

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM터널의 최적 건설기술”과제(1세부과제: “TBM 커터헤드 최적 설계기술 및 고성능 디스크커터 개발”)의 최종보고서로 제출합니다.

2015. 8. 17

주관연구기관명 : 한국건설기술연구원

주관연구책임자 : 배 규 진

연구원 : 장 수 호

연구원 : 최 순 욱

연구원 : 이 규 필

연구원 : 이 성 원

연구원 : 김 창 용

연구원 : 신 휴 성

연구원 : 이 철 호

연구원 : 김 영 진

연구원 : 조 한 나

연구원 : 홍 혜 경

연구원 : 류 혜 림

연구원 : 박 지 은

연구원 : 박 영 택

연구원 : 강 태 호

공동연구기관명 : (주)동아지질

공동연구책임자 : 신 민 식

연구원 : 권 준 용

연구원 : 권 준 용

연구원 : 박 만 규

연구원 : 문 준 배

연구원 : 정 문 식

연구원 : 백 남 석

연구원 : 김 민 철

연구원 : 신 평 수

연구원 : 김 동 현

연구원 : 박 회 원

연구원 : 박 계 한

연구원 : 이 병 훈

연구원 : 강 태 영

연구원 : 권 진 욱

연구원 : 유 지 영

공동연구기관명 : (주)진성티이씨

공동연구책임자 : 김 갑 부

연구원 : 이 영 동

연구원 : 송 봉 찬

연구원 : 길 기 용

연구원 : 손 용 수

연구원 : 윤 상 혁

연구원 : 박 재 완

연구원 : 정 보 람

연구원 : 민 현

연구원 : 유 종 옥

연구원 : 장 병 훈

공동연구기관명 : 호서대학교

공동연구책임자 : 김 상 환

연구원 : 김 지 태

연구원 : 김 진 대

연구원 : 김 원 경

연구원 : 정 우 진

연구원 : 강 준 구

연구원 : 임 채 호

연구원 : 장 인 석

연구원 : 허 청

연구원 : 이 혜 윤

연구원 : 이 충 렬

연구원 : 박 수 환

연구원 : 강 은 모

공동연구기관명 : 서울대학교

공동연구책임자 : 전 석 원

연구원 : 정 호 영

연구원 : 이 수 득

연구원 : 허 찬

공동연구기관명 : (주)삼연기술

공동연구책임자 : 박 지 원

연구원 : 정 희 영

연구원 : 하 재 창

연구원 : 주 인 권

연구원 : 김 도 승

연구원 : 안 현 숙

연구원 : 양 현 태

위탁연구기관명 : 한국산업기술대학교

위탁연구책임자 : 정 용 석

연구원 : 이 규 용
연구원 : 허 선 화
연구원 : 엄 형 식

보고서 요약서

과제고유번호	10기술혁신 E091	해 당 단 계 연 구 기 간	2010.12.29.~ 2015.05.31	단 계 구 분	5차년/5차년
연 구 사 업 명	건설기술연구사업				
연 구 과 제 명	최 상 위 과 제 명	TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM터널의 최적 건설기술			
	단위과제명	주관	TBM 커터헤드 최적 설계기술 및 고성능 디스크커터 개발		
		공동	CUTTER HEAD 제작 및 TBM 재활용 기술 개발		
		공동	고성능 디스크커터의 개발		
		공동	수치모델링 및 실내시험 시스템을 통한 TBM 커터헤드의 최적 설계기법 개발		
		공동	토사지반 커터헤드 설계요소 핵심기술 개발		
		위탁	TBM 디스크 커터 특성평가 및 고정도 고인성 주강합금설계		
연 구 책 임 자	배규진	총연구기간 참 여 연구원수	총 : 130명 내부: 87명 외부: 43명	총연구비	정부 : 5,947,800천원 기업 : 3,092,000천원 계 : 9,039,800천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	한국건설기술연구원 지반연구소		참여기업명	(주)동아지질, (주)진성티이씨, 이엠코리아(주), (주)삼연기술, 반석건설기계	
국제공동연구	해당사항 없음				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서면수	746
- 커터헤드 설계모델 개발을 실험 절삭시험 및 모형 굴착시험 수행 - 커터헤드 개구율/스포크 설계기술 개발 - TBM 굴진성능 예측모델 개발 - 디스크커터와 커터비트의 상호작용을 고려한 수치모델링 - 복합지반용 커터헤드의 커터·비트 상세 배열설계 기술 개발 - TBM 최적 커터헤드 설계 시스템 개발 - 커터헤드 시작품 제작용 부속설비 구축 - 국산 커터헤드 장착 쉴드TBM 제작 및 현장 적용 (TEST-BED #1 및 #2)					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	TBM, 커터헤드, 디스크커터, 복합지반, 재활용			
	영 어	TBM, Cutterhead, Disc cutter, Mixed ground, Refurbishment			

요 약 문

I. 제 목

TBM 커터헤드 최적 설계기술 및 고성능 디스크커터 개발

II. 연구개발과제 개요

본 연구에서는 선진 6개국에서만 비공개로 보유하고 있는 TBM 커터헤드 설계·제작기술을 개발하고 소모성 굴착도구인 디스크커터를 고성능화하여 TBM터널의 공사비 절감에 기여하고 향후 TBM 국산화를 위한 원천기술로 활용하고자 하였다. 본 연구과제에서는 다음과 같은 주요 핵심기술들을 개발하였다.

- (1) 복합지반용 TBM 커터헤드 설계기술
- (2) TBM 커터헤드 설계 및 TBM 굴진성능 예측 시스템
- (3) 경암 대응형(압축강도 150 MPa) 고성능 디스크커터

이상과 같은 기술들을 개발하기 위하여, 다양한 암반과 토사 조건에 대해 실물 절삭실험과 모형 굴착실험을 실시하고 현장 굴진정보를 데이터베이스화하여 TBM 커터헤드 설계모델을 개발하였다. 또한 지반조건에 따라 최적의 굴진성능을 발현할 수 있는 TBM 커터헤드의 설계시스템을 함께 개발하였다. 이와 더불어 디스크커터의 교체를 최소화할 수 있는 내마모성의 고성능 디스크커터를 개발하였다. 이와 같이 개발된 기술에 의해 실제 2개의 쉘드터널들을 굴착시공하였으며, TBM 굴진자료의 분석결과 성공적으로 적용이 되었음을 검증하였다.

III. 연구개발 수행내용 및 결과

본 연구에서 수행한 주요 연구개발 내용 및 범위는 다음과 같다.

- (1) TBM 커터헤드 설계모델 개발을 위한 데이터베이스 구축
 - 약 5,000여개의 국내외 TBM 설계·시공 자료 수집 및 데이터베이스화
 - 약 600여건의 실물 절삭실험 및 모형 굴착실험을 통한 설계모델 도출
- (2) TBM 커터헤드 설계시스템 제작 및 검증
 - 공개된 기존 모델 대비 20% 이상 정확성이 향상된 TBM 설계모델 제시
 - TBM 커터헤드 설계시스템 구축
- (3) 국산 커터헤드 장착 TBM 제작 및 현장적용
 - 커터헤드 제작용 부속설비 및 jig 구축
 - TEST-BED #1 및 #2 현장 대상 국산 커터헤드 장착 토압식 쉘드TBM 설계·제작 및 현장 적용 (최대 굴진율: 14.4 m/day)

직경 8.2 m 커터헤드 시작품 설계·제작 (대곡-소사 복선전철 한강하저터널 대상)

(4) 고성능 디스크커터 개발

선진국 제품 동등 이상의 성능(경도, 내마모성 등)을 가진 고성능 커터 링 재료 개발

TEST-BED 현장 등 총 3개소의 현장 적용을 통한 성능 검증 (제작비용 10% 이상 절감 및 커터 마모 20% 이상 저감)

IV. 최종 연구성과 및 적용실적

본 연구를 통해 TBM 커터헤드의 독자적인 설계·제작기술 등을 개발 완료하였으며, 이상으로부터 얻어진 학술적 성과 및 현장적용 실적을 요약하면 다음과 같다.

- 논문게재 성과: 국내외 학술지 논문 22편
- 학술발표회 논문 발표 성과: 국내외 학술발표회 25편
- 인력양성: 석사 5명 배출
- 특허 출원 및 등록: 특허등록 9건 및 특허출원 10건
- 프로그램 등록: 6건
- 울춘II복합화력발전소 취배수로 건설공사 현장적용 (TEST-BED #1)
- 장문천연가스발전소 송전선로 지중화공사 현장적용 (TEST-BED #2)
- 대곡-소사 복선전철 한강 하저터널 대상 직경 8.2 m 커터헤드 시작품
- 광주OO도수로터널 고성능 디스크커터 현장적용
- 국토교통부 “터널표준시방서” 개정 반영: TBM 재활용 관련 (2015. 2)

V. 연구목표 달성 및 효과

- 국내 고유의 TBM 커터헤드 설계/제작기술을 확보
- TBM 커터헤드 설계 및 굴진성능 예측 시 정확성이 향상됨
- 국내 장비보수를 통해 기존 TBM장비 재활용이 가능하게 되어 경제성 향상. 즉, 국내에서 TBM의 커터헤드를 제작하여 재활용을 할 수 있게 되어 TBM 수입 감소 기여
- 해외 디스크커터 대비 성능 상 우위에 있는 디스크커터 기술 개발

VI. 연구성과 활용계획

- 개발기술의 활용을 통해 TBM 재활용 자체 제작 및 그에 따른 외화유출 방지
- 향후 TBM 국산화를 위한 핵심 원천기술로 활용
- 고성능 디스크커터의 상용화 및 해외시장 진출 추진

SUMMARY

I . Title

Development of optimized TBM cutterhead design method and high-performance disc cutter

II . Overview

In this study, TBM cutterhead design and manufacturing technologies which are not open to the public except only six countries were developed. In addition, the performance of a disc cutter which is a consumable tool for rock cutting was highly improved. The developed technologies would contribute to construction cost reduction of a TBM tunnel and be utilized as original technologies for producing future Korean TBMs. Key technologies to achieve those research goals were developed as follows:

- (1) TBM cutterhead design method for mixed ground conditions
- (2) Computerized system for TBM cutterhead design and performance prediction
- (3) High-performance disc cutter to cope with hard rocks (compressive strength > 150 MPa)

First, full-scale rock cutting tests and model excavation tests under various ground conditions were carried out to make a TBM cutterhead design database system including numerous TBM field advance data. Then, a TBM cutterhead design system to optimize TBM performance in a given ground condition was made. In addition, high-durable disc cutter was developed to minimize the changes of disc cutters in TBM driving. Based on the developed technologies, two shield tunnels were fully excavated by refurbished TBMs. From the field applications, the refurbished TBMs were validated showing good advance performance.

III. Contents and results of research

Main contents and features of this research work are summarized as follows:

- (1) Establishment of a database system for TBM cutterhead design
 - Including approx. 5,000 global TBM design and construction data
 - Derivation of TBM cutterhead design model based on approx. 600 full-scale cutting tests and model excavation tests
- (2) TBM cutterhead design system and its verification
 - Proposal of TBM design model with its more increased accuracy by over 20% in comparison with conventional design models
 - Building TBM cutterhead design system

- (3) Refurbishment of shield TBMs with domestically-made cutterhead and their field application
- Building auxiliary facilities and jigs for cutterhead manufacturing
 - Design, manufacturing and field application of refurbished earth pressure-balanced shield TBMs for TEST-BED #1 and #2 tunnels (Maximum advance rate: 14.4 m/day)
 - Design and manufacturing a TBM cutterhead with the diameter of 8.2 m (target for a subaqueous railway tunnel)
- (4) Development of high-performance disc cutter
- Development of high-performance cutter ring showing mechanical properties (hardness, wear resistance and so on) equal to or higher than foreign cutters
 - Performance validation by field application to three TBM tunnels (reduction of production costs by over 10% and cutter wear by over 20%)

IV. Achievements and applications

From this study, the original design and manufacturing technologies for TBM cutterhead were developed. Main academic achievements and field applications in this study are summarized as follows:

- Articles: 22 international and domestic journal papers (published)
- Conference papers: 25 international and domestic conference papers
- Profession manpower training: 5 masters
- 9 registered patents and 10 applied patents
- 6 Registered softwares
- Field application(TEST-BED #1): YulchonII Complex thermoelectric power plant discharge tunnel
- Field application(TEST-BED #2): Jangmun natural gas power plant cable tunnel
- Prototype of a cutterhead with the diameter of 8.2 m applicable to a subaqueous railway shield tunnel
- Field application of high-performance disc cutter: Kwangju OO discharge tunnel
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport “Tunnel Standard Specifications” revision: use of a refurbished TBM (2015. 2)

V. Achievement and effects of project goals

- Securement of Korean original TBM cutterhead design and manufacturing technologies
- Improvement of the accuracy of TBM cutterhead design and performance prediction

- Improvement of economic feasibility of TBM tunnels by using domestically refurbished TBMs.
As a result, reduction of the outflow of foreign currency for TBM imports
- Development of a disc cutter technology with performances higher than foreign products

VI. Future plans of research outcomes

- Domestic production of refurbished TBMs and corresponding outflow reduction of foreign currency
- Use of the developed technologies as key original technologies for localization of future TBM production
- Commercialization of high-performance disc cutters and its entrance to global markets

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	1
Section 1. Goals and necessities	1
Section 2. Definitions, scopes and features of research works	2
Section 3. Global trend of cutting-edge technologies related to research works	3
Section 4. Significance of research works	6
 Chapter 2. Contents and results of research	7
Section 1. Development of TBM cutterhead design methodology	7
1. Design concept of TBM cutterhead and its main specifications	7
2. Database for TBM cutterhead and its main specifications design	26
3. Design model for rock TBMs by full-scale rock cutting tests	88
4. Design model for soil ground TBMs by model tests	124
5. Design model for rock TBMs from by 3D dynamic numerical modeling	204
6. Proposal of simple testing methods for TBM performance prediction	272
7. Development of TBM cutterhead and its specification design method	305
8. Computerized TBM cutterhead design system	365
Section 2. Development of TBM cutterhead manufacturing technology	433
1. Key technologies for TBM cutterhead manufacturing	433
2. Survey of current technologies for TBM cutterhead manufacturing	443
3. Selection of materials for manufacturing a TBM cutterhead	456
4. Building key facilities to manufacture a TBM cutterhead	467
Section 3. Design, manufacturing and field application of refurbished shield TBMs	471
1. TEST-BED #1	471
2. TEST-BED #2	519
3. Prototype of a TBM cutterhead with the diameter over 7 m	539
Section 4. Development of a high-performance disc cutter	597
1. Materials and their performance evaluation for a high-performance disc cutter	597
2. Development of a high-performance cutter ring alloy	625
3. Design of a new inner structure to replace roller bearings	629

4. Prototypes and their performance evaluation	631
5. Final products and their field verification	688
Chapter 3. Achievements and applications	720
Section 1. Main outcomes of critical technology elements	720
Section 2. Academic and technical achievements	722
Section 3. Technology license contracts and their field applications	723
Section 4. Future prospects of global markets	723
Chapter 4. Achievements and effects of project goals	725
Section 1. Achievements of project target goals	725
Section 2. Technical effects of research outcomes	726
Section 3. Economic effects of research outcomes	728
Section 4. Political effects of research outcomes	733
Chapter 5. Future plan and further studies for research outcomes	733
References	734
[Appendix]	739
1. Quantitative and qualitative outcomes (articles, patents and so on)	739
2. Oversea scientific information obtained in research works	745
3. Others	745

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	1
제1절 연구개발의 목적 및 필요성	1
제2절 연구개발의 정의, 범위, 특징	2
제3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황	3
제4절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치	6
 제 2 장 연구개발 수행 내용 및 결과	7
제1절 TBM 커터헤드 설계기술의 개발	7
1. TBM 커터헤드 및 TBM 핵심사양의 설계개념	7
2. TBM 커터헤드 및 핵심사양 설계를 위한 D/B 구축	26
3. 암석 실물 절삭실험에 의한 암반대응형 TBM 설계모델 개발	88
4. 모형 굴착실험에 의한 토사지반 TBM 설계모델 개발	124
5. 암반 절삭 수치모델링에 의한 TBM 설계모델	204
6. TBM 굴진성능 예측 및 평가용 간편시험법 개발	272
7. TBM 커터헤드와 TBM 최적 사양의 설계기술 개발	305
8. TBM 커터헤드 설계 시스템 제작	365
제2절 TBM 커터헤드 제작기술의 개발	433
1. TBM 커터헤드 핵심 제작기술 조사	433
2. 연구단 보유 TBM에 대한 제작방식 분석	443
3. 커터헤드 소재 선정	456
4. 커터헤드 제작용 부속설비의 구축	467
제3절 국산 커터헤드 장착 쉴드TBM의 설계·제작 및 현장시공	471
1. TEST-BED #1	471
2. TEST-BED #2	519
3. 직경 7 m 이상급 TBM 커터헤드 시작품 제작	539
제4절 고성능 디스크커터의 개발	597
1. 고성능 디스크커터 개발을 위한 재료 검토 및 특성평가	597
2. 고성능 디스크커터 링 재료 개발	625
3. 디스크커터 신 내부구조 설계	629
4. 시작품 제작 및 성능평가	631

5. 완성품 제작 및 현장적용	688
------------------------	-----

제 3 장 최종 연구성과 및 적용실적	720
-----------------------------------	------------

제1절 핵심요소기술(Critical Technology Elements)별 성과물	720
제2절 주요 연구성과(학술적 성과 및 기술적 성과)	722
제3절 기술 실시 및 적용사례	723
제4절 기술개발 성과의 국내외 시장 전망	723

제 4 장 연구목표 달성 및 효과	725
---------------------------------	------------

제1절 연구개발 최종목표 달성도	725
제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석	726
제3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석(시장창출, 고용창출 등)	728
제4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석	733

제 5 장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성	733
--	------------

참고문헌	734
-------------------	------------

[부록]	739
-------------------	------------

1. 논문, 특허 등 정량적 성과와 정성적 성과	739
2. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	745
3. 기타사항(중요 연구 변경사항 등)	745