

도심지 지하철 터널에서의 정밀 굴착 및 안전시공사례



홍창표
(주)대우건설 대전 지하철 1호선
6공구 현장소장



정영수
(주)대우건설 대전 지하철 1호선
6공구 공사차장



김영근
(주)대우건설 기술연구소
토목연구팀 책임연구원

1. 서론

국내 대도시에서 지하철 공사가 많이 시행되고 있어 여러 가지 지반 조건에 따라 다양한 시공 기술이 적용되어 왔으며 그러한 기술과 경험들이 축적되어있다. 본 고에서 소개하는 대전 지하철 6공구 현장의 사례는 대전의 구 도심 중앙부를 관통하는 중앙로를 따라 연장 거리 1.2KM에 달하는 노후된 지하상가를 병행하고 하천과교량을 통과하는 도심지 지하철 터널공사로 터널 발파에 의한 지하상가 및 주변 건물에서 집단 민원을 방지하고자 당 현장에 적용한 제어 발파방법과 계측결과를 기술하였고 기본적으로 터널에 대한 설계는 예비적 설계개념으로 된 것이므로 굴착중 축적된 현장의 기술적 경험을 바탕으로 막장 관찰 및 계측

자료를 통하여 터널의 안전을 확보하면서 불필요한 공정을 삭제하고 최적의 터널 패턴 적용 및 지반보강공법을 변경하여 공기절감 및 합리적인 공사를 추진하였으며 현장 특성상 공사추진에 애로점 및 대처 방안에 대하여 정리하였다.

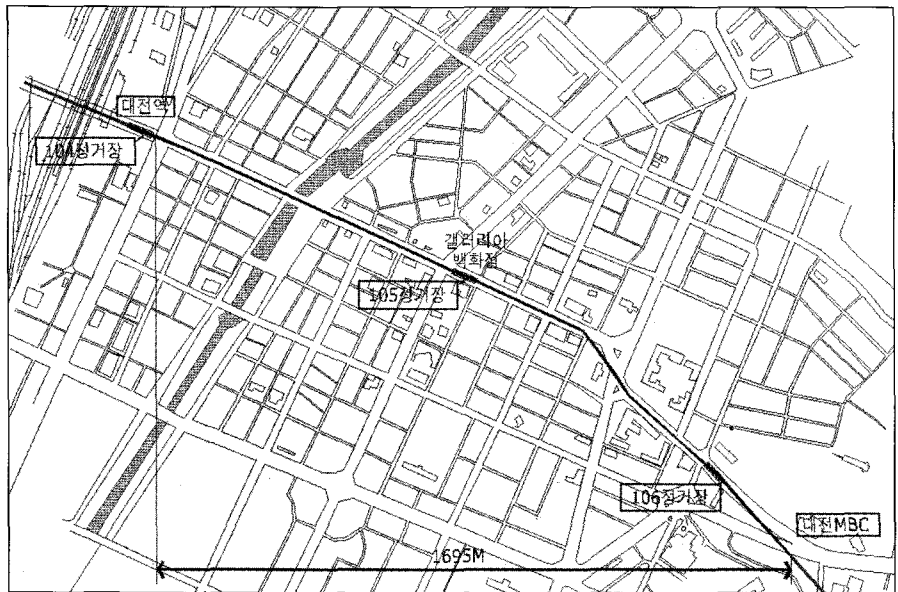


그림 1. 노선도

2. 지반 특성 및 터널설계

2.1 공사개요

- 현장 위치: 대전역~MBC문화 방송국(그림 1)
- 총 연장거리: 1700M
- 지하철 방식: 정거장, 환기구, 상, 하행선 분리 단선 병렬 터널.
- 정거장: 2개소, (L=226M) 환기구: 5개소
- 터널 총 연장거리: 1,459M
- 공사 기간: 97. 12. 01 ~ 2005. 12. 31
- 공사비: 94,508백만원

당 현장은 현재 57%의 공정진행율을 보이고 있으며 정

거장 2개소중 1개소는 토공굴착완료후 정거장 구조물의 지하4층 시공중에 있으며 1개소는 현재 6단 굴착후 지하상가하부를 굴착하기 위한 TRM작업 준비중이다.

터널구간은 상·하행선 총연장 1459M중에서 1429M를 굴착하였으며 터널라이닝 구조물이 792M완료되었으며 잔여구간의 구조물작업이 추진중에 있다.

2.2 지반특성

당구간의 지질조건은 중생대 주라기에 관입한 화성암류와 백악기말의 암맥류가 분포하고 있으며 터널이 통과되는 부분은 엽리상 화강암층으로 N20~30E/50~70NW방향의 편마구조를 가지고 있는 특징을 보이고 있다(그림 2).

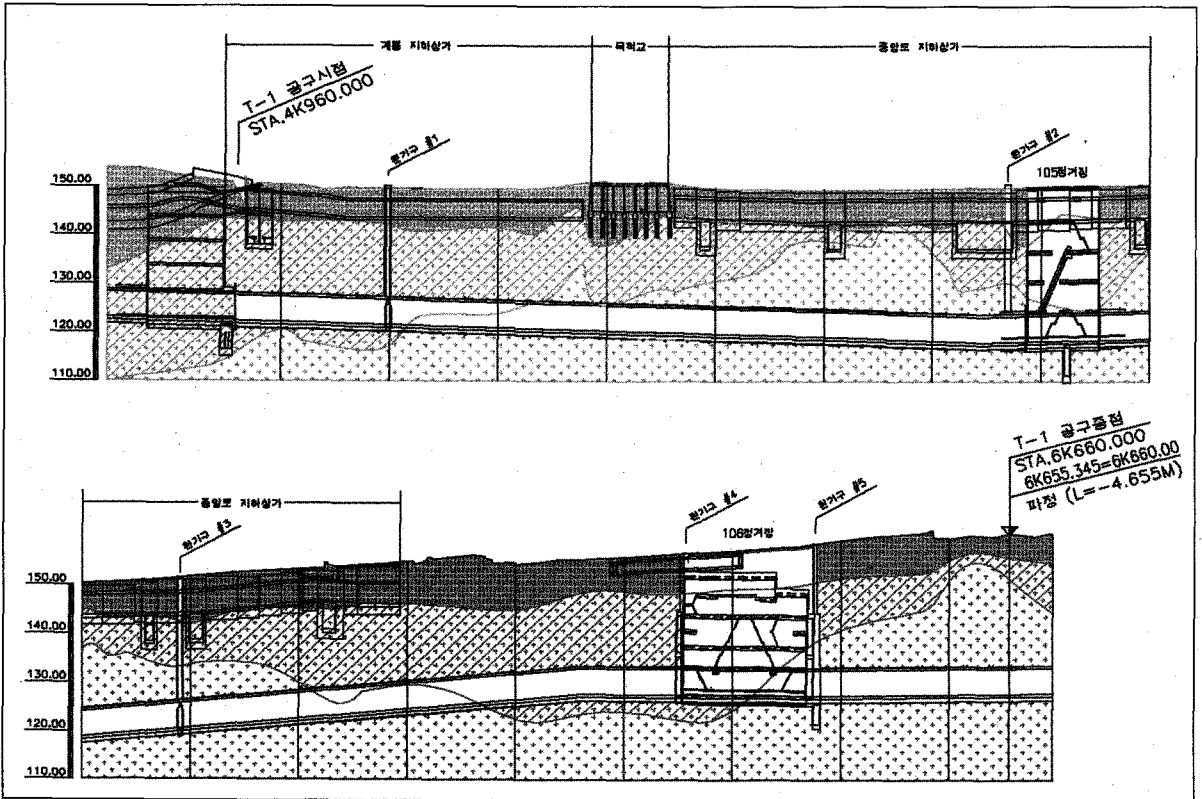


그림 2. 지질 종단도

대전역앞 계룡지하상가구간중 일부와 목척교 하부구간의 터널 크라운 부위 상단은 풍화암층으로 되어있고 지하상가 대부분의 구간은 암반층으로 지하상가에 근접하거나

접하여 있다.

2.3 터널지보패턴(그림 3)

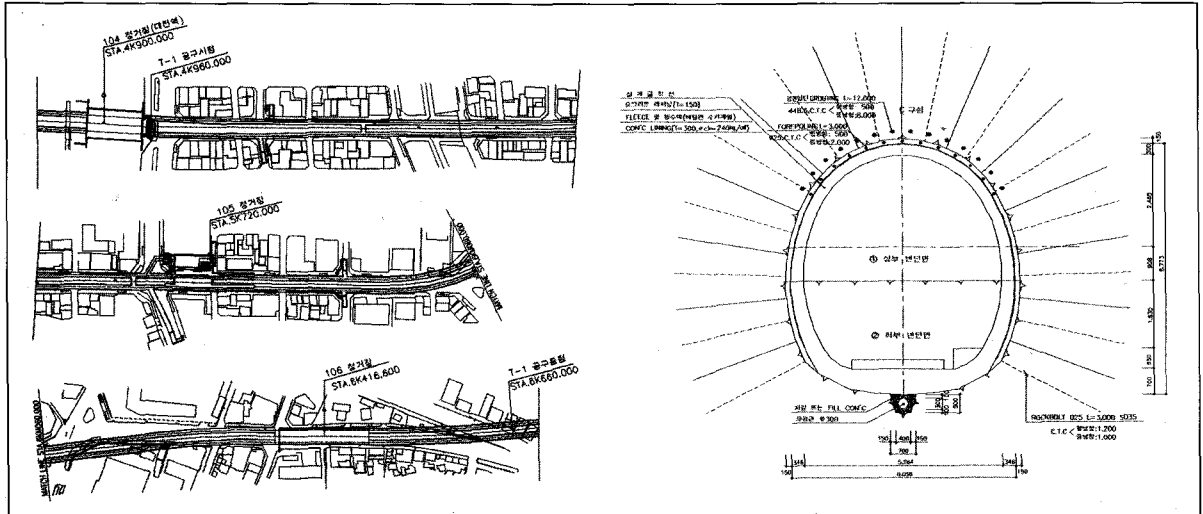


그림 3. 터널 표준도

표 1. 표준 지보패턴

구분	PSU-5	PSU-4	PSU-3	PS-3	PS-4	PS-5	PSW-4	PTS
구간특징	지하상가구간	지하상가구간	지하상가구간	일반구간	일반구간	일반구간	목척교구간	지하상가 정거장터널
적용지층	경암	연암, 보통암	풍화암	풍화암	연암, 보통암	경암	연암, 보통암	연암, 보통암
굴진장	1.2M	1M	0.8M	1M	1.2M	1.5M	1M	1M
SHOT	1.2차	1.2차	1.2.3차	1.2.3차	1.2차	1.2차	1.2차	1.2.3차
CRETE	(10cm)	(15cm)	(20cm)	(20cm)	(15cm)	(10cm)	(15cm)	(20cm)
R/BOLT	RANDOM	13/14EA	10EA	10EA	13/14EA	RANDOM	13/14EA	8.5/6.5EA
보조공법		F/P CTC=2.0M	F/P CTC=1.6M	F/P CTC=2M			F/P CTC=2M	F/P CTC=2M
		강관일단 그라우팅 14EA/SPAN 1SPAN: 8M (일부적용)	강관일단 그라우팅 18EA/SPAN 1SPAN: 8M	강관일단 그라우팅 18EA/SPAN 1SPAN: 8M			LWG/T B=3M 상부반단면 강관G/T 14EA/SPAN 1SPAN	강관G/T 17EA/SPAN 1SPAN/8개
연장거리 (M)	757	742	430	434	228	120	200	78

표 2. 지반 및 현장조건을 고려한 터널시공 변경사례

변경일자	내 용
1999. 4. 16	환기구 #3(급,배기) 접속 본선터널 지반보강공 변경
1999. 10. 1	#3작업구 연결상행선 종점(PSU-4구간)F/P 시공조정
1999. 10. 13	#2작업구(하행선)본선횡갱 터널 접합부 강관G/T시공검토
1999. 10. 13	본선터널 상행선 종점(PSU-4구간:5K980)F/P 조정
1999. 11. 1	#2작업구(하행선)횡갱, 본선접속 터널구간 지반보강공 변경
1999. 11. 2	#1작업구(하행선)추가 지반보강 승인
1999. 12. 13	#1작업구(상행선)연결 본선터널구간 지반보강방안 변경
1999. 12. 30	#1환기구 연결횡갱 및 본선터널 지반보강 변경
2000. 1. 5	106정거장 본선터널 시점궤구부 FORE POLING 삭제
2000. 1. 7	#3환기구 상·하행선 종점측 본선터널 패턴 변경
2000. 1. 17	무지보 터널구간 여굴처리 시공방안
2000. 1. 21	#3환기구(배기)종점측 막장 F/P시공
2000. 1. 27	#1환기구(배기)시점측 터널 강관그라우팅 실시
2000. 2. 14	#1환기구 연결횡갱 및 본선터널 지반보강
2000. 2. 14	#3환기구 상행선 터널패턴 변경
2000. 2. 16	#1환기구 횡갱(STA.5K129.3)보조공법 변경에 대한 보완
2000. 2. 21	#1환기구(배기)종점측(STA5K150~220)지반변경
2000. 2. 21	#1환기구 횡갱(STA.5K129)보조공법 변경
2000. 2. 24	#3환기구 상,하행선 터널 지반보강 변경
2000. 3. 2	#3환기구 하행선 시점측 터널보강
2000. 3. 2	본선터널 횡갱접속부 무형지보 시공방안
2000. 3. 7	#2환기구 하행선 시점측 터널패턴 변경
2000. 3. 8	#2환기구 상행선 종점측 터널시공방안
2000. 3. 8	106정거장 시점부 굴착방법 변경
2000. 3. 31	#2환기구 하행선 시점측 터널패턴 변경
2000. 3. 31	#2환기구 연결 하행선의 본선, 횡갱접합부 시공방안 보완
2000. 4. 14	#1환기구 하행선 연결 본선터널패턴 변경
2000. 4. 21	#2환기구 하행선 시점측 터널패턴 임시변경
2000. 5. 8	#2환기구 하행선 시점측 터널패턴 변경
2000. 5. 17	본선터널(하부) 굴진장 변경 승인
2000. 5. 18	#2환기구 하행선 시점측 터널패턴 임시변경
2000. 5. 30	#2환기구 하행선 시점측 터널패턴 임시변경
2000. 6. 9	본선환기구 #1 상선터널 패턴 변경
2000. 7. 14	#2환기구 상행선 시점측 터널패턴 변경
2000. 7. 18	본선환기구 #1 상선터널 패턴 변경
2000. 7. 17	#1환기구 하행선 종점측 터널패턴 변경
2000. 8. 17	#2환기구 상행선 터널패턴 변경
2000. 9. 22	#1환기구 상,하행선 종점측 터널 강관G/T 실시
2000. 9. 29	#2환기구 시점측 본선터널 PSW-4구간 지반보강 변경
2000. 10. 13	#2환기구 상행선 시점터널 W/M 추가설치
2000. 10. 24	#1환기구 하행선 시점측 본선터널 지반보강 방안 변경
2000. 10. 30	정거장터널(PSW-4)상행선구간 강관 및 F/P시공
2000. 11. 1	상,하행선 정거장터널 잔여구간 강관단단G/T 검토
2000. 11. 3	#2환기구 하행선터널 보강방안 승인
2000. 12. 19	#2작업구 상행선시점, #1작업구 하행선종점 강관G/T시공안 변경
2001. 1. 29	#1,2환기구간 하행선 터널 관통부 강관G/T 및 시공방안

당 현장은 노후된 지하상가에 터널굴착으로 인한 영향을 최소화하기 위하여 단선 병렬터널방식으로 설계가 되었으며 지질조건에 따른 터널패턴등급을 일반적으로 적용하는 기준보다 1단계 올려 설계되었으며 표 1과 같다.

3. 터널굴착공법변경

통상50~100M간격으로 지질조사한 자료로 터널의 설계가 이루어지기 때문에 터널설계는 예비적 설계개념을 가지고있는 특성이 있다. 그러므로 터널 굴착 진행중 현장경험이 많은 전문가기술자를 통하여 막장관찰 및 계측자료를 분석하여 설계도면에 의한 굴착패턴항목이 해당지질조건과 적합한가를 FEED BACK하여 관리하고 공정중 불필요한 요소는 삭제하거나 변경하여 터널공사를 추진하는 것이 합리적이다. 특히 굴착공정중 지반보강공법공정은 터널굴착시 막장의 자립시간 확보 및 붕괴의 위험으로부터 안전을 확보하고자 설계되는 것으로 굴착중 관찰되는 지질조건에 따라 적절하게 안전성을 확보되는 상황에서 가감을 하는 게 타당하다.

당 현장에서는 1.45KM의 터널을 굴착하면서 거의 전구간에 걸쳐 당초설계도면에 명시된 터널굴착 공법중에서 총 46건의 변경을 추진하였으며 공사비의 약 20여억원을 절감하였고 공기를 4개월 정도 단축하여 안전사고 없이 터널굴착을 완료하였다.(표 2)

4. 시공중 문제점 및 대책공 사례

- 1) 터널에서 근접 위치한 지하상가의 민원을 방지하기 위한 제어발파실시.
- 2) 횡갱을 통한 상, 하행선 분리형 본선터널의 정밀 굴착시공
- 3) 하상폭 100M의 대전천 목적교구간 안전통과

4.1 도심지 제어발파

4.1.1 당초 터널발파 설계안(그림 4)

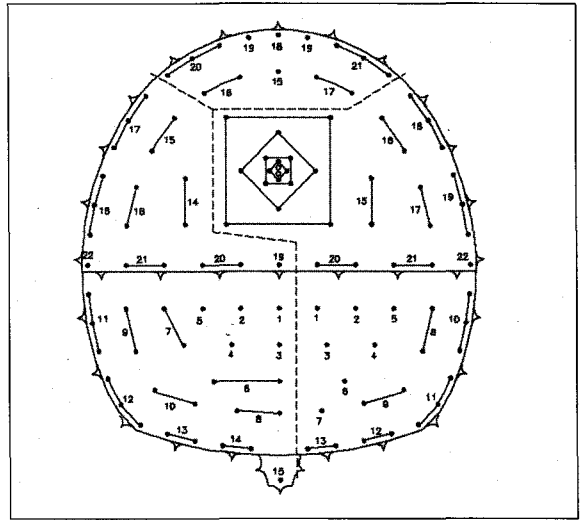


그림 4. 터널 발파 패턴도(설계)

- 천공간격 : 80cm~100cm
- 사용뇌관 : 전기식 뇌관 : 심발공 : MS-4 ~ MS-17
확대공 : DS-2 ~ DS-9
- 공당 장약량 : 300~550g/공
- 지발당 장약량 : 300 ~ 1100g

4.1.2 문제점

터널주변을 감싸고 있는 암반층이 RQD 80~100에 가까운 매우 신선한 상태의 화강암질의 경암층으로 지질주상도상으로 보면 대부분의 지하상가 구간이 지하 8~10M 정도까지 상승되어 지하상가 밑부분까지 접하여 있거나 근접하게 분포하고있어 터널발파시 발생하는 진동과 소음이 암반을 타고 감쇄됨이 없이 그대로 지하상가에 전달되는 지질조건과 터널과 지하상가간의 거리가 17M되고 중앙로변의 큰빌딩 경우 지하3~4층의 기계실은 불과 10M 정도밖에 이격되어 있지 않아 제어발파 방안 수립이 불가피 하였으며 발주처에서 지하상가의 많은 통행인과 상가

의 집단민원을 우려하여 타도시의 일반관리 기준치 (상가지역 : 1KINE)보다 훨씬 엄격한 0.3KINE 범위내에서 발파가 되도록 요구하였다.

4.1.3 해결방안

막장면의 임반은 매우 신선한 경암층으로 전기식 뇌관의 지발효과만으로는 공당장약량이 매우 많아져서 진동, 소음을 제어할 수가 없었다.

당현장에서 해결한 제어 발파방법은 천공간격을 당초 80~100cm에서 40~45cm로 축소시켜 1막장당 상부 반 단면에 170~180공의 천공수를 늘려 공당 장약량을 축소 시켰고 뇌관이 중복 발파되지 않도록 다단 발파기(BH175-10PT)를 사용하여 1막장면을 8개의 구역으로 분할하고 구역당 17ms간격(17/1000초)으로 연속적 시치를 두고 발파되도록 하고 MS뇌관과 LP뇌관을 사용하여 170여공이 1개도 중복되지 않고 7~8초에 걸쳐 발파되도록 하였다.

시행한결과 지하상가에서 측정된 진동, 소음치가 0.3~0.4KINE 범위로 잡히고 소음은 지하상가내의 소음과 합성되어 정확한 소음량 측정이 어려웠지만 통상 80dB 범위내에서 측정되었으며 지하 상가에 통행하는 사람과 각 점포 상인들의 영업에 전혀 지장주지 않았고 1.2KM전구간을 민원없이 터널굴착을 완료하였다.

4.1.4 제어 발파 방안

① 전기식 뇌관 종류별 발화 시차

- MS뇌관 : 0번~19번 : 번호당 20/1000초 간격으로 발파 (0.02초간격), MS뇌관으로 0~0.38초까지 조정가능
- LP뇌관 : 4번~10번 : 100/1000초 간격으로 발파 (0.1초간격)
11번~20번 : 200/1000초 간격으로 발파 (0.2초간격)
21~25번 : 500/1000초 간격으로 발파 (0.5초간격)

LP뇌관으로 발파시간을 0.4~7초까지 조정가능

② 다단발파기 (BM175-10PT)(그림 5)

발파구역을 최대 10개 분할하여 뇌관 배선을 연결하고 각배선당 발파되는 시차간격을 임의로 조정하여 연속발파를 할수있는 장비로서 한 구역당 시차간격을 0~999/1000초까지 1MS간격으로 조정이 가능하다.

전기식 뇌관의 시차분할 단점을 보완하여 비전기식 뇌관을 사용한것과 같은 효과를 얻으며 도심지내의 제어발파를 하기위해서는 필수적이다.

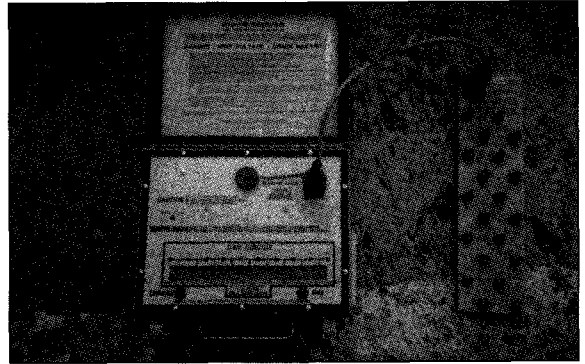


그림 5. 다단발파기(BH175-10PT)

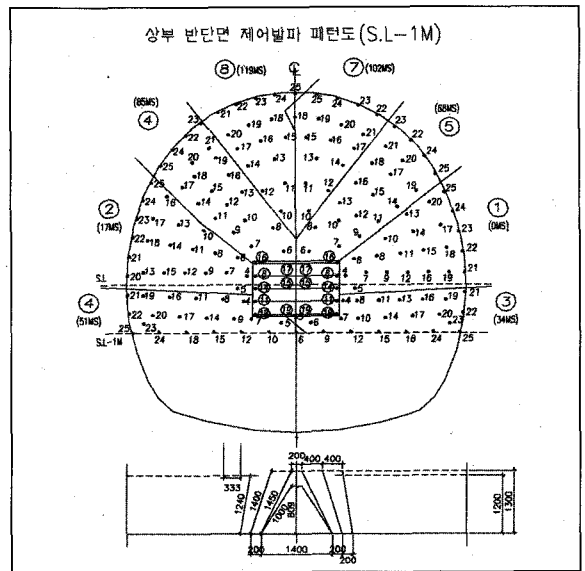


그림 6. 제어 발파 패턴도

③ 현장에서 실시한 제어발파(그림 6)

- 상반 반단면 : (SL-1M) : 31M² 공단간격 : 40~45cm
 - 하반 : 30~40공
 - 뇌관수량 : 상반 : 170~180EA
 - 뇌관번호 : MSO번에서 LP25번까지 사용
 - 1공당 화약사용량 : 1개당 화약량(뉴마이트플러스) : 0.125kg
 - 1공당 1개에서 최대3개까지 사용 : 0.375kg
 - 상반1막장 발파시 화약사용량 : 40~50kg (평균 45kg)
 - 제어발파비교
- 제어발파에서 가장 중요한 요인은 공당간격, 천공장, 1공당 화약사용량이므로 진동을 줄이기 위해서는 막장면에 천공수를 늘려 간격을 줄이고 공당 화약 사용량을 줄이고 중복 발화가 되지 않도록 다단 발파기로 발화 시차를 조정하는 것이다.
- 계측결과
 - 지하상가 : 0.3~0.4KINE

표 3. 제어발파 시공안

	당초설계	제어 발파 시공안	비 고
공당간격	700 ~ 800	400 ~ 500	
공당장약량	300 ~ 550	250 ~ 375	

4.2 횡갱을 통한 상, 하행선 단선 병렬터널의 정밀 굴착 시공

당현장은 지하상가로 인하여 도로상에서 본선터널로 직접작업구(환기구)가 연결되지 못하고 횡갱을 이용하여 본선터널로 굴착이 진행되는데 다음과 같은 시공상 어려움이 있었으나 무난히 해결하였다.

각 환기구별로 협소한 수직구 굴착후 횡갱을 따라 본선터널과 접속되어 터널굴착 작업이 양방향으로 진행되고 600M 떨어진 각 환기구간에 터널로 정밀하게 관통이 되어야 하였다(그림 7).

정밀굴착을 위해서 조치한 사항은 다음과 같다.

당 현장의 시·종점 구역별측정, 인접공간간 측정들을 인공위성을 이용한 G.P.S 측량을 공사착수 전에 실시하여 지상 기준점을 정밀하게 설정하였다.

길이 15M, 깊이 35M의 협소한 수직구를 이용하여 터널 크라운 부분에 기준점을 설치하고 매달 각환기구 별로 반복확인 측량을 실시 기준점의 이동여부를 체크하였고 수회 걸쳐서 전문측량 용역업체에 확인측량을 의뢰하여 검증하면서 굴착작업을 진행하였다.

수직구에서 두점을 내릴때는 피아노 선과 추가 있어야

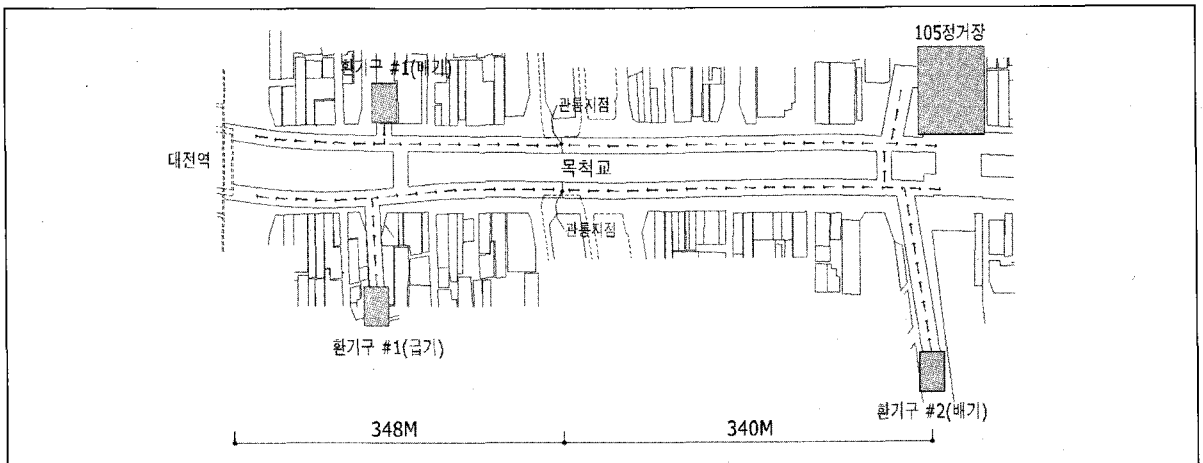


그림 7. 상하행선 단선병렬 터널의 관통지점

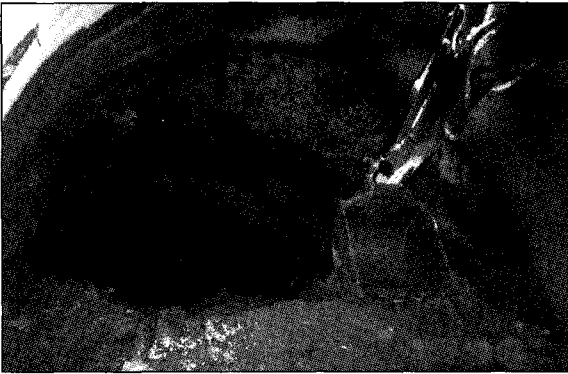


그림 8. 터널관통

되며 매년 확인측량시 지상점에서부터 반복측량만이 오차를 줄이는 최선의 방법이다.

터널굴착중에는 정밀시공을 위하여 터널크라운부분에 레이저 빔을 설치하여 막장 중앙부에 표시된 기준점으로 매막장마다 지보설치시 정밀시공을 하여 당 현장의 가장 굴곡이 심했던 1변환기구(배기:상행선)와 2변환기구(배기:하행선)간의 터널관통시 8mm의 오차만으로 정밀굴착 되었다(그림 8).

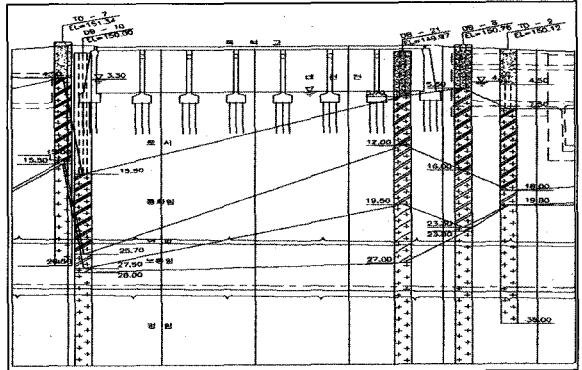


그림 9. 목책교 구간 단면도

4.3 대전천 목책교 구간 안전통과

4.3.1 개요

굴착작업 진행중 관찰되는 터널의 막장지질상태 및 지질주상도상 예측할 수 있는 지반조건을 감안하여 목책교 통과구간의 당초설계 계획되어있는 L,W그라우팅 적정성 여부를 예측하여 보다 경제적이고 효과적인 방안으로 변경하고자 하였다(그림 9).

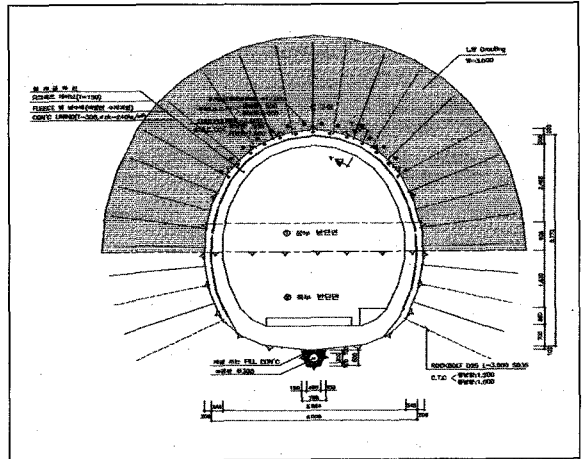


그림 10. LW그라우팅 보강설계

4.3.2 당초설계안 및 적용사유

목책교 하부 대전천을 통과하는 구간으로 대전천에서 공급되는 수량으로 터널굴착시 지하수유입이 많을 것으로 예상하여 차수목적에 중점을 둔 지반공법으로 L,W그라우팅을 설계하였으며(그림 10), 설계당시에는 주변 구간에 실시한 지질조사 보링자료와 하천통과 구간이라는 지리적

조건으로 차수공법을 적용하게 되었다.

- L,W구간 : PSW-4, 100M
- 1SPAN당 : 20M, 총5회 실시
- L,W범위 : 터널상부 반단면
- L,W폭 : 3M

4.3.3 당구간 지질상태

시작지점 전방에서 관찰되는 막장지질상태는 R.M.R분류법에 의한 암반 평가치는 58점으로 보통등급 범위에 있으며, 기반암이 화강암으로 다소 신선한 상태에 있으며

Picker Hammer 타격시 불꽃이 튀고 맑은음이 나는 정도
 임 압반 절리의 경사각은 Against dip 방향으로 유지되고
 있고 불연속면의 상태가 일부 풍화가 진행된 부분이 있
 으나 막장이 진행됨에 따라 점차 신선한 상태로 변해가는 경
 향을 보이고 있으며 당구간의 지질주상도상 분포는 상단
 부 위로 8~12M정도의 연암이 COVER ROCK를 형성하
 고 있는 것으로 나타나고 있었음.

4.3.4 갱내에서의 LW 그라우팅의 문제점

절리틈새를 따라 규산과 시멘트 밀크액으로 배합된 그
 라우팅 용액을 관입시켜 응고된 효과로 OPEN된 절리틈
 새를 따라 유입되는 지하수를 차단하고 암괴의 불연속면이
 불량하여 발파에 의한 충격으로 쉽게 이탈되려는 것을 암
 괴를 봉합시켜 이탈 및 붕괴를 막아주는 효과를 얻기위해
 서 암반구간에 L.W를 적용하게 된다. 그러나 당구간과 같
 이 암반이 신선하고 절리가 다소 적은편이며 불연속면의
 절개면이 협소하고 치밀한 상태에서는 강관그라우팅 주입
 시 주입용액이 절개면속으로 관입하기 어렵고 완전충진이
 어렵기 때문에 시공후에도 보강효과가 매우 미미할 것으
 로 예상된다.

또한 터널상부 암반층에 3M ZONE으로 74공의 천공홀
 을 만들어 플라스틱 주입관을 삽입 L.W그라우팅 주입시
 일부 미충진 부분이 발생될 경우 오히려 외부 지하수를 터
 널내층으로 유입을 유발시킬 수 있어 더 불리하게 작용될
 수 있다

4.3.5 변경 방안

당구간에서의 지반보강방안은 터널 크라운 상단으로 8
 ~12M정도 연, 경암으로 분포되어있어 L.W그라우팅의
 효과는 매우 비효율적일 것으로 예상되므로 차수효과는
 얻으면서 현재 막장에 Against dip으로 나타나고 있는 경
 사각에 효과적으로 대처할 수 있는 강관을 적용하고 차수
 의 효과를 높이고자 동일막장에서 강관다단으로 2열 시공
 하여 차수효과와 지반 봉락방지 효과를 얻고자 변경하였

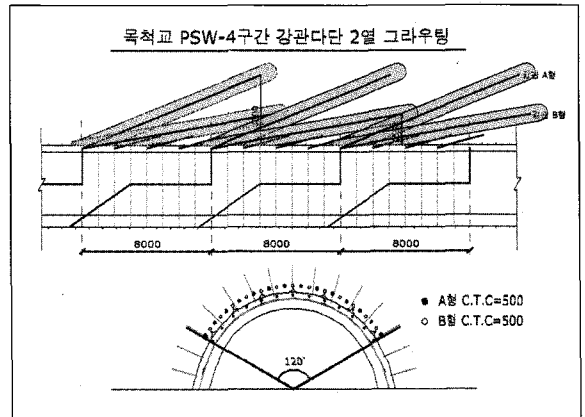


그림 11. 강관다단 그라우팅보강

다(그림 11).

(중전 강관다단의 경우 PIPE내에 삽입하는 Packer를
 Air방식으로 하여 그라우팅 주입압이 10kg/cm² 정도를
 초과할 경우 Packer사이로 누출되는 경향이있어 주입 효
 과가 떨어졌는데, 금번에 추진하고자하는 방식은 Packer
 를 수압식으로 바꾸어 그라우팅 주입압이 20kg/cm² 정도
 주입하여도 Packer뒤로 유출되지않아 보다 개선된 주입
 효과를 얻을 수 있어 차수효과를 높일 것으로 예상하였음)

- 지반보강 당초설계안

- L.W : 터널상단 3M ZONE으로 그라우팅
- 강관일단 : 횡 C.T.C : 500, 종 C.T.C : 8000(L=12M)
- FORE POLING : 횡 C.T.C : 500, 종 C.T.C : 2000
13EA/막장

- 지반보강 변경방안

- 강관다단 : 횡 C.T.C : 250 (A형,B형), 종 C.T.C :
8000(L=12M)
A형 : 시공각도 : 22°, B형 : 시공각도 :
10° (동일막장에서 시공함)
- FORE POLING : 횡 C.T.C : 500, 종 C.T.C : 2000
13EA/막장

터널 상단부위로 종간격 250으로 강관이 시공되어있고
 그 밑으로 F/P이 2막장당 13EA 중복시공이 되므로 중첩
 되는 부분이 크라운상단 120° 범위구간에서 ROCK BOLT

를 시공하려면 F/P과 강관에 간섭되어 시공이 극히 어렵고 R/B의 역할분담을 대신하여 주므로 PSU-3 패턴과 같이 120° 범위만 R/B를 생략하였다.

4.3.6 목적교 터널 구간 시공 결과

30년이상 노후된 교량으로 터널굴착으로 인한 지반침하가 예상되어 전문가로 하여금 정밀조사를 실시하여 교량의 허용침하량을 산정, 계측관리 기준치로 활용하였다.

교각의 1차 허용침하량 값은 25mm로 산정 되었으며 당구간의 터널 굴착이 완료되고 터널 교량의 각 교각에 설치된 침하 측정기의 최대침하량이 18mm로 완전 수렴되어 성공적으로 터널굴착을 완료하였다.

한 형상의 노선을 유지하고 각 작업구마다 이면도로를 차단하여 공사를 추진해야되는 조건하에서 최소한의 작업공간 확보 어려움, 인접 노후 건물과 근접 위치함으로서 민원 발생등 도심지 지하철 공사에 따르는 문제점들을 집약적으로 모아 놓은 구간 같은 많은 애로점이 있었으나, 그동안 쌓아온 지하철 공사경험을 바탕으로 안전과 품질을 확보하면서 무난히 문제점들을 하나 하나 풀어나가 터널 굴착을 완료하였고, 현재 터널 구조물 공사를 진행하고 있으며 늦게 착수된 105정거장의 T.R.M (대구경 강관 병렬 추진 공법)공정을 향후 성공적으로 추진되어야 할 과제로 남아있다.

5. 결론 및 향후 과제

당현장은 대전지하철 공사 구간중에서 가장 복잡한 도심지내를 관통하고 협소한 도로, 지하상가로 인하여 복잡