강 좌

# 터널(IV)

김승렬*

## Ⅳ. 터널의 굴착과 지보

### 1. 시작하며

인간이 가장 인간다운 것 중의 하나가 생각하거나 상상하는 것만으로 목적하는 바를 이루어 낼 수 없다는 것일 것이다. 우리 인간은 반드시 땀을 흘려 일을 하여야 무언가 원하는 것을 이루어 낼 수 있다. 터널 건설에 있어서도 계획, 설계, 시공 등의 모든 과정이 땀을 흘리는 과정이지만 그 중에서 가장 많은 땀을 흘리는 과정이 아마 굴착과 지보재를 설치하는 작업일 것이다. 우리가 요구하는 터널의 최종 목적물은 이 과정을 통해 실제의 모습을 드러내게 된다.

터널 건설을 위해 지반을 굴착한다는 것은 아주 오랫동안 안정을 유지해 온 지반에 새로운 변화를 가하는 행위이기 때문에 굴착이라는 과정이 원 지반에 미치는 영향을 분석하여 효율적인 방법으로 가장 적은 비용을 들여 최상의 구조물을 건설하도록 하는 것이 우리 기술자들의 몫이 된다. 이것은 지반조건이 양호한 경우에는 지보재의 필요성이 적은 반면 지반조건이 열악한 경우에는 막중한 지보재를 필요로 하게 됨을 의미하는 것이기 때문에 굴착과 지보라는 과정은 지반과 지보재의 상호작용(interaction)을 올바로 이해하여 가장 합리적인 재안정 조건을 이루어 내는 과정으로 정의할 수 있다.

터널은 지반을 개착(open cut)한 후 구조물을 설치하고 되메움 하는 이른바 개착식터널(cut and cover tunnel)과 지반을 개착하지 않고 시공하는 터널(mined tunnel)로 구분할 수 있다. 전자의 경우는 터널을 유지하는 구조체가 지반의 시간 의존성 특성에 의해 결정되지 않는 반면 후자의 경우는 지반의 특성에 의해 터널의 지보재가 결정되게 된다. 즉, 지반과 지보재의 상호의존도에 의해 굴착된 터널의 안정성이 유지되게 된다. 따라서, 후자는 동일한 지보재를 사용하는 경우라도 굴착후 지반의 특성이 시간변화에 따라 달라지기 때문에 지보재의 설치시기에 따라 지보재의 효과가 크게 달라질 수 있다.

본 강좌에서는 굴착식 터널(mined tunnel)에서의 굴착방법 및 공법과 지보재에 대한 몇가지 기술사항을 살펴보고자 한다.

### 2. 터널의 굴착

건설교통부제정(1999년) "터널표준시방서"에는 굴착방법과 굴착공법에 대해 다음과 같이 정의하고 있다.

- **굴착방법** : 지반을 굴착하는 수단을 말하며 인력굴착, 기계굴착, 파쇄굴착, 발파굴착 방법 등이 있다.
- **굴착공법** : 막장면 또는 터널길이 방향의 굴착계획을 총칭하는 것으로서 전단면굴착, 분할굴착, 선진도갱굴착공법 등이 있다.

* 정회원, (주)에스코컨설턴트 대표이사

상기의 정의에 의하면 굴착방법은 어떠한 수단으로 터널을 굴착할 것인가를 말하는 것이고 굴착공법은 이 굴착수단을 이용하여 어떻게 굴진해 나갈것인가 하는 계획을 의미한다. 이들 굴착방법과 공법은 기술과 장비의 발전에 힘입어 획기적인 진전을 이룩하였다. 일례로 과거에는 상상하지 못하였던 연약한 지반에 대단면 터널의 시공도 가능하게 된 점 등을 꼽을 수 있겠다.

## 2.1 굴착방법

터널의 굴착방법에는 인력, 기계, 발파 및 파쇄굴착 등이 있으며 굴착방법은 굴착대상이 되는 지반조건과 연장, 단면의 크기와 기하학적 형상 및 토피 지장물의 위치와 규모 등 주변여건에 의해 결정된다. 굴착방법 선정시에는 굴착면 주변의 원지반이 본래 보유하고 있는 지보능력을 최대한 보존시킬 수 있는 방법을 선정하여야 한다.

### (1) 인력굴착

인력 굴착방법은 곡괭이, 삽, 착암기 등 간단한 굴착도구를 사용하여 인력으로 굴착하는 방법으로 자립시간이 짧은 토사지반을 소규모로 분할굴착하고 조기에 지보재를 설치하여야 하는 경우나 진동영향을 많이 받는 지반을 소규모로 분할굴착하고 조기에 지보재를 설치하여야 하는 경우에 주로 적용한다.

### (2) 기계굴착

기계 굴착방법은 중장비에 의한 굴착으로 쇼벨(shovel), 브레이커(breaker), 로드헤더(road header) 등으로 비교적 파쇄가 심한 암반이나 풍화암, 풍화토지반을 큰 진동없이 굴착하는 방법과 TBM(Tunnel Boring Machine)이나 쉴드(shield)에 의한 전단면 굴착방법 등이 있다.

국내에서 가장 쉽게 볼 수 있는 기계굴착은 대형브레이커에 의한 굴착이다. 이 굴착방법은 절리가 심하게 발달된 파쇄암이나 풍화암, 풍화토 지반 등에서 지반이완을 줄이고 여굴을 억제하는데 효과가 큰 굴착방법이다. 로드헤더에 의한 굴착은 서울지하철 3, 4호선 도심구간에 일부 사용한 적이 있지만 우리 기술환경에서 아직은 큰 호응을 얻지 못하고 있는 실정이다. 이 방법은 지반변화에 대한 대응성이 소발파를 겸한 브레이커에 의한 굴착에 비해 떨어졌고 장비의 운용기술(유지관리 및 숙련도)도 미흡하였을 뿐 만 아니라 새 기술환경으로 전환하고자 하는 데에 대한 저항감이 비교적 컸던 우리의 기술환경 때문이었을 것으로 추측된다. 해를 거듭할수록 TBM이나 쉴드, 또는 이 두 공법의 기능이 일부 서로 합해진 쉴드형 TBM(Shielded TBM) 등에 의한 시공이 늘어나고 있는 추세이므로 향후 터널의 굴착은 장비의 발달과 기술의 진보에 힘입어 기계에 더 많이 의존하는 시공이 될 것으로 전망된다. 따라서 기술자들의 능력도 한층 고급화되어야 할 것이다.

1) TBM(Tunnel Boring Machine)에 의한 굴착

TBM에 의한 굴착은 여러개의 디스크가 장착된 커터헤드에 가해지는 추력(thrust force)과 회전력에 의해 암반을 파쇄하며 굴진하는 방법이다. TBM 장비는 기계설비 부분과 후속설비 부분으로 구분할 수 있으며 기계설비 부분은 커터와 커터헤드, 추진 및 클램핑 시스템으로 구성되어 있다. 커터는 동일한 중심의 원형궤적을 따라 회전하며 클램핑 시스템으로부터 전달되는 추력(굴착면에 수직으로 작용하는 힘)에 의해 발생되는 응력이 암반의 강도보다 크게 되도록 하여 암반을 파쇄시킨다. 커터헤드는 커터가 장착된 TBM 장비의 선단부를 지칭한다. 커터헤드 직후방에는 커터헤드를 전후진 시킬 수 있는 유압잭 챔버가 있으며 분쇄된 암편이 이 공간에 모아져 컨베어벨트를 통해 후속설비 부분으로 이송되어 배출된다. 유압 챔버 후방에는 TBM굴진을 가능케 하는 클램핑 시스템이 있다.

TBM은 1846년에 최초로 제작이 시도되었고 1851년에 비로소 현장에 직접 적용되었던 것으로 알려져 있으며 국내에는 1985년에 처음 도입된 것으로

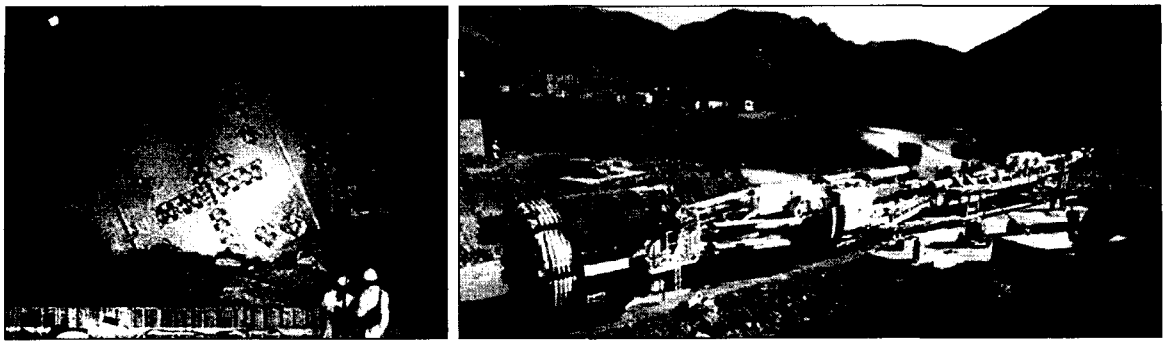


그림 1. TBM 장비의 탈출모습과 조립된 TBM전경

알려져 있다. 이 장비는 조기지보가 필요하지 않는 연암 이상의 암반에 사용되는 것이 효과적이어서 암반의 강도가 3,000kgf/cm²인 경우에도 적용이 가능하다. 그러나 암반의 경도(hardness)가 클 경우에는 커터의 마모가 심하여 굴진율이 저하되고 절리가 많은 암반구간에서는 TBM의 재밍(jamming) 현상 등이 발생하여 그 적용성이 크게 떨어진다. 따라서, TBM 장비를 적용하기 전에 현장의 지반조건, 굴착단면의 크기 연장 및 구배와 주변환경 등을 조사하여 TBM 적용시의 효율성을 검토하여야 한다. 또한, 시공연장중 조기지보가 요구되는 연약지반 구간이 길어 공기지연 및 TBM 매몰 등의 우려가 있는 현장에서는 가급적 TBM 적용을 지양하고 부득이 적용하여야 할 경우에는 지보용 세그먼트 라이닝의 설치가 가능한 쉴드형 TBM으로 기종변경이나 세그먼트 설치시기 등을 사전에 검토해 두어야 한다.

TBM에 의한 굴착은 굴착면에 여굴이 없고 발파굴착보다 진동이나 소음이 적으며 굴진속도도 매우 빠르다는 장점이 있지만 막장면 지반에 절리가 많고 구성지반의 특성이 상이할 경우는 TBM 굴진이 어렵고 선형이 이탈되는 경우가 종종 발생하는 단점이 있다. 또한 연약한 지반을 만나게 되면 TBM이 침하하기도 하며 클램핑 부분의 지지력이 확보되지 않아 굴진이 불가능하게 되는 경우도 있기 때문에 이러한 지반조건에서는 굴진중에 TBM을 장시간 정지하는 것을 피하는 것이 바람직하다. 특히, TBM은 단면형상에 크게 제한을 받기 때문에 요구되는 단면의 형상에 따라 적용상의 효율성을 검토하여야 한다.

2) 쉴드(shield)에 의한 굴착

쉴드에 의한 굴착은 지반의 강도가 작고 자립성이 적은 지반이나 자립성을 거의 기대할 수 없는 지반에 적용하는 굴착방법이다. 따라서 쉴드는 막장의 안정성확보가 가능하며, 안전하고 경제적인 시공을 이룰 수 있는 것이어야 한다. 쉴드의 형식은 다음 3가지 형식으로 크게 구분할 수 있으며 지반조건에 적합한 방법을 선정하여야 한다.

- 막장의 인력굴착이나 기계굴착이 가능한 전면개방형
- 블라인드식의 부분개방형
- 토압 또는 이수압을 이용하는 밀폐형

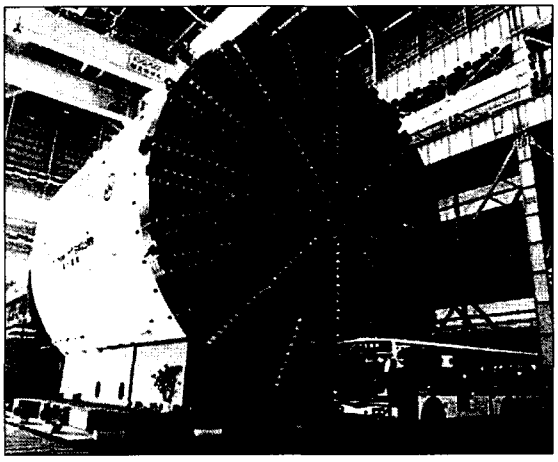


그림 2. 밀폐형 쉴드 굴착장비 전경

밀폐형 쉴드 굴진중에는 막장관찰이 불가능하므로 쉴드헤드의 회전력과 추력의 크기, 쉴드의 편향정도 등 쉴드 운전시 각종 계기에 나타나는 수치들을 분석하여 지반상태의 변화를 예측하고 이를 시공에 반영하여야 한다. 쉴드헤드가 전진된 직후 세그먼트를 설치하고 뒤채움을 실시하여야 쉴드굴착방법을 채택한 목적을 달성할 수 있으므로 철저한 사전 시공계획 수립이 요구된다.

특히, 쉴드는 연약한 지반에 적용되기 때문에 쉴드기 자체의 침하가 빈번히 발생되고 핵석 등 부분적으로 강도가 큰 지반을 조우하게 될 경우에는 시공성이 매우 저하되므로 지속적인 측량확인과 막장 전방지반의 변화추이를 분석하며 굴진하여야 한다. 즉, 철저한 선형관리가 요구된다.

3) 쉴드형 TBM(Shielded TBM)에 의한 굴착

굴착에 따른 침하를 적극적으로 억제하여야 하고 막장의 안정유지상 조기지보가 요구되는 연약한 지반에는 일반적으로 쉴드공법이 적용된다. 그러나 막장의 구성지반이 쉴드 굴착으로는 효율이 떨어지는 정도의 강도를 보유하고 있는 경우에는 TBM식의 굴착이 요구된다. 특히, 토피가 작은 풍화암 지반 등에서와 같이 지반은 연약하지만 굴착이 용이하지 않는 지반 등에서 쉴드의 기능과 TBM의 기능이 조합된 형태를 적용하는데, 즉 굴착은 TBM식 지보는 쉴드식의 형태를 갖는 굴착방법을 쉴드형 TBM 굴착방법이라 일컫는다.

### (3) 발파굴착

발파굴착은 암반을 천공하고 화약을 장전한 다음 나머지 천공한 부분을 모래 등으로 밀폐시키고 화약을 점화시켰을 때 발생된 순간적인 고온고압의 에너지를 이용하여 암반을 파쇄하는 굴착방법을 말한다. 이 굴착방법은 터널시공에 사용되고 있는 아주 일반적인 굴착방법이며 천공발파(drill and blast)에 의한 방법으로도 불리우고 있다.

발파방법은 화약, 뇌관, 천공장비와 천공기술 등의 발전과 더불어 효율도 많이 좋아졌으며 안전성과 경제성이 양호하고 무엇보다도 원하는 굴착단면을 쉽게 얻을 수 있다는 장점이 있기 때문에 터널굴착에 널리 적용되고 있다. 그러나, 발파는 굴착면 주변지반의 손상을 초래할 수 있을 뿐만 아니라 여굴도 비교적 크게 발생시킬 수 있으므로 경험있는 숙련된 기술자의 현장지도가 필요하다. 또한 발파는 소음과 진동을 수반하기 때문에 우리의 생활을 불편하게 하거나 건축물 등의 시설물에 손상을 초래하기도 한다. 따라서, 인구가 밀집해 있는 도심지에서의 발파작업은 아주 어려운 과제중의 하나이며, 주민들의 심리적인 측면만을 고려한다면 터널굴착 등의 지중 발파보다 개착굴착 등의 지표면 발파가 더 까다로운 작업이라 할 수 있다.

일반적으로 발파의 산물인 소음이나 진동의 크기는 주로 발파대상이 되는 암반의 특성, 사용되는 화약의 종류와 양, 발파기법 및 발파원으로 부터의 거리 등에 의해 결정되게 된다. 화약이 발명된 이래로 발파이론에 대한 부단한 연구가 수행되어 왔음에도 불구하고 어느 경우에나 통용되는 유일한 발파이론은 아직 개발되지 않았다. 그러나 오랜 경험에 의해 시설물 손상 방지를 위한 발파 규제안이 제안되어 적용되어 오고 있으며 이들에 대한 내용을 살펴보면 다음과 같다.

1) 발파진동과 손상기준

① 지상구조물에 대한 손상기준

1930년대 중반부터 1980년대 중반까지 약 50년 동안에 발파진동에 따른 손상기준이 여러 가지 형태로 제안되었다. 1930년대에는 발파에 의한 진동에너지가 진동주파수와 진폭의 제곱에 비례한다는 연구결과가 제시되었고 1940년대에는 미광무국(USBM)이 이 연구결과에 화약의 양과 지반특성 및 거리의 영향 등을 조합한 공식을 제안하였다. 그러나 이 공식을 적용함에 있어서는 예상되는 가장 적합한 주파수 예측과 상재하중에 따라 달라지는 지반인자 등의 예측이 필요하기 때문에 복잡한 발파 설계에는 적용

이 부적절한 것으로 판명되었다. 그 이후 구조물 손상기준으로 가속도 기준이 제안되기도 하였다.

1950년대에는 변위, 속도, 가속도에 근거한 손상기준이 제안되었는데 이 무렵에는 손상기준에 대한 많은 이견들이 다각적으로 제시되었으며 대체적으로 입자속도를 기준으로 한 손상기준이 최선의 손상기준이라는 관점에 의견의 일치가 이루어지자 이전의 손상기준을 입자속도 기준으로 전환하는 작업이 진행되었다.

그림 3은 1971년 미광무국에서 측정자료를 근거로 작성하여 발표한 자료로서 최대입자 속도가 5cm/sec일 경우에는 주거지의 구조물에 구조적인 손상을 초래할 확률이 낮음을 보여주고 있다. 그러나 최대입자속도가 5cm/sec를 초과하여 증가하게 될 경우는 손상확률도 증가되지만 진동주파수 500Hz 이하에 대해서 구조물손상 정도는 주파수의 영향을 거의 받지 않음을 보여주고 있다.

1970년대 중반에 접어들어 최대입자속도 손상기준은 지반과 지반에 건설되어 있는 구조물의 탁월 주파수(predominant frequencies)라는 아주 중요한 인자가 고려되어 있지 않다는 주장이 제기되었다(Medearis, 1976). 1980년대에 미광무국(USBM)과 미노천광국(DSM)에서는 주파수를 고려한 손상진동입자속도 규정을 제안하였다. 이들을 DIN 규정과 함께 나타내면 그림 4와 같다.

또한 미광무국에서 발표한 석탄광, 채석장 및 일반 건설현장 발파의 주파수 현황은 그림 5와 같다. 이 그림에 의하면 대부분의 건설현장의 주파수대는 15~60Hz임을 알 수 있다.

그림 4와 그림 5를 조합하여 보면 건설현장 주위의 노면 주거용 구조물에 손상을 주는 최대입자속도는 1.0cm/sec 이상인 경우에 발생함을 알 수 있다.

② 지하구조물에 대한 손상기준

지하구조물에 대한 진동 손상기준에 대한 연구는 지상구조물에 대한 연구에 비해 상대적으로 아주 적은 실정이다. 통상 이에 대한 손상기준도 지상구조물에 대한 기준처럼 경험적인 근거를 기준하고 있지만 일반적으로 지상구조물에 대한 허용기준치보다 크다. 국내에는 지하구조물에 대한 손상규제 허용진동치가 규정되어 있지 않으므로 스위스와 스웨덴의 규

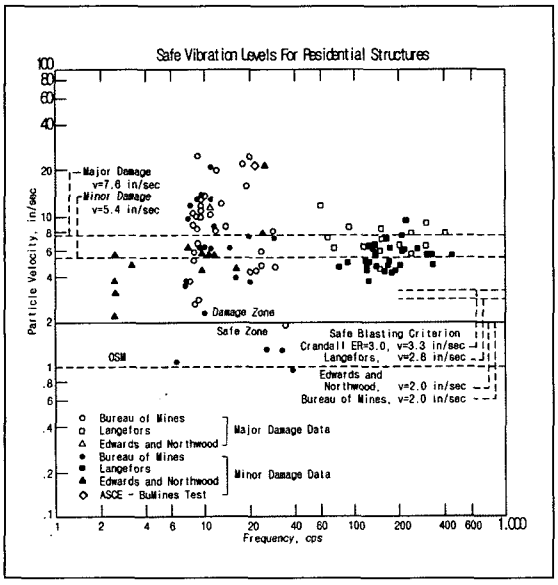



그림 3. 안전발파 기준과 입자속도 및 주파수관계
(USBM Bulletin 656, 1971)

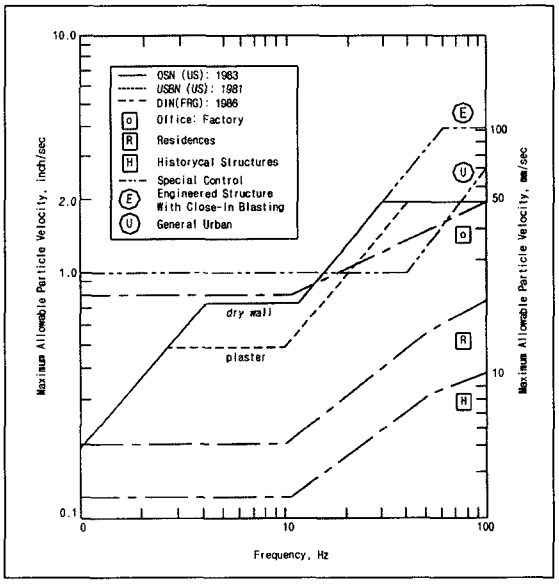



그림4. USBM/OSM, DIN-4150의 허용발파진동기준과 주파수와의 관계

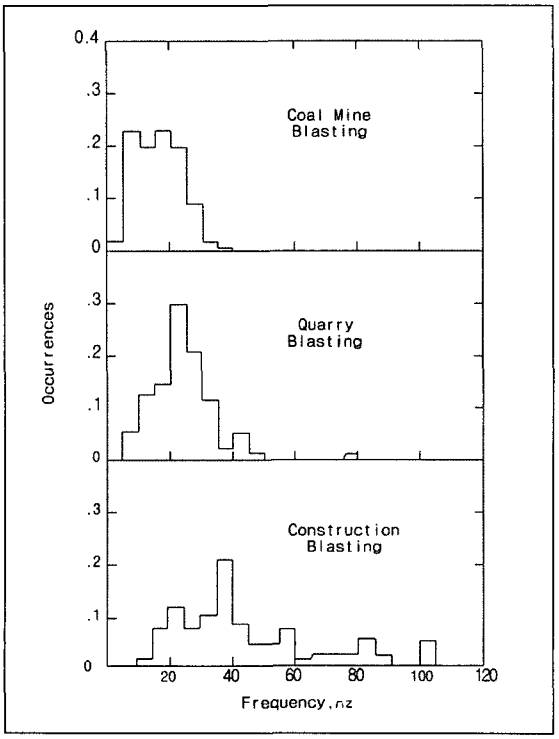



그림 5. 현장별 주도주파수의 Histogram
(USBM, RI8507, 1980)

정을 살펴보면 표 1. 및 표 2.와 같다. 표 1.에 정리된 스위스 규정(Norm SN 640312)은 구조물의 종류를 4등급으로 나누어 발파진동과 교통 및 기계진동에 대한 허용치를 주파수대역별로 구분하여 정하고 있다.

표 2 에 나타낸 스웨덴의 경우에는 견고한 암반내의 지하공동인 경우에 7~10cm/sec의 입자속도를 허용하고 있음을 알 수 있다. 스위스와 스웨덴의 기준에 의하면 지하시설물에 대한 기준이 지상구조물에 대한 기준보다는 큰 것을 알 수 있다. 이것은 견고한 지반이 터널구조물을 감싸주는 역할을 수행하고 있기 때문일 것으로 판단된다. 그러나 이 기준들에는 암반의 절리영향이나 풍화정도 지층의 구조적 특성 및 토피에 대한 명확한 규정이 없기 때문에 이 값들을 무분별하게 적용하여서는 안될 것이다.

③ 우리나라의 허용진동기준

우리나라의 허용진동기준으로서 최근 제정된 "터널설계기준(건설교통부, 1999년)"에 제시된 내용은 표 3.과 같다. 이 기준은 진동에 아주 민감한 특정시설의 경우는 해당시설이 요구하는 규제치를 기준하여 발파설계를 실시하도록 규정하고 있다.

2) 발파진동의 제어와 설계

화약이 폭발하면 굉음과 함께 지반진동이 발생하고 발생된 진동은 진동원으로부터 멀어지면서 급격히 감소하며 소멸된다. 진동의 크기는 일반적으로 입자의 속도로 표현하고(단위 : mm/sec 또는 cm/sec) $V=KW^{m}D^{-n}$ (cm/sec) 형태로 표시되는데 장약량(W)에 비례하고 발파원의 거리(D)에 반비례한다.

표 1. 허용진동에 대한 스위스의 규정

| 종별 | 구조물의 종류 | 발파진동 | | 교통/기계진동 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 주파수범위(Hz) | 입자속도(mm/s) | 주파수범위10-90Hz | 입자속도(mm/s) |
| 1종 | 강구조 및 철근콘크리트 구조물 | 10 - 60 | 30 | 10 - 30 | 12 |
| | : 공장건물/교량/철탑/지하터널 | 60 - 90 | 30 -40 | 30 - 60 | 12 -18 |
| 2종 | 기초벽과 콘크리트 슬래브가 있는 건물 : 지하터널 및 | 10 - 60 | 18 | 10 - 30 | 8 |
| | 지하공동중 석조재 라이닝 처리한 것 | 60 - 90 | 18 -25 | 10 - 30 | 8 - 12 |
| 3종 | 석조재 벽체와 함께 목재 천장을 갖고 있는 건물 | 10 - 60 | 12 | 10 - 30 | 5 |
| | | 60 - 90 | 12 - 18 | 30 - 60 | 5 - 8 |
| 4종 | 역사적 가치가 있는 문화재 및 기타 진동예민 구조물 | 10 - 60 | 8 | 10 - 30 | 3 |
| | | 60 - 90 | 8 - 12 | 30 - 60 | 3 -5 |

표 2. 견고한 암반내외에 축조된 구조물에 대한 일시진동허용기준(스웨덴)

| 구조물의 종류 | | 입자속도 (mm/sec) | 가속도 (mm/sec²) |
|---|---|---|---|
| 구조물자체손상 | 철근 콘크리트 방호 구조물(bunker) | 200 | - |
| | 고층아파트 및 현대식 철근 콘크리트 또는 철골 구조물 | 100 | - |
| | 견고한 암반내 지하공동(cavern)의 천단(roof) : span = 10-18m | 70~100 | - |
| | 서구식 연립주택(flats) : 벽돌 또는 이와 유사한 석조식 벽체로 축조된 것 | 70 | |
| | 중소형 콘크리트 건물 | 35 | |
| | 스웨덴 국립박물관 : 건물자체 | 25 | |
| | : 진동예민 전시물 | | 5 |

따라서 발파에 따른 진동치를 줄이는 일차적인 방법으로는 사용하는 장약량(주어진 시간대에 동시에 폭발하는 화약의 양= 지발당 장약량)을 줄이거나 발파지점과의 거리를 크게 하면 된다. 이러한 조건 등을 조화시켜 주어진 허용규제치 안에서 발파패턴을 정하는 것이 발파설계이다.

발파설계시 고려사항은 다음과 같다.

① 굴착 단면의 크기 및 형상
② 심발형식, 심발공, 발파공 및 주변공의 직경, 배치, 각도 및 천공깊이
③ 화약의 종류와 장약량
④ 뇌관의 형식

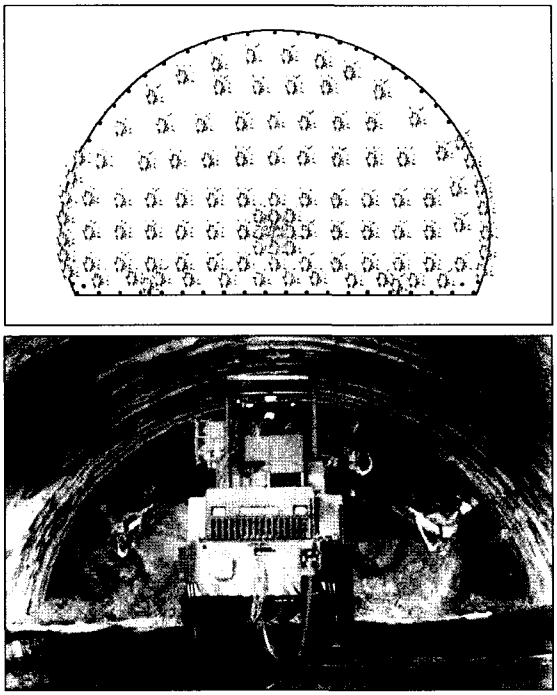


그림 6. 발파패턴(예)와 천공전경

⑤ 발파순서
⑥ 시험발파 및 실제발파계획 조정

발파진동치를 줄이는 이차적인 방법으로는 진동전달 매체인 지반에 진동전파를 차단하는 방해물을 설치하는 것으로서 전파경로에 주로 빈공(무장약공)이나 저밀도층을 설치한다. 발파의 효율을 증대시키기 위한 자유면을 형성하기 위해 페럴렐컷, 경사컷 등의 심빼기 방법을 적용하게 된다. 특히, 절리가 발달한

표 3. 구조물 손상기준 발파진동허용치(터널설계기준, 건설교통부, 1999년)

| 구 분 | 진동예민 구조물 | 조적식(벽돌,석재 등) 벽체와 목재로된 천정을 가진 구조물 | 지하기초와 콘크리트 슬래브를 갖는 조적식 건물 | 철근 콘크리트 골조 및 슬래브를 갖는 중소형 건축물 | 철근 콘크리트, 철근골조 및 슬래브를 갖는 대형 건축물 |
|---|---|---|---|---|---|
| | 문화재 등 | 재래가옥,저층 일반가옥 등 | 저층 양옥, 연립주택 등 | 중, 저층 아파트, 중소상가 및 공장 | 내진구조물, 고층아파트, 대형건물 등 |
| 허용입자속도 (㎝/sec) | 0.3 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 5.0 |

지역에서는 절리의 발달양상을 고려하여야 하고 초기응력상태가 발파의 효율에 미치는 영향도 감안하면 효과적인 발파를 실시할 수 있다. 또한, 발파굴착에는 위험요인이 상존하고 있기 때문에 안전관리에 철저를 기하여야 한다.

#### (4) TBM-발파병용(Bore-Blast Technique)방법에 의한 굴착

발파공법에서 큰 진동을 야기시키는 심빼기를 배제시킴으로써 진동을 감소시키고 큰 자유면으로 인한 발파효율을 증대시킬 수 있다는 장점과 굴진속도가 빠른 TBM의 장점을 조합한 굴착방법으로서 TBM으로 소구경 선진 터널(pilot터널)을 굴착하고 발파로 소요의 단면을 형성하는 굴착방법이다. 이 방법은 국내에서 적용되는 전력구 터널이나 통신구 터널을 제외한 대단면을 TBM을 적용하여 굴착하는 경우에 빈번하게 적용하는 굴착방법이다.

이 방법은 TBM이 보유하고 있는 단면형상의 제약을 발파에 의해 보완함으로써 최종단면의 크기와 형상에 제약을 받지 않는 방법이며 세부의 장점을 기술하면 다음과 같다.

- 선진 TBM 터널시공을 통해 지반조건을 미리 파악할 수 있기 때문에 공사중 위험 발생을 줄일 수 있다.
- 각종 계측이나 현장시험을 사전에 시행할 수 있어서 본 터널 시공전에 설계보완이나 변경이 가능하므로 경제적이고 합리적인 지보시스템을 적용할 수 있다.
- 지하수 유입이 많은 지역에서는 TBM터널을 활용하여 배수함으로써 지하수위를 저하시킬 수 있어 시공성과 안정성을 재고할 수 있다.
- TBM 터널을 활용하여 환기 또는 버럭처리를 수행할 수 있어 양호한 공사환경을 제공할 수 있다.
- 연약대 또는 파쇄대 등에는 TBM 터널을 통해 사전에 보강할 수 있다.
- 확대 발파시에는 장공발파가 가능하여 굴진속도를 향상시킬 수 있다.

그러나 이 방법의 단점으로는 발파굴착과 기계굴착이 병용됨으로써 공사가 복잡하게 되고 부대설비가 많아져 체계적인 시공순서 수립이 필요하다. 또한 버럭처리상 이중버럭처리 시스템이 도입되어야 하고 TBM 연약지반을 조우하게 될 경우에는 TBM 시공상의 문제를 유발하여 오히려 전 터널과정을 어렵게 하는 경우도 발생할 수 있다.

## 3. 터널 굴착공법

제한된 지반조사 결과로부터 추정된 지반상태는 실제 지반과는 차이를 보이게 되는 경우가 많으므로 실제 시공시 현장여건에 대응하여 어떻게 변경하고 조정하며 굴착해 나아갈 것인가가 설계 및 시공단계에서 고려해야 할 매우 중요한 요소이다. 국내에서는 터널 단면의 횡방향 굴착공법은 비교적 상세하나 종방향의 굴착공법이 너무 개략적이므로 종방향에 대한 굴착순서 즉, 어떠한 형태의 지보를 어떻게 설치해 나아갈 것인가를 명확히 할 필요가 있다.

굴착공법 결정시에는 막장의 자립성, 원지반의 지

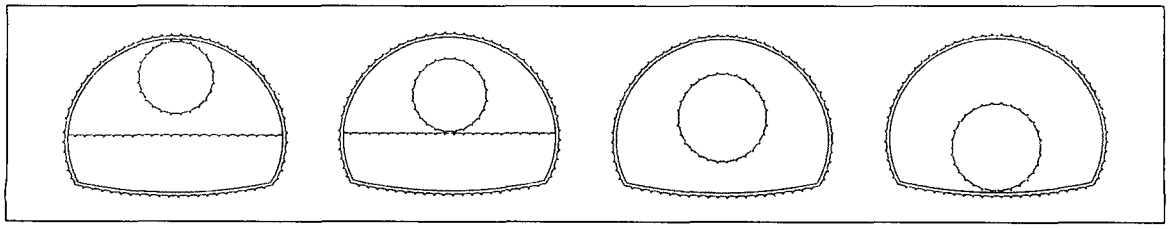


그림 7. TBM-발파병용공법 적용(예)

보능력, 지표면 침하의 허용값 등을 충분히 조사한 후에 시공성과 경제성을 고려하여야 하며 현장여건 변화에 대한 대처방안을 상세히 제시하여야 한다

## 3.1 터널 굴착공법의 종류 및 시공순서

터널의 굴착공법은 일반적으로 전단면굴착, 분할굴착이 있으며 분할굴착은 수평분할굴착, 연직분할굴착 및 선진도갱공법으로 구분된다. 수평분할굴착은 통상 벤치길이 및 수에 따라 롱벤치, 쇼트벤치, 미니벤치, 다단벤치 등으로 구분하여 벤치길이 30m 이상인 경우를 롱벤치, 30m미만으로부터 터널직경이상인 경우를 쇼트벤치, 터널직경 미만인 경우를 미니벤치로 구분한다. 다단벤치는 벤치의 수가 3개이상인 수평분할굴착을 말하며 벤치길이는 일반적으로 터널직경이하를 말한다. 선진도갱 굴착공법은 도갱의 수에 따라 1도갱 혹은 2도갱 방법으로 분류한다. 최근에 국외의 연약지반 터널시공시에는 시공장비의 발달로 상·하반 동시 굴착이 가능하고 공기단축이 가능한 미니벤치 커트 공법이 종종 적용되고 있다.

굴착공법은 지반조건과 굴착단면의 크기와의 상관관계에 의하여 결정할 수 있으며 현재까지의 시공실

표 4. 터널 굴착공법의 분류

| 굴착공법 | | | 정 의 | 비 고 |
|---|---|---|---|---|
| 전단면 굴착 | | | 전단면을 1회에 굴착 | |
| 분할굴착 | 수평분할 굴착 | 롱벤치 | 벤치길이 : 30m 이상 | |
| | | 쇼트벤치 | 벤치길이 : 1D~30m | D: 터널의 직경 |
| | | 미니벤치 | 벤치길이 : 1D 미만 | D: 터널의 직경 |
| | | 다단벤치 | 벤치 수 : 3개 이상 | |
| | 연직분할굴착 | | 연직방향으로 분할굴착 | |
| | 선진도갱굴착 | | 단면의 일부분을 먼저 굴착 | 1도갱, 2도갱 |

적에 기초한 굴착공법의 적용 사례는 표 5.와 같다.

### (1) 전단면 굴착

전단면굴착은 단면전체를 한번에 굴착하는 공법으로서 지반의 자립성과 지보능력이 충분한 경우에 적용할 수 있으며, 주로 발파굴착이 가능한 양호한 지

표 5. 굴착공법 적용범위(예)

| 단면크기 / 지반조건 | 소단면 | 중단면 | 대단면 | 특수대단면 |
|---|---|---|---|---|
| 풍화토 | • 전단면 굴착<br>• 쇼트벤치 커트<br>• 링커트+쇼트벤치 커트 | • 링커트+쇼트벤치 커트<br>• 쇼트벤치커트+ 가인버트 | • 링커트+쇼트벤치 커트<br>• 롱벤치커트+ 가인버트 | • 선진도갱굴착<br>• 다단벤치커트+가인버트 |
| 풍화암 | • 전단면 굴착 | • 쇼트벤치 커트<br>• 롱벤치커트+ 가인버트 | • 쇼트벤치 커트<br>• 롱벤치커트+ 가인버트 | • 선진도갱굴착<br>• 다단벤치커트 |
| 연 암 | • 전단면 굴착 | • 롱벤치커트<br>• 전단면 굴착 | • 쇼트벤치 커트 + 롱벤치커트 | • 쇼트벤치 커트<br>• 다단벤치커트<br>• 롱벤치커트 |
| 경 암 | • 전단면 굴착 | • 전단면 굴착 | • 전단면 굴착 | • 롱벤치커트<br>• 다단벤치커트<br>• 전단면 굴착 |

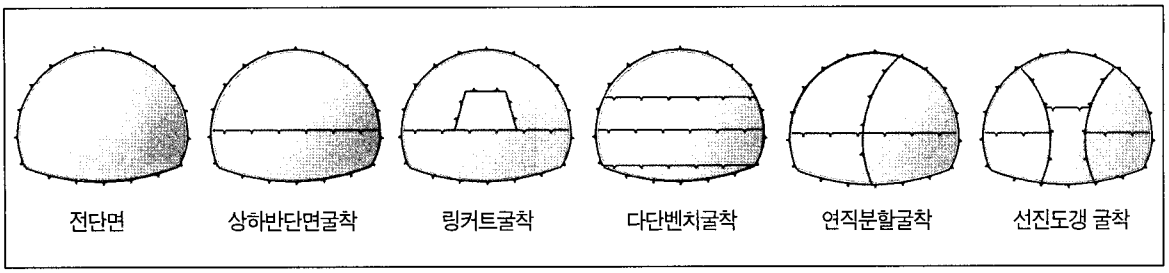



그림 8. 횡방향 굴착공법의 개요

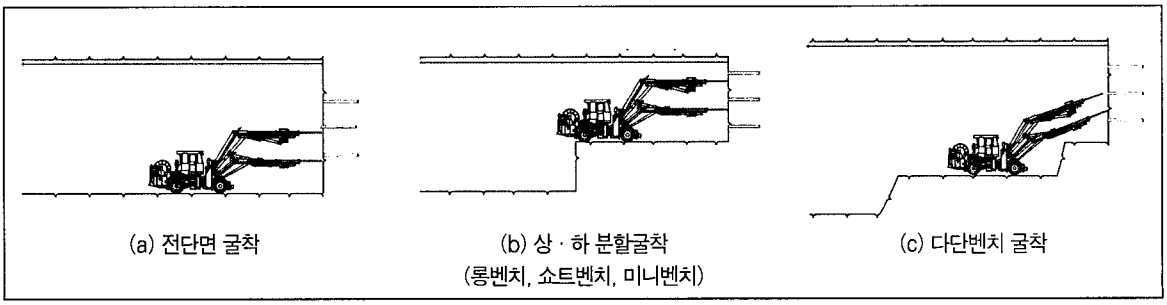



그림 9. 종방향 굴착공법의 개요

반의 중소단면의 터널에서 적용할 수 있다. 막장 굴착공정이 단일하고 작업이 단순하므로 시공속도가 빠르지만 지반 변화에 따라 공법을 변경하여야 할 경우가 많다. 특히, 대단면인 경우에는 1차지보 설치 작업효율이 떨어지고 큰 작업대가 요구된다.

### (2) 수평분할굴착

수평분할굴착은 주로 지반상태가 양호하고 굴착단면이 큰 경우에, 시공성을 향상시키기 위하여 적용하거나 지반상태가 다소 불량한 경우에 막장의 자립성을 높이기 위하여 적용한다.

① 롱벤치 커트 공법 : 벤치길이가 30m 이상인 경우이며 비교적 안정된 지반조건의 터널굴착에 적용한다. 상 · 하반 병행작업이 가능하며 일반적인 장비의 운용과 작업사이클 조정이 용이하다.

② 쇼트벤치 커트 공법 : 벤치길이가 보통 10~30m 정도이며 지반조건이 나쁜 경우에는 막장면에 지지코아를 남겨두고 굴착한다. 하반의 지반조건이 비교적 안정된 경우에 적용 가능하며 중단면 이상의 터널굴착에 일반적으로 적용한다. 지반변화에 대처하기 쉬우며 일반적으로 장비운용이 용이하지만 상 · 하반 분할굴착에 따른 작업사이클 조정이 어려운 단점이 있다.

③ 다단벤치 커트 공법 : 대단면 터널의 굴착이나 막장 지반의 자립이 극히 불량하여 조기에 단면폐합이 요구되는 경우에 적용한다. 주로 지반의 자립시간이 짧은 경우에 적용한다.

④ 가인버트 공법 : 굴착단면이 중단면 이상으로 막장 지반의 자립시간이 극히 짧거나 지반의 변형을 최소화하고 시공성을 높이기 위해 벤치 길이를 길게 할 필요가 있을 경우에 적용한다. 가인버트 공법을 적용하는 경우는 상반을 선시공한 후 하반을 시공할 수 있으며 시공속도가 느리고 작업사이클 조정이 어려우며 경제성이 떨어지는 단점이 있다.

⑤ 링커트 공법 : 막장면에 지지코아(supporting core)를 남기고 굴착하는 공법으로 막장면의 안

정이 위협되는 지반조건에 적용하며 지반조건이 매우 나쁜 경우에는 지지코아 주위를 분할굴착 한다. 링커트공법을 적용함으로서 막장면의 안정성 확보가 용이하며 연약한 지반조건에서 대단면 굴착이 가능하고 지반변화에 대처하기 쉽지만 작업공간 확보에 제한적이며 1차지보의 설치가 어렵고 작업 공종이 많아서 작업사이클 조정이 어려운 단점이 있다.

### (3) 연직분할굴착

연직분할굴착 공법은 주로 지반상태가 불량하고 단면적이 큰 경우에 적용할 수 있으며 안전성 확보를 위해 임시지보재를 설치하기도 한다. 연직분할굴착의 대표적인 공법은 중벽분할공법이다. 중벽분할공법은 하반의 지반조건은 양호하나 상반의 지반조건이 불량하여 지반의 침하량을 억제할 필요가 있는 경우에 적용한다. 막장면간의 이격거리를 보통 터널직경의 1~2배를 유지하므로써 막장의 안정성을 유지하고 침하량을 어느정도 억제할 수 있으나 시공 속도가 느리며 작업 공간의 제약으로 시공성이 다소 떨어지는 단점이 있다.

### (4) 선진도갱 굴착

선진도갱 굴착공법은 주로 굴착단면적이 크고 터널상부에 대규모 지장물이 있는 경우나 하저통과 등 특수한 조건하에서 침하를 최대한 억제하고 안정을 도모할 필요가 있는 경우에 막장 전방 지반 및 지하수상태를 확인하면서 굴착할 수 있는 공법이다. 지반조건이 불량한 중단면 터널에 적용하며 1도갱 공법은 선진도갱의 막장면을 본 터널 막장면으로부터 터널직경의 1~2배 이상의 이격거리를 두어야 하며 보다 큰 대단면 터널에 적용하는 2도갱 공법은 양 측갱의 막장면간의 이격거리는 적어도 터널 직경의 1~2배 이상을 유지하여야 한다. 필요에 따라서 조기에 링폐합을 실시하여야 한다. 대단면 터널 굴착시 침하량을 최소화 할 수 있으며 암피복 두께가 얇은 지역의 건물하부 통과도 가능 하지만 작업공간의 제약으로 장비운용이 어렵고 공사비가 비싸고 시공속도가 느리다.

## 4. 터널 지보재

### 4.1 터널 지보재 개요

지보재는 터널을 안정화시키는 기능을 수행하기 때문에 터널 시공에 있어서 지보재의 선택은 대단히 중요한 사항이다. 또한, 지보재는 터널의 형상, 초기응력, 지반의 등급, 터널의 용도와 규모, 시간적 요소 등에 따라 결정된다. 터널 지보재는 강지보재, 록볼트, 숏크리트 등으로 구성되어 있는 주지보재와 굴착의 용이성 및 안정성 증진을 목적으로 주지보재에 추가하여 시공하는 훠폴링, 막장면 록볼트 등의 보조지보재로 구분할 수 있다. 지보재의 역할은 그 종류에 따라 다소 차이가 있지만 주요기능은 터널의 주요지보재인 지반으로 하여금 역학적인 기능을 발휘할 수 있도록 하는 것이다. 따라서 지보재는 터널주변의 지반거동 특성에 부합되도록 설계하여야 하며 시공중이나 완공후에도 터널의 안정을 유지할 수 있도록 하여야 한다. 특히, 굴착면 주변지반의 지보능력을 활용하기 위해서는 지반특성에 적합한 지보재를 적절한 시기에 합리적으로 설치하여야 하기 때문에 지반조건에 따른 지보재 선정기준을 수립해 둠으로써 굴착시 해당지반에 적합한 지보재를 선정할 수 있도록 설계하는 것이 바람직하다. 이것은 설계시의 지보재 선정이 최종지보재가 아닐 수 있음을 의미하고 실제 굴착시의 지반조건은 설계 당시의 지반조건과 다르게 될 수 있음을 의미하는 것이다.

### 4.2 지반의 거동특성과 지보재의 역할

지반의 공학적 능력을 평가함에 있어서는 두가지의 방법이 있다. 첫번째는 터널 굴착시 자체의 지보능력이 없기 때문에 굴착에 따른 하중을 지보재가 모두 지지하여야 하는 하중개념의 지반이며 두번째는

굴착된 터널공동을 스스로 지지할 수 있는 능력을 보유하고 있는 지반이다. 전자의 경우에는 작용하는 모든 하중을 터널의 지보재가 충분한 안전율을 가지고 지탱하여야 하므로 강한 지보부재가 필요하다. 토피가 적은 경우에는 전 토피하중을 지보재가 지지하며 토피가 큰 경우는 굴착공동 형상에 따른 이완하중을 지보재가 지지한다. 지반이 지보능력을 가지고 있다고 고려하는 경우에는 지반의 자체 지보능력을 최대로 활용하여야 하며 다소 강성이 약한 부재로 터널설계가 가능하다.

탄성 지반내에 터널을 굴착하면 굴착면 주변의 지반은 원래의 3축응력상태에서 2축응력상태의 평면변형율 조건이 된다. 이때 소멸되는 터널반경방향의 지중응력 때문에 굴착면의 접선응력은 크게 증가하고 굴착면의 변위가 굴착공동 내측으로 발생한다(그림 10.참조). 이때, 굴착으로 인해 증가된 접선응력이 지반의 강도보다 적으면 터널 주변 지반은 적은 변위와 함께 조기에 안정되나 발생되는 접선응력이 지반의 고유강도보다 크면 큰 변위가 발생되고 지보재로 지반을 지지하지 않으면 터널은 결국 파괴에 이르게 된다.

굴착과 동시에 초기응력과 동일한 응력을 굴착면에 작용시키면 반경방향의 변위는 발생하지 않으며 지보재에 작용하는 하중은 초기응력과 동일 (Ao)하다. 굴착면의 변위를 허용하면 변위가 증가하면서 반경 방향으로 작용하는 하중은 급격하게 감소하지만 어느 한계변위를 넘으면(그림 11의 곡선 b' & c 경우) 지반은 이완되고 반경 방향의 응력은 오히려 증가한다. 따라서, 굴착면의 변위가 한계치를 넘지 않도록 지반조건에 따라 적절히 조치하여 지보재에 가해지는 응력을 최소화($(\sigma_r)_{min}$) 하고 지반자체의 지보능력을 활용하여 최소 지지 지보재를 사용하여 터널의 안정을 도모하는 것이 중요하다.

지반이 자체의 지보능력이 없다고 판단 될 경우에는 보통 지하구조물 설계와 동일하게 지반하중을 모두 지탱할 수 있는 지보재를 사용하여야 한다.

이처럼 지보가 강하면(직선a') 비경제적이고 너무 약하면(곡선 b') 위험을 초래하게 되므로 적절한 시기에 최적 강성의 지보를 설치하는 것이 이상적(곡선 b)임을 알 수 있다. 따라서, 변위를 허용하는 가축성 지보재를 사용하여 변위를 허용하되 지반이 자체의 지보능력을 상실하지 않는 범위내에서 지보력과 지보재에 작용하는 지반응력이 평형상태(지보력 A)가 되도록 하는 것이 NATM을 적용한 터널의 합리적인 설계개념이다.

이러한 개념에 기초하는 터널은 지반자체가 주지보재이며 숏크리트, 록볼트, 강지보재 등은 지반이 주지보재가 되도록 보조해 주는 수단이다. 따라서 터널 시공시에는 계측을 통하여 지보의 효과와 지반의 거동상태 등을 관측하여 시공의 안전성을 도모하여

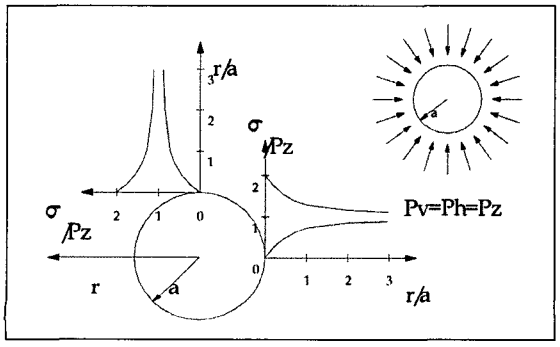


그림 10. 터널주변 응력상태

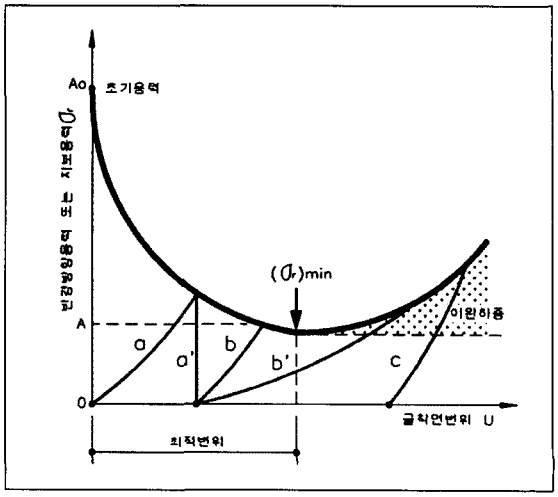


그림 11. 지보재에 작용하는 응력과 굴착면의 변위관계

야 하며 지반 자체도 지보재이므로 시공시 및 시공완료 후에도 터널 주변지반을 보호해 주어야 할 필요가 있다.

## 4.3 터널 지보재 종류 및 특성

### (1) 숏크리트

숏크리트는 지반자체를 터널의 지보재로 활용하는 NATM 터널공법에서 가장 중요한 지보부재이며 다음과 같은 주요기능을 발휘한다.

① 지반과의 부착 및 자체전단 저항효과로 숏크리트에 작용하는 외력을 지반에 분산시키고, 터널 주변의 붕락하기 쉬운 암괴를 지지하며, 굴착면 가까이에 지반아치 형성
② 휨압축응력 또는 축력에 의한 저항효과로 주변 원지반에 내압을 가함으로써 국부적인 응력집중을 방지하고 굴착면 주변지반을 3축응력상태로 유지시켜 지반강도 저하를 방지
③ 강지보재 또는 록볼트에 지반압을 전달
④ 굴착면을 피복하여 풍화방지, 지수, 세립자 유출 등을 방지

숏크리트는 시공방법에 따라 건식과 습식으로 구분되고, 사용되는 보강재료에 따라 철망보강 숏크리트와 강섬유보강 숏크리트로 구분할 수 있다.

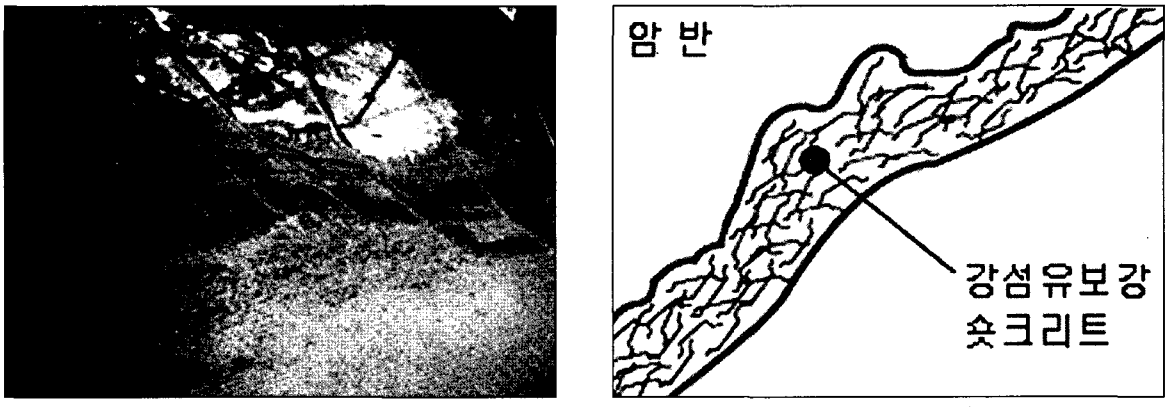
숏크리트는 재료적인 측면에서 다음과 같은 특성을 보유하여야 한다.

① 소요 강도 확보 및 조기에 필요한 강도 발휘
② 지반과 충분한 부착성 확보
③ 소요 내구성 확보로 터널의 수명기간 동안 소요의 기능을 발휘
④ 반발률(rebound) 및 분진발생량 최소화
⑤ 평활한 굴착면을 확보하여 방수 및 배수시공이 용이성 확보

숏크리트는 가능한한 조기에 타설하여 지반과 일체가 되도록 시공순서를 준수하여 시공하여야 한다. 용출수가 예상되는 토사지반 혹은 충적지반에 대해서는 시공법을 설계단계에서 충분히 고려하여야 한다. 또한, 분할굴착시 취약부로 대두되는 연결부의 시공방안을 제시하여야 하며 강지보재와 연합하여 일체로 거동하도록 설계하고 시공되어야 한다. 특히, 철저한 품질관리를 통하여 양질의 숏크리트가 시공되도록 노력하여야 한다.

### (2) 강지보재

강지보재는 숏크리트가 경화할 때까지 즉시 지보효과를 발휘하며 숏크리트가 경화한 후에는 숏크리트와 일체화된 합성구조체 기능을 하는 지보재이다. 따라서 강지보재는 이음부가 적고 예상되는 외력 및 기타 제조건에 대하여 유리한 형상을 가져야 하며 시공성이 양호한 것이어야 한다. 특히, 연약한 지반에




(a) 철망보강 숏크리트 (b) 강섬유보강 숏크리트

그림 12. 보강재료에 따른 숏크리트

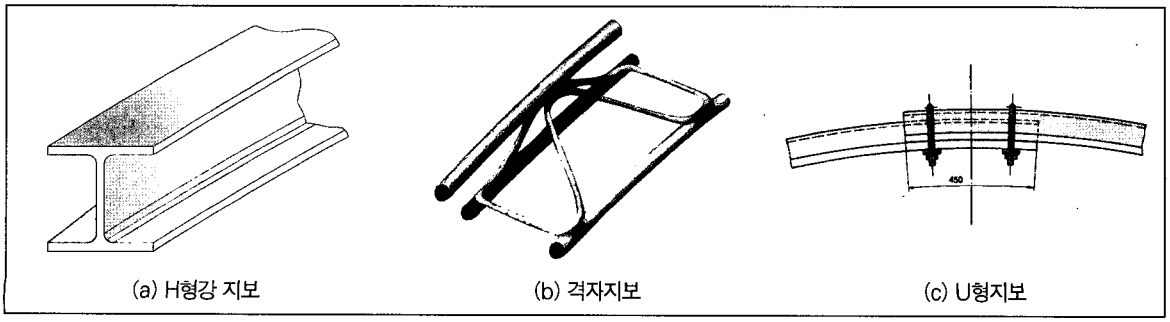
표 6. 숏크리트 종류와 특징

| 구 분 | 습식 숏크리트 | 건식 숏크리트 |
|---|---|---|
| 공 법<br>개 요 | · 고정식 B/P에서 조 세골재, 시멘트 및 물을 계량하여 혼합<br>· 뿜어붙이기 작업시 노즐에서 급결재를 재료에 혼합 | · 믹서에서 조 세골재 시멘트 및 급결재로 미리 혼합<br>· 뿜어붙이기 작업시 노즐에서 물을 재료에 혼합 |
| 소요인력 | 6인 | 11인 |
| 장비조합 | B/P+믹서트럭+압축기+콘크리트펌프+분사로보트 | 콘크리트믹서+공기압축기+알리바(Aliva) |
| 특 징 | · 분진이 적어서 작업환경 양호<br>· 시거확보로 시공성 양호<br>· 기계화 시공으로 안정성 증가와 품질 관리 확실<br>· 반발율이 적어서 (10~15%) 경제성 우수 | · 시공경험이 풍부하고 장비 보유 대수 다수<br>· 분진이 많아서 작업환경 불량<br>· 인력시공으로 품질관리가 어렵고 품질 불균일<br>· 반발율이 많아서(35-45%) 비경제적 |

표 7. 보강재료에 따른 숏크리트 분류와 특징

| 구 분 | 강섬유보강 숏크리트 | 철망보강 숏크리트 |
|---|---|---|
| 안정성 | · 굴착 즉시 시공이 가능하므로 보강효과 증진<br>· 진동, 충격에 강하며 높은 인장력 발휘<br>· 굴착요철면에 균일한 두께로 시공 가능하므로 보강효과 증진 | · 인장강도가 낮아 암반 변형시 균열 발생<br>· 숏크리트 타설시 철망에 진동이 일어나 부착력 감소 및 층분리현상 발생<br>· 여굴이 많을 경우 보강효과 감소 |
| 시공성 | · 강섬유 혼합 불량시 분사가 어려움<br>· 기계화 시공으로 시공이 간편하고 공기단축 가능<br>· 국내 적용사례가 증가하여 시공경험이 다수 | · 철망 설치 시간 소요되고 공종이 많음<br>· 시공경험 풍부<br>· 숏크리트 리바운드율 증가 |
| 경제성 | · 자재비가 고가이나 인력감소, 공기단축 등의 효과가 있음 | · 자재비는 저렴하나 철망설치에 따른 공종으로 공기 지연 |
| 적용성 | · 대규모 공사 및 습식으로 시공시 유리 | · 소규모 공사 및 건식으로 시공시 유리 |

서는 휘폴링 등 보조공법 적용시 지지대 역할을 하며 터널내공 및 굴착간격 확보와 같은 부가적인 역할도 동시에 수행한다. 지반이 양호한 경우에는 강지보재를 생략할 수 있다. 강지보재 설치시에는 숏크리트, 록볼트 등의 다른 주지보재와 일체가 되도록 하여 소요의 지보기능을 발휘하도록 규격과 배치간격을 정하여야 한다. 강지보재도 시공순서 및 시공성을 고려하여 제거와 추가이음이 요구되는 곳에는 시공이 용이하도록 설계에 이를 반영하여야 한다. 강지보재의 주요 역할을 정리하면 다음과 같다.




(a) H형강 지보 (b) 격자지보 (c) U형지보

그림 13. 강지보재의 종류와 형상

표 8. 국내에서 주로 적용되는 강지보재 특성비교

| | |
|---|---|
| 격자지보재 | · 경량으로 운반이 쉽고, 설치가 용이하며, 시공기간 및 인력을 경감<br>· 격자지보는 특수강으로 제작되어 있어 강도에 비하여 유연성이 크므로 기하구조에 순응성이 크며 여굴 등 불규칙한 터널 형상에 대처 용이<br>· 훠폴링 등의 설치시 설치각도 조정이 용이하며 다른 보조공법과의 병용시 유리<br>· 숏크리트와의 부착이 용이하므로 긴밀한 합성구조체로 방수성이 양호<br>· 숏크리트 타설시 리바운드량을 줄일 수 있으며, 접속시공과 품질관리가 용이 |
| H형강지보재 | · 중량이 비교적 커서 시공 및 설치이동이 용이치 않음<br>· 평평한 판형 구조이므로 숏크리트 타설시 배면공극 발생<br>· 훠폴링 등 보조공법 적용시 강지보재의 간섭으로 설치각도를 줄이기 어려움<br>· 초기강성발현이 좋아 연약한 지반에 효과적 |

① 숏크리트 타설 후 숏크리트 또는 록볼트의 지보기능이 발휘되기까지 경화시까지 임시 보강재 기능
② 무지보 지반의 직접보강 및 숏크리트 라이닝 하중분산 작용
③ 훠폴링, 파이프 루프 시공시 지지대 역할
④ 터널 내공확인, 발파 천공의 지표(guide) 역할
⑤ 지표침하 등 지반변위 억제

강지보재의 종류로는 H-형강, U-형강 및 격자지보재(lattice girder) 등이 있으며 일반구간에는 시공성이 양호하며, 경제적인 격자지보재를 적용하며 갱구부, 편토압구간, 단층대 등에는 초기강성이 큰 H-형강 지보재를 적용 하는 것이 바람직하다. 외국에서는 고토피 연약대 구간에 팽윤압 작용이 예상되는 경우 가축성 지보재인 U-형 지보재를 적용하고 있다.

강지보재의 단면은 강지보재의 설치후에도 숏크리트의 타설이 용이하고, 숏크리트와 일체화되기 쉬운 형상을 가진 것이어야 하며 강지보재의 치수는 작용하중 외에 숏크리트의 두께, 강지보재의 최소덮개, 굴착공법, 굴착방법 등을 고려하여 결정하여야 한다.

### (3) 록볼트

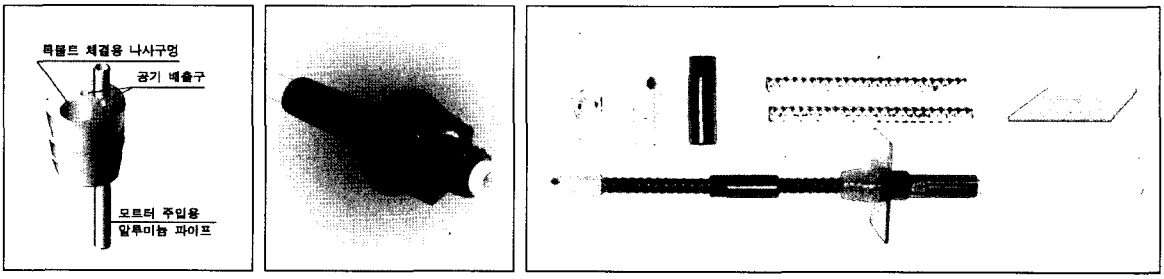
록볼트 설계시에는 록볼트 자체의 항복하중과 정착방법을 면밀히 검토하여야 하며 지반상태, 불연속면의 분포, 발생용출수 등을 고려하여 다음에 언급한 효과가 사용 목적에 적합하게 발휘되어야 한다.

① 봉합작용 : 굴착에 의해 이완된 지반을 견고한 지반에 고정하여 낙반방지
② 보형성작용 : 터널 주변의 층을 이루고 있는 지반의 절리면 사이를 조여줌으로써 절리면에서의 전단력의 전달을 가능하게 하여 합성보로서 거동
③ 내압작용 : 록볼트의 인장력과 동등한 힘이 내압으로 터널 벽면에 작용하면 2축응력상태에 있던 터널 주변 지반이 3축응력상태로 되는 효과가 있으며 이것은 3축 시험시 구속력(측압)의 증대와 같은 의미를 가지며 지반의 강도 혹은 내하력 저하를 억제하는 작용
④ 아치형성 작용 : 시스템 록볼트의 내압효과로 인해 굴착면 주변의 지반이 내공측으로 일정하게 변형하는 것에 의해 내하력이 큰 그랜드아치 형성
⑤ 지반보강 작용 : 지반의 전단 저항능력이 증대하여 지반의 내하력을 증대시키고 지반의 항복 후에도 잔류강도 향상 도모

록볼트의 선정은 주로 '어떤 정착방법을 적용할 것인가' 의 문제이며 록볼트의 정착방법으로는 표 9.와 같이 선단정착형, 전면접착형, 혼합형 등이 있으며 사용목적, 지반조건, 시공성 등을 고려하여 정착방법을 선정하여야 한다. 터널 시공에서는 특수한 경우를

표 9. 록볼트의 정착방법과 특징

| 형식 | 정착방법 | 특징 | 적용범위 |
|---|---|---|---|
| 선단 정착형 | 기계적으로 정착하는 쐐기형 및 확장형과 캡슐에 의한 접착형이 있으며 록볼트의 선단 정착후 너트로 조임 | 확장형 및 캡슐정착형은 봉합효과를 목적으로 하는 경우에 사용 | 절리 또는 균열발달이 비교적 적은 경암 또는 보통암 층에서 일부 사용 |
| 전면 접착형 | 정착재료로 수지, 시멘트 모르터 등을 사용하거나 기계적인 방법으로 록볼트 전장을 원지반에 정착 | 록볼트 전장에서 원지반을 구속하며 원지반의 강도, 절리, 균열의 상태, 용출수의 상태 및 막장의 자립성 등에 따라 종류가 다양 | 경암, 보통암, 연암, 토사 원지반에서 팽창성 원지반까지 적용범위가 넓음 |
| 혼합형 | 선단을 기계적으로 정착후 시멘트 밀크를 주입하는 방법과 전면접착형의 정착재료 충전시 선단에 급결용의 캡슐을 사용하는 방법 등이 있음 | 선단접착형과 전면접착형을 혼합<br>① 시공 공정이 2단계<br>② 시공에 따라서는 선단의 급결성이 얻어지지 않는 경우도 있음 | ① 선단을 기계적으로 정착하는 록볼트는 많이 사용되고 있지 않음<br>② 팽창성 원지반 또는 프리스트레스를 도입하는 경우에 유효 |
| 선단 정착형 : 웨지형, 익스팬션형, 레진형<br>전면 접착형 : 레진형, 충전형(시멘트 모르터), 주입형(시멘트 밀크 또는 모르터)<br>기 타 : 혼합형, 자천공형, 마찰형 등 | | | |




(a) 주입형 록볼트 (b) GRP형 록볼트 (c) 자천공형 록볼트

그림 14. 록볼트의 종류

제외하고 대부분 안정성 및 신뢰도가 높은 전면접착형을 적용하고 있으며 전면접착방법은 접착재료에 따라 레진형, 모르터 충전형 및 주입형이 있으며 주입형의 경우 천장부시공 조건에서 가장 신뢰성이 있는 것으로 평가되고 있다. 최근에는 천장부 모르터홀림 방지를 적용한 주입형을 적용하고 있다. 단층대 등 천공후 공의 자립이 곤란한 구간에는 자천공형 록볼트를 적용하며 막장전방 보강 등 설치후 제거가 필요한 구간에는 GRP형 록볼트를 적용하기도한다. 특히, 지반조건이 양호하고 조기에 록볼트 효과를 발현시켜야 할 경우에는 마찰형 록볼트를 적용한다.

록볼트는 원칙적으로 굴착에 의해 영향을 받는 영역을 보강하도록 배치하여야 하며 그 사용목적, 지반조건, 터널 단면의 크기 및 형상, 굴착공법, 절리의 간격 등을 고려하여 결정하여야 한다.

록볼트의 배치 및 길이 선정시 고려사항은 다음과 같다.

① 록볼트의 길이는 굴착단면의 크기와 이완영역의 발달 깊이에 따라 조정하여야 하며 보통 소성영역폭의 1.5~1.2배 이상 또는 설치간격의 2배 정도를 표준으로 하고 1회 굴진장 및 암반의 절리상태에 따라 지반자체의 지보능력을 원활히 발휘할 수 있는 간격으로 배치하여야 한다.

② 록볼트의 배치에 있어서는 터널단면의 방사선 방향으로 굴착면에 직각으로 타설하는 것을 원칙으로 하며 인접한 록볼트간에는 상호 작용발

휘가 가능하도록 록볼트를 배치하여야 한다.

③ 록볼트의 직경은 1본의 록볼트가 지지하는 암괴의 중량 또는 지반에 필요한 전단 보강력에 의해 결정할 수 있으나 일반적으로 D25의 규격을 표준으로 한다.

### (4) 콘크리트 라이닝

콘크리트 라이닝은 사용 목적에 따라 구조체로서의 역학적 기능, 비배수형 터널에서의 내압기능, 영구 구조물로서의 내구성 확보 및 미관유지 기능 등의 역할을 하며 콘크리트 라이닝은 터널 주변의 지반상태, 환경조건 및 주지보재의 지보능력을 고려하여 사용목적에 적합하고 장기간 사용에 충분한 안전성과 내구성을 가지도록 설계 및 시공되어야 한다.

콘크리트라이닝이 구조체로서의 역학적 기능을 발휘하게 되는 경우는 다음과 같다.

① 숏크리트 등으로 형성된 주지보재가 영구 구조물로서 충분한 안전율이 미확보된 경우와 숏크리트에 균열과 록볼트에 큰 축력이 작용하고 응력 저항부에 크리프 현상이 발생하거나 볼트의 부식으로 인하여 지반응력이 콘크리트 라이닝에 전달되는 경우

② 현장여건으로 인하여 지반변위가 수렴되기 전에 콘크리트 라이닝을 시공하는 경우

③ 토피가 작은 토사 지반 등에서 주변 환경의 영향을 받기 쉬워 상재하중을 반영한 역학적 검토가 필요한 경우

④ 비배수형 터널에서는 콘크리트 라이닝에 수압이 작용하므로 수압을 고려하여 설계하는 경우

콘크리트 라이닝에 사용되는 재료는 터널의 사용목적에 적합한 것이어야 한다. 일반적으로 무근 또는 철근 콘크리트를 사용할 수 있다.

콘크리트라이닝은 원지반의 특성에 따라 터널 단면 형상과 인버트 설치여부를 결정하여야 하며 특수한 지반에서는 인버트의 타설 시기에 대하여도 검토하여야 하며 특히, 지반이 불량한 경우에는 숏크리트에 의한 인버트도 고려해야 한다. 지형 조건상 편압이 예상되는 경우 또는 큰크리트 라이닝이 구조적인 기능을 발휘하는 경우에는 인버트를 설치하는 것이 바람직하다. 인버트는 측벽과 일체가 되어 외력에 안전하게 저항할 수 있는 형상이 되도록 하여야 하며 인버트의 두께는 지형 및 지반조건에 따라 정하여야 하며 시공성 및 경제성 등도 검토하여야 한다.

## 5. 표준지보패턴

### 5.1 개요

표준지보패턴은 지반조건별로 적합한 지보재의 제원과 시공순서 및 위치 등을 결정한 터널의 표준화된 지보형식을 말한다. 일반적으로 대상지반을 균일한 조건으로 가정하고 있으며 동일한 지반조건에 대해서도 터널의 크기와 형상에 따라 지보패턴은 다르게 된다. 표준지보패턴은 축적된 시공실적이나 경험 등을 반영하여 결정하되 특수조건이나 암반등급의 폭을 감안하여 결정하고 해석적인 기법으로 검증을 거쳐 최종안으로 확정된다.

### 5.2 표준지보패턴의 적용

지반조사 결과를 토대로 터널 전구간에 대한 지반조건을 분류하여 각 지반에 적합한 표준지보패턴을 적용하되 필요에 따라 보조공법도 병행하여 적용한다. 표준지보패턴은 천단부 상부의 지층의 지층별 두께를 참고하여 적용하여야 한다. 최근에는 지반분류등급에 부합하는 표준지보패턴 선정시 터널 굴착영향범위 고려한 공학적 접근을 통한 지보재량 검토를 통해 굴착규모 및 여굴깊이 등 실제 시공성을 고려한 지보재량을 검토하여 표준지보패턴 설계에 반영하고 있다.

표준지보패턴은 일종의 계획안이라고 할 수 있으므로 현장의 실제조건이 예측과 상이할 경우에는 조정하여야 한다. 특히, 해석적인 검증에 너무 의존하지 않아야 하며 계측 결과를 분석하여 적부를 판단하

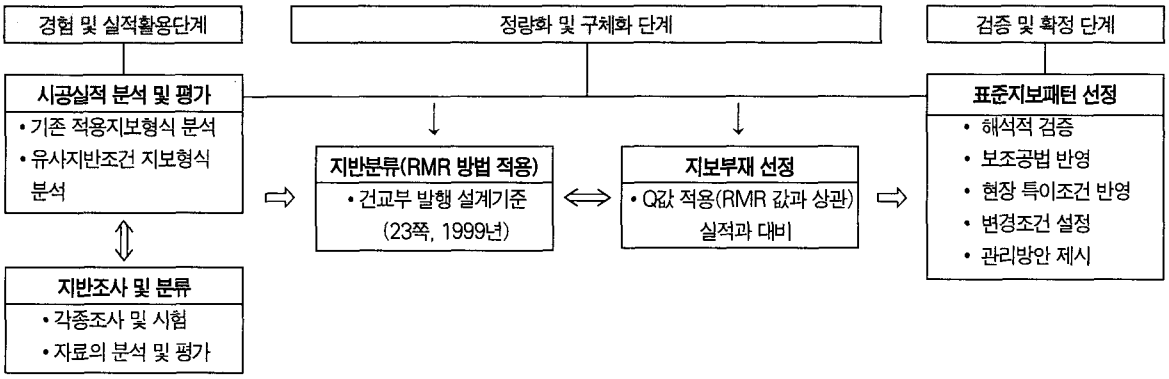



그림 15. 정량화적 표준지보패턴 선정과정

고 계속적으로 개선을 도모하는 노력이 필요하다.

(1) 지보패턴 결정시 고려사항은 다음과 같다.

① 터널 용도
② 지반 상태
③ 토피(특히, 천단부 상부지반의 지층 구성상태)
④ 지 형
⑤ 용출수 상태
⑥ 안 정 성
⑦ 경 제 성

(2) 표준 지보패턴의 구성요소는 다음과 같다.

① 굴착 공법 및 방법
② 숏크리트
③ 철망(필요시)
④ 록볼트
⑤ 강지보재
⑥ 방배수 계통
⑦ 콘크리트 라이닝
⑧ 시공

## 6. 마감하며

굴착과 지보과정은 터널 전체 시공 공종에서 매우 큰 비중을 차지하는 과정이며 터널 노선이 통과하는 지역의 지반조건, 터널 단면형상, 지장물 및 지상 구조물의 허용 변위한계, 공사기간, 사용 가능한 굴착장비, 경제성 및 민원 등과 밀접한 연관이 있으므로 이러한 요소들를 다각적으로 고려하여 최적의 조합방법을 도출하여야 한다. 특히, 굴착면 주변의 지반상태는 시간에 따라 지속적으로 변화하기 때문에 터널 시공의 성패는 시간과의 싸움에 달려 있다해도 과언이 아니다. 따라서 지보설치의 시간개념을 도입하여 지반의 자립시간을 정량적으로 평가하고 그 시간 이내에 합리적인 굴착 및 지보를 실시하는 것이 무엇보다도 중요하다고 하겠다.

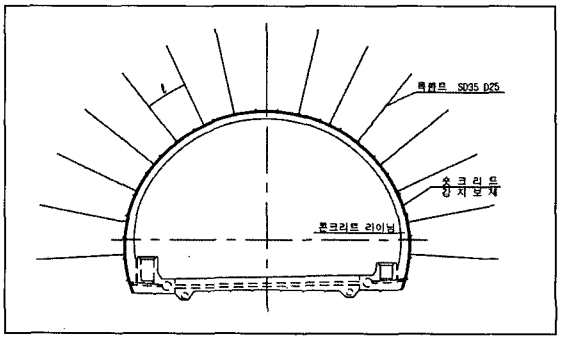



그림 16. 표준지보패턴 구성요소

지면관계상 본 강좌의 내용을 좀더 상세하게 기술할 수 없게됨을 아쉽게 생각하며 원고준비에 많은 도움을 준 박치면 차장에게 고마움을 표한다.

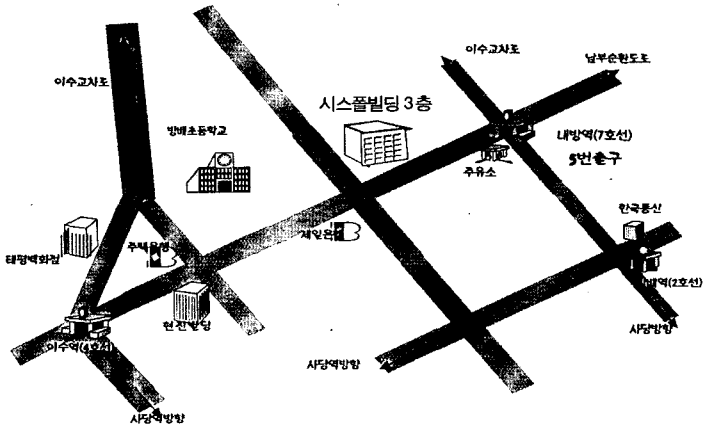
## 참고문헌

1. 건설교통부(1999), 터널설계기준
2. 건설교통부(1999), 터널표준시방서
3. 김승렬(1993), 서울지하철 터널의 설계 및 시공현황과 평가, 지하공간 건설기술에 관한 서울심포지움 논문집, PP. 51~75
4. 서울시 지하철건설본부(1994), 제2기 서울지하철 설계 및 시공감리 종합보고서
5. (주)대우(1984), 터널신공법 연구개발보고서
6. Atlas Powder Company, Explosives and Rock Blasting, 1987
7. Bell F.G.(1992), Engineering in Rock Masses
8. Hoek E. and Brown E.T.(1980), Underground Excavation in Rock

광·고

# 사무실 이전안내

평소 우리회사에 베풀어주신 사랑과 후원에 깊은 감사를 드립니다. 금번 우리회사 사무실을 아래 주소로 이전하게 되어 알려드리오니 앞으로도 변함없는 성원과 지도편달을 바랍니다.

(주)에스코컨설턴트 대표 김승렬 올림

**일시** : 2000년 12월 26일 (화요일)
**이전장소** : 서울시 서초구 방배동 869-9 시스폴빌딩 3층
**안내전화** : 02)6006-4114 FAX : 02)6006-4115
**대표직통** : 02)6006-4200