

실드 TBM의 암반굴삭 원리

지왕률 · 이호성

(주)청석엔지니어링

1. 서 론

1985년 OPEN TBM이 국내에 처음 도입된 이후 지금까지 실드 TBM을 포함한 기계화 시공법이 꾸준히 적용되어 오고 있다.

하지만 지금까지 국내에서는 지반 굴삭을 위한 장비의 계획 및 선정을 외국의 장비회사에 전적으로 의존하고 있는 실정으로 장비의 적정성 검토 없이 현장에 투입되어 많은 오류와 난관에 부딪히고 있다.

이러한 기계화 시공을 계획할 때 문제발생을 최소로 줄일 수 있도록 적절한 비트선정 및 굴착설계를 위해서 굴삭이론의 확립은 매우 중요한 요소이다.

암반의 기계화 굴삭 이론(Rock cutting theory)은 영국의 Evans 모델, 수정 Ernst-Merchant 모델과 일본의 Nishimastu 모델이 대표적인 이론으로 주로 drag pick에 대한 것이며, 경암의 굴착은 근자에 이르러 disc cutting 이론이 호주의 Roxborough 등에 의해 정립되어 왔다.

본 원고에서는 위에 언급한 굴삭이론을 소개하고 비트선정을 위해 고려해야 할 사항들과 굴착대상 암반물성과 굴착속도와의 관계에 대하여 정리하여 외국 장비회사에 의존하고 있는 장비선정과 기계화시공 계획에 참고가 되고, 향후 연구하여야 할 과제를 제시함으로써 국내 기계화 시공기술 및 장비제작 분야의 발전에 도움이 되고자 한다.

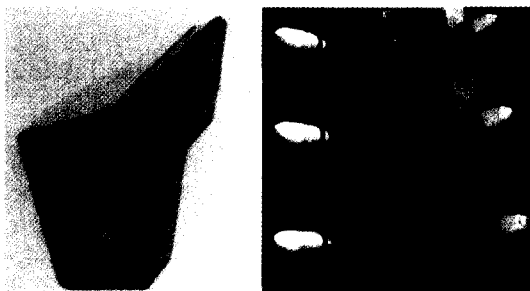


그림 1. 쐐기형 chisel pick과 원추형 conical pick.

2. Drag pick의 이론적 model

Drag bit는 일반적으로 쐐기형 chisel pick과 원추형 conical pick으로 분류된다(그림 1).

Drag pick을 이용해 암반을 절삭할 때 절삭홈은 pick의 깊이보다 더 깊게 생긴다. 그림 2를 보면 절삭면과 pick과의 사이에 관련 변수인 절삭각 α , β , θ 가 존재한다. 절삭력은 절삭 깊이와 rake angle인 α 와 암석강도에 따라 달라진다.

2.1 Evans 모델

암반의 전단면을 wedge형의 drag pick으로 절삭할 때, pick의 끝에서 암반의 표면에 이르는 원호를 따라서 인장 파괴가 발생한다. 파괴의 순간에 절삭되는 암편에는 세 가지의 힘이 작용한다고 보며 절삭력은 이 세 가지 힘과 평형상태를 이룬다.

- (1) 힘 R : pick 면에 법선방향으로 작용하는 힘
- (2) 힘 T : 파괴면인 원호를 따라 작용하는 인장력의

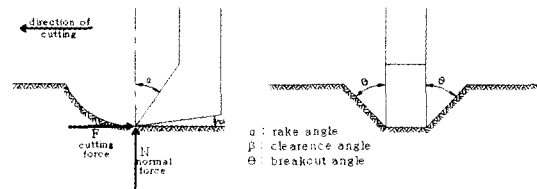


그림 2. Chisel pick의 주요 변수.

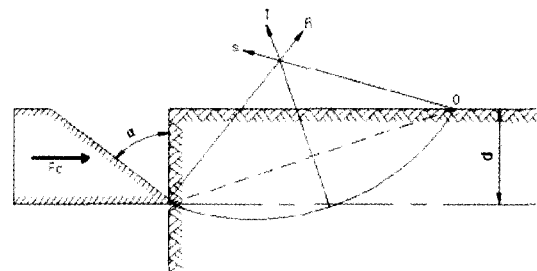


그림 3. Evans의 인장파괴 절삭이론.

합력

(3) 힘 s : O점에서 암편(chip)이 제거될 때 hinge를 따라 걸리는 반력

파괴 발생시의 굴착거리가 굴착깊이(d)에 비해 아주 작다는 가정 하에서 다음의 파괴식을 얻게 된다.

$$F_c = \frac{2twd \sin^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}{1 - \sin^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}$$

여기서 F_c : 파괴순간의 절삭력(kN)
 t : 암석의 인장강도(MPa)
 w : pick의 폭(mm)
 d : 절삭 깊이(mm)
 α : pick rake angle(°)

2.2 수정 Ernst-Merchant 모델

암반의 절삭이 인장에 의해 발생하는지 전단에 의해서 발생하는지는 어느 강도가 먼저 한계를 넘어서는가에 달려있다. 이 이론은 암석의 절삭을 전단파괴의 과정으로 모델링하고 있다.

Evans 이론과 마찬가지로 이 이론도 파괴의 순간에 암편에 작용하는 두 set의 힘들에 의한 평형상태를 가정함으로써 절삭력을 구한다.

이때 절삭력 F_c 는

$$F_c = 2wdS \tan^{1/2}(90 - \alpha + \tau)$$

여기서 F_c : 파괴순간의 절삭력(kN)
 S : 암석의 전단강도(MPa)
 w : pick의 폭(mm)
 d : 절삭 깊이(mm)
 α : pick rake angle(°)
 τ : 암석과 pick사이의 마찰각(°)

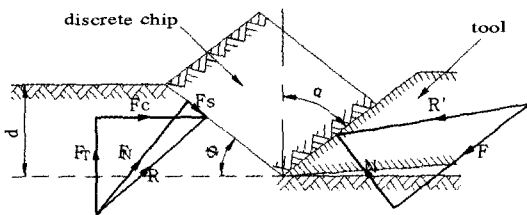


그림 4. 암반 절삭에 대한 수정 Ernst-Merchant model.

2.3 Nishimatsu 모델

수정 Ernst-Merchant 모델에서는 암반의 전단강도가 전단면에 수직으로 작용하는 압축응력과 독립적이라는 가정을 한다. Nishimatsu 모델에서는 이러한 가정이 없다. 이 모델은 세 가지의 힘이 작용하는 암편의 한계평형에 기초하고 있다.

이것을 수식화 하면

$$F_c = \frac{2Swd \cos(\tau - \alpha) \cos \phi}{(n+1)(1 - \sin[\phi - \alpha + \tau])}$$

여기서 F_c : 파괴순간의 절삭력(kN)
 S : 암석의 전단강도(MPa)
 w : pick의 폭(mm)
 d : 절삭 깊이(mm)
 α : pick rake angle(°)
 τ : 암석과 pick 사이의 마찰각(°)
 ϕ : 암석의 내부 마찰각(°)
 n : 응력 분배 요소(절삭 작업중인 암반의 응력상태와 Rake angle의 기능에 관한 요소)

3. Drag pick의 절삭 운용시 주요 변수

수학적 모델에서 나온 이론식에서는 절삭력에 대해 설명하였으나, 실제적으로 이것은 절삭 작업중 pick에 작용하는 힘들 중의 한 요소에 불과하다. 실제로는 횡방향 요소 및 수직방향 요소 등이 실제 작용하는 힘을 구성하고 있다. 이와 같이 drag pick 작업의 효율을 얻어 내는데 필요한 다양한 요소들은 그림 6과 표 1과 같다.

이외에 drag pick의 절삭 작업은 pick의 크기와 형태, 작동 방법에 영향을 받는다. 상기 요소외에 주요 변수를 다시 나열하면, pick rake angle(α°), back clearance angle(β°), pick width(w), pick shape(front ridge angle, vee bottom angle), depth of cut(d), cutting speed(v), pick의 구성물질, 암석의 물성, pick의 배치 간격 등의 변수들이 있다.

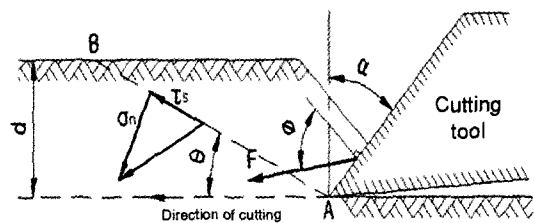


그림 5. 전단력에 의한 암편 형성을 보여주는 Nishimatsu 모델.

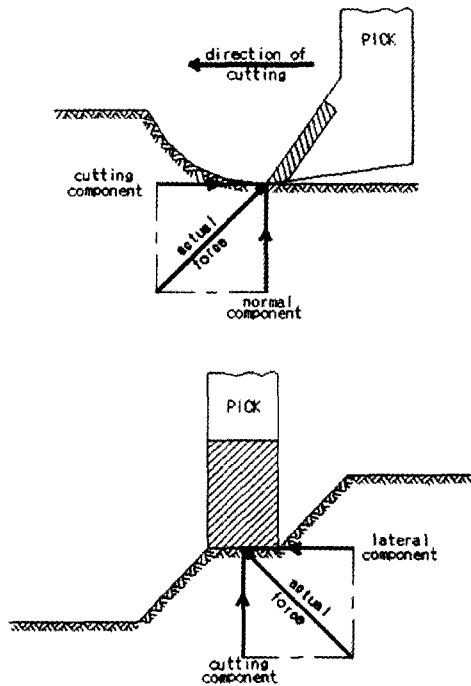


그림 6. 절삭시 pick에 작용하는 응력들.

4. Disc cutter의 절삭 이론

일반적으로 disc cutter는 암질이 강해서 drag pick에 의한 절삭이 불가능한 곳에 적용된다. 그러나 disc cutter는 그 적용 방식에서 pick처럼 자유자재로 적용이 어려우며 원형 전단면 boring과 같은 방식으로 제한되어 사용된다. 현재 기술적으로 drag pick의 사용은 암반의 압축강도가 약 100 Mpa 이하의 암반에 제한되지만,

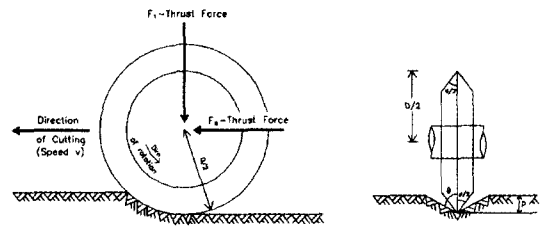


그림 7. Disc cutter의 기본적 형상과 주요 절삭변수.

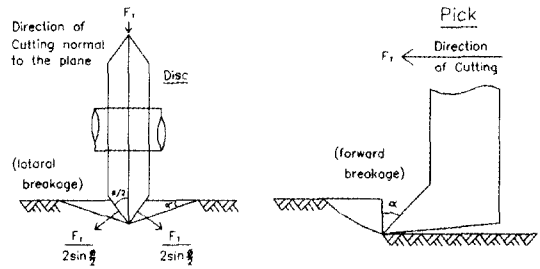


그림 8. Disc와 pick에 의한 파괴 패턴의 비교.

disc cutter는 압축강도 200 Mpa에 이르는 암반에서도 사용할 수 있다.

4.1 Disc cutter 절삭의 기본 역학이론

Disc cutter는 축방향으로 자유로이 회전하는 바퀴와 같다. Disc는 암반표면에 연직된 방향으로 높은 추력(Thrust Force)을 가하여 암반을 절삭한다. Disc를 회전시키는 데 필요한 회전력(Rolling Force)은 암반표면과 평행하고 disc의 운동방향과 같은 선상에 있다(그림 7). disc가 자유로이 회전하기 때문에 외적으로 작용되는 토크는 발생하지 않는다.

표 1. 절삭시 Pick에 작용하는 변수들.

Parameter	Units	Symbol	Definition
Mean Cutting Force	kN	F_C	절삭 방향에서의 평균 절삭력
Mean Peak Cutting Force	kN	F_C^1	절삭 방향 tool에 작용하는 peak force의 평균
Mean Normal Force	kN	F_N	pick을 위로 밀어내는 힘의 평균
Mean Peak Normal Force	kN	F_N^1	normal peak force의 평균
Mean Lateral Force	kN	F_L	tool의 측면에서 작용하여 횡방향으로 움직이게 하는 힘의 평균
Mean Peak Lateral Force	kN	F_L^1	lateral peak force의 평균
Yield	m^3/km	Q	단위 절삭 거리당 pick에 의한 암의 절삭량
Breakout Angle	degree	θ	수직방향과 절삭홈 경사면과의 각도
Specific energy	MJ/m^3	S.E.	단위 체적을 절삭하는데 드는 일의 양
Coarseness Index	-	C.I.	절삭된 암석의 크기 분포를 정량화하여 절삭효율 Index로 사용

Drag pick와는 달리 disc의 wedge는 근접된 노출 자유면이 없이 암표면을 향해 관입된다. 즉 disc 양측의 횡방향으로 높은 추력이 작용하여 암 표면의 파괴가 발생한다. Pick의 주요힘이 운동방향의 수평 방향에 작용되는 것에 반해 디스크는 종 방향으로 가장 큰 힘이 작용된다(그림 8).

4.2 Disc의 설계 변수

Disc의 설계변수는 디스크 직경(D), 디스크 edge각(θ), 관입깊이, Coarseness Index(C.I : 절삭된 암편들의 조립도로 절삭효율을 측정하는 방법) 등이 있다.

1) Disc force에 대한 이론

Disc cutter의 경우에 있어 추력 F_T 는 디스크 접촉면적 A의 투영된 면적이다. 암반과 접촉한 디스크의 길이 l은 디스크의 관입깊이에 따라 증가한다.

이를 수식으로 나타내면

$$F_T/F_R = \sqrt{\frac{D-p}{p}} \text{ (disc cutter가 한번 절삭시)}$$

여러번 절삭시는

$$F_T/F_R = \frac{d}{p} \sqrt{\frac{D-p}{p}}$$

여기서, D : disc의 직경
 d : 절삭심도의 합
 p : 1회 절삭심도

$$\text{즉, } l = 2\sqrt{Dp-p^2}$$

디스크의 접촉폭이 접촉길이와 같다고 가정하면, 면적 A는 다음과 같다.

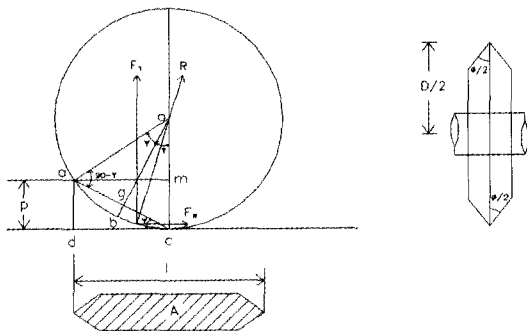


그림 9. Disc force의 기하학적 관계.

$$A = 2p \tan \frac{\theta}{2}$$

$$F_T = A \sigma \text{ 이므로,}$$

$$F_T = 4\sigma p \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{Dp^3 - p^4}$$

여기서, σ : 암석의 압축강도 (Mpa)

θ : Disc edge angle(°)

D : Disc 직경 (mm)

p : 절삭심도 (mm)

$$\text{또한 } F_R = 4\sigma p^2 \tan \frac{\theta}{2}$$

Disc cutter의 영향요소로는 절삭깊이 p의 영향, disc의 직경, disc edge angle, 암석물성 등의 조건을 고려하여 설계하게 된다.

5. 암석물성과 비트 선정

굴착대상인 암반의 물리적 특성은 굴착 장비선정, 비트 선정과 중요한 관계를 갖게된다. 현재 Shield TBM이 적용되고 있는 국내의 지하철 터널 공사의 경우도 지질 및 지반조건에 맞는 bit의 선정과 최적 장비 선정의 중요성을 보여주고 있고, 이것은 공사의 성공여부를 결정하는 요소이기도 하다.

일반적으로 현재 장비선택에 있어 암반의 물성이 중요하게 다뤄지지는 못하는 경향이이나, 향후에는 암반 물성과 장비운용과의 관계를 고려하여 bit 선정을 하도록 하여야 한다.

Bit 선정에 필요한 암반의 강도와 경도를 구하기 위한 여러 시험 방법이 개발되어 있다.

5.1 암반의 주요 강도 요소들

일반적으로 장비 제작에 필요한 주요 물성치로 암반의 압축강도(σc)를 들 수 있으며, σc를 통해 cutter system 구성에 필요한 에너지와 힘 등을 결정하게 된다. 주요 제작업체들은 암반의 압축강도를 이용해 굴착시 적용되는 적정 절삭 깊이와 cutter 종류 및 cutter 사용 비용 등을 정하는 index로 사용하고 있다. 시험실 시험과 이론적 해석결과 암반의 전단강도(σs) 역시 절삭 운용에 중요한 역할을 한다는 것이 밝혀졌고, pick의 운용과 암석의 물성과는 복잡한 역학적 관계가 있다.

5.2 암반과 bit의 마모시험

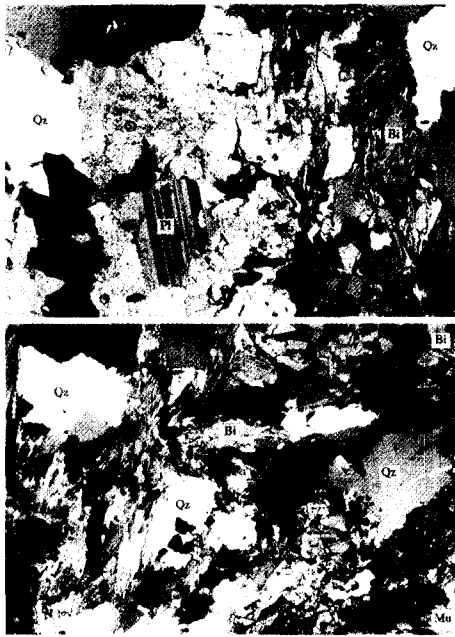


그림 10. 현미경 박편 관찰 사진.

Cutting pick의 굴삭시 문제는 암반의 저항에 따른 마모 발생으로 pick이 닳아버려 절삭능력이 손실되는데 있다. 암석의 마모 저항도를 측정하면 적정 cutter나 pick 선정에 도움이 된다. 암반의 마모 저항도 시험은 광물 분포 박편시험등 여러 가지 방법이 있다.

5.2.1 석영함유량 시험

절삭 cutter 마모의 주원인인 암반내 석영의 함유량이 pick 선정에 중요한 요소가 되어, 체적 함유율 및 또한 석영의 입도 크기가 주 시험대상이 된다. 각종 시험 결과에 의하면, pick의 마모도는 암반내 석영의 함유정도 및 석영 입자크기에 비례한다.

5.2.2 세르샤 마모시험(Cerchar abrasivity test)

프랑스 광업연구소(Cerchar)에서 개발된 시험으로 연한 철제 Tip(또는 다이아몬드 Tip)으로 암반을 10 mm 길이로 긁어 발생하는 절삭 흠의 직경과 모양으로 암석의 마모도를 측정하는 방법으로, 이때 암반급기에 적용되는 수직하중은 7 kgf이다. 절삭흠의 크기는 0.1 mm 단위로 측정된다.

단위당 소모 에너지(specific energy)

$$= \frac{\text{동력}}{\text{절삭흠단면}} \times \frac{1}{\text{굴진율}}$$

$$\text{마모도} = \frac{\text{닳은 bit의 S·E} - \text{새 bit의 S·E}}{\text{굴삭거리}}$$



그림 11. 세르샤 마모시험.

로 나타내어 bit 선정에 사용된다.

그 외 Taber 마모시험(Tarkoy가 개발한 Tab의 마모시험), Schmidt 해머 test, Shore 경도시험, Protodyakonov의 Impact 강도시험, Brinell 경도시험, 직접 암석 core를 절삭하는 core cutting 시험, 1:1 scale 암석 절삭시험 등이 있다.

이러한 암석물성 및 마모도 시험 등을 통해 적정 bit 선정이 가능해 진다.

5.3 장비의 굴삭속도와 암석물성과의 관계

5.3.1 순 굴삭속도와 굴진속도

굴진속도는 장비의 능력과 암반등 지반의 저항력에 의해 결정되는데, 가장 먼저 결정되어야 되는 요소는 커터의 굴삭심도(p)이다. 순 굴삭속도(P)는 커터가 암반 굴삭시 굴삭심도 p(mm/rev)와 cutter head의 회전속도 n(RPM)에 의해 결정된다.

순 굴삭속도 : $P_r = 0.06 \times p \times n$ (m/hr)

굴진속도 :

$$Ar = \text{굴진거리/작업시간} = \text{가동률} \times Pr \text{ (m/hr)} = \text{가동률} \times Pr \times 26 \text{ (m/day)}$$

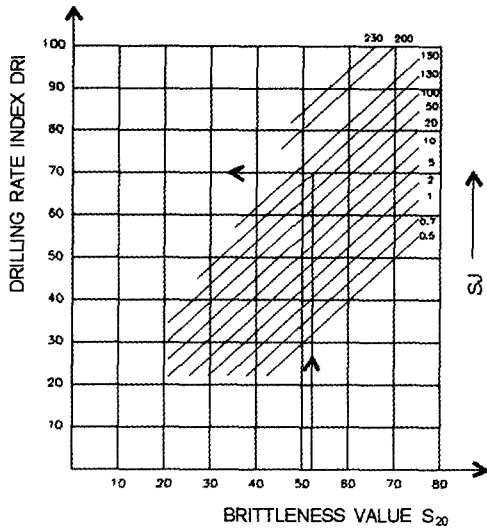


그림 12. DRI의 계산(NTH, 1990).

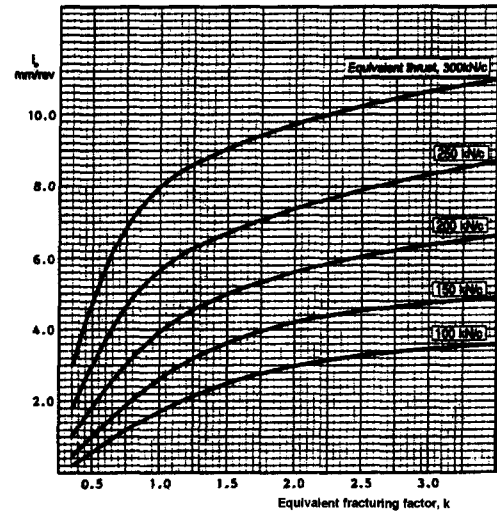


그림 14. Basic penetration depth(NTH,1994).

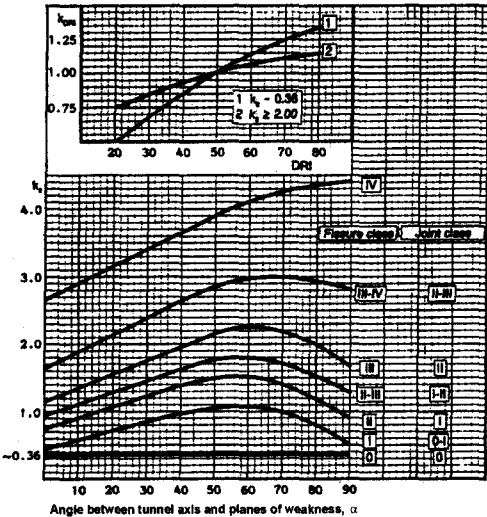


그림 13. Fracturing factor on DRI(NTH, 1994).

5.3.2 마모 정도와 굴착속도와의 관계

암석실험을 통하여 얻어진 S_{20} 및 S_j 등의 두 값과 천공속도지수(DRI, Drilling Rate Index)와의 관계는 그림 12와 같다.

여기에서 얻어진 DRI 값은 암반의 균열요소를 고려하여 그림 13과 같이 $k(s)$ 및 $k(DRI)$ 값을 얻고, 그림 14에서 I의 크기를 얻어 굴착계획을 수립한다.

여기에서 $k(ekv) = k(s) \times k(DRI)$ 이며, I의 크기는 굴착속도 설계에 필요한 커터의 굴삭심도(p, penetration depth, mm/rev)이다.

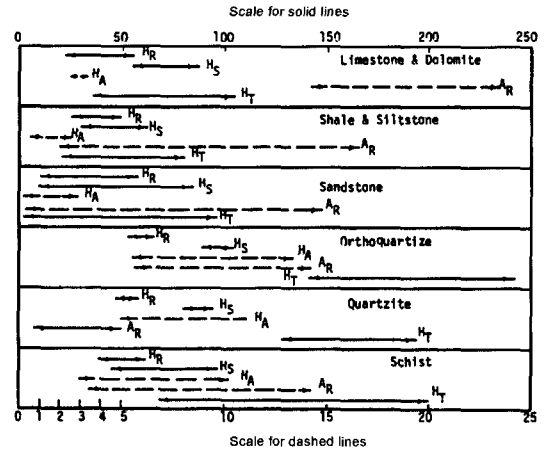


그림 15. 경도시험법과 암석에 따른 경도의 크기(Tarkoy, 1973-B).

5.3.3. 반발경도와 굴착속도와의 관계

종합경도는 슈미트해머(Schmidt hammer)에 의한 현저암반의 반발경도(H_R)와 실험실 실험에 의한 마모경도(H_A)에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$(H_T) = (H_R) \sqrt{H_A}$$

종합경도는 반발경도와 마모경도 제공근의 곱으로 얻어지므로 반발경도의 크기에 의해 크게 영향을 받는다.

암석경도에는 슈미트해머에 의한 반발경도(H_R)와 쇼어경도(H_S), 암석마모경도(H_A) 및 A_R 그리고 위에서 정

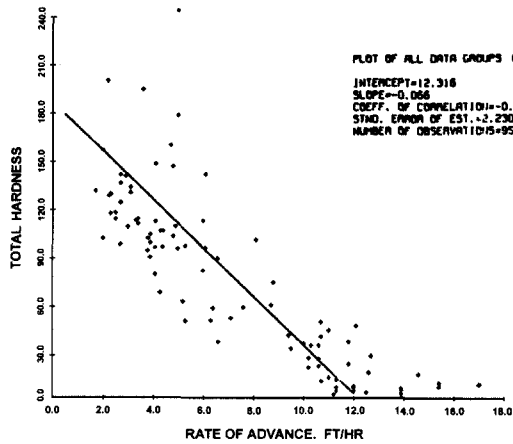


그림 16. 굴착속도와 종합경도와의 관계.

의된 종합경도를 측정하여 굴착속도와의 상관관계를 얻었는데 종합경도와의 관계가 가장 좋다고 결론지었다. 이들의 관계는 그림 16과 같다.

95개의 자료로부터 얻어진 상관관계는 0.850이며 이를 수식화하면

$$P_r = -0.066HT + 12.316 \text{ (ft/hr)}$$

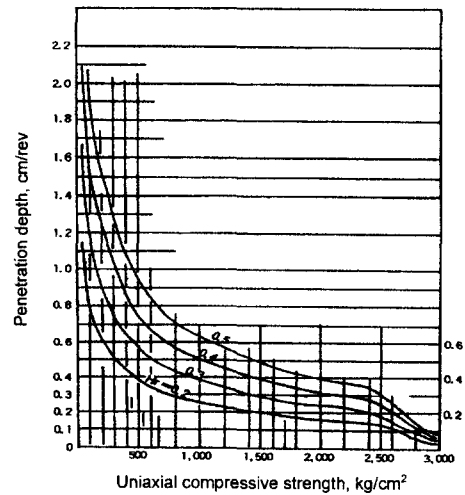


그림 17. 일축압축강도와 압입깊이와의 관계(일본).

$$= -0.02HT + 3.754 \text{ (m/hr)와 같다.}$$

그리고 굴착속도가 1 ft/hr가 되는 임계값은 170이며 120 이상일 때는 특별한 설계가 요구된다고 지적하고 있다.

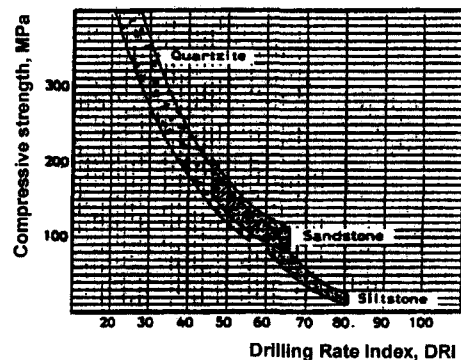
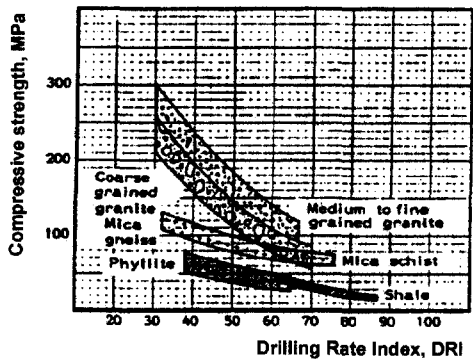
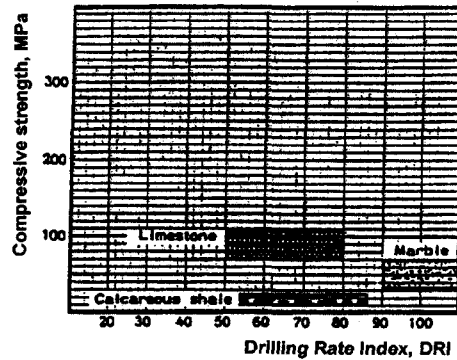
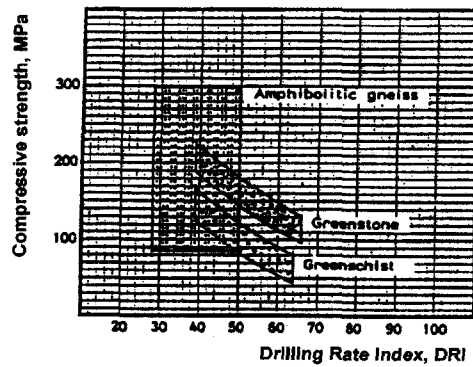


그림 18. 천공속도 지수와 일축압축강도의 관계곡선(NTH, 1994).

5.3.4. 일축압축강도와 굴착속도와의 관계

보다 간단하게 굴착속도를 찾아내기 위하여 일반적으로 알려진 일축압축강도나 경도로부터 유추하려는 연구가 많이 시도되었다. 일본에서는 암석의 일축압축강도로부터 압입깊이를 직접 얻을 수 있는 도표를 활용하고 있다(그림 17).

NTH는 천공속도지수(DRI)로부터 압입깊이를 설계할때 이 크기를 일축압축강도의 함수로 도시하였는데 그림 18과 같다. 강도가 200 MPa 이상인 극경암으로는 Amphibolite와 화강암, 규암 등을 언급하고 있다.

6. 결 론

본 원고에서는 기계화 굴착시 굴삭 이론의 소개와 굴착대상 암반의 물리적 특성에 따른 비트선정 및 굴착속도와의 관계에 대해서 언급하였으며 이에 대한 요약은 다음과 같다.

- 1) Drag pick의 굴삭은 인장파괴, 전단파괴 그리고 압편에 작용하는 힘들의 한계평형에 의해 설명된다.
- 2) Disc cutter는 암반표면에 연직인 방향으로 작용하는 추력(thrust force)에 의해 암반을 절삭한다.
- 3) Pick의 주요힘은 운동방향의 수평방향이고, disc는 종방향으로 가장 큰 힘이 적용된다.
- 4) 일반적으로 장비제작에 필요한 암반의 주요 강도 요소들은 압축강도와 전단강도이며, pick의 운용과 암석의 물성과는 복잡한 역학적 관계가 있다.
- 5) 암석의 마모저항도 시험은 적정 cutter와 pick 선정에 도움이 되며, 암석의 취성, 천공속도지수, 암반의 균열요소 그리고 cutter의 추력(thrust)에 의해서 결정한 cutter의 압입깊이와 cutter head의 회전속도에 의해 굴진속도를 구할 수 있다.
- 6) 암석의 경도와 굴착속도와의 관계, 일축압축강도와 굴착속도와의 관계유추에 대한 외국의 연구사례를 활용하여 보다 간단하게 압입깊이와 굴진속도를 결정할 수 있다.

이외에도 기계화 시공의 설계를 위해서는 drag picks와 disc cutter의 중형 배치, center cutter의 적용 그리고 암편이나 핵석(core stone)등의 처리장비 등 고려해야 할 요소들이 많이 있으며, 향후 체계적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

지금까지 국내에 적용된 기계화 시공에서는 굴삭이론과 암반특성을 고려한 장비의 설계를 외국장비회사에 전적으로 의존해 오고 있다.

이로 인하여 국내에서 기계화 굴착에 대한 연구나 검토가 부진하여 설계나 시공 시 검증할 수 있는 기준도 제대로 마련되지 못한 실정이다.

또한 지반변화가 심한 국내 특성이 제대로 반영되지 못한 채 장비가 도입, 운영됨으로써 시공 중 발생하는 문제점들에 대하여 적절한 예측과 대책이 수립되지 못하고 이로 인한 기계화 시공에 대한 부정적인 인식으로 널리 적용되지 못하고 있으며 장비의 국산화도 요원한 실정이다.

이와 같은 각각의 문제들이 악순환의 고리를 만들어 국내 기계화시공의 정착을 막고 있는데, 그 고리를 끊기 위하여 다음과 같은 과제들을 해결하여야 할 것으로 생각한다.

첫째, 대상 지반에 적절한 장비선정 및 설계를 위해서 기계화 굴착을 위한 정밀 지반조사 및 굴삭시험(rock cutting test)의 지속적인 기술개발 및 연구가 필요한 것으로 판단된다.

둘째, 굴삭 원리의 이론적 해석 연구에 의해 적절한 장비 제작과 시공계획 수립을 위한 기술축적을 해야 할 것이다.

셋째, 기계화 시공의 원활한 적용을 위해 합리적인 기준의 재정립 등의 행정적·제도적 뒷받침이 필요할 것이다.

마지막으로 특수재료 및 기계제작 분야와의 상호 공조에 의해 장비 제작기술 발전을 통한 국산화를 이룰 수 있어야 할 것이다.

참고문헌

1. W.R. JEE, 1992, An Assessment of the Cutting Ability and Dust Generation of Polycrystalline Diamond Compact Insert Picks., Ph.D Thesis of University of New South Wales, Sydney, Australia.
2. BROWN, E.T. & HOEK, E., 1978, Trends in Relationships between Measured In-Situ Stresses and Depth. Int. J. Rock Mechanics, Vol. 15.
3. HOEK, E., 1976, Structurally Controlled Instability. 17th U.S. Rock Mechanics Symposium.
4. WHITTAKER, B.N. and SINGH, R.J., 1979, Evaluation of Design Requirements and Performance of Longwall Gateroads. Mining Engineer.
5. EVANS, I., 1962, A Theory of the Basic Mechanics of Coal Ploughing, Proc. Int. Symp. on Min. Research, Pergamon, London.
6. ROXBOROUGH, F.F., 1973, Cutting Rock with Picks, The Mining Engineer (Proc I. Min. E.) London.
7. MERCHANT, M.E., 1945, Basic Mechanics of the Metal Cutting Process, J of Appl. Mechs., Vol II.

8. NISHIMATSU, Y., 1972, The Mechanics of Rock Cutting, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 9.
9. EVANS, I. and Pomeroy, C.D., 1966, The Strength, Fracture and Workability of Coal, Pergamon, London, 277.
10. ROXBOROUGH, F.F. and Phillips, H.R., 1977, Experimental Studies on the Excavation of Rock Using Picks, Proc. III Congress of the Int. Soc. for Rock Mech. Vol. 11B, 1407-1412.
11. PHILLIPS, H.R., 1975, The Mechanical Cutting Characteristics and Properties of Selected Rock Formations, Report to Transport & Road Research Laboratory, Dept. of Mining Engineering, University of Newcastle upon Tyne.
12. BECKMANN U. and H. Simons, 1982, Tunnel boring machine payment on basis of actual rock quality effect, Tunnelling '82, 261-264.
13. ROXBOROUGH, 1988, Multiple pass sub- interactive rock cutting with picks and discs, Congress on Applied Rock Engineering, IMM.
14. HOWARTH D.F., 1994, Database of TBM projects undertaken between 1950 and 1990 and assessment of associated ground-strength limitations, Tunnelling and Underground Space Tech., 9(2), 209-213.
15. NTH, 1990, Hard rock tunnel boring, Project Report 1.
16. TARKOY PETER. J., 1973-A, A study of rock properties and TBM advance rates in two mica schist formations, Proc. 15th U.S. Symposium on Rock Mechanics.
17. TARKOY PETER. J., 1973-B, Predicting TBM penetration rates and cutter costs in selected rock type, Proc. 9th Canadian Rock Mechanics Symposium.
18. TARKOY PETER. J. and Massimo Marconi, 1991 Difficult rock comminution and associated geological conditions, Tunnelling '91, 195-207.

지왕률



1980년 한양대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
 1982년-1984년 독일 Aachen 공과대학 대학원, 디플로마
 1986년 한양대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
 1992년 호주 NSW대학, 공학박사
 Tel : 02-598-1591
 E-mail : wrjee@cse.co.kr
 현재 (주)정석엔지니어링 지반공학부 상무이사

이호성



1993년 한양대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
 Tel : 02-523-9272
 E-mail : hoslee@cse.co.kr
 현재 (주)정석엔지니어링 지반공학부 과장
