

영 · 불해협 해저터널



신희순
정회원, 한국자원연구소 책임연구원

1. 서론

영불해협을 터널로 잇는 구상은 프랑스의 광산기술자인 Alvert Mathieu가 제안한 이래로 많은 구상과 연구가 이어져 왔다. 그림 1은 나폴레옹이 구상한 영불해협을 건너기 위한 3가지 방안 즉 기구, 배, 터널을 이용하는 전략을 나타내고 있다. 영국의 Folkstone과 프랑스의 Calais를 연결하는 영불해협 해저터널이 총공사비 약 10조원을 들여 7년간의 공사 끝에 지난 1994년 5월 6일 개통식을 가졌다. 터널의 총길이는 50.4km이며 이중 해저구간이 약 38km에 달하는 데 해상으로부터 25~45m하부에 위치한다.



그림 1. Napoleon plans to cross the Channel

Eurotunnel 사가 순수한 민간자본에 의한 영불해협해저터널의 건설을 제안하였으며 사업자금조달, 건설을 맡

았으며 건설 후의 운영도 하게 되었다. Eurotunnel사는 영국의 Channel Tunnel Group 과 프랑스의 France Manche 로 구성되어 있다. 영국의 Translink사와 프랑스의 Transmanche construction 의 연합체인 Trans Manche Link(TML)가 터널과 운송시스템의 건설을 맡았다.

2. 지질

영불해협 바다밑의 지반조사는 100년을 넘도록 수행되었으며 지난 30년간 100개 이상의 시추공에 의한 지반조사를 통하여 최적의 영불해협터널 노선선정을 할 수 있었다. 그림 2에서와 같이 영국과 프랑스쪽의 지질구조는 국부적인 변화는 있으나 대체적으로 균일하며 연속성을 가지고 있었다.

영불해협 바다밑의 지반은 White chalk, Gray chalk, Blue chalk, Gault clay 층으로 되어 있는데 교질 암석층인 Gray chalk층은 지하수의 흐름이 양호하고 Gault clay 층은 초 연약층으로 높은 수압에 의하여 팽창하는 특성을 지녀 구조물의 중량을 견디기 어렵기 때문에 터널 대상 지반으로는 부적합하였다. 그림 3~그림 4에서 보는 바와 같이 터널굴착공사의 대부분이 chalk marl에서 이루어졌다.

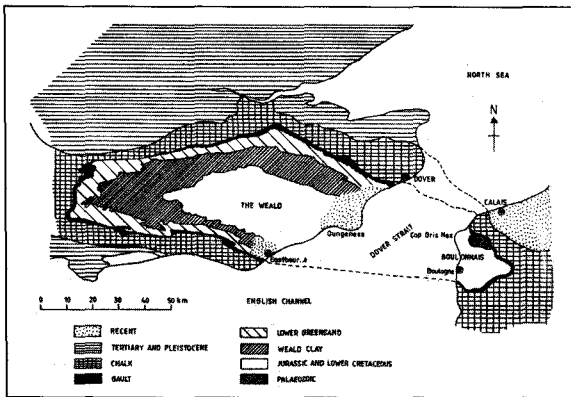


그림 2. Geological structure of the Dover Strait

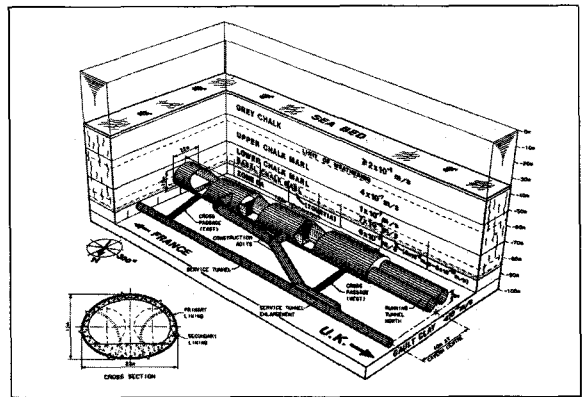


그림 5. Perspective view of cavern and geology

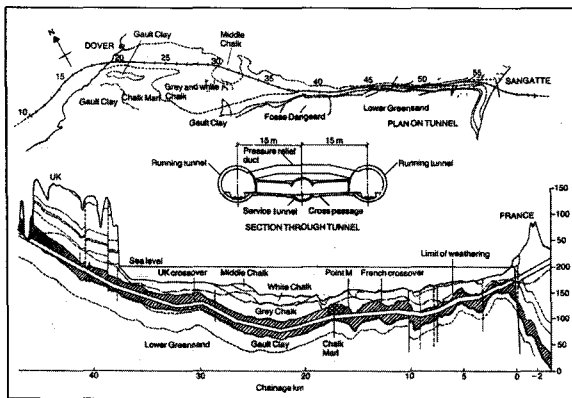


그림 3. Geological section and tunnel alignment (as planned)

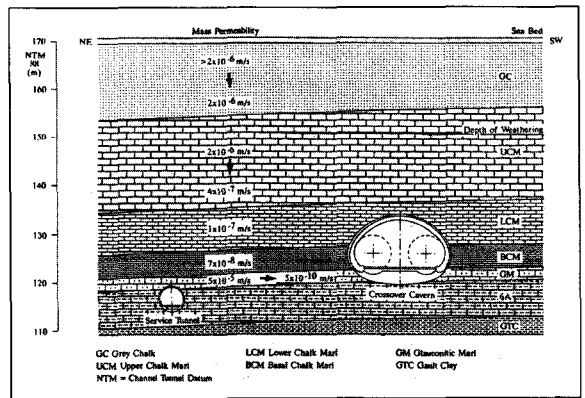


그림 6. Detailed geological section

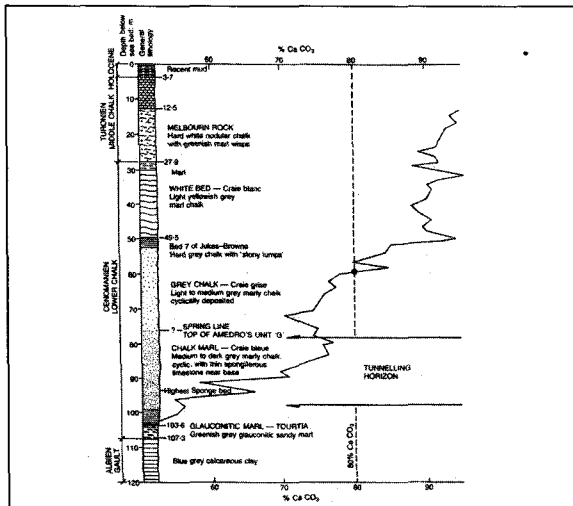


그림 4. Strata adjacent to the main Channel Tunnel tunnelling horizon

Chalk 암반의 투수율은 균열망(network)에 좌우되는데 chalk 자체는 불투수성이다. 실험실내 시편에 대한 투수율 시험은 Grey chalk는 10^{-10} m/s 이고 Craie blue는 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ m/s 로서 균열암반이 투수율이 시료보다 1,000배이상 큰 것은 균열망의 기하학적특성(불연속균의 밀도, 방향, 불연속균의 상호연결성 등)과 균열 각각의 수리전도도(침투율)에 좌우되기 때문이다.

표 2는 프랑스쪽에서의 1986~1987, 1988~1989년의 두차례에 걸친 시추조사를 통하여 구한 지반의 주요 특성 들을 요약한 것이다.

표 1. Geological formations

Geological formation	Typical thickness(m)		General description
	England	France	
Upper Chalk	-	90	White chalk with flints
Middle Chalk	80	70	White marly chalk, some flints in upper part. Hard Melbourn Rock 15m thick at its base
Lower Chalk	80 (19)	68 (15)	Top: White Chalk-soft yellow white chalk with 2m thick Plenus Marl at top of stratum
	(21)	(26)	Middle: Grey Chalk-grey marly chalk with 2m thick Bed 7 near top(gritty chalk with shells)
	(35)	(25)	Lower: Chalk Marl-grey chalky marl
	(5)	(2)	Base: Glauconitic Marl-marly sands: sometimes with basal layer of cemented sandstone
Gault Clay	42	15	Grey-blue calcareous clay/mudstone
Lower Greensands	25	15	Alternating weakly cemented sands and clays

표 2. Typical geotechnical parameters adopted for design

Formation	Saturated density γ_s (KN/m ³)	Resistance to simple compression R_c (MPa)	Modulus of instaneous deformation E_i (MPa)*	Coefficient of creep ϕ	Coefficient of mass permeability k (m/s)
Coniacian	19.5	3	2,000	1	10^{-6}
Turonian O and N'	19.5	3	2,000	1	10^{-6}
Turonian L and M'	23	6	1,500	1	3×10^{-6}
White Chalk	21.5				10^{-6}
Grey Chalk					
PK-0.2-1	22.5	9	2,000	1.5	10^{-6}
PK1-8.5	22.5	9	1,500	1.5	5×10^{-6}
PK 8.5-16.3	22.5	9	1,300	1.5	$1 \sim 5 \times 10^{-6}$
Craie Blue					
PK-0.2-1	23.5	9	1,500	1.5	5×10^{-7}
PK1-8.5	23.5	9	1,500	1.5	5×10^{-7}
PK 8.5-16.3	22.5~23	6~9	900~1,300	1.5	$1 \sim 2 \times 10^{-7}$
Crossover	23	9~12	2,300~4,000	17	$3 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-7}$
Tourtia	23.5	5	900	1.5	5×10^{-7}
Gault Clay	21.5~22	1.8	200	2.1	10^{-9}

* a E_i is corrected to the very long term modulus by

3. 지반조사

영불해협지반에 대한 첫 조사는 19세기 후반경에 행해졌지만 현대적인 조사는 1958~1959년에 비로서 실시되었다. 표 3에서 보는 바와 같이 총 186개 시추공중 바다에서 116개, 육지에서 70개 시추공이 터널노선을 따라 굴

착되었으며 물리탐사는 4,000 line-km 수행되었다.

육지시추공으로부터 얻은 정보는 해상으로부터보다 비용이 훨씬 저렴하였는데 1987년 가격으로 1개 육상시추공의 조사비용은 20,000파운드(3천5백만원)인데 반하

표 3. Channel Tunnel-alignment boreholes

Campaign	UK land	UK sea	French sea	French land
1958~1959	3	5	3	1
1962~1965	14	32	41	10
1972~1974	8	9	7	-
1986~1987 (Phase I)	19	3	9	15
1988 (Phase II)		5	2	-
Total	44	54	62	26

여 해상은 0.5백만 파운드(8억9천만원)에 달하였다. 물리 탐사는 지질자료를 얻는 매우 저렴하면서 효과적인 방법으로 영불해협지반조사의 주요역할을 하였다.

현장시험으로는 Reflection seismic surveys, Hydrophone surveys, Continous velocity log, Sonic log, Sonic amplitude log, Gamma log, Neutron log, Resistivity, Spontaneous potential, Verticality (inclinometer) test, Caliper log, Packer permeability test, Dilatometer test, In-situ masuring test 등이 수행되었다.

영불해협해저지반을 크기 3개 구역 즉 Unit 2, Unit 3, Unit 4로 나누어 살펴보면 다음과 같다.

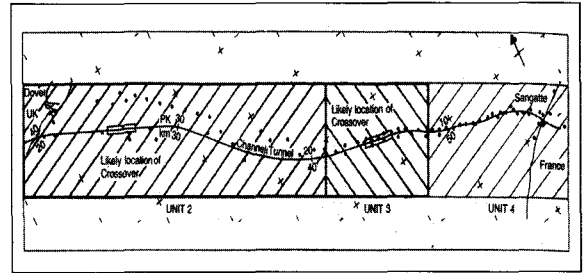


그림 7. Location plan of boreholes used to define geotechnical units 2 to 4

표 4는 Gault clay, Glauconitic marl, Chalk marl의 주요 물성을 나타내고 있다.

현장측정시험을 통하여 구한 결론은 영불해협을 걸쳐 최대수평주응력방향은 대략 NW-SE으로 주지질구조경향과 및 터널노선방향과 유사하며 터널축방향의 K_v 값은 1.5~2.5 이고 터널횡방향의 K_v 값은 1.0~2.0 으로 분석하고 이를 설계에 사용하였다. 그림 8은 이들 경향을 나타내고 있다.

표 4. Cross channel properties for the principal geotechnical properties of the Gault Clay, Glauconitic Marl and Chalk Marl

Unit No.	Moisture content (%)	Dry unit weight (kN/m ³)	Uniaxial compressive strength (MPa)	Vertical Young's modulus (MPa)	Longitudinal velocity (m/s)	Transverse velocity (m/s)	Liquid limit (%)	Plasticity index
Gault Clay								
2	19.8±3.0	17.3±0.8	3.7±2.4	340±177	1852±180	2142±153	77.3±21.1	49.5±18.6
3	19.3±3.1	17.3±1.2	1.5±1.1	428±160	2168±375	2344±318	67.1±14.6	42.4±12.2
4	19.5±4.7	17.3±1.4	2.9(0.1-23.8)	567±202	1960±555	2372±289	68.0±6.1	43.2±6.1
Glauconitic Marl								
2	12.2±2.7	20.6±1.1	4.7±3.7	1404±1308	2296±446	2696±312		
3	10.7±3.2	20.8±1.5	4.2±3.4	805±700	2339±662	2631±443		
4	9.1±3.9	21.4±1.7	6.3±4.4	1378±170	2607±504	2815±414		
Chalk Marl								
2	13.3±3.9	19.6±1.4	5.9±2.5	643(148-4200)	2445±269	2623±311		
3	10.7±3.3	20.3±1.4	7.4±4.5	1870±750	2612±450	2840±313		
4	9.2±2.2	21.0±1.1	9.3±3.7	1116±390	2773±277	2960±224		

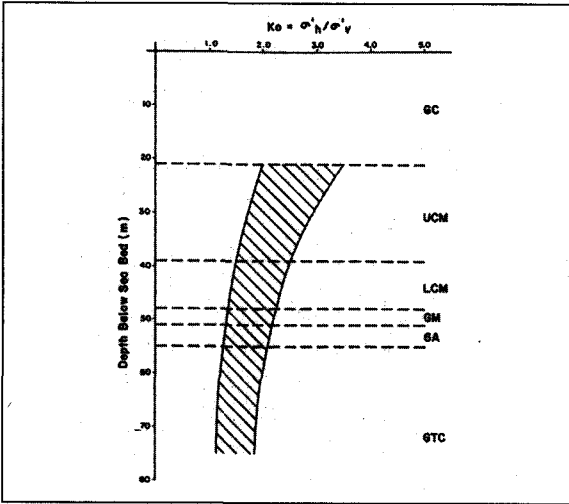


그림 8. Range of probable K_o values transverse to cavern longitudinal axis

4. 터널 설계

최적 터널설계를 위한 기준설정을 위하여 다음 요소들에 대한 분석을 하였다.

- (a) train speed and traction power
- (b) ventilation and cooling in tunnel
- (c) running tunnel diameter, aerodynamic effects and piston relief ducts
- (d) wagon design, including wheel design and passenger comfort
- (e) tunnel gradients Items(a) to (d) were considered to be interrelated)
- (f) tunnel lining design
- (g) tunnel earthing and bonding
- (h) system control and communications
- (i) track form
- (j) overhead current collection
- (k) number, location and construction of tunnel crossovers
- (l) shuttle lengths, weight and composition,

- including numbers of rolling stock
- (m) service tunnel transport systems for both normal in-service and emergency access /evacuation
- (n) UK Terminal layout including 'free exit' and integration with British Rail and the road network
- (o) French Terminal layout and integration with French National rail and the road network
- (p) maintenance layout
- (q) geotechnical investigations for terminals and tunnels
- (r) safety

설계단계에서 작성된 설계도면, 시방서, 설계기준 등 상세한 서류들의 수는 약 100,000장에 달하였다. 영불해협터널은 세 개의 병렬터널로 그림 9에서와 같이 외측에 위치하는 두 본선터널간의 중심거리는 30m이며 내경이 7.6m 인 단선터널이며 본선터널사이에 있는 터널은 내경이 4.8m인데 비상시의 비난통로 또는 서비스 터널용이다.

5. 터널굴착공사

영국측은 6대의 TBM으로 84km의 터널공사를 하게 되었다. 이 터널공사에는 서로 30m 거리를 두고 외경이 8.2m 인 2개의 본선터널과 이들 본선터널사이에 서비스 터널(외경 5.2m)을 굴착하고 375m 마다 3개의 터널을 서로 연결하는 통로와 250m 마다 두 본선사이를 연결하는 압력조절통로(내경 2m)의 굴착이 포함되어 있다. TBM 6대의 총무게는 6,500톤으로 총가격이 6천만파운드(1,050억원)였다. TBM 1대의 길이는 200m 였다. 6개 굴착공사중 가장 긴 것이 21.7km 지점에서의 Marine Service Tunnel 이었다. 2개의 marine running tunnels의 길이는 각각 18km, 19km 였다. 굴착은 하루

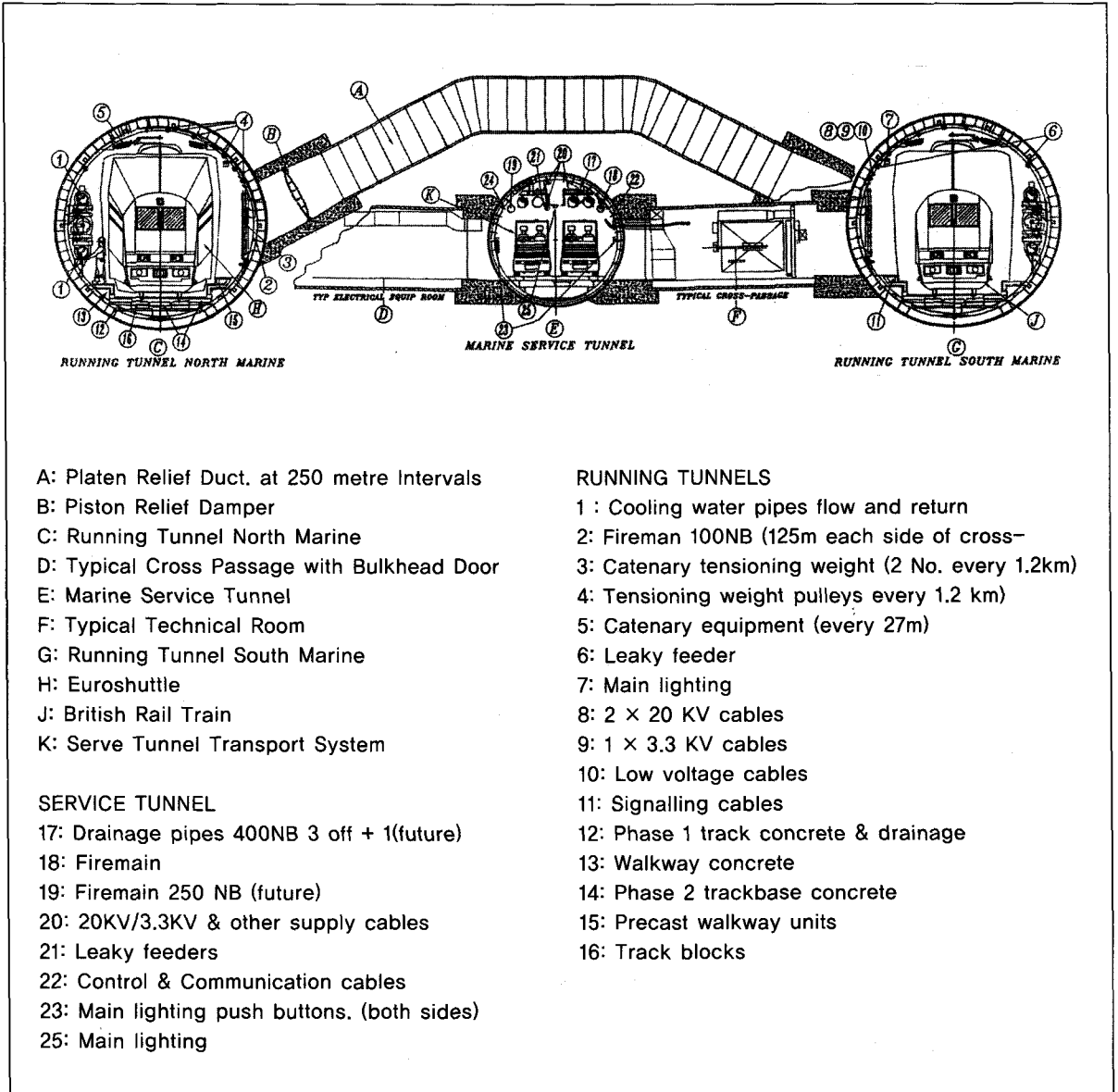


그림 9. Typical cross-section through the UK marine tunnels.

8시간씩 3교대, 일주일에 7일 작업을 하였으며 작업교대는 TBM에서 하였다. 1991년 3월 24일에 Marine Running Tunnel South TBM 가 최대굴착속도인 428m/주를 기록하였다. 전체 TBM의 평균 굴착속도는 150m/주 였다. 지반공학적 검토에 따라 라이닝의 형식은 expanded lining 이 적합한 형태인 것으로 판단되었다

(그림 10).

다음 표 5는 영국에서의 굴착작업에 투입된 TBM에 관한 정보이다.

다음 표 6은 프랑스측에서 사용한 장비에 대한 정보이다.

1990년 12월 1일 영국과 프랑스측 터널이 드디어 관통하게 되었다(그림 11 참조).

표 5. Summary of drive data(UK)

Description	MST	MRTN	MRTS	LST	LRTN	LRTS
TBM manufacturer	Howden	Robbins -Markham	Robbins -Markham	Howden	Howden	Howden
TBM cost (million £)	4.82	9.27	9.27	4.82	8.03	8.03
Cut diameter (m)	5.38	8.36	8.36	5.76	8.72	8.72
Shield length (m)	13.52	14.11	14.11	13.52	14.03	14.03
Segment thickness (m)	0.27	0.27/0.36	0.27/0.36	0.41	0.54	0.54
Ring length (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Driven distance (m)	21,770	17,651	18,803	7,930	7,911	7,859
TBM Availability (%)	73.4	65.4	71.7	67.2	77.6	81.9
TBM utilization (%)	50.0	43.4	48.1	49.3	47.0	55.3
Best shift (hours), m	24	30	30	21	21	25.5
Best week (m)	293	409	426	267	308	320
Average rate(m/week)	142	156	179	137	134	151

표 6. Summary of drive data(France)

Description	Undersea			Underland		
	STM(T1)	RTNM(T2)	RTSM(T3)	STL(T4)	RTNL(T6)	RTSL(T5)
TBM manufacturer	Robbins	Robbins -Kawasaki	Robbins -Kawasaki	Mitsubishi	Mitsubishi	Mitsubishi
Cut diameter(m)	5.77	8.78	8.78	5.61	8.64	8.64
Shield length(m)	11.00	13.75	13.75	10.56	12.61	12.61
Segment thickness(m)	0.32	0.4	0.4	0.32	0.4	0.4
Ring length(m)	1.4	1.6	1.6	1.4	1.6	1.6
Driven distance(m)	15,528	19,920	18,769	3,162	3,174	3,176
Best week(m/week)	285	294	322	230	184	231
Average rate(m/week)	111	149	159	72	77	68

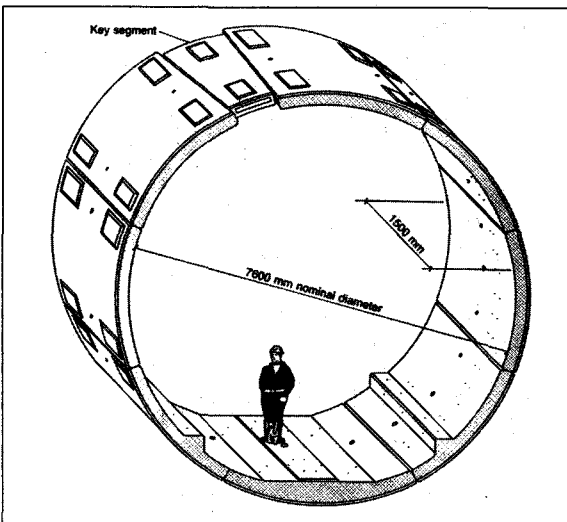


그림 10. Expanded concrete wedge-block lining(running tunnel)

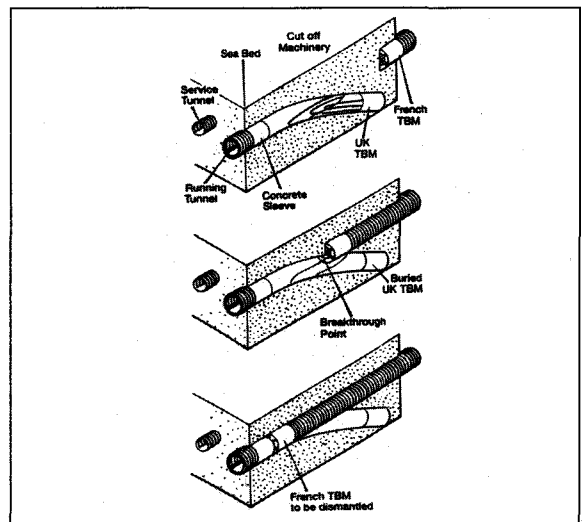


그림 11. Breakthrough sequence for both the north and south running tunnels

6. 계측

현장계측은 세그먼트 라이닝의 설계를 점검하고 굴착면과 지보를 조정하기 위하여 실시되었다. 세그먼트 라이닝에 설치된 영구계측장비로는 vibrating wire strain gauges, convergene bolts, piezometer, phtoelastic stressmeter, extensometer, rock pressure cell 등이 있다(그림 12)

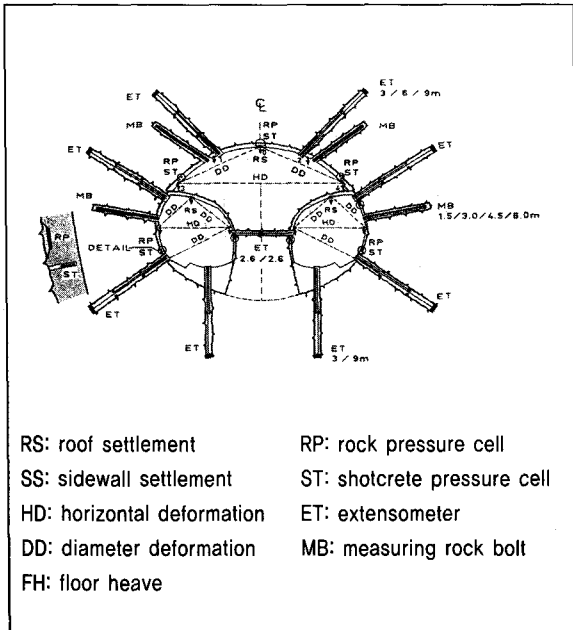


그림 12. Cross-sections showing typical instrumentation deployed

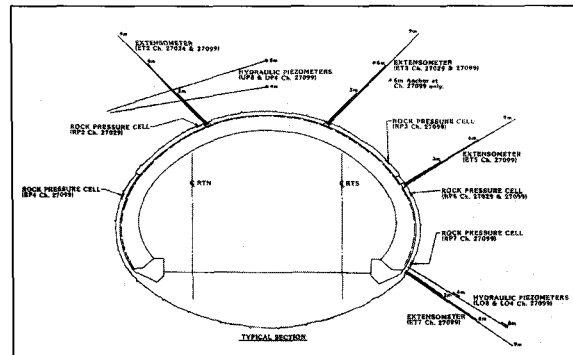


그림 13. Permanent ground instrumentation in UK Cross cavern

7. 보강공법

그림 14~그림 15와 그림 16은 각각 영국과 프랑스측의 터널지반보강의 사례들을 보여준다

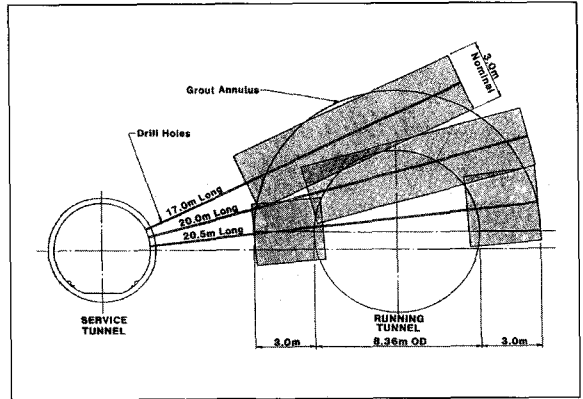


그림 14. Marine treatment-hole layout(UK)

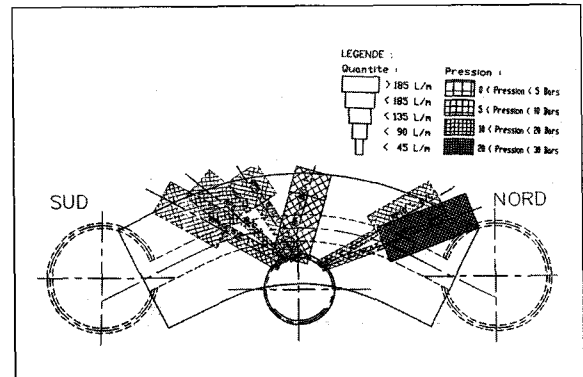


그림 15. Typical ground treatment of a piston relief duct(UK)

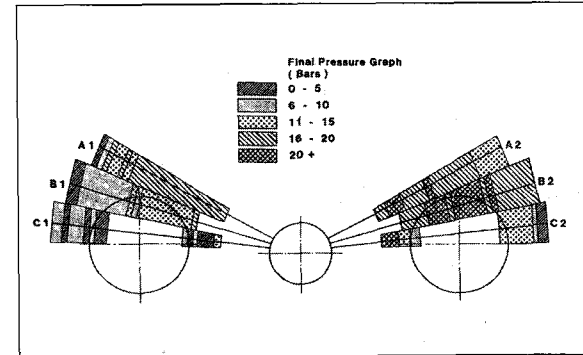


그림 16. Treatment printout: final pressure graph(France)

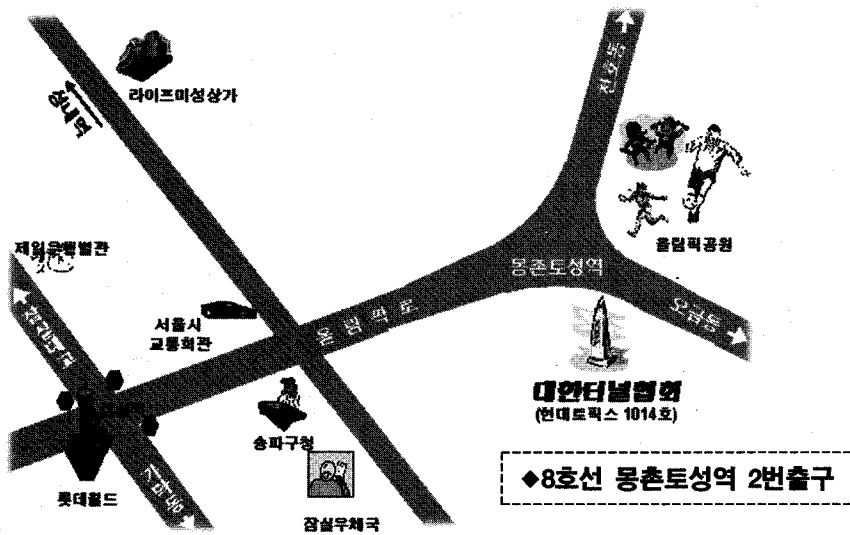
8. 맺는말

총공사비 약 10조원을 들여 7년간의 공사 끝에 완공된 세계 최장의 영불해협 해저터널은 완공된 구조물 자체뿐 아니라 본 공사를 통하여 각 분야별로 수많은 시행착오와 기술적인 진보가 이루어 졌다. 본 고에서는 터널공사에 대하여 전반적으로 간략하게 기술하였다. 차후 기회가 있을 경우 세부적인 기술적인 문제들을 다루고자 한다.

참고문헌

1. 오우영외(2000), "Eurotunnel", 한국지하공간협회지, 지하공간 8호, pp.106~119.
2. 이안근(1995), "영불해협터널의 안전시스템", 한국지하공간협회지, 지하공간 4호, pp.91~101.
3. Harris, C. S., M.B. Hart, P. M. Varley, and C. D. Warren (Editors) (1996), Engineering Geology of the Channel Tunnel, Thomas Telford, 526p.

● 대한터널협회 약도 ●



(사) 대한터널협회
Korean Tunnelling Association

서울특별시 송파구 방이동 44-3 현대토펅크스 1014호
Tel : (02)2203-3442, Fax : (02)2203-3553,