

터널의 지보개념과 설계

김 승 렬 / (주)에스코컨설팅 대표



터널의 지보개념과 설계

1. 서론

지상 교통의 체증이 심화되고 있는 도심지 또는 크고 작은 산들이 많이 흩어져 있는 지역 등에서 수송의 효율성을 제고하고 생활의 편의를 제공하는데 크게 기여하는 터널의 건설은 시간이 흐를수록 활발하게 진행되어지고 있다. 지하공간을 생활공간으로 적극 이용하여야 할 필요성 대두를 내다보면 향후 또 다른 용도의 터널 건설이 도래할 수도 있을 것이다.

터널의 설계는 대상이 되는 지반에 대한 정보획득과정의 기술상의 문제와 지반변화의 임의성 때문에 다소 미흡한 정보를 바탕으로 실시되게 된다. 이 점은 현재의 제반 여건상 피할 수 없는 한계이므로 시공과정에서의 보완이 수반되어야 한다는 점을 간과해서는 안될 것이다. 터널의 설계는 각 과정이 상호 밀접하게 연관되어 있기 때문에 항목별로 구분하기에는 어려움이 있지만 본 강의에서는 터널의 지보개념과 그에 따른 설계사항에 대한 기본적인 사항만을 살펴보고자 한다.

2. 터널의 계획

2.1 터널설계의 선형계획

선형의 계획은 터널의 용도(철도, 도로, 지하철, 수로, 공동구 터널 등)와 공사의 안정성 및 시공성, 유지관리비와 건설비를 포함한 경제성 등을 고려하여 수립한다.

2.1.1 평면선형 계획시 고려하여야 할 사항

- (1) 터널은 가능한한 직선이 되도록 노선을 계획하여야 한다.
- (2) 터널노선은 가능한한 불연속면의 발달이 심한 단층파쇄대 또는 습곡지역 등을 피하는 것이 바람직하다.
- (3) 불연속면 또는 단층대와 평행하여 노선을 계획하는 것은 가급적 피하고 선형이 이것들과 단거리로 교차하도록 계획하는 것이 바람직하다.
- (4) 터널의 갱구 위치는 지형 및 지반조건, 토피 등을 감안하여 결정하되 편압 영향이 적고 사면활동에 대해 충분히 안전한 경사면에 직교하도록 계획하는 것이 좋다.
- (5) 2개 이상의 터널을 병렬로 계획하여야 할 경우에는 지반조건을 고려하여 터널 사이에 안정된 록필러(Rock Pillar)가 형성될 수 있도록 충분히 이격시켜야 한다.

- (6) 터널노선을 기존시설물에 근접하여 계획할 경우에는 터널 시공시 피할 수 없는 지반변위 영향을 감안하여 시설물에 피해를 주지 않고 터널시공이 가능하도록 노선을 계획하여야 한다.

2.1.2 종단선형 계획시 고려하여야 할 사항

- (1) 지반조건을 충분히 분석하고 장기적 변동요인을 고려하여 무리한 터널이 계획되지 않도록 충분한 토피를 확보하도록 심도를 결정하여야 한다.
- (2) 터널의 기능에 알맞는 구배로 계획하여야 하며 평면선형과 잘 조화되는 종단선형이 되도록 하여야 한다.
- (3) 시공시 및 운영시 유지비가 적게 드는 종단선형 구배를 갖도록 하여야 한다.

2.1.3 습곡지역에서의 선형 계획시 인지해 두어야 할 사항

- (1) 배사구조의 정점부에는 파쇄가 심하여 풍화가 깊게 발달되는 경향이 있고 천단부 낙반 현상이 예상된다.
- (2) 향사구조의 하부(계곡부)에는 축방향 응력으로 인해 터널측면에 문제를 일으키기 쉽고 심한 지하수 유입이 예상된다.

2.2 터널의 단면계획

터널의 단면은 터널의 목적 및 기능에 따라 소요건축한계와 선형조건에 따른 확폭량, 터널내 제반설비의 시설공간, 유지관리에 필요한 여유폭 등과 지형 및 지반조건, 토피정도에 따라 구조적으로 유리한 형상이 되도록 정한다.

2.2.1 터널의 기본적인 단면형상

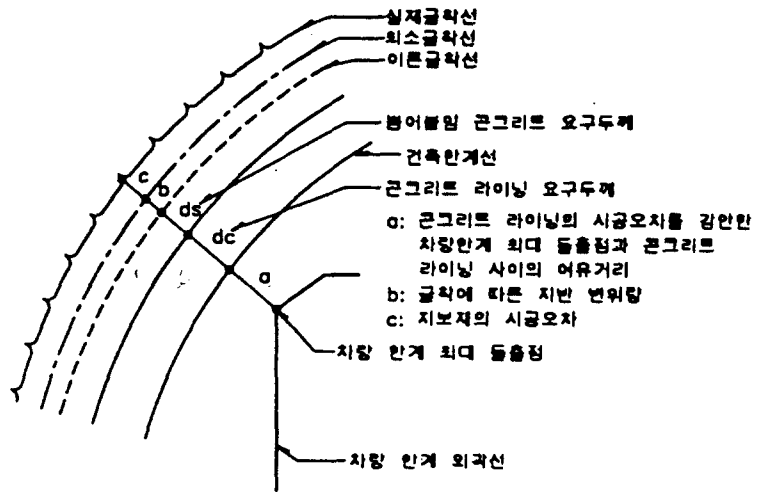
- 마제형 : - 다른 단면형상보다 외력에 대해 구조적으로 취약
 - 배수형 터널에 많이 적용
 - 시공성이 양호하고 경제적
- 난 형 : - 구조적으로 원형과 마제형의 중간 정도로 양호
 - 비배수형 터널에도 적용 가능(형상 조정)
 - 굴착량은 마제형보다 다소 증가하는 원형단면처럼 불필요한 공간이 형성되지 않음.
- 원 형 : - 구조적으로 가장 안전
 - 비배수형 터널에 많이 적용
 - 인버트부 시공이 까다롭고 불필요한 공간형성으로 비경제적 요소 존재

(1) 터널의 단면결정

• **터널의 내공 치수** = **터널의 용도에 따른 건축한계** + **필요한 여유**
 • **최종 굴착 단면** = **내공치수** + **지보재의 총 두께** + **지반변형량**
 + **시공허용편차**

(2) 단면 결정시 고려사항

- 1) 내공치수
- 2) 터널 굴착공법
- 3) 지반 및 지하수 조건
- 4) 하중조건
- 5) 환기방식
- 6) 시공 및 운영측면
- 7) 안전측면
- 8) 진동/소음 저감
- 9) 기타



2.3 지하수 대책에 따른 터널형식계획

지하수 처리방법에 따라 터널은 크게 배수형과 비배수형으로 구분한다.

- 배수형 터널은 터널로 유입되는 지하수를 배수하는 터널로서 배수의 허용방식에 따라 완전 배수형, 부분 배수형, 외부 배수형으로 세분 (배수조건이 양호하면 콘크리트 라이닝에 수압이 작용하지 않음)

- 완전배수형 : 터널내부의 전단면으로 배수허용 (수로터널, 시공중터널)
- 부분배수형 : 쾌적한 공간을 제공할 목적으로 터널 천단과 측벽에만 방수막을 설치하여 유입수를 한 곳으로 유도하여 배수
- 외부배수형 : 유해 지하수로부터 터널 내부 시설물이나 콘크리트 라이닝을 보호하기 위하여 콘크리트 라이닝 외부 전체를 방수막으로 둘러싸고 그밖에 배수로 설치하여 배수

- 비배수형 터널은 지하수가 터널내부로 유입될 수 없도록 차단
(콘크리트 라이닝에 수압이 작용)
- 지하수 처리방법 (비배수형 혹은 배수형)은 터널의 구축 목적에 부합되며, 지반조건이나 지하수 조건, 안전성, 경제성, 시공성 등을 고려하여 선정

2.3.1 배수형과 비배수형 결정시 고려사항

(1) 지반조건 및 지하수위

지하수위 하부에 위치한 배수형 터널은 터널 굴착작업시 뿐 아니라 운영기간 동안에도 지하수위를 저하시킨다. 또한, 한 지역에 집중적으로 배수형 터널을 건설하면 대규모 지역의 지하수위 저하를 유발시킨다. 이러한 지하수위 저하는 구성 지반조건에 따라 터널주변에 위치한 주요 시설물에 악영향을 미칠 수 있으므로 지반의 특성은 물론 주변 시설물의 종류, 규모, 보존상태, 중요도 등을 고려하여야 한다. 지반조건이 양호하여 유입수가 적은 반면 지하수위는 높은 지역에 대하여는 배수형식을 채택하는 것이 좋다. 그러나, 지하수위가 아주 높은 경우(수압이 큰 경우)는 배수형식만이 유일한 해결책이 된다.

(2) 경제성

배수형의 경우는 콘크리트 라이닝에 수압이 작용하지 않도록 하거나, 작용하는 수압을 경감시킴으로서 구조물의 단면을 줄일 수 있다. 그러나 장기적인 유지관리 측면에서는 터널 내로 유도된 지하수 처리를 위한 비용(양수 및 하수처리 비용)이 운영기간동안 발생하게 되므로 초기 투자비와 유지관리비를 비교 검토하여야 한다. 지하수 처리 비용이 과다해질 것으로 판단되면 그라우팅 등의 공법으로 유입수를 적극 감소시키는 방안을 검토하여야 한다.

(3) 방수기술의 수준

방수시설이 불완전하면 터널내부 환경이 불량해지고 시설물 노후를 촉진시키게 된다. 특히, 비배수형 터널의 경우에 방수시공이 실패한다면 유입되는 지하수를 처리할 시설미비로 인해 큰 어려움을 초래하게 되므로 방수공법과 기술수준, 시공성 등을 고려하여야 한다. 비배수형인 경우 방수막에만 의존하는 방수방식 보다는 콘크리트 라이닝과 방수막이 동시에 방수하도록 수밀 콘크리트 라이닝 구조를 검토하는 것이 바람직하고 시공 이음부에 지수판을 두는 등 이음부 시공관리에 유의하여야 기하여야 한다. 인위적인 방수시설이 완벽한 방수기능을 제공하는 것은 사실상 불가능하다.

2.3.2 비배수형 터널의 특징

비배수형 터널은 터널 주위의 지하수를 배수시키지 않기 때문에 (공사중 일시 변화되었던 지하 수위는 곧바로 복원) 터널의 콘크리트 라이닝 구조물은 터널 주변의 지하수압을 견디도록 설계하여야 한다. 작용 수압에 가장 유리한 단면은 원형이며 수압이 클 경우에는 철근보강이 필요하다.

- 비배수형 터널의 장점으로는,
 - 지하철의 내구연한 동안의 양수를 위한 유지 관리 비용의 절감
 - 지하수위에 영향을 미치지 않으므로 지반 침하나 건물 피해의 예방
 - 터널 구조체, 내부 시설물, 운행 차량 등을 습기에 의한 부식으로부터 예방할 수 있다는 것 등이고
- 예상되는 문제점으로는,
 - 단면 형상의 제한으로 불필요한 공간의 형성
 - 높은 수준의 방수공이 요구되고 누수시 보수가 곤란
 - 대단면이나 심도가 깊으면 구조체가 막중해져 적용이 불가능하거나 비경제적인 점을 들 수 있다.

2.3.3 배수형 터널의 특징

배수형 터널은 터널 주위에 흘러 들어오는 지하수를 계속적으로 배제하기 때문에 얇은 콘크리트 라이닝에 의해서도 구조적인 안정성이 확보되나 유입 수량이 과다하거나, 지하수위 저하에 영향을 미치는 지역에서는 여러가지 사회, 경제적인 문제를 야기시킬 수 있다. 또한, 토피가 커서 지하수위는 높지만 지반의 투수성이 적어 지하수 유입량이 소량일 것으로 예상되는 지역에서는 경제성이 좋은 터널형식이다.

- 배수형 터널의 장점으로는,
 - 단면 형상이 비배수형 보다 자유롭고 경제적인 콘크리트 라이닝의 시공이 가능
 - 비배수형에 비해 시공성이 양호
- 단점으로는,
 - 터널 내구 연한동안 유입수 처리경비가 소요
 - 지하수위 저하를 초래하여, 지하수원을 고갈시키고 자연환경과 식생에 영향을 미침
 - 지역에 따라 지반 침하를 유발시킬 수 있고 주변 시설물에도 손상을 초래
 - 경우에 따라 터널 내부의 습도를 증가시켜 시설물과 차량의 부식을 촉진시킬 수 있고 배수 시설의 기능마비시에는 구조물의 안정을 해치게 됨

3. 터널의 지보개념

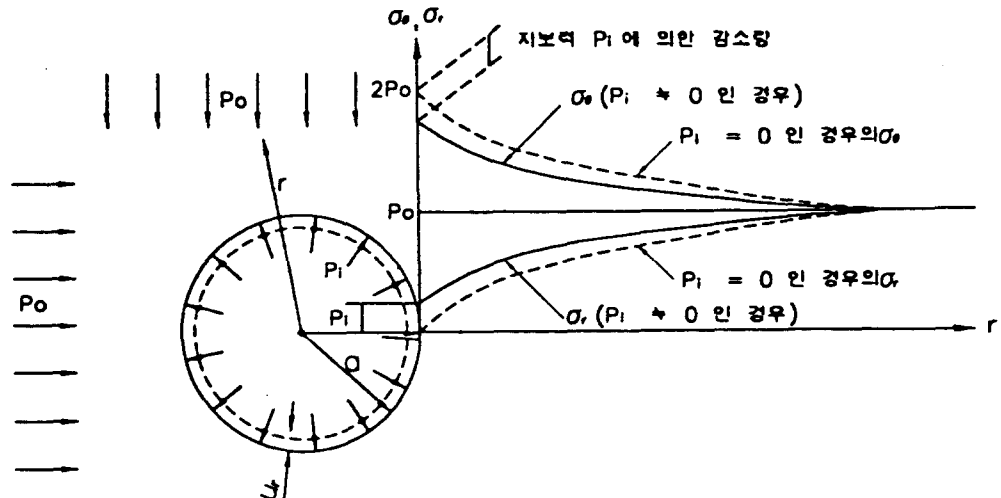
- 터널지보재를 설계함에 있어서 지반의 공학적인 능력을 평가하는 방법에 따라 지반을 다음과 같이 2가지로 분류할 수 있다.
 - (i) 자체 지보능력이 없는 하중으로서의 지반
 - (ii) 자체 지보능력을 보유하고 있는 지반
- (i)의 경우와 같이 지반이 하중으로만 작용하는 경우에는 작용하는 모든 하중을 터널의 지보재가 충분한 안전율을 가지고 지탱하도록 설계한다 : 강한 부재 필요
 - 토피가 적은 경우 : 전 토피 하중을 지보재가 지지
 - 토피가 큰 경우 : 굴착공동 형상에 따른 이완하중을 지보재가 지지
- (ii)의 경우와 같이 지반이 지보능력을 가지고 있다고 고려하는 경우에는 지반의 자체 지보능력을 최대한으로 활용하도록 설계한다 : 약한 부재로 터널설계가 가능

3.1 탄성지반의 굴착과 굴착면 주변의 응력분포

지반내에 터널을 굴착하면 굴착면 주변의 지반은 원래의 3축 응력상태에서 2축 응력상태의 평면변형을 조건이 된다(갱구부 제외). 이때 소멸되는 터널반경방향의 지중응력 때문에 굴착면의 접선응력은 크게 증가하고 굴착면의 변위가 굴착공동 내측으로 발생한다. 이때,

- 굴착으로 인해 증가된 접선응력이 지반의 강도보다 적으면 터널 주변 지반은 적은 변위와 함께 조기에 안정되나
- 발생하는 접선응력이 지반의 고유강도보다 크면 큰 변위가 발생되고 지보재로 지반을 지지하지 않으면 터널은 결국 파괴하게 된다.

3.1.1 등방응력상태($\sigma_v = \sigma_h = P_0$)와 원형터널



• 접선방향응력 $\sigma_\theta = P_o(1 + \frac{a^2}{r^2}) - \frac{P_i a^2}{r^2}$ (1a)

• 반경방향응력 $\sigma_r = P_o(1 - \frac{a^2}{r^2}) + \frac{P_i a^2}{r^2}$ (1b)

• 반경방향변위 $u_r = \frac{(P_o - P_i)}{E} \frac{a^2}{r} (1 + \mu)$ (1c)

여기서, P_i : 지보력, μ : 포아송비, E : 탄성계수, a : 터널반경

r : 터널중심 으로부터 임의 거리, P_o : 초기응력

등방응력상태의 탄성지반에 원형터널을 굴착하게 되면 굴착면에서의 접선방향의 응력은 원래응력(P_o)의 2배로 증가한다. 그러나, 이러한 응력집중 현상은 굴착면으로부터 멀어질 수록 거리의 제곱에 반비례하는 형태로 급격히 감소하여 어느 거리 이상에서는 원래의 응력과 동일한 상태로 도달하게 된다. 이 범위가 굴착에 의한 영향범위다. 반면, 반경방향의 응력(터널 중심방향으로 작용하는 응력)은 굴착면에서 '영(Zero)'이며 굴착면으로부터 멀어질수록 급격히 증가하여 어느 거리 이상에서는 접선응력과 마찬가지로 원래의 응력과 같아진다.

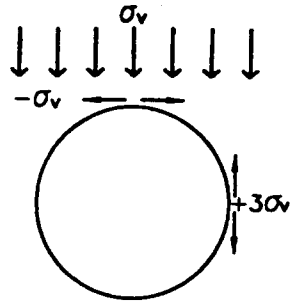
만약 지보재를 설치하여 지보력 P_i 를 가해 주면 굴착면에서의 접선응력은 그만큼 감소하는 반면 지보재에는 P_i 만큼의 응력이 작용하게 된다. 따라서, 지반의 강도가 굴착에 의해 증가된 응력 P_o 보다 작을 경우에는 지보재를 설치하지 않으면 굴착공동은 불안정 상태가 되게 된다.

3.1.2 이방응력상태($\sigma_v \neq \sigma_h$, $K = \sigma_h/\sigma_v$) ((-) : 인장, (+) : 압축)

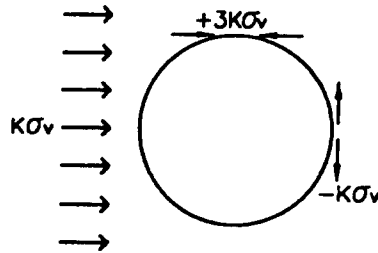
연직응력과 수평응력이 서로 다른 이방응력 상태의 탄성지반에서 축압계수(K)의 영향을 살펴보기 위해서 연직응력(Case #1)과 수평응력(Case #2)이 각각 따로 작용하는 두가지 경우를 살펴보고, 이를 중첩시켜 실제 연직응력과 수평응력의 비가 K인 경우에 대하여 아래 그림으로 살펴보고자 한다.

연직응력이나 수평응력만 작용하게 되면 작용하는 방향 천단부에서의 접선응력은 작용하는 응력과 동일한 인장응력이 되고 최대 굴착폭이 되는 지점에서는 작용하는 응력의 3배에 해당하는 압축응력이 작용하게 된다. Case #1과 Case #2를 중첩하게 되면 천단부의 접선응력은 $\sigma_v(3K-1)$ 이 되며 SL부의 접선응력은 $\sigma_v(3K-1)$ 가 되어 K값이 1/3보다 적으면 천단부와 인버트부에 인장응력이 작용하고 K값이 3보다 크면 SL부근에 인장응력이 발생하게 된다.

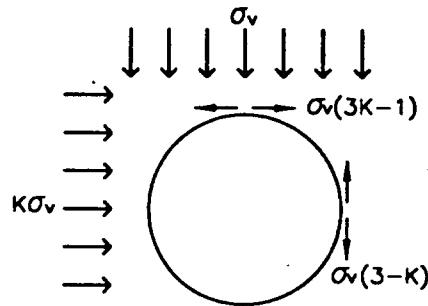
- CASE #1 : 연직응력만 작용($\sigma_v \neq 0, \sigma_h = 0$)한 경우의 천단부와 SL부의 응력상태



- CASE #2 : 수평응력만 작용($\sigma_v = 0, \sigma_h = K\sigma_v$)



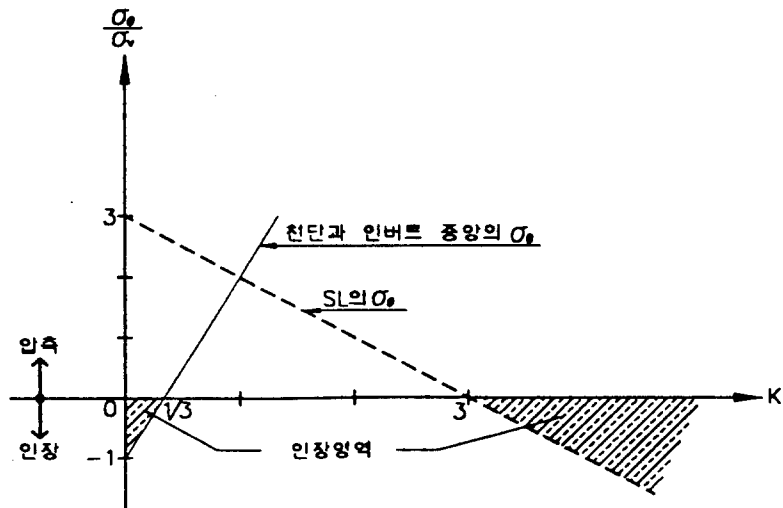
- 이방응력 영역의 경우($K = \sigma_h/\sigma_v$: CASE #1 + CASE #2)



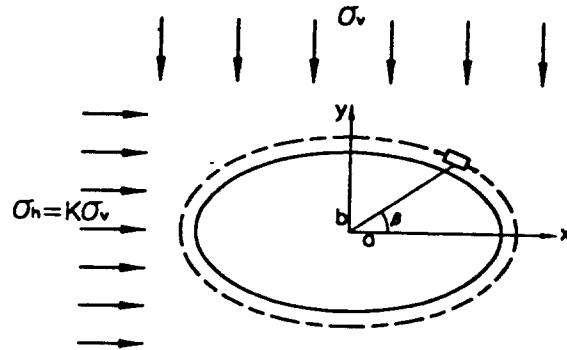
- K값과 천단부 및 SL부의 접선응력상태

$K < \frac{1}{3}$: 천단부와 인버트에 인장응력 ($\sigma_\theta < 0$) 발생

$K > 3$: SL부에 인장응력 ($\sigma_\theta < 0$) 발생



3.1.3 굴착형상과 응력상태



$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_v(K-1) \left[\left(\frac{a}{b}\right)^2 \sin^2 \beta - 1 \right] + 2\left(\frac{a}{b}\right)\sigma_v}{\left[\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 1 \right] \sin^2 \beta + 1} \quad (2a)$$

$$\sigma_\theta = \left[1 + 2\left(\frac{a}{b}\right) - K \right] \sigma_v \quad (SL, \beta = 0) \quad (2b)$$

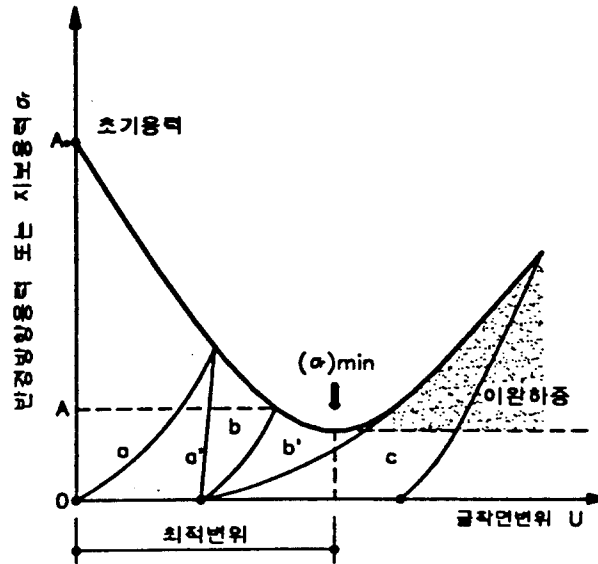
$$\sigma_\theta = \left[K\left(1 + 2\left(\frac{b}{a}\right)\right) - 1 \right] \sigma_v \quad (\text{천단}, \beta = 90^\circ) \quad (2c)$$

만약 $K = \frac{a}{b}$ 이면 전 굴착면 주위의 σ_θ 는 $(1 + K)\sigma_v$ 로 동일

3.1.4 초기응력과 굴착형상

초기측압계수 K값이 클수록 SL 부근에 인장영역이 발생하고 적어질수록 천단부와 인버트에 인장영역이 발생한다. 그러나 K값의 크기에 적합한 타원형상($\frac{a}{b} = K$)을 유지하면 굴착면 접선 방향의 응력집중을 피할 수 있다. 이와같은 결과는 탄성지반을 가정한 경우이기 때문에 실제지반과는 다른 결과를 보일 수 있지만 초기응력의 영향을 개념적으로 이해하는 데는 도움이 된다. 또한 암반이나 토사가 특성상 압축보다는 인장에 약한 점을 감안할 때 가능한 한 인장영역이 발생하는 단면형상은 피하도록 하는 것이 좋다.

3.2 지보재의 역할과 지반의 거동특성



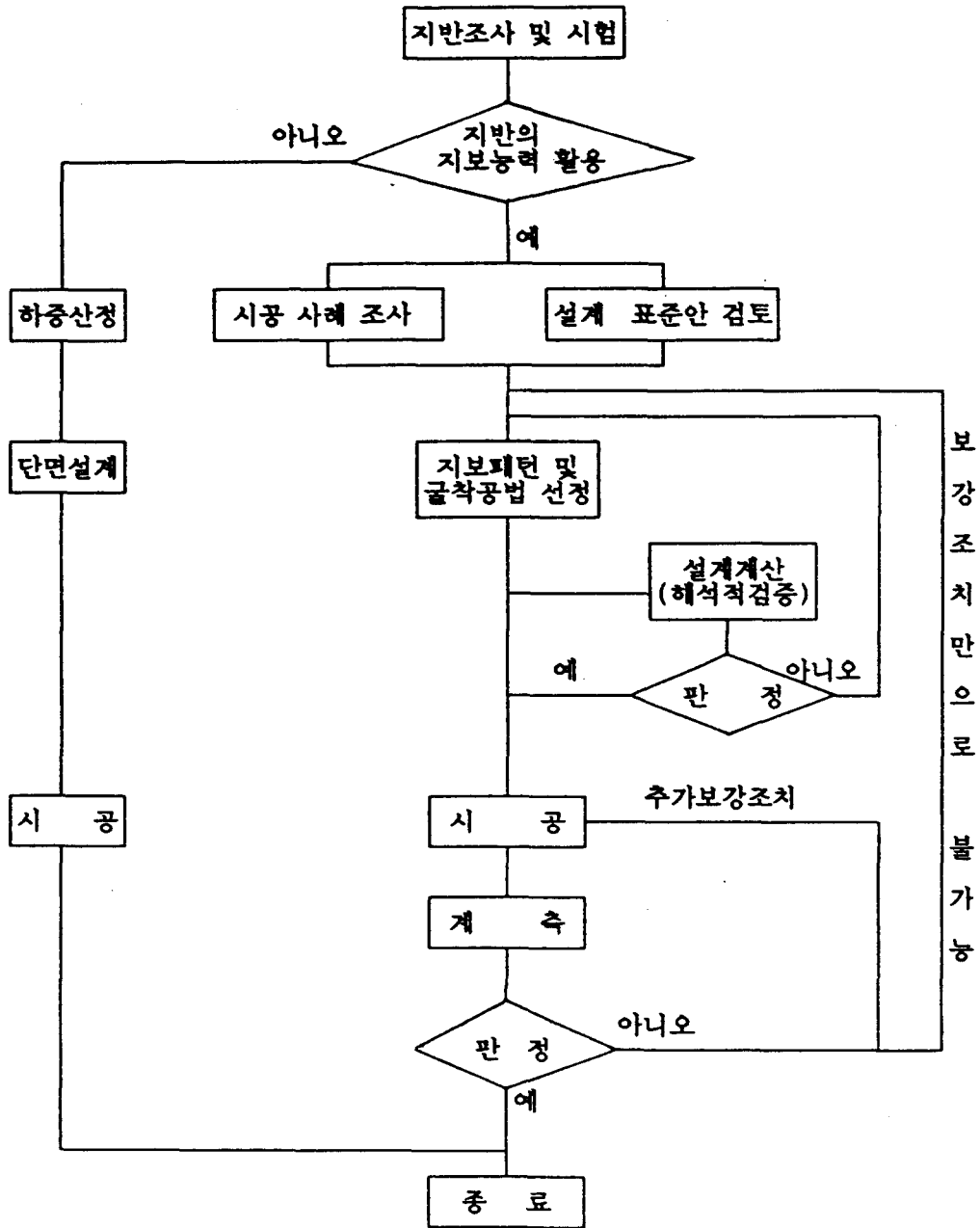
<그림 3.1> 지보재에 작용하는 응력과 굴착면의 변위관계

- 굴착과 동시에 초기응력과 동일한 응력을 굴착면에 작용시키면 반경방향의 변위(벽면의 변위)는 발생하지 않음 : 지보재에 작용하는 하중은 초기응력과 동일 (A_0)
- 굴착면의 변위를 허용하면 변위가 증가하면서 반경 방향으로 작용하는 하중은 급격하게 감소하나 어느 한계변위를 넘으면 지반은 이완되고 반경 방향의 응력은 오히려 증가 (그림 3.1의 곡선 b' & c 경우)
- 굴착면의 변위가 한계치를 넘지 않도록 적절히 조치하여 지보재에 가해지는 응력을 최소화 (σ_r)_{min}
 - 지반자체의 지보능력 활용으로 최소 지지 지보재를 사용하여 굴착공동 안정을 도모
- 지반이 자체지보 능력이 없다고 판단 될 경우는 지반하중을 모두 지탱할 수 있는 지보재를 사용하여야 함 (막중한 지보재가 필요) → 보통 지하구조물 설계와 동일
- 지보가 강하면(a') 비경제적이고 너무 약하면(곡선 b') 위험을 초래하게 되므로 적절한 시기에 적절한 강성의 지보를 설치하는 것이 이상적(곡선 b)
- 따라서, 변위를 허용하는 가축성 지보재를 사용하여 변위를 허용하되 지반이 자체의 지보능력을 상실하지 않는 범위내에서 지보력과 지보재에 작용하는 지반응력이 평형상태가 되도록 설계함 (합리적인 터널설계 개념) : 지보력 A에서 평형 유지

이렇게 설계된 터널은

- (i) 지반자체가 주 지보재
- (ii) 뿔어붙임 콘크리트, 록볼트, 강지보재 등은 지반이 주지보재가 되도록 보조해 주는 수단
- (iii) 계측으로 지보의 효과와 지반의 거동상태 등을 관측하여 시공의 안전성을 도모하여야 하며
- (iv) 시공시 및 시공완료 후에도 터널 주변지반을 보호해 주어야함
(지반 자체도 지보재이므로)

3.3 터널공법의 구성요소 및 절차



지반을 지보부재로 활용하여 설계할 경우 (NATM 설계의 경우) 실제 지반에 적합한 지보재를 설치하여야 함. 만약 설계시의 지반예측이 실제 지반과 상이할 경우에는 지체없이 지보부재를 실제 지반에 부합하도록 변경해 주어야 함. 따라서, 터널의 설계는 최종설계의 개념보다는 예비설계의 개념이 강함.

4. 터널의 표준지보패턴

4.1 표준지보패턴의 정의 및 적용

4.1.1 표준지보패턴

표준지보패턴은 지반조건별로 적합한 지보재의 제원과 시공순서 및 위치 등을 결정한 터널의 지보형식을 말한다. 대상지반이 균일한 지반조건을 가정하고 있으며 터널의 크기와 형상에 따라 패턴이 다르게 된다. 표준지보패턴은 축적된 시공실적이나 경험 등을 반영하여 결정하되 특수조건이나 암반등급의 폭을 감안하여 결정하고 해석적인 기법으로 검증을 거쳐 최종안으로 확정된다.

4.1.2 표준지보패턴의 적용

지반조사 결과를 토대로 터널 전구간에 대한 지반조건을 분류하여 각 지반에 적합한 표준지보패턴을 적용하되 필요에 따라 보조공법도 병행하여 적용한다. 표준지보패턴은 천단부 상부의 지층의 구성은 지층별 두께를 참고하여 적용하여야 한다. 표준지보패턴은 일종의 계획안이라고 할 수 있으므로 현장의 실제조건이 예측과 상이할 경우에는 조정하여야 한다. 특히 해석적인 검증에 너무 의존하지 않아야 하며 계측 결과를 분석하여 적부를 판단하고 계속적으로 개선을 도모하는 노력이 필요하다.

4.2 지보패턴 결정시 고려사항

- (1) 터널 용도
- (2) 지반 상태
- (3) 토 피 (특히 천단부 상부지반의 지층 구성상태)
- (4) 지 형
- (5) 용수 상태
- (6) 안 정 성
- (7) 경 계 성
- (8) 시 공 성
- (9) 시공허용오차 및 지반 변형량

4.3 표준 지보패턴의 구성요소

- | | |
|---------------|---------------|
| (1) 굴착 방법 | (6) 방배수 계통 |
| (2) 뿔어블임 콘크리트 | (7) 콘크리트 라이닝 |
| (3) 철망 | (8) 시공 순서 |
| (4) 록볼트 | (9) 보조공법(필요시) |
| (5) 강지보재 | |

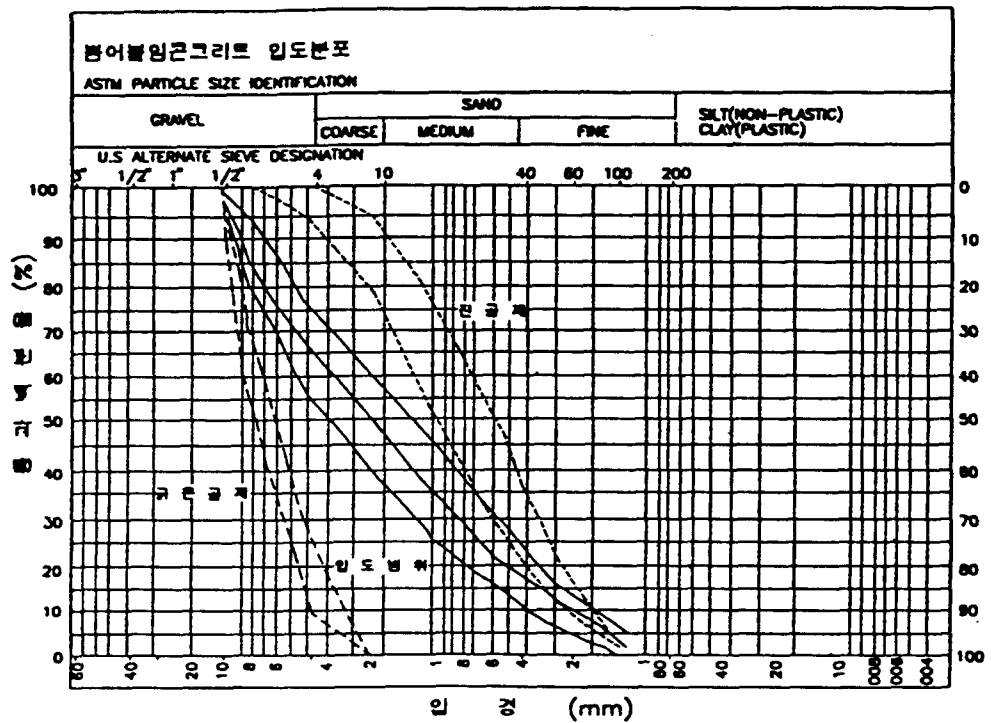
(2) 뿔어붙임 콘크리트의 구성요소

1) 시멘트 :

- KSL 5201 기준에 적합한 포틀랜드 시멘트

2) 잔골재 :

- 0.1mm 이하의 세립자를 포함하지 않은 깨끗한 모래
- 조립율은 2.8~3.2의 범위
- 건식 뿔어붙임 콘크리트에서 표면수는 3~6%가 적합
- 입도분포 : 그림 4.1 참조



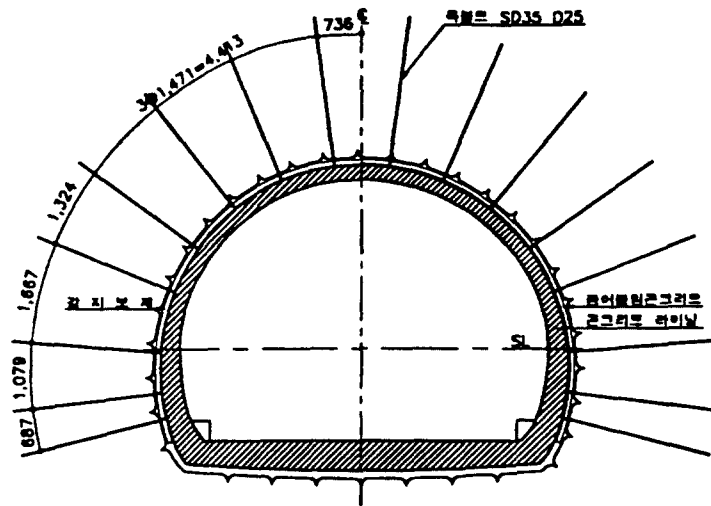
<그림 4.1> 뿔어붙임 콘크리트 골재의 입도분포

3) 굵은 골재 :

- 깨끗하고 둥근 강자갈 혹은 쇠석
- 최대 입경은 16mm 이하
- 입도분포 : 그림 4.1 참조

※ 잔골재나 굵은 골재를 혼합하였을 때의 입도 범위는 그림 4.1에 표시되어 있으며, 입도는 급격한 변화가 없는 매끈한 곡선이 좋다.

※ 잔골재와 굵은 골재의 입도가 규격에 맞을 때 혼합비율은 3 : 2가 적정



4.4 터널 지보재의 종류와 역할

여기에서 터널 지보재라 함은 굴착후 인위적으로 설치되는 지보재로서 뿔어붙임 콘크리트, 철망, 강지보재 및 록볼트 등을 말한다. 굴착면 주변의 지반이 지보능력을 발휘하느냐 (지반아치 형성으로) 못하느냐 하는 문제는 지반의 특성과 설치하는 지보재들의 설치시기와 순서 그리고 품질에 절대적으로 의존한다.

4.4.1 뿔어붙임 콘크리트(Shotcrete)

뿔어붙임 콘크리트라 함은 압축공기를 이용하여 굴착된 지반면에 뿔어 붙여지는 몰탈 혹은 콘크리트를 말한다.

(1) 뿔어붙임 콘크리트의 역할

- 뿔어붙임 콘크리트는 지반자체를 터널의 지보재로 활용하는 터널공법에서 가장 중요한 지보부재이며 굴착면에 시공되어 콘크리트 아치를 형성함으로써
 - (i) 지반의 이완을 방지하여 원지반 강도유지
 - (ii) 콘크리트 아치로서 하중을 분담
 - (iii) 응력의 국부적인 집중방지
 - (iv) 암괴의 이동방지 및 낙반의 방지
 - (v) 굴착면의 풍화방지 등의 기능을 발휘한다.
- 위와 같은 기능을 발휘하기 위해서는 굴착면에 밀착 시공하는 것이 필수적이다.

4) 물 :

시멘트의 화학작용에 유해한 물질을 포함하지 않는 것

5) 급결제 :

- 급결제는 뿔어붙임 콘크리트의 초기강도 발현에 중요한 영향을 미치므로 시멘트와의 적합성을 미리 판단하여야 한다.
- 급결제의 혼합비율은 시멘트 중량의 5~7%가 적정

급결제의 요건

- 충분한 초기강도를 발현시킬 것
- 최종 강도에 악영향을 주지 않을 것
- 인체에 영향이 작을 것
- 부착성을 높일 것
- 용수 출현시 충분한 효과를 거둘 것

급결제의 종류

- 급결제의 종류는 분말형 급결제와 액상 급결제로 구분되며 양이 많으면 초기 강도는 커지나 장기 강도는 떨어진다

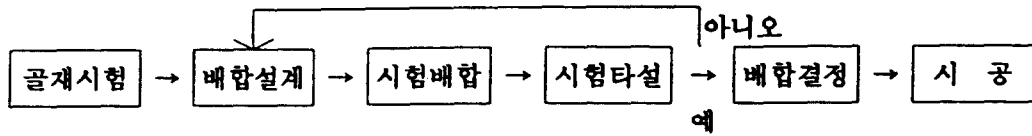
구 분	액 상 급 결 제	분 말 형 급 결 제
첨가방법	물과 급결제가 미리 혼합된 상태에서 압송하여 노즐 부근에서 건조상태로 배합된 재료와 혼합	뿔어붙임 콘크리트 기계에서 건조상태로 배합된 재료에 압송되기 직전 첨가되어 노즐 부근에서 물과 혼합
압축강도	시멘트와의 반응이 단시간에 일어나므로 초기 강도 발현에 유리	물에 완전히 녹아야 반응하므로 초기 강도 발현이 약간 늦다
리바운드	비교적 적다	비교적 많다
분진량	비교적 적다	비교적 많다
pH	pH 13	pH 10 ~ 13

(3) 뿔어붙임 콘크리트의 배합설계

- 배합설계는 다음과 같은 조건을 만족시키며 시공이 용이하고 리바운드량이 적은 배합이 되도록 한다.

- 초기 응결 시간 : 최소 90초, 최대 5분
- 최종 응결 시간 : 최소 12초, 최대 20분
- 압 축 강 도 : 24시간 ——— 100kg/cm² 이상
28일 ——— 210kg/cm² 이상

• 배합설계의 흐름도



- | | | |
|---|----------|-------------|
| [| 잔골재 | (검토) • 리바운드 |
| | 굵은 골재 | • 압축강도 |
| • | 입도, 비중 등 | • 부착상태 |

• 서울지하철의 표준배합

- 1m³당
- 시멘트 : 380kg
 - 물 : 170kg
 - 잔골재 : 1,092kg
 - 굵은골재 : 742kg
 - 물-시멘트비 : 45%
 - 급결제 : 시멘트량의 5~7%

4.4.2 록볼트(Rock Bolt)

(1) 록볼트의 역할

- 1) 봉 합 작용 : 굴착에 의하여 이완되어 있는 지반을 견고한 지반에 결합하여 낙반을 방지
- 2) 보 강 작용 : 절리, 균열 등 역학적인 불연속면 또는 굴착중 발생하는 파괴면으로부터 분리되어 파괴되는 것을 방지
- 3) 보형성 작용 : 층상의 절리가 있는 암반을 록볼트로 수층을 결합하여 각층간의 마찰저항을 증대시켜 각층을 일체로 한 일종의 종합보를 형성
- 4) 내 압 작용 : 록볼트에 도입되는 인장력이 터널 내압으로 작용하여 터널 벽면의 지반을 3축 응력상태가 되도록 하여 큰 접선방향의 응력조건에서도 안정성 유지

(2) 록볼트의 종류(재질 : 일반 구조용 강재)

- 1) 선단정착형 : 선단을 정착시킨후 프리스트레스를 주어 지반의 붕락을 방지, 절리와 균열이 적은 암반층에 효과적임
- 2) 전면접착형 : 록볼트의 전면을 지반에 정착시키는 것으로서 접착재로서는 레진 혹은 시멘트 몰탈이 주로 쓰이며 레진형, 충전형, 주입형 및 병용형으로 구분함

가) 레진형은 레진과 경화제의 혼합된 레진캡슐을 천공홀에 넣은 다음 록볼트를 회전, 삽입함으로써 캡슐을 분쇄하여 캡슐속의 레진이 록볼트와 지반을 서로 결합

종 류	장 점	단 점
보통 레진	<ul style="list-style-type: none"> · 시공성 양호 · 조기에 큰 정착력을 기대 · 다소의 용수가 있어도 시공 가능 	<ul style="list-style-type: none"> · 시멘트계의 정착제 보다도 고가 · 천공경이 커지면 정착제가 부족하여 정착불량 가능 · 경화가 빠르므로 인력타입시 길이 3m 정도가 한계
발포성레진	<ul style="list-style-type: none"> · 가격이 몰탈 전면 접착형에 근접 · 길이 5~6m까지 시공 가능 · 선단에 급결성의 보통 레진을 사용하고 또 다른 부분에 발포성 레진을 사용하므로 프리스트레스 도입이 가능 	<ul style="list-style-type: none"> · 발포배율이 커지면 접착력이 저하 · 보통 레진 보다는 경화가 늦으므로 타설 직후 록볼트가 빠질 수 있음

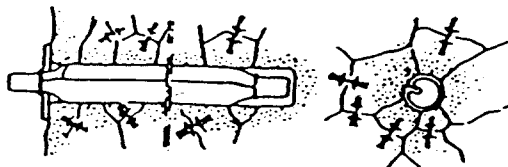
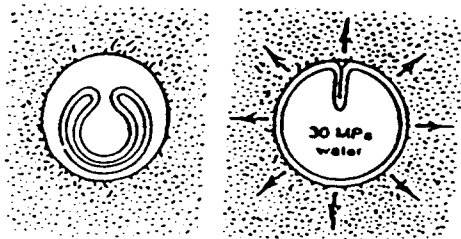
나) 시멘트 몰탈형(충전형)은 가장 널리 사용되고 있으며 천공-몰탈 충전-록볼트의 타입 순으로 시공. 보통 시멘트를 사용하는 SN 록볼트와 초 조강 시멘트를 사용하는 AS 록볼트가 있음

장 점	<ul style="list-style-type: none"> · 레진형보다 저가 · 공경이 확대되어도 천공홀내에 몰탈을 충분히 충전할 수 있으므로 정착력이 확보 · 길이가 긴 록볼트(L=6m) 시공 가능
단 점	<ul style="list-style-type: none"> · 몰탈의 품질관리에 주의를 요하며 용수가 있을 경우에는 정착효과 불량 · 구멍에 거친 면이 있을 경우에는 몰탈 충전용 호스의 삽입이 곤란 · 사질토 등의 흡수성 지반에서는 몰탈의 수분이 상실 · 초기 강도의 발현이 레진형보다 지연 · 몰탈 믹서(Mixer), 몰탈 피더(또는 펌프) 등의 설비가 필요

다) 시멘트 밀크형(주입형)은 시멘트 밀크와 급결제의 2가지 액을 각각 별도의 펌프로 압송하여 록볼트 가까이에서 혼합한 후 록볼트에 장치해 있는 파이프를 통하여 주입. 주입을 완전히 하기 위해서 또는 록볼트를 고정하기 위해서 천공홀 입구에 패커(Packer) 설치가 필요

장점	<ul style="list-style-type: none"> • 급결제를 사용하므로 조기 강도 발현이 가능 • 다소의 용수가 있더라도 시공 가능 • 구멍에 거침이 있더라도 록볼트가 삽입이 되면 시공이 가능 • 확실한 충전을 보장
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 급결제, 패커, 주입관, 배기관을 사용하므로 시멘트 몰탈형보다 고가 • 패커 부착, 주입, 확인에 시간이 소요 • 믹서 펌프가 2대씩 필요 • 토사지반, 균열이 많은 지반 등에서는 주입량이 다량소요 가능 • 몰탈 믹서, 몰탈 피터 (또는 펌프) 등의 설비가 필요

라) 병용형은 선단정착형 록볼트의 부식방지 및 지보효과 확대를 목적으로 사용
 마) 마찰형은 록볼트의 표면과 지반과의 마찰력을 활용하는 것으로 전면 접촉형과 근본적으로 동일. 관중심 방향으로 구겨진 철관을 천공홀에 삽입한 후 펌프로 수압력을 가하여 팽창시켜 철관을 원지반에 완전히 밀착시킴으로써 볼트 전길이의 마찰력과 상호물림 작용에 의해 즉시 지지력 발휘가 가능하며 설치방법이 간단하고 신속함. 특히, 용수가 많은 암반지역에 효과적이나 전단 저항이 약한 단점이 있음.



(3) 록볼트의 선정조건

록볼트를 선정하기 위해서는 다음 항목을 검토하여야 한다.

- 원지반의 강도
- 1 싸이클의 시공 수량
- 절리, 균열의 상태
- 타설방향
- 용수상태
- 작업성(시공관리의 난이)
- 천공홀벽의 자립정도
- 프리스트레스의 도입여부
- 설계내력
- 정착의 확실성
- 록볼트의 길이
- 경제성(작업 시간까지 포함)

4.4.3 강지보재 (Steel Rib) (재질 : 일반 구조용 강재)

강지보재는 뿔어붙임 콘크리트가 경화할 때까지 즉시 지보효과를 발휘하며 뿔어붙임 콘크리트가 경화한 후에는 뿔어붙임 콘크리트와 연합하여 지지효과를 증진시킨다. 따라서 강지보재는 이음부가 적고 예상되는 외력, 기타 재조건에 대하여 유리한 형상을 가지며 시공상 편리한 것 이어야 한다. 강지보의 종류는 U형, H형, 레티스 거더(Lattice Girder) 등이 있으며 그 역할을 정리하면 다음과 같다.

- (i) 뿔어붙임 콘크리트 타설 후 경화시까지 임시 보강재 기능
- (ii) 무지보 지반의 직접보강 및 뿔어붙임 콘크리트 라이닝 하중분산 작용
- (iii) 휘폴링, 파이프 루프 시공시 지지대 역할
- (iv) 터널 내공확인, 발파 천공의 지표(Guide) 역할

4.4.4 철 망 (Wiremesh)

철망은 뿔어붙임 콘크리트와 지반과의 부착력을 증대시키고 뿔어붙임 콘크리트에 작용하는 휨응력에 대한 인장 보강재의 역할을 하며 경화시까지의 강도 및 자립성을 유지 시켜주며 시공 이음부를 보강하고 균열을 방지하는 역할을 담당한다.

5. 굴착설계

터널 굴착시 고려하여야 할 사항은 터널 노선이 통과하는 지역의 지반조건, 터널 단면형상, 지장물 및 지상 구조물의 허용변위 한계, 공사기간, 사용 가능한 굴착장비, 경제성 및 민원 등이다. 굴착공법은 굴착장비, 굴착방법에 의하여 분류할 수 있다. 토사터널은 대부분 인력이나 기계굴착을 적용하며 기계 굴착은 브레이커에 의한 굴착, 로드헤더에 의한 굴착, TBM 또는 실드에 의한 굴착 등으로 세분할 수 있다. 암반지역에 대해서는 발파에 의한 굴착을 실시한다.

굴착 공법 선정시 고려사항 :

- 상부에 존재하는 지장물이나 지상 구조물에 미치는 영향
- 지반조건에 따른 막장과 굴착면의 안정문제
- 지반내에 분포하는 응력의 재분배
- 터널의 크기 및 형상

5.1 굴착설계에 포함되어야 할 사항

제한된 지반조사 결과로부터 추정된 지반 상태는 실제 지반과는 차이를 보이게 되는 경우가 많으므로 시공시의 현장여건에 대응하여 어떻게 변경하고 조정하며 굴착해 나아갈 것인가를 설계 단계에서 명시해 주어야 한다. 특히, 종방향에 대한 굴착순서 즉, 어떠한 형태의 지보를 어떻게 설치하여야 하는 가를 명확하게 제시하여야 한다. 세부사항을 항목별로 구분하면 다음과 같다.

- (i) 실제지반 조건이나 현장여건 변화에 대한 대처방안을 상세히 제시하여야 한다 (지 보형식 적용)
- (ii) 횡방향의 굴착방법 뿐만 아니라 종방향의 굴착방법을 상세히 제시하여야 한다
- (iii) 가인버트를 설치하는 굴착공법의 경우 가인버트는 구조적으로 양호한 형상이 되도록 하여야 하며 장비 운행에 따른 손상이 발생되지 않도록 설계하여야 한다
- (iv) 가인버트나 인버트의 링폐합 시간을 명기하여야 한다
- (v) 링커트 공법의 경우 지지 코아의 크기는 후속작업에 지장이 없는 크기로 결정하여야 한다

5.2 굴착방법의 종류 및 시공순서

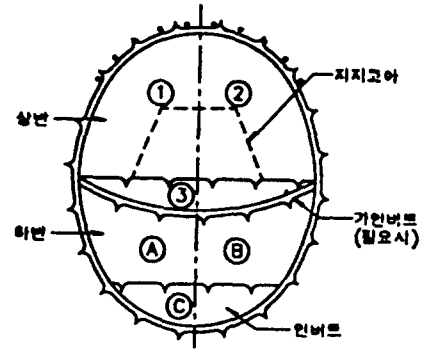
굴착방법은 상/하반 분할굴착, 측벽 선진도갱 굴착, 중벽분할 굴착 등으로 구분할 수 있다. 상/하반 분할 굴착은 다시 링커트, 벤치커트, 미니 벤치커트, 다단 벤치커트 가인버트 공법 등으로 분류할 수 있으며, 측벽 선진도갱 굴착공법은 도갱의 수에 따라 1도갱 혹 2도갱 방법으로 분류한다. 상/하반 분할 공법이나 중벽분할 공법은 시공과정상 별도의 경사로를 필요로 한다.

5.2.1 상/하반 분할 굴착

- (1) 링커트 공법 - 막장면에 지지코아를 남기고 굴착하는 공법으로서 막장면의 안정이 위협되는 지반조건에 적용한다. 지반조건이 매우 나쁜 경우에는 지지코아 주위를 분할하여 굴착해야 한다.

장 점

- 막장면 안정이 가능
- 연약한 지반 조건에서 대단면 굴착이 가능
- 지반 변화에 대처가 용이
- 조기 지보설치가 가능



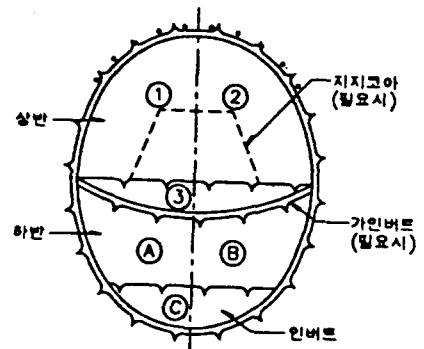
단 점

- 작업 공간이 확보되지 않으면 적합한 지보재 설치가 곤란
- 작업 공종이 많아서 작업 사이클 조정이 불리

(2) 롱벤치 커트 공법 - 벤치길이가 30m 이상인 경우이며 비교적 안정된 지반조건인 터널굴착에 적용한다.

장 점

- 상/하반 병행 작업이 가능
- 일반적인 장비의 운용과 작업 사이클 조정이 용이



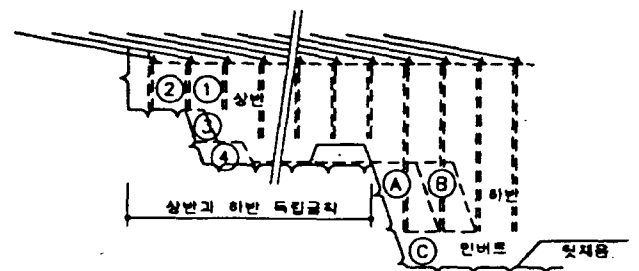
단 점

- 경사로를 필요

(3) 쇼트벤치 커트 공법 - 벤치길이가 보통 10~30m 정도이며, 지반 조건이 나쁜 경우 막장면에 지지 코어를 남겨두고 굴착한다. 하반의 지반조건이 비교적 안정된 경우에 적용이 가능하며 중단면 이상의 터널 굴착에 일반적으로 적용한다.

장 점

- 지반변화에 대처가 용이
- 일반적인 장비 운용이 용이



단 점

- 경사로 필요
- 상/하반을 분할 굴착에 따른 작업 사이클 조정이 필요

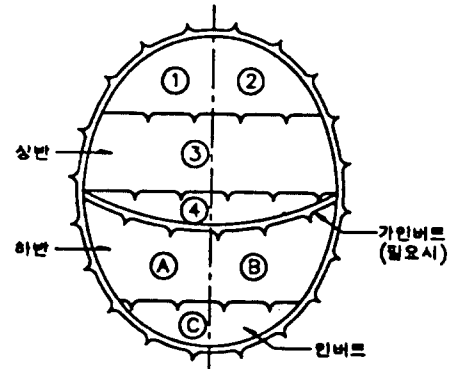
(4) 다단벤치 커트 공법 - 대단면 터널의 굴착이나 막장 지반의 자립이 극히 불량하여 조기에 단면폐합이 요구되는 경우에 적용한다. 주로 지반의 자립시간이 짧은 경우에 적용된다.

장 점

- 막장의 안정성 확보 용이
- 대단면 터널 굴착시 일반적인 장비로 시공 가능

단 점

- 버력 처리가 중복되는 경우 발생
- 각 단의 벤치의 길이가 한정된 경우 작업 공간이 협소



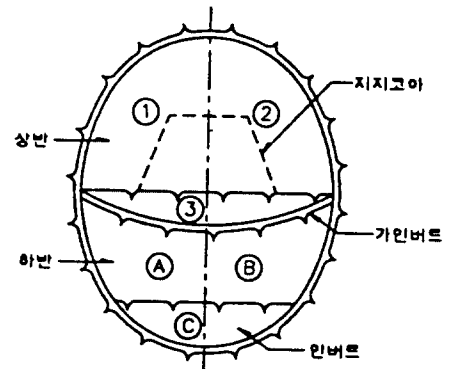
(5) 가인버트 공법 - 굴착 단면이 중단면 이상으로 막장 지반의 자립 시간이 극히 짧은 조건이나 지반의 변형을 최소화하는 경우에 적용된다. 또한, 시공성을 높이기 위하여 벤치 길이를 길게 할 필요가 있을 경우 적용한다.

장 점

- 상반의 작업공간 확보가 용이
- 상반을 선 시공한 후 하반 시공이 가능

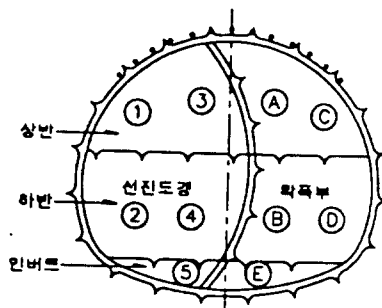
단 점

- 시공속도가 느리고 작업 사이클 조정이 불리
- 경제성 저하
- 장비 이동에 의해 가인버트 손상발생



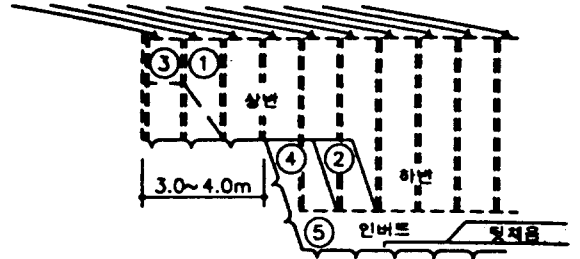
5.2.2 측벽 선진 도갱 공법

(1) 1 도갱 공법(SWG 공법, CRD 공법) - 지반 조건이 불량한 중단면 터널의 굴착이나 지상에 건물이 존재하여 침하를 억제할 필요가 있는 경우 적용한다. 건물의 막장면은 본 터널 막장면으로부터 1D~2D 이상의 이격거리를 두어야 한다. 필요에 따라서 조기에 전단면 링폐합을 실시하여야 한다.



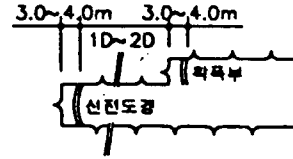
장점

- 침하량을 줄일 수 있음
- 건물 하부 통과에 유리
- 선진 도갱을 통하여 지하수 배수가 가능
- 지반조건 사전조사와 필요시 보강이 가능



단점

- 시공속도 저하
- 작업 공간의 제약으로 시공성 저하



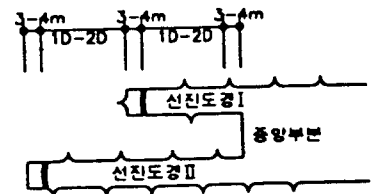
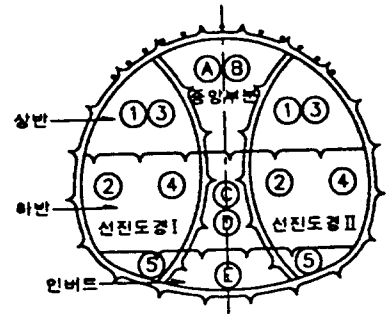
(2) 2 도갱 공법 - 지반조건이 불량한 대단면 터널의 굴착이나 지장물로 인하여 침하량을 극히 제한할 필요가 있는 경우 적용한다. 양 측갱의 막장면 간의 이격거리는 적어도 1D~2D 이상 유지하여야 한다. 필요에 따라서 조기에 링폐합을 실시하여야 한다.

장점

- 대단면 터널 굴착시 침하량 최소화가 가능
- 암피복이 얇은 지역의 건물 하부 통과시 적합

단점

- 작업 공간의 제약으로 장비 운용이 불리
- 공사비가 고가이고 시공속도 저하



5.2.3 중벽분할 공법

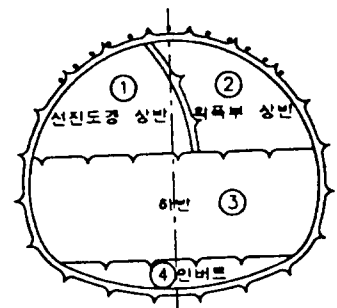
하반의 지반조건은 양호하나 상반의 지반조건이 불량하여 지반의 침하량을 억제할 필요가 있는 경우 적용한다. 막장간의 이격거리는 1D ~ 2D를 유지하는 것이 바람직하다.

장점

- 침하량을 어느 정도 억제 가능
- 막장의 안정성을 유지

단점

- 시공 속도가 다소 저하
- 작업 공간의 제약으로 시공성이 저하



5.3 발파굴착과 영향

발파란 암반내의 파쇄된 장약공내에서 폭약이 순간적으로 산화할 때 발생하는 고압과 고열을 수반한 강력한 에너지에 의해서 주변 암반을 파쇄시키는 것을 말하며 암석을 파쇄하는 에너지 이외의 에너지는 소음, 진동 등으로 전환되어 공기나 지반을 통하여 확산되면서 소멸한다.

5.3.1 발파계획

발파계획을 세우는데 있어서는 미리 정해진 굴착공법, 굴착공정을 근거로하여 암질, 단면의 모양과 크기를 고려하여 우선 발파예정 진행장(천공깊이)을 정한 다음 심뱃기의 형식, 천공배치, 화약의 종류, 화약량, 뇌관의 형식, 주변공의 간격, 주변공의 약량, 화약의 발파순서 등을 정한다. 경제적 측면에서는 굴진길이를 길게하는 것이 바람직하나, 지반의 자립성 및 주변환경에 의하여 제약을 받게 된다. 굴진길이는 대부분 지반의 종류에 따라 다르게 되나 일반적으로 연암에서는 1.5~2.0m정도로 하며, 강지보재 설치가 필요없는 경암지역에서는 지반의 상태에 따라 유연하게 조정이 가능하다. 다만 발파지역 주위에 미치는 진동, 소음 등에 유의하고, 장공(4.0m 이상)발파도 포함하여 경제성과 안정성을 고려하여 1회 발파굴진장을 결정할 필요가 있다.

특히, 지상 및 지중구조물, 인가, 축사, 기타 시설에 접근하여 터널을 설치하는 경우에는, 발파진동이 이들에게 악영향을 미칠 경우가 발생하므로 주변환경에 대한 영향을 조사해서 대책을 강구하여야 한다. 발파진동의 최대치는 주로 심뱃기의 단계에서 발생하므로 적절한 심뱃기방법을 선택하여야 한다. 진동경감대책 으로서는 1회에 폭파하는 화약의 사용량을 제한하고 또 발파속도가 낮은 화약을 사용하는 등의 방법을 쓰고 있고, 또 심뱃기에 순발이외의 전기지발뇌관을 사용함으로써 전기뇌관의 미소한 발파시간차를 활용하여 진동을 경감할 수 있다. 발파의 기본은 적정 장약량 선정에 있고 과대장약이 되지 않도록 신중을 기하여야 하며, 반면에 화약의 사용량을 너무 제한하여 과소장약이 되지 않도록 주의하여야 한다. 과소장약은 오히려 발파진동 및 발파음을 크게 할 때가 있다. 경우에 따라서는 시험발파를 행하여 발파진동과 발파음에 대하여 측정하고 적정한 발파를 계획하여야 한다.

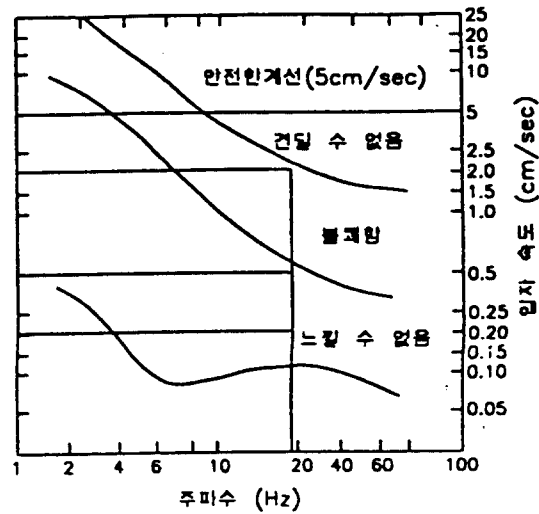
5.3.2 발파의 영향

(1) 환경에 미치는 영향

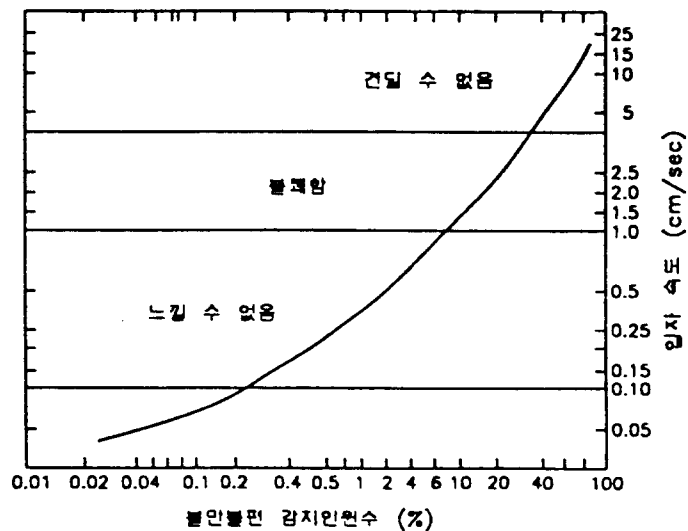
- 소음 및 진동 : 주민의 심리적 불안감을 조성하여 민원의 대상이 되며 기온이나 습도등 기상조건과 지형조건에 따라 크기나 속도가 좌우
- 분진 : 피해범위는 제한적이나 민원의 요인
- 비산석 : 비산거리는 장약량, 발파방법 등에 의해 결정되며 대개 터널내에서는 비산 범위가 제한적이기는 하지만 작업원의 안정을 위협하기도 함

(2) 인체에 미치는 영향

생활수준과 의식수준에 따라 영향을 받으며 근래에는 민감한 문제의 하나이다. 인체의 반응의 정도는 개개인의 심리와 관계하여 상당히 주관적인 경우가 대부분이다. Salmon과 Goldman은 인체의 감응을 다음의 3단계로 구분하였다.



<그림 5.1> 발과 진동에 대한 인체의 감응 곡선



<그림 5.2> 발과진동에 대한 불만불편 감지 반응

(3) 인접구조물에 미치는 영향

발파진동속도와 구조물의 피해와의 관계를 표시한 각국의 연구자료는 다음의 <표 5.1>과 같다.

<표 5.1> 발파속도와 구조물의 피해 관계

진동치(m/sec)	연구지	Longefore (Sweden)	Edwards (Canada)	USBM (USA)	E. Bonik (Germany)	ASCE
50		근근떨이 발생	피해의 발생	근거리의 근떨이 발생 벽체의 흙이 떨어짐.	근거리	구조물이 위험
		근떨이 발생		가벼운 피해		
		이세한 근떨				
10		오주의	오주의	오주의	피해발생	10Hz, 35Hz 구조물 부의
		눈에 보이는 피해는 없음	전 전	전 전		
5					오주의	
1	전체에는 잘 느껴지나 구조물에 피해는 없음					
0.5						
0.1	일반적으로 많은 사람이 진동을 느낌					
0.05						
0.01	대단히 민감한 사람만이 진동을 느낌					
0.005	전체에 감각이 없음					

*USBM : 미국광무국, ASCE : 미국토목학회

5.3.3 발파진동치의 측정과 규제

(1) 진동에 영향을 주는 요인

- 화약의 종류 : 다이ना마이트, 함수폭약, 고성능폭약, 정밀폭약 등
- 화약의 특성 : 폭속, 밀도
- 지발당 장약량
- 기폭방법
- 진쇄상태, 천공경, 장약밀도
- 자유면수
- 지반조건 : 지반의 밀도, 불연속면의 빈도
- 폭원거리

(2) 진동치를 추정하는 방법

진동은 장약량이 많을수록 폭원에서 거리가 가까울수록 크게 된다.

$$V = K W^m D^{-n} \quad \text{여기서, } V : \text{입자속도 (cm/sec)}$$

K : 발파진동 상수

m, n : 시험에서 결정되는 상수

세계적으로 소개된 발파진동의 경험식은 <표 5.2>에 제시된 바와 같으며 서울지역의 경우 화강암 및 편마암 지층에 대하여는 별도의 추정공식을 사용하고 있다.

• 서울지하철 건설에서는 화강암 및 편마암 지층에 대한 실험발파를 통하여 다음과 같은 발파진동 추정공식을 수립하여 사용하고 있다. 따라서 대규모의 터널사업 단위로 기반암 종류별로 실험발파를 시행하여 지역특성에 부합되는 발파진동 추정식을 수립함이 바람직하다.

• 화강암에서의 발파진동 추정공식

$$V = K \times W^{0.57} \times D^{-1.7}$$

• 편마암에서의 발파진동 추정공식

$$V = K \times W^{0.5} \times D^{-1.5}$$

※ 화강암 및 편마암에서의 발파진동 상수K는 <표 5.3>과 <표 5.4>와 같다.

<표 5.2> 발파 진동 경험식

관리 기준	제안자	추정식	성립조건	비고
진폭의 최대치 (A)	火田中	$A = 400 K \cdot W^{2/3} \cdot D^{-2}$ $A = 5.2 K \cdot W^{2/3} \cdot D^{-2}$	15<D<250 250<D<1,500	K= 7.0 표토층이 파장에 비하여 깊은 경우 K= 2.5 표토층이 파장에 비하여 얇은 경우 K= 1.0 표토층이 없는 경우
	USBM	$A = 30^{1.1} \cdot K \cdot (e^{-0.00469D} + 0.0143) \cdot W^{2/3}$	152<D<1,829 454<W<4,536	K= 1.0 표토층이 없는 경우 K= 1.0 표토층이 두께가 보통 (파장의 1/2~1/4) K= 3.0 표토층이 두께가 두꺼운 경우 (파장의 1/2 이상)
변위 속도의 최대치 (V)	Langefors	$V = K \cdot W^{0.5} \cdot D^{-0.75}$		K= 300 ~ 700
	Crandell	$E \cdot R = K \cdot W^2 \cdot (50/D)^2$		K= Local Constant E·R : 4 f ² v ² V : 진동속도
	Devine et al	$V = K \cdot W^{0.75} \cdot D^{-1.5}$		
	일본화약(주)	$V = K \cdot W^{0.75} \cdot D^{-2}$	5<D<3,000 0.2<W<4,000	K= 450 ~ 900 심발발파의 경우 K= 200 ~ 500 확대발파의 경우 K= 300 ~ 700 Floor hole의 경우
	일본유지(주)	$V = K \cdot W^{0.75} \cdot D^{-1.5}$		K= 80±40 : Dynamite 사용시 K= 60±20 : 제어발파 폭약 K= 20±10 : Cone 파쇄기
	吉川他	$V = K \cdot W^{0.75} \cdot D^{-1.5}$		K= 100 ~ 700
	USBM	$V = K \cdot (D/W^{0.5})^n$		K= 12 ~ 550 n : 상수

단위 : V : cm/sec, D : m, A : μ, W : kg

<표 5.3> 화강암에서의 발파진동 상수 K

구분 폭약	발파방법 압축강도(kg/cm ²)	개 착 식	터 널 식	
		단 계 발 파	심 발 발 파	확 대 발 파
다 이 나 마 이 트	1,800~1,500	117	127	97
	1,500~1,200	106	116	86
	1,200~900	95	105	75
	900~600	84	94	64
	600이하	73	83	53
함 수 폭 약	1,800~1,500	94	102	78
	1,500~1,200	85	93	69
	1,200~900	76	84	60
	900~600	67	75	51
	600이하	58	66	42
초 안 폭 약	1,800~1,500	76	66	63
	1,500~1,200	68	74	55
	1,200~900	61	67	48
	900~600	54	60	41
	600이하	46	53	34

<표 5.4> 편마암에서의 발파진동 상수 K

구분 폭약	발파방법 압축강도(kg/cm ²)	개 착 식	터 널 식	
		단 계 발 파	심 발 발 파	확 대 발 파
다 이 나 마 이 트	1,500~1,200	61	71	41
	1,200~900	55	65	35
	900~600	49	59	29
	600이하	42	52	22
함 수 폭 약	1,500~1,200	49	57	33
	1,200~900	44	52	28
	900~600	39	47	23
	600이하	34	42	18
초 안 폭 약	1,500~1,200	39	46	26
	1,200~900	35	42	22
	900~600	31	38	18
	600이하	27	34	14

(3) 허용 진동 기준치

1) 일반적 기준치

- 입자속도 0.5 cm/sec 미만은 안정하며, 5.0 ~ 13.5 cm/sec의 범위에서는 경미한 피해가 예상되고 그 이상에서는 상당한 구조적 피해가 있다고 알려져 있다.

2) 허용진동규제치

- 허용발파진동치란 진동에 의해 구조물에 피해가 발생되지 않도록 규제하는 범위의 진동치를 말하며, 일반적으로 엄밀한 의미의 허용진동치는 구조물의 크기(층수 등), 설계구조(내진설계 유무), 재질(철근 콘크리트, 블록조, 석조, 목조 등)과 건전성(결합, 유무, 노후화 정도 등)등에 따라서 개개 구조물별로 서로 상이하게 되며, 인체에 대한 허용진동치는 개개인의 진동에 대한 인내심이나 그 당시의 심리상태 등의 주관적 요소에 따라 서로 달라지게 된다.
- 현재 터널공사시방서에서는 대상시설물 위치에서 <표 5.5>와 같은 규제치를 설정 적용하도록 규정하고 있으며 교외지에서는 동일한 조건이라도 이보다 큰 허용치를 적용할 수 있도록 허용하고 있다.

<표 5.5> 지하철 진동 허용규제치

구 분	문화재	주택/아파트	상 가	철근 콘크리트 빌딩 및 공장
건물진동에서의 허용진동치 (cm/sec)	0.2	0.5	1.0	1.0 - 4.0

5.3.4 발파진동의 경감방법

발파진동은 장약량을 감소시키면 감소하나 장약량의 감소는 발파효과의 저하를 초래하기 쉽기 때문에 발파진동을 억제하고 파쇄효과도 충분히 얻을 수 있는 발파방법을 모색할 필요가 있다. 시험발파나 발파진동 측정결과로부터 발파진동의 피해가 예측되는 경우 다음에 열거된 진동경감방법중 발파효과 및 경제성 등을 검토하여 최적의 방법을 선택하여야 한다. 경감방법은 진동의 발파원에서의 억제방법과 진동전파의 방지로 대별할 수 있으며 아래와 같이 요약할 수 있다.

(1) 발파원에서의 억제

1) 약종에 의한 경감

저폭속 또는 특수폭약을 사용한다. 발파진동은 근본적으로 단위시간당의 발파공내의 압력 상승에 의해 좌우되므로 저폭속의 폭약을 사용하므로써 어느 정도의 경감이 가능하다. 국내에서 생산되는 폭약중 대표적인 것들의 폭속은 다음과 같다.

· 고성능 폭약 I 호	5,500~6,000 m/sec
· 고성능 폭약 II 호	5,200~5,500 m/sec
· 다이나마이트	5,000~5,500 m/sec
· 함수폭약	3,900 m/sec
· 정밀폭약 FINEX I 호	4,000 m/sec
· 정밀폭약 FINEX II 호	3,500 m/sec
· Emulite	5,000~5,500 m/sec
· ANFO	2,800~3,000 m/sec

근접 발파시에 폭음과 발파진동을 억제하기 위해서 개발된 특수화약중 대표적인 것이 미진동 파쇄기와 팽창제(Calm-mite, S-mite 등)이다. 미진동 파쇄기는 폭속 60m/sec, 반응열 1,300~1,500Kcal/kg 정도로 일반화약과 같이 폭력에 의한 파괴가 아니며 모재가 물과 혼합되었을 때의 수화작용에서 생기는 고열과 팽창압이 발파공벽에 작용하여 공벽에 균열이 생기게 하는 원리를 이용한 것이다.

2) 장약량의 제한에 의한 방법

진동치 추정공식인 $V = K \cdot W^m \cdot D^n$ 으로부터 알 수 있는 것과 같이 진동치는 장약의 양에 비례한다. 따라서, 시차를 두어 발파하므로써 1회에 발파되는 장약의 양(지발당 장약량)을 제한하는 방법이다. 이 방법에는 다음의 3가지가 주로 사용된다.

- DSD(Decisecond Detonator) 뇌관에 의한 분할 점화 : 발파진동의 지속시간은 극히 짧으므로 뇌관의 점화시간차를 이용하여 단발 발파를 실시함으로써 각단의 진동이 연속하지 않고 독립된 진동으로서 허용한계치내에 들어가도록 한다.
- MSD(Milisecond Detonator) 뇌관에 의한 간섭효과 이용 : DSD는 진동이 연속되지 않도록 점화시차를 조정하였으나 MSD는 반대로 극히 짧은 시간차를 중복시켜서 진동파의 상호간섭에 의해서 진동치를 감쇠시키는 방법이다. 파의 간섭을 이용한 방법이기 때문에 반대로 진동치가 증가될 가능성도 있으나 발파진동의 파형이 불규칙하므로 큰 문제없이 진동의 경감이 가능하다.
- 비전기식 뇌관 (NONEL)에 의한 무한단수 분할 점화 : 일반뇌관(DSD, MSD)은 사용단수가 한정되기 때문에 진동치 규제를 위해서는 부득이하게 시공이 번거롭고 공사비도 고가인 분할굴착을 계획하여야 한다. 이를 피하기 위해서 무한단수가 가능한 비전기식 뇌관을 사용하면 1회에 폭발하는 화약량을 최소화 하면서 분할 발파없이 발파를 수행할 수 있다. 최근에 도심지 발파에서 많이 사용되고 있다.

3) 심폐기발파 방법에 의한 경감

심폐기 발파는 자유면을 형성하기 위한 발파로써 자유면이 없는 상태에서 발파되므로 진동치를 크게 발생시키는 경우가 많으므로 심폐기부의 중앙부에 작은 심폐기를 두는 이른바 이중 심폐기 방법을 사용하거나 심폐기의 위치를 보호대상 구조물로부터 최대가 되는 곳에 두어 진동치를 경감하게 하는 방법이다.

4) Decoupling 효과에 의한 방법

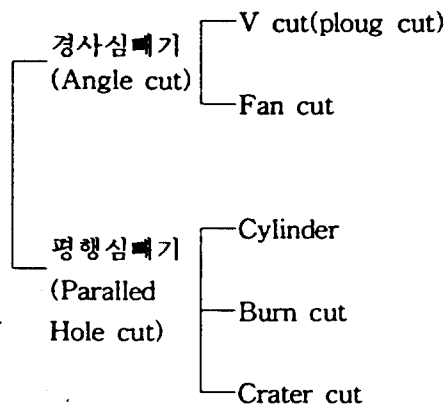
폭약이 폭발하면 장약공내 극히 높은 가스압이 공벽에 작용하게 되며 이때 가스압은 장약공과 화약 사이의 공간에 크게 영향을 받는다. 이것은 공기의 압축성이 크기 때문이다. 따라서, 장약공 내부에 공간을 형성시켜서 발생가스압을 감소시켜 폭발의 위력을 감소시키는 방법이다. 감소정도를 나타내는데 사용되는 것은 천공 직경과 장약의 직경과의 비인 DI(Decoupling Index)를 주로 사용한다.

5.3.5 진동전파의 방지

이 방법은 근본적으로 폭원과 보호대상 시설물간에 인위적으로 진동전파 차단시설을 형성시켜 시설물에 진동이 직접 전파되는 것을 방지하는 방법이다. 대표적인 예로서는 굴착 예정선에 연하여 일정한 간격으로 다수의 빈공을 천공하여 인위적으로 파단면을 형성시킴으로서 진동이 폭원으로부터 직접 전파되는 것을 억제하는 라인 드릴링(Line Drilling) 방법이 있다.

5.3.6 심폐기 방법

심폐기는 자유면을 형성시키는 것으로서 터널 발파에 있어서 그 성패를 좌우할 만큼 중요한 역할을 하므로 그 패턴 결정에 있어서 세심한 주의를 요한다. 심폐기 방법의 종류는 여러 가지가 있으나 국내에서 비교적 많이 사용되는 방법들은 다음과 같다.



- (1) V cut : 경사 심매기중 가장 일반적인 방법으로써 천공방향이 막장면의 시작점으로부터 심매기 중심선 방향으로 향하는 것이 가장 이상적이다. 천공시 로드 조작의 한계성 때문에 소단면에서는 적용하기가 곤란함. 그러나, 일회 굴진장이 비교적 짧은 경우 (L=1.5m 이하)에는 심매기를 여러 단계로 나눈 다중 심매기를 함으로써 비교적 적은 장약량으로도 소기의 목적을 달성할 수 있고 Cylinder cut과 같이 대공(통상 75 ~ 200mm)을 천공하기 위한 특수한 장비를 필요로 하지 않는다.
- (2) Burn cut 및 Cylinder cut : Burn cut나 Cylinder cut는 모두 심매기의 중앙부에 Burn Hole(무장약공)을 천공하여 이를 자유면으로 활용한다는 점을 기본으로 하나 Burn cut는 비교적 소구경(공경 75mm 이하)의 Burn Hole을, 또 Cylinder cut는 대구경(공경 75mm ~ 200mm)의 Burn Hole을 사용하고 있다는 점이 다르다. Burn Hole의 목적이 자유면의 제공에 있으므로 효과면에서 보면 Cylinder cut이 Burn cut보다 우월하다.

Burn cut는 중앙부에 1개 혹은 여러개의 Burn Hole을 천공하고 그 주변의 수평공으로부터 발파를하여 순차적으로 발파해가는 방법으로써 정확한 수평천공을 기본요건으로 하며 Burn Hole 주변공의 장약량이 많아지고 또 Burn Hole의 공경이 작아 자유면 역할을 충분히 하지 못하는 경우 진동이 커질 가능성이 높다. Cylinder cut는 중앙부에 비교적 큰 Burn Hole을 1~2개 형성시켜 자유면으로 활용하므로써 Burn cut에 비하여 심매기 효과가 확실하여 최근 터널 굴착에 가장 널리 쓰이는 방법이다.

또, Burn Hole의 공경이 클수록 그리고 공수가 많을수록 발파효과가 양호하므로 공간격을 좁힐 수도 있고 장약량의 조정도 가능하여 장약량의 제한을 받을 경우 효과적인 방법이다. 특히, 장공 발파에 유효한 공법이다. 그러나, 대공경의 천공을 하기 위해서는 특수한 장비를 필요로 하며 Burn Hole 천공이 정확히 수평이 되지 않으면 심매기 효과가 크게 저하되는 것이 단점이다.

5.3.7 제어발파

보통의 발파방식에서는 발파에너지가 작용하는 방향이 제어되지 않는 점에서 굴착면은 요철이 심하고 경우에 따라서 굴착면 지반의 상당 깊이까지 손상을 받기도 한다. 이러한 경우에는 지보공 및 여굴의 증대, 버력처리의 문제 등 경제 및 안전면에 있어서 큰 손실이 생기게 되므로 발파에너지를 제어하는 공법이 제어발파이다. 제어발파에는 스무스 블라스팅, 프리스플리팅 등이 있다.

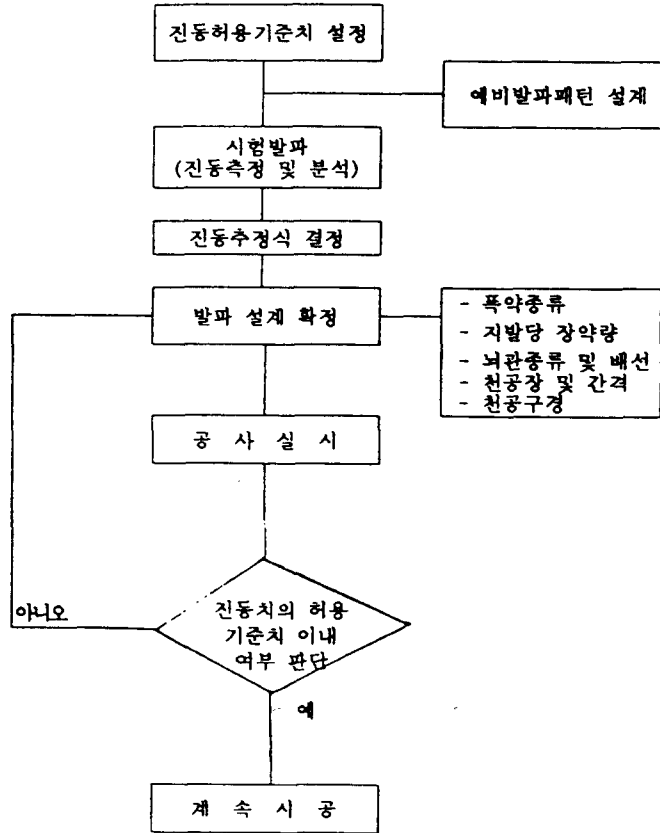
(1) 스무스 블라스팅(Smooth Blasting)

스무스 블라스팅의 원리는 발파력의 쏠선작용에 기초를 두는 것으로 발파충격에 의한 불규칙적인 암반의 파쇄를 방지하고 정적인 에너지를 가진 발파가스의 작용으로 암반을 파괴하여 평탄한 굴착면을 얻는 것이다. 이를 위해서는 굴착면을 따라 천공열을 평행하게 배치하고 구멍지름보다 아주 작은 지름의 폭약을 사용하여 경장약으로 발파하는 방법으로 발파에너지가 제어됨으로써 원지반의 손상을 방지하고 여굴도 줄인다.

(2) 프리스플리팅(Pre-Splitting)

이 방법은 굴착면 주변을 먼저 발파하여 파단면을 형성하고 그 후 나머지 부분을 발파하는 방법이다. 주변의 천공 간격은 스무스 블라스팅의 경우보다 작고 장약량도 적다. 그러나, 평행천공의 정밀한 기술이 필요하고, 암반의 균열에 따라 발파에너지가 작용하므로 장약량과 천공간격을 암반조건에 맞추어 결정해야 하는 어려움이 따른다. 천공을 평행하게 접근시켜 배치하고 천공을 지름보다 작은 지름의 폭약을 사용하여 경장약으로서 발파하는 방법으로 발파에너지의 작용방향이 제어됨으로써 원지반의 손상이 적게 되고, 발파면이 평활해져서 여굴은 물론 부석도 적어진다.

5.3.8 발파작업의 진행과정



5.3.9 발파유의사항

- (1) 발파에 의해 발생된 버력의 크기는 활용계획 및 버력적재 방법과 운반장비에 적합하도록 발파계획을 수립하여야 한다.
- (2) 발파 작업시에는 총포 화약류 단속법 및 동 시행령, 근로 안전관리 규정, 기타 관계법규 등을 준수하여야 한다
- (3) 발파작업은 정해진 책임자에 의해서 진행되어야 하며 이미 설치된 지보재들을 보호하여 손상되지 않도록 하여야 한다.
- (4) 발파후 소정의 시간이 경과한 후 막장에 접근하여야 하며 불발 장약공, 잔류폭약 유무를 점검하고 잔류 화약의 제거 등의 필요한 조치를 강구하여야 한다.
- (5) 발파후 굴착면을 따라서 뜬돌의 잔존여부를 확인하고 뜬돌이 확인될 경우 안전하게 제거하여야 한다. 이를 위하여 필요한 도구를 상시 마련해 두고 정기적인 점검을 실시하여야 한다.
- (6) 발파결과가 당초 계획과 상이할 경우에는 그 원인을 규명하여 후속 발파작업에 반영하여야 한다.
- (7) 진동측정 계기는 발파진동의 주파수(통상 10Hz~500Hz) 범위에 적합하고 입자변위, 입자속도, 입자가속도를 측정할 수 있는 것이어야 하며 정밀분석이 필요할 경우에는 주파수 분석이 가능하도록 시간이력을 기록할 수 있는 것을 사용하는 것이 바람직하다.
- (8) 진동측정 항목은 입자변위, 입자속도, 입자가속도의 3가지로 구분하며 측정 목적에 따라 측정항목을 다르게 할 수 있다.
- (9) 발파에 의한 지반진동의 크기 및 파형의 측정은 원칙적으로 연직방향과 이에 직교하는 수평 2방향(Longitudinal and Transversal)의 3성분을 동시에 측정하는 것이 바람직하며 진동크기의 거리에 따른 감소를 측정할 필요가 있는 경우에는 최소한 3측점 이상을 동시에 측정하여야 한다.
- (10) 대상 시설물에 대한 진동측정은 발파원으로부터 가장 근접한 위치의 시설물 부위에서 실시하는 것을 원칙으로 하나 부득이한 경우 이에 근접한 지표에서 측정할 수 있다.
- (11) 측정빈도는 다음의 기준을 원칙으로 하되 현장의 작업여건이나 입지여건에 따라 조정할 수 있다.
 - 시험발파와 굴착 및 발파패턴 변경시에는 목표의 발파효과와 발파진동 관리치 도달시 까지 매 발파마다 측정한다.
 - 일상적 발파작업이 이루어질 경우에도 주 1회 정도는 주기적으로 측정하여 발파작업의 효과확인 과 작업원에 대한 안전의식을 반복적으로 점검하도록 하는 것이 바람직하다.
 - 보호대상 시설물에 대하여는 발파진동 영향권 전구간을 통과할 때까지 매 발파마다 측정함을 원칙으로 한다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1996), 터널공사 표준시방서
2. 김승렬(1993), 서울지하철 터널의 설계 및 시공현황과 평가, 지하공간 건설기술에 관한 서울 심포지움 논문집, PP. 51~75
3. 김승렬, 박광준, 박봉기(1993), 배수형 터널과 방수형 터널의 설계와 시공, 한국지반공학회 봄 학술발표회, PP. 49~58
4. 서울시 지하철건설본부(1994), 제2기 서울지하철 설계 및 시공감리 종합보고서
5. (주)대우(1984), 터널신공법 연구개발보고서
6. Bell F.G.(1992), Engineering in Rock Masses
7. Hoek E. and Brown E.T.(1980), Underground Excavation in Rock