

축소모형실험을 통한 쉴드TBM 커터비트의 절삭력 평가를 위한 기초 연구

김상환^{1*}, 장인석², 김지태³

A fundamental study on drag force of shield TBM cutter bit by scaled model test

Sang-Hwan Kim, In-suk Jang, Ji-Tae Kim

ABSTRACT This paper presents the fundamental study on drag force of shield TBM cutter bit by scaled model test. Several theoretical analyses of the drag force of cutter bit have been studied. However, there are still some difference between the theoretical approaches and actual drag bit capacity. In order to study the drag forces of shield TBM cutter bit, the scaled model tests are carried out and analyzed. The results obtained from scaled model tests are compared with the existing theoretical equations. It is highly expected that the results of this study will be very essentially useful to design and develop the TBM cutterhead.

Keywords: Shield TBM, cutter bit, drag force, scaled model test

요약 본 논문에서는 쉴드 TBM 커터비트의 절삭력 평가를 위한 기초적 연구를 실시하였다. 기존 커터비트 절삭력 분석을 위한 여러 이론식이 존재하지만 기존이론식은 실제 커터비트 절삭력과 차이를 보인다. 따라서 실제 커터비트의 절삭력을 분석하기위하여 축소모형실험을 실시하였으며, 축소모형시험에서 얻은 결과는 기존 이론식과 비교 분석하였다. 이 연구로부터 얻은 결과는 TBM 커터헤드 설계에 있어 기본적으로 매우 필수적인 자료로 활용될 것이라 판단된다.

주요어: 쉴드 TBM, 커터비트, 절삭력, 축소모형실험

접수일(2012.05.11), 수정일(2012.05.20), 게재확정일(2012.05.27)

¹정회원, 호서대학교 토목공학과 교수

²비회원, 호서대학교 토목공학과 석사과정

³정회원, 호서대학교 토목공학과 박사과정

*교신저자: 김상환 (E-mail: kimsh@hoseo.edu)

1. 서론

TBM은 커터헤드가 회전하며 지반굴착을 진행하므로 실질적으로 굴착대상 지반조건에 적합한 절삭도구의 선정과 설계는 쉴드 TBM의 굴착성능을 좌우하는 가장 중요한 과정이다. 복합지반이 주를 이루고 있는 국내지반의 경우 암반을 굴착하는 디스크커터와 더불어 커터비트의 절삭 성능이 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 따라서 지반 절삭도구인 디스크커터와 더불어 토사지반에 대한 절삭도구인 커터비트의 최적 설계가 무엇보다 중요하다. 하지만 아직까지 우리나라에서는 TBM을 전적으로 수입에 의존하고 있으며 TBM을 설계·제작할 수 있는 기술이 매우 미흡하다. 따라서 굴착대상 조건에 적합한 절삭도구의 선정 및 설계기술의 확보가 시급한 상황이다.

국외의 경우, 커터도구에 대한 설계기술을 바탕으로 TBM 디스크커터에 의한 암석절삭에 대한 실험적 연구(Snowdon 등, 1982)와 비트 절삭에 따른 굴착반응에 대한 연구(Detournay 등, 2008) 등 극히 부분적인 내용에 대한 학술적 논문이 주를 이루고 있다. 또한 실질적으로 설계에 필요한 설계요소에 대해 선진국가의 일부 TBM 제조회사가 독점하고 있으며, 설계 노하우 등 제작에 필요한 설계요소에 대해 공개하지 않고 있다.

국내의 경우, 터널굴착 시뮬레이션을 위한 터널굴착장비의 개발에 대한 연구(김상환, 2003), 실내모형실험을 통한 TBM 커터헤드 개구율에 관한 연구(김상환 등, 2010)를 통하여 쉴드 TBM 굴착성능 및 굴착에 따른 지반 거동에 대한 연구를 실시하였으며, 선형절삭시험기(LCM, Linear cutting machine)를 수행하여 디스크커터를 장착한 TBM 커터헤드의 최적 설계모델 도출을 위한 영향인자 분석에 관한 연구(장수호 등, 2007)와 단일절리를 포함한 암석 시험편에서 디스크커터의 압입에 의한 파괴 메커니즘의 수치해석적 연구(이승중 등, 2009)를 수행하였다. 그러나 기존의 국내 연구들은 암반지반용 TBM 및 포괄적인 쉴드 TBM 굴착에 따른 굴착성능 및 지반거동에 관한 연구로 국한되어 있으며, 풍화암 및 토사지반에 대한 절삭도구의 개별적인 절삭력 분석에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 커터비트의 설계와 절삭성능 평가를 위한 기술개발이 시급하다.

본 연구에서는 토사 및 복합지반을 대상으로 TBM의 절삭도구인 커터비트에 대한 개별 커터비트 실험 시스템을 구축하였다. 개별 커터비트 시스템은 지반강도 및 커터비트의 관입깊이, 각도 등을 변화시켜가며 실험을 수행할 수 있으며 다양한 설계조건들에 대한 절삭력 분석이 가능하다. 본 연구에서 구축한 실험시스템의 실험결과와 이론식에 의한 계산결과를 비교·분석하여, 커터비트의 최적 설계모델을 도출하기 위한 기초적인 자료들을 축적하고자 하였다.

2. 커터비트의 이론적 절삭 메커니즘

커터비트의 절삭 메커니즘에 대하여서는 많은 연구자에 의하여 제안된 모델들이 다수 있다. 그러나 본 연구에서는 터널 기계화 굴착에 사용되는 절삭도구인 커터비트의 지반 절삭 이론 중에 대표적으로 영국의 Evans 모델, 수정 Ernst-Merchant 모델과 일본의 Nishimatsu 모델 등에 대하여 검토하고 실험결과와 비교·분석하였다. 각 모델에 대한 상세분석 내용은 다음과 같다.

2.1 Evans 모델

Evans 모델의 메커니즘은 그림 1과 같이 지반의 전단면을 썩기형의 Drag pick로 절삭할 때, Pick의 끝에서 지반의 표면에 이르는 원호를 따라 인장파괴가 발생하고, 지반 절삭 시 지반에는 세 가지 힘이 작용한다고 보며 절삭력은 이 세 가지 힘과 평형상태를 이룬다고 가정한 모델이다.

- (1) 힘 R : Pick 면에 법선방향으로 작용하는 힘
- (2) 힘 T : 파괴면인 원호를 따라 작용하는 인장력의 합력
- (3) 힘 S : O점에서 지반이 절삭될 때 hinge를 따라 걸리는 반력

이 모델은 굴착거리가 관입깊이(d)에 비해 아주 작다는 가정 하에 커터비트로 인한 지반파괴 발생시 굴착지반에 발생하는 인장파괴를 가정으로 최대 절삭력을 예측하는 이론적 모델로 식 (1)과 같이 제시하였다.

$$F_c = \frac{2 \cdot t \cdot d \cdot \sin[(90^\circ - \alpha)/2]}{1 - \sin[(90^\circ - \alpha)/2]} \quad (1)$$

여기서, F_c : 파괴순간의 절삭력, d : 비트 관입깊이, w : 비트의 폭, α : 비트 절삭각도, t : 지반의 인장강도

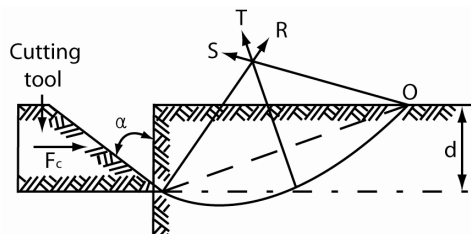


그림 1. Evans 모델

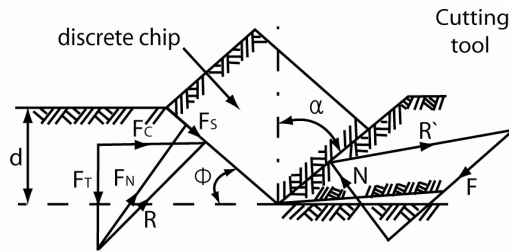


그림 2. 수정 Ernst-Merchant 모델

이 모델은 인장강도를 발휘할 수 있는 암반지반의 경우 적용성이 우수한 모델로 토사지반에 대한 절삭력 평가에는 적용성이 어렵다는 단점이 있다.

2.2 수정 Ernst-Merchant 모델

수정 Ernst-Merchant 모델은 지반의 절삭을 전단파괴의 과정으로 가정하고 있으며, 그림 2와 같이 Evans 모델과 동일하게 커터비트가 지반 절삭시 지반에 작용하는 전단력과 Pick 면에 작용하는 힘에 의한 평형상태를 가정함으로써 절삭력을 선정하는 모델로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (2)에서 제시된 관입깊이(Penetration depth)는 장비사양에 따라 영향이 증가하기 때문에 장비의 추진력과 회전력의 크기에 따른 사항도 고려되어야 할 것이다.

$$F_c = 2 \cdot w \cdot d \cdot s \cdot \tan^{0.5}(90 - \alpha - \tau) \quad (2)$$

여기서, F_c : 파괴순간의 절삭력, s : 지반의 전단강도(MPa), w : 비트의 폭(mm), d : 비트 관입 깊이(mm), τ : 지반과 비트 마찰각($^\circ$), α : 비트 절삭각도

2.3 Nishimatsu 모델

수정 Ernst-Merchant 모델에서는 지반의 전단강도가 전단면에 수직으로 작용하는 압축응력과 독립적이라는 가정을 하는 반면 Nishimatsu 모델은 지반의 전단강도와 커터비트와 지반과의 마찰각, 비트의 절삭각도, 커터비트의 폭을 절삭력 산정의 주요 Parameters로 가정하여 커터비트에 발생하는 절삭력을 산정하였다. 이러한 개념으로 파괴순간의 절삭력은 식 (3)과 같이 제시하였다. Nishimatsu 모델의 경우 다른 절삭력 산정모델에 비해 지반의 내부마찰각, 지반과 비트의 마찰각 등 비교적 많은 변수가 고려된 모델로 평가된다.

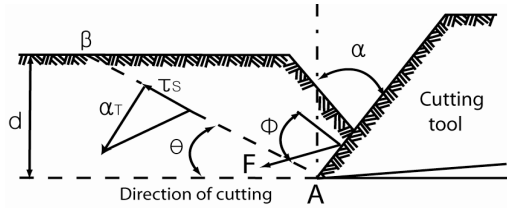


그림 3. Nishimatsu 모델

$$F_c = \frac{2 \cdot s \cdot w \cdot d \cdot \cos(\tau - \alpha) \cdot \cos\phi}{(13 - \alpha/5)(1 - \sin(\phi - \alpha + \tau))} \quad (3)$$

여기서, F_c : 파괴순간의 절삭력, d : 비트 관입깊이(mm), α : 비트 절삭각도($^\circ$), ϕ : 지반의 내부마찰각($^\circ$), s : 지반의 전단강도(MPa), w : 비트의 폭(mm), τ : 지반과 비트 마찰각($^\circ$),

2.4 커터비트 지반절삭에 따른 주요 변수

커터헤드가 지반을 굴착할 때 실제 작용하는 힘은 횡방향 작용력과 수직방향 작용력 등으로 구성되어 있다. 커터비트는 커터헤드의 회전방향으로 회전하면서 지반을 절삭한다. 커터비트는 굴착을 진행하는 추진력과 커터비트의 회전력, 비트의 폭, 배열, 설치 각도 등에 따라 절삭력이 결정되며 굴착효율에 영향을 미치게 된다.

실제 커터비트의 굴착효율을 얻는데 필요한 주요 변수들은 비트 절삭각도(α°), 지반과 비트사이 간격 각도(β°), 비트 절삭폭(w), 관입깊이(d), 지반과 비트사이의 마찰각(τ°), 비트 형태, 지반강도(전단강도, 압축강도 등) 및 비트의 배치간격 등 커터비트의 형상, 작동방법에 따라 절삭력에 영향을 받는다.

모든 변수들을 고려하여 실험을 실시하는 것은 실질적으로 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 여러 주요 변수들 중 커터비트 설계요소에서 가장 기본이 될 수 있는 비트 폭과 비트 설치각도, 비트의 관입깊이를 변수로 하여 실험을 실시하였다.

커터헤드에 부착된 커터비트를 이용하여 지반을 절삭할 때 그림 4와 같이 절삭힘은 비트 Pick의 깊이보다 더 깊게 발생하며, 절삭면과 비트 Pick과의 사이에는 절삭 관련 변수인 절삭각도(α), 비트와 지반과의 각도(β), 원추각(절삭시 비트와 지반사이에 발생하는 각: θ)이 존재한다. 절삭력은 관입 깊이와 절삭각도 인 α , 굴착지반의 지질특성 등에 따라 달라진다. 상기에 언급한 이론식은 수학적 모델에서 나온 이론식을 통하여 커터비트의 절삭력에 대해 분석하였으나, 실제 커터비트의 절삭력과는 다소 차이를 보일 수 있다.

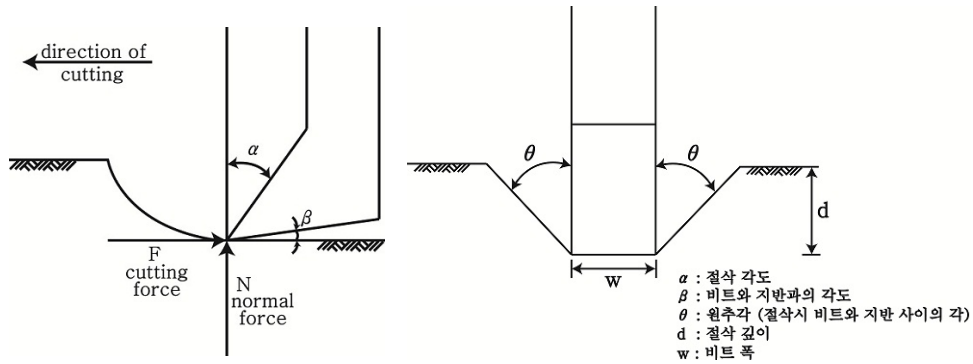


그림 4. Chisel pick의 주요 변수

3. 커터비트 축소모형 실험

3.1 모형실험장비개요

본 연구에서는 쉘드 TBM 커터비트가 지반을 절삭 할 때 발생하는 절삭력 분석을 위하여 개별 커터비트 실험기를 개발·제작하였다. 이를 위해 개별 커터비트 실험장비는 쉘드 TBM과 같은 원리를 적용하여 실제 지반굴착과 동일하게 굴착 가능하도록 모사하였다. 실내 실험장비는 그림 5와 같이 지반을 고정시키고 커터비트가 좌우로 이동하며 지반을 절삭할 수 있도록 설계·제작하였다.

개별 커터비트 실험 시스템은 그림 5와 같이 개별 커터비트 고정 및 이동시스템(A), 커터비트를 이동시켜 지반을 절삭시키는 시스템(B), 지반 절삭시 발생하는 장비 흔들림에 대해 완충 시켜주는 스프링 완충시스템(C), 일축압축실험 강도에 맞추어 조성된 실험용 지반(D), 비트커터 관입깊이 측정용 LVDT(E), 굴착거리 측측용 Wire LVDT(F), 절삭력 측측을 위한 Load cell(G)로 구성되어 있다. 개별 커터비트 실험장비의 주요 실험 조건 및 절삭력이 발생하는 원리를 그림 6과 같이 나타내었다.

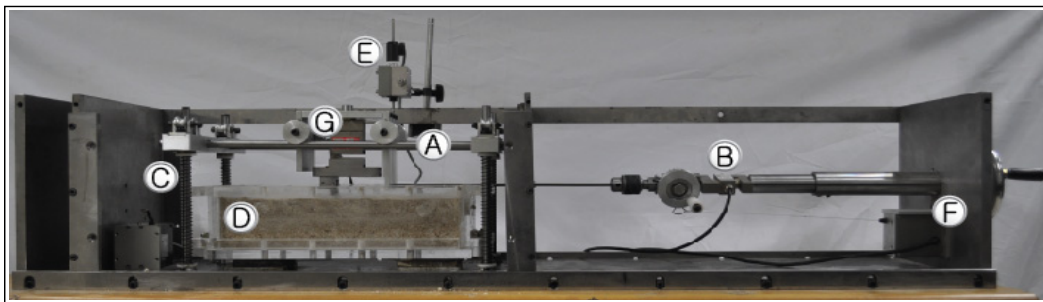
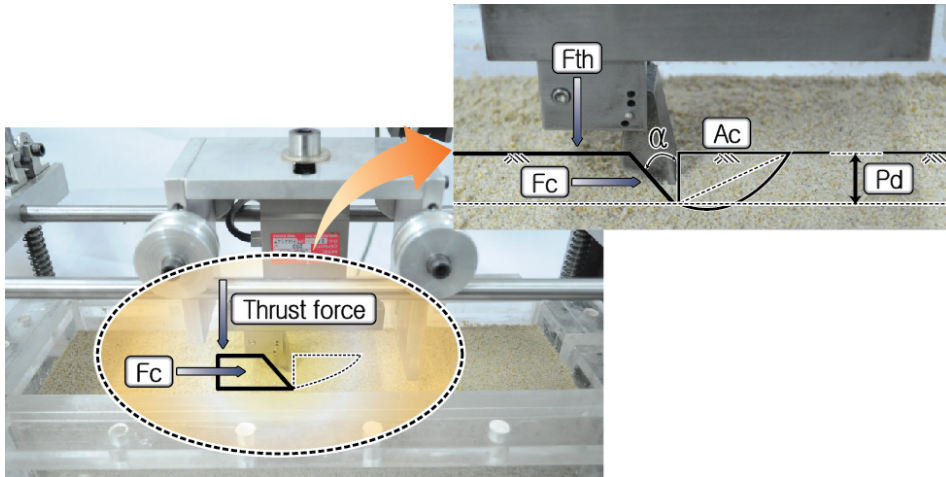


그림 5. 개별 커터비트 실험장비



Fc : 절삭력(Cutting force), Fth : 추력(Thrust force), Pd : 관입깊이(Penetration depth), Ac : 절삭영역(Cutting area)

그림 6. 커터비트 축소 모형 실험 절삭 메커니즘

3.2 모형커터비트모델

실내실험을 위해 선정된 커터비트의 형상은 복합지반 및 토사지반에 실제 시공된 실드 TBM 시공사례 조사와 문헌조사 자료를 바탕으로 제작되었다. 커터비트의 경우, 그림 7과 같이 실드 TBM 제조사, 적용지반에 따라 각각 다른 형상으로 분석되었다. 따라서 점선 원과 같이 밀집되어 분석된 커터비트의 형상에 대해 장비의 평균사양을 선정하고 이를 바탕으로 표 1과 같이 실내모형 실험인 것을 고려하여 개별비트 실험기의 축소율을 1/10로 적용하여 커터비트를 제작하였다.

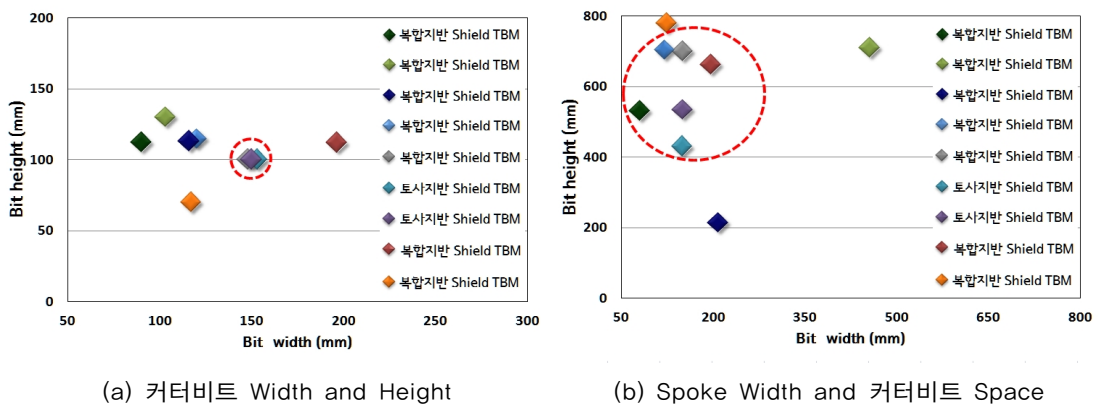
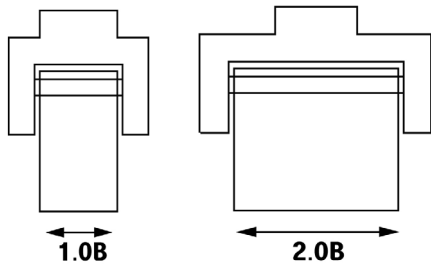
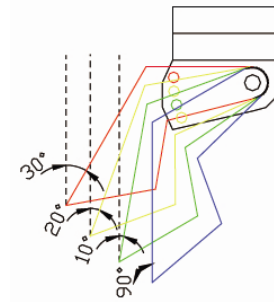


그림 7. TBM 커터비트 형상 분석



(a) 커터비트 폭



(b) 커터비트 각도

그림 8. 모형 실험 커터비트 형상 Case

표 1. 커터비트의 형상 선정

구분	커터비트		
	비트 폭(mm)	비트 높이(mm)	비트설치각(°)
실제 TBM 커터비트(평균사양 적용)	약 150(149.16)	약 120(119.05)	-
모형실험용 커터비트(1/10축소율 적용)	15~30	10~25	0~30°

커터비트의 형상은 일반적으로 많이 사용하고 있는 췌기형 Chisel pick 형태로 선정하였으며, 그림 8과 같이 커터비트폭은 1.0B(15 mm)와 2.0B(30 mm), 커터비트 각도는 0°, 10°, 20°, 30°로 조정하여 실험을 실시할 수 있게 제작하였다. 또한 각도 조절과 마모율에 따른 부품교체를 위해 조립식으로 제작하였다.

3.3 모형실험지반조성

토사지반 쉼드 TBM의 커터비트 절삭력 분석을 위하여 아래 표 2와 같이 기관별 일축압축강도에 따른 암반분류 기준과 표 3과 같이 사전 설계자료 분석을 통하여 구축된 지반물성 D/B를 분석하여 실내실험에 적용 할 지반을 풍화암으로 선정하였으며 실험 장비의 축소율과 같이 1/10의 축소율을 적용하여 실험 지반을 조성하였다.

표 2. 기관별 일축압축강도에 따른 암반분류 기준

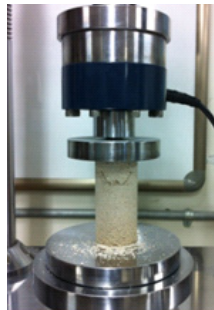
구분	풍화암 (MPa)	연 압 (MPa)	중경암 (MPa)	경 암 (MPa)	극경암 (MPa)
한국고속철도 건설공단	5이하	5~25	25~50	50~100	100이상
서울특별시 설계기준	10이하	10~25	25~50	50~100	100이상
지질조사 표준품셈	5이하	5~30	30~80	80~150	150이상

표 3. 전국 지질특성 데이터베이스

구분	일반 파라미터	매립층	중적층	중적층	중질토	중화암	I등급암	II등급암	III등급암	IV등급암	V등급암	연암	경암	단층대
서울경기지역 - 편마암	점착력 (kN/m ²)	15	-	13.8	20.8	30.5	2025	1013	650	310	85	-	-	50
	내부마찰각 (°)	25	-	25	27.8	29.5	46.5	39.5	34	33	30	-	-	27
서울경기지역 - 화강암	점착력 (kN/m ²)	-	-	-	-	-	7000	4000	1500	500	50	-	-	-
	내부마찰각 (°)	-	-	-	-	-	50	44	40	35	32	-	-	-
충청도지역 - 편암	점착력 (kN/m ²)	-	-	8	15	30	2700	1250	1600	675	175	-	-	-
	내부마찰각 (°)	-	-	29	29.5	32.5	46	41.5	39.5	33	32.5	-	-	-
충청도지역 - 화강암	점착력 (kN/m ²)	-	-	8	15	30	5455	3225	2000	1075	300	-	-	-
	내부마찰각 (°)	-	-	29	29.5	32.5	46	42.5	40.5	33.5	32.5	-	-	-
전라도지역 - 안산암	점착력 (kN/m ²)	0	-	10	10	20	200	400	-	-	-	-	-	-
	내부마찰각 (°)	25	-	30	30	32	35	41	-	-	-	-	-	-
전라도지역 - 용회암	점착력 (kN/m ²)	-	-	10	25	31	1900	1100	900	600	31	-	-	-
	내부마찰각 (°)	-	-	28	31	32	42	39	36	33	32	-	-	-
경상도지역 - 각성암	점착력 (kN/m ²)	-	0	10	20	30	-	-	-	-	-	230	430	-
	내부마찰각 (°)	-	30	33	30	32	-	-	-	-	-	33	40	-
경상도지역 - 화강암	점착력 (kN/m ²)	0	10	10	17.5	31	-	-	-	-	-	450	950	-
	내부마찰각 (°)	28	29	29	30	32	-	-	-	-	-	33.5	39.5	-

커터비트 분석용 실험지반의 강도측정은 높이 10 cm, 면적 19.625 cm²의 몰드 제작틀에 모래, 석고, 물의 배합비에 변화를 주어 혼합한 후 각 Case에 추 무게, 낙하높이, 타격횟수 등에 변화에 따른 다짐을 실시하여 몰드를 제작하였다. 제작된 몰드는 그림 9(a)와 같이 각 실험조건별 다짐 에너지 변화에 따른 일축압축강도를 측정 후, 그림 9(b)와 같이 실내 실험용 지반을 제작하였다.

또한 조성된 실험용 지반에 대하여 동일한 전단실험용 몰드를 제작하고 직접전단실험을 실시하여 점착력과 내부 마찰각을 산정하였다. 일축압축강도 실험과 직접전단실험 결과는 표 4와 같다.



(a) 일축압축강도 실험



(b) 실험지반 조성

그림 9. 실험지반 조성방법

표 4. 지반강도에 따른 지반계수

구분	실제 풍화암 지반강도	실험 지반강도
점착력(kPa)	30~50	25
내부마찰각(°)	30~33	28
일축압축강도(MPa)	5이하	0.3

표 5. 실험 Case

구분	실험 Case			
지반 강도(풍화암) (kPa)	300			
커터비트 폭(W)	1.0B(15 mm)		2.0B(30 mm)	
관입깊이(Penetration depth) (mm)	4	6	8	
절삭 각도 (°)	0	10	20	30

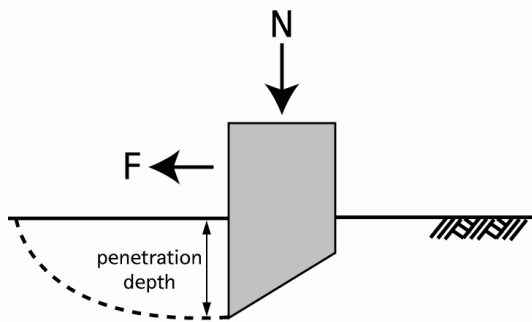


그림 10. 모형실험방법

3.4 모형실험방법

모형 실험 조건은 표 4와 같이 실험 지반으로 조성한 풍화암 지반에 대하여 커터비트 각도(0°, 10°, 20°, 30°)와 커터비트 주요 변수인 관입깊이 (2 mm, 4 mm, 6 mm)를 변경하며 실험을 실시하였다. 또한 비트폭을 1.0B(15 mm)와 2.0B(30 mm)로 선정하여 총 24개 Case의 실험 조건에 대해 절삭력을 분석하였다. 절삭력 측정을 위하여 커터비트상부와 커터비트 이동시스템에 로드셀을 설치하여 지반 절삭시 발생하는 응력을 측정하고 계측시스템을 이용하여 커터비트의 절삭거리 (Cutting distance)와 관입깊이(Penetration depth)를 측정하였다.

4. 실험 결과

개별 커터비트 실험 시스템을 이용하여 지반강도 및 커터비트의 관입깊이, 각도 등에 따른 절삭력 변화에 대한 기초적인 실험을 수행하였다. 실험 비트 커터비트 형상 폭인 1B(15 mm)와 2B(30 mm)에 대해 절삭력 측정 실험을 실시한 결과는 다음 그림 11, 12와 같고 최대 절삭력은 표 6, 7에 정리하였다. 비트폭 1.0B에 대한 커터비트 절삭력을 측정된 결과는 다음 그림 11과 같다.

실험결과 절삭 초기에 최대 절삭력이 발현된 후, 절삭이 진행됨에 따라 균일한 절삭력을 보였다. 또한 절삭각도가 증가함에 따라 비트커터의 절삭력이 감소하였다. 관입깊이가 깊어짐으로써 절삭단면이 커지기 때문에 절삭력은 증가하는 경향을 보였다. 최대 절삭력은 절삭각도 0°, 관입깊이 8 mm에서 0.170 kN으로 측정되었다.

비트폭 2.0B에서 관입깊이와 비트의 설치각도별 커터비트 절삭력 측정결과는 다음 그림 11과 같다.

실험결과 비트 폭 1.0B와 마찬가지로 절삭 초기에 최대 절삭력이 발현된 후, 절삭이 진행됨에 따라 균일한 절삭력을 보였다. 비트폭 2.0B의 경우도 1.0B와 같이 최대 절삭력은 절삭각도 0°, 관입깊이 8 mm에서 발현되었으며 필요 절삭력은 0.212 kN로 1.0B에 비해 약 25% 증가하는 것으로 측정되었다.

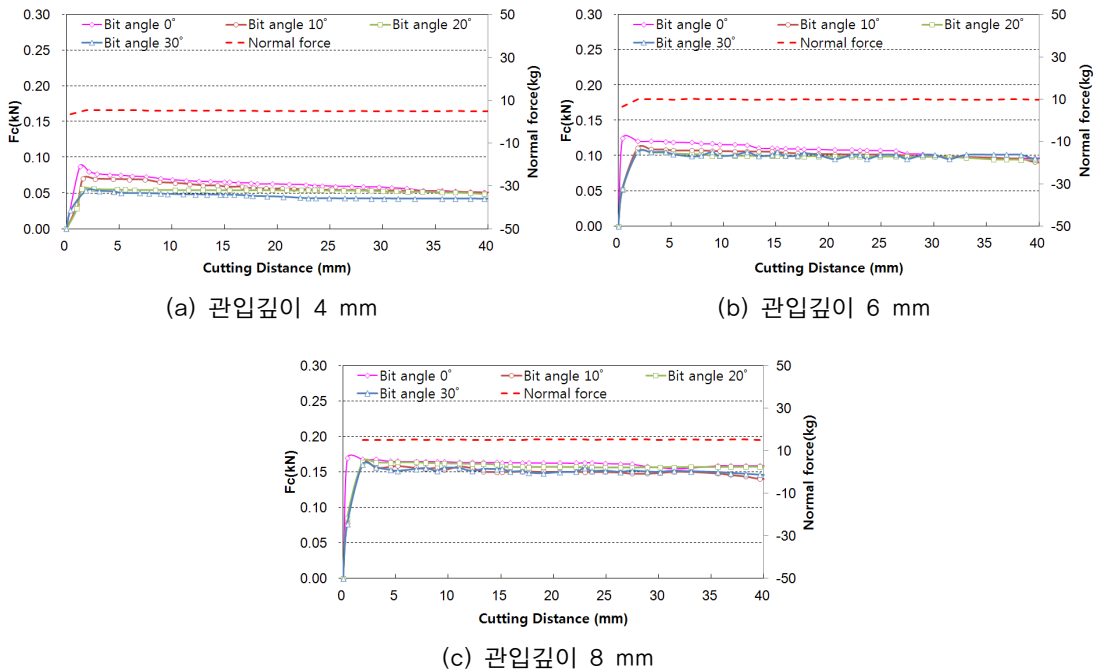
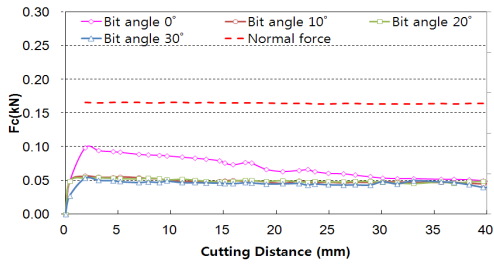


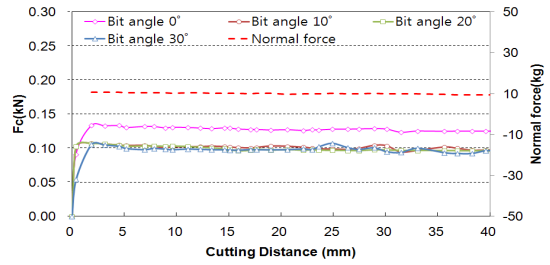
그림 11. 비트폭 1B(15 mm)의 커터비트 절삭력 측정결과

표 6. 비트폭 1.0B(15 mm) 커터비트의 절삭력 측정결과(단위: kN)

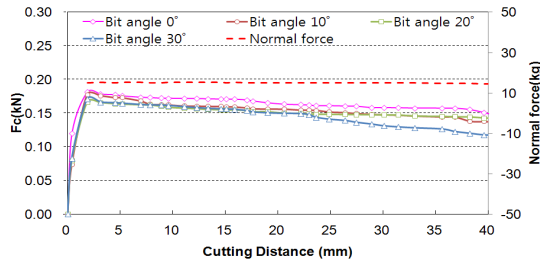
구분	절삭각도 0°	절삭각도 10°	절삭각도 20°	절삭각도 30°
관입깊이 4 mm	0.088	0.070	0.056	0.053
관입깊이 6 mm	0.125	0.111	0.105	0.110
관입깊이 8 mm	0.170	0.168	0.162	0.160



(a) 관입깊이 4 mm



(b) 관입깊이 6 mm



(c) 관입깊이 8 mm

그림 12. 비트폭 2.0B(30 mm)의 커터비트 절삭력 측정결과

표 7. 비트폭 2.0B(30 mm) 커터비트의 절삭력 측정결과(단위: kN)

구분	절삭각도 0°	절삭각도 10°	절삭각도 20°	절삭각도 30°
관입깊이 4 mm	0.101	0.091	0.061	0.060
관입깊이 6 mm	0.146	0.141	0.120	0.112
관입깊이 8 mm	0.212	0.180	0.173	0.164

5. 결과 분석

커터비트 형상변화(비트 폭, 비트 설치 각도)와 비트 관입깊이에 따른 조건별 실내 실험결과와 다양한 이론식에 의한 계산결과를 비교·분석한 결과는 다음과 같다.

비트폭 1.0B에 대한 모형실험 및 기존 이론식을 통한 커터비트 예측절삭력 분석 결과 커터비트의 절삭각도가 증가함에 따라 절삭력이 감소하였다. 지반과 커터비트가 수직으로 형성될 경우 지반에 작용하는 전단력과 Pick면에 작용하는 힘에 가장 크게 작용하고 있는 비트의 설치각도가 증가할수록 지반과 커터비트사이의 마찰력이 감소하여 나타난 결과라고 판단되어 진다. 관입깊이에 따른 절삭력 변화를 분석한 결과 관입깊이 증가에 따른 절삭면적 증가로 인해 절삭력이 증가하는 것으로 나타났다. 모형실험을 통한 절삭력 분석결과도 관입깊이가 깊어질수록 커터비트 절삭력

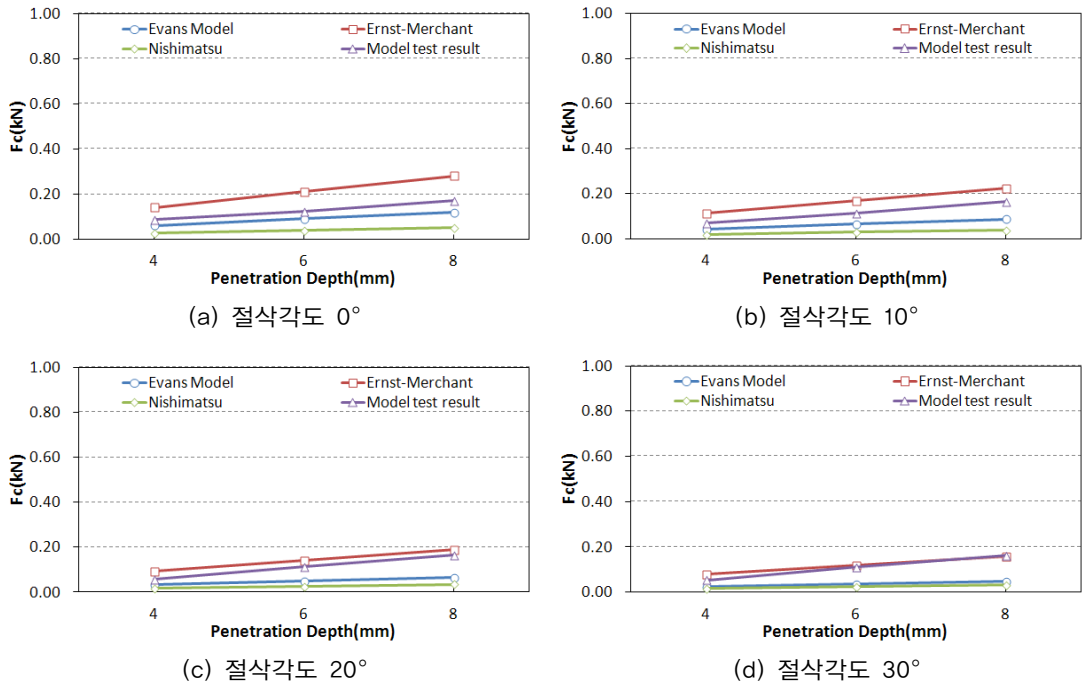


그림 13. 비트 폭 1.0B에 대한 분석결과

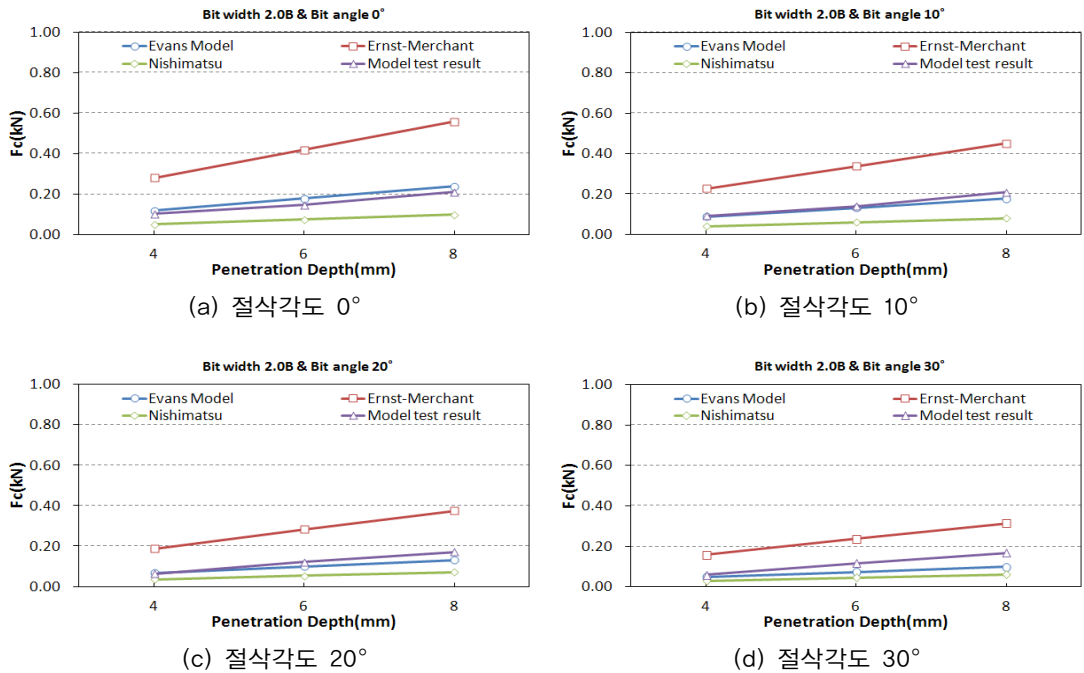


그림 14. 비트 폭 2.0B에 대한 분석결과

또한 증가하는 경향을 보였다. 이는 커터비트 절삭시 지질특성 중 일축압축강도 및 전단강도 등의 지반강도가 커터비트 절삭력에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

비트폭 2.0B에 대한 모형실험 및 기존 이론식을 통한 커터비트 예측절삭력 분석 결과는 비트폭 1.0B의 분석결과와 비슷한 경향을 보였다. 다만 절삭 깊이와 비트폭에 큰 영향을 받는 Ernst-Merchant모델의 경우 비트의 폭이 커지면서 필요 절삭력이 다른 이론식 및 실험결과 보다 크게 나타나는 경향을 보였다. 이는 Ernst-Merchant모델의 경우 지반상태보다 장비사양에 따른 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다.

모형실험을 통한 커터 비트폭 1.0B와 2.0B의 예측절삭력 분석 결과는 그림 15와 같다. 비트 설치 각도가 증가함에 따라 필요 절삭력은 감소하였으며 비트폭에 따른 절삭력은 1.0B에 비해 2.0B이 약 3~28% 크게 발생하였다.

이론식에 의해 산정된 예측절삭력은 동일 지반에서는 비트의 폭과 비트의 설치각도에 따라 일정하게 산출되는 반면 모형실험결과를 통해 도출된 예측절삭력은 비트의 설치각이 20°이하일 경우 비트 폭이 넓어짐에 따라 크게 증가하는 경향을 보였다. 향후 비트 설치각에 대한 다양한 분석이 이루어진다면 최적의 절삭각 선정기법 개발이 이루어 질 것으로 판단된다.

커터비트로 인한 지반 절삭시 주요 Parameters(관입깊이, 절삭각도, 비트 폭)에 대한 모형실험 결과와 기존 커터비트 절삭 이론식을 이용하여 도출된 절삭력을 비교·분석한 결과 지질특성 보다는 장비사양에 영향을 많이 받는 Ernst-Merchant 모델과 차이를 보였다. 하지만 모형실험을 통한 커터비트 절삭력 분석에 있어 Scale Effect등의 영향으로 다소 차이는 발생하였으나 지질특성을 고려한 Evans모델이나 Nishimastu모델의 경우는 근사한 절삭력이 필요한 것으로 검토되었다.

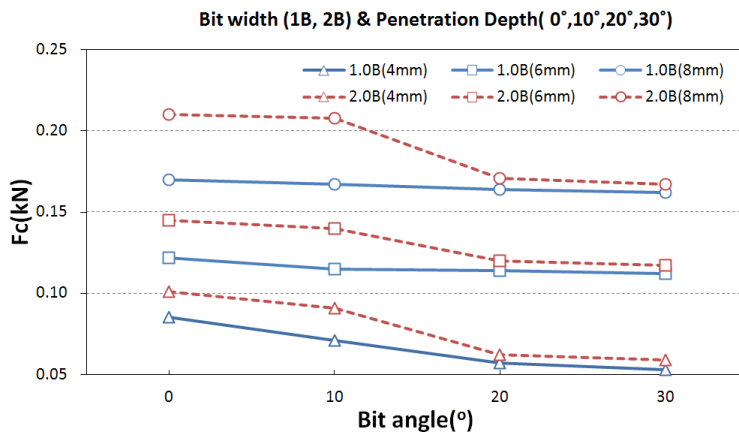


그림 15. 비트 폭 1.0B와 2.0B에 대한 모형실험 결과 분석

본 연구의 경우, 실제 장비 및 지반이 아닌 축소율을 적용한 모형실험이므로 실제 지반에 대하여 강도 축소율 1/10을 적용함에 있어 실내모형실험 특성상 실험지반 조성재료의 근본적인 성질에 차이 등으로 인한 기존지반을 100% 동일하게 구현하지 못하는 한계가 있다. 또한 실제 TBM장비의 성능 제원과 비교하여 매우 작은 힘으로 구동하게 되므로 실제와는 다소 차이가 발생할 수 있다. 그러나 본 연구는 커터비트 형상변화와 관입깊이에 따른 절삭력의 경향을 분석한 기초적 연구이므로 다양한 설계조건에 따른 절삭력을 분석하고, 실내 실험결과와 이론식에 의한 계산결과를 비교·분석하여, 커터비트의 최적 설계모델을 도출하기 위한 기초적인 자료들을 축적하고자 하였다.

6. 결 론

본 연구는 커터비트 형상변화(비트 설치각도, 비트폭) 및 관입깊이에 따른 절삭력의 경향을 분석한 기초적 연구이다. 따라서 다양한 절삭조건에 따른 커터비트의 절삭력을 실험적으로 분석하고, 기존 이론식에 의한 계산결과를 비교·분석하였다. 연구결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

1. 비트형상과 관입깊이에 대한 실험결과 절삭 초기에 최대 절삭력이 발현된 후, 절삭이 진행됨에 따라 균일한 절삭력을 보이며, 절삭각도가 증가함에 따라 비트커터의 절삭력이 감소하는 경향으로 나타났다. 관입깊이(Penetration depth)가 깊어지고 비트의 폭이 넓어짐에 따라 절삭단면이 커지기 때문에 필요 절삭력은 증가하였다.
2. 이론식에 의한 예측절삭력 산정시 장비사양(Thrust force, Torque, 비트 폭 등)의 영향을 많이 받는 Ernst-Merchant 모델은 관입깊이가 깊어지고 비트의 폭이 넓어짐에 따라 커터비트의 필요 절삭력이 크게 증가하였으며 Evans 모델과 Nishimatsu 모델, 모형실험결과는 비트의 설치각도가 증가함에 따라 근사한 절삭력이 필요한 것으로 나타났다. 그러나 실제 커터비트의 절삭력을 예측하기 위해서는 오차범위에 대한 충분한 고려가 필요하다고 판단되어진다.
3. 실험결과와 실제 TBM장비의 성능 제원을 비교할 경우 실험결과에 다소 오차가 있을 것으로 판단되나 설계시 Evans 모델과 Nishimatsu 모델의 경우 복합지반 및 토사지반 커터비트의 절삭력을 예측하는데 가장 적합할 것으로 판단된다.
4. 본 연구의 실험결과는 커터비트 절삭력 평가에 대한 커터비트의 절삭력은 여러 변수에 의해 영향을 받으므로 토크와 추력과의 상관관계 및 커터비트의 형상, 작동방법 등에 따른 추가적인 실험이 수행되어 절삭력 예측모델 개발 및 검증이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 실내실험의 한계상 실제 지반 및 TBM 장비를 100% 동일하게 모사하지 못하기 때문에 커터비트의 다양한 요소들 중 커터비트 형상과 관입깊이에 대한 경향적 분석을 진행하였다. 향후 Scale Effect를 고려한 실험을 실시함으로써 기존에 제시된 절삭력 예측 이론식들을 보완한 예측모델 개발의 기초 자료로 활용할 것이다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM 터널의 최적 건설기술(과제번호 : 10기술혁신E09) - 토사지반 커터헤드 설계요소 핵심기술 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

참고 문헌

1. 김상환 (2003), “터널굴착 시뮬레이션을 위한 터널굴착장비의 개발에 대한 연구”, 한국터널지하공간학회 논문집, Vol. 5, No. 2, pp. 199-207.
2. 김상환, 김지태, 강준구 (2010), “실내모형실험을 통한 TBM 커터헤드 개구율에 관한 연구”, 한국터널지하공간학회 제 11차 터널 기계화 시공기술 국제 심포지움 논문집, pp. 213-220.
3. 이승중, 최성웅 (2009), “단일절리를 포함한 암석 시험편에서 디스크 커터의 압입에 의한 파괴 메커니즘의 수치해석적 연구”, 한국터널지하공간학회, Vol. 19, No. 5, pp. 440-449.
4. 지왕률, 이호성 (2001), “실드 TBM의 지반굴삭 원리”, 터널과 지하공간, 한국지반공학회, Vol. 11, No. 3, pp. 191-199.
5. Emmanuel Detournay, Thomas Richard, and Mike Shepherd (2008), “Drilling response of drag bits: Theory and experiment”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 45, pp. 1347-1360.
6. Evans, I. (1962). “A theory on the basic mechanics of coal ploughing.”. Proceedings of the International Symposium on Mining Research, Pergamon, London, Vol. 2, pp. 761-798.
7. Nishimatsu Y. (1972). “The mechanics of rock cutting”. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 9, pp. 261-270.
8. Merchant, M.E. (1945), “Basic mechanics of the metal cutting process”. Journal of Applied Mech, Volume: 11, Issue: 3, pp. 168-175
9. 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.