

기계굴착에서 굴착속도의 발전경향분석

박철환^{1)*}, 박 찬¹⁾, 천대성¹⁾, 신중호¹⁾

Improvement of Tunnelling Speed in Full-Face Mechanical Excavation

Chulwhan Park, Chan Park, Dae-Sung Cheon and Joong-Ho Synn

Abstract Because of Norwegian topography as valleys and fjords, a large number of tunnels has been built and 59 of them have been excavated by TBM for last 30 years. Prognosis technology has been developed and improved through lots of TBM experiences, and the NTNU prediction model has been completed. This paper focuses the improvement of net penetration rate and advance rate in 14 Norwegian and 4 Korean TBM tunnelling sites of which data were reported. Through this period, net penetration rate as well as advance rate were increased to double with the improvement of disc cutter size and cutter arrangement in Norway. These rates in Korea were also increased for 15 years even though the rates were lower compared to Norwegian. It is estimated that these low rates were mainly caused by using disc cutters less than 17 inch diameter. It is expected that net penetration rate and advance rate can be increased by improvement of machine and tunnelling technology, especially by using 17 or 19 inch of the disc cutter size in the Korean full face mechanical tunnelling site.

Key words TBM, Norwegian tunnelling, Net penetration rate, Advance rate, Disc cutter

초 록 노르웨이는 계곡이나 피요르드와 같은 굴곡이 심한 지형 때문에 터널이 많이 건설되었으며, 그 가운데 지난 30년 동안 59개의 터널이 전단면 기계굴착으로 완성되었다. 이러한 기계굴착 경험을 통하여 예측방법이 개발되고 발전되었으며 마침내 국립공과대학인 NTNU에서 예측방법이 체계화되었다. 본 보고는 TBM 굴착자료가 알려진 14개의 노르웨이 터널과 4개의 국내의 터널에서 순굴착속도와 굴진속도를 분석하여, 이들의 발전경향을 연구한 것이다. 이 기간동안 노르웨이에서는 디스크 커터의 직경을 증대시키고 배열을 최적화하여 순굴착속도와 굴진속도를 두배 정도로 증진시켰다. 국내에서도 1980년부터 1990대까지 15년 동안 TBM의 굴진속도는 노르웨이에 비하여 작은 크기이지만 뚜렷이 증가하는 경향을 보였다. 이러한 작은 속도는 암반의 특성에도 기인하지만 17 인치보다 작은 직경의 디스크 커터를 사용한다든 크게 기인된 것으로 판단된다. 향후 국내의 전단면 기계굴착에서 장비와 기술의 개선을 이루고, 특히 17 또는 19 인치의 디스크 커터를 사용한다면 순굴착속도와 굴진속도를 향상시킬 수 있을 것으로 예측된다.

핵심어 전단면 기계굴착, 노르웨이 터널기술, 순굴착속도, 굴진속도, 디스크 커터

1. 서 론

전단면터널 굴착장비가 본격적으로 사용된 지 반세기가 지났다. 국내에서 이 공법은 1985년에 4.5 m 직경의 암반용 TBM을 도입하여 2.26 km 연장의 부산 구덕수로터널에 처음 적용한 이후, 약 20년 동안 총 247 km의 터널의 굴착에 적용되었다. 이에는 암반용 TBM 36건(총

연장 약 180 km)와 실드 TBM 35건(총 연장 약 67 km)의 터널공사가 포함되어 있다. 이러한 적지 않은 TBM 굴착경험에도 불구하고 낮은 순굴착속도로 인하여 국내에서 뚜렷한 공기 단축의 효과를 보여주지 못하고 있어 많은 터널계획에서 이 공법을 적용하지 않고 있는 실정이다.

많은 터널이 굴착된 대표적인 나라인 노르웨이에서 1967년에 수로터널에 처음으로 전단면터널 굴착장비를 사용하였으며, 본격적으로 사용한 것은 1972년 트론하임의 하수터널이었다. 이후 30년 동안에 59개의 터널이 TBM으로 굴착되었다고 보고된 바 있으며, 이 기간에

¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부

* 교신저자 : cwpark@kigam.re.kr

접수일 : 2007년 5월 18일

심사 완료일 : 2007년 6월 25일

도입된 장비는 30대이며 총 연장은 전체 터널연장 약 5,000 km의 5% 수준인 258 km이다. 또한 90년대 초에 완성된 메로케르 터널에서 순굴착속도는 6.40 m/h로 평가되었는데 이러한 기술이 도입되면 우리의 기계굴착 기술을 한층 더 높일 수 있을 것이며 TBM에 의한 굴착이 보다 활발히 적용될 것이다.

본 연구는 노르웨이에서 보고된 14개 암반용 TBM 현장자료를 바탕으로 순굴착속도와 장비의 가동률, 굴진속도를 분석하여 이들의 발전경향을 기술하고 있다. 또한 국내 4개소의 암반용 TBM 현장에서 얻어진 기술은 어떤 수준에 있는가를 분석하였다. 이러한 국내외 기술의 비교분석을 통하여 우리의 미흡한 기술을 파악하고 이를 발전시킬 수 있을 것으로 판단된다.

2. 굴착속도의 정의

전단면터널 기계굴착에서 굴착속도는 순굴착속도(PR, net penetration rate)와 굴진속도(AR, advance rate)의 두 가지 의미를 갖는다. 굴착속도는 굴착거리를 소요 시간으로 나누어 평가하는데, 이 때 소요 시간을 실제 장비가 가동한 시간으로 적용한 것이 순굴착속도이며, 전체 공정에 소요된 시간으로 적용하면 굴진속도가 된다. 이러한 두 가지 소요 시간의 비를 가동률(η)이라 정의하며, 보통 25~60%의 범위에 있다. 이러한 요소들은 굴착이 완료된 후에 굴착속도를 평가하는데 사용된다.

기계굴착 터널설계에서 순굴착속도는 예측된 비트의 압입깊이(p)와 장비의 회전속도(RPM)로부터 식 (1)과 같이 정의되며, 굴진속도는 순굴착속도와 장비의 가동률에 의하여 식 (2)와 같이 정의된다(한국자원연구소, 1991). 일반적으로 순굴착속도는 m/h의 단위를 사용하며, 굴진속도는 m/h의 단위도 사용하지만 매일 또는 매주의 단위로 표시하는 경우가 많다.

$$PR = 60 * p * RPM \quad (1)$$

$$AR = \eta * PR \quad (2)$$

식 (1)에서 알 수 있듯이 비트의 압입깊이는 암반의 여러 가지 특성을 고려한 암반의 굴착저항력과 장비의 능력에 의하여 예측된다. 이러한 예측기법은 노르웨이 국립공과대학(NTNU, 1994)과 미국 콜로라도 광산대학의 두 기관에서 독립적으로 확립되어 전세계적으로 널리 사용되고 있다. 이 두 기관 외에도 장비의 제작회사나 연구가들에 의하여 예측기법이 보고되고 있으나 대부분 단편적인 방법으로 구축되어 있어 활용하는 데에는

한계가 있다.

굴진속도는 식 (2)에서 알 수 있듯이 암반의 굴착저항력과 장비의 능력에 의하여 결정되는 순굴착속도에 비례하며, 동시에 암반 및 장비의 여건을 포함한 여러가지 현장조건에 따라 변화하는 가동률에 비례한다. 따라서 굴착공정을 결정하는 굴진속도를 향상시키기 위해서는 순굴착속도의 정확한 예측이 필수적이며, 가동률을 증대시키는 노력이 요구된다.

순굴착속도 또는 가동률의 평가에서 장비의 가동시간에는 순수 굴착시간 외에도 재정치시간이 포함되기도 한다. 재정치에는 5~10분이 소요되는데 이는 순수 굴착시간의 5~20%의 크기에 해당된다.

3. 우리나라의 기계굴착기술

한국터널공학회의 자료에 의하면 2002년까지 국내 터널의 총연장은 약 700 km 연장의 도시지하철을 포함하여 약 1800 km이다. 국내에서 전단면 굴착공법은 1985년에 직경 4.5 m 크기의 암반용 TBM을 도입하여 안산암과 같은 경질의 암반으로 구성된 2.26 km 연장의 부산 구덕수로터널(부산직할시, 1987)에 처음 적용한 이후, 약 20년 동안 총연장 약 247 km의 터널을 굴착하였다. 이에는 암반용 TBM 36건(총 연장 약 180 km)과 실드 TBM 35건(총 연장 약 67 km)의 터널공사가 포함되어 있다(배규진 외, 2006). 이러한 자료로 미루어 볼 때 TBM에 의한 굴착된 터널의 총 연장은 전체 터널의 약 13% 수준으로, 국내에서 터널굴착에서 기계굴착공법의 사용빈도가 높다고 할 수 있다.

국내에서 직경 3~5 m 크기의 전력구 및 통신구 터널에는 거의 실드 TBM이 사용되었으며, 또한 대구경 터널이나 하저를 통과하는 파쇄지역에도 적용된 바 있다. 이에 반하여 암반용 TBM은 여러 선진국의 경우와 같이 수로터널에 많이 적용되었으며, 21세기 이전까지 굴착이 시작된 현장 가운데 자료가 알려진 터널의 개요는 표 1과 같다. 표에 $\times 2$ 로 표현된 것은 복선으로 시공했음을 뜻하는데 이들 24개 터널의 총 연장은 약 160 km이며, 수자원과 관련한 사업이 15개로 가장 많고, 도로 및 지하철에도 적용되었다. 미국을 비롯한 많은 외국에서는 TBM 장비를 광산의 주운반 갱도굴착에 많이 활용하고 있는데 반하여, 국내에서는 동해신광산에서 벨트콘베어를 설치하는 터널에 4.5 m 직경의 장비를 한번 적용한 바 있다.

도로터널에서 암반용 TBM은 5번 적용되었는데, 남산터널과 죽령터널에서는 4.5~5 m 크기의 파일럿 터널을 기계굴착한 다음 필요한 도로폭을 확보하였다. 약 10

Table 1. Tunnels by hard rock TBM in Korea

	공 사 명	start year	diameter (m)	length (km)
1	부산상수도 구덕수로터널축조	1985	4.5	2.24
2	부산시 지하철 3-0공구	1985	7	1.84
3	주암댐 도수터널 및 부대시설	1986	4.5	8.59
4	남산 제 1호 터널 쌍굴공사	1989	4.5	1.46
5	주암댐 계통 광역상수도	1990	3.3	7.00
6	서울 지하철 5-9공구	1990	7	0.67×2
7	울산공업용수 확장사업 도수터널	1990	3.5	18.12
8	서울 지하철 제 5호선 5-21공구	1990	5	0.63×2
9	북부도시고속도로 - 2공구	1991	6.5	1.78×2
10	북부도시고속도로 - 3공구	1991	6.5	1.66×2
11	영천댐 도수터널	1991	3.5	29.98
12	동해신광산 B/C 설치공사	1992	4.5	7.40
13	해운대 신시가지 우회도로(2,3공구)	1992	4.5	2.20
14	용담 다목적댐 도수터널	1992	3.8	21.9
15	북악터널배수지 건설공사	1992	5	4.79×2
16	수도권 광역상수도 5-4 공구	1994	4.1	5.17
17	한강변 차집관거증설	1994	3	0.90
18	불광 터널배수지	1995	3.5	1.80×2
19	강북 정수장계통 정릉천구간 송수터널	1995	3	2.33×2
20	수도권 광역상수도 5-2공구	1995	5	3.97
21	수도권 광역상수도 1단계 확장공사	1997	3.4	3.64
22	밀양댐 계통 광역상수도사업 터널공사	1997	2.6	7.60
23	중앙고속도로 영주-계천간 죽령터널	1997	5	3.64×2
24	포항권 광역상수도 사업 터널공사	1997	3.3	3.97

m 크기로 확폭하기 위하여 천공발파공법을 주로 사용하는데 남산에서는 기존터널이 인접하고 있고 도심지이기 때문에 11.4 m 크기의 확대굴착기를 사용하였다.

한편 최근 들어 장대터널이 많이 계획되고 있는데 기계굴착을 적용할 예정인 배후령 터널은 굴착이 2007년 중반에 시작되며, 태백산맥을 관통하는 인제터널은 실시설계가 곧 이루어질 예정이다. 춘천에 위치한 5 km 연장의 배후령 터널에서 본 터널은 약 14 m 폭으로 발파에 의하여 다단굴착되는데 이에 병행하는 서비스 터널은 4.5 m 직경의 TBM으로 굴착될 계획이다. 향후 교통량이 증가하면 이 서비스터널은 본선과 같은 크기로 확폭되어 일방향 2차선 도로터널로 계획되어 있다. 그림 1은 위에서 언급한 국내 도로터널에서 TBM으로 파일터 터널을 굴착한 다음 10 m 이상의 폭으로 확대되는 공법의 개요를 도시한 것이다.

4. 노르웨이의 터널굴착기술

4.1. 굴착기술의 개요

노르웨이는 피오르드와 같은 지형으로 인하여 많은 터널이 굴착된 대표적인 나라인데 수로 및 교통용으로 약 5,000 km의 터널이 굴착되었다. 이러한 터널연장은 우리나라의 총 연장에 비하여 3배에 이르는 많은 양이며, 국토 면적이 4배 정도인 것을 고려할 때 두 나라의 터널연장은 비슷한 수준이라 할 수 있다. 그러나 인구가 우리나라의 1/10에 불과한 것을 고려하면 매우 크다고 할 수 있다.

노르웨이에서 1967년에 수로터널에 처음으로 전단면 터널 굴착장비를 사용하였으며, 본격적으로 사용한 것은 1972년 트론하임의 하수터널이었다. 이후 30년 동안에 59개의 터널이 TBM으로 굴착되었다고 보고된 바 있으며, 이 기간에 도입된 장비는 30대이며 총 연장

텔이 완성되었다고 볼 수 있다.

노르웨이 TBM 현장에서는 3개조가 형성되어 매주마다 1개조는 휴식하며 2개조는 교대로 작업하는데, 초창기에는 조당 12시간 근무하였으나 80년대부터는 매일 2교대로 20시간 운영한다. 이는 주간 작업시간이 33.6시간을 초과할 수 없는 지하작업장에 대한 근로조건에 따른 것인데, 작업자들의 작업능률을 향상시키는 것으로 분석되었다. 일요일은 휴무이며 때에 따라 가동하는 토요일 8시간 근무를 포함하여 주간 운영시간은 100~106시간이다.

반면에, 우리나라의 TBM 굴착은 초창기 구덕터널에서 매일 10시간씩 2교대 작업을 시행한 이후 거의 모든 현장에서 매일 12시간씩 2교대로 운영되고 있다. 앞으로 우리나라도 근로조건이 강화되고 근로자의 권익보호가 요구되면 작업시간이 변화되어야 할 것이며, 노르웨이의 운영방안은 본받을 가치가 있다.

4.2. TBM 터널 굴착자료

노르웨이 토질암반공학회에서 1998년에 발간한 Norwegian TBM Tunnelling에는 TBM 굴착의 역사와 시험법, 현장소개 및 기술전망에 대하여 14편의 논문이 수

록되어 있다. 이들 논문에는 59개의 TBM 터널현장이 소개되어 있으며, 그 가운데 14개 현장은 순굴착속도와 가동률, 커터 소모량 등의 상세한 굴착자료를 언급하고 있다. 1980년부터 시작된 14개 TBM 터널의 기술자료는 표 2에서 보는 바와 같이 굴착개시 순으로 언급되어 있다. 표 2에 언급된 기술자료는 터널과 장비의 규격 외에 전체 작업시간과 가동률, 굴진속도, 순가동속도 등이다. 이들 터널은 모두 Holandsfjord 및 Kobbelv, Meråker, Mosvik, Stavanger 등의 지역에서 수행된 수력발전소계획에 따라 건설된 것이다. 대부분의 터널은 수로터널이며 굴착직경은 대체로 3.5~4.5 m이며, 그 외 5 m 이상인 3개의 터널도 언급되어 있다. 여기서 직경이 6.25 m 및 7.8 m인 2개의 터널은 수력사업에 필요한 도로터널이다.

노르웨이에서 도로터널은 TBM으로 굴착한 후에 필요한 도로폭을 확보하기 위하여 하부 가장자리를 발파로 확장하는 방법으로 시공된다. 그림 2는 6번의 Floyfjellet 도로터널의 시공사례를 도시한 것인데 일방향 2차선에 요구되는 도로폭은 9 m이다. 이를 위하여 7.8 m 직경의 TBM으로 굴착한 다음 양쪽으로 각각 약 2 m, 면적은 약 3 m²을 확폭하였다. 이 공법은 강한 암반에서 지보와 라이닝을 거의 하지 않기 때문에 가능한 것이며, 전단면

Table 2. Technical data for 14 Norwegian and 5 Korean TBM tunnels

Tunnel	Starting Year	Tunnel Length (km)	Cutterhead Dia.(m)	Disc Size (inches)	Working Time (week)	Degree of Op. (%)	Ad. Rate (m/week)	net PR (m/h)	
1	Brattset-1	1980	8.15	4.5	15.5	67	40.4	122	2.85
2	Brattset-2	1980	7.00	4.5	15.5	61	28.3	115	2.50
3	Stolsdal	1981	7.80	3.5	15.5	116	38.4	67	1.65
4	Mosvik	1982	5.39	3.5	15.5	37	56.6	147	2.45
5	Holandsfjord	1984	4.33	6.25	15.5	54	38.1	81	2.00
6	Floyfjellet	1984	6.85	7.8	17	94	45.4	73	1.52
7	IVAR	1989	8.07	3.5	16.2	51	34.9	159	4.30
8	Gutter-220	1989	9.27	3.5	17	73	45.3	127	2.78
9	Storglomvatn-1	1989	6.02	4.3	19	48	32.4	125	3.76
10	Bogva	1989	11.86	4.3	19	66	49.6	181	3.55
11	Staupaga	1990	8.22	3.5	19	64	34.5	130	3.69
12	Storglomvatn-2	1991	7.82	5.0	19	57	48.7	137	2.74
13	Vegdalen	1991	6.16	3.5	17	30	50.7	200	3.85
14	Meråker	1991	9.65	3.5	19	42	40.2	230	6.40
GD	Goodeok	1985	2.25	4.5	(14)	208 op. days, 11 m/day			
JA	Juam	1987	8.60	4.5	14	149	30.1	58	1.13
NS	Namsan	1989	1.46	4.5	16.7	28	23.5	52	1.62
YD	Yongdam	1994	21.11	3.8	16.7	322	21.8	65	1.88
JR	Jookryung	1997	3.62	4.5	16	37	31.4	98	2.30

발파공법에 비하여 총 굴착비용은 약 10% 정도 절감된 것으로 평가되었다. 이러한 비용절감에는 75% 절감된 지보비용과 공기단축이 포함되어 있어 그림 1에서 소개한 우리의 확폭방법은 강한 암반에서는 재고되어 그림 2와 같은 기술이 습득되어야 할 것으로 평가된다.

표 1에서 언급된 많은 TBM 현장 가운데 굴착자료가 알려진 국내 현장은 많지 않지만, 국내의 기계굴착기술을 비교평가하기 위하여 수자원 사업과 도로건설에 시행된 5개의 국내 현장자료를 표 2에 함께 수록하였다. 이들의 굴착개시 시기는 1985년부터 1990년 후반이다. TBM 장비가 국내에 도입되어 처음 적용된 것은 1985년으로 국제적으로나 노르웨이에 비하여 뒤늦게 건설된 것임에 불구하고 구덕수로터널의 상세한 현장자료는 알려져 있지 않다. 이 현장에서 1.2 m 길이의 1 stroke를 굴착하는데 소요된 시간은 약 50분이며, 재설치 시간 10분으로 분석되어 순굴착속도는 1.4 m/h 정도로 알려져 있으며, 굴착을 수행한 일수는 208일로서 전체 평균 11 m/day로 기록되었다.

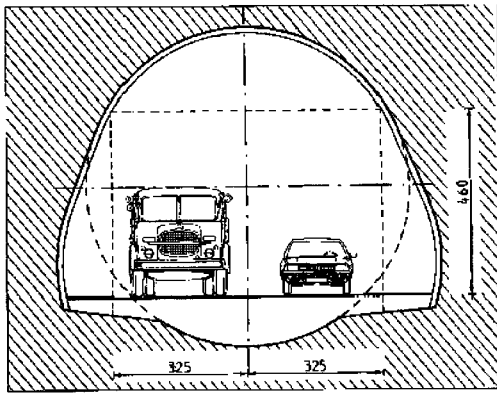


Fig. 2. Cross section of the double lane road tunnel in No. 6 Floyfjellet (after Blindheim, 1998)

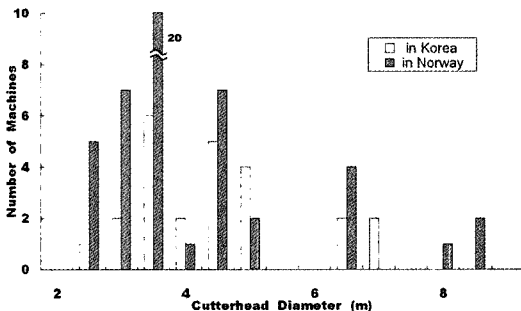


Fig. 3. Number of TBMs used in Korea and Norway

4.3. 굴착장비의 발달

1990년대에 이르러 전자장비의 발달로 인하여 TBM 장비도 많은 발전을 이룩하였지만, 순굴착속도의 향상에는 장비규모의 발전이 직접적으로 영향을 미친다. 장비의 규모는 굴착직경으로 표현할 수 있지만 실제로 굴착기술의 발전과 무관하며, 연도별 증가추이도 없다. 그림 3은 표 1과 표 2에 언급된 터널들을 포함하여 공사개요가 알려진 현장에서 사용된 장비의 구경별 사용빈도를 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 약 3.5 m 직경의 장비가 많이 사용되었는데, 국내 24개 현장 가운데 6개 및 노르웨이의 59개 현장 가운데 20개의 현장에 적용되었다. 이러한 크기는 맴의 여수로 및 도수 터널에 가장 적절한 크기임을 의미한다.

장비가 발달하면서 커터의 직경이 점점 증가하고 있는데 이는 굴착속도의 증대에 직결되고 있음을 표 2를 통하여 알 수 있다. 전단면 굴착장비의 개발단계에서는 9~12 인치 크기의 커터가 장착된 것으로 알려져 있으며, 14 인치로 발전하였다가 표 2에서 알 수 있듯이 1980년대 초반에는 15.5 인치가 사용되었다. 이후 17 인치를 거쳐 1990년 이후에는 19 인치의 크기를 주로 사용하고 있으며, 최근에는 21 인치의 사용을 고려하고 있다. 이와 같이 커터의 직경은 점점 증가하여 왔는데 이는 굴착공학적 측면에서 가장 중요한 장비의 발전이라 할 수 있다. 커터가 커짐에 따라 커터에 가하는 추력이 증대될 수 있으므로 압입깊이가 증가하며, 또한 그림 4와 같이 커터헤드의 회전속도를 증가시킬 수 있다. 이러한 요소들은 식 (1) 및 식 (2)에 의하여 순굴착속도 및 굴진속도의 향상에 직결되는 직접적인 영향요소들이다.

표 2에서 노르웨이의 14번째인 메모케르 터널에서 순굴착속도는 6.40 m/h로 이전의 다른 현장에 비하여 크게 증대되었는데, 이는 과거의 경험을 바탕으로 많은

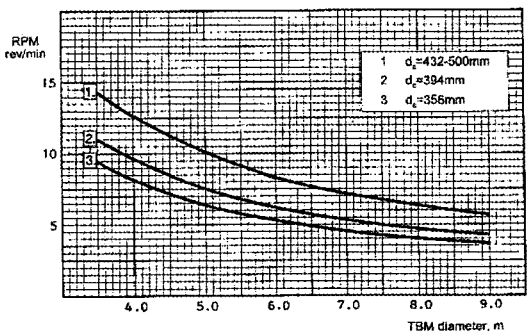


Fig. 4. Cutterhead speed on cutter size and TBM diameter (after NTNU, 1994)

기술이 개선된 것에 기인한 것으로 평가되었다. 이러한 기술개선에는 커터의 직경증대와 함께 커터헤드에 장착되는 커터의 간격을 조정한 것이 가장 중요한 것으로 평가되었다(박철환 외, 2005, Johannessen 외, 1993).

5. 굴착속도의 발전

본 연구에서는 식 (1)이나 식 (2)에서 정의한 굴착속도의 예측과는 별도로 여러 현장에서 수행되어 얻어진 순굴착속도와 굴진속도에 대하여 분석하였다. 표 2에서 알 수 있듯이 노르웨이에서는 1980년부터 90년대 초반까지 굴진속도나 순굴착속도는 점진적으로 증가한 것을 알 수 있다.

5.1. 순굴착속도의 발전

순굴착속도의 연도별 추이를 그림으로 표현하면 그림 5와 같은데, 노르웨이 14개 현장에서 80년대 초반에는 그 크기가 1.5~2.8 m/h이며 90년 전후에서는 2.7~3.8 m/h로 증대하여 발전한 경향을 뚜렷이 확인할 수 있다. 특히 1991년에 굴착을 시작한 메로케르 터널에서는 아주 높은 6.4 m/h를 기록하여 10 km를 11개월에 굴착을 완료하였다. 이 터널의 지질개황은 앞의 여러 터널과 유사한 압중으로 구성되어 있을 뿐 만 아니라 강도가 300 MPa에 달하는 괴상의 반상반려암이 상당부분 포함되어 있어, 굴진속도와 순굴착속도의 향상은 앞에서 설명한 커터직경의 증대와 커터간격 조정 등의 기술개선에 전적으로 기인하고 있다. 이 터널 외에도 표 2의 9번~12번의 4개 터널에서도 19 인치 커터를 장착하여 비교적 높은 순굴착속도를 기록하여 커터의 직경 크기가 큰 영향요소임을 알 수 있다.

표 2에 언급된 국내의 4개 현장은 순굴착속도는 1.1~2.3 m/h에 불과하였다. 국내의 현장은 노르웨이 현장보다 늦게 시작되었음에도 불구하고 위와 같이 낮은 순굴착속도를 보이는 이유는 대상 암반과 장비운영자의 경험의

차이에도 기인하며 동시에 장비가 도입된 지 오래되어 사용한 커터의 크기가 14 인치 및 16 인치이기 때문이다. 이런 관점에서 국내에 도입된 기존의 장비를 사용할 때 추력이나 회전력의 크기가 허용하는 범위에서 19 인치 또는 17 인치 크기의 커터를 장착할 수 있는 새로운 커터헤드의 설계가 필요하다고 판단된다.

이렇게 순굴착속도가 노르웨이에 비하여 낮음에도 불구하고 순굴착속도는 점점 증가하는 경향을 보이고 있어 우리의 굴착기술도 발전한다고 볼 수 있다. 따라서 커터의 크기와 배열을 조정하는 등과 같은 장비를 개선하면 보다 높은 순굴착속도를 갖는 굴착작업이 이루어질 것으로 예측되어 국내의 기계굴착기술의 발달은 희망적으로 관측된다. 보다 더 큰 크기의 커터를 사용하여 추력을 증대시킨다면 메로케르 터널에서와 같은 속도는 아니더라도 3~4 m/h의 순굴착속도를 얻을 수 있을 것으로 예측된다.

5.2. 굴진속도의 발전

노르웨이 14개 현장에서 굴진속도의 연도별 추이를 그림으로 표현하면 그림 6과 같으며, 그림 5와 비슷한 경향을 보이고 있다. 80년대 초반의 6개 현장에서는 표 2에서 알 수 있듯이 67~147 m/week로 다양하게 나타났다. 이는 굴착직경의 크기에 따라 달라지는 경향을 확인할 수 있다. 즉 5번과 6번 터널은 직경이 비교적 크기 때문에 80 m/week 내외로 낮은 굴진속도를 보였으며, 3번을 제외한 3.5~4.5 m 직경의 3개 터널에서는 115~147 m/week로 높게 나타났다. 이후 1990년을 전후하여 130~180 m/week를 기록하였으며, 마지막 2개 현장에서는 200 m/week 및 230 m/week로 높은 속도를 보였다.

5.3. 가동률과의 관계

굴진속도의 또 다른 주요 요인인 가동률의 연도별 변

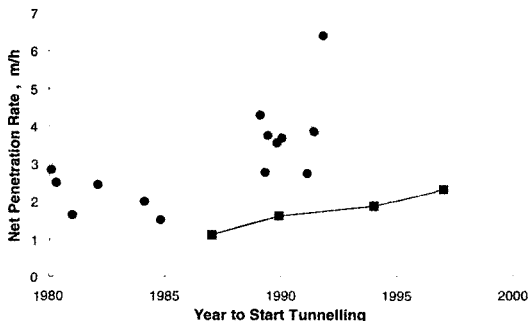


Fig. 5. Progress of net penetration rate in Norway(●) and Korea(■)

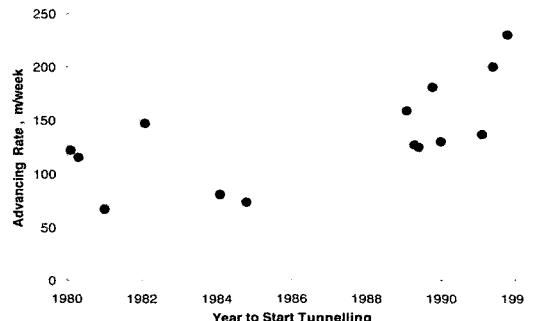


Fig. 6. Progress of advance rate in Norway

회추이는 그림 7과 같은데 지난 20년간 발전양상은 전혀 없으며 30~50%에 집중되어 있다. 노르웨이 14개 현장에서 기록한 가동률은 27~57%이며 평균 크기는 41.7%이며, 우리나라의 4개 현장에서는 이 보다 낮은 22~32% 정도에 불과한 크기를 기록하였다.

앞의 식들에서 알 수 있듯이 가동률은 순굴착속도와는 이론적으로 서로 독립적인 굴착요소이며, 실제 기록에서도 두 요소는 어떠한 관계를 보이지 않고 있다. 굴

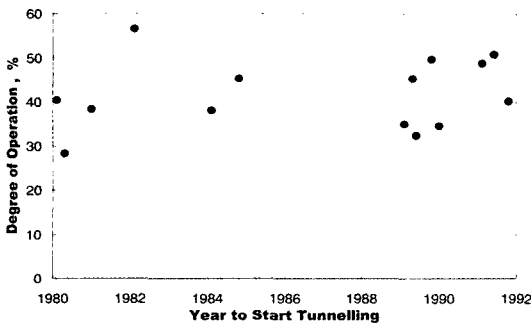


Fig. 7. Degree of operation in Norway TBM tunnels

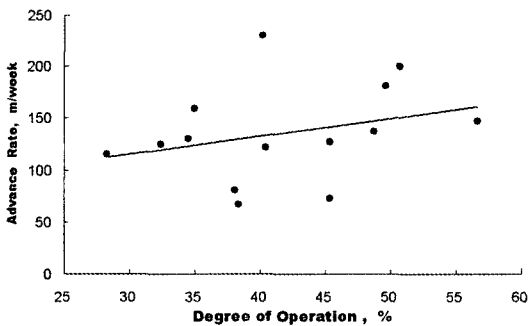


Fig. 8. Relations between degree of operation and advance rate

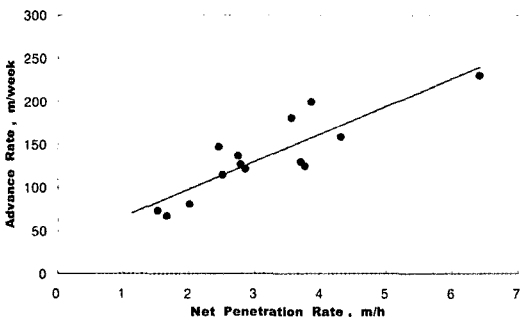


Fig. 9. Relations between net penetration rate and advance rate

진속도는 식 (2)와 같이 정의되므로 이론적으로 가동률과 순굴착속도에 비례하지만 현장자료의 분석 결과는 이와 다른 양상을 보이고 있다. 즉, 굴진속도와 가동률과의 직선적 상관관계는 그림 8과 같이 R2의 크기가 0.09로 나타나 어떠한 상관관계를 보이지 않는 반면에, 순굴착속도에는 그림 9와 같이 직선적 비례관계가 뚜렷하다. 이들 간의 상관관계인 R2의 크기는 0.76으로 분석되었다. 따라서 굴진속도는 순굴착속도의 크기에 좌우되며, 가동률의 변화에 따라 약간 영향을 받는다고 할 수 있다.

6. 결 론

터널 및 TBM 굴착의 강국이라 할 수 있는 노르웨이에서 30년 동안의 14개 현장에서 얻어진 굴착자료로부터 굴착속도에 대하여 분석하고, 이를 국내의 현장과 비교분석한 결과는 다음과 같다.

1. 1980년대 초반에 수행된 터널에 비하여 1990년대 초반의 터널에서는 사용한 커터직경의 증대와 이로 인한 추력의 증대로 인하여 순굴착속도와 굴진속도는 약 2배로 향상되었다. 이들의 향상과는 달리 가동률의 변화는 뚜렷하지 않다.
2. 노르웨이에서 순굴착속도의 크기는 80년대 초반에는 1.5~2.8 m/h 이었으며, 90년 초반에서는 2.7~3.8 m/h로 증대하였다. 앞으로 커터의 재질과 크기의 향상 및 커터 배열과 같은 장비발달이 이루어지면 메로케르 터널에서와 같이 높은 순굴착속도에 의한 공기단축이 가능해질 것으로 예상된다.
3. 우리나라의 순굴착속도 실적은 3 m/h 이하로 노르웨이에 비하여 낮은 크기이지만 점차 증대되고 있는 것으로 분석되어 앞으로 19 인치 또는 17 인치 크기의 커터를 사용한다면 보다 높은 속도를 얻을 수 있을 것으로 예측된다.
4. 굴진속도는 순굴착속도와 직선적 비례관계에 있으며, 가동률과는 어떠한 관계를 갖지 않는 것으로 밝혀졌다. 따라서 전단면 기계굴착에 의한 터널설계를 보다 용이하게 하기 위하여 굴진속도의 예측이 요구되는데 순굴착속도의 정확한 예측이 바탕이 된다. 이러한 관점에서 가동률의 예측이나 향상을 위한 연구는 향후 과제이다.

사 사

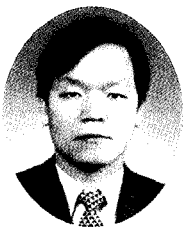
본 연구는 한국지질자원연구원의 과학기술부 출연과

제인 “고심도 지하연구실협실 구축 및 실증실험연구”의 일부분이며, 국내 기계굴착 현장자료를 제공해 주신 울트라건설의 허성룡 차장님께 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국자원연구소, 1991, 전단면 터널 굴착기술 개발 연구, 한국자원연구소 연구보고서 KR-91-B-15, 과학기술처
2. 박철환, 박연준, 2005, 노르웨이 메로케르 수력발전소의 TBM 굴착, 터널과 지하공간 제 15권, p. 22-27, 한국암반공학회
3. 배규진, 장수호, 2006, 시공 리스크를 고려한 TBM의 굴진성능 향상 및 평가기술, 제 7차 터널 기계화 시공기술 심포지움 논문집, 한국터널공학회
4. 부산직할시, 1987, 구덕 수로터널축조 건설지
5. Brindheim O. T., E. Johansen and A. Hegreneas, 1998, "Bored road tunnels in hard rock", Norwegian TBM Tunnelling, NSREA
6. Hansen A., 1998, "The history of TBM tunnelling in Norway", Norwegian TBM Tunnelling, NSREA
7. Johannessen S. and O. Askilrud, 1993, Meråker Hydro-Tunnelling - the Norwegian way, Proc. RETC 1993
8. NTNU, 1994, Hard rock tunnel boring, Project Report 1-94

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 지반안전연구부 책임연구원

박 찬



1988년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 2000년 수원대학교 공과대학 토목공학과 공학석사
 2006년 충남대학교 공과대학 토목공학과 공학박사

Tel: 042-868-3245
 E-mail: chan@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

천 대 성



1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3248
 E-mail: cds@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

신 중 호



1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
 1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3242
 E-mail: jhsynn@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원