



KR C-12070

Rev.7, 15. July 2026

터널 굴착

2026. 7. 15



국가철도공단

경 과 조 치

이 “철도설계지침 및 편람” 이전에 이미 시행 중에 있는 설계용역이나 건설공사에 대하여는 발주기관의 장이 인정하는 경우 종전에 적용하고 있는 우리공단 “철도설계지침 및 편람”을 그대로 사용할 수 있습니다.

일 러 두 기

- 사용자의 이용 편의를 위하여 책 단위로 구성된 “철도설계지침” 및 “편람”을 국제적인 방식에 맞게 체계를 코드별로 변경하였습니다.
또한, 코드에 대한 해설 및 목차역할을 하는 KR CODE 2012, 각 코드별로 기준 변경사항을 파악할 수 있도록 Review Chart 및 Record History를 제정하였습니다.
- 이번 개정된 “철도설계지침 및 편람”은 개정 소요가 발생할 때마다 각 항목별로 수정되어 공단 EPMS, CPMS에 게시될 것이니 설계적용 시 최신판을 확인 바랍니다.
- “철도설계지침 및 편람”에서 지침에 해당하는 본문은 설계 시 준수해야 하는 부분이고, 해설(이전 편람) 부분은 설계용역 업무수행의 편의를 제공하기 위해 작성한 참고용 기술도서입니다. 여기서, 제목 부분의 편람은 각 코드에서의 해설을 총칭한 것입니다.

목 차

1. 일반사항	1
1.1 목적	1
1.2 적용범위	1
1.3 참고기준	1
1.4 용어의 정의	1
1.5 기호의 정의	4
2. 조사 및 계획	4
2.1 조사 및 계획 일반	4
2.2 조사	4
2.3 계획	4
3. 재료	5
3.1 재료 일반	5
3.2 재료 특성	5
3.3 품질 및 성능시험	5
4. 설계	5
4.1 설계 일반	5
4.2 터널 내진설계를 위한 지진해석 방법	5
4.3 굴착방법	6
4.4 굴착공법	6
해설 1. 굴착방법	7
1. 굴착방법의 종류 및 적용	7
1.1 인력굴착	7
1.2 기계굴착	7
1.3 파쇄굴착	8
1.4 발파굴착	9
2. 굴착공법	9
2.1 굴착 공법의 종류 및 적용	9
2.2 발파 공법	16
2.3 여굴	43
2.4 버력	45
해설 2. 굴착 보조공법	52



1. 굴착 보조공법의 정의 및 목적	52
1.1 정의	52
1.2 목적	52
2. 적용 계획	53
2.1 적용 대상	53
2.2 적용계획 수립시 고려사항	53
2.3 굴착보조공법 수행절차	54
3. 굴착보조공법의 선정 및 종류	56
3.1 보강목적에 따른 분류	56
3.2 공법 선정	56
3.3 막장부 안정 보강공법	57
3.4 약액주입공법	74
3.5 고압분사 교반공법	83
3.6 유도 배수공법	85
 RECORD HISTORY	 88

1. 일반사항

1.1 목적

- (1) 이 기준의 목적은 철도 터널 굴착에 관련된 설계사항을 제시하는 것이다.

1.2 적용 범위

- (1) KDS 27 20 00(1.2)를 따른다.

1.3 참고 기준

1.3.1 관련 법규

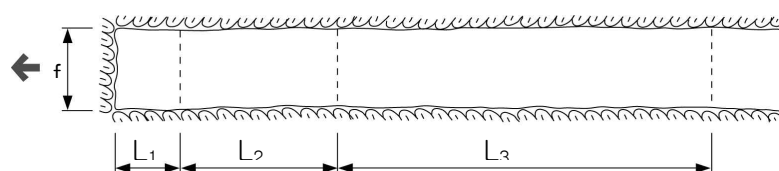
- (1) KDS 27 20 00(1.3.1)을 따른다.

1.3.2 관련 기준

- (1) KDS 27 20 00(1.3.2)를 따른다.

1.4 용어의 정의

- (1) 경사(Dip) : 주향(Strike)과 직각을 이루는 지질구조면(층리면, 단층면, 절리면 등의 불연속면)의 기울어진 방향과 수평면이 이루는 사잇각.
- (2) 굴진면(막장면, Tunnel face) : 터널 굴진방향의 굴착면을 말하며, 굴착작업이 주체적으로 실시되는 굴진면(막장면) 후방의 20~30 m 구간을 굴착부(막장부, 굴진구역과 굴착구역을 포함한 구간)라고 칭함. 여기서 굴진구역은 현재 시공의 영향을 받아 지중응력 재분배가 이루어지는 구역이며 굴착구역은 응력 재분배가 대부분 진행되었거나 완료되어 시공의 영향이 작은 구역을 말함.
- (3) 굴착공법(Excavation method) : 굴진면(막장면) 또는 터널굴착방향 굴착계획을 총칭하는 것으로서 크게 전단면굴착공법, 수평분할굴착공법, 연직분할굴착공법, 선진도갱굴착공법으로 구분.
- (4) 굴착방법(Methods of tunnel construction) : 지반을 굴착하는 수단을 말하며, 인력굴착, 기계굴착, 파쇄굴착, 발파굴착 등이 있음.



(f : 굴진면, L₁ : 굴진구역, L₂ : 굴착구역, L₃ : 후방구역)

그림 1. 굴진면과 굴착부



- (5) 기계굴착(Mechanical excavation) : 쇼벨, 로드헤더, 브레이커, 굴착기, 전단면 터널굴착기계(TBM, Tunnel Boring Machine) 등을 이용하여 터널을 굴착하는 방식.
- (6) 뇌관(Detonator) : 화약류를 폭발시키기 위해 사용되는 기폭약 또는 침장약이 장전된 관체.
- (7) 단층(Fault) : 지각의 응력에 의하여 생긴 일정 규모 이상의 전단파괴면에서 양측에 상대적으로 어긋남을 가지는 선상 또는 대상의 부분을 말하며, 정단층, 역단층, 주향이동단층 이동단층 등으로 구분.

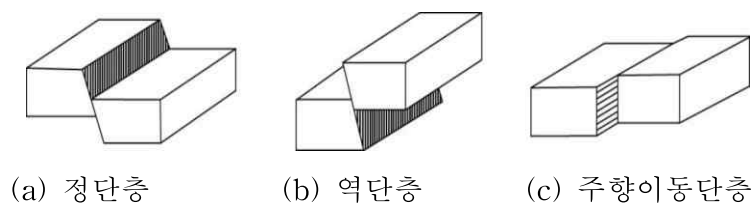


그림 2. 단층의 종류

- (8) 디스크커터(Disc cutter) : TBM과 같은 기계굴착기에 부착되어 회전력과 압축력에 의하여 암반을 압쇄시키는 원반형의 커터.
- (9) 록볼트(Rock bolt) : 지반 중에 정착되어 지반을 보강하거나 변위를 구속하여 지반의 지내력을 증가시키는 막대기 모양의 부재.
- (10) 록볼트 인발시험(Rock bolt pull-out test, proof test) : 록볼트의 인발내력을 평가하기 위한 시험.
- (11) 바닥부(Bottom) : 터널단면의 바닥부분.
- (12) 발파굴착(Drill and blast) : 착암기나 점보드릴 등 천공장비에 의하여 천공된 공에 화약류를 장약함으로써 그 폭발력을 이용하여 암반을 굴착하는 방법.
- (13) 버력(Mucks) : 터널의 굴착과정에서 발생하는 암석덩어리, 암석조각, 토사 등의 총칭.
- (14) 벤치(Bench) : 터널단면을 상·하로 분할하여 종방향(축방향)으로 굴착하는 경우의 분할면.
- (15) 벤치길이 : 분할굴착 시 상단부 굴진면과 하단부 굴진면 간의 터널 축방향 이격거리.
- (16) 불연속면(Discontinuities in rock mass) : 암반 내에 존재하는 절리, 층리, 엽리, 단층 또는 파쇄대 등과 같이 암반(Rock Mass)의 물리, 화학적 특성과 공학적 성질의 연속성을 해치는 면 또는 층.
- (17) 쏫크리트(Shotcrete) : 굳지 않은 콘크리트를 가압하여 노즐로부터 뿜어 소정의 위치에 부착하는 콘크리트.

- (18) 쉴드TBM(Shield Tunnel Boring Machine) : 주변지반을 지지하는 외판(원통형의 판)이 부착된 TBM.
- (19) 여굴(Overbreak) : 터널굴착공사에서 계획한 굴착면보다 더 넓게 굴착된 부위.
- (20) 용출수(Sump water) : 터널의 굴착면으로부터 용출되는 지하수.
- (21) 이완영역(Loosened zone) : 터널굴착으로 터널 주변의 지반응력이 재분배되어 다소 느슨해지는 범위.
- (22) 인버트(Invert) : 터널단면의 바닥 부분을 통칭하며, 원형터널의 경우 바닥부 90°구간의 원호 부분, 마제형 및 난형 터널의 경우 터널 하반의 바닥 부분을 말함. 인버트의 형상에 따라 곡선형 인버트와 직선형 인버트로 분류하며 인버트 부분의 콘크리트라이닝 타설 유무에 따라 폐합형 콘크리트라이닝과 비폐합형 콘크리트라이닝으로 분류함.
- (23) 절리(Joint) : 암반에 존재하는 비교적 일정한 방향성을 갖는 불연속면으로서 상대적 변위가 단층에 비하여 크지 않거나 거의 없는 것을 말하며, 절리의 생성 요인은 암석 자체에 의한 것과 외력에 의한 것이 있음.
- (24) 주지보재(Main support materials) : 굴착 후 굴착면에 붙여 지반과 일체가 되도록 시공하는 슛크리트, 강지보재 및 록볼트로 조합된 지보체계를 말하며, 콘크리트라이닝으로 이와 같은 지보체계의 역할을 대신하는 경우에는 콘크리트라이닝을 주지보재에 포함할 수 있음.
- (25) 주향(Strike): 불연속면(층리면, 단층면, 절리면 등)과 수평면의 교선방향을 진북방향 기준으로 측정한 방향과 사잇각.
- (26) 지반(Ground) : 건설공사에 관련한 지구의 표층 부분이며, 구조물의 기초나 굴착 등의 대상이 되는 부분.
- (27) 지반조건(Ground condition) : 터널 주변 지반의 지형, 지질, 지반특성, 수리·수문조건 등을 말함.
- (28) 지보재(Support materials) : 굴착 시 또는 굴착 후에 터널의 안정 및 시공의 안전을 위하여 지반을 지지, 보강 또는 피복하는 부재 또는 그 총칭.
- (29) 지중변위(Ground displacement) : 터널 굴착으로 인하여 발생하는 굴착면 주변 지반의 터널방향 변위.
- (30) 지표침하(Surface settlement) : 터널 굴착으로 발생하는 지표면의 침하.
- (31) 천단침하(Crown settlement) : 터널 굴착으로 인하여 발생하는 터널 천장의 연직방향 침하를 말하며 기준점에 대한 하향방향의 절대 침하량을 양(+)의 천단침하량으로 정의함.
- (32) 천장부(Crown) : 터널의 천단을 포함한 좌우 어깨 사이의 구간.
- (33) 측벽부(Wall) : 터널어깨 하부로부터 바닥부에 이르는 구간.



- (34) 층리(Stratification, Bedding) : 퇴적암이 생성될 때 퇴적조건의 변화로 퇴적물 속에 생기는 층상 구조.
- (35) 커터(Cutter) : TBM의 커터헤드에 토사 또는 암반의 굴착을 위하여 부착하는 금속으로 디스크커터, 커터비트, 카피커터 등이 있음.
- (36) 커터비트(Cutter bit) : 풍화암 이하의 지반을 굴착하기 위하여 쉴드TBM의 커터헤드에 부착하는 칼날형의 고정식 비트를 말하며, 본체와 팁으로 구성됨.
- (37) 커터헤드(Cutterhead) : TBM의 맨 앞부분에 배열·장착되는 디스크커터 또는 커터비트 등 각종 커터를 부착하여 회전·굴착하는 부분.
- (38) 토피 : 터널 천장으로부터 지표까지의 연직두께.
- (39) 파쇄굴착(Crushing excavation) : 유압장비, 가스, 팽창성 모르타르, 특수 저폭속화약 등을 이용하여 암반을 파쇄시켜 굴착하는 방법.
- (40) 환기설비(Tunnel ventilation system) : 터널 내 공기질을 유지하기 위하여 신선공기를 유입 또는 급기하거나 오염공기를 배출하기 위한 설비.
- (41) 회전력(Torque) : TBM의 커터헤드를 회전시키는 힘의 크기.
- (42) Open TBM(개방형 TBM) : 무지보 상태에서 기기전면에 장착된 커터의 회전과 주변 암반으로부터 추진력을 얻어 터널 전단면을 절삭 또는 파쇄하여 굴진하는 터널 굴착기계.
- (43) TBM(Tunnel Boring Machine) : 소규모 굴착장비나 발파방법에 의하지 않고 굴착에서 버력처리까지 기계화·시스템화되어 있는 굴착기계를 말하며, 일반적으로 개방형TBM(Open TBM)과 쉴드TBM(Shield TBM)으로 구분.

1.5 기호의 정의

- (1) KDS 27 20 00(1.5)를 따른다.

2. 조사 및 계획

2.1 조사 및 계획 일반

- (1) KDS 27 20 00(2.1)을 따른다.

2.2 조사

- (1) KDS 27 20 00(2.2)를 따른다.

2.3 계획

- (1) KDS 27 20 00(2.3)을 따른다.

3. 재료

3.1 재료 일반

- (1) KDS 27 20 00(3.1)을 따른다.

3.2 재료 특성

- (1) KDS 27 20 00(3.2)를 따른다.

3.3 품질 및 성능시험

- (1) KDS 27 20 00(3.3)을 따른다.

4. 설계

4.1 설계 일반

- (1) KDS 27 20 00(4.1)을 따른다.
- (2) 굴착 시 발생하는 버력의 재활용 여부를 검토하여 설계에 반영해야 한다.

4.2 굴착방법

4.2.1 인력굴착

- (1) KDS 27 20 00(4.2.1)을 따른다.

4.2.2 기계굴착

- (1) KDS 27 20 00(4.2.2)를 따른다.

4.2.3 발파굴착

- (1) KDS 27 20 00(4.2.3)을 따른다.

4.2.4 파쇄굴착

- (1) KDS 27 20 00(4.2.4)를 따른다.

4.2.5 보조공법

- (1) KDS 27 20 00(4.2.5)를 따른다.



4.3 굴착공법

- (1) KDS 27 20 00(4.3)을 따른다.

4.4 연직갱 및 경사갱 굴착

4.4.1 연직갱

- (1) KDS 27 20 00(4.4.1)을 따른다.

4.4.2 경사갱

- (1) KDS 27 20 00(4.4.2)를 따른다.

해설 1. 굴착방법

1. 굴착방법의 종류 및 적용

굴착방법에는 인력굴착, 기계굴착, 발파굴착, 파쇄굴착 등이 있으며 현장여건과 지반조건을 고려하여 적합한 굴착방법을 선정하여야 한다.

일반적으로 점착력이 적거나 파쇄 혹은 팽창성 등이 심하여 굴착면의 자립시간이 짧은 지반에서는 막장부의 안정을 위하여 휘폴링, 막장부보강, 주입공법 등 굴착 보조공법을 적용하여야 하며 자세한 보조공법은 본 ‘해설 3. 굴착보조공법’을 참조하기 바란다.

굴착방법 선정시에는 다음 사항을 고려하여야 한다.

- 원지반이 본래 가지고 있는 지보능력을 최대한 보존할 수 있으며 안정성, 경제성 및 시공성이 우수하여야 한다.
- 지반조건, 지하수 유입 정도, 굴착단면의 크기와 형태, 터널 연장, 근접구조물 유무와 주변 환경영향(진동, 소음, 민원 및 지표침하 등), 공사기간, 굴착장비, 굴착보조공법의 적용성 등을 종합적으로 검토하여야 한다.

1.1 인력굴착

인력굴착은 곡괭이, 삽, 착암기와 같이 인력으로 운영이 가능한 굴착도구를 사용하여 인력으로 굴착하는 방법으로 주로 다음과 같은 조건에서 적용한다.

- 자립시간이 짧은 토사지반을 소규모로 분할굴착하고 조기에 지보재를 설치하여야 하는 경우
- 진동의 영향을 크게 받는 지반을 소규모로 분할굴착하고 조기에 지보재를 설치하여야 하는 경우

1.2 기계굴착

기계굴착은 쇼벨(Shovel), 브레이커(Breaker), 터널용 브레이커(ITC), 로드헤더(Road header) 등의 중장비 또는 TBM이나 쉴드TBM 등 터널 굴진 장비를 사용하여 굴착하는 방법으로 설계시에 다음 사항을 고려하여야 한다.

- 중장비에 의한 기계굴착은 절리가 심하게 발달한 파쇄암이나 풍화암 등에서 지반이완을 최소화하고 여굴을 억제하는데 적용할 수 있다.
- 굴착 중장비는 지반조건, 터널단면의 크기, 형상 및 연장, 주변환경, 버력처리방법을 고려해서 시공성과 경제성 있는 기종으로 선정하여야 한다.
- TBM 터널과 쉴드TBM 터널의 설계는 「KR C-12110 TBM 터널」을 참조한다.
- 터널 굴착용 중장비인 브레이커, 터널용 브레이커(ITC) 및 로드헤더의 장비개요 및 주요 특징은 <표 1>과 같다.



표 1. 기계 굴착 장비

구 분	브레이커	터널용 브레이커(ITC)	로드헤더
개 요 도			
장비개요	굴착기에 브레이커 장착	브레이커와 소용량의 버킷을 동시에 장착	커터헤드에 비트를 장착
굴착속도	(0.25m~0.45m)/일 (복선)	(0.39m~0.53m)/일 (단선)	(0.4m~0.6m)/일 (복선)
장 점	초기 투자비가 적으며, 자유 단면 굴착이 가능	브레이커, 버킷, 버력처리의 동시 작업으로 인해 굴착속도 증대	굴착 단면이 클수록 경제 적이며, 굴진 속도 빠름 발파공법에 비하여 지반 의 이완이 적고 여굴적음
단 점	굴진시 브레이커와 버킷 의 교체 장착으로 인하여 다소 번거로움	초기 투자비가 크며, 연 암 이상 암반에서 굴진효 율 극히 저하	초기 투자비가 다소 크 며, 보통암 이상의 암반 에서 경제성 저하
적용사례	대부분의 기계굴착구간에 서 사용	서울 지하철 5-12공구(안 양천), 한강하저 등	서울 지하철 5-16공구(샛 강), 한강하저 등

1.3 파쇄굴착

파쇄굴착은 저진동으로 암을 파쇄굴착하는 방법으로 인력굴착방법을 적용할 수 없는 견고한 암반에서 기계 또는 발파굴착을 채택하기 어려운 경우에 적용하며, 터널 주변에 주택지나 주요구조물, 공공건물, 병원, 학교, 목장 등 주변환경으로 인하여 진동과 소음을 최소화 할 필요가 있는 경우에도 적용할 수 있다.

파쇄굴착 방법에는 정적파쇄제의 팽창력을 이용하는 것과 켄트를 유압력으로 밀어 넣든가 또는 경질 우레탄 고무와 고내압 고무튜브를 팽창시켜 암반에 균열을 발생시키고 브레이커나 굴착기를 이용하여 굴착하는 방법 등이 있다.

국내에 적용되고 있는 무진동 암반파쇄공법으로는 팽창성 파쇄제공법, DARDA 공법, GNR 공법, HRS 공법, PRS 공법, 전력충격 파암(PLASMA)공법 등이 있다. 이들 무진동 굴착공법은 진동, 비산석의 발생은 적지만 2차 파쇄를 위하여 대형 브레이커를 사용하여야 하므로 연속적인 기계소음 발생이 있고, 공사 효율성, 공사비 증가 문제 등을 가지고 있다.

1.4 발파굴착

발파굴착은 뇌관과 화약을 이용하는 암반에서 뇌관과 화약을 이용하여 굴착하는 방법이다.

- 발파굴착은 경제성과 시공성은 양호하나 진동과 소음 등이 수반되기 때문에 지반 조건 또는 주변여건에 따라서 적용여부를 결정하여야 한다.
- 발파설계는 지반조건을 고려하여 여굴과 터널 주변 지반의 이완영역을 최소화하며 평활한 굴착면이 형성되고, 버력의 크기가 적재와 운반에 적합하도록 수행되어야 하며, 굴착 단면의 크기 및 형상, 심발형식, 심발공, 발파공 및 주변공의 지름, 배치, 각도 및 천공깊이, 화약 종류 및 장약량, 뇌관의 형식, 발파순서, 현장 시험 발파 계획 등과 같은 사항을 포함하여야 한다.
- 발파설계시에는 발파진동이나 소음이 주변 환경에 미치는 영향을 고려하여 대책을 수립하여야 하며 엄격한 진동규제를 필요로 할 때에는 방진대책을 제시하거나 미진동 파쇄를 검토하여야 한다.
- 주변에 보호하여야 할 시설물이나 구조물이 있는 경우, 대상 시설물 위치에서의 발파진동 허용치는 발파진동 속도 측정치를 기준으로 구조물 손상기준 지반진동 허용치(<표 10> 참조)에서 정한 값을 준용하여 설계하여야 한다. 단, 진동에 아주 민감한 특정시설의 진동 규제치는 해당 시설의 규제치를 기준으로 설계하여야 한다.
- 발파지점 주변의 주민에 대한 생활공해방지를 위한 발파진동 허용치는 환경부 제정 ‘진동과 소음에 관한 규정’을 준용한다. 단, 가축사육장 및 양식장, 정밀기계공장 등에 대한 인접공사의 경우에는 해당 전문가의 자문을 얻어 발파진동 허용치를 정하여야 한다.

터널 발파에 관한 내용은 ‘2.2 발파공법’에 상세하게 기술하였다.

2. 굴착공법

2.1 굴착공법의 종류 및 적용

터널의 설계 및 시공시 굴착공법의 결정은 터널의 안정성, 경제성, 공기 등을 결정하는 중요한 요소이므로 터널단면의 크기, 막장부의 자립성, 원지반의 지보능력 및 지표침하의 허용값 등 제반여건을 충분히 고려하여 결정하여야 한다. 일반적인 굴착공법의 분류는 지반조건에 따라 전단면 굴착, 수평분할 굴착, 연직 분할 굴착 및 선진 도강 굴착공법 등으로 분류할 수 있다.

<표 2>는 이러한 굴착공법 분류 및 각 공법의 적용조건 보여주고 있다.



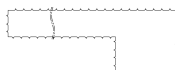
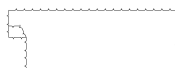
2.1.1 지반조건에 따른 굴착공법 분류

(1) 전단면 굴착공법

터널단면 전체를 1회에 굴착하는 방법으로서, 주로 지반상태가 양호하여 터널의 상·하반을 동시에 굴착하는 공법으로 터널 단면적이 작거나 지반의 자립성과 지보능력이 충분한 경우에 적용할 수 있는 공법으로 그 주된 특징은 아래와 같다.

- 굴착에 따른 응력의 재배치가 한 공정(Cycle)에 완료되므로 조기에 터널을 안정화시킬 수 있는 공법이다.
- 막장부가 균일하므로 작업이 단순하다.
- 기계화에 따른 급속 시공에 유리하다.
- 굴착 부분이 크기 때문에 지반 조건변화에 대한 대응성이 떨어진다.
- 단면이 큰 경우 숏크리트 및 록볼트 작업이 늦어지고 큰 작업대 등이 필요하다. 최근에는 연약암반에서도 굴착 보조공법(막장부보강 등)을 병행하여 전단면 굴착 공법을 실시하고 있는 추세이다.

표 2. 굴착공법의 분류

굴 착 공 법			적용조건 (지반 및 단면의 크기)	개념도		정 의
				횡단면	종단면	
전단면 굴착			• 소단면에서 일반적인 공법 • 양호한 지반에서 중단면 이상도 가능			전단면을 1회에 굴착
분할굴착	수평 분할 굴착	롱 벤치	• 비교적 양호한 지반에서 중단면 이상의 일반적 시공법			$L > 3D$ (L: 벤치길이, D: 터널 지름)
		숏 벤치	• 보통 지반에서 중단면 이상의 일반적 시공법			$1D < L < 3D$
		미니 벤치	• 연약한 지반에서 중, 소 단면일 경우			$L < 1D$
		다단 벤치	• 중단면 이상에서 막장부의 자립성이 극히 불량한 경우			벤치수 3개 이상
	연직 분할 굴착	중벽 분할 굴착	• 대단면에서 지반이 비교적 불량한 경우 • 침하를 극소화할 필요가 있는 경우			연직 방향으로 분할굴착
	선진 도강굴착		• 중대단면 터널에서 침하를 극도로 억제하여야 하는 경우 • 비교적 대단면으로 막장부의 자립력이 부족한 경우 • 단, 다음과 같은 사항에 주의하여야 한다. - 단면 확보필요 - 중벽 형상, 위치, 강성을 검토하여야 함			단면의 일부분을 먼저 굴착



(2) 수평분할 굴착공법

일명 벤치컷(Bench Cut)공법이라고도 하며, 단면을 여러 단계 분할하여 굴착하는 공법으로서 벤치의 단수나 길이는 굴착단면의 크기, 지반조건에 따른 설계상 인버트의 폐합시기, 투입되는 기계설비 등에 따라 결정된다. 이 공법은 터널의 상반, 하반 또는 인버트로 분할하여 굴착하는 공법으로 막장의 자립시간이 짧아 전단면 굴착이 곤란할 경우에 적용한다. 각 공법별 특징은 아래와 같다.

① 롱벤치 굴착

통상 벤치의 길이가 3D 이상으로 지반이 비교적 양호하고 시공단계에 있어서 인버트 폐합을 거의 필요로 하지 않는 경우에 채택되며 넓은 의미로는 상반 선갱 굴착 공법도 포함된다. 이 공법의 장점 및 단점은 다음과 같다.

가. 장점

- 상·하반 병행작업이 가능하다.
- 일반적인 장비의 운용이 용이하다.

나. 단점

- 경사로를 만들지 않으면 버력이 두 번 적재된다.

② 숏벤치 굴착

벤치 길이는 보통 1D~3D 정도로 공법의 적용범위가 넓고 NATM개념의 터널공법에서 주류를 이루는 공법이라고 할 수 있다. 지반에 있어서는 토사에서 경암에 이르기까지 거의 모든 지반에서 적용 가능하며 크기에 있어서는 중단면 이상에서 일반적인 공법이다. 이 공법의 장점 및 단점은 다음과 같다.

가. 장점

- 굴진 도중 지반의 변화에 대처하기가 용이하다.
- 일반적인 장비의 운용이 용이하다.

나. 단점

- 상반 작업공간의 여유가 적어질 가능성이 있다.
- 경사로를 만들지 않으면 버력이 두 번 적재된다.
- 상·하반 중 한 부분만 작업이 가능하므로 작업 공정의 균형을 맞추기 어렵다.

③ 미니벤치 굴착

팽창성지반이나 토사지반에서 인버트의 조기 폐합을 할 필요가 있는 경우 주로 채택되며, 벤치의 길이는 터널지름의 1배 이내가 보통이다. 이 공법의 장점 및 단점은 다음과 같다.

가. 장점

- 인버트의 조기 폐합이 가능하다.
- 지표침하를 최소로 억제하는 것이 가능하다.

나. 단점

- 상반 작업공간의 여유가 적어질 가능성이 있다.
- 경사로를 만들지 않으면 버력이 두 번 적재된다.
- 상·하반 중 한 부분만 작업이 가능하므로 작업 공정의 균형을 맞추기 어렵다.

④ 다단벤치 굴착

이 공법은 벤치의 수가 3개 이상인 분할 굴착공법으로서 막장부의 자립성이 극히 불량하여 분할 굴착을 하여야 할 필요가 있는 경우에 채택되며, 그 동안 국내·외의 실적을 보면 주로 막장부의 자립성 때문에 선정되는 예가 많다. 이 공법의 장점 및 단점은 다음과 같다.

가. 장점

- 버력의 안정성을 확보하기가 용이하다.
- 대단면에서도 일반적인 장비의 운용이 가능하다.

나. 단점

- 버력굴착이 각 막장부에서 중복되는 일이 많다.
- 각단의 벤치의 길이가 한정된 경우는 작업공간이 협소해질 가능성이 크다.
- 일반적으로 숏벤치 굴착보다 변형 및 침하는 크다.

(3) 연직분할 굴착공법

하반의 지반조건은 양호하나 상반의 지반조건이 불량하여 지반의 침하량을 최대로 억제할 필요가 있는 경우나 비교적 대단면으로 막장부의 지지력이 부족한 경우에 적용되는 공법이다. 따라서 안전성 측면에서 임시 지보채를 설치할 수 있다. 막장간의 이격거리는 1D~2D를 유지하는 것이 바람직하다. 이 공법의 장점 및 단점은 다음과 같다.

① 장점

- 침하량을 어느 정도 억제시키는 것이 가능하다.
- 막장부의 안정성을 유지하는데 유리한 공법이다.

② 단점

- 중벽으로 분할하기 위해서는 어느 정도의 단면확보가 필요하고, 시공속도가 다소 저하되는 단점이 있다.
- 작업공간의 제약으로 시공성이 저하될 우려가 있다.



(4) 선진도갱 굴착공법

주로 시험터널을 우선 굴착하는 공법으로 지반이 연약하여 소분할 굴착이 필요하거나 막장 전방의 지층조건이 불확실하여 전단면굴착 전에 전방지반을 확인할 필요가 있을 때 적용한다. 연약지반에서도 침하를 적게 할 수 있다는 특징이 있다. 이 공법의 장점 및 단점은 다음과 같다.

① 장점

- 대단면 시공에서도 침하를 최소화할 수 있다.
- 용출수가 많은 경우 측벽도갱으로 배수가 가능하다.

② 단점

- 일반적으로 공사비가 타 공법에 비하여 높다.
- 도갱 내벽 철거에 많은 시간과 비용이 소요된다.

(5) 가인버트 굴착공법

통상 중단면 이상에서 지반의 변형을 적극 억제하면서 시공성을 높이기 위하여 벤치의 길이를 길게 할 필요가 있을 경우에 벤치 상부에 소정량의 슛크리트를 타설하여 가인버트를 형성시키면서 굴진하는 공법이다. 이 공법의 장점 및 단점은 다음과 같다.

음과 같다.

① 장점

- 상반 벤치의 길이를 크게 할 수 있으므로 상반작업공간을 넓힐 수 있다.
- 상반관통 후 하반을 시공하면 경사로가 필요 없다.

② 단점

- 상반시공 속도가 크게 저하될 가능성이 크다. 즉, 가인버트의 타설시간, 슛크리트가 일정한 강도에 달하는데 소요되는 시간, 굴착장비의 통행으로부터 인버트를 보호하기 위해 버력 매우기 시간 등 시간 상실이 많다.
- 별도의 슛크리트가 필요하므로 경제성이 떨어진다.

2.1.2 굴착공법 비교

상기 방법 중 부분분할 굴착과 선진도갱 굴착공법은 철도터널 설계시 적용된 사례가 많지 않으므로, 여기서는 전단면 굴착공법과 상·하반 분할 굴착공법에 대해서만 비교하였고, 그 결과는 다음의 <표 3>에 기술하였으며, 천공장비로 점보드릴 사용시의 비교는 <표 4>에 나타내었다.

2.1.3 굴착공법 선정

각 굴착공법을 비교 검토한 결과, 일반적으로 전단면 굴착이 분할 굴착공법에 비하여 시공성, 경제성에 유리하므로 암질이 비교적 좋은 구간에서는 전단면 굴착공법을

적용하는 것이 유리하며, 터널 구간 중 암질이 좋지 않은 구간과 터널 갱구부에서는 분할 굴착공법을 적용하는 것이 유리하다. 특히 장대터널에서는 피난연결통로, 대형 대피소 및 환기관 관련 지하환기소 등이 필요하고 기능별 터널 단면의 크기가 다양하므로 기존 국내의 시공실적을 비교·검토하여 합리적인 선정기준을 결정하여야 한다.

표 3. 전단면 굴착공법과 상·하반 분할 굴착공법의 비교

구 분	전단면 굴착 공법	상·하반 분할 굴착 공법
검 토 사 항	• 암질이 양호하여 지반자체가 가지고 있는 지보능력이 크므로 막장부의 자립시간이 긴 경우에 주로 적용한다. • 굴착에 따른 응력의 재배치가 한 공정에서 완료되므로 조기에 터널을 안정화시킬 수 있는 공법이다. • 막장부가 단일하므로 작업이 단순하다. • 일시에 전단면을 보강하므로 이음부의 시공불량을 방지할 수 있다. • 하단부 굴착시 발파로 인한 상부보강의 파손 우려가 없다. • 기계화에 따른 고속 시공에 유리하다. • 버력처리 작업이 용이하다.	• 암질이 비교적 불량하여 막장부의 자립시간이 비교적 짧은 경우에 주로 적용한다. • 하부굴착시 상부 1차 보강의 파손우려가 있다. • 상·하반보강 이음부의 시공 불량을 유발할 수 있다. • 버력처리 작업이 용이하지 않다. • 굴착공법이 복잡하여 공기가 길어진다.

표 4. 점보드릴을 사용할 때 전단면 굴착공법과 상·하반 분할 굴착공법의 비교

항 목	전단면 굴착공법	상·하반 분할 굴착공법
천공작업	○	-
버력처리	○	-
보강공사의 일관성	○	-
굴착공사비	○	-
소요공기	○	-
품질관리	○	-
양질의 암반 연약암반	○ -	- ○
비 고	연약암반에 대하여는 지반 보강공법 등 보조공법이 필요	
적 용	경암, 보통암, 연암에 적용	풍화암, 파쇄대에 적용

주) ○ : 비교공법보다 우수



2.1.4 일반적 적용기준 사례

철도터널은 대부분 단선 또는 복선단면으로 지반분류에 따른 표준단면별 일반적인 굴착공법과 굴진장의 적용사례는 <표 5>과 같다.

터널이란 조사, 설계, 시공 및 계측이 삼위일체가 되어야만 성공적으로 공사를 수행할 수 있으므로 터널 설계와 시공시 지반분류 및 지보재 형식에 대한 패턴을 충분히 이해하고 사용목적과 지반조건에 부합된 적절한 조치가 필요하다.

표 5. 표준단면의 일반적 적용 예

구 분	지반분류	단 선		복 선	
		굴착공법	1회 굴진장 (m)	굴착공법	1회 굴진장 (m)
표준단면-1	경 압	전단면 굴착	3.5~4.0	전단면 굴착	3.5~4.0
표준단면-2	보통압	전단면 굴착	3.0~3.5	전단면 굴착	3.0~3.5
표준단면-3	연 압	전단면 굴착	2.0~3.0	전단면 굴착	2.0~3.0
표준단면-4	풍화암	상·하반 분할굴착	1.5	상·하반 분할굴착	1.5
표준단면-5	풍화암(토)	상·하반 분할굴착	1.0~1.2	상·하반 분할굴착	1.0~1.2
표준단면-6	갱구보강용	상·하반 분할굴착	0.5~1.0	상·하반 분할굴착	0.5~1.0

2.2 발파공법

2.2.1 발파계획

발파공법은 터널의 용도에 맞는 공간확보를 위하여 암반의 안정성과 자립력을 유지시키면서 경제적이고 효율성 있게 굴착하기 위하여 폭약을 이용하는 굴착방법으로, 발파계획을 수립하는데 있어서는 사전에 조사된 지반조건과 자립시간 등을 기초로 하여 미리 정해진 굴착공법과 지보형식 및 간격 등을 고려하여 발파굴진장, 심발공의 형태, 발파공의 배치, 기폭방법, 장약량 등의 발파패턴을 계획하여야 한다.

터널발파는 1자유면 형태의 발파이므로 2자유면 형태의 계단발파와 비교하여 발파공의 배치, 장약량 산출방법에서도 여러 가지의 변수요인들이 많아서 정량적이고 체계적이지 못한 특성을 지니고 있어 여러 실험과 경험적요소를 충분히 활용하여야 한다.

터널발파 계획을 수립하는데 중점적으로 고려하여야 할 사항을 살펴보면 다음과 같다.

- (1) 발파당 굴진길이 : 시공성과 경제적 측면에서 발파당 굴진길이를 길게 하는 것이 바람직하나, 암반의 자립성, 지보형식 및 주변환경에 제약을 받게 된다. 지반의 상태에 따라 발파지역 주변에 미치는 진동, 소음 등에 유의하고 장공발파도 포함하여 경제

- 성과 안전성을 고려하여 1회 발파 굴진길이를 결정하여야 한다. 굴진길이는 대부분 지반의 조건에 따라 다르게 되나, 일반적으로 연암에서는 1.0~1.5m 정도, 보통암에서는 1.5~2.0m, 경암지역에서는 지반의 상태에 따라 2.0~4.0m 범위에서 작업의 싸이클 타임(Cycle time)과 주변환경 영향에 따라 유연하게 조정이 가능하다. 분할굴착시 각 굴착면의 굴진장은 터널의 안정성이 확보되는 범위 내에서 공사비 및 공사기간이 과다하게 산정되지 않도록 면밀하게 검토하여 최적의 길이를 산정하여야 한다.
- (2) 심발공의 형태 : 심발공은 자유면을 형성하기 위하여 가장 먼저 발파되는 부분으로 터널발파 효율을 결정하는 가장 중요한 요소이다. 특히 심발공은 구속력이 가장 큰 발파공으로 발파진동이 가장 크게 발생되므로 진동제어를 위한 적절한 심발공의 형태 선정이 매우 중요하다.
 - (3) 장약량 : 터널발파는 1자유면 형태의 발파이므로 약장약 혹은 과장약시 발파의 실패 확률이 높아서 적정장약량 산출은 매우 중요한 요소이다.
 - (4) 기폭 시스템 : 터널발파는 전기뇌관이나 비전기식뇌관을 사용하여 미소한 발파공의 시간차를 이용하는 기술로써 기폭시스템은 발파공의 굴진효율, 진동과 폭음 발생의 중요한 요소이므로 적절한 활용이 중요하다.
 - (5) 폭약의 선택 : 폭약의 선택이 적합하지 않을 경우에 발파 효율저하 및 진동발생의 증가요인이 되므로 암반의 강도와 특성에 부합되는 폭약의 선택은 매우 중요하다.
 - (6) 모암의 손상과 여굴방지를 위한 스무스 블라스팅(Smooth Blasting)과 같은 조절발파 기술
 - (7) 정밀한 천공으로 여굴방지 및 굴진효율 증가를 위한 장비선택 및 천공 기술
 - (8) 발파진동과 폭음을 저감시킬 수 있는 공해방지 기술
 - (9) 터널발파시 사고방지를 위한 안전대책 확보

2.2.2 터널 발파공의 명칭

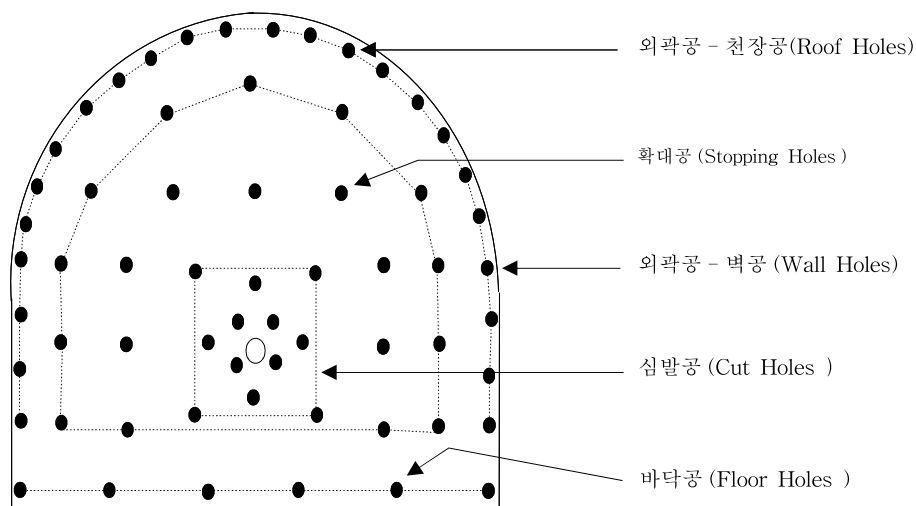


그림 1. 터널발파공의 명칭



(1) 심발공 (Cut Holes)

- ① 자유면을 형성하기 위해 가장 먼저 발파하는 부분으로, 암석을 압축하고 깨어 표면으로 퍼냄으로 자유면을 형성시킨다.
- ② 일반적으로 심발공의 면적은 약 2m^2 를 기준으로 하여야 한다.
- ③ 심발공의 형태는 수평천공 방법과 경사천공 방법으로 구분 한다.
- ④ 심발공은 천공밀도가 높고, 장약량은 약 $2\sim 12\text{kg}/\text{m}^3$ 이 소비된다.

(2) 확대공 (Stopping Holes)

- ① 심발공에서 자유면이 형성되어 2자유면 발파형태로 장약량에서도 계단발파와 같은 원리이나, 터널에서 장약량을 증가시키는 이유는 계단발파에 비하여 천공오차가 크고 좋은 파쇄입도를 얻기 위함이다.
- ② 확대공은 수평, 하향, 상향으로 발파공위치에 따라 세분할 수 있으며 하향 확대공은 수평, 상향 확대공에 비하여 적은 장약량으로 장약되는데 그 이유는 하향으로 발파되면서 암석의 자중이 고려되어, 구속력이 적기 때문이다.
- ③ 확대공의 평균장약량은 $0.7\sim 0.9\text{ kg}/\text{m}^3$ 정도이다.

(3) 외곽공 (Roof, Wall Hole)

- ① 암반을 발파굴착함에 있어서 주변 암반을 최대한 손상시키지 않고 정확하게 파쇄하기 위하여 스무스 블라스팅 (Smooth Blasting)을 적용하고 있다.
- ② 외곽공(Roof, Wall Hole)에서 천공각도, 방향, 천공간격은 여굴과 암반의 손상 등에 영향을 주기 때문에 신중한 시공이 요구된다.

(4) 바닥공 (Floor Hole)

- ① 발파형태가 상향으로 발파되므로 다른 공들에 비하여 많은 장약량이 필요하다.
- ② 바닥공의 천공간격과 장약량은 바닥의 평탄성에 관계되므로 굴착장비의 운행 등에 영향을 미친다.

2.2.3 터널발파의 기본적인 설계기준

터널발파의 경우 여러 실험과 경험에 따라 다양한 굴착방식이 사용될 수 있으며, 터널발파는 일반 계단발파와 비교하여 장약량 산출시 여러 가지 변수요인들이 많아서 장약량 계산방식이 계단발파에 비하여 정량적, 체계적이지 못한 특성을 가지고 있다.

본 해설에서 기술되는 기본적인 기준은 발파이론과 실험 및 경험에 의한 정상적인 발파조건을 기준으로 하여 작성하였다.

(1) 터널면적에 따른 m^3 당 장약량

터널발파에서 통상 필요로 하는 단위체적당 장약량은 암석의 종류 등에 따라 차이가 있으나 일반적인 장약량은 <그림 2>와 같다. 국내 철도터널의 경우 굴착단면적

에 따른 장약량은 $0.95 \sim 1.3 \text{ kg/m}^3$ 이다.

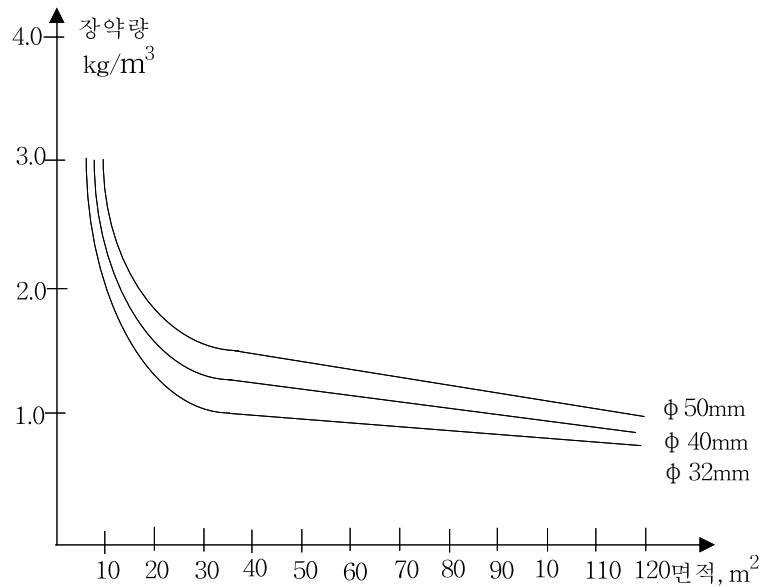


그림 2. 터널면적에 따른 m^3 당 장약량

(2) 터널면적에 따른 천공수

터널면적에 따른 천공수는 <그림 3>과 같다

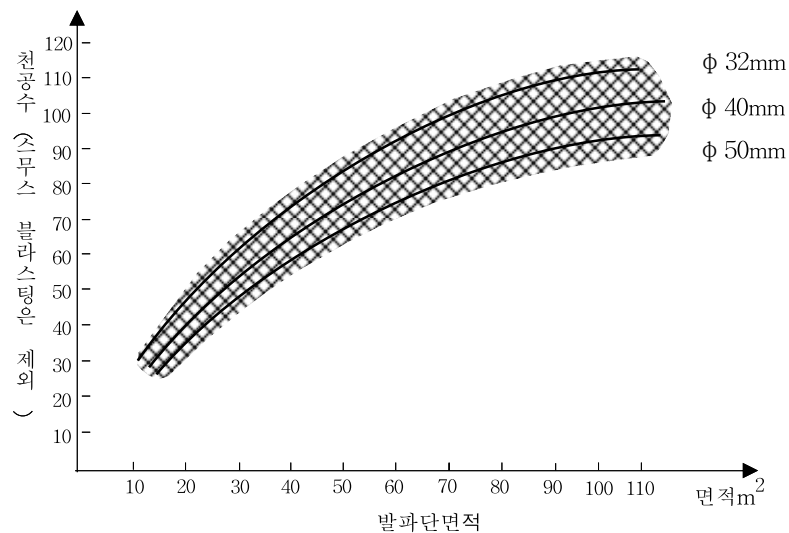


그림 3. 터널면적에 따른 천공수

(3) 터널의 외향각(Look Out)에 의한 여굴량

- ① 터널의 설계단면이 좁아지는 것을 방지하고 다음 막장면에서의 천공장비운용을 위하여 외곽공을 약 3° 경사지게 천공하여 발생된 것으로 천공장의 길이와 강지보재(Steel Rib)의 설치여부에 따라 다르게 적용된다.

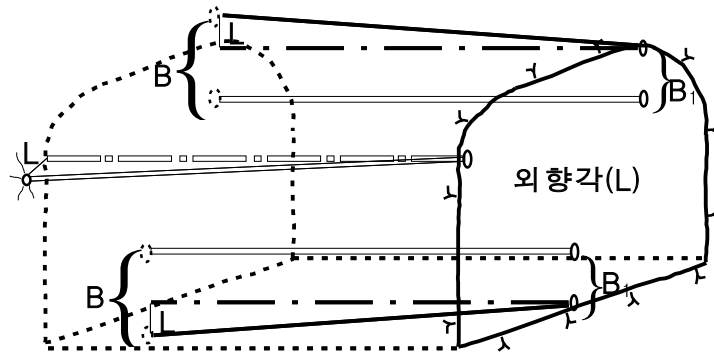


그림 4. 외향각(Look Out) 천공

② 외향각에 의한 여굴량 산출

- 강지보재(Steel Rib)가 없는 경우 : $100\text{mm} + \text{천공장} \times 30\text{mm/m}$
- 강지보재(Steel Rib)가 설치되는 경우 : $(100\text{mm} + \text{rib의 두께}) + \text{천공장} \times 30\text{mm/m}$

(4) 천공장과 굴진장의 비율

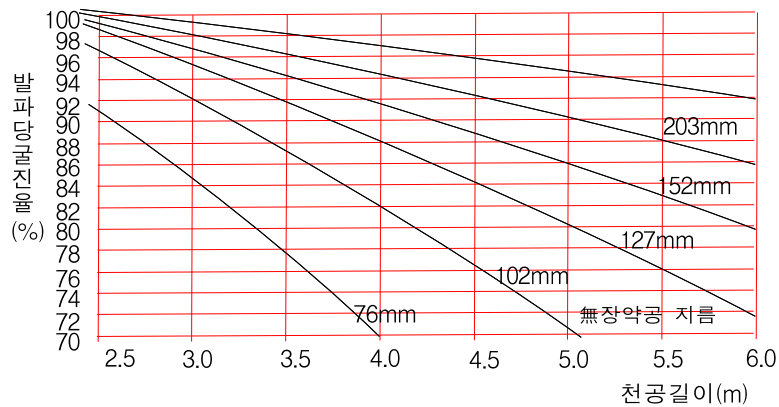


그림 5. 천공길이와 발파당 굴진율의 관계

- ① 건설표준품셈의 기준에서는 굴진장에서 천공장의 길이를 일률적으로 100mm를 가산 길이로 산정하였으나, 본 기준은 비현실적이다.
- ② 일반적으로 천공장 3.5m 이내에서 굴진율은 85~90% 정도이므로, 굴진장에서 천공장 가산길이는 10~15%를 적용하는 것이 바람직하다.

(5) 심빼기공법의 종류

암반이 공기와 같은 외부에 노출된 면을 자유면이라 하는데, 발파효과는 자유면의 수에 따라 크게 달라진다. 터널굴착시 전단면 발파와 상부반단면 발파는 자유면이 1개이므로, 인위적으로 자유면을 형성시키기 위한 심빼기 발파는 터널발파의 성패를 좌우할 정도로 중요한 부분이므로 많은 실험과 경험에 의거 여러 가지의 공법을 제

시하고 있다.

또한 1자유면이므로 구속력이 커서 발파진동이 제일 크게 발생하는 부분이므로 진동저감을 위해서도 가장 심도 있게 다루어져야 한다.

현재 터널발파에서 사용되고 있는 심빼기 발파방법은 경사천공 방법과 평행천공법 및 평행천공과 경사천공을 혼용한 방법으로 구분할 수 있는데 각 천공방법에서 원리는 비슷하나 발파공의 배치방법에 따라 여러 가지의 공법으로 분류되고 있는 실정이다.

① 심빼기발파의 종류

가. 경사 천공법 : V-Cut, Pyramid-Cut, Fan-Cut, Swing-Cut 등

나. 평행 천공법 : Cylinder-Cut, Burn-Cut, Coromant-Cut 등

다. 경사 + 평행천공법 : Supex-Cut

② 경사 천공법(V-Cut방법)

터널의 경사천공법중에서 가장 일반적인 심빼기발파 공법으로 경사천공을 위해서는 어느 정도의 터널폭이 필요하다.

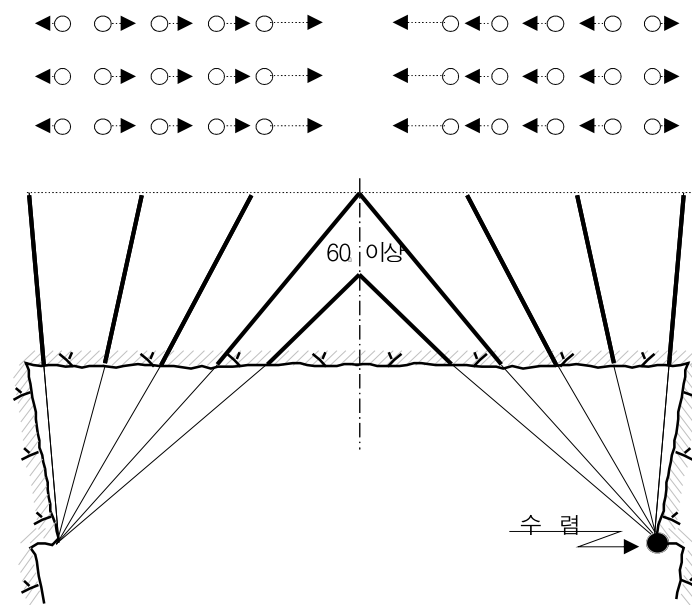


그림 6. V-Cut방법

가. 설계방법

- 터널의 최대 굴진장은 터널폭의 50% 이내
- 심발공의 각도는 60°이상
- 심발공은 충분한 자유면 확보를 위해 3조 이상
- 천공각도는 수렴점을 기준
- 심발공의 저항선은 1.5m 이하로 하며 1.5m 이상일 경우는 보조심발공 배치



- 장약량 계산방법

- 전색장(무장약량) : $H_o = 0.3 \times B$ (최소 저항선)

- 장약비중(I_b) : 천공경 $\phi 38\text{mm}$ 이하(Leg Drill)경우 : $0.5 \sim 0.7\text{kg/m}$

천공경 $\phi 45\text{mm}$ 이상(Jumbo Drill)경우 : $0.8 \sim 1.2\text{kg/m}$

- 공당 장약량 산출 : $(H - H_o) \times I_b$

· H : 천공장 H_o : 전색장 I_b : 장약비중

- 발파공이 대칭되는 심발공은 똑같은 단수의 뇌관 배치

- V형 각도공사이의 기폭시차는 발파암석의 이동과 팽창시간을 고려하여 50ms 이상

나. 적용성 검토

- 국내에서 가장 널리 적용되고 있으며, 천공밀도가 약간 떨어져도 발파효율에 영향이 적어서 현장에서 가장 선호하는 공법임

- 레그드릴 (Leg Drill) 천공장소와 굴진장이 2m 이하의 장소에서 효과적임

③ 수평 천공법(Burn-Cut 및 Cylinder-Cut)

현재 점보드릴(Jumbo Drill) 천공장소에서 널리 시행하는 방법으로 Burn-Cut은 비교적 소구경(공경 95mm 이하)의 무장약공을 사용하고, Cylinder-Cut은 대구경(공경 95~200mm)의 무장약공을 1~3공 천공하며 무장약공을 중심으로 장약공을 평행하게 천공하여 일정한 시차로 발파하면서 무장약공을 중심으로 자유면을 확대시키는 공법이다.

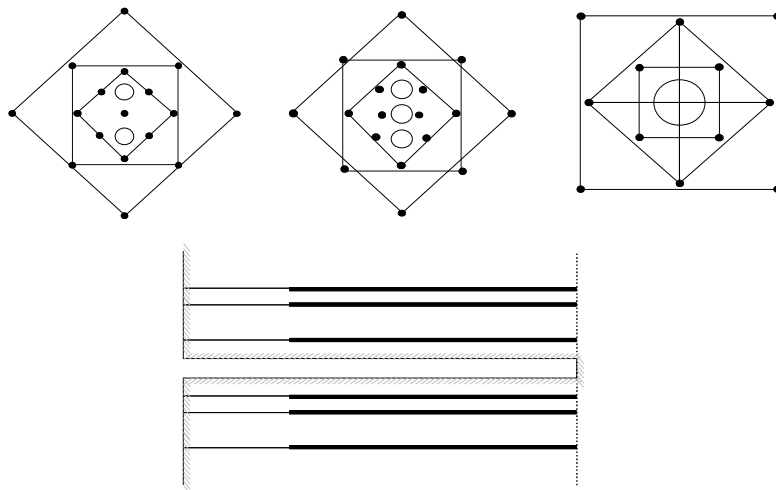


그림 7. Burn-Cut방법

가. 심발공의 설계조건

Burn-Cut을 설계할 때 좋은 결과를 얻기 위해서는 다음 사항이 매우 중요하다.

- 대구경(무장약공)의 지름
- 저항선

- 장약밀도

- 천공의 정밀도

• 대구경(무장약공)의 지름

무장약공의 지름이 크면 클수록 굴착효율은 좋다. 그러므로 국내에서도 $\phi 350\text{mm}$ 이상의 무장약공을 이용하여 굴착효율을 증대시키는 사례가 많다.

그러나 천공장비 등의 여건으로 대구경의 무장약공 천공이 곤란하여 점보드릴에서 천공이 가능한 $\phi 102\text{mm}$ 무장약공을 두개 이상 천공하여 실시하는 경우에는 다음과 같은 환산지름 공식으로 계산된다.

$D = d\sqrt{n}$ 여기서, D = 무장약공의 환산지름(mm)

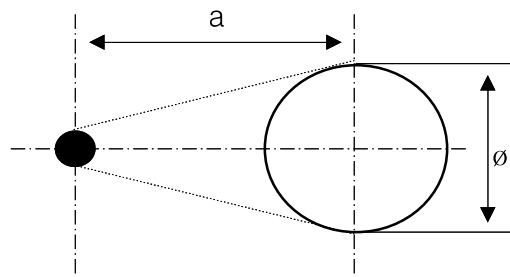
d = 실제 천공하는 무장약공의 지름(mm)

n = 무장약공의 천공수

• 저항선

너무 큰 저항선은 심발공에 균열이 생기고, 너무 짧은 저항선은 무장약공으로 연결되어 터널발파의 전체가 공발이 되어 실패확률이 높다.

따라서 무장약공과 발파공의 간격은 $a=1.5\phi$ 가 유지되어야 한다.



$a > 2.1\phi$: 균 열

$a = 1.5 \sim 2.1\phi$: 파 쇄

$a < 1.5\phi$: 완 전 파 쇄

• 장약 집중도

무장약공 가까이 있는 구멍은 조심스럽게 장전하여야 한다. 구멍내 장약밀도가 너무 낮으면 암석을 파괴시키지 못하는 반면, 너무 높으면 대구경 반대편 벽을 향하여 암석이 분출하여 다시 암석이 굳어지는 소결현상으로 인하여 터널전체에 공발현상이 발생된다.

• 천공의 정밀도

무장약공과 발파공사이에는 일정한 간격으로 평행이 유지되어야 한다. 만일 평행이 유지되지 않고 편차가 발생할 경우에는 소결 및 공발(Rifle)현상으로 발파가 실패하게 된다.

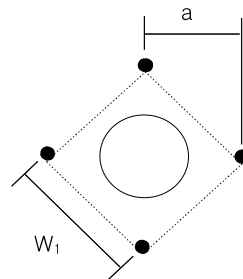


나. 심발공의 발파설계

• 첫번째 사각형 계산

$a = 1.5\phi$ a : 대구경과 발파공사이의 중심거리

$W_1 = a\sqrt{2}$ W_1 : 첫번째 사각형의 폭

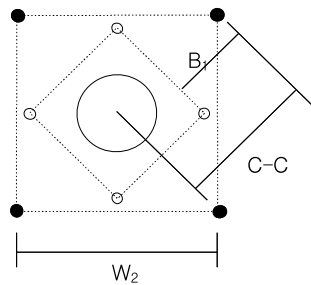


• 두번째 사각형 계산

$B_1 = W_1$

$C-C = 1.5W_1$

$W_2 = 1.5W_1\sqrt{2}$ W_2 : 두번째 사각형의 폭

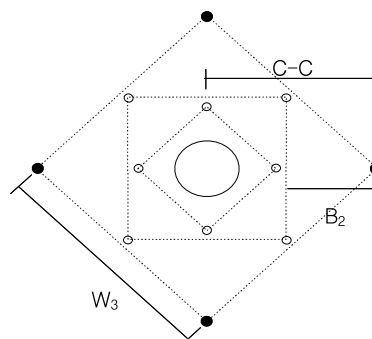


• 세번째 사각형 계산

$B_2 = W_2$

$C-C = 1.5W_2$

$W_3 = 1.5W_2\sqrt{2}$ W_3 : 세번째 사각형의 폭

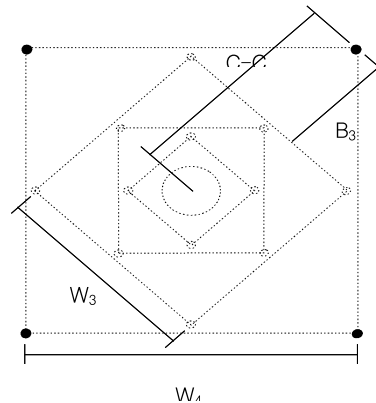


- 네 번째 사각형 계산

$$B_3 = W_3$$

$$C-C = 1.5W_3$$

$$W_4 = 1.5W_3\sqrt{2} \quad W_4 : \text{네 번째 사각형의 폭}$$



다. 심발공의 장약량

- 기저 장약(Hb) : $1/3 \times \text{천공장}(H)$
- 기저 장약 장약비중(Ib) :
 - 천공경 $\phi 38\text{mm}$ 이하(Leg Drill) 경우 : $0.6 \sim 1.2\text{kg/m}$
 - 천공경 $\phi 45\text{mm}$ 이상(Jumbo Drill) 경우 : $1.2 \sim 1.8\text{kg/m}$
- 기저 장약량(Qb) : $Hb \times Ib$
- 주상장약(Hc) : $H - (Hb + Ho)$
- 주상장약량(Qc) : $Hc \times Ib \times 0.5$

라. Burn-Cut 발파 실패 현상

- 소결(Recementation) 현상

심발공에서 폭굉압이 세어 팽창율이 커지게 되는데 이때 파괴된 암반들이 무장약공을 매우면서 세립된 암이 다시 굳는 것을 말한다.

- Bridge현상

장약장이 짧은 경우 주로 발생되며 활처럼 휘어지면서 파괴가 일어나며 공저에서 발파된 화약이 메지길이 부분의 암을 밖으로 밀어내지 못하기 때문이다.

- 공발(Rifle) 현상

제1심발공과 무장약공간의 거리가 너무 멀거나 장약밀도가 작을 때, 메지가 부적절할 때 화약이 암석을 파괴하지 못하고 충을 쏘듯이 유출되는 것을 말하며 적절한 거리와 메지를 하여야 한다.

- 감응 폭발(Influenced Explosion)

장약공이 발파시 인접공에 충격을 가하여 폭발을 야기시키는 현상으로 절리, 층



리 크랙이 발달된 암층에서는 멀리 있는 인접공에서도 감응폭발이 일어나 기폭순

서가 역으로 되어 발파효율을 감소시킬 수 있다.

④ Supex-Cut (경사+평행 천공법)

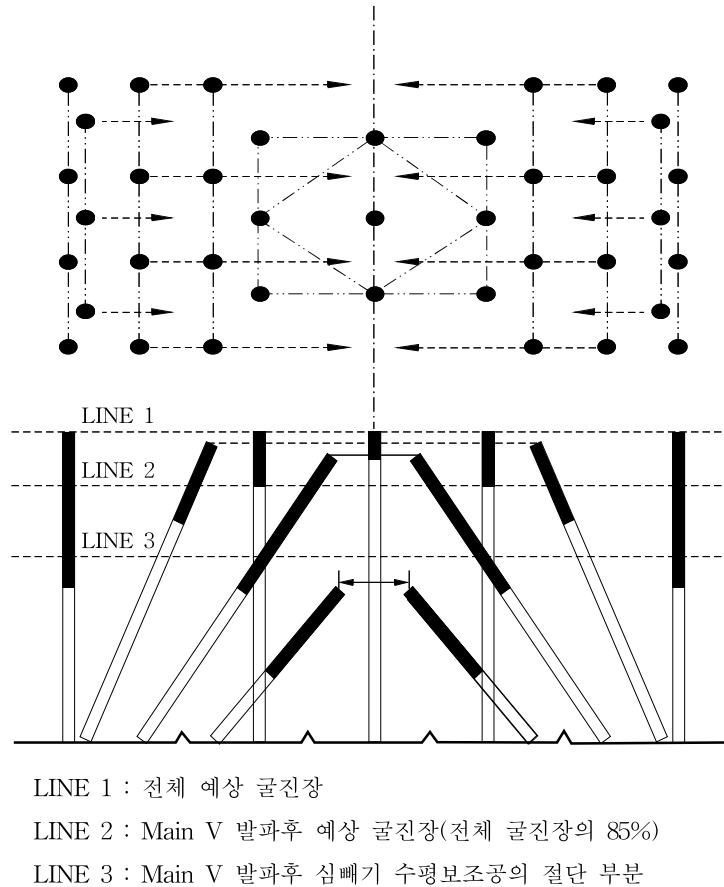


그림 8. Supex-Cut방법

가. 천공순서는 심빼기 수평공, 외곽공, 바닥공, 확장공, 심빼기 각도공순으로 실시하도록 한다. 각도공보다 수평공을 먼저 천공하는 것이 보다 효율적이다.

나. 각도공쌍의 갯수와 간격, 각도공의 경사각은 터널의 규격과 암반조건에 따라 정하며 각도공의 공저간격은 200~700mm가 되도록 한다.

다. 가능한 각도공쌍의 중앙부분에 심빼기 수평공이 위치하도록 하며 심빼기 수평공의 공간격은 최대 900mm를 넘지 않도록 한다.

라. 심빼기공 이외의 공은 기존의 통상거리를 적용하거나 100~200mm를 넓게 할 수 있다.

⑤ 심발공형식 검토

국내 터널 공사에서는 현재까지 V-Cut, Burn-Cut, Cylinder-Cut 등이 도입·적용되고 있는 실정이며, 여기서는 Burn-cut 및 Cylinder-Cut이 공히 무장약공을 천공하여 이를 자유면으로 활용한다는 점을 기본으로 하나 단지 무장약공의 공경 차이

만 있으므로 V-Cut과 Burn-Cut의 장단점에 대해서 <표 6>과 같이 비교하였다.

표 6. Burn-Cut 및 V-Cut의 비교

구 분	Burn-Cut	V-Cut
장 점	• 천공장 2m 이상의 장공천공에 의한 굴진작업시 굴진효율이 좋다. • 파쇄암의 크기가 작고 균일하여 버력 처리 작업이 용이하다. • 장약작업이 용이하다. • 규격천공이 가능하다. • 발파비석이 중앙으로 되기 때문에 터널시설물의 파손이 적다.	• 기능공들의 숙련도가 높다. • 천공,장약의 정밀도가 떨어져도 발파실패율이 적다. • 2m 미만의 굴진장에서는 효율이 좋다. • 천공수가 적고, 천공이 간편하여 천공 시간을 단축시킬 수 있다.
단 점	• 심발공의 정밀한 천공작업이 요구되며 심발공 일부만 잘못되어도 굴착면 전체가 공발이 발생된다. • 레그드릴(Leg Drill) 사용시 천공오차가 커서 실패확율이 높다. • 뇌관배열, 천공미숙 또는 과장약으로 폭음과 진동이 심하고 낙석이 많다. • 천공장 2m 미만에서는 발파실패율이 매우 높다.	• 장공굴착(굴진장 3.0m 이상)이 곤란하다. • 점보드릴(Jumbo Drill)을 사용할 때 터널폭이 최소 6m 이상 되어야 3.0m를 굴진할 수 있다. • 터널 벽면에 비석발생이 많아 슛크리트 파손이 많다.

일반적으로 천공장이 길고 숙련된 기능공에 의해 정확한 시공이 이루어질 경우에는 Burn-Cut이나 Cylinder-Cut이 효과적이고, 불량 암질에서는 지보목적상 발파당 굴진장을 1.5m 내외로 짧게 하여야 하므로 천공장이 짧을 때에 유리한 V-Cut 공법을 주로 적용한다.

2.2.4 조절발파(스무스 블라스팅공법)

(1) 스무스 블라스팅의 원리 및 목적

스무스 블라스팅공법의 원리는 발파공내에서 폭약이 폭발할 때 다량의 충격파(동적 파괴효과)와 고압의 가스(정적파괴)가 발생되며, 충격파는 발파공에 균열을 발생시키고, 고압의 가스는 균열권에 따라 파괴를 일으킨다. 발파공의 지름에 비하여 폭약의 지름이 적을 경우에는 발파공의 내부에 공극이 발생되는데, 발파시 충격파는 공극으로 인하여 감쇠시키고 가스압으로 암반을 파괴 시키므로써, 암반의 손상 및 여굴을 방지하는데 목적이 있다.

$$\textcircled{1} \text{ 디커플링(Decoupling)계수} = \frac{\text{발파공의직경}}{\text{폭약의직경}}$$

② 스무스 블라스팅공법에서 디커플링(Decoupling)계수가 2.0~3.0일 때 가장 적합하다.

③ 스무스 블라스팅공법에 적합한 정밀폭약을 사용하여야 한다.



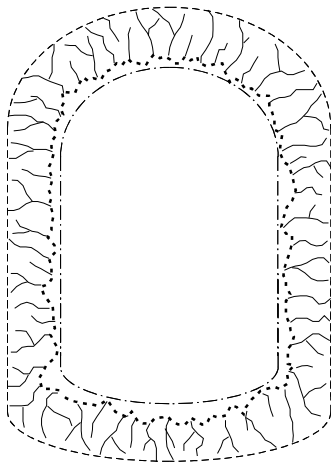
(2) 스무스 블라스팅공법의 설계방법

① 천 공

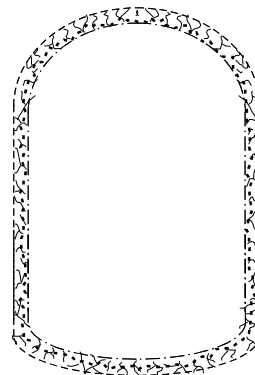
- 발파공의 천공장, 천공각도 공간격의 오차를 적게 하여야 한다.
- 발파공의 간격(S) : $S=(12\sim16)d$ 여기서, d = 발파공의 지름
- 최소저항선(B) : $B=(0.6\sim0.8)\cdot S$

② 장 약

- 정밀폭약을 사용하여야 한다.
- 디커플링(Decoupling)계수는 2.0~3.0의 범위로 한다.
- 공저장약은 에멀전폭약 혹은 다이너마이트로 0.15~0.3kg/공 장약한다.
- 기폭시차는 가능한 동시 기폭시키는 것이 좋으나, 진동문제로 지발당 장약량이 제한될 경우에는 최소 2공 이상을 동시 기폭시킨다.



일반발파에 의한 균열영역



스무스 블라스팅발파에 의한 균열영역

그림 9. 발파에 의한 균열 영역

2.2.5 폭약과 뇌관

(1) 폭약의 특성

작업조건과 사용목적에 맞는 폭약을 선택하기 위해서는 사용할 폭약의 기본적인 성능을 고려하여야 한다.

폭약의 가장 중요한 특징은 다음과 같다.

- ① 폭발속도(Velocity of Detonation)
- ② 강도(Strength)
- ③ 순폭도
- ④ 밀도(Density)
- ⑤ 내수성(Water Resistance)

- ⑥ 예민성(Sensitivity)
- ⑦ 동결에 대한 저항성(Resistance)
- ⑧ 산소균형(Oxygen Balance)
- ⑨ 내용년수(Life Time)

(2) 폭약의 선정

- ① 터널발파시에 발생한 가스는 통풍을 하여도 없어지지 않고 호흡으로 체내에 들어가서 해를 끼치게 된다.

폭약중에 내포된 N, C, O, H의 원소 중에서 가스화되어 NO₂는 5ppm, CO는 15ppm 이상이면 유해하다. 따라서 갱내에서는 유독성 폭약의 사용을 금지하고 가능한 함수계통 폭약(에멀전)의 사용이 바람직하다.

- ② 폭약을 선택할 때에는 암반의 강도와 부합되는 폭약이 선택되어야 발파효율 증대와 진동 및 폭음의 저감효과를 기대할 수 있다. 따라서 암반의 탄성파속도와 폭약의 폭발속도가 동일한 폭약이 적합하다.

(3) 국내에서 생산되는 폭약류의 종류와 특성은 <표 7>와 같다.

(4) 뇌관의 종류

뇌관의 종류에는 공업뇌관, 전기뇌관, 비전기식 뇌관, 전자뇌관 등이 있으며, 공업뇌관은 관체를 동으로 제조한 것과 알루미늄으로 제조한 것이 있다. 전기뇌관 중에는 순발용과 1/10초 단위를 단차로 하는 DS전기뇌관 및 1/1000초 단위를 단차로 하는 MS뇌관 등이 있으며, 이들 뇌관은 기폭역할을 한다.

① 전기뇌관(Electric Detonator)

전기뇌관은 보통 공업뇌관에 전교장치를 한 것이다. 즉 공업뇌관의 공간부분에 각선을 끼우고, 그 끝에 백금 80%, 이리듐 20%의 합금선(지름 0.02mm, 길이 2mm)의 전교를 납땜하고 점화약을 묻힌 다음 공간부분을 막아버린 것이다.

각선에 전기를 통하면 백금선이 가열되어 면화약 등으로 된 점화구가 발화하고, 계속하여 뇌관이 점폭작용을 하게 된다. 점화약은 티오시안산납과 염소산칼륨의 혼합물을 연화약 용액으로 반죽을 만들고, 이것을 백금선에 묻힌 다음 건조하여 고착시킨다.

점화약과 기폭약 사이에 지연장치를 해두면 점화한 다음 일정한 시간이 지난 후에야 비로소 점폭하게 된다. 지연장치가 없는 것을 순발전기뇌관, 지연장치가 있는 것을 지발 전기뇌관이라고 한다.



표 7. 국내에서 생산되는 폭약류

구 분		다이ना마이트	합수폭약	에멀전폭약	ANFO폭약	정밀폭약	도폭선
폭속 (m/s)		6,100 ~6,700	4,500 ~4,800	5,700 ~5,900	3,300	3,900 ~4,400	7,000
가비중 (g/cc)		1.3~1.6	1.1~1.2	1.1~1.3	0.9	1.0	-
내수성		우수	최우수	최우수	취약	보통	우수
위 력		최우수	우수	우수	보통	보통	우수
내한성 (℃)		-20	-5	-20	-30	-20	-
후가스 (ℓ/kg)		880~900	680~760	810~890	970	640~740	-
개 요		• 니트로젤 약 20%를 한도로 하여 산화제, 가연제, 감열소염제등을주성분으로구성됨 • 폭력이 가장 우수 • 경암, 중경암에 적합	• 내수성으로 수공에서 사용가능 • 충격에 둔감하고 ANFO 폭약보다 취급이 안전 • 폭발후 가스가 적다 • 장기간 저장하면 물이 분리되어 내수성 저하	• 연료와 산화제간 밀착접촉으로 신속하고 완전연소가 가능하며 에너지 방출이 빠름 • 수분에 대한 친화력이 양호하여 수중작업에 이상적임 • 열,마찰,충격등에 안전하고, 혹서에 도 사용가능	• 충격감도가 둔감 • 가격이 저렴 • 재료취급이 안전하나 흡습성이 있어 장기저장곤란 • 가스량이 많아 갱내 환기불량 • 수공에 사용불가	• 내수성이 양호하고 취급성이 우수하며, 신속,정확하게 장전 • 모암의 균열최소화 • 여굴방지 및 발파면의 미려함과 정밀성 확보	• 선형상의 폭약 • 1m당 함유약량으로 표시
용 도		• 대발파 • 산악발파 • 건설산업용 발파	• 도심지발파 • 용출수 많은 지역	• 도심지 발파나 발파공해로 인한 민원예상지역 • 용출수 많은 지역 • 터널발파	• 노천발파에서 대량의 채석, 채광을 목적으로 사용 • 용출수 없는 지역	• 터널발파시 제어발파에 적용 • 대절토사면 굴착경계부이완억제	• 비전기식 뇌관의 연결선으로 사용 • 정밀폭약 대신 사용가능
종 류	H사	메가마이트 (MegaMITE I, II)	코벡스 (KOVEX) -100 -300(탄광용) -700	뉴마이트 플러스 (NewMITE I, II)	초유폭약 (ANFO Plus) -Bag -Bulk	화이넥스 (FINEX) -FINEX I -FINEX II	하이코드 (Hi-Cord)
	K사	-	-	뉴에멀라이트 (New Emulite) 슈퍼 에멀전 (Super Emulsion)	Prillit A(일반용) C(터널용)	카이넥스 (KINEX) -KINEX I -KINEX II	디코드 (D-Cord)

지발전기뇌관은 0.1~1.0초 사이의 간격으로 터지는 보통 단발전기뇌관(DS)과 0.01~0.1초 사이 즉 9~90 밀리세컨드(Milli-Second) 간격으로 터지는 밀리세컨드 단발전기뇌관(MS)으로 나누어진다.

가. 전기뇌관의 발화시험 기준(KSM-4801, 2)

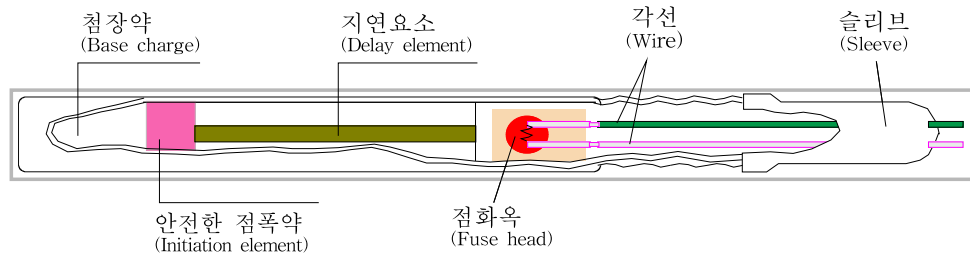


그림 10. 전기뇌관의 구조

나. 비전기식뇌관

기뇌관은 발파모선과 각선을 통해 전기에너지가 전달되어 이를 열에너지로 전환시켜 뇌관을 기폭시키는 것이지만, 비전기식뇌관은 각선 대신 화약분말을 내부에 코팅한 플라스틱 튜브로 대체한 것으로서 정밀한 지연초시와 사용 안전성이 뛰어난 장점을 갖고 있는 것이 특징이며, 전기뇌관과 같이 순발을 포함한 MS, DS시리즈로 구분되나, 사용목적에 따라 터널용 MS, DS뇌관, 노천용 연결뇌관, 공내뇌관 등이 있다.

다. 전기뇌관과 비전기식뇌관의 비교

폭약을 기폭시키기 위해 초기에는 도화선과 공업뇌관을 사용하다가, 그 이후 전기뇌관이 발명되어 전세계적으로 이용되었다. 최근에는 비전기식뇌관이 1993년부터 제조공급되고 있다.

비전기식뇌관은 한 발파당 거의 무한단수를 기폭시킬 수 있고, 누설전류 및 정전기 등에 안전하여 전기적인 위험요소가 있는 곳에 안전하게 사용할 수 있는 뇌관으로 알려지고 있으나, 최근에 해외에서 낙뢰(Lightning)등으로 비전기식뇌관 사고가 발생됨에 따라 노천(Open) 및 터널현장에서 안전조치를 강화하고 있는 실정이다.

전기뇌관 사용시 누설전류가 있는 곳에서는 비전기식뇌관을 사용하여야 하나 낙뢰 발생시는 비전기식뇌관도 기폭된 사례가 있으므로 발파작업등을 중단하여야 한다. 전기뇌관은 결선후 단선유무를 확인할 수 있는 반면, 비전기식뇌관은 육안으로 확인하여야 하는 단점이 있고, 기폭원리상 단선(Cut-Off) 발생가능성이 상대적으로 높아 신중한 작업을 요한다.



비전기식뇌관은 많은 단수의 발파를 할 수 있는 장점이 있으나, 전기뇌관은 발파 공수에 제한을 받아 왔다. 그러나 최근 다단식발파로 많은 발수로 진동, 소음을 줄일 수 있는 발파공법이 개발되어 이에 대한 문제점도 개선되었다.

전기뇌관과 비전기식뇌관의 제품 특성에 따른 비교는 <표 8>과 같다.

2.2.6 천공과 장약

(1) 천공경과 폭약의 지름

- ① 터널발파에서 사용되는 폭약은 대부분 종이포장으로 되어 있기 때문에 쉽게 장약이 가능하도록 천공과 폭약사이에 적절한 간격이 필요하다. 그러나 폭약의 지름과 천공의 지름이 너무 차이가 발생될 경우에 장약비중의 약화로 폭력이 약해져서 발파실패 확률이 높아진다.

따라서 터널발파에서는 조절발파공을 제외한 발파공은 폭약의 지름의 1.2~1.5배 정도가 적합하므로, 천공경이 $\phi 45\text{mm}$ 이상의 점보드릴을 사용할 경우에는 $\phi 32\text{mm}$ 또는 $\phi 36\text{mm}$ 지름의 폭약을 사용하며 천공경이 $\phi 38\text{mm}$ 이하인 레그드릴을 사용할 경우에는 $\phi 25\text{mm}$ 또는 $\phi 28\text{mm}$ 지름의 폭약이 사용된다.

- ② 터널의 파단선에 배치되는 조절발파공에 대해서는 디커플링 효과를 얻기 위하여 폭약경과 발파공경 차이가 2.0~3.0배가 적합하므로 $\phi 17\text{mm}$ 정도의 정밀폭약이 사용된다.

표 8. 전기뇌관과 비전기식 뇌관의 비교

구 분	전 기 식 뇌 관	비 전 기 식 뇌 관
기폭원리	뇌관단차로 기폭	뇌관단차+표면뇌관단차로 기폭
단 차	42단차(실제는 20공 이내)	무한 단차
안 정 성	· 물리적 외력에 민감 · 전기 및 전파에 불안정	· 전기나 물리적 외력에 안정
결선확인	확인가능	육안확인만 가능
진동·소음	· 진동 및 소음이 큼 · 42단차로 진동제어 가능한곳에 적용	· 지발당 장약량 감소가능 · 진동 및 소음이 적음
작 업 성	· 전기적인 위험으로 수중발파 곤란 · 터널발파시 누설전류에 주의 · 취급이 복잡함	· 사용이 안전하고 다양 · 시공시간 절감 · 터널발파, 대발파에 적합
종 류	· H 사 : HiDETO · K 사 : NPED	· H 사 : HiNEL · K 사 : NONEL
점화방식	전 기 식	타 격 식
비 고	· 전기식뇌관의 경우 다단발파기를 사용할 때 단차수증대 가능 · 현재 세계적인 추세는 누설전류와 낙뢰에 안전하고 무한단차 확보에 유리하며, 발파에 따른 소음, 진동 등의 환경공해를 줄일 수 있는 비전기식뇌관의 이용이 증대하고 있는 추세이다.	

(2) 발파공의 간격과 공당장약량 설계기준

구 분	최소저항선 (m)	공간간격 (m)	기저장약장 (m, W_4)	장약집중도(kg/m)		전색장 (m)
				하부	상부(Ic)	
심발공	B	$1 \sim 1.1 \times B$	$0.3 \times H$	Ib	$1.0 \times Ib$	$1.0 \times B$
바닥공	B	$0.8 \sim 1.0 \times B$	$0.3 \times H$	Ib	$1.0 \times Ib$	$0.8 \sim 1.0 \times B$
외곽공	B	$0.7 \sim 0.8 \times B$	$0.1 \sim 0.2 \times H$	Ib	$0.3 \sim 0.4 \times Ib$	$0.05 \sim 0.1 \times B$
확대공	B	$1.0 \sim 1.2 \times B$	$0.2 \sim 0.3 \times H$	Ib	$0.5 \times Ib$	$1.0 \sim 1.2 \times B$
외곽보조공	B	$0.9 \sim 1.1 \times B$	$0.2 \sim 0.3 \times H$	Ib	$0.5 \times Ib$	$1.1 \sim 1.3 \times B$

(3) 터널발파시 누전방지 및 불발잔류약 처리

- ① 터널발파시 막장면과 바닥에는 항상 지하수가 존재하고 터널막장부 주변에는 양수기, 조명 및 각종 전기선이 위치하고 있어 누설전류로 인한 전기뇌관 폭발사고 위험이 있으므로 장약작업을 하기 전에는 반드시 누설전류를 측정하여 누설전류가 0.1A 이상의 경우에는 전기발파를 금지하고 비전기식뇌관을 사용하여야 한다.
- ② 불발뇌관 및 잔류약을 회수하기 전에 먼저 확인작업을 수행하여야 하는데, 발파후 전부 또는 일부뇌관이 기폭되지 않았을 경우에는 막장부에 접근시 발파후 5분뒤에 접근하여야 하며 부석의 유무, 유독성 후가스 존재여부를 확인하여야 한다. 또한 잔류공에 뇌관각선이 보이는 경우에는 잔류공 내부를 램프로 비추어 확인한다. 그리고 손으로 꺼낼 수 있는 경우에는 조용히 꺼내도 좋지만 무리하게 파내면 안 된다.
- ③ 불발된 뇌관 및 화약을 손으로 꺼낼 수 없는 경우에는 불발된 장약공으로부터 600mm 이상의 간격을 두고 평행으로 천공한 후 다시 발파하여 화약류를 회수하는 방법, 불발된 장약공에 고무호스를 삽입한 후 물을 주입하여 그 주입압으로 화약을 회수하는 방법, 또는 압축공기를 이용하여 회수하는 방법 등을 이용하여 불발뇌관 및 잔류약을 회수하여야 한다.

2.2.7 터널발파시 진동에 영향을 미치는 요소

발파진동의 전파특성을 결정하는 조건은 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있다.

입지조건은 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특성 및 역학적 성질 등을 말하며, 발파조건은 사용하는 폭약, 장약량, 기폭방법, 폭원과의 거리 등이다. 이 중에서 발파조건은 조절 가능한 변수로, 입지조건은 조절 불가능한 변수로 구분가능하며, 발파진동의 영향을 최소한으로 하기 위해서는 조절 가능한 변수들을 잘 파악하여 이를 적극 활용하여야 한다(<표 9> 참조).



표 9. 발파변수가 진동에 영향을 미치는 정도

변 수	항 목	영향을 미치는 정도			비 고
		심각	보통	미약	
조 절 가능한 변 수	1) 지발당 장약량	○			
	2) 지연 시차	○			
	3) 화약류의 종류		○		
	4) 최소저항선과 천공간격		○		
	5) 자유면의 상태	○			
	6) 천공구경 각도		○		
	7) 발파방향		○		
	8) 1발파당 장약량			○	
조 절 불가능한 변 수	1) 폭원과 구조물과의 거리	○			
	2) 일반적인 지형		○		
	3) 토피 두께 및 형태		○		
	4) 암반 상태		○		
	5) 대기 상태			○	

2.2.8 발파진동 추정식 산출방법

발파진동 예측을 위한 추정식을 산정하는 데는 두 가지 방법을 생각할 수 있다.

첫째, 거리와 장약량을 달리하고 그 외의 조건들을 동일하게 정한 후 발파진동을 반복 측정하면 실험식을 구할 수 있으므로 이와 같은 방법으로 산정된 기존의 경험식을 우선 설계에 적용하고 시공 중에 확인측정을 수행하여 그 결과에 따라 진동 전파식을 조절하는 방법이다.

둘째, 굴착공사 착수전에 시험발파를 행하고 첫째와 같이 발파진동을 계측함으로써 대상지역의 발파진동 전파식을 산정하여 설계에 적용하고 발파패턴을 결정하는 방식이다. 물론 이 경우에도 시공 중에 검측을 시행하여 작업의 안전성과 효율성을 확보하여야 한다.

위에 언급한 방법들은 모두 인접구조물과 인체에 대한 허용진동속도가 중요 변수가 되므로 우리나라와 같이 확실한 기준이 없는 상태에서는 허용치의 결정에 신중을 기하여야 하며, 또한 첫째 방법을 적용할 때는 사전에 조사한 지반조건 등을 특히 고려하여 적용지역에 가장 적합한 경험식을 선정하는 것이 무엇보다 중요하다. 현장계측을 통하여 발파진동 전파식을 산정하는 절차를 기술하면 다음과 같다.

발파에 의한 지반진동의 크기는 전술한 바와 같이 화약류의 종류에 따른 화약의 특성, 장약량, 폭원과 측정간의 거리, 진쇄상태, 지반조건 등에 따라 다르지만 지질

및 암반 조건이 동일한 경우 특히 측점으로부터 발파지점까지의 거리와 지발당 최대 장약량간에 깊은 함수관계가 있음이 밝혀졌다.

즉, 발파진동식은

$$V = K\left(\frac{D}{W^b}\right)^n$$

여기서, V : 진동속도(kine)

D : 폭원으로부터의 거리(m)

W : 지발당 장약량(kg/delay)

K : 발파진동 상수

b : 장약지수

n : 감쇠지수

이 발파 진동식에서 $b = 1/2$ 인 경우 즉 $D/W^{\frac{1}{2}}$ 를 자승근 환산거리(Square Root Scaled Distance), $b = 1/3$ 인 경우 즉 $D/W^{\frac{1}{3}}$ 를 입방근 환산거리(Cube Root Scaled Distance)라 한다. 이때 장약 및 감쇠지수는 발파진동상수를 구하기 위하여 임의 거리와 장약량에 대한 진동속도를 측정한 후, 선형회귀분석(Linear Regression Analysis)에 의해 일반식을 유도하고 자승근 및 입방근 환산거리에 대한 회귀선(Regression line)을 구하여 회귀선에 대한 결정계수(R², Coefficient of Determination)값을 택하여 비교, 검토하고 최종 결정하여야 한다. 환산거리를 이용한 진동 예상식으로 진동속도를 추정할 때 주의할 점은 다음과 같다.

- ① 어떠한 경우라도 시험발파를 실시하여야 한다.
- ② 예상식으로 추정할 수 있는 값은 평균진동 수준이므로 통계적처리에 의해 95%신뢰도를 갖는 식을 사용하여야 한다.
- ③ 통계적처리를 위해서는 로그정규분포의 표준편차를 적용할 수 있도록 하기 위하여 최소한 30개 이상의 자료를 획득하여야 한다.
- ④ 추정된 수치는 진동피해를 막기 위한 안전기준이 된다. 따라서 이러한 추정결과가 규제기준보다 낮으면 면책이 된다.

(1) 기존의 경험적 추정식

① 미광무국 발파진동 추정식

미광무국 고시 제 656호(Nichols, Johnson and Duvall, 1977)에서는 10여년간 채석장을 중심으로 발파진동에 관한 연구결과에 따라 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$V = 160(D/W^{\frac{1}{2}})^{-1.6}$$



본 식은 여러 종류의 지형적여건, 암반의 종류, 지질, 지층의 두께 등 여러 가지 요인을 복합적인 통계방식으로 산출되어서, 노천발파 조건에서는 아주 잘 맞는 발파진동 추정식으로 평가되고 있다.

② 건설교통부(구) 발파진동 추정식

건설교통부(구)에서 2006년 12월 제정한 「도로공사 노천발파 설계·시공지침」에 의하면 발파진동 추정식은 다음과 같다.

$$V = 200(D/W^{\frac{1}{2}})^{-1.6}$$

② 서울지하철 발파진동 추정식

서울지하철 3, 4호선 건설당시 발표된 서울지하철 공사에서 발간된 「발파진동식 확립과 파쇄발파 지침결정을 위한 연구보고」에 의하면 발파진동 추정식은 다음과 같다.

$$V = k(D/W^b)^n$$

여기서, V : 지반진동속도(kine)

k : 발파진동 상수

D : 폭원과 구조물간의 거리(m)

W : 지발당 최대장약량(kg/delay)

• 발파진동상수 (k)

발파진동상수 (k)는 폭약의 종류, 암반의 강도 및 암질, 자유면의 수에 따라 많은 변화를 지니고 있다. “화약, 암석강도 및 발파유형이 발파진동에 미치는 영향”(동력자원연구소, 이경운, 김문규, 신희순)에 의하면 지하철 3, 4호선 건설지역을 대상으로 15회 측정한 결과로부터 진동식을 산출하여 서울지역의 암반을 대상으로 발파진동 상수 “k” 값을 아래와 같이 정량적으로 산출하는 방법을 제시하였다.

$$k = E_i(R_i \times S_c + Q_i)$$

E_i : 폭약 보정

— 제라틴 다이ना마이트 : 1.0
— 에멀전, 함수폭약 : 0.8
— 초안폭약 : 0.6

R_i : 암반에 따른 발파상수

— 서울화강암 : 0.037
— 서울편마암 : 0.0206

S_c : 암석의 일축압축강도 (kg/cm^2)

Q_i : 발파방법에 따른 보정값

발파방법 \ 압 종		화강암	편마암
개착식	바닥발파	80	60
	계단발파	50	30
터널식	심발발파	60	40
	확대발파	30	10

• 장약지수 (b)

장약지수 (b)에 대해서 일본 吉川등은 실험적으로 1/2을 제안하였고 이를 root scaling이라고 하며 USBM에서는 1/3으로써 이를 cube root scaling이라 하여 차원적 해석의 이론적 근거로 하고 있다. 서울지하철의 경우는 여러번 시험발파에 의한 회귀분석 결과 적합도가 좋은 cube root scaling(b=1/3)을 적용하고 있다.

• 감쇠지수(n)

발파원과 40m 이내의 거리에서 각종 보고서에 의하면 서울 화강암의 경우 “n”은 -1.60~-1.78를 보이고 있으나, 편마암의 값은 -1.5를 보이고 있다.

(2) 시험발파에 의한 진동 추정식

- ① 설계도에 준해 장약작업을 실시하고 계측측점을 달리하여 측정함으로써, 거리에 따른 감쇠지수를 파악 한다. 계측기는 4대 이상을 일정한 보안물건에 대해 일직선상으로 거리를 달리하여 설치하거나, 주변 보안물건에 배치하여 측정한다.
- ② 터널발파는 많은 공수를 한꺼번에 발파하므로 폭풍압 및 소음의 영향이 크다. 따라서 폭풍압 dB(L) 및 소음 dB(A)를 동시에 측정함이 바람직하다.
- ③ 터널발파는 대부분 1회의 발파로 끝나기 때문에 노천발파와 같이 30점 이상의 계측 결과치를 얻기가 용이하지 않다. 따라서 초시분석 프로그램을 이용하여 계측 결과치에서 뇌관기폭 초시별로 데이터를 얻어 30점 이상의 결과치에 대한 분석을 실시하여야 한다. 또한 각 발파위치별로 구속력이 달라 진동속도의 차이가 있기 때문에 심발공, 확대공, 바닥공으로 구분하여 각각의 진동추정식을 산출하여야 정확한 발파패턴을 설계할 수 있다.
- ④ 시험발파 결과치 분석방법

측정된 결과치를 거리별, 장약량별로 정리한 후에 $V=K(D/Wb)^n$ 의 식에서 변수 b를 1/2과 1/3로 취하고, D/Wb를 SD(Scaled Distance)라 놓으면 $V=K(SD)^n$ 이 된다. 그리고 측정된 진동값에 대한 회귀분석(regression analysis)을 실시하기 위해 로그-로그 그래프에 나타내면, 직선관계가 성립되어 K값과 n값이 최종적으로 결정되며 당 현장에 알맞는 진동추정식을 얻게 된다.

이에 대한 결과치가 많으면 수계산이 복잡해지므로 정확도를 높이기 위해 회귀분석 전산프로그램을 이용하여 분석해야 한다.



⑤ 분석결과 검토 및 적용

- 가. 시험발파 결과분석에 의해 발파진동 추정식을 얻게 되면 시험발파에 따른 발파설계 패턴의 적합성을 판단하고, 주변 보안 물건에 미치는 피해 영향 등을 검토하여 현장에 알맞은 지발당 장약량을 구할 수 있다
- 나. 지발당 장약량을 기준으로 장비 및 작업효율 등을 감안하여 천공장, 천공경, 천공간격, 저항선 등 발파 패턴을 설계하여야 한다.
- 다. 발파이론과 경험에 입각해 발파공해 저감대책 및 발파작업시 제기된 문제점을 검토하여 현장에 가장 이상적인 발파계획을 수립하게 된다.

2.2.9 발파진동 허용 기준치

(1) 일반적 기준치

일반적으로 입자속도가 0.5kine 미만은 안정하며, 5.0~13.5kine의 범위에서는 경미한 피해가 예상되고 그 이상에서는 상당한 구조적 피해가 있다고 알려져 있다.

(2) 허용진동 규제치

허용 발파진동치란 진동에 의해 구조물에 피해가 발생되지 않도록 규제하는 범위의 진동치를 말하며, 일반적으로 엄밀한 의미의 허용진동치는 구조물의 크기(층수 등), 설계구조(내진설계 유무), 재질(철근 콘크리트, 블록조, 석조, 목조 등)과 건전성(결함 유무, 노후화 정도 등) 등에 따라서 개개 구조물별로 서로 상이하게 되며, 인체에 대한 허용진동치는 개개인의 진동에 대한 인내심이나 그 당시의 심리상태 등의 주관적 요소에 따라 서로 달라지게 된다.

주변에 발파진동으로부터 보호하여야 할 보안물건이 있는 경우, 대상 보안물건 위치에서의 발파진동 허용치는 구조물 손상 및 민원을 고려하여 <표 10>에서 정한 값을 준용할 수 있으며 설계시 환경영향평가를 수행하는 경우 그 결과를 함께 고려하여 설계하여야 한다.

진동에 아주 민감한 특정시설의 경우에는 해당시설의 진동규제치를 기준으로 설계하여야 하고 <표 10>에 의한 구조물의 구분이 명확히 적용하기 어려운 경우에는 시험발파 등의 방법을 통하여 별도로 진동 규제치를 정할 수 있다.

표 10. 구조물 손상기준 발파진동 허용치

구분	구조물 형식	문화재 및 지반진동 예민 구조물	조적식 벽체 (벽돌, 석재 등) 와 목재로 된 천장을 가진 구조물	지하기초와 콘크리트 슬래브를 갖는 조적식 건물	철근콘크리트 골조 및 슬래브를 갖는 중소형 건물	철근콘크리트, 철근골조 및 슬래브를 갖는 대형 건물
	구조물종류	문화재 등	재래가옥, 저층 일반가옥 등	저층 양옥, 연립주택 등	중·저층아파 트, 중소상가 및 공장	내진구조물 고층아파트, 대형 건물 등
주파수 대역별 허용치 (cm/s)	50Hz 이상	0.75	1.5	2.5	4.0	5.0
	50Hz 미만	0.3	1.0	2.0	3.0	5.0

2.2.10 터널발파의 진동경감 방법

발파진동은 장약량을 감소시키면 감소하나 장약량의 감소는 발파효과의 저하를 초래하기 쉽기 때문에 발파진동을 억제하고 파쇄효과도 충분히 얻을 수 있는 발파방법을 모색할 필요가 있다. 시험발파나 발파진동 측정결과로부터 발파진동의 피해가 예측되는 경우 다음에 열거된 진동경감방법 중 발파효과 및 경제성 등을 검토하여 최적의 방법을 선택하여야 한다.

(1) 지발당 장약량의 감소에 의한 경감대책

- ① 지발당 장약량이란 수십개의 뇌관을 기폭시킬 때 같은 시간에 기폭되는 폭약량으로 최대 진동속도에 가장 영향이 크다.

즉 암반은 탄성파속도가 대략 1,500~6,000m/sec이므로 진동속도가 빠른 속도로 전파되는 특성을 지니고 있어, 뇌관과 뇌관의 기폭단차가 8ms 이상이면 발파진동파가 중첩되지 않고 개별요소로 전파되면서 소멸된다. 그러므로 터널발파에서 지발당 장약량을 감소시키는 것이 진동저감의 최상의 대책이다.

② 터널발파에서의 지발당 감소 방안

- 터널단면을 여러 단계로 분할발파하는 방법
- 터널의 천공장을 감소시켜 발파하는 방법
- 터널발파의 기폭 시스템을 이용하여 발파하는 방법
 - 비전기식 뇌관을 사용하는 법
 - 전기뇌관 + 다단식발파기를 사용하는 법

상기 (가), (나)방법은 터널의 공사효율과 경제적 및 공사기간과 관련되기 때문에 적용에 문제점을 가지고 있으나, 발파 기폭 시스템을 적절하게 이용하는 방법이 가장 효율적으로 판단된다.

(2) 새로운 자유면 확보를 위한 심빼기방법

터널발파에서 새로운 자유면 확보로 굴착효율 증대와 진동저감을 위하여 이용되는 방법으로 일반적 심빼기 발파법(V-Cut, Burn-Cut, Supex-Cut)과 TBM확장 굴착방



법으로 구분될 수 있다.

심빼기 발파법의 원리나 진동제어 측면에서 월등하게 구별되는 방법은 없으나, 일반적으로 Burn Cut방법은 3.0m 이상의 발파공에서는 효율적이나 발파 실패율이 높고 발파 실패시에 진동과 폭음이 크게 발생하는 경향이 있으므로, 도심터널의 경우는 진동의 저감을 위하여 천공장 3.0m 미만의 발파작업이 많으므로 발파실패 확률이 적고 구속력이 적은 Double V-Cut방법이 효율적인 경향이 많다.

최근에는 장비의 발달로 심발공의 구속력을 없애고 인위적으로 자유면의 확보를 위하여 사용되는 방법으로 이용되는 TBM 확장굴착법은 심발발파법과 비교하여 30% 이상의 진동감쇠 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

(3) 발파공 위치별 지발당 장약량 차등설계 기법

터널의 시험발파를 통하여 설계를 실시할 때, 시험발파의 계측 측정결과를 정밀하게 분석하여야 한다. 일반적으로 진동의 최대값만을 분석하여 설계에 반영하면 허용장약량 이내에서 전체적인 설계가 되므로 발파공의 위치별 특성이 무시된다.

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

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

(4) 방진공의 설계기법

터널발파에서 진동저감을 위하여 터널단면 외곽에 대구경 방진공을 주열상으로 천공하여 시행하고 있으나, 여러 현장에서 측정결과 약간의 감쇠효과는 기대할 수 있으나 20% 이상의 감쇠효과는 기대하기 곤란하다. 그 원인은 방진공의 천공장(H)이 발파진동에서 발생하는 표면파(R-파)의 파장 λ 보다도 커야하나, 대부분 천공장이 적게 설계되기 때문에 큰 효과를 기대하기가 곤란하며, 파장 λ 보다 천공장 H를 길게 할 경우에는 시공성과 경제성 측면에서 곤란한 경우가 많이 발생된다.

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

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

· α : P-파의 속도 β : S-파의 속도

γ : R-파의 속도 $T = 1/f = \lambda/v$

· T : 진동의 주기

f : 주파수

v : 진동파의 속도

2.2.11 발파 소음

(1) 발파소음의 특성

발파음은 폭약의 에너지가 파쇄되는 압파를 통하여 대기중으로 방출되는 압축파에 의해 주로 발생되며, 이외에도 지반진동으로 전파되었다가 자유면 근처에서 공기중으로 전파되는 과정에서 매질의 차이로 소음을 야기하는 경우가 있으나, 이는 무시할 정도로 경미한 상태이다.

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

실제로 지하철 터널이나 개착구간 발파에서 발파음의 주파수를 분석하면 40Hz 이하의 저주파가 우세하며, 풍압 기준으로 110dB(L) 이하로 측정되어 건물이나 구조물에 손상을 주지 않는 정도 수준이지만, 현실적으로 창문이나 문짝 등이 덜컹거리는 2차적 영향으로 불쾌감이 많아 인근 주민들은 발파진동으로 오해하여 주된 민원의 대상이 되고 있다. 여기에서 발파음으로 인한 인체 감응은 아직도 정량적으로 계산되지 못하고 있다. 인체에 대한 발파음의 영향중에서 건물안에 있을 때가 건물밖에 있는 것보다 영향이 증가된다. 그 이유로는 건물에 초저주파로 전달되는 발파음이 건물자체를 진동시켜서 인체를 자극하기 때문이다.

미국광무국 조사 결과에 의하면 100dB(L)부터 접시나 창이 흔들림 현상이 발생되며 고통의 한계는 110dB(L)로 조사되었다.

(2) 발파진동과 소음의 차이점

발파진동과 소음은 전파매질(지반, 대기)이 다를 뿐 파동현상은 마찬가지로 파동론 범위에 속하는 문제로 같이 다루는 경우가 많다. 발파음은 전술한 바와 같이 발생원은 진동체이며, 초저주파를 수반하므로 크던, 작던 간에 진동을 수반한다. 발파음에 의한 영향을 받는 주택이나 건물에서는 창호나 선반 등에서 소리를 내는 경우가 많아 일차적으로 도착하는 발파진동보다도 더욱 성가시게 느껴지므로, 발파음에 대한 인체 감응도는 더욱 커서 사실상 민원의 주대상이 되고 있다.

그러나 발파진동과 달리 발파음은 주택이나 구조물에 피해를 주는 일은 극히 드물기 때문에 인체 감응에 대한 대수척도는 소음레벨(데시벨, dB)을 사용하며, 발파진동은 건물이나 구조물에 직접적인 피해를 주므로 진동속도(cm/sec, Kine)를 사용하여야 한다.

(3) 소음 규제기준

발파소음은 지속시간이 매우 짧은 일시적인 충격음으로 곧바로 소멸되고 일반적인 교통 및 공장등에서 지속적으로 발생하는 생활소음과는 다르다.

따라서 발파소음의 지속시간과 발파횟수 등을 고려하고 일시적인 충격파동임을 고려한 허용기준이 제정되어야 한다.

또한, 발파작업 주변에 가축이 있을 경우 축종별 허용기준이 제시되어 있지 않아 피해에 따른 민원발생시 인과관계 규명에 많은 어려움이 따르고 있다.



일반적으로 축종별 피해사례 및 연구논문 등을 통해 피해영향이 없는 기준을 제시하고 있다. 발파로 인한 피해허용기준을 건물 등 물적 진동피해기준과 인체 및 가축에 대한 피해기준 그리고 발파소음에 대한 규제기준 등으로 세분해서 정하는 것이 합리적이다.

소음·진동규제법시행규칙[일부개정 2010.6 환경부령 374호] [별표 8] 제20조 제3항에서 규정한 생활소음·진동의 규제기준은 <표 11>, <표 12>와 같다.

표 11. 생활 진동 규제 기준

[단위 : dB(V)]

시간대별 대상 지역	주간 (06:00~22:00)	심야 (22:00~06:00)
가. 주거지역, 녹지지역, 관리지역 중 취락지구 · 주거개발진흥지구 및 관광·휴양개발진흥지구, 자연환경보전지역, 그 밖의 지역에 소재한 학교·종합병원·공공도서관	65 이하	60 이하
나. 그 밖의 지역	70 이하	65 이하

※ 비고

1. 진동의 측정 및 평가기준은 「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률」 제6조제1항제2호에 해당하는 분야에 대한 환경오염공정시험기준에서 정하는 바에 따른다.
2. 대상 지역의 구분은 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 따른다.
3. 규제기준치는 생활진동의 영향이 미치는 대상 지역을 기준으로 하여 적용한다.
4. 공사장의 진동 규제기준은 주간의 경우 특정공사의 사전신고 대상 기계·장비를 사용하는 작업시간이 1일 2시간 이하일 때는 +10dB을, 2시간 초과 4시간 이하일 때는 +5dB을 규제기준치에 보정한다.
5. 발파진동의 경우 주간에만 규제기준치에 +10dB을 보정한다.

표 12. 생활 소음 규제 기준

[단위 : dB(A)]

대상 지역	시간대별		아침, 저녁 (05:00~07:00, 18:00~22:00)	주간 (07:00~18:00)	야간 (22:00~05:00)
	소음원				
가. 주거지역, 녹지지역, 관리지역 중 취락지구 · 주거 개발 진 흥 지 구 및 관광 · 휴양 개발 진 흥 지 구, 자연 환경 보 전 지 역, 그 밖의 지역에 있는 학교 · 종합 병원 · 공공 도서관	확성기	옥외설치	60이하	65 이하	60 이하
		옥내에서 옥외로 소음이 나오는 경우	50 이하	55 이하	45 이하
	공 장		50 이하	55 이하	45 이하
	사업장	동일 건물	45 이하	50 이하	40 이하
		기 타	50 이하	55 이하	45 이하
	공사장		60 이하	65 이하	50 이하

표 12. 생활 소음 규제 기준(계속)

[단위 : dB(A)]

대상 지역	시간대별 소음원		아침, 저녁 (05:00~07:00, 18:00~22:00)	주간 (07:00~18:00)	야간 (22:00~05:00)
	확성 기	옥외설치 옥내에서 옥외로 소음이 나오는 경우	65 이하	70 이하	60 이하
나. 그 밖의 지역	공 장		60 이하	65 이하	55 이하
	사업 장	동일 건물	50 이하	55 이하	45 이하
		기 타	60 이하	65 이하	55 이하
	공사장		65 이하	70 이하	50 이하

※ 비고

1. 소음의 측정 및 평가기준은 「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률」 제6조제1항제2호에 해당하는 분야에 대한 환경오염공정시험기준에서 정하는 바에 따른다.
2. 대상 지역의 구분은 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 따른다.
3. 규제 기준치는 생활소음의 영향이 미치는 대상 지역을 기준으로 하여 적용한다.
4. 옥외에 설치한 확성기의 사용은 1회 3분 이내로 하여야 하고, 15분 이상의 간격을 두어야 한다.
5. 공사장의 소음 규제기준은 주간의 경우 특정공사의 사전신고 대상 기계·장비를 사용하는 작업시간이 1일 3시간 이하일 때는 +10dB을, 3시간 초과 6시간 이하일 때는 +5dB을 규제기준치에 보정한다.
6. 발파소음의 경우 주간에만 규제기준치(광산의 경우 사업장 규제기준)에 +10dB을 보정한다.
7. 2010년 12월 31일까지는 발파작업 및 브레이커·항타기·항발기·천공기·굴삭기(브레이커 작업에 한한다)를 사용하는 공사작업이 있는 공사장에 대하여는 주간에만 규제기준치(발파소음의 경우 비고 제6호에 따라 보정된 규제기준치)에 +3dB을 보정한다.
8. 공사장의 규제기준 중 다음 지역은 공휴일에만 -5dB를 규제기준치에 보정한다.
 - 가. 주거지역
 - 나. 「의료법」에 따른 종합병원, 「초·중등교육법」 및 「고등교육법」에 따른 학교, 「도서관법」에 따른 공공도서관의 부지경계로부터 직선거리 50m 이내의 지역
9. "동일 건물"이란 「건축법」 제2조에 따른 건축물로서 지붕과 기둥 또는 벽이 일체로 되어 있는 건물을 말하며, 동일 건물에 대한 생활소음 규제기준은 다음 각 목에 해당하는 영업을 행하는 사업장에만 적용한다.
 - 가. 「체육시설의 설치·이용에 관한 법률」 제10조에 따른 체력단련장업·체육도장업·무도학원업·무도장업
 - 나. 「학원의 설립·운영 및 과외교습에 관한 법률」 제2조에 따른 음악교습을 위한 학원·교습소
 - 다. 「식품위생법 시행령」 제7조에 따른 단란주점영업·유흥주점영업
 - 라. 「음악산업진흥에 관한 법률」 제2조에 따른 노래연습장업

2.3 여굴

터널 숏크리트의 설계선 외측 부분에 여분으로 굴착된 것을 여굴이라 하며 화약의 낭비, 여분의 버력 반출, 콘크리트 충전량의 증가 등을 초래하여 공사비 증가의 원인이 된다.

통계에 의하면 여굴에 의해 추가 소요되는 비용은 터널공사비의 15~18%에 해당한다고 한다. 여굴은 시공상 불가피한 것임은 분명하나 시공기술에 따라 상당량을 줄일 수 있으므로 여굴을 줄이기 위한 많은 노력이 필요하다.



2.3.1 여굴의 발생원인

(1) 사용장비에 의한 원인

사용장비의 규격에 따라 여굴량이 달라진다. 예를 들면 점보드릴과 같은 대형장비의 경우 그 장비가 크므로 많은 여굴이 발생하며 레그드릴과 같은 소형의 경우 여굴량은 감소한다.

- 점보드릴의 경우 드릴의 작업방향과 터널단면과 이루는 최소각 4° 발생
 - 천공장 3.7m일 때 260mm 여굴 발생
 - 천공장 4.2m일 때 290mm 여굴 발생
 - 천공장 4.7m일 때 330mm 여굴 발생
- 레그드릴의 경우 착암기 크기에 따라 천공장 1.0~2.8m일 때 100~300mm 여굴 발생

(2) 천공위치 및 천공기능에 의한 원인

- 천공위치에 따른 작업의 난이도에 따라 여굴량이 변화한다. 예를 들어 측벽의 경우보다는 천장부가 작업이 곤란하므로 여굴량이 증가한다.
- 작업원의 천공기능 숙련도에 따라 여굴량이 크게 변화한다. 통상 굴착 막장부는 많은 요철로 불규칙하므로 주변공 위치가 경사면과 같이 난해할 때 작업원의 숙련도에 따라 여굴량이 크게 좌우된다.

(3) 천공 로드와 휨에 의한 원인

장공 천공시 연약구조대를 따라 드릴 로드와 휘어지는 현상이 발생되는데 이로 인하여 여굴이 불규칙하게 발생한다.

(4) 사용 발파법에 의한 원인

현재 터널굴착에는 미려한 굴착면을 확보하기 위하여 스무스 블라스팅공법이 널리 채택되고 있다. 외곽공에 다이나마이트 등 일반 폭약을 사용하는 통상의 발파법을 적용할 경우는 스무스 블라스팅에 비하여 주위지반을 크게 손상시키며 이로 인한 버력이 다량 발생하게 되고 또한 여굴량이 증가한다.

(5) 지질구조적인 원인

지반조건 및 터널 굴착시 수시로 변화하는 지질여건에 따라 연약지반 부위 및 절리의 상호 교차지점에서 나타나는 미끄러짐 현상으로 여굴이 발생한다.

2.3.2 과다여굴 방지대책

터널 공사에서 발생하는 여굴은 그 양이 증가함에 따라 버력 반출량, 숏크리트 시공량 및 콘크리트라이닝 시공량이 증가하게 되어 상대적으로 공사비의 증가를 초래하며 터널 지보 측면에서도 가능한 한 여굴량을 감소시키는 것이 유리하므로 이를 위하여 굴착공사시 다음과 같은 사항이 고려되어야 한다.

- 스무스 블라스팅 공법과 같은 제어발파 채택
- 매 공종별 발파후 가능한 한 조속히 초기 보강(샷크리트 타설) 실시
- 적정 시공장비의 선정
- 숙련된 종업원 활용 및 기능교육 실시
- 정밀폭약 사용 또는 적정량의 폭약량 사용
- 예상되는 연약지반에는 선진그라우팅 실시

2.3.3 여굴에 관한 규정 및 허용기준

여굴에 관한 규정 및 허용기준은 다음과 같은 사항이 고려되어야 한다.

- 여굴량은 굴착비에 계상하지 않으며, 버력처리비에는 계상한다.
- 여굴두께의 결정은 상반과 하반을 구분하여 별도로 정해 적용한다.
- 터널 바닥면의 여굴두께는 자갈도상은 고려하지 않고, 바닥버력을 제거하여 콘크리트로 채우는 콘크리트 도상구조와 인버트구간에 한해 적용한다.
- 여굴은 샷크리트와 라이닝 콘크리트로 50%씩 채운다.
- 바닥부는 콘크리트 18Mpa로 채우며, 인버트구간은 암질 및 현장여건에 따라 별도로 정하여 적용한다.

표 13. 여굴두께 산정

구 분			천 장 부	측 벽 부	바닥부
여굴두께 (cm)	발파 구간	TYPE-1,2	10	10	15
		TYPE-3	15	15	15
		TYPE-4,5,6	20	20	15
	기계굴착구간		70	70	

※ 여굴량(B)

B1 = 천장부 여굴굴착중심주변장×여굴두께×터널연장

B2 = 측벽부 여굴굴착중심주변장×여굴두께×터널연장

B3 = 바닥부 여굴굴착중심주변장×여굴두께×터널연장

여굴량 계 B = B1 + B2 + B3

※ 지보패턴의 적용 해석

예시) TYPE 4-1 ⇒ TYPE 4 적용

TYPE 6-2 ⇒ TYPE 6 적용

TYPE 7(6이상) ⇒ TYPE 6 적용

2.4 버력

터널굴착공사는 크게 천공발파, 버력처리, 보강의 세공정이 반복 진행되면서 이루어지게 된다. 여기서 버력처리시 버력의 크기는 버력처리 능력을 결정하는데 크게 작용되어 상대적으로 굴착경비 결정에 중요하며, 또한 버력의 이용을 위해서도 그 크기를 파악하는 것이 필요하다.

그러나 버력의 크기는 지반조건, 절리, 균열 등 지질구조적인 여건, 발파법, 천공수, 천공장, 장약량 등 제 여건에 따라 크게 좌우되어 단정적으로 기술하기는 극히 곤란하므로 터널 굴착 초기에 시험발파를 통하여 그 크기를 측정하고 이를 토대로 목적하는 크기를 결정하는 방법이 일반적으로 이용되고 있다.



2.4.1 버력크기를 결정하는 요소

버력 크기는 다음과 같은 요소에 따라 결정된다.

(1) 지반조건 및 지질구조적인 여건

버력의 크기는 지반조건 및 지질여건에 따라 좌우된다. 예를 들어 퇴적층(Shale)에서는 비교적 잘게 부스러지는 반면 화강암의 신선한 암반에서는 큰 덩어리의 암석이 채취될 것이다. 또한 동일한 화강암에서도 절리가 없는 균질의 암반에서는 대괴가 나타나며, 절리가 많은 암반에서는 절리 간격에 따라 잘게 부스러지게 된다.

(2) 발파법

V-Cut, Cylinder-Cut 등 사용 발파공법에 따라 버력 크기가 다소 달라지며 또한 상반, pilot 굴착, 벤치굴착 등 발파형태에 따라서도 달라진다. 예를 들어 동일한 지질여건 하에서도 V-Cut일 경우에는 Cylinder-Cut에 비하여 다소 크게 부스러지게 되며, 상반 파일럿(Pilot) 굴착시에는 잘게 부스러지는 반면, 벤치 굴착시에는 큰 덩어리의 암석이 발생하게 된다.

(3) 천공수 및 천공장

일반적으로 천공수가 많을수록 버력은 잘게 부스러지게 된다. 또한 천공장이 클수록 상대적으로 천공 지름이 크게 되며 이는 저항선의 증가를 의미하므로 버력크기가 크게 나타난다.

(4) 장약량

장약량이 증가함에 따라 버력 크기는 적어지며 장약량의 결정은 발파공법 및 천공수와 함께 버력 크기를 조절하는데 중요하다. 과장약일 경우에 버력은 잘게 부스러지는 반면, 약장약일 경우에는 정상적인 발파가 이루어지지 않고 공발현상과 함께 암반에 균열을 형성하게 된다.

2.4.2 버력크기의 예측

버력 크기는 제 여건에 따라 크게 좌우되어 단정적으로 언급하기는 곤란하므로 여기에서는 아래와 같은 조건하에서 이제까지의 통상적인 터널 및 각종 지하공동 굴착 결과 나타난 버력 크기 결과치를 토대로 다음과 같이 예상할 수 있을 것이다.

(1) 조건

- 지반조건 : 우리나라 전역에 널리 분포되어 있는 편마암 내지 화강암에서의 경암질
- 사용장비 : 레그드릴, 점보드릴
- 굴착공법 : 깎러리 굴착(전단면 굴착), 벤치 굴착

(2) 예상 버력 크기

<표 14>의 예상치는 일반적인 터널 굴착시의 경우이며 천공 수, 장약량의 증감 또는 제어발파 등으로 버력 크기를 조절할 필요가 있다. 예를 들어 발파된 버력을 골

재로 사용하고자 할 경우는 대피가 발생되지 않도록 함으로써 파쇄비용을 절감할

수 있을 것이며 석재 또는 호안공사 등에 활용코자 할 경우에는 반드시 굴착경비와 종합적으로 검토하여 보다 경제적인 범위 안에서 계획되어야 할 것이다. 이러한 검토 없이 버력을 골재로 활용하기 위하여 무한정 천공수 및 장약량을 증가시키면 파쇄비용은 감소되나 굴착경비가 더욱 증가되어 전체적으로 불리하게 되기 때문이다. 버력 크기를 조절하는 방법은 다음과 같다.

① 버력 크기를 보다 작게 하는 방법

- 비천공장(Specific Drilling)을 증가시킨다(천공수 증가=저항선 감소).
- 비장약량(Specific Charging)을 증가시킨다(장약량 증가).
- 젤라틴 다이나마이트와 같은 폭력이 큰 화약류를 사용한다.
- 가능한 천공지름을 적게 한다.

② 버력 크기를 보다 크게 하는 방법

- 가능한 한 비장약량(Specific Charging)을 감소시킨다.
- 가능한 한 비천공장(Specific Drilling)을 감소시킨다.
- 공간간격을 최소 저항선보다 작게 한다.
- 순발너관을 이용하여 1개의 발파열은 동시에 점화, 발파시킨다.

표 14. 예상 버력 크기

구 분 버력 크기	레 그 드 린		점 보 드 린	
	갤러리(%)	벤치(%)	갤러리(%)	벤치(%)
100mm 이하	30~40	25~35	25~35	20~30
200mm 이하	20~30	15~25	20~30	15~25
300mm 이하	15~25	10~20	10~20	10~20
500mm 이하	8~18	10~20	10~20	10~20
600mm 이하	0~10	10~20	5~15	10~20
700mm 이하	0~4	0~10	0~10	5~15
합 계	100%	100%	100%	100%

2.4.3 버력처리 계획

중소터널에서 버력반출은 터널시공 공기중에서 1/3~1/4을 차지하는 요소이며 어떻게 합리적으로 기계를 조합시키는가에 따라 공기의 단축도 가능하며 1일당 굴착진행을 좌우하고 굴착경비에 크게 영향을 미친다. 공기중 착공, 발파, 지보재에 요하는 시간은 터널내경, 지질 등에 의해 결정되어서 큰 단축은 곤란하나 이 버력 반출 시간은 그 터널에 합당한 기구의 조합 여하에 따라서 단축될 수 있다.

버력처리계획은 터널의 굴진속도를 지배하는 큰 요소이기 때문에 지반조건, 입지조건, 터널단면의 크기, 연장, 경사, 굴착공법, 굴착방식, 버력의 성상 등을 고려하여 적



입기계, 버력처리 설비 등을 정할 필요가 있다.

버력처리는 버력 쌓기, 버력 운반, 버력 처분으로 나뉘어 지지만 기본적인 작업은 버력운반이며 운반방식은 타이어방식과 레일방식이 일반적으로 채용되고 있다.

갱내에서의 버력 쌓기에는 쌓을 자리를 정리하는 것이 어렵고 또 타이어방식의 경우에는 일반도로 노면과 비교해서 노면의 요철이 크기 때문에 운반중의 흘림방지의 관점에서 여유가 있게 계획할 필요가 있다.

버력운반방식이 결정되면 버력의 성상을 고려해 버력적재기, 운반기계 및 이들의 조합을 비교검토하여 안전하고 효율적인 처리계획을 결정함과 동시에 버력반출방식에 대응하여 환기용량·환기방식에 대한 검토도 충분히 할 필요가 있다.

버력의 성상이라는 것은 파쇄된 버력의 크기, 경도, 흡수에 의한 변화, 용적증가율 등을 말하지만 이들은 지반조건, 굴착방식 등에 영향을 받는다. 또한 버력의 크기와 그 혼합비율, 경도 및 흡수에 의한 변화는 버력적재기, 운반방식, 2차 파쇄설비 등의 적정에 관계되며 버력 용적증가는 버력처리 설비의 용량 결정에 관계한다. 증가율은 운반중과 적하시의 상태가 다르다. 버력량은 용적증가에 의한 것과 여굴에 의한 증가도 있기 때문에 이들을 고려한 버력량을 고려할 필요가 있다.

최근 사토장에서의 거리 원격화와 도로교통 사정의 악화 영향이 나타나며, 반출경로 등에 있어서 충분한 검토를 할 필요가 있다.

2.4.4 버력의 적재 및 운반

(1) 버력 반출량

버력반출량은 지반의 종류에 따른 용적변화율 및 여굴율을 고려하여 다음과 같이 산정하며 이때의 용적변화율은 <표 15>와 같다.

$$\text{버력반출량} = \text{굴착량} \times (1 + \text{여굴율}) \times \text{용적 변화율}$$

표 15. 용적변화율 및 단위중량의 표준

분 류	자연지반		운 반 중	
	용 적	단위중량(kN/m ³)	용 적	단위중량(kN/m ³)
경 압	1	22~28	1.4~1.8	14~20
연 압	1	20~25	1.3~1.7	13~19
토 사	1	15~22	1.2~1.5	12~18

(2) 버력 적재기

버력 적재기의 결정은 버력 반출 전반의 능률을 좌우하므로 그 터널의 내공 단면에 적당하고 또한 단시간에 적재 작업을 완료하는 기종을 선택하여야 한다. 또 이것에 후속되는 기계의 능력도 고려하여야 한다.

버력적재기는 주행방식에 따라 레일식, 크롤러식 및 타이어식이 있다. 그리고 적재

방법에 따라 Over Head식, Front End식, Side Dump식으로 나누어진다. 또한 동력

에 따라 압축공기식, 디젤식, 전기식 등으로 분류한다.

버력적재기의 적재능력은 제작회사의 사양에 제시되어 있지만 터널작업에서 실제 적재능력은 작업조건에 따라 제시된 값의 25~40% 정도이다. 그리고 적재기의 준비, 버력적재 초기의 능률저하 등을 고려하면 적재능력은 더욱 저하된다. 주요장비별 용도와 특성은 다음과 같다.

① 록 쇼벨(Rock Shovel)

터널단면의 폭이 3m 이하이고 터널의 길이가 1,000m 이상으로 길며 횡경을 굴착하지 못하는 조건에서 광차와 결합하여 버력을 적재하는 적재기로서 크게 나누어 컨베이어가 부착된 록쇼벨과 대형 록쇼벨의 두 종류가 있다. 록쇼벨의 버켓 용량은 0.25~1.0m³이며 적재능력은 1.0~7.0m³/min이고 동력은 공기식, 디젤식, 전기식 등이 있다.

② 휠 로더 (Wheel Loader)

터널 단면이 비교적 큰 철도터널 등에 많이 쓰이며 기동성이 뛰어나지만 동력이 디젤식으로 매연이 심하므로 환기에 주의하여야 한다. 터널의 크기에 따라 휠로더의 용량을 선정하여야 한다.

한편 선진국에서는 휠로더의 단점인 작업중 매연을 없애고, 행동반경을 줄이며 적재 싸이클 타임을 대폭 축소시킨 전기식 페이스 쇼벨(Electric Powered Face Shovel)을 일부 터널에 적용하고 있다.

(3) 버력 운반

버력운반은 <표 16>과 같이 타이어방식, 레일식이 있으나 소형단면일 경우에는 대부분 레일식을 사용한다. 그러나 복선 단면의 경우는 타이어방식(덤프트럭)을 이용하여 갱외로 버력을 반출하는 방법이 유리하다.

타이어방식은 덤프트럭, 트럭믹서 등의 차량에 의해 적환하지 않고 갱내와 갱외를 운반하기 때문에 레일방식에 비해 갱내·외의 가설비가 간단하며 비교적 큰 단면의 터널에 적당하다. 그러나 조기의 인버트 폐합을 필요로 하는 터널에서는 막장부예의 주로확보를 위해서 이동식의 잔교설비가 필요하다. 또 차량의 배기가스를 배출하기 때문에 대형 환기설비가 필요하며 갱내환경의 개선과 병행하여 최근 대용량의 웬(Fan)을 도입하는 경우가 증가하고 있다.

레일방식은 갱도에 궤도를 설치하고 버력 트로울리, 대차, 아지테이터 카 등의 차량을 연결하여 전기기관차로 운반하는 방식이다. 터널의 규모, 지질 등에 제약이 없지만 터널의 경사에 제약을 받으며 2% 정도 이상의 경사에서는 차량이 탈선 일주할 위험이 높기 때문에 충분한 일주방지대책을 할 필요가 있다.



표 16. 타이어방식과 레일방식의 비교

항 목	타이어방식	레일방식
갱외설비	· 특별한 설비가 필요없다	· 어느 정도의 설비 및 부지가 필요
노면 · 주행로	· 노면보수 유지가 필요 · 연약한 지질이나 침수가 많은 경우 노면유지대책이 필요	· 노반을 손상하지 않는다. · 경연의 어느 지질에서도 가능
경사의 제한	· 제한이 적다 · 통상 15% 정도까지	· 제한이 생긴다 · 통상 2% 정도까지
단면의 제한	· 소단면에서는 적당하지 않음	· 타이어방식에 비해 소단면에서도 가능
환기설비	· 배기가스 처리장치를 설비할 경우에도 비교적 대형 환기설비가 필요	· 축전지 기관차의 경우는 타이어방식보다 소형의 설비로 가능

(4) 운행관리

터널공사에서 차량에 관련된 사고는 중대사고로 되기 쉽기 때문에 차량의 운행에는 만전을 기할 필요가 있다. 운반계획에 기초한 운행관리 규정을 정하고 안전운행 관리체제의 확립이 필요하다. 운행관리 규정에는 운행관리체제, 신호의 표시방법, 합도, 유도, 제한속도, 후진운전시의 장치, 차선 및 운행경로, 운전, 운전석을 이탈한 경우의 처치, 통로, 차도, 출입금지를 할 경우는 그 처치, 하적, 차량탑승의 정원, 차량점검정비, 승차, 열차편성 등을 정할 필요가 있다. 또 타이어방식의 경우는 도로교통법을 참고로 하여 운행관리규정을 정하는 것이 바람직하다. 또 필요에 따라서 신호장치, 제한속도 표시 등을 설치하여야 한다.

(5) 버력 적재 및 운반 사례

터널 형식 및 굴착 단면적 또는 터널 지름에 따른 버력적재 및 운반장비 사례는 <표 17>, <표 18> 및 <표 19>과 같다.

표 17. NATM 터널

구 분	굴착단면적(m ²)	적재장비	운반장비	비 고
도로터널(2차로)	≒ 95m ²	휠로더 (3.0~4.0m ³)	덤프트럭(15tonf)	
철도터널(복선)	≒ 85m ²	휠로더 (3.0~4.0m ³)	덤프트럭(15tonf)	
지하철터널(복선)	≒ 80m ²	휠로더 (3.0~4.0m ³)	덤프트럭(15tonf)	

표 18. TBM 터널

구 분	구경(m)	적재장비	운반장비	비 고
지하철터널 (5-21공구)	ø5.0m	Train Loader	디젤기관차(15tonf) + Muck(14m ³)	
도로터널 (북부도시고속화)	ø6.5m ø8.0m	Train Loader	디젤기관차(15tonf) + Muck(11m ³)	

표 19. Shield TBM 터널

구 분	구 경 (m)	형 식	운반장비	비 고
광주지하철	ø7.38m	이토압식	배터리 기관차	
서울지하철 909공구	ø6.75m	이수가압식	배기관	유체수송식



해설 2. 굴착 보조공법

1. 굴착 보조공법의 정의 및 목적

1.1 정의

굴착보조공법은 터널 굴착시 지반의 상황이나 용출수에 의해 시공이 곤란해지거나, 지보효과가 저하되는 경우, 안전하고 효율적으로 시공하기 위해 터널 주지보재(샷크리트, 록볼트, 철망, 강지보재 등)이외에 보조적으로 사용되는 공법으로 연약한 지반에서 터널의 안전시공을 위하여 터널막장부나 천장부 및 측벽부를 보강하기 위하여 채택되는 공법이다.

1.2 목적

굴착보조공법의 목적은 터널 굴착시의 안전성을 증대시키고, 터널의 수명기간 동안 안정을 도모하기 위하여 주변지반의 전단강도 증진, 침하 방지, 투수성 저하, 구조적 보강 등이다.

- (1) 터널의 안전성을 증대시키기 위하여 주변지반의 전단강도를 강화한다.

지반의 전단강도는 Mohr-Coulomb 항복기준에 따라 유효응력 개념으로 <식(1)>과 같이 표현되며, 주입재의 특성과 지반의 특성이 상호·결합하여 강도 정수 c' 혹은 ϕ' 을 향상시킴으로써 터널 굴착시 터널의 안전성을 높이게 된다.

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (1)$$

여기서, τ : 전단강도(MPa)

c' : 유효점착력(MPa)

ϕ' : 유효내부마찰각(°)

σ' : 유효연직응력(MPa)

- (2) 주변지반의 압축특성을 개선시킨다.

안정제의 첨가, 주입 등에 의해서 토립자들을 접착하여 지반의 골조강성을 증가시키고, 압축 특성을 개선시킨다. 또한 결합물질의 간극 충전도 지반의 변형을 감소시키는 원인이 되므로 터널굴착에 따른 주변 지반침하를 억제시킬 수 있다.

- (3) 주변지반의 투수성을 저감시킨다.

결합재 모르타르, 결합재 밀크 또는 약액 등을 사용하여 원위치 혼합이나 주입을 통한 지반의 간극 충전으로 투수성을 저하시켜서 지하수 유출에 의한 터널의 안정성 저해 요소를 감소시킨다.

- (4) 지반의 변형 및 파괴를 방지하여야 한다.

지반강화 및 구조적 보강을 통한 터널굴착에 따른 지반의 변형 및 파괴 방지를 도모하여야 한다.

2. 적용 계획

2.1 적용 대상

터널 굴착보조공법을 적용하기 위한 주요 대상은 다음과 같다.

- (1) 횡단선형에 토파가 작게 설계된 경우
- (2) 지반조사 결과 지반이 연약하여 자립성이 낮을 경우
- (3) 터널 인접구조물 보호를 위하여 지표나 지중변위를 억제하여야 할 필요가 있는 경우
- (4) 지하수 조사로부터 용출수로 인하여 지반의 열화 및 지반이완이 진행될 수 있어 터널의 안정성 확보가 필요할 경우
- (5) 기타 편토압 지역 및 심한 이방성 지반 혹은 특수 지형조건 등에 건설 예정인 경우
또한, 터널 굴착시의 안정을 확보하여야 할 필요성이 있을 때, 그리고 터널 수명기간 동안의 안정성을 충분히 확보하여야만 하는 경우에 설계단계에서 계획을 반드시 수립하여야 한다.

2.2 적용계획 수립시 고려사항

터널 공사는 지하수위 아래에서 실시되는 경우가 대부분이므로 <표 20>에 나타낸 바와 같이 용출수에 의한 문제점 등 지하수 유입에 대한 대비를 철저히 하여야 한다. 특히, 함수 미결지반에서의 터널 굴착은 지하수에 의해 민감하게 영향을 받으므로 터널 굴착전 반드시 적절한 조치를 취하여야 한다.

터널 굴착시 적용되는 굴착보조공법은 ‘시공을 위한 일시적인 안정공법인가?’ 아니면, ‘터널 구조물 수명기간 동안의 안정을 도모하여야 하는가?’를 우선적으로 결정하여야 한다. 특히 지반의 강도를 최대한으로 활용하고자 하는 경우에는 후자에 대하여 신중하게 고려하여야 한다.

적용계획 수립시 특별히 유의하여야 할 사항들은 다음과 같다.

- (1) 목적, 문제점 및 종류들을 명확히 설정하여야 한다.
- (2) 보조공법 위치 선정, 보강량, 보강구간 등을 신뢰도가 높도록 계획하여야 한다.
- (3) 보강효과를 신속히 파악하여 재설계(Feed Back) 하도록 한다.
- (4) 긴급사태에 신속히 대응하기 위해 조치내용과 범위를 사전에 고려하여야 한다

이와 같이 터널 굴착보조공법으로서 선행 지반 보강공법은 경제성, 개량효과, 작업성 등에서 전부를 만족시키는 공법을 선정하기는 쉽지 않고, 특히 터널 진행을 저해하는 경우가 많아서 체계적이고 철저한 계획 수립을 하여야 한다.



표 20. 터널 굴착시 용출수에 의한 문제점

원인 또는 환경	직접 작용	굴착작업에 영향을 미치는 현상
침투성이 큰 지반	• 지반의 연약화 • 파쇄대 암석의 박리 촉진 • 점토의 팽창 • 응집력이 없는 지반의 유동화	• 지반압 증대 • 측벽의 붕괴, 낙반의 원인 • 흡수팽창, 지반의 크리프(Creep) • 지반의 붕괴, 자립의 저지
용출수대의 접근	• 차수벽의 파괴	• 막장부 지반의 붕괴, 유실 • 갱도의 매몰
과·소 배수설비	• 배수불량	• 터널내 환경의 불량화 • 지보재 기초의 지지력 저하
집중용출수	• 유속이 크고, 수압이 큼	• 막장부 설비의 수몰 • 작업위험 • 공사중지
연직갱 • 경사갱	• 펌프 배수	• 터널내 침수 • 집수정 및 펌프설비의 영구화
지하수의 계속적인 유출	• 지하수위 저하	• 수자원 고갈, 이용수위 저하 • 해안부의 해수 침입, 염수화

2.3 굴착보조공법 수행절차

터널 굴착보조공법의 설계 및 시공단계별 고려 사항을 흐름도로 표시하면 <그림 11>과 같다.

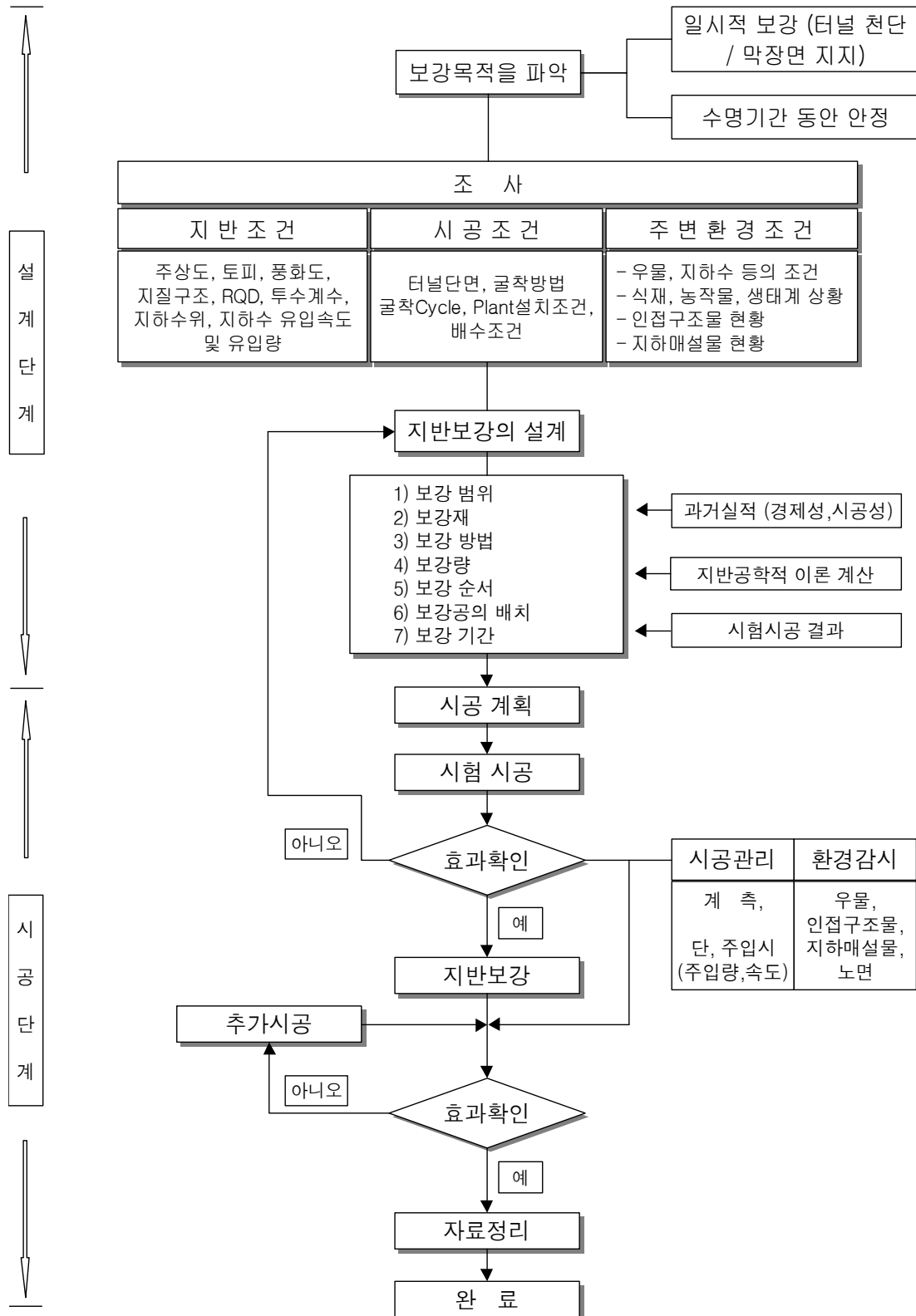


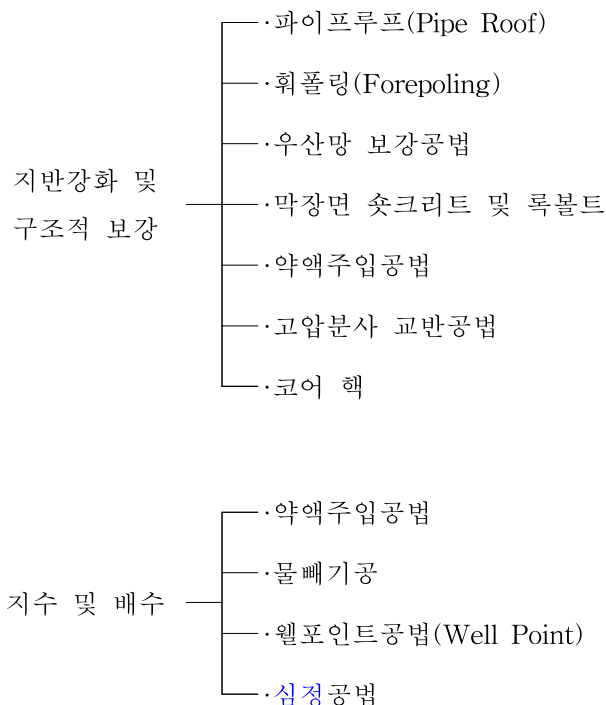
그림 11. 터널 보강 흐름도



3. 굴착보조공법의 선정 및 종류

3.1 보강목적에 따른 분류

터널 굴착보조공법은 보강목적에 따라서 ‘지반강화 및 구조적 보강’, ‘지수 및 배수를 위한 공법’으로 크게 나눌 수 있고, 다시 ‘터널 천단부 지반의 안정’과 ‘막장면 지지’의 목적으로 구분할 수 있다. 아래의 보강목적에 따른 분류에는 국내에서 산악 도로 및 도심지 지하철 터널 굴착시 적용된 바 있는 공법들을 위주로 나열하였으며, 한 가지 보조공법으로 보강 목적을 만족하기 어려운 경우에는 두 가지 이상의 굴착보조공법들을 병용하여야 한다.



3.2 공법 선정

각 보조공법의 중요도는 지반조건, 지하수 상황, 터널의 용도, 터널의 규모 등에 따라서 상이하기 때문에 구체적인 보강공법의 활용 목적과 평가 방법을 명확히 설정한 뒤 지반조사 결과에 따라 현장 여건에 필요한 공법을 선정하여야 하며, 시공방법과 잘 부합하도록 충분히 검토하여야 한다.

<표 22>은 터널 굴착시 국내에서 주로 적용되어온 굴착보조공법의 적용성을 개략적으로 보여주고 있는데, 합리적인 굴착보조공법의 적용은 <표 21>의 공법과 더불어 현장 상황에 따라 2개 혹은 3개의 지반 보강공법을 목적에 따라 병용하여야 할 것이다.

표 21. 굴착 보조공법의 적용성

대 책	목 적	공 법	원지반 조건			비 고
			경암	연암	토사	
지 반 강 화 및 구 조 적 보 강	천 단 안 정	파이프루프		△	△	
		경사 록볼트		△		
		휘폴링		△	△	철근, 강봉, 강관 등 사용
		우산망보강공법		△	○	강관, GRP 등 사용
		약액주입공법			○	
		고압분사교반공법			○	
	막 장 면 / 바 닥 면	막장면 슛크리트		△	○	
		막장면 록볼트		△	△	철근, GRP 등 사용
		코어 핵		△	△	Ring Cut
		약액주입공법			○	
		고압분사교반공법			○	
		가인버트		△	△	
용 출 수 대 책	지 수 / 배 수	약액주입공법	△	○	○	
		물빼기공	△	○	○	웰포인트, 심정 공법 포함
		웰포인트공법			○	
		심정 공법			○	

주) ○ : 비교적 자주 사용되는 공법

△ : 보통 사용되는 공법

3.3 막장부 안정 보강공법

철도터널 굴착에 적용 가능한 보조공법 중 막장면 안정과 천단 지반강화와 관련된 공법으로는 주로 파이프루프, 휘폴링, 우산망보강공법, 막장면 슛크리트 및 록볼트, 약액주입공법, 고압분사교반공법 등이 있다.

특히 약액주입공법은 막장면 안정뿐만 아니라 지수공법 등 광범위하게 적용되는 중요한 공법으로써 「해설2. 3.4 약액주입공법」에서 상세하게 기술하였다.

3.3.1 파이프 루프(Pipe Roof) 공법

터널 천단부 연약지반의 이완방지 등을 주된 목적으로 하며, 터널 내공변위를 최대한 억제하고 상부 구조물의 보호를 위해 보다 적극적으로 지지하여야 할 경우에 효과적이므로 주요 구조물 하부 통과시 적합한 공법이다. 파이프 루프 공법의 주요 용도는 다음과 같다.



- 도로, 철도 하부 시공시
- 지중 및 지상 구조물 하부 시공시
- 대단면 터널 시공시
- 터널 갱구부 시공시
- 단층 파쇄대, 불락성 지반의 관통시

그러나 이 공법은 시공비가 고가이고, 작업대 및 플랜트(Plant)설치 공간이 필요한 단점을 가지고 있으므로 세심한 검토를 바탕으로 대상 철도터널에 적용하여야 할 것이다.

(1) 강관 규격 및 설치

강관은 여러 종류가 있으나 일시적인 가설 지보재로 설계하는 경우에는 경제성을 고려하여 국내에서 생산되는 일반구조용 강관을 사용하는 것이 바람직하다.

강관의 규격은 가해지는 하중의 크기에 따라 변화하며, 일반적으로 강관 두께는 3~4mm 이고, 지름은 50~300mm, 길이는 6~15m로 1회 시공 후 9~8개 막장부까지 연결시킬 수 있다.

철도, 도로 등과 같이 큰 상재하중이나 주요 구조물에 근접하여 시공할 경우 큰 강성과 토사의 유출방지를 위하여 지름 300mm 이상의 대구경 강관을 연결형으로 시공하는 것이 유리하지만(<그림 12> 참조), 토피가 어느 정도 형성된 경우는 소, 중구경 강관을 일정 간격으로 분리 배치하는 방법이 경제적이다(<그림 13> 참조).

분리간격(CTC)은 지반조건(점착력, 입도분포, 밀도, 균열, 지하수 등), 지반압, 강관 배열 위치, 굴착방법, 지보간격 등의 요소들을 검토하여 결정하며, 분리 최소간격은 경험적으로 강관 지름의 약 2~2.5배 정도를 이용하고 있다.

연결형의 경우 연결 조인트의 설계가 필요한데 외부 하중에 의한 전단응력을 지지할 수 있도록 충분한 강성을 가져야 하며, 일반적으로 강관 반경의 약 1/3~1/4 배로 부착높이를 정하고 있다.

파이프 루프의 삽입 전에 지반중에 충분한 그라우팅이 요구되며, 반드시 강지보재 바깥쪽에서 가능한 수평(최대 5°이내, 터널 입구부에서는 2~3°이내)으로 시공하여야 한다. 이러한 여건을 만족시키기 위해서 터널 단면을 종방향으로 3~4m 구간을 300~400mm 정도로 확폭하면 파이프 루프를 정밀하게 설치할 수 있다. 그러나 수평 시공이 불가능할 때에는 휘폴링과 병용하여야 효과적이며, 특히 고압 수평분사와 병용할 경우는 대상지반을 선별하여 시공하여야 하는데 풍화토나 풍화암 지반에서는 그 효과가 크게 저감되고, 충적층에서는 확실한 보강 효과가 있음이 시공을 통하여 증명되었으므로 파이프 루프의 설계시 이러한 점을 충분히 고려하여야 할 것이다.

(2) 파이프루프 시공 사례

국내의 파이프루프 시공 실적은 도심지 지하철 터널에서 주요 구조물 통과시 적용한 사례는 있지만, 철도터널에서는 대부분 산악지역의 양호한 지반조건과 충분한 토피고를 가지고 있기 때문에 파이프루프를 보조공법으로 시공한 사례는 매우 드물다. 그러나 풍화암 또는 절리가 심한 연암지반 뿐만 아니라 갱구부와 교차터널 구간 및 주요 구조물 하부를 낮은 토피고로 통과하는 구간에서는 설계의 고려 대상이 된다.

3.3.2 휘폴링(Forepoling) 공법

휘폴링 공법은 일시적인 지보재로서 굴착전 터널 천단부에 종방향으로 설치하여 굴착면의 자유면 길이를 감소시키고, 국부적으로 낙반을 방지하여 굴착 천단부의 안정을 도모하며, 막장부 전방의 지반보호 및 느슨함을 방지하기 위한 목적으로 사용한다.

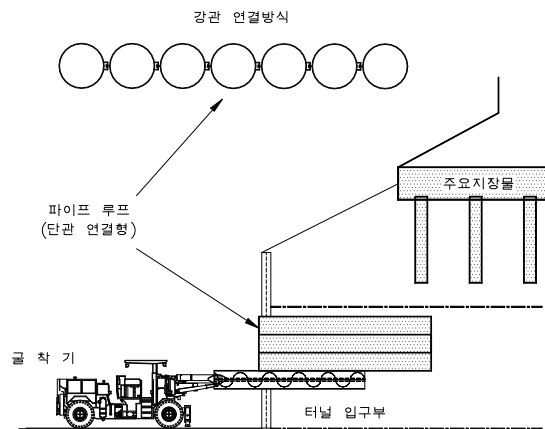


그림 12. 연결형 파이프루프 사례

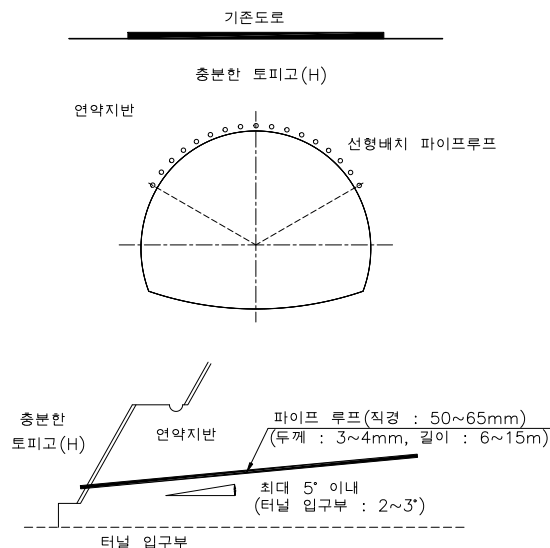


그림 13. 분리형 파이프루프 사례



휘폴링의 횡, 종간격은 굴진장, 지반하중, 지반조건 등에 따라서 조절하여야 하며, 휘폴링 공법의 규격 및 설치범위는 다음과 같다.

(1) 보강재 규격 및 설치

보강재 재질은 철근, 강관 혹은 강지보말뚝을 사용하는데 철근의 지름은 25mm, 강관 파이프의 지름은 약 30~40mm를 주로 사용한다. 또한 보강재의 길이는 굴진장의 2~3배를 추천한다.

횡방향 설치간격(CTC)은 지반조건과 굴진장에 따라서 탄력적으로 조정하여야 하는데 문헌마다 다소 차이는 있지만 경험적으로 약 0.3~0.8m 이내로 하고, 종방향의 설치간격은 매 막장마다 설치하는 것을 원칙으로 하나 2막장마다 설치하는 경우도 있다. 또한 설치범위는 터널 굴착면 크라운부분에서 좌우로 약 30°~60° 범위에 보강재를 설치한다.

설계 및 시공시 주의사항으로는 여굴방지를 위하여 최대한 수평을 유지(설치각도 15°미만)하도록 설계하고, 강지보재와 지반을 이용하여 2점 지지가 되도록 설계하며, 안전성을 증가시키기 위해 상호 중첩되도록 설계하여야 한다.

참고로 시공 후 느슨함 방지를 위하여 천공면은 반드시 모르타르 그라우팅을 실시하여야 한다. <그림 14>는 터널 막장면 상부의 지반안정을 목적으로 휘폴링을 시공하기 위한 표준설계단면 사례를 나타낸 것이다.

(2) 휘폴링 종류

여러 형식의 휘폴링 중에서 현재 국내에서 적용되고 있는 종류들은 보강재와 주입 방식에 따라서 다음과 같이 구분할 수 있다.

- 충전식

- 천공후 철근삽입 및 모르타르 채움
- 천공후 강관삽입 및 모르타르 채움

-주입식

- PU-IF(Poly Urethane-Injection Forepoling)
- AB Forepoling(Forepoling Method with Advanced Bit) 등

휘폴링 종류 중에서 철근 및 강관삽입 방식의 설계는 전술한 「가. 보강재 규격 및 설치」 부분을 참조하기 바라며, 본 절에서는 국내에서 적용된 바 있는 우레탄 압입식 PU-IF공법에 대한 특성을 설명하고자 한다.

이 공법은 불안정 지반에서 막장부 상부의 안정성을 높이기 위한 보조공법으로서 주입이 가능한 룯트를 사용하여 순결성 우레탄(FCU)을 주입함으로써 막장부를 보강하는 공법이다. 주입재인 FCU는 <표 22>에 나타낸 바와 같이 A액과 B액을 중량비 1 : 1로 혼합하는 것으로서, 주입 직후에는 점성이 낮고 침투성이 풍부하지만 매우 짧은 시간에 점성이 높아져서 팩커나 코킹이 불필요한 특징이 있다.

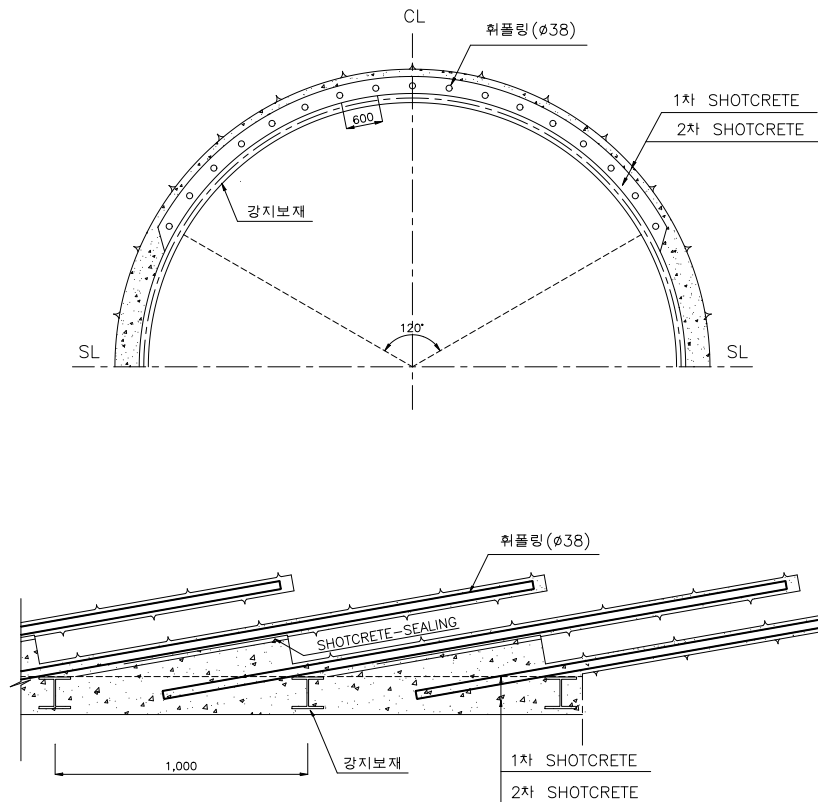


그림 14. 휘폴링 시공 표준단면 설계사례

표 22. 순결성 우레탄(FCU)의 재료 특성

항 목		특 성
점 성	A 액	900 ± 100 CPS
	B 액	150 ± 20 CPS
겔 타임		7 ± 2초
비 중	A 액	1.052 ± 0.33
	B 액	1.236 ± 0.03
연 성		인화점 약 200℃

그러나 이 공법의 단점으로는 용출수가 많으면 반응시간이 길어지고 물에 썩길 우려가 있으므로 지하수 조건에 따라 적용에 대한 타당성을 검증하여야 한다.

<그림 15>는 PU-IF공법의 시공을 위한 표준설계단면 사례이다.

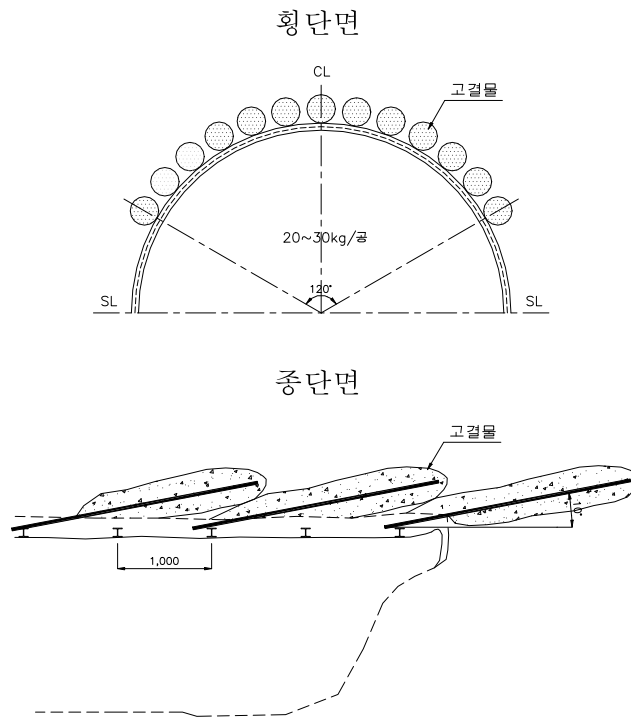


그림 15. PU-IF공법 설계 사례

(3) 일본 도로터널 및 국내 지하철 터널의 PU-IF공법 적용 사례

일본 도로터널의 PU-IF 공법적용 사례를 살펴보면, 막장부 상황을 관찰하면서 지반이 심하게 박락되는 곳을 중심으로 <그림 16>과 같이 배치하고, 인접간격을 700mm, 1막장마다 7~8개를 지그재그로 배치하였다.

1단면 8개를 장착 및 주입하는 시간은 약 90분이 소요되었고(<그림 17> 참조), 총 2,300개를 시공하였으며, 주입재 FCU의 사용량은 1공당 약 9kg이었다.

국내에서의 시공사례는 부산 지하철 ○○○공구 교량하부 터널공사에서 PU-IF가 적용되었는데, J.S.P. 그라우팅이 시공되지 않은 약 33m 구간에 적용하였다.

압입 볼트는 고강도 중공(中空)볼트로 외경 27mm, 길이 6m의 볼트를 사용하였고, 천공 간격은 CTC 700mm로 상단에 약 15°~30°로 상향 천공하였으며, 시공 간격은 2.4m로 총 224공을 시공하였다.

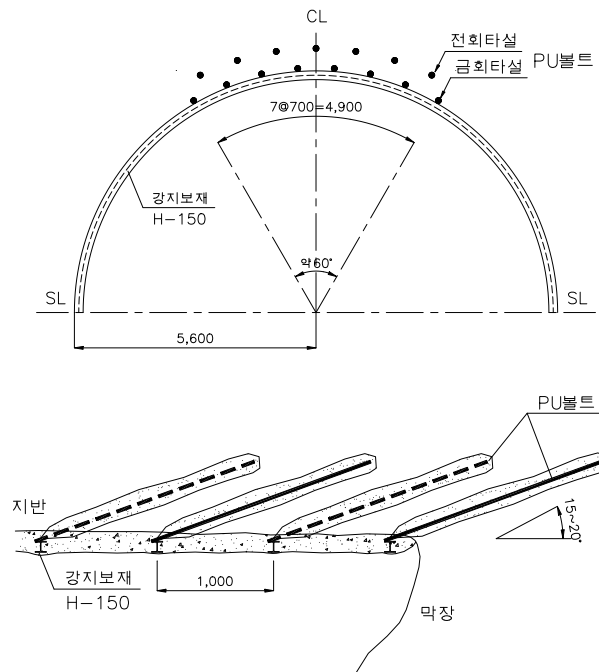


그림 16. 일본 도로터널의 PU-IF의 배치 및 단면도 사례

공 종	0	20	40	60	80	시간(min)
준 비 공	■					
천 공		■				
볼트압입		■				
우레탄삽입			■			
뒤 처 리					■	

- 1) 특히 켈타임이 긴 경우
- 2) 지반에 의한 침투가능한계는 주입제 종류, 켈화시간 이외에 시공법도 큰 관계가 있음

그림 17. 일본 도로터널의 1막장 8개 공에 소요된 싸이클 타임 사례

3.3.3 우산망 보강 공법

우산망 보강 공법은 터널 굴착전에 터널 주위에 아치형으로 지반보강재(강관, GRP 관)를 설치하여 지반을 우산망 형태로 보강 강화시키는 공법이다. 이 공법은 토사, 풍화암, 파쇄대지반과 갱구부 및 토피가 작은 구간에서 터널안정 및 지표면 침하억제를 위한 굴착 보조공법이다.

우산망 보강 공법은 다음과 같이 크게 4가지로 대별되며, 지반상태와 천공방식이나 주입방식을 조합함으로써 지반조건에 적절한 여러 가지 시공패턴 선택이 가능하다.



- 대구경 강관보강 그라우팅 공법
- 강관보강 다단그라우팅 공법
- GRP보강 그라우팅 공법
- 수평 제트 그라우팅 공법

우산망 보강 공법의 적용 시에는 터널 내 지보재 간 간섭여부와 지질 조건을 고려하여야 한다.

(1) 대구경 강관보강 그라우팅 공법

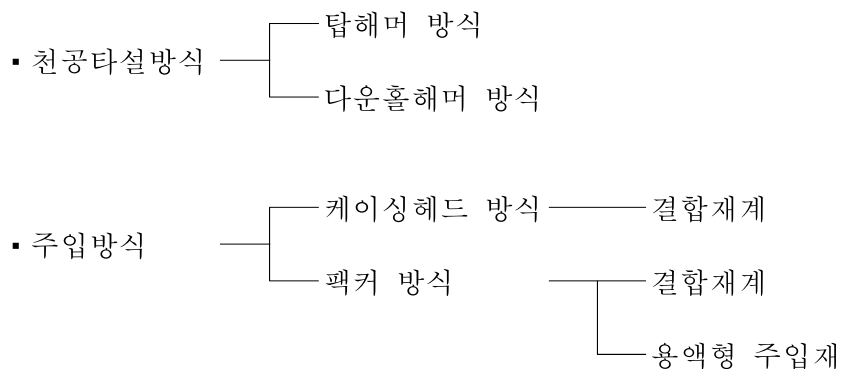
대구경 강관보강 그라우팅 공법은 전용장비를 사용하여 이중관 방식으로 천공과 동시에 강관을 설치하고 주입재를 주입하여 터널 굴착면 주변에 빔 아치(Beam Arch)를 형성시켜 주는 터널 굴착 보조공법이다.

본 공법은 터널 막장부전방 지반을 보강하기 위한 공법의 하나로, 토사지반, 풍화암, 파쇄대 등 미고결지반이나 저고결 지반에서의 막장부의 안정대책 및 갱구부나 토피가 얇은 곳에서의 지표면 침하대책, 지반안정 대책 등을 목적으로 적용시키는 공법이다.

① 시공방식

대구경 강관보강 그라우팅 공법의 시공방식은 천공타설 방식 및 주입방식에 따라 아래와 같이 분류되고, 지반조건에 따라 각 방식을 선정하여야 한다.

천공은 보강재인 강관을 외관으로 하고, 릿드를 내관으로 하는 이중관 방식이다. 소정길이의 천공이 종료되면 강관은 남기고 릿드를 인발한 후 주입하여야 한다.



② 천공 타설방식

대구경 강관보강 그라우팅의 천공·타설방식에는 지반조건에 따라 탐해머방식과, 하향식 탄성파탐사 해머방식이 있다. 지반종류에 따른 천공·타설방식은 <표 23>와 같다.

표 23. 천공 · 타설방식별 적용 지반

지반조건 천공타설방식	점성토	사질토	자갈질토	굵은자갈 혼합토	전석 혼합토	균열성 암반		
						풍화암	연암	경암
타해머방식	○	○	○	△	△	○	△	△
하향식 탄성과타사 해머방식	-	△	△	○	○	△	○	○

③ 주입방식과 적용 지반

주입방식에는 보강강관 내부 및 외주지반과의 간극을 충전하는 충전주입과 지반 자체를 개량하여 강관 사이에서의 지반붕괴방지나 강도특성개선을 도모하는 개량주입이 있다. 주입방식과 주입재에 따른 적용지반은 <표 24>과 같다.

표 24. 주입방식 · 주입재별 적용 지반

주입 방식	지반조건 주입재	점성토	사질토	자갈질토	굵은자갈 혼합토	전석 혼합토	균열성 암반 (풍화암 · 연 암 · 경암)
케이싱 헤드 방식	조강 · 일반결합재	●	●	●	△	●	●
	마이크로결합재	●	△	△	△	△	△
팩커 방식	조강 · 일반결합재	-	△	○	○	○	○
	마이크로결합재	△	△	○	○	○	○
	(용액형 주입재)	-	○	○	-	-	-

④ 시공순서

- 천공 및 강관 설치
 - 천공장비 : $\phi 125\text{mm}$ 이상의 천공이 가능한 터널전용 천공기를 투입하여 천공하여야 한다.
 - 천공지름 : $\phi 125\text{mm}$
 - 천 공 장 : 12m, 겹침길이는 현장의 지반조건에 따라 조절하여 사용하여야 한다.
 - 천공각도 : 20° 이하가 되도록 하되 최대한 수평 유지
 - 강관설치 : 12m 강관(외경 114mm, $t=6\text{mm} \pm 1\text{mm}$)을 천공과 동시에 삽입하여야 한다.
- 공입구 코킹
 - 천공 구멍과 강관 사이는 주입압력에 충분히 견딜 수 있는 코킹재를 사용하여 지하수의 유입을 차단하고 주입재의 누출을 방지하기 위하여 코킹을 실시하여야 한다.



다.

- 주입시 주입재가 누출되지 않도록 충분한 강도를 갖는 급결성의 고강도제품을 사용하여야 한다.

- 그라우팅

- 보강튜브 외주의 공입구를 코킹하여야 한다.
- 주입시 팩커는 유압식 또는 공압식을 사용하여야 한다.
- 주입은 3m 간격으로 하며 현장지질여건을 고려하여 조정할 수 있다.
- 주입압력은 지하수의 정수압 및 상재하중을 고려하여 결정하며 통상 0.5~1.5MPa로 한다.

결합재 그라우트재의 배합비는 <표 25>과 같고 LW그라우트재의 배합비는 <표 26>과 같다.

표 25. 결합재 그라우트재의 배합비

시멘트(kg)	물(ℓ)	비고
500	841	1m ³ 당

표 26. LW 그라우트재의 배합비

A액		B액			비고
규산소다(ℓ)	물(ℓ)	결합재(kg)	물(ℓ)	W/C(%)	
250	250	250	420	168	1m ³ 당

⑤ 설계사례

대구경 강관보강 그라우팅 공법을 서울 지하철 9호선 ○○○공구에 적용한 설계사례이다

서울 지하철 9호선 ○○○공구는 터널 천단 및 막장부에 풍화대가 발달하고 상부에 셋장이 있는 구간으로 대구경 강관보강 그라우팅공법을 적용하였다.

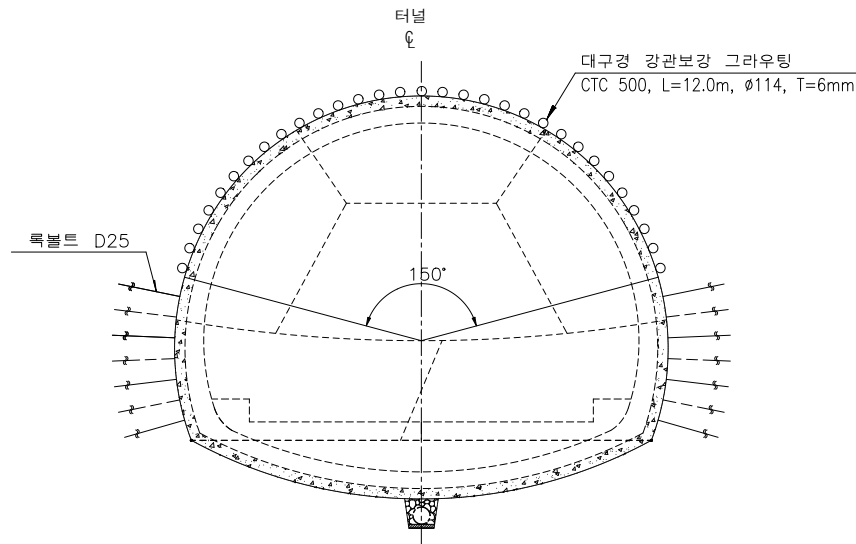


그림 18. 대구경 강관보강 그라우팅 적용 사례

(2) 강관보강 다단 그라우팅 공법

강관보강 다단 그라우팅은 터널 주변의 사력층 및 파쇄된 연암층과 암반 절리면을 통하여 유출되는 지하수를 차단하고 활동 가능면의 봉합을 위하여 터널내에서 주로 적용되는 보조공법으로, 터널 굴착전에 강관을 적절한 형상으로 배열, 설치하고 강관을 통하여 주입재를 주입함으로써 강관과 주변 지반을 일체화시키며, 강관을 이용 그라우트재를 주입하여 차수 및 보강효과를 동시에 얻기 위하여 사용하여야 한다.

① 기대효과 및 적용대상

이 공법을 적용함으로써 기대되는 효과들은 다음과 같다.

- 주입재에 의한 외곽 차수효과
- 강관에 의한 빔 아치형성 효과
- 상부지반압의 경감효과
- 이완영역의 감소효과
- 지표침하 및 천단침하 경감효과
- 측벽부의 변위억제 효과 등

또한 이 공법의 적용대상을 요약·정리하면 다음과 같다.

- 연약지반에서의 터널굴착
- 터널 갱구부 보강
- 도로 및 철도 등의 시설물 횡단
- 지상 및 지중구조물 주변 통과
- 비탈면 보강 및 개착으로 인한 주변 구조물 방호시 등



② 규격 및 설치

보강형 강관의 규격과 강관삽입을 위한 천공작업에 관한 규격은 다음 <표 27>에 나타난 바와 같다. 이 공법의 천공방식은 일반적으로 룯드천공이 가능하지만, 공의 붕괴시 케이싱 룯드를 이용한 천공방법을 사용하기도 한다.

표 27. 강관보강 다단 그라우팅공법의 일반적인 규격

구 분	규 격
강 관	• 일반 구조용 흑관(SS-41) • 외경 : 60.5mm ± 3mm • 두께 : 4mm ± 1mm • 강관 1개 당 길이 : 6m 이내 • 주입스트레나 천공간격 : 0.5~1.0m • 스트레나 지름(φ) : 5mm • 스트레나 수 : 천공 위치당 4방향으로 4개
설 재	• 벤토나이트 + 결합재 계통의 약재 • 목적 부위를 충분히 밀봉(Sealing)할 수 있는 특수한 제품을 사용할 수 있다. • 밀봉재는 주입 후 부피가 줄지 않아야 하며, 너무 큰 강도를 갖지 말아야 한다.

터널 현장의 지반조건 및 굴착 단면 규모, 용출수 상태 등 여러 가지 요인들에 따라 강관 설치를 위한 천공규격을 결정하여야 하며, 국내외의 터널시공 경험 및 시공 후 효과확인에 의해 일반적으로 추천되고 있는 천공규격은 다음과 같다(<그림 19> 참조).

- 천공지름 : 보강용 강관의 약 1.8~2.0 배(φ 100mm 이상)
- 천 공 장 : 겹침 길이는 현장의 지반조건에 따라 조절하며 수평방향으로 12~18m
- 천공각도 : 갱구부에서는 상향 2°이내, 터널 내부 **중방향의 설치각도는 20° 이하가 되도록 하여야 하되, 최대한 수평을 유지하도록 하여야 한다.**
- 천공간격(CTC) : 약 0.3~0.6m 이내

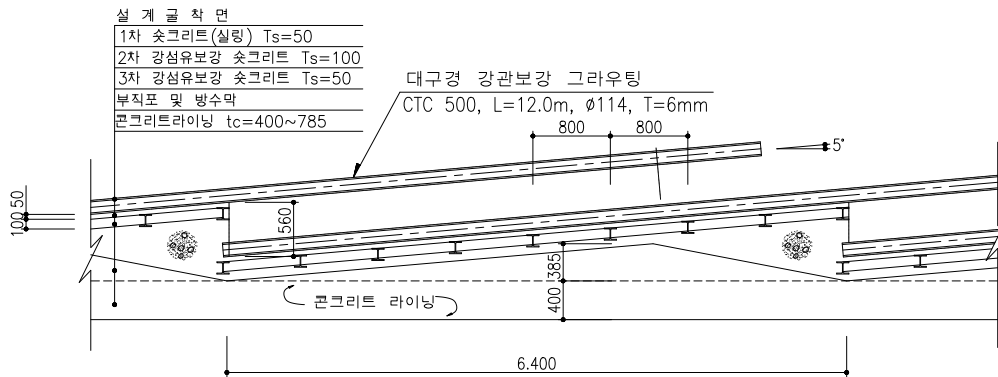


그림 19. 강관보강 다단 그라우팅 적용 사례

또한 다단식 그라우팅 주입을 위한 고려사항은 다음과 같다.

- 주입압력은 지하수의 정수압, 상재하중을 고려하여 결정하여야 한다.
- 주입작업은 공의 선단부부터 3m 단계로 시행하며, 현장여건을 고려하여 결정하여야 한다.
- 결합재 현탁액 그라우트재의 배합비는 빈배합(貧配合)에서 부배합(富配合)으로 변경하여 현장 지반조건에 맞는 배합비를 선정하여야 한다(<표 28> 참조).

표 28. 주입재(물-결합재) 배합비

구 분	200(ℓ / batch)	
	결합재(kg)	물(ℓ)
1 배합	80.0	174
2 배합	90.0	171
3 배합	100.0	168

- 1) 결합재 비중 = 3.15
- 2) 1 Batch는 200리터를 기준으로 하고, 시공 편의상 결합재 대수는 정수로 만들어 배합 결정
- 3) 주입시 주입량과 압력 변화에 따라 상기 3개 배합을 조정하여 사용하여야 한다.

- 이상의 배합비로 주입시 소정의 압력에 도달하지 않으면 결합재의 분량을 증가시킨다.
- LW재를 주입할 때에는 <표 29>의 배합비 중 현장여건을 고려하여 선택하여야 한다.
- 주입의 종료는 설정된 한계주입압력에 도달시 주입을 종료하며, LW재를 사용하여 팩커의 제거로 인한 주입재의 역류를 방지한 후, 팩커를 다음 단계로 이동하여 주입작업을 반복하여야 한다.



표 29. 주입재(LW 약액) 배합비

구 분	A 액		B 액		
	규산소다(ℓ)	물(ℓ)	물(ℓ)	결합재(kg)	W/C(%)
1 배합	100	100	181	60	302
2 배합	100	100	174	80	218
3 배합	100	100	168	100	168

- 1) 주입량 = 400ℓ , 결합재 비중 = 3.15
- 2) 1 Batch는 400리터를 기준으로 하고, 시공 편의상 결합재 대수는 정수로 만들어 배합 결정
- 3) 주입시 주입량과 압력 변화에 따라 상기 3개 배합을 조정하여 사용하여야 한다.

(3) GRP보강 그라우팅 공법

본 공법은 (2) 강관보강 다단 그라우팅 공법'에서 언급한 것과 같은 공법으로서 강관의 자중에 의한 시공성저하와 부식성 문제를 해결하기 위해 중량이 가볍고 내부식성이 좋은 고강도 GRP (Glassfiber Reinforced Plastic)관을 강관대신 사용한 공법이다. 또한, 본 공법은 터널굴착면 주변의 보강뿐만 아니라 GRP의 장점인 경량성과 가공 및 절단의 용이성으로 인해 터널 막장면 안정을 위한 막장면 록볼트로 적용되기도 한다.

터널 굴착중 연약지반이나 파쇄가 심한 지반에서는 막장면을 안정시키기 위해 막장 중앙부에 코어를 남기거나 다단굴착 또는 측벽선갱공법 등을 일반적으로 적용하고 있다. 이러한 경우 터널폐합시간이 길어져 터널안정에 불리하고 또한 시공기간 및 공사비가 증가하는 문제점이 있다. 최근 유럽에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 막장면에 비교적 길이가 긴 막장면 볼트를 적용하여 대단면굴착을 시행하고 있으며, 막장면 볼트로 GRP보강 그라우팅 공법을 사용하고 있다. 일반적으로 사용되고 있는 GRP의 종류는 <그림 20>과 같고 적용에는 <그림 21>과 같다.



GRP관



삼각 GRP보강판



GRP 다발볼



GRP 록볼트

그림 20. GRP의 종류

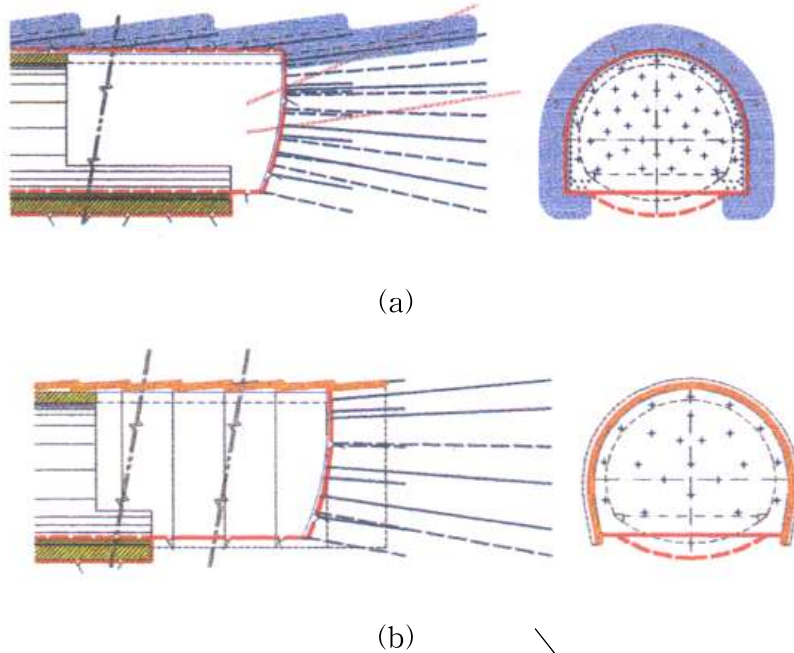


그림 21. GRP의 적용예

(4) 수평 제트 그라우팅 공법

수평 제트 그라우팅 공법은 <그림 22>와 같은 경로에 의해 고안되었다. 강관에 의한 지반보강은 주입효과에 좌우되고, 주입효과는 지반조건에 따라 일부 보강이 안 되는 부분이 있다. 또한, 제트 그라우트에 의한 지반보강에서는 조성된 파일이 굴착 중에 절단된다는 점, 파괴되는 등의 경우가 있다. 전자에 대해서는 균질한 보강을 할 필요가 있고, 후자에 대해서는 파일의 파괴·붕괴를 막기 위해 보강강관으로 보강하는 것이 필요하다. 즉, 수평 제트 그라우팅 공법은 양자를 보강한다는 발상으로 생긴 것이다.

따라서 수평 제트 그라우팅 공법은 제트 그라우트 파일에 의한 지반보강과 강관에 의한 지반보강이 일체로 된 공법을 말한다.

본 공법은 대구경 강관보강공법과 같이 장척 천공타설 전용기에 의해 고압의 경화 재료 개량체를 조성하면서 천공하고 동시에 중심부에는 보강재인 강관을 타설함으로써 터널 외주부에 아치형 구조를 구축하여 우산형의 보강지역을 형성하는 것이다. 또, 공극이 많은 지반에서는 본 공법의 특징인 보강강관을 이용한 2차 주입에 의해 공극이 충전되므로 보다 확실한 개량을 하는 것이 가능하다.

또한, 배토성을 고려하여 내관(롯데)과 외관(보강강관)을 각각 반대방향으로 구동시키는 더블헤드 구조에 의해 천공타설 조성을 실시하므로 적용범위가 넓다.

그리고 대구경 강관보강공법과 같이 장척 천공타설 전용기를 사용하기 때문에, 대구경 강관보강공법과의 병용이 가능한 것도 특징의 하나이다.

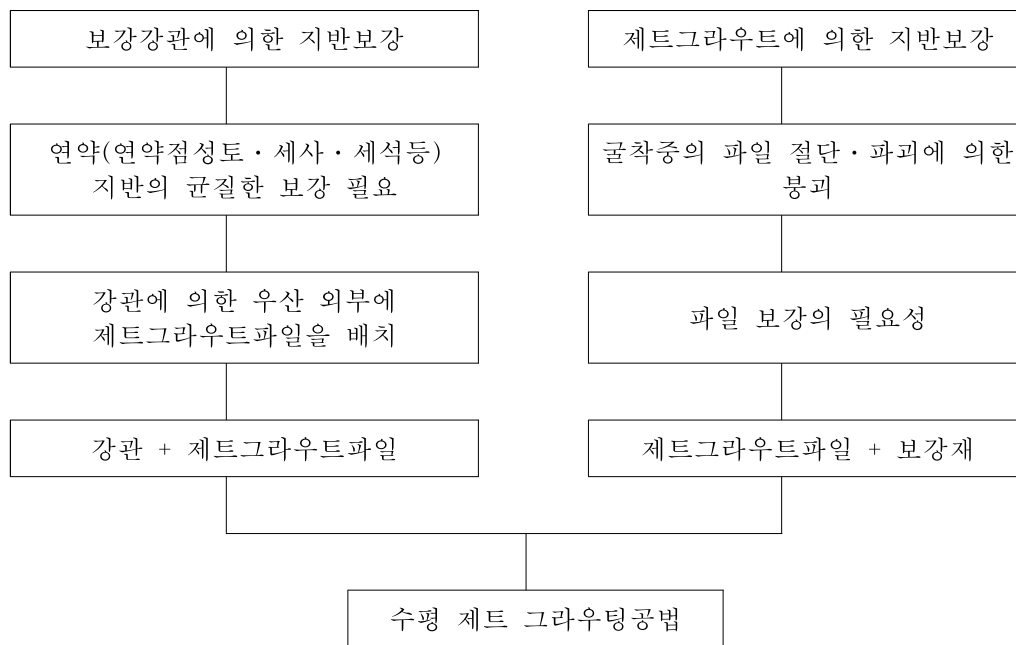
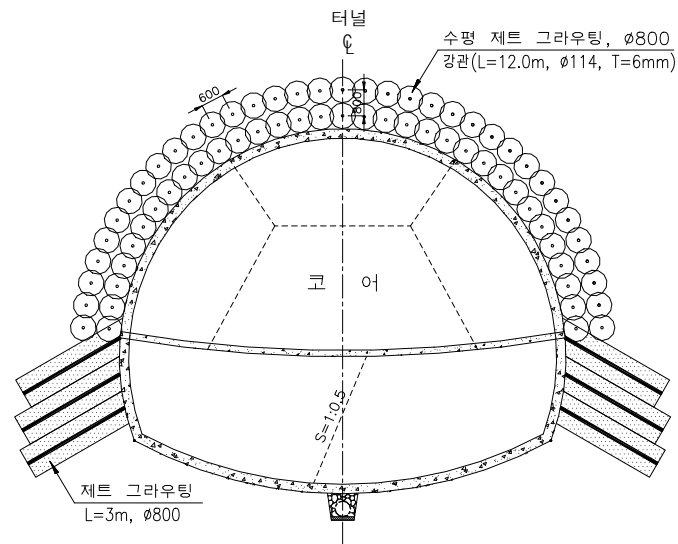


그림 22. 수평 제트 그라우팅 공법

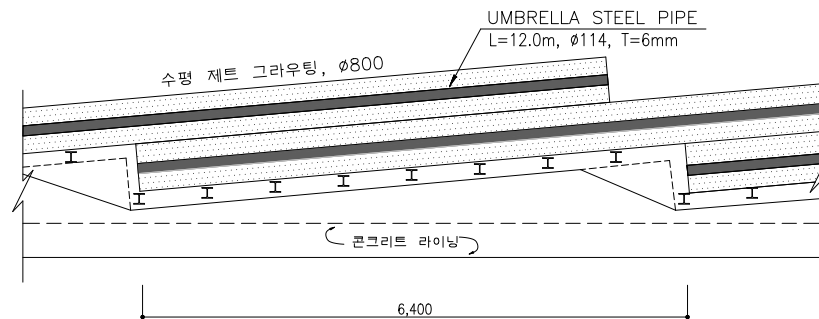
수평 제트 그라우팅공법과 다른 종류의 공법과의 차이점은 다음과 같다.

- 천공하면서 조성할 수 있기 때문에 1사이클로 시공할 수 있다.
- 강제적으로 지반을 개량하여 보강강관을 삽입시키기 때문에 보강효과가 높다.
- 2차주입을 실시하므로 조성체 확보 신뢰성이 향상된다.
- 더블헤드구동에 의해 천공타설조성을 하기 때문에 배토가 쉽고, 내압 상승을 방지할 수 있다.
- 천공타설 전용기를 사용하기 때문에 계획길이를 확실하게 천공하여 조성할 수 있다.
- 보강강관은 12m 정도로 이음부가 없는 강관을 사용할 수 있기 때문에 작업효율이 높고, 강도손실은 없다.
- 두께가 두꺼운 강관을 사용할 수 있기 때문에 강성이 큰 개량지역을 조성할 수 있다.

본 공법의 설계사례로는 서울지하철 ○○○공구 구간으로 터널 상부에 충적층~풍화토, 터널하부는 풍화암이 나타나는 구간에 적용하였다. 주변여건은 터널 상부는 도로이며 양측에 아파트가 인접하여 있어 토사 구간 굴착에 의한 지반침하의 우려가 있어 차수효과가 높고 강성이 크며 충적층에서 시공효과가 우수한 수평 제트 그라우팅공법을 적용하였다. 횡단면 및 종단면도는 <그림 23>과 같다.



(a) 횡단면도



(b) 종단면도

그림 23. 수평 제트 그라우팅 적용 사례

3.3.4 코어 핵(Ring Cut)

코어 핵(Ring Cut)공법은 지반이 연약하여 막장부의 자립성이 부족할 때, 막장면으로 작용하는 힘에 저항하기 위해 코어 핵(Core)을 남기는 방법이다. 핵의 길이는 보통 2~3m이고, 막장면 슛크리트와 병행할 수 있다(<그림 24> 참조).

3.3.5 막장면 슛크리트 타설

미고결지반이나 팽창성지반과 같이 취약한 지반에서 1회 작업시간 사이에 막장부의 붕락이 예상되는 경우에 적용하여야 한다. 막장부의 상황에 따라 막장면에 약 50mm 이상의 슛크리트를 타설하여 막장면의 굴곡을 완화시켜 응력집중을 분산시키고, 암반의 절리에 따른 이동을 슛크리트의 전단저항력에 의해 막는 효과를 기대하는 것이다.

이 공법은 막장면 지지효과가 크고 시공이 비교적 간편하므로 장기간 굴착작업이 중단되는 경우 막장부의 강도 약화를 방지시킬 목적으로 시공한다(<그림 24> 참조).



3.3.6 막장면 록볼트

팽창성지반이나 막장부의 자립성이 극히 불량한 지반에서 막장면 이완방지 및 강화 대책의 하나로써 막장면에 록볼트를 설치하는 방법이다.

록볼트의 규격은 지반의 상황에 따라 설치 개수와 설치 빈도를 결정하며, 또한 막장면 일부 혹은 전면에 설치할 것인지를 결정하여야 한다. 길이는 설치효과를 위하여 보통 1회 굴진장의 3배 정도로 약 3~6m이며, 설치 빈도는 일반적으로 1~2m² 당 1개를 설치하는 것이 바람직하다(<그림 24> 참조).

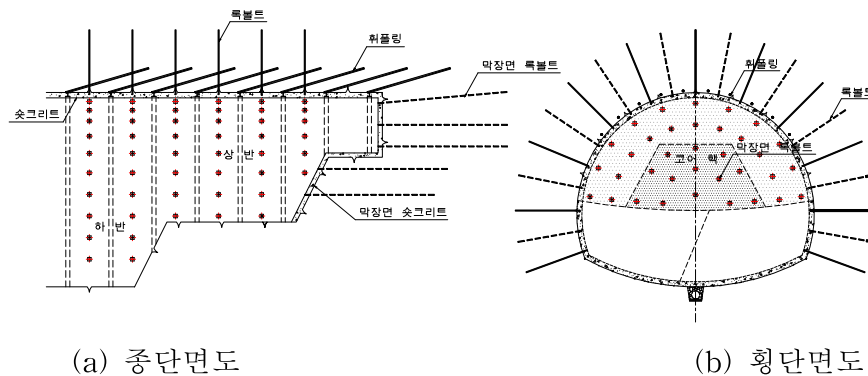


그림 24. 막장면 슛크리트 및 록볼트 사례

3.4 약액 주입공법

3.4.1 일반사항

터널 시공 중에 주변 구조물을 보호하고, 시공의 용이성 및 안정성을 도모하기 위하여 지반에 응결제를 주입·고결시켜 지반의 강도를 증가시키기도 하고, 지반의 투수성을 감소시키는 공법으로 지반특성, 주입목적에 맞도록 주입재료, 켈 시간 (Gel-Time), 주입재 배합비율 등을 조정하여 지반개량 및 차수효과를 최대한 높여야 한다.

3.4.2 공법의 목적 및 영향인자

약액주입공법을 적용하고자 하는 목적은 다음과 같이 대별된다.

(1) 지반의 강도 증진 :

굴착에 따라 위험이 발생할 부분을 고결시킴으로써 공사를 용이하게 하고, 기초지반의 지지력을 증대시키며, 터널 굴착시 주변지반의 붕괴를 방지하고, 인접구조물 보호 및 지반압의 경감 등을 목적으로 한다.

(2) 지반의 지수성 증진 :

터널 굴착시의 지하수 유입을 억제하여 작업의 용이성을 증대시키고, 굴착에 따른 지하수위 저하를 방지하여 지반침하 및 주변환경을 보호한다.

(3) 지반의 압축성 절감 :

지반강화 및 차수성 증대에 의한 지반변형을 감소시키기 위한 목적으로 사용될 수 있다.

이 공법의 주입효과에 중요한 영향을 미치는 요인으로는 다음과 같다.

- ① 대상지반의 불균질성, 균열, 투수성 등 지반의 특성
- ② 주입재의 점성, 겔 시간(Gel-Time), 화학적 성질 등 재료의 특성
- ③ 주입압력, 시공방법 등의 기술적 요소

따라서 여러 가지 주입재 및 주입방법의 특성을 파악하여 사용목적과 대상지반에 적합한 공법을 선정하여야 하고, 철저한 시공관리와 주입효과의 확인을 지속적으로 수행하여야 한다.

3.4.3 주입공법의 분류

주입공법은 실시시기, 주입재료, 주입방식, 주입공 수에 따라서 구분할 수 있는데, 주입공법의 적용을 위한 기본적인 사항들은 관련문헌을 참조하기 바란다.

참고로 주입재는 지반의 침투성을 고려하여 그 적용성을 평가하여야 하는데, <그림 25>는 주입재와 토사지반의 침투성과의 일반적인 관계를 나타내고 있다. 그러나 암반에서는 주입재의 침투가 암반 블록사이의 절리면과 파쇄대를 따라 이루어지므로 암반에서의 침투성에 관한 향후 연구가 필요하다.

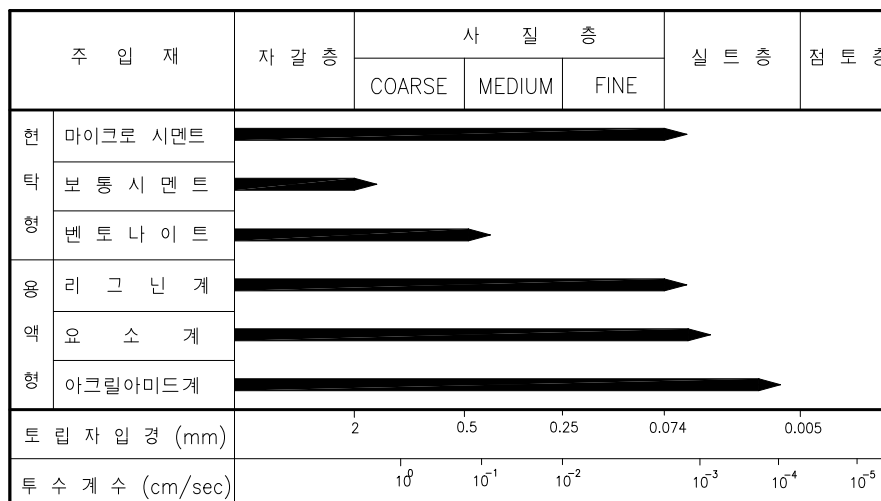
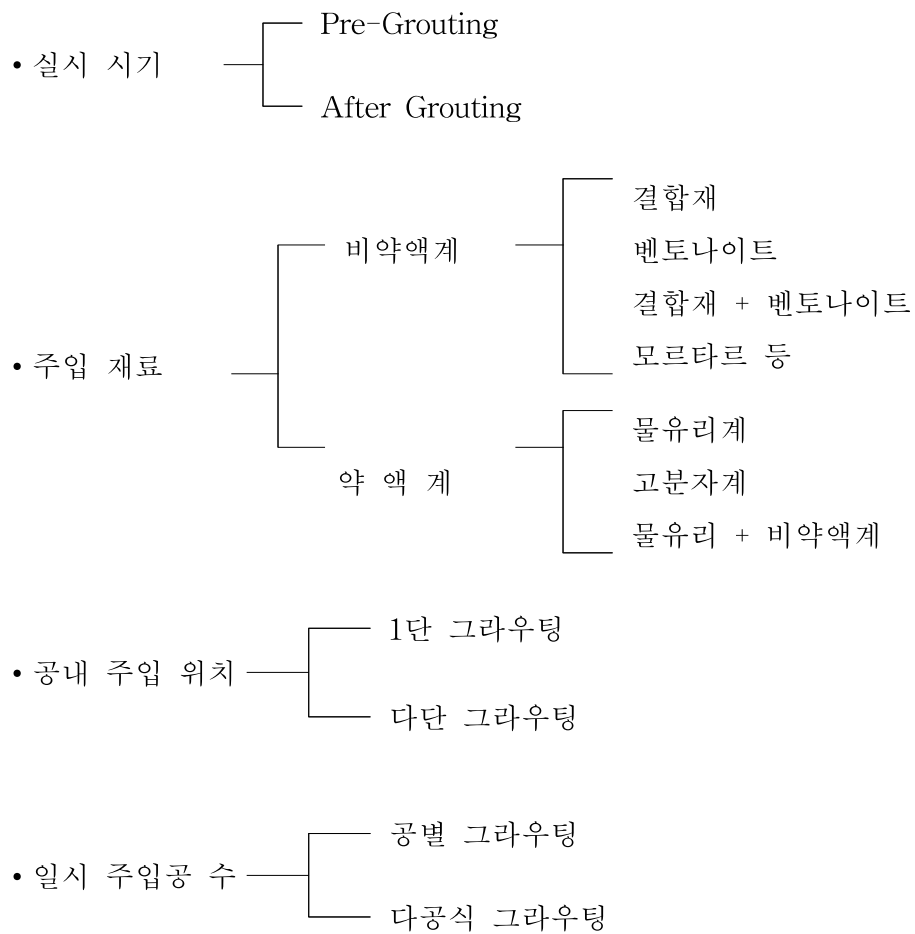


그림 25. 일반적인 주입재별 침투성



3.4.4 주입공법의 설계·시공 절차

주입공법을 적용하기 위한 기본적인 설계인자는 주입범위, 주입재, 주입방식, 주입량, 주입공배치, 주입압력 및 속도 등이 있고, 일반적인 설계 및 시공순서는 <그림 26>과 같다.

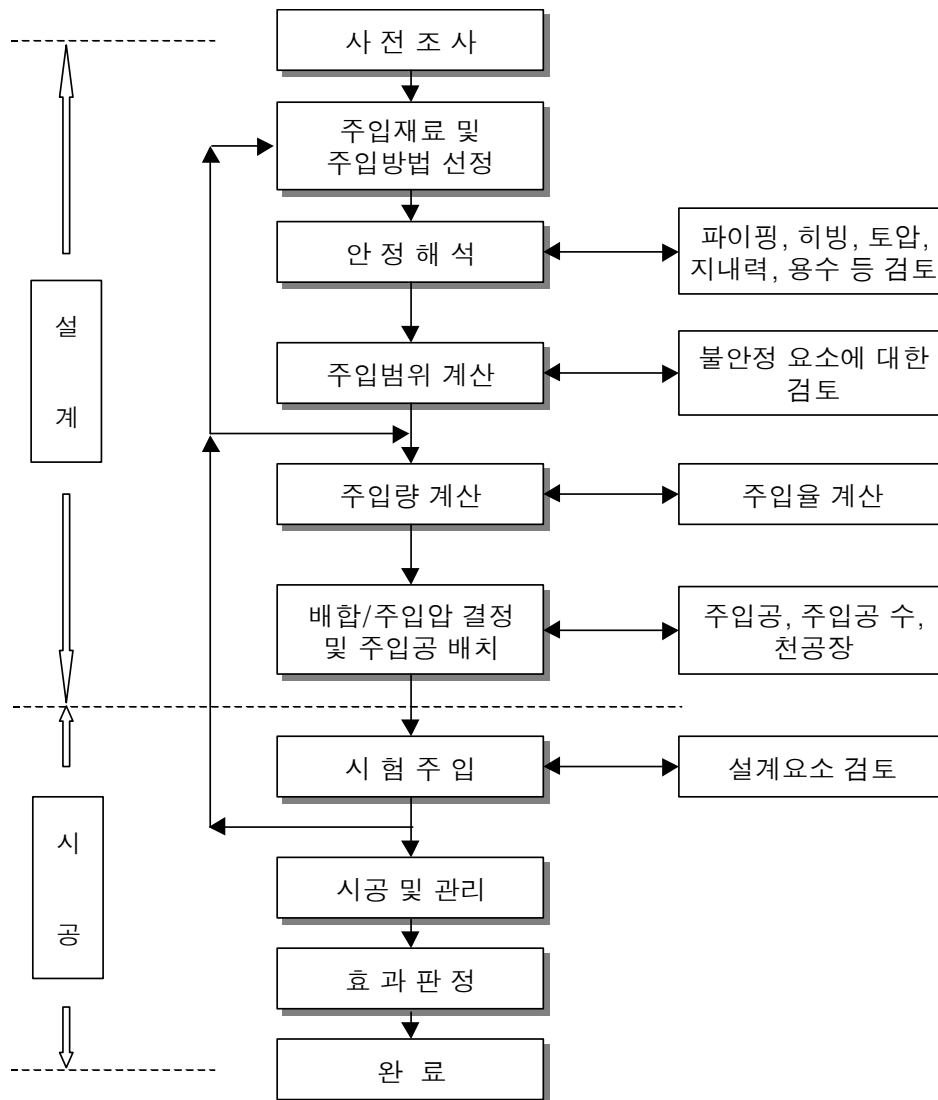


그림 26. 주입공법의 설계 및 시공 절차

(1) 사전조사

지반보강의 필요성과 적합한 지반보강공법을 판단하고, 선정된 공법을 설계하며 시공 및 시공관리 기준 확립과 환경보존 대책을 확립하기 위한 목적으로 사전조사를 수행하여야 한다.

사전조사에는 <표 30>에 나타난 바와 같이 크게 지반조사(현장조사, 물리시험, 역학시험, 화학시험 등)와 환경조사(지하매설물조사, 인접구조물조사 및 지하수, 우물 및 공공용수 지역조사, 식생조사 등)로 구분할 수 있다.



표 30. 지반 및 지반보강 목적에 따른 일반적 지반조사 항목

흙의 종류		사질토		점토	암반	
항 목	주입목적	지수	강화	강화	지수	강화
현장조사	시추주상도	○	○	○	○	○
	표준관입시험(SPT)	○	○	○	-	-
	간극수압측정	○	○	-	-	-
	SPT에 의한 샘플링	○	○	○	-	-
	신월 튜브 샘플링	-	-	○	-	-
	공내 투수시험	○	○	-	○	○
물리시험	토립자 비중	○	○	○	-	-
	자연 함수비	○	○	○	-	-
	밀 도	○	○	○	○	○
	간극비	○	○	○	-	-
	입 도	○	○	-	-	-
	컨시스턴시(액, 소성)	-	-	○	-	-
역학시험	일축압축시험	-	-	○	○	○
	전단시험	-	-	-	○	○
	삼축압축시험	-	○	○	-	-
	투수시험	○	○	-	○	○
화학시험	pH조사	○	○	○	○	○
	COD조사	○	○	○	-	-
	BOD조사	○	○	○	-	-
	유화광물 조사	-	-	-	○	○

(2) 주입범위

주입범위를 산정하기 위해서는 지반 및 수리학적인 계산을 바탕으로 하고, 여기에 안전율을 고려하여 결정하여야 한다. 그러나 개량된 지반의 공학적 특성을 파악하는 것이 어렵고, 안정조건의 해석에 이용되는 계산식이 실제 조건과 차이가 있으며, 개량지반의 불균질 등의 요인으로 인해 이론적 계산 결과만으로 주입범위를 결정하는 데는 문제점이 있다.

그러므로 안정계산으로 구한 결과와 과거의 시공경험을 참고하여 주입범위를 결정하여야 할 것이다.

주입범위는 주입의 목적에 따라 그 주입 범위가 달라질 수 있으며 주입공법과 주입 대상 지반조건에 따라 달라질 수 있다.

주입범위에 대한 이론적 배경은 Terzaghi의 이완영역과 터널 굴착후의 소성영역에 근거하고 있는데, 최근에는 터널 중심으로부터 일반적으로 터널 반경(a)의 약 2배 범위를 소성영역으로 보고 설계하며, 막장부의 안정을 위해 지반조건, 터널 크기, 지하수 조건 등을 고려하여 종방향으로 충분히 중첩되도록 설계하여야 한다(참고적으로 일본 세이칸 터널의 경우는 반경(a)의 4~6배를 적용). <그림 27>에는 주입에 의해 점착력이 증가한 지반에서 터널을 굴착하였을 때, 발생하는 소성영역을 나타낸 것으로 터널 외주면(a=r)에서 r=R까지의 범위가 되고 이 범위는 다음<식 (2)>에 의해 구할 수 있다.

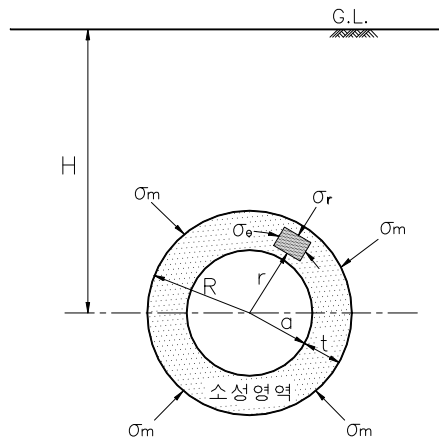


그림 27. 터널굴착시의 응력분포 상태

B. Haimson의 응력평형방정식 :

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} \quad (2 \text{ a})$$

M. K. Hubbert의 파괴조건식 :

$$\sigma_\theta - \sigma_r = 2c \quad (2 \text{ b})$$

$r = R$ 일 때, $\sigma_r = \sigma_m$ 이므로 이 식을 적분하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_r = \sigma_m + 2c \cdot \ln \frac{r}{R} \quad (3)$$

여기서, R(m) : 터널 중심에서 소성영역까지의 거리

c : 상 수

σ_m : 주입범위 외측에 작용하는 수직응력

그리고, $r = a$ 에서는 $\sigma_r = 0$ 이 되므로 <식 (3)>을 소성영역 경계 R에 의해 정리하면 <식 (4)>와 같다.

$$\ln R = \frac{\sigma_m}{2c} + \ln a \quad (4)$$



여기서, 주입범위 외측에 작용하는 응력(σ_m)을 $\sigma_m = (H - R)\gamma_t$ 라고 하면, <식 (5)>는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln R + \frac{R \cdot \gamma_t}{2c} = \frac{H \cdot \gamma_t}{2c} + \ln a \quad (5)$$

여기서, 우변의 H , γ_t , c , a 는 현장에서 구할 수 있는 변수들로서 반복계산에 의해 소성영역(R)을 구할 수 있다. 그리고 토질공학적 개념을 바탕으로 주입범위의 자중을 고려하면, $\sigma_m = (H - a)\gamma_t$ 가 되므로 소성영역 R 은 다음 <식 (6)>과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \text{Exp} \left[(h - a) \frac{\gamma_t}{2c} + \ln a \right] \quad (6)$$

<그림 28>에는 터널 주변의 주입영역 계산 예를 나타내었다.

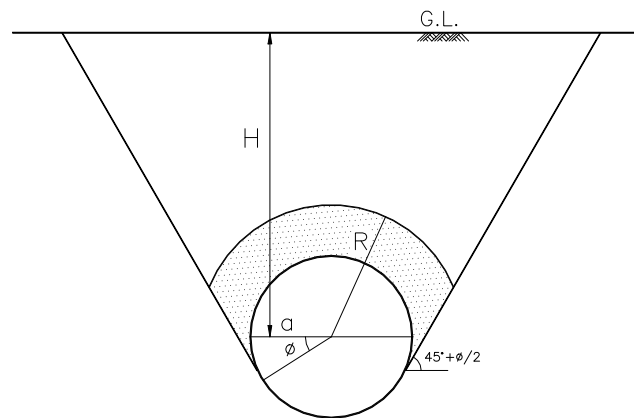


그림 28. 터널주변의 주입 범위 계산 예

(3) 주입재의 선정

주입공법의 적용 목적을 크게 지반강화 및 지수 등으로 구분할 수 있으며, 주입재의 특성을 고려하여 각각의 목적에 적합한 주입재를 선정하여야 한다(<표 31> 참조).

(4) 주입량 결정

주입량은 대상 지반의 성질, 그라우트재의 침투성 등에 따라 달라지기 때문에 주입 대상지반의 조건을 충분히 조사하여야 한다. 그리고 주입율(λ)은 지반의 단위체적 중에 어느 정도 주입되는가를 표시하는 정도로써 원지반에서 주입시험에 의해 결정하여야 하지만, 지반의 간극율, 압축지수, 가압도, 시공법 등에 따라서 변화하기 때문에 초기 계획단계에서는 경험에 의한 결과치를 기준으로 하고, 주입공법이 결정되면 각 공법에서 제시하는 수치를 참고하도록 한다. 일반적으로 주입량 계산은 다음 식에 의해 구할 수 있다(한국지반공학회, 1991).

$$Q = V \cdot \lambda = V \cdot n \cdot d \quad (9)$$

$$= V \cdot n \cdot \alpha \frac{(1 + \beta/100)}{10,000}$$

여기서, n, α : 간극율 및 간극 충전율(<표 32> 참조)

Q : 전체 주입량

λ : 주입율

β : 손실율(10 ~ 30%, 주로 10%)

V : 주입 대상이 되는 지반의 체적

표 31. 주입재 선정 기본 조건

항 목			기 본 조 건	
개 량 목 적	지 수		침투성만 고려, 저점성 용액형 약액(단, 사전처리로서 현탁형 사용)	
	지 반 강 화	침 투	침투성에 뛰어난 고결토는 어느 정도 강도가 필요. 저점성 용액형 약액	
		맥 상	겔시간이 짧고, 호모겔 강도가 큰 현탁형 약액	
		병 용	호모겔 강도가 크고, 고(高)침투성인 약액	
	용 수		· 지하수에 희석되어도 겔시간이 지연되지 않는 약액 · 급결성 고결에 뛰어난 약액(용액 또는 현탁형 ; 2중관 사용)	
복 합	선행주입		겔시간이 짧고, 호모겔 강도가 비교적 큰 현탁형 약액	
	본 주입		선행 주입재와 반응이 좋고, 침투성이 뛰어난 약액	
특수지반			사전에 시험하여 주입재를 선정(산성, 알칼리성지반, 유기질지반)	
기 타			환경 보전성 검토(독성, 지하수 오염, 수질 혼탁 등)	
주) 불연속 암반내 주입의 경우 불연속면의 투수성에 따라 선정되어야 함				

표 32. 충전율 적용 예(일본 국유철도 건설국)

토 질	주입 목적	N치	간극율		간극 충전율(%)
			범위	표준치	
점토, 실트, Loam	지 수, 지반강화	0~4	65~75	70	약 40
		4~8	50~70	60	약 30
		8~15	40~60	50	약 20
모래	지 수	0~10	46~50	48	약 60
		10~30	40~48	44	약 60
		30 이상	30~40	35	약 50
	지반강화	0~10	46~50	48	약 50
		10~30	40~48	44	약 40
모래, 자갈	지 수	10~30	40~60	50	약 60
		30~50	28~40	34	
		50 이상	22~30	26	



(5) 주입공의 배치

설계된 주입량을 효과적으로 주입하기 위해서는 적절한 주입공의 배치가 중요하며, 주입공은 원칙적으로 주입재료의 유효범위가 서로 겹치도록 설계하여야 한다. 주입공의 배치 및 간격은 <표 33>과 같이 단열배치와 복열배치로 구분할 수 있으며, 시공 깊이가 약 15m 이상인 경우에는 배치간격을 최소로 취하고, 이때 지수목적인 경우 정삼각형 복열주입방법을 적극적으로 검토하여 적용하여야 한다.

이외에도 국부적으로 작은 개소에서는 간격을 적게 하며 경우에 따라서는 $D=0.6m$ 이하로 할 수 있고, 지반조건이 맥상주입 예상지역과 점성토 지반에서는 가장 적은 간격을 택하도록 하여야 한다.

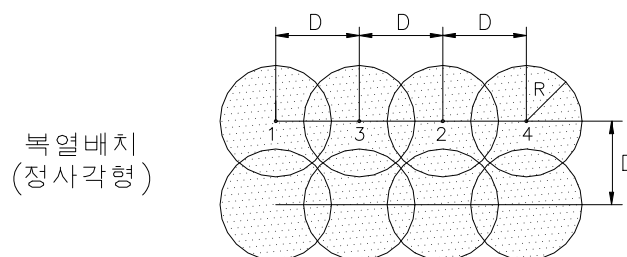
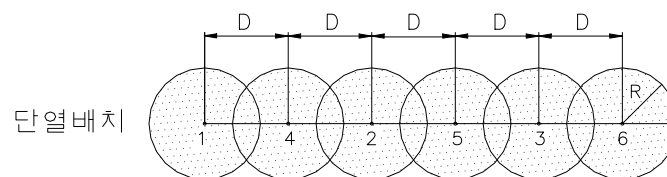
<그림 29>는 토사지반에서의 일본 국유철도 건설국에서 제시한 주입공 배치방식 및 간격, 주입 순서 예를 보여주고 있다.

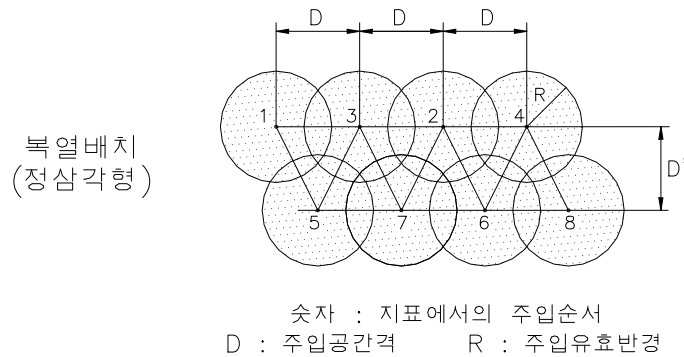
(6) 주입압력 및 주입속도

주입압력은 일반적으로 간극수압의 3~5배 이하로 조절하여야 하며, 주입압을 과도하게 크게 하면 주변지반을 교란시키고, 지표 또는 주입 유효범위 밖으로 이탈하거나 주변 구조물에 나쁜 영향을 미치게 되므로 주의를 요한다.

표 33. 토사지반에서의 주입공 배치 간격(일본 국유철도 건설국)

구 분	벽상주입			괴상주입
	단열 배치	복열 정사각형 / 정삼각형배치	3열 정삼각형 배치	정사각형 배치
지 반 강 화	0.8~1.0m	□ : 1.0~1.2m		1.0~1.5m
지 수	0.6~0.8m	△ : 0.8~1.0m	1.0~1.2m	1.0~1.2m





단열배치	$D < 2R$
복열배치(정사각형)	$D < 2R$
복열배치(정삼각형)	$D' = \frac{\sqrt{3}}{2} R, D < 2R$

그림 29. 주입공 배치 예(일본 국유철도 건설국)

특히 터널공사시의 약액주입은 주로 암반을 대상으로 하기 때문에 토사지반보다는 견고한 경우가 대부분이며, 연결 혹은 단락된 불연속면에 대한 지반보강 및 지수를 목적으로 하기 때문에 고압주입(수압의 2~3배)이 요구되는 경우가 많이 있다.

경우에 따라서는 피압대수층의 경우 피압수가 크게 작용하는 파쇄대 주입에서 1MPa 이상으로 시공한 사례도 보고 되고 있다. 그리고 주입속도는 일반적으로 용액형은 8~20 ℓ/min, 현탁액형은 20~30 ℓ/min으로 하며, 균열에 의한 지반파괴를 방지하기 위해서는 쉘 시간이 긴 주입재를 비교적 낮은 주입속도로 주입하도록 하여야 한다.

3.5 고압분사 교반공법

고압분사 교반공법은 분사메카니즘, 사용기계, 분사압력, 시공방법에 따라 단관, 2중관, 3중관 분사주입공법의 세 가지로 분류되고 있다.

단관 분사주입공법(CCP : Chemical Churning Pile)은 단관로드(Rod)를 사용해서 경화제를 분사시켜 지반을 절삭하고 로드를 회전상승시킴으로써 개량체를 조성하는 방법이며, 2중관 분사주입공법(JSP : Jumbo Special Pattern)은 2중관 로드를 사용해서 경화제와 공기를 분사시켜 지반을 절삭하고 로드를 회전 상승시킴으로써 개량체를 조성하는 방법이다. 마지막으로 3중관 분사주입공법(RJP : Rodin Jet Pile, SIG : Super Injection Grouting)은 3중관 로드를 사용해서 물과 공기를 분사시켜 지반을 절삭하고 로드를 회전 상승시키면서 하단부터 경화제를 충전시킴으로써 개량체를 조성하는 방법이다. 고압 분사 교반공법 중에서 주로 적용되는 JSP 및 RJP 공법의 모식도는 <그림 30>과 같다.

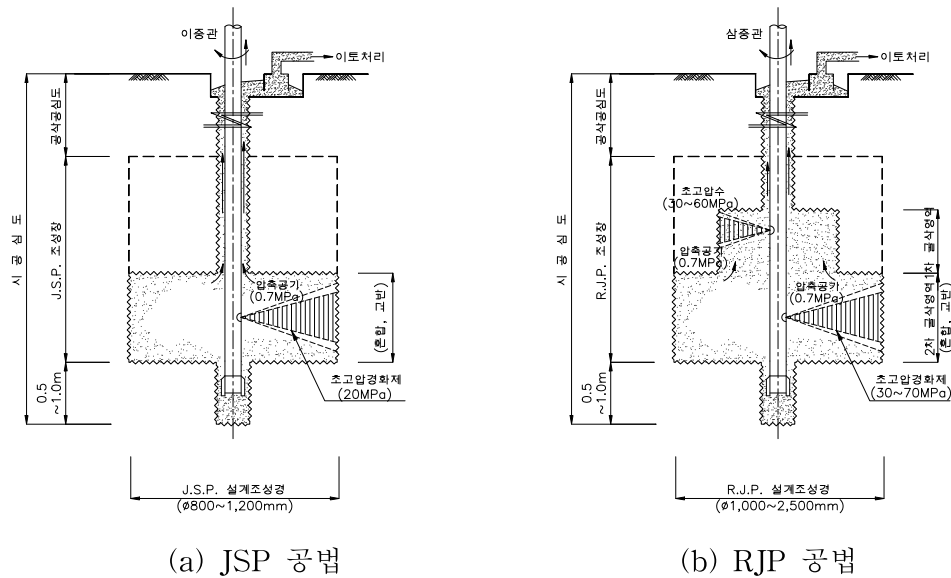


그림 30. 고압분사 교반공법의 모식도

고압분사 교반공법은 시공성 문제로 인하여 주로 지상에서 수직으로 보강하는 경우에 적용되어 왔으나 최근 장비의 발달과 신공법(트레비 제트, 로딩 제트 등)의 개발로 인하여 터널내에서 수평시공이 가능하게 되었으며 국내에서도 서울지하철 5호선(5-42, 5-43구구, 안양천 하부 통과구간 등)과 부산지하철 2호선(모라교 하부 통과구간) 등에 수평 제트그라우팅 공법을 적용되었다.

3.5.1 2중관 고압분사 교반공법

2중관 고압분사 교반공법인 JSP(Jumbo Special Pattern)공법은 광의적 의미에서 제트 그라우팅의 일종이며 그 모체는 일본에서 개발된 교반혼합공법(CCP공법)에서 발전되었다.

CCP 공법은 수평방향으로 고압의 경화재(Cement Paste)를 분사하여 원주상(D=300~500mm)의 고결체를 형성하는 반면에 JSP공법은 에어제트(Air Jet)를 병용시킴으로써 경화재 분출류의 지반 절삭능률을 증진시켜서 고결체의 지름을 크게(D=800~1,200mm)하는 고압(20MPa)분사 주입공법이다. 주입재료는 주로 결합재 밀크계가 중심이므로 약액에 의한 환경오염이 거의 없다.

주입방식은 2중관 룯드에 연결된 제트 노즐을 통하여 한쪽방향의 수평으로 공기와 경화재를 동시에 분사시킨다<그림 30(a)> 참조). 천공후에 시공함으로써 계획된 심도와 범위까지 정확하게 지반개량이 가능하고 주변 지장물에 큰 영향이 없으며 지표면의 융기현상도 없다.

JSP공법의 특징은 목적범위까지만 확실하게 개량함으로써 시공손실이 없어서 경제적이고 소형장비로 좁은 장소에서 시공이 가능하다.

적용지반은 사질토에서 점성토지반까지 시공이 가능하며 표준관입시험 N치를 기준하여 사질토는 N치 30 이하, 점성토는 N치 5 이하인 지반에서 매우 효과적인 공법이다.

3.5.2 3중관 초고압 분사 교반공법

고압분사 기술의 발전으로 분출수력이 커져서 초대형의 지름($D=1,000\sim2,500\text{mm}$)을 갖는 고결체를 조성할 수 있게 되었다. 주입재의 분사압력이 $30\sim70\text{MPa}$ 로 고압이기 때문에 통상 제트 그라우팅이라 부르고 있다.

본 공법은 분사노즐이 상부와 하부에 있으며 상단부에서는 초고압수와 에어제트를 분사하여 지층을 절삭함으로써 일정공간을 느슨하게 한 다음에 하단부에서는 이차적으로 초고압 주입재(Cement Milk)와 에어제트를 분사하여 교반범위를 더욱 확대시켜서 대구경의 고결체를 형성하는 공법이다(<그림 30(b)> 참조). 주입재는 결합재, 벤토나이트 이외에 에폭시, 에틸렌, 수지 등 화학약품이 개발되어 있으나 효용성 및 경제성 측면에서 결합재가 적합하다.

주입방식은 3중관 룯드 선단에 노즐을 장착하고 계획심도까지 천공한다. 천공 후 상단 노즐에서는 초고압 수로 지반을 교반하고 하단 노즐로부터는 주입재를 초고압으로 분사하여 대구경의 균일한 보강체를 조성한다. 필요한 경우 초고압수 분사 노즐과 초고압 주입재 분사 노즐을 동일 방향으로 장착하여 분사할 수 있다.

본 공법의 특징은 선주상의 구근형성이 가능하며 근접건물에 손상을 미치지 않으며 밀착성이 높은 부착개량이 가능하므로 지수성과 연속성이 풍부한 보강체를 얻을 수 있다. 또한 보강체의 강도가 비교적 크고 무진동, 무소음, 무공해이며 경제적이다.

적용지반은 사질토에서 점성토까지 모두 적용할 수 있으며 고압분사로 표준관입시험의 N치 30(사질토기준) 이상의 지반에서도 효과적인 주입이 가능하다.

시공심도가 25m 이상인 경우에는 시공조건을 충분히 검토한 후 공법적용을 결정하여야 한다.

RJP, SIG공법 등이 이 공법에 속한다.

3.6 유도 배수공법

터널의 굴착에 있어서 용출수가 많은 경우에는 막장부붕괴, 슛크리트의 부착 불량, 록볼트의 정착 불량, 터널의 작업능률 저하 등의 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 용출수를 지수하는 방법(대표적으로 약액 및 결합재계 주입공법)이 있고, 용출수를 유도 배수시키는 공법과 양자를 병용하는 경우도 있다.

용출수를 유도 배수하는 공법으로는 물빼기공, 웰포인트 공법, 심정공법 등이 있는데, 지형, 지반조건, 지하수의 상황, 주변의 환경 등 지반조사 결과를 기초로 터널의 공정, 시공법 등을 고려하여 적절한 공법을 결정하여야 한다.

본 해설에서는 유도 배수공법 중 터널에서 적용되고 있는 물빼기공, 웰포인트, 심정공법 등에 대하여 현장 적용 사례를 중심으로 간략하게 기술하였고, 이 공법들에 대한 상세한 사항들은 관련문헌들을 참조하기 바란다.



3.6.1 물빼기공

물빼기공은 일반적으로 터널 내에서 선진시추를 통하여 용출수를 유도 배수하는 방법으로, 수압, 지하수위 저하를 목적으로 한다. 물빼기공의 규격은 <그림 31>에 나타낸 바와 같이 지름 86~116mm, 길이 약 5~8m 정도이며, 이 공법은 터널내 용출수량이 많은 경우에 적합하지만, 유도 배수로 인하여 세립분의 유출 등이 발생할 수 있으므로 스트레이너관과 망사 등의 이용을 충분히 검토하여야 한다.

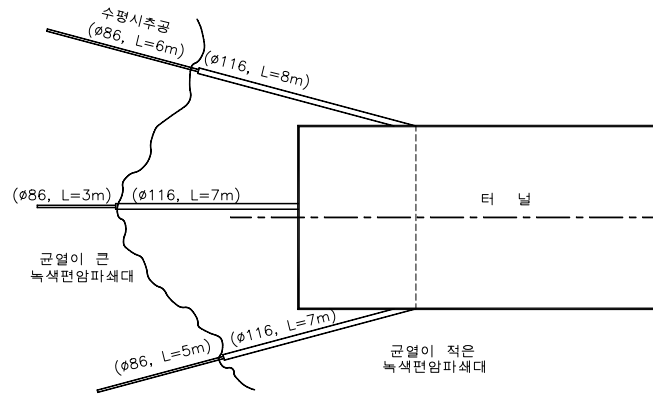


그림 31. 터널 막장면 물빼기공의 설치 사례

3.6.2 웰포인트(Well Point) 공법

웰포인트라 칭하는 집수관을 터널 바닥에 설치하고, 지반에 부압(負壓)을 걸어서 지하수를 유도 배수시키는 공법이다.

일반적으로 웰포인트 공법의 적용은 터널의 토피가 적고 용출수량이 적은 경우에 터널의 굴착과 병행하여 시공할 수 있고, 미고결 사질토 지반에서 균등 계수가 5 이하로 $74\mu\text{m}$ 이하의 세립분이 10~20% 이하의 경우일 때 적합하다. 또한 지하수위 저하 범위는 약 5~8m로써 <그림 32>에 나타낸 바와 같이 터널에서는 상반 굴착 후 설치하거나 혹은 토피가 적은 경우 지표에서 시공할 수도 있다.

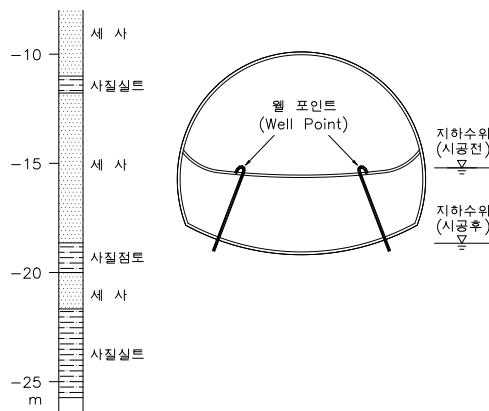


그림 32. 터널 내부에서 웰포인트 공법을 시공한 예

3.6.3 심정공법

이 공법은 일반적으로 지표에서 깊은 정호(Deep Well)를 굴착하여 수중 펌프에 의해 배수하는 공법으로 ‘웰포인트 공법’에 비하여 다소 큰 규모의 유도 배수공법이다. 정호의 외경은 약 300mm 정도로 시공하는 예가 많으며, 이 공법의 특징으로 지표면에서 터널 노선을 따라 일정한 간격으로 설치하지 않으면 배수 효과가 저하되므로 지상 구조물 및 지장물 등이 있는 경우에는 배치에 특히 주의하여야 한다(<그림 33> 참조).

이상과 같이 웰포인트(Well Point) 공법이나 심정공법을 적용하는 경우에는 원지반의 입경 분포, 투수계수, 유도 배수량 등을 종합적으로 검토하여 적절한 공법을 선정하지 않으면 안된다. 즉, 지하수와 더불어 원지반의 세립분이 유출될 수 있으며, 유도배수량이 과다하여 원지반의 함수량을 극단적으로 저하시키면, 오히려 터널 막장면의 붕괴를 야기할 수도 있기 때문에 지속적으로 막장부의 상태를 관찰하고, 배수량을 관리하여야 한다.

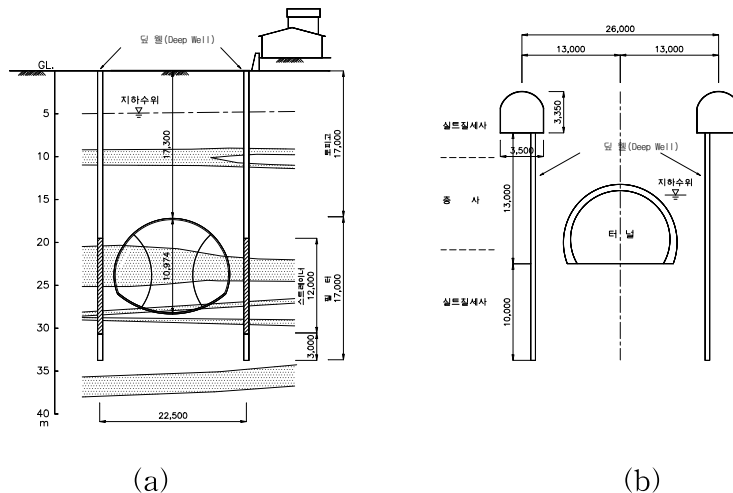


그림 33. 유도배수를 위하여 심정공법을 시공한 예



RECORD HISTORY

- Rev.0('12.12.05) 철도설계기준 철도설계지침, 철도설계편람으로 나누어져 있는 기준 체계를 국제적인 방법인 항목별(코드별)체계로 개정하여 사용자가 손쉽게 이용하는 데 목적을 둬.
- Rev.1('13.03.18) 해설1. 굴착방법 중 터널바닥 여굴량 기준제시
- Rev.2('14.01.10) 철도설계기준(국토교통부고시제2013-757호, '13.12.5)이 개정 고시됨에 따라 개정내용을 반영
- Rev.3('16.05.19) 터널 여굴량 적용개선('16.02.25) 반영(해설편)(설계기준처-1329호)
- Rev.4('17.10.27) 터널 바닥여굴 및 보조도상 콘크리트 최적화 자체연구 결과(기술연구처-1835호, '17.5.8) 반영
- Rev.5('24.06.04) 상위기준(KDS 등)과 체계일치, 현행화 등 시행을 위한 건설기준 고도화 용역 검토사항 등을 반영한 KR CODE 체계 개편 및 개정(심사기준처-715호, '24.06.04)
- Rev.6('25.11.25) 터널에 강관다단 그라우팅 적용 시 강지보 미설치 상태에서 강관다단 그라우팅을 시공하는 등의 문제 발생에 따라 설계시 지보재 간섭여부 및 지질조건을 고려하도록 문구 반영('25년 강원본부 종합감사 처분사항)(심사기준처-4633, '25.11.21.)
- Rev.7('26.07.15) 상위기준(KDS)와 일치화(강관보강 그라우팅 천공각도)(심사기준처-2922, '26.07.15.)