

특별강연

암반공학적 고찰에 의한 추곡-웅진간 도로터널 설계 사례의 분석

김치환¹⁾ · 임경호²⁾ · 김영근³⁾ · 김택곤⁴⁾

- 1) 우석대학교 토목공학과
- 2) (주) 청석엔지니어링 지반공학부
- 3) (주) 대우건설 토목연구팀
- 4) (주) 대본엔지니어링 지반공학부

1. 서 론

최근 국내에서는 국토 개발의 일환으로 추진되는 국가의 토목공사 중 많은 사업이 설계와 시공을 일괄 계약하는 형태로 바뀌고 있다. 이에 따르면 설계의 평가에 따라 시공자와 설계사가 동시에 결정되는 경쟁 방법도 도입되었다. 따라서 대규모 토목공사에서 시공을 위한 설계의 중요성이 더욱 높아졌다. 설계의 내용에 따라 시공사가 결정되기 때문에 설계사는 새로운 개념과 설계 기술을 동원하여 최고의 설계를 해 내려고 심혈을 기울이고 있다. 이와 같은 계약 형태는 앞으로도 더욱 확대될 것으로 예상되며, 이에 따라 설계 기술의 발전도 더욱 빨라지고 지속될 것으로 기대된다.

이러한 추세에 따라 터널 설계도 발전된 면이 있을 것으로 기대된다. 최근 사회 기반시설의 하나인 도로의 설계 사례를 보면 총 연장 중 터널이 차지하는 비율이 크게 증가하고 있다. 앞으로도 산지가 많은 우리나라의 상황을 감안할 때 터널이 많아지고 길어지는 추세는 필연적일 것으로 예상된다. 따라서 도로와 같은 설계에서 터널의 설계 수준에 따라서 시공의 계약 여부가 결정되는 상황이 많아질 것이다. 요즘에도 경쟁사보다 우수한 터널 설계를 하기 위하여 조사와 시험을 위한 다양한 방법이 동원되고 조사량과 시험 횟수도 크게 증가하고 있다. 터널의 안정성 해석을 위하여 암반 공학적 특성을 반영한 여러 종류의 소프트웨어도 활용하고 있다. 이렇듯 양적 질적으로 발전하고 있는 터널 설계의 향후 발전 방향을 예측하기 위해서는 현재의 터널 설계 내용을 파악해 보는 것도 필요할 것으로 판단된다. 이를 위해 본 보고에서는 최근에 수행된 도로 터널 설계 사례를 살펴보고자 한다.

설계 사례로 선정된 터널은 1999년에 설계된 강원도 추곡-웅진 지역에서 도로를 시공하는 사업 중 일부 구간

에 시공될 예정에 있다. 이 사업은 산과 호수가 어우러져 수려한 경관을 자랑하는 지역이나 굴곡이 심하고 사고 위험이 높은 기존도로를 산악지역을 가로지르는 터널로 대체 시공하여 주행 시간을 단축하고 교통 서비스 수준을 향상시키고 동시에 자연 환경을 최대한 보존하려는 계획의 일환이다. 산악지역이기 때문에 전체 도로 구간 중 터널이 차지하는 비율이 65%를 상회하였고 결과적으로 터널 설계의 중요도가 극히 크다고 판단된 사업이다. 이 사업과 관련하여 여러 설계사의 설계 사례가 있으나 그 중 4개의 설계 사례를 대상으로 설계 내용을 검토하고자 한다. 파악하고자 하는 내용은 조사의 종류와 조사량을 중심으로 조사와 시험 종류를 분석하는 것이다. 다음으로 조사와 시험의 결과와 터널의 역학적 안정성을 검토하기 위하여 수치해석에 적용된 입력물성의 특성에 대하여 파악하고자 한다. 마지막으로 터널 단면 크기의 결정 과정과 굴착 및 보강패턴의 결정 과정을 파악하고 계측 장비의 선정과 터널의 방수 외에 유지 관리 등의 설계 내용에 대하여도 파악하고자 한다.

2. 지형 및 지질

2.1 지형

본 지역은 행정 구역상 강원도 춘천시 추곡리에서 강원도 양구군 웅진리에 속하는 지역으로서 남측에 소양호가 근접하여 있고 동북부에는 양구읍이 소재한다.

태백산맥에서 분기된 광주산맥의 동북부에 해당하는 본 지역 북측으로 사명산(1,197.6 m)이 위치한다. 사명산은 본 지형을 지배하고 있는 산으로 남북 능선이 춘천시와 양구군을 구분지으며, 서쪽으로는 동서로 연결된 죽엽산(859.2 m), 동쪽은 청량현(684.8 m)과 연결되어 있다.

사명산을 분수령으로 하여 주 능선의 방향은 대부분의 지역에서 남북 방향이나 중부 및 남부 지역에서는 N40°W

로 편향되어 있다. 산능의 규칙적인 발달은 편마암의 엽리 방향 및 화강암의 경계선과 매우 밀접하다. 즉, 북부 및 동부 지역에서의 편마암의 엽리 방향은 N10°~20°W이며, 남부 지역의 화강암 경계와 엽리 방향은 N30°~40°W이다.

본 지역의 가장 큰 지형적 특징은 사명산을 중심으로 한 고지대로 급한 산사면과 V자 모양의 계곡을 이루고 있는 것이 특징이다. 능선, 산사면 및 계곡 곳곳에 암반 노두가 잘 나타나 있으며, 계곡부는 암반 절리 및 편리를 따라 분리, 운반 퇴적된 전석(rock debris)과 테일러스(talus)가 있다.

수계의 발달도 지질 구조와 매우 밀접하여 큰 단층에 의해 규제된 하천이 이 지역에 발달하여 있고, 춘천시와 양구군 경계의 토속 박물관 상부의 하천은 편마암의 엽리 방향과 일치한다. 본 지역의 하천들은 대부분 급류하는 하천들로서 하상의 폭이 좁은 협곡을 이루고 하도의 경사가 급하여 우기에는 하각 작용을 강하게 받아 산사면은 급사면을 이룰 뿐만 아니라 요철이 심한 모양을 이루고 계곡에는 큰 전석들이 퇴적되어 애주가 발달되어 있다.

2.2 지질

본 지역에 분포하는 지질은 선캠브리아기의 변성 퇴적암류와 후기에 관입한 고기의 각섬암과 이를 관입한 화강암류로 구성되어 있는 혼성암체(migmatite complex)로서 고온 저압의 변성 작용에 의하여 편리의 발달이 양호하며, 전반적인 지질구조를 지배한다. 선캠브리아기의 편마암류는 용두리 편마암 복합체에 속하며 조사 지역 지질의 기저를 이루고 있다. 편마암류는 호상 편마암과 석류석 편마암으로 구성되고 조사 지역의 대부분을 차지한다. 이들 사이는 서로 점이적인 관계를 가지며, 기존 도폭에서는 미그마타이트질 편마암(화춘도폭, 1997) 혹은 석류석 편마암(내평도폭, 1994)으로 명명한 암석으로서 하부의 호상 편마암 및 상부의 석류석 편마암으로 구분하였다. 이 편마암류는 니질과 사질 퇴적물이 변성된 암석으로서 미그마타이트화 된 것이며 석류석 편마암이 미그마타이트화 작용이 더 진행되어 엽리의 발달이 상대적으로 미약하고 연장성이 불량한 것이 특징이다.

3. 터널 현황

설계 구간 중 터널의 위치는 Fig. 2와 같고, 터널의

평면상 선형은 4개 설계 사례에서 거의 비슷하였다. 각 설계 사례에서 평면상 터널의 거리 차이는 최대 약 120 m 내외로 추정되었다.

기본설계에 의하면 도로 총 길이가 약 6,100 m이다. 이 중 터널이 2개소가 있고 각각의 길이는 약 2,420 m와 약 822 m로 터널의 총 길이는 약 3,242 m이다. 이번 실시설계 사례에 의하면 도로의 총 길이는 변하지 않았으나 터널의 개수와 길이가 늘어난 특징이 있다. Table 1과 Fig. 1은 실시설계의 터널현황을 나타내며 터널의 개수가 1개 증가하여 3번째 터널이 추가로 계획되었다. 기본설계에서 1번째 터널의 길이가 약 2,420 m에서 실시설계 사례에서는 그 길이가 약 2,688 m~2,990 m로 길어졌다. 또 2번째 터널의 길이도 기본설계에서 약 822 m인 것이 실시설계에서는 약 903 m~1,293 m로 늘어났다. 마지막 3번째 터널은 길이가 약 385 m~463 m의 범주에 들어 있다. 실시설계 사례에서 터널의 총 길이는 약 4,001 m~약 4,739 m로 기본설계에서의 터널 길이 약 3,242 m에 비교하면 약 23.4%~ 46.2% 길어졌다. 도로의 총 길이 약 6,100 m와 비교하면 기본 설

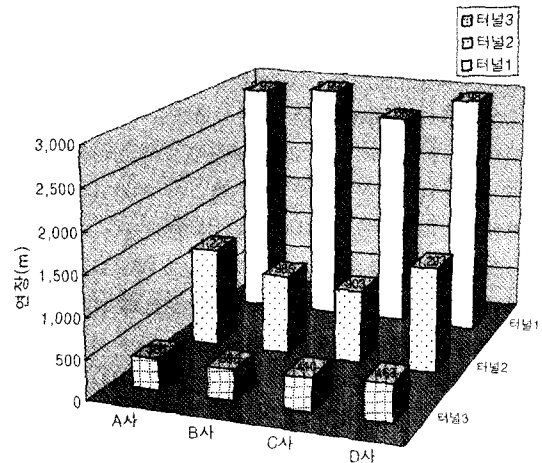


Fig. 1. 터널 현황.

Table 1. 터널 현황.

구분	기본 설계	설계 사례				
		A사	B사	C사	D사	
터널 갯수	2	3	3	3	3	
연장 (m)	터널 1	2,420	2,925	2,990	2,688	2,983
	터널 2	822	1,225	985	903	1,293
	터널 3	-	385	385	410	463
계	3,242	4,535	4,360	4,001	4,739	

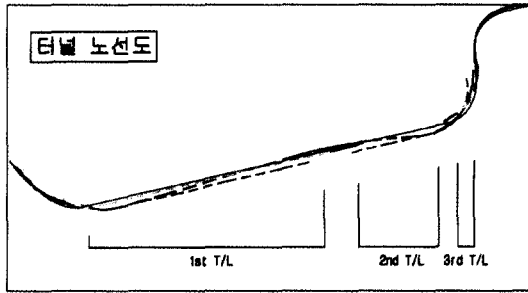


Fig. 2. 터널 노선도.

계에서는 터널의 비율이 약 53.1% 이었으나 실시설계에 서는 그 비율이 약 65.6%~77.7%로 크게 증가하였다.

4. 조사 및 시험

4.1 조사 및 시험 결과의 비교 분석

조사 항목에서는 일반 실시설계에서 보편적으로 시행 하고 있는 지표지질조사, 시추조사, 전기 비저항 탐사, 탄성과 탐사, 실내의 시험 뿐만 아니라 지오토포그래피 (geomotography), 수직절리 분포 특성을 파악하기 위한 BIPS (Borehole Image Processing System), BHTV (Borehole Televiewer), 초기응력 측정을 위한 수압파쇄 시험, 절리 특성 규명을 위한 절리면 전단 및 관련 시험 등을 실시하였다. 이외에도 시추공내 전단시험(borehole shear test), swelling & slaking 특성 실험을 실시한 사 례도 있었다.

Table 2는 각 설계 사례에서 수행한 조사 항목과 조 사 목적을 요약한 것이다.

4.1.1 지표지질조사

암석의 분포, 지질 구조대의 파악이나 노선 선정에 필 요한 지질 정보의 획득 이외에도 암반 내 불연속면의 특 성을 파악하여 설계에 반영하였다. 주로 터널의 시점부와 종점부에서 발견한 노두를 중점 대상으로 하여 관찰한 절리의 개수는 Table 3과 같이 약 74개~303개 었다. 절 리 조사에서 관찰 항목으로는 절리 간격(J_s), 절리면의 연 장성(J_p), 절리면의 거칠기(J_r), 절리의 틈새 간격 (J_a), 절 리내 충전물(J_f), 절리면의 습윤 정도(J_w) 이다. 이외에도 시추공내 BIPS 나 BHTV 조사에서 관찰된 절리를 분석 활용하였다.

이 중 1개사의 보고서에서는 절리 조사를 분석한 결과 는 있으나 절리를 관찰한 위치수와 절리의 개수를 확인 할 수 없었다.

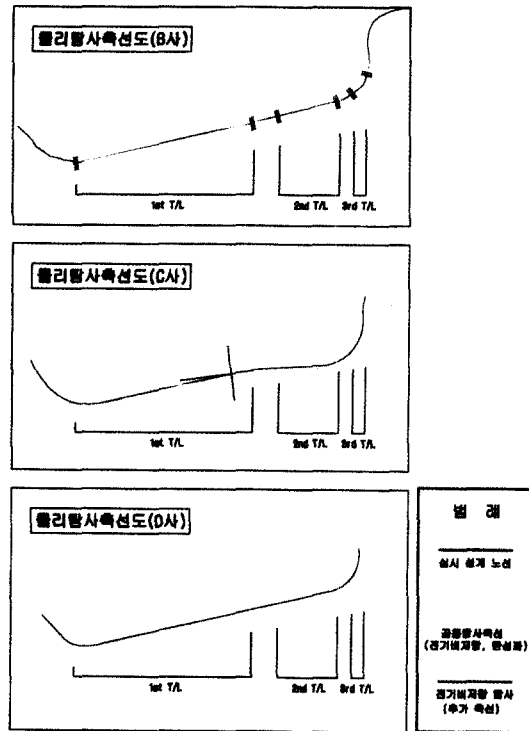


Fig. 3 물리 탐사 측선도.

4.1.2 전기 비저항 탐사 / 탄성과 탐사

이번 설계사례 외에 1개 설계사를 포함하여 전체 5개 설계사가 공동으로 물리탐사를 수행하였고 각 사의 판단 에 따라 물리탐사를 추가로 실시하였다. 공동으로 수행 한 물리탐사의 측선은 터널 축 방향에 평행하게 3개 이 었다.

전기 비저항 탐사의 경우 A사는 3개 공동 측선 이외 에 터널 입·출구부의 횡단 노선 12측선을 포함하여 총 17.35 km의 탐사를 시행하였고, B사는 각각의 터널 입· 출구부를 대상으로 3개 측선씩 총 18개로 터널을 횡단하 는 측선을 포함한 총 15.6 km, C사는 추가의 횡단, 종 단 방향 측선을 포함한 총 17.257 km, D사는 터널 진 행 방향으로 1개의 추가 측선과 갱구부 50 m 간격의 횡 단 측선을 포함한 총 24.67 km의 탐사를 시행하였다. 전 기비저항 탐사선의 길이를 터널 연장별과 대비하면 터널 길이 1 km에 대해 약 3.58~5.21 km의 전기 비저항 탐 사를 수행한 것이다.

탄성과 탐사의 경우에는 4개의 설계 사례 중 3개의 설계 사례에서 추가 탄성과 탐사를 수행하지 않고 3개 공동 측선에서만 탐사를 수행하였다. 단지 1개 설계 사

Table 2. 지반 조사의 항목과 수행 목적.

조사 항목	설계 사례			
	A사	B사	C사	D사
인공 위성 영상 분석	· 광역적인 선구조, 추정 단층, 암석 분포 지역 파악	· 광역 지질 현황 및 구조선 파악	· 노선 계획 수립 · 조사 계획 수립	-
지 표 지질조사	· 구조 지질적 특성 · 불연속면 상태 파악	· 노선 선정에 활용 · 터널구간 시추심도 결정에 활용	· 지질구조대 파악 · 불연속면의 특성 파악	· 노선 결정에 반영 · 노선 주변의 불연속면 발달상태, 특성 조사 · 암석 분포상태 확인
전 기 비 저항 탐 사	· 지층 분포 파악 · 파쇄대 구조 파악	· 지질 구조대 파악 · 암반 등급 분류에 활용 · 지층구조경계, 단층파쇄대 및 지하수, 공동 분포 파악	· 전기 비저항 이상대 및 지반내 공동 확인	· 노선결정에 반영 · 기반암의 분포상태 파악 · 지표 지질조사 결과와의 비교 · 시추조사 위치 선정 · 터널 구간 지보 형식 결정에 활용
탄 성 파 탐 사	· 지층 상태 및 구조대 파악	· 지층 경계 파악 · 지층의 파쇄 분포 · 암반 등급 분류에 활용	· 지층 구조 파악 · 탄성과 저속도 이상대 및 지반 공동 확인	· 지표 지질조사와 전기 비저항 탐사 결과와의 비교 · 선형 결정 및 지보 형식 결정에 활용
시추조사 (수평)	· 갱구부 암 상태 파악 · 단층대 확인 및 터널 패턴 결정	-	· 전단 파쇄대 규모 확인 · 터널 굴진 방향에 따른 지반의 변화 상황 조사	· 갱구부의 수평적 지층분포 파악 · 갱구부 지보형식, 보강 방안 결정
시추조사 (수직)	· 지층 확인 및 분류 · 터널 굴착 및 보강 패턴 계획	· 암반 등급 분류에 활용	· 암반 분류에 활용	· 암반 분류시 활용 · 단층대 유무 확인
BIPS/ BHTV	· 불연속면의 발달 상태 파악 · 절리내 충전물 유무 파악	· 사면 안정성 해석 · 불연속체 해석 · 암반 등급 분류에 활용	· 불연속면의 방향성, 발달 상태 파악 · 시추조사 및 지질 조사의 연계분석	· 갱구부 사면안정 해석 · 불연속체 해석에 이용
Down hole test/ cross hole test	· 갱구부 지층 상태 파악	· 지층 경계 파악	· 갱구부 지층 상태 파악	-
Geotomography	-	-	· 갱구부 지층 상태 파악	· 갱구부 보강 영역 범위 결정
수압 파쇄 시험	· 초기 지압의 크기 및 방향 측정	· 수치해석에 활용	· 수치해석에 활용	· 수치해석 입력자료로 활용
공내 재하 시험	· 암반의 변형 특성 파악	· 수치해석에 활용	· 수치해석에 활용	· 수치해석에 활용
투수시험/ 수압시험	· 암반의 투수성 파악	· 침투류 해석에 활용	· 대수층 및 암반층의 투수성 검토	· 침투류해석에 활용
실내 암석 시험 (일축압축강도, 인장강도)	· 수치해석에 활용	· 수치해석에 활용	· 수치해석에 활용	· 지반의 물성치 산정에 이용
현지암반시험 (절리면거칠기, 강도시험)	-	· 갱구부사면의 안정성 해석에 활용	· 암반 분류 및 수치 해석에 적용	· 암반 분류에 이용
BHST	-	-	· 시료채취가 어려운 현지 암반(풍화암 층)의 전단 강도 측정	-
Swelling&Slaking	-	-	-	· 갱구부 사면 피복공법 선정에 반영
알카리 골재반응 시험	-	-	-	· 재료원 활용에 이용

Table 3. 노두에서 조사된 절리의 갯수.

조사 위치		설계 사례			
		A사	B사	C사	D사
터널 1	시점부	-	37	22	미확인
	중앙부	-	-	127	
	종점부	17	44	22	
터널 2	시점부	18	-	27	미확인
	중앙부	-	-	20	
	종점부	-	-	18	
터널 3	시점부	39	41	27	미확인
	중앙부	-	-	16	
	종점부	-	51	24	
계		74 (3개소)	173 (4개소)	303 (10개소)	

레에서만 터널 진행 방향으로 1개의 축선에서 추가 탐사를 실시하였다. 탐사 연장은 최소 15.45~최대 21.77 km로 4개사 평균은 약 17.52 km 이고, 이를 각 사의 터널 계획 연장별로 대비해보면 터널 길이 1 km에 대해 약 3.41~4.59 km의 탄성과 탐사를 수행한 것이다.

전기 비저항 탐사와 탄성과 탐사의 해석 결과는 공동 조사를 수행한 관례로 각사의 해석 결과가 유사한 경향을 나타내고 있다. 다만 저 비저항대나 탄성과 탐사의 저속도대 분포에 근거한 지질 구조대나 파쇄대의 추정 위치는 두 번째 터널과 세 번째 터널에서 일부 상이한 경향을 나타내지만 이는 각사별 터널 시·종점부의 위치가 서로 상이하기 때문일 것으로 추정된다.

첫 번째 터널의 경우에는 시점부와 종점부에서 파쇄대로 추정되는 양상을 나타내었고, 두 번째 터널의 경우 시·종점부, 세 번째 터널의 경우 시점부에 파쇄대로 추정되는 이상대로 해석되었다.

4.1.3 공내 탄성과 탐사 / Geotomography

터널 갱구부 지층의 수직 수평적 분포를 파악하기 위해 down hole test 혹은 cross hole test 또는 지오토모

그래피도 수행하였다.

4.1.4 시추조사

지층 확인 및 단층대 유·무 확인 그리고 암반 분류에 활용하기 위해 시추조사를 하였다. 4개사 모두 대부분의 시추조사를 지표에서 연직된 방향으로 수행하였으나, 터널 갱구부 부근의 수평적 지층 분포를 확인하기 위해 3개 사는 각각 1~2개공의 수평 시추조사도 실시하였다. 특히 이들 수평 시추로부터 획득한 지질 정보는 갱문 위치 선정과 터널 진행 방향의 암반 분류에 활용할 수 있어 수직 시추조사 결과와 물리 탐사법으로 얻은 결과와의 연계 분석을 통해 보다 상세한 지질 정보의 유추가 가능한 장점이 있었다.

Table 4는 각 설계 사례의 터널별 시추 길이와 대략적인 시추 간격을 나타내는 것으로서 시추 장비의 진입이 곤란한 터널 중앙부의 산지 일부 구간을 제외한 평균 시추 간격은 약 200~250 m 이며, 평균 시추 길이는 터널 1 km에 대해 약 235~300 m, 시추공의 수는 터널 연장 1 km 대비 약 3.6~5.5공, 시추조사 심도는 터널의 계획고 하부 약 3 m~터널 폭의 1D(10 m 내외)까지로 나타났다.

4.1.5 시추공내 시험

시추공내 불연속면의 발달 상태 파악을 위해 A사의 경우 터널부 시추공 25공 중 7공, B사의 경우 시추공 16공 중 8공, C사의 경우 21공 중 11공, D사의 경우 22공 중 8공에서 BIPS와 BHTV 조사를 수행하였으며 이는 시추공 약 2~4개공 마다 1공씩에서 본 조사를 수행한 것과 같다.

공내재하시험의 경우 A사는 시추공 25공에서 58회, B사는 시추공 16공에서 16회, C사는 시추공 21공에서 32회, D사는 시추공 22공에서 39회를 실시하여 시추공당 약 1~2.32회의 시험을 실시하였다.

수압시험은 A사는 시추공 25공에서 25회, B사는 시

Table 4. 시추 조사 수량

터널별	설계 사례				비 고
	A사	B사	C사	D사	
터널 1	760.9 m(11공)	557.4 m(8공)	814.1 m(11공)	757 m (10공)	수평 시추포함
터널 2	401.1 m (8공)	296.6 m(4공)	310.9 m (5공)	432.5 m (7공)	
터널 3	198.3 m (6공)	88 m (4공)	138.2 m (5공)	199.8 m (5공)	
계	1360.3 m(25공)	942 m(16공)	1263.2 m(21공)	1389.3 m(22공)	
터널 계획고 하부 시추심도	터널 폭의 1D	미확인	3m	10m	

추공 16공에서 7회, C사는 시추공 21공에서 15회, D사는 시추공 22공에서 50회를 실시하여 시추공 당 약 0.44~2.27회의 시험을 실시하였다.

수압파쇄 시험은 각 사 모두 3~4개소 씩에서 수행하였다.

4.1.6 실내 및 현장시험

기본적인 실내 암석 시험의 경우 최소 8회~최대 60회 까지 시행하였으며 4개사 평균은 약 30회 정도 수행한 것으로 나타났다.

비중 및 흡수율, 탄성계수, 포아송비, 일축압축강도, 탄성과 속도의 경우 A사는 시추공 25공중 17회, B사는 시추공 16공중 8회, C사는 시추공 21공중 36회, D사는

Table 5. 공동 지질 조사 항목 및 수량

조사 항목	수 량
시추 조사	428 m (2공)
진기비저항 탐사	11.973 km (3개 축선)
탄성파 탐사	11.973 km (3개 축선)
시추공 영상촬영	2공
공내재하시험	4회(2공)
수압파쇄시험	3공
수압시험	4회(2공)
실내 암석시험	4회(2공)
절리면전단시험	4회(2공)

Table 6. 각 사 추가 조사 항목 및 수량

조사 항목	A사	B사	C사	D사	
위성사진/항공사진분석	1식	1식	1식	1식	
지표 지질조사	1식	1식	1식	1식	
시추 조사	21공(832.3 m)	14공(514 m)	18공(775.2 m)	18공(701.1 m)	
수평 시추	2공(100 m)	-	1공(60 m)	2공(120.7 m)	
물리 탐사	탄성파 탐사	3.477 km	3.627 km	5.284 km	9.797 km
	진기비저항 탐사	5.377 km	3.627 km	7.402 km	12.697 km
	공내탄성파 탐사	7개소 (down hole test)	1개소 (cross hole test)	4개소 (cross hole test)	-
	지오토모그래피	-	-	2개소	2개소
시추공내 시험	BIPS	2공	1공	7공	6공
	BHTV	3공	5공	2공	-
	Borehole Shear Test	-	-	1회	-
	지하수위 측정	23공	16공	20공	20공
	수압 시험	25회	7회	15회	50회
	수압파쇄 시험	-	-	1개소	-
실내 · 외 암석 시험	공내재하 시험	54회	12회	28회	35회
	절리면 전단시험	6회	-	6회	8회
	일축압축강도	13회	4회	32회	56회
	삼축압축강도	7회	4회	6회	미확인
	점하중 강도	365회	-	36회	-
	인장 강도	7회	미확인	13회	미확인
	탄성파 속도	13회	4회	32회	56회
	비중 및 흡수율	13회	4회	32회	56회
	탄성계수	13회	4회	32회	56회
	포아송비	13회	4회	32회	56회
	슈미트 햄머	-	-	14회	미확인
	Tilt Test	-	-	29회	-
	절리면 거칠기	108회	-	28회	미확인
swelling & slaking	-	-	-	5회	
알칼리 골재 반응시험	-	-	-	11회	

시추공 22공중 60회의 실험을 실시하였고, 시추공 당 약 0.5~2.72회, 터널 연장 1 km 당 약 1.83~12.66회의 실험을 실시한 것에 해당된다.

삼축압축강도의 경우 최소 8~최대 11회의 실험을 실시하여 4개사 평균은 약 9.6회 정도이고, 시추공당 0.44~0.5회, 터널 연장 1 km 당 약 1.83~2.5회의 실험을 실시한 것으로 나타났다.

절리면 전단강도 시험은 최소 4~최대 12회의 실험을 실시하여 4개사 평균은 약 9회 정도이고, 시추공당 약 0.25~0.55회, 터널 연장 1 km 당 약 0.92~2.53회의 실험을 실시한 것으로 나타났다.

이 외에도 절리면 거칠기 측정을 비롯하여 시추공 내

전단시험(borehole shear test)과 swelling, slaking test 을 수행하였다.

조사의 종류와 수량 및 시험 결과는 Table 5~7과 같다.

4.2 암반 분류 결과

4.2.1 암반 분류 기준

대부분의 참여사들이 RQD에 의한 분류기준, RMR과 Q-System에 의한 분류 기준을 위주로 하여 암반 등급을 분류하였고, 일부 탄성과 속도나 전기 비저항 측정치, 코어 회수율, 암석의 일축압축강도 등을 분류 기준에 추가하여 활용하기도 하였다. Table 8~10은 본 설계에 적용 하였던 각사별 암반 분류 기준을 나타낸 것이다.

Table 7. 실내 및 현장 시험 결과

조사항목		구 분	A사	B사	C사	D사
실내 시험	비중		2.641 ~ 2.693	2.63 ~ 2.75	2.064 ~ 2.75	2.61 ~ 2.75
	흡수율(%)		0.159 ~ 0.383	0.118 ~ 0.91	0.118 ~ 0.304	0.12 ~ 0.20
	일축압축강도(kg/cm ²)		884 ~ 1805	715 ~ 2003	474 ~ 1548	400 ~ 2101
	인장강도(kg/cm ²)		81 ~ 120	118 ~ 197	67 ~ 197	134 ~ 197
	탄성계수(x105kg/cm ²)		4.701 ~ 6.302	4.8 ~ 7.2	3.95 ~ 7.2	3.24 ~ 7.2
	포아송 비		0.185 ~ 0.292	0.19 ~ 0.32	0.201 ~ 0.304	0.2 ~ 0.32
	삼 축	점착력(kg/cm ²)	140 ~ 227	171 ~ 367	104 ~ 367	70 ~ 367
		내부 마찰각(°)	25 ~ 51	37 ~ 53	37 ~ 59	37 ~ 59
	절 리	점착력(kg/cm ²)	0.4 ~ 9.8	0.424 ~ 2.914	0.424 ~ 4.5	0.42 ~ 6.5
		최대내부마찰각(°)	25 ~ 51	14 ~ 51	25 ~ 40	27 ~ 40
		잔류내부마찰각(°)	-	-	22 ~ 40	24 ~ 30
	P파 속도(m/sec)		3976 ~ 5479	3338 ~ 5259	3024 ~ 5259	2510 ~ 5360
	S파 속도(m/sec)		2272 ~ 3242	2125 ~ 3364	1800 ~ 3364	1500 ~ 3360
	swelling strain(%)		-	-	-	0.053
	slake durability(%)		-	-	-	97.06 ~ 99.71
현장 시험	투수계수(cm/sec)		5.77 × 10 ⁻⁴ ~ 3.54 × 10 ⁻⁸	1.5 × 10 ⁻⁴ ~ 5.76 × 10 ⁻⁷	3.57 × 10 ⁻⁴ ~ 2.47 × 10 ⁻⁷	7.4 × 10 ⁻⁴ ~ 5.01 × 10 ⁻⁸
	탄성계수 (공내재하) (kg/cm ²)	연암	4030 ~ 244015	8593 ~ 13015	31000	0.9 ~ 2.64 × 10 ⁴
		보통암	42041 ~ 169676	13501 ~ 35265	29000 ~ 118956	-
		경암	2.35 ~ 62 × 10 ⁴	2.14 ~ 76 × 10 ⁴	12 ~ 76 × 10 ⁴	1.02 ~ 76 × 10 ⁴
	축압계수	(K _{max})	1.47 ~ 5.16	미확인	1.73 ~ 9.31	1.47 ~ 5.16
		(K _{min})	1.10 ~ 3.39	미확인	1.10 ~ 7.45	1.10 ~ 10.65
		측정심도(m)	47.8 ~ 222.4	미확인	18.6 ~ 222.4	47.8 ~ 222.4
	탄성과속도 (km/sec)	1st층	미확인	미확인	3.6 ~ 6.0	0.28 ~ 0.64
		2nd층	미확인	미확인	3.7 ~ 5.0	0.95 ~ 2.5
		3rd층	미확인	미확인	3.45 ~ 4.5	1.85 ~ 6.43
	JRC		-	-	0 ~ 8	-
절리면 마찰각(°)		-	-	41 ~ 54	-	

4.2.2 암반 분류 결과

Table 11은 4.2.1절의 암반 분류 기준에 따라 분류된 터널의 등급을 나타내는 표이다.

각사 모두 약간의 차이는 있으나 기본적으로 RMR 분류 방식, Q-system, RQD에 의한 분류, 도로공사의 암반 분류 기준을 토대로 1~5등급(6등급 구간은 갱구부) 까지 분류하고 있는 양상임을 감안할 때, 4개사 모두 동일한 지역의 유사한 선형에 대해서 분류된 암반 등급에 차이를 나타내고 있다.

일례로 터널 연장 대비 1등급 구간의 구성비는 최소(D사) 24.4%~최대(C사) 58.06%, 2등급 구간의 구성비는 최소(C사) 17.16%~최대(D사) 57.21% 까지 약 2~3

배 이상의 편차를 나타내기도 하였으며, 특히 4등급과 5 등급 구간의 구성비에서는 전혀 없는 경우(C사)에서부터 4.82%(A사의 5등급 구간)~8.19%(B사의 4등급 구간) 까지 분류 등급 구성비의 차이를 나타내기도 하였다.

5. 터널 수치해석

5.1 사용 프로그램 종류

본 과업 구간의 터널안정성 평가를 위해 사용된 해석 프로그램의 종류 및 해석 단면은 Table 12, Fig. 5와 같다.

2차원 안정해석 안정해석 단면수는 20개 이상으로 평균 24단면으로 나타났다.

국내에서 2차원 터널 안정성 해석 프로그램은 FLAC 을 많이 사용하였고 불연속체 해석 프로그램인 UDEC의 적용은 연속체 해석에 비해 많지 않았다.

UNWEDGE는 Keyblock의 한계평형 해석으로 주로 노두 조사가 실시되는 시·종점 갱구부 쪽에 집중되어 있다. 3차원 해석 프로그램은 다양하게 나타났는데, 최근 경향은 Pentagon3D를 많이 사용하였다. 이는 Pentagon3D가 FLAC 3D에 비해 3차원 요소망 작성이 쉽고, 국내 산 프로그램이기 때문에 사용시 발생하는 문제점들을 빠

Table 8. B사의 암반 분류 기준

암반분류(Type)		RMR	Q	탄성과 속도 (km/sec)
등급	명칭			
1	경암~극경암	86~100	100이상	5.5 이상
2	보통암~경암	66~85	10~100	5.0~5.5
3	연암~보통암	46~65	1~10	4.0~5.0
4	풍화암~연암	26~45	0.1~1	2.5~4.0
5	풍화토~풍화암	0~25	0.1 이하	2.5 이하

Table 9. C사의 암반 분류 기준

암반분류 (TYPE)	RQD에 의한 분류	RMR 분류	Q-System	도로공사 기준에 의한 분류			
				RQD(%)	탄성과 속도 (km/sec)	일축압축강도 (kg/cm ²)	TCR(%)
1	90~100	81~100	40~1,000	70 이상	4.5 이상	1,000 이상	90 이상
2	75~90	61~80	10~40	40~70	4.0~4.5	800~1,000	70 이상
3	50~75	41~60	4~10	20~40	3.5~4.0	600~800	40~70
4	25~50	21~40	1~4	20 이하 N>100, Type 4 N<100, Type 5	3.5 이하	600 이하	40 이하
5	25 이하	20 이하	1이하	-	3.0 이하	250 이하	-
6(갱구부)	-	-	-	-	3.0 이하	250 이하	-

Table 10. D사의 암반 분류 기준

암반분류 (TYPE)	기존의 암반분류법		탄성과속도		전기비저항 (Ωm)
	RMR	Q	자연상태(km/sec)	암편상태(km/sec)	
I	81~100	60 이상	3.55 이상	5.25 이상	> 110,000
II	61~80	7~60	2.4~3.55	4.2~5.25	42,000~10,000
III	41~60	0.8~7	1.55~2.4	3.2~4.2	26,000~42,000
IV	21~40	0.08~0.8	0.95~1.55	2.35~3.2	250,00~26,000
V	0~20	0.08 이하	0.95 이하	2.35 이하	< 25,000

Table 11. 각사별 터널의 암반 등급 분류 (연장 : m)

	1등급	2등급	3등급	4등급	5등급	6등급(쟁구부)	계
A사	2,054 46.08%	1,077 24.16%	943.5 21.17%	96 2.15%	215 4.82%	72 1.62%	4,457.5 100%
B사	1,758.5 40.33%	971.5 22.28%	1,060 24.31%	357 8.19%	51 1.17%	162 3.72%	4,360 100%
C사	2290.78 58.06%	676.84 17.16%	708.38 17.96%	- -	- -	269 6.82%	3,945 100%
D사	1,140 24.40%	2,673 57.21%	597 12.78%	105 2.25%	25 0.53%	132 2.83%	4,672 100%

주) 1. 개착 구간 제외

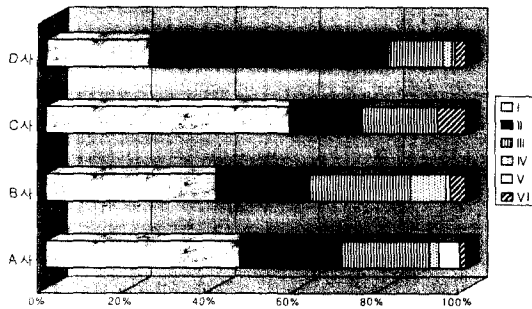


Fig. 4. 암반 분류 등급 구성비.

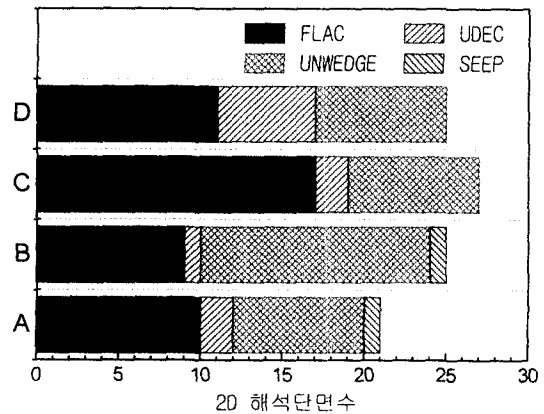


Fig. 5. 해석 단면수.

Table 12. 사용 프로그램의 종류 및 해석 단면수.

*()는 해석 단면수

	프로그램명	A사	B사	C사	D사	비고
2차원	FLAC-2D	○(10)	○(9)	○(17)	○(11)	FDM
	UDEC	○(2)	○(1)	○(2)	○(6)	DEM
	UNWEDGE	○(8)	○(14)	○(8)	○(8)	한계평형해석
	SEEP/W	○(1)	○(1)			FEM
계	21	25	27	25		
3차원	FLAC-3D				○(2)	FDM
	Pentagon-3D	○(2)	○(3)			FEM
	3D-σ			○(3)		FEM

르게 해결해 주기 때문 인듯 하다.

5.2 해석 위치 선정 및 경계 조건

5.2.1 2차원 해석

해석 위치는 대표 단면 위주로 경제적인 해석이 되어야 하며, 주로 취약지반구간, 지중응력상태, 지장물, 불연

속모델, 탄성구성모델 등으로 나눌 수 있다. Table 13은 각 설계 사례에서 수치해석을 수행한 사유를 나타낸다.

가장 기본적인 해석은 각 지보패턴별로 취약한 대표단면이나 단층대와 같은 지반불량구간이다. 지반응력 상태는 크게 비대칭 하중인 편토압 구간과 상재하중이 제일 큰 단면해석을 많이 실행하였다. 산악터널인 만큼 대심도 구간의 터널안정 해석을 실시해야 하는데 이를 위해 지표면까지 모델링하는 것은 비경제적이므로 경제적인 안정해석을 위한 근거가 필요하다.

D사의 경우 대심도를 200 m 이상으로 가정하고, 터널 굴착으로 인한 상부 영향 범위 해석 결과, 약 100 m 미만으로 파악되었으며, 안전측을 위해 상부 150 m 까지만 모델링하고, 나머지 구간은 상재하중 처리를 하였다. B사의 경우 무지보 상태가 지보한 경우보다 크게 불리하지 않다는 점에 착안하여 마찰력을 고려한 해석을 실시하였다.

불연속면 모델 해석의 물성치는 절리면 전단시험 결과

Table 13. 수치해석 사유

분류	해석 사유	A사	B사	C사	D사
취약구간	지보패턴별로 취약 지반 구간	○	○	○	○
	단층파쇄대 등의 지반불량 구간	○	○		
지반응력상태	낮은 토피와 갭문 설치로 인한 편토압적용구간		○	○	○
	토피가 높아 상재 하중이 제일 큰 구간	○		○	○
	대심도 터널 영향 고려		○		○
	심도에 따른 지중응력상태의 변화가 큰 구간				○
불연속면모델	불연속체 해석을 통한 암반의 절리거동파악, 절리면 전단시험위치와 일치	○	○	○	○
	절리군 분석에 의한 Key-Block 안정성 검토	○	○		
지장물	터널상부에 도로와 같은 중요 구조물이 있는 구간	○		○	○
	향후 병설터널 굴착에 의한 영향 고려		○		○
구성모델	엽리의 발달로 인해 이방성이 두드러지는 구간 (탄성등방성단모델)		○		○
	Creep 해석		○		
지하수	터널내 유입수량 산정 및 잔류수압검토	○	○		
기타	굴착장비영향을 고려한 해석	○			

를 많이 사용하였으며, 절리 모델링 방법은 단순한 절리 구성으로 이루어졌는데 이 방법에 대한 최적의 연구가 요구된다. 기존 도로와 같은 지장물에 관한 해석과 교통량의 증가로 향후 건설될 추가 병설터널의 안정성 검토를 수행하였다.

과업 구간내에 편마암이 분포하므로 연속체 모델에서 이방성 해석을 위해 탄성횡단 등방성 모델 해석을 수행하였는데, 최근에는 ubiquitous joint 탄소성 모델의 해석이 수행되었다. B사의 경우 Burger's Model을 사용하여 Creep에 의한 터널 안정성 검토를 수행한 결과 10년 후에도 안전하게 나타났다. 한 가지 아쉬운 것은 입력변수가 실험에 의한 것이 아니라는 점이다.

A사와 B사는 터널 배수구 용량 해석을 위해 침투류 해석도 수행하였다. A사의 경우 천공 장비의 회전 반경을 고려하여 상반 중앙부에 약간의 trench를 파게되어 이에 대한 응력 집중의 영향을 고려하여 안정성 검토를 수행하였다.

5.2.2 3차원 해석

터널안정 해석은 경제적인 해석을 위해 평면 변형률 조건에서 주로 2차원 해석을 많이 수행하나 특수 입체단면에서는 3차원 해석을 수행해야 한다. 3차원 해석은 2차원 해석과 달리 각 사마다 Table 14와 같이 다양하며 두 터널이 교차하는 구간, 굴진 영향 검토, 하중분담에 적용하였다. 비상주차대와 같이 두 터널이 접촉하는 구간

Table 14. 3차원 해석 사유.

해석 사유	A사	B사	C사	D사
비상주차대 및 회차시설 접속부로 암반조건불량으로 인한 응력집중 예상	○	○	○	○
2차원 해석시 하중분담을 결정을 위한 3차원 해석			○	○
CD 굴착 단면으로 토피가 낮고 상부에 국도 통과 구간		○		
터널 관통으로 응력집중이 예상되는 관통구간				○
가시설, 면벽+돌출형 갭문의 안정검토	○		○	

에서 모두 공통으로 수행하였다. C사와 D사는 2차원 해석의 하중분담을 결정을 하는데 있어 기존 참고 문헌과 3차원 해석을 수행하여 결정하였다. B사는 연약대 통과 시 CD굴착(중벽분할식 굴착)을 적용하여 이에 대한 안정성 검토를 수행하였다. D사는 두 터널이 관통되는 과정과 비상 주차대가 확폭되는 구간에 대해 3차원 해석을 수행하였다. A사는 갭구부 주변이 사면을 포함한 돌출형 단면에 대해 3차원 해석을 수행하였다.

5.2.3 해석 영역 및 경계 조건

1) 해석 영역

D사의 경우 좌우 경계 및 하부 경계 영역 선정을 위해 10D 까지 영역을 선정하여 영향 범위를 파악하였다.

Table 15. 해석 영역 비교표

	좌우 경계	하부경계	상부경계
A사	4D	4D	지표면까지를 원칙으로 하며 대심도구간은 상재하중 처리
B사	3D	2D	
C사	3D	2D	
D사	5D	3D	

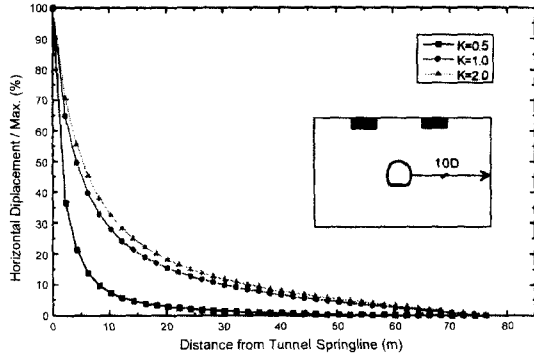


Fig. 6. 해석 영역의 선정.

평균적으로 좌우 경계는 3D 이상, 하부 경계는 2D 이상으로 나타났다(Table 15, Fig. 6).

2) 경계 조건

경계 조건은 4개 설계 사례 모두 동일하다(Table 16).

5.3 하중분담율

3차원해석 및 기존 사례를 바탕으로 하중 분담율(굴착-연성숏크리트-경성숏크리트)을 결정하였다(Table 17, Fig. 7).

하중분담율은 기존 사례를 사용하거나, 지형에 맞는 조건을 위해 3차원 해석을 수행하여 결정하였다.

각 사마다 다양하게 적용하였으나 전반적인 경향은 경암 일수록, 즉 지보 타입이 좋을수록 굴착시 하중 분담을 크게 적용한다. C사는 기존 연구를 토대로 3가지 방법으로 분류하고 3차원 해석을 통해 평균적으로 전구간에 동일하게 40-20-20의 비율로 적용하였다. D사는 Type-I은 3차원 해석을 적용하고, 그 외는 기존 연구 문헌을 참고하여 정리하였다.

Table 16. 경계 조건.

	A사	B사	C사	D사
좌우 경계부 : X 방향변위-고정, Y방향 변위-허용				
하부 경계부 : X 방향변위-허용, Y방향 변위-고정	○	○	○	○
하부 양단모서리 : X 방향변위-고정, Y방향 변위-고정				

Table 17. 하중 분담율

	A사	B사	C사	D사
Type-I			40-40-20%	75-10-15 %
Type-II	60-20-20%	60-20-20%		60-15-25 %
Type-III		50-25-25%		55-15-30 %
Type-IV	50-25-25%	40-30-30%		상반 : 45-30-25%
Type-V	40-30-30%			하반 : 50-30-20%

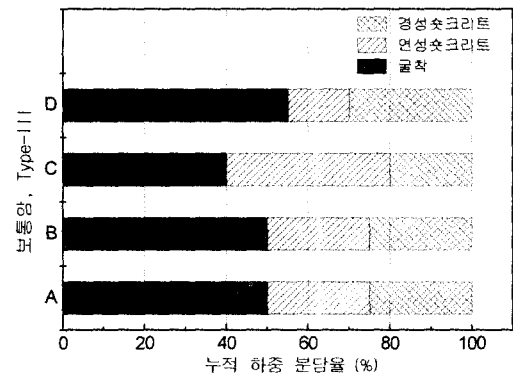
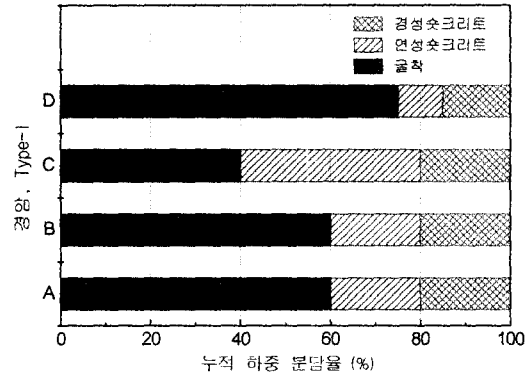


Fig. 7. 누적 하중 분담율.

5.4 입력 물성치

여기서 RMR을 기준으로 Type - I : 경암 - 극경암 : 81 - 100, Type - II : 보통암 - 경암 : 61 - 80, Type - III : 연암 - 보통암 : 41 - 60, Type - IV : 풍화암 - 연암 : 21 - 40, Type - V : 풍화토 - 풍화암 : 20 이하로 분류한 것이다.

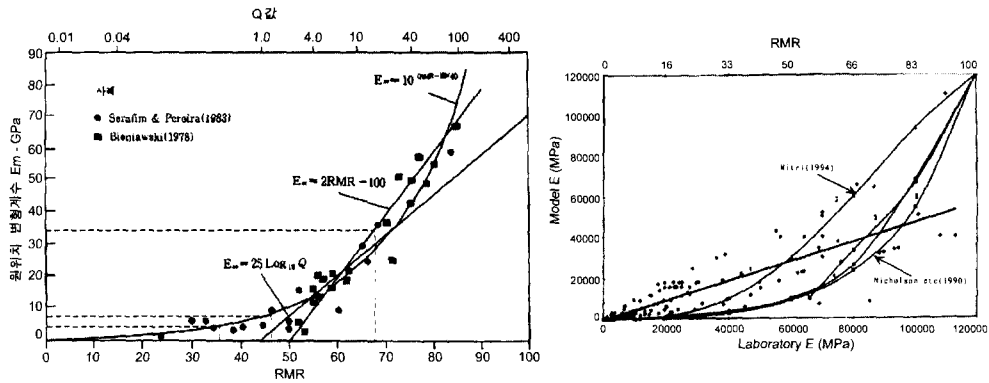


Fig. 8. 탄성계수의 보정.

수치해석 입력 물성치는 현장시험, 실내시험의 보정, 암반분류에 의한 추정, 기존사례분석을 거쳐 결정하였다.

5.4.1 탄성계수(E)

탄성계수는 일축압축강도의 시험으로부터 대개 구하지만 이를 암반에 적용하기 위해서는 보정이 필요하다. 그러나 실내시험을 수행하지 못했을 경우는 암반 분류값을 가지고 개략 추정할 수 있지만(Fig. 8) 개략적인 값일 것이다. 결정 방법은 다음과 같았다.

- 기존적용사례 분석
- 공내수평재 하 시험결과
- 탄성계수를 추정할 수 있는 경험식 활용

- Serafim & Pereira, 1983 RMR ≤ 50 : E_{dr} = 10^{(RMR-10)/40} (GPa)
- Bieniawski, 1978 RMR > 50 : E_{dr} = 2RMR - 100 (GPa)
- Barton & Grimstad(1993) Q > 1.0 : E_m = 25Log₁₀Q (GPa)
- Nicholson & Bieniawski(1990)

$$RF = \frac{E_{pm}}{E_{int}} = 0.0028 RMR^2 + 0.9 \exp\left(\frac{RMR}{22.82}\right) (\%)$$

- Mitri et al.(1994)

$$RF = \frac{E_{pm}}{E_{int}} = 0.5 \times \left[1 - \left\{ \cos\left(\pi \times \frac{RMR}{100}\right) \right\} \right]$$

- 실내암석시험과 RQD와의 관계식 (Cording, 1975)
- Barton 경험식(1993) - Qc, 탄성파속도, 터널침도를 이용한 도표 활용

$$Q_c = \left(\frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \right) \times \frac{\sigma_c}{100}$$

■ GSI(Geological Strength Index, 1995)에 의한 변형계수 선정

- σ_c 가 100 MPa 이하 적용하도록 권고
- 대심도인 경우 σ_c를 100 MPa로 적용하여 안전측으로 평가

$$E_m = 10^{\frac{(GSI-10)}{40}} \times \sqrt{\frac{\sigma_c(MPa)}{100}} \text{ (GPa)}$$

각 사마다 실내시험 값들은 비슷하나 실제 수치해석에 적용된 입력치의 범위는 다양하다. 특히 C사의 입력치는 타사와의 편차가 크다(Table 18, Fig. 9).

5.4.2 단위 중량(γ)

단위 중량은 실내시험결과를 많이 사용하므로 각 사마다 편차가 크지 않았다.

5.4.3 점착력(C)

점착력은 각 사마다 편차가 크다. 특히 변형계수가 가장 컸던 C사의 점착력은 Type-I에서 가장 작게 나타났다(Table 20, Fig. 11). 점착력과 내부마찰각은 Hoek-Brown 파괴 조건식을 많이 이용하고 있었다.

5.4.4 내부 마찰각(φ)

내부 마찰각은 약 5° 정도의 차이를 보였다(Table 21, Fig. 12).

5.4.5 포아송비(ν)

포아송 비는 큰 차이가 없었으나 D사가 약간 크게 적용하였다(Table 22, Fig. 13)

5.4.6 축압 계수(K₀)

축압계수는 실측치의 범위가 큰 결과 입력치의 범주도

Table 18. 탄성계수 입력치 비교.

(단위 : 10^3 t/m^2)

	A사		B사		C사	D사	
	갱구부	대심도	화강암	편마암		일반구간	대심도 구간
Type - I	500	2,000	3,000	2,500	6000	1,700	2,700
Type - II	300		1,500	1,000	4000	550	
Type - III	100		800	500	1500	280	
Type - IV	4		80	80	500	30	
Type - V	2		2	2	200	3	

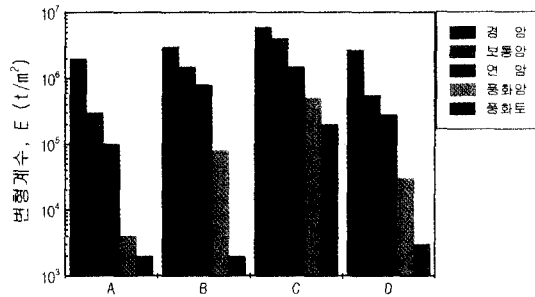


Fig. 9. 탄성계수 입력치의 비교.

Table 19. 단위 중량 입력치 비교 (단위 : t/m^3)

	A사		B사	C사	D사	
	갱구부	대심도			일반 구간	대심도 구간
Type - I	2.65	2.65	2.70	2.7	2.58	2.63
Type - II	2.6		2.65	2.7	2.38	
Type - III	2.5		2.50	2.6	2.30	
Type - IV	2.2		2.30	2.3	2.10	
Type - V	1.9		1.9	1.8	1.90	

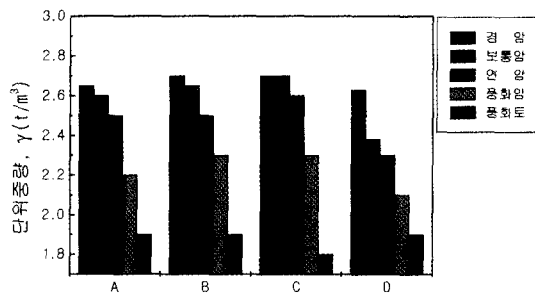


Fig. 10. 단위 중량 입력치의 비교.

크게 나타났다(Table 23, Fig. 14).

5.4.7 불연속 모델 물성치

불연속체 해석의 절리 패턴은 각 사 마다 조사한 노

Table 20. 점착력의 입력치 비교.

(단위 : t/m^2)

	A사		B사		C사	D사	
	갱구부	대심도	화강암	편마암		일반 구간	대심도 구간
Type-I	100	100	125	80	50	173	295
Type-II	50		85	60	32	104	
Type-III	30		50	40	25	78	
Type-IV	5		20	20	10	20	
Type-V	1.5		1	1	1	2.4	



Fig. 11. 점착력 입력치 비교.

Table 21. 내부 마찰각 입력치 비교.

(단위 : °)

	A사		B사		C사	D사	
	갱구부	대심도	화강암	편마암		일반 구간	대심도 구간
Type-I	45	45	50	45	45	47	47
Type-II	40		45	40	40	40	
Type-III	35		40	35	35	38	
Type-IV	33		35	30	30	32	
Type-V	30		30	25	30	25	

두 자료, BIPS 자료 등을 사용하였으나 모델에 사용한 절리 연장성에는 이해가 어려웠다. 또한 입력 자료들은 절리면 전단시험 결과와 연관성을 파악하기 어려웠다.

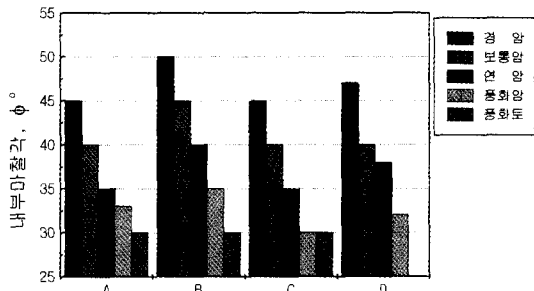


Fig. 12. 내부 마찰각 입력치 비교.

Table 22. 포아송비 입력치 비교

	A사		B사	C사	D사	
	갱구부	대심도			일반 구간	대심도 구간
Type-I	0.20	0.20	0.2	0.2	0.23	0.23
Type-II	0.20		0.2	0.2	0.27	
Type-III	0.25		0.25	0.25	0.32	
Type-IV	0.27		0.3	0.27	0.36	
Type-V	0.30		0.35	0.35	0.40	

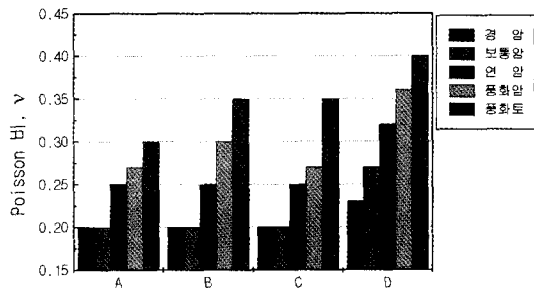


Fig. 13. 포아송비 입력치 비교.

6. 터널 설계 내용 비교분석

본 장에서는 터널 설계에 대한 전반적인 내용을 분석

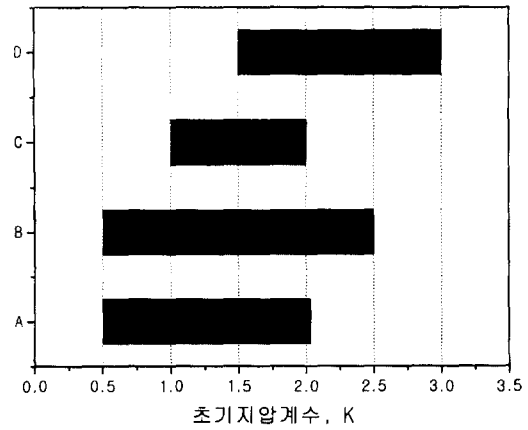


Fig. 14. 축압계수 입력치 비교.

하기 위하여 터널단면, 굴착/지보공, 표준지보패턴, 발파, 콘크리트라이닝, 방배수, 갱구부, 계측/유지관리에 대한 각각의 설계내용을 비교·검토하였다.

6.1 터널단면 설계

터널단면은 그 크기에 따라 공사비에 미치는 영향이 가장 크므로 터널 기능에 따라 적절하고 경제적인 단면을 결정해야 한다. 또한 도로폭원 및 건축한계를 만족시켜야 하며, 내부설비의 설치공간을 확보하여야 한다. Table 24에는 각각의 터널단면 설계 내용을 비교한 것이다.

가장 긴 터널의 연장은 2,688~2,995 m 정도이며, 종단구배는 최소허용구배인 0.3% 이상을 만족하고 있다. 터널형상은 모두 난형으로 설계되었으며, 편평율은 0.6 이상으로 단면형상이나 크기에 따라 약간의 차이가 나타났다. 횡단구배는 모두 2%를 적용하였다.

내공단면적과 굴착단면적은 A가 가장 크며 C가 가장 작게 설계되었다. 중앙분리대는 30~50 cm를 설치한 것(A, B)과 설치하지 않은 것(C, D)으로 구분되었으며, 검

Table 23. 축압계수 입력치 비교

	A사			B사	C사	D사	
	터널 1	터널 2	터널 3		깊이에 따른 분류	일반구간	대심도 구간
Type-I	0.5-1.77	0.5-2.03	0.5-1.5	1.5 2.0 2.5	>200 m : 1.0~2.0	3.0	1.5
Type-II				1.5	150~200 : 1.5~2.5	미확인	
Type-III				1.0	100~150 : 1.5~2.5	1.0	
Type-IV	0.5			1.0	<100 : 1.0~2.5	0.5	
Type-V				0.5	풍화암 : 0.5		

Table 24. 터널단면 설계 비교

	A사	B사	C사	D사
중단구배(%)	0.51	0.3	0.93	0.676
형상	난형	난형	난형	난형
편평율	0.60	0.613	0.681	0.754
내공단면적(m ²)	70.03	66.108	63.571	67.817
굴착단면적(m ²)	88.069	83.777	81.951	85.884
횡단구배(%)	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0
건축한계여유폭(cm)	30	30	30	30
중양분리대(cm)	30	50	없음	없음
검사원통로	양측설치 (0.75×200)	양측설치 (0.75×200)	양측설치 (0.75×200)	편측설치 (0.75×200)
공동구	좌 550×750 우 450×550	좌 450×450 우 550×850	500×900	좌 400×400 우 700×600
폭원(m)	10.884	11.164	11.222	10.533
비고	직선부 기준임			

사원통로는 A, B, C의 경우 양측에 설치하였으나, D의 경우 경제성을 고려하여 편측으로 설치하였다. 공동구는 양측크기가 다른 경우(A, B, D)와 같은 경우(C)로 구분할 수 있다.

이와 같이 터널단면설계에서 단면형상은 거의 차이가 없었으나, 중앙분리대, 검사원통로, 공동구 등과 같은 요소에 의해 단면적이나 형태가 부분적으로 달라짐을 알 수 있다.

6.2 굴착 및 지보공 설계

터널굴착공법은 지반조건, 터널단면의 크기 및 형상, 터널연장, 구배 등의 제반조건과 경제성, 시공성, 안정성, 공사기간 등을 고려하여 선정한다. 또한 지보공인 슛크리트, 록볼트, 강지보는 터널 안정성을 확보하고 시공시의 문제점을 해결할 수 있는 기술들을 적용하게 된다. Table 25에는 각각의 터널굴착 및 지보공 설계 내용을 비교한 것이다.

터널공법은 모두 NATM 공법을 선정하였으며, 굴착공법은 암질이 양호한 경우 전단면굴착을, 불량한 경우 상하반 분할굴착을 선택하였다. A와 C의 경우 상반의 높이를 장비의 특성을 고려하였으며, A는 상반 중앙부를 추가 굴착하여 천단부 록볼트의 직각 천공이 가능하도록 하였다.

스�크리트는 모두 강섬유보강 슛크리트(SFRS)로 타설 방식은 습식공법을 선택하였으나, 암질이 매우 양호한 경우 일반 슛크리트를 적용하였다. 슛크리트 두께는 암질에

따라 5~16 cm로 일반 슛크리트보다 두께가 감소하였다.

록볼트는 모두 전면접착형을 적용하였으며, 주입재료는 천단부, 측벽부, 용수부에 따라 충전형과 레진형을 선택하였다. 록볼트 길이는 암질에 따라 3~4 m로 모두 동일하였다. 또한 구형지압관, 주입재 흘림방지캡, 스페이서 등이 록볼트 시공상의 문제를 개선하기 위하여 적용되었다.

강지보는 모두 배면 공극이 적게 발생하는 격자지보재를 적용하였으며, 규격은 △100×100×10(B, D)와 △50×20×30(A, C)와 적용되었으며, C의 경우 규격 및 설치방법에 대한 구체적인 방법이 제시되었다.

터널보조공법은 지반조건에 따라 Fore poling, 프리그라우팅, Pipe Roof, 강관다단그라우팅 등이 적용될 수 있으며, 갱구부와 연약대, 파쇄대 구간에 이를 반영하여 설계하였다.

대부분 여굴 경향 분석, 관통 굴착계획 등이 수립되어 있었으며, C의 경우 랜덤 록볼트 방향, 굴진방향 검토, 연약대 통과 방안 등에 설명이 제시되었다.

이와 같이 설계에 반영된 터널지보공은 국내에서 개발되어 현재 적용할 수 있는 최신기술을 최대한 반영하도록 설계되어 있음을 알 수 있다.

6.3 표준지보패턴 설계

터널표준지보패턴은 암반분류, 수치해석, 국내적용사례, RMR 시스템 등에 의해 제시된 지보패턴 등을 종합적으로 비교 검토하여 결정하게 된다. 도로터널의 경우 암반 상태에 따라 표준지보패턴이 설정되고, 기타 특수구간에

Table 25. 터널굴착 및 지보공 설계 비교

		A사	B사	C사	D사
터널공법		NATM	NATM	NATM	NATM
굴착 공법	굴착	전단면 상하반단면	전단면 상하반단면	전단면 상하반단면	전단면 상하반단면
	비고	상반중앙부 추가 굴착 (상반특볼트시공용)		상반높이 4.9 m	
쑏크리트	방식	일반 쑏크리트 강섬유보강쑏크리트	일반 쑏크리트 강섬유보강쑏크리트	일반 쑏크리트 강섬유 보강 쑏크리트	일반 쑏크리트 강섬유보강 쑏크리트
	시공	습식쑏크리트	습식쑏크리트	습식 쑏크리트	습식 쑏크리트
	두께	5~16 cm	5~16 cm	5~16cm	5~16 cm
특볼트	정착 방식	전면접착형	전면접착형	전면접착형	전면접착형
	주입 재료	시멘트모르타르형 · 충전형 : 측벽부 · 주입형 : 천단부	시멘트모르타르형 (용수부분 레진형)	천단부 : 캡슐레진 측벽부 : 모르타르 충전	천단부 : 캡슐레진 측벽부 : 모르타르충전
	길이	3~4 m	3~4 m	3~4 m	3~4 m
	개선 사항	주입재 홀림방지캡 구형지압판	모르타르홀림방지캡	반구형와샤사용 스페이서 사용	모르타르홀림방지캡 반구형 Plate
강지보	형식	격자지보	격자지보	격자지보	격자지보
	규격	△50×20×30	△100×100×10	△50×20×30	△100×100×10
보조 공법	적용 공법	포아폴링, 프리그라우팅, 파이프 루트, 강관다단그라우팅			
	적용	갱구부	시중점부, 파쇄대구간	갱구부	갱구부
특기사항		연약암반대/단층파쇄대 확인 및 대책	여굴경향분석/ 대책 관통부 굴착계획 파쇄대 통과방안	랜덤특볼트 방향 굴진 방향 검토 연약대 통과방안 관통부굴착 계획	관통계획 여굴대책 (TAS)

Table 26. 터널 표준지보패턴 비교

		A사			B사			C사			D사		
표준지보패턴		6개+예비패턴(5-1) (토사층/단층파쇄대)			6개			6개+예비패턴(연약대) +편토압구간(VI-1)			6개		
TYPE	Pattern	암질 (RMR)	굴진장	S/C 두께	암질 (RMR)	굴진장	S/C 두께	암질 (RMR)	굴진장	S/C 두께	암질 (RMR)	굴진장	S/C 두께
I	1	81-100	3.0	5(일반)	극경암	3.0	5(일반)	경 암	3.0	5(일반)	86-100	3.0	5(일반)
II	2	61-80	3.0	5	경 암	3.0	5	보통암	3.0	5	66-85	3.0	5
III	3	41-60	2.0	8	연 암	2.0	8	연 암	2.0	8	46-65	2.0	8
IV	4	21-40	1.5	12	풍화암	1.5	12	풍화암	1.5	12	26-45	1.5	12
V	5	20이하	1.2	16	풍화토	1.2	16	풍화토	1.2	16	25이하	1.2	16
VI	6	갱구부	1.0	16	갱구부	1.0	16	갱구부	1.0	16	갱구부	1.0	6
TYPE	Pattern	R/B길이	강지보	라이닝	R/B길이	강지보	라이닝	R/B길이	강지보	라이닝	R/B길이	강지보	라이닝
I	1	3(랜덤)	-	30	3(랜덤)	-	30	3(랜덤)	-	30	3(랜덤)	-	30
II	2	3	-	30	3	-	30	3	-	30	3	-	30
III	3	4	-	30	4	-	30	4	-	30	4	-	30
IV	4	4	1.50	30(철근)	4	1.50	30	4	1.50	30	4	1.50	30
V	5	4	1.20	30(철근)	4	1.20	30	4	1.20	40(철근)	4	1.20	30(철근)
VI	6	4	1.00	30(철근)	4	0.60	40(철근)	4	1.00	40(철근)	4	1.00	30(철근)

별도로 지보패턴을 설계하기도 한다. Table 26에는 각각의 표준지보패턴 설계내용을 비교한 것이다.

표준지보패턴은 5개를 기본으로 갱구부에 대한 지보패턴으로 설계되었다. 특히 A의 경우는 토사층 및 단층파쇄대 구간, C의 경우 편토압구간과 인버트 설치에 대한 예비패턴을 설계하여 적용하도록 하였다.

굴진장은 4개사 모두 암질이 양호한 경우 3.0 m, 불량하면 1.0 m로 설계되어 있으며, 지보패턴별 굴진장, 슛크리트 두께, 록볼트 길이에는 차이가 없었으며, 강지보재의 간격은 큰 차이를 보이지 않으나, B사의 경우 지보패턴 6의 경우에 0.6 m를 적용하였다.

콘크리트 라이닝의 경우 라이닝 두께는 30~40 cm로 지보패턴에 따라 철근 콘크리트 라이닝을 적용하였다. A 경우 Type-IV부터 철근 콘크리트를 적용하여 가장 보수적으로 설계되었으며, C와 D는 풍화토지반과 갱구부에 철근 콘크리트를 보강하도록 하였으며, B는 갱구부에서만 보강하게 설계되었다.

이와 같이 표준지보패턴은 암반분류에 따라 5개의 지보패턴과 갱구부, 토사층, 단층파쇄대, 편토압 구간 등에 예비패턴을 설계하고 있으며, 굴진장, 슛크리트 두께, 록볼트 길이와 간격에는 큰 차이가 없었으나, 라이닝은 지보패턴별로 철근보강여부, 두께에서 차이가 나타남을 알 수 있다.

6.4 발파설계

본 설계구간은 대부분이 연암 이상의 암반층에 위치하고 발파에 의한 굴착공법을 선정하였는데, 발파설계는 발파효율, 진동 및 소음, 암반조건을 고려하여야 한다. Table 27에는 각각의 발파설계내용을 비교한 것이다.

심베기 공법은 굴진장이 길면 Cylinder-Cut을, 굴진장이 짧으면 V-Cut으로 설계되었으며(A, D), B의 경우는 Supex-Cut을, C는 장공발파를 고려 Cylinder-Cut으로 설계하였으며, 갱구부에는 선대구경 수평 보오링공을 심발공으로 하였다.

화약은 주로 에멀전계로 설계되었으나, 젤라틴 다이아마이트는 극경암에 적용하는 경우(C)와 연암 이상에서 적용하는 경우(D)에 적용하였으며, 터널 외곽공에는 정밀폭약이 적용되었다. 뇌관은 비전기식(A, C) 또는 전기식(D)으로 설계되었으며, 전기식과 비전기식을 혼용하는 경우(B)도 있었다.

제어발파의 경우 주변암반 손상 및 여굴 발생률이 적은 Smooth Blasting 공법을 모두 적용하였고, C의 경우 편토압 구간에서 Line Drilling 공법을 적용하기도 하였다.

진동 및 소음문제가 중요한 문제로 부각되면서, 진동 허용치는 0.3 kine 기준을 적용하였고, 측사나 사육장이 있는 경우 그 이하로 설정되었다. 대부분 발파진동 및

Table 27. 발파설계 비교.

	A사	B사	C사	D사
심베기공법	Parallel Cut : P-1, 2, 3 Angle Cut : P-4, 5, 6	Supex-Cut	Cylinder-Cut 선대구경심발(갱구부)	Cylinder Cut : P-1, 2, 3 V-Cut : P-4, 5, 6 다단식 발파공법
화약	에멀전계 정밀폭약	젤라틴 다이아마이트 에멀전계 정밀폭약	에멀전계 정밀폭약 젤라틴다이아마이트 (극경암)	젤라틴 다이아마이트 (P-1, 2, 3) 에멀전계(P-4, 5, 6) 정밀폭약
뇌관	비전기식	전기식 비전기식(미진동지역)	비전기식	전기식
제어발파	Smooth Blasting	Smooth Blasting	Smooth Blasting Line Drilling(편토압구간)	Smooth Blasting
진동허용치	0.3 kine	0.3 kine 0.1 kine(토끼사육장)	0.3 kine	0.3 kine 0.2 kine(농장)
발파소음 진동분석	발파진동/ 소음영향권 분석	발파진동/ 소음영향권 분석	발파진동/소음 영향권분석 Dynamic 해석(FLAC)	발파진동/ 소음영향권 분석
소음진동 대책	상반 4분할 발파패턴 방음문 설치	터널내 3중 방음벽 갱구입구 이동식 방음벽	모래샌드위치 방음문	방음문 설치 머력을 이용한 소단설치
특기사항			양생중인 콘크리트 발파진동영향	

발파소음에 대한 영향권을 분석하여 그 결과를 설계에 반영하였으며, C의 경우 Dynamic 해석을 실시하기도 하였다.

소음진동 대책으로는 3중 방음문, 모래샌드위치 방음문과 같은 방음문을 설치하는 것이 고려되었으며, A의 경우 발파방법을 개선한 상반 4분할 발파를 적용하였다. 또한 C의 경우 양생중인 콘크리트 라이닝에 대한 영향을 분석하여 발파 작업과 라이닝 작업의 최소 이격거리를 제시하였다.

6.5 콘크리트라이닝 설계

콘크리트 라이닝은 작용하는 외력을 지지하고, 내공단면 및 장기적인 구조적 안정성을 확보하도록 해야한다. 설계하중은 라이닝 자중과 암반이완하중, 잔류수압, 온도 및 건조수축, Fan 하중을 고려하게 된다. Table 28에는 각각의 콘크리트 라이닝 설계내용을 비교한 것이다.

콘크리트 라이닝에 작용하는 하중조건 차이가 없었으며, 지보패턴에 따라 이완하중을 달리 적용하였다. 주로 이완하중, 잔류수압, 온도하중, 지진하중, Jet-Fan 하중을 적용하였으며, 갱구부의 경우 3차원 해석과 지진하중을 고려하여 설계하였다. 사용 S/W는 SAP을 기본으로 하고, RCUSD, GTSTRUL, PENTAGON 등이 사용되었다.

철근보강 여부는 주로 풍화토 구간, 갱구부 구간, Jet-

Fan 설치구간, 비상주차대, 방향전환소 등에 적용되었으며, A사의 경우 지보패턴 4, 5, 6에, B사는 갱구부(Type-VI)에, C와 D사는 지보패턴 5, 6에 적용하였다.

라이닝 균열대책은 배면그라우팅, 측벽구 주입, 자동살수기를 이용한 습윤 양생이 적용되었으며, A의 경우 천단부에 강섬유를 보강하도록 하였고, D의 경우 보강와이어메쉬를 설치하도록 하였다.

6.6 방·배수설계

터널에서 누수는 콘크리트 라이닝 재질을 열화시키고, 내부시설의 기능과 내구성을 저하시키는 요인으로 작용하므로 터널방수는 구조물의 유지관리·터널의 기능확보 및 미관상 대단히 중요하다. Table 29에는 각각의 방·배수설계를 비교한 것이다.

방수형식은 모두 배수형 방수시스템을 적용하였고, 예철렌 수지계열 재료를 이용한 슈트방수공법으로 설계하였다. 시공상의 특징으로는 A의 경우 지수판을, B의 경우 란넬시공개선, C의 경우 격실방수시스템, D의 경우 방수시트부착형 앵커를 도입하였다.

배수방식은 모두 측벽하부 배수를 적용하였고, Drain Board를 이용 배수능력을 개선하도록 하였다. 측벽 배수 재료는 터널드레인(Φ30×3)을 도입하였으며, 배수관으로는 스파이럴썸타프관, 아연도강관, THP관, CSP관 등이 사용되었다. 배수구 규격은 수치해석 결과 등을 충분히

Table 28. 콘크리트 라이닝 설계 비교

		A사	B사	C사	D사
하중	이완하중	Terzaghi 수정이완하중	I~III : 발파이완하중 IV~VI : Terzaghi 수정이완하중	I~III : 발파이완하중 IV~VI : Terzaghi 수정이완하중	1, 2, 3 : 발파이완하중 4, 5, 6 : Terzaghi 수정이완하중
	주요 고려사항	이완하중+잔류수압 갱구부(온도하중)	이완하중+잔류수압 지진하중	이완하중+잔류수압 갱구부(지진하중)	이완하중+잔류수압 기타하중
사용 S/W		SAP90 RCUSD	SAP90 GTSTRUDL	SAP2000 GTSTRUDL	SAP90, RCUSD PENTAGON 3D
특기 사항		교차부 3차원 해석 철근치짐량 검토	접속부 3차원 해석 철근치짐량 검토	갱구부 3차원 해석 Jet Fan 설치부 해석	접속부 3차원 해석 Jet Fan 설치부 해석
라이닝 두께		30 cm	30~40 cm	30~40 cm	30 cm
설계강도		240 kg/cm ²	240 kg/cm ²	240 kg/cm ²	240 kg/cm ²
철근보강		갱구부, JetFan 설치부 풍화암이하, 접속부 비상 주차대, 방향 전환 소	갱구부 JetFan 설치부 비상주차대, 피난연락갱, 집진갱	풍화토 구간 갱구부, JetFan 설치부	갱구부(P-6) JetFan 설치부, 비상주차대, 회차시설
라이닝 균열대책		천단부 강섬유보강 측벽주입구 설치 자동살수기-습윤양생 천단부 뒷채움 그라우팅	배면 그라우트밀크 주입	자동살수기-습윤양생 측벽주입구 설치 배면그라우팅 철근피복두께 확보	자동살수기-습윤양생 보강와이어메쉬 설치

Table 29. 방·배수설계 비교

		A사	B사	C사	D사	
방수	방수형식	부분 방수 (Wet System)	배수형 방수 (Wet System)	배수형 방수 (Wet System)	배수형 방수 (Wet System)	
	방수공법	쉬트방수공법	쉬트방수공법	쉬트방수공법	쉬트방수공법	
	방수재료	에칠렌수지계열 (ECB / EVA)	에칠렌수지계열(ECB) 쉬트보호재(Polyester)	에칠렌수지계열 (ECB / EVA)	에칠렌수지계열 (ECB / EVA)	
	방수시공	지수판 설치	란넬시공개선 (부직포고정란넬 철근고정용란넬)	격실방수시스템	방수시트부착형앵커	
배수	배수방식	측벽하부배수	측벽하부배수	측벽하부배수	측벽하부배수	
	배수유도	Drain board	Drain board	Drain board	Drain board	
	측벽배수재	터널드레인(Φ30×3)	터널드레인(Φ30×3)	3-Hole 측벽배수재	배수용반월관	
	배수로	배면침투수 노면배수 터널오페수	스파이럴섀드트판 (Φ400, Φ300)	배면침투수, 하부침투수 : 아연도강관(Φ300) 노면침투수,오페수 : THP(Φ400)	CSP관(Φ300)	스파이럴섀드트판 (Φ350, Φ300)
		하부침투수	유공아연도강관(Φ400)		THP(Φ400.300)	CSP유공판(Φ300)
특징	유지관리설계	노면수, 배면수 분리	중단배수구배 검토	배수구 구조검토		

검토하여 설계되었다. 특히 B의 경우 침투수와 노면침투수와 같은 오페수를 분리하도록 설계된 것이 특징이라 할 수 있다. 또 C의 경우 중단배수 구배를 검토하였으며, D의 경우 배수구의 구조 안정성을 검토하였다.

6.7 갱구부 설계

갱문은 지형, 지반조건, 기상환경, 주변환경, 차량의 주행성, 유지관리 등을 고려하여 위치 및 형식을 선정한다. 또한 갱문 형식, 갱구부 보강방법, 갱구 사면 안정성 검

토, 조형화 검토 등이 이루어진다. Table 30에는 각각의 갱구부 설계 내용을 비교한 것이다.

갱문 설계는 터널 축과 등고선의 교차각, 경사도, 지반조건, 주변조건을 고려하여 형식을 선정하였는데, 지형적 특성으로 인하여 면벽식이 가장 많이 적용되었으며, A의 경우 돌출형을, C의 경우 조도순응구조물을 적용하였다. 또한 주변 자연과의 조화를 검토하여 조형화 설계 및 환경 친화적인 면을 고려하여 조정 계획이 수립되었다.

갱구 보강은 슛크리트와 록볼트로 보강하며, 강관그라

Table 30. 갱구부 설계 비교.

		A사	B사	C사	D사
갱문 설계	위치	3차원 Rendering	공사용 갱문 위치 선정	피토고 고려	
	조건	터널축과 등고선 교차각 경사도(완경사) 도로 및 수로통과여부 지반 및 지질조건	터널축과 등고선 교차각 절취고/배수로 구조물/지장물 최소토포고, RMR	제공부 위치 배수처리 Landmark적 기능지질조건	절토량 최소화 제공부 배수처리 지형과의 조화
	형식	시 : 면벽식+돌출형 종 : 원통절개형	시 : 면벽식 종 : 면벽식	시 : 면벽식+조도순응구조물 종 : 면벽식+조도순응구조물	시 : 면벽식 종 : 면벽식
갱구보강		슛크리트+록볼트보강 강관다단그라우팅	슛크리트+록볼트보강 Fore Poling	슛크리트+록볼트보강 강관+Fore Poling 가설갱문시공	
갱구 사면	안정 검토	암반사면 : DIPS 토사사면 : SLOPE/W TALREN	암반사면 : DIPS 토사사면 : SLOPE/W	암반사면: DIPS/SMR 토사사면: SLOPE/W 대절토부: FLAC	암반사면 : DIPS 토사사면 : TALERN
	공법	Soil Nailing 사면녹화공법	록볼트+녹생토	낙석방지시설	Soil Nailing
비고		갱구부 조형화 갱문부 3차원해석	갱구부 방배수 갱구부 동결방지대책	갱구부 방배수 갱구부동결 방지대책	조형설계

우팅, 포아플링 등이 적용되었다. 갱구 사면 안정성 해석은 암반사면의 경우 DIPS, 토사사면의 경우 Slope/W, TALERN 등이 이용되었으며, 사면보강공법으로는 A, D의 경우 Soil Nailing 공법을, B의 경우 록볼트+녹생토 공법을 설계에 반영하였다.

또한 갱구부는 외부온도에 의해 영향을 많이 받기 때문에 갱구부 동결방지 대책을 수립하여 설계에 반영하였다.(B, C)

6.8 계측 및 유지관리

NATM 터널에서 계측은 터널의 안정성 및 지보의 적정성을 확인할 수 있는 중요한 요소라 할 수 있으며, 보다 쉽고 빠르게 계측결과를 획득 분석하려는 기술들이 적용되고 있다. 또한 최근 구조물의 안전관리차원에서 완공 후 유지관리에 대한 계획이 설계에 적극적으로 반영되고 있다. Table 31은 각각의 계측 및 유지관리 계획을 비교한 것이다.

터널 시공중 수행되는 계측에서 내공변위나 천단변위는 3차원화(A, C)하고 있으며, 시공중 전방예측을 위하여 갱내탄성파탐사(A, B, D)를 도입하였으며, B는 막장사진을 Scanning 하는 기법을 적용하기도 하였다. 계측기기는 기계식에서 전기저항식(C, D)이나 진동현식(D)으로 개선되고 있으며, TDR 방식(C)과 같은 기술이 도입되었으며, 자동계측을 계측에 적극적으로 반영하고 있다. 또한 C의 경우 계측빈도나 운용계획을 구체적으로 설계에

반영하였다.

영구계측은 라이닝 복공응력과 간극수압측정을 기본으로 하여 내공변위(A), 지중침하 / SC 응력 / RB 축력(C, D)에 대한 측정도 포함되어 있는 경우도 있다. Digital Optic 센서를 이용한 자동계측기술(A)와 다점식 광섬유 센서를 이용한 계측기술(D)과 같은 새로운 계측기술이 영구계측에 반영되고 있음을 알 수 있다.

유지관리는 일상관리와 정기관리로 구분하여 실시되는데, B사의 경우 터널스캐너(TS360)을 도입하여 터널 유지관리 전산화 방안을 설계에 반영하였다.

7. 요약 및 결론

이상과 같이 최근에 설계한 도로터널의 설계 사례 4개를 분석한 결과는 다음과 같이 요약되었다.

- 1) 기본 설계를 더욱 발전시켜 실시설계 및 시공 일괄 경쟁 형태로 설계를 수행한 사례를 검토한 결과 도로의 전체 연장에 비교할 때 터널의 연장이 기본설계 보다 길어졌다. 즉 기본설계에서 터널이 차지하는 길이는 약 3,242 m로 도로의 총 길이 약 6,100 m에 비하여 그 비율이 약 53% 이었다. 기본설계를 바탕으로 경쟁에 의해 설계를 개선 발전시켜 실시설계를 수행한 결과 터널의 길이가 약 4,001~4,729 m로 증가하여 도로의 총 길이 대한 비율이 약 65~77%로 높아졌다. 또 터널의 갯수도 기본설계에는 2개였으나 실시설계에서는 3개로 증가하였

Table 31. 계측 및 유지관리 설계 비교

		A사	B사	C사	D사
계측	A계측 B계측	3차원 내공변위 3차원 천단침하 갱내탄성파탐사 신진수평 시추조사	일상계측 : 수동 대표계측 : 자동 Face Mapping : Scanning 갱내탐사 : TSP	3차원 내공변위/ 천단갱구부 계측역해석 Feed Back 전기저항식/ 진동현식적용	다점식광섬유시스템소미터 → 암반이완영역 측정 갱내탄성파탐사 Vibrating Wire Type
		수동계측 관리시스템 3차원 계측 시스템	계측자동화시스템 NET 2B 시스템	자동화계측 3D-PKM, TDR	3D-PKM
영구 계측		3차원 내공변위 라이닝 복공응력 간극수압	라이닝응력 간극수압	지중침하/SC응력/RB축력 라이닝 응력간극수압	지중침하/SC응력/RB축력 간극 수압 라이닝배면응력
		자동화 계측관리 (JDOS)	계측단자 BOX설치 → 컴퓨터로 자료수집	BMD단면력 고려 계측빈도/운용계획	다점식광섬유센서
유지 관리	관 리	일상관리/정기관리	일상관리/정기관리 터널유지관리전산화	일상관리/정기관리 중점유지관리부위선정	일상관리/정기관리
	대 책	상태평가 보수보강대책	상태평가 보수보강대책	상태평가 노후화 / 누수 / 동해 / 균열대책	상태평가 보수보강대책
	특 징		터널스캐너 TS360		

다. 따라서 터널을 설계하는 기술의 중요성이 상대적으로 높아진 것으로 판단된다.

2) 조사 방법과 조사량이 설계·시공일괄 경쟁 전보다 크게 증가하였다. 설계·시공일괄 경쟁이 아닌 경우에는 시추조사를 터널의 입구와 출구에 각각 1개씩 조사하는 사례가 있었으나 이번 사례에서는 시추 조사공이 16~25개로 증가하였다. 터널의 총 길이와 비교할 때 약 181~272 m 간격으로 시추조사 한 결과가 된다. 또 대부분의 시추공이 지표에서 터널 심도 이하까지 도달하였고 터널의 단위길이에 대한 시추 길이가 약 235~300 m 였다. 탄성과 탐사와 전기비저항 탐사 축선 총 길이도 약 17.25~24.7 km로 터널의 단위길이에 대하여 약 3.85~4.59 km로 탐사 길이가 길어졌다. 조사의 종류에 있어서도 시추공을 활용한 공내 조사가 활발히 도입되어 BIPS, BHTV, Geotomography, 공내탄성과 탐사 외에 공내전단시험도 수행하는 단계로 발전하였다. 실내시험의 횡수도 크게 증가하여 총 시험 횡수가 최대 약 590회였다.

3) 터널의 설계에 있어서 경험적 방법을 적용하였다. 이번에 검토한 4개의 설계사례 모두에서 공학적 RMR 암반분류 방법을 기본으로 도로공사에서 정한 암반 분류 기준에 의하여 보강패턴까지 결정하였고 Q 시스템을 보조적으로 활용하였다. 따라서 근본적인 면에서 4개의 설계사례에서 록볼트의 길이와 간격, 슛크리트의 두께, 1회 굴진장에서 동일한 보강 패턴이 제시되었으나 보강 등급을 산정하기 위한 암반분류 기준값을 5 정도 높여서 보강량을 약간 상향 변형하여 적용한 사례도 있었다.

4) 터널의 설계 방법의 하나인 수치해석적인 방법도 적용하였다. 모든 설계사례에서 동일한 소프트웨어를 사용하였다. 조사와 시험 결과로부터 현지 암반의 탄성계수, 강도 등과 암반 내 초기응력 등 공학적인 입력 자료를 합리적으로 결정하려는 시도가 있었다. 이를 위하여 Bieniawski, Barton, Barton-Bandis, Trueman, Tsuchiya, Hoek & Brown 등이 보고한 결과식을 적용하였으나 실험치의 편차에 의하여 실제 수치해석적인 터널 안정성 해석에 입력한 값들은 설계사례 마다 차이가 있었다. 굴착의 보강의 진행에 따라 개방되는 응력의 크기에 대하여 강조된 면이 있었고 굴착 중에 개방되는 응력의 비율을 75%로 비교적 크게 가정한 사례도 있었다. 이와 같이 입력변수 값이 다름에 따라 변위와 응력의 크기도 다른 결과를 보였다. 또 터널의 안정성 해석을 2차원을 위주로 최대 약 27단면에 대하여 수행하였고 단면의 모양이 변하거나 분기되는 곳에서는 3차원 해석도 수행하였다.

5) 시공 중 계측과 막장 전방의 공학적 암반 특성을 조사하려는 여러 가지 방법이 제안되었다. 터널 막장 전방의 암반상태를 조사하기 위하여 tunnel seismic prediction system과 LIM 시스템이 제안되었다. 터널의 계측을 편리성과 정확도를 높이기 위하여 3차원으로 계측하려는 시도의 일환으로 3D-PKM, NET2B, TDR 등이 제안되었다. 계측기의 원리도 전기식과 진동현식 센서에서 발전되어 광섬유 다점 익스텐소미터도 활용되었다.

김치환



1983년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1985년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사
1990년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학박사

Tel : 0652-290-1468

E-mail : kimchee@hanimail.com

현 재 우석대학교 토목공학과 조교수

임경호



1986년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사

Tel : 02-523-9272

E-mail : khlim@cse.co.kr

현 재 (주)청석엔지니어링 지반공학부

김영근



1987년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1989년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학석사
1993년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학박사

Tel : 0331-250-1188

E-mail : kyg@mail.dwconst.co.kr

현 재 (주)대우건설 기술연구소 책임연구원

김택곤



1992년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1994년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학석사
1999년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학박사

Tel : 02-3485-3590

E-mail : rockim@hanimail.com

현 재 대본엔지니어링 지반부 과장
