

노르웨이 메로케르 수력발전소의 TBM 굴착

박철환^{1)*}, 박연준²⁾

The Meråker TBM Project in Norway

Chulwhan Park and Yeonjun Park

Abstract This paper presents an article explaining a TBM project overall in Norway. The paper which published in Norwegian TBM Tunnelling by Norwegian Soil and Rock Eng. Assoc. in 1998, contains most of the items considered in TBM tunnelling. New powerplants, tunnels and dams have been built at Meråker in Central Norway. A total of 44 km of tunnels with cross sections varying from 7 m² to 32 m² have been excavated in hard rock formation. Tunnel of 10 km with the 3.5 m diameter was excavated by a HP TBM in a year. his project gives the special attention to the TBM drive and equipment selection, including planning, site organization and performance.

KeyWords norwegian tunnelling, HP TBM, TBM drive, TBM performance

초 록 본보는 1998년 노르웨이 토질암반공학협회에서 일회 발간한 Norwegian TBM Tunnelling 전문지에 수록된 논문을 소개하는 기술보고서이다. 노르웨이 중부 Meråker 지방에 새로운 수력발전사업이 진행되어, 발전소 및 터널, 댐이 건설되었다. 단면적이 7 m² 부터 32 m² 까지 다양한 형태의 터널들이 비교적 경암층에 굴착되었으며 이의 총 연장은 44 km에 달한다. 이 가운데 직경 3.5 m의 터널 10 km가 HP TBM으로 12개월 만에 굴착되었다. 이 터널에서 TBM의 굴착과 장비선정 외에도, 기획, 운영 및 조직 등이 특별한 관심을 끌고 있다.

핵심어 노르웨이 터널, 기계굴착, TBM 굴진, TBM 운영

1. 서 론

1.1 노르웨이의 TBM 터널

노르웨이는 피오르드와 같은 지형으로 인하여 많은 터널이 굴착된 대표적인 나라로서 수로 및 교통용으로 약 5천 km의 터널이 굴착되었다. 전단면터널 굴착장비를 본격적으로 사용한 것은 1972년 트론하임의 하수 터널이었으며, 사반세기 동안에 49개의 터널이 TBM으로 굴착되었다고 보고된 바 있다. 이 기간에 도입된 장비는 약 30대이며, 총 연장은 전체 터널연장의 5% 수준인 258 km이다.

우리나라의 경우와 비교해 볼 경우, 한국터널공학회의 자료에 의하면 2002년까지 국내 터널의 총연장은 약 700 km 연장의 도시지하철을 포함하여 약 1800 km로, 노르웨이의 국토면적이 우리의 약 4배 정도임을 고려

할 때 두 나라의 터널연장은 비슷한 수준이라 할 수 있다. 그러나 인구가 우리나라의 약 1/10 정도이고 또한 스칸디나비아 반도의 다른 나라에서 TBM으로 굴착된 터널의 연장이 불과 70 km에도 미치지 않는 것으로 미루어 볼 때, 노르웨이는 터널 및 TBM 굴착의 선진국이라 할 수 있다.

노르웨이는 많은 TBM 터널의 수요로 인하여 터널의 굴착속도 등에 대한 예측기술이 요구되어 발전되어 왔으며, 따라서 오늘날 노르웨이 공과대학(NTNU)의 TBM 굴착속도 예측모델이 완성되었다고 볼 수 있다.

1.2 원문 소개

노르웨이 토질암반공학협회에서는 1980년대 후반부터 '지하공간 건설분야에서 노르웨이의 기술'이란 커다란 제목으로 일련의 단행본을 출간하였다. 그 가운데 11번째인 전문지는 Norwegian TBM Tunnelling의 제목으로 1998년에 출간되었는데 이에는 TBM 굴착의 역사와 시험법, 현장소개 및 연구논문들이 수록되어 있다. 본보는 이러한 14개의 보고서 가운데 하나인 'The Meråker Project - 10 km of Tunnel in 12

¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

²⁾ 수원대학교 토목공학과 부교수

* 교신저자 : cwpark@kigam.re.kr

접수일: 2005년 1월 14일

심사 완료일: 2005년 2월 21일

Months' 라는 제목으로 발표된 논문을 소개하는 기술보고서이다.

이 논문은 제목에서 알 수 있듯이 빠른 굴진속도로 굴착을 완수했음을 강조하고 있으며 사업의 계약을 비롯하여 장비의 선정 및 개조, 현장의 인력조직 등과 같은 일반적인 운영에 대한 기술 뿐 만 아니라 굴착속도 및 커터소모와 같은 기술분석도 언급하고 있다. 이러한 설명이나 분석은 앞으로 우리나라의 터널현장에서 TBM을 운영할 때 필요한 수칙이나 목표가 될 수 있을 것으로 판단된다(이상 역자 주).

2. 사업개요

2.1 사업 설정

트론히임으로부터 동쪽 80 km에 위치한 Meråker (메로케르) 지역의 전력을 공급하기 위하여 5개의 소규모 수력발전소가 1890년부터 1915년까지 건설되었다. 1987년에는 이 지역의 연간 전력을 200 GWh에서 590 GWh로 증설하기 위하여 4개의 전력시설을 교체하기로 결정되었다.

이 수력사업의 건설은 1990년 9월에 시작되어 발전소 및 터널 그리고 댐이 1994년에 완공되었으며, 그 중 44 km 연장의 터널굴착은 예정보다 약 9개월 단축되어 1992년 말에 굴착이 완결되었다(그림 1 참조).

2.2 계약

사업의 발주자인 Nord-Troendelag Energy는 사업을 2개의 계약으로 나누었다. 하나는 17 km의 터널과 2개 사력댐을 건설하는 Tevla 발전소 계약이며, 다른 하나는 27 km의 터널을 굴착하는 Meråker 발전소 계약이다. Meråker 계약은 E.H. 및 Veidekke 두 회사로 구성된 조인트 벤처기업인 Merkraft와 이루어졌다.

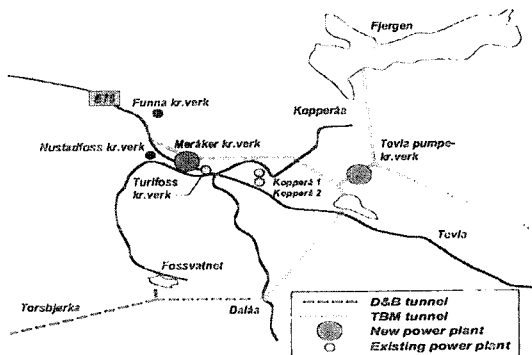


Fig. 1. Overview of the Meråker project

2.3 TBM 터널구간의 지질

이 지역에서 예상되는 암종은 변성반려암이 관입되어 있는 캄브리아기와 오오도비스기의 변성 퇴적암으로 주로 구성되어 있으며, 변성반려암은 일축압축강도가 300 MPa 이상으로 극경암이며 과상으로 판단되었다. 터널의 종단을 따라 녹암 및 천매암을 비롯하여 6개의 다른 암종이 있다.

입찰과정에서 가능한 최상의 자료를 얻기 위하여 Merkraft는 광역조사를 수행하여 지질정보를 보충하였으며, 이러한 지질조사는 NTNU와 노르웨이 국가전력국인 Statkraft*과 협력으로 수행되었다.

이 지역의 암석 및 암반들의 시험결과, 굴착에 관련된 요인들은 다양한 크기로 나타났는데 약한 천매암에서 DRI(천공속도지수)는 60이며, 균열등급은 II+로 나타났다. 또한 강한 암석인 변성반려암에서는 DRI는 32, 균열등급은 0+이다. DRI 및 균열등급은 NTNU의 보고서 1-88의 분류체계에 의한 것이다.

또한 Graywacke(회색의 점토기질 사암) 및 사암의 지층구조는 혼합된 형태로 나타났다. 따라서 암석의 매우 높은 강도와 굴착특성의 다양성은 TBM 기종을 선정하는 중요한 요인이 되었다.

3. 굴착 장비

3.1 노르웨이의 TBM 굴착기술 현황

노르웨이에서 1980년대에는 강도가 큰 과상의 편마암이나 화강암 암반에서 대단위 사업이 TBM 공법에 의하여 많이 이루어졌다. 이러한 터널에는 커터 한 개 당 추력이 최대 222 kN의 능력을 가진 최신 기종의 TBM 장비가 사용되었다. 대부분의 사업이 기술적으로나 경제적으로 비록 성공적이었다 하더라도, 실제 현장의 시험과 연구를 통하여 보다 빠른 굴착이 이루어질 수 있었다는 분석이 제기되어 왔었다.

유압이나 전기, 주베어링, 커터 등에 문제를 포함하는 장비는 강도 및 마모성이 큰 과상의 암반에 요구되는 높은 수준의 추력을 유지할 수 없다는 것을 경험을 통하여 알 수 있었다. 만약 장비나 커터가 보다 높은 추력에 대비하여 설계된다면 굴착속도의 실제적인 향상을

주)* : 노르웨이 건설부의 조직이며 NVE라는 약칭을 가진 Norwegian State Power Board는 1980년대에 공사의 성격인 Statkraftverkene으로 바뀌었으며 오늘날 Statkraft SF이다. 이 회사는 수력발전 사업을 많이 수행하여 TBM 장비 및 운영경험을 많이 갖고 있고 자회사로 Statkraft라는 이름의 설계사 및 건설사를 소유하고 있으며, 국가를 대행하여 다수의 수력발전소를 소유하고 있다(역자 주).

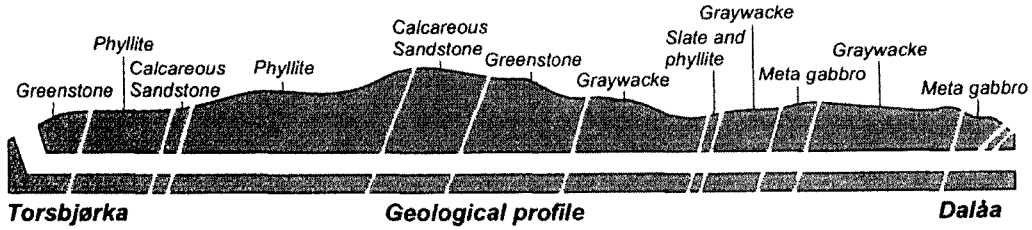


Fig. 2. Geological profile

실현할 수 있을 것이 명확해졌다. 반면에 보다 약한 암반층에서는 회전력의 능력한계로 인하여 5 m/h 이상의 굴착속도를 얻지 못한다는 것도 과거 경험에서 얻어졌다.

3.2 장비의 선정

과거 경험을 토대로 하여 Statkraft는 1989년에 Svartisen 수력발전 사업에 새로운 선진장비를 사용할 것을 결정하였다. 1992년까지 이 기간 동안 30 km의 터널을 굴착하기 위하여, 직경이 각각 4.3 m 및 5.0 m, 3.5 m인 세대의 로빈스사의 HP 장비(High Performance의 약어이며 HP 시리즈 TBM 장비를 뜻함, 역자 주)를 구매하였다.

앞에서 언급한 경험에 의거하여, 발주처는 TBM 장비가 다음과 같은 조건을 가질 것을 명문화하였다.

- 약한 천매암 뿐 만 아니라 강하면서 괴상의 변성반려암 및 녹암 등에서도 효과적인 굴착수행 가능
- 장비의 기본적인 HP 개념을 변화시키지 않고 직경을 4.3 m 까지 증가 가능

이러한 주문은 로빈스사의 HP 제품이 483 mm(19") 크기의 디스크 커터를 사용하면서 커터당 최대 312 kN까지의 추력으로 굴착할 수 있는 설계를 이끌어냈다. Statkraft와 로빈스의 밀접한 협력으로 인하여 HP의 개념과 착상들이 보다 더 발전하게 되어 결과적으로 HP TBM 1215-265 모델의 최종적 설계 및 제작으로 귀착되었다. 이 장비의 간략한 사양은 다음과 같다.

- 최대 추천 추력 : 7.9 MN
- 커터헤드 마력 : 1.34 MW(335 kW x 4)
- 커터헤드 회전속도 : 13.4 RPM
- 커터 장착수 : 25 single disc cutters
- 장비의 중량 : 약 200 ton

3.3 장비의 개선

직경 3.5 m의 HP TBM 1215-257을 사용하여 1991년에 완성된 Svartisen 수력발전소 터널의 굴착에서 커터 추력이 265 kN 이상일 경우에 비정상적인 커터 마모 및 베어링 파손을 경험하였다. 이는 추력 용량을 최대로 사용하는 것을 실제적으로 제한하고 있으며, 이럴 경우에 비용과 시간이 추가되는 것을 뜻한다. 따라서 HP 1215-265에서는 커터의 단면형상을 개선하였으며 가장 핵심적인 개선작업은 그림 3에서 볼 수 있는 커터의 간격조정이다.

그림 3은 과거의 장비 및 개선된 장비에서 커터간격이 가장 큰 2-3-4번 사이의 간격을 1로 하여, 각 커터의 상대적 간격을 표시한 그림이다. 과거의 장비(HP TBM 1215-257, 점선으로 표시)에서 커터의 간격은 거의 일정한데 반하여, 개선된 HP TBM 1215-265 장비에서는 커터헤드 중앙에서 바깥으로 갈수록 간격을 줄인 것이다. 이는 추력작용의 임계구역에서 커터간격을 줄일 수 있도록 할 수 있으며 결과적으로 보다 나은 추력의 분포를 제공할 수 있는 개선이라고 할 수 있다. 이러한 개선작업은 만족한 결과를 얻을 수 있게 하였으며, 지속적인 커터 추력을 312 kN까지 제공하면서 굴착할 수 있게 하였다.

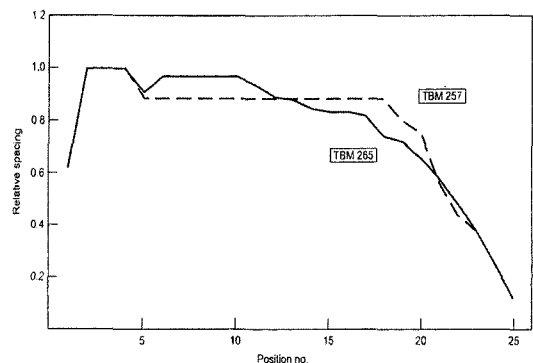


Fig. 3. Spacing HP TBM 1215-257 and HP TBM 1215-265

4. 굴착속도 및 현장의 기술분석

4.1 굴착속도

HP 1215-265 장비는 일부 구간이지만 약 10 m/h 이상의 순굴착속도를 발휘하였으며, 이 때 작용하는 큰 회전력으로 인한 문제점은 나타나지 않았고 버력처리도 원활하게 이루어졌다. 전체 구간에서의 순굴착속도는 그림 4와 같은데 이러한 속도는 계획단계에서 평가된 예측속도를 초과하는 크기이다.

그림 5는 주간 굴착장의 변화를 도시한 것이다. 노르웨이 규정에 의하여 굴착작업은 주당 100 시간을 초과할 수 없다는 제약에도 불구하고 주간 평균 굴착장은 253 m이었으며, 이는 노르웨이에서 이제까지의 실적보다 100 m 이상 큰 속도이며, 또한 NTNU 예측속도보다 큰 크기이다. 이로써 전체 터널굴착작업은 예정보다 6개월 앞서 완료되었다.

굴착속도에 관한 종합적 정보는 다음과 같다.

- 최대 순굴착속도(1 shift에서) : 9.54 m/h
- 1 shift 최대 굴착장 : 69.1 m(10 시간)
- 일일 최대 굴착장 : 100.3 m(2 shift x 10 시간)
- 주간 최대 굴착장 : 426.8 m(100 시간)
- 월간 최대 굴착장 : 1358 m(430 시간)
- 평균 순굴착속도 : 6.4 m/h
- 주간 평균 굴착장 : 253.0 m

4.2 가동률

여기에서 총 작업시간에 대한 순굴착시간의 비로 표현된 가동률은 그림 6에서 알 수 있듯이 주간 30~50%로 나타났으며, 평균 크기는 그림 7과 같이 40.2%로 평가되었다. 굴착 종점부 약 4 km 구간에서 가동률이 감소하였는데 이는 1대의 기관차와 2대의 폐석차로 이루어진 버력처리 장치의 용량이 충분하지 못하였기 때문이다. 터널 종점부인 천대암 구간에서 기관차 1대 및 교행장치가 추가되었더라면 더 높은 굴착속도와 가동률을 기록할 수 있었을 것으로 판단된다.

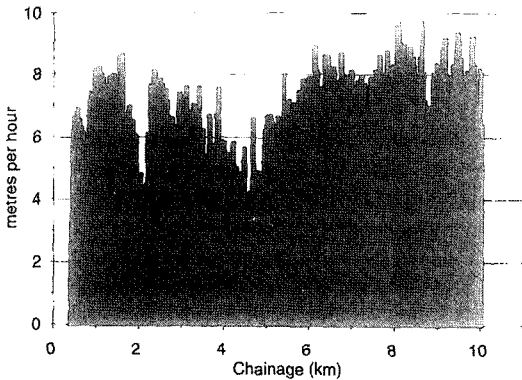


Fig. 4. Actual penetration rate over the tunnel length

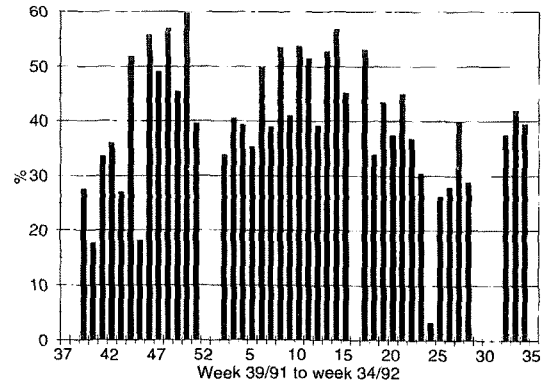


Fig. 6. Machine utilization

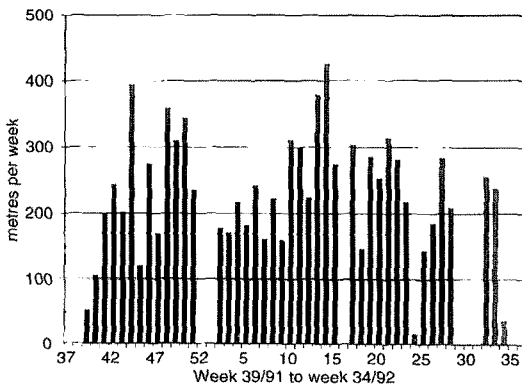


Fig. 5. Length of weekly advance

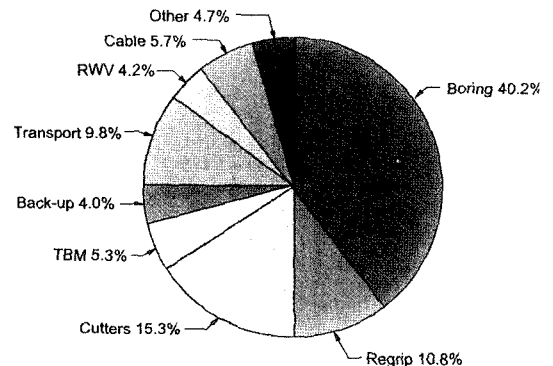


Fig. 7. Average of time portion

4.3 커터 마모

굴착구간에 분포하는 암반 중에서 녹암이 굴착이 가장 힘든 암석이라고 판단되었다. 이로 인하여 가장 많은 양의 커터소모와 커터교체로 인한 휴지시간을 유발하였다. 또한 암반이 혼재된 구간에서도 높은 커터소모를 보였다.

커터의 수명은 그림 8과 같이 지반조건에 따라 크게 변화하는 것도 놀라운 일이었다. 그림 4와 같이 TBM의 순굴착속도는 4 m/h 이하를 기록하지 않은 반면에 커터의 수명은 커터당 300 m³에서 30 m³로 큰 변화를 보였다.

커터교체로 인한 TBM의 휴지시간은 이상적으로 낮은 크기를 유지할 수 있었는데, 이는 커터의 단면과 간격을 조정하면서 개선된 추력의 분포에 의하여 일부 기인한 것으로 판단된다. 이러한 개선작업으로 각각의 커터는 비교적 균등하게 마모되면서 한번의 교체작업에 많은 커터를 동시에 교체할 수 있어 결과적으로 시간을 절약하게 되었다. 그림 9는 커터의 위치별 소모량을 도시한 것인데, 최소량은 11개이며 최대량은 최소량의 3배에 불과한 33개로 나타났다. 이러한 통계분석을 통하여 위치에 크게 관계없이 각 커터는 균등하게 마모되었음을 알 수 있다.

4.4 폐석운반

작업장에서 폐석장 사일로(silo)까지 운반은 2대의 기관차로 이루어졌다. 각 기관차는 10 m³ 크기의 9대 덩프 광차를 왕복 25 km/h의 평균속도로 견인하였으며, 이러한 광차의 크기는 직경 4.5 m의 TBM이 세 번의 굴착사이클에서 얻어지는 폐석의 양을 처리할 수 있다. 광차는 산중에 있는 300 m³ 규모의 사일로에 폐석을 처리하고 이후 폐석은 트럭으로 운반되어 1:8 경사로 만들어진 운반용 터널을 통하여 폐석장으로 처리된다.

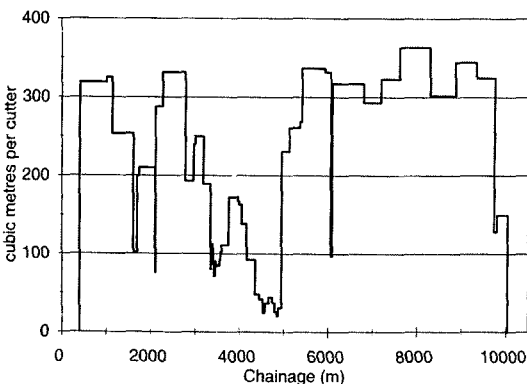


Fig. 8. Cutter life over the tunnel length

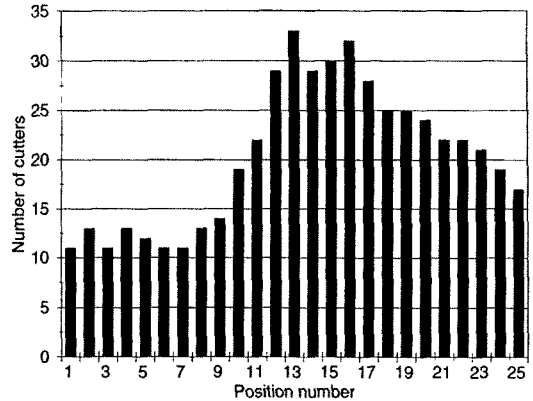


Fig. 9. Number of cutter change

전체 10 km 굴착구간 가운데 마지막 4 km 구간은 10 m/h의 높은 순굴착속도(그림 4 참조) 때문에 전체적 운반용량은 부족하였다. 그러나 우회스위치를 만들고 기관차를 증설하고 이에 따르는 인력을 충원하는 비용은 폐석기관차를 기다리면서 휴지하는 비용보다 큰 것으로 분석되어 시행되지 않았다. 그 결과 이 구간에서의 주당 굴진장은 크지 않았지만(그림 5 참조), 전체 공기는 계획보다 상당히 단축되었다.

4.5 장비의 조립과 해체

HP 1215-265 장비는 87 ton을 초과하지 않았으며 각각의 부품으로 시에틀에서 노르웨이까지 배로 운반되었다. 선적물은 1991년 8월에 현지에 도착하였는데 TBM은 지하에서 조립되어 3주 후에 굴착이 시작되었다. 장비제작공장에서 주요 작업자에 대한 집중적인 훈련과 함께 상세한 계획과 경험, 직원들의 교육으로 인하여 TBM의 조립을 단기간에 수행할 수 있었다.

굴착이 완료된 후에 커터헤드는 해체되어 전방에 이미 건설된 취수구를 통하여 운반되었으며, 장비의 나머지 부분과 후속설비는 터널의 레일로 운반되었다.

4.6 현장의 조직 및 직원

노르웨이는 오랫동안 효과적인 비용으로 터널굴착을 수행하는 국가로 알려져 왔다. 이의 주요 원인은 작업자의 수가 적고 최신의 장비를 사용하는데 있다고 볼 수 있다. 본 터널에서도 세 shift를 담당하는데 16명으로 작업을 수행하였고 각 직원은 규정에 의하여 주당 33.6 시간 작업하였다.

이러한 직원들은 굴착을 비롯하여 지보설치, 버력처리, 수리작업, 커터교체 등의 모든 작업을 수행하였다. 작업자들이 경험이 많고 융통성이 있으며 헌신적이라면 적은

인원으로도 이러한 모든 작업이 가능해질 것이다.

작업장에서 직원들은 팀웍을 증대시키기 위하여 순환 보직으로 작업한다. 한명이 조정실에서 TBM을 운영하면서 폐석광차에 적재한다. 한명의 기계공 및 전기공, 기관차 운전공은 다른 일들을 맡는다. 직원들은 실제 생산량에 따라 보수를 받게 되는데, 이는 휴지시간을 줄이기 위해서 장비가 잘 정비되어야 하고 수리되어야 함을 뜻한다.

4.7 암반 지보

설계당시에 발주처에 의해 수행된 지반조사결과에 의하면 TBM을 사용하는 경우에 암반지보는 극소량 만이 필요한 것으로 나타났으며 실제 시공에서는 이보다 더 적은 양의 지보가 이루어졌다. 발주처에서는 전장 10 km 구간에서 당초 900개의 록볼트 및 300 m³의 슛크리트, 그리고 200 m²의 보조판이 소모될 것으로 평가하였으나, 실행에서는 록볼트는 140개 그리고 슛크리트는 44 m³의 양이 사용되었다. 또한 TBM 굴착이 아닌 천공-발파에 의한 터널굴착에서는 1 km 터널마다 평균적으로 250개의 록볼트 및 33 m³의 슛크리트가 필요한 것으로 보고되었다. 이 경우에 주간 굴착장은 약 80 m로 예상되어 전체 공사기간은 2년 이상이 될 것이다. 노르웨이의 전통적인 터널링 공법은 지보가 필요하여

지보량을 설계할 때 암반자체가 지니고 있는 지보능력을 최대로 활용하는 것이다. Meråker 사업에서 암반지보의 요구량이 적은 주된 이유는 TBM 굴착으로 인하여 터널벽면이 평탄하게 되고 또한 단면적이 적고 암반이 양호하다는 점이다.

5. 결 론

Meråker 사업은 터널 굴착의 새로운 표준을 보여주는 것이었다. 높은 굴진속도와 적은 통기요구량은 장대 터널의 굴착과 전체 공사기간 및 공사비용의 감소에 대한 가능성을 제시한 것이라 볼 수 있다. 공사의 계획과 장비 및 후속설비의 선정, 그리고 경험이 많은 작업자의 투입 등은 경암에서의 터널 굴착을 성공적으로 완수한 주된 요인으로 평가된다.

참고문헌

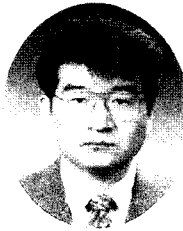
1. Johannessen, S. and O. Askilsrud, 1993, Meråker Hydro-Tunnelling the Norwegian way, Proc. RETC 1993.
2. NTNU, 1988, Project Report 1-88, Hard rock tunnel boring, NTNU.
3. NTNU, 1994, Project Report 1-94, Hard rock tunnel boring, NTNU.

박 철 환



1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1981년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1987년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
 Tel: 042-868-3244
 E-mail: cwpark@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원
 탐사개발연구부 책임연구원

박 연 준



1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1983년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원 토목공학과 공학박사
 Tel: 031-220-2580
 E-mail: yjpark@suwon.ac.kr
 현재 수원대학교 토목공학과 교수