

싱글셸 터널의 국내 적용에 대한 고찰

이상필^{1*} · 하희상² · 김동현²

¹정회원, GS건설(주) 지반터널팀 전문위원

²정회원, GS건설(주) 지반터널팀 책임연구원

Review on the application of single-shell tunnel in Korea

Sangpil Lee^{1*} · Heesang Ha² · Donghyun Kim²

¹Senior Technical Advisor, Geotechnical & Tunnel Engineering Team, GS E&C

²Leader, Geotechnical & Tunnel Engineering Team, GS E&C

*Corresponding Author : Sangpil Lee, splee@gsenc.com

Abstract

Single-shell tunnels, introduced to South Korea in the early 2000s, have not been adopted for the main tunnels of roads or railways over the past two decades despite several attempts starting with the Gwangju City Bypass. This reluctance likely arises from concerns about the long-term performance of supporting materials and the absence of relevant criteria and specifications. However, recent progress, including the incorporation of high-strength shotcrete standards and corrosion-resistant rock bolt specifications, alongside equipment and technique enhancements, necessitates a reassessment of single-shell tunnels. While the single-shell tunnel method offers advantages in environmental impact, construction cost and period compared to the conventional NATM, it is crucial to address the challenges, such as limited design and construction experience, incomplete detailed standards, and insufficient construction specifications, through further research and pilot projects. This paper reviewed the basic principles of single-shell tunnel, current application and research status, technical development trends, criteria and specifications, and remaining challenges. It aims to reignite discussions on the feasibility of applying single-shell tunnels in South Korea.

Keywords: Single-shell tunnel, Application and research status, High-performance support, Criteria and specifications, Challenges

초 록

2000년대 초 싱글셸 터널이 한국에 소개된 이후, 광주우회도로를 시작으로 이 공법에 기반한 터널을 실제 프로젝트에 적용하려는 시도가 여러 번 있었으나 20여 년이 지난 지금까지도 도로나 철도와 같은 교통 터널의 본선에 채택된 적은 없다. 이는 터널 지보재가 영구지보재로서의 성능을 확보하지 못한다는 우려와 이와 관련된 기준이나 시방의

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
26(3)223-242(2024)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2024.26.3.223>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received April 1, 2024

Revised April 23, 2024

Accepted April 24, 2024



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2024, Korean Tunnelling and Underground Space Association

부재에 기인한 바가 크다. 이후 터널 전문가들의 많은 연구와 노력으로 고강도 및 최종 마감재로서의 슛크리트에 대한 기준과 내부식성 록볼트 등 영구지보재로서의 요구 조건이 설계 및 시공기준에 반영되었을 뿐만 아니라 장비, 시공기술, 작업자의 숙련도 등 시공 측면에서도 상당한 개선이 이루어져 왔다. 따라서, 이제는 기존 NATM 공법에 비해 환경 영향, 공기 및 공사비 측면에서 차별성이 있는 싱글셸 터널공법의 국내 적용을 다시 고려해볼 때라고 생각된다. 다만, 싱글셸 터널공법에 대한 부족한 설계 및 시공 경험, 불충분한 세부기준, 미흡한 시공상세 등에 대해서는 추가 연구 또는 시험시공 등을 통해서 보완이 필요하다. 본 논문에서는 싱글셸 터널의 기본 개념부터 적용 및 연구현황, 기술발전 동향, 극복과제 등에 대하여 고찰하였으며, 이를 통하여 싱글셸 터널의 국내 적용성에 대하여 다시 한 번 적극적인 논의를 제안하고자 한다.

주요어: 싱글셸 터널, 적용 및 연구현황, 고성능 지보재, 기준 및 시방, 극복과제

1. 서론

터널 굴착공법은 TBM (Tunnel Boring Machine), 로드헤더(roadheader) 등과 같은 기계식 굴착공법과 발파굴착(drill and blast)으로 시공되는 NATM (New Austrian Tunnelling Method), NMT (Norwegian Method of Tunnelling) 등으로 대별될 수 있으며, 이 중 NMT 공법에서 현장타설 라이닝이 적용되지 않는 터널을 일반적으로 싱글셸 터널이라고 한다. 싱글셸 터널은 굴착 지반에서부터 최종 마무리 지보재(final lining)까지 전단력이 전달되는 일체화된 라이닝 구조를 가지며, 방수시트에 의해 분리된 이중 라이닝 구조(double-shell, 암반/슛크리트 + 방수시트 + 현장타설 콘크리트라이닝)를 형성하는 NATM 공법의 터널과 구별된다. 싱글셸 터널은 무라이닝(unlined) 터널, PCL (Precast Concrete Lining) 터널, PSCL (Permanent Sprayed Concrete Lining) 터널 등을 포함하며, 일본, 독일 등에서 적용되고 있는 고품질의 슛크리트와 록볼트를 영구지보재로 사용하여 NATM의 현장타설 라이닝 대신 여러 층의 슛크리트를 타설하여 일체화시키는 공법인 싱글셸 NATM도 여기에 해당한다. 이 중 PCL 터널공법은 최종 마감 지보재는 슛크리트이지만 미관, 방수, 결빙방지, 운전자의 시각적인 안정성 등을 목적으로 터널 벽면과 이격되어 PC (Precast Concrete)로 내부 라이닝(inner lining)을 설치하는 공법이며 국내 실제 프로젝트에 적용을 추진했던 대표적인 공법이다.

Fig. 1은 싱글셸 터널의 일반적인 구조형식을 나타낸 것이다. 싱글셸 터널은 Fig. 1(a)와 같이 단일구조 형식과 Fig. 1(b)와 같이 다층구조 형식으로 되어 있는 경우가 있으며, 미관, 방수 등의 목적으로 Fig. 1(c), (d)와 같이 PC 나 PE-foam+shotcrete 등으로 내부 라이닝을 설치하는 형식도 있다.

노르웨이 등 북유럽을 중심으로 전 세계적으로 수백 개의 터널이 싱글셸 개념을 이용하여 건설되었지만, 국내에서는 유류비축기지 등과 같이 일반적으로 콘크리트 라이닝이 설치되지 않는 경우를 제외하고는 도로나 철도 등 교통 터널 본선에 싱글셸 형식으로 터널이 시공된 적은 없다. 다만, NATM 공법으로 시공된 서울양양간고속도로 구간 중 인제양양터널의 경사갱은 슛크리트만으로 최종 마감되었으며, 고속철도 터널의 경사갱에서 현장타설 콘크리트 라이닝이 없이 슛크리트만으로 마감된 터널이 다수 시공되어 공용 중이다. 한편, 2000년대 초 광주

우회도로 건설공사에서 양호한 암반 구간의 터널이 싱글셸 공법으로 설계되었으나 시공으로 이어지지는 못하였으며, 경춘선복선전철 건설공사 시공 중에 몇 개의 터널이 싱글셸 공법으로 설계변경이 추진되었으나 역시 채택되지는 못했다. 이는 숏크리트 등 터널 지보재가 영구지보재로서의 성능을 확보하지 못한다는 의구심과 이와 관련된 기준이나 시방, 지침 등이 제대로 갖춰져 있지 않은 것에 기인하고 있다. 몇 번의 실제 프로젝트 적용 시도 이후 공공기관, 학계, 건설사의 전문가들에 의해 이와 관련된 기준 마련 노력과 고성능 지보재 개발 및 성능 검증 등 기술적 연구가 많이 수행되었으며, 터널설계기준 및 터널공사표준시방서에 고강도 숏크리트의 성능 및 적용기준이 수록되었다. 2010년 도로설계편람(터널편) 개정 시에는 터널라이닝 항목에 프리캐스트 콘크리트 라이닝(PCL)에 대한 내용이 추가되었으며, 싱글셸 터널이라는 항목도 별도로 신설되었다.

그 후 십여 년이 지난 현재, 코드 기반으로 구축된 KDS (터널설계기준)과 KCS (터널공사표준시방서)에는 최종 마감재로서의 숏크리트에 대한 기준과 록볼트 등 지보재의 영구지보재로서의 요구 조건이 어느 정도 반영되었을 뿐만 아니라 터널기술, 시공 장비, 작업자 숙련도 등이 향상됨에 따라 지보재의 시공 품질도 상당히 개선되었다. 따라서 이제는 노르웨이 등 북유럽을 중심으로 널리 적용되고 있는 싱글셸 터널의 국내 적용을 다시 시도할 만한 시점이라고 생각된다. 본 논문에서는 싱글셸 터널의 기본 개념부터 그동안 진행된 국외 적용현황과 국내 연구현황, 주요 지보재의 기술발전 동향, 기술적 또는 제도적 극복과제 등에 대하여 고찰할 예정이며, 이를 통하여 현재 대부분 국내에서 시공되고 있는 발파 굴착공법인 NATM과 차별되는 싱글셸 터널공법의 국내 적용에 대해 적극적인 논의를 제안하고자 한다.

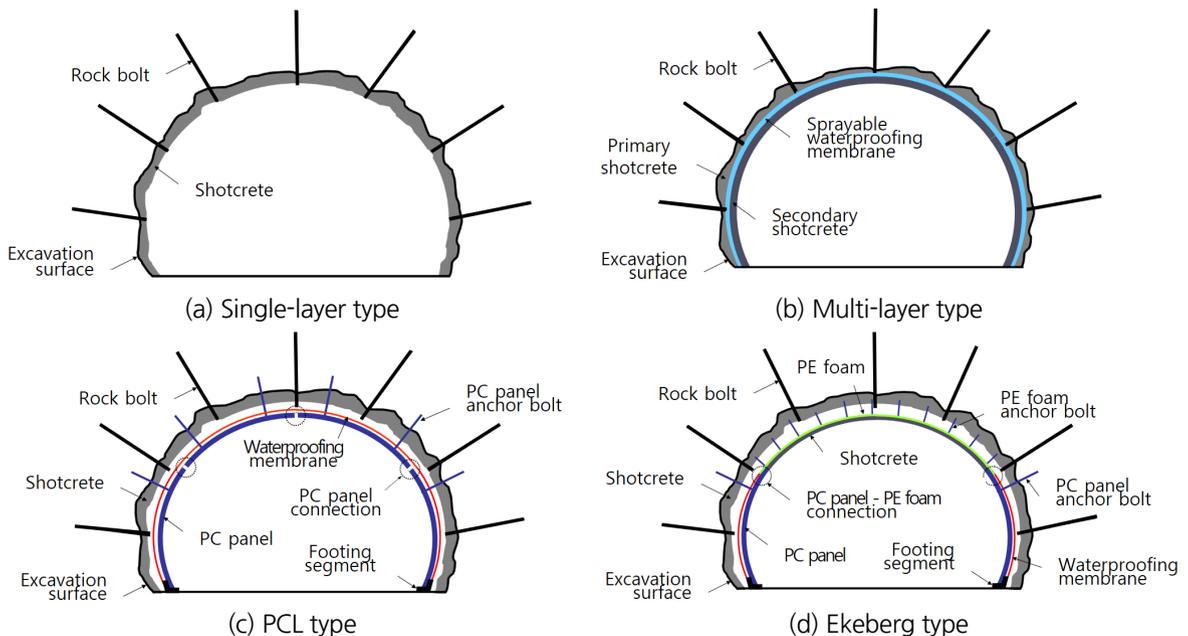


Fig. 1. Types of single-shell tunnel

2. 싱글셸 터널의 국내외 적용 및 연구현황

2.1 국외 적용현황

ITA (International Tunnelling Association)에서 2020년도에 조사한 바에 따르면 싱글셸 터널(PSCL)은 전 세계적으로 2017년까지 수백 개의 터널에서 총 1,500 km 이상이 시공된 것으로 나타났으며, 이 중에서 대표적인 사

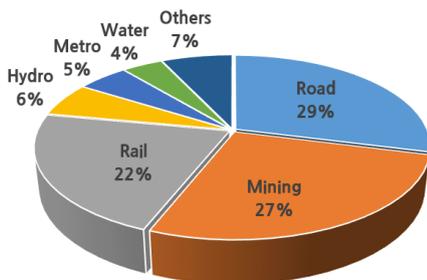
Table 1. Typical examples of single-shell tunnel in the world

Project	Country	Type	Length (km)	Depth (m)	Year of completion	Ground	PSCL (mm)	PSCL (MPa)	Remarks
Vereina	Switzerland	Rail	19.1	1,500	1999	Rock	P ^{a)} : 50~200 S ^{b)} : 100~150	-	Fiberglass rock bolt No waterproofing layer
Hindhead	United Kingdom	Road	1.8	65	2009	Soil	P: 200~300 S: 150	C32/40 700 J	SAWM ^{c)} Synthetic fiber
Gevingas	Norway	Rail	4.1	30~120	2011	Rock	P: 70~100 S: 60	-	PP fiber PE-foam inner lining
Elizabeth line	United Kingdom	Rail	14.0	40	2015	Soil	P: 325 S: 400	C32/40	Design life 120 year SAWM
Rivaloro	Italy	Road	0.6	10~100	2015	Rock	P: 300~600 S: 100~150	-	Washed with high pressure water jet
Strathfield	Australia	Rail	0.1	3	2015	Rock	P: 250 S: 100	40	Design life 100 year Synthetic & PP fiber
Seymour Capilano	Canada	Water	7.1	640	2015	Rock	50~75	-	Q-system Rock burst occurred
Serra do Cafezal	Brazil	Road	0.3~0.7	70~85	2017	Rock Soil	P: 250~300 S: 200~250	P: 45 S: 60	Crystallizing admixtures in secondary lining
Chuquicamata	Chile	Mining	25	1,050	2018	Rock	P: 50~70 S: 100~400	-	Design life 50 year Synthetic fiber
Kingsgrove ramps	Australia	Road	0.3	17	2020	Rock	P: 300~350 S: 200~300	40	SAWM between two layers

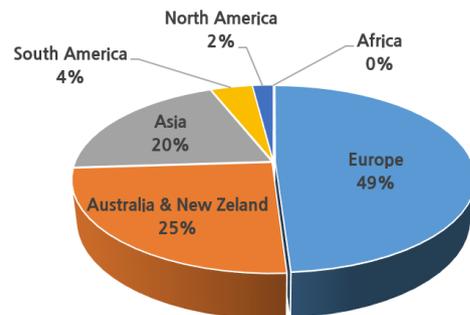
a) P: Primary lining (hard rock: 80~150 mm, soft ground: 150~300 mm)

b) S: Secondary lining (share the load with primary lining)

c) SAWM: Spray Applied Waterproofing Membrane



(a) Distribution by sector



(b) Distribution by location

Fig. 2. Distribution of single-shell tunnel (ITA Working Group No. 12 and ITAtech, 2020)

례를 Table 1에 정리하였다. Fig. 2는 조사된 전체 싱글셸 터널의 분야별, 지역별 분포를 도시한 것인데, 분야별로는 도로, 광산, 철도 순이며 지역별로는 유럽, 오세아니아, 아시아 순으로 많이 분포하였다(ITA Working Group No. 12 and ITAtech, 2020).

노르웨이는 NMT에 기반하여 도로, 철도 등 교통 터널을 대부분 싱글셸 공법으로 시공하고 있으며 대표적인 사례를 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Typical examples of single-shell tunnel in Norway

Name of tunnel	Type	Year of completion	Length (km)	Cross-sectional area (m ²)	Compressive strength of shotcrete (MPa)	Remarks
Lierasen	Rail	1973	10.7	70	28~36 (C35~C45)	-
Valderoy	Road	1987	4.2	65	28 (C35)	Subsea
Gudvanga	Road	1987	11.4	45	32 (C40)	-
Byfjord	Road	1992	5.9	65	36 (C45)	Subsea
Mastrafjord	Road	1992	4.4	65	36 (C45)	Subsea
Freifjord	Road	1992	5.1	70	36 (C45)	Subsea
Granfoss	Road	1992	1.2	65	-	Ekeberg
Nordby	Road	1993	3.8	65	-	PCL
Ekeberg	Road	1993	1.5	90	-	Ekeberg
Bekkestua	Road	1994	0.7	65	-	PCL
Blødekjær	Road	1994	1.4	-	-	Ekeberg
Rælingen	Road	1998	1.8	65	-	PCL
Romeriksporten	Rail	1999	14.5	110	-	PCL / Ekeberg
Svartdals	Road	2000	1.3	50~80	-	Ekeberg
Oslo fjord	Road	2000	7.2	78	-	Ekeberg
Lærdal	Road	2001	24.5	48	32 (C40)	Longest road tunnel in the world
Skui	Road	2009	1.4	75	-	PCL
Stavengåsen	Road	-	0.9	65	-	PCL
Smihagen	Road	-	1.0	65	-	PCL
Kjørbo	Road	-	0.5	65	-	PCL

2.2 국내 추진현황

국내에서 싱글셸 개념을 이용하여 수로터널, 유류비축기지, 방호시설, 화약저장고 등이 구축된 사례는 많이 있지만, 교통 터널에서는 경사갱을 제외하고는 본선 구간에 싱글셸 공법 도입이 추진되었던 프로젝트는 몇 개 없다 (Table 3 참조). 싱글셸 터널이 국내에 소개된 2000년대 초반부터 국내 프로젝트 적용이 시도되었는데, 2001년

광주시 우회도로 건설공사 일괄입찰 프로젝트에 국내 최초로 싱글셸 터널(PCL 공법)이 설계에 반영되어 우수한 평가를 받았으나 시공으로 이어지지 못하였다. 2002년에는 시공 중이던 경춘선 복선전철 건설공사 구간 중에서 암반 상태가 비교적 양호한 3개의 터널이 싱글셸 터널(PCL 공법)으로 설계변경이 추진되었으나 미채택되었다. 이후 교통 터널 본선은 아니지만 공사용, 환기 및 대피용 경사갱에 지반 및 지보재 조건을 고려하여 싱글셸 개념이 적용되기 시작하였다. 2017년에 준공된 서울양양고속도로의 인제양양터널 구간 중에서 환기 및 비상시 대피를 위한 약 1.4 km 길이의 경사갱은 갱구부, 본선접속부, 차량 회전구간을 제외한 전체 구간이 현장타설 콘크리트 라이닝이 없이 5 cm 두께의 고강도 슛크리트(35 MPa)의 추가 타설로 마감되어 현재 공용 중이다. 이외에도 경부고속철도, 원주~강릉철도, 성남~여주철도, 도담~영천철도 등의 일부 터널 경사갱은 당초 설계된 현장타설 콘크리트 라이닝이 생략된 싱글셸 개념으로 시공되었는데(Jung and Jeong, 2016), 주로 양호한 지반인 지보패턴 1~3구간을 대상으로 대부분 고강도 슛크리트가 아닌 일반 슛크리트(21 MPa)가 적용되었다.

Table 3. Cases of single-shell tunnel project in Korea

Year	Project		Dimension (m) (W × H)	Descriptions	Note
2001	Gwangju city bypass	1 main tunnel	13.5 × 8.3	The Jangseong Tunnel (3.6 km) with good rock section was designed for single-shell tunnel.	Unconstructed
2002	Gyeongchun Line double track railway	3 main tunnels	10.9 × 8.5	Three tunnels with good rock sections (2.7 km, 1.2 km, 2.6 km) were promoted design change from NATM to single-shell tunnel.	Not adopted
2017	Seoul Yangyang expressway	1 approach tunnel	9.6 × 6.7	An approach tunnel in the Injae Tunnel (total 1.4 km) was finished with additional high strength shotcrete (5 cm, 35 MPa) except for the area of entrance, main line connection, and turning shelter.	In operation
-	Gyeongbu high-speed railway	2 approach tunnel	8.0 × 6.6	Two approach tunnels with support pattern 1 to 3 were finished with shotcrete (21 MPa) except for the area of entrances and main line connections.	In operation
-	Wonju~Gangneung railway	1 approach tunnel	8.3 × 6.6	An approach tunnel with support pattern 1 to 5 was finished with shotcrete (21 MPa) except for the area of entrance and main line connection.	In operation
-	Seongnam~Yeoju railway	1 approach tunnel	5.1 × 5.1	An approach tunnel with support pattern 1 to 5 was finished with shotcrete (21 MPa) except for the area of entrance and main line connection.	In operation
-	○○ Dam railroad relocation	1 approach tunnel	7.5 × 7.0	An approach tunnel with support pattern 1 to 3 was finished with shotcrete (30 MPa).	In operation
-	Seohae Line railway	1 approach tunnel	6.4 × 5.6	An approach tunnel with support pattern 1 to 3 was finished with shotcrete.	In operation
-	Dodam~Yeongcheon railway	1 approach tunnel	6.4 × 5.6	An approach tunnel with support pattern 1 to 5 was finished with high strength shotcrete except for the area of entrance and main line connection.	In operation

싱글셸 터널과 관련된 국내 연구는 2001년부터 2022년까지 학계, 국가연구기관, 건설업계 등에서 60건 이상이 수행된 것으로 조사되었다. Table 4에 이 중에서 주요어를 중심으로 대표적인 연구를 수록하였으며, Fig. 3은 조사된 전체 연구의 수행 연도와 주제에 따른 분포를 도시한 것이다. 2001년도부터 무라이닝, 프리캐스트 세그먼트 터널 라이닝, 싱글셸 등과 같은 용어로 싱글셸 터널의 국내 도입 논의 및 연구가 시작되었는데, 2001년에서 2007년 사이에 73% (총 67건 중 49건 수행)가 수행되었다. 초기에는 싱글셸 터널에 대한 개념 및 전반적인 소개, 국내 적용성 등에 대한 고찰, 숏크리트 급결제에 대한 실험 연구가 대부분이었으며, 싱글셸 터널에 대한 구체적인 연구는 2004년부터라고 할 수 있는데, 이때에는 고성능 숏크리트의 개발과 강도 및 내구성 검증 연구가 많았으며, 싱글셸 터널의 경제성, 암반분류 및 지보, PCL의 내진성능, 거동 및 파괴 메커니즘 등 한국형 싱글셸 터널을 도입하기 위한 다방면의 연구가 수행되었다. 이후 2008년부터 2022년까지는 도로 또는 철도 터널 등 실제 교통

Table 4. Research on single-shell tunnel in Korea

Year	Title	First author	Publisher	Keywords
2001	An applying of unlined tunnelling to Korea	Hak Whang	KSRM Conference	overview of unlined tunnel, overseas application status, challenges, domestic application plan
2002	Precast segment tunnel lining method illuminated in the domestic tunnel technology environment	Seung-Ryul Kim	KGS Conference	role of concrete lining, names of single-shell/double-shell method
2005	Unlined tunnel and precast concrete lining method	Jong-Hyun Ryu	KCI Journal	high-performance shotcrete, status of unlined tunnel, precast concreted lining
2006	Development of the Korean single shell tunnelling method	KICT	Ministry of Construction and Transportation	single-shell tunnel concept/mechanism/ characteristics, shotcrete durability, waterproof/drainage system
2006	Development of high durable rock bolt	Samsung C&T	Samsung C&T Research Institute	rock bolt, high strength and durability, single-shell tunnel, tunnel support
2007	Performance improvement and durability evaluation of shotcrete for permanent tunnel support	Sangpil Lee	KSRM Journal	unlined tunnel, permanent tunnel support, high strength shotcrete, shotcrete durability, accelerator, silica fume
2010	Flexural behavior of reinforced ribs of shotcrete for various configurations of reinforcements	Yeonjun Park	KSRM Journal	reinforced ribs of shotcrete (RRS), flexural toughness test, types of rebar arrangement
2020	A method for high strength and durability shotcrete using eco-friendly alkali-free accelerators and high performance powder admixture	Myung-Sik Choi	KCI Journal	alkali-free accelerators, high performance powder admixture, high strength and high durability shotcrete
2022	A study on strength characteristics of high-performance shotcrete according thin spray-on liner	Cheol-Ho Lee	KSCE Conference	shotcrete strength, sprayable waterproofing membrane, full-scale test, performance

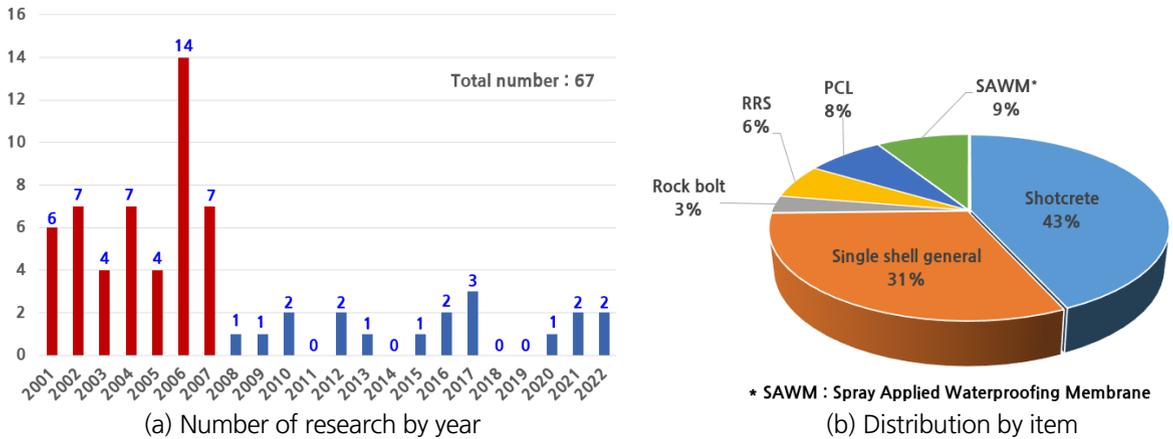


Fig. 3. Research distribution on single-shell tunnel in Korea

터널에 적용하기 위한 정부의 설계기준 및 시방서 개정작업과 병행하여 매년 1~2건 정도씩 수행되었고, 주요 주제는 철근보강 슛크리트(Reinforced Ribs of Shotcrete, RRS), 내부식성 GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) 록볼트, 고강도 분체 혼화재 등 국산 재료를 활용한 고강도화 및 수밀성 개선 연구 등이었다. 2020년 이후 최근에는 뿔어 붙임 멤브레인(Sprayed Applied Waterproofing Membrane, SAWM)을 이용한 방수 연구가 몇 건 수행되었다.

수행된 전체 연구를 주제별로 보면 고성능 슛크리트가 43% (29건) 정도로 가장 많고, 싱글셸 공법 일반사항이 31% (21건), 뿔어 붙임 방수재가 9% (6건), 프리캐스트 라이닝이 8% (5건) 순이었으며, 기타 철근보강 슛크리트, 고성능/내부식성 록볼트 등의 주제로 각각 6% (4건), 3% (2건) 씩 수행되었다. 연구 주제 건수 분석을 통해 싱글셸 터널의 국내 적용을 위해서 가장 먼저 해결해야 할 사항은 지보재, 특히 슛크리트의 영구지보재로서의 성능 확보라고 생각할 수 있으며, 노르웨이 등 북유럽에서는 비록 일반화되어 있지만, 지반 및 환경 여건이 다른 우리나라에서는 국내 조건에 적합한 싱글셸 공법이 필요하다는 것을 알 수 있다.

3. 싱글셸 터널의 기본요소 및 기술발전 동향

3.1 싱글셸 터널의 설계 일반

노르웨이에서 일반적으로 적용되고 있는 싱글셸 터널의 주요 설계 내용을 정리하면 Table 5와 같다. 싱글셸 터널은 Q-system을 이용한 지반평가를 기본으로 하나 Q와 RMR의 관계식을 통하여 RMR로도 평가가 가능하다. 지보재는 슛크리트와 록볼트를 주 지보재로 하며 H형강이나 격자지보재 대신에 RRS를 사용한다. 지반조건이 매우 불량한 경우에는 철근이 보강된 현장타설 콘크리트(CCA)를 적용하나 최근에는 복철근을 사용한 double RRS로 대체되는 경향이다. 마감재는 구조적 개념보다는 단열, 방수/배수, 시각적 안정성 등의 목적으로 설치하며 최종 보강 시스템인 슛크리트와 수십 cm 이격되어 설치되는 내부 라이닝이다.

Table 5. Design general for single-shell tunnel (in case of PCL)

Division		Contents
Rock mass classification		Q-system (can be evaluated by RMR-Q correlation)
Main support	Rock bolt	High-strength, corrosion-resistant rock bolts (in Norway, CT-Bolt and NC-Bolt)
	Shotcrete	High-quality steel fiber reinforced shotcrete (with high strength, high toughness, high durability and low rebound)
	Steel support	RRS is applied instead of H-beam and lattice girder.
	CCA	In the case of very poor ground conditions, CCA (Cast Concrete Application) reinforced with steel bars are applied (currently being replaced by RRS).
Inner lining	Purpose	For insulation, drainage, waterproofing, visual stability, aesthetics, lighting, and ventilation
	Types	Include insulated sandwich panels, PE (Polyethylene)-foam with shotcrete, and PC panels. In Norway, the type of inner lining is selected according to AADT (Average Annual Daily Traffic).
	Design load	Dead load: self-weight, attached load (cable, lighting, ventilation facility, etc.) Live load: falling rock load (300 kg rock falls) Seismic load: acceleration according to time history (max. 0.154 g) Others: aerodynamic load, collision load (5 kPa), ice load (0.3 kPa)
Maintenance monitoring		The internal displacement monitors the deformation of the ground and the tunnel, the pore water pressure checks the status of drainage treatment, the vibration measurement measures the vibrations that can cause long-term creep deformation of the bedrock, and the temperature measurement observe whether the surrounding ground is frozen.
Inspection and diagnosis		Survey hatches are installed every 150 m to directly observe the original ground. The bolts and nuts connecting the PC panel and anchor bolts can be measured or additionally tightened using a moment wrench. Examine whether there is corrosion or deterioration of the waterproof membrane or insulation through visual observation. Examine whether cracks, corrosion, or falling rocks have occurred through visual observation. To check compressive strength, use a Schmidt hammer or conduct a core sampling test for carbonation and salt damage investigation.

3.2 고성능 슛크리트

터널 굴착시에는 원지반의 강성을 최대한 활용하는 것이 중요하며 지반조건에 따라 슛크리트는 록볼트와 더불어 지반 자체의 지보능력을 보완하는 핵심 지보재이다. 슛크리트는 지반에 밀착하여 타설이 가능하므로 지반의 변형과 이완을 조기에 억제하며 변형에 대한 지보압력을 제공한다. 슛크리트의 주요 구성요소는 시멘트, 굵은 골재, 잔골재, 강섬유, 급결제, 물, 혼화제이며, 요구성능을 확보하기 위해서는 구성요소들의 적절한 규격과 배합비를 결정해야 하며, 고성능 슛크리트에서는 장기강도와 내구성을 증가시킬 목적으로 실리카폼 등과 같은 혼화재료를 추가하기도 한다.

싱글셸 터널에서는 슛크리트가 구조적으로 최종 마감면이 되기 때문에 터널 유지기간 동안 안정성을 확보할 수 있는 고성능의 품질이 요구된다. 고성능 슛크리트는 28일 압축강도가 35 MPa 이상의 고강도(KDS 기준)가 요구되는데, 이는 고강도에 의한 지지능력 향상뿐만 아니라 동결융해, 중성화, 염해, 투수성 등에 대한 내구성 확보에도 비중을 두고 있는 것이다. Table 6에서 Case 1은 고강도 슛크리트 개발 연구(Lee et al., 2007), Case 2는 노

르웨이 Lærdal Tunnel에서 적용된(Bae et al., 2004) 28일 강도 40 MPa 이상의 고성능 슛크리트의 배합예시를 나타낸 것이다. 최근 연구에 따르면 플라이애쉬와 칼슘설펜포알루미네이트(CSA)를 주성분으로 하는 고성능 분체 혼화재(High Performance Admixture, HPA)를 개발하여 수입에 의존하는 실리카폼 사용량을 50% 이상 절감하면서 경제성과 조기 및 장기강도를 더 높일 수 있도록 하였는데(Table 6, Case 3 참조) 낙반 발생 구간, 단층대 통과 구간, 해저터널 등에 조기 안정성과 내염해성 확보 목적으로 일부 구간에 적용된 바가 있으며(Choi and Kim, 2020) 향후 싱글셀 터널에서 고성능 슛크리트로서의 활용도 기대할 수 있다.

Table 6. Example of mixing design for high performance shotcrete

Case	Slump (cm)	W/C ratio (%)	Fine aggregate ratio (%)	Weight (kgf/m ³)								
				Water	Cement	Coarse agg.	Fine agg.	Steel fiber	Silica fume	Super-plasticizer	Accelerator	Concrete improver
1	12 ± 3	43	65	207	461	564	1,004	40	19	5.76	AF (8%)	-
2	20~22	42	-	-	439	1,670		44	30	2.7	AF (7.5%)	5
3	20	35~40	55~70	183	456	603	1,127	40	24 (HPA)	5~8	AF (8%)	-

싱글셀 터널에서 슛크리트 시스템은 조강 성능을 중시하는 1차 슛크리트층, 방수성능을 갖는 뿔어 붙임 방수층, 이들과 합체되어 구조적인 기능이 충분하도록 장기적인 성능을 중시하는 2차 슛크리트층으로 구성된다. 그리고 2차 슛크리트층을 보호할 목적으로 최종 마감 슛크리트층을 시공하기도 하는데 마감층은 타설두께는 따로 설계하지 않고 미관상 매끈한 마감처리를 하는 정도로 얇게 타설한다(KICT, 2006). 고성능 슛크리트는 지반과의 충분한 부착력과 압축, 휨에 대한 저항력을 발휘하여야 하며, 균열이 발생하여도 인성이 높아 구조적으로 영구지보재로서의 역할을 할 수 있어야 한다. 또한, 장기 내구성을 확보해야 하며 수밀성이 우수해야 하고 내화학성(동결융해, 중성화, 염해)에 대한 저항성이 있어야 한다.

3.3 내부식성 록볼트

록볼트의 내구연한을 확대하는 방법으로는 부식방지 코팅이나 간격재를 이용하여 균질한 그라우팅 구근 형성을 하는 방법이 있지만, 현재 국내 NATM에서 사용하는 록볼트는 Fig. 4와 같이 부식방지 코팅이나 장치가 없으며 균질한 그라우트 충전을 위한 간격재도 없다. 최근에는 중공 철근을 이용하여 경량화를 시도하거나 부식 발생이 없는 GFRP 볼트를 적용하기도 하며 용수 구간에는 swellex 볼트를 사용하기도 한다. 그러나 국내 NATM에서 록볼트는 임시지보로 인식되는 경향이 높으므로 고성능 록볼트는 사용되지 않고 이러한 경향은 1990년대 이후로 큰 변화가 없다.

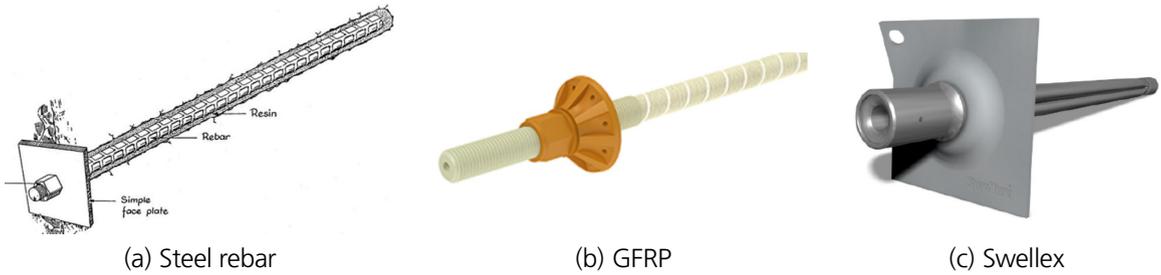


Fig. 4. Types of rock bolt used in Korea

싱글셸 터널에서 요구되는 록볼트는 지반변형에 의해 파단되지 않는 고내력을 지녀야 하며, 부식방지 처리를 하거나 부식이 되지 않는 재질을 사용한다. Fig. 5에는 노르웨이 싱글셸 터널에 많이 사용되고 있는 고성능 록볼트인 CT-bolt와 NC-bolt를 도시하였다. 최근 노르웨이에서는 록볼트 표면을 그라우트재와 PVC sleeve로 감싸 염분 침투나 균열 확장을 방지할 수 있는 NC-bolt가 많이 사용되고 있다. 싱글셸 터널에서 록볼트는 지반의 변형을 충분히 추종할 수 있도록 신장성과 파단에 대한 강도를 확보해야 하며 장기적으로 부식과 열화에 대한 저항성이 있어야 한다.

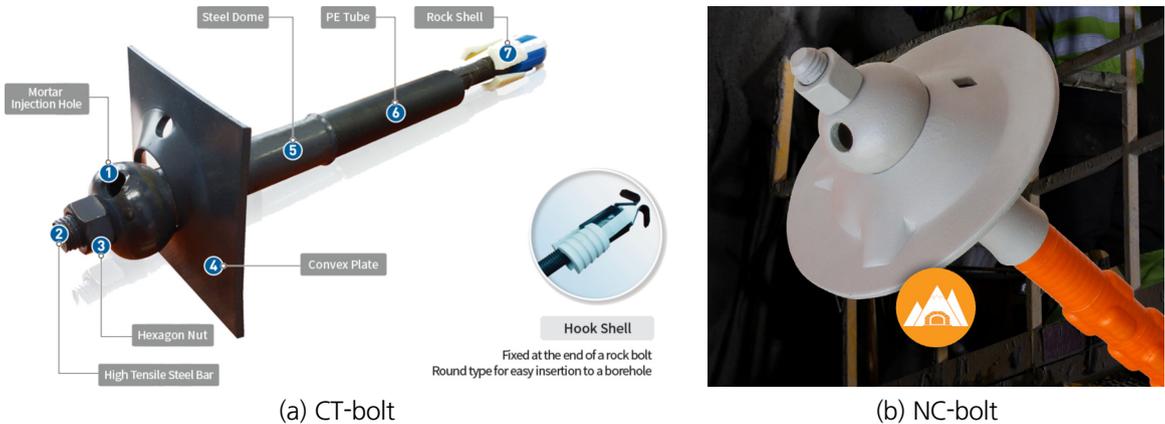


Fig. 5. Types of corrosion-resistant rock bolt

3.4 RRS (철근보강 슛크리트)

매우 불량한 지반에서는 슛크리트의 통상적인 두께만으로는 안정성 확보가 불충분하여 RRS가 이용된다. 이는 NATM에서의 강지보재 역할과 유사하지만, 여굴이 생기거나 불규칙하게 형성된 지반에도 굴착면에 밀착하여 시공할 수 있고, 철근의 규격, 간격, 개수 등을 필요에 따라 조정할 수 있는 효과적인 보강방법이다.

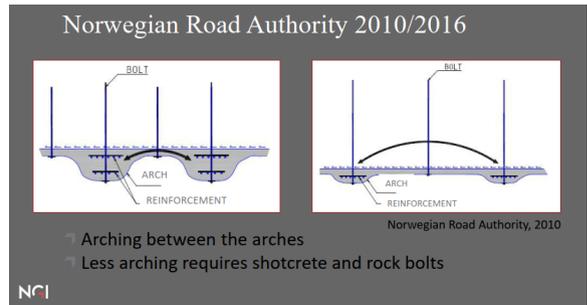
RRS에 관한 연구는 NMT에 기반하여 터널을 시공하고 있는 북유럽, 특히 노르웨이를 중심으로 주로 이루어져 왔다. 노르웨이 등 북유럽에서는 Q값이 0.01~0.1의 암반등급에 대해서 RRS로 보강을 하는데, 최근에는 Q값이 0.01 이하 등급에서도 기존의 CCA를 RRS로 대체하고 있다. NGI (Norwegian Geotechnical Institute)에서 수행한 수백 번의 실제 사례를 통하여 Grimstad et al. (2002)는 RRS가 극히 불량한 암반 등급에서도 기존에 설계 및 시공되어 왔던 전통적인 CCA를 대체할 수 있다는 것을 확인하였으며, 상세한 RRS 설계 정보를 제공할 수 있는 개선된 Q-support chart를 제시하였다.

한편, 국내에는 RRS가 터널 설계 및 시공에 반영된 사례는 없지만, 한국도로공사 도로교통연구원에서는 다소 불량한 지반조건에서 강지보재를 대체할 수 있는 RRS의 설계 및 시공법을 개발하고 직접 설계에 고려하기 위한 방법을 확립하기 위하여 자료조사, 시험실 및 현장 실험, 다양한 조건에서 수치해석 등을 수행하였으며, Q값 0.1 (RMR = 35) 부근의 지반에서 강지보재를 대체할 수 있음을 확인하였다(KECRI, 2007). Park et al. (2010)은 RRS의 휨파괴 특성을 규명하기 위하여 철근 배근 형태에 따른 휨파괴 거동 특성을 연구하였는데, 복철근 배근을 포함한 다양한 형태의 RRS 철근 배근에 대한 실내 시험을 수행하고 H-beam과 격자지보에 의한 보강효과와 비교 분석하여 국내 터널에 적합한 RRS 철근 배근 형태를 검토하였다.

Fig. 6은 RRS를 설치하는 과정과 아치효과가 발현되는 개념을 나타낸 것인데, RRS를 록볼트 및 슛크리트와 일체화할 경우 RRS 사이의 아치효과로 인해 록볼트 축력이 슛크리트 압축력으로 전환되어 파괴 시 터널 붕괴가 아닌 압착 형태로 발생하게 된다.



(a) Installation of RRS



(b) Arch effect of RRS

Fig. 6. Installation and effect of RRS

3.5 뿔어 불임 방수재

터널 내로 유입되는 지하수는 일차적으로 지반 그라우팅을 통하여 제어하는 것을 기본으로 하고 필요한 경우 하부 배수로로 유도하지만, 슛크리트의 시공 이음부이나 균열 등을 통하여 누수가 발생할 수 있으므로 NATM의 경우에는 방수시트를 시공하고 이중구조의 현장타설 콘크리트로 마감한다. 싱글셸 터널의 경우에는 Fig. 7에서와 같이 뿔칠형 방수 멤브레인(Spray Applied Waterproofing Membrane, SAWM)을 타설하고 마감 슛크리트를

시공하여 방수가 가능한 일체화된 다층구조를 형성한다(KICT, 2006). PCL 공법과 같이 내부 라이닝을 시공하는 경우에는 숏크리트와 내부 라이닝 사이의 이격 공간에 유연한 방수쉬트를 시공하여 유입되는 지하수를 바닥 배수공으로 유도하는 방법을 적용한다.

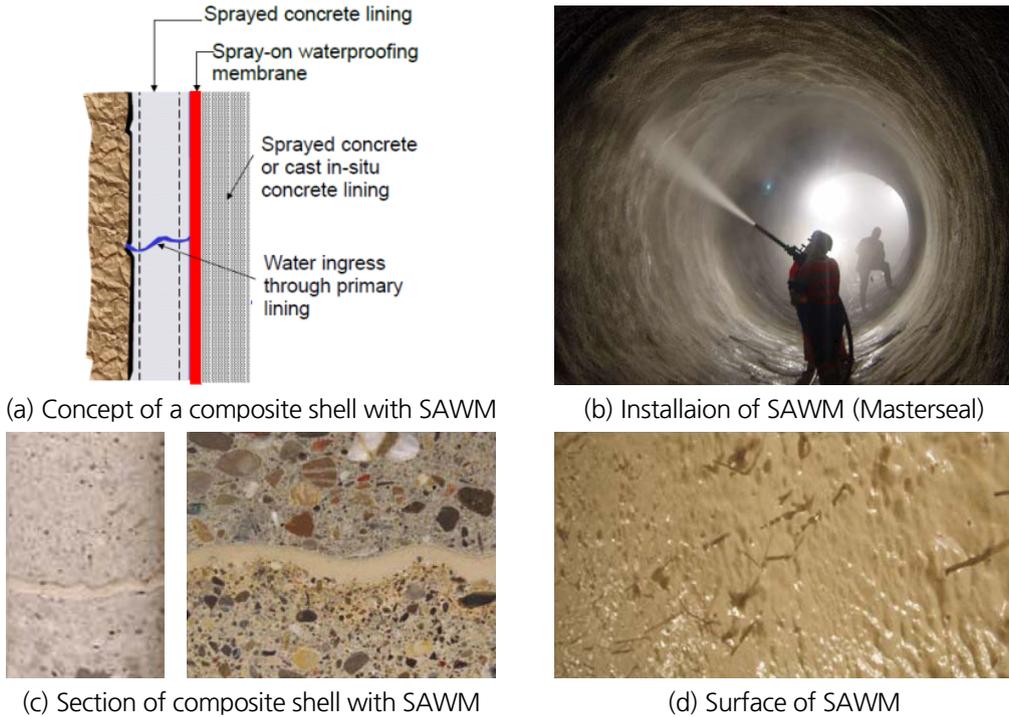


Fig. 7. Example of SAWM (KICT, 2006)

싱글셸 터널 라이닝은 자체적으로 방수체계를 포함하여 기본적으로 최종 마감층이 지하수에 노출되지 않아 터널 내부로 누수가 발생하지 않도록 하는 것을 기본으로 한다. 한국건설기술연구원에서 수행한 ‘한국형 싱글셸 터널공법 개발’ 연구에서는 유럽 싱글셸 터널에서 널리 시공되고 있는 Masterseal을 이용한 방수형식을 소개하고 있다(KICT, 2006). Masterseal은 일반적으로 3~4 mm 정도 두께로 공기압 펌프를 사용하여 뿜어 붙이며 인장강도는 약 1.5~2.0 MPa 정도이다. 또한, 이 연구에서는 숏크리트 제조 시 방수재를 혼입하여 숏크리트 자체에 방수 기능을 부여하고 도포용 방수재를 이용하여 방수하는 방법도 함께 제시하였으며, 유출수가 많을 경우는 수발공을 설치하여 터널 측벽 하부 배수로로 유도하는 방법을 제안하였다. 최근 Lee et al. (2022)은 지하복합플랜트 건설을 위해 굴착한 지반을 대상으로 고강도와 차수성을 동시에 확보할 수 있는 뿜어 붙임 멤브레인을 적용한 지보재에 대하여 실내 휨실험과 실대형 실험을 수행하여, 숏크리트 구조체가 파괴된 이후에도 멤브레인이 휨인성에 일부 기여할 수 있음을 확인하였다.

4. 싱글셸 터널 관련 국내 기준

건설관련 국가의 기준, 표준시방서, 전문시방서, 지침 등은 코드 기반으로 구축된 국가건설기준센터(KCSC, <https://www.kcsc.re.kr>)에서 확인할 수 있다. 터널 선진국의 경우 암반 상태가 좋은 곳은 숏크리트로 최종 마감하는 경우가 많으며 국내에서도 영구지보재로서 숏크리트로 마감하는 경우에 대한 요구성능이 터널설계기준(2007년)과 터널공사표준시방서(2009년)에 반영되었으며, 2023년 9월에는 KDS, KCS를 통하여 개정 고시되었다. 또한, 2010년 도로설계편람(터널편) 개정 내용에는 ‘콘크리트 라이닝’ 항목에 프리캐스트 콘크리트 라이닝(PCL) 내용이 추가되었으며, ‘싱글셸 터널’ 항목이 별도로 신설되어 이와 관련된 설계 및 시공 내용이 상세히 수록되었다. 이외에도 여러 기관의 기준 및 시방서에서도 영구지보재 개념의 숏크리트와 관련 내용이 다수 포함되어 있다. 아래 요약 내용에서 보듯이 싱글셸 터널, 즉 숏크리트를 영구지보재로 간주하여 마감하는 터널을 위한 기본 기준은 큰 틀에서 정의되어 있다고 볼 수 있지만, 교통 터널 본선에 적용한 경험이 없고 외국 환경조건과 다른 상황을 고려할 때 실제 설계에 반영되어 시공으로 이어지기 위해서는 시행착오를 최대한 줄일 수 있도록 방/배수, 내화, 고성능 혼화재료 등과 같은 세부 항목에 대한 기준이나 지침들이 보완될 필요가 있다.

4.1 터널설계기준(KDS 27 30 터널 지보재) _ 2023.9, 국토교통부

터널관련 최상위 기준이라고 할 수 있는 터널설계기준(KDS)에는 싱글셸과 관련된 내용이 다음과 같이 수록되어 있다.

- 고강도 숏크리트의 경우 재령 28일 강도가 35 MPa 이상이 되도록 배합하여야 한다.
- 숏크리트를 최종 마감재로 설계할 경우, 숏크리트 라이닝이 최종 노출면이 될 수 있으므로 필요한 경우에는 화재에 대한 안전성 확보와 누수에 대한 대책을 수립하여야 한다.
- 숏크리트를 영구지보재로 설계할 경우에는 소요의 두께와 타설층별 기능 확보를 위해 각 층별로 다른 성능의 숏크리트를 적용할 수 있다.
- 숏크리트를 영구지보재로 설계할 경우에는, 조명설비, 환기설비 및 기타 부대설비를 고정시킬 수 있도록 숏크리트의 강도와 부착 성능을 확보하여야 한다.
- 고강도 숏크리트의 적용 범위: 콘크리트라이닝을 설치하지 않는 경우...
- 록볼트의 작용 효과를 장기적으로 기대하는 경우에는 부식에 대한 검토가 필요하며...
- 터널의 장기 안정성이 확보되는 경우나 현장여건과 구조물 목적에 영향을 미치지 않는 경우에는 현장타설 라이닝을 설치하지 않을 수 있다.

4.2 터널공사표준시방서(KCS 27 30 터널 지보재) _ 2023.9, 국토교통부

2023년 9월 국토교통부에서 고시한 터널공사표준시방서(KCS)에 수록된 싱글셸 터널 관련된 주요 내용 중

KDS와 중복되는 내용을 제외하고 정리하면 아래와 같다.

- 고강도 슛크리트를 최종 마감재로 적용할 경우, 재령 28일 부착강도는 암반에 대하여 0.5 MPa, 슛크리트에 대하여 1.0 MPa 이상이 되도록 관리하여야 한다.
- 고강도 슛크리트가 마감면이 되는 경우에는 슛크리트의 안정성을 확보할 수 있는 대책을 세워야 한다.

4.3 도로설계편람(터널편) _ 2010.1, 국토교통부

2009년 도로설계편람(터널편) 개정 과정에서 싱글셸 터널 관련 내용이 많이 검토되었으며 2010년 1월에 공개되었다. 여기에는 ‘607 (콘크리트라이닝)’ 항목에 프리캐스트 콘크리트 라이닝(PCL) 설계 및 시공에 대한 내용을 추가하였는데, PCL의 역할 및 설계 순서, 재료 및 규격, 해석방법, 제작 및 운반, 시공 및 유지관리 등에 대하여 상세히 수록하였다. 또한, ‘624 (싱글셸 터널)’ 항목을 별도로 두어 싱글셸 터널의 개념, 적용 범위, 구조, 지반 평가, 지보재 설계, 마감재 설계, 마감재 형식에 따른 방수 및 배수, 유지관리, 적용형식, 설계 사례, 시공 사례 등에 대해 자세하게 정리하였다.

4.4 철도건설공사 전문시방서(KRACS 47 10 70 터널공사) _ 2018.11, 국토교통부

철도공사 전문시방서(KRACS)에서는 아래와 같이 규정하고 있다.

- 슛크리트는 일반스�크리트와 고강도스�크리트로 구분하며 슛크리트의 설치 목적에 맞게 성능과 품질을 확보해야 한다. 슛크리트의 재령 28일 설계기준강도는 일반스�크리트의 경우 21 MPa 이상, 고강도스�크리트의 경우 35 MPa 이상이고 재령 1일 강도는 10 MPa 이상이 되도록 해야 한다.
- 고강도스�크리트는 일반스�크리트 기능 이외에 다음과 같은 기능을 추가적으로 발휘할 수 있도록 해야 한다. 마감면이 되는 경우, 1차 지보재로서 굴착에 따른 지반변형을 허용범위 내로 수렴시킬 수 있는 지보특성 적합 여부 및 화재에 대한 슛크리트의 안정성을 확보할 수 있는 대책을 세워야 한다. 조명, 환기 등 기타 부대설비를 고정시킬 수 있을 만큼 슛크리트의 강도와 부착 성능이 확보되어야 한다.
- 현장조건 및 시공여건에 따라 유리섬유재질(Glass Fiber Reinforced Plastic) 록볼트, 강관 록볼트, 팽창성 록볼트 및 케이블 볼트 등을 사용할 수 있다.

4.5 콘크리트표준시방서(KCS 14 20 51 슛크리트) _ 2021.2, 국토교통부

2021년 2월 고시된 콘크리트표준시방서 ‘스�크리트’ 항목에는 영구지보재로서의 슛크리트에 대한 기준을 아래와 같이 규정하고 있다.

- 영구지보재 개념으로 슛크리트를 타설할 경우에는 설계기준 압축강도를 35 MPa 이상으로 한다.
- 영구지보재로 슛크리트를 적용할 경우 재령 28일 부착강도는 1.0 MPa 이상이 되도록 관리하여야 한다.

- 영구지보재로 슛크리트를 적용할 경우 절리와 균열의 거동에 저항하기 위하여 휨인성 및 전단강도가 우수하여야 한다.
- 영구지보재로 슛크리트를 적용할 경우에는 기본적으로 수압이 걸리지 않도록 하여야 하며, 2층 이상의 경우 기능면에서 확실한 용수처리(도수공, 유도배수공)를 하여야 한다.
- 영구지보재로 슛크리트를 적용할 경우 뿔어붙이기는 2회 이상 중복하여 뿔어붙이기로 하고, 타설 이음매가 지그재그가 되도록 뿔어붙이기를 하여야 한다.
- 슛크리트가 영구지보재의 역할을 하게 되므로 화재 및 동결에 대한 저항성을 확보할 수 있는 대책을 강구하여야 한다.
- 슛크리트가 최종 마감재인 경우 조명, 환기 등 각종 부대설비의 고정에 무리가 없도록 충분한 성능을 확보하여야 한다.

5. 국내 싱글셀 터널 적용을 위한 극복과제

노르웨이 등 북유럽에서는 일반적으로 적용되고 있지만, 싱글셀 터널을 국내에 도입하기 위해서는 극복할 과제들이 많다. 우선, 기술적 측면에서 1차 지보재(스�크리트, 록볼트, RRS 또는 강지보재)의 고성능화를 통해 영구 지보 성능을 확보하고 검증해야 하며 국내 여건에 맞는 싱글셀 구조형식과 방배수 시스템 등이 도출되어야 한다. 경제적 측면에서는 검토 시점과 적용 여건에 따라 큰 차이가 없는 보편적으로 타당한 시스템을 구성하여야 한다. 제도적 측면에서도 기준 및 시방, 지침 등의 원칙적인 규정뿐만 아니라 실제 설계 및 시공이 가능하도록 상세 내용이 보완되어야 하며 계약방식에 있어서도 지질적인 문제로 야기되는 리스크는 발주처 부담(노르웨이 NMT 방식)으로 하거나 분담하는 융통성 있는 방식이 필요하다. 또한, 인식 및 정서적 측면에서도 과도할 정도로 안전을 요구하는 사회적 분위기를 극복할 수 있는 안정성에 대한 충분한 검증과 인식 전환에 대한 설득이 필요하다.

5.1 기술적 측면

기술적 측면에서 핵심 요소는 1차 지보재가 영구지보재로서의 기능을 담당할 수 있도록 장기적 성능을 확보하는 것이다. 싱글셀 터널을 적용하고 있는 노르웨이에서는 슛크리트, 록볼트 등 1차 지보재를 임시지보재로만 간주하지 않으며, RRS도 국내의 강지보재의 역할과는 달리 록볼트, 슛크리트 등과 결합되어 영구적인 지보 역할을 하는 구조체로 고려하고 있다. 국내에서는 1차 지보재를 임시지보재라고 명시하고 있지는 않지만, 최종 마감재인 현장타설 콘크리트 라이닝 설계 시에는 1차 지보재의 열화를 고려하여 지반조건에 따라 이완하중을 다르게 산정하도록 하고 있다.

한편, 국내에 싱글셀 터널공법이 소개된 2000년대 초에는 슛크리트 강도 기준이 20~21 MPa 정도였으나, 다수의 터널 현장에서 확인한 결과는 10~33 MPa 정도로 현장별로 현저한 차이가 있었으며 기준강도가 미달하는 곳도 많았다(Lee et al., 2007). 이후, 알칼리프리카계 급결제 도입을 통한 배합개선, 장비개량, 작업자의 숙련도 향상

등으로 현재는 비교적 균질한 품질을 나타내고 있으며, 이를 반영하여 한국도로공사에서는 압축강도 기준을 28 MPa로 상향하였고, 일반 NATM 설계에서도 일부 구간을 35 MPa 정도의 고강도 슛크리트를 적용하는 프로젝트도 생겨나고 있다. 따라서 현재 국가기준에 정의되어 있는 고강도 슛크리트(35 MPa)를 안정적으로 설계 및 시공할 수 있는 기술적 수준이 확보되었다고 볼 수 있다.

록볼트는 현재 국내 NATM에서는 별도의 방식 처리가 불필요하지만, 간격재를 사용하여 천공홀 중심에 록볼트를 위치시켜 그라우트에 가능한 문힐 수 있도록 개선할 수 있으며, 슛크리트로 최종 마감을 하는 경우에는 NC-Bolt 등 고성능 록볼트나 부식방지 처리된 록볼트를 적용하는 것은 기술적으로는 어렵지 않다. RRS는 연약 암반이나 토사 구간에 유용한 지보 방법으로 슛크리트 및 록볼트와 결합되어 영구적인 구조체로서의 기능을 수행할 수 있도록 설계, 시공할 수 있으며 굴착 초기 단계에 대한 임시지보 개념인 강지보재와 달리 불규칙한 굴착면에 밀착하여 시공할 수 있고 인버트까지 폐합하여 시공하면 보다 안정적인 영구 구조체를 형성할 수 있다.

이상과 같이 1차 지보재에 대해서는 국내 싱글셀 적용을 위한 충분한 기술적 역량은 갖춰져 있다고 볼 수 있으나, 현재 1차 지보재를 영구지보재로 간주하지 않는 국내 NATM에서는 고성능의 지보재가 요구되지 않고 있으며, 그동안 축적되고 개선되어 온 기술과 역량으로 현재 기준치보다 크게 상향된 지보 성능을 기대할 수 있음에도 불구하고 기존의 기준만 따르는 설계로 인해 새로운 기술이나 공법의 확산이 지연되고 있다. 다만, 추가 연구를 통해 해결이 필요한 기술적 사항으로는 국내 기준과 여건을 고려한 싱글셀 터널의 구조형식, RRS 규격의 최적화, 방/배수 시스템 등을 들 수 있다.

5.2 경제적 측면

싱글셀 터널 중 PCL 공법과 같이 내부 라이닝을 필요로 하는 구조형식은 NATM 대비 경제성에 대해서도 크게 유리하다고 말하기 어려울 수 있다. 싱글셀 터널은 비교적 양호한 암반을 대상으로 하고 있으며 이 구간은 NATM에서 최종 라이닝을 보통 무근 콘크리트로 시공한다. 국내 실제 프로젝트 적용성 검토 당시 현장타설 라이닝보다 약간 저렴한 것으로 분석되기는 하였으나, 록볼트, 슛크리트의 단가가 기존 NATM 공법과 유사한 수준으로 적용되었으며 시장 상황에 따라 프리캐스트와 현장타설 콘크리트의 가격 변동이 클 수 있다. 그렇지만 PCL이나 PE-foam+shotcrete 같은 내부 라이닝을 설치하지 않는 단일구조 또는 다층구조의 싱글셀 공법은 구조와 방수 기능을 갖는 슛크리트로 최종 마감되므로 공사비와 공기를 줄일 수 있는 여지가 많다. 또한, 고성능 지보재의 적용으로 슛크리트의 두께나 지반보강 등에 있어서도 유리한 측면도 있다. 아울러 현장타설 콘크리트 라이닝이 설치되는 기존의 이중구조의 시스템에 비해 고품질 지보재로 구성된 싱글셀 구조는 전체 라이닝 시스템의 두께를 줄일 수 있으므로, 시공과정의 단순화, 슛크리트 두께 감소, 굴착량 축소, 공기단축 등이 가능하므로 공사비를 줄일 수 있는 여지는 많다. 그렇지만 고성능 지보재 반영에 따른 단가 상승, 방수 기능을 갖는 슛크리트 라이닝 적용, 설계 및 시공경험 부족 등에 따른 추가 비용을 포함한, 국내 조건과 시장 상황에 따른 종합적인 경제성 검토가 요구되며, 이에 기반하여 경제성이 확보된 국내 맞춤형 싱글셀 터널 시스템의 도출이 필요하다.

5.3 제도적 측면

싱글셸 터널에 대한 안정성 평가 시에는 항상 1차 지보재가 영구지보재로서의 역할을 수행할 수 있는가에 대한 우려가 따르는데, 2023년 9월에 개정된 터널설계기준(KDS) 및 터널공사표준시방서(KCS)에서 이 부분에 대한 기준이 제시되었으나 세부 사항에 대해서는 미흡한 요소가 많다. 설계 및 시공기술과 역량은 어느 정도 축적되었다고 생각되나 기준 및 시방의 상세 내용에 대한 보완이 필요하고 NATM을 기반으로 정착된 제도에 대한 개선이 요구된다. 계약방식에서도 노르웨이 NMT의 경우 예상되는 모든 터널 시공조건에 대한 단가를 구성하고 지질적인 문제로 야기되는 물량증가와 공기연장 문제는 발주처에서 모두 부담하는 방식이다. 다만 발주자는 합리적인 기술지원을 해야 하며 시공사는 입찰 시 단가로 공사비를 지불받고 시공 중에 필요하다고 판단되는 지보 변경은 획득한 Q 값을 토대로 발주처와 시공사가 합의하여 설계변경을 확정한다(KICT, 2006). 반면, 국내에서는 설계 단계에서 모든 구간에 대해 RMR 평가에 의한 지보패턴을 설계한 후 계측 및 암판정을 통해 부분적으로 지보패턴을 변경하는 방식으로 확정설계에 가까우며 압질 변화에 대해 시공사가 위험부담을 대부분 안고 가는 방식이다. 현재 상향된 지보성능과 시공기술을 영구지보 기준에 반영하여 과다 설계를 방지하고 경제적인 싱글셸 터널 도입을 위한 제도적 보완이 필요하다.

5.4 정서적 측면

NATM의 기본 개념은 터널 주변 지반이 터널을 최대한 지지하고 슛크리트, 록볼트 등은 지반의 이완을 억제하여 지반 지지력을 보완해 주는 역할이지만, 과도한 안전측 설계로 인해 현재는 1차 지보재가 임시지보재로만 간주되고 있으며, 지보재 강성 증가에도 불구하고 이완하중 등 추가되는 하중을 더 크게 반영하는 등 점점 더 안전측으로 설계가 이루어지고 있는 추세이다. 이는 터널 안정성에 대한 과도한 우려에 기인한 것이며 기술적, 구조적으로 충분한 안정성이 확보되는 경우에도 추가 비용을 감수하더라도 더 안전측으로 설계하면 보다 유리한 평가를 받을 수 있다는 믿음 때문이다. 1차 지보재를 영구지보재로 간주하고 있는 NMT와 마찬가지로 NATM에서도 1차 지보재가 영구지보재로서의 역할을 할 수 있다는 인식 전환과 더불어 이를 충족할 수 있는 지보재의 강도와 내구성을 확보하고 충분한 검증을 통하여 안전에 대한 우려를 해소할 수 있는 지보 시스템을 제안하고 설득하는 과정이 필요하다.

6. 결 언

본 논문은 북유럽을 중심으로 널리 적용되고 있는 경제적인 싱글셸 터널공법의 국내 도입에 대한 논의를 다시 시작하자는 의도로 작성되었다. 2020년 ITA 조사에서 보듯이 현재는 싱글셸 터널공법이 PSCL이라는 이름으로 전 세계적으로 많이 적용되고 있다. 국내에서도 교통 터널의 본선에는 적용되지 못하고 있지만 경사갱에 적용된 사례는 많이 있고 현재 안정적으로 운용되고 있으며, 지보재료 및 장비개선, 작업자 숙련도 향상 등의 시공기술

발전으로 고성능 지보재 품질을 안정적으로 확보할 수 있는 여건이 형성되었다고 볼 수 있다. 기술적, 경제적, 제도적, 정서적 측면에서 공감대가 형성된다면 국내 적용을 주저할 이유는 없는 것 같다. 이에 그동안 전문가들이 수십 년 동안 열정을 다해 연구해왔던 싱글셸 터널공법의 국내 적용을 다시 한 번 적극적으로 논의했으면 한다. 우선, 그동안의 연구 결과를 실제 프로젝트에 바로 적용하기보다는 시험적용을 통하여 국내 시공여건을 점검하고 혹시 있을지 모르는 문제에 대한 대응도 미리 만들 필요가 있다. 그리고 지반조건이 양호하고 지하수 유입이 적은 산악터널에 우선 적용하면서 도출된 문제점에 대한 보완기술을 개발하고 충분한 검증을 거친 후 점차 확대하는 방안을 제안한다. 진동 및 소음의 환경피해를 줄이고 효율적인 굴착을 위한 TBM 등의 기계식 터널 굴착공법 적용을 확대하는 것도 국내 터널기술 발전의 중요한 추세이지만, 지금까지 국내 터널 분야에서 너무나도 익숙하게 설계, 시공되어 왔기에 때로는 기술이 정체된 느낌마저 드는 NATM 공법을 최적화하고, 특히 연약지반이나 저토포 도심공사 등 기존 개념으로 접근이 어려운 조건에서도 활용할 수 있는 새로운 개념, 공법, 기술에 관한 연구와 도입에 적극적으로 대응하는 것이 터널기술자들의 의무가 아닌가 생각한다.

저자 기여도

이상필은 개념 및 자료 분석과 원고를 작성하였고, 하희상은 데이터를 수집하고 정리하였으며, 김동현은 데이터 편집과 원고를 검토하였다.

References

1. Bae, G.J., Chang, S.H., Lee, S.W., Park, H.G., Lee, M.S., Kim, J.K. (2004), "Recent issues in the design and construction of high-performance shotcrete lining", Tunnel and Underground Space, Vol. 14, No. 1, pp. 1-15.
2. Choi, M.S., Kim, J.T. (2020), "A method for high strength and durability shotcrete using eco-friendly alkali-free accelerators and high performance powder admixture", Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol. 32, No. 3, pp. 39-45.
3. Grimstad, E., Kankes, K., Bhasin, R., Magnussen, A.W., Kaynia, A. (2002), "Rock mass quality Q used in designing reinforced ribs of sprayed concrete and energy absorption", Norwegian Geotechnical Institute, pp. 1-18.
4. ITA Working Group No. 12 and ITAtech (2020), Permanent sprayed concrete linings, ITA Report No. 24, pp. 1-55.
5. Jung, D.H., Jeong, C.M. (2016), "A basic study for single shell support system of railway tunnel", Journal of the Korean Geo-environmental Society, Vol. 17, No. 1, pp. 39-48.
6. KECRI (2007), Development of the design and construction method of rib reinforced shotcrete, Report No. RT-GE-07-13, Korea Expressway Corporation Research Institute, pp. 1-163.
7. KICT (2006), Development of the Korean single shell tunnelling method, Report No. R&D/03A01-06,

Korea Institute of Construction Technology, pp. 1-331.

8. Lee, C.H., Jang, S.H., Choi, S.W., Kang, T.H. (2022), “A study on strength characteristics of high-performance shotcrete according thin spray-on liner”, Proceedings of the KSCE 2022 Convention, Busan, pp. 96-97.
9. Lee, S.P., Ryu, J.H., Lee, S.D., Jeon, S.W., Lee, C.I. (2007), “Performance improvement and durability evaluation of shotcrete for permanent tunnel support”, Tunnel and Underground Space, Vol. 17, No. 4, pp. 266-284.
10. Park, Y.J., Lee, J.K., Noh, B.K., You, K.H., Lee, S.D. (2010), “Flexural behavior of reinforced ribs of shotcrete for various configurations of reinforcements”, Tunnel and Underground Space, Vol. 20, No. 3, pp. 169-182.