

# 지하철 터널에 적용된 대구경 쉴드 TBM의 굴착성능 연구 분석

## A Study of the Large Diameter Shield TBM Excavation for Subway Tunnels

이승원\*                      강문구\*\*  
Lee, Seong-Won              Kang, Moon-Gu

---

### ABSTRACT

The objective of this study is controlling of the large diameter Shield TBM excavation for subway tunnels. In this paper, it will focus on the selection of Shield TBM and the problems of excavation due to unusual abrasion of the Disk Cutters and the distorted Cutter Mounts, in mixed layer of soil in below and hard rock in above, and in rock layer. And also, it will be discussed that the type of ground improvement to change and repair the Disk Cutters and the distorted Cutter Mounts, Advance Rate, Cutter Torque, etc. The results of this study will be using controlling of the excavation in various large diameter Shield TBM for subway tunnels.

---

## 1. 서론

본 연구에서는 지하철 하저터널에 적용된 대구경 쉴드 TBM 공법의 굴착자료를 수집하여 쉴드 TBM 장비 선정, 굴착시 발생된 문제점, 디스크 컷터(Disk Cutter) 및 비트(Bit) 교체를 위한 지반보강 사례, 굴진율 등을 분석하였다. 즉 인접구조물과 지반이완에 미치는 영향을 최소화하여야하는 굴착에 적용이 가능한 대구경 쉴드 TBM 공법의 굴착성능에 대한 각종 굴착자료를 수집 분석한뒤 분석자료를 기초로하여 대구경 쉴드 TBM 장비선정, 굴착시 발생된 각종 문제점, 즉 비정상적인 디스크 컷터(Disk Cutter) 마모분석 및 효율적인 교체시점 분석 그리고 효율적인 비트(Bit) 교체를 위한 지반보강 사례, 각종 굴진자료 분석을 통한 효율적인 굴진율등을 분석 평가연구를 수행하였다. 따라서 본 연구분석 결과는 향후 각종 대구경 Shield TBM 공법의 설계 및 시공에 도움이 되어 굴착성능 향상과 디스크 컷터 및 비트의 효율적인 교체시점 판단에 기여하고자 한다.

---

† 정희원, 경북대학 건설환경정보과 교수  
E-mail : swlee@kyungbok.ac.kr  
TEL : (031)570-9890 FAX : (031)570-9898

\* 정희원, 두산건설(주) 인천도시철도2호선 208공구 현장 차장

## 2. 대구경 쉘드 TBM 공법의 개요

### 2.1 쉘드 TBM 공법의 분류

쉘드 TBM 공법은 크게 기계전면 구조 및 굴착방법에 의한 분류, 단면의 형상에 의한 분류 등으로 구분할 수 있으며, 격벽이 없어 막장이 자립할 수 있는 지반에서 사용가능한 전면 개방형과 격벽을 두고 개구부로 굴착토사를 반출하는 부분 개방형은 현재 시공 실적이 매우 적어 소구경 쉘드터널에 주로 사용되고 있다. 밀폐형 쉘드에는 이수식, 토압식 및 이토압식이 있고, 이수식은 지반이완을 막기 위해 챔버(Chamber)안을 이수로 채워 막장면을 가압하면서 굴착하고 굴착토사는 이수와 함께 섞이어 배니관으로 유체운송하여 터널밖 지상플랜트에서 이수과 토사를 분리되어 처리되는 방식이다. 토압식은 챔버안을 굴착한 토사로 채운 후 쉘드 굴진속도에 맞추어 스크류 콘베이어로 배토량을 제어하면서 토사를 쉘드 내부로 반출하는 방식으로, 쉘드 내부로 반출된 토사는 광차에 의해 터널 밖으로 운송되어 처리된다. 이러한 밀폐형 쉘드 방식은 주로 대구경 쉘드터널에 적용된다.

### 2.2 대구경 밀폐형 쉘드터널공법의 굴착원리

토사지반에서 쉘드 TBM은 강재로 제작된 원통(쉘드)으로 외주부의 지반붕괴를 방지하면서 막장에서 인력 및 기계로 굴착한다. 최근 많이 사용되는 밀폐형 쉘드TBM은 스포크(Spoke) 또는 면판(Cutterhead)에 부착한 여러 타입의 비트(Bit)를 사용하여 면판이 회전하면서 막장의 토사를 끊어 면판 개구부 후방으로 떨어뜨린 다음 쉘드 TBM 내부를 통해 지상으로 배토시킨다. 밀폐식 쉘드 TBM은 회전하는 면판과 격벽사이의 공간(챔버)에 슬러리 또는 굴착토를 채워 압력을 가할수 있게 설계되어 막장의 붕괴를 방지할수 있다. 막장의 안정은 다음 그림과 같이 기계 전방의 토압 및 수압과 챔버안에서 가압된 압력간의 균형에 의해 유지된다.

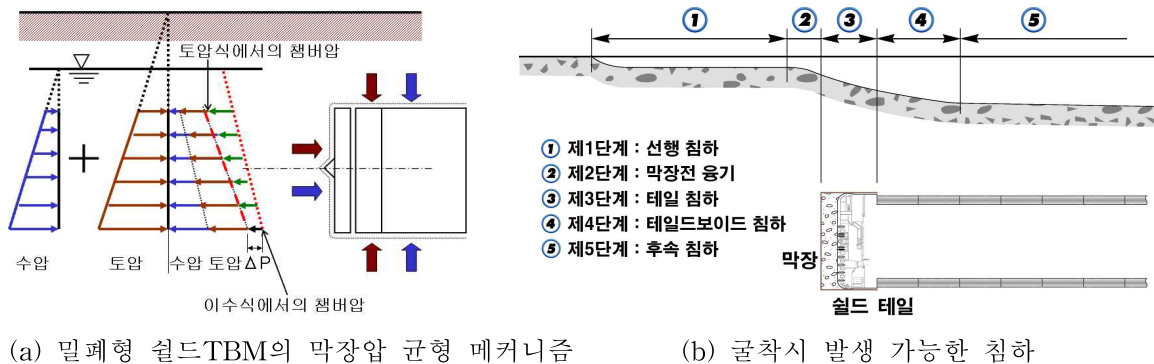


그림 2. 밀폐형 쉘드 TBM의 막장압 균형 메커니즘 및 굴착시 발생 가능한 침하

암반구간에서는 막장 자립이 가능하기 때문에 막장압과 챔버압의 균형보다는 쉘드TBM의 굴착능력(boreability)에 따라 공사시간과 비용이 달라지므로 현장여건 및 암반성분에 적합한 최상의 쉘드기 설계가 중요하다. 암반구간에서는 비트(Bit) 대신 디스크 컷터(Disk Cutter)가 사용되고, 복합지반인 경우 굴진 대상 지반이 토사와 암반이 혼재하므로 컷터 비트(Cutter Bit)와 디스크 컷터(Disk Cutter)를 혼합하여 사용한다. 디스크 컷터는 고속회전하는 절삭기에 의해 굴진을 시행하는 로드헤드나 충격력에 의해 암반을 파쇄 하는 브레이커와 달리 다음 그림과 같이 별도의 동력 없이 면판에 의해 궤적을 그리며 이동하고, 쉘드 TBM이 전진하면서 막장에 압축력을 가압하여 다음 그림과 같이 국부적인 압축변형과 이

로 인해 궤적사이에 발생하는 균열로 암반을 파쇄 한다. 컷터툴(디스크 컷터와 컷터 비트)과 면판의 설계는 특수조사항목(석영함유율, Cerchar 마모시험, Brittleness test, Siever drill test, Full scale linear cutting test 등)을 조사하고 노르웨이에서 개발한 NTH설계법과 미국 콜로라도에서 개발한 CSM설계법, 그리고 장비제작사의 시공 Know-how를 바탕으로 설계/제작 한다.

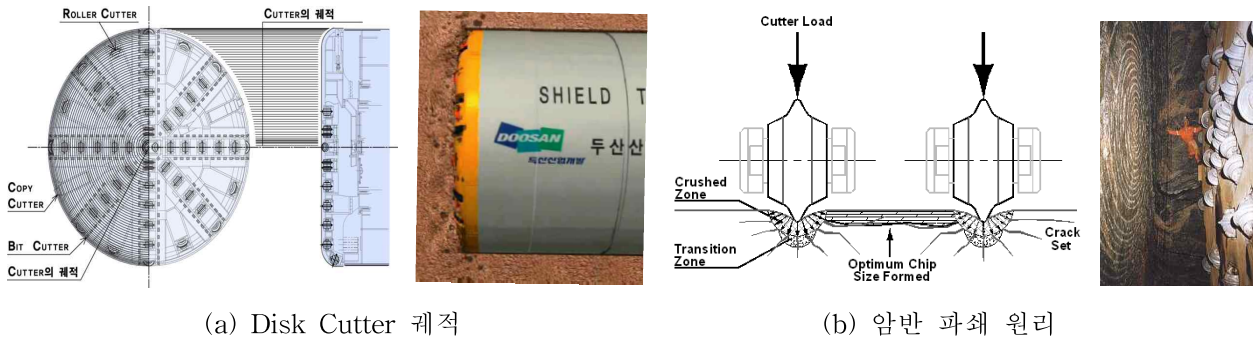


그림 3 쉴드TBM의 Disk Cutter 궤적 및 암반 파쇄 원리

### 3. 대구경 쉴드 TBM 공법의 굴착자료 분석

#### 3.1 디스크 컷터 손상 자료분석

분석 현장의 일부 극경암을 포함한 암반과 토사로 구성된 복합지반의 특성에 대한 이해 부족, 해외 업체의 국내 암반 특성에 대한 경험 부족, 사전 조사의 미비, 면판 및 디스크컷터 설계의 오류 등으로 비정상적인 편마모와 디스크 컷터의 탈락이 발생하여 많은 디스크 컷터의 교체가 필요하게 되었다. 즉 디스크 컷터의 마모는 일축압축강도, 경도, 인장강도, 암반을 구성하는 광물의 성분 등의 지반공학적 요소와 디스크 컷터의 크기, 재질, 수량, 등의 기계적 요소에 따라 정도가 틀러지며, 마모 형상은 다음 그림과 같이 마모되어야 하나 분석 현장의 디스크 컷터는 다음 그림과 같은 비정상적인 마모 형상을 보였다. 참고로 자료 분석 현장은 부산지하철 쉴드 TBM 적용 현장이다.

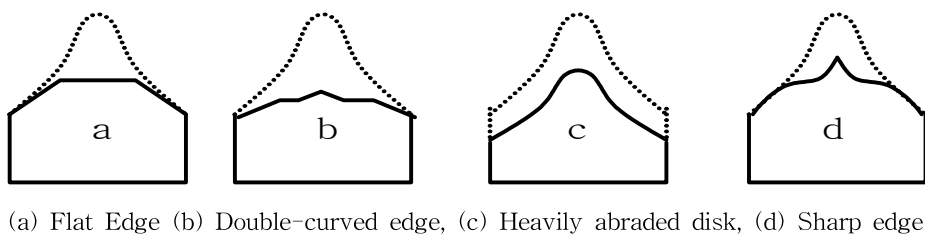


그림 4. 디스크컷터의 마모 형상

분석 현장에서의 디스크 컷터 마모는 그림 3(a)의 정상적인 형태로 마모되었으나, 비정상적인 마모도 하행선 굴착시 일부 극경암을 포함한 암반 및 토사로 구성된 복합지반에서 많이 발생하였다. 이는 다음 그림과 같이 복합부에서 상부 토사층을 이동하다가 경암이나 핵석에 충돌하면서 발생된 충격으로 디스크 컷터의 쉘, Nut, 베어링이 손상되거나 면판에 있는 컷터헤드 하우징이 변형되어 디스크 컷터의 회전이 불가능하게 되고 이로 인해 편마모가 발생되었다.

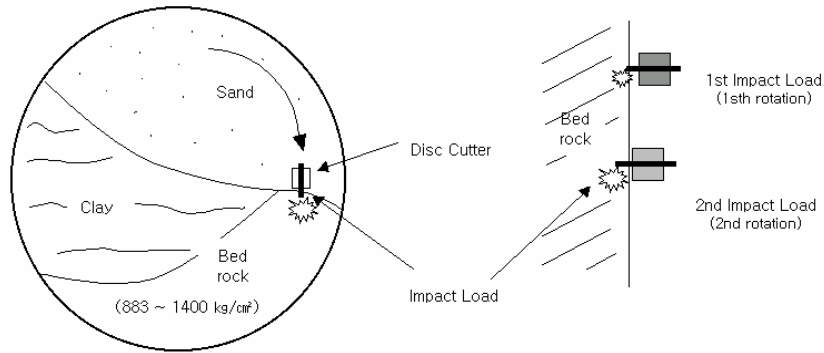


그림 5 복합지반에서 디스크 컷터의 손상

이러한 비정상적인 마모는 면판에 암반이 그대로 닿아 면판의 마모를 유발시키며, 비정상적으로 마모된 디스크 컷터의 갯수가 많아지면 다음 그림과 같이 회전력이 점점 상승하고 매우 불규칙하게 되며 추진력도 급상승하여 면판 회전 및 추진이 불가능하게 된다. 이로 인해 분석현장에는 8회에 걸친 지반보강과 16회의 디스크 컷터 교체가 필요하게 되었다.

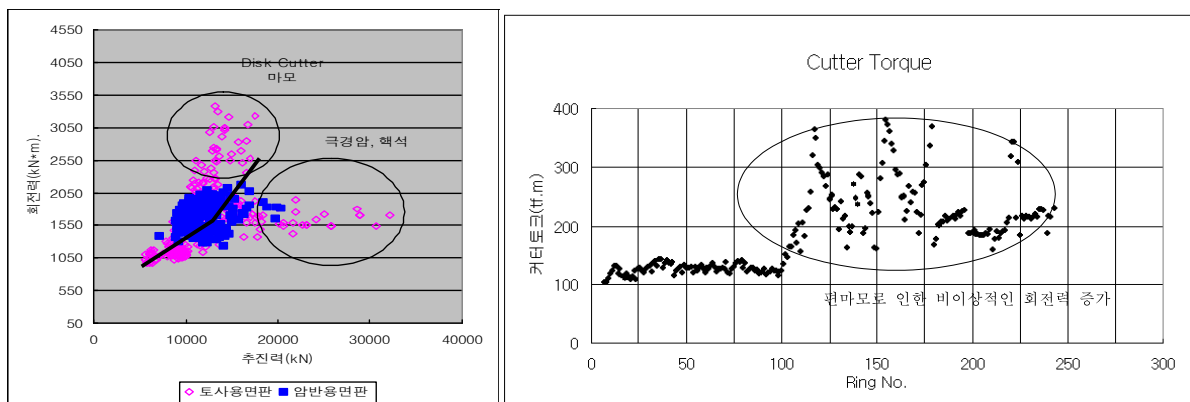


그림 6. 비정상적인 마모로 인한 회전력 상승

### 3.2 디스크 컷터 교체를 위한 지반보강 자료 분석

셴드TBM 굴진에 있어서 지질조건 변화는 셴드TBM의 순굴진율의 변화와 컷터툴(디스크컷터 및 비트)의 마모율에 많은 영향을 미치기 때문에 굴착전 디스크 컷터의 마모율을 계산하여 이동거리 및 평균 굴진율을 예상하고 토사구간의 교체지점에서는 셴드TBM이 도달하기전 기내 그라우팅이나 수직그라우팅으로 지반을 보강한 후 챔버안에서 디스크컷터나 비트를 교체해야 한다. 분석 현장에서는 디스크 컷터의 예견치 않은 마모 및 이탈로 인해 하행선 굴착만 다음 그림과 같이 8차의 지상그라우팅이 시공되었고 교체기간을 포함하여 1회당 8 ~ 92일 이상의 기간이 소요되었다. 또한 암반구간에서는 디스크 컷터 링과 하우징 강성 부족으로 많은 교체와 수리 시간이 소요되었다. 예견치 않은 디스크 컷터 교체를 위한 지상그라우팅은 셴드가 정지한 상태에서 보강후 챔버 안의 이수를 배출하고 인력으로 교체해야 하므로, 최소의 지반보강 기간과 최대의 보강효과가 확보되고, 셴드TBM에 손상을 주지 않으며, 재발전시 지반보강으로 인한 셴드TBM의 과부하가 방지되는 공법으로 선정해야 한다. 이러한 조건을 만족하는 공법으로 N-Tight, Clean Firm(C.F), Jet Grouting 등이 검토되었고 친환경적이고 차수를 목적으로 한 Clean Firm공법을 시공하였다. 그러나 2차, 3차, 5차 교체시 강도 부족으로 인한 공동발생 및 지반 붕괴까지 발생되어 이로 인한 재시공 비용과 시공기간이 발생된 것으로 분석되었다.

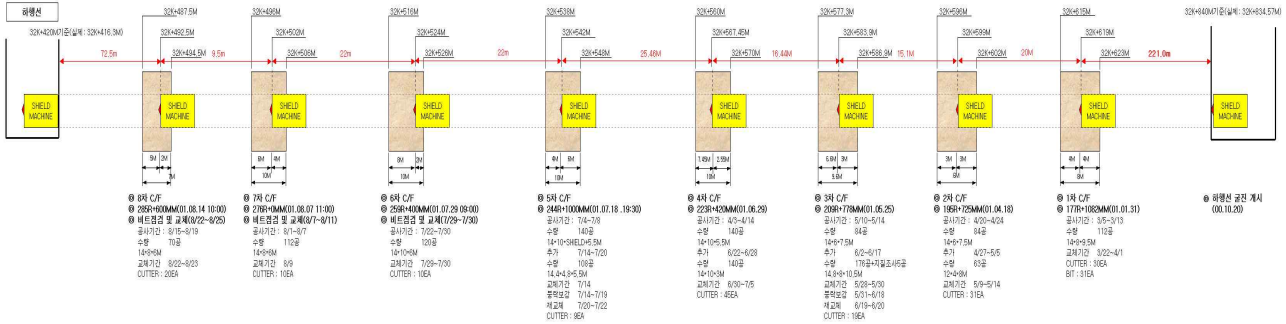


그림 7. 디스크 컷터 교체를 위한 하행선 지상그라우팅 위치도

분석 현장에서는 쉘드터널 계획시 하행선 굴착 공기를 4 ~ 5개월로 예상하였으나 이러한 디스크 마모 및 이탈로 인해 지반보강기간을 포함하여 약 10개월이 소요되었고 상대적으로 후행터널(상행선) 굴착기간이 절대적으로 부족하였다. 또한, 후행터널(상행선) 굴착은 공기부족 뿐만 아니라 선행터널(하행선)의 디스크 교체시 발생한 CF지반보강공법의 보강효과저하로 인한 공동발생 및 붕괴현상도 후행터널에 재발 가능성이 있었다. 후행터널은 상수도관과 수영가교에 선행터널보다 더 근접하여 붕괴나 침하 발생시 막대한 피해를 줄 수 있으므로 지반강도를 증대시킬 수 있는 다른 지반보강공법이 요구 되었다. 이에 대한 대책으로는 후행터널 굴착시 Komatsu사의 경암용 면판 및 디스크 컷터로 교체하였고, 그 결과 디스크 컷터의 마모도 현저히 줄고 비정상적인 마모도 줄어 디스크 컷터의 교체 지점을 예측하고 계획된 지점에 쉘드TBM 도달전 사전에 그라우팅을 할 수 있어 교체시간외에 그라우팅 시공시간 및 양생시간도 줄일 수 있었다. 또한 쉘드TBM 도달전에 그라우팅을 시공하므로 강성이 큰 Chemical Jet Grouting을 시공하여도 쉘드TBM의 손상과 재발진시 과부하를 주지 않아 3지점에 시공되었고, 막장붕괴로 인한 공동 발생과 침하 없이 Disk Cutter를 점검하고 2번째 보강지점에서 교체된 것으로 분석되었다.

### 3.3 굴진 자료 분석

분석현장의 작업정지시간(Downtime)을 포함하여 시간당 굴진거리를 나타내는 평균 굴진율은 N.K.K사 면판을 사용한 하행선이 1.19m/day(1일 20시간 가동 기준)를 나타내었고 Komastu사의 경암용 면판을 사용한 상행선은 4.34m/day(1일 20시간 가동 기준)의 굴진율을 나타내어 상행선 굴진이 3.6배 빠른 것으로 분석되었다. 또한, 작업정지시간(Downtime) 및 세그먼트 조립시간을 제외한 순굴진율(Net penetration rate)은 다음 표와 같이 장비제작사인 NKK사가 토사부 1.08m/hr, 복합/암반부 0.42m/hr로 설계하여 제시하였지만 실제 굴진율은 N.K.K면판으로 토사지반에서 0.79m/hr, 암반부에서 0.27m/hr로 굴진하여 많은 차이를 보였다. Komastu사의 면판을 사용한 후행터널은 토사부 0.60m/hr와 복합/암반부 0.43m/hr의 순굴진율을 보여 토사용 면판을 사용한 굴진율이 토사지반에서 암반용 면판을 사용한 굴진율 보다 1.32배 빠르고 암반에서 암반용 면판을 사용한 것이 암반에서 토사용 면판을 사용한 것보다 1.59배 빠른 것을 알 수 있었다.

표 1. 면판별 순 굴진율

구간별 순 굴진율		하행선(토사/복합용 면판)	상행선(암반용 면판)	비 고
설계자료 (장비회사 제공)	토사	1.08 m/hr	-	
	복합/암반	0.42 m/hr	-	
실제 굴착자료	토사	0.79 m/hr	0.60 m/hr	
	복합/암반	0.27 m/hr	0.43 m/hr	

분석 현장의 상하행선의 순굴진율과 회전력, 추진력을 토사, 복합/암반부별로 비교하여 보면 다음 그림과 같이 토사부에서는 NKK 면판(토사/복합용)이 저회전력과 저추진력으로 높은 순굴진율을 보였고 암반부에서는 Komatsu 면판(경암용)이 높은 순굴진율을 보이는 것으로 분석되었다.

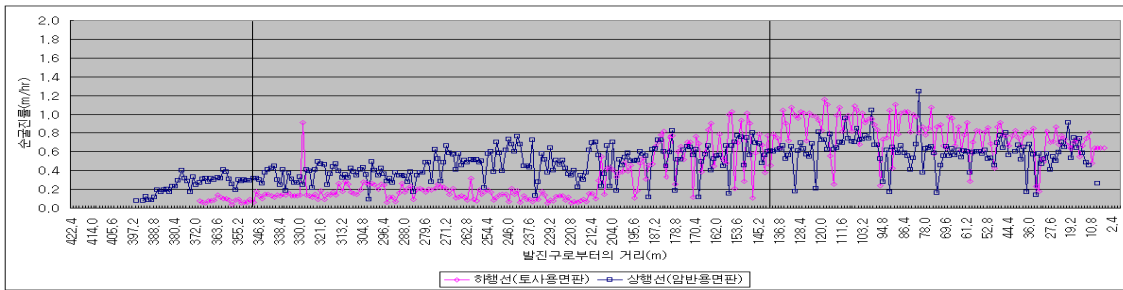


그림 8 분석 현장 터널의 순굴진율

## 6. 결론

본 연구에서는 대구경 쉘드 TBM 공법의 각종 굴착자료를 분석한 뒤 다음과 같은 연구결론을 얻을 수 있었다. 쉘드터널의 일부 극경암을 포함한 암반과 토사로 구성된 복합지반의 특성에 대한 이해 부족, 해외 업체의 국내 암반 특성에 대한 경험 부족, 사전 조사의 미비, 면판 및 디스크컷터 설계의 오류 등으로 예견치 않은 비정상적인 편마모와 디스크 컷터의 탈락이 발생하였으며, 암반구간에서도 디스크 컷터 링과 하우징 강성 부족으로 많은 교체와 수리 시간이 소요되었다. 후행터널 굴착시에는 Komatsu사의 경암용 면판 및 디스크 컷터로 교체하였다. 그 결과 디스크 컷터의 마모도 현저히 줄고 비정상적인 마모도 줄어 디스크 컷터의 교체 지점을 예측하고 계획된 지점에 쉘드TBM 도달전 사전에 그라우팅을 할 수 있어 교체시간외에 그라우팅 시공시간 및 양생시간을 줄일 수 있었다. 또한 쉘드TBM 도달전에 그라우팅을 시공하므로 지반 붕괴와 공동 발생 없이 Disk Cutter를 점검하고 교체하여 공기를 단축시킬 수 있었다. 굴착기간은 평균 굴진율로 예상하는데, 평균 굴진율은 지반조건, 장비 특성, 시공경험으로 결정된 순굴진율에 휴일, 장비 고장 및 수리 시간, 유지관리 시간 등의 Downtime과 세그먼트 조립시간을 고려하여 산정한다. 쉘드TBM의 굴착기간은 현장 전체 공기에 많은 영향을 미치므로 쉘드터널의 설계 및 시공시 철저한 분석이 요구된다. 토사, 복합/암반부에서의 순굴진율과 회전력 및 추진력을 면판별로 비교하면 토사부에서는 토사/복합용 NKK 면판이 경암용 Komatsu 면판보다 저회전력과 저추진력으로 높은 순굴진율을 보였고, 복합/암반부에서는 그 반대의 경향을 보여 지반조건에 따른 적절한 면판 설계의 중요성이 강조되었다.

## 참고문헌

1. Blindheim, O.T. & Buland, A (1998): Boreability Testing, Norwegian TBM Tunnelling, 30 years of experience with TBMs in Norwegian tunneling, Publication No. 11, Norwegian Soil and Rock Engineering Association, Norwegian Tunnelling Society, NFF, pp 21-27.
2. M. Cigla, S. Yagiz and L. Ozdemir(2001), "Application of Tunnel Boring Machines in Underground Mine Development", International Mining Congress, Ankara, Turkey.
3. O.T. Blindheim, E Grov, B.Nilsen(2002), "The effect of mixed face condition on hard rock TBM performance", '02 AITES-ITA World Tunnel Congress. pp24~31.