◎—기술칼럼

04

글 | **정경한** (주)도담 E&C 이사
031-420-4440
birdyayaya@hanmail.net

글 | **김창수** 토목기술부 과장
02-3433-7767
conshot@ssyenc.com

RBM 공법을 위주로한 산악터널 수직구 굴착공법 검토

우리 나라는 국토의 70%가 산악지형으로 되어 있는 지질적인 특징으로 인해 도시지하철 뿐만아니라 철도, 도로터널의 건설이 매년 증가하고 있다. 최근 들어서는 주변 자연환경 훼손 최소화를 위한 환경친화적 도로 및 철도 건설정책추진으로 1km 이상의 장대터널 건설이 급증하고 있는 추세이다.

1 검토목적

일반적으로 터널 환기목적에 의한 터널수직구 건설시 필요한 굴착공법(RBM공법)은 일반적인 굴착공법에 비해 차이가 있으며, 이에 대한 공법의 종류 및 굴착방식에 대해 소개하고자 한다.

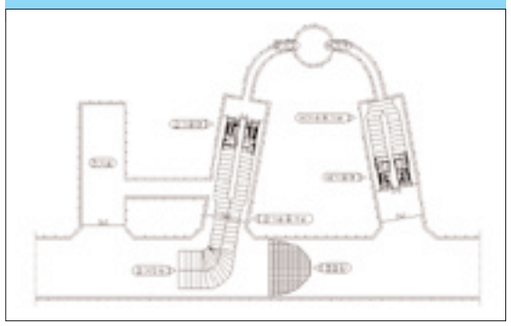
2 설계사례

1) 기본계획

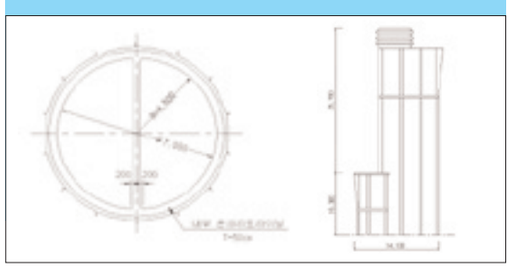
■ 표 1. 현황

위 치	STA.12+210
지반고	293.29m
계획고	120.36m
굴착심도	172.93m
주암종	함각력 암산암
	(1300~1600kgf/cm^2)
환기방식	중앙터널을 이용한 급기 및 배기
수직구 형상	원형단면
내공직경	Φ7,000mm
적용공법	RBM공법

■ 그림 1. 지하환기소 단면도



■ 그림 2. 수직구 일반도 및 단면도



2) 수직구 RBM공법 작업분석

· RBM장비 거치용 기초 및 오수처리용 침전조 설치
· RBM본체 이동 및 설치
· 유도공 천공
· 리밍(확공)작업
· 확공용 장비설치 및 하향방향 확대발파
· 숏크리트, 락볼트등 1차지보 설치
· 수직구 라이닝
· 환기탑 설치 및 부대시설 설치

■ 표 2. 예상공기

구 분	작업속도	비 고
유도공굴착	10m/일	
확공굴착	2.4m/일	확공굴착 : 1.2m/공당 ※ 2회×1.2=2.4m/일
구조물	2.4m/일	
예상공기	5개월	

3 수직갱 건설현황

■ 표 3. 광산내 소구경 수직구 시공 실적(2000년 8월 현재)

시공년도	공사명	직경 (Φ : m)	연장 (m)	암질 (암석강도 : kgf/cm^2)	공법	용도
1980	봉명 #1	2.4	380	화강암(2,000~2,500)	RBM	환기갱
1981	봉명 #2	2.4	250	화강암(2,000~2,500)	RBM	환기갱
1982	동원 #1	2.4	230	사암(1,300~1,700)	RBM	환기갱
1982	동원 #2	2.4	220	사암(1,300~1,700)	RBM	환기갱
1983	함태 #1	2.4	290	사암(1,500~2,000)	RBM	환기갱
1983	경동 #1	2.4	300	사암(1,000~1,800)	RBM	환기갱
1984	경동 #2	2.4	230	사암(1,000~1,800)	RBM	환기갱
1984	함태 #2	2.4	300	사암(1,500~2,000)	RBM	환기갱
1985	한보 #1	2.4	240	사암(1,000~1,800)	RBM	환기갱
1985	동원 #3	2.4	230	사암(1,300~1,700)	RBM	환기갱
1986	대성 #1	2.4	300	화강암(2,000~2,500)	RBM	환기갱
1986	은성 #1	2.4	300	화강암(2,000~2,500)	RBM	환기갱
1987	성주 #1	2.4	225	사암(1,300~1,800)	RBM	환기갱
1987	동양 #1	2.4	270	화강암(2,000~2,500)	RBM	환기갱
1988	삼척 #1	2.4	150	사암(950~1,400)	RBM	환기갱
1989	영풍 #1	2.4	380	석회암(1,000~1,500)	RBM	환기갱
1990	영풍 #2	2.4	380	석회암(1,000~1,500)	RBM	환기갱
1990	삼척 #2	2.4	200	암(950~1,400)	RBM	환기갱
1991	강원 #1	2.4	200	사암(800~2,000)	RBM	환기갱
1991	영풍 #3	2.4	300	석회암(1,000~1,500)	RBM	환기갱
1992	영풍 #4	2.4	240	석회암(1,000~1,500)	RBM	환기갱
1992	경동 #3	3.05	80	사암(800~2,000)	RBM	환기갱
1993	삼척 #3	2.4	100	사암(800~2,000)	RBM	환기갱
1993	무극 #1	2.1	270	사암(1,300?~2,200)	RBM	환기갱
1994	무극 #2	2.1	240	화강암(1,200~1,500)	RBM	환기갱
1994	신예미 #1	2.4	200	석회암(980~1,500)	RBM	환기갱
1994	삼척 #4	2.4	100	사암(1,000~1,400)	RBM	환기갱
1994	삼척 #5	2.4	100	사암(1,000~1,400)	RBM	환기갱
1995	경동 #4	3.05	200	사암(800~1,500)	RBM	환기갱
2000	경동 #5	3.05	348	사암(800~1,500)	RBM	환기갱

■ 표 4. 양수발전소 수압터널내 수직구 시공 실적(2000년 8월 현재)

시공년도	공사명	직경 (Φ : m)	연장 (m)	암 질	공 법	용 도	비 고
75~80	청평양수	2.0 → 4.8	731	대상편마암	RC + NATM 확공	수압터널	사갱
7985	삼랑진양수	2.0 → 6.2	288	안산암/응회암	RC + NATM 확공	수압터널	
8895	무주양수	2.0 → 6.8	883	유문암질 응회암	RC + NATM 확공	수압터널	사갱
9697	산청양수	3.0 → 8.6	91 (#1) 358 (#2)	백립암/편마암	RBM + NATM 확공	수압터널	
9701	양양양수	2.4 → 7.2	395 (#1) 385 (#2)	편마암	RC + NATM 확공	수압터널	
02 예정	청송양수	미정 → 8.3	245	사암/화강암	미정	수압터널	

■ 표 5. 도로터널내 수직구 시공 실적(2000년 8월 현재)

공사명	직경 (φ : m)	연 장(m)	공 법	용 도	비 고
둔내터널	3.05 → 8.4	204	RBM + NATM 확공	환기갱	
죽령터널	2.1 → 6.8	210(#1), 131(#2)	RC + NATM 확공	환기갱	
차령터널	7.05	59	NATM 전단면 하향굴착	환기갱	
육십령터널	5.9 × 5.5	140	NATM 확공 하향굴착	환기갱	사갱, 폐갱도를 선진갱으로 이용
능동터널	3.0 → 6.8	218.5	RC + NATM 확공	환기갱	

■ 표 6. 6가지 터널의 시공실적 비교(2000년 8월 현재)

터널 종류	공법 및 연장	선정 사유	건설 전망
광산	· D&B→ 3개 광업소의 6개 공에서 4,000m시공	작업갱 용도로 굴착	건설 가망성이 불투명
	· RC→ 보고된 바 있으나 확인 안됨		
	· RBM→ 14개 광업소의 30개 공에서 7,000m시공	장비보유 및 관련 시공실적이 다수	
양수발전소의 수압터널	· D&B→	선진갱 굴착 후 확공 시 적용	계속적인 건설 예정
	· RC→ 4개 발전소의 5개 공에서 2,700m시공	장비보유 및 관련 시공실적이 다수	
	· RBM→ 1개 발전소의 2개 공에서 450m시공	지반이 균일하여 처음 시도	
도로터널	· D&B→ 2개 터널의 2개 공에서 200m시공	연장이 짧은 경우와 폐갱도를 선진갱으로 이용한 경우에 적용	급속한 증가 예상
	· RC→ 2개 터널의 3개 공에서 550m시공	지반조건을 고려하여 적용	
	· RBM→ 1개 터널의 1개 공에서 204m시공	상부 접근이 용이한 경우 적용	
철도터널	· D&B→	선진갱 굴착 후 확공 시 적용	급속한 증가 예상
	· RC→ 없음	시공실적 없음	
	· RBM→ 1개 터널의 1개 공에서 240m예정		
지하철터널	· D&B→ 5, 6, 7, 8호선 전 수직구에 적용	연장이 짧고 작업갱 개념	계속적 건설 예상
	· RC→ 없음	시공실적 없음	
	· RBM→ 없음	시공실적 없음	
통신구터널	· D&B→ 모든 통신구터널의 수직구에 적용	연장이 짧고 작업갱 개념	계속적 건설 예상
	· RC→ 없음	시공실적 없음	
	· RBM→ 없음	시공실적 없음	

4 공법검토

■ 표 7. 굴착공법 비교

구 분	Drill and Blast 공법	RC(Raise Climber) 공법	RBM(Raise Boring Machine) 공법
개념도	–		
굴착방법	운반기계 + 인력천공의 하향굴착	운반기계 + 인력천공의 상향굴착	전단면 기계식 상향굴착
보강	굴착과 동시에 라이닝 타설가능	굴착 중 보강불가	굴착 중 보강불가
지수	가능	불가	불가
적용지반	토사 ~ 극경암(제한 없음)	풍화암 ~ 경암	풍화암 ~ 경암(양호한 지반)
적용성	· 굴착단면 : 제한없음 · 굴착심도 : 4m이상(제한없음) · 주로 수평갱이나 짧은 수직구 (지하철, 통신분각구 등)의 굴착에 적용	· 굴착단면 : 2.0m×2.0m(3.0m×3.0m까지 가능) · 굴착심도 : 100 ~ 400m(200m 내외가 최적) · 30 ~ 90°의 범위의 수직도 유지 가능 · 사갱, 복잡한 형태의 굴착 가능 · 절리, 파쇄대 구간 시공곤란	· 굴착단면 : Φ2.4m ~ 3.0m · 굴착심도 : 100 ~ 400m(200m 내외가 최적) · 모든 굴착이 가능하나, 사갱 굴착시 고도의 기술필요 · 절리, 파쇄대 구간 시공속도 저하
안전성	불량	불량	안전
시공성	· 암반강도에 크게 좌우되지 않음 · 문제점 발생시 대처가 용이 · 굴착 및 보강의 동시 시공이 가능 · 장공 굴착이 가능 · 버력처리에 시간이 많이 소요되어 공사기간이 길다 · 용수대책에 대해서 사전대책이 필요 · 소구경 수직구의 굴착이 거의 불가능	· 문제점 발생시 대처가 용이 · 암반의 강도가 매우 큰 경우 RBM공법 보다 효율적일 수 있음 · 낙석, 낙반, 용출수 발생시 매우 불리 · 용출수 발생시 측량이 불가능 · 대심도의 경우 싸이클 타임이 길다	· 여굴량이 적다 · 버력 사이즈가 적어 버력처리 장비가 소형으로도 가능 · 용출수 발생 시에도 작업 가능 · 굴착 중 지반보강이 불가능 · 기계굴착으로 안정성 확보가 가능하나 수직도를 유지하지 못할 경우 추가 작업이 곤란 · 암반강도가 매우 큰 경우 시공 효율이 저하될 수 있음 · 상부 표토를 경화시켜 기계 기초를 해야함

구 분	Drill and Blast 공법	RC(Raise Climber) 공법	RBM(Raise Boring Machine) 공법
경제성	· 버력처리 비용이 비싸다 · 인력굴착으로 인건비 투입이 과다 · 부대시설(환기, 급 · 배수) 등이 필요	· 설비가 적어 초기투자비가 저렴 · 장비운반, 소모품 비용 저렴 · 인건비 투입이 비교적 많음 · 부대시설(환기, 급 · 배수) 등이 필요	· 작업효율이 높음 · 인건비 투입이 작다 · 초기투자비가 상대적으로 고가 · 운반비용, 소모품이 고가
작업환경	· 작업공간 확보에 크게 구애받지 않음 · 발파 및 진동, 소음이 커서 안전상 위험을 내포	· 수직구 상부의 작업공간의 확보가 어려울 때 적용이 이상적 · 하부 작업공간 확보 필요 · 발파 및 진동의 소음이 크며 주변지반을 이완시키기 때문에 낙석, 낙반등 안전상 문제가 있음 · 하향환기이므로 분진이 정체	· 수직구내 인원투입이 없어 안전 · 저소음, 저진동 공법 · 환기장비가 불필요 · 부지확보 필요 및 헬기를 이용한 RBM장비 이동이 필요한 경우도 있음
단가	2,236 만원 / m	2,518 만원 / m	2,180 만원 / m

5 RBM공법 단가 선정

1) 산출조건

· 굴착심도 : 170m

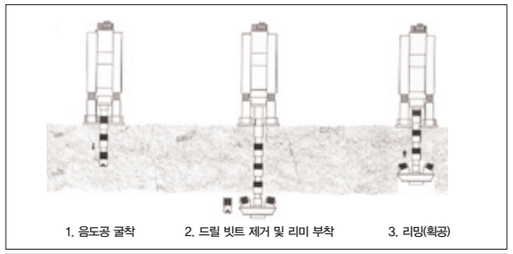
· 수직구 공경 : Φ7m

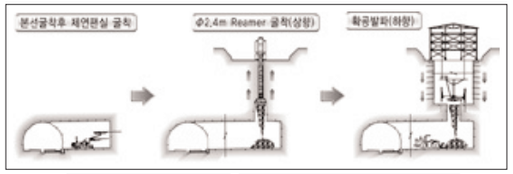
· 지층조건 : 경암(함각력 암산암)

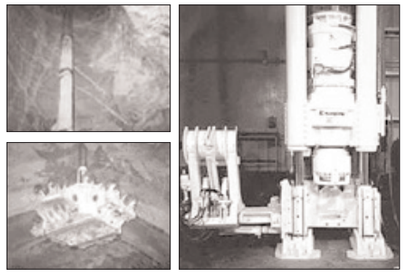
■ 표 8. 단가비교

구 분	Drill and Blast 공법	RC(Raise Climber) 공법	RBM(Raise Boring Machine) 공법
유도공	845,000,000원	– 원	748,800,000원
확갱굴착	2,176,200,000원	3,500,000,000원	2,176,200,000원
라이닝	780,000,000원	780,000,000원	780,000,000원
합계	3,801,200,000원	4,280,000,000원	3,705,000,000원
단위길이당	2236 만원/m	2518 만원/m	2180 만원/m

2) RBM공법 개념도







6 RBM공법 적용시 장점

① RVDS장비를 이용시 수직구 상단의 소요 부지가 감소하여 자연경관 훼손을 최소화 가능

② 수직구내 인원투입이 없어 안전함

③ 갱내버력처리를 통한 분진발생 및 공사용 차량통행으로 인한 교통 혼잡으로 인한 민원예방 가능

④ 저소음, 저진동 공법으로 민원예방 가능함

⑤ 예상수직구 굴착심도가 150m이상의 대심도 지역으로 RBM공법으로 경제적임

7 현장 적용시 사전분석사항

① RBM 적용구간의 시추조사공으로부터 채취된 암편시료에 대한 마모경도 등 암석시험 수행

② RBM에 대한 모델링을 수행하고 암석시험 자료를 입력하여 RBM에 대한 굴진속도를 재분석

③ 기본계획 수직구 보강패턴 분석

④ 수직구 상단에 RBM및 부속기기 운반을 위한 공사용 진입도로의 설치 여부

⑤ 수직구 상단의 자연경관 훼손을 최소를 통한 작업공간 확보 가능성 판단 ⇒ RVDS장비 이용시 5m×6m

RBM 작업순서

1) 작업장 부지조성

작업장 크기(30m×30m) : BACKHOE를 사용하여 표토를 제거하고 풍화암은 BACKHOE BREAKER로 파쇄. 암반의 바닥고르기를 위한 LEG DRILLI로 천공후 화약을 사용하여 발파.

- 장비조합 : BACKHOE(03), LEG DRILLI, COMPRESSOR, 발전기(150kw)
- 인원투입 : 9명(전공1명,착암공3명,착암보조3명,장비기사2명)
- 자재투입 : 경유, 유류저장탱크, 화약

2) 준비공사

① **기계기초 및 침전시설설치** : 시공바닥면의 부석을 제거한 뒤 소형 WATER PUMP 를 사용하여 청소를 하고 6580 x 5000 x 500로 무근콘크리트를 인력비 빔과 인력타설을 한다.(강도는 210kg/cm^2)
유도공 굴착시 발생되는 탁수는 암분을 1차 침전후 굴착에 재사용 하기 위한 침전조는 CON'C무근구조물로하며, 규격은 1.5m x 5.8m x 1m 2단으로한다.(도면참조)

- 장비조합 : BACKHOE(03), WATER PUMP, 바이브레이터, 발전기, COMPRESSOR
- 인원투입 : 8명(콘크리트공2명, 보통인부4명, 목수2명)
- 자재투입 : 경유, 시멘트, 자갈, 모래, 거푸집자재(합판, 판재, 각재, 철선, 못, 박리제)

② **앙카설치** : LEG DRILL을 사용하여 기계기초 위에 ø32mm 구경으로 52개를 천공한후 앙카(ø1″ x 0.6m : 16EA, ø1″ x 1.0m : 36EA)를 시공한다.

- 장비조합 : LEG DRILLI, COMPRESSOR, 발전기
- 인원투입 : 4명(착암공2명, 보통인부2명)
- 자재투입 : 경유, 앙카볼트, 레진, 착암기빗트

③ **WATER PUMP 및 배관설비** : 취수원에서 2″PIPE를 배관하여 중간물탱크(ø150 x 500)까지 배관하고 중간물탱크에서 RBM까지 6″PIPE로 재배관하여 가압 WATER PUMP(75HP, 4단와권펌프)를 설치하여 물공급이 600l/분, 7bar 이어야 한다. 중간물탱크는 RBM작업장 최단거리에 설치하며 탱크 인입구와 배출구에 GATE VALVE와 CHECK VALVE를 설치한다. WATER PUMP 배출구에는 20kg/cm^{2}의 압력게이지를 설치한다.

- 장비조합 : WATER PUMP(75HP), 용접기, 발전기(150kw)
- 인원투입 : 8명(배관공2명, 용접공2명, 보통인부4명)
- 자재투입: 경유, 6″ 강관파이프, 2″ PVC파이프, 압력게이지, 물탱크, 게이트발브, 체크발브

④ **동력설비** : 변압기(500kVA)에서 440V를 RBM까지, 220V를 분전반 까지 배선한다. 현장조명은 할로겐 등을 사용하여 100Lux 이상이어야 하며 수직갱 내부는조도 50Lux를 유지할 수 있도록 형광등 또는 백열등을 설치한다. 분전반에서 가압 WATER PUMP까지 배선한다. 수직갱내 사용연결부는 방수형으로 한다. 각종 조명용 등기구는 누전차단기(ELB)를 통과후 시설한다. 전등선 및 기타전선은 용량을 검토하여 충분한 굵기로 한다.

- 장비조합 : 변압기(500kVA)
- 인원투입 : 4명(전공2명, 보통인부2명)
- 자재투입 : 전기케이블, 분전반, 조명등, 압력게이지, 물탱크, 게이트밸브, 체크밸브

⑤ **레일부설** : 레일부설은 드릴파이프의 이동을 위한 용도로 레일(경레일 KSE 4002:30kg)을 기계기초의 STEEL PAD와 높이를 동일하게 40m 시설한다. 침목간격은 레일이 10m당 20ton의 하중을 견딜 수 있도록 설치하며 레일폭은 80cm이다.

- 인원투입 : 4명(레일공2명, 보통인부2명)
- 자재투입 : 레일, 침목, 이음매판, 스파이크

⑥ **통신시설** : 상부작업장과 하부사무실과는 무선통신시설을 개설하고 하부사무실과 갱내하부 작업장 간에는 유선시설을 설치한다.

- 장비조합 : 기지국 및 차량용 무전기
- 인원투입 : 4명(전공2명, 보통인부2명)
- 자재투입 : 통신용케이블

⑦ **작업장 마루 설치** : 기계기초 위에 STEEL PAD에 동일한 높이에 500kg 정도의 하중을 견딜수 있도록 송판으로 20평 정도 시공한다.

- 인원투입 : 4명(목수2명, 보통인부2명)
- 자재투입 : 판재, 각목, 못

⑧ **기장비 운반 및 설치** : RBM에 사용되는 장비의 총중량은 약 200ton이며 관리도로 가 없는 경우 헬리콥터 또는 케이블카를 설치하고 소운반을 한다. 관리도로가 있다면 장비반입순서는 가압펌프, 운전반, 전기장치, 유압장치, 스틸패드, 펌프기동반, 물저장탱크, 본체, 드릴파이프 순으로 이동설치한다. 본체 SETTING시 STEEL PAD와 본체는 측량을 실시하여 수직과 수평을 이루어야 한다.

- 장비조합 : RBM본체 및 부대장비, 간이고정식크레인(관리도로가 없는경우), 카고크 레인(관리도로가 있는경우), WATER PUMP, 용접기
- 인원투입 : 8명(작업반장1명, RBM운전공2명, 전공1명, 기계공1명, 특별인부2명)
- 자재투입 : 목침목, 경유

⑨ **유도공굴착** : 정확한 굴착을 위해 bit와 2본의 STABILIZER가 암반속으로 완전히 들어갈때까지 자리잡기를 한다. 침전지에서 배출되는 물의 입자농도가 짙어지면 새물로 교환한다.

- 장비조합 : RBM본체 및 부대장치, WATER PUMP
- 인원투입 : 7명(작업반장1명, RBM운전공2명, 전공1명, 기계공1명, 특별인부2명)
- 자재투입 : 트리콘빗트, 스태빌라이저, 롤러빗트, 베스트오라이프

⑩ **리머헤드 조립** : 상부작업장과 하부갱도의 관통(311mm)이 되기전에 REAMER HEAD를 하부갱도 막장까지 반입완료 하여야 한다. 반입된 REAMER HEAD와 상부에서 드릴파이프와 연결을 위해 상 · 하부에 통신시설이 완비되어야 한다. REAMER HEAD 조립 갱도에는 REAMER HEAD 연결작업시 낙석위험을 방지하기 위해 5T의 숏크리트 타설을 한다.

- 장비조합 : RBM본체 및 부대장치, 리머헤드, 카고크레인
- 인원투입 : 8명(RBM운전공2명, 전공1명, 기계공1명, 특별인부2명, 보통인부2명)
- 자재투입 : 경유

⑪ **리밍확공(ø2.4~3.05m)** : 리머헤드 조립이 완료되면 확공을 시작하게 되는데 리머헤드가 암반속으로 완전히 들어갈때까지 자리잡기를 한다.

- 장비조합 : RBM본체 및 부대장치,특장차
- 인원투입 : 7명(작업반장1명, RBM운전공2명, 전공1명, 기계공1명, 특별인부2명)
- 자재투입 : 카터, 스태빌라이저, 스팅거, 베스트오라이프, 볼트, 경유

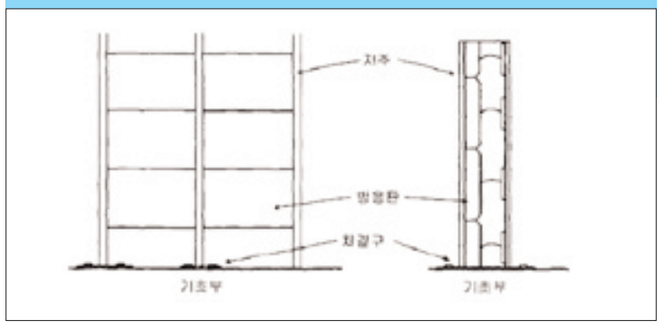
⑫ **장비철수** : 50ton 크레인 및 11ton 카고트럭을 이용하여 소운반 철수한다.

- 장비조합 : 간이고정식크레인
- 인원투입 : 7명(작업반장1명, RBM운전공2명, 전공1명, 기계공1명, 특별인부2명)
- 자재투입 : 경유

3 방음벽의 구조

방음벽은 일반적으로 〈그림2〉와 같이 기초부, 지주, 방음판의 3가지로 구성되며, 지면에 시공된 기초 위에 지주가 앵커볼트로 고정되어 이 지주에 방음판이 클립, 볼트 등으로 고정되는 형태로 시공된다.

■ 그림 2. 방음벽의 기본 구조



4 방음벽의 분류

방음벽은 기본적으로 소음의 전달경로상에 장애물을 설치하여 소음이 직접 전달되지 못하고 우회경로를 통하여 전달되게 하여 전달경로를 길게 만드는 음의 회절감쇠 특성을 이용하여 소음감쇠효과를 얻을 수 있다. 그러나 방음벽은 음원과 접한 면의 상태에 따라 벽 주변의 소음의 영향이 다소 달라지며, 이를 이용하여 방음벽의 효과를 극대화하기 위하여 여러 가지 형태의 벽면과 다양한 재료들이 사용되고 있으며, 각 특징에 따라 분류하면 다음과 같다.

1) 벽면 또는 벽 상단의 음향특성에 따른 분류

종 류	소음 저감의 원리 및 적용위치
반사형	– 방음벽면에서 음파가 대부분 반사하는 방음벽 – 반사음의 영향을 받지 않는 지역
흡음형	– 방음벽면에서 흡음의 원리를 이용하여 음파의 일부를 흡수하는 방음벽 – 설치지역에 제한을 받지 않는다.
간섭형	– 방음벽면 또는 상단에서 입사음과 반사음이 간섭을 일으켜 감쇠되는 방음벽 – 소음원이 수음원보다 높은 지역
공명형	– 방음벽면에 구멍이 뚫려 있고 내부에 공동이 있어 음파가 공명에 의한 흡음에 의하여 감쇠되는 방음벽 – 설치지역에 제한을 받지 않는다.

2) 기능 및 사용재료에 따른 분류

기능별	재질별	형 상
흡음형	금속제 방음벽	철판 또는 알루미늄 판내에 흡음재를 내장시킨 형태
	컬러형 방음벽	금속 방음판 표면에 특수 도장 처리하여 색채 조화성을 가미한 형태
	목재형 방음벽	원주 목재와 판 목재 사이에 흡음제가 내장된 형태
	콘크리트 방음벽	P/C 또는 시멘트 압출판 형태
반사형	투명형 방음벽	플라스틱제 투명판을 프레임에 고정시킨 형태
	목재형 방음벽	가압 방부 처리한 각목을 사용한 형태
간섭형	소음 감쇠기	소음이 회절 전파될 때 간섭 현상을 이용하여 소음을 저감하는 형태
	VeSS 공명형	패널 내부에 공명 흡음 구조를 만들어 감음을 유발하는 형태
공명형	방음블럭	시멘트 블록 형상을 이용하여 공명 흡음 구조를 만들어 감음을 유발하는 형태

3) 형상에 따른 분류

종 류		특 징
직립형		노면과 수직으로 설치하여 회절 감쇠를 얻기 위한 목적으로 사용된다.
절곡형	경사형	절토부 등 지하 구조의 도로 등에서 사용할 수 있다.
	꺾임형	방음벽의 높이를 낮추기 위하여 방음판의 윗부분을 음원측으로 꺾어 기울이는 방법으로 주로 도로에 사용하고 있다.
	역L형	꺾임형과 같은 형태이며, 벽의 높이를 낮추어도 적립형 이상의 효과를 얻을 수 있도록 한 것이며, 철도의 소음 대책으로 사용할 수 있다.
	원호형	꺾임형과 같은 효과를 가져오며 주로 경관을 위한 목적이나 운전자에 대한 압박감을 줄이기 위한 목적으로 사용하며 특수한 장소(구조물, 철도)에 설치하여 사용할 수 있다.
방음터널		주변 지형여건상 방음벽으로 적절한 방음효과를 얻기 어려운 지역에 사용된다.

방음벽의 벽면에 사용되는 재료의 특성과 방음벽의 형상에 따라서 방음효과와 시공성, 경제성 등이 차이가 있으며, 그 성능을 비교하면 다음과 같다.

(1) 방음벽의 재질별 장 · 단점 비교

구분	금속재	투명형	목재	콘크리트
수음원 측 방음효과	○	○	○	○
소음원 측 방음효과	○	×	○	×
재료비	△	×	×	○
외관	△	○	○	×
시공성	○	○	×	×
내구성 및 유지 관리	○	×	△	○

(2) 방음벽 형태별 장 · 단점 비교

형 태		방음효과	시공면적	시공성	설치비용	유지관리
직립형		△	○	○	○	○
절곡형	말단	△	×	△	△	×
	중간	○	△	△	△	×
	복수	○	×	×	×	×
터널형		◎	×	×	×	×

5 방음벽의 음향설계

음파의 파장은 1.7m~1.7cm 범위이므로 큰 회절을 일으켜 장애물 뒤에도 쉽게 전달된다. 장애물 뒤로 회절되는 음의 세기는 파장이 클수록 크고 파장이 짧을수록 작다. 이와 같이 음이 전파되는 도중에 장애물이 있을 때 그 장애물이 파장보다 작은 경우에는 배후로 많이 전달되지만 파장에 비해 장애물이 아주 클 경우에는 회절은 현저하게 저하된다. 즉 고주파음은 낮은 벽으로도 효과가 있지만 저주파음의 경우에는 높은 벽이 아니고는 효과를 거의 기대할 수 없다. 따라서 방음벽 설계시에는 반드시 소음의 주파수분석을 실시하여야 하며, 도로, 철도 등 소음 발생원 주변에 방음벽을 시공할 경우 그 효과는 방음벽으로 사용된 벽체의 투과손실, 방음벽 상단과 측단을 통한 회절감쇠, 지표면 영향에 의한 감쇠, 방음벽 이외의 구조물에 의한 감쇠 등에 의해 결정된다.

1) 방음벽의 투과손실

사용될 벽체의 투과손실은 1/3 옥타브 대역별로 방음벽에 기대하는 효과보다 10dB 이상은 되어야 한다. 일반적으로 방음벽 설치에 의해 기대할 수 있는 효과는 최대 15~20dB 이므로 사용 벽체의 투과손실은 25~30dB 이상 되어야 한다.

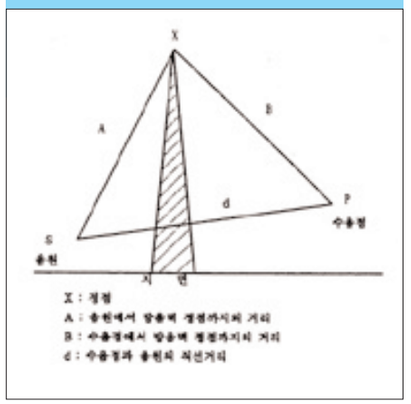
2) 방음벽 설계시 음원 및 수음점

① 음원 : 무한길이의 선음원
② 음원의 높이 : 노면에서 0.5m
③ 방음벽에서 음원까지의 거리 : 가장 가까운 차선의 중심선까지의 거리와 가장 먼 차선의 중심선까지의 거리의 곱의 제곱근, 단 콘크리트 중앙 분리대가 있을 경우에는 편도 차선에 대하여 적용
④ 수음점 높이 : 지면 또는 보호대상지점의 바닥에서 1.5m

3) 방음벽의 높이

방음벽의 효과는 주로 음의 회절감쇠에 의하여 얻어진다. 〈그림3〉과 같이 벽의 길이가 무한히 길고 벽의 투과손실이 아주 크다고 가정하면 음이 수음점에 도달하기 위한 경로는 방음벽 상단을 넘어 회절하는 회절경로 뿐이다.

■ 그림 3. 방음벽의 회절경로



벽의 회절감쇠는 회절각에 관계되고 회절각이 클수록 감쇠량이 크다. 따라서 벽의 높이가 증가하거나 음원 또는 수음점이 벽에 가까울수록 회절각이 크게 되고 감쇠량이 커진다. 실제 회절감쇠량 계산에는 회절각 대신 경로차를 이용하여 계산한다. 경로차(δ)는 (식1)과 같이 음이 직접 전달될 때와 회절되어 전달될 때의 전파경로 차이로 정의된다.

$$\delta = (A + B) - d \quad \text{———— (1)}$$

회절감쇠에 의한 벽의 삽입손실의 크기는 경로차뿐만 아니라 해당 음의 주파수와 밀접한 관계가 있다. 실제 벽의 삽입손실은 (식2)와 같이 경로차와 음의 파장을 고려한 프레즈넬 상수(Fresnel Zone Number, N)로 구한다.

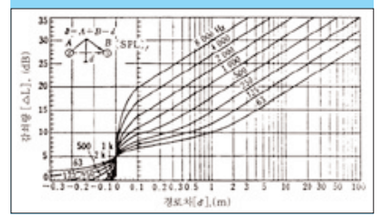
$$N = \frac{\delta}{\lambda / 2} = \frac{\delta \cdot f}{170} \quad \text{———— (2)}$$

여기서, δ : 경로차, λ : 음의 파장 (= C / f), C : 음속(340m/sec), f : 주파수

이로부터 회절감쇠량, 즉 벽의 삽입손실은 다음 식으로 구할 수 있으며, 이것을 경로차에 따른 각 주파수별로 나타내면 〈그림4〉와 같다.

$$\Delta L = 20 \lg \left(\frac{\sqrt{2\pi \cdot |N|}}{\tanh \sqrt{\pi \cdot |N|}} \right) + 5 \quad \text{— (3)}$$

■ 그림 4. 방음벽의 삽입손실



여기서, 주어진 식과 그림은 음원과 수음점이 자유공간에 있는 경우에 대한 것으로써 실제 건설현장은 음원과 수음점이 지상에 있는 경우이므로 f가 0 일 때 감쇠량이 0 이 되도록 상기의 값에서 5dB를 뺀 값을 이용해야 한다.

4) 방음벽의 길이

일반적으로 방음벽의 삽입손실은 벽이 무한히 긴 것으로 가정하여 벽 상단부를 통한 회절손실만 고려하여 설계된다. 그러나 현실적으로는 방음벽의 길이가 유한하므로 벽의 양 측단으로부터 수음점으로 입사되는 음의 영향을 고려하여 이것이 벽의 상단을 통한 회절손실보다 충분히 크게 되도록 벽의 길이가 결정되어야 한다.

◎ 참고자료
1. 정일록 외3인, 「최신 소음 · 진동 – 이론과 실무」, 신광문화사, 2002
2. 한국토지공사, 「단지내 도로교통소음 예측 및 개선에 관한 연구」, 2002
3. 한국도로공사, 「소음예측기법 및 방음시설 설계기준 연구」, 2001
4. 한국소음진동공학회, 「소음 · 진동편람」, 1995
5. 정일록, "방음벽의 효과산정 및 설치현황", 한국소음진동공학회지 제3권 제3호, pp.199~201, 1993.09