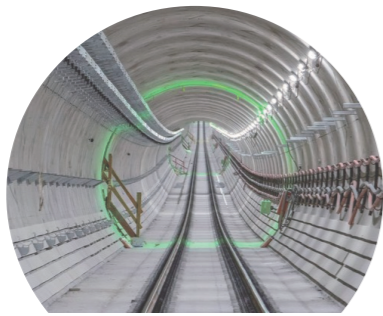


숫자와 그림으로 보는 초장대 터널

- 제9강 초장대 터널 - Trends and Changes of Super Long Tunnel

김영근 | ㈜건화 부사장, 한국터널지하공간학회 감사, 공학박사, 기술사



초장대 터널(Super Long Tunnel)은 터널의 연장(길이)이 매우 긴 터널을 말한다. 최근 교통물류시스템의 발달로 인해 바다 밑을 통과하는 해저 터널(Undersea Tunnel)이나 산맥 하부를 통과하는 베이스 터널(Base Tunnel) 건설이 활발히 검토되고 있으며, 초장대 터널은 미래 새로운 교통 인프라로서 주요 이슈가 되고 있다. [표 1]에는 초장대 터널의 주요 특성과 기술 트렌드를 핵심 키워드로 정리하였다. 본고에서는 10가지 핵심 키워드를 중심으로 국내외 초장대 터널 사례와 초장대 터널의 과제 및 향후 전망에 대해 기술하였다.

[표 1] 초장대 터널의 핵심 키워드

Key Word	As-is	To-be
1 초장대 터널의 특성	장대화 한계	초장대화
2 초장대 터널의 핵심 이슈	공사비 등 이슈 많음	메가/고난도/통합/방재
3 초장대 터널의 기술 트렌드	기술적 해결 문제 많음	급속/복합/터널링/안전
4 초장대 철도터널	사례 적음	글로벌 네트워크
5 초장대 도로터널	사례 적음	핵심 교통인프라
6 초장대 해저터널	사례 적음	국가 간 연결
7 알프스의 초장대 터널	사례 적음	통합 철도망
8 세계의 메가 터널 프로젝트	사례 적음	메가 프로젝트
9 국내 초장대 터널	사례 적음	장대화/대규모화
10 초장대 터널의 과제와 전망	해결과제 많음	미래 새로운 교통인프라

1. 초장대 터널의 특성

1.1 초장대 터널의 특성

최근 교통물류 인프라 확충과 지리적 제약 극복을 위해 초장대 터널 건설이 활발하게 추진되고 있다. 초장대 터널은 연장이 매우 길기 때문에 기존 터널에 비해 시공 측면에서 기술적 난이도가 매우 높으며, 특히 운영 중 방재 및 안전에 대한 특별한 고려가 요구된다.

1.2 초장대 터널의 건설계획

장대 터널은 지반의 특성, 터널의 규모, 주변 환경 등 다양한 요소에 따라 적합한 터널 공법이 선택된다. 일반적으로 NATM 공법과 TBM 공법이 적용되고 있으며, 초장대 터널 공사의 공기를 단축하고 공사비를 절감하기 위해 다양한 건설 시스템이 계획된다. 즉, 베이스 터널은 수직구와 경사갱을 조합하고, 해저 터널은 인공섬 등을 설치하여 시공 및 운영 계획을 수립하게 된다.

1.3 초장대 터널의 특징과 장점

초장대 터널은 국가 간 또는 지역 간을 빠르고 편리하게 연결하는 핵심 교통물류시스템으로, 국가 경쟁력 강화와 지역 발전에 기여하는 중요한 인프라이다. 초장대 터널의 특징과 장점을 정리하면 다음과 같다.

- ① 국가 간/지역 간 연결 인프라: 초장대 터널은 국가 간 또는 지역 간(섬과 내륙)을 연결하여 규모가 큰 메가 인프라이다.
- ② 산맥/해저 통과로 초장대화: 국가 간을 연결하기 위해 바다 밑을 통과하거나 산맥 하부를 통과하기 때문에 연장이 상당히 길어진다.
- ③ 글로벌 통합 네트워크 구축: 유럽 통합과 같이 국가 간 물류 교통을 연결하고 통합 운영하기 위해 초장대 터널은 필수적인 인프라이다.
- ④ 고난도 터널링 기술: 연장이 길고 심도가 깊기 때문에 상당한 지오 리스크에 대응할 수 있는 고난도 터널링 기술이 요구된다.

초장대 터널은 단순한 교통 시설을 넘어 국가 경쟁력 강화와 지역 발전에 기여하는 중요한 교통물류 인프라로서, 물류

효율성 증대, 관광 산업 활성화 등 경제 성장에 기여할 수 있으며, 국가 간/지역 간 이동성 향상을 통한 글로벌/지역 발전을 도모하고, 전략 물자 수송 등과 같은 국가 안보에서도 중요하다.

[그림 1] 초장대 터널의 특징과 장점



2. 초장대 터널의 핵심 이슈

2.1 국가적 연결에 대한 글로벌 메가프로젝트 협의

초장대 터널은 국가 간 연결성을 강화하고 경제·사회 발전을 촉진하는 핵심적인 역할을 수행한다. 글로벌 메가프로젝트 협의는 초장대 터널 건설을 성공적으로 추진하기 위한 필수적인 과정이다. 다양한 국가의 이해관계를 조정하고, 기술적·재정적 어려움을 극복하기 위해서는 국제적인 협력이 절대적으로 필요하다. [표 2]에는 국가 간 연결 초장대 터널의 현황이 정리되어 있다.

[표 2] 국가 간 연결 초장대 터널

터널명	터널 연장	터널 용도	비고
고타하르트 베이스 터널	57.0km	철도	스위스 - 이탈리아
브레너 베이스 터널	55.4km	철도	오스트리아 - 이탈리아
Mont Cenis Base 터널	57.5km	철도	프랑스 - 이탈리아
유로 터널	50.0km	철도	영국 - 프랑스
Fernarbelt 터널	18.5km	도로+철도	덴마크 - 독일
FinEst/Talsinki 터널	80.0km	철도	핀란드 - 에스토니아(계획)
한일해저터널	209km	철도	한국 - 일본 (구상)

2.2 산맥/해저 통과에 대한 고난도 터널링 기술

산맥이나 해저를 관통하는 초장대 터널 건설은 극한 환경에서의 고난도 기술력을 요구하는 대규모 프로젝트이다. 이러한 터널 건설은 지질적 어려움, 기술적 한계, 환경 문제 등 다양한 과제를 안고 있다. [표 3]에는 산맥이나 해저를 통과하는 초장대 터널의 현황이 정리되어 있다.

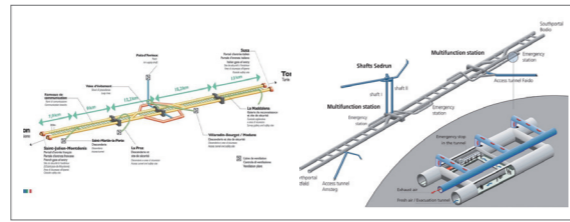
[표 3] 산맥/해저 통과 초장대 터널

터널명	터널 연장	터널 용도	비고
고타하르트 베이스 터널	57.0km	철도	알프스 산맥 하부 통과
브레너 베이스 터널	55.4km	철도	알프스 산맥 하부 통과
Mont Cenis Base 터널	57.5km	철도	알프스 산맥 하부 통과
세이칸 터널	53.9km	철도	쓰가루 해협 해저 통과
유로 터널	50.0km	철도	도버 해협 해저 통과
Fehmarnbelt 터널	18.5km	도로+철도	페만벨트 해협 해저 통과
Bohai Strait 터널	123km	철도(계획)	Bohai 해협 해저 통과

2.3 효율적인 공사계획수립을 위한 통합 터널시스템과 재난 대응을 위한 방재시스템

초장대 터널 건설은 복잡하고 대규모의 프로젝트로 다양한 변수와 불확실성을 관리해야 한다. 이러한 어려움을 극복하고 효율적인 공사를 수행하기 위해 통합 터널 시스템이 요구된다. 이 시스템은 터널 설계, 시공, 유지관리 등 모든 단계의 정보를 통합하여 관리하고, 이를 바탕으로 최적의 의사 결정을 지원하는 시스템이다. [그림 2]에는 초장대 터널의 통합 터널 시스템의 예가 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 터널 시종점, 수직구, 경사갱 등에 대한 통합 계획이 요구된다. 초장대 터널은 지리적 제약을 극복하고 교통망을 확충하는데 중요한 역할을 하지만, 폐쇄된 공간이라는 특성상 화재, 붕괴 등 다양한 재난 발생 가능성이 높다. 따라서 초장대 터널 건설 시에는 재난 발생에 대비한 철저한 방재 시스템 구축이 필수적이다. [그림 2]에서 보는 바와 같이 본선 터널 이외의 서비스 안전 터널 구축과 환기 및 방재 시스템 구현, 그리고 비상 대피 시나리오 등이 충분히 검토되어야 한다.

[그림 2] 초장대 터널의 통합터널 및 방재시스템



3. 초장대 터널의 기술 트렌드

3.1 급속굴착 및 시공의 도전

초장대 건설 프로젝트에서는 짧은 기간 내에 목표를 달성하기 위해 급속 굴착 및 시공 기술이 필수적으로 요구된다. 특히 NATM 터널 굴착 시 예상치 못한 지반 조건에 대응할 수 있는 기술과 급속 굴착을 위한 고성능 TBM 장비와 기술이 필요하다. 일반적으로 Open TBM 공법의 굴진 속도가 가장 빠르며, [그림 3]에서 보는 바와 같이 Brenner Base 터널의 경우 굴진 속도 61.4m/일을 기록한 바 있다.

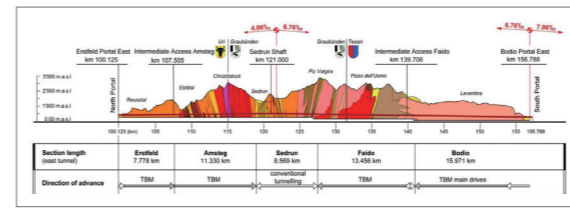
[그림 3] 급속굴착 및 시공의 도전



3.2 NATM과 TBM의 복합 적용

초장대 터널 건설은 지질 및 지반 조건 등 다양한 요소를 고려하여 최적 공법을 선택해야 하며, NATM 공법과 TBM 공법을 복합적으로 적용하는 경우가 많다. 각 공법의 장단점을 살리고, 프로젝트의 특성에 맞게 유연하게 대처하기 위한 전략이 필요하다. [그림 4]에서 보는 Brenner Base 터널의 경우 주요 임반 구간에서는 Open TBM 공법을, 지질 불량 구간에서는 NATM 공법을 복합 적용하였다.

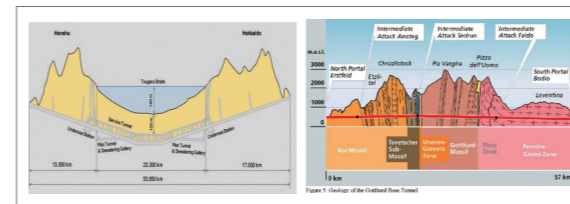
[그림 4] NATM과 TBM의 복합 적용



3.3 고수압 및 대심도 통과에 대한 터널링 해결

초장대 터널 건설 시 가장 큰 어려움 중 하나는 고수압과 대심도 환경이다. 해저터널의 경우 해저 심도에 따라 상당한 고수압에 대응할 수 있는 TBM 장비가 필요하다. 베이스 터널에서는 대심도 암반에서의 임반 응력(rock stress)에 대한 터널링 기술적 대응이 요구된다. [그림 5]에서 보는 세이칸 해저터널의 경우 출수 및 용수 문제가, 고타하르트 베이스 터널의 경우 다양한 지질 리스크 문제가 발생한 바 있다.

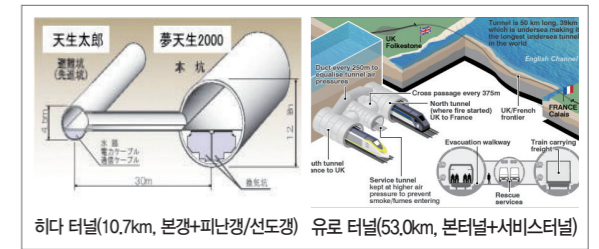
[그림 5] 고수압 및 고심도 통과에 대한 터널링 해결



3.4 초장대 터널사고 시의 안전 확보

초장대 터널은 사고 발생 시 다수의 인명 피해가 발생할 수 있으므로, 사고 발생 전에 철저한 안전 대책을 마련하고, 사고 발생 시 신속하고 효율적인 대응 체계를 구축하는 것이 매우 중요하다. 특히 서비스 터널은 본선과 분리된 공간으로, 터널 유지보수, 방재시설 점검, 특히 사고 발생 시 구조 활동 등을 위한 통로로 활용되므로 초장대 터널의 경우 이를 반드시 계획하여야 한다. [그림 6]에서 보는 히다터널은 본갱+피난갱을, 유로터널은 본터널+서비스 터널로 계획되었다.

[그림 6] 초장대 터널사고시의 안전 확보



4. 초장대 도로터널

4.1 초장대 도로터널 현황

세계적으로 도로망 확장과 교통 인프라 구축에 대한 관심이 높아지면서, 초장대 도로터널 건설 프로젝트가 활발히 진행되고 있다. 현재 준공되어 운영 중인 세계 초장대 도로터널 현황은 [표 4]에 나타나 있다. 이 중 가장 긴 터널은 노르웨이의 Lærdal 터널로, 2000년에 완공되었으며 그 연장은 24.51km에 이른다. 이어 도심지 교통 문제를 해결하기 위한 지하도로인 호주의 WestConnex와 일본의 야마테 터널 등이 있다.

[표 4] 세계의 초장대 도로터널 (운영 중)

순위	터널명	연장	국가
1	Lærdal 터널	24.51km	노르웨이
2	WestConnex	22.00km	호주
3	야마테 터널	18.20km	일본
4	중난산 터널	18.04km	중국
5	진핑산 터널	17.54km	중국
6	St. Gotthard 터널	16.92km	스위스
7	텐타이산 터널	15.56km	중국
8	Zigana 터널	14.48km	튀르키예
9	Ryfylke 터널	14.47km	노르웨이
10	Ovit 터널	14.36km	튀르키예

현재 준공되어 운영 중인 세계 초장대 도로터널 현황은 [표 5]에 나타나 있다. 터널링 기술이 발달함에 따라 다양한 조건에서 초장대 터널이 건설 중에 있으며, 특히 노르웨이의 경우 해협을 통과하는 초장대 도로터널이, 중국의 경우 산악지형을 통과하는 초장대 도로터널이 시공 중에 있음을 볼 수 있다. 또한, Fehmarnbelt 터널과 같이 도로와 철도를 복합적으로

이용할 수 있는 복합 터널도 있다. 하지만 초장대 도로터널 건설은 막대한 비용과 기술적 어려움을 동반하기 때문에 신중한 계획과 준비가 요구된다.

[표 5] 세계의 초장대 도로터널(시공 중)

순위	터널명	연장	국가
1	Rogfast 터널	26.70km	노르웨이
2	Tianshan Shengli 터널	22.10km	중국
3	Fehmarnbelt 터널	18.20km	덴마크/독일
4	Förfärd Stockholm	18.04km	스웨덴
5	다량산 제1터널	15.30km	중국



4.2 세계 최장대 도로터널 - Lærdal Tunnel과 Yamate Tunnel

노르웨이 Lærdal 터널은 세계에서 가장 긴 도로 터널로, 총 연장 24.51km의 오슬로와 베르겐을 잇는 E16 고속도로의 일부이다. 1995년에 착공되어 2000년에 개통되었다. 본 터널은 NMT(Norwegian Method of Tunnelling) 공법으로 시공되었으며, 이 공법은 콘크리트 라이닝이 없는 싱글셸 구조로, 노르웨이에서 개발되어 사용되고 있다. [그림 7]에서 보는 바와 같이, 장대 터널의 안전 운행과 경관을 위해 중간에 푸른 빛 LED가 설치되어 있다.

아마테 터널은 도교도 수도고속도로 주요 환상선(C2)에 자리 잡고 있으며, 2015년에 개통한 터널이다. 총 길이 약 18.2km의 초장대 터널로, 일본 1위이자 세계 2위를 차지하고 있다. 아마테 터널은 기존 도로의 교통량에 미치는 영향을 최소화하고 공사 중 주변 지역의 소음과 진동을 줄이기 위해 주로 대구경(외경 11.2~13.0m) 쉴드 TBM 공법이 사용되었다. 안전 설비로는 100m 간격으로 비상전화와 카메라 설비가 있으며, 화재에 대비해 50m 간격으로 스프링클러도 갖추어져 있다.

[그림 7] Lærdal Tunnel과 Yamate Tunnel



5. 초장대 철도터널

5.1 초장대 철도터널 현황

세계적으로 철도망 확장과 교통 인프라 구축에 대한 관심이 높아지면서 초장대 철도터널 건설 프로젝트가 활발하게 진행되고 있다. 현재 준공되어 운영 중인 세계 초장대 철도터널 현황은 [표 6]에 나타나 있다. 철도터널은 도로터널에 비해 상대적으로 연장이 길며, 50km 이상인 터널도 다수 존재한다. 현재 운영 중인 최장대 철도터널은 고트타르트 베이스 터널로, 연장이 57.1km에 이른다. 최장대 철도터널은 주로 해저터널과 베이스 터널로 구성되어 있다. 국내의 울현 터널은 도심지를 통과하는 연장 50.3km의 초장대 터널로, 현재 세계 4위를 기록하고 있다.

[표 6] 세계의 초장대 철도터널(운영 중)

순위	터널명	연장	국가
1	Gotthard Base 터널	57.1km	스위스
2	Seikan 터널	53.9km	일본
3	EURO 터널	50.5km	프랑스/영국
4	울현 터널	50.3km	한국
5	쑹산호 터널	38.8km	중국
6	Lötschberg Base 터널	34.6km	스위스
7	신관자오 터널	32.7km	중국
8	Guadarrama 터널	28.4km	스페인
9	서린칭 터널	28.2km	중국
10	타이항 터널	27.8km	중국

현재 유럽 국가들은 스위스 알프스를 가로지르는 국가 간 연결 통합철도망을 구축하고 있으며, 연장 57.5km의 Mont d'Ambin Base 터널과 55km의 Brenner Base 터널을 포함한 많은 초장대 터널이 건설 중이거나 계획되고 있다. 또한, 중국은 중앙지역과 외곽지역을 하나로 연결하는 고속철도

인프라망 구축을 지속적으로 추진하고 있다. 국내에서도 한일해저터널 및 한중해저터널과 같은 초장대 터널에 대한 기본적인 검토가 진행 중이다.

[표 7] 세계의 초장대 철도터널 (시공 중)

순위	터널명	연장	국가
1	Brenner Base Tunnel	64.1km	오스트리아/이탈리아
2	Mont d'Ambin Base Tunnel	57.5km	이탈리아/프랑스
3	Yigong Tunnel	42.36km	중국
4	Shanghai Airport Tunnel	40.18km	중국
5	Sejla Mountain Tunnel	37.96km	중국

5.2 세계 최장대 터널 - Gotthard Base Tunnel과 Brenner Base Tunnel

고트타르트 베이스 터널(Gotthard Base Tunnel)은 스위스 우리주의 에르스트펠트와 티치노주의 보디오를 연결하는 57.09km 길이의 터널로, 세계에서 가장 길고 깊은 초장대 철도터널이다. 1999년 11월 착공하여 2010년 10월 동쪽 터널이 관통되었고, 2016년 6월 전 구간이 개통되었다. 본 터널의 공사 기간은 17년이며, 총 공사비는 약 14조 6천억 원이 소요되었다. 터널 공법은 주로 TBM 공법이 적용되었고, 지질 불량 구간에는 NATM 공법이 부분적으로 활용되었다. 브레너 베이스 터널(Brenner Base Tunnel)은 오스트리아 인스브루크 일대와 이탈리아 포르테자를 연결하는 철도터널이다. 총 공사비는 105억 유로이며, 총 연장은 64km로, 유럽 최대 공사 프로젝트 중 하나로 개통 즉시 세계에서 가장 긴 교통 목적 초장대 터널이 될 예정이다. 본 터널은 본선 터널 두 개와 중앙의 비상용 터널 하나로 구성되어 있으며, 333m마다 터널 사이를 가로지르는 비상 통로가 설치된다. 터널 공법은 주로 TBM 공법(직경 8.1m)이 적용되었다.

[그림 8] Gotthard Base Tunnel과 Brenner Base Tunnel



6. 초장대 해저터널

6.1 초장대 해저터널 현황

최근 국가 간, 대륙 간 정치·경제·문화의 통합에 따른 여객 및 물류 수송 증가로, 이를 수용할 수 있는 교통물류시스템 건설을 위한 필수적 요소 중 하나인 해저터널의 필요성이 대두되고 있다. 이에 따라 해저터널의 연장이 점차 증가하는 추세이다. [표 8]에는 세계 초장대 터널 현황이 정리되어 있다. 현재 50km 이상의 해저터널로는 세이칸 터널과 유로터널(영국-프랑스)이 있다. 국내에서는 한중 해저터널, 한일 해저터널, 호남~제주 해저터널 등 연장 50km 이상의 해저터널이 계획 중이며, 특성상 국가 간 또는 지역 간을 연결하는 터널이 대다수를 차지한다.

[표 8] 세계의 초장대 해저터널 현황

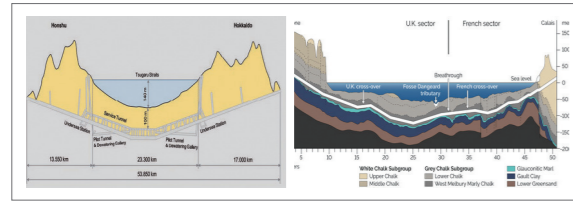
순위	터널명	연장	국가
1	세이칸 터널	53.9km	일본
2	Euro Tunnel	50.5km	프랑스/영국
3	Fehmarn Belt Tunnel	17.6km	독일/덴마크
4	Ryfast Tunnel	14.3km	노르웨이
5	Eysturoy Tunnel	11.2km	노르웨이
6	동경만 아쿠아 터널	9.6km	일본
7	Great Belt Bridge tunnel	8.0km	덴마크
8	Eiksund Tunnel	7.7km	노르웨이
9	Qingdao Jiaozhou Bay Tunnel	7.8km	중국
10	North Cape Tunnel	6.8km	노르웨이
-	보령해저터널	5.2km	국내최장
-	가덕해저터널	3.7km	침매터널

6.2 세계 최장 해저터널 - 세이칸 터널(일본)과 유로 터널(영국/프랑스)

세이칸 터널은 쓰가루 해협을 가로지르며 본토와 홋카이도 북부 섬을 연결하는 세계 최장 해저터널이다. 1988년 재래식 가이코 선으로 개통했으며, 2016년부터 홋카이도 신칸센이 운행 중이다. 현재 세계에서 두 번째로 긴 철도터널로, NATM 공법이 적용되었다. 또한, 제2세이칸 터널도 계획 중이다. 유로터널(Euro Tunnel)은 프랑스와 영국 사이의 도버 해협을 통과하는 총연장 50.45km의 해저터널로, 1987년 도버 해협 양쪽에서 건설이 시작되어 1991년에 공사가 완료된 후 1994년 5월 공식적으로 개통되었다. 유로터널은 직경 7.6m의 2개의

단선 철도터널과 1개의 비상용 서비스 터널로 구성되어 있으며, TBM 공법이 적용되었다. 해저 구간의 길이는 37.9km로, 해저부문만으로는 세계 최장 터널이다.

[그림 9] Seikan Tunnel(NATM) 및 Euro Tunnel(TBM)



6.3 세계 최심도 해저터널 – Ryfast Tunnel(노르웨이)

노르웨이 Rogaland 카운티의 해저 도로터널로, Stavanger와 Ryfylke를 연결하는 노르웨이 국도 13호선의 일부이다. 연장은 14.4km로, 현재 세계에서 가장 긴 해저 도로터널이자 모든 종류의 터널 중 해수면 하부 386m로 가장 깊은 터널이다. 2013년에 공사가 시작되어 2019년 12월에 터널이 개통되었으며, 노르웨이 터널 공법인 슛크리트 라이닝으로 구성된 NMT 공법(NATM 공법의 일종)이 적용되었다. Ryfast Tunnel은 노르웨이의 뛰어난 터널 기술력을 증명한 사례로 평가받고 있다.

[그림 10] Ryfast Tunnel(NATM/NMT 공법)



7. 알프스의 초장대 터널

7.1 알프스의 초장대 터널

알프스 산맥은 유럽 중심부에 위치해 여러 국가를 연결하는 중요한 지점이다. 그러나 험준한 지형으로 인해 교통이 불편하고 이동 시간이 오래 걸리는 문제가 있었다. 알프스 초장대 터널은 이러한 문제를 해결하고 유럽 내 이동을 더욱 원활하게 하기 위해 건설되었거나 계획되었다. 기존 터널과는 달리,

터널 기술의 발전으로 알프스 산맥 하부를 통과할 수 있게 되어 'Base'라는 이름이 붙여졌다. [표 9]에는 알프스 산맥 하부를 통과하는 초장대 터널의 현황이 정리되어 있다.

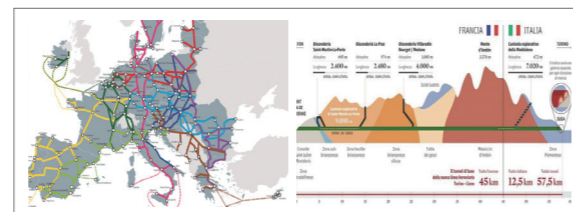
[표 9] 알프스 초장대 터널 현황

터널	연장	공법	국가	비고
Brenner Base Tunnel	64.0 km	D/B+TBM	오스트리아-이탈리아	시공 중
Mont Cenis Base Tunnel	57.5 km	D/B+TBM	프랑스-이탈리아	시공 중
Gotthard Base Tunnel	57.1 km	D/B+TBM	스위스-이탈리아	운영 중
Lötschberg Base Tunnel	34.6 km	D/B+TBM	스위스	운영 중
Koralpin Base Tunnel	32.9 km	D/B+TBM	오스트리아	운영 중
Semmering Base Tunnel	27.3 km	D/B+TBM	오스트리아	운영 중
Cereni Base Tunnel	15.0 km	D/B+TBM	스위스	운영 중
Zimmerberg Base Tunnel	10.0 km	D/B+TBM	스위스	운영 중

7.2 TEN-T 프로젝트와 Mont Cenis Base Tunnel

TEN-T(Trans-European Transport Network) 프로젝트는 유럽을 잇는 거대한 교통망이다. 유럽연합(EU)이 추진하는 대규모 인프라 프로젝트로, 유럽 전역을 하나로 연결하는 효율적이고 지속 가능한 교통 네트워크를 구축하는 것을 목표로 한다. TEN-T 프로젝트에서 초장대 터널의 구축은 필수적인 인프라로 간주된다. Mont Cenis Base 터널은 Lyon-Turin 철도 연결 프로젝트의 핵심 터널로, 완공되면 이탈리아와 프랑스를 잇는 주요 고속철도 연결을 용이하게 하여 두 나라 사이에서 고속 여객 열차와 철도 화물을 운송할 수 있게 된다. 연장 57.5km에 달하는 본 터널은 57.1km의 고트하르트 베이스 터널을 넘어 세계에서 가장 긴 철도 터널이 될 예정이다. 공사비는 80억 유로로 추산되며, 2013년에 공사가 시작되었으며 예상 준공일자는 2032년이다. 터널 공법은 주로 TBM 공법이 적용되었으며, 구분된 공사 구간을 이탈리아와 프랑스에서 각각 진행 중이다.

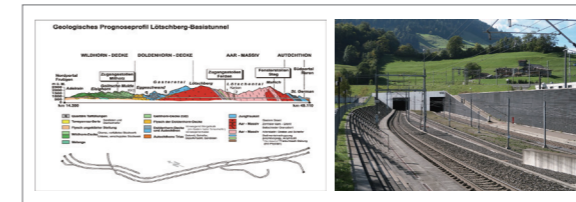
[그림 11] Trans-European Transport Network와 Mont Cenis Base Tunnel Tunnel



7.3 Lötschberg Base Tunnel(LBT)

기존 Lötschberg 터널보다 약 400m 하부에 위치한 스위스 베른 알프스를 가로지르는 BLS AG의 Lötschberg 라인에 있는 34.57km 길이의 철도 터널이다. LBT는 주로 철도 기반 화물을 위한 더 빠른 대안 경로를 제공하기 위해 건설되었으며, 2020년 4월에 완전 개통되었다. 본 터널은 TBM 공법이 적용되었으며, 비상 상황에 대응하기 위한 다양한 조치(지하 응급 스테이션 등)가 포함되어 있다.

[그림 12] Lötschberg Base Tunnel



8. 세계의 메가 터널 프로젝트

8.1 세계 최장대 메트로 터널 프로젝트

최근 도심 교통 혼잡 완화와 대중교통 이용 활성화를 목표로 메트로 터널 건설이 활발히 진행되고 있다. 특히, 대규모 메가 프로젝트는 도시 인프라에 큰 영향을 미치며, 다양한 기술적·사회적 이슈로 주목받고 있다. [표 10]에는 세계 주요 도시에서 진행된 최장 메트로 터널 프로젝트가 나타나 있다. 표에서 알 수 있듯이, 인프라 투자가 활발한 중국에서 대규모 메트로 프로젝트가 진행 중이며, 한국의 서울 지하철 5호선도 포함되어 있다.

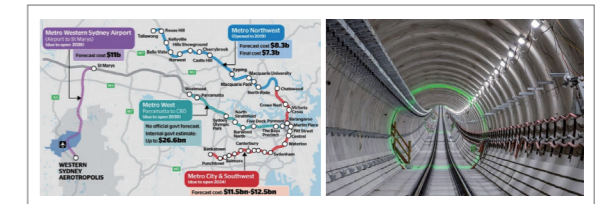
[표 10] 세계의 최장대 메트로 터널 프로젝트

순위	터널명	연장	국가
1	Shzhou Line 3-11	86.54km	중국
2	Chengdu Line 6	68.22km	중국
3	칭다오 Line 1	59.82km	중국
4	광저우 Line 18	58.30km	중국
5	모스크바 메트로 Bolshaya Koltsevaya line	57.54km	러시아
6	베이징 지하철 10	57.10km	중국
7	베이징 지하철 6	53.40km	중국
8	서울 지하철 5호선	52.90km	한국
9	이스탄불 메트로 M11	50.90km	튀르키예
10	우한 메트로 7	44.20km	중국

8.2 세계 메가 터널 프로젝트 – Sydney Metro

시드니 메트로호는 호주 시드니에 위치한 완전 자동화된 고속 교통 철도 시스템이다. 현재 Metro North West 및 Bankstown Line으로 구성되어 있으며, 총 52km 길이의 트윈 트랙과 21개의 역으로 이루어져 있으며 대부분 지하에 위치한다. 이 노선의 첫 번째 구간은 2019년 5월에 개통되었으며, 이후 두 차례 연장 확장이 이루어졌다. 본선 터널 대부분은 TBM 공법이 적용되었다.

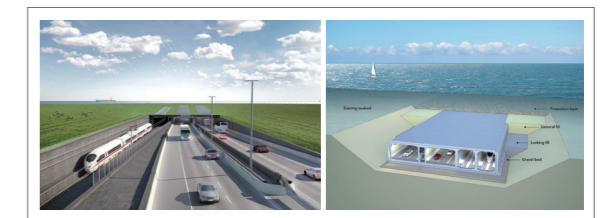
[그림 13] Sydney Metro



8.3 세계 최장대 침매터널 – Fehmarnbelt Tunnel(독일-덴마크)

Fehmarnbelt 터널은 덴마크 롤란드(Lolland) 섬과 독일 페마른(Fehmarn) 섬을 연결하며 발트해의 18km 구간을 가로지르는 해저터널이다. 이 터널은 중부 유럽과 스칸디나비아를 연결하는 주요 교통 인프라로, 세계에서 가장 긴 복합터널(도로 및 철도 터널)로 기록될 예정이다. European Commission의 TEN-T 프로그램의 핵심 프로젝트이자 우선 철도 노선인 Fehmarnbelt 터널에는 2차선 고속도로와 고속 전기 열차를 위한 복선 철도가 포함되며, 2029년 완공을 목표로 하고 있다.

[그림 14] Fehmarnbelt Tunnel



8.4 세계 최장대 터널(비교통) - Delaware Aqueduct Tunnel(미국)

Delaware Aqueduct는 뉴욕시 급수 시스템의 수로 터널이다. 이 수로 터널은 1939년에서 1945년 사이에 건설되었으며, 뉴욕시 하루 물 공급량의 약 4,900,000m³ 중 절반을 운반한다. 폭 4.1m, 길이 137km에 달하는 Delaware Aqueduct 수로 터널은 세계에서 가장 긴 터널로 알려져 있다. 제1터널은 1917년에, 제2터널은 1936년에 가동되었으며, 현재 두 터널 모두 검사와 보수가 필요한 상태이다. 제3터널은 1970년에 착공되어 현재 운영 중이나, 2026년에 완공될 예정이다.

[그림 15] Delaware Aqueduct Tunnel



9. 국내 초장대 터널

9.1 국내 장대 도로터널 현황

국내의 경우 산악 지형이 많아 장대 터널 건설이 필수적이다. 특히, 고속도로 건설과 함께 장대 터널 건설이 활발히 이루어지고 있다. [표 11]에는 국내 장대 도로 터널의 현황이 정리되어 있다. 표에서 보듯 고속국도뿐만 아니라 국도에서도 초장대 터널이 구축되고 있으며, 도심지 구간을 통과하는 지하도로 중 20km 이상의 초장대 터널도 포함되고 있다.

[표 11] 국내 장대 도로터널 현황

순위	터널명	연장	비고	특징
1	인제양양터널	10.96km	고속국도	국내 최장대 도로터널/운영 중
2	서부간선 지하도로	10.33km	지하도로	도심지 대신도 지하터널/서울시
3	재약산터널	7.91km	고속국도	재약산 통과/밀양울산 고속국도
4	문무대왕터널	7.54km	고속국도	토함산 통과/양북터널/동해고속국도
5	신월여의 지하도로	7.53km	지하도로	도심지 대신도 지하터널/서울시
6	금정산 터널	7.10km	고속국도	금정산 통과/부산외곽순환고속국도
7	진해 터널	6.08km	일반국도	석동소시간 도로/국내 최장대 국도터널
-	사상-해운대 지하고속도로	22.90km	지하도로	도심지 대신도 지하터널/부산시/설계 중
-	만덕-센텀 지하고속도로	7.8km	지하도로	도심지 대신도 지하터널/부산시/시공 중

9.2 국내 최장대 도로터널 - 인제양양터널

인제양양터널은 강원도 인제군 기린면과 양양군 서면을 잇는 연장 10,965m의 양방향 터널로, 국내에서 가장 긴 도로 터널이다. NATM 공법이 적용되었으며, 터널 중간에 경사갱을 굴착해 동시에 4방향 굴착이 가능하도록 설계되었다. 또한, 장대 터널에서 운전자의 안전성을 고려해 S자 곡선 선형으로 설계되었으며, 물분무 시스템 등 다양한 첨단 장비와 시스템을 적용해 방재 성능을 확보하였다.

[그림 16] 국내 최장대 도로터널 - 인제양양 터널



9.3 국내 장대 철도터널 현황

국내에서는 산악 지형을 효과적으로 극복하고 지역 간 이동 시간을 단축하여 교통망을 확충하기 위해 장대 철도터널의 건설이 활발히 진행되고 있다. 특히 국내는 산악 지형이 많아 고속화가 진행됨에 따라 초장대 터널이 상당 부분을 차지하고 있다. [표 12]에는 국내 장대 철도터널의 현황이 정리되어 있다. 표에서 보는 바와 같이 국철뿐만 아니라 도시철도(지하철) 및 도심지 급행철도도 50km 이상의 초장대 터널로 구축되고 있다.

[표 12] 국내 장대 철도터널 현황

순위	터널명	연장	비고	특징
1	울현터널	50.3km	수서고속철도	국내 최장/세계 4위 초장대 터널
2	대관령터널	21.75km	일반철도(경강선)	대관령 산악통과
3	금정터널	20.32km	경부고속철도	도심지(부산) 대신도 터널
4	술안터널	16.20km	일반철도(영동선)	동백산 도계 산악통과/파리형
5	백운터널	14.23km	일반철도(중앙선)	재천/원주 산악통과
6	원효터널	13.28km	경부고속철도	천성산 산악통과/환경민원
7	박달터널	11.20km	일반철도(중앙선)	박달재 산악통과
-	GTX-A	53.4km	광역급행철도	도심지 대신도 지하터널/시공
-	서울 지하철 5호선	52.9km	수도권 지하철	방화-하남검단산/연장선 시공

9.4 국내 최장대 터널/철도터널 - 울현터널

울현터널은 SRT 평택 지체역에서 시작하여 수서역까지 이어지는 깊이 50m, 길이 50.3km의 국내에서 가장 긴 터널이자 철도터널이다. NATM 공법을 적용하였으며, 터널 중간에 총 16개의 수직구를 굴착하여 동시에 여러 방향으로 굴착이 가능하도록 하였다. 또한, 초장대 터널에서의 터널 화재 등에 대비하여 수직 탈출로 17개, 24인승 엘리베이터와 계단을 설치하여 안전 기능을 강화하였다. 신갈 단층대를 통과하므로 장기적인 터널의 안전 관리가 요구된다.

[그림 17] 국내 최장대 철도터널 - 울현터널



10. 초장대 터널의 과제와 전망

10.1 초장대 터널의 과제

초장대 터널은 초장대화, 고속화 및 복합화됨에 따라 다양한 기술적 과제가 해결되어야 한다. 현재의 지하 터널링 기술과 신기술 등을 종합적으로 반영하여 안전하고 스마트한 초장대 터널을 구축해야 한다. 초장대 터널의 주요 해결 과제를 정리하면 다음과 같다.

• 기술적 도전

급속 시공과 방재 기술은 초장대 터널의 안전 시공과 효율적인 시공 관리를 위한 핵심 기술이다. 초장대 터널 공사에서는 고심도 및 고수압 조건에서 터널 안전성을 최대한 확보하고, 다양한 최신 터널링 기술을 적용하여 안전하고 효율적인 초장대 터널 공사가 진행되도록 해야 한다.

• 장기적 계획

초장대 터널은 교통 물류 인프라의 핵심 축으로서 국가

및 지역 발전과 밀접하게 연결되어 있다. 지속 가능한 국가 및 지역 개발을 추진하기 위해서는 인프라 구축 사업과 함께 지하 중심의 초장대 터널 네트워크 구축을 장기적으로 추진해야 한다.

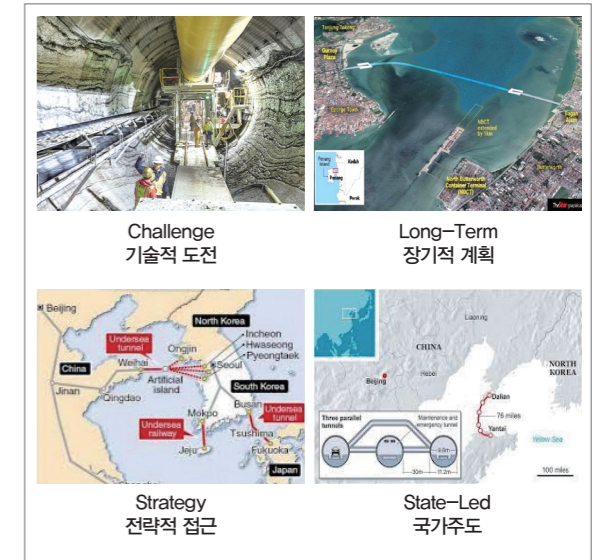
• 전략적 접근

초장대 터널 사업은 단순히 기술적인 문제가 아니라 국가, 사회, 경제, 환경 등 다양한 요소를 고려한 종합적이고 전략적인 접근이 필요하다. 이는 초장대 터널 네트워크를 통해 국가의 니즈를 해결하고, 국가적 인프라 교통 시스템과 효율적으로 연계되어 전략적으로 추진되어야 한다.

• 국가 주도

초장대 터널은 단순한 교통 인프라 거점을 넘어, 주변 국가와의 연결을 촉진하며 다양한 기능을 수행하는 중요한 핵심 인프라이다. 교통 인프라 연결의 국가 간 통합 원칙에 따라 교통, 물류, 안보 등 다양한 기능을 혼합하여 개발함으로써 초장대 터널의 활용도를 높이고 시너지 효과를 창출해야 한다.

[그림 18] 초장대 터널의 과제 - CLSS(기술/장기적/전략적/국가주도)



10.2 초장대 터널의 향후 전망

초장대 터널은 미래 교통 물류 시스템의 핵심 요소로 자리매김할 것으로 보이며, 끊임없는 기술 발전과 국가적 니즈에 맞춰 안전하고 스마트하며 지속 가능한 방향으로 계획될 전망이다. 특히, 기존의 노후화된 교통 인프라를 대체하는 사업을 통해 교통 물류망을 효율적으로 활용하고, 복잡한 교통 물류 문제를 해결하며 국민들의 삶의 질을 향상시키는 것을 목표로 한다. 향후 초장대 터널 전망에 있어 요구되는 주요 사항을 정리하면 다음과 같다.

• 국가 간 협력

초장대 터널은 복잡하고 혼잡한 기존 교통 물류를 대체하기 위해 지하에 구축되는 것이다. 국가 간 협력을 기반으로 한 연결 인프라는 핵심적인 글로벌 교통 물류 시스템으로 가능하며, 국제적인 협력을 통해 구현되도록 한다.

• 통합 네트워크

지역 간 또는 국가 간 연결을 위한 초장대 터널 구축은 국가와 지역 간의 교통 물류 문제를 해결하고, 국가 경제를 활성화하는 데 기여할 수 있는 통합 인프라이다. 특히 국가 간 연결과 협력을 강화하고, 글로벌 교통물류 네트워크를 구축하여 글로벌 발전에도 기여할 수 있다.

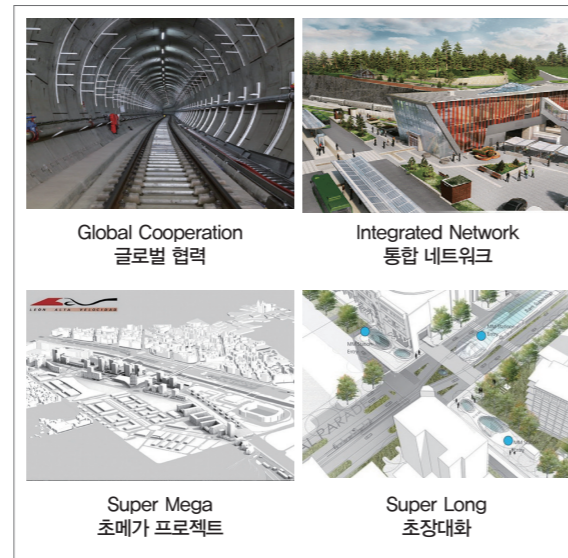
• 초메가 프로젝트

초장대 터널은 수십 조에서 수백 조에 이르는 비용이 소요되는 초메가 프로젝트로서, 한정적인 교통물류를 혁신하고 국민들의 삶의 질을 향상시키는 전략적인 사업이다. 특히 교통 인프라의 급행시스템, 초연결성을 통한 물류시스템 혁신 등을 통해 국가 경제를 활성화하는 데 기여할 수 있다.

• 초장대화

초장대 터널은 미래 스마트 교통 인프라 시대를 위한 필수 인프라로, 첨단 터널기술을 활용하여 지하공간을 보다 스마트하고 안전하게 구축하는 것이다. 이는 혁신적인 지하 인프라 구축, 쾌적하고 빠른 교통물류시스템 구축 및 지속 가능한 지하공간 발전에 기여할 수 있다.

[그림 19] 초장대 터널의 전망 - GISS(글로벌/네트워크/메가/초장대)



■ 장대 터널 기준 및 용어정리

터널 기술이 발전하고 터널 기능이 다양해짐에 따라 터널 연장이 점점 길어지는 장대화 경향이 나타나고 있다. [표 13]에는 장대 터널에 대한 정의를 터널 설계 기준, 방재 기준, 그리고 통상적 개념으로 구분하여 정리하였다. 일반적으로 터널 연장이 점차 길어져 수십 km에 이르면 초장대 터널로 분류된다. [표 13]에는 초장대 터널과 관련된 용어를 정리하여 제시하였다.

[표 13] 국가별 장대 터널/초장대 터널 기준

		짧은 터널	터널	장대 터널	초장대 터널
		Very Short	Short/Middle	Long	Very/Super Long
설계 기준	국내(철도)	-	1km 이하	1~5 km	5km 이상
	국내(도로)	0.5km 이하	0.5~1km	1km 이상	-
	국제터널협회(ITA)	-	5km 이하	5km 이상	-
	일본(도로)	-	5km 이하	5km 이상	-
	중국(도로)	0.25km 이하	0.25~1km	1~3 km	3km 이상
방재 기준	유럽(TC)	-	0.5~1km	1~15 km	15km 이상
	독일	1km 이하	1~15km	15km 이상	-
	오스트리아	1km 이하	1~15km	15~25km	25km 이상
통상적 개념	도로	1km 이하	1~5 Km	5~10 Km	10km 이상
	철도	1km 이하	1~5 Km	5~20 Km	20km 이상

[표 14] 초장대 터널관련 용어 정리

용어	정의	비고
초장대 터널 Super Long Very Long	초장대 터널은 매우 길게 뚫린 터널을 의미한다. 정확한 길이 기준은 국가마다 다르지만, 일반적으로 도로터널의 경우 10km 이상을, 철도터널의 경우 20km 이상을 초장대 터널로 분류한다. 초장터널이라는 용어는 장대터널과 같은 의미로 사용되기도 한다.	<ul style="list-style-type: none"> • 단/짧은(Very Short) • 일반/중간(Short) • 장대/긴(Long) • 초장대/매우 긴(Very Long)
해저 터널 Underseal Underwater	바다 하부에 만들어진 터널을 의미한다. 도로나 철도 등을 통해 육지와 육지 또는 육지와 섬을 연결하는 역할을 하며, 바다를 건너는 데 드는 시간을 단축하고 교통량을 분산시키는 중요한 역할을 한다. 대표적인 해저터널로 유로터널과 세이칸 터널이 있다.	<ul style="list-style-type: none"> • Euro Tunnel • Seikan Tunnel • 보령해저터널
베이스 터널 Base	대규모 산 또는 산맥을 통과하기 위해서 능선까지 올라가지 않고 산맥하부(base)를 관통하는 터널을 의미한다. 베이스 터널이라는 용어를 사용하는 대표적인 예로 알프스 산맥하부를 통과하는 세계 최장터널 고타하르트 베이스 터널이 있다.	<ul style="list-style-type: none"> • Gotthard Base Tunnel • Brenner Base Tunnel

■ 제9강을 마치면서 - 미래 통합 네트워크 : 초장대 터널

지하터널은 오랫동안 교통물류 인프라의 핵심으로 인류 역사와 함께 발전해 왔다. 특히 국가 주도의 지하터널 인프라는 국가 발전과 함께 지역 간을 연결함으로써 국민들의 중요한 교통수단으로 자리매김해왔다.

이제 교통물류 인프라는 새로운 전환기를 맞이하고 있다. 지역 간을 연결하고 도심지를 통과하는 새로운 인프라를 건설함과 동시에 기존 인프라를 개선하고 확장하며, 교통물류 인프라는 지하 중심으로 더욱 발전하고 성장하고 있다.

특히, 오래전부터 바다와 산맥으로 가로막힌 지역이나 국가에서는 연결을 목적으로 하는 교통물류 인프라 건설에 대한 지역 주민들의 다양한 민원과 개발 요구가 급증하면서 초장대 터널 구축이 뜨거운 이슈로 부각되고 있다. 하지만 과연 수십 조 원이 소요되는 수십 km의 초장대 터널을 실현할 수 있을까? 그 막대한 비용은 어떻게 조달할 것인가? 초장대화에 따른 기술적 문제들은 해결 가능한 수준인가? 그리고 어느 지역이나 국가를 우선적으로 시행할 것인가? 등 해결해야 할 수많은 난제와 이슈들이 여전히 산적해 있다.

그러나 더 나은 미래의 교통물류 시스템을 건설하고, 다양한 통합 교통물류 인프라를 통해 국가 간을 연결하며, 글로벌 교

통물류 네트워크를 구축할 수 있다는 점에서 초장대 터널 구축은 우리가 해결해야 할 중요한 과제라 할 수 있다. 이를 위해 정부뿐만 아니라 이해 당사자와 관계 국가 간의 지속적인 소통과 협력이 요구되며, 법적·제도적·기술적 뒷받침이 마련되어야 한다. 또한, 지속적이고 장기적인 관점에서 체계적인 마스터플랜이 수립되어야 한다.

초장대 터널은 미래 교통물류의 핵심이자 글로벌 시대의 발전 방향을 결정짓는 중대한 요소이다. 지속 가능한 기술 발전을 통해 초장대 터널은 더욱 안전하고 스마트한 교통물류 시스템으로 발전할 것으로 기대된다. 초장대 터널이 새로운 글로벌 미래 공간으로 자리매김하기 위해서는 기술 개발과 투자 확대가 필수적이며, 정부, 엔지니어, 국민 간의 협력 체계를 구축해야 한다. 또한, 지하공간 활용과 관련된 법규 및 제도를 개선하고, 안전 및 환경 관련 규제를 조속히 마련하는 것이 필요하다.

초장대 터널은 국가 간 협력 체제 구축, 국제적 통합 네트워크 형성, 초메가 프로젝트 실행, 그리고 디지털화를 통한 초장대화 실현으로 미래 글로벌 교통물류의 핵심 솔루션이 될 것이다. 🇰🇷