발 간 등 록 번 호
11-1613000-001366-01

보안 과제( ), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개( )
국토교통기술사업화지원사업 제2차년도 최종보고서

국토교통기술사업화지원사업 R&D Report

R&D / 15TBIP-C073487-02

직경 1m이하 소구경 터널굴착을 위한 암반확공기 시공기술개발

최종보고서

2016. 09. 01.

주관연구기관 / 실리기업(주)
공동연구기관 / 한국생산기술연구원

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘직경 1m이하 소구경 터널굴착을 위한 암반확공기 시공기술개발’(연구개발 기간 : 2014.06.02. ~ 2016.06.01) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2016. 09. 01.

주관연구기관명 : 실리기업(주) (대표자) 한 붕 전 (인)

공동연구기관명 : 한국생산기술연구원 (대표자) 이 영 수 (인)

위탁연구기관명 : (주)델타텍코리아 (대표자) 이 승 호 (인)

주관연구기관책임자 : 한붕전
공동연구기관책임자 : 조정우
위탁연구기관책임자 : 기우용

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>15TBIP-C073487-02</td><td>해당 단계 연구 기간</td><td>24개월</td><td>단계구분</td><td>(2)/(2)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통연구개발사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">국토교통기술사업화지원사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">직경1m이하 소구경 터널굴착을 위한 암반확공기 시공기술개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">한붕전</td><td>해당단계 참여 연구원 수</td><td>총: 15명
내부: 0명
외부: 5명</td><td>해당단계 연구개발비</td><td>정부: 214,000천원
기업: 145,000천원
정부 외: 천원
계: 359,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간 참여 연구원 수</td><td>총: 15명
내부: 0명
외부: 5명</td><td>총 연구개발비</td><td>정부: 428,000천원
기업: 290,000천원
정부 외: 천원
계: 718,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속 부서명</td><td colspan="3">실리기업(주) 기업부설연구소</td><td colspan="2">참여기관명: 한국생산기술연구원</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

국문 요약문

연구의 목적 및 내용	직경1m이하 터널굴착을 위한 암반확공기 설계, 제조, 운용 기술 개발				
연구개발성과	○ 다중해머 암반확공기 설계/시공기술에 기반한 비개착 터널시공 신공법 개발 - 암반확공기 최적 설계기술 확보 - 암반확공기 제조 및 최적 운용기술 개발 - 현장시험 수행을 통한 시공기술 확보 및 굴착성능검증 완료 ○ 정량적 연구성과(확공기 제작/설계 관련) - 국내 특허출원: 3건 - SCI급, 국제학술지 게재: 3건 - 소프트웨어(S/W): 2건 - 암반확공기 시제품 제작: 2건 - 암반확공 현장시험 및 검증: 2건				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 암반 확공시공기술 신공법을 개발하여 기존 다단계 시공공정을 1회로 단축하여 소구경 유틸리티 터널 시공업 신 시장 창출이 기대됨. - 개발 제품의 향상된 천공성능과 공기절감에 의한 시공성, 경제성을 적극 홍보하여 발주처 설득 및 공사 수주 - 건설신기술 도전 후 유틸리티 터널공사 국내시장 점유율 향상 - 건설기계제조/건설시공업체에 제품성능 기업대상 홍보 예정				
핵심어 (5개 이내)	비개착공법	소형터널시공	암반확공	다중 해머	암석파쇄

〈 SUMMARY 〉

<table>
<tr><td>Purpose & Contents</td><td colspan="5">Development of Rock Reaming Technology for Micro-tunnelling (under 1 m dioameter tunnel)</td></tr>
<tr><td>Results</td><td colspan="5">○ Development of new trenchless Technology using cluster-hammer Rock Reaming machine
- Development of Optimization design technique for rock reaming machine
- Development of Manufacturing and operating technology
- Validation of operating technique through in-situ tunneling tests

○ Quantitative research outputs
- Patent application: 3
- Software: 2
- Development prototype: 2
- In-situ tunneling test: 2</td></tr>
<tr><td>Expected Contribution</td><td colspan="5">- Deveoloped new tunneling technology will show high performance in micro-tunneling field
- The new technology will be advertised to construction company and government for the high drilling performance and eco-friendly advantages
- Application of New Contruction Technology and increasing a market share using rock reaming techology</td></tr>
<tr><td>Keywords</td><td>Trenchless technology</td><td>Micro-Tunnelling</td><td>Rock reaming</td><td>Cluster hammer</td><td>Rock fragmentation</td></tr>
</table>

〈 Contents 〉

1. Summary of R&D project ····· 7

2. Current situation of international R&D ····· 20

3. Project contents and outputs ····· 31

4. Achievement and contribution plan ····· 83

5. Apllication plan of project results ····· 87

6. New collected technology information during the R&D project ····· 89

7. Security level of the outputs ····· 95

8. Research facilities ····· 96

9. Security execution history ····· 97

10. Representative results ····· 98

11. Additional contents ····· 100

12. References ····· 108

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 7

2. 국내외 기술 개발 현황 ····· 20

3. 연구 수행 내용 및 성과 ····· 31

4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 83

5. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 87

6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 89

7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 95

8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비현황 ····· 96

9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치이행 실적 ····· 97

10. 연구개발과제의 대표적 연구실적 ····· 98

11. 기타사항 ····· 100

12. 참고문헌 ····· 108

제 1 장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

가. 사업화 대상기술 정의

<직경1m이하 소구경 터널굴착을 위한 암반확공기 터널시공 기술 개발>

(1) DTH(Down The Hole) 다중Hammer 방식의 암반용 확공기 제작 및 최적설계 모델 확보
(가) 대구경 DTH 천공기술을 이용한 HDD(Horizontal Directional Drilling) 암반확공기 최적 설계
(나) 다양한 지질조건(암반과 토사)에서 시공 가능한 확공기 설계/제조기술 개발
(다) 유공압, 구조안정성 해석, 실내시험을 통한 확공기 성능예측 모델 개발
(라) 해머비트 타격시험과 시험결과 Data를 통한 암반등급별 최적 운용조건 규명

(2) 암반확공 시공기술 개발 및 상용화 추진
(가) 곡선 슈팅(선 천공) 장비기술 및 시공기법 확보
(나) 수 차례(5~8회)에 걸친 암반 확공 과정을 단 1회 확공으로 감축하는 비개착공법 개발
(다) 암반확공기 현장시험 수행 및 곡선 터널굴진 시공성 검증

(3) 비개착공법의 기술자립 및 시공성 향상을 도모
(가) 기존 공법(세미쉴드 공법) 대비 경제성 및 시공성을 정량적 비교분석함으로써, 기술적 경제적, 환경적 우위 확보
(나) 비개착 터널공사(전력구, 통신망, 가스관거 매설공사)의 시공 메커니즘 확립 및 지형, 지질에 따른 현장적합형 시공법 개발

나. 사업화 대상기술 설명

(1) 기술의 우수성
(가) 확공기의 제조단가를 절감하면서 기존보다 높은 굴진율을 도모할 수 있음
① 본 기술은 다양한 지질(암반과 토사)의 굴착이 가능하고 조향식 천공이 가능함
② 고속시공으로 공기절감 및 시공 경제성을 확보할 수 있는 기술임
(나) 기존 기술에 비해 경제성이 높은 공법임
① 세미쉴드공법 대비 개발하고자 하는 기술의 시공단가 비교

(단위 : 원)

구 분	금 액		차 액	절감율
	세미쉴드	개발기술		
연암 m당 (Φ900mm)	3,393,000	2,915,000	478,000	약 15%
굴진율 (m/day)	4m/day	8m/day		2배 향상

② 개발기술은 기존 세미쉴드공법에 비해, 본 공사를 위한 가시설공사 등이 불필요 하므로, 부대공사비용이 현격하게 절감됨. 천공속도 또한 약 2배 정도 빠르기 때문에 가격 경쟁력을 충분히 갖출 수 있는 기술임.

③ 기존의 HDD공법이 수차례의 확공을 반복하는 반면 개발기술은 단 1번의 확공으로 작업을 완료할 수 있기 때문에 이수제(활제)로 쓰이는 벤토나이트 재료비를 60%이상, 벤토나이트 오니 등 폐기물 처리비 30%이상을 절감 가능함.

(2) 기술의 독창성

(가) 기존의 압반확공기술은 수차례의 반복 시공이 필요하지만, 본 기술은 단 1회로 확공작업을 완료할 수 있음.

(나) 다중해머방식의 압반확공기는 수직천공에만 사용되었을 뿐, 수평터널시공에 사용된 사례는 전무함.(표1)

(다) 국내 제조업체로는 에비다임, 전진CSM, 수산중공업 등이 있으며, 주 생산품목은 TH(Top Hammer) 천공기로 DTH 수평천공기를 생산하는 국내 제조업체는 전무함.

표 1. 제조사별 국내 천공기 등록 현황

내용	천공기 회사	등록대수 (1996년 이후)	점유율
국내 업체	전진CSM, 에비다임, 수산중공업 외	156 대	8 %
국외 업체	Sandvik사 (스웨덴)	217 대	11 %
	Atlas Copco사 (스웨덴)	196 대	10 %
	Furukawa사 (일본)	1,396 대	71 %
* 출처: 대한건설기계안전관리원			

(라) 다중해머 방식의 압반확공기로 압반굴착과 강관끌기를 동시에 시공한 사례는 아직 없음.

(마) 작업 전,후 해머비트의 팽창/수축 이동이 가능한 시스템을 도입하여 더블막장면의 드리블(Jamming, 비트고착) 발생 시, 강관내회수(Pipe-Return)가 가능한 설계기술을 개발/도입하고자 함.

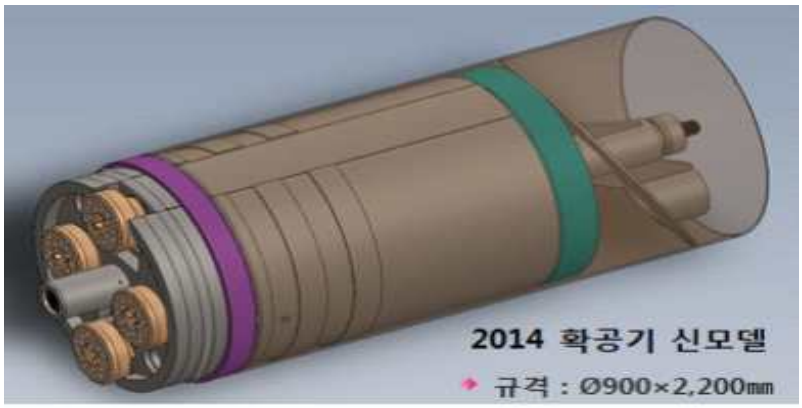


그림 1. 암반확공기 신모델 개념도

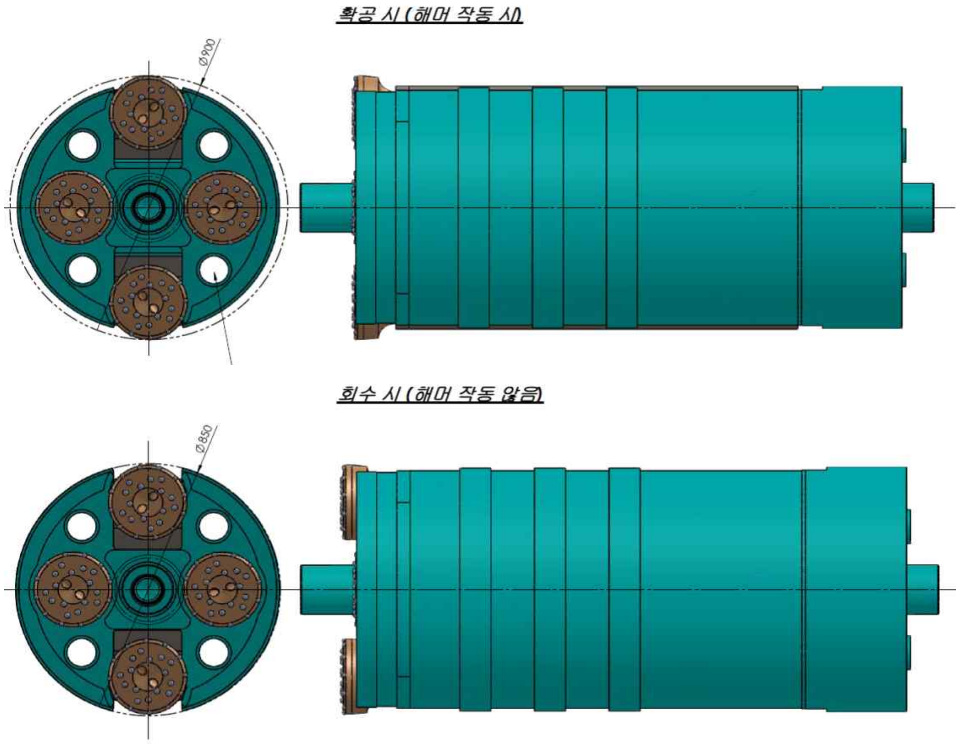


그림 2. 해머작동 시(위 그림), 회수 시(아래 그림) 비트의 반경방향 이동설계 개념도

(3) 기술의 활용성

(가) HDD 수평 천공을 위한 확공기의 제작 및 설계기술을 확보함으로써, 비개착식공법에 특화된 천공 및 굴착 현장에 유용하게 활용될 것으로 기대함.

(나) 암반확공 현장시험에 발주처 및 수요처를 초빙하여 현장시공 시연회를 개최함으로써 개발기술의 우수성을 홍보할 수 있을 것으로 판단됨.

(다) 기존 제품(세미쉴드TBM) 대비 개발 제품의 향상된 천공성능과 공기절감에 의한 시공경제성 증대 등 경제적, 환경적인 장점을 적극 홍보하여 건설시공 시 신공법으로써의 공사 발주기준을 유도하고 세부기준을 정립할 수 있을 것으로 판단됨.

(라) 건설기계 장비는 가혹한 환경에 따른 부품의 마모/파손 등이 빈번하기 때문에 각종 부

분의 수리와 교체가 빈번히 발생함. 향후, 신규 금속소재 산업과 연관된 고 내구성 신소재를 활용한 기계/합금 관련 고부가가치 신시장 창출에도 기여할 수 있을 것으로 판단됨.

다. 연구목적 및 사업화 내용

(1) 사업화 대상

(가) 본 과제는 기존의 기초연구 결과를 활용하여 현재 국내기술 수준 (TRL 4-5단계)을 실용화/사업화 (TRL 8-9단계) 단계까지 성장시키는 사업화 과제이므로 기초연구개발 과제의 성격과는 상당히 차별화됨.

(나) 본 국토부 사업을 수행하며 2년간 수 차례의 현장검증을 완료하여 시공효과를 검증한 후 주관기관(실리기업)에서 사업화를 도모할 계획임.

(2) 기존 공법 대비 사업화 강점

(가) 국내에 적용되고 있는 비개착식 굴착공법(Trenchless Technology)은 세미쉴드 공법(Micro-TBM)과 강관압입공법(Pipe Jacking)으로 양분할 수 있음.

(나) 세미쉴드공법 및 강관압입공법은 시공단가가 고가이며, 조향이 어려운 단점이 있으며, 특히 세미쉴드공법은 커터헤드 치짐이 발생하는 단점이 있음.

(다) 현재의 수평천공 확공기술은 최초 80㎜ 슈팅공정부터 최종 800~1,000㎜ 파이프 매설까지 최소 5~8회의 반복적인 확공 공정을 거쳐야 하므로 다단계의 시공공정이 필요함.

(라) 본 과제에서는 단 1회의 공정으로 확공이 가능한 다중해머방식의 암반 및 토사확공기 모델을 개발함으로써 비개착공법의 기술자립과 신기술 개발을 도모하고자 함.

구 분	세미실드	강관압입	조향식 수평 천공(H.D.D)
개요도			
최대시공거리	1,000m	120m	1,800m
굴착직경	800㎜~3000㎜	800㎜~3000㎜	200㎜~1200㎜
장비설치공간	넓은 공간 필요 (8×4m)	넓은 공간 필요 (8×4m)	지상(3m ×2m)
공사기간	2	3	1
시공비용	150%	180%	100%
m/day	4m/day	2m/day	8m/day
시공성공률	90% 이상	95% 이상	90% 이상
시장점유율	65%	34%	1%

그림 3. 기존공법과 조향식 수평천공법의 비교

2. 연구개발의 필요성

가. 현재 보유하고 있는 확공기술은 최초 80㎜ 슈팅공정부터 최종 800~1000㎜ 파이프 매설까지 최소 5~8회의 확공공정을 거쳐야 했음.(그림 4).

나. 다양한 지반조건(암반 및 토사)에서 굴착이 가능하며 단 1회의 확공으로 공정이 완료되는 신기술 개발이 필요함.(그림 5).

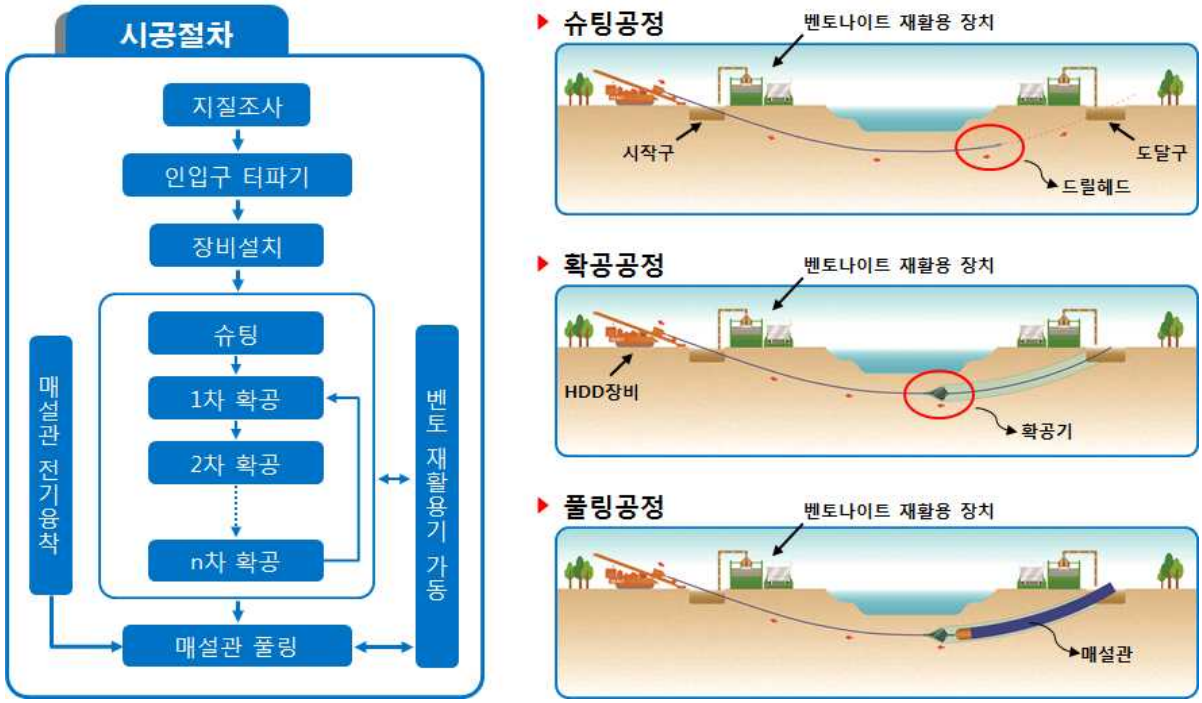


그림 4. 현재 보유하고 있는 기존 확공기술의 시공절차

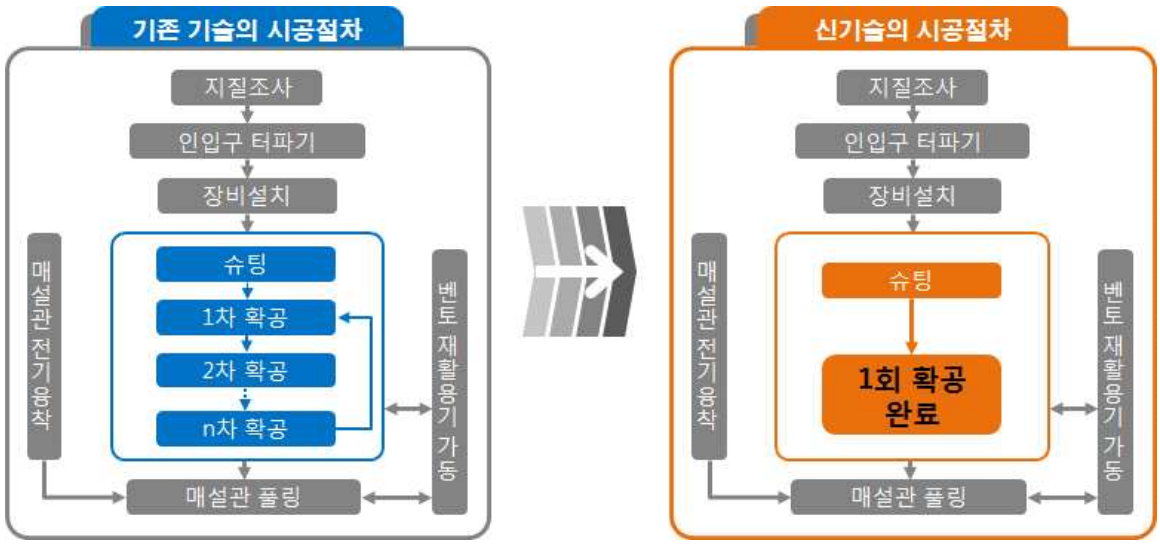


그림 5. 신기술의 시공절차(확공횟수 1회로 설정)

다. 또한, 현재 보유기술에서는 확공 이후에 강관을 매설하기 위해 다시 확공기의 왕복굴착이 필요함. 따라서, 터널굴착과 강관매설을 동시에 진행하여 공기를 추가로 단축하는 방법이 필요함.

라. 본 과제에서는 조향이 가능한 수평천공(Horizontal Directional Drilling)방식 암반확공 기술을 개발하여 소형 TBM(Micro TBM)의 제작 및 시공의 대외 의존도를 낮추고 순수 국내 기술로 수입대체효과를 갖고자 함.

나. 본 과업은 기존의 토사와 암반 전 지층을 세미쉴드 1일 굴진율(4 m/day)의 2배 이상 빠른 속도(굴진율 ≥ 8 m/day)로 굴착할 수 있는 다중해머를 장착한 암반확공기술을 개발하여 기존 시장인 강관압입 및 세미쉴드공법의 수요를 일정부분(30%)이상 대체하는 것을 목표로 함.

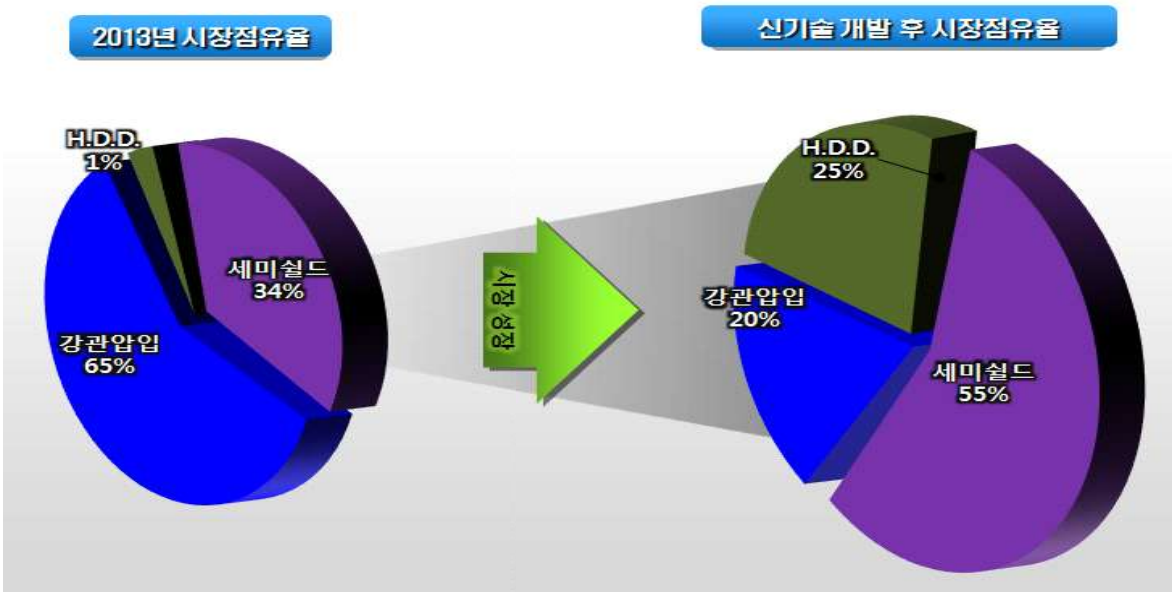


그림 6. 암반확공 신기술 개발후의 비개착공법 국내시장 변화

3. 연구개발 범위

가. 사업화 최종목표

(1) 최종목표

(가) 최종목표: 직경1m이하 터널굴착을 위한 암반확공기 설계/제조/시공 기술개발
① 직경 650mm 암반 확공기 최적 설계기술 확보
② 암반 확공기 제조 및 최적 운용기술 개발
③ 시공기술 확보 및 현장시험 수행을 통한 굴착성능검증

성과목표	성과지표		측정방법	최종 목표치	가중치 (0~1)	목표치 설정 근거
시제품 검증	1-1	굴착대상 암반등급 -경암	암반강도 (공인시험 성적서)	100 MPa	0.1	본 과제의 실증목표
	1-2	천공속도 (경암)	현장시험 (공인시험 성적서)	0.8 m/hr	0.1	선두주자인 스웨덴 Atlas Copco社 성능수준: 0.5 m/hr
	1-3	확공횟수	현장시험 (공인시험 성적서)	1회	0.2	선두주자인 스웨덴 Atlas Copco社 성능수준: 약6-8회
	1-4	천공직경	측정 (공인시험 성적서)	650mm	0.1	본 과제의 실증목표 직경1m에 가장 근접한 수치
특허 및 신기술	2-1	특허	출원	2건	0.1	특허출원
	2-2	건설신기술	신청 (신기술 인증)	1건	0.1	건설신기술 신청/점수
논문게재	3-1	SCI급 논문	게재승인	2건	0.2	국제학술지 게재
	3-2	학술발표회	게재	2건	0.1	학술발표회

(2) 최종목표의 성격 및 설정근거

(가)**최종목표내용**

① 설계기술: 직경 650㎜ 암반확공기 최적 설계기술 확보

㉮ 유공압 해석을 통한 DTH Hammer 다격성능 결정인자 규명 : 작동원리를 수치모델로 구현, 공압작동 회로 분석

㉯ 암반 파쇄용 드릴비트 버튼 배열 분석 : 버튼 배열에 따른 암석 파쇄량 분석

② 제조기술: 암반확공기 제조 및 최적 운용기술 개발

㉮ 다중공압해머방식의 암반확공기를 개발하여 직경 650㎜ 암반확공작업을 단 1회에 완료

㉯ 소규모 시험(선형굴착시험)을 통해 암반확공기의 최적 운용 조건 파악

③ 시공기술: 시공기술 확보 및 현장시험 수행을 통한 굴착성능검증

㉮ 도심지와 같이 작업공간이 협소한 현장에서도 시공 가능한 곡선 굴착기술 확보

㉯ 실제와 유사한 조건으로 현장시험을 수행하여 확공기 굴착성능 검증 및 시공 기술 검증

(나) **목표설정근거**

① 굴착 대상 암반등급

㉮ 국내 지층에서 빈번히 분포해 있는 경암 (일축압축강도 기준 100 MPa) 이상을 굴착기준으로 설정함 (가중치 : 0.1)

㉯ 강도시험 후 공인시험성적서 예정

② 천공속도

㉮ 암반구간에서의 천공속도를 기존 기술인 세미쉴드 공법보다 약 40%이상 향상시켜 시공소요시간 단축 (가중치 : 0.1)

③ 확공횟수

㉮ 수차례 반복 시공이 필요한 확공 작업을 단 1회로 함으로써 공사기간 단축을 유도함

㉯ 이를 통해 당해 공사비 절감과 후속 본 공사의 공기단축에 따른 시공상 경제적 효과의 극대화를 가져올 수 있으므로, 본 기술에서 가장 중요한 항목으로 판단됨. (가중치 : 0.2)

④ 천공직경

㉮ 본 과업의 목표인 1 m이하 소형 터널굴착에 가장 근접한 수치인 650㎜ 목표를 설정함.

⑤ 특허/건설신기술

㉮ 특허를 출원하여 신기술 시장을 선점함. (가중치: 0.1)

㉯ 건설신기술을 신청함으로써 추후 신시장 확보를 추구함. (가중치: 0.1)

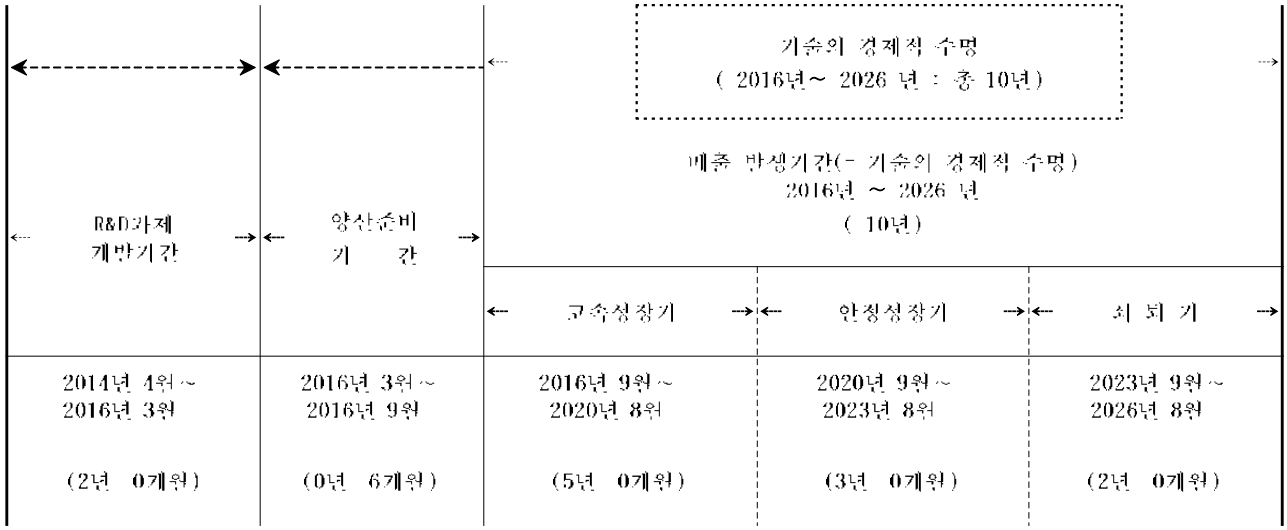
㉰ 건설신기술을 접수하여 인증 예정.

⑥ SCI급 논문

㉮ SCI(E)급 국제학술지에 1편 이상 게재를 목표로 논문을 2건 투고 예정 (가중치: 0.2)

㉯ 국내저널에 1편 이상 게재하여 국내 건설수요자/공학자들에게 본 기술의 장점을 홍보하고 기술정보를 공유함. (가중치: 0.1)

(3) 단계별 소요기간



나. 사업화 추진 계획

(1) 연차별 추진내용

연 차	연구목표	주요연구내용
1차년도	- 암반확공기 최적 설계, 제조 기술 개발	DTH 천공기술을 이용한 HDD 암반 확공기 최적 설계/제조기술 개발 - 해머비트 타격시험을 통한 암반등급별 최적 운용조건 규명
2차년도	- 암반확공 시공 신기술 검증 - 시공기술 상용화 추진	곡선 유닛(선천공) 장비기술 및 시공기법 확보 - 암반확공기 현장시험 수행 및 곡선 터널 굴진 시공성 검증 - 소규모 터널공사(전력구, 통신망, 가스관거 매설공사) 수주 및 국내외시장 진출

(2) 세부 추진 계획

No	연구개발내용	세부추진 계획 및 방법	수행 기간	해당 기관
1	■ HDD 암반확공기 현황 및 관련 자료조사	- HDD용 암반확공기 및 천공장비 국내외 자료조사 HDD용 암반확공기 기술현황 자료 확보 및 분석	3개월	실리기업
2	■ HDD암반확공기 작동 메커니즘 분석	- 핵심부품 DTH Hammer 작동 메커니즘 분석 - 암반 파쇄용 드릴비트 분석	3개월	실리기업 /생기원
3	■ 암반확공기 설계기법 개발	HDD용 암반확공기 제작을 위한 2D 도면 확보 암반확공기 3D Modeling - 암반확공기 3D 모델의 구조안정성/동적 안정성 분석 - 1차 현장시험 후 문제점 보완/설계	6개월	생기원
4	■ 암반확공기 제작	- 설계도면에 입각하여 관련 부품/재료 구입 - 가공업체에 확공기 시제품 제조의뢰 - 1차 현장시험 후 보완제작	6개월	생기원
5	■ 암반확공 현장시험수행	- 기존에 5회 이상 필요한 확공 과정을 1회로 축소 - 시험현장 부지 확보 - 시제품의 1차 현장시험 수행 - 최종제품의 2차 현장시험 수행	8개월	실리기업 /생기원
6	■ 현장시험 결과검증	- 시험데이터(굴진율, 시공오차 등) 분석 - 국제저널(SCI), 국내저널 논문투고	2개월	실리기업 /생기원
7	■ 비 개착식 암반확공법 개발	- 건설신기술 신청 - 비 개착 터널공사 수주 및 해외시장 진출	2개월	실리기업 /생기원

(3) 세부 추진 일정

2014년도 (1차년도)

일련번호	연 구 내 용	추 진 일 정 (월별)												기간(주)
		2014년							2015년					
		6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월	4월	5월	
1	HDD 확공기 기존모델 조사													8
2	핵심부품 DTH Hammer 작동 메커니즘 분석													8
3	암반 파쇄용 드릴비트 분석													4
4	최적 비트 매설 설계법 구축													8
5	DTH 공압 회로도 완성													8
6	선형굴착시험을 통한 DTH Hammer 최적운용조건 파악													8
7	암반확공기 3D Modeling													8
8	암반확공기 제작 및 1차 현장시험													20
9	연차보고서 작성, 논문 투고													12

2015년도 (2차년도)

일련번호	연 구 내 용	추 진 일 정 (월별)												기간(주)
		2015년							2016년					
		6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월	4월	5월	
1	1차 현장시험 분석													8
2	확공기 및 시공기술 보완													8
3	2차 현장 섭외													12
4	곡선 슈팅(선 천공) 기술 확보													12
5	곡선 굴진 시공성 검증													12
6	2차 현장시험수행													20
7	현장시험결과분석													12
8	비 개착 터널공사 시공성 확보 국내외 시장 진출													12
9	연차보고서 작성, 논문 투고													8

다. 연구 성과목표 및 성과지표

(1) 최종 성과목표 및 성과지표

구분	핵심성과 (Level1)		단위성과 (Level2)		최종 성과점검기준					해당 기관	예산 (백만 원)	양적 성과목표
					전적 성과지표		목표치	측정 방법	산출방법	가중치		
총괄	A	암반확공 시공기술	A-1	암반 확공 시공기술개발	①	굴착가능 암반강도 (MPa)	강암 100 MPa	일축 압축 시험	허머굴착시험	3	실리기임	240	년차: 중간 0 건, 최종 0 건 누적: 0 건 재목표: 0 건 SW: 0 건
					②	확공직경 (mm)	650 mm	현장 시험	터널직경계측	2			
					③	확공횟수	1회	현장 시험	횟수검증	1			
			A-2	암반 비빈 굴착성능 기술개발	①	천공속도, 경암 (m/hr)	0.8 m/hr	현장 시험	굴진율 측정	2	실리기임, 생기원	278	년차: 중간 0 건, 최종 0 건 누적: 0 건 재목표: 0 건 SW: 0 건
					②	천공속도, 중경암(m/hr)	1.0 m/hr	현장 시험	굴진율 측정	2			
					③	천공속도, 보통암(m/hr)	1.2 m/hr	현장 시험	굴진율 측정	2			
	B	암반확공기 설계제작 기술	B-1	확공기 설계제작 및 굴착율 추정 예측 기술개발	①	확공기 설계 프로그램	1 개	프로그램 등록	등록	1	생기원	200	년차: 중간 2 건, 최종 0 건 누적: 2 건 재목표: 2 건 SW: 2 건
					②	확공기 설계학	1 개	설계도	보고서	2			
					③	확공기 제작기술	1 개	시제품 제작	보고서	3			
					④	굴진율 획득/예측기술	1 개	데이터 수집	보고서	2			
계										30		718	년차: 중간 2 건, 최종 0 건 누적: 2 건 재목표: 2 건 SW: 2 건

라. 연차별 주요 추진 일정

구분	연구과제명 (연구수행기관)	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물	소요 연구비 (백만원)	1차년도				2차년도			
		핵심 성과	단위 성과	정성 성과 지표				1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
총괄	직경1m이하 소구경 터널의 착공 위한 암반확공기 시공기술개발														
주관	직경1m이하 소구경 터널의 착공 위한 암반확공기 시공기술개발 (산업기술)	V	V 1	V 1 (1)	심도가능 함탄분극 탐지	함탄감도	30	30							
				V 1 (2)	대상 암반 심도대별 시험 수행	현장시험	200			200					
				V 1 (3)	현장시험시 터널직경 계측	계측데이터	50							50	
				V 1 (4)	현장시험시 확공력수 측정	현장검증	69							69	
			V 2	V 2 (1)	현장시험시 연암 심천율 계측	현장시험검증	80				80				
				V 2 (2)	현장시험시 풍경암 심조율 계측	현장시험검증	80			80					
				V 2 (3)	현장시험시 고경암 심조율 계측	현장시험검증	60			60					
공동	암반확공기 선계지침 및 최적 운용기술개발 (생산기술연구원)	B	B 1	B 1 (1)	암반확공기 선계 프로그램 제작	프로그램	19	19							
				B 1 (2)	암반확공기 최적 선계기술 개발	선계도 확보	20		20						
				B 1 (3)	암반확공기 제작	시제품 제작	50		50						
				B 1 (4)	암반확공기 추진보완	최종품 제작	30					30			
				B 1 (5)	심조율 확보계측 기술 개발	데이터 확보	30					30			
계							718	359				359			

제2장. 국내·외 기술개발 현황

1. 국내·외 특허 동향

가. 관련 기술의 특허 동향

(1) 2000년 이후 전세계적인 TBM 시공 공사가 지속적으로 증가하고 있음.
(2) 소구경 전력구 및 통신구의 적용실적이 가장 많고, 최근에 들어서는 지하철 / 철도 적용실적이 증가하고 있음.
(3) 하기에 있는 표와 같이 도심지 TBM 적용비율은 1%에 불과한 실정으로 전 세계적인 추세와 큰 차이를 나타내고 있음.

국가	유럽	일본	미국	중국	대만	한국
도심지 교통터널에서의 TBM 적용비율	80%	60%	50%	40%	30%	1%

※출처 : 건설경제신문, 2013

(4) TBM은 그 시공 특성상 고속시공이 어려운 단점이 있음. 한편 선진국은 TBM 최대구경이 15m에 이르는 반면, 국내에 적용되는 TBM의 최대구경은 8.1m에 불과한 실정임.
(5) 이러한 고속시공에 대한 문제점을 개선하고, TBM 시공리스크를 최소화하기 위한 투자가 증가하고 있는 실정임.

나. 확공 관련 기술의 특허 동향

(1) 확공 관련 기술은 2000년 이전까지는 일본, 이후에는 미국 및 유럽에서 기술발전이 이루어지고 있음.
(2) 고정구조는 이미 발전기에서 성숙기로 넘어가는 단계에 있으며 확공구조에 비해 성장 가능성이 낮은 것으로 조사 되었으며, 상대적으로 확공 구조에 대한 중요성이 높은 것으로 나타남.
(3) 수평형 확공 구조는 현재까지 성장기 단계에 있는 기술로써, 지속적인 추가 연구개발이 필요한 분야인 것으로 사료됨.

다. 소구경 터널 굴착 장치 해외 특허 동향

(1) 2001~2015년 기간 동안의 소구경 터널 굴착 장치의 해외 출원 특허를 분석한 결과 미국 출원 특허가 과반(52.9%) 이상인 것으로 보아, 소구경 확공 분야의 기술 경쟁력이 가장 우수한 것으로 추정됨.

(가) 일본(10.62%), 독일(3.66%)의 순으로 나타났으며, 한국은 0.18%로 소구경확공 분야의

기술수준이 낮은 것으로 분석됨.

(나) 해외 주요 기술 경쟁업체로는 △Arthrex Inc, △Marotec LLC, △Shell Oil Company, ConforMIS, Inc, △Vermeer Manufacturing Company, △Red Leaf Resources Inc, 및 △The Robbins Company로 나타남.

(다) 국내 기업의 경우 △Sungkyong Engineering & Construction Limited 및 △Kolon Construction Co., Ltd. 가 해외 출원 기술을 보유한 것으로 나타남.

2. 국내·외 시장규모 분석

가. 관련 기술의 시장 동향

(1) 2002년 이후 중국 건설기계 시장의 폭발적인 성장이 수출 증가를 견인하고 있음.

(2) 굴삭기의 경우에는 국내 업체가 중국 시장 점유율의 상당 부분을 차지하고 있음.

(3) 중동, 아프리카, 중남미 등의 자원 보유국의 SOC개발에 따른 수요가 지속적으로 증가 추세에 있음.

(4) 국내 관련분야 기업의 주력 제품에 대한 해외시장 수요의 꾸준한 증가와 콘크리트 펌프, 기중기, 어태치먼드 등 수출 기종의 확대로 국내 생산의 지속적인 성장 예상.

(5) 선진국의 환경규제 강화와 전 세계적 온실가스 배출 실감 요구 등의 협약조건이 미래에 수출 장벽으로 적용될 가능성이 높음.

(6) 국내 부품 업체의 경쟁력 취약 및 핵심 부품의 경쟁국 의존 등으로 인한 낮은 수준의 경상수익은 국내 건설기계산업의 위험 요소로 작용되고 있음.

나. 시장동향

(1) 국내시장규모

(가) 한국의 TBM 시장규모는 약 1조원/년 규모임.

(나) 한국의 중소형 TBM(직경 3m이하) 장비 시장 또한, 매년 10%이상 성장하고 있으며, 2015년 시장규모는 약 4,000억원으로 추정됨.

(다) 국내·외 보고서를 근거로 소형 TBM 시장(직경 1m이하) 및 천공시장을 추정한 결과, 본 과제 종료 후, 2016년에 1,000억원, 2020년에는 약 1,500억원의 국내시장이 형성될 것으로 예상됨.

(라) 이 중 본 사업과 직접적 연관이 있는 1m이하 소구경 TBM 및 일반확공 산업의 매출 규모는 아래와 같이 예측됨.

※ (국내매출 : 400억원 / 2010년 → 900억 / 2016년)

(마) 2010년 기준 국내 TBM공법(세미쉴드 포함)의 사용 현황을 살펴보면 전력구 분야가 44%로 절반에 달하며, 통신구 20%, 철도(지하철 포함) 20%, 상하수관 12%, 가스관로가 4% 수준임.

① 국내에서는 지하철과 대심도지하도로, 철도, 도로터널 등 중대형 이상의 TBM공법 사용을 극히 제한적으로 적용하였으나, 상대적으로 기반시설 유틸리티 공사에는 지속적으로 사용되고 있음.

② 시민사회의 정책적 영향이 커지면서 공사에 따른 다양한 민원제기가 높아져 에너지시장의 터널공사는 비개착식 방법인 TBM공법 적용이 늘어날 것으로 예상됨.

③ 특히 에너지분야 내 터널공사는 도심지에 집중돼 있어 공사 시 민원제기가 공기에 직접적인 영향을 제공하고 있으며, 공기 연장은 결국 투입비용을 상승시키는 요인으로 작용함.

④ 따라서 대설 전 구간 개착에 따른 시민 불편과 진동, 소음 등의 민원 발생이 높은 개착식 공사보다는 비개착식 공법인 TBM 장비 사용이 증가하고 있음.

(바) 확공기의 국산화로 적용 공사의 TBM 적용률을 향상시켜, △공사기간 단축, △공사비용 절감, △공사 안전성 및 환경성 제고로 국가 건설 경쟁력을 획기적으로 개선시키는 공법이 필요함.

① 건설기술연구원의 자료에 따르면 우리나라의 교통터널 중 TBM 적용 비율이 1%에도 미치지 못하여 30%인 대만, 40%인 중국보다도 훨씬 낮고 미국(50%) 일본(60%) 유럽(80%)에는 비교할 수도 없는 실정임.



그림 7. TBM 공법 적용 현황

출처: 국내 TBM시장, 에너지산업이 비탈목 역할 했다, 투데이에너지, 2014.0206

표2. 2010년 기준 국내 쉴드TBM 사용현황

구분	사용용도	대수	비율(%)	규격(m)
1	전력구	25	42.4	3.5~5.0
2	통신구	13	22	2.75~3.65
3	지하철	10	16.9	7.28~8.13
4	철도	2	3.4	7.9~8.25
5	하수관로	2	3.4	3.55
6	가스관로	2	3.4	2.5~3.5
7	방류관로	2	3.4	3.5
8	급수관로	2	3.4	2.5~3.75
9	취수로	1	1.7	4.3
합계		59	100	-

출처: 국내 TBM시장, 에너지산업이 비탈목 역할 했다, 투데이에너지, 2014.0206

② 한국전력공사의 경우 국내에서 TBM공법을 적용한 기업으로 전체 TBM장비시장 중 40%이상을 활용하고 있음.

③ 2012년까지 착공된 총 118건의 전력구 터널공사를 기준으로도 80건의 공사에서 TBM(세미쉴드 포함)장비를 사용한 것으로 나타남.

④ 한국전력공사는 업계 최초로 자체 TBM공법 적용기준과 적산기준을 마련해 놓고 있는 것으로 알려져 있으며 최근 수평지향성 압입공사의 굴착 가능한 전 토질에 대한 품셈 제정 등 설계 표준화를 추진하고 있음.

⑤ 한국전력공사의 경우 터널 연장길이가 짧은 구간에서는 개착식 공법의 공사비용이 낮아 비용적 측면에서는 우수하나 도심지나 2차선 등 짧은 도로를 통과할 경우 주민불편과 민원발생 소지가 높아 공법 평가 시 기계식(TBM) 공법 채택을 높이고 있음.

(사) 에너지산업에서의 TBM공법은 중소형 쉴드TBM 또는 세미쉴드가 주로 사용되고 있으며, 한국건설기술연구원이 2010년 설문조사한 국내 TBM보급 설문내용을 살펴보면 다음과 같음.

① TBM사례가 적은 이유는 △TBM 공법 기술과 전문가부족(23.81%), △발주체계 및 제도적 문제(36.9%) 등 주로 미흡한 국내 인프라 여건이 부족한 것으로 나타남.

② 향후 수요예측과 관련해서는 점진적 증가(66.67%), 급격한 증가(21.43%)등 수요확대를 예상하고 있음.

③ 국산화 필요성에도 절대다수인 88.1%가 '필요하다'는 응답을 보였으나, TBM이 사용될 수요처는 향후 큰 폭으로 증가할 것으로 예측하지만 관련 인프라의 부족을 문제점으로 지적함.

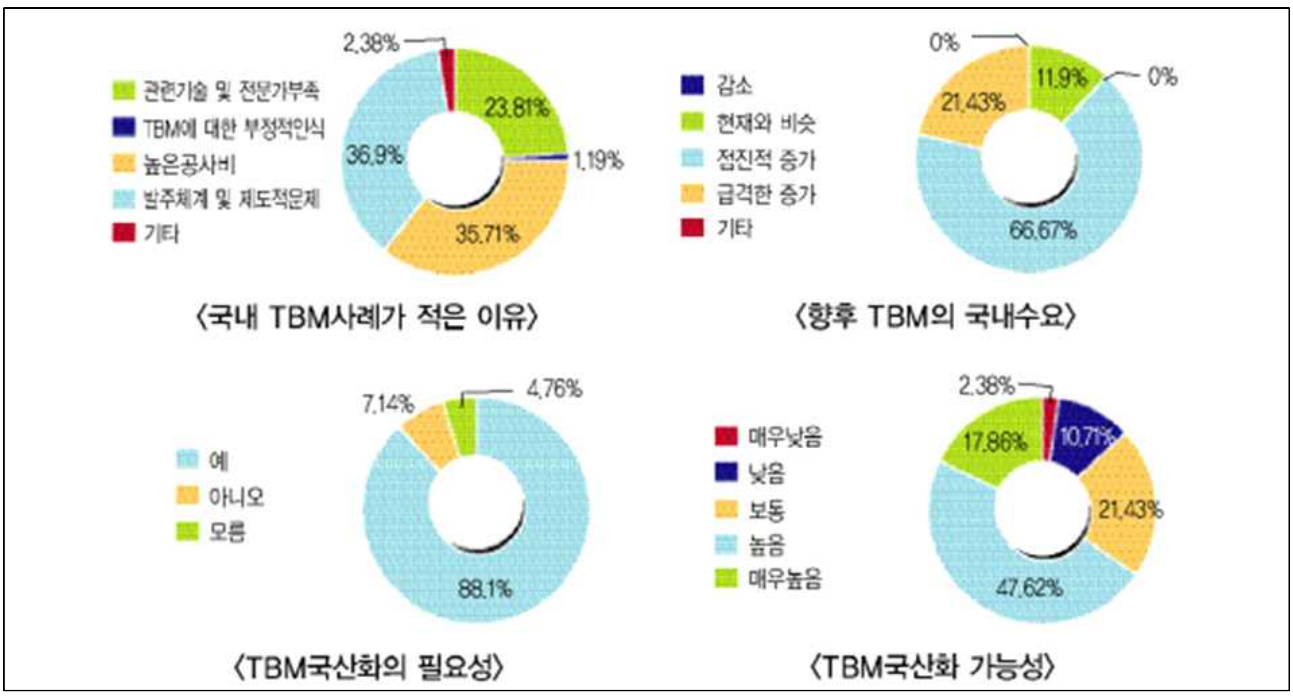


그림 8. 2010 TBM기술 설문조사 (출처: 한국건설기술연구원)

(2) 국외시장규모

(가) TBM 및 천공 세계시장은 연 30%정도로 꾸준히 성장하고 있는 산업이며, 2016년까지 약 250억불, 2020년까지 약 600억불로 지속적으로 시장이 증가할 것으로 예측됨.

연 도	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년
국 내	1,160억원	1,240억원	1,320억원	1,400억원	1,470억원
국 외	254억불	330억불	406억불	482억불	558억불
관 련 근 거	기계화 자동화 터널건설을 위한 TBM 기술개발 보고서 (한국건설교통기술평가원, 2010) 국외 자료는 각 나라 전문업체의 제공사항을 근거로 추정하였음 국내는 소형 TBM 시장(직경 1m이하) 및 천공시장				

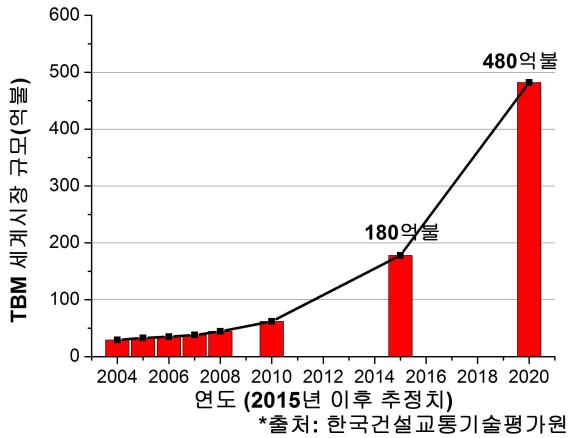


그림 9. TBM산업의 세계시장 규모

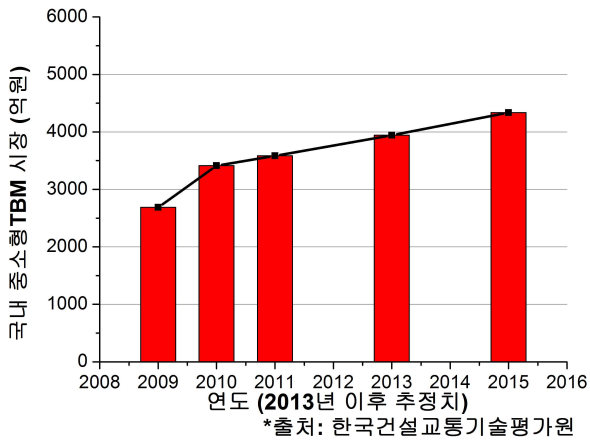


그림 10. 국내 중소형(직경 3m이하) TBM시장

(나) 세계 TBM장비 업계는 전 세계적인 변화추세인 발파굴착(NATM) 공법에서 기계굴착(TBM)공법으로 전환되고 있으며, 환경성과 안전성, 경제성 등의 요구로 TBM 공법의 적용이 빠른 속도로 확산되고 있음.

① 소구경TBM(구경3m이하)은 주로 수도터널공사, 전력구, 통신구, 가스관 공사 등에 적용되고 있음.

② 구경7~8m이상의 대구경 및 초대구경의 적용분야는 지하철터널공사, GTX철도터널공사, 고속도로 터널공사, 대심도고속도로 터널공사, 한-일 및 한-중 해저 터널공사 등 구경에 따라 매우 다양하고 폭넓게 적용됨.

(다) 중국은 TBM의 최대 수요처이면서 최대의 공급자로 급부상하고 있으며, 1966년부터 TBM 개발에 착수해 2005년 독자적으로 설계를 이루었으며 TBM 제작기술도 향상되면서 지금은 수입 장비 대비 2/3수준으로 장비가격을 하락시켰으며, 향후에도 중국의 국내 TBM 시장 공략은 지속될 것으로 예상됨.

3. 관련기술의 사업화 전망

가. 전력구, 통신관로, 상하수도, 강변 여과수, 빗물관리, 열 배관 Pipe Line 등 다양한 분야에서 터널 공사에 대한 기술 수요가 급증하고 있음.

나. 본 연구에서 개발하고자 하는 기술은 복합지층 및 토질변화에 대응한 다종식 해머굴착장비 기술이므로, 굴진율과 조향에서 강점이 있기 때문에 건설토목분야, 특히 소구경 터널시공에 활용되어 기존의 세미쉴드 시장의 최소 30%이상을 대체할 것으로 예상됨. 세미쉴드 전력구 시장의 30%이상을 대체할 경우, 2015년 현재 200억원, 2018년까지 300억원 규모로 암반확공시장이 성장할 것으로 예측됨. 이처럼 암반확공기를 이용한 수평천공시장이 지속적으로 확대되면 암반확공기술의 사업화를 2018년부터 개시할 수 있을 것으로 전망됨.

다. 한국의 터널시공/천공장비 유지보수와 천공 소모품 시장은 1,000억원/년 정도의 규모가 있는 시장이므로, 향후 천공공구 관련 내마모성 문제 해결을 위한 신소재산업 분야와 연계한 융·복합 산업발전이 가능할 것으로 판단됨.

라. 또한, 건설기계산업 중 해머비트의 생산시장 활성화, 천공/건설기계 산업의 신규 제품 품목으로도 주목받을 수 있을 것으로 판단됨.

나. 현재 크게 이슈가 되고 있는 신재생 에너지 개발(지하수, 지열발전)사업과도 접목 가능할 것으로 판단됨.

4. 기술 홍보 방안

가. 건설기계제조 및 건설시공업체에 본 과업에서 개발된 기술을 시현/시공함으로써, 제품(확공기)과 공법의 우수성을 홍보할 예정임.

나. 기존 공법 대비 개발 기술의 향상된 천공성능과 공기절감에 의한 시공 경제성 증대 등 경제적, 환경적인 장점을 적극 홍보하여 발주처 및 수요처에 개발 기술의 적용 필요성을 강조하고, Spec적용 및 발주를 유도할 예정임.

다. 국내,외 주요 수요자(국내·외 딜러, 고객 등)를 대상으로 개발기술에 대한 현장시험을 수행하고, 제품 및 기술을 검증받을 계획임.

라. 국내·외 학술대회/전시회 참가를 통해 기술 및 제품을 홍보할 계획임.

나. 건설신기술 접수 및 등록할 계획임.

바. 국내 : 한국건설기계전, 유공압학회, 터널공학회 등 참가할 계획임.

사. 국외 : Bauma(독일), Conexpo(미국), Intermat(프랑스), Bauma China(중국), 국제정밀공학회(ISCIA), 국제터널공학회 (World Tunnel Congress) 등 참가할 계획임.

5. 기술개발 동향분석 내용

가. 본 기술 사업화 현황 분석내용은 하기와 같음

(1) 기업일반 정보 및 지식재산권 현황 파악
(2) 계획 제품의 내용 및 기술특성 파악
(3) 재무 분석을 통한 기업의 경영상태 점검

나. 국내외 시장 동향 분석

(1) 국내의 공급망 분류에 따른 계획 기술제품의 예상 수요처 리스트 도출
(2) 해외의 마케팅 환경 분석을 통한 시장 분석
(3) 해외시장 진출 가능성을 고려한 정부지원 정책 등을 공유
(4) 산업특성 분석, 4P(Price, Products, Place, Promotion) 관점의 환경을 분석과 시장 진출 전략 분석
(5) 계획 제품 및 적용기술 관련 산업 분석 및 시장세분화 및 목표시장 선정
(6) 국내·외 잠재 수요처 분석을 통한 시장규모 및 경쟁성 보고서 작성
(7) 사업화 전망 및 기술의 활용방안 마련

다. 신사업 융합기술 발굴

(1) 비개착식 공법 분야의 기술 동향 분석
(2) 수혜기업에서 보유 중인 특허 및 기술 동향 분석
(3) 소구경 암반 확공기의 신기술 분석과 적용 사례를 통한 융합 기술 방향 도출
(4) 국내·외 정부지원 시책 관련 정보 분석 및 제공
(5) 해외시장 진출에 필요한 주요 전시회 정보 분석 및 제공

마. 시장 동향

(1) 국내 시장동향

(가) 소규모 터널시공에 주로 세미쉴드 TBM 장비가 활용되고 있음.

① 이러한 방식은, 극경암 및 복합지반 굴착에 부적합함.

② 국내기술로 제작된 바가 없고, 복합지층 및 토질변화에 대하여 대응하기가 어려움이 있음.

(나) 다중식 해머는 암반수직굴착용(지하수, 천부지열 개발)으로 주로 제작됨.

① 국내 중소업체를 중심으로 수직굴착을 위한 다중식 해머기술이 적용되고 있음.

(2) 국외 시장동향

(가) 복합지층 및 토질변화에 대응한 다중식 해머굴착 장비 기술 개발됨.

① 독일, 일본, 미국 등 에서 적극 개발 중이며, 이미 상용화 성공사례가 있음.

② 굴진율과 조향에서 강점이 있기 때문에 소규모 공사에 빈번히 사용됨.

바. 기술 동향

(1) 국내기술동향

(가) 현재 암반굴착 기계를 생산하는 국내업체는 해외 선진기업 복제품을 제작하는 수준임

(나) 선진 천공장비 제조업체와의 기술격차는 약 10년 이상 차이가 나는 것으로 분석 된.

(다) 국내의 지반은 토질변화가 대우 심하고, 특히 암반층이 많으므로 암반 굴착에 대응하는 장비의 개발이 시급한.

(라) 최근 소형 TBM Somi Shield 장비에 대한 수요가 급증한 상태이나, 국내의 소형 TBM 관련 원천기술은 확보되지 못하고 있는 실정임.

(마) 따라서, 비개착공법과 관련된 한국형 자립기술 개발이 시급한 실정임.

(2) 국외기술동향

(가) 천공장비

① 암반 천공장비의 경우 스웨덴 및 일본 업체들이 세계시장의 80%정도를 점유하고 있으며, 관련 소재 및 열처리, 소결생산 기술까지 전 공정의 기술과 제조라인을 보유하여 이 분야 시장을 선도하고 있음.

② 유럽 및 미주에서는 선진 다국적기업, 아시아와 중동 지역에서는 일본산 제품이 시장과 기술을 선도하고 있음.

(나) TBM 장비

① 소형 TBM Somi Shield 장비는 독일, 미국, 일본 등의 선진국을 바탕으로 1990년대부터 상용화가 활발히 진행되고 있음.

② 선진국의 주요 TBM 제작사는 독일 Herrenknecht, 일본 Kawasaki, 미국Robbins 등 있음.

③ 독일, 미국, 프랑스 등 구미지역은 TBM 전문제작사, 일본은 중 공업사 위주로 생산하고 있음.

④ 건설장비 제조사로는 캐터필러의 자회사(Lovat社)에서 생산, 고마츠는 중국 법인에서 생산하고 있음.

⑤ 중국 또한, 빠른 속도로 기술개발을 추진하여 비개착공법 관련 가격 경쟁력은 이미 한국을 추월한 것으로 분석됨.

6. 연구개발기술의 시장규모 및 경제성

가. 시장전망

(1) 관련기술의 주 사용처인 한국전력공사의 매출액 중 송.배전 전력선 지중화작업이 약 30% 차지하고 있음.

(2) 지질 암반의 경우 기존의 세미실드 공법으로 사업 수행되어, 본 개발 기술의 신기술 인증을 통한 기술 신뢰성 확보 및 세미실드 공법의 대체성이 확보된다면, 암반지질의 전력선 지중화작업에서의 추가적인 시장 확대가 가능할 것으로 판단됨.

(3) 연구개발기술의 사업화는 주 사용처인 한국전력공사와의 사업화 수행이 요구되나, 도시

가스공사의 가스구 지중화작업, 지방자치단체의 도시재생사업을 통한 상수도 개량 지중화작업, 기타의 통신구 지중화작업 등으로도 전차 확대될 것으로 판단됨.

나. 시장규모

(1) 연구개발기술과 대비되는 기존 공법를 주로 채택하여 공사 발주를 하는 한국전력공사의 경우 2013년 발주용역공사 1,555건을 분석해보면, 순수 전력구·지중화공사 발주 건수는 약 104건으로 나타남.

(2) 전력구·지중화공사의 공사종료별/지역별로 분석해보면 그림11과 그림12에서와 같이 배전건설 분야의 전력구·지중화공사가 64건으로 가장 많았으며, 송전건설 26건, 변전건설 10건 및 송전지중-계통 O&M공사가 4건으로 나타내며 전력구·지중화 공사는 배전건설 분야에서 가장 많은 공사를 발주하는 것으로 나타남.



그림11. 2013년 한국전력공사의 전력구·지중화 용역공사 분야

공사종류/지역	강원	경기	대구경북	대전충남	부산	부산경남	서울	전남	전북	충북	충북강원	총합계
배전건설	2	10	2	4	1	16	13	2	11	1	2	64
변전건설						10						10
송전건설		8		4		10	4				1	27
송전지중-계통O&M		1			1		2					4
총합계	2	19	2	8	2	36	19	2	11	1	3	105

그림12. 공사종류별/지역별 공사발주 현황

(3) 한국전력공사의 최근 3년간 지하성 암입공사의 발주형태를 보면 표3과 같이 지반의 지질 형태에 따라 구분하여 발주하고 있으며 토사(79%), 풍화암(19%), 연암이상(2%)로 연암이상은 극히 미미한 수준을 나타내고 있음.

(4) 따라서 한국전력공사에서는 실계절차 표준화 작업을 실시하여 풍화암 및 연암을 비롯 경암 이상의 경 암질까지 실계표준화 작업을 실시하고 있으며 공사물량 및 공사비의 증가추세로 확대 발주를 준비하고 있음.

구 분		'13	'14	'15	계
공사건수		21	29	35	85
총 연장 (m)	토 사	2,860	2,470	6,235	11,565
	풍 화 암	615	1,820	280	2,715
	연 암		325		325
	계	3,475	4,615	6,515	14,605
공사비(천원)		4,792,745	7,904,120	12,329,519	25,026,384

표 3. 한국전력공사 최근 3년간 지하성 위임공사 발주현황

※출처 : KEPCO 배전기획처

(5) 도시재생사업

(가) 국가 차원에서 지역발전 및 도시재생을 위하여 지방자치단체가 지역발전 및 도시재생을 위하여 도시재생사업을 추진하고 있으며, 주민 제안에 따라 해당 지역의 물리적·사회적·인적 자원을 활용함으로써 지역 공동체를 활성화하는 사업임.

(나) 도시재생사업은 인구 감소, 산업구조 변화, 도시의 무분별한 확장, 주거환경의 노후화 등으로 쇠퇴하는 도시를 지역역량의 강화, 새로운 기능의 도입·창출 및 지역자원의 활용을 통하여 경제적·사회적·물리적·환경적으로 활성화 시키는 것을 목적으로 수행함.

(다) 도시의 기능 개선 및 강화를 위해 전력선지중화 사업, 상·하수관 정비 및 가스관 정비 사업이 도시재생사업의 주요 추진 과제로 등장하고 있음.

(라) 도시재생사업은 개별 도시의 고유 기능을 회복하기 위한 주거환경정비, 역세권개발, 항만재개발, 낙후 상권의 활성화, 시범도시 구축 및 경관의 활성화를 위한 도시의 재건축(Remodeling) 사업으로 지상에 산재되어 있는 전선의 지중화 작업이 주요 추진 과제로 수행되고 있음.

(마) 기존의 재정비촉진사업(예: 뉴타운개발사업)인 일산, 분당 등 신도시는 지역주민의 토지를 수용하여 도시를 건설하는 사업은 토지구획정리를 통해 개착식 공법을 통한 지중화를 다수 추진하였으나, 최근 국토교통부가 적극 추진 중인 도시재생사업은 기존 시설이 존치하는 상태에서 추진되는 사업으로, 비개착식 공법을 통한 지중화가 요구됨.

(바) 따라서 본 연구개발기술은 도시재생사업의 가스공사의 가스구 지중화작업, 지방자치단체의 도시재생사업을 통한 상수도 개량 지중화작업 및 기타의 통신구 지중화작업 등으로 점차 확대될 것으로 판단됨.

다. 연구개발기술의 경제성

(1) 기존의 HDD공법 및 세미쉴드 공법의 공기산정 및 공사비를 비교한 결과 고속시공으로 공기절감 및 시공 경제성을 확보할 수 있는 기술임.

(2) 연구개발기술은 기존 HDD공법에서 나타난 수차례의 확공공정을 단 1회로 확공함. 따라서 공사기간을 대폭 절감 할 수 있으며 또한, 세미쉴드공법에 비해 본 공사 추진을 위한 수직구 가시설공사 등이 불필요하므로 부대공사비용이 현격히 절감되고 천공속도 또한 빠르기 때문에 가격 경쟁력을 충분히 갖출 수 있음.

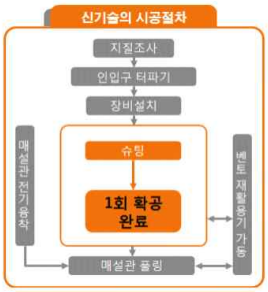
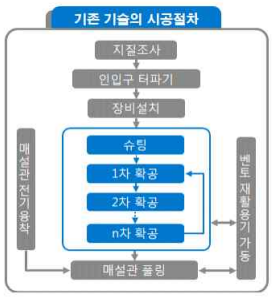
구 분	신공법	HDD공법	세미쉴드공법
시공 개념			
공사 기간	- D900㎜, L=100m기준 지질상태 : 연암 34일 소요	- D900㎜, L=100m기준 지질상태 : 연암 97일 소요	- D900㎜, L=100m 기준 지질상태 : 연암 134일 소요
시공비 (직접비)	- 245만원/m	- 400만원/m	- 734만원/m (수직구 가시설 물 포함)

그림 13. 공법별 시공경제성 비교

제3장. 연구 수행내용 및 성과

1. 연구 수행내용

가. 암반확공기 설계/제조기술 개발(설계)

(1) 연구개발 기술의 원리 및 제작과정

(가) 다중 DTH 해머 방식의 암반 확공기의 작동원리

① DTH(Down The Hole) 해머 작동 원리

㉮ DTH해머는 공기압축기로부터 공급받은 압축공기에 의해 암반을 타격하여 파쇄하는 천공장비임. 공급된 압축공기는 해머 내부의 피스톤을 상하로 왕복 운동시키고 피스톤은 해머 비트를 타격하게 됨. 이에 따라 해머 비트 바닥에 장착된 버튼이 암반에 충격을 주게 되어 암반을 파쇄함. 또한, 로터리 헤드에 의해 DTH해머를 회전시켜 암반의 타격 위치를 분산시키고 파쇄된 암반의 크랙을 진전시킴.

㉯ DTH해머를 사용하여 암반을 천공하면 롤러비트 등을 이용한 천공에 비해 속도가 대우 증가하는 반면에 분진, 소음, 진동이 발생한다는 단점도 있음.



그림 14. DTH 해머

② DTH hammer의 구조

㉮ DTH hammer는 그림 15와 같이 Rotary head에 장착되는 Backhead, 공기압축기로부터 토출되는 압축공기의 흐름을 결정하는 Check valve, 왕복운동을 하면서 타격을 가하는 piston, 암식 및 지반에 천공 작업을 가능케 하는 Button bit등으로 구성됨.

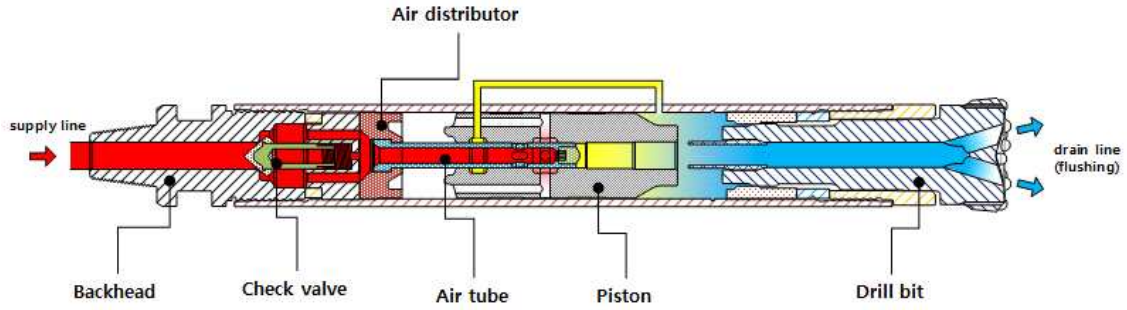


그림 15. DTH 해머 구조

③ DTH hammer의 작동 과정

㉮ DTH hammer는 공기 압축기에서 토출되는 압축공기의 공압에너지를 피스톤의 운동에너지로 변환되어, 피스톤이 비트를 연속 타격함으로써 천공작업이 수행됨. 그림 16, 17에서는 해머비트 부품별로 작동과정을 분석함.

초기 위치[STEP 0]에서 공기 압축기로부터 토출되는 압축공기는 Rotary head를 지나 Hole 1번을 통해 Lower chamber에 압력을 형성한[STEP 1]. 이 때 피스톤의 단면적 A2에 작용하는 압력 힘으로 피스톤은 좌측으로 거동한[STEP 2]. 이러한 동작이 계속되어 Hole2와 Check Valve가 유로를 형성하면 피스톤은 동작을 멈추게 되고 Hole 2를 통해 압축공기는 피스톤의 Upper chamber에 유입되어 고압을 형성함[STEP 3]. 이와 동시에, Lower chamber에 형성되었던 공기압은 비트를 통해 외부로 배출이 되어 Lower chamber는 대기압 상태가 됨[STEP 4]. 따라서, Lower chamber는 Upper chamber보다 상대적으로 저압이 형성되고 A1에 작용하는 압력 힘과 자중에 의해 피스톤은 우측으로 이동하여 비트를 통해 대상물에 타격에너지를 전달함[STEP 5]. 또한 천공작업에 의해 만들어진 압분은 압축기로 유도된 압축공기에 의해서 외부로 배출됨[STEP 6]. 마지막으로 Upper chamber의 압력은 피스톤이 우측으로 이동함에 따라 외부로 배출되며, 다시 공급 압력이 Lower chamber에 공급되어 피스톤이 좌측으로 이동되어 STEP 1부터 반복 타격 행정을 수행함.

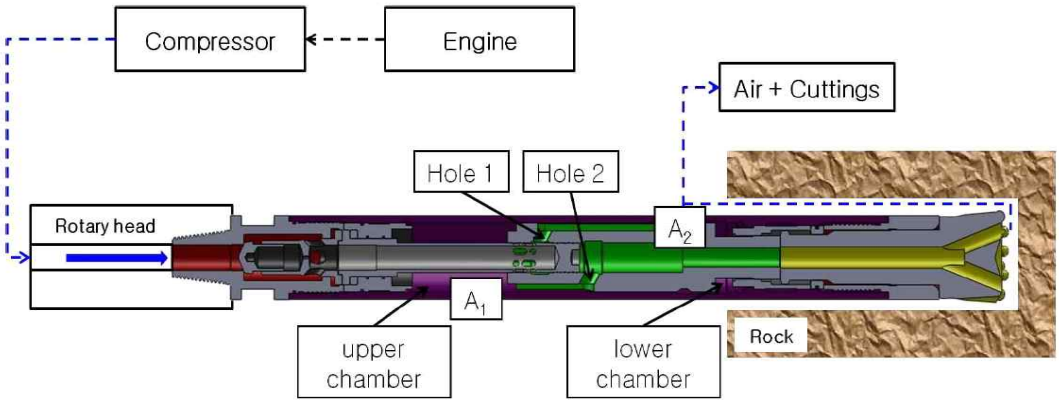


그림 16. DTH 해머 작동 원리 (Song and Shin, 2010)

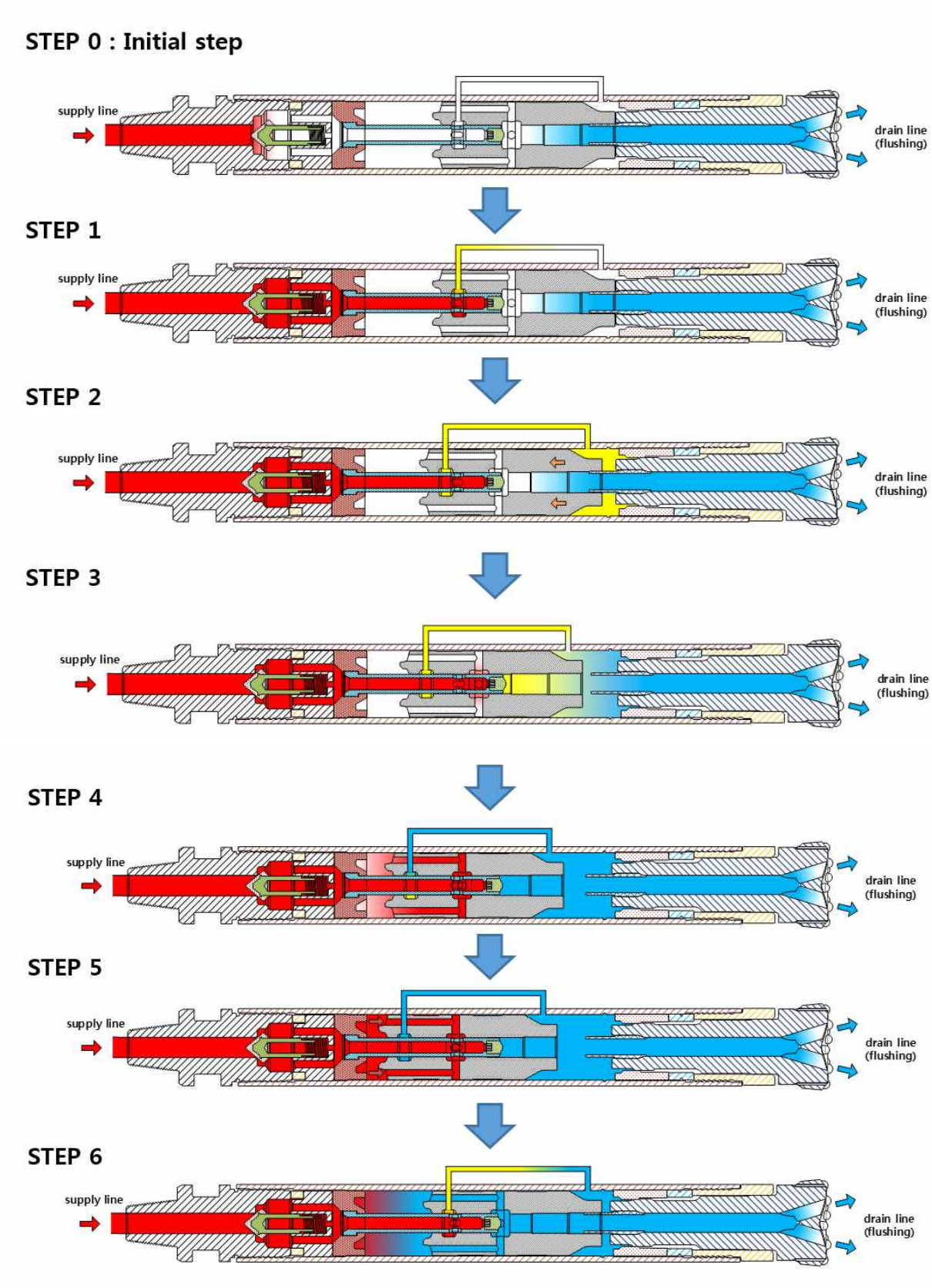


그림 17. DTH Hammer 단계별 타격 메커니즘

㉯ 다중 DTH hammer의 천공 속도

㉮ 일반적으로 DTH 해머를 이용한 암반 천공 시에 비트의 직경이 클수록 천공 속도가 느린 특성이 있음. 이를 수식으로 나타내면 수식 1과 같으며, 천공 속도는 비트 직경의 제곱에 반비례함. 여기서 K는 타격 시간과 천공 체적의 함수로, 다시 말해 암반의 특성이 반영된 계수이며, D는 비트 직경, ν는 천공속도임.

$$\nu = K \cdot \frac{1}{D^2} \qquad \text{수식 1}$$

㉰ 4개의 DTH 해머가 있을 경우, 동일한 타격에너지가 비트에 인가되더라도 각 천공경이 상이하면 천공 속도가 다르므로 이를 평균으로 등가하여 나타낼 수 있음. 여기서 D_1 ~ D_1는 상이한 천공경.

$$\nu_A = \frac{K_1 \cdot \frac{1}{D_1^2} + K_2 \cdot \frac{1}{D_2^2} + K_3 \cdot \frac{1}{D_3^2} + K_4 \cdot \frac{1}{D_4^2}}{4} \qquad \text{수식 2}$$

㉱ 이를 다중 DTH해머로 일반화 시키면 수식 3과 같이 정리한.

$$\nu_A = \sum_{i=1}^{n} \frac{K_n \frac{1}{D_n^2}}{n} \qquad \text{수식 3}$$

㉲ 다중 DTH 해머비트에 대한 천공 속도를 나타내면, 그림 18과 같으며, 각각의 경우는 8인치 해머비트 2개, 6인치 해머비트 4개 (Case 1), 8인치 해머비트 3개, 6인치 해머비트 3개 (Case 2), 8인치 해머비트 4개, 6인치 해머비트 2개(Case 3)로 천공 속도가 해머비트 크기가 증가할수록 1회 타격 시의 다중 DTH 해머의 천공속도가 느려짐.

㉳ 그러나, 이 결과는 해머비트의 개별 천공속도를 단순 합산하여 이론식으로 계산한 것이므로 실제 해머비트의 성능 및 다중해머 방식 확공기의 회전타격 및 암반과의 복합적인 천공작용과는 차이가 발생할 수 있음.

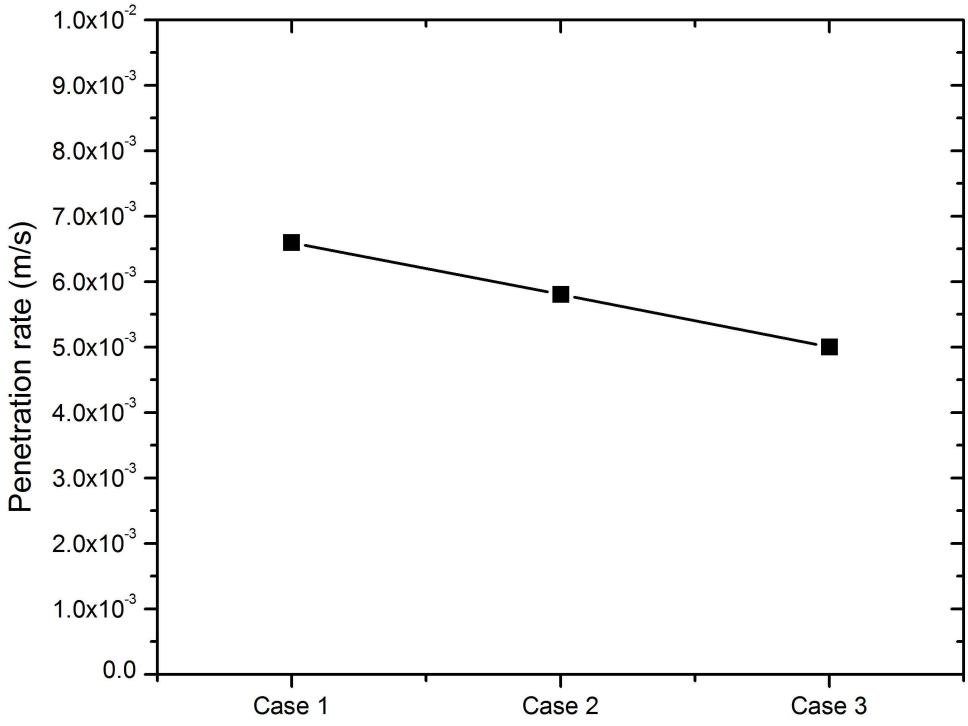


그림 18. 다중 DTH 해머의 직경에 따른 이론적 천공속도

⑤ 다중 DTH hammer의 비에너지

㉮ DTH Hammer의 타격력은 타격에너지에 의해서 드릴비트의 천공 직경에 따라 단위 체적당 타격 에너지로 변환된. 다중 해머에 적용하기 위해서는 수식 4와 같이 상이한 비트 크기에 의한 비에너지(*SE*)로 나타낼 수 있음. 여기서, E는 DTH 해머의 타격에너지이고, i는 n번째 DTH 해머비트의 타격에 의한 천공 체적임.

$$SE_A = \sum_{i=1}^{n} \frac{E}{V_n} \qquad \text{수식 4}$$

㉯ 이 때, 천공체적은 천공속도와 비트의 면적으로 정리할 수 있으며, 수식 5에서 다중 해머의 타격력은 상이한 드릴 비트의 크기로 표현된. 여기서, v_n은 천공속도, t는 작동시간, A_n은 천공직경임.

$$V_n = \nu_n \cdot t \cdot A_n = K \cdot t \cdot \frac{1}{D_n^2} \qquad \text{수식 5}$$

㉰ 확공기의 DTH 해머가 암반에 모두 접촉되어 있다고 가정하고 비트 구경 및 해머 개수에 대한 확공기의 비에너지는 아래 그림으로 표현됨. (Case 1 : 8인치 해머 2개, 6인치 해머 4개, Case 2 : 8인치 해머 3개, 6인치 해머 3개, Case 3 : 8인치 해머 4개, 6인치 해머 2개)

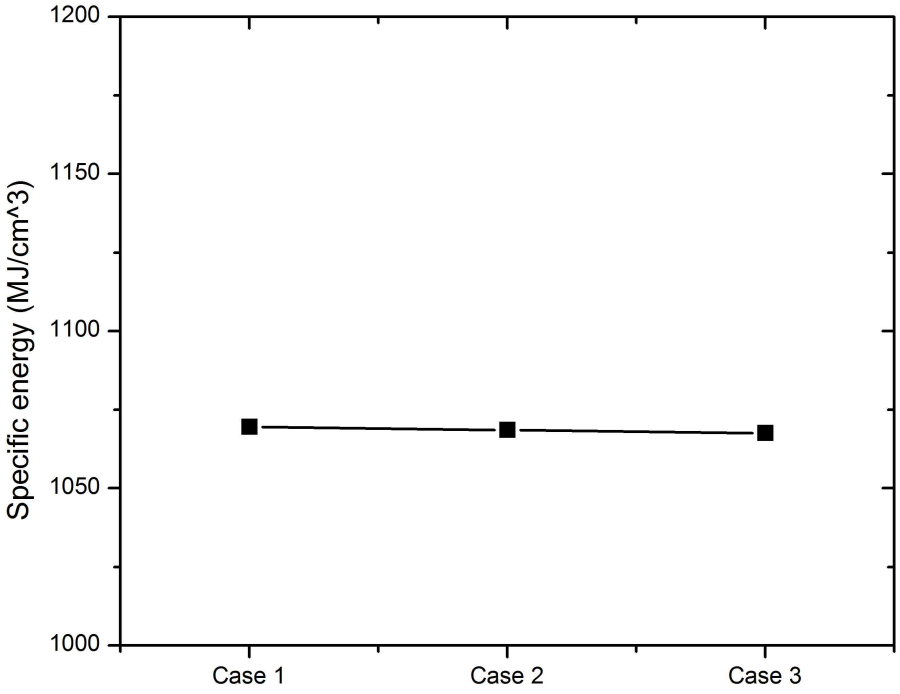


그림 19. 다중 DTH 해머의 비에너지 변화

㉱ 위의 결과(그림 19)와 같이 해머비트에 입력되는 공압에너지가 동일할 때 각 비트는 비슷한 타격에너지를 발산하므로 비에너지는 비트 크기에 상관없이 거의 유사함.

(나) 굴진성능예측을 위한 선형굴착시험

① 선형굴착시험 개요 및 원리

㉮ 본 연구개발기술에서 개발, 적용한 암반확공기는 4개의 DTH 해머를 장착한 다중공압 해머 방식임. 암반확공기는 장비운용 조건인 회전속도(RPM)와 공기압축기(Air compressor)의 공압(Air Pressure)에 의해 1회 타격 시 굴착량과 굴진속도가 영향을 받음. 따라서 해당 해머비트의 암반굴착 성능 및 최적 굴착조건을 규명하기 위하여 선형굴착시험을 수행함. 선형굴착시험은 TBM 디스크 커터 성능 평가 및 설계를 위해 널리 사용 중인 선형절삭시험(Linear cutting machine test)에 착안하여 개발함. (Bilgin et al.2006; Gertsch et al., 2007; Nilson and Ozdemir, 1993; Sanio, 1985; Snowdon et al,1982). 선형굴착시험에 사용된 에너지 대비 운용 조건별 굴착량을 계산하고, 이를 이용하여 최적 운용 조건을 산정함.

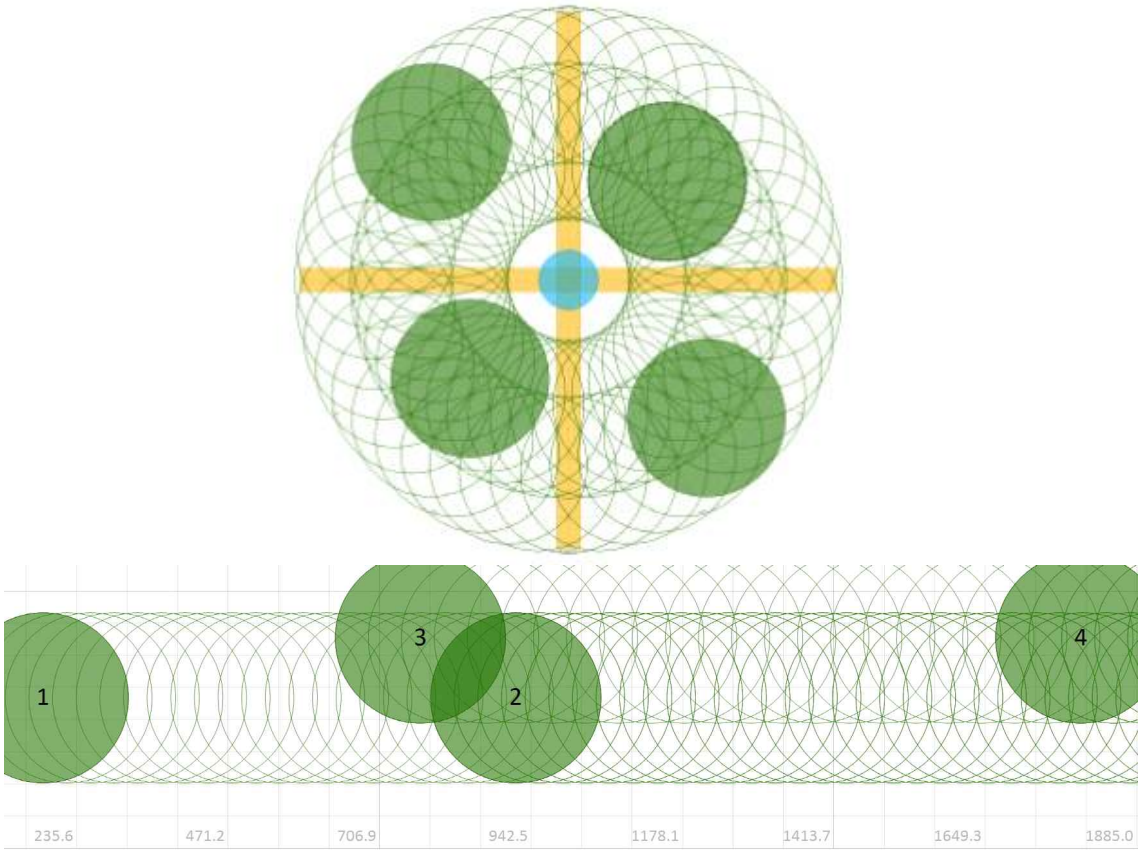


그림 20. 암반확공기(상)와 동일한 굴착 효과를 갖도록 설계한 선형굴착시험(하)
(RPM : 30, BPM : 1200 일 때)

㉯ 선형굴착시험은 회전하는 커터헤드에 장착된 해머비트가 암반을 굴착하는 효과를 알아보기 위해 수행함. 굴착시 해머비트의 타격중첩효과 등을 동일하게 유지하면서, 면판이 회전하며 타격하는 방식(암반확공기)이 아닌 해머비트가 선형으로 이동하면서 타격하는방식으로 진행됨. 그림 21은 암반확공기와 동일한 굴착 효과를 갖도록 설계한 선형굴착시험의 한 예를 보여줌.

㉰ 선형굴착시험에서 공기압축기 압력을 1200, 1800, 2400 kpa로 구분하여 현장에서 암반확공기 운용 시 공기압축기 투입 대수에 따른 영향을 조사함. 일반적으로 확공기 운용시 운용자의 주관적인 판단에 따라 중경암 이하의 암반인 경우 2대, 경암인 경우 3대 혹은 4대의 공기압축기를 사용함. 현장시험 전 암반등급에 따라 공기압축기의 최적 사용대수를 파악함. 일반적으로 사용되는 공기압축기 1대가 토출하는 최대 압력이 2400 kpa임을 감안하여, 2대의 공기압축기를 사용하여 확공기를 운용할 경우를 1200 kpa로 가정하고, 3대는 1800 kpa, 4대는 2400 kpa로 가정하여 선형굴착시험을 진행함.

- 타격 대상의 물리적 특성은 생성되는 파편 크기 및 균열 연결 등에 영향을 주고, 이에 따라 최적 타격 간격이 변화함(Kwon *et al.*, 2013). DTH 해머의 타격간격은 암반확공기의 회전속도(RPM)에 따라 변화하므로, 회전속도가 3, 4, 5 rpm 인 경우를 가정하여 실험함. 선형굴착시험 시스템에서는 회전운동이 불가하므로 회전속도를 선속도로 변환하여 시험편 이송속도를 변화시켜가며 시험함.

㉱ 공기압축기의 최적사용대수와 암반확공기의 최적회전속도는 선형굴착시험을 통해 구한 비에너지를 이용하여 산정됨. 비에너지는 단위체적을 굴착하기 위해 필요한 에너지를

의미하는 것으로 수식 6과 같이 표현된(Teale, 1965, Cho *et al.*, 2010). SE는 비에너지(specific energy)를 의미함. Input Energy(MJ)는 선형굴착시험에 사용된 공기압축기, 압입장비(pulling M/C) 등에 투입된 총 에너지량, Vcut은 사진측량을 통해 측정한 굴착 부피임.

$$SE(MJ/m^3) = \frac{Input\ Energy\ (MJ)}{V_{cut}\ (m^3)} \qquad \text{수식 6}$$

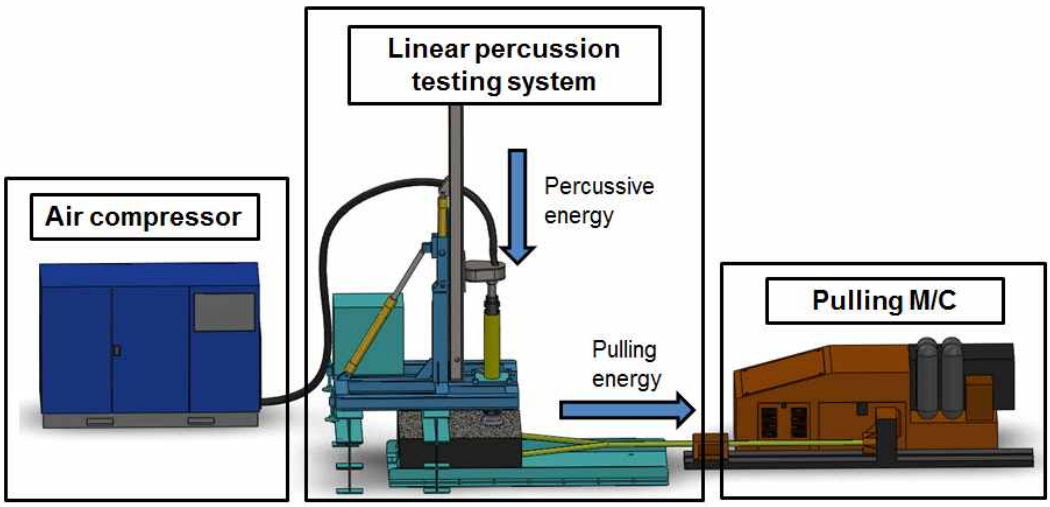


그림 21. 선형굴착시험 시스템 구성도

② 시험 방법

㉮ 시험 대상

선형굴착시험은 경암(화강암), 중경암(고강도 콘크리트), 보통암(일반 콘크리트)을 대상으로 수행함. 중경암, 보통암의 경우 1,000 ㎜ × 800 ㎜ × 600 ㎜ 크기의 암석블럭을 구할 수 없어 해당범위의 압축강도를 갖는 콘크리트 시편로 대체하여 시험을 수행함.

표 4. 시험편의 역학적 성질

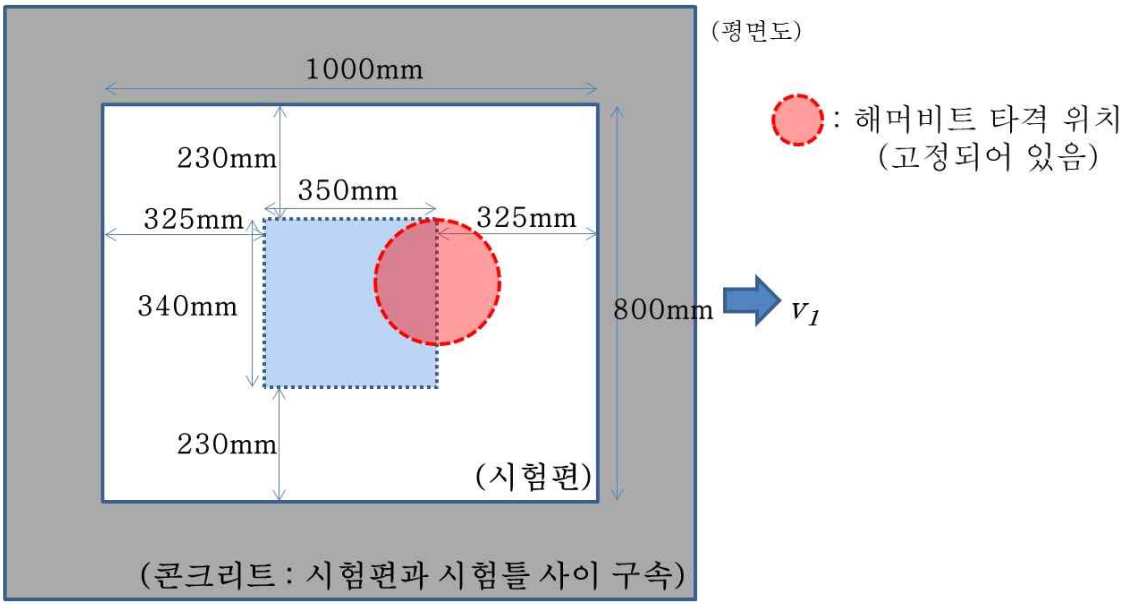
항목 \ 시험편 종류	황등 화강암	중경암 대용 고강도 콘크리트	보통암 대용 일반 콘크리트
단축압축강도 (MPa)	185	52	27
비중	2.64	2.21	2.17
공극률 (%)	0.83	10.70	12.49
P파 속도	3590	4370	4220
S파 속도	2290	2300	2250
영률 (GPa)	55.1	26.9	16.3
포아송 비	0.24	0.24	0.20

표 5. 국제암반역학회(ISRM)의 무결암 분류(1981)

용어	단축압축강도(MPa)
극경암 (very high strength)	240 이상
경 암 (high strength)	100 - 240
중경암 (medium strength)	50 - 100
보통암 (moderate strength)	25 - 50
연 암 (low strength)	5 - 25
극연암 (very low strength)	1 - 5

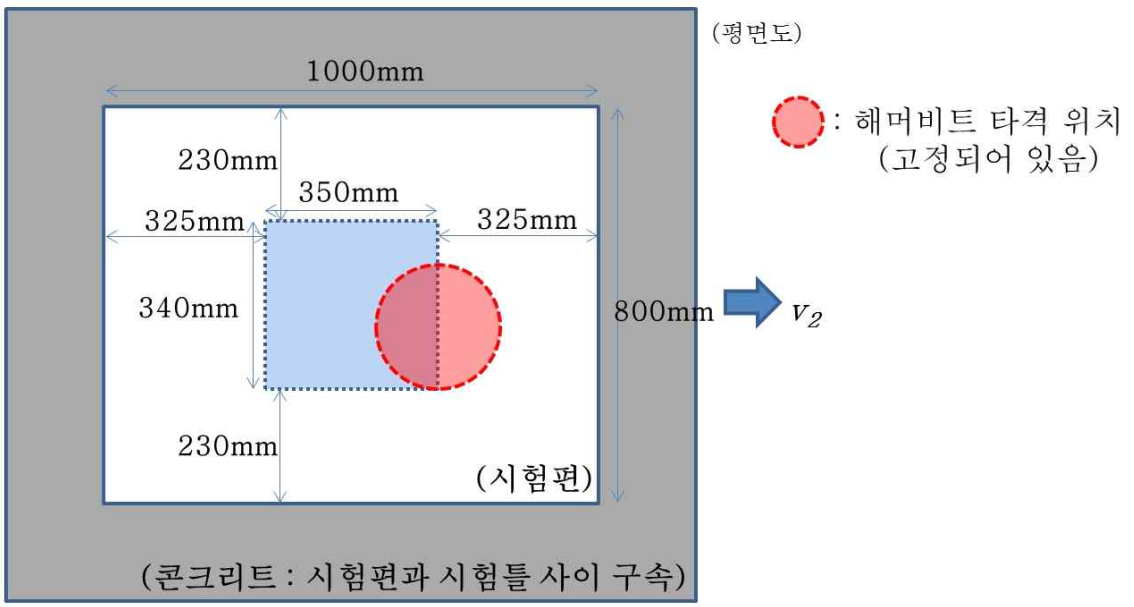
③시험 순서

㉮ 항타기로 타격(외곽 비트)



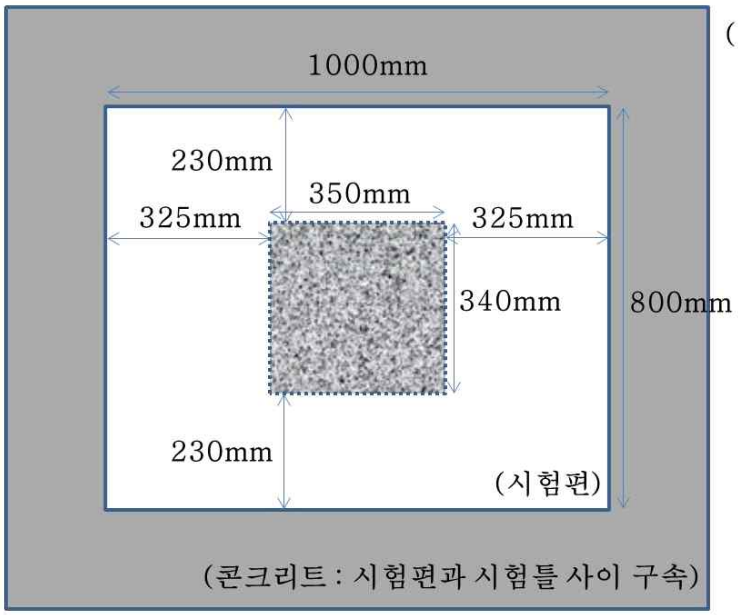
- 해머비트를 선형굴착시험 타격영역 시점에 위치시킨 후, 타격을 실시하며 v1 속도로 시료 박스를 직선 이동시켜 선형으로 타격시험을 수행함. (이 때, 시험시스템에서 해머비트 위치는 고정됨)

㉯ 항타기로 타격(내곽 비트)



- 해머비트를 시험 영역에 위치시킨 후, 타격을 실시하며 v2 속도로 시료박스를 직선 이동시킴.

㉰ 굴착부피측정



- 비트에 의해 굴착된 암석시편의 표면 영역에 대하여 Shapemetrix 3D를 이용한 굴착된 안반의 부피를 측정함. (3D Software & Measurement, 2007, Golden Software, 2004, Cho, 2010)

④ 시험 결과

㉮ 경암

표 6. 시험 조건에 따른 굴착 부피 및 비에너지 (경암)

시험 번호	확공기 회전속도 (RPM)	공기 압축기 압력 (kPa)	해머 타격 에너지 (J)	굴착 부피 (㎤)	비에너지 (해머비트) (MJ/㎥)
H12R3	3	1200	755	182	540
H12R4	4			148	495
H12R5	5			75	780
H18R3	3	1800	1189	350	538
H18R4	4			300	471
H18R5	5			209	539
H24R3	3	2400	1622	529	575
H24R4	4			463	493
H24R5	5			321	569

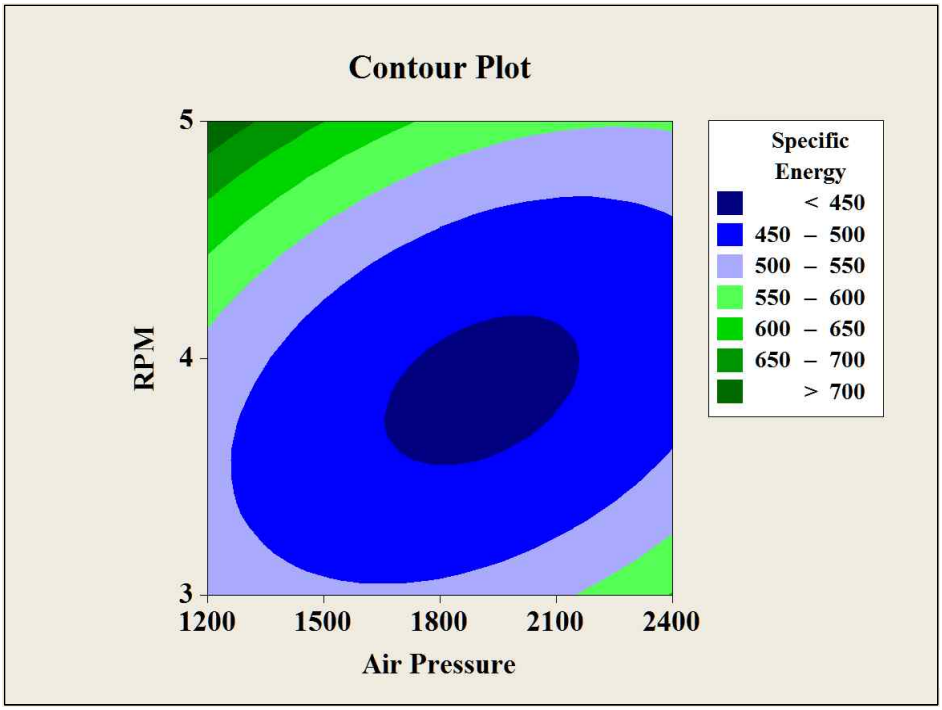


그림 22. 비에너지 vs (회전속도, 공기압축기압력)의 등고선도(경암)

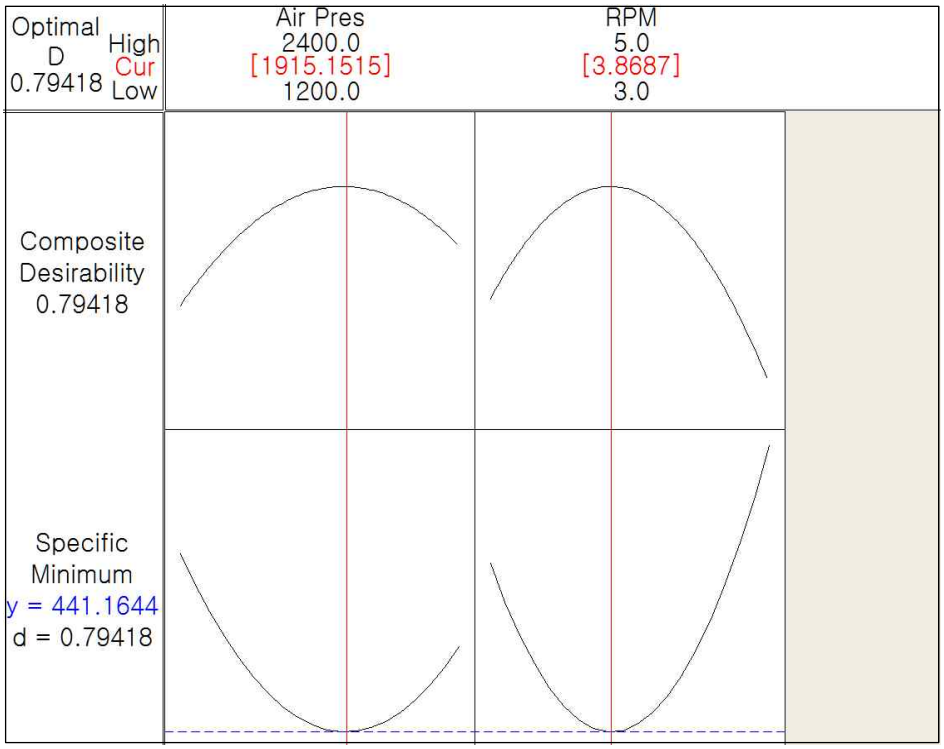


그림 23. 비에너지가 최소가 되는 최적의 공기압축기 압력, 회전속도 조합 (경암)

그림 23에 나타난 반응표면의 회귀식은 수식 7에 표현된. 경암에 대한 선형굴착시험으로 도출된 결과를 분석해 보면, 비에너지가 최소가 되는 최적의 공기압축기 , 회전속도 조합은 1900 kpa, 3.9 RPM으로 도출됨. 이 결과를 현장에 반영하면 공기압축기 3대, 확공기 회전속도를 4 RPM 내외로 운용하는 것이 실작 효율을 가장 증대시킬 수 있을 것으로 판단됨. 경암 다적시, 암석 내부의 균열 발생을 위해서 3대 이상의 공기압

축기가 투입되어야 하고, RPM을 낮은 수준으로 유지하며 조밀한 타격을 실시하여야 안반에 생긴 균열이 효율적으로 상호 연결되는 것을 의미함. 해당 조건으로 현장시험 운용시 최상의 굴진성능이 발현될 수 있을 것으로 분석됨.

$$Specific\,Energy = 1839.37 - 0.23 \times A_p - 608.68 \times RPM + 0.000165 \times A_p^2 + 104.2179 \times RPM^2 - 0.10319 \times A_p \times RPM$$

수식 7

㈏ 중경암

표 7. 시험 조건에 따른 굴착 부피 및 비에너지 (중경암)

시험 번호	확공기 회전속도 (RPM)	공기 압축기 압력 (kPa)	해머 타격 에너지 (J)	굴착 부피 (cm^3)	비에너지 (해머비트) (MJ/m^3)
ME12R3	3	1200	755	282	348
ME12R4	4			221	333
ME12R5	5			185	318
ME18R3	3	1800	1189	528	356
ME18R4	4			467	302
ME18R5	5			382	296
ME24R3	3	2400	1622	819	372
ME24R4	4			672	340
ME24R5	5			538	339

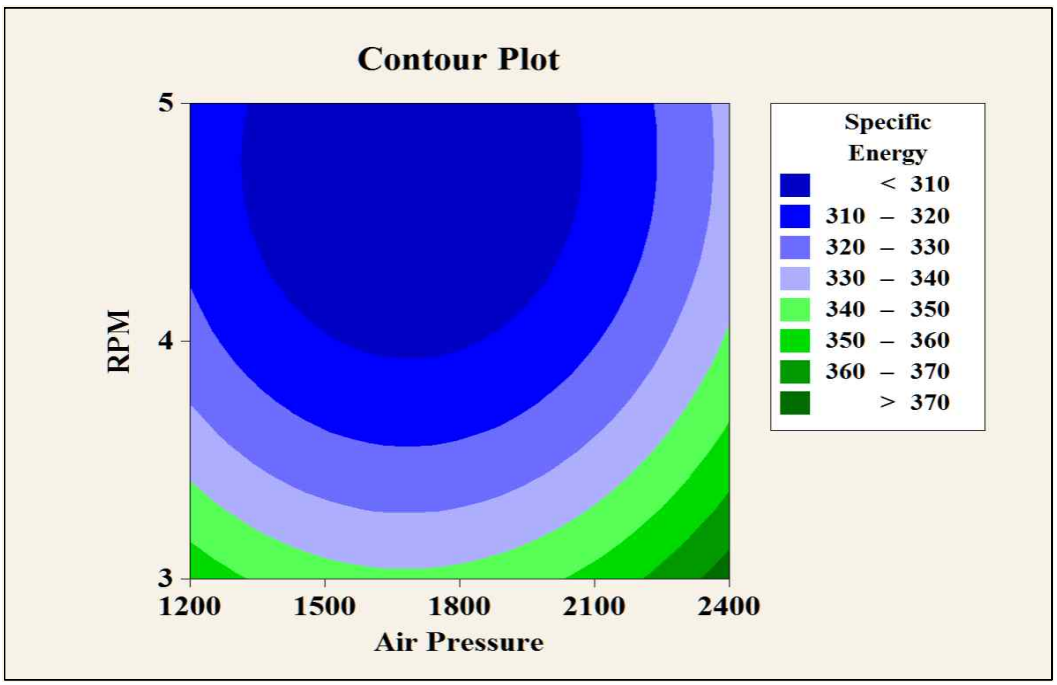


그림 24. 비에너지 vs (회전속도, 공기압축기 압력)의 등고선 선도 (중경암)

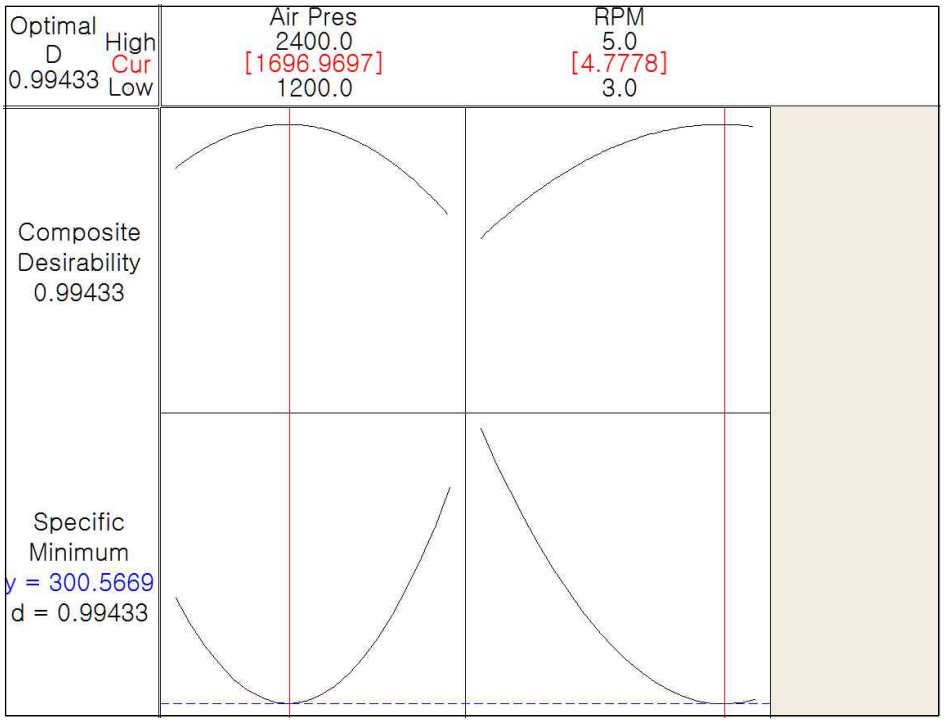


그림 25. 비에너지가 최소가 되는 최적의 공기압축기 압력, 회전속도 조합 (중경암)

- 그림 25에 나타난 반응표면의 회귀식은 수식 8에 표현됨. 비에너지가 최소가 되는 최적의 공기압축기, 회전속도 조합은 1700 kpa, 4.8 RPM임. 이 결과를 현장에 반영하면 공기압축기 3대, 확공기 회전속도를 5 RPM 내외로 운용하는 것이 에너지 소비를 최소화하고 굴삭 효율을 가장 증대시킬 수 있을 것으로 판단됨. 경암에 비하여 최적회전속도가 증가한 이유는, 암반 강도가 상대적으로 낮기 때문에 타격 간격을 증가시켜도 인접한 균열이 원활히 연결되기 때문임.

$$Specific\,Energy = 779.843 - 0.2156 \times A_p - 124.4569 \times RPM + 0.000065 \times A_p^2 + 13.2361 \times RPM^2 - 0.00105 \times A_p \times RPM$$

수식 8

㈐ 보통암

표 8. 시험 조건에 따른 굴착 부피 및 비에너지 (보통암)

시험 번호	착공기 회전속도 (RPM)	공기 압축기 압력 (kPa)	해머 타격 에너지 (J)	절삭 부피 (cm^3)	비에너지 (해머비트) (MJ/m^3)
M012R3	3	1200	755	389	252
M012R4	4	1200	755	303	243
M012R5	5	1200	755	245	240
M018R3	3	1800	1189	720	261
M018R4	4	1800	1189	576	245
M018R5	5	1800	1189	454	248
M024R3	3	2400	1622	1142	266
M024R4	4	2400	1622	860	265
M024R5	5	2400	1622	708	258

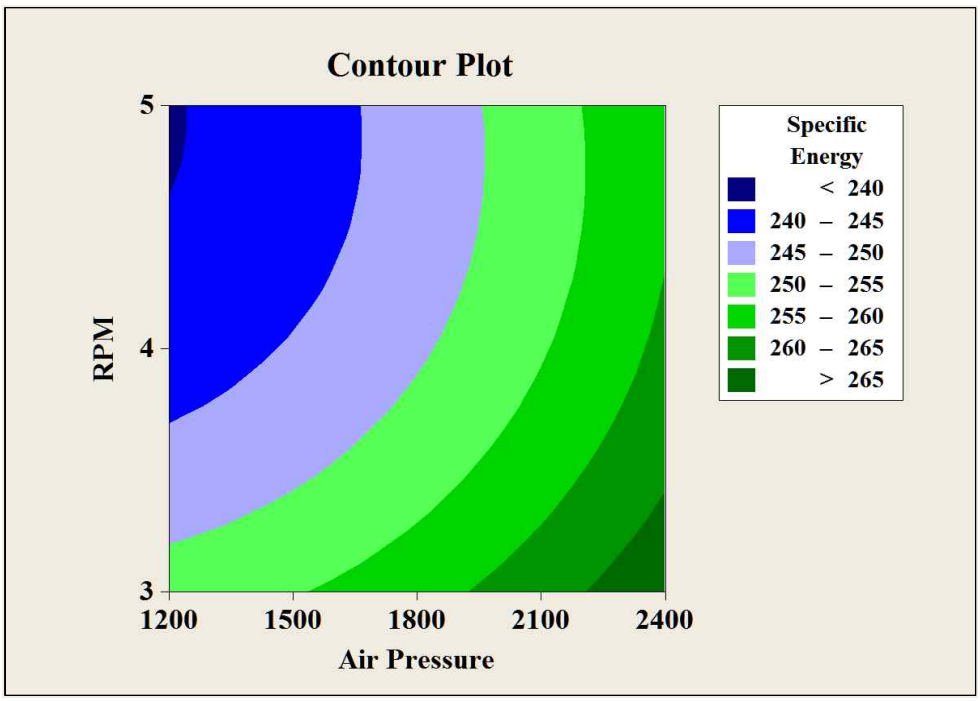


그림 26. 비에너지 vs (회전속도, 공기압축기 압력)의 등고선 선도(보통암)

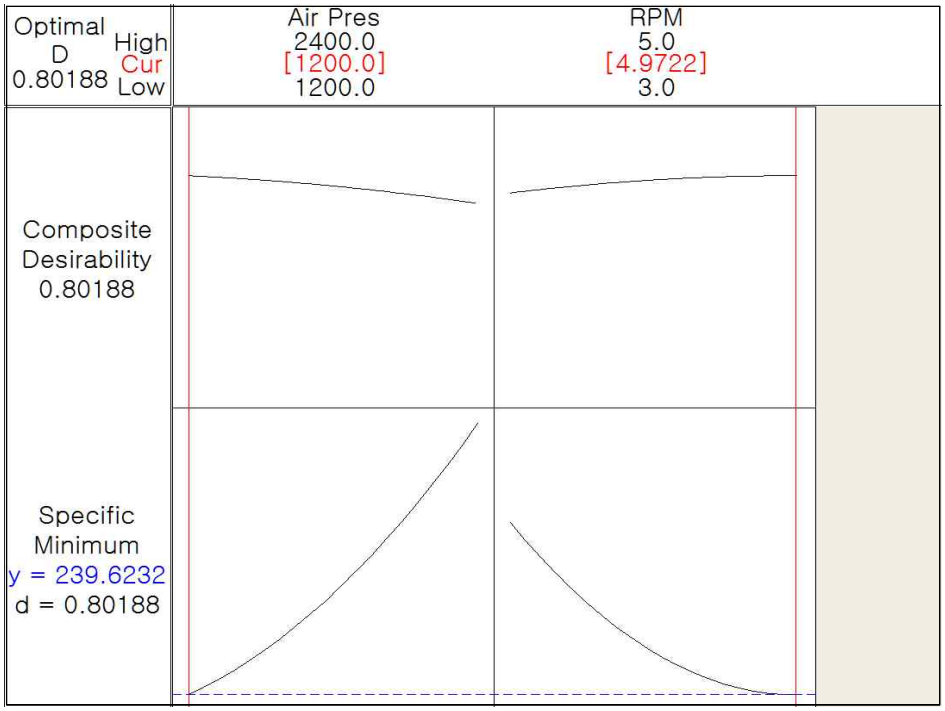


그림 27. 비에너지가 최소가 되는 최적의 공기압축기 압력, 회전속도 조합 (모통암)

- 그림 27에 나타난 반응표면의 회귀식은 수식 9와 같음. 비에너지가 최소가 되는 최적의 공기압축기 , 회전속도 조합은 1200 kpa, 5 RPM임. 이 결과를 현장에 반영하면 공기압축기 2대, 확공기 회전속도를 5 RPM 내외로 운용하는 것이 에너지 소비를 최소화하고 실작 효율을 가장 증대시킬 수 있을 것으로 판단됨. 경암, 중경암에 비하여 암반강도가 낮으므로 2대의 공기압축기 에서 토출하는 공압만으로도 안반을 파쇄하는 데에 충분한 타격에너지를 발생할 수 있고, 회전 속도가 5 RPM 일 때도 타격으로 인해 발생한 인접 균열들을 원활히 결합시킬 수 있기 때문임.

$$Specific\,Energy = 330.3759 - 0.01623 \times A_p - 34.5945 \times RPM + 0.000007 \times A_p^2 + 3.299 \times RPM^2 - 0.0015 \times A_p \times RPM \quad \text{수식 9}$$

⑤ 결론

㉮ 안반확공기 최적 운용조건

a. 최적운용 조건 예측

선형굴착시험 결과를 바탕으로 안반강도(UCS, Uniaxial compressive strength)와 최적 운용조건(공압수준, RPM)을 조사함. 암반강도와 최적 공압(P_{air})의 관계와 최적 RPM의 관계를 그림 25, 26에 각각 도시하고, 회귀분석 결과를 최적조건의 예측식으로 수식 10, 11과 같이 제안함.

$$P_{air} = 1920 - 2050 \cdot e^{-UCS/38.2} \quad (R^2 = 0.99)$$ 수식 10

$$RPM = 3.32 + 3.18 \cdot e^{-UCS/105.3} \quad (R^2 = 0.99)$$ 수식 11

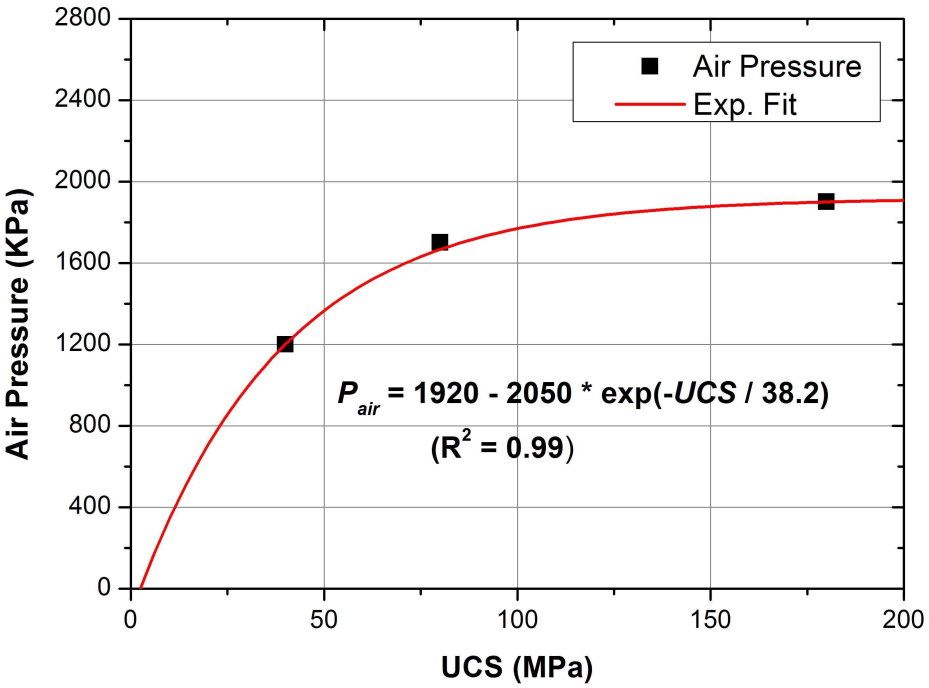


그림 28. 암반강도(UCS)와 최적 공압의 관계

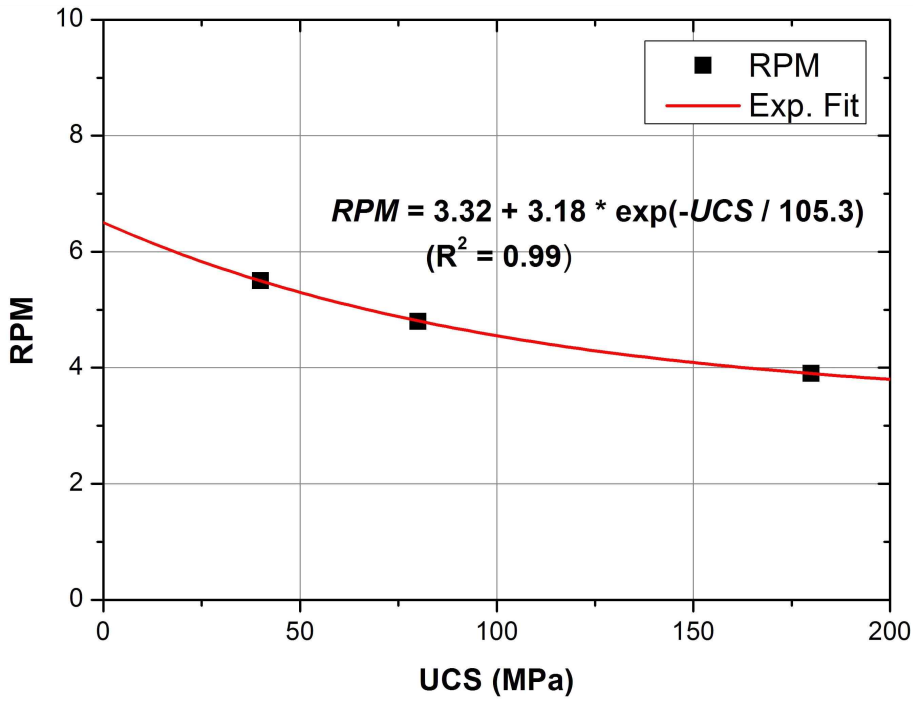


그림 29. 암반강도(UCS)와 최적 RPM의 관계

나. 암반확공기 설계/제조기술 개발(제조기술)

(1) 다중해머방식 암반확공기 1차 모델(CDH900) 제작

(가) 암반확공기(다중식 공압해머)의 설계도면(형상) 및 제원

① 본 신기술을 위해 설계/제작된 다중해머 방식 암반확공기 설계도면은 그림 30, 31에 도시한. 확공기의 외경은 900mm로 1m이하 소구경 유틸리티 터널용으로 설계된.

② 확공기 키더헤드에 4개의 해머비트가 장착되어 있으며, 공기순환식 압분배출을 위한 4개의 플러싱 채널(100A RC Pipe)이 확공기 전후방으로 연결됨.

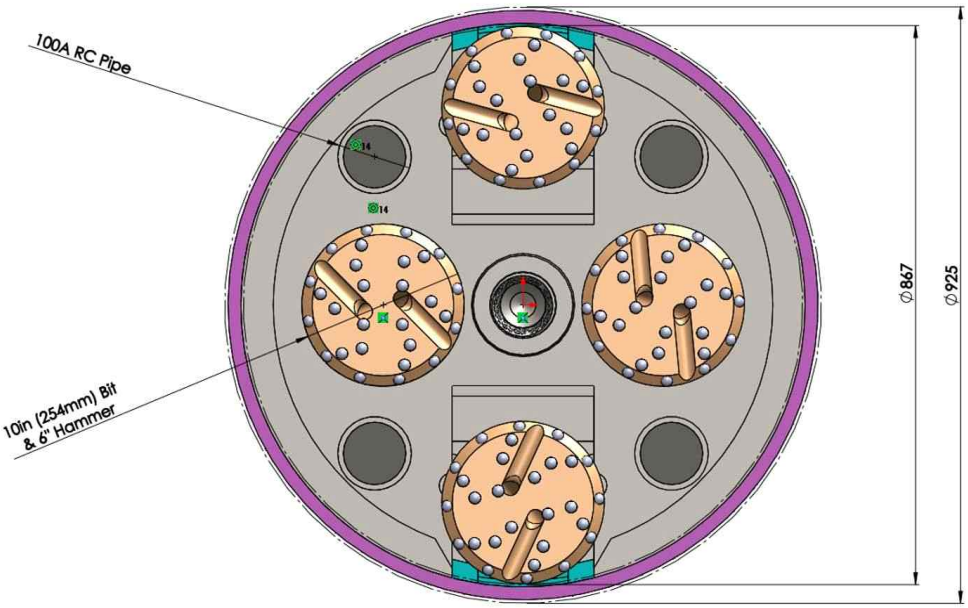


그림 30. 다중식 암반확공기 (정면도)

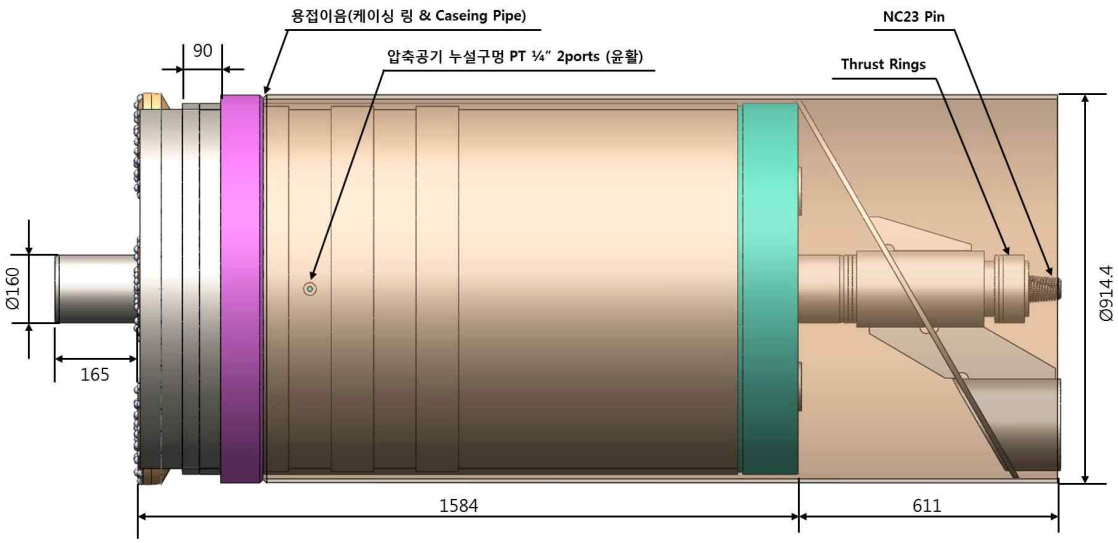


그림 31. 다중식 암반확공기 (측면도)

③ 본 확공기는 확공시 시공트러블 방지를 위해 파이프내 리턴이 되도록 제작한. 그림32와 같이 터널굴착시 최외각 해머비트 외부로 일부 돌출되어 직경 925mm의 터널이 확공된. 확공기 회수시 해머비트가 반경 내측방향으로 최대 29mm이동하여 직경 867mm까지 축소됨. 이처럼 확공기가 직경 방향으로 58mm까지 축소되어 파이프내 리턴이 가능하도록 설계됨.

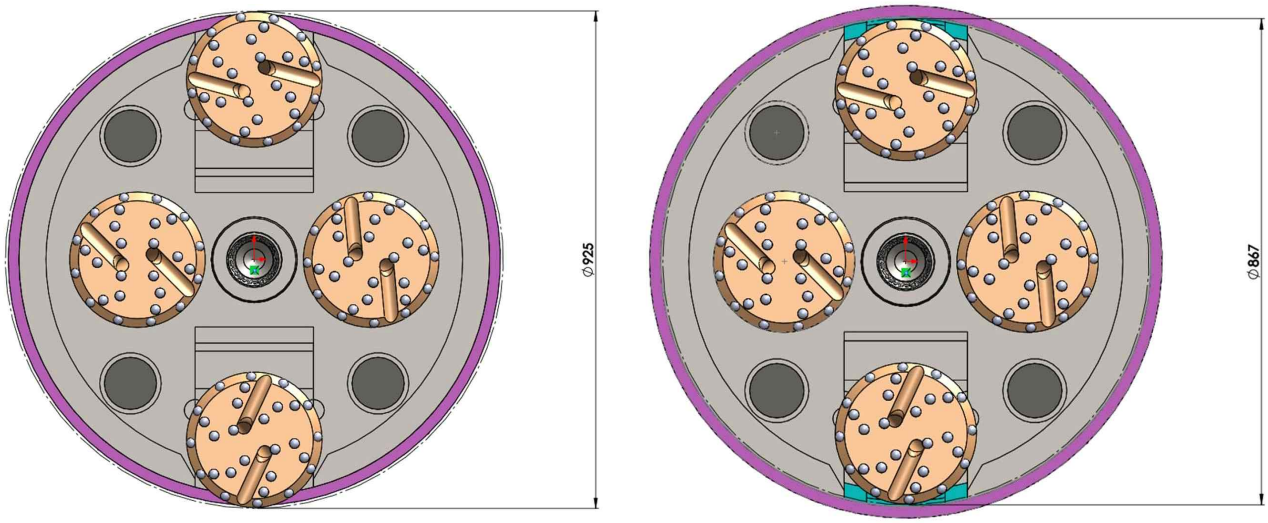


그림 32. 해머작동 시(좌), 회수 시(우) 비트의 반경방향 이동 설계도

④ 암반확공기의 측면도(그림 31)를 보면, 왼쪽의 해머비트 앞쪽의 돌출부는 압입장비와 연결되는 익스텐션 로드가 장착되어 확공기를 견인하는 역할을 함.

⑤ 연암, 풍화암, 파쇄대 등을 통과할 때는 막장면 붕락 및 터널상부 이완 시 확공기 Jamming을 방지하기 위하여 확공기의 커터헤드가 강관을 끌면서 굴진하도록 설계됨. 강관의 가장 앞부분인 케이싱 링은 암반면과의 마찰을 고려하여 특수합금 소재(SCM440)로 제작됨.

⑥ 강관(케이싱)과 확공기 사이의 윤활을 위해서 윤활유가 포함된 압축공기가 확공기 외부 케이스와 강관 사이로 누출되도록 2개의 누설구를 설계함.

⑦ 암반확공기의 후방에는 공급되는 공압과 함께 암분을 원활히 배출하기 위하여 경사판, 베어링, Thrust ring, 배출파이프를 설치함. 경사판의 각도, 배출파이프의 직경은 공기압축기 사용대수와 발생하는 암분의 양을 고려한 후 암분배출속도를 계산하여 설계해야 함. 본 기술에서는 공기압축기 2대 사용을 기준으로 CFD해석을 통하여 해당 설계인자를 결정함(Song *et al.*, 2015). 경사판의 각도는 27도, 배출 파이프의 직경은 97mm로 설계됨.

(2) 다중해머방식 암반확공기 2차 모델(CDH650) 시제품 제작

(가) 암반확공기 해머비트 부품설계/제조

① 확공기 해머비트의 성능을 분석한 후 본 사업목표를 달성하기 위하여 확공기 신모델을 개발함.

② 확공기 커터헤드 부분에 아래 그림 33,34와 같은 5인치 DTH해머, 6인치 비트 4기를 부착하여 천공효율을 극대화함.

㉮ 암반확공기 제작에 필요한 다중해머를 개발하기 위하여 복수개의 환봉재료를 가공/조립하여 DTH 해머부품을 제작하였다.

㉯ 복수개의 공압식 DTH 해머를 부착하여 암반확공기가 제작됨. 해머전방부에는 비트가 일체형으로 부착되어 암반을 직접 타격하며 암반을 확공함.

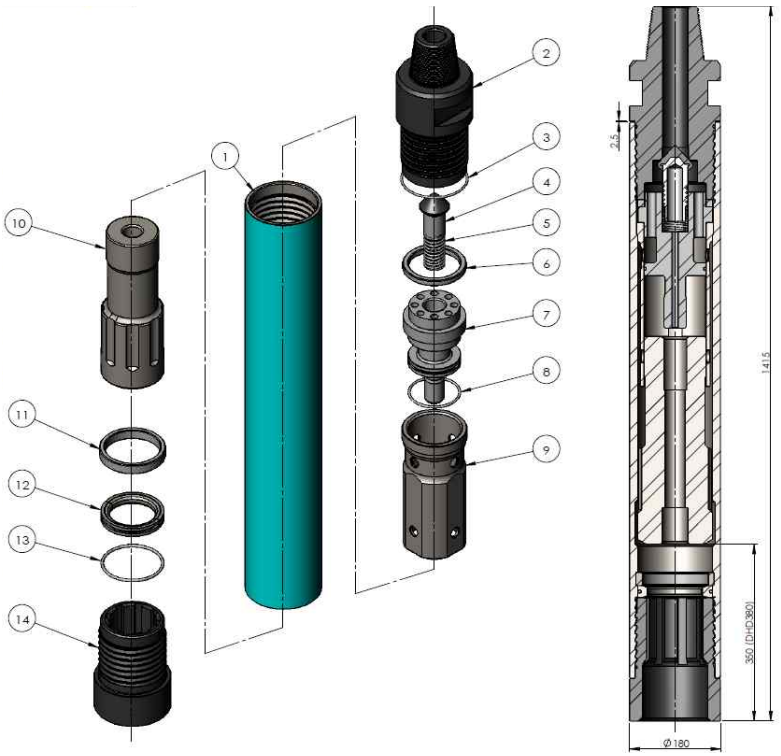


그림 33. DTH 해머의 부품분해도



그림 34. 6인치 비트

(나) 암반확공기 내부설계/제작

① 합금 철판 및 특수환봉 재료로 해머비트를 제외한 확공기 내부가 구성됨.

② 본 과제에서 암반확공기의 내부 구성 재료인 철판 및 환봉재료를 구입/가공하여 CDH650 확공기를 제작하고자 함.

㉮ 재질: 내부구성 재료인 환봉 및 철판은 각각 SNCM8, SM45C 2가지 재질로 설계됨.

㉯ 확공기 작동성능: 작동압력 150 bar 이상, 타격빈도 18 bps이상, 타격에너지 900J 이상, 적용대상 에어컴프레서 - 350 psi 이상.

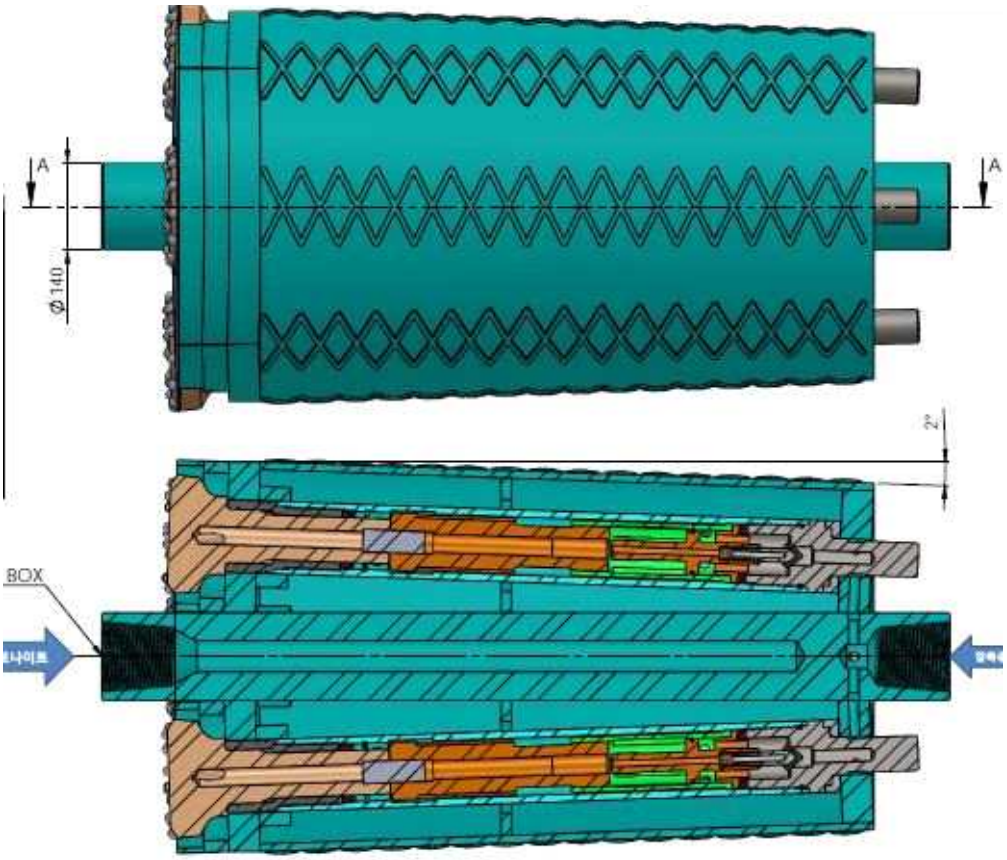


그림 35. 암반확공기(CDH650 #1 모델)의 내부단면

(다) 암반확공기 신모델 외형 설계/제작

① 암반확공기 2015년 신모델 (모델명: CDH650)를 개발하기 위하여 확공기 커터헤드, 케이스 재료구입 및 가공(보링, 부착, 조립)을 진행함.

㉮ 암반 확공기의 4개의 DTH해머비트의 장착을 위한 커터헤드 삽입홈을 가공함.

㉯ 확공기의 외형을 완성하기 위하여 외부 케이스 대형보링 및 제작 가공한.

② 세부 재료 및 제작 내역

㉮ 커터헤드: 외경 650mm의 합금소재로 구성되며, 4개의 해머비트 삽입홈과 압분배출 외부 유로가 가공됨.

㉯ 케이스: 대형보링 가공을 통해 외경 650mm에 맞춰 가공되며, 마모방지를 위한 용접비드가 추가됨.

㉰ 케이스 외부 스크류: 압분배출을 원활하게 하기 위한 스크류가 외형에 4개 장착됨.

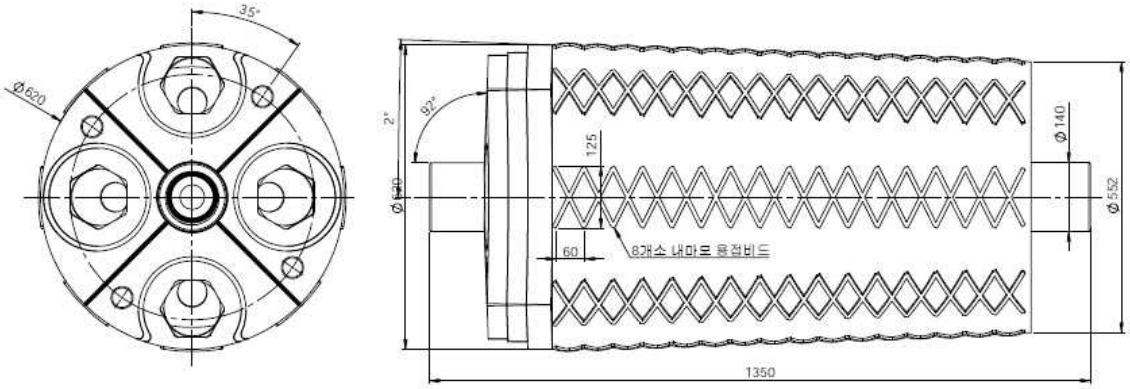


그림 36. 커터헤드의 해머비트 삽입홈 규격 및 비드의 형상

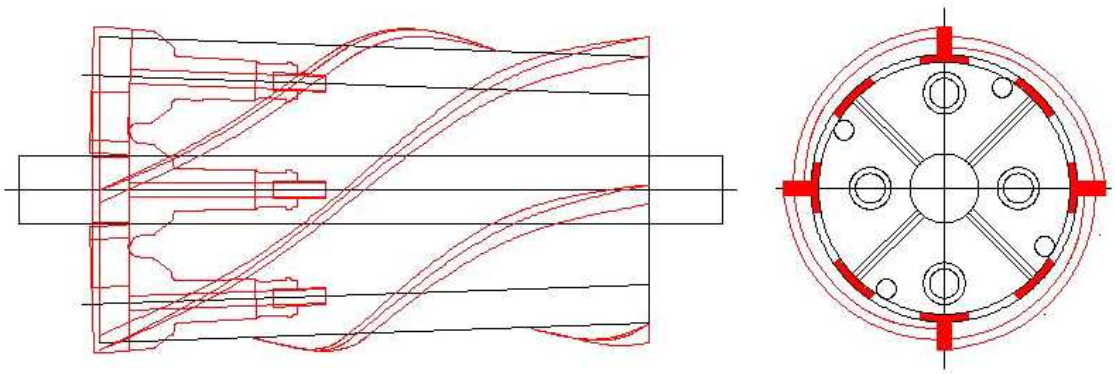


그림 37. 압분배출을 위한 케이스 외부 스크류 가공 및 부착 도면

다. 암반확공 현장시험

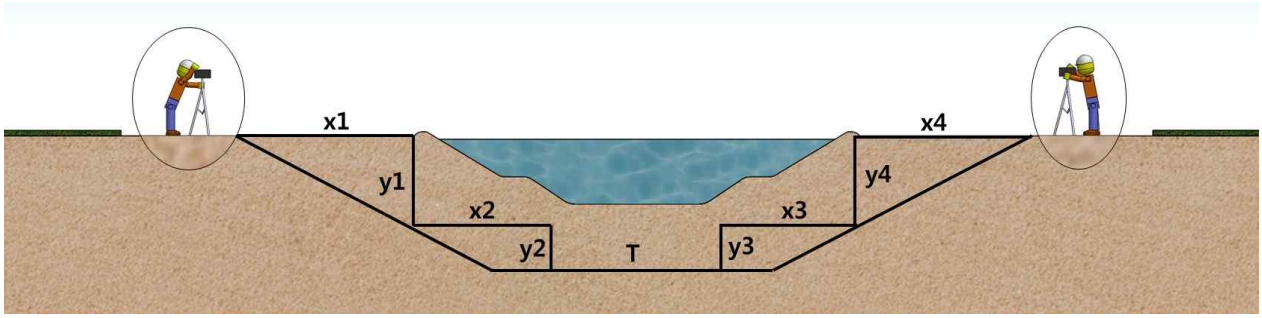
(1) 암반확공 현장시험 개요 및 실차

(가) 경기도 여주시에서 총 2회의 현장시험 시공을 실시함.

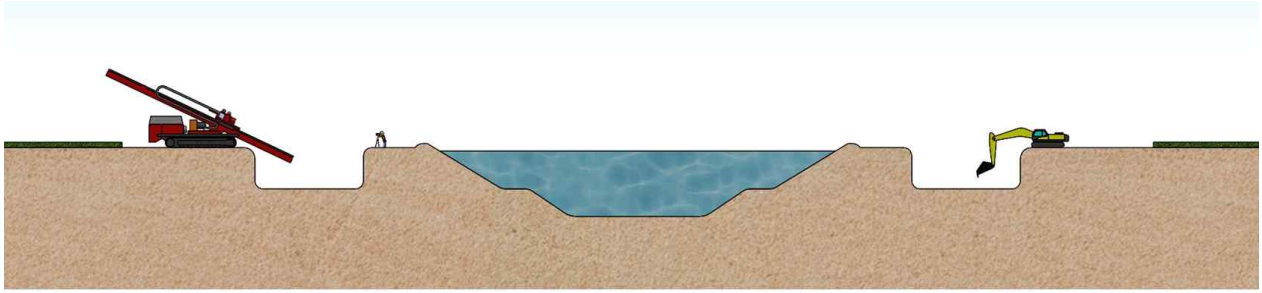
① 선 천공(슈팅공정)을 수행하여 소형 천공홀을 형성한 후, 반대편에서부터 암반확공기를 견인하며 확공 시험을 수행함.

② 세부 단계는 아래 그림과 같이 총 4개의 스텝으로 시공순서가 진행됨.

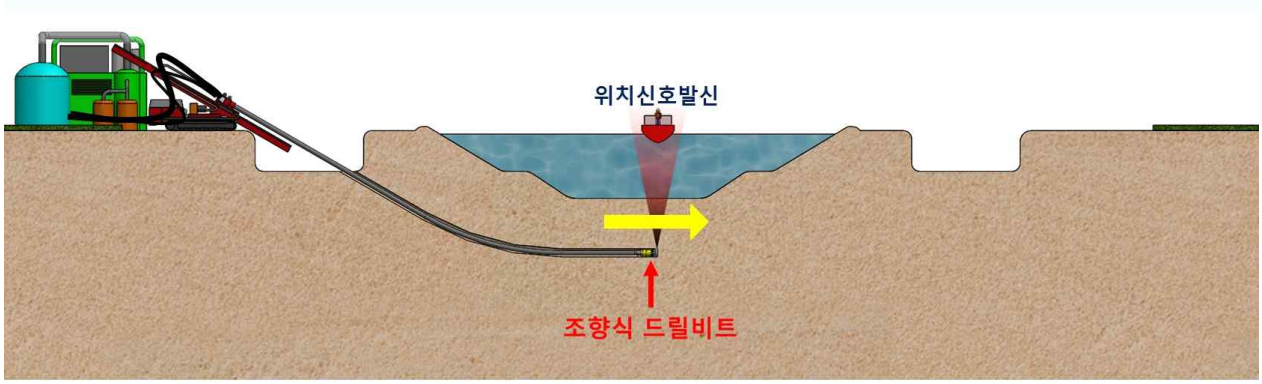
STEP#1 천공계획 및 좌표수립



STEP#2 작업장 (시작부, 도달부) 정리 및 장비 세팅



STEP#3 슈팅공정



STEP#4 확공작업

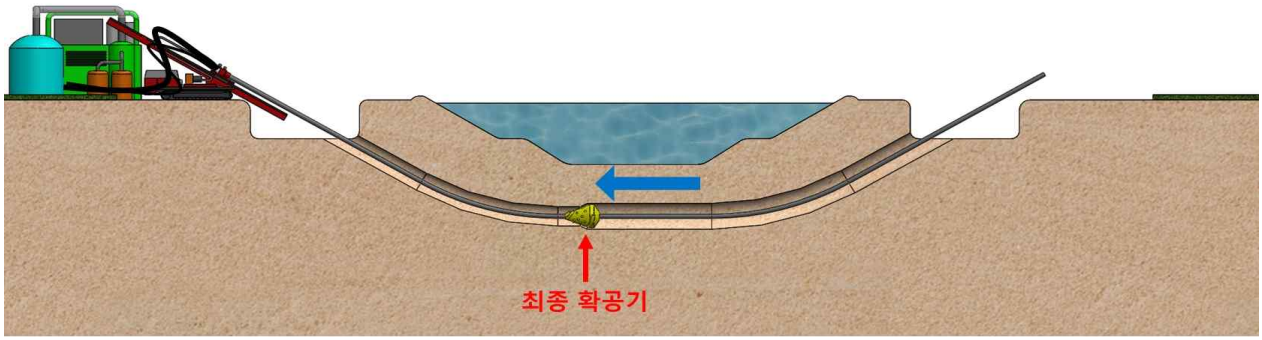


그림 38. 암반확공 현장시험 시공순서

(2) 현장시험시 사용장비

(가) 신보텍 암반확공기(CDH650)의 성능검증 현장시험시 사용된 장비를 아래 표에 정리함.

<현장시험 시 사용한 장비 목록 및 규격>

구분	제조사 규격 (용량)	사용 목적
굴삭기	Volvo, 두산 등 21톤, 30톤	시공 환경 조성을 위한 지반정리 등
Horizontal Directional Drilling Rig	Jiangsu Goodeng Engineering Machinery assembling.co.LTD 45TON	슈팅 및 확공작업
카고크레인	기아자동차, 현대자동차 5톤	확공기 등 중량물 운반 및 설치
에어 컴프레서	Ingersoll Rand, Atlas Copco 등 900CFM	확공기에 장착된 DTH hammer의 타격을 위한 공압 공급
스위블 조인트 (swivel joint)	Jiangsu Goodeng Engineering Machinery assembling.co.LTD 100TON	확공기 후미에 연결되는 로드와 공압 공급 호스의 연결부에 장착하여, 확공기 회전 시 발생할 수 있는 꼬임 현상 방지
익스텐션 로드	Jiangsu Goodeng Engineering Machinery assembling.co.LTD Φ86㎜	HDD 장비의 회전력을 확공기에 전달.
확공기	창신인터내셔날(주) Φ650 ㎜	터널 시공을 위한 암반 굴착
Mud-Pump	Jiangsu Goodeng Engineering Machinery assembling.co.LTD 1200L/min	확공 시 슬러지 배토
Mud Motor Package (sonde housing, tricon bit-8 1/2 IADC637 bit 포함 일체)	Jiangsu Goodeng Engineering Machinery assembling.co.LTD 5 inch.	슈팅 시 사용

(3) 안반확공기 굴진율 산정

(가) 기계식 굴착장비(TBM 등)의 굴진율 산정방법

① 굴착장비가 지반을 굴착할 때, 지반을 굴착하는데 소요되는 시간이외에도 장비의 문제 발생으로 인한 작업정지 및 장비의 유지보수를 위하여 많은 시간이 요구됨. 이에 따라 굴진율은 순 굴진율(Penetration Rate, PR)과 총 굴진율(Advance Rate, AR)로 구분됨.

② 순굴진율은 순수하게 지반을 굴착하는데 소요된 시간 대비 굴착거리를 의미하며 수식 12와 같이 표현됨. 반면 총 굴진율은 총 소요된 작업시간 대비 굴착거리를 의미하며 수식13과 같이 표현됨.

③ 굴진율의 단위는 일반적으로 m/day를 사용하며 순 굴진율과 총 굴진율의 단위가 같을 때, 둘의 비율은 수식 14와 같이 장비의 가동율(Utilization, %)을 의미함. 순굴진율은 지질학적구조나 지반의 불성에만 영향을 받는 값이며, 총 굴진율은 현장에서의 작업조건에 추가적인 영향을 받음.

$$\text{굴진율}(PR) = \frac{\text{굴착거리}}{\text{굴착시간}} \qquad \text{<수식 12>}$$

$$\text{총굴진율}(AR) = \frac{\text{굴착거리}}{\text{총작업시간}} \qquad \text{<수식 13>}$$

$$\text{가동율}(U,\%) = \frac{AR}{PR} \times 100 \qquad \text{<수식 14>}$$

④ 순 굴진율은 수식 15와 같이 다시 확공기의 회전수에 대한 함수로 변환됨. P_{rev}는 확공기 1회전당 굴진거리를 나타내며 단위는 mm/rev 이고, RPM은 확공기의 분당 회전수로써 단위는 rev/min인.

$$P_{rev} = \frac{1000 \times AR}{24 \times 60 \times RPM} \qquad \text{<수식 15>}$$

(4) CDM 900 암반확공기 자체 현장시험(1차년도 수행실적)

① 현장시험 수행 전경



확공 중 터널 막넘



확공 중 막장넘



확공기 출구 도달



완성된 터널 모습

② 암반강도 평가

- 사전 조사된 지질조사와 시추코어를 대상으로 일축압축강도시험을 수행하였음. 해당 결과에 따르면 본 현장시험 부지 대상 암반은 경암과 중경암 2개 암반등급이 존재하는 것으로 판정됨.

(1)

TABLE OF TEST RESULT : UNIAXIAL COMPRESSION

용 역 명 : 암반확공기 오학동 현장시험 중 수륜코어분석 (경기도 여주시 오학동, 2015년 04월)

Sample Number	Rock Type	Specific Gravity	Porosity (%)	Size of Specimen D x L (mm)	Wave Velocity (m/sec)		Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Depth (m)
					P wave	S wave				
BH - 0		2.79	0.40	50.2 x 122.7	5400	2980	160	85.6	0.12	1
BH - 1		2.68	0.98	50.5 x 98.2	5280	2810	140	60.1	0.22	1
BH - 2		2.69	1.00	50.6 x 92.8	5270	2800	105	56.9	0.19	1
BH - 3		2.67	1.54	50.6 x 117.8	4590	2680	60	29.5	0.30	1
BH - 4		2.70	1.21	50.6 x 107.5	4760	266	88	47.6	0.23	1

ROCK MECHANICS LABORATORY, DEPARTMENT OF ENERGY SYSTEMS ENGINEERING, SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

그림 39. 현장시험 암반강도 공인시험 성적서(경암, 중경암)

③ 굴진율 측정

경암구간과 중경암 구간의 순굴진율을 측정함. 본 현장시험은 연구조사로서 사업비의 한계로 자동화 장비를 도입하지 못했기 때문에 다운타임 및 가동률을 고려하지 않고, 순굴진율만을 조사함.

표 9. 암반등급에 따른 굴진율

암반등급 (Rock Class)	압축강도 기준 (UCS, MPa)	평균 암반강도 (MPa)	굴진 거리(m)	굴진율 목표 (m/hr)	순굴진율 (m/hr)
경 암 (High strength rock)	100 - 240	140	18	0.80	0.75
중경암 (Medium strength rock)	50 - 100	75	9	1.00	1.01

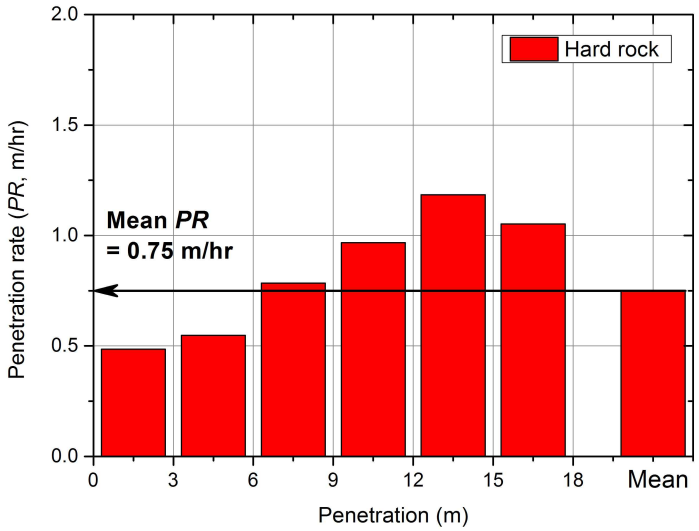


그림 40. 경암구간의 굴진율 그래프

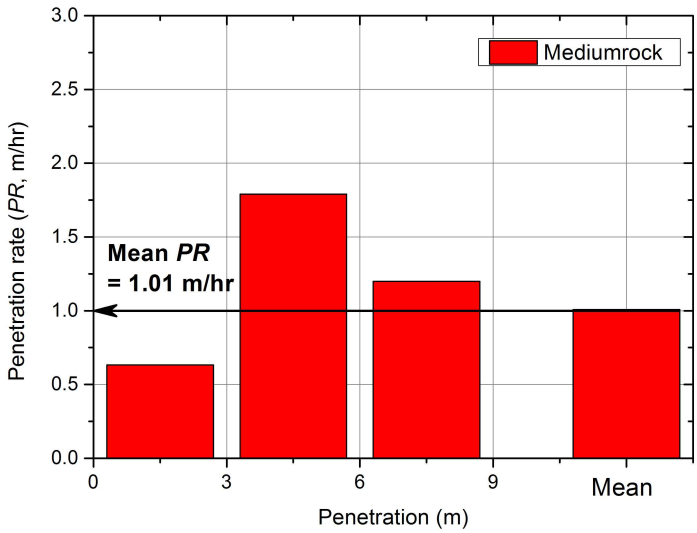


그림 41. 중경암구간의 굴진율 그래프

현장시험 결과, 경암의 순굴진율은 0.75 m/hr, 중경암의 굴진율을 1.01 m/hr로 도출되어 경암의 경우 당초 목표치보다 약 6% 미달되는 것으로 조사됨.

- 그러나, 본 일반확공시험에서 사용된 장비는 토사용 압입장비로서 선형굴착시험에서 조사된 최적 운용조건을 적용하는 것이 불가능하였음. 또한 장비의 오퍼레이터의 숙련도에 따라서 순굴진율을 편차가 큰 것으로 조사됨. 실제로 그림 40에서 보는 바와 같이, 터널굴진이 진행됨에 따라 굴진율을 지속적으로 상승하는 양상이 확인됨. 이것은 오퍼레이터의 숙련도가 향상되면서 발생한 현상으로 분석됨.
  본 과제에서 도달한 순굴진율 0.75 m/hr는 숙련도에 따라 최고 1.2 m/hr까지 상승할 수 있을 것으로 판단됨. 본 과업의 최종목표인 유틸리티 터널시공 상용화에 무난히 활용될 것으로 기대됨.

④ 선형굴착시험을 통한 굴진율 평가

- 상기 토사용 압입장비를 이용하여 수행한 현장시험의 결과는 최적 운용조건이 반영되지 않았음. 현장시험에서 획득한 데이터를 바탕으로 암반강도, RQD, 확공기에 사용된 해머식경에 따른 확공기의 굴진율(Drilling rate, DR)을 경험식으로 예측함.
- 현장시험을 통해 측정한 값은 표 10에 기록함. 이를 통해 수식 16와 같은 회귀식을 도출함. 그림 42는 확공기에 사용된 해머의 회귀표면과 측정값임. 기존의 측정값과 회귀식을 통해 작성한 회귀표면이 유사한 형태로 나타남.
- 회귀분석으로 예측된 굴진율은 경암 0.89 m/hr, 중경암 1.10 m/hr로 계산되어 당초목표를 초과 달성할 수 있을 것으로 평가됨.

표 10. 시험 조건에 따른 굴진율 평가

시험차수 (시험장소)	암반등급	현장암반강도 (MPa)	RQD (%)	해머직경 (인치)	굴진율 목표 (m/hr)	순굴진율 (m/hr)	달성도 (%)
현장시험 (여주)	경암	140	61	6	0.80	0.89	110%
	중경암	75	90	6	1.00	1.10	110%

$$PR(m/hr) = \{1.002599 - (RQD \times UCS)^{0.0002532648}\} \times Hammer^{4.402058} \quad (R^2 = 0.96)$$ 수식 16

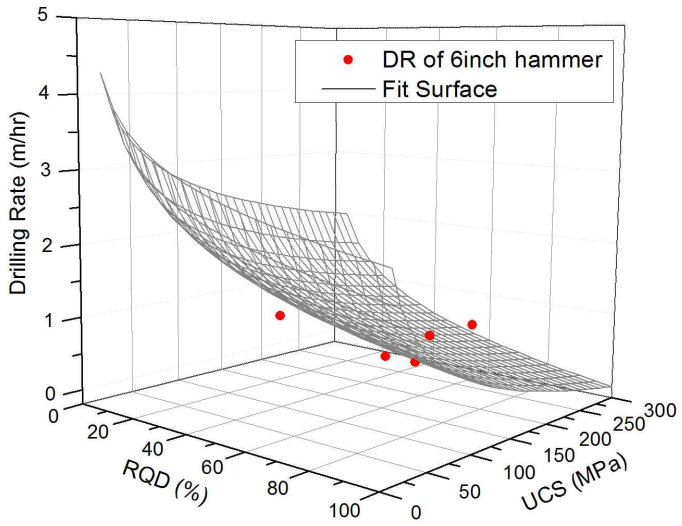


그림 42. 확공기의 굴진율 회귀표면과 측정값

(5) CDH 650 암반확공기 자체 현장시험

(가) 자체 시험시공 목적

① 2015년 1차년도 현장시험시공 결과에서 나타난 문제점(ex: Drill Rig와의 호환성, 압입장비 구동능력, 탈/장착에 따른 Down Time 실감, 암반확공기 경량화 등)을 극복하기 위해 암반확공기를 D650으로 보완 설계/제작하였음. 2차년도 현장시험 전 암반확공기의 성능 및 굴진효율성, Bit의 마모도 및 배토의 성능 등을 파악하여 개선/보완하고자 연구기관 자체적으로 현장시험시공을 실시함.

② CDH 650 #1암반확공기의 2차년도 현장시험에 앞서 그 동안 우려되었던 해머bit의 공압에 의한 타격 중 파쇄식 충현시 Bit 사이의 공간에 파쇄식의 끼임 현상으로 Bit의 타격력이 감소하는 현상이 일부 발견되었음. 또한, 수직천공에서와 달리 Pilot Hole 형성으로 인하여 공압이 분산됨에 따라 역순환 방식의 배토가 원활하지 않아 우선적으로 굴진율, bit의 마모도 측정 및 배토의 성능 등을 파악하기 위하여 간이 시험시공을 실시함.

(나) CDH 650 #1 암반확공기

① 암반확공기 규격 : 직경 650mm 암반확공기(모델명: CDH 650 #1)

② 해머비트 규격: 5인치 해머, 6인치 비트, 각 4개

③ 1차년도에 현장시험에서 발생한 문제점등을 감안하여 D650 암반확공기의 선단과 후단을 약 2%의 경사를 두어 원뿔형태로 제작함.

(다) 전력선뿐만 아니라 가스관 또는 에너지 수송관에도 적용가능성을 파악하기 위하여 다음과 같은 품명으로 연구기관 자체 현장시험을 실시함.

① 시험품명 : 에너지수송관 시공을 위한 직경 650mm 암반확공 1차 현장시험
(연구기관 자체 현장시험)

② 시험장비 : 신모델 암반확공기(CDH 650 #1)

③ 시험장소 : 경기도 여주시 오학동 일원

④ 시험일시 : 2015년 9월 16일 ~ 2015년 9월 23일 (8일간)

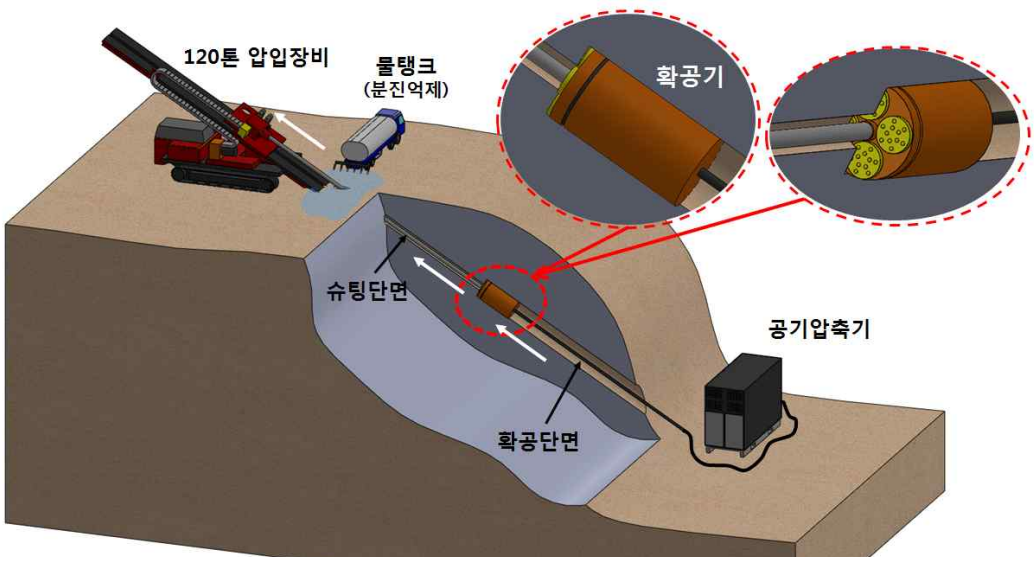


그림 43. 암반확공 현장시험 개념도

(라) 현장시험 세부내역

① 현장지질: 풍화암, 연암을 포함한 암반

② 시공거리: 20~40m

③ 작업순서: 디파기, 압입장비 안착, Pilot Hole 구축, 암반확공, 장비철수, 현장정리

④ 현장시험시공 동원장비목록은 표 10에 기록함.

표 11. List of construction machinery used in field test

Category	Manufacture / Capacity	Purpose
Excavator	Volvo, Doosan etc. / 21 tons, 30 tons	Ground flattening and etc. to conduct test easily
Horizontal Directional Drilling Rig	Hanjin D&B / 120 tons	Drilling pilot-hole and operating cluster-hammer reaming machine
Crane	Kia, Hyundai / 5 tons	Transportation and installation heavy machineries such as cluster-hammer reaming machine
Air compressor	Ingersoll Rand, Atlas Copco etc. / 900CFM	Supply air pressure to percuss on DTH hammer in cluster-hammer reaming machine
Swivel joint	Own manufacturing / φ127 ㎜	To prevent getting twist extension rod with air hose which are connected behind of cluster-hammer reaming machine
Extension rod	Hanjin D&B / φ160 ㎜	Connection between HDD rig and reaming machine
Cluster-hammer reaming machine	Chang-Shin international / φ650㎜	Rock drilling for tunnelling
Mud-Pump	Hanjin D&B / 1200 L/min	Flushing slurry during reaming process
DTH hammer bit	Chang-Shin international / 6 inch	Drilling for pilot-hole



그림 44. CDH 650 #1 암반확공기

(마) 현장 시험전경



확공기 안착



확공드릴구 압입장비



확공 시작



확공 중



터널 관통



완성 터널

(바) 자체현장시험 결과 문제점 및 개선(대안)점

① 풍화암과 연암이 혼재된 지반에서의 CDH D650 #1 암반확공기의 암반확공을 실시하였음. 암반확공기의 성능, Bit의 마모도 및 배토의 성능 등을 판단하기 위한 부분적인 현장시험으로 공압 에너지에 의한 암반다격 및 확공/굴진능력은 확인되었음.

② 시험시공 문제점

㉮ 해머비트의 다격 중 파쇄식 출현 시 비트 사이의 공간에 파쇄식의 끼임 현상이 다시 발견.

㉯ 비트의 다격력이 다소 저하.

㉰ 수직천공에서와 달리 Pilot Hole 로 인하여 공압이 분산됨에 따라 역순환 방식의 배토가 원활하지 않아 배토의 성능이 일부 저하.

③ 개선(대안)선

㉮ 2차년도 현장시험시공에 투입되는 암반확공기(CHH 650#2)에 Bit간의 유격 및 확공기 본체와 Bit의 체결 방식에 추가적 검토.

㉯ 비트 사이의 공간에 파쇄석의 끼임 현상 등으로 비트의 다걱럭이 감소에 비트의 체결 방법 및 형상의 개선.

㉰ 해머비트는 4개의 부채꼴 모양의 비트로 구성 된 대형 비트식 커터헤드 형태로 수정/보완.

㉱ 안분의 원활한 배토를 위하여 암반확공기의 본체 외곽부에 Screw 타입 재밍 방지장치의 설치.

㉲ 후면의 원활한 배토를 위하여 Extension Rod에도 Screw 설치가 필요.

(6) 연구과제 2차년도 CHH 650 암반확공기 현장시험시공

(가) 공법 원리

① 조향이 가능한 비트를 이용하여 터널의 궤적을 선천공한 후 복수개의 해머비트를 장착한 암반확공기를 사용하여 암반을 1회에 확공하여 매설관을 매설하는 직경 1m이하 소구경 터널공법으로서 암반확공 개념도는 그림 52와 같다.

② 터널의 정밀도

㉮ 선천공시 로케이터를 이용한 정밀계측을 통해 하천, 도로, 철도 등의 횡단 및 건물 등의 지장물을 회피하는 터널의 곡선궤적을 정확히 설계한다.

③ 도심지 시공성

㉮ 수직 개착구나 가시설(반력벽, 유압잭) 설치 없이 도심지 협소한 공간에서도 터널시공이 가능하다.

④ 확공공정 단축

㉮ 다양한 지반조건(암반과 토사)에서 굴착이 가능하며 단 1회의 확공으로 확공공정을 완료하여 시공기간을 감축한다.

⑤ 시공절차

㉮ 천공 계획 및 터널 좌표설정

하천, 건물, 지장물 등의 장애물을 회피하는 터널의 궤적을 결정하고, 추진기지와 도달기지를 선정한다.

- 천공 종단면도 작성을 위하여 시작구, 도달구의 지상 좌표를 설정한다. 추진기지와 도달기지의 방위각을 측정하고, 굴착장비와 매설관의 곡률반경을 감안하여 굴착각도를 설정한다.

㉯ 작업장(시작구, 도달구) 정리 및 장비세팅

지표면에서 바로 선단굴착이 가능하므로, 강관압입, 세미쉴드 공법과 같이 작업장을 마련하기 위하여 별도의 터파기를 할 필요는 없다. 시공장비를 원활히 안착시킬 수 있도록 작업 공간 확보 및 지면 평탄화 작업 등을 실시한다.

- HDD 시공장비(압입장비, 굴삭기, 크레인, 굴착용 비트, 로케이터, 벤토나이트 재처리장치 등)를 시작구에 설치한다.

㉰ 슈팅공정(Pilot 터널 선(先)천공)

- 토질에 적합한 드릴비트을 선택하여, 설계된 경로를 따라 시작구에서 도달구로 슈팅작업을 진행한다.

슈팅 시 일반 토양일 경우 물과 벤토나이트를 분사하여 작업하고, 암반층일 경우 Mud Motor를 연결하여 유정 작업 시 사용하는 것과 유사한 드릴 비트를 사용한다.

- 선(先)천공을 시작하는 동시에 전자기식 로케이터를 이용하여 비트 헤드의 방향 및 좌표를 실시간으로 확인하며 천공을 진행한다.
- 천공작업이 진행될 때 익스텐션 로드를 후방에 계속 연결한다.

㉲ 확공작업

슈팅공정이 완료되면, 로드전방에 확공기를 장착한 후, 벤토나이트 및 물을 전방 선천공된 익스텐션 로드로부터 공급하며 확공을 시작한다.

- 기존의 HDD 공법처럼 수차례 확공 과정을 반복할 필요 없이, 1회의 확공 과정으로 암반확공 공정을 완료한다.

㉳ 매설관(PE관) 풀링

계획된 터널 직경에 해당하는 확공이 완료되면, 터널 내부의 이물질을 제거하는 청소작업을 1~2회 실시한다.

- 최종적으로 매설관을 확공기 후방에 체결한 후 매설관을 풀링하여 터널시공을 완료한다.

㉴ 매설관 확인 및 작업장 정리

- 매설관이 도달구에 도착하면 확공기와 매설관을 분리한다.
- 매설관이 설계한 좌표대로 시공되었는지 확인 후, 매설관 내부의 이물질을 제거한다. 청소가 완료되면 장비를 철수시키고 시공을 완료한다.

(나) 현장시험시공 목적

① 국토교통부의 중소기업 보유기술 사업화 지원사업 과제명 "직경1m이하 소구경 터널굴착을 위한 암반확공기 시공기술개발"에 있어 암반확공공법의 상용화 가능성을 평가하기 위하여 2차년도 암반확공 현장시험시공을 수행함.

② 시험장비

㉮ 신보텍 암반확공기: 직경 650mm(모델명: CDH 650 #2)

㉯ 특이사항: 암분배출 스크류 및 대형 해머비트 장착

㉰ 2015년 1차년도 현장시험시공 결과에서 나타난 문제점(Drill Rig의 호환성, 압입장비 구동능력 향상, 탈·장착에 따른 Down Time 지감, 경량화)을 해결하기 위해 확공기의 직경을 650mm로 변경하여 신규 제작하였은. 연구기관 자체적으로 현장시험시공을 실시하여 발견된 일부 문제점 등을 보완함.

(다) 현장시험 세부내역

① 목적: 보통암이 출현하는 암반구간을 약 20 m 굴착하여 확공기 성능을 검증함.

② 현장시험비에 현장의 디파기 비용, 압입장비, 굴삭기 대어비, 소모품 비용, 자재 운반비 및 현장운용 비용 등이 현장시험비에 포함됨.

③ 작업순서: 현장 시험장 조성, 터파기, 압입장비 안착, PILOT HOLE 구축, 암반확공, 장비철수, 현장정리

(라) 현장시험 상세절차

① 일시 : 2015년 10월 28일 ~ 11월 13일(17일간, 휴지기 포함)

② 장소 : 경기도 여주시 능서면 번도리 887 10 택지개발현장 내

㉮ 민간 택지개발 현장부지이며, 마닥면 조성 중 암반이 출현하여 일부 설계하고 있는 현장으로 일정시간 내에 암반지역을 실취해 주는 조건으로 사용하였음.

㉯ 현장시험에 필요한 시작구 및 도달구 확보를 위하여 굴삭기 및 유압브레이커를 이용하

어 현장조성작업을 수행하였음.

③ 주관연구기관 : 실리기업(주)

④ 공동연구기관 : 한국생산기술연구원

⑤ 암반종류 : 보통암

⑥ 시공거리 : 약 18m

⑦ 주요투입장비 현황

Drill Rig : GD450 LS (Goodeng , 45Ton, RPM 9~12 저속조정 가능)

Air Compressor : 900 cfm

- Extension Rod : 확공기 후방 로드 스크류 장착(외경부분)
- 굴삭기 : 6W, 10LC
- Tank Lorry : 12 ton

Mud Motor(Tricone Bit 장착), Hammer Bit

Mud Pump : 3 ton

(나) 시험시공 현황

① 시험시공현장 조성 및 사전준비

㉮ 시공일자: 2015년 10월 28일 ~ 2015년 11월 2일(6일간)

② 장비 반입 안착 및 Pilot Hole 슈팅

㉮ 시공일자: 2015년 11월 3일 ~ 11월 6일(4일간)

㉯ 준비사항: 시작구, 도달구 위치 설정 및 슈팅, Level측정, 소음도 측정 등 슈팅에 필요한 장비의 투입 및 활용 등

㉰ 사용장비: Drill Rig, Mud Motor, Tank Lorry, Tricone Bit, Locator 위치탐지 송·수신장치, Air Compressor 등

㉱ 슈팅내용: 굴착정도 및 Locator 위치탐지 송·수신장치에 의한 조향성능 및 암질에 따른 굴진율

㉲ 인원투입현황: 참여연구원 4명, 생기원 2명, Drill Rig Operator외 4명

③ CDH 650 암반확공기 확공

㉮ 시공일자: 2015년 11월 9일 ~ 11월 12일(4일간)

㉯ 일정별 주요시험현황

11월 9일: RPM조절 및 회전, 비회전 방식으로 암반확공기 굴착성능 검증
다격 후 암반확공기 후진하여 비트의 마모량, 확공기 상태 점검
공압분배에 의한 Bit의 균등타격 성능

- 11월 10일: Air Compressor의 공압조절에 따른 Hammer Bit의 파쇄능력 점검
Hammer Bit 자전 능력이 없는 상태에서의 타격력 검증
RPM조정에 따른 확공능력 및 Drill Rig장비의 부하 검토
RPM 9~20 에서의 암반확공기 구동 효율성 검토
- 11월 11일: Drill Rig 구동력에 의한 암반확공기의 회전, 비회전에 따른 확공시험
확공기 후진-견인 반복운동을 통한 Bit의 마모도 육안 측정
- 11월 12일: 암반확공기 및 Extension Rod Screw 장착에 따른 배토능력 점검
시간당 굴진율 및 Down Time 등 검토

㉰ 주요사용장비: Drill Rig(GD450 LS), CDH 650 암반확공기, Air Compressor 900 cfm
굴삭기 6W, Mud-Pump등

㉱ 인원투입현황: 참여연구원 4명, 생기원 2명, Drill Rig Operator외 4명

(바) 현장시험시공 결과 문제점 및 개선(대안)점

① 당초 진흥원에서 제공하는 테스트 베드를 사용하려고 하였으나, 과제종료 시까지 테스트 베드 확보에 있어 당 시험시공의 요건을 모두 갖춘 Test Bed의 확보가 어려워 협의에 따라 제한된 시간과 조건으로 현장시험 시공을 수행함.

② 비드보더에 Tricone Bit를 장착하여 1.75°의 입사각으로 Pilot Hole을 형성하였고, Locator 위치탐지 송·수신상태, 조향성의 원활, 물과 벤토나이트 이수액을 교차 공급하며 슈팅하였으며, 그 결과 굴진율이 약 1.3 m/hr로 측정됨.

③ CHH 650 암반확공기를 구동로드에 장착, Air Compressor 2대를 이용하여 공압을 공급하고, 전·후 왕복운동에 의한 타격력을 발생시켰고 동시에 Drill Rig의 구동 Rod에 의한 회전력과 견인력을 이용하여 암반층 확공을 완료하였음.

④ 이때 Drill Rig의 구동 RPM은 9~12로 조정함으로써, 암반 막장면을 고르게 타격할 수 있었으며, 각 Bit의 타격도 균일하게 이루어져 Bit의 마모가 균일한 것으로 관찰됨.

⑤ 1차년도에 문제점으로 제기되었던 배토의 문제를 해결하고자 암반확공기에 스크류 형태의 재밍방지 장치를 설치하였고, Screw가 부착/체결된 로드를 사용하여 현장시험을 실시하였음.

⑥ 시험시공 문제점

㉮ 암반확공기에 대한 배토능력은 시험시공을 통하여 다소 검증되었으나, Rod Screw에 의한 배토능력 규명은 아직 명확히 이루어지지 못함.

㉯ 실제 현장에 투입하여 구동 Rod의 Screw 체결에 있어 Pitch 및 연속 체결부분의 효과에 대한 추가적인 검토가 요구됨.

㉰ 구동 Rod의 해체 조립과정에서 자동화된 System의 부재로 인하여 Down Time이 증가함에 따라 총굴진율이 저하 됨.

⑦ 개선(대안)점

㉮ 과제 종료 1차년도에 계획된 현장시험 전 암반확공기의 배토능력 및 Rod Screw의 Pitch 및 연속 체결부분에 대한 설계 및 제작을 통하여 배토능력 규명

㉯ 압분매출 자동화 기술을 연구개발하여 굴진장 내부의 파쇄암분 배토를 원활하게 함 (예, 공압식, 스크류타입 로드를 이용한 압분매출기술)

㉰ Rod 급속 탈부착 기술개발

익스텐션 로드 탈착 자동화 System개발을 통한 Down Time 저감

(사) 현장시험시공 현장전경 및 시공절차 설명



현장시험부지 암반출현지역



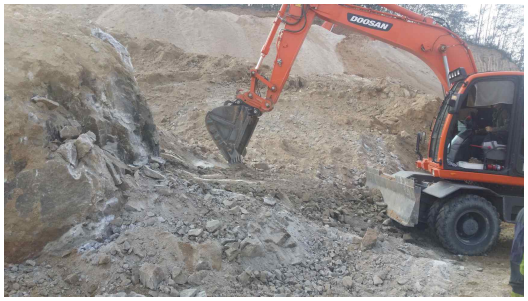
2차년도 현장시험 착수



1차 암반지역 실취



시험시공 지역 실취



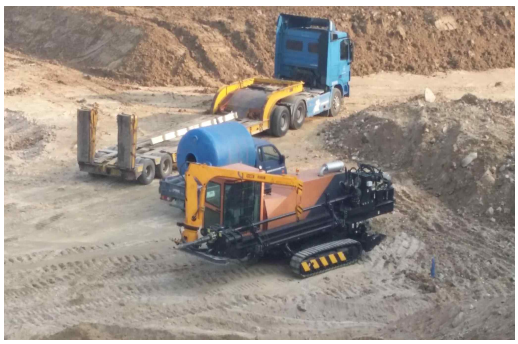
시작구 조성



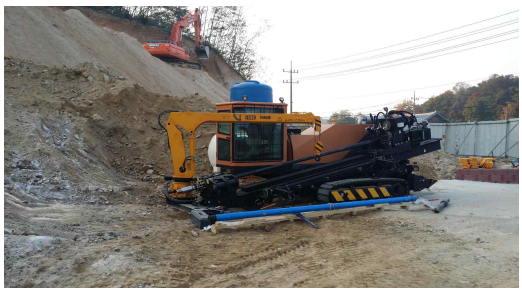
도달구 조성



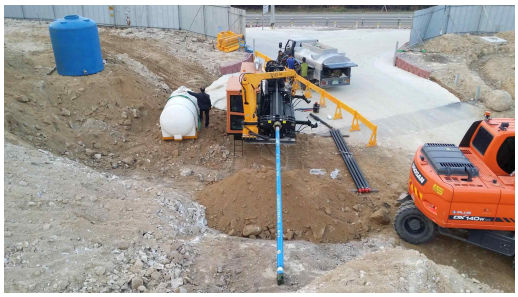
사용장비(Drill Rig)



Drill Rig 현장투입



시작구 장비 안착



Mud Motor 장착 슈팅준비



Pilot Hole 슈팅준비



Tricone Bit 입사각 조정



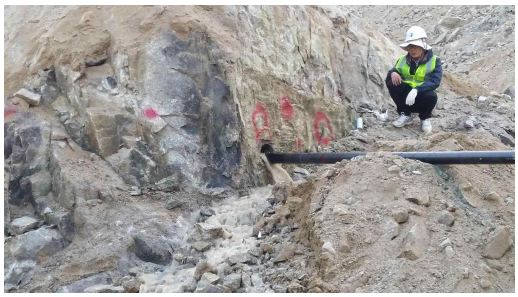
Tricone Bit 슈팅 시작



슈팅 중 Rod 체결



Tricone Bit 슈팅



Tricone Bit 슈팅



Locator 슈팅방향 점검



Locator 슈팅방향 점검



Tricone Bit 슈팅 완료(이수액 분사)



Tricone Bit 슈팅 완료



슈팅 완료 후 Tricone Bit Head

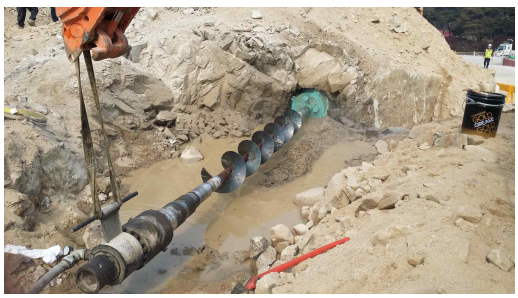



안반확공기 도달구 확공면 안착


암반확공기 초기 확공면


암반확공기 확공


Bit 마모도 견사


Screw Rod 체결 확공


암반확공면


암반확공 완료

(아) D650 현상시험 결과 (2차년도 수행결과)

① 현상시험지 암반등급 평가

- 사전 조사된 지질조사와 시추코어를 대상으로 일축압축강도시험을 수행하였음. 해당 암석시험 결과에 따르면 해당부지의 암반은 35~50MPa로서 대부분 보통암 등급에 해당하는 것으로 평가되었음.

TABLE OF TEST RESULT : UNIAXIAL COMPRESSION

용 역 명 : 실내암석시험 (경기도 여주시 빈도리, 2015년 11월)

Sample Number	Rock Type	Specific Gravity	Porosity (%)	Size of Specimen D x L (mm)	Wave Velocity (m/sec)		Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Depth (m)
					P wave	S wave				
1		2.67	3.29	52.0 x 107.7	2530	1540	35	6.2	0.38	G. L.
2		2.66	3.16	52.0 x 108.2	2800	1600	56	6.7	0.33	G. L.
3		2.63	3.74	52.3 x 99.0	2840	1680	45	5.1	0.36	G. L.

* : Joint Exists

ROCK MECHANICS LABORATORY, DEPARTMENT OF ENERGY SYSTEMS ENGINEERING, SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

그림 45. 현장시험 암반강도 공인시험 성적서(보통암)

② D650 암반확공기의 굴진율 측정결과

- 2차년도 암반확공 현장시험의 암반은 보통암이었으며, 이에 대해 암반확공기 신모델(CDH D650 #2)에 대한 암반터널 굴진시험을 수행하고, 굴진율 데이터를 계측함.
  그 결과, 아래 그림46과 같이 초기 굴진율은 1.0 m/hr이하였지만, 1.5 m/hr를 상회하는 성능을 보임. 굴진율 평균치는 1.43 m/hr로 도출되어 당초 목표인 1.2 m/hr를 약 20% 상회하는 결과가 도출됨.
- 2차년도에 수행된 보통암에 대한 굴진율 데이터는 초기 3m구간을 제외하면 거의 일정한 수준으로 도출되어 암반터널굴착이 안정적으로 수행됨을 알 수 있었음. 2차년도의 굴진율 편차가 1차년(경암, 중경암) 굴진율 데이터에 비해 작았던 이유는 1차년에 비해 작업자의 경험이 축적되어 숙련도가 향상되었기 때문으로 분석됨.

그림 46. 보통암 구간의 굴진율 그래프

(6) 현장 시험데이터에 의한 굴진율 예측모델 수립

(가)선형굴착시험에 의한 굴진율 예측

① 본 기술의 최적의 운영조건을 사전에 검토하고자 수행된 선형굴착시험은 TBM의 굴진성능 예측을 위한 선형절삭시험에서 착안한 것이다. TBM의 굴진성능예측을 위하여 선형절삭시험에서는 실규모의 디스크 커터를 사용하여 커터의 간격, 커터의 관입깊이를 변수로 하여 디스크커터가 암석을 절삭할 때 작용하는 힘과 해당 절삭조건에서의 암석의 절삭부피를 측정함. 암석을 절삭하는데 소요되는 일과 암석의 절삭 부피로부터 최소의 에너지를 요하는 절삭조건을 규명함.

② 최적의 절삭조건하에서 측정된 디스크 커터의 작용력으로부터 현장에서 암반을 굴착하는데 필요한 TBM장비의 사양과 굴진율을 예측함. 장비의 추력과 토크는 하나의 커터에 작용하는 힘에 커터의 개수를 곱하여 산출됨. 1차적으로 산출된 추력과 토크 값을 기본으로 하여 현장에 알맞은 안전율과 에너지 손실을 고려한 장비의 사양을 계산됨. 장비의 토크(동력)과 최적 절삭조건에서의 비에너지로부터 굴진율을 산정한.

③ 선형굴착시험을 통하여 최소의 에너지로 최대의 굴착효과를 보이는 확공기의 최적운용조건 및 해당 운용조건에서의 비에너지를 결정함. 선형굴착시험을 통해 결정되는 확공기의 운용조건으로는 RPM, 공기압축기의 압력(공기압축기의 대수와 해머에 공급되는 공기압이 비례하다고 가정한)과 해당 압력에서의 피스톤의 타격에너지임. 이를 토대로 해당 조건에서의 비에너지를 계산한.

④ 따라서 장비의 사양 및 굴진율은 다음과 같이 계산됨. 굴진방향으로 확공기에 공급되는 동력은 피스톤의 타격에너지와 타격빈도는 공기압축기의 압력(압축기의 대수)로부터 결정되며 그 값은 수식 17과 같이 계산됨.

⑤ 암반을 굴착하는데 확공기에 필요한 토크는 선형굴착시험으로부터 직접적으로 측정하기 어려움. 따라서 현장시험으로부터 측정된 토크의 비율을 경험적으로 산정하여 안전율로써 적용하기나 확공기의 제원으로부터 개략적으로 추측함. 확공기의 회전에 필요한 동력(Power, *Rotation*)은 수식 18과 같이 계산된.

$$P_{hammer} = E_{impact} \times f_{hammer} \times N \qquad \text{수식 17}$$

$$P_{rotation} = 2\pi \frac{RPM_{opt}}{60} T = 2\pi \frac{RPM_{opt}}{60} \times \left(\sum_{i=1}^{N} \mu F_{pull} \frac{A_i}{A_t} \times r_i\right) \qquad \text{수식 18}$$

여기서, 각 변수는 아래와 같다.

E_{impact} : 해머의 1회당 타격에너지 (J/beat)

f_{hammer} : 해머의 타격 빈도수 (beat/sec)

N : 확공기에 장착된 해머의 개수

RPM_{opt} : 최적운용조건에서의 확공기 회전수

T : 확공기에 필요한 토크 (N-m)

μ: 해머비트와 암반면의 마찰계수 (0.2~0.4)

F_{pull}: 확공기의 견인력(pulling force, N)

A_t: 암반과 접촉하는 해머비트의 총면적 (in^2)

A_i: i번째 해머비트의 접촉 면적 (in^2)

r_i: 확공기 중심에서 i번째 해머비트 중심까지의 거리 (m)

⑥ 선형굴착시험으로부터 얻은 결과를 실제 현장에 적용할 때에는 안전율을 고려하여 장비의 사양을 결정하는 것이 합리적인. 계산된 값으로부터 굴진율은 비에너지를 고려하여 시간당 굴착부피를 다음과 같이 산정할 수 있으며 k는 무차원 상수로 기계장비의 암반 굴착 에너지 비율을 의미함. TBM의 경우에는 0.8의 값을 사용한다(Rostami et al., 1994). 실제 현장에서는 장비의 가동율을 곱하여 순굴진율을 산정함.

$$PR(m/hr) = k \times \frac{P_{total}}{SE_{opt}} \times \frac{1}{A_{tunnel}} = k \times \frac{(P_{hammer} + P_{rotation})}{SE_{opt}} \times \frac{1}{A_{tunnel}}$$ 수식 19

P_{total}: 확공기 운용 시 투입된 총 에너지 (J)

SE_{opt}: 최적운용조건에서의 확공기 비에너지 (J/m^3)

A_{tunnel}: 터널 확공 단면적 (m^2)

※ 비트별 위치와 굴착면적에 따른 비에너지 비율 환산 식

$$PR(m/hr) = k \times \frac{P_{total}}{SE_{opt}} \times \frac{1}{A_{tunnel}} = k \times \frac{(P_{hammer} + P_{rotation})}{SE_{opt}} \times \frac{1}{A_{tunnel}} = k \times \frac{(P_{hammer} + P_{rotation})}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} SE_i} \times \frac{1}{A_{tunnel}}$$ 수식 20

⑦ 수식 19에 의한 굴진율 산정법에서는 모든 비트가 동일한 면적을 굴착하는 것으로 가정하고, 평균적인 비에너지를 고려하여 분모를 SE_{opt}로 나누게 됨. 하지만 확공기의 모든 비트는 같은 RPM과 공압 조건에서 타격을 수행하고 중심에서 가까운 비트가 먼 비트에 비해 상대적으로 적은 면적을 굴착한. 모든 비트의 비에너지가 동일한 것은 아니다. 따라서 각 개별 비트의 비에너지를 수식 20와 같이 계산해야 함. 이는 개별 해머비트의 굴착면적 비를 이용하면 가능함.

⑧ 먼저 i번째 비트의 굴착 면적을 수식 21과 같이 표현된. 단, 가장 중심부에 위치한 비트는 내부 면적을 모두 굴착하며, 그 다음 비트부터는 이전비트와 다음 비트 사이 면적을 굴착하는 것으로 가정함. 신기술에 사용한 확공기의 경우 내외곽 비트간 굴착 영역이 중첩되는 부분이 있으나 그 영향이 미비한 것으로 나타났음.

$$A_i = \frac{\pi[(r_{i+1}+r_i)^2-(r_i+r_{i-1})^2]}{4}, \quad r_0 = 0 \qquad \text{수식 21}$$

⑨ 한편 모든 비트는 확공기 본체에 설치되어 굴진율과 공급되는 공압(공기 에너지)이 모두 같음. 따라서 개별 해머비트의 굴착면적과 비에너지를 곱한 값은 항상 일정함. 이로 인해 해머비트가 중심에서 떨어진 거리에 따른 비에너지의 비율은 모든 비트의 평균 비에너지(선형굴착시험 또는 경험식으로부터 도출된 값, $SE_{opt(avg)}$)와 면적의 비로 표현됨.

⑩ N개의 비트가 설치된 다중해머의 비트 한 개당 평균 굴착면적을 $\frac{A_{tunnel}}{N}$라 하면, 평균 굴착면적과 실 굴착면적 A_i와의 비는 평균 비에너지와 실제 비에너지의 역수관계가 성립하고 수식 22와 같이 표현된다. 따라서 비트가 중심에서 가까울수록(실 굴착면적이 적을수록) 실제 비에너지는 증가함.

$$SE_{opt(\text{or } avg)} : SE_i = \frac{N}{A_{tunnel}} : \frac{1}{A_i} \qquad \text{수식 22}$$

⑪ 수식 19를 수식 16, 17, 21을 고려하여 다시 쓰면, 아래와 같이 수식 23으로 표현됨.

$$\begin{aligned} PR(m/hr) &= k \times \frac{(P_{hammer}+P_{rotation})}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} SE_i} \times \frac{1}{A_{tunnel}} \\ &= k \times \frac{(P_{hammer}+P_{rotation})}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \frac{SE_{opt}}{A_i} \times \frac{A_{tunnel}}{N}} \times \frac{1}{A_{tunnel}} \\ &= k \times \frac{\sum_{i=1}^{N}[(E_i \times f_i) + \left\{2\pi \frac{RPM_{opt}}{60} \times (\mu F_{pull} \frac{A_i}{A_t} \times r_i)\right\}]}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \frac{SE_{opt}}{A_i} \times \frac{A_{tunnel}}{N}} \times \frac{1}{A_{tunnel}} \end{aligned} \qquad \text{수식 23}$$

(나) 현상 굴진데이터에 의한 굴진율 예측방법

① 총 2회의 현상시험에서 획득한 데이터를 바탕으로 암반상도, RQD, 확공기에 사용된 해머 직경에 따른 확공기의 굴진율(Drilling rate, DR)을 경험식으로 예측함. 그림 47과 48은 확공기에 사용된 해머의 직경이 각각 6인치, 8인치일 때의 회귀표면과 측정

값을 나타낸. 기존의 측정값(빨간점)과 회귀식을 통해 작성한 회귀표면이 유사한 형태로 나타남.

$$PR(m/hr) = \{1.002599 - (RQD \times UCS)^{0.0002532648}\} \times Hammer^{4.402058} \quad (R^2 = 0.96)$$ 수식 24

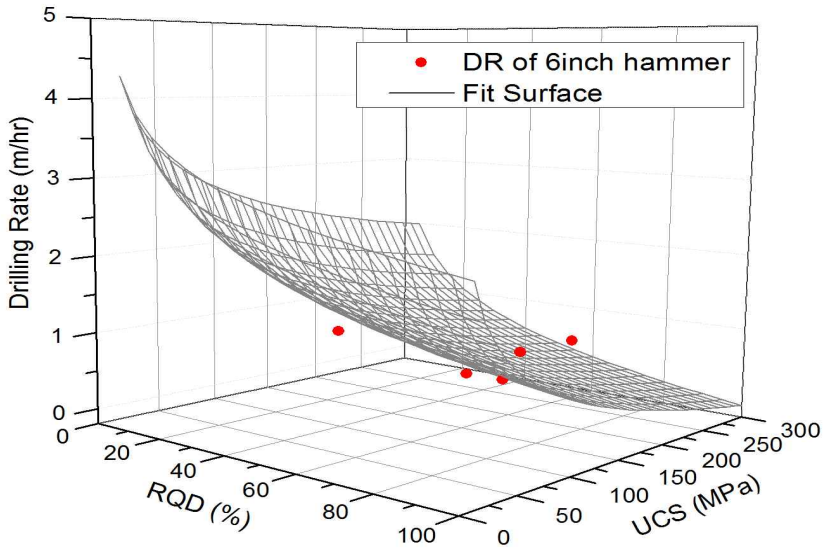


그림 47. 6인치 해머를 사용한 확공기의 굴진율 회귀표면과 측정값

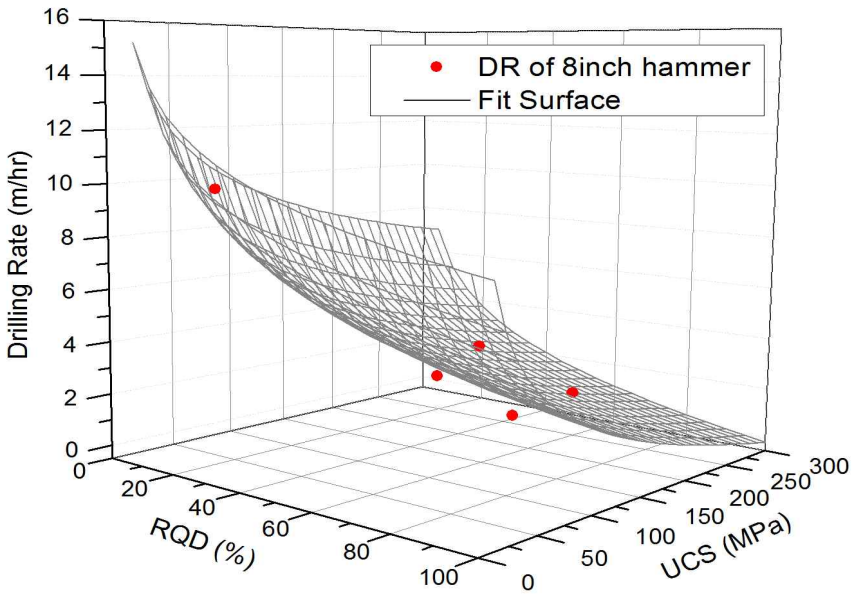


그림 48. 8인치 해머를 사용한 확공기의 굴진율 회귀표면과 측정값

(다) 기타 TBM의 예측모델 적용성 검토

① 기계식 장비를 이용하여 지반을 굴착하는 경우에 굴진율을 예측하는 방법은 크게 두 가지로 구분됨. 하나는 이론적인 모델과 실대형 선형절삭시험 데이터를 기반으로 하는 예측 기법이며 다른 하나는 실내 실험데이터와 현장데이터를 기반으로 한 경험적 예측 기법임(Rostami et al., 1996). 특히 터널굴착기(TBM)의 경우에는 두 가지 예측기법에 대하여 다양한 예측 모델이 제시되어 있으며 실무에 활용되고 있음.

㉮ 먼저 이론적인 모델 및 선형절삭시험을 바탕으로 한 예측기법은 CSM(Corlorado Schoolsof Mines, 콜로라도 광산대학)모델로 대표되며 지속적으로 수정/보완되어온 모델이며(Ozdemir et al., 1978; Rostami, 1997; Cheema, 1999; Yagiz, 2002), TBM 현장 실무에 활용되어 현장 적용성이 검증(Rostami and Ozdemir, 1993)되어 있는 예측모델임. CSM모델 이외에도 이론적인 분석을 바탕으로 하는 굴진율 예측 모델들(Crow, 1975; Roxborough and Phillips, 1975; Ozdemir et al., 1978; Snowdon et al., 1982; Sanio, 1985; Sato et al., 1991)이 있으나, TBM에 장착되는 디스크커터를 대상으로 한 실험과 이론적 모델로부터 도출된 예측 모델이며 예측모델에 사용되는 변수(예: 커터간격, 관입깊이, 커터직경, 커터 니비 등)들 또한 디스크커터 및 TBM장비의 설계에 관련된 것을 포함하므로 본 암반확공기술에 적용하기 어려움. 또한 본 기술에서와는 달리 TBM의 경우에는 먼저 디스크 커터가 암석을 굴착할 때 커터에 작용하는 하중을 산정하고 장비의 허용하중을 고려하여 굴진율을 산정하기 때문에 본 기술에의 직접적인 적용은 어려운 것으로 판단됨.

② 현장데이터를 기반으로 한 경험적인 예측 모델 중 가장 널리 사용되고 있는 것은 NTNU(Norwegian University of Science and Technology)모델임. NTNU모델에서는 암석의 역학적 특성을 평가하기 위하여 일련의 지수를 실내시험을 통해 산정함(Bruland, 1998). 다양한 변수들을 고려하여 TBM의 굴진율을 도출하기는 하지만, NTNU 모델 또한 모델식의 도출에 TBM의 굴진데이터가 사용되었으므로 본 기술에 적용되기 어려움.

③ 이외에 경험적인 굴진율 예측모델로는 암석의 일축압축강도와 인장강도를 사용하는 모델들이 있고(Graham, 1976; Farmer and Glossop, 1980; Hughes, 1986), 특수한 지수로부터 굴진율을 예측하는 모델들이 있으며(Tarkoy, 1973; Blind-heim, 1979; Nelson et al.,1983, 1985; Bamford, 1984; Wijk, 1992; Dollinger et al., 1998), 암석의 물성뿐만 아니라 암반전체의 특성을 전체적으로 고려한 모델(Sundin and Wanstedt, 1994; Nelson et al., 1999; Alvarez Grima et al., 2000; Zhao et al., 2007; Yagiz, 2008; Gong and Zhao, 2009; Hassanpour et al., 2009)등이 있으나 이 또한 TBM의 현장데이터를 바탕으로 한 모델로써 본 기술에 적용되기는 어렵다.

라. 커터수명지수(CLI, Cutter life index)

(1) 커터수명지수 개요 및 설명

(가) NTNU TBM예측모델

① NTNU 예측모델은 Norwegian University of Science and Technology(NTNU)에서 개발한, 수십년간 축적된 자료에 근거하여 얻어진 경험적인 TBM 예측방법임(NTH, 1994).

② TBM의 기본 설계자료 도출, 굴진성능 예측, 커터 수명 예측 및 공비 예측이 가능함. 기본적으로 NTNU 예측모델에 사용되는 지반특성 관련 입력변수는 등가균열계수, DRI (Drilling Rate Index) 및 CLI (Cutter Life Index) 등이 있다 (건교부, 2007).

(나) NTNU시험법

① Siever's J-value test

㉮ Siever's J-value 는 암석의 표면성도를 측정하는 것으로 NTNU 굴착성능예측 모델의

주요 입력자료인. 미리 성형된 암석시료를 사용하는 데 천공은 일정한 모양을 내도록 주의하여 한다. 성형된 표면은 서로 평행하여야 하며 암석의 연리에 직각인. 연리에 수평방향으로 측정된 SJ-value 는 DRI를 산정하는 데 사용됨. SJ-value는 규암과 같은 경암에서의 0.5이하에서부터 세일이나 편암과 같은 연암에서의 200이상까지 변화함.

② Brittleness test

㉮ 취성시험은 NTH 굴착성능 예측모델에서 DRI을 정의하는데 사용되는 두 번째 시험인. 이것은 골재 충격시험으로 반복되는 충격으로부터의 분쇄저항성을 측정한다. Brittleness value(S20)는 골재를 분쇄한 후 11.2mm 체를 통과하는 물질의 비율이다. S20은 현무암이나 각섬석(amphibolite)과 같이 세립입자로 되어 있고 매우 강하고 괴상인 암석에서는 20에서부터 대리석과 같이 연약하고 깨지기 쉬운 암석의 80~90까지 다양하게 변함.

③ NTH abrasion test

㉮ NTH 모델에 사용되는 세 번째 실험실 시험. 1mm 이하의 입자로 분쇄된 암석을 회전하는 강제판에 상재함. Abrasion value (AVS)는 강제판을 20회 회전시킨 후 잃어진 무게로서 정의함. AVS 값은 석회암, 세일과 같은 연질 암석의 거의 "0"인 값에서부터 규암과 같은 매우 거친 암석의 60~70까지 다양함(건교부, 2007).

㉯ 이상과 같은 3가지 시험법으로부터 DRI와 CLI를 산정함.

(다) DRI (Drilling Rate Index), CLI (Cutter Life Index)의 산정방법

① DRI 결정법

㉮ 다음의 그림은 DRI를 도출하기 위한 Brittleness value와 Sievers' J value의 관계임.

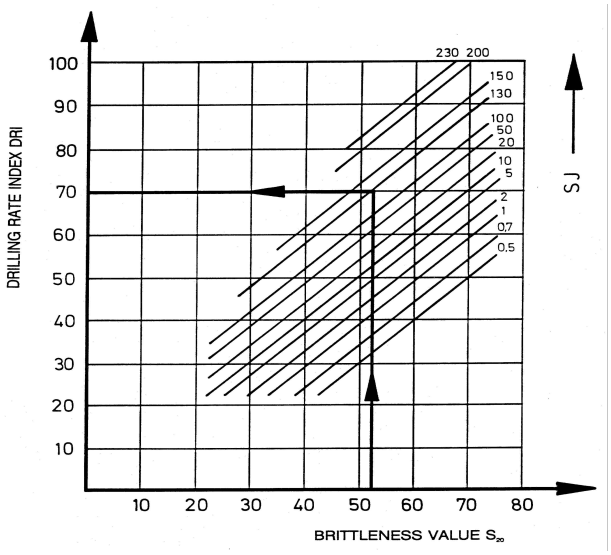


그림 49. DRI의 산정 (NTH, 1990)

② CLI 계산법

㉮ CLI는 Sievers' J-value SJ와 AVS(Abrasion Value Steel cutter) 값을 이용하여 산출함. CLI는 TBM 디스크의 수명을 나타내는 지표로 사용됨.

$$CLI = -13.84\left(\frac{SJ}{AVS}\right)^{0.3847} \qquad \text{수식 25}$$

(2) 안반확공기 해머비트 수명지수(CLI) 도입에 대한 고찰

(가) CLI지수는 NTNU에서 제안한 TBM 디스크 커터의 마모를 예측하기 위한 경험식 기법임. 노르웨이의 암반을 바탕으로 십수년간의 현장굴진자료를 바탕으로 확보된 예측모델이나, 현재까지 TBM 디스크 커터의 마모를 위해 주로 사용되었음.

(나) TBM 디스크 커터는 커터헤드에 공급되는 추력과 회전력을 이용해서 암반을 압입하여 파쇄하는 원리인. 이에 비해 본 안반확공기는 DTH방식 해머비트의 타격을 이용하여 암반을 천공하는 방식임. 따라서 기존의 TBM의 CLI모델을 바로 적용하기에 다소 무리가 있음.

(다) 또한, CLI지수와 경험식 예측모델을 당 과제의 연구기간(2년)과 예산 내에서 수립하기에 한계가 있었음. NTNU의 CLI지수 및 모델은 15년이상의 데이터가 축적된 결과임.

(라) 본 시공법은 과제종료후 건설신기술을 도전할 예정으로 건설신기술 심사에 앞서 추가의 현장시험을 수행할 예정임. 이 때, CLI모델을 변경하거나 혹은 별도의 마모지수 모델을 수립하고, DTH해비의 암반천공 메커니즘에 적합한 모델을 수립하여 암반확공기 제조 및 소구경 암반터널 굴진예측에 활용하겠음.

2. 연구성과 (특허, 논문, 소프트웨어, 시제품 등)

가. 특허출원: 3건

압분 배출이 효과적으로 이루어지는 DTH방식의 천공기 및, 이를 이용한 천공방법

관인생략

출원번호통지서

출원일자 2015.03.26
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(PD0422)
출원번호 10-2015-0042721 (접수번호 1-1-2015-0299545-15)
출원인명칭 한국생산기술연구원(3-1999-902938-2)
대리인성명 차형석(9-2004-000679-4)
발명자성명 조정우 박진영
발명의명칭 압분 배출이 효과적으로 이루어지는 DTH 방식의 천공기 및, 이를 이용한 천공방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 경정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000
7. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

곡선 궤도로 굴착이 가능한 확공기 및, 이를 이용한 확공 방법

관인생략

출원번호통지서

출원일자 2015.08.26
특기사항 심사청구(유) 공개신청(유) 참조번호(P15010)
출원번호 10-2015-0120278 (접수번호 1-1-2015-0828926-61)
출원인명칭 한국생산기술연구원(3-1999-902938-2)
대리인성명 차형석(9-2004-000679-4)
발명자성명 조정우 박진영 정명식 이재욱
발명의명칭 곡선 궤도로 굴착이 가능한 확공기 및, 이를 이용한 확공 방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 경정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000
7. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

터널 상부에서 이완 또는 붕락된 암석 블록과 압분을 터널 외부로 배출할 수 있는 확공기 및, 이를 이용한 확공 방법

관인생략

출원번호통지서

출원일자 2015.08.26
특기사항 심사청구(유) 공개신청(유) 참조번호(P15011)
출원번호 10-2015-0120311 (접수번호 1-1-2015-0829160-73)
출원인명칭 한국생산기술연구원(3-1999-902938-2)
대리인성명 차형석(9-2004-000679-4)
발명자성명 조정우 박진영 정명식 이재욱
발명의명칭 터널 상부에서 이완 또는 붕락된 암석 블록과 압분을 터널 외부로 배출할 수 있는 확공기 및, 이를 이용한 확공 방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 경정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000
7. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

나. SCI급 국제학술지 논문게재: 3건

Design Study of a Rock Particle Flushing Device for a Rock Reaming Machine by CFD Simulation



Design Study of a Rock Particle Flushing Device for a Rock Reaming Machine by CFD Simulation

Chang-Heon Song[1], Min-Gi Cho[1], Jin-Young Park[1], Jae-Wook Lee[1], Myeong-Sik Jeong[1], Jung-Woo Cho[1,#], and Sunghoon Ryu[2]

KEYWORDS: Rock drill, Reaming machine, Flushing device, CFD (Computational Fluid Dynamics), RSM (Response Surface Methodology)

A series of multiphase CFD (computational fluid dynamics) simulation was carried out in order to evaluate the design study of flushing device of rock reaming machine. The Star-CCM+ code was adopted for simulating rock particle discharge flow of flushing air during the rock reaming process. The input parameters for the flow simulation of rock particle were obtained from a previously performed in-situ drilling test results. After three design factors (degree of swash plate, radius of curvature of swash plate, and diameter of flushing channel) were determined, the experimental design method (response surface methodology) was applied to determine optimum value of each factor.

Manuscript received: July 31, 2014 / Revised: December 23, 2014 / Accepted: February 10, 2015

NOMENCLATURE

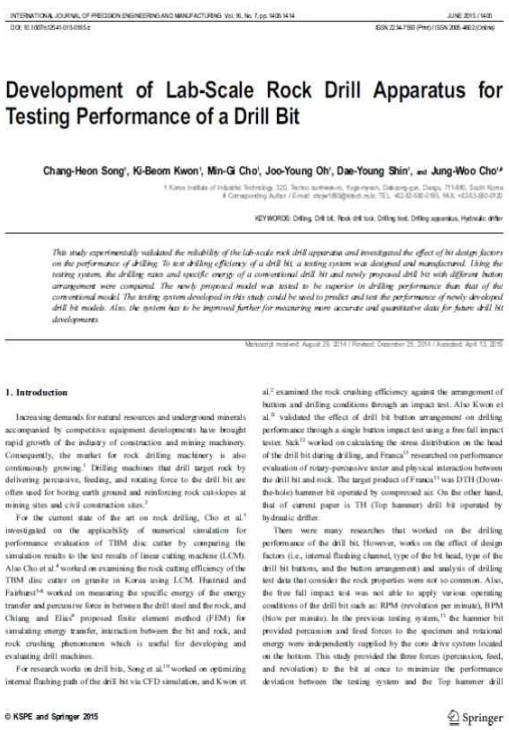
A_P : Projected area of the particle (m^2)
C_d, C_R, C_S, C_M : Coefficients of turbulent dissipation rate
C_d : Drag coefficient
C_{vm} : Virtual mass coefficient
F_b : Particle body force (N)
F_s : Particle surface force (N)
f_u : User defined body force (N)
g : Gravity acceleration ($m\,s^{-2}$)
k : Turbulence kinetic energy ($m^2\,s^{-2}$)
m_p : Particles' mass (kg)
m_p : Rate of mass transfer to the particle ($kg\,s^{-1}$)
p : Pressure (Pa)
p_{abs} : Absolute pressure (Pa)
∇p_{st} : Gradient of the static pressure in the continuous phase (Pa)
R : Universal gas constant ($J\,mol^{-1}\,K^{-1}$)
r_p : Position of the particle
T : Fluid temperature (K)
t : Time (s)
u_i : Fluctuant fluid velocity of i (i = x) ($m\,s^{-1}$)
u_j : Fluctuant fluid velocity of j (j = y) ($m\,s^{-1}$)
v_i : Fluid velocity in direction i (i = x) ($m\,s^{-1}$)
v_j : Fluid velocity in direction j (j = y) ($m\,s^{-1}$)
v_k : Fluid velocity in direction k (k = z) ($m\,s^{-1}$)
v_s : Particle slip velocity ($m\,s^{-1}$)
v_p : Absolute velocity of a particle ($m\,s^{-1}$)
v_g : Grid velocity of a particle ($m\,s^{-1}$)
V_P : Volume of the particle (m^3)
m_{total} : Discharged rock particles (kg)

Greek nomenclature

δ : Kronoker delta
ε : Turbulence dissipation rate ($m^2\,s^{-3}$)
μ : Molecular viscosity of fluid ($kg\,s\,m^{-3}$)
μ_t : Turbulence viscosity ($kg\,s\,m^{-3}$)
μ_m : Mean value of rock particle diameter (mm)
ρ : Particle density ($kg\,m^{-3}$)

© KSPE and Springer 2015

Development of Lab Scale Rock Drill Apparatus for Testing Performance of a Drill Bit



Development of Lab-Scale Rock Drill Apparatus for Testing Performance of a Drill Bit

Chang-Heon Song[1], Ki-Beom Kwon[1], Min-Gi Cho[1], Joo-Young Oh[1], Dae-Young Shin[1], and Jung-Woo Cho[1,#]

KEYWORDS: Drilling, Drill bit, Rock drill bit, Drilling test, Drilling apparatus, Hydraulic drifter

This study experimentally validated the reliability of the lab-scale rock drill apparatus and investigated the effect of bit design factors on the performance of drilling. To test drilling efficiency of a drill bit, a testing system was designed and manufactured. Using the testing system, the drilling rates and specific energy of a conventional drill bit and newly proposed drill bit with different button arrangement were compared. The newly proposed model was tested to be superior in drilling performance than that of the conventional model. The testing system developed in this study could be used to predict and test the performance of newly developed drill bit models. Also, the system has to be improved further for measuring more accurate and quantitative data for future drill bit developments.

Manuscript received: August 29, 2014 / Revised: December 25, 2014 / Accepted: April 13, 2015

1. Introduction

Increasing demands for natural resources and underground minerals accompanied by competitive equipment developments have brought rapid growth of the industry of construction and mining machinery. Consequently, the market for rock drilling machinery is also continuously growing.[1] Drilling machines that drill target rock by delivering percussive, feeding, and rotating force to the drill bit are often used for boring earth ground and reinforcing rock cut-slopes at mining sites and civil construction sites.[2]

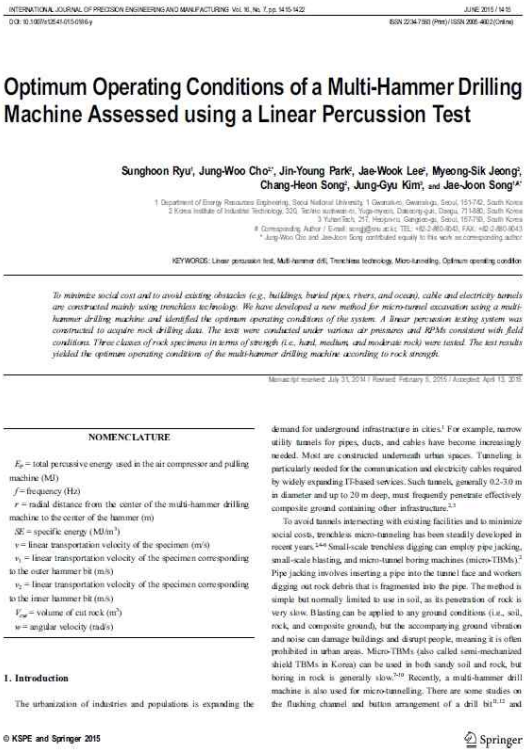
For the current state of the art on rock drilling, Cho et al.[3] investigated on the applicability of numerical simulation for performance evaluation of TBM disc cutter by comparing the simulation results to the test results of linear cutting machine (LCM). Also Cho et al.[4] worked on examining the rock cutting efficiency of the TBM disc cutter on granite in Korea using LCM. Hustrid and Fairhurst[5,6] worked on measuring the specific energy of the energy transfer and percussive force in between the drill steel and the rock, and Chiang and Elias[7] proposed finite element method (FEM) for simulating energy transfer, interaction between the bit and rock, and rock crushing phenomenon which is useful for developing and evaluating drill machines.

For research works on drill bits, Song et al.[8,9] worked on optimizing internal flushing path of the drill bit via CFD simulation, and Kwon et al.[2] examined the rock crushing efficiency against the arrangement of buttons and drilling conditions through an impact test. Also Kwon et al.[9] validated the effect of drill bit button arrangement on drilling performance through a single button impact test using a free fall impact tester. Sick[10] worked on calculating the stress distribution on the head of the drill bit during drilling, and Franca[11] researched on performance evaluation of rotary-percussive tester and physical interaction between the drill bit and rock. The target product of Franca[11] was DTH (Down-the-hole) hammer bit operated by compressed air. On the other hand, that of current paper is TH (Top hammer) drill bit operated by hydraulic drifter.

There were many researches that worked on the drilling performance of the drill bit. However, works on the effect of design factors (i.e., internal flushing channel, type of the bit head, type of the drill bit buttons, and the button arrangement) and analysis of drilling test data that consider the rock properties were not so common. Also, the free fall impact test was not able to apply various operating conditions of the drill bit such as: RPM (revolution per minute), BPM (blow per minute). In the previous testing system,[12] the hammer bit provided percussion and feed forces to the specimen and rotational energy were independently supplied by the core drive system located on the bottom. This study provided the three forces (percussion, feed, and revolution) to the bit at once to minimize the performance deviation between the testing system and the Top hammer drill

© KSPE and Springer 2015

Optimum Operating Conditions of a Multi-Hammer Drilling Machine Assessed using a Linear Percussion Test



Optimum Operating Conditions of a Multi-Hammer Drilling Machine Assessed using a Linear Percussion Test

Sunghoon Ryu[1], Jung-Woo Cho[2,*], Jin-Young Park[2], Jae-Wook Lee[2], Myeong-Sik Jeong[2], Chang-Heon Song[2], Jung-Gyu Kim[3], and Jae-Joon Song[2,#]

KEYWORDS: Linear percussion test, Multi-hammer drill, Trenchless technology, Micro-tunneling, Optimum operating condition

To minimize social cost and to avoid existing obstacles (e.g., buildings, buried pipes, rivers, and ocean), cable and electricity tunnels are constructed mainly using trenchless technology. We have developed a new method for micro-tunnel excavation using a multi-hammer drilling machine and identified the optimum operating conditions of the system. A linear percussion testing system was constructed to acquire rock drilling data. The tests were conducted under various air pressures and RPMs consistent with field conditions. Three classes of rock specimens in terms of strength (i.e., hard, medium, and moderate rock) were tested. The test results yielded the optimum operating conditions of the multi-hammer drilling machine according to rock strength.

Manuscript received: July 31, 2014 / Revised: February 9, 2015 / Accepted: April 13, 2015

NOMENCLATURE

E_p = total percussive energy used in the air compressor and pulling machine (MJ)
f = frequency (Hz)
r = radial distance from the center of the multi-hammer drilling machine to the center of the hammer (m)
SE = specific energy (MJ/m^3)
v = linear transportation velocity of the specimen (m/s)
v_1 = linear transportation velocity of the specimen corresponding to the outer hammer bit (m/s)
v_2 = linear transportation velocity of the specimen corresponding to the inner hammer bit (m/s)
V_{cut} = volume of cut rock (m^3)
w = angular velocity (rad/s)

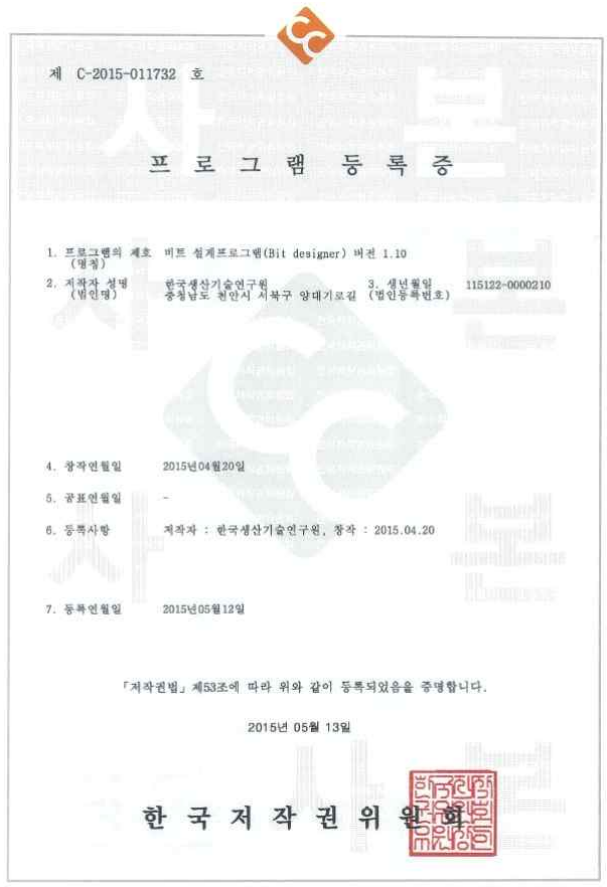
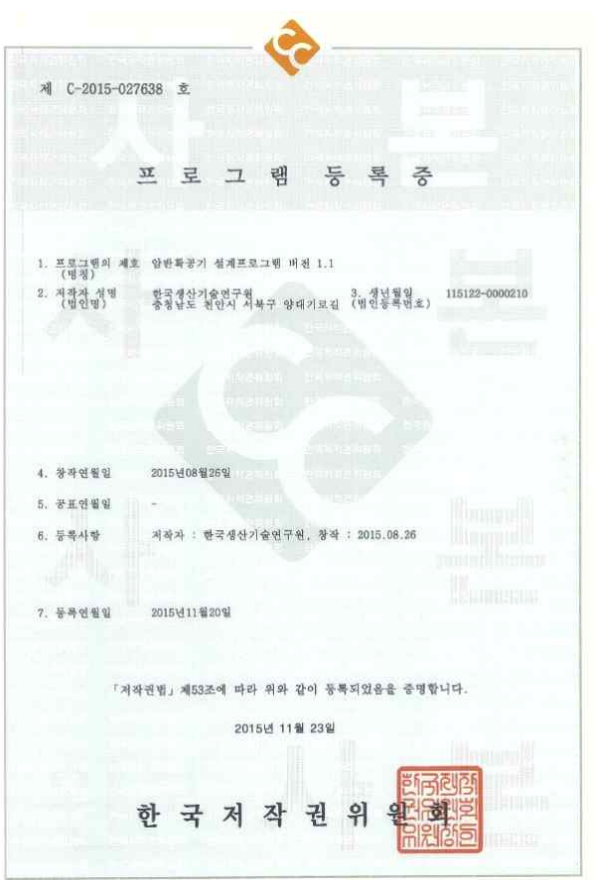
1. Introduction

The urbanization of industries and populations is expanding the demand for underground infrastructure in cities.[1] For example, narrow utility tunnels for pipes, ducts, and cables have become increasingly needed. Most are constructed underneath urban spaces. Tunneling is particularly needed for the communication and electricity cables required by widely expanding IT-based services. Such tunnels, generally 0.2–3.0 m in diameter and up to 20 m deep, must frequently penetrate effectively composite ground containing other infrastructure.[2,3]

To avoid tunnels intersecting with existing facilities and to minimize social costs, trenchless micro-tunneling has been steadily developed in recent years.[4–6] Small-scale trenchless digging can employ pipe jacking, small-scale blasting, and micro-tunnel boring machines (micro-TBMs).[7] Pipe jacking involves inserting a pipe into the tunnel face and workers digging out rock debris that is fragmented into the pipe. The method is simple but normally limited to use in soil, as its penetration of rock is very slow. Blasting can be applied to any ground conditions (i.e., soil, rock, and composite ground), but the accompanying ground vibration and noise can damage buildings and disrupt people, meaning it is often prohibited in urban areas. Micro-TBMs (also called semi-mechanized shield TBMs in Korea) can be used in both sandy soil and rock, but boring in rock is generally slow.[7–9] Recently, a multi-hammer drill machine is also used for micro-tunnelling. There are some studies on the flushing channel and button arrangement of a drill bit[9,12] and

© KSPE and Springer 2015

다. 소프트웨어(S/W) 등록: 2건

프로그램명: Bit Designer v1.1	알반확공기 설계프로그램 v1.1
	

제 C-2015-011732 호

프 로 그 램 등 록 증

1. 프로그램의 제호 (명칭) 비트 설계프로그램(Bit designer) 버전 1.10
2. 저작자 성명 (법인명) 한국생산기술연구원 충청남도 천안시 서북구 양대기로길 3. 생년월일 (법인등록번호) 115122-0000210
4. 창작연월일 2015년04월20일
5. 공표연월일 -
6. 등록사항 저작자 : 한국생산기술연구원, 창작 : 2015.04.20
7. 등록연월일 2015년05월12일

「저작권법」 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2015년 05월 13일

한 국 저 작 권 위 원 회

제 C-2015-027638 호

프 로 그 램 등 록 증

1. 프로그램의 제호 (명칭) 알반확공기 설계프로그램 버전 1.1
2. 저작자 성명 (법인명) 한국생산기술연구원 충청남도 천안시 서북구 양대기로길 3. 생년월일 (법인등록번호) 115122-0000210
4. 창작연월일 2015년08월26일
5. 공표연월일 -
6. 등록사항 저작자 : 한국생산기술연구원, 창작 : 2015.08.26
7. 등록연월일 2015년11월20일

「저작권법」 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2015년 11월 23일

한 국 저 작 권 위 원 회

라. 암반확공기 신모델 시제품/완성품 제작

(1) 암반확공기 시제품 제작 및 보완

(가) 상기의 내외부 설계/가공/제작 공정을 통해 직경 900㎜ 확공기의 시제품이 완성됨.

(나) 암반확공기 1차 시제품: 4개의 해머비트가 상착됨.

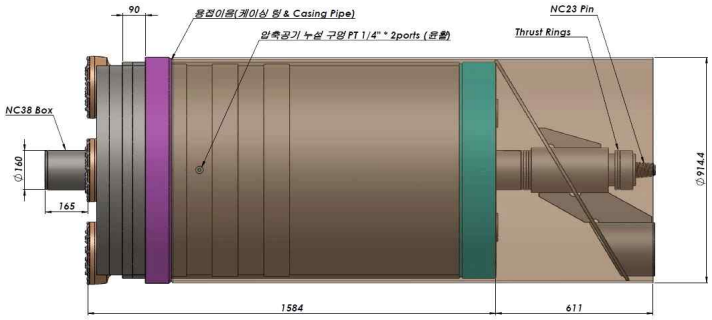




그림 50. 암반확공기 1차 시제품 개발

(2) 암반확공기 2차 시제품 보완제작

(가) 시제품의 상실을 극대화하고 단실을 보완하고자 직경 650㎜ 2차 시제품 제작함.

(나) 커터헤드와 더널면의 재밍을 방지하기 위하여 대형 비트를 상착함.

- 암분배출 원활히 하기 위하여 스크류 케이스 외곽에 상착함.



그림 51. 암반확공기 2차 완성품 개발

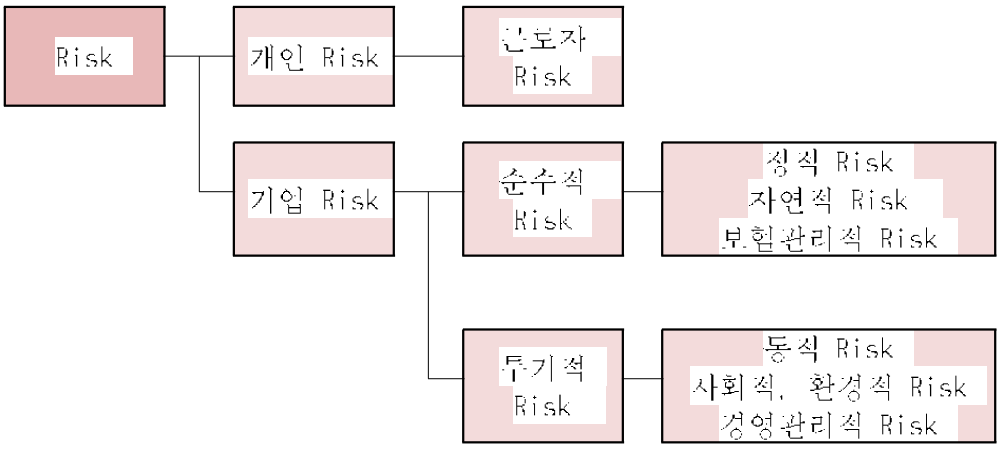
3. 리스크 관리체계

가. 리스크 관리 개요

(1) 건설공사의 Risk관리란 공사시행도중 발생할 수 있는 인명피해 또는 재정적 손실등과 같은 불이익의 가능성을 예방하기 위한 관리 System을 말한.

(2) 건설공사는 공사시행 중 항상 위험성을 내포하고 있으므로 위험성이 예상되는 요인을 사전에 발견하여 사전에 대비할 수 있는 체계적인 관리가 필요함.

나. Risk의 구분



다. Risk 관리 방안

(1) Risk 사전인식

(가) 외적 Risk

예측 불가능한 Risk	예측 가능한 Risk
- 예측 불가능한 요인이 발생하여 건설관계 법령 개정 - 폭우, 폭설 등의 자연재해 쟁동, 태업 등에 따른 작업거부 지역주민의 민원 제기 발주처 방침 변경에 따른 공기지연	- 환율, 물가상승, 금융, 세금제도 등의 변화 - 국.내외 환경변화에 따른 건설시장의 개방 구매조건, 조달조건 등의 변화 경제적, 사회적, 환경적 영향

(나) 내적 Risk

비 기술적 Risk	기술적 Risk	법규관련 Risk
- 공기지연 - 공사비 초과 - 자금수급 중단	설계누락 설계내용과 현장조건의 차이 - 작업성, 생산성, 경제성 - 신기술, 신공법 특허	인.허가 특허권 - 소송 - 계약

(2) 위험도 영향 분석

(가) Risk의 발생 원인별 원인분석

(나) Risk가 발생할 가능성

(다) Risk가 Project에 미치는 손실, 손해의 영향분석

① 기술적 측면의 영향

② 비용에 미치는 영향

③ 공정에 미치는 영향

(라) Risk가 작업분류에 미치는 영향

(마) Risk가 Network구성에 미치는 영향

(바) Risk를 LCC측면에서 분석

(3) Risk의 완화 및 회피

보험으로 처리 할 수 있는 Risk	공정에 영향을 주는 Risk
- 인적,물적 재산상의 손해 - 공사중지 등 간접적 손해 - 법적인 손해배상책임 - 피해범위의 산정	- 공기,공사비 등 당초계획을 변경 - 계약범위를 재설정 - 사업의 불확실성 증가 - 공정만회, 원가절감 등 긴급대책 수립 - Project를 LCC측면에서 사업성 재분석

(4) Risk대응 관리

(가) Risk 분산

① 발주자, 설계자, 시공자에게 Risk 분산

(나) Risk에 대한 보증

라. Risk 제어를 위한 조직관리 방안

(1) Risk 대응관리에 필요한 자료를 문서화 하여 재발 방지

(2) Risk 소요재원을 분석하여 경제적 측면에서 사업성 분석

(3) 추후 Risk에 대한 검색, 수정이 용이하도록 자료 관리

마. 암반확공 시공시 리스크 관리대책

(1) 시공시 시작구와 도달구의 방향 이탈시 대책

① Locator(전자기장 센서)를 이용하여 슈딩시 드릴비트의 위치를 실시간으로 계측하여 방향성을 담지함.

② 경로이탈이 감지되면, 로드 선단을 후진하여 굴진경로를 수정한 후 상하좌우 방향을 설정하여 재 진입함.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 실적 성과지표 및 달성도

(1) 연구수행한 결과를 바탕으로 도출된 실적 성과지표의 달성도는 아래의 표와 같음.

(2) 연구계획서 상에 기재된 성과지표를 100%이상 충족하여 1차년 연구목표를 성실히 달성한 것으로 판단됨.

실적 성과점검기준						
실적 성과지표		측정방법	검증방법	목표치	달성치	달성도
1	굴착가능 안반강도 경암 (MPa)	일축압축 시험	해머굴착시 힘	100	140	140%
2	확공직경 (mm)	현장시험	터널직경계 측	650mm	650	100%
3	확공횟수	현장시험	횟수검증	1회	1회	100%
4	천공속도, 경암 (m/hr)	현장시험	굴진율측정	0.8 m/hr	0.75 m/hr	94%
5	천공속도 ,중경암(m/hr)	현장시험	굴진율측정	1.0 m/hr	1.10 m/hr	110%
6	천공속도 ,보통암(m/hr)	현장시험	굴진율측정	1.2 m/hr	1.43 m/hr	120%
7	확공기 설계 프로그램	프로그램 등록	등록	1 개	2 개	200%
8	확공기 설계안	설계도	보고서	1 개	1 개	100%
9	확공기 제작기술	시제품제 작	보고서	1 개	1 개	100%
10	굴진율 획득/예측기술	데이터수 집	보고서	1 개	1 개	100%
	달성도 평균치					116.40%

나. 양적 성과지표 및 달성도

(1) 연구계획서에 명시된 양적 성과지표 달성도 목표치와 달성도는 아래에 기록함.

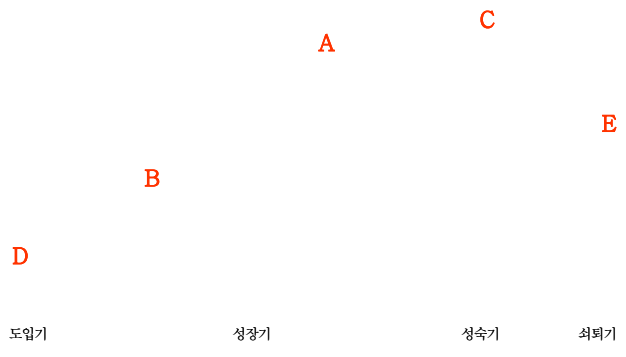
(2) 특허출원, 논문게재, 시제품 제작, 소프트웨어 등록 4가지 항목 모두 목표치를 초과 달성함.

(3) 양적 성과지표의 증빙자료는 8장(대표연구성과)와 연구성과 별첨자료에 기록하여 증빙함.

양적 성과점검기준표					
양적 성과지표		검증방법	목표치	달성치	달성도
1.	특허출원	특허출원 완료	2	3	150%
2.	논문	학술지 게재	2	3	150%
3.	시제품	압반확공기 시제품	2	2	100%
4.	S/W	소프트웨어 등록	1	2	200%
	달성도 평균치				**150.00%**

2. 관련 분야 기여도

가. 기술 수명주기



- 수명주기상 위치 : (B)
- 선택근거
  다중해머는 현재까지 수직천공(지하수, 수직갱, 반기초공사)에만 활용됨.
  다중해머를 이용한 조향식 수평천공 시공법이 소구경 터널시공 분야에 사용된 국내사례는 없음.
  본 과제를 통해 국내외 소규모 터널 시공에 도입/적용될 것으로 기대됨.

나. 기술개발 수준

(1) 당시 기술 수준

(가) 본 연구를 제안하고 시작하는 시기에 다중해머를 이용한 조향식 수평천공시공법이 소구경 터널시공 분야에 사용된 국내사례는 전무함. 따라서 당시 기술수준은 유사환경

시험단계인 TRL(Technology Readiness Level) 5단계에 해당되는 상태였음.

(2) 개발후 현재기술 수준

(가) 암반확공기 시제품 신모델을 개발하여 다수의 암반확공 현장시험을 수행하고, 성능시험 및 검증을 완료하였음.

(나) 본 과제를 통하여 2년의 개발기간 동안 TRL(Technology Readiness Level) 5단계에서 8단계까지 도달한 것으로 판단된다.

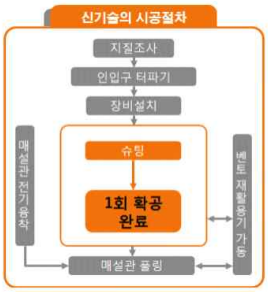
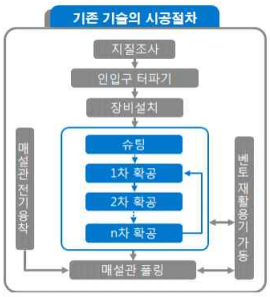
구 분		표 기	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	■	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	TRL 6	유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	■	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계



3. 기술의 경제적 우수성

가. 현장시험시공 및 선형굴착시험 결과 등에서 나타난 굴진율을 기준으로하여 기존의 HDD공법 및 세미쉴드 공법의 공기산정 및 공사비를 비교한 결과 고속시공으로 공기절감 및 시공 경제성을 확보 할 수 있는 기술임.

나. 개발기술은 기존 HDD공법에서 나타난 수차례의 확공공정을 단 1회로 확공함. 따라서 공사기간을 대폭 절감 할 수 있으며 또한, 세미실드공법에 비해 본 공사 추진을 위한 수직구 가시설공사 등이 불필요하므로 부대공사비용이 현격히 절감되고 전공속도 또한 빠르기 때문에 가격 경쟁력을 충분히 갖출 수 있음.

구 분	신공법	HDD공법	세미쉴드공법
시공 개념			
공법 개요	- 소구경의 드리콘비트를 장착한 Mud Moter에서 고압의 벤토나이트를 분사, 회전하여 Locator관측에 의한 조향성에 따라 지하 지장물 등을 피해 통과지심을 기록하며 Pilot Hole을 구축 - 다중의 Dth해머를 장착한 원통형 천공장치를 사용하여 선천공의 노선에 따라 공압을 이용한 해머비트의 타격력과 Drill Rig의 회전력을 이용한 견인력으로 단1회로 확공하는 회전파쇄천공 확공된 Hole을 따라 Pipe(P.E관등)를 Pulling한다	- 소구경의 드리콘비트를 장착한 Mud Moter에서 고압의 벤토나이트를 분사, 회전하여 Locator관측에 의한 조향성에 따라 지하 지장물 등을 피해 통과지심을 기록하며 Pilot Hole을 구축 - Drill Rig의 구동력에 의한 암반용 확공기를 견인하여 암을 갈아내면서 천공하는 Rotary Crushing 방법으로 D950 확공 직경 기준으로 7회에 걸쳐 단계적 암반용확공기를 이용하여 순차적 확공 확공된 Hole을 따라 Pipe(P.E관등)를 Pulling한다	- Semi-Shield Machine이라는 강재 원통형의 굴착기계를 수직 작업구에 투입시켜 기계의 선단부에 장착된 굴착용 Cutter Head를 회전시키면서 지반을 굴착 - 각종의 보조공법으로(이수 및 활재주입) 막장면의 붕괴를 예방하면서 굴진기 후방부에 추진관을 조립 유압 잭키로 압입추진 시키는 것을 반복하면서 관로를 설치하는 공법
확공기 (추진기)			
공사 기간	- D900mm, L=100m기준 지질상태 : 연암 34일 소요	- D900mm, L=100m기준 지질상태 : 연암 97일 소요	- D900mm, L=100m 기준 지질상태 : 연암 134일 소요
시공비 (직접비)	- 245만원/m	- 400만원/m	- 734만원/m (수직구 가시설 별 포함)

주1) 변점 공사비 내역서 참조

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 개발기술의 활용방안

가. 향후 HDD 수평 천공의 제작 및 설계기술을 확보하고, 개발 목표인 비개착식 공법은 천공 장비 및 굴착 산업에 유용하게 활용될 전망임.

나. 안만확공 현장시험을 통해서 발주처 및 수요처를 초빙하여 현장시공 시연회 개최할 예정.

다. 기존 제품(세미쉴드M/C) 대비 개발 제품의 향상된 천공성능과 공기실감에 의한 시공 경제성 증대 등 경제적, 환경적인 장점을 적극 홍보하여 건설시공 시 신공법으로의 공사 발주를 유도하고, 세부 기준을 정립할 예정임.

라. 건설기계 장비의 가혹한 적용에 따른 장비와 부품의 마모/파손 등이 빈번하기 때문에 부품과 어태치먼트의 다양한 부품의 수리와 교체가 발생됨. 신규 금속소재 산업과 연관된 고 내구성 신소재 기계/합금 부품 관련 고부가가치의 신 시장 창출이 예상됨.

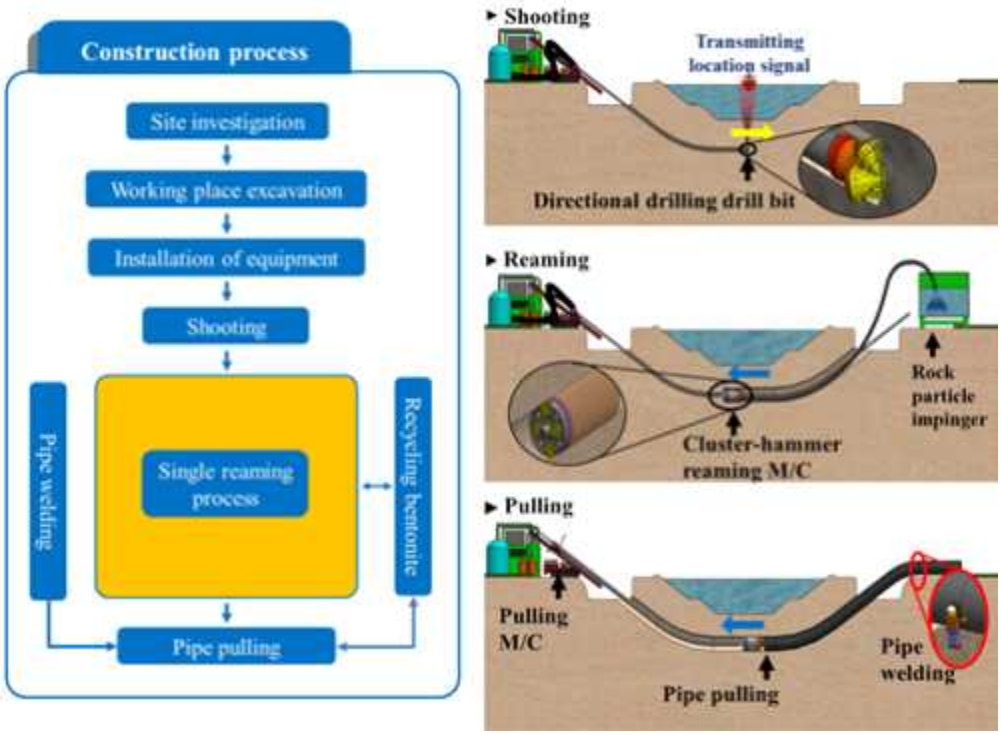


그림 52. Procedure of new technology with cluster hammer reaming machine

2. 개발기술 및 성과의 파급효과

가. 기술적 측면

(1) 굴착속도 향상, 시공기간 감축으로 비개착공법의 경제성 확보.
(2) 굴착 장비 및 건설기계 국내시장 점유율 급속 향상에 기여함.
(3) 천공산업의 경제성 제고 및 제조업의 국제경쟁력 강화에 기여함.
(4) 수평천공(Horizontal Directional Drilling) 방식 안반 확공기 최적 모델 설계 및 시제품 개발하여 비개착식 확공법의 기술자립을 유도함.
(5) HDD 수평 확공기의 제작 및 설계기술을 확보하여 고효율의 확공이 가능해짐에 따라 기술경쟁력을 강화할 수 있음.
(6) 수평조향식 확공방식은 비개착 천공방법을 이용함으로 천공 작업 안전성 및 환경파괴 최소화를 달성함.

나. 경제·산업적 측면

(1) 천공산업
(가) 세계적으로 천공산업은 조선 산업의 2배 규모의 산업으로 지속적으로 성장 중임.
(나) 세계시장규모 '10년 약 700억불, '16년 1,000억불 이상 성장할 것으로 예상하며 '01년 이후에는 연평균 8.5% 지속적으로 성장함.(Freedonia Group, 2008).
(다) '01년에서 '11년 사이의 10년 동안에 아시아-태평양 지역의 국산제품의 시장 점유율(매출액 기준)은 31%에 이르며 2016년에는 40%에 이를 것으로 전망됨.
(라) 한국 천공장비 유지보수와 천공 소모품 시장은 연간 1,000억원
(마) 천공기술 개발 성공 시 시장 점유율
국산 천공장비 신장비 국내시장 점유율 : 70% / '10년 → 80% / '18년
세계 신장비 시장 점유율 : 약 0.6% / '10년 → 1.5% / '18년

(2) TBM 산업
(가) TBM 장비는 중대형 TBM 1위 업체인 Herrenknecht사의 매출을 기준으로, 전체 세계시장 규모를 추정하며 2012년 대형 및 초대형 TBM 시장규모는 52억불, 중소형 TBM 시장규모는 50억불로 연간 매출 규모는 102억불로 추정됨.
(나) 2015년 이후 세계 TBM 시장규모가 300~400억불로 성장할 것으로 예상됨.
(다) 세계시장에서 TBM산업은 연 30%정도로 꾸준히 성장중임.
(라) 한국의 TBM 시장규모는 약 1조원/년 이상 예상됨. 한국의 중소형 TBM(직경 3m이하) 장비 시장도 매년 10%이상 성장하며 2015년 시장규모는 약 4,000억원으로 추정됨.
(마) 이 중 본 사업과 연관 있는 1m이하 소구경 TBM(세미쉴드, 안반확공) 산업의 매출규모를 아래와 같이 예측 됨. (국내매출 : 400억원/2010년 → 900억/ 2016년)

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

비개착 터널공법 및 기계를 이용한 암반굴착과 관련한 다양한 연구는 예전부터 지속되어 왔다. 그 중 본 연구과 밀접한 관련이 있는 과학기술 및 연구사례를 간단히 정리함.

1. 기계식 암반천공 및 굴삭 관련 해외 연구사례

- Su et al.(2012)은 적합한 타입의 굴착 도구 선택을 위해 치즐(chisel)과 비트(button bits)의 암반굴착성능을 비교 검토함.

- Altindag (2009, 2003)는 거침계수(coarseness index), 평균 입자 크기(mean particle size), 취성계수(brittleness index) 등을 이용해 암반 굴착 시 굴진율을 예측하는 방법을 제안함.

- Shaterpour-Mamaghani et al.(2015)는 다수의 커터(cutter)를 장착한 raise boring machine의 굴진율과 운용 변수를 예측하기 위한 경험적인 모델을 제안함.

- Zhao et al.(2014)는 DTH 해머비트를 경사방향으로 사용했을 때의 성능 변화를 분석하고 예측모델을 제작함.

- 암반확공기를 이용한 굴착 공법을 도입하기 위해서는 위와 같은 사전 연구에 더불어 커터헤드 설계, 해머비트 비트의 배열, 암분 배토 문제 등 다양한 방면의 연구가 필요하다고 보고된 바 있음(Kwon et al., 2014; Song et al., 2015, 2014).

2. 비개착공법 관련 기존 국내외기술 정보

가. 강관압입공법

(1) 강관압입공법은 철도, 도로, 하천 등을 관통하여 관로를 설치하는 공사인, 지장물이나 교통상황 등 기타 환경적 여건으로 인해 개착식 공법으로의 적용이 곤란한 경우 적용되며, 다 매설물이나 차량통행에 지장을 주지 않음. 후방의 반력벽에 지지된 유압잭을 이용하여 추진관을 압입 후, 추진관 내부에서 인력 및 장비로 굴착하여 버력과 토사를 외부로 반출시킨 뒤 본관을 삽입하여 지중 매입하는 공법임.

(2) 강관압입공법은 연약지반 개량, 철도/고속도로 침하방지, 상·하수도관, 가스관, 전력구, 송유관, 농수로 등 광범위한 용도로 사용됨. 일반적으로 시공연장이 짧을수록 유리하나 관경과 토질조건에 따라 다름. 시공연장의 산정 및 적용은 현장의 여건에 따라서 직경 3,000㎜이상의 대구경 추진도 가능하나, 현장의 여건 즉, 토질, 지하수위, 토피, 관경에 따라서 달라짐. 우선적으로 토질의 조건과 지하수위의 유무를 고려해야 함.

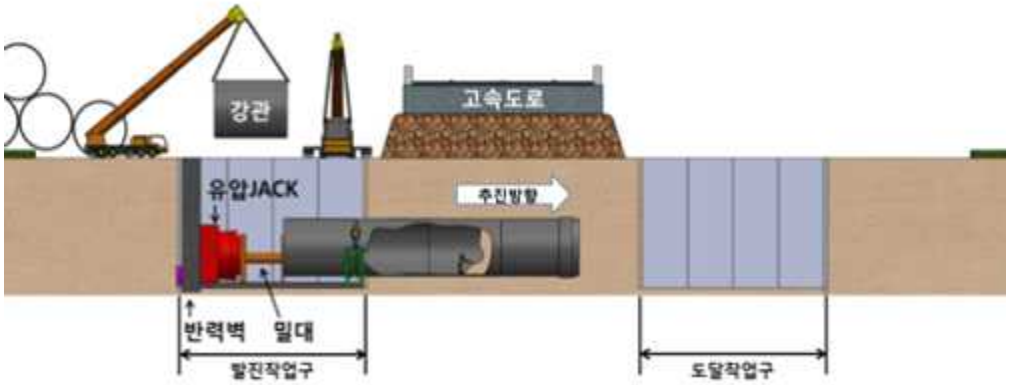


그림 53. Schematic view of pipe jacking method

나. 세미쉴드(semi shield)공법

(1) 세미쉴드공법은 micro-TBM method 혹은 semi-mechanized shield TBM공법의 건설 용어로 일본과 한국에서 통용됨.

(2) 아래 그림 54와 같이 수직구/도달구 개착, 반력벽 설치, 강관추진 등 추진력을 제공하는 방법은 강관압입공법과 동일하나 추진기로서 소형 TBM을 사용하고, 굴착토/버력을 배출시스템을 통해 자동 배출한다는 점에서 강관압입에 비해 진보된 공법임.

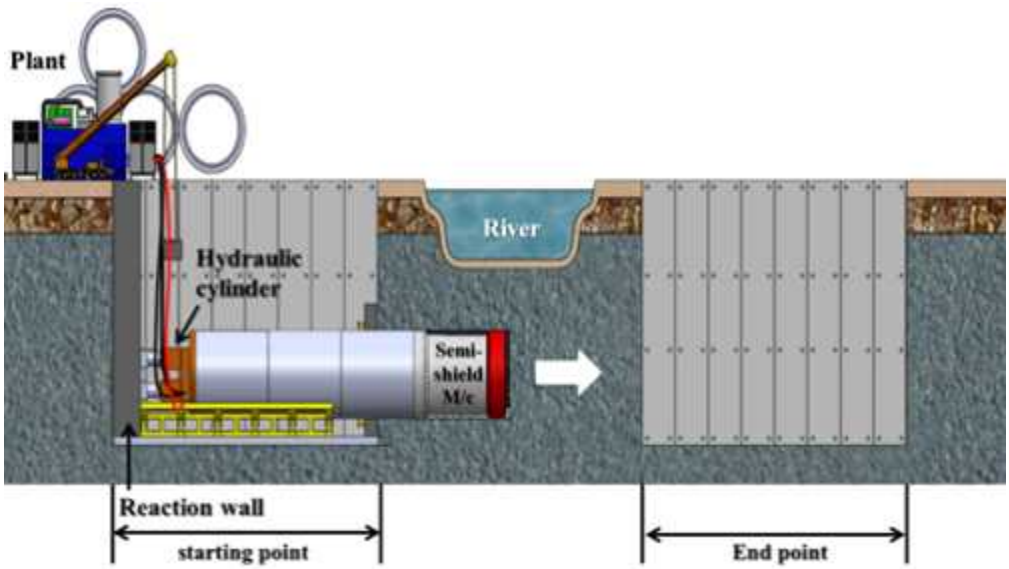


그림 54. Schematic view of pipe jacking method

다. HDD(horizontal directional drilling)공법

(1) 조향식 수평천공(HDD, horizontal directional drilling)공법이라고도 함. 지금까지 전력선, 통신, 가스배관 등을 시공할 때 하천, 도로, 철도나 만(灣)을 횡단하는 경우 수직구를 개착한 후 터널을 굴진하는데 비하여 HDD공법은 별도 수직 개착구 및 반력벽을 가설하지 않고 지면에서 특정각도(조향식)로 굴착하는 공법임.

(2) 굴진장비의 로드선단에 장착된 드릴 헤드로 먼저 슈팅공정이라 불리는 파일럿 터널(pilot hole) 시공 공정을 거친 후 확공기를 이용하여 여러 단계(5~8회)로 확공하며 최종적으로 요구되는 매관경의 1.2배까지 터널을 확공한 후 매관(강관, PE관)을 매설함.

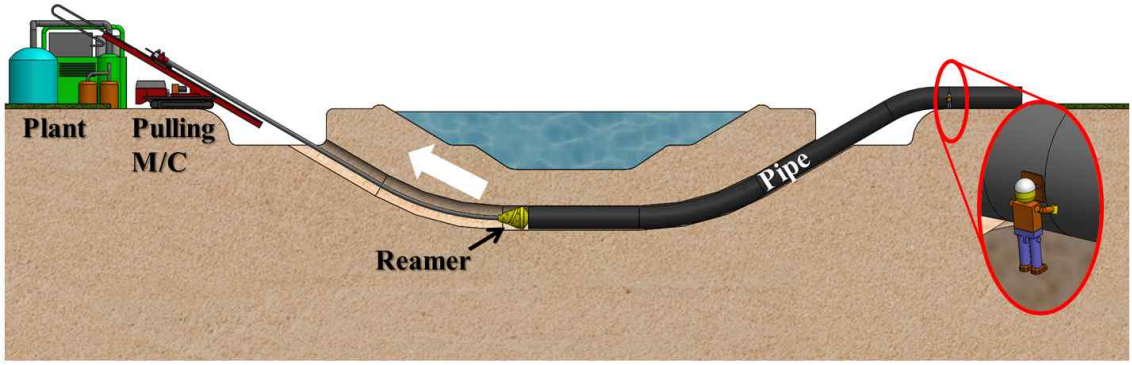


그림 55. Schematic view of horizontal directional drilling method

(가) HDD(horizontal directional drilling) 공법의 장점

① 교통, 소음/진동, 민원 등의 시공 상애요소가 없는 기존 비개착식 공법의 장점이 있음.

② 기존 기반시설 및 건축물을 회피하여 방향성 시공이 가능함. 도심공간의 제약을 최소화 할 수 있어서 다 비개착공법(강관압입, 세미쉴드)에 비하여 시공성이 우수함.

③ 수직개착구가 필요치 않으므로 수직구 터파기 비용이 필요치 않아 타공법(강관압입, 세미 쉴드)에 비해 경제적임.

④ 강관압입공법, 세미쉴드공법에 비하여 상대적으로 작은 추력으로 안반굴착이 가능하므로,유압장비의 설치가 필요 없고, 지상에 위치한 압입장비의 자체 추력만으로 굴진이 가능함.

⑤ 하천/해안 하부 터널횡단 시 시공완료 후 매관의 부양 우려가 없고, 선박의 닻에 의한 손상의 우려가 없음.

(나) HDD(horizontal directional drilling) 공법의 단점

① 자갈층, 호박돌 등 암반층에 대한 적용이 곤란하며, 공법 상 장척관(강관 및 PE관) 연결을 위한 지상의 추가 공간이 필요함.

② 전반적으로 다 공법대비 공기를 단축시킬 수 있으나 확공 과정에서 여러 단계의 확공 과정을 거쳐야하는 단점이 있음.

③ 유압잭에 비해 압입장비의 추력이 낮기 때문에 암반굴진율이 세미쉴드에 비해 매우 낮음.

3. 암반의 공학적 분류

암반분류체계는 암반의 특성을 경험적 자료를 바탕으로 정량화하는 방법이며 암반분류결과는 계측결과, 현장경험 및 공학적 판단을 종합하여 암반조건과 지보량을 평가하는데 사용됨. 암반분류법은 1946년 Terzaghi에 의한 암반하중 분류법(rock load classification)이 제안된 후 여러 가지의 다른 방법이 제시된 바 있으며, 현재 가장 널리 사용되고 있는 방법은 아래 표에 정리함.

본 연구과제에서는 표 13에 기재된 국제암반역학회의 분류를 기준으로 현장암반상도를 측정하고 암반등급을 분류하였다.

표12. 현재 사용되고 있는 주요 암반분류법

분류법	제안자, 연도	개발된 나라	적용범위
암반하중	Terzaghi, 1946	미국	철재지보 터널
자립시간	Lauffer, 1958	오스트리아	터널
RQD	Deere, 1964	미국	천이주상도, 터널
무결암의 강도	Deere&Miller,1966	미국	정보교환
RSR 개념	Wickham 등, 1972	남아프리카,	터널
RMR 분류	Bieniawski, 1973	미국	터널, 광산, 기초
Q 분류	Barton 등, 1974	노르웨이	터널, 대규모 공동
강도/블록크기	Franklin, 1975	캐나다	터널
기초 지반공학적 분류	ISRM, 1981	국제학회	범용

표13. 국제암반역학회(ISRM)의 두길암 분류(1981)

용어	단축압축강도(MPa)
극경암 (very high strength)	240 이상
경 암 (high strength)	100 240
중경암 (medium strength)	50 - 100
보통암 (moderate strength)	25 - 50
연 암 (low strength)	5 - 25
극연암 (very low strength)	1 5

표14. 단축 압축강도에 따른 무결암의 분류(Deere and Miller, 1966)

등급	용어	단축압축강도(kgf/cm²)
A	극경암(very high strength)	> 2,240
B	경암(high strength)	1,120 -
C	보통암(medium strength)	560 -
D	연암(low strength)	280 -
E	극연암(very low strength)	< 280

가. 우리나라의 분류

표 15. 건설부 표준품셈의 암반 분류 (이희근, 양형식 외, 1997)

암반분류	암종그룹	암편 내압 강도(kg/cm²)
풍화암	A	300 - 700
	B	100 - 200
연 암	A	700 - 1000
	B	200 - 500
보통암	A	1,000 - 1,300
	B	500 - 800
경 암	A	1,300 - 1,600
	B	800 이상
극경암	A	1,600 이상

표 16. 지질품셈의 암석 강도분류 (이희근, 양형식 외, 1997)

암반분류	단축압축강도(kg/cm²)
풍화암	125 이하
연 암	125 - 400
중경암	400 - 800
경 암	800 - 1,200
극경암	1,200 이상

표 17. 한국도로공사 암석 분류 기준 (이희근, 양형식 외, 1997)

암질	압편 내압 강도(kg/cm^2)
풍화토	2 이하
풍화암	600 이하
연 암	600 - 800
보통암	800 - 1,000
경 암	1,000 이상

[참고문헌]

이희근, 양형식 외, 1997, 응용암석역학, 서울대학교 출판부, pp. 119-170.

Bieniawski, Z.T., 1984, Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, A.A. Balkema, p272.

Deere, D.U. and Miller, R.P., 1966, Engineering classification and index properties for intact rock, Illinois Univ. at Urbana Dept. of Civil Engineering.

Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F., 1998, Support of Underground Excavations in Hard Rock, A.A. Balkema, p215.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

- 본 과제는 보안등급이 일반과제 등급으로 공개가 가능한 과제임.
- 단, 과제종료 후 6개월이내 국토부의 건설신기술을 접수하고자 하므로, 건설신기술 접수/심사일 까지 대외보안이 필요함.

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비현황

[해당사항 없음]

제9장. 연구개발수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행 실적

[해당사항 없음]

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

1. 대표 연구실적

번호	구분(논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속기관명	역할	논문 게재지/특허 등록국가	영향력지수	논문 게재일/특허 등록일	사사 여부(단독사사 또는 중복사사)	특기사항(SCI 여부/인용 횟수 등)
1.	특허출원	안분 배출이 효과적으로 이루어지는 DTH 방식의 천공기 및, 이를 이용한 천공방법	한국생산기술연구원	주발명사	대한민국		2015.03.26	단독	
2.	특허출원	곡선 궤도로 굴착이 가능한 확공기 및, 이를 이용한 확공 방법	한국생산기술연구원	주발명사	대한민국		2015.08.26	단독	
3.	특허출원	터널 상부에서 이완 또는 붕락된 암석 블록과 암분을 터널 외부로 배출할 수 있는 확공기 및, 이를 이용한 확공 방법	한국생산기술연구원	주발명사	대한민국		2015.08.26	단독	
4.	SCI논문	Design Study of a Rock Particle Flushing Device for a Rock Reaming Machine by CFD Simulation	한국생산기술연구원	주저자	International journal of precision engineering and manufacturing	1.2	2015.06.01	중복	SCI(E)

5.	SCI논문	Development of Lab-Scale Rock Drill Apparatus for Testing Performance of a Drill Bit	한국생산기술연구원	주저자	International journal of precision engineering and manufacturing	1,2	2015.06.01.	중복	SCI(E)
6.	SCI논문	Optimum Operating Conditions of a Multi-Hammer Drilling Machine Assessed using a Linear Percussion Test	한국생산기술연구원	주저자	International journal of precision engineering and manufacturing	1,2	2015.06.01	중복	SCI(E)
7.	S/W	비트설계프로그램(Bit designer) 버전 1.10	한국생산기술연구원	주발명사	대한민국	-	2015.04.20	단독	-
8.	S/W	암반확공기 설계프로그램 버전 1.1	한국생산기술연구원	주발명사	대한민국	-	2015.08.26	단독	-

※ 참고사항

- 상기 기록된 특허, 논문 등의 정량적 연구성과물은 본 과제로부터 취득한 성과물이므로, 주관/공동기관의 공통목표인 건설신기술 취득시까지 주관기관에 무상이전할 계획임.
- 건설신기술은 주관/공동기관이 공동으로 도전하며, 상호협의된 지분에 의거하여 향후 상용화 추진할 예정임.

제11장. 기타 사항

1. 현장시험부지 암반강도 공인시험성적서

(시험기관: 서울대학교 암반공학연구실)

암반확공기 오학동 현장시험 중 수평코어분석
(경기도 여주시 오학동)

실 내 암 석 시 험 보 고 서

2015. 04

서울대학교 공과대학
에너지시스템공학부 암반공학연구실

TABLE OF TEST RESULT : UNIAXIAL COMPRESSION

용 역 명 : 암반확공기 오학동 현장시험 중 수평코어분석 (경기도 여주시 오학동, 2015년 04월)

Sample Number	Rock Type	Specific Gravity	Porosity (%)	Size of Specimen D x L (mm)	Wave Velocity (m/sec)		Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Depth (m)
					P wave	S wave				
BH - 0		2.79	0.40	50.2 x 122.7	5400	2980	160	85.6	0.12	1
BH - 1		2.68	0.98	50.5 x 98.2	5280	2810	140	60.1	0.22	1
BH - 2		2.69	1.00	50.6 x 92.8	5270	2800	105	56.9	0.19	1
BH - 3		2.67	1.54	50.6 x 117.8	4590	2680	60	29.5	0.30	1
BH - 4		2.70	1.21	50.6 x 107.5	4760	266	88	47.6	0.23	1

ROCK MECHANICS LABORATORY, DEPARTMENT OF ENERGY SYSTEMS ENGINEERING, SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

TABLE OF TEST RESULT : UNIAXIAL COMPRESSION

용 역 명 : 암반확공기 오학동 현장시험 중 수평코어분석 (경기도 여주시 오학동, 2015년 04월)

Sample Number	Rock Type	Specific Gravity	Porosity (%)	Size of Specimen D x L (mm)	Wave Velocity (m/sec)		Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Depth (m)
					P wave	S wave				
BH - 5		2.71	0.90	50.6 x 115.6	5350	2910	143	51.3	0.18	1
BH - 6		2.69	1.34	50.6 x 118.8	4810	2780	68	35.3	0.29	1
BH - 7		2.70	1.32	50.7 x 118.6	3330	2170	112	48.9	0.23	1
BH - 8		2.69	1.02	50.7 x 120.5	5310	2860	168	63.0	0.12	1
BH - 9		2.69	0.92	50.7 x 119.0	5130	2850	163	48.1	0.17	1

ROCK MECHANICS LABORATORY, DEPARTMENT OF ENERGY SYSTEMS ENGINEERING, SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

TABLE OF TEST RESULT : UNIAXIAL COMPRESSION

용 역 명 : 암반확공기 오학동 현장시험 중 수평코어분석 (경기도 여주시 오학동, 2015년 04월)

Sample Number	Rock Type	Specific Gravity	Porosity (%)	Size of Specimen D x L (mm)	Wave Velocity (m/sec)		Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Depth (m)
					P wave	S wave				
BH - 10		2.71	0.61	50.7 x 117.8	5400	2950	162	67.6	0.12	1
BH - 11		2.70	0.83	50.7 x 119.5	5220	2890	85	42.1	0.30	1

ROCK MECHANICS LABORATORY, DEPARTMENT OF ENERGY SYSTEMS ENGINEERING, SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

암반확공기 능서면 현장시험 중 암석시료분석
(경기도 여주시 능서면)

실 내 암 석 시 험 보 고 서

2015. 11

서울대학교 공과대학
에너지시스템공학부 암반공학연구실

TABLE OF TEST RESULT : UNIAXIAL COMPRESSION

용 역 명 : 암반확공기 능서면 현장시험 중 암석시료분석 (경기도 여주시 능서면, 2015년 11월)

Sample Number	Rock Type	Specific Gravity	Porosity (%)	Size of Specimen D x L (mm)	Wave Velocity (m/sec)		Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Depth (m)
					P wave	S wave				
1		2.67	3.29	52.0 x 107.7	2530	1540	35	6.2	0.38	G. L.
2		2.66	3.16	52.0 x 108.2	2800	1600	56	6.7	0.33	G. L.
3		2.63	3.74	52.3 x 99.0	2840	1680	45	5.1	0.36	G. L.

ROCK MECHANICS LABORATORY, DEPARTMENT OF ENERGY SYSTEMS ENGINEERING, SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

2. 공사비 설계 내역서

DTH 암반확공기 설계내역서

- 연암 L100M D900 -

건명 : 지향성 암반확공 공사원가

No	품 명	규 격	단 위	수 량	재료비		노무비		산출경비		합 계	
					단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액
1)	지향성 압입공사					50,143,027		57,784,629		93,414,222		201,341,878
	Pilot Hole	D216mm,연암층	m	100	109,302	10,930,200	142,241	14,224,100	95,994	9,599,400	347,537	34,753,700
	암반확공기 확공	DTH D900 확공	m	100	298,797	29,879,700	193,651	19,365,100	435,945	43,594,500	928,393	92,839,300
	청소 및 PULLING		m	100	86,509	8,650,900	157,662	15,766,200	397,194	39,719,400	641,365	64,136,500
	PE관 압력관 융착		개소	153	4,459	682,227	55,093	8,429,229	3,274	500,922	62,826	9,612,378
2)	부대공사					2,042,298		2,989,295		3,677,589		8,709,182
	아스팔트포장절단	콘크리트 커터 φ320~400 t3.2m/m	m	20.00	281	5,620	1,534	30,680	839	16,780	2,654	53,080
	아스팔트포장깨기	백호0.7M3 + 대형브레이커	m3	2.4	3,992	9,581	10,064	24,154	8,172	19,613	22,228	53,348
	경광등설치		개소	4	55,648	222,593	32,469	129,875	207	828	88,324	353,296
	터파기	(시작구,도달구)	m3	16.60	537	8,916	2,091	34,707	949	15,760	3,577	59,383
	토사운반	(덤프15TON,현장→임시사토장)	m3	89.00	2,885	256,765	3,209	285,601	2,278	202,742	8,372	745,108
	토사운반	(덤프15TON,임시사토장→현장)	m3	16.60	3,084	51,194	3,583	59,478	2,561	42,513	9,228	153,185
	고르기		m3	16.60	27	452	71	1,172	25	412	123	2,036
	되메우기	B.D 7 TON	m3	16.60	454	7,543	1,769	29,360	803	13,333	3,026	50,236
	다짐	PLATE COMPACTOR 1.5 TON	m3	16.60	168	2,784	2,233	37,074	53	885	2,454	40,743
	EGI휀스설치및해체		m	80.00	10,695	855,600	16,093	1,287,440	1,124	89,920	27,912	2,232,960
	장비운반비	트레일러 20ton	회	2	180,983	361,966	192,599	385,198	110,954	221,908	484,536	969,072
	화물운반비	4.5ton	회	4	64,821	259,284	171,139	684,556	102,174	408,696	338,134	1,352,536
	폐기물처리비	건설오니처리	ton	20.10		0		0	37,204	747,800	37,204	747,800
	폐아스콘처리	2.3ton/m3	ton	5.52		0		0	17,464	96,399	17,464	96,399
	준설차	임대(일대)	식	1		0		0	1,800,000	1,800,000	1,800,000	1,800,000
3)	투입자재					35,179,650		0		0		35,179,650
	PE 압력관	200mm	m	927.00	37,950	35,179,650		0		0	37,950	35,179,650
	직접공사비 계					87,364,975		60,773,924		97,091,811		245,230,710

HDD 설 계 내 역 서

- 연암 L100M D950 -

건명 : 지향성 암반확공 공사원가

No	품 명	규 격	단 위	수 량	재료비		노무비		산출경비		합 계	
					단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액
1)	지향성 압입공사					169,454,027		120,123,229		67,135,122		356,712,378
	Pilot Hole	D216mm,연암층	m	100	109,302	10,930,200	142,241	14,224,100	95,994	9,599,400	347,537	34,753,700
	암반확공기 확공	HDD D350 확공	m	100	116,038	11,603,800	112,160	11,216,000	58,192	5,819,200	286,390	28,639,000
	암반확공기 확공	HDD D450 확공	m	100	138,489	13,848,900	116,281	11,628,100	63,627	6,362,700	318,397	31,839,700
	암반확공기 확공	HDD D550 확공	m	100	165,533	16,553,300	118,337	11,833,700	66,813	6,681,300	350,683	35,068,300
	암반확공기 확공	HDD D650 확공	m	100	179,300	17,930,000	120,406	12,040,600	69,612	6,961,200	369,318	36,931,800
	암반확공기 확공	HDD D750 확공	m	100	220,216	22,021,600	122,461	12,246,100	73,214	7,321,400	415,891	41,589,100
	암반확공기 확공	HDD D850 확공	m	100	235,771	23,577,100	124,528	12,452,800	76,068	7,606,800	436,367	43,636,700
	암반확공기 확공	HDD D950 확공	m	100	279,059	27,905,900	130,263	13,026,300	83,992	8,399,200	493,314	49,331,400
	청소 및 PULLING		m	100	244,010	24,401,000	130,263	13,026,300	78,830	7,883,000	453,103	45,310,300
	PE관 압력관 융착		개소	153.00	4,459	682,227	55,093	8,429,229	3,274	500,922	62,826	9,612,378
2)	부대공사					2,042,298		2,989,295		3,677,589		8,709,182
	아스팔트포장절단	콘크리트 커터 φ320~400 t3.2m/m	m	20.00	281	5,620	1,534	30,680	839	16,780	2,654	53,080
	아스팔트포장깨기	백호0.7M3 + 대형브레이커	m3	2.4	3,992	9,581	10,064	24,154	8,172	19,613	22,228	53,348
	경광등설치		개소	4	55,648	222,593	32,469	129,875	207	828	88,324	353,296
	터파기	(시작구,도달구)	m3	16.60	537	8,916	2,091	34,707	949	15,760	3,577	59,383
	토사운반	(덤프15TON,현장→임시사토장)	m3	89.00	2,885	256,765	3,209	285,601	2,278	202,742	8,372	745,108
	토사운반	(덤프15TON,임시사토장→현장)	m3	16.60	3,084	51,194	3,583	59,478	2,561	42,513	9,228	153,185
	고르기		m3	16.60	27	452	71	1,172	25	412	123	2,036
	되메우기	B.D 7 TON	m3	16.60	454	7,543	1,769	29,360	803	13,333	3,026	50,236
	다짐	PLATE COMPACTOR 1.5 TON	m3	16.60	168	2,784	2,233	37,074	53	885	2,454	40,743
	EGI휀스설치및해체		m	80.00	10,695	855,600	16,093	1,287,440	1,124	89,920	27,912	2,232,960
	장비운반비	트레일러 20ton	회	2	180,983	361,966	192,599	385,198	110,954	221,908	484,536	969,072
	화물운반비	4.5ton	회	4	64,821	259,284	171,139	684,556	102,174	408,696	338,134	1,352,536
	폐기물처리비	건설오니처리	ton	20.10		0		0	37,204	747,800	37,204	747,800
	폐아스콘처리	2.3ton/m3	ton	5.52		0		0	17,464	96,399	17,464	96,399
	준설차	임대(일대)	식	1		0		0	1,800,000	1,800,000	1,800,000	1,800,000
3)	투입자재					35,179,650		0		0		35,179,650
	PE 압력관	200mm	m	927.00	37,950	35,179,650		0		0	37,950	35,179,650
	직접공사비 계					206,675,975		123,112,524		70,812,711		400,601,210

세미쉴드 설계내역서

연암 L100M D900

종 목	규 격	단위	수량	재 료 비		노 무 비		산출경비		합 계		비 고
				단가	금 액	단가	금 액	단가	금 액	단가	금 액	
1) 관추진공	D900	식	1		28,394,022		42,406,684		374,902,123		445,702,829	
2) 추진설비공		식	1		23,064,800		39,374,811		56,887,101		119,326,712	
3) 송배니설비공		식	1		7,230,652		16,393,710		18,948,032		42,572,394	
4) 이수처리설비공		식	1		8,784,640		8,393,819		54,945,279		72,123,738	
5) 부대공		식	1		3,712,464		2,729,952		574,261		7,016,677	
6) 자재비		식	1		47,996,444		-		-		47,996,444	
직접공사비계					119,183,022		109,298,976		506,256,796		734,738,794	
1) 관추진공					28,394,022		42,406,684		374,902,123		445,702,829	
굴진작업공	D900	m	100	-	-	30,334	3,033,400	-	-	30,334	3,033,400	
갱내작업공		m	100	101,723	10,172,300	152,289	15,228,900	6,091	609,100	260,103	26,010,300	
갱외작업공		m	100	-	-	181,222	18,122,236	-	-	181,222	18,122,236	
뒷채움주입공		m	100	28,631	2,863,100	31,983	3,198,300	1,279	127,900	61,893	6,189,300	
기계기구손료(1)		식	1	-	-	-	-	182,593,000	182,593,000	182,593,000	182,593,000	
기계기구손료(2)		식	1	-	-	-	-	189,795,000	189,795,000	189,795,000	189,795,000	
발전기사용료	운전일수	일	149	103,078	15,358,622	18,952	2,823,848	11,927	1,777,123	133,957	19,959,593	
2) 추진설비공					23,064,800		39,374,811		56,887,101		119,326,712	
반력벽공	설치철거	개소	1	330,372	330,372	938,694	938,694	-	-	1,269,066	1,269,066	기존단가
발진갱구공		개소	1	2,124,797	2,124,797	492,439	492,439	1,856	1,856	2,619,092	2,619,092	
도달갱구공		개소	1	2,072,246	2,072,246	271,999	271,999	82,620	82,620	2,426,865	2,426,865	
크레인설비공	운전일수	일	149	96,864	14,432,736	186,808	27,834,392	358,376	53,398,024	642,048	95,665,152	
추진용기기설치철거공		개소	1	442,758	442,758	1,652,390	1,652,390	895,940	895,940	2,991,088	2,991,088	
굴진기발진용받침공		개소	1	1,474,922	1,474,922	511,864	511,864	444,392	444,392	2,431,178	2,431,178	
굴진기반출용받침공		개소	1	1,228,019	1,228,019	426,177	426,177	370,000	370,000	2,024,196	2,024,196	
굴진기설치공		대	1	96,864	96,864	1,858,390	1,858,390	358,376	358,376	2,313,630	2,313,630	
굴진기반출공		대	1	48,432	48,432	939,662	939,662	179,188	179,188	1,167,282	1,167,282	
굴진기 입회검사,시운전		대	1	290,592	290,592	2,420,529	2,420,529	1,075,128	1,075,128	3,786,249	3,786,249	

1

종 목	규 격	단위	수량	재 료 비		노 무 비		산출경비		합 계		비 고
				단가	금 액	단가	금 액	단가	금 액	단가	금 액	
발진구경절단공		개소	1	-	-	162,750	162,750	16,268	16,268	179,018	179,018	
도달구경절단공		개소	1	-	-	97,650	97,650	15,572	15,572	113,222	113,222	
통신배선설비공		식	1	412,890	412,890	152,281	152,281	-	-	565,171	565,171	
환기설비공		식	1	24,200	24,200	-	-	-	-	24,200	24,200	
주입설비공		개소	1	45,556	45,556	807,262	807,262	49,737	49,737	902,555	902,555	
원격감시장치설비공		회	1	40,416	40,416	808,332	808,332	-	-	848,748	848,748	
3) 송배니설비공					7,230,652		16,393,710		18,948,032		42,572,394	
송배니관설치철거공		m	270	24,800	6,696,000	23,295	6,289,650	-	-	48,095	12,985,650	
송니펌프설치철거공		대	1	75,928	75,928	1,328,884	1,328,884	82,896	82,896	1,487,708	1,487,708	
배니펌프설치철거공		대	1	75,928	75,928	1,328,884	1,328,884	82,896	82,896	1,487,708	1,487,708	
계측기기설치철거공		개소	1	75,928	75,928	1,332,622	1,332,622	82,896	82,896	1,491,446	1,491,446	
조작제어회선설치철거		회	1	-	-	1,895,520	1,895,520	-	-	1,895,520	1,895,520	
현장제어반설치철거공		회	1	75,928	75,928	1,037,808	1,037,808	82,896	82,896	1,196,632	1,196,632	
디센드랜설치철거공		식	1	230,940	230,940	3,180,342	3,180,342	297,648	297,648	3,708,930	3,708,930	
기계기구손료(3)		식	1	-	-	-	-	18,318,800	18,318,800	18,318,800	18,318,800	
4) 이수처리설비공					8,784,640		8,393,819		54,945,279		72,123,738	
이수처리장치설치철거공		회	1	434,336	434,336	4,051,441	4,051,441	912,176	912,176	5,397,953	5,397,953	
처리설비부대작업공		회	1	227,784	227,784	3,557,042	3,557,042	249,048	249,048	4,033,874	4,033,874	
이토처분공	사토:토사	m3	89	13,730	1,221,970	8,824	785,336	6,172	549,308	28,726	2,556,614	기존단가
작니재		m3	58	118,975	6,900,550	-	-	-	-	118,975	6,900,550	
기계손료 (4)		회	1	-	-	-	-	53,234,747	53,234,747	53,234,747	53,234,747	
5) 부대공					3,712,464		2,729,952		574,261		7,016,677	
입갱내가설작업대	발진, 도달	개소	2	1,855,778	3,711,556	937,765	1,875,530	287,055	574,110	3,080,598	6,161,196	
관형소공		m	100	-	-	8,531	853,100	-	-	8,531	853,100	
추진관내 조명공		식	1	908	908	1,322	1,322	151	151	2,381	2,381	
6) 자재비					47,996,444		-		-		47,996,444	
추진관	D900	본	41	953,930	39,111,130	-	-	-	-	953,930	39,111,130	
종압관	D900	본	1	6,219,720	8,885,314	-	-	-	-	6,219,720	8,885,314	

2

※ 참고사항

공사비 설계내역서는 한국전력공사에서 시행중인 지향성 압입공사 설계절차 표준화 지침에 따라 비교 견토한 것인. 본 연구개발기술에 대한 시공비의 품셈 및 적용기준은 기획재정부 계약에규 예정가격 작성기준" 제31조에 의한 용역기관 자격 요건을 충족하는 기관으로 하여금 원가계산서를 작성 제시함.

제12장. 참고 문헌

3G Software & Measurement, 2007. ShapeMetrix3D User Manual 2.0.

Altındağ, R., 2009. Assessment of some brittleness indexes in rock-drilling efficiency. Rock Mech. Rock Eng. 43, 361 - 370. doi:10.1007/s00603-009-0057-x

Altındağ, R., 2003. Estimation of Penetration Rate in Percussive Drilling by Means of Coarseness Index and Mean Particle Size. Rock Mech. Rock Eng. 36, 323 - 332. doi:10.1007/s00603-003-0002-3

Balci, C., Tumac, D., Copur, H., Bilgin, N., Yazgan, S., Demir, E., Aslantas, G., 2009. Performance prediction and comparison with in situ values of a TBM: a case study of Otogar-Bagcilar metro tunnel in Istanbul, in: Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress.

Bilgin, N., Demircin, M.A., Copur, H., Balci, C., Tuncdemir, H., Akcin, N., 2006. Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 43, 139 - 156. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.04.009

Bu, C.G., Qu, Y.G., Cheng, Z., Liu, B.L., 2009. Numerical simulation of impact on pneumatic DTH hammer percussive drilling. J. EARTH Sci. 20, 868 - 878.

Bu, C.G., Qu, Y.G., Liu, B.L., 2006. Dynamic Modeling and Simulation of DTH Hammer, in: Proceeding of 16th CIRP International Design Seminar, Alberta, Canada, Kananaskis, pp. 810 - 813.

Centis, S., Giacomin, G., 2004. EPB tunnelling in highly variable ground - the experience of Oporto Light Metro. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 19, 358.

Chapman, D.N., Rogers, C.D.F., Burd, H.J., Norris, P.M., Milligan, G.W.E., 2007. Research needs for new construction using trenchless technologies. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 22, 491 - 502. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2007.05.003

Cho, J.-W., 2010. TBM 디스크 커터의 암석 절삭성능 평가에 대한 실험적 수치해석적 연구. Seoul National University, Seoul.

Cho, J.-W., Jeon, S., Jeong, H.-Y., Chang, S.-H., 2013. Evaluation of cutting efficiency during TBM disc cutter excavation within a Korean granitic rock using linear-cutting-machine testing and photogrammetric measurement. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 35, 37 - 54. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2012.08.006

Cho, J.-W., Jeon, S., Yu, S.-H., Chang, S.-H., 2010. Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 25, 230 - 244. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2009.11.007

Elgenklöw, M., 2003. Boxhole boring at El Teniente—the Lieutenant marches on. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 18, 485 - 495. doi:10.1016/S0886-7798(03)00064-6

Franca, L.F.P., 2011. A bit - rock interaction model for rotary - percussive drilling. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 48, 827 - 835. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.05.007

Gertsch, R., Gertsch, L., Rostami, J., 2007. Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 44, 238-246. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.07.007

Golden Software, 2004. Surfer 8.0 User Help Manual.

Halco Rock Tools, 2015. A-Z of DTH drilling. Halco Rock Tools, West Yorkshire.

Hood, M., 1976. Cutting strong rock with a drag bit assisted by high pressure water jets. J. South African Inst. Min. Metall. 77, 79-90.

Hustrulid, W.A., Fairhurst, C., 1972a. A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock Part IV—application of the model to actual percussion drilling. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 9, 431-442. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(72)90007-1

Hustrulid, W.A., Fairhurst, C., 1972b. A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock part III—experimental verification of the mathematical theory. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 9, 417-418. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(72)90006-X

Hustrulid, W.A., Fairhurst, C., 1971a. A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock Part II—force-penetration and specific energy determinations. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 8, 335-356. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(71)90046-5

Hustrulid, W.A., Fairhurst, C., 1971b. A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock part I—theory of percussive drilling. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 8, 311-333. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(71)90045-3

ISRM, 1981. Commission on Classification of Rocks and Rock Masses. Basic geotechnical description of rock masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 85-110. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(81)90994-3

Jafarimoghaddam, A., Khademi Hamidi, J., Najafi, M., 2013. Application of decision tree to selection of MTBM for adverse geological conditions. Int. J. Min. Sci. Technol. 23, 503-511. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.07.007

Jung, H.-S., Choi, J.-M., Chun, B.-S., Park, J.-S., Lee, Y.-J., 2011. Causes of reduction in shield TBM performance - A case study in Seoul. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 26, 453-461. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2011.01.001

Kahraman, S., Bilgin, N., Feridunoglu, C., 2003. Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 40, 711-723. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00063-7

Karakurt, I., Aydin, G., Aydiner, K., 2013. An investigation on the kerf width in abrasive waterjet cutting of granitic rocks. Arab. J. Geosci. 1-10.

Karanam, U.R., Misra, B., 1998. Principles of rock drilling. Balkema, Rotterdam.

Kollé, J.J., 1999. A comparison of water jet, abrasive jet and rotary diamond drilling in hard rock. Tempress Technol. Inc 1-8.

Kwon, K.-B., Song, C.-H., Park, J.-Y., Oh, J.-Y., Lee, J.-W., Cho, J.-W., 2014. Evaluation of drilling efficiency by percussion testing of a drill bit with new

button arrangement. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 15, 1063-1068. doi:10.1007/s12541-014-0437-3

Kwon, K.-B., Song, C.-H., Park, J.-Y., Shin, D.-Y., Cho, J.-W., Cho, S.-H., 2013. Rock Fragmentation Assessment of a Drill Bit by Hopkinson Bar Percussion Test. Tunn. Undergr. Sp. 23, 42-53.

Lu, Y., Tang, J., Ge, Z., Xia, B., Liu, Y., 2013. Hard rock drilling technique with abrasive water jet assistance. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 60, 47-56. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.12.021

Ma, B., Najafi, M., 2008. Development and applications of trenchless technology in China. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 23, 476-480. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2007.08.003

Nilsen, L., B. and O., 1993. Hard rock tunnel boring prediction and field performance. Proc. Rapid Excav. Tunneling Conf. 833-852.

NTH, 1995. Hard Rock Tunnel Boring. Project Report 1-94.

Oh, J.-Y., Lee, G.-H., Kang, H.-S., Song, C.-S., 2012. Modeling and Performance Analysis of Rock Drill Drifters for Rock Stiffness. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 13, 2187-2193.

Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, D.M., 1995. Performance prediction: a key issue in mechanical hard rock mining. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 32, A171. doi:10.1016/0148-9062(95)97085-W

Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, D.M., 1994. Performance prediction: a key issue in mechanical hard rock mining. Min. Enfineering 46, 1263-1267.

Rowe, R.K., 2001. Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook. Springer.

Roxborough, F.F., 1973. Cutting rock with picks. Min. Eng. 133, 445-452.

Ryu, S., Cho, J.-W., Park, J.-Y., Lee, J.-W., Jeong, M.-S., Song, C.-H., Kim, J.-G., Song, J.-J., 2015. Optimum operating conditions of a multi-hammer drilling machine assessed using a linear percussion test. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 16, 1415-1422. doi:10.1007/s12541-015-0186-y

Sanio, H.P., 1985. Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 22, 153-161. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(85)93229-2

Shang, Y., Xue, J., Wang, S., Yang, Z., Yang, J., 2004. A case history of Tunnel Boring Machine jamming in an inter-layer shear zone at the Yellow River Diversion Project in China. Eng. Geol. 71, 199-211. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00134-0

Shaterpour-Mamaghani, A., Bilgin, N., Balci, C., Wunduk, E., Polat, C., 2015. Predicting Performance of Raise Boring Machines Using Empirical Models. Rock Mech. Rock Eng. 1-9. doi:10.1007/s00603-015-0900-1

Shin, D. Y., Song, C. H., 2012. Performance Optimization of Down the Hole Hammer Using Taguchi Method. Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A 36, 109-116.

Snowdon, R.A., Ryley, M.D., Temporal, J., 1982. A study of disc cutting in selected British rocks. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 19, 107-121.

doi:http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(82)91151-2

Song, C., H., Shin, D.Y., 2010. Down The Hole hammer의 공압 특성에 관한 연구 = A study on pneumatic characteristics of the Down The Hole hammer. in: 한국정밀공학회 2010년도 추계학술대회논문집. Korean Society Of Precision Engineering, pp. 599-600.

Song, C.-H., Cho, M.-G., Park, J.-Y., Lee, J.-W., Jeong, M.-S., Cho, J.-W., Ryu, S., 2015. Design study of a rock particle flushing device for a rock reaming machine by CFD simulation. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 16, 1533-1542. doi:10.1007/s12541-015-0203-1

Song, C.-H., Kwon, K.-B., Park, J.-Y., Oh, J.-Y., Lee, S., Shin, D.-Y., Cho, J.-W., 2014. Optimum design of the internal flushing channel of a drill bit using RSM and CFD simulation. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 15, 1041-1050. doi:10.1007/s12541-014-0434-6

Su, O., Yarali, O., Akcin, N.A., 2012. Comparison of Drilling Performance of Chisel and Button Bits on the Electro Hydraulic Driller. Rock Mech. Rock Eng. 46, 1577-1587. doi:10.1007/s00603-012-0358-3

Teale, R., 1965. The concept of specific energy in rock drilling. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 2, 57-73. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(65)90022-7

Thomson, J., Rumsey, P., 1997. Trenchless technology applications for utility installation. Arboric. J. 21, 137-143.

Tuncdemir, H., Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., 2008. Control of rock cutting efficiency by muck size. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 45, 278-288. doi:10.1016/j.ijrmms.2007.04.010

Ueki, M., Haas, C.T., Seo, J., 1999. Decision tool for microtunneling method selection. J. Constr. Eng. Manag. 125, 123-131.

Xiaohong, L., Jiansheng, W., Yiyu, L., Lin, Y., Huiming, K., Jiajun, S., 2000. Experimental investigation of hard rock cutting with collimated abrasive water jets. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 37, 1143-1148. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(00)00036-8

Yang, X., Li, N., Lu, Y., 2011. Wear characteristics of the cemented carbide blades in drilling limestone with water jet. Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 29, 320-325. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2010.09.007

Zhao, J., Gong, Q.M., Eisenstein, Z., 2007. Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 22, 388-400. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2006.10.002

Zhao, Z., Meng, Y., Li, Y., Shi, X., Xiang, C., 2014. Effects of Working Angle on Pneumatic Down-the-hole Hammer Drilling. Rock Mech. Rock Eng. 48, 2141-2155. doi:10.1007/s00603-014-0667-9

건설교통부, 2007. 급속터널 기계화 시공을 위한 굴착설계 모델 개발, 최종보고서

김정근, 박태동, 2003. 워터젯 보조면판이 장착된 마이크로터널링 머신의 장애물 돌파 성능에 관한 연구. 한국정보통신설비학회 학술대회 2003, 367-372.

송창헌, 2011. 다구찌 기법을 이용한 Down The Hole hammer의 타격 성능 최적화에 관한 연구.

한국산업기술대학교 지식기반기술·에너지대학원, 시흥.
오주영, 박진영, 조성우, 강학순, 이근호, 2013. 설계인자 변화에 대한 천공 드리프터의 타격 성능 분석, in: 한국정밀공학회 학술대회 논문집. 한국정밀공학회, pp. 981 - 982.
오주영, 이근호, 송창섭, 2011. 천공용 드릴 드리프터 유압 회로 해석에 관한 연구. 유공압건설기계학회 학술대회논문집 2011, 70 - 75.
정호영, 2010. 암석의 압입 특성과 TBM 디스크 커터 절삭 성능과의 관계에 대한 실험적 분석 / 정호영, Exp. Anal. Relat. between punch penetration Charact. rock Cut. Perform. a TBM disc Cut. 서울 : 서울대학교 대학원, 2010. 서울.
한정훈, 2007. 입체사진측량기법의 암반절리조사에 대한 적용성 연구, Study on applicability of stereophotogrammetry to rock joint survey / 한정훈. 서울 : 서울대학교 대학원, 2007.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술사업화지원사업의 연구보고서 입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발 성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.