

리옹과 튜린을 연결하는 알프스관통 고속철도 터널건설사업

박철환 · 정소걸

정회원, 한국자원연구소 자원연구부

지난 10여년 동안 계획단계에 있는 리옹과 튜린을 연결하는 고속철도는 52 km의 Basis 터널과 12 km의 Bussoleno 터널을 포함하고 있다. 두 도시 뿐 만 아니라 52 km 길이의 장대터널도 프랑스와 이탈리아의 국경을 관통하고 있어 터널굴착은 국제적 사업이 되었다. 이 국제적 터널사업은 밀라노와 쥘리히를 연결하는 57 km 길이의 고속철도의 Gotthard 터널과 함께 알프스 산맥을 관통하는 21세기 장대터널 사업이 되고 있다. 이들 두 장대터널에서는 알프스를 각각 동서 및 남북방향으로 관통하면서 각종 지질조건을 관측할 수 있다. 특히 squeezing 암반과 swelling 암반이 발달하고 있어 암석 역학적으로 사색연구나 역사적 의미를 많이 갖고 있기도 하다.

본 기술해설은 약 6조원의 사업비와 52 km 길이의 규모를 갖는 대형사업인 Basis 터널에 대한 영향평가 및 지질조사, 터널설계, 위험요소 등을 전반적으로 소개한 보고서를 완역한 것이다. 원전은 ISRM News Journal 1999년도 3월호에 실려 있는 보고서로서, 제목은 Lyon-to-Turin Railway Base Tunnel: An Alps Geology Project이며, 저자는 Alpetunnel GEIE의 J. Brulard와 P. Lacombe, 그리고 Simecsol 사의 J. Robert와 A. P. Bois이다. (이상 역자 주)

1. 새로운 리옹-튜린 철도노선이 미치는 영향

1987년 최초로 구상된 이래, 화물운송과 여객수송을 위해 리옹과 튜린(Lyon-Turin)을 연결하는 철도사업이 계획되었다. 동서의 철로축을 이루는 이 연결선은 리옹에서 프랑스 TGV 고속철도망과 튜린에서 이탈리아 고속철도망을 연결하게 될 것이다. 이러한 연결은 Fig. 1과 같이 환상적인 여행시간의 단축 때문에 개통 때부터 매년 700만명으로 추정되는 여행자에게는 매우 중요한 철로가 될 것이다. 예상되는 시간단축의 2가지 예로는;

- 1) 파리와 튜린 사이가 현재 5시간이상 소요되는 것이 3시간 미만으로 단축.
- 2) 런던과 튜린 사이가 현재 12시간 소요되는 것이 5시간 미만으로 단축.

이 새로운 연결선은 Fig. 2와 같이 경제력을 가진 Lombard, Piedmont와 Rhones-Alpes 지역들의 연계를 한층 더 강화할 것이다. 화물운송 측면에서 보면 현재 매년 1000만톤에 비해 1500만톤 이상 운송할 수 있을 것이다. 이것은 다음과 같은 것들이 향상되기 때문이다.

- 1) 용량과 규칙성 - 현존하는 철도노선으로 더 많은 화물운송을 촉진시킨다 할지라도, 반면에 여객수송량은 급격히 감소할 것이다.

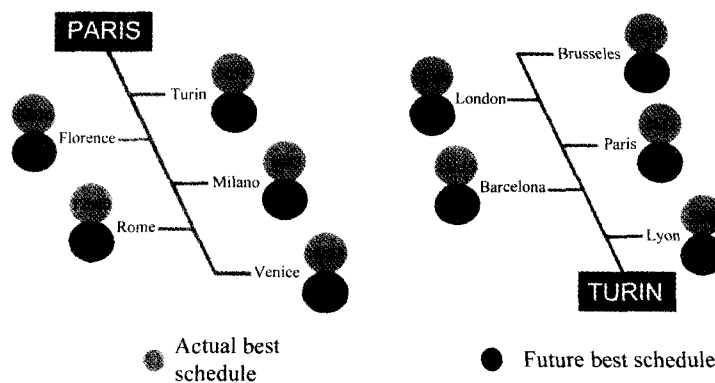


Fig. 1. Travel times

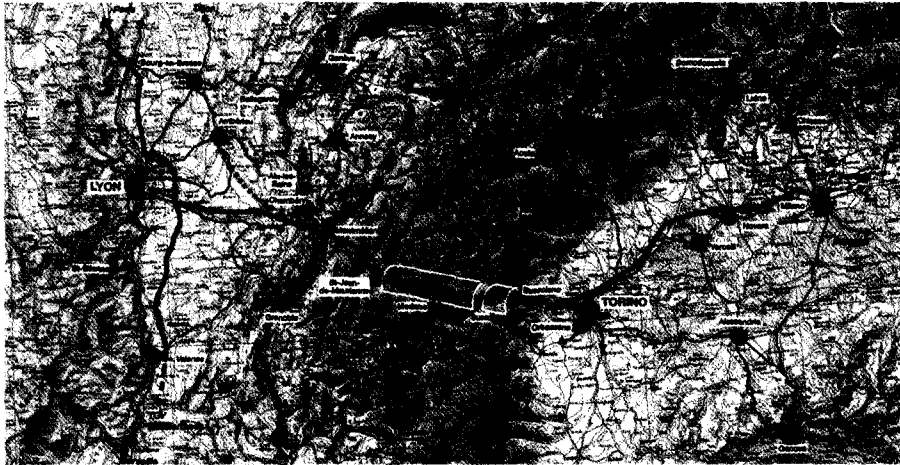


Fig. 2. Lyon-Turin railway link

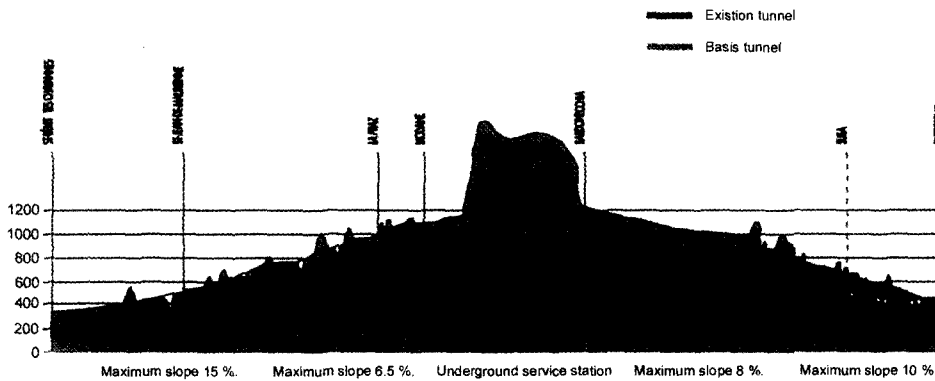


Fig. 3. Schematic profile of basis tunnel

2) 생산성 - 중량의 화물열차는 가파른 경사를 오르기 위해 힘 좋은 엔진을 필요로 하기 때문에, 알프스산맥의 천연장애물을 제거함으로써 생산성을 증진시킨다.

3) 터널의 규격 - 화물 및 여객운송이 조화될 수 있도록 터널의 적정한 규격을 얻게된다. 또한, 이 사업은 자동차를 적재한 기차의 규칙적인 운영을 가능하게 하여, 트럭 및 운전자들을 운송함으로써 경제적 매력을 갖게 된다.

2. 알프스산맥 횡단에 대한 지리적 제약

우리의 전임자들은 지난 세기 동안에 처음으로 긴 알프스산맥 철도터널(Frejus터널, Fig. 3의 상부 터널)을 건설할 당시에 서쪽산맥의 양쪽에 La Maurienne 지역의 Arc 계곡과 Susa 지역의 Susa 계곡이 가장 가까운

계곡이었다는 사실을 이미 이용했다. 이 14 km의 기다란 터널은 이탈리아와 프랑스 양편에서 10 km 이상에서 30도의 가파른 경사를 완전히 피할 수 없었다.

이러한 경사는 기차가 산을 오르고 내림에 있어서 엄청난 크고 힘과 저속을 요구하고 기차의 성능과 경제성을 완전히 감소시킨다. 경사에 비교적 영향이 적은 여객운송과 화물수송간의 속도면에서의 격차는 철도의 역량을 감소시킨다.

그런 측면에서 프랑스의 Saint-Jean-de Maurienne 지역과 이탈리아의 Susa 지역을 연결하는 52 km의 긴 Basis 터널은 리옹-투린 철도사업 중에도 걸작품으로 꼽힌다.

Fig. 3에서 볼 수 있는 이 터널은 긴 단면(화물열차의 최대경사 15도)과 환경적 측면(홍수, 산사태, 눈사태에 대한 방재)에서 평지와 같은 특징을 갖는다.

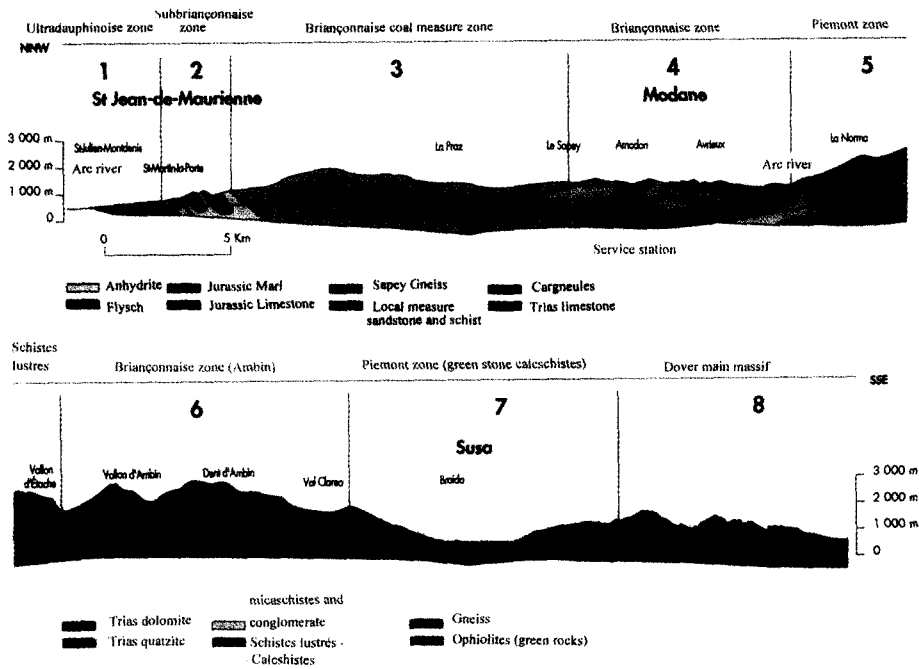


Fig. 4. Schematic geological profile of basis tunnel

3. 터널 부근의 지질

사업지역은 알프스산맥의 서쪽지역으로 프랑스와 이탈리아에 걸쳐 위치하고 있으며, Fig. 4와 같이 外帶 및 內帶(external zone and internal zone)로 구분할 수 있는 두 개의 지질구조를 가지고 있다.

이들 두 지질구조는 외대에서는 내대에 비하여 두꺼운 퇴적층, 내대에서는 외대에 비하여 변성도가 약하거나 혹은 좀 더 강하며 체계적인 이동특성을 가지고 있으므로 구별이 된다.

외대는 2차 퇴적물로 덮여 있는 더 오래된 Hercynian 기반암 용기부의 측부와 일치하고 있으며, Belladonna 육괴와 같은 결정질암 지괴는 내대와의 경계부 부근에서는 상부를 덮고 있는 퇴적물과 함께 노출되어 있다. 상부 퇴적물은 서측에서 더 잘 발달하고 있으며, 이들은 주능선에서 분기하는 능선을 형성하고 있다. 동측에서는 상부 퇴적물이 그 두께가 합판처럼 얇아지며 이의 가장 안쪽은 Ultra-dauphinoise Zone 이라 부르고 있다.

내대는 전술한 외대와는 달리 훨씬 복잡한 지질구조를 보이고 있는데, 이는 강한 지구구조활동과 변성작용을 받은 결과로서 심하게 파쇄되어 있으며 지구구조운동의 초기부터

말기까지의 진화과정이 모두 기록되어 있다. 이러한 복잡한 지질구조는 여러가지 지질구조들이 겹치고 주요 층상 단층들과 연결되어 있는 nappe 구조들이 중첩되어 만들어진 것이다. 서쪽으로부터 동쪽으로 가면서 다음과 같은 큰 지질구조들로 구분할 수 있다.

- 1) Subbriançonnaise Zone
- 2) Briançonnaise Zone
- 3) Piedmont Zone

사업지역은 활모양의 알프스산맥을 가로지르고 있는데, 이 지역에 발달하여 있는 지질구조인 Ultra-dauphinoise Zone, Subbriançonnaise Zone, Briançonnaise Zone, Piedmont Zone을 서측으로부터 동측으로 가로지르고 있다. 이 지역에 분포하고 있는 암석은 매우 다양하며, 지질공학적으로 암질의 변화가 매우 심하다. 즉, 구성물질은 detritus (암설), colluvium (붕적층), cagneules (공동이 많이 발달하여 있는 석회질암) 등과 같이 물성이 약한 것으로부터 편마암이나 운모편암과 같이 강한 것까지 있으며 극경암인 규암류도 있다. 그리고 이 지역의 암반에는 균열이 보통 이상으로 잘 발달하여 있으며, 때로는 파쇄가 매우 심한 부분도 있다.

4. 본터널의 설계

1994년말, GEIE(Groupment Europeend'Interet Economique)의 Alpetunnel 회사는 프랑스 - 이탈리아 철도국에 의해 리용-투린 프로젝트의 지질단면조사를 맡게 되었다. 이 조사구간은 Saint-Jean-de-Maurienne과 Bussoleno 지역을 연결하는 약 70 km의 구간으로 52 km 길이의 본터널과 이탈리아 Susa 주변의 12 km 길이의 보조터널을 포함한다.

완만한 경사가 겨우 12%로 한정되었음에도 불구하고, 해발고도 약 600m 에 위치한 터널의 양쪽입구 사이에 중간진입로들을 지형적으로 유리한 위치에 두었다. 이것은 조사터널에서의 지질학적 조사, 중간작업개시 지점에서의 작업, 그리고 유지와 안전을 위한 진입로의 개척을 용이하게 한다. 이로써 터널의 중간 지점에서 보수작업 및 안전을 위한 대피소를 미리 예측할 수 있었고, 보조의 서비스 터널없이도 안전한 운영체계를 제공할 수 있었다.

현재까지의 설계에 의한 본터널의 특징은 다음과 같다.

- 1) 서비스를 위한 보조터널없는 Bi-tube 터널로서 한 터널은 반대편 다른 터널의 대피터널의 역할
- 2) 두 터널은 400m 마다 Fig. 5와 같이 서로 연결
- 3) Fig. 6과 같이 중앙부인 Modane 구역에 보수-안전 대피소

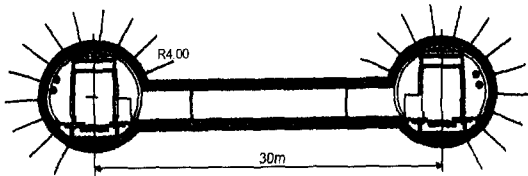


Fig. 5. Cross section with linking branch

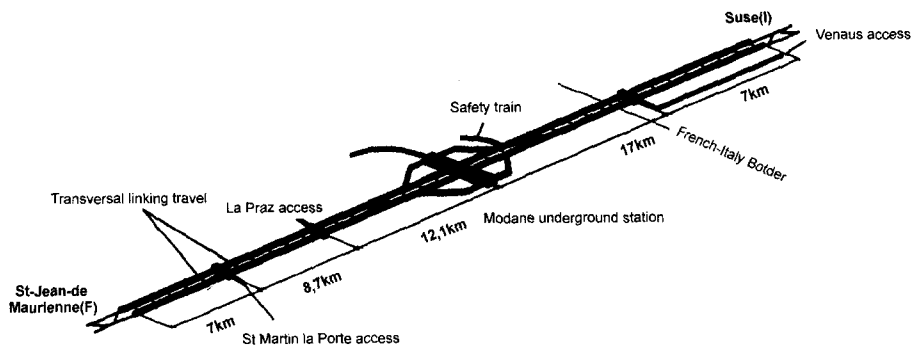


Fig. 6. General view of basis tunnel

- 4) 52 km 길이 및 최대경사 12%
- 5) 최대 피복층 높이 2500m (터널 10 km 이상이 피복층 높이 2000m)
- 6) 터널축 사이의 최소 거리 30m
- 7) 각 터널의 단면적은 43m²로서 220 km/h 고속열차 또는 차를 적재한 열차로 인한 밀폐공간을 순환하기에 적합

5. 현재와 미래의 지질조사

1990년 9월부터 1998년 9월동안 지질조사의 여러 단계마다 각각 4가지 조사 방법이 수행되었다.

- 1) 자세한 연구조사, 지표조사 및 정밀 지질도의 준비
- 2) 항공사진이나 위성사진(SPOT, LANDSAT, ERS)을 근거로 한 지체구조연구
- 3) 지구물리탐사, 특히 탄성과 탐사 - 108 km 길이에 대한 탄성파에 의한 축선반응곡선과 62개의 수직탄성파 탐사가 수행되었다.
- 4) 시추공에 의한 조사 - 각각 45m에서 1520m로 시추깊이가 다양한 86개 시추공, 총 28,800m 길이가 시추되었다.

이러한 여러가지 조사방법은 동시에 수행되었는데 서로서로 보완되는 작업이며, 결과와 부딪히는 문제점에 따라 항상 일정하게 적용되었다. 더욱이 수리지질학적 견해와 측량학적 견해에 의한 평가는 동시에 수행되었다. 지반의 극단적인 지질학적 복잡성과 사업규모에 의하여 이러한 방법들은 한계에 도달하였다. 이런 방법들을 향상시키기 위해서는 새롭고 원칙에 따르는 아래와 같은 접근 방법들을 계속하여 시도해야 할 것이다.

- 1) 지구물리학적 접근방법; 굴절법 탄성과 탐사와 수직

탄성과 탐사를 최대도로 이용하기 위하여 파선추적기법(ray trace)으로 모델연구가 수행되었다.

2) 굴절법 탄성과 탐사(SRP); 먼 거리와 중간 정도 떨어진 거리에서 실시하는 발파방법의 개선과 각 층에서 파의 전파속도를 적용한 이래로, 도달시간의 계산값과 측정값 사이의 상관관계로 정의되는 파선추적기법을 이용하여 모델을 만드는 것이 가능하였다. 각 파선의 추적기법을 이용한 접근법은 토목공학에 적용되어 온 전통적 방법을 보완하였다.

3) 수직탄성과 탐사(VSP); 타원형의 방법을 사용하여 증가하는 파와 감소하는 파를 처리하는 기법이 수행되었다. 그 다음에 각기 다른 층들 주위에 있는 구조들을 보다 정밀하게 밝히기 위하여 파선추적기법을 이용하여 특이한 모델링 방법이 수행되었다. 그 결과 탐사층들의 주변에 있는 단층들의 기하학적 분포를 규명할 수 있게 되었다.

4) 특정한 연구법; 본래의 접근방법에는 응력장을 결정할 수 있는 수압파쇄시험, 파쇄면의 위치를 결정할 수 있는 BHTV, 인회암의 균열 비적법(fission tracking)에 의한 연대측정으로 수직적 단층의 변위의 정량화 작업, 활성단층 및 사면의 움직임을 감지하기 위한 측량 네트워크 설치가 있다.

5) 방향성 시추공; 특히 중요한 지질학적 단층 주변의 지질학적 수리학적 상태와 응력상태를 파악하기 위하여 Alpetunnel GEIE는 알프스 산맥조건(복합구조체, 불규칙한 결정, 퇴적암층 및 변성암층) 때문에 시추의 성공을 예측한다. 그러므로 접근하기 어려운 지역으로부터 사업의 조사분야를 수행하기 위하여 광산 및 석유분야의 시추기술이 필수적으로 요구된다. 이러한 시추공들은 1000m 이상 수평을 유지해야 하며, 연속성있는 코어를 시추해야 할 것이다. 이로서 시추공 측정과는 별도로 역학적 및 수리지질학 시험이 가능하게 될 것이다.

6. 예상되는 문제점과 해결책

커다란 상재하중은 다음과 같은 중요한 지질공학적 문제들로 인하여 위험이 증폭된다.

6.1 단층대

부득이 이 지역의 복합체 구조로 인하여 알려지지 않은 것이 많이 있다. 터널을 굴착하는 동안에 조사작업은 조직적으로 예측하여 주의 깊게 수행되어야 한다. 특히,

본 사업에서 다음의 5가지의 중요한 지질학적 단층대를 접하게 된다.

1) Ultra-Dauphinoise Zone과 Subbrianconaise Zone을 분리시키는 pennique front

2) Subbrianconaise Zone과 Brianconaise Coal Measure Zone의 접촉면

3) Modane-Chavieres 단층(Brianconaise Vanoise Zone의 단층)

4) Ambin 기반층(Brianconaise Zone)과 Triassic 피복층(Piedmont Zone)의 접촉면

5) Pont Ventoux 단층(Brianconaise Zone/Piedmont Zone)

이러한 지역들은 낮은 값의 역학적 특성이나 swelling 또는 squeezing 특성을 갖고 있으며, 어떤 경우에는 10 MPa을 초과하는 높은 수압하에 있을 것이다. 이런 지역의 특성을 사전에 파악하지 않고 가로질러 굴착하는 것은 벽면의 불안정과 붕괴 등의 대단히 큰 위험을 초래할 수 있다. 수리적 특성의 적절한 평가가 필요하며, 다음과 같은 세가지 요소가 결정되어야 한다.

1) 수두 또는 potential

2) 암반의 투수성

3) 수리적 활동지역의 위치

이것은 BOP(blow out preventers)를 방지하면서 터널에서 선진천공에 의하여 수행되어야 할 것이다. 단층대의 탐지는 시험 또는 처리의 단계적 계획에 의해 다음과 같이 수행될 것이다. 첫번째, 시험공은 지구물리탐사나 수리시험이 수행될 수 있는 곳에 시추될 것이다. 이 시험공은 필요하다면 공극압을 낮추는 일련의 양수작업을 수행해야 할 것이다. 주입공은 초기 공극압에 따라 사용되어야 할 것이다. 만약, 이러한 공극압이 터널 라이닝에 의해 지지될 수 있을 만큼 충분히 낮고 단층대의 강도가 충분히 높다면, 주입이 필요하지 않을 것이고 배수가 효과적일 때 터널은 굴착될 수 있을 것이다. 반대로 만약, 공극압이 너무 높거나 암반의 역학적 강도가 충분히 높지 않다면, 주입공을 시추하는 고결작업을 먼저 착수해야 할 것이다. 주입공의 숫자는 공극압력의 중요도에 따라 결정되어야 하며, 조사공은 고결의 효력을 시험하기 위해 필요할 것이다.

그럼에도 불구하고 그러한 단계적인 계획은 사전에 또는 굴착방법(천공-발파 또는 TBM)에 따라 단층대를 감지하는 능력에 의존한다. 특히, TBM 굴착과 터널벽면에

서의 사전조사가 사업초기에 계획되지 않았다면, 이 방법들은 항상 적합한 것은 아니다. 더욱이 TBM을 사용할 때 BOP를 방지하면서 양수공과 주입공의 시추작업은 매우 어려운 과제이다.

6.2 high natural stress and risk of rock bursts

심부의 터널은 높은 응력에 직면할 것이다. 이는 암석의 무게로 인한 결과일 뿐 만 아니라, 암반 내에 저장될 수 있는 과거와 현재의 구조적 힘으로부터 생길 것이다. 응력장을 이해한다는 것은 원위치 응력측정과 응력과 연관된 모든 것(borehole breakouts, shear wave splitting 등등)을 완벽히 이해한다는 것이다.

수압파쇄법에 의한 원위치 응력측정은 6개 이상의 시추공에서 수행되었는데, 매우 다양한 결과를 보여 주었다. 측정된 수직응력은 암석의 무게에 기인한 응력의 수치해석의 결과와 비교되었다. 때에 따라서 측정값은 수치해석의 수직응력보다 높거나 낮은 값을 나타냈다. 이런 응력들은 계곡이 존재함에 따라 영향을 받았지만, 이것만으로 모든 변수들을 설명할 순 없다.

높은 응력들은 Mont-d'Ambin 단층지괴 아래에서 나타났는데 수직응력이 62 MPa에 이른다. 수평응력 대 수직응력의 비율이 약 0.5인 것을 감안하면 최대 전단응력은 약 150 MPa로 유도되었다. 이 단층지괴를 구성하는 암석은 Mont-d'Ambin 편마암과 Val Clarea 운모편암이다. 이 암석들은 강하면서 취성도가 크다. 이것은 10 km 이상의 거리까지 암반의 폭발적 파괴(rock burst)의 위험성이 매우 높은 것을 의미한다. 이러한 폭발적인 파괴는 지협적으로는 매우 격렬해질 수 있다.

그러한 파괴는 높은 응력을 받는 취성의 암석 내에 굴착된 터널 내에서 발생하며, 일반적으로 터널벽면 뒤쪽에서 터널반경의 절반에서 3배에 해당하는 거리까지 나타난다. 그러나 만약 응력이 높다면 직접적으로 터널벽면에서 일어날 것이다. 보통의 경우 매우 날카로운 모서리를 갖는 얇은 판상형태의 암석파편은 암석벽면으로부터 격렬하게 튀어져 나오고, 사람 등의 안전에 대한 위험요소가 된다. 만약 원위치 응력이 매우 크다면, 이러한 파편은 아주 큰 크기가 될 수도 있다.

사실은 터널내에서 이러한 폭발적 파괴발생을 예측할 수 있는 방법은 거의 전무한 상태다. 이것은 Mont-Blanc 터널과 오래된 Lotschberg 터널에서 얻은 경험으로 생긴 방법론들을 적용하는 이유이기도 하다. 파괴와 이로부터 유발된 파괴력의 위험은 언어진 최대 전단응력

과 암석의 강도 비율에 의해 기초하여 추정될 수 있다. 최대 전단응력은 암석이 탄성체인 것으로 가정하고 평가된 값이다. 이것은 암석강도의 평가작업은 물론 원위치 응력장을 평가하는 것을 가정한 것이다.

암반변형에 의한 파괴양상은 사용된 굴착방법에 따라 달라진다. 천공-발파의 경우에 있어서는 점진적으로 활동할 가능성이 있을 것이다. 지보는 암석파괴를 멈추기 위해 설치한 것이 아니라 파괴에 따르는 결과물을 줄이기 위해 설치되며, 굴착하는 동안 부딪히는 실제 상황에 따라서 점진적으로 적용되어야 할 것이다. 또한, 가능한 많은 에너지를 소모하면서 지보는 연성화될 것이다. 이때 split-set 볼트는 추천할 만한 좋은 지보재이다. 볼트패턴은 떨어져 나오는 속도와 과대하게 깨진 부피를 추정하여 효과적인 분석을 기초로 설계되어질 것이다. 이러한 볼트는 그 능력을 증대시킬 수 있는 커다란 판과 철침강화 슛크리트와 결합되어 사용되어야 한다.

다른 방법으로 TBM을 사용하는 경우에는 특히, 터널 벽면에 가까이에서 암석파괴가 일어난다면, 미리 앞서서 예측하는 접근법이 가능하지 않다. 그립의 작동에 의하여 파굴이 억제되지만, TBM에 떨어지는 파편들은 장비들에 손상을 입힐 것이다. 한편 터널벽면 가까이에 지보를 설치하는 것은 매우 어려운 작업이다. 암석의 폭발적 파괴는 TBM이 이점으로 갖는 굴착속도를 떨어지게 할 것이다.

6.3 squeezing rocks

사업기간 중에 두종류의 squeezing 암반을 직면하게 될 것인데, 첫번째로는 1600m 이상의 심부에 있는 Piedmont 지역의 schistes lustrés이다. 이들 암석은 경석고(anhydrite)와 백운석으로 형성된 기반 위에 이동된 편암으로 변성작용을 받았다. 이들 암석은 Frejus 도로터널에서 서로 교차하고 있다. 마치 어떤 구성물질들이 풍화(천매암의 수화작용)된 것처럼 크립에 의한 커다란 수축변형(large convergence with creep)이 관찰되었다. Mont Cenis 터널을 굴착하는 과정에서도 탄화수소가 발견되었다.

불균질하고 이방성을 띠는 이러한 암층은 신선한 시료에서 10~130 MPa 크기의 단축압축강도를 갖고 있다. 편암특성 면들은 연약면과 일치한다. 측정된 탄성계수의 크기는 10~60 GPa의 크기로 다양하다. 터널이 주로 동서방향을 보이는 반면 편암특성 면은 주로 북동방향의 경사를 갖는다. 굴착과정에서 주요 위험은 작업장의 안정성(긴 록볼트의 사용), 천정부의 안정성(적절한 록볼트에

의해 극복될 수 있는 암석의 쪼개짐과 낙반의 위험성), 그리고 심한 수축변형을 보이는 지보의 거동(과밀 압력으로 인한 갑작스런 파괴를 피하기 위하여 록볼트, 콘크리트 또는 sliding 철재지보를 기초로 하는 가축성 지보체계)에 있다.

두번째의 squeezing 암반종류는 1300m 이상 깊이의 상재하중을 받는 Briançonnais Zone의 탄층이다. 이 지층은 무연탄과 편암의 얇은 지층을 포함하는 편암과 약간의 엽리상의 사암이 교대로 층을 이룬다. 이는 수많은 습곡과 단층에 의해 이루어졌다. 낮은 심도에서 Electricite de France(EDF)터널은 이 지층을 가로지른다. 무연탄층을 포함한 편암은 파괴이후의 단계에서 소성 특성을 보이고, 지보체계에 영향을 미친다. 배수되는 물속에서는 H₂S와 같은 용해가스가 발견되었다.

굴착과정에서 직면한 중요한 위험요소는 단층대(배수, 주입 및 선행지보와 같은 선행의 구축작업이 요구되는 잠재적으로 불안정한 지대)와 극심하게 수축변형되는 곳에서의 지보의 거동이다. 관찰된 수축변형의 크기에 따라서 록볼트와 슛크리트로 강화하는 가축성 지보가 추천된다.

6.4 swelling rocks

사업기간 중에 두가지 종류의 swelling rock과 직면하게 될 것이다. 하나는 황산염이 풍부한 물속에서 경석고, 탄산염암, 돌로마이트 또는 점토가 화학적으로 풍화된 산물인 carnegules의 점토질 파편이다. 이러한 암석들은 물이 있는 곳에서 팽창하는 경향을 보인다. 다른 하나는 수미터 또는 수킬로미터 이상되는 길이의 구조적 단층을 채우고 있는 경석고이다. (예로는 schistes lustrés nappe의 기반) 그것은 화석가스(fossil gases)와 카르스트지형의 빈틈(karstic voids)으로 구성될 수 있고 물이 있으면 팽창한다.

경석고의 swelling 위험은 대단히 크게 나타난다. 이는 부피를 60%까지 증가시키는 수화작용에 의해 경석고를 석고로 변환시키는 결과로 나타난다. 완전히 순수한 경석고 암질은 매우 낮은 투수성을 갖고 있기는 하나, 터널에서 배수되는 물에 의해 이러한 수화작용이 대부분 이루어진다. 일정한 체적에서 팽창압력은 8 MPa에 달한다.

터널내에서 주변암질에 대한 swelling의 효과는 암반에 구속력을 생성시키면서 인버트 내에서만 보여질 수 있다. 응력은 인버트에서 크게 감소하고 팽창력은 심한 이방성으로 작용한다. 터널의 상부와 옆면을 따라서 일어나는 swelling의 영향은 바닥에서와는 달리 무시해도 된다.

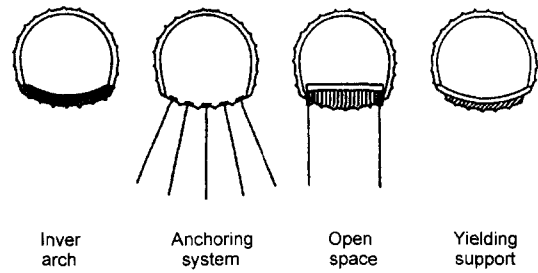


Fig. 7. Tunnel design in swelling rock

실험실내에서의 swelling 시험은 암석의 팽창을 조절하고 터널 사용중에 나타날 수 있는 어떤 중요한 피해의 위험을 줄이기 위해서 바닥에 있는 암석에 대한 구속력의 필요성을 확인하는 것이다.

인버트의 규모는 특성곡선들을 사용하여 가능할 수 있다. 터널바닥 아래 지반의 수축변형 곡선과 인버트로 인한 구속력 곡선, 그리고 두 곡선의 교차점과 관련된 지반과 인버트의 상호작용의 안정한 상태로 정의된다. Swelling에 의한 변형과 압력을 해석하기 위해서 바닥면 지보의 네가지 종류는 다음과 같이 설계될 수 있다. (Fig. 7)

1) 암반과 인버트에서 변위가 작을 때의 역아치 모양의 강력한 바닥지보(rigid invert). 이것은 힘을 받는 인버트의 수용력을 증가시키기 위하여 곡률반경을 아주 크게 할 필요가 있을 것이다.

2) 앞에서와 같은 원리(낮은 변위와 큰 접촉응력)에 의하여 암반 앵카 또는 대형 앵카를 설치하는 바닥지보(anchored invert)

3) 지반의 변위를 구속하지 않는 가축성 바닥지보(flexible invert). 이는 발생가능한 커다란 변형을 허용함으로써 암반과 인버트 사이의 접촉면에서 발달하는 응력을 적게 하고, 그리고 그 자체적으로 최후에는 swelling이 멈출 것이라는 것을 가정한다.

4) 변형되기 쉬운 물질의 층위에 설치된 역아치 모양의 바닥지보. 이 지보체계는 인버트가 받아 들일 수 있는 수준에서 암반과의 접촉면에서의 응력을 제한하기 위하여 초기변위값을 허용한다.

대부분의 경우 주로 선택되는 해결책은 첫번째의 역아치 모양의 강력한 바닥지보 체계이다. swelling 잠재능력에 따라 굴착반경을 선택한다. Fig. 8과 같이 넷째 그림의 변형되기 쉬운 물질의 층위에 설치된 역아치 모양의 바닥지보는 Buechberg나 Freudenstein 같은 터널에서

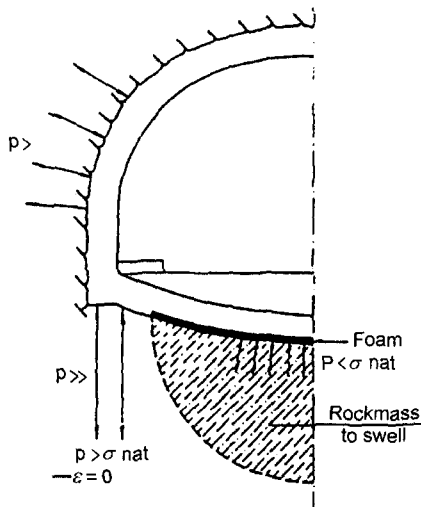


Fig. 8. Invert on deformable material

적용되었다.

6.5 용출가스

메탄, 황화수소, 이산화탄소 등의 다양한 가스들이 터널 굴착 중에 나온다. 이 가스들은 측정되어 특별한 방법으로 대책이 수립되지 않는 한 사람들의 안전에 위협을 줄 것이다.

6.6 온도

실제적인 경사구배가 이론상의 경사구배보다 급격하지 않다 할지라도 터널을 굴착하는 중에 온도가 50°C에 도달할 수 있다. 온도에 관한 연구는 작업자를 위해서나 후에 터널을 사용하게 될 때 적절한 냉각체계를 설계하

기 위해서 필요하다.

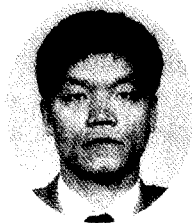
7. 향후전망

현재 이 국제구간의 비용은 유럽통화단위로 56억 ECU(약 55억불 및 6조원)로 추정되고, 그중 48억 ECU는 본터널에 사용될 것으로 예상하고 있다. 화물운송으로 계획된 첫 단계에는 비용이 30억 ECU 정도 소요될 것이다. 공사수행에서 단계마다 서로 다른 공사량 때문에 비록 행정상 절차가 최소라는 조건에서조차도 2015년 전에 개통시일을 예상할 수 없다. 사업수행의 몇몇 단계는 다음과 같이 추정된다.

- 1) 1999에서 2000까지 2년간 방향성있는 시추작업
- 2) 6년간 지질조사와 준비작업(access ramps, shaft, ground treatment 등등)
- 3) 5 ~ 6년간 토목공사
- 4) 2년간 장치설치 및 시험기간

그러므로 사람과 자연 사이의 관계에 항상 존재하는 위험을 보다 안전하게 통제하기 위하여 어쩔 수 없이 지연되는 것은 바람직하다. 특히, 그러한 복잡성을 지닌 지하공사에서는 그런 위험들은 제거되는 것이 아니라, 감소시키거나 조절되어야 하기 때문이다. 따라서 사업기간 끝까지 그러한 위험들이 존재한다 할지라도, 더욱 더 자세한 조사와 공사진행으로 인해 얻어진 관찰과 교훈에 의하여 위험은 점차 감소되어질 것이다. 그러므로 본 사업이 지역개발과 환경으로 매우 중대하고 거대한 인프라가 명백하게 구축되는 것이라 하더라도, 프랑스와 이탈리아 양국의 강력한 정책의지가 요구된다.

박 철 환



1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
 1981년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
 1987년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel : 042-868-3244

E-mail : cwpark@rock25t.kigam.re.kr

현 재 한국자원연구소 자원연구부 책임연구원

정 소 길



1975년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
 1982년 Nancy Ecole Des Mines (in France), 공학석사
 1984년 Orleans 대학(in France), 공학박사

Tel : 042-868-3231

E-mail : skchung@kigam.re.kr

현 재 한국자원연구소 자원연구부 부장