

# TBM 디스크 커터 마모 예측 모델 비교 연구

고태영<sup>1</sup> · 윤현진<sup>2</sup> · 손영진<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>정회원, SK 건설 Infra ENG'G 2팀, 과장

<sup>2</sup>비회원, SK 건설 TBM TF, 과장

<sup>3</sup>비회원, SK 건설 Infra ENG'G 2팀, 부장

## A comparative study on the TBM disc cutter wear prediction model

Tae Young Ko<sup>1</sup>, Hyun Jin Yoon<sup>2</sup>, Young Jin Son<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Manager, Infra ENG'G Team 2, SK Engineering & Construction

<sup>2</sup>Manager, TBM Task Force, SK Engineering & Construction

<sup>3</sup>Senior Manager, Infra ENG'G Team 2, SK Engineering & Construction

**ABSTRACT:** In this study TBM disc cutter prediction models including Gehring, CSM and NTNU models were investigated and the characteristics of the models were examined. The influence of penetration, uniaxial compressive strength and abrasiveness index on the models was analyzed. The life of disc cutter linearly increases with penetration per revolution and decreases with increasing uniaxial compressive strength of rocks. As the abrasiveness index, CAI, increases, the life of disc cutter in Gehring and CSM model decreases. On the contrary, the life of disc cutter life in NTNU model decreases with increasing CLI. Also, comparisons of predicted disc life were made between models using actual job site data.

**Keywords:** Disc cutter, Wear prediction, Gehring, CSM, NTNU

**초 록:** 본 연구에서는 Gehring, CSM, NTNU 모델을 이용한 디스크 커터 수명 예측 방법과 각 모델이 가지는 특징을 살펴보았다. 디스크 커터 수명에 크게 영향을 주는 요소인 관입깊이, 암석의 일축압축강도, 마모지수의 변화가 각각의 예측 모델들에 미치는 영향을 분석하였다. 디스크 커터 수명은 1회전당 관입깊이에 선형적으로 증가하였고, 일축압축강도의 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다. 마모지수인 CAI 값이 증가함에 따라 Gehring과 CSM 모델에서의 디스크 커터 수명은 감소하였으나, CLI 값이 증가할수록 NTNU 모델의 디스크 커터 수명은 증가하는 경향을 보였다. 그리고 실제 현장 자료를 이용하여 디스크 커터 수명을 상호 비교하였다.

**주요어:** 디스크 커터, 마모 예측, Gehring 모델, CSM 모델, NTNU 모델

## 1. 서론

TBM은 원형의 커터헤드에 디스크 커터나 비트 커터를 부착하고 회전을 하여 토사나 암반을 파내어 터널을 굴착하는 기계이다. 과거에는 발파 등을 이용한 재래식 터널공법(conventional tunneling method)에 의한 터널 굴착이 많았지만, 현재는 소음과 진동이 적고 주변 지반에 대한 손상을 최소화 하고 시공 중에

높은 안정성을 확보할 수 있는 장점을 가진 TBM에 의한 기계화 터널공법(mechanized tunneling method)을 이용한 터널 시공이 증가하는 추세를 보이고 있다. TBM을 이용하여 암반을 굴착할 때 디스크 커터는 TBM의 추력을 이용하여 암반을 압쇄하여 절삭한다. 이 때 디스크 커터는 자연적으로 마모가 발생하게 되고, 마모한계에 도달한 디스크 커터는 교체를 해야 한다. 마모가 되어 수명이 다한 디스크 커터를 계속 사용하게 되면 주변의 다른 디스크 커터들에 과도한 작용력을 유발시켜 마모를 촉진시키고, 커터헤드 전체에 대한 마모를 증가시켜 궁극적으로 TBM 굴착효율을 저하시키게 된다. 디스크 커터의 교체에 소요되

\*Corresponding author: Young Jin Son  
E-mail: sohnyjin@sk.com

Received October 10, 2014; Revised October 22, 2014;  
Accepted October 24, 2014

는 시간과 비용은 전체 공사기간 및 공사비에 큰 영향을 미치게 되므로 디스크 커터의 수명과 소요개수를 정확히 예측하는 것은 반드시 필요하다.

디스크 커터의 수명을 예측할 수 있는 디스크 마모에 관한 연구는 다른 TBM 관련 연구에 비해 그 수가 적고 많이 알려져 있지 않은 편이다. Gehring (1995)은 세르샤 마모지수 (Cerchar Abrasiveness Index, CAI)와 마모되는 디스크 커터의 질량과의 상관관계를 이용한 예측모델을 제안하였다. 미국 Colorado School of Mines의 CSM 모델 (Rostami and Ozdemir, 1993)도 세르샤 마모지수를 이용하여 커터 수명을 추정할 수 있으나, 자세한 과정과 내용을 공개하지 않고 있다. 하지만, Rostami et al. (2005)와 Frenzel (2011)의 연구 결과를 토대로 어느 정도의 추정은 가능하다. 노르웨이 의 Norwegian University of Science and Technology에서 개발된 NTNU 모델 (Bruland, 1998)은 커터 수명지수 (Cutter Life Index, CLI)와 디스크 커터의 기본 수명 시간의 상관관계를 이용한다. 이 밖에 Bieniawski et al. (2009)은 RME (Rock Mass Excavability)와 CAI를 이용한 모델을 제안하였고, Hassanpour et al. (2014)는 암석의 비커 경도지수 (Vicker's hardness number of rock, VHNR)와 일축압축강도를 이용한 모델을 제안하였다.

본 연구에서는 비교적 사용빈도가 높은 Gehring, CSM, 그리고 NTNU 모델을 이용한 디스크 커터 수명 예측 방법을 고찰하고, 각 모델이 가지는 특징을 살펴 보았다. 관입깊이, 암석의 일축압축강도 및 마모지수의 변화가 디스크 커터의 수명에 끼치는 영향을 분석하였다. 그리고, 실제 현장 자료를 이용하여 각각의 모델별 디스크 커터 수명을 비교하였다.

## 2. 디스크 커터 마모 예측 모델

### 2.1 Gehring 모델

Gehring (1995)은 CAI와 디스크 커터의 1 m 회전거

리 때 마모되는 질량과의 관계를 식 (1)과 같이 나타내었으며, 여기서 비 커터링 마모(specific cutter ring wear,  $v_s$ )는 mg/m의 단위이다. Maidl et al. (2008)은 식 (1)에서 사용된 보정계수 0.74가 현재 디스크 커터에서 사용되는 강철합금의 마모율보다 더 크다고 판단하여 0.65를 사용할 것을 제안하였으며, 본 연구에서는 보정계수 0.65를 사용하는 식을 Gehring 모델에 적용하였다.

$$v_s = 0.74 CAI^{1.93} \quad (1)$$

디스크 커터의 수명( $H_f$ )은 하나의 디스크 커터가 마모되어 교체될 때까지 굴착할 수 있는 부피로 식 (2)와 같다.

$$H_f = \frac{\Delta G \cdot p \cdot D^2}{4 \cdot \bar{D} \cdot v_s \cdot N} \quad [m^3/c] \quad (2)$$

여기서,  $\Delta G$  = 디스크 커터의 마모질량 [g]

$p$  = 커터헤드가 1회 회전했을 때 디스크 커터의 관입깊이 [mm]

$D$  = 커터헤드의 직경 [m]

$\bar{D}$  = 디스크 커터의 평균 회전 직경으로 약 0.6D

$N$  = 디스크 커터의 개수

이다.

17인치 디스크 커터의 반경 마모 허용치(radial wear allowance)는 중앙부(center) 커터의 경우 25 mm, 페이스(face) 커터 20 mm, 커터헤드의 가장 외곽에 설치되는 게이지(gage) 커터 13 mm이다 (The Robbins Company, 2005). 식 (2)는 커터헤드에 설치되는 디스크 커터의 평균에 대한 수명이므로, 반경 마모 허용치도 각각의 위치에 따른 디스크 커터 개수의 가중치를 고려한 평균값을 사용하는 것이 바람직하다. 예를 들어, 중앙부 커터가 8개, 페이스 커터가 27개, 게이지 커터가 8개라면, 가중 평균 반경 마모

허용치는 20 mm이다((8 × 25 mm + 27 × 20 mm + 8 × 13 mm) / 43 ≈ 20 mm). 17인치 디스크 커터가 20 mm 마모되었을 때의 마모 질량은 약 3,700 g이다 (Leitner, 2004).

디스크 커터의 마모는 커터헤드의 회전속도에도 영향을 받는다. 따라서 식 (2)는 커터헤드의 회전속도에 대한 보정을 해야한다. NTNU 모델은 식 (3)과 같은 보정식을 제안하고 있으며 이를 그대로 Gehring 모델에도 적용하였다.

$$H_{f,RPM} = H_f \frac{50}{D \cdot RPM} \text{ [m}^3/\text{c]} \quad (3)$$

여기서, RPM은 커터헤드의 분당 회전속도이다.

## 2.2 CSM 모델

CSM 모델에 의한 디스크 커터의 마모를 예측하는 방법은 공개되어 있지 않으나, Rostami et al. (2005)와 Frenzel (2011)의 연구 결과를 이용하여 추정할 수 있다.

Rostami et al. (2005)는 마모가 되어 교체될 때까지 디스크 커터가 회전하여 절삭할 수 있는 최대의 선형 거리(CL)를 식 (4)와 같이 제시하였다.

$$CL = \frac{2054}{CAI} \frac{D_c}{432} \text{ [km]} \quad (4)$$

여기서,  $D_c$  = 디스크 커터의 직경 [mm] 이다.

커터헤드가 한번 회전할 때 디스크 커터들의 평균 회전 거리( $\bar{s}_r$ )는 식 (5)와 같으며, 식 (4)와 (5)를 이용하면 디스크 커터가 교체될 때까지의 최대 회전수 ( $U$ )를 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{s}_r = \frac{0.6D\pi}{1000} \text{ [km]} \quad (5)$$

Table 1. Correction factor  $k_k$  and  $k_v$

|               | $k_k$ | $k_v$ |
|---------------|-------|-------|
| Center cutter | 0.56  | 1.0   |
| Face cutter   | 0.76  | 1.0   |
| Gage cutter   | 0.92  | 0.54  |

$$U_c = \frac{CL \cdot \bar{k}}{s_r} \quad (6)$$

여기서,  $\bar{k}$ 는 디스크 위치에 관련된 마모 보정계수로 Frenzel (2011)은 식 (7)과 같이 제안하였다.

$$\bar{k} = \sum g k_k k_v \quad (7)$$

여기서,  $g$ 는 중앙부 커터, 페이스 커터, 게이지 커터 개수에 대한 상대 가중치로  $\sum g = 1$  이며,  $k_k$ 와  $k_v$ 는 Table 1과 같다. 만약 디스크 커터 개수에 대한 정보가 없다면 보정계수  $\bar{k}$ 는 0.67을 사용한다.

CSM 모델에서의 디스크 커터의 수명( $H_f$ )은 식 (8)과 같다.

$$H_f = \frac{D^2\pi}{4} \cdot U_c \cdot \frac{p}{1000} \cdot \frac{2S}{D \cdot 1000} \text{ [m}^3/\text{c]} \quad (8)$$

여기서  $S$ 는 디스크 커터의 간격으로 mm 단위이다.  $D/2S$ 는 대략적으로 디스크 커터 개수  $N$ 과 같다.

식 (7)의 보정계수를 적용했을 경우 식 (8)에 추가적으로 커터헤드 회전속도에 관한 보정은 필요하지 않다.

## 2.3 NTNU 모델

NTNU 모델(Bruland, 1998)은 디스크 커터의 크기 별로 커터수명지수(Cutter Life Index, CLI)와 디스크 커터의 기본 수명 시간( $H_0$ )의 상관관계를 Fig. 1과 같이 나타내었다.

또한 커터헤드의 크기, 석영 함유량, 커터헤드 회전 속도, 디스크 커터의 개수에 관련한 보정계수를 적용

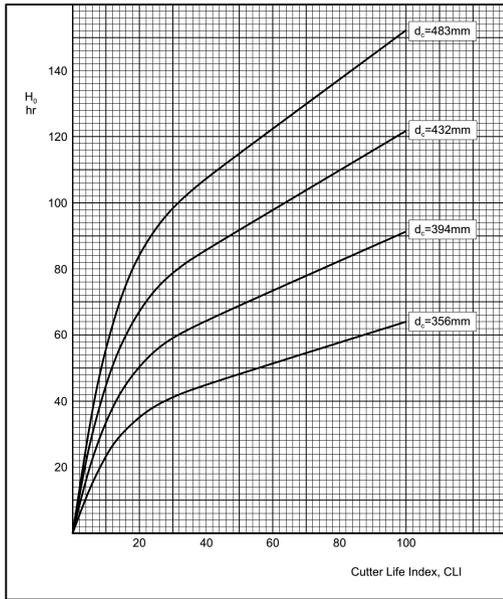


Fig. 1. Basic cutter ring life,  $H_0$

하여 디스크 커터의 수명( $H_f$ )을 식 (9)와 같이 구한다.

$$H_f = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{H_0 \cdot k_D \cdot k_Q \cdot k_{RPM} \cdot k_N}{N \cdot p \cdot RPM \cdot \frac{60}{1000}} \text{ [m}^3\text{/c]} \quad (9)$$

여기서,  $k_D$  = 커터헤드 크기에 대한 보정계수

$k_Q$  = 석영 함유량(Q[%])에 대한 보정계수

$k_{RPM}$  = 커터헤드 회전속도에 대한 보정계수

$k_N$  = 디스크 커터 개수에 대한 보정계수

### 2.4 마모 예측 모델들의 특징

공통적으로 디스크 커터의 수명은 관입깊이에 비례하고 디스크 커터의 개수에 반비례한다. Gehring 모델은 마모되는 질량을, CSM 모델은 최대 절삭 거리를, NTNU 모델은 기본 수명 시간을 이용하는 점이 각각의 모델의 차이점이다. Gehring 모델과 CSM 모델은 마모지수로 CAI를 이용한다. CAI 값이 클수록 디스크 커터의 마모는 증가하게 되고, 디스크 커터당 굴착

부피는 줄어들게 된다.

반면에 NTNU 모델은 마모지수로 CLI를 이용한다. CLI 값이 클수록 디스크 커터의 마모는 감소하게 되고, 디스크 커터당 굴착 부피는 늘어나게 된다.

수명시간과 최대 굴삭거리의 디스크 커터의 회전수와 관련이 있다. 식 (6)을 이용해서 디스크 커터의 최대 절삭거리로부터 회전수를 계산하고, 계산된 디스크 커터의 회전수를 커터헤드의 분당 회전수로 나누어 주게 되면 수명시간이 된다. 식 (9)에서 커터헤드 회전속도인 RPM을 곱해주는 이유가 수명시간을 회전수로 계산하기 위함이다. CSM 모델과 NTNU 모델은 같은 원리를 이용해서 디스크 커터 당 굴착부피를 계산한다고 볼 수 있다. 두 모델 모두 굴착면의 면적, 1회전당 관입깊이, 디스크 커터의 회전수, 디스크 커터의 개수를 이용하며, 교체 전까지의 디스크 커터의 회전수를 CAI를 이용해서 구하느냐 CLI를 이용해서 구하느냐의 차이가 있다.

### 3. 영향인자 분석

디스크 커터의 수명은 1회전당 관입깊이와 마모지수에 큰 영향을 받는다. 그리고 관입깊이는 암반의 강도와 디스크 커터에 가해지는 작용력과 관련이 있

Table 2. Input date for the influence analysis

| Parameters            |                            | Value (Ranges) |
|-----------------------|----------------------------|----------------|
| Rock mass properties  | Rock type                  | Gneiss         |
|                       | UCS [MPa]                  | 146 (80~200)   |
|                       | Quartz contents [%]        | 28.7           |
|                       | No. of joint set           | 2              |
|                       | No. of joint per meter     | 5              |
|                       | CAI                        | 4 (1.5~6)      |
|                       | CLI                        | 7.6 (4~30)     |
| TBM specification     | $\Delta G$ [g]             | 3700           |
|                       | Cutterhead diameter, D [m] | 6.3            |
|                       | No. of disc cutters        | 43             |
|                       | Disc cutter spacing [mm]   | 73             |
|                       | Cutterhead speed [rpm]     | 9              |
| Max. cutter load [kN] | 200                        |                |

다. 따라서 관입깊이와 마모지수, 암반의 강도를 일정한 범위 내에서 변화시켜서 이들이 디스크 커터의 수명에 주는 영향을 분석하였다. 분석에 사용된 지반 물성 및 TBM의 제원은 Table 2와 같다.

### 3.1 관입깊이의 영향

각 모델들의 디스크 커터 수명식들에서 알 수 있듯이 디스크 커터 수명은 1회전당 관입깊이에 선형적으로 비례한다. 즉 관입깊이가 2배 증가하면 디스크 커터 수명도 2배 증가하게 된다. Fig. 2에 관입깊이 증가에 따른 디스크 커터의 수명을 나타내었다. 관입 깊이는 5 mm부터 15 mm까지 증가시켰다.

Gehring과 CSM모델은 거의 유사한 결과를 보였으며, NTNU 모델에서의 관입깊이에 따른 디스크 커터의 수명 증가율이 다른 두 모델에 비해 약간 낮은 것으로 나타났다.

### 3.2 암반강도의 영향

본 연구에서 사용된 디스크 커터 수명식에는 암반 강도와 관련된 물성이 직접 변수로 사용되지 않지만 Gehring 모델과 CSM모델의 관입깊이를 예측하는 식들은 모두 압축강도의 함수로 되어있다(Gehring, 1995; Rostami and Ozdemir, 1993). 또한 NTNU 모델은 압축강도가 직접 변수로 되어 있지는 않지만 천공도

지수(Drill Rate Index, DRI)값이 압축강도와 관련이 있다(Bruland, 1998). 본 연구에서는 자세한 관입깊이 예측식을 소개하지 않지만 세 모델에서의 압축강도에 따른 관입깊이를 이용하여 압축강도와 디스크 커터의 수명의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 이 때 압축강도 이외의 다른 지반 물성값들은 변화시키지 않았고, 압축 강도는 80 MPa부터 200 MPa까지 변화시켰다. 디스크 커터에 작용하는 최대 작용력은 200 kN으로 설정하였다. 17인치 디스크는 1회전당 최대 관입깊이가 15 mm 이므로(Frenzel et al., 2008) 각각의 모델에서 추정된 관입깊이가 15 mm를 넘지 않도록 하였다.

세 모델 모두 디스크 커터의 수명은 일축압축강도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. CSM 모델이 압축강도의 변화에 가장 큰 디스크 커터 수명의 변화를 보였다. 다른 두 모델에 비해 NTNU 모델은 압축강도 변화에 대한 디스크 커터 수명에 크게 차이가 없는 것으로 나타나는데 이는 NTNU 모델이 다른 모델들과는 달리 압축강도가 직접 적용되는 변수가 아니고 DRI를 이용한 보정계수로 적용되고 그 크기의 변화가 크지 않기 때문이다. 압축강도가 120~140 MPa사이에서 각각 모델에서의 디스크 커터의 수명 차이가 최소로 나타났다.

### 3.3 마모지수의 영향

마모지수에 의한 영향을 알아보기 위해서 Gehring

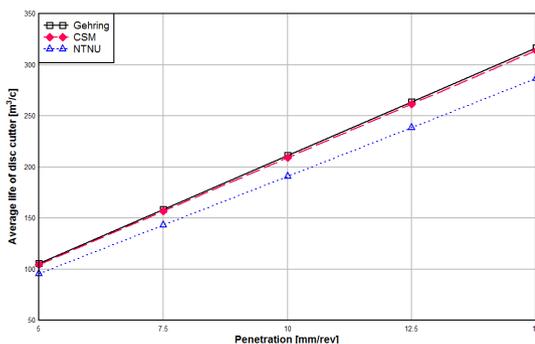


Fig. 2. Variation of average life of a disc cutter with respect to penetration

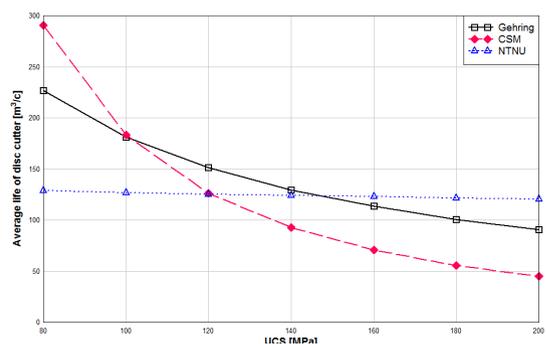


Fig. 3. Variation of average life of a disc cutter with respect to UCS

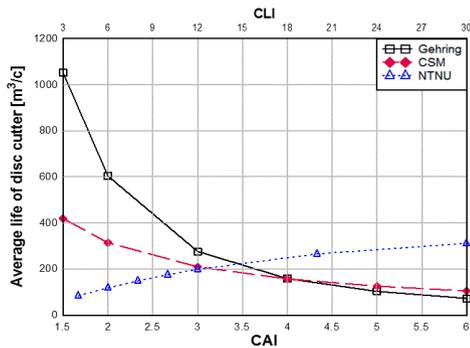


Fig. 4. Variation of average life of disc cutter with respect to abrasiveness index.

모델과 CSM 모델은 CAI 값을 1.5부터 6까지 변화하여 디스크 커터의 수명을 추정하였고, NTNU 모델은 CLI 값을 4부터 30까지 변화하여 적용하였다. 이 때 모두 관입깊이는 7.5 mm를 사용하였다. Fig. 4에 마모 지수의 변화에 따른 모델별 디스크 커터의 수명을 나타내었다. Fig. 4에서 CAI 값과 CLI 값은 서로 상관 관계를 나타내는 것은 아니며, 단순히 모델별 디스크 커터의 수명을 하나의 그래프에 도시한 것이다. 따라서 디스크 커터의 수명이 유사하다고 해서 그 때의 CAI 값과 CLI 값의 상관관계를 Fig. 4에서 유추하는 것은 바람직하지 않다.

CAI 값이 4 이상일 때 Gehring 모델과 CSM 모델에서의 디스크 커터 수명은 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 CAI 값이 4이하일 경우 두 모델의 예측된 디스크 커터 수명은 큰 차이를 보였다. 특히 Gehring 모델은 CAI가 4일 때 비해 1.5에서 디스크 커터의 수명이 6.6배 증가하는 것으로 나타났다. 이는 CSM 모델의 결과와 비교했을 때 2.5배 정도 더 큰 값이다. CLI를 사용한 NTNU 모델도 CLI 값이 12를 기준으로 해서 증가율이 변하는 경향을 보였다.

#### 4. 현장자료 적용을 통한 예측모델 분석

##### 4.1 적용 대상지역의 지질학적 정보 및 TBM 제원

본 연구에서는 북부 유럽의 TBM현장의 지질학적

Table 3. Geological information for the reference site

| Parameters                          | Values       |
|-------------------------------------|--------------|
| Rock Type                           | Gneiss       |
| Uniaxial compressive strength [MPa] | 145.9 ± 57.4 |
| Brazilian tensile strength [MPa]    | 13.4 ± 3.9   |
| Cerchar abrasiveness index, CAI     | 4 ± 0.8      |
| Cutter life index, CLI              | 7.6 ± 4.6    |
| Drill rate index, DRI               | 37.7 ± 6.8   |
| Porosity [%]                        | 2            |
| Quartz content [%]                  | 28.7 ± 14.6  |
| Number of joint set                 | 2            |
| Number of joint per meter           | 5            |

Table 4. Specification for TBM

| Parameters                              | Values  |
|---|---|
| Cutterhead diameter [m]                 | 6.3   |
| Disc cutter size [mm]                   | 432 (17 inch)   |
| Number of disc cutters                  | 43 (center cutters : 8, face cutters : 27, gage cutter : 8) |
| Max. individual cutter load [kN]        | 311.5   |
| Cutterhead speed [rpm]                  | 0~10.8 (normal operation : 9)                               |
| Average disc cutter spacing [mm]        | 73  |
| TBM weight [ton]                        | 250   |
| Normal operating cutterhead thrust [kN] | 12,756  |
| Max. cutterhead thrust [kN]             | 13,667  |

정보와 TBM 제원을 이용하여 예측 모델별 디스크 수명을 추정하고 비교하였다. Table 3과 4에 지질 및 지반 조사자료와 TBM 제원을 나타내었다. 두 자료 모두 서로 다른 현장의 자료임을 밝히는 바이다.

##### 4.2 모델별 디스크 커터 수명 추정

1회전당 관입깊이를 7.5 mm로 가정했을 때 각각의 모델이 추정한 디스크 커터 수명을 Table 5에 나타내었다. NTNU 모델에서 추정된 굴착부피는 143.2 m³/c로 가장 작았으며, 그 다음은 CSM 모델로 NTNU 모델보다 9.6% 더 큰 157.0 m³/c로 추정되었고, Gehring 모델이 가장 큰 158.3 m³/c로 추정되었는데 이는 NTNU

**Table 5.** Comparison of disc cutter life with penetration of 7.5 mm/rev

|                           | Gehring model | CSM model | NTNU model |
|---------------------------|---------------|-----------|------------|
| $H_f$ [m <sup>3</sup> /c] | 158.3         | 157.0     | 143.2      |
| $H_m$ [m/c]               | 5.1           | 5.0       | 4.6        |
| $H_h$ [hr/c]              | 1.25          | 1.24      | 1.13       |

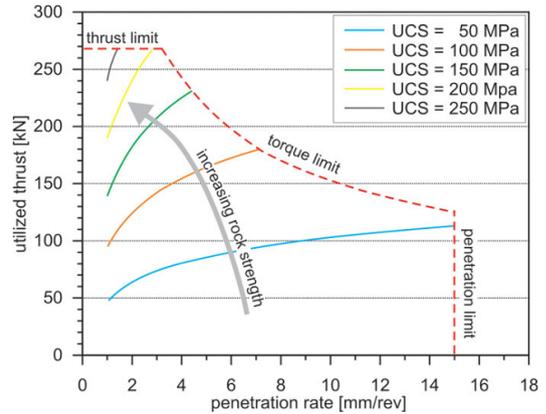
모델보다 10.5% 더 크다. 세 모델에서 추정된 디스크 커터 수명의 차이가 10% 내외이며 적용된 지반물성의 분산성을 고려해볼 때 서로 유사한 결과를 나타내었다고 볼 수 있다. 그러나 이것은 세 모델이 항상 유사한 결과를 도출한다는 의미는 아니며, 적용된 지반물성치가 우연히 세 모델의 결과 차이를 가장 최소화하는 값으로 된 것에 기인하는 것이다.

디스크 커터의 수명은 디스크 커터 당 굴착부피( $H_f$ ) 뿐만 아니라 굴착거리( $H_m$ ), 사용시간( $H_h$ )으로도 표현이 가능하며, 이렇게 굴착거리나 사용시간으로 표현하면 디스크 교체 시기를 예측하는 데 편리한 장점이 있다. 디스크 커터 당 굴착부피를 굴착 단면적으로 나누어 주면 디스크 커터 당 굴착거리로 표현이 가능하고, 이를 다시 회전당 관입깊이와 커터헤드의 회전 속도의 함수인 단위 관입률(net penetration ratio)으로 나누어주면 디스크 커터 당 사용시간으로 표현된다.

## 5. 토의 및 고찰

### 5.1 관입깊이

본 연구에서 디스크 커터의 수명은 하나의 디스크 커터가 마모되어 교체될 때까지 굴착할 수 있는 부피로, 일반적으로 1회전당 관입깊이에 비례하는 것으로 알려져 있다. 그러나, 암반의 강도 및 TBM 장비의 제원을 고려한 최적의 관입깊이로 굴착을 해야한다. 지나친 관입깊이의 증가는 TBM의 진동이 증가하고, 장비자체에 무리를 주어 downtime이 증가하게 하는 원인이 될 수도 있고, 또 디스크 커터의 교체 주기를 단축시킬 수도 있으므로, 오히려 전체적인 성능의 저



**Fig. 5.** Operating limits of a TBM with 17" disc cutters at different rock strengths (Frenzel et al., 2008)

하를 일으킬 수도 있기 때문이다. Fig. 5는 서로 다른 암반 강도에서 적용 가능한 추력과 관입깊이의 관계를 나타낸 것이다(Frenzel et al., 2008). 암반의 강도가 증가할수록 추력은 증가하게 되고, 관입깊이는 감소하게 된다. 암반의 강도가 작을 경우는 관입깊이는 디스크 커터가 허용하는 최대 관입깊이 이하로 운영되어야 하고, 암반의 강도가 아주 큰 경암의 경우에는 TBM이 낼 수 있는 최대 추력에 의해서 관입깊이는 제한되고, 보통 강도의 경우 관입깊이는 TBM의 토크 한계에 따라 제한되게 된다.

### 5.2 압축강도

이미 3.2장에서 언급한 바와 같이 NTNU 모델의 경우 압축강도는 관입깊이 추정에 직접 사용되는 변수가 아니고 DRI를 통해서 간접적으로 적용된다.

Palmström (1995)은 암석의 압축강도와 DRI의 상관관계를 식 (10)과 같이 제안하였다.

$$DRI = E \times \sigma_c^{-0.6} \quad (10)$$

여기서  $E$ 는 암석의 종류에 따른 보정계수로 압축강도 40 MPa 이상의 비편암 경암에서는 1000, 압축강도

30~150 MPa의 편압에서는 750, 압축강도 10~100 MPa의 퇴적암에서는 500이 적용된다.

본 연구에서도 식 (10)을 적용하여 NTNU 모델에서 압축강도변화에 따른 디스크 커터수명 예측을 계산하였다. NTNU 모델에서의 DRI에 대한 보정계수( $k_{DRI}$ )는 대략적으로  $k_{DRI} = 0.14\sqrt{DRI}$ 이고 식 (10)을 적용하게 되면  $k_{DRI} = 0.14E^{0.5} \times \sigma_c^{-0.3}$ 이 된다.  $E$ 를 750으로 가정하면 압축강도가 80 MPa일 때  $k_{DRI} = 1.03$ 이고 압축강도가 200 MPa일 때  $k_{DRI} = 0.78$ 로 관입깊이 변화에 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 NTNU 모델에서 압축강도변화에 대한 디스크 커터 수명이 크게 차이가 나지 않았다.

### 5.3 마모지수

Gehring 모델과 CSM 모델은 마모지수로 CAI를 이용하는데, Fig. 4에서 알 수 있듯이 CAI 값이 4보다 작은 경우에 각각의 모델들에서 예측하는 디스크 커터의 수명은 큰 차이를 보인다. 따라서 CAI 값이 4이하인 경우 적합한 모델의 선택이 중요하다.

현장 지반조사 보고서 및 실내시험 보고서를 토대로 CAI와 CLI의 분포를 Fig. 6과 7에 나타내었다. 총 269개의 CAI 결과가 사용되었으며 평균 4.0, 표준편차 0.8의 정규분포 형태를 나타낸다. CLI는 총 33개의 결과가 사용되었으며 평균 7.6, 표준편차는 4.6이고 로그정규 분포형태를 가진다. CAI 자료수에 비해 CLI 자료수가 작은 것은 CAI에 비해 CLI를 산정하는 시험방법이 더 복잡하고 시험을 할 수 있는 장소가 노르웨이의 SINTEF 등으로 제한적이기 때문이다. Table 6은 CAI 값에 따른 마모의 정도를 나타내는 분류표이다. CAI 값은 일반적으로 1~7사이로 나타나는 데 Fig. 6에 의하면 동일한 지역에서의 유사한 암종이지만 CAI 값은 2에서 6.5사이로 거의 전 범위에 걸쳐서 나타났고 CAI 값이 4이하를 차지하는 비율이 54.4%이므로 CSM 모델과 Gehring 모델의 예측 수명이 큰 차이를 보이는 경우가 자주 발생할 것으로 보인다.

다. 반면에 CLI 값은 일반적으로 1~100사이로 나타나고 암종에 따라서 100 이상의 값도 가질 수 있는데, Fig. 7에 의하면 CLI의 값은 3~33사이로 나타났고 CLI 값이 3~9사이를 차지하는 비율이 81.9%로 나타났다. 표준편차를 평균으로 나눈 변동계수(coefficient of variation)는 CAI 값의 경우 20.0%로 CLI 값의 경우 60.5%로 CLI의 분산성이 더 큰 것처럼 보일 수 있으나, CAI의 이론적 변화범위가 1~7이고 CLI

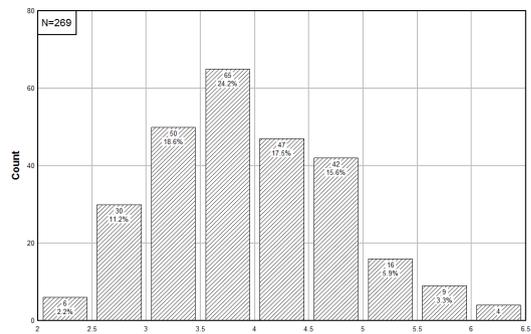


Fig. 6. Histogram of CAI

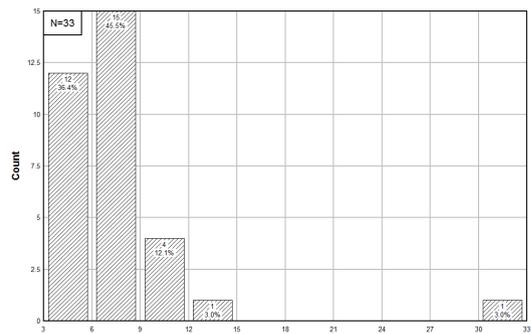


Fig. 7. Histogram of CLI

Table 6. Classification of CAI (ASTM, 2010)

| Category                    | CAI     |
|-----------------------------|---------|
| Not very abrasive           | 0.3~0.5 |
| Slightly abrasive           | 0.5~1.0 |
| Medium abrasive to abrasive | 1.0~2.0 |
| Very abrasive               | 2.0~4.0 |
| Extremely abrasive          | 4.0~6.0 |
| Quartzitic                  | 6.0~7.0 |

의 경우는 1~100인 것을 감안한다면 실제 분산성은 CAI 값이 더 크다고 볼 수 있다.

동일하거나 비슷한 암종에서 CAI 값의 분산성이 크게 나타나는 것은 CAI 값을 산정하는 세르샤 마모 시험법 자체에서 기인한 것으로 볼 수 있다. CAI 값은 70 N의 수직하중을 받는 핀을 암석면에 수직으로 접촉한 후 10 mm를 긁어서 발생된 핀의 마모된 면의 직경을 측정하여 산정한다. 일반적으로 암석을 구성하는 광물의 경도가 마모에 영향을 미치고, 높은 경도를 갖는 석영의 함량이 CAI에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 동일한 암종이라도 핀이 접촉하여 이동한 시편에 높은 경도를 갖는 광물이 없다면 CAI는 낮게 산정될 것이고, 반대로 높은 경도를 갖는 광물에 접촉해서 이동했다면 CAI는 높게 산정될 것이다.

이러한 마모지수들의 분산성을 고려한다면 대표값으로 어떤 값을 사용하느냐 하는 것이 디스크 커터 마모 예측에 중요한 영향을 미치게 된다. CLI를 마모지수로 사용하는 NTNU 모델의 경우 CLI의 대표값으로 단순한 산술평균보다는 비대칭분포의 특징을 나타낼 수 있는 최빈값을 쓰는 것이 보다 정확한 마모 예측을 할 수 있을 것이다. 또한 CAI를 마모지수로 사용하는 CSM이나 Gehring 모델의 경우 CAI의 분포가 대칭형으로 산술평균이 가장 적절한 대표값으로 보일 수 있으나, CAI 값이 4이하로 분포하는 경우도 빈번하게 발생할 수 있으며 이 때 CSM과 Gehring 모델의 예측 디스크 커터 수명이 큰 차이를 보일 수 있다는 점을 간과해서는 안될 것이다.

## 6. 결론

본 연구에서는 Gehring 모델, CSM 모델, 그리고 NTNU 모델을 이용한 디스크 커터 수명 예측 방법을 살펴보고, 관입깊이, 암석의 일축압축강도, 마모지수의 변화가 예측 모델들에 미치는 영향을 분석하였다 또한 실제 현장 자료를 이용하여 디스크 커터 수명을

상호 비교하였다. 본 연구에서 얻어진 주요한 결과들은 다음과 같다.

1. 디스크 커터 수명은 커터헤드의 1회전당 관입깊이에 선형적으로 비례한다. Gehring과 CSM모델은 거의 유사한 결과를 보였으며, NTNU 모델에서의 관입깊이에 따른 디스크 커터의 수명 증가율이 다른 두 모델에 비해 약간 낮은 것으로 나타났다.
2. 디스크 커터 수명은 일축압축강도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. CSM 모델이 압축강도의 변화에 가장 큰 디스크 커터 수명의 변화를 보였다. 다른 두 모델에 비해 NTNU 모델은 압축강도 변화에 대한 디스크 커터 수명이 크게 차이가 없는 것으로 나타나는데, 이는 NTNU 모델이 다른 모델들과는 달리 압축강도가 직접 적용되는 변수가 아니고 DRI를 이용한 보정계수로 적용되고 그 크기의 변화가 크지 않기 때문인 것으로 판단된다.
3. Gehring 모델과 CSM 모델은 마모지수로 CAI를 이용하는데, CAI 값이 클수록 디스크 커터의 수명은 감소하는 경향을 보였다. 특히, CAI 값이 4보다 작은 경우에 모델들에서 예측하는 디스크 커터의 수명은 큰 차이를 보이므로 CAI 값이 4이하인 경우 적합한 모델의 선택이 중요하다. 반면에 CLI를 마모지수로 사용한 NTNU 모델은 CLI 값이 클수록 디스크 커터의 수명이 증가하는 경향을 보였다. 또한 CLI 값이 12를 기준으로 해서 증가율이 변하는 경향을 보였다.
4. 현장 지반조사 보고서 및 실내시험 보고서를 분석한 결과, 대상지역 Gneiss의 CAI 값은 정규분포의 형태를 나타내었고, CLI 값은 로그 정규분포의 분산 형태를 나타내었다. NTNU 모델의 경우 CLI의 대표값으로 단순한 산술평균보다는 비대칭분포의 특징을 나타낼 수 있는 최빈값을 쓰는 것이 보다 정확한 마모 예측을 할 수 있을 것으로 판단된다.

## References

1. ASTM D7625-10. (2010), "Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR Method", ASTM International.
2. Bieniawski, Z.T., Celada, B., Galera, J.M., Tardáguila, I. (2009), "Prediction of cutter wear using RME", Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress 2009 & 35<sup>th</sup> ITA General Assembly, Budapest, Hungary.
3. Bruland, A. (1998), "Hard rock tunnel boring-advance rate and cutter wear", Vol. 3, Doctoral Thesis at NTNU p. 81.
4. Frenzel, C., Käsling, H., Thuro, K. (2008), "Factors influencing disc cutter wear", Geomechanik und Tunnelbau, Vol. 1, No. 1, pp. 55-60.
5. Frenzel, C. (2011), "Disc cutter wear phenomenology and their implications on disc cutter consumption for TBM", Proceedings of 45<sup>th</sup> US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium, San Francisco, U.S.A.
6. Gehring, K. (1995), "Leistungs-und verschleissprognosen im maschinellen tunnelbau", Felsbau, Vol. 13, No. 6, pp. 439-448.
7. Hassanpour, J., Rostami, J., Tarigh Azali, S., Zhao, J. (2014), "Introduction of an empirical TBM cutter wear prediction model for pyroclastic and mafic igneous rocks; a case history of Karaj water conveyance tunnel, Iran", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 43, pp. 222-231.
8. Leitner, W. (2004), "Baubetriebliche modellierung der prozesse maschineller tunnelvortriebe im festgestein: von der Penetration zur vortriebsgeschwindigkeit", p. 232.
9. Maidl, B., Schmid, L., Ritz, R., Herrenknecht, M. (2008), "Hardrock tunnel boring machines", Ernst & Sohn, p. 356.
10. Palmström, A. (1995), "RMi - a rock mass characterization system for rock engineering purposes", PhD thesis, Oslo University, Norway.
11. Rostami, J., Ozdemir, L., Bruland, A., Daul, F. (2005), "Review of issues related to cerchar abrasivity testing and their implications on investigations and cutter cost estimates", Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), Seattle, U.S.A., pp. 738-751.
12. Rostami, J., Ozdemir, L. (1993), "A new model for performance prediction of hard rock TBMs", Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), Boston, U.S.A., pp. 793-809.
13. The Robbins Company (2005), "Service Manual -Model 1812-299-2", U.S.A.