

## TBM 굴진성능 예측을 위한 모델링

이석원<sup>1)\*</sup>, 최순욱<sup>2)</sup>

### Modelling for TBM Performance Prediction

Seok-Won Lee and Soon-Wook Choi

**Abstract** Modelling for performance prediction of mechanical excavation is discussed in this paper. Two of the most successful performance prediction models, namely theoretical based CSM model and empirical based NTH model, are discussed and compared. The basic principles of rock cutting with disc cutters, especially Constant Cross Section cutters, are discussed and a theoretical model developed is introduced to provide an estimate of disc cutting forces as a function of rock properties and the cutting geometry. General modelling logic for the performance prediction of mechanical excavation is introduced. CSM computer model developed and currently used at the Earth Mechanics Institute(EMI) of the Colorado School of Mines is discussed. Example of input and output of this model is illustrated for the typical operation by Tunnel Boring Machine(TBM).

**KeyWords** Performance prediction, Tunnel boring machine, Linear cutting machine, Mechanical excavation

**초 록** 본 논문에서는 터널 및 지하공간의 기계화 시공에 있어서 굴진성능을 예측하는 모델링 기법을 고찰하였다. 첫 번째로 세계적으로 가장 잘 알려져 있는 두 가지 모델, 즉 이론적 접근을 기본으로 하고 있는 CSM 모델과 경험적 접근을 기본으로 하고 있는 NTH 모델의 비교를 수행하였다. 두 번째로는, 특별히 Constant Cross Section 커터를 사용하는 경우의 암석 굴삭 원리를 알아보고, 이 원리를 기본으로 하는 이론적 모델을 전개하여 암석 특성과 커터 제원만으로 유도되는 절삭력을 구하는 관계식을 고찰하였다. 세 번째로는 기계화 시공에 있어서 굴진성능을 예측하기 위한 일반적인 모델링 기법을 제시하였다. 마지막으로, 미국 Colorado School of Mines의 Earth Mechanics Institute(EMI)에서 개발한 CSM 컴퓨터 모델을 소개하고, 이 모델을 TBM 설계에 적용한 사례를 제시하였다.

**핵심어** 굴진성능, Tunnel boring machine, 선형굴삭시험기, 기계화 시공

## 1. 서 론

TBM(Tunnel Boring Machine)과 Shield TBM은 토목사업과 광산에서 지하 공간 및 터널을 건설하는데 많이 사용되고 있는 기계화 장비들이다. 최근 이러한 기계화 장비는 여러 방면에서 급속히 개발되고 있다. 선진 외국과 같이 우리나라에서도 통진구·전력구 터널을 비롯하여 최근 분당선 하저터널에 이르기까지 기계화 시공이 증가 추세를 보이고 있다. 이러한 기계화 시공의 설계단계에서 우선적으로 수행되는 것이 굴진을 산정, 커터 선정, 및 면판 디자인 등 최저의 비용으로 최고의 굴진성능(performance)을 얻기 위한 기계의 조합

을 들 수 있다. 일반적으로 굴삭 성능을 지배하는 인자들은 암석특성, 암반특성, 커터 종류, 커터 형상, 굴삭기의 기계적 사양, 및 운영상 요소 등으로 대별될 수 있다.

최근 기계적 발전에도 불구하고 암반의 복잡성으로 인하여 이제까지 굴삭과정을 정확히 이해하는데 많은 어려움이 있는 것이 사실이다. 이러한 연유로 아직까지 실제 현장에서 굴삭에 절대적으로 영향을 미치는 인자에 대한 정확한 규명이 이루어지지 못하고 있다. 이러한 문제를 해결하고자 몇몇의 연구자들이 굴진성능을 예측하고자하는 연구를 수행하여 각각의 예측 모델을 제시하고 있다. 이러한 모델의 접근은 크게 개별 커터의 성능에 관점을 두고 있는 이론적 모델과 전체 TBM의 성능에 관점을 둔 경험적 모델로 나누어진다. 이러한 두 가지 접근의 대표적 모델로 이론적 접근을 수행한 미국의 Colorado School of Mines의 CSM 모델을 들 수 있고, 경험적 접근은 노르웨이의 Norwegian

<sup>1)</sup> 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원

<sup>2)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원

\*교신저자(Corresponding Author): slee@kict.re.kr

접수일: 2003년 12월 18일

심사 완료일: 2003년 12월 23일

Institute of Technology에서 개발한 NTH 모델(Listrud, 1988; NTH, 1995; Bruland et al., 1985)을 들 수 있다.

CSM 모델은 본 논고의 주요 대상으로 뒷부분에서 자세히 소개할 것이다. NTH 모델은 암석특성, 지반조건, 기계요소와 측정된 굴진성능과의 경험적인 관계식 또는 그래프로 구성되어 있다. 다시 말하면, 기계장비의 전체 굴진성능을 각각의 설계요소들과 경험적인 관계로 연결하여 설계하고자 하는 대상에 적용하는 방법을 말한다. 이러한 경험적인 방법으로 추론된 모델은 NTH 모델이외에 Total Hardness method(Tarkoy, 1975)와 Nelson's method(Nelson et al., 1985)를 들 수 있다. 이러한 두 가지 모델에 있어서 사용되는 입력 변수와 최종적으로 산출되는 결과를 비교하면 Table 1과 같다.

이석원 등(2003)은 앞에서 제시한 Total Hardness 방법을 이용하여 국내 기계화 시공의 굴진성능을 산정하는 방법을 검토하였으며, 본 논고를 통하여 CSM 모델의 적정성을 검토하여 추후 개선·보완하고자 한다. 이를 위하여 현재 여러 가지 기술자료를 축적하여 LCM (Linear Cutting Machine) 장비를 제작하고 있으며 장비 완성 후 우리나라에 적합한 굴진성능 예측 모델을

제시하고자 한다. 본 논고에서는 미국에서 개발된 CSM 모델을 중심으로 TBM 굴진성능 예측에 관한 내용을 기술하고자 한다.

## 2. CSM 모델에서의 굴삭 이론

TBM과 같은 기계화 시공이 도입되면서 현재까지 세계적으로 많은 굴삭 이론들이 연구되었다. 이렇듯 암석과 커터사이의 상호 관계가 굴삭의 가장 중요한 요소임에도 불구하고 커터에 의한 암석의 파괴 메카니즘, 즉 파괴형상에 대한 논란은 끝임 없이 이루어지고 있다. 예를 들어, 전단 파괴(shear failure)에 근거를 둔 최초 CSM 모델, 그리고 두 커터 사이 암석의 bending에 의하여 chip이 형성된다는 스웨덴 모델(Lindqvist, 1982)을 들 수 있다. 본 논고에서는 이러한 여러 가지 이론 중에서 CSM 모델에 적용된 이론을 근거로 서술하고자 한다.

TBM 굴진 성능을 예측하기 위한 새로운 CSM 모델은 지난 25년간 EMI(Earth Mechanics Institute) 연구실에서 개발되었다. 첫 연구는 한 개의 커터가 다른 커

Table 1. Input and output of the two models

	CSM 모델		NTH 모델	
	Parameter	Units	Parameter	Units
Input	Cutter Radius	in	Fracturing	Classes(0-IV)
	Tip Width	in	Brittleness	S20 Index
	Spacing	in	Drillability	Sievers' J Index
	Penetration	in	Abrasiveness	AV Index
	Rock UCS	psi	Porosity	%
	Tensile Strength	psi	Cutter Diameter	mm
	Existing TBM Diameter	ft	Cutter Load	kN
	RPM	rev/min	Spacing	mm
	No. of Cutters	#	Machine's Dia.	m
	Thrust	lbs		
	Torque	ft-lbs		
	Power	hp		
	Output	Cutting Forces	lbs	No. of Cutters
Normal-Thrust		lbs	RPM	rev/min
Rolling/Torque		lbs/ft-lbs	Thrust	Ton
Power		hp	Power	kW
Basic Penetration		in/rev	Basic Penetration	mm/rev
Rate of Penet.		ft/hr	Rate of Penet.	m/hr
Head Balance		force/moments	Torque	kN-m
Machine Spec.'s Perform. Curve		th, tq, hp, etc.	Utilization	%
Utilization		Graph(ROP vs th, tq vs th)	Advance Rate	m/day
Advance Rate		%	Cutter Life	hr/cutter
Advance Rate		ft/day		
Cutter Life		hr/cutter		

터와 연관성 없이 암반에 관입되면서 발생하는 균열 현상을 이론적으로 접근하면서 이루어졌다. 단, 여기서 서술하고자 하는 이론은 CCS(Constant Cross Section) 커터에 의한 암석절삭 이론에 근거한다.

본 이론을 정립하기에 앞서 CSM 모델에서도 여러 가지 가정 사항들을 제시하였는데, 그 첫 번째의 가정은 “한 개의 커터가 인접한 커터의 영향 없이 암반에 관입되는 동안 커터하부에 발생하는 분쇄영역(crushed zone)의 형상은 Fig. 1에서처럼 원형이다”라는 사항이다. 모든 연구자가 이러한 분쇄영역의 존재를 인정하지만 그 형상에 대해서는 논란의 대상이 되고 있다. 이러한 분쇄영역의 범위는 커터의 형상과 암석 특성에 따라 상당히 변화한다.

이러한 분쇄영역에서 작용되는 압력분포 또한 논란의 대상이다. CSM 모델에서는 계산의 편의상 “분쇄영역에서의 압력분포는 Fig. 2에서처럼 정수압상태(hydrostatic pressure)이다”라고 가정한다. 분쇄영역에 작용하는 응력에 의해 방사상의 인장균열이 발생하며 이 균열은 분쇄영역주변에 Fig. 2와 같이 많은 불연속면들을 발생시

킨다. 단, 분쇄영역 주변의 균열은 인장만이 아닌, 특별히 암석 표면까지 전달된 균열의 경우, 전단 응력 또한 받고 있다. 따라서 복합 응력에 의하여 균열이 발생한다고 볼 수 있다.

인접한 두 커터에 의해 발생된 균열사이의 상호작용이 파괴를 확대시킨다. 각각의 커터에 의해 발생한 균열이 인접한 커터에 의한 균열과 만나거나 자유면과 만나게 되면 Fig. 3 (c)와 같이 chip이 형성된다. 이때 가압력이 부족한 경우 Fig. 3 (a)처럼 ridge가 형성되며, 과도한 경우는 Fig. 3 (b)와 같이 과도한 파괴(overbreak)가 일어난다.

디스크 커터의 주변을 따라 압력분포가 Fig. 4와 같이 분포한다고 가정하면, 이 분포는 커터 직경과 관입깊이로 결정되는 식(1)의  $\phi$ 함수를 이용하여 정의될 수 있다.

$$\phi = \cos^{-1} \left( \frac{R-p}{R} \right) \quad (1)$$

여기에서, R = 커터의 반경  
p = 관입깊이

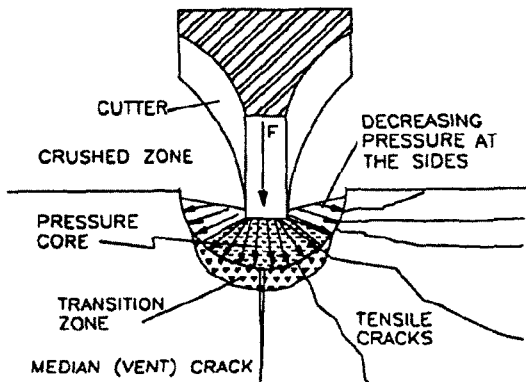


Fig. 1. The crushed zone or pressure bulb under disc cutter after Rostami and Ozdemir(1993)

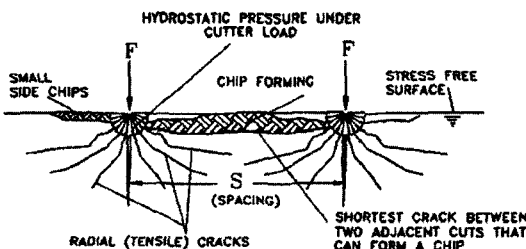
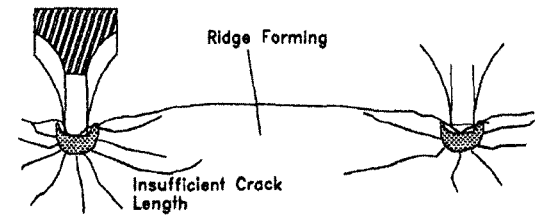
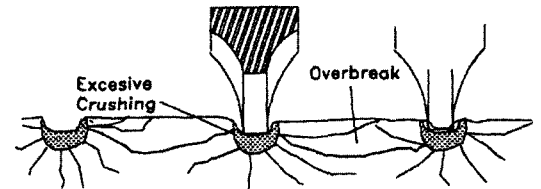


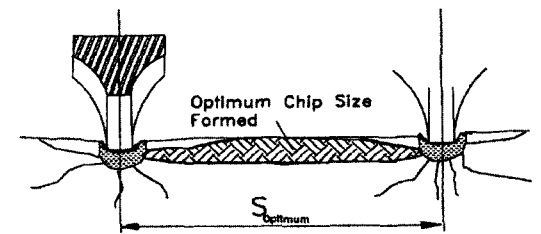
Fig. 2. Simplified crushed zone pressure(hydrostatic) and chip formation after Rostami and Ozdemir(1993)



(a) Ridge formation due to lack of pressure and length of cracks



(b) Overbreak due to excessive loading and longer cracks



(c) Normal cutting with optimum crack length and direction

Fig. 3. Chip formation with optimum crack length and direction after Rostami and Ozdemir(1993)

커터를 관입시킨 상태에서 이동시킬 때 커터의 반경 방향으로 작용하는 반력 P는 Fig. 4에서의 수직 방향 최대 가압력 P'에 대하여 식 (2)와 같이  $\theta$ 의 멱함수로 나타낼 수 있다. 식 (2)에서 보는 바와 같이 압력 P의 분포는 Fig. 4 (a)와 같이  $\psi=1$  인 경우 즉 압력분포 P가  $\theta$ 의 선형 함수로 표현되는 경우와  $\psi=0$ 인 경우 즉 압력분포가  $\theta$ 에 상관없이 일정한 경우와의 사이에 놓이게 되며 실제의 값에 보다 가까운 함수로 표현하기 위해 Fig. 4 (b)와 같이 P를  $\theta$ 의 power 함수로 나타낼 수 있다.

$$P = P' \left(1 - \frac{\theta}{\phi}\right)^\psi \quad (2)$$

여기서, P' = 커터 직 하부 최대 응력  
 $\theta$  = 암석면의 법선방향과 반력의 합력이 이루는 각 ( $0 \leq \theta \leq \phi$ )  
 $\psi$  = 멱지수 ( $0 \leq \psi \leq 1$ )

회전력(rolling force,  $F_r$ )에 대한 수직력(normal force,  $F_n$ )의 비인 절삭효율(cutting coefficient, CC)는 식 (3)과 같이 정의할 수 있으며, 절삭면의 수직축(Y축)과 합력과의 각도인  $\beta$ 는 식 (4)와 같이 절삭효율로부터 산정된다.

$$CC = \left(\frac{F_r}{F_n}\right) \quad (3)$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{F_r}{F_n}\right) = \tan^{-1}(CC) \quad (4)$$

$\phi$ 값은 커터 끝단의 형상에 따라 달라진다. V 형태의 날카로운 커터는  $\phi$ 값이 1에 가까운 반면 CCS형이나 무

던 형태의 커터에서는 무딘 정도에 따라 0에 가까워진다. CCS형 커터의 경우 커터 끝단의 두께가 12.5mm 정도이므로  $\phi$ 값은 일반적으로 0으로 가정할 수 있다. 따라서 CCS형 커터에서는  $\beta$ 와 CC를 식 (5), 식 (6)과 같이 가정할 수 있으며, 이에 따라 커터에 가해지는 반력도 식 (7), 식 (8)과 같이 가정할 수 있다.

$$\beta = \frac{\phi}{2} \quad (5)$$

$$CC = \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (6)$$

$$F_t = \frac{P'RT\phi}{\psi+1} \quad (7)$$

$$F_n = F_t \cos\beta, \quad F_r = F_t \sin\beta \quad (8)$$

여기서 T는 커터 끝단의 두께이다. 위의 식에서 유일한 변수인 P'(base pressure)를 실험적으로 알아내기 위해 CSM 모델에서는 다양한 변수들을 조정된 시험을 통하여 다음 식 (9), (10), (11)과 같은 다항의 식을 도출해 내었다. 또한, 굴삭효율에 영향을 줄 수 있는 다양한 인자의 특성파악을 위한 지속적인 시험을 실시하여 현실에 보다 근사하도록 연구를 계속하고 있다.

$$P' = -32628 + 521\sigma_c^{0.5} \quad (R^2 = 52.5\%) \quad (9)$$

$$P' = 103400 + 4200S - 7.37\sigma_t + 2.48\sigma_c - 1260p - 21030T - 11740R \quad (R^2 = 78\%) \quad (10)$$

$$P' = 100500 + 12170S + 7.88\sigma_c - 28830\sigma_t^{0.1} - 192S^3 - 0.000147\sigma_c^2 - 29450T - 13000R \quad (R^2 = 86.5\%) \quad (11)$$

여기에서,  $\sigma_c$  = 암석의 일축압축강도(psi)  
 $\sigma_t$  = 암석의 간접인장강도(psi)  
 S = 커터사이의 간격(in)

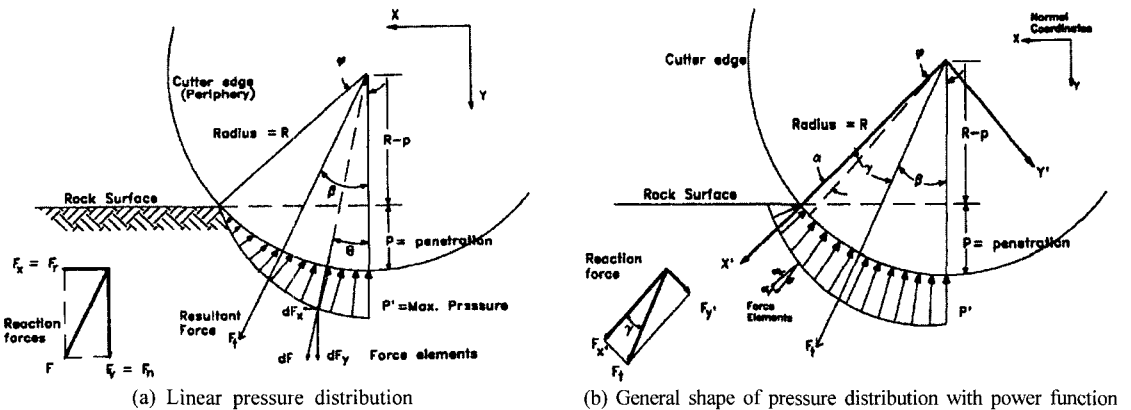


Fig. 4. General shape of pressure distribution with power function after Rostami and Ozdemir(1993)

T = 커터끝단의 두께(in)  
 R = 커터반경(in)  
 p = 관입깊이(in)

### 3. 기계굴착을 위한 모델링

기계굴착을 위해서는 Fig. 5와 같은 순서에 따라 모델링을 실시하여 설계에 반영하여야 한다. 첫 번째 단계는 기계굴착을 시행할 현장부근의 암반의 역학적 특성과 지질학적 특성을 파악하는 것이다. 암반의 역학적 특성으로는 대표적으로 일축압축강도, 인장강도, 마모도, 취성도, 소성도, 탄성파속도 등이 있고, 지질학적 특성으로는 절리, 단층, 지하수위 등이 있다.

두 번째 단계는 현장에 맞는 절삭도구(cutting tool)와 절삭방법(cutting geometry)을 선택하는 것이다. 기계굴착에 사용되는 절삭도구는 rolling cutter와 drag bit의 두 가지로 구분되며, 절삭방법은 커터사이의 간격과 커터의 관입깊이에 의해 좌우된다. 커터사이의 간격과 커터의 관입깊이사이의 관계는 커터의 종류, 암석특성(rock properties)과 함께 암석을 절삭하는 효율에 영향을 미친다.

세 번째 단계는 커터에 작용하는 힘을 측정하거나 추정하는 단계이다. 일반적으로 이를 수행하기 위하여 반경험적인 관계식을 이용하지만, 정밀한 추정을 위해서는 뒤에서 서술할 LCM(Linear Cutting Machine) 장비를 이용한 대형 실험을 통하여 커터에 작용하는 힘을 구하게 된다. CSM(Colorado School of Mines)에서는 25년 동안 축적된 실대형 절삭시험(Linear Cutting Test 등) 데이터베이스를 통하여 위의 식 (9), (10), (11)과 같이 절삭력(cutting force)을 추정하거나 측정하고 있으며 이의 입력변수로 암석특성과 커터의 기하학적 특성을 사용한다. 즉, 많은 실험을 통하여 LCM 장비를 이용하지 않고 암석의 특성과 커터의 종류만으로 커터에 작용될 힘을 추정하는 것이다.

이와 같이 절삭도구, 절삭방법 및 커터에 작용하는 힘을 구하는 과정이 완료되면 굴착기 면판 설계와 면판에 장착되는 커터배열을 선정하여야 한다. 굴착기 면판 설계에서는 앞에서 구한 절삭도구, 절삭방법 및 커터에 작용하는 힘을 입력 값으로 하여 설계에서 요구되는 굴진율과 암반의 단위체적을 굴착하는데 필요한 최소 에너지 즉, 최소의 specific energy를 찾기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한다. 이것은 또한 주어진 암반조건과 절삭방법에서 굴착동안 굴착기의 진동이 최소가 되도록 선정된다. 또한, 새로 설계된 굴착기 면판의 시뮬레이션에서는 LCM 또는 이론적 모델로부터 얻어진 절삭력을 기초로 하여 추력(thrust)과 회전력(torque)같은 기

계적인 특성요소(machine parameters)를 산출할 수 있다.

다음의 다섯 번째 단계는 터널굴진에 맞추어 후속장치(back up system)와 버럭 운반장치(mucking system)를 설계하는 것이며, 마지막 여섯 번째 단계는 계획공정(scheduling)과 비용분석(cost analysis)을 실시하는 것이다. 여섯 번째 단계에서는 굴진율과 가동율, 커터마모율의 3가지 사항을 고려해야 한다.

### 4. CSM 컴퓨터 모델을 이용한 굴진성능 예측

CSM 모델을 이용하여 굴진성능을 예측하기 위한 입

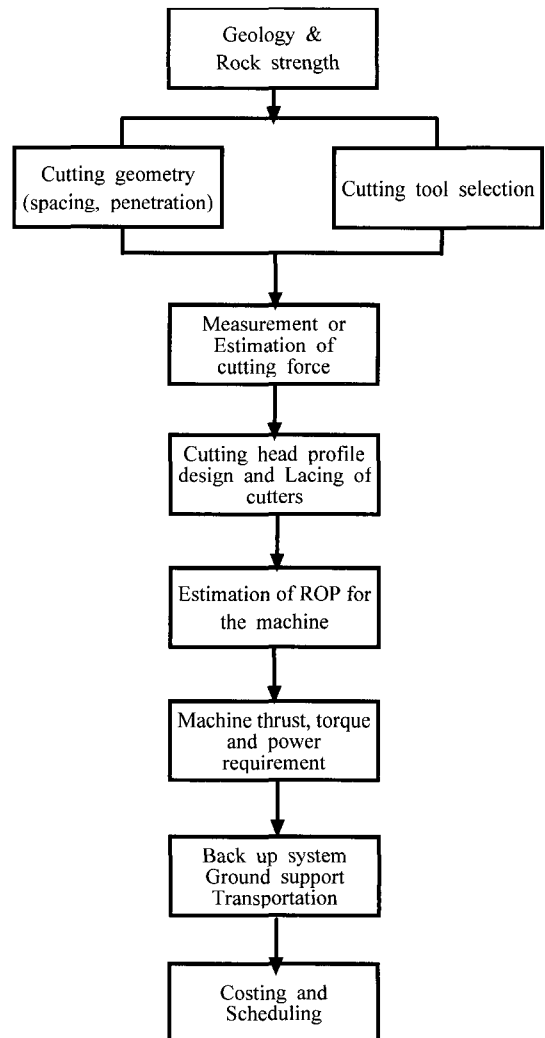


Fig. 5. Flow chart for modelling steps after Cigla and Ozdemir (2000)

력 값을 산정하기 위해서는 다음과 같은 실내 실험이 반드시 수반되어야 한다.

- 일축압축강도
- Brazilian 인장 강도
- 밀도
- Punch penetration
- Cerchar abrasivity
- Petrographic analysis

일반적으로 이러한 실내실험으로 비교적 정확하게 굴착성능을 예측한다고 알려져 있으나, 암반의 불균질성 등이 심할 경우 이러한 실험값으로 예측하기는 어려움이 따른다. 따라서 이러한 경우 일반적으로 수행하는 실내 실험이 바로 LCM 장비 등을 이용한 실내 절삭실험이다. 이 방법은 실험대 크기로 실험을 수행하므로 실험 크기효과(size effect) 등이 무시될 수 있을 정도이다. 이러한 실험 방법에 대해서는 다음 장에서 서술하고자 한다.

CSM 모델의 기본 개념은 굴착기 면판에 있는 각각의 커터를 개별적으로 관리하는 것이다. 면판에서 커터의 위치는 커터간의 간격과 면판 중심으로부터의 거리 및 각도와 같은 기하학적인 요소에 의해 결정되며 이러한 면판의 기하학적 특성은 극좌표시스템으로 정의된다. 이렇게 각 커터의 위치가 정의되면 모델은 각 커터의 회전당 관입깊이를 계산하고 커터가 암석에 관입되

는데 필요한 절삭력을 산정한다. 이렇게 산정된 힘은 면판의 추력, 회전력, 및 동력을 산출하는데 사용된다. 이렇게 구성된 모델은 어떠한 형태의 면판 설계 및 굴진성능 예측에 적용된다. 굴착기 면판의 최적화를 위한 컴퓨터 모델링의 또 다른 장점은 굴착기의 진동이 최소화되도록 하여 커터 소모율이나 downtime을 줄일 수 있는 것이다.

CSM 컴퓨터 모델은 TBM, Raise Boring machine, Shaft Drilling machine과 같은 굴착기계의 면판 설계에 유용하게 사용되며 이 모델로부터 커터 면판의 모양과 배열, 각 커터의 절삭력, 추력, 회전력, 기계의 동력, 편입(eccentric force), 모멘트, 커터 면판의 회전에 따른 절삭력의 변화와 같은 특성을 얻을 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 최종적으로는 면판 추력과 회전력의 적절한 조화를 얻어냄으로써 기계굴착에 의한 생산성 향상, 커터와 베어링의 수명 연장, 가동율의 증진과 같은 경제적 효과를 얻을 수 있다.

Fig. 6은 컴퓨터 모델링의 정보입력에 관한 예를 나타낸 것이다. 입력정보는 크게 수행과제에 대한 정보(project information; project name, location, tunnel diameter, etc.), 굴착기계에 대한 정보(machine information; cutterhead diameter, geometry of the disc cutters, machine specifications, cutterhead profile if available, etc.), 그리고 암석에 대한 정보(rock information; Uniaxial compressive strength, tensile strength, etc.)로 구분된다.

EARTH MECHANICS INSTITUTE COLORADO SCHOOL OF MINES TBM PERFORMANCE PREDICTION			
<i>Tunnel and Machine Input Data</i>			
Unit System for Calculations?	2	1 - English System 2 - Metric System	
<b>PROJECT AND TUNNEL INFORMATION</b>			
Project Name	XYZ	Tunnel Diameter	7.06 m
Location	A	Total Length	3.000 m
Contractor	B	Area	39 m <sup>2</sup>
Owner	C		
<b>MACHINE SPECIFICATIONS</b>			
Machine Type	Open Bore	Total Installed Thrust	15,570 kN
Cutterhead Diameter	7.06 m	Thrust Efficiency	90%
Cutterhead Radius	3.53 m	Net Cutterhead Thrust	14,013 kN
No. of Cutters	50	Max. Cutterhead Torque	3,625 kNm
Cutterhead RPM	8.3 rpm	Drive Efficiency	90%
Cutter Type	DISC	Net Cutterhead Torque	3,263 kNm
Cutter Diameter	482.6 mm	Total Installed Power	3,150 kW
Cutter Tip Width	19.95 mm	Net Cutterhead Power	2,835 kW
Maximum Cutter Load	311 kN	ROP Limit	7.62 m/hr
Max Linear Speed	152.4 m/min	Cutter Wear Effect	25%
DO YOU HAVE CUTTERHEAD PROFILE?	1	1 - YES 2 - NO	
IF NO, WHAT IS THE FACE CUTTER SPACING?	86.36	mm	

Fig. 6. Input data for CSM TBM model after Cigla and Ozdemir(2000)

EARTH MECHANICS INSTITUTE COLORADO SCHOOL OF MINES TBM PERFORMANCE PREDICTION			
<i>TBM PERFORMANCE PREDICTION</i>			
<b>Machine Specifications :</b>		<b>Input Data for Geologic Zone</b>	
Machine Type	Open Bore	Rock Type	Granite
Cutterhead Diameter	7.06 m	Rock Origin	3 mph/us
No. of Cutters	50	UCS	153 MPa
Cutterhead RPM	8.3 rpm	BTS	14 MPa
Cutter Type	DISC	Density	2.5 g/cm <sup>3</sup>
Cutter Diameter	482.6 mm	Grain Size	1.0 mm
Cutter Tip Width	19.95 mm	Porosity	1.0%
Maximum Cutter Load	311 kN	CAI	4.5
Total Installed Thrust	15,570 kN	Cost of Hub	\$7,700
Thrust Efficiency	90%	Cost of Ring	\$550
Net Cutterhead Thrust	14,013 kN	Cutter Diameter	482.6 mm
Max. Cutterhead Torque	3,625 kNm	Cutter Tip Width	19.95 mm
Drive Efficiency	90%	Face Cutter Spacing	86.36 mm
Net Cutterhead Torque	3,263 kNm		
Total Installed Power	3,150 kW		
Net Cut Power	2,835 kW		
ROP Limit	7.62 m/hr		
<b>Machine Performance Evaluation :</b>			
Machine Thrust	O.K.	90.01%	of machine thrust used
Machine Torque	O.K.	90.00%	of machine torque used
Machine Power	O.K.	100.00%	of machine power used
Cutter Load Capacity	O.K.	95.61%	of maximum cutter load used
ROP Limit	O.K.	68.44%	of ROP Limit used
<p><b>ROP: 8.94 mm/rev</b> ←</p> <p><b>4.5 m/hr</b> ←</p>			
<i>Maximum ROP controlled by Machine Power</i>			

Fig. 7. CSM model calculation after Cigla and Ozdemir (2000)

이렇게 기본적인 입력이 끝나면 컴퓨터 모델에서 다음 단계는 설계 굴진율(desired rate of penetration, ROP, ft/hr or m/hr)을 얻기 위한 절삭력(cutting force)과 요구되는 기계적 요소들을 산정하는 것이다. Fig. 7은 이러한 계산이 끝난 후의 결과 예를 보여주고 있다. 즉, 굴착 예상 지역의 각각의 다른 지질학적 특성 구간을 입력하면 각각의 특성구간에 대한 최종 굴진율(ROP)을 제시한다. 또한 이 단계에서 선정된 장비가 다른 암석 강도에서의 작업수행능력도 Fig. 8과 같이 제시한다.

최종적으로 모델의 활용 범위를 알아본다면 커터 면판의 배열이 이미 결정되어 있는 경우는 대상 암반에 대한 굴진율을 좌우하는 추력, 회전력, 및 동력 등을 산정하게 되고, 미리 커터 면판이 결정되어 있지 않은 경우는 여러 번의 반복 모델링으로 최적의 specific energy와 굴진율을 갖는 최적의 면판 설계를 제시하게 된다. 이러한 모델링은 전술한 이론적 근거와 경험적인 관계식으로 이루어져 있다.

### 5. LCM 장비의 활용

LCM 장비는 실험하고자하는 암석시편을 선택된 커터가 직선으로 절삭하는 동안 커터에 작용하는 절삭력을 3방향의 로드셀을 이용하여 측정하는 실험 장비로서 실험크기로 시험을 시행하기 때문에 실내시험에서 발생하는 scale effect나 재료의 물리적 특성에 의한 영향을 받지 않는다고 알려져 있다. LCM 장비에 의해 측정된 커터의 절삭력은 전술한 기계굴착 모델링의 세 번째 단계에 적용되어 굴착기의 설계와 커터의 선택, TBM 굴착성능 예측 등에 사용된다.

LCM 실험 장비는 Fig. 9와 같으며, 실험방법은 대형의 암석 블록을 베드(bed)에 고정시키고 상부에 장착된

커터를 서보(servo)시스템으로 조절되는 유압시스템을 사용하여 산정된 소정의 깊이만큼 관입시킨 상태에서 하부 배드를 이동시킬 때 커터에 작용되는 normal force, drag force, side force를 측정한다. 이렇게 일정 길이만큼 실험을 수행한 후, 커터를 일정 간격 수평으로 이동시킨 후 다시 반복하여 앞의 3방향의 힘을 측정한다. 또한, 커터의 종류를 바꾸어서 시행할 수 있다. 이렇게 측정된 3 방향 힘 중에서 normal force는 TBM 기계에 작용되어야 할 추력(thrust)을 정하는데 사용되는데, 이는 TBM 장비가 효율적으로 굴착하고자 하는 암반에 관입되도록 하기 위한 힘을 산정하는 것이다. Drag force는 TBM의 회전력(torque)과 직접적으로 관련이 있으며, 이 값은 TBM 장비의 specific energy를 구하는데 사용된다. Specific energy는 암반의 단위체적을 굴착하는데 필요한 에너지를 말하며, 낮은 specific energy를 유지하는 것이 가장 효율적인 굴착을 의미한다. 세 번째로 side force는 다른 normal force 및 drag force와 함께 면판 디자인에 사용된다.

### 6. 결 론

본 논고에서는 최근 기계화 시공의 관심 및 시공실적이 증가하는 추세에서 그간 우리나라에서 외국에 의존하던 커터 및 면판 디자인에 관한 기본적 내용을 미국 Colorado School of Mines에서 개발한 CSM 컴퓨터 모델을 중심으로 하여 간단히 소개하였다. 세계적으로 굴진성능을 예측하기 위해서 개발된 이론적 모델과 경험적 모델 중 CSM 모델과 NTH 모델을 대표적 사례로 선정하여 차이점을 제시하였으며, 그 중 CSM 모델에서 사용되는 굴삭의 기본적인 이론적 원리를 소개함으로써 우리나라에서 연구되어야 할 방향을 제시하고자 하였다.

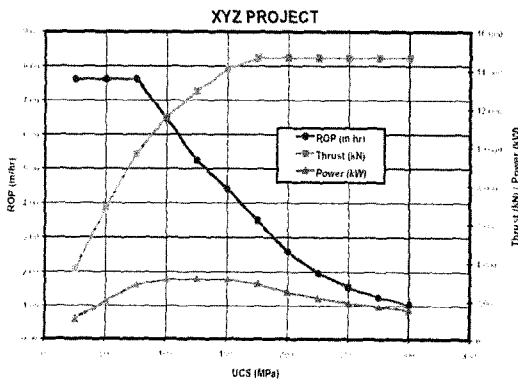


Fig. 8. Relationship between UCS and ROP, machine thrust, power after Cigla and Ozdemir(2000)

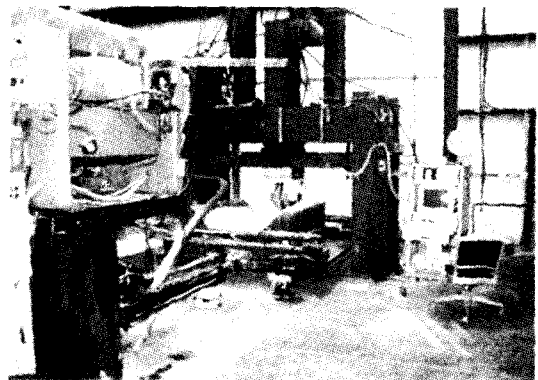


Fig. 9. Linear Cutting Machine

- 1) 이론적 접근을 기본으로 하고 있는 CSM 모델과 경험적 접근을 기본으로 하고 있는 NTH 모델의 비교를 수행하였다.
- 2) 특별히 Constant Cross Section 커터를 사용하는 경우의 암석 굴삭 원리를 알아보고, 이 원리를 기본으로 하는 이론적 모델을 전개하여 암석 특성과 커터 제원만으로 유도되는 절산력을 구하는 관계식을 고찰하였다.
- 3) 기계화 시공에 있어서 굴진성능을 예측하기 위한 일반적인 모델링 기법을 제시하였다.
- 4) 미국 Colorado School of Mines의 Earth Mechanics Institute(EMI)에서 개발한 CSM 컴퓨터 모델을 소개하고, 이 모델을 TBM 설계에 적용한 사례를 제시하였다.

## 참고문헌

1. 이석원, 조만섭, 배규진, 2003, 국내 Raise Boring Machine의 굴착능력에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 13.3, 196-206.
2. Bruland A., Dahlo T.S. and Nilsen, B., 1985, Tunneling Performance Estimation Based in Drillability Testing, Proceedings 8th International Congress on Rock Mechanics, Sep. 25-30, Tokyo, Japan.
3. Bilgin N., Nasuf E. and Cigla M., 1993, Stability Problems effecting the performance of a full-face tunnel boring machine in Istanbul - Baltalimani Tunnel, Proceeding on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, Istanbul, Turkey.
4. Cigla M. and Ozdemir L., 2000, Computer Modeling For Improved Production of Mechanical Excavators, Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME) Annual Meeting, Salt Lake City, UT, February.
5. Cigla M., Yagiz S. and Ozdemir L., 2001, Application of Tunnel Boring Machines in Underground Mine Development, International Mining Congress, Ankara, Turkey.
6. Friant E.J. and Ozdemir L., 1993, Tunnel Boring Technology - Present and Future, Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC) Proceedings, Boston, USA.
7. Lindqvist P.A., 1982, Rock Fragmentation by Indentation and Disc Cutting, Doctoral Thesis, University of Lulea, Sweden.
8. Nelson P.P., Ingraffea A.R. and O'Rourke T.D., 1985, Technical Note: TBM performance prediction using rock fracture parameters, Int. J. of Rock Mech. & Mining Sci. & Geomech. 22.3, 189-192.
9. Nelson B. and Ozdemir L., 1999, Recent Developments in Site Investigation and Testing For Hard Rock TBM Projects, Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC) Proceedings, Chapter 39.
10. Ozdemir L., 1991, Performance Prediction for Mechanical Excavators in Yucca Mountain Tuff, Task Report to Sandia National Laboratories, Contract 35-0039, February.
11. Ozdemir L. and Nilsen B., 1993, Hard Rock Tunnel Boring Prediction and Field Performance, Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC) Proceedings, Boston, USA.
12. Rostami J. and Ozdemir L., 1993, A new model for performance prediction of hard rock TBMs, Chapter 50, RETC conference proceedings, June 13-17, Boston MA.
13. Rostami J., Ozdemir L. and Neil D., 1994, Performance Prediction, The Key Issue in Mechanical Excavation". Mining Engineering, November.
14. Rostami J. and Ozdemir L., 1996, Computer Modeling of Mechanical Excavators Cutterhead, Proceedings of the World Rock Boring Association Conference, September 17-19.
15. Rostami J., Ozdemir L. and Nilsen B., 1996, Comparison Between CSM and NTH Hard Rock TBM Performance Prediction Models, ISDT, Las Vegas NV.
16. Tarkoy P.J. and Hendron A.J., 1975, Rock Hardness Index Properties and Geotechnical Parameters for Predicting Tunnel Boring Machine Performance, Report prepared for NSF, PB-246-293, Dep. of Civil Engineering, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61820.

### 이 석 원



1989년 고려대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
1991년 고려대학교 대학원 토목공학과  
공학석사  
1998년 미국 조지아공과대학 토목공학과  
공학박사  
Tel: 031-910-0230  
E-mail: stee@kict.re.kr  
현재 한국건설기술연구원 지반연구부  
선임연구원

### 최 순 욱



1997년 건국대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
2003년 연세대학교 공과대학원 공학석사  
재학중  
Tel: 031-910-0243  
E-mail: soonugi@kict.re.kr  
현재 한국건설기술연구원 지반연구부  
연구원