

남극 극지점 기지에서 얼음 터널 프로젝트

지 왕 룰¹⁾

Snow Tunnelling Project at the South Pole

Wang Ruel Jee

Abstract. The United States Antarctic Program (USAP) through its principal Support Contractor Raytheon Polar Services Co. (RPSC), has recently finished a 3 years projects, almost 936m length of underground utility tunnels at Amundsen-Scott station. It accommodates the piping that conveys fresh water from current well sites, as well as waste water to repositories in abandoned wells. The under snow tunnels allow year-round access for system operations and maintenance.



1. 서 론

미국의 남극 극지 프로그램에 따른 지하 터널구조물

¹⁾Department of Mining & Geosystem Engineering, Colorado School of Mines, USA

접수일: 2002년 10월 18일
심사 완료일: 2003년 2월 5일

시공에 대한 사업이 주시공자인 RPSC(Raytheon Polar Services Co.) 에 의해서 지난 3년간 936 m에 이르는 지하 다용도 터널의 공사가 미국의 아문젠-스코트 남극극지 기지에서 이루어 졌다. 이터널의 굴착으로 년 중 내내 기지의 유지관리와 시스템운영이 가능해 진것이다. 터널선형의 내부구조는 전적으로 무라이닝과 무지보설계로 되어 있으며, 얼음터널의 단면은 직사각형

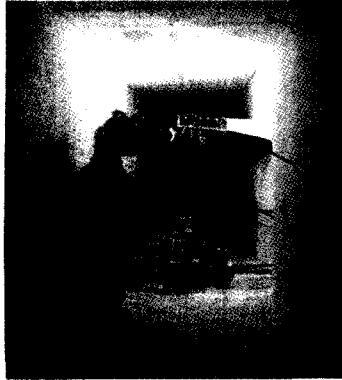


Fig. 1. Side view of the ice cutter at the Amundsen-Scott station.

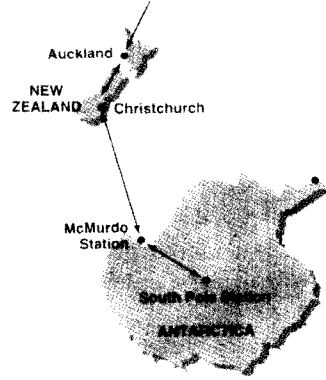


Fig. 2. Supplies and personnel route through New Zealand, to the South Pole.

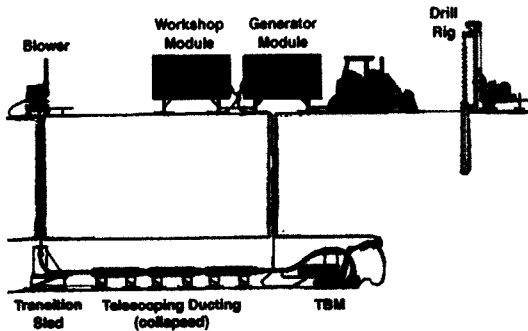


Fig. 3. Schematic View of the CRREL tunnelling system.

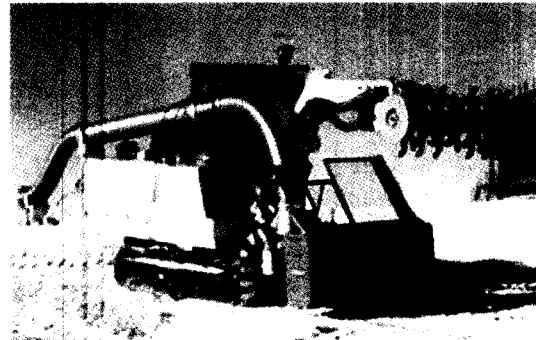


Fig. 4. The CRREL tunnelling machine.

으로 폭 1.8 m x 높이 3.0 m로, 터널 심도는 지표하 6 m내지 14 m이다. 사고시 도피로 및 구조용 수갱의 직경 1 m의 크기로 Raise Bore를 이용하여 시공되었다.

터널 굴착 대상인 지반은 매우단단한 만년설 얼음지대로 평균밀도 0.5 g/cc이며, 조직상으로 균질하며, 매년 적설된 얼음층 외는 이물질도, 파쇄대도 전혀 없는 이상적인 상태이다. 폐쇄된 터널내에서 터널내 순환 온도는 터널벽과 같으며, 이는 -50°C로 측정되었다.

터널굴착 방법은 기계굴착과 인력굴착으로 되어 있고, 특수 TBM장비가 미공병단의 극지연구소에서 개발되어 현지 시험을 거쳐서 현장에 투입되었다.

전시공 과정을 걸쳐서 무사고 안전율 100%를 자랑하였다.

2. 왜극지에 터널을 시공하는가?

Amundsen-Scott 기지는 정확하게 남극 극점주변에 위치하고 있다. 기지는 남극의 극지분지에 위치하며, 해발 2,800 m의 고지대이다. 이지역은 상부가 대부분 얼

음으로 덮여있다. 이중 상부 92 m가 눈과 만년설로 구성되어 있으며, 기지주변의 온도는 -83°C에서 -14°C이며, 연간 적설량은 평균 200 mm이다. 따라서 남극극지대는 세계에서 가장 높고, 건조하고, 추운지역이라 할 수 있다.

이러한 외진 위치 때문에 남극극지 기지는 세계에서 가장길고, 어려운 물류 수송라인을 갖추고 있다. 예를 들면, 미국을 떠난 수송물품은 뉴질랜드까지 운송되며, 남극대륙 해안부근 Ross섬에 위치한 미국 McMurdo기지로 옮겨진 후에 다시 항공편으로 남극 극지점으로 운송되고 있다(Fig.2).

통상 조달준비는 2년전에 계획된다. 극심한 기후와 문명세계로 부터 외진 위치 때문에 남극극지점에서의 주요 건설 활동은 년 중 짧은 여름 3개월, 즉 10월 1일부터 2월 15일까지 제한적으로 이뤄진다. 이기간 동안에 사업 수행에 필요한 장비의 이동과 해체를 매년해야 한다. 미국정부는 1956년 이후 남극 극지점에서의 연구 활동을 계속해 오고 있다. 특히 국제 지구물리의 해에 일종의 영구 기지를 이곳에 설치하였다. 현재 그기지는

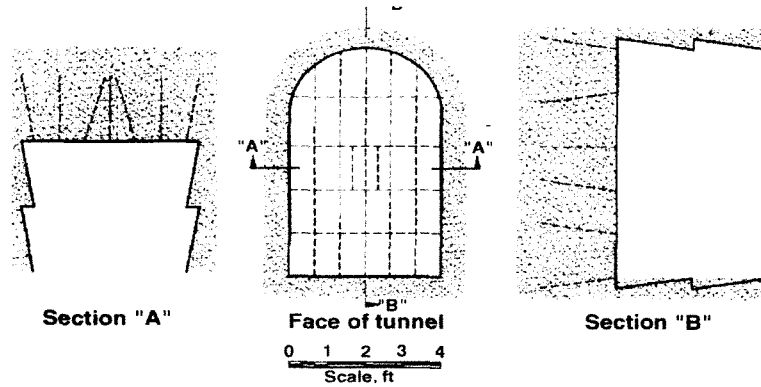


Fig. 5. Manual face tunnelling pattern.

구기지라 불리며, 새로운 기능의 기지가 0.4 km 떨어진 곳에 1972년에 설치되었다. 이 두번째 기지도 이제는 너무 구식이 되었다. 현재 국립과학재단 (NSF)의 지원을 받는 USAP는 새로운 제3세대형의 남극기지지를 건설 중에 있다. 현재 새로운 기지건설을 위해서, 기존 기지의 설비와 장비등을 이용할 필요가 대두되었다. 이러한 새로운 기지 건설과 관련하여, RPSC는 만년설내의 터널로 완벽한 연결통로를 갖추어, 식용수 운반용 파이프, 폐수 운반용 파이프 설치, 터널내 조명설치, 전기 설비 설치, 및 작업용 통로로써의 기능을 터널을 이용하여 설치하였다.

식용수 파이프를 통해서, 현재와 미래의 우물관정에서 새기지로의 상수도 공급이 가능해 진다. 이 식용관정은 얼음층내로 지표에서 60 m정도 시추하여 설치하며, 기지내의 폐열을 이용하여, 얼음을 녹여, 전구형태의 관정우물을 만들어 사용한다. 물의 사용량에 따라, 관정인, Bulb의 크기는 직경 30 m에서 120 m까지 확장되며, 물을 다 퍼낸 후의 빈공간은 폐수 저장시설로 활용된다. 이 때 기지로 부터 폐관정까지의 폐수운반은 터널내의 파이프를 이용한다. 현재의 물사용량을 고려할 때, 각관정의 수명은 7년이고, 현 터널네트워크를 이용하여 2050년까지 활용할 수 있다. 만년설내의 얼음터널의 건설은 지표의 이용을 극대화하고, 일년내내, 외부의 기상변화에 변함없는 안전한 장소를 제공한다.

3. 터널의 시공 및 주변 지반상태

현재 건설된 얼음터널은 본선 연장이 568 m이고, 현재 기지에서 3% 경사로 145 m 전진한 후 90도를 꺾어서 -1% 경사로 굴진되어 있다.

토퍼는 갱구부에 6 m정도로 천부상태이며, 최대 심

도는 14 m이다. 직경 1 m의 수갱이 Raise Bore를 이용하여 굴착되었고, 지상부는 뚜껑이 설치되어 있고, 사다리를 통하여 상부로 대피할 수 있다.

굴착대상 지반은 만년설(Firm)이며, 결정질얼음이 아닌 밀도가 높은 눈이라 할 수있다. 터널의 심도에서 밀도는 0.5 g/cc이며, 반면에 결정질 얼음은 0.92 g/cc를 나타내고 있다. 터널심도에서의 Firm은 조직이 균일하고, 파쇄가 없고, 다른 불순 유기질등이 함유 안된 이상적인 터널 재질이다. 또한, 압축강도는 14 kg/cm²로 좋은 편이다. 따라서, Chainsaw와 Auger Bit가 굴착에 사용되었고, 비트의 마모현상은 발견되지 않았다. 0.6 m 크기의 얼음블록이 체인톱으로 잘려 나갔고, 터널내에서 측정된 온도는 -50°C이었으며, 여름에는 외부의 더운 공기가 터널내로 유입되어, -32°C로 측정되었다. 이때 만년설의 온도는 -37°C로 측정되었다.

일반적으로 만년설은 정적인 상부 하중에 의해서 느리고, 소성적인 압착에 의해서 변화한다. 1.8 x 3 m의 직사각형의 터널단면은 계측결과, 수직으로 10~50 mm 변위가 있었고, 수평으로는 10~30 mm의 변위가 측정되었다. 암반터널에서의 압착현상 (Squeezing)과는 달리 얼음터널에서는 Spalling, 파쇄, Burst를 동반하지는 않았다.

특이한 점은 남극점에서 1년에 1 m정도의 변위가 일어나도 터널 선형상의 어떤 심각한 처짐현상도 일어나지 않았다.

일찍이, 재료 강도 시험(Sodhis, Rand,Tobiassn; 1993)을 통해서 주어진 안전 가이드라인 에 따라 최대 폭1.8 m의 터널굴착이 요구되었다. 또한 깊이 6.5 m, 밀도 0.5 g/cc의 만년설에서 터널은 지상의 LC-130 수송기나, 28톤의 D-7H 캐터필러 볼도져가 터널상부에 지나가는데 큰 문제가 없어야 했다. 프로젝트 현장에서 눈의

재질과 밀도는 수직 분포상 균일하지는 않았다. 반면에 심도에 따라 점차적으로 밀도의 변화가 예상되었다.

1998~1999년에 시험을 거쳐 수정 보강되었다.

4. 터널굴착공법의 현지시험

남극극지점에서는 터널의 본격적인 본공사에 앞서서 기계화 시공과 기존의 Conventional 터널공법이 함께 현지에서 적용시험을 실시되었다.

기계화 굴착 장비는 미공병단의 극지연구소에서 개발한 Continuous Miner로써, 특수 굴진기계로써 Tractor 위에 탑재하였다. 장비는 전자식 유압시스템에 노벨절삭드럼, 압축공기식 얼음조각 분산기등을 갖추었으며, 1995~1996년, 과 1996~1997년 여름에 시험 가동되었다. 시험터널은 120 m를 굴진하여 성공적이었다. 다시

5. CRREL 시스템

본남극극지 기지 터널 프로젝트에 사용된 굴착 시스템은 1950년대말에서 1960년대초 그린랜드에서 적용되었던 시스템을 개선한 것이다. Joy-3 Continuous Coal Miner로써 버력 처리를 위한 Shuttle Car를 달았고, 후에 Russel Miner로 명명되었다. 이장비에는 붙이 탑재된 절삭기구와 Chip제거를 위한 압기식 Vane-Axial Booster Fan이 달려있다. 강제 환기는 33kW의 Centrifugal Fan 1대가 설치되었고, CRREL 시스템은 5개의 Subsystem으로 구성되어 있다. 즉, TBM, 압기식 Chip Disposal System., The Drill Rig, Generator

Table 1

Mechanical advance, time.

Season	Duration (weeks)	Operational time, %	Down time, %	Standby time, %	Total time on machine
1999-2000	9	39	51	10	846 hr
2000-2001	9	35	57	8	926 hr
2001-2002	10	42	31	27	906 hr

Table 2.

Mechanical advance, meters (feet).

Season	Total mechanical advance	Average weekly advance	Average advance/operating hour	Best shift	Total reaming advance
1999-2000	294 (964)	32.6 (107)	0.9 (2.9)	10.4 (34)	24 (80)
2000-2001	287 (940)	31.7 (104)	0.9 (2.9)	7.9 (26)	86 (283)
2001-2002	290 (951)	28.4 (93)	0.8 (2.5)	9.4 (31)	7 (24)

Table 3.

Manual advance, meters (feet).

Season	Heading	Dimension	Length max tram length	Shifts	Average advance/shift
1999-2000	Main tunnel	1.2 x 2.1 (4 x 7)	24.4 (80)	3.3	7.3 (24)
2000-2001	Main tunnel	1.2 x 2.1 (4 x 7)	86.3 (283)	14.7	5.9 (19.2)
2001-2002	Tunnel A	1.2 x 2.1 (4 x 7)	7.3 (24)	1.0	7.3 (24)
	Tunnel B	1.8 x 2.7 (6 x 9)	20.1 (66)	8.6	2.3 (7.7)
	Tunnel E	1.2 x 2.1 (4 x 7)	45.7 (150)	6.1	7.5 (24.6)

Module과 workshop Module로 구성되어 있다.

TBM은 Transverse Type의 회전형 로드헤더로서 폭 1.8 m x 0.6 m 직경의 절삭드럼이 뿔끝에 달려 있다. 드럼에는 26개의 암(Arm)이 달려있고, 방향이 비틀린 상태로 되어 있고, 1.8 m x 3 m 규모의 평면 절삭이 가능하다.

Skid에 설치된 발전기는 205kVA 터보엔진을 갖추고 있다. 터널의 굴진 기록은

Table 1, 2, 3을 참고토록한다.

공사 초기에는 현장 기술자들의 흡연이 문제시 되었으나, 모두들 안전 규정을 잘 지켜 주어, 아무런 안전 사고 없이 굴진이 훌륭히 이루어 졌다.

앞으로 한국도 남극이나 북극에서의 연구기지 개발시, 기존 남극의 세종기지와는 달리 보다 효율적인 얼음터널 공법의 적용도 고려해 볼만하다고 본인은 결론 지게 되었다.

6. 결 론

최근에 발표된 미국정부의 남극내 남극관통도로의 개발계획은 또다른 미국의 남극정복에 대한 야심을 엿볼 수 있으며, 현재 남극횡단고속도로 (Traverse Highway)라 명명된 도로의 건설주체는 미국정부이며, 공사기간은 5년으로 예상하고 있다. 지구상에서 가장 험하고 외로운 길이 될 이도로의 총길이는 990마일 (약 1600 km)에 달하며, 과학자 주둔지역인 맥머드 사운드에서

시작해 극점의 스콧 아문젠 기지까지 이어진다. 도로는 두꺼운 얼음층과 눈이 바다위에 첩첩이 쌓여 이뤄진 로스 아이스셸프 (Rose Ice Shelf)를 건넌다. 이어 알프스 만큼 높은 산들로 이뤄진 트랜스 아틀랜틱 산맥을 넘어 약 3048 m 높이의 얼음층을 지나 극점에 닿는다. 캐터필러형 트랙터가 주로 8마일의 속도로 주행하게 되며, 10일 정도 걸려서 극점에 도달하게 될 것이다. 그럼에도 도로가 개설 되면, 항공으로만 접근이 가능했던 극점 지역 스콧 아문젠 기지의 연중 가동이 가능해지고, 남극연구의 획기적 발전이 기대되며, 미국은 극점까지의 광케이블 설치도 계획중에 있다. 미국이 남극의 막대한 지하자원을 선점하고, 지구상 금단의 땅을 훼손할 것이라는 환경단체의 반발도 있지만, 주인 없는 땅을 마냥 지켜만 보고 살 수 만을 없을 것이고, 우리도 부족한 자원 획득과 생태계연구를 위해서, 우리의 남극 기지도 남극 대륙내로 이전해야 하고, 이 때 터널 공법을 이용하여, 기지를 건설하는 것도 필요할 것이라는 생각을 하게 되었다.

Reference

1. John H. Wright, & Eivind Jensen, Snow Tunneling at the South Pole, Mining Engineering of SME, September 2002.
2. The times, Development of Traverse Highway in South Pole, 22th, Jan, 2003.