

국내 TBM 터널의 미래 수요 예측



이 성 원
한국건설기술연구원 기반시설연구본부
지반연구실 연구위원
(swlee@kict.re.kr)



장 수 호
한국건설기술연구원 기반시설연구본부
지반연구실 연구위원
(sooho@kict.re.kr)



최 순 욱
한국건설기술연구원 기반시설연구본부
지반연구실 전임연구원
(soonugi@kict.re.kr)

1. 서론

20세기에 들어서면서 도심지의 대중교통수단을 포함하여 국토의 효율적 이용을 위한 다양한 터널의 수요가 급증하였고 이에 따라 다양하고 복합적인 설계·시공 상의 문제점도 함께 증가하였다. 이에 대처하기 위해서 터널 건설기술은 보다 정교해지고 기계화·자동화되는 과정으로 발전해 왔다

기계화·자동화 터널기술의 대표라고 할 수 있는 TBM(Tunnel Boring Machine)은 현재 시공 중 또는 운영 중인 세계 10대 초장대 터널의 50% 이상을 차지하고 있으며, 특히 도심지에서 환경성, 안전성 및 경제성 향상을 위한 최적의 터널공법으로 고려되고 있다. 특히 TBM 공법은 기존의 발파공법과 비교할 때 소음·진동 등의 저감 효과뿐만 아니라 낙반 등의 위험요소가 적으며, 여굴과 주변 지반에 대한 손상이 적기 때문에 지보재 물량이 감소되고 관련 시공시간의 단축으로 인해 고효율의 급속 시공이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 주로 비배

수 터널로 시공되는 TBM 터널의 세그먼트라이닝은 방수성이 우수하여 시공 후 운영 중 배수 비용 절감효과도 얻을 수 있다.

우리나라에서는 1980년도 중반부터 도수터널 공사에 주로 암반용인 Open TBM이 적용되었으며 도심지, 연약지반이나 지중선 공사에는 주로 쉴드(shield) TBM이 활용되기 시작하여 최근까지 약 70여건 이상의 크고 작은 터널공사에서 적용되어 왔다.

그러나 국외 적용 실적과 비교하면 매우 낮은 수준이며 이는 관련 기술 및 기술자의 부족, 높은 공사비, 발주체계 및 제도적 문제 등으로 인해 결과로서 판단되며 전문가 설문에 의해 조사된 바도 있다(한국건설교통기술평가원, 2010).

경제발전예 따라 향후에도 지하공간에 대한 수요가 늘어날 것으로 예측되고 환경 친화적인 건설에 대한 요구 증대, 높은 노무비용에 대처하기 위해서는 국내 터널 건설시장에서 TBM의 도입과 적용은 필연적인 추세로 판단된다.

본고에서는 국내 TBM 건설 현황을 소개하고 수요예측, 전문가 설문자료, 경제성 향상 방안 등을 살펴봄으로써 국내 터널 기계화 시공분야의 나아가야 할 방향을 모색해보고자 한다.

2. 국내 TBM 터널 현황과 수요

국내에서는 1985년 구덕 수로터널에 처음으로 Open TBM이 적용된 이래로 시공 또는 설계가 완료된 TBM 시공현장은 Open TBM 36건 그리고 쉴드 TBM 35건으로 총 71건의 TBM이 적용 또는 계획되었다. 시공연장으로 볼 때 Open TBM 180 km, 쉴드 TBM 90 km로 총 270 km에 해당한다(그림 1).

도입 초기에는 연장이 긴 수로터널을 중심으로 주로 압반용인 Open TBM의 적용 실적이 많았으나, 그 이후에는 도로터널과 지하철에서 TBM+NATM 병용공법에서 채택된 사례가 증가하였다. 현재까지 수로터널과 도로터널에의 적용이 각각 53%와 25%의 적용사례가 있었으며(그림 2), 국내에 적용된 Open TBM의 직경은 주로 3.5 m~6.5 m의 직경이었다.

쉴드 TBM은 1987년에 부산 광복동 전력구 공사에서 약 1 km의 터널 시공에 처음으로 적용된 후, 1995년부터 도심지 터널구간에 적용사례가 급증하여 현재까지 총 45건이 국내에서 시공되었거나 추진 중이다(그림 3).

관로공사에 적용되기 시작한 초기 쉴드 TBM은 Open TBM과 유사한 직경이 주를 이루었지만, 90년대 중반이후부터는 지하철에 적용됨으로써 8.0 m 내외의 직경의 적용이 점차 증가하고 있다. 쉴드 TBM의 형식별로는 현재까지 EPB(earth pressure balanced)형식이 28건, 이수(Slurry)형식은 7건으로 EPB 형식이 주를 이루고 있으며, 터널 용도별로는 2000년 이전을 기준으로 쉴드 TBM의 실적은 관로공사가 약 80%를 차지하고 있었으나, 2010년까지의 실적을 파악해 보면 상하수도의 적용은 감소하고 전력구와 지하철의 적용이 점차 증가하고 있음을 알 수 있다(그림 4).

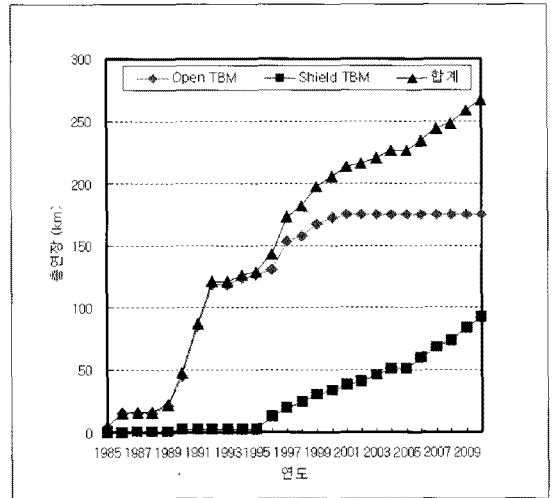


그림 1. 국내 TBM 시공현황
(완공년도 기준, Open TBM은 2005년까지 실적임)

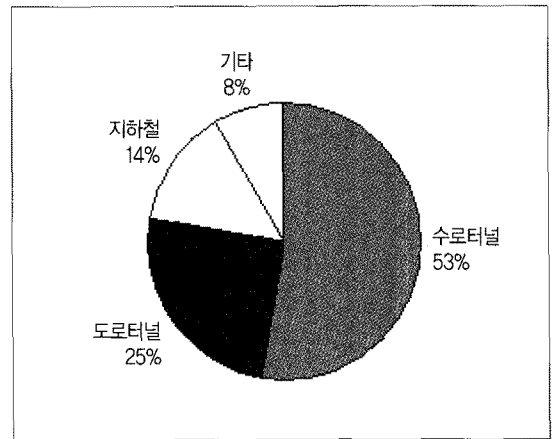


그림 2. Open TBM 적용현황

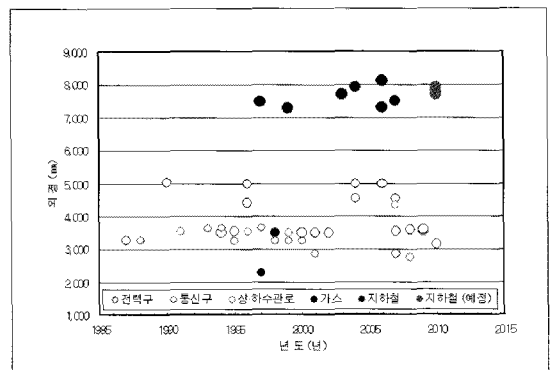
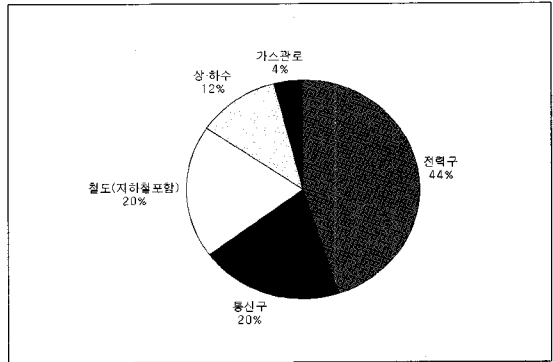
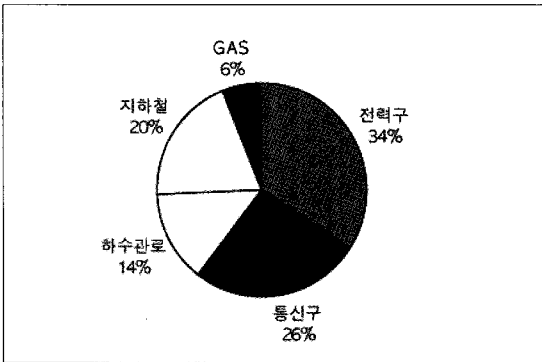


그림 3. 연도별 국내 쉴드 TBM 현황



(a) 2000년 이전

(b) 2010년

그림 4. 용도별 국내 쉴드 TBM 적용현황

최근에는 서울시 지하철 909공구의 일부(강남의 신논현역까지)가 개통되었고, 분당선 왕십리~청담간 복선전철(연장 1.7 km) 및 서울시 지하철 7호선 703/704공구(연장 약 4.5 km)와 인천국제공항철도(연장 1.9 km)도 쉴드 TBM의 굴진중이거나 완료된 상태이다. 또한 서울시 지하철 919~921공구(쉴드 TBM 3대, 3공구 연장 4.25 km), 부전-마산 복선전철(쉴드 TBM 2대, 총연장 32.6 km중 낙동강 하저 약 5 km구간), 대곡-소사 복선전철(쉴드 TBM 1대, 총연장 19.6 km중 한강하저 2.86 km구간)이 2010년 현재 설계 완료된 상태이다. 이외에도 제물포길 지하화 사업(왕복 4차로 연장 9.7km), 신분당선 연장선(용산~강남, 총연장 8km중 한강하저 약 3km) 등이 쉴드TBM으로 발주 예상되고 있다.

향후 TBM 적용이 유망한 대도시권 도심도 터널 건설 프로젝트로는 수도권 도심도 광역급행철도(GTX, 총연장 147 km, 3개 노선, 총사업비 약 13조원 추정)와 서울시의 U-SMARTWAY(총연장 148.7 km, 6개 노선, 총사업비 11조 2천억원 추정), 신분당선 연장(용산-강남선 (총연장 7.49 km, 한강하저 통과구간포함, 총사업비 9천억원 추정)이 예정되어 있다.

또한 국내에서도 TBM 적용이 유력한 초장대 해저터널의 구상이 진행되고 있다. 마간-거제 해저터널은 당초 교량으로 검토되었으나 선박의 대형화 추세 등으로 총연장 6.9km의 해저터널로 변경되어 현재 한국개발연구원(KDI)에서 타당성 조사가 완료된 상태이다. 그리고 현재 국토해양부에서 타당성조사중인 호남-제주(목포-제주)

해저터널은 총연장 167km로써 프로젝트가 추진될 경우 세계적인 초장대 해저터널 건설 사업이 될 것으로 예상된다. 총연장 167km 가운데 해저터널 73km, 해상교량 28km 및 지상구간 66km로 구성되고 있고 총사업비는 14조 6천억원 쉴드TBM 터널로 계획될 경우 공사비는 약 8조 8천억원으로 추정된다.

이와 같이 현재 시공예정이거나 설계중인 국내 TBM 관련 프로젝트의 총연장은 약 30km 이상으로 그동안의 TBM터널의 증가추세에 탄력을 더하고 있으며, 향후 GTX, 호남-제주간 해저터널 등 굵직한 TBM 터널의 수요가 지속적으로 예측되는 가운데 TBM의 국산화까지도 추진해 볼만한 사업이라고 할 수 있다.

3. TBM 관련 설문조사

전술한 바와 같이 TBM 터널의 현황과 향후 지속적인 수요에 대처하고자 한국건설교통기술평가원에서는 2009년 12월부터 약 8개월간 TBM 국산화를 위한 “기계화·자동화 터널 건설을 위한 TBM 기술개발 기획연구”를 수행하였다. 본 기획연구에서는 국내 TBM 터널의 향후 수요예측, 경제적인 파급효과를 면밀히 분석함으로써 국산화에 필요성과 이에 따르는 연구개발 전략을 수립하였다. 또한 국산화 타당성 분석의 일환으로 국내 터널분야 전문가를 대상으로 설문조사를 실시하였다. 설문은 건설·기계분야 전문가 124명을 대상으로 진행되었으며,

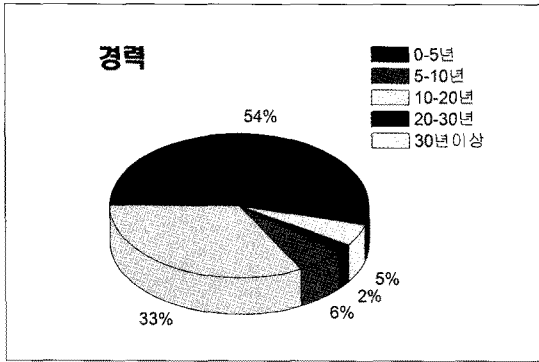


그림 5. 설문대상자의 경력

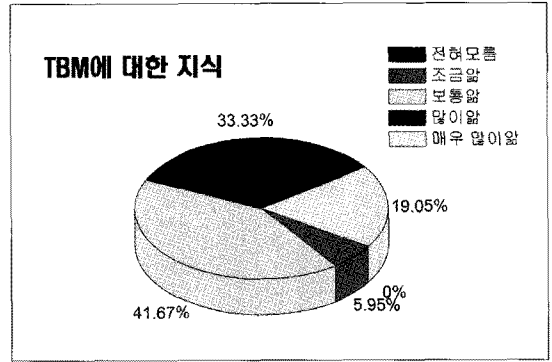


그림 6. 설문대상자의 TBM에 대한 지식

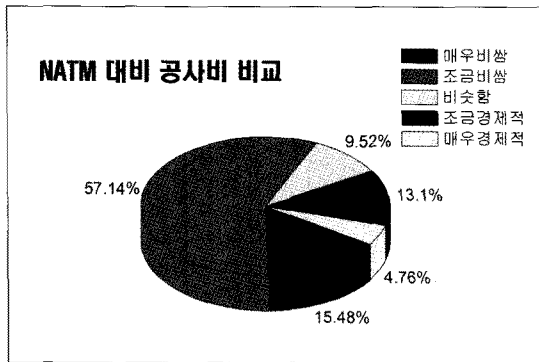


그림 7. NATM대비 TBM의 공사비 비교

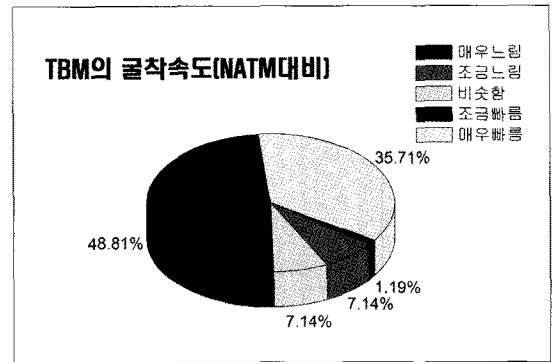


그림 8. TBM의 굴착속도(NATM대비)

약 66%인 82명이 응답하였다.

설문대상자는 해당분야에서 10년 이상의 경력을 지닌 자가 87%이었고, TBM에 대한 지식이 보통 이상인 자가 94%로서 설문결과의 신뢰성을 확보하기에 부족하지 않을 것으로 판단된다(그림 5, 6참조).

그림 7은 NATM공법에 대비한 TBM공법의 공사비에 대한 설문결과이다. 72%가 TBM공법이 NATM공법에 비해 비싼 것으로 인식하고 있었다. 일반적으로 TBM공법은 연장에 비례하여 경제성을 가지는 것으로 알려져 있다. 그동안 국내에서는 대부분의 TBM공법이 2 km이하의 짧은 연장에서 사용된 점과 TBM의 장점인 공사속도 증대를 충분히 활용하는데 제도적인 문제가 있다는 점, 그리고 TBM공법은 NATM공법에 비해 공사 후 유지관리비가 적게 드는 점을 복합적으로 고려해야 할 것으로 판단된다. 반면 TBM의 굴착속도에 대한 설문조사에 의하면 그림 8과 같이 응답자의 약 84%가 TBM공법이

NATM공법에 비해 빠르다고 응답하였다.

국내에 TBM사례가 적은 이유에 대해서는 발주체계 및 제도적 문제(37%)와 높은 공사비(33%)를 지적하였으며, 관련기술 및 전문가의 부족 또한 약 24%로 조사되었다(그림 9).

향후 TBM 수요전망에 대해서는 그림 10에서 보는 바와 같이 67%가 점진적으로 증가할 것으로 예측하였고, 21%는 급격한 증가를 보일 것으로 판단하여 대부분의 전문가가 TBM의 향후 국내 수요는 증가할 것으로 예측하고 있다.

TBM국산화의 필요성에 대해서 그림 11과 같이 전문가의 88%가 필요한 것으로 응답하였으며, 국산화 가능성에 대해서는 그림 12와 같이 65%가 가능성이 높은 것으로 예상하였다. 또한 그림 13과 같이 과연 TBM을 국산화할 경우 적합한 TBM의 규모를 묻는 질문에 대해서는 TBM 외경 7~9m급이 약 58%, 10m이상급이 약 38%로

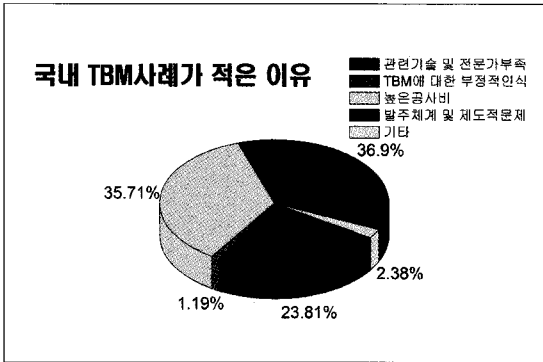


그림 9. 국내에 TBM 사례가 적은 이유

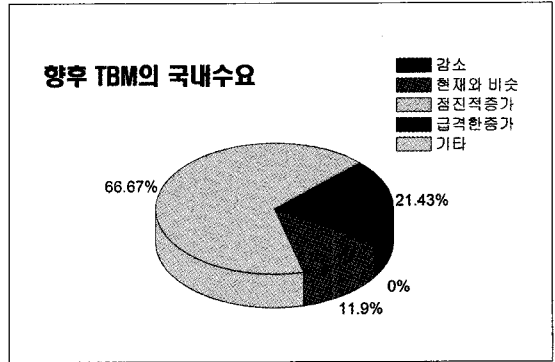


그림 10. 향후 TBM의 국내 수요예측

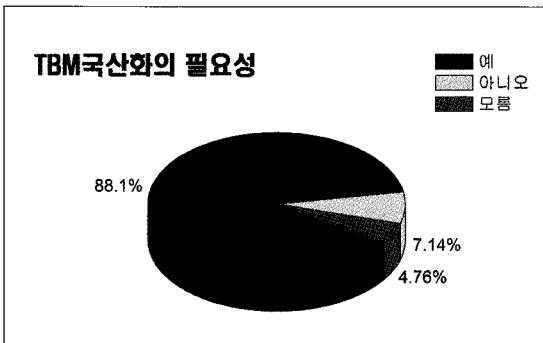


그림 11. TBM국산화의 필요성

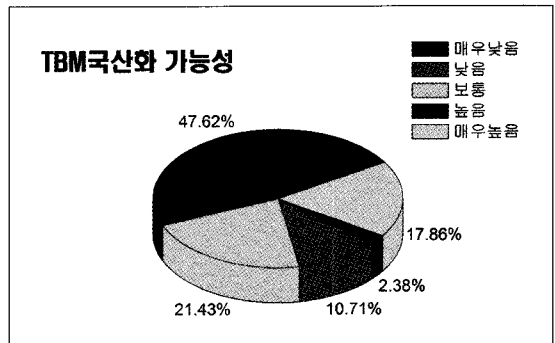


그림 12. TBM국산화의 가능성 예측

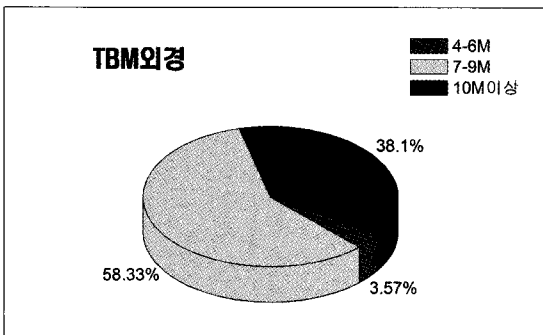


그림 13. TBM의 적정외경 의견

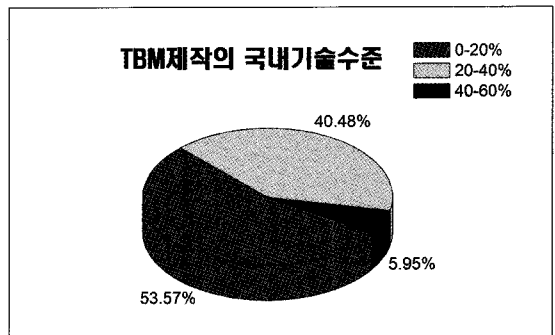


그림 14. TBM 제작의 국내기술수준

응답하여 전체적으로 약 96%의 응답자가 중대형급 이상의 TBM 국산화 제작이 필요하다고 판단하고 있다.

마지막으로 그림 14와 같이 TBM 제작에 대하여 선진국 대비 국내의 기술수준에 대한 전문가의 의견을 들어본 결과, 아예 기술이 없거나 20%이하라고 생각하는 응답자가 54%로 많았고 전반적으로 40%이하라고 생각하는 응

답자가 95%로 대부분이 TBM 제작에 대해서는 기술수준이 매우 낮은 것으로 평가하였다. 또한 그림 15와 같이 TBM을 이용한 국내의 건설기술 수준도 선진국 대비 40~60%로 평가하는 응답자가 71%로써 미흡하다고 평가하고 있었다.

국내 TBM 터널의 미래 수요 예측

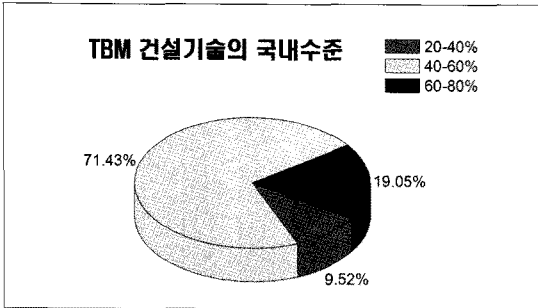


그림 15. TBM 건설기술의 국내수준

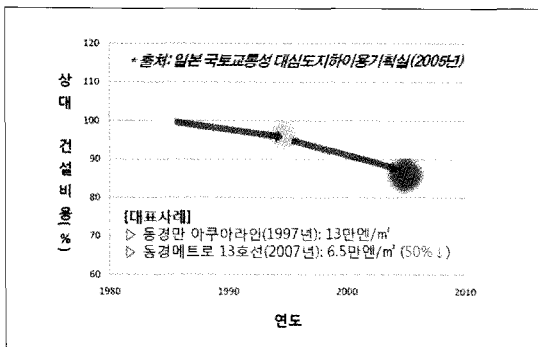


그림 16. 연도별 TBM 건설의 상대비용추세

4. TBM터널의 경제성 향상 방안

TBM 터널은 일반적으로 연장이 매우 긴 초장대 터널 즉 최소 5km 이상은 되어야 경제성이 있는 것으로 알려져

표 2. TBM공법의 각 파트별 직접공사비의 비율

구분	세그먼트	TBM 장비	커터 및 비트	기타
직접공사비 비율	25~40%	10~20%	10~15%	25~50%

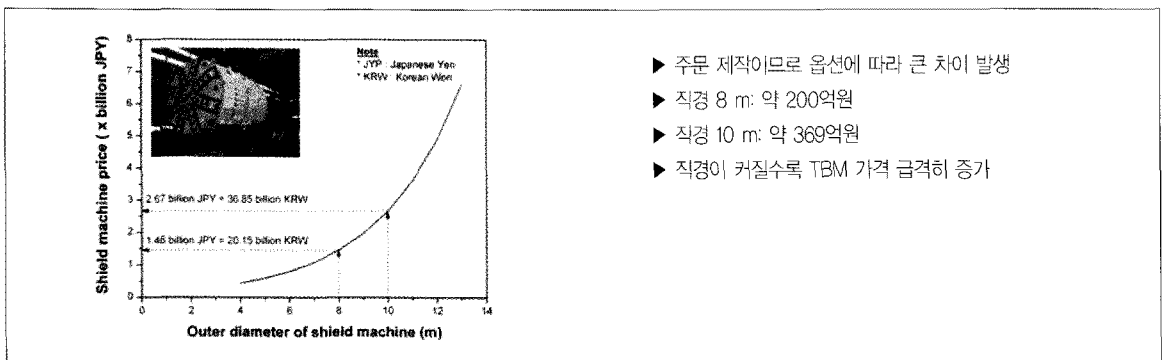


그림 17. 쉴드TBM 장비 참고가격

표 1. 터널공법별 경제적인 시공연장

출처	터널공법별 경제적인 시공 연장	
	TBM	NATM
Sauer(2004)	3.2 km 이상	2.4 km 이하
노르웨이(1998)	5~6 km 이상	3 km 이하
Handwirth & Dahmen(1982)	6.7 km 이상	6.7 km이하

있으나 지속적인 기술발달로 인해 최근에는 표 1에서 보는 바와 같이 경제적인 TBM 시공연장과 건설비용이 감소하고 있다.

그림 16은 일본국토교통성 대심도 지하이용기획실(2005)에서 제시한 연도별 TBM 건설의 상대비용이다. 1980년대 중반을 기준으로 2000년대 중반의 상대건설비용은 점차 줄어드는 것으로 나타났다. 이와 같이 TBM 건설비용의 감소이유는 TBM 장비기술의 발달로 인한 고 효율 시공, 장거리 굴착에 의한 수직구 최소화, 고속화에 의한 공기 단축, 세그먼트 기술발달에 따른 단가 절감, 2차 콘크리트 라이닝의 생략등을 들 수 있다.

(사)일본터널기술협회(2000)의 대심도 지하이용기술 조사 소위원회보고서에서는 표 2와 같이 TBM 공법의 각 파트별 직접공사비의 비율을 제시하였고, 쉴드 TBM 장

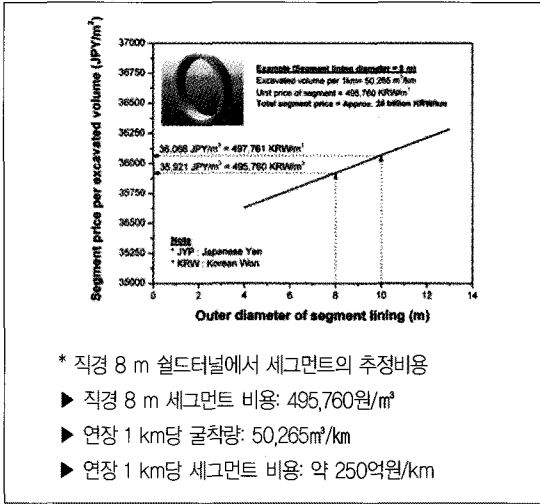


그림 18. 세그먼트라이닝 참고가격



그림 19. 커터 및 비트 참고가격

비와 세그먼트라이닝, 그리고 디스크커터의 참고가격을 제시하였다(그림 17~19). 시공연장이 길어질수록, TBM 전체공사비중 장비비의 비중은 작아지고 세그먼트와 커터의 비중이 커지는 경향을 알 수 있다.

또 다른 공사비 절감방안으로써 TBM 동경지하철주식회사(2006)에서는 TBM공사를 지속적으로 발주하여 비용절감 방안을 도출하는 것이 중요하다고 보고한 바 있

다. 이는 국내의 경우에서도 찾아볼 수 있는데 한국전력공사의 전력구 공사 사례이다. 표 3은 한국전력공사의 전력구공사시 단위공사비표이다. 표에서 알 수 있듯이 국내에서도 전력구 터널공사시에는 쉴드TBM의 적용이 일반화되면서 NATM보다 설계단가가 낮은 것으로 인식하고 있다.

국내전문가 설문조사나 그림 17의 직경에 따른 장비가

표 3. 전력구공사시 단위공사비표(한국전력공사)

구분	공종	단위	설계단가 (만원)		'03년도	'04년도(서울)	
			1단면(부산)	2단면			
관로	맨홀	개소	9,000		14,708	12,393	
	본선	m당	99		114	123	
전력구	본선	m당	410	580	652	654	
터널	압입	본선	330		312	459	
		수직구			m당	1,402	1,288
	세미쉴드	본선	m당	730	1,000	728	799
		수직구	m당	1,700		3,861	4,355
	쉴드TBM	본선	m당	790	1,020	-	834
		수직구	m당	3,600		-	4,694
	NATM	본선	m당	900	1,200	967	1,353
		수직구	m당	2,600		3,622	3,490
메서쉴드	본선	m당	1,100	1,460	1,385	1,051	
	수직구	m당	1,600		-	-	
케이블헤드	개소		7,500		14,039	16,579	

국내 TBM 터널의 미래 수요 예측

표 4. 세계 최대의 TBM 크기와 용도(2006년 현재)

TBM 종류	외경 (m)	적용 위치	터널용도
EPB 실드 TBM	15.2	스페인 마드리드	도로
이수식 실드 TBM	14.2	독일, 함부르크, 러시아	도로(독일)/도로·철도(러시아)
	14.14	모스크바, 일본 동경만	도로
경암 TBM	10.7~12.2	미국 시카고 (TARP plan)	하수·홍수조절용

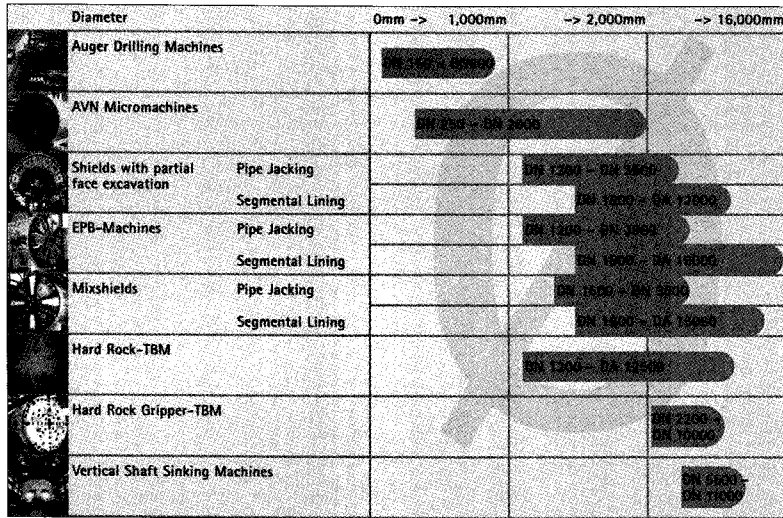


그림 20. Herrenknecht사의 TBM 제작 직경

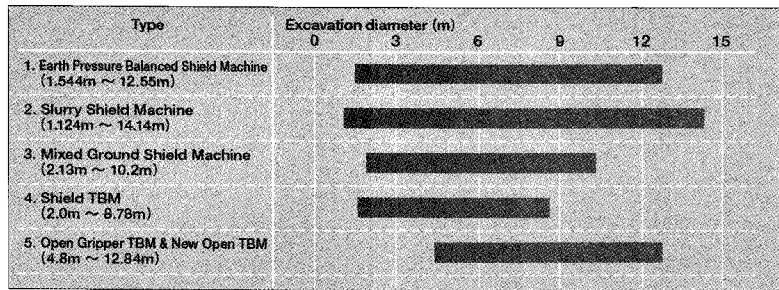


그림 21. Kawasaki사의 TBM 제작 직경

격, 적용빈도 등을 고려할 때 TBM 직경은 경제성을 좌우하는 중요한 요소이며 국산화를 위해서도 매우 중요한 판단요인이 된다. 국내에서 보유하고 있는 장비는 대부분 7~8 m 직경의 중구경 TBM으로서 지하철 단선터널 규모로 적합하나 2차선 이상으로 계획되는 도로터널에는 부적합하며, 단선병렬로 적용할 경우 공사비 부담이 NATM에 비해 증가하는 문제가 있다. 그리고 대구경 TBM은 현재 국내에 적용실적이 없으며, 국내의 설계계

획단계에서 검토는 하고 있으나 경제성을 가장 큰 문제로 삼고 있다. 또한 대구경 TBM은 해외에서도 그 실적이 적고 제작사가 한정되어 있어 국내의 설계회사에서 장비제작사에 견적을 의뢰할 때 높은 견적이 책정되는 문제가 있다. 이와 같은 문제로 설계적용단계에서 대구경 TBM의 적용이 채택되지 않는 경향이 나타나고 있다.

그러나 표 4와 그림 20 및 그림 21과 같이 해외에서는 TBM 장비 형식별로 최대 15.2 m에 이르는 다양한 직경

의 TBM을 제작하여 사용함으로써 TBM의 장점을 잘살려 친환경적 터널을 건설하고 있다. 국내의 터널단면의 증가추세에 비추볼 때, 중구경 이상의 TBM 적용은 필연적이라 할 수 있다. 따라서 중구경 이상에서 문제가 되고 있는 경제성에 대한 확보방안이 마련된다면, 향후에는 국내에서도 터널 기계화시공의 다변화를 이룰 수 있을 것이다.

5. 결론

최근 정부에서는 사회전반에 녹색성장을 추진하고 있다. 이의 일환으로 건설 분야 전반에서도 친환경성이 강조되어 신설 도로 및 철도건설시 자연경관 훼손방지 및 환경피해 최소화 중요성이 대두되고 있다. 국토의 70% 이상이 산악지역인 국내의 특성을 고려할 때, 노선의 선형성 확보와 절개지 등 대단면 절토에 의한 자연 훼손 최소화를 위해 터널 건설이 급증하는 것으로 평가되고 있다. 국토해양부 통계에 따르면 국내 터널은 1997년 184개소 총연장 150km에서 2007년 1,064개소 총연장 754km로 연평균 터널 개소 47.8% 증가 및 연장 40.3% 증가 추세를 나타내고 있다. 이중 녹색성장 추진전략인 철도의 경우 복선화, 선형성 향상 및 주거지와 시가지 접근시 민원과 환경피해 최소화를 위해 철도터널 건설 증대 및 장대화가 이루어져 1994년 452개소 연장 164.1km에서 2005년 577개소 358.0 km로 10년간 개소는 1.3배 증가하였고 연장은 약 2배 이상 증가하였다. 이와 같은 국내 정책·사회적 동향과 터널건설의 수요증가 추세에서 향후 국내 TBM 터널의 수요전망을 매우 밝다고 예측할 수 있다.

그러나 아직까지는 국내 TBM 터널의 안정적인 시장 확보를 장담하기는 이르며 국내뿐만 아니라 전 세계 터널 시장에 진출하고 터널 기술의 선진화를 도모하기 위해서는 아직까지 해결해야 할 일들이 산재해 있다. 국내 지반 조건에 적합한 TBM의 설계 및 시공기술, 보다 경제적인

세그먼트 라이닝 및 디스크 커터 개발, 제도적 문제점 개선 그리고 더 나아가서는 TBM의 국산화가 이에 해당한다고 할 수 있다.

앞서 기술한 바와 같이 국토해양부 발주로 TBM 국산화를 위한 기획연구가 이미 완료되었고 2020년까지 단계별(1단계 4.5년, 2단계 5년)로 TBM 자체 개발을 목표로 2011년 올해부터 TBM 국산화를 위한 1단계 연구가 시작될 예정이다. TBM 국산화를 위해 겨우 첫발을 내딛은 상황이지만 이 연구를 통해 기술선진국에 대등한 기술개발과 보다 나은 국내의 수요창출을 기대해 보며 이제는 터널 기계화시공법의 도입에 의해 터널 기술자의 역할이 줄어들어 가는 것이 아닌가 하는 기우는 떨쳐버리고, 기계화시공법을 적극적으로 도입하고 발전시키기 위한 터널 기술자의 노력과 학습이 필요한 때라고 판단된다.

참고 문헌

1. 배규진, 이성원, 이두화, 2000, 터널 기계화 시공분야의 기술 개발 현황과 미래수요예측, 제1차 터널기계화시공기술 심포지엄 논문집, pp. 13~26.
2. 배규진, 장수호, 2006, 시공 리스크를 고려한 TBM의 굴진성능 향상 및 평가기술, 제7차 터널기계화시공기술 심포지엄 논문집, pp. 11~46.
3. 이두화, 이성기, 추석연(2001), "일본의 터널 기계화 시공 발전 현황 및 사례분석", 제2차 터널기계화시공기술 심포지엄 논문집, pp. 11-32.
4. NTNU(1998), "Advance Rate and Cutter Wear", Hard Rock Tunnel Boring, Vol. 3 of 10.
5. 한국터널공학회(2008), 터널공학시리즈 3 터널기계화시공 설계편, 씨아이알, 서울.
6. 한국건설교통기술평가원, 2010, 기계화·자동화 터널건설을 위한 TBM 기술개발 기획연구.