

# Tunnel Boring Machine의 국내외 활용 및 기술개발 현황

The Utilization of T. B. M in site and the trend of technology development

배 규 진\*  
K. J. Bae

## 1. 머리말

TBM(Tunnel Boring Machine)은 재래식 발파공법에 비해 여굴 및 지보재의 경감효과와 지진동 억제효과가 있으며, 적정 시공조건에서는 최대 8m/hr의 굴진속도를 갖기 때문에 공기단축효과 또한 매우 커, 가히 현세기의 혁신적인 터널굴착 기계로 불리고 있다. TBM의 이러한 이점 때문에 구미 선진국에서는 이미 장대 산악터널과 시가지 내 터널공사에서 TBM 공법이 보편화되어 있고 80년대에 들어서는 동남아, 중남미 등에서도 TBM 공법의 선호경향이 급속도로 높아지고 있는 추세이다.

우리나라의 경우도 1980년도 중반 부산 지하철터널공사에 첫 도입, 적용된 이래로 그 사용실적이 증가하고 있어 TBM의 현 국내 보유 대수가 30여대에 이르고 있으며, 세계 TBM 시장의 26% 정도를 점유하고 있다. 이같은 점유율을 볼 때 국내 지하구조물의 건설수요나 국내 TBM 시장의 열기 등을 미루어 짐작할 수 있겠다. 그러나 TBM을 국내 도입, 적용한지 10여년이 되어가지만, 관련 기술보고서나 연구논문 등을 찾아 보기 힘들고, 최근

들어서는 TBM 시공현장에서 TBM 매몰사고가 자주 일어나고 있으며, TBM 굴진속도나 지보설계 방법 등에서도 상당한 문제가 있는 것으로 알려지고 있어 TBM 공법의 국내 정착을 위한 기술개발 및 연구노력이 그 어느때 보다 요구되고 있다고 판단된다.

따라서, 본고에서는 국내외 TBM의 활용현황 및 기술개발 현황조사를 통하여 국내 현안을 파악하고 향후 TBM 공법의 국내 정착화와 발전을 위한 기술개발 및 연구방향을 제시코자 한다.

## 2. TBM의 개발 및 활용현황

TBM은 1846년 벨기에의 H.J. Maus가 이탈리아와 프랑스를 연결하는 12,290m의 알프스 산맥 관통공사를 위해 설계, 제작한 것이 최초이나 이 기계는 실제 공사에 투입되지 못했으며, 현장적용은 그 뒤 1851년 미국의 C. Wilson이 직경 7.3m의 TBM을 제작, Hoosac 터널의 동쪽 갱구에 활용한 것이 처음으로 볼 수 있다. 그러나 현대식 TBM의 모습을 갖춘 기계로 성공적으로 토널을 굴착한 것은 1954년 캐나다 토론토의 하수터널 프로

\* 建設技術研究院

젝트이며, 이후 암반터널 시공에 TBM의 실질적인 적용이 이루어지게 되었다. 이러한 TBM을 이용하는 전단면 기계식 터널 굴착공법은 굴착진동 및 여굴의 감소, 높은 굴진속도, 지보경감효과 등의 다양한 이점 때문에 오늘날 전 세계적으로 폭넓게 활용되고 있다.

그림1은 TBM 공법이 적용된 전 세계 터널현장의 개수를 연도별로 도시한 것이다. 그림에서와 같이 TBM의 활용건수는 지난 50년대부터 기하급수적으로 증가하여 왔으며, 특히 90년대에 들어서는 전세계적으로 1,000여 개소의 터널 공사에서 TBM이 이용되었거나 이용중에 있어 향후 TBM 공법은 암반터널의 주 굴착공법으로 확고한 자리를 잡아갈 것으로 전망된다.

한편 국내의 경우, TBM은 1985년 주암 도수터널 현장에 적용되어 그 우수성이 알려졌으나 대단면의 부산 지하철 시공현장에서는 TBM의 굴진기술 미흡과 불량한 현장지반으로 인해 TBM의 이점을 크게 살리지 못함으로써 일부 기술자들에게는 TBM이 불신과 제약이 큰 굴진기계로 알려지게 되었다. 그러나 90년대 들어서 부터 국내 지하 구조물의 건설수요가 급증하자 공기단축효과가 큰 TBM공법이 시공법으로 재 검토되기 시작하였고,

실제 그 적용현장도 상당히 늘게 되었다.

국내 TBM의 연도별 시공실적을 살펴보면 표1에서 보는 바와 같이 86년도에 2,258m를 첫 시공한 이래, 최근 90년도에 들어서는 시공실적이 급

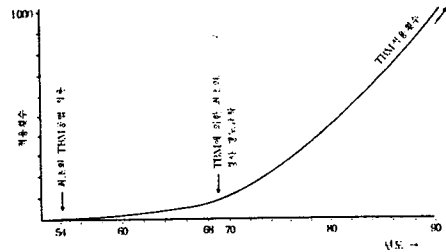


그림1. 전세계 TBM공법 적용경향

격한 증가추세를 보이고 있다. 또한 시공건수를 살펴보면 80년대 후반기에는 4년 동안 3건, 90년대 전반기에는 4년 동안 20건의 시공실적으로 보이고 있으며, 시공 길이의 경우도 80년대 후반기에는 15,875m, 90년대 전반기에는 149,956m로 약 10배에 가까운 증가추세를 보임을 알 수 있다. 여기에서 시공건수와 시공 길이는 공사발주 년도를 기준으로 하여 산정된 값이다. 최근들어 이처럼 TBM 활용실적이 크게 증가하고 있는 것은 국내

표1. 국내 TBM 연도별 시공실적 (93년 10월 기준)

년 도	86	87	88	89	90	91	92	93	합 계
건 수 (건)	1	2	0	0	6	3	8	3	23
시공길이(m)	2,258	13,617	0	0	23,578	11,074	11,350	3,954	165,831

表2. 국내 TBM 용도별 분류 (93년 10월 기준)

용 도	도 로	수 로	지하철	전력구	운송터널	땅 굴	합 계
건 수 (건)	6	11	5	1	2	1	26
TBM직경(m)	4.5~11.3	3.3~5.0	4.5~7.0	3.5	4.5	3.0	3.0~11.3
비 율 (%)	23.1	42.3	19.3	3.8	7.7	3.8	100

지하구조물의 건설수요 증가에 따른 것으로 보이나, 8% 정도가 산악으로 형성되어 있는 국내 지형적인 특성 그리고 발파진동에 따른 민원문제를 근본적으로 해결할 수 있고 높은 굴진속도를 얻을 수 있다는 TBM의 이점등이 TBM의 활용을 더욱 증가시킬 것으로 판단된다.

또한 국내 TBM의 용도별 현황을 살펴보면 표2에 나타난 바와 같이 소단면 수로터널의 경우가 42.3%로 가장 많고 그 다음이 도로터널, 23.1%로 나타났으며 지하철, 운송용 터널, 전력구, 땅굴 등이 다음 순으로 나타났다. 이와 같이 수로터널의 경우에 TBM 활용이 두드러진 것은 수로터널이 소

단면이면서도 길이가 매우 길어 TBM의 기술적, 경제적 이점을 크게 얻을 수 있기 때문이며, 특히 원형으로 굴착되는 TBM 시공단면을 그대로 이용할 수 있으므로 수로터널 시공시 TBM의 활용이 보다 현저했던 것으로 판단된다.

한편 국내 TBM의 보유회사와 보유대수는 1984년 (주)세림개발에서 TBM헤드 직경 7.0m인 독일 Wirth사의 제품을 첫 도입한 이후, 진로건설, 유원건설, (주)한양 등 유수의 건설회사들이 도로터널, 수로터널, 지하철 등의 건설을 목적으로 TBM을 지속적으로 도입함으로써 현재 8개 회사, 25대에 이르고 있다.〈表3〉

표3. 국내 TBM 보유현황

(1993년 10월 기준)

TBM 보유회사	굴착직경(m)	비유(%)	보유대수	제 작 회 사
대 립 산 업	3.5	4	1	Voest Alpine(오스트리아)
동 아 건 설	3.3	4	1	Atlas Copco(스웨덴)
유 원 건 설	2.6~8.0	36	9(3)*	Wirth(독일)
진 로 건 설	2.5~11.3	24	3	Wirth(독일)
			3	Robbins(미국)
삼성종합건설	3.8	8	1	Wirth(독일)
	5.0		1	Robbins(미국)
(주) 한 양	3.5~7.0	16	4	Atlas Copco(스웨덴)
쌍 용 건 설	4.5	4	1	Voest Alpine(오스트리아)
현 대 건 설	3.5	4	1	Robbins(미국)
합 계	2.6~11.3	100	25	-

□ ( )\*: 커터헤드만 보유

이상과 같이 TBM은 국내에서 생산되지 않고 cutter를 포함한 시스템장비 전부가 국외에서 도입되고 있으며 back-up 장비를 포함한 TBM(직경 6.5m 기준)의 1대당 가격이 약 200억 원에 이르는 고가의 장비이므로 합리적이고 체계적인 도입계획 없이 무절제한 도입이 이루어지면 TBM이 과도한 외화 낭비의 주 원인이 될 수도 있을 것이다.

따라서 도입 전에 TBM 종류별로 세밀한 특성 파악을 통해 투입현장의 지질조건과 국내 터널현재 여건에 부합하는 장비의 선정이 필요하며, 현 투입계획 이외에도 향후 TBM 활용계획을 체계적으로 수립하여 고가의 TBM이 창고에서 녹슬어가는 일이 없도록 해야 할 것이다.

특히 TBM은 굴착기계이므로 우리가 흔히 쓰는

가전제품처럼 해가 감에 따라 up-grade된 제품이 생산되고 있음으로 TBM의 제한적인 도입이 바람직할 것이며, 또한 석영분을 포함하는 경암반 지층에서 국내 터널공사가 많이 이루어지고 있는 것을 감안할 때, TBM의 주 부품이며 교체품인 커터의 경우는 앞으로 국내 기술진이 개발하여 국산화 하는 것이 필요하다고 판단된다. 과거 특정 열처리 업체가 국산 커터의 개발을 추진하다가 포기한 적이 있으므로 향후 TBM 보유회사들의 보다 큰 관심과 지원으로 국산 커터의 개발이 재개되어야 할 것이다.

### 3. TBM 기술개발 현황

#### 3.1 TBM 굴진기술

TBM 굴진시 공기단축 효과를 크게 얻기 위해서는 1차적으로 TBM 굴진속도 및 지체시간해석(down time analysis)을 통해 굴진효율을 증대시킬 수 있는 방법을 고안하고, 현장에서 가장 큰 지체시간을 갖게 만드는 연약지반에서의 TBM 굴진을 보다 효율적으로 수행할 수 있도록 굴진방법 및 지보방법을 개량하는 것이 필요하다.

이러한 TBM 굴진효율을 증대시키기 위한 연구 노력은 고감도 커터의 개발과 함께 현장조건을 고려한 추력(thrust) 및 회전력(rolling force)의 조정기술을 개발하는 방향으로 추진되어 오며, 미국, 노르웨이 등지에서는 체 조건별 적정 추력과 회전력을 현장에서 적용할 수 있는 자동설계 도표들을 만들어 사용하거나 이들이 자동으로 조절될 수 있는 자동변환장치를 개발, 사용하고 있으며, 또한 지체시간해석을 통해 지체시간을 줄일 수 있는 방안강구와 백업장비 개선, 개량을 위한 노력도 경주해 오고 있다.

한편 연약지반에서의 TBM 굴진기술에 관한 연구 개발은 TBM공법을 많이 사용하고 있는 노르웨

이, 독일, 스웨덴 등, 유럽국가가 주축이 되어 그동안 추진되어 왔다. 1970년도 초기의 TBM 굴진시 지반 보강 방법으로는 TBM 후면에서의 강 지보공을 시공하는 방법이 주를 이루었으나 이는 TBM의 후진을 불가능하게 할 뿐 아니라 지보시기를 매우 지연시키므로 적용에 제약을 받아왔다. 1980년 후반에 들어서는 TBM 뒷면 보강방식에서 탈피, TBM 전면에서의 보강방법쪽으로 많은 연구가 추진되어 왔으며, 대표적으로는 1987년 오스트리아의 Ilbau사에 의해 개발된 커터헤드 전면보강 시스템을 들 수 있다. 이 시스템은 지반이 연약할 경우 TBM 전면에서 그라우팅을 실시하고 상반굴차(top heading)은 인력에 의해, 하반굴착(benching)은 TBM에 의해 이루어 지도록 한 것이며, 오스트리아의 Gosensass 터널과 이탈리아의 Camporosso 터널에 이 시스템을 적용하여 공기단축 효과를 크게 얻은 것으로 보고된 바 있다. 그 뒤 TBM 전방에서의 지보방식으로 록볼트와 숏크리트, 거어더, 광산지주용 대(pole) 등 여러 재료를 이용하는 방법이 개발, 적용되어 오고 있다.

그러나 국내의 경우, TBM을 도입한 지 10여년이 되어가고 상당한 수의 TBM 보유를 자랑하고 있으나 TBM 굴진기술에 대하여 체계적으로 연구한 사례는 거의 보고된 바가 없으며, TBM 보유회사마다 기술의 노하우(knowhow)를 들어 기술자료의 공개를 꺼리고 있어 TBM에 관한 국내 연구 기반마저 흔들리고 있는 상태이다. 이로 인해 국내 TBM의 굴진효율은 대부분 30% 이하로서 TBM 기술선진국의 평균 효율 약 40%에 비해 매우 낮으며, TBM의 지보설계 기술이나 취약지반을 만났을 때의 조기대응 기술 또한 매우 부족하여 TBM 굴진설계와 시공에 많은 어려움을 겪고 있다. 특히, TBM 굴진설계와 시공에 많은 어려움을 겪고 있다. 특히, TBM공법에 의한 터널계획, 설계시 공기예측 및 산정이 체계적으로 이루어지지 않고 경험적, 개괄적, 획일적으로 이루어지고 있어 계획

공기와 실 공기와의 차가 큰 것도 문제점으로 지적되고 있다. 또한 경부 고속철도용 터널이나 지하철과 같이 단면이 매우 크고 원형이 아닌 경우에도 적용할 수 있는 이른바 기계굴착-발파 병용기술(bore-blast techniques)에 대해서도 연구가 미흡해 이 기술의 이점을 충분히 발휘하지 못하고 있으며, 적용사례도 소수에 지나지 않고 있다.

### 3.2 TBM 지보설계기술

보다 합리적이고 경제적인 터널지보 설계를 이루고자 하는 기술자의 노력은 암하중(rock load) 계산에 의해 터널지보 설계를 수행하여 왔던 종래의 Terzaghi(1946년) 방식에서 오늘날 정량적인 지반 분류 방식에 의한 지보설계방법으로의 전환을 이루게 하였다. 이러한 정량적인 지반분류 방식에 의한 지보설계법으로는 RQD(Deere 등, 1970), RSR(Wickham 등, 1972), RMR(Bieniawski, 1973), Q(Barton, 1974), ISRM 분류법(ISRM, 1981) 등 다양한 방법이 개발되어 있으나 이들 방법은 어떤 이론적 배경에서 출발되었다기 보다는 대부분 터널 현장 기술자들의 오랜 경험을 통해 제안된 것들이므로 시대적 변천에 따라 많은 수정, 보완을 거치고 있다. 특히 이 지보설계 방법들은 발파방법(큰 여굴과 진동에 의해 주변 지반의 교란영역을 크게 확장시킴)을 주 굴착방법으로 채용하는 터널시공에 맞도록 개발된 것이므로 여굴과 지반의 소성 영역확장을 극소화할 수 있는 TBM에 의한 터널시공시에는 기존 지보설계 방법에 의해 결정된 지보량보다 상당량 경감시킨 지보재로서도 터널의 안정을 이룰 수 있게 된다.

TBM 기술 선진국의 경우, TBM에 의한 터널시공시에는 자국의 암반조건과 TBM 굴진 기술수준 및 제반 시공여건을 반영한 적절한 지보설계 시스템을 개발하여 현장에 적용하고 있다. 1972년 Wickham 등은 미국 내 수십 개소 터널의 현장자료

를 기초로 하여 RSR 지반분류방법을 개발하면서 TBM 굴착시 지보설계를 수행할 수 있도록 AF(Adjustment Factor) 개념을 도입하였으며, 1983년 Gonzalez는 지표면 조사결과와 굴착방법을 고려하여 기존 RMR 값을 부분적으로 수정할 수 있는 수정표를 제안하였는데, 이 방식에 의하면 전단면 기계굴착시는 기존 RMR 값에 10점을 추가 배점하여 지반조건을 상향조정함으로써 지보설계를 보다 경제적으로 수행하도록 하고 있다. 이 밖에도 1988년 Nicholson은 수로터널인 Park River Auxiliary Tunnel의 TBM 지보설계시, 현장경험과 기 연구결과를 토대로 기존 RMR 값에 30% 이상을 증가시킨 수정 RMR 값을 이용한 결과, 성공적인 터널건설을 수행하였다고 보고한 바 있다.

그러나 이들방법은 개발국의 TBM 굴진기술 및 지보기술수준, 지반조건, workmanship 등, 제 조건에 부합하도록 제시된 것이므로 우리나라에서 TBM 지보설계를 원활히 수행하기 위해서는 국내 제 여건에 부합하는 지보설계법이 개발되어야 할 것이다. 국내의 경우는 TBM 관련 연구가 매우 미흡한 실정이므로 TBM 터널에서도 NATM 터널의 지보방법을 그대로 적용하고 있어 TBM 적용시 지보 경감효과가 사실상 반영되지 않고 있으며, 이에 따른 지보재의 과다 설계가 이루어지고 있는 실정이다.

### 4. 맺음말

TBM은 전단면 터널 굴착기이며, 헤더 후면에서의 지보를 주로 허용하므로 굴착과 동시에 지보를 필요로 하는 연약지반 보다는 자립도가 큰 암반구간의 터널시공에 적합하다. 우리나라는 상당한 지역에서 수 m만 파면 암이 나오는 지질적인 특성을 갖기 때문에 암반구간에 적합하도록 고안된 TBM은 향후 국내에서의 활용도가 보다 증대될 것으로

사료된다.

그러나 TBM에 의한 터널시공은 재래식 발파시공과는 굴진 메커니즘이나 굴진 시스템, 지보 시스템, 버력처리 시스템, 환기, 배전 및 급수설비 그리고 공정관리 시스템 등, 많은 분야에서 큰 차이를 보이므로, 각 분야에 대한 명확한 이해와 충분히 분야별 기술개발 없이는 TBM이 갖는 다양한 이점을 살릴 수가 없을 것이다. 우리나라는 TBM이 도입된 지 10여 년이 되어 가지만 TBM 관련기술이 TBM 운전기술에만 국한되어 있다 해도 과언이 아니며, TBM 보유회사 중 상당수가 관련 기술자료나 설계, 시공 자료의 공개를 꺼리고 있어 연구기반마저 취약한 상태에 놓여 있다.

따라서 TBM 관련 국내 기술개발 및 발전을 위해서는 다음과 같은 노력과 관계자들의 상호지원이 필요한 것으로 판단된다.

- 국내 TBM 공법의 연구기반 및 기술개발 기반 조성
  - TBM 굴진 data나 가동설계 자료 등이 TBM 보유회사의 knowhow가 될 수 없으므로 보유 기술자료를 공개하여 기술개발을 위한 자료로써 활용될 수 있게 하여야 함.
  - 시공경험을 갖고 있는 TBM 보유회사가 TBM과 관련한 제 이론 및 해석 연구의 경험을 갖고 있는 대학 또는 연구소와 공동연구를 추진함으로써 국내 전문 연구인력을 최대한으로 활용토록 함.
  - TBM에 대한 연구 의욕을 고취시킬 수 있도록 연구 및 기술개발 분야의 다양성과 TBM의 적용가능분야 등을 홍보하고 TBM 보유회사 내의 기술연구자 및 개발자를 양성토록 함.
- TBM 보유 업체별 기술개발을 통해 현 hidden technology 체제에서 선의의 기술경쟁 체제로의 전환
  - 1992년도에 기술개발 보상제도법이 제정됨

에 따라 기술개발 업체에 실리가 돌아가도록 정부차원에서의 노력이 이루어지고 있으며, 실제 주암댐 계통 광역상수도 TBM 공사에서 이 법이 적용된 바 있으므로 관련 기술 개발이 요망됨.

- TBM을 보유하고 있는 한 회사에서는 TBM 관련 기술개발로 특허출원을 준비중에 있음. TBM 보유 업체별로 TBM과 관련한 요소 기술의 개발이 필요함.
- 국내 현 기술수준의 공개 및 예측방법의 개발 추진
  - TBM 굴진 공기의 현 수준 및 예측방법의 정확도
  - TBM 본체의 가동설계 기술수준
  - 갑작스런 연약지층을 만났을 때의 조기 대응 기술수준
  - TBM 본체의 가동설계 기술수준
  - 갑작스런 연약지층을 만났을 때의 조기 대응 기술수준
  - TBM 터널의 지보설계 기술수준
  - TBM에 의해 터널막장이 봉쇄된 상태에서 막장 전방의 지반상태 예측 및 평가기술 수준
  - 대단면, 비 원형 터널에서의 병용 시공법 (bore-blast techniques)의 기술수준
- 합리성과 계획성을 갖는 TBM의 국외 도입 추진 및 향후 TBM 장비의 국산화 추진
  - 올해는 국내뿐만 아니라 국외의 TBM 터널 공사도 우리나라에서 수주한 실적이 있으므로 국내외 시장규모를 고려하여 TBM 주 부품인 커터부드 국산화를 추진해야 할 것임.
  - 과도한 외화유출을 방지하고 창고에 보관하는 TBM이 없도록 TBM 도입은 현 국내 터널 시장규모 외에 향후 터널 시장성도 아울러 고려하여 결정되어야 할 것임.