

천공용이도에 의한 천공속도의 예측 기술



장수호
한국건설기술연구원
책임연구원



최순욱
한국건설기술연구원
연구원



김광염
한국건설기술연구원
연구원

1. 머리말

천공 장비의 발전으로 인해 높은 정확도와 정밀도로 발파패턴을 천공할 수 있게 되었을 뿐만 아니라 최대 순천공속도 또한 크게 증대되고 있다(Bell, 1992).

특히 전단면 발파굴착의 경우 전체 터널 공정시간 가운데 천공작업이 차지하는 비중이 10~30%에 달하기 때문에, 발파굴착에 의한 공사기간과 공사비용을 산출하는데 있어 합리적인 천공속도의 예측과정이 매우 중요하다고 할 수 있다(Jimeno 등, 1995).

일반적으로 천공속도는 현장 천공시험, 다른 작업조건에서 얻어진 자료들의 활용, 다양한 경험식의 활용, 그리고 암석 시료에 대한 실험실 시험 등으로부터 측정 또는 추정될 수 있다. 하지만 이 가운데 실험실 시험을 통해 얻어지는 천공용이도(drillability) 지수를 기반으로 천공속도를 산출하는 것이 다른 방법들과 비교할 때 경제적이고

신뢰적인 방법으로 고려되고 있다(Jimeno 등, 1995).

또한 장공발파시 작업능력이 향상되면 단위 m당 공사비가 감소되기 때문에, 공사기간과 공사비용 측면에서 더욱 효율적이라고 할 수 있다(두준기, 2007). 연장 12.7km의 오스트리아 Inntal터널에서 시공비용을 분석한 결과에서도, 시공비용을 증가시키는 요인은 재료의 순비용이 아니라 시간과 관련된 비용이라는 것이 밝혀졌다(Thuro & Spaun, 1996b). 따라서 천공속도가 터널의 공사비용과 공사기간을 평가하는데 있어 매우 중요한 항목 가운데 하나임을 알 수 있다.

따라서 본 고에서는 암석의 천공용이도를 기반으로 하여 천공속도를 예측하기 위한 방법과 함께 천공비트의 마모수명을 고려하여 천공비용을 추정할 수 있는 방법을 소개하였다. 마지막으로 천공속도를 산출하기 위해 선행되어야 할 제반 고려사항들을 정리하였다.

2. 천공용이도와 발파용이도

2.1 천공용이도

암석의 천공용이도는 광물의 경도, 입자크기 등과 같은 다양한 요인들에 따라 달라진다. 예를 들어 석영함유량이 높은 규암(quartzite)에서는 천공 비트의 마모가 크게 발생하며 천공 속도 또한 느려진다. 이 경우에는 천공 성능을 유지할 수 있도록 마모된 비트를 교체하거나 자주 연마해주어야 한다. 반면 석회석의 경우에는 천공속도가 빠르며 천공 비트의 마모는 크지 않다. 따라서 천공장비의 성능은 높아지며 천공비트를 교환할 필요 없이 오랜 시간 동안 천공 작업을 수행할 수 있게 된다.

이와 같이 천공용이도는 암반굴착시 천공 성능과 관련 비용을 예측하기 위하여 활용된다. 특히 천공용이도는 천공 비트와 장비의 마모를 예측하는데 활용될 뿐만 아니라 굴착과정을 사전에 평가하기 위한 천공속도의 예측에도 활용되는 중요한 인자이다. 이와 같이 천공용이도는 천공속도와 비트 마모에 영향을 미치는 수많은 변수들의 영향을 고려하기 위해 사용된다. 이와 같은 변수들의 상관관계를 정리하면 그림 1과 같다.

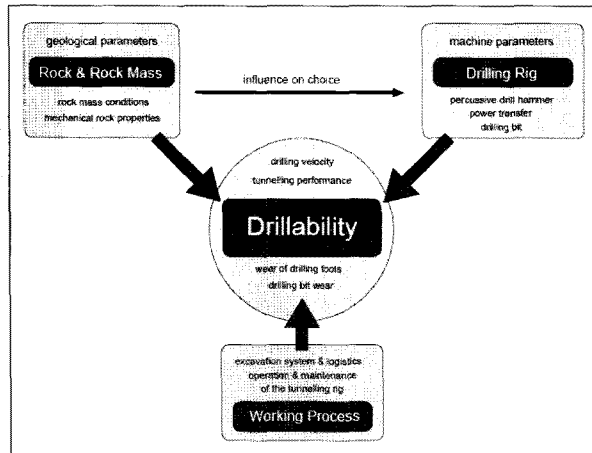


그림 1. 천공용이도와 주요 영향 변수 사이의 상관관계(Thuro & Spaun, 1996a)

첫 번째로 천공용이도에 영향을 미치는 지질학적인 변수에는 구성광물, 암석의 역학적 특성, 암반 불연속면의 특성, 암반의 이방성과 풍화도 등을 들 수 있다. 두 번째로 암반조건에 따라 적절한 천공장비를 선택해야 한다. 특히, 천공장비와 관련된 영향변수들은 천공방법에 따라 달라진다. 일반적으로 터널 굴착시에는 회전-충격식 천공방법(rotary percussive drilling)이 표준이라고 할 수 있다. 이와 관련된 변수에는 천공 해머, 플러싱(flushing) 시스템, 천공비트의 설계 등이 포함된다(그림 2). 현재 사용되고 있는 대표적인 천공장비로는 COP 1238(충격 동력 15kW, Atlas Copco社)과 COP 1440(충격 동력 20kW, Atlas Copco社)을 들 수 있다. 세 번째 변수는 작업과정과 관련된 것이다. 우선 원활한 작업수행과 지속적인 유지관리가 성공적인 천공 성능을 크게 좌우한다고 할 수 있다. 또한 천공속도가 높다고 반드시 굴착 성능이 향상되는 것은 아니다. 굴착 성능은 전체 굴착 시스템의 최적화 정도에 따라 달라지기 때문이다.

버튼 비트(button bit)를 사용하는 회전-충격식 천공시에 발생하는 암석의 파괴 메커니즘을 정리하면 그림 3과 같으며, 다음과 같이 크게 4가지의 세부 메커니즘으로 구분할 수 있다.

- 1) 버튼 비트 하부에서는 충격에 의해 파쇄영역이 형성
- 2) 파쇄영역으로부터 인장응력에 의해 반경방향의 균열이 형성

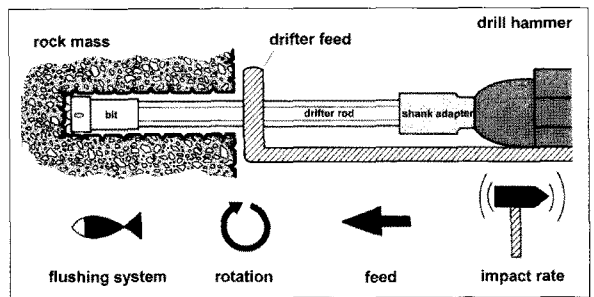


그림 2. 회전-충격식 유압 천공장비와 관련된 영향 인자(Thuro & Spaun, 1996a)

- 3) 버튼 사이에서 전단응력에 의해 암석 파편이 형성
- 4) 기타 동적과정에 의한 파괴

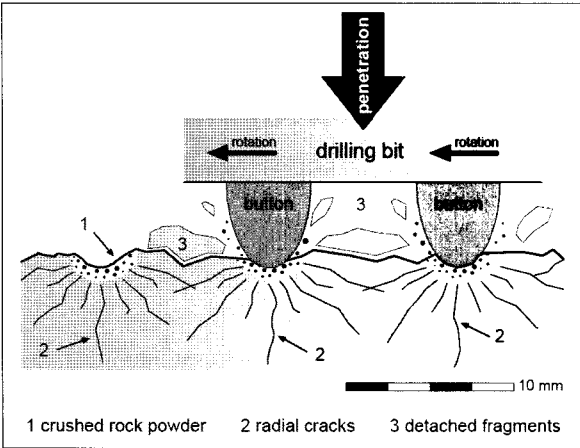


그림 3. 회전-충격식 천공시 버튼 비트 하부에 발생하는 암석의 파괴 메커니즘(Thuro & Spaun, 1996a)

이러한 천공용이도 등급을 실험실이나 현장 시험을 통해 확인해야 하지만 일반적으로 다소 복잡한 과정이다. 따라서 암석의 역학적 특성과 천공속도와의 관계를 도출하려는 시도들이 있었지만, 그림 4와 같이 암석의 압축강도 및 인장강도와의 상관계수가 0.63으로 얻어졌을 뿐, 기타 역학적 특성과 천공 속도와와의 관계는 좋지 못한 것으로 나타났다(Thuro & Spaun, 1996a).

따라서 설계단계에서 다음과 같은 과정들에 의해 천공 장비의 천공속도를 예측하는 것이 타당하다고 할 수 있다.

- 1) 현장 천공시험
- 2) 다른 작업조건에서 얻어진 자료들의 외삽
- 3) 경험식의 활용
- 4) 실험실 시험결과에 근거한 발파용이도의 산정과 활용

현장조건과 동일한 천공비트와 장비를 사용하는 실제

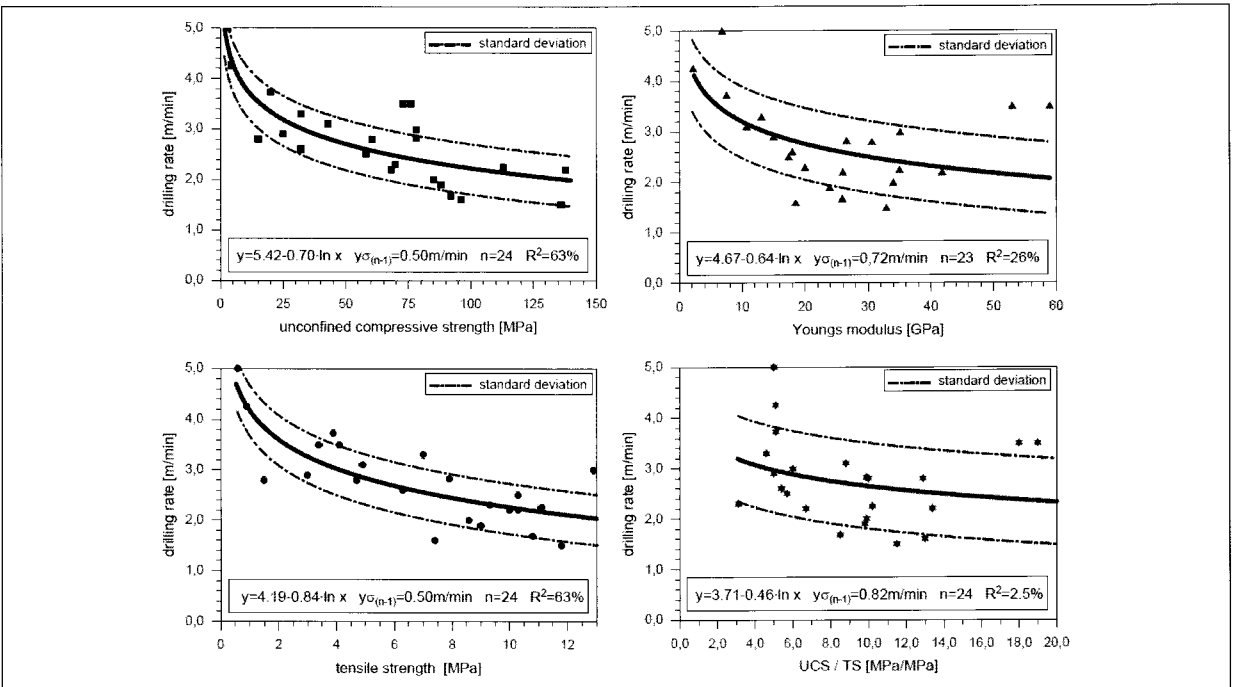


그림 4. 암석의 역학적 특성과 천공속도와의 관계(20kW 충격식 천공장비 COP 1440)

규모의 천공 시험은 천공 비트의 마모와 천공성능을 예측하기 위한 신뢰적인 방법이라고 할 수 있다. 하지만 시험에 많은 비용과 시간이 소요되기 때문에 거의 수행되지 않는다.

대신 특정 천공경에 대한 천공속도를 안다면 식 (1)에 제시된 변환 지수를 활용하여 외삽에 의해 천공경이 다른 경우의 천공속도를 추정할 수 있다(Jimeno 등, 1995). 예를 들어 천공경이 76mm일 때 천공속도가 36m/h로 얻어졌다면, 천공경이 102mm인 경우의 천공속도는 대략 $36 \text{ m/h} \times (76\text{mm}/102\text{mm})^{1.5} = 23.4\text{m/h}$ 가 된다. 하지만 정확한 예측을 위해서는 외삽에 사용되는 천공 자료가 동일한 암반 조건에서 도출된 것이어야 한다는 한계가 있다.

$$F = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{1.5} \quad (1)$$

또한 순천공속도(net drilling rate)를 추정하기 위한 대표적인 경험식으로는 Barre Granite에 대해 얻어진 다음과 같은 추정식을 들 수 있다(Jimeno 등, 1995).

$$VP = 31 \frac{POT}{D^{1.4}} \quad (2)$$

여기서 VP는 천공속도(m/min), POT는 해머의 가용 동력(kW), D는 발파공의 지름(mm)이다.

예를 들어 식 (2)에 의하면 동력이 18kW인 유압식 해머로 100mm 직경의 발파공을 천공하게 될 때의 천공 속도는 0.88m/min이 된다. 하지만 장비에 대한 고려만 있을 뿐 암반 조건에 대한 고려가 전혀 포함되어 있지 않다.

따라서 현재까지 다른 방법과 비교하여 발파용이도 지수를 활용하는 방법이 경제적이고 신뢰적인 천공속도 예측방법이라고 할 수 있다(Jimeno 등, 1995).

대표적인 발파용이도 관련 모델로는 노르웨이 NTNU (Norwegian University of Science and Technology) 모델과 독일의 Thuro-Spaun 모델을 들 수 있다. NTNU 모델에서 천공용이도는 DRI(Drilling Rate Index)로 평가한다. DRI는 취성도(Brittleness value, S_{20}) 및 Siever's J-value(SJ)와 같은 변수를 기반으로 결정된다. DRI 등에 의한 천공용이도 분류는 표 1과 같다.

반면 Thuro & Spaun(1996a)은 암석의 변형파괴 특성에 대한 연구를 통해 천공속도를 예측하기 위한 암석의 특성으로서 '파괴일(destruction work)'의 개념을 제안하였다. 그림 5와 같은 암석의 응력-변형을 곡선에서 곡선 하부의 면적을 적분하면 에너지(또는 일)를 계산할 수 있게 된다. 이를 비파괴일(specific destruction work, W_z , 단위: kJ/m^3)로 제시하였다. 파괴일 개념을 활용하기 위해서는 암석 특성에 따라 파괴 후 거동을 파악하는 것이 필요할 수 있기 때문에, 강성제어시험기(stiffness-controlled testing machine) 또는 서보제어시험기(servo-controlled testing machine)의 사용이 필수적이라고 할 수 있겠다.

표 1. 천공용이도의 분류(Bruland, 1998)

분류	DRI	BWI	CLI
극히 낮음	< 25	< 10	< 5
매우 낮음	26~32	11~20	5.0~5.9
낮음	33~42	21~30	6.0~7.9
보통	43~57	31~44	8.0~14.9
높음	58~69	45~55	15.0~34
매우 높음	70~82	56~69	35~74
극히 높음	> 82	> 70	≥ 75

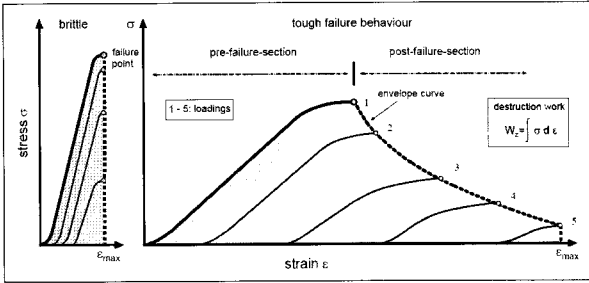


그림 5. 암석의 변형파괴 특성에 따른 응력-변형률 곡선과 파괴일 (Thuro & Spaun, 1996a)

2.2 발파용이도

발파용이도(blastability)를 나타내는 많은 지수가 제시되어 있지만, NTNU모델에 의한 발파비용 산출시 발파용이도가 활용되므로 NTNU모델의 발파용이도 지수(SPR)만 간략히 소개하고자 한다.

NTNU모델에 사용되는 발파용이도 지수(SPR)는 암반의 발파용이도를 나타낸다(NTNU, 1995a). 암반의 발파용이도는 암종에 따른 발파용이도, 암반의 파쇄도, 폭약의 종류 등으로 나타낼 수 있다. 암종에 따른 발파용이도는 이방성, 밀도, 초음파속도, 광물 성분과 입자 결합도, 폭약의 장약밀도 등에 따라 좌우된다. 다양한 암석들에 대해 얻어진 발파용이도는 다음의 표 2와 같이 분류할 수 있다.

발파용이도 지수를 계산하기 위한 공식은 식 (3)과 같다. 이 지수는 발파용이도를 평가하기 위해 적용되었으며 암석 시료에 대한 실험실 시험으로부터 쉽게 평가할 수 있다. 하지만 이 지수는 암반의 파쇄도와 절리 방향 등을

고려하고 있지 않다(NTNU, 1995a).

$$SPR = 0.736 \cdot \frac{I_a^{0.6} \cdot LT^{0.7}}{\left(\frac{c}{1000}\right)^{0.4} \cdot \left(\frac{w}{c}\right)^{0.25} \cdot \rho^{0.2}} \quad (3)$$

여기서, I_n =엽리에 수직한 방향의 초음파속도(m/sec),
 I_p =엽리에 평행한 방향의 초음파속도(m/sec),
 $I_a = I_p / I_n$,
 $c = (I_p + I_n) / 2$ =건조상태의 초음파속도(m/sec),
 w =폭약의 폭속(m/sec),
 ρ =암반의 밀도(g/cm^3),
 LT =폭약의 장약밀도(발파공의 단위체적당 폭약 kg 중량)

3. 천공용이도에 의한 천공속도의 천공비용의 추정

3.1 NTNU모델

그림 6은 DRI의 함수로서 표현된 천공 해머의 종류에 따른 순천공속도(net penetration rate)를 보여준다. 이 도표는 다양한 현장에서 수집한 암석 시료들에 대해 실시된 다양한 시험조건을 고려하여 만들어진 것이다. 공기압식 천공장비의 경우에는 588kPa의 작업 압력을 가정하였다. 이 천공속도는 일반적인 천공 환경에서 측정된 결과에 기반한 것이다.

표 2. 발파용이도 지수 SPR의 분류

발파용이도	설명
높음(SPR = 0.38)	입자크기가 큰 균질한 화강암, 섬장암, 석영섬록암
보통(SPR = 0.47)	예를 들어 편마암
낮음(SPR = 0.56)	슬레이트 구조를 가진 변성암, 운모 함량이 높고 압축강도가 낮은 암석. 예를 들어 운모 편암

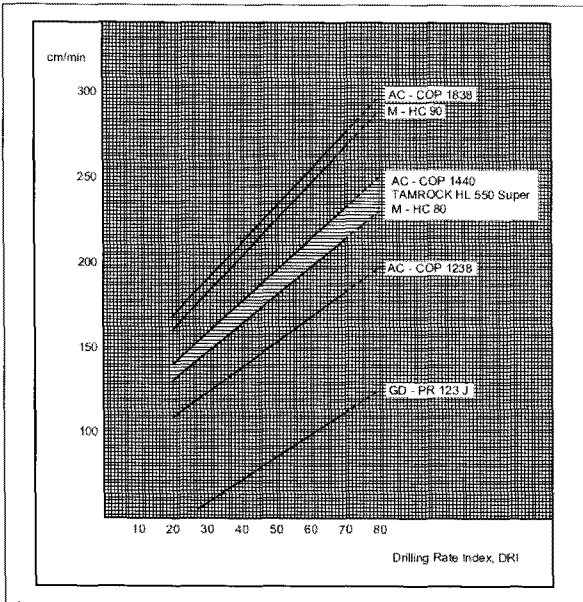


그림 6. 45 mm 천공비트를 사용할 경우 DRI의 함수로 표현된 순천공속도, b45(NTNU, 1995b)

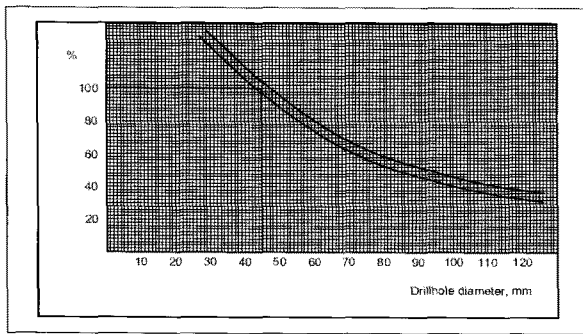


그림 7. 천공경 45 mm에 대한 순천공속도의 백분율로 표현된 천공경에 따른 순천공속도의 변화(NTNU, 1995b)

그림 7은 순천공속도와 천공경 사이의 관계를 보여준다. 이 곡선에서 천공 해머는 천공경과 작업압력과 관련하여 최적 작업 조건에서 작동하는 것으로 가정되었다. 이때 대구경의 발파공은 직접 천공을 하거나 pilot hole을 확대하여 천공할 수 있다. 그러나 pilot hole을 천공한 뒤 확대할 때의 천공시간은 직접 천공시와 비교할 때와 비교하여 1.25배 크다.

Joint drilling을 적용할 때, 두 번째 rod의 천공속도는 첫 번째 rod와 비교하여 3~5% 정도 감소한다. 천공된 발파공의 길이는 일반적으로 rod 길이보다 0.3~0.5m 정도 짧다. 천공패턴을 설계할 때에는 0.5m의 값을 사용할 것을 추천한다.

Round당 천공시간은 다음 식 (4)과 같이 계산된다.

$$t_p = \frac{\text{Drilled length} \cdot \text{Number of holes}}{\text{Net penetration rate} \cdot \text{Number of drilling hammers}} \quad (4)$$

여기서 발파공의 개수는 그림 8 및 그림 9와 같이 터널 단면적으로 함수로 주어지며 round당 표준 천공길이는 5.0m 이다(NTNU, 1995a).

그림 6으로부터 천공 해머의 종류에 따라 DRI의 함수로 순천공속도를 추정할 수 있다. 천공경이 다른 경우의

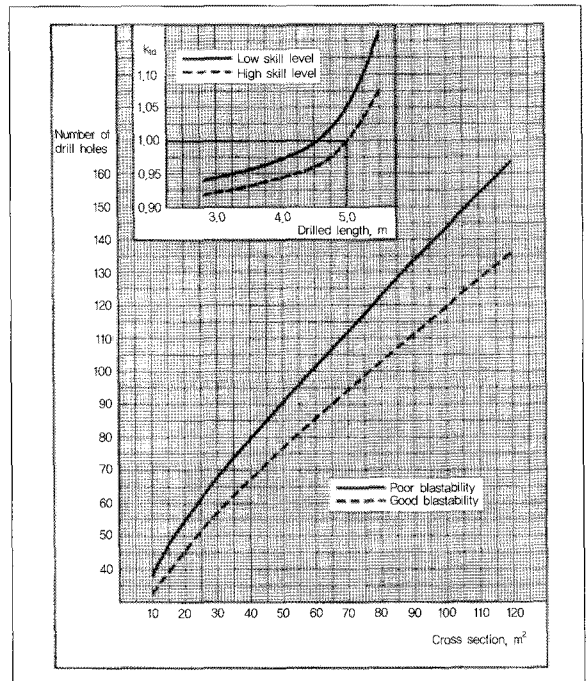


그림 8. 대구경 발파공을 제외한 직경 45mm 발파공의 소요 개수(NTNU, 1995a)

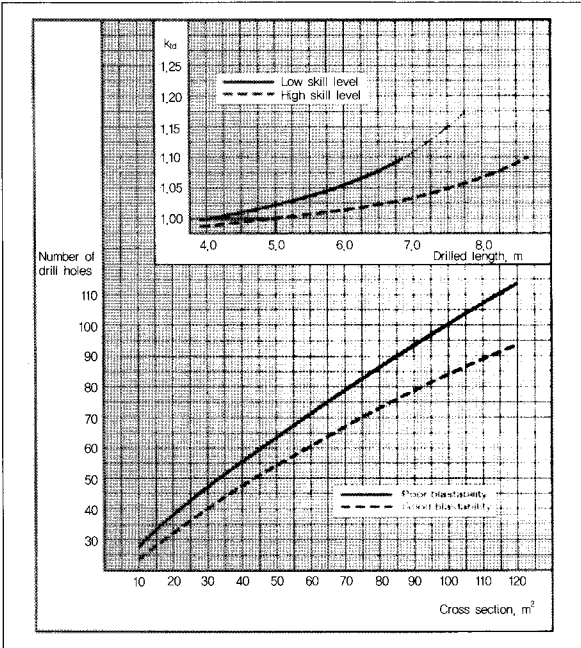


그림 9. 대구경 발파공을 제외한 지름 64mm 발파공의 소요 개수 (NTNU, 1995a)

천공속도는 그림 7로부터 추정한다. Pilot hole을 사용하는 대구경 발파공에 대해서는 직접 천공과 비교하여 천공 시간을 1.25배로 고려한다.

이동시간에는 장비정렬, 공좌잡기, rod 회수 및 천공위치 이동 등이 포함된다. 따라서 이동시간은 암반 조건에는 거의 무관하다고 할 수 있다. 회수 시간은 천공길이에 따라 달라진다. Cutter bar에 대한 회수 시간은 0.5m/sec로 측정되었다. 실제 시간측정 결과, 5.0m 천공시 공당 0.75분의 이동 시간이 걸리는 것으로 나타났다. 그림 10은 천공길이에 따른 이동 시간을 보여준다. 총 이동시간은 대구경 발파공의 개수에 따라서도 달라진다.

이상과 같이 round당 총 이동시간은 식 (5)와 같이 계산된다.

$$t_r = \frac{\text{Moving time per hole} \cdot \text{Total number of holes}}{\text{Number of drilling hammers}} \quad (5)$$

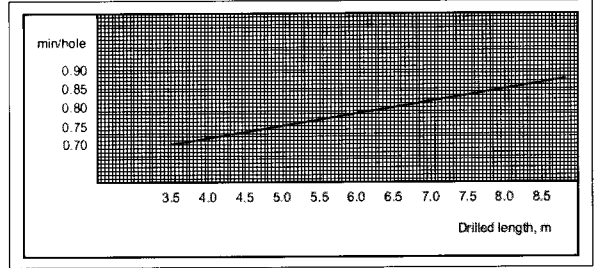


그림 10. 발파공당 이동시간, ff(NTNU, 1995b)

여기서 각 공당 이동시간은 그림 10으로부터 구한다.

Rod 연결시간은 rod의 길이에 무관한 것으로 가정한다. Rod 연결에는 천공전의 삽입과 두 번째 rod의 회수 등이 포함된다. 두 번째 rod를 삽입할 때는 나사조임, 천공장비의 회수, 두 번째 rod의 삽입, 연결부에서의 나사조임 등의 작업이 포함된다. 반면, 두 번째 rod를 회수할 때는 두 번째 rod의 회수, 연결부에서의 나사제거, 첫 번째 rod의 회수, 나사제거 등의 작업이 포함된다.

Rod 연결에 필요한 총 시간 역시 대구경 발파공의 개수에 따라 달라진다. 일반적으로 rod 연결시간은 각 연결부위당 1.8~1.9분 정도로 측정되었다. Rod 연결시간을 줄이기 위해서는 rod 연결장치를 개선하는 것이 필요하다.

이와 같이 round당 rod 연결시간은 식 (6)과 같이 계산된다.

$$t_{sr} = \frac{\text{Adding time per hole} \cdot \text{Total number of holes}}{\text{Number of drilling hammers}} \quad (6)$$

여기서 각 공당 연결시간은 1.8~1.9분으로 적용한다.

반면, 비트 교환시간은 고정되어 있으며 1.5분으로 가정한다. 비트 교환빈도는 암반조건에 따른 비트의 마모도에 따라 달라진다. 1m 천공길이당 비트 교환회수와 암반의 마모도 사이의 상관관계는 그림 11과 같다. 비트를 교환하기 위해 모든 장비를 정지해야한다고 가정하면, 비트 교환시간은 2배로 증가한다. 여기서 비트 교환회수와 천

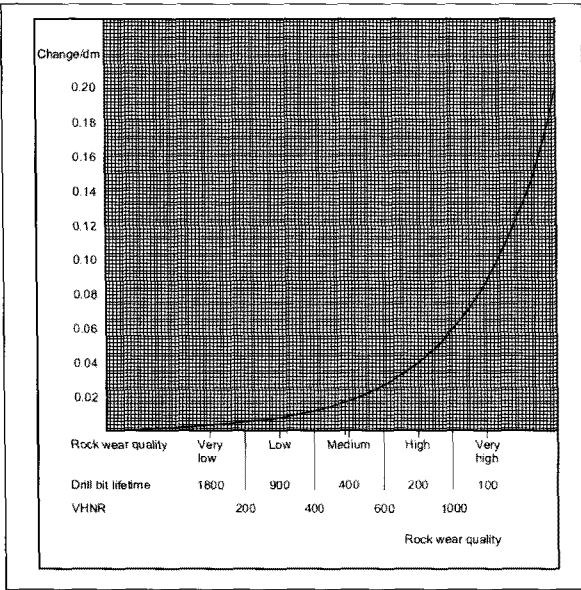


그림 11. Button bit를 사용할 경우 천공길이 1m당 비트교환 빈도, f_k (NTNU, 1995b)

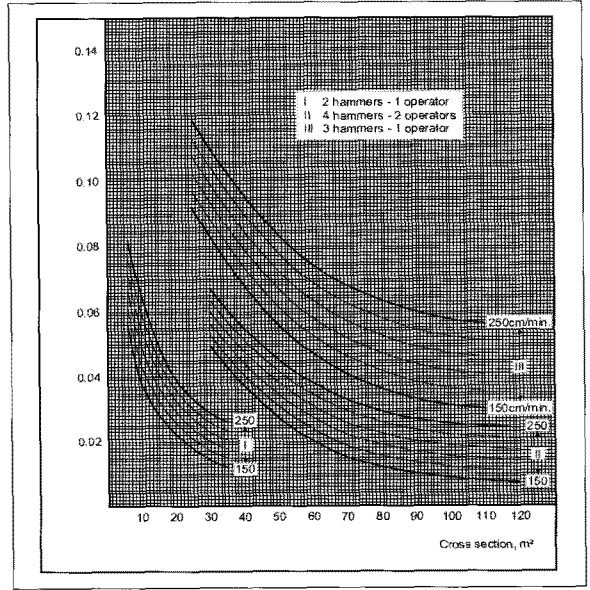


그림 12. 터널 단면적, 천공속도, 천공기사 1명당 천공기 대수의 함수로 표현된 시간손실 지수 f_{sa} (NTNU, 1995b)

공비트 수명은 VHNR(Vickers Hardness Number of the Rock)로 추정한다.

Round당 비트 교환시간은 식 (7)과 같이 계산된다.

$$t_c = \frac{\text{Number of holes} \cdot \text{Drilled length} \cdot \text{frequency for changing bits} \cdot \text{Time per bit change}}{\text{Number of drilling hammers}} \quad (7)$$

여기서 암석 마모도의 함수로 표현된 비트 교환빈도는 그림 11로부터 구할 수 있으며, 1개 비트 교환에 필요한 시간은 1.5분으로 설정한다.

시공지체 시간인 시간손실(loss time)에는 천공기사의 미숙으로 인한 천공 정지, 여러번 천공해머를 작동했다가 정지할 때의 시간 손실, 해머간 천공작업의 동등하지 못한 분포로 인한 시간손실 등이 포함된다. 시간손실은 터널의 단면적, 천공속도와 천공기사 1명당 장비대수에 따라 달라진다. 시간손실은 천공시간 및 이동시간의 백분율로 계산된다(그림 12). 따라서 천공 작업동안 발생할 수 있는 시간손실은 식 (8)과 같이 계산된다.

$$t_{sa} = (\text{Drillingtime} + \text{Movingtime}) \cdot \text{Timeloss factor} \quad (8)$$

여기서 터널 단면적, 천공속도, 천공 점보의 종류, 천공기사당 천공 해머의 개수의 함수로 표현된 시간손실 보정계수는 그림 12로부터 구할 수 있다.

천공경이 45mm인 경우와 천공경이 64mm인 경우의 rod, shank adaptor 및 coupling의 기대 수명은 각각 다음의 표 3 및 표 4와 같이 가정할 수 있다(NTNU, 1995c).

Drill steel의 수명은 암석의 천공용이도 이외에 암반 파쇄도, 취급, 발파공 개수, 천공장비의 종류와 크기 등과 같은 여러 인자들의 영향을 받는다.

한편, 천공경이 45mm와 64mm인 천공 비트의 기대 수명은 암석의 마모도 또는 암석의 경도(VHNR)의 함수로서 그림 13과 같이 추정할 수 있다.

이상과 같이 고려된 제반 사항으로부터 터널 단면적, 천공용이도, 발파용이도에 의해 노무비를 제외한 총 공사비용은 천공경이 45mm와 64mm인 경우 각각 그림 14 및

표 3. 천공용이도에 따른 천공장비 부품의 기대 수명(천공경 45mm)

천공용이도	나뭇	보통	양호
Rod(18' drifter)	1,300m	2,000m	3,000m
Shank adaptor	2,400m	3,200m	5,000m
Coupling	2,200m	3,000m	4,500m

표 4. 천공용이도에 따른 천공장비 부품의 기대 수명(천공경 64mm)

천공용이도	나뭇	보통	양호
Rod T38	1,800m	2,500m	3,300m
Shank adaptor	2,000m	2,800m	4,000m
Coupling	2,200m	3,000m	4,500m

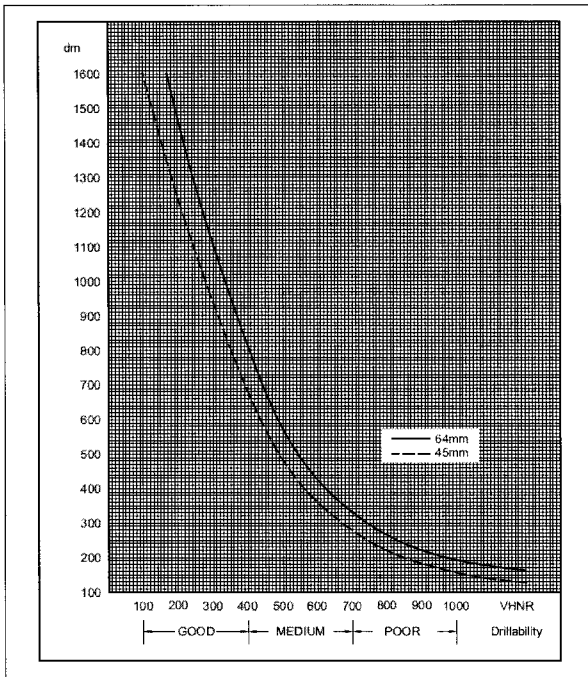


그림 13. 천공용이도 또는 VHNr의 함수로 표현된 천공 비트의 예측 수명(NTNU, 1995c)

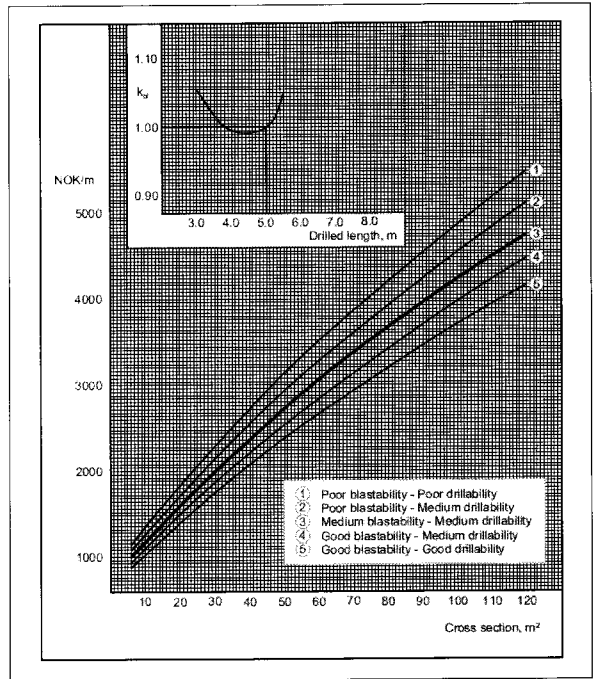


그림 14. 천공경이 45mm인 경우 노무비를 제외한 천공, 장약, 발파, 부석제거와 관련된 총 공사비용(NTNU, 1995c).

그림 15로부터 추정할 수 있다. 이때 추정도표들은 사용 화약으로서 다이너마이트를 5% 사용한 ANFO를 적용하고, round당 길이는 5.0m, 그리고 비전기식 뇌관을 사용할 경우에 국한된다.

3.2 Thuro-Spaun모델

암석의 압축시험결과로부터 계산된 파괴일과 실제 천공속도와의 상관관계를 살펴본 결과, 그림 16과 같이 파

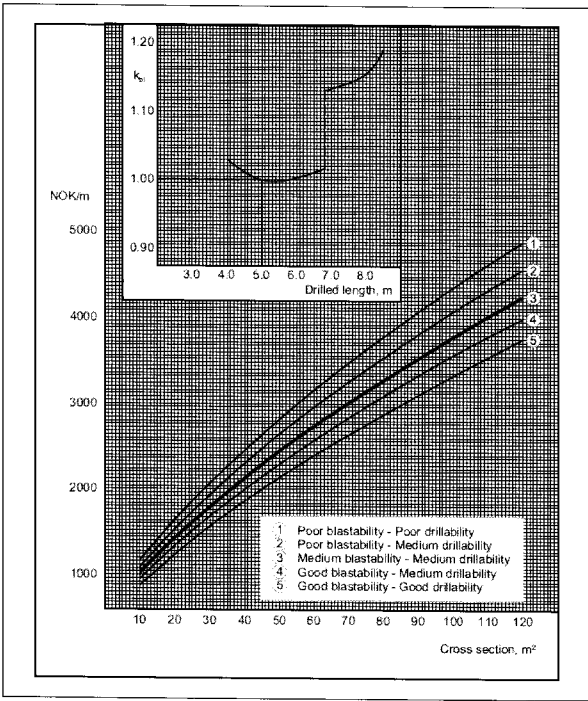


그림 15. 천공경이 64mm인 경우 노무비를 제외한 천공, 장약, 발파, 부서제거와 관련된 총 공사비용(NTNU, 1995c).

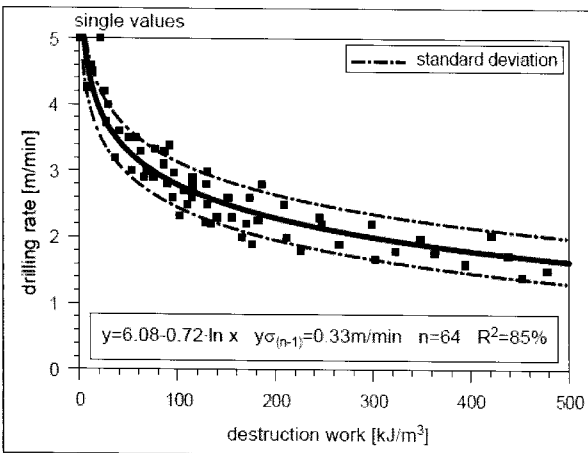


그림 16. 64개 현장자료에 의한 천공속도와 파괴일의 상관관계(Thuro & Spaun, 1996a)

괴일에 의해 실제 천공속도를 보다 신뢰적으로 추정할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 천공장비별로 제시

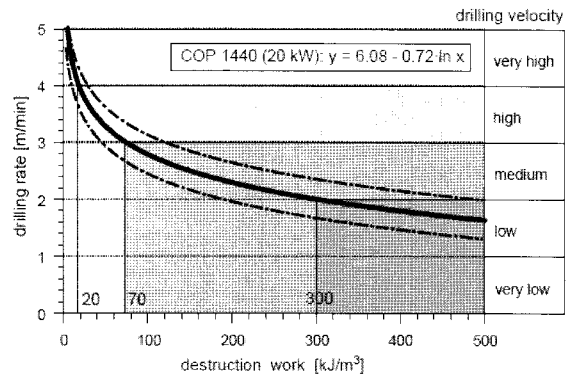
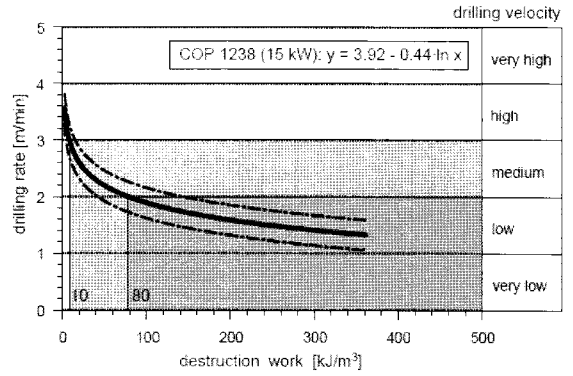


그림 17. COP 1238 및 COP 1440 천공 해머를 적용할 경우 파괴일에 의한 천공속도의 추정(Thuro & Spaun, 1996a)

한 결과는 그림 17과 같다.

또한 Thuro & Spaun(1996b)은 두 가지 종류의 천공 해머를 사용하는 경우에 대해서 천공속도와 비트 마모를 고려한 천공용이도를 그림 18과 같이 분류하였다. 여기서 Thuro & Spaun(1996b)은 현장 경험상, 천공속도가 높고(3~4m/min) 비트 마모가 적은(1,500~2,000m/bit)의 경우를 “fair”한 천공용이도로 분류하였다.

4. 천공비트의 수명 예측 방법

천공 비트의 마모수명을 예측하기 위해 현재까지 제시된 방법들을 정리하면 다음과 같다.

4.2 Bit Wear Index(BWI)

노르웨이 NTNU에서는 BWI에 의해 천공비트의 수명을 예측할 수 있는 것으로 언급되어 있지만, 실제로 BWI에 의해 비트 수명을 예측하기 위한 예측식이나 도표들이 전혀 제시되어 있지 않다. 이에 대해 원 제안자인 Bruland (1998)는 BWI를 천공비트의 수명을 예측하는데 적용하는데 있어 상당한 단점들이 내포되어 있기 때문에 비트 수명 예측시에는 BWI를 VHNR로 교체하였다고 언급하였다.

4.3 Cerchar Abrasiveness Index(CAI)

세르샤 마모지수(CAI)는 NTNU모델과 유사하게 천공 비트뿐만 아니라 TBM 커터의 마모수명을 예측하기 위해서 널리 적용되고 있는 방법이다(그림 19). CAI는 needle 이 평평하게 마모된 부분의 길이로서 계산된다. 하지만 Plinninger 등(2002)은 CAI와 비트 수명 사이의 뚜렷한 상관관계가 존재하지 않는 것으로 지적하였다(그림 20). 따라서 CAI는 천공 비트의 수명과 관련 비용을 추정하는데 있어 적합하지 않다고 지적하였다.

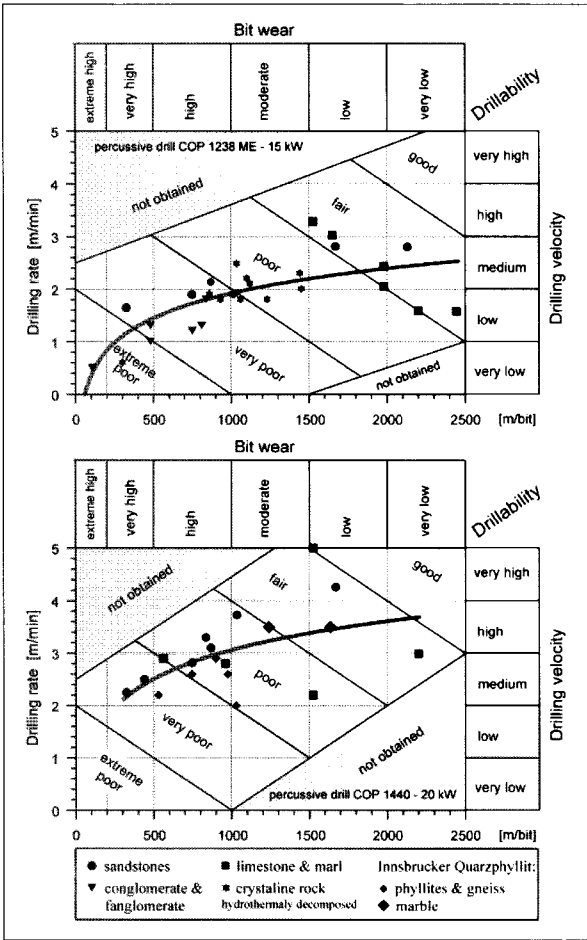


그림 18. 두 가지 종류의 천공장비(COP 1238-15 kW 및 COP 1440 -20kW)에 대한 천공용이도의 분류도표(Thuro & Spaun, 1996b)

4.1 현장 블록 천공시험

현장조건과 동일한 천공비트와 장비를 사용하는 실제 규모의 천공 시험은 천공 비트의 마모와 천공성능을 예측하기 위한 신뢰적인 방법이라고 할 수 있다. 특히 시험에 사용되는 블록 시편의 조건과 크기에 따라 많은 영향 인자들을 고려할 수 있다. 하지만 시험에 많은 비용과 시간이 소요되기 때문에 거의 수행되지 않는다(Plinninger 등, 2002).

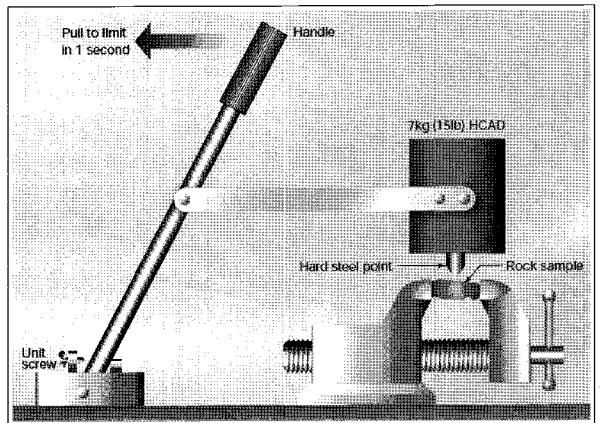


그림 19. 세르샤 마모시험

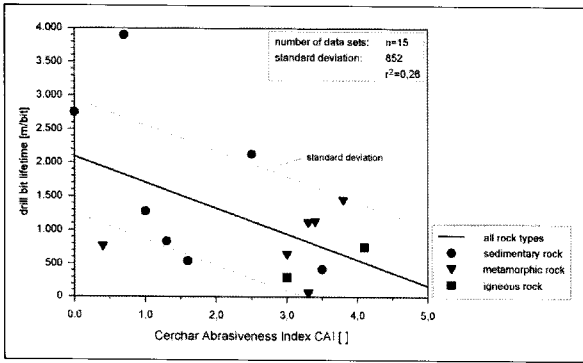


그림 20. CAI와 천공비트 수명 사이의 상관관계

4.4 AMC, VHNR 및 EQC

AMC(Abrasive Mineral Content), VHNR, EQC(Equivalent Quartz Content)는 암석 박편 분석결과를 활용한다는 점에서 유사한 지수들로 고려할 수 있다. 이들 지수들은 어떠한 광물의 함량에 해당 광물의 경도를 곱하는 방식으로 계산된다. 이들 지수들은 어떠한 경도값을 사용하는지에 따라 달라진다. AMC는 Mohs 경도를 사용하며, VHNR은 Vickers 압입경도를 사용하는 반면, EQC에서는 Rosiwal grinding 경도를 사용한다. 예를 들어 EQC는 다음의 식 (9)와 같이 계산된다. 특히 VHNR과 EQC는 각각 그림 13 및 그림 21과 같이 천공비트의 수명 예측에 적절한 것으로 나타났다(NTNU, 1995c; Thuro, 1997).

$$EQC = \sum_{i=1}^n A_i \cdot R_i \quad (9)$$

여기서 A는 광물 함량(%), R은 Rosiwal 마모도(%), 그리고 n은 광물 종류의 개수이다.

4.5 RAI(Rock Abrasivity Index)

RAI는 Plinninger 등(2002)이 제안한 지수로서 일반적인 시험방법들로부터 쉽게 측정할 수 있는 암석 특성에

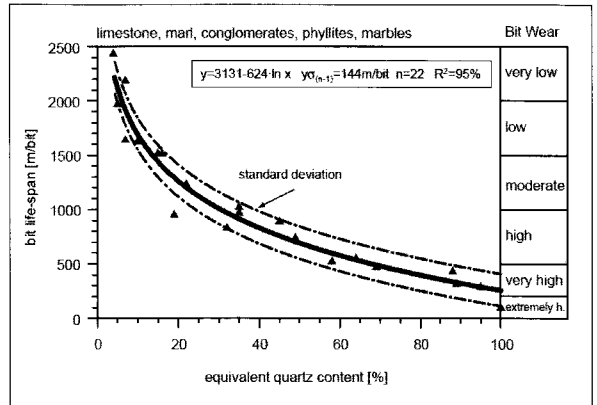


그림 21. EQC와 천공비트 수명 사이의 상관관계(Thuro, 1997)

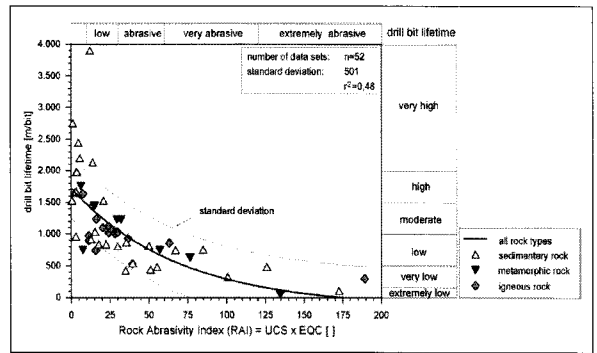


그림 22. RAI와 천공비트 수명 사이의 상관관계(Plinninger 등, 2002)

기반하고 있다. 특히 광물 스케일과 암석 스케일에 대한 고려를 위해 암석의 일축압축강도와 EQC를 곱한 값을 RAI로 정의하여 적용하였다. RAI로부터 천공비트의 수명을 예측하기 위한 도표는 그림 22와 같다.

5. 맺음말

본 고에서는 발파에 의한 터널 굴착시 전체 공정시간 가운데 상당한 비중을 차지하는 천공시간과 천공비용을 합리적으로 설계단계에서 사전에 예측하기 위한 제반 방법들을 검토하였다. 그 결과, 실험실 시험으로부터 얻어진 천공용이도 지수를 활용하여 천공 성능을 예측하는 방

법의 적용성이 높은 것으로 나타났다. 특히, 노르웨이 NTNU 모델과 독일의 Thuro-Spaun 모델이 그 대안이 될 수 있는 것으로 판단되었다.

NTNU 모델은 DRI를 기반으로 한 경험적 모델이지만, 천공시간과 천공비용을 체계적으로 예측할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 반면, Thuro-Spaun 모델은 천공비트에 의한 파괴메커니즘을 고려하여 암석의 변형·파괴 특성을 고려한 파괴일 개념을 제시하였고 파괴일에 의해 천공속도를 신뢰적으로 예측 가능한 것으로 나타났다. 또한 천공비트 수명에 대한 많은 예측 방법 가운데 VHNR, EQC 및 RAI의 적용성이 높을 것으로 사료되었다.

하지만 아직까지 국내에서는 설계단계 및 공사비·공사기간 산정시 이상과 같은 체계적인 사전 검토가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 장공발파를 통해 작업능력이 향상되면 단위 m당 공사비가 감소되기 때문에, 오히려 공사기간과 공사비용 측면에서 더욱 효율적이라고 할 수 있다. 따라서 천공 성능을 사전에 정확히 파악하여 경제적이고 효율적인 발파 설계·시공을 도모하기 위한 노력이 요구된다.

본 고에서는 천공용이도에 대해서만 집중적으로 검토를 하였지만, 암반조건에 따른 최적 발파설계를 위해 활용될 수 있는 발파용이도 지수에 대해서도 많은 관심이 필요하다고 하겠다. 국내에서도 외국의 발파용이도 지수를 설계단계에서 일부 적용하고 있으나, 이들 발파용이도 지수를 국내에 적용하기 위한 사전 검토 또는 국내 암반조건에 적합한 발파용이도 지수의 제안과 관련된 연구 노력이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 두준기(2007), *터널발파기술의 심발파파방법과 신공법*, 한국건설기술연구원 세미나자료.
2. Bell, F.G.(1992), *Engineering in Rock Masses*, pp. 385~387, Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd.
3. Bruland, A.(1998), *Project Report 13A-98 Hard Rock Tunnel Boring - Drillability Test Methods*, Department of Civil and Transport Engineering, NTNU, Trondheim, Norway.
4. Jimeno, C.L., Jimeno, E.L. and Carcedo, F.J.A.(1995), *Drilling and Blasting of Rocks*, Rotterdam, A.A.Balkema.
5. NTNU(1995), *Project Report 2A-95 TUNNELLING - Blast Design*, Department of Civil and Transport Engineering, NTNU, Trondheim, Norway.
6. NTNU(1995), *Project Report 2B-95 TUNNELLING - Prognosis for Drill and Blast*, Department of Civil and Transport Engineering, NTNU, Trondheim, Norway.
7. NTNU(1995), *Project Report 2C-95 TUNNELLING - Costs for Drill and Blast*, Department of Civil and Transport Engineering, NTNU, Trondheim, Norway.
8. Plinninger, R.J., Spaun, G. and Thuro, K.(2002), Prediction and classification of tool wear in drill and blast tunnelling, *Proc. of 9th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment*, Rooy & Jermy(eds.), pp. 2226~2236.
9. Thuro, K.(1997), Drillability prediction - geological influences in hard rock drill and blast tunnelling, *Geol. Rundsh.*, Vol. 86, pp. 426~438.
10. Thuro, K. and Spaun, G.(1996), Drillability in hard rock drill and blast tunnelling, *Felsbau*, Vol. 14, pp. 103~109
11. Thuro, K. and Spaun, G.(1996), Introducing the 'destruction work' as a new rock property of toughness referring to drillability in conventional drill-and blast tunnelling, *Proc. of Eurock '96*, Vol. 2, pp. 707~713, Barla, G.(ed.), Rotterdam, A.A.Balkema.