

서울外部 순환 고속도로 4차 터널의 설계와 施工

On the Design and Execution of 4th tunnel, Seoul Suburban High Speed Road

*안 성 순
Ahn, Sung Soon

1. 머리말

날로 심각해지고 있는 수도권과 주변 위성 도시의 교통난을 완화하고, 신도시 건설에 따른 교통수요에 효율적으로 대처하기 위하여 서울도심을 중심으로 반경 20-25km의 외곽을 연결하는 총연장126km의 서울외곽 순환고속도로가 지난 1988년 착공하여 오는 2000년대 초 완공을 목표로 건설에 박차를 가하고 있으며, 그중 판교~퇴계원간 34.1km는 양방향 4차로로, 판교~산본간 15.9km와 한강 하류를 횡단하는 김포~일산간 3.48km는 양방향 8차로로 건설 개통되어 서울과 주변도시 및 주변도시 상호간의 교통수요에 효과적으로 부응하고 있다.

계획노선중 판교~일산 구간은 일부 산악지역을 제외하고는 성남, 분당, 안양, 군포, 안산, 시흥, 부천, 인천등의 도심외곽 및 부도심을 통과하는 노선 특성상 전체 노선의 약 48%를 교량과 터널 등 구조물로 건설하고 있으며, 양방향 8차로 고속도로로서 터널도 본선에 준하는 일방향 4차로의 대 단면 터널이 요구된다.

*한국도로공사 수도권 건설사업소장

그러나 노선 설계당시('91)의 국내 단면 터널은 서울시의 도곡터널(3차로)이 도로분야에서 유일한 실적일 정도로 대단면 터널에 대한 국내의 설계 및 시공경험은 극히 빈약한 실정으로서 일부에서는 2차로 터널 2개를 설치하는 방안이 바람직하다는 의견도 제시되었으나, 계획노선에 대한 지반 조사결과 터널 통과 구간의 지반상태가 양호한 암질로 확인되어 4차로 터널의 가능성에 대한 확신을 갖게 되었고, 구조해석 등 세부 검토단계를 거쳐 4차로 터널의 단면을 확정하게 되었다.

계획 노선중 터널은 4개소, 총연장 4.04km로서 터널별 위치와 연장 등은 <표-1> 과 같으며 그 중 판교~산본구간에 위치한 청계터널은 기 개통되어 공용중에 있다.

본문에서는 서울외곽순환도로 판교~일산간을 중심으로 4차 도로터널의 설계와 시공과정에서의 검토사항, 도출된 문제점 및 개선사항 등에 관하여 간략하게 기술기로 한다.

2. 지형 및 지질특성



그림 1 판교~일산간 노선현황

표 1 터널별 위치 및 연장현황

터널명	연장	위치	건설기간	비고
청계	450	성남시 운중동~ 의왕시 청계동	'92~'95	
수리	1,865	군포시 산본동~ 안양시 안양동	'95~'99	
수암	1,294	인양시 안양동~ 시흥시 수암동	"	
소래	433	시흥시 대야동~ 인천시 장수동	"	

(1) 청계터널

판교기점 5.2km 지점으로 노선 북측에 해발 538m의 청계산, 남측에 백운산(해발 560m)이 위치하고 있으며, 터널노선은 학현고개를 지나는 판교~안양간 지방도 342호선 하단을 통과하고 있다.

터널 통과구간의 암반상태는 일축압축강도 630~1100kg/cm², RQD 59~82%, 절리간격 30~300

cm로 남아연방 과학산업연구실(CSIR: South African Council for Scientific and Industrial Research)의 R.M.R(터널 암반의 등급화)기준에 의한 종합평가 점수는 64~76점으로 II 등급에 해당하는 양호한 경암층이 분포하고 있다.(표2참조)

(2) 수리, 수암터널

판교기점 15.8km 지점(수리터널)과 18.1km 지점(수암터널)으로 수리산 북측을 지나 수암봉 정상을 관통하는 터널로서 안양시 안양9동 병목안에 위치한 약 500m의 계곡을 사이에 두고 수리터널과 수암터널이 양측으로 위치하고 있다.

수리터널 판교측 갱구부는 산본 IC 및 산본 신도시의 대규모 아파트 및 주택단지와 접하고 있고, 터널전방 약 1.0km 지점은 안양시가지로서 국도 1호선과 전철, 상가 및 주택이 밀집되어 있어 판교~일산간 건설 노선중 고속도로 건설 여건이 가장 어렵고 복잡한 위치이다.

터널통과 구간의 암반상태는 수암터널의 일산측 갱구부(단층지대의 영향으로 파쇄대 분포)를 제외하고는 일축압축강도 500~2,000kg/cm² RQD 61~99%, 절리가격 30~300cm이며, RMR 기준상 59~97점으로 대부분이 I~II 등급에 해당하는 양호한 경암층이 분포하고 있다.

(3) 소래터널

판교기점 34.6km 지점에 위치한 소래산을 통과하는 터널로서 터널구간이 소래산의 안부(Saddle) 파쇄대로 존재하고 있어 터널을 설치할 경우, Heavy Support가 필요하고 단면의 형상이 상단방향으로 높게 형성되어 굴착 내공단면이 과대해지



사진 1 청계터널 입구부 전경

표 터널 암반상태의 등급화 기준

RATING	100~81	80~61	60~41	40~21	<20
ClassNo..	I	II	III	IV	V
Description	Very Good Rock	Good Rock	Fair Rock	Poor Rock	Very Poor Rock

는 점, 터널시공중 절리로 인한 썩기형 파괴 등으로 인한 안전사고와 시공성의 불확실성 등이 예상되어 실시설계시에는 부득이 대절토로 계획하였으나, 공사착공이후 실시설계('91년 시행)이후의 여건변화, 대절토시 환경 훼손 문제 등 지역주민의 의견을 반영하기 위하여 각계 전문가의 의견을 수렴, 터널로 변경 시행하게 되었다.

3. 1-Arch 터널의 설계

(1) 내공단면의 설계

가. 2차로 터널과 4차로 터널의 비교

노선계획 단계에서 일방향 4차로 터널과 2차로 터널 2개소를 계획하는 방안에 대하여 검토한 결과, 터널통과구간의 암반상태가 양호하고, 대단면

터널의 안전성 확보 등 시공상의 어려움은 다소 예상되나 교통운용상 4차선 터널이 훨씬 유리하고, 편입용지 및 자연훼손을 최소화할 수 있을 뿐 아니라 현지 지형 여건상 터널과 근접하여 인터체인지 및 지장물이 인접되어 있는 등 노선분리상의 어려움이 있어 4차로 대단면 터널로 계획을 확정하였다.

나. 내공단면의 설계

터널의 내공단면은 터널의 기능에 따라 안전성, 공사비 등을 종합적으로 판단, 경제적인 단면으로 선정되어야 하며, 터널의 설치 목적에 부합되는 내부공간을 확보하고, 확보된 공간의 구조적 안정성, 차량의 주행성 등이 주된 검토사항으로써 이러한 조건을 만족하는, 단면 형상이 되어야 한다.

청계, 수리, 수암터널의 단면 구성은 기존 고속도로 터널 단면과 동일한 기준으로

로 설정하였으며, 1차적으로는 내부공간이 확보되는 단면성을 가정, 작도한 후 구조적 안정여부를 비교, 검토하는 과정으로 수행되었다.

이와 같은 과정을 거쳐 최적의 단면 3개안을 도출하였으며, 4차로 터널단면이 국내에서 처음 계획되는 점을 감안, 보다 확실하고 합리적인 설계를 기하고자 사계의 전문가로 구성된 터널설계자문회를 구성(학계,용역업체, 시공업체)하고 종합적인 검토를 거쳐 <표-5> 와 같이 단면을 최종 확정하였다.

(2) 굴착공법

가. NATM과 TBM 공법의 비교

터널 굴착공법은 일반적으로 자연지반 자체를

표 3 2차로 터널과 4차로 터널의 비교

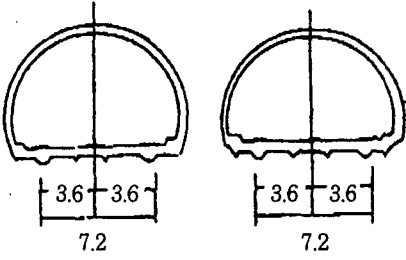
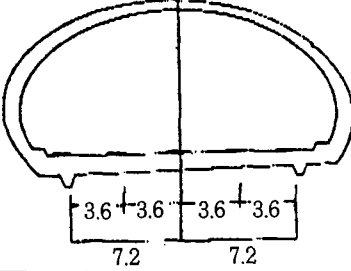
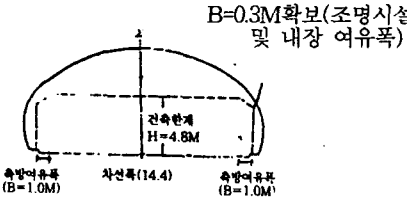
구분	2차로 터널(편도)	4차로 터널(편도)
단면		
단면적	A=60m ² ×2 = 120m ² (편도)	A=133m ² (편도)
특징	<ul style="list-style-type: none"> · 터널 전후구간 차선분리로 교통흐름 불리 · 시공경험 풍부 · 구조적 안정상의 신뢰도가 높음 · 편입 용지 과다 · 자연경관 훼손 과다 · 공사비 과다(14,000천원/m) 	<ul style="list-style-type: none"> · 4차로 동시 통과로 교통흐름 원활 · 시공경험없음 · 대단면으로 구조적 안정성 확보가 다소 어려움 · 편입용지가 적음 · 자연경관 훼손 적음 · 공사비 저렴(13,000천원/m)

표 4 단면 구성 기준

구분	폭원기준	단면구성
<ul style="list-style-type: none"> · 차도폭 · 건축한계 · 측방여유폭 · 기타 	<ul style="list-style-type: none"> · B=14.4M(4@3.6M) · H=4.8M · B=2.0M(좌,우측:각1.0M) · 전기설비, 방재설비, 공동구 등 설치공간 고려 · 4차로 환기시설 공간 	

Boring Machine)공법이 도심지 장대 도로터널에 일부 적용되고 있어 터널연장이 긴 수리 터널(L=1.865m)에 대하여 적용 가능 여부 및 경제성을 검토한 결과 TBM 공법으로 선진개도후(φ8.0m)NATM공법으로 확대 발파하는 방안이 가능하나, NATM과 병행함으로써 TBM공법의 장점인 소음, 진동 감소 효과를 기대하기 어려울 뿐만 아니라 단층대, 파쇄 등이 나타날 경우 대응이

어렵고, 대규모 TBM 장기투입으로 인하여 굴착 공사비도 상당히 높은 것으로 판단되었다.

그러나, 소음, 진동이 제한되는 도심 인접지역의 도로터널에 있어서는 TBM 공법이 매우 적절한 공법이며, 또한 대부분의 작업이 기계화 시공이라는 장점이 있어 멀지 않은 장래에 산악지 도로터널에서도 경제적 타당성이 있을 것으로 전망된다.

표 5 4차로 터널 단면 형상 비교안

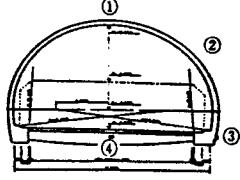
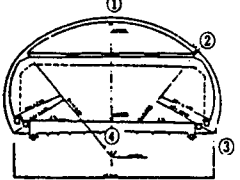
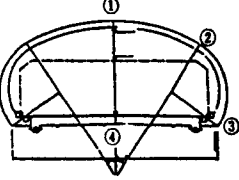
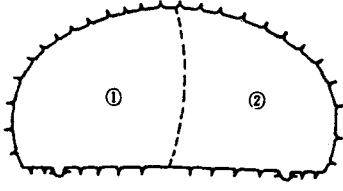
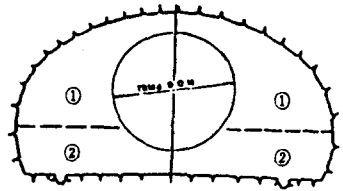
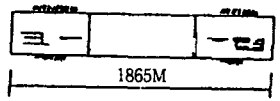
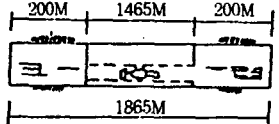
구 분	제 1 안(기본 설계안)	제 2 안	제 3 안																																																																																																														
단면형상																																																																																																																	
단면구분	<ul style="list-style-type: none"> 굴착단면적 : 198.8m² 내공단면적 : 157.4m² 내공 높이 : 10.83m 내공폭 : 17.40(17.66m) 	<ul style="list-style-type: none"> 굴착단면적 : 178.2m² 내공단면적 : 128.5m² 내공높이 : 8.65m 내공폭 : 17.94m(18.16m) 	<ul style="list-style-type: none"> 굴착 단면적 : 173.24m² 내공 단면적 : 126.7m² 내공높이 : 8.00m 내공폭 : 17.96m(18.43m) 																																																																																																														
해석방법	FDM	FEM, FDM	FDM																																																																																																														
해석결과	<table border="1"> <thead> <tr> <th>항목 위치</th> <th>①</th> <th>②</th> <th>③</th> <th>④</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>최대 주응력 (t/m²)</td> <td>1.2</td> <td>102</td> <td>112</td> <td>0.9</td> </tr> <tr> <td>최소 주응력 (t/m²)</td> <td>1.0</td> <td>0.7</td> <td>15.7</td> <td>6.4</td> </tr> <tr> <td>최종침하량 (mm)</td> <td>7.68</td> <td>3.68</td> <td>1.33</td> <td>0.05</td> </tr> </tbody> </table>	항목 위치	①	②	③	④	최대 주응력 (t/m ²)	1.2	102	112	0.9	최소 주응력 (t/m ²)	1.0	0.7	15.7	6.4	최종침하량 (mm)	7.68	3.68	1.33	0.05	<table border="1"> <thead> <tr> <th>항목 위치</th> <th>①</th> <th>②</th> <th>③</th> <th>④</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>최대 주응력 (t/m²)</td> <td>90</td> <td>118</td> <td>217</td> <td>89</td> </tr> <tr> <td>최소 주응력 (t/m²)</td> <td>66</td> <td>69</td> <td>177</td> <td>22</td> </tr> <tr> <td>최종침하량 (mm)</td> <td>0.89</td> <td>0.74</td> <td>-0.13</td> <td>-0.70</td> </tr> <tr> <td>Shotcrete의 최대응력</td> <td colspan="4">36.7kg/cm²</td> </tr> <tr> <td>Rock Bolt의 최대 축력</td> <td colspan="4">0.17ton</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th>항목 위치</th> <th>①</th> <th>②</th> <th>③</th> <th>④</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>최대 주응력 (t/m²)</td> <td>1.0</td> <td>261</td> <td>166</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>최소 주응력 (t/m²)</td> <td>0.2</td> <td>17.7</td> <td>14.5</td> <td>-7.8</td> </tr> <tr> <td>최종침하량 (mm)</td> <td>2.9</td> <td>2.1</td> <td>0.5</td> <td>0.05</td> </tr> <tr> <td>Shotcrete의 최대응력</td> <td colspan="4">12.68/cm²</td> </tr> <tr> <td>Rock Bolt의 최대 축력</td> <td colspan="4">0.74ton</td> </tr> </tbody> </table>	항목 위치	①	②	③	④	최대 주응력 (t/m ²)	90	118	217	89	최소 주응력 (t/m ²)	66	69	177	22	최종침하량 (mm)	0.89	0.74	-0.13	-0.70	Shotcrete의 최대응력	36.7kg/cm ²				Rock Bolt의 최대 축력	0.17ton				항목 위치	①	②	③	④	최대 주응력 (t/m ²)	1.0	261	166	1.0	최소 주응력 (t/m ²)	0.2	17.7	14.5	-7.8	최종침하량 (mm)	2.9	2.1	0.5	0.05	Shotcrete의 최대응력	12.68/cm ²				Rock Bolt의 최대 축력	0.74ton				<table border="1"> <thead> <tr> <th>항목 위치</th> <th>①</th> <th>②</th> <th>③</th> <th>④</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>최대 주응력 (t/m²)</td> <td>2.6</td> <td>297</td> <td>157</td> <td>0.9</td> </tr> <tr> <td>최소 주응력 (t/m²)</td> <td>0.4</td> <td>11.6</td> <td>17.6</td> <td>-8.4</td> </tr> <tr> <td>최종침하량 (mm)</td> <td>3.0</td> <td>1.28</td> <td>0.5</td> <td>0.04</td> </tr> <tr> <td>Shotcrete의 최대응력</td> <td colspan="4">16.52/cm²</td> </tr> <tr> <td>Rock Bolt의 최대 축력</td> <td colspan="4">1.13ton</td> </tr> </tbody> </table>	항목 위치	①	②	③	④	최대 주응력 (t/m ²)	2.6	297	157	0.9	최소 주응력 (t/m ²)	0.4	11.6	17.6	-8.4	최종침하량 (mm)	3.0	1.28	0.5	0.04	Shotcrete의 최대응력	16.52/cm ²				Rock Bolt의 최대 축력	1.13ton			
항목 위치	①	②	③	④																																																																																																													
최대 주응력 (t/m ²)	1.2	102	112	0.9																																																																																																													
최소 주응력 (t/m ²)	1.0	0.7	15.7	6.4																																																																																																													
최종침하량 (mm)	7.68	3.68	1.33	0.05																																																																																																													
항목 위치	①	②	③	④																																																																																																													
최대 주응력 (t/m ²)	90	118	217	89																																																																																																													
최소 주응력 (t/m ²)	66	69	177	22																																																																																																													
최종침하량 (mm)	0.89	0.74	-0.13	-0.70																																																																																																													
Shotcrete의 최대응력	36.7kg/cm ²																																																																																																																
Rock Bolt의 최대 축력	0.17ton																																																																																																																
항목 위치	①	②	③	④																																																																																																													
최대 주응력 (t/m ²)	1.0	261	166	1.0																																																																																																													
최소 주응력 (t/m ²)	0.2	17.7	14.5	-7.8																																																																																																													
최종침하량 (mm)	2.9	2.1	0.5	0.05																																																																																																													
Shotcrete의 최대응력	12.68/cm ²																																																																																																																
Rock Bolt의 최대 축력	0.74ton																																																																																																																
항목 위치	①	②	③	④																																																																																																													
최대 주응력 (t/m ²)	2.6	297	157	0.9																																																																																																													
최소 주응력 (t/m ²)	0.4	11.6	17.6	-8.4																																																																																																													
최종침하량 (mm)	3.0	1.28	0.5	0.04																																																																																																													
Shotcrete의 최대응력	16.52/cm ²																																																																																																																
Rock Bolt의 최대 축력	1.13ton																																																																																																																
장 단 점	<ul style="list-style-type: none"> 구조적으로 가장 안정 공사비 과다 	<ul style="list-style-type: none"> 구조적으로 안정 천정부의 곡률반경이 제3안보다 적어 쉐기형태의 낙반발생 가능성이 적다 기본설계안에 비해 굴착공사비 절감 	<ul style="list-style-type: none"> 제2안 보다 내공 높이는 0.65 적은 반면 구조적 안정을 위해 측벽부간의 폭이 상대적으로 증가하여 내공단면적은 비슷하며 비효율적인 형상임 따라서 지보재설치(Rock,Bolt,Shotcrete, 2차Lining)는 제2안과 비슷하므로 공사비 절감액 미소 																																																																																																														

표 6 수리터널의 굴착공법비교

구 분	전구간 NATM	TBM(ϕ 8.0)+NATM 화폭+NATM
단 면		
굴 착 도		
시공개요	· 전구간 화약발파에 의한 NATM 공법시공	· TBM ϕ 8.0 선행굴진후 NATM 확대발파 출구측 NATM 공법 시공
굴착장비	Jumbo Drill	TBM(ϕ 8.0)+JUMBO DRILL+출구JUMBO DRILL
굴착단면적	178m ²	178m ² (TBM 50m ² +NATM 128m ²)
공사비('91기준)	13,000천원/m	15,600천원/m
장 점	<ul style="list-style-type: none"> · 지질상태에 따라 대응조치 용이 · 공사비 저렴 · 장공발파 가능 · 국내시공실적 다수 · 굴착머리 재활용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> · TBM과 NATM의 장점을 살릴 수 있다(사진 지반 조사 및 지질상태에 따른 작업연계성 양호)-지질상태 미리 예측 · 시공시 환기에 유리 · 중앙부 기계 굴착부 확대발파하므로 발파진동 및 주위 암반 교란 범위를 줄일 수 있음
단 점	<ul style="list-style-type: none"> · 화약발파작업으로 작업환경 불량 · TBM공법에 비해 공사용 환기설비 증대 	<ul style="list-style-type: none"> · 국내 시공 실적이 적다 · 공사비가 고가 · 단층대, 파쇄대등 문제성 지반에 대한 대응책이 어려움 · 전원도입을 위한 가설공사비 증가

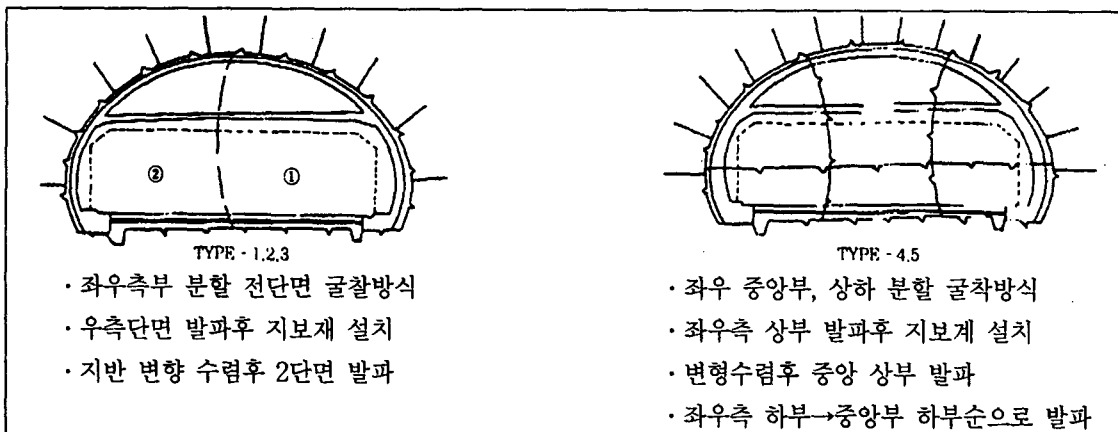


그림 2 굴착방법

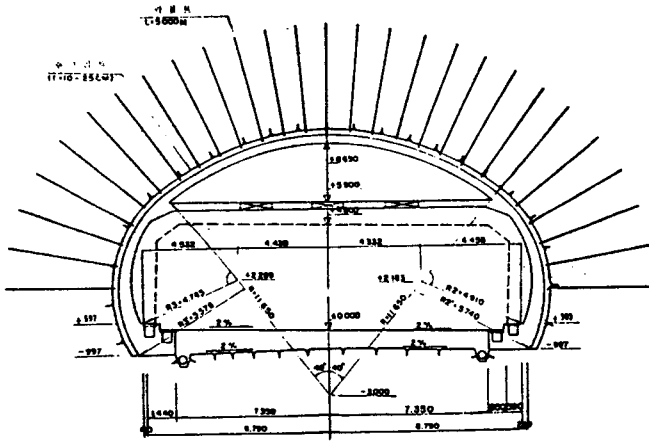


그림 3 표준단면별 지보형태

였고, 굴착중 예상치 못한 암질출현시는 Fore- Poling 이나 Pre-Grouting 공법을 병행토록하였으며, 암질별 굴착 단면 및 지보 형태는 <그림-3> <표-7> 과 같다.

(3) 부대시설

가. 피난갱과 비상주차대

터널의 연장이 길어지면 터널내 화재발생, 차량고장 등의 비상상태가 발생할 경우를 대비하여 피난갱과 비상주차대 시설의 설치 필요성이 요구되며, 피난갱은 양방향

표 7 표준단면별 지보형태

구 분		표준단면-I(경암)	표준단면-II(보통암)	표준단면-III(연암)	표준단면-IV 갱구부(풍화암)	비 고
ROCK BOLY	형 식	RANDOM	SYSTEM	좌동	좌동	
	길 이	SBD3.5, ϕ25L=5.0m	좌동	좌동	좌동	
	종방향간격	3.0m	2.0m	1.5m	1.0m	
	횡방향간격	2.0m	1.5m	1.5m	1.0m	
SHORCRETE		t=10cm	t=15cm	t=20cm	t=25m	σck-200kg/cm ²
STEEL RIB(H-150)		-	-	-	-	
WIRE MESH ϕ48×100×100		1차	2차	3차	3차	
CON'C LINING		t=40cm	좌동	좌동	좌동	σck-270kg/cm ²

나. 굴착공법

굴착방법은 지반조건, 굴착단면의 크기, 막장의 자립성, 발파시 진동으로 인한 영향 등을 종합적으로 검토, 판단하여야 한다. 4차로 터널에서는 굴착폭원이 약 19m로서 터널의 역학적 안정 측면에서 연직 방향의 토압에 대한 대처 방안으로 세로 분할 공법보다 적절한 굴착방법이다.

굴착기준단면은 암질이 대체로 양호한 경암, 보통암, 연암은 좌, 우측 2단계 굴착으로 막장의 자립성이 불량하고 터널의 변위가 큰 풍화암 및 rod 구부는 측벽선진(側壁先進) 도갱공법으로 계획하

으로 설치되는 터널이 서로 연결되도록 연락갱을 설치하는 방안이 있으며, 비상주차대는 주행방향 우측으로 설치하되 양시설 모두 약 750m 마다 1개소씩 설치토록 권장되고 있다.

위 기준을 준용하여 수리터널은 2개소, 수암터널은 1개소의 피난갱을 설치토록 하였으나 비상주차대는 비상시 피난갱 활용이 가능하고, 터널단면이 일방향 4차로의 대단면 터널로서 구조상 대단히 불리하고, 터널내에서 변단면처리가 어려운 점이 있어 설치하지 않는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

나. 환기설비

터널의 환기목적은 차량의 배기가스를 터널밖으로 배출시켜 터널내 오염물질의 농도를 허용수준 이하로 유지하여 안전하고 쾌적한 교통환경을 유지하기위한 것으로 매연(분진) 일산화탄소(Co)가 주된 검토대상이 된다.

환기방식은 터널연장, 종단구배, 교통량, 대형차혼입률 등에 따라 상이하게 됨으로 터널별로 소요 환기량을 산정, 종합적인 검토를 통하여 환기방식을 선정하게되며, 터널별로 적용된 환기방식은 표 8과 같다.

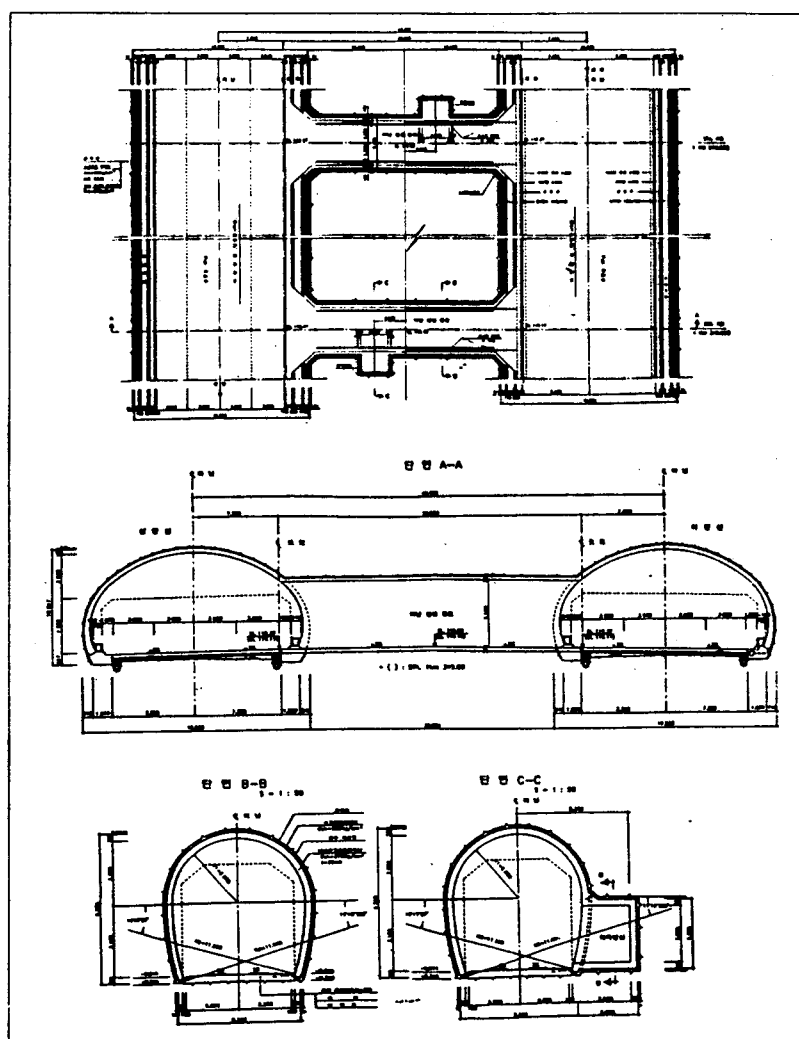


그림 4 피난갱 설치 계획

표 8 터널별 환기방식

터널명	연장(m)	환기방식	비고
창계터널	450	자연환기	
수리터널	1,850	Jet-Fan종류식	
수암터널	1,294		
소래터널	433	자연환기	

4. 2-Arch 터널의 설계

(1) 건설경위

소래터널 건설구간은 경기도 시흥시와 인천직할시의 경계점에 위치하며, 기본계획시 터널로 계획되었으나, 계획노선이 안부(Saddle)를 통과하게 되어 단층 파쇄지역이 넓게 분포하며, RQD가 0에 가까울 정도로 암반의 파쇄정도가 심하고 불연속





면이 존재하여, 시공시의 안전사고, 터널 인근에 IC가 근접(1.2km), 순성토 필요 등의 문제가 있어 실시설계시 절개공법으로 설계되어 일부 공사를 시행하게 되었다. 546

그러나 공사착수후 지역주민들의 자연환경훼손 반대와 터널 건설요구에 따라 4차로 터널시공 가능 여부, 4차로 터널시공 불가시 보완방안, 2차로 터널시공 방안 등의 내용에 대하여 산학 전문가들로 구성되어 자문회의를 개최한 결과, 3차로 터널 건설이 합리적이라는 소수의견도 있었으나 대다수의 의견이 적절한 보강공법을 병행한 2-Arch 형태의 4차로 터널시공으로 추천되었고, 또한 소래산 주변의 지형여건상 토지편입에 따른 민원의 최소화, 원활한 도로선형의 계획 등을 고려하여 2-Arch 4차로 터널로 건설을 추진하게 되었다.

표 9 터널단면 검토 결과

구분	제1안	제2안	제3안	비고
	2-Arch 터널	4차선 터널 (수리,수암 적용단면)	4차선 터널 (개량 단면)	
단면				
단면구분	<ul style="list-style-type: none"> 굴착단면:192.5m' 내공높이:6.92m 내공폭:22.50m 	<ul style="list-style-type: none"> 굴착단면적:178.2m' 내공높이:8.65m 내공폭:17.94m 	<ul style="list-style-type: none"> 굴착단면적:239.6m' 내공높이:12.54m 내공폭:18.73m 	
지반보강공법	강관다단그라우팅	강관다단그라우팅	강관다단그라우팅	
안정성검토 (수치해석결과)	<ul style="list-style-type: none"> 천단침하:14.40mm 내공변위:3.10mm 숏크리트 최대압축응력: 75.45kg/cm² 최대 록볼트 축력:5.1ton 	<ul style="list-style-type: none"> 천단침하:15.80mm 내공변위:5.51mm 숏크리트 최대압축응력: 143.7kg/cm² 최대록볼트축력:17.8ton 	<ul style="list-style-type: none"> 천단침하:17.11mm 내공변위:4.50mm 숏크리트 최대압축응력 :130.8kg/cm² 최대록볼트축력:20.4ton 	σ Ca=80(kg/cm ²) Ta=14ton
m당 공사비	5,600만원/m	5,300만원/m	7,200만원/m	
검토결과	중양기등타설로 터널 안정성이 양호하고 2차선 터널을 접속시켜 상부 여굴량 최소화	숏크리트 압축응력 및 록볼트 축력이 허용치를 크게 초과하고 단면형상이 불안정함	숏크리트 압축응력 및 크게 초과하고 공사비 과다	
적용단면	○			

표 10 도로 터널 지보 형태 비교

Type	구분	2차선	3차선	4차선	2-Arch(지하철)	2-Arch(신설터널)
I	공중					
	록볼트길이(간격)(m)	3.0(Random)	4.0(2.0)	5.0(2.4)		4.0(Random)
	shot크리트 두께(cm)	5.0	10.	80.0		10.0
	라이닝 콘크리트 두께(cm)	30.0	40.0	40.0		40.0
	발파패턴	전단면	상하반단면	상부 3등분(중앙 및 좌,우), 하부반단면		전단면(중앙) 상하반단면(좌,우)
굴진장(m)	3.0	2.0	2.0	3.0~5.0(1.0)	1.5	
록볼트길이(간격)(m)	3.0(3.0)	4.0(1.5)	5.0(2.0)		4.0(2.0)	
shot크리트 두께(cm)	5.0	15.0	10.0		15.0	
II	라이닝 콘크리트 두께(cm)	30.0	40.0	40.0		40.0
	발파패턴	전단면	상하반단면	TYPE-1과 동일	상하반단면 (중앙 및 좌·우)	전단면(중앙) 상하반단면(좌,우)
	굴진장(m)	3.0	1.5	2.0	1.0	1.5
	록볼트길이(간격)(m)	4.0(2.0)	5.0(1.0)	5.0(1.5)		4.0(2.0)
	shot크리트 두께(cm)	8.0	15.0	12.0		15.0
III	라이닝 콘크리트 두께(cm)	30.0	40.0	40.0		40.0
	발파패턴	전단면	상하반단면	TYPE-1과 동일		전단면(중앙)상 하반단면(좌·우)
	굴진장(m)	2.0	1.0	1.5		1.5
	록볼트길이(간격)(m)	4.0(1.5)	5.0(1.0)	5.0(1.2)		4.0(1.5)
	shot크리트 두께(cm)	12.0	20.0	18.0		15.0
IV	라이닝 콘크리트 두께(cm)	30.0	40.0	40.0		40.0
	발파패턴	상하반단면	상하반단면	TYPE-1과 동일		전단면(중앙)상 하반단면(좌·우)
	굴진장(m)	1.5	1.0	1.2		
	록볼트길이(간격)(m)	4.0(2.0)	5.0(0.5)	5.0(1.0)		1.5
	shot크리트 두께(cm)	16.0	20.0	20.0		
V	라이닝 콘크리트 두께(cm)	30.0	40.0	40.0		
	발파패턴	상하반단면	상하반단면	상하3등분(중앙 및 좌우)하부반단면		
	굴진장(m)	1.2	1.0	1.0		
	단면형상					
		2차선	3차선	4차선	(지하철)	(신설터널)

(2) 내공단면 검토

추천된 의견을 토대로 지반보강을 전제한 계획 구간 토질조사결과를 이용하여 2-Arch 4차로 터널, 기존 4차로 터널에 대한 수치해석을 실시하고, 안정성을 재검토한 결과 4차로 터널은 슛크리트 응력 및 볼트의 축력이 허용치를 크게 초과하여 불안정하고 공사비 또한 3-Arch 터널에 비하여 과다하게 소요될 것으로 판단되어 2-Arch 터널 단면 형태를 최종 확정하고 터널중앙부에 철근 콘크리트 등을 설치하여 지반의 이완영역 확대방지 및 중앙부에 걸리는 하중을 분담토록 하였다.

한편, 이에 대한 종합적인 단면 해석방법으로 현장에서 실시한 지질조사 자료를 이용하여 FDM 해석을 실시하고, RMR 및 Q System에 따라 지보형태 및 굴착방안을 아울러 강구하고, 내부 Lining의 구조적 안정을 위하여 콘크리트포장을 라이닝의 Invert로서 거동할 수 있도록 설계하였다.

(3) 지보형태

도로터널에서 기 설계된 표준단면별 지조사례는 <표-10> 과 같이 난형 2, 3, 4차로 터널이 있으나 2-Arch 터널은 '95. 2월에 완료된 대전~공주간 고속도로 구간중 신성터널의 설계 사례만 있을 뿐 시공사례는 현재까지 전혀 없는 실정이다.

그러나 지하철 정거장 설계시에는 2-Arch 형태

의 많은 설계시공사례가 있으며, 시공방법은 중앙부 굴착후 중앙부에 기둥을 설치하여 기둥이 터널 천장부에 작용하는 하중을 지지하도록 한 후 아치부에 대한 굴착 및 보강을 실시하게 된다.

소래터널의 지보형태는 시공시 암질을 비롯한 여건 변화 대응할 수 있도록 암반 등급 및 터널의 토피등에 따라 <표-11> 과 같이 3-Type으로 구분하였으나, 굴착방법은 모두 반단면 굴착을 적용하였다.

(4) 강섬유 보강 Shotcrete

NATM공법에 슛크리트는 굴착후 최단시간내에 지반에 밀착되도록 시공함으로써 굴착지반의 이완을 최소화하여 조기에 지반의 안정을 기할 수 있으며, 굴착단면의 형상에 거의 영향을 받지 않고 시공이 가능한 중요한 지보재이다.

스�크리트는 작업방법에 따라 시멘트, 골재 및 첨가재를 건조한 상태에서 혼합하여 운반하고 노즐에서 물과 혼합하여 분사하는 건식방법과 고정식 B/P에서 조세골재와 시멘트, 물을 계량하여 혼합하고 뿜어 불이기 작업시 노즐에서 급결제를 혼합하여 분사하는 습식방법으로 대별할 수 있으며, 습식방법은 건식방법에 비하여 시공중 분진발생이 적고, 전 작업의 기계시공이 가능하므로 인력절감 및 품질관리가 확실하고 탈락율이 적어(건식35 - 45% → 습식 10~15%) 경제적 시공이 가능한 장

표 11

터널 위치	TYPE	내부 라이닝 두께(cm)	스�크리트 두께(cm)	여굴 두께 (cm)	ROCK BOLT			강지보공(Steel-Rib)		굴진장 (m)	굴착 구분	보조 공법	비 고
					길이 (m)	간격		형태	간격(m)				
						횡방향(m)	종방향(m)						
중앙부	I	-	20	20	3	1.5	1.5	H-100	1.5	1.5	반단면	-	RMR > 20
	II	-	20	20	3	1.5	0.75	H-100	0.75	1.5	"	강관다단 그라우팅	RMR ≤ 20
	III	-	20	20	3	1.5	0.6	H-100	0.6	1.2	"	"	갱구부
측부	I	60	25	20	4	1.5	1.5	H-150	1.5	1.5	"	"	RMR > 20
	II	60	25	20	4	1.5	1.5	H-150	0.75	1.5	"	강관다단 그라우팅	RMR ≤ 20
	III	60	25	20	4	1.5	1.5	H-150	0.6	1.2	"	"	갱구부

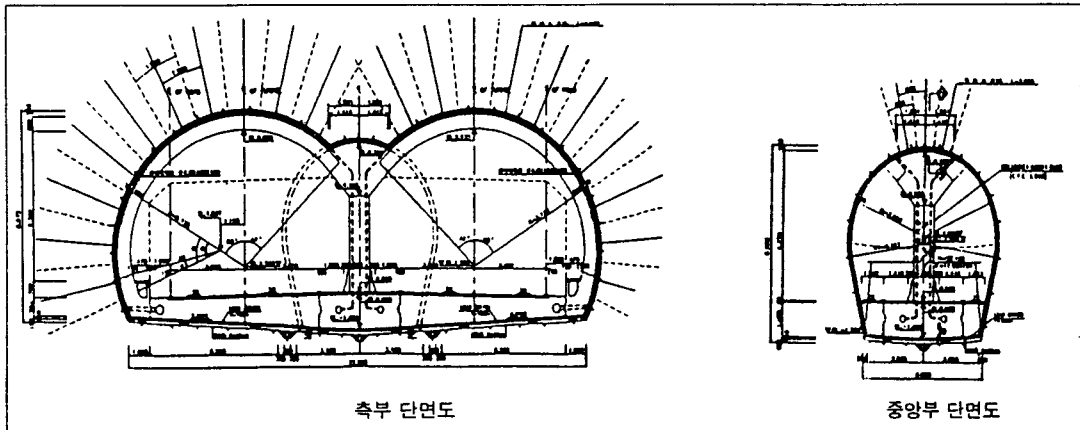


그림 6 소래터널의 지보 형태

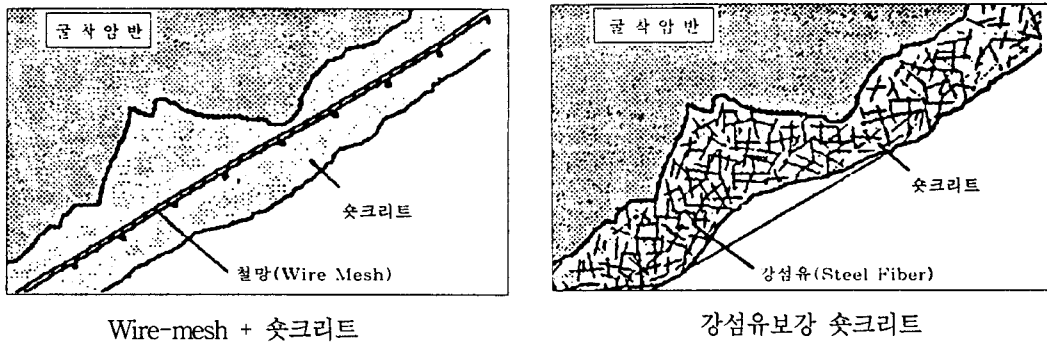


그림 12

표 12 강섬유 숯크리트 특성 비교

구 분	Wire Mesh+숯크리트	강섬유보강 숯크리트	비고
개 요	· 숯크리트의 강도를 보완하기 위하여 Wire-Mesh를 설치	· 숯크리트의 강성을 보완하기 위하여 강섬유를 혼입하고, Wire-mesh를 설치할 생략	
장·단점	<ul style="list-style-type: none"> · 굴착에 의한 여굴이 많아 발생될 경우 Wire-mesh 설치가 곤란하고 보강효과 감소 · 숯크리트 타설시 Wire-mesh에 진동을 주므로 부착력 감소 · 숯크리트에 균열발생 빈도가 크며, 균열발생시 보강효과 저하 · 터널굴착 즉시 숯크리트 보강하여야 효과가 크나 Wire-mesh 설치로 인한 작업시간이 증가되어 공사비 증가 · 국내생산자재로 시공 가능 · 소규모 공사에 유리 	<ul style="list-style-type: none"> · 굴착 요철면에 균일한 두께로 시공이 가능하므로 보강효과 증진 · 콘크리트 인장강도, 휨강도, 전단강도가 증가되고, 시공두께 감소 기증(20%) · 균열발생에 대한 저항성이 크고 균열발생후에도 인성(잔류강도) 증가 · 터널굴착 즉시 숯크리트 시공이 가능하므로 보강효과증가 · 작업공중 단순화되어 품질향상 및 안정성 증가 · 국내생산에서는 강섬유 생산이 불가하여 수입에 의존(국내에 생산설비 건립 추진중) · 대규모 공사 및 습식으로 시공시 유리 	

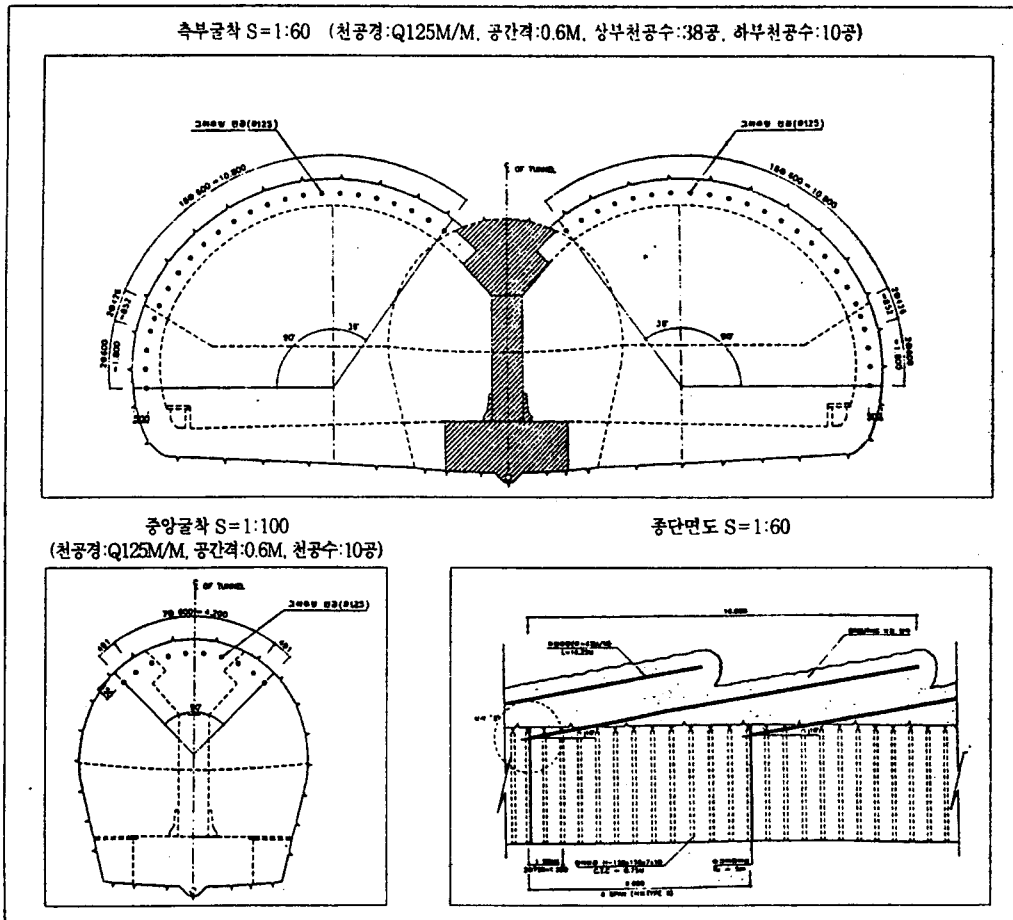


그림 7 강관다단 그라우팅에 의한 지반보강

점이 있다.

이와 같은 점을 고려, 숏크리트의 강도를 보완하기 위하여 설치하는 Wire-mesh 대신 숏크리트 생산시 강섬유(길이 30mm, 직경 0.5mm 내외의 철선)를 숏크리트에 혼합하여 숏크리트의 강성을 보완한 강섬유 보강 숏크리트를 적용하였다.

강섬유 보강 숏크리트는 <표 -12>에서 보는 바와 같이 기존의 Wire-mesh 설치 작업공정이 생략됨으로서 작업공정이 단순화 되는점, 콘크리트의 인장강도, 전단강도, 휨강도가 증가되어 숏크리트의 두께를 줄일 수 있으며, 보다 빠른 시간내에 숏크리트를 시공할 수 있고 요철면에 균일한 두께로 시공이 가능하게 됨으로 보다 큰 지반보강 효

과 등을 기 할 수 있는 장점이 있으므로 향후 터널 숏크리트공법은 습식 강섬유보강 숏크리트 공법으로 적용함이 바람직 할 것으로 판단된다.

(5) 강관 다단식 그라우팅에 의한 지반보강

파쇄대와 절리가 심하게 발달된 연약한 암반층을 발파에 의하여 굴진하기 위해서는 발파진동에 효과적으로 적용하고 장기적인 지반진동을 억제할 수 있도록 사전에 기존암반층을 보강할 필요가 있다.

프리그라우팅공법의 일종인 본공법은 터널굴착에 선행하여 터널 예정단면으로 Pipe Roof를 형성하여 주입재(Cement milk)를 주입하고 주변지반의

보강을 겸비한 지반의 이완, 침투수의 차단 및 지압의 확대 등을 미연에 방지하여 터널굴착시 안전한 시공이 되도록 함에 목적이 있으며 일반적인 특성을 다음과 같다.

- 강관에 의한 Beam체 형성으로 하중 경감 효과가 양호함
- 불연속면 봉합으로 차수 효과 양호
- 모든 지반에 적용가능
- 주입지반의 강도가 약하면 Gel time이 다소 길어짐

소래터널에 적용한 강관다단식 그라우팅은 그림과 같이 터널 막장에서 10° 상향방향으로 강관을 삽입하여 시멘트 및 규산 소다를 혼합한 milk를 주입하여 강관연결 개량체를 형성하는 개념으로 해당지반에 직경 65mm, 연장 16m의 강관을 삽입, 그중 Packer 장치로 주입보강재를 주입하는 방법을 적용하였으며, 천공간격은 0.6m, 주입간격은 표준단면별로 8.4 또는 9.0m를 기준하였다.

(6) 라이닝 콘크리트(Lining Con'c)

라이닝 터널의 구조상 중요한 요소로 토압, 수압등의 하중에 장기적으로 견디어 내고 균열, 변형, 파괴등을 일으키지 않으며 내구성이외의 수밀성과 평탄성 등의 성질을 갖고 터널의 필요한 공간과 기능을 확실하게 유지시켜 주어야 하며, 특히 NATM에 의한 터널 건설시 라이닝의 역할은 다음과 같다.

- 라이닝 터널의 변형이 수렴된 뒤에 시공되므로, 기본적으로 라이닝에는 외력이 작용되지 않는다.
- 락볼트는 통상 부식에 대한 방수처리가 되어있지 않고, 최종적으로 하중을 지보하는 것은 슛크리트와 라이닝이므로, 락볼트의 부식문제나 지반의 불균질 등의 불완전 요소를 고려하여 라이닝은 안전율의 증가로서 평가한다.
- 라이닝후에 새로이 발생하는 수압, 지반의 크리이프변형에 의한 팽창성 토압 또는 토피가 낮은

경우에는 나중에 작용하는 상재하중을 라이닝에 의하여 지보한다고 볼 수 있다.

- 재래공법에서의 사고방식과 마찬가지로 슛크리트, 락볼트를 일차적인 지보로 생각하고 최종적으로 라이닝이 전하중을 지보한다고 볼 수 있다.

2-Arch 터널구간은 지반특성상 암반의 이완 하중이 터널 라이닝에도 작용할 것으로 예상되어 중앙기둥은 물론 라이닝 Invert에도 철근을 배근하도록 설계하여 터널 완성후의 예기치 않는 돌발응력에 대응할 수 있도록 하였다.

· 사용재료

- 콘크리트 : 설계기준 강도(δck)=240kg/cm²이상
- 철근 : SD 30이상

· 설계하중

- 사하중 수압, 잔류응력 고려

· 라이닝 두께 적용

- NATM 구간 : t = 60cm
- 개착식 구간 :
- 피토고 10~15m : t=70cm
- 피토고 10m이하 : t=60cm

5. 4차로 터널시공

(1) 굴착

가. 굴착 방법의 변경

설계 당시 검토된 4차로 터널의 굴착방법은 2차로 터널에서 일반적으로 적용되고 있는 상하반단면 또는 전단면굴착 방법과는 달리 터널의 역학적 안정 측면에서 연직방향의 토압에 대처하기 위한 방안으로 좌우분할공법을 적용하였으나, 실제 시공시 다음과 같은 문제점이 도출되었다.

- 설계 단면대로 시공할 경우 전체 굴착높이가 10m로 Jumbo Drill의 유효 천공작업 높이가 8.0m 인점을 고려하면 원활한 시공이 어렵다.
- Jumbo Drill에 의한 천단부 Rock Bolt(L=5.0m) 시공이 어렵다.
- 슛크리트 타설시 이격거리 증가에 따른 유효거

표 13 상·하분할 굴착으로 인한 수치해석 및 계측결과

터널명	구분		단위	좌우분할굴착(설계)				상하분할굴착(시공)				허용 범위
				T-1	T-2	T-3	T-4	T-1	T-2	T-3	T-4	
수리터널	내공변위	해석치	m/m	4.0		1.43	0.49	3.9		1.24	0.67	
		계측치						0.84		0.76	0.33	
	천단침하	해석치	m/m	5.01		1.21	1.18	8.37		2.96	1.18	
		계측치						3.3		1.2	1.0	
	쏫크리트 응력	해석치	kg/cm ²	68.9		18.6	26.3	68.9		24.4	18.9	
		계측치						-		11.7	15.5	
록볼트 축력	해석치	ton	0.58		1.0	0.26	0.31		0.28	4.3		
	계측치						-		0.29	0.54		
수암터널	내공변위	해석치	m/m					0.97	1.53	0.33	47.3	
		계측치		0.64	0.89	0.84	4.4	0.92	2.6	1.02	1.59	
	천단침하	해석치	m/m					-	-	-	-	
		계측치		2.08	1.77	1.67	11.7	2.0	2.0	3.0	2.0	
	쏫크리트 응력	해석치	kg/cm ²	28.7	13.6	13.1	63.5	3.68	5.84	1.41	26.94	$\sigma_{ca}=80$
		계측치						0.98			14.9	
	록볼트 축력	해석치	ton					0.31	0.60	0.28	16.93	
		계측치		0.58	0.60	0.08	2.40	0.52			0.57	

리확보가 어려워 Rebound 량과 작업시간이 증가한다.

- 좌우 경계면의 경우는 Steel Rib 폐합전까지 굴착면의 형상으로 지보역할이 어렵다.
- 각종 장비 및 자재 이동시 효율이 저하되고 송풍, 정기, 송수시설 등의 관리가 어렵다.

이상과 같은 문제점을 해소하는 방안으로 2차로 터널에서 적용하고 있는 상하분할굴착공법에 대한 수치해석을 실시한 결과 좌우 분할굴착방법과 비교하여 다소 변위량과 응력이 증대되지만 해석결과 허용범위내인 안전측으로 확인되어 <그림-8>과 같이 상하분할굴착방법으로 변경 시행하게 되었으며 <표-13>과 같이 굴착과정마다 정기적인 계측을 통하여 해석값과 실제 거동값의 추이를 비교하면서 공사를 추진한 결과 현재까지 이상징후가 없이 안전한 작업을 수행하고 있다.

향후 4차로 터널 설계시에는 좌우분할굴착시 발생하는 작업성, 안정성의 문제를 고려하여 현실적

으로 시공가능한 개선된 굴착방법의 적용이 있어야 할 것으로 판단된다.

나. 내공단면 및 여굴의 관리

터널굴착시 여굴을 줄이고 원하는 굴착단면으로 굴진하기 위하여는 발파전, 후의 내공단면과 여굴 발생량에 신속성과 정확성을 기하는 것이 무엇보다도 선행되어야 할 일이다.

과거에는 굴착원을 분할하고 분한된 임의점의 좌표를 트랜시 측량기에 의하여 막장에 Setting, 작도하는 방법으로 굴착 내공단면과 여굴량 확인 및 천공위치를 확정하거나 임의점의 내공단면은 이동식 내공단면 측정기를 제작, 수동적으로 조작하는 방법을 주로 사용하였기 때문에 시간과 인력이 많이 소요되고 특히 후자의 경우는 신뢰도가 결여되어 라이닝콘크리트 시공시 단면 부족현상이 발생하는 등의 문제가 발생되었다.

그러나 최근에는 컴퓨터에 의한 측량기 술의 발

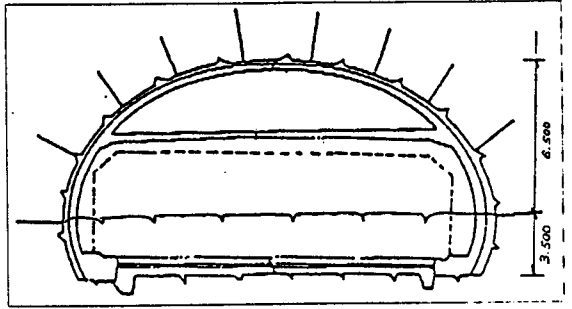


그림 8 상하분할 굴착방법



사진 2 수암터널의 일산측 전경

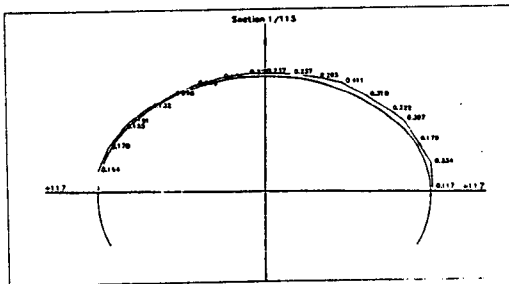


그림 9 수리터널의 내공단면 및 여굴 측정예 TYPE-1

달로 내공단면과 여굴의 측정에 신속성, 정확성을 기할 수 있게 되어 터널굴착시 효과적으로 이용되고 실정이다.

최근에 주로 이용되고 있는 방법은 Geodata 468(Total Station) 및 Geodlight 504형 측량기에 휴대용 컴퓨터를 접속시켜 사용하는 방법으로서 터널의 원둘레를 등각도로 분할하고 분할된 임의점의 좌표를 확인, 입력한후 터널 중앙선의 임의점에 기기를 Setting하고 좌표와 Elevation을 입력한 후 목표로 하는 임의점에 Target를 설치하고 이를 시준하면 광과기 및 컴퓨터 상호통신에 의한 프로그램으로 데이터가 입력되고 시준점의 좌표 Elevation, 단면형상과 여굴량 등이 자동적으로 출력으로 방법이며 내공단면형상 및 여굴량의 측정 예는 그림 9와 같다.

다. 시공중 발파 진동의 제어

NATM 터널 굴착시에는 발파에 의한 소음 및 진동이 필연적으로 발생하게 되며 소음과 진동은 사용화약 및 장약량, 자유면의 유무, 발파방법, 측정지점과 발파지점의 이격거리 등과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 설계시에는 주변의 지형 지물 상태에 따라 영향을 최소화 할 수 있는 방법으로 검토되어야 하며 시공시에도 시험발파를 통하여 실제적인 영향을 비교·검토하여 터널내 구조물 및 터널 인근에 피해가 없도록 발파 소음과 진동의 허용기준을 설정하여야 한다.

현재 국내에서는 대부분 독일의 DIN 기준을 준용하여 <표-14>와 같이 발파진동의 허용기준을 설정하고 있으나, 서울 외곽 순환고속도로의 경우 허용기준을 0.3cm/sec 이하로 적

표 14 발파진동 허용기준(DIN기준)

진동등급	I	II	III	IV
분류	문화재	주택,아파트	상가	철근콘크리트빌딩 및 공장
허용진동속도(cm/sec)	0.2	0.5	1.0	1.0~4.0

표 15 발파진동의 영향 측정결과

터널명	구분	표준단면1	표준단면2	표준단면3	표준단면4
수리터널	인근주택과의 거리(m)	400	350	300	250
	진동실측치(cm/sec)	0.08	0.16	0.12	0.07
수암터널	인근주택과의 거리(m)	500	310	240	160
	진동실측치(cm/sec)	0.013	0.037	0.065	0.085

표 16 Beam 공시체(150×150×530mm)에 의한 압축강도 기준

압축강도 σ 차(kg/cm ²)	8시간		W/C(%)	SLUMP(cm)	굵은 골재의 최대 지수(mm)
	3일	28일			
55	140	200	60이내	5-12	15

표 17 시방배합

터널명	설계 기준 강도(kg/cm ²)	굵은골재최대 지수(m/m)	슬럼프(cm)	공기량(%)	단위 수량(kg)	단위 시멘트량(kg)	물시멘트비(%)	절대 잔골재율(%)	단위 잔골재량(kg)	단위 굵은골재량(kg)	금결량(kg)	유동화제(kg)
수리터널	200	15	12	4	203	450	45	60	958.5	644	54	4.5
수암터널		13		3.5	181	452	40	60	1,005	717	22.6	4.5

표 18 Rebound 량(%)

수리터널		수암터널	
천정부	측벽부	천정부	측벽부
14	12	15	10

표 19 슛크리트의 평균강도(kg/cm²)

재령8시간	3일(σ_{28})	28일(σ_{28})	
		시험mold	시추core
65	155	245~250	240

용하고 있으며, 특히 터널 시공구간중 수리터널과 수암터널의 인근에는 대단위 APT와 주택, 목장들이 위치하고 있어 소음과 진동에 대한 인근 주민의 반응이 민감한 점을 고려할 때 시공중 관리대책과 공법 및 시설보완이 무엇보다도 요구되고 있다.

이와 같은 점을 반영하여 발파진동 및 소음의 최소화를 기할 수 있는 발파패턴의 선정과 아울러 터널입구와 인근주택가 사이에 갱문부 방음문 및 터널내부 차음 벽 설치, 송풍기 소음방지시설은 물론 야간작업금지 등의 노력을 기울이고 있으며, 현재까지의 터널별, 굴착단면별 측정결과를 요약하면 <표-15> 와 같이 인근 최단주택지역에 미치는 진동이 영향은 평균0.16cm/sec 이하로 측정되고 있다.

(2) 슛크리트

스�크리트는 굴착단면에 완전하게 부착되어 절리면을 봉합하여 지반의 진행성 거동을 억제할 수 있어야 함으로 이와 같은 효과를 기하기 위해서는 발파버럭처리와 필요에 따라 강지보공(Steel-Rib)의 설치가 완료되는 즉시 시행되어야 하며, 재령 28일의 설계기준 강도뿐만 아니라 시공시에는 초기강도 발현도 중요한 관리요소가 된다.

도로터널에서는 8시간 또는 1일, 3일, 28일의 강도를 기준으로 관리하고 있으며, 적절한 슛크리트의 품질을 확보하기 위해서는 원석선정 및 Crucher에서의 골재생산관리, 세골재의 입도 및 불순물관리, 골재의 보관, 골재의 보관, 적정배합의 선정 및 생산시 배합의 수정, 고정식 B/P에서의 혼합과 생산, 생산 및 타설시 Slump 관리, 슛크리트 타설

장비의 성능 및 기능공의 숙련도, 타설시 유효거리의 확보등 제반사항에 관하여 충분한 사전조치가 이루어져야 하며 시공굴착면의 여굴정도, Wire-Mesh와 굴착면 사이의 간격도 슛크리트시공시 고려되어야할 요소이다. 또한 시공후에는 일정한 검사기준에 의하여 지속적인 사후확인이 필요하며 고속도로 터널에서 시행중인 슛크리트의 품질기준 및 시공결과를 요약하면 다음과 같다.

가. Wire-mesh용 Shortcrete

① 배합 및 강도기준(표 16 참조)

② 두께관리

· 관리기준

- 검측된 평균두께 \geq 설계두께
- 검측된 최소두께 \geq 설계두께 $\times 75\%$

· 연장 20m당 아치부 5개소, 측벽부 1개소씩

Percussion, Diamond Drill로 지름 32mm이상의 검사공을 뚫어 확인

③ 시공후의 Core 확인

- 재령 28일이 경과된 슛크리트 면에서 코아보링기로 $\varnothing 100 \times 200$ 또는 $\varnothing 50 \times 100$ mm 되는 원추공시체 채취, 압축강도 실시.
- 시험코아의 평균값 $\geq 85\%$ 이상 강도 발현

④ 배합설계 및 시공결과

· 골재원

- 조골재 : 터널암 이용생산
- 새골재 : 세척사 이용
- 시멘트 : 1종 포틀랜드 시멘트(표 17,18,19 참조)

나. 강섬유보강 슛크리트

① 강섬유의 형상과 조건 강섬유의 형상은 시멘트 콘크리트 속에서 콘크리트와 부착력 및 인발에 대한 저항력과 같은 기계적인 특성에 많은 영향을 준다. 현재 콘크리트의 보강재료로 사용되고 있는 강섬유의 형상은 그림과 같으며 슛크리트용으로서 아래와 같은 특성이 요구된다.

· 분산성으로 콘크리트 내에 분산이 잘 되어야

한다.

- 정착성으로서 콘크리트 내에서 빠지지 않고 견뎌야 한다.
- 높은 인장강도로서 외부응력에 강력히 대응을 해야한다.

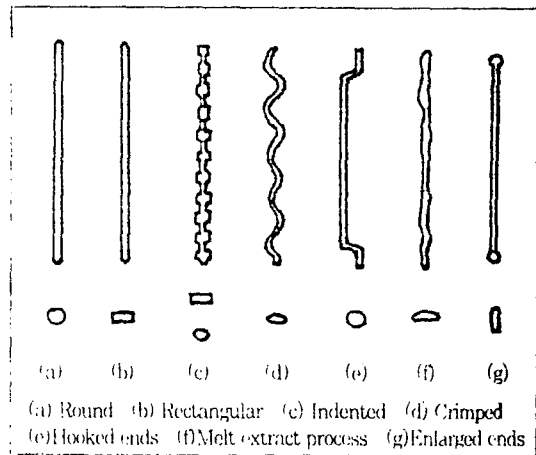


그림 10 강섬유의 형상에 따른 종류

② 품질기준(표 20 참조)

· 휨인성지수(Toughness Index)는 주어진 변위까지 흡수된 에너지를 최초 균열이 발생하는 변위까지의 흡수된 에너지로 나눈값을 의미하며 시험방법은 ASTM C 1018에 준한다.

- 조골재 : 터널암 이용 생산
- 새골재 : 세척사
- 시멘트 : 1종 포틀랜드 시멘트
- 지방배합(표 21 참조)
- 혼합 및 시공

강섬유보강 슛크리트에서는 콘크리트 속의 강섬유가 고르게 분산 혼합되어야만 시공시 노즐의 막힘현상을 방지하여 원활한 슛크리트를 시공할 수 있다. 고정식 B/P에서 (골재+시멘트+강섬유) → (물+혼합재)순으로 혼합생산하게 되면 강섬유의 계량오차가 기준(2%이내)보다 상대적으로 크게

발생되고 강섬유 Bin에서 믹서로 직접 투입하면 섬유투입이 일시에 이루어지기 때문에 강섬유가 분산 혼합되지 않고 뭉침현상이 필연적으로 발생하게 된다.

이와 같은 문제를 해석하기위한 방안으로 강섬유 투입 Bin에 Screen을 설치하고 진동기를 부착하면 강섬유가 고르게 분산투입되어 적정 혼합물의 생산이 가능해지는 장점이 있다.

표 20

강섬유			숏크리트 혼합물				
인장강도 (kg/cm ²)	섬유길이	형상비	휨강도 [°] bk(kg/cm ²)			압축강도	휨인성지수
			1일	3일	28일		
70이상	30mm표준 노즐직경의 70%이내	40~70	24이상	33이상	50이상	200이상	Is=3.5 I10=6이상

표 21

설계기준 휨강도 [°] 28 (kg/cm ²)	콘은골재 최대지수 (m/m)	슬럼프 (cm)	Air (%)	W (kg)	C (kg)	W/C (%)	S/a (%)	S (kg)	G (kg)	급결 재량 (kg)	유동 화계 (kg)	강 섬유 (kg)
50	13	10	2.5	207	464	44.6	65	105	581	23.2	1.392	40

※휨인성지수 Is=4.4> 3.5 I10=7.8> 6

(3) 록볼트와 강지보공

가. Rock Bolt의 적용형태

Rock Bolt는 지반자체의 강도를 봉합, 보강, 보형성, 내압작용의 효과를 통하여 증진시켜 응력을 지지하는 공법으로 Rock Bolt의 길이는 굴착면 주변의 이완영역을 넘어서 불안정영역까지 충분히 지지할 수 있어야 한다.

ROCK Bolt는 정착방식과 주입재료에 따라 선단정착형과 전면접착형, 혼합형이 있으며, 판교~일산간에 적용하고 있는 Rock Bolt는 모두 전면접착형으로서 주입재료는 1Arch 4차로 터널에서는 Resin형, 2-Arch 4차로 터널에서는 선단 Resin 시멘트 모르타르 충전형을 혼합적용하고 있으며 직경

45mm(38mm Bit천공)의 천공구멍에 SD35직경 25mm 규격의 이형강봉을 삽입 체결하는 형태이다.

나. 품질검사 기준 및 시공결과

Rock Bolt는 시공에 앞서 사전에 시험시공을 실시하고 인발내력을 확인한 후 인발시험시 설정된 인발내력의 80% 이상이면 합격하는 것으로 보며, 인발시험은 50분당 1개소의 빈도로 시행한다.

인발시험의 목적은 암반층과 Rock Bolt의 항복강도를 최대 인발내력으로 기준하여도 무방하다.

Resin형 주입재료로 시공한 1-Arch 터널의 인발시험결과를 요약하면 철근 항복강도의 80% 이상인 15ton의 인발내력이 확보되고 있어 Rock Bolt 시공시 사전에 Resin의 팽창성, 천공직경과 Rock Bolt의 직경차이, 천공길이 등을 사전에 검토하여 Resin등 주입재료의 소요량을 결정하고 공내 청소를 완벽히 한 후 주입재를 주입하고 Rock Bolt를

삽입시공하고 Plate를 부착한 다음 볼트너트가 빠지지 않을 정도로만 조이면 충분한 축력과 인발내력이 확보될 것으로 판단된다.

다. Rock Bolt 시행상의 문제점

Rock Bolt 시공을 위한 천공시 천공직경을 유지하기 위하여는 천공시 구멍이 증가되는 점을 고려 설계직경보다 최소 6~8mm 적은 Bit로 천공하여야 하여야 소요 천공경을 시공할 수 있다.

천공장비에는 Bit를 동력모체와 연결하는 Rod가 있으며 이 Rod는 통상 Bit의 직경보다 5~6mm정도 적은 직경으로 조합되어야 Bit로 굴착한 암편 및 토석을 Rod와의 직경차이 부분을 통하여 구멍밖으로 배출할 수 있다.

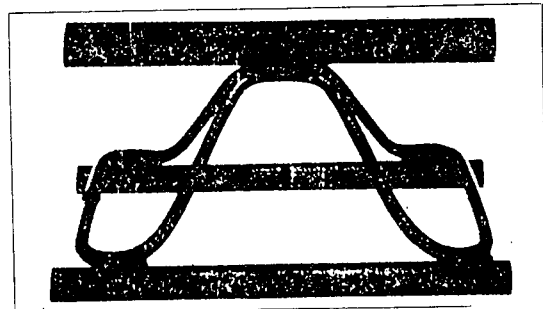
도로터널에서 적용하고 있는 Rock Bolt의 설계 천공 직경은 45mm이므로 이에 소요되는 Bit는 약 38~40mm, Rod는 32~305mm 정도가 사용되어야 하나 국내에서 사용되고 있는 점보드릴의 Bit는 모두 직경 45mm를 표준으로 하고 있으며, 그 이하의 제품은 외국의 장비 제조회사에 특수 목적으로 주문 생산되어야 하는 문제점이 있고, 실제 주문 생산된 38mm Bit와 32mm Rod를 조합하여 Rock 구멍을 천공한 결과 천공시 Rod가 휘거나 부러지는 현상이 발생하여 사용이 불가능한 실정이며, 41mm Bit에 36mm Rod를 조합한 경우에도 시공은 가능하나 작업효율이 많이 뒤떨어지는 문제점이 도출되었다.

결과적으로 점보드릴의 특성과 Rock Bolt의 길이가 길어진 점을 고려하면 천공경의 확공현상과 이에 따른 레진 등 고가의 투입재료 추가투입도 부득이한 실정으로서 향후 터널설계시에는 합리적 개선이 필요 할 것으로 판단된다.

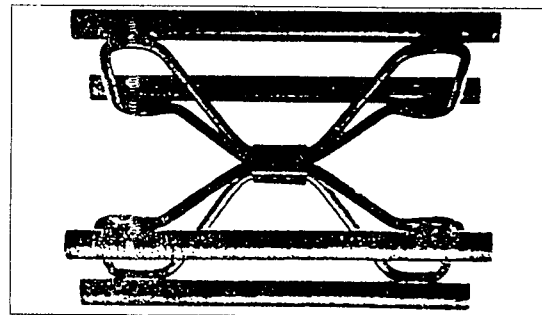
라. 강지보공

강지보공(Steel-Rib)은 숏크리트 타설후 경화시 까지 임시 보강재 기능, 무지보 지반의 직접보강 및 숏크리트 라이닝 하중분산 작용, Fore-pilling, Pipe Rofe 시공시 지지대, 터널 내공확인, 발파 천공의 지표(Guide)등의 기능을 하는 보조 지보재로서 현재 국내의 NATM 터널에서는 H-형강 지보공은 중량이 무거워 설치시간이 지연되고, 설치후에도 터널 내측과 지보공의 외측은 여굴의 대소에 따라 빈 공간이 형성되거나 대부분은 내측에 밀착하여 설치되므로 그 좁은 공간에 숏크리트를 완벽하게 타설하기에는 많은 어려움이 따르게 된다. 이와 같은 문제를 보완하기 위하여 개발된 lattice Girder는 3차원적 구조 형상 때문에 숏크리트의 부착성 증대 및 리바운드량의 감소는 물론 무게가 가벼워 설치시간이 단축되는 장점이 있어 지보재의 기능을 크게 향상시킨 것으로 판단되며

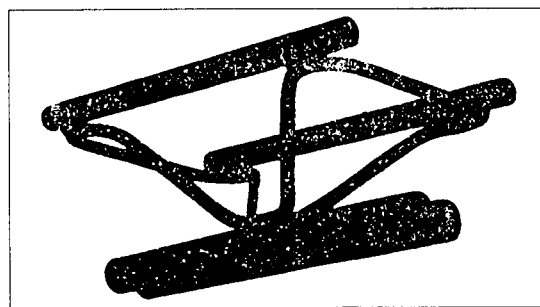
Lattice Girder의 특성을 요약하면 다음과 같다.



(a) Pantex Lattice Grinder(3 Bar Type)



(b) Pantex Lattice Grinder (4 Bar Type)



(c) Pantex Lattice Grinder(Reinforced 3 Bar Type)

그림 12각종 lattice Grinder의 형상

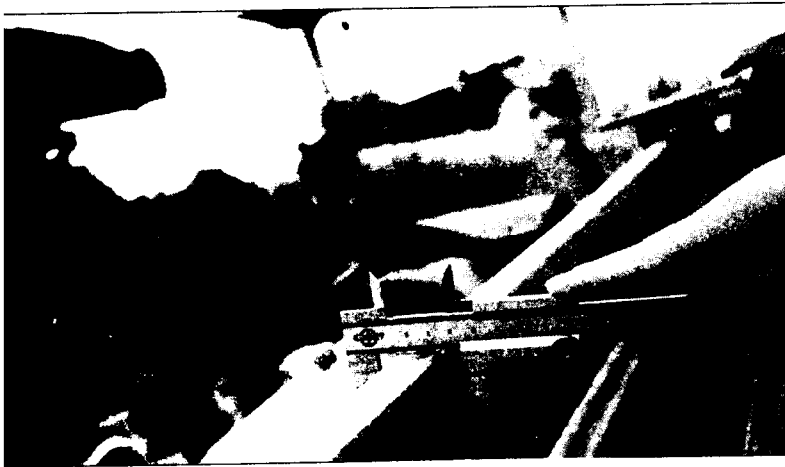


사진 10 직경 36mm Rod



사진 11 직경 41mm Bit

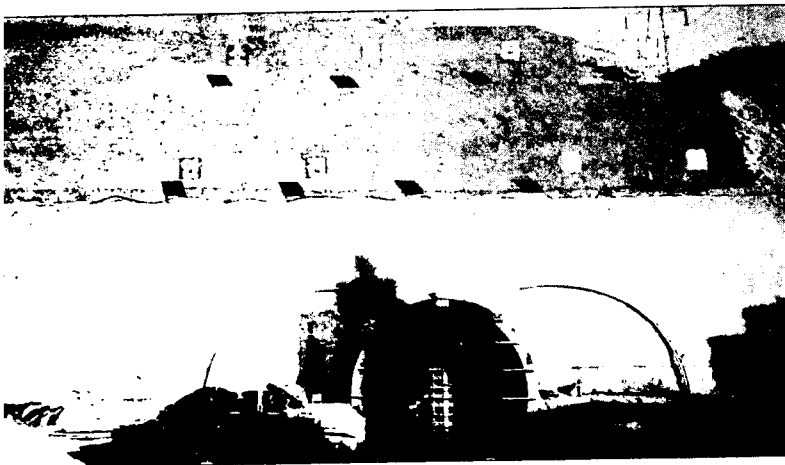


사진 12 소래터널(24Arch)의 갱문부 시공

- H 형강 지보재에 비해 40-60% 정도 가볍기 때문에 운반 및 설치시간이 단축되며 막장의 조기안정이 가능하도록 터널 굴착후 조기에 설치가 가능하다.
- H 형강 지보재에 비해 유연성이 있으므로 굴착면에 밀착설치가 가능하다.
- 슛크리트 밀착성이 우수하여 방수효가 뛰어나고, 고품질의 구조체를 만들 수 있다.
- Lattice Girder 사이로 Forepilling 시공이 가능하므로 설치 각도를 최대한 줄여 시공 할수 있다. (그림 12 참조)

(4) 2-ARCH 터널의 시공순서

2-ARCH 터널은 기존 1-ARCH 터널과 달리 시공중 발생하는 응력변화를 최대한 억제, 각 과정으로 분배하면서 시공하여야 안정성을 기할 수 있는 구조체 이기때문에 응력이 집중되는 중앙부를 선 시공한후 좌우측벽을 시공하고 최종적으로 라이닝과 바닥부 Invert를 폐합하는 순서를 14단계의 세분화된 과정으로 작업이 수행되며 이를 간단하게 요약하면 그림13과 같다.

'97.11. 현재 시공진도는 제4단계의 중앙터널기 등을 설치하는 과정까지 추진되고 있으며, 기존시공경험에서 도출된 천단 CROWN 부위의 보 콘크리트의 밀착타설 및 라이닝과 보의 연결 등 보의시공이 음부 방수상의 문제점을 최소화할 수 있는 방향

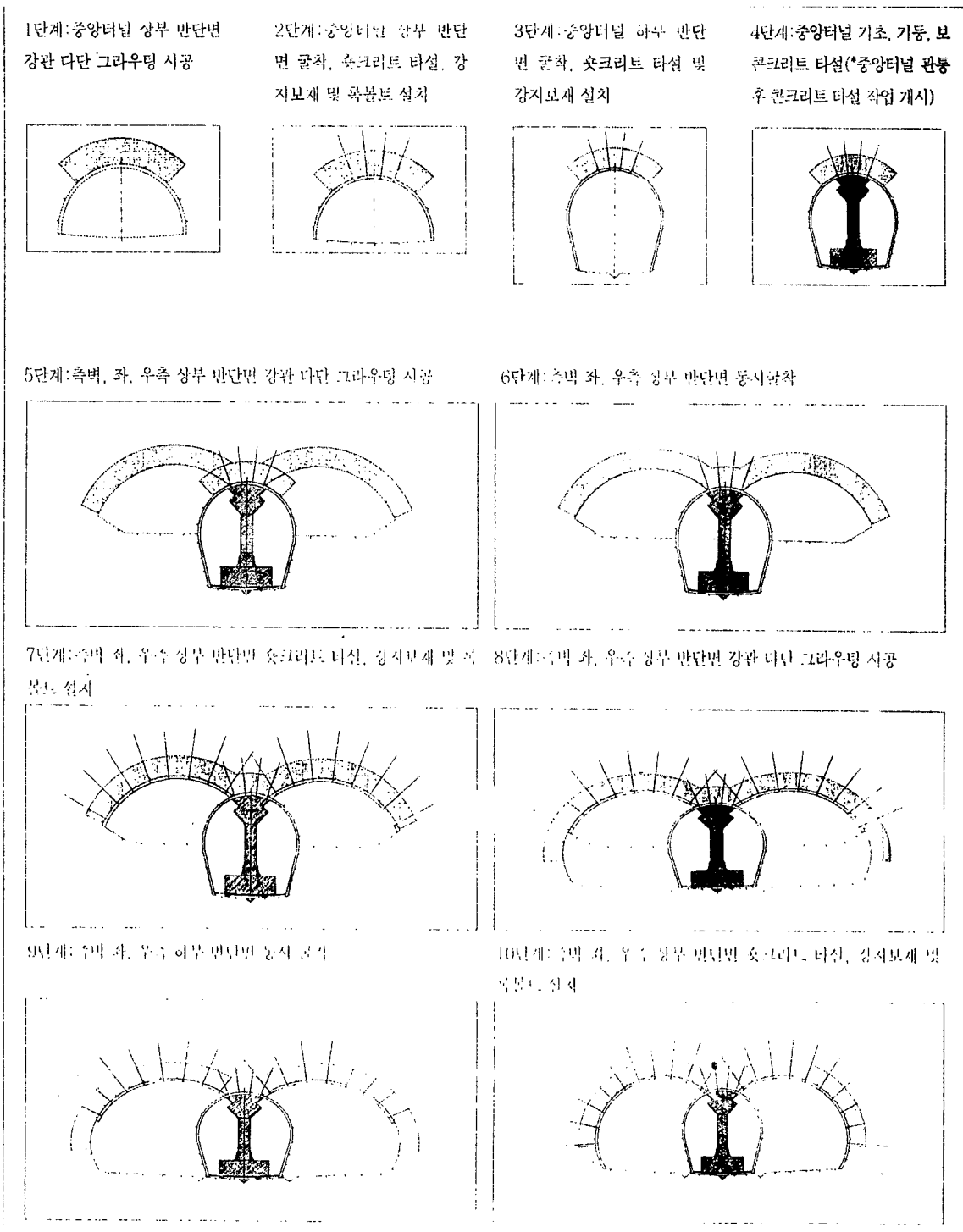
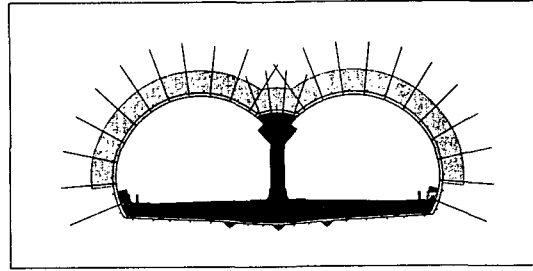
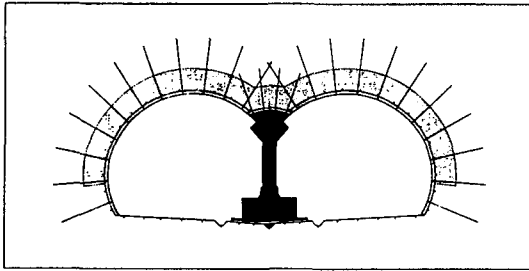


그림 13 2-Arch 터널의 시공순서

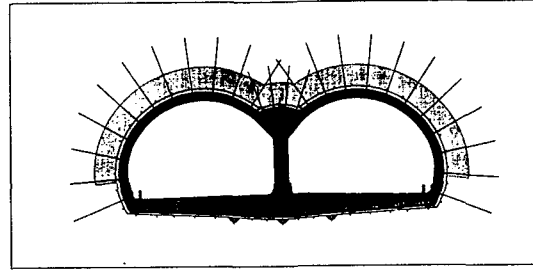
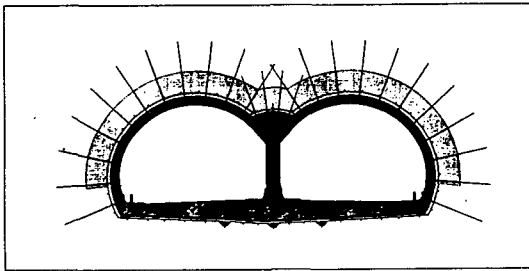
11단계: 중앙터널 숏크리트 및 지보제 제거

12단계:바닥 및 측배 ABUR 콘크리트 타설("측벽 터널 관통후 콘크리트 타설)



13단계:라이닝 콘크리트 타설

14단계:노면 아스팔트 덧씌우기



으로 공사 및 품질관리에 역점을 두고 추진하고 있다.

6. 맺음말

국토면적이 좁고 산지가 많은 우리나라의 제외되어 여건상 대도시 주변의 교통수요에 대처하기 위하여는 다차선 도로건설과 대단면 터널의 필요성이 증대될 것으로 예상되어 4차선 도로터널의 설계, 시공을 통한 경험 축적은 국내터널 기술의 발전과 다차선 도로의 원활한 교통운용에 많은 기여를 할 것으로 기대된다.

1. NATM 공법을 적용하는 터널에서 라이닝은 주 지보재의 기능보다는 미관, 기타부속시설 설치 공간, 터널안전도 증진 등의 목적으로 설치하고 있으나 터널공기의 대부분이 라이닝 콘크리트 시공에 소요되므로 앞으로 시공성, 경제성, 안정성 등을 고려하여 콘크리트 라이닝을 대체할 수 있는 방안이 적극 검토되어야 하겠다.

2. 2-ARCH 터널은 안전성을 고려, 재래식공법과 같이 라이닝이 모든 이완하중을 지지하는 개념으로 설계하였으나, 앞으로 보나 적정설계를 위하여 암질이 나쁜 산악터널의 이완 영역범위가

연구·검토되어야 하겠다.

3. 좌우 분할 굴착방법은 4차로 터널의 전체굴착 높이가 10m로서 점보드릴의 유효 천공작업높이 보다 훨씬 높게 되어 천공 및 굴착, 록볼트 시공이 어렵고 슛크리트 타설시 이격거리 증가로 REBOUND 량과 작업시간증가 등의 문제가 있으므로 설계당시부터 상하 반단면 굴착 등 시공 가능한 방법으로 굴착방법이 반영되어야 하겠다.

4. 여굴과 내공단면의 측량방법을 보다 단순, 정확하게 수행할 수 있도록 과학화하고 발파패턴, 천공길이, 장약량 등을 암반상태에 맞게 조절하는 등 여굴량을 감소할 수 있는 방안 수립이 시공 과정에서 보다 더 강조되어야 하겠다.

5. 강섬유 보강 슛크리트는 와이어 매쉬 + 슛크리트방법보다도 내구성, 시공성, 경제성이 우수하고 품질관리도 용이함으로 향후 도로 시공시 적극 반영하는 것이 바람직하다.

6. 록볼트 천공장 5.0M, 천공직경이 45MM로서 국내보유 점보드릴의 표준 bit 규격이 43-45MM 인점을 고려하면, 설계상의 천공직경을 50MM 수준으로 변경하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

7. 기존의 H-형강 Steel-Rib에 비하여 Lattice Grider는 취급용이 및 설치시간의 절약, 정밀 시공가능, 부착성 증대 및 리바운드 감소 등의 효과가 있으므로 앞으로 시공성, 안전성, 경제성 등을 고려하여 Steel-Rib의 재료 변경이 필요하다.

이상과 같이 국내에서 최초로 건설이 이루어지

고 있는 4차로 도로터널에 대한 몇가지 검토사항을 나름대로 정리해 보았다. 앞으로 터널 시공시 예기치 못한 문제점이 발생할 수 있을 것으로 판단되며, 학회 회원 여러분의 많은 조언과 충고가 있으시길 바란다.

(註 ; 土木學會誌 '97年 12月에서 轉載함)

금년의 APEC Engr. 國際회의 日程

1. 東南亞太平洋工學會聯合(FEISEAP)

技術士分科委員會

25次 會長團 會議

· 期間 : 10月 7日~9日

· 場所 : 香港工學會 會議室

2. APEC Engineering Project

運用 및 調整分課 委員會

· 期間 : 11月 5日~6日

· 場所 : Sydney 澳洲 工學會聯合 會議室