

남극대륙 빙판내의 터널건설

박철환

한국지질자원연구원 탐사개발연구부

1. 서 론

미국에서 지구의 극지방에 공공사업으로 얼음이나 눈 속에 터널을 건설하는 계획은 1950년대부터 시작되었다. 이는 즉시 북극 그린랜드에 성공적으로 완수되었으며, 최근에는 보다 더 기계화된 터널장비로서 남극에도 시도되었다. 남극은 19세기초부터 바다표범 사냥으로 미국 어선들에 의해 발견되었는데, 그 중의 한 선장인 파머(Nathaniel B. Palmer, 1799~1877)는 1820년에 남쪽의 새로운 땅을 보았다고 주장했다. 그 후 미국의 윌크스 중위(Charles Wilkes, 1798~1877)는 남극해안선을 따라 탐사작업을 지휘했으며, 20세기에 버드(Richard E. Byrd, 1888~1957)는 1926년 북극점을 정복한 후 1929년 비행기로 남극점을 정복했다.

미국은 이러한 탐험가들의 이름을 딴 여러개의 기지들을 NSF의 OPP(국립과학재단위원회 極地計劃室, Office of Polar Program in National Science Foundation)를 통하여 운영하고 있는데, 1986년 여름철에는 1500명 이상이 연구계획에 참여한 바 있다. 이중 기상 및 빙하, 지질분야 등의 과학자 수는 330명이었으며, 겨울철에는 14명만이 참여하였다. Fig. 1은 2000년 현재 남극대륙에 운영되는 80개의 永久基地 및 夏季基地의 위치를 표시한 것이며, 그 중 36개는 그림의 왼편에 있는 남극반도에 위치하고 있다. 반도에 속하는 King George 섬에는 9개의 기지가 있는데 우리나라의 세종기지(King Sejong Station)도 여기에 있다. 미국은 많은 기지들을 다른 나라로 넘기고 남극반도의 파머기지(78S, 1955), 남쪽의 맥머도기지(70번, 64S, 1965) 그리고 남극점에 위치하는 남극점기지(60번, 90S, 1957) 등, 지금은 3개의 기지를 운영하고 있는 것으로 알려져 있다.

본 보고문은 미국의 기지에서 설치한 지국들을 연결하는 도로시설을 빙판 내에 터널로 개설하는 기술기사를 소개한 것이다. 이는 영국의 터널협회에서 발행하는

“Tunnels & Tunnelling International” 2001년 7월호에 南極報告라는 제목 아래, “Breaking the ice at the South Pole” 부제로 주로 굴착체계와 장비의 문제점에 관하여 설명하고 있다. 그리고 이는 2001년도 “Rapid Excavation and Tunnelling Conference” San Diego 학술대회에서 미육군 극한지역연구실 소속의 Michael Walsh 등에 의하여 발표된 “A TBM at the South Pole” 연구보고서를 편집한 것이다. 이를 소개하는데 부수적으로 필요한 첨언자료는 kesti.co.kr, thuleab.com, nsf.gov, comnap.aq 등의 www site들로부터 참고된 것이다.(譯者 註)

미국의 남극점기지(*정식명칭은 Amundsen-Scott South Pole Station)는 시설물을 운영하는데 어려운 도전을 많이 겪고 있다. 바람에 의한 냉기로 인한 극단적인 저온을 비롯하여, 남양의 길고 긴 밤의 어두움, 표류하는 눈덩이가 그러하다.

지난 40여년 동안 극지방에서 공익사업의 하나인 터널건설계획은 지속적으로 추진되었다. 미국의 NSF는 미육군 CRREL(Cold Regions Research and Engineering Laboratory)로 하여금 남극점기지에서 사용할 터널체계를 구축하는 임무를 부여하였다. 현재 남극에서 사용되고 있는 남극점기지의 터널체계는 이러한 연구작업의 결과이다.

2. 배 경

극한지방에서 여러 형태의 터널건설은 새로운 것도 아니며 비범한 것도 아니다. 미육군은 얼음이나 눈 속에 터널을 건설하려는 연구는 50년대에 북부 그린랜드에서 처음으로 심도있게 이루어졌다. Camp Tuto 및 Camp Century 그리고 Distant Early Warning(*구소련에서 발사된 탄도미사일의 조기경보체계기지)에서 얼음 지붕을 가진 레이더 기지국들은 모두 터널로 연결되어 있다.

괄호 내의 *표시는 譯者 註

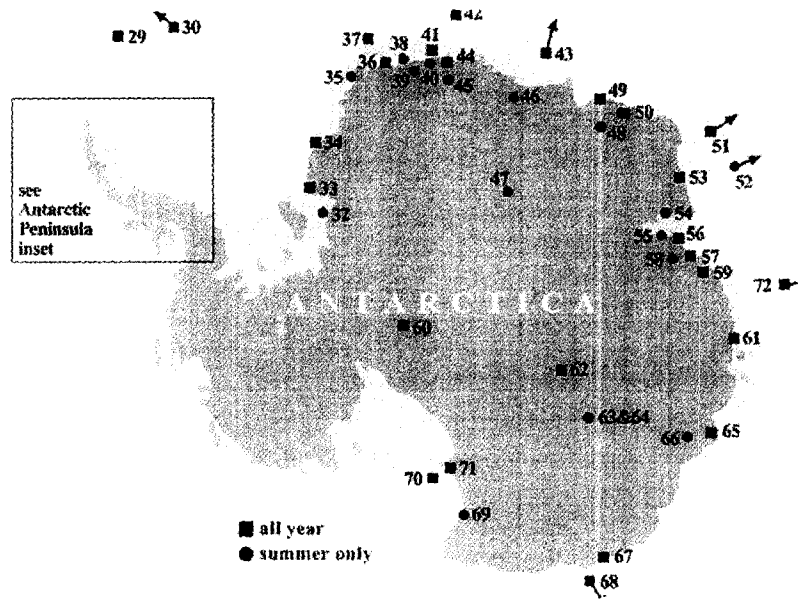


Fig. 1. Operating stations in the Antarctic (after COMNAP).

Thule AFB (*Thule Air Base, 하단참고)에 인접한 Camp Tuto(*Thule Take Off의 약자로 이루어진 이름)에서 여러 개의 터널이 1957년 경암용 광산장비를 개조한 굴착기로 얼음 지붕 안까지 굴착되었다. 이들 터널들은 초기에는 빙판 내에서 건설되었는데 대부분이 지주나 라이닝이 설치되지 않았다. 중장비를 사용했음에도 불구하고 많은 노동인력이 투입되어 건설되었으며, 버럭처리에는 작은 광산용 전동기차가 이용되었다.

Thule AFB 북동쪽에 위치한 Camp Century(*Thule로부터 100 마일 떨어진 지역에서 유래된 이름, 77 N, 고도 6200 ft)는 미육군에 의하여 1960년에 구축되었는데, 초기에는 북개공법으로 굴착되었다. 기본적으로 대형의 氷雪 粉碎機를 사용하여 트랜치를 개설하고, 주름 있는 금속체 지붕을 타설한 다음, 이를 뒤채움하여 터널을 형성하였다.

이러한 지표 부근에 적용한 금속체 지붕은 두가지 형태가 사용되었는데, 弦狀의 지붕은 직경이 크면서 2~4 m 크기의 짧은 간격을 갖고 있으며 눈으로 뒤덮인다. 경우에 따라서 뒤덮인 눈이 경화된 뒤에 금속지붕을 제거하였는데 이 때는 완전히 무지보 상태가 된다. 또 다른 형태는 Wonder Arch라고 불리는 커다란 반원형으로 터널의 측벽과 지붕을 형성하고 있다. 이는 보

다 영구적인 구조물이며 큰 규모 때문에 한번 묻히면 쉽게 제거될 수 없는 것이다. Wonder Arch의 간격은 19 m 이상이다.

국제 물리탐사의 해인 1956년 이후, 남극에 기지를 건설하는데 그린랜드에서 개발된 기술이 지하식 구조물을 구축하는데 적용되었다(*subsurface는 지하로 해석되지만 본보에서는 빙설의 내부를 뜻함). 그러나 불행하게도 그린랜드에서도 부분적으로 라이닝된 터널에서 야기된 문제들이 역시 일어났다. 첫째 문제는 강한 구조물의 침하현상과 이로 인하여 지속적으로 발생하는 파괴현상이다.

따라서 라이닝 터널로 개념을 전환하였는데 무라이닝을 구축한 방법들이 다시 조사되었다. CRREL은 1963년에 Russell Miner를 개발했는데 이는 특별히 눈과 얼음 속을 굴착하는 TBM이다.

이 장비는 비록 눈 속에서 제법 효과적인 작업을 수행하였으나, 버럭운반용 공압식 장비는 결빙되어 운전정지가 빈번하였다. 1965년에 그린랜드의 Camp Century에서 시운전을 거친 후에 이 계획은 폐지되었다. 어쨌든 이러한 일련의 작업들은 현재의 남극점 기지에 시도될 굴착에 대한 개념을 정립하는데 많은 교훈을 제공하였다.

*Thule Air Base는 1951년 미국 정부가 구축한 군사적 전략기지이다. 그린랜드 서해안에 있는 North Star Bay 항구로부터 6 km 떨어져 있고 북극점으로부터 남쪽 1440 km 지점에 위치한다. 여기에는 여러 개의 camp가 있으며 대형 연료 탱크와 지원시설은 4천명을 수용하는데, 냉전시대에는 한 때 1만명 이상이 거주하였지만 오늘날은 군인을 포함하여 불과 800명 정도가 상주하고 있다.

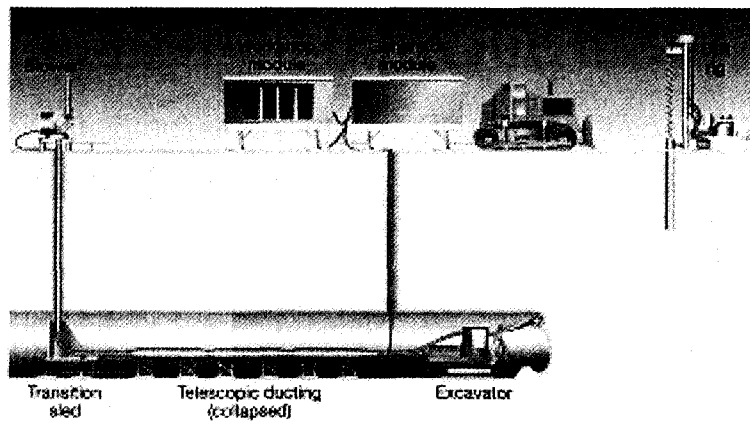


Fig. 2. Operations diagram of the South Pole tunnelling system.

3. 남극점 터널체계의 개요

CRREL의 남극점 터널의 굴착체계는 초기에 Fig. 2와 같이 굴착기계 및 버럭처리, 천공장치, 발전기, 공작소 등의 5개 주요 부속체제로 구성된 턴키사업이었다. 굴착기계는 만년설 또는 매우 강력하게 다져진 눈을 굴착할 수 있도록 설계되었다. 이러한 굴착체계는 현재 적용되고 있어 여기에 소개하고자 하며, 앞으로도 지속적으로 연구개발되고 있다.

굴착체계는 최대 심도가 16m에서 작동되도록 설계되었다. 터널 내에서 작업온도는 -50°C 이며, 굴착속도는 $2\text{m}\times 3\text{m}$ 크기에서 $6\text{m}^3/\text{hr}$ 를 목표로 하였다. 교대조마다 투입되는 작업인부의 수는 굴착장비기사, 천공기사, 지표장비 운전공 그리고 감독자 등으로 4명으로 예상된다. 작업이 11월부터 1월까지 겨울철의 짧은 기간 동안만 이루어지므로 10시간씩의 2 교대로 매일의 작업이 수행되었다.

Fig. 2에서 보듯이 굴착작업에서 버럭처리하는 송풍장치와 통로를 개설하는 천공장치는 지표에 설치되는 반면에 굴착기와 버럭운송관은 지하에서 설치운영된다. 굴착기가 터널 막장면에서 굴착작업을 수행하면 버럭은 막장면 바닥에 쌓이게 된다. 굴착기 전면에 큰 규모로 부착된 송풍기(snowblower)는 버럭을 송출관의 기류 속으로 보내는 작업을 수행한다. 굴착기 후면에는 멀리에서도 보이는 일련의 운송관이 조립되어 있고 수직 운송관으로 연결된다. 지상에서는 굴곡성 호스와 여러 길이의 수평 운송관이 수직관에 연결되어 버럭을 일정장소로 운반처리한다. 천공장치는 수직공을 뚫어 운송관 뿐만 아니라 지하 장치들이 사용할 전력을 공급할 전력선 설치를 가능하게 한다. 발전기는 지하의 장비 외에도 지

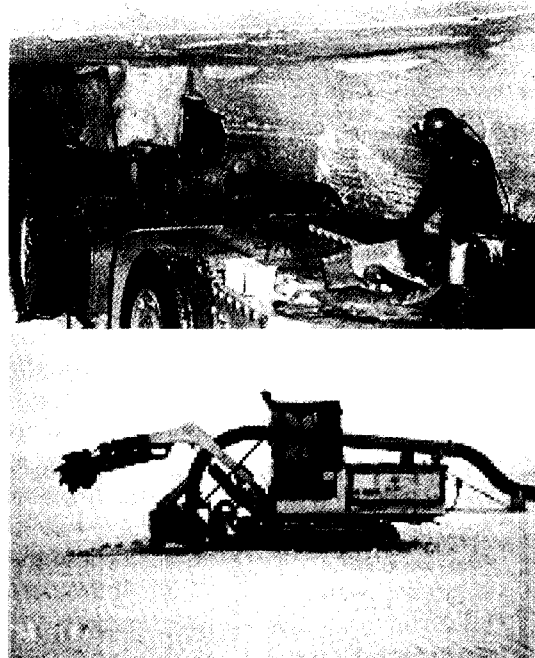


Fig. 3. Joy 3 continuous coal miner in Greenland(upper) and hydraulic excavator as a basis of tunneller in the South Pole.

상의 원심분리형 송풍장치 및 공작소에서 사용할 전력을 공급한다. 공작소는 작업기지임과 동시에 장비들의 사소한 보선작업을 수행하는 곳이다.

4. 굴착장비

굴착기는 Fig. 3에서 볼 수 있는 횡방향으로 회전가능한 연속채광기(transverse rotational continuous miner)



Fig. 4. Cutting drum of the excavator.

를 기본으로 하여 설계되었다. 이는 현존하는 디젤유압식과 상대되는 전기유압식 전동함(electrohydraulic powerpack)을 갖춘 소규모의 상업적 유압식 굴착기이다. 장비는 지하작업을 목적으로 전부 전기식이며, 지상의 디젤발전기에 의한 전력공급으로 운영된다. 붐의 선단에 있는 절삭봉은 유압식 절삭드럼으로 교체되었다.

절삭드럼은 Fig. 4와 같은데 15도 경사지게 배치된 26개의 날개가 달려있다. 각 날개에는 폭이 1 mm이고 11도의 clearance(*비트의 背面角), 24도의 top rake(*비트의 前面角)를 갖는 편평한 날들(flat teeth)로 구성된 커터들이 달려있다. 커터의 크기는 50 mm부터 76 mm 까지 다양하며, 날개들은 직경이 406 mm부터 432 mm 크기인데 직선적 작업이 가능하게 배치되었다. 절삭드럼은 7:1 감속기로서 저속 및 고회전력을 발휘할 수 있는 유압모터(axial vane hydraulic motor)에 의해 작동된다. 21개 및 25개의 치차를 가진 감속기에는 2 m 길이의 드럼축과 저용량 체인으로 결속되어 있다.

절삭면에서 절삭파편은 승강이 가능한 부가적 구조물에 부착된 1.8 m 폭의 송풍기에 의하여 모아진다. 모여진 버력의 중심에 위치한 auger는 처리장치의 기류 내로 보내줄 수 있는 추진날개로 버력을 이송한다. 이후 버력은 직경 250 mm 크기의 고정관과 신축관들을 통하여 주 버력장치로 보내진다.

전기유압식 전동함은 직렬로 장착된 두 개의 기어펌프를 갖는 37 kW 용량의 전기모터로 구성되어 있다. 한 펌프는 굴착장비의 조정기 및 견인장치와 승강장치에, 다른 펌프는 송풍장치와 절삭드럼을 구동시키는 동력을 제공한다. 드럼펌프의 출력은 17 MPa에서 16 kW이며, 드럼에서의 회전력은 100 rpm에서 1 kNm로서 이론적으로는 비효율적인 것이다. 절삭에 요구되는 6 kW 상당

의 유효동력을 제공하기 위해서는 극한상태에서 작업이 이루어지므로 실제로 비효율적인 설계를 피할 수 없다. 두 개의 기어펌프가 직렬로 장착된 체계는 본래의 굴삭기에 동력을 제공할 수 있는 폐쇄회로로 구성되었으며, 이런 회로는 압력식 안전밸브에 의하여 보호되어 있다.

5. 버력처리장치

이전의 눈속 터널작업에서 깨어진 조각들을 버력처리하는 과정에서는 항상 막히는 부위가 있었다. 남극점 터널에서도 조각들을 운반하는데 공압식으로 설계하였다. Russell Miner와는 달리, 직접구동을 하지 않는 대신 벨트로 구동되는 송출관의 끝부분에 기동력이 제공되는 방식을 사용하였다. 37 kW의 전기모터에 의해 구동되는 대형의 원심분리형 팬은 최소한 19 m 수직관과 52 m의 수평관 내에서 버력을 이송하는데 필요한 흡인력을 발생시킨다.

수평관은 여러개의 관으로 구성되었는데 고무재질의 원판형 개스킷(silicon rubber annular gasket)으로 봉합된다. 관들은 높이조절이 가능한 썰매나 대차 위에 설치되는데 이는 굴착기가 작동함에 따라 이동을 허용하게 된다. 조립된 관들이 당김에 의하여 분리되는 것을 방지하기 위하여 와이어 로프로써 관 전체에 인장력을 제공한다.

수직관의 터널쪽 끝에는 방향전환용 썰매에 의하여 수직관과 수평관을 서로 연결하며, 수직관 전체를 고착시킨다. 수직관들을 고정시키는데는 수평관에서와 마찬가지로 V자형 밴드클램프를 사용한다. 수직관의 다른 끝은 직경 250 mm의 신축성있는 관으로 구성되었으며 원심분리형 팬의 입구와 연결된다. 버력처리 전체 시스템에서 관들의 직경은 236 mm에서 273 mm로 다양하다.

6. 지원시설

전장비의 동력은 250 kVA 용량의 디젤터빈 발전기에 의해 제공되는데, 극지방의 고도로 인한 희박한 공기 때문에 발전량은 180 kVA에 불과하다. 동력은 발전기 출구부분에 위치한 300 A 용량의 절연판에 60 A의 차단기를 통하여 운전장비에 연결된다. 공장소는 교체 부품들을 보관하고 장비의 사소한 수리작업을 수행하는 곳이다. 이는 지상에 설치되는데 통신장비도 갖추고 있다.

천공장치는 터널 내부로 기계작동과 난방을 위한 전력선을 제공하고, 수직관을 설치한 수직공을 굴착하는데 사용된다. 수직공은 Fig. 3에서 보듯이 굴착기가 도

달하기 이전의 위치에 착공된다. 굴착기가 수직공을 지나가면 송출관이 투입되어 연결하는데 숙련공에 의한 작업시간은 15분 정도이다.

7. 사업전개

남극점 터널체계는 1996년 1월에 남극에 처음으로 전개되었다. CRREL의 작업반은 남극점기지에서 장비를 조립하고 운영하였다. 지상에서 시운전을 거친 후, 트랜치로 옮겨져 실제의 운전시험을 수행하였는데, 송출 모터에 결함이 있었고 펌프 축이 손상되어 굴진은 조금 밖에 이루어지지 않은 채 작업은 중단되었다.

두 번째 시도는 본보의 저자인 M. Walsh의 감독으로 그해 11월에 수행되었다. 터널링 개념을 증명하는 기본 목적을 가진 33 m 길이의 터널은 NSF에 의하여 기지에서 동절기 작업을 극복할 수 있는 한계인 120 m 길이의 작업용 시설을 포함하는 사업으로 확장되었다. 장비들은 이전에 발생한 문제점들을 해결할 수 있도록 개조되었다. 이틀동안 장비의 적응훈련과 하루의 교육을 포함하여 이 계획은 11월 22일부터 시작하여 12월 2일에 완수되었다.

세 번째 작업은 1999년 11월에 전개되었는데, 미국에 있는 CRREL로부터 원격 지원과 본보의 저자인 J. Wright의 감독아래 한 사람의 운전공에 의하여 수행되었다. 이의 목적은 새로운 남극기지의 시설물로 사용될 600 m의 터널을 구축하는 것이었다. 이는 11월 29일에 시작되었지만, 송풍장치의 위치구축을 비롯하여 드럼의 유압장치 부품들의 반복되는 파손, 부품공급 등에서 야기되는 문제로 인하여 2000년 1월 15일 종결되었다. 초기에 종결하여 290 m 밖에 구축하지 못했지만, 굴착장비로서 작업능력을 유지하기 위한 화합된 노력은 상당히 성공적이었다고 평가된다.

2000-01년도의 작업은 부품공급과 시험운전이 수행된 직후인 12월 15일부터 Wright의 지도와 새로운 운전공의 협력으로 시작되었다. 이 작업의 목적은 이전 터널을 완성함과 동시에 주 터널의 지선을 65 m 구축하는 것이었다. 많은 진척이 있었던 것은 사실이지만 굴착장비의 유압체계와 송풍기의 송강장치에는 확실한 문제점이 있어 효율적인 작업수행을 방해하였다. 장비와 작업공정을 개선하는 노력으로 시스템의 효율성을 지속적으로 발전시켰다.

8. 작업체계

터널굴착은 트랜치 끝부분의 일정 심도에서 시작하

였는데, 초기에는 송풍장치가 트랜치 내에서 굴착기 뒷편에 위치하였다. 이는 굴진되면서 지상으로 이전되었는데 최소 거리는 약 15 m이다. 이 지점에 수직공이 천공되었으며 버럭처리 수직관이 설치되었다. 그리고 방향전환용 썰매와 수평관용 작은 대차가 설치된 후에 굴진작업이 재개되었다. 굴착기가 전진하면서 대형의 수평관이 조립되는데, 33 m 전진하면 버럭처리 장비는 해체되어 원심분리형 팬과 수직관은 다음 수직공으로 옮겨진다. 방향전환용 썰매와 수평관 대차는 작은 규모이고 많은 경험을 통하여 터널 내에서 이전되고 설치되는데 어려움이 없다.

커터드럼은 고정속도로 작동되고, 드럼에 부착된 붐을 올리고 내림으로써 작업면에서 절삭이 이루어진다. 굴착기에는 드럼의 위치를 feedback할 수 있는 장치로서 기본적으로 전기적 각도기가 장착되었지만, 1999년 이를 기계식으로 대체하였다. 방향과 각도는 작업자가 볼 수 있는 지점에 배치된 레이저식 정열장치에 의하여 유지된다. 레이저빔이 드럼을 구동하는 체인을 비추고 있으면 굴착기는 터널의 중앙선에 자리잡고 있는 것이다. 이는 또한 터널의 구배를 보여주는데, 레이저 위치를 통하여 막장면과 바닥의 경사를 확인하는 측정이 1.5 m 굴진마다 이루어진다.

막장면에서의 버럭처리 작업은 작업자의 주요 업무로서 조화된 노력이 요구된다. 비록 버럭의 일부는 굴착작업 도중에 처리장치에 의하여 처리되지만, 많은 양은 큰 더미로서 작업장 바닥에 누적되게 된다. 굴착기 전면에 장착된 송풍기는 이러한 더미 속으로 들어가 버럭을 처리한다. 이 때 흡입장치가 매몰되지 않도록 주의가 요하며, 전체 버럭장치의 작동이 정지되지 않도록 압력계기를 관찰하여야 한다. 굴착기가 지나간 다음에 외부에 쌓이는 버럭을 깨끗이 처리하는 것과 송풍관들이 제대로 작동하는가를 확인하는 것은 터널내에서의 보조공의 임무이다. 지상의 보조공은 송풍장치를 관찰하고 또한 작동이상이 발견될 때 이를 재설치하는 임무를 갖고 있으며, 숙련공을 도와 천공기로 수직공을 굴착한다.

터널내 작업자의 비상탈출구로서 적당한 위치에 또 다른 수직공을 만든다. 터널 벽측으로 300 mm 직경의 선진공을 천공한 다음, 1m 직경의 back-boring 비트로서 확공한다.

9. 평 가

남극점 터널체계는 그 개념이 존립가능하다는 것이

입증되었지만, 굴착의 속도와 신뢰성은 현재 상태에서는 충분하지 못하다. 기본적으로 $18 \text{ m}^3/\text{hr}$ 의 굴착속도로 설계되었지만 현재의 목표는 75% 수준에 그친다. 3개의 터널이 전개되는 과정에서 굴착속도는 현재 수준의 50% 정도인 $6 \text{ m}^3/\text{hr}$ 였다. 문제점들의 대부분은 가혹한 조건들과 외떨어진 생활에서 야기되므로 특별한 해결책이 제기되어야 할 것이다.

굴착기의 작동을 어렵게 하는 주요 문제는 유압체계에 있으므로 드럼이나 송풍기를 전기로 작동되게 하는 것이 심각하게 고려되어야 한다. 압력식 안전밸브가 자주 파손되는데 드럼회로와 송출호스에 장착된 모터의 손상으로 이어진다. 방향조절 밸브도 굴착기에서 뿐만

이 아니라 극지방에서 작동하는 증장비에서 문제가 있다. 비록 굴착대상이 눈이긴 하지만 이는 매우 높은 강도와 밀도를 갖고 있다. 이러한 강도 때문에 버럭처리에서 자주 고장이 일어나 유압체계에 중압을 가하여 부품의 파손으로 연결된다.

송풍기도 고려해야 할 주요 대상인데 추진날개가 장비의 중앙에 있어 출력이 작게된다. 추진날개가 측면에 위치하면 버럭을 기류 속으로 효율적으로 공급하여 굴착능력을 증대시킬 것이다. 굴착기에서 버럭을 축출하는 장비의 중량을 줄인다면 신축 연결관에 하중을 경감시켜 전체 굴착장비의 신뢰도를 증대할 수 있다. 굴착기에 부착된 버럭처리기를 분리하는 것도 고려중이다.



박철환

1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사

1981년 서울대학교 대학원 자원공학과 공
학석사

1987년 서울대학교 대학원 자원공학과 공
학박사

Tel : 042-868-3244

E-mail : cwpark@rock25t.kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 탐사개발연구부
암반공학연구팀 책임연구원