

터널 자유단면 굴착장비



박정환
삼보지철(주)

1. 터널 자유단면 굴착기의 특징 및 적용사례

1.1 터널 자유단면 굴착기의 선정

터널 굴착방식은 지반조건, 토피, 환경조건, 터널단면의 크기, 형상, 연장 등을 고려하여 가장 적합한 방식을 적용하여야 한다. 또한 굴착면 주변지반의 지보능력을 최대한 활용할 수 있는 굴착방식을 선택하여야 한다.

모든 기계굴착에서와 같이 터널자유단면 굴착기의 선정시 가장 중요한 요소는 굴착대상 토질에 적합한 장비를 선택하는 것이다. 대상토질에 대한 적용성 검토후 터널단면, 연장, 굴착공법 등에 대한 검토가 필요하다.

적정 자유단면 굴착기를 선정하기 위해 검토가 필요한 사항은 다음과 같다.

- 1) 대상토질 : 굴착가능여부, 효율검토
- 2) 터널단면 : 굴착공법(상하부 분할, RING CUT 등)에 따른 각 굴착단면에서 투입장비가 원활한 작업이 가능한지 여부 검토
- 3) 터널연장 : 대부분의 터널자유단면 굴착기는 자중이 무겁고(20~150TON), 무한궤도로 구동하므로 연장

이 길고(통상 1km 이상) 터널단면이 작아 타장비와의 교행이 힘든 경우는 터널중간에 대피소 설치를 검토해야 함

또한 지층이 연약한 경우 장비의 Trafficability에 대한 검토 필요

- 4) 후방설비 : 일반적인 발파굴착시보다 많은 대용량의 수전설비가 필요하며(ITC 86kw, Road Header 422kw, TTM 800kw 수전용량 필요), 수직구를 통한 장비투입시 장비투입이 가능하도록 수직구 크기에 대한 검토필요

- 5) 경제성 : 대부분의 경우 대상토질과의 적합성 여부가 경제성을 좌우하며, 특히 연암이상의 경우 소모품(특히 Pick) 소모율과 이로 인한 경제성 검토 필요

표 1. 터널 자유단면 굴착기의 주요제원 비교

구분	ITC 312	Road Header E206	TTM 100
적용토질	토사~풍화암	풍화암~연암	경암 이상
장비 SIZE (높이×너비)	2.75m×3.35m	3.38m×3.05m	3.87m×5.0m
중량	20 Ton	76 Ton	153 Ton
전기용량	86 Kw	422 Kw	800 Kw

1.2 ITC 312

1.2.1 개요

ITC 312는 Ripper + Bucket + Breaker의 조합으로 대상토질에 맞는 경제적 굴착이 가능한 장비로 90년초 국내 도입이래 주로 지하철 터널(토사~풍화암)에서 성공적인 굴착을 수행하였다. ITC 312 도입전 발파가 불가능한 토사터널 굴착시에는 주로 Short Boom Back Hoe를 투입하여 작업을 수행하였으나 Boom 스윙각도로 인한 거친 굴착(여굴 과다발생)발생, 터널내 Diesel 장비 가동으로 인한 작업환경 악화, 버럭처리시 별도의 장비투입, 토사터널 Ring Cut 굴착시의 작업곤란 등 많은 문제가 발생하였다.



그림 1.

표 2. B/H(Breaker)와 ITC 굴착특징 비교

구분	B/H (BREAKER)	ITC
개요	<ul style="list-style-type: none"> Back Hoe에 부착된 Breaker로 대상 암반을 굴착 무진동 굴착에서 대상암반 균열발생후의 후속굴착용 또는 발파후의 Scaling용으로 주로 적용 	<ul style="list-style-type: none"> Ripper + Bucket + Breaker의 조합으로 지층여건에 맞는 경제적 굴착이 가능한 터널자유단면 굴착기의 일종
대상지층	토사 ~ 풍화암	토사 ~ 풍화암
장점	<ul style="list-style-type: none"> 발파로 인한 제반문제점(소음, 진동) 없음 ITC에 비해 범용장비로 초기투자비가 작다 주변암반 이완이 없어 터널 안정성 증가 굴착후 별도의 면정리 장비 불필요 	<ul style="list-style-type: none"> 발파로 인한 제반문제점(소음, 진동) 없음 정밀굴착 가능 → 여굴감소 → 경제성 향상 주변암반 이완이 없어 터널 안정성 증가 도심지 터널 굴착에 적합 굴착후 별도의 면정리 장비 불필요 굴착과 동시에 버럭처리 가능 터널상향작업전용 Breaker 장착으로 시공속도가 빠름 토사~풍화암에서 최대의 효율발휘 터널전용 전기장비로 갱내작업환경 양호
단점	<ul style="list-style-type: none"> BREAKER는 하향작업을 위주로 만들어진 장비로 상향 혹은 수평 작업시 효율저하 심함 터널단면이 작은곳에서는 분할굴착시 Back Hoe Boom이 길어 작업성이 대단히 나쁨 (Short Boom으로 개조하여도 효율은 저하) Back Hoe Boom 관절이 2곳으로 터널상부단면 굴착시 외곽부분은 정밀굴착 불가 → 여굴증가 → 경제성 저하 시공속도 느림 Diesel 장비로 갱내 작업환경 불량 	<ul style="list-style-type: none"> Back Hoe에 비해 장비가가 비싸 초기 투자비가 많이 듦 전력사용장비라 수전설비 필요 (소요전력 86KW)

ITC 312는 이러한 재래 Back Hoe 굴착시의 많은 문제 점을 해결하는 장비로 현재 국내에서 토사터널 굴착에 위력을 발휘하고 있다. 현재 당사가 보유중인 Model은 ITC 312 4대와 ITC 112 1대로 ITC 312는 지하철, 터널, 도로터널, 고속전철 터널굴착에 주로 활용되고 있으며, ITC 112는 소단면 공동구 터널(공동구, 전력구)에 투입되고 있다.

1.2.2 ITC 장점

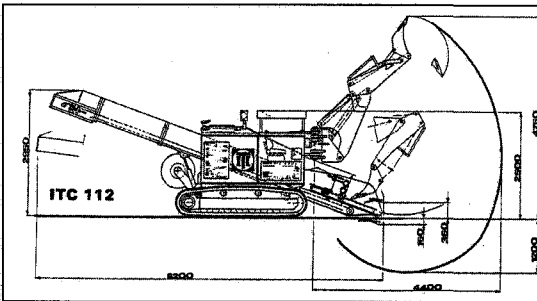
- 1) 대상지층(토사~풍화암)에 맞는 Tool 조합(Ripper + Bucket + Breaker)으로 경제적 굴착가능
- 2) B/H에 비해 Boom 관절이 1개 더 있어 터널단면대로 정밀굴착이 가능하고 터널내 좁은 공간에서도 작업원활
- 3) 장비중앙을 통과하는 Conveyer System으로 굴착과 동시에 장비후방으로 버럭처리 가능
- 4) 굴착과 동시에 버럭처리가 가능하여 장비교행이 힘

든 터널의 경우에도 굴착장비 철수없이 버럭처리 가능

- 5) 터널전용장비로 매연발생이 없고 터널내 작업환경 양호
- 6) 운전자 1명으로 굴착과 버럭처리가 가능하여 인원투입 절감
- 7) 별도의 Scaling 장비 불필요
- 8) 터널전용 상향식 Breaker 장착으로 암층에서도 효율 향상
- 9) 발파시 혹은 B/H 굴착시보다 굴진속도가 1.5배 이상 빨라 경제성 양호
- 10) 무진동, 무소음 굴착으로 주변민원 예방
- 11) 주변지반이완 극소화로 안전시공 가능

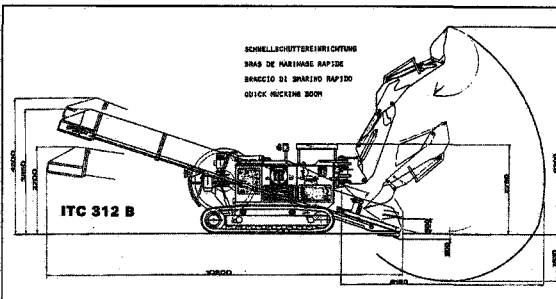
1.2.3 장비제원

그림2~5, 표3 참조



Model		ITC 112
Engine	Model	F4L 912W
	Output (Kw)	42
Electrical Motor (Kw)		37(380V) 42(440V)
Conveyor Capacity (m³/h)		150
Operating Weight (kg)		10,000

그림 2.



Model		ITC 312B
Engine	Model	F6L 912W
	Output (Kw)	63
Electrical Motor (Kw)		75(380V) 86(440V)
Conveyor Capacity (m³/h)		250
Operating Weight (kg)		20,000

그림 3.

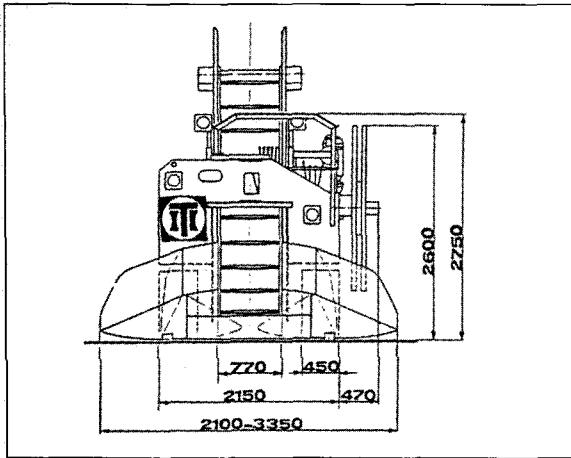


그림 4.

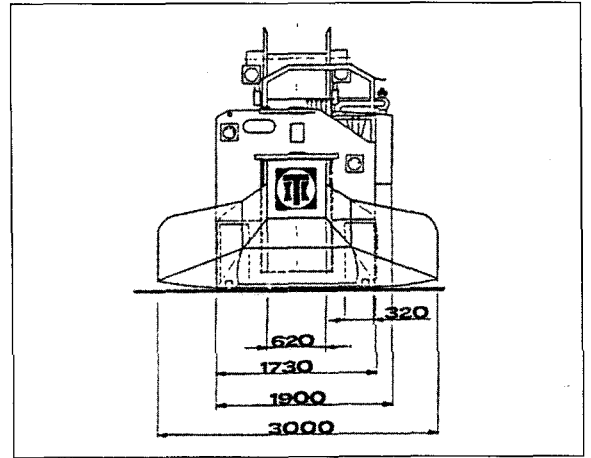


그림 5.

표 3. ITC 주요 MODEL별 제원비교

구 분		ITC 112	ITC 312B	ITC 320
장비 SIZE	폭	1.9m (Apron 장착시 3.0m)	2.62m (Apron 장착시 3.35m)	2.33m (Apron 장착시 4.0m)
	높이	2.5m (Conveyor 최대높이 2.95m)	2.75m (Conveyor 최대높이 4.2m)	3.03m (Conveyor 최대높이 4.3m)
	길이	8.2m	10.8m	11.3m
Engine Output (Kw)		42Kw	63Kw	118Kw
Electrical Motor (Kw)		37Kw (380V) 42Kw (440V)	75Kw (380V) 86Kw (440V)	130Kw (440V)
Conveyor Capacity (m³/h)		150m³/h	250m³/h	250m³/h
Operating Weight (ton)		10ton	20ton	38ton

1.2.4 굴착능력

표4 참조

표 4. 암석강도에 따른 장비조합 및 굴착능력

Rock Strength	Tool	Estimated Cutting Rate (m³/h)			Remarks
		Max	Average	Min	
~ 200kgf/cm² (Soil)	Ripper + Bucket	25	20	15	
~ 400kgf/cm²	Breaker + Bucket	20	15	10	
~ 600kgf/cm²	Breaker + Bucket	10	5	3	* Drill & Blast

※ Above excavation rate is variable according to geologic condition, operator skill, working circumstance, etc. Machine moving time was not considered.

※ Excavation rate of ITC 112 is approximately 40% of above rate.

※ The cost of consumable parts will be approximately EUR 2.0~4.0/m³ depend on geologic condition and excavation volume.

통과, 지하상가 하부통과 등) 터널공사에서 성공적으로 공사를 수행하였다. 발파굴착이 힘든 암반터널 공사의 경우 재래에는 주로 Cardox, HRS 등 암반 무진동 파쇄공법을 적용하였으나 이 경우 굴착지연, 암파쇄후 별도의 Breaker 장비투입 등으로 공기와 공사비가 지나치게 증가하는 문제점이 있었다.

Road Header는 이러한 재래굴착공법 적용시의 문제점을 해결하는 장비로 국내 도심지 암반터널 굴착을 성공적으로 수행하였다. 현재 당사가 보유중인 Model은 PAURAT E206으로 풍화암에서 연암굴착에 가장 적합한 장비이다.

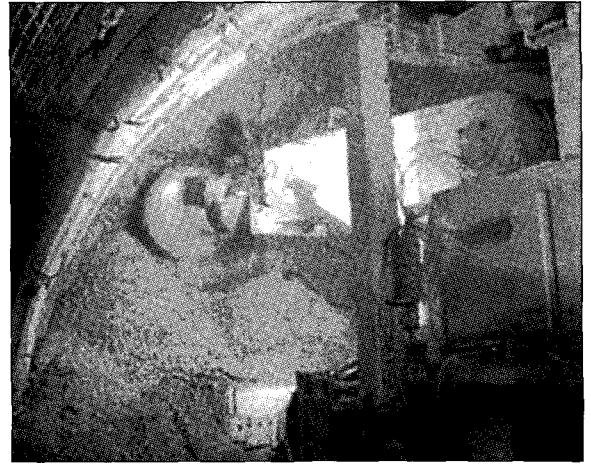


그림 9.

1.3.2 Road Header PAURAT E206 특징

- 1) 적정 중량(76Ton)으로 굴착시 Pick 소모율 감소 및 굴착효율 증대로 경제성 양호
- : Boom이 Cutting Head를 굴착면에 밀어붙이면서 Cutting을 할 때 뒤에서 받쳐주는 본체장비의 중량

이 충분치 못하면 반발력으로 인해 본체장비가 밀려나게 되고 따라서 굴착시 Cutting Head에 오는 진동이 가중되어 굴착효율은 떨어지면서 Pick의 소모량만 많아지고 굴착면에 Cutting Head가 미끄러

표 5. Road Header Cutting Head Type 비교

공 정	Longitudinal (PAURAT E206)	Transverse
개 요		
Sumping-in	<ul style="list-style-type: none"> · Cutting Pick 방향이 원심력 방향의 오른쪽 방향이므로 작은 힘으로도 가능함 · Crawler의 전진과 약간의 Boom 회전으로 Sump-in 가능 경암에서는 Boom을 터널 굴진방향의 수평방향으로 고정시키는 것만으로도 Sump-in 가능 · 한번의 Cut로 가능한 최대 관통능력은 Cutting Head의 길이와 같음 	<ul style="list-style-type: none"> · Cutting Pick 방향이 원심력 방향과 거의 같으므로 상대적으로 큰 힘이 필요함 · Crawler 전진과 축방향으로의 Boom 회전을 동시에 행하여 Sump-in 하여야 함 · 한번의 Cut로 가능한 최대 관통능력은 Cutting Head 지름의 2/3이므로 Sump-in 작업을 여러번 반복해야 함

표 5. Road Header Cutting Head Type 비교(계속)

구분	Longitudinal (PAURAT E206)	Transverse
굴착면 제거	<ul style="list-style-type: none"> · Cutting 방향이 수평, 수직, 대각 등 어떠한 방향으로든 가능함 · 따라서 지질조건, 요구된 기본조건에 따라 Cutting 순서를 자유롭게 조정 · Cutting 깊이를 수cm에서 Cutting Head 길이까지 자유롭게 조절할 수 있음 · 경암의 굴삭에서는 Cutting 깊이를 깊게 하여야만 가능하므로 Longitudinal Head가 적합하여 중경암의 경우 10~30cm정도의 Cutting 깊이가 가장 효율적인 것으로 경험치가 알려짐 	<ul style="list-style-type: none"> · 주 Cutting Force가 Cutting Head의 원심력이기 때문에 단지 수직방향(위에서 아래로)의 굴삭만이 가능함 · 따라서 Cutting 순서는 조정할 수 없음 · Cutting 깊이는 약간 조정할 수 있으나 Gear Box 문제로 20cm를 초과할 수 없음 · 충분한 깊이로 Cutting하지 못하기 때문에 불리한 Stress를 가져와서 상당한 진동문제를 야기할 수 있다.
Profile 굴착	<ul style="list-style-type: none"> · 본체가 고정된 위치에서도 Cutting 방향이 자유롭게 때문에 한 위치에서 반구형 혹은 말굽형 등 어떠한 형태의 Profile도 유연하고 정교한 굴삭 가능함 	<ul style="list-style-type: none"> · 정교한 동작을 위해서는 본체가 움직여야 하기 때문에 상당한 시간을 요함 · 이를 보완하기 위해서는 Telescopic Boom, 특수 관절, 회전 Boom 등 특수사양의 장치가 필요함
Gear Box for Cutting Head	<ul style="list-style-type: none"> · Gear Box와 Cutting Head 사이의 Shaft와 Coupling이 Tortion Shock를 흡수하여 Gear Box의 내구성을 제고함(Transverse Gear Box 수명의 약 3배이상) · 가격수준은 Transverse Gear Box의 약 1/2 수준임 	<ul style="list-style-type: none"> · Cutting Head와 Gear Box가 직결되어 있어 Tortion Shock가 Gear Box에 직접 영향을 주고 또한 작업시 Gear Box가 굴삭면에 자주 닿게되므로 수명이 길지 못함 · 가격수준은 Longitudinal Gear Box의 2배 수준임
Pick 소모량	<ul style="list-style-type: none"> · 충분한 깊이로 굴삭할 수 있으므로 가장 경제적인 Pick 소모량 보장 	<ul style="list-style-type: none"> · 충분한 깊이로 굴삭하지 못하므로 오는 Boom의 진동으로 Pick 소모량이 많음
Energy 소모량	<ul style="list-style-type: none"> · Cutting된 암반버력의 크기가 Transverse 보다 커서 Energy가 적게 소모됨 	<ul style="list-style-type: none"> · Cutting된 암반버력의 크기가 Longitudinal의 것 과 비교하여 작으므로, Energy가 많이 소모됨

지는 현상 발생

- 2) Cutting Head가 터널굴착에 효과적인 Longitudinal Type임
(표 5. Road Header Cutting Head Type 비교 참조)
- 3) 다양한 단면, 변화가 심한 단면도 추가장비 투입없이 굴착가능
- 4) 장비중량을 통과하는 Conveyor System으로 굴착과 동시에 장비후방으로 버력처리 가능
- 5) 굴착과 동시에 버력처리가 가능하여 장비교행이 힘든 터널의 경우에도 굴착장비 철수없이 버력처리 가능
- 6) 터널전용장비로 매연발생이 없고 터널내 작업환경 양호
- 7) 운전자 1명으로 굴착과 버력처리가 가능하여 인원투

입 절감

- 8) 별도의 Scaling 장비 불필요
- 9) 발파로 인한 제반 문제점(소음, 진동, 주변지반 이완 등) 방지

1.3.3 장비제원

그림 10~12, 표6 참조

1.3.4 Road Header E206의 굴착효율 및 Bit 소모율 표 7 참조

1.3.5 주요 시공 실적

- 1) 서울지하철 5-16, 5-17공구
- 2) 부산지하철 210공구

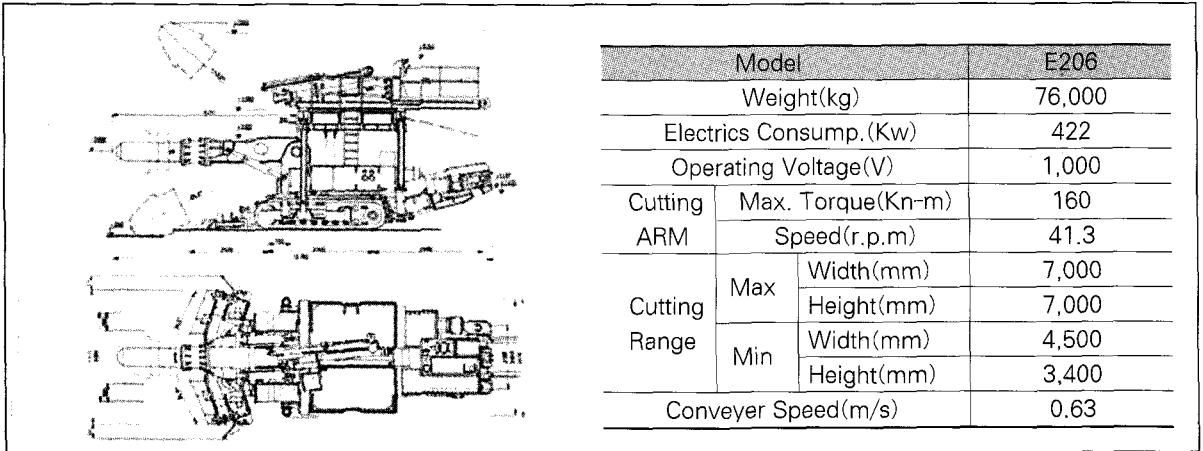


그림 10.

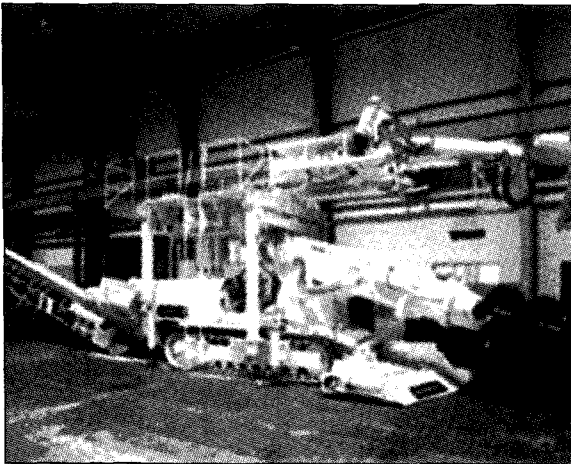


그림 11.

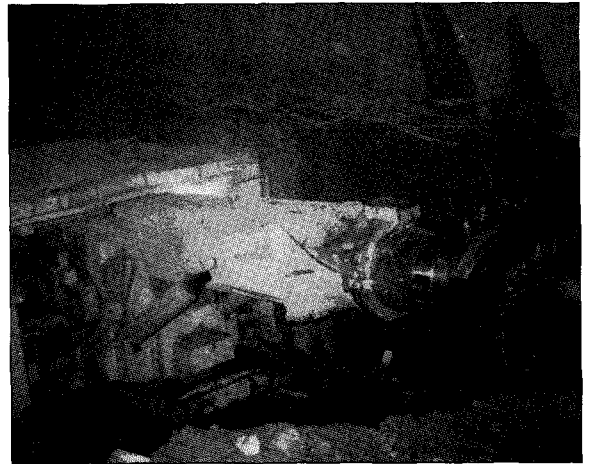


그림 12.

- 3) 인천지하철 1-7공구
- 4) 백제큰길도로 정지산 터널(무녕왕릉 유적지 하부 통과)
- 5) 부전~사상간 복선화 노반공사중 주령 제 2 터널(시공중)

- 3) 대상지층 : 풍화암
- 4) 공사기간 : 2000년 12월 ~ 2003년 12월
- 5) 공사물량 : 단선터널 730m

1.3.6 적용사례

- 1) 공 사 명 : 부전~사상간 복선화 노반공사중 주령 제 2 터널공사
- 2) 공사위치 : 부산시 부산진구 개금동 일원

1.4 TTM 100

1.4.1 개요

TTM 100은 영국 Dosco사의 제품으로 TBM과 Road Header를 조합한 장비이다. 이 장비는 94년 당초 TBM으로 설계되었으나, 부지문제 등으로 TBM 투입이 힘들

표 6. PAURAT ROAD HEADER 주요 MODEL별 제원 비교

구 분		E 301	E 206	E 249 (0.8m Telescopic Boom)	E 242 (1.2m Telescopic Boom)
장비 SIZE	폭 (Apron 제외)	2.6m	3.05m	3.2m	3.4m
	높이	1.5m	3.38m	4.3m	3.94m
	길이	9.6m	13.01m	16.525m	16.6m
Cutting Range	최대굴착높이	4.315m	7.0m	8.5m	7.6m
	최대굴착폭	6.2m	7.0m	8.8m	8.96m
	최대굴착 하단깊이*	0.19m	0.24m	0.45m	1.06m
Weight		40ton	76ton	87ton	120ton
Electrics Consump.		247Kw	422Kw	438Kw	444Kw
Operating Voltage		1000V/60Hz	1000V/60Hz	1000V/60Hz	1000V/60Hz
Conveyor Speed		1.11m/s	0.63m/s	1.06m/s	0.84m/s

*Max. Undercut Below Crawler Level

표 7. 일축압축강도에 따른 굴착능력

Compressive Strength	Estimated Cutting Rate (m ³ /h)			Estimated Pick Consumption (ea/m ²)	
	MPa	Max.	Average	Min.	Max.
20	120	90	50	0.05	0.01
30	110	60	35	0.07	0.02
40	100	40	25	0.10	0.03
50	80	30	20	0.13	0.04
60	55	25	15	0.15	0.05
70	40	20	12	0.17	0.06
80	30	17	10	0.20	0.07
90	25	15	7	0.23	0.08
100	20	12	5	0.27	0.10
110	17	10	3	0.30	0.12
120	15	7	3	0.35	0.15
130	12	5	0	0.40	0.20
140	10	5	0	0.50	0.30

※ 1. 상기 굴착효율은 지층구조, 석영분 함유정도, 인장강도, 운전자의 숙련도에 따라 변할 수 있다.
2. 상기 굴착효율은 석영분 10% 미만의 경우이다.

있던 서울지하철 7-20공구 터널공사를 위해 도입된 장비로 경암에서의 굴착효율은 Road Header보다 우수하다.

TTM 100의 외형과 구동방식은 Road Header와 같으며, 굴착방식은 TBM과 유사하다. 즉 TBM이 Gripper 반력

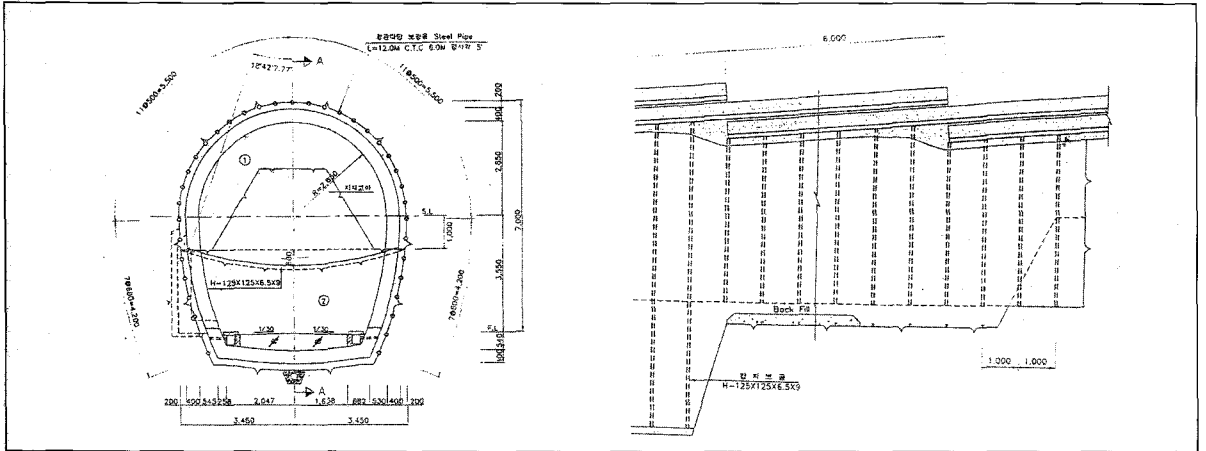


그림 13.



그림 14.



그림 15.

을 이용하여 굴착하는 것과 같이 TTM 100은 장비의 측면과 상부 좌우에 각각 4개씩 16개의 Staker가 있어 굴착 시 장비본체를 지지하며 본체의 진동을 감소시키고 장비의 굴착력을 증가시킨다. 각 Staker는 개당 25Ton의 지지력을 가지며 1m이내의 벽면이나 천장을 지지한다.

엄밀하게 말할 경우 TTM 100은 자유단면 굴착기로는 보기 어려운데 그 이유는 굴착가능한 형상이 고정되기 때문이다. 즉 TBM과 유사하게 16개의 Staker로 장비본체가 고정되기 때문에 Boom Head 이동만으로 굴착이 이루어져서 지하철, 도로 등 다양한 형상과 크기의 굴착이 불가능하며, 암반터널의 Pilot 터널 굴착에 적합하다.

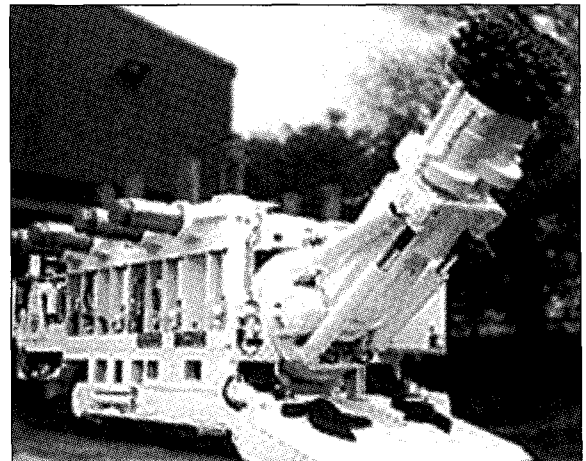


그림 16.

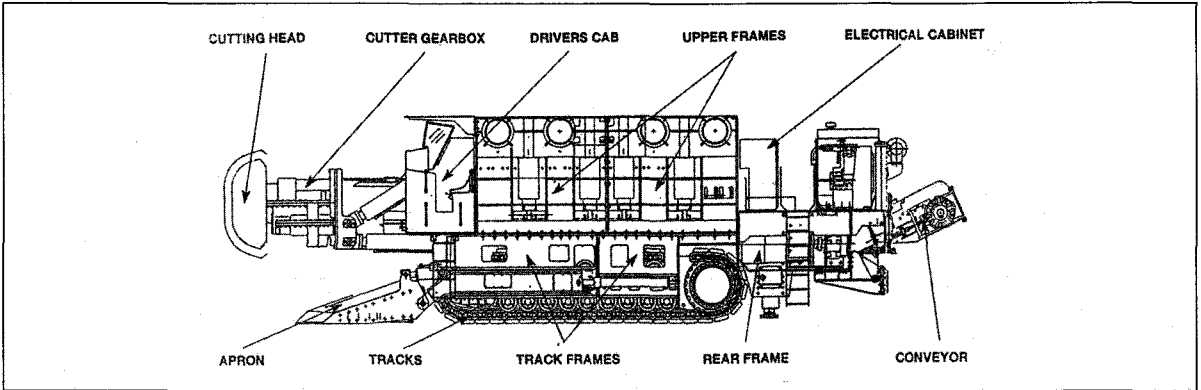
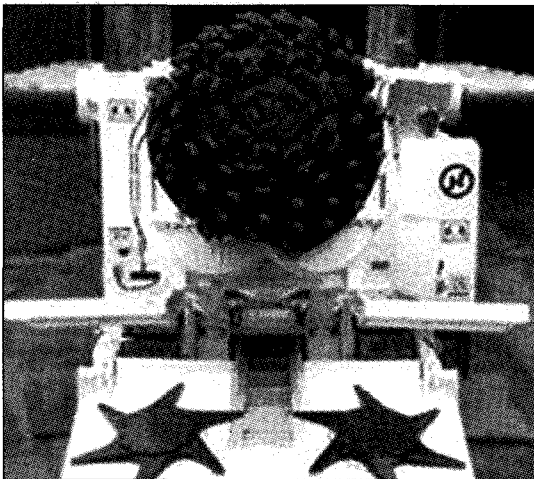


그림 17.



Model		TTM 100	
Weight(kg)		153,000	
Electrics Consump.(Kw)		800	
Operating Voltage(V)		1,000	
Cutting Head	Cutting Pressure(Ton)	30	
	Speed(r.p.m)	3~12	
Cutting Range	Max	Width(mm)	6,574
		Height(mm)	5,287
	Min	Width(mm)	5,000
		Height(mm)	3,870

그림 18.

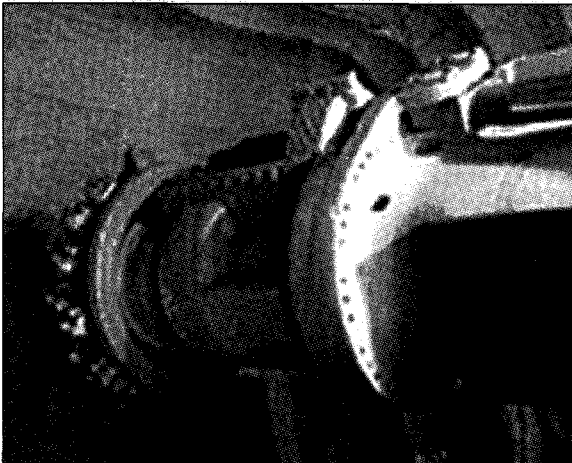


그림 19.

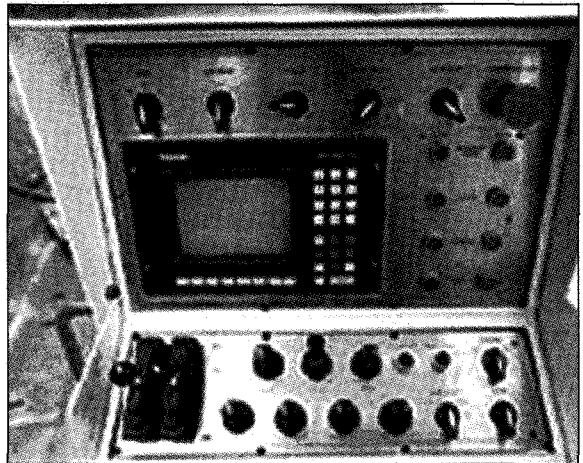


그림 20.

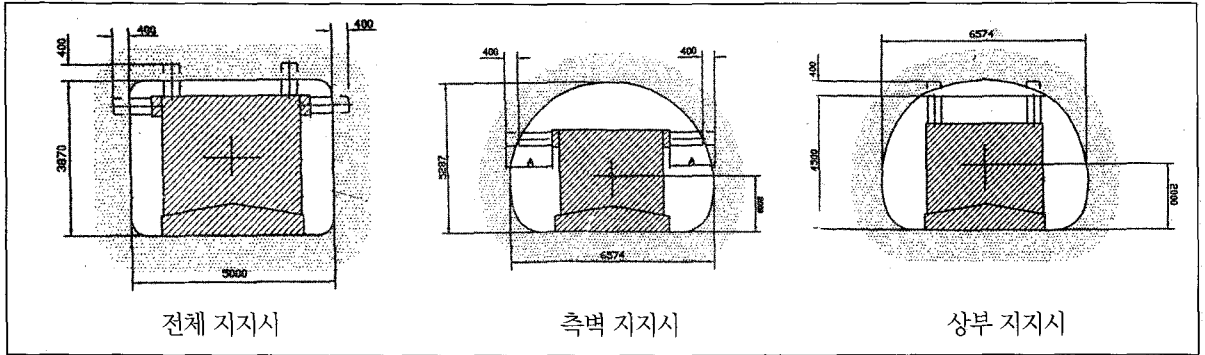


그림 21. TTM 100 굴착가능 단면현상

표 8. 암질에 따른 굴착능력

암질구분 (kg/cm ²)	작업구분 (굴진량)	TTM		비 고
		굴진단면 굴진량	R=5.6m 24m ³ /m	
경암 1600이상	1시간	0.30m		
	1일(18시간)	5.00m		
	1월(25일)	125.00m		
보통암 1200이상	1시간	0.40m		
	1일(18시간)	7.00m		
	1월(25일)	175.00m		
연암 1000이상	1시간	0.60m		
	1일(18시간)	11.00m		
	1월(25일)	275.00m		
풍화암 800이상	1시간	0.80m		
	1일(18시간)	15.00m		
	1월(25일)	375.00m		
풍화토 800이하	1시간	1.00m		
	1일(18시간)	18.00m		
	1월(25일)	450.00m		

1.4.2 TTM 100의 특징

- 1) 터널 갱구 여건상(특히 부지문제) TBM 도입이 힘든 TBM Pilot 굴착 + NATM 확대 굴착현장에 적합
- 2) 16개의 Staker로 벽면을 지지하여 굴착하므로 경암층에서의 굴착력이 Road Header에 비해 뛰어남
- 3) 장비중양을 통과하는 Conveyor System으로 굴착과 동시에 장비후방으로 버력처리 가능
- 4) 굴착과 동시에 버력처리가 가능하며 장비교행이 힘

- 5) 터널 전용장비로 매연발생이 없고 터널내 작업환경 양호
- 6) 운전자 1명으로 굴착과 버력처리가 가능하여 인원투입 절감
- 7) 발파로 인한 제반 문제점(소음, 진동, 주변지반이완 등) 방지

표 9. 암질에 따른 Pick 소모량

구분	단위	장착갯수	경암	연암	풍화암
Attack Type	개	42	0.14	0.11	0.06
Radial Type	개	36	0.2	0.15	0.09

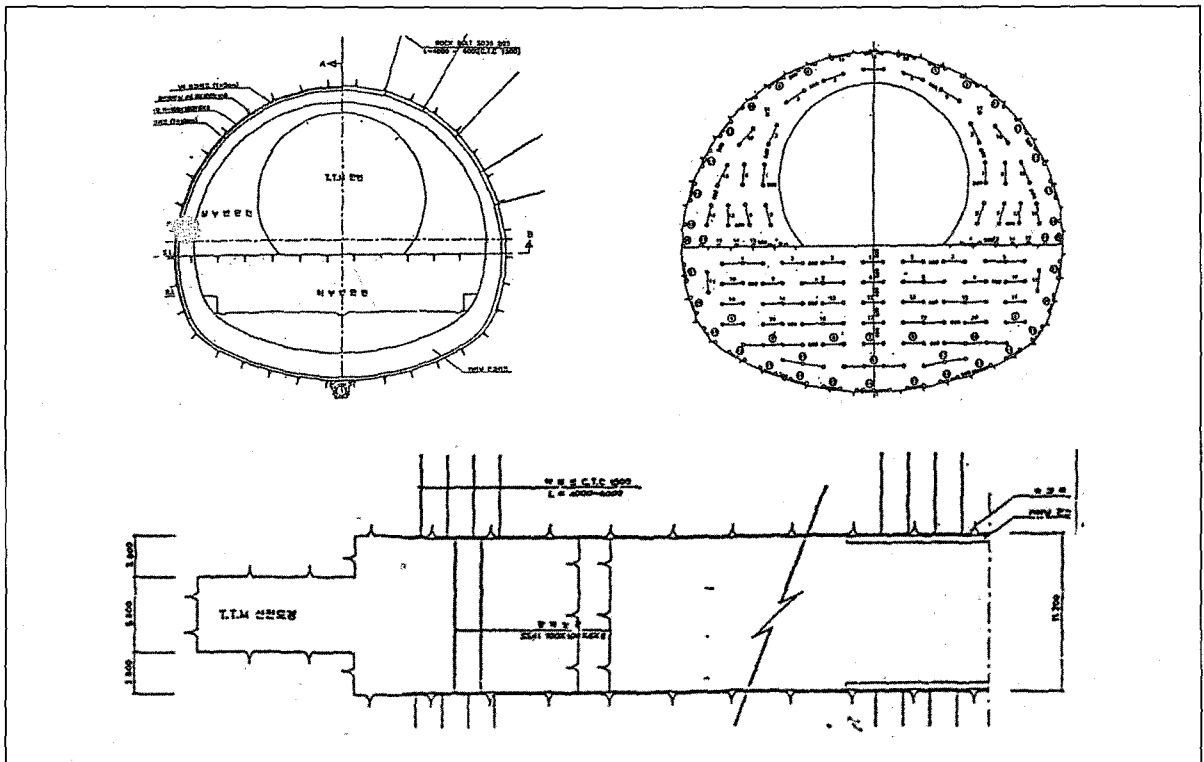


그림 22.

- 8) 굴착 가능한 단면형상이 고정되어 있어 Pilot 굴착용으로 적합
- 9) 일반터널의 경우 TTM 100 굴착후 추가 확대굴착 필요

- 2) Pick 소모량 (m³당)
표 9 참조

1.4.3 장비제원

전체 지지시 측벽 지지시 상부 지지시

1.4.4 TTM 100의 굴착효율 및 PICK 소모율

- 1) 굴착효율
표8 참조

1.4.5 주요 시공 실적

- 1) 서울지하철 7-20공구
- 2) 우면산 터널 예술의 전당 통과구간

1.4.6 적용사례

- 1) 공사명 : 서울지하철 7-20공구 건설공사
- 2) 공사위치 : 서울시 서초구 방배동 일원
- 3) 대상지층 : 경암

- 4) 공사기간 : 1994년 1월 ~ 1998년 12월
- 5) 공사물량 : 지하철 복선터널 1,820m

2. 결론

현재 발파 및 환경규제의 강화로 도심지 터널공사의 경우 당연히 기계굴착이라는 인식이 점차 증가하고 있어 향후 터널 기계식 굴착의 적용은 크게 증가하리라 사료된다.

터널 기계식 굴착의 적용은 대상토질, 터널의 연장, 단

면형상, 갱구조건, 부지 등의 제반여건을 통합하여 판단하여야 하며, 특히 터널자유단면 굴착기는 발파굴착이 어렵고 터널의 연장, 굴착단면 형상 및 부지여건상 전단면 굴착기(TBM, SHIELD)의 적용이 힘든 굴착단면과 지층 변화가 심한 도심지 터널굴착에 매우 유용하리라 전망된다.

증가하는 터널 자유단면 굴착기 적용에 대응하여 향후 국산 Pick의 개발 등 수입장비와 자재에 대한 의존도를 줄이는 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 보여지며, 이에 대한 다양한 지원대책이 필요하다고 사료된다.