초장대 터널의 현황과 전망

A Review of Super Long Tunnels

김 영 근*

*삼성건설 부장

1. 초장대 터널이란?

국내의 경우 목재지보로부터 강아치지보를 이용한 재래식 터널공법(ASSM공법)이 주로 사용되어 오다가, 80년대 초 지하철 3·4호선 건설을 기점으로 숏크리트와 락볼트를 주지보재로 사용하는 NATM공법이 도입되었고, 이를 기점으로 터널건설 기술의 많은 발전을 가져 왔다.

국내에서는 지형적 여건, 지반조건 등으로 인하여 다른 나라에 비해 터널 건설 물량이 많은 가운데 터널분야의 여러 기술의 도입 및 개발이 활발히 이루어져 왔다. 그러나 대부분의 경우 국내 적용성에 대한 상세한 기술적 검토 없이 그대로 도입하여 사용하여 왔기 때문에 국내의 독자적인 터널기술의 개발은 아직도 미흡한 실정이라 할 수 있다.

최근에는 세계적으로 터널의 연장이 길어지고(장대화), 심도가 깊어지며(심층화), 단면이 커지고 있는(대단면화) 추세가 진행되고 있다. 이는 터널기술이 발전함에 따라 복잡하고 어려운 지반조건을 극복할 수 있기 때문이며, 국내에서도 매년 터널수요가 급증하여 고속도로 터널의 경우 2002년 현재를 기준으로 향후 5년 이내에 2.5배나 터널연장이 증가될 전망(연간 약 30km)이며, 이 중 장대터널의 경우도 유사한 비율로 증가될 전망(연간 약 18km)이다.

장대터널에 대한 정의는 표 1에서 보는 바와 같이 국내 터널설계기준에서는 1km이상을 장대터널, 5km이상인 경우는 초장대 터널로 규정한바 있으며, 국제터널협회(ITA)의 기술위원회에서는 5km이상의 터널을 장대터널로, 심도 300m이상을 심층터널도 규정하고 있다.

표 1 터널길이에 따른 터널 구분

터널의 연장	터널의 구분	
	터널 설계기준(2007)	국제터널학회 (ITA)
1000m미만	짧은 터널	
1000m이상 - 5000m미만	장대 터널 (Long Tunnel)	
5000m이상	초장대 터널 (Super Long Tunnel)	장대터널

이와 같이 국내 터널의 경우, 지형의 70%이상이 산악지형이며, 대부분의 산악지대의 환경보전을 위해 사면을 억제하고 자연훼손을 최소화하여야 하며, 신속한 물류망 구축을 위해서는 철도, 도로 등의 선형을 최단거리 직선화하는 것이 가장 바람직하므로 필연적으로 장대화되며, 또한 심층 터널화되어 가고 있다. 따라서 장대터널은 물론 5km이상의 초장대 터널의 건설도 향후 더욱 증가될 전망이다.

본고에서는 국내외 장대터널의 건설현황을 살펴보고, 장대터널의 합리적인 건설을 위한 제반 기술적인 사항에 대한 검토를 통하여 장대터널 건설을 전망하고자 하였다.

2. 초장대 터널의 현황

2.1 국내 장대 도로터널 현황

최근 산악구간을 통과하는 고속도로 및 도로건설이 증가함에 따라 장대터널이 증가하고 있다. 그림 1은 현재 건설되었거나 건설중인 국내 장대 도로터널의 현황을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 최근 4km이상의 장대터널이 계획되고 있다. 현재 강원도에 시공중인 5,057m의 배후령터널이 국내 최장터널이며(그림 2), 최근 춘천-양양간 고속도로구간중 인제터널(10,920m)이 계획중에 있다.

장대도로 터널의 경우에는 주로 환기 및 방재가 중요한 문제이며, 수직갱 등을 고려한 포함한 환기방식의 선정 및 터널내 화재발생시 구간 및 피난을 위한 방재시설 계획 등이 주요한 검토내용이 된다.

2.2 국내 장대 철도터널 현황

철도의 경우에는 기존선형을 개량하거나 새로운 철도노선이 신설됨에 따라 장대터널이 증가하고 있다. 그림 3은 현재 건설되었거나 건설중인 국내 장대 철도터널의 현황을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 주로 직선화가 요구되는 고속철도 구간에서 10km이상의 장대터널이 시공되고 있다. 현재 운영중인 최장대 철도터널은 경부고속철도 구간의 황악

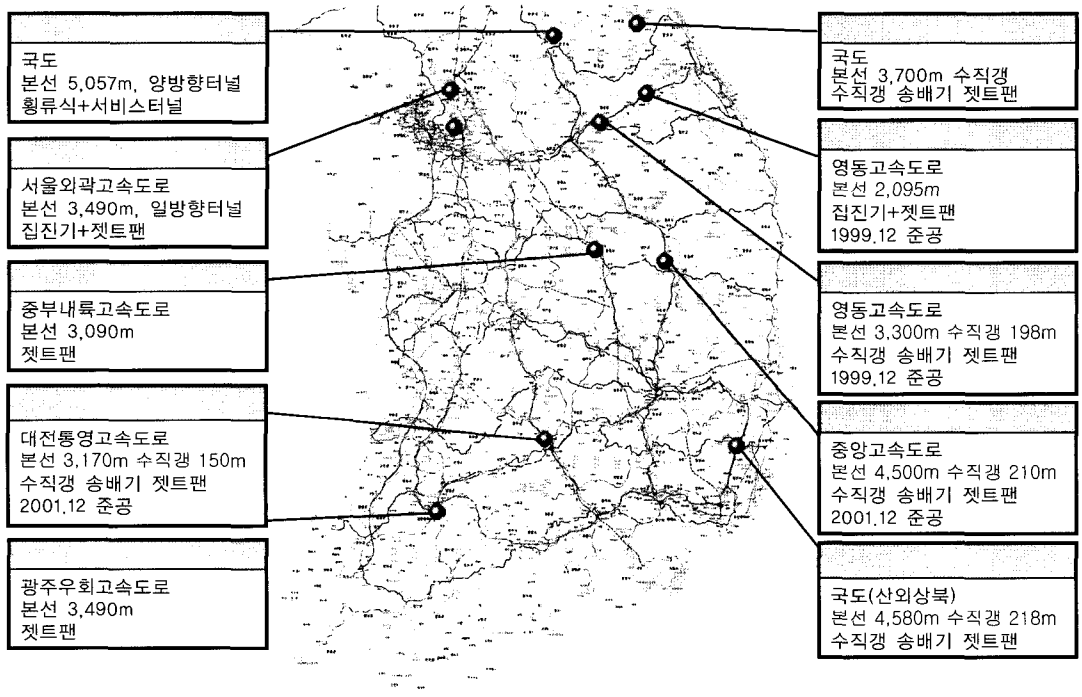

그림 1 국내 장대터널의 현황(도로터널)

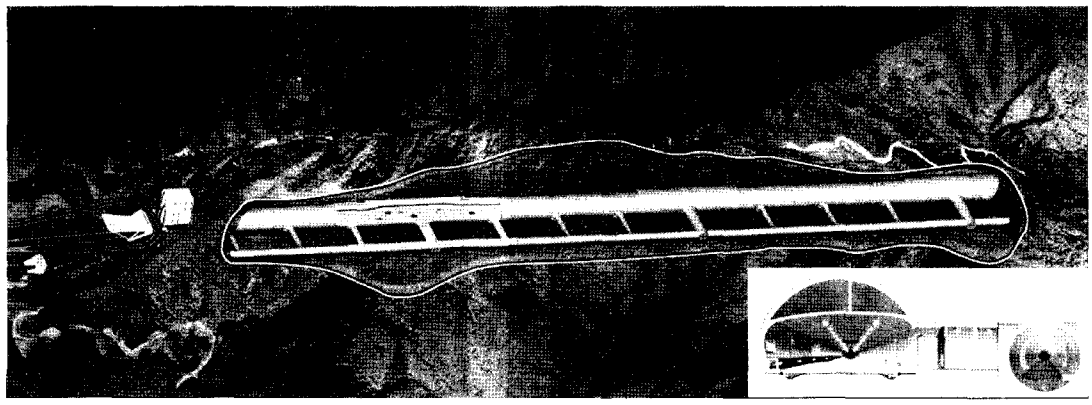

그림 2 국내 최장대 도로터널 - 배후령터널

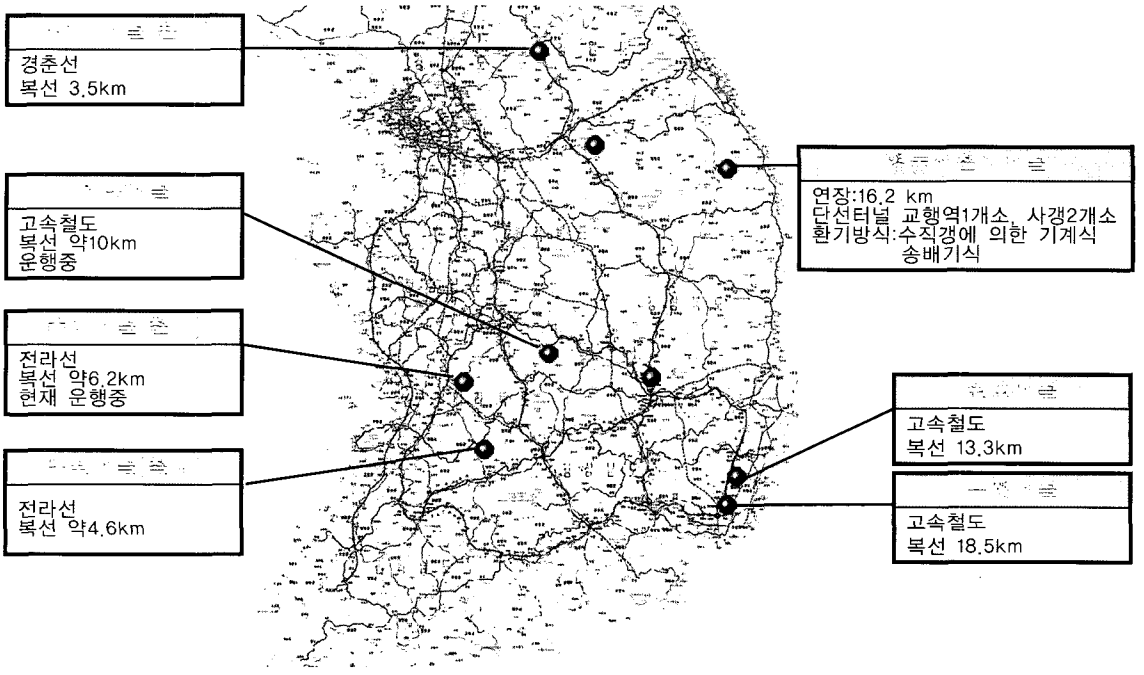

그림 3 국내 장대터널의 현황(철도터널)

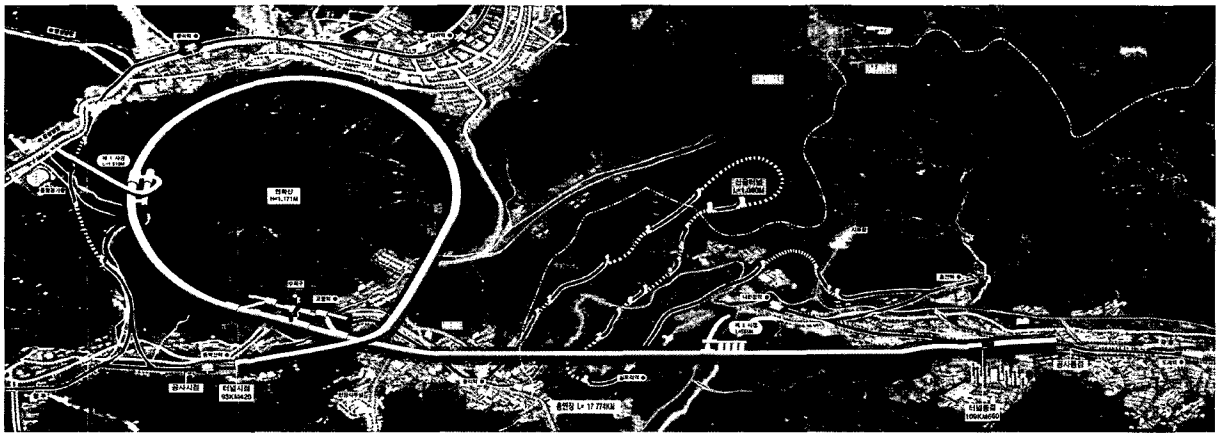

그림 4 국내 최장대 철도터널 - 영동선 솔안터널

터널(10km)이며, 현재 건설중인 최장대 철도 터널은 영동선 철도구간의 솔안터널(16.2km)이다(그림 4).

장대철도 터널의 경우에도 환기 및 방재가 중요한 문제이며, 특히 터널내 화재발생시 대피 및 피난을 위한 방재시설 계획(구난역, 방재설비, 대피계획 등)이 주요한 검토내용이 되며, 최근 고속철도 및 일반 철도터널에 대한 방재기준이 강화되면서 터널계획 및 설계시 이에 대한 공학적인 검토가 면밀히 요구되고 있다.

2.3 해외 장대터널 현황

국외의 경우에도 철도 및 도로를 건설하면서 많은 장대터널이 시공되었거나 시공되고 있다. 표 2와 그림 5에는 국외의 대표적인 장대터널을 나타내었다. 국외의 경우에는 해협을 통과하는 해저터널과 산맥을 통과하는 산악터널로 구분될 수 있다.

대표적인 장대터널로는 그림 6에서 보는 바와 같이 일본 신간선의 세이칸 터널로, NATM공법으로 건설된 세계 최장대 터널이다. 또한 그림 7에서와 같이 영불해협을 연결하는 유로터널은 Shied공법으로 건설되었으며, 해저구간으로는 세계 최장대 터널이다. 그림 8은 노르웨이에 위치한 라에르달 터널은 NTM 공법으로 건설된 세계 최장대 육상터널이다. 그리고 현재 시공중인 세계 최장대 터널은 스위스 알프스 산맥을 통과하는 고타드 베이스 터널(그림 9)이며, 계획중인 세계 최장대 터널로는 대한해협을 해저로 연결하는 한일해저터널이 구상 중에 있다(그림 10).

표 2 국외에서의 장대터널 현황

국가	터널명	연장(m)	비고
노르웨이	Laerdal	24,510	세계 최장대 육상터널(운영중)
	Gudvanga	11,428	대면통행
중 국	Zhongnanshan	18,040	일방통행(2tubes)
스 위 스	Lotschberg	34,577	대면통행(서비스터널)
	Gottahard base tunnel	57,000	세계 최장대 터널(시공중)
오스트리아	Alberg	13,972	대면통행
대 만	Hsuehshan	12,900	수직갱 종류식
프 랑 스	Le tunnel Est	10,000	대면통행
프랑스 - 영국	Euro tunnel	49,940	세계최장(해저구간) 터널
프랑스 - 이탈리아	Frejus	12,896	대면통행/횡류식
	Mont-Blac	11,611	대면통행/반횡류
이탈리아 - 스위스	Simplon I, II	19,824	일방통행
일 본	Hakkoda	26,455	2010 개통예정
	Seigan tunnel	53,850	세계 최장대 해저터널

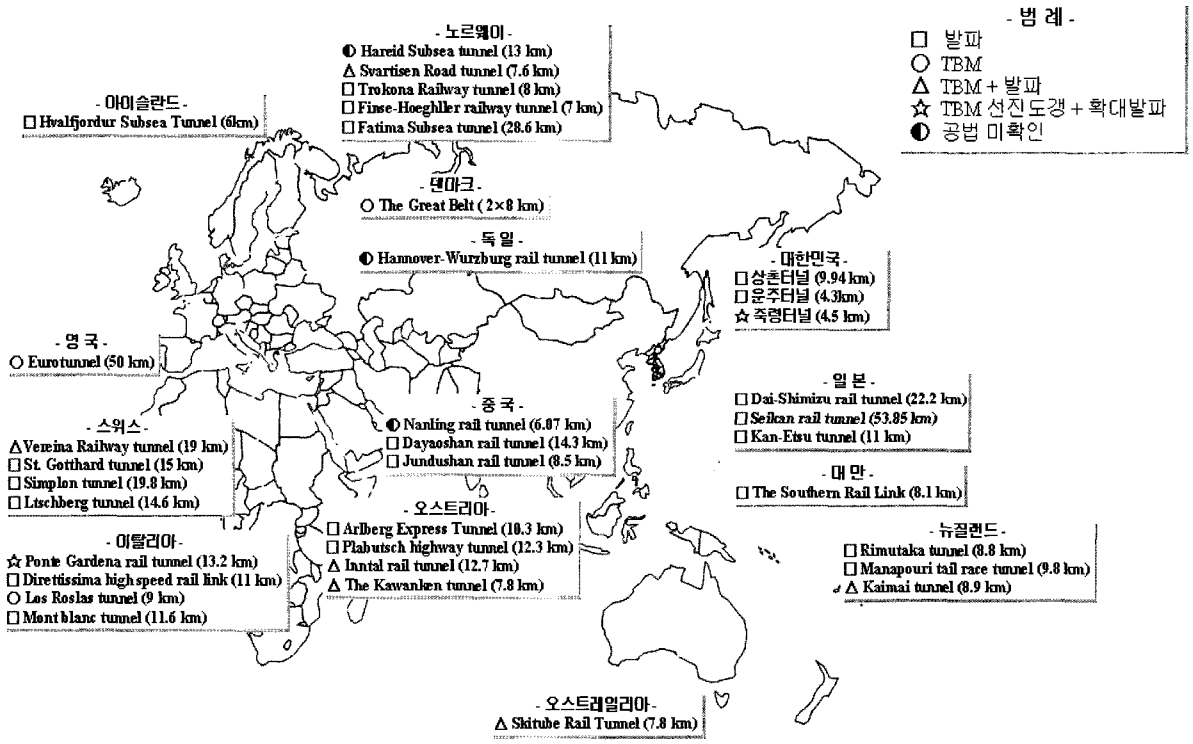

그림 5 국외 장대터널의 현황

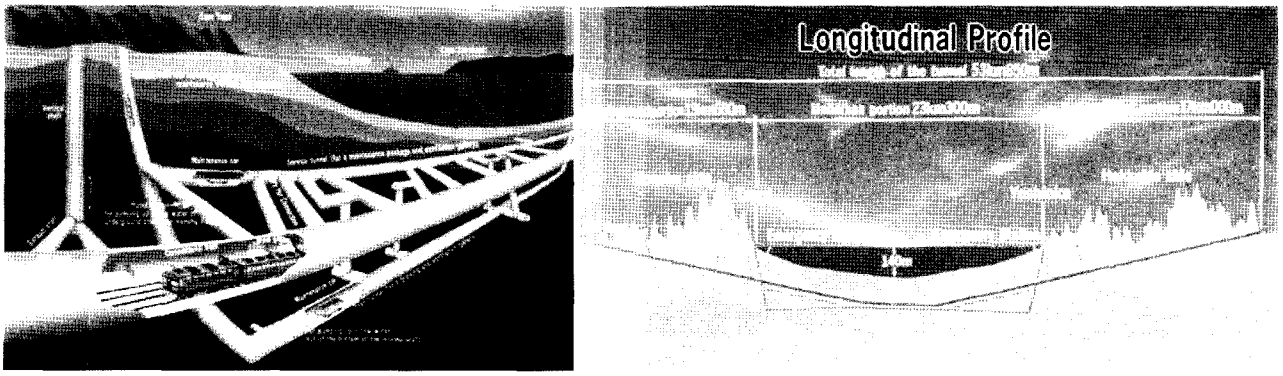

그림 6 세계 최장대 터널 - 세이칸 터널(53.85km)

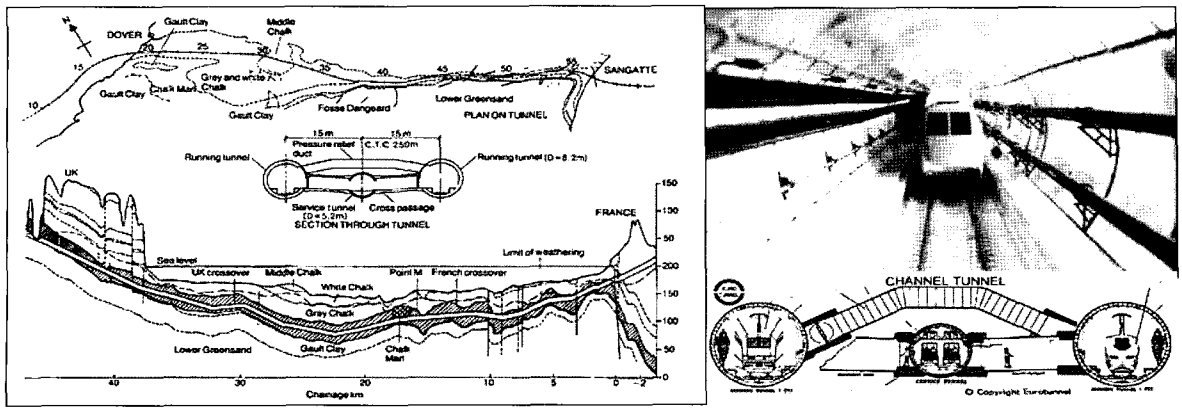

그림 7 세계 최장대 터널(해저구간) - Euro Tunnel(50km)

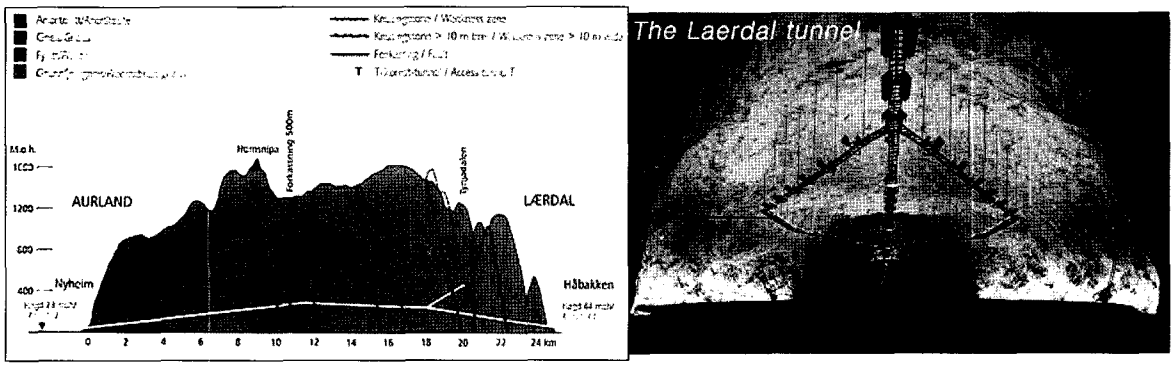

그림 8 세계 최장대 육상터널(운영중) - Laerdal Tunnel(24.5km)

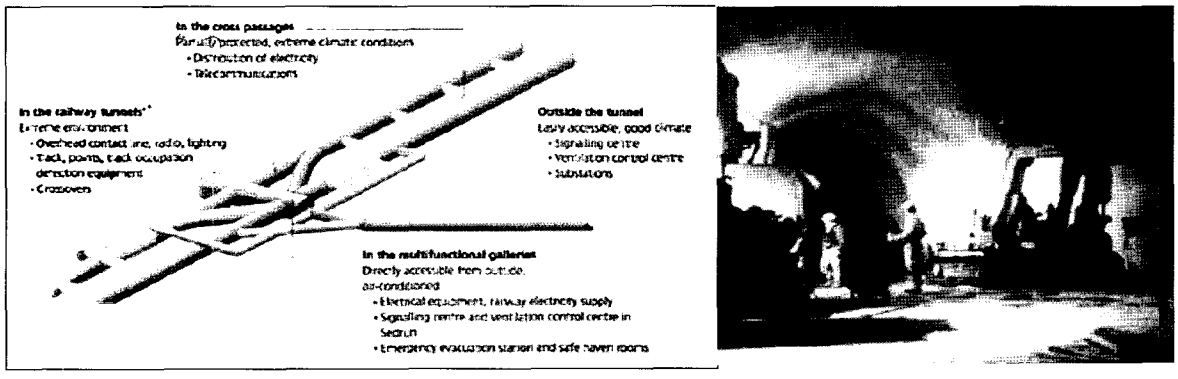

그림 9 세계 최장대 터널(시공중) - Gottahard Base Tunnel(57km)

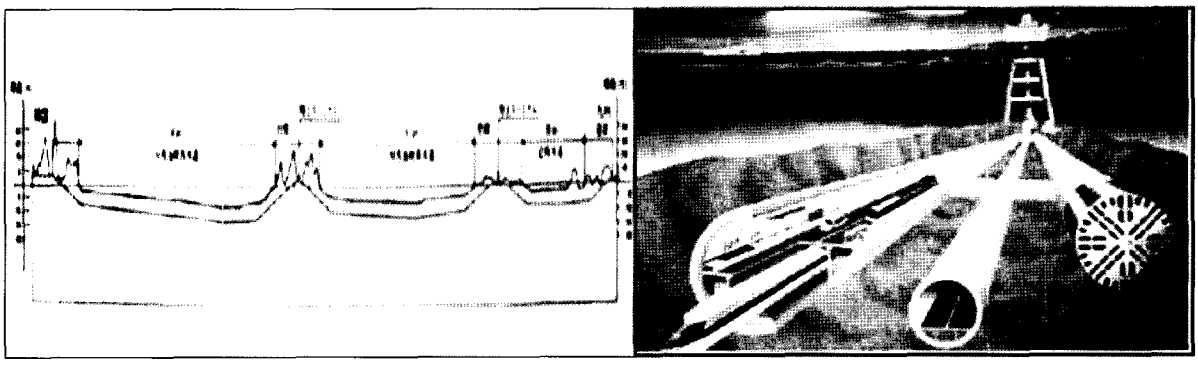

그림 10 계획중인 세계 최장대 터널 - 한일해저터널(235km)

3. 초장대 터널의 전망

3.1 장대터널의 기술개발

장대터널 및 초장대 터널의 증가에 대비하여 외국의 기술도입에 의존하기보다는 터널기술에 대한 연구개발 노력이 절실히 필요하다. 특히, 기존의 터널과 장대, 초장대 터널의 차별성 있는 설계 및 시공에 관한 기술수준은 매우 부족한 상태이므로, 초장대 터널의 합리적인 계획 및 시공을 위한 기술개발이 우선되어야 할 것이다.

초장대 터널 건설을 위해 우선적으로 고려하여야할 사항들로는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

첫째, 국내에서는 공사계획에서 운영개시 일까지의 공사기간이 길지 않다는 제약이 있으며, 또한 동시굴착을 위한 접근로 개발에도 어려움이 있으므로, 터널공사 공정을 고려한 안정적인 급속시공 굴착기술에 대한 고려가 있어야 한다. 이를 위해서는 저비용·고효율의 최적의 지반조사기술 및 터널붕락 예방을 위한 시공 중 안정성 평가기술의 개발도 필히 수반되어야 할 것이다.

둘째, 고속철도와 같이 초고속이 요구되는 경우, 선형 및 종단구배에 대하여 큰 영향을 미치게 되며, 대부분의 경우 터널 심도가 깊어져 수압에 대한 영향 때문에 배수터널로 시공을 하여야 한다. 따라서 배수로가 장대화됨으로서 발생할 수 있는 다수의 문제점은 터널의 구조적 안정성 문제, 터널내 환경문제로 확대 될 수 있기 때문에 일반 터널의 배수시스템과는 차별화 되어 신개념의 배수시스템이 고려되어야 하며, 완공후 터널의 유지관리에 대하여도 계획시부터 필수적으로 검토되어야 한다.

셋째, 터널 장대화에 따르는 지보, 설비, 기타의 시공재료들의 운반거리가 장대화되므로, 빠른 시공이 이루어질 수 있도록 지보시스템의 개선이 필요하며 특히, 내구성 향상 및 방재개념이 포함된 최적의 지보시스템의 개발이 필요하다.

넷째, 초장대 터널 시공시 시공 중과 운영중의 환기문제는 기존의 일반터널에서 사용하는 환기 방법으로는 해결하는데 어려움이 있고, 또한 완공후의 원활한 환기가 되지 않을 경우 터널의 내열이 지속적으로 증가하기 때문에 사용 중 환기방법에 대해서도 일반터널과는 차별성을 가지고 고려하여야 할 것이다.

다섯째, 초장대 터널의 건설운영사례는 세계적으로 사례가 많지 않고, 최근 몽블랑 터널 등 장대터널에서 발생한 화재사고 등으로 인해 설계개념의 전반적인 재정립이 요구되고 있다. 따라서 방재개념은 초장대 터널을 건설하는데 있어 가장 중요한 설계개념중의 하나이며 기술개발이 요구되는 분야라 할 수 있다.

환기와 방재문제의 심각성은 프랑스와 이탈리아를 연결하는 몽블랑터널과 오스트리아의 산악을 통과하는 타우언 터널의 화재 사고 후 유럽의 각국에서는 새롭고 엄격한 안전기준을 마련하여 기존의 터널시설의 보완계획을 세우고 신설되는 터널에서는 한층 강화된 법규규정을 적용하고 있으며 터널 기술 선진국에서는 환기·방재에 대한 관심이 높아지고 있는 것을 보면 알 수 있으며, 작업 갱으로 사용하는 사갱을 이용한 환기 시스템 개발 등 새로운 개념의 환기·방재 시스템의 개발이 필수적이다.

상술한 초장대 터널에 필요한 기술은 다음과 같이 크게 설계·시공분야와 환기·방재분야로 나눌 수 있으며 각각에 대한 요소기술개발이 고려되어야 할 것이다.

◈ 설계·시공분야

- 지반 조사 : 사전지반조사의 열악성 극복, 시공 중 지반조사 및 터널안전성 평가법의 적극 활용 필요
- 선형 선정 : 접근로, 자연훼손, 작업공정 등을 고려한 평면선형 및 종단구배
- 배수 시스템 : 대심도에 따른 수압증가로 장대 배수로의 배수터널에 대한 차별화 된 배수시스템
- 공사 기간 : 새로운 굴착공법 개발 등 급속시공 방안 도입
- 터널 품질 : 고성능 지보 시스템의 재고 및 라이닝 문제 해결
- 유지 관리 : 완공 후 터널의 유지관리에 대하여도 계획 시부터 검토

◈ 환기·방재 분야

- 시공중 환기 : 작업갱, 환기갱 계획 설계 최적화 필요
- 운영중 환기 : 내열의 지속적 증가 문제, 유지관리 문제 해결
- 방재 시스템 : 터널 내 화재사고 등을 고려한 방재 시스템의 전반적 고려

초장대 터널의 건설을 위해서는 특히 환기·방재분야가 중요한 분야로서 고려하여야 되며, 그러나 단순히 환기·

방재시스템의 개발은 향후 터널구조물의 유지관리를 어렵게 하는 장대터널을 건설하게 되는 오류를 초래할 수 있으므로 설계에서부터 시공단계까지 동시에 환기·방재를 고려한 설계·시공이 필수적이므로 검토하여야 할 것이다.

즉, 초장대 터널 건설을 위해서는 경제성(급속시공), 안전성(신지보 시스템, 배수시스템), 쾌적성(환기·방재시스템)을 모두 고려하여 요소개발들이 개발되고, 이를 바탕으로 초장대 터널 최적 건설시스템의 개발이 이루어져야 할 것이다.

따라서, 가까운 미래에 급증할 것으로 전망되는 초장대 터널건설에 대비한 요소기술들의 개발이 필요하며, 향후 이들 요소기술을 통합하는 초장대 터널건설을 위한 최적화 시스템의 개발이 수행되어야 할 것이다.

3.2 장대터널의 물류시스템으로서의 역할

초장대 터널의 건설은 물류의 이동과 통행시간의 단축에 따른 경제적 활동의 촉진으로 편익을 크게 증진시키며 나아가 지형적으로 단절된 지역간 균형발전을 촉진시켜 국토의 이용효율 제고에 크게 기여할 것이다. 따라서 산업기반 시설로서 매우 중요한 위치를 점하게 되고, 그 경제적 가치는 매우 크다고 할 수 있다.

또한 전 세계적으로 초장대 터널의 건설이 증가하고 있는 추세에서, 국내에서도 5km 이상의 초장대 터널의 계획이 다수 수립되고 있는 실정이며, 최근의 태풍피해로 사면붕괴, 도로, 교량의 유실 등 타 도로 구조물들의 취약성이 드러나고 있는 가운데 근본적인 해결방안으로서 거론되고 있다.

그러나 아직까지는 초장대 터널건설에 대한 체계적인 연구나 설계·시공법의 개념 수립이 미흡하며, 기존의 터널과 초장대 터널과의 차별성에 대한 인식도 부족한 상태이므로 물류시스템 측면과는 다소 다른 모습을 나타나고 있다.

따라서, 물류시스템 측면에서의 초장대 터널건설에 필요한 제반 요소기술들의 개발의 중요성 인식이 우선적으로 이루어져야 할 것이며, 삶의 질적 향상 필요성에 따라 향후 계획될 초장대 터널건설의 고도화가 수반되어야 할 것이다. 초장대 터널건설의 핵심 분야에 있어서 물류시스템 측면을 고려한 개발의 중요성은 다음과 같다.

굴착공법은 암반조건, 터널의 단면형상, 연장, 공사기간 등을 고려해서 안전하고 경제적인 공법을 선정할 필요가 있지만, 일반적으로는 막장이 자립하는 단면의 크기에 의해 결정되는 경우가 많다. 따라서 막장의 자립정도가 경제적 터널 굴착공법을 선정하는데 중요한 역할을 한다. 하지만 현재 국내 터널 시공 시에는 막장이 굴진방향에 직립함으로써 응력의 집중이 발생하며 또한 막장의 안정성을 염려하여 단면분할공법을 채택하는 것이 일반적 공법으로 되어왔다. 그러나 이러한 방법은 경제적으로 큰 부담이 되며 공사기간 연장의 한 원인이 된다. 특히 초장대 터널과 같은 경우에는 공사기간 및 공사비용이 더욱 중요하므로 대단면 곡면형상의 막장 굴착공법을 개발하여 적용한다면 공사비절감 및 공사기간 단축에 매우 유리할 것이며, 분할공법을 피함으로써 보다 나은 응력상태를 유지할 수 있어 시공 후에도 관리측면에서 경비절감의 효과를 얻을 수 있을 것이다.

또한, 터널 장대화에 따라 급속시공의 필요성의 필요성이 인지된다. 따라서 굴착공법도 다양하게 적용될 수 있으며 이에 따르는 터널의 막장면이나 천장부의 시공 중 안정성에 대한 간편하고 효과적인 평가방법이 필요로 된다. 시공 중 붕락사고에 치유하는 과정에서 공비의 추가, 공사기간의 증가를 초래하므로 이를 예방하는 차원에서 시공 중 최소의 비용으로 사전에 터널의 붕락을 예측할 수 있는 방법의 개발은 장대터널의 급속시공을 위해 필수적인 기술이라 할 수 있다.

배수시스템에 있어서도 마찬가지로 연장의 장대화에 따르는 배수시스템 기능 저하문제는 기존 터널에서의 기술로서는 극복이 어려우며 배수기능저하에 따르는 초장대 터널구조물의 안정성 문제와 수반되는 유지보수의 비용은 국가 경제적 차원의 손실이라고 할 수 있다. 따라서 물과의 전쟁이라고 할 수 있는 토목기술의 하나인 터널구조물 특히, 초장대 터널구조물을 위한 배수시스템의 새로운 개발은 반드시 수행되어야 할 요소기술이라 할 수 있다.

초장대 터널계획에 있어서 가장 중요한 경제적 측면은 터널공사비 및 공기, 운영방법, 유지관리 등과 같은 거시적인 소요비용의 복합적인 분석이 요구 되어진다. 그러나 이와 같은 분석내용의 대부분은 정량적이기보다는 정성적인 측면에서 터널기술자의 경험에 좌우되는 경우가 일반적이며, 체계적이고 정량적인 판단 시스템의 구축은 미흡한 실정이다. 따라서, 현재 기존분석방법에 의해 계획된 장대터널이 완공된 후에는 추가적인 비용발생에 따라 경제적인 부가가치의 상승효과는 기대하기 힘들 때가 많다. 대표적으로는 일본의 세이칸 장대터널을 들 수 있다. 이러한 현상은 장래 미래형 장대터널의 경우 추가되는 부수적인 신 개념의 터널계획 단계에서 누락된 고려사항 때문에 자주 접하게 된다. 따라서, 최근 국내의 경우 연장이 긴 초장대 터널의 증가추세에 따라, 초장대 터널평가 시스템에 대한 개발연구가 향후 필요할 것으로 판단된다.

상기와 같은 평가 시스템의 개발연구와 아울러, 터널공

사비 측면에서 본다면, 지보에 대한 비용이 지반조건에 따라 다소 차이는 있지만 터널공사비의 30~50%에 해당된다는 점을 감안해 볼 때, 지보에 대한 최적화에 따른 부가가치는 매우 클 것으로 기대되며, 장대터널특성상, 방재를 고려한 지보의 신 개념에 대한 연구의 필요성은 매우 크다고 볼 수 있다.

환기 · 방재 분야에 있어서, 특히, 초장대 터널의 환기 관련 주요 설비인 젯트팬, 축류팬, 집진기, 수직갱 등의 대용량화에 따른 운영비용이 급격히 증대하므로 동력비를 경제적이고 효율적으로 감소시키기 위한 노력은 매우 중요한 핵심 기술이 될 수 있다. 아울러, 개발하고자 하는 초장대 터널의 환기안전계획 및 방재기술은 모든 지하 공간 개발에 응용 가능하므로 우리기술에 의한 안전한 지하 공간 건설을 촉진하게 될 것이다.

4. 제4의 공간으로서의 초장대 터널의 구축

세계가 글로발화하고 통합화됨에 따라 도로 및 철도와 같은 물류시스템의 구축은 매우 중요한 이슈가 아닐 수 없다. 특히 대규모 산악지형이나 대심도 해협을 통과하는 초장대 터널의 출현은 이제 현실로 다가오고 있으며, 초장대 터널은 안전하고 쾌적한 친환경적인 제4의 공간으로서의 의미를 갖는다고 할 수 있다.

지난 20년간 국내의 터널기술은 크고 작은 시행착오를 겪으면서 많은 발전을 가져왔으며, 이러한 기술력을 바탕으로 현재 16km의 장대터널이 시공중에 있으며, 20km 이상의 장대 터널이 계획되고 있다. 또한 초대단면 터널, 해저 시설물 구축, 대심도 지하공간 등을 구축하기 위한 연구 및 기술개발이 활발하게 진행되고 있으며, 이러한 연구개발결과는 다양한 시공기술력과 결합하여 안전하고 경제적인 초장대 터널과 지하공간의 구축이 가능해질 전망이다.

이를 위해서는 산학연 터널기술자 모두가 힘을 모아야 하며, 터널 및 지하공간 구축에 필요한 모든 분야의 기술자들이 공동의 목표를 향하여 더욱 노력해야 할 것이다. 산악과 해협을 통과하는 초장대 터널, 안전하고 쾌적한 제4의 공간으로서의 지하공간이 실현되도록 모두 함께 나가야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 미래형 초장대 터널의 최적화 건설기술 시스템 개발 연구, 2003, 건설교통부, 한국건설교통기술평가원
2. 해저시설물 차폐기술 개발 연구, 2006, 해저시설물 차폐기술연구단, 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업
3. 터널설계기준, 2007, 건설교통부, 한국터널공학회
4. 터널공학 분야의 기술개발현황과 미래수요 예측 및 개발전략, 1998, 대한토목학회
5. 지하생활공간 개발 요소기술연구, 1996, 한국건설기술연구원