

# 마이크로터널링 기술의 현재와 미래②

- 마이크로터널링 공법의 적용 -

이창호<sup>1</sup>, 최광철<sup>1</sup>, 김병모<sup>2</sup>

전편의 마이크로터널링 공법에 대한 전반적인 소개에 이어, 이번 호에서는 마이크로터널링 공법을 현장에 적용하려고 할 때 고려해 보아야 할 중요한 사항에 대해서 살펴보고, 현재 마이크로터널링 공법이 갖고 있는 한계와 앞으로의 발전방향에 대해서도 생각해보고자 한다.

## 1. 마이크로터널링 설계 및 시공

### 1.1 계획 및 조사

마이크로터널링 공법은 일반적인 터널 공법과는 달리 막장을 직접적으로 관찰하기가 어려워 지질의 변화를 파악할 수 없을뿐더러, 토질 조건에 따라 사용하는 굴진기도 달라지므로 계획 및 조사 단계에서부터 세심한 주의를 기울일 필요가 있다. 또한 공사 도중에 굴진기 변경이나 교체 등이 곤란하여 시공 계획이 미비할 경우 공사기간의 지연이나 공사비 증대에 의한 피해가 막대하다.

뿐만 아니라 마이크로터널링 공법은 건물이 밀집한 도심지에서 이루어지는 경우가 대부분이기 때문에 일단 막장의 안정을 해치게되면 굴착작업이 곤란해질 뿐만 아니라 지표면의 침하나 주변 구조물의 손상 등 중대한 장애를 가져오는 경우가 많으므로 막장의 안정 및 지반 침하 방지대책에 대해서도 충분히 검토할 필요가 있다.

이와 같은 이유로 마이크로터널링 공법에서는 일반적인 조사 항목에 대해서도 좀 더 세심한 주의를 기울일 필요가 있으며, 이외에도 특히 다음과 같은 항목들은 충분한 검토가 필요하다.

① 선형 계획 : 마이크로터널링 공법에 있어 현재

까지는 곡선부 시공 및 장거리 시공에 따른 제약이 많이 존재한다. 따라서 선형 계획 시 중단 선형 및 곡률반경 등을 상세히 검토하고, 장거리 시공일 경우 작업구 설치 가능 위치 등을 사전에 면밀히 조사하여야 한다.

② 지장물 조사 : 마이크로터널링 공법은 타 공법에 비해 심도가 낮은 경우가 많은데 이러한 경우 지중에 각종 지장물이 있을 확률이 높으므로 사전에 이를 조사하여 이에 대한 대비책을 마련해 놓아야 한다. 또한 옥석 등으로 인하여 굴진이 곤란한 경우가 발생될 수 있으므로 굴진이 예정된 지반에 대한 조사를 면밀히 실시한다.

③ 시공 중의 조사 : 굴진이 시작되면 컷터헤드의 회전수, 추진력의 크기, 굴진기의 위치 등 굴진기의 상태를 나타내는 각종 정보를 항상 주시하여야 하며, 공사 도중에 배토되는 토질의 종류나 입도분포 등을 조사하여 지질의 변화 등을 파악하고 사전에 대처하여야 한다.

### 1.2 작업구

일반적인 터널 공법에서는 작업구를 터널의 노선 상에 설치하는 것을 원칙으로 하고 있으며 여의치 않을 경우 노선 외의 적당한 곳에 작업구를 설치하고, 본선으로 연결구를 설치하여 시공하고 있다. 하지만 마이크로터널링 공법에서는 초기부 급곡선 시공이 곤란하므로 작업구를 터널의 노선 상에 설치하여야만 한다. 다만 작업구 외에 발전 설비, 송배수 설비, 뒷채움주입 설비 등 각종 설비용지의 확보가 곤란한 경우에는 노선 상 이외의 적당한 위치에 설비를 들 수 있도록 작업장을 마련하도록 한다.

<sup>1</sup> 정희원, 한국통신 가입자망연구소 선임연구원

<sup>2</sup> 정희원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수

작업구의 형상과 크기는 위치 선정과 동시에 검토해야 한다. 용지 사용상 제약이 없는 경우 작업구 면적은 넓을수록 좋으나, 공사비가 증대되므로 일반적으로 기능상 필요한 최소 면적으로 한다. 단, 기능상 또는 설계상 최소 치수가 아니라 작업자가 여유를 갖고 안전하게 작업할 수 있는 공간을 고려한 치수여야 한다. 이와 같은 점을 고려할 때 필요한 일반적인 작업구의 크기는 <표 1>과 같다.

표 1. 작업구의 크기 예

직경 (mm)	발진구 (길이×폭,m)	도달구 (길이×폭,m)
600~1100	7.2×3.2	4.8×3.2
1200	7.2×4.0	4.8×4.0
1300~1700	8.0×4.0	5.6×4.0
1800	8.0×4.8	5.6×4.8
2000~2200	8.8×4.8	6.4×4.8
2400~2800	8.8×5.6	6.4×5.6
3000	9.6×5.6	7.2×5.6

### 1.3 굴진

#### (1) 발진

굴진기를 발진시키기 위해서는 우선 발진부에 대한 사전 지반개량 및 보강 필요여부를 조사하여 조치를 취한다. 이러한 단계를 거친 후 굴진기를 소정의 위치에 고정시키는데, 고정 위치는 설계 상의 터널 중심을 기본으로 정하나 지반이 연약하여 굴진기의 처짐이 예상되는 경우에는 위치를 상향 보정하기도 한다. 하지만 어떠한 경우에도 굴진기는 반력벽과 반드시 직각을 이루도록 한다.

발진 시에는 또한 지하수와 토사의 유출을 방지하기 위하여 엔트런스(entrance) 패키징을 실시한다.

#### (2) 본굴진

마이크로터널링 공법은 작업구에 설치된 유압잭으로 추진관을 밀어 이 추진력으로 굴진기가 굴진해 나가게 되므로 일단 굴진기나 추진관이 계획된 노선에서 벗어나게 되면 오차가 누적될 가능성이 커 본굴진

시에는 설계 노선을 따라 정확하게 굴진하고 있는지를 항시 계측하도록 한다.

또한 오랜 시간 동안 굴진을 중지해야 할 경우에는 반드시 윤활재를 충분히 공급하여 재굴진 시 흠과의 부착력이나 마찰력을 감소시켜 주어야 한다.

한편 굴진에 필요한 추진력은 추진관 및 굴진기 외부 흠과의 마찰에 의한 저항력과 컷터 전면에서의 저항, 추진관의 자중에 의한 저항 등으로 결정이 되는데, 이와 같은 요소들을 고려하여 결정된 추진력보다 20~60% 정도의 여유를 두어 유압잭의 용량을 결정하게 된다.

시공 시에는 이러한 추진력을 감소시키기 위해 추진관 외부에 윤활재를 주입하여 마찰력과 부착력을 감소시키기도 하며, 지반이 자립성을 확보할 수 있도록 지반개량 등의 보조공법을 사용하기도 한다.

한편 장거리를 추진하게 될 경우에는 중압추진을 사용하여 추진력을 분할하게 되는데, 이러한 중압추진은 이론상으로는 무제한으로 가능하나 실제적으로는 공사비와 시공 속도 등에 의해 제약이 따른다.

#### (3) 도달

굴진기가 도달작업구 벽체에 다다르게 되면 최종적으로 굴진기의 중심 위치를 정확히 파악하여야 한다. 이것은 굴진기가 계획된 노선을 벗어나 작업구 벽체의 중심이 아닌 모서리 등으로 뚫고 나올 가능성이 있기 때문이다. 이런 경우 지보재를 제거해야 하는 경우도 발생할 수 있는데 이로 인한 지반변형이나 붕괴가 발생하지 않도록 사전에 충분히 검토하여야 한다.

그리고 발진 시와 마찬가지로 지하수와 토사의 유출을 방지하기 위한 엔트런스 패키징을 실시하는데, 이 또한 굴진기의 중심 위치가 정확히 파악된 후에 설치하는 것은 자명한 것이다.

## 2. 굴진기 선정

마이크로터널링 공법에 있어서 어떤 굴진기를 사용하는가의 문제는 단순히 공사비와 '공사기간, 공사품질 만의 문제가 아니라, 때에 따라서는 공사의 성

패 여부를 좌우할 수 있을 정도로 그 비중이 크다. 따라서 굴진기 선정은 그만큼 중요한 의미를 가지게 되는데, 여기에서는 여러 마이크로터널링용 굴진기 제조회사에서 제시하는 장비의 규격과 시공 실적 등을 토대로 이에 관해서 살펴보고자 하겠다.

### 2.1 굴진기의 구조 및 주요 성능

일반적으로 굴진기 본체는 (그림 1)과 같이 후드부와 거더부 2부분으로 나뉜다. 후드부에는 전면에 컷터헤드가 있으며 후면에 있는 챔버 내에 토사, 이수 등을 충만·가압시켜서 막장의 안정을 꾀하게 된다. 거더부 내에는 컷터헤드 구동장치, 배토장치 등이 설치되어 있다.

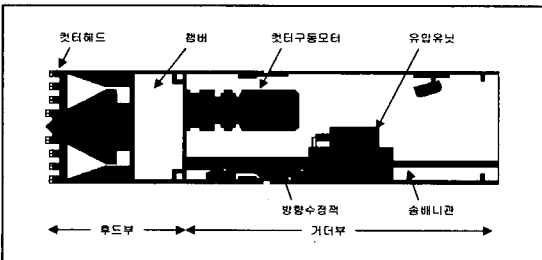
굴진기를 선정하기 위해서는 굴착하고자 하는 터널의 규모 및 대상 토질에 따라 여러 가지 규격을 검토하여야 하겠지만, 이중에서도 특히 다음과 같은 요소들에 중점을 두고 살펴보아야 한다.

- 컷터헤드의 형상
- 컷터헤드의 토크
- 컷터헤드의 회전수
- 컷터구동모터의 총동력

이러한 요소들은 굴진기의 성능을 결정짓는 가장 중요한 것들로 굴진기 설계 도면이나 성능요약서 등에 제시되어 있으므로 이와 같은 요소들을 분석하면 굴진기의 전체적인 성능과 작업성 등을 예측할 수 있다.

### 2.2 컷터헤드의 형상

굴진기 전면에 배치되어 회전하면서 지반을 굴착함과 동시에 막장의 안정을 유지시키는 기능을 갖는



(그림 1) 굴진기 구조도 예

다. 컷터헤드의 형상은 기본적으로 스포크형과 면판형, 돔형의 3가지로 분류할 수 있다. 스포크형은 컷터의 실부하 토크가 적고 토사의 취입이 용이하여, 토압식에 쓰여지는 일이 많다. 면판형은 막장의 토류 기능을 갖고 있으며, 토압식·이수식에 쓰여진다. 돔형은 막장이 자립하는 지반을 대상으로 하여 디스크 컷터나 롤러비트를 붙여서 주로 모래자갈층이나 암반을 대상으로 한 지반의 굴착에 쓰여진다.

컷터비트는 토질 조건에 따라 형상, 재질이 선정된다. 종류는 고정식과 회전식으로 나뉘며 티스비트, 루프비트, 셸비트, 디스크컷터 등이 주로 사용되고 있다. 티스비트, 루프비트는 주로 모래, 실트, 점성토 등 비교적 연약한 지반에 사용된다. 셸비트, 디스크 컷터는 자갈층이나 풍화암 등 경질지반에 사용된다.

모래자갈층을 대상으로 한 장거리 굴진에서는 컷터비트의 마찰, 손상, 탈락 등의 문제가 많아 앞으로 해결해야 할 중요 과제 중의 하나로 되어 있다.

### 2.3 컷터헤드의 토크

컷터헤드의 토크는 굴진기의 성능 중에서도 가장 기본이 되는 것이라고 할 수 있다. 컷터헤드에 충분한 토크가 전달되어야만 굴진기 전면의 토압 및 수압에 대응하면서 지반을 파쇄하거나 굴진할 수 있기 때문이다.

토크에 영향을 미치는 요소로는 토질의 강도와 컷터

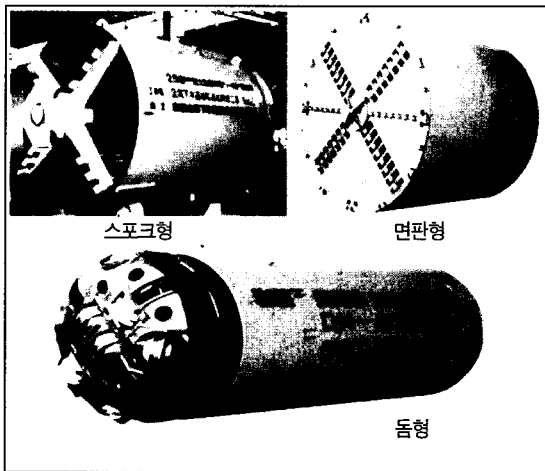


그림 2. 컷터헤드의 기본 현상

헤드 전면의 압력이 있는데, 지반이 단단할수록 그리고 압력이 높을수록 더 큰 토크가 요구되는 것이다. 하지만 컷터 구동모터의 용량이 일정하다고 볼 때에는 토크가 클수록 컷터의 회전수가 작아지므로 컷터 토크와 회전수를 적절하게 조화시키는 것이 중요하다.

실드용 굴진기의 경우에는 컷터 구동모터가 유압식이므로 컷터의 회전수를 변화시키는 것이 용이하여 굴착 지질의 변화에 따라 컷터의 회전수와 토크를 변화시켜 가면서 최적의 굴착 성능을 발휘할 수 있다

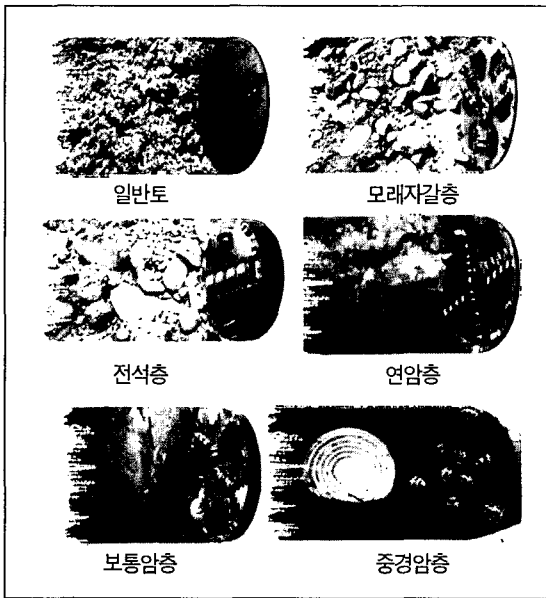


그림 3. 토질에 따른 컷터헤드 형상

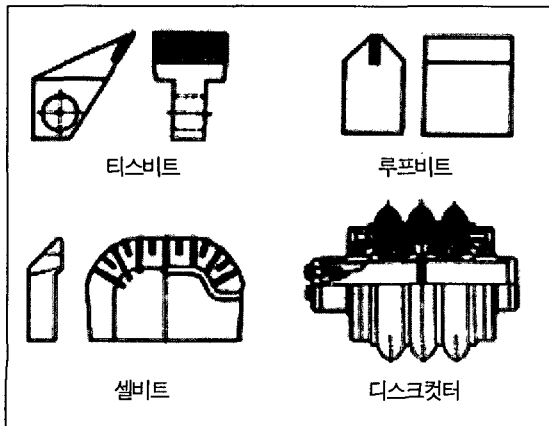


그림 4. 컷터비트의 종류

록 조절하는 것이 가능하지만, 마이크로터널링용 굴진기의 경우에는 전동식 모터를 사용하므로 컷터의 회전수를 변화시키는 것이 복잡하여 대부분의 장비가 고정 회전수와 토크를 가지게 된다. 이를 토질 조건과의 관계에서 좀 더 자세히 살펴보면, 사질토의 경우는 컷터비트를 이용하여 일정 깊이만큼 긁어내면서 굴착을 하는 반면에 암반층의 경우에는 압력을 가하면서 디스크컷터 등으로 문질러 파쇄하면서 굴진하게 된다. 컷터헤드의 회전수는 굴진속도에 큰 영향을 미치는 성능으로서 특히 암반층의 경우는 높은 회전수가 요구되기 때문에 실드용 굴진기의 경우에는 암반층을 만났을 때 컷터의 토크를 낮추고 회전수를 높여서 굴진하게 된다. 하지만 마이크로터널링용 굴진기의 경우에는 컷터의 회전수가 일정하므로 토사층에서 암반층으로 갈수록 토크를 크게 하여 굴진에 지장이 없도록 설계하고 있다.

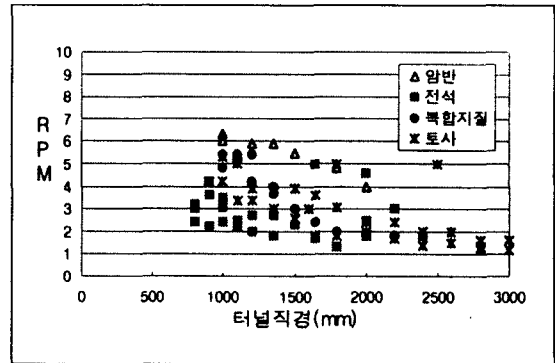


그림 5. 토질 및 직경에 따른 컷터회전수

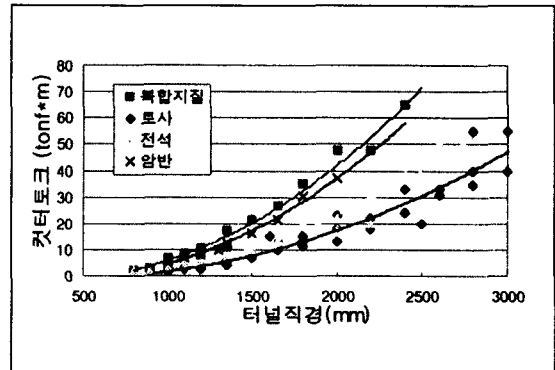


그림 6. 토질 및 직경에 따른 컷터토크

실제 사용되고 있는 굴진기들의 특징을 살펴보면 토질이나 터널 직경에 따라 컷터의 회전수는 거의 변화가 없으며 오히려 터널 직경이 커짐에 따라 회전수가 감소하는 경향을 보인다(그림 5). 하지만 컷터 토크는 터널 직경에 따라 뚜렷한 증가 추세를 보이고 있으며, 복합지질 대응형 굴진기나 암반용 굴진기의 경우 토사용에 비해 2배 이상 크게 나타나게 된다.(그림 6 참조)

### 2.4 컷터 구동모터의 총동력

컷터 구동모터의 총동력은 굴진기의 굴착 능력을 가장 잘 나타낼 수 있는 기준이라고 할 수 있다. 일반적으로 총동력은 지질 조건에 따라 암반용 굴진기가 월등하게 크며, 토사용 굴진기가 가장 작다. 복합지질용은 암반용과 토사용의 중간 정도에 해당된다.(그림 7 참조)

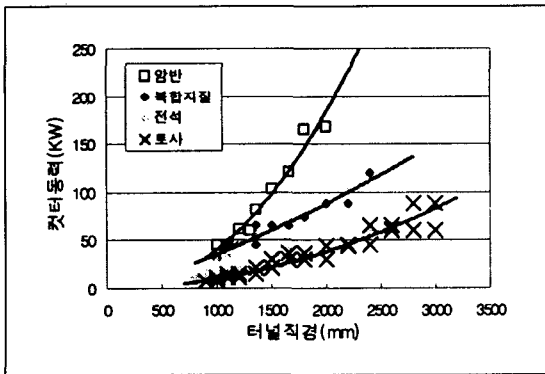


그림 7. 토질 및 직경에 따른 컷터동력

### 3. 일일추진량 기준

일일추진량이란 마이크로터널링 장비가 적정 작업 인원이 배치된 상황에서 하루(8시간 작업)에 굴진할 수 있는 거리를 의미하며, 이 중에서 직선 구간의 본 굴진 일일추진량을 표준일진량이라고 한다. 일일추진량에 영향을 주는 요인으로는 토질의 종류, 굴착 직경, 굴진연장, 중압단수, 터널의 곡률반경, 초기 및 도달굴진 거리 등이 있으며, 각각의 영향을 고려할 수 있도록 기준이 제시되어 있다.

이와 같은 일일추진량은 공사기간 및 공사비 산정

에 가장 큰 영향을 주기 때문에 마이크로터널링에서 아주 중요한 의미를 가지게 되는데, 지금부터는 일일추진량 기준에 대해서 살펴보도록 하겠다.

### 3.1 일본의 설계 기준

일본은 공사비 산정 방식 등이 우리나라의 경우와 유사하며, 국내의 경우 주로 일본으로부터 마이크로터널링용 장비 및 기술이 도입되어 일반적으로 일본에서 사용하고 있는 일일추진량 기준을 그대로 적용하고 있는 실정이다. 일본의 경우에도 여러 단체에서 기준을 제시하고 있는데 이 중에서도 "일본하수도관거추진기술협회"에서 제시된 기준이 가장 많이 사용되고 있으며, 암반 등의 특수한 경우에는 다른 기준이 사용되기도 한다.

따라서 여기에서는 "일본하수도관거추진기술협회"에서 제시하고 있는 「이수식 마이크로터널링용 기준(1999년)」을 살펴보도록 하겠다. 이곳에서 정의하고 있는 토질의 구분은 다음과 같다.

- 토질 A : 사질토, 점성토
- 토질 B : 사질토, 모래자갈층 지반  
(최대 암석 지름 20mm 미만)
- 토질 C : 모래자갈층 지반  
(최대 암석 지름 20mm 이상)
- 토질 D : 점성토(N값 5이상 30 미만)

#### (1) 표준일진량

표 2. 표준일진량(m/일)

토질 \ 직경(mm)	A	B	C	D
800~1000	5.4	4.1	3.8	3.7
1100~1200	5.3	4.0	3.7	3.6
1350~1500	5.1	3.8	3.6	3.4
1650	5.0	3.7	3.5	3.4
1800	4.9	3.6	3.4	3.2
2000	4.6	3.5	3.2	3.1
2200	4.4	3.3	3.1	3.0
3.02400~2600	4.2	3.1	2.9	2.8
2800~3000	4.1	3.1	2.9	2.8

(2) 일일추진량 보정

일일추진량은 전술한 바와 같이 여러 가지 요인에 의한 영향을 받게 되는데, 이를 고려하여 일일추진량을 계산하는 식은 다음과 같다.

일일추진량 = 표준일진량 × 보정계수

1) 초기굴진 및 도달굴진 보정

초기굴진 및 도달굴진 구간에서는 본굴진 표준일진량의 1/2을 일일추진량으로 한다.

2) 장거리 굴진 보정

직경을 고려한 장거리 굴진 보정계수는 다음과 같다.

표 3.

직경(mm)	보정계수
800~200	$K=1.0 - 0.1(\frac{l}{150} - 1)$
2200~3000	$K=1.0 - 0.1(\frac{l}{200} - 1)$

K : 보정계수, l : 굴진연장(m)

3) 토질에 따른 보정

- 최대 암석 지름을 고려한 모래자갈층 지반의 보정계수

표 4.

최대암석지름 직경(mm)	최대암석지름 (mm)				
	50 이하	50 ~100	100 ~200	200 ~300	300 ~500*
800~1100	1.0	0.95	0.90	0.85	0.70
1200~1500	1.0	0.95	0.90	0.85	0.75
1650~2000	1.0	1.0	0.95	0.90	0.80
2200~3000	1.0	1.0	0.95	0.90	0.85

\* : 최대 암석 지름 300mm이상의 경우는 기계의 특수성을 고려하여 검토할 필요가 있음.

- 점성토에서 N값을 고려한 일일추진량 보정계수

표 5.

N값	5~10	10~20	20~30
보정계수	1.0	0.8	0.7

4) 중압 보정

표 6.

토질	직경(mm)	중압 1단	중압 2단	중압 3단	중압 4단
A D	1000~1650	0.93	0.89	0.86	0.82
	1800~3000	0.93	0.87	0.85	0.81
B	1000~1650	0.93	0.88	0.83	0.81
	1800~3000	0.92	0.88	0.84	0.81
C	1000~1650	0.93	0.90	0.85	0.83
	1800~3000	0.93	0.90	0.86	0.81

주) 중압 1~2단의 경우는 '개별조작방식', 중압 3~4단의 경우는 '집중조작방식'에 대한 보정계수를 말한다.

5) 곡선 굴진 보정

곡선굴진을 하기 위해서는 대부분 곡선용 잭이 부착된 추진관을 추진시키기 때문에 굴착속도가 저하하게 된다. 또 곡선부에서는 측량기를 추진관 내에 배치하여 측량을 실시하고, 그 결과를 도면으로 그려서 관리하기 때문에 측량에 필요한 시간이 큰 폭으로 증가하고 있다. 이러한 점을 고려하여 추진관 직경에 따른 곡선 굴진에서의 측량시간과 굴진속도를 표시하면 (그림 8)과 같게 된다.

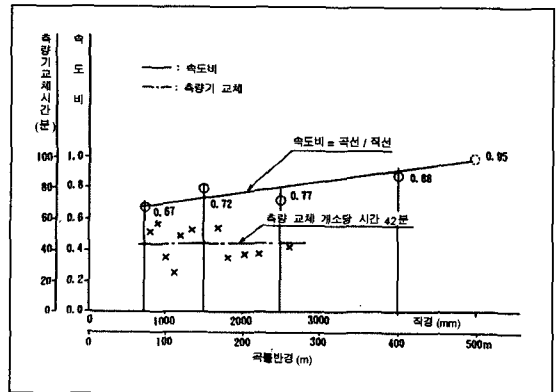


그림 8. 곡선굴진의 보정

3.2 국내 적용 실적

국내에서 1998년까지 실시된 대표적인 마이크로터널링 공법의 적용 실적을 살펴보면 (표 7)과 같다. 이와 같은 국내 적용 실적을 일본의 기준과 비교해

〈표 7〉 국내 마이크로터널링 적용 실적

공사명	공사규모	일일추진량(mm/日)			토질상태
		초기 굴진	중 굴진	도착 굴진	
△△지역난방	D=1800 L=80	1.5	2.8	1.5	실트, 풍화토
□□공업용수	D=1800 L=590	3.0	5.0	3.0	실트
□□송전관로	D=2200 L=170	1.8	2.8	1.5	풍화토
◇◇전력구	D=2200 L=200	1.5	2.3	1.2	풍화토
○○지역난방	D=2200 L=90	1.0	5.0	1.0	실트, 풍화토
◇◇차집관로	D=2200 L=205	1.5	3.0	1.5	실트
▽▽전력구	D=2400 L=800	2.0	5.0	1.0	연암, 풍화토
△△통신구	D=2600 L=290.7	2.0	2.9	1.5	점성토

보면 대부분의 경우 일일추진량이 크게 뒤떨어진 것을 알 수 있다. 이것은 마이크로터널링 공법의 시공 경험이나 기술 수준이 일본에 비해 뒤떨어져 있기 때문인 것으로 생각되는데, 앞으로 국내에서도 마이크로터널링의 적용이 확대되고 시공경험이 축적되면 근접한 결과를 가져올 것으로 기대된다.

한편, 앞서 말한 바와 같이 설계 시에는 이와 같은 사실을 간과한 채 일본의 기준을 그대로 적용하고 있어, 작업 시간을 연장하는 방법 등으로 실제 시공 시간과의 차이를 줄이고 있는 것이 국내 현실이다. 따라서 이에 따른 부작용을 없애기 위해서는 국내에서도 시공 실적 등을 토대로 합리적인 일일추진량 기준을 제시할 필요가 있다.

#### 4. 마이크로터널링 신기술 동향

지금까지 마이크로터널링 공법을 현장에 적용하려고 할 때 검토해 보아야 할 사항에 대해서 살펴보았다. 이제부터는 마이크로터널링 공법이 가지는 한계를 이야기하고, 이를 극복하기 위한 새로운 노력으로서 관련 신기술을 소개하고자 한다.

#### 4.1 현재 기술의 적용 한계

마이크로터널링 공법의 한계는 근본적으로 추진을 위한 힘의 근원이 실드나 TBM과 같이 굴진기 자체에 있지 않고 작업구에 위치한 유압잭에 있다는 점에 있다. 따라서 굴진을 위해서는 굴진기 헤드에서 걸리는 저항 외에도 추진관과 지반 사이에 작용하는 마찰력을 동시에 극복해야 할 필요성이 있으므로 일정거리 이상의 장거리 시공이 불가능하다. 실드공법의 경우 전원이나 자재공급이 원활하고 지반을 굴삭하는 롤러컷터나 비트 등 마모성 자재의 교환만 가능하다면 이론적으로 굴진거리에 제약이 없는 것과 비교된다. 다음 〈표 8〉은 "일본하수도관거추진기술협회"에서 제안하고 있는 이수식추진공법에 대한 적용도질별 표준추진연장을 나타낸 것이다.

〈표 8〉 표준추진연장 (단위:m)

지질(mm)	토질	A D	B	C
800~900		80	55	60
1,000~1,650		120	70	90
1,800~3,000		130	80	100

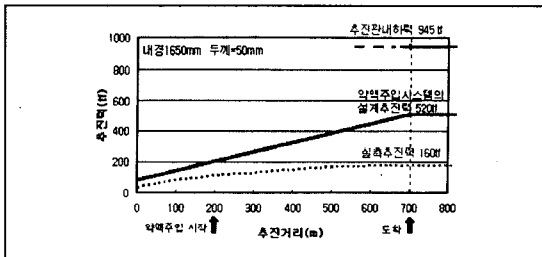
위 〈표 8〉에 나타난 추진거리는 직선경로에서 중압잭을 사용하지 않을 경우에 해당한다. 중압잭이란 수직구와 굴진기 본체 사이, 즉 추진관 사이에 추진잭을 추가로 설치하여 수직구에 설치된 메인잭의 추진력을 분산하고 굴진기 헤드에 추진력을 효과적으로 전달하고자 도입된 개념으로서 시공 거리에 따라 그 설치 개수를 정하는데, 최대 6개까지 설치할 경우 추진연장이 4~5배까지 늘어날 수 있다. 하지만 중압잭을 사용할 경우 시공 후 회수가 불가능하기 때문에 비용이 높아지는 것으로 나타나 있다.

곡선시공의 경우는 곡선경로에 대한 접선방향의 저항력이 추가됨으로 인해 추진거리가 상당히 짧아지며 정확한 경로제어(path control)를 필요로 하므로 급곡선시공에 한계를 가진다. 또한 〈표 8〉에서 알 수 있는 바와 같이 구경이 작아질수록 추진거리 또한 제한을 받게 되는데 이는 장비의 성능이 그 크기와 비례해서이기도 하지만 소형화될수록 경로제어도 어려워지기 때문이다.

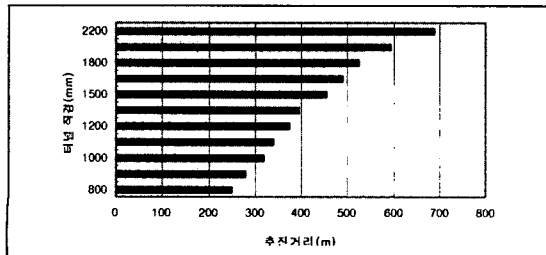
다음은 이러한 현 기술의 한계를 극복하기 위한 신 기술의 동향을 살펴본 것이다.

### 4.2 장거리 시공

마이크로터널 시공이 많이 적용되는 복잡한 도심지에 대해서는 전체 공사비의 절감은 물론 교통장애 방지 등 사회적 비용의 감소를 위해서도 수직구의 수를 가능하면 줄여야하므로 장거리 시공에 대한 필요성이 강하게 부각되고 있다. 장거리 시공을 달성하기 위해서 주목해야 할 것은 지반을 굴삭하는 컷터헤드의 설계와 추진관과 주위 지반과의 마찰력을 줄이는 일이다. 시공하고자 하는 대상 지반에 대한 최적의 면전형상이 정해진다고 할 때 결국은 주위 지반과의 마찰력을 줄이는 것이 장거리 시공의 관건이라 할 수 있다. 이를 위해 추진관과 지반사이에 마찰을 줄일 수 있는 약액, 즉 일종의 윤활제를 주입하는 방식이 도입되어 상당한 효과를 나타내는 것으로 보고되고 있다. (그림 9)는 이러한 약액주입시스템을 적용했을 경우 측정된 추진력을 나타낸 것이다. 이러한 시스템을 통해 지반과의 상대마찰계수가 1/2 ~ 1/4 이상 감소하는 것으로 나타나 있다. 이를 통해 내경별 추진가능한 거리는 안전율을 고려하고도 (그림 10)과



(그림 9) 거리에 따른 추진력의 변화



(그림 10) 약액주입시스템의 직경별 추진거리

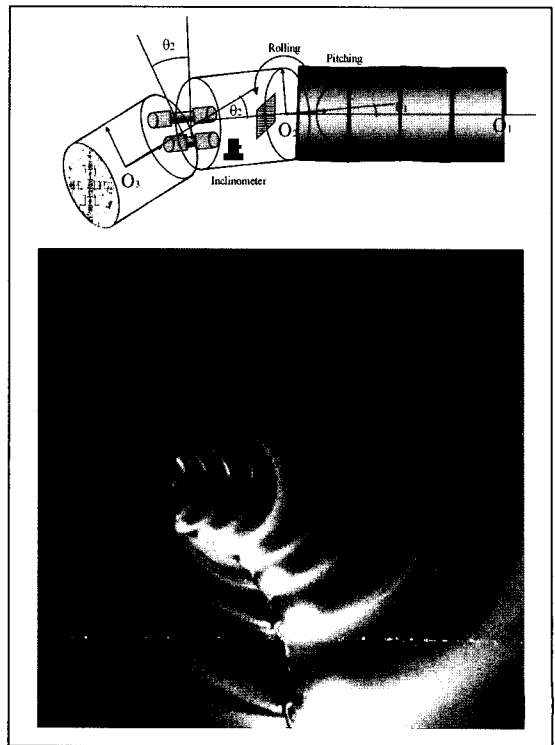
같이 기존방식에 비해 3~6배 가량 증가하였다.

### 4.3 급곡선 시공

마이크로터널링 공법이 적용되는 지역은 신시가지와 같이 도시계획이 잘 이루어진 곳보다는 구시가지와 같이 무계획적으로 시설확충이 이루어져, 도로 등이 곡선으로 형성된 경우가 많다. 이럴 경우 곡선부마다 수직구를 설치함으로 인해 발생하는 비용을 줄이기 위해서는 물론, 적소에 수직구를 설치하지 못하는 경우가 많기 때문에 곡선시공에 대한 필요성이 그만큼 높다고 볼 수 있다.

하지만 기존의 곡선시공 기술은 기존 도로나 하천의 곡률반경보다 크므로 적용성이 매우 제약되었으나 방향잭(steering jack)의 제어기술과 경로제어기술, 추진관 설계기술 등의 발전으로 인해 상당한 수준까지 시공 가능성이 보여지고 있다(그림 11 참조).

(그림 12)는 특수공법을 적용할 경우 시공 가능한

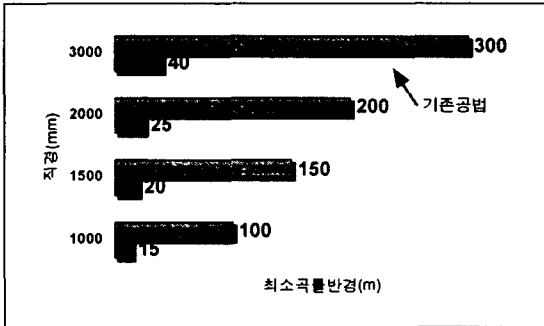


(그림 11) 급곡선 추진



곡률반경을 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 곡률반경이 기존의 약 15% 수준으로 향상될 수 있으며 안전율을 고려하더라도 최소 30R의 시공이 가능할 것으로 전망된다

#### 4.4 초소형터널 시공



(그림 12) 곡선 시공 성능 비교

마이크로터널의 적용범위는 일반적으로 내경 800~3,000mm 정도이나 내경이 작을수록 시공성이 감소함으로 인해 기 시공된 터널의 경우 직경 1,500mm 이상이 대다수를 차지하고 있다. 하지만 협소한 지하공간으로 말미암아 구경축소의 필요성이 커지고 있고, 또한 소규모 터널에서의 시공 비용을 절감하고자 하는 노력에 의해 초소형터널 시공 기술에 대한 관심이 커지게 되었다. 현재에도 터널 직경 500mm이하 크기에 대해 마이크로터널링 공법을 적용한 시공 사례가 있으며, 100~200mm 정도의 극소형터널에 대해서도 미국 등에서 많이 적용되고 있는 HDD (Horizontal Directional Drilling) 공법을 접목한 형태로 시공기술이 개발되고 있다.

이상과 같이 마이크로터널링 공법의 한계를 극복하기 위한 신기술들이 각 분야에서 개발되고 있으며 머지 않은 장래에는 안정된 공법으로서 그 적용성이 확대될 것으로 예상된다. 이를 위해 좀 더 보완 및 향상이 필요한 기술분야를 예시하면 다음과 같다.

- 장거리 굴진을 위해 내마모성이 뛰어난 컷터 및 비트의 생산기술
- 복합지질에 대응 가능한 효율적인 면판 설계 기술

- 굴진 중 전방 지질 탐사기술
- 곡선시공 및 지진 하중에 대응 가능한 추진관 설계기술
- 전체 시스템 모니터링 기술 및 Feedback 기술
- 전동모터의 회전수 조정 기술

#### 5. 결론

지금까지 마이크로터널링 공법의 현재와 미래에 대하여 간략하게 살펴보았다. 적용 국가별로 보면 미국이나 유럽 등지에서도 어느 정도 시공경험이 있는 것으로 조사되고 있으나 일본이 압도적인 실적을 보유하고 있다. 이를 통해 볼 때 사회적 여건이 비슷한 우리나라도 그 적용폭이 확대될 것으로 보여지며 실제로도 그 시공실적이 매년 증가추세에 있다. 그러나, 일본이 마이크로터널링 분야에서 세계적 지위를 가지게 된 데는 사회적 필요에 의해서이기도 하지만 소재, 부품, 시스템 제어 등 사회 각 분야의 기술적 밑받침이 있었기 때문이다. 이러한 면에서는 터널링 장비나 부수 장비의 외국 의존도가 높은 우리나라와는 크게 차이가 있다. 이 외에도 마이크로터널링은 작업자의 숙련도에 시공의 성패가 달렸다고 할 정도로 그 의존도가 높다. 따라서 숙련공의 양성화에 힘쓰는 한편 장비의 자동화 및 인공지능화를 통해 작업자 의존도를 낮추는 노력이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

끝으로, 마이크로터널링 공법의 활성화를 위해서는 국내 여건에 맞는 일일추진량 기준과 적정 손료 기준 등이 마련되어야 하며, 이와 관련한 기술력의 발전이 함께 이루어져야 할 것이다.