

제4장 터널발파

4.1 Tunnel Blasting 개요

- NATM(New Austrian Tunneling Method)의 적용과 천공기계의 진보에 관련하여 암질과 함께 발파작업을 구성하는 작업 사이클에서 가장 중요한 요소가 되는 최적 천공장 채택
- 천공은 암반조건에 알맞은 천공 패턴을 설계하고 정확한 위치에 정확한 경사로 천공하도록 막창면에 터널방향, 윤곽 및 천공좌표를 표시하고 표시된 위치에 맞추어 천공하여야 하며 드릴 운전자는 천공 패턴을 숙지하고 변화되는 작업장의 상황에 따라 능동적으로 대처할 수 있어야 함
- 계단발파는 두 개 이상의 자유면을 가지고 시행하는 것이고, 터널발파는 한 개의 자유면에서 시행하는 것
- 자유면은 암반이 공기와 접해 있는 면으로 파쇄암이 이동할 수 있는 공간을 제공하고 발파시 응력파의 간섭과 관련하여 발파효율에 큰 영향을 미치는 중요한 변수임
- 터널 발파에서는 노천발파와 달리 터널방향으로 천공이 되므로 발파공과 평행한 방향의 자유면이 없으므로 터널발파에서 가장 중요한 것은 자유면 형성을 위한 심발발파임
- 터널굴착을 위한 발파공법은 자유면 형성을 위한 심발발파 방법에 따라 Angle Cut 공법과 Parallel Cut 공법으로 분류
- 굴착대상 암반의 물성인 압축강도, 인장강도, 전단강도와 같은 강도 특성, 동적하중에 대한 변형거동 특성, 그리고 암반 내 존재하는 단층면, 절리 등의 구조적 특성은 발파효율에 큰 영향을 미치므로 화약류 선정이나 발파 패턴 설계 시 고려해야 함
- 발파에 의한 진동, 소음, 비산 등의 주위환경에 대한 영향으로 민원의 발생이나 작업 중단 등의 심각한 문제가 발생하여 발파효율만을 고려한 발파작업은 지양되어야 하며, 발파에 의한 환경영향을 평가하고 발파공해를 방지할 수 있는 제어발파 설계와 시공 등 고도의 발파기술이 요구됨
- 터널 발파의 특수성은 구축된 공간 내에서 항력이 높은 암반을 굴착하는 것으로 터널 지압과 지열 발생, 지하수가 유출과 폭약 기폭에 의한 충격파나 가스 팽창압에 의해 암반 내 응력 변화로 굴진조건에 영향을 주고 폭약 사용에 의한 갱내 환경악화 등 야기
- 굴착의 어려움이 공사의 기간 및 공사비에 중대한 영향을 미치므로 지질조건을 충분히 파악해야 하고, 암반 강도, 풍화도, 절리 및 단층 등의 지질적인 조건과 용수는 1자유면 발파가 주체가 되는 터널발파에서는 중요한 문제가 됨
- 터널굴착 단면은 터널의 목적이나 용도에 따라 결정되며, 도로터널의 경우 교통량에 따라 터널의 폭이나 환기덕트 등의 크기, 철도터널의 경우 운행 차량의 크기나 운행 속도 및 운행 방법 등에 의해 결정됨
- 굴착단면이 비교적 적고 지반이 안정되어 있을 경우 전단면 굴착공법 적용, 그 외에는 대부분 분할 굴착공법 적용

4.2 터널 형상의 분류

- 터널의 형상: 난형, 원형, 마제형으로 분류되며, 구조적 안전성과 경제적인 난형을 기준 단면 형상으로 결정
- 내공단면 구성요소: 터널사용 목적에 의한 건축한계, 터널의 내부설비, 지하수위 및 수압

처리방식, 토피와 지반의 강도, 터널의 내부하중과 라이닝의 재질과 강도, 굴착공법과 굴착단면적, 토압과 시공법 등을 고려하여 내공단면의 크기와 형상 결정

- 난형 터널: 구조적으로 안정, 양수압에 안정, 원형보다 굴착량이 적어 경제적
- 원형 터널: 외압에 대한 적응과 구조적으로 타형상에 비해 안전하고 양수압에 안정한 반면, 굴착시공이 공법에 따라 난이하고 굴착면이 크므로 비경제적
- 마제형 터널: 굴착단면이 적고 시공성이 양호하며 여굴량이 적어 경제적인 반면, 양수압이 클 경우 구조적으로 불안정

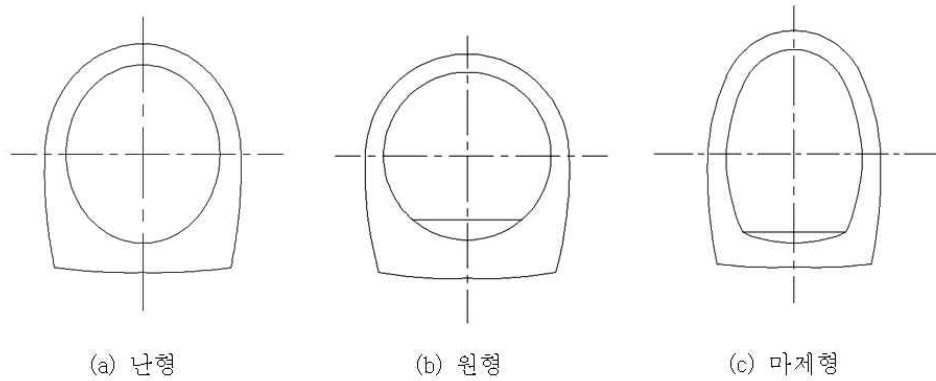


그림 4.1 터널의 형상

4.3 터널 굴착의 분류

- 터널굴착 분류: 굴착방법과 굴착공법으로 분류
 - 굴착방법: 막장의 지반을 굴착하는 수단으로 발파굴착, 일력굴착, 기계굴착, 파쇄굴착 방법 등
 - 굴착공법: 어떤 수단으로 터널을 굴착하는 것인가로 막장면 혹은 터널 길이방향의 굴착계획을 총칭하며 전단면 굴착공법, 분할굴착공법, 선진도갱굴착방법 등
- 암반 및 토사터널의 굴착에 영향을 미치는 요소: 공동 발달 위치 및 크기, 연약대(단층 및 파쇄대) 분포 및 크기, 암반의 이방성 및 주응력 방향, 절리상태(거칠기, 전단강도, 간격 등), 절리방향(주향과 경사) 등, 토사지반은 상부 구조물 및 상재하중, 이완영역, 지반강성 및 지하수의 조건, 함수상태, 지반고결 여부 등

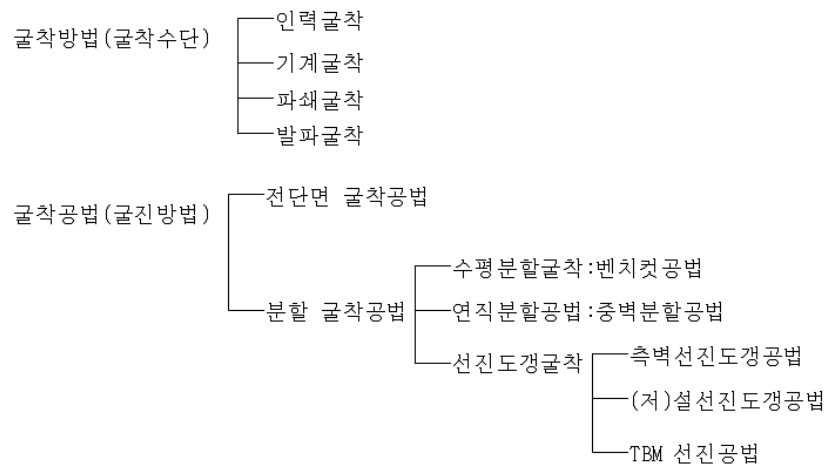


그림 4.2 굴착방법과 굴착공법의 분류

4.4 터널붕괴 형태 및 유형

- 터널굴착공사에서 지보재를 설치하는 동안 터널을 유지할 수 있는 잠재력 확보가 중요한데, 발파로 인한 터널주변의 이완형태, 원지반의 높은 초기응력으로 인한 갑작스러운 파괴, 박편 등과 같은 현상이 터널붕괴 시 발생 가능
- 터널붕괴 형태는 시공순서에 따라 상이하게 발생되며, 시공단계별로 발파 직후 무지보 상태의 붕괴, 1차지보재(쉴크리트 등) 타설 후 붕괴, 콘크리트 라이닝 타설 후 붕괴 형태로 분류
 - 무지보 상태 붕괴: 벤치부 파괴는 벤치부분에서 굴착 후 절리 등 불연속면의 발달에 의하여 미끄러짐 형상의 파괴
 - ✓ 천장부 파괴: 터널 천장부에 형성된 절리군이 블록을 형성하여 썬기형 파괴를 일으키는 경우
 - ✓ 막장부 파괴: 발파 후 불연속면에 의한 막장부의 국부적인 암반블록이 붕락되는 경우
 - ✓ 전막장 파괴: 터널 막장 전체가 연약층으로 형성되어 있는 경우 굴착으로 인하여 시간이 경과함에 따라 주변지반의 지지력이 허용한계를 초과하여 막장면 전체에서 붕락 발생
 - ✓ 연약대 파괴: 대규모 및 소규모의 연약대가 터널 막장부의 굴진방향에 대해서 수직 또는 경사져서 발달되어 있는 지반조건의 경우 연약대를 따라 슬라이딩 형태의 파괴 발생
 - ✓ 표토층 파괴: 터널규모에 비하여 표토층이 너무 얇아 발파진동 등에 기인하여 터널 막장 표토층의 함몰
 - 1차지보재 타설 후 붕괴: 굴착 후 쉴크리트를 타설한 경우 쉴크리트가 경화되지 못한 상태에서 주변지반의 거동으로 1차지보재가 한계강도에 도달하면 크립(Creep) 파괴형태로 터널 붕괴
 - ✓ 쉴크리트 타설 후 강지보재의 설치 및 굴착속도 조절로 지반의 안정성 향상
 - ✓ 상반 굴착직후 지지력 부족에 의한 Invert에서의 침하 및 전단파괴
 - ✓ 터널주변 지반의 측압으로 인한 바닥부의 부풀림 현상
 - ✓ 터널 측벽부 콘크리트 라이닝에서 측압에 의한 파괴
 - 콘크리트 라이닝 타설 이후 붕괴: 붕괴 확률이 적으며, 모든 지보재를 타설한 후 붕괴 발생하는 경우
 - ✓ 터널설계의 오류 등으로 인하여 터널의 구조적인 문제
 - ✓ 터널 시공 시 품질관리 불량 및 시공 후 유지관리의 소홀
 - ✓ 전단파괴, 국부파괴, 압축파괴, 휨과 단층의 조합파괴 등으로 일어남
- 붕괴사고의 원인
 - 예상치 못한 지질학적 원인에 의한 사고: 전문가에 의한 막장관찰 기록, 분석 및 조치의 미비, 시공중 연속적으로 지층상태를 파악할 수 있는 수평 시추조사의 미수행, 수압을 가진 모래, 자갈층의 갑작스런 출현(미고결함수 지반의 진행성 파괴)
 - 계획과 시방조건 미비에 의한 사고: 문제 발생 시 긴급조치 계획의 부적합, 부적합한 시공자재의 사용과 허용오차 선정의 오류, 지반조건 분류기준의 오류로 보강공법의 부적절한 선택, 터널의 안정성을 확보할 수 있는 암토피의 미확보 등
 - 계산과 수치해석의 오류에 의한 사고: 계측자료에 대한 정확한 분석 미비, 부적합한 재료모델 및 컴퓨터 프로그램의 사용, 지하수의 영향을 충분히 고려하지 못한 경우, 설계 입력자료의 오류 등
 - 시공상의 오류에 의한 사고: 설계시방과 다른 시공단계 적용, 콘크리트 라이닝 시공불량,

록볼트와 강지보의 잘못된 시공, 1, 2차 숏크리트 두께가 시방서와 다른 경우

- 경영과 관리의 오류에 의한 사고: 경험이 충분하지 않는 설계자와 현장관리인의 선정, 시공사례의 장·단점을 충분히 인식하지 못한 현장관리인의 선정, 능력과 경험이 풍부하지 않는 시공업체의 선정, 불충분한 감리제도의 도입, 현장 계측관리에 따른 시공의 적용이 즉시 이루어지지 않는 경우

4.5 굴착방법 및 공법

- 굴착방법: 굴착대상이 되는 지반조건과 연장, 단면의 크기와 기하학적 형상 및 토피, 지장물의 위치와 규모 등 주변여건에 의해 결정
- 굴착방법 선정: 원지반이 가지고 있는 지보능력을 최대한 고려하고, 안정성, 경제성 시공성이 우수한 방법과 지반조건, 지하수 유입정도, 굴착단면의 크기와 형상, 터널의 연장, 근접구조물 유무와 주변 환경영향, 보조공법의 적용성 등을 반영하여 결정(표 4.1)
- 굴착공법: 터널단면의 횡방향 굴착공법은 비교적 상세하나 종방향의 굴착공법은 너무 개략적으로 종방향에 대한 굴착순서의 명확화 필요
- 굴착공법 선정: 주변지반의 이완영역 최소화 상태에서 최대한 큰 단면을 계획, 지반내에 분포하는 응력의 재분배, 지반조건에 따른 자립시간 및 막장과 굴착면의 안정성 문제, 막장의 자립성, 터널의 크기와 형상 등 고려

표4.1 굴착방법별 적용장비 및 특성

구분	장비	지반조건	적용구간	비고
인력굴착	· 곡괭이 및 삽, 착암기 등 간단한 굴착도구	· 자립시간 짧은 토사터널 · 소규모 분할굴착을 필요로 하는 연약지반	· 지보재 조기 설치구간 · 진동영향 민감구간	
기계굴착	· 쇼벨(Shovel) · 브레이커(Brake) · 로드헤더(Road Header) · ITC · TTM	· 풍화암 이하 연약한 지반 · 절리나 파쇄가 심한(RQD≒0)연약대 및 단층대	· 지반이완 최소화 · 여굴억제 · 발파진동 영향 있는 곳	· TBM · Shield · 쉴드형 TBM
파쇄굴착	· 유압 암파쇄 · 수압 암파쇄 · 비폭성 암파쇄 · 가스압이용암파쇄	· 저진동으로 파쇄 가능한 연·경암 · 기계굴착을 적용할 수 없는 견고한 암반	· 발파진동으로 인한 민원 문제 있는 곳	· GNR · HRS · DARDA · CARDOX
발파굴착	· 천공장비 · 뇌관 및 화약	· 일반적인 암반 굴착방법 · 발파로 인한 지반의 이완영역 영향이 없는 풍화암 이상	· 발파진동 및 소음으로 인한 주변영향 없는 곳 · 진동과 소음에 관한 규정에 제약이 없는 곳	· 전기식 · 비전기식 · 다단식 · 무장약확공식

- 굴착방향에 따라 수평분할굴착과 수직분할굴착으로 구분할 수 있으며 수평분할굴착은 중단면에서 벤치의 길이에 따라 구분하며 벤치 수가 3개 이상은 수평분할굴착을 다단벤치라고 말하며 수직분할굴착은 측벽선진도갱공법과 중벽분할공법으로 분류
- 굴착공법은 지반조건과 굴착단면의 크기와 상관관계에 의하여 결정(표 4.2)

표4.2 굴착공법의 적용범위

단면크기 지반조건	소단면	중단면	대단면	특수대단면
풍화토	· 전단면굴착 · 숏벤치 컷 · 링컷+숏벤치컷	· 링컷+숏벤치 컷 · 숏벤치 컷 + 가인버트	· 링컷+숏벤치 컷 · 롱벤치컷+가인버트	· 선진도갱 굴착 · 다단벤치컷 + 가인버트
풍화암	· 전단면 굴착	· 숏벤치 컷 · 롱벤치컷+가인버트	· 숏벤치 컷 · 롱벤치컷+가인버트	· 선진도갱 굴착 · 다단벤치 컷
연 암	· 전단면 굴착	· 롱벤치 컷 · 전단면 굴착	· 숏벤치 컷 · 롱벤치 컷	· 숏벤치 컷 · 다단벤치 컷 · 롱벤치 컷
경 암	· 전단면 굴착	· 전단면 굴착	· 전단면 굴착	· 롱벤치 컷 · 다단벤치 컷 · 전단면 굴착

4.5.1 천공 표시(Drilling Marking)

- 우리나라 대부분의 터널발파 현장에서는 천공 작업 시 굴착단면의 윤곽만을 페인트로 그리고 나머지 천공좌의 표시는 하지 않고 천공을 하므로 천공의 공간격과 저항선이 일정할 수가 없게 되어, 폭약 소비량이 많아지고, 굴착면 요철이 심하며, 여굴량이 많게 됨. 따라서 이를 방지하기 위해서는 반드시 천공전에 표시(Marking)을 실시하여야 함
- 막장면 표시 방법: 인력에 의한 페인트 표시가 주로 이용되며, 최소 1시간 이상 소요되므로 현장에서 기피
 - ✓ 인력에 의한 페인트 표시 단점: 작업원이 높은 작업대에서 페인트로 천공위치를 표시하기 때문에 시간이 많이 걸리고 비효율적이며, 작업원이 불안정한 자세로 인하여 표시 정밀도가 떨어지고, 안전에 문제가 발생할 수 있으며, 발파효율이 저하되고, 막장에 접근하여 작업하기 때문에 부석의 낙하로 인한 재해의 위험 존재
- 일본 시미즈 건설은 발파공법에 의한 터널공사에서 천공 패턴을 레이저 광선으로 막장에 비추는 자동조사 시스템 개발하여 실용화
 - ✓ 자동조사 시스템의 특징: 막장에 레이저 광선으로 표시를 하기 때문에 페인트 표시에 비해 사이클 시간이 축소되고, 막장전방의 천단에 설치한 레이저 조사기로부터 천공 패턴을 조사하기 때문에 착암기 등이 조사의 장애가 되지 않고, 천공 중 계속 패턴이 조사되므로 천공의 정밀도 향상되며, 막장후방에 설치한 토털스테이션에 의해 조사기

의 위치를 자동으로 산정하여 조사각도가 자동 조정됨. 하지만 레이저광선을 고속으로 이동시켜 설치비가 고액 소요되므로 실용화를 위한 저가 장비의 개발 필요

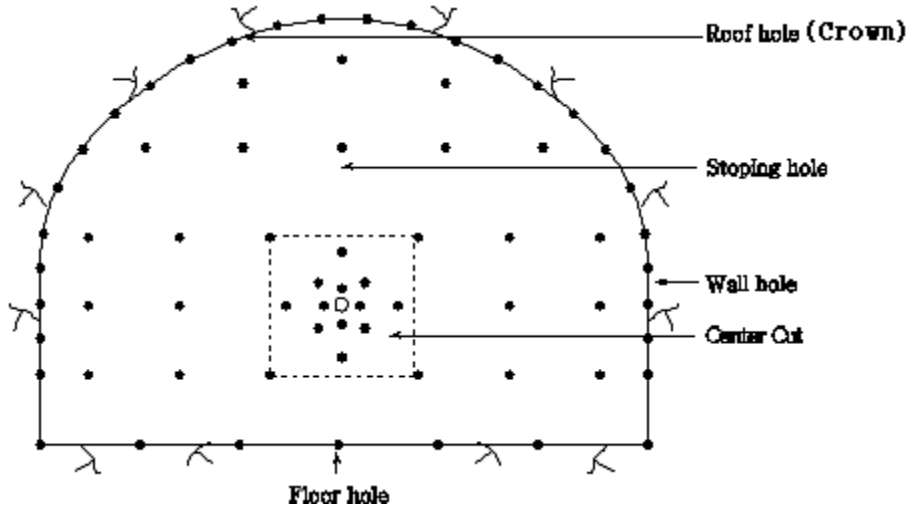


그림 4.3 천공위치별 명칭

4.6 터널굴착공법

- 터널굴착공법은 지질적인 조건(표토 두께, 단층, 파쇄대, 용수 등) 유무 또는 상태, 단면의 대소 등에 따라 결정
- 기본 시공법: 전단면 굴착공법, 버섯형 굴착공법, 측벽도갱 선진굴착공법, 상부반단면 선진굴착공법, 저설도갱 선진상부반단면 굴착공법, 링커트공법, 벤치커트공법 등으로 분류
- 굴진발파를 대상으로 할 경우 경암, 중경암 및 연암의 터널로 분류하고 알맞은 폭약량 표준 제시(표 4.3)

표 4.3 굴착공법과 적정폭약량

암반의 분류	탄성파속도 (km/sec)	굴 착 공 법	표준폭약사용량 (kg/m ³)
경 암	4.5 이상	전단면 굴착공법 버섯형 굴착공법	1.5~2.0(20~30 m ²) 1.2~1.7(30m ² 이상)
보통암	3.5 이상	전단면 굴착공법 버섯형 굴착공법 상부반단면 공법	1.1~1.5(20~30m ²) 0.9~1.3(30m ² 이상)
보통암	2.5 이상	버섯형 굴착공법 저설도갱 선진상부반단면 공법	0.7~1.3(20~30m ²) 0.6~1.1(30m ² 이상)
연 암	1.5 이상	저설도갱 선진상부반단면 공법 상부반단면 공법 저설도갱 선진상부반단면 공법	0.4~0.8(20~30m ²) 0.3~0.7(30m ² 이상)
토 사	0.8 이상	측벽도갱 선진순말이 공법 저설도갱 선진상부반단면 공법	0~0.3
팽창암		쇼트벤치커트 공법 측벽도갱 선진순말이 공법	0.5~1.0(20~30m ²) 0.2~0.5(30m ² 이상)

4.6.1 전단면 굴착공법(Full Face Excavation Method)

- 전단면 굴착공법은 가장 단순한 공법으로 가장 바람직한 것이지만 넓은 단면과 전면을 단면에 굴착하려면 양질의 막장이 필요.
- 소단면 터널에서 사용하는 공법으로 지질이 불량한 부분을 만날 때는 다른 공법으로의 변경 용이
- 전단면 천공은 점보드릴 이용하며, 굴진장은 원지반 상태에서 결정될 때가 많음
- 컷 형태(Cut-type)는 V-cut이나 Burn Cut이며, 천공지름은 36mm나 45~51mm로 다양

4.6.2 버섯형 굴착공법

- 상부반단면과 도갱을 합한 버섯형 단면을 동시에 굴착하는 공법으로 강아치동바리공을 이용하여 양측각부를 지지하기에 충분할 정도의 양측하부를 남기고 나머지 전단면을 단면에 굴착

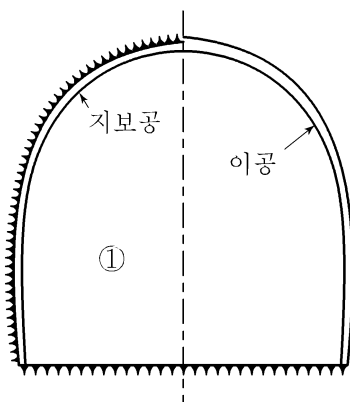


그림 4.4 전단면 굴착공법

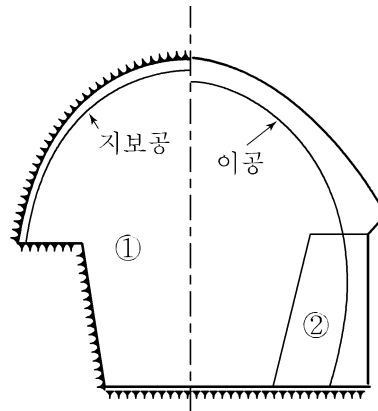


그림 4.5 버섯형 굴착공법

4.6.3 측벽도갱 선진굴착공법(Side Drift Method)

- 최초에 양측벽 도갱을 굴착하여 측벽부에 콘크리트를 타설한 후 상부반단면의 굴착을 시행하는 방법
- 아치부를 굴착하면 토하중이 커져서 지질적으로 지내력이 부족해지므로 상부의 하중을 충분히 지지하기 어려워 터널의 침하와 붕락 등의 사고가 발생할 염려가 있는 터널시공법에 적용
- 상부의 하중이 안정된 측벽부에 타설되어 있는 콘크리트에 의해 지지되기 때문에 지질조건이 나쁜 터널에서도 시공 가능

4.6.4 상부반단면 굴착공법(Top Heading Method)

- 지질적으로 전단면을 한 번에 굴착하는 것이 불안할 경우 상부반단면을 선진으로 굴착하여 복공을 완료시킨 후 하부단면을 굴착하는 공법(하부 굴착은 보통 벤치식 발파로 함)
- 상부반단면에는 대형기계사용이 가능해서 전단면에 대해 막장작업 단순함
- 매우 불량한 지질의 경우 단면에 굴착이 불가능할 때에 링형(Ring)으로 상반부의 아치부를 선행해서 굴착하고, 지보공을 세워 그 후에 상반부의 남은 블록부분을 굴착하면 원지반은 안정된 상태에서 반단면의 굴착 완료. 상부 굴착이 완료되면 아치부는 콘크리트가 덮개로, 그 후 하부 굴착

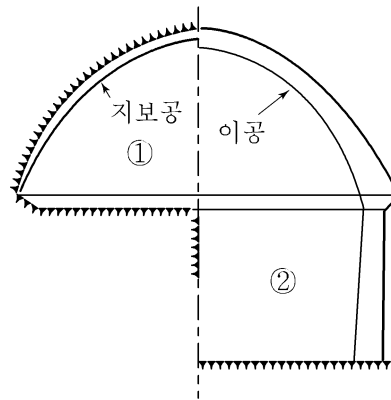
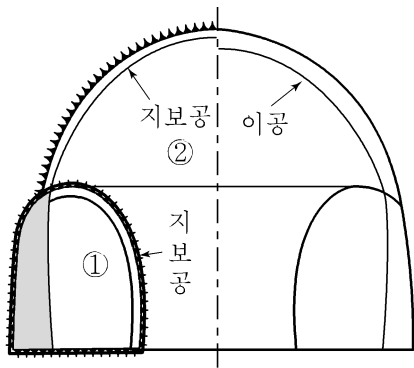


그림 4.6 측벽도갱 선진굴착공법 그림 4.7 상부반단면 선진굴착공법(쇼트벤치커트공법을 포함)

4.6.5 저설도갱 선진상부반단면 공법(Bottom Drift Method)

- 터널 저설부에 도갱을 선진해서 굴착한 후 상부반단면 부분을 굴착하는 공법
- 도갱단면: 10m² 전후로 굴착하며, 상반부 지질이 좋지 않으면 링커트로 굴착 가능
- 상반부의 버력은 도갱부에 떨어져 외갱으로 반출
- 선진한 도갱으로 터널의 지질을 충분히 예지하게 되고, 지하수위를 낮춘 다음 행해지므로 상반부굴착 용이
- 상반부 굴착은 저설도갱부의 어느 부분에서도 넓혀서 아치부의 콘크리트 하부발굴도 용이 하지만 작업면에 있어서 반드시 유리한 공법이라고 말할 수는 없으며, 작업이 폭주하던가 반입재료를 하부에서 위로 올려야 하는 결점

4.6.6 링커트 공법(Ring Cut Method)

- 굴진시작점이 자립하기 어려울 정도로 불량한 지질이거나 편압이 걸릴 우려가 있는 지질의 경우 상부반단면을 굴착할 때 한꺼번에 굴착하지 않고 중심부에 남겨 링상대로 외주를 굴착하여 아치동 바리공을 건립하는 공법
- 예상 밖의 토압이 작용하여도 보강이 비교적 간단하고 신속히 되는 장점

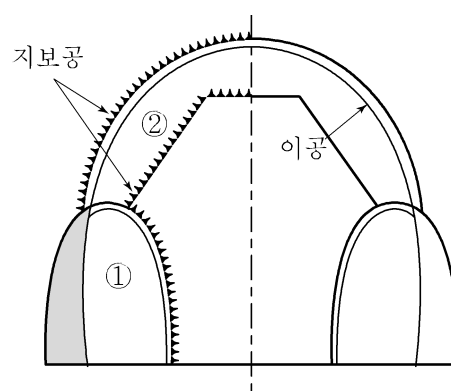
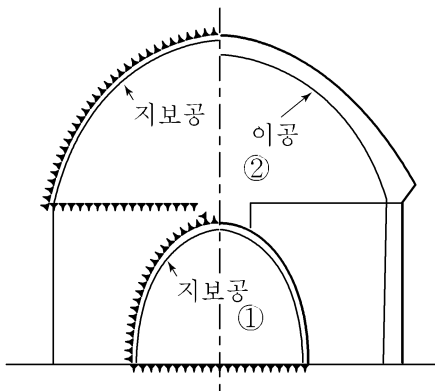


그림 4.8 저설도갱 선진상부반단면 굴착공법

그림 4.9 링커트 공법

4.6.7 벤치커트 공법(Bench Cut Method)

- 터널 단면을 상, 하로 나누고 터널 상부 반단면, 하부 반단면의 순서로 굴착하여 지보를

설치한 다음 전단면 복공을 타설하는 공법으로 현재는 록볼트와 슛크리트 등의 지보 구조를 이용한 NATM공법에 적용

- 상부 반단면의 막장과, 하부 반단면 막장간의 거리에 따라 롱 벤치컷(대체로 50m 이상), 슛 벤치컷(약 15~30m), 미니 벤치컷(3~5m) 그리고 다단 벤치컷 공법으로 세분

(1) 롱 벤치컷 공법(Long Bench Cut Method)

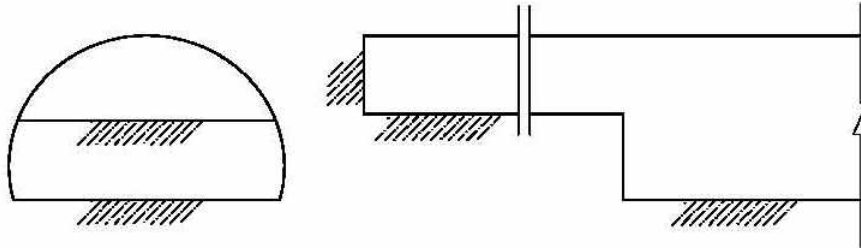


그림 4.10 롱 벤치컷 공법

- 단면이 폐합될 때까지의 기간이 길기 때문에 터널 주변 암반을 이완시킬 가능성이 크므로 빠른 시일 내 인버트(Invert)를 타설할 필요가 없는 비교적 양호한 암반 굴착 시 적용되는 공법

- 상부 반단면이 길어 상, 하부 작업의 상호간섭이 적고 또 병행 작업이 가능하기 때문에 공기단축 가능

(2) 슛 벤치컷 공법(Short Bench Cut Method)

- 폭파방식, 기계방식 등 어느 경우에도 널리 채택되는 공법이지만 터널 단면을 가능한 한 조기에 폐합하여 변위를 적게 할 필요가 있는 불량한 지반에 적용

- 상부에서의 굴착, 지보작업과 하부에서의 작업은 벤치 길이가 짧아 서로 간섭되기 때문에 사이클 조정 필요
- 지보의 변형이나 침하가 현저할 경우에는 빠른 시간 내에 인버트를 폐합시킬 수 있도록 최단의 벤치 길이 검토

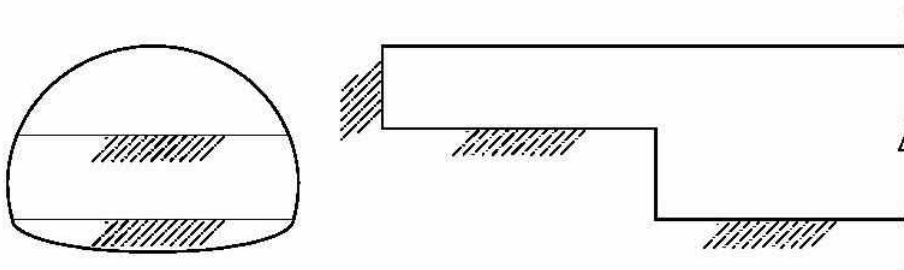


그림 4.11 슛 벤치컷 공법

(3) 미니 벤치컷 공법(Mini Bench Cut Method)

- 벤치 길이를 짧게 조정함으로써 토사 터널 등 지반의 안정이 나쁜 경우에 적용

- 막장 굴착 부분에는 굴착기를 배치하고, 버럭은 뒤쪽 하반부분에 직접 낙하시켜 적재

- 측벽의 지보, 인버트 시공이 서로 접근해 있어 숏 벤치컷 공법보다도 능률이 저하하지만 조기 폐합 효과에 의한 지반의 안정성이 높음

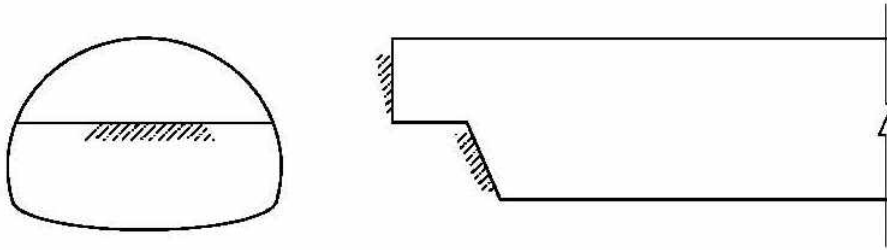


그림 4.12 미니 벤치컷 공법

(4) 다단 벤치컷 공법(Multi-Bench Cut Method)

- 비교적 단면이 큰 터널에서 벤치컷로서는 막장이 자립하지 못할 경우에 채택되는 공법으로 한 단면을 3개 이상으로 분할하여 굴착
- 벤치수가 증가되어 단면 폐합 시간이 늦어지고 이로 인해 변형이 증대될 가능성이 있으며 각 벤치에서의 작업이 간섭되는 문제점

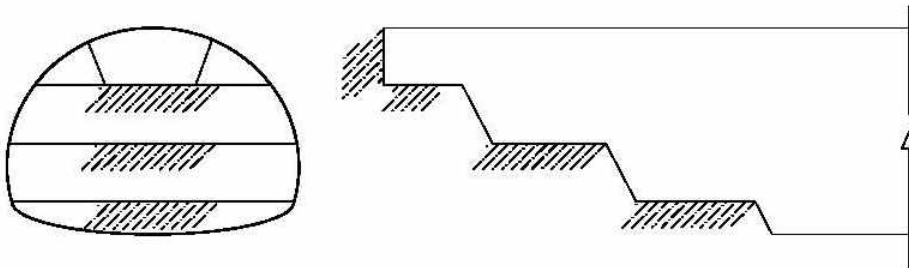


그림 4.13 다단 벤치컷 공법

(5) 사이드 파일럿 공법(Side Pilot Method)

- 비교적 단면이 큰 도시 터널에서 지표 침하를 억제하기 위한 공법
- 중, 소규모의 단면에서는 중앙 부분의 폭이 좁아지기 때문에 이 공법을 적용하기 곤란할 때는 한 쪽 사이드 파일럿 공법이나 중벽식 공법 등으로 변형시켜 사용
- 마사토나 사질토층처럼 연약한 토사 지반에 계획된 도시 터널의 시공에서는 초기 응력의 개방과 무지보로 방치되는 암반의 면적 및 시간을 가능한 한 적게 하기 위하여 선택

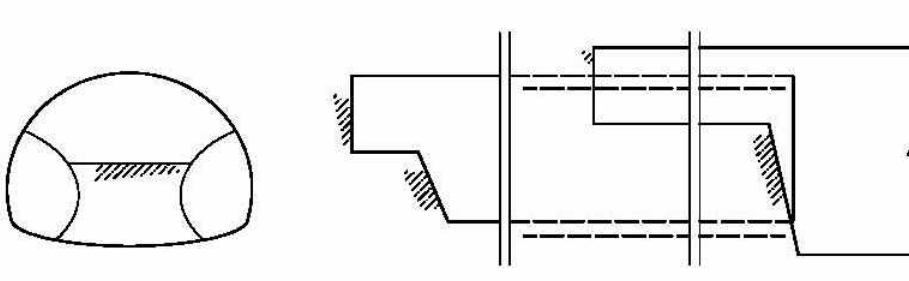


그림 4.14 사이드 파일럿 공법

4.7 일반 터널발파

- 계단발파는 2자유면 이상에서 행해지는 반면에 터널발파는 한 개의 자유면에서 행해짐
- 터널발파는 암석이 상당히 구속된 상태이고 2차 자유면을 형성하면서 암석이 파쇄되어 자유면으로부터 암석이 멀리 비산함
- 터널 막장에서 심빼기 발파에 의해 2차 자유면이 형성되는데 심빼기 발파는 경사공 심빼기와 평행공 심빼기 등이 실시됨
- 심빼기 발파가 행해진 후 막장이 발파되며, 막장발파는 천공오차와 양호한 파쇄도의 요구 및 경사공이 없으므로 높은 비장약이 필요함
- 천반공, 벽공 및 바닥공과 같은 윤곽공(설계굴착예상선공)들은 윤곽선 밖으로 경사져야 하는데 이것을 Look-out이라 하며 터널단면은 일부면적을 보유하게 됨
 - Look-out은 다음 Round의 천공장비 운용을 위해 공간을 충분히 허용해야 함
 - Look-out의 기준값으로서 10cm에 천공장 1m당 3cm를 더한 값을 초과하지 않아야 하며, 터널막장 둘레는 약 20cm로 Look-out을 유지해야 함

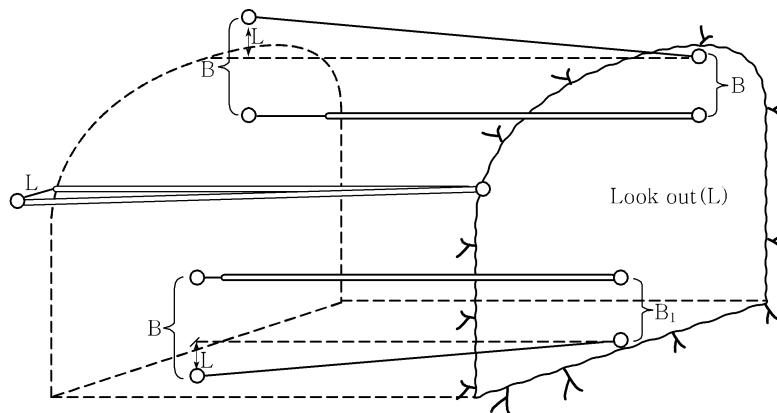


그림 4.15 주변공 천공시의 Look-out

- 폭약 소비량: 터널발파 > 계단발파
 - 터널발파에서는 천공의 분산, 발파공의 높은 구속성, 팽창을 확실하게 하기 위한 저부 암석의 상향 응기 및 인접 발파공들 사이의 상호 보완작용의 결핍 때문에 계단발파보다도 비장약량이 3~10배 정도 더 높음
- 심빼기 발파의 폭약 소비량은 아주 많음
 - 평행공 심빼기에서 공공 둘레의 $1 m^3$ 면적에 약 $7 kg/m^3$ 의 폭약이 소비되고, 비장약량은 최소 약 $0.9 kg/m^3$ 에 달할 때까지 심빼기 공에서부터 감소
- 터널굴착에서 일반적인 발파에 의한 작업 공정: 천공 → 장약 → 발파 → 환기 → 버력 적재 및 운반 → 록볼트 → 슛크리트 → 지보 순서
 - 발파 결과로 파쇄도 불량할 경우: 적재 작업에 영향을 미치며 경우에 따라 적재를 위하여 2차 발파가 필요하게 됨
 - 굴착 단면이 설계보다 크게 과굴된 경우: 과굴된 공간만큼 그라우팅을 위한 보강 비용이 증대하고, 주위 암반에 손상을 주게 되므로 유지, 보수비가 증대
 - 굴착단면이 설계보다 좁게 형성된 경우: 단면의 확장을 위한 추가 작업이 필요

- 과도한 지반 진동 발생 경우: 인접 터널의 손상, 붕괴 또는 인접가옥, 건물 등 피해
- 과도한 소음 발생 경우: 인체 및 동물에 피해
- 비석의 발생으로 구조물 또는 인명 피해

○ 발파 설계에 고려하여야 할 주요 요소

- 암반을 효율적, 경제적으로 파쇄하는 일
- 파쇄암의 크기가 적재, 운반, 저장, 처리가 용이하도록 조절
- 파쇄되지 않은 주변 암반은 가능한 손상을 받지 않아야 하며
- 인접 구조물 또는 시설물에 영향을 주지 않아야 함

4.7.1 터널 단면적과 천공 수

○ 터널 단면적이 넓어질수록 천공 수가 증가하고, 천공경이 클수록 천공 수는 감소하는 경향(그림 4.16)

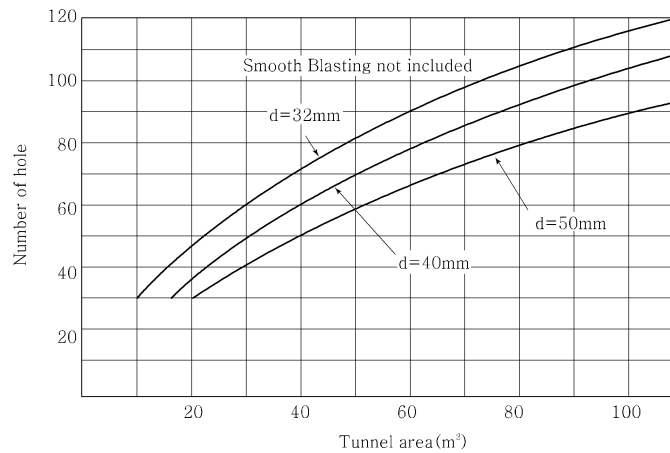


그림 4.16 터널 면적과 천공 수

4.7.2 비천공장 및 비장약량

○ 터널면적이 넓어질수록 비천공장과 비장약량이 감소하며, 천공경이 클수록 비천공장은 짧아지고 비장약량은 증가하는 경향(그림 4.17)

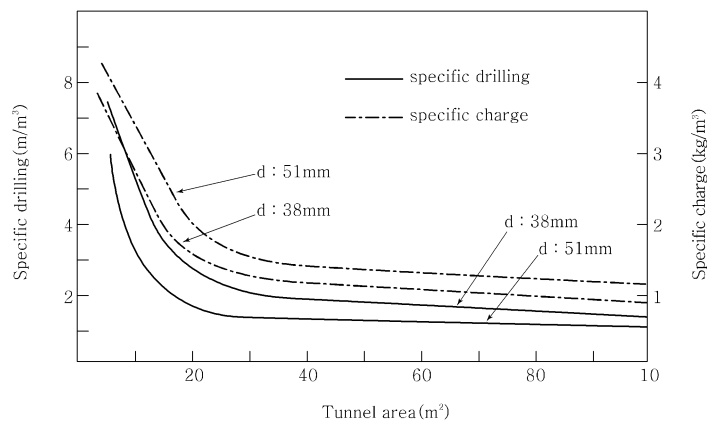


그림 4.17 터널면적과 비천공장 및 비장약량

4.7.3 최대 굴진장

- 가능한 최대 굴진장은 공경과 공수 및 천공장에 결정되지만, 공공주위의 천공배치에 따라 변화
- 공의 천공장과 심빼기공의 천공장이 동일한 경우 약 95%의 굴진율을 얻기 위해서는 다음 식 이용

$$L = 0.15 + 34.1\phi - 39.4\phi^2 \quad (4.1)$$

여기서, L : 공공과 심빼기공의 천공장(m)

ϕ : 공공의 직경(m)

- 공의 천공장을 심빼기의 천공장보다 더 깊게 천공하는 것도 굴진율을 증가시킬 수 있는 방법 중의 하나
- 공공의 직경이 클수록, 천공장이 짧을수록 굴진율이 증가하는 경향(그림 4.18)

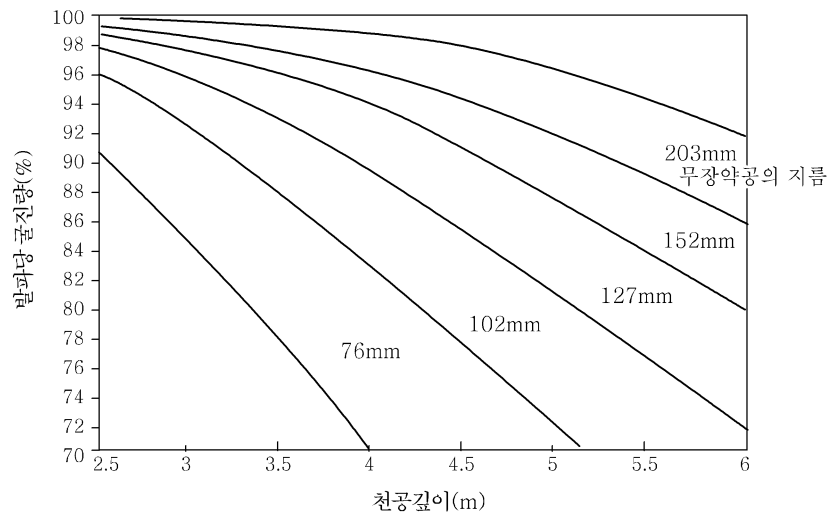


그림 4.18 천공장과 굴진율

4.8 갯문의 위치 및 형식

- 터널 갯문은 일반적으로 갯구의 위치에 따라 결정
 - 터널 개통 후에 낙석, 눈사태, 토사류 등의 자연 기상재해가 발생하기 쉬운 장소에 갯구를 설치할 때는 이러한 재해와의 관계를 고려하여 갯문의 위치 결정
 - 갯문의 위치 결정시 지형의 횡단면이 터널 축선에 대하여 될 수록 대칭이 되는 위치로 하고 편토압을 받지 않도록 해야 하며, 높이나 시냇물과는 교차하지 않도록 선정
 - 부득이한 경우 충분한 배수 설비를 만들어 물을 처리하고 터널에 나쁜 영향을 주지 않도록 함
 - 교량 구조물과 근접할 때의 갯문 위치는 원지반 조건을 고려하고 갯문 기초의 지반 반력 분포 범위와 교대의 굴착선과의 관계를 충분히 검토하여 터널에 나쁜 영향을 주지 않도록 하여야 하며, 갯구 부근에 계획된 장래의 유지 관리 시설의 배치에 대해서도 고려
 - 인접한 도로와 건물 등의 영향, 갯문에 연결되는 교량과의 위치 관계 등을 고려하여 갯구의 위치 결정
 - 갯문 부위는 시공에 있어서 불안정한 경우가 많으므로 시공 방법을 충분히 검토 필요
 - 시공시나 시공완료 후에 작용하는 토압, 상재하중, 지진 등의 영향을 받는 경우가 있으므로

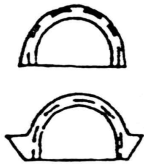
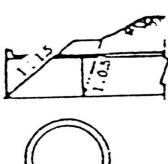
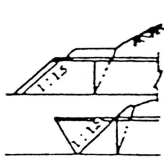
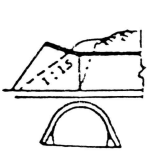
로 철근 등의 보강, 인버트의 단면을 폐합하는 등의 설계 검토

- 갯문은 지표 비탈면의 낙석 붕괴, 눈사태, 누수 등으로부터 갯문부를 보호하기 위한 것으로서, 갯문자체의 변위, 침하 등이 생기지 않은 역학적으로 안정된 것이어야 하며, 특히 차량 통과 시 공기압의 감소 효과, 소음 방지, 전열을 이용한 눈녹임 장치 그리고 갯문 자체의 미관, 주변의 조경 등을 복합적으로 고려해야 함
- 갯문의 종류: 중력형, 면벽형, 반돌출형, 돌출형
 - 중력형: 비교적 경사가 급한 지형에 많이 적용
 - 면벽형: 가장 일반적인 형식으로 면벽에 작용하는 외력은 터널 축방향의 토압과 같으므로 흙막이 벽으로 설계
 - 돌출형: 갯구의 지형, 지질, 기상 등에 따라 갯의 라이닝을 채택하고 갯문 옹벽을 설치하지 않은 구조이므로 갯문부의 원지반을 이완시키는 일이 적고 안정성 및 미관이 좋으며 공기압의 감소 효과 등을 기대할 수 있는 매우 이상적인 형식

표 4.4 갯문의 종류와 특징(국내)

구 분	옹벽식	벨 마우스(Bell Mouth)
장점	<ul style="list-style-type: none"> • 터널 갯구부 시공이 용이 • 터널 상부 되메우기가 불필요 • 터널 상부에서 유하하는 지표수에 대한 배수처리가 용이 	<ul style="list-style-type: none"> • 도로와 자연스럽게 접속 유도되므로 운전자에게 안전감을 줌 • 주변 지형과 조화를 이루어 미관이 수려
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 운전자에게 위압감을 줌 • 인위적 구조물 설치에 따른 주변 경관과의 조화를 이루기 어려움 • 정면벽의 휘도 조화를 고려할 필요가 있음 	<ul style="list-style-type: none"> • 갯구부 개착 터널 길이가 깊 • 갯구부 터널 상부에 인위적인 성토 필요 • 특수 거푸집이 필요하고 공기가 깊 • 터널 상부 지표수에 대한 배수처리 필요
적용지형	<ul style="list-style-type: none"> • 갯구부 지형이 횡단상 편측으로 경사진 경우 • 배면 배수 처리가 용이한 지형 • 갯구부 지형이 종단상 급경사인 경우 	<ul style="list-style-type: none"> • 지형이 편측 경사가 없고 갯문 전면 절토가 적어 개착 터널 설치 후 자연스럽게 조화를 이룰 수 있는 지형

표 4.5 갯문의 종류와 특징(국내)

	반돌출형	돌출형		
	파라페트(Parapet)형	돌출식	원통절개형	벨 마우스형
형식과 종류				
지반 조건에 의한 적용성	<ul style="list-style-type: none"> • 지형적으로 말미된 곳이나 좌우에 다른 구조물이 적은 경우 	<ul style="list-style-type: none"> • 압성토를 시공 할 경우 • 갯구 주변의 지질이 	<ul style="list-style-type: none"> • 갯문 주변의 지형이 완만한 경우 • 주변 지형을 조경할 	<ul style="list-style-type: none"> • 지형지질이 비교적 양호하고 갯구 주변이 열려 있는 곳에

	<ul style="list-style-type: none"> • 적설지에 가능 • 갱문 주변지질이 비교적 안정되어 있는 경우 	<ul style="list-style-type: none"> • 좋지 않을 경우 • 적설지에도 가능 • 갱구주변 지형의 절취 등 성형이 비교적 가능한 경우 	<ul style="list-style-type: none"> • 필요가 있음 • 적설지에는 날아 들어오는 눈이 많이 쌓이기 쉬움 	<ul style="list-style-type: none"> • 가능 • 적설지에는 날아 들어오는 눈이 많이 쌓이기 쉬움
시공성	<ul style="list-style-type: none"> • 터널 본체공을 수m 까지 갱구부로연결해야 하지만 갱문 공으로서의 가장 적합한 형임 	<ul style="list-style-type: none"> • 지형, 지질이 안정되어 있는 경우는 가장 경제적이지만 지질이 불량하여 압성토를 필요로 할 경우에는 두께를 두껍게 하여야 함 	<ul style="list-style-type: none"> • 거푸집 및 배근 등에 시간이 많이 들고 경비도 많이 든다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 특수 거푸집을 필요로 하고 공기도 상당히 필요하다. • 경비가 많이 든다.
경관	<ul style="list-style-type: none"> • 면벽 구조가 아니기 때문에 터널 갱구 주변 지형과 비교적 일치함 	<ul style="list-style-type: none"> • 면벽 구조가 아니기 때문에 터널 갱구 주변 지형과 비교적 일치함 	<ul style="list-style-type: none"> • 주변 지형을 조경함으로써 갱문과 조화를 이룸 	<ul style="list-style-type: none"> • 차량 주행에 의한 영향이 적음 • 주변 지형과 조화를 이룸
설계상의 유의점	<ul style="list-style-type: none"> • 지진시 응력 검토 • 갱문 부위의 터널 본체 공에 대한 구조 검토 	<ul style="list-style-type: none"> • 되메움 흙의 지진시 하중 고려 • 기초 지지력 • 시공 이음 고려 		

4.9 심빼기 발파(Center Cut)

- 터널 발파에서는 터널 진행 방향으로 천공이 되므로 발파공과 평행한 방향의 자유면이 없으므로 터널 발파에서 중요한 첫 단계는 자유면 형성을 위한 심빼기 발파가 필요함
- 심빼기 발파 방법: 작업 막장면에 각을 이루어 천공하는 경사공 심빼기 방법과 막장면과 직각으로 몇 개의 평행한 공을 천공하는 평행공 심빼기 방법으로 분류

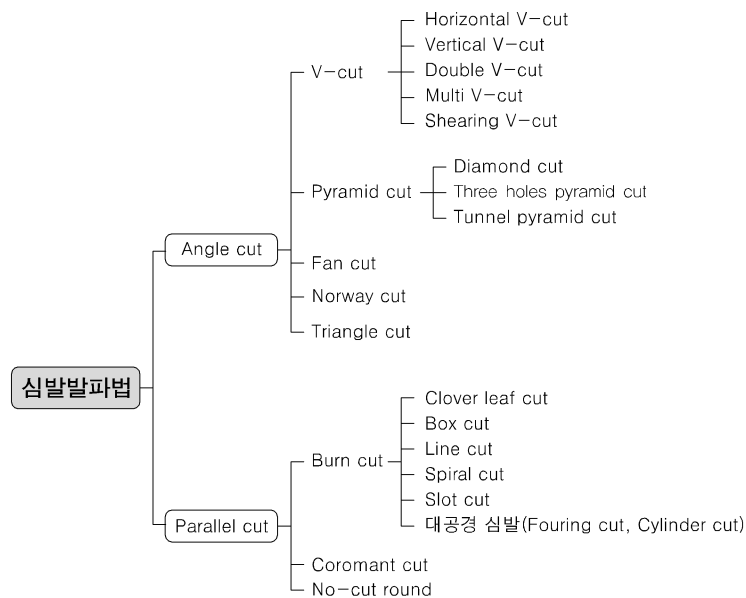


그림 4.19 심빼기발파법의 분류

4.9.1 경사공 심빼기(Angle cut)

- 터널 단면이 크지 않고, 장공 천공을 위한 장비 투입이 어려운 경우에 많이 적용
- 경사공 심빼기 방법: V형 심빼기(V-cut), 피라미드형 심빼기(Pyramid cut), 부채살형 심빼기(Fan cut)
- 경사공 심빼기 시공에서 가장 중요한 사항은 천공 각도이며, 경사공의 각도가 정확하게 천공되지 않으면 공바닥 부분에서 공 간격이 실제보다 작아지거나 커지게 되어 폭약이 과다하게 집중됨

(1) 종류 및 적용

① V-cut

- 가장 오래된 현재도 사용되고 있는 방법으로 천공저가 일직선이 되도록 하며, 그 단면은 V형. 천공위치에 따라 Horizontal V-cut, Vertical V-cut, Double V-cut 등으로 구분
- 천공각도는 $60\sim 70^\circ$, 천공저는 일직선, 공저에서의 공간격은 20cm 정도
- 장약장은 천공장의 1/3이 적합
- Horizontal V-cut: 연암의 가로 층리가 발달한 암석에 적합
- Vertical V-cut: 세로 층리가 발달한 암석에 적합
- Double V-cut: baby cut라고도 하며 연암에 적합

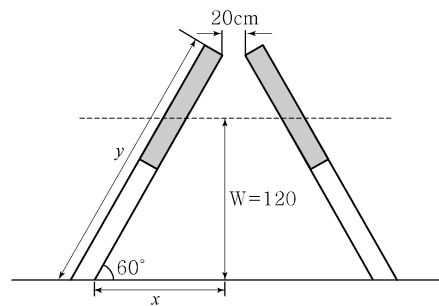
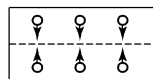
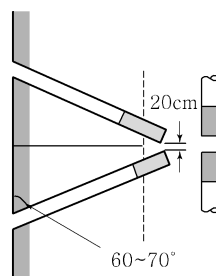
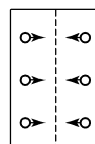


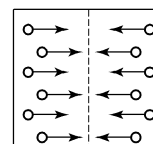
그림 4.20 V-cut에서의 천공각도



① Horizontal V-cut



② Vertical V-cut



③ Double V-cut

그림 4.21 V-cut

② Pyramid cut

- 피라미드형으로 천공할 때 발파공의 공저가 합치하도록 하는 방법으로 실제로는 곤란하나 경암의 심발에 적합하며, 수평갱도에 부적합. German cut이라고도 함
- Three holes pyramid cut: 3방면으로부터 중심으로 집중하는 방법
- Tunnel pyramid cut: 터널이나 개항 굴착시 사용하는 방법
- Diamond cut: 사방에서 중심으로 집중하는 방법

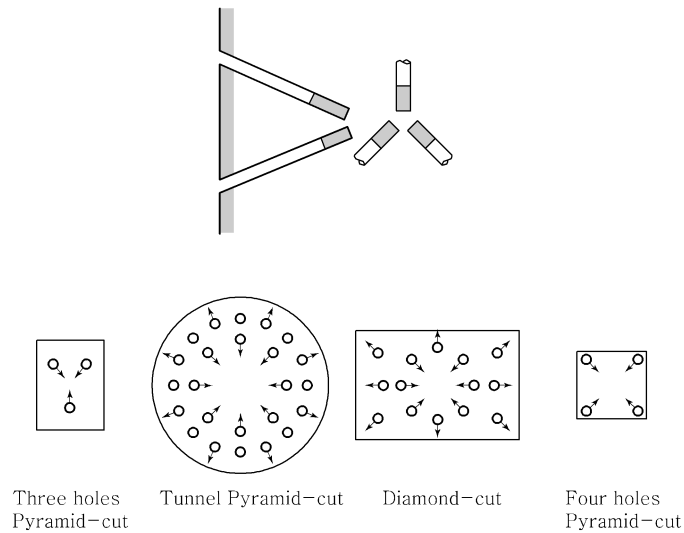


그림 4.22 Pyramid cut

③ Fan cut

- 천공을 부채꼴로 하여 암석의 층상을 이용하는 것으로, Italian cut라고도 함. m^3 당 폭약량이 적게 들며 비교적 긴 굴진이 가능하며, 단면적이 적은 데는 부적당

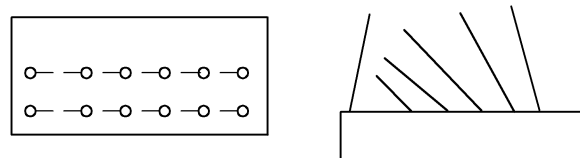


그림 4.23 Fan cut

④ Norway cut

- V-cut과 Pyramid cut의 두 방법을 조합한 것으로 비교적 좁은 작업구역에서 사용. 천공수가 많으므로 굳은 암석에 적합

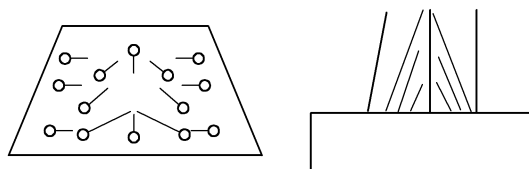


그림 4.24 Norway cut

4.9.2 수평공 심빼기(Parallel cut)

- 중앙에 화약을 넣지 않는 무장약공을 천공하고 그 주위에 장약공을 천공하여 무장약공이 자유면의 역할을 담당하도록 하는 것
- 이 방법은 장공 천공이 가능하여 1회 굴진 거리를 경사공 심빼기보다 크게 할 수 있는 이점이 있음
- 천공길이가 짧을 때는 경사공 심빼기보다 효과가 작음
- 대표적인 수평공 심빼기: 번 심빼기(Burn cut), 코로만트 심빼기(Coromant cut)
 - 번 심빼기: 무장약공의 위치는 여러 가지 형태로 설계할 수 있음. 장비의 발달과 함께 최근에는 대구경의 무장약공을 천공하여 더욱 효율을 높이도록 개선
 - 코로만트 심빼기: 판형을 터널 작업 장면에 대고 고정시킨 후 형태대로 천공. 중앙 무장약공의 지름은 57mm를 사용하여 두 구멍을 겹쳐 천공하여 한 구멍을 만듦(그림 4.25)
- 특징
 - 각 공은 평행천공이 요구되고 또한 압질 및 절리상태, 사용폭약의 종류 등에 의해 최소저항선 및 천공간격, 장약량을 결정하는데 경험 필요
 - 천공위치는 큰 편차가 허용되지 않으므로 천공기술에 숙련 요함
 - 터널의 크기에 따라 1회 발파 진행장의 제한을 적게 받음
 - 파석의 비산거리가 비교적 적고 막장 부근에 집중되므로 파석 처리가 편리함
 - 장약 형식은 장장약(長裝藥)이며 너무 강력한 폭약을 이용하면 암석이 파쇄되어 체적을 증가시키거나 공공의 벽에 강하게 충돌하여 소결될 수 있음
 - 천공이 근접되면 장약이 유폭되거나 어떤 것은 사압현상으로 불발 잔류를 일으키는 수가 있고 불발, Cut off 등이 일어나서 전기뇌관의 종류(초시차) 및 기폭약포의 위치에 주의
 - Angle cut에 비해서 총 천공장은 약간 길게 하고 폭약소비량이 적게
- 소결현상: 강력한 폭약이 가까운 공공을 향해서 기폭되면 한번 분쇄되었던 암분이 공공에 다져져서 굳어지는 것

(1) 종류 및 적용

① Burn cut

- 수개의 심발공을 공간거리를 근접시켜 평행으로 천공하면 그 중 몇 구멍은 무장약공으로 새로운 자유면의 역할을 하게 되므로 효과적. Burn cut는 도화선발파로서 가능

○ Burn cut의 종류

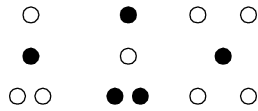
① Coromant cut(그림 4.26)

- 소단면 갱도에서 1발파당 굴진장을 Burn cut보다 더 길게 하기 위해서 고안한 신 천공법으로 천공 예정 압벽에 안내판을 사용하여 천공배치가 정확하게 되도록 함
- Coromant cut 이점: 1발파당 굴진 길이를 더 길게 할 수 있고, 저렴하고 간단한 보조 기구만으로 미숙련공도 용이하게 천공 가능, 파쇄 암석이 가일층 균일하므로 적재 능력 향상

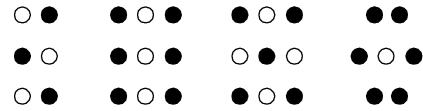
② Spiral cut

- Burn cut 발파에서 나타나는 소결현상을 방지하기 위하여 대구경 천공의 주위에 Spiral(나선)상으로 천공 배치하여 무장약공에서 가까운 것부터 차례로 발파하는 방법

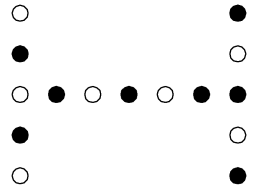
클로버잎 카트(Clover leaf cut)



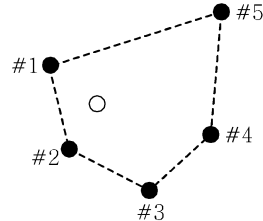
박스 카트(Box cut)



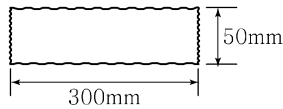
라인 카트(Line cut)



스파이럴 카트(Spiral cut)



슬롯 카트(Slot cut)



대공경 심발(Fouring cut, Cylinder cut)

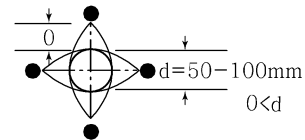


그림 4.25 Burn cut의 종류

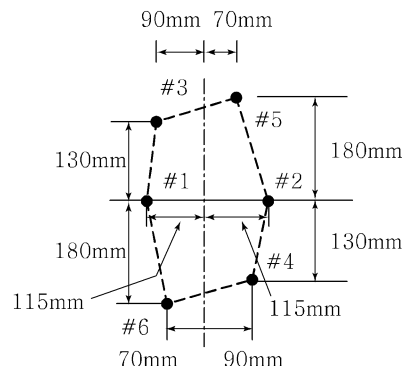


그림 4.26 Coromant cut

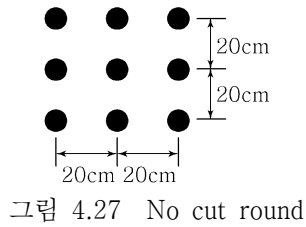
○ Burn cut 발파의 이점

- 심공발파 가능. 종래의 심발파는 구멍깊이(발파심도)가 갱도 폭에 의해 제한을 받는데 비해 번 컷 발파는 심공발파가 용이
- 천공이 용이하고 시간 단축
- 전 발파공은 대체로 수평이고 약장 자유면과 직각이며, 파쇄 암석의 비산이 적게 되며, 폭약 절약(단, 심공 발파를 하였을 때) 가능
- 발파당 장약량도 1m 이하에서는 오히려 m3당 폭약량이 많아지고, 1.5m에서는 거의 동량이며 2m 이상의 경우 절약되고, 잔공이 거의 없음

② No cut round(집중식 노-컷)

- 충격 이론으로 유도한 발파법으로 수직공을 뚫고 무장약공이 없으며 보통보다도 더 많이 천공하여 심빠기에 폭약을 집중하여 장전하는 방법(그림 4.27)

- 공경은 크게 할수록 유리하며, 심빼기에 동시폭발이 필요하므로 도폭선이나 순발전기 뇌관 사용



4.9.3 무장약공 및 인접공 설계

- 무장약공을 이용한 심빼기 설계에서 가장 중요한 사항: 무장약공의 크기, 인접공과의 거리, 장약 밀도를 결정하는 것
- 인접공과의 거리가 너무 크면 파쇄대가 형성이 안 되어 심빼기가 되지 않으며, 너무 작으면 파쇄암의 다짐 효과로 인하여 무장약공의 효과가 감소
- 무장약공과 장약공과의 거리 a 는 보통 무장약공 지름의 1.5배 이하로 하는 것이 좋음(그림 4.28)
- 시공할 때 천공의 정확도는 매우 중요하며, 인접공의 기폭은 자유면을 확대하여 가는 순서로 점화시키도록 설계

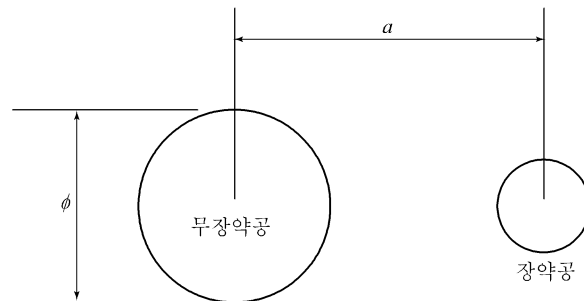


그림 4.28 무장약공과 장약공과의 거리

- 심빼기 공의 패턴: 암반 조건에 따라 다름(그림 4.29)

- 암반이 강할수록 무장약공의 면적을 크게 하는 것이 효율적

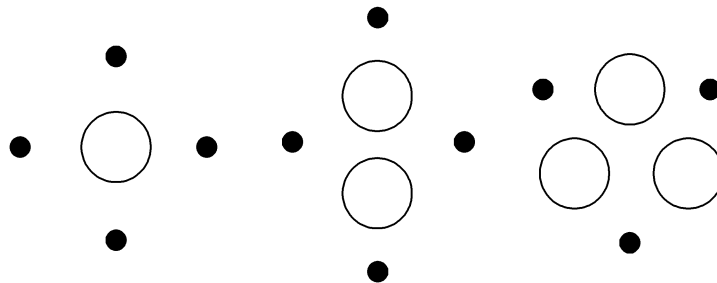


그림 4.29 심빼기공의 몇가지 형태

4.9.4 심빼기공의 위치

- 심빼기공은 보통 터널 단면 중앙에서 약간 하부에 위치시키지만 작업 조건에 따라 다름 (그림 4.30)

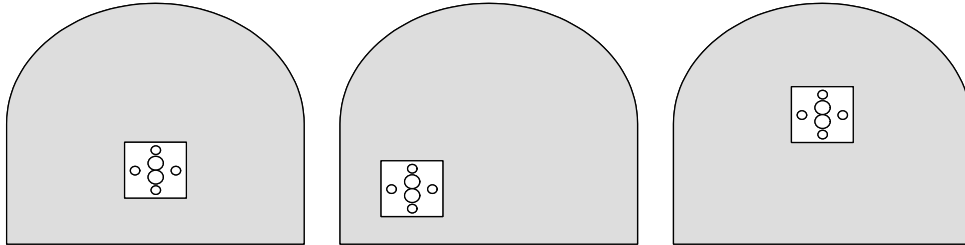


그림 4.30 심빼기공의 위치

4.10 장약량 계산

4.10.1 심빼기공의 장약량 계산

- 평행 심발 공법
 - 첫째, 장약공에 비해 대구경(102mm이상) 한 개만 있는 대구경 심발공(그림 4.31)
 - 둘째, 평행한 번컷(Burn-cut)으로 작은 공경 여러 개의 무장약공이 모두 평행하여 장약공과 원칙적으로 발파된 암석은 자유면쪽으로 움직이며 무장약공을 향해 파괴가 이루어지는 것(그림 4.32). 번컷(Burn-cut)은 대구경공을 가진 평행공 심빼기에 비하면 효과가 좋지 않음

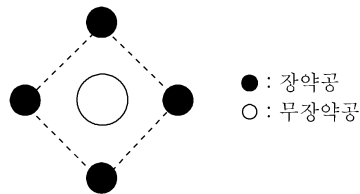


그림 4.31 평행 심발공

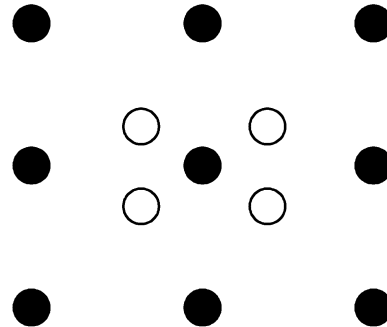


그림 4.32 Burn-cut

- 심발 설계 시 중요한 사항
 - 대구경의 지름
 - 저항선
 - 장약밀도
- 천공의 정확성과 굴진장-무장약공 지름 크기 관계
 - 천공의 부정확성에 의한 오차 발생으로 과도한 저항선 발생과 이로 인한 심발내 균열이나 소성변형 초래
 - 효율적 굴진장을 위한 무장약공 지름 결정. 직경이 커질수록 1회 발파에 있어서 천공장을

- 길게 할 수 있고, 그 결과 진행장을 길게 할 수 있음
- 무장약공 지름 크기에 따른 천공깊이-굴진장 관계(그림 4.33)

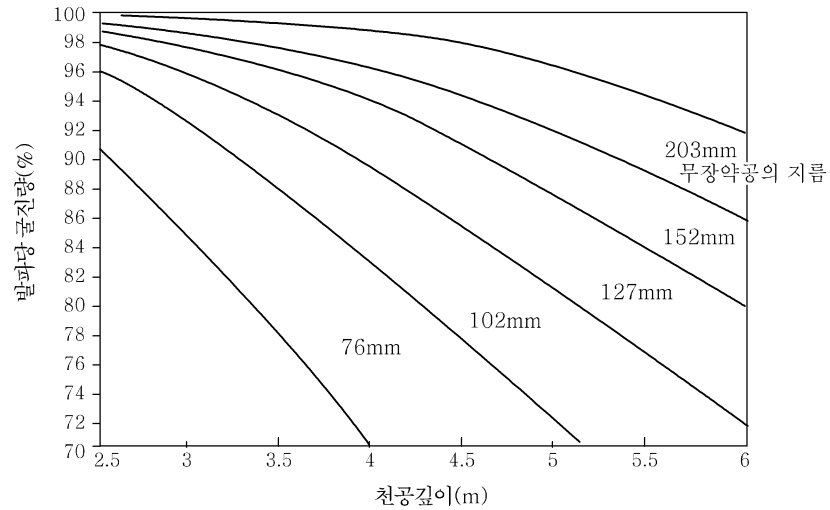


그림 4.33 천공깊이, 백분율의 굴진량과 무장약공 지름 크기간의 관계

- 환산직경 계산식

$$D = d\sqrt{n} \quad (4.2)$$

여기서, D : 무장약공의 환산직경

d : 무장약공의 지름

n : 무장약공의 수

- 심빼기법의 무장약공과 인접하는 장약공의 저항선 길이 계산식

$$\text{저항선 길이} = 0.7 \times \text{무장약공경} \quad (B = 0.7 \times d_{\text{large}}) \quad (4.3)$$

- 2개의 대구경일 경우

$$B = 0.7 \times 2d_{\text{large}} \quad (4.4)$$

○ 무장약공과 공경의 패턴(표 4.6~4.7)

표 4.6 무장약공과 공경의 패턴

무장약공경 (mm)	발파공경 (mm)	저항선 길이 (mm)	공의 중심간 거리 (mm)
57	32	40	85
76	32	53	107
76	45	53	113
2×57	32	80	125
2×57	45	80	131
2×76	32	106	160
2×76	45	106	167
100	45	70	143
100	51	70	146
125	51	88	176

표 4.7 무장약공과 공경의 패턴

발파공경 (mm)	장약량 (kg/m)	빈공경 (mm)
32	0.25	57-2×76
35	0.30	76-2×76
38	0.36	76-2×76
45	0.45	2×76-125
48	0.55	2×76-125
51	0.55	2×76-125

표 4.8 발파공 중에 공간의 목편 크기

발파공경 (mm)	장약량 (kg/m)
1/3 약포 22mm.....+10cm 목편	0.21
1/2 약포 22mm.....+10cm 목편	0.25
1/2 약포 25mm.....+10cm 목편	0.31
1 약포 22mm.....+10cm 목편	0.35

4.10.2 심빼기 계산법

1) 첫 번째 사각형 계산

○ 발파공과 대구경 무장약공 사이의 거리는 1.5ϕ 보다 작게 할 것(그림 4.34)

- 거리가 더 길면 겨우 균열만 생기고, 거리가 짧으면 발파공과 무장약공이 연결될 위험성이 있음

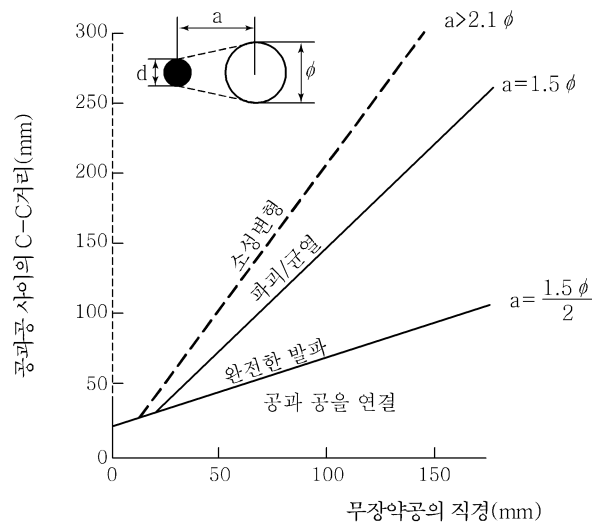


그림 4.34 다양한 거리에서 다양한 직경의 무장약공을 향해 발파했을 때의 결과

- 첫 번째 심빼기 사각형에서 발파공의 위치

$$a = 1.5\phi \quad (4.6)$$

여기서, a : 대구경과 발파공 사이의 중심거리

ϕ : 대구경 지름

- 여러 개의 대구경인 경우

$$a = 1.5D \quad (4.7)$$

여기서, a : 대구경 중심점과 발파공 사이의 거리

D : 작은 무장약공을 큰 무장약공으로 환산된 직경

(2) 첫 번째 심빼기 사각형의 발파공

- 발파공내에 장약밀도가 너무 낮으면 암석을 파괴시키지 못하는 반면, 장약밀도가 너무 높으면 상당한 고속으로 대구경의 반대편 벽을 향하여 암석이 분출
- 무장약의 대구경과 가장 가까운 발파공간의 간격인 C-C에 있어서 필요한 각 장약 집중도는 여러 가지 대구경 지름을 나타냄(그림 4.35). 일반적으로 $a = 1.5\phi$ 이며, 이 간격이 떨어질수록 장약집중도 증가

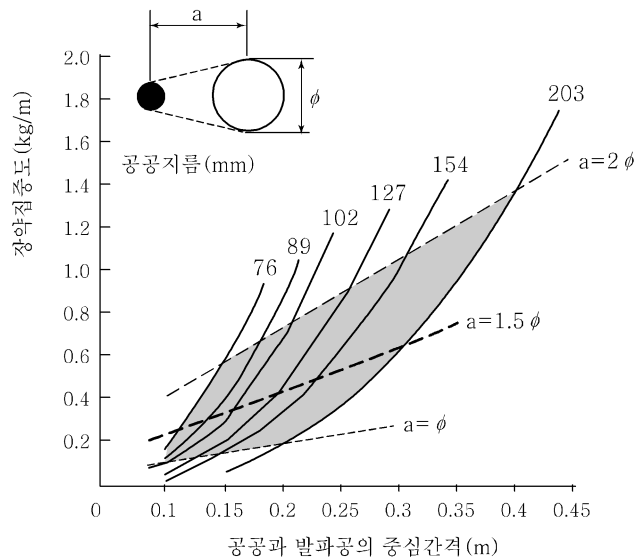


그림 4.35 최소한의 장약집중도(kg/m)와 다른 대구경 지름 C-C 최대의 간격

(3) 나머지 심빼기 사각형 계산

- 심빼기 사각형의 나머지 계산방법은 본질적으로 첫 번째 사각형과 같으며, 균열이 원형을 향하는 대신에 사각형 입구 쪽을 향해 일어나는 것이 다름
- 심빼기의 잔여면적을 위한 저항선(B)은 첫 번째 사각형에서 기폭된 폭과 같음

$$B = W \quad (4.8)$$

- 구속된 기저부분을 파괴하기 위해서는 두 배의 기저 장약집중도와 공저로부터 $5 \times B$ 의 길이만큼 장약 필요. 전색 부분의 길이는 $0.5 \times B$ (그림 4.36)

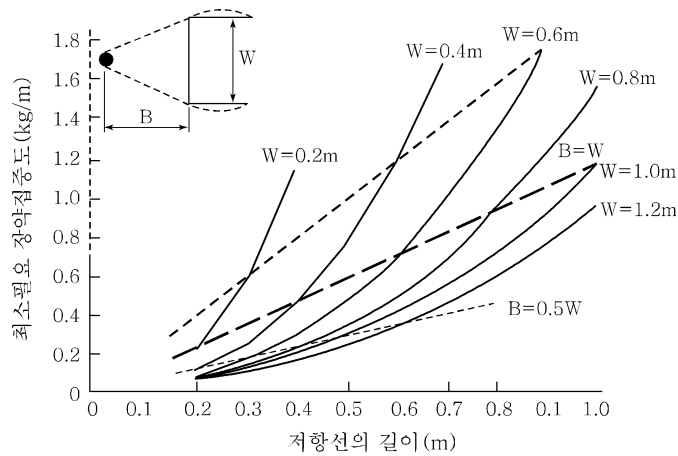


그림 4.36 최소장약집중도(kg/m)와 개구부의 여러 폭에 대한 저항선의 길이

(4) V-cut 계산

- 켜기의 정점내측 각도: 최저 60° 이상으로, 그 이하의 경우 공당 장약량을 증가시켜야 함(그림 4.37)
- V-cut 저항선의 길이: 장약공의 공경에 의해 결정되는 장약량에 의존(표 4.9)
 - 기저장약 길이: 적어도 공길이의 1/3. 각도가 예각이 될 경우 약량을 많이 필요로 함
 - 주상장약량= $0.5 \times$ 기저장약량
 - 전색장= $0.6 \times B$

표 4.9 V-cut의 장약

천공경 (mm)	심배기공 깊이 (m)	저항선길이 (m)	하부장약량 (kg/m)	V-cut 공수 (세로)
약 30	1.5	1.0	0.9	3
38	1.6	1.2	1.4	3
45	1.8	1.5	2.0	3
51	2.0	2.0	2.6	3

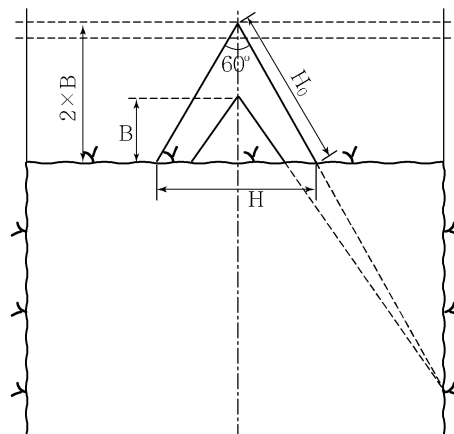


그림 4.37 V-cut 심배기의 배치

○ 심발 보조공의 천공작약 기준(표 4.10)

표 4.10 심발 보조공의 약량

천공경 (mm)	저항선 길이 (m)	기저장약 (kg/m)	주상장약 (kg/m)	전색장 (m)
약 30	0.80	0.90	0.36	0.40
38	0.90	1.40	0.55	0.45
45	1.00	2.00	0.80	0.50
48	1.10	2.30	0.90	0.55
51	1.20	2.60	1.00	0.60

- 기저장약 길이 = $1/3 \times$ 천공장, 주상장약량 = $0.4 \times$ 기저장약량, 저항성의 길이는 한 발파의 진행장이 짧을수록 작게 됨

○ 심빼기와 심발 보조공은 MS뇌관을 사용하되 단차를 각각 분리하여 진동 크기를 감소시키는 것이 좋고, DS 뇌관은 수렴점에서 천공한 구멍의 기폭과는 조화가 어려워 사용하지 않는 게 좋음

○ 각 V-cut의 열 사이의 뇌관단차가 너무 짧아서는 안 됨(그림 4.38)

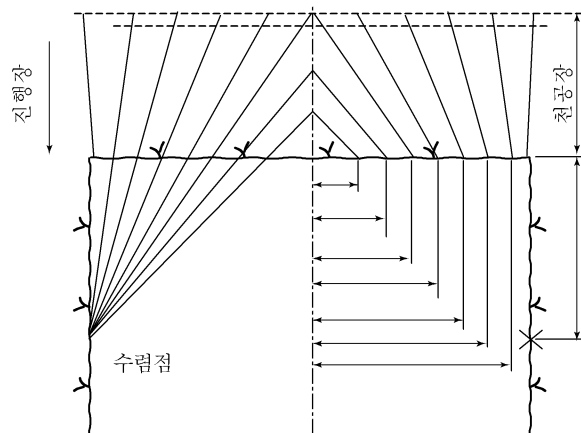


그림 4.38 V-cut 공법의 이론적 배치

4.10.3 그 밖의 공 계산

(1) 상향 또는 수평방향으로 파괴하는 확대공의 계산

- 저항선 길이 = $\frac{\text{천공장} - 4}{2} I$ (천공장 1/3까지 공저에 집중 장약)

- 천공간격 = 저항선의 길이 $\times 1.1$

- 전색장 = 저항선의 길이 $\times 0.50$

- 주상장약밀도 = 기저장약량 (kg/m) $\times 0.50$

- 천공간격: 기저 장약부의 소요 장약량으로부터 계산

- 기저장약과 주상장약의 장전밀도 및 장약 표 4.13 참조

표 4.11 천공경과 장약량

천공경 (mm)	장약 (kg/m ³)
약 30	1.1
40	1.3
50	1.5

표 4.12 천공경과 패턴

천공경 (mm)	면적/공 (m ² /공)	저항선의 길이 (m)	천공간격 (m) ¹⁾
32	0.91	0.90	1.00
35	1.00	1.95	1.05
38	1.15	1.00	1.15
45	1.44	1.15	1.25
48	1.57	1.20	1.30 ¹⁾
51	1.71	1.25	1.35 ¹⁾

¹⁾ 이 천공간격은 대단면 터널의 경우에만 적용. 소단면 터널의 경우 천공간격은 기하학적 조건에 따라 감소

$$h_b = 1/3 \times H, \quad h_b: \text{공저집중장약 (4.9)}$$

$$B \leq \frac{(H-0.4)}{2} \quad (\text{계산식은 아님}); \quad S = 1.1 \times B \quad (S: \text{천공간격}, B: \text{저항선의 길}$$

이) (4.10)

$$Q_{pk} = 0.5 \times Q_{bk} \quad (4.11); \quad (Q_{pk}: \text{주상장약의 장전밀도}, Q_{bk}: \text{기저장약의 장전밀도})$$

$$h_0 = 0.5 \times B \quad (h_0: \text{전색장}) \quad (4.12)$$

표 4.13 천공경과 장약량

천공경 (mm)	천공장 (m)	저항선길이 (m)	천공간격 (m)	기저장약		주상장약		전색장 (m)
				kg	kg/m	kg	kg/m	
33	1.6	0.60	0.70	0.60	1.10	0.30	0.40	0.30
32	2.4	0.90	1.00	0.80	1.00	0.55	0.50	0.45
31	3.2	0.90	0.95	1.00	0.95	0.85	0.50	0.45
38	2.4	1.00	1.10	1.15	1.44	0.80	0.70	0.50
37	3.2	1.00	1.10	1.50	1.36	1.15	0.70	0.50
45	3.2	1.15	1.25	2.25	2.03	1.50	1.00	0.55
48	3.2	1.20	1.30	2.50	2.30	1.70	1.15	0.60
48	4.0	1.20	1.30	3.00	2.30	2.45	1.15	0.60
51	3.2	1.25	1.35	2.50	2.60	1.95	1.30	0.60
51	4.0	1.25	1.35	3.40	2.60	2.70	1.30	0.60

(2) 바닥공의 약량 계산

○ 바닥공의 저항선 길이와 천공간격은 앞의 확대공과 같은 계산

- 저항선 길이는 내향각 및 외향각 고려

- 전색장=0.20×저항선 길이, 주상장약밀도=0.70×기저장약량(kg/m)

$$h_0 = 0.20 \times B \quad (4.13)$$

$$Q_{pk} = 0.70 \times Q_{bk} \quad (4.14)$$

표 4.14 바닥공의 장약량

천공경 (mm)	천공장 (m)	저항선길이 (m)	천공간격 (m)	기저장약		주상장약		전색장 (m)
				kg	kg/m	kg	kg/m	
32	2.4	0.9	1.00	0.8	1.00	0.85	0.75	0.20

(3) 하향으로 파괴하는 확대공의 약량 계산

○ 파쇄암 팽창에 의한 결속력도 적어지고 또한 중력 작용 때문에 기저장약량도 감소(표 4.15), 천공간격은 $1.2 \times$ 저항선길이로 확장 가능, 장약량의 계산은 앞의 확대공의 경우와 같음

- 발파가 쉬운 암반에 대해서는 집중장약도가 낮더라도 표 4.16의 천공간격 적용 가능

$$S = 1.2 \times B \quad (4.15)$$

표 4.15 하부방향 파쇄의 장약량

천공경(mm)	장약(kg/m ³)
30	1.0
40	1.2
50	1.4

표 4.16 천공경과 장약량

천공경 (mm)	천공장 (m)	저항선길이 (m)	천공간격 (m)	기저장약		주상장약		전색장 (m)
				kg	kg/m	kg	kg/m	
33	1.6	0.60	0.70	0.60	1.10	0.30	0.40	0.30
32	2.4	0.90	1.10	0.80	1.00	0.55	0.50	0.45
31	3.2	0.85 ¹⁾	1.10	1.00	0.95	0.85	0.50	0.45
38	2.4	1.00 ¹⁾	1.20	1.15	1.44	0.80	0.70	0.50
37	3.2	1.00 ¹⁾	1.20	1.50	1.36	1.15	0.70	0.50
45	3.2	1.15 ¹⁾	1.40	2.25	2.03	1.50	1.25	0.55
48	3.2	1.20 ¹⁾	1.45	2.50	2.30	1.70	1.15	0.60
48	4.0	1.20 ¹⁾	1.45	3.00	2.30	2.45	1.15	0.60
51	3.2	1.25 ¹⁾	1.50	2.50	2.60	1.95	1.30	0.60
51	4.0	1.25 ¹⁾	1.50	3.40	2.60	2.70	1.30	0.60

주) 표 4.16에 나타난 천공간격은 공저부의 집중장약도를 표 4.13의 값으로 한 경우. 다만, 장전 방법에 의해 집중장약도가 높지 않은 경우 천공간격은 적게 하고 소요약량을 얻을 수 있도록 함

1) 단면적이 70m² 이상의 터널에서는 자유면이 증가하여 암반이 파쇄하기 쉽기 때문에 저항선 길이와 천공간격을 크게 할 수 있고, 이는 벤치발파에 가까움

(4) 측벽공의 약량 계산

- 일반 터널의 측벽 및 천장의 끝은 스무스 발파 적용
- 스무스 발파가 없는 경우의 계산 방법
- 천공간격 = $1.2 \times B$
- 저항선의 길이 = $0.90 \times \text{확대공}$
- 기저 장약장 = $1/6 \times \text{천공장}$
- 전색장 = $0.5 \times \text{저항선 길이}$
- 주상장약의 집중도는 $0.40 \times \text{기저장약의 집중도에 따라 감소}$

$$B = 0.90 \times B_{\text{하향으로 파괴하는 제거공}} \quad (4.16)$$

$$Q_{pk} = 0.40 \times Q_{bk} \quad (4.17)$$

표 4.17 측벽공의 장약량

천공경 (mm)	천공장 (m)	저항선길이 (m)	천공간격 (m)	기저장약		주상장약		전색장 (m)
				kg	kg/m	kg	kg/m	
31	3.2	0.75	0.90	0.50	0.50	0.95	0.70	0.35
45	3.2	1.00	1.20	1.20	1.00	2.03	1.30	0.50

(5) 천반공의 약량 계산

- 천공간격은 측벽공에 준하며, 주상장약은 $0.30 \times \text{기저장약 집중도에 따라 감소}$

$$B = B_{\text{측벽공}} \quad (4.18)$$

$$Q_{pk} = 0.30 \times Q_{bk} \quad (4.19)$$

표 4.18 천반공의 장약량

천공경 (mm)	천공장 (m)	저항선길이 (m)	천공간격 (m)	기저장약		주상장약		전색장 (m)
				kg	kg/m	kg	kg/m	
31	3.2	0.75	0.90	0.50	0.95	0.70	0.30	0.35
45	3.2	1.00	1.20	1.00	2.03	1.30	0.60	0.50

4.11 대단면 터널발파

- 터널 단면이 클 경우 전체 단면을 부분적으로 나누어 발파하여 굴착하는 것이 효율적
- 국내 유류 저장을 위한 공동 단면 4단계 부분 굴착 예(그림 4.39)
- 각 부분을 굴착하는 데 소요된 천공 수와 장약량 및 비장약량(표 4.19)
- 상부 갤러리는 번 심빼기를 이용한 일반 터널 발파와 같이 실시하고, 하부는 3단계(I, II, III)로 나누어 계단식 발파 실시

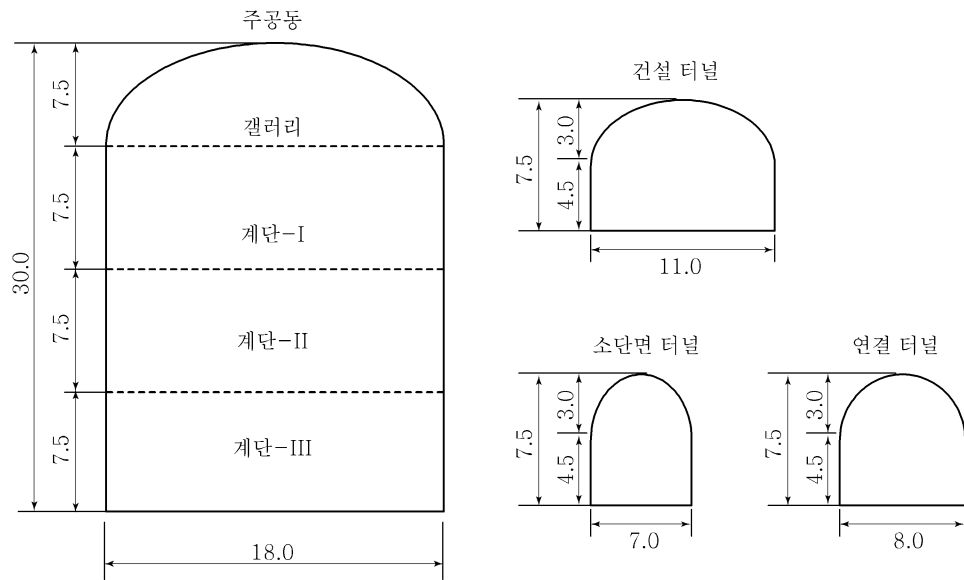
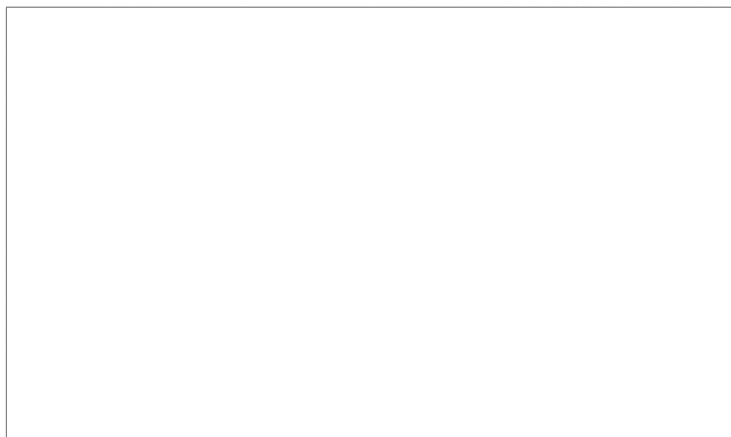


그림 4.39 대단면 유류 저장 공동

표 4.19 1회 발파당 천공 및 장약 패턴

구 분	단면적 (m^2)	천공 수 (공)	장약량 (kg)	굴진 깊이 (m)	장약비 (kg/m^3)
〈저장공동〉					
갤러리	111.4	146	4.41	3.4	1.163
계단-I	135.0	123	470	3.4	1.033
계단-II	135.0	123	470	3.4	1.033
계단-III	135.0	123	470	3.4	1.033
〈진입터널〉					
주진입터널	56.8	92	250	3.4	1.292
분기터널	47.4	85	221	3.4	1.371
수봉터널	18.1	53	127	3.4	2.061



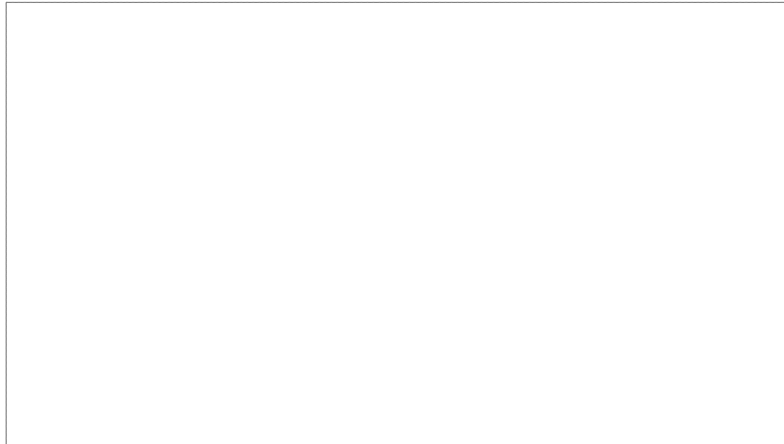


그림 4.40 천공 패턴

4.12 N.A.T.M 터널굴착 공법과 기계굴착 공법

- N.A.T.M(New Austrian Tunneling Method)공법: 지반이 갖고 있는 지지력을 최대한 활용할 수 있으며 현장 계측에 의한 관리가 가능하여 오늘날 거의 모든 발파식 터널굴착에서 적용
 - 록볼트(Rock bolt)나 슛크리트(Shotcrete) 등의 가시적인 인공지보에 의한 효과를 기대함과 동시에 암반 자체가 갖고 있는 강도, 즉 하중 지지력을 충분히 이용하여 최적 경제성과 높은 품질의 터널을 추구하는 공법
 - 암반 또는 지반 중의 지하공간 주변에 링(Ring) 모양의 지지구조체를 형성하는 것을 피하고자 하는 공법
- N.A.T.M공법의 적용범위: 큰 지압을 받는 터널, 토피가 얇은 터널, 매우 연약한 토사터널, 또는 경암 내의 터널이나 대단면 터널에까지 확대
- N.A.T.M공법 적용 원리: 암반의 이완이나 광범위한 변형을 최대한 억제하기 위해 굴착면에 지보를 설치하고 시기적절하게 복공을 실시하여 지보 효과를 보다 높이는 것
 - 암반의 변형이나 이완이 크게 예측되는 경우 슛크리트는 직접 암반면에 밀착하여 표면을 피복하여 보호하므로 변형과 이완 억제에 효과적
 - 강아치 지보공의 접촉점은 암반을 지지하여 집중응력을 받기 쉬우므로 변형이나 이완의 원인
 - N.A.T.M에서는 슛크리트가 가장 유리한 지보로 이해되며, 복공과 지보공을 얹게하여 변형하기 쉽도록 해야 함
 - 1차 복공뿐만 아니라 2차 복공도 얹게 하고 복공을 보강할 필요가 있을 경우에는 복공이나 지보공의 두께를 증가시키지 않고 철근, 철망, 강아치 지보공, 록볼트 등을 사용
 - 지질의 변화에 맞추어 굴착단면을 변화시킬 필요는 없고, 복공의 방법이나 시기는 암반 변위의 계측에 근거하여 결정하고, 암반거동은 기본적으로 링을 폐합하는 시기에 의해서 결정
- 굴착면 부근 암반의 손상을 적게 하기 위해서는 응력의 재분배라는 관점에서 전단면굴착 또는 벤치컷트 방식으로 굴착하는 것이 유리
- 분할굴착은 응력이 증대함과 동시에 응력 재분배 반복으로 암반 손상을 시키므로 가능하

면 기계굴착을 실시하고 단면수가 적은 굴착면으로 하는 것이 유리

- 굴착방법(폭파굴착, 기계굴착, 인력굴착 등의 터널굴착방법)은 암반의 시간 특성에 영향을 미침으로 굴착 사이클, 복공 시기, 인버트 폐합 시기, 벤치 길이, 복공 강도 등을 여러 가지로 변화시켜 조직적으로 조합함으로써 암반과 지보시스템을 하나의 계로 암반 안정화 가능
- 암반의 붕괴를 일으키는 응력집중을 방지하기 위하여 단면의 모서리가 모나지 않도록 최대한 피하고, 단면형이 부드러운 곡선을 이루도록 배려하고, 이중 복공으로 설계될 경우 2차 복공도 얇게 실시
- 2차 복공은 1차 복공과 밀착되는 것이 바람직하며 양자의 접촉부에 마찰이 생기는 것은 바람직하지 않으므로 시공 중에 암반의 변위를 계속적으로 측정함과 동시에 복공내의 응력 및 암반과 복공사이의 접촉부에서 응력을 측정하는 것은 적절한 설계 및 시공을 실시하는데 효과적인 자료가 됨
- 토압, 지보응력, 암반이나 지보의 변형 등 계속적인 계측시스템을 확립함으로써 설계는 물론이고 그 결과를 시공면에 피드백(Feed back)할 수 있으며 한층 경제성과 안정성을 도모하게 되고, 복공에 작용하는 정수압뿐만 아니라 암반의 침투류에 의한 압력도 배수공에 의해서 감소시켜야 함

4.12.1 특징

(1) 암반 이완대

- 채래식공법에서는 터널굴착에 의하여 발생한 이완하중을 강재지보공 및 쏘장으로 지지하므로, 그 사이에 공극이 생기는 것을 피할 수가 없고, 시간이 경과함에 따라 주변 암반은 풍화 및 약화되어 강도가 저하하며, 암반의 이완이 확대되어 그 결과 침하 경향이 증대하거나 큰 지압이 작용하게 됨
- 큰 지압을 대형의 강재지보공이나 두꺼운 콘크리트로 지지하지만 암반의 변형, 이완에 대응할 수가 없어 암반의 붕락, 지보의 파괴 발생 가능
- N.A.T.M에서는 굴착 후 바로 뿔어붙임 콘크리트를 암반에 밀착시켜 시공하므로 풍화나 약화에 따른 암반의 변형, 이완을 최소한으로 억제 가능

(2) 라이닝 배면의 공극

- N.A.T.M에서는 굴착직후에 암반에 밀착시켜 뿔어붙임 콘크리트를 시공하기 때문에 콘크리트 타설시에는 쏘장류 등의 장애물이 없어서 천반의 충전에 주의한다면 암반과 밀착된 콘크리트 라이닝(Concrete Lining)을 타설할 수 없음

(3) 강재지보공의 내하력(지지력)

- 채래식 공법에서는 양호한 상태로 시공된 강재지보공일지라도 내하력에는 한계가 있고, 토압이 깊은 터널 등에서 토압이 크게 작용하면 지지하기 어려우며, 지반이 나쁜 지질일수록 강재지보공이 대형으로 되어 굴착단면도 확대되므로 더욱 내하력이 저하 됨
- N.A.T.M에서는 숏크리트, 록볼트, 강재지보 등을 조합한 비교적 가굴성이 있는 1차 복공을 사용하므로 지반의 토압을 어느 정도 저하시켜가면서 지반의 지보능력을 최대한으로 발휘할 수가 있어 숏크리트, 록볼트 등에 의해 암반의 굴착면에 구속압을 부여함으로써 암반의 내하능력 증가시킬 수 있음

(4) 인버트(Invert)

- **복공콘크리트와 일체로 되어 링을 형성하는 구조체**로서 강도를 증가시켜 지압에 대항할 목적으로 갯도 바닥에 설치하는 일종의 복공
- N.A.T.M에서는 굴착작업의 최종단계에서 인버트가 타설됨으로 조기에 링 폐합이 가능하여 변형 억제 가능

(5) 터널의 누수

- 채래식 공법에서는 강재지보, 쏘장, 연결재를 사용하기 때문에 완전히 방수할 수는 없음
- 뿔어 붙이는 콘크리트와 라이닝 사이에 방수 시트 등을 삽입함으로써 터널의 지수성을 높여 누수가 적은 터널이 될 수 있음

(6) 침하의 억제

- 채래식 공법에서는 쏘장을 넣어서 암반을 지지하기 때문에 지표면의 침하를 최대한 억제하려면 강재지보공을 설치한 후에 임시적으로 콘크리트를 타설하든가 아니면 배면의 공극을 충전하는 등 대책을 세워야 하므로 시간적, 경제적 손실을 면할 수 없음
- N.A.T.M에서는 암반에 밀착한 지보구조물 전단면을 조기에 폐합함으로써 토피가 얇은 지반의 터널에서도 지표면의 침하를 최대한 억제 가능

(7) 시공법의 변경

- 지질 변화에 대응하기 쉽고, 팽창성 지반, 토사 지반으로부터 경암 암반에 이르기까지 유사성이 있는 시공법이 채택되므로, 암반 조건이 복잡하게 변화하는 터널에서도 지보 패턴이나 시공시기 등의 변경이 가능하며, 굴착공법, 투입기기의 부분적 전환가능, 보조공법, 특수공법의 개발 및 개선으로 한층 시공법의 변경 편리

(8) 1회의 굴착길이

- N.A.T.M에서는 암반에 밀착한 지보가 굴착직후에 시공됨으로 같은 암반 조건하에 있다면 막장 및 부석에 대한 안전성이 높으므로 막장의 자립성에 따라 시공능률이 좋을 경우 1회 굴착 길이를 길게 할 수 있어 굴진 능률 향상에 기여

4.12.2 이점

(1) 설계의 합리화

- 암반자신이 갖는 지지력을 효과적으로 이용하므로 **암반의 공학적 특성에 맞는 설계 및 합리적인 지보구조**의 선택이 가능
- **보조공법** 등의 채택으로 **토피가 얇은 터널의 지표침하를 억제**할 수 있음
- 두께가 얇은 복공의 채택으로 **소요 굴착단면이 감소**됨
- **계측결과를 설계, 시공에 반영**하여 보다 합리적이고, 경제적인 터널 구조물을 축조 가능

(2) 시공의 합리성

- 굴착은 전단면 굴착, 벤치 커트 공법, 중벽분할 공법이 채용됨
- 지질변화에 따른 굴착 공법, 투입기기 및 제반시설의 전환이 용이함

- 전단면 복공이 가능하여 터널품질 향상에 기여
- 갱내작업이 집중화 및 단순화 가능
- 대형 기계 투입으로 굴착 능률을 높일 수 있어 경제성 추구
- 용수, 침투수에 대한 방수가 보다 철저하게 이루어짐
- 단면 변화나 변형단면에 대처하기 쉬우므로 터널의 교점, 분기부, 단면 변화부 등의 시공에 유리하며 구조적인 약점도 어느 정도 보완됨

(3) 시공의 안정성

- 계측에 의하여 암반 거동이 파악되고 주변 암반의 붕락, 구축물의 변형을 사전에 관찰할 수 가 있어서 효과적인 대책 수립 가능
- 갱내작업이 막장부근에 집약되어 작업의 폭주를 피할 수 있음

(4) 구조물의 내구성

- 복공배면의 공극이나 연결 부재가 없어서 마무리 면은 원활하게 됨
- 누수, 고드름 등의 피해를 억제
- 고품질의 터널 구축물이 되어, 내구연한이 대폭 연장

(5) 경제성

- 일반적인 암반에서는 채래식 공법에 비하여 보다 경제성이 높아짐
- 특수조건하의 암반에서도 채래식 공법에 비하여 보다 경제성이 높아짐
- 공사비만의 단순비교가 아니고 내구성, 품질, 보수유지비 등 종합비교를 하여도 채래식 공법보다 우위에 있음

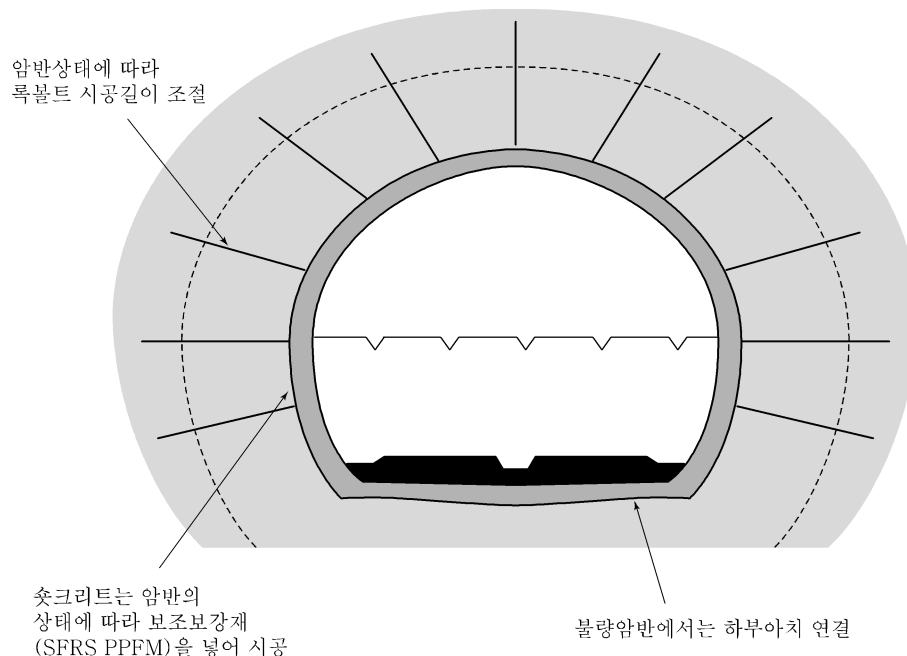
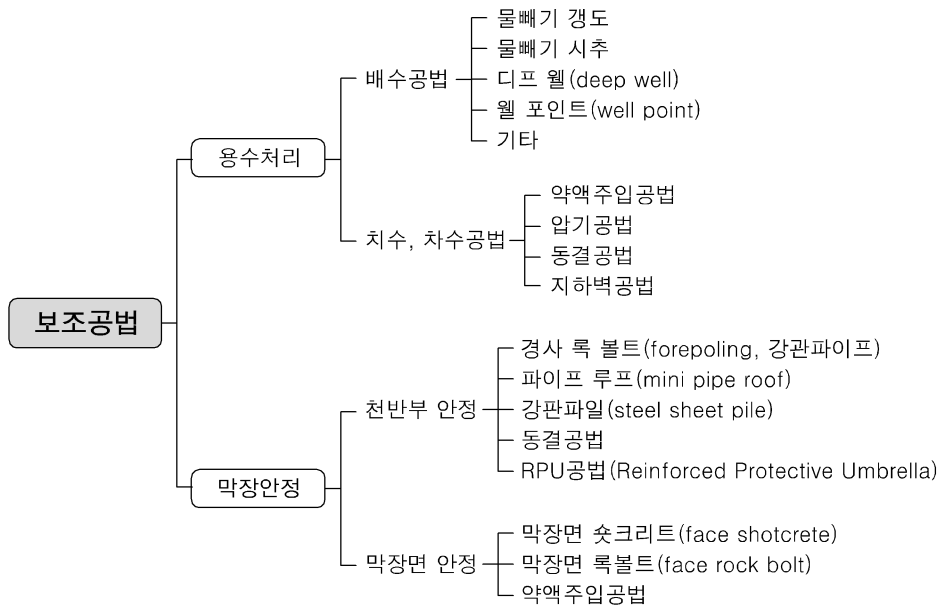


그림 4.41 N.A.T.M 터널

표 4.20 N.A.T.M 보조공법



4.12.3 지보재

- 균열이 많은 암반, 파쇄된 암반, 팽창성 연암이나 토사지반에서는 천반부의 붕락, 막장면의 붕괴가 발생하여 막장의 안정성을 확보하기 어려울 때나, 용수에 의해 시공이 곤란하게 되는 경우, 지보효과가 저하하는 경우 시공을 안전하고 원활하게 추진하기 위한 적절한 보조공법 필요

(1) 용수처리

- 용수대책: 용수를 처리하여 굴착상의 안전성 및 구조물의 고품질을 유지하기 위한 것으로 물빼기공법, 지수공법 등이 있음
- ① 물빼기공법: 지하수위를 저하시켜 막장에 용출하는 수량과 수압을 감소시키고, 탈수, 압밀에 의해 지반을 개량하는 방법
 - ② 지수공법: 지하수위를 저하시키는 것이 토사유출 때문에 곤란할 때 지반 주입, 일시적 동결, 갱내압기 등에 의한 지수공법을 적용
 - ③ 물빼기 시추법: 갱내에서 막장 깊은 곳에 위치한 대수층에 물빼기 시추를 실시하여 지하수위를 저하시키는 방법
 - ④ 딥 웰(Deep well)공법: 지하수위를 저하시키고자 하는 곳에 우물을 준비하고 굴착에 앞서 일제히 양수하여 갱내 수위가 저하할 때 굴착하는 방법. 사전 배수방식이므로 굴착시의 안전과 능률면에서 효과적

표 4.21 대책공법과 그 특징 및 적용범위

대책 처리공법		특 징	적용범위
물빼기 공 법	물빼기갱, 우회갱도의 굴착	<ul style="list-style-type: none"> • 본 터널의 지반을 이완시킬 우려가 있음. • 단독공법으로는 적고 다른 공법과 함께 실시 • 터널굴착과 동시 시행 • 용수량, 공급원 범위로서 몇 개 	<ul style="list-style-type: none"> • 피압저하 • 단층파쇄대에 포함된 부분적인 저유층의 돌파 • 지하수위 공급원이 넓을 때

		의 물빼기 갭이 필요	
	물빼기 시추	<ul style="list-style-type: none"> • 굴착막장 전방에 있는 대수층의 지하수위를 저하 • 본갱 막장작업을 정지시킴 • 막장 전방 지질의 예측에도 이용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 토피와 용수량이 클 때 • 지하수위가 대단히 높고, 수량도 많을 때 • 경암지반에서 토사지반까지 광범위하게 이용
	딥 웰 (deep well)	<ul style="list-style-type: none"> • 투수계수를 잘 파악할 필요가 있을 때 • 굴착과 동시에 시공가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 투수성이 좋은 암반 • 양수높이가 5~8m 이하
	웰 포인트 (well point)	<ul style="list-style-type: none"> • 갭내나 지표에서 지하수를 강제로 배제시켜 수위 저하를 도모코자 할 때 • 수위저하에 시간이 필요할 때가 많다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 실트층, 모래층을 대상으로 함 • 양수높이 5~8m • 토피와 용수량이 적을 때 • 굴착심도가 깊지 않을 때
지수 공법	주입공법	<ul style="list-style-type: none"> • 지반의 역학적 강도증가가 가능함 • 지표침하 방지 • 주입량과 그 효과를 판단하기 곤란함 • 토피가 얇은 곳에서는 지반응기가 나타남 • 비교적 얇게 분할된 높이 	<ul style="list-style-type: none"> • 환경조건을 가장 중요시함 • 특히 가는 모래, 토피가 얇은 지반에서는 요주의 • 균열이 발달하여 붕괴되기 쉬움
	압기공법	<ul style="list-style-type: none"> • 지표침하를 방지 • 지표침하가 곤란할 때 효과가 좋음 • 바닥 부근의 지수는 곤란함 • 작업환경이 불량함 • 경비가 많이 소요됨 	<ul style="list-style-type: none"> • 용수량이 많을 때 • 연약층 • 지반침하가 문제될 때
	동결공법	<ul style="list-style-type: none"> • 차수성 및 지반강화 가능 • 동결, 융해 모두가 현장상태 그대로 시공 가능함 • 공기가 길고 공비도 많음 • 지하수의 연속성을 필요로 함 • 저온하 작업에 의한 작업원의 건강관리에 유념해야 함 	<ul style="list-style-type: none"> • 토질에 대한 적용범위가 넓음 • 지반침하가 문제일 때

(2) 록볼트

○ 록볼트(Rock bolt)는 암반에 정착하는 방법에 따라 여러 가지가 있는데, N.A.T.M이 도입되기 전에 그 초기 단계에서 경암지반을 대상으로 침단정착식의 것이 일반적이었지만, 그 후 전면접착식의 록볼트가 개발되어 연암지반에서도 사용

① 록볼트의 작용효과

- 록볼트를 암반에 삽입하여 **암반의 내하력**을 이끌어내는 것
 - 강아치 지보공은 터널벽면에서 지반을 압박하는 것에 반하여, 록볼트는 터널내측에서 지반을 구속하여 지반 자신이 갖고 있는 지보능력을 이용하는 것
 - 원지반의 아치효과, 마찰효과, 매달림효과, 엇물림효과, 주변암반의 개량효과 등

② 록볼트 시공

- 록볼트 지보시스템이 **굴착 및 지보의 통합된 사이클**로써 지보로서의 역할(그림 4.42)
- 발파 후 새로 생긴 공동의 천반 및 측벽 암반의 변형된 부분에 대한 스케일링(Scaling)의 적절한 조치

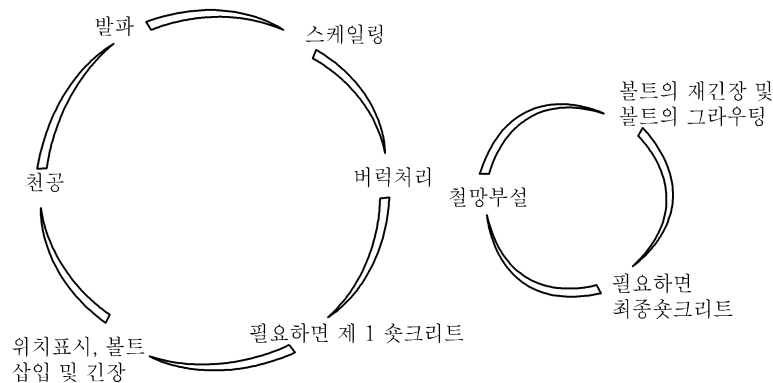


그림 4.42 록볼트를 주요 지보요소로 사용했을 경우 통합된 굴착/지보 사이클

③ 록볼트에 의한 보조공법

- 균열이나 미끄럼 면이 많은 암반이나 토사지반 및 팽창성 암반을 굴착하는 경우 막장천단의 붕괴, 스폐링(Spalling) 발생으로 위험이 있을 때, 터널막장의 천반이나 막장면의 안정화를 위해 강재지보공의 간격이나 1회 굴진장을 짧게 하여 막장 전반의 지반을 보강하고, 선행침하를 억제한 다음에 굴착하는 방법으로 선수봉, mini pipe roof 및 sheet pile과 같은 보조지보부재를 사용하거나, 막장면의 안정을 위해 록볼트 사용

㉓ Mini pipe roof

- **점착력이 약한 토사지반의 터널**을 대상으로 천공경보다 약간 굵은 파이프를 굴착면 바깥 둘레에 따라 타설 하여 굴착에 의한 지반의 느슨함과 천단의 스폐링을 방지하는 것
- **Talus 지대나 균열이 많고 막장이 자립하기에 어려운 암반**에서는 파이프에 작은 구멍을 뚫고 파이프 주변암반의 균열에 시멘트 밀크를 주입하여, 막장전반의 암반을 굳히는 동시에 스폐링을 방지하는 역할

㉔ Sheet pile

- **암반조건이 나쁜 토사지반에서 막장보호**를 위해서 Sheet pile을 굴착면 바깥 둘레에 따라 직접 타설
- 슛크리트 시공시에 이들 부재와 암반과의 사이에 공극이 발생하기 쉽고 밀착성이 나쁘기 때문에, 뒤쪽 공극에는 모르타르 또는 시멘트 밀크 등의 충전 검토 필요

㉕ Face rock bolt

- **막장면이 굴착된 터널방향으로 밀려나오는 암반**에서 자주 사용되는 방법으로 막장 강화 대책의 하나로서 막장에 록볼트하여 막장의 안정을 얻고자 하는 것
- 록볼트 길이는 막장 굴착시 이전에 타설한 록볼트가 남아있어 효과적으로 작용할 수 있는 길이로, 보통 1회 굴진장의 3배 정도

4.12.4 터널굴착 보조공법

(1) Fore poling

- 강아치 지보공을 굴진장의 2배 이상 록볼트나 철근봉을 막장전반에 수평으로 타설하여 천단 붕락을 방지하는 방법
- 일시적 지보재로서 굴착 전 터널천반부에 종방향으로 설치하여 굴착천반부의 안정을 도모하고 막장전반의 지반보강 및 느슨함 방지
 - 재질은 철근, 강관, 강지보 말뚝, 길이는 2~4m, 굴진장의 2~3배 정도, 횡방향 설치 간격 30~60cm, 횡방향 설치범위 60° ~120° , 종방향 설치각도 0° ~15° (갱구부 저각 가능), 지반에 강지보를 밀착시켜 2점 지지가 되도록 하여 터널 막장 전방에 빔을 형성시키며 매 막장 또는 2막장마다 설치하여 상호 중첩을 통한 강성을 증대하고 천공면은 모르타르 그라우팅으로 여굴 및 느슨함 방지
- 시공법: 천공 중에 모르타르를 주입하여 그 후에 철근을 삽입하는 방법과 모르타르를 넣지 않고 철근 봉만 타설 하는 방법이 있으나, 후자는 막장 자립에 나쁜 영향을 초래하는 경우가 있어 전자가 바람직

(2) Pipe roof / 강관다단 그라우팅

- 터널굴착에 따른 변위를 최대한 억제하고 상부 시설물 보호 및 터널의 안정성 확보를 위해 적용하는 공법
- 재질은 강관, FRP, 길이는 6m 이상, 횡방향 설치간격 30~60cm, 횡방향 설치범위 90° ~180° , 종방향 설치각도 0° ~15° (갱구부 저각 가능), 시멘트 주입 횟수에 따라 1회 주입 시는 Pipe roof, 다단 주입 시는 강관(FRP) 다단 그라우팅 공법으로 구분하며 점착력이 작은 토사지반에도 보강 효과가 탁월하며 고각으로 설치할 경우 굴착면 여굴방지를 위해 Fore poling과 함께 적용이 가능
- 굴착 전에 일정규모의 강관을 지중에 삽입, 지반굴착시 강관의 빔 작용을 유발시켜 상부 및 주변 지반을 지지해 주는 역할을 하기 때문에 하중 경감효과를 크게 얻을 수 있음. 상재하중 크기나 지질조건 인접구조물의 특성 및 규모, 터널의 토피두께 등에 따라 강관을 적절한 형상으로 배열시켜 주변환경, 지질적 요소에 강력히 대처해 나가는 것이므로 장비의 출반입 및 발진 개구경의 설치가 가능한 곳에서는 어느 장소에서나 시공 가능

1) 공법적용

- 철도 및 고속도로, 국도 등을 가로지르는 지하차도, 지하보도, 지하연결통로, 차집관거, 하수암거 등의 설치를 위한 선행보조공사
- 각종 대형관로공사를 위한 선행보조공사
- 터널굴착을 위한 보조공사
- 연약지반에서의 각종 구조물 방호
- 지중매설관 및 매설 수로의 방호
- 단층파쇄대 및 해저파쇄대 층의 방호
- 교량 기초의 방호
- 사면 미끄럼의 방호

2) 시공장비

Pipe roof 강관 크기에 따라 유압식 또는 항타식 장비사용

3) 시공형태

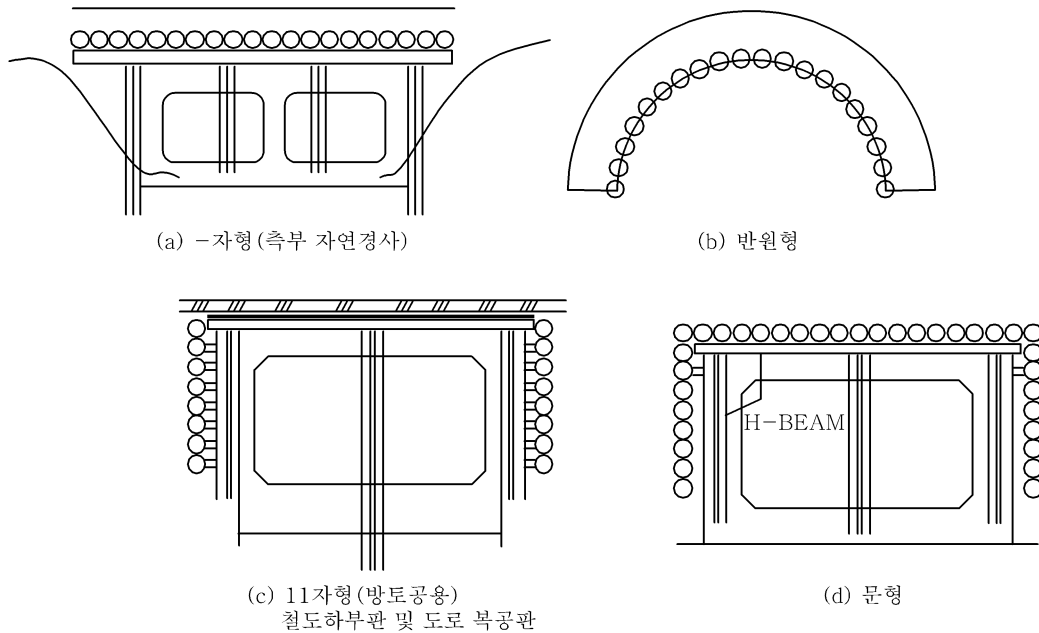


그림 4.43 Pipe Roof 시공형태

(3) Working face 자립공법

- 연약한 지반에 위치하는 막장면이 밀어내거나 붕괴에 저항할 수 있도록 도와주는 공법
- 막장면 중앙부에 지지코아를 남겨두고 굴착한 후 지보를 설치, 토사지반에서 필수적이며, 지지코아의 크기 및 후속 작업공정의 원활한 수행이 가능하도록 결정하는 지지코아 설치 방법
- 미고결 지반이나 팽창성 지반이 1사이클 사이에 현저히 열화하여 작은 붕괴로부터 큰 붕괴로의 연결이 예상될 경우 3cm 이상(최소 5cm 추천)의 쇼크리트를 막장면에 타설, 장기간 공사중 관리가 필수적이며, 시공이 용이하고 효과가 좋은 막장면 쇼크리트 타설 방법이 있으며, 길이는 굴진장의 3배 이상, 연약지반은 막장 Shotcrete와 병용하면 효과 증대
- 절단이 용이한 Rock Bolt 적용이 바람직하며 베어링 플레이트를 설치하여 Rock Bolt를 정착하고 천공홀은 모르터나 세멘트 Grout로 충전할 필요가 있는 막장 Rock Bolt 방법
- 수발공으로 용수처리 및 굴착단면 축소(분할굴착) 무지보 Span 길이를 최소화하는 방법

(4) 그라우팅 공법

- 주입재를 지반에 주입시켜 지반의 강도증진, 지수성 증진, 변위억제 등을 유도하여 구조물을 보호하고 시공의 용이성, 안정성을 도모하는 공법
- 목적: 지반 강도 증진, 기초지반 지지력 증대, 터널 굴착 시 주변지반 붕괴방지, 인접구조물 보호, 토압의 경감, 터널굴착 시 용수방지, 지하수위 저하방지, 지반 변위 억제 등
- 그라우팅에 영향을 미치는 요인
- 대상 지반의 불균질성, 균열, 투수성과 주입재의 종류에 따른 점성, 젤 타입, 화학적 성질 및 주입압력, 시공방법 등

- 주입제 및 주입방법의 특성을 파악하여 사용목적과 대상지반에 적합한 공법을 선정 한 후 철저한 시공관리와 주입효과 확인 필요

○ 그라우팅 주입재료 조건

- 침투성이 좋을 것
- 젤 반응 종료와 동시에 고강도 발휘 할 것
- 젤화 또는 고화한 주입제는 수축 등을 일으키지 않고 지반을 불투수성화 할 것
- 환경 오염 문제를 일으키지 않을 것
- 취급, 조합 등이 간단할 것
- 젤 타임 조정이 용이할 것
- 고화 및 젤화 시 지반의 물리 화학적 성질에 대해 영향을 적게 받을 것

○ 터널이나 지하공간을 굴착할 때 용수대책으로 물빼기 공법을 사용하여 지하수위를 낮추는 것이 토사유출이나 침하, 원지반의 변형을 일으킬 우려가 있는 경우 사용하는 지수공법의 하나로써 지반 중에 시추공을 천공하고 그 공 내에 시멘트나 물유리, 기타 약액을 주입하여 각종 균열이나 틈을 충전함으로써 지수와 차수, 지반강화 및 변형 방지를 목적으로 시행

○ 그라우팅 기능: 지반강화와 불투수성화

- 지반강화: 터널 굴착시 붕괴방지, 굴착지반 인근 구조물의 방호, 기초지반의 지지력개선, 지하굴착시 융기(Heaving)방지, 토압의 감소를 도모하는 것
- 불투수성화: 터널 및 수직갱 굴착시 용수방지, 기초 및 지하굴착시 파이핑 방지, 굴착지반 부근의 지하수위 저하방지, 댐 제방 등의 지수 등을 도모하는 것

○ 주입제의 물리 화학적 조건

- 침투성(세밀한 토립자 간극에 침투)이 좋을 것
- 젤 반응 종료와 동시에 고강도를 발휘할 것
- 젤화 또는 고화한 주입제는 수축 등을 일으키지 않고 지반을 불투수성화 할 것
- 환경오염 문제를 일으키지 않을 것
- 취급, 조합 등이 간단하고 젤 타임 조정이 용이할 것

표 4.22 천단 및 지반보강 공법

공법 내용	천단 및 지반보강 공법		
	휘폴링 공법	FRP(강관)다단 그라우팅 공법	Ernrud 강관 다단그라우팅 공법
공 법 개 요	불량한 지반조건의 구간에서 터널을 굴착하기 전에 굴착 자유면의 길이를 감소시키고 지반변형을 방지하여 국부적인 막장 붕락을 막기 위하여 강관 또는 철근을 터널막장에 관입하는 보조공법	터널 굴착전에 고강도 FRP관(강관)을 우산형태로 적절히 배열, 설치하고 주입제에 의한 지반고결로 보강재와 주변지반을 일체화시켜 Beam Arch를 형성하는 공법으로 차수 및 보강효과를 동시에 얻을 수 있는 공법	굴착면전방에 우산모양의 구조체를 형성하여 굴착시 구조적인 안전성을 도모유지하는 공법으로지반조건에 따라 강관을 이용한 직천공이 가능하며 주입방식 및 목적에 따라 다단주입, 케이싱 헤드방식 및 수평 JET방식의 3가지 형태로 시공 가능

주 입 재 료	시멘트	시멘트+규산소다+	마이크로실리카시멘트 +규산소다
주 입 방 법	1.0 Shot 방식의 단관주입	Air Packer System을 이용한 다단주입	Air Packer System을 이용한 다단주입
적 용 목 적	· 여굴 및 봉락방지	· 여굴 및 봉락방지 · 차수 및 지반보강	· 여굴 및 봉락방지 · 차수 및 지반보강
적 용 토 질	· 풍화암 및 연암	· ML(SC) 이상의 토질, 풍화암(연암), 파쇄대 및 단층대	· SC 이상의 토질토사, 풍화 암, 연암, 파쇄대 및 단층대
장 점	· 시공 용이 · 공정 간단 · 소규모 봉락방지 효과적	· FRP는 중량이 가벼워 취급용이 (강관은 제작용이, 재료비 저렴) · 내부식성이 좋아 영구적인 보강 재로 가능 · FRP 주입관과 간격재가 일체화 되게 특수 제작되어 고무밴드를 보호하여 그라우팅 품질향상이 기대되고 시공 신뢰도 높음 · FRP관의표면이 거칠어 그라우 트재와 부착강도가 증가	· 전용 장비 시공으로 시공 정 밀도가 양호하고 180° 보강 가능 · 강도발현 및 내경 우수 · 지반조건 및 주입재의 특성 에 맞는 주입방법의 선택 (1.5or 2.0Shot) 시공 가능 · 강관을 이용한 직천공이 가 능하므로 천공홀의 붕괴에 의한 시공성의 저하를 방지 할 수 있음
단 점	· 막장면지지 불량 · 막장 굴착길이 길어질수 록 지지효과 감소 · 지하수 누출부나 침단부 보강효과 감소	· 고가의 재료비 · 신공법으로 시공실적 부족 · 강관은 중량이 커서 시공성이 저하되고 부식으로 인한 영구 보강재로 부적합	· 전용장비 고가 · 시공비 고가

표 4.23 차수 및 지반보강 그라우팅

구 분	MSG 공법 (Micro Silica Grouting)	SGR 공법 (Space Grouting Rocket System)	LW 공법 (Cement Milk Grouting)
시공개요	· 이중관 주입롯드에 특 수 주입 장치를 장착하 여 이중팻터를 이용하 여 주입	· 이중관 주입롯드에 특수 선 단장치(로켓)를 함하여 대상 지반에 유도공간을 확보후 복합주입	· 맨젯튜브나 파이프 삽입후 이중팻터를 설치하여 주입
주입방법	· 1.5또는2.0 Short · 복합주입	· 2.0 Shot · 복합주입	· 1.0 또는 1.5 Shot
주 재료	· 마이크로 실리카 (시멘트) · 규산소다	· 겔타임 조절 약액 · 시멘트 · 규산소다	· 시멘트 · 규산소다 · 벤토나이트
일축압축 강도 (kgf/cm ²)	20~30	6~10	6~15
차수효과 k(cm/sec)	10-6~10-7	10-5~10-6	10-4~10-5

개량범위 (m)	1.0~1.5	0.8 · 1.2	0.8~1.0
장 점	<ul style="list-style-type: none"> · 겔타임 조절 용이 (급결, 완결) · 주입재료의 입경이 작아(3.7~10μm) 미세한 암반 크랙까지 주입재의 침투가 가능 · 지하수에 의한 주입재의 용탈현상을 억제시키는 실리카졸겔 활성화 사용되므로 내구성이 크고 영구적 · 환경 및 지하수 오염에 대한 안정성 확보 	<ul style="list-style-type: none"> · 겔타임 조절 용이 (급결, 완결) · 유도공간을 이용한 저압주입으로 지반의 교란 적음 · 시공경험 풍부 · 마이크로 시멘트 사용시 미세틈에 주입 가능 	<ul style="list-style-type: none"> · 장비 소규모, 작업 단순 · 경제적인 공사비 · 시공경험 풍부 · 공극이 다소 큰 지반에 지반보강 효과 양호
단 점	<ul style="list-style-type: none"> · 주입재료 공사비 고가 · 시공이 적음 	<ul style="list-style-type: none"> · 지하수에 의한 약액의 용탈 및 용해로 인해 내구성 미약 · 암반층의 시공효과 불량 · 미세 균열에는 충전 불가 (암반층 절리 0.5mm 이하) 	<ul style="list-style-type: none"> · 지하수에 의한 약액의 용탈 및 용해로 인해 내구성 미약 · 차수효과 기대 미흡 · 지하수에 의한 용탈현상 큼 · 환경오염 우려

1) 선행그라우팅(Pre-Grouting)

- 감지공(Feeler hole)에 의해 지하수 양과 수압이 확인되어 차수의 필요성이 있으면 막장 굴진에 앞서 깊이 10m 정도의 다수의 공을 천공한 후 3m 깊이에 팩커를 설치하고 초기 주입압력 4 kg/cm²에서 점차 가압하여 최종 15 kg/cm²까지 약 2~3시간 동안 벤토나이트와 혼합된 시멘트밀크를 주입. 평균 15 l/min 정도가 주입되어 공당 약 20포씩 투입
- 선행그라우팅 예(그림 4.44): 공간격을 1m 또는 2m씩 띄어 전 막장에 45공을 공당 4.2m씩 천공한 다음, 시멘트 + 벤토나이트 + 혼합제로 구성된 주입액을 투입 경화시킨 것

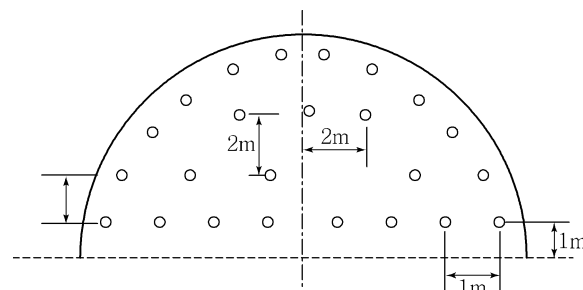


그림 4.44 선행그라우팅의 예

2) 후그라우팅(After Grouting)

- 선행그라우팅을 실시하고 발파에 의해 개착된 터널 주벽으로부터 출수되는 경우 이를 차수시키기 위하여 2차로 실시한 그라우팅공법
- 시행방법은 선행그라우팅과 동일하나 시멘트 주입액의 주입량이 30~50 l/min 정도로 주입 시간 단축 가능

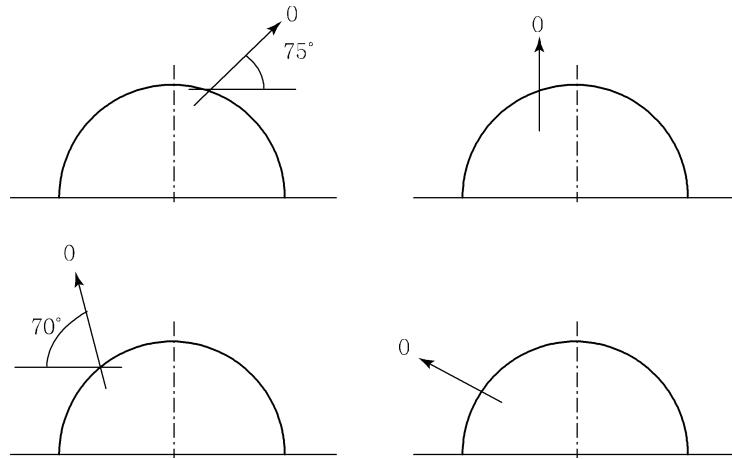


그림 4.45 후그라우팅공의 배치

(5) RPU(Reinforced Protective Umbrella)공법

- 지반은 흙입자의 크기 및 배열, 간극비, 밀도, 함수비, 지하수위 등에 따라 지반강도측면에서 대단히 복잡하게 변화하며, 또한 사질층에서의 점토층이 존재하거나 지반내 피압지하수의 형성과 같은 지질적인 다양한 변화요소를 갖고 있기 때문에 지하구조물 축조시에 많은 문제점을 가지고 있음
- 도심지에서의 지하구조물 축조는 지하구조물 자체의 안정뿐만 아니라 굴착시의 지반응력 변화에 따른 주변 기존 구조물의 안정에 대해서도 각별히 주의를 기울여야 하므로 이러한 복잡한 양상을 나타내는 지반에 대한 안정처리는 매우 중요함
- 지하수위가 높아 지하 굴착시 주변지반의 침하가 크게 예상되거나, 연약지반으로 인한 지반이완영역이 넓은 경우에는 지하구조물 및 인접구조물의 안정이 우려되므로 굴착공법과 병행하여 적절한 보조공법을 사용
- 보조공법의 대표적인 것으로 주입공법이 있으나 철도 및 인근 고층건물 등으로 인한 상재하중이 큰 경우나 지반의 투수계수가 낮아 주입공법으로 지수·보강의 확실한 효과를 기대하기가 어려운 연약한 점성토 지반에서는 다른 적절한 보조공법이 요구
- 터널 굴착단면의 크기는 원지반의 역학적 성질에 따라 결정되고, 터널굴착은 막장이 개방되어 있는 상태에서 이루어지므로 지반조건에 따라 막장의 안정을 위한 보조공법이 필요하며, 보조공법을 포함한 굴착방식은 굴착단면에 따라서 선정
- 이탈리아에서는 N.A.T.M 시공에서 터널주변의 연약한 지반을 적극적으로 개량, 보강(용수구간에서는 차수 및 배수공법을 선행하여 용수를 최소화)하여 터널을 전단면 또는 반단면으로 굴착하는 기술을 개발하여 활용. 이 공법은 N.A.T.M의 시공원칙을 준수하면서 보조공법을 사용하여 N.A.T.M에 의한 효율적인 터널굴착을 하는 것을 특징으로 하고 있으며, 터널 막장 전방에 우산(Umbrella) 모양의 구조체를 형성하여 터널굴착시의 구조적인 안정성을 유지하는 것으로서, RPU(Reinforced Protective Umbrella)공법이라 함(그림 4.46)

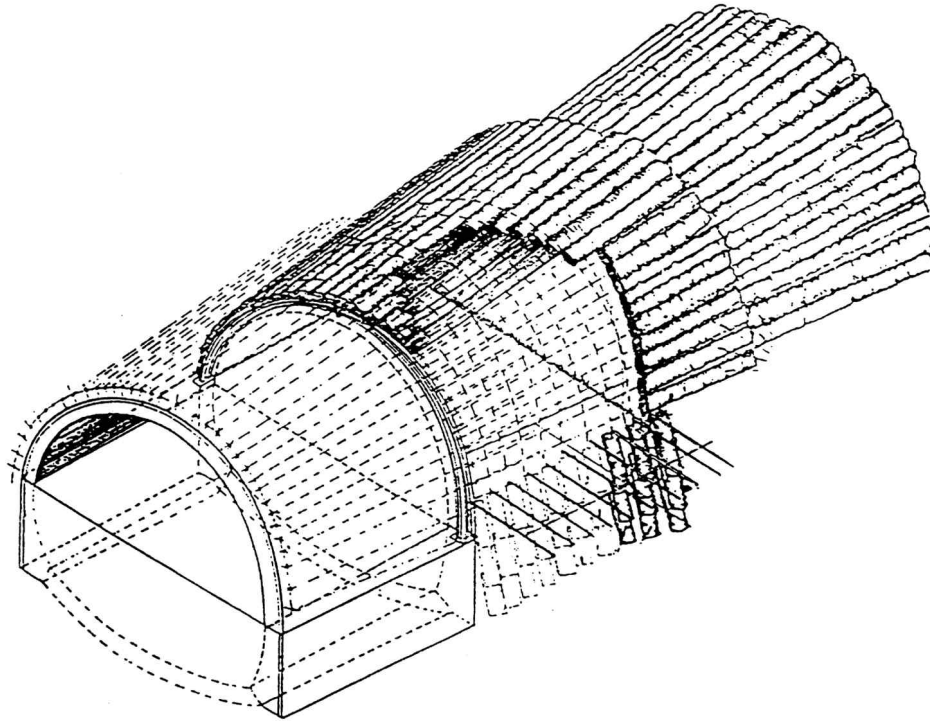


그림 4.46 RPU의 시공도

- RPU공법은 주입공법으로 해결하기 어려운 지반 및 환경조건하에서 지압 및 방호대책용으로 주로 이용되고 있는 공법으로, 터널굴착에 선행하여 터널예정 단면 주변에 수평 보링방식에 의한 소구경관을 일정간격으로 천공·설치하고 Umbrella(우산) 형태의 구조체를 형성시켜 지반의 이완 및 지압의 확대 등을 미연에 막음으로써 굴착면의 붕괴토사의 봉락 및 유출, 지반침하 등을 방지해 나가는 공법이기 때문에 연약한 사질토에서 점성토 지반 및 파쇄대층에 이르기까지 다양한 지반에 적용될 수 있으며, 특히 철도, 도로, 상부 구조물이 있는 구간에서의 횡단과 같은 시공이 어려운 지역에서 다른 시공법에 비해 안정효과가 큼
- RPU공법 용도
 - 도로·철도 횡단
 - ✓ 도로·철도의 방호
 - ✓ 굴착터널 자체안정
 - 지상 및 지중 구조물 주변통과
 - ✓ 지상의 수로 및 고층건물의 방호
 - ✓ 지중 매설물(전력 및 통신케이블, Gas관, 상하수도관 등)의 방호
 - ✓ 기존 지하구조물(지하철, 공동구, 도로터널)의 방호
 - ✓ 굴착터널 자체안정
 - 대단면 터널시공
 - ✓ 지하 확대 단면부의 방호
 - ✓ 지하역, 복합대단면 시공시의 터널방호
 - 터널 갱구부 시공

- ✓ 사면의 방호
- ✓ 풍화된 파쇄대층의 방호
- ✓ 사면 상하방의 건조물 시설의 방호
- 해저, 단층파쇄대, 붕괴성 지반 통과
 - ✓ 터널 막장 및 주변의 방호
- 기타 보조수단
 - ✓ 교량기초 등의 Underpinning용
 - ✓ 실드 및 추진공발진부의 방호

(6) AB Forepiling 공법

- 도심지 및 미고결 지반의 굴착에서 막장의 안정성, 용수처리, 지표침하 문제를 해결하기 위한 보조공법으로 토사지반에서 N.A.T.M에 의한 터널굴착 시 지반 침하를 억제하고 막장의 안정성을 확보하는 일본에서 개발된 굴착보조공법

- (1) AB Forepiling 공법: 터널굴착에 앞서 터널 상부 지반을 일정 깊이까지 개량하는 것(그림 4.47)으로, 천공시 발생되는 토사와 주입재를 혼합한 소일모르타르(Soil mortar)에 의해 수평연속구체를 형성. 먼저 2연식 천공기로 일정깊이(3~5m)까지 천공한 후 비트를 회전시키면서 Pilot hole을 확보(30cm)한 다음 인발과 함께 비트 선단에서 주입재를 분사하여 2열의 수평연속구체를 동시에 형성시키므로써 터널상부에 개량된 그라운드 아치영역을 만듦. AB Forepiling 공법에서는 2연식 천공기를 사용한 급속 시공이 가능하여 2열의 Forepile을 시공하는데 소요되는 시간이 준비과정과 마무리 과정을 포함하여 약 20분 정도이며 한 단면(20~28열)을 시공하는데는 3~4시간이 소요
- (2) AB Forepiling 공법의 특징: 지반과 지보재의 밀착성이 좋고, 지반의 아치효과(Arching effect)를 향상시켜 지반의 안정성을 증가시키며, 2연식 천공기를 이용하여 시공하므로 급속시공이 가능하고, 천공, 주입, 교반이 Packer 안에서 이루어지므로 토사의 Slime이 적음

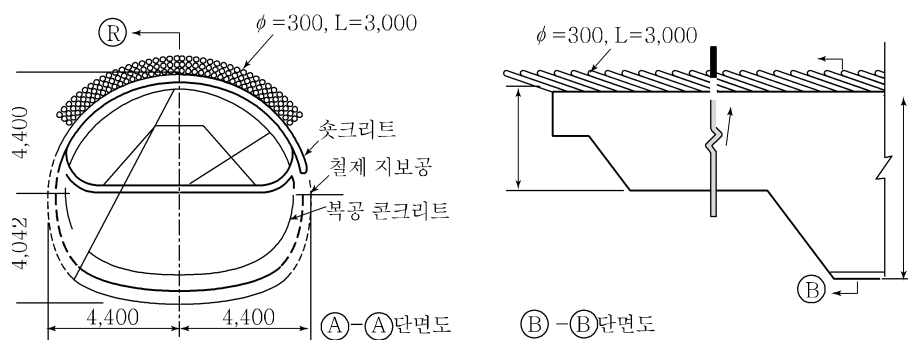


그림 4.47 AB Forepiling 공법의 개요도

1) 강재지보공

- 강아치 지보공은 설치함과 동시에 암반을 지지하는 능력 발휘하므로 막장의 자립시간이 짧은 암반, 균열이 많고 굴착에 의하여 붕괴 위험성이 있는 암반, 또는 변형을 내부에서 일부 흡수하여 터널의 안정을 유지할 필요가 있는 암반의 지지에 효과적
- 강아치 지보공은 이완된 토압 등의 작용력을 일반 구조물과 같이 지지하는 기능을 가지

고 있지만, 단독으로는 암반이 가진 강도를 적극적으로 이용할 수 없는 구조물임. 그러나 암반조건에 관계없이 막장 자립성에 문제가 되는 암반의 경우에는 다른 지보 재료에 비하여 유리함

- 기능: 임시보강재작용, 하중분산작용, 지지대역할, 지표(Guide)역할 등
- 종류: U 형, H 형, 레티스거더(Lattice girder) 등

2) 숏크리트

- 굴착 후 즉각 모르타르를 암반에 분사시켜 암반의 이완을 방지하는 지보부재
- 작용효과: 암반과의 부착력, 전단력에 의한 저항력, 그리고 내압효과, 응력집중완화 또는 약층 보강효과, 암반하중의 배분효과, 피복효과 등
- 지보기능을 발휘하기 위한 요건
 - 조기에 필요한 강도가 발현되어 작용하중에 충분한 강도를 얻을 수 있을 것
 - 지반과의 충분한 부착성 및 내구성이 있을 것
 - 수밀성이 높을 것
 - 리바운드량이 적을 것

① 특수보강 Shotcrete

- Steel Fiber Reinforced Shotcrete(강섬유보강 숏크리트): 갑작스런 인장력이나 동하중에 의한 암반의 균열생성에 대한 일반 Shotcrete의 단점을 개선 보완하기 위하여 직경 0.5mm, 길이 30mm 정도의 강섬유를 $80kg/m^3$ 정도 콘크리트에 혼입한 것으로 기존의 와이어메쉬(wire mesh)보다 시공성과 경제성이 우수하며 강도가 높음
- Polypropylene Fiber Mesh Shotcrete: 콘크리트 고유의 결합인 수축균열을 억제하여 보다 견고하고 치밀하게 만들어 주기 위하여 고정재 섬유를 혼입한 것으로 원리는 시골의 토담집을 지을 때 볏짚을 썰어 넣는 것과 같음
- SEC(Sand Enveloped with Cement) Shotcrete: 모래표면에 시멘트풀(Cement paste)이 흡착하여 표면에 껍질을 형성하도록 하고 여기에 활성(Workability)을 갖도록 2차로 물을 가하면 SEC모르타르가 완성됨. 분리성이 적고 펌프 수송율도 양호하며 분진 및 리바운드율도 낮음

3) 철망(Wire mesh)

- 철망은 뽑아 붙이기 두께가 얇을 때를 제외하고 일반적으로 많이 사용. 철망은 변형된 암반의 작은 암괴의 붕락을 방지하거나 숏크리트를 보강하여 부착력을 향상시킬 목적으로 사용. 지하 공동에서 사용되는 철망은 체인링크철망(Chain link mesh)과 용접철망(Weld mesh)

4) 라이닝(Lining)

- 터널의 기능을 장기간 유지하기 위한 구조물로서 터널의 사용목적, 사용조건 등을 충분히 만족해야 하며, 터널의 아치·측벽부 및 인버트부를 충칭한 것

(7) 터널 계측

1) 계측 목적

- 지반 및 터널의 안정평가와 사전대책
- 설계의 타당성 확인과 최적설계 변경
- 주변 구조물의 영향 평가 및 사전대책

2) 터널 계측 종류

- 일상관리 계측(A계측): 시공대상 전구간의 일상 지반 거동 계측 ⇒ **시공의 안정성 및 적합성**
- 대표위치 계측(B계측): 대표적 지반조건의 초기구간 계측 ⇒ **지보부재 안정성 설계 타당성**

표 4.24 계측 항목과 간격, 빈도

	계측항목	계측간격	배치	빈도(회)		
				0~15일	16~30일	31~
계 측 A	갱내관찰조사	전 연장	각 막장	1회/일	1회/일	1회/일
	내공변위측정	10~50m 마다	수평2측선 또는 6측선	2~1회/일	1회/2일	1회/주
	천단의 침하측정	"	1점	2~1회/일	1회/2일	1회/주
	록볼트의 인발시험	50~100m 마다	1단면 5본	-	-	-
계 측 B	지반시료시험	200~500m 마다	-	-	-	-
	지중의 변위측정	"	3~5개소/단면 심도는 5중 이상	2~1회/일	1회/2일	1회/주
	록볼트의 축력측정	"	3~5개소/단면 1본당 5점 이상	"	"	"
	복공의 응력측정	"	접선방향, 반경방향, 각 3~5개소/단면	"	"	"
	지표지중의 침하측정					
	갱내탄성파 속도측정	500m 마다	측선장 100~200m	1회	1회	1회

㉔ 내공변위 및 천단 침하 측정

- 내공변위(Convergence): 일반적으로 터널 벽면간 거리의 상대적 변화로 터널의 침하 및 하반의 융기(Heaving 등)도 포함
- 내공 변위 측정으로부터 터널 내공의 변화 현상, 침하나 융기 등의 절대량, 편압 현상, 변위의 증가상태 또는 변위의 안정화 시기 등 막장 진행과 관련된 정보를 얻음
- 측정 방법이 쉽기 때문에 측정 단면 수, 측정 빈도 등도 조밀하게 할 수 있고 많은 자료를 수집 가능하므로 N.A.T.M에서 반드시 실시하는 계측 항목
- 내공 변위의 측선 배치(표 4.25)는 지질조건, 피복 두께와 지형 상황, 지표 및 지중 인접 구조물의 존재, 터널의 크기와 형성 및 굴착 단면의 분할 방식 등을 배려하여 결정

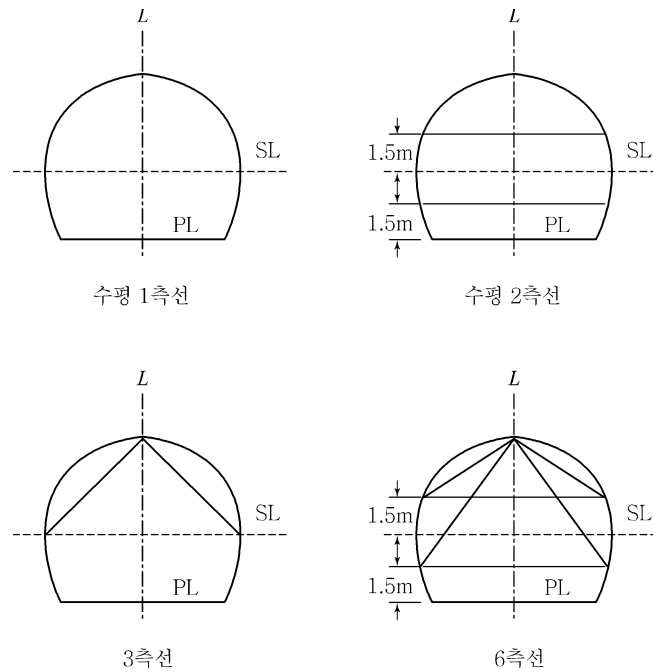


그림 4.48 내공변위 및 천단 침하 측정의 측선 배치

표 4.25 내공변위 측정의 측선 수

구간 굴착 공법	일반구간	특 수 구 간			
		터널입구 부근	토피가 터널 굴착폭의 2배 이하	팽압이나 편압이 예상되는 구간	정밀계측을 실시하는 위치
전단면 굴착	수평 1측선	—	3측선 또는 6측선	—	3측선 또는 6측선
반단면 굴착	수평 2측선	4측선 또는 6측선	4측선 또는 6측선	4측선 또는 6측선	4측선 또는 6측선
분할 굴착	각 벤치마다 수평 1측선	각 벤치마다 3측선	각 벤치마다 3측선	각 벤치마다 3측선	각 벤치마다 3측선

㉠ 록볼트 인발시험

- 록볼트 시공 후 정착효과를 확인하기 위하여 센터홀잭(Center hole jack) 등을 사용하여 인발시험 실시.

㉡ 지중변위 측정

- 터널 반경 방향으로 변위를 측정하여 터널주변 이완 영역을 파악하고 록볼트의 적정 길이를 판정할 목적으로 MPBX(Multi Point Borehole Extensometer) 등을 주로 사용
- 터널의 반경 방향으로 시추공을 굴착 1개공마다 깊이가 서로 다른 앵커가 부착된 익스텐션메타(Extensionmeter)를 설치하고, 각 앵커와 터널 벽면과의 변위를 다이얼 게이지(Dial Gauge) 또는 디지털메타(Digital Meter)로 측정하여 이완영역 확인

㉢ 록볼트의 축력측정

- 전면 접착식 록볼트는 설치초기에는 무응력 상태이지만 그 후 지반의 이동으로 록볼트에

응력이 도입되어 록볼트 각 지점에서 축력을 측정함으로써 록볼트 증설 여부와 이완영역을 파악하여 록볼트 적정길이 판단

㉮ 복공의 응력측정

- 일차복공의 안정성 및 이차복공의 두께 및 시공 시기들을 결정하기 위하여 원지반과 숏크리트 경계면에 센서를 매설하여 숏크리트에 미치는 배면 토압을 계측하는 반경방향응력 측정과 숏크리트 두께 방향으로 센서를 매설하여 숏크리트 파괴를 감시하는 축방향응력 측정. 내공변위 및 지중변위의 결과와 종합하여 복공 콘크리트의 타설 시기, 두께 그리고 강도 등을 설계

㉮ 지표, 지중의 침하측정

- 터널굴착으로 인한 지표 및 지중의 침하측정으로 이완영역을 추정하여 록볼트의 적정길이 판단 등 지보 방향을 개선하고 지반의 안정도를 관찰하기 위하여 측정하는 것으로, 특히 토피가 얇거나, 지상 구조물이 인접된 경우는 지표에 미치는 영향 범위를 파악하기 위하여 반드시 실시
- 측정 결과 평가 기준은 천단침하 측정결과와 종합하여 평가하며 주변 구조물에 미치는 영향은 허용 변형각을 설정하여 침하가 이를 초과할 경우 그 대책을 수립해야 하며, 횡단 방향의 지표 침하곡선이 좌우 비대칭되거나 침하량이 비정상적으로 크게 되면 편압지형, 근접 터널의 영향, 지반의 미끌림에 기인하는 경우가 많으므로 지형, 지질구조를 검토하여 적절한 계측을 추가 실시

㉮ 갱내 탄성과 속도 측정

- 막장의 자립성 판단과 변위량의 개략적 측정을 위해 실시하는 것으로, 암석층의 탄성적 성질의 차이, 즉 탄성파의 전파속도가 서로 다른 것을 이용하여 탄성과 전파속도로부터 지층의 고결정도, 균열 및 변질 정도를 추정하기 위함

4.12.5 T.B.M 공법(Tunnel Boring Machine)

- T.B.M은 터널 굴착장비로써 자동화된 기계로써 터널 전단면을 동시에 굴진해 나가는 굴착기계
- T.B.M시공은 정력학적으로 가장 안정성이 큰 원형단면으로 전단면을 동시에 굴진하므로써 시공 상의 안전성이 높고, 굴진속도가 빨라 경제성도 있어 광산분야까지 적용 가능

(1) T.B.M 공법의 특성

1) 우수성

- ① **굴진속도의 향상**: 굴진속도는 암질에 따라 크게 변화. 암질이 양호한 경우 발파공법에 비하여 월등히 빠르며 특히 중간에 작업갱을 설치하기 곤란한 장대터널의 경우 현저한 공기 단축효과 기대
- ② **굴착단면의 안전성**: 터널 굴착단면의 형태는 터널 축선을 중심으로 회전하는 원판에 의한 절삭에 의하여 원형으로 완성되며 갱벽은 매끄러운 면이 되므로 구조적, 수리적, 역학적으로 가장 안정된 형상
- ③ **여굴 및 라이닝의 감소**: 터널굴착에서 여굴 및 라이닝은 큰 비중을 차지함. 발파에서는 상당한 여굴이 발생되는데 반하여 T.B.M은 설계 치수대로 굴착이 가능함. 굴착면의 요철이 수 mm 이내의 평탄한 단면이므로 여굴에 의한 굴착면의 요철에 작용하는 응력 집중

을 방지할 수 있고, 특히 콘크리트 복공을 시공해야 되는 때는 라이닝 작업량의 감소로 공사비(보강비)가 절감

- ④ **노무비의 절감**: 대부분의 굴진 작업이 기계에 의하므로 인력사용을 최소화함으로써 노무비 절감 및 노동재해 요인 감소
- ⑤ **발파로 인한 위험작업의 감소**: 발파로 인한 안전사고 및 유독가스, 분진, 소음, 충격 등의 발생을 막을 수 있어 양호한 작업환경을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 인근 지역의 피해를 최소화시켜 민원 발생 요인이 적음
- ⑥ **머력 처리의 용이성 및 활용성**: 머력의 크기가 비교적 균일하여 반출작업이 용이하고 또 암질에 따라서는 골재로서 활용 가능

2) 적용상의 문제

- ① **암질의 변화에 대한 적용성의 결여**: T.B.M공법은 구성 암질에 의한 제약을 많이 받는데, 극경암에서는 작업능률이 떨어져 발파공법에 비하여 비경제적일 수 있으며, 단층과쇄대나 연약지반에서는 T.B.M에 의한 굴진작업이 곤란. 또한 비트와 커터의 형식은 어느 특정한 암층에 적합하도록 주문, 제작되기 때문에 불균질한 암층이나 지질상태의 변화가 심한 지층에서는 작업능률이 저하되고 때로는 굴진이 불가능
- ② **굴착 노선의 제한**: T.B.M은 굴착 도중에 굴착단면의 변경이 어렵고, 최소 회전 반경은 $R=150m$ 이상이어야 하며 구배가 20° 이상에서는 굴착에 제한
- ③ **구입비의 고가로 인한 기계 상각비의 상승**: 장비가 워낙 고가이고 단면의 형상과 크기가 개개의 장비에만 국한되기 때문에 장비의 활용이 제한을 받을 뿐만 아니라 굴착단면의 비활용율이 커질 우려가 높아 일반적으로 다른 장비에 비하여 경제성이 떨어지며 제작에 필요한 시일이 오래 걸리는 등 초기 투자비가 과다히 소요되므로 상각비가 높기 때문에 터널연장이 길어야 함
- ④ **고배선 등 부대 설비비의 과대 소요**: 고압 전력 사용에 따른 대용량 동력설비, 중량물 운반을 위한 도로확보, 배수를 위한 침전설비 등 발파공법에 비하여 대규모 공사용 가설비 시설 필요
- ⑤ **기계 편성의 한정**: 굴진에 필요한 전체 작업이 T.B.M 1대에 연계되어 작업되므로 지질적, 기계적 요인이나 장비 조합의 불균형으로 인한 가동률 저하시 장비의 대체 등 다각적인 대처가 어렵고, 가동 실적에 의하면 가동률이 25~30% 정도로 낮음

(2) T.B.M과 N.A.T.M의 병용공법

- T.B.M으로 pilot tunnel을 굴착하고, T.B.M에 의한 확대 굴착 대신에 N.A.T.M에 의한 발파 굴착을 채택하는 방법으로 기계와 발파식 방법의 장점을 두루 채택한 방법
- T.B.M에 의한 확대 굴착시 각종 커터의 소모량이 증가하는 데 비하여 발파식을 채택함으로써 경제적이며, 발파 때에는 기존 pilot tunnel을 자유면으로 활용할 수 있기 때문에 효율적
- 장점
 - 순수 기계 굴착과는 달리 터널 단면의 형상이나 크기에 제약을 받지 않기 때문에 다양한 종류의 터널공사에 적용
 - pilot tunnel을 통하여 지질조사 및 지질구조를 조사할 수 있기 때문에 지질변화에 따른 공사중지나 위험상황에 효과적으로 대응
 - 지보설계를 경제적, 합리적으로 수행할 수 있으며, pilot tunnel을 통하여 각종 현장 실험

- 및 계측을 할 수 있어 터널의 거동을 보다 정확히 예측
- pilot tunnel을 완전 개통 후 본 터널을 시공할 경우 환기통로 및 배수로로 활용할 수 있어 작업여건이 개선
 - 연약 파쇄대 등을 만날 때에도 pilot tunnel에서 지반보강을 실시한다면 본 터널 굴착시 안전시공이 가능
 - pilot tunnel을 자유면으로 활용하기 때문에 발파진동의 감소와 1발파당 굴진장을 증대시킬 수 있음
- 단점
- 발파 굴착과 기계굴착이 병용되어 공정 사이클이 복잡해지고 부대설비가 많아져 체계적인 시공순서의 수립이 필요
 - T.B.M-N.A.T.M 병용공법을 적용하기 위해서는 터널의 보강 작업이 크게 요구되는 연약지반에는 채택에 제한을 받음
 - 기계굴착과 발파 굴착시 얻어지는 버력의 크기가 상이하여 이중의 버력 처리 시스템이 필요

4.12.6 실드 공법

1) 실드의 정의

- 실드 터널(Shield Tunnel)은 터널 외형 단면보다 약간 큰 단면을 갖는 실드라고 하는 튼튼한 원통형의 강재를 지반에 밀어 넣으면서 굴진해 만드는 터널로 강재 원통에는 굴착기를 부착한 것이 많고 그 전체를 실드라 함
- 실드로 터널전면의 토사를 방호하면서 굴착과 동시에 실드를 전방으로 추진
 - 추진된 실드의 뒷부분은 강재 또는 콘크리트 블록(세그먼트)을 원형으로 조립
 - 세그먼트는 굴진방향으로 연속 설치되어 터널의 내벽이 되며, 터널의 내벽을 복공이라 함
 - 실드를 추진하는데 수백 톤부터 수천 톤의 큰 힘이 필요하지만, 철재 또는 콘크리트로 만든 세그먼트가 그 반력을 받게 되고 책으로 Shield를 전방으로 추진시키는 작업을 반복해서 터널이 만들어짐

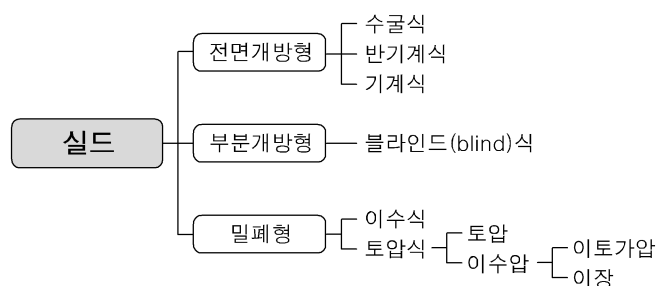
(2) 실드공법의 목적

- 지상의 교통소통에 지장이 없도록 하여 지반침하, 소음, 진동 등의 공해예방에 두고 있으며, 최근 연약지반 및 자갈층 등 광범위한 지반에 적용되며 시공의 안전성, 정밀도, 경제성 등이 있음

(3) 실드의 종류

- 실드는 막장과 작업실을 분리하는 격벽 구조에 따라 전면개방형, 부분개방형 및 밀폐형의 3종류로 분류(표 4.26)

표 4.26 실드의 종류



① 수굴식 실드

- 전면이 개방되어 있고, 굴착은 쇼벨, 피크, 브레카 등의 굴착에 의해 인력으로 행해짐
- 막장이 자립하는 지반에 적용되며, 자립성이 없는 지반이나 용수가 있는 경우는 압기공법, 지반개량공법, 지하수위저하공법과 병용에 의해 시공
- 현재는 굴착단면에 장애물, 자갈층 등이 있는 특수조건에 경우에만 채택되고 있어 시공건수가 해마다 감소

② 반기계식 실드

- 굴착 및 적재에 전문기계를 사용하므로 유압 쇼벨이나 붐 커터 등의 굴착기, 벨트컨베이어 등의 적재기, 혹은 굴착 및 적재병 용기 등을 조합하여 능률적 시공
- 수굴식 실드와 마찬가지로 막장의 자립이 가능한 곳에 적용

③ 기계식 실드: 실드 전면에 커터헤드를 장비하여 굴착능률의 증대 도모. 지반의 굴착 및 배토가 연속적으로 행해짐으로 공기의 단축이나 작업원의 절감이 가능

④ 블라인드 실드

- 막장의 약간 후방에 격벽을 두고 그 일부에 개구면적이 조절 가능한 토사반출구를 갖고 있음
- 실드 전면을 지반에 관입·추진하는 것으로 관입부의 토사를 유동화 시켜 개구부에서 배토
- 자립성이 없고 유동성이 높은 연약성점토 및 실트질 지반에 적용

⑤ 이수식 실드: 기계식 실드의 앞쪽에 격벽을 설치하고 지상에 배니수를 분리하는 이수처리 플랜트 등을 설치. 막장의 안정은 챔버에 이수를 보내어 불투수성의 이막을 만들고 이 이막을 통하여 막장에 작용하는 토압 및 수압에 대항하는 이수 수압 유지

⑥ 토압식 실드: 기계식 실드의 앞쪽에 격벽을 설치하고 챔버내와 배토용 스크루컨베이어에 굴착토사를 충전시켜 실드체의 추진력으로 챔버내의 굴착토사를 가압해서 막장에 토압을 작용시켜 그 안정을 꾀하는 것

(4) 실드공법 선정 시 유의사항

- 지반 조건에 적합한 기종이어야 하며, 보조공법의 병용이 합리적인 기종이어야 하고, 시공연장 및 선형에 알맞은 기종이어야 하며, 후반설비, 발진기지등의 시공설비와 실드의 굴착능력에 적합해야 하고, 노동 및 작업여건에 적합하여야 함
- 지반조건에 의해 좌우되는 경우에는 연약 유동성 점성토, 붕괴성의 모래, 사력층 또는 대수 사력층 또는 호층 중의 피압대수 사력층 그리고, 자갈을 함유하는 지층, 산재가 예상되는 지층, 경질 및 연질의 토층을 함유하는 지층 등
- 실드공법을 적용할 때 실드 선정상 보조공법을 줄이고 안전하면서도 확실한 시공이 되게 하기 위해서는 막장의 안정성 제고와 굴진이 지반조건에 적합한 기종의 선정이 중요

4.12.7 침매공법(Submerged Method)

- 수저 또는 지하수면 아래에 터널을 축조하기 위하여 터널형태의 케이슨을 육상에서 미리 제작하여 이것을 물에 띄워 부설현장까지 예인하여 소정의 위치에 침하시켜서 가설부분과 연결하고 되메우기 한 후 물을 배수하여 터널을 구축하는 공법

(1) 침매공법의 종류

- ① 원형 강곡(鋼殼) 방식 : Sand Mat 등으로 평탄하게 한 기초에 직접 침전 설치하여 수중

콘크리트 또는 고무 가스켓(Gasket)을 사용하여 수압접합을 하는 방식으로 기본 단면은 원형 또는 8각형인 데 직경 10m 이내의 복선 철도선로, 하수관 등에 주로 사용

- ② 장방형 콘크리트 방식 : 침매각의 양단을 저지대 상에 가설한 후 침매각과 기초의 공극 사이에 특수한 방법으로 모래를 뿜어 넣고 모르타르를 주입한 후 고무 가스켓을 사용하여 수압접합을 하는 방식으로 이는 폭이 넓은 다차선 도로 등에 사용

(2) 침매공법의 작업순서

- Trench굴착 → Caisson예인 → Caisson 선단에 보조 탱크(Tank) 설치 → 가지지대에 침설 → 기설부분과 연결(수압접합)작업으로 작업 : 작업 반복

(3) 침매공법의 장·단점

○ 장점

- 토파를 필요로 하고, 함체 방호를 위하여 1m 내외의 상재토가 있으면 좋고, 지반 중을 굴진하는 터널에 비하여 터널 전체길이를 단축할 수가 있음
- 터널함체는 별도제조 방식으로 제작하므로 고품질로 수밀성이 높은 구조체를 만들 수 있음
- 터널에 작용하는 부력으로 길보기 비중이 적음
- 지반의 큰 지지력을 필요로 하지 않으므로 연약지반에 적당
- 단면형상은 터널의 용도에 따라 선택할 수 있으며 특히 폭이 넓은 경우에 유리
- 침매함의 침하 설치는 짧은 시간에 시행되므로 항로에 대한 제약이 적음
- 케이슨공법과 같이 압축공기를 필요로 하지 않으므로 상당한 깊이의 수심에서도 안전하게 시공
- 별도제조 방식이므로 시공능률이 좋고 공기가 단축될 수 있음

○ 단점

- 유속이 빠른 곳에서는 침하 설치작업이 어렵고, 강력한 작업기계 필요
- 수저에 암초가 있는 경우에는 트렌치(Trench)상 굴착 곤란
- 협소한 수로나 항행 선박이 많은 곳에서는 여러 가지 장애가 생김

4.12.8 T.R.M(Tubular Roof Construction Method) 공법

(1) 개요

- T.R.M 공법은 벨기에의 SMET사가 개발한 **지하구조물 축조공법으로서 강관을 이용하여 지하에 거대한 Roof를 형성하는 수평관 굴진공법**
- 강관을 작업구에서 유압잭을 이용하여 압입한 후 강관 내부굴착과 함께 콘크리트를 주입하여 루프를 완성시키고 강관의 하부를 굴착함으로써 구조물을 축조하는 공법
- 현재 유럽 및 동남아시아 등에서 도심지에 지하상가나 지하철, 전력구, 공동구 공사에 활용
- 공사가 진행되는 동안 나타나는 문제점인 지상의 구조물이나 차량통행, 노면침하, 지하매설물 등에 대하여 안정하고 경제적인 시공을 할 수 있는 공법

(2) 특징

- T.R.M 공법은 발진부에서 강관을 압입하여 내부를 굴착한 후 시설물을 설치하는 공법으로서 주변지반의 침하를 방지하여 기존의 지상 및 지하구조물에 대한 피해를 최소화하고 소요의 공간을 확보할 수 있는 공법이 아니기 때문에 발진부에서 시작된 강관이 소요길

이 만큼 임의의 선형으로 시공이 가능

- 선도관 후미의 조정 장치에 의해 방향이 조절되므로 시공 정밀성이 우수하며, 지반거동을 극소화하므로 인접한 구조물에 관계없이 시공이 가능하고, 압입식이므로 진동 및 소음에 따른 문제점이 발생하지 않음
- 전인식 공법과는 달리 발진부에서 시작된 강관은 소정의 지점까지 제한 없이 도달할 수 있으며, 대형 강관을 시공하므로 내부굴착 및 토사반출이 용이하고, 곡선선형에 관계없이 굴진 및 구조물 설치가 가능하고, 굴진시 호박돌이나 전석이 조우되더라도 기계식 굴착에 의한 처리가 가능하며, 외부조건에 관계없이 시공되므로 공기 단축
- 갤러리(Gallery), 측벽 및 수평강관으로 구성된 가설구조물을 표면처리하여 영구구조물로 활용하므로 전체적인 공사비가 절감되고, 연경암부 굴착시 다소 시간이 요구되나 굴착이 가능하며, 강관 선단부의 굴착단면적이 터널공사에 비해 작으므로 연약지반, 붕괴성 토질, 지하수 유입과 같은 문제성 지반에 대한 대책적용이 용이하고, 도심지 공사 유리

표 4.27 각종 굴착공법의 특성비교

a) 노천 굴착방법

굴착 공법	세부내역	조업특성	경제성 (단가, 원/ m^3)	시공성 (굴착량, m^3 /일)
발파 공법	대상암반 : 일부연암, 보통암, 경암 대규모 발파공법	<ul style="list-style-type: none"> • 작업장 주변에 시설물이 없어 폭약사용에 제한이 없는 경우 • 진동, 소음, 비산이 발생 • 크롤러 드릴에 의한 대규모 작업기준 	2 (5,419)	2 (47.6)
	제어 발파공법	<ul style="list-style-type: none"> • 주변에 시설물이 있어 진동, 소음, 비산을 제어해야 함 • 대규모 발파법에 비하여 능률이 떨어짐 • 소규모 Hand drill에 의한 작업 	3 (13,029)	3 (12.5)
	선행 이완 발파	<ul style="list-style-type: none"> • 주변시설물에 인접되어 제어발파의 경우보다 더욱 약장약으로 발파하여 암반에 인공균열을 형성 • 립퍼 또는 브레이커로 제거함 • 팽창성 파쇄재, C.C.R대신 사용 	4 (15,300)	5 (9)
기계 에 의한 굴착 공법	Ripping 공법	<ul style="list-style-type: none"> • 풍화암 또는 일부 연암에 효과적 	1 (467)	1 (약 500)
	브레이커 공법	<ul style="list-style-type: none"> • 리핑 및 발파작업이 어려운 조건에서 채택 • 비교적 경암에도 적용가능 • 소음이 발생 	5 (15,484)	4 (11.0)
특수 공법	미진동, 미소음 파쇄공법	<ul style="list-style-type: none"> • C.C.R이라는 특수 화약류를 사용하여 암반에 균열을 형성 • back-hoe나 립퍼로 긁어내어 제거 • 진동, 소음이 극히 적으나 2차 파쇄가 요구됨 	6 (32,426)	6 (8)

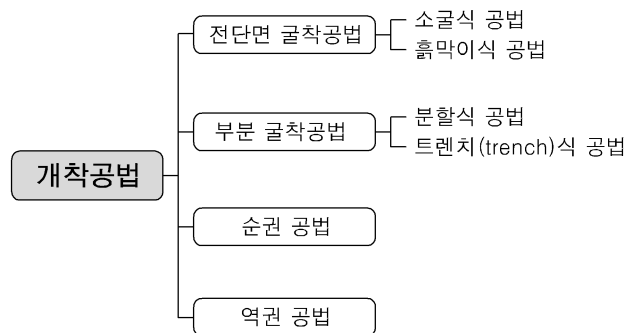
	팽창성 파쇄재 공법	<ul style="list-style-type: none"> • 굴착대상 암반에 천공 후 팽창성 파쇄재를 주입하여 인공균열 형성 • 장약 후 암이 파쇄될 때까지 상당한 시간이 요구됨 • back-hoe나 립퍼로 긁어냄 • 진동, 소음이 없음 	7 (78,179)	7 (4.6)

b) 터널 굴착공법

굴착 공법	세부내역	조업특성
발파 공법	N.A.T.M 공법	<ul style="list-style-type: none"> • 주변지반의 지지력 활용 • 발파에 의한 굴착 후 슛크리트나 Rockbolt를 보조지보공으로사용 • 굴착과 동시에 슛크리트로 지반이완을 방지함으로 대단면 유리 • 지반조건이 불량한곳에 적응성이 우수 • 여굴 방지를 위하여 조절발파법 채택 • 다수 장비의 필요로 소단면에 부적합 • 진동, 소음이 문제됨
	선행 이완 발파 (다단 분할 발파)	<ul style="list-style-type: none"> • 진동, 소음의 제한으로 정상조업이 어려움 • 인공균열면 형성 후 브레이커로 제거(경암에 효과적)
기계에 의한 굴착 공법	T.B.M공법	<ul style="list-style-type: none"> • 전단면 기계굴착공법(비발파공법) • 여굴이 적고, 진동, 소음이 극히 적음 • 암반이 균일한 장대터널(2km 이상)에 효과적임 • 설치 및 해체에 많은 시간소요
	로드 헤더	<ul style="list-style-type: none"> • 비교적 연암, 풍화암이나 파쇄암에 효과적(경암에는 비능률적임) • 다량의 분진이 발생
	실드공법	① 기계식 실드 <ul style="list-style-type: none"> • 막장자립성이 있는 지반으로 홍적층에 적용 • 굴착헤드 전면에 회전식 커터헤드를 장착하여 굴착능률이 향상 ② 이수식 실드 <ul style="list-style-type: none"> • 연약 사질층에서 사력층까지 광범위하게 적용 • 기계식 실드의 앞쪽에 격벽을 설치하였다. ③ 토압식 실드 <ul style="list-style-type: none"> • 카타굴착으로 소성유동으로 모래함유가 적은 연성점성토 지반적용 • 카타헤드로 굴착한 토사를 챔버내에 충전시켜 실드잭의 추진력으로 가압하여 그 토압을 막장전체에 작용시켜 막장을 안정시킴
특수 공법	침매공법	<ul style="list-style-type: none"> • 터널elements는 선대(船臺)나 Drydock 등 좋은 조건에서 함체를 제작하므로 전체를 매우 수밀성이 높은 수저터널의 건설이 가능. • 터널단면을 용도에 따라 자유롭게 유효하게 설계가능. • 유수가 빠른 곳은 강력한 작업기계가 필요하고, 침설작업이 곤란. • 물 밑에 암초가 있으면 Trench의 굴착이 어려움.

4.12.9 개착식 터널공법(Open Cut)

- 지표면에서부터 굴착하여 소정의 위치에 지하구조물을 축조한 다음 그 윗부분을 되메워 지표면을 복구하는 공법
- 개착터널은 계획수립에 기초가 되는 단면, 선형, 구배 및 외력의 결정과 함께 안정성, 경제성을 검토하고, 환경과의 조화 및 공해 방지에 대해서도 배려하여 설계하여야 함으로 설계와 시공에 많은 경험이 요구됨
- 철근 콘크리트 구조물은 보수, 개량 등이 곤란한 경우가 많으므로 조사 결과에 따라 적절히 판단하고 터널에 해로운 변형이 생기지 않도록 설계
- 시공 목적에 따른 분류



(1) 소굴식 공법

- 전단면을 굴착하는 방법으로 굴착부분 주위의 지질에 따라 경사면을 형성하고 미끌림에 대한 안정을 도모하면서 굴착을 실시하는 공법
- 장점
 - 흙막이 지보공이 필요치 않으며 작업공간의 제약이 없으므로 기계력을 최대한 이용하여 굴착할 수 있기 때문에 구축물의 축조가 빠르고, 일반적인 개착공법으로 시공하는 경우 흙막이 말뚝이나 벽 및 복공의 시공이 없어 공기상 큰 잇점이 있음
- 단점
 - 경사면 유지 관계로 연약 지반 및 지하수가 많은 지반에는 적합하지 않으며, 공사중 비교적 넓은 용지를 필요로 하므로 시가지나 교통차단을 할 수 없는 도로부의 시공에는 적합하지 않으며 지하철의 시공에는 그 적용도가 적음

(2) 흙막이식 공법

- 공사에 필요한 넓이의 양쪽에 흙막이 벽을 시공하고 반침목, 어스 앵커(earth anchor)등으로 지보공을 시공하면서 전단면 굴착을 실시하는 공법으로 지하철 공사의 개착공법으로 널리 이용되는 일반적인 공법
- 복공식과 무복공식으로 나누어지는데 지하철 공사는 시가지에서 교통을 차단할 수 없는 장소에서 시공되는 경우가 많아 일반적으로 복공식이 채택되며, 무복공식은 공원이나 넓은 공지 등과 같이 교통에 지장이 없는 장소에서 채택
- 장점
 - 축조하는 구축폭과 흙막이 벽을 시공하는 폭을 합한 용지만 확보되면 시공할 수 있으므로 앞의 소굴식에 비하여 넓은 용지를 필요로 하지 않는 점과 다음에 설명하는 흙막이 공법과 보조공법의 선택에 따라 연약지반이나 지하수위가 높은 지반, 그리고 대단면 굴착에

도 적용할 수 있는 점

○ 단점

- 흙막이 지보공에 받침목을 사용하는 경우 굴착, 구축물의 축조에 제약이 따르고 공기면에서 불리한 점이 있다. 이의 해결책으로 흙막이 지보공에 어스앵커를 사용하는 방법이 있지만 앵커의 정착력 확보를 위하여 토질의 문제, 어스앵커 타입부의 공간 확보 등 제약이 따름

(3) 분할식 공법

- 정류장이나 지하차고와 같이 구축물의 폭이 넓은 개소에서 연약지반이나 편토압을 받아 히빙(heaving)의 우려가 있을 때나 굴착도중 흙막이 지보공의 안정성 도모가 우려되는 경우에 채택되는 공법

- 시공방법은 중간 말뚝 등을 경계로 하여 종방향으로 굴착단면을 몇 개로 나누고, 1분할씩 굴착완료, 구축물 축조를 반복하여 지반과 흙막이 지보공의 안정을 도모하면서 굴착 실시

○ 단점

- 굴착의 안정성은 높아지나 작업이 번잡하여 소요 공기가 길어짐

(4) 트렌치식 공법

- 지반이 연약하거나 이미 설치된 중요 구조물의 아래를 굴착하여 구축물을 축조하는 경우에 채택되는 공법

- 시공 방법은 벽이나 기둥 부분을 종방향으로 좁게 굴착하고 그 부분에 구축물을 축조한 다음 나머지 부분을 굴착하여 구축물을 완성시키는 방법

○ 장점

- 좁은 범위의 부분굴착이므로 연약한 지반에서도 지반의 안정을 도모할 수 있을 뿐만 아니라 상부 중요 구조물의 굴착중 안전 확보가 가능

○ 단점

- 굴착 방법이 복잡하므로 공기면에서 불리하며, 중요 구조물의 하부에 구축물을 축조하는 경우에도 다른 언더피닝(underpinning)공법과 비교할 때 특수한 경우 이외에는 채택되는 경우가 적음

(5) 순권공법

- 구축물의 시공순서는 굴착을 소정의 깊이까지 완료한 다음 바닥면→측벽→ 윗면의 순서로 축조하는 것으로 개착공법에서 구축물을 축조하는 표준공법

(6) 역권 공법

- 깊은 층 굴착, 연약지반굴착, 중요구조물 근접 시공등의 경우 굴착도중에 구조물의 윗면을 강성이 있는 흙막이 지보공, 흙막이 벽 또는 흙막이 뒷면 지반의 안정을 도모하고자 하는데 목적

○ 단점

- 윗면을 먼저 축조하므로 그 후의 굴착, 자재의 반출입이 불편하며, 구축공은 윗면의 부분적 개구부를 이용함으로 작업능률이 크게 떨어짐

4.12.10 개착터널의 설계와 시공계획

(1) 설계의 기본적 고찰

- 연약지반, 경사지등에서 지표면의 하중, 지하수위의 변동, 지진 등에 의한 지반의 변위가

예상될 때는 이에 따른 터널의 변위에 대응하는 여유를 고려할 필요

(2) 하중의 종류

- 터널외부에서 작용하는 하중, 자중 그리고 터널 내부의 하중과 이로 인해 발생하는 지반 반력 고려
- 터널 바닥면 및 측면에 작용하는 지반 반력은 터널 내외부의 하중과 조화되어 외력으로 작용

1) 지표면의 하중

- 개착터널에 작용하는 지표면의 하중은 노면 교통하중, 열차하중, 건물하중, 성토하중 등
- 사유지의 건물하중은 건물의 계획이 명확한 경우에는 그 하중을 바탕으로 설계하지만 미정인 때는 토지 소유자와의 계약에 의해 터널상부의 하중을 제한하는 것이 일반적

2) 토피 하중

- 지표에서 터널 윗면까지의 깊이, 되메우기 한 흙 및 지하수의 무게 등을 고려하여 결정하지만 지반침하의 우려가 있는 연약한 지반상에서 터널이 말뚝으로 지지 된다던가 터널 밑면이 침하하지 않는 양질의 지반에 지지되고 있는 경우 등은 터널 직상부 보다 넓은 범위의 지반이 토피 하중으로 작용함으로 주의 필요. 또 토피가 얇고 지하수위가 높을 때에는 터널이 부상할 우려가 있으므로 안정성에 대하여 검토 필요

3) 토압 및 수압

① 터널과 지반의 상대변위와 토압

- 터널과 그 옆부분의 지반이 상대적으로 가까워질 때는 토압은 증가하고 그 한계치는 수동 토압이 되며, 멀어질 때의 토압은 감소하고 그한계치는 주동토압이 되고 터널과 그 옆부분의 지반이 상대적으로 움직이지 않을 때는 정지 토압으로 작용
- 터널과 지반의 상대변위와 토압의 관계식

$$p = p_o \times k\delta \quad (4.20)$$

(p : 토압, p_o : 정지토압, k : 지반 반력계수, δ : 터널과 지반의 상대변위 (가까워질 때 ; $+\delta$, 멀어질 때 ; $-\delta$))

- 수동토압을 p_p , 주동토압을 p_a 라 하고 주동토압과 수동토압 사이의 지반 상태는 벽체에 대하여 탄성체로 취급

② 터널측벽에 작용하는 토압의 고려방법

- 흙막이를 이용한 개착공법으로 터널을 구축할 때는 흙막이 벽이 변형함으로 정지토압보다 대단히 적은 토압이 흙막이 벽에 작용하는 경우가 많으나 터널 측벽과 같이 거의 변형하지 않는 강성이 큰 벽체에 대해서는 시공 직후에는 적은 토압이라도 시간이 지남에 따라 증대하여 정지토압과 거의 같은 토압이 되므로, 이와 같은 일반적인 경우에는 터널측벽에 작용하는 최대토압으로서 정지토압 이용

③ 수압

- 투수계수가 큰 사질 지반에서는 터널측벽에 작용하는 수압의 영향이 중요하므로, 원칙적으로 간극수압으로 설계하지만 정확한 간극 수압을 파악하기가 어려운 때는 지하수위를 설정하고 정수압 분포로 계산

4) 시공시의 하중

- 시공시에 완성후와는 다른 하중이 작용하는 경우 그 하중에 대한 안정성을 확인해야 하며, 시공 방법에 따라서는 구축물의 일부에 시공시 하중에 의한 응력이 남아있다가 완성

시에 하중에 의한 응력과 중첩되는 경우도 있으므로 주의 요

- 구체적인 예

- ① 터널 단면이 커서, 구조물의 시공 도중에 버팀재 일부를 철거하여 토압을 구축물에 작용시킨 경우
- ② 터널을 역권법으로 축조하는 경우
- ③ 연속 지중벽등의 가설 구조물을 본체의 일부로 이용하는 경우
- ④ 상판상에 실드(shield) 발진기지의 설비등을 재하하는 경우

4.12.11 개착 공법에서의 특수 시공법

- 개착공법은 전단면을 동시에 굴착하고 하부 바닥으로부터 순차적으로 측벽, 중간벽, 윗바닥과 본체를 축조하는 것이 일반적이며 공비나 공기면에서 유리하나 시공조건이 다음과 같은 경우 전단면 굴착공법으로는 안정성이 염려되므로 일반적인 시공 순서를 따르지 않고 분할굴착을 하든지 본체의 일부를 선행 시공하여 안정성 확보 도모
- ① 토질이 아주 연약할 때
- ② 굴착 심도가 깊을 때
- ③ 굴착 폭이 넓을 때
- ④ 굴착 형태가 일정하지 않을 때
- ⑤ 토압이 불균형할 때
- ⑥ 거대한 상재하중이 있고 언더피닝(underpinning)이 필요할 때 등
- 특수 시공법: 분할굴착공법, 트랜치 공법, 역권공법, 깊은 기초공법 등

(1) 분할 굴착공법

- 굴착을 적은 범위로 분할하여 시공하므로써 보다 시공의 안정성을 얻고자 하는 것
- 1) 종방향 분할 굴착방식
- 지하차고, 유치선, 분기부, 지하변전소등과 같이 폭이 넓은 터널을 시공하는 경우 채택. 1회의 굴착폭을 좁게 함으로써 히빙(heaving)의 방지, 받침재의 이완이나 변형률의 방지를 주목적으로 실시
- 굴착폭이 매우 넓은 경우에는 종방향 3분할 방식이 채택되며, 양쪽 측부의 지반을 남겨 놓고 중앙부를 선행시공하는 방식과 반대로 양쪽 측부를 선행 시공하는 방식
- 분할 경계의 흠막이는 시공성 및 공비면에서 수평널말뚝 흠막이가 사용되어 투수성 흠막이가 되므로 나머지 지반의 탈수 압밀에 의한 받침재의 이완을 고려하면 흠막이 변형 및 이에 따른 배면 지반의 침하는 전자가 후자보다 적어 안정성이 높음
- 측부 선행 방식은 본체의 중량이 충분하여 옹벽으로서 측부 토압에 견디어 내는 경우에는 중앙부 굴착시에 지보공의 필요성이 없고 또 능률적, 경제적인 시공 기대

2) 특수부분 분할 굴착 방식

- 굴착갱의 형태가 일정하지 않고 대단면인 경우에는 받침재의 방향이 다양하여 편압이 생기는 등 안정성이 저하하는 외에도 후속작업의 작업능률에 큰 영향을 미침
- 대단면 터널의 종단부등의 버팀보는 매우 시공이 어려우므로 굴착을 적은 범위로 분할하여 시공함으로써 받침재등의 지보공을 효과적으로 설치할 수 있어서 안정성이 높음. 나머지 부분의 시공은 선행 시공한 본체가 옹벽으로 토압을 눌러줌으로 안전 시공 기대

(2) 트렌치 공법

1) 언더피닝을 위한 트렌치 공법

- 기설 구조물하부의 굴착에 있어 먼저 구조물의 안전이 보전되는 범위 내에서 구조물 하부지반의 일부를 파고 이 속에 터널 본체의 일부 예를 들면 측벽, 중간벽 등을 선행 시공한 다음 이것을 이용하여 구조물을 받친 다음 터널 축조에 필요한 단면을 굴착

2) 흙막이 벽으로 사용하는 트렌치

- 사면에 터널을 축조하는 경우의 편토압 대책, 근접 구조물 기초의 방호대책등을 위해 선행하여 지중벽을 만드는 경우에 사용

3) 작업통로로서의 트렌치

- 갱내의 일부분으로 전면굴착에 앞서 기초공사 등을 할 필요가 있는 경우, 외부로부터 갱내로의 통로공간 확보를 위해 사용

4) 수평굴진공법에서 부분 시공으로서의 트렌치

- 동결공법, 메세르(messer)공법, 파이프루프 공법등의 시공을 할 때 굴착시 지반안정의 면에서 트렌치공법을 병용. 언더피닝을 위한 트렌치공법과 흙막이 벽으로 사용하는 트렌치의 복합

○ 트렌치 공법의 특징

- 장점

- ① 연속적인 벽상 구조물을 선행 시공하여 상재하중을 받으므로써 큰 지지력
- ② 굴착폭이 좁고 짧은 기간에 아래받침 또는 흙막이 벽을 축조하므로 배면 지반을 거의 이완시키지 않음
- ③ 후속 작업으로서 트렌치벽 내부의 굴착을 할 때 양측벽이 견고한 흙막이로 되어 안전한 시공 가능

- 단점

- ① 일반적으로 공기 연장
- ② 터널 본체의 시공 연결부(joint)가 많아져서 구조상의 약점
- ③ 지반이 나쁠 때는 트렌치 굴착에서 약액주입, 지하수위저하등의 처리 필요

(3) 역권공법

- 굴착도중에 본체의 윗바닥판 또는 중간바닥판의 철근 콘크리트를 먼저 타설하여 흙막이 지보공으로서 이용하면서 하부의 굴착을 실시하는 것

○ 시공조건

- 굴착면에 근접하여 중요 구조물이 존재하기 때문에 흙막이 지보공의 이완이나 변형으로 인하여 흙막이의 변형이 극도로 제한되는 경우
- 굴착폭이 넓거나 굴착 형태가 일정하지 않아 일반적인 흙막이 지보공으로는 이완이나 변형이 우려될 때
- 지반이 연약하고 굴착 심도가 깊어 흙막이 지보공에 큰 토압이나 수압이 작용하는 경우
- 굴착 규모가 크고, 시공기간이 오래 걸리는 경우
- 시공조건상 하부 굴착이전에 윗바닥 상부에서 작업을 할 필요가 있을때 (되메우기, 매설물의 이설, 신설 등)

○ 역권공법의 시공순서 유의해야 할 점

- 역권 슬라브(slab) 콘크리트의 형틀은 직접 또는 간접적으로 지반에 지지되므로 지반의 상황을 잘 보고 콘크리트 타설시 변형이 생기지 않도록 필요에 따라 모래깔기, 판깔기 등

실시

- 역권 슬라브의 지지 상태가 본체 완성시와 다르기 때문에 슬라브 자중에 상재하중을 합한 실효하중으로 점검하고, 필요에 따라 슬라브의 철근보강, 중간 말뚝의 기초박이 증가등 조치
- 이음부의 시공은 콘크리트의 충전이 아주 어려우므로 프리팩트(prefact) 콘크리트 또는 무수축 모르타르 등을 이용하여 다른 부재와 같은 정도의 강성을 갖도록 마무리

(4) 깊은 기초 방법

- 원래 건축분야에서 발달한 공법으로서 파형강판과 링형태의 강재로 흙막이를 하면서 직경 1~3m의 원주형의 수갱을 인력으로 굴착하는 공법으로 이 공내에 상부 구조물의 기초를 축조할 목적
- 지하철 공사에서는 트렌치 공법에서 다시 구부적인 굴착이 요구되는 경우 즉 다음과 같은 목적으로 적용

- 역권공법과 병용하여 터널본체의 기둥부분을 먼저 시공
- 언더피닝의 기초를 먼저 시공
- 지중 지장물을 먼저 철거
- 조사공, 배수공으로 이용

○ 깊은 기초공법의 특징

- 장점

- ① 필요한 작업공간이 적게 소요된다.
- ② 공저상태를 확인할 수 있으므로 확실한 시공이 기대된다.
- ③ 시공조건에 맞추어 변경하기 쉽다.
- ④ 시공해야 할 기둥 개수가 적어도 됨으로 경제적 시공이 기대된다.
- ⑤ 작업시 소음과 진동이 거의 없다.

- 단점

- ① 대단히 연약한 지반이나 대단히 용수가 많은 지반에서의 시공이 곤란하다.
- ② 3m이상의 대구경, 30~40m이상의 대굴착 심도로 되면 시공이 어렵다.

단원정리

1. 최대 굴진장

$$L = 0.15 + 34.1\phi - 39.4\phi^2$$

L : 공공과 심폐기공의 천공장(m), ϕ : 공공의 직경(m)

2. 심폐기의 계산법

(1) 첫번째 심폐기의 사각형 계산

$$a = 1.5\phi$$

a : 대구경과 발파공 사이의 중심거리

ϕ : 대구경 지름

$$a = 1.5\phi \text{ (여러개의 대구경인 경우)}$$

a : 대구경과 발파공 사이의 중심거리

ϕ : 대구경 지름

(2) 나머지 심빼기의 사각형 계산

$$B = W$$

(3) V-cut의 계산법

$$\text{기저장약 길이} = \text{공길이} \times \frac{1}{3}$$

$$\text{주상장약량} = 0.5 \times \text{기저장약량}$$

$$\text{전색장} = 0.6 \times B$$

3. 그밖의 공의 계산

(1) 상향 또는 수평방향으로 파괴하는 확대공의 계산

$$h_b = 1/3 \times H, \quad h_b : \text{공저집중장약}$$

$$B_1 \leq \frac{(H-0.4)}{2} \quad (\text{계산식은 아님})$$

$$S = 1.1 \times B \quad (S : \text{천공간격}, B : \text{저항선의 길이})$$

$$Q_{pk} = 0.5 \times Q_{bk} \quad (Q_{pk} : \text{주상장약의 장전밀도}, Q_{bk} : \text{기저장약의 장전밀도})$$

$$h_0 = 0.5 \times B \quad (h_0 : \text{전색장})$$

(2) 바닥공의 약량 계산

$$h_0 = 0.2 \times B$$

$$Q_{pk} = 0.70 \times Q_{bk}$$

(3) 측벽공의 약량 계산

$$\text{천공간격} = 1.2 \times B$$

$$\text{기저 장약장} = 1/6 \times \text{천공장}$$

$$\text{전색장} = 0.5 \times \text{저항선 길이}$$

$$B = 0.90 \times B_{\text{하향으로파괴하는제거공}}$$

$$Q_{pk} = 0.40 \times Q_{bk}$$

(4) 천반공의 약량 계산

$$B = B_{\text{측벽공}}$$

$$Q_{pk} = 0.30 \times Q_{bk}$$

4. 록볼트 관련 공식

(1) 갱도 단위길이당 증대되는 지보력

$$\begin{aligned} \Delta T_A &= \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \frac{\sigma_b A_b}{S^2} \times t \\ &= P_r \times B \end{aligned}$$

여기서, σ_b : rock bolt steel의 항복응력

A_b : rock bolt 단면적

S : rock bolt 설치간격

t : 압축대 유효두께

B : 공동의 폭

(2) Rock bolt 1개가 지지할 수 있는 면적

$$A = S^2 = \frac{T_b}{P_r}$$

T_b : rock bolt 인발강도, P_r : 갱도 주변 사하중

(3) Rock bolt 길이(Bieniawski)

$$L = \frac{\Delta T_A}{\tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)} + S$$

(4) Rock bolt 설치간격

$$S = (0.5 \sim 0.7)L$$

(5) 압축대의 유효두께

$$t = L - S$$

L : rock bolt 길이, S : bolt 설치간격

(6) Bolt길이(기타 경험식)

$$L = 1.4 + (0.184)B \quad (\text{무인장 bolt})$$

$$L = 1.6 + \sqrt{1 + (0.012 \times B^2)} \quad (\text{인장 bolt})$$

$$L = \frac{2 + 0.15B}{ESR} \quad (\text{천반})$$

$$L = \frac{2 + 0.15H}{ESR} \quad (\text{측벽})$$

ESR : 굴착지보계수, B : 터널의 폭, H : 터널의 높이

(7) 앵커길이

$$L = \frac{0.4B}{ESR} \quad (\text{천반})$$

$$L = \frac{0.35H}{ESR} \quad (\text{측벽})$$

ESR : 굴착지보계수, B : 터널의 폭, H : 터널의 높이

(8) Rock bolt 1개에 걸리는 최종하중

$$P = \frac{L \times B \times T \times \gamma}{\frac{L}{I} \times \frac{B}{b}}$$

γ : 암석밀도, L : 지하공동길이, B : 지하공동폭, T : 지하공동 암반두께

I : 록볼트 길이, b : 록볼트 폭

(9) Rock bolt 비

$$\alpha_B = \frac{nA_b \cdot \sigma_b}{2\pi r_o L \cdot S}$$

n : bolt 개수, A_b : bolt 단면적, σ_b : bolt 항복응력
 r_o : 터널의 평균반경, S : 상재압, L : 터널 축방향 길이

(10) Bolt의 수(각각의 볼트가 받는 하중의 크기가 동일시 가정)

$$N = \frac{\gamma \cdot B \cdot h}{F \cdot \sigma_{\max}}$$

γ : 암석 단위중량, B : 공동 폭, F : 안전율
 h : 현수가 필요한 이완대의 높이, σ_{\max} : bolt최대하중

(11) 마찰효과를 이용시 bolt 1개당 지지하중

$$P = \frac{W \cdot t \cdot B \cdot L}{(n_1 + 1)(n_2 + 1)}$$

$$\frac{L}{n_1 + 1}, \frac{B}{n_2 + 1} : \text{bolt 설치간격}$$

n_1, n_2 : 공동 길이 및 나비방향으로 설치한 bolt의 열수
 t : 공동천정의 두께
 W : 암반의 단위중량
 L : 공동천정의 길이
 B : 공동천정의 너비

(12) 인발하중으로부터 bolt의 간격 결정

$$S = \sqrt{\frac{C_b}{1.5} G \cdot h_t}$$

S : bolt간격, C_b : bolt의 인발하중, h_t : 이완대의 크기, G : 강성률

(13) Rock bolt 축력

$$\sigma_i = (\varepsilon_i - \varepsilon_{0i})E$$

$$N_i = \sigma_i A$$

E : bolt 의 탄성계수, A : bolt 의 단면적, ε_i : 암석의 탄성계수
 ε_{0i} : rock bolt의 탄성계수