

대구경 Shield TBM의 암반층 굴착속도

Net Penetration Rate of a Large Diameter Shield TBM in Hard Rock

박 철 환, 송 원 경, 신 중 호, 천 대 성
한국지질자원연구원 암반공학연구팀

Abstract : In No. 1 tunnel for Kwangju urban subway construction, net penetration rate of the shield TBM was analyzed. This tunnel of 540 m length is located in soil layers at starting and in hard rocks such as amphibolite and granitic gneiss at ending with 84 m length. The net penetration rate was dropped down to 2~11 cm/hr in rock while 50~80 cm/hr in soil. Theoretical penetration rate is analyzed in conditions of machine and rock in order to compare the actual net penetration rate. The relationships between net penetration rate and thrust force is also investigated in this report.

key words : shield TBM, net penetration rate, thrust force

1. 서 론

광주도시철도 1호선 가운데 동구 학동 남광주 사거리에서 충금동 금남로 광주은행에 이르는 구간은 턴키방식으로 Shield TBM에 의하여 터널이 시공중이다. 도청북측 정거장에서 금남로4가 정거장방향으로 536 m 연장인 No.1 터널 구간은 13개월 동안 굴착되었는데, 종점부 84 m 구간은 각섬암과 화강편마암을 기반암으로 하는 경암층이 출현하여 굴착속도가 급격히 저하되었다.

본 연구에서는 지질 및 암석의 특성과 투입된 쉘드장비의 특성과 재원을 분석하여 경암층에서의 순굴착속도를 이론적으로 제시하였으며, 작업일지에 의한 순굴착속도 등의 굴진현황을 분석하여 이론값과 비교검토하였다.

2. 굴진현황

본 공사에서 쉘드장비에 의한 터널시공은 4개 차선으로 나누어 진행되고 있는데, No.1 차선은 2001년 2월 12일에 관통되었는데 시작부와 관통부를 제외하면, 실제 기록된 굴착장은 527m이다. 이로서 쉘드장비에 의한 굴진의 총 소요일은 391일이나 작업을 수행한 作業日은 전체의 53%인 207일이다. 그림 1은 이 기간동안 누적 굴진장을 도시한 것으로 휴지사유와 장비의 보수현황을 함께 표현하였다. 여기에서 알 수 있듯이 굴진속도는 7월 14일(STA. 4K +220 지점)부터 급격히 저하되었는데, 이 지점을 전후하여 전체 터널구간은 토사층 구간 및 암반층 구간으로 대별할 수 있다.

그림 2는 암반층 구간에서 휴지일을 제외한 작업일을 4~7일로 묶어 표현한 21개의 週에 대한 週刊平均 純掘鑿速度의 변화를 도시한 것이다. 토사구간의 순굴착속도는 작업초기를 제외

하고 40~80 cm/hr인데 반하여 암반구간에서는 2~11 cm/hr에 불과하였다. 그림에서 알 수 있듯이 암반구간 초기에는 암반을 예상하지 못하였고 막장면이 암반과 토사층이 혼재되어 있는 이유 등으로 원활한 굴착작업이 수행되지 못하였다. 그 후 대체로 6~11 cm/hr로 일정한 순굴착속도를 보이고 있어 원활한 굴착작업이 수행되었음을 알 수 있다.

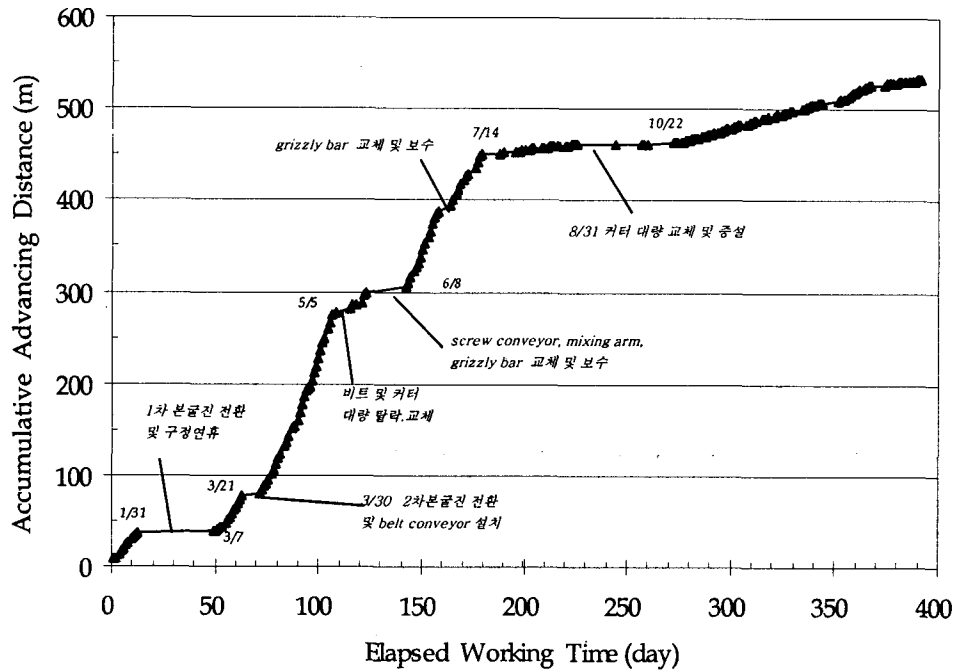


Fig. 1. Daily accumulative advancing distance for shield TBM operation

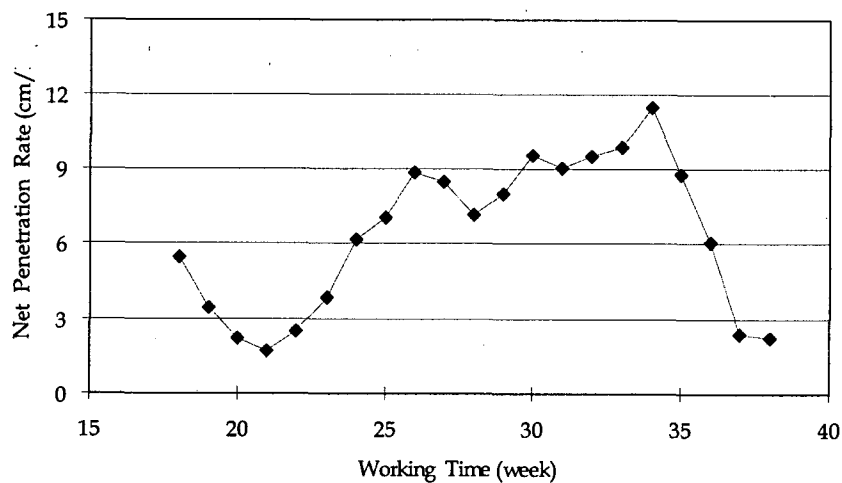


Fig. 2. Weekly net penetration rate in rock

2. 암반특성

굴착작업을 수행하면서 암반층에서 순굴착속도가 저하되었기 때문에 앞으로 분포되는 암반의 특성을 분석하기 위하여 수평시추가 시도되었다. 약 90 m의 시추결과 전구간은 연홍색을 띤 조립질 암석 및 흑색 또는 흑회색의 세립질 암석 등의 두 암반으로 이루어져 있다. 편광현미경에 의한 사진관측과 X선 회절분석에 의한 조성광물의 정량분석 시험을 수행한 결과, 흑색 또는 흑회색의 암석은 각섬암(Amphibolite)이며 연홍색의 암석은 화강편마암(Granitic gneiss)으로 판명되었다.

수평천공 시추코아로부터 3가지 시료를 채취하여 물리적 특성을 시험한 결과는 다음 표 1과 같다. 여기서 각섬암은 색상에 의하여 두 가지 시료로 구분하였는데, 포아송비와 쇼아경도 외에는 특성이 뚜렷하게 구분된다. 흑색의 각섬암은 비중과 단축압축강도의 크기가 2.85 및 234 MPa로 나타났으며 다른 자료들도 극경암의 특성으로 판단된다. 흑회색의 각섬암은 흑색에 비하여 석영함량이 조금 높기 때문에 쇼아경도가 조금 높은 것으로 나타났다. 비중이나 단축압축강도를 비롯하여 그외의 물리적 특성은 약간 약한 암석으로 나타났으며, 전체적으로 극경암 또는 경암이라 할 수 있다. 한편 화강편마암은 비중이 2.70이며, 단축압축강도의 크기가 166 MPa로 나타나 경암으로 판단할 수 있으나, 입자가 조립질이며, 미세한 균열들이 내재되어 있어 보통암 내지는 중경암으로 분류할 수 있다.

표 1에 언급된 석영함량 및 세르샤 마모지수, 천공속도지수는 쉴드장비의 순굴착속도와 Disk cutter의 소모량을 이론적으로 얻을 수 있는 암석의 특성이다.

Table 1. Test results of rock properties

rocks	Amphibolite (흑색)	Amphibolite (흑회색)	Granitic Gneiss
Specific Gravity (g/cm ³)	2.85	2.75	2.70
P-wave Velocity (km/sec)	6.08	5.46	5.17
S-wave Velocity (km/sec)	3.06	2.83	2.67
Compress. Strength (MPa)	234	197	166
Tensile Strength (MPa)	18.0	13.7	10.7
Young's Modulus (GPa)	57.6	49.9	48.9
Poisson's Ratio	0.224	0.236	0.234
Shore Hardness	76~84	82~84	91~98
Quartz Contents (%)	6.8	10.7	25.7
Cerchar Abrasiveness Index	2.47	2.77	3.32
Drilling Rate Index	41		45~61

3. 장비특성

쉴드장비(Shield TBM)는 개방형 굴착장비(Open TBM)에 대비되는 명칭이며, 토사층이나 암반층에 관계없이 작업면이나 터널주벽의 붕락을 방지하기 위하여 철재원통의 보호막을 가진

全斷面 掘鑿裝備를 일컫는다. 그러나 터널 주변의 자립성이 강한 암반층에는 쉴드화된 장비를 대체로 사용하지 않으므로, 일반적으로 쉴드장비라 함은 연약지반이나 토사층에 적용되는 전단면 굴착장비를 뜻한다고도 할 수 있다. 토사층 등의 연약지반으로 형성된 막장면이 굴착에 의한 토압으로 인하여 부분적 또는 전면이 붕괴되는 것을 방지하기 위하여 토압에 상응하는 압력을 가하는 장치가 쉴드장비에 장착되어 있다. 막장의 유지를 위하여 압력을 가하는 형식에 따라 쉴드장비는 土壓式(EPB Shield TBM)과 泥水式(Slurry Shield TBM)으로 대별되며, 본 사업의 터널공사에 투입된 장비는 EPB 형식의 Shield TBM이다.

본 장비는 토사층과 암반층을 효과적으로 굴착하기 위하여 혼합형 커터체계(Hybrid cutter systems)를 장착할 수 있는 커터헤드를 갖고 있다. 즉, 토사층에서는 Chisel bit가 전진 배치되어 토사를 절삭하며, 암반층에서는 Disk cutter가 암석을 파쇄하여 굴착작업을 수행한다. 표 2는 이러한 장비의 주요 제원을 요약한 것이다.

Table 2. Main specification of shield TBM

General specification	
model type	EPB shield
cut diameter for soil	7,420 mm
bore diameter for rock	7,398 mm
shield diameter	7,380 mm
transformer capacity	4×500 kVA = 2,000 kW
Disk cutter for rock	
number and diameter	41 ea and 355 mm (14")
bearing	No. 32221 (C ₉₀ = 68.8 kN)
Chisel bit for soil	
number	247 ea
width	70 mm and 90 mm
Cutting head operation	
cutting head power	11 ea×132 kW (1,452 kW)
rotational speed	2.5 RPM max.
maximum thrust	5030 ton (49 MN)
maximum torque	1,010 t·m (9,898 kN·m)

4. 순굴착속도

연구대상 암반의 특성 및 장비특성으로부터 NTNU(트론드하임 대학의 노르웨이 기술연구소)에서 제시한 방법에 의하여 순굴착속도의 이론값을 유도하였다. 이를 위하여 각섬암에 대한 파쇄시험 및 천공시험(그림 3 참고)을 수행한 결과 S₂₀ 및 SJ 값은 각각 42.3 및 6.2이다. SJ 크기에 따라 S₂₀ 값은 표 1에 언급한 천공속도지수(DRI)로 변환되는데, 분석결과 41로 나타났다. 이러한 크기는 각섬암에 대한 NTNU 통계자료의 평균에 속한다. 또한 화강편마암에 대

한 NTNU의 통계자료는 45~61로 DRI 평균값은 약 53으로 유추되어, 각섬암에서 보다 순굴착 속도는 30% 정도 높은 것으로 평가된다.

암석의 고유특성인 천공속도지수는 암반의 절리간격과 커터직경 및 커터간격, 추력과 같은 TBM 장비의 특성을 고려하여 이론적 순굴착속도를 얻게된다. 이때 Disk cutter에 작용하는 순수 추력의 크기는 사용한 베어링의 하중용량에 의하여 결정되는데 약 530 ton으로 예상된다. 이는 쉘드장비의 추력 용량의 약 10% 정도에 불과하다.

이러한 일련의 분석과정은 참고문헌인 NTNU 보고서에 기술되어 있는데, 이로써 각섬암의 압입깊이는 0.7 mm/rev.으로 평가된다. 커터헤드의 최대 회전수는 2.5 RPM이지만 장비의 진동을 고려하여 암반층에서는 2.1 RPM을 사용하므로, 각섬암층에서의 이론적 순굴착속도는 8.8 cm/hr로 예상된다. 한편 화강편마암에서 이론값은 0.9 mm/rev. 및 11.5 cm/hr로 평가된다.

그림 2에서 분석하였듯이 원활한 굴착작업이 진행된 제 24주부터 제 36주까지 748.4 시간 장비를 가동한 순굴착속도의 전체평균은 8.54 cm/hr인데, 이는 각섬암반에서의 이론값과 잘 일치한다. 이 기간 중에서 순굴착속도의 크기가 9 cm/hr 이상을 기록한 구간은 제 30주부터 제 34주까지인데 이의 평균은 10.1 cm/hr이다. 이 5주간 동안에는 막장면에 각섬암이 거의 나타나지 않은 화강편마암층으로 가정한다면, 실제의 순굴착속도는 12%의 오차로 이론값과 일치하는 크기이다.

그림 4는 암반층 굴착에서 쉘드장비의 운전추력과 순굴착속도의 관계를 도시한 것이다. 이 그림에서 굴착작업이 원활하게 진행된 구간은 숫자로 표시하지 않았는데, 이들 자료는 순굴착속도는 추력의 크기에 직선적으로 비례하는 경향을 보이고 있다. 쉘드장비를 가동할 때의 추력의 크기는 약 1000 ~2000 ton으로 기록되었는데 암반파쇄에 요구되는 순수 추력을 제외한 500~1500 ton은 쉘드의 마찰저항으로 작용하였으므로, 순굴착속도와 추력의 관계를 수식화하는 것은 무의미한 것으로 판단된다

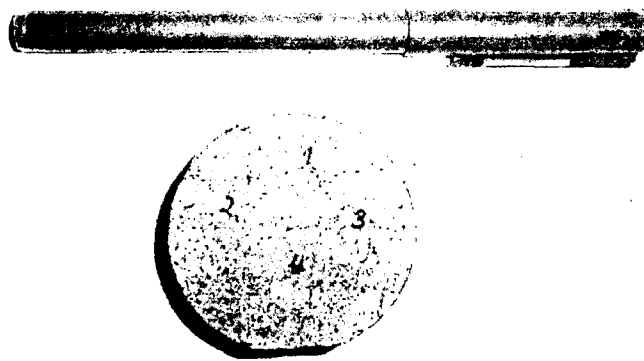


Fig. 3. Specimen after Sievers' drill test at NTNU

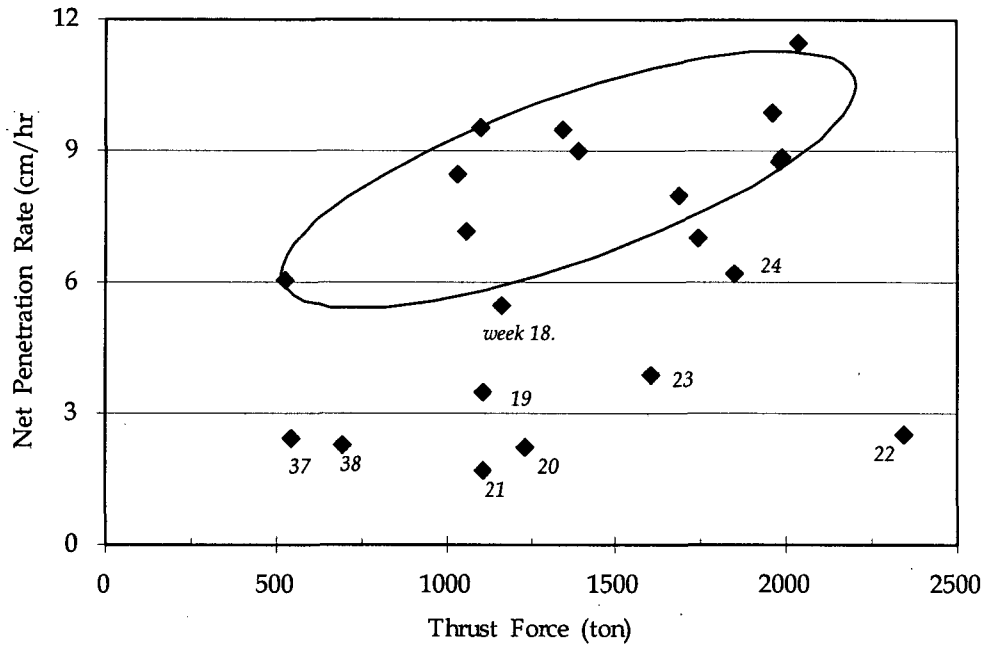


Fig. 4. Relations between thrust force and net penetration rate in soil

5. 결론

광주도시철도 건설사업에서 시공중인 터널의 암반구간에서 Shield TBM의 순굴착속도는 작업이 원활하게 수행된 경우 6~11 cm/hr이며 평균 8.54 cm/hr이다. 이러한 크기의 순굴착속도는 NTNU에서 제안한 이론적 속도보다 5~30% 작은 값이다. 이론적 해석에서 고려해야 할 요인이 복잡적이고, 실드장비의 굴착직경이 7.4 m로 대형인 것을 고려한다면 이러한 크기의 오차를 갖는 해석법은 유효하다고 평가된다. NTNU 해석법은 밀양댐 도수터널의 극경암에서도 유효성이 입증된 바 있어 암반에서의 TBM의 순굴착속도를 예측하는 매우 유용한 기법이라고 결론지을 수 있다.

참고문헌

1. 광주광역시; 1998, 광주도시철도 1호선 터널구간 실시설계 지반조사보고서
2. 박철환 외; 2001, TBM penetration rate with rock mass properties in hard rock, ITA Symposium
3. 박철환 외; 1999, 밀양댐 도수로 터널의 암반물성 및 TBM 굴착속도 분석연구, 한국자원연구회 연구보고서
4. Eisenstein Z.; 1994, "Large undersea tunnels and the progress of tunneling technology", T&US, vol. 9, no. 3
5. NTNU; 1998, DRILLABILITY - Test Method and Statistics of Drillability Test Results