

## VI. 기계화 시공

### 1. 서언

터널 건설에 이용된 최초의 쉴드기는 1818년 마크 브루넬이 특허를 낸 쉴드기이며 이는 토사터널 굴착용으로 영국 테임즈강의 하저터널 건설에 사용되었으나 기계화 시공법이라기 보다는 자립성이 부족하여 쉽게 무너져 내리는 지반을 쉴드로 지지하고 그 속에서 인력굴착 작업을 진행한 단순한 터널주면 지지공법이라 볼 수 있겠다. 그리고, 터널 기계화 시공법의 대명사로 불리는 Open TBM 공법은 1851년 미국의 C. Wilson이 직경 7.3m의 TBM을 제작하여 Hoosac 터널의 동쪽 갱구 공사에 활용한 것이 처음으로 볼 수 있다. 그 후 터널 굴착기계가 지속적으로 개발되어 왔으나 현장에 폭넓게 이용되게 된 것은 1960년대부터이며, 일본을 중심으로 한 기계화된 고성능 쉴드기의 개발이 이루어지면서 오늘날의 터널 기계화 시공이 가능하게 되었다.

이러한 기계화 시공법은 환경 친화적인 건설요구도가 증대되고 높은 Labour cost가 사회문제로 대두되기 때문에 필연적으로 발전하게 되며, 앞으로의 터널 건설에 주 공법으로 정착될 것임을 새삼스레 강조할 필요가 없을 것이다. 국내에서는 1980년도 중반부터 도수터널 공사에 Open TBM이, 도심지 연

약지반의 지중선 공사에 쉴드 TBM이 주로 활용되기 시작하여 최근까지 50개소 이상의 터널 공사에 기계화 시공법이 적용되어 왔다. 그러나 국내의 터널 기계화 시공기술은 도입시기, 활용기간 및 공사적용회수 등에 비해 아직까지 기술의 정착이 이루어지지 않고 있으며, 계획, 해석, 설계, 시공에 이르기까지 여러 분야에서 외국 기술의 의존도가 높은 것이 우리의 현실이다.

본 강좌에서는 매우 다양한 종류의 기계화 시공기술 중 국내에 주로 사용되고 있는 TBM과 쉴드 또는 쉴드 TBM이라 불리는 터널 전단면 굴착기계에 대하여 정의, 분류 및 선정방법, TBM 또는 쉴드 TBM 터널의 설계를 위한 실내시험과 적용성, 쉴드 TBM 라이닝 설계에 대하여 논하고자 한다.

### 2. 기계화 시공법

#### 2.1 정의

기계화 시공법은 프랑스 지하공간협회 AFITES에서 제안한 바에 의하면 "비트와 디스크 등에 의해 기계적으로 수행하는 모든 터널 굴착 기술"이라 정의하고 있다. 이는 백호우(back-hoe) 또는 디거(digger)에서부터 가장 복잡한 형태의 쉴드 TBM까지의 모든 기계굴착 방법이 이에 속한다. 본 강좌에서 다루고자 하는 국내의 TBM, 쉴드TBM은 TBM과 쉴드로 분리, 통용되고 있으며 이는 정확한 의미전달에서

\*1 정희원, 한국건설기술연구원 토목연구부장

\*2 정희원, 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원

표 1. 터널 기계화 시공법의 분류(ITA)

터널링 방법	그룹	별칭	굴착방법
부지보	불타입 터널굴착기	로드헤더	in line cutter transverse cutter
		디거타입	백호우, 버킷, 리퍼 또는 pick, 수압충격 breaker
	Open TBM	main-beam TBM	전단면
	터널확장기	TBE	-
주면지보방식	전면개방형 쉴드 TBM	그리퍼(gripper) 쉴드TBM	전단면
		세그멘탈 쉴드TBM	전, 부분단면
		더블 쉴드TBM	전단면
막장 및 주면지보방식	전면밀폐형 쉴드 TBM	mechanical support 쉴드TBM	전, 부분단면
		압축공기 쉴드TBM	전, 부분단면
		슬러리 쉴드 TBM	전단면
		토압식 쉴드 TBM	전단면
		혼합단면형 쉴드 TBM(hybrid 쉴드TBM) - 개방형+토압식 - 개방형+슬러리식 - 토압식+슬러리식	전단면

혼동을 초래할 우려가 있다.

그러므로, 필자는 이번 기회에 기존 open-TBM, TBM, 쉴드, 쉴드TBM 등의 모든 굴착기에 대하여 TBM(Tunnel Boring Machine)이라고 정의하고, 쉴드는 TBM을 둘러싸고 있는 원통형의 쉴드가 있는 경우에 한정하여 쉴드 TBM이라고 명명하는 것을 제안하고자 한다. 이하 TBM의 정의에 의한 분류는 2.2절에서 상세히 소개하도록 하겠다.

### 2.2 분류

기계화 시공법에 대한 분류 또한 각 나라마다 약간씩의 차이를 가지고 있어 이를 통합하기 위해 지난 2000년 5월에 열린 ITA Working Group No. 14(Mechanized Tunnelling)회의가 개최되었다. 이 회의에서는 터널굴착 기계의 체계적인 분류 및 관련 기술의 선정기준에 대한 각국의 안(案)들을 받고, 이를 일본터널협회에서 취합하여 2000년 9월까지 절충(案)을 만드는 것으로 의견을 모은 바 있다. 그러나, 각 나라마다 굴착장비의 특성 및 적용방법이 특

색을 지니고 있어 통합 절충안을 내놓기가 어려워 현재 판단하고 있는 2~3가지 정도의 분류체계를 함께 제시하는 방향으로 진행되고 있다.

한편, 국내에서 사용되고 있는 TBM, 쉴드TBM 등의 명칭은 비판 없이 국외의 장비제작사에서 명명한 대로 사용하고 있으며, 공법의 정의를 명확히 하지 못하거나 나름대로의 정의를 내려 사용하고 있다고 할 수 있다. 통상적으로 국내에서는 지반조건에 따라 TBM을 암반용, 쉴드를 토사용, 쉴드TBM을 복합지반용의 의미로 사용하거나, 굴진기의 추진력을 암반에서 얻으면 TBM, 후속 되는 세그먼트(segment)를 미는 반력으로부터 얻으면 쉴드, 두 가지 방법을 모두 사용하여 얻을 수 있는 경우를 쉴드 TBM으로 명명하기도 한다. 최근 개·제정된 각종 설계기준이나 시방서 상에서도 특별히 정의를 내리지 않고 TBM터널, 쉴드터널 등으로 분류하여 기술하고 있으나 앞으로는 국내에서도 국제적으로 통용되는 명칭의 사용과 함께 기계화 시공기술의 체계적인 분류 시스템이 갖추어져야 할 것으로 판단된다.

현재 국제적으로 터널을 굴착하는 모든 기계를

TBM 즉 Tunnel Boring Machine이라고 하고, 쉴드나 쉘드TBM은 이 분류에 속하는 것으로 보고 있으며, 그밖에 세분된 명칭은 그 분류속에서 세부적인 기계형식, 지반조건의 대응성, 작업수행 방법 등에 따라 사용하는 것이 보편화되어 있다.

표 1은 ITA에서 제시하고 있는 분류체계 중 하나로 지보형태에 따른 분류체계를 보여주고 있다. 표 1에서는 기계화 시공법을 지보방법에 의해 분류하는데, 이때 지보는 기계가 직접적으로 제공하는 즉각적인 지보를 의미하는 것으로 제한한다. 지보의 형태는 무지보, 터널의 원주방향 벽면을 지지하는 주면지보, 그리고 막장면과 주면을 함께 지지하는 막장+주면지보의 세 가지로 구분할 수 있다.

### 2.3 기계화 시공법의 선정 기준

터널시공시 기계화 시공법을 선정하기 위해서는 기술성, 경제성 등 다양한 항목들에 대한 사전검토가 필요하다. 국외에서는 현장적용경험을 토대로 자국에 맞는 공법의 선정기준들을 개발·활용하고는 있으나, 검토항목이 매우 많고 복잡하여 정량적인 기준보다는 선정절차나 선정 시 고려해야 할 사항들을 제시하는 정도이다. 국내에서는 기계화 시공법의 선정절차나 고려사항들조차 마련되어 있지 않으며, 해외 장비 제작사의 추천이나 일반적인 지식 및 정보에 의거한 공법선정이 이루어지고 있어 국내 현실에 적합한 기계화 시공법이 선정되었는지는 아직까지 의문이 있다.

따라서 현 단계에서는 국내 여건들을 반영한 합리적인 선정방안을 강구할 수 있도록 국외의 시공법 선정방법들을 면밀히 조사·분석하는 것이 필요하다고 판단된다.

표 2는 2000년 프랑스 AFTES에서 제안한 지반조건별로 적용 가능한 굴착기계 종류를 제시한 표이다. 표에서는 지반을 일축압축강도에 따라 6등급으로 분류하고 그 등급별로 적용가능한 굴착기계의 종류를 제시하고 있다. 표에서 표기한 A~J까지는 굴착기계의 종류를 나타내며, 기계별 세부특성은 다음과 같다.

- A. 붐타입 굴착기계 : 높은 점착력을 갖는 토사나 연약 암반에 적합. R3~R5 범주내의 지반에 대하여 적용이 가능하나, 압축강도가 30~40 Mpa(300~400 kg/cm<sup>2</sup>) 이상의 지반에 적용하는 것이 바람직함. 함수지반에 사용시에는 유입수 문제 해결을 위해 지반개량이 선행되어야 함.
- B. Open TBM : R1~R4의 지반에서의 굴착이 용이하며, R3a~R4 정도의 지반에서는 그리퍼가 암반면을 뚫고 들어가는 것을 방지하기 위한 표면의 지지력을 개선하는 작업이 필요함.
- C. 터널확장기(TBE) : R1~R3(때로는 R4~R5)의 암반에서 직경 8m이상의 대단면 터널을 굴착시 적합.
- D. 그리퍼 쉘드TBM : R1~R3의 지반에 적합. 지반이 그리퍼의 저항을 충분히 견딜 수 있는가를 함께 검토하여야 함.
- E. 세그먼트 쉘드TBM : 연약한 암반, R4~R5 지반에 적용이 가능하나 막장은 자립할 수 있는 지반이어야 함.
- F. 더블 쉘드TBM : 위의 두 가지 개방형 쉘드TBM의 장단점을 복합적 보완하여 해당 지반에 사용할 수 있음.
- G. Mechanical-support 쉘드TBM : 연약한 암반이나 수압의 영향이 없거나 약간 존재하는 암밀지반.
- H. 압축공기 쉘드TBM : 갑작스러운 압축공기의 손실이 없어야 하므로 주절리가 없고 낮은 투수성을 가진 지반에 적합. 터널 상부층에는 불투수층이 필수적으로 있어야 함. 때문에 압축공기 쉘드TBM은 주로 작은 직경의 터널에 사용하는 경향이 있음. 막장의 지질상태가 이방성인 지반에서는 사용하지 않기를 권고하고 있으며 화재의 위험이 있는 유기질 토양에서는 사용을 금하고 있음.
- I. 슬러리 쉘드TBM : 충적층 지반과 이방성의 연

약지반에 적합하며 부분적으로 경암반을 포함하는 지반에도 사용이 가능함. 지반에 점토가 포함되어 있을 경우 커터헤드로부터 굴착토의 분리가 어렵거나 클로깅이 있을 수 있음. 10<sup>2</sup>m/sec 이상의 투수계수가 높은 지반에서도 사용이 가능하나 높은 수압이 작용할 시 굴착면에 방수층을 형성할 수 있는 특수한 슬러리의 이용이 필요함. 오염된 지반 또는 높은 침투수압이 존재하는 지반에서는 문제 발생의 여지가 있으므로 슬러리 혼합에 특수한 선택이 필요함. 이러한 종류의 쉘드TBM에서는 지반에 메탄이 함유되어 있어도 문제가 없으나 터널 선형을 따라 대조적인 이방성의 지반이 나타날 경우 굴착토 제거 작업이 어려워짐을 감안하여야 함.

J. 토압식 쉘드TBM : 점토질 지반, 실트, 세립의 점토질 모래, chalk, 이회토, 점토질 schist 등의 지반이 교반된 후 커터헤드의 밀실에 압력 전달과 버력반출용 스크류 컨베이어에 마개형성을 일정하게 유지할 수 있는 지반에 적합. 토압식 쉘드TBM은 10<sup>-3</sup>~10<sup>-4</sup>m/sec의 높은 투수도를 지닌 지반에서도 굴착이 가능하며 국부적 안정이 필요한 불연속면이 교호하는 지반에서도 사용이 가능함. 단단하고 마모에 강한 지

반에서는 첨가제를 사용하거나 커터헤드 또는 스크류 컨베이어 표면을 강하게 하는 특별한 처리가 필요함.

표 3은 프랑스 AFTES에서 제시한 기계화 시공법의 선정에 있어서의 영향요소들을 정리한 표이다. 이 표에서는 각각의 요소들이 해당 기계화 시공법을 선정하는데 어느 정도의 영향이 있는가를 각각 2(결정적인 영향을 줌), 1(영향이 있음), 0(영향 없음), NA(적용 않함)의 순으로 분류하고 있다.

### 3. TBM 설계를 위한 실내 시험

TBM 공법의 적용 시에는 막장안정, 장비의 침하 등의 문제가 발생 할 수 있으므로 사전에 신중한 지반조사를 실시하여야 한다. 또한, 암석구조, 단층과 쉐대, 점토대, 암석강도가 현격하게 높거나 석영함량이 높은 지반 등에서는 TBM 굴착효율이 급격히 낮아 질 수 있기 때문에 관련한 충분한 조사 및 시험이 실시되어야 한다.

TBM 터널 시공을 위한 일반적 시험사항은 NATM 등 기타 터널공법에서 적용하는 터널 설계시의 '조사 및 시험'에서 정하는 바를 기본으로 따르나 TBM의 기계적인 특성을 고려하여 합경도 시험

표 2. 지반의 강도별 대응 굴착기계류

분류기호	지반분류	일축압축강도(Mpa)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
R1	Very strong rock	>200										
R2a	Strong rock	200~120										
R2b		120~60										
R3a	Moderately strong rock	60~40										
R3b		40~20										
R4	Low strength rock	20~6										
R5a	Very low strength rock and consolidated cohesive soils	6~0.5										
R5b		< 0.5										
R6a	Plastic or slightly consolidated soils	-										
R6b												

표 3. 기계화 시공기술 선정에 영향을 미치는 요소

영향요소	무지보		주면지보			막장 및 주면지보				
	블터입	Open-TBM & TBE	그리퍼 셸드 TBM	세그먼트 셸드TBM	전단면굴취 부분굴취	mechanical support 셸드TBM	암속공기 셸드TBM	전단면굴취 부분굴취	슬러리 셸드TBM	토압식 셸드TBM
1.자연적 제약	0	2	2	2	2	2	1	2	1	1
2. 물리적 변수										
2.1 지반 성분 규명	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2.2 지반의 질적 특성	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
2.3 연약지반/경암반의 불연속성	1/2	1/2	NA/2	1/2	1/2	1/2	2/2	2/2	2/2	1/2
2.4 지반의 변이성	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.5 지하수 성분	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
3. 역학적 변수										
3.1 강도										
연약지반	2	2	NA	2	2	2	1	2	1	1
경암반	2	1	1	NA	2	1	1	2	1	1
3.2 응력변형	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.3 액상화 가능성	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4. 수리지질학적 변수	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5. 기타										
5.1 연경도(마모도-경도)	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1or2
5.2 sticking-clogging	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
5.3 지반과 기계사이의 마찰	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1
5.3 지반내 기스의 존재	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
6. 작업특성										
6.1 규모, 형상	0	2	2	2	2	2	2	2	1	1
6.2 종단 선형	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
6.3 평면 선형	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
6.4 환경										
6.4.1 침하에 대한 민감도	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1
6.4.2 작업제약에 대한 민감도	1	1	1	1	1	1	1	1	1&2	1
6.5 지반의 특이성										
6.5.1 지반의 불균일성	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1&2
6.5.2 자연적/인공적 장애물	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1&2
6.5.3 공동	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

• 2 : 선정에 결정적인 영향을 줌 • 1 : 영향이 있음 • 0 : 영향없음 • NA : 적용없음

(total hardness) 등을 추가로 실시하여야 한다. 그리고 기본적인 암석의 강도특성과 TBM설계를 위한 여러 가지 변수와의 관계에 대한 연구결과들을 참조하여 설계에 반영하여야 한다.

### 3.1 합경도(Total Hardness)

암석의 합경도(Ht)는 슈미트해머(schmidt's hammer)에 의한 반발경도(H<sub>R</sub>)와 마모경도(taber

abrasiveness,  $H_A$ )를 고려한 암반의 물성치로써 다음 식과 같이 나타낼 수 있으며, TBM의 관입율 (penetration rates) 및 cutter 소모율(cutter costs)과의 상관성이 높은 것으로 알려져 있다.

$$H_T = H_R \times \sqrt{H_A}$$

여기서,  $H_R$  : 반발경도 평균치,  
 $H_A$  : 마모경도 평균치

마모경도의 측정은 ASTM C 1353-96에 의해 그림 1의 taber abraser(modified taber abraser model 5130)를 이용하여 암석시편을 일정한 속도로 회전시키면서 abraser wheel에 의해 마모되는 정도를 측정한다.

$$H_A = \frac{1}{\text{average weight loss(g)}}$$

그리고 Tarkoy(1982)는 여러 가지 종류의 암석에 대한 함경도를 실제 실험에 의하여 구하였고, 각 암종별 일반적인 범위는 다음에 인용한 그림 2와 같다.

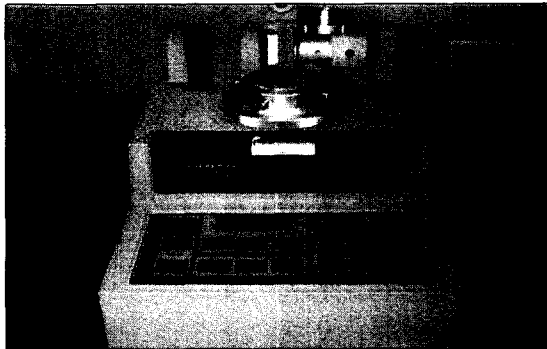


그림 1. Taber abraser model 5130

### 3.2 일축압축강도

일축압축강도는 기본적인 시험항목으로서, 국내의 많은 연구자들에 의해 TBM 관입율과 압입강도 추

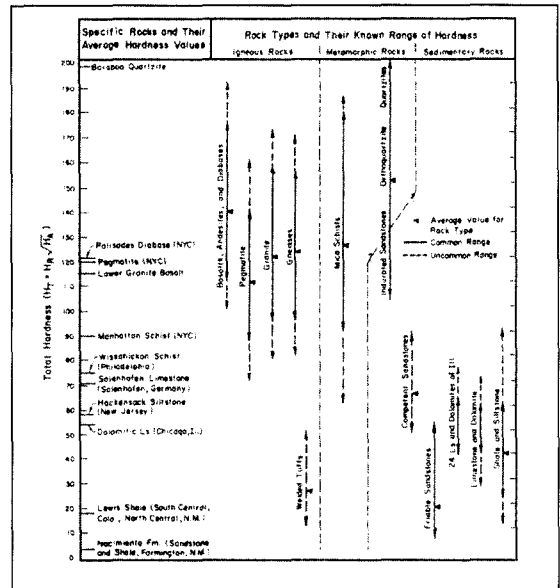


그림 2. Total hardness for common rock type bored by TBM(tarkoy, 1982)

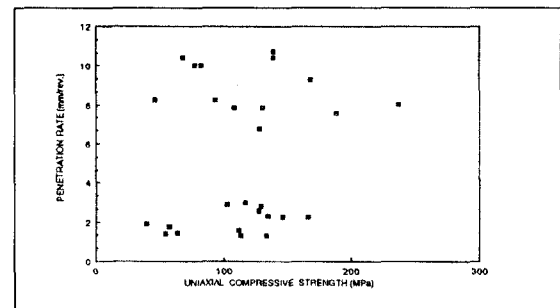


그림 3. Empirical relationship between uniaxial compressive strength and penetration rate (한국건설기술연구원, 1993)

정을 위하여 사용되어 왔다. 다음 그림 3은 penetration rate과 암석의 일축압축강도값과의 관계이다. 이것은 미국 Buffalo-LRRT culver goodman 터널(Robbins), Chicago trap. cont. 터널(Robbins)과 한국의 수로터널(Wirth), 이탈리아의 Alps 터널(Wirth)과 같은 현장에서 수집된 자료에 근거한 것이다.

그림 3에서 보면 일축압축강도와 TBM의 관입율

과의 관계는 암석에 따라 그 상관관계가 좋거나 나쁠 수 있다. 참고로 일축압축강도를 통해 관입율(penetration rate)을 예측하는 방법 중 가장 많이 쓰이는 Graham(1976년)의 경험식을 들 수 있다. Graham의 경험식은 미국의 Robbins사의 현장경험을 토대로 한 것으로 관입율에 영향을 주는 주된 요소를 암석의 일축압축강도와 추력으로 보고 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$P = \frac{3940 \sim F}{\sigma_{cf}}$$

여기서, P : 관입율,  $\sigma_{cf}$  : 일축압축강도, F : 추력

일축압축강도는 이방성인 암석의 경우 TBM 수행 판단을 위한 지침으로 그 신뢰성이 부족하지만 limestone, sandstone, horizontally bedded shale 과 같은 등방성인 암석에서는 강도와 penetration사이에 경험적인 관계가 발전되었다. 일축압축강도는 높은 강도의 암석일 경우 효과적인 암석파괴를 위해 필요한 normal cutter load( $F_n$ )의 지침으로서 유용하다.

### 3.3 점하중 강도

Point load index와 관입율과의 관계에 대하여 1985년 Sanio에 의해 그 상관성이 제안된 바 있다. 그리고 점하중강도의 결과 값은 일축압축강도의 값보다 신뢰성 및 일관성이 떨어지기 때문에 68.9MPa보다 낮은 강도의 암석에 대해서 normal cutter load의 지침으로 적용할 수 있다(Tarkoy, 1982). 그러나 point load index와 TBM 관입율(penetration rate)과의 관계는 그림 4에 나타낸 바와 같이 그 분산이 다소 큰 것으로 나타났다.

### 3.4 DRI(Drilling Rate Index) 및 석영 함유량

TBM 굴착을 위한 암반의 평가방법 중 굴진율에

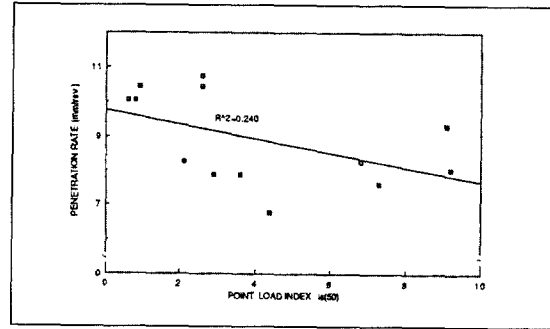


그림 4. Empirical relationship between point load index and penetration rate(한국건설기술연구원, 1993)

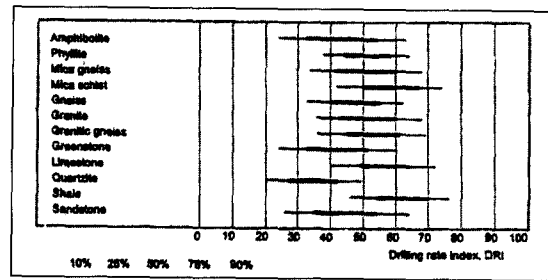


그림 5. 암종에 대한 DRI

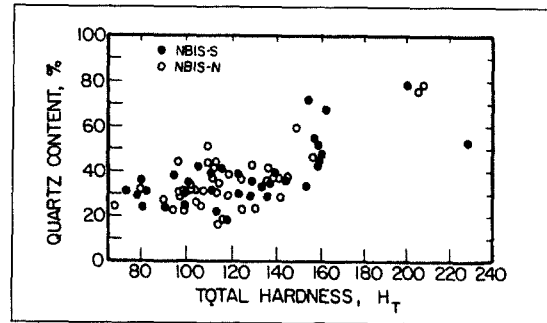


그림 6. 석영함유량과 합경도와의 관계(Tarkoy, 1973-A)

중대한 영향을 미치는 암반 factor인 DRI는 실내시험으로 구할 수 있는데, 암석의 표면경도(surface hardness)에 관한 것으로 반복된 충격을 통해 암석의 파쇄저항능력에 관한 평가치를 부여한다.

그림 5에는 몇 가지의 암종별 DRI를 나타내었고, 석영이 많이 포함된 Quartzite는 DRI가 25~42로 매우 작은 값을 보여준다.

또한 석영함유량과 합경도는 그림 6에 나타난 바와 같이 비교적 높은 상관관계를 나타내고 있으므로 석영함유량의 조사를 통해 TBM 굴착의 적용성 평가에 고려할 수 있다.

#### 4. TBM 적용성 분석

TBM 작업의 판단은 합경도(Ht)와 다음의 3가지 요소(관입율, 가동율, 커터소모율)와 연관하여 정립된 경험적인 관계에 기초한다. 이 방법은 100개 이상의 project에서 얻은 경험을 포함하며, 설계자의 터널굴착판단에 대한 기초를 제공하는데 사용되고 있다(Tarkoy, 1982).

##### 4.1 관입율(penetration rates)

관입율이란 TBM head가 1회전하였을 때 암반을 뚫고 들어간 관입 깊이(mm/rev)나 TBM 1 stroke 길이를 1 stroke 굴진시 소요된 시간(m/hr)을 말한다. 관입율(penetration rates)은 그림 7과 같이 합경도(Ht)와 TBM 관입율과의 경험적인 관계에서 구할 수 있다.

$$\text{penetration rate(ft/hr)} = \frac{\text{length of tunnel bored(ft per shift)}}{\text{elapsed boring time(hr per shift)}}$$

$$\text{advance rate (ft/day)} = \text{penetration rate} \times 24\text{hr} \times \text{utilization}$$

(for three 8 - hr shifts)

##### 4.2 커터소모율(cutter costs)

cutter costs는 그림 8에 보여지는 합경도(Ht)와의 경험적인 관계에서 알 수 있다. 보다 정확한 결과는 시공자의 knowhow와 함께 합경도와 커터 마모율, 커터 한계속도, 커터 강도, 커터 부품비 등과 같

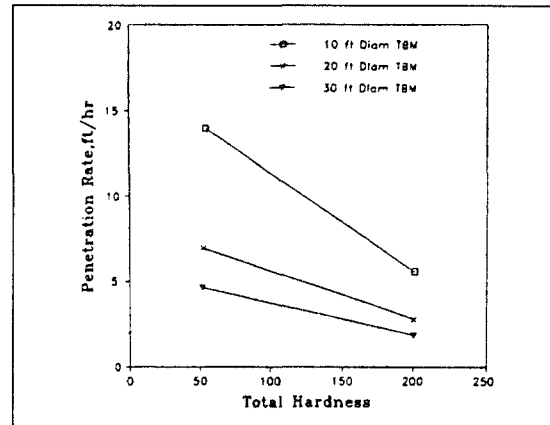


그림 7. Empirical relationship between total hardness and TBM penetration

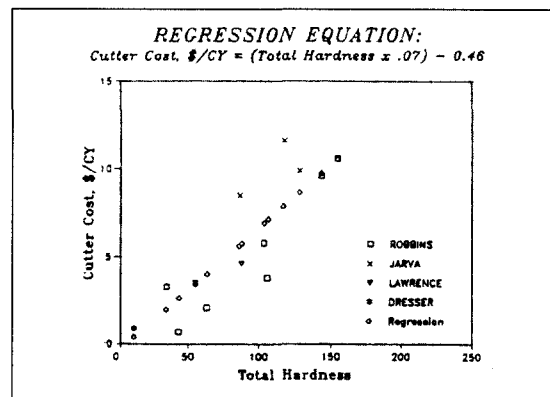


그림 8. Empirical relationship between total hardness and TBM cutter costs

은 복합적인 관계로부터 결정되어질 수 있다. 또한 cutter costs는 터널 alignment에 따른 각각의 지질에 따라 계산할 수 있다.

##### 4.3 가동율(utilization)

가동율(utilization)은 하나의 unity(교대가 없는 단일작업, 일 교대, 굴착교대시간)에서 downtime을 제외하고 TBM이 가동한 시간을 전체 시간에 대한 백분율로 나타낸 것으로 하나의 unity에서 downtime의 전체 percentage를 뺀 것으로 계산한다. 가



동율은 만약 굴착 shift를 일 굴진 개념으로 설정하였다면 일 굴진으로 계산되어야 한다. 또 주말과 같은 때 shift가 보통 24시간 이상 이루어질 경우 가동율 평가에 포함시키지 않는다.

경험에 의하면 열악한 지반환경에서의 TBM굴착 일때 가동율이 10%에서 평균 30% 범위까지 분포하고, 75%정도의 높은 가동율은 주의깊게 backup system을 디자인하고 적극적인 project관리와 완벽한 준비, 비예측 상황에 대해 유연성을 가진 projects에서 보인다.

$$\begin{aligned} \text{utilization}(\%) &= \\ & \frac{\text{elapsed machine time}(\text{hr per shift})}{\text{excavation shift time}(\text{hr per shift})} \\ & = \text{total shift time} - \text{downtime} \end{aligned}$$

### 5. 쉴드 TBM 라이닝 설계

쉴드 TBM 라이닝 설계는 국내 설계기술과 경험 부족으로 일본 등 해외의 기술 의존도가 높은 분야이다. 본 강좌에서는 최근 ITA working group no. 2(2000)에서 발간한 "Guidelines for the design of shield tunnel lining"을 요약하였고, 이 가이드 라인에서는 전 세계에서 일반적으로 그리고 폭넓게 쉴드 TBM 라이닝 설계에 사용될 수 있는 지침을 소개하고 있다.

#### 5.1 세그먼트 라이닝의 설계과정

세그먼트 라이닝은 일반적으로 그림 9와 같은 순서에 따라 설계되어 진다.

#### 5.2 쉴드터널의 적용을 위한 지반 조건

세그먼트 라이닝은 충적층과 봉적층과 같은 매우 연약한 지반에 시공되는 쉴드터널에 적용하며, 연약 지반을 정의하기 위한 물리적 특성들은 다음과 같다.

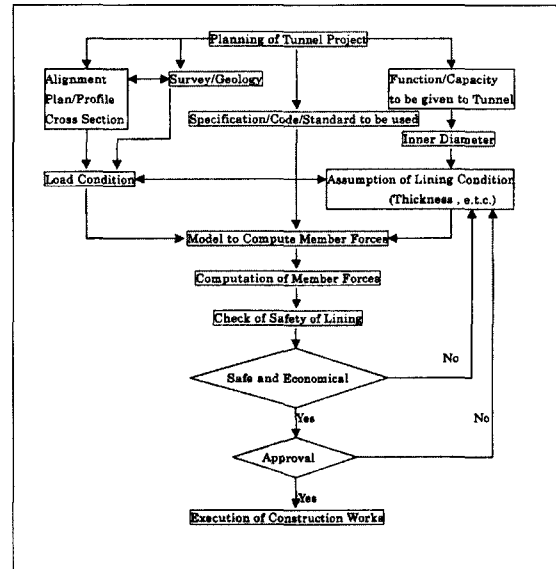


그림 9. Flow chart of shield tunnel lining design

$$N \leq 50$$

$$E = 2.5 \times N \leq 125 \text{ MN/m}^2$$

$$q_u = N/80 \leq 0.6 \text{ MN/m}^2$$

여기서, N : 표준관입시험으로부터 구한 N-value

E : 토사의 탄성계수

$q_u$  : 토사의 비압밀 압축강도

#### 5.3 세그먼트 라이닝의 설계 하중

세그먼트 라이닝 설계 시 Ground pressure, Water pressure, Dead load, Surcharge, Subgrade reaction에 대한 충분한 검토가 반드시 필요하다. 이외에도 내부하중이나 지진에 의한 영향 등과 함께 특수한 경우로서 인접터널 및 침하에 의한 영향 등을 고려할 수 있다.

#### 5.4 구조계산

라이닝의 구조적 계산에서는 일반적으로 SI 단위

를 사용하며, 터널 횡단면의 설계 계산은 다음의 극한단면에 대하여 각각 수행해야 한다.

- case 1 가장 깊은 토피고에 대한 단면
- case 2 가장 낮은 토피고에 대한 단면
- case 3 가장 높은 지하수위에 대한 단면
- case 4 가장 낮은 지하수위에 대한 단면
- case 5 높은 상재하중(동하중, surcharge)에 대한 단면
- case 6 편심하중에 대한 단면
- case 7 unlevel surface에 대한 단면
- case 8 현재 인접해 있는 혹은 미래에 계획된 인접터널에 대한 단면

세그먼트 라이닝의 휨모멘트(bending moment), 축력(axial force), 전단력(shear force) 등 부재력(member force)을 구하기 위해서는 Bedded Frame Model Method, FEM, Elastic Equation Method, Schultze and Duddeck Model, Muir Wood Model의 방식이 사용된다. 특히 bedded frame model method는 1) 토사조건 변화에 기인하여 불균질하게 변화하는 하중, 2) 편심하중, 3) 정수압, 4) 지반반력의 시뮬레이션을 위한 spring force, 5) 조인트의 영향 등의 조건에 대해 적용할 수 있다.

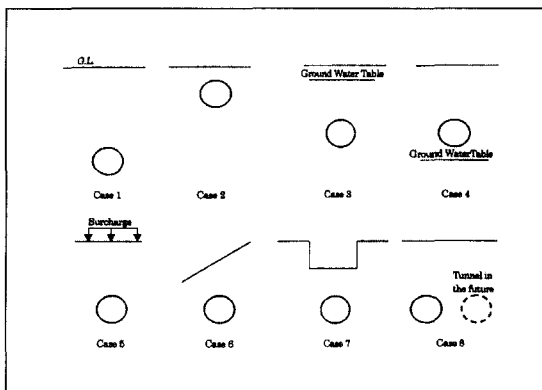


그림 10. Critical sections to be checked by the designer of the lining

그리고 조인트에서 세그먼트 라이닝의 실제 휨강성(flexural rigidity)은 세그먼트 자체의 휨강성보다 적게 되며, 설계에 있어서 실제 조인트의 영향이 평가되어야 한다.

### 5.5 안전을 검토

부재력들의 계산결과에 따라 가장 극한 단면에 대한 안전율을 "한계상태설계법(The Limit State Design Method)" 혹은 "허용응력설계법(The Allowable Stress Design Method)"을 이용하여 검토하게 된다. 즉, 최대 (+), (-) 모멘트 단면 및 최대 축력 단면에 대해 안전율을 검토하며, 실드 잭들의 thrust force에 지지되는 라이닝의 안정성도 검토되어야 한다. 그림 11에는 한계상태설계법의 예를 나타낸 것으로서 축력과 휨모멘트를 받는 횡단면의 설계 축력과 설계 휨력 사이의 관계는 하나의 곡선으로 나타낼 수 있다.

그러므로 일반적으로 합성된 축하중과 휨모멘트에 대한 안정성은 (Md, Nd)점이 (Mud, N'ud)곡선의 내부에 위치됨을 확인하는 것으로 조사할 수 있다. 그리고 shield jack들의 thrust force에 대한 안전성을 검토하기 위해서는 최소한 다음 식을 이용하여 검토되어야 한다.

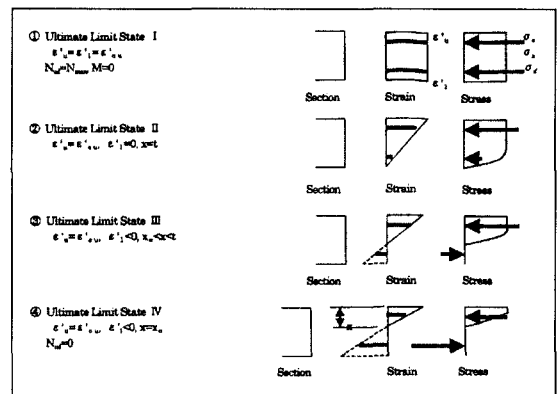


그림 11. Transition of ultimate limit states and Mud-N'ud diagram

$$f_{ck} / F_c < = F_s / A$$

여기서,

- $f_{ck}$  : characteristic compressive strength  
(nominal strength) of concrete
- $F_c$  : safety factor of concrete
- $F_s$  : total thrust force of shield jacks
- A : area

세그먼트들 내부의 미소 균열들은 shield jack들의 thrust force에 의해 진전되며, 세그멘탈 라이닝의 내구수명에 영향을 미치게 된다. 따라서 세그먼트의 인장강도를 위한 품질관리는 세그먼트들이 생산되어 질 때 발생된 내부 미소균열들의 증가를 억제시켜야 한다.

### 5.6 2차 라이닝의 설계

2차 라이닝은 현장 타설 시공법으로 시공되며, 비구조체와 구조체 라이닝으로 구분된다. 비구조체는 세그먼트를 보강하기 위함이며, 부식 및 진동 방지, 라이닝에 나타난 문제점을 개선, 노선을 보정하기 위해 실시된다. 비구조체 2차 라이닝의 두께는 일반적으로 15~30cm의 두께를 가진다. 구조체의 경우는 설계력 계산의 결과에 따라 결정된다.

2차 라이닝이 구조체로 시공된다면, 2차 라이닝의 부재력은 라이닝이 완성된 이후 라이닝에 작용하는 사용하중에 의해 계산되어야 한다. 이 경우, 세그멘탈 라이닝과 2차 라이닝에 의해 조합된 터널 라이닝은 두 라이닝 사이의 경계에서 접촉상태(smoothness)에 따라서 "double shell structure"와 "composit structure"로 구분된다. double shell structure의 경우, 단지 축력만이 전달되어야 하며, 전단력은 전달될 필요가 없다.

만약 2차 라이닝이 비구조체라면, 설계력 계산은 생략될 수도 있으나 안전성을 위하여 계산은 하중조건(사용중인 사하중)에 따라 해야 한다. 그리고 배수

시스템이 없는 방수막이 2차 라이닝의 타설 이전에 설치된다면, 2차 라이닝은 최대 전 수압으로 설계되어야 한다.

2차 라이닝 단면의 안전성은 쉘드 세그먼트와 마찬가지로 극한한계설계법(Limit Station Design Method) 혹은 허용응력설계법(Allowable Stress Design Method)을 이용하여 검토해야 한다.

## 6. 결론

서언에서도 밝힌 바와 같이 국제적인 건설기술의 흐름은 기계화, 자동화 기술 발전의 추세로 나아가고 있으며, 국내에서도 그동안 전력구, 통신구, 수로터널 등의 소단면 터널 위주로 적용되어 왔던 TBM 공법이 최근에는 지하철 터널까지 확대 적용되고 있어 미래의 기계화시공법 수요증대를 예견하고 있다.

본 강좌의 마지막으로 아직까지 기계화 시공법에 대한 충분한 경험미비로부터 나타난 대표적인 기술상의 문제점을 극복하기 위하여 우선적으로 이루어져야 할 기술개발에 대하여 기술함으로써 결론을 가름하고자 한다.

- (1) 기계화 시공과 관련한 각종 용어의 통일된 정의와 함께 기계화 시공육성을 위한 기계손료의 합리적인 계상
- (2) 기계화 시공법의 선정기준, 기계기종의 선정기준, Backfill재 강도기준 등, 각종 기준의 정립 및 시공요소 기술의 통일된 시방수립
- (3) 특수지반(토사-경암 복합지반, Core stone 내재 토사지반, 피압수대 형성 지반 등)에 적용할 수 있는 특수 쉘드 TBM기의 개발 유도 또는 관련 보조공법의 개발
- (4) 국내 기계화 시공 현장별로 과도한 Down Time의 발생원인과 이에 대한 대책공, 현장조건별 굴진속도 등 각종 정보들을 사례별로 모두 조사, D/B화 한 후 이를 분석, 평가, 적용할 수 있는 AI(Artificial Intelligence) tool을 개발, 현장 활용토록함. 이는 설계 또는 시공단계

에서 가공된 각종 정보를 제공토록 하는 첨단 정보화기술의 개발 일환임.

- (5) 대구경 쉴드 TBM 시공시 굴진효율 증대기술의 개발
  - 터널 선형조정기술(곡선부, centering, 침하 문제) 확보
  - 고효율 Bit, 고강도 Cutter의 국산화
  - 급속 시공 및 안전성이 우수한 세그먼트 라이닝 제조 및 설치 기술개발
  - 막장 전방지반의 정밀조사 기술확보(비파괴 탐사기술, 버력분석기술, 기계작동력 분석기술 등)
  - 기계화 시공분야에 맞는 보조공법 등 취약지반 대응기술 확보
- (6) 쉴드 TBM 관련 거동 메카니즘 규명 및 각종 해석 기술들의 개발
- (7) 국내 기계화 시공 특성을 반영한 굴착 및 지보 설계가 가능하도록 국외 지반분류 시스템에 대한 도입 및 수정, 보완(1993, 1999년 Nick Barton의 QTBM, 1969년 Peck의 토사터널의 지반분류법 등의 검토)
- (8) 기계화 시공시 주변환경 보호를 위한 각종 기술(지반침하의 예측 및 억제기술, 인접 구조물의 안정성 평가기술, 지하수 오염방지기술, 버력 처리기술 등)의 개발
- (9) 기타
  - 기계화 시공기술 관련 전문가 양성 및 전문가들간의 만남의 장 지속적인 유지
  - 현장별 문제점 및 해결책 등 현장사례 발표를 통한 관련기술의 공유 및 보급
  - 국내뿐만 아니라 해외 기계화 시공현장의 수주가 늘고 있는 점을 감안, 쉴드 TBM의 국산화 방안 재검토 필요

**참고문헌**

1. 건설교통부(1999), 터널설계기준
2. 건설교통부(1999), 터널표준시방서
3. 건설교통부(1999), 도로설계편람(Ⅰ)-제6편 터널
4. 한국건설기술연구원 (1997), "쉴드 터널용 사다리꼴 세그먼트의 효용성 평가", 한국건설기술연구원, 수탁연구보고서
5. 한국건설기술연구원 (2000), "AITES-ITS 2000 국제 터널 학술회의 참가 해외출장 복명서", 한국건설기술연구원
6. 배규진, 이성원, 이두화(2000), "터널 기계화 시공분야의 기술개발 현황 및 미래수요예측", (사)대한터널협회, 제1차 터널 기계화 시공기술 심포지움 논문집, pp.13-26.
7. 한국건설기술연구원(1995), "지하생활공간 개발 요소기술 연구 -지반굴착기술분야(II)-, 정책연구보고서, pp.1-4~1-6
8. A.F.T.E.S. (2000) Working Group No.4, "New Recommendations on choosing Mechanized Tunnelling Techniques" A.F.T.E.S. Recommendations 2000, version 1-2000, pp. 1-25.
9. ASTM(1996), "Standard Test Method for Abrasion Resistance of Dimension stone by the Taber Abraser1,2", ASTM Designation: C 1353-96
10. ITA Working Group No. 2(2000), Official Report - Guidelines for the design of shield tunnel lining, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 303-331
11. P. J. Tarkoy(1982), "Practical Geotechnical and Engineering Properties for tunnel-boring machine performance analysis and prediction, Transportation research record, pp.62-77
12. P. J. Tarkoy (1973-A), "A study of rock properties and TBM advance rates in two mica schist formations", Proc. 15th U.S. symposium on rock mechanics