

## 시험시공을 통한 암석의 강도특성과 RBM의 순관입률과의 관계

### The Relationship between Rock Strength Characteristics and Net Penetration Rate of RBM by Pilot Test

이 석 원\*<sup>1</sup> Lee, Seok-Won

조 만 섭\*<sup>2</sup> Cho, Man-Sup

배 규 진\*<sup>3</sup> Bae, Gyu-Jin

#### Abstract

For the purpose of research study, a vertical shaft of 98m in length and 3.05m in diameter was constructed in the layer of conglomerate by using the Raise Boring Machine (RBM). In order to estimate the net penetration rate of the RBM, which can be used in the stage of design, the in-situ test results were analysed and correlated to data from the boring log in situ and laboratory testing. Its average net penetration rate is 2.233mm/rev while its average advance rate is 0.382m/hr, which is lower than that of TBM(Tunnel Boring Machine). It turns out that the net penetration rate increases with the increase of strength characteristics in rock mass (e.g., uniaxial compression strength, tensile strength, etc.). Similarly, the net penetration rate increases linearly with the hardness of rock mass. These results are contrary to the results of the previous construction sites where the TBM was generally used in the layer of hard rock. However, the trend obtained in this study is in accordance with the findings of Barton suggesting the relationship between  $Q_{TBM}$  and penetration rate in the layer of soft rock. Thus, the trend is valid in soft and/or weathered rocks.

#### 요 지

본 연구에서는 RBM공법을 이용하여 역암지반 내 연장 98m, 직경 3.05m의 수직구를 시험시공 하였다. 시험시공 결과를 토대로 설계 단계에서의 예상 관입률을 산정하기 위하여, 시추조사 및 실내실험 결과들과 RBM 가동인자들과의 상관성을 비교·검토하였다. 연구결과, 평균 순관입률은 2.233mm/rev으로 분석되어 국내의 TBM 시공실적의 평균 관입률에 비해 낮게 나타났고, 평균 굴진율도 TBM의 경우에 비해 다소 적은 0.382m/hr로 분석되었다. RBM 가동 설계인자와 순관입률과의 관계에서는 암석의 강도특성(일축압축강도, 인장강도, 반발경도 등)들이 증가할수록 순관입률이 증가하는 것으로 분석되었고, TBM에 관한 기존의 연구결과와 반대의 경향을 보이고 있다. 합경도와 순관입률과의 관계는  $Pe = 0.0039 \times H_T + 2.07$ 로서 합경도가 증가할수록 순관입률이 증가하고 있다. 이상과 같은 경향은 일반적으로 경암반에 시공되는 TBM의 연구결과와 반대의 경향을 보이고 있는데, Barton이 제시한  $Q_{TBM}$ 에 의한 예상 관입률의 경향에서도 볼 수 있듯이 본 연구의 연암 및 풍화암 지반에 대해서는 정상적인 결과인 것으로 판단된다.

**Keywords :** Net penetration rate, RBM, Rock strength, Shaft, Total hardness

\*1 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, KICT, slee@kict.re.kr)

\*2 정회원, (주)유니베 제1사업본부 터널팀 차장 (Member, Manager, Univec Corp.)

\*3 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 부장 (Member, Senior Research Fellow, KICT)

## 1. 서론

국내 철도의 터널내 속도향상 및 300km/hr 이상의 고속철도 등에서 발생하는 내부압력을 경감시키기 위한 방법으로 터널 내공단면적의 확대 또는 통풍공 수직구 설치 등의 방법을 고려할 수 있으나, 내공단면적의 확대는 공사비 및 열차의 노선 변경 등 제약이 많을 것으로 예상된다. 따라서, 한국건설기술연구원(2001)에서는 공기압 저감 및 환기효과를 극대화하기 위하여 철도터널에 통풍공 수직구를 설치할 것을 제안하였고, 이런 경우 열차의 운행지연과 기존 본선 철도터널의 안정성 등을 고려하여 기계화 수직구 굴착방식인 RBM(Raise Boring Machine)공법을 굴착공법(안)으로 제안하였다. 이 공법은 국내 석탄광산의 환기갱을 굴착하면서 많은 실적을 보유하고 있고, 도로터널의 pilot 수직구 굴착 등 최근 도로, 철도, 양수발전소 등에서 적용사례가 증가하는 추세이다(대한광업진흥공사, 1997). 그러나 RBM공법의 분석자료로서 굴진성능이나 굴착 기술력 등의 실증적인 분석이 체계적으로 실시된 바가 없기 때문에 설계시 인자들을 가정하거나 혹은 장비제작사에서 제공하는 외국의 경험치를 그대로 적용하고 있다.

따라서 본 연구에서는 RBM공법의 적용성 증대를 위한 실증적인 기술력 분석을 목적으로 강원도 도계읍 S 광업소에서 연장 98m의 RBM굴착 시험시공을 수행하였다. 시험시공과 함께 암석특성 분석을 위한 시추코어를 수직구의 안정성을 고려하여 10m 이격된 거리에서 심도별로 채취하였다. 시험시공 결과로부터 순관입률(net penetration rate)과 순굴진율(net advance rate)을 분석하였고, 시추조사 및 실내실험으로부터 암반의 역학적 특성을 산정하였다. 이러한 결과로부터 최종적으로 암석의 강도특성과 순관입률과의 상관관계를 분석함으로써 향후 RBM 설계시 반드시 필요한 굴진성능 분석을 위한 기초자료를 제시하였다.

## 2. 시험시공 개요 및 지질조건

본 연구의 시험시공은 2001년 8월 1일부터 11월 20일까지(112일간) 수행하였고, 시험시공 현장은 해발 445m의 강원도 삼척시 도계읍 상덕리에 위치한 S 광업소에서 수행하였다. 그림 1에는 시험시공 현장의 정면도를 나타내었다. 수직구의 거리는 약 100m이며, 순 RBM리밍 거리는 상부 작업갱과 하부 작업갱의 높이를 제외한 약 90m이다. 본 시험시공에서 사용된 RBM장비는 스웨

덴의 Atlas Copco사에서 제작한 83RM-DC type이며, 직경 3.05m의 수직구 단면을 굴착하기 위해서 총 22개의 커터를 장착하였다(그림 2 참조).

본 시험시공을 수행한 S 광업소 지역의 지질은 주라 백악기 신라통의 도계동층과 제4기 충적층으로 구성되어 있다. 도계동층은 경상계지층들 중에서 최상위에 속하는 지층으로서 도계동을 중심으로 서남부 일대에 폭

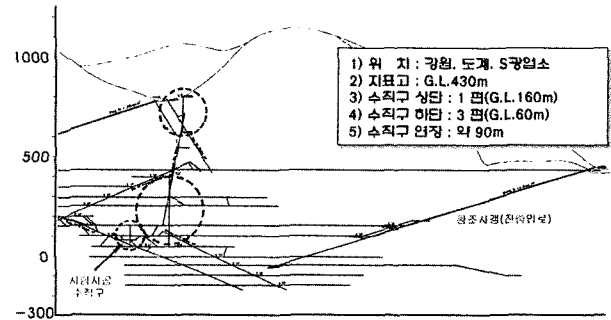
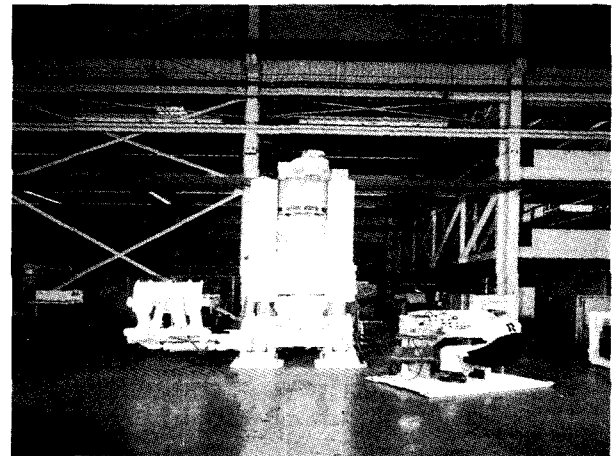
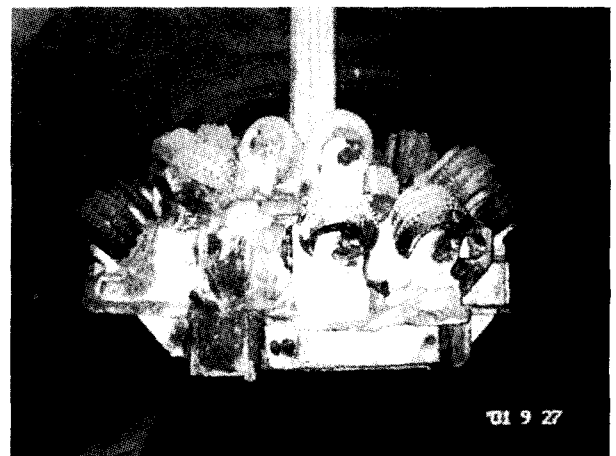


그림 1. 시험시공 현장주변 지형도



(a) RBM(83RM-DC type)



(b) reamer head(직경 3.05m, cutter 22개)

그림 2. 시험시공에 사용된 RBM 굴착장비 및 reamer head

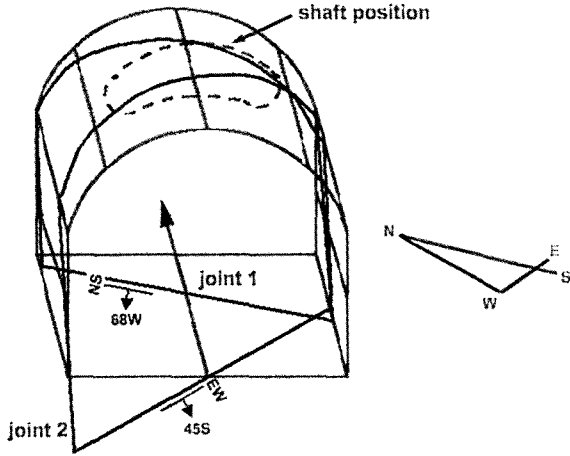


그림 3. 하부 작업갱 대표 절리군

넓게 분포하고 있으며, 본 층은 주로 역암, 사암, 셰일 및 이암 등으로 구성되어 있고 이들은 대체로 응탄질이다. 역암과 사암은 본 층의 하부에서 현저하며, 상부로 갈수록 셰일 및 이암층이 우세하며, 역암의 기질은 알코스질 또는 응탄질로 갈색 내지 담홍색으로 역(礫)의 입도가 높고 크기가 5cm이내의 것들이다. 본 역암층은 곳에 따라서 알코스 사암으로 전이되며, 도계동 부근에서의 본층 하부에는 역암층이 현저하게 발달해 있다.

본 시험시공 현장의 하부 작업갱에서 대표 절리군의 주향과 경사를 조사한 결과 2개의 절리군으로 나타났는데, 그림 3과 같이 하부 작업갱의 축방향(N60°E)을 각각 30°, 120°로 교차하여 가로지르고 있다. 이 절리군들의 경사는 작업갱 진행방향을 중심으로 상부-전방에서 하부-후방으로 누워있는 상태이며, 절리면의 상태는 충전물이 없는 비교적 신선한 것으로 조사되었다.

### 3. 수직구 기계화 굴착의 가동인자

#### 3.1 순관입률(net penetration rate, Pe)

순관입률(Pe)은 RBM의 커터헤드가 1회전하였을 때 암반을 뚫고 들어간 관입 깊이를 나타내며, mm/rev으로 표기된다. 설계 시 순관입률의 산정은 일반적으로 커터와 장비의 사양에 따라 이론적으로 구할 수 있으며, 후술한 바와 같이 여러 연구자들이 제안한 경험적 산정방식으로도 구할 수 있다. 본 연구의 시험시공 구간은 대표 암석시료의 일축압축강도 범위가 실내시험결과 대체적으로 300~600kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났으며, 수직구 굴착결과 평균 순관입률이 2.233mm/rev으로 분석되었다. 여

표 1. TBM 시공실적에 의한 순관입률(유원건설)

| 구 분 | 일축압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 순관입률(mm/rev) |
|-----|-------------------------------|--------------|
| 극경암 | 1,500 이상                      | 2.3~2.7      |
| 경 암 | 1,300 ~ 1,500                 | 2.7~3.2      |
| 보통암 | 1,000 ~ 1,300                 | 3.2~3.8      |
| 연 암 | 700 ~ 1,000                   | 3.8~4.2      |
| 풍화암 | 500 ~ 700                     | 4.2~4.7      |

기에서 순관입률은 1 stroke(1,520mm) 굴착시 나타난 RPM(rev/min)의 범위 중 평균값을 취하여 작업시간(min)과 평균 RPM(rev/min)의 곱으로 전체회전수를 산출한 후, 1 stroke인 1,520mm를 전체회전수로 나누어 각 stroke 당 평균 순관입률을 산출하였다. 총 시험시공길이 90m에는 약 60 strokes가 소요되었는데, 각 stroke 마다의 순관입률의 평균값이 평균 순관입률에 해당한다. 참고적으로, 본 시험시공의 분석결과와 비교하기 위하여 최근 시공된 국내 D터널의 수직구 굴착자료를 수집하여 분석하여 본 결과, 암석시료의 압축강도는 약 1,900kgf/cm<sup>2</sup>이며 평균 순관입률은 1.488mm/rev로 조사되었다.

표 1에는 국내 TBM(Tunnel Boring Machine) 설계시 적용한 암석강도별 순관입률을 나타내었는데, RBM에 관한 암석강도 등급에 따른 기존의 관입률 분석자료를 국내외 자료로부터 수집할 수 없었고, 암석의 파쇄 메카니즘과 추력 등의 기계적요소가 유사하기 때문에 비교 대상으로 선정하였다. 참고로, 본 시험시공에서 사용한 RBM의 reamer head에는 22개의 button type bit가 장착되어 있고, bit의 자전 및 공전운동과 함께 압쇄를 이용하여 암반을 굴착하게 된다. 그리고 버력들은 대부분 1~3cm 정도로서 bit의 압쇄에 의해 잘게 분쇄되어 있으며, 역과 홍점토가 섞여서 산출되었다.

분석결과, 본 시험시공 및 D터널의 사례가 대체로 낮은 순관입률의 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 기존의 장비제작사에서 제시한 실제 시공에서의 일반적인 RBM 굴착능력보다도 다소 적은 것으로서, 본 시험시공의 목적상 높은 굴착능력으로 시공하기보다는 지반의 연·경 정도에 가장 적합한 추력(thrust 또는 bit force)으로 과부하를 방지하는 조건으로 가동시킨 후 이때의 순수 굴착능력을 평가하였기 때문이다.

#### 3.2 순굴진율(net advance rate, Ar)

순굴진율(Ar)은 RBM의 가동율에 순관입률을 곱한 값으로 나타내며 실제 RBM의 굴진성능을 평가하는 지표

가 된다. 본 시험시공과 D터널에서는 실제 RBM이 작동하였던 작업시간과 1 stroke(1,520mm)를 토대로 순굴진율을 산출하였고, 단위 시간당 굴착장(m/hr)으로 분석하였다. 본 시험시공에서 구한 평균 굴진율은 0.382m/hr로 분석되었고, D터널에서 구한 평균 순굴진율은 0.281m/hr로 조사되었다. 참고로 국내 터널시공 사례에서 조사된 TBM의 굴진율은 0.13~0.83m/hr(평균 0.4m/hr)로서 RBM 굴착의 경우가 다소 낮은 경향을 보이고 있다. 비록 TBM 굴진율과 절대적 비교는 안되더라도 RBM이 다소 낮은 이유는 전술한 바와 같이 순수 굴착능력을 평가하기 위한 시험시공의 목적에 기인된다. 즉, 어느 정도의 암반강도가 유지되는 경우에는 굴착에 따른 지반의 안정성보다는 굴진능력 향상을 목적으로 하겠으나, 본 시험시공구간과 같이 낮은 강도의 암반에서는 굴착 수직구의 안정성 유지가 우선되며 따라서 순관입률과 순굴진율이 상대적으로 낮게 산정되었다.

#### 4. RBM 설계인자 선정을 위한 실내실험

##### 4.1 암석강도특성

본 연구에서는 RBM의 굴진능력을 분석하기 위하여 수직구의 심도별 일축압축강도( $S_c$ ), 압열인장강도( $S_t$ ), schmidt hammer 반발경도( $H_r$ ) 실험을 실시하였고, 각각 1개/m 단위로 총 90회의 실험을 수행하였다. 그림 4는 실제 RBM 굴착위치와 10m 이격된 곳에서의 NX시추코어를 역(礫)의 크기와 점토와 역의 비율에 따라 대표 암종별로 구분한 시험편이며, 본 시험시공 현장의 대표 암종별 압축강도 실내실험결과를 표 2에 나타내었다. 참고로 역의 크기에 대하여 제안된 분류기준이 없기 때

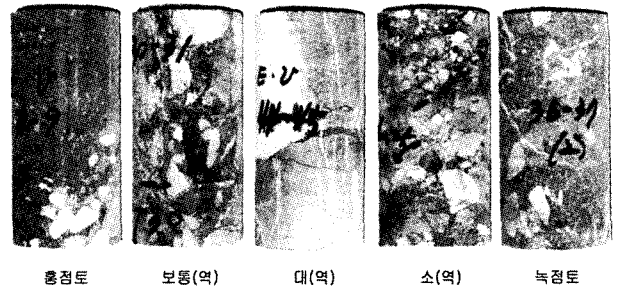


그림 4. 점토성분과 역의 크기에 따른 대표분류

문에 시험편의 길이를 고려하여 5cm 이상 > 5~2cm > 2cm로 각각 구분하였다.

세계적으로 2,000개 이상의 TBM 굴진현장에서 추출한 역암의 일반적인 일축압축강도 및 인장강도는 각각 1,130kgf/cm<sup>2</sup>, 119kgf/cm<sup>2</sup>로 보고되고 있으며(WIRTH Co. Ltd.), 본 연구에서 실험한 역암의 경우 일축압축강도가 대체적으로 300~600kgf/cm<sup>2</sup>로 나타나 다소 낮은 강도의 역암으로 밝혀졌다.

##### 4.2 합경도(total hardness, $H_T$ )

암석의 합경도(total hardness,  $H_T$ )는 schmidt hammer에 의한 반발경도(rebound hardness,  $H_r$ )와 마모경도(taber abrasion hardness,  $H_a$ )를 고려한 물성치로서 아래식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\text{Total hardness}(H_T) = H_r \times \sqrt{H_a} \quad (1)$$

마모경도는 Tarkoy(1982)가 제안한 마모실험으로부터 구할 수 있는데, taber abraser (modified taber abraser model 5130)를 이용하여 암석시험편을 일정한 속도로 회전시키면서 abraser wheel에 의해 마모되는 정도를 측정

표 2. 시추구간의 대표적인 강도특성 실험결과

| 심도(m) | 일축압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 종탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 포아송비 | 비고 <sup>1)</sup> |
|-------|-------------------------------|------------------------------|------|------------------|
| 2~3   | 569.83                        | 3.72E+05                     | 0.23 | 신선-80%-소         |
| 44~45 | 570.56                        | 1.54E+06                     | 0.05 | 신선-80%-대         |
| 46~47 | 334.75                        | 1.19E+05                     | 0.21 | 신선-20%-소         |
| 6~7   | 354.73                        | 3.17E+05                     | 0.25 | 신선-20%-대         |
| 64~65 | 326.74                        | 1.83E+05                     | 0.30 | 보통-50%-중         |
| 57~58 | 321.23                        | 2.47E+05                     | 0.21 | 녹점-80%-대         |
| 54~55 | 478.81                        | 2.02E+05                     | 0.19 | 녹점-20%-대         |
| 62~63 | 360.17                        | 3.14E+05                     | 0.08 | 녹점-20%-소         |
| 43~44 | 498.11                        | 1.69E+05                     | 0.20 | 홍점토              |

<sup>1)</sup> 비고에서 (녹점)-(80%)-(대)는 (cementation 물질)-(역의 함유율, %)-(역의 크기)를 의미

표 3. 시추구간의 대표적인 마모경도 실험결과

| 시험전(g) | 시험후(g) | 손실량(g) | 마모경도(Ha) | 반발경도(Hr) | 합경도(Hr) | 비고       |
|--------|--------|--------|----------|----------|---------|----------|
| 156.53 | 156.09 | 0.44   | 2.27     | 13.0     | 19.60   | 녹점-1     |
| 141.62 | 140.71 | 0.91   | 1.10     | 26.8     | 28.09   | 녹점-2     |
| 129.85 | 129.47 | 0.38   | 2.63     | 13.4     | 21.74   | 녹점-20-대  |
| 139.24 | 138.41 | 0.83   | 1.20     | 16.2     | 17.78   | 녹점-20-소  |
| 131.56 | 131.17 | 0.39   | 2.56     | 22.8     | 36.51   | 녹점-80-소  |
| 144.07 | 143.67 | 0.4    | 2.50     | 25.0     | 39.53   | 신-20-소-1 |
| 151.25 | 150.77 | 0.48   | 2.08     | 12.7     | 18.33   | 신-20-소-2 |
| 135.85 | 135.63 | 0.22   | 4.55     | 23.8     | 50.74   | 신-80-대-1 |
| 137.28 | 137.09 | 0.19   | 5.26     | 23.4     | 53.68   | 신-80-대-2 |
| 141.46 | 141.26 | 0.2    | 5.00     | 23.5     | 52.55   | 신-80-소-1 |
| 138.22 | 137.98 | 0.24   | 4.17     | 25.0     | 51.03   | 신-80-소-2 |
| 130.63 | 130.06 | 0.57   | 1.75     | 28.0     | 37.09   | 홍점-1     |
| 144.72 | 144.05 | 0.67   | 1.49     | 24.2     | 29.57   | 홍점-2     |
| 134.58 | 134.3  | 0.28   | 3.57     | 22.0     | 41.58   | 보통-50-중  |
| 151.18 | 150.76 | 0.42   | 2.38     | 24.5     | 37.80   | 녹점-80-대  |

한다(ASTM, 1996). 본 실험에서는 시추구간 중 대표적으로 역의 크기 및 점토와 역의 비율에 따라 표 3에 나타난 바와 같이 15개 대표시료에 대하여 실험을 수행하였다. 실험결과 본 현장에서의 합경도는 대략 17에서 54 정도의 범위에서 변화하며 이는 Tarkoy(1982)가 제시한 암종별 합경도 변화에서 퇴적암 중 “부서지기 쉬운 사암(friable sandstone)”에 해당하는 7~55의 범위와 유사하게 나타났다. 단, 역암에 대한 합경도 분포값은 Tarkoy(1982) 자료에서는 제시되지 않았다.

이와 같이 시추코어의 마모경도와 반발경도로부터 약 17~54까지의 합경도를 구할 수 있었는데, 이 결과는 일반적으로 제시되는 기계화 시공을 적용할 수 있는 암반들의 합경도에 비해 매우 낮은 범위에 속하고 있다. 특히 석영 함유량이 거의 없는 점토층 구간에서 가장 낮은 값을 보이고 있다. 그림 5에는 *taber* 마모실험을 수

행한 동일 심도에서의 일축압축강도 및 압열인장강도와 합경도의 관계를 그래프로 보여주고 있으며, 일반적인 문헌(Tarkoy, 1982)에서 알려져 있듯이 합경도가 증가할수록 강도 값들도 함께 증가하는 (+)의 상관관계를 보이고 있다.

### 5. RBM 굴착의 순관입률과 설계 인자들과의 관계

터널의 기계화 시공을 위한 RBM 굴착, TBM 굴착 및 Shield TBM 굴착 등을 위하여 설계단계에서 예상 순관입률 및 순굴진율을 추정하는 것은 시공기간 및 공사비 등의 산정을 위하여 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 절에서는 수직구의 RBM 굴착 시 예상되는 순관입률을 설계단계에서 보다 근사적으로 산출하기 위하여, 실제 시험시공에서 도출한 굴착능력과 시추조사결과로부터 구한 암반의 강도특성들과의 상관성을 규명하여 보았다.

#### 5.1 강도특성과 순관입률과의 상관성

Graham(1976)은 TBM의 순관입률에 영향을 주는 요소로 암석의 일축압축강도와 추력으로 판단하고, 미국 Robbins사의 현장경험을 토대로 일축압축강도가 1400kgf/cm<sup>2</sup>~2000kgf/cm<sup>2</sup>인 경암반에서 시공한 사례들을 대상으로 다음 식 (2)와 같이 제안하였다. 그러나 intact한 시료에 대한 일축압축강도는 현장특성이 반영되지 못하므로 순관입률을 추정하는데 부적절한 것으

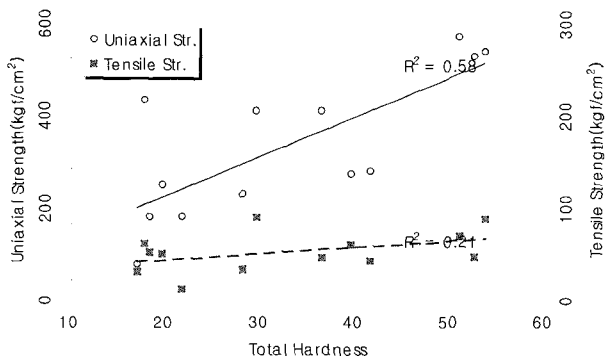


그림 5. 대표 암종에 대한 합경도와 일축압축강도 및 인장강도와의 관계

로 알려져 있다. 이와 함께 Hughes(1986)는 식 (3)과 같이 광산에서 수집한 TBM 시공자료를 토대로 일축압축강도와 추력, 디스크 직경을 이용한 순관입률 산정식을 제안하였다. Farmer와 Glossop(1980)의 반경험적 해석식에서는 TBM 굴진 시 chip이 암석의 인장파괴로부터 유발된다고 판단하여 압열인장실험에 의한 인장강도로 순관입률 예측을 연구하였고, 퇴적암반에서의 자료를 이용하여 다음 식 (4)와 같이 제안하였다. 인장강도는 비교적 연약한 암반에 대하여 적용할 수 있으며, 특히 암석의 취성거동과 이방성을 평가하는데 사용될 수 있다(U.S. Army, 1997).

이와 같이 식 (2)~(4)의 경험적 해석에 의한 순관입률 추정에서는 암석의 압축강도 및 인장강도가 증가할수록 순관입률이 감소하는 경향을 알 수 있다. 그러나 한국건설기술연구원(1993)은 국내외 TBM 시공자료들로부터 구한 일축압축강도 및 인장강도와 순관입률과의 관계에서 보통암에서 극경암에 속하는 지반조건에서도 이들의 상관성이 명확하게 나타나지 않은 것으로 제시하였다.

$$Pe = \frac{3940F_n}{\sigma_{cf}} \quad (2)$$

$$Pe = 1.667 \left( \frac{F_n}{\sigma_{cf}} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{2}{D} \right)^{0.6} \quad (3)$$

$$Pe = \frac{624F_n}{\sigma_{rf}} \quad (4)$$

여기서, Pe : 순관입률(mm/rev),

$F_n$  : bit force(kN),

$\sigma_{cf}$  : 일축압축강도(MPa),

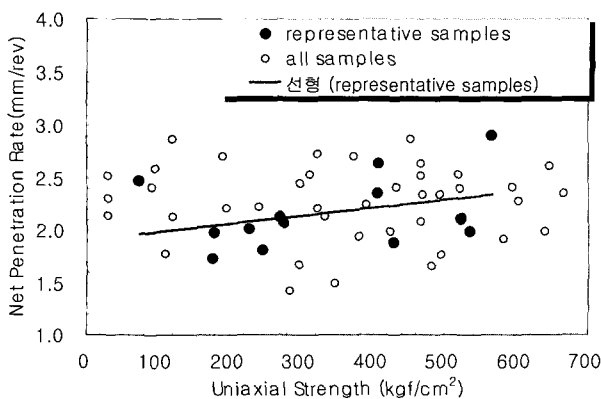
D : 디스크 커터의 직경(mm),

$\sigma_{rf}$  : 암석의 인장강도(MPa)

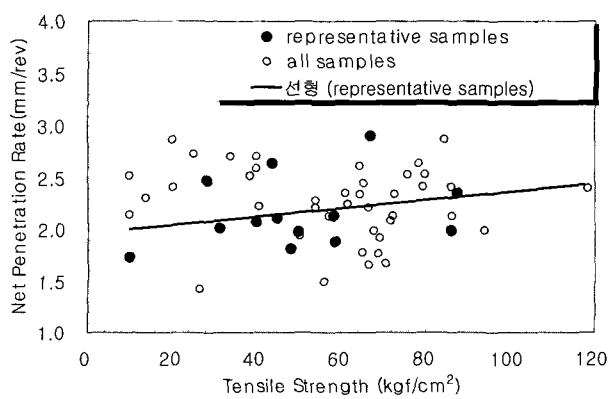
따라서 본 연구에서는 경험적 해석식들과 본 연구에서 수행한 시험시공에서의 경향을 상호 비교하기 위하여 일축압축강도와 인장강도에 대한 순관입률을 분석하였고, 그림 6의 (a), (b)에 각각 도시하였다.

그림 6에서 볼 수 있듯이 본 시험시공의 수직구 굴착 구간 전체를 대상으로 분석한 결과 전체적으로 암석의 강도특성과 순관입률은 큰 상관성이 없는 것으로 조사되었다. 시험시공 전구간을 대상(그림 6에서 모든 점)으로 분석한 경우에는 많은 자료에 의한 객관성은 증대될 수 있으나 자료의 분산이 매우 커져 일정한 관계를 찾을 수 없었다. 그러나 시험시공 대상지반이 역암이고 따라서 이의 특성을 고려하여 전체 시추구간 중 표 3에 나타난 바와 같이 역의 크기 및 점토와 역의 비율에 따라 구분한 대표지반의 15개 자료(그림 6에서 채워진 점)들만 도시한 결과, 통계학적으로 뚜렷한 상관관계를 보인다고 할 수는 없으나 그림 6의 대표시료 선형에서 보이는 바와 같이 암석의 강도가 증가할수록 순관입률이 다소 증가하는 경향을 보이고 있다.

이러한 대표지반에 대한 분석결과는 식 (2)~(4)의 TBM의 순관입률 산정식에 의한 결과와 상반되는 경향을 나타내고 있는데, 이러한 경향은 시공기술과 지반조건에 따른 원인으로 추정할 수 있다. 즉, 본 시험시공 현장의 일축압축강도 범위가 약 60kgf/cm<sup>2</sup> ~ 660kgf/cm<sup>2</sup>로서 연암층으로 구성되어 있기 때문에 전술한 바와 같이 장비보호 및 시공의 안정성을 위하여 암반이 연약해질수록 bit force와 RPM을 저하시켜 작업하였고, 이와 함께 순관입률도 동반하여 낮아지게 된 것으로 사료된다. 기존의 경험에 의하면 경암같은 조건에서는 RPM을



(a) 일축압축강도



(b) 인장강도

그림 6. 시험시공에서 구한 RBM굴착 시 순관입률과 강도특성과의 관계

낮추어 시공하고 연암지역의 경우는 RPM을 높여 다소 빠른 굴진율을 유도하는 것이 일반적이다.

### 5.2 반발경도와 순관입률과의 상관성

슈미트 헤머에 의한 암반의 반발경도 측정은 현장에서 강도특성을 용이하게 측정할 수 있는 방법으로서 일축압축강도와 상관성이 높다고 알려져 있다. Bamford (1984)는 반발경도, 전추진력(total propel thrust), NCB 콘 관입치, 전단저항각도들로부터 결정된 반발경도의 함수로서 관입률을 예측하기 위한 다중선형모델을 유도하였다. Tarkoy(1982)는 반발경도와 마모경도를 이용하여 합경도( $H_T$ )를 유도하였고, 합경도와 순관입률과의 관계를 현장에서 수집한 자료를 이용하여 제시하였다. 한국자원연구소(1999)는 M도수로터널에서의 TBM시공에 따른 순굴진거리와 현장 반발경도값을 상호 비교하였고, 순굴진거리(평균치)가 1.24m/hr에서 0.78m/hr로 저하된 구간에서 반발경도 값(평균치)이 54.9에서 62.0으로 증가하고 있음을 제시하였다. 이와 같이 경암을 주요대상으로 한 기존의 연구문헌에서는 반발경도가 증가함에 따라 순관입률이 증가함을 보이고 있다.

슈미트 헤머에 의한 반발경도는 순관입률을 예측하기 위해 여러 가지 인자들과 함께 복합적으로 사용되는 중요인자로서, 본 연구에서는 시추코어의 1 stroke (1,520mm)에 대하여 8회의 반발경도를 측정하였다. 여기서, 굴착능력 분석이 1 stroke을 단위로 이루어지기 때문에 1 stroke에 포함된 역의 크기 및 함유량, 풍화대 폭 등의 다양한 특성을 모두 반영할 수 있도록 거의 등간격으로 반발경도를 측정하였다.

그림 7은 본 시험시공 구간의 시추코어에 대한 반발경도와 순관입률과의 관계를 나타낸 그래프로서, 반발경도는 순관입률의 예측에 사용되는 중요인자임에도 불구하고 전반적으로 명확한 상관성이 없는 것으로 분석되었다. 그러나 강도특성과 순관입률과의 상관성에서 보인바와 같이 15개의 대표암종에 대한 실험결과(그림 7에서 채워진 점)들만 도시한 결과에서는 뚜렷한 상관관계를 갖는다고 단정할 수는 없으나, 대체적으로 반발경도가 증가할수록 순관입률이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 강도특성과 굴진성능과의 관계에서 기존의 연구문헌 결과와는 상이한 것으로 본 시험시공에서는 장비운영 상 안정성을 고려하여 암반이 연약할수록 bit force와 RPM을 저하시켜 작업하였고,

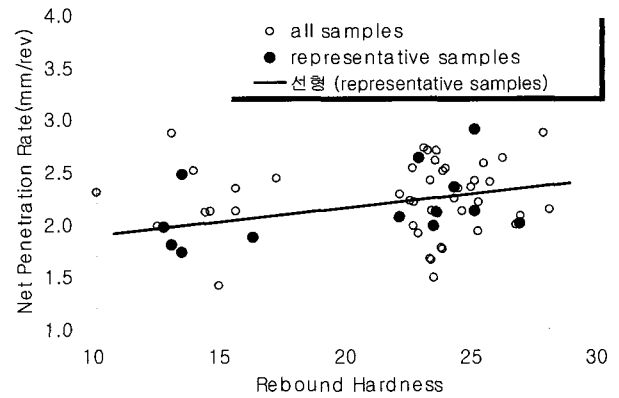


그림 7. 시험시공에서 구한 RBM굴착 시 순관입률과 반발경도와의 관계

이와 함께 순관입률도 동반하여 낮아지게 된 것으로 사료된다. 다른 하나의 관점은 본 시험시공 구간의 암반 강도가 기존의 연구문헌에서 결과를 도출한 암석강도보다 낮은 범위에 있고 따라서 실질적인 기존의 연구자료는 전무한 상태이다. 따라서 본 연구에서 얻어진 강도 및 반발경도와 순관입률과의 상관관계 결과가 기계화 시공 관점에서 매우 연약한 연암층에서의 새로운 결과가 될 수도 있을 것이라 판단된다. 이러한 추론사유는 최근의 연구자료와 함께 본 논문의 5.4절에서 서술하였다.

### 5.3 역(礫)의 크기와 순관입률과의 상관성

본 시험시공 현장의 수직구(약 90m) 전구간이 주로 홍점토에 의해 결합된 역암층으로 역의 구성비 및 크기, 그리고 cement 물질의 특성에 따라 강도특성이 상이할 것으로 판단되어 역의 구성비 및 크기에 따른 순관입률의 분석을 수행하였다. 그림 8에는 역의 분포비율에 따른 순관입률의 상관성을 그래프로 나타내었고, 역의 크

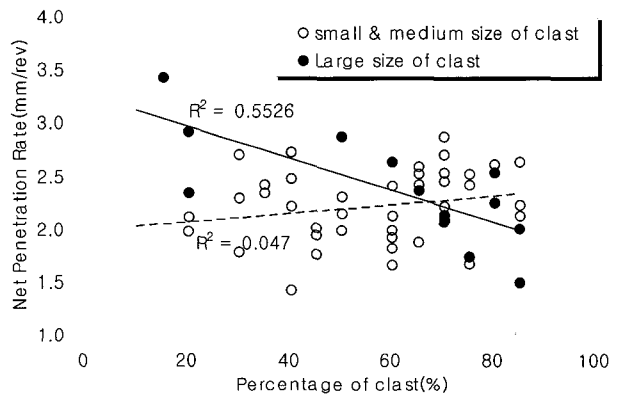


그림 8. RBM 리밍시 순관입률과 역(礫) 분포와의 관계

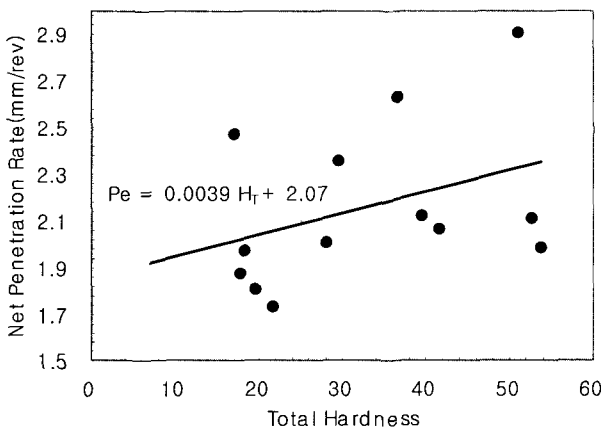
기가 (중)·(소)인 구간들에서는 역의 분포율이 클수록 순관입률이 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 역의 크기가 (대)인 구간들에서는 역의 분포율이 클수록 순관입률이 저하되는 경향을 나타내었다.

이러한 경향은 역암의 조직구성에 따른 영향으로 사료된다. 즉, 역의 크기가 (중)·(소)인 경우, cement 물질이 충분하게 분포하고 있기 때문에 역의 함유가 많을수록 강도가 증가하며, 따라서 그림 6에서 보인바와 같이 강도특성과 순관입률의 상관관계와 마찬가지로 (+) 상관성을 검증할 수 있었다. 그러나 역의 크기가 (대)이고, 함유량이 많은 구간에서는 결합효과(cementation effect)가 적어지기 때문에 일축압축강도 및 인장강도가 저하된다. 또한 편분포의 가능성이 크며, bit의 편마모 등에 기인하여 낮은 범위의 bit force 및 RPM에서 작업을 수행하게 되므로 순관입률이 저하되는 것으로 판단된다.

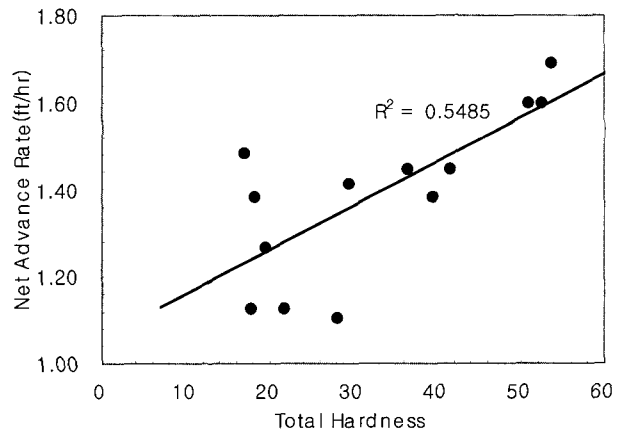
#### 5.4 합경도(H<sub>T</sub>)와 순관입률과의 상관성

암석의 합경도(H<sub>T</sub>)는 TBM의 관입률 및 커터 소모율과 상관성이 높은 것으로 알려져 있는데, 그림 9에는 합경도와 순관입률과의 관계 및 암반등급과 순관입률과의 관계를 나타내었다. 본 시험시공에서는 심도별 시추코어의 대표적인 특성을 고려하여 15개 시료에 대한 합경도(H<sub>T</sub>)를 구하였고, 그림 9(a) 및 (b)에 합경도와 해당 심도에서 구한 순관입률 및 순굴진율과의 관계를 각각 도시하였다.

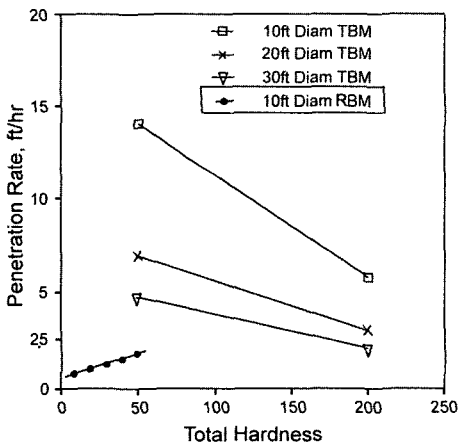
그림 9(a)에서 보는 바와 같이  $Pe = 0.0039 \times H_T + 2.07$ 로서 합경도가 증가할수록 순관입률이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이 결과는 그림 9(c)의 Tarkoy(1982)가 제시한 기존의 연구결과 경향과 반대의 결과를 나타내고 있는데, 이러한 원인으로는 본 시험시공에서 구한 합경도 값(그림 9(c)에서 ● 값)들이 약 10~50의 낮은 범위로서 그림 9(c)의 합경도 범위에 포함되지 않았으며, 낮은 범위



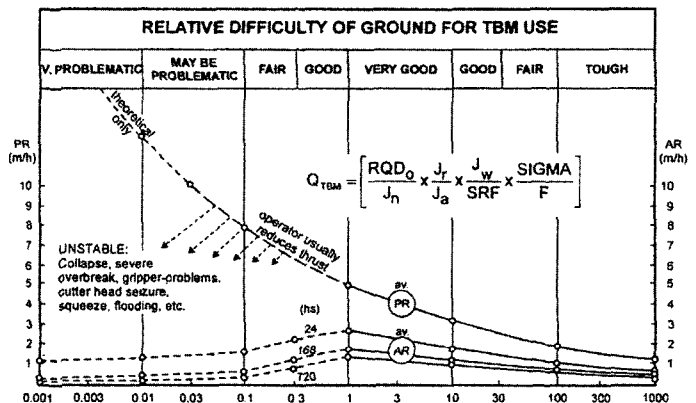
(a) 순관입률과 합경도와의 관계



(b) 순굴진율과 합경도와의 관계



(c) 순관입률과 합경도(Tarkoy, 1982)



(d) Q<sub>TBM</sub> 예상 관입률 및 굴진율(Barton, 2000)

그림 9. RBM 및 TBM굴착 시 Pe와 H<sub>T</sub>와의 관계



의 합경도 및 연암 이하의 암석에서는 bit force의 감소가 동반되기 때문에 순관입률도 감소되는 것으로 사료된다. 또한 그림 9(d)의 Barton(2000)이 제시한 바와 같이 Q-value가 낮은 구간에서는 지반의 강도가 양호해 질수록 순관입률과 순굴진율이 증가하는 경향과 일치하고 있다.

전술한 두가지 자료에서 볼 수 있듯이 강도특성에 따라 순관입률의 경향이 바뀔 수 있고, 따라서 본 시험시공에서 구한 강도특성, 반발경도, 및 합경도와 순관입률와의 관계에서 얻은 (+)상관성이 적합할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서, 낮은 암반강도 및 합경도에서의 순관입률에 대한 자료로서 Tarkoy(1982) 및 Barton(2000)이 제시한 결과와 더불어 RBM의 특성에 적합한 수정된 관계 도출을 위한 연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 RBM공법을 이용하여 연장 98m 수직구의 시험시공을 수행하였고, 시험시공에 따른 RBM 굴진성능을 분석하여 보았다. 또한 설계 단계에서의 예상 관입률을 산정하기 위하여 지반조사의 결과들을 토대로 가동인자들과의 상관성을 비교·검토하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 시험시공으로부터 RBM 굴진성능을 분석한 결과, 평균 순관입률은 2.233mm/rev으로 분석되어 국내외 TBM 시공실적의 평균 관입률에 비해 약 1/2배로 나타났고, 평균 굴진율도 TBM의 경우에 비해 다소 적은 0.382m/hr로 분석되었다. 이러한 경향은 통상적인 RBM장비의 굴착능력보다 낮은 것이며, 이는 본 시험시공 구간 지반의 강도가 연암 및 풍화암 범위로서 수직구 굴착면의 안정성 확보와 추력(thrust or bit force)의 증가에 따른 과부하를 방지하기 위한 작업자의 판단에 기인된 것으로 사료된다.
- (2) RBM 가동 설계인자와 관입률과의 관계에서는 암석의 강도특성(일축압축강도, 인장강도, 반발경도 등)들이 증가할수록 순관입률이 증가하는 것으로 분석되었고, TBM에 관한 기존의 연구결과와 반대의 경향을 보이고 있다. 또한 합경도와 순관입률과의 관계는  $Pe = 0.0039 \times H_T + 2.07$ 로서 합경도가 증가할수록 순관입률이 증가하고 있다.
- (3) 이와 같은 경향은 주로 경암반을 대상으로 한 기존의 TBM 연구결과와 상이한 것으로 나타났으나, 연암 및

풍화암 지반의 범위 내에서 나타나는 것으로서 Barton(2000)이 제시한  $Q_{TBM}$ 에 의한 예상 관입률의 경향과는 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 얻어진 결과를 토대로 연암지역에서의 기계화시공 굴진능력 평가를 위한 계속적인 연구를 통하여 보다 정량적인 연구결과 도출이 필요하다고 판단된다.

본 시험시공 구간의 경우 최초 예상과는 달리 시추조사결과 역암의 연암지반으로 구성되어 있어 실제 TBM과 같은 기계화시공에 다소 불리한 지역으로 나타났다. 그러나 RBM 공법은 특성상 TBM과는 달리 본 시험시공구간과 같은 연암지반에서 추후에도 적용될 가능성이 높으며, 본 연구 결과는 RBM공법을 이용한 굴진성능 평가를 최초로 시도한 것으로 추후 연구자료로 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

## 참고 문헌

1. 대한광업진흥공사(1997), 광업진흥공사 30년사 : 1967~1997, pp. 413-425.
2. 유원건설(주), TBM공법, 32p.
3. 한국건설기술연구원(1993), 지하생활공간개발 요소기술 연구-지반굴착기술분야(1), 정책연구보고서, pp.1-4 ~ 1-127.
4. 한국건설기술연구원(2001), 철도터널 내공단면적 저감을 위한 통풍공(Air-Shaft)의 공기역학 설계기술 및 수직구 굴착공법 개발, 99산학연연구개발사업 최종보고서, pp.546-563.
5. 한국자원연구소(1999), 밀양댐 도수로 터널의 암반물성 및 TBM 굴착 분석연구-최종보고서, pp.4-69.
6. ASTM(1996), "Standard Test Method for Abrasion Resistance of Dimension Stone by the Taber Abraser(1,2)", *ASTM Designation: C 1353-96*.
7. Bamford, W. E.(1984), "Rock Test Indices are being Successfully Correlated with Tunnel Boring Machine Performance", *Proc. 5th Australian Tunnelling Conference, Melbourne, Vol.2, pp.19-22*.
8. Barton, N.(2000), *TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock*, A. A. Balkema, Rotterdam, pp.3-99.
9. Farmer, I. W., and Glossop, N. H.(1980), "Mechanics of Disc Cutter Penetration", *Tunnels and Tunnelling*, pp.22-25.
10. Graham, P. C.(1976), "Rock Exploration for Machine Manufacturer in Exploration for Rock Engineering", *Proceedings, Symposium on exploration for rock engineering*, Johannesburg, Balkema, Vol.1, pp.173-180.
11. Hughes, H. M.(1986), "The Relative Cuttability of Coal Measures Rock", *Mining Science and Technology*, Vol.3, pp.95-109.
12. Tarkoy, P. J.(1982), "Practical Geotechnical and Engineering Properties for Tunnel-Boring Machine Performance Analysis and Prediction", *Transportation research record*, pp.62-77.
13. U.S. Army Corps(1997), *Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock*, Engineering Manual 1110-2-2901, C-1~C14.
14. WIRTH Co. Ltd., *Cutters and Drilling Tools for Tunnelling and Mining*, Catalog.

(접수일자 2003. 3. 18, 심사완료일 2003. 7. 4)