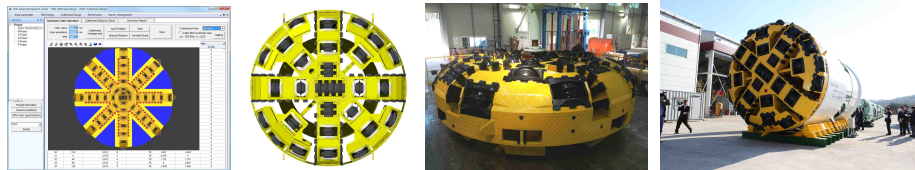


제 3 장 최종 연구성과 및 적용실적

제1절 핵심요소기술(Critical Technology Elements)별 성과물

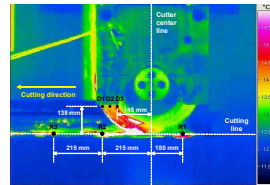
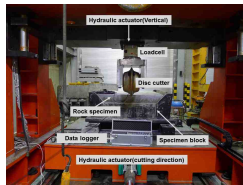
본 연구과제에서 도출된 핵심요소기술(Critical Technology Element)는 TBM 커터헤드 설계·제작기술과 고성능 디스크커터로 구분할 수 있다. 이와 같은 핵심요소기술별 성과물에 대한 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 핵심요소기술명 : TBM 커터헤드 설계 및 제작 기술

관련 그림 / 사진			
정의		TBM(Tunnel Boring Machine)에서 실제 지반을 굴착하는 부분으로서 TBM의 굴착성능을 좌우하는 가장 중요한 커터헤드(cutterhead)의 설계·제작 기술	
목적		세계 7번째로 개발한 TBM 커터헤드 설계·제작기술을 통해, 고가의 외국산 쉴드TBM의 재활용을 도모하여 공사비용을 절감하고 향후 TBM 100% 국산화를 위한 핵심기술 확보	
성능목표		(기존기술 수준) TBM 커터헤드 설계·제작 원천기술 전무(국내), Φ 15 m 이상의 TBM 제작(세계 최고기술, 독일, 일본 등) (개발기술 수준) Φ 7 m 이상급 복합지반용 쉴드TBM 커터헤드 설계·제작 기술	
핵심성과	질적성과	1차년도	* 국내외 TBM 설계·시공정보 4,675개 수집 및 D/B화 * Φ 7m급 커터헤드 제작·가공을 위한 총 35개사 인프라 조사·분석 * Φ 7m급 재활용 가능 쉴드TBM 2대의 호환부 실측 및 도면화
		2차년도	* 커터헤드 설계용 굴착실험 시스템 제작 (예: 커터비트 실험 1/10 scale 등) * 총 387개 암석/토사 조건에 대한 굴착실험 수행 및 설계모델화 * 최대 Φ 9m급 커터헤드 제작이 가능한 부속설비/jig 설계
		3차년도	* TBM 커터헤드 통합 설계 시스템 완성(TBM 사양, 커터헤드 배열설계 등) * 총 142조건에 대한 굴착실험 추가 수행 및 설계모델에의 반영 * 커터헤드 설계용 3차원 파괴 모델링 기법의 정확도 80%이상(실험대비) * Φ 4.4m 국산 커터헤드 장착 쉴드TBM 설계·제작·현장적용(TEST-BED #1)
		4차년도	* TEST-BED #1 시공 완료: 최대 굴진율 12.6 m/day 기록 * TBM 커터헤드 통합 설계 시스템 보완 완성(회전/균등배열 설계방법 추가 등) * TBM 커터헤드 설계모델 완성: 공개된 외국 모델 대비 높은 예측 정확성 검증 * Φ 8.2 m 커터헤드 시작품 설계·제작: 대곡-소사 복선전철 한강하저터널 구간
		5차년도	* TBM 커터헤드 통합 설계 시스템 완성 * TEST-BED #2 시공 완료: 최대 굴진율 14.4 m/day 기록
파급 및 기대효과		* 선진 6개국에서 비공개로 보유하던 TBM 커터헤드 설계·제작 원천기술의 확보를 통해 기술경쟁력 향상 * 기존에는 외국 원제작사에서 TBM 재활용 제작을 수행하였으나, 관련 독자 기술이 확보되어 자체적으로 TBM 재활용 제작이 가능하게 되어 관련 국부 유출 방지에 기여 * 향후 TBM 국산화의 초석 마련	
성과 활용실적 및 계획		* 공사비용 절감을 위한 국산 커터헤드 장착 재활용 쉴드TBM의 적용을 적극 도모 * 복합지반 TBM 커터헤드 설계기술의 기술이전계약 완료 및 관련 제작사로의 기술지원 * TEST-BED #1: 울촌II복합화력발전소 취배수로 터널(Φ 4.4m, 연장 1.5km, '12.12~'13.11) * TEST-BED #2: 장문천연가스발전소 송전선로 지중화공사 (Φ 3.6 m, 연장 1.3 km, '14.9~15.6)	

[illegible]

관련 그림 /
사진



제2절 주요 연구성과(학술적 성과 및 기술적 성과)

본 연구과제에서 도출된 학술적 성과를 요약하면 다음과 같으며, 세부적인 성과 정보들을 부록에 기술하였다.

- 논문게재 성과: SCI저널 논문 1편 게재 및 2편 심사중, 국내 등재학술지 논문 21편
- 학술발표회 논문 발표 성과: 국외 학술발표회 6편 및 국내 학술발표회 19편
- 인력양성: 석사 5명 배출
- 미래창조과학부 ‘2014 국가연구개발 우수성과 100선’에 2개 선정(2014.7)
 - 기 술 명: 복합지반용 TBM 커터헤드 최적 설계 기술
 - 선정분야: 「순수기초인프라」 분야 및 「기술이전」 분야
- 산업통산자원부/한국공학한림원 ‘2013 한국을 빛낸 산업기술성과 26선’선정(2014.5)
 - 기 술 명: 안전하고 빠른 터널 건설을 위한 TBM 커터헤드의 최적 설계·제작 기술
- 국토교통부/국토진흥원 ‘2012 건설교통R&D 우수성과 20선’선정(2012.12)
 - 기 술 명: 화약 없이 터널 만든다-전단면 터널굴착기 커터헤드의 독자적 설계기술

본 연구과제에서 도출된 기술적 성과를 요약하면 다음과 같다. 특히, 앞서 기술한 바와 같이 기존에 선진 6개국만 비공개로 보유하던 TBM 커터헤드 설계·제작기술을 개발함으로 인해, 독자적인 TBM의 재활용 기반을 마련하고 향후 TBM 국산화를 위한 초석을 마련하였다. 이와 같은 세부적인 기술적 성과 정보들을 역시 부록에 기술하였다.

- 현장적용 (실제 쉘드터널 굴착시공)
 - 울촌II복합화력발전소 취배수로 건설공사: 연장 1.5 km, 해저터널, 국산 커터헤드를 장착한 Φ 4.4 m 쉘드TBM 적용, 2013.11 굴착완료, 최대 굴진율 12.6 m/day 기록
 - 장문천연가스발전소 송전선로 지중화공사: 연장 1.3 km, 국산 커터헤드를 장착한 Φ 3.6 m 쉘드TBM 적용, 2015.6 굴착완료, 최대 굴진율 14.4 m/day 기록
- 특허 출원 및 등록: 특허등록 9건 및 특허출원 10건
- 프로그램 등록: 6건
- 기술실시계약 체결: 2건
- 홍보: 50건
- 국토교통부 “터널표준시방서” 개정 반영: TBM 재활용, 장비 선정 등 (2015. 2)

제3절 기술 실시 및 적용사례

본 연구과제에서는 앞선 1절에서 기술한 두 가지의 핵심요소기술에 대해 참여기업과 기술실시계약을 다음과 같이 체결하였다.

- 한국건설기술연구원-(주)동아지질
 - 계약명: 복합지반용 TBM 커터헤드 최적 설계기술
 - 체결일: 2013.11.29
- 한국건설기술연구원-(주)진성티이씨
 - 계약명: 열처리 및 고주파처리에 의한 고성능 디스크커터 제작 기술
 - 체결일: 2015.5.26

기술이전된 복합지반용 TBM 커터헤드 최적 설계기술은 본 연구과제 보고서에 기술된 두 개의 TEST-BED 현장에 실제 적용되어 굴착공사를 완료하였으며, 향후 실시기업에서 TBM 재 활용 관련 사업들에서 활용할 계획이다. 고성능 디스크커터 제작기술 역시 TEST-BED #2 현장 등에 적용되었으며, 향후 국내뿐만 아니라 해외 시장에서의 판매를 실시기업에서 추진할 계획이다.

제4절 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

TBM 제작대수 기준으로 전 세계적인 TBM 시장은 본 연구과제에서 수행한 두 개의 TEST-BED 현장들에 해당하는 소단면의 유틸리티터널(utility tunnel, 직경 4 m 이하)에서 수요가 가장 크며, 최다 적용실적을 보유한 일본에서도 상·하수도/가스/공동구/전력의 적용실적이 전체의 74.2%를 차지하고 있다 (직경 6 m 미만이 90.6%).

우리나라의 경우에도, 전력구/가스관로/통신구/상·하수도의 적용실적이 전체의 80%를 차지하고 있으며, 특히 고속도로 또는 도로에의 적용 실적은 전무한 실정이다.

하지만 장대/대단면 터널의 건설이 증가함에 따라 TBM 기술은 대단면화·대심도화·장대화 추세에 대응하기 위한 기술로 발전되고 있다. 특히, 전 세계적으로 직경 7 m 이상의 중·대단면 TBM은 연장이 길거나 높은 안전성이 요구되는 조건의 철도/지하철 터널에 대부분 적용되고 있다. 세계 최대의 TBM 제작사인 독일 Herrenknecht社의 실적을 참고해보면, 교통터널(traffic tunnel) 가운데 지하철/철도(직경 6~13 m)가 87%로서 가장 큰 비중을 차지하고 있다 (시공연장 기준).

최근 들어서는 도심지 지하도로(예: 프랑스 A86 지하도로) 등과 같은 도로터널에의 적용도 일부 이루어지고 있으나, 도로터널에 규모에 적합한 직경 14 m의 대단면 TBM(Mega TBM)은 1994년부터 현재까지 약 20년간 27건만이 제작되었고 전 세계적으로 7개 제작사에서만 실적을

보유하고 있다 (독일 Herrenkecht社가 55% 실적 보유).

세계 최대 직경의 TBM은 홍콩 해저 도로터널 건설에 사용되고 있는 독일 Herrenknecht社의 직경 17.6 m 쉴드TBM이며, 국내 최대 직경 TBM은 원주-강릉 철도건설 11-3공구에 적용될 직경 8.41 m의 쉴드TBM(Herrenknecht 제작)이다.

최근의 초장대 산악터널과 초장대 해저터널의 대부분은 경제성과 안전성을 확보할 수 있는 TBM으로 시공되고 있다. 현재 세계 10대 초장대 터널 가운데 5개가 TBM으로 완공 또는 시공 중으로서, 나머지 5개 초장대 터널은 과거에 발파공법 등에 의한 재래식 터널로 시공된 사례이다.

이상과 같은 TBM시장은 전 세계적으로 7.5% 성장(2009년~2013년)하였으며, 중국의 경우에는 2009년~2014년까지 12%이상 성장하였고 앞으로도 성장할 것으로 예상되고 있다 (QYResearch, 2015). 특히, 중국의 철도투자는 계속적인 증가가 예상되며(도시철도: 2020년까지 2,677 km, 지하철: 2050년까지 18,829 km), 특히 지하철의 경우 쉴드TBM을 이용한 4,500 km(500개 프로젝트) 굴착공사가 예상된다 (QYResearch, 2015). 중국의 제2도시들에서도 TBM 수요가 있고 전 세계적으로는 거대도시(megacity)가 지속적으로 팽창(성장)하면서 이에 따라 교통 터널의 수요 증가와 고속철도 터널의 수요가 증가할 것으로 전망되고 있다.

우리나라에서도 1990년대 중반 이후로 TBM 시공실적이 증가하고 있으며 (연간 약 12% 증가), 특히 유틸리티터널 분야에서는 전력구(한국전력)의 TBM 공사가 지속적으로 발주되고 있으며 최근에는 가스관로의 노후화에 따라 향후 가스공사의 TBM 공사발주가 확대될 것으로 예상된다. 그러나 우리나라 도심지 교통터널에서의 TBM 적용 비율은 1% 미만으로서 전세계적인 추세와 큰 차이를 보이고 있다(유럽 80%, 일본 60%). 단, 서울시를 중심으로 지하철·철도터널에서 TBM 적용실적이 증가 추세에 있다.

무엇보다도 해외 터널공사 사업의 대부분이 TBM터널로 발주되고 있으며, 대표적인 사례로는 국내 건설사들이 진출하고 있는 싱가포르 MRT, 카타르 도하 지하철, 아부다비 수로터널 등을 들 수 있다. 장기적으로는 TBM의 적용이 유력한 수도권 광역급행철도(GTX), 서울시 지하도로망(U-SMARTWAY), 한·중/한·일 해저터널 등의 검토가 이루어지고 있다.

따라서 단기적으로는 TBM 시장의 가장 큰 비중을 차지하고 있는 유틸리티터널에서 TBM 재 활용 위주의 커터헤드 기술 활용이 예상되며, 장기적으로는 우리나라의 장기적인 대형 프로젝트를 고려한 교통터널 대상의 TBM 국산화 기술 개발에 활용될 것으로 기대한다.

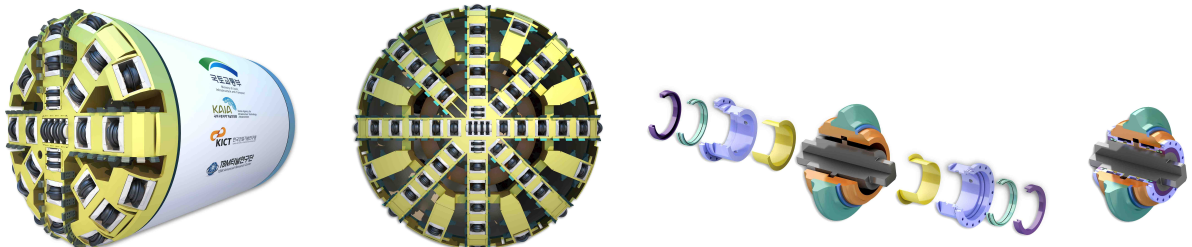
고성능 디스크커터의 경우에는 직경이나 연장에 따른 기술적인 차별성이 크지 않으므로, 본 연구과제에서 가격경쟁력과 굴착성능이 확보되도록 개발한 기술을 국내외의 다양한 TBM 현장에 적용할 수 있을 것으로 전망한다.

제 4 장 연구목표 달성 및 효과

제1절 연구개발 최종목표 달성도

앞선 제3장의 제1절에서 기술한 바와 같이 본 연구과제에서 설정한 기술개발 목표를 모두 달성하였고, 개략적인 목표 달성내용을 정리하면 다음과 같다.

번호	세 부 연 구 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
1	TBM 커터헤드 최적 설계·제작 기술 개발	- 비공개 기술인 TBM 커터헤드 설계·제작 기술의 세계 7번째 개발 성공 및 이를 활용한 국산 커터헤드 장착 재활용 쉴드TBM 제작·적용 - TBM 커터헤드 자동화 설계 시스템(특허 및 S/W) - TEST-BED #1 및 #2 실제 현장시공 완료 - Φ 8.2 m 커터헤드 시작품 설계·제작 완료 - 복합지반 TBM 커터헤드 최적 설계기술의 기술실시계약 체결	100
2	고성능 디스크커터의 개발	- 선진국 제품 대비 경도/내마모성/내충격성 우위의 고성능 커터 링 개발(특허) - 외국산 롤러 베어링을 대체하면서 원활한 회전이 가능한 바이메탈 부상(bushing) 신 구조 개발(특허) - TEST-BED #1 및 #2 등 현장적용을 통한 성능검증 완료 - 고성능 디스크커터 기술의 기술실시계약 체결	100



제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석

본 연구과제의 성과에 대해 제3의 컨설팅 전문기업에서 분석한 기술적 효과를 정리하면 다음과 같다 (날리지웍스, 2015).

- 국내 고유의 TBM 커터헤드 설계/제작기술을 확보
 - 연구단 이전 TBM 장비 기술은 100% 해외에 의존하고 있는 실정이었음
 - 국외 제조사들의 커터헤드 소재가 대외적으로 알려져 있지 않은 상황에서 세계 7번째로 TBM 커터헤드 설계·제작기술을 개발하고 쉘드 TBM에 적용하였음
 - 지름 8.2m 커터헤드 시작품의 설계·제작을 완료하고 Test-Bed에 적용함
- TBM 커터헤드 설계 및 굴진성능 예측 시 정확성이 향상됨
 - 해외 TBM 장비 DB를 구축하고 이를 기반으로 공개된 해외 설계프로그램과 정확성이 근사한 TBM 커터 사양설계 시스템을 개발함
 - 해외 TBM 장비의 사양과 비교했을 경우 평균 상대오차는 4%~8%에 불과함
- 국내 장비보수를 통해 기존 TBM장비 재활용이 가능함
 - 국내 고유 TBM 커터헤드 설계·제작기술을 확보하고 재활용된 시제품 검증을 수행함
 - 향후 국내 TBM 터널 시공 시, 연구단 개발기술을 적용할 경우 기존 TBM장비를 재활용하여 시공 현장에 투입이 가능함
 - 기존 국내 TBM 터널시공은 국내 지반여건을 고려해 해외 장비를 신규 도입하거나, 해외 원제작사에 장비를 보내 지반조건에 맞게 변경하는 것이 일반적이었음
- 공사 직경이 일치할 경우, 국내 TBM 장비의 커터헤드를 제작하여 재활용을 할 수 있게 됨에 따라 해외 TBM 장비도입이 감소함
 - 국내 기업은 커터헤드 제작을 통한 TBM 장비재활용이 가능하여 기존 현장과 지질조건이 상이하나 공사 직경이 일치하는 경우, 해외장비를 추가 도입하는 대신 연구단 개발기술을 적용하여 TBM장비를 재활용할 것으로 예상됨
 - 연구단 참여기업의 기업의 TBM 장비 재활용 확률은 '18년 15%에서 '27년 40%로 증가가 전망됨
- 해외 디스크 커터 대비 성능 상 우위에 있는 국내 디스크커터를 상용화함
 - 기존 국내외 TBM공법 적용 현장에서는 독일 등 선진국의 디스크커터가 일부 적용됨
 - 연구단에서는 TBM선진국인 독일 H사의 디스크커터 대비 내마모성 53%, 내충격성 23%, 커터수명 23%를 향상시킨 디스크커터 제품을 상용화함
- 국내외 디스크커터 시장점유율 확대가 가능함

- 국내에서 해외 제품 대비 경도, 내마모성, 내충격성이 우수한 디스크 커터가 생산되면, 공사원가 절감이 가능하므로 국내 시장에서 주를 이루던 해외 수입 디스크커터를 대체할 것으로 보임
- 중국 등 신흥시장에서 점유율 확대가 예상됨
- 고성능 디스크커터 적용으로 디스크커터 소모량 감소 및 디스크커터 교체시간 단축, 저비용 구조로 공사비 절감이 가능함
 - 연구단에서 개발된 우수한 디스크 커터로 인해 커터 사용 수명이 연장되므로 디스크 커터 소모가 줄어, 공사비 절감이 가능함
 - 선진국(독일 H사) 디스크커터 대비 커터 수명은 23% 향상됨
- 해외 제품 대비 저렴하고 우수한 성능의 디스크 커터 생산 능력을 확보하게 됨에 따라 해외 도입 디스크커터 대체가 가능함
 - 바이메탈 부상(bushing)를 통해 외국산 롤러베어링을 대체가능한 신내부구조를 적용하여 기존 해외 디스크커터 대비 제작비용이 절감됨
 - 베어링이 포함된 해외 디스크커터의 가격은 약 750만원인 반면 국내에서 개발된 부상 포함 디스크커터의 가격은 약 400만원 수준임 (직경 17인치 기준)
 - 국내 디스크커터 시장에서 해외 디스크커터 제품의 점유율은 20% 수준이며 개발기술 적용 시, 해외 제품 도입이 감소 가능함



[복합지반용 TBM 커터헤드 최적 설계 및 굴착성능 평가기술 개발산출물 및 효과]

제3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석(시장창출, 고용창출 등)

앞선 기술적 효과분석 내용과 마찬가지로, 본 연구과제의 성과에 대해 제3의 컨설팅 전문기업에서 분석한 경제적 효과를 정리하였다 (날리지웍스, 2015).

TBM터널 시공수주 매출편익은 경제적 TBM 터널 시공기술 확보를 통해 향상되는 국내 TBM터널 시공사업 수주 매출 중, 개발기술이 편익 발생에 기여한 부분을 현재가치로 평가하였다. 또한 국산 TBM 커터헤드와 고성능 디스크커터의 매출편익은 연구단 개발기술의 이전 대상 기업의 추가 매출 중, 개발기술이 편익 발생에 기여한 부분을 현재가치로 평가하였다.

이와 같은 TBM 시공수주, 국산 TBM 커터헤드 및 고성능 디스크커터의 매출편익을 계산하는 방법은 다음과 같다.

TBM 시공수주 매출편익

$$Bs_{ta} = \sum_{T=2018}^{2027} \frac{M(T)_t \times Ms(T)_d \times Wt_{ch} \times Ct_{ch} \times Cr_{ch} \times Rop_{sc}}{(1+r)^{(T-2015)}}$$

Bs_{ta} : 국내 TBM 터널 시공사업 수주 매출편익(억원)

$M(T)_t$: T년도 국내 TBM 시공시장 규모(억원)

$Ms(T)_d$: 연구단 참여기업의 시장점유율(%)

Wt_{ch} : 기술 비중(%)

Ct_{ch} : 기술 완성도(%)

Cr_{ch} : R&D 기여율(%)

Rop_{sc} : 국내 전문건설업 영업이익률(%)

r : 이자율(%)

국산 TBM 커터헤드 매출편익

$$Bs_{ch} = \sum_{T=2018}^{2027} \frac{P(T)_t \times Ms(T)_d \times Rr(T)_d \times R_r \times Wt_{ch} \times Ct_{ch} \times Cr_{ch} \times Rop_{sc}}{(1+r)^{(T-2015)}}$$

Bs_{ch} : 국내 TBM 커터헤드 매출편익(억원)

$P(T)_t$: T년도 국내 TBM 시공사업 건수

$Ms(T)_d$: 국내 기업(참여기업 제외)의 시장점유율(%)

$Rr(T)_d$: 커터헤드 재활용 기술 적용률(%)

R_r : 교체건당 커터헤드 재활용 매출

Wt_{ch} : 기술 비중(%)

Ct_{ch} : 기술 완성도(%)

Cr_{ch} : R&D 기여율(%)

Rop_{sc} : 국내 전문건설업 영업이익률(%)

r : 이자율(%)

고성능 디스크커터 매출편익

$$Bs_{dc} = \sum_{T=2016}^{2025} \frac{M(T)_{dc} \times Ms(T)_{js} \times Wt_{dc} \times Ct_{dc} \times Cr_{dc} \times Rop_{sc}}{(1+r)^{(T-2015)}}$$

Bs_{dc} : 국내외 TBM 디스크커터 매출편익(억원)

$M(T)_{dc}$: 디스크커터 시장(억원)

$Ms(T)_{js}$: 참여기업의 국내외 디스크커터 시장 점유율(%)

Wt_{dc} : 기술 비중(%)

Ct_{dc} : 기술 완성도(%)

Cr_{dc} : R&D 기여율(%)

Rop_{sc} : 영업이익률(%)

r : 이자율(%)

또한 본 연구과제 성과에 의한 건설비용 절감편익은 TBM 재활용을 통한 공사비 절감편익과 디스크커터 교체 저감에 따른 공사비 절감편익으로 구분되며 다음과 같이 산정된다.

TBM 장비재활용을 통한 공사비 절감 편익

$$Bc_{ch} = \sum_{T=2018}^{2027} \frac{S(T)_{ch} \times Rcc_{ch} \times Rc_{ch} \times Ct_{ch}}{(1+r)^{(T-2015)}}$$

Bc_{ch} : TBM 장비재활용을 통한 공사비 절감편익(억원)

$S(T)_{ch}$: 국내 TBM 터널 시공사업 수주 건수(억원)

Rcc_{ch} : 커터헤드 교체비용 절감액(억원)

Rc_{ch} : R&D기여율(%)

Ct_{ch} : 개발기술의 완성도(%)

r : 이자율(%)

TBM 디스크커터 교체비용/공사비 절감편익

$$Bc_{sbc} = \sum_{T=2016}^{2025} \frac{S(T)_{sbc} \times Rcc_{sbc} \times Rsc_{sbc} \times Rc_c \times Ct_c}{(1+r)^{(T-2014)}}$$

Bc_{sbc} : TBM 디스크커터 교체비용/공사비 절감편익(억원)

$S(T)_{sbc}$: 국내 TBM 터널 시공사업 수주 연장(km)

Rcc_{sbc} : 기존 사업비 중 커터헤드 교체비용(%)

Rsc_{sbc} : 커터헤드 교체비용 절감률(%)

Rc_c : R&D기여율(%)

Ct_c : 개발기술의 완성도(%)

r : 이자율(%)

마지막으로 본 연구과제 성과에 의한 외화유출 절감편익은 국내 개발기술에 의한 TBM 커터헤드와 디스크커터 절감편익으로 구분되며 다음과 같이 산정된다.

TBM 커터헤드 교체 시, 국내 기술적용을 통한 외화유출 절감 편익

$$Bs_{bm} = \sum_{T=2018}^{2027} \frac{Dto_{ch}(T) \times Rc_{ch} \times Ct_{ch}}{(1+r)^{(T-2015)}}$$

Bs_{bm} : TBM 커터헤드 교체에 국내 기술적용을 통한 외화유출액 절감 편익

$Dto_{ch}(T)$: 국내 커터헤드 교체 불가능 가정 시, 해외장비 도입 비용

Rc_{spb} : R&D기여율(%)

Ct_{spb} : 개발기술의 완성도(%)

r : 이자율(%)

국내 기술적용을 통한 TBM 디스크커터 관련 외화유출 절감 편익

$$Bs_{dc} = \sum_{T=2018}^{2027} \frac{Dto_{dc}(T) \times Rc_{dc} \times Ct_{dc}}{(1+r)^{(T-2015)}}$$

Bs_{dc} : TBM 커터헤드 교체에 국내 기술적용을 통한 외화유출액 절감 편익

$Dto_{dc}(T)$: 국내 커터헤드 교체 불가능 가정 시, 해외장비 도입 비용

Rc_{dc} : R&D기여율(%)

Ct_{dc} : 개발기술의 완성도(%)

r : 이자율(%)

이상과 같이 산출된 본 연구과제 성과의 직·간접적인 경제적 파급효과는 다음과 같다 (날리지웍스, 2015). 2018년에서 2027년의 10년 기간 동안 매출편익의 현재 가치는 약 10억원이지만, 외화유출 절감 및 비용절감 편익이 각각 약 568억원 및 161억원으로서 간접적인 파급효과가 크다는 것을 확인할 수 있다.

[TBM 커터헤드 및 고성능 디스크커터 기술에 의한 경제적 파급효과 (날리지웍스, 2015)]

구분	편익항목	판매 매출편익 (2018~2027, 단위: 억원)
매출 편익	개발기술에 의한 TBM 시장 사업수주 매출편익	6.46
	국산 커터헤드 장착 재활용 TBM의 매출편익	0.16
	국내 TBM 디스크커터 판매매출편익	1.23
	해외 TBM 디스크커터 판매매출편익	2.29
	소계	10.14
비용절감 편익	TBM 재활용으로 인한 비용절감 편익	118.7
	디스크커터 교체 저감으로 인한 비용절감	42.81
	소계	161.51
외화유출 절감 편익	TBM 커터헤드 교체 외화유출 절감편익	536.7
	TBM 디스크커터 관련 외화유출 절감편익	31.87
	소계	568.57
합계		740.22

제4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석

본 연구과제의 성과로 인한 정책적 파급효과는 TBM 관련 유망 프로젝트들에의 기여, 기존 발파 또는 개착공법으로 인한 민원/피해 저감 등과 더불어 장기적으로는 TBM 국산화에 기여함으로써 인해 TBM 관련 전 세계 시장 진출과 국가 기술력 제고에의 기여로 구분할 수 있다. 이와 같은 내용을 요약하면 다음과 같다.

- TBM장비가 요구되는 해저교통터널, GTX, U-SMARTWAY 등의 메가 프로젝트 관련 정책 실현에 기여
- 독자적인 TBM 핵심기술을 확보함에 따라 기존 발파/개착공법 대비 TBM에 의해 안전하고 빠른 개통에 기여하여 정부 및 지자체의 도시인프라 건설효과 조기 실현
- 발파/개착공법으로 추진해야 했던 터널 건설현장에서 발생하는 소음진동 등의 각종 사회적 이슈 해결에의 기여
- 발파/개착공법 대비 안전성이 향상되어 정부의 안전을 우선시하는 정책에 기여
- 본 연구과제 성과가 TBM 국산화 개발로 이어질 경우, 2015년 대비 2020년에 33% 증가가 예상되는 전 세계 TBM 제작시장에의 참여와 수주에 기여 (2012년 기준 전 세계 TBM 제작 시장규모 추정액: 약 4조1,100억원)
- 경쟁력이 있는 TBM 장비의 선정과 설계를 통해 국내 건설기업의 해외 TBM터널 시공 사업 수주 가능성 제고
- 향후 TBM 국산화를 통해 국내 중공업 및 기계산업 분야의 신시장 창출 항목으로 활용
- 선진 6개국이 독점한 TBM 핵심 기술 확보를 통한 국가 기술력 이미지 제고에 기여

제 5 장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

앞서 기술한 바와 같이 본 연구성과는 세계에서 7번째로 독자 개발한 TBM 커터헤드 설계·제작기술을 바탕으로 기존 TBM을 재활용하는데 국한하여 활용된다. 따라서 향후에는 본 연구성과를 바탕으로 하여, 중·대단면 커터헤드 설계기술의 개선뿐만 아니라 TBM 추진부, 구동·운영 시스템, 세그먼트 이렉터, 후방설비, 장비운영 기술 등 TBM 전체에 대한 국산화 연구(관련 국토진흥원의 기획연구: “중·대단면 TBM 국산화 기획”, 2014. 8 ~ 2015. 8)를 통해 전 세계적으로 시장 규모가 급증하고 있는 TBM 제작·건설 시장에서의 진출을 모색할 필요가 있다.

또한 본 연구과제에서 설계·제작된 직경 8.2 m 커터헤드의 실제 현장적용을 모색하고자 한다(설계대상이었던 대곡-소사 복선전철 한강하저 구간 외).

마지막으로 향후 현장여건이 가능할 경우, 동일한 시공조건에 본 연구에서 개발된 디스크커터(베어링 및 부싱 방식)와 외국산 디스크커터의 현장적용성 비교를 추가 실시하고자 한다.

참고문헌

1. 건설교통부(2007), 급속 터널 기계화 시공을 위한 최적 굴착 설계모델 개발, 건설핵심기술 개발사업연구보고서.
2. 날리지웍스(2015), TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM터널의 최적 건설기술의 경제성 분석, 최종보고서, 2015. 4. 15.
3. 유상화(2007), TBM에 사용되는 디스크커터에 의한 암석 절삭에 관한 연구, 공학석사 학위 논문, 서울대학교 대학원.
4. 장수호, 최순욱, 배규진, 전석원(2007), “디스크 커터를 장착한 TBM 커터헤드의 최적 설계 모델 도출을 위한 영향인자 분석”, 대한토목학회논문집, 제27권 제1C호, pp. 87-98.
5. 정호영(2010), 암석의 압입특성과 TBM 디스크커터 절삭성능과의 관계에 대한 실험적 분석, 공학석사학위논문, 서울대학교 대학원
6. 조정우(2010), TBM 디스크커터의 암석절삭성능 평가에 대한 선형절삭시험 및 수치해석 연구, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원
7. 지왕률, 장수호, 배규진, 이상주(2008), “중국의 TBM 현황 및 전망”, 한국터널공학회지, 2008년 9월호, pp. 62~71.
8. 한국터널공학회(2008), 터널 기계화시공 설계편, pp.3-311.
9. Acaroglu, O., Ozdemir, L., Asubury, B.(2008), A fuzzy logic model to predict specific energy requirement for TBM performance prediction, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 23, No. 5, pp. 600-608.
10. Asbury, B., Ozdemir, L. and Rozgonyi, T.G.(2001), “Frustum Bit Technology for Continuous Miners and Roadheader Applications”, The South African Institute of Mining and Metallurgy Center for Mine Mechanization and Automation.
11. ASTM D-7625-10 Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method.
12. Balci, C., Tumac, D. (2012), “Investigation into the effects of different rocks on rock cuttability by a V-type disc cutter”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 30, pp. 183-193.
13. Bilgin, N., Balci, C., Tunçdemir, H., Eskikaya, Ş, Akgül, M., Algan, M. (1999), “The Performance Prediction of A TBM in Difficult Ground Condition”, AFTES-Journees d’Etudes Internationales de Paris:, pp. 115-121.
14. Blackdiamond, www.blackdiamondcutters.com .
15. Bruland, Amund (1998), Hard Rock Tunnel Boring – Background and Discussion, Vol. 1, Doctoral theses at NTNU 1998:81.

16. Bruland, A.(1998), "Hard rock tunnel boring – Drillability test methods", Vol. 8, Doctoral Theses at NTNU 1998:81.
17. CERCHAR(1986), Centre d' Etudes et Recherches de Charbonnages de France. The CERCHAR abrasiveness index, 12 S., Verneuil,
18. Chang, S.-H., Choi, S.-W., Park, Y.-T., Lee, G.-P., Bae, G.-J. (2013), "Experimental evaluation of the effects of cutting ring shape on cutter acting forces in a hard rock", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 3, pp. 225–235 (in Korean).
19. Chang, S.-H., Choi, S.-W., Park, Y.-T., Lee, G.-P., Bae, G.-J. (2012), "Characterization of the deformation of a disc cutter in linear rock cutting test", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 3, pp. 197–213 (in Korean).
20. Chang, S.-H., Choi, S.-W., Lee, G.-P., Bae, G.-J. (2011), "Statistical analysis of NTNU test results to predict rock TBM performance", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 13, No. 3, pp. 243–260 (in Korean).
21. Cho, Jung-Woo , Jeon, Seokwon , Yu, Sang-Hwa , Chang, Soo-Ho (2010), "Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 25, Issue 3, pp. 230~244.
22. Cho, J.-W., Yu, S.-H., Jeon, S., Chang, S.-H. (2008), "Numerical study on rock fragmentation by TBM disc cutter", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 10, No. 2, pp. 1–14.
23. Choi, S.-W., Chang, S.-H., Park, Y.-T., Lee, G.-P., Bae, G.-J. (2013), "An experimental study on the loads and temperature acting on the shaft of a disc cutter during linear rock cutting test", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 3, pp. 237–251 (in Korean).
24. Dollinger, G.L., Handewith, H.J., C. D. Breeds(1998), Use of the punch test for estimation TBM performance, Tunneling and Underground Space Technology, 13 (4), pp. 403–408.
25. Entacher, M., Winter, G., Bumberger, T., Decker, K., Godor, I., Galler, R.(2012), "Cutter force measurement on tunnel boring machines–System design", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 31, pp. 97–106.
26. Farmer, I.W., Glossop, N.H. (1980), "Mechanics of Disc Cutter Penetration", Tunnels

and Tunnelling, Vol. 12, No. 6, pp. 22–25.

27. Farrokh, E., Rostami, J., Laughton, C. (2012), “Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 30, pp. 110–123.
28. Gehring, K.(1995), Prognosis of advance rates and wear for underground mechanized excavations (in German), Felsbau 13 (6), 439–448.
29. Gertsch, R., Gertsch, L., Rostami, J. (2007), “Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 44, pp. 238–246.
30. Girmscheid, G.(2005), "Tunnelvortriebsmaschinen – Vortriebsmethoden und Logistik, Betonkalender, Fertigteile und Tunnelbauwerke, Teil I, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, pp.119–256 (in German).
31. Graham, P.C. (1976), “Rock exploration for machine manufacturers”, Proc. Symp. on Exploration for Rock Engineering, pp. 173–180.
32. Herrenknecht(2007), “Herrenknecht cutter tools”, Herrenknecht AG.
33. Herzog, M.(1985), “Die Pressenkräfte bei Schildvortrieb und Rohrvorpressung im Lockergestein”, Baumaschine + Bautechnik, Vol. 32, pp.236–238 (in German)
34. Hughes, H.M.(1986), “The relative cuttability of coal measures rock”, Mining Science and Technology, Vol. 3, pp.95–109.
35. Hyun, K,-C., Min, S,-Y., Moon, J,-B., Jeong, G,-H., Lee, I,-M. (2012), “Risk management applicable to shield TBM tunnel: II. Risk analysis methodology”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 6, pp. 683–697.
36. Johnson, S.T., Fowell, R.J.(1986), Compressive strength is not enough (Assessing Pick Wear for Drag Tool-Equipped Machines). In: Proceedings of the 27th US Symp. Rock Mech., Tuscaloosa, Ala., USA, pp. 840–845.
37. Kato, M. (1971), Construction machinery Gihodo, Tokyo, pp. 348–349.
38. KS(2007), Cr-Mo Steel(KS D 3711:2007), KS.
39. KTA(2008), Series of Tunnel Engineering 3-Mechanized tunneling technology–design, Korean Tunneling Association, CIR, pp. 261.
40. Leitner, W., Schneider, E. (2003), “Penetration Prediction Models for Hard Rock Tunnel Boring Machines”, Felsbau, Vol. 21, pp. 8–13.
41. Maidl, B., Herrenknecht, M. and Anheuser, L.(1994), Maschineller Tunnelbau im

Schildvortrieb, Verlag Ernst & Sohn, Berlin (in German).

42. Movinkel, T., Johannessen, O. (1986), "Geological parameters for hard rock tunnel boring", *Tunnels and Tunnelling*, April, pp. 45–48.
43. Nishimatsu, Y., Okuno, N. and Hirasawa, Y.(1975), "The rock cutting with roller cutters", *J. of MMIJ*, Vol. 91, pp. 653–658.
44. Ozdemir, L., Nilsen, B. (1993), "Hard Rock Tunnel Boring Prediction and Field Performance", *Rapid Excavation Tunneling Conference(RETC) Proceedings*, Boston, USA.
45. Plinninger, R., H. Kasling, K. Thuro, G. Spaun(2003), Testing conditions and geomechanical properties influencing the Cerchar abrasiveness index (CAI) value. *Int J Rock Mech Min Sci.* 40, pp. 259–263.
46. QYResearch(2015), *Global Tunnel Boring Machine (TBM) Industry 2015 Market Research Report*, Beijing Hengzhou Bozhi International Information Consulting Co.,Ltd.
47. Rostami, J. (2013), "Study of pressure distribution within the crushed zone in the contact area between rock and disc cutters", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 57, pp. 172–186.
48. Rostami, J.(2008), *Hard Rock TBM Cutterhead Modeling for Design and performance Prediction*, *Geomechanik und Tunnelbau*, Vol.1, pp. 18–28.
49. Rostami, J.(2005), CAI testing and ist implications, *Tunnels Tunnelling Int.* (October), 43–45.
50. Rostami, J.(1997), "Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical and physical measurement of crushed zone pressure", *Ph.D Dissertation*, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, pp. 68~69.
51. Rostami, J., Ozdemir, L., Nisen, B. (1996), "Comparison Between CSM and NTH Hard Rock TBM Performance Prediction Models", *Proc. of ISDT 1996*, Las Vegas NV, pp. 1–11.
52. Rostami, J. Ozdemir, L. (1993), "A New Model for Performance Prediction of Hard Rock TBMs", *Proc. of Rapid Excavation and Tunneling Conference(RETC)*, Boston, USA, pp. 793–809.
53. Saito, T. Shimada, T., Yoshikawa, K., Tukioka, A. (1971), "Mechanized tunnel excavation", *Sankaido*, Tokyo, pp. 36–81.
54. Shanahan, A., Box, Z.(2011), "TBM Cutter Instrumentation at Malaysia's Pahang Selangor Water Tunnel and Canada's Niagara Tunnel Project", *Proceedings of the*

World Tunneling Congress(WTC) 2011, Helsinki, Finland.

55. Schmid, L.(2004), “Die Entwicklung der Methodik des Schildvortriebs in der Schweiz”, Geotechnik, Vol. 27, Nr. 2, pp.193–200 (in German).
56. Snowdon, R.A., Ryley, M.D., Temporal, J.(1982), A study of disc cutting in selected British rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 19, pp. 107–121.
57. Stanford, J., P. Hagan.(2009), An assessment of the impact of stylus metallurgy on Cerchar abrasiveness index. In Proceedings of the Coal Operators' Conference. pp. 348–355.
58. Tarkoy, P.J. (1987), “Practical Geotechnical and Engineering Properties for Tunnel–Boring Machine Performance Analysis and Prediction”, Transportation Research Record, Vol. 1087, Transportation Research Board, pp. 62–78.
59. Thuro, K., Plinninger, R.J.(2003), Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting: rock parameters for excavability, Proceedings of the 10th ISRM International Congress on Rock Mechanics, pp. 8–12.
60. TUNCONSTRUCT (2008), Going Underground, Graz University of Technology, Austria.
61. West, G.(1989), Rock Abrasiveness Testing for Tunnelling, Technical Note, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, Vol 26, No 2, pp. 151–160.
62. Wittke, W.(2007), Stability Analysis and Design for Mechanized Tunneling, WBI–Print 6, WBI GmbH, Aachen, Germany.
63. You, S.–H., Chang, S.–H., Cho, J.–W., Jeon, S. (2008), “Estimation of the optimum TBM disc cutter spacing by the dynamic fracture modeling”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 10, No. 1, pp. 81–90.