발파작업을 대체할 수 있는 TBM, Road Header, 유압파쇄기등의 각종 굴착장비가 개발활용되고 있으나, 경제성과 시공성측면에서 발파굴착보다 월등한 대체공법이 거의 없는 상황에서 여러가지 발파진동 저감대책 기술공법의 활용이 증대되고 있다.

그러나 발파진동 저감기술 공법들은 실효성과 경제성 및 시공성등을 면밀하게 검토하여활용되어야 함에도 불구하고, 터널 발파설계시에 진동감쇄율을 과대포장하여 반영되므로써, 실제 시공시에는 시공성과 효율성결여로 공사비 낭비요인이 되는 경우가 많다.

따라서 본고에서는 서울지하철과 각종 도심지터널에서 발파경험을 토대로 하여, 통상적으로 많이 적용되고 있는 터널 발파진동 저감공법들의 적용원리와 효율성을 살펴

보고 터널발파시 발생하는 피해와 민원사례를 검토하여, 국내에서 적용되고 있는 진동 허용기준치의 적정성 및 진동과 폭음의 저감대책 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 터널발파의 특성

터널발파의 경우는 여러 가지 실험과 경험을 바탕으로 하여 다양한 발파방법이 사용되고있으나 2자유면의 계단 발파 형태에 비하여 1자유면의 발파이므로 천공배치, 장약량 산출방법등에서도 여러 가지 변수요인들이 많아서 정량적이고 체계적이지 못한 특성을 지니고 있다.

일반적으로 터널의 발파작업의 경우에 발파로 인하여 발생하는 에너지중에서 0.5~20%가 탄성파로 변화되어 발파진동(Ground Shock)로 소비되는 것으로 밝혀졌다.

이러한 탄성파는 지반속으로 전파되면서 지면에서는 진폭과 주기를 갖는 진동으로 나타난다. 건물과 구조물의 피해기준을 고찰하면, 건물은 진동에 의한 벽체내의 변형 발생에 따라 피해가 발생하며, 그 피해는 진동속도 성분 에 가장 잘 비례하는 것으로 알려져 있다.

따라서 건물에 피해기준을 진동속도(cm/sec, Kine)으로 기준하는 것이 일반적인 경향이다.

## 2.1 터널발파에서 발파진동의 크기에 영향을 주는 요소

터널발파의 진동 전파특성을 결정하는 조건은 발파부지와 구조물의 지형지형태, 암반의 지질학적, 역학적성질 등의 입지조건과 발파공의 배치, 화약의 종류, 뇌관의 기폭방법, 지발당장약량등의 발파조건으로 구분된다. 발파 조건은 조절이 가능한 변수로써 발파진동의 저감을 위해서는 이들의 특성을 충분히 이해하여 이를 적극 활용하여야 한다.

### 1) 암반 및 암질의 조건

발파진동은 암석의 압축강도와 탄성파속도에 비례한다.

지반조건에 따라 발파상수(K)값은 암반>토사층이 얇은 지층>토사층이 두꺼운 지층>연약한 충적층의 순으로 되며, 암질에 따라 발파진동의 크기는 화성암>변성암>퇴적암의 순서이나, 절리나 층리의 방향에 따라 퇴적암도 크게 발생하는 경우가 있다.

### 2) 발파공 위치 및 장약량

터널발파공의 명칭은 심발공, 확대공, 바닥공 및 외곽공으로 구분할 수 있으며 일반적인 발파공의 설계방법은 표 1과 같다.

터널발파 작업은 두 개이상의 자유면을 향하여 시행하는 계단발파와는 달리, 한 개의 자유면에 행하는 것으로 심발공은 가장 먼저 발파되는 부분으로, 암석을 깨고 표

면에서 떼어냄으로 자유면을 형성시킨다.

일반적으로 심발공의 면적은 약 2m<sup>2</sup>를 기준하며, 심발공과 바닥공은 구속력이 가장 커서 장약집중도가 1.0kg/m정도이며 상대적으로 조절발파 구역인 외곽공은 30~40%정도의 적은 장약량이 사용되므로 진동발생 측면에서 심발공>바닥공>확대공>외곽공 순서이므로 발파 설계에서 가장 고려해야 할 부분이다.

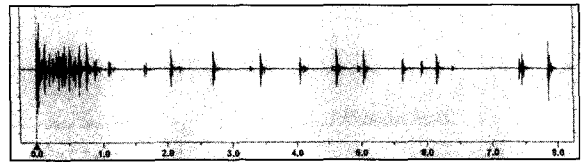


그림 1. 진동 이력곡선

### 3) 심발공의 천공방법

심발공의 천공방법은 평행천공(Burn Cut), 경사천공(V-Cut), 평행+경사천공(Supex Cut)을 국내에서 가장 많이 사용하는 방법으로 진동제어 측면에서 어떤 방법이 가장 효율적이라고 정량적으로 평가하기는 곤란하나, 발파실패 확률이 적은 심발공의 형태가 진동발생이 가장 적다는 것이다. 왜냐하면 발파실패의 경우에는 화약의 에너지가 암반을 굴착하는데 소비되지 않고 탄성파로 전환되어 진동발생이 커지기 때문이다.

따라서 도심지 터널발파에서는 굴착효율보다는 진동제어가 중요한 사안이므로 발파실패 확률이 가장 적고 구속력이 적은 Double V-Cut방식이 가장 무난하다고 판단되나, Burn Cut의 경우에서도 빈공의 구경이  $\phi$ 400mm 이상일 경우에는 진동제어와 굴착효율에 좋다.

### 4) 화약의 종류

표 1. 터널발파공 설계방법

구분	최소저항선 (m)	공간간격 (m)	기저장약량(m) W <sub>a</sub>	장약집중도(kg/m)	
				하부	상부(l <sub>b</sub> )
심발공	B	1~1.1×B	0.3×H	l <sub>b</sub>	1.0×l <sub>b</sub>
바닥공	B	0.8~1.0×B	0.3×H	l <sub>b</sub>	1.0×l <sub>b</sub>
외곽공	B	0.7~0.8×B	0.1~0.2×H	l <sub>b</sub>	0.3~0.4×l <sub>b</sub>
확대공	B	1.0~1.2×B	0.2~0.3×H	l <sub>b</sub>	0.5×l <sub>b</sub>
보조외곽공	B	0.9~1.1×B	0.2~0.3×H	l <sub>b</sub>	0.5×l <sub>b</sub>

서울지하철 3, 4호선 건설시 연구결과에 의하면 진동치의 크기는 폭약의 폭발속도와 비례하는 것으로 즉 제라틴 다이아마이트:합수폭약:초안폭약 = 1.0:0.8:0.65로 제시하였다.

따라서 진동제어를 위해서는 저폭속폭약이 사용되어야 한다는 이론은 진동저감을 위한 폭약의 선택에서 오류를 범하기 쉽다.

발파에 의한 암반의 파괴형태는 암반의 강도와 성질 특히 취성도와 관계가 있으므로 취성도가 큰 화강암과 같은 경암에서는 고폭속에 화약력이 큰 폭약을 사용해야 하고, 퇴적암류와 같이 취성이 약하나 인장력이 상대적으로 큰 암질에서는 저폭속에 가스발생량이 많은 폭약류가 효과적이다.

따라서 폭약의 선택은 암석의 탄성파속도와 폭약의 폭속이 동일한 폭약을 사용하는 것이 가장 이상적인 선택이다.

5) 뇌관의 기폭단차에 따른 진동의 크기

동일한 지발당장약량의 경우에는 일반적으로 20ms이 내의 M.S뇌관의 경우에는 진동의 상호 감쇄작용으로 진동치가 적을 것이라는 것이 일반적이론이나 실제 터널발파에서 열과 열의 시간단차가 20ms이하일 경우는 진동치가 크게 발생되었으며 천공장에 따라 다소 차이는 발생될 수 있으나 100ms이상이 되어야 진동치가 적었다.

그 사유는 전열의 발파석이 파쇄되어 떨어지기전에 다음열이 발파될 경우에 구속력이 커서 진동발생이 오히려 크게 발생되었기 때문이다.

6) 터널의 계측지점에 따른 진동치의 크기

진동치의 크기는 터널의 직상부에서 가장 크게 발생된다는 것이 일반적인 인식이나, 실제 계측결과에 의하면 터널의 진행방향의 5~10° 범위의 상부에서 가장 크게 발생되며 터널직상부, 터널진행 반대방향의 순으로 계측되었다.

2.2 터널발파의 진동저감 대책검토

도심터널에서 발파진동의 문제가 심각하게 거론되어지면서, 터널발파 설계에서 진동감쇄율을 과대포장하는 사례가 많아, 현장에서 발파진동 계측사례등을 통하여 실효성과 경제성 및 시공성에 대한 평가를 실시하여 올바른 저감대책 수립에 참고가 되기 위하여 기술하고자 한다.

일반적으로 터널에서 진동저감 대책으로 지발당장약량 감소를 위한 분할굴착 혹은 기폭 방법과 심발공의 천공방법 및 방진공의 천공방법을 들 수 있다.

1) 지발당장약량의 감소대책

지발당장약량이란 수백개의 뇌관을 사용하여 기폭시킬 때 동일시차에 발파되는 장약량으로 발파진동에 가장 많은 영향을 미치는 요소이다.

즉, 발파진동의 전파속도는 암반의 탄성파속도와 거의 비슷한 속도로 전파되므로 뇌관의 기폭시차가 8ms이상이면 진동파가 중첩되지 않고 개별요소로 전파되면서 소멸된다는 이론이다. 그러므로 터널발파에서는 지발당장약량을 감소시키는 방안이 진동저감에 가장 최상의 대책

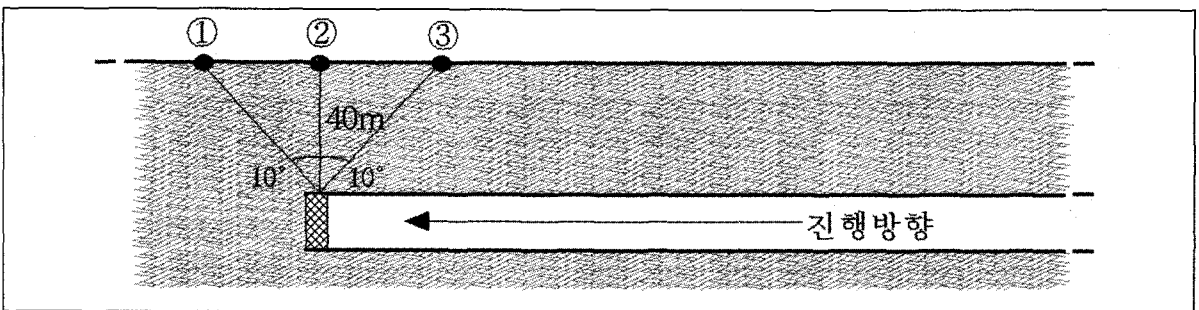


그림 2. 터널진동 위치별 진동크기

으로 여러 가지의 방안이 모색되고 있는데 ① 터널의 단면을 여러단 계를 분할하여 발파하는 방법, ② 발파공의 천공장을 감소시키는 방법, ③ 수백공의 발파공을 정밀시차로 분할하는 기폭System을 이용하는 방법으로 구분된다. 그러나 ①, ②방법은 터널공사의 효율과 경제성 및 공사기간과 관련되어 있어 최근에는 별로 이용 하지 않고 ③의 기폭System을 이용하는 방법이 주로 이용되며 전기 뇌관+다단발파기 이용법과 비전기식을 이용하는 방법으로 구분되므로 이를 중점적으로 검토하고자 한다.

이들의 방법에 대한 진동제어의 원리는 비슷하나, 다단 발파기 방법의 원리는 회로별로 뇌관의 전류공급 시차를 적절하게 조정하여 지발뇌관의 시간차를 이용하는 방법으로 국내에서는 기존의 다단발파기의 원리를 이용하는 방법으로 신기술과 특허로 지정된 발파방법이다.

주로 사용되는 전기뇌관은 L.P(혹은 D.S)의 4번이상 뇌관으로 뇌관과 뇌관의 기폭시차가 100~500ms의 뇌관을 이용하여 3~10 구획으로 나누어 회로별 시차를 8~65ms의 범위에서 전류를 통전시켜서 전기뇌관을 분할기폭시키는 방법이다.

본 발파방법의 문제점은 전기뇌관의 상품에 표시된 시차를 그대로 발파에 적용할 경우에는 국내 지발전기뇌관의 제조상의 최대 허용오차범위가 1~211ms범위에 있어 상당 수의 많은 뇌관들이 중첩기폭될 가능성이 많아 진동 제어발파의 효과가 없으며, 발파설 계상의 오류를 범하기 쉽다.

뇌관의 가격이 전기뇌관과 비전기식뇌관은 차이가 약 600~700원/EA 발생하여 경제성 측면에서 본 방법을 선호하는 경향이 있으나, 신기술과 특허로 지정되어 있어 굴착공 사비의 3%이상을 기술료로 지불하여야 하기 때문에 경제성측면에서도 큰 차별성이 없는 형편이다. 따라서 기폭시차도 적으며 무한단계로 조절이 가능하여 진동제어가 용이 하고 회로구성과 사용이 간편하며 누설전류에서도 안전한 비전기식뇌관이 효율적인 기폭방법으로 판단된다.

2) 새로운 자유면 확보를 위한 심빼기방법  
터널발파에서 새로운 자유면 확보로 굴착효율 증대와 진동저감을 위하여 이용되는 방법으로 일반적 심빼기발파법(V-Cut, Burn Cut, Supex Cut)과 TBM확장 굴착방법으로 구분될 수 있다.

심빼기발파법의 원리나 진동제어 측면에서 월등하게 구별되는 방법은 없으나, 일반적으로 Burn Cut방법은 3.0m 이상의 발파공에서는 효율적이나 발파실패률이 높고 발파실 패시에 진동과 폭음이 크게 발생하는 경향이 있으므로, 도심터널의 경우는 진동의 저감을 위하여 천공장 3.0m미만의 발파작업이 많으므로 발파실패 확률이 적고 구속력이 적은 Double V-Cut방법이 효율적인 경향이 많다. 최근에는 장비의 발달로 심발공의 구속력을 없애고 인위적으로 자유면의 확보를 위하여 사용되는 방법으로 이용되는 TBM 확장굴착법을 검토하면 토파가 얇고 민원발생 가능성이 높은 구역인 갱구부에서는 TBM조립과 설치를 위하여 20~30m 발파굴착이 선행되어야 하는 단점을 가지고 있으나 확대발파시의 발파진동 효과는 매우 탁월하다.

서울 창신동 도로 터널에서 심발발파법과 TBM확대 굴착법을 비교한 바에 의하면 평균 30%정도의 진동감쇄 효과가 있으나 발파시에 다음과 같은 현상에 대하여 주의해야 한다.

TBM굴착후 Shotcrete와 Steel Rib등으로 지보상태에서 발파를 실시한 결과에 의하면 진동저감 효과가 없는 것으로 분석되었는데 그 원인은 막장이 폐합되어 구속력이 커서 진동발생이 크게 발생한 것으로 검토되어, 발파 예정 구역에 대해서는 Steel Rib와 Shotcrete등을 Breaker로 탈락시키면서 작업을 수행하는 문제점도 도출되었다.

따라서 TBM확대 굴착시에는 터널의 보강을 최소화해야 하는 설계방법도 고려되어야 효과적이다.

3) 발파공 위치별 지발당장약량 차등설계 기법  
터널의 시험발파를 통하여 설계를 실시할 때, 시험발파의 계측 측정결과를 정밀하게 분석해야 한다. 일반적으로 진동의 Peak치만을 분석하여 설계에 반영하면 허용장약

랑이내에서 전체적인 설계가 되므로 발파공의 위치별 특성이 무시된다.

계측결과에 대한 분석은 심발공, 확대공, 외곽공, 바닥공으로 구분하여 초시분석을 실시 해야 한다. 즉 1회의 발파에서도 천공위치별로 뇌관폭발 시차에 따른 각각의 초시분석이 가능하기 때문에 다수의 자료를 갖고 분석할 수 있어 정밀한 분석이 가능하다. 초시 분석을 통해 발파공 위치별 진동추정치를 산출하여 지발당 허용장약량을 설정하면 발파공 위치별 특성에 따른 설계가 가능하다.

대부분 심발공 및 바닥공의 진동치가 크므로 심발공 및 바닥공을 1지발공수로 확대공 및 외곽공은 다지발공수로 조합된다.

4) 방진공의 설계기법

터널발파에서 진동저감을 위하여 터널단면의 외곽에 대규모 방진공을 주열상으로 천공하여 시행하고 있으나, 여러 현장에서 측정결과 약간의 감쇄효과는 기대할 수 있으나 20%이상의 감쇄효과는 기대하기 곤란하다. 그의 원인은 방진공의 천공장(H)이 발파진 동에서 발생하는 표면파(R-파)의 파장λ보다도 커야하나, 대부분 천공장이 적게 설계되기 때문에 큰 효과를 기대하기가 곤란하며, 파장λ보다는 천공장 H를 길게 할 경우에는 시공성과 경제성 측면에서 곤란한 경우가 많이 발생된다.

표면파의 파장을 계산하는 방법은 지반조사에서 산출되는 탄성파(P파)의 속도를 알게 되면 다음과 같이 λ가 산출된다.

$$\alpha = \sqrt{3}\beta, \gamma = \beta \times 0.9194$$

· α: P-파의 속도, β: S-파의 속도, γ: R-파의 속도

$$T = 1/f = \lambda/v$$

· T: 진동의 주기, f: 주파수, v: 진동파의 속도

예를들어 발파대상의 암반에 P파속도가 3500m/s일 때 표면파의 파장λ는

$$\beta = 3500/\sqrt{3} = 2020\text{m/sec}$$

$$\gamma = 2020 \times 0.9194 = 1858 \text{ m/sec}$$

발파 인접지역에서 발파진동의 주파수를 250Hz로 가정할때 τ = 0.004sec이므로

$$\lambda = v \times T = 1858 \times 0.004 = 7.4\text{m}$$

따라서 방진효율의 20%이상의 효과를 거두기 위해서는 방진공의 천공장(H)는 7.4m이상이 되어야 한다.

2.3 발파폭음의 특성과 대책

1) 발파폭음의 특성

발파음은 폭약의 에너지가 파쇄되는 암괴를 통하여 대 기중으로 방출되는 압축파에의해 주로 발생되며, 이외에도 지반진동으로 전파되었다가 자유면 근처에서 공기중으로 전파되는 과정에서 매질의 차이로 소음을 야기하는 경우가 있으나, 이는 무시할 정도로 경미한 상태이다.

대기중으로 전파되는 발파폭음은 0.1Hz에서 200Hz 범위의 저주파 특성으로 20Hz이상의 주파수는 가청소음으로 인체에 전달되며 20Hz이하의 초저주파는 귀로 들을 수는 없으나, 비교적 먼곳까지 에너지의 손실 없이 전파되는 특성이 있으며, 건물과 구조물을 진동시켜서 2차 소음을 발생시킨다.

실제로 지하철의 터널이나 개착구간 발파에서 발파음의 주파수를 분석하면 40Hz이하의 저주파가 우세하며, 풍압 기준으로 110dB(L)이하로 측정되어 건물이나 구조물에 손상을 주지는 않은 정도 수준이지만, 현실적으로 창문이나 문짝등이 떨컹거리는 2차적 영향으로 불쾌감이 많아 인근 주민들은 발파진동으로 오해하여 주된 민원의 대상이 되고 있다. 여기에서 발파음으로 인한 인체 감응은 아직도 정량적으로 계산되지 못하고 있다. 인체에 대한 발파음의 영향 중에서 건물안에 있을때가 건물밖에 있는 것보다 영향이 증가된다. 그 이유로는 건물에 초저주파로 전달되는 발파음이 건물자체를 진동시켜서 인체를 자극하기 때문이다.

2) 발파진동과 소음의 차이점

표 2 참조.

3) 발파폭음의 저감대책

발파의 폭음은 전파경로를 차단하는 것이 효율적 제어 방법으로 자연적지형을 활용하거나 전파경로에 방음벽과

표 2. 발파진동과 소음의 차이점

구분	발파진동	발파소음
전달매질	지반(토사, 암반)	대기(공기중)
전파속도	2,000~5,000m/sec	343m/sec
인체감응	· 전파속도가 빠르기 때문에 청으로서는 느끼지 못하고 육체적 신경으로 느낌 · 인체 감응도는 크지 않음	· 대부분 청각으로 느낌 · 소음을 수반하므로 인체 감응도는 크게 느껴짐
주택 및 구조물의 피해정도	· 주택 및 구조물에 직접적인 피해 영향을 줌	· 주택이나 구조물에 피해를 주는 경우는 거의 없음
측정단위	진동속도(cm/sec, Kine)	음압(dB)
민원정도	민원이 적음	발파민원의 대부분임

터널의 갱구부에 방음갯문의 설치가 필수적이다.

사례로 창신동의 도로터널 현장에서 터널갯문과 전파경로에 이종으로 방음시설을 설치 하여도 어느 정도의 저감 효과는 거둘 수가 있었으나 완벽한 차단효과를 거둘 수가 없어 민원이 계속되었다. 따라서, 스펀지는 연성재질이면 서 가볍고, 방음효과가 뛰어나다는 재질특성을 착안하여 발파작업시에 터널의 갯문부를 2.0m×2.0m Block 스펀지를 쌓아서 터널의 전단면을 막고서 발파작업을 수행한 결과에 의하면 20dB(A)이상의 저감 효과를 거둘 수가 있어 민원을 해결하고 공사를 수행할 수 있었다.

### 3. 터널 발파진동에 따른 민원사례 및 발파진동 허용치검토

#### 3.1 발파진동의 민원사례

##### 1) 발파진동에 의한 벽의 균열현상

“우리집의 벽에 발생된 균열이 발파진동에 의한 균열이 아니라는 것을 확신하는가”에 대한 질문은 미국에서 과학적으로 관측한 균열사례를 확률통계적 연구를 통하여 건물에 균열발생 하한선을 결정하려고 연구한 결과인 Siskind(1980~1981)의 발표 논문에 의하면 미세가시 균열의 발생확률을 5%로 설정할 경우에 진동하한선은 1.2cm/sec이며 발파진동치 1.0cm/sec이하에서는 균열이 발생되지 않음을 보고하였다.

##### 2) 발파진동의 피로도

측정된 발파진동치가 허용기준치보다 낮은 수준에서의 발파민원중에서 반복진동이 문제로 야기되는 경우가 많다. 반복진동에 의한 약화를 재료시험에서는 피로(Fatigue)라고 하며 발파에서도 피로의 징후는 있으나, 허용기준치 이하에서의 발파진동에 대해서는 큰 영향을 받지 않는다. 미광무국에서 피로의 영향을 조사하기 위하여 발파작업을 계속적으로 수행하는 노천광산 근처에서 건설한 시험가옥에서 발파진동치 1.2cm/sec이 하로 52,000회 발파를 수행하여도 균열이 발생되지 않았다.(Stagg,1984)

참고로 미광무국에서 일상 생활에서 발생하는 다양한 형태의 생활진동 조사자료에 의하면 방안에서 걸을 때 0.08cm/sec, 땀뽀기의 경우 0.71cm/sec, 문을 팽 닫았을 때 1.27cm/sec, 벽에 못을 박을 때 2.24cm/sec 수준의 진동발생을 비교하면 쉽게 이해할 수 있다.

##### 3) 암반위에 놓여 있는 건물의 안전도

민원인들이 “우리집은 단단한 암반위에 기초가 얽혀 있어 발파진동이 그대로 전달되는 데 피해가 없다고 말할 수 있는가?”에 대한 주장을 검토한 연구결과, 스웨덴(Lange fors와 Kinhlstrom)에서 탄성파속도 1,000~1,500m/sec인 모래, 자갈위의 기초는 3.0cm/sec에서 미세균열이 발생이 되었고, 탄성파속도 4,500~6,000m/sec인 화강암위의 기초는 10.0cm/sec에서 미세균열이 발생되었다. 또한 포르투갈(Estevés, 1978)에서 결집력이 없는 토양의 기초에서는 0.5cm/sec이 허용진동치이나

표 3. 건교부 터널설계기준

구분	진동 속도에 따른 규제 기준	
	건물종류	허용진동치
건교부 터널설계기준 (1999)	진동에민 구조물(문화재등)	0.3
	조적식벽체와 목재천장 구조물(재래가옥등)	1.0
	조적식 중소형건축물(저층양옥, 연립주택등)	2.0
	철근콘크리트 중소형건축물(중, 저층 아파트등)	3.0
	철근콘크리트 대형건축물(고층아파트등)	15.0

암석위의 기초는 2.0cm/sec를 허용 진동치로 제안하고 있다.

따라서 같은 진동수준 조건에서는 암반위에 놓여 있는 건물이 오히려 더 안전하다.

4) 창문이 흔들리는 현상

많은 민원인들이 “발파후에 창문이 흔들리면서 집이 무너질 것 같은 느낌을 받는데, 우리집과 같은 낡은 주택에서는 무너지지 않는다고 말할 수 있는가?”라는 질문을 자주하는데, 발파음은 건물과 구조물을 진동시켜 2차소음을 발생시키는 것이 사실이다.

그러나 폭풍압이 150dB(L)이상일 때 일부 유리창이 깨지고 180dB(L)이상일 때 건물에 손상을 주기 시작한다고 미광무국 시험결과 발표되었으므로 발파현장의 인근에서 발파 폭음으로 유리창의 깨짐이 발생되지 않는 수준일 때는 건물의 구조에 전혀 피해가 발생 되지 않는다.

3.2 발파진동의 허용기준치 검토

1) 발파진동에 의한 인체와 건물의 영향을 살펴보면  $V=0.2\sim 0.5\text{cm/sec}$ 에서는 일반적으로 사람들이 진동은 불쾌한 수준으로 느끼는 수준이나, 건물에는 피해발생이 전혀 없으며,  $V=0.5\sim 1.0\text{cm/sec}$ 에서는 사람이 진동을 심하게 느끼는 수준이나, 건물에는 기발생된 균열에 약간의 영향을 미치는 미약한 수준으로 건물에 피해가 없으며  $V=1.0\sim 5.0\text{cm/sec}$ 에서는 노후되거나 구조적으로 취약한 건물에서 가벼운 피해가 발생하는 수준이지만, 정상적인 건물에서는 안전한계로 판단할 수 있다.

2) 서울지하철의 허용기준치는 노선주변에 구조적으로 취약한 주택들이 적지 않았고 무엇보다도 인체감응도에 따른 민원의 발생이 많지않으면서, 독일의 진동허용기준치(DIN4150)에서 피해발생이 큰 저주파 영역범위인 10Hz 이하 기준치를 준용하여 설정되었으나, 이는 인체감응도의 기준치로 평가되며, 건물의 피해수준과는 일치되지 않는 것이 일반적인 견해이다.

3) 1999년 건교부 터널시방서를 제정하면서 국내 도심 터널의 발파진동 주파수가 50Hz이 상이라는 점을 감안하여 국내 전문가들의 연구결과로 건물이나 주택의 피해기준을 건물의 종류와 구조에 따라 차등 설정한 기준치는 매우 적합한 기준치로 평가되고 있다(표 3 참조).

4. 결론 및 제안

도심지에서 터널 발파작업은 건물의 피해 및 민원의 우려가 높고, 실제로 시공시에 여러가지 변수로 인해 발파작업이 순조롭게 진행되지 못하는 경우가 많다.

특히 발파진동 및 폭음을 저감시키기 위해 다양한 방법을 강구하여 적용함에도 불구하고피해를 호소하는 각종 민원이 제기되어 시공에 어려움을 겪고 있다.

도심지 터널작업은 상부 건물과 일정한 이격거리가 확보되면 시공성 및 경제적인 조건을고려하여 기계굴착보다는 발파굴착이 합리적이며, 진동을 저감시킬 수 있는 여러 가지 방법에 의해 시공을 실시하고 발파작업 진행중에 암반조건, 발파패턴등에 따라 진동 및폭음치가 달라질

수 있으므로 전문 계측기관에 의뢰하여 상시계측을 실시 하므로써, 발파작업을 정밀한 범위에서 진행되도록 해야 한다. 그동안 터널의 발파작업에서 진동저감을위한 많은 방법들이 제시되고, 실행되었지만 발파수행 경험 및 자료를 종합해 볼 때 가장 확실한 방법은 다음과 같이 판단된다.

- 1) 암반의 탄성파속도와 동일한 폭속을 갖는 폭약의 선택
  - 2) 정밀한 기폭시차를 갖고 있어 지발당장약량을 최소로 할 수 있는 비전기식뇌관 사용
  - 3) 구속력에 따라 진동치가 달라지는 발파공 위치별로 지발당장약량의 차등설계
  - 4) 굴진장이 짧은 도심지 터널에서 발파의 실패율이 적고 간편한 심발방법인 V-Cut(Double V-Cut)적용
  - 5) 정확한 설계에 의한 대구경 방진공천공
- 따라서 위와 같은 진동저감 대책을 발파설계에 반영할 것을 제안한다.

현재 도심지에서 적용되는 진동허용기준은 건물의 안전보다는 민원을 고려한 측면이 더강하므로 건물의 안전을 우선 고려한 건교부 터널 설계기준을 준용함이 바람직하며, 민원이 심한 곳에서는 주민들에게 충분한 설명을 통해 건물의 안전성을 강조하고, 진동저감을 위한 대책을 공개하며 계측작업과 병행한 철저한 시공관리에 의한 발파작업이 이뤄진다면 원활하게 공사수행을 할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 민원발생시 민원인과 건설업계 관계에서 공정성

문제, 발파 전문지식의 부족, 상호불신등의 문제로 원만한 해결방안 모색에 애로가 있었다. 그래서 서울시지하철 건설본부에서는 각 분야의 전문위원을 위촉하여 민원인과 건설업계의 중간에서 피해에 대한 심의를 실시하였고, 사안에 따라서는 보수금액의 일부를 보정하여 왔다. 그러나 3기지하철의 경우에는 선진국과 같이 시공업체에 공사보험을 가입토록하여 주민과 업체의 피해관계를 해결하는 방안이 시행중이다. 그러므로 발파공해에 대한 피해유무를 공정하게 평가할 수있는 전문지식을 가진 감정인 제도 도입의 필요성이 요구된다.

### 참고자료

1. 김재극(1986) 산업회약과 발파공학
2. 임한욱, 이정인외(1993) 암발파 설계기법에 관한 연구(보고서)
3. 정일록(1991) 소음진동 이론과 실무
4. 양형식(1992) 발파진동학
5. 한국소음·진동 총학회(1995) 소음·진동편람
6. 두준기(2000)지발뇌관의 시차와 다단발파에 대한 고찰, 화약·발파, p29~41
7. Stig O. Olofsson(1987), Applied Explosives Technology For Construction And Mining
8. Lengefors U., And Kihlstrom B (1978) The Modern Technique Of Rock Blasting
9. Siskind D.E.(1981) Structure Response & Damage Produced By Ground Vibration From Surface Mine Blasting.