

20CTAP
-C152888
-02

언더커팅을 적용한
기반기술개발 최종보고서

2021

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

보안 과제(), 일반 과제() / 공개(), 비공개() 발간등록번호(11-B552989-000361-01)
ISBN(979-11-88683-19-2)

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종 보고서

R&D / 20CTAP-C152888-02

언더커팅을 적용한 암반굴착장비의 기반기술개발 최종보고서

2021. 1. 14.

주관연구기관 / 서울대학교 산학협력단

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

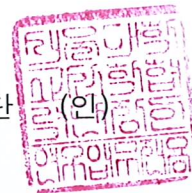
제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘언더커팅을 적용한 암반굴착장비의 기반기술 개발’(연구개발 기간 : 2019. 4. ~ 2020. 12.)
과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2021. 02. 16.

주관연구기관명 : 서울대학교 산학협력단



주관연구기관책임자 : 전석원

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	1615011220	해당 단계 연구 기간	2020.01.01.~ 2020.12.31	단계구분	(2년차)/ (2년차)
연구사업명	중사업명				
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	언더커팅을 적용한 암반굴착장비의 기반기술개발			
연구책임자	전석원	해당단계 참여연구원 수	총: 7 명 내부: 1 명 외부: 6 명	해당단계 연구비	정부: 200,000 천원 계: 200,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 8 명 내부: 1 명 외부: 7 명	총 연구비	정부: 360,000 천원 계: 360,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	서울대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	보안등급: 일반				
	본 연구과제는 under-cutting에 의한 기계굴착장비와 관련한 기반기술개발을 위한 기초연구로서, 본 과제의 연구성과 공개는 under-cutting을 활용한 기계굴착 장비의 국산화를 위한 기반을 제공할 것으로 판단됨. 개발된 연구성과의 보호가 필요하다고 판단되는 경우에는 특허 출원을 통하여 지식재산권을 설정하였음.				

9대 성과 등록 · 기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	6	2				1					

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설 · 장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약

- 본 연구의 최종목표는 암반기계굴착장비에 적용되는 새로운 암석절삭방식인 언더커팅에 관한 기반기술을 개발하는 것임.
- 본 연구개발과제에서 대상으로 하는 공법의 적용 대상 암반은 극경암까지 적용될 수 있는 것을 목표로 함
- 본 연구의 세부 연구성과로는 언더커팅을 적용한 기계굴착장비의 굴착성능 평가 시스템 구축, 언더커팅 절삭시험법 확립, 언더커팅에 의한 암석절삭 해석기법 개발, 언더커팅 암석절삭메커니즘의 이론 정립, 언더커팅 핵심설계변수 도출, 절삭 시험인프라를 활용한 언더커팅 절삭시험결과 도출 등이 달성됨.

보고서 면수: 93

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 본 연구과제에서는 암반기계굴착장비에 적용되는 새로운 암석절삭방식인 언더커팅(undercutting)에 관한 기반기술을 개발하는 것을 목표로 함. 본 연구에서 대상으로 하는 언더커팅의 적용 범위는 연암(20 MPa)에서부터 극경암(200 MPa)이며, 기존 TBM 디스크커터 대비 절삭효율을 20% 이상 높일 수 있는 기술 개발을 궁극적인 목표로 함. ○ 언더커팅을 적용한 기계굴착장비의 굴착성능 평가 시스템 구축 및 시험법 확립 - 언더커팅에 의한 암석절삭성능을 평가할 수 있는 시험시스템을 설계·제작함 - 구축된 시험인프라를 활용하여 언더커팅에 의한 암석절삭시험법을 확립함 ○ 언더커팅에 의한 암석절삭 해석기법 개발 - 언더커팅형 커터에 의한 3차원 암석절삭 수치해석모델을 개발함 - 절삭시험 결과와의 비교를 통해 수치해석기법의 적용성을 평가함 ○ 암석절삭메커니즘의 규명 및 최적 절삭조건 도출 - 다양한 절삭조건을 고려하여 언더커팅에 의한 암반절삭메커니즘을 규명함 - 절삭시험 및 해석결과에 기반하여 언더커팅의 최적 절삭조건을 규명함 ○ 언더커팅방식 기계굴착장비의 핵심설계변수 및 설계개념 정립 - 언더커팅형 기계굴착장비의 핵심설계변수를 규명함 - 언더커팅형 기계굴착장비의 설계흐름을 정립함				
연구개발성과	○ 본 연구과제를 통해 SCI 논문 4건, 비SCI 논문 2건, 특허출원 2건, 소프트웨어 등록 1건, 학술발표 2건, 인력양성 2건을 달성하였음.				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 향후 언더커팅형 암반굴착장비의 설계 및 제작에 필요한 핵심기술을 개발하고 이를 후속연구의 핵심 원천기술로 활용함 ○ 개발된 기술을 바탕으로 해외 선진 연구기관과의 공동·협력연구를 추진함 ○ 기술선진국과의 기술격차를 해소하고 최신기술개발을 선도하는 역할로의 전환 도모함 ○ 점진적으로 TBM공법 등 기계굴착공법의 인식을 개선하고 기계굴착장비의 국산화에 기여하고자 함				
국문핵심어 (5개 이내)	언더커팅	암석절삭	기계굴착공법	터널	지하공간
영문핵심어 (5개 이내)	Undercutting	Rock cutting	Mechanical excavation method	Tunnel	Underground space

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	5
1.1 연구개발의 목적 및 필요성	5
1.2 연구개발의 범위	13
2. 연구수행내용 및 성과	16
2.1 연구개발 추진전략 및 방법	16
2.2 연구개발 추진체계 및 일정	16
2.3 연구개발성과	18
2.4 연구결과	21
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	87
3.1 목표	87
3.2 목표 달성여부	88
3.3 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성)	89
4. 연구개발성과의 활용 계획	90
붙임. 참고 문헌	91

<별첨> 주관연구기관의 자체 평가 의견서

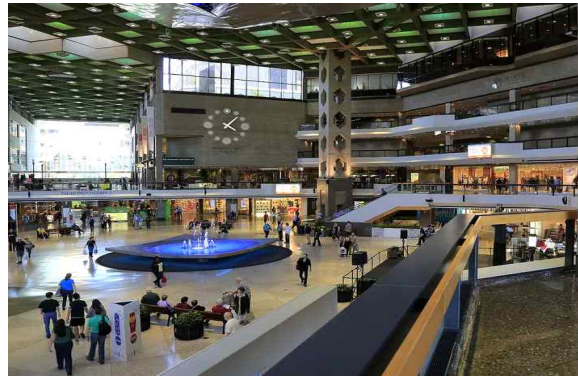
1. 연구개발과제의 개요

1.1 연구개발의 목적 및 필요성

세계적으로 지하공간은 지속가능한 발전(sustainable development), 에너지 절감 등을 위한 프론티어 공간(frontier space)으로서 고려되고 있다. 토론토 패스, 몬트리올 언더그라운드 시티, 뉴욕 로라인(Lowline) 프로젝트 등 세계 각국에서 지하공간을 효율적으로 활용하는 사례들을 어렵지 않게 찾아볼 수 있으며, 최근 국내에서도 지하공간을 개발하여 활용하기 위한 영동대로 지하공간 복합개발사업(강남권 광역복합환승센터 개발사업), 광화문 지하도시 등의 대규모 사업들이 예정되어 있는 상황이다. 따라서 도심지 지하공간을 효율적·친환경적으로 건설하기 위한 공법의 개발이 끊임없이 요구되고 있다.



(a) 토론토 패스



(b) 몬트리올 지하도시



(c) 뉴욕 로라인(Lowline) 프로젝트



(d) 영동대로 지하공간 복합개발사업

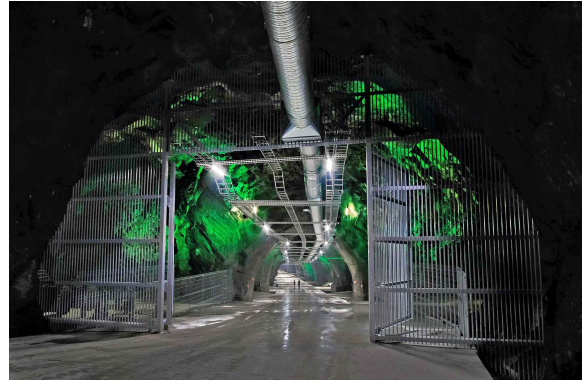
그림 1.1. 세계 각국에서 운영 중인 지하공간 개발사업 예시

한편 지하공간은 생활공간 뿐만 아니라 혐오시설(방사성폐기물 처분시설, 오폐수 처리시설, 발전소 등)의 지하화 및 병커형 데이터센터 건설에도 중요하게 고려되고 있다. 이미 국내에서 세계 최초로 도심지 지하에 화력발전소를 건설하는 사업이 수행되었고(당인리 화력발전소), 병커형 데이터센터의 경우에는 미국, 영국, 스웨덴, 스위스, 노르웨이 등 세계 각지에서 건

설되어 운영되고 있으며, 향후 많은 사업이 예정되어 있는 것으로 파악되고 있다.



(a) Pionen Data Center (스톡홀름)



(b) Lefdal Mine Data Center (노르웨이)

그림 1.2. 병커형 데이터센터 운영 예시

이러한 지하 공간 개발에는 지반(암반)을 굴착 하는 작업이 필수적이지만 소음·진동 등으로 인한 민원과 환경피해로 인해 도심지에서 발파굴착이나 대규모 개착공사를 실시하는 것은 매우 제한적이며 소음·진동의 발생으로 인한 민원으로 인해 공사기간이 증가하는 사례를 어렵지 않게 찾아볼 수 있다. 그로 인해 도심지에서의 터널공사 및 지하공간 개발은 기계식 굴착공법을 적용하는 것이 일반적이다. 해외에서 도심지에서의 지하공간 개발에 기계식 굴착공법을 적용한 사례를 살펴보면, 뉴욕의 East Side Access 터널, 대단면 터널인 Devil's Slide 터널, Caldecott Fourth Bore 고속도로 터널 등 대규모 프로젝트 사례가 있으며, 이러한 도심지에서의 프로젝트에서 기계굴착공법이 효과적이었음이 보고되고 있으며, 국내에서도 도심지에서의 터널 및 지하공간 개발 공사에서 기계식 굴착공법의 적용이 늘어나고 있는 추세에 있다.

터널 및 지하공간의 건설에 가장 대표적으로 활용되는 암반 기계굴착장비는 TBM과 로드헤더이다. 그 중 굴착면과 직교하는 방향으로 암석을 파쇄하며 굴진하는 TBM은 굴착하는 형상이 제한적이며(특수한 목적으로 개발된 TBM은 사각단면 등을 가지기도 한다), 굴진방향 또한 선형 혹은 일부 곡률을 갖는 정도로 제한되는 한계점이 있다. 한편 로드헤더는 부분단면 굴착 방식으로 TBM과 달리 단면의 형상을 자유롭게 굴착할 수 있는 장비이나, 절삭도구로 사용하는 픽 커터의 절삭성능 및 내마모성의 한계로 인하여 적용 가능한 암석의 강도가 약 100 MPa 까지로 보고되고 있다. 따라서 주로 연암에서 효율적인 굴착성능을 보이는 것으로 알려져 있으며, 광산 개발을 목적으로 개발된 컨티뉴어스 마이너(continuous miner), 쉬어러(shearer) 등의 기계굴착장비도 연암 굴착만이 가능하여 우리나라와 같이 암반이 양호한 조건에서는 적용이 제한된다(KICT, 2015).



(a) TBM



(b) Roadheader

그림 1.3. 대표적인 기계굴착장비인 전단면 굴착기(TBM) 및 자유단면 굴착기(roadheader)

한편 수로터널 및 공동구 터널의 경우, 원형단면을 전부 본래의 용도로 활용할 수 있지만 교통터널(도로, 철도)은 시공 터널 단면이 표준화되어 있기 때문에, 표준화된 단면 규격 및 형상을 만족시키기 위해서, 터널단면보다 큰 직경을 굴착하고 여분의 공간을 다른 용도로 활용하거나, 단면보다 작은 직경의 원형 단면을 굴착 후 발파공법을 이용하여 터널 단면을 확장하는 공법을 사용하고 있다. 대표적인 예로는 과거 국내 중앙고속도로에 위치한 죽령터널 시공 시, TBM-NATM의 병용공법이 적용된 바 있으나 발파공법의 한계(소음·진동 발생, 낮은 굴진율)로 인하여 진동 저감(TBM pilot 터널 선 굴착을 통한 자유면 확보)과 공기/공사비 저감이라는 소기의 목적을 달성하기 어려웠던 것으로 보고된 바 있다. 국내에서는 죽령터널에서의 확공 시도 이후 NATM공법을 이용한 확공 공법이 적용된 바 없는 것으로 보고되고 있다.

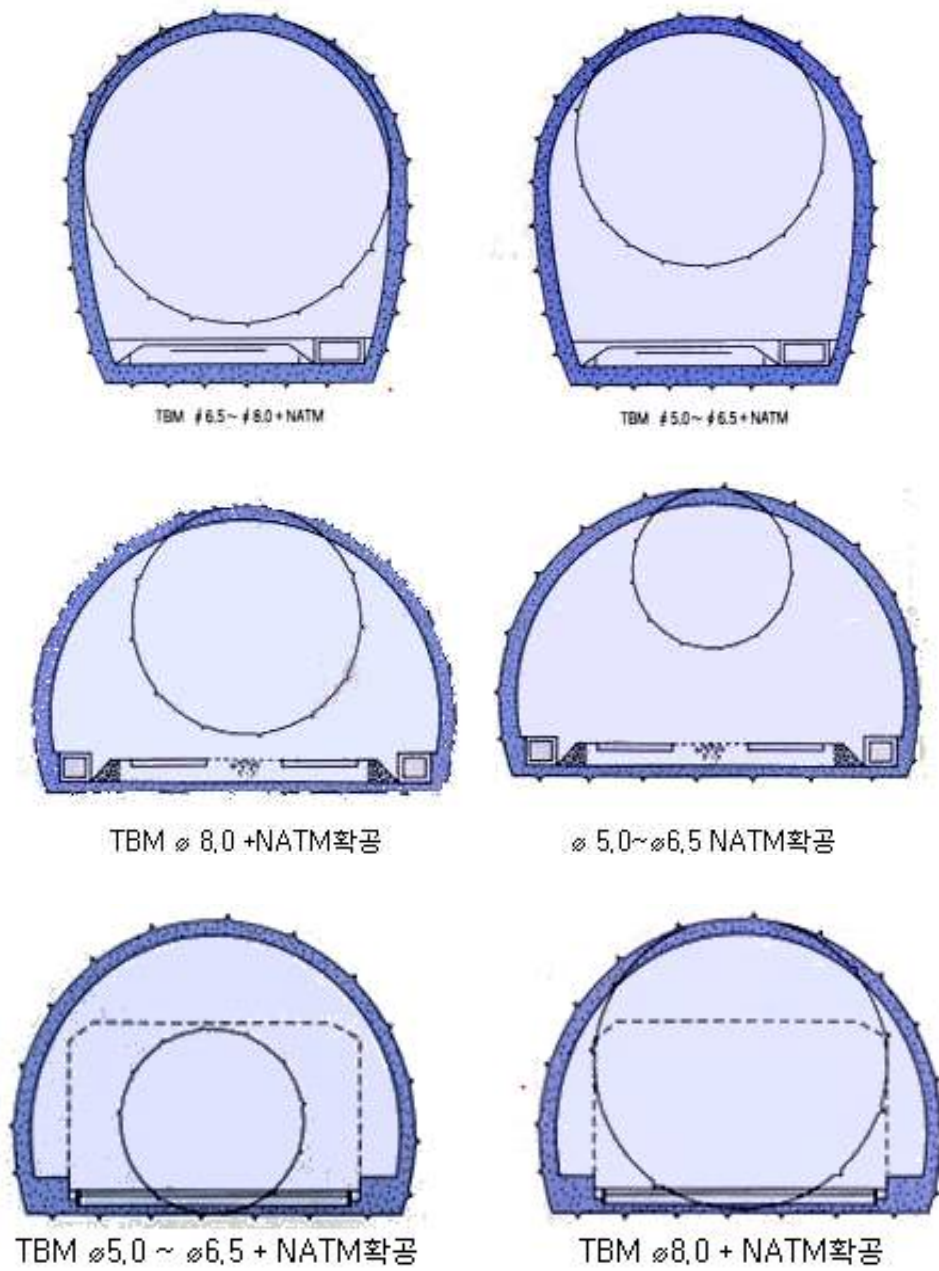
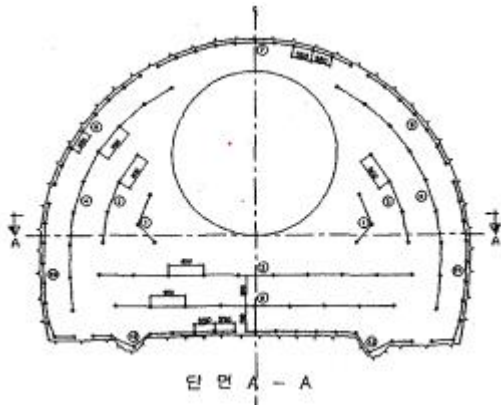


그림 1.4. TBM 교통 터널에서의 단면 확장 예시



(a) TBM-NATM 병용 설계 단면 형상



(b) 시공사진

그림 1.5. 죽령터널에서의 TBM+NATM 병용공법 적용 예시

이러한 효율적인 지하공간의 개발을 위한 TBM 및 기계식 굴착공법의 적용성을 높이기 위해서는 터널의 확공을 위한 효율적인 보조 굴착공법의 개발이 요구된다고 할 수 있다. 상술한 기존 TBM과 로드헤더와 같은 암반굴착장비의 한계점을 극복하기 위하여 해외에서는 2000년대 중반부터 언더커팅형 암반기계굴착장비의 개발을 시작한 바 있다. 최근 10년 사이에는 이미 시작품 제작이 완료되어 터널 및 지하공간개발 등의 토목사업 뿐만 아니라 일부 국가에서는 자원개발에 시험적용하여 그 적용성을 평가하고 있는 단계에 있다. 해외에서의 적용사례에 의하면 언더커팅형 기계굴착 장비는 기존 암반기계굴착 장비의 단점을 보완하고자 개발된 장비이기 때문에, 적용 가능한 단면형상에 제한이 없을 뿐만 아니라 적용되는 암반의 강도도 연암에서부터 경암에 이르기까지 전 범위의 강도를 갖는 암반에 대하여 효율적인 굴착이 가능한 것으로 보고하고 있다.



(a) Wirth 사



(b) Sandvik 사

그림 1.6. 해외의 언더커팅형 기계굴착장비

하지만 과거 TBM 및 로드헤더의 핵심기술과 마찬가지로 언더커팅형 기계굴착장비의 경우에도 유럽, 미국, 호주 등 일부 선진국들에 의해서만 연구개발이 이루어지고 있는 상황이다 (Ramezanzadeh and Hood, 2010, Van Dan Berg, 2014). 따라서 장비의 커터헤드설계, 절삭도구 형상, 사양설계 등 핵심적인 기술들이 철저히 비공개 되어있는 상황으로 독자적인 연구개발이 이루어지지 않고서는 해당기술로의 진입이 불가능한 상황이라고 할 수 있다.

기존 기계굴착공법의 경우, 암석절삭 메커니즘에 대하여 여전히 연구자들 간에 의견이 분분한 상황이지만, 절삭도구(예: 디스크커터, 픽커터)가 암석을 압입함에 따라 생성된 높은 압축응력으로부터 유도되는 인장응력이 암석의 인장균열을 발생시켜 암석을 칩핑(chipping)한다는 것이 이론이 일반적으로 통용되고 있다.

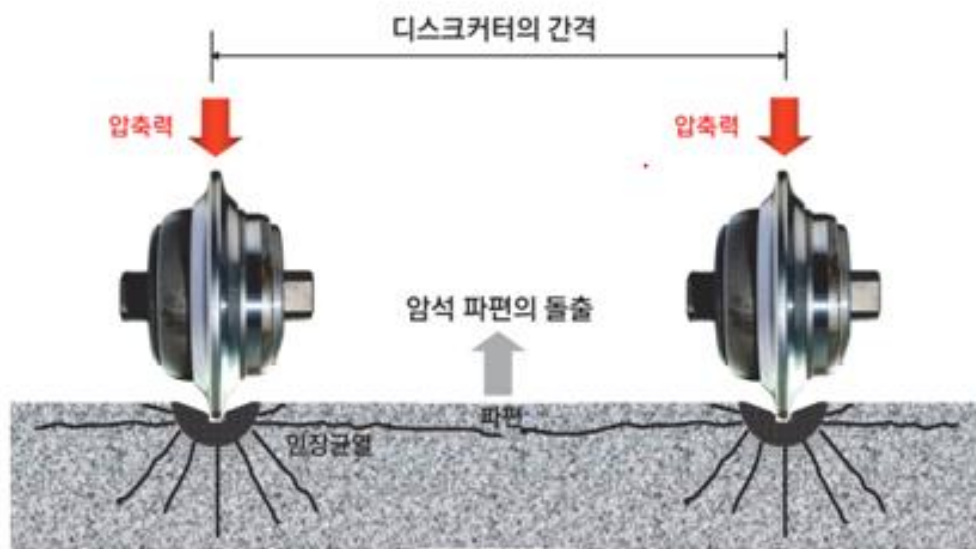
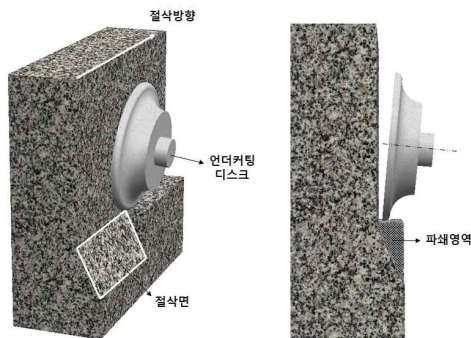


그림 1.7. 기존의 암석절삭 개념 및 이론

반면 본 연구과제에서 대상으로 하는 언더커팅은 최근 암석절삭 분야에서 연구되고 있는 주제로서, 압축 응력장으로부터 인장균열을 유도하기보다 인장균열이 발생하기 쉬운 방향으로 절삭력을 가하여 인장균열을 직접 생성하는 암석절삭 방식이다. 또한 기계굴착장비에 일반적으로 사용되는 절삭 도구인 디스크커터와 픽 커터에 모두 적용 가능한 기술이다.

한편 암석은 취성거동을 보이는 대표적인 재료로서, 압축강도에 비하여 낮은 인장강도를 가지는 것이 특징이다. 따라서 압축응력으로부터 인장응력을 유도시켜 암석을 절삭하는 경우, 실제 절삭에 필요한 에너지(작용력)보다 큰 수준의 응력장을 생성하여야 하는 반면, 언더커팅 기술을 적용할 경우 전통적인 암석절삭(conventional rock cutting) 메커니즘에 비해 낮은 커터작용력으로 높은 절삭효율을 기대할 수 있다는 장점이 있으며, 특히 암석의 강도가 강하여 기존의 로드헤더로 절삭이 불가능하거나 굴진 성능이 떨어지는 암석 강도의 범위에서도 효과적으로 적용 가능하다는 장점을 가진다.

특히 국내에는 편마암 같은 이방성 암석이 흔히 나타나며 이방성 암석에서는 편리, 엽리면 같은 불연속면이 존재하는데 이는 연약면으로 작용한다. 언더커팅형 절삭방식을 적용하여 연약면 방향으로 균열의 발생방향을 제어할 경우, 절삭효율이 극대화 될 수 있으며 이는 기존의 암석절삭방식에서는 적용이 불가능한 방식이다.



(a) 언더 커팅의 개념



(b) 언더커팅에 의한 암반굴착

그림 1.8. 언더커팅의 개념 및 이에 의한 암석절삭

상기 언급된 기존 암석절삭방식과 비교하여 언더커팅에서는 적용되는 절삭조건과 이에 따른 암석의 절삭메커니즘이 상이하므로, 언더커팅 조건에서의 암석 절삭메커니즘을 규명하고 암석을 효율적으로 절삭하기 위한 최적절삭조건을 결정하기 위한 연구가 필요하다고 할 수 있다.

한편 기계굴착에 의한 암석의 절삭메커니즘을 이해하고 절삭효율을 평가하는 방법으로 가장 직관적이며 정확한 방법은 실험실에서의 암석절삭시험이다. 과거 디스크커터 및 픽 커터를 장착한 다양한 기계굴착장비의 핵심설계기술들은 실험실에서 수행된 수많은 선형절삭시험 결과로부터 도출되었으며, 언더커팅의 경우에도 유사한 접근이 이루어지고 있다. 호주 CSIRO에서는 언더커팅과 관련한 암석절삭시험을 수행하기 위한 시험시설을 구축하고 그 결과를 장비의 설계에 활용하고 있는 것으로 파악되고 있다(Dehkhoda and Detournay, 2017, 2019, Dehkhoda and Hill, 2019).



(a) 기존 선형절삭시험장비(서울대학교)



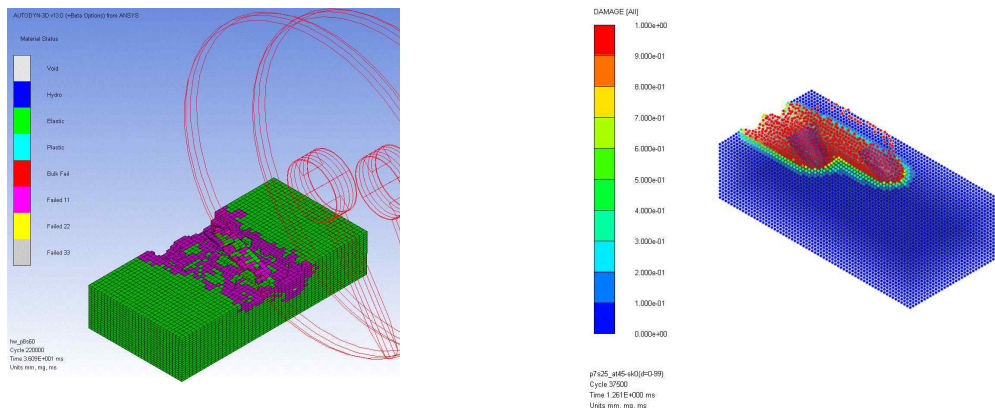
(b) 언더커팅형 선형절삭시험장비(호주)

그림 1.9. 암석의 절삭성능평가를 위한 절삭시험장비 예시

1.2 연구개발의 범위

본 연구과제에서는 언더커팅에 의한 절삭성능평가 시험시스템을 구축하고(기존 선형절삭 시험 장비 업그레이드) 언더커팅 커터의 절삭성능을 평가하는 시험법을 정립하는 것을 연구목표 중 하나로 설정하였다. 구축된 시스템 및 시험법을 활용하여 다양한 절삭조건하에서 절삭 시험을 수행하고, 언더커팅에 의한 암석절삭 메커니즘을 규명하여 언더커팅을 이용한 기계굴착장비의 핵심설계변수(커터작용력, 절삭각도, 절삭궤적 등)들을 도출하고자 하였다.

또한 본 연구과제에서는 실험적인 한계를 보완하고자 상기 절삭과정을 수치해석적으로 모사하는 기법을 개발하고 이를 실험결과와 비교하여 수치해석기법의 적용성을 확보하고자 하였다. 과거 국가연구개발사업을 통하여 암석의 절삭해석기술(디스크커터, 픽커터)을 성공적으로 개발한 바 있기 때문에 이를 활용하면 암석의 절삭메커니즘을 이해하고 실험적으로 구현이 어려운 조건에서의 절삭성능 변화를 관찰하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.



(a) 디스크커터

(b) 픽커터

그림 1.10. 절삭도구에 의한 암석절삭해석 예시

언더커팅형 장비는 전통적인 암석절삭 방식에 비하여 굴착에 소요되는 힘과 에너지(동력, 추력 등)를 대폭 절감할 수 있으므로 장비의 크기와 중량을 소형화하는 것이 가능하다. 국가개발연구사업을 통하여 TBM(국토교통과학기술진흥원)과 로드헤더(한국건설기술연구원, 한국생산기술연구원)를 설계·제작하기 위한 핵심기술들이 연구되고 있으나, 이와 같은 대형 기계굴착장비를 생산하기 위해서는 초기 투자비가 높기 때문에 기계굴착장비의 완전 국산화의 가능성은 여전히 미지수인 상황으로 새로운 굴착방식을 적용한 굴착장비의 개발도 요구되는 상황이라 할 수 있다.

언더커팅형 기계굴착방식은 터널/토목 공사에 이용되는 TBM, 로드헤더, 트랜처 뿐만 아니라 자원개발분야에서 활용되는 shearer, continuous miner, reef miner, mobile miner 등 모든

암반기계굴착장비에 확장하여 적용 가능한 기술이다. TBM의 경우에는 전통적인 방식에 비하여 언더커팅방식을 적용하였을 때 동일한 암반 조건에서 장비의 주요사양을 50% 이상 감소시킬 수 있는 것으로 보고하고 있으며, 장비의 중량 또한 50% 이상 경량화 할 수 있는 것으로 보고 하였다.

소형화된 장비의 경우 초기 투자비가 낮기 때문에 장비의 제작 및 실제 설계를 위한 핵심 기술을 국산화 할 수 있는 가능성이 높다. 이러한 경우에도 이론적/실험적 기반기술, 설계모델 등의 장비설계기술, 제작기술 등을 후속연구를 통해 단계적으로 개발하는 것이 중요하며, 본 연구과제는 이론적 실험적 기반기술을 개발하는 것을 목표로 하였다.

일부 선진국에서 개발된 언더커팅 굴착장비 관련 핵심기술들은 비공개 상태이기 때문에 기반기술의 자립화가 필요한 상황이다. 본 연구과제에서는 암석 절삭시험 및 수치적 절삭시험에 의해 규명된 최적 절삭조건과 도출된 핵심설계변수를 이용하여 언더커팅형 암반기계굴착 장비의 설계개념을 정립하는 것을 목표로 하였다.

상술한 선행 연구내용을 종합하여 본 연구과제에서는 1) 언더커팅을 적용한 기계굴착장비의 굴착성능 평가 시스템 구축 및 시험법 확립, 2) 언더커팅에 의한 암석절삭 해석기법 개발, 3) 언더커팅에 의한 암석절삭메커니즘의 규명 및 최적 절삭조건 도출, 4) 언더커팅방식 기계굴착장비의 핵심설계변수 도출을 연구 개발 내용으로 설정하였다. 이를 통하여, 국내 도심지에서의 대규모 지하공간 건설에 기계식굴착공법의 적용성을 높이고 해당 기술 분야의 국가경쟁력을 제고하는 것을 본 연구의 비전으로 설정하였다.

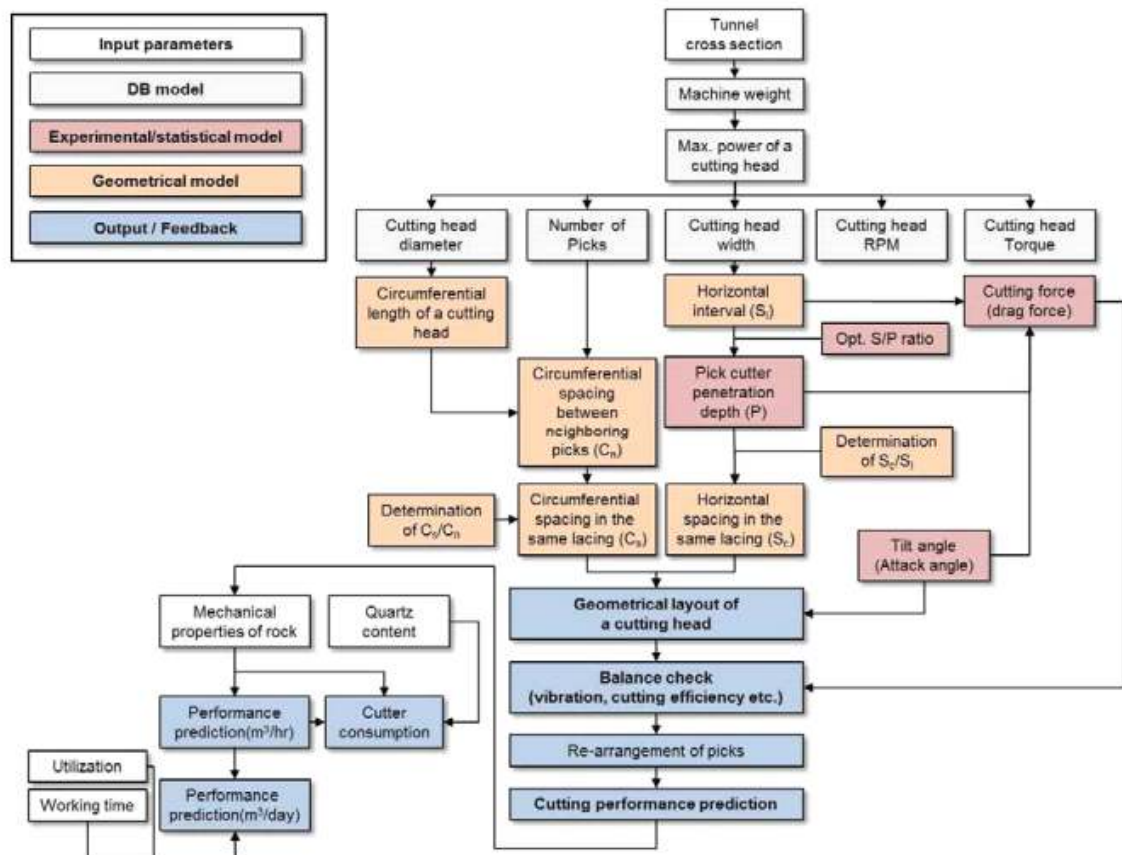
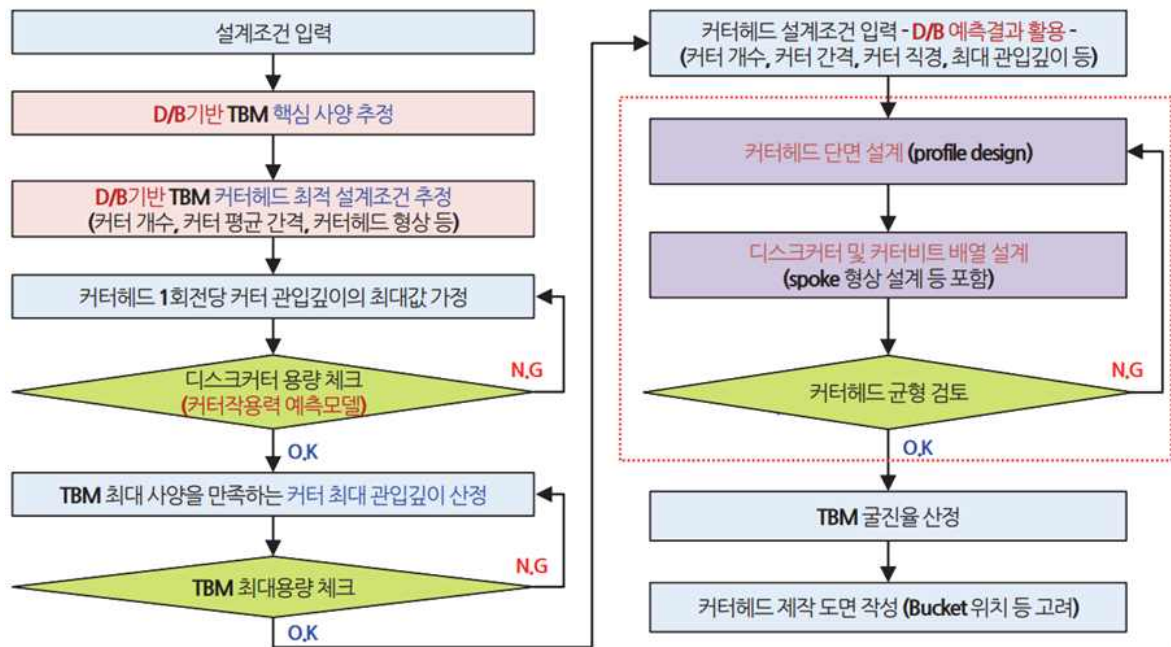


그림 1.11. 기존 암반절삭 방식을 적용한 기계굴착장비의 설계흐름도 예시

2. 연구수행내용 및 성과

2.1 연구개발 추진전략 및 방법

본 연구에서 설정한 연구목표를 달성하고 해당 연구결과를 도출하기 위하여 다음과 같은 추진전략을 계획하였다.

- 기존의 암반기계굴착관련 업계 전문가들을 활용하여 연구개발의 기술적 보완사항에 대한 꾸준한 자문 수행
- 수치해석모델 개발에 있어, 선행 국가연구개발 사업을 통해 개발된 기술을 적극 활용. 본 연구과제의 주관연구기관은 기계굴착에 관한 선행 국가연구개발사업에 다수 참여하여 이에 관한 노하우와 연구인력을 보유하고 있음
- 필요시 외국 전문가 또는 외국기관과 협업하여 연구 진행의 효율성을 제고함
- 비교적 단기간에 연구가 수행되는 것을 고려하여 연구진의 연구참여율을 높게 설정하여 연구 집중도를 제고하고 설정된 연구목표를 충분히 달성할 수 있도록 함
- 실용화나 제품화가 가능한 기술들은 특허출원을 진행하여 연구성과의 지적재산권을 보호할 예정

2.2 연구개발 추진체계 및 일정

<추진체계>

연구개발과제		총 참여 연구원
과제명	언더커팅을 적용한 암반굴착장비의 기반기술개발	주관연구책임자(전석원)외 총 7명
서울대학교 산학협력단		
언더커팅을 적용한 암반굴착장비의 기반기술개발		
연구책임자명(전석원)외 7명		
담당기술개발내용		
• 언더커팅을 적용한 기계굴착장비의 굴착성능 시험인프라 구축 및 시험법 확립 • 언더커팅에 의한 암석절삭 해석기법 개발 • 언더커팅에 의한 암석절삭메커니즘의 규명 및 최적 절삭조건 도출 • 언더커팅방식 기계굴착장비의 핵심설계변수 및 설계개념 정립		

<추진일정>

1차년도															
일련 번호	연구내용	추진 일정												비고	책임자 (소속 기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	선행기술조사														
2	언더커팅 시험시스템 구축														
3	언더커팅 암석절삭시험 법 정립														
4	예비시험 수행														
5	시험시스템 수정 및 보완														
6	수치해석 모델개발														
2차년도															
1	언더커팅 시험수행														
2	언더커팅 수치해석														
3	해석모델 보완														
4	언더커팅에 의한 암석절삭 메커니즘 규명														
5	언더커팅 커터의 최적절삭조건 규명														
6	암반굴착장비 의 굴진성능 평가기법 제시														
7	언더커팅형 암반굴착장비 의 설계개념 제안														

2.3 연구 개발 성과

(1) 국내·외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저 자명	권(호)	국명	발행 기관	SCI 여부 (SCI/비 SCI)	게재일	등록 번호*
1	Rock cutting simulation of point attack picks using the smooth particle hydrodynamic s technique and the cumulative damage model	Applied Sciences	정호영 (전석원)	10	스위스	MDPI	SCI	2020.07	
2	Fracturing behavior around a blasthole in a brittle material under blasting loading	International Journal of Impact Engineering	정호영 (전석원)	140	네덜란드	Elsevier	SCI	2020.06	
3	Effect of skew angle on the cutting performance and cutting stability of point-attack type picks	Tunnelling and Underground Space Technology	정호영 (전석원)	103	네덜란드	Elsevier	SCI	2020.09	
4	Applicability of partition approximation source locating technique for a transversely isotropic medium	Episodes (Journal of International Geosciences)	최승범 (전석원)	43(4)	대한민국	IUGS (국제지질학 연합)	SCI	2020.12	

5	언더커팅을 적용한 암반굴착장비의 현황 분석	터널과 지하공간	정호영 (전석원*)	29(3)	대한민국	한국 암반 공학회	비SCI	2019.06	
6	구동형 언더커팅 디스크에 의한 암석절삭에 관한 기초연구	터널과 지하공간	정호영 (전석원*)	30(6)	대한민국	한국 암반 공학회	비SCI	2020.12	

(2) 지식재산권

번호	지식재산권 등 명칭	국명	출원·등록				기여율
			출원·등록 인	출원·등록 일	출원·등록번호	등록번호	
1	암반 굴착용 언더커팅 디스크 커터	대한민국	서울대학교 산학협력단	2020.07.03	10-2020-0082231		100%
2	언더커팅형 암반 굴착 장비의 절삭성능평가를 위한 암석 절삭 시험 장치, 시스템 및 분석방법	대한민국	서울대학교 산학협력단	2020.10.08	10-2020-0130334		100%

(3) 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	International Symposium on Rock Mechanics and Engineering for Sustainable Energy / The 35 th VSRM Anniversary Symposium	전석원	19.11.22	하노이	베트남
2	The 5 th Young Scholar's Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future	전석원	19.12.03	오키나와	일본

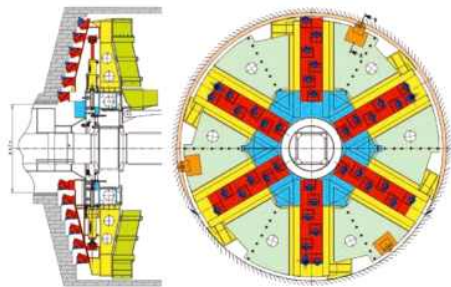
(4) 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호*	저작권자 명	기여 율
1	Tunnel Boring Extender(터널 굴착 확공기)의 절삭궤적 모사 프로그램	20.10.01	정호영, 전석원	20.12.23	C-2020-0 52106	서울대학 교산학협 력단	100%

2.4 연구 결과

(1) 해외 선행기술분석

본 연구에서는 해외 문헌, 제작사 홈페이지 조사를 통하여 해외 언더커팅형 장비를 조사하여 사양, 절삭방식, 굴착성능 등에 대한 선행기술에 대한 조사를 수행하였다. 현재 선진국에서도 언더커팅을 적용한 다양한 형식의 기계굴착장비를 제작하여 현장에서의 적용성을 평가하고 있는 상황에 있다. 언더커팅의 경우 장비 형상에 대한 자유도가 높아 장비의 형상에 따른 체계적인 분류는 불가능한 상황이나 언더커팅의 절삭메커니즘에 따라 비구동형 언더커팅방식과 구동형 언더커팅방식으로 나눌 수 있는 것으로 조사되었다.



(a) 비 구동형 언더커팅 굴착장비



(b) 구동형 언더커팅 굴착장비

그림 2.1. 언더커팅형 암반굴착장비의 분류

Aker Solutions와 Sandvik사는 터널 굴착/광물 채광 장비 제조업체로 언더커팅 기술을 도입한 신타형 장비를 제작하여 시작품에 대한 실증 및 시험채광을 성공적으로 수행한 이력이 있는 것으로 조사되었다. 최근에는 직사각형 등 다양한 단면 굴착 기술이 개발되고 있으며, MTM (Mobile Tunnel Miner)라고 불리는 장비의 개발에 성공하였다. 당시 개발한 MTM은 직경 5.5 m부터 12 m의 터널을 굴착할 수 있으며 단면형상에 제한이 없다는 장점을 가지고 있었으며, Reef miner에 언더커팅방식을 적용한 ARM 1100 장비는 Sandvik사에서 개발한 것으로서 남아프리카공화국에 위치한 백금광산에 투입되어 경암층(150-200 MPa)를 시공한 실적을 확보한 바 있다.

Sandvik사는 ARM 1100장비를 활용하여 보통암층(40-120 MPa)에서도 시험채광을 수행한 실적을 보고하였다. 하지만 보통암층에서의 시공에서는, 암석의 높은 마모도로 인해 시험채광이 성공적이지 못하였던 것으로 보이며, 최근 꾸준히 해당기술에 대한 연구를 수행하여 보완된 장비를 활용하여 경암층(단축압축강도 250 MPa 이상)에 위치한 텅스텐 광산에 적용한 사례를 보고한 바 있으나(2017년), 장비의 사양이나 굴진성능에 대한 자세한 내용은 공개되어 있지 않다.



그림 2.2. Aker Solutions와 Sandvik사에서 개발한 언더커팅방식을 적용한 기계굴착장비

한편 Aker Wirth사에서 개발한 “Wirth TBE 500/1440 H-HST” 장비의 경우, 기존의 TBM을 재활용하여 언더커팅형방식 방식의 TBM으로 변형시켜 제작한 장비(Reaming Tunnel Boring Machine)이며, 이 장비는 스위스 Uetilberg 터널공사에 투입되어 직경 14.4 m의 터널(2.8 km, 경암)을 성공적으로 시공한 것으로 보고하였다.

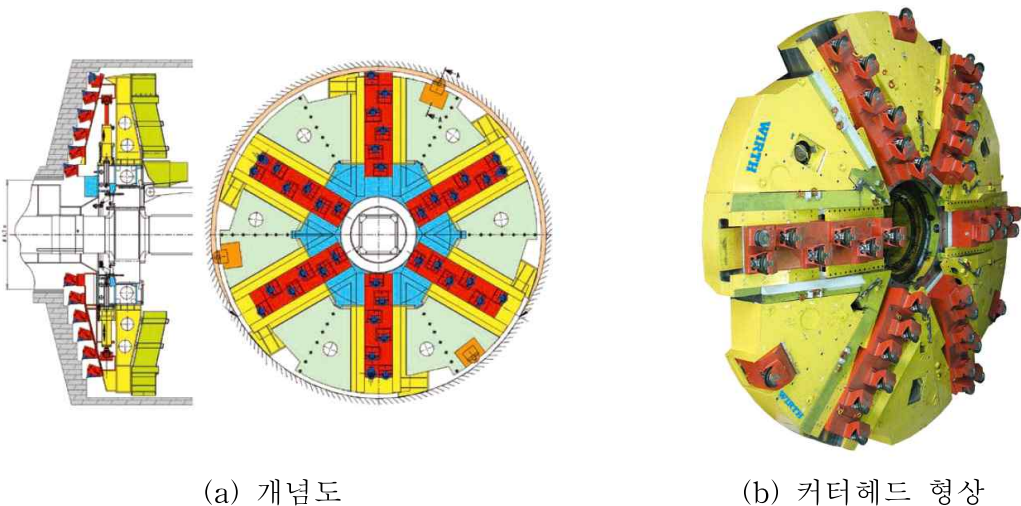


그림 2.3. Wirth사에서 개발한 언더커팅방식을 적용한 TBE

Aker Wirth는 광물 채광뿐만 아니라 언더커팅을 이용한 토목용 터널 굴착 기술도 보유하고 있으며(TBE, Tunnel Boring Extender), 전통적인 TBM에 비하여 동력(power), 장비무게, 공사비 감축 효과가 있음을 보고하였다. 여기서 TBE 공법은 커터헤드 중앙부에 자유면 형성을 위한 선행보링터널을 굴착한 후 보링공으로부터 커터헤드의 위치상 외곽에 설치되는 언더커팅 디스크를 통해 순차적으로 절삭면을 형성하는 방식으로 터널을 굴착하는 공법이며, 직경이 작은 터널에서는 언더커팅 디스크를 굴착장비의 암에 장착하여 TBE와 같은 보조공법 없

이 터널 굴착을 수행할 수 있는 특징을 갖고 있다. 반면 대단면의 터널을 굴착할 때에는, 상술한 암의 작업반경 제한으로 인해 언더커팅형 장비를 TBE와 같은 보조굴착공법과 동시에 적용하는 것으로 파악된다. TBE의 운영방법 및 설계변수에 대해서는 본 절의 후반부에 보다 자세히 설명하였다.

이와 같이 언더커팅방식의 기계굴착장비는 단독으로 다양한 형상의 터널 공사 및 지하공간 개발에 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 기존 기계굴착장비에의 적용성 또한 확보된 기술로 파악되었다. 또한 단독적인 시공 외에도 지하공간 및 터널 공사를 위한 기존 부분단면굴착기 및 발파공법을 보완하기 위한 보조굴착공법으로서의 적용성도 높은 것으로 조사되었다.

언더커팅에 관한 연구를 선도하고 있는 호주 CSIRO의 선행연구(Kovalyshen, 2015; Dehkhoda and Detournay, 2017, 2019; Dehkhoda and Hill, 2019)에서 수행한 언더커팅 절삭시험(직경 50 mm 커터) 자료를 수집하였다. 그 결과 본 연구과제에서와 동일한 수준으로 주요 절삭변수들을 간략히 변화시켜가며 언더커팅 절삭방식의 절삭효율을 분석하는 연구를 수행하여오고 있는 것으로 조사되었고 이론적인 모델의 검증에 중점으로 시험이 수행되고 있는 것으로 분석되었다.

(2) 언더커팅 시험시스템 구축

암석의 기계식 절삭성능을 실험적으로 평가하기 위한 시험으로는 선형절삭시험(linear cutting machine test)이 대표적이다. 선형절삭시험(linear cutting test)은 영국 Newcastle대학에서 최초로 제안되고 미국 CSM에서 발전된 이후 현재까지 암반의 절삭성능을 평가하고 설계변수를 도출하는 방법으로 유용하게 활용되어 오고 있다. 선형절삭시험은 크기효과를 배제할 수 있을 정도의 큰 시험편과 절삭도구를 사용하여 암반을 절삭하는데 소요되는 절삭도구의 작용력을 측정하고 절삭효율을 평가하여 설계변수를 획득한다. 선형절삭시험은 그 스케일에 따라 실규모 선형절삭시험(full-scale linear cutting test), 소규모 절삭시험(small-scale cutting test)으로 구분된다. 실규모 선형절삭시험은 대형 암석블록 시험체가 필요하고 시험을 수행하는데 시간과 노력이 수반된다는 단점이 있으나 다른 예측 방법에 비하여 상대적으로 정확한 예측이 가능한 장점이 있다. 이에 반해 소규모 절삭시험은 암석코어를 사용하거나 실규모 선형절삭시험에 비해 축소된 암석블록 시험체를 사용하는 방법으로, 암석코어와 소형 커터를 사용하는 경우에는 축소시험을 통해 지수화된 시험이 가능하지만 축소된 암석블록시험체와 실제 크기 커터를 사용하는 경우에는 실규모 선형절삭시험을 보다 적은 노력과 시간으로 대체할 수 있다는 장점이 있다. LCM을 활용한 선형절삭시험에서는 암반굴착 시 발생하는 커터 작용력과 관입정도를 모사할 수 있다. 한국에서도 한국건설기술연구원에 실대형 LCM시험시스템이 구축되어 TBM 디스크 커터 및 로드헤더 등에 사용되는 픽 커터의 절삭성능 예측을 위한 제반 연구를 수행한 바 있고, 커팅헤드의 설계 및 사양예측을 위한 연구들이 꾸준히 수행되어 왔다. 한편 국내 서울대학교 및 한국생산기술연구원에서는 소형선형절삭시험시스템을 구

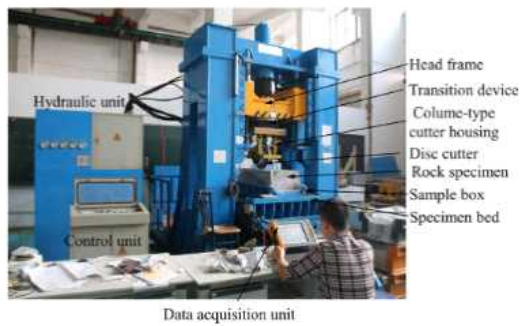
축하여 픽 커터 및 디스크커터의 절삭성능을 평가하기 위한 제반 연구가 꾸준히 수행되어 시험시스템에 대한 검증 및 적용성 평가가 이루어져 있는 상황이다.



(가) 한국건설기술연구원



(나) 터키 이스타불공과대학

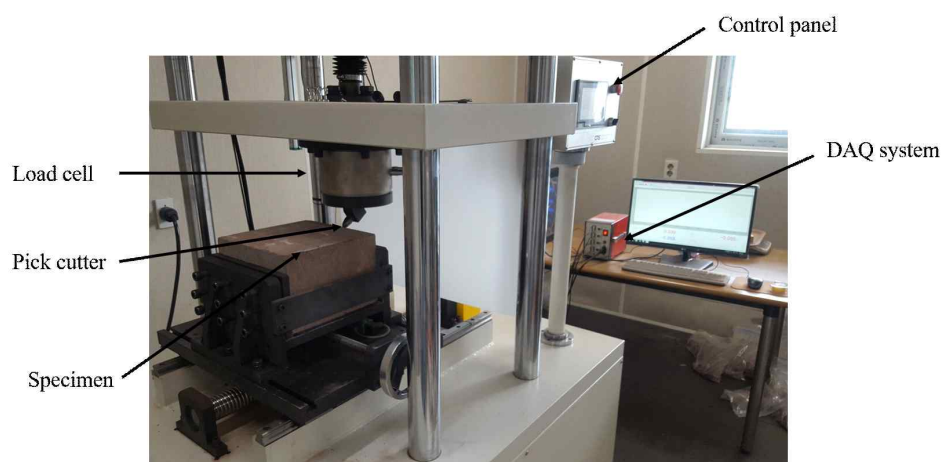


(다) 중국 동지대학교



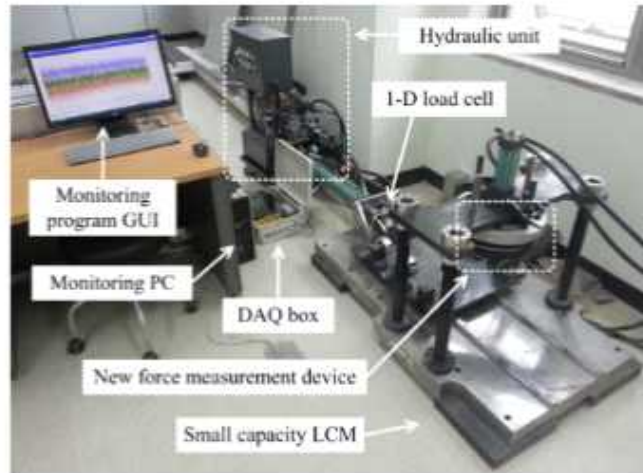
(라) 호주 CSIRO

그림 2.4. 세계 각국에 구축되어 활용 중인 실험형 선형절삭시험 장비



(가) 서울대학교

그림 2.5. 국내에 구축되어 활용 중인 소형선형절삭시험 장비



(나) 생산기술연구원

그림 2.5. 국내에 구축되어 활용 중인 소형선형절삭시험 장비 (계속)

최근 호주 CSIRO에서는 언더커팅 디스크에 편심을 부여한 회전운동을 결합한 ADC(구동형 언더커팅) 방법에 대한 연구를 수행한 바 있다. 선행연구에서는 구동형 언더커팅에 의한 암석의 절삭성능평가를 위하여 기존의 선형절삭시험 장비와 유사한 형태의 시험시스템을 구축하였다. 커터축의 편심회전(wobbling)이 가능한 상기 시험장치에서는 암석 시편 박스를 선형 이동시키면서 선형절삭을 모사하는 동시에 언더커팅 디스크커터를 연결한 플레이트 전체를 편심회전시키면서 구동형 언더커팅에 의한 암석절삭 메커니즘을 구현한다. 디스크커터에 편심회전을 부여하지 않는 경우에도 선형절삭에 의한 언더커팅을 구현할 수 있다. 하지만 해당 연구에서는 상당히 축소된 규모의 시험이 이루어진 것으로 보고되었다(커터직경 50 mm 이하).



(a) 절삭면



(b) 시험장비

그림 2.6. 호주에 구축되어 있는 구동형 언더커팅 절삭시험 시스템; (a) 절삭면, (b) 시험장비 (Dehkhoda and Detournay, 2019)

본 연구과제에서는 호주에 구축되어 있는 시스템을 참고하여 보다 발전된 형태의 언더커팅 절삭시험시스템을 구축하고자 하였다. 그림 2.7과 2.8은 서울대학교에서 구축한 언더커팅 선형 절삭시험 시스템의 설계 도면 및 모습을 보여주고 있다. 표 2.1은 구축된 시스템의 사양을 정리한 내용을 보여준다. 기존의 선형절삭시험기의 기능은 유지하며 언더커팅에 의한 절삭메커니즘의 구현을 위한 보완이 이루어졌다. 3축 방향하중 20 tonf 용량의 로드셀이 장착되어 있으며, ADC의 편심회전을 구현하기 위한 회전 전기모터 외에 3축 방향으로의 시험편의 이송과 디스크커터의 이동을 제어하기 위한 교류전원 서보모터가 각 축에 장착되어 있다. 최대 가용 가능한 토크는 1 kN-m, 최대 절삭속도는 1,000 mm/s 이며, RPM은 800까지 가능하도록 제작되었다. 시험기에 연결된 별도의 컨트롤러를 통해 ADC 시험조건을 구현하기 위한 RPM, 선형 절삭속도(v), 법선압입깊이(p_v), 평행압입깊이(p_h), 절삭거리(l), 절삭간격(s) 등을 입력하여 자동 제어할 수 있으며, 편심반경(e)과 기울임 각(α)은 사용자가 별도로 설치된 자와 지그를 결합하여 수동으로 제어할 수 있도록 제작하였다. 최대 거치 가능한 시험편의 크기는 30 cm × 30 cm 이다. 본 연구를 통하여 구축되는 시험인프라는 해외의 장비와 비교하여 가용 가능한 절삭하중 및 허용하중이 그 10배로 해외의 장비와는 달리 실제 현장에 직접적으로 적용 가능한 시험결과들을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

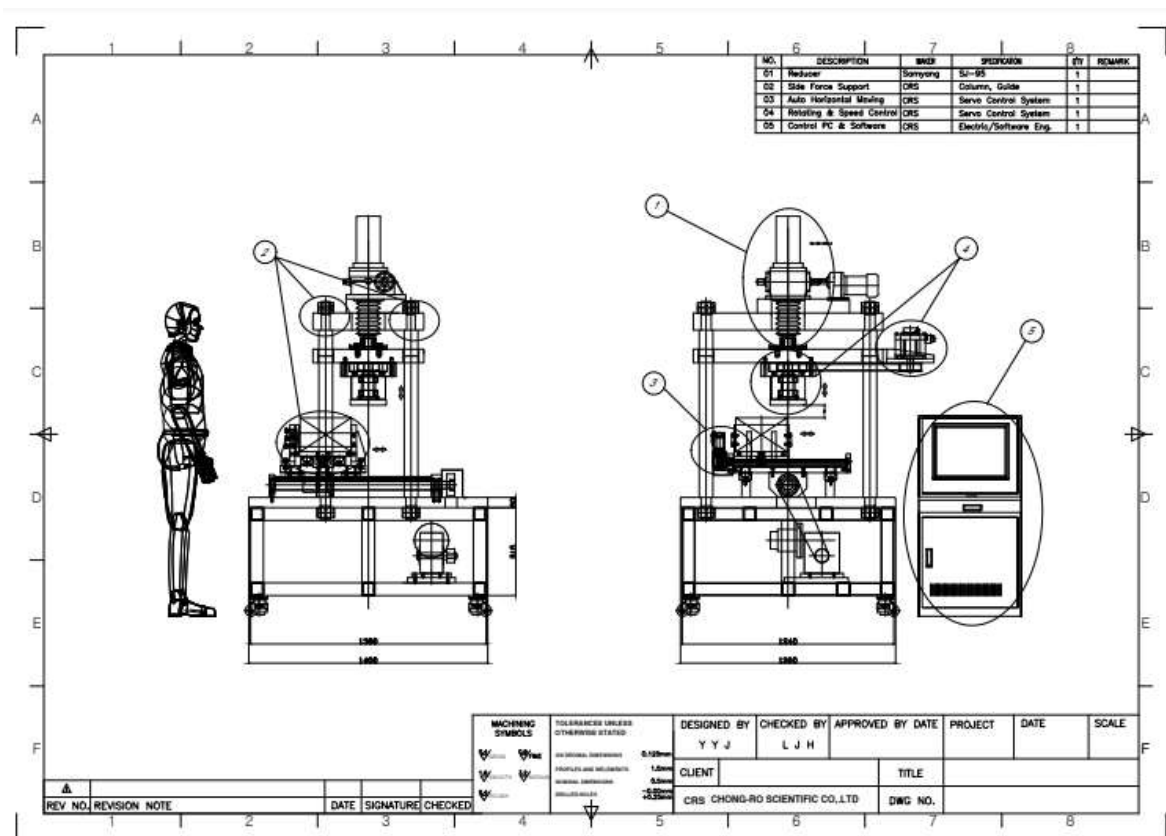


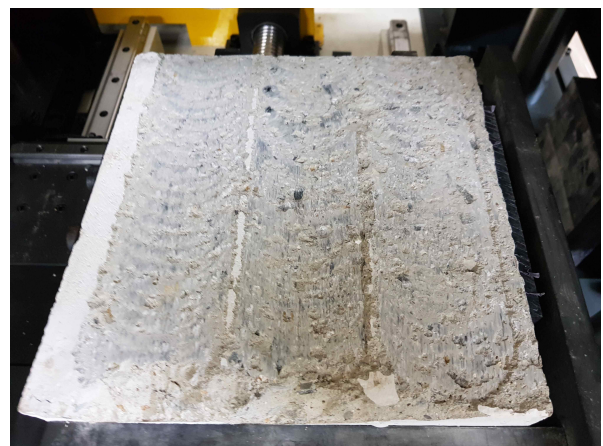
그림 2.7. 언더커팅 시험 인프라 설계 도면

표 2.1. 본 연구에서 구축한 언더커팅 시험기의 주요 사양

구분	주요사양
개요	◆ 전기 액추에이터를 Crosshead 상부에 탑재 ◆ Column 수: 4개 ◆ 시험공간 : 1 m 이상 ◆ 최대 재하용량 : 20 tonf 이상 (로드셀의 측정 하중 20 tonf) ◆ 설계 기준: 안전계수 파단강도 6 이상 ◆ 소성변형/좌굴/공진제거 ◆ 절삭시험 시 커터의 흔들림을 방지 ◆ 4개의 동일한 용접구조물로 구성
액추에이터 사양 및 기타 제원	◆ 커터의 회전속도: 800 RPM ◆ Maximum testing speed: 100 mm/s ◆ Disc cutter size: up to 150 mm ◆ Cutter depth: up to 50 mm ◆ Clearance angle: 0-20° ◆ Thrust force: 200 kN ◆ Rolling force: 200 kN ◆ Lateral force: 200 kN ◆ Torque: 1000 Nm



(a) 시험장비

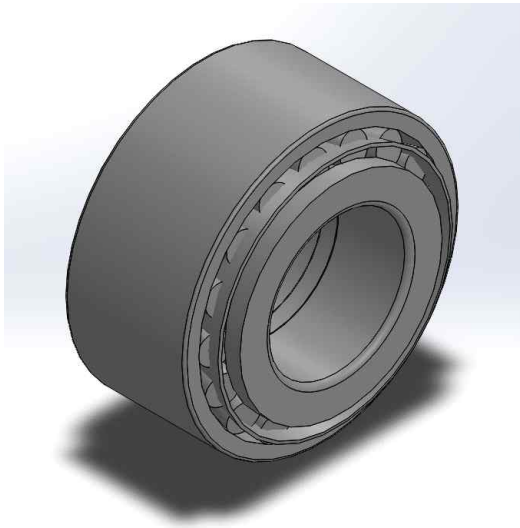


(b) 절삭면

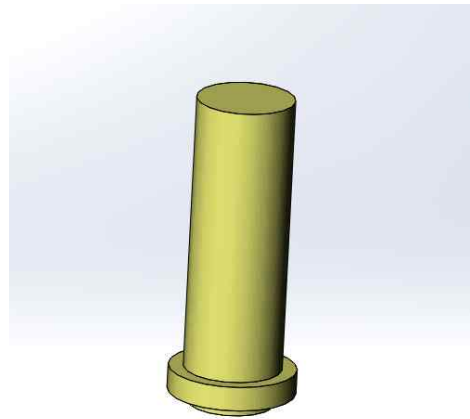
그림 2.8. 본 연구과제에서 구축한 언더커팅 절삭시험 시스템

암반기계굴착에서 암석과 맞닿아 절삭을 수행하는 절삭도구(cutting tool)에 대한 연구가 매우 중요한 부분이다. 커터의 내부구조, 커터소재의 내마모성, 내충격성 등은 기계굴착장비의 절삭성능에 주요한 영향을 미친다. 하지만 본 연구에서 대상으로 하는 언더커팅 디스크의 경우에는 내부구조 및 작동원리에 대한 정보가 비공개되어 있는 상황으로 독자적인 연구가 요구되었다. 본 연구과제에서는 축소된 규모의 커터로 현장 규모에서와 동일한 기능이 가능한 언더커팅형 디스크 커터의 내부구조를 설계하여 제작하는 기술을 확보하였다.

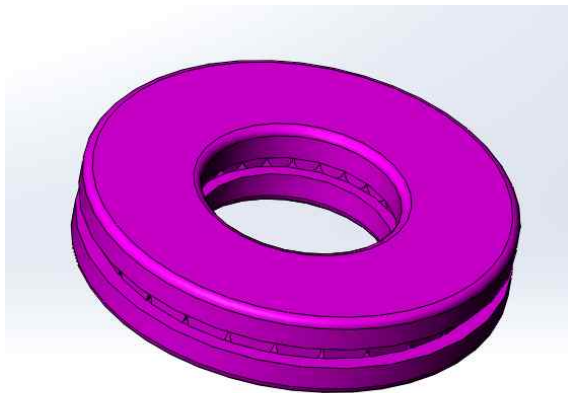
본 연구에서 개발한 언더커팅 디스크는 원하는 방향으로 집중응력을 가할 수 있도록 예각의 단면형상을 갖는 날카로운 커터링이 설치되어 있으며, 기존 TBM 디스크커터와 같이 회전축과 수직축을 중심으로 대칭 구조를 갖는 롤러 구조의 커터가 아닌 비대칭 형상을 갖는 것이 특징이다. 언더커팅 디스크는 커터의 회전을 위한 샤프트(shaft), 커터의 수직방향 수직력을 지지하기 위한 추력베어링, 수직력과 직교하는 양측방향의 작용력을 지지하기 위한 롤러베어링, 높은 내마모성의 재료로 제작된 커터바디 및 커터링, 베어링 부의 오일의 누수를 막기위한 오일셀로 구성되어 있다. TBM 디스크 커터와 마찬가지로 커터 내부의 베어링, 베어링의 예압, 오일셀 등이 언더커팅 디스크 커터의 핵심부품인 것으로 판단되었다.



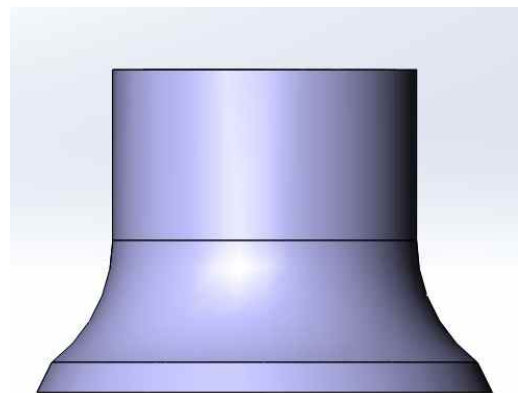
(a) 추력베어링



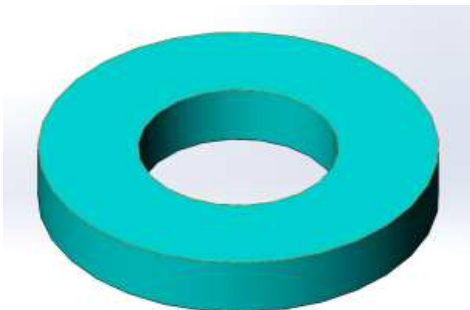
(b) 샤프트 축



(c) 롤러베어링



(d) 커터링



(e) 오일씰



(f) 스냅링

그림 2.9. 본 연구에서 개발한 언더커팅 디스크 커터 부품의 3차원 형상



그림 2.10. 본 연구에서 제작한 언더커팅 디스크 커터 (커터링 직경 150 mm)

이렇게 결정된 내부구조 및 부품을 토대로 하여 다양한 직경의 디스크 커터를 제작하였다. 향후 실제 크기의 언더커팅 디스크 커터를 제작하기 위한 기술개발에 있어 기초 자료로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.



그림 2.11. 본 연구에서 제작한 언더커팅 디스크 커터 (커터링 직경 150 mm, 100 mm, 80 mm, 60 mm)

한편 언더커팅형 디스크 커터는 전통적인 TBM 디스크커터에 비하여 커터의 형상이 마모에 불리할 뿐만 아니라 진동에 의한 충격하중이 관여하기 때문에 내마모성을 향상시킬 필요가 있을 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 TBM 디스크커터에 사용되는 소재와 비교하여 내충격성과 내마모성을 동시에 향상 시킨 소재를 적용하여 언더커팅 디스크커터의 마모성을 향상시

키고자 하였으며, 커터소재의 내마모성은 세르샤마모시험을 통해 평가되었으며, 국내 암석을 대상으로 재료의 내마모성을 평가하였다. 세르샤 마모시험에서는 일반적으로 HRC(Rockwell Hardness C)값이 40-42, 54-56을 만족하는 재료로 제작된 표준 stylus pin을 사용하여 시험을 수행하고 있지만, 동일한 암석에 대하여 서로 다른 금속을 이용하여 시험을 수행하는 경우 금속 간의 상대적인 내마모성의 비교가 가능하다. 본 연구에서는 총 6개의 암석에 대하여 세르샤 마모시험을 수행하여 본 연구에서 제작된 언더커팅 디스크에 사용된 금속의 내마모성 향상 정도를 평가해 보았다. 그 결과 평균 13%의 내마모성 향상이 이루어졌음을 확인할 수 있었으며, 일반적인 TBM 디스크 커터보다 마모에 취약한 절삭메커니즘이 관여하는 언더커팅 디스크 커터의 마모성능 향상에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단하였다.

한편 본 연구과제에서 수행한 실험실스케일에서의 절삭시험에서는 총 300 m 정도의 절삭거리를 절삭하는 동안 암석의 절삭성능에 영향을 줄 정도의 커터마모는 발생하지 않았다. 하지만 해외에서 수행한 현장시험에서는 극경암 및 마모도가 높은 암반에서 커터마모의 증가로 인한 시공성의 저하를 보고하고 있다(Pickering et al., 2006). 추후 연구에서는 언더커팅 디스크 커터의 충격, 진동하중 등 절삭메커니즘을 고려하여 커터소재의 내충격성과 내마모성을 향상과 커터의 형상을 TBM 디스크커터와 같이 마모에 유리한 곡선형태로 보완하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

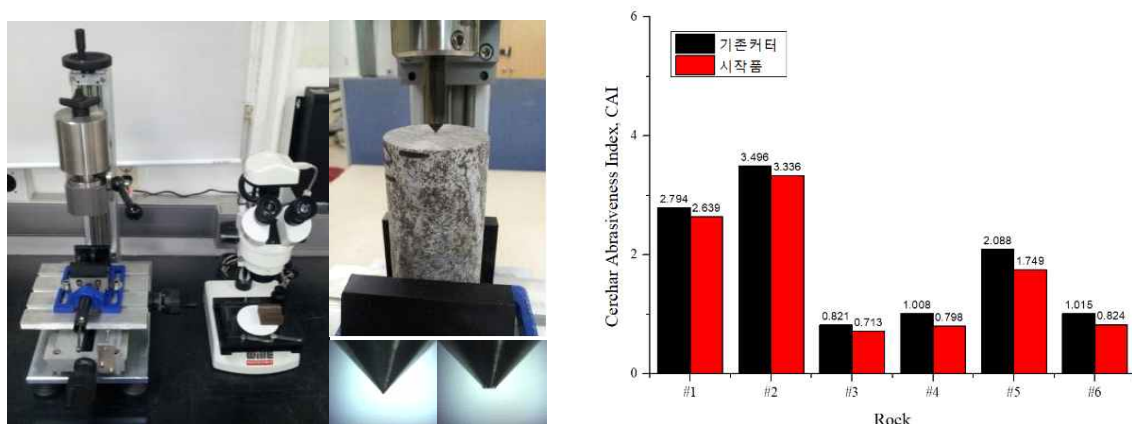


그림 2.12. 언더커팅 디스크커터 소재의 내마모성 평가를 위한 세르샤마모시험 및 결과

표 2.2. 언더커팅 디스크커터에 사용된 소재의 세르샤마모지수 평가 결과

암석	세르샤마모지수	
	기존	시작품
화강암	2.794	2.639
사암	3.496	3.336
세일	0.821	0.713
석회암#1	1.008	0.798
화강반암	2.088	1.749
석회암#2	1.015	0.824

(3) 언더커팅 절삭시험법 및 절삭메커니즘 정립

본 연구에서는 언더커팅에 의한 암석의 절삭성능을 평가하기 위한 절삭시험법을 정립하고 절삭시험인프라의 개발에 활용하고자 하였다. 언더커팅의 경우에는 아직 절삭변수들의 영향을 분석하기 위한 기초연구가 수행 중이기 때문에 절삭성능을 평가하기 위한 절삭시험법을 구축할 필요가 있을 것으로 판단하였기 때문이다. 그리하여 구축된 시험시스템을 활용하여 암석시험편의 거치에서부터 언더커팅 절삭을 구현하기 위한 디스크커터의 설치개념, 언더커팅의 구현을 위한 암석의 절삭 방향 등에 대한 개념을 정립하였다.

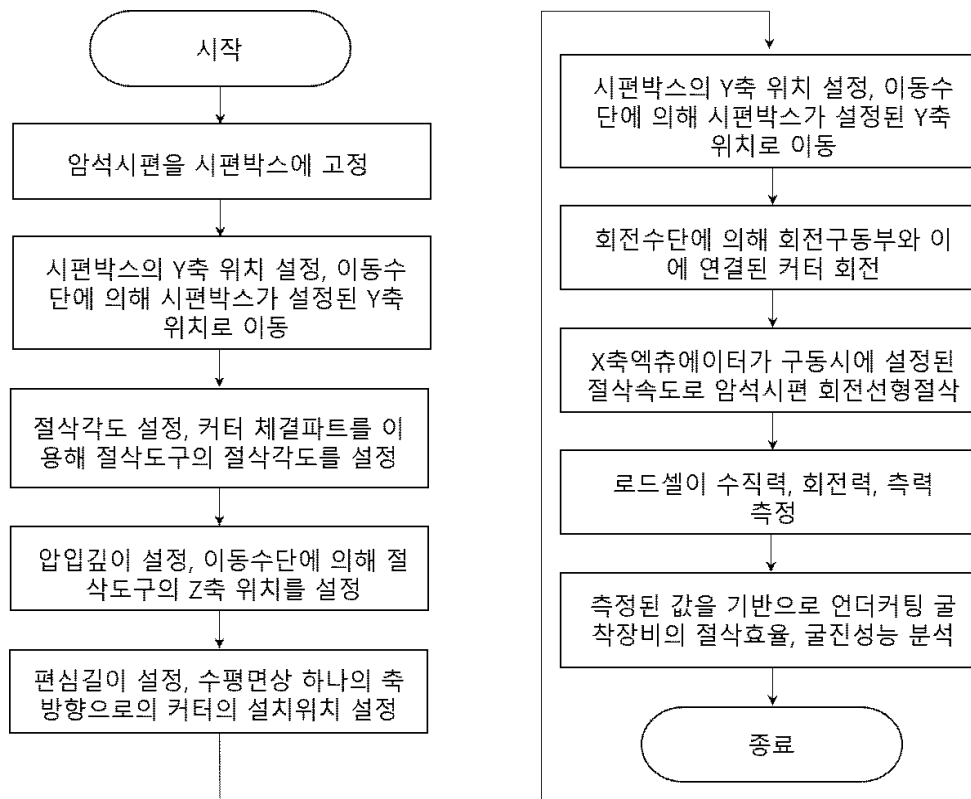


그림 2.13. 언더커팅에 의한 암석절삭시험 순서 및 방법

또한 본 연구에서는 언더커팅에 의한 암석절삭의 기본적인 메커니즘을 정립하고 암석과 커터의 접촉에 따라 정의되는 핵심설계변수들을 정의하였다. 전통적인 방식의 암석절삭에 비해 언더커팅에 의한 암석의 절삭에서는 커터의 절삭방향, 각도에 따른 자유도가 높아 굴착장비의 형상, 운용되는 형태에 따라 다양한 형태로 암석을 절삭할 수 있으며, 절삭면의 형상도 달라지므로, 추가적인 변수가 관여할 수 있다.

- ◆ 커터간격(절삭간격)(s): 전통적인 암석의 절삭에서는 인접한 커터가 한 평면상에서 커터간격만큼 일정한 거리를 둔 상태에서 암석을 절삭하지만 언더커팅에서는 개별커터는 개별적인 절삭 평면을 가질 수 있다는 것이 특징임. 따라서 선행커터가 형성시킨 자유면으로부터 떨어진 거리로도 정의 가능. TBE와 같이 굴착장비에 다수의 커터가 설치되는 경우에 커터헤드의 침단부 각도에 따라 설치간격을 결정하는 핵심설계변수가 됨. 절삭시험 시에는 커터를 선형이동시켜가며 cut spacing을 적용하지만 언더커팅형 커터가 소수 설치되어 하나의 커터가 같은 평면상에서 다수의 절삭을 수행하는 경우에는 커터의 선형 이송방향과 직교하는 방향으로 설정된 절삭간격은 무의미한 설계변수가 되며, 이 경우에는 절삭간격을 거의 설정하지 않음으로써 균일한 평면을 만들 수 있음.
- ◆ 압입깊이(p_v , p_h): 전통적인 암석의 절삭에서는 커터헤드가 1회전 할 때 굴진방향으로 커터가 이동한 거리를 의미. 커터의 이동방향이 원형궤적으로 고정된 전통적인 방식에 비해 언더커팅에서는 커터의 이동방향이 굴진 축 방향 뿐만 아니라 터널 외곽방향으로도 발생하는 것이 특징임. 따라서 언더커팅에서는 굴진방향으로가 아닌 반경방향으로 커터가 관입한 깊이로 압입깊이를 정의하여야 하며 커터헤드 혹은 커터 자체의 회전속도와 언더커팅 디스크가 반경방향으로 이동하는 속도에 의해 계산 가능함.
- ◆ 기울임각(α): 커터가 커터헤드에 설치되는 각도 혹은 절삭면으로부터 기울어진 각도를 의미하며 각도에 따라 수직력, 회전력의 비율이 달라지므로 언더커팅 디스크커터의 이송을 위한 유압유닛의 사양을 결정하는 중요 변수가 됨. 언더커팅의 경우에는 이 각도를 0-20°의 범위에서(커터와 암석의 접촉면적이 커져 커터작용력이 매우 증가하게 된다)의 범위에서 운용하여야 하며 또한 이 값은 디스크 커터의 커터팁의 각도와 연관이 되어 있으므로 커터의 형상에도 의존적인 값임.
- ◆ 절삭속도(v): 커터가 절삭을 수행하면서 선형이동하는 속도를 뜻함. 기존의 TBM, 로드헤더 등에서는 커터가 암석을 절삭하는 속도는 절삭성능에 영향을 미치는 않는 것으로 보고되고 있음. 다만 베어링의 내구도를 고려하여 커터의 크기별로 선형한계속도를 정의하고 있지만 언더커팅에서는 절삭속도가 매우 중요한 변수가 되는데, 절삭속도에 의해 커터 이동방향으로의 압입깊이가 결정이 되기 때문임.
- ◆ 편심반경(e): 언더커팅에 의한 암석절삭은 커터 자체에 편심에 의한 회전이 부여되는 경우와 그렇지 않은 경우로 나눌 수 있음. 편심길이가 없을 경우에는 상기 커터절삭궤적의 변화 그림에서 빨간 커터 중심의 궤적이 선형으로 한정되나 편심에 의한 회전이 부여되는 경우에는 편심의 길이는 언더커팅 절삭의 절삭효율, 커터작용력, 그리고 커터의 절삭 가능 여부를 결정하는 매우 중요한 변수가 됨.

- ♦ RPM: 통상 TBM, 로드헤더의 굴착에서는 커터헤드의 회전속도로 정의하는 값. 언더커팅에서는 편심에 의해 커터자체에 회전이 부여되는 경우가 있는데, 커터가 일정한 편심길이를 갖고 회전하는 속도를 정의할 필요가 있음. RPM의 변화에 따라 커터의 절삭궤적이 달라지며 이는 커터작용력과 암석의 절삭효율에 큰 영향을 미치게 됨.

이상과 같이 암석의 절삭에 관여하는 변수들을 정의하였으며, 기존의 TBM 디스크커터와 픽 커터에 의한 암석절삭에서는 암반을 관입하는 깊이와 절삭간격, 절삭각도(픽 커터)이 절삭성능을 좌우하는 주요변수이나, 언더커팅에서는 선형이동속도, 절삭각도, 커터직경, RPM, 편심이 추가적으로 관여하는 것을 알 수 있다.



그림 2.13. 언더커팅에서의 핵심변수 정의

또한 이론적인 접근에 의해 언더커팅에서의 암석과 디스크커터 사이의 접촉메커니즘을 수학적으로 규명하였다. 기존의 TBM 디스크커터 및 픽 커터에 비해 복잡한 이동궤적이 관여하여 시험에서 획득되는 커터작용력 및 암석부파를 통해 절삭성능 및 절삭효율을 분석하기 위해서는 실시간으로 변화하는 암석과 커터 사이의 접촉점과 이동궤적을 수학적으로 표현할 필요가 있었다. 그림 2.14는 언더커팅에서의 암석-커터 간 접촉메커니즘을 나타내고 있다.

언더커팅의 암석절삭에서는 커터의 작용력 및 비에너지를 계산하기 위해 암석과 커터 사이의 접촉면적을 계산하는 것이 중요하다. 그림 2.15와 같이, 커터가 회전하면서 초반에 암석과 접촉하는 접촉면적의 왼쪽 끝 부분을 L, 오른쪽 끝 부분을 R이라고 지정하고, S에 대한 동경을 θ , S에 대한 $\tilde{O}$ 의 동경을 $\tilde{\theta}$ 라 하면 O에 대한 L의 동경은 ϕ_L 이고, $\tilde{R}$ 에 대한 동경은 $\phi_{\tilde{R}}$ 이다.

또한 커터의 각속도(angular velocity, ω), 디스크 커터의 중심의 각도는 아래 식과 같이 계산 할 수 있다.

$$\omega = 2\pi \times \frac{RPM}{60} \quad (1)$$

$$\theta = \omega t \quad (2)$$

한편 시간 t_O 와 $t_{\bar{O}}$ 사이에서 커터 중심의 위치는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_O(t) = (e \cos \omega t_O, e \sin \omega t_O + V t_O) \quad (3)$$

$$x_{\bar{O}}(t) = (e \cos \omega t_{\bar{O}}, e \sin \omega t_{\bar{O}} + V t_{\bar{O}}) \quad (4)$$

절삭이 진행되면서 언더커팅 디스크커터와 암석 사이의 접촉점 R과 $\tilde{R}'$ 은 일치하게 되는데 이때 아래의 식이 성립한다.

$$\tan \phi_{\tilde{R}} = \frac{\sin \tilde{\theta}}{\cos \tilde{\theta} + \frac{V}{ew}} \quad (5)$$

$$\cos \phi_{\tilde{R}} = \frac{\cos \tilde{\theta} + \frac{V}{ew}}{\sqrt{1 + \frac{2V}{ew} \cos \tilde{\theta} + \left(\frac{V}{ew}\right)^2}} \quad (6)$$

$$\sin \phi_{\tilde{R}} = \frac{\sin \tilde{\theta}}{\sqrt{1 + \frac{2V}{ew} \cos \tilde{\theta} + \left(\frac{V}{ew}\right)^2}} \quad (7)$$

그림 2.15에 나타낸 바와 같이 L은 $\tilde{R}$ 과 같으므로 각 커터의 중심으로부터 계산한 식을 같게 놓으면 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

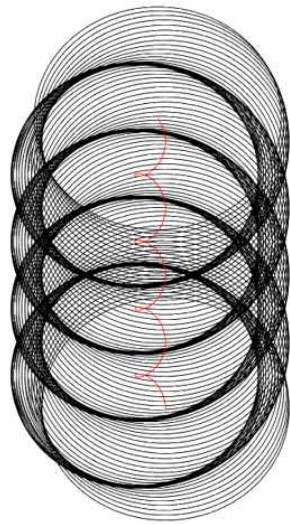
$$e(\cos \theta - \cos \tilde{\theta}) + a(\cos \phi_L - \cos \phi_{\tilde{R}}) = 0 \quad (8)$$

$$e(\sin \theta - \sin \tilde{\theta}) + a(\sin \phi_L - \sin \phi_{\tilde{R}}) + \frac{V}{w}(\theta - \tilde{\theta}) = 0 \quad (9)$$

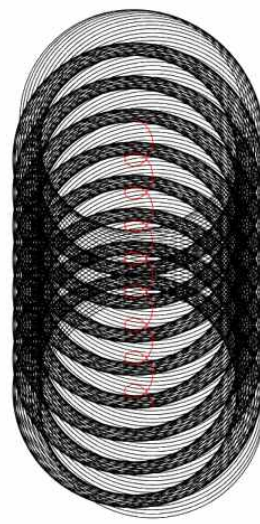
여기서 $\cos^2\varphi_L + \sin^2\varphi_L = 1$ 이 항상 성립하므로, 식(6)과 식 (7)을 풀면 θ 를 $\tilde{\theta}$ 에 대해 나타낼 수 있으며, 커터의 위치에 따른 φ_L 을 계산할 수 있게 된다. φ_R 의 경우에도 앞서 설명한 과정과 유사하게 풀어낼 수 있다. 최종적으로 커터의 접촉길이는 아래 식을 통해 계산할 수 있게 된다.

$$L(\theta;t) = a(\varphi_L - \varphi_R) \quad (10)$$

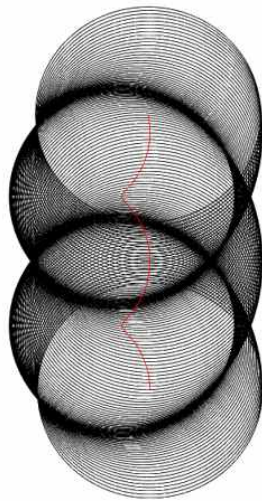
그림 2.16은 위에서 설명한 접촉메커니즘에 따라 절삭변수에 따른 언더커팅 디스크커터의 이동궤적 변화 예시를 보여주고 있다. 커터의 직경이 80 mm로 고정된 상태에서 선형이동속도, RPM, 편심의 변화에 따른 디스크커터와 커터 중심의 2D헬리컬 이동 궤적을 나타낸 예시이다. 이동궤적을 나타내는 데 있어 선형이동속도와 RPM(각속도), 그리고 편심길 이와 커터직경은 서로 영향을 주는 변수가 된다. 예를 들어 선형이동속도에 비해 RPM이 큰 경우에는 촘촘한 절삭궤적을 그리며 절삭을 수행하게 되고, 편심길이가 직경 대비 비교적 작게 설정된 경우에는 커터의 좌우방향으로의 움직임이 촘촘해지는 특성을 갖는 것을 알 수 있다.



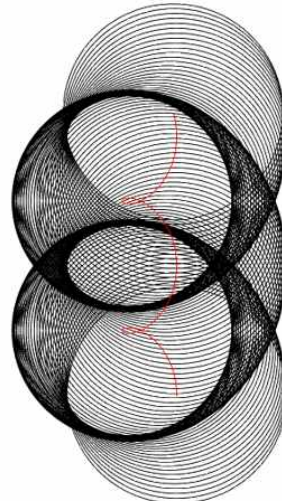
RPM = 100, e = 5, V = 40



RPM = 100, e = 5, V = 20



RPM = 50, e = 5, V = 40



RPM = 50, e = 10, V = 40

그림 2.16. 핵심변수에 따른 절삭궤적 변화 예시

한편 언더커팅 굴착장비는 커터에 편심이 부여된 형태와 그렇지 않은 경우로 나뉘어 지며 앞서 설명한 언더커팅의 메커니즘은 편심이 부여된 경우에 해당한다. 편심이 부여되지 않은 경우에 대해서는 대표적인 굴착장비인 Tunnel Boring Machine(TBE)의 굴착메커니즘에 대하여 분석을 실시하였다.

먼저 TBE는 기존의 소구경 TBM 장비를 활용하여 작은 반경의 pilot tunnel을 생성하고, 언더커팅 방법으로 확공하여 터널을 굴착하는 장비이다(그림 2.3 참조). TBE의 총길이는 180 m, 총무게는 1000 ton이다. 언더커팅 방법으로 암반을 절삭하기 위해서 UDC가 들어갈 파일럿 터널이 필요하다. Uetliberg's molasse section의 2.7 km 시험 적용구간에서는 직경 4.5 m의 pilot tunnel을 기존 소구경 TBM 장비로 선행 굴착하여 최내각 UDC의 언더커팅 공간을 제공

하였다. 이후 연속적으로 추력과 반경축력을 제공하면서 회전하여 TBE를 운영하며, 직경 14.2-14.4 m 까지 확공하여 터널을 굴착한 것으로 보고하고 있다.

TBE가 운용되는 과정을 다음과 같다. TBE는 총 6개의 arm을 가지고 있으며, 각각의 arm에는 6개의 언더커팅 방식 디스크 커터가 장착되어 있다. 즉, 헤드에 총 36개의 디스크 커터가 있다. 각각의 arm은 헤드가 8-10 회전할 때 반경 방향으로 60-80 cm 이동하면서 연속적으로 언더커팅 메커니즘으로 암반을 파쇄한다. 반경방향 이동이 끝나면 각각의 arm은 반경 중심으로 이동하며(retracted), 이와 동시에 TBE는 굴착방향으로 20 cm(axial displacement) 진행한다. 경암 굴착시 언더커팅 깊이를 감소시키고, 1회전당 굴진율도 하향조정한다.

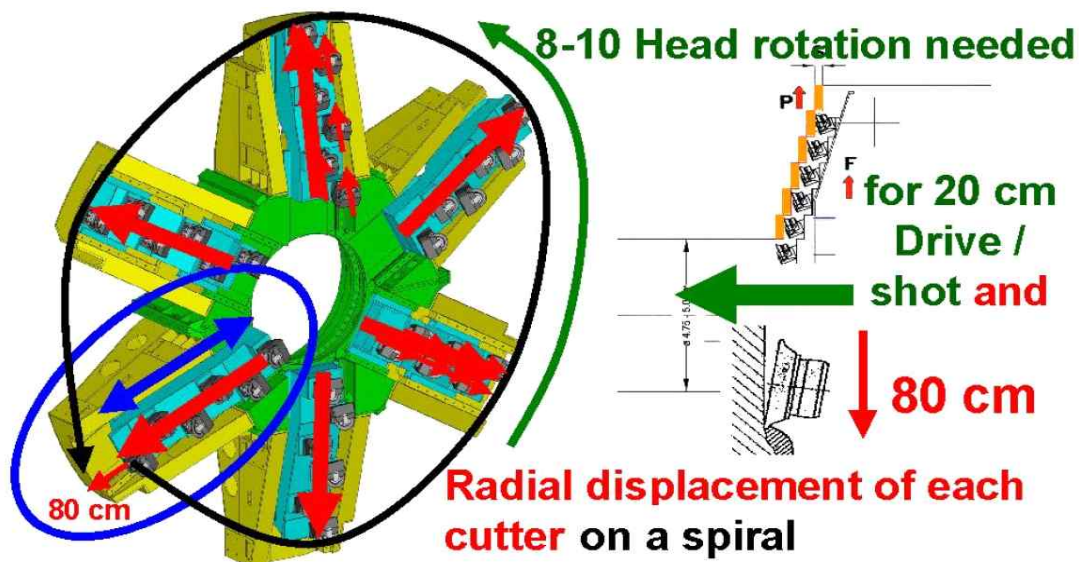


그림 2.17. TBE 장비 운용조건 (Wirth사 장비 기준)

TBE에 대한 기술사양, Technical data는 다음의 표 1에 정리하였다. 하지만, 여기에서 반경 방향 실린더의 사양이 기재되어 있지 않아서 추력과 축력의 비율을 추정할 수 없다. UDC의 핵심설계기술 중에 하나가 tilt angle을 설정하는 것인데, 현재 참고문헌 조사만으로는 UDC 핵심설계기술을 이해하는 데에 한계가 있었다.

표 2.3. TBE에 대한 주요 사양 정보 (Wirth사)

Boring Head	
Diameter, nominal	DN = 14.00 ~ 14.40 m
Boring head drive	10 × 250 = 2,500 kW
Rotating speed of the boring head	0 ~ 3.7 RPM
Cutting rollers	36 EA
Thrust	
Contact pressure of the boring head	15,000 kN
Boring stroke	1,500 mm
Driving speed	0 ~ 4 m/h
Thrust cylinders	4 EA
Bracing	
Bracing force	42,500 kN
Bracing plates	12 EA
Cylinders	24 EA
Weight of the TBE and trailer approx. 1,000t	

터널공학 혹은 전체 장비의 관점에서 보면 추력(thrust force)은 터널굴착면의 법선방향(normal vector) 힘의 성분이다. 또한 반경방향 측력(F_s)은 터널의 반경방향으로 능동적으로 가해하는 작용힘(actuating force to the radial direction)이다. 여기서 회전력은 기존 정의 방법과 동일하다. 따라서 추력의 방향과 커터의 수직력을 동일한 방향으로 정의하면, 회전변환을 할 필요가 없어지므로 단순하게 3방향 힘의 요소가 표현된다(식(11)). 왜냐하면 장비의 3방향 요소와 커터의 요소가 일치하기 때문이다.

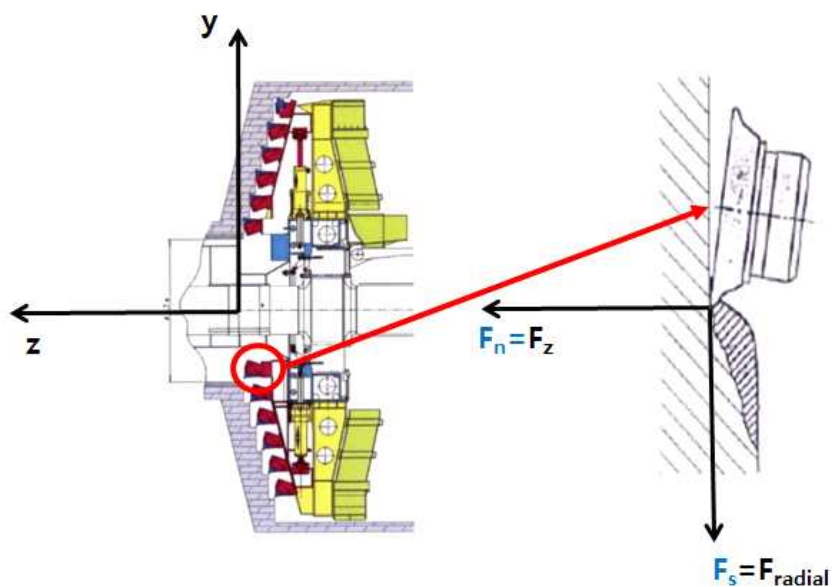


그림 2.18. TBE에 대한 터널공학 관점에서의 좌표축 정의

$$\begin{pmatrix} F_z \\ F_{radial} \\ F_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_n \\ F_s \\ F_r \end{pmatrix} \quad (11)$$

구동형 언더커팅의 경우와 마찬가지로 TBE에 의한 암석의 절삭에서도 커터의 이동궤적을 수학적으로 규명하는 것이 중요하다. 이를 위해 TBE 커터의 회전 궤적을 간단화하여 나타내면 그림 2.19와 같다.

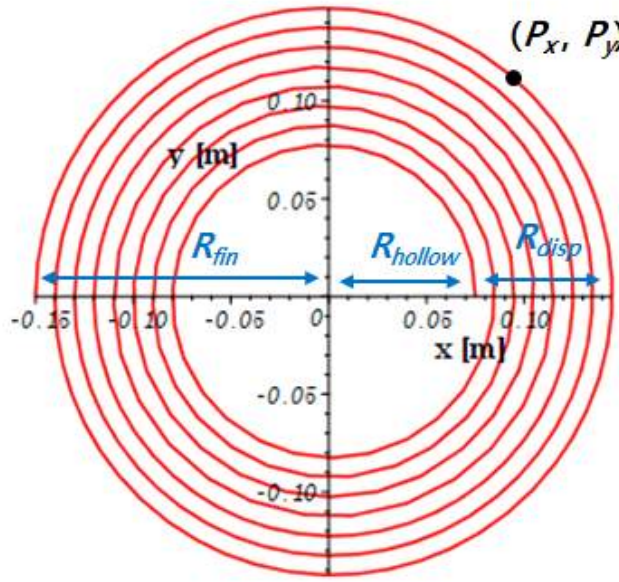


그림 2.19. TBE의 설계변수 및 좌표정의

절대좌표계(x,y)를 기준으로 나선의 좌표를 (P_x, P_y) 라고 하면, 나선상의 절대좌표와 상대좌표의 관계는 다음 행렬로 계산된다.

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_0) & -\sin(\theta_0) & 0 \\ \sin(\theta_0) & \cos(\theta_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{hollow} \\ (\frac{R_{disp}}{2\pi}) \cdot \theta_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서, R_{hollow} 는 TBE의 Pilot 터널의 내부 반경(inner radius), R_{disp} 는 1회전당 반경 방향 이동거리를 의미한다. 반경 이동길이(radial cutting length, L_r)는 나선의 최종 반경과 나선이 시작되는 위치의 반경과의 차이를 의미하며, 여기서 나선이 시작되는 위치의 반경은 일반적으로 Hollow 시편의 내부 반경(R_{hollow})으로 다음 수식을 만족한다.

$$L_r = R_{fin} - R_{hollow} \quad (13)$$

최종 반경을 R_{fin} 이라고 두고 최종반경에 도달하기까지 나선의 회전 수(N_{rot})를 계산하면 다음 수식과 같다.

$$N_{rot} = (R_{fin} - \frac{D_{pilot}}{2}) \times \frac{1}{R_{disp}} \quad (14)$$

나선의 회전수(N_{rot})에 2π 를 곱하면 나선경로를 이동하는 동안 회전한 각도(θ_0)가 된다.

$$\theta_0 = 2\pi \times N_{rot} = \frac{2\pi(R_{fin} - R_{hollow})}{R_{disp}} \quad (15)$$

등각속도, 등반경속도로 이동하는 아르키메데스 나선의 길이(L)는 다음의 수식으로 계산된다.

$$L = \int_0^{\theta_0} \sqrt{\left(\frac{d}{d\theta} P_x\right)^2 + \left(\frac{d}{d\theta} P_y\right)^2} d\theta \quad (16)$$

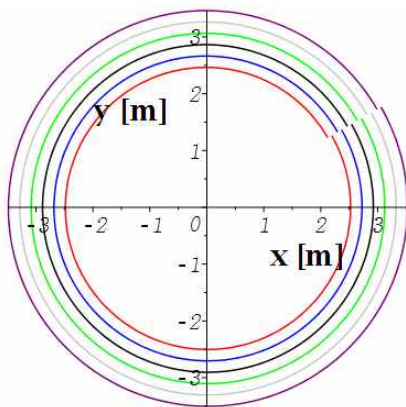
여기서, 나선의 좌표(P_x, P_y)는 회전 각도(θ)로 표현되어야 하며, 적분 구간을 나선 시작점($\theta = 0^\circ$)에서 최종 반경일 때의 각도 값(θ_0)으로 하면, 나선의 총 길이(L_{total})를 식 17과 같은 정적분식으로 계산할 수 있다.

$$L_{total} = \int_0^{\theta_0} \sqrt{\left(\frac{d}{d\theta} P_x\right)^2 + \left(\frac{d}{d\theta} P_y\right)^2} d\theta \quad (17)$$

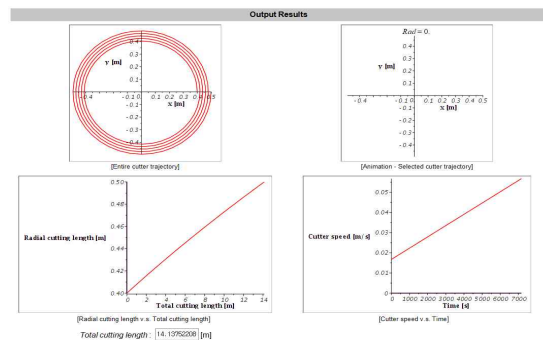
본 연구에서는 이와 같이 정립된 메커니즘을 활용하여 언더커팅방식의 암반굴착장비인 TBE에 설치되는 언더커팅 디스크커터의 설치간격, 회전속도, 반경이송속도에 따른 커터의 암석절삭궤적을 모사하는 프로그램을 개발하였다. TBE 커터헤드에 설치되는 커터의 정보, 커터의 절삭속도, 터널의 직경 등을 입력하면 TBE에 설치되는 개별커터의 이동궤적, 이동거리 등을 산출해 주는 프로그램이다. 따라서 TBE의 개략적인 커터헤드의 설계가 가능하다. 향후 언더커팅 디스크 커터의 작용력 산출을 위한 모델이 개발되는 경우 TBE의 사양 계산을 위한 프로그램으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

GUI Screen

그림 2.20. TBE Cutter Trajectory Calculation 프로그램



(a) 절삭궤적



(b) 커터의 절삭길이 계산

그림 2.21. TBE Cutter Trajectory Calculation 프로그램에 의한 계산 예시

(4) 언더커팅 절삭시험 및 절삭성능 평가

1) 언더커팅 선형절삭시험

본 연구를 통해 구축된 시험인프라를 활용하여 언더커팅에서의 주요 변수인 회전속도, 편심길이, 압입깊이, 절삭간격, 커터직경, 선속도 등이 암석절삭 시 절삭효율에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

기존의 TBM 디스크커터와 픽 커터에 의한 암석절삭에서는 암반을 관입하는 깊이와 절삭간격이 절삭성능을 좌우하는 주요 변수 중 하나로 고려된다. 추가적으로 픽 커터의 경우에는 TBM 디스크커터와는 달리 3가지 절삭각도(skew, attack, and tilt angle)가 절삭성능에 영향을 미친다. 한편 구동형 언더커팅을 이용한 암석절삭(actuated-undercutting disc cutting, ADC)에서는 그림 2.22에 나타낸 바와 같이 다양한 변수들이 추가적으로 관여한다. 압입깊이와 절삭간격 이외에도 선형이동속도, 절삭각도(tilt or clearance angle), 커터직경, RPM, 편심(eccentricity)가 추가적으로 관여한다. 압입깊이(p)는 커터가 절삭평면에 대하여 수직방향으로 관입한 깊이, 절삭간격(s)은 이전 절삭선과 현재 절삭선 중심사이의 거리, 선형이동속도(v)는 커터의 절삭방향으로의 이동속도, 편심반경(e)은 커터축이 편심회전축으로부터 이격된 거리, RPM은 편심회전 축을 중심으로 한 회전 속도, tilt angle(α)은 절삭평면으로부터 커터가 기울어진 각도로 정의된다.

기존의 암석절삭에서는 선형이동속도가 절삭성능에 미치는 영향이 커터 마모에 대한 이슈를 제외하면 실제 장비가 가동되는 범위에서는 그리 크지 않은 것으로 파악되고 있다(Nishimatsu, 1979; Copur et al., 2017). 기존의 암석절삭에서는 선형이동속도에 따른 절삭조건의 변화가 없기 때문이다. 반면 ADC에서는 커터가 선형으로 이동하는 방향으로의 선형이동속도가 중요 변수 중 하나가 된다. 그 이유는 언더커팅에서 선형이동속도는 기존의 암석절삭에서와는 달리 압입깊이를 변화시킨다. 언더커팅에서는 압입깊이가 두 가지로 구분되는데, 이에 대한 선행 연구가 없으므로 본 연구에서는 편의상 굴착면에 대한 법선압입깊이(p_v)와 평행압입깊이(p_h)로 구분하였다. 평행압입깊이는 선형이동속도와 RPM의 영향을 받는다. 다시 말해 커터가 편심축을 따라 1회전 하는 동안 선형이동방향으로 커터가 압입하는 깊이를 의미한다.

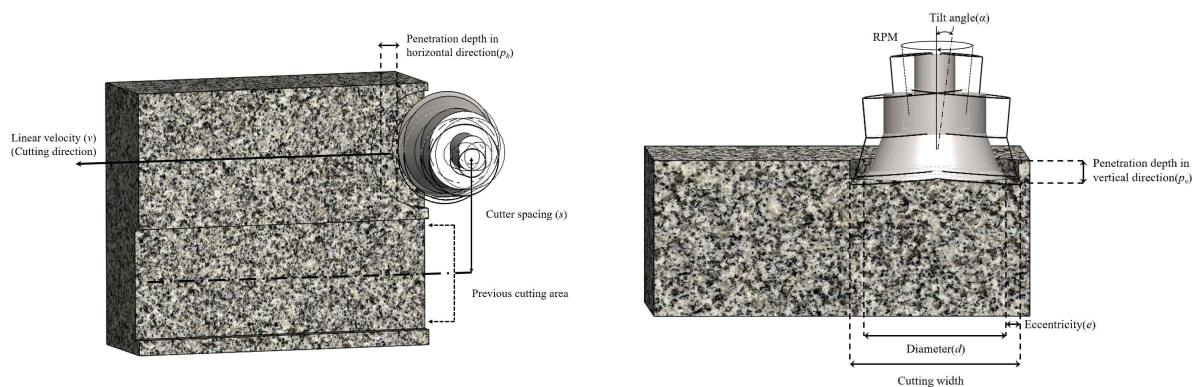


그림 2.22. 선형절삭시험에서의 언더커팅 절삭변수 개념

한편 실제 굴착장비에 장착되는 ADC의 크기는 직경 500~550 mm 정도이나, 본 연구에서는 상술한 바와 같이 실제 커터에 비해 축소된 크기의 커터를 사용하였다. 시험에 활용된 언더커팅 디스크의 직경은 60, 80, 100, 150 mm로 실제에 비해 3.3 ~ 8.8배 스케일로 축소된 크기이다(실제 크기 500 mm 기준). 커터크기가 축소됨에 따라 시험편의 강도를 감소시킬 필요가 있었으며 본 연구에서는 압축강도 20 MPa를 갖는 콘크리트로 유사 암석시험편을 제작하여 절삭시험을 수행하였다. 차원해석에 따라 본 시험편은 실스케일(축소비 1/7.7)에서 약 155 MPa의 경암에 해당한다. 표 4에는 차원해석의 결과를 요약하였으며, 차원해석 시 콘크리트의 밀도는 2.1 g/cm^3 으로 측정되었고, 암석의 밀도는 2.6 g/cm^3 으로 가정하였다.

표 2.4. 본 연구의 선형절삭시험에 사용된 축소비율

Physical parameter	Dimension	Scale
Length	[L]	0.16
Gravity acceleration	[LT ⁻²]	1
Time	[T]	0.4
Density*	[ML ⁻³]	0.808
Mass	[M]	0.003
Strength / Stress	[ML ⁻³ T ⁻²]	0.129

본 연구에서 고려한 시험조건은 커터직경(60, 80, 100 mm), 편심(직경 대 편심비로 표현, 16, 11, 8), RPM(70, 100, 125), 법선압입깊이(2, 3, 4, 5 mm), 선형이동속도(20, 30, 40, 50, 60 mm/s)이며, 시험조건들의 조합에 따라 총 70 여 회의 시험을 수행하였다. 본 연구에서는 절삭조건들의 변화에 따른 절삭성능 변화를 규명하는 것이 목적이기 때문에 절삭조건들을 설정하는데 있어서는 상술한 차원해석 결과를 고려하지 않았다. 그림 2.23은 본 연구에서 구축한 시험시스템을 통해 수행된 언더커팅 절삭시험의 모습을 보여주고 있다.

표 2.5. 본 연구에서 수행한 언더커팅 절삭시험 조건

시험번호	커터직경 (mm)	편심 (mm)	RPM	법선압입깊이 (mm)	절삭속도 (mm/s)
1	60	7.5	70	3	20
2	60	7.5	70	3	30
3	60	7.5	70	3	40
4	60	7.5	70	4	20
5	60	7.5	70	4	30
6	60	7.5	70	4	40
7	60	7.5	70	5	20
8	60	7.5	70	5	30
9	60	7.5	70	5	40
10	60	5.6	70	4	20
11	60	5.6	70	4	30

12	60	5.6	70	4	40
13	60	3.75	70	4	20
14	60	3.75	70	4	30
15	60	3.75	70	4	40
16	80	5	100	3	20
17	80	5	100	3	30
18	80	5	100	3	40
19	80	5	100	4	20
20	80	5	100	4	30
21	80	5	100	4	40
22	80	5	100	5	20
23	80	5	100	5	30
24	80	5	100	5	40
25	80	7.5	100	3	20
26	80	7.5	100	3	30
27	80	7.5	100	3	40
28	80	7.5	70	4	20
29	80	7.5	70	4	30
30	80	7.5	70	4	40
31	80	7.5	70	5	20
32	80	7.5	70	5	30
33	80	7.5	70	5	40
34	80	10	70	3	20
35	80	10	70	3	30
36	80	10	70	3	40
37	80	10	70	4	20
38	80	10	70	4	30
39	80	10	70	4	40
40	80	10	70	5	20
41	80	10	70	5	30
42	80	10	70	5	40
43	80	5	100	3	20
44	80	5	100	3	30
45	80	5	100	3	40
46	80	7.5	100	3	20
47	80	7.5	100	3	30
48	80	7.5	100	3	40
49	80	10	70	3	20
50	80	10	70	3	30
51	80	10	70	3	40
52	60	3.75	70	3	20
53	60	3.75	70	3	30
54	60	3.75	70	3	40
55	60	5.6	70	3	20
56	60	5.6	70	3	30
57	60	5.6	70	3	40
58	60	7.5	70	3	20
59	60	7.5	70	3	30
60	60	7.5	70	3	40



그림 2.23. 본 연구에서 수행된 언더커팅 절삭시험의 전경

절삭시험 도중 실시간으로 획득되는 3방향 커터작용력을 획득하여 주요 절삭조건에 따른 커터작용력의 변화를 관찰하였다. 먼저 본 연구에서 얻어진 언더커팅 디스크의 커터작용력(그림 2.24)의 특성은 다음과 같이 파악되었다. 세 방향의 커터작용력은 주기적이며, 특정한 수준의 최대값이 연속적으로 나타나는 특징을 가진다. 또한 절삭력(cutting force)과 수직력(normal force)의 최대값은 동시에 나타나는 것으로 파악되며, 반면 절삭력과 측력(side force)사이에는 특정한 위상차가 있고, 이는 커터의 회전속도 및 선형이동속도와 관계되는 값인 것으로 판단된다. 표 2.6에는 본 연구에서 수행된 언더커팅 절삭시험으로부터 획득된 커터작용력 측정 결과를 요약하여 정리하였다.

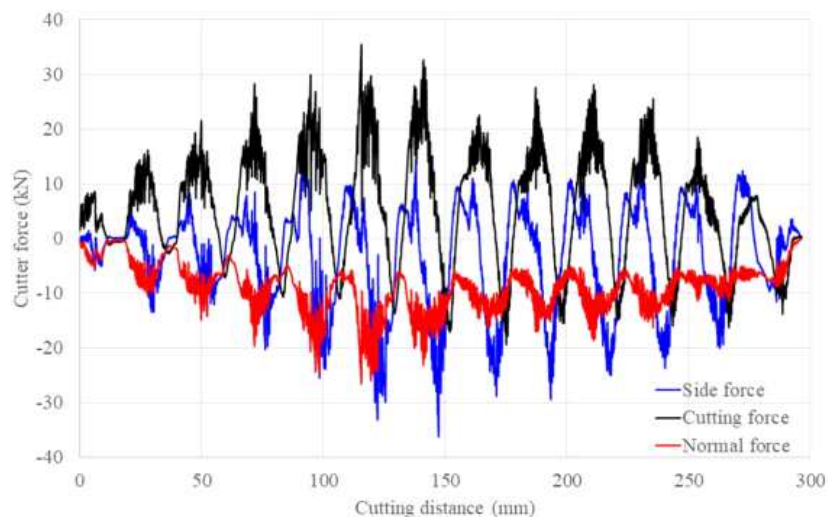


그림 2.24. 언더커팅 디스크커터의 커터작용력 예시

표 2.6. 본 연구에서 수행한 언더커팅 절삭시험 커터작용력 결과

시험 번호	평균 커터작용력 (tonf)			최대 커터작용력 (tonf)		
	측력	회전력	수직력	측력	회전력	수직력
1	0.523	0.696	-0.616	2.012	2.367	-2.162
2	0.520	0.738	-0.666	1.947	2.514	-1.837
3	0.581	0.974	-0.879	1.795	3.229	-2.68
4	0.490	0.713	-0.535	2.311	2.486	-1.925
5	0.564	0.851	-0.658	2.148	2.719	-2.059
6	0.752	1.064	-1.091	2.227	3.933	-3.944
7	0.495	0.804	-0.676	1.408	2.777	-2.208
8	0.830	1.294	-1.481	2.585	3.754	-4.062
9	0.906	1.522	-1.822	2.499	4.451	-4.946
10	0.279	0.501	-0.358	1.52	1.958	-1.36
11	0.394	0.621	-0.521	1.699	2.507	-2.314
12	0.477	0.808	-0.724	1.506	3.124	-2.411
13	0.312	0.515	-0.445	1.336	2.297	-1.76
14	0.439	0.818	-0.751	1.219	2.91	-2.419
15	0.565	1.081	-0.992	2.215	3.453	-3.221
16	0.613	0.823	-0.645	1.412	1.996	-1.295
17	0.632	0.802	-0.617	2.53	3.332	-1.928
18	0.911	1.117	-1.063	2.566	3.495	-2.562
19	0.615	0.876	-0.697	2.268	2.698	-1.817
20	0.862	1.496	-1.147	2.91	4.463	-3.309
21	0.811	1.421	-0.995	3.145	4.656	-3.109
22	0.686	0.914	-0.747	2.779	3.637	-2.409
23	0.771	1.218	-0.919	2.268	4.365	-2.993
24	0.893	1.596	-1.255	3.142	5.573	-4.007
25	0.512	0.857	-0.621	2.407	2.311	-1.549
26	0.658	1.144	-0.794	3.303	3.04	-2.321
27	0.691	1.330	-0.796	3.451	3.919	-2.713
28	0.431	0.697	-0.492	1.474	2.471	-1.317
29	0.451	0.610	-0.483	1.759	2.203	-1.257
30	0.716	1.040	-0.827	2.923	2.959	-2.086
31	0.787	1.111	-0.828	4.289	3.463	-2.754
32	0.823	1.197	-0.939	3.343	4.486	-3.127
33	1.202	1.573	-1.308	4.349	5.374	-3.659
34	0.655	1.048	-0.750	3.006	2.656	-1.676
35	0.833	1.203	-0.975	3.695	3.621	-2.711
36	1.065	1.516	-1.177	3.989	5.722	-4.617
37	0.478	0.544	-0.419	1.88	2.371	-1.298
38	0.639	0.879	-0.708	2.399	2.758	-2.182
39	0.686	0.956	-0.795	2.514	3.05	-1.856
40	0.412	0.534	-0.404	2.082	2.56	-1.331
41	0.617	0.844	-0.639	2.425	3.57	-1.968
42	0.892	1.140	-0.918	3.866	4.293	-3.254
43	0.613	0.823	-0.645	1.412	1.996	-1.295
44	0.632	0.802	-0.617	2.530	3.332	-1.928
45	0.911	1.117	-1.063	2.566	3.495	-2.562

46	0.512	0.857	-0.621	2.407	2.311	-1.549
47	0.658	1.144	-0.794	3.303	3.040	-2.321
48	0.691	1.330	-0.796	3.451	3.919	-2.713
49	0.655	1.048	-0.750	3.006	2.656	-1.676
50	0.833	1.203	-0.975	3.695	3.621	-2.711
51	1.065	1.516	-1.177	3.989	5.722	-4.617
52	0.464	0.883	-0.720	1.520	2.989	-1.973
53	0.671	1.122	-1.121	1.921	3.386	-3.144
54	0.720	0.750	-0.905	2.688	2.826	-2.261
55	0.495	0.769	-0.667	1.358	2.900	-2.488
56	0.814	1.081	-1.128	2.521	3.062	-2.902
57	0.706	0.762	-0.887	2.825	3.069	-2.617
58	0.523	0.696	-0.616	2.012	2.367	-2.162
59	0.520	0.738	-0.666	1.947	2.514	-1.837
60	0.581	0.974	-0.879	1.795	3.229	-2.680

또한 언더커팅 디스크커터의 작용력의 특징으로 TBM 디스크커터(1/10 ~ 1/20)와 달리(Cho et al., 2010; Jeong et al., 2011) 수직력에 대한 절삭력과 축력의 비율이 동일한 수준의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 최대작용력의 경우 수직력에 대한 회전력, 축력의 비율은 평균적으로 107 %, 137 % 였으며, 평균작용력의 경우 82 %, 122 %로 나타나 세 방향의 절삭력 성분이 암석의 절삭에 모두 관여하는 것을 알 수 있었다. 표 2.7은 각 시험조건에서 획득된 세 방향 절삭력성분의 비율을 나타낸 것이다.

표 2.7. 수직력에 대한 회전력 및 축력의 비율

시험번호	평균 커터작용력 (tonf)		최대 커터작용력 (tonf)	
	축력	회전력	축력	회전력
1	84.8%	113.0%	93.1%	109.5%
2	78.2%	110.8%	106.0%	136.9%
3	66.1%	110.7%	67.0%	120.5%
4	91.4%	133.3%	120.1%	129.1%
5	85.7%	129.3%	104.3%	132.1%
6	68.9%	97.4%	56.5%	99.7%
7	73.3%	119.0%	63.8%	125.8%
8	56.0%	87.4%	63.6%	92.4%
9	49.7%	83.6%	50.5%	90.0%
10	77.9%	140.0%	111.8%	144.0%
11	75.7%	119.3%	73.4%	108.3%
12	65.9%	111.6%	62.5%	129.6%
13	70.1%	115.8%	75.9%	130.5%
14	58.4%	109.0%	50.4%	120.3%
15	56.9%	108.9%	68.8%	107.2%
16	95.0%	127.5%	109.0%	154.1%
17	102.3%	130.0%	131.2%	172.8%
18	85.7%	105.0%	100.2%	136.4%
19	88.2%	125.7%	124.8%	148.5%

20	75.2%	130.5%	87.9%	134.9%
21	81.5%	142.8%	101.2%	149.8%
22	91.9%	122.3%	115.4%	151.0%
23	83.8%	132.5%	75.8%	145.8%
24	71.2%	127.2%	78.4%	139.1%
25	82.5%	138.0%	155.4%	149.2%
26	82.9%	144.1%	142.3%	131.0%
27	86.7%	167.0%	127.2%	144.5%
28	87.6%	141.8%	111.9%	187.6%
29	93.3%	126.3%	139.9%	175.3%
30	86.6%	125.7%	140.1%	141.9%
31	95.1%	134.3%	155.7%	125.7%
32	87.7%	127.5%	106.9%	143.5%
33	91.9%	120.3%	118.9%	146.9%
34	87.4%	139.7%	179.4%	158.5%
35	85.4%	123.4%	136.3%	133.6%
36	90.5%	128.8%	86.4%	123.9%
37	113.9%	129.8%	144.8%	182.7%
38	90.2%	124.1%	109.9%	126.4%
39	86.3%	120.3%	135.5%	164.3%
40	101.9%	132.1%	156.4%	192.3%
41	96.6%	132.1%	123.2%	181.4%
42	97.1%	124.2%	118.8%	131.9%
43	95.0%	127.5%	109.0%	154.1%
44	102.3%	130.0%	131.2%	172.8%
45	85.7%	105.0%	100.2%	136.4%
46	82.5%	138.0%	155.4%	149.2%
47	82.9%	144.1%	142.3%	131.0%
48	86.7%	167.0%	127.2%	144.5%
49	87.4%	139.7%	179.4%	158.5%
50	85.4%	123.4%	136.3%	133.6%
51	90.5%	128.8%	86.4%	123.9%
52	64.5%	122.7%	77.0%	151.5%
53	59.9%	100.1%	61.1%	107.7%
54	79.6%	82.8%	118.9%	125.0%
55	74.3%	115.3%	54.6%	116.6%
56	72.1%	95.8%	86.9%	105.5%
57	79.5%	85.9%	107.9%	117.3%
58	84.8%	113.0%	93.1%	109.5%
59	78.2%	110.8%	106.0%	136.9%
60	66.1%	110.7%	67.0%	120.5%

언더커팅에서 정의되는 절삭조건인 법선압입깊이, 평행압입깊이, 절삭속도, 편심에 따라 모든 커터작용력이 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며, 그림 2.25는 법선 압입깊이에 따른 커터작용력의 변화양상 중 커터직경 80 mm, 절삭속도 40 mm/s, 편심 5 mm에서의 결과를 보여 주고 있다. 다른 절삭조건이 일정한 경우에 법선압입깊이의 영향은 동일한 것으로 분석되었다. 먼저 평균작용력의 경우에는 수직력과 절삭력이 압입깊이 증가에 따른 선형적인 증가 경향을

보여주고 있으나 측력의 경우에는 경향성을 확인할 수 없었다. 다만 절삭평면상에서 함께 작용하는 측력과 절삭력의 합력을 계산한 결과, 압입깊이에 따라 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이러한 원인 중 하나는 ADC에서는 커터의 회전에 따라 암석과의 접촉점이 지속적으로 변화하기 때문인 것으로 판단된다. 반면 최대 커터작용력의 경우에는 압입깊이에 따른 모든 커터작용력이 증가하는 경향을 명확하게 관찰할 수 있었다.

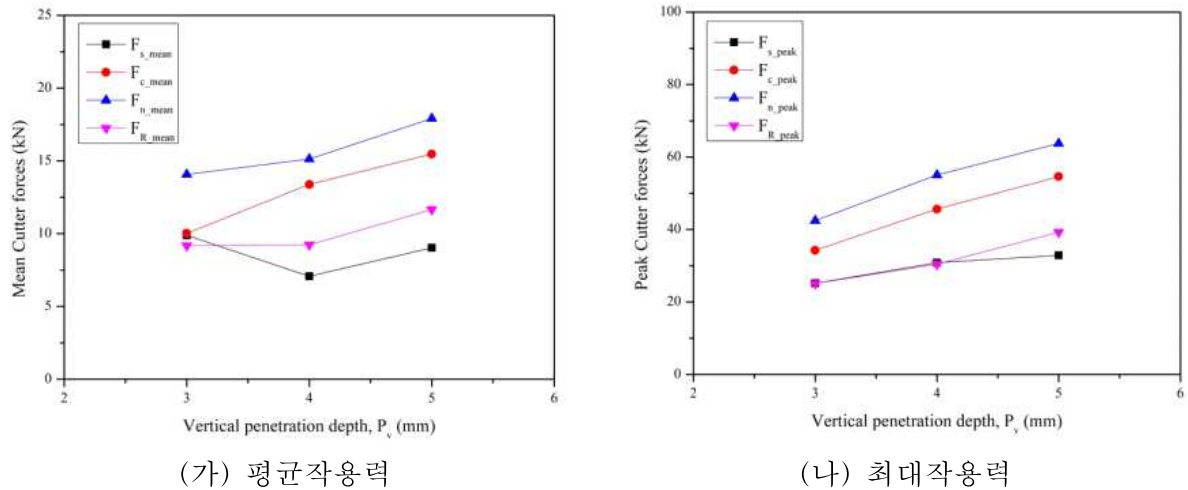
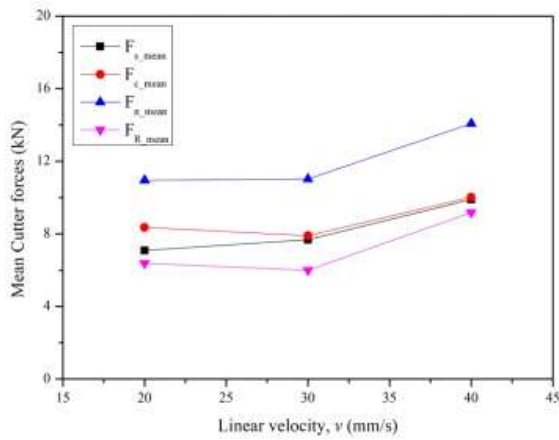
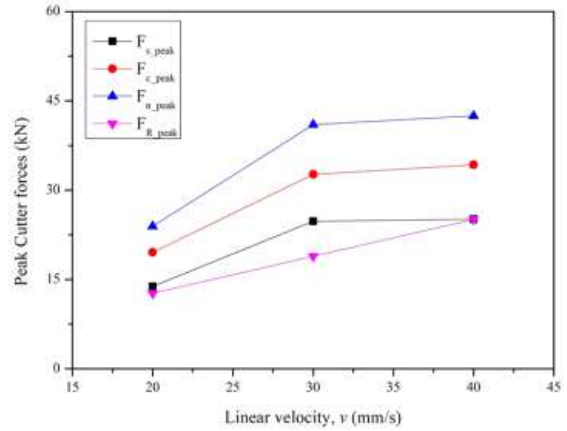


그림 2.25. 법선압입깊이에 따른 커터작용력 변화

한편 그림 2.26은 선형이동속도의 변화에 따른 언더커팅 디스크의 커터작용력 변화양상을 보여준다. 마찬가지로 일부 절삭조건에 대한 결과만을 도시하였다. 앞선 분석과 마찬가지로 측력, 절삭력, 측력과 절삭력의 합력, 수직력을 함께 도시하였다. 평균작용력과 최대작용력 모두 대체로 커터의 선형이동속도에 따라 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 선형이동속도를 제외하고는 모든 조건을 동일하게 적용하였기 때문에, 선형이동속도의 증가는 곧바로 평행압입깊이(p_h)의 증가를 의미하게 된다. 따라서 ADC에서는 법선압입깊이(p_v)와 함께 평행압입깊이 또한 커터작용력에 주요한 영향을 미치는 인자인 것으로 판단할 수 있다. 하지만 평행압입깊이는 RPM과 선형이동속도의 함수이기 때문에, 다양한 조합의 RPM과 선형이동속도에 대한 추가실험을 통하여 RPM, 선형이동속도, 평행압입깊이가 커터작용력에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다.



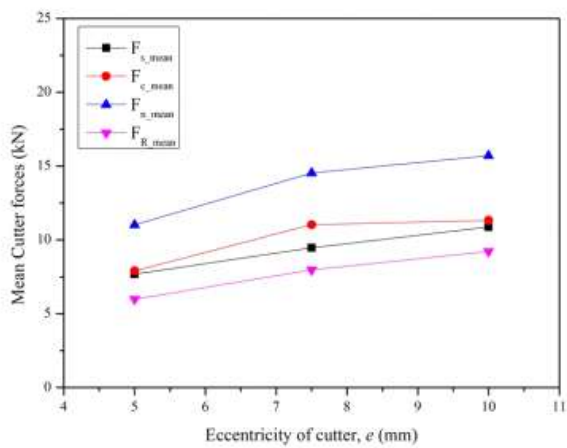
(가) 평균작용력



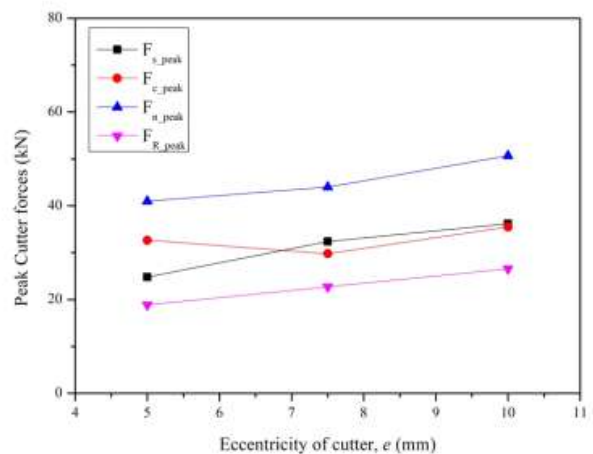
(나) 최대작용력

그림 2.26. 선형이동속도에 따른 커터작용력 변화

그림 2.27은 편심의 변화에 따른 언더커팅 디스크의 커터작용력의 변화를 보여주고 있다. 앞선 분석과 동일한 방법으로 그래프를 도시하였다. 편심의 경우에도 평균작용력, 최대작용력 모두와 대체로 비례관계에 있는 것을 확인할 수 있었다. 편심이 증가하게 되면 평행압입깊이가 증가하고 커터가 절삭평면상에서 이동하는 궤적의 면적도 함께 증가한다. 이에 따라 커터 작용력이 증가한 것으로 판단된다. 또한 편심은 커터의 직경에도 영향을 받을 것으로 추정되므로, 다양한 커터직경에 대한 시험을 바탕으로 편심과 커터직경이 커터작용력에 미치는 영향을 추가적으로 분석할 필요가 있을 것으로 판단되었다.



(가) 평균작용력



(나) 최대작용력

그림 2.27. 편심에 따른 커터작용력 변화

한편 일반적으로 기계굴착에 의한 암석의 절삭효율을 평가하는 지수는 단위 부피의 암석을 굴착하는데 커터가 하는 일(work)로 정의되는 비에너지(specific energy, SE)이며, 식(18)과 같이 계산된다.

$$SE = \frac{F_c \times l}{V_{cut}} \quad (18)$$

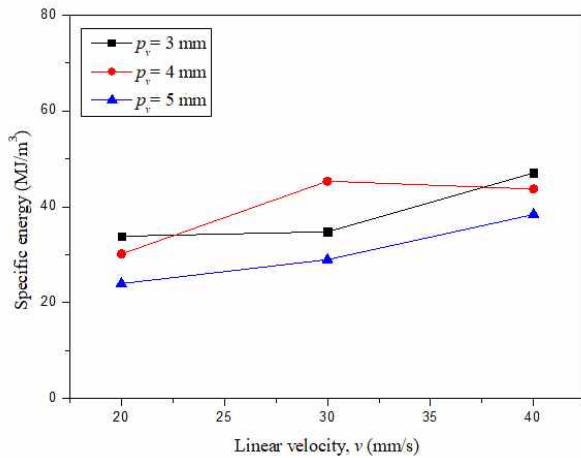
여기서, SE는 비에너지, F_c 는 절삭력(cutting force), l 은 절삭거리, V_{cut} 은 절삭된 암석의 부피이다. 기존의 TBM 디스크커터와 픽 커터의 절삭에서는 절삭력의 방향과 커터가 일을 하는 방향(절삭거리의 계산을 위함)이 일치할 뿐만 아니라 절삭 도중 같은 방향이 유지되기 때문에 비에너지의 계산이 비교적 간단하다. 반면 ADC에서는 암석과 커터의 접촉점이 커터의 회전에 따라 지속적으로 바뀌고 커터의 궤적 또한 기존의 선형궤적이 아닌 곡선(2D헬리컬) 궤적이기 때문에 비энер지를 계산하기 위해서는 지속적으로 변화하는 암석과 커터의 접촉점과 이에 따른 커터의 곡선절삭궤적을 계산해 주어야 한다. 또한 지속적으로 변화하는 접촉점에서의 커터 작용력을 접선방향과 반경방향 성분으로 분해하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 한정된 시간으로 인하여 비에너지 계산에서 이러한 고려는 하지 못하였다. 본 연구에서는 로드셀로부터 측정된 평균 회전력을 이용하여 비에너지 산출하였으며 그 결과는 표 2.8에 요약하였다.

표 2.8. 본 연구에서 수행한 언더커팅 절삭시험의 비에너지 산출 결과

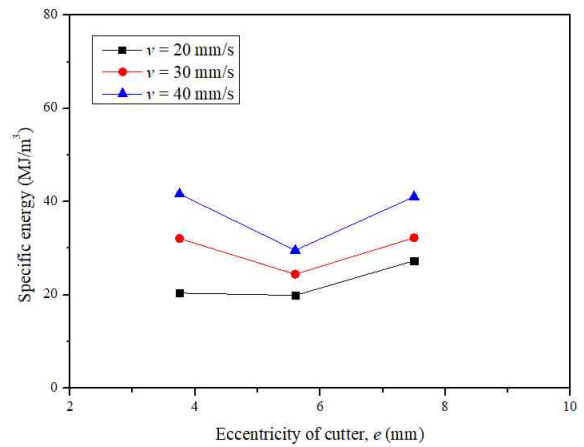
시험 번호	커터직경 (mm)	편심 (mm)	RPM	법선압입 깊이 (mm)	절삭속도 (mm/s)	비에너지 (MJ/m ³)
1	60	7.5	70	3	20	35.98
2	60	7.5	70	3	30	36.74
3	60	7.5	70	3	40	46.43
4	60	7.5	70	4	20	27.33
5	60	7.5	70	4	30	32.26
6	60	7.5	70	4	40	41.07
7	60	7.5	70	5	20	24.39
8	60	7.5	70	5	30	42.34
9	60	7.5	70	5	40	44.45
10	60	5.6	70	4	20	19.91
11	60	5.6	70	4	30	24.45
12	60	5.6	70	4	40	29.59
13	60	3.75	70	4	20	20.42
14	60	3.75	70	4	30	32.09
15	60	3.75	70	4	40	41.65
16	80	5	100	3	20	33.86
17	80	5	100	3	30	34.77
18	80	5	100	3	40	47.07
19	80	5	100	4	20	30.14
20	80	5	100	4	30	45.33

21	80	5	100	4	40	43.7
22	80	5	100	5	20	23.96
23	80	5	100	5	30	28.98
24	80	5	100	5	40	38.39
25	80	7.5	100	3	20	36.08
26	80	7.5	100	3	30	49.74
27	80	7.5	100	3	40	52.9
28	80	7.5	70	4	20	19.28
29	80	7.5	70	4	30	19.41
30	80	7.5	70	4	40	30.83
31	80	7.5	70	5	20	25.12
32	80	7.5	70	5	30	30.63
33	80	7.5	70	5	40	38.9
34	80	10	70	3	20	43.51
35	80	10	70	3	30	46.41
36	80	10	70	3	40	59.29
37	80	10	70	4	20	20.56
38	80	10	70	4	30	26.32
39	80	10	70	4	40	27.23
40	80	10	70	5	20	14.91
41	80	10	70	5	30	21.62
42	80	10	70	5	40	29.25
43	80	5	100	3	20	33.86
44	80	5	100	3	30	34.77
45	80	5	100	3	40	47.07
46	80	7.5	100	3	20	36.08
47	80	7.5	100	3	30	49.74
48	80	7.5	100	3	40	52.9
49	80	10	70	3	20	43.51
50	80	10	70	3	30	46.41
51	80	10	70	3	40	59.29
52	60	3.75	70	3	20	45.86
53	60	3.75	70	3	30	59.63
54	60	3.75	70	3	40	41.49
55	60	5.6	70	3	20	39.61
56	60	5.6	70	3	30	57.09
57	60	5.6	70	3	40	39.49
58	60	7.5	70	3	20	35.98
59	60	7.5	70	3	30	36.74
60	60	7.5	70	3	40	46.43

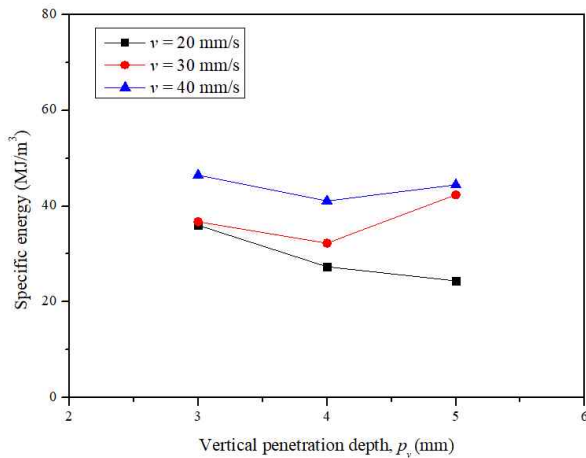
이로부터 커터작용력과 마찬가지로 언더커팅에서 정의되는 절삭조건인 법선압입깊이, 절삭 속도, 편심에 따른 비에너지의 변화 경향을 분석하였다. 그림 2.28은 언더커팅의 주요변수의 변화에 따른 비에너지의 변화 추이를 보여주고 있다.



(가) 선형이동속도



(나) 편심



(다) 법선압입깊이

그림 2.28. 주요 절삭조건에 따른 비에너지 변화 예시

커터의 직경, 선형이동속도가 증가함에 따라 비에너지는 지속적으로 감소하여 굴삭효율이 증가하는 것으로 나타났으며, 법선압입깊이의 경우에는 계속적으로 감소하거나 최적점이 일부 관측되었다. 선형이동속도와 법선압입깊이의 관계에 따라 최적 절삭조건을 규명하는 것이 가능할 것으로 판단되지만 본 연구에서는 한정된 조건을 고려한 관계로 이에 대한 추가 분석은 어려웠다. 편심의 경우에도 최소의 비에너지를 갖게하는 최적점이 존재하는 것으로 도출되었고, 편심은 커터의 직경, 선형이동속도와와의 관계에 따라 최적점을 정의할 수 있을 것으로 판단되었다.

본 연구의 시험결과로부터 각 시험조건 별 최소의 비에너지가 도출된 시험결과를 요약하면 표 2.9와 같다. 먼저 다른 조건들이 고정된 경우에 선형이동속도에 증가에 따라 절삭효율은 감소하는 것으로 도출되어 20 mm/s에서 최소의 비에너지가 나타났다. 변수들의 변화에 따라 편심 1회전 당 적절한 선형이동속도(평행압입깊이)를 설정하는 것이 중요하며, 본 연구의 시험으로부터 도출된 최적 평행압입깊이(편심 1회전 당)의 범위는 12 ~ 17이었다. 이와 동시에 법선압입깊이가 증가하게 되면 절삭효율은 증가하거나 특정지점에서 최적값을 나타내는 값이 존

제한다. 본 연구에서는 평행압입깊이와 법선압입깊이의 비율이 2.4 ~ 5.7 일 때 최소의 비에너지 값을 나타내었다. 언더커팅 디스크 커터의 선형절삭속도와 굴착깊이의 비율을 적절하게 제어하는 것이 굴착효율의 측면에서 중요함을 나타내는 결과이다.

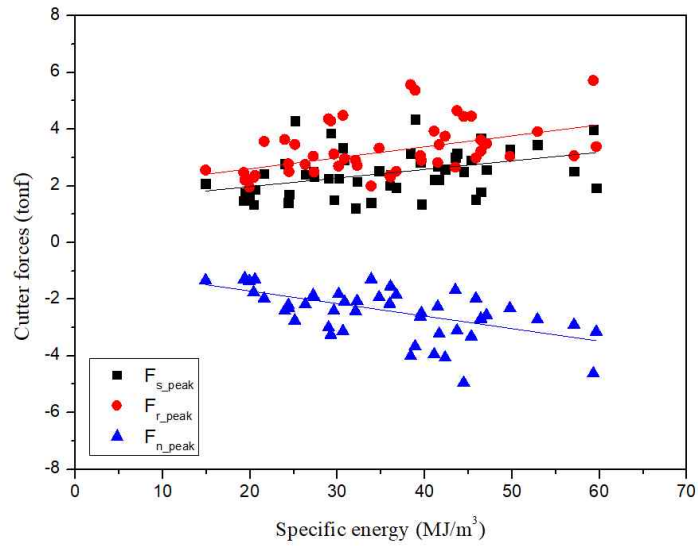
표 2.9. 본 연구에서 수행한 언더커팅 절삭시험의 최적절삭조건 요약

커터 직경 (mm)	법선압입 깊이, P_v (mm)	절삭속도 (mm/s)	커터 1회전당 P_h (mm/rev)	P_h/P_v 비	비에너지 (MJ/m ³)
60	3	20	17	5.7	35.98
60	4	20	17	4.2	27.33
60	5	20	17	3.4	24.39
60	4	20	17	4.2	19.91
60	4	20	17	4.2	20.42
80	3	20	12	4.0	33.86
80	4	20	12	3.0	30.14
80	5	20	12	2.4	23.96
80	3	20	12	4.0	36.08
80	4	20	17	4.2	19.28
80	5	20	17	3.4	25.12
80	3	20	17	5.7	43.51
80	4	20	17	4.2	20.56
80	5	20	17	3.4	14.91
80	3	20	12	4.0	33.86
80	3	20	12	4.0	36.08
80	3	20	17	5.7	43.51
60	3	40	17	5.7	41.49
60	3	40	17	5.7	39.49
60	3	40	17	5.7	46.43

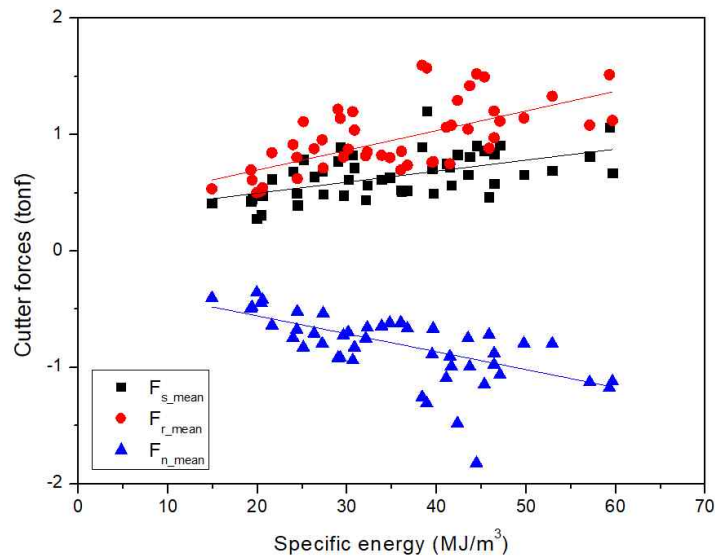
민감도분석에 의하여 3방향 커터작용력과 비에너지에 미치는 절삭변수들의 중요도를 평가하였으며, 그 결과는 표 2.10과 같다. 계수로 표현된 민감도의 부호는 변수들간의 상관관계를 의미하며 계수의 절대값이 높을수록 강한 상관관계를 가지는 것을 의미한다. 한편 그림 2.29는 커터작용력과 비에너지의 관계를 도시한 것이다. 모든 절삭조건에서 최대커터작용력과 평균커터작용력이 증가할수록 비에너지 또한 증가하는 개략적인 경향을 확인할 수 있었다.

표 2.10. 절삭조건이 커터작용력과 비에너지에 미치는 영향에 대한 민감도 분석 결과

변수	비에너지	측력	절삭력	수직력
커터직경	-0.037 (5)	0.392 (2)	0.377 (2)	0.062 (2)
법선압입깊이	-0.622 (1)	0.026 (5)	0.065 (5)	0.054 (3)
편심	-0.041 (4)	0.115 (4)	0.104 (4)	-0.044 (4)
RPM	0.191 (3)	0.214 (3)	0.279 (3)	0.035 (5)
선형이동속도	0.465 (2)	0.589 (1)	0.541 (1)	0.683 (1)



(a) 최대 커터작용력



(b) 평균 커터작용력

그림 2.29 언더커팅 절삭시험에서 획득된 비에너지와 커터작용력 간의 상관관계

한편 모든 절삭조건을 통하여 언더커팅에 의한 비에너지의 측정범위는 14.91-49.74 MJ/m³ (평균: 34.64 MJ/m³)로써, 극경암을 모사한 시료에서도 높은 절삭효율을 보이는 것으로 나타났다. 선행연구(그림 2.30)에서 보고된 TBM 디스크커터의 비에너지 범위는 35-75.9 MJ/m³ (평균: 53.21 MJ/m³)이며, 동일한 절삭조건을 기준으로 측정된 값은 아님을 고려하더라도 평균 34%의 비에너지 감소 효과를 확인할 수 있었으나, 이에 대해서는 추후 자료 확보가 필요할 것으로 판단되었다.

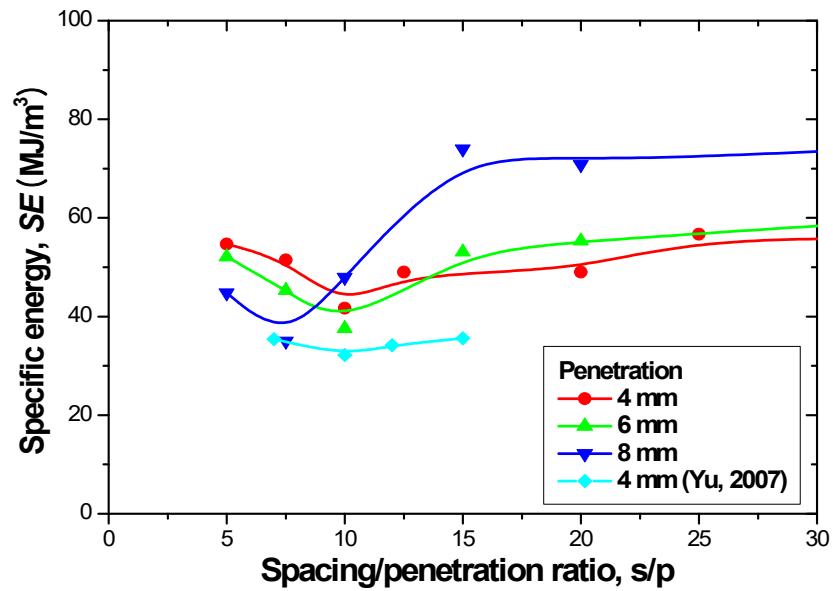


그림 2.30. 선행연구의 극경암에 대한 TBM 디스크 커터의 비에너지(조정우, 2010)

또한 본 연구에서 측정된 언더커팅의 비에너지의 범위는 로드헤더에 사용되는 픽 커터가 25~75 MPa(Bilgin et al., 2006)의 암석을 절삭할 때 획득되는 수준과 유사한 것으로 분석되었다. 로드헤더의 경우, 경암 및 극경암의 굴착이 일부 가능하기는 하나 그 굴착효율이 암석의 강도의 증가에 따라 급격하게 감소하는 것으로 알려져 있으므로, 언더커팅방식이 픽 커터에 비하여 보다 효율적으로 암석절삭을 수행할 수 있을 것으로 판단되었다.

2) 회전식 언더커팅 절삭시험

본 연구에서 수행한 선형절삭에 의한 언더커팅 절삭시험 결과의 비교검증과 암석강도가 언더커팅의 절삭성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 추가적인 시험을 수행하였다. 회전식 절삭시험시스템(한국생산기술연구원)을 이용하여 연속적인 언더커팅에 의한 암석절삭시험을 수행하였으며 시험에 대한 개략적인 모습은 그림 2.31과 같다.

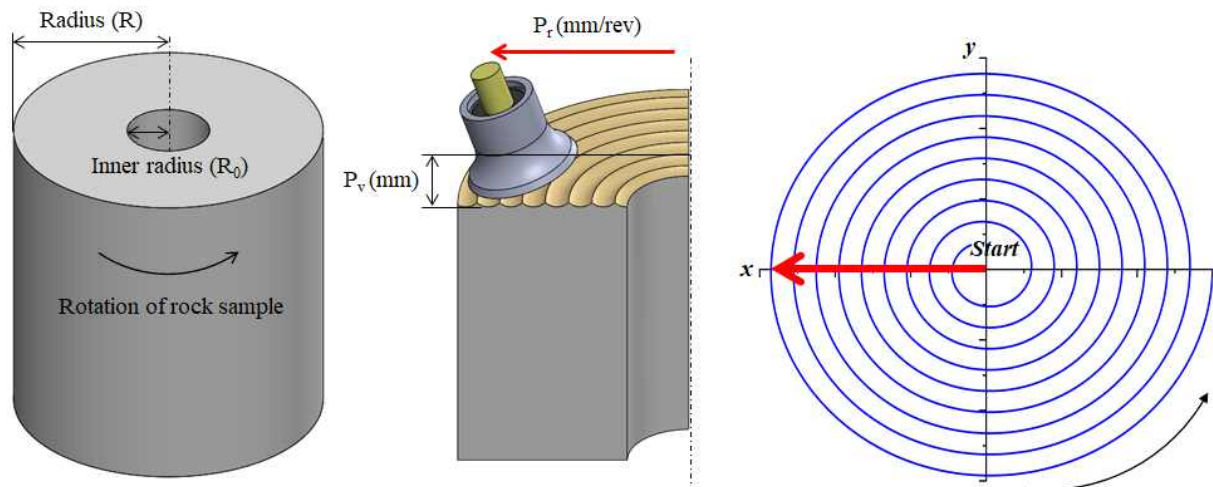


그림 2.31. UDC 회전식 절삭시험 개념도

앞선 선형절삭시험과 마찬가지로 실제 커터에 비해 작은 크기의 언더커터를 사용하게 되므로, 커터의 축소비율을 고려하여 차원계산을 통하여 시편의 강도를 결정하였다. 차원 계산 결과는 표 2.11과 같다. 강도축소율은 5.6으로 계산되었고, 이를 일축압축강도에서 나눠서 대상 시편의 강도를 결정하였다. 앞선 선형절삭시험과는 달리 축소율 계산 시 17인치를 기준으로 축소비와 축소율을 계산하였으나, 절삭조건의 설정에는 축소비율을 고려하지 않았기 때문에 시험의 결과분석에 미치는 영향은 없다. 만약 기준 커터의 크기를 증가시키는 경우 축소비가 늘어나므로 실스케일에서의 강도는 더욱 증가하게 된다.

표 2.11. 커터 축소비율 및 차원계산

인자	단위, 차원	값	설명
실제 커터직경, D_{cutter}	mm	432	TBE 커터 추정값 (17인치)
축소모형 커터직경, $D_{\text{cutter_reduced}}$	mm	100	실험에 사용된 커터
커터 축소비율	ratio	0.23	
대상 암반 밀도	-	2.60	
모형 시편 밀도	-	2.00	
길이비	L	0.23	
중력가속도비	L/T^2	1	
시간 비	T	0.48	
밀도의 비	M/L^3	0.77	
질량 축소율	M	0.01	
응력, 강도 축소율	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$	0.178	축소율
축소배수		5.62	축소비

표 2.12는 축소배수가 반영된 축소모형 시편 목표강도를 계산한 결과이다. 시멘트 시편의 양생일자에 대한 강도변화를 사전에 조사하였다. 그 결과, 압축강도 8-45 MPa까지 조절할 수 있을 것으로 파악되었다.

표 2.12. 축소모형 시편의 목표강도

암석강도 등급	대표강도 (MPa)	축소모델 목표강도 (MPa)
극경암	200.0	35.6
경암	120.0	21.4
중경암	75.0	13.4
보통암	37.5	6.7
연 암	15.0	2.7
극연암	3.0	0.5

그림 2.32은 실내온도(20℃) 조건에서 시멘트 양생기간에 따른 압축강도를 보여주고 있다. 그러나 온도 변화에 따른 강도 변화 가능성을 고려하여 시멘트 시편을 직접 양생하여 일축압축강도를 측정 한 후 시험을 수행하였다. 그 결과 표 2.13에 나타난 바와 같이 중경암, 경암, 극경암의 경계수준까지 강도치를 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 양생일 1, 2, 4일에 걸쳐 회전식 절삭시험을 수행하였다.

제품명	물혼합량 (물/포),%	단위사용량 (TON/m ³)	FLOW (%)	압축강도MPa			
				1일	3일	7일	28일
GP400	15~17	1.9~1.95	150 이상	8 이상	18 이상	35 이상	45 이상
GP600	15~17	1.9~1.95	150 이상	15 이상	35 이상	50 이상	60 이상
HP800	15~17	1.9~1.95	150 이상	25 이상	50 이상	60 이상	80 이상
QP600	15~16	1.9~1.95	150 이상	3 시간	6 시간	1일	28일
				30 이상	40 이상	45 이상	60 이상

그림 2.32. 시멘트의 재령별 압축강도(한일시멘트, 2020)



그림 2.33 양생된 시멘트 공시체와 일축압축시험 전경

표 2.13. 양생 재령에 따른 시멘트 시편의 강도

재령 (일)	축소시편 강도 (MPa)	환산강도 (MPa)	목표등급
1	10~13	73.1	중경암
2	16~22	123.6	경암
3	24~30	168.6	경암
4	32.7	183.8	극경암

회전절삭시험의 실험인자 중 독립변수는 시편내경(R0), 시편외경(R), 수직절삭깊이(Pv), 반경절삭깊이(Pr), 그리고 회전속도(RPM) 총 5개이다. 그러나 축소모형 길이 배율이 약 4.4배 (응력비율 5.6배)로 크지 않아 시편 내경과 외경을 실제 터널직경 및 파일럿 터널 직경과 일치시키는 것이 불가하였다 (파일럿 터널직경이 3 m, 전체터널 직경을 8 m라고 가정했을 때, 시편 내경, 외경은 각각 0.7 m, 1.8 m가 되어야 함). 따라서 시편의 내외경을 현재 시험기의 한계치인 300, 650 mm로 설정하였다. 그리고 RPM을 실험변수로 선정하게 되면 이에 따른 실험횟수가 지나치게 증가함을 고려하여 RPM은 20으로 고정하였다.

결과적으로 실험변수는 수직절삭깊이(Pv), 반경절삭깊이(Pr) 2개로 선정하여 표 2.14와 같이 실험계획을 수립하였다. 회전식 절삭시험기에 시험편이 거치된 모습은 그림 2.34와 같다. 암석의 강도(중경암, 경암, 극경암), 반경방향압입깊이(4수준), 수직압입깊이(3수준)를 고려하였고 총 36회의 회전식절삭시험에 의한 언더커팅 절삭시험을 수행하여 절삭조건의 변화에 따른 커터작용력 및 비에너지의 변화양상을 관찰하였다.

표 2.14. 회전식 절삭시험 실험계획표

No	UCS (MPa)	Pv (mm)	Pr (mm/rev)	RPM
1	13 (중경암)	2	6	20
2		2	8	20
3		2	10	20
4		2	14	20
5		3	6	20
6		3	9	20
7		3	12	20
8		3	15	20
9		4	8	20
10		4	12	20
11		4	14	20
12		4	16	20
13	20 (경암)	1	3	20
14		1	4	20
15		1	5	20
16		1	7	20
17		2	6	20
18		2	8	20
19		2	10	20
20		2	14	20
21		3	6	20
22		3	9	20
23		3	12	20
24		3	15	20
25		4	8	20
26		4	12	20
27	32 (극경암)	1	3	20
28		1	4	20
29		1	5	20
30		1	7	20
31		2	6	20
32		2	8	20
33		2	10	20
34		2	14	20
35		3	6	20
36		3	9	20



그림 2.34. 회전 절삭시험 시험편 세팅 사진

절삭거리는 반경 절삭거리(radial cutting length, L_r)와 접선방향 절삭거리(tangential cutting length)로 분리된다. 반경 절삭거리의 계산에 대해서는 앞서 설명한 과정에 따라 다시 정리하면 아래와 같다.

$$L_r = R_{fin} - R_{hollow} \quad (19)$$

나선의 좌표(P_x, P_y)는 회전 각도(θ)로 표현될 때, 적분 구간을 나선 시작점($\theta = 0^\circ$)에서 최종 반경일 때의 각도 값(θ_0)으로 하면, 나선의 총 길이(L_{total})를 수식 8과 같은 정적분식으로 계산할 수 있다.

$$L_{total} = \int_0^{\theta_0} \sqrt{\left(\frac{d}{d\theta} P_x\right)^2 + \left(\frac{d}{d\theta} P_y\right)^2} d\theta \quad (20)$$

그런데 수학적으로 접선방향 절삭거리를 계산할 때, 반경방향의 직교하는 방향의 거리를 미소구간을 적분하여 구하게 된다. 그러면 접선방향 절삭거리(L_t)는 나선의 총 접촉길이와 수학적으로 계산결과가 같다. 따라서, 접선방향 절삭거리는 나선의 총길이를 그대로 사용할 수 밖에 없다.

$$L_t = L_{total} = \int_0^{\theta_0} \sqrt{\left(\frac{d}{d\theta} P_x\right)^2 + \left(\frac{d}{d\theta} P_y\right)^2} d\theta \quad (21)$$

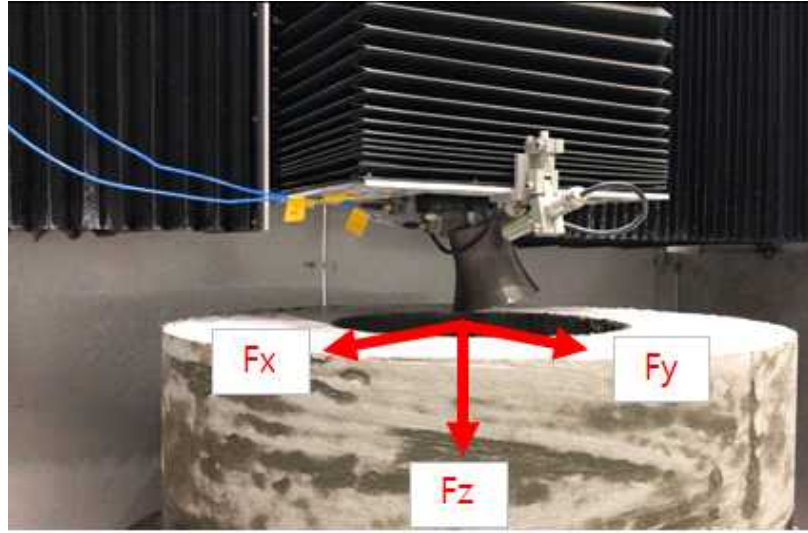


그림 2.35. 회전식 언더커팅시험 좌표정의

절삭에너지(cutting energy)는 물리적으로 진행방향의 힘과 진행거리의 곱으로 계산된다. 따라서 직교하는 3방향 성분의 힘을 표현하면 아래 수식과 같다.

$$E_x = F_r * L_{ra} = F_{x-mean} * L_{ra} \quad (22)$$

$$E_y = F_t * L_t = F_{y-mean} * L_t \quad (23)$$

$$E_z = F_n * L_n = F_{z-mean} * P_v \quad (24)$$

기존 문헌에서 수직력에 연계된 수직에너지를 에너지로 계산하지 않는 문헌(Cho et al., 2010; Hood, 2000)과 계산한 문헌(Medel-Morales et al., 2013; Mirahmadi et al., 2017)을 찾을 수 있다 (실내시험에서 수직방향의 변위를 고정하고 대부분 실험하기 때문에 물리적으로 수직 에너지는 발생하지 않지만, 실제 TBM, TBE에서는 터널면 방향으로 추력이 지속적으로 가해지므로, 실제 상황에서는 추력 에너지가 존재함). 이처럼 실험상황을 물리적으로 정의하기에 따라 달라지지만, 추력방향 수직에너지는 회전에너지의 1~5% 미만이므로 수직에너지가 고려되어도 결과에 큰 영향을 미치지 못한다. 하지만, 본 연구에서는 언더커팅 메커니즘을 반영하여 수행된 회전절삭시험의 데이터를 생산하고자 3방향의 에너지를 모두 계산에 포함하였다.

마지막으로 3방향의 평균힘과 에너지가 계산되었으면 비에너지(SE)는 사용된 에너지를 절

삭부피(V)로 나누어 계산된다. 절삭부피는 반경방향 절삭거리를 기준으로 아래 수식으로 계산하였다.

$$SE = \frac{E_t}{V} = \frac{E_x + E_y + E_z}{V} \quad (25)$$

$$where, V = \pi (R_{fin}^2 - R_{hollow}^2) P_v$$

표 2.15 ~ 2.20에는 본 연구에서 수행한 언더커팅 절삭시험 결과를 커터작용력과 비에너지로 나누어 정리하였다.

표 2.15. 회전식 언더커팅 시험에서 획득된 커터작용력(중경암)

UCS (MPa)	Pv (mm)	Pr (mm)	Max. Force (kgf)			Average Force (kgf)			Peak/Mean Force		
			x	y	z	x	y	z	x	y	z
13 (Intermediate rock)	2	6	103.0	36.0	981.0	34.0	28.1	742.2	3.029412	1.281139	1.321746
	2	8	149.0	50.0	1286.0	66.4	31.0	917.6	2.243976	1.612903	1.401482
	2	10	154.0	61.2	1317.6	72.3	36.3	932.6	2.130014	1.68595	1.412824
	2	14	167.0	83.0	1601.0	77.8	48.0	1223.5	2.14653	1.729167	1.308541
	3	6	152.0	55.0	1206.0	89.2	44.4	1017.7	1.704036	1.238739	1.185025
	3	9	222.0	67.0	1540.0	131.8	53.1	1213.4	1.68437	1.26177	1.269161
	3	12	246.0	84.0	1652.0	133.3	64.0	1301.7	1.845461	1.3125	1.26911
	3	15	267.0	104.0	1833.0	147.3	78.0	1438.4	1.812627	1.333333	1.274333
	4	8	283.0	78.0	1760.0	168.0	62.0	1347.9	1.684524	1.258065	1.305735
	4	12	315.0	101.0	2051.0	172.0	74.3	1599.0	1.831395	1.359354	1.282677
	4	14	378.0	140.0	2334.0	206.3	79.8	1789.1	1.832283	1.754386	1.304567
	4	16	411.0	165.0	2671.0	263.0	85.4	1914.3	1.562738	1.932084	1.395288

표 2.16. 회전식 언더커팅 시험에서 획득된 커터작용력(경암)

UCS (MPa)	Pv (mm)	Pr	Max. Force (kgf)			Average Force (kgf)			Peak/Mean Force		
			x	y	z	x	y	z	x	y	z
20 (Hard Rock)	1	3	40.0	15.0	513.0	28.0	8.0	312.0	1.428571	1.875	1.644231
	1	4	41.0	16.0	524.0	30.0	8.5	325.0	1.366666	1.882352	1.612308
	1	5	63.0	19.0	568.0	38.5	10.5	373.0	1.636363	1.809523	1.522788
	1	7	78.0	21.0	583.0	41.5	17.0	398.0	1.879518	1.235294	1.464824
	2	6	153.0	42.0	1300.0	107.0	26.0	1172.0	1.429906	1.615384	1.109215
	2	8	196.0	68.0	1625.0	119.0	30.0	1362.0	1.647058	2.266666	1.193098
	2	10	215.0	79.0	1718.0	125.0	35.0	1459.0	1.72	2.257142	1.177519
	2	14	235.0	107.0	1857.0	134.0	55.0	1689.0	1.753731	1.945454	1.099467
	3	6	257.0	62.0	1704.0	180.5	43.0	1302.0	1.423822	1.441860	1.308756
	3	9	272.0	78.0	2228.0	197.0	58.0	1544.0	1.380710	1.344827	1.443005
	3	12	316.0	99.0	2378.0	223.0	65.0	1973.5	1.417040	1.523076	1.204966
	3	15	328.0	136.0	2563.0	237.5	75.0	2319.0	1.381052	1.813333	1.105218
	4	8	302.0	82.0	1887.0	202.0	45.5	1436.0	1.495049	1.802197	1.314067
	4	12	323.0	100.0	2448.0	245.0	76.0	1982.0	1.318367	1.315789	1.235116

표 2.17 회전식 언더커팅 시험에서 획득된 커터작용력(경암)

UCS (MPa)	Pv (mm)	Pr	Max. Force (kgf)			Average Force (kgf)			Peak/Mean Force		
			x	y	z	x	y	z	x	y	z
33 (Extremely Hard Rock)	1	3	49.0	22.0	560.0	30.0	12.0	360.0	1.633333	1.833333	1.555556
	1	4	58.0	23.0	572.0	32.0	12.5	365.0	1.8125	1.84	1.567123
	1	5	72.0	25.0	598.0	37.7	19.0	372.0	1.909814	1.315789	1.607527
	1	7	79.0	29.0	672.0	39.0	27.0	421.0	2.025641	1.074074	1.5962
	2	6	214.0	52.0	1563.0	122.0	36.0	1240.0	1.754098	1.444444	1.260484
	2	8	216.0	55.0	1753.0	123.0	36.5	1398.0	1.756098	1.506849	1.253934
	2	10	239.0	91.0	1844.0	134.5	57.0	1496.0	1.776952	1.596491	1.23262
	2	14	258.0	135.0	2229.0	141.5	87.0	1732.0	1.823322	1.551724	1.286952
	3	6	312.0	91.0	1987.0	192.0	54.0	1452.0	1.625	1.685185	1.368457
	3	9	360.0	107.0	2456.0	207.0	62.0	1736.0	1.73913	1.725806	1.414747

표 2.18. 회전식 언더커팅 시험에서 획득된 비에너지(중경암)

UCS (MPa)	Pv (mm)	Pr	Pr/Pv	Specific energy (MJ/m ³)
13	2	6	3	30.8
	2	8	4	25.6
	2	10	5	24.0
	2	14	7	22.8
	3	6	2	32.5
	3	9	3	26.1
	3	12	4	23.7
	3	15	5	23.1
	4	8	2	25.8
	4	12	3	20.7
	4	14	3.5	19.2
	4	16	4	18.1

표 2.19. 회전식 언더커팅 시험에서 획득된 비에너지(경암)

UCS (MPa)	Pv (mm)	Pr	Pr/Pv	Specific energy (MJ/m ³)
20	1	3	3	35.1
	1	4	4	28.0
	1	5	5	27.7
	1	7	7	32.0
	2	6	3	28.8
	2	8	4	25.0
	2	10	5	23.4
	2	14	7	26.3
	3	6	2	31.8
	3	9	3	28.7
	3	12	4	24.3
	3	15	5	22.5
	4	8	2	19.1
	4	12	3	21.3

표 2.20 회전식 언더커팅 시험에서 획득된 비에너지(극경암)

UCS (MPa)	Pv (mm)	Pr	Pr/Pv	Specific energy (MJ/m ³)
30	1	3	3	52.5
	1	4	4	41.1
	1	5	5	49.9
	1	7	7	50.7
	2	6	3	39.7
	2	8	4	30.3
	2	10	5	37.8
	2	14	7	41.2
	3	6	2	39.8
	3	9	3	30.6

그림 2.36은 중경암 시편에 대해서 수행된 평균절삭력 그래프이다. 수직 절삭깊이(Pv)는 2, 3, 4 mm에 대해서 수행되었다. 반경방향 절삭속도(Pr)이 증가할수록 수직력이 급격히 증가하는 양상을 확인할 수 있다. 그림 2.37은 경암 시편에 대해서 수행된 평균절삭력 그래프이다. 수직 절삭깊이(Pv)는 1, 2, 3, 4 mm에 대해서 수행되었다. 반경방향 절삭속도(Pr)와 수직압입깊이(Pv)가 증가할수록 커터 수직력이 급격히 증가하였다. Pv= 4 mm인 조건에서 커터허용하중의 한계로 Pr=12 mm까지만 시험이 수행되었다. 그림 2.38은 극경암 시편에 대한 커터 작용력 그래프이다. 이 역시 커터의 수직하중이 Pv, Pr에 따라 가장 민감하게 증가하고 있는 양상을 보여주고 있다. Pv= 3 mm인 조건에서 커터허용하중의 한계로 Pr= 9 mm까지만 시험이 수행되었다.

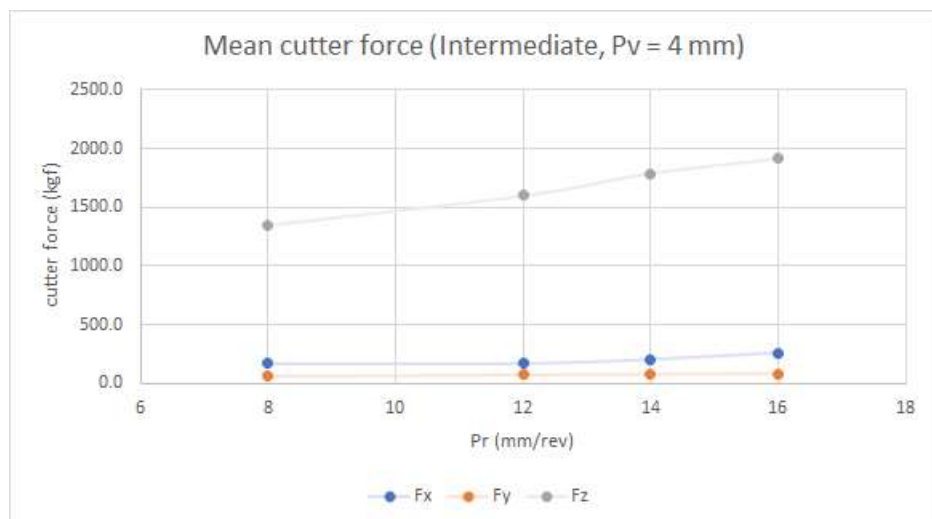
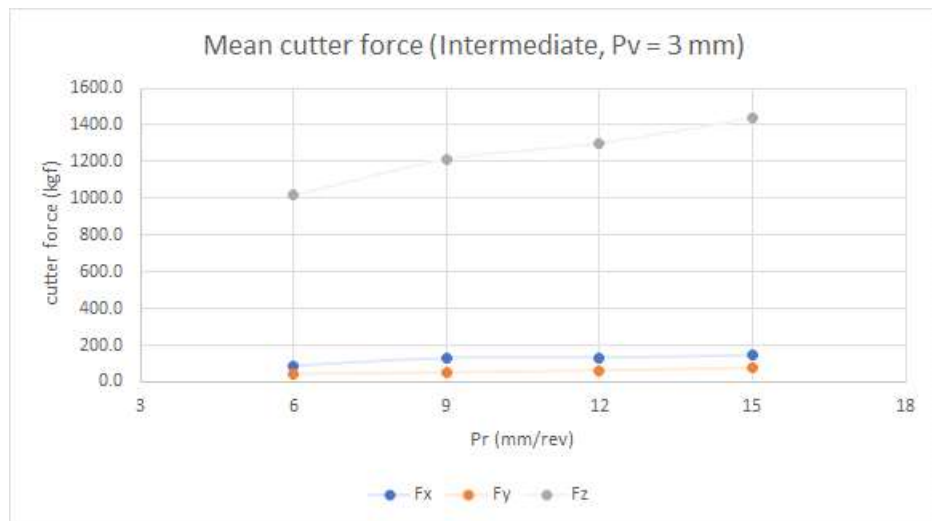
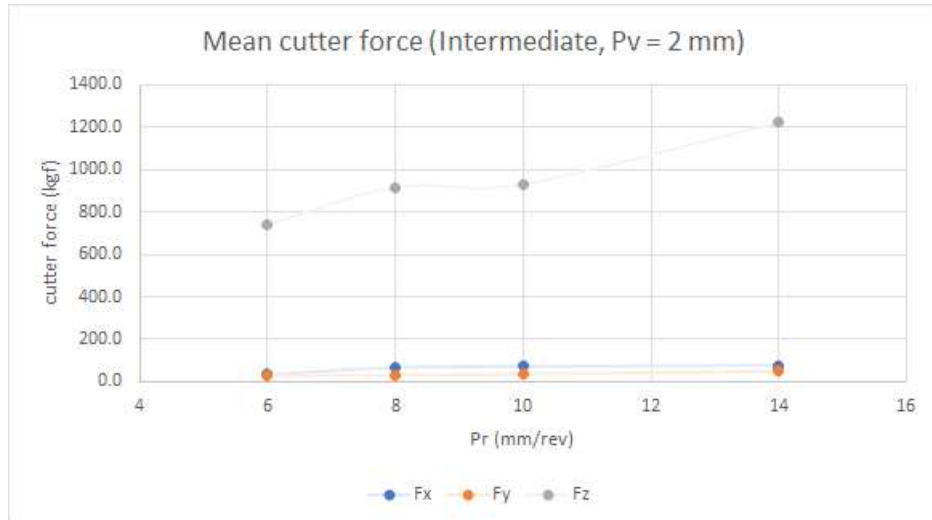


그림 2.36. 중경암 시편의 평균절삭력 그래프

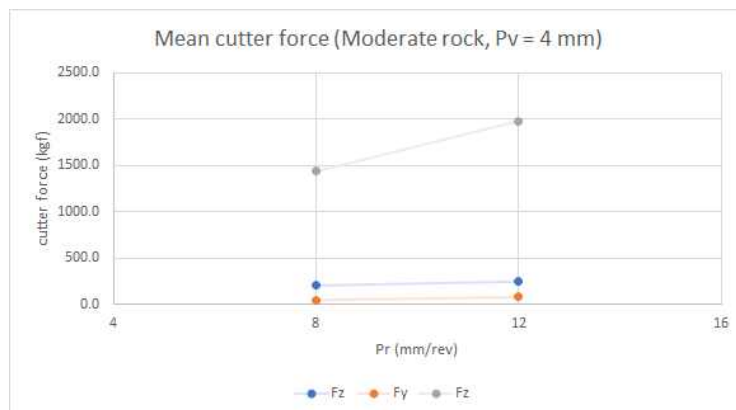
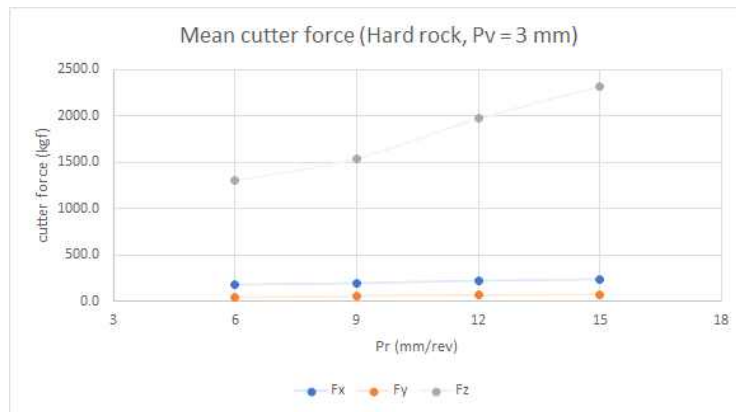
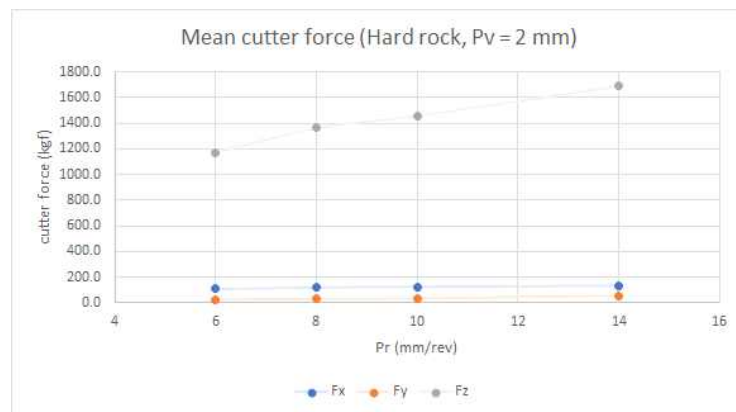
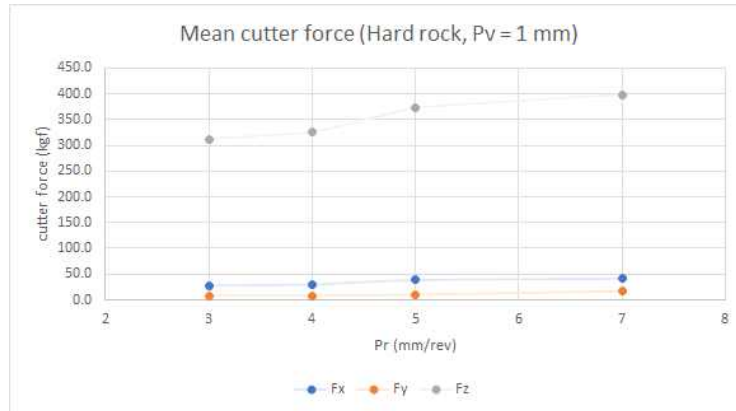


그림 2.37. 경암 시편의 평균절삭력 그래프

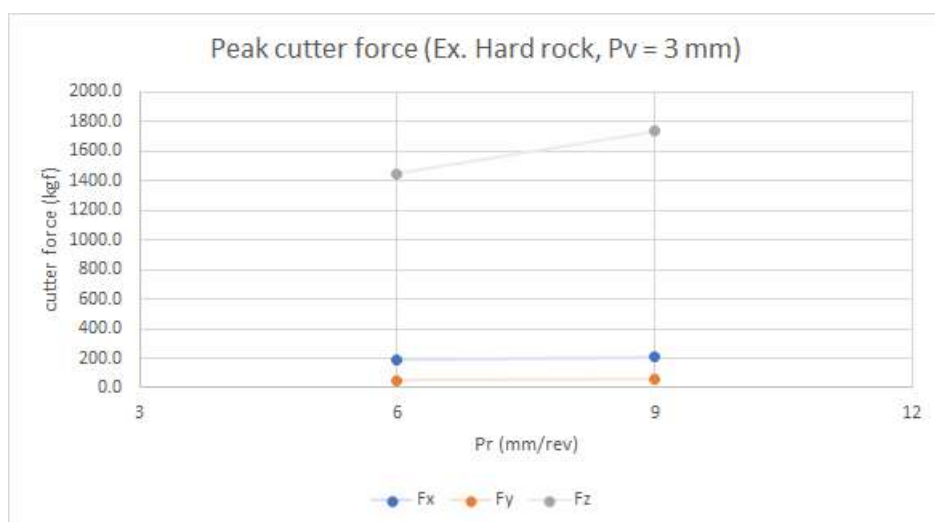
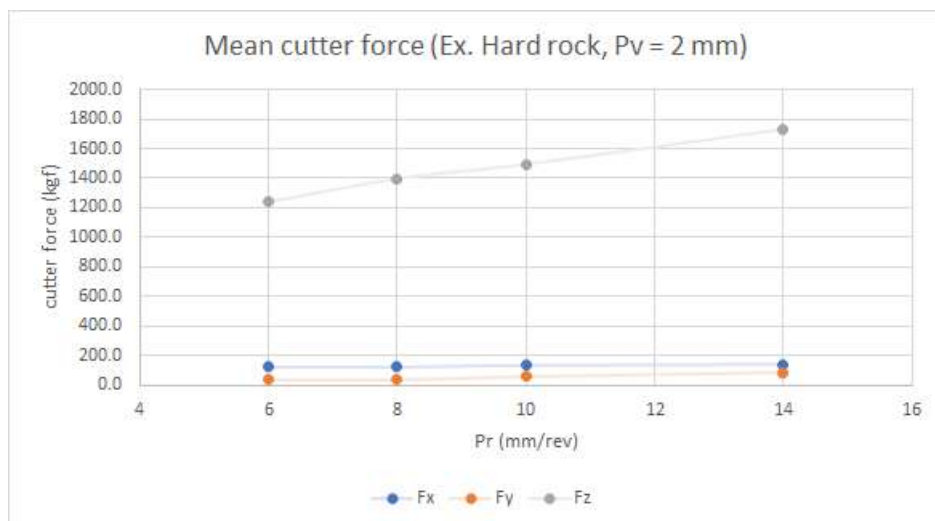
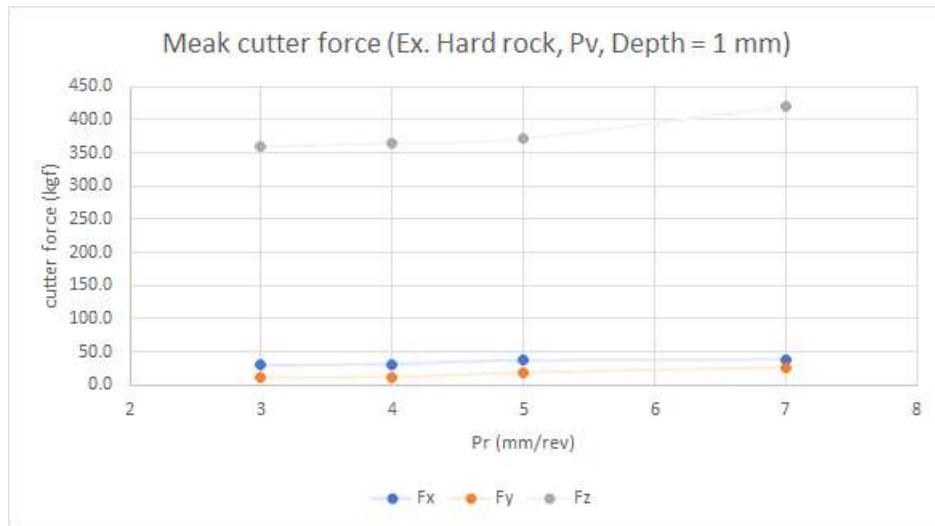


그림 2.38. 극경암 시편의 평균절삭력 그래프

한편 그림 2.39 ~ 2.41은 중경압, 경압, 극경압에서 측정된 비에너지의 변화 양상을 나타내고 있다. 먼저 중경압에서는 Pr 이 증가하면서 비에너지 값이 지속적으로 감소하고 있다. 최적 비에너지 지점은 Pr/P_v 비율이 7이거나 혹은 그 이상인 지점인 것으로 예상된다. 본 연구에서는 커터하중의 한계 때문에 Pr/P_v 가 7이상인 조건에 대해 시험을 수행하기 어려웠으며, 최적 절삭조건을 명확하게 규명하기 위해서는 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다.

경압 시편에 대한 비에너지는 수직 절삭깊이에 관계없이 $Pr/P_v=5.0$ 일 때 최소값이 도출되었다. 비록 축소모형 시험이지만 최적 비에너지 값이 존재하므로, 경압인 경우 설정된 절삭깊이의 5배만큼 반경방향 속도를 유지하는 것이 TBE 운영에 가장 유리할 것으로 판단된다. ($P_v=4\text{ mm}$ 인 조건은 커터하중 한계상 2개 조건만 시험되어 최적 지점을 도출하지 못함.)

극경압에서는, $P_v=1, 2\text{ mm}$ 에서 모두 최적 비에너지 지점은 $Pr/P_v=4.0$ 인 지점이 도출되었다. 따라서 대상 시편의 강도가 증가할수록 최적 Pr/P_v 값은 감소하는 경향이 도출되었다. 이는 실제 TBE 굴진시 압반강도 증가에 따라 반경방향 이송속도를 낮게 운용하는 것이 에너지 효율상 유리하다는 것을 의미한다.

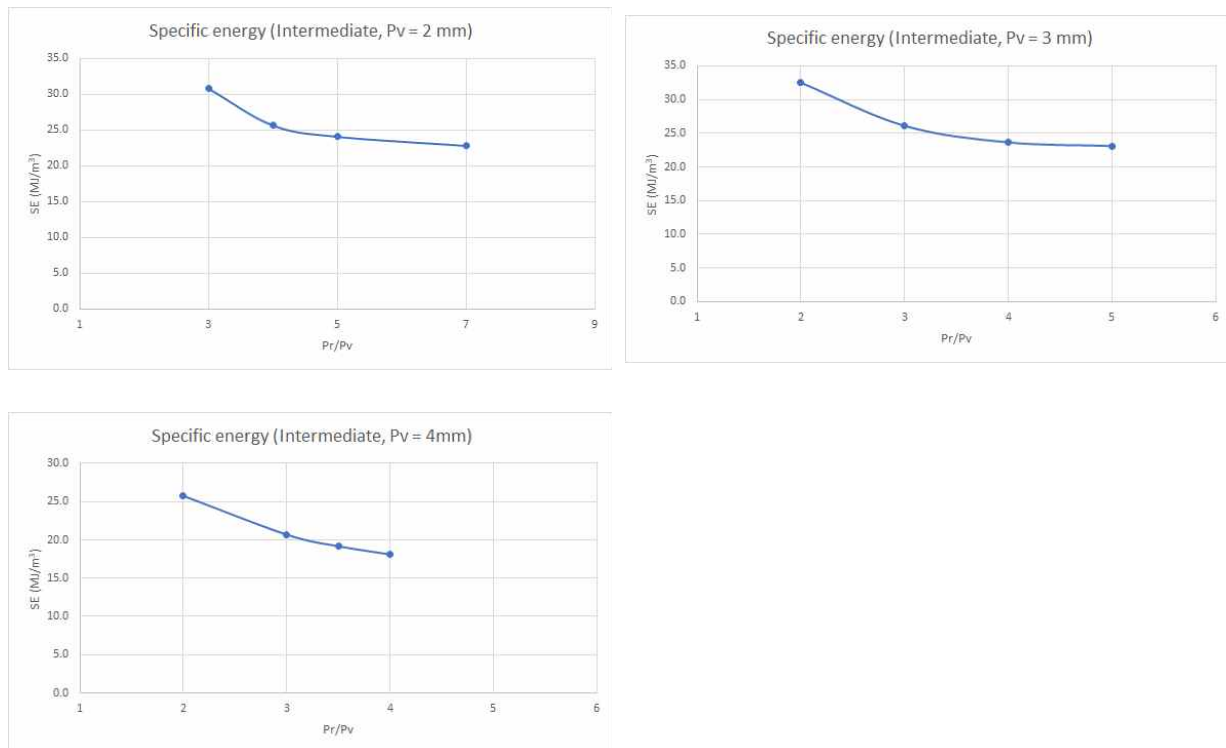


그림 2.39. 중경압 시편의 비에너지

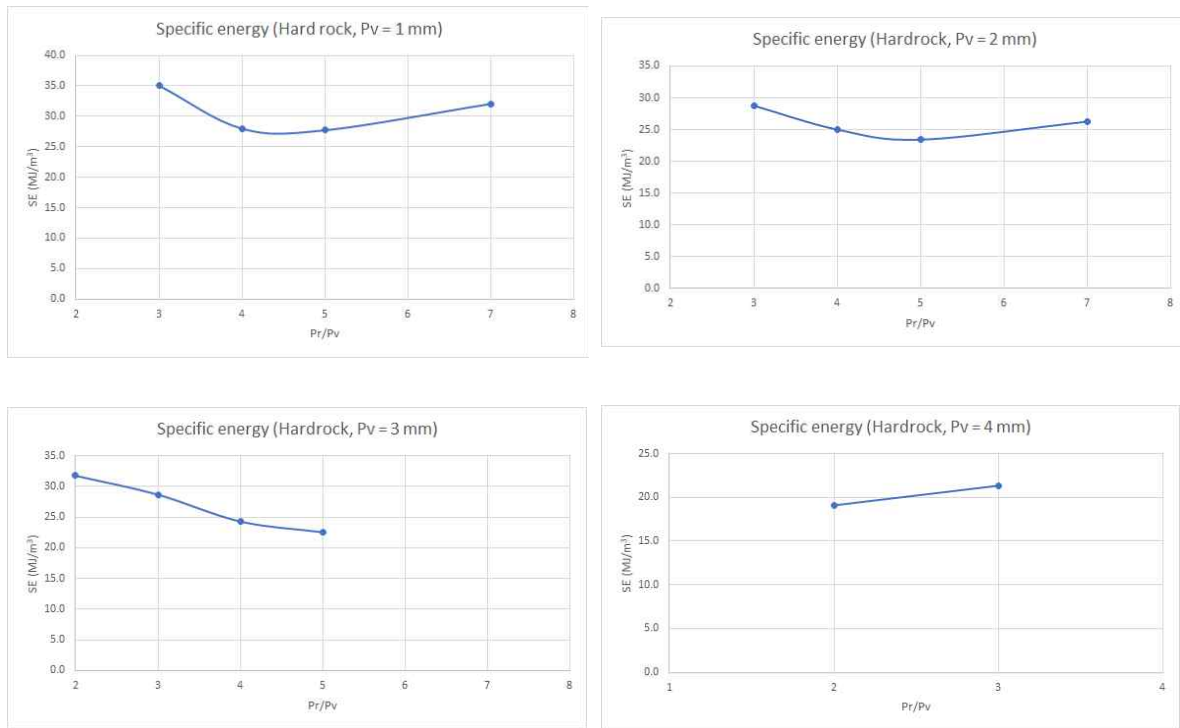


그림 2.40. 경암 시편의 비에너지

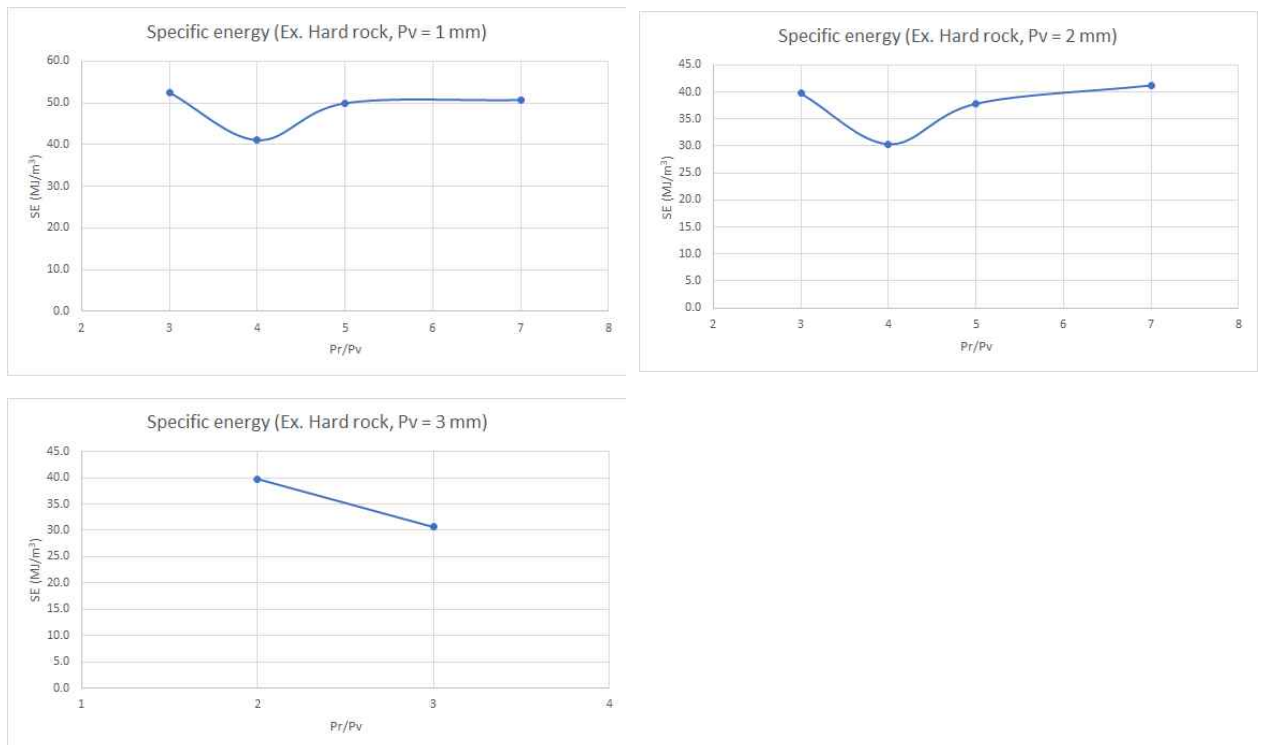


그림 41. 극경암 시편의 비에너지 그래프

본 연구과제에서 수행된 회전식 절삭시험을 통해 얻어진 암반강도별 최적 절삭조건은 표 2.21과 같이 요약할 수 있다. 중경암(실스케일 강도: 80 MPa)의 경우에는 최적 Pr/Pv의 범위가 4-7로 도출되었으며, 경암(실스케일 강도: 130 MPa)의 경우에는 커터허용하중의 관계로 시험이 불완전하게 수행된 Pv=4 mm의 경우를 제외하면 최적 Pr/Pv의 값이 5로 도출되었다. 극경암의 경우에는 3-4의 범위에서 최적값이 도출되었다. 모든 암반 강도에서 Pv의 증가에 따라 비에너지가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. TBM 디스크 커터의 경우에도 압입깊이가 증가함에 따라 비에너지가 감소(굴착효율 증가)하여 장비의 사양이 허용하는 만큼 굴착속도를 증가시키는 것이 굴착효율의 증진에도 도움을 주게 되는데(Cho, 2010, Jeong, 2010), 언더커팅을 적용한 암석절삭에서도 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 표 2.20에 요약된 바와 같이 암반의 강도가 증가함에 따라 최적 Pr/Pv의 값은 점진적으로 감소하는 결과를 확인할 수 있었다. 암반의 강도가 증가할수록 인접한 커터의 절삭궤적을 좁게 설정하거나 운용조건을 조절하여 Pr/Pv의 값을 보수적으로 설정할 필요가 있음을 의미하는 결과이다.

표 2.21. 회전식 언더커팅 시험에서 획득된 암반강도 별 최적 절삭조건

UCS (MPa)	Pv (mm)	Pr	Pr/Pv	Specific energy (MJ/m3)
13 (중경암)	2	14	7	22.8
	3	15	5	23.1
	4	16	4	18.1
20 (경암)	1	5	5	27.7
	2	10	5	23.4
	3	15	5	22.5
	4	8	2	19.1
30 (극경암)	1	4	4	41.1
	2	8	4	30.3
	3	9	3	30.6

언더커팅에서는 측정된 3방향 절삭력과 3방향 에너지 수치를 표 2.22와 정리된 바와 같이 서로 비교하였다. 힘의 합력과 에너지 합산은 다음 수식으로 계산하였다. 3방향 힘 중에 99% 이상의 영향력을 가지는 것은 커터 수직력(Fz)였고, 에너지중 98%의 비중을 차지하는 것은 회전 에너지(Ey)였다. 실제 TBM이나 TBE에서도 힘과 에너지의 분배가 이와 유사할 것으로 예측된다. TBE 설계 시 축소모형 실험결과가 유의미하게 이용될 수 있을 것으로 분석된다.

$$F_{result} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (26)$$

$$E_{total} = E_x + E_y + E_z$$

표 2.22. 절삭력과 에너지의 비율

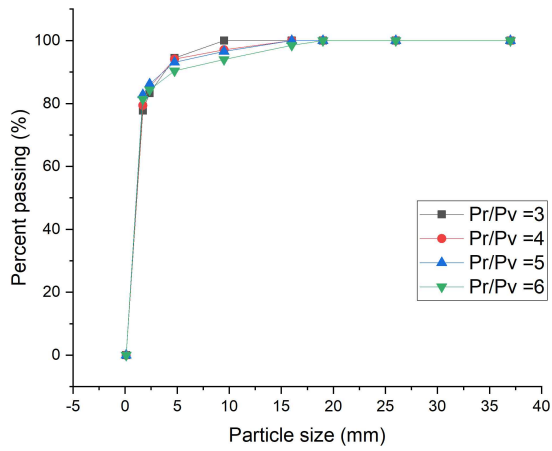
Test No.	Fx (%)	Fy (%)	Fz (%)	Ex (%)	Ey (%)	Ez (%)
1	4.6%	3.8%	99.8%	0.4%	99.4%	0.2%
2	7.2%	3.4%	99.7%	0.9%	98.8%	0.3%
3	7.7%	3.9%	99.6%	1.0%	98.7%	0.3%
4	6.3%	3.9%	99.7%	1.2%	98.4%	0.4%
5	8.7%	4.3%	99.5%	0.6%	99.1%	0.3%
6	10.8%	4.3%	99.3%	1.2%	98.4%	0.4%
7	10.2%	4.9%	99.4%	1.3%	98.2%	0.5%
8	10.2%	5.4%	99.3%	1.5%	97.9%	0.6%
9	12.4%	4.6%	99.1%	1.2%	98.3%	0.5%
10	10.7%	4.6%	99.3%	1.5%	97.7%	0.8%
11	11.4%	4.4%	99.2%	2.0%	97.1%	1.0%
12	13.6%	4.4%	99.0%	2.6%	96.3%	1.1%
13	8.9%	2.6%	99.6%	0.5%	99.4%	0.1%
14	9.2%	2.6%	99.5%	0.7%	99.2%	0.1%
15	10.3%	2.8%	99.4%	0.9%	99.0%	0.1%
16	10.4%	4.2%	99.4%	0.9%	99.0%	0.1%
17	9.1%	2.2%	99.6%	1.3%	98.4%	0.3%
18	8.7%	2.2%	99.6%	1.6%	97.9%	0.4%
19	8.5%	2.4%	99.6%	1.9%	97.7%	0.5%
20	7.9%	3.2%	99.6%	1.8%	97.7%	0.5%
21	13.7%	3.3%	99.0%	1.3%	98.3%	0.4%
22	12.6%	3.7%	99.1%	1.6%	97.9%	0.5%
23	11.2%	3.3%	99.3%	2.2%	97.1%	0.7%
24	10.2%	3.2%	99.4%	2.5%	96.6%	0.9%
25	13.9%	3.1%	99.0%	1.9%	97.3%	0.8%
26	12.3%	3.8%	99.2%	2.1%	97.0%	1.0%
27	8.3%	3.3%	99.6%	0.4%	99.6%	0.0%
28	8.7%	3.4%	99.6%	0.5%	99.4%	0.1%
29	10.1%	5.1%	99.4%	0.5%	99.4%	0.1%
30	9.2%	6.4%	99.4%	0.5%	99.4%	0.1%
31	9.8%	2.9%	99.5%	1.1%	98.7%	0.2%
32	8.8%	2.6%	99.6%	1.4%	98.2%	0.4%
33	8.9%	3.8%	99.5%	1.2%	98.5%	0.3%
34	8.1%	5.0%	99.5%	1.2%	98.5%	0.3%
35	13.1%	3.7%	99.1%	1.1%	98.5%	0.3%
36	11.8%	3.5%	99.2%	1.6%	97.9%	0.5%
Mean	9.9%	3.7%	99.4%	1.3%	98.3%	0.4%

회전절삭시험을 수행한 후 버력을 회수하여 체가름 분석을 실시하였다(그림 2.42 ~ 2.43). 데이터를 정리한 후 누적입도분포 곡선을 도시하였다. 우선 수직절삭깊이(Pv) 2 mm 조건과 3 mm 조건에서 입도분포를 분석하였다.

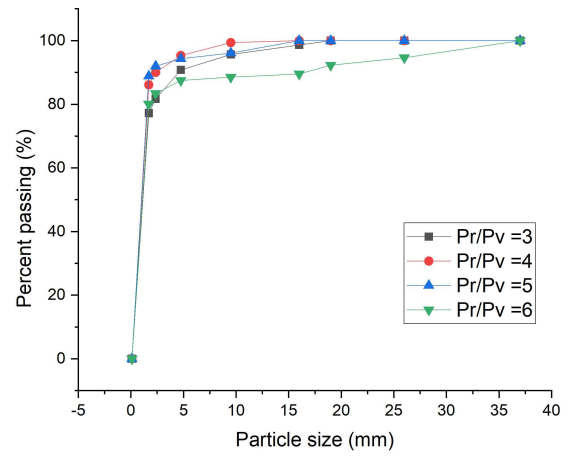
그 결과, Pr/Pv 비율이 증가할수록 그래프 증가율이 약간 낮아지는 경향을 보여 큰 입자의 분포율이 일부 증가하는 점을 확인할 수 있었다. 하지만, 그 경향이 명확히 드러나지 않았다. 축소모형 시험이라 수직압입깊이(Pv)가 불과 2~4 mm에 불과하였기 때문에 분석된다. 향후 실험대형시험을 통해 보다 정확한 경향이 분석될 수 있을 것으로 예상된다.



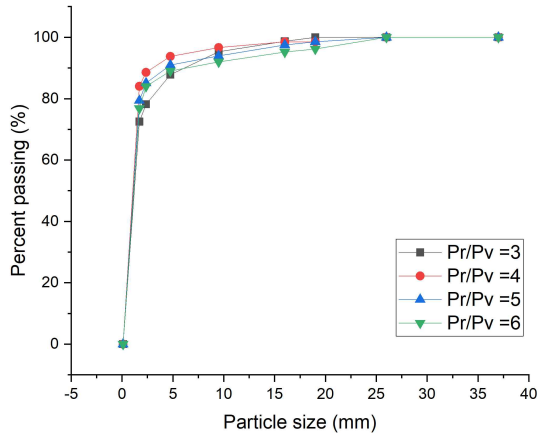
그림 2.42. 절삭시험 후 회수된 버력의 체가름 분석



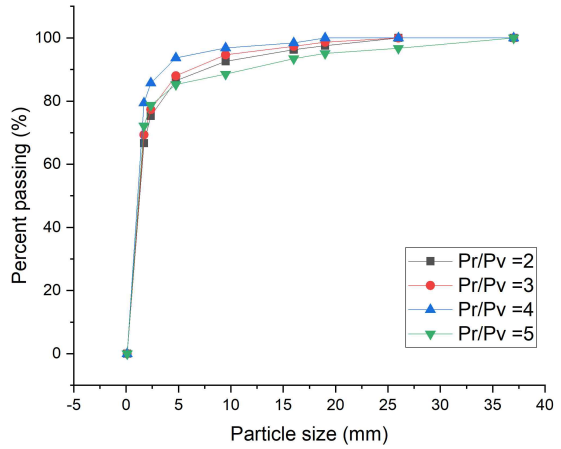
(가) 중경암, 수직압입깊이 2 mm



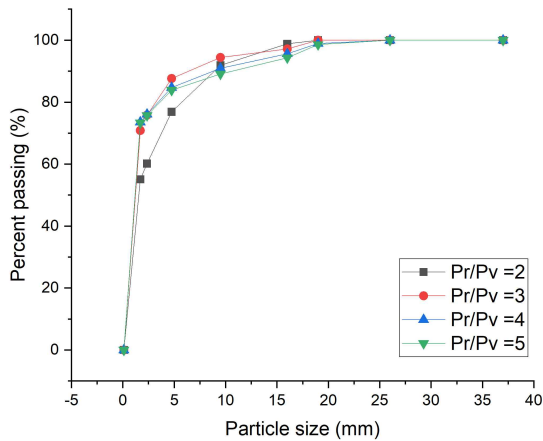
(나) 경암, 수직압입깊이 2 mm



(다) 극경암, 수직압입깊이 2 mm



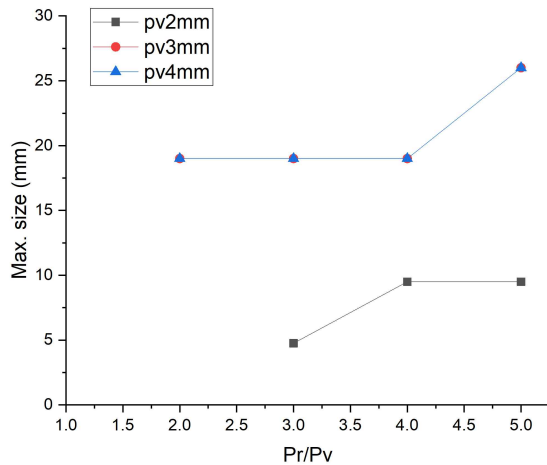
(라) 중경암, 수직압입깊이 3 mm



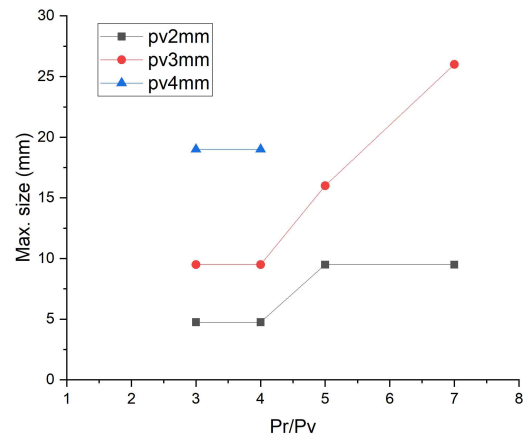
(마) 경암, 수직압입깊이 3 mm

그림 43. 압입깊이, 암반강도에 따른 절삭된 암석버력의 크기분포

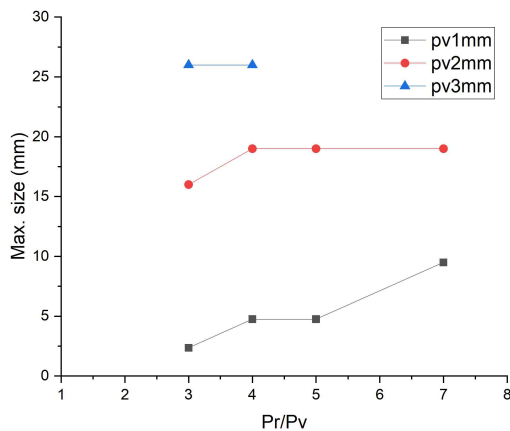
누적 입도분포 곡선에서 그 경향이 확연히 나타나지 않아 최대입자 크기만 별도로 추출하여 그래프에 도시하였다. 그 결과, 절삭깊이와 간격이 증가할수록 버력의 최대 입자크기도 증가하는 양상을 조금 더 명확히 확인할 수 있었다.



(가) 중경압



(나) 경압



(다) 극경압

그림 44. 절삭조건에 따른 암석버력의 최대입자크기

5) 언더커팅 암석절삭과정 수치해석

본 연구에서는 언더커팅에 의한 암석절삭과정 수치해석기법 개발에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에서 대상으로 한 절삭메커니즘은 진동이 결합된 언더커팅방식(ADC)이 아닌 기본적인 언더커팅개념에 해당하며, 진동이 결합된 언더커팅방식을 모사하기 위해서는 디스크커터가 매우 긴 거리를 절삭 이동하여야 하므로 수치해석으로 모사하기에는 비효율적인 것으로 판단되었기 때문이다. 본 연구에서는 수치해석을 통해 언더커팅에 관여하는 변수들이 절삭효율에 미치는 영향을 개략적으로 분석하고자 기본적인 언더커팅개념을 적용한 수치해석모델을 구축하고 다양한 절삭조건하에서 수치해석을 실시하였다.

그림 2.45는 본 연구에서 개발한 수치해석모델을 보여주고 있다. 언더커팅 디스크커터의 경우 제작된 커터를 참고하여 유사한 접촉폭을 가지는 커터모델을 생성하였으며, 암석모델의 크기는 $200\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 이며 메쉬의 크기는 각 변의 길이가 2 mm 인 정육면체로 구성하였다.

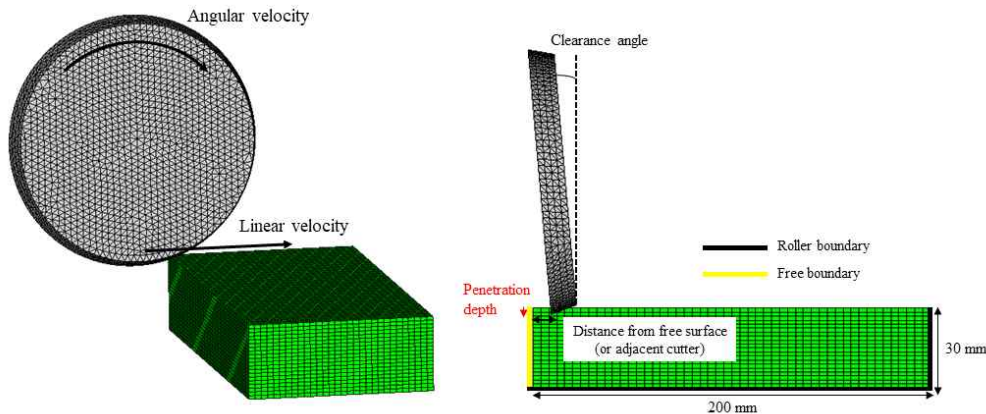


그림 2.45. 언더커팅 수치해석모델

본 연구에서 사용된 해석모델의 암석재료를 정의하는데 필요한 입력 자료는 표 2.23에 정리하였다. 선행연구(조정우, 2010)를 참고하여 온도에 따른 파괴양상변화를 고려하지 않는 linear equation of state(EOS)를 적용하였으며, 체적탄성률(bulk modulus)와 전단탄성률(shear modulus)는 탄성론에 근거하여 입력하였다. AUTODYN에서는 강도모델에 따라 재료의 항복함수가 정의된다. 본 연구에서는 Drucker-Prager 항복함수를 선택하여 암석의 탄소성 거동을 모델링하고자 하였으며 일축압축강도 및 간접인장강도의 90%지점을 각각 압축, 인장 영역에서의 항복시점으로 설정하였다. 암석의 파괴기준으로는 주응력/주변형률 모델을 사용하였으며 인장주응력 파괴점으로는 암석의 인장강도를 입력하였고 압축응력의 절반에 해당하는 전단응력을 기준으로 전단파괴가 발생하도록 하였다. 변형률은 인장파괴와 전단파괴 모두 영률(Young's modulus)를 기준으로 발생하도록 결정하였다. 또한 파괴이후 균열전파(crack propagation)을 모사하기 위하여 균열연화(crack softening)모델을 적용하였으며 여기에서 파괴에너지(fracture energy)는 인장모드(Mode I)의 파괴인성을 적용하여 계산하였다. 소성 유동법칙(plastic flow rule)은 연상유동법칙(bulking, associative rule)을 선택하였고, 확률론적인 파괴는 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 또한 해석영역의 제한을 극복하고자 상부 절삭면을 제외한 전면부에 반무한 투과 경계조건(transmit boundary condition)을 적용하였다.

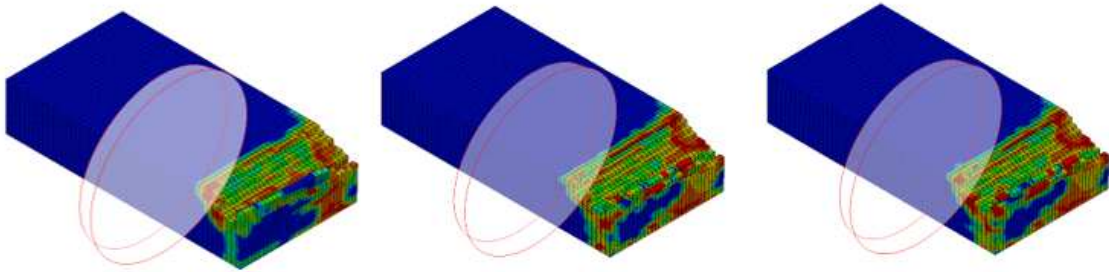
한편 디스크커터 모델은 커터의 직선운동과 암석과의 마찰에 의해 자유 회전하는 방식이 아닌 경계조건에 의하여 강제 회전방식을 적용하였다. 유한요소해석의 특성상 디스크커터와 접촉하는 요소들이 파괴되어 erosion option에 의해 삭제되기 때문에 충분한 마찰력을 제공할

수 없었기 때문이다. 디스크커터모형을 구성하는 요소의 개수는 20,000여개이다. 디스크커터가 정해진 경계조건에 따라 직선운동을 하는 동시에 일정각속도(9.1 rad/sec)를 부여하여 회전시키는 방식으로 디스크커터의 암반절삭과정을 모사하였다.

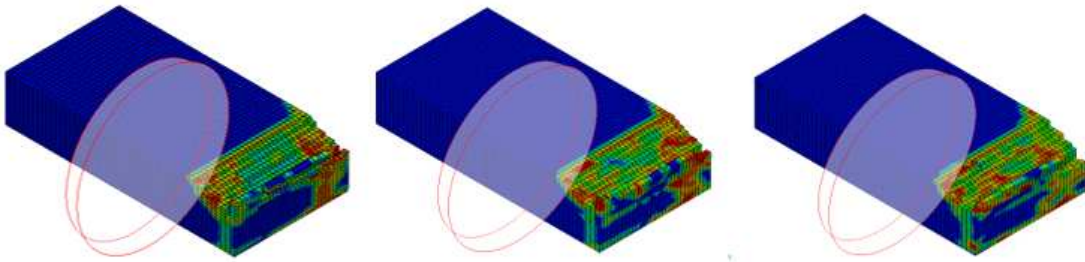
표 2.23. 디스크커터의 암석절삭 수치해석에 사용되는 입력변수

분류	모델	변수	입력 값
EOS (상태방정식)	Linear	Bulk modulus	$B = \frac{E}{3(1-2\nu)}$
		Reference temperature (K)	293
Strength	Drucker-Prager	Shear Modulus	$S = \frac{E}{2(1+\nu)}$
		Pressure hardening type	Stassi
		Yield stress in uniaxial tension (MPa)	90% of σ_T
		Yield stress in uniaxial tension (MPa)	90% of σ_c
Failure	Principal stress/strain	Tensile failure stress (MPa)	σ_T
		Shear failure stress (MPa)	$\frac{\sigma_c}{2}$
		Tensile failure strain	$\frac{\sigma_T}{E}$
		Shear failure strain	$\frac{\sigma_c}{2E}$
		Crack softening	Yes
		Fracture energy (J/m2)	$G_f = \frac{K_I^2}{E}$
		Flow rule	Bulking (associative)
		Stochastic failure	No

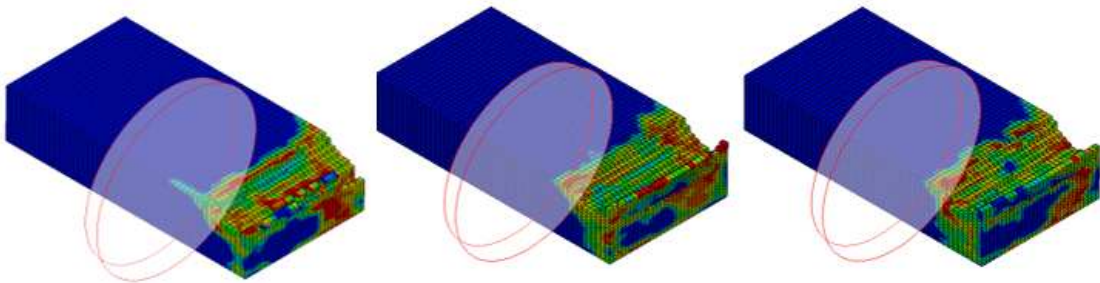
그림 2.46은 언더커팅의 주요 절삭조건인 압입깊이, 절삭각도, 자유면과의 거리를 변화시켜가면서 절삭조건에 따른 암석의 파쇄양상 변화를 나타내고 있다. 절삭깊이, 절삭각도, 절삭간격에 따른 수치해석을 실시하여 암석의 파쇄 및 절삭성능에 영향을 미치는 변수들을 개략적으로 파악하였으며 언더커팅에 의한 암석절삭 메커니즘 이론 정립 및 시험의 설계에 활용하였다.



(a) 압입깊이의 영향



(b) 절삭각도의 영향



(c) 절삭간격의 영향

그림 2.46. 수치해석에 의한 주요 절삭변수의 영향 분석

수치해석의 검증에는 기존의 TBM 디스크커터를 사용한 절삭시험 결과(건설교통부, 2007)가 활용되었다. 동일한 암석모델과 분석방법을 적용하여 본 연구에서 개발한 수치해석모델의 적용성을 검증해 보았다. 암종별 암석재료의 모델링에 사용된 물성값은 표 2.24에 정리하였으며 해석결과는 표 2.25와 같다. 해석결과 본 연구에서 적용한 수치해석기법은 디스크커터에 의한 암반절삭과정을 모사하고 그 과정에서 디스크커터에 작용하는 하중을 비교적 잘 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 연직하중의 경우 평균 7.47%의 상대오차(relative error)를 보였으며 회전하중의 경우에는 13.08%의 상대오차를 나타내었다.

표 2.24. 수치해석에 사용된 암석모델재료의 물성치

암종	밀도 (g/cm ³)	영률 (GPa)	포아송비	압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	파괴인성 (MPa√m)
황등화강암	2.65	42.3	0.18	209	9.2	0.99
마천화강암	2.85	71.0	0.17	108	7.4	1.33
후동화강암	2.94	47.3	0.26	91.3	10.1	1.13
팔당편마암	2.67	44.4	0.21	12.4	11.2	1.1

표 2.25. 수치모델링 기법의 검증을 위한 해석 결과

암종	압입깊이 (mm)	커터간격 (mm)	연직하중 (kN)			회전하중 (kN)		
			수치해석	LCM	오차 (%)	수치해석	LCM	오차 (%)
황등 화강암	6	30		137.2			7.5	
	6	45	160.29	159.1	0.75	10.48	10.7	2.06
	6	60	175.04	184.2	4.97	10.85	10.1	7.43
	6	75	175.19			11.78	-	
	6	90	162.74	172.9	5.88	11.25	10.6	
	8	40	209.82	167.2	25.49	15.07	13.2	14.17
	8	60	236.1	212.5	11.11	16.45	17.2	4.36
	8	80	228.91	219.3	4.38	17.63	17.3	1.91
마천 화강암	8	100	223.39			17.46	-	
	8	120		234.6			17.6	6.13
	4	40	80.57	90.8	11.27	4.04	5.1	20.78
	4	48	84.14	91.7	8.24	4.78	5.6	14.64
후동 화강암	4	60	94.47	107.1	11.79	6.42	7.8	17.69
	4	72	96.77			6.5	9	27.78
	4	40	68.82	70.4	2.24	4.61	5.1	9.61
팔당편마암	4	48	68.88	74	6.92	4.64	5.6	17.14
	4	60	85.75	96.4	11.05	6.37	7.8	18.33
	4	72	104.69	106.1	1.33	9.1	9	1.11
	4	40	49.6	52.2	2.24	4.91	4.5	9.11
	4	48	59.04	49.9	6.92	5.69	4.6	23.70
	4	60	56.39	63.2	11.05	5.15	5.5	6.36
	4	72	63.66	67.7	1.33	5.41	8.1	33.21

표 2.26에는 본 연구에서 수행한 수치해석에서 측정된 절삭조건에 따른 비에너지의 도출 결과를 선형절삭시험 결과와 비교한 것이다. 커터작용력의 경우와 마찬가지로 선형절삭시험과 비교하여 절삭조건에 따른 비에너지의 변화양상을 현실적으로 묘사하는 것으로 나타났다. 향후 언더커팅의 절삭성능 평가를 위해 수치해석 기법이 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단되었다.

표 2.26. 수치모델링 기법의 검증을 위한 비에너지 비교

압종	관입깊이 (mm)	커터간격 (mm)	비에너지 (MJ/m ³)	
			수치해석	LCM
황등화강압	6	30	-	52.1
	6	45	59.37	45.3
	6	60	48.62	37.6
	6	75	38.93	-
	6	90	30.14	53.1
	8	40	65.57	44.8
	8	60	49.19	35.0
	8	80	35.77	47.9
	8	100	27.92	-
	8	120	-	74.0
마천화강압	4	40	25.25	39.4
	4	48	24.90	44.7
	4	60	26.75	41.0
	4	72	22.57	-
후동화강압	4	40	28.81	49.3
	4	48	24.47	41.6
	4	60	26.54	43.7
	4	72	31.60	45.6
팔당편마암	4	40	30.69	36.2
	4	48	29.64	30.8
	4	60	21.43	29.2
	4	72	18.78	35.8

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

3.1 목표

<연차별 연구목표>

구분	년도	성과목표	세계 최고수준 (보유국/ 보유기관)	연구전 국내 수준	목표치	가중치 (%)	평가기준	달성치
최종목표	2020	언더커팅방식 기계굴착장비 의 설계변수 및 개념정립	호주/CSIRO	0%	70%	0.4	보고서	70%
		언더커팅 절삭성능 평가기법 및 시험인프라 구축	호주/CSIRO	0%	80%	0.6	보고서	80%
1차년도	2019	언더커팅 시험 인프라	호주/CSIRO	0%	70%	0.5	보고서	70%
		언더커팅 절삭성능 평가기법 정립	호주/CSIRO	0%	70%	0.5	보고서	70%
2차년도	2020	언더커팅 굴착장비 설계변수 도출을 위한 절삭시험	호주/CSIRO	0%	70%	0.6	보고서	70%
		언더커팅 굴착장비 설계기법 정립	호주/CSIRO	0%	50%	0.4	보고서	50%

<정량적 연구성과>

구분		1차년도	2차년도	목표치(계)	달성치
국외논문게재	SCI	1	2	3	4
	비SCI				
	계	1	2	3	4
국내논문게재	SCI				
	비SCI	2		2	2
	계	2		2	2
특허출원	국내		1	1	2
	국외				
	계		1	1	2
등록·기탁 대상 성과물	소프트웨어		1	1	1

3.2 목표 달성여부

세부 연구 목표 (연구 계획서의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
언더커팅 절삭성능 평가기법 및 시험인프라 구축	50	100	- 본 연구에서 개발되어 구축이 완료된 언더커팅형 절삭시험 인프라는 해외에서 개발된 장비와 비교하여 측정 하중이 10배 이상인 점과 적용 가능한 디스크 커터의 직경 등이 향상된 점 등에 착안하면 해외의 시험 인프라에 비교하여 성능이 수월한 시험시스템을 구축한 것으로 평가할 수 있음. - 언더커팅의 절삭시험을 수행하여 언더커팅에 관여하는 변수들의 영향을 검토하기 위한 시험법을 정립하고 이를 통해 굴삭성능을 평가할 수 있는 기법을 제시하였다는 점에서 계획된 목표를 모두 달성하였다고 판단함.
언더커팅방식 기계굴착장비의 설계변수 및 개념 정립	50	100	본 연구에서는 언더커팅에 의해 암석이 절삭되는 메커니즘과 이에 관여하는 변수들을 이론적으로 정립하고자 한 바, 이론적인 접근을 바탕으로 언더커팅의

			암석절삭에서 핵심적으로 다루어야 할 변수들을 정의하였으며, 이를 시험적으로 구현하기 위한 기법 등을 제시하였음. 향후 실제 장비를 제작하기 위한 핵심 기술을 개발하는데 필요한 이론적인 배경을 마련하고 커터의 제작방법, 시험법 정립, 굴착성능 평가방법 등 요소기술을 개발하였다는 점에서 해당 기술 분야에 기여도가 우수한 것으로 판단됨. 따라서 당초 목표로 하였던 연구목표를 모두 만족하는 것으로 판단하였음.
합계	100점	100%	

3-3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성)

- 본 연구에서는 언더커팅의 기본 이론, 메커니즘 규명, 시험 인프라 구축, 시험법 정립 등의 기반 기술을 개발하고자 하였음. 본 연구는 축소된 스케일에서 수행되어 최종 실용화를 위해서는 실 스케일에서의 기술 검증 및 보완, 현장적용 등 단계적인 후속연구가 필요할 것이라 판단됨.
- 언더커팅을 활용한 기계굴착장비의 실용화·사업화를 위해서는 현재 실험실스케일에서 수행된 연구내용에 대한 실스케일/현장스케일에서의 검증과 보완이 이루어져야 할 것으로 판단되며, 실제 암반굴착장비를 제작하기 위해 필요한 다양한 요소기술들에 대한 연구 개발이 이루어져야 할 것으로 판단됨.
- 최종적인 실용화를 위해 단계적으로 후속연구가 추진된다면, 후속연구에서는 유관 암반 굴착장비 전문업체와의 협업 및 공동연구가 필수적일 것으로 판단됨.

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

- 본 연구에서는 언더커팅의 기본 이론, 메커니즘 규명, 시험 인프라 구축, 시험법 정립 등의 기반 기술을 개발하고자 하였음. 본 연구의 축소된 스케일에서 수행된 연구결과를 기반으로 실 스케일에서의 기술 검증 및 보완, 현장적용 등 최종 실용화를 위한 단계적인 후속연구에 활용
 - 본 연구과제에서 언더커팅에 사용되는 절삭도구의 경우 기존에 사용되는 디스크커터 혹은 픽커터와 그 형태가 상이하므로 개발되는 핵심연구성과를 활용하여 국내 디스크커터 제조사로의 기술이전을 추진.
 - 언더커팅을 활용한 기계굴착장비의 실용화·사업화를 위해서는 현재 실험실스케일에서 수행된 연구내용에 대한 실스케일/현장스케일에서의 검증과 보완이 이루어져야 할 것으로 판단되며, 실제 암반굴착장비를 제작하기 위해 필요한 다양한 요소기술들에 대한 연구개발에 기반 기술로 활용.
 - 도심지 지하공간 개발 등 타 연구사업에 응용/확장하기 위한 추가 연구를 추진 가능함. 특히 시설물의 유지보수를 위한 확공, 분기 등의 작업에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대됨.
 - 연구개발을 통해 확보된 기반 기술을 바탕으로 선진 해외 연구기관과의 공동·협력연구를 추진함으로써 세계적인 수준의 기술 및 연구 역량 마련
-

붙임. 참고문헌

1. Aker Wirth, Designing Mobile Tunnel Miner for Chilean Copper Mine, http://www.oemoffhighway.com/press_release/10874235/ Aker Wirth designing mobile tunnel miner for Chilean copper mine (2. 9. 2016)
2. Aker Wirth and Rio Tinto - Mobile Tunnel Miner (MTM) Full Version, 2013.06.14. <http://www.youtube.com/watch?v=u6AJ-YvjbiA>
3. Caterpillar, 2016, Website:
(https://www.cat.com/en_US/campaigns/awareness/rock-straight-system.html)
4. CSIRO, 2019, Rock cutting equipment, Website:
(<https://research.csiro.au/hardrockcutting/facilities>).
5. Cho, J., Jeon, S., Yu, S., and Chang, S., 2010, Optimum spacing of TBM disc cutter: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(3), pp. 230-244.
6. Jung-Woo Cho, Seokwon Jeon, Ho-young Jeong, Soo-Ho Chang, 2013, Evaluation of cutting efficiency during TBM disc cutter excavation within a Korean granitic rock using linear-cutting-machine testing and photogrammetric measurement, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, pp. 37-54.
7. Dehkhoda, S., and Detournay, E., 2017, Mechanics of actuated disc cutting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(2), pp. 465-483.
8. Dehkhoda S. and B. Hill, 2019, Clearance angle and evolution of depth of cut in actuated disc cutting, *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 11, 644-658.
9. Dehkhoda S. and E. Detournay, 2019, Rock cutting experiments with an Actuated Disc, *Rock Mech. and Rock. Eng.* 52, 3443-3458.
10. Jeong, H., Jeon, S., Cho, J., Chang, S., and Bae, G., 2011, Assessment of cutting performance of a TBM disc cutter for anisotropic rock by linear cutting test. *Tunnel & Underground Space*, 21(6), pp. 508-517.
11. Jin-Young Park, Hoon Kang, Jae-Wook Lee, Jong-Hyoung Kim, Joo-Young Oh, Jung-Woo Cho*, Jamal Rostami, Hyun Deok Kim, 2018, A study on rock cutting efficiency and structural stability of a point attack pick cutter by lab-scale linear cutting machine testing and finite element analysis, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 103 (2018), pp. 215-229.
12. Kovalyshen Y., 2015, Analytical model of oscillatory disc cutting, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 77, 378-383.

13. Korea Institute of Construction and Building technology (KICT), 2015, Development of underground excavation and stabilization technologies for expansion of underground space in use, Annual report, pp. 1-2.
14. Mirahmadi, Majid & Tabaei, Morteza & Dehkordi, Mohsen. (2017). Estimation of the specific energy of tunnel boring machine using post-failure behaviour of rock mass. Case study: Karaj-tehran water conveyance tunnel in Iran. Journal of Engineering Science and Technology. 12. 2488-2503.
15. Medel-Morales, R. C., & Botello-Rionda, S. (2013). Design and optimization of tunnel boring machines by simulating the cutting rock process using the discrete element method, 2013.
16. N4.1.5 Uetliberg Tunnel (The world's largest tunnel bore extender (TBE), which excavates the molasse by undercutting, was commissioned on April 11, 2003, AMBERG ENGINEERING, 2003
17. Pickering, R., Smit, A., and Moxham, K., 2006, Mining by rock cutting in narrow reefs, Proceedings of International Platinum Conference 'Platinum Surges Ahead', Sun city, South Africa, pp. 221-230.
18. Ramezanzadeh, A., and Hood, M., 2010, A state-of-the-art review of mechanical rock excavation technologies. Journal of Mining Environment, 1(1), pp. 29-39.
19. Sifferlinger et al., The importance of research on alternative and hybrid rock extraction methods, 2017
20. Van Dan Berg, D.P., 2014, 'Rock cutting' - platinum mining of the future? Proceedings of the 6th International Platinum Conference, 'Platinum-Metal for the Future'. Sun City, South Africa. Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg. pp. 225-236.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.