

# 쉴드 TBM 성능예측모델과 굴진자료 분석을 통한 굴진성능 개선방안

## Improvement Plan of Excavation Performance Based on Shield TBM Performance Prediction Models and Field Data

정혁상<sup>1)</sup> · 강형남<sup>1)</sup> · 최정명<sup>2)</sup> · 천병식<sup>†</sup>

Jung, Hyuksang · Kang, Hyounghnam · Choi, Jungmyung · Chun, Byungsik

**ABSTRACT** : Shield method is the tunnel boring method that propels a steel cylinder in the ground and excavates tunnels at once. After Marc Isambard Brunel started using the method for the Thames Riverbed Tunnel excavation in London, many kinds of TBM (Tunnel Boring Machine) developed and applied for the construction of road, railway, electricity channel, pipeline, etc. In comparison with NATM concept that allows to observe ground condition and copes with difficulty. The machine selected before starting construction is not able to be changed during construction in shield TBM. Therefore the machine should be designed based on the ground survey result and experiment, so that the tunnel might be excavated effectively by controlling penetration speed, excavation depth and cutter head speed according to the ground condition change. This research was conducted to estimate penetration depth, excavate speed, wear of disc cutter on Boondang Railway of the Han Riverbed Tunnel ground condition by TBM performance prediction models such as NTNU,  $Q_{TBM}$ , Total Hardness, KICT-SNU and compare the estimated value with the field data. The estimation method is also used to analyze the reason of poor excavation efficiency at south bound tunnel.

**Keywords** : Shield method, TBM, TBM performance, The han riverbed tunnel, Total Hardness

**요 지** : 쉴드공법은 막장을 굴착함과 동시에 원통형 강재를 지반속에 추진시켜 터널을 축조하는 공법이다. 1818년 마크 브루넬이 런던의 템즈강 하저 굴착공사에 처음 사용한 이래 지반조건에 따른 다양한 쉴드 TBM이 개발되어 도로, 지하철, 전력구, 상하수도 등에 널리 활용되고 있다. 막장상태를 수시로 관찰하며 지반변화에 빠르게 대처할 수 있는 NATM 공법과 달리, 쉴드 공법은 굴진이 시작되면 장비 교체가 거의 불가능하다. 따라서 지반조사 및 실내시험 결과에 따라 적절한 장비를 설계하고, 막장상태에 따라 압입 깊이, 커터헤드 회전속도 등을 효율적으로 관리하여 장비의 성능을 최대한 활용하여 굴착공사를 수행해야 한다. 본 연구에서는 분당선 한강하저터널의 지반조건을 NTNU,  $Q_{TBM}$ , 합경도, KICT-SNU 등의 모델에 적용하여 굴진성능을 예측하고, 실시간 굴진자료와 비교·분석하여 예측모델의 적용성을 검토하였으며, 한강하저터널 하행선의 굴진성능 저하원인을 분석하였다.

**주요어** : 쉴드공법, TBM, 굴진성능, 한강하저터널, 합경도

## 1. 서 론

우리나라는 국토가 좁은데다 70% 이상이 산악지역이라 도로나 철도 건설에 있어 터널이 차지하는 비중이 적지 않다. 또한 대도시로의 인구 유입이 가속화되어 지하철이나 지하도로의 수요도 늘어나고 있는 실정이다.

하지만 지금까지 국내 대부분의 터널에 적용된 NATM 공법은 작업환경이 열악하여 사고 위험이 높고, 발파 소음과 진동에 의한 민원발생이 잦아 최근에는 쉴드공법이 많이 적용되고 있다.

국내에서는 1980년대 후반부터 전력구 공사를 시작으로 직경 5m 이하의 소구경 쉴드터널을 많이 시공하였으나, 대구경 쉴드터널 시공실적은 광주지하철 TK-1공구, 부산지하

철 230공구 등 손에 꼽을 정도로 미미하다. 최근 분당선 왕십리~선릉간 제3공구, 인천공항철도 2B-5공구를 비롯하여 서울지하철 703, 704, 909공구 등 대구경 쉴드 TBM을 이용한 공사가 늘어나고 있기는 하나, 축적된 기술력이 부족하여, 장비 계획 및 선정에 외국의 장비회사에 전적으로 의존하고 있고 공사에 많은 어려움을 겪어왔다.

장비가 투입되어 굴착공사가 시작되면 변경이 거의 불가능하기 때문에 지반조건 및 공사환경에 맞춘 적절한 장비설계가 무엇보다도 중요하며, 막장변화에 따른 효율적인 장비운영이 공사의 성패를 좌우하게 된다.

본 연구에서는 분당선 3공구 한강하저구간의 지반조건을 NTNU,  $Q_{TBM}$ , 합경도, KICT-SNU 등의 TBM 성능예측모델에 적용하여 디스크 커터 압입깊이, 순굴착속도, 디스크 커

1) 정회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

2) 정회원, (주)대우건설 분당선하저터널현장 대리

† 정회원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

터 소모량 등을 산정하였다. 또한 선형절삭시험 결과와 실시공 굴진자료를 예측모델 결과와 분석하여 적용성을 검토하였으며, 하행선 굴착중 발생한 굴진성능 저하 원인을 분석하고 개선방안을 제시하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 쉘드 TBM의 기본설계이론

#### 2.1.1 추력

밀폐형 쉘드 TBM에 필요한 추력은 쉘드 외판과 지반 사이의 마찰력과 굴진면에 대한 지지압력 등을 고려하여 식 (1)과 같이 계산된다.

$$F_{Th} = F_c + F_s + F_f + \Delta F \quad (1)$$

여기서,  $F_c$  : 커터 작용하중

$F_s$  : 굴진면의 지지압력으로 인한 하중

$F_f$  : 쉘드 외판과 지반 사이의 마찰력

$\Delta F$  : 안전여유

그림 1에 밀폐형 쉘드 TBM 굴진에 필요한 추력에 대한 상세한 그림 이다.

#### 2.1.2 토크

커터헤드가 회전하기 위해서는 암반 굴진면에서 디스크 커터의 회전 등으로 인한 저항력을 극복할 수 있는 충분한 토크가 필요하다. 또한 이수식, 토압식 등의 밀폐형 쉘드 TBM은 이수 또는 굴착토의 저항력을 극복할 수 있어야 한다. 그림 2에 밀폐형 쉘드 TBM에 필요한 구동 토크를 나타내었다.

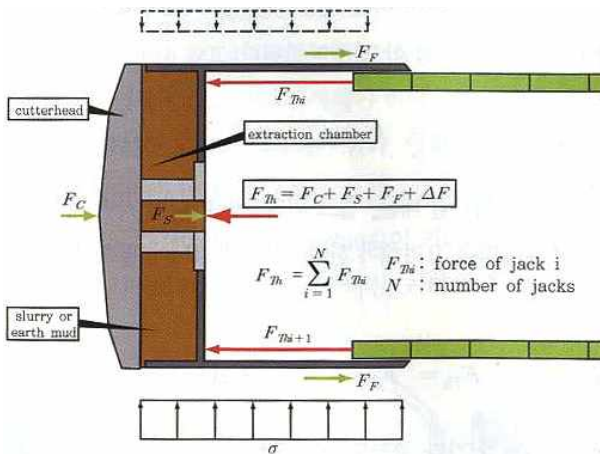


그림 1. 밀폐형 쉘드 TBM 굴진에 필요한 추력

$$M_D = M_C + M_S + \Delta M \quad (2)$$

여기서,  $M_D$  : 쉘드 TBM에 필요한 구동 토크

$M_C$  : 굴착도구에 의한 저항 토크

$M_S$  : 이수 또는 굴착토에 의한 저항 토크

$\Delta M$  : 안전을 위한 여유 토크

### 2.2 쉘드 TBM의 굴진성능 예측

#### 2.2.1 CSM 모델

CSM 예측모델은 미국 콜로라도 광산대학(Colorado School of Mines, CSM)에서 20~30년 이상 축적한 방대한 현장자료 및 실험실 시험결과에 근거해 제시한 TBM 설계모델이다. CSM 예측모델을 활용하기 위해서는 암석학적인 분석, 암석의 일축압축강도(변형특성 포함), 간접인장강도, 밀도 및 세르샤 마모시험 등이 필요하다.

CSM 예측모델에 근거해 TBM 성능을 예측하기 위해서는 일단 암반 및 지질자료를 모델에 입력하고 몇가지 선택 사항들 가운데 한 조건에 대한 검토를 수행한다. 기존 TBM에 대한 예측을 할 경우에는 커터 종류, 커터 배열, 추력, 토크, 동력 등 TBM 장비에 대한 정보를 입력한다. 새로운 TBM을 설계하는 경우에는 CSM 모델에 의해서 굴착대상 지반조건에 적합한 TBM 사용과 최적 커터헤드 구성을 산출할 수 있다.

그러나 CSM 모델은 실제 TBM 설계에서 핵심적인 커터헤드 설계, 최적 굴진속도 산출 및 커터수명 예측 등에 대해서는 공개하지 않고 있기 때문에 실제 활용에는 한계가 있다.

#### 2.2.2 NTNU 모델

NTNU 모델은 노르웨이 과학기술대학(Norwegian University of Science and Technology, NTNU)에서 개발된 방법으로, 노르웨이 지반조건에 대해 수십년간 축적된 자료에 근거해 얻어진 경험적인 TBM 설계·평가 기술이며(NTH, 1995), 모

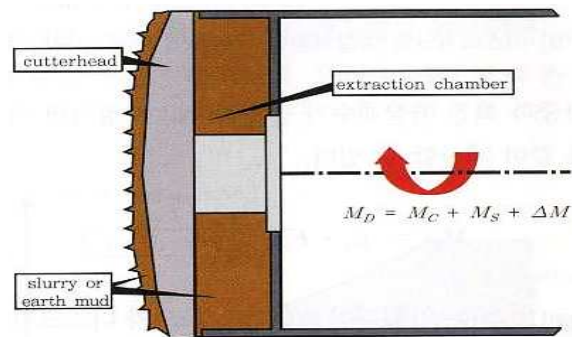


그림 2. 밀폐형 쉘드 TBM에 필요한 구동 토크

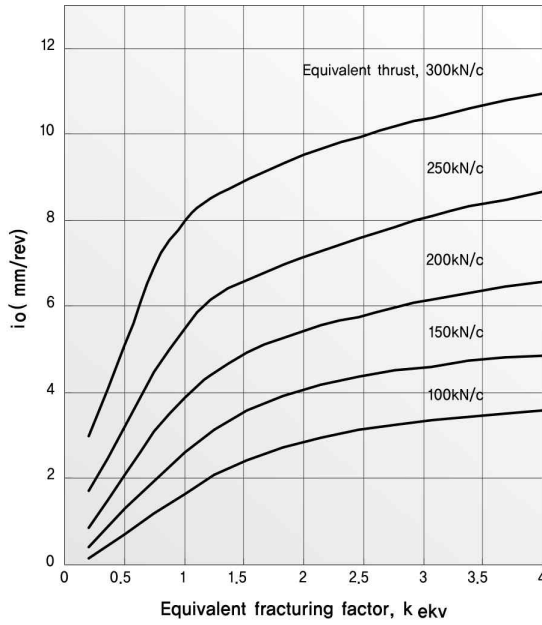


그림 3. 압입깊이산정(NTNU, 1998)

은 활용과정과 시험방법들이 공개되어 있다는 점에서 활용성이 매우 높다.

Siever's J-value test(모형 천공시험), Brittleness test(취성도 시험)를 수행하여 DRI(Drilling Rate Index, 천공속도지수)를 산정하고 암반의 절리간격, 커터직경, 커터간격, 추력 등을 고려하여 순굴삭 속도를 예측한다. 그림 3에 압입깊이 산정에 대한 그림을 나타내었다.

### 2.2.3 $Q_{TBM}$

Barton에 의해 제시된 Q-system 및 암반분류 기준은 노르웨이 터널공법인 NMT(Norwegian Method of Tunnelling) 등의 천공-발파 터널에 널리 사용되어 왔다. 그 후 Barton (2000)은 TBM의 굴진성능을 예측하기 위해 Q값을 수정·보완한  $Q_{TBM}$ 을 제시하기에 이르렀다.

Barton에 의해 개발된  $Q_{TBM}$  분석시스템의 활용에 필요한 기본적인 입력자료는 Q값, 일축압축강도  $\sigma_c$ (MPa), 점하중강도  $I_{50}$ (MPa), 단위중량 $\gamma$ (g/cm<sup>3</sup>), 석영함유량  $q$ (%), 공극률  $n$ (%) 그리고 터널연장  $L_t$ (km) 등으로 구성된다. 이를 정리하여 식 (3)과 (4)에 나타내었다.

$$Q_{TBM} = Q \left( \frac{\Sigma}{F_T^{10}/20^9} \right) \left( \frac{20}{CLI} \right) \left( \frac{q}{20} \right) \left( \frac{\sigma_\theta}{5} \right) \quad (3)$$

$$PR = 5(Q_{TBM})^{-0.2} = 5 \left[ Q \left( \frac{SIGMA}{F_T^{10}/20^9} \right) \left( \frac{20}{CLI} \right) \left( \frac{q}{20} \right) \left( \frac{\sigma_\theta}{5} \right) \right]^{-0.2} \quad (4)$$

여기서,  $F_T$  : 추력(tonf)

$CLI$  : Cutter Life Index

$\sigma_\theta$  : 접선응력(MPa)

$SIGMA$ : 평균 커터 연직하중(단위는 kN)

### 2.2.4 합경도 모델

합경도는 슈미트해머(Schmidt hammer)로 측정되는 현지 암반의 반발경도( $H_R$ )와 실험실 실험에 의한 마모경도( $H_A$ )에 의해 다음 식 (5)와 같이 정의되며(Tarkoy 등, 1975), 굴삭속도 및 커터 소모율과의 상관성이 높은 것으로 알려져 있다.

$$H_T = H_R \sqrt{H_A} \quad (5)$$

### 2.2.5 KICT-SNU 모델

KICT-SNU 모델은 LCM, DRI, CLI 등의 시험결과와 제반자료에 근거하여 TBM 면판설계와 굴진성능을 예측하기 위해 한국건설기술연구원과 서울대학교에서 공동연구하여 개발한 모델이다. 국내 8개 암석조건에 대해 실시한 51회 선형절삭시험으로부터 얻어진 커터 작용하중과 절삭 비에너지, 최적 절삭조건, 임계압입 깊이, DRI와 CLI 등의 기본 물성 자료에 근거해 디스크 커터에 의한 제반 절삭성능을 정량화하고 이를 통해 설계용 예측모델을 도출하였다.

$$F_n = 29.59 + 0.36S + 16.22P + 6.57 \frac{S_c}{S_t} - 0.67SJ - 0.59S_{20} - 1.76AVS \quad (6)$$

$$F_r = 2.92 + 0.03S + 1.33P + 0.20 \frac{S_c}{S_t} + 0.01SJ - 0.10S_{20} - 0.04AVS \quad (7)$$

$$SE = 6.53 - 0.03S + 0.09P + 0.08 \frac{S_c}{S_t} + 0.01SJ - 0.05S_{20} - 0.02AVS \quad (8)$$

$$S/P_{opt} = 14.47 - 0.31 \frac{S_c}{S_t} + 0.02DRI + 0.07CLI \quad (9)$$

$$P_{critical} = 9.26 + 0.08SJ - 0.08S_{20} + 0.09AVS \quad (10)$$

여기서,  $F_n$  : 평균 커터 연직하중(단위는 kN)

$SJ$  : Siever's J-value test

$AVS$  : Abrasion Value Steel

$F_r$  : 평균 커터 회전하중(단위는 kN)

$S$  : 커터 간격(단위는 mm)

$P$  : 커터 압입깊이(단위는 mm)

$S_{20}$  : Brittleness test

$S_c$  : 압축강도(단위는 MPa)

$S_t$  : 인장강도(단위는 MPa)



또한, 방향제어시추(DCD, Directional Core Drilling) 및 3D 전기비저항 탐사결과 2km900~2km960(L=60m)에 터널을 가로지르는 단층대가 발견되었다.

하상구간은 비교적 신선한 경암반(평균 일축압축강도 170 MPa)으로 구성되어 있으며, 강북구간에 60m 폭의 단층과 쉐대 1개소와 강남구간에 2개소의 연약대가 분포하고 있는 것으로 파악되었다.

하상구간의 저수로 폭은 710m, 하폭은 773m이며, 평수위는 2.95m, 최대홍수위는 16.68m로 조사되어 터널상부에 미치는 평시 수압은 310kPa, 최대홍수위시 수압은 470kPa로 예측되어 굴진중 막장면을 통한 고수압 발생 가능성을 내재하고 있었다.

### 3.2 현장 굴진자료 분석

#### 3.2.1 상·하행선 계측결과 비교

셸드 TBM 계측관리의 목적은 굴진 중 직접 관찰하기 어려운 지반상태를 파악하여 막장의 안정을 안정시키고 굴착속도를 향상하는데 있다.

추력은 암반의 강도를 판단할 수 있는 가장 기본적인 기준이 된다. 일반적으로 약한 암반에서는 낮은 추력으로 굴착이 가능하지만, 암반의 강도가 높아질수록 높은 추력을 가해야 한다.

셸드 TBM의 순굴착속도 PR(mm/min)은 디스크 커터 압입깊이  $P_c$ (mm/rev)와 커터헤드 회전속도 N(rpm)의 곱으로 산출되므로, 순굴착속도 향상을 위해 적절한 압입깊이의 확보는 무엇보다도 중요하다.

KICT-SNU 모델을 통해 예측한 과업구간의 최적 압입깊이는 6.0mm/rev였으며, 상·하행선의 평균 압입깊이는 각각 4.55mm/rev, 2.72mm/rev를 기록했다.

상·하행선의 최대 이격거리가 6m에 불과한 점과 계측값의 거동으로 미루어 볼 때 암질은 거의 동일한 것으로 보인다.

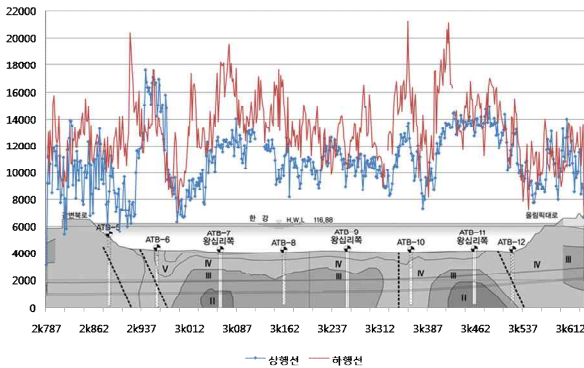


그림 9. 굴착중 추력 계측

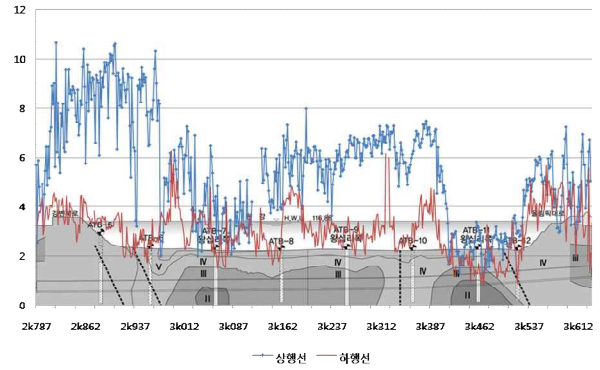


그림 10. 굴착중 압입깊이 계측

다. 하행선의 추력이 상행선보다 20%정도 높았음에도 불구하고 순굴착속도가 저하된 이유는 압입깊이가 매우 낮았기 때문인 것으로 분석되었다.

#### 3.2.2 상·하행선 순굴착속도

상행선의 순굴착속도는 평균 0.88m/hr인 반면 하행선은 평균 0.49m/hr에 그쳤으며, 거의 모든 구간에서 하행선의 순굴착속도가 상행선보다 매우 낮았다.

#### 3.2.3 디스크 커터 소모량

한강하저터널 1,691m를 굴착하면서 총 1,263개의 디스크 커터가 소모되었으며, 이 중 정상 마모된 커터의 비율은 78%였다.

상행선 굴착에 사용한 커터는 378개였고, 하행선은 885개로 상행선의 234%에 이르렀다. 잦은 커터 점검 및 교환으로 편마모 수량은 줄었지만, 하향굴착으로 인해 파손된 디스크 링과 비트가 챔버안에 잔류하며 디스크 링에 충격하중

표 1. 상·하행선의 순굴착속도 비교표

구 분	상 행 선	하 행 선
최고 순굴착속도	1.73m/hr	1.12m/hr
최저 순굴착속도	0.29m/hr	0.14m/hr
평균 순굴착속도	0.88m/hr	0.49m/hr

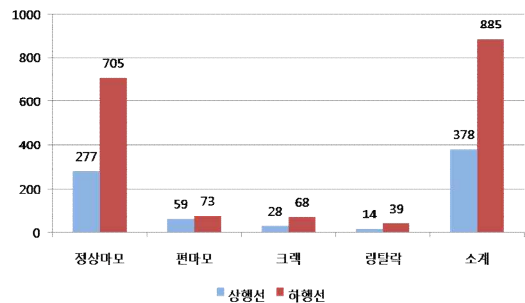


그림 11. 마모 유형별 디스크 커터 소모량



(a) 정상마모 (b) 편마모



(c) 디스크 링 크랙 (d) 디스크 링 탈락

그림 12. 굴착중 압입깊이 계측 디스크 커터의 마모 유형

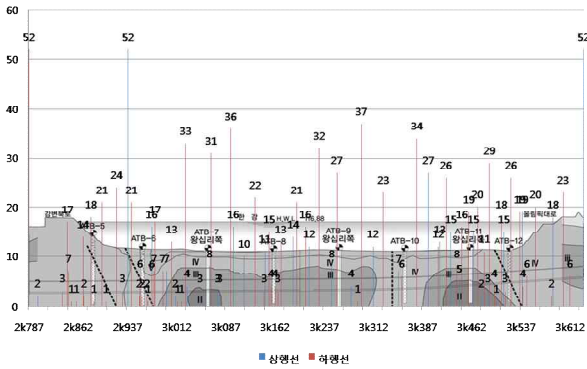


그림 13. 구간별 디스크 커터 교환 수량

을 주어 크랙과 탈락 비율은 여전히 높았다.

구간별 커터 교환수량을 살펴보면 연경암 및 경암 구간 보다 파쇄대 및 극경암 구간에서 교환 횟수가 잦고 교환 수량이 많았다.

## 4. 굴진성능 예측모델의 적용성 검토

### 4.1 시추 위치별 계측결과 및 예측모델의 적용성 검토

실제 굴착속도와 예측모델을 통해 산정된 굴진속도와 비교하기 위해 시추조사 지점을 중심으로 10.5m(7링) 계측결과를의 평균을 대표값으로 하였으며, 하행선의 경우 굴진성능 저하가 심각하여 상행선 굴진정보만 예측모델 값과 비교하였다.

예측모델의 적용성 검토는 지반특성 중 일축압축강도와 커터 하중만을 변수로 적용한 모델과 장비과 암석의 다양한 물성치를 변수로 적용한 모델로 나누어 진행하였다.

표 2. 시추 위치별 상·하행선 순굴착속도(m/hr)

시추No.	6	7	8	9	10	11	12
상행선	1.08	0.97	1.03	1.17	1.14	0.69	0.74
하행선	0.47	0.39	0.47	0.58	0.50	0.28	0.30

표 3. 일축압축강도에 의한 예측값과 실제 굴착속도(m/hr)

시추No.	6	7	8	9	10	11	12	평균
KOMATSU	1.37	1.19	1.33	1.13	1.11	1.13	1.06	1.19
Graham	1.50	1.27	1.42	1.21	1.17	1.20	1.08	1.26
Farmer & Glossop	2.37	2.02	2.25	1.91	1.86	1.90	1.72	2.00
상행선	1.08	0.97	1.03	1.17	1.14	0.69	0.74	0.97

#### 4.1.1 일축압축강도를 변수로 적용한 모델

암반의 일축강도와 디스크 커터의 허용하중만으로 굴착속도를 예측한 KOMATSU, Graham, Farmer와 Glossop 등의 모델의 예측결과는 실제 굴착속도와 평균 23~106%의 오차를 보였다.

세 가지 모델 중 현장에 적용된 쉘드 TBM의 제작사인 KOMATSU 모델이 가장 유사했으나, 암반의 일축압축강도 외에는 지반의 특성을 전혀 반영하지 않았기 때문에 실제 굴착속도와는 평균 35%의 오차가 발생했다. 일반 경암 구간인 ATB-8~10의 오차는 7%에 불과한 반면, 극경암 구간인 ATB-11,1의 오차는 53%에 이르렀다. 따라서 제한된 조건에서 빠르게 굴착속도를 산정해야하는 경우 적용할 수 있으나, 극경암 구간은 피해야 할 것으로 보였다.

#### 4.1.2 암석의 다양한 물성치를 변수로 반영한 모델

다양한 암석의 특성과 장비 특성을 반영한 함경도, NTNU,  $Q_{TBM}$  등의 모델에 의한 예측도 실제 굴착속도와는 많은 차이를 보였다.

평균값을 비교해보면 함경도에 의한 산출방법이 가장 유사하게 나타났지만, ATB-6과 ATB-12에서만 측정된 값이기 때문에 일반화 하는데 무리가 있고,  $Q_{TBM}$ 은 다른 모델에 비해 지나치게 높게 산출되어 적용에 유의해야 할 것으로 보였다.

가장 많이 활용되고 있는 NTNU 모델의 경우 실제 굴착

표 4. 함경도, NTNU,  $Q_{TBM}$  및 실시공 굴착속도(m/hr)

시추No.	6	7	8	9	10	11	12	평균
함경도	-	1.11	-	-	-	-	1.03	0.31
NTNU	1.25	1.36	1.36	1.29	1.30	1.17	0.91	1.23
$Q_{TBM}$	6.24	5.45	5.92	5.79	5.27	4.60	5.13	5.49
상행선	1.08	0.97	1.03	1.17	1.14	0.69	0.74	0.97

속도와 평균 27%의 오차가 발생했다. NTNU가 주로 노르웨이 지반을 굴착한 Open TBM의 실적을 통해 산출한 경험식이므로 국내 암반에 적합하지 않을 수 있다. 하지만 가장 큰 원인은 실제 굴착공사를 수행하면서 장비의 성능을 최대한 활용하지 못한데 있다.

#### 4.2 암종별 계측결과 및 예측모델의 적용성 검토

추력과 압입깊이, 커터헤드 토크 및 회전속도를 종합적으로 분석하면 암반의 상대적인 강도의 추정할 수 있다. 커터헤드가 강한 암반을 만나서 굴착속도가 낮아지면 추력을 높여서 압입깊이를 회복하고, 암반이 매우 단단하여 압입깊이가 회복되지 않을 경우 커터헤드 회전속도를 높여 굴착속도를 높게 된다. 반대로 약한 암반을 만나서 압입깊이가 너무 높아지면 디스크 커터가 손상될 수 있기 때문에 추력을 낮추고, 커터헤드 회전속도를 조절해 순굴착속도를 조절하게 된다.

계측결과와 약한 추력으로 높은 압입깊이를 유지한 A구간(2km982~3km022)을 연경암, 압입깊이가 높은 상태로 지속된 B구간(3km130~3km395)을 경암, 추력이 높고 압입깊이가 매우 낮은 상태로 지속된 C구간(3km425~3km527)을 극경암의 대표구간으로 설정하였고, 지반조사결과 연약대로 추정된 D구간(3km331~3km349)과 방향제어수평시추를 통해 파악한 단층파쇄대(2km900~2km960)를 E구간을 추가 설정하여 표 5, 표 6과 같이 구간별 계측결과를 비교하였다.

표 5. 암반상태에 따른 계측결과(상행선)

구간	암종	추력 (kN)	압입 (mm/rev)	굴착 (m/hr)	회전 (rpm)	토크 (%)
A	연경암	8,288	5.64	1.32	3.9	28
B	경 암	10,656	6.04	1.13	3.1	31
C	극경암	13,320	2.50	0.60	4.0	30
D	연약대	10,500	6.46	1.20	3.1	33
E	파쇄대	11,338	8.26	1.12	2.3	56
Total	-	10,973	4.55	0.88	3.2	34

표 6. 암반상태에 따른 계측결과(하행선)

구간	암종	추력 (kN)	압입 (mm/rev)	굴착 (m/hr)	회전 (rpm)	토크 (%)
A	연경암	11,596	3.64	0.63	2.9	28
B	경 암	13,223	3.13	0.55	3.0	35
C	극경암	14,697	1.80	0.35	3.3	34
D	연약대	13,591	2.85	0.53	3.1	36
E	파쇄대	14,058	2.70	0.50	3.0	30
Total	-	13,244	2.72	0.49	3.0	34

표 7. 암종별 예측모델의 적용성 평가

구 분	전체구간(평균)		경 암		극 경 암	
	압입 (mm/rev)	속도 (m/hr)	압입 (mm/rev)	속도 (m/hr)	압입 (mm/rev)	속도 (m/hr)
KOMATSU	6.30	1.19	6.30	1.19	5.82	1.10
Graham	6.69	1.26	6.71	1.27	6.04	1.14
Farmer & Glossop	10.60	2.00	10.62	2.01	9.57	1.81
NTNU	6.53	1.23	6.97	1.32	5.50	1.04
$Q_{TBM}$	-	5.49	-	5.66	-	4.87
KICT-SNU	-	-	5.70	1.08	6.00	1.13
실시공(상행선)	4.55	0.88	6.04	1.13	2.50	0.60

암종별 대표구간 계측값과 분당선 3공구 실내시험결과(철도청, 2003), KICT-SNU 모델 시험을 위한 실내시험결과(한국건설기술연구원, 2007)를 토대로 경암과 극경암에서의 압입깊이와 굴착속도를 예측하고, 굴진자료와 비교하였다. 하지만 연경암과 연약대, 파쇄대 구간은 해당 구간에 대한 실내시험 결과가 없어 분석에서 제외하였다.

예측모델 중 비교적 정확한 예측결과를 도출한 KOMATSU와 NTNU, KICT-SNU 모델과 실시공 결과와 비교하면 전체구간은 35~45%의 오차가 발생하였지만, 경암구간에서는 4~15%로 적용성이 매우 높았다. 하지만 극경암 구간에서는 2배 이상의 오차가 나타나 적용이 곤란한 것으로 나타났다.

경암구간에서 일축압축강도만을 변수로 적용한 모델 중에는 KOMATSU 예측방법이 실시공 결과에 가장 근접했으며, 암석의 다양한 물성치를 변수로 적용한 모델 중 KICT-SNU 모델이 NTNU보다 실시공 값과 좀 더 근접했으나, 예측된 압입깊이의 오차가 모두 1mm 이내로 두 모델 모두 높은 적용성을 나타냈다. 하지만  $Q_{TBM}$  오차의 폭이 매우 커서 적용에 유의해야 할 것으로 보였다.

#### 4.3 디스크 커터 소모량 분석

디스크 커터 소모량 예측값과 실제 교환수량은 많은 차이를 나타내었다. 가장 근접한 NTNU 기법조차 2배가량 차이를 보여 직접 적용은 어려울 것으로 판단되었다.

표 8. 디스크 커터 소모량 예측 및 실시공 결과

구 분	상행선	하행선	합 계
KOMATSU 예측	106	131	237
MITSUBISHI 예측	179	322	501
NTNU 기법 예측	227	407	634
실시공 결과	378	885	1,263

## 5. 굴진성능 저하원인 및 개선방안

### 5.1 압입깊이 및 순굴착속도 저하 원인

#### 5.1.1 추력의 손실

순굴착속도는 압입깊이( $P_c$ )와 커터헤드 회전속도(N)의 곱으로 결정되며, 과업구간에서의 커터헤드 평균 회전속도가 상행선 3.4rpm, 하행선 3.0rpm으로 고속이었다는 점을 볼 때, 하행선의 순굴진속도 저하의 주된 원인을 압입깊이 부족으로 볼 수 있다.

상행선 전체 구간의 평균 압입깊이는 4.35mm/rev이며, 효율적으로 굴착작업을 수행했던 A,B구간(연경암 및 경암)의 압입깊이는 5.57~5.61mm/rev에 이르렀다. 이는 KICT-SNU 모델로 분석한 최적 압입깊이(6.0mm/rev)에 거의 근접한 결과였다.

반면 하행선 전체 구간의 평균 압입깊이는 2.72mm/rev로써 상행선의 63%에 그쳤으며, 극경암으로 추정되는 B구간(표 5)의 압입깊이는 1.80mm/rev에 그쳐 상행선의 73%에 머물렀다.

같은 지점에서의 상·하행선 암반 물성은 거의 동일하다고 보여지므로, 압입깊이를 KICT-SNU 모델의 평균 커터 연직하중( $F_n$ ) 산정식에 적용하여 하행선 압입깊이가 상행선 수준까지 도달하기 위한 소요추력을 산정하였다.

하행선 굴착시 상행선보다 평균 2270kN을 더 가했음에도 불구하고 압입깊이는 1.83mm/rev 줄어들었으며, 하행선의 압입깊이를 상행선 수준까지 올리기 위해선 620~2440 kN의 추력을 더 가했어야 할 것으로 분석되었다.

추력을 지나치게 높여 디스크 커터 베어링의 허용하중을 초과하게 되면 커터에 심각한 손상을 주게 되지만, 경암구간을 기준으로 커터가 받은 하중은 188kN/cutter에 불과하다. 오차를 염두해 두더라도, 19인치 디스크 커터의 최대 허용하중이 314kN/cutter라는 점과 70%이하로 관리하는 커터헤드 토크가 30%대에 머물러 있었다는 점을 감안하면 추력을 좀 더 높여도 커터에는 무리가 가지 않을 것으로 예상된다.

지반붕락 방지를 위해 Closed Mode로 굴착한 하행선 시점부를 제외한 나머지 전 구간에서 Open Mode로 굴착한 점과 측정결과로 보아 막장에서 발생한 수압이나 토압은 미약할 것으로 예측되며, 하행선 굴착시 순굴착속도 향상을 위해

표 9. 상·하행선 굴착시 추력의 구성(kN)

위치	추력	$F_n$	커터 총하중	마찰력 ( $\mu=0.35$ )	막장압 (손실압)
상행선	10,973	164	8,528	1,996	449
하행선	13,244	134	6,968	1,996	4,280

상행선보다 높은 추력을 가했음에도 불구하고 압입깊이가 줄어든 것은 추력의 손실이 많이 발생한 것으로 분석된다.

Girmscheid(2005)가 제시한 암반에 대한 마찰계수( $\mu=0.3\sim 0.4$ )과 쉴드 TBM의 무게(5,820kN)로 마찰력을 산정하고, 예측된 총추력에서 커터 총하중과 마찰력을 제외하면 나머지를 막장압 또는 손실압으로 볼 수 있다.

상행선에서 발생한 449kN의 막장압이 하행선에도 같다고 볼 때, 하행선 굴착시 추력의 손실차이는 3,831kN에 달했다. 추력 손실의 가장 큰 원인은 버력의 배토효율 저하에 있을 것으로 예상되며, 스크류 컨베이어 효율과 버력의 상태로 나눠 원인을 밝혀 보고자 한다.

#### 5.1.2 스크류 컨베이어의 배토효율 저하

쉴드터널 공사는 노선의 설계구배에 따라 상행선은 상향, 하행선은 하향 굴착을 시행했다. 이에 따라 하향 굴착을 시행해야 하는 하행선의 경우 스크류 컨베이어의 경사가 급해져 배토효율이 저하되었고, 이로 인해 챔버안에 정체되어 있는 버력이 추력을 감쇄시킨 것이다.

현장에 투입된 스크류 컨베이어의 각도는 22°이며 과업 노선의 최대경사 29% 구간에서는 스크류 컨베이어의 각도가 그림 14와 같이 적용된다.

일본 KAWASAKI 중공업의 연구결과에 의하면 스크류 컨베이어 각도가 19°에서 25°로 바뀌면 배토효율이 32%에서 16%로 급격히 저하되며, 챔버와 커터헤드 외부에 잔류하고 있는 버력은 커터헤드, 챔버, 디스크 커터의 마모를 유발하게 된다.

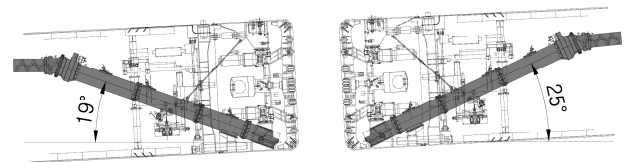


그림 14. 스크류 컨베이어의 각도 변화

#### 5.1.3 굴착버력의 석분화

하행선 굴착시 배토효율이 저하된 또 다른 원인은 굴착 버력의 형상에 있다. 한국건설기술연구원(2007)은 과업구간의 시료를 채취하여 버력크기의 분포를 정량적으로 파악하여 지수화하기 위해 절삭 암편의 파쇄 정도를 나타내는 척도인 CI(Coarseness Index)를 적용한 선형절삭실험을 하였다.

CI값은 암석에 대해 고유한 값이 아니라 각 체를 통과하는 누적 중량비의 합으로 정의되며, CI값이 크다는 것은 상대적으로 절삭 효율이 더 좋다는 것을 의미한다.



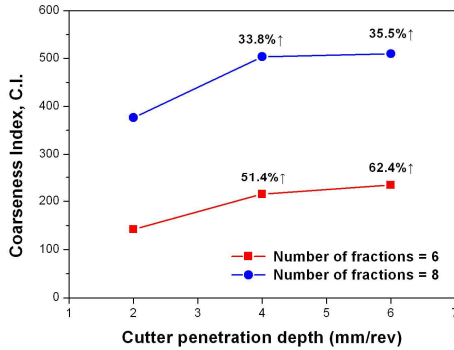


그림 15. 커터 압입깊이에 따른 Coarseness Index의 변화(한국건설기술연구원, 2007)

선형절삭시험은 커터 간격이 78mm로 고정된 상태에서 압입깊이 4mm 및 6mm인 경우로 나누어 실시했으며, 2mm인 경우에는 압편의 발생이 원활하지 않아 커터 간격 30mm로 줄여 시험을 실시하였다.

커터 압입깊이가 2mm에서 4mm 증가할 경우 체의 종류가 6개, 8개인 경우에 C.I값이 각각 51%, 34% 향상되어 효과가 매우 큰 것으로 확인되었으며, 4mm에서 6mm로 증가할 때는 C.I값이 각각 7%, 1% 향상으로 효과가 미약한 것으로 드러났다.

상행선의 경우 4mm 이상의 압입깊이를 유지한 구간이 846m 중 593m인 반면 하행선은 80m에 불과한 점은 하행선의 버력상태가 석분에 가까워 스크류 컨베이어의 배토효율을 저하시킨 것으로 분석된다.

스크류 컨베이어의 배토효율이 저하와 굴착버력의 석분화는 설계구배와 암반조건에 따라 언제든지 발생할 수 있으며, 이를 효율적으로 극복하기 위해서는 굴착버력의 소성유동화가 무엇보다도 중요하다. 월드 선진국인 일본에서는 지반조건과 장비특성에 맞춘 다양한 주입재를 개발하여 활용하고 있지만, 국내에는 이에 대한 연구가 미진한 실정이다.

## 5.2 디스크 커터 소모량 증가 분석

디스크 커터의 소모량 예측은 지반조건이 동일하다는 가정에서 이루어지지만 과업구간의 지질은 파쇄대부터 극경암까지 다양한 암종이 분포하여 소모량이 증가한 것으로 분석되었다. 디스크 커터는 암반의 특성에 따라 베어링의 토크 설정치, 디스크 링의 경도와 열처리 등을 바꿔줘야 하지만 암질 변화를 정확하게 예측하기가 어려우므로 동일한 규격으로 굴착공사를 수행할 수 밖에 없어 소모량이 급증한 것으로 보인다.

월드 TBM 장비가 현장에 반입되면서 커터헤드에 장착된 디스크 커터와 예비 커터 1Set(52EA)는 장비 제작사인 KOMATSU사에서 제작한 제품이었고, 이후에 사용된 커터



(a) 뭉툭하게 마모된 디스크링 (b) 날카롭게 마모된 디스크링

그림 16. 디스크링의 마모 형태

는 국내에서 제작한 제품이었다. KOMATSU 제품을 모두 교환하기까지 312m를 굴착했으며 교환하지 않고 남은 커터가 마모율을 50%로 가정했을 때, 커터 1개당 굴착 거리는 2.33m/cutter로 나타났다. 이후 533m 구간은 커터당 굴진거리는 2.18m/cutter로 약간 저하됐지만, 극경암이 있었다는 점을 감안하면 커터의 품질 차이는 거의 없는 것으로 분석됐다.

예측모델 중 가장 많은 소모량을 도출한 NTNU기법에 의한 예측량과 비교하면 상행선은 167%, 하행선은 217%의 디스크 커터 소모량을 보였다(표 9). 하행선의 마모율이 상행선에 비해 높은 이유는 커터의 마모형태로 찾아볼 수 있다. 커터헤드 전면 암반과의 마찰로 인한 경우 디스크 커터가 뭉툭하게 마모되는 반면, 챔버에 정체된 버력으로 인해 배면 마모가 발생하면 날카로운 형태로 마모되게 된다. 상행선은 정상마모된 디스크 커터 팁의 모양이 뭉툭한 반면, 하행선은 날카로운 형태로 마모된 점으로 볼 때, 하행선 마모의 원인은 순굴착속도 저하 원인과 마찬가지로 스크류 컨베이어를 통해 빠져나가지 못하고 챔버내에서 정체된 버력으로 인한 것으로 분석되었다.

최근들어 우수한 냉각효과로 인해 커터 베어링의 내구성을 증가시키고, 커터의 온도를 낮춤으로써 커터 마모율을 감소시키는 막장주입재의 사용이 시도되고 있다. 스페인 Guadarrama 고속철도 터널에 막장주입재를 적용한 결과 마모성이 높은 지반조건(CAI=5.66, Extremely Abrasive)에서도 커터 마모율을 15% 감소시키는 효과를 얻었다. 따라서 커터의 온도를 낮추며, 버력의 소성유동화를 도와 커터의 마모율을 저감시키는 막장주입재에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 TBM의 굴진성능 예측모델로 산출한 압입깊이, 순굴착속도, 디스크 커터 소모량을 분당선 한강하저터널 굴진자료와 비교하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) TBM 굴진성능 예측모델로 순굴착속도를 예측한 결과 일축압축강도에 의한 예측은 평균 1.19~2.00m/hr이었으며, 합경도는 1.07m/hr, NTNU기법은 1.23m/hr로 나타났으며,  $Q_{TBM}$ 에 의한 예측은 5.49m/hr로 지나치게 높게 추정되어 적용에 유의해야 할 것으로 나타났다. 경암과 극경암 구간에서의 굴진성능 예측모델의 적용성을 평가한 결과 KOMATSU, NTNU, KICT- SNU 모델이 경암에서의 적용성이 매우 높게 나타났으며, 극경암 구간에서는 2배 이상의 오차가 발생하여 적용이 곤란한 것으로 나타났다.
- (2) 분당선 한강하저터널(L=846m)은 단선병렬로 두 개의 터널을 굴착하였으며 평균 순굴착속도는 상행선 0.88m/hr, 하행선 0.49m/hr였으며, 평균 압입깊이는 상행선 4.55 mm/rev, 하행선 2.72mm/rev로 하행선에서 심각한 굴진성능 저하가 일어났다. 하행선 굴착은 하향구배로 인한 스크류 컨베이어의 경사각이 커져 배토효율이 저하되었고, 디스크 커터의 압입깊이가 낮아 막장에서 굴착된 버력이 석분화 되었다. 챔버안에 정체된 버력은 추력의 손실을 가져와 막장에 가해진 추력이 상행선 보다 평균 1560kN의 부족했던 것으로 분석되었다. 굴진속도 향상을 위해서는 부족한 추력을 가해주고 커터의 압입깊이를 높여 버력을 골재화하여 스크류 컨베이어의 배토효율을 높여야 할 것으로 보이며, 약조건에서도 버력을 소성유동화 시켜 배토효율을 높일 수 있는 막장주입재에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.
- (3) KOMATSU는 디스크 커터 소모량을 237개로 예상하였으며, 굴진정보를 MITSUBISHI와 NTNU의 예측모델에 적용한 결과 각각 501개, 634개를 소모할 것으로 예측

하였다. 하지만 실제 굴착중 소모된 디스크 커터의 양은 1,263개에 이르렀으며, 하행선의 소모량은 상행선의 2.3 배에 달했다. 디스크 커터는 암반특성에 따라 일부 사양을 변경해야 하지만, 동일한 사양의 커터로 파쇄대에서 극경암에 이르는 다양한 암종을 굴착하여 마모량이 급증한 것으로 보이며, 특히 하행선의 커터 소모량 급증은 챔버에 정체된 버력에 의한 배면마모 발생으로 분석되었다.

## 참 고 문 헌

1. 철도청 (2003), 분당선 왕십리~선릉간 복선전철 제3공구 노반건설공사 지반조사보고서, pp. 23~55, 169~196.
2. 한국건설기술연구원 (2007), 쉘드 TBM 굴진성능 평가 보고서, pp. 15~63.
3. Barton, N. (2000), *TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock*, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 87~98.
4. Girmscheid, G. (2005), *Tunnelortriebsmaschinen-Votriebsmethoden und Logistik, Betonkalender, Gertigteile und Tunnelbauwerke*, Teil I. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, pp. 119~256.
5. KAWASAKI Heavy Industries, LTD. (2003), *8.16m $\Phi$  E.P.B. Dual Mode (Open/Close) Type Tunnel Boring Machine*, pp. 14
6. MITSUBISHI Heavy Industries, LTD. (2004), *Estimation of Disc Cutter Consumption ( $\Phi$ 8100mm EPB Shield TBM)*, pp. 1~6.
7. NTH (1995), *Hard Rock Tunnel Boring*, Project Report, pp. 1~94.
8. NTNU (1998), *Advance Rate and Cutter Wear*, Hard Rock Tunnel Boring, Vol. 3, pp. 10.
9. Tarkoy, P. J. and Hendron, A. J. (1975), *Rock Hardness Index Properties and Geotechnical Parameters for Predicting Tunnel Boring Machine Performance*, Report prepared for NSF. Dept. of Civil Engineering, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana. IL. 61820, pp. 246~294.

(접수일: 2009. 12. 1 심사일: 2009. 12. 10 심사완료일: 2009. 12. 31)