

# 복합지반에서의 쉴드 TBM 커터헤드의 회전속도에 따른 커터비트 손상에 관한 실험적 연구

강은모<sup>1</sup> · 김용민<sup>1</sup> · 황인준<sup>1</sup> · 김상환<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>비회원, 호서대학교 토목공학과 석사과정

<sup>2</sup>정회원, 호서대학교 토목공학과 교수

## A study on the damage of cutter bit due to the rotation speed of shield TBM cutter head in mixed ground

Eun-Mo Kang<sup>1</sup>, Yong-Min Kim<sup>1</sup>, In-Jun Hwang<sup>1</sup>, Sang-Hwan Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dept of Civil Engineering, Hoseo University, Graduate student

<sup>2</sup>Dept of Civil Engineering, Hoseo University, Professor

**ABSTRACT:** This paper presents the cutter bit damage due to the rotation speed of shield TBM cutter head in the mixed ground. The efficient of cutter bits and disk cutter are very important for tunnelling in mixed ground. In particular, this research is focused on the performance of cutter bits during excavation in mixed ground which is consist of the weathered soil and rock formation. In order to carry out this research, the experimental works are prepared performed by using the scaled shield TBM cutter bits evaluation machine developed. The mixed ground is prepared considering with a scale effect of tunnel size. Three different rotation speeds of shield TBM cutter head (i.e. 2, 3, 4 rpm) are applied in the experimental work. The drag forces acting on the cutter bits are measured at each cutter bit during rotation of cutter head. It is also analysed the variation of drag forces due to the rotation speed of shield TBM cutter head. The results of this research are clearly shown that the drag forces acting on the cutter bits are jumped up at the boundary between weathered soil and rock. It is also indicated that the jamping drag forces are increased with increasing the rotation speed of the cutter head. It is found from the research that the higher rotation speed of shield TBM cutter head will be high risk in the mixed ground. It is, therefore, suggested that the use of lower rotation speed of shield TBM cutter head is recommended for reducing the cutter bit damage in practice.

**Keywords:** Shield TBM cutter head, Cutter bit, Mixed ground, Rotation speed

**초 록:** 본 논문은 복합지반에서 쉴드 TBM 커터헤드의 회전속도 제어에 관한 실험적 연구이다. 복합지반에서는 암반을 굴착하는 디스크커터와 더불어 커터비트의 절삭 성능이 매우 중요하다. 이 연구에서는 특히 풍화토와 풍화암으로 이루어진 복합지반의 커터비트의 성능평가에 초점을 두었다. 이 연구를 위하여 실험실용으로 개발된 쉴드 TBM 커터비트 평가 장비를 이용하여 실내시험을 실시하였다. 복합지반은 공학적 상사성을 고려하여 조성하였다. 조성된 복합지반에서 쉴드 TBM 커터헤드 회전속도를 2, 3, 4 rpm으로 적용하여 각 커터비트에 작용하는 절삭력을 측정하고 회전에 따른 절삭력의 변화를 분석하였다. 실험결과로부터 커터비트에 작용하는 절삭력은 지반경계부에서 급상승하는 경향을 보여주었다. 또한 이러한 상승되는 절삭력의 크기는 쉴드 TBM 커터헤드의 회전속도가 클수록 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 복합지반에서 쉴드 TBM 커터헤드의 회전속도를 빠르게 할 경우 커터비트에 가해지는 위험요소가 더 크다는 것을 보여주고 있다. 따라서 복합지반조건에 현장 TBM 굴착 시 회전속도의 제어가 필요한 것으로 나타났으며 감속시키는 것이 비트에 가해지는 리스크를 저감시킬 수 있을 것이다.

**주요어:** 쉴드 TBM 커터헤드, 커터비트, 복합지반, 회전속도

\*Corresponding author: Sang-Hwan Ki

E-mail: kimsh@hoseo.edu

Received May 13, 2015; Revised May 22, 2015;

Accepted May 26, 2015

Copyright ©2015, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

국토의 도심지화가 급속히 진행되면서 지상구조물의 포화로 인해 지하 구조물 건설에 이목이 집중되어 있으며 더불어 도심지 인프라 구축을 위한 터널시공이 증가하는 추세이다. 특히 쉴드 TBM 공법은 기존의 발파공법과 비교하여 소음·진동 등의 저감효과를 가져올 수 있으며 낙반 등의 위험요소가 적고 여굴과 주변 지반에 대한 손상이 적기 때문에 지보재 물량이 감소되고 관련 시공시간의 단축으로 인해 고효율의 급속 시공이 가능하다는 장점을 가지고 있다(Friant & Ozdemir, 1993). 쉴드 TBM 공법은 커터헤드가 회전하면서 지반굴착을 진행하므로 실질적으로 굴착 지반을 굴착하는 커터헤드의 커터도구의 성능은 사실상 쉴드 TBM 설계에 있어 가장 중요한 부분이다. 그중에서 커터 비트는 쉴드 TBM의 선단부에 부착하는 장치로, 토사의 절삭을 주목적으로 하여 절삭을 하는 것의 1축 압축 강도에 따라서 비트의 재질을 바꾸어 장비하는 것으로서 커터도구의 중요 요소이다. 국내지반의 경우 복합지반이 주를 이루고 있으므로 암반을 굴착하는 디스크커터와 더불어 커터비트의 절삭 성능이 매우 중요한 요소라 할 수 있다(김상환 등 2012).

국외의 경우, 커터도구에 대한 설계기술을 바탕으로 쉴드 TBM 디스크커터에 의한 암석절삭에 대한 실험적 연구(Snowdon 등, 1982)와 비트 절삭에 따른 굴착반응에 대한 연구(Detoumay 등, 2008) 등 커터도구에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

국내의 경우, 터널굴착 시뮬레이션을 위한 터널굴착장비의 개발에 대한 연구(김상환, 2003), 실내모형 실험을 통한 TBM 커터헤드 개구율에 관한 연구(김상환 등, 2010)를 통하여 쉴드 TBM 굴착성능 및 굴착에 따른 지반 거동에 대한 연구를 실시되었으며, 디스크 커터를 장착한 TBM 커터헤드의 최적 설계모델 도출을 위한 영향인자 분석에 관한 연구(장수호 등, 2007)를 수행하였다. 하지만, 암반지반 및 토사지반용 TBM

에 관한 연구로 국한되어 있으며, 풍화암 및 풍화토로 구성되어진 복합지반에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 국내의 경우 현재까지 TBM의 완전한 제작은 이루어지지 않고 있으며, 쉴드 TBM의 설계·제작관련 핵심 기술을 대부분 외국에 의존하고 있어서 국내 지반 조건에 적합한 장비 개발 및 연구가 요구된다.

따라서 본 연구에서는 쉴드 TBM 커터비트 성능 평가 실험을 통한 복합지반에서 쉴드 TBM 커터헤드의 회전속도에 따른 커터비트 손상에 관한 연구로써 국내 복합지반 쉴드 TBM 굴착에 있어 설계 및 시공가이드로 유용하게 활용될 것이며, 아울러 국내 쉴드 TBM의 발전 및 안정성 문제해결을 위한 중요한 자료가 될 것으로 판단된다.

## 2. 커터비트 손상 평가 실험

### 2.1 개요

쉴드 TBM 공법은 강재원통형의 굴착기계를 수직 작업구내에 투입시켜 기계의 선단부에 장착되어 있는 굴착용 커터헤드를 회전시키면서 지반을 굴착하며, 동시에 각종 안정재를 주입하여 막장면의 붕괴를 방지하고, 1사이클 굴착이 종료되면 굴진기 후미에서 지보인 세그먼트를 설치하는 것을 반복하면서 터널을 굴착하는 공법이다. 특히 쉴드 TBM 굴착 시 중요한 요소가 되는 것이 커터헤드이다.

일반적으로 커터헤드에는 암반용 디스크커터와 버력 및 토사용 커터비트의 절삭도구가 설치되어 있다. 이들의 굴착능력은 공기 및 시공의 성패가 좌우되므로 현장여건 및 현장 지질조건에서 최상의 굴착능력을 발휘할 수 있는 굴착시스템과 커터헤드설계 및 절삭도구의 선정과 관리방안이 중요하다. 특히 복합지반에서는 더욱 더 요구됨으로 인하여 굴착도구에 대한 손상을 최소화시킬 수 있는 방안의 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 이 에 대하여 개발된 쉴드

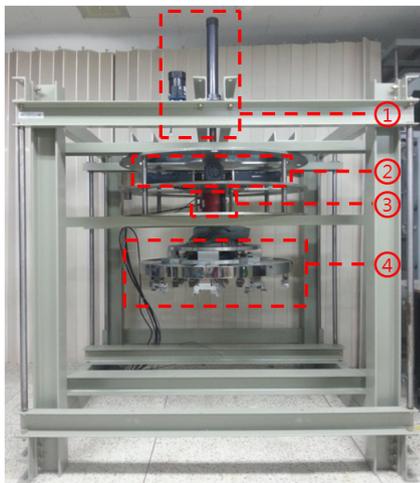
TBM 커터비트 성능평가 장비(강은모, 2015)를 이용하여 국내 일반적인 지층조건인 풍화토와 풍화암으로 이루어진 복합지반에서 커터헤드의 회전속도에 따른 특히 손상에 취약한 토사용 커터비트에 대한 거동연구를 실시하였다. 대상 복합지반은 터널크기에 따른 공학적 상사성을 고려하여 조성하였다.

터널 장비에서 무엇보다 중요한 것은 연구하고자 하는 목적에 합당한 계측 시스템의 구축이다. 터널 굴착과정에 있어서 필요한 지반거동 및 굴착과정에 대한 제원 등의 자료를 측정하는 작업은 터널장비 개발과 병행되어야 하기 때문이다(김상환, 2003).

따라서 본 쉴드 TBM 성능평가 장비에는 토사지반 및 암반지반에서 굴착 시 각 절삭도구에 발생하는 압력을 실시간 측정할 수 있는 시스템이 구축되어 있다.

## 2.2 실험장비 시스템

개발된 쉴드 TBM 커터비트 성능평가용 실험장비는 커터헤드 구동 시 비트의 거동을 평가하기 위한 실험 시스템으로서 주요 구성 내용은 Fig. 1과 같으며



- ① Thrust force system, ② Rotation power system
- ③ Torque and rpm measurement system
- ④ Cutter head with cutter bits

Fig. 1. Shield TBM cutter bits Evaluation Machine

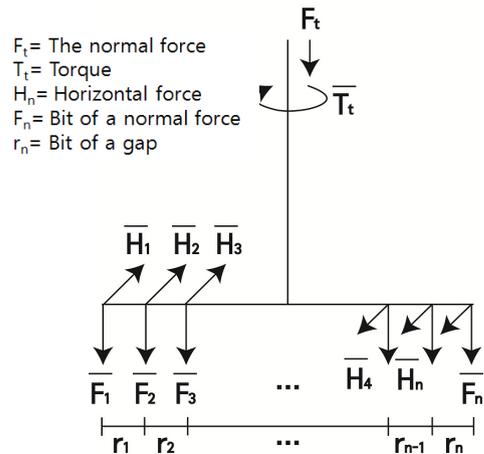


Fig. 2. Mechanism of cutter bits

(강은모, 2015) 구성내용에 대하여 설명 하면 다음과 같다.

본 장비에 있어 고려된 주요 메커니즘은 Fig. 2와 같이  $\vec{T}_t = \sum \vec{r}_i \cdot \vec{H}_i$  /  $\vec{F}_t = \sum \vec{F}_n$  과 같은 관계식이며, 스포크 회전축에 대한 토크  $\vec{T}_t$ 는 각 비트에 걸리는 토크의 합이고, 커터헤드에 발생하는 총 추력  $\vec{F}_t$ 은 커터헤드 지반 굴착 시 각 비트에 발생하는 지반과의 연직하중  $\vec{F}_n$ 들의 합으로 고려 될 수 있다.

### 2.2.1 절삭시스템

본 장비에 부착된 커터비트는 상기 언급된 메커니즘을 적용하여 Fig. 3과 같이 쌍기형 형태로 제작되었다. 커터비트는 디스크커터와 다르게 제조사, 적용지반에 따라 크기가 개별 제작되기 때문에, 국내 쉴드 TBM 시공 자료를 근거로 커터비트의 평균값을 기준으로 축소모형으로 제작되었다. 커터비트의 구성은 각도 조절과 마모율에 따른 부품교체를 위해 조립식으로 제작되었다. 또한 다양한 커터비트의 조건에 따른 효율을 평가하기 위하여 간격과 폭 및 각도조절이 조절 가능하도록 제작되었다.

또한 토사지반 및 암반지반에서 굴착 시 커터비트에 발생하는 압력을 실시간 측정할 수 있는 압력센서가 각 각 설치되어 있으며, 굴착 시 발생하는 커터헤드

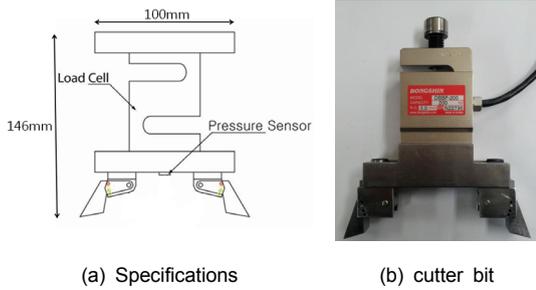


Fig. 3. cutter bit detail

의 압력을 측정하기 위한 회전력 및 추력센서를 비롯하여 다양한 계측센서들을 설치 할 수 있도록 설계 제작되었다.

### 2.2.2 동력시스템

동력 시스템은 커터헤드를 회전시키는 장비 중간에 장착된 구동모터와 기어장치가 장착된 토크시스템 (Fig. 4)과 그 하부에 토크센서(Fig. 5)설치된 측정시스템으로 구성되어 있다.

회전동력은 Fig. 4와 같이 직경이 서로 다른 기어를 이용하여 설계된 40 : 1의 감속장치를 작동하여 속도 조절을 할 수 있도록 설계되었다.

토크센서는 Fig. 5와 같이 커터헤드 회전 시 0~6 RPM의 속도를 측정할 수 있는 장치로서 회전시 rpm 및 토크 그리고 추력을 동시에 측정할 수 있는 장치이다.

또한 동력시스템은 커터비트 실험장비 상부에 스크류잭을 설치하여 정확한 재하속도와 관입깊이를 적용할 수 있게 하는 시스템으로, 굴진속도도 피니언 기어 시스템으로 설계된 60 : 1의 감속장치를 이용하여



Fig. 4. Power system



Fig. 5. Torque, rpm, force measurement system

Table 1. Specification of the cutter bit evaluation machine

Maximum Excavation Speed	Torque	Cutter Head RPM	Total Thrust
3.54 mm/sec	16 kgf·cm	0 ~ 6 rpm	1.76 kN

변화를 줄 수 있도록 제작되었다(김상환 등 2015).

상기와 같이 실내 실험용 TBM 커터비트 성능평가 장비에 대한 회전속도, 토크, RPM, 추력 등을 정리하면 Table 1과 같다.

### 2.3 실험 방법

#### 2.3.1 커터비트 선정

커터비트의 폭, 간격, 각도의 선정은 커터비트의 압력, 굴진시간 및 지반변위의 변화에 영향이 적은 것으로 나타나는 폭 30 mm, 간격 27.5 mm, 각도 20°로 적용하여 실험을 실시하였다(김상환 등, 2012). 이에 따라 본 연구에 적용된 커터비트의 형태, 폭, 간격, 각도를 나타내면 Fig. 6과 같다.

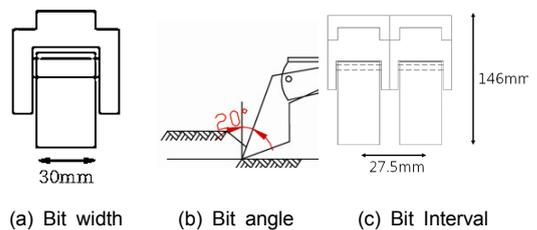


Fig. 6. Bit Dimensions

지반조성은 실험지반의 균질성을 확보하기 위하여 터널 크기에 따른 공학적 상사성을 고려하여 실제 복합지반을 실험장비의 축소율과 같은 1/10로 축소시킨 시료를 조성하였다. 쉴드 TBM 커터비트 성능평가 실험을 통한 정확한 데이터를 얻기 위해서는 실험장비 뿐만 아니라 축소모형지반의 조성 또한 매우 중요하므로 실제 원지반과 유사한 축소모형지반을 조성하여야 한다(오태상, 2014). 풍화토와 풍화암의 원지반 일축압축강도는 일반적인 압축강도를 나타내며, 실험에서는 지반의 석고량 혹은 함수비를 변동시키면 실험 지반의 압축강도를 조절하였다.

풍화암의 경우에는, 일반적인 지반조사결과에서도 압축강도와 밀도 등 오차범위가 크게 나타나는 경향이 있으므로 실험 지반의 강성을 원지반의 강성보다 크게 설정하여 지반모형을 제작하기도 한다.

Table 2는 조성된 각 지반의 제원에 대하여 나타낸 것이다. 풍화토 시료의 배합비율은 모래량 80%, 석고량 5%, 함수비 15%이며, 풍화암 시료의 배합비율은 모래량 78%, 석고량 7%, 함수비 15%로 하여 각각 일축압축강도 312 kPa, 468 kPa의 복합지반을 조성하

였다. 조성되어진 복합지반의 형태는 Fig. 7과 같다.

실제 쉴드 TBM 굴착 시 커터비트에 작용하는 굴삭력을 측정된 값에서 보정하기 위한 축력과 절삭력의 관계를 얻기 위하여 Fig. 8(a)와 같이 실내 보정시험을 실시하였다.

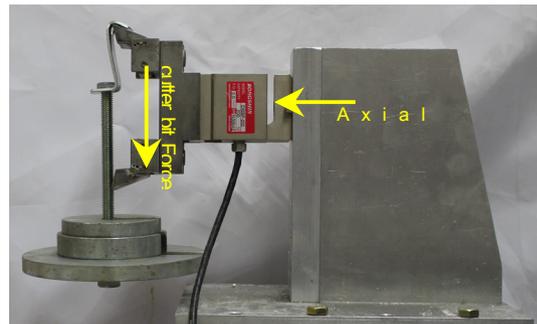
실험은 로드셀이 장착된 비트를 직각으로 고정시킨 후 일정한 무게의 추를 올려 출력되는 데이터를 분석한 결과 Fig. 8(b)와 같이 축력과 절삭력의 관계를



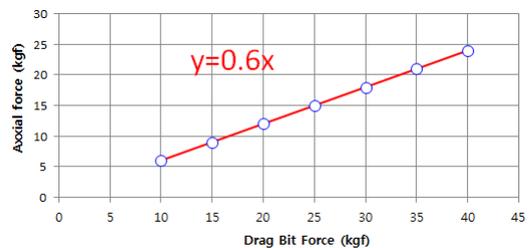
Fig. 7. Mixed ground of weathered soil and rock

Table 2. Experimental mixed ground

		unit	weathered soil	weathered rock	
original soil unconfined compressive strength		kPa	2,970	4,500	
1/10 Collapse unconfined compressive strength		kPa	297	450	
Scale model experiment	tests soil unconfined compressive strength	kPa	312	468	
	Mixing ratio	The amount of sand	g	1,200 (80%)	1,170 (78%)
		The amount of gypsum	g(%)	75 (5%)	105 (7%)
		Moisture content	g(%)	225 (15%)	225 (15%)
	Compaction Count	Count	1	1	
	Compaction energy	kg·cm/cm <sup>3</sup>	0.05	0.05	



(a) Calibration test of drag force



(b) Relation between drag and axial force

Fig. 8. Axial force vs. drag force

연였으며 실질적인 절삭력이 요구되는 경우 활용할 수 있도록 제시하였다. 이 결과로부터 실질적으로 측정된 축력은 절삭력의 약 0.6배로 나타났다.

커터헤드의 회전속도에 대하여서는 실질적으로 현장에서 평균적용되고 있는 3 rpm을 기준으로 하여 본 연구에서는 2, 3, 4 rpm의 3가지 회전속도에 대하여 커터비트에 작용되는 절삭력(drag fore)을 풍화토구간(토사부)과 토사와 암반 경계부 그리고 풍화암구간(암반부)으로 나누어 연속적으로 변화를 측정하였다.

각 회전속도에 대한 회전수는 2회씩(720도)을 실시하였다. 위치별 커터비트의 거동을 연구하기 위하여는 총 12개를 설치하였으며 이들에 대한 배치는 Fig. 9와 같다.

이 커터비트들이 실제 배치된 커터헤드의 구조를 나타내면 Fig. 10과 같다.

Fig. 11은 조성된 복합지반위에 커터비트가 정착된 커터헤드를 설치하고 실험준비가 완료된 쉘드 TBM 커터비트 성능평가 실험장비의 전경이다.

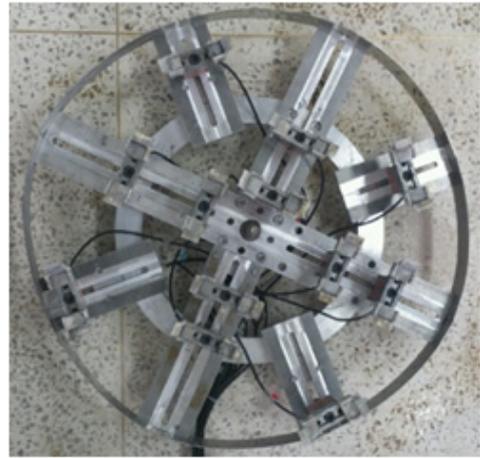


Fig. 10. View of cutter head



Fig. 11. Set up of the test machine

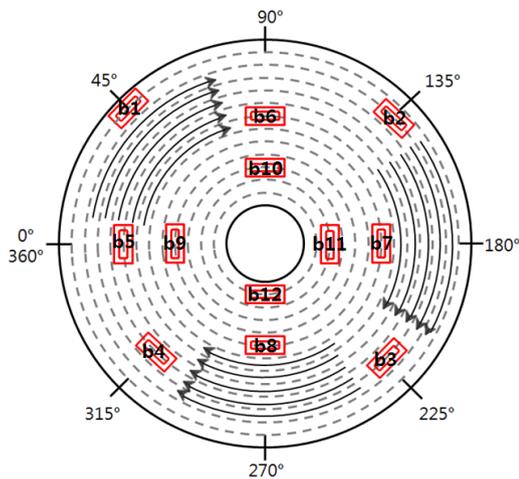
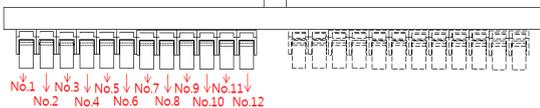


Fig. 9. Locations of cutter bits

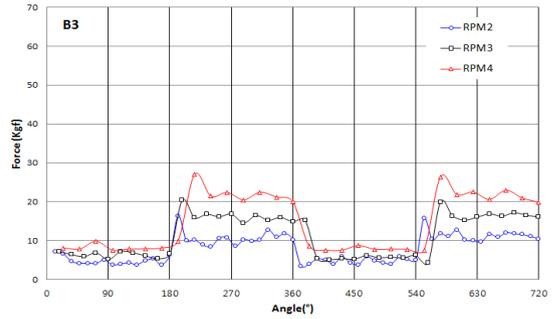


### 3. 쉘드 TBM 성능 평가 실험결과

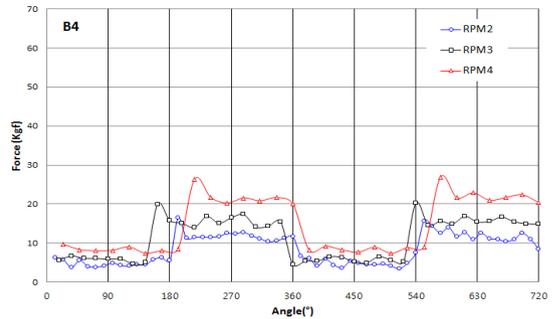
상기 실험방법에 따라 쉘드 TBM 커터비트 성능평가용 실험장비를 이용하여 실시한 결과를 정리하여 나타내면 다음과 같다.

Fig. 12(a)~(l)는 풍화토와 풍화암으로 구성된 복합지반에서 커터헤드가 회전할 때 회전속도 rpm 변화에 따라 각 커터비트에 작용하는 절삭력의 변화를 회전각도에 따라 측정된 값을 나타낸 것이다. 각 그림에서 보여주는 바와 같이 커터헤드가 2회전하는 동안 측정된 값, 즉 0°-360°로 2회전한 720°에 대한 측정값을 나타내었으며 절삭력이 작은 경우는 풍화토구간이며 상대적으로 큰 값을 보이는 풍화암구간을 절삭할 때 측정된 값이다. 또한 절삭력이 급상승하는 위치는 풍화토와 풍화암의 경계부에서 측정된 값이다. 각 커터헤드의 회전속도 2, 3, 4 rpm에 대한 값을 각 커터비트별로 비교하여 나타냈다.

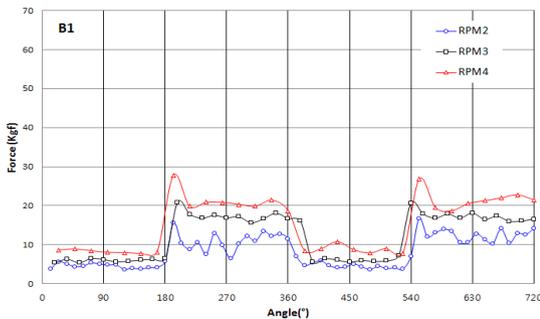
Fig. 12(a)~(l)에서 보여주는 측정 결과로부터 복합지반에서 커터헤드 회전속도 할 때 지층의 강성에 따라 절삭력의 크기도 변화하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 회전속도가 크면 클수록 커터비트에 부과되는 절삭력은 크다는 것을 보여주고 있다.



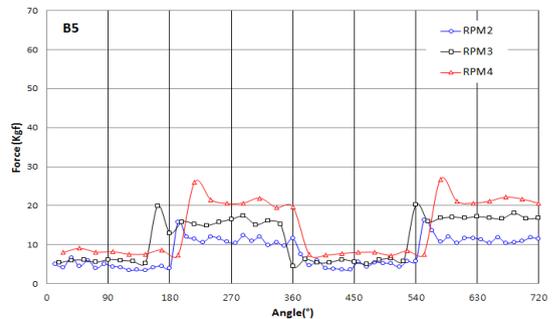
(c) cutrer bit no.3



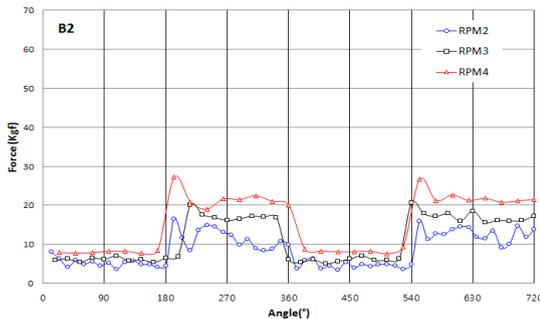
(d) cutrer bit no.4



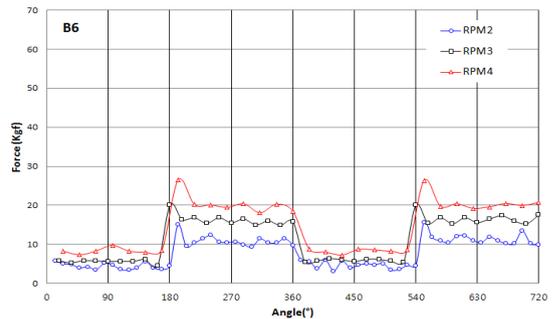
(a) cutrer bit no.1



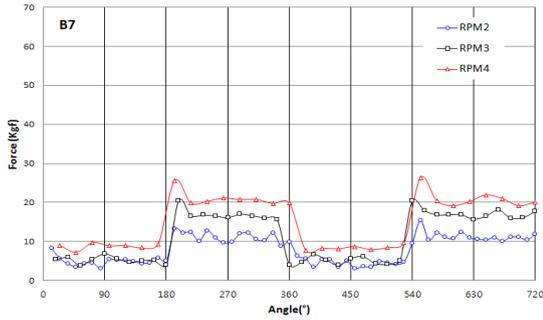
(e) cutrer bit no.5



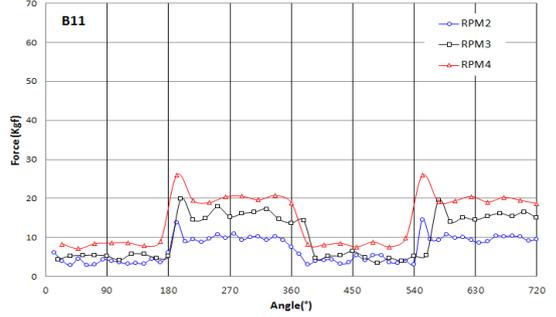
(b) cutrer bit no.2



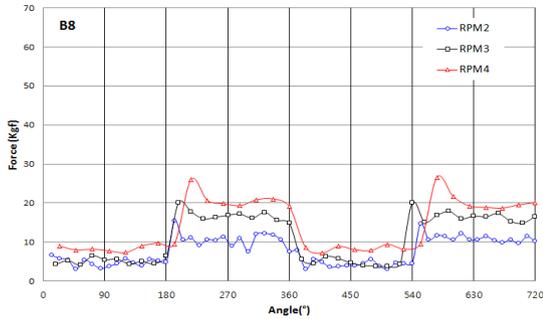
(f) cutrer bit no.6



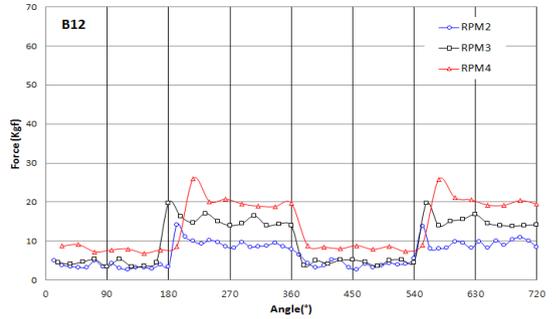
(g) cutter bit no.7



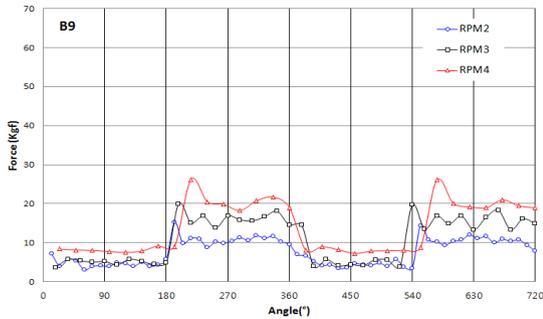
(k) cutter bit no.11



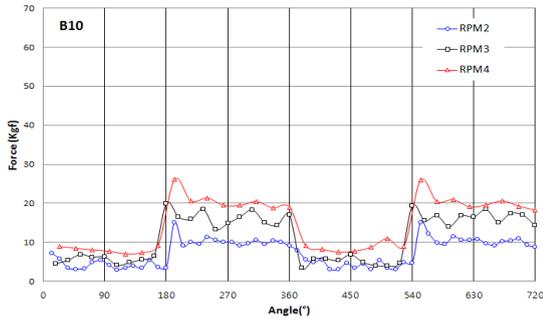
(h) cutter bit no.8



(l) cutter bit no.12



(i) cutter bit no.9



(j) cutter bit no.10

Fig. 12. (a)~(l) The force variations due to rpm for each bit

특히 지층경계부에서는 강성이 낮은 지층에서 상대적으로 큰 지층으로 이동 할 때 커터비트에 작용되는 절삭력은 급상승하였다가 감소되면서 해당 지층에 대응하는 절삭력을 나타내고 있다. 반대로 강성이 큰 지층에서 작은 지층으로 이동할 때는 이러한 현상이 나타나지 않는다는 것으로 측정되었다.

#### 4. 커터비트의 절삭력 및 손상 분석

Fig. 12(a)~(l)에서 보여준 실험 결과로부터 복합 지반에서의 커터헤드 회전속도에 따른 각 위치별 커터비트의 절삭력 및 손상에 대한 위험도를 분석하면 다음과 같다.

Fig. 13(a)~(c)는 커터헤드 회전속도별(2,3,4 rpm) 커터헤드에 정착된 각 12개의 커터비트에 작용되는 절삭력을 나타낸 것이다. 이 그림에서 LB는 지층 경계

부에서 급상승한 절삭력을 말하며, WS는 풍화토, WR은 풍화암에서의 절삭력을 각각 의미한다.

이 분석결과로부터 쉘드 TBM 커터헤드의 중심축에서 멀리 위치하는 커터비트들의 절삭력은 전반적으로 상대적인 평균값이 다소 크게 측정됨에 따라 커터비트의 손상에 대한 위험도 클 것으로 판단된다.

또한 복합지반에서 커터헤드의 회전속도는 부과되는 절삭력에 많은 영향을 주기 때문에 커터비트의 손상에 대한 위험을 좌우 할 수 있다고 분석된다.

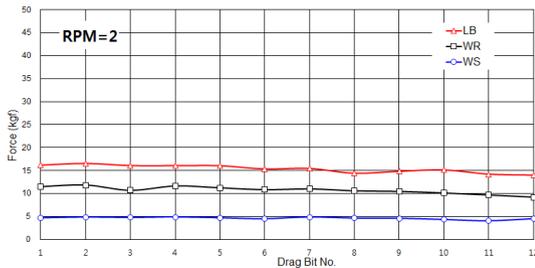
Fig. 13(a)~(c)에서 보여주는 바와 같이 커터헤드의 회전속도가 2 rpm인 경우 부과되는 풍화토에서

풍화암으로 통과 할 때의 지층 경계부 평균 급상승 절삭력(LB)는 15.35 kgf, 3 rpm 경우는 20.06 kgf, 그리고 4 rpm 경우는 26.39 kgf로 회전속도가 가장 작은 2 rpm 에서 가장 낮게 측정되었다. 또한 풍화토와 풍화암구간에서 측정된 평균절삭력을 정리하면 Table 3과 같다.

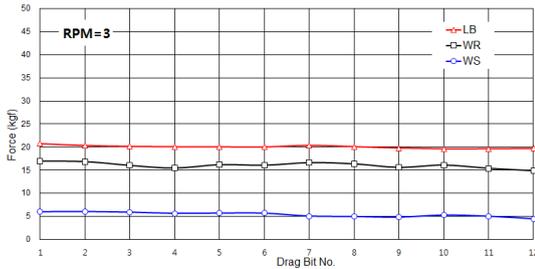
Table 3에 대한 값을 그림으로 나타내면 Fig. 14와 같다.

Fig. 14에서 보여주는 바와 같이 커터헤드의 회전속도가 빠를수록 동일한 지층에서도 커터비트에는 절삭력이 크게 작용된다는 것을 알 수 있다. 따라서 커터헤드의 회전속도는 커터비트의 손상 위험에 많은 영향을 준다는 결과를 도출하였다. 또한 커터헤드의 회전속도가 증가 될수록 풍화토와 풍화암에서의 절삭력의 차이도 크게 나타나는 결과를 얻었다.

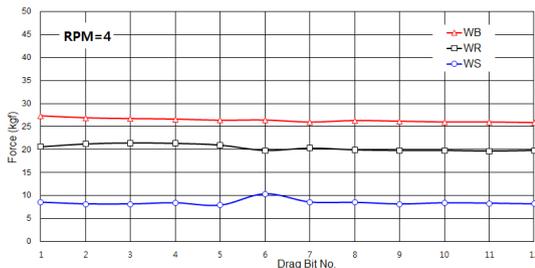
상기 분석결과로부터 복합지반에서 쉘드 TBM 시공시 커터비트의 손상 위험을 줄이기 위하여서는 커터헤드의 회전속도를 감소시키는 방안을 적용시키는 것이 안정적인 것으로 판단된다. 또한 커터헤드의 중심부에서 멀리 위치한 커터비트에 작용하는 압력이 더 높게 측정된 것으로 보아 커터비트의 마모율이



(a) rpm = 2



(a) rpm = 3



(a) rpm = 4

Fig. 13. (a)~(c). Drag force acting on each cutter bit due to rpm

Table 3. Experimental mixed ground

Stratum	Average Drag force (kgf)		
	2 rpm	3 rpm	4 rpm
weathered soil	4.64	5.39	8.49
weathered rock	10.73	16.05	20.39
boundary layer	15.35	20.06	26.39

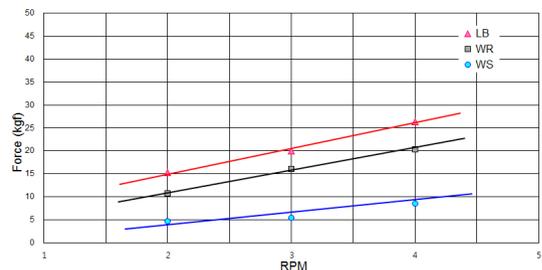


Fig. 14. Average drag force vs. rpm

바깥쪽에서 더 높을 것으로 판단되므로 이러한 점을 고려하여 커터비트 위치별로 절삭력이 동일하게 분산되도록 설계 시 반영되어야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 복합지반에서의 실드 TBM 굴착 시 커터헤드 회전속도에 따른 커터비트의 손상 위험에 대한 연구이다. 본 연구를 수행하기 위하여 실드 TBM 커터비트 성능 평가 실험장비를 이용하여 연구를 실시하였다. 또한 공학적 상사성을 고려하여 실험용 복합지반을 조성하였으며 실드 TBM 커터헤드의 회전수를 3가지로 구분하여 2,3,4 rpm에 대한 각 커터비트에 부과되는 절삭력을 측정하였다. 이러한 연구를 통하여 얻어진 결과를 요약 정리 하면 다음과 같다.

1. 성능평가형 실드 TBM 실험에서 복합지반을 일정한 분당회전속도(rpm)로 굴착을 할 경우 풍화토에서 발생하는 절삭력보다 풍화암에서 발생하는 절삭력이 더 크게 발생하며, 지층이 바뀌는 경계부에서 커터비트에 작용하는 압력이 큰 폭으로 증가하였다.
2. 커터헤드의 회전속도가 증가함에 따라 각 비트에 작용하는 압력 또한 크게 측정 되었으며, 최대압력과 최소압력의 차이 또한 rpm 이 클수록 점점 증가하였다.
3. 복합지반 굴착 시 토사지반과는 다르게 rpm을 낮게 유지하면서 굴착하는 것이 커터비트에 작용하는 절삭력의 차가 적게 발생되므로 지반거동 및 안정성 측면에서 좋은 것으로 판단된다.
4. 커터헤드의 중심에서 멀게 위치한 커터비트에 작용하는 절삭력이 다소 크게 측정되므로 커터비트 위치별로 절삭력이 동일하게 분산되도록 설계 시 반영되어야 할 것으로 판단된다.
5. 또한 실드 TBM 굴착 시 고려해야하는 사항인 커터마모 부분도 커터헤드의 회전속도(rpm)을 낮게 유

지할수록 커터비트에 작용하는 절삭력에 대한 부담을 줄 일수 있고 또한 비트 마모율 효율도 상승시킬 수 있을 것으로 판단된다.

6. 본 연구는 실내모형 실험연구 결과로 실질적인 현장과는 차이가 있을 수 있을 것으로 예측된다. 그러나 본 연구에 사용되어진 실험 장비를 주축으로 실험을 통하여 각 비트의 절삭력 및 최적의 각도, 위치 배열 실험과 같은 커터헤드 요소분석 실험을 통하여 근본적인 실드 TBM 커터헤드의 커터비트의 배열기술과 시공가이드라인으로는 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국 건설교통부 TBM 핵심 설계 부품기술 및 TBM터널의 최적 건설기술연구개발사업의 연구비지원(과제번호 : 10기술혁신 E091)의 수행되었습니다.

## References

1. Chang, S.H., Choi, S.W., Bea, G.J., Jeon, S.W. (2007), "A parametric study of rock properties and mechanical cutting conditions for deriving an optimum design model of a TBM cutterhead equipped with disc cutters", Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 27, No. 1C, pp. 87-98.
2. Emmanuel Detournay, Thomas Richard, Mike Shepherd (2008), "Drilling response of drag bits: Theory and experiment", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 45, pp. 1347-1360.
3. Friant, J.E., Ozdemir, L. (1993), "Tunnel boring technology present and future", Proc of Rapid Excavation and Tunnelling Conference (RETC), pp. 869-888.
4. Kang, U.M., Kim, Y.M., Hwang, I.J., Kim, S.H. (2015), "Development of scaled shield TBM drag

- bits evaluation machine”, KTA 2015 General Assembly and Annual Conference of Korean Tunnelling and Underground space association, pp. 175-178.
5. Kim, S.H. (2003), “A study on the development of the tunnel drilling equipment for the tunnel excavation simulation”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association Vol. 5, No. 2, pp. 199-207.
  6. Kim, S.H., Kim J.T., Jang, I.S. (2012), “A study on the using experimental system for Shield-TBM Drag bit performance evaluation bit design element analysis”, KTA 2012 Symposium, pp. 2-10, Korean Tunnelling and Underground space association “Tunnel engineering series 3 tunnel mechanized construction design” pp. 34-35.
  7. Kim, S.H., Kim J.T., Lim, C.H. (2012), “A study on the arrangement design of Shield-TBM cutter bit”, Journal of the Korean geotechnical society, Vol. 28, No. 5, pp. 9-10.
  8. Kim, S.H., Kim, J.T., Kang, J.K. (2010), “A study on TBM cutter head aperture ratio through the indoor model experiment”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association No. 11 Tunnel mechanized construction technology International Symposium, pp. 213-220.
  9. Oh, T.S. (2014), “Model testing and analysis on shield TBM excavation for railway tunnel in mixed ground”, Seoul University of Science and Technology, Railroad professional Graduate school, Railroad Construction Engineering Department, Thesis of Doctor of Engineering, pp. 39.
  10. Snowdon, R.A., Ryley, M.D., Temporal, J. (1982), “A study of disc cutting in selected british rocks”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomech. Abstr., 19, pp. 107-121.