국토교통기술촉진연구사업

R&D-12기술혁신E01

배수 유로홈을 이용 수압저감을 통한 공사비 절감 슬림형 세그먼트 터널 라이닝 기술 개발 최종보고서

2015. 10. 07.

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 한국건설기술연구원
공동연구기관 / ㈜케이씨씨건설
㈜씨엠어
㈜한맥기술
㈜에코마이스터
위탁연구기관 / 강릉원주대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 “배수 유로홈을 이용 수압저감을 통한 공사비 절감 슬림형 세그먼트 터널 라이닝 기술 개발” 연구과제의 최종 보고서(안)으로 제출합니다.

2015. 06. 26.

주관연구기관명 : 한국건설기술연구원
주관연구책임자 : 연구 위원 마 상 준
연 구 원 : 전임연구원 김 동 민
〃 : 전임연구원 이 영 섭

공동연구기관명 : (주)케이씨씨건설
공동연구책임자 : 차 장 최 진 우
연 구 원 : 이 사 김 동 식
〃 : 부 장 장 송 엽
〃 : 과 장 조 광 훈
〃 : 과 장 이 육 규

공동연구기관명 : (주)씨엠어
공동연구책임자 : 대 표 전 종 식
연 구 원 : 팀 장 이 성 훈
〃 : 과 장 박 석 준
〃 : 대 리 송 순 호

공동연구기관명 : (주)한맥기술
공동연구책임자 : 이 사 신 성 진
연 구 원 : 전 무 이 종 관
〃 : 이 사 문 정 선

공동연구기관명 : (주)에코마이스터
공동연구책임자 : 차 장 김 형 섭
연 구 원 : 부 장 문 영 배
〃 : 차 장 임 승 준
〃 : 차 장 노 성 호
〃 : 대 리 신 준 식

위탁연구기관명 : 강릉원주대학교
위탁연구책임자 : 교 수 윤 찬 영
연 구 원 : 교 수 김 기 홍
〃 : 박 사 최 규 문
〃 : 석 사 김 범 준
〃 : 학 사 전 경 재

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>12기술혁
신E01</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td colspan="2">2014.04.01
~2015.05.28</td><td>단 계 구 분</td><td>3차년/3차년</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="6">건설교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>최 상 위
과 제 명</td><td colspan="5">배수 유로홈을 이용 수압 저감을 통한 공사비 절감
슬림형 세그먼트 터널 라이닝 기술 개발</td></tr>
<tr><td>단위
과제명</td><td colspan="5"><table>
<tr><td>㈜케이씨씨건설</td><td>슬림형 쉴드터널 라이닝 기술의 국내 적용을 위한 실용화 기반 확보</td></tr>
<tr><td>㈜씨엠어</td><td>슬림형 쉴드터널의 경제성 평가 및 최적 시공시스템 도출</td></tr>
<tr><td>㈜한맥기술</td><td>슬림형 쉴드터널의 설계기술 개발 및 설계 지침 제안</td></tr>
<tr><td>㈜에코마이스터</td><td>배수형 쉴드터널 뒤채움재의 최적 주입시스템 개발</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>마 상 준</td><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 25명
내부 : 20명
외부 : 5명</td><td>총연구비</td><td colspan="2">정부: 852,000천원
기업: 610,000천원
계: 1,462,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명
및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한국건설기술연구원
지반연구소</td><td>참여기업명</td><td colspan="3">㈜케이씨씨건설, ㈜씨엠어
㈜한맥기술, ㈜에코마이스터</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 :</td><td colspan="3">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="3">연구기관명 :</td><td colspan="3">연구책임자 :</td></tr>
<tr><td colspan="5">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="7">쉴드터널 공법은 일률적으로 비배수 터널로 설계 및 시공되고 있으나, 비배수 설계임에도 불구하고 지속적인 지하수 누수가 고질적인 문제가 되고 있음. 또한, 토압 및 수압 모두를 고려하여 설계되기 때문에 안정성 확보를 위해 세그먼트 단면 두께를 증가시켜야 하며, 기존 터널공법에 비해 안정성 및 시공성 면에서 우수한 공법임에도 불구하고 고가의 공사비로 그 적용성이 높지 않은 실정임.
본 연구에서는 배수 유로홈 기술 개발을 통해 쉴드터널에 유입되는 지하수를 자연 배수시킬 수 있는 배수형 쉴드터널을 개발하였음. 또한, 지하수 유입으로 인한 수압 저감 현상을 평가하고, 쉴드 라이닝에 작용하는 하중 감소를 통해 기존 세그먼트 단면을 20% 축소시킬 수 있는 슬림형 쉴드터널을 개발하였음.
본 연구개발을 통해 최종적으로는 쉴드 세그먼트 재료비 20% 절감, 쉴드터널 전체공사비 10% 절감을 달성하였으며, 장기적으로는 쉴드터널의 공사비 절감을 통해 기존 터널공법과의 가격 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 판단됨.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="5">배수형 쉴드터널, 배수 유로홈, 슬림형 세그먼트, 경제성</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="5">Drainage shield tunnel, Drainage furrow, Slim Segment, Economic Effects</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

배수 유로홈을 이용, 수압 저감을 통한 공사비 절감 슬림형 세그먼트 터널 라이닝 기술 개발

Ⅱ. 연구개발 목적 및 필요성

터널 건설시장이 도심지 시공으로 이전되면서 굴착시 소음 및 진동 최소화로 민원해결, 굴착에 따른 지반붕락 대비, 안정성 우수, 공기단축, 인접 구조물 영향 최소화 등의 장점으로 인해 쉴드터널에 대한 적용 확대 요구가 높아지고 있지만, 도심지 및 열악한 지반조건에서 NATM 터널에 비해 전체 공사비가 110~120% 정도로서 아직까지 경제성 면에서 부족한 상황이다. 따라서 쉴드터널 전체 공사비를 절감할 수 있는 대안을 통해 NATM 터널과의 경쟁력 확보, 안정성 및 환경성 등 사회적 요구를 충족시킬 수 있는 방안이 절실히 요구되고 있다.

기존의 토압 및 수압까지 고려한 비배수 설계에서는 안정성 확보 방안으로 쉴드 세그먼트 단면을 증가시키게 되는데, 이로 인해 시멘트, 철근 등의 재료 투입량도 증가하게 되어 쉴드 세그먼트 재료비 상승을 유발하고 있으나 현실적으로 비배수 터널로서의 기능은 전혀 감당하지 못하고 있는 상황이다.

본 연구에서는 도심지 터널시공에서 야기되는 문제점을 최소화 할 수 있는 경제성 및 시공성을 확보할 수 있는 새로운 쉴드 세그먼트 기술을 개발하고자 다음과 같은 최종목표 설정하였다.

○ 쉴드터널에서 배수 유로홈을 이용한 배수형 세그먼트 라이닝 기술 개발
- 쉴드터널에서의 배수설계개념 적용 가능성 및 안정성 검증
- 배수유로홈 개발 및 세그먼트 단면 10~20% 슬림(Slim)화 실현
- 건설재료 사용 절감을 통한 제조단계의 CO_2 배출 20% 저감
- 세그먼트 제조단가 20% 및 터널 총공사비 10% 절감
- 쉴드터널의 경제성 및 기술력 향상을 통해 NATM 터널과의 경쟁력 확보

Ⅲ. 연구개발 목적 및 필요성

■ 1차년도 연구내용 및 범위

(1) 국내외 쉴드터널 현황 조사 및 문제점 분석
- 국내외 쉴드터널의 시공 사례 조사 및 분석
- 국내외 쉴드터널 기술개발 현황 및 연구 실태 조사
- 국내외 쉴드터널 방배수 시스템 조사
- 기존 쉴드터널 문제점 분석

(2) 쉴드터널의 누수실태 파악 및 방수대책 조사
- 국내외 시공 및 운용중인 터널의 누수실태/지하수 유입수량 분석사례 조사
- 국내 실무기술자를 대상으로 한 현장설문조사 실시
- 기존 쉴드터널의 방수 대책 조사 및 효율성 평가
- 기존 국내·외 배수형 터널의 유입량 및 펌핑비용 자료조사

(3) 기존 쉴드터널 뒤채움 재료 개발 현황 및 특성 조사
- 국내외 쉴드터널 뒤채움재 재료 특성 조사
- 배수형 쉴드터널에 대한 적용성 평가

(4) 배수형 쉴드터널 라이닝 적용을 위한 최적 뒤채움재 선정
- 기존 뒷채움재의 물리적 특성 평가(입도분포, 투수계수등)
- 배수형 쉴드터널에 적합한 뒷채움재료 선정

(5) 쉴드터널 라이닝의 배수 유로홈 제안
- 경험식을 바탕으로 한 배수 유로홈의 배수성능 계산
- 기존 터널 배수시스템과 배수 유로홈의 배수성능 비교
- 배수 유로홈 기능에 대한 수리학적 검토
- 경험식을 통한 전단키 세그먼트 안정성 검토
- 직경 및 외부 영향인자에 따른 유로홈의 배수성능 DB 산정

- 유로홈내 지하수 이동 메커니즘의 시각적 검증

(6) 배수유로홈을 적용한 세그먼트 설계(안) 제시
- 유로홈 직경 및 연결부를 고려한 세그먼트 단면설계
- 유로홈 적정 배치(안) 제시

(7) 배수/비배수 조건의 작용압력에 대한 이론적 근거 확립 및 모형실험장치 설계
- 배수/비배수 조건의 터널라이닝 작용압력(토압,수압,침투압)에 대한 이론적 분석
- 배수조건 변화에 따른 침투유량과 라이닝 하중에 대한 수치적 분석
- 이론적/수치적 분석을 고려한 배수조건 모형실험장치 상세설계

(8) 쉴드터널의 수팽창 지수재에 대한 이론적 고찰
- 국내외 수팽창 지수재 재료 조사
- 수팽창 지수재 시방규정 및 재료실험 조사

(9) 국내 세그먼트 라이닝 생산 시스템 조사
- 국내 세그먼트 생산업체 조사 및 생산 역량 검토
- 개발 기술의 국내 적용에 따른 기대효과 도출

■ 2차년도 연구내용 및 범위

(1) 설계단계에서 지반 및 배수 조건에 따른 쉴드터널 하중 이론 정립
- 세그먼트 라이닝에 작용하는 하중에 대한 기존 연구 문헌 조사
- 부분배수 쉴드터널 개발기술의 이론적 배경 정립

(2) 배수형 쉴드터널 라이닝 뒤채움재의 적용성 평가
- 실내실험을 위한 시험체 제작
- 실내실험을 통한 배수형 쉴드터널 라이닝 뒤채움재의 배수능 검토
- 뒤채움재의 종류에 따른 배수성능 검토

- 뒤채움재의 환경영향 평가

(3) 축소모형실험을 통한 배수 유로홈의 성능 평가

- 배수형 쉴드터널의 축소모형 시험체 제작
- 모형실험 수행 및 배수 유로홈 성능 평가
- 뒤채움재에 의한 배수 유로홈 폐색 가능성 평가

(4) 배수/비배수 조건을 고려한 터널 모형실험 수행

- 배수조건 모형실험장치 구축 및 검증
- 배수/비배수 조건을 고려한 터널의 라이닝 작용압력 분석, 작용수압 감소 현상 및 지반 침하거동 평가
- 개발 실험장치의 특허 출원 추진

(5) 수치해석을 통한 배수형 쉴드터널의 적용 가능성 및 안정성 검토

- 수치해석을 통한 배수형 쉴드터널의 안정성 평가
- 상부응력 산정을 통한 배수시의 단면력 감소효과 및 단면축소가능성 제시
- 침투 수압 발생 모델 예측 및 극한상태를 고려한 수치해석 수행
- 지하수 배수로 인한 지반침하에 대한 검토
- 지반종류별 세그먼트 두께 조정(안) 제시

(6) 수팽창 지수재 성능수명 평가를 통한 배수설계 필요성 검증

- 단기 및 장기내구성 평가를 통한 기존 수팽장 지수재의 성능수명 예측
- 성능수명 예측을 통한 쉴드터널의 누수발생 시점 예측

(7) 구조계산을 통한 슬림형 쉴드터널의 안정성 검토

- 최소 단면 산정을 통한 단면 축소 방안 제시
- 슬림화된 세그먼트의 상세 세부 설계
- 단면 안정성 검토 수행

(8) 비배수 쉴드터널의 지하수 측정 시스템 구축

- 모니터링 시스템 구축을 위한 국내 현장 선정
- 터널 내부 지하수 유입량 측정 시스템 구축

(9) 슬림형 쉴드터널의 시공 및 운영 위험도 평가(Risk assessment)

- 시공 공정에서의 발생가능 시나리오 예측 및 Accident Risk에 대한 Risk Matrix 평가
- 운영 기간에서의 발생가능 시나리오 예측 및 Accident Risk에 대한 Risk Matrix 평가

(10) 슬림형 쉴드터널의 미래 수요 예측 및 시장성 평가

- 국내외 시장성 조사 : 도로, 철도, 전력, 하수 등 적용가능 사업 발굴 및 시장성 평가
- 국외 시장성 조사 : 국외 국가별 수요 및 시장성조사
- 개발 기술의 국내외 미래 시장 경쟁력 분석

■ 3차년도 연구내용 및 범위

(1) 배수형 쉴드터널 뒤채움재의 최적 주입시스템 개발

- 뒤채움재 특성을 고려한 최적 주입장비 선정
- 뒤채움재 세부시공 요건(압력, 배송)결정 및 주입시공 프로세스 정립

(2) 배수형 쉴드터널 모형실험 및 현장적용방안 도출

- 잔류수압을 고려한 터널모형실험 수행
- 배수능에 따른 배수형 쉴드터널 적용성 및 안정성 평가
- 수치해석을 통한 모형실험 검증 평가
- 모형실험 및 수치해석 결과에 따른 현장적용 방안 도출
- 요소기술 문제점 분석 및 개선사항 도출

(3) 배수형 쉴드터널의 설계 매뉴얼(안) 제안

- 배수유로홈 배치를 고려한 세부 설계 지침 제안
- 배수형 쉴드터널의 표준단면 설계

(4) 배수개념을 적용한 슬림형 쉴드터널의 CO_2 배출 저감 효과 평가

- 기존 쉴드터널 시공 사례별 재료생산, 운반 및 시공시 발생하는 CO_2 발생량 산정
- 운용중 발생하는 CO_2배출량 저감 효과확인
- 단면 축소율에 따른 재료 절감 및 CO_2 배출 20%저감 효과 평가

(5) 비배수 쉴드터널에 대한 장기 모니터링 수행

- 장기 모니터링 결과 분석
- 터널 내부 지하수 유입량 측정 및 결과 분석

(6) 슬림형 쉴드터널 부분 실대형 실험 수행

- 실대형 실험을 위한 슬림형 세그먼트 시제품 제작
- 실험 추진방향 결정 및 실험 모델 구축
- 배수 유로홈 기능의 적용성 평가

(7) 슬림형 쉴드터널의 시공성 평가

- 단위공종별 소요공기 분석 및 시공 프로세스 정립
- 터널 전체에 대한 소요공기 분석, 전체 시공프로세스 분석 및 비교 평가
- 배수형 쉴드터널 시공메뉴얼(안) 제안

(8) 슬림형 쉴드터널 유지관리 방안 확보

- 배수 유로홈 유지관리 방안 제시
- 배수 유로홈 유지관리용 에어 석션건 개념 설계

(9) 슬림형 쉴드터널의 경제성 평가

- 기존 및 슬림형 세그먼트에 대한 원가분석 및 비교평가(시공비 및 재료비)

- 뒤채움재 선정재료에 대한 경제성 평가

- 세그먼트 제조단가 20% 및 총공사비 10% 절감효과 검증

- VE평가(비용평가) 및 LCC평가(유지관리비용 분석)를 통한 경제성 향상 방안 제시

- 터널용도, 연장, 시공여건에 따른 경제성 검토 및 기존방식과의 경제적 임계점 분석

(10) 개발 기술의 성과 확보 및 가치 평가

- 각 개발 요소기술의 산업재산권 확보

- 사업화 추진을 위한 기술로드맵 제시

- 시장 확보 방안, 설비 및 업무 지원 방안에 대한 상용적 비지니스 모델 제시

Ⅳ. 연구개발결과

■ 국내외 쉴드터널 현황 조사 및 문제점 분석

국내외 쉴드터널의 시공사례 및 연구에 대한 동향을 분석하였으며, 기존 쉴드터널 공법에서 발생하는 문제점에 대하여 원인조사를 수행하였다.

■ 쉴드터널 누수실태 파악 및 방수대책

국내 지역별 터널과 국외 터널에 대하여 터널 내 유입수량에 대한 조사를 수행하고, 쉴드터널에서 누수를 방지하기 위한 방수대책에 대한 조사 및 분석을 수행하였다.

■ 수팽창 지수재 평가를 통한 배수설계 필요성 검증

쉴드터널의 방수를 위한 지수재의 종류 및 평가 기준에 대한 조사를 수행하고, 단기 및 장기적인 내구성을 평가하여 지수재 성능수명의 예측을 통하여 누수발생 시점에 대한 연구를 수행하였다.

■ 배수 유로홈을 적용한 쉴드터널 세그먼트 제안

배수조건에 따른 터널 세그먼트 라이닝에 작용하는 수압에 대한 연구자료 조사를 통하여 배수형 쉴드터널의 이론적 배경을 정립하고, 기존 배수형 터널과의 배수성능 비교 및 안정성 검토를 통하여 배수 유로홈의 적용성 검토를 수행하였다.

■ 배수형 쉴드터널 최적 뒤채움재 선정

배수형 쉴드터널에서의 최적의 뒤채움재를 선정하기 위하여 뒤채움재의 특성에 대한 조사를 수행하고, 배수형 쉴드터널의 배면 뒤채움재로 적용이 가능한 재료에 대하여 주입성능 및 투수성능에 대한 실험을 실시하고, 선정된 재료의 환경성을 평가하였다.

■ 배수형 쉴드터널 뒤채움 시스템 개발

배수형 쉴드터널에서 뒤채움재의 효율적인 주입을 위하여 뒤채움 주입효율을 극대화할 수 있는 주입장치를 제작하여 성능실험을 수행하였다.

■ **축소모형실험을 통한 배수 유로홈 성능 평가**

배수 유로홈의 성능을 실험적으로 평가하기 위해 축소모형 실험장치를 제작하였고, 수압의 조절을 통해 수압 상승에 따라 지하수가 배수 유로홈을 따라 실제적으로 이동하는 지에 대한 평가를 수행하였다. 또한, 배면에 뒤채움 되는 재료 종류에 따라 배수 유로홈 폐색 현상의 발생 여부에 대한 실험도 수행하였다.

■ **실대형 실험을 통한 배수 유로홈 성능 평가**

배수형 쉴드터널로서 거동이 가능하기 위해서는 뒤채움재를 통한 터널로의 지하수 이동, 세그먼트 내부로 이동한 지하수를 유도 배수할수 있는 배수 유로홈의 기능이 가장 중요한 역할을 수행한다. 이에 실대형 실험을 통하여 실제 지반조건과 배수 유로홈을 통한 지하수의 배수성능 실험을 수행하여 뒤채움재와 배수 유로홈의 기능에 대한 적용성을 평가하였다.

■ **배수/비배수 조건을 고려한 쉴드터널 모형실험**

다양한 지반조건에서 배수조건에 따른 쉴드터널 라이닝의 작용 응력을 분석하기 위하여 터널모형 실험장비를 개발하였다. 또한 개발된 터널모형 실험장비를 이용하여 지중응력 및 배수조건을 자유롭게 변화시키며 다양한 현장조건에서 쉴드터널 라이닝에 작용 응력 및 내부 응력을 분석하였다.

■ **수치해석을 통한 쉴드터널 구조안정성 검토**

지중에 건설된 쉴드터널을 모사하고 터널 라이닝의 단면력, 작용응력, 지반침하 및 터널내 지하수 유출량 등을 확인하기 위하여 현장조건을 고려한 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 지하수위, 터널심도, 지반종류 및 뒤채움(PS 볼) 변화에 따른 터널 라이닝의 영향을 비교·검토하였다.

■ **현장 계측을 통한 쉴드터널 작용 압력 평가**

본 연구에서는 실제 쉴드터널 배면에서 작용하는 토압 및 수압을 측정하기 위해 쉴드터널 시공현장에서 세그먼트 내에 계측기를 설치하여 현장 계측을 실시하였다.

■ **슬림형 쉴드터널 표준단면 제안**

본 연구에서는 안정성 검토를 통하여 슬림형 쉴드터널의 축소가능성에 대하여 검토를 수행하였으며, 축소 비율을 산정하여 표준단면까지 설계를 수행하였다.

■ **슬림형 쉴드터널 시공성 평가**

BIM을 통하여 슬림형 쉴드터널의 세부공정을 분석하여 시공속도를 분석하였고, 뒷채움재의 시공성 평가 및, 위험도 분석을 수행하였다.

■ **슬림형 쉴드터널 경제성 평가**

슬림형 쉴드터널 세부공정 별 생애주기비용(LCC) 및 VE평가를 통하여 경제성 분석을 수행하였고, 슬림화된 단면에 따라 저감된 CO_2를 평가하였다.

■ **배수형 쉴드터널 유지관리 방안**

배수형 쉴드터널에서의 배수 유로홈의 유지관리를 위하여 에어석션건을 설계하고, 유지관리 방안에 대한 개념설계를 수행하였다.

■ **슬림형 쉴드터널 미래 수요예측 및 시장성 평가**

국내외 세그먼트 관여 업체의 매출조사를 통하여 향후 시장의 성장가능성을 예측하고, 향후 사업추진계획 수립 및 상용적 비즈니스 모델을 제시하였다.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

본 연구개발을 통해 얻은 결과와 이를 통해 개발된 기술들은 다음과 같은 측면에서 활용 가능할 것으로 판단된다.

■ 선진 터널공법으로서 쉴드터널 공법의 경쟁력 향상

- 본 연구를 통해 개발된 슬림형 쉴드터널은 기존 쉴드터널 체결부에서 발생되는 누수를 절감 가능할 것으로 판단된다.
- 기존 NATM 터널 대비 향상된 품질 및 경제성에서 우위를 가지고, 배수형 터널로서 수압을 경감시켜 세그먼트의 슬림화가 가능하여, 앞으로 예상되는 쉴드터널 수요에 맞추어 국내 시공능력 향상에 크게 기여하게 될 것으로 판단된다.
- 본 연구를 통하여 축적된 슬림형 쉴드터널 기술은 터널 시공현장에서의 민원발생을 최소화하고, 자연훼손을 최소화하여 친환경적인 생태 도시건설(Eco-City)과 같은 정부정책에도 부응할 수 있으며, 미래 지향적이고 인간 중심의 도시 복원 및 건설에 이바지 할 것으로 예상된다.
- 2010년 기준 국내 세그먼트 터널 시장은 전력구 및 수로터널에 한정되어 약 1천억원 규모이나, 향후 서부간선도로 지하화, 서울시 스마트 하이웨이, 수도권 대심도 광역급행 철도, 강변북로 확장공사 지하화, 동부간선도로 지하화, 신분당선 연장, 도심지 고속화 도로 등 대규모 건설계획이 수립되어 2020년에는 3조원 정도의 시장 규모가 될 것으로 예상된다.
- 시장 확대 및 세그먼트 터널 건설 증가와 더불어 경제적이고 효과적인 설계 및 시공기술 개발이 더욱 필요한 현 시점에서 슬림형 쉴드터널 기술은 터널 시공 분야의 국내 기술 축적과 설계 자립화를 통해 건설기술력 향상을 가져올 것으로 판단된다.
- 배수 유로홈 시스템의 개발은 기존 쉴드터널의 라이닝 단면 두께감소를 가능케 하여, 향후 구조물 슬림화 연구 추진으로 연결됨으로써 경제적인 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

■ 기술력 향상을 통한 쉴드터널 공법의 적용성 확대

- 기존 쉴드터널 공법은 하저터널 및 천층 연약지반에 적용되어 왔으나 장비의 개발과 시공 기술의 축적으로 현재는 거의 모든 지질에 시공이 가능하게 되었으며 향후 민원의 최소화, 구조물 안정성 확보, 공기단축 등의 장점을 가지고 있어 도심지내 대심도 터널 시공시 널리 적용될 것으로 판단된다.
- 본 개발 기술은 향후 기하급수적으로 증가 할 것으로 예상되는 쉴드터널 수요에 맞추어 경제성이 향상된 세그먼트로 널리 적용 될 것으로 예상된다.
- 본 개발 기술은 기존 쉴드터널 방식에 비해 터널 내부 누수량을 대폭 저감시킬 수 있으며, 향후 대규모 시공이 계획 중인 목포-제주, 한-중 해저터널, 한일 해저터널 등 해저터널 시공시 적용될 경우 세그먼트 누수방지 및 내구성 유지에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

■ 경제성 향상을 통한 쉴드터널 공법의 적용성 확대

- 본 연구를 통해 개발된 배수 유로홈 기술은 세그먼트의 재료비를 약 20% 절감할 수 있으며, 쉴드터널 전체로 보면 공사비를 10% 이상 절감 가능하다. 또한, 세그먼트의 재료 사용량 절감으로 인하여 CO_2 가스발생량을 20% 저감할 수 있다.
- 기존 쉴드터널은 비배수 개념으로서 정수압을 모두 고려해야 하지만, 슬림형 쉴드터널은 배수개념의 터널로서 작용수압의 경감으로 인하여 세그먼트 단면의 슬림화가 가능하여, 향후 쉴드터널 세그먼트 단면 축소로 인한 구조물 슬림화의 근간을 이루는 기술이다.
- 개발 기술의 우수한 시공성 및 경제성의 장점을 바탕으로 국외 기술 수출 및 해외사업 참여가 가능할 것으로 판단된다.

SUMMARY

Ⅰ. Subject

Development of Cable assembling system of Segment tunnel Lining

Ⅱ. Objective and Necessity of Research and Development

This study aims to develop cable clamping technology of segment lining that can solve problems of chronic leakage on the existing shield tunnels and higher construction costs compared to those of NATM tunnel and increase the segment lining clamping force by more than 10%. In segment tunnel designed and constructed under the concept of non-drainage, the leaks to the inside of the tunnel have continuously occurred in spite of implementing waterproofing measures such as rear backfilling, grout injection and waterproofing of caulking and bolt holes, and more than 50% of the total leakage has occurred in bolted joints. However, there has been no research on the measures to improve those situations. This study attempted to suggest cable clamping system to maintain the connection strength of segment tunnel linings and prevent excessive leakage in bolted joints fundamentally. The ultimate goals established for research and development are as follows.

○ The development of drainage type segment lining technology using outflow drainage hole of shield tunnel

- Verification of the applicability and stability of the drainage design concept in the shield tunnel
- Development of drainage hole and segment of the cross-section 10-20%

Slim of the realization

- Reduce CO_2 emissions 20% of the production stage through the reduced use of construction materials
- Production of the segment unit price 20 percent and tunnel total cost 10% reduction
- To ensure the competitiveness of the NATM tunnel through the improvement of economic efficiency and technical capabilities of the shield tunnel

Ⅲ. Contents and Range of Research and Development

To achieve the ultimate goals, the following R&D contents were implemented in this research and development.

■ Contents and range of research in the 1st year

(1) Domestic and foreign shield tunnel survey and problem analysis

- Example of construction research and analysis of domestic and foreign Shield Tunnel
- Shield tunnel technology Development Status and domestic and foreign research survey
- Shield tunnel waterproof drainage systems research domestic and foreign
- Problems of the existing shield tunnel

(2) Conditions identify leaks and survey moisture protection of the shield tunnel

- Leak Condition / groundwater inflow quantity analysis of case studies of domestic and foreign construction and operation of the tunnel

- Field surveys conducted by domestic technicians in the target
- Waterproof measures investigation and efficiencies evaluation of the existing shield tunnel
- Inflow and pumping costs data research of existing domestic and foreign drainage type tunnel

(3) Existing shield tunnel backfill material development status and characteristic investigation
- Shield tunnel backfill material Characteristics investigation domestic and foreign
- Applicability assessment of the drainage type shield tunnel

(4) Selection of the best backfill material apply for drainage type shield tunnel lining
- Evaluation the physical properties of the existing backfill material (particle size distributions, Coefficient of permeability)
- Selected backfill material for drainage type shield tunnel

(5) The proposal of the shield tunnel lining of the drainage hole
- Experience calculate the euro home drainage performance based on the equation
- Comparison of the drainage performance of the drainage hole and drainage system of existing tunnel
- Study of hydraulics of drainage hole function
- Stability of the segment through the empirical formula
- Evaluation of drainage performance database of the drainage hole according to the diameter and the influencing factors
- Visual verification of the groundwater movement mechanism within the drainage hole

(6) Design of the segment applying the drainage hole (plan)

- Considering the cross-sectional design of the segment diameters and connections of drainage hole
- Optimal location of drainage hole (plan)

(7) Rationale and model experimental apparatus designed for working pressure in the drainage and non-drainage conditions

- Theoretical analysis of the multiple pressures acting on the tunnel lining and undrained conditions (soil pressure, water pressure, osmotic pressure)
- Numerical analysis of flow and penetration of the drainage lining load conditions change
- Detailed design of the drainage device model test

(8) Theoretical study on the water stop of shield tunnel

- Research on water stop of domestic and foreign
- Investigation of rules and test methods of water stop

(9) Research on domestic production segment lining systems

- Domestic Segment producers reviewed research and production capabilities
- Benefits derived in accordance with domestic application of development technology

■ Contents and range of research in the 2nd year

(1) Load Theory of shield tunnel under the soil and drainage conditions at the design stage

- Existing literature survey of the load acting on the lining segments
- Establish part of the theoretical background of the tunnel drainage shield technology development

(2) Evaluation of a multiple-type shield tunnel lining behind the filler

- Specimens for laboratory production
- Review the performance of the drain tunnel lining behind the shield-type filler through a laboratory
- Examination of drainage performance according to the type of back fill material
- Environmental Impact Assessment of back fill material

(3) Evaluate the performance of drainage hole through down scale model

- Production of down scale model of drain shield tunnel
- Model tests performed and evaluate of drainage hole
- Evaluation of blockade of drainage hole through back fill material

(4) The performance of experiment with a model of drain condition and undrain condition

- Build and verification of Experimental model of drain conditions
- Evaluation of the effect pressure of lining considering the drain/ undrain conditions, Evaluation of Reduction of the working pressure
- Promotion of the development of patent experimental device

(5) Review of the feasibility and reliability of draine shield tunnel through numerical analysis

- Evaluation of Stability assessment of shield tunnel through numerical analysis
- The effect of reducing the stress resultant stress during drained through the upper estimate and presenting the possibility of a cross-section reduction
- Prediction of seepage pressure model and numerical analysis considering ultimate state
- Presentation of the thickness of the ground segment type

(6) Verification of the need for drainage design through evaluation of lifetime performance of water stop

- Prediction of lifetime performance of water stop through endurance evalution
- Prediction of the start of the leak of the shield tunnel through the prediction of lifetime performance

(7) Review of the stability of structure of the slim-type shield tunnel through numerical analysis

- Presentation of the way of the cross-section reduction through the minimum cross-section
- Detailed design of the slim-type segment
- Review of the stability of the section

(8) Construction of measuring system of underground water in undrain shielded tunnel

- Selection of a site for the construction of domestic monitoring system
- Construction of measuring system of underground water in tunnel

(9) Evaluation of construction and operating risks of slim-type shield tunnel(Risk assessment)

- Prediction of occurrence of the possible scenarios in the construction process, assessment of Risk Matrix for the Accident Risk
- Prediction of occurrence of the possible scenarios in the operation period , assessment of Risk Matrix for the Accident Risk

(10) Prediction and assessment of the future marketability of the demand for slim-type shield tunnel

- Domestic and foreign marketable Survey: roads, railways, electricity, sewage, etc. Assessment of marketability
- Foreign marketable survey: national survey of foreign demand and

marketability

- Analyze the competitiveness of the domestic market of the future development of technology

■ Contents and range of research in the 3rd year

(1) Development of optimum injection system back fill material of drain shield tunnel

- Selection of the optimal injection equipment considering characteristics of back fill material
- The requirements of back fill material (pressure, delivery) decision and establishment of infusion construction process

(2) Model tests of the drain shield tunnel and derivation of field application Method

- Conducting shield tunnel model experiment considering residual water pressure
- Assessing displacement shield tunnel applicability and stability according to drainage capability
- Verification assessment of the model experiment through numerical analysis
- Deriving application method of the scene according to model experiment and numerical analysis result
- Deriving component technology problem analysis and Improvements

(3) Suggestion of design manual of drain shield tunnel

- Suggesting detail design guidelines considering the placement of drainage hole
- Standard section design of displacement shield tunnel

(4) Evaluation of the CO_2 emission reduction effect of applying a slim-type shield tunnel considering drainage concept

- Calculation of the CO_2 emissions generated during material production, transportation and installation of the case of an existing shield tunnel construction
- Verification of CO_2 emission reduction during operation
- Material reduction of the cross section reduction ratio and evaluation of the effect of reducing CO_2 emissions by 20%

(5) Long-term monitoring of undrain shield tunnel

- Analysis of long-term monitoring results
- Measurement of tunnel groundwater inflow and analysis of results

(6) Patial real scale experiment of slim type shield tunnel

- Making slim type segment for real scale experiment
- Construction of an experimental model and direction of experiment
- Evaluation of applicability of the drainage hole

(7) Evaluation of workability of slim type shield tunnel

- Measurement of each construction period and establishment of the construction process
- Analysis of the total construction period and evaluation of the entire construction process
- Proposal of construction Manual of drain shield tunnel

(8) Procure of the maintenance control plan of slim type shield tunnel

- Presentation of maintenance control plan of the drainage hole
- Conceptual design of air suction gun for drainage hl;e

(9) Assessment of the economic of slim type shield tunnel

- Comparison with the cost analysis for the existing and slim type segments (installation cost and material cost)
- Evaluation of the economics of back fill material
- Verification of the manufacturing costs of the segment and 20% total cost savings of 10%
- Suggests ways of improving affordability through VE assessment (cost estimates) and LCC assessment (Maintenance Cost Analysis)
- Review of tunnel extension of the construction and economic conditions and analysis of the economic threshold of the conventional method

(10) Evaluation of the results obtained and the value of developing technologies

- Ensuring the development of the industrial property of each component technology
- Presentation of the technical roadmap for the commercialization of promotion
- Ensuring the equipment market and the presentation of a commercial business model enemy on business support measures

Ⅳ. Research and Development Results

■ Research of shield tunnel and analysis of the problem

Analyzes the trends for the construction practices and research in Japan and overseas shield tunnel, it was carried out investigation about the problems that occur in the existing shield tunneling method.

■ water leak condition and a flood prevention measure in shield tunnel

Perform a search for the quantity with respect to the inlet tunnel of the tunnel and outside the country of the region, in the shield tunnel investigation and analysis were carried out on the water measures to prevent leakage.

■ Verification of the need for drainage design through evaluation of water stop

Perform a search of the index material types and criteria for the water of the shield tunnel, which was carried out the study of the leak through the prediction of the time index to evaluate the performance life material short- and long-term durability.

■ Suggestion of drain shield tunnel

Establishing the theoretical background of the drai shield tunnel through the research survey of pressure acting on the tunnel lining segments according to multiple criteria and review the applicability of the drainage passage home through the drainage performance and reliability compared with existing drainage type tunnel ReviewIt was performed.

■ Selection of the optimal back fill material of drain shield tunnel

Perform a search of multiple shield-type characteristics of the back fill material to select an optimal back fill material in the tunnel, and conducted experiments for injection performance and water permeability for the application

is available after the filler material to the back surface of the multiple-type shield tunnel and evaluate the environmental performance of the selected material.

■ Development of backfill system of drain shield tunnel

Trying to efficiently inject the back fill material in a drain shield tunnel, by making the injection device, the performance tests were carried out.

■ Evaluation of drainage hole through down scale experiment

A scale model experiment apparatus was manufactured to evaluate experimentally the performance of the drainage flow path grooves, as the pressure increases over the control of ground water pressure was carried out to evaluate whether to go to the actual drainage passage along the groove. In addition, experiments were carried out as to whether or not clogging occurs in the drain flow path grooves developing according to the type of fill material behind the back surface.

■ Evaluation of the performance of drainage hole through real scale experiment

The movement of ground water into the tunnel through the back fill material to be shielded tunnel behaves as a multiple type, the function of the drain passage grooves inside the movement of the ground water to induce drainage segments can be carried out in the most important role. This thread through a large experiment to perform multiple performance tests of the groundwater flow through the actual soil conditions and drainage grooves to evaluate the applicability of the function of the filler and drainage hole.

■ Model test of shield tunnel considering the drained/undrained condition

In various ground conditions we developed a tunnel model test equipment to analyze the applied stress of the shield tunnel lining according to multiple criteria. Also it analyzed the effects stress and internal stress in the shield tunnel lining in free field conditions change sikimyeo various stresses and underground drainage tunnel model was developed using the lab equipment.

■ Review of the shield tunnel structure through numerical stability

Simulation of a shield tunnel construction in underground and stress resultant of the tunnel lining, applied stress, in order to determine the subsidence and tunnels, including groundwater flow numerical analysis was carried out considering the field conditions. This allows the water table, tunnel depth, soil type and backfill (PS Ball), were compared the effects of tunnel lining in accordance with the change.

■ Evaluation of the action of the pressure in the shield tunnel through the field measurement

The instrument is installed in a segment in the shield tunnel construction site in order to determine the soil pressure and the actual pressure acting on the back surface shield tunnel, which was subjected to the measurement site.

■ Suggestion of standard cross-section of drain shield tunnel

The review was carried out with respect to the reduction potential of the thin shield tunnel through the safety review was carried out by calculating the reduced rate to the standard cross-sectional design.

■ Evaluation of workability of drain shield tunnel

Through the BIM by analyzing the detailed process of the thin shield tunnel analyzed the construction speed, backfill material and workability evaluation was

performed risk analysis.

■ **Evaluation of economic of slim type shield tunnel**

Slim type shield tunnel through a detailed economic analysis was performed by process life cycle cost (LCC) and VE evaluation, it was evaluated according to the thinner cross-section with reduced CO_2.

■ **Maintenance control plan of drain shield tunnel**

Slim type shield tunnel for maintenance of drainage hole of the design of an air suction gun, which was carried out in the maintenance plan for the conceptual design.

■ **Prediction of future demand for drain shield tunnel and assessment of marketability**

Through the investigation of the domestic segment sales companies involved in predicting the future growth potential of the market and proposed a plan future projects and commercial business model enemy.

Ⅴ. Plans to Utilize Research and Development Results

It is expected that the results obtained through this research and development and technologies developed based on the results can be utilized in the following contents.

■ Improving the competitiveness of shield tunneling method as advanced tunneling method

- It is expected to solve the leakage problems of segment tunnel lining in the existing segment tunnels through field applications of the slim-type segment tunnel lining developed through this study.
- Reducing the pressure as a multiple type of tunnels are slim segment are possible, while getting an advantage over the existing NATM tunnels in terms of quality and economical efficiency, and it is expected to contribute to improving domestic construction capabilities in response to demand for segment tunnels anticipated in the near future.
- The slim-type segment tunnel lining technologies accumulated through this study is expected to contribute to restoration and construction of future-oriented and human-centered city through responding to government policies such as eco-city construction through minimization of civil complaints and destruction of natural environment.
- In 2010, the range of domestic segment tunnel market was limited to power districts and channel tunnels, and its scale was approximately 100 billion won, but in 2020 the market scale of about 3 trillion won is expected through ripple effects resulting from the establishment of large-scale construction projects such as underground Western arterial road, Seoul smart highway, metropolitan deep-railway express, underground construction of North riverside road, underground Eastern Expressway, extension of new-Bundang Line Railway and accelerated urban roads, etc.

- With market expansion and increase in segment tunnel construction, development of economical and effective design and construction methods is urgently required, and the slim-type segment tunnel lining technology is expected to bring about the improvement of construction technologies through design independence and accumulation of domestic technologies for tunnel construction.
- Development of drainage hole systems enables reduction in the thickness of lining sections of the existing shield tunnels, and it can lead to achieving economical efficiency through linkage to the promotion of researches on the slimmer structures.

■ Expanding applicability of shield tunneling method through technology improvements

- The existing segment TBM methods were applied only to underwater tunnels and shallow soft grounds, but development of equipment and accumulation of construction technology led to applicability to all geological features. With its advantages of minimization of civil complaints, security of stability and reduction in construction period, it is expected to be utilized in underwater tunnel and downtown tunnel construction.
- The technology developed through this study is expected to be widely applied as the improved economic segment lining in response to demand for segment tunnels expected to be increased in the near future.
- The developed technology can help to reduce leakage inside the tunnel, and it is expected to contribute to preventing segment leaks and maintaining durability through application to the construction of the planned large-scale undersea tunnels such as Mokpo-Jeju, Korea-China and Korea-Japan tunnels.

■ Expanding applicability of shield tunneling method through enhancement of economical efficiency

- Drainage hole system developed throughout this study, can be reduced by about 20% the material costs of the segments can be reduced as seen in the entire shield tunnel and the construction costs more than 10%. Moreover, the reduction of the amount of segments of the material, the amount of generated CO_2 gas it can be reduced by 20%.
- Existing shield tunnel, as a non-drainage concept, but you need to consider the hydrostatic pressure, slim-type shield tunnel, by the reduction of water pressure acting as a tunnel of the concept of waste water, can streamline the segment cross section, shield tunnel future it is a technology that forms the foundation of the structure slim due to the segment cross section reduction.
- Since the segment tunnel subway is currently under construction in Southeast Asia, and construction of large-scale subway and power districts is planned in the Middle East within 5 years, it is possible to export the new technologies to foreign countries and participate in overseas projects.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction ····· 1

I. Background and Necessities ····· 1

II. Scope and Contents ····· 6

1. Objective of study ····· 6

2. Contents of study용 ····· 8

III. State of Technical Development ····· 14

1. Status of Development in Domestic ····· 14

2. Status of Development in Foreign ····· 18

Chapter 2. Accomplishment Content and Results ····· 24

I. Research of shield tunnel and analysis of the problem ····· 24

1. Investigation and analysis of the case study ····· 24

2. Survey of technology development status ····· 33

3. Analysis of problems existing shield tunnel ····· 41

4. Survey ····· 44

Conclusion of Chapter ····· 49

II. water leak condition and a flood prevention measure in shield tunnel ····· 50

1. Survey of underground water inflow quantity ····· 50

2. Investigation and analysis of water stop ····· 60

3. Cause of the leak and survey of inflow ····· 65

Conclusion of Chapter ····· 71

III. Verification of the need for drainage design through evaluation of water stop ····· 72

1. Domestic and foreign research material water stop ····· 72

2. Specifications provisions of experiment and materials research ····· 80

3. Prediction of performance of lifetime durability evaluation ····· 85

Conclusion of Chapter ····· 93

IV. Suggestion of drain shield tunnel ····· 94

1. Existing literature survey of the load acting on the lining segments ····· 94

2. Establish of the theoretical background of drain shield tunnel ····· 107
3. Evaluation of drainage hole ····· 108
4. Visual verification of the groundwater movement mechanism within the drainage hole ····· 119
Conclusion of Chapter ····· 124
V. Selection of the optimal back fill material of drain shield tunnel ····· 125
1. shield tunnel backfill Characteristics investigation ····· 125
2. Applicability assessment of the drainage type shield tunnel ····· 129
3. Review the performance of the drain tunnel lining behind the shield-type filler through a laboratory ····· 139
4. Examination of drainage performance according to the type of back fill material ····· 143
5. Environmental Impact Assessment of back fill material ····· 149
6. Evaluation of the impact of the expansion of the PS-ball ····· 154
Conclusion of Chapter ····· 156
VI. Development of backfill system of drain shield tunnel ····· 158
1. Development of the injection device of the PS-ball ····· 158
2. Evaluation of the injection device of the PS-ball ····· 163
Conclusion of Chapter ····· 166
VII. Evaluation of drainage hole through down scale experiment ····· 167
1. Production of down scale model of drain shield tunnel ····· 167
3. Evaluation of drainage hole ····· 172
Conclusion of Chapter ····· 177
VIII. Evaluation of the performance of drainage hole through real scale experiment ····· 178
1. The planning of the experiment ····· 178
2. Design and production ····· 180
3. Perform the experiment ····· 186
Conclusion of Chapter ····· 190
IX. Model test of shield tunnel considering the drained/undrained condition ·· 191
1. Development of a model experiment equipment ····· 191
2. Results of shield tunnel model test of drainage conditions ····· 213
Conclusion of Chapter ····· 286

X. Review of the shield tunnel structure through numerical stability ····· 290
1. Overview of the numerical analysis ····· 290
2. Analysis of the groundwater level change ····· 297
3. Analysis of tunnel depth ····· 304
4. Subsidence of the tunnel depth ····· 313
5. Thickness of the lining segments according type of soil ····· 317
6. Back fill of the PS-ball ····· 330
7. Ground conditions of model test ····· 335
Conclusion of Chapter ····· 343
XI. Evaluation of the action of the pressure in the shield tunnel through the field measurement ····· 345
1. Planning ····· 345
2. Results of measurement ····· 357
Conclusion of Chapter ····· 361
XII. Suggestion of standard cross-section of drain shield tunnel ····· 362
1. Evaluation of the cross-section reduction through Stability ····· 362
2. Design of the slim type segments ····· 372
3. Production of Drain shield tunnel segment ····· 377
Conclusion of Chapter ····· 385
XIII. Evaluation of workability of drain shield tunnel ····· 386
1. Analysis of Construction Process ····· 386
2. Risk Evaluation ····· 392
Conclusion of Chapter ····· 408
XIV. Evaluation of economic of slim type shield tunnel ····· 409
1. Analysis of Economic Feasibility ····· 409
2. VE Evaluation ····· 421
3. Assessment of CO_2 emissions ····· 433
Conclusion of Chapter ····· 440
XV. Maintenance control plan of drain shield tunnel ····· 441
1. Maintenance of drainage hole ····· 441
2. Design of air-suction gun ····· 444
Conclusion of Chapter ····· 449

XVI. Prediction of future demand for drain shield tunnel and assessment of marketability ····· 450
1. Survey of production systems of segment ····· 450
2. Demand of technologies and assessment of marketability ····· 465
Conclusion of Chapter ····· 481

Chapter 3. Final Research Achievement and Application ····· 482
I. Key Element Technology ····· 482
II. Major Research Achievemen ····· 489
1. Scholarly Achievement ····· 489
2. Technical Achievement ····· 494
III. Analysis of Demand and Future Market of Shield tunnel ····· 496
1. Prospect of Domestic Market ····· 496
2. Prospect of Overseas Market ····· 497

Chapter 4. Achievement of Research Goal and Effect ····· 499

References ····· 502

Appendix ····· 509

목 차

제 1 장 연구개발과제 개요 ····· 1

제 1 절 연구개발의 배경 및 필요성 ····· 1

제 2 절 연구개발의 내용 및 범위 ····· 6

1. 연구개발 최종목표 ····· 6

2. 연구개발 내용 ····· 8

제 3 절 국내외 기술개발 현황 ····· 14

1. 국내기술개발 현황 ····· 14

2. 국외기술개발 현황 ····· 18

제 2 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 24

제 1 절 국내외 쉴드터널 현황 조사 및 문제점 분석 ····· 24

1. 시공사례 조사 및 분석 ····· 24

2. 기술개발 현황 조사 ····· 33

3. 기존 쉴드터널 문제점 분석 ····· 41

4. 현장설문조사 수행 ····· 44

소결론 ····· 49

제 2 절 쉴드터널 누수실태 파악 및 방수방법 조사 ····· 50

1. 지하수 유입수량 조사 ····· 50

2. 방수방법 조사 및 효율성 분석 ····· 60

3. 누수발생 원인 분석 및 유입량 조사 ····· 65

소결론 ····· 71

제 3 절 수팽창 지수재 평가를 통한 배수설계 필요성 검증 ····· 72

1. 국내외 수팽창 지수재 조사 ····· 72

2. 시방규정 및 재료 실험방법 조사 ····· 80

3. 내구성 평가를 통한 성능수명 예측 ····· 85

소결론 ····· 93

제 4 절 배수형 쉴드터널 적용성 평가 ····· 94

1. 세그먼트 라이닝 작용하중에 대한 연구 조사 ····· 94
2. 배수형 쉴드터널의 이론적 배경 정립 ····· 107
3. 배수 유로홈의 배수성능 고찰 ····· 108
4. 배수 유로홈내 지하수 이동 메커니즘의 시각적 검증 ····· 119
소결론 ····· 124
제 5 절 배수형 쉴드터널 최적 뒤채움재 선정 ····· 125
1. 쉴드터널 뒤채움재 특성 ····· 125
2. 배수형 쉴드터널 적용을 위한 뒤채움재 조사 ····· 129
3. 실험을 통한 뒤채움재 배수성능 평가 ····· 139
4. 뒤채움재 종류에 따른 배면주입실험 ····· 143
5. 환경영향 평가 ····· 149
6. PS 볼 팽창으로 인한 성능저하 평가 ····· 154
소결론 ····· 156
제 6 절 배수형 쉴드터널 뒤채움 시스템 개발 ····· 158
1. PS 볼 뒤채움 주입장치 개발 ····· 158
2. PS 볼 뒤채움 주입장치 성능평가 ····· 163
소결론 ····· 166
제 7 절 축소모형실험을 통한 배수 유로홈 성능 평가 ····· 167
1. 배수 유로홈 축소모형 실험장치 제작 ····· 167
2. 배수 유로홈 성능평가 ····· 172
소결론 ····· 177
제 8 절 실대형 실험을 통한 배수 유로홈 성능 평가 ····· 178
1. 실험 계획 ····· 178
2. 설계 및 제작 ····· 180
3. 실험 수행 ····· 186
소결론 ····· 190
제 9 절 배수/비배수 조건을 고려한 쉴드터널 모형실험 ····· 191
1. 모형실험장비 개발 ····· 191
2. 배수조건에 따른 쉴드터널 모형실험결과 ····· 213
소결론 ····· 286

제 10 절 수치해석을 통한 쉴드터널 구조안정성 검토 ····· 290
1. 수치해석 개요 ····· 290
2. 지하수위 변화 해석 ····· 297
3. 터널심도 해석 ····· 304
4. 터널심도에 따른 지반침하 ····· 313
5. 지반종류에 따른 세그먼트 라이닝 두께 ····· 317
6. PS 볼 뒤채움 ····· 330
7. 모형실험 지반조건 ····· 335
소결론 ····· 343
제 11 절 현장 계측을 통한 쉴드터널 작용 압력 평가 ····· 345
1. 계획 수립 ····· 345
2. 계측 결과 ····· 357
소결론 ····· 361
제 12 절 배수형 쉴드터널 표준단면 제안 ····· 362
1. 안정성 검토를 통한 단면 축소 가능성 평가 ····· 362
2. 슬림형 세그먼트 상세설계 ····· 372
3. 배수형 쉴드터널 세그먼트 제작 ····· 377
소결론 ····· 385
제 13 절 배수형 쉴드터널 시공성 평가 ····· 386
1. 공통 시공프로세스 분석 ····· 386
2. 시공 및 운영 위험도 평가 ····· 392
소결론 ····· 408
제 14 절 배수형 쉴드터널 경제성 평가 ····· 409
1. 원가 비교분석 ····· 409
2. VE(Value Engineering) 분석 ····· 421
3. CO_2 배출 저감 평가 ····· 433
소결론 ····· 440
제 15 절 배수형 쉴드터널 유지관리 방안 ····· 441
1. 배수 유로홈 유지관리 방안 ····· 441
2. 에어석션건 개념설계 ····· 444

소결론 ····· 449
제 16 절 배수형 쉴드터널 미래 수요예측 및 시장성 평가 ····· 450
1. 국내외 세그먼트 생산시스템 조사 ····· 450
2. 개발기술 수요예측 및 시장성 평가 ····· 465
소결론 ····· 481

제 3 장 최종 연구성과 및 적용실적 ····· 482
제 1 절 핵심요소기술 ····· 482
제 2 절 주요 연구성과 ····· 489
1. 학술적 성과 ····· 489
2. 기술적 성과 ····· 494
제 3 절 기술개발 성과의 국내외 시장 전망 ····· 496
1. 국내 시장 전망 ····· 496
2. 국외 시장 전망 ····· 497

제 4 장 연구 목표 달성 및 효과 ····· 499

참고문헌 ····· 502
부 록 ····· 509
1. 배수형 쉴드터널 설계·시공·유지관리 매뉴얼(안)
2. 배수형 쉴드터널 표준단면
3. 배수/비배수 조건 쉴드터널 모형실험장치 매뉴얼
4. PS 볼 뒤채움 주입장치 매뉴얼
5. 국외출장복명서
6. 해외과학기술정보

그 림 차 례

그림 1.1.1 쉴드터널 발생 누수량 분포 ····· 2
그림 1.1.2 기존 쉴드터널의 누수 발생 ····· 3
그림 1.1.3 세그멘트 연결 볼트 부분 누수 전경 ····· 3
그림 1.1.4 세그멘트 간 단차를 통한 지하수 유입 ····· 4
그림 1.1.5 건설환경 및 터널시공 패러다임 변화 ····· 4
그림 1.2.1 최종목표 달성을 위한 로드맵 ····· 7
그림 1.3.1 국내 TBM 시공현황 ····· 14
그림 1.3.2 연도별 TBM 적용현황a ····· 15
그림 1.3.3 연도별 TBM 적용현황b ····· 15
그림 1.3.4 군장터널 위치도 ····· 17
그림 1.3.5 전세계 TBM 제작시장 규모(추정) ····· 19
그림 1.3.6 일본의 쉴드터널 시공직경 변화 추이 ····· 20
그림 1.3.7 일본의 쉴드터널 시공연장 변화 추이 ····· 20
그림 1.3.8 일본의 쉴드장비 생산업체 제작실적 ····· 21
그림 1.3.9 난징~양쯔강 터널단면도 ····· 22
그림 1.3.10 Alaskan way viaduct and seawall Replacement 복층터널 ····· 22
그림 1.3.11 말레이시아 SMART터널 개요도 ····· 23
그림 2.1.1 2000년 이전 국내 세그먼트 터널 현황 ····· 24
그림 2.1.2 A86 도시고속도로 구조 ····· 31
그림 2.1.3 유로터널의 구조 ····· 31
그림 2.1.4 엘버터널 4th Tube 단면도 ····· 31
그림 2.1.5 이스탄블해협 단선 복층터널면 ····· 31
그림 2.1.6 일본의 세그먼트 터널 현황 ····· 32
그림 2.1.7 4심원 이수식 쉴드장비 모습 ····· 33
그림 2.1.8 시공 구간의 횡단도 ····· 33
그림 2.1.9 록본기역 공구의 단면도 ····· 33
그림 2.1.10 4심원 이수식 쉴드장비 상세 ····· 35
그림 2.1.11 NM 세그먼트 구조 ····· 35
그림 2.1.12 NM 세그먼트 모습 ····· 36
그림 2.1.13 구조 안정성 시험 모습 ····· 36
그림 2.1.14 NOMST에 의한 발진 개념도 ····· 36
그림 2.1.15 3심원 이수식 쉴드장비의 구조 ····· 38
그림 2.1.16 3심원 이수식 쉴드장비 모습 ····· 38
그림 2.1.17 M·F 쉴드머신 모습 ····· 40

그림 2.1.18 마고메 간선 건설공사에 사용된 쉴드장비 ····· 40
그림 2.1.19 쉴드터널 발생 누수량 분포 ····· 41
그림 2.1.20 기존 쉴드터널의 누수 발생 ····· 41
그림 2.1.21 세그멘트 연결 볼트 부분 누수 전경 ····· 42
그림 2.1.22 세그멘트 간 단차를 통한 지하수 유입 ····· 42
그림 2.1.23 대상자의 직종 분류 ····· 44
그림 2.1.24 대상자의 각 분야 종사기간 ····· 44
그림 2.1.25 배수/비배수 설계개념에 대한 이해 정도 ····· 45
그림 2.1.26 쉴드터널 공법에 대한 이해 정도 ····· 45
그림 2.1.27 쉴드공법의 장점 ····· 45
그림 2.1.28 공사비 절감을 위한 방안 ····· 45
그림 2.1.29 일률적인 비배수 설계개념으로 인한 문제점 ····· 46
그림 2.1.30 현재의 설계 단면두께 수준에 대한 의견 ····· 46
그림 2.1.31 배변 뒤채움재 주입시 발생하는 문제점 ····· 46
그림 2.1.32 비배수 설계개념에서 쉴드터널 내부 유입 지하수의 차단 가능성 ····· 47
그림 2.1.33 쉴드터널에서 내부 지하수 유입이 가장 심각한 부분 ····· 47
그림 2.1.34 수팽창 지수재의 지하수 유입 차단 기능 ····· 47
그림 2.1.35 수팽창 지수재 수명 예상(쉴드터널 내구연한 50년 가정) ····· 48
그림 2.1.36 부분배수 개념의 쉴드터널 적용 가능성 ····· 48
그림 2.1.37 부분배수 적용으로 수압 저감시 쉴드 단면 축소 가능 범위 ····· 48
그림 2.2.1 쉴드터널 누수 발생 요인 ····· 60
그림 2.2.2 씰재의 소성변형 ····· 62
그림 2.2.3 씰재 형상(예) ····· 62
그림 2.2.4 씰재에 의한 지수조건 ····· 62
그림 2.2.5 쉴드터널 발생 누수량 분포 ····· 65
그림 2.2.6 세그먼트 볼트 부분 누수 ····· 66
그림 2.2.7 세그먼트간 단차를 통한 지하수 유입 ····· 66
그림 2.2.8 세그먼트 지수재 탈락 ····· 68
그림 2.2.9 그라우팅 주입구를 통한 누수 ····· 68
그림 2.2.10 쉴드터널 체결부 누수 사례 ····· 68
그림 2.2.11 시공 중인 쉴드터널의 월강수량 대비 월평균 지하수 유입량 ····· 70
그림 2.3.1 벤토나이트 수팽창 지수재 시공방법 ····· 77
그림 2.3.2 수팽창 실란트 지수재 팽창률 곡선 ····· 78
그림 2.3.3 수팽창 실란트 지수재 시공예 ····· 78
그림 2.3.4 터널 세그먼트 개스킷 ····· 79
그림 2.3.5 설치 허용오차 ····· 79

그림 2.3.6 TSG 세그먼트 라이닝 ····· 79
그림 2.3.7 Gap(δ)과 Offset(△) 개념도 ····· 83
그림 2.3.8 Gap-Offset 관계 그래프 ····· 83
그림 2.3.9 세그먼트 체결에 의한 개스킷의 압축 및 돌출 ····· 88
그림 2.3.10 온습도 환경챔버(한국건설생활환경시험연구원 서산 옥외실증시험센터) ····· 89
그림 2.3.11 수팽창 지수재 내구성 실험 수행과정 ····· 91
그림 2.3.12 수팽창 지수재 변화 ····· 92
그림 2.4.1 부정류 상태 ····· 95
그림 2.4.2 정상류 상태 ····· 95
그림 2.4.3 단선터널 ····· 97
그림 2.4.4 복선터널 ····· 97
그림 2.4.5 배수형 터널의 균열폭-수압 측정 예 ····· 99
그림 2.4.6 라이닝 모델링 개념 ····· 99
그림 2.4.7 배수형 터널주변의 유선망 ····· 100
그림 2.4.8 방수식터널 ····· 103
그림 2.4.9 배수식터널 ····· 103
그림 2.4.10 Channel 터널에 작용하는 침투압 ····· 105
그림 2.4.11 그라우팅 링 외부에 작용하는 수압(세이칸 터널) ····· 105
그림 2.4.12 해석 적용 단면 ····· 116
그림 2.4.13 해석 적용 모델링 ····· 117
그림 2.4.14 해석 결과 - 유속 벡터 ····· 117
그림 2.4.15 해석 결과 - 터널 주변 수압 분포 ····· 118
그림 2.4.16 해석 결과 - 터널 유입 용수량 ····· 118
그림 2.4.17 모의 실험용 세그먼트 ····· 119
그림 2.4.18 모의 실험용 세그먼트 링 ····· 119
그림 2.4.19 모의 실험용 수조 ····· 120
그림 2.4.20 모형 수조의 부속장치 ····· 121
그림 2.4.21 Case-1 실험 상태 ····· 121
그림 2.4.22 Case-2 실험 상태 ····· 122
그림 2.4.23 Case-3 실험 상태 ····· 122
그림 2.4.24 Case-3에서 지하수 이동 모습 ····· 122
그림 2.4.25 배수 유로홈내 지하수 이동의 시각적 검증 ····· 123
그림 2.5.1 쉴드 굴착시 테이보이드 발생 원인 ····· 125
그림 2.5.2 사용재료 특성에 의한 뒤채움 주입재료의 분류 ····· 126
그림 2.5.3 주입상태에 의한 뒤채움 주입재료의 분류 ····· 126
그림 2.5.4 물유리계 2액성 완결고결형 그라우트의 주입 메커니즘 ····· 127

그림 2.5.5 순결 고결형 그라우트의 주입 메커니즘 ····· 127
그림 2.5.6 가소성형 그라우트의 주입 메커니즘 ····· 127
그림 2.5.7 뒤채움재 주입방식 종류 ····· 128
그림 2.5.8 철강슬래그의 발생공정 및 재활용 ····· 129
그림 2.5.9 슬래그의 온도별 결합구조 변화도 ····· 130
그림 2.5.10 PS Ball의 XRD 분석결과 ····· 130
그림 2.5.11 PS Ball의 구형율 ····· 131
그림 2.5.12 PS Ball 실적율 측정 결과 ····· 131
그림 2.5.13 PS Ball 밀도와 흡수율 실험 결과 ····· 132
그림 2.5.14 PS 볼 생산 공정 ····· 133
그림 2.5.15 국내 생산공장의 PS 볼 선별과정 ····· 135
그림 2.5.16 직경별 PS 볼 선별기 ····· 135
그림 2.5.17 PS 볼 입도분포 공인시험성적서(직경 1~2mm) ····· 136
그림 2.5.18 원형 인공경량골재 모습 ····· 138
그림 2.5.19 배면주입장치 초기모델의 제작 도안 ····· 139
그림 2.5.20 배면주입장치 초기모델 모습 ····· 140
그림 2.5.21 전력구 표준단면도 ····· 141
그림 2.5.22 전력구 1/4단면 ····· 141
그림 2.5.23 전력구 쉴드터널 배면형상 제작안 ····· 141
그림 2.5.24 뒤채움재 주입구 모사 ····· 142
그림 2.5.25 전력구 쉴드터널 배면형상 몰드 ····· 142
그림 2.5.26 표준사를 이용한 뒤채움 실험 ····· 143
그림 2.5.27 표준사를 이용한 배면뒤채움 실험 순서 ····· 144
그림 2.5.28 표준사의 시간에 따른 주입효율 ····· 145
그림 2.5.29 PS 볼을 이용한 배면주입실험 ····· 145
그림 2.5.30 PS 볼을 이용한 배면주입실험 ····· 146
그림 2.5.31 주입재료 역류현상 ····· 146
그림 2.5.32 배면주입장치 기존 주입구 ····· 147
그림 2.5.33 배면주입장치 개조 주입구 ····· 147
그림 2.5.34 PS 볼의 시간에 따른 주입효율 ····· 148
그림 2.5.35 PS 볼 공기 투과성 확인 ····· 148
그림 2.6.1 PS 볼 뒤채움 주입장치 본체 설계 개념 ····· 160
그림 2.6.2 제작된 PS 볼 뒤채움 주입장치 본체 ····· 160
그림 2.6.3 PS 볼 저장 사일로 개념설계 ····· 161
그림 2.6.4 뒤채움 장치 본체와 연결된 PS 볼 저장 사일로 제작 ····· 162
그림 2.6.5 PS 볼 이송호스 ····· 162

그림 2.6.6 PS 볼 뒤채움 주입장치 성능평가 흐름도 ····· 163
그림 2.6.7 PS 볼 뒤채움 실험 모습 ····· 163
그림 2.6.8 PS 볼 뒤채움 실험결과 ····· 165
그림 2.7.1 실제 전력구 쉴드터널 단면 형상 ····· 167
그림 2.7.2 배수 유로홈 축소모형실험장치 ····· 168
그림 2.7.3 배수 유로홈이 형성된 세그먼트 단면 ····· 169
그림 2.7.4 배수 유로홈 축소모형실험 수행 ····· 173
그림 2.7.5 배수 유로홈 폐색 가능성 평가시험 ····· 175
그림 2.8.1 배수 유로홈 성능평가 장치 개요도 ····· 179
그림 2.8.2 ○○전력구 A타입 세그먼트 정면도 ····· 180
그림 2.8.3 ○○전력구 A타입 세그먼트 평면 및 측면도 ····· 180
그림 2.8.4 배수 유로홈 성능평가용 세그먼트 상세도 ····· 181
그림 2.8.5 세그먼트 하부보강 설계 ····· 182
그림 2.8.6 세그먼트 하부보강 설계 ····· 182
그림 2.8.7 실험용 세그먼트 모형 ····· 183
그림 2.8.8 실험체 하부보강 구조 ····· 184
그림 2.8.9 실험체 토조 결합 ····· 184
그림 2.8.10 실험체 지하수 배출관 ····· 185
그림 2.8.11 유량계 ····· 185
그림 2.8.12 배수성능 평가를 위한 실험 순서 ····· 186
그림 2.8.13 세그먼트 배면 지층 형성 ····· 187
그림 2.8.14 배수 유로홈을 통한 지하수 이동 ····· 188
그림 2.8.15 집수된 지하수 배출 ····· 188
그림 2.8.16 가능 배수량 이상의 지하수 ····· 189
그림 2.8.17 유량계를 통한 계측 ····· 189
그림 2.9.1 수팽창 지수재 팽창성능 모형실험장비 ····· 193
그림 2.9.2 2차원 축소모형 실험장비 ····· 193
그림 2.9.3 원심모형실험장비 ····· 194
그림 2.9.4 터널모형 실험장비 전체 외관 ····· 196
그림 2.9.5 터널모형 실험장비 구성 장비 ····· 197
그림 2.9.6 내관 및 계측장비 배치도 ····· 198
그림 2.9.7 수압: 0.05 ㎫, 토압: 0.0278 → 0.1390 ㎫ ····· 199
그림 2.9.8 수압: 0.10 ㎫, 토압: 0.0278 → 0.1390 ㎫ ····· 200
그림 2.9.9 수압: 0.15~0.20 ㎫, 토압: 0.0278 → 0.1390 ㎫ ····· 201
그림 2.9.10 비중시험 전경 ····· 203
그림 2.9.11 입도실험 전경 ····· 204

그림 2.9.12 다짐실험 전경 ····· 205
그림 2.9.13 함수비실험 전경 ····· 206
그림 2.9.14 삼축압축실험 전경 ····· 206
그림 2.9.15 시료별 입도분포곡선 ····· 209
그림 2.9.16 비배수조건 1차에서의 전응력 변화 ····· 213
그림 2.9.17 비배수조건 2차에서의 전응력 변화 ····· 214
그림 2.9.18 배수조건 1차에서의 전응력 변화 ····· 215
그림 2.9.19 배수조건 2차에서의 전응력 변화 ····· 216
그림 2.9.20 배수조건 3차에서의 전응력 변화 ····· 217
그림 2.9.21 배수조건 4차에서의 전응력 변화 ····· 218
그림 2.9.22 배수조건 5차에서의 전응력 변화 ····· 218
그림 2.9.23 배수조건 6차에서의 전응력 변화 ····· 219
그림 2.9.24 비배수조건 1차에서의 간극수압 변화 ····· 223
그림 2.9.25 비배수조건 2차에서의 간극수압 변화 ····· 223
그림 2.9.26 배수조건 1차에서의 간극수압 변화 ····· 224
그림 2.9.27 배수조건 2차에서의 간극수압 변화 ····· 225
그림 2.9.28 배수조건 3차에서의 간극수압 변화 ····· 225
그림 2.9.29 배수조건 4차에서의 간극수압 변화 ····· 226
그림 2.9.30 배수조건 5차에서의 간극수압 변화 ····· 227
그림 2.9.31 배수조건 6차에서의 간극수압 변화 ····· 227
그림 2.9.32 비배수조건 1차에서의 변형률 변화 ····· 231
그림 2.9.33 비배수조건 2차에서의 변형률 변화 ····· 232
그림 2.9.34 배수조건 1차에서의 변형률 변화 ····· 233
그림 2.9.35 배수조건 2차에서의 변형률 변화 ····· 234
그림 2.9.36 배수조건 3차에서의 변형률 변화 ····· 235
그림 2.9.37 배수조건 4차에서의 변형률 변화 ····· 236
그림 2.9.38 배수조건 5차에서의 변형률 변화 ····· 237
그림 2.9.39 배수조건 6차에서의 변형률 변화 ····· 238
그림 2.9.40 수압 0.05 ㎫일 때 전응력과 유효응력의 변화 ····· 250
그림 2.9.41 수압 0.10 ㎫일 때 전응력과 유효응력의 변화 ····· 251
그림 2.9.42 수압 0.15 ㎫일 때 전응력과 유효응력의 변화 ····· 252
그림 2.9.43 수압 0.20 ㎫일 때 전응력과 유효응력의 변화 ····· 254
그림 2.9.44 비배수조건 1차에서의 전응력 변화 ····· 255
그림 2.2.45 비배수조건 2차에서의 전응력 변화 ····· 256
그림 2.9.46 배수조건 1차에서의 전응력 변화 ····· 257
그림 2.9.47 배수조건 2차에서의 전응력 변화 ····· 258

그림 2.9.48 비배수조건 1차에서의 간극수압 변화 ····· 260
그림 2.9.49 비배수조건 2차에서의 간극수압 변화 ····· 261
그림 2.9.50 배수조건 1차에서의 간극수압 변화 ····· 262
그림 2.9.51 배수조건 2차에서의 간극수압 변화 ····· 262
그림 2.9.52 비배수조건 1차에서의 변형률 변화 ····· 265
그림 2.9.53 비배수조건 2차에서의 변형률 변화 ····· 266
그림 2.9.54 배수조건 1차에서의 변형률 변화 ····· 267
그림 2.9.55 배수조건 2차에서의 변형률 변화 ····· 268
그림 2.9.56 수압 0.05 ㎫일 때 전응력과 유효응력의 변화 ····· 274
그림 2.9.57 수압 0.10 ㎫일 때 전응력과 유효응력의 변화 ····· 275
그림 2.9.58 수압 0.15 ㎫일 때 전응력과 유효응력의 변화 ····· 276
그림 2.9.59 수압 0.20 ㎫일 때 전응력과 유효응력의 변화 ····· 277
그림 2.9.60 표준사 지반의 심도별 수압 ····· 281
그림 2.9.61 비배수 및 배수조건에서의 수압 변화(표준사 지반) ····· 282
그림 2.9.62 비배수 및 배수조건에서의 수압 변화(화강풍화토 지반) ····· 285
그림 2.10.1 현장지반조건 ····· 291
그림 2.10.2 유한요소망 ····· 291
그림 2.10.3 비배수조건의 전단력(현장조건) ····· 293
그림 2.10.4 비배수조건의 모멘트(현장조건) ····· 293
그림 2.10.5 비배수조건의 유출량(현장조건) ····· 294
그림 2.10.6 배수조건의 전단력(현장조건) ····· 294
그림 2.10.7 배수조건의 모멘트(현장조건) ····· 295
그림 2.10.8 배수조건의 유출량(현장조건) ····· 295
그림 2.10.9 지하수위 변화 전 축력(우기시) ····· 297
그림 2.10.10 지하수위 변화 후 축력(우기시) ····· 298
그림 2.10.11 지하수위 변화 전 모멘트(우기시) ····· 298
그림 2.10.12 지하수위 변화 후 모멘트(우기시) ····· 298
그림 2.10.13 지하수위 변화 전 축력(평상시) ····· 299
그림 2.10.14 지하수위 변화 후 축력(평상시) ····· 300
그림 2.10.15 지하수위 변화 전 모멘트(평상시) ····· 300
그림 2.10.16 지하수위 변화 후 모멘트(평상시) ····· 300
그림 2.10.17 지하수위 변화 전 축력(시공중 및 건기시) ····· 301
그림 2.10.18 지하수위 변화 후 축력(시공중 및 건기시) ····· 302
그림 2.10.19 지하수위 변화 전 모멘트(시공중 및 건기시) ····· 302
그림 2.10.20 지하수위 변화 후 모멘트(시공중 및 건기시) ····· 302
그림 2.10.21 비배수조건의 전단력(4D조건) ····· 304

그림 2.10.22 비배수조건의 모멘트(4D조건) ····· 305
그림 2.10.23 비배수조건의 유출량(4D조건) ····· 305
그림 2.10.24 배수조건의 전단력(4D조건) ····· 306
그림 2.10.25 배수조건의 모멘트(4D조건) ····· 306
그림 2.10.26 배수조건의 유출량(4D조건) ····· 307
그림 2.10.27 비배수조건의 전단력(6D조건) ····· 307
그림 2.10.28 비배수조건의 모멘트(6D조건) ····· 308
그림 2.10.29 비배수조건의 유출량(6D조건) ····· 308
그림 2.10.30 배수조건의 전단력(6D조건) ····· 309
그림 2.10.31 배수조건의 모멘트(6D조건) ····· 309
그림 2.10.32 배수조건의 유출량(6D조건) ····· 310
그림 2.10.33 비배수조건의 전단력 ····· 330
그림 2.10.34 비배수조건의 모멘트 ····· 331
그림 2.10.35 비배수조건의 유출량 ····· 331
그림 2.10.36 배수조건의 전단력 ····· 332
그림 2.10.37 배수조건의 모멘트 ····· 332
그림 2.10.38 배수조건의 유출량 ····· 333
그림 2.10.39 비배수조건의 전단력 ····· 335
그림 2.10.40 비배수조건의 모멘트 ····· 336
그림 2.10.41 비배수조건의 유출량 ····· 336
그림 2.10.42 배수조건의 전단력 ····· 337
그림 2.10.43 배수조건의 모멘트 ····· 337
그림 2.10.44 배수조건의 유출량 ····· 338
그림 2.10.45 비배수조건의 전단력 ····· 339
그림 2.10.46 비배수조건의 모멘트 ····· 339
그림 2.10.47 비배수조건의 유출량 ····· 339
그림 2.10.48 배수조건의 전단력 ····· 340
그림 2.10.49 배수조건의 모멘트 ····· 340
그림 2.10.50 배수조건의 유출량 ····· 341
그림 2.11.1 쉴드터널 계측기 설치 현장 종평면도 ····· 345
그림 2.11.2 쉴드터널 계측기 설치 위치 ····· 346
그림 2.11.3 계측 현장 쉴드터널 일반도 ····· 346
그림 2.11.4 세그먼트 주입홀을 이용한 토압계 설치 방법 ····· 349
그림 2.11.5 계측용 세그먼트 제작 모습 ····· 351
그림 2.11.6 세그먼트 주입홀을 이용한 간극수압계 설치 방법 ····· 352
그림 2.11.7 쉴드터널 내 간극수압계 설치 위치 ····· 354

그림 2.11.8 세그먼트 내 토압계 설치 모습 ····· 355
그림 2.11.9 세그먼트 내 간극수압계 설치 모습 ····· 356
그림 2.11.10 계측 지점 C의 토압 계측 결과 ····· 357
그림 2.11.11 계측 지점 D의 토압 계측 결과 ····· 358
그림 2.11.12 계측 지점 A의 간극수압 계측 결과 ····· 359
그림 2.11.13 계측 지점 B의 간극수압 계측 결과 ····· 360
그림 2.12.1 안전계수 개념도 ····· 362
그림 2.12.2 기존 쉴드터널 표준단면도 ····· 363
그림 2.12.3 기존 설계의 지층조건 ····· 363
그림 2.12.4 세그먼트 검토단면 ····· 364
그림 2.12.5 P-M 상관도 ····· 364
그림 2.12.6 지층조건 ····· 365
그림 2.12.7 비배수 모델 P-M 상관도 ····· 366
그림 2.12.8 부분배수 모델 P-M 상관도 ····· 366
그림 2.12.9 지층조건 ····· 367
그림 2.12.10 세그먼트 검토단면 ····· 367
그림 2.12.11 비배수 모델 P-M 상관도 ····· 368
그림 2.12.12 부분배수 모델 P-M 상관도 ····· 369
그림 2.12.13 세그먼트 검토단면 ····· 369
그림 2.12.14 P-M 상관도 ····· 369
그림 2.12.15 세그먼트 검토단면 ····· 370
그림 2.12.16 P-M 상관도 ····· 370
그림 2.12.17 단면 축소 검토 단면 ····· 372
그림 2.12.18 세그먼트 검토단면 ····· 372
그림 2.12.19 P-M 상관도 ····· 373
그림 2.12.20 세그먼트 검토단면 ····· 373
그림 2.12.21 P-M 상관도 ····· 374
그림 2.12.22 지하철 표준단면도 ····· 375
그림 2.12.23 지하철 표준단면 세그먼트도 ····· 375
그림 2.12.24 배수형 쉴드터널 표준단면도 ····· 376
그림 2.12.25 배수형 쉴드터널 표준단면 세그먼트도 ····· 376
그림 2.12.26 세그먼트 구성 ····· 377
그림 2.12.27 쉴드터널 조립방식 ····· 378
그림 2.12.28 A타입 세그먼트 설계도 ····· 378
그림 2.12.29 A타입 세그먼트 몰드 설계도 ····· 379
그림 2.12.30 슬림형 세그먼트 몰드 ····· 379

그림 2.12.31 볼트박스 탈부착 시스템 ····· 379
그림 2.12.32 뒤채움재 주입홀 고정부 ····· 380
그림 2.12.33 세그먼트 치수의 측정 ····· 382
그림 2.12.34 세그먼트 철근 배근도 ····· 383
그림 2.12.35 슬림형 세그먼트 배수기능 부분 ····· 383
그림 2.12.36 슬림형 세그먼트 제작과정 ····· 384
그림 2.13.1 쉴드공법 굴진 시공프로세스[1] ····· 386
그림 2.13.2 TBM 본체 개요도 ····· 388
그림 2.13.3 TBM 장비의 후속설비 ····· 389
그림 2.13.4 쉴드터널 단위공종별 시공프로세스 ····· 390
그림 2.13.5 세그먼트 조립 소요공기 분석 ····· 390
그림 2.13.6 위험도 평가 시스템 개요도 ····· 392
그림 2.13.7 Event Tree 구성의 예시 ····· 394
그림 2.13.8 일반적 터널의 시공단계 시나리오 구성 ····· 403
그림 2.13.9 일반적 터널의 운영단계 시나리오 구성 ····· 404
그림 2.13.10 배수형 쉴드터널 위험도 평가 시나리오 구성 ····· 406
그림 2.14.1 VE 분석 절차 ····· 423
그림 2.14.2 준비단계 주요업무 ····· 424
그림 2.14.3 분석단계 주요업무 ····· 424
그림 2.14.4 실행단계 주요업무 ····· 426
그림 2.14.5 VE 평가 분석결과 ····· 432
그림 2.14.6 전과정 평가 기본구조 ····· 433
그림 2.14.7 전과정 평가의 기본절차 ····· 434
그림 2.14.8 기존 및 배수형 쉴드터널 탄소배출량 비교(철도터널) ····· 437
그림 2.14.9 기존 및 배수형 쉴드터널 탄소배출가격 비교(철도터널) ····· 437
그림 2.14.10 기존 및 배수형 쉴드터널 탄소배출량 비교(도로터널) ····· 439
그림 2.14.11 기존 및 배수형 쉴드터널 탄소배출가격 비교(도로터널) ····· 439
그림 2.15.1 배수 유로홈 운용 모습 ····· 441
그림 2.15.2 에어석션건 개념설계 수행 과정 ····· 442
그림 2.15.3 기존 산업용 석션 제품 검토 ····· 443
그림 2.15.4 에어석션건 부품도a ····· 444
그림 2.15.5 에어석션건 부품도b ····· 445
그림 2.15.6 도출된 에어석션건 사양 ····· 445
그림 2.15.7 도출된 에어석션건 구조 ····· 446
그림 2.15.8 에어석션건의 이물질 배출 방안 ····· 446
그림 2.15.9 에어석션건 단계별 작동과정 모델링 ····· 447

그림 2.16.1 2000년 이전 국내 세그먼트 터널 현황 ····· 450
그림 2.15.2 전세계 TBM 제작시장 규모(추정) ····· 463
그림 2.15.3 SPC 주요 생산 제품 ····· 464
그림 2.16.4 8년간(2006년~2013년) 국내 도로터널의 발주개소 및 전체 연장 ····· 466
그림 2.16.5 2009년 기준 나라별 전체 터널 대비 쉴드터널 시공현황 ····· 468
그림 2.16.6 프랑스 파리의 도시고속도로 구조 ····· 469
그림 2.16.7 유로터널의 구조 ····· 469
그림 2.16.8 엘베터널 4th Tube 단면도 ····· 470
그림 2.16.9 이스탄블 해협 단선복층터널 단면 ····· 470
그림 2.16.10 일본의 쉴드터널 현황 ····· 471

표 차 례

표 1.3.1 해외 장대터널의 굴착공법 적용현황 ····· 18
표 1.3.2 해외 장대터널중 대구경 TBM의 적용사례 ····· 19
표 2.1.1 국내 관로공사 세그먼트 터널 시공현황 ····· 25
표 2.1.2 서울 및 수도권의 2000년 이후 세그먼트 터널의 시공현황 ····· 27
표 2.1.3 국내 세그먼트 터널 시공현황 ····· 28
표 2.1.4 국내 세그먼트 터널 설계현황 ····· 29
표 2.1.5 국외 세그먼트 터널 적용 현황 ····· 30
표 2.1.6 기존 원형 쉴드공법과 M·F 쉴드공법의 경제성 비교(단위 m당) ····· 39
표 2.1.7 쉴드터널의 지반변위 메커니즘 ····· 43
표 1.2.1 서울 지하철 1~4호선 지하수 유출 현황 ····· 50
표 2.2.2 부산 지하철 1~4호선 지하수 유출 현황 ····· 53
표 2.2.3 대구 지하철 1, 2호선 지하수 유출 현황 ····· 55
표 2.2.4 인천 지하철 1호선 지하수 유출 현황 ····· 57
표 2.2.5 광주 지하철 지하수 유출 현황 ····· 57
표 2.2.6 노르웨이 해저 및 장대 도로터널 ····· 58
표 2.2.7 씰재에 의한 방수 ····· 63
표 2.2.8 기타 방수공 ····· 64
표 2.2.9 시공 중인 쉴드터널 수직구 유량 일지 ····· 69
표 2.2.10 운용 중인 쉴드터널 지하수 유입량 ····· 70
표 2.3.1 수팽창성 고무지수재 물리적 특성 기준 ····· 74
표 2.3.2 벤토나이트 수팽창 지수재 물리적 특성 기준 ····· 76
표 2.3.3 벤토나이트 수팽창 지수재 물리적 규격 ····· 76
표 2.3.4 수팽창 지수재의 표준형상 및 규격(신공항 철도터널공사) ····· 80
표 2.3.5 수팽창성 지수재의 시험방법 및 시험값(신공항 철도터널공사) ····· 80
표 2.3.6 수팽창성 지수재의 시험값(철도공사, 2001) ····· 81
표 2.3.7 수팽창 지수재의 시험 항목과 기준 ····· 82
표 2.3.8 가스캣 지수재의 시험방법 및 기준값 ····· 82
표 2.3.9 수팽창 지수재 내구성 실험 CASE ····· 88
표 2.3.10 온습도 환경챔버 기본 사양 및 장비 구성 ····· 89
표 2.3.11 수팽창 지수새 변형결과 ····· 92
표 2.4.1 일반적 수리경계조건별 작용수압 개념 ····· 98
표 2.4.2 침투 고려시 수리경계조건에 따른 작용수압 ····· 101
표 2.4.3 기존 터널 배수 시스템과의 비교 ····· 108

표 2.4.4 기존 터널 배수 시스템과의 배수 성능 비교 ····· 109
표 2.4.5 기존 설계 적용 사례 ····· 110
표 2.4.6 운영 중 터널 측정 사례 ····· 110
표 2.4.7 기준용수량 0.5㎥/min/km적용시 유로홈 규격 검토 ····· 111
표 2.4.8 기준용수량 1.0㎥/min/km적용시 유로홈 규격 검토 ····· 111
표 2.4.9 기준용수량 3.0㎥/min/km적용시 유로홈 규격 검토 ····· 112
표 2.4.10 관재질에 따른 Manning식의 조도계수 n ····· 113
표 2.4.11 영향인자에 따른 배수유로홈 배수성능 검토(D=30mm) ····· 114
표 2.4.12 영향인자에 따른 배수유로홈 배수성능 검토(D=40mm) ····· 115
표 2.4.13 영향인자에 따른 배수유로홈 배수성능 검토(D=50mm) ····· 115
표 2.4.14 모의실험의 누수량 ····· 123
표 2.5.1 PS 볼 품질시험 결과(직경 1~2mm) ····· 134
표 2.5.2 원형 인공경량골재 물리적 특성 ····· 138
표 2.5.3 PS 볼 배면주입장치 초기모델의 제작 용량 ····· 139
표 2.5.4 용출시험방법 ····· 150
표 2.5.5 분석 및 실험에 사용된 시약 ····· 150
표 2.5.6 분석 및 실험기기 ····· 151
표 2.5.7 A-Type PS 볼 용출실험 결과 ····· 151
표 2.5.8 B-Type PS 볼 용출실험 결과 ····· 152
표 2.5.9 C-Type PS 볼 용출실험 결과 ····· 152
표 2.5.10 D-Type PS 볼 용출실험 결과 ····· 153
표 2.5.11 PS 볼 화학적 특성 분석 ····· 154
표 2.5.12 PS 볼 팽창성 시험 결과 ····· 155
표 2.6.1 PS 볼 이송량과 이송속도 계산 ····· 159
표 2.6.2 PS 볼 뒤채움 주입장치 본체 사양 ····· 160
표 2.6.3 PS 볼 뒤채움 주입장치 성능평가 결과 ····· 164
표 2.7.1 축소모형 실험장치 조립과정 및 주의 사항 ····· 170
표 2.7.2 배수 유로홈 축소모형실험 결과 ····· 174
표 2.9.1 측정시간별 실험조건 ····· 202
표 2.9.2 비중실험 결과 ····· 207
표 2.9.3 시료 1의 첫 번째 입도실험 결과 ····· 208
표 2.9.4 시료 1의 두 번째 입도실험 결과 ····· 208
표 2.9.5 시료 2의 첫 번째 입도실험 결과 ····· 208
표 2.9.6 시료 2의 두 번째 입도실험 결과 ····· 209
표 2.9.7 다짐실험 결과 ····· 211
표 2.9.8 함수비실험 결과 ····· 211

표 2.9.9 삼축투수실험 결과 ····· 212
표 2.9.10 배수 및 비배수조건에 따른 전응력 변화량 ····· 221
표 2.9.11 배수 및 비배수조건에 따른 전응력 증가율 ····· 222
표 2.9.12 배수 및 비배수조건에 따른 간극수압 변화량 ····· 229
표 2.9.13 배배수 및 비배수조건에 따른 간극수압 증가율 ····· 230
표 2.9.14 배수 및 비배수조건에 따른 내관 상부 변형률 변화량(mm) ····· 239
표 2.9.15 배수조건 1차에서의 유출량 변화량 ····· 240
표 2.9.16 배수조건 2차에서의 유출량 변화량 ····· 242
표 2.9.17 배수조건 3차에서의 유출량 변화량 ····· 243
표 2.9.18 배수조건 4차에서의 유출량 변화량 ····· 244
표 2.9.19 배수조건 5차에서의 유출량 변화량 ····· 245
표 2.9.20 배수조건 6차에서의 유출량 변화량 ····· 246
표 2.9.21 토압 0.1390MPa 일 때 1분간 유출량(㎤) ····· 248
표 2.9.22 수압 0.20MPa 일 때 1분간 유출량(㎤) ····· 248
표 2.9.23 상사법칙을 이용한 유출량 산정(㎥/㎞/min) ····· 248
표 2.9.24 유출량별 평균 전응력 및 간극수압증가율 ····· 248
표 2.9.25 수압 0.05㎫일 때 배수 및 비배수조건에 따른 유효응력 변화량 ····· 249
표 2.9.26 수압 0.10㎫일 때 배수 및 비배수조건에 따른 유효응력 변화량 ····· 250
표 2.9.27 수압 0.15㎫일 때 배수 및 비배수조건에 따른 유효응력 변화량 ····· 252
표 2.9.28 수압 0.20㎫일 때 배수 및 비배수조건에 따른 유효응력 변화량 ····· 253
표 2.9.29 배수 및 비배수조건에 따른 전응력 변화량 ····· 259
표 2.9.30 배수 및 비배수조건에 따른 전응력 증가율 ····· 260
표 2.9.31 배수 및 비배수조건에 따른 간극수압 변화량 ····· 264
표 2.9.32 배수 및 비배수조건에 따른 간극수압 증가율 ····· 264
표 2.9.33 배수 및 비배수조건에 따른 내관 상부 변형률 변화량 ····· 269
표 2.9.34 배수조건 1차에서의 유출량 변화량 ····· 270
표 2.9.35 배수조건 2차에서의 유출량 변화량 ····· 271
표 2.9.36 토압 0.1390 MPa 일 때 1분간 유출량(㎤) ····· 272
표 2.9.37 수압 0.20 MPa 일 때 1분간 유출량(㎤) ····· 273
표 2.9.38 상사법칙을 이용한 유출량 산정(㎥/㎞/min) ····· 273
표 2.9.39 수압 0.05 ㎫일 때 배수조건에 따른 유효응력 변화량 ····· 274
표 2.9.40 수압 0.10 ㎫일 때 배수조건에 따른 유효응력 변화량 ····· 275
표 2.2.41 수압 0.15㎫일 때 배수조건에 따른 유효응력 변화량 ····· 276
표 2.9.42 수압 0.20 ㎫일 때 배수조건에 따른 유효응력 변화량 ····· 277
표 2.9.43 표준사 지반의 각 토압별 간극수압(㎫) ····· 279
표 2.9.44 표준사 지반의 토압별 평균 간극수압 감소비율 ····· 279

표 2.9.45 비배수조건에서 표준사 지반의 토압 및 수압 ····· 280
표 2.9.46 배수조건에서 표준사 지반의 수압 산정 ····· 280
표 2.9.47 배수조건에서 표준사 지반의 토압 및 수압 ····· 281
표 2.9.48 화강풍화토 지반의 토압별 간극수압(㎫) ····· 283
표 2.9.49 화강풍화토 지반의 토압별 간극수압 감소비율 ····· 283
표 2.9.50 비배수조건에서 화강풍화토 지반의 토압 및 수압 ····· 284
표 2.9.51 배수조건에서 화강풍화토 지반의 토압 및 수압 ····· 284
표 2.10.1 적용프로그램 ····· 291
표 2.10.2 쉴드터널 라이닝 물성치 ····· 292
표 2.10.3 지반 물성치 ····· 292
표 2.10.4 우기시 세그먼트 라이닝에 작용하는 응력 ····· 299
표 2.10.5 평상시 세그먼트 라이닝에 작용하는 응력 ····· 301
표 2.10.6 시공중 및 건기시 세그먼트 라이닝에 작용하는 응력 ····· 303
표 2.10.7 터널심도 및 배수조건에 따른 단면력 검토 ····· 311
표 2.10.8 터널심도 및 배수조건에 따른 유출량 검토 ····· 311
표 2.10.9 현장조건(2D조건)에서 침하량 검토 ····· 313
표 2.10.10 4D조건에서 침하량 검토 ····· 314
표 2.10.11 6D조건에서 침하량 검토 ····· 315
표 2.10.12 여러 건물의 형태에 따른 평균 허용침하량(Wahls, 1981) ····· 316
표 2.10.13 세그먼트 두께 산정을 위한 지반 입력물성치 ····· 317
표 2.10.14 지반종류별 세그먼트 두께 검토 ····· 329
표 2.10.15 PS 볼 하중에 따른 단면력 검토 ····· 334
표 2.10.16 배수조건에 따른 단면력 검토 ····· 334
표 2.10.17 지반종류에 따른 단면력 검토 ····· 342
표 2.10.18 배수조건에 따른 단면력 검토 ····· 342
표 2.11.1 설치 계측기 종류 ····· 347
표 2.11.2 설치 계측기 사양 ····· 347
표 2.12.1 단면력 산정결과 ····· 364
표 2.12.2 비배수 모델의 단면력 산정결과 ····· 365
표 2.12.3 배수 모델의 단면력 산정결과 ····· 366
표 2.12.4 비배수 모델의 단면력 산정결과 ····· 368
표 2.12.5 배수 모델의 단면력 산정결과 ····· 368
표 2.12.6 철근량 25% 감소 시 단면력 산정결과 ····· 370
표 2.12.7 철근량 50% 감소 시 단면력 산정결과 ····· 371
표 2.12.8 t=300mm 지하철 단면 단면력 ····· 373
표 2.12.9 t=240mm 지하철 단면 단면력 ····· 374

표 2.12.10 몰드 사용 재료의 규격 ····· 377
표 2.12.11 Concrete 탄성계수 ····· 380
표 2.12.12 Concrete 허용 응력도(kgf/cm^2) ····· 380
표 2.12.13 세그먼트 사용 재료의 규격 ····· 381
표 2.12.14 세그먼트 치수 허용 차(예) ····· 382
표 2.13.1 시공단계별 관리방안 ····· 387
표 2.13.2 쉴드공법 암별 굴착시간 ····· 389
표 2.13.3 위험도 평가절차 ····· 393
표 2.13.4 E.T.A 분석의 단계별 주요내용 ····· 394
표 2.13.5 E.T.A 분석 예시 ····· 395
표 2.13.6 재해별 위험요소 ····· 396
표 2.13.7 공정별 위험요소 ····· 396
표 2.13.8 시공단계 위험요소 ····· 397
표 2.13.9 운영 중 위험요소 ····· 397
표 2.13.10 2007년~2011년 철도사고 현황 ····· 398
표 2.13.11 2007년~2011년 기존철도 위험도 평가 사항 ····· 399
표 2.13.12 2007년~2011년 도로사고 현황 ····· 400
표 2.13.13 2007년~2011년 사고유형별 도로사고 건수 ····· 400
표 2.13.14 2007년~2011년 기존도로 위험도 평가 사항 ····· 401
표 2.13.15 일반적 터널의 단계별 시나리오 유형 ····· 402
표 2.13.16 일반적 터널의 시공단계 및 운영단계의 촉발사건 ····· 402
표 2.13.17 배수형 쉴드터널 위험도 평가 시나리오 유형 ····· 405
표 2.13.18 배수형 쉴드터널 위험도 평가 촉발사건 ····· 405
표 2.13.19 배수형 쉴드터널 위험도 평가 발생가능 사건 ····· 405
표 2.13.20 배수형 쉴드터널 위험도 평가 단계별 주요내용 ····· 406
표 2.13.21 배수형 쉴드터널 위험도 평가 결과 ····· 407
표 2.13.22 위험도 평가 결과에 따른 대책 ····· 407
표 2.14.1 기초단가 적용기준 ····· 409
표 2.14.2 도로 쉴드터널 공종구분 ····· 409
표 2.14.3 뒤채움재 원가분석(도로 쉴드터널) ····· 412
표 2.14.4 기존 도로 쉴드터널과의 전체공사비 비교 ····· 412
표 2.14.5 철도 쉴드터널의 공종구분 ····· 413
표 2.14.6 뒤채움재 원가분석(철도 쉴드터널) ····· 415
표 2.14.7 기존 철도 쉴드터널과의 전체공사비 비교 ····· 416
표 2.14.8 쉴드터널 연장에 따른 전체공사비 변화 ····· 417
표 2.14.9 버력처리 1㎥ 당 소요공기 분석 ····· 419

표 2.14.10 도로터널(내경 Φ11,500) 연장별 버력처리 소요공기 및 공사비 분석 ····· 419
표 2.14.11 철도터널(내경 Φ7,200)연장별 버력처리 소요공기 및 공사비 분석 ····· 420
표 2.14.12 VE 핵심요소 ····· 421
표 2.14.13 분석단계 항목별 체크리스트 항목 ····· 425
표 2.14.14 가중치 설문결과(평가의원 1~5) ····· 427
표 2.14.15 가중치 설문결과(평가의원 6~10) ····· 428
표 2.14.16 쌍대비교 매트릭스 ····· 429
표 2.14.17 가중치 산정결과 ····· 429
표 2.14.18 성능평가 설문조사 ····· 430
표 2.14.19 성능평가 결과 ····· 431
표 2.14.20 탄소배출계수 및 기초자료 ····· 436
표 2.14.21 기존 및 배수형 쉴드터널의 탄소배출가격 산출(철도터널) ····· 436
표 2.14.22 기존 및 배수형 쉴드터널의 연장별 탄소배출량 산출(철도터널) ····· 437
표 2.14.23 기존 및 배수형 쉴드터널의 탄소배출가격 산출(도로터널) ····· 438
표 2.14.24 기존 및 배수형 쉴드터널의 연장별 탄소배출량 산출(도로터널) ····· 438
표 2.16.1 2000년 이전 국내 세그먼트 터널 시공현황 ····· 451
표 2.16.2 서울 및 수도권의 2000년 이후 세그먼트 터널 전체 현황(2010년 기준) ····· 453
표 2.16.3 국내 세그먼트 터널 시공 현황 ····· 454
표 2.16.4 국내 설계 완료된 세그먼트 터널 현황 ····· 454
표 2.16.5 서울 및 수도권의 2000년 이후 세그먼트 터널의 생산업체 ····· 455
표 2.16.6 태명실업 세그먼트 실적(1,000링 이상) ····· 456
표 2.16.7 태명실업 세그먼트 해외 납품 실적 ····· 457
표 2.16.8 태명실업 최근 3개년 재무정보 ····· 457
표 2.16.9 태명실업의 세그먼트 관련 기술현황 ····· 458
표 2.16.10 아이에스 동서(주) 생산 및 납품실적 ····· 458
표 2.16.11 아이에스동서(주) 최근 3개년 재무정보 ····· 459
표 2.16.12 아이에스동서(주) 천안공장현황 ····· 459
표 2.16.13 삼표이앤씨 주요 생산품목 ····· 460
표 2.16.14 삼표이앤씨 최근 3개년 재무정보 ····· 461
표 2.16.15 해외 장대터널중 대구경 TBM의 적용사례 ····· 462
표 2.16.16 SPC Precast Tunnel Lining Segments 주요 실적 ····· 463
표 2.16.17 SPC Precast Tunnel Lining Segments 기술 현황 ····· 464
표 2.16.18 국내터널의 8년간 발주현황(2006년~2013년) ····· 465
표 2.16.19 서울 및 수도권의 2000년 이후 쉴드터널 시공현황 ····· 467
표 2.16.20 전세계 교통터널의 계획수요(2004년~2014년) ····· 468
표 2.16.21 중국 4종 4횡 계획 ····· 472

표 2.16.22 인도정부의 인프라부문 투입 예산액 및 비중 ····· 473
표 2.16.23 인도의 도로망 ····· 473
표 2.16.24 현재 진행 중인 철도 인프라 프로젝트4) ····· 474
표 2.16.25 국내 쉴드터널 연구논문 현황 ····· 476
표 2.16.26 국내외 쉴드터널 관련 특허 ····· 477
표 4.1.1 연구개발 최종목표 달성도 ····· 499

제 1 장 연구개발과제 개요

제 1 절 연구개발의 배경 및 필요성

최근 국토의 효율적인 이용을 위하여 지하공간에 대한 수요가 증대되고 있고, 지하철 터널 등의 시설 등 도심지에 지하공간을 설치하는 경우가 빈번하며 그 수요가 증대될 것으로 기대되고 있다.[1] 근래 들어 가장 많이 사용되고 있는 터널 공법 중의 하나인 쉴드터널(shield tunnel) 공법은 대심도 지하공간을 효율적으로 이용할 수 있는 지하 공간 구축기술로, 세계 각국에서 공법 적용과 함께 관련 기술의 개발이 이루어지고 있다.[2]

쉴드터널 공법은 비교적 연약한 지반에서 원형단면의 쉴드(Shield)라 불리는 강제로 된 통을 지중으로 밀어올리고, 그 내부에서 토사의 붕괴유동을 막으면서 굴착과 동시에 쉴드 뒷부분에서 세그먼트라는 터널 라이닝을 세우며 전진 시켜가는 비배수 방식의 터널공법을 말한다.[3] 쉴드터널 공법은 지하철, 상하수도, 전력통신용터널 등에 주로 이용되며, 도로교통이나 주변환경에 대한 영향이 적고 기설매설물이나 구조물을 피해 터널을 축조할 수 있다는 이점 때문에 도심지 공사에서 다양하게 활용되고 있다.

그러나 쉴드터널은 지하수위에 구축되는 경우가 많고 터널 내의 누수 발생은 터널 유지관리에 여러 가지 문제를 발생시키기 때문에, 세그먼트 조립 후 누수 방지를 위한 방수공과 뒤채움 주입은 쉴드터널 공법에서 매우 중요한 공정중 하나이다. 그러나 쉴드 세그먼트는 링 형태로 조립되기 때문에 누수 방지의 대상이 되는 이음이나 볼트 구멍이 대단히 많고, 쉴드잭(Jack)의 추진력에 의한 머신의 반복하중이나 토압의 경시적 변화에 의해 이음면이 신축되는 경우가 발생하며, 세그먼트 운반 시나 조립 시에 이물질이나 묻거나 세그먼트 면이 손상되어 완전한 비배수 터널로서의 누수 방지가 매우 어려운 상황이다. 이런 문제로 인해 실제 건설현장에서는 누수 방지가 가장 큰 문제로 부각되고 있고 효과적인 해결 방안을 찾고자 노력하고 있지만, 이렇다할만한 해결책을 얻지 못한채 어려움을 겪고 있는 상황이다.

본 연구는 기존의 세그먼트 터널이 가지고 있는 고질적인 누수 및 NATM 터널 대비 높은 공사비 등의 문제를 효과적으로 해결하기 위하여 배수 유로홈을 이용한 배수형 쉴드터널 개발을 목표로 한다. 비배수개념으로 설계 및 시공되는 세그먼트 터널에서 배면 뒤채움 그라우트 주입, 코킹 방수, 볼트구멍 방수 등의 방수대책을 실시함에도 터널 내부로의 누수가 계속적으로 발생되고 있고, 누수량 전체의 50% 이상이 볼트 체결부에서 발생되고 있으나 아직까지 이에 대한 개선방안에 대한 연구는 전무한 실

정이다.[4)]

유럽의 경우 2009년 기준 전체 터널 중 80%가 세그먼트 터널로 시공되고 있으며, 일본 60%, 미국 50%, 중국 40%, 대만의 경우 30%가 세그먼트 터널로 시공되고 있다. 이와 관련하여 미국, 유럽, 일본 등에서는 지난 30년간의 터널분야 연구에서 세그먼트 터널과 관련된 기술개발이 상당한 비중을 차지하고 있다. 반면, 국내의 경우 전력구 및 수로터널을 제외한 전체 터널 중 세그먼트 터널은 경우 1% 정도에 불과하고 터널 분야 연구에서도 세그먼트 터널에 대한 연구가 턱없이 부족한 실정이다.[5)]

세그먼트 연결 초기에는 보편적인 이음방식으로 볼트박스 방식에 적용되었으나, 쉴드머신의 추진력 등으로 발생하는 하중에 구조적으로 취약하고 박스에 설치된 강재의 부식우려로 인해 최근에는 곡볼트 방식을 주로 사용되고 있다. 그러나 세그먼트 이음 및 링이음을 볼트로 체결해야 하므로 조립 시공 시간이 길고 많은 인력을 필요로 하는 문제가 있다.

쉴드터널에서 발생되는 누수량 전체의 60% 이상은 볼트 체결부에서 발생, 볼트 체결부에 대한 방수공이 링상의 패킹제를 볼트 와셔 및 구멍 사이에 설치하는 것에 불과하기 때문에, 패킹제의 장기적인 마모, 장기적인 누수로 인한 볼트의 부피팽창, 볼트 구멍에서의 크랙 발생, 볼트연결의 Gap 및 Offset 등으로 인해 계속적인 누수발생은 불가피하다.[4)]

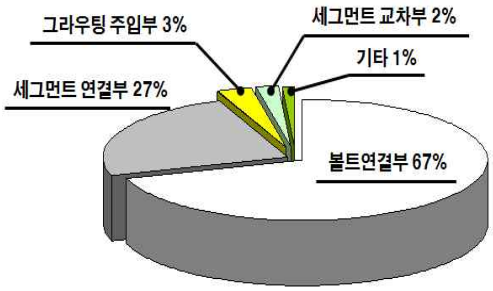


그림 1.1.1 쉴드터널 발생 누수량 분포



그림 1.1.2 기존 쉴드터널의 누수 발생



그림 1.1.3 세그멘트 연결 볼트 부분 누수 전경

볼트 체결부의 누수는 세그먼트 연결을 위해 구조상 체결부가 밖으로 노출되어 있고 체결부의 공간도 커서 이를 통한 누수발생이 일반적이며, 특히 경사볼트의 경우 수팽창 지수재 사이를 통과하여 연결되므로 볼트 자체가 통수경로가 되며, 외부로 노출된 볼트의 녹 발생 및 볼트 홀을 통한 누수가 발생한다. 또한 볼트 삽입부분에 발생하는 Crack으로 인한 누수도 발생한다.

세그먼트 조립시 단차 발생에 따른 누수는 세그먼트는 5개 또는 7개로 공장에서 제작, 운반하여 현장 터널 내부에서 볼트를 이용하여 조립하고 있으나 중량이 무겁고 기계로 조립함에 따라 세그먼트 간 단차가 발생한다. 또한 가장 상단에 설치되는 세그먼트는 상재하중, 토압 및 자체 중량으로 인하여 처짐 및 단차가 발생하여 세그먼트 간 완전한 진원이 형성되지 않아 상단에 위치한 세그먼트를 통해 지하수가 유입된다.



그림 1.1.4 세그멘트 간 단차를 통한 지하수 유입

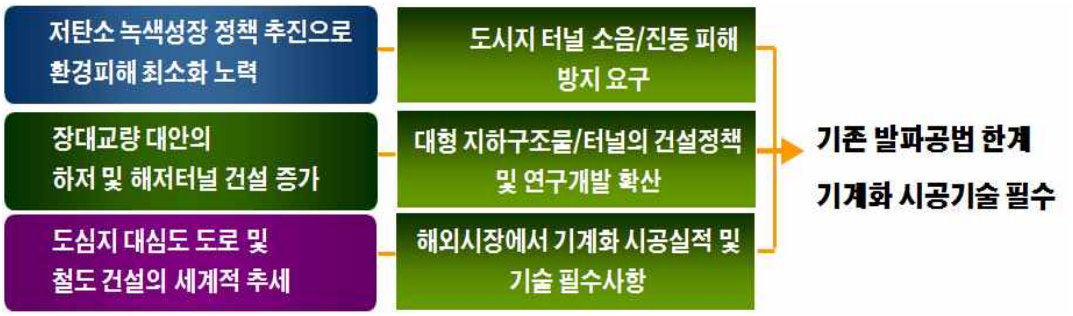


그림 1.1.5 건설환경 및 터널시공 패러다임 변화

기타 구조적인 누수 원인은 쉴드터널은 터널내부로 누수되는 지하수의 유입을 방지하기 위하여 세그먼트와 터널 굴진단면 사이를 그라우팅 처리를 하고 있으나 그라우팅이 밀실하게 채워지지 않아 미세하게 누수되는 수량은 불가피하게 발생하고 있으며 우레탄을 이용하여 유입량을 차단하고 있는 실정이다.[6)]

2010년 기준 국내 쉴드터널 시장은 전력구 및 수로터널에 한정되어 약 1천억원 규모이지만, 향후 서부간선도로 지하화, 서울시 스마트 하이웨이, 수도권 대심도 광역급행 철도, 강변북로 확장공사 지하화, 동부간선도로 지하화, 신분당선 연장, 도심지 고속화 도로 등 대규모 건설계획이 수립되어 2020년에는 3조원 정도의 시장 규모가 될 것으로 예상된다. 시장확대 및 쉴드터널 건설 증가와 더불어 경제적이고 효과적인 설계 및 시공기술 개발이 더욱 필요한 상황이다.

향후 터널 건설시장이 도심지 시공으로 이전되면서 굴착 시 소음 및 진동 최소화로 인한 민원 해결, 인접 구조물 영향 최소화 등의 장점으로 인해 쉴드터널에 대한 적용 확대의 요구가 높아지고 있지만, 현재 NATM 터널에 비해 전체 공사비가 120% 정도로서 아직까지 경제성 면에서는 부족한 상황이다. 따라서 쉴드터널의 전체 공사비를 절감할 수 있는 대안을 통해 NATM 터널과의 경쟁력 확보가 절실히 요구되고 있다. 배수형 쉴드터널의 개발로 세그먼트의 재료비를 20%이상 절감함으로 인해 전

체공사비의 절감을 통하여 기존 NATM터널과의 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

제 2 절 연구개발의 내용 및 범위

1. 연구개발 최종목표

본 연구는 기존의 쉴드터널이 가지고 있는 고질적인 누수 및 NATM 터널 대비 높은 공사비 등의 문제를 효과적으로 해결하고, 세그먼트 라이닝 재료비를 20% 이상 저감시킬 수 있는 배수 유로홈을 이용한 슬림형 세그먼트 터널 라이닝 기술의 개발을 목표로 하고 있다. 비배수개념으로 설계 및 시공되는 세그먼트 터널에서 배면 뒤채움 그라우트 주입, 코킹 방수, 볼트구멍 방수 등의 방수대책을 실시함에도 터널 내부로의 누수가 계속적으로 발생되고 있고, 누수량 전체의 50% 이상이 볼트 체결부에서 발생되고 있으나 아직까지 이에 대한 개선방안에 대한 연구는 전무한 실정이다. 본 연구에서는 배수 유로홈을 이용하여 배수형 쉴드터널로서 볼트체결부에서의 과다한 누수 발생을 원천적으로 봉쇄하기 위해 배수 유로홈 시스템을 제안하고자 한다. 본 연구개발을 위해 설정한 최종목표는 다음과 같다.

○ 도심지 쉴드터널에서 배수개념을 적용한 유로홈을 통해 10~20% 세그먼트 단면을 슬림(Slim)화하여 세그먼트 제조단가 20% 및 터널 총공사비 10% 절감하고, 건설재료 소비 저감으로 CO_2 배출을 20%까지 저감시켜 NATM 터널보다 우수한 안정성 및 친환경적 시공이 가능한 슬림형(Slim-type) 쉴드터널 기술 개발

-쉴드터널에서의 배수설계개념 적용 가능성 및 안정성 검증

-배수유로홈 개발 및 세그먼트 단면 10~20% 슬림(Slim)화 실현

-건설재료 사용 절감을 통한 제조단계의 CO_2 배출 20% 저감

-세그먼트 제조단가 20% 및 터널 총공사비 10% 절감

-쉴드터널의 경제성 및 기술력 향상을 통해 NATM 터널과의 경쟁력 확보

본 연구개발의 최종 성과물은 이론적 아이디어, 시작품 및 제품 개발, 공정 개발의 성격을 가지고 있으며, 다음과 같은 그 세부적인 최종 성과물을 지향하고자 한다.

- 이론적 아이디어 : 세그먼트 재료비20% 절감, 쉴드터널 총 공사비 10% 절감, CO_2 발생량 20% 저감

- 시작품 및 제품 개발 : 슬림형 쉴드터널 세그먼트 라이닝 터널 설계도면, 슬림형 세그먼트 시제품, 설계 및 시공 매뉴얼(안)

- 공정개발 : 슬림형 쉴드터널 시공 프로세스, 시공 및 운영 위험도 평가

- 사업화 추진 : 상용적 비즈니스 모델, 요소기술의 산업재산원 확보



그림 1.2.1 최종목표 달성을 위한 로드맵

2. 연구개발 내용

최종목표를 달성하기 위해 본 연구개발에서는 다음과 같은 연구개발 내용을 계획하였고, 1차년도 연구를 수행하였다.

가. 1차년도 연구내용 및 범위

(1) 국내외 쉴드터널 현황 조사 및 문제점 분석
- 국내외 쉴드터널의 시공 사례 조사 및 분석
- 국내외 쉴드터널 기술개발 현황 및 연구 실태 조사
- 국내외 쉴드터널 방배수 시스템 조사
- 기존 쉴드터널 문제점 분석

(2) 쉴드터널의 누수실태 파악 및 방수대책 조사
- 국내외 시공 및 운용중인 터널의 누수실태/지하수 유입수량 분석사례 조사
- 국내 실무기술자를 대상으로 한 현장설문조사 실시
- 기존 쉴드터널의 방수 대책 조사 및 효율성 평가
- 기존 국내·외 배수형 터널의 유입량 및 펌핑비용 자료조사

(3) 기존 쉴드터널 뒤채움 재료 개발 현황 및 특성 조사
- 국내외 쉴드터널 뒤채움재 재료 특성 조사
- 배수형 쉴드터널에 대한 적용성 평가

(4) 배수형 쉴드터널 라이닝 적용을 위한 최적 뒤채움재 선정
- 기존 뒷채움재의 물리적 특성 평가(입도분포, 투수계수등)
- 배수형 쉴드터널에 적합한 뒷채움재료 선정

(5) 쉴드터널 라이닝의 배수 유로홈 제안
- 경험식을 바탕으로 한 배수 유로홈의 배수성능 계산
- 기존 터널 배수시스템과 배수 유로홈의 배수성능 비교

- 배수 유로홈 기능에 대한 수리학적 검토
- 경험식을 통한 전단키 세그먼트 안정성 검토
- 직경 및 외부 영향인자에 따른 유로홈의 배수성능 DB 산정
- 유로홈내 지하수 이동 메커니즘의 시각적 검증

(6) 배수유로홈을 적용한 세그먼트 설계(안) 제시
- 유로홈 직경 및 연결부를 고려한 세그먼트 단면설계
- 유로홈 적정 배치(안) 제시

(7) 배수/비배수 조건의 작용압력에 대한 이론적 근거 확립 및 모형실험장치 설계
- 배수/비배수 조건의 터널라이닝 작용압력(토압, 수압, 침투압)에 대한 이론적 분석
- 배수조건 변화에 따른 침투유량과 라이닝 하중에 대한 수치적 분석
- 이론적/수치적 분석을 고려한 배수조건 모형실험장치 상세설계

(8) 쉴드터널의 수팽창 지수재에 대한 이론적 고찰
- 국내외 수팽창 지수재 재료 조사
- 수팽창 지수재 시방규정 및 재료실험 조사

(9) 국내 세그먼트 라이닝 생산 시스템 조사
- 국내 세그먼트 생산업체 조사 및 생산 역량 검토
- 개발 기술의 국내 적용에 따른 기대효과 도출

나. 2차년도 연구내용 및 범위

(1) 설계단계에서 지반 및 배수 조건에 따른 쉴드터널 하중 이론 정립
- 세그먼트 라이닝에 작용하는 하중에 대한 기존 연구 문헌 조사
- 부분배수 쉴드터널 개발기술의 이론적 배경 정립

(2) 배수형 쉴드터널 라이닝 뒤채움재의 적용성 평가

- 실내실험을 위한 시험체 제작
- 실내실험을 통한 배수형 쉴드터널 라이닝 뒤채움재의 배수능 검토
- 뒤채움재의 종류에 따른 배수성능 검토
- 뒤채움재의 환경영향 평가

(3) 축소모형실험을 통한 배수 유로홈의 성능 평가

- 배수형 쉴드터널의 축소모형 시험체 제작
- 모형실험 수행 및 배수 유로홈 성능 평가
- 뒤채움재에 의한 배수 유로홈 폐색 가능성 평가

(4) 배수/비배수 조건을 고려한 터널 모형실험 수행

- 배수조건 모형실험장치 구축 및 검증
- 배수/비배수 조건을 고려한 터널의 라이닝 작용압력 분석, 작용수압 감소 현상 및 지반 침하거동 평가
- 개발 실험장치의 특허 출원 추진

(5) 수치해석을 통한 배수형 쉴드터널의 적용 가능성 및 안정성 검토

- 수치해석을 통한 배수형 쉴드터널의 안정성 평가
- 상부응력 산정을 통한 배수시의 단면력 감소효과 및 단면축소가능성 제시
- 침투 수압 발생 모델 예측 및 극한상태를 고려한 수치해석 수행
- 지하수 배수로 인한 지반침하에 대한 검토
- 지반종류별 세그먼트 두께 조정(안) 제시

(6) 수팽창 지수재 성능수명 평가를 통한 배수설계 필요성 검증

- 단기 및 장기내구성 평가를 통한 기존 수팽장 지수재의 성능수명 예측
- 성능수명 예측을 통한 쉴드터널의 누수발생 시점 예측

(7) 구조계산을 통한 슬림형 쉴드터널의 안정성 검토

- 최소 단면 산정을 통한 단면 축소 방안 제시

- 슬림화된 세그먼트의 상세 세부 설계
- 단면 안정성 검토 수행

(8) 비배수 쉴드터널의 지하수 측정 시스템 구축
- 모니터링 시스템 구축을 위한 국내 현장 선정
- 터널 내부 지하수 유입량 측정 시스템 구축

(9) 슬림형 쉴드터널의 시공 및 운영 위험도 평가(Risk assessment)
- 시공 공정에서의 발생가능 시나리오 예측 및 Accident Risk에 대한 Risk Matrix 평가
- 운영 기간에서의 발생가능 시나리오 예측 및 Accident Risk에 대한 Risk Matrix 평가

(10) 슬림형 쉴드터널의 미래 수요 예측 및 시장성 평가
- 국내외 시장성 조사 : 도로, 철도, 전력, 하수 등 적용가능 사업 발굴 및 시장성 평가
- 국외 시장성 조사 : 국외 국가별 수요 및 시장성조사
- 개발 기술의 국내외 미래 시장 경쟁력 분석

다. 3차년도 연구내용 및 범위

(1) 배수형 쉴드터널 뒤채움재의 최적 주입시스템 개발
- 뒤채움재 특성을 고려한 최적 주입장비 선정
- 뒤채움재 세부시공 요건(압력, 배송)결정 및 주입시공 프로세스 정립

(2) 배수형 쉴드터널 모형실험 및 현장적용방안 도출
- 잔류수압을 고려한 터널모형실험 수행
- 배수능에 따른 배수형 쉴드터널 적용성 및 안정성 평가
- 수치해석을 통한 모형실험 검증 평가
- 모형실험 및 수치해석 결과에 따른 현장적용 방안 도출

- 요소기술 문제점 분석 및 개선사항 도출

(3) 배수형 쉴드터널의 설계 매뉴얼(안) 제안

- 배수유로홈 배치를 고려한 세부 설계 지침 제안
- 배수형 쉴드터널의 표준단면 설계

(4) 배수개념을 적용한 슬림형 쉴드터널의 CO_2 배출 저감 효과 평가

- 기존 쉴드터널 시공 사례별 재료생산, 운반 및 시공시 발생하는 CO_2 발생량 산정
- 운용중 발생하는 CO_2배출량 저감 효과확인
- 단면 축소율에 따른 재료 절감 및 CO_2 배출 20%저감 효과 평가

(5) 비배수 쉴드터널에 대한 장기 모니터링 수행

- 장기 모니터링 결과 분석
- 터널 내부 지하수 유입량 측정 및 결과 분석

(6) 슬림형 쉴드터널 부분 실대형 실험 수행

- 실대형 실험을 위한 슬림형 세그먼트 시제품 제작
- 실험 추진방향 결정 및 실험 모델 구축
- 배수 유로홈 기능의 적용성 평가

(7) 슬림형 쉴드터널의 시공성 평가

- 단위공종별 소요공기 분석 및 시공 프로세스 정립
- 터널 전체에 대한 소요공기 분석, 전체 시공프로세스 분석 및 비교 평가
- 배수형 쉴드터널 시공메뉴얼(안) 제안

(8) 슬림형 쉴드터널 유지관리 방안 확보

- 배수 유로홈 유지관리 방안 제시
- 배수 유로홈 유지관리용 에어 석션 건 개념 설계

(9) 슬림형 쉴드터널의 경제성 평가

- 기존 및 슬림형 세그먼트에 대한 원가분석 및 비교평가(시공비 및 재료비)
- 뒤채움재 선정재료에 대한 경제성 평가
- 세그먼트 제조단가 20% 및 총공사비 10% 절감효과 검증
- VE평가(비용평가) 및 LCC평가(유지관리비용 분석)를 통한 경제성 향상 방안 제시
- 터널용도, 연장, 시공여건에 따른 경제성 검토 및 기존방식과의 경제적 임계점 분석

(10) 개발 기술의 성과 확보 및 가치 평가

- 각 개발 요소기술의 산업재산권 확보
- 사업화 추진을 위한 기술로드맵 제시
- 시장 확보 방안, 설비 및 업무 지원 방안에 대한 상용적 비지니스 모델 제시

제 3 절 국내외 기술개발 현황

1. 국내기술개발 현황

쉴드공법은 기존의 발파공법과 비교할 때 소음·진동 등의 저감 효과뿐만 아니라 낙반 등의 위험요소가 적으며, 기계 굴착으로 안정성 확보가 뛰어나다. 또한 여굴과 주변 지반에 대한 손상이 적기 때문에 지보재 물량이 감소되고 관련 시공시간의 단축으로 인해 고효율의 급속 시공이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

국내의 쉴드공법은 1987년에 부산 광복동 전력구 공사에서 약 1 km의 터널 시공에 최초로 적용된 이후 주로 연약지반, 복합지층조건하에서 직경 5m이내의 소구경 전력구, 통신구, 하수관로, 방류관로 공사 등에 적용이 한정되어왔다.

1990년대 후반부터 도심지 지하철을 중심으로 직경 7m 이상의 대구경 쉴드공법의 시공 및 설계사례가 증가하고 있으며, 도심지 터널구간에 적용사례가 급증하여 현재까지 총 45건이 국내에서 시공되었거나 추진 중에 있는데, 현재까지 총 90km가 시공되었다. 2000년 이전을 기준으로 쉴드의 실적은 관로공사가 약 80%를 차지하고 있었으나, 2010년까지의 실적을 파악해 보면 상하수도의 적용은 감소하고 전력구와 지하철의 적용이 점차 증가하는 것으로 나타났다. 연도별 국내 쉴드 TBM 현황분석결과 2000년 이전은 통신구에 적용사례가 많이 보이며 2000년 이후 전력구 현황과 대구경 TBM장비를 적용하여 시공되는 지하철의 시공사례가 많아지는 것으로 분석되었다.

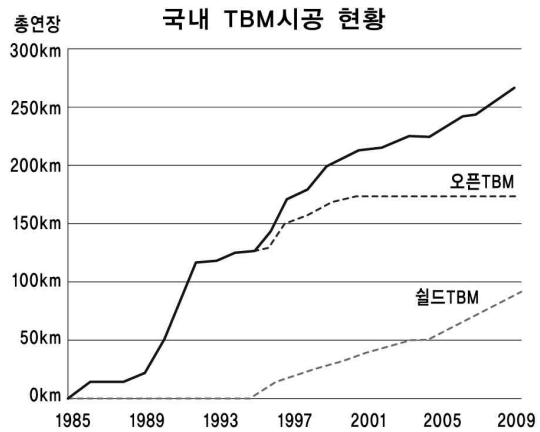


그림 1.3.1 국내 TBM 시공현황

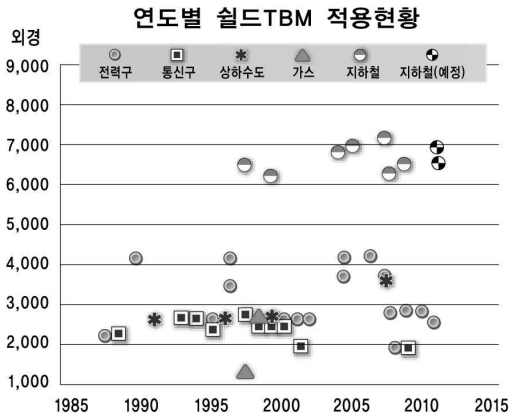
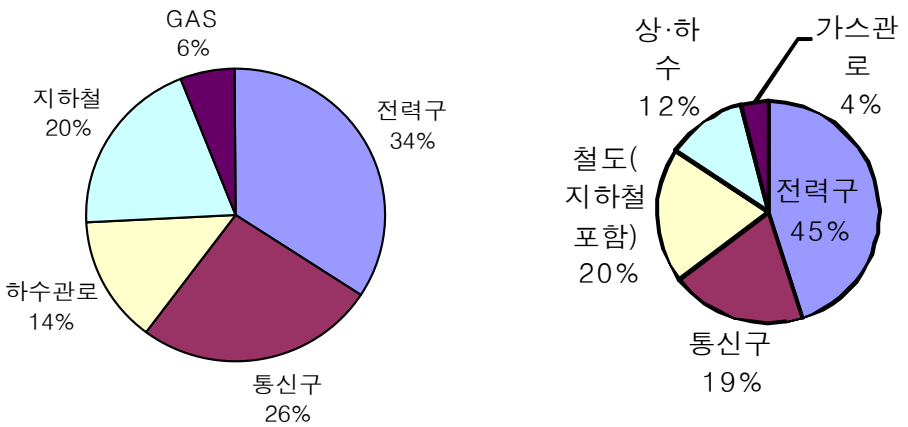


그림 1.3.2 연도별 TBM 적용현황a



(a) 2000년 이전 (b) 2010년

그림 1.3.3 연도별 TBM 적용현황b

TBM의 발주처별 현황을 살펴보면 전체 81개 프로젝트 중 한국전력이 전선 지중화 공사를 중심으로 38건으로 전체의 46.9%를 차지하여 가장 많은 TBM공사 발주실적을 가지고 있으며, 한국통신공사는 통신케이블 지하매설용 10건 발주로 12.4%를 차지하고 있다. 한국가스공사로 6건의 TBM 발주 실적을 가지고 있으며, 그 외로 서울시, 서울도시기반시설본부, 서울지하철 건설본부 등의 순으로 발주 실적을 가지고 있다. 국내 TBM발주 실적 81건은 Open TBM, Shield TBM의 실적이며 중소구경인 Semi-Shield TBM, Pipe Jacking System등은 제외한 실적이다.[1)]

구경 D3,000~4,000mm가 총 43건(53.1%)으로 가장 많이 사용되고 있으며, D3,000mm미만이 17건(21%) 적용되었고, 지하철공사에서 많이 사용하는 D7,000~8,000mm이 발주된 것으로 확인된다. 형식별로 구분하면 토압식(EPB) TBM이 30건으로 전체의 37%를 차지하며 가장 많이 적용되고 있으며, 그 다음이 복합지반용(EPB+TBM)이 27건으로 33.3%의 사용실적을 보이며 이수식(SLURRY)TBM이 11건으로 13.6% 적용되었다.[1)]

최근에는 서울시 지하철 909공구의 일부(강남의 신논현역까지)가 개통되었고, 분당선 왕십리~청담간 복선전철(연장 1.7 km) 및 서울시지하철 7호선 703/704공구(연장 약 4.5 km)와 인천국제공항철도(연장 1.9 km)도 쉴드공법으로 굴진중이거나 완료된 상태이다. 또한, 서울시 지하철 919~921공구(3공구 연장 4.3 km), 부전-마산 복선전철(총연장 32.6 km중 낙동강 하저 5 km 구간), 대곡-소사 복선전철(총연장 19.5 km 중 한강 하저 2.5 km구간)이 2010년 설계 완료된 상태이다.

이에 더불어 TBM 적용이 유망한 대도시권 대심도 터널 건설 프로젝트로는 수도권 대심도 광역급행철도(GTX, 총 연장 147 km, 3개 노선, 총 사업비 13조 9천억원 추정)와 서울시의 U-SMART WAY(총 연장 148.7 km, 6개 노선, 총 사업비 11조 2천억원 추정), 신분당선 연장(용산-강남)선(총 연장 7.49 km, 한강 하저 통과구간 포함, 총 사업비 9천억원 추정)이 예정되어 있으며, 나아가서는 대통력 직속 지역발전위원회(2009.12.02)에서 추진키로 결정한 한-중 해저터널(제2안 화성-웨이하이, 쉴드터널 연장 220.3 km, 공사비 77조)과 한-일 해저터널(노선A 거제도-가라쓰, 쉴드터널 연장 145.0 km, 공사비 50조)이 대륙간-국가간 초장대 해저터널사업으로 준비되어 있다. 국내에서는 이러한 초장대 해저터널사업에 앞서 호남-제주간 해저터널(쉴드터널 연장 167.0 km, 공사비 14조)에 대한 검토를 진행하고 있다. 최근 이테크건설이 쉴드 TBM공법을 이용한 터널 중 국내에서 가장 긴 해저터널 굴진을 완료하였으며 이 터널은 해저심도 35m에 D=3m, L=3.24km이다.[2)]



그림 1.3.4 군장터널 위치도

2. 국외기술개발 현황

세계 장대터널의 굴착공법 중 쉴드공법은 산악터널의 60% 이상, 도심터널의 80% 이상, 하·해저터널의 80% 이상으로 현재 시공 중이거나 계획 중인 장대터널은 대부분 쉴드공법으로 시공되고 있다. 특히 유럽은 고속시공, 경제성, 환경성 측면에서 유리한 쉴드공법이 증가추세에 있으며 도심지의 경우는 90% 이상이 적용되고 있다.

표 1.3.1은 세계의 장대터널에 적용된 굴착공법 현황이며, 표 1.3.2는 해외 장대터널 중 대구경 TBM의 적용사례이다.

표 1.3.1 해외 장대터널의 굴착공법 적용현황

순위	터 널 명	총연장	국 명	용 도	터 널 공 법	준공년도
1	Gotthard Base Tunnel	57.1Km	스위스	철도터널	4-Hard Rock TBM	2010
2	Seikan Tunnel	53.9Km	일 본	철도터널	Conventional Method	1988
3	Euro Tunnel	50.5Km	영국-프랑스	철도터널	11-Shield TBM	1994
4	Loetschberg Base Tunnel	34.6Km	스위스	철도터널	Hard Rock TBM	2007
5	Guadarrama Tunnel	28.4Km	스페인	철도터널	4-Shield TBM	2007
6	Hakkoda Tunnel	26.5Km	일 본	철도터널	Conventional Method	2013 (시공중)
7	Iwate-Ichinohe Tunnel	25.8Km	일 본	철도터널	Conventional Method	2002
8	Pajares Base Tunnel	24.7Km	스페인	철도터널	10-Double Shield TBM+Single Shield TBM	2010 (시공중)
9	Laerdal Tunnel	24.5Km	노르웨이	도로터널	NMT (Norwegian Method of Tunnelling)	2000
10	Iiyama Tunnel	22.2Km	일 본	철도터널	Conventional Method	2013 (시공중)
11	Qinling Tunnel	18.0Km	중 국	철도터널	Hard Rock TBM	2002
12	Zhongnanshan Tunnel	18.0Km	중 국	도로터널	Conventional Method	2008
13	Pinglin Tunnel	12.9Km	대 만	도로터널	Shield TBM	2005
14	Kan-etsu Tunnel	11.0Km	일 본	도로터널	Conventional Method	1991
15	Hida Tunnel	10.7Km	일 본	도로터널	Hard Rock TBM	2008
16	Chongming Tunnel	9.0Km	중 국	도로터널	Mix Shield TBM	2008

일본의 경우 쉴드공법 적용이 전체의 약 40% 정도로서 NATM의 50%에 비하여 약간 떨어지나 쉴드공법 기술력이 우수하여 지속적으로 증가추세에 있으며 도심지의 경우 80% 이상이 적용되고 있다. 또한, 중국은 최근 들어 시공 중이거나 계획 중인 터널에 쉴드공법을 적극 채택하고 있으며 도심지구간에도 상당부분 활용되고 있다.

표 1.3.2 해외 장대터널중 대구경 TBM의 적용사례

구 분	개 소	국 명	터널명	TBM 직경	터널연장	비고
도심지 도로터널	2개소	스페인	M30	Φ 15.2m	3.65Km	2007년 준공
		프랑스	A86	Φ 11.6m	5.5Km	시공중 2010년까지 단계별 개통
산악도로 터널	2개소	대 만	Pinglin	Φ 11.8m	12.9Km	2004년 준공
		일 본	Hida	Φ 12.8m	10.7Km	2008년 준공
하저도로 터널	1개소	중 국	Chongming	Φ 15.4m	9.0Km	2008년 준공

이와 같이 도심지 및 산악 장대터널을 중심으로 쉴드공법의 수요가 급증하고 있는 추세에서 2008년 기준으로 전세계 쉴드장비 시장규모는 약 4조 4,350억원에 이르고 있다. 그리고 매년 약 22%씩 쉴드장비 시장규모가 확대될 것으로 가정하면 2015년에는 전세계 시장규모는 약 17조 8,407억원 정도로 추정된다.

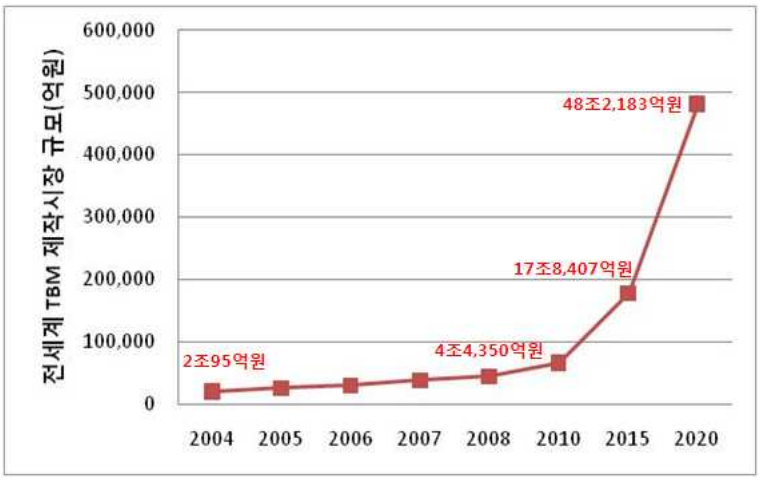


그림 1.3.5 전세계 TBM 제작시장 규모(추정)

가. 일본

1990년 이후 고속도로 쉴드터널을 시작으로 직경이 증가하는 경향이 나타나고 있다. 시공직경의 대단면화를 통해 주로 대단면으로 시공되는 도로터널에 적극 채택될 것으로 예상된다. 이와 더불어 쉴드터널 시공연장도 장대화되고 있다. 1990년 이후 쉴드터널 직경이 커지면서 장거리화 되는 경향으로 쉴드공법은 대개 2 km 이상의 연장에서 적용되고 있으며, 사업비(토지보상비, 지장물등) 절감을 위해 시공심도가 대심도로 변화되고 있는 추세이다. 일본은 쉴드공법 기술 선진국으로서 더욱 기술발전에 박차를 가하고 있는 상황이다. 그림 1.3.6과 그림 1.3.7은 일본의 쉴드터널 시공직경과 시공연장의 변화를 나타낸 것이다.

그림 1.3.8은 현재 일본의 쉴드장비 생산업체의 제작 실적을 나타낸 것인데, 소구경 쉴드터널 시장에서는 감소추세에 있지만, 일본 내 건설시장이 급격하게 축소되고 있음에도 불구하고 대구경 쉴드터널 시장은 어느 정도 유지함을 알 수 있다.

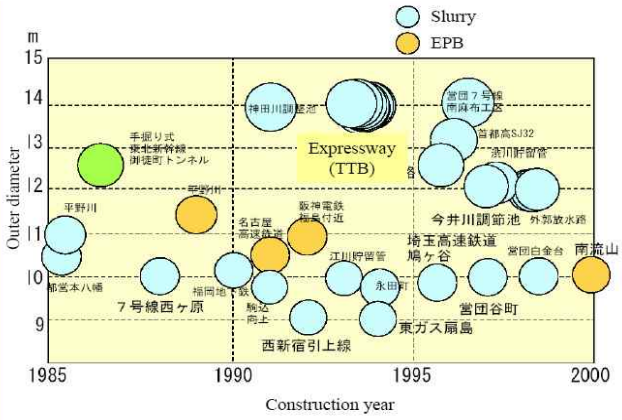


그림 1.3.6 일본의 쉴드터널 시공직경 변화 추이

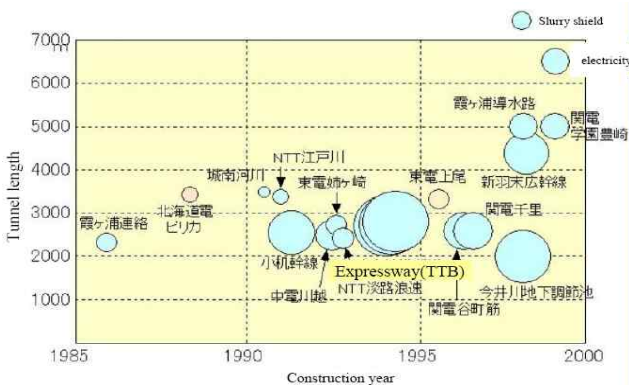


그림 1.3.7 일본의 쉴드터널 시공연장 변화 추이

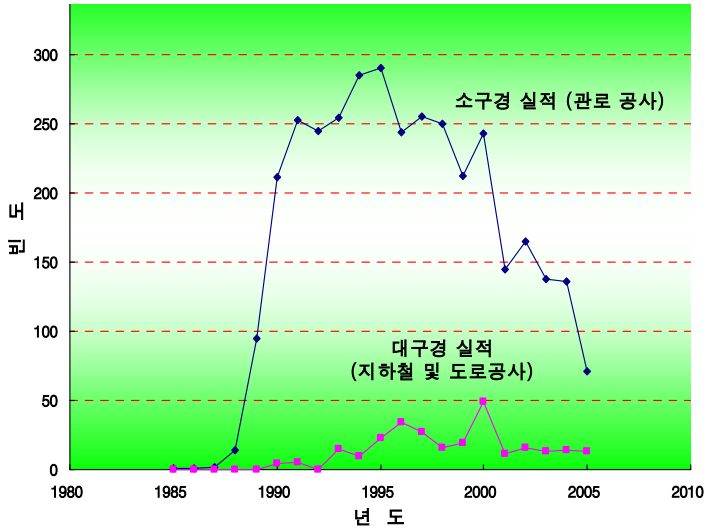


그림 1.3.8 일본의 쉴드장비 생산업체 제작실적

나. 중국

중국은 2002년에서 2006년까지 6년간 도입된 쉴드장비가 138대이며 시공연장이 600 km로 대부분의 쉴드터널은 중국 6대 도시의 지하철 건설에 적용되어, 2004년 기준으로 전체 지하철의 70% 이상이 쉴드터널로 시공되었다.

향후 10년간 건설될 교통터널은 약 20,000개(세계 2위인 일본의 8배)로 지하철은 매년 평균 180 km가 시공되고 있고, 철도터널은 향후 5년간 2,500 km이상이 시공될 예정이다. 이중에서 1/3이상인 760 km의 구간이 초장대 터널로 계획되어 있다.

도로터널은 향후 10,000 km의 신규 도로 구간에 터널이 건설될 것으로 예상되어 약 100대 이상의 쉴드장비의 발주가 예상된다. 특히, 남수북조 프로젝트(南水北調工程)는 가뭄해소를 위해 양쯔강을 화북과 서북 지방으로 연결하는 세계 최대의 수로건설 프로젝트(2010년부터 추진 예정)로서 터널의 총 연장이 244 km이고 3개 터널의 연장은 50 km 이상, 그리고 최장 터널의 연장은 73 km이다. 따라서 이 프로젝트에서 쉴드터널이 대부분 적용될 것으로 추정된다.

중국은 상하이~양쯔 터널을 비롯해 난징~양쯔, 샤먼다오 등의 해저터널을 보유했다. 그중 난징~양쯔강 터널은 D=14.93m의 대구경 Slurry Shield TBM 방식으로 2008년 1월~2009년 8월까지 20개월이라는 짧은 기간 내 성공적으로 시공을 마쳤다. 세그먼트 제원은 외경(14.50m), 내경(13.30m), 두께(0.60m), 폭(2.00m), 링분할(9+1key)로 구성됐다. Slurry Shield TBM은 외경이 14,930mm로 대기압하 커너터헤드 내에서 커터교체가 가능한 장비 2대를 사용해 시공되었다.[3)]

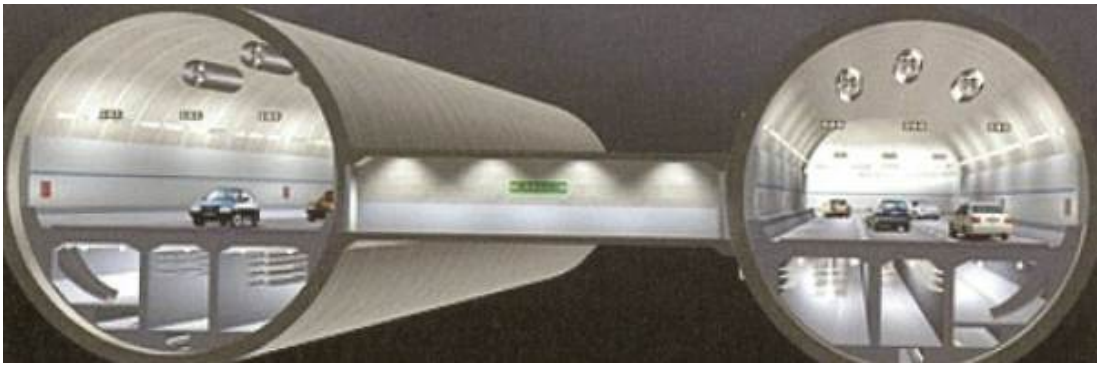


그림 1.3.9 난징~양쯔강 터널단면도

다. 미국

미국의 워싱턴주 시애틀에는 세계 최대 규모의 직경터널이 공사 중이다. 1930년 준공된 Alaskan way고가도로는 2001년 4월에 발생한 대규모 지진으로 인해 상당수가 손상되어 고가도로를 철거하고 직경 16.5m에 달하는 대단면 복층터널(Alaskan way viaduct and seawall Replacement)인 지하도로를 건설하고 있다. 2011년에 본격적으로 프로젝트가 진행되었으며 2015년 완공을 목표로 총사업비 약 9억 달러의 공사가 진행되고 있다.



그림 1.3.10 Alaskan way viaduct and seawall Replacement 복층터널

라. 말레이시아

말레이시아의 쿠알라룸푸르는 강의 범람에 따른 홍수 피해를 방지하고 늘어난 교통량을 해결하기 위해서 지하도로를 계획하고 있다. SMART(Storm water Management And Road Tunnel)라 불리는 이 프로젝트는 홍수조절기능을 수반한 다목적 도로터널이다. 총연장 12.7km이며, 이중 9.7km가 홍수조절역할을 하는 수로 터널로 계

획되어있고, 3.0km 구간은 편도 2차선의 복층구간과 최하부 홍수 조절구간 등 3층 터널로 구성되어 있다.[4)]

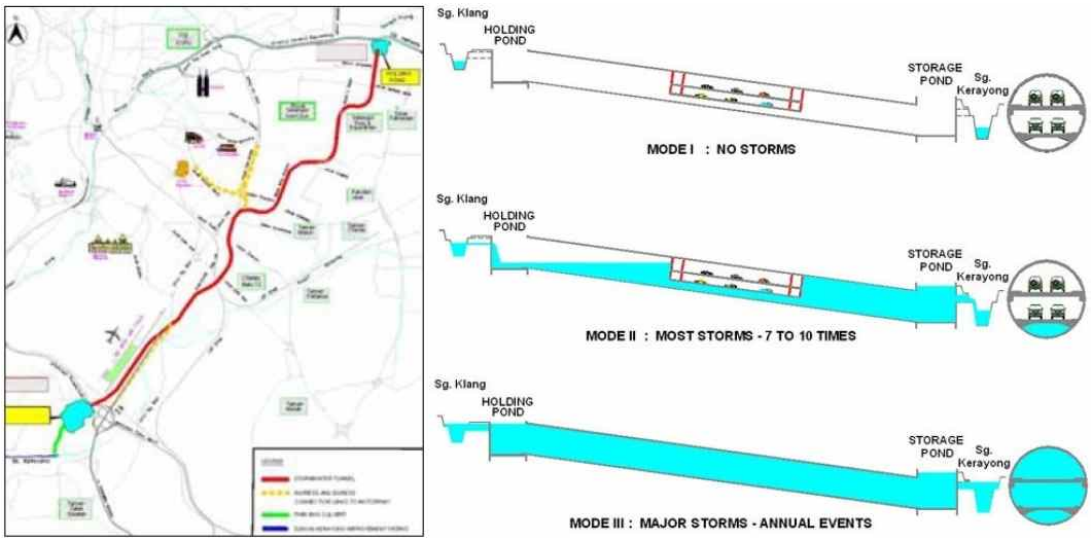


그림 1.3.11 말레이시아 SMART터널 개요도

제 2 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 국내외 쉴드터널 현황 조사 및 문제점 분석

본 연구에서는 배수방식 쉴드터널의 개발을 위해 기존 쉴드터널 의 설계도서 및 관련서적, 논문 등을 조사함으로써 국내외 시공사례를 바탕으로한 기초 연구가 진행되었다. 먼저 기존 쉴드터널의 시공사례 및 기술개발 현황에 대해 조사하고, 문제점에 대하여 검토를 수행하였다.

1. 시공사례 조사 및 분석

국내 쉴드터널은 1987년에 부산 광복동 전력구 공사에서 약 1km의 터널에 처음으로 적용된 후, 1995년부터 도심지 터널구간에 적용사례가 급증하여 현재 시공 완료하였거나 추진 중이다. 2000년 이전은 아래 표 2.1.1과 같이 연장 1~3km 내외의 전력구, 통신구, 상·하수도 관로공사 등에 적용되었다.[1)]

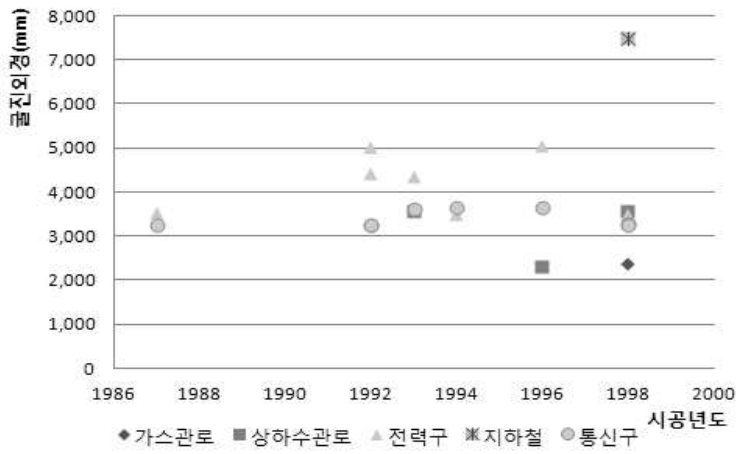


그림 2.1.1 2000년 이전 국내 세그먼트 터널 현황

표 2.1.1 국내 관로공사 세그먼트 터널 시공현황

PROJECT 명	공사기간	기계제작		기계외경 (mm)	터널연장 (m)	세그먼트(mm)	
		제작사	형식			외경	두께
부산광복동전력구공사	87.12~90.04	KOMATSU	EPB	3,280	1,033	2,850	150
부산법원앞통신구공사	88.12~90.04	KOMATSU	EPB	3,280	416	2,850	150
남부하수처리장공사 (차집관로1공구)	91.12~97.03	KAWASAKI	EPB +TBM	3,550	5,903	3,050	150
부산구포전력구공사 (154KV)	90.12~96.09	MITSUBISHI	EPB	4,350	940	3,800	200
부산구포전력구공사 (345KV)	90.12~96.09	KOMATSU (3대)	EPB	5,030	6,750	4,500	200
부산사상통신구공사(1차)	93.07~97.12	HITACHI	EPB	3,630	905	3,100	200
남천안통신구공사	94.05~96.08	LOVAT	EPB	3,650	1,802	3,100	200
안산전화국인입통신구공사	95.03~96.11	LOVAT	EPB	3,260	873	2,750	200
신당한남전력구공사	94.09~	VOEST-ALPINE	EPB +TBM	3,500	3,900	2,800	250
마산통신구공사	95.10~	LOVAT	EPB	3,250	560	2,850	150
마산지중T/L전력구공사 (154KV)	95.04~99.09	HERREN KNECHT	EPB	3,510	2,330	2,850	200
	KAWASAKI	EPB +TBM	3,550				
엄궁인출전력구공사 (154KV)	96.07~98.12	KAWASAKI	EPB	4,410	706	3,800	200
남부하수처리장방류관로 설치공사	96.09~97.08	KAWASAKI	EPB +TBM	3,550	490	3,050	150
남부권주배관제3공구공사	97.11~99.06	KAWASAKI	SLY +TBM	2,300	1,354	1,900	76
부산사상통신구공사(2차)	97.05~02.02	LOVAT	EPB +TBM	3,650	976	3,100	200

표 2.1.1 국내 관로공사 세그먼트 터널 시공현황(계속)

PROJECT 명	공사기간	기계제작		기계외경(mm)	터널연장(m)	세그먼트(mm)	
		제작사	형식			외경	두께
한남~원효전력구공사	98.	VOEST-ALPINE	EPB+TBM	3,500	3,000	2,800	250
영서~영등포전력구공사	98.	ROBBINS	EPB+TBM	5,000	3,300	4,500	200
광주도시철도1호선	97.10~01.12	NKK	EPB+TBM	7,500	1,799	6,600	300
금강횡단가스관로공사	98.10~99.08	KAWASAKI	SLY	2,370	1,140	-	-
북수원통신구공사	98.10~00.12	LOVAT	EPB+TBM	3,260	920	-	-
서대전통신구공사	99.05~01.12	LOVAT	EPB+TBM	3,260	818	-	-

1990년대 중반 이전까지는 굴진외경이 소규모인 관로공사 위주로 시공되었으며, 1990년 중반 이후부터 굴진외경이 8.0m 내외인 지하철에 적용되어 현재의 대구경 세그먼트 터널로 점차 증가하였다. 서울 및 수도권에 시공, 계획 중인 터널공사 중 소음, 진동, 분진의 발생이 적은 세그먼트 터널 적용 공사가 점차 증가중이다. 아래 표는 서울 및 수도권의 2000년 이후 세그먼트 터널의 시공현황을 나타낸 것이며, 서울시 지하철 909공구의 일부가 개통되었다. 분당선 왕십리~청담 복선전철(연장 1.7km) 및 서울시 지하철 7호선 703/704공구(연장 약 4.5km)와 인천국제공항철도(연장 1.9km)도 세그먼트 터널로 시공 중이거나 완료된 상태이다.

서울시 지하철 919~921공구(Shield TBM 3대, 3개 공구 연장 4.3km), 부전-마산 복선전철(Shield TBM 2대, 총연장 32.6 km 중 낙동강 하저 5 km구간), 대곡-소사 복선전철(Shield TBM 1대, 총연장 19.5 km 중 한강 하저 2.5 km 구간)이 설계완료 상태이다.

표 2.1.2 서울 및 수도권의 2000년 이후 세그먼트 터널의 시공현황

공사명	연장(Km)	비고
지하철 909 공구	1.8	개통
인천국제공항철도	1.9	개통
분당선 왕십리-청담간 복선 전철	1.7	시공 완료
인천지하철 3개 공구	7.5	설계 완료/시공중
지하철 7호선	4.5	시공중
지하철 9호선 3개 공구	6.0	시공중
부전-마산 복선전철	5.0	설계 완료/시공 예정
대곡-소사 복선전철	2.5	2011년 설계/2012년 시공 예정
신분당선 연장(용산-강남)	1.5	2011년 설계/2012년 시공 예정
수도권 대심도 광역급행철도	147.0	시공 예정
서울시 U-Smartway	8.0	시공 예정
서부간선도로 확장공사	15.0	시공 예정
서울시내 경전철 공사	3.0	2012년 설계/2013년 시공 예정
동부간선도로 당현4교-대치 구간	17.2	시공 예정
고속도시철도(GTX), 고속전철, 도심지 고속화도로	70.0	시공 예정
한중 해저터널	220.3	검토 진행
한일 해저터널	145.0	검토 진행
목포-제주 해저터널	167.0	검토 진행

최근 국내 세그먼트 터널은 주로 지하철과 지하도로의 터널에 많이 적용되며, 아래 표는 국내 세그먼트 터널의 시공 및 설계 상세현황임. 지하철의 경우 굴진외경이 8.0m 내외의 대단면으로 대부분의 터널이 7m 이상의 세그먼트 외경으로 시공되었으며 세그먼트 연결방식 대부분이 곡볼트 체결방식을 적용하였음. Singapore Downtown Line Stage3 929A/935, 마산～거제 연결도로(연장 약 12.6km), 신분당선 용산～강남(연장 3km)은 설계완료 상태이다.

향후 대도시권 대심도 터널 건설 프로젝트 사업에 수도권 대심도 광역급행철도(GTX, 총 연장 145.5km, 3개 노선, 총 사업비 12조원 추정), 서울시의 U-SMARTWAY(총 연장 149 km, 6개 노선, 총 사업비 11조 2천억원 추정), 신분당선 연장(용산-강남)선 (총연장 7.49 km, 한강하저 통과구간포함, 총 사업비 9천억원 추정)등의 세그먼트 터널설계가 다수 적용될 것으로 예상된다.

또한 한-중해저터널(제2안 화성-웨이하이, Shield TBM연장 220.3 km, 공사비 77

조원)과 한-일 해저터널(노선A 거제도-가라쓰, Shield TBM연장 145.0km, 공사비 50조원)이 대륙간-국가간 초장대 해저터널사업으로 논의되고 있음. 국내에서는 이러한 초장대 해저터널사업에 앞서 호남-제주간 해저터널(Shield TBM 연장 167.0 km, 공사비 14조원)에 대한 검토가 진행 중이다.

표 2.1.3 국내 세그먼트 터널 시공현황

구 분		분당선 제3공구	서울 지하철 703공구	서울 지하철 704공구	서울 지하철 909공구	인천공항 도시철도 2-5B공구	광주 지하철 T/K 1공구	부산 지하철 230공구
시 공 사		대우건설	대우건설	삼성물산	두산산업 개발	삼환기업	성원건설	두산산업 개발
쉴드공법	Type	EPB	EPB	EPB	SPB	EPB	EPB	SPB
	제작사	고마츠	미쓰비시 중공업	히다찌조센	가와사끼 중공업	가와사끼 중공업	NKK (고마츠면판)	NKK (고마츠면판)
	장비 직경(m)	8.06	7.40	7.31	7.80	7.93	7.38	7.28
	장비 길이(m)	9.75	13.25	9.39	8.50	8.80	8.33	8.33
	쉴드터널 연장(m)	1,691	3,188	1,387	3,614	1,935	1,798	842
세그먼트	Type	R.C 평판형	R.C 평판형	R.C 평판형	R.C 평판형	R.C 평판형	R.C 평판형	R.C 평판형
	Out Dia. (mm)	7,800	7,220	7,130	7,450	7,580	7,200	7,100
	분할 방식	7(6+1key)	7(6+1key)	7(6+1key)	7(6+1key)	8(7+1key)	7(6+1key)	7(6+1key)
	두께/폭 (mm)	400/1,500	300/1,500	300/1,500	350/1,200	350/1,200	300/1,200	300/1,200
	연결 방식	경사볼트	곡볼트	곡볼트	곡볼트	경사볼트	경사볼트	곡볼트 /장볼트
	테이퍼 형식	양테이퍼	편테이퍼	편테이퍼	양테이퍼	양테이퍼	편테이퍼	편테이퍼
	지수 방식	수팽창지수재 (내외측 2열)	수팽창지수재 (외측2열)	수팽창지수재 (내외측 2열)	수팽창지수재 (내외측 2열)	수팽창지수재 (내외측 2열)	수팽창지수재 (외측 1열)	수팽창지수재 (외측 1열)

표 2.1.4 국내 세그먼트 터널 설계현황

구 분		Singapore Downtown Line Stage3 929A	Singapore Downtown Line Stage3 935	마산~거제 연결도로	신분당선 (용산-강남)
쉴드공법	쉴드 터널 연장(m)	5,950 (2,930+3,020)	1,543 (770+773)	12,570 (6,280+6,290)	3,003.8 (1493.4+1510.4)
세그먼트	Type	평판형	평판형	평판형	평판형
	Out Dia. (mm)	6,350	6,350	12,500	8,000
	분할 방식	6(5+1key)	6(5+1key)	10(9+1key)	7(6+1key)
	두께/폭 (mm)	275/1,378~1,442	275/1,380~1,420	500/1,600	400/1,500
	연결 방식	곡볼트	경사볼트	곡볼트	곡볼트
	테이퍼 형식	양테이퍼	양테이퍼	양테이퍼	양테이퍼
	지수 방식	가스켓 지수재	가스켓 지수재	수팽창지수재 복합형 가스켓	복합 지수판 설치

국내 터널설계에 세그먼트 터널을 도입하기 시작한 시기보다 훨씬 이전에 유럽, 일본은 세그먼트 터널을 철도 및 도로 터널에 적용하였다. 이에, 국외의 세그먼트 터널 시공사례를 분석하여 시공현황 및 기술력 정도를 분석 수행하였다.

유럽은 시공성, 경제성, 환경성 측면에서 유리한 세그먼트 터널공법이 증가하는 추세이며, 일본 도심지의 경우 80% 이상이 세그먼트 터널공법 적용으로 지속적인 증가 추세이고, 중국은 최근에 들어서 시공 중이거나 계획 중인 터널을 세그먼트 터널공법으로 적극 채택하고 있음. 현재 계획 및 시공 중인 장대터널 중 산악터널의 60%이상, 도심터널의 80%이상, 하저·해저터널의 80%이상이 세그먼트 터널로 적용되고 있다.[2)]

표 2.1.5 국외 세그먼트 터널 적용 현황

터널명	총연장	국명	용도	터널공법	준공 년도
Gotthard Base Tunnel	57.1km	스위스	철도터널	4-Hard Rock TBM	2010 (시공중)
Euro Tunnel	50.5km	영국-프랑스	철도터널	11-Shield TBM	1994
Loetschberg Base Tunnel	34.6km	스위스	철도터널	Hard Rock TBM	2007
Pajares Base Tunnel	24.7km	스페인	철도터널	10-Double Shield TBM + Single Shield TBM	2010 (시공중)
Qinling Tunnel	18.0km	중국	철도터널	Hard Rock TBM	2002
Pinglin Tunnel	12.9km	대만	도로터널	Shield TBM	2005
Hida Tunnel	10.7km	일본	도로터널	Hard Rock TBM	2008
Chongming Tunnel	9.0km	중국	도로터널	Mix Shield TBM	2008
A86 Tunnel	5.5km	프랑스	도로터널	Shield TBM	(시공중)

유럽의 세그먼트 터널은 대단면화, 대심도화를 주로 이루며, 고속화, 장대화가 가능한 우수한 세그먼트 터널 장비기술력을 확보하고 있다. 대표 터널로는 프랑스 파리의 A86과 영국-프랑스 유로터널, 독일의 엘베터널, 그리고 가장 최근의 이스탄불해협 도로터널이 있다. 파리의 제2외곽순환도로인 A86의 미연결 구간을 연결하는 2층 지하도로 터널로 연장은 10km이며, 건설비는 24억 유로임. A86승용자 전용의 2층 도시 고속도로로서 지하 20~90m 깊이에 건설된 터널로, 각 층은 2차로 일방통행으로 운영되고 있다. 유럽 통합의 차원에서 범유럽 교통네트워크 형성을 위해 추진된 유로터널은 영국의 포크스턴(Folkstone)과 프랑스의 칼레(Calais)를 연결하는 터널로 총 연장은 50.45km이고, 이 중 38km는 도버해협을 통과하는 해저터널임. 터널은 총 3개로 이루어져 있고, 양편의 2개 터널은 철도 터널로 영국과 프랑스를 연결하는 터널이며, 중앙 1개의 터널은 서비스 터널로 주로 자동차 등의 화물 운송을 담당하고 있다. New 엘베터널 4th Tube는 총 연장 4.4km로 독일 엘베강을 횡단하여 함부르크 남북을 연결하는 지하도로이며, 유럽대륙과 아시아대륙을 해저터널로 연결하는 역사적인 사업으로 총연장은 14.6km로, 10억달러 규모의 대규모 공사이며, 세그먼트 터널 단면형식은 단선복층터널(Single Double Deck Tunnel)로 설계되었다.[3)]

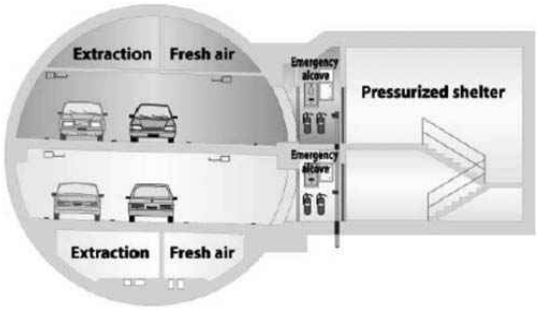


그림 2.1.2 A86 도시고속도로 구조

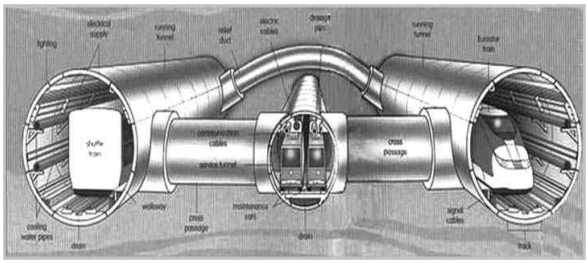


그림 2.1.3 유로터널의 구조

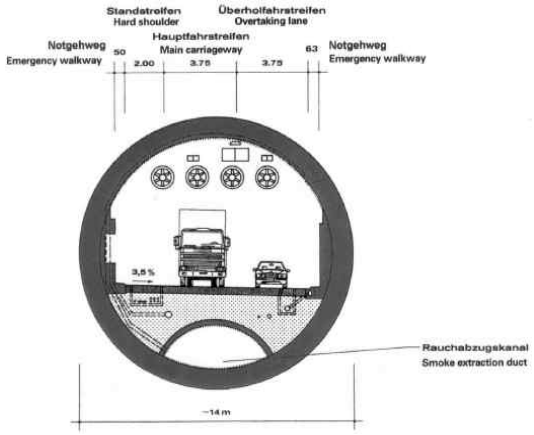


그림 2.1.4 엘버터널 4th Tube 단면도

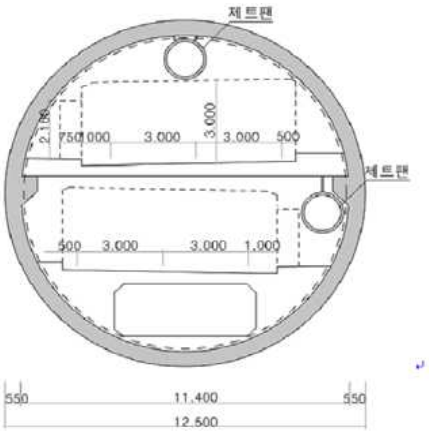


그림 2.1.5 이스탄블해협 단선 복층터널면

1999년부터 2006년까지 일본의 세그먼트 터널 공사건수는 약 1,086건으로, 이중 하수도 공사가 절반이 넘는 610건으로 일본의 TBM 기계화 시공을 견인했다고 할 수 있음. 일본의 세그먼트 터널은 철도나 도로 분야보다 상·하수도 공사 등 물과 관련된 공사가 주로 이루어 졌고, 대표적인 교통터널로 동경만 아쿠아 라인 해저터널이 있다. 1997년에 개통된 동경만 해저터널은 가나가와현의 가와사키에서 동경만을 관통하여 지바현의 기사라즈까지 연결되는 4차선 도로로 총 연장은 15.1km이며, 가와사키 쪽의 9.5km는 해저터널(폭 13.9m)로 건설하였다. 중국에서 2002년부터 2006년까지 5년간 도입된 세그먼터 터널은 시공연장이 600km로 대부분의 중국 6대도시 지하철건설에 투입되어 2004년을 기준으로 전체 지하철의 70% 이상이 세그먼트 터널로 시공되었으며, 중국의 창장(長江) 하저터널은 설계기간 11년, 건설기간 5년으로 중국에서 3번째로 큰 섬인 숭명도(崇明島)와 상하이를 연결하는 도로로 연장 25.5km이며, 6차선 고속도로와 선로가 연결된 평면도로이다.[4)]

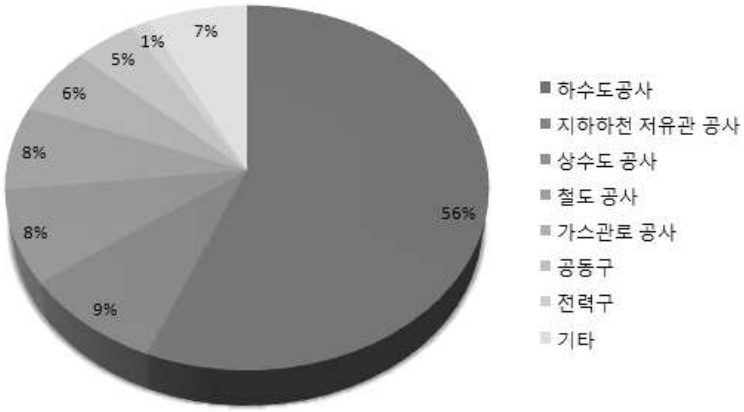


그림 2.1.6 일본의 세그먼트 터널 현황

현재 추진중인 대도시권 대심도 터널 건설 프로젝트 사업인 수도권 대심도 광역급행철도(GTX), 서울시의 U-SMARTWAY, 신분당선 연장(용산-강남)선에 적용이 예상되며, 한-중 해저터널(제2안 화성-웨이하이)과 한-일 해저터널(거제도-가라쓰)이 대륙간-국가간 초장대 해저터널사업으로 준비되고 있으며, 장대 해저터널사업에 앞서 호남-제주간 해저터널에 대한 검토를 진행 중에 있음. 따라서 이러한 사업과 더불어 향후 세그먼트 터널 건설 수요가 증가될 것으로 전망된다.[4)]

세그먼트 터널 건설시장의 활성화와 더불어 국내·외에서 세그먼트 터널의 장비에 관련된 연구도 활발히 진행되어지고 있고, 터널 내부의 안전성, 내구성 등을 고려하여 장비와 세그먼트 등 공법의 경쟁력을 강화할 필요가 있다.[5)]

2. 기술개발 현황 조사

가. 4심원 이수식 쉴드터널 기술

일본 지하철 록본기역(가칭) 공구는 지상의 교통 및 지하 매설물에 미치는 영향을 줄이기 위해 역 양단의 97m 구간을 개삭 공법으로 시공하여, 쉴드기의 발진 및 도달 수직갱도로 설정하고, 중앙의 역 홈부 118m를 4심원 이수식 쉴드기(상하 2단)로 굴진하고 박스 거더를 장착한 세그먼트를 조립하여 역을 구축하는 공법이 적용되었다.

현장 시공 조건으로는 심도가 27m(상단)~37m(하단) 정도이고, 토질은 자갈혼합 모래, 세사, 사질이암층으로 조사되었고, 곡선 및 경사는 R=500m, i=0.2% 정도 되고, 지하수위는 지표면 이하 12m에서 조사되었다.[6)]



그림 2.1.7 4심원 이수식 쉴드장비 모습

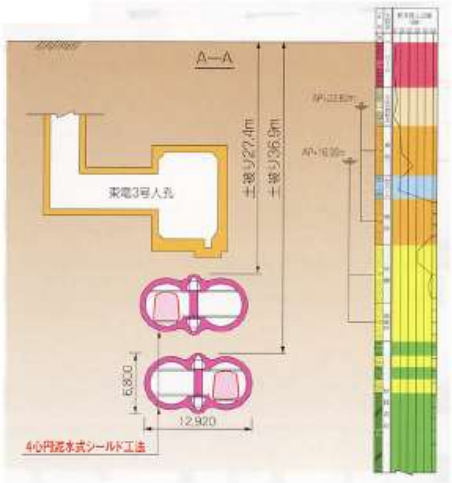


그림 2.1.8 시공 구간의 횡단도

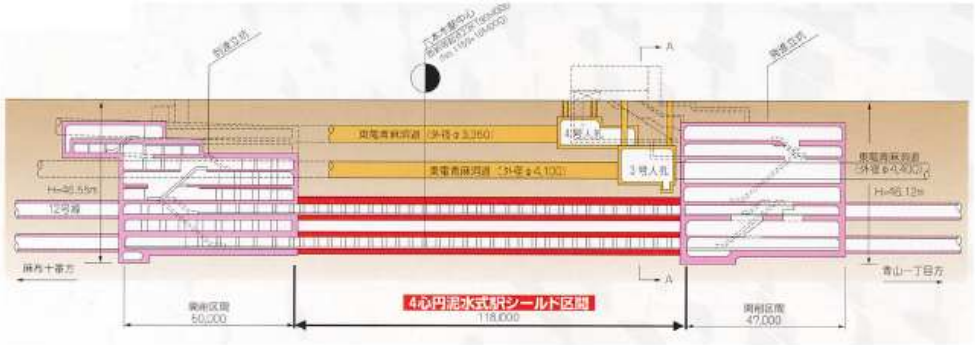
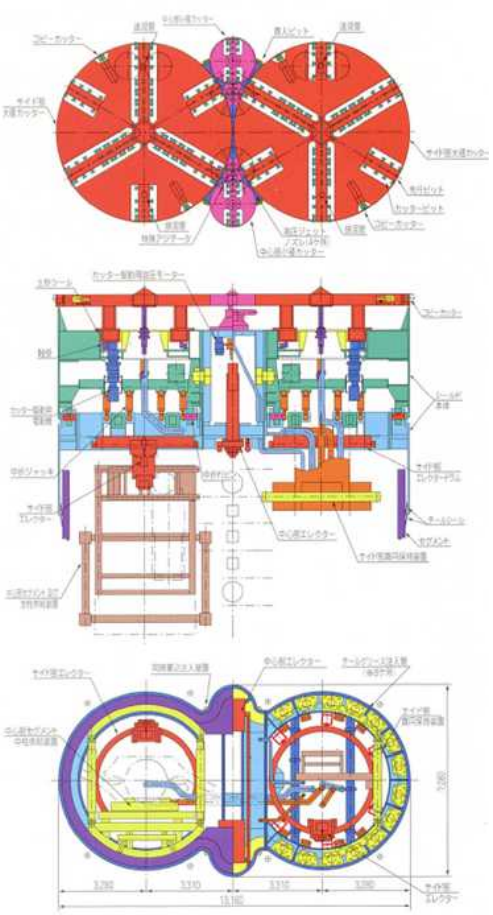


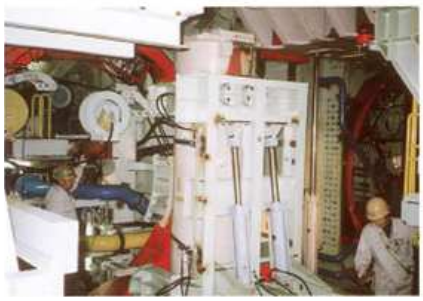
그림 2.1.9 록본기역 공구의 단면도

쉴드장비는 좌우 회전 커터(∅6,560)와 중앙의 상하부에 회전 커터(∅1,720)를 갖는 높이 7.06m, 폭 13.18m이며, 사행을 수정하기 위해 좌우의 쉴드 동체에 상하 굴곡형 중절(H&V)기구를 장비하였다.. 측부 커터와 중앙부 커터 간의 잔여 굴진 부분은 챔버 내에 장비한 에지데이터(커터 겸용) 등으로 절삭하게 되며, 수직갱도로부터 반송된 중앙부 세그먼트는 상하 이동식 이렉터로 조립하고 좌우 기둥 및 중간 기둥은 기둥용 특수 공급 장치로 조립하였다. 세그먼트는 시공 시에는 좌우 기둥(1m 간폭) 및 중간 기둥(4m 간폭)으로 지지되고 있으나, 완성 시에는 4m 간폭의 중간 기둥만으로 지지됨. 이에 박스 거더를 장착한 특수 세그먼트를 기둥의 상하부에 배치하고 그 박스 거더를 1링마다 접합하여 터널 축 방향의 양부재를 형성하는 구조로 되어있다. 따라서 중앙부 세그먼트는 터널 횡단면의 통상의 세그먼트 기능과 터널 종단 방향의 양부재의 기능을 겸비한 구조로 이루어져 있다.

공사에 사용된 세그먼트 종류는 NM 세그먼트(중앙부는 박스 거더 내장식)로서 크기는 6,800mm×12,920mm이고, 측원부 두께는 300mm, 폭 1,000mm, 분할 수는 12분할이며, 기존 터널 구조와 달리 터널 종단 방향에 양부재 및 기둥을 갖는 특수한 구조이기 때문에 기존 설계 방법(2차원 해석) 외에 각종 구조 적재 시험, 시공성 시험 및 3차원 FEM 해석 등에 의해 안전성의 확인을 실시하였다.



(a) 쉴드장비 상세도



(b) 중간 기둥 공급 장치



(c) 이렉터

그림 2.1.10 4심원 이수식 쉴드장비 상세

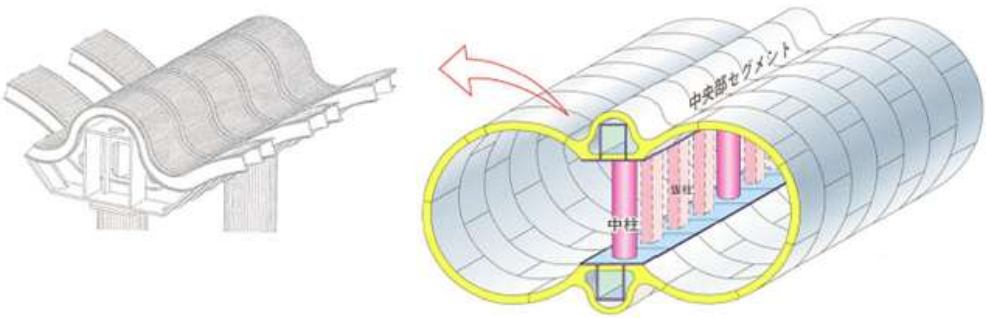


그림 2.1.11 NM 세그먼트 구조

쉴드 굴진은 하단부를 선행한 후에 상단부를 실시하는데, 쉴드 발진 및 도달부의 일부에서 NOMST 공법(신소재 콘크리트를 사용한 쉴드 발진 공법)을 채용. NOMST부 자재는 도로 아래의 주열침(∅900)에 세운 후 압착재로 접합. 갱구 지수 씰은 고수압 사층, 4심원이라는 특수성을 고려하여 슬라이드 플레이트와 에어백을 병용한 2단 구조이다.



(a) 중앙부 세그먼트 (b) 측부 NM 세그먼트 (c) 가조립 상태(3링)

그림 2.1.12 NM 세그먼트 모습



(a) 중앙부 세그먼트 성능 확인 시험 (b) 전체 링 적재시험 (c) FEM 해석

그림 2.1.13 구조 안정성 시험 모습

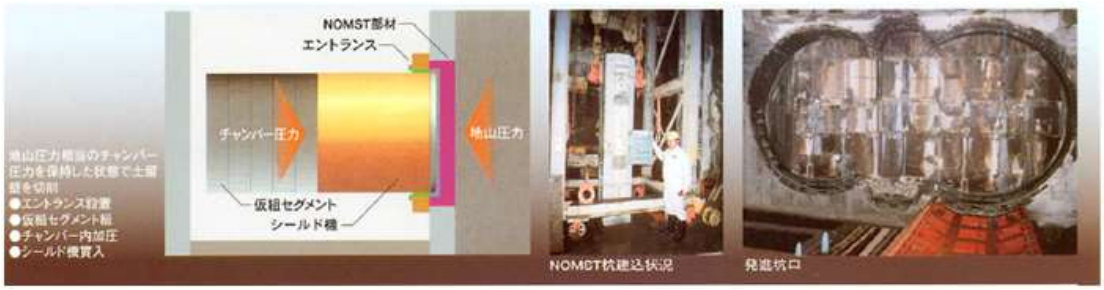


그림 2.1.14 NOMST에 의한 발진 개념도

나. 3심원 이수식 쉴드터널 기술

일본 동경의 지하철 12호선은 신쥬쿠 부도심을 기점으로 하여 동경 지역을 순회하는 지하철로서 세계 최초로 3심원 이수식 쉴드터널 기술이 적용되었다. 3심원 이수식 쉴드공법은 다수의 커터 면판을 전후로 배치하면서 그 일부를 겹쳐놓은 것으로 사용목적에 맞는 필요 최소 단면의 터널 시공을 안전하고 확실하게 진행할 수 있고, 지반침하 및 지하 수위의 저하를 발생시키지 않으며 근접 구조물에 영향을 가장 적게 주는 공법이다. 쉴드공법의 적용 구간은 발진 및 도달부 부근에 곡률 140m · 125m의 급곡선을 가지며 종단 경사는 2‰이며, 토층은 약 27m로 에이단 지하철, 칸다강 분수로, 고속도로 등 중요 시설물이 밀집되어 있는 지역의 바로 밑을 통과함. 쉴드구간의 지질은 에도강 사층으로 간극수압은 2.6kg/㎠로 조사되었다. 3심원 이수식 쉴드장비 3대의 쉴드장비를 횡열로 연결한 형태를 하고 있으며 중앙부 외경 ∅8,846mm, 좌우측부 외경 ∅8,140mm, 전폭은 17,440mm로 중앙 원부가 전면에 돌출되어 있는 구조로 제작됨. 급곡선부(R=125m)를 굴삭하기 위하여 중절 기구(중절각 2°)를 적용하였고 일반 세그먼트 외에 특수형 세그먼트(날개 세그먼트)와 강관기둥 등을 조립하기 위하여 4기의 이렉터를 장비하고 있으며 쉴드장비의 중량은 약 2,600ton임. 쉴드장비의 전체 길이는 약 275m로 중간부 약 137m가 플랫폼부, 양단부가 통로부가 구성되어 있으며, 플랫폼부는 스틸 세그먼트, 통로부는 덕타일 세그먼트로 시공되었다. 3심원 이수식 쉴드장비의 특징으로는 커터 헤드가 전후 방향(중앙부는 앞 측, 좌우부는 뒤 측)으로 포개진 형태이며, 커터 회전 방향은 단독으로 제어가 가능하며, 또한, 커터는 동일 챔버를 서로 공유하며, 급곡선 시공을 위하여 중절식을 채용되었다.

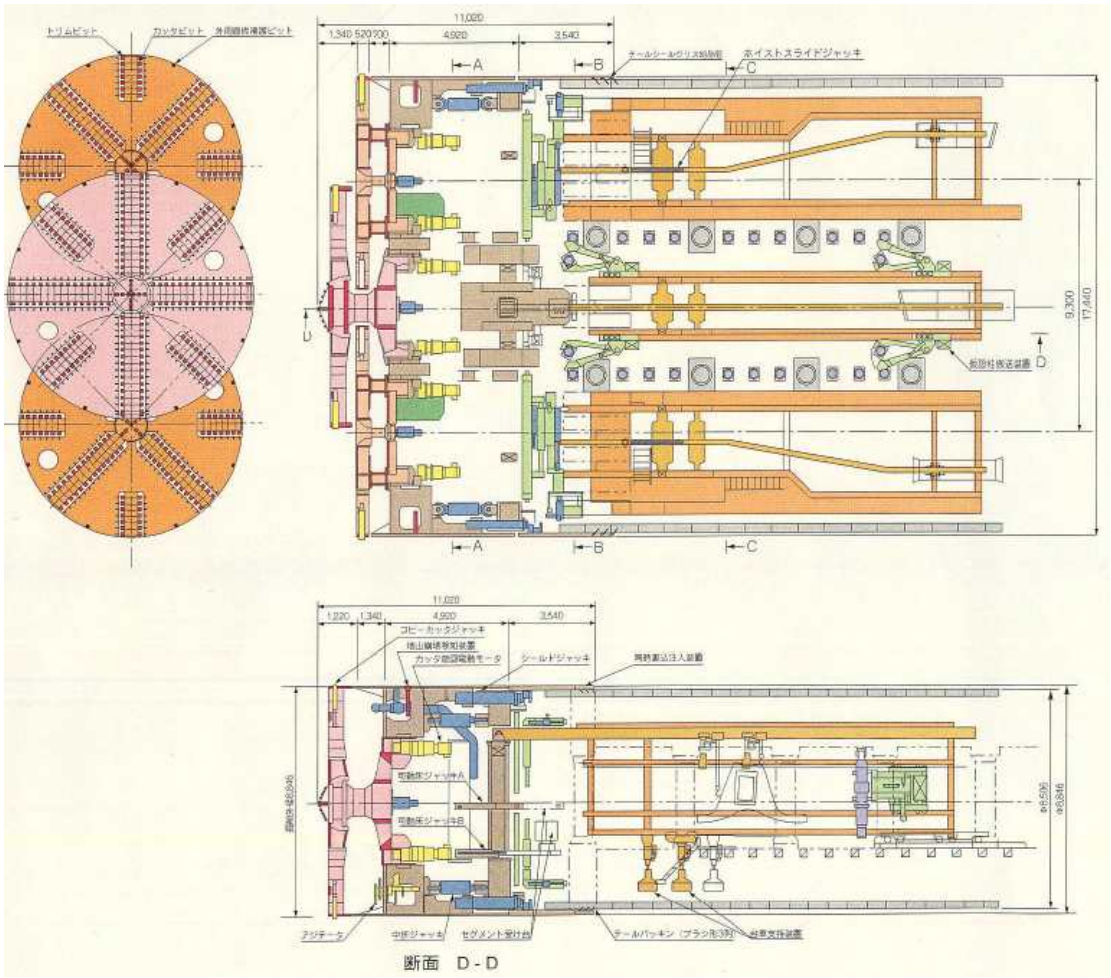


그림 2.1.15 3심원 이수식 쉴드장비의 구조

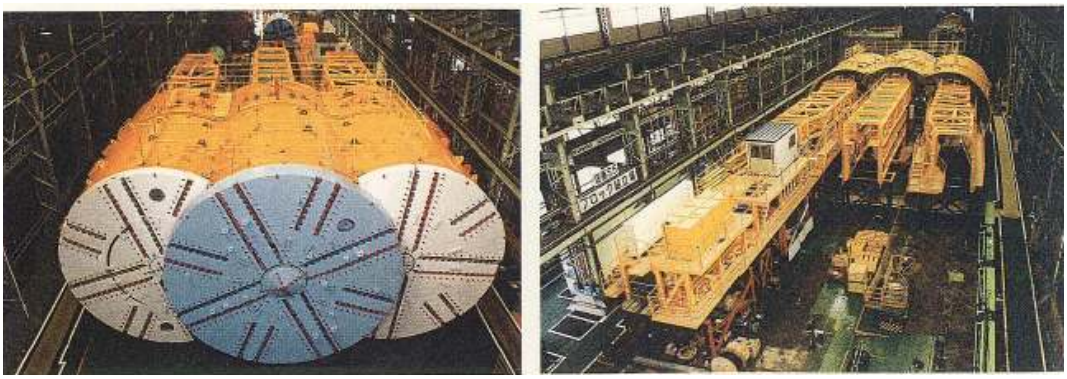


그림 2.1.16 3심원 이수식 쉴드장비 모습

다. 멀티 페이스 쉴드공법

멀티페이스 쉴드공법(이하, M·F 쉴드공법)은 일본 케이요 도심선 및 쿄바시 공구에 적용된 쉴드공법으로서, 기존의 원형 쉴드머신을 위치를 엇갈리도록 단차를 두고 연결시킨 2개의 복수 커터 페이스(Multi-Face)를 갖는 쉴드머신을 통해 시공하는 공법이다. 도심지 터널 공사에서 중요한 당면 문제인 환경 보전과 대단면 터널의 불필요한 굴착 단면의 감소에 효과적이며, 시설 점유 폭의 감소, 다른 지하 구조물과의 교차, 밀폐식 기계 굴착 등을 용이하게 하는 등 경제성과 시공성이 우수한 쉴드공법으로 알려져 있음. M·F 쉴드공법은 향후 3~4개의 다면화된 복선 터널과 높이에 비하여 폭이 넓은 지하가로 등을 동시에 굴진할 수 있는 넓은 응용 범위를 가진 쉴드공법으로 주목을 받고 있다. M·F 쉴드공법의 특징은 뛰어난 경제성으로서 원형 단면에 비하여 불필요 단면이 적고 굴삭, 사토처리, 콘크리트 등에 의한 복공 작업을 대폭 경감할 수 있고, 세그먼트의 단면 크기도 축소시킬 수 있으며, 최소한의 점유면적으로서 종단 선형 및 터널 높이가 원형 단면에 비해 작게 설계할 수 있으므로 다른 지하 구조물과의 교차에 대처하기 쉽다. 또한, 원형을 임의로 조합함으로써 여러 단면 형상이 가능하며 동시 굴착도 가능하다.

표 2.1.6 기존 원형 쉴드공법과 M·F 쉴드공법의 경제성 비교(단위 m당)

구분	원형 쉴드공법(A)	M · F 쉴드공법(B)	비율(B/A)
단면 세로 외경(m)	10.40	7.20	0.69
단면 가로 내경(m)	10.40	11.97	0.15
굴삭 단면적(㎡)	87.9	76.1	0.87
1차 복공(㎥)	12.6	10.3	0.82
2차 복공(㎥)	6.3	5.6	0.89
뒤채움 주입공(㎥)	4.4	5.5	1.25
인버트 콘크리트(㎥)	9.7	1.8	0.19

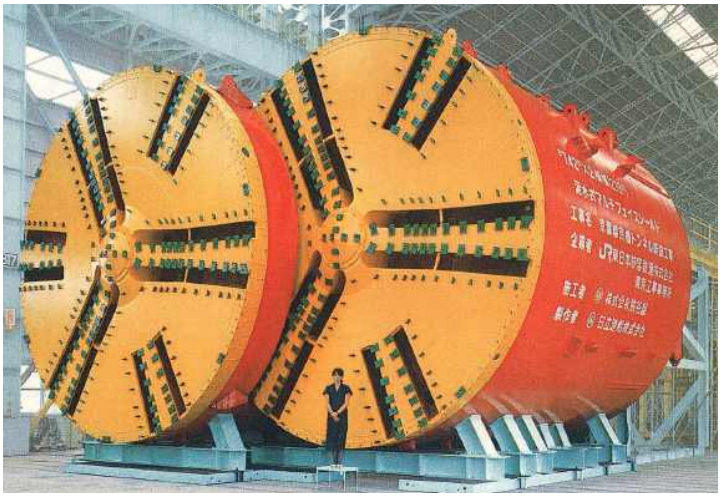
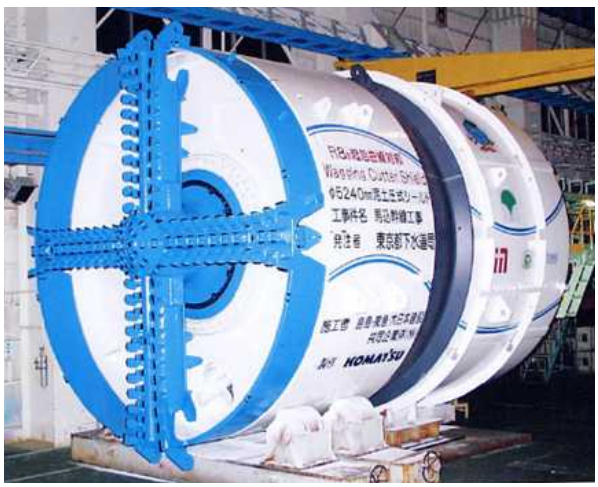


그림 2.1.17 M·F 쉴드머신 모습

라. 워깅 커터 쉴드공법(진동식 쉴드공법)

도달부 부근에 예정되어 있는 초 급곡선 시공에 대응하기 위해 최첨단 기술을 채용한 시공기술. 공사에 사용되는 쉴드장비는 이토압식으로 직경 5,240mm, 길이 5,535mm~6,925mm이며, 최대 중절각은 17도이다. 쉴드장비는 선단의 커터 헤드로 굴삭한 범위 안에서만 기체의 방향을 변경할 수 있어, 시공 가능한 곡률 반경은 주로 길이에 의해 한정됨. 이에 반해 워깅 커터 공법에서는 커터 헤드를 소수의 요동 잭으로 구동하기 때문에 머신 내부의 기기가 간소화되어 최대한의 길이 단축이 가능하다.



(a) 쉴드장비 전경



(b) 쉴드장비 중절 상황

그림 2.1.18 마고메 간선 건설공사에 사용된 쉴드장비

3. 기존 쉴드터널 문제점 분석

가. 터널 내부 누수 발생

쉴드터널에서 발생되는 누수량 전체의 60% 이상은 볼트 체결부에서 발생, 볼트 체결부에 대한 방수공이 링상의 패킹제를 볼트 와셔 및 구멍 사이에 설치하는 것에 불과하기 때문에, 패킹제의 장기적인 마모, 장기적인 누수로 인한 볼트의 부피팽창, 볼트 구멍에서의 크랙 발생, 볼트연결의 Gap 및 Offset 등으로 인해 계속적인 누수발생은 불가피하다.[7)]

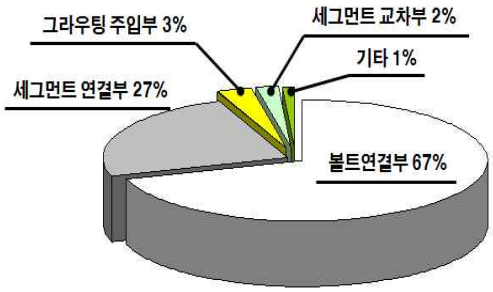


그림 2.1.19 쉴드터널 발생 누수량 분포



그림 2.1.20 기존 쉴드터널의 누수 발생

볼트 체결부의 누수는 세그먼트 연결을 위해 구조상 체결부가 밖으로 노출되어 있고 체결부의 공간도 커서 이를 통한 누수발생이 일반적이며, 특히 경사볼트의 경우 수팽창 지수재 사이를 통과하여 연결되므로 볼트 자체가 통수경로가 되며, 외부로 노출된 볼트의 녹 발생 및 볼트 홀을 통한 누수가 발생한다. 또한 볼트 삽입부분에 발생하는 Crack으로 인한 누수도 발생한다.[8)]

세그먼트 조립시 단차 발생에 따른 누수는 세그먼트는 5개 또는 7개로 공장에서 제작, 운반하여 현장 터널 내부에서 볼트를 이용하여 조립하고 있으나 중량이 무겁고 기계로 조립함에 따라 세그먼트 간 단차가 발생한다. 또한 가장 상단에 설치되는 세그먼트는 상재하중, 토압 및 자체 중량으로 인하여 처짐 및 단차가 발생하여 세그먼트 간 완전한 진원이 형성되지 않아 상단에 위치한 세그먼트를 통해 지하수가 유입된다.

기타 구조적인 누수 원인은 쉴드터널은 터널내부로 누수되는 지하수의 유입을 방지하기 위하여 세그먼트와 터널 굴진단면 사이를 그라우팅 처리를 하고 있으나 그라우팅이 밀실하게 채워지지 않아 미세하게 누수되는 수량은 불가피하게 발생하고 있으며 우레탄을 이용하여 유입량을 차단하고 있는 실정이다.[9)]



그림 2.1.21 세그멘트 연결 볼트 부분 누수 전경



그림 2.1.22 세그멘트 간 단차를 통한 지하수 유입

나. 세그먼트 단면 과설계 및 굴착에 따른 지반 침하

쉴드터널 라이닝 설계시 단면 두께 결정은 첫째, 상재하중(토압+수압)을 고려한 안정성 확보 가능 두께, 둘째, 암반상태에 따른 머신장비의 추진력 및 반력을 고려한 두께, 셋째, 세그먼트 라이닝의 체결볼트 설치공간을 확보 가능한 두께 등을 고려하여 결정. 이로 인해 현재 볼트 체결방식의 경우 체결볼트(일반적인 곡볼트)의 설치공간이 과다하여 세그먼트 라이닝의 단면축소를 시도하기가 불가능한 상황이다.[10)]

쉴드터널 굴착 중 지반변형이 쉽게 발생되는 토사지반에서의 문제점 중 하나는, 토피가 얇고 주택지나 구조물 밑을 통과하는 경우의 막장관리와 지표침하 방지대책에 있음. 지하수위저하에 의한 선행침하방지를 위해서는 적절한 막장압의 관리와 더불어 뒤채움 주입의 철저한 관리로 누수를 방지하여야 함. 막장 전방의 침하 및 융기는 막장에서의 토압과 수압의 균형관리와 적절한 잭추력이 요구되며, 과다한 융기발생시에는 배토량 조절도 필요하다.[11)]

표 2.1.7 쉴드터널의 지반변위 메커니즘

침하종류	원인	지반침하	변형메커니즘
선행 침하	지하수위 저하	유효토피압 증가	압축, 압밀침하
막장전방 침하 및 융기	막장붕괴, 과대취입, 막장압입	지반응력해방 교란부하 토압	탄소성평형
테일 침하	쉴드기 통과시 교란	교란	압축
테일보이드 침하	테일보이드	지반응력해방	탄소성평형
후속 침하	상기요인	-	압축,크리프 침하

4. 현장설문조사 수행

부분배수를 적용하여 쉴드터널 세그먼트 단면 축소의 전문적인 개발에 앞서, 실제 시공 현장에서의 의견 수렴을 위해 실무기술자들을 대상으로 현장설문조사를 실시하였다. 설문조사에서는 쉴드공법에 대한 이해, 기존 쉴드공법의 문제점, 부분배수 개념 적용의 가능성 등에 대해 의견을 조사하였다.

현장설문조사를 실시한 대상은 총 102명이며, 발주처, 시공사, 설계사, CM사, 감리사, 교육기간 등 다양한 분야에 종사하는 전문가들의 의견을 수렴하고자 하였으며 설문조사 대상자의 각 분야 종사기간은 6~10년이 가장 많았고, 다음으로 1~5년이 많게 조사되었다.

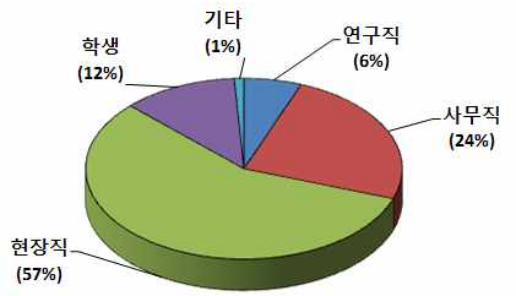


그림 2.1.23 대상자의 직종 분류

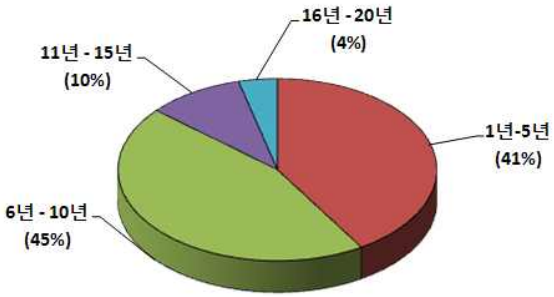


그림 2.1.24 대상자의 각 분야 종사기간

먼저, 터널의 배수설계 개념에 대한 질문에서 배수, 비배수에 대한 개념 차이를 명확하게 이해하거나, 어느 정도 수준으로 이해하고 있다는 의견이 약 75% 정도로 나타났으며, 쉴드터널 공법에 대해서는 실제적이고 명확한 지식을 갖고 있다는 의견이 전체의 66% 정도로 나타났다.

응답자가 생각하고 있는 쉴드공법의 장점에서 가장 우수한 것으로는 소음 진동의 최소화가 35%로 가장 많이 응답하였고, 다음으로 안정성 우수(25%), 인접 구조물의 영향 최소화(21%), 시공기간 단축(10%) 순으로 조사되었다. 쉴드공법의 미래 적용 가능성에 대해서는 공사비가 증가됨에도 불구하고 다양한 장점으로 인해 적용성이 높을 것이라는 의견이 전체의 95% 이상으로 나타났다.

쉴드공법 공사비 절감을 위해서 가장 효과적인 방안에 대한 의견으로는 세그먼트 재료비의 절감이 가장 필요하다는 의견이 전체의 55%로 가장 높게 나타났고, 다음으로 세그먼트 몰드 비용 절감(16%), 쉴드장비 비용 절감(13%), 조립공정의 간소화로 시공비 절감(11%)이 필요하다는 의견 순으로 나타났다.

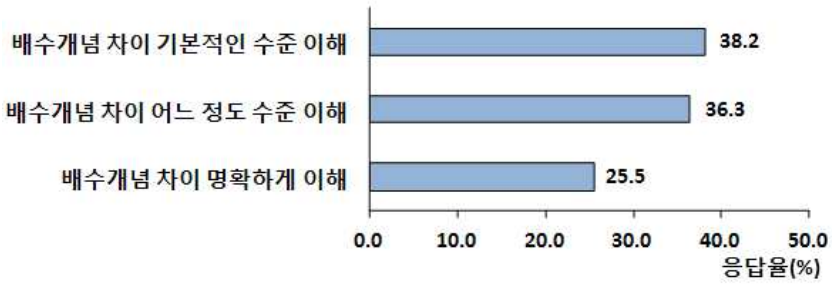


그림 2.1.25 배수/비배수 설계개념에 대한 이해 정도

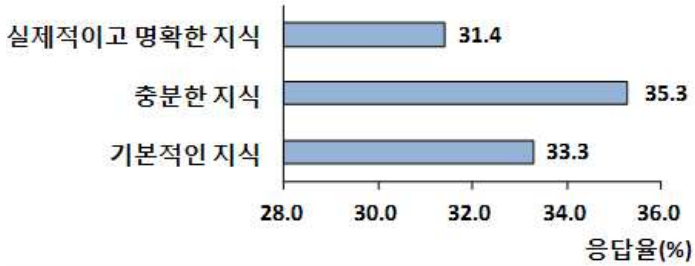


그림 2.1.26 쉴드터널 공법에 대한 이해 정도

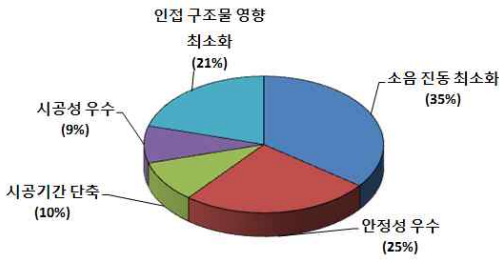


그림 2.1.27 쉴드공법의 장점

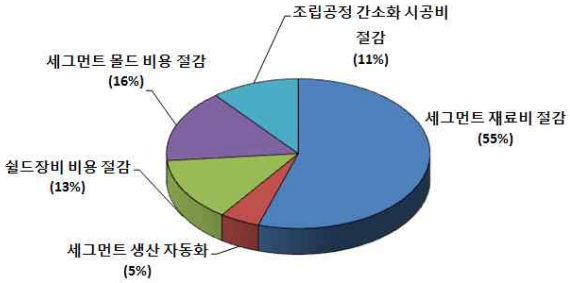


그림 2.1.28 공사비 절감을 위한 방안

기존 쉴드공법에서 일률적인 비배수 설계개념만을 적용함으로 발생되는 문제점에 대한 설문에서는 특별한 문제가 없다는 의견은 6% 정도에 불과하였고, 대부분의 세그먼트 단면이 과다하게 증가된다고 응답하였다. 그리고 현재 설계되고 있는 세그먼트 단면두께의 수준에 대한 질문에서는 적용하중에 비해 과다하게 설계되고 있는 의견이 59% 로서 가장 많게 나타났다.

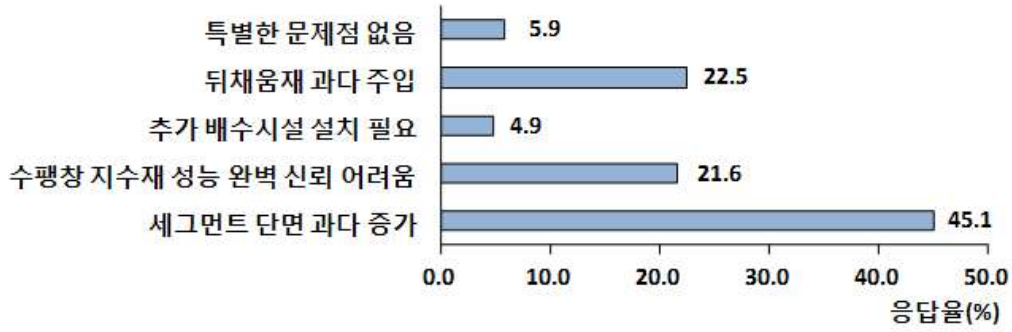


그림 2.1.29 일률적인 비배수 설계개념으로 인한 문제점

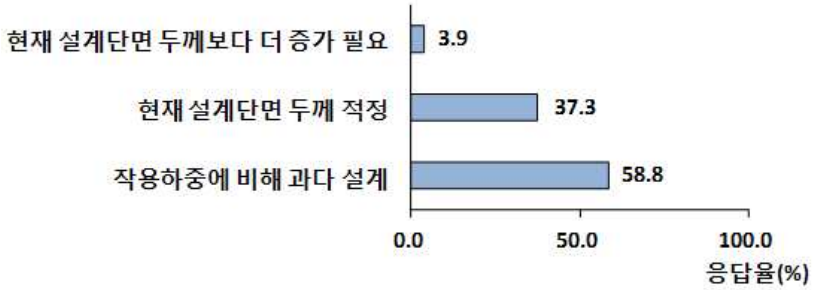


그림 2.1.30 현재의 설계 단면두께 수준에 대한 의견

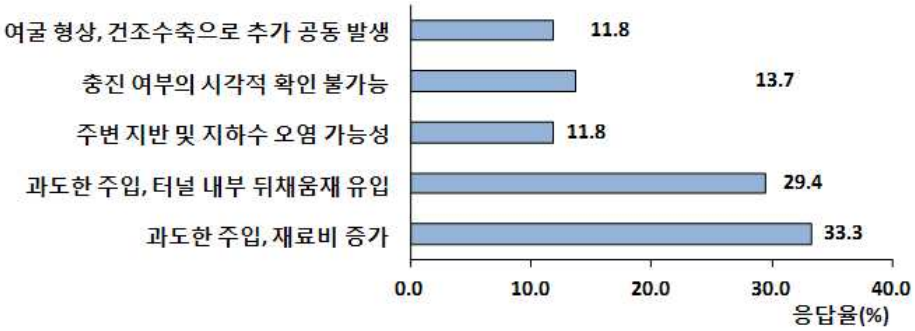


그림 2.1.31 배변 뒤채움재 주입시 발생하는 문제점

쉴드터널 내부로 유입되는 지하수의 차수를 위해 라이닝 배면에 뒤채움재 주입시 발생되는 문제들에 대한 질문에서는 과도한 주입으로 재료비가 증가하고(33%), 터널 내부로 뒤채움재가 유입(29%)되는 문제를 지적한 의견이 전체의 60% 이상으로 나타남. 또한 비배수 설계개념에서 터널 내부로 유입되는 지하수에 대해 완전 차단 가능성에 대해서는 전체의 90% 이상이 현실적으로 완전 차단이 불가능하다고 응답하였다.

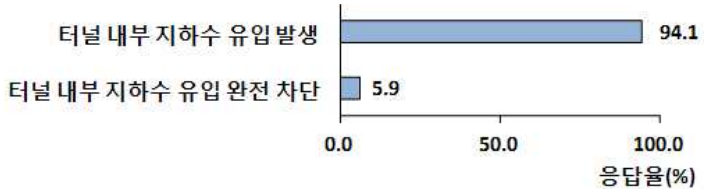


그림 2.1.32 비배수 설계개념에서 쉴드터널 내부 유입 지하수의 차단 가능성

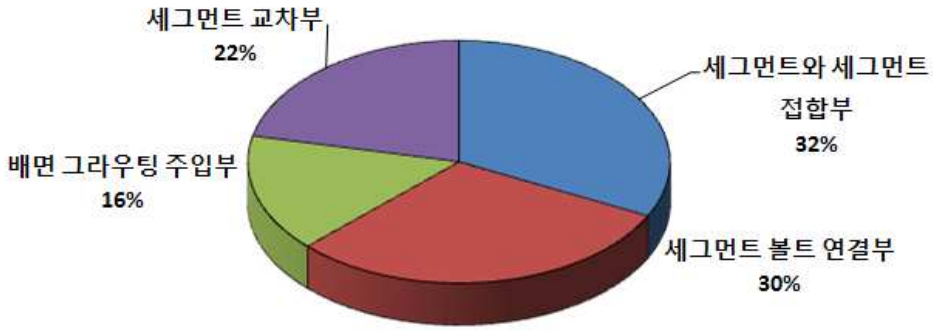


그림 2.1.33 쉴드터널에서 내부 지하수 유입이 가장 심각한 부분

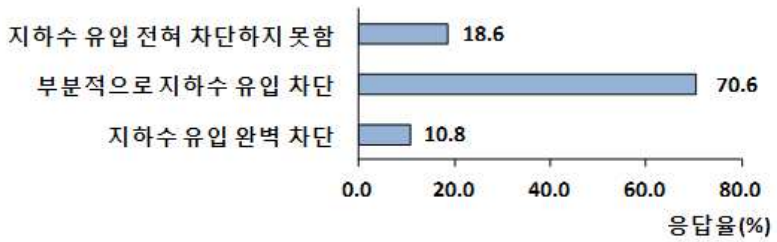


그림 2.1.34 수팽창 지수재의 지하수 유입 차단 기능

○ 쉴드터널에서 지하수 유입이 가장 심각한 부분에 대한 질문에서는 세그먼트와 세그먼트의 교차부가 32%로 가장 높게 나타났고, 세그먼트 볼트 연결부가 30%, 세그먼트 교차부가 20%로 나타났다. 또한, 지하수 차수를 담당하는 수팽창 지수재의 효과에 대해서는 전체 의견의 70% 정도가 부분적으로 차단하고 있다고 응답하였고, 전혀 차단하지 못하고 있다는 의견도 18% 이상이었다. 특히, 쉴드터널의 내구연한을 50년 정도로 가정하였을 경우, 수팽창 지수재가 본 역할을 담당할 수 있는 예상기간에 대해서는 10년 이하일 것이라는 의견이 전체의 43%로 가장 많았고, 다음으로 수년 이하일 것이라는 의견도 27%로 많았으며 쉴드터널의 내구연한과 같은 50년 이라는 의견은 전혀 없었다.



그림 2.1.35 수팽창 지수재 수명 예상(쉴드터널 내구연한 50년 가정)

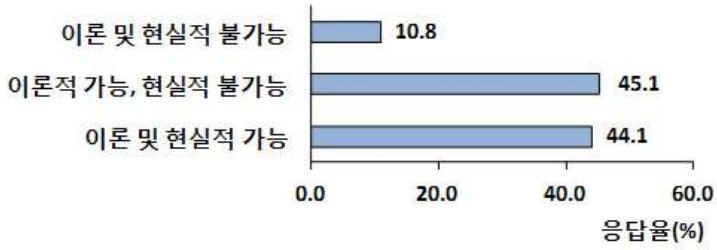


그림 2.1.36 부분배수 개념의 쉴드터널 적용 가능성

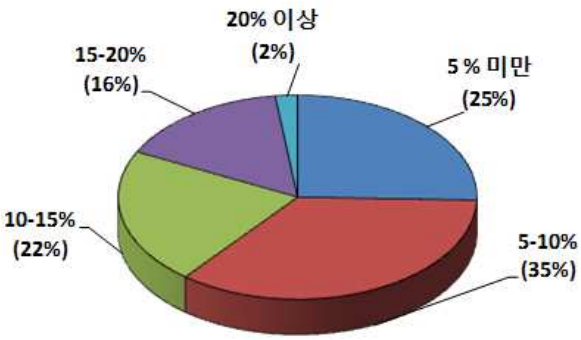


그림 2.1.37 부분배수 적용으로 수압 저감시 쉴드 단면 축소 가능 범위

쉴드터널에 대해 부분배수 개념을 적용하는 것에 대한 의견으로는 이론 및 현실적으로 가능하다는 의견이 45%, 이론은 가능하나 현실적으로는 불가능 할 것이라는 의견이 46%로 나타나 상반되는 의견을 보였다.

부분배수 개념 적용으로 쉴드터널에 작용하는 수압이 저감되었을 경우, 축소 가능한 쉴드터널 단면 크기에 대해서는 전체의 36%가 5~10% 정도가 가능할 것으로 응답하였고, 다음으로 5% 이하 축소가 가능할 것이라는 의견이 26%로 나타났다.

소결론

국내외 쉴드터널의 시공사례 및 연구에 대한 동향을 분석하였으며, 기존 쉴드터널 공법에서 발생하는 문제점에 대하여 원인조사를 수행하였다.

(1) 국내 및 해외에서 쉴드터널에 대한 수요가 꾸준히 증가하는 추세이다. 국내의 경우 분당선, 서울 지하철 7호선, 9호선, 인천공항 도시철도, 광주지하철, 부산지하철 2호선 등에 설계 및 시공이 완료, 또는 진행중이며, 도심지 지하공간 개발 등 수요가 증가할 것으로 예상된다.

(2) 쉴드터널 공법은 세그먼트 접합면 등에서 누수가 발생되므로, 복합형 수팽창 지수재, 가스켓, 수팽창 복합형 가스켓 등의 씰재를 이용한 방법과 볼트공 방수, 뒤채움 주입구 방수, 개착구조물 연결부 등의 방구 공법을 적용하고 있다.

(3) 기존 쉴드터널은 방수공법의 적용도 불구하고 세그먼트 이음부, 볼트 체결부 등에서 터널 내부로의 누수가 발생되고 있으며, 정수압고려로 인한 세그먼트 단면두께의 과설계와 지반 굴착시의 지반침하가 문제되고 있다.

(4) 전문가 현장 설문조사 결과, 쉴드터널에 부분배수 개념을 적용하는 것에 대한 의견으로는 이론 및 현실적으로 가능하다는 의견이 45%, 이론은 가능하나 현실적으로는 불가능 할 것이라는 의견이 46%로 나타나 상반되는 의견을 보였다.

제 2 절 쉴드터널 누수실태 파악 및 방수방법 조사

1. 지하수 유입수량 조사

일반적으로 터널은 지하수위 아래에 위치하는 경우가 많으며, 터널의 방수 및 배수처리는 터널 구조물의 안정성에 큰 영향을 미친다. 터널구조물의 유지관리시 터널 배수시설에 영향을 미치는 요소들은 배수구배의 단차발생, 지하수의 유입, 치전물질의 유입 등으로 이는 배수장애 및 배수기능을 저하시켜 구조물 변상 및 추가적인 유지관리 비용의 증대를 초래하고 있다. 본 절에서는 쉴드터널의 누수 실태 파악에 앞서 국내 지하철 현장에서 발생하는 터널내 지하수 유입 현황을 조사하였다.

가. 국내 터널

(1) 서울 지하철

서울메트로의 관리 구간인 1~4호선의 지하수 유입 및 펌핑 아웃 데이터를 수집하였다. 서울메트로 1~4호선은 총 100개역에 146개소의 집수정이 있으며, 총 배수 펌프는 483대, 2011년 기준 지하수 유입량은 22,265ton/일 이다. 표 2.2.1은 서울메트로에서 관리하는 지하철 역사와 각 역사의 평균 지하수 유출 현황을 나타내고 있다.

표 1.2.1 서울 지하철 1~4호선 지하수 유출 현황[1)]

호선	역명	연장(m)	일평균 지하수유출량 (ton/day)	단위거리당 지하수 유출량(ton/day/km)
1	서울역	1,160	6.9	5.9
	시 청	1,038	26.5	25.5
	종 각	779	17.4	22.3
	종로3가	870	19.2	22.1
	동묘앞	711	11.6	16.3
	신설동	944	28.7	30.4
	제기동	942	11.6	12.3
	청량리	943	138.5	146.9
2	신설동	1,214	126.6	104.3
	용 두	914	109.3	119.6

표 2.2.1 서울 지하철 1~4호선 지하수 유출 현황(계속)

호선	역명	연장(m)	일평균 지하수유출량 (ton/day)	단위거리당 지하수 유출량 (ton/day/km)
2	시 청	1,062.5	166.7	156.9
	을지로입구	760	9.0	11.8
	을지로3가	640	1.4	2.2
	을지로4가	1015	8.1	8.0
	동대문역사	940	5.2	5.5
	신 당	877.5	34	38.7
	왕십리	995.2	189.6	190.5
	잠 실	1,215	27.2	22.4
	신 천	1,155	14.6	12.6
	종합운동장	1,000	114.9	114.9
	삼 성	1,317	8.6	6.5
	선 릉	1,203	16.4	13.6
	역 삼	775	4.7	6.1
	강 남	1,245	1.5	1.2
	교 대	695	16.0	23.0
	서 초	1,655	20.4	12.3
	방 배	1,560	578.4	370.8
	사 당	1,660	404.4	243.6
	낙성대	1,047	5.4	5.2
	서울대입구	9,86	20.3	20.6
	봉 천	1,147	71.9	62.7
	신 림	7,77	49.4	63.6
	신도림	1,186	47.5	40.1
	도림천	1,662	178.3	107.3
	양천구청	1,897.5	9.1	4.8
	신정네거리	1,428	534.6	374.4
	문 래	865	4.2	4.9
	영등포구청	830	28.3	34.1
	합 정	1,075	19.6	18.2
	홍대입구	1,315	33.7	25.6
	신 촌	830	303.3	365.4
	이대입구	917.5	0.0	0.0
	아 현	797.5	477.9	599.2
3	구파발	2,543	397.7	156.4
	연신내	1,318	1,280.7	971.7
	불 광	1,110	66.7	60.1
	녹 번	1,593	205.0	128.7
	홍 제	891	1,391.6	1561.8
	무악재	1,088	0.0	0.0
	독립문	1,571	422.2	268.7
	경복궁	1,081	2,557.8	2366.1
	안 국	1,041	189.8	182.3
	종로3가	624	1,619.8	2595.8

표 2.2.1 서울 지하철 1~4호선 지하수 유출 현황(계속)

호선	역명	연장 (m)	일평균 지하수유출량 (ton/day)	단위거리당 지하수 유출량 (ton/day/km)
3	을지로3가	626	215.5	344.2
	충무로	1,587	141.9	89.4
	동대입구	769	322.0	418.7
	약수	810	332.0	409.9
	금호	641	0.0	0.0
	압구정	1,991	34.4	17.3
	신 사	891	2.9	3.3
	잠 원	1,223	17.0	13.9
	고속터미널	1,636	186.6	114.1
	교 대	918	46.4	50.5
	남부터미널	1,734	17.0	9.8
	양 재	1,162	24.1	20.7
	매 봉	879	178.6	203.2
	도 곡	807	241.5	299.3
	대 치	768	1,748.2	2276.3
	학여울	933	8.2	8.8
	대 청	1,147	258.6	225.5
	일 원	1,777	16.8	9.5
	수 서	1,414	219	154.9
	가락시장	802	715.4	892.0
	경찰병원	832	296.3	356.1
4	쌍 문	1,455	157.3	108.1
	수 유	1,351	5.5	4.1
	미 아	1,524	15.9	10.4
	미아삼거리	1,250	63.2	50.6
	길 음	1,430	1,232.4	861.8
	성신여대입구	1,013	79.4	78.4
	한성대입구	921	47.7	51.8
	혜 화	1,487	577.1	388.1
	동대문	725	134.7	185.8
	동대문역사문화공원	1,275	3.6	2.8
	충무로	720	50.8	70.6
	명 동	735	57.9	78.8
	회 현	835	241.4	289.1
	서울역	1,000	66.7	66.7
	숙대입구	1,228	62.9	51.2
	삼각지	670	68.1	101.6
	신용산	1,259	8.0	6.4
	이 촌	1,219	7.7	6.3
	총신대입구	1,158	691.3	597.0
	사 당	1,561	411.1	263.4
	남태령	935	920.1	984.1

(2) 부산 지하철

부산교통공사에서 관리하는 구간인 부산 지하철의 1~4 호선 구간에 대한 지하수 유입 및 펌핑 아웃 데이터를 수집하였다. 부산지하철 1~4호선은 총 72개역에 집수정이 있으며, 2011년 기준 연평균 일일 지하수 유입량은 18,351ton/일 이다. 표 2.2.2는 집수정이 설치된 부산 지하철 역사와 각 역사의 평균 지하수 유출 현황을 나타낸 것이다.

표 2.2.2 부산 지하철 1~4호선 지하수 유출 현황[2)]

호선	역명	연장 (m)	일평균 지하수유출량 (ton/day)	단위거리당 지하수 유출량 (ton/day/km)
1	범어사	1,229.5	45	36.6
	남 산	890	22	24.7
	두 실	930	55	59.1
	교대앞	1,130.5	22	19.5
	연 산	1,070	27	25.2
	시 청	830	130	156.6
	양 정	870	22	25.3
	부 전	1,369.5	490	357.8
	서 면	624.5	6	9.6
	범내골	1,188	125	105.2
	범 일	767.5	5	6.5
	좌 천	937.5	57	60.8
	부산진	982.5	15	15.3
	부산역	815	50	61.3
	중 앙	1,090	143	131.2
	남 포	930	53	57.0
	자갈치	700.5	105	149.9
	토 성	972.5	35	36.0
	동대신	1,157	38	32.8
	서대신	690	197	285.5
	대 티	1,447	55	38.0
	괴 정	773	115	148.8
	사 하	910	108	118.7
	당 리	920	40	43.5
	하 단	810	394	486.4
2	금 곡	1,062	2	1.9
	동 원	1,398	30	21.5
	율 리	1,285	3	2.3
	화 명	1,455	2	1.4
	수 정	1,470	230	156.5

표 2.2.2 부산 지하철 1~4호선 지하수 유출 현황(계속)

호선	역명	연장 (m)	일평균 지하수유출량 (ton/day)	단위거리당 지하수 유출량 (ton/day/km)
2	덕 천	1,170	9	7.7
	구 명	780	2	2.6
	모 라	1,055	255	241.7
	덕 포	1,205	16	13.3
	사 상	1,115	332	297.8
	감 전	1,230	71	57.7
	냉 정	830	293	353.0
	동의대	920	213	231.5
	가 야	720	255	354.2
	부 암	800	1,322	1652.5
	서 면	1,050	15	14.3
	문 현	830	1,120	1349.4
	지게골	925	244	263.8
	못 골	738	53	71.8
	대 연	834	276	330.9
	경성대부경대	841	386	459.0
	금련산	878	281	320.0
	광 안	855	175	204.7
	수 영	954	50	52.4
	민 락	1,002	551	549.9
	시립미술관	1,110	3	2.7
	장 산	856	8	9.3
3	망 미	1,175	1,000	851.1
	배 산	1,051	675	642.2
	물만골	1,107	0	0.0
	연 산	675	1,250	1851.9
	거 제	700	0	0.0
	종합운동장	840	6	7.1
	사 직	810	4	4.9
	미 남	3,334	2,200	659.9
	만 덕	1,151	12	10.4
	남산정	1,000	1,300	1300.0
	숙 등	649	0	0.0
	덕 천	1,096	0	0.0
4	동 래	676	1,298	1920.1
	수 안	676.1	260	384.6
	낙 민	715.9	190	265.4
	충렬사	718	380	529.2
	명 장	1,029	67	65.1
	서 동	787	56	71.2
	금 사	848.4	1,100	1296.6

(3) 대구 지하철

대구지하철 1, 2호선 구간에 대한 지하수 유입 및 펌핑 아웃 데이터를 수집하였다. 대구지하철 1, 2호선은 총 53개역에 집수정이 있으며, 2011년 기준 연평균 일일 지하수 유입량은 18,565ton/일 이다. 표 2.2.3은 집수정이 설치된 부산 지하철 역사와 각 역사의 평균 지하수 유출 현황을 나타내고 있다.

표 2.2.3 대구 지하철 1, 2호선 지하수 유출 현황[3)]

호선	역명	연장 (m)	일평균 지하수유출량 (ton/day)	단위거리당 지하수 유출량 (ton/day/km)
1	대 곡	1,030	117.6	114.2
	진 천	750	미량	미량
	월 배	750	미량	미량
	상 인	860	미량	미량
	월 촌	990	미량	미량
	송 현	850	미량	미량
	성당못	800	미량	미량
	대 명	750	미량	미량
	안지랑	730	미량	미량
	현충로	730	미량	미량
	영대병원	840	13.2	15.7
	교 대	760	435.12	572.5
	명 덕	760	15.84	20.8
	반월당	725	461.04	635.9
	중앙로	725	20.16	27.8
	대구	740	163.2	220.5
	칠 성	1,235	1,176	952.2
	신 천	905	미량	미량
	동대구	850	573.6	674.8
	큰고개	835	미량	미량
	아양교	1,045	141.6	135.5
	동 촌	920	2162.4	2350.4
	해 안	1,050	미량	미량
	방 촌	1,100	미량	미량
	용 계	1,220	미량	미량
	율 하	1,030	미량	미량
	신 기	1,010	미량	미량
	반야월	990	미량	미량
	각 산	930	미량	미량
2	다 사	2,930	77	26.3
	대 실	1,000	1,296	1296.0

표 2.2.3 대구 지하철 1, 2호선 지하수 유출 현황(계속)

호선	역명	연장 (m)	일평균 지하수유출량 (ton/day)	단위거리당 지하수 유출량 (ton/day/km)
2	강 창	1,330	미량	미량
	계명대	1,330	413	310.5
	성서공단	1,190	1,836	1542.9
	이 곡	1,210	84	69.4
	용 산	920	958	1041.3
	죽 전	890	204	229.2
	감 삼	870	180	206.9
	두 류	830	286	344.6
	내 당	830	288	347.0
	반고개	940	미량	미량
	서문시장	950	886	932.6
	반월당	920	미량	미량
	경대병원	1,110	1,901	1712.6
	대구은행	970	1,087	1120.6
	범 어	910	331	363.7
	수성구청	870	91	104.6
	만 촌	970	269	277.3
	담 티	1,780	110	61.8
	연 호	950	879	925.3
	대공원	1,200	653	544.2
	고 산	1,150	809	703.5
	사 월	1,100	648	589.1

(4) 인천 지하철

인천지하철 1호선 구간에 대한 지하수 유입 및 펌핑 아웃 데이터를 수집하였다. 인천지하철 1호선 구간의 경우 지하수 유입에 대해 관리하고 DB를 구축하고 있는 역사는 총 7곳으로 계산, 경인교대, 부평시장, 부평, 동수, 부평삼거리, 간석오거리이다. 2011년 기준 연평균 일일 지하수 유입량은 2,273ton/일 이다. 표 2.2.4는 집수정이 설치된 인천 지하철 역사와 각 역사의 평균 지하수 유출 현황을 나타낸 것이다.

표 2.2.4 인천 지하철 1호선 지하수 유출 현황[4)]

호선	역명	연장 (m)	일평균 지하수유출량 (ton/day)	단위거리당 지하수 유출량 (ton/day/km)
1	계 산	1,110	79.9	72.0
	경인교대	900	1191.6	1324.0
	부평시장	1,135	321.4	283.2
	부 평	891.1	170.5	191.3
	동 수	859	238.3	277.4
	부평삼거리	1,125	110.5	98.2
	간석오거리	1,219.7	161.4	132.3

(5) 광주 지하철

광주 지하철의 경우 총 3곳의 집수정에서 지하수 유입에 대해 관리하고 있으며, 2011년 기준 연평균 일일 지하수 유입량은 4,220ton/일 이다. 표 2.2.5는 집수정이 설치된 광주 지하철 역사와 각 역사의 평균 지하수 유출 현황을 나타낸 것이다.

표 2.2.5 광주 지하철 지하수 유출 현황[5)]

호선	역명	연장 (m)	일평균 지하수유출량 (ton/day)	단위거리당 지하수 유출량 (ton/day/km)
1	문화전당	775	820	1058.1
	양동시장	800	400	500.0
	공 항	1,984	3,000	1512.1

나. 국외 터널

(1) 노르웨이 터널

표 2.2.6은 노르웨이의 해저 및 장대 도로터널에서 지하수의 유입량을 나타낸 것이다. 노르웨이의 터널들은 지역적 특성에 따라 조금씩 차이가 있으나 일반적으로 0.3㎥/min/km 이하의 값을 허용유입량 기준으로 하여 설계에 적용하고 있다.

표 2.2.6 노르웨이 해저 및 장대 도로터널[6)]

터널명	개통년도	연 장(m)	최대깊이(m)	유입량 (㎥/min/km)
VardΦ	1983	2,892	88	0.46
EllingsΦy	1987	3,520	140	0.31
ValderΦy	1987	4,222	145	-
Kvalsund	1988	1,650	56	0.20
GodΦy	1989	3,844	153	0.30
FlekkerΦy	1989	2,327	101	0.10
Hvaler	1989	3,751	120	0.10
Nappstraum	1990	1,780	60	0.20
Fannefjord	1991	2,743	100	0.14
Maursund	1991	2,122	92	0.21
Byfjord	1992	5,875	223	0.10
Mastrafjord	1992	4,424	132	0.03
Freifjord	1992	5,086	132	0.08
Hitra	1994	5,645	264	0.06
TromsΦysund	1994	3,376	101	0.27
BjorΦy	1996	2,000	85	0.40
SlΦverfjord	1997	3,200	100	0.15
Nordkapp	1999	6,826	212	0.07
Oslofjord	2000	7,252	134	0.25
FrΦya	2000	5,305	164	0.11
Ibestad	2000	3,398	112	0.11
BΦmlafjord	2000	7,900	260	0.70

(2) 세이칸 터널

세이칸 터널은 1988년 3월 13일에 개통되어 일본 아오모리 현 히가시쓰가루 군 이마베쓰 정과 홋카이도 가미이소 군 시리우치 정을 연결하는 해저 터널이다. 총 연장 53.8km의 세이칸 터널은 일부 TBM 공법이나 NATM 공법으로 시공된 곳도 있다.

이 지역의 지질상황은 아주 복잡하고, 배수터널로 설계할 경우 유입량 또한 만만치 않은 것으로 판단되었다. 따라서, 비교적 안정된 지층까지 이르고자 지표하 100m 정

도에 터널이 설치되는 것으로 계획되었으며, 수위선은 지표면으로부터 140m까지 이르는 악조건인 것으로 알려져 있다. 세이칸 터널의 지하수 유입수량 기준은 본선 터널의 경우 2.0㎥/min/km, 서비스 터널은 1.0㎥/min/km 이며, 실측 유입량은 0.74㎥/min/km로 보고되고 있다.[6)]

(3) Channel 터널 (영국-프랑스 해저터널)

영국과 프랑스를 연결하는 해저 터널로 영국 해협의 가장 좁은 부분인 도버 해협의 지하를 통해 영국의 포크스턴(Folkestone)과 프랑스의 칼레(Calais)를 연결하며 총 3개의 터널로 이루어져 있다.

터널연장은 총 51km, 터널 수심은 55m이며 해저면 토피고는 40m이다. 이 터널은 영국 쪽은 배수형으로, 프랑스 쪽은 비배수형으로 설계되었으며, 지하수 유입수량 기준은 약 0.4㎥/min/km로 적용되었다. 실측 누수량은 본선 터널의 경우 0.06㎥/min/km, 서비스 터널은 0.04㎥/min/km로 조사되었다.[6)]

(4) Xiang'an (중국 해저터널)

Xiang'an 터널은 3차로의 양방향 도로터널로써 총연장 8.695km, 최대수심 65m로 건설 되었으며 지하수 유입수량의 설계기준은 굴착시 2.87~3.44㎥/min/km, 차수 그라우팅 및 철근 콘크리트, 숏크리트 적용시 0.29~0.57㎥/min/km로 설계되었다.

숏크리트 시공 후 주변 암반에 차수 그라우팅을 실시하고, 불량한 암반에 위치한 라이닝을 완전 폐합하여 배수를 적용할 경우 지하수 유입량은 0.09~0.12㎥/min/km 정도로 저감이 가능한 것으로 조사되었다. 라이닝의 방배수를 위한 목표 지하수 유입량은 비배수 터널의 경우에는 0.035㎥/min/km 이며, 배수터널의 누수율은 0.069~0.694㎥/min/km이다.[6)]

2. 방수방법 조사 및 효율성 분석

가. 세그먼트 접합면 방수

쉴드터널의 누수는 터널 시공 및 운용시 유지관리에 여러 가지 문제를 발생시킨다. 쉴드터널의 누수의 원인은 환경조건, 세그먼트 구조, 지수재, 시공 상황 등이 있으며, 그 중 세그먼트 접합 틈새에서의 누수가 지배적인 원인이 되고 있다.

세그먼트 접합면 방수공은 세그먼트 지반측에 접착되는 씰재, 연결 볼트에 하는 링 팩킹재, 주입공에 하는 그라우트용 팩킹재 등으로 이루어지며 이중 씰재가 가장 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 씰재가 갖추어야 하는 기본적 성질은 아래와 같은 특성을 가져야 한다.[7)]

- 쉴드잭의 반복추력, 세그먼트의 변형에 따라 수밀성을 잃지 않을 것.
- 쉴드잭의 추력 및 볼트의 조이는 힘에 견딜 것.
- 세그먼트의 조립 정밀도에 악영향을 미치지 않을 것.
- 씰재 상호간은 물론 세그먼트에 대하여 충분한 접창성을 가질 것.
- 내후성, 내약품성이 뛰어날 것.
- 작업성이 좋고, 볼트를 조인상태로 균일성이 풍부할 것

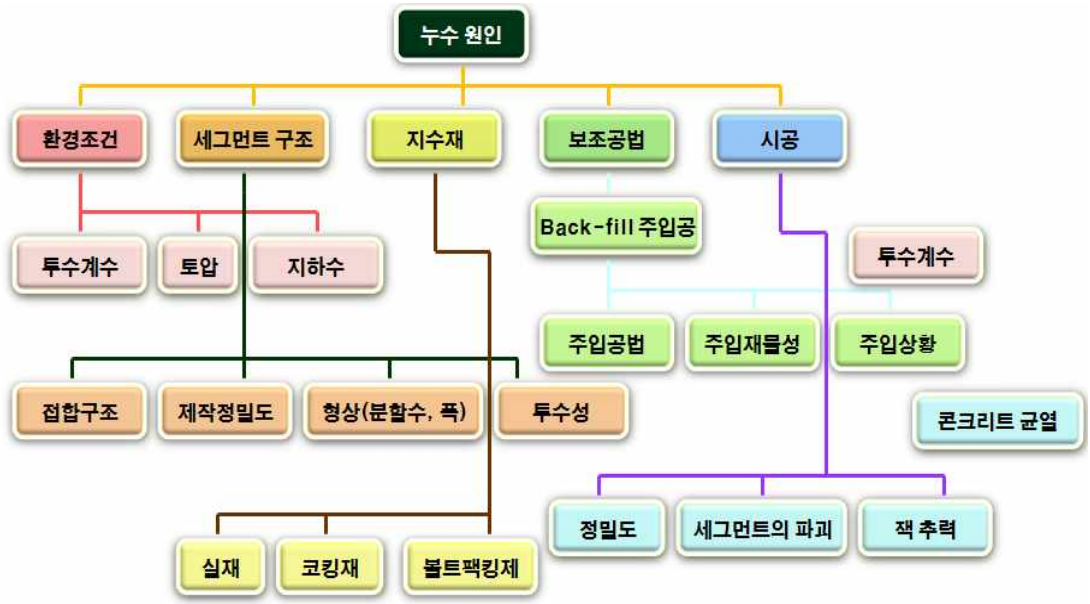


그림 2.2.1 쉴드터널 누수 발생 요인

쉴드터널의 각종 방수공 중 세그먼트 접합면에서의 방수공이 가장 중요하고, 신뢰성이 높은 방수공이어야 한다. 이 접합부 방수에 빼놓을 수 없는 씰재의 재료특성으로는 점착성을 이용하는 것, 탄성반발력을 이용하는 것, 수팽창에 의한 팽창압을 이용하는 것으로 나눌 수 있다.

씰재의 점착성을 이용한 방수는 접합틈새를 재료가 갖는 점착성과 씰재의 체적으로 막아서 방수를 하는 원리이며, 가격이 싸기 때문에 과거에 많이 사용되었다. 그러나 이 씰재는 탄성력이 부족하기 때문에 쉴드가 추진할 때의 잭 추력에 대하여 저항력이 없고, 그림 2.3.2에서 보이는 것과 같이 씰홈에서 보호되고 있지 않은 부분은 엷게 늘여져 소성변형을 일으킨다. 이 소성부분의 지수효과가 극단적으로 감소하는 결점을 갖고 있으므로, 비교적 높은 수압이 작용하는 경우에는 사용하지 않는다. 또한 소성화하여 씰홈에서 삐어져 나온 재료가 접합면의 마찰계수를 저하시킨다.[8] 특히 Key 세그먼트에서는 접합볼트에 직접 작용하는 전단력이 증가하여 Key 세그먼트의 탈락을 생기게 하는 원인으로 발전할 가능성이 있음이 현장에서 지적되고 있다. 그리고 이 씰재의 특성인 점착성 때문에 세그먼트의 조립 시 씰홈에서 빠져나오거나 탈락도 많이 발생하게 된다. 이와 같은 이유로 요즘은 많이 사용되지 않는 추세이다.

탄성반발력을 이용하는 씰재는 부칠고무나 크로로프렌 등의 합성고무, 우레틴고무 등의 합성수지 등이 있으며, 이러한 씰재는 침매터널의 접합부에도 사용되고 있다.[9] 일본에서는 경제성이나 내열성에 뛰어난 EPDM(에치펜, 프리르렌, 디엔, 모노아)를 많이 사용하고 있으며, 그림 2.2.3과 같은 형상을 가지고 있다. 이들의 고무를 단독으로 사용하지 않고 심부에 크로로프렌고무 등과 같이 탄력성이 많은 재료를 삽입한 부칠고무를 사용하거나, 고무중에 쐐망의 매쉬를 넣은 것 등의 복합계 씰재도 사용되고 있다. 그러나, 씰재가 두껍고, 세그먼트 조립시에 탈락 등이 생길 경우가 있으며, 조립정밀도나 시공성이 좋지 않은 단점이 있다.

수팽창을 이용하는 씰재로는 흡수성 프리마 등을 크로로프렌고무나 우레탄고무에 혼합한 것이 일반적이다. 수팽창 씰재는 처음에는 흡수재로서 유기계의 재료를 사용하였으나, 내구성에 문제가 있어, 현재는 흡수성을 갖는 포리머가 많이 사용된다. 이 수팽창성의 씰재는 물과의 반응에 의해 자기팽창을 일으키고, 이 체적증가는 씰홈의 용적에 의해 구속되며 그림 2.2.4 표시한 것과 같은 반발력이 발생한다. 이 반발력에 의해 수압에 저항하여 물의 침투를 막게 된다. 따라서 수팽창성의 씰재는 종래의 씰재보다 두께가 엷게 되어 조립 정밀도나 시공에 지장을 주지 않는 이점을 가지고 있다. 수팽창성의 씰재는 다른 씰재보다 비교적 가격은 비싸나, 이것을 적용한 터널에서의 누수량은 매우 적고, 방수효과도 좋은 것으로 보고되고 있다.

수팽창 씰재는 그 팽창압에 의해 지수가 되는 것이 특징이며, 적당한 강성이나 경

도를 갖도록 하는것도 가능하므로 그 탄성반발력도 충분하게 기대된다. 따라서 어느 정도의 수압이나 틈까지는 탄성 반발력으로 대응하고, 그것을 넘는 것에 대하여는 팽창압으로 대응하는 등 세그먼트의 설계조건이나 시공조건 등에 따라 씰재를 설계할 수 있다. 이 때문에 씰홈의 용적에 대한 씰재의 체적의 비가 적게 되며 조립시의 탈락 등에 대해 유리하다.[8)]

표 2.2.7은 최근에 사용되고 있는 씰재에 의한 세그먼트 접합면의 방수 방법을 보여주고 있다.

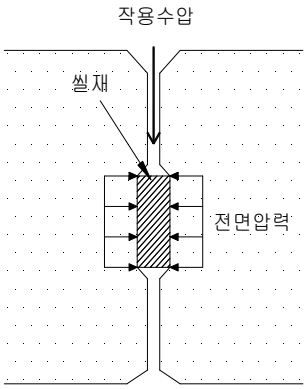


그림 2.2.2 씰재의 소성변형

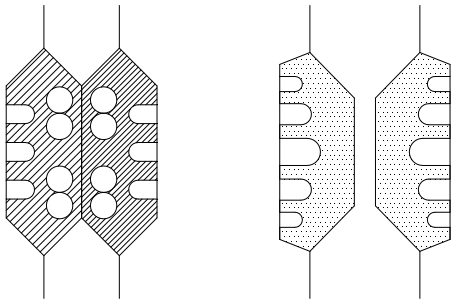


그림 2.2.3 씰재 형상(예)

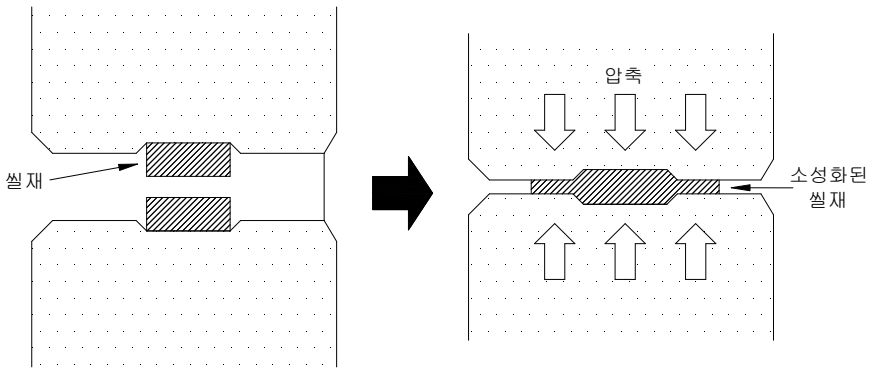
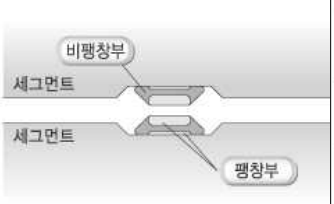
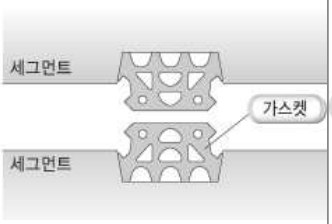
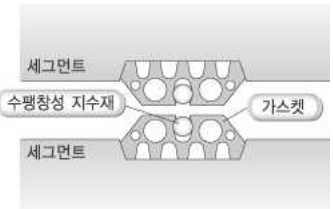


그림 2.2.4 씰재에 의한 지수조건

표 2.2.7 씰재에 의한 방수[7)]

구분	복합형 수팽창	개스킷	수팽창 복합형 개스킷
형상			
지수성	·고무반발로 지수압 확보	·고무반발로 지수압 확보	·수팽창에 의해 지수 가능
조립성	·돌출량이 개스킷에 비해 적어 조립이 용이	·이음면에 돌출량이 많아 조립시 주의해야 함	·이음면에 돌출량이 다른 개스킷에 비해 적어 조립이 용이
실 적	·최근 RC세그먼트에 많이 적용	·유럽에 실적이 많음	·실적이 적음
선정 사유	·조립의 정밀도, 시공성의 측면에서 유리한 복합형 수팽창성 씰재(3열) 적용		

나. 씰재에 의한 방수시 고려사항

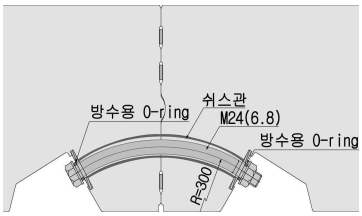
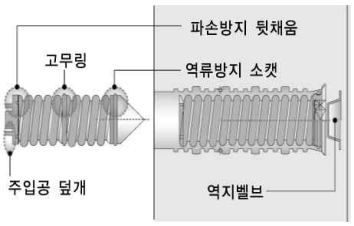
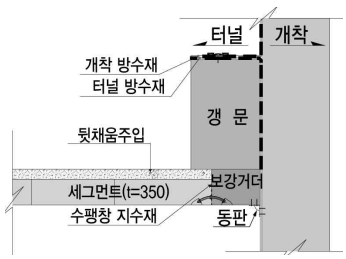
씰재에 의한 지수는 시간이 경과함에 따라 씰재의 특성 상실에 따른 누수가 발생할 우려가 많다. 이는 씰재의 압축으로 발현하는 접면응력이 시간이 경과하면서 저하되기 때문이다. 그러므로 씰재의 접면응력은 장기적으로도 설계수압이상이 되어야 한다. 씰재가 갖추어야 할 조건은 다음과 같다.

- 씰재가 압축되면 발생하는 반발력이 설계수압보다 클 것
- 씰재의 접면응력은 시간의 경과에 따라 응력완화 및 열화에 의해 저하된다. 따라서 접면응력은 장기적으로도 설계수압보다 적지 않아야 한다.

대구경의 쉴드에서는 세그먼트 연결볼트공의 틈을 통하여 누수가 발생 할 수 있다. 이러한 누수방지를 위하여 볼트와 볼트공 사이에 그라메트나 씰링이라 불리는 합성고무나 합성수지제의 팩킹을 삽입하고 이것을 와샤로 둘러놓는 것으로 방수를 하는 것이 볼트공에서의 일반적인 방법이다. 이음볼트공에서의 방수는 정확한 조립상태를 유지하여야 하고, 볼트 체결력의 저하나 볼트공 주변의 손상이 발생하지 않도록 주의하여야 한다. 또, 콘크리트 세그먼트에서 뒤채움 주입공을 설치한 부분은 지수면에서 취

약하게 된다. 뒤채움주입후 주입공을 폐쇄하여도 주입공 외주벽과 콘크리트사이에 분리면이 발생하고 이틈으로 누수가 발생하므로 고무로 된 링(O링)을 끼워 지수를 한다. 근래에는 이 고무링에도 팽창성의 것을 사용하기도 한다. 기타, 세그먼트 접합면에 설치하는 방수공으로, 콘크리트계 세그먼트나 덕타일 세그먼트에 코팅을 하기도 하고, 뒤채움 주입공에서 침투하는 물을 지수할 목적으로 그라우트용 팩킹재로 사용하기도 한다. 표 2.2.8은 세그먼트 접합면의 기타 방수공을 보여주고 있다.

표 2.2.8 기타 방수공[7)]

볼트공 방수	뒤채움 주입구 방수	개착구조물 연결부
		
·연결부 링패킹을 통한 볼트공 누수 및 볼트 부식 방지 ·볼트 머리 및 나사 위치 링패킹으로 내부로의 누수 방지	·역류 방지 밸브사용 ·주입구 커버사용으로 미주입시 완전 밀폐	·터널방수재, 개착방수재 및 수팽창 지수재등을 적용하여 연결부 누수 방지

3. 누수발생 원인 분석 및 유입량 조사

가. 원인 분석

쉴드터널은 지하수위에 구축되는 경우가 많고 터널 내의 누수 발생은 터널 유지관리에 여러 가지 문제를 발생시키기 때문에, 세그먼트 조립 후 누수 방지를 위한 방수공과 뒤채움 주입은 쉴드터널 공법에서 매우 중요한 공정중 하나이다. 그러나 쉴드 세그먼트는 링 형태로 조립되기 때문에 누수 방지의 대상이 되는 이음이나 볼트 구멍이 대단히 많고, 쉴드잭의 추력에 의한 되풀이 하중이나 토압의 경시적 변화에 의해 이음면이 신축되는 경우가 발생하며, 세그먼트 운반시나 조립시에 이물질이나 묻거나 세그먼트 면이 손상되어 완전한 비배수터널로서의 누수 방지가 매우 어려운 상황이다. 이런 문제로 인해 실제 건설현장에서는 누수 방지가 가장 큰 문제로 부각되고 있고 효과적인 해결 방안을 찾고자 노력하고 있지만, 이렇다할만한 해결책을 얻지 못한 채 어려움을 겪고 있는 상황이다.

특히, 쉴드터널에서 발생되는 누수량 전체의 60% 이상은 볼트 체결부에서 발생되고 있고, 볼트 체결부에 대한 방수공이 링상의 패킹제를 볼트 와셔 및 구멍 사이에 설치하는 것에 불과하기 때문에, 패킹제의 장기적인 마모, 장기적인 누수로 인한 볼트의 부피팽창, 볼트 구멍에서의 크랙 발생, 볼트 연결의 갭(Gap) 및 오프셋(Offset) 등으로 인해 계속적인 누수발생은 불가피하다.[10)]

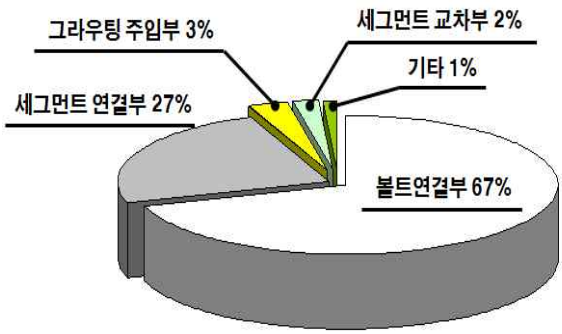


그림 2.2.5 쉴드터널 발생 누수량 분포

(1) 세그먼트 구조에 의한 누수

(가) 볼트 체결부 누수

쉴드터널에서 발생되는 누수량 전체의 60% 이상은 볼트 체결부에서 발생되고 있다. 세그먼트 연결을 위해 구조상 체결부가 밖으로 노출되어 있고 체결부의 공간도 커서 이를 통한 누수발생이 일반적이다. 특히 경사볼트의 경우 수팽창 지수재 사이를 통과하여 연결되므로 볼트 자체가 통수경로가 되며, 외부로 노출된 볼트의 녹 발생 및 볼트 홀을 통한 누수가 발생한다.[10] 또한 볼트 삽입부분에 발생하는 Crack으로 인한 누수도 발생할 수 있다. 그림 2.2.6은 세그먼트 연결 볼트 부분으로 발생하는 누수의 모습을 보여준다.

(나) 세그먼트 조립 단차에 따른 누수

세그먼트는 5개 또는 7개로 공장에서 제작, 운반하여 현장 터널 내부에서 볼트를 이용하여 조립하고 있으나 중량이 무겁고 기계로 조립함에 따라 세그먼트간 단차가 발생한다. 또한 가장 상단에 설치되는 세그먼트는 상재하중, 토압 및 자체 중량으로 인하여 처짐 및 단차가 발생하여 세그먼트 간 완전한 진원이 형성되지 않아 상단에 위치한 세그먼트를 통해 지하수가 유입되는 경우도 있다. 그림 2.2.7은 세그먼트 단차를 통해 지하수가 유입되는 모습을 보여주고 있다.



그림 2.2.6 세그먼트 볼트 부분 누수



그림 2.2.7 세그먼트간 단차를 통한 지하수 유입

(다) 기타 구조적인 누수 원인

쉴드 터널은 터널내부로 누수되는 지하수의 유입을 방지하기 위하여 세그먼트와 터널 굴진단면 사이를 그라우팅 처리를 하고 있으나 그라우팅이 밀실하게 채워지지 않아 미세하게 누수되는 수량은 불가피하게 발생하고 있으며 우레탄을 이용하여 유입량을 차단하고 있는 실정이다.

터널 내부의 세그먼트는 전 면적이 외력(토압, 수압, 상재 하중 등)을 지탱하도록 설계되어 있으나 세그먼트 어느 한 부분이 취약해질 경우 모든 외력은 취약부에 집중되어 터널이 손상되고 이 부분을 통한 누수가 발생할 수 있다. 또한, 세그먼트의 취약부로 지하수가 집중될 경우 이에 대한 보수를 위해 많은 시간과 경비가 추가로 소요된다.

(2) 지수재에 의한 누수

최근에는 수팽창 지수재와 개스킷 지수재가 합성된 복합형을 사용하고 있는데, 시공시 개스킷의 경우 내구성은 우수하나 Key 세그먼트 조립 시 고무의 집중현상으로 개스킷이 이탈되어 벗겨지는 문제가 발생한다. 또한, 수팽창지수재의 비효율적인 팽창(폭과 높이 방향으로 동시 팽창)으로 인해 지수재가 바깥으로 노출되어 유로를 형성하는 문제점도 발생한다.[12] 이러한 경우 지수재에 의한 원활한 방수를 기대하기 어렵다. 그림 2.2.8은 시공 중에 지수재가 바깥으로 노출되는 모습을 보여주고 있다.

세그먼트 주입구의 경우 세그멘트 뒤채움 주입구를 따라 유로가 형성되어 이부분으로 누수가 발생 한다. 그라우팅제 주입 후 주입홀 내부가 밀실하게 채워지지 않아 발생하는 부분도 있으며 주입구 마개 고무 패킹재가 뒤채움재와의 화학반응 등의 이유로 시간이 경과함에 따라 경화되어 주입구 입구를 밀실하게 압착하지 못하여 발생하는 경우도 있다.

기타 시공에 의해 발생하는 누수 원인에는 미숙련된 기능공에 의한 조립 정밀성 저하, 세그먼트 조립시의 취급 부주의 등으로 인한 크랙 및 균열 발생, 볼트 조임 과다로 인한 콘크리트 균열발생에 따른 누수, 터널의 사행에 따른 누수 등이 있다.



그림 2.2.8 세그먼트 지수재 탈락



그림 2.2.9 그라우팅 주입구를 통한 누수

(3) 세그먼트 체결부 누수 사례

본 하저터널은 단선 철도터널로 직경 7.1m, 세그먼트 두께는 0.3m로 설계되었으며 2002년에 시공되었다. 쉴드 공법 중 이수가압식을 적용하였으며 중앙 배수식 터널로 세그먼트의 강도는 45MPa이다. 본 터널은 국내 최초의 하저 쉴드 터널로서 시공되었는데, 수영강 하저를 통과하는 터널로서 수심 4m, 토피 9.4m로 모래,실트, 점토/자갈층이 상부에 있으며 하부에는 풍화암이 존재한다.

그림 2.2.10은 손상 현황을 보여주고 있다. 터널상부에 수영강이 흐르고 있어 누수개소가 많고, 세그먼트 이음부와 볼트부, 뒤채움재 주입구에서 누수가 다수 발생하였고, 터널 입·출구부에서 세그먼트 이음부, 볼트부 등의 누수들이 많이 발생하였다. 특히, 세그먼트 볼트부 누수는 약액주입 등의 지수작업이 어려워 문제가 되고 있다.

터널 볼트부의 손상 원인으로는 터널 상부에 수영강이 흐르고 있고 시공시 쉴드터널의 배면에 뒤채움재를 충전하였으나 전단면 균일하게 충전되지 않아 배변에 공동이 존재해서 지하수에 노출되는 경우가 있고, 쉴드터널의 특성상 세그먼트 이음부, 볼트부 등 취약개소가 다수 존재하며, 특히 볼트부는 세그먼트 배면 공동에 침투된 지하수가 터널내부로 들어오는 통로역할을 하기 때문인 것으로 조사되었다.



그림 2.2.10 쉴드터널 체결부 누수 사례

나. 쉴드터널 지하수 유입량 조사

쉴드터널의 누수 실태 파악을 위해 운용중인 터널 현장에서 발생하는 세 가지 case의 지하수 유입 현황과 현재 시공중인 쉴드터널 현장의 지하수 유입 현황에 대해 조사하였다(조사 대상이 된 운용 및 시공 중인 터널은 모두 유입되는 지하수의 양이 설계 기준에 비해 현저히 낮으며, 설계조건에 대해서도 지하수의 수압에 대한 소정의 안전율 이상의 안전성을 확보하고 있으나 협력기관의 요청에 의해 현장명은 별도로 기재하지 않기로 함.).

표 2.2.9는 쉴드터널 공법으로 시공 중인 터널의 수직구 유량 일지를 나타낸 것이다. 그리고 그림 2.2.11은 표 2.2.9를 바탕으로 월별 강수량 합계와 월별 평균 지하수 유입량을 계산하여 나타낸 것이다. 강수량의 월 합계와 월별 평균 지하수 유입량의 추세가 일치하지 않는 모습을 보이며, 이를 통해 강수량과 쉴드 터널 시공 중의 지하수 유입량의 상관관계는 거의 없는 것으로 판단된다.

표 2.2.9에서 일일 지하수 유입량이 전날과 다음 날의 차이가 현저하며 시간이 지남에 따라 부드럽게 연결되는 고른 분포곡선을 이루는데, 이를 통해 굴착면의 지반 성질 및 지하수의 분포가 지하수 유입량과 더 관계가 있음을 유추해 볼 수 있다.

표 2.2.9 시공 중인 쉴드터널 수직구 유량 일지

측정일		월평균강수량 (㎜)	월평균기온 (℃)	평균측정유량 (㎥/day/km)
2011년	4월	15	10.2	1,596
	5월	21.5	16.8	1,605
	6월	27.3	20.6	1,738
	7월	64.3	23.7	2,060
	8월	15.1	24.3	1,875
	9월	6.4	19.6	1,725
	10월	5.9	12.0	1,708
	11월	7.1	9.1	1,774
	12월	1.3	-2.5	1,759
2012년	1월	1.8	-4.7	1,722
	2월	0.1	-3.4	1,982
	3월	4.1	4.1	2,422

표 2.2.10은 운용 중인 쉴드터널 3개소의 집수정에서 측정한 지하수 유입량을 나타낸 것이다. 조사 현장의 단위 지하수 유입량은 0.042, 0.107, 0.052m^3/min/km으로 모두 허용 유입수량인 3.0m^3/min/km에 비해 충분한 안전율을 가지고 있는 것으로 판단된다.

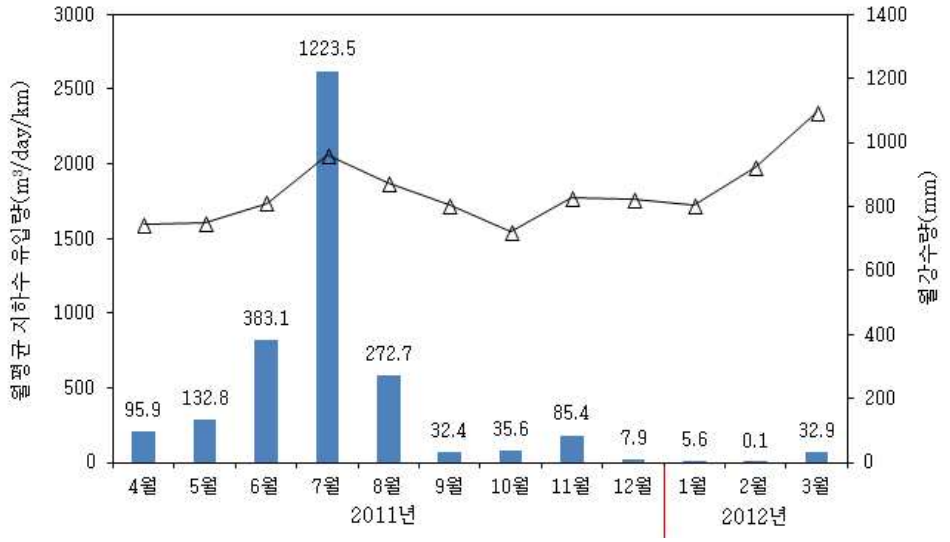


그림 2.2.11 시공 중인 쉴드터널의 월강수량 대비 월평균 지하수 유입량

표 2.2.10 운용 중인 쉴드터널 지하수 유입량

현장명	연장(km)	굴착직경(m)	평균 지하수유입량 (㎥/day)	단위 지하수유입량 (㎥/min/km)
001터널	1.67	3.85	100	0.042
002터널	2.17	5.0	333	0.107
003터널	2.04	3.5	153	0.052

소결론

국내 지역별 터널과 국외 터널에 대하여 터널 내 유입수량에 대한 조사를 수행하고 쉴드터널에서 누수를 방지하기 위한 방수대책에 대한 분석을 수행하였다.

(1) 국내 서울, 부산, 대구, 인천, 광주 지역의 지하철터널의 유입수량과 국외 노르웨이 터널, 세이칸 터널, Channel 터널, Xiang'an 터널의 유입수량을 조사한 결과 모두 허용수량을 만족하는 것으로 나타났다.

(2) 쉴드터널의 방수대책으로는 세그먼트끼리의 접합면에 부착하는 씰재가 가장 중요한 역할을 하며, 방수성능을 향상하기 위해서는 씰재의 압축 시 반발력, 부착 후 시간경과에 따른 응력완화 및 열화에 대한 충분한 검토가 있어야한다.

(3) 쉴드터널에서 발생하는 누수량의 조사결과 볼트연결부에서 67%, 세그먼트 연결부에서 27%로 전체 누수량의 대부분을 차지한다. 볼트체결부에서의 누수는 삽입부의 크랙 및 볼트의 녹 등으로 인하여 발생하며, 세그먼트 연결부의 누수는 세그먼트간 단차로 인해, 지수재 틈으로 누수가 발생하므로 체결방식의 개선을 통해 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 발생하는 누수에 대하여 3개 현장에 대해 조사한 결과 모두 허용 유입수량에 비해 충분한 안전율을 가진 것으로 판단된다. 또한 쉴드터널의 누수량은 강수량보다는 지반의 성질 및 지하수의 분포가 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

제 3 절 수팽창 지수재 평가를 통한 배수설계 필요성 검증

1. 국내외 수팽창 지수재 조사

지수재는 재료의 성질에 따라 재료의 점착성을 이용하는 것, 탄성 반발력을 이용하는 것, 수팽창에 의한 팽창 압을 이용하는 방법 등이 있으며, 최근에는 방수효과가 가장 큰 수팽창형을 널리 사용하고 있다. 수팽창 지수재는 흡수성 폴리머 등을 클로로프렌 고무나 우레탄고무에 혼합한 것이 일반적이다. 수팽창 씰재는 처음에는 흡수재로서 유기계의 재료를 사용하였으나, 내구성에 문제가 있어, 현재는 흡수성을 갖는 포리머가 많이 사용된다. 수팽창성의 물질은 물과의 반응에 의해 자기팽창을 일으키고, 이 체적증가는 씰홈의 용적에 의해 구속되어 반발력이 발생한다. 이 반발력에 의해 수압에 저항하여 물의 침투를 방지한다. 따라서 수팽창 지수재는 종래의 씰재보다 두께가 엷게 되어 조립 정밀도나 시공에 지장을 주지 않는 이점을 가지고 있다. 수팽창 지수재는 다른 지수재보다 가격은 비교적 비싸지만, 이것을 적용한 터널에서의 누수량은 매우 적고, 방수효과도 좋은 것으로 보고되고 있다.[1)]

수팽창 지수재는 팽창압에 의해 지수가 되는 것이 특징이며, 적당한 강성이나 경도를 갖도록 하는것도 가능하므로 그 탄성반발력도 충분히 기대할 수 있다. 따라서 어느 정도의 수압이나 틈까지는 탄성반발력으로 대응하고, 그것을 넘는것에 대하여는 팽창압으로 대응하는 등 세그먼트의 설계조건이나 시공조건 등에 따라 씰재를 설계할 수 있다. 이 때문에 씰홈의 용적에 대한 씰재의 체적의 비가 적게 되며 조립시의 탈락 등에 대하여 유리하다.[2)]

수팽창 지수재는 팽창시점 및 특성에 따라 표준형, 초기 팽창지연형, 길이 팽창억제형, 해수 팽창형 등이 있다. 표준형은 H형강, 관통 파이프형, 콘크리트 시공조인트 공동구, BOX연결부, 수도관, 가스관, 익스펜션 조인트 등에 일반적으로 널리 사용되고 있는 보급형이다. 초기 팽창 지연형은 우기시 또는 시공 조인트 부위의 지하수 침수가 예상될 때 사용되며, 길이팽창 억제형은 스테인리스 망이 삽입되어 있어서 수팽창 시 길이팽창이 억제 함으로써 콘크리트의 이탈현상을 방지하는 목적으로 쓰인다. 한편, 항만, 발전소, 조선소 등의 구조물에서 해수로 인한 누수를 차단하기 위해 사용되는 해수 팽창형 등이 있다.[3)]

가. 수팽창성 고무 지수재

수팽창성고무지수재는 토목, 건축 분야의 구조물 등에 필연적으로 발생하는 침수 누수를 완벽하게 방지하고 반영구적으로 지수성능을 유지하기 위해 개발 된 제품으로 물, 습기와 접촉하면 자기체적의 수배까지 팽창하여 6kfg/cm^2 이상의 내수압을 유지하며 빈 공간을 채워줌으로서 지하구조물 접합부 전반에 지수효과를 발휘한다.[4)]

(1) 특성

① CR(클로로프렌 고무)을 주성분으로 하였으므로 내구성, 내후성, 내약품성이 우수하며 일반고무와 동일한 탄력성을 가지고 있어 압축변형하여도 쉽게 변형이 가능하며, 구조물의 파손 및 크랙현상을 방지한다.

② 특수친수성 고분자를 사용하여 물과 접촉하면 자기체적의 400% 이상 팽창하여 빈 공간을 채움으로서 종래의 동지수판, 고무지수판, P.V.C 지수판 등에서는 발휘할 수 없는 성능을 발휘한다.

③ CON′C 표면에 대한 접척상 및 지수재 상호간의 접착성, 밀착성이 우수하여 시공이 간편하며, 경량이므로 사용자의 사용여건에 따라 설치가 가능하여 다른 종류의 지수판에 비해 시공일위대가가 저렴하다.

④ 반복팽창후에는 원형을 그대로 유지하므로 벤토나이트 계열의 지수재와는 달리 원형이 유실될 염려가 없다.

⑤ 유해물질을 전혀 사용하지 않으므로 인체에 안전하고 환경오염 문제도 없다.

(2) 물리적 성질

표 2.3.1 수팽창성 고무지수재 물리적 특성 기준[5)]

시험 항목		단위	규격치	시험조건
경도(HS)		-	55±10	KS M 6815 상온물, 15일 후
인장강도		kgf/cm2(MPa)	20이상(1.96)	
신장율		%	350이상	
노화시험	인장강도 변화율	%	±10이하	
	신장율 변화율	%	±10이하	
	중량 변화율	%	±10이하	
체적 변화율		%	400이상	
팽창후 성상		-	이상없을것	

(3) 기능

① 내구성, 내후성, 내약품성이 우수함.

② 수질, 수온의 영향을 받지 않음.

③ 적당한 압축능력과 높은 복원성으로 지수(止水)기능이 뛰어남.

④ 운반, 취급이 용이하여 시공이 간편하며, 안정성이 뛰어남.

⑤ 부동침하로 생기는 누수, 침수를 자기체적 평창으로 지수(止水) 시킴..

⑥ 시공후 습기가 많은 곳에서는 습기를 흡수하므로, 지하구조물에서는 팽창상태를 영구히 지속함.

⑦ 반복팽창능력으로 영구히 지수 시킴.

(4) 용도

① 상 · 하수도 / 배수로, 맨홀, 후륨, 도관, 흄관, Box칼바트, Segement, 펌프장, 정수장, 하수처리장

② 철도, 도로 / Tunnel, Box칼바트, 지하철, 지하도

③ 전력, 통신 / DAM, Tunnel, Box칼바트, APT공동구

④ 하천, 항만 / 사방(砂防), DAM, 제방

⑤ 지하구조물 / H강, 관통로, 소방수로

(5) 시공 방법

1) 표면처리

① EASY-SEAL을 부착할 표면의 흙, 모래, 나무조각, 유분 등의 오염물질을 깨끗이 제거한다.

② 요철이 심한 경우에는 몰탈시공이나 급결시멘트로 시공처리하여 평활하게 한

2) 부착

① 콘크리트 못을 사용하는 경우에는 25~30㎝간격으로 못에 박킹을 끼우고 고정시킨다.

② 접착제를 사용하는 경우에는 EASY-SEAL이 밀착되도록 균일하게 도포한 후 공간이 생기지 않도록 밀착 시킨다.

③ EASY-SEAL을 겹쳐서 사용하는 경우에는 그림과 같이 5~7㎝정도 중첩하여 부착한다.

3) 시공시 주의사항

① 콘크리트 타설시 잔카, Air-pockt가 생기지 않도록 Vibrator를 사용하여 균일하게 타설

② 콘크리트 타설전에 EASY-SEAL을 비에 젖게 하거나 습기가 있는 곳에 보관하지 말 것.

나. 벤토나이트 수팽창 지수재

벤토나이트 수팽창 지수재는 물과 접촉하면 체적의 16배에 달하는 고팽창성을 지닌 소디움 벤토나이트를 압축 성형하여 그 사면을 그물망사(부직포)를 부착하여 일정치수로 가공한 제품으로서, 유연성과 경직성을 알맞게 조합하여 토목, 건축공사 등에 필연적으로 발생하는 JOINT 부위의 누수현상을 방지하기 위한 제품이다.[6)]

(1) 특성

① 독특한 수화팽창 능력 : 고팽창성 천연산 벤토나이트만을 재료로 하여 물과 접촉하면 일정한 한도까지 팽창

② 자체보수(Self-Sealing)효과 : 수화팽창작용에 의해 1차적인 단순지수 외에도 구체가 가진 균열 및 공극까지도 2차적인 Sealing효과를 발휘하며 또한, 어떤 기후나

현장조건에서도 응용시공이 가능

③ 적당한 압축능력과 높은 복원성으로 지수기능이 뛰어남.

④ 운반, 취급이 용이하여 시공이 간편하며, 안정성이 뛰어남.

(2) 물리적 성질

표 2.3.2 벤토나이트 수팽창 지수재 물리적 특성 기준

시험항목	단위	기준치	시험방법
인장하중	kgf	30이상	KSM 6518
노화후 인장하중	kgf	30이상	
경도	Hs	80이상	
부피팽창율	%	400이상	의뢰자 제공

※ 벤토나이트와 부틸고무를 합성한 벤토나이트 고무지수재는 일반 수팽창지수재의 특성과 벤토나이트 지수재의 특성을 복합적으로 나타내며, 또한 자착력을 갖추고 있어 시공성이 우수하다.

(3) 규격

표 2.3.3 벤토나이트 수팽창 지수재 물리적 규격

	구분	형상	너비	두께	1R/L 길이	포장 단위
제품모습	RX형 (H/S-1)	고무+벤토나이트 	주문	-	-	-
	RX형 (H/S-1)	천연산 소디움 벤토나이트 	25mm	15mm	5m	40m/ BOX

(4) 시공 방법

① 1 차 콘크리트 타설후 지수재를 설치할 부위에 콘크리트가 굳기전 쇠손으로 미리 평탄작업 수행.

② 지수재의 위치는 가급적 콘크리트의 중앙으로 하되 여건상 그렇지 못할 경우 가능한 바깥쪽으로 설치.

③ 지수재를 이어서 시공시에는 위에다 겹치게 하지 않고 맞대어 시공.

④ 설치된 지수재의 이동을 방지하기 위해 손으로 누르며 30㎝ 간격으로 못으로 고정시키되, 시공면 상태가 양호하면 간격을 30㎝ 이상으로 하여도 무방함.

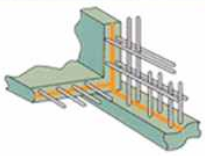
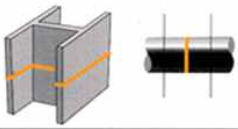
시공 방법	사 용 개 략 도	적 용 법(mm)
콘크리트 시공단면 Construction Joint		20×10 25×10 25×15
형강, 관통부위 Arround H Beam Pipe		20×15

그림 2.3.1 벤토나이트 수팽창 지수재 시공방법

다. 수팽창 실란트지수재

일액형 우레탄 계 실란트 지수재로 코킹형 소포장으로 시공이 간단하다. 일반 지수재로 시공이 어려운 부위에 쉽게 시공 할 수 있도록, 실란트 형태로 생산되어져, H 형강의 둘레지수, 슬라브 관통과부, 슬러리 월 공사의 컷빔부위등 고르지 않은 면에도 쉽게 시공가능하며, 50% 내외의 팽창율로 완벽한 지수효과를 가진다.

(1) 특성

① 우수한 작업성 : 일액형으로써 작업성이 우수
② 완벽한 지수성 : 물에 접촉시 50%이상 팽창하여 완전지수를 발휘
③ 강력한 접착성 : 곤크리트, 금속 등에 우수한 접착 기밀성을 유지함
④ 간편한 시공성 : 습기경화형으로써 습윤면에도 시공이 가능

(2) 사양

① 재질 : 특수 폴리우레탄 고무계
② 포장 : 320ml Cartridge, 25pcs/BOX
③ 팽창률 곡선

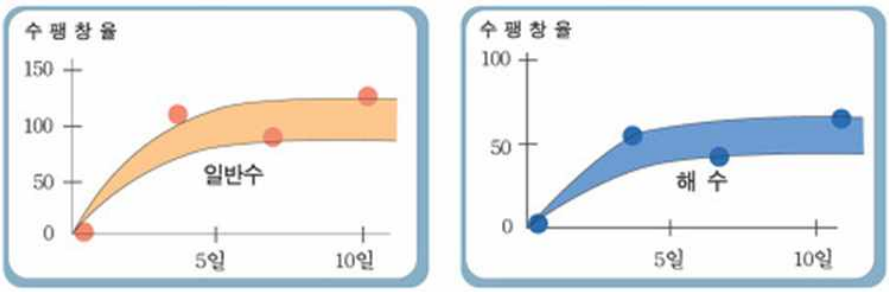


그림 2.3.2 수팽창 실란트 지수재 팽창률 곡선

-측정조건 : 7일간 경화 후 침적 부피 변화율 측정
-수온 : 20±5℃

(3) 시공 예



그림 2.3.3 수팽창 실란트 지수재 시공예

라. 가스킷

최근 들어 TBM 터널의 세그먼트 라이닝의 차수를 위해 터널 세그먼트 개스킷(TSG)을 적용하는 방법이 수행되고 있다. TSG는 각 세그먼트 접합면에 미리 성형된 홈에 설치하여 세그먼트가 볼트로 접합되는 즉시 캐스킷 라이닝 접합부를 폐합하여 방수의 역할을 하도록 하는데 기본 원리를 갖고 있다.[7)]

TSG는 일반적으로 탄성력이 강한 고무합성재료로 제작되는데 압축시 변형정도와 응력이완(stress relaxation)이 작다는 장점이 있어 지반거동으로 인해 작용하중이 완

화되더라도 세그먼트 사이의 밀실효과를 유지할 수 있다는 장점이 있다. 현재 시판되는 TSG는 일반 터널 혹은 수직구, 그리고 수로터널에 적용할 수 있으며 PC 콘크리트나 강재 혹은 주철 세그먼트 라이닝 등 라이닝 세그먼트 종류에 따라 다양한 제품이 나와 있다.

TSG 세그먼트 라이닝의 시공에 있어서 시공성 확보를 위해 그림 6.2와 같이 세그먼트 라이닝 사이에 일정한 틈과 변위를 허용하고 있다. 이러한 공간과 변위는 TSG의 수밀성을 저해하기 때문에 대상 터널에 있어서 허용할 수 있는 틈과 변위를 찾는 것이 중요하다. 따라서, 이를 위해 실험을 통해 주어진 최대 틈과 변위에 대해서 TSG가 밀실효과를 확보할 수 있는 최대압력을 고려하여 적절한 TSG를 선정하여야 한다.

TSG 설치를 위해 성형되는 홈의 크기는 세그먼트 폐합시 완전 밀폐되어야 하므로 이를 고려하여 TSG의 부피를 설정하여야 하며 이는 완전 차수를 위한 매우 중요한 조건이 된다. 한편, TSG가 적용된 세그먼트의 시공에서는 TSG에 충분한 접착제를 적용하여 충분한 밀실 효과를 확보하도록 되어 있으며 라이닝 조립시 편의상 TSG 표면에 윤활유를 적용한다.



그림 2.3.4 터널 세그먼트 개스킷

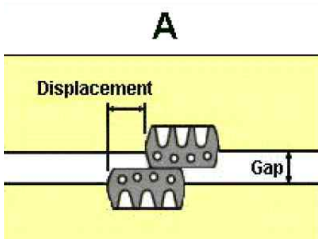


그림 2.3.5 설치 허용오차



그림 2.3.6 TSG 세그먼트 라이닝

2. 시방규정 및 재료 실험방법 조사

가. 시방규정

(1) 신공항 철도터널공사 지수재 시방규정

쉴드터널 구조물의 방수를 위하여 사용되는 Segment용 수팽창성 고무 지수재에 대하여 적용한다. 수팽창 지수재의 구조는 에테르형 폴리우레탄(Poly Urethan)과 비팽창 고무(EPDM 고무)로 되어 있는 복합재질의 이중구조이어야 한다. 또한, 수팽창 지수재의 팽창능력을 담당하는 팽창재는 에테르형 폴리우레탄 이어야 한다.

제품의 품질을 보장하기 위하여 국내외 실드터널 현장 사용 실적이 최소 10개 이상이어야 하며 공인기관으로부터 ISO품질경영시스템 인증을 획득한 업체에서 생산된 제품이어야 한다. 그리고 충분한 내후성, 내약품성, 내구성이 있어야 하며 세그먼트에 대하여 부착성이 있어야 한다. 수팽창 지수재의 표준형상 및 규격은 표 2.3.4와 같고, 시험 방법 및 시험값은 다음 표2.3.5에 의한다.

표 2.3.4 수팽창 지수재의 표준형상 및 규격(신공항 철도터널공사)

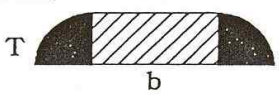
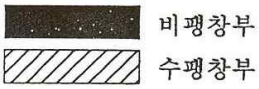
종 류	형 상	b	t	비 고
수팽창 지수재		25mm	5mm	

표 2.3.5 수팽창성 지수재의 시험방법 및 시험값(신공항 철도터널공사)

시 험 항 목	시 험 값	시 험 방 법	비 고
인장강도(kgf/cm2)	100이상	KS M 6518	비팽창부
신 율(%)	350이상	KS M 6518	
경 도(Hs)	55이상	KS M 6518	
수팽창성(%)	300～500	KS M 6518	수팽창부

(2) 철도 공사 수팽창 지수제 규정

설계도에 표시된 시공 이음부, 중앙파일 개구부 틈 이음부에는 KS M 6518 『가황 고무 물리 시험 방법(2001)』에 부합되는 수팽창성 고무성형 지수재를 설치하여야 하며, 재질은 특수성형 고무와 친수성 분자 포루마로 합성 제조되어 재질이 일정해야 한다. 지수재는 KS M 6518 『가황 고무 물리 시험 방법(2001)』에 따른 다음 값이 표 2.3.6에 나타난 값 이상이어야 한다.

고무탄성이 수팽창 상태에서도 충분히 유지되며 건조와 습도가 반복되어도 수팽창을 유지하며 내후성이 일반 천연고무 제품과 동등하여야 하며, 내수압을 5kg/cm^2 이상이어야 한다.

표 2.3.6 수팽창성 지수재의 시험값(철도공사, 2001)

특 성		허 용 치
경 도		45 이상
인 장 강 도		25이상
신 장 율		700 이상
노화시험	인장강도 변화율(%)	10 이하
	신장율 변화율(%)	10 이하
	경 도 변 화(H.S)	10 이하
체 적 변 화 율 (%)		500 이하

(3) 쉴드터널용 규정

쉴드터널용 수팽창 지수재의 시험방법과 시험값은 표 2.3.7 따른다. 가스캣 지수재의 경우 재질은 탄성고무(EPDM)으로 하며, 시험방법 및 기준값은 표 3.7.8에 따른다.

표 2.3.7 수팽창 지수재의 시험 항목과 기준

차례	시 험 항 목	시 험 방 법	시 험 값	비 고
1	인장강도(kgf/cm^2)	KS M 6518	25 이상	기본 물성시험
2	신 율(%)	KS M 6518	600 이상	기본 물성시험
3	경 도(Hs)	KS M 6518	33< Hs ≤ 55	기본 물성시험
4	팽창율(%)	KS M 6518	300 이상~500 이하	수중팽창율 시험 방법 적용
5	염수팽창률(%)	JIS K 6301	200 이상	염수비율 0.5, 1.0, 2.0, 3.0
6	외관검사	버니어 캘리퍼스사용	폭:20㎜ 평탄형: 4.0㎜	

* KS M 6518 『가황 고무 물리 시험 방법(2001)』

표 2.3.8 가스캣 지수재의 시험방법 및 기준값

차 례	시 험 항 목	시 험 방 법	기 준 값	비 고
1	인장강도(kgf/cm2)	KS M 6518	150 이상	
2	신 율(%)	KS M 6518	350 이상	
3	경 도(Hs)	KS M 6518	70< Hs ≤ 75	
4	압축시험(%)	KS M 6518	20 이하	70℃에서 22시간
5	흡수율시험(%)	BS 906 A16	2 이하	20℃에서 7일간
6	오존 저항시험	BS 903 A43	No Cracks	40℃, 20% 신장 상태에서 72시간 100 ppm 오존농도
7	파열시험(N/m)	KS M 6518	35,000 이상	
8	내화학성 시험	시험온도 75° F 시험기간 12개월 시험방법 KS M 6518		

나. 재료실험 조사

(1) 국내외 방수성능 시험 방법

국내에서 지수재의 방수성능 평가방법으로는 기본물성시험, 내수압 시험, 수침팽창 내수압 시험, 팽창-건조 반복시험, 열노화 시험 등의 성능평가 방법이 주로 이용되고 있지만, 현재 상황에서는 사용환경에 적합한 평가방법이 특별히 없으며 시험자체도

열악한 것이 실상이다.

일반적으로 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 시험방법은 비팽창 내수압 시험과 수침팽창 내수압 시험 등이 있다. 비팽창 내수압 시험은 방수재 접합부의 내압성능 및 Gap과 Offset에 따른 내압성능을 평가하는 것으로서, 방수재의 방수성능이 설계구간의 수압조건에 타당한 가를 평가하는 것을 주목적으로 한다.[8)]

수침팽창 내수압 시험은 현장 조립시 발생하는 Gap 상태에서 수팽창 지수재가 팽창하여도 재질의 변화가 없는 내구성을 유지하면서, 방수재의 반력 및 접면응력(탄성압+팽창압)에 의한 내압성능을 갖는지 평가하는 것이다. 특히, 방수재의 설계수압 조건에 대한 타당성을 평가하는 것을 주목적으로 수침팽창 후 내수압 시험을 하기도 한다.

국외의 지수재의 방수성능 평가방법을 살펴보면, 일본의 경우에는 사용 환경에 적합한 평가방법이 정형화되어 있지 않으며, 국내와 같이 내수압 시험방법이 일반적으로 수행되고 있다. 유럽에서는 쉴드 터널에 통상 고무 가스켓을 사용하기 때문에 고무의 기본물성시험과 가스켓의 압축응력시험, Gap과 Offset에 따른 내수압 시험이 이루어지고 있다.

(2) 연결부 방수를 위한 관리기준치

세그먼트의 경우 누수의 주요 원인은 세그먼트 시공시 시공오차, 세그먼트의 과다변형, 연결부 방수재의 탈락 및 내구성 저하, 작업 과정에서 발생되는 세그먼트의 파손 등이 있으며, 이중에서도 세그먼트 시공 시 시공오차 및 과다변형에 의한 누수 등이 주된 원인으로 지적되어 왔다. 즉, 세그먼트의 방수성능 저하는 그림 2.3.7과 같이 연결부 방수재의 접촉면적을 감소시키는 세그먼트간의 Gap(δ)과 Offset(Δ)에 의해 주로 발생된다고 할 수 있다. 그러므로 연결부 방수성능은 Gap과 Offset에 따른 내수압을 결정하고, 세그먼트 설계 및 시공시 관리기준치로서 Gap과 Offset이 결정되어야 한다고 할 수 있다.[9)]

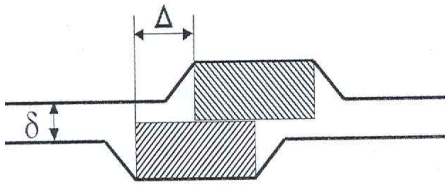


그림 2.3.7 Gap(δ)과 Offset(△) 개념도

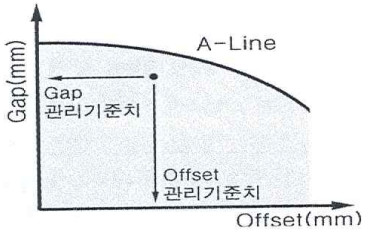


그림 2.3.8 Gap-Offset 관계 그래프

Gap과 Offset에 대한 관리기준치는 방수재의 필요 접면응력, σ에 대한 Gap-Offset 관계 그래프 상에서 구할 수 있다. 그림 2.3.8은 실험결과로부터 구한 필요 접면압에서의 Gap-Offset 관계 그래프를 나타낸 것이다. 이 그래프에서 A-선 아래 영역이 관리기준으로 제시 가능한 Gap과 Offset이라고 할 수 있다. 단, 여기에서 제시된 Gap과 Offset의 관리기준치는 세그먼트 연결부 방수성능과 직접적인 연관을 가지며, 세그먼트의 시공 후 미관이나 역학적 특성은 고려되지 않는다.

3. 내구성 평가를 통한 성능수명 예측

가. 고무소재의 사용수명

대부분 고무부품들은 환경적인 영향에 의한 노화와 반복하중에 의한 피로 손상누적으로 인해 수명을 다하게 된다. 현재 쉴드터널용 고무 가스켓 및 수팽창 지수재 제품은 품질과 신뢰도가 우수하다고 인정되고 있으며, 제조사에서 가속수명시험을 수행하여 신뢰성 보고서를 발표하고 이를 근거로 100년의 사용수명을 보증하고 있다.

TB ED 2005-162의 보고서는 응력완화(Relaxation)라는 고장모드로 시간에 따른 일정 변형에서의 하중 감소의 영향을 관찰하였다. 이 연구에서는 Briggs의 대수가 시간에 따라 선형적으로 감소하며 응력완화가 10의 배수로 일정하다고 가정하였다. 배합된 고무의 응력 완화율이 10년 동안 6% 정도 감소한다고 보고 이로부터 100년 후의 응력 완화율이 46.3%, 즉 100년 후에 초기 반력하중의 53.7%가 남아 있을 것이라고 추정하고 응력완화시험(Relaxation test)을 수행하였다.

또한, LO1039 (Lifetime estimation of compound for Gina-and Omega seals)에서는 ISO 11346의 아레니우스 모델식에 의거하여 고무 씰의 사용온도를 5℃에서 10℃로 보고 고온(50℃, 70℃, 100℃)에서 가속 열 열화시험을 실시하여 사용온도에서의 수명을 예측하였다. 고무의 물성 중 30% 신장 시 인장응력이 초기 값의 50%로 저하되는 시점을 고장기준으로 적용하였으며, 시험 결과 사용조건에서 고무 씰인 Gina와 Omega seal용 고무소재의 수명은 5℃의 경우 430년, 10℃의 겨우 224년, 15℃의 경우 117년으로 각각 예측하였다.[10)]

고무는 변형을 받으면 초기상태의 분자구조가 수정 및 재배치로 인하여 강성이 낮아지고 댐핑(damping) 특성이 변하게 된다. 이러한 응력-변형률 완화현상을 뮬린스(Mullins) 효과라고 하며, 특히 경도가 높은 고무소재일수록 두드러지게 나타나는데 이는 충진제인 카본 블랙(carbon black)의 양에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 강성은 경로에 종속적인 관계를 나타내는 특성으로 고무는 부하(loading)와 제하(unloading) 시의 응력-변형률 곡선이 다르며, 또한, 초기의 응력-변형률 곡선을 다시 반복하지 않고 동일 변형률 구간에서 대략 3~10회 정도의 반복하중을 받아야 곡선이 안정화된다. 그리고 고무소재가 이전에 받았던 변형률 보다 더 큰 수준의 변형률을 받으면 응력-변형률 곡선은 다시 변하게 되어 고무소재가 초기 변형률을 받으면 일정한 영구변형이 발생하여 응력이 영(zero)인데도 불구하고 변형률은 영으로 되지 않는 특성을 가지고 있다.

플라스틱 및 고분자 등은 대기 또는 접촉에서 어떠한 물질로부터 화학 작용에 의한 공격을 받을 수도 있고, 고온이나 저온에 의해 다양한 물리적 변화가 일어날 수 있으며 자외선 및 습도에 의한 화학적, 물리적 변화가 일어날 수 있다.

고분자의 일부인 고무도 다양한 외부 환경이나 진동, 피로, 작업조건 등 많은 요인들에 매우 취약하다는 것은 논문이나 문헌에서 이미 기술하고 있는 부분이다. 하지만 수많은 요인들에서 열화(degradation)가 진행 될 때는 그에 의한 물성 변화나 화학적 반응 변화가 비선형 거동을 나타내므로 정확한 수명을 예측하기란 매우 어려운 일이다.

고무제품은 사용 환경이나 조건이 복잡하고 수명예측에 필요한 데이터가 절대적으로 부족하며 온도, 습도, 오존, 빛, 유체, 기계 및 전기적 응력 등의 특성저하 인자(degradation factors) 및 사용조건과 배합조건 등이 다양하기 때문에 사용수명을 예측하는 것은 쉬운 일이 아니다. 특히, 실제 사용될 때와 동일한 조건에서의 시험을 설계하여 수명을 예측하기란 매우 어려운 문제이다.

아레니우스 모델은 여러 온도에서 고무제품의 초기 특성 값의 일정 변화가 발생하는 시점을 수명으로 판단하여 시간-온도의 마스터 커브 및 관계식으로 표현된다. 이러한 관계로부터 특정 온도에서 예측 수명을 계산할 수 있으며 상온에서의 자연노화에 의한 수명을 가속시험 결과로 얻어진 데이터를 이용하여 예측할 수 있다.

쉴드 세그먼트 조인트에 사용되고 있는 수팽창 지수재 및 가스킷에 요구되는 주요 성능은 지수 안전성을 높이는 것이 주요이며 이러한 성능에 영향을 주는 물성인 인장강도, 신장률, 저신장에서의 인장응력, 경도를 고장 모드라 할 수 있다. 일반적인 고장의 판단 기준은 KS M ISO 11346(2007)에 따라 초기 물성 값의 50 %로 저하되는 시점을 고장으로 정의한다.

나. 내구성 실험 수행

(1) 성능 예측방법

최근 부각되고 있는 신뢰성이 보증되는 고내구성 부품의 개발과정에서 수명예측은 반드시 필요하다. 수명을 판단하는 방법으로는 실제 고무제품을 필요한 곳에 사용하여 수명을 직접 평가하는 방법이 있으나 이는 현실적으로 거의 불가능한 방법이다. 경험에 의한 수명예측은 보다 짧은 시간에 비교적 정확한 수명 예측 가능하나 오랜 기간 동안 관련된 고무제품을 다룬 숙련자가 필요하다. 마지막으로 가속시험 (ALT : Accelerated Life Test) 방법은 시간, 경제적으로 절약되나, 다음과 같은 요인으로 수

명예측이 불가능하거나 부정확할 수 있다.[11)]

첫째, 수명예측을 위한 시험 설계가 복잡하고 데이터가 부족하다. 이는 고무부품의 수명에 미치는 요인이 한 가지로 요인이 아닌 열(온도), 산소, 빛, 오존, 오일, 약품 등의 화학적 요인과 creep 및 응력완화와 같은 정적 응력, 피로, 마모 등이 서로 복합적으로 작용하여 재현시험을 수행하는 것이 매우 어렵기 때문이다.

둘째, 수명의 명확한 기준점(point)을 잡는 것이 쉽지 않다. 즉, 수명의 기준이 완전한 파단(rupture) 등과 같이 분명하지 않다는 것이다. 예를 들어, 오존 균열 길이를 3mm가 되는 시점으로 할 것인가? 아니면, 강성의 변화율을 20%로 할 것인가? 는 아직 명확한 기준이 없다.

고무부품의 피로수명을 평가하기 위한 방법으로는 크게 소재 피로시험, 부품 피로시험 그리고 실차 내구주행시험으로 나눌 수 있다. 소재 피로시험은 기하학적 형상, 하중 상태 등의 영향으로 부품의 피로특성을 평가하는데 많은 문제점을 가지고 있다. 부품의 내구시험 및 실차 내구피로시험은 시간과 경제적으로 많은 제약을 가지고 있으며 특히 제품개발 초기단계에서는 이 방법을 이용하여 수명을 평가하지 못하는 제한점이 있다.

대부분의 고무부품은 공기 중에 포함된 산소나 오존 또는 자외선 등과의 화학반응에 의하여 일어나는 고무 분자구조의 절단과 가교에 기인하며 사용 온도에 의해 가속된다. 그 이외의 요인으로 인한 노화문제는 발생빈도가 낮으며 재현시험을 수행하는 것이 매우 어렵거나 불가능하다. 따라서 사용온도 또는 열을 가장 중요한 특성저하요인(degradation factor)으로 가정하고 가속시험을 수행하여 얻은 데이터를 아레니우스 관계식 또는 WLF master curve를 통하여 수명을 예측하는 방법을 이용한다.

고무재료가 열에 의해 성능이 변형되는 특성의 재료이나, 쉴드터널은 시공 및 운용 중 화재 등의 특별한 상황이 아닌 경우 고온에 노출되는 기회가 거의 없는 환경이다. 오히려 쉴드터널은 시공 지점의 환경을 고려할 경우 연약한 지반의 지하수위 아래에 시공되는 경우가 대부분이며, 수팽창 지수재가 지하수 지수의 목적으로 수팽창성을 가지는 재료이기 때문에 계속적인 침수 환경을 고려하여야 할 것으로 판단된다. 따라서, 환경에 따라 우기 및 건기시에 침수 및 건조가 반복되거나 지하수위 위에 설치될 경우에는 지속적인 건조 환경을 고려하여 침수, 건조, 습윤 및 건조 등의 조건을 주어야 할 것이다.

특히, 현재 일반 도로터널로 쉴드터널이 시공된 국내 사례는 없지만, 국외의 경우나 차후 국내 건설계획을 고려할 경우 24시간 동안 차량 운행 환경을 고려하여 배기가스에 의한 산성화 영향도 중요한 변수라고 판단된다. 따라서, 고무재료의 pH 농도에 대한 가속화 시험은 충분히 고려해야할 가치가 있다고 판단된다.

또한, 그림 2.3.9와 같이 개스킷의 경우 세그먼트 체결시 압축되어 영구적으로 압축된 상태에서 쉴드터널 수명과 함께 함. 따라서 압축된 상태에서의 성능수명을 평가하는 것이 필요할 것으로 판단된다.



그림 2.3.9 세그먼트 체결에 의한 개스킷의 압축 및 돌출

(2) 내구성 실험 수행

수팽창 지수재의 성능수명 예측을 위해 온습도 환경 챔버를 이용한 내구성 실험을 실시하였다. 표 2.3.9는 내구성 실험 CASE를 나타낸 것이고, 그림 2.3.7은 한국건설생활환경시험연구원 서산 옥외실증시험센터에 구축되어 있는 온습도 환경챔버의 모습이다. 그리고 그림 2.3.10은 내구성 실험 수행과정을 나타낸 것이다.

표 2.3.9 수팽창 지수재 내구성 실험 CASE

온도	수침 여부	pH	시료 종류	챔버 기간	비고
30도	침수	7(중성)	4	1주일	○ 가속시험기 : 단일 온도 설정만 가능 ⇒ 한 종류의 온도 case만 실험 진행 가능 ○ pH 조건은 수침하는 용액의 산도를 조정하여 설정⇒ “건조” 시료의 pH는 7.0 (중성)으로 가정
		5			
		3			
	건조	(7)(중성)			



그림 2.3.10 온습도 환경챔버(한국건설생활환경시험연구원 서산 옥외실증시험센터)

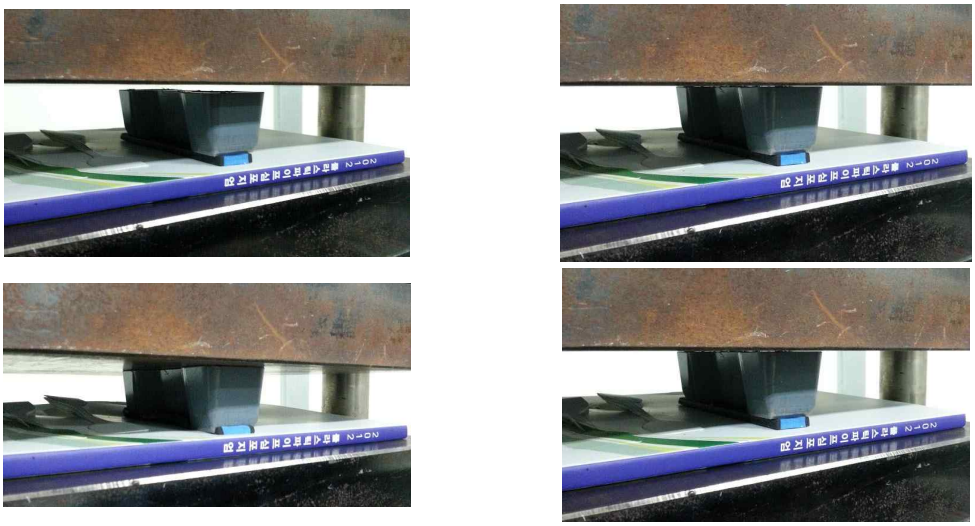
표 2.3.10 온습도 환경챔버 기본 사양 및 장비 구성

Temp. Range	-50℃ ~ 100℃
습도 범위	30%~ 98% RH(습도조절 정도 : ± 1.0% RH)
온도 상/하강 속도	1.5℃/분
Inside Size	1500W ×2500D × 2500H
Outside Size	2100L × 3200W × 3000H
내부바닥	200kg/㎡

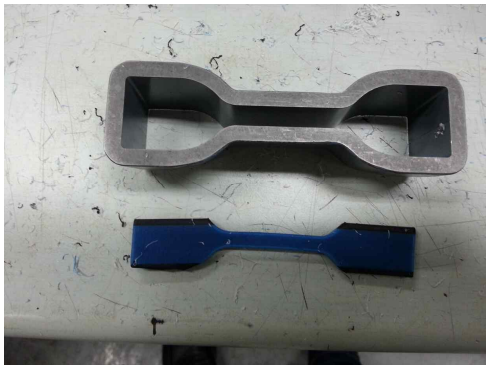
표 2.3.10 온습도 환경챔버 기본 사양 및 장비 구성(계속)

1. Chamber Body	Material : SUS304 1.2T
	Main Frame : Square Pipe, Paint
	내부조명
	Door with window
	단열재 : 우레탄 & 세라클 울
2. Refrigeration System	5HP
	냉매 : R23, R22
	Evaporator
	Heat Exchange
	배관 System
	Frame
3. Heater	Heater - 20KW × 1ea
	Heat Exchange
	Fan : 4000W - 4SET
	Duct
	Sensor
	히터 출력 제어 : 무접점 릴레이
4. Controller	Rack - 장비내장 Type
	PID Controller, 프로그램 디지털 지시 및 설정
	모델 : TEMI 2200, 디지털 레코딩 가능
	Conjunction Box
	안전회로 : 각회로 차단기, 온습도과승방지장치
	Internal Junction Box
	Wire Harness
	기기 소요동력 및 용량 : 55KW/H

실험은 지수재의 수명을 50년으로 예상하고, 168시간동안 항온항습 챔버에서 가속을 하였다. 터널의 사용목적에 따라 성능유지기간의 차이가 발생되며, 도로터널의 경우 밀폐된 공간 내에서 매연가스의 탄산화 변수를 고려해야 한다. 이를 고려하기 위하여 건조상태의 수팽창 지수재를 중성, 약산성, 강산성 용액에 침수시켜 실험을 수행하였다.



(a) 프레스 머신에 의한 수팽창 지수재 압축



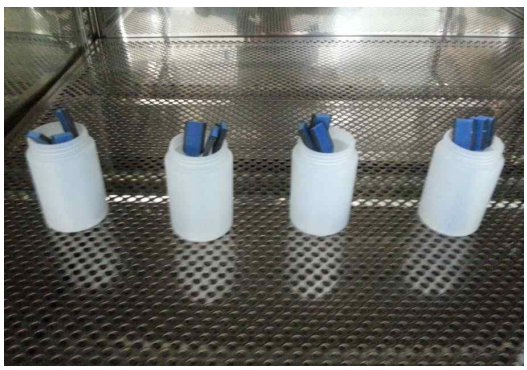
(b) Dog-bone 제작틀



(c) 제작된 수팽창 지수재 Dog-bone



(d) 건조 조건의 수팽창 지수재



(e) 침수 및 열화 조건의 수팽창 지수재

그림 2.3.11 수팽창 지수재 내구성 실험 수행과정

실험의 수행결과 그림 2.3.12와 같이 중성용액을 제외한 산성용액에 노출된 경우 재료의 강도 및 특성유지뿐 아니라 형체를 유지하지 못하였다. 실험결과 초기 건조상태의 수팽창지수재보다 중성의 경우 인장강도는 63%, 신장률은 15%가 감소하였으며,

산성에 노출된 경우는 측정이 불가능 하였다.

고무재료의 경우 초기성능의 50% 이하로 감소하게 되면 고장으로 판단을 하기 때문에 중성용액에 노출된 수팽창 지수재 역시 기능을 상실한 것으로 판단할 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 터널의 무조건적인 방수보다는 배수방안 등의 다른 처리공법을 도입하는 것에 대한 검토가 필요하다고 판단된다.



(a) 침수(중성) (b) 침수(약산성) (c) 침수(강산성)

그림 2.3.12 수팽창 지수재 변화

표 2.3.11 수팽창 지수새 변형결과

		초기		168시간 후	
		인장강도 (N/mm^2)	신장률(%)	인장강도 (N/mm^2)	신장률(%)
건조		1.43 N/mm^2	156.3 %	0.83 N/mm^2	121.5 %
침수	중성			0.53 N/mm^2	133.3 %
	약산			측정 불가	측정 불가
	강산			측정 불가	측정 불가

소결론

쉴드터널의 방수를 위한 지수재의 종류 및 평가 기준에 대한 조사를 수행하고, 단기 및 장기적인 내구성을 평가하여 지수재 성능수명의 예측을 통하여 누수발생 시점에 대한 연구를 수행하였다.

(1) 세그먼트의 특성에 따른 지수재 부착 및 거동을 파악하기 위하여 지수재의 설치방법 및 특성을 조사하였다. 수팽창 지수재로는 사용된 재료에 따라 고무 수팽창지수재, 벤토나이트 수팽창지수재, 수팽창 실란트지수재 등이 있다. 재료의 특성 및 시험기준은 KS기준 및 철도공사 등에서 품질기준을 명시 하였으며, 관리기준치는 Gap과 Offset의 기준치를 적용한다.

(2) 쉴드 세그먼트 조인트에 사용되고 있는 수팽창 지수재 및 가스킷에 요구되는 주요 성능은 영향을 주는 물성인 인장강도, 신장률, 저신장에서의 인장응력, 경도를 고장 모드라 할 수 있으며, 일반적인 고장의 판단 기준은 KS M ISO 11346(2007)에 따라 초기 물성 값의 50 %로 저하되는 시점을 고장으로 정의한다.

(3) 고내구성 부품의 수명을 판단하는 방법으로는 실제 고무제품을 필요한 곳에 사용하여 수명을 직접 평가하는 방법, 경험에 의한 수명예측방법, 가속시험 방법이 있으며, 쉴드터널에 사용되는 재료에 대해서는 압축력을 받은 상태에서의 평가가 필요할 것으로 판단된다.

(4) 중성, 약산성, 강산성 용액에 노출된 수팽창 지수재에 대하여 항온항습 챔버를 이용한 가속시험결과 산성에 노출된 수팽창 지수재는 형체를 알아보기 힘들 정도로 부식이 진행되었으며 중성환경에 노출된 수팽창 지수재 역시 강도의 감소율이 63%로 50%를 넘어서 고장으로 판단된다. 이러한 문제점 개선을 위해서는 방수보다는 배수방법 등의 다른 대안에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

제 4 절 배수형 쉴드터널 적용성 평가

1. 세그먼트 라이닝 작용하중에 대한 연구 조사

가. 배수형 터널과 방수형 터널의 설계와 시공

이 연구에서는 지하수 유입량이 많고 세립토사의 유실이 예상되는 지역에 배수형 터널을 구축할 경우에 대한 지하수 거동을 체계적으로 분석하고, 그에 대한 설계 및 시공상의 접근방법을 제시하였다.

(1) 터널의 방수 및 배수에 대한 고찰

지하수를 처리하는 방법에 따라 터널은 크게 배수형과 방수형으로 나누어지며, 배수형 터널은 다시 부분배수형과 완전배수형으로 구분된다. 방수형 터널이란 터널 주변의 지하수가 터널내부로 전혀 유입될 수 없도록 차단한 경우를 말한다.

배수형 터널이란 터널 주변의 지하수를 인위적으로 배수시키는 터널로서 배수의 허용정도에 따라 완전배수형과 부분배수형으로 세분될 수 있는데 완전배수형이란 터널내부의 전단면으로 배수를 허용한 경우로 일부 수로터널이나 시공중의 터널이 여기에 해당되며, 부분배수형이란 터널의 천정과 측벽까지 방수막을 설치하여 지하수의 유입을 차단하고 유도하여 터널바닥의 측방향 배수관이나 중앙배수관을 통해서 배수시키도록 설계·시공된 터널을 말한다. 부분배수형 터널을 통상 '배수형 터널'이라고 칭하며 터널에서는 콘크리트 라이닝에 수압이 작용하지 않는 것으로 간주되고 있으나 수압의 작용유무는 아직 검증되지 않고 있는 실정이다.[1)]

(2) 터널내 유입수 처리개념 및 문제점 분석

지하수위면 이하의 지반중에 배수형 터널을 구축하게 되면 터널은 지중에 설치된 배수관과 같은 역할을 감당하게 되는데, 이에 반응하는 지하수의 형태는 크게 두가지 형태로 나눌 수 있다. 터널내부로 유입되는 지하수면이 터널바닥까지 저하되는 그림 2.4.1과 같은 부정류상태이며, 다른 하나는 그림 2.4.2와 같은 계속적인 배수를 실시한다 하더라도 원래의 지하수위를 유지하는 이른바 정상류이다. 대부분 배수형 터널의

실제상태는 이 두가지 극단적인 경우의 중간형태가 될 것으로 사료된다. 이와같이 지하수의 반응은 지반의 특성과 주위환경 및 터널의 배수상태에 따라 큰 차이를 보이게 되므로 특수한 조건하에서는 이들의 종합적이고 신중한 분석이 수반되어야 한다.

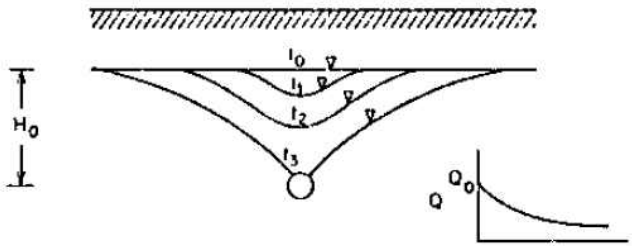


그림 2.4.1 부정류 상태

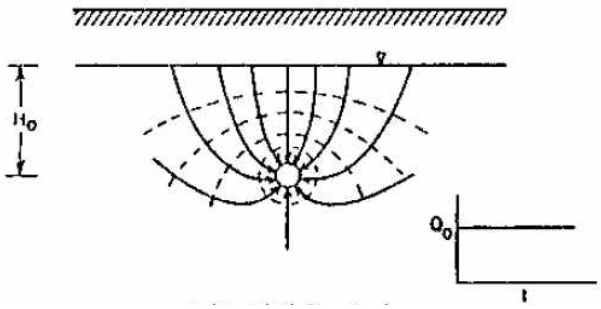


그림 2.4.2 정상류 상태

터널 굴착중에는 지하수가 터널내부로 유입되어서 전 굴착면이 자유수면이 되어 굴착면에는 수압이 전혀 발생하지 않고 자유롭게 유입하게 된다. 시공중 유입되는 지하수는 굴착저면의 양측면이나 중앙에 설치된 배수구를 통하여 신속히 배수하여 굴착면이 지하수에 의해 연화되지 않도록 한다. 집수된 유입수는 다시 수직구에 설치된 집수정으로 보내져 지상으로 배수시켜야 한다.

운행중 유도배수층의 통수능력보다 더 많은 지하수가 유입될 경우는 유입수량의 완전배제는 불가능하며 유도배수층의 통수량에 의해 집수정의 용량이 결정되어야 한다.

배수형 터널의 장기적인 배수가 미치는 영향 분석이 미흡하며, 터널내 집수정 용량은 지반의 특수성, 지하수위 그리고 터널 내의 유도 배수층의 통수 능력을 분석하여 결정하지 않고 일률적인 기준을 적용하고 있다.

터널주변 여건에 근거한 배수재의 적합성이 검증되고 있지 않다. 일률적 규격의 부직포를 사용하고 있으며, 모든 경우의 지하수는 터널바닥까지 저하되며 콘크리트 라이닝에는 전혀 수압이 작용되지 않는다고 가정하여 콘크리트 라이닝을 설계를 하고

있다.

또한 현재의 배수량이 배수재의 통수능력을 나타내고 있을 수 있고, 이때에는 콘크리트 라이닝에 일정량의 수압이 작용하게 되며 배수형 터널로 시공된 콘크리트 라이닝이 파손되어 다량의 지하수가 유입된 사례는 이런 사실을 뒷받침 해주고 있다.

(3) 과대 유입수 처리를 위한 접근방법에 대한 연구

배수형 터널설계와 시공에서의 지하수 처리대책으로는 첫째, 차수벽(cut-off wall)이나 차수주입을 실시하여 유입 지하수량을 감소시키는 것이고 둘째, 배수시설의 기능을 유지시켜 콘크리트 라이닝의 구조적인 유해요인을 제거 시키는 것이다. 지금까지 후자의 중요성이 경시되어온 것은 유입지하수양이 소량이고 배수시설의 3차원적 기능이 수압의 상승을 해소시킨 결과로 사료되지만 지하수에 의한 영구구조물의 훼손도 종종 보고 되었음을 상기하여야 한다.

배수형 터널에서 콘크리트 배면의 수압해소 유무는 배수시설의 배수능력과 직결되어 있다. 즉, 유입수량이 소량이라 할지라도 배수시설이 이를 원활하게 배수시키지 못하면 수압은 상승하게 된다. 이러한 경우에는 배수시설의 배수능력을 증대시켜 수압이 상승되지 않도록 하거나 배수형 터널이라 할지라도 배수지연으로 인해 발생될 수 있는 수압을 안전하게 견딜 수 있는 콘크리트 라이닝 구조를 갖추도록 하여야 한다.

콘크리트 라이닝에도 상당량의 수압이 발생하는 것으로 나타나고 있으므로 지역조건에 따라 배수형 터널의 적용여부에 대한 신중한 검토가 이루어져야 할 것이다

수압에 가장 효율적으로 대응하는 단면 형상은 원형이고, 수압강도에 따라서 두께를 결정하는 것은 어려운일이 아니다. 그러나, 현재의 마제형 콘크리트 라이닝으로도 어느정도의 수압은 견딜 수 있으므로 먼저 산정된 수압에 원단면이 견딜 수 있는지 여부를 검토하여야 한다. 측벽과 인버트가 연결되는 우각부가 구조적으로 가장 취약한 부분이 될 것이다. 만약, 단면의 형상을 변경하여야 할 경우에는 현재의 선형에 지장을 주지 않는 단면이 현상이 현시공에 대한 충격을 최소화 하게 될 것이다. 이를 위해서는 단면의 변화없이 콘크리트 라이닝을 철근으로 보강하는 경우와 내공단면은 현상태를 유지한채 하부 인버트의 두께만 증가시키는 방안이 검토될 수 있다.

지반조건과 지하수 조건에 따라 배수형 터널에 수압이 작용할 경우는 콘크리트 라이닝이 이 수압에 견딜 수 있도록 하는 구조적인 배려가 필요하다. 그림 2.4.3과 2.4.4에 제안된 수정단면은 현선형을 변화시키지 않고 이러한 사항을 반영한 단면의 대안을 나타낸 것이다.

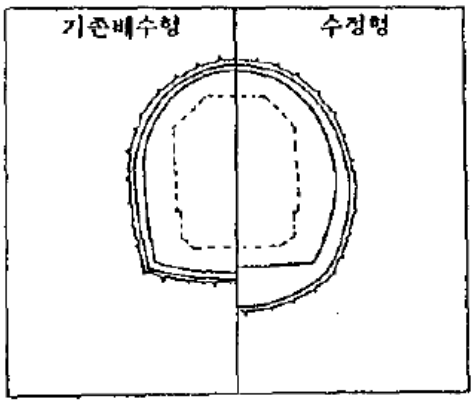


그림 2.4.3 단선터널

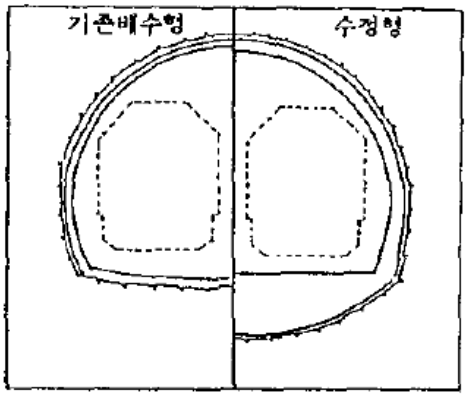


그림 2.4.4 복선터널

침투류 해석에 의해서 배수형 터널의 콘크리트 라이닝이 추가적으로 보강 및 수정되더라도 개념상으로는 배수형 터널에 해당되므로 복공배면의 유도배수층과 측방향 배수관, 그리고 중앙배수관에서 원활한 배수가 이루어지도록 해야 한다. 따라서, 현재 사용하고 있는 부직포의 사양을 $300g/m^2$(t=3mm)에서 $500g/m^2$(t=5mm)으로 증가시키고 또한 측방향 배수관은 관경을 Φ50mm에서 Φ100mm이상으로 확대하는 것이 바람직하다.

(4) 연구 요약

본 연구에서는 지반과 지하수원 특성 그리고 배수시설의 배수 능력을 종합적으로 고려하는 배수형 터널의 설계접근방법을 분석하였으며 기존 배수형 터널의 설계와 시공에 대한 문제점 분석 및 고찰을 통하여, 지역조건에 따라 배수형 터널의 적용여부검토와 수압에 대항할 수 있는 수정된 단면, 그리고 배수시설의 설계와 시공법에 대하여 제시되었다.

나. 배수형 터널의 수압작용 메카니즘과 지속가능한 터널설계에 대한 고찰

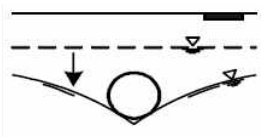
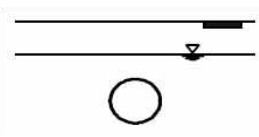
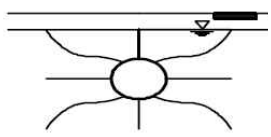
어떤 구조물이든 시간경과에 따라 열화하기 마련이므로 설계시 수압감소를 전제로 배수형 터널을 채택한 것이므로 배수기능의 저하는 곧 라이닝에 작용하는 하중의 증가로 이어지며 이는 구조적 손상으로 나타날 수 있다. 따라서 배수형 터널의 설계는 터널-지하수 상호작용과 장기적인 영향을 모두 고려하는 검토가 필요하다. 본 연구에

서는 배수형 터널에 작용하는 수압메카니즘을 살펴보고 라이닝 작용수압을 고려하는 새로운 터널 라이닝 설계개념을 제시하고자하며, 나아가 장기적으로 배수, 비배수 조건을 모두 고려하는 지속가능한 터널 설계개념을 모색하고자 한다.

(1) 수압 작용 메카니즘 고찰

이론적으로라면 비배수터널은 정수압크기의 수압이 작용하고, 배수터널은 작용수압이 거의 영에 가까울 것이다. 표 2.4.1은 현재 우리나라에서 통용되고 있는 배수조건에 따른 지반응력 및 라이닝 작용응력 개념도이다.[2)]

표 2.4.1 일반적 수리경계조건별 작용수압 개념

구분	배수개념	비배수개념	침투를 고려한 배수개념
개념			
지하수위	배수에 의한 강하	변동 없음	
침투	발생	발생 없음	발생
지중응력	유효응력(=전응력)	유효응력 + 정수압	유효응력 + 침투압
라이닝에 작용하는수압	0	정수압	0

우선 위 표의 첫 번째 개념인 배수개념은 '지하수위 저하개념'으로 수정하는 것이 타당하고 침투를 고려한 배수개념의 경우 이제까지 보고된 터널 사고사례에 비추어 라이닝 작용수압을 0으로 보는것은 적절치 않다.

배수형 터널의 경우 충분한 수압 계측자료가 보고되고 있지 않다. 다만 그림 1-5에서처럼 수위증가로부터 수압증가를 유추할 수 있고, 라이닝타설시 콘크리트 압력 등을 고려할 때 터널배수 기능의 열화가능성이 상당히 높아, 설계 개념인 수압감소효과를 얻지 못할 수 있다. 배수형 터널의 파괴는 유발된 수압이 2차라이닝의 시공취약부에 작용하여 생긴 결과로 이해하는 것이 타당할 것이다.

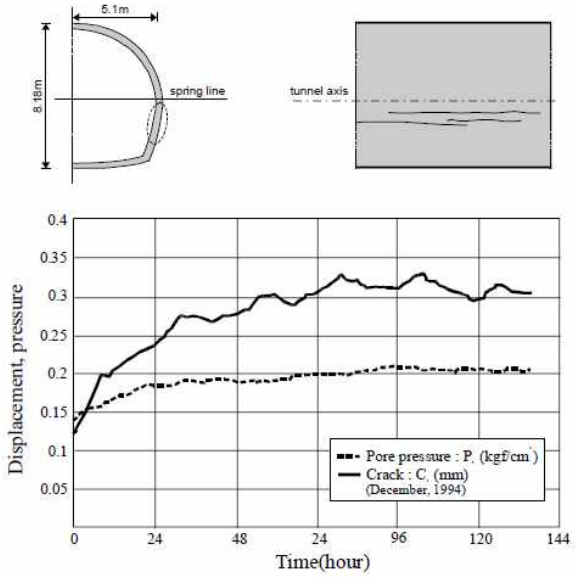


그림 2.4.5 배수형 터널의 균열폭-수압 측정 예

(2) 터널주변 흐름에 따른 수치실험 검토

흐름이 있는 터널에 대한 연구는 많은 제약이 있다. 특히 배수형 터널의 경우 배수재가 1차 및 2차 라이닝 사이에 위치하므로 '지반-1차라이닝-배수재-2차라이닝' 상호작용에 대한 검토가 이루어져야 한다.

배수형 터널의 라이닝 모델링은 1차라이닝의 투수거동을 포함하며, 그림 1.6은 배수형 터널의 라이닝 모델링 개념을 보인 것이다. 고체요소는 투수거동을, 빔 요소는 구조적 거동을 나타내도록 하는 복합 요소법을 적용하였다. 배수형 터널은 라이닝 투수계수, kl을 지반투수계수 ks와 같거나 크게 취함으로써 모델링 가능하며, 지반-라이닝 수리 상호작용에서 다룰 부분투수조건은 kl < ks로 고려할 수 있다.

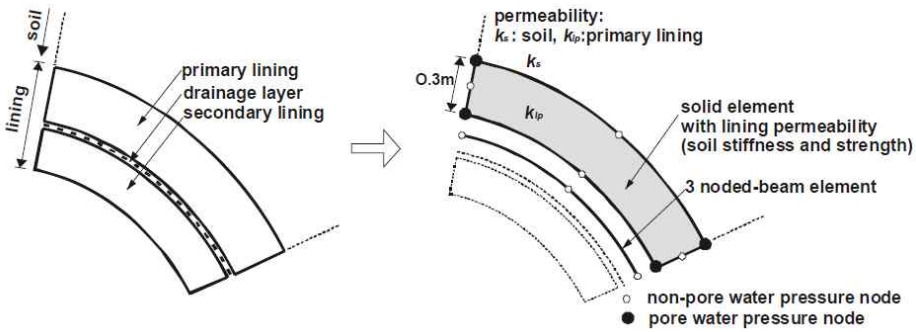


그림 2.4.6 라이닝 모델링 개념

흐름 특성의 파악을 위해 심도에 따른 유선망과 간극수압을 조사하였고, 그림 2.4.7에서와 같이 천층터널의 경우 유선이 상부에 집중됨을 보였으며 심도가 깊어질수록 터널주변의 흐름은 비교적 방사형에 가깝게 나타남을 보였다. 따라서 20m이내의 심도에서는 방사형흐름 가정은 적절해 보이지 않는다.

터널주변의 간극수압은 터널주변에서 현저히 저하되는 것으로 나타났으며, 특히 비구속 흐름의 경우 수압 저하 범위가 광범위해짐을 보였다. 간극수압의 증가는 누수의 가능성을 증가시키므로 라이닝 설계에서 중요한 사항이다.

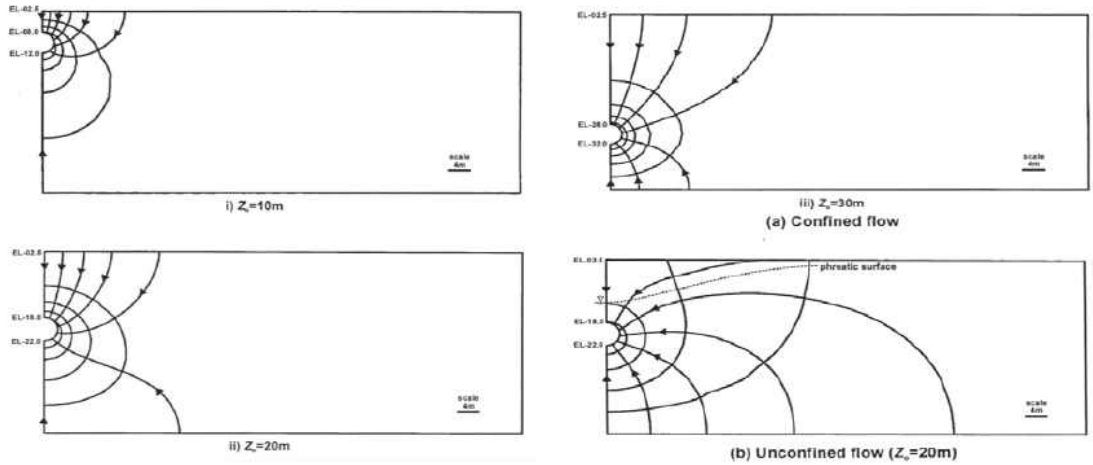


그림 2.4.7 배수형 터널주변의 유선망

(3) 배수형 터널 라이닝 신설계개념 제안

지반과 1차 라이닝간의 수리 상호 작용은 라이닝 투수계수가 지반보다 1000분의 1만큼 작은 경우 라이닝에 걸리는 수압은 정수압의 90%에 이르며, k_l/k_s가 0.1인 경우라도 정수압의 30%에 해당하는 잔류수압이 라이닝에 작용함을 알 수 있다.

1차 라이닝과 배수재간의 수리 상호 작용은 배수재 투수성이 1차라이닝보다 작아지는 경우, 이때 발생하는 간극수압은 배수재 즉, 방수막으로 덮혀있는 2차라이닝에 작용하게 된다. 간극수압이 1차라이닝의 경우 유효응력과 관련되어 일부만 하중증가로 나타나나, 2차라이닝의 경우 위의 전수압이 잔류수압으로 작용하게 된다는 것이다.

위 분석결과를 토대로 현재 통용되는 표 2.4.1의 터널에 작용하는 수압설계 개념은 보다 세밀하게 분류할 필요가 있어 표 2.4.2와 같은 신 설계개념을 제안한다.

표 2.4.2 침투 고려시 수리경계조건에 따른 작용수압

구분		침투를 고려한 배수개념			
지중 응력		유효응력 + 침투압			
라이닝 작용 수압		지반투수성>라이닝투수성		지반투수성<라이닝투수성	
		라이닝투수성 >배수재 투수성	라이닝투수성 <배수재 투수성	라이닝투수성 >배수재 투수성	라이닝투수성 <배수재 투수성
	1차 라이닝	수압작용	수압작용	-	-
	2차 라이닝	수압작용	-	수압작용	-

지하수 환경 유지가 가능하며, 비배수구조가 열화되어도 수리손상이 없고, 터널배수구조에 관계없이 관리 가능한 안정된 배수체계 유지할 수 있으며 “비배수 구조저항능력을 가지며, 관리 가능한 배수체계를 유지함으로써 지하수 환경영향을 최소화할 수 있는 터널”이라 정의할 수 있을 것이다.

이 연구에서는 터널주변의 흐름메카니즘과 지속가능한 터널 설계에 대하여 고찰하였다. 터널은 궁극적으로 비배수터널은 배수 터널화하고, 배수터널은 배수시스템의 열화로 부분배수조건으로 거동함을 확인하였다. 이러한 거동특성은 장기적인 지반-라이닝-배수재간 수리상호작용에 따른 것으로 이해된다. 따라서 터널의 지속가능성은 궁극적인 수리상호작용을 고려하여 이를 관리 가능한 수준으로 설계하여야 확보 가능할 것이다. 이런 관점에서 현재의 터널설계에 대한 설계개념의 재정립이 필요하고, 배수와 비배수조건 그리고 환경영향을 고려한 지속가능한 터널 설계기술의 개발이 요망된다.

다. 터널에서의 지하수 문제 고찰

지하수를 고려한 설계 개념은 배수 개념에 의한 설계와 비배수 개념(완전 방수)에 의한 설계가 있다. 배수 개념에 의한 터널 설계의 개념은 실제로 산악지와 같이 지하수가 터널의 아래부분에 존재하는 경우를 주로 일컬어 왔으나, 비록 터널내로 지하수가 흘러들어서 궁극적으로 터널외부 필터재에 이르러서는 수압이 '0'이 되어도 전술한 완전 배수상태와는 완전히 다른 경우가 있다. 즉, 지하수의 공급원이 충분하기 때문에 지하수위의 하강이 크지 않은 경우 지하수가 계속적으로 흘러 들어와서 지하수가 흐르는 방향으로 침투압이 작용되는 경우도 있기 때문이다. 본 연구는 터널설계 지하수의 고려방안에 대하여 서술하고 있다.

(1) 지하수를 고려한 터널설계법 제안

라이닝의 배면부에 지하수가 체류하면 라이닝 배면에 과대한 수압이 작용하게 되어 터널의 안정성을 저하시킬 뿐만 아니라 누수에 의하여 내부설비의 기능저하, 라이닝의 재질약화 및 유지관리상의 문제 등을 초래할 수 있으므로, 터널설계시 지하수의 합리적인 고려방안이 요구된다.[3)]

일반적으로 지하수를 고려한 터널의 설계방법은 배수공법과 비배수 공법이 있다. 배수공법은 라이닝의 수압을 고려하지 않으므로 시공비가 적게 드는 장점이 있으나 지하수위의 저하를 초래하여 지표침하 문제를 야기할 뿐만 아니라 시공 후 운영중에 항상 배수시설을 가동하여야 하는 문제점이 있다. 이에 반하여, 비배수 터널은 라이닝에 정수압이 작용하므로 단면보강으로 인한 시공비가 증가하는 문제점이 있다.

배수터널의 설계개념은 배수시설이 정상적으로 가동된다는 가정하에서 수압의 영향을 고려하지 않는 것이 일반적이다. 이 가정은 지하수위가 터널 하단부 아래로 저하되는 경우에는 합당하지만, 지하수의 공급원이 충분하여 지하수위의 저하가 크지 않은 하천 인접구간 등에서는 침투력(Seepage Force)이 라이닝에 작용하므로 수압을 고려하지 않으면 터널안정성에 문제가 발생할 수 있다. 또한 국내의 지하철 터널에서 실제 배수층을 숏크리트층과 라이닝 사이에 설치함으로써 투수계수가 적은 숏크리트층에 상당한 수압이 작용하게 될 가능성이 존재한다. 지하수위의 저하가 크지 않은 배수터널에서는 지하수의 흐름이 발생하며, 이로 인하여 지중응력의 상태가 변하므로 라이닝에 영향을 끼친다.

실제 침투가 발생하는 터널의 라이닝 설계는, 해석경계부는 유효응력과 정수압이 작용하는 방수개념을 적용하고, 라이닝에 걸리는 수압은 0이며, 지중에는 해석경계부

와 리이닝과의 수두차(터널 중심에서의 지하수위)로 인한 정상류(Steady State)의 흐름으로 인한 유효응력과 침투압을 적용해야 한다. 흙 자체는 아칭현상에 의하여, 토압의 감소를 가져올 수 있으나, 침투압은 물이 흙 사이로 흘러감으로 인하여 생성되는 압력이기 때문에 아칭현상이 존재하지 않아 큰 압력이 터널의 지보 시스템에 작용될 수 있다. 해저터널에 대하여 아칭으로 토압이 감소한 경우와 침투압으로 인하여 흙의 무게가 증가하게 된 예가 그림 2.4.8과 2.4.9에 표시되어 있다.

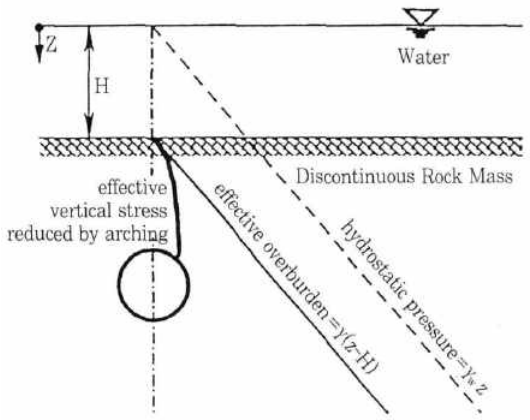


그림 2.4.8 방수식터널

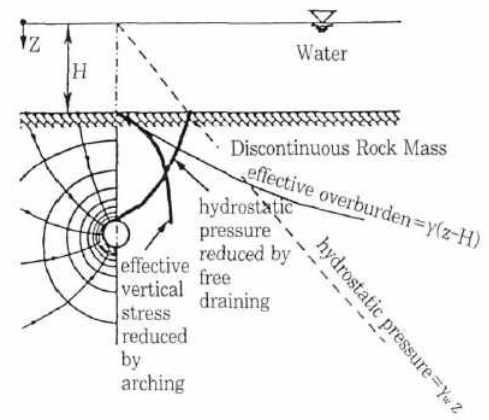


그림 2.4.9 배수식터널

배수형 터널에서 완전히 공사가 완료된 후에, 숏크리트 사이에 설치된 부직포로 된 유도배수층으로 지하수가 유입되고, 터널 저부에 있는 측방배수관 또는 중앙배수관으로 유입된 지하수는 집수정으로 흘러서 펌핑작업으로 외부로 배출되어 진다. 여기에서 3mm의 두께로 된 부직포는 외부로부터 압력이 가해져 압착되는 경우 통수능력이 급격히 떨어지는 것으로 보고되어 있다. 또한, 외부 원지반이 이산현상을 띄는 경우 부직포의 간극이 막힐 가능성도 있으며, 이 경우 더더욱 통수능력이 저하되어 터널라이닝에 추가적인 압력이 작용할 수 있다.

(2) 국외 하저·해저터널 시공사례 분석

(가) Channel터널(유로터널)

Channel 터널은 그 지질구조가 비교적 안정되고 간단하여 잔층에 터널이 계획된 경우이다. 지층은 주로 Chalk로 이루어져 있으며, 특히 지표하 40m되는 곳의 투수성이 급격히 감소하여 배수터널로 설계하더라도 유입량이 극소할 것으로 판단되는

'Chalk Marl'층이 존재한다. 따라서 본 터널은 이 Chalk Marl층에 건설되었고, 또한 해저수위 지표면으로부터 25m~30m 정도였다. 이 경우에도 그 양이 많지는 않을지라도 지하수는 계속하여 터널내로 유입할 수밖에 없고, 따라서 Channel 터널 설계시 침투류 해석을 실시하여, 그림 2.4.10에 표시된 터널방향으로 작용되는 침투압을 고려한 것으로 보고되었다.

(나) 세이칸 터널

일본에서 시공한 세이칸 터널설계의 기본 개념은 전술한 Channel 터널과 판이하게 다른 것으로 알려져 있다. 우선 이 지역의 지질상황은 아주 복잡하고, 배수터널로 설계할 경우 유입량 또한 만만치 않은 것으로 판단되었다. 비교적 안정된 지층가지 이르고자 지표하 100m 정도에 터널이 설치되는 것으로 계획되었으며, 수위선은 지표면으로부터 140m까지 이르는 악조건이어서 방수터널로 설계하는 것은 불가능하다. 최악의 경우 $240t/m^2$까지에 이를 수도 있는 엄청난 수압을 라이닝이 받아주는 것이 공학적 견지에서 불가능하기 때문이다. 따라서 터널 주위로 그라우팅을 해주어 터널내로 유입되는 지하수 양을 최대로 막고 유입되는 양만 집수정에 모아 유출시킨다는 개념을 도입하였다. 터널 주위로 그라우팅 작업을 해 주면 그라우팅 실시지역은 여타의 지역보다 상대적으로 불투수성 성향이 크므로 그림 2.4.11에서 보여주는 것과 같이 오히려 그라우팅 링 외부에 $Y_W \cdot Z$의 큰 수압이 작용된다는 점이다. 이러한 큰 수압이 그라우팅 Zone을 지나면서 소산되어 이 Zone에 큰 투수력이 작용되는 결과를 가져오게 된다. 따라서 그라우팅의 두께에 대한 설계는 유입량이 작아지는 정도뿐만 아니라, 그라우팅 Zone 외부에 작용되는 수압으로 인하여 발생되는 변위를 제어할 수 있는 정도까지 해 주어야 한다는 두 가지 요건을 다 만족시키는 방향으로 이루어졌다.

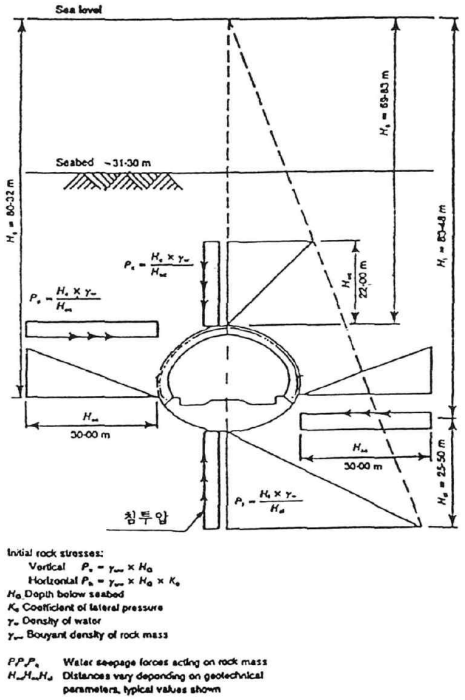


그림 2.4.10 Channel 터널에 작용하는 침투압

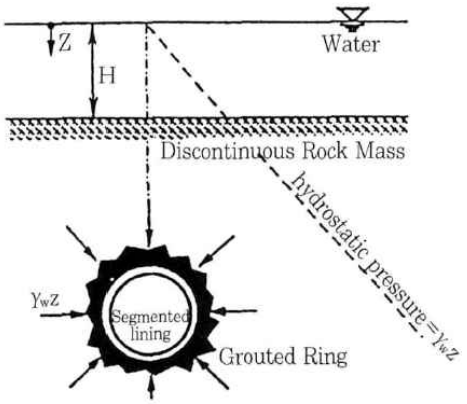


그림 2.4.11 그라우팅 링 외부에 작용하는 수압(세이칸 터널)

(3) 배수형 터널과 비배수형 터널의 적용

배수형 터널은 터널의 배수시설은 수명기간동안 유입수를 원활히 처리할 수 있도록 계획하여야 한다.

터널 내부를 완전히 건조한 상태로 유지하여야 하거나 내부에 습기에 민감한 시설물이 있을 경우 또는 유해 지하수로부터 콘크리트 라이닝을 보호해 주어야 할 경우에는 외부배수형을 채택하는 것이 바림직하다. 배수형 터널은 유입수처리 및 시설물 유지관리비를 증가시키기 때문에 유입수량을 최대로 억제해주는 시공법을 병행해야 하

며, 터널의 내구연한동안 배수시설의 기능이 충분히 유지되어 콘크리트 라이닝에 수압이 작용하지 않도록 고려하여야 한다. 지하수위 수두는 높지만 지반의 투수성이 적어 터널 내부로의 유입수가 소량일 것으로 판단되는 지역은 모두 이러한 배수 터널을 채택하여야 한다. 강이나 하천하부 등과 같이 지하수 유입이 많을 것으로 예상되는 지반조건에서 적극적인 차수 그라우팅을 실시하여 유입수량을 현격히 감소시켰을 경우에도 배수형 터널을 적용하도록 한다.

지하수위 저하로 인한 터널주위의 지반침하가 발생하고, 주요 시설물에 영향을 미쳐 사회·경제적 손실발생이 우려되어 지하수위를 보존하여야 하거나, 차수공법으로는 지하수의 유입량을 감소시킬 수 없어서 고가의 유지비를 장기간 지불하여야 할 경우 등과 같은 경우에는 지하수를 인위적으로 배수시키지 않는 비배수형 터널을 채택한다.

배수형을 선택하는 경우에도 유입량 예측, 부직포의 통수능력, 부직포의 Clogging으로 인한 라이닝에 작용되는 수압문제, 지하수 하강으로 인한 지표침하 문제 등을 고려한 설계가 되어져야 한다. 특히 부직포로 완전배수가 되었다고 해도, 물이 흐름으로 인한 투수압의 고려는 반드시 설계에서 감안해 주어야 한다.

방수형 터널의 경우에는 방수형 터널로 설계·시공하기 위한 시공이음부의 상세, 이중 방수막법 등의 연구와 준비가 있어야 한다.

2. 배수형 쉴드터널의 이론적 배경 정립

배수터널의 설계개념은 배수시설이 정상적으로 가동된다는 가정하에서 수압의 영향을 고려하지 않는 것이 일반적이나, 지하수의 공급원이 충분하여 지하수위의 저하가 크지 않은 하천 인접구간 등에서는 침투력이 라이닝에 작용하므로 수압을 고려하지 않으면 터널안정성에 문제가 발생할 수 있다. 지하수위의 저하가 크지 않은 배수터널에서는 지하수의 흐름이 발생하며, 이로 인하여 지중응력의 상태가 변하므로 라이닝에 영향을 끼친다. 흙 자체는 아칭현상에 의하여, 토압의 감소를 가져올 수 있으나, 침투압은 물이 흙 사이로 흘러감으로 인하여 생성되는 압력이기 때문에 아칭현상이 존재하지 않아 큰 압력이 터널의 지보 시스템에 작용될 수 있다.[3)]

또한 기존 배수개념의 설계가 많이 이루어지고 있는 NATM터널의 경우에서도 장기적인 관점에서 터널의 배수층을 형성하는 배수재의 성능저하와 열화 등으로 인한 누수로 인하여 터널상부에 상당한 수압이 발생하는 것으로 알려져 있다.

많은 전문가들이 배수개념의 터널설계 시 수압을 0으로 보는 것은 적절하지 않다고 보고 있으나 이에 대한 충분한 수압 계측자료와 연구가 부족한 실정이다.

배수개념의 터널 설계 시 배수재의 성능저하는 수압의 작용으로 이어져 구조물의 안정성을 위협할 수 있으며 기존 비비수 개념의 설계에서 발생하는 누수문제 역시 구조물의 손상으로 이어질 수 있다. 배수재의 성능저하로 인한 수압작용을 방지하기 위해 유입수량을 모두 배수시키기에 충분한 용량을 가진 배수구가 필요하므로 본 과제의 배수 유로홈이 배수구의 역할을 수행하여 배수기능을 하며 누수를 방지할 수 있다.

또한 기존 배수형 개념이 많이 사용되고 있는 NATM터널에서는 수압의 작용유무가 검증되지 않고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 배수시 수압작용의 거동을 분석하기 위하여 비배수시와 배수시의 전응력 및 간극수압을 측정할 수 있는 축소모형실험장비를 제작하여 터널상부에 작용하는 수압을 측정하여 수압모델을 제시하였다..

제시된 수압모델을 통하여 부분배수형 쉴드터널의 안정성을 평가하였고, 기존에 실시되었던 설계와 비교분석을 통하여 비배수터널과의 세그먼트의 단면 축소 및 철근량 축소방안을 제시하였다.

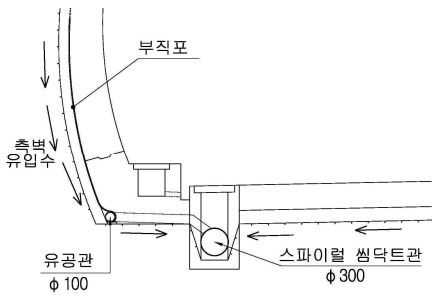
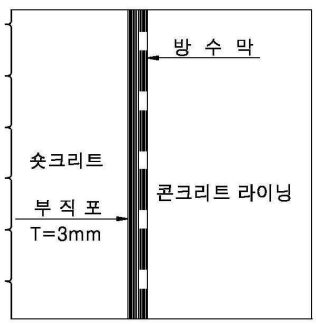
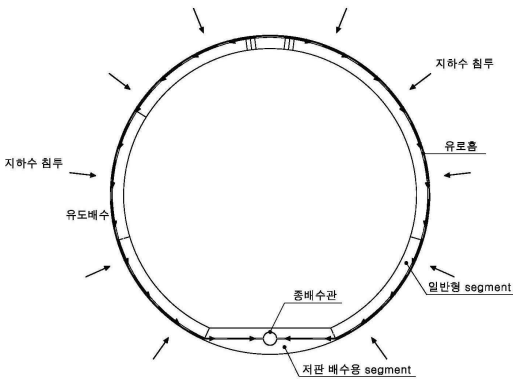
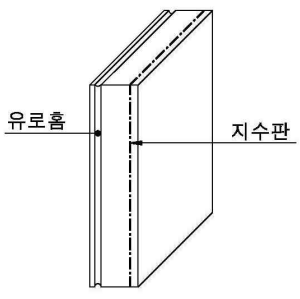
3. 배수 유로홈의 배수성능 고찰

가. 배수형 NATM 터널과 배수 성능 비교

NATM 공법은 현장타설 콘크리트 라이닝의 터널 굴진과 보강 작업이 완료된 후 방수 및 배수 작업이 이루어져 주변 여건 등에 따라 지하수 처리 방식을 선택할 수 있는 반면, 쉴드(Shield)터널의 경우 터널 굴진 중 세그먼트의 거치 작업과 동시에 방수 작업이 이루어져 대부분 비배수 공법을 적용하고 있기 때문에 세그먼트 라이닝에 수압이 작용하지 않도록 할 수 있는 슬림형 세그먼트 기술을 개발하면 세그먼트 두께 감소 및 철근량 축소로 쉴드터널의 경제성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

쉴드터널 세그먼트의 유도배수를 위해서는 NATM공법처럼 라이닝 외부로 배수가 어렵기 때문에 세그먼트 사이로 누수를 발생시켜 이를 유도 처리하는 방안을 검토하였다.

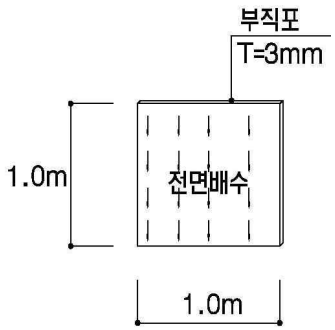
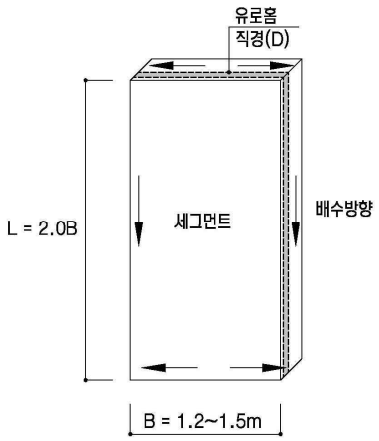
표 2.4.3 기존 터널 배수 시스템과의 비교

구분	NATM 터널 유도 배수	쉴드터널 유도 배수
유도배수 원리	콘크리트라이닝 배면의 부직포 전면을 통해 유입되는 지하수를 종방향 유공관에서 집수 처리	세그먼트 내부에 설치된 유로홈을 통해 침투된 지하수를 종배수관이 구비된 저부 세그먼트에서 집수 처리
개요 및 상세도	 	 

NATM 공법의 배수공법은 대부분 부직포 전면을 통해 유입되는 지하수를 종방향 배수관에서 집수하여 처리하는 방식을 적용하였다. NATM 공법의 배수재로 사용되는 부직포의 두께(T)를 3mm로 가정하였을 경우 부직포의 단위면적당 집수량(Q1)은 0.003㎥ 로 산정되며, 쉴드터널 배수 유로홈에 의한 세그먼트 단위면적당 집수량(Q2) 산정된다.

$$Q_2 = \frac{\pi \times D^2}{4} \times 2EA \quad (D : \text{유로홈 직경})$$

표 2.4.4 기존 터널 배수 시스템과의 배수 성능 비교

NATM 터널 배수	쉴드터널 배수 유로홈 배수
 • 단위면적당 집수량 : Q1 = 0.003m3	 • 단위면적당 집수량 : $Q_2 = \frac{\pi \times D^2}{4} \times 2EA$ • 세그먼트 폭당 등가 유로홈 직경(D) - 산출방법 : Q1 = Q2 공식에서 산출 - 등가 유로홈 직경 : Dreq = 43mm

일반적으로 배수형 터널공법을 적용하고 있는 NATM터널과 동등한 배수성능을 발휘하도록 NATM에서 배수재로 사용되는 부직포의 통수능을 확보할 수 있도록 유로홈의 규격을 검토하였으며, 관수로 개념에서의 배수용량 검토를 통한 유로홈의 규격을 검토하였다.

터널 내로 유입되는 지하수량은 지질적, 지형적 조건 등의 많은 영향에 의해 그 정확한 양을 산출하기는 매우 어려우므로 기존의 문헌 및 사례 분석 등을 통해 터널 내 유입되는 지하수량을 종합적으로 분석하였다.

표 2.4.5 기존 설계 적용 사례

구분	도심지 지하철터널	산 악 철도터널	둔내 터널	육십령 터 널	대관령 터 널	지하철 3,4호선	
						BOX구간	단선터널
대상지반	토사-연암	경암	경암	경암	경암	-	-
투수계수	비교적 큼	극히작음	작음	작음	작음	-	-
적용용수량 (㎥/min/km)	평균 1.547 최대 2.390	평균 0.657 최대 1.210	3.0	2.0	3.0	2.0	3.0

표 2.4.6 운영 중 터널 측정 사례

구분	서울지하철 3호선					서울지하철 4호선	
	독립문	홍제사거리	경복궁	종로3가	고속터미널	동대문	길음
통과하천	인왕산지류	홍제천	북아산지류	청계천	반포천	청계천	정릉천
터널구성	단선병렬	단선병렬	단선병렬	단선병렬	2-Arch	단선병렬	단선병렬
용수량 (㎥/min/km)	3.79	2.30	2.24	2.41	0.35	1.80	0.87

기존 터널 설계시 적용된 기준 용수량의 범위는 0.6~3.0㎥/min/km 정도이며, 2.0~3.0㎥/min/km의 기준 용수량을 적용한 사례가 다수 있다.[4] 기존의 문헌 및 사례 분석 등을 통해 터널 내 유입되는 지하수량을 종합적으로 분석하여 볼 때, 유입수량의 범위가 상당히 넓어 배수 유로홈 규격 검토를 위한 유입수량을 0.5, 1.0, 3.0 ㎥/min/km으로 세 가지 경우를 적용하여 비교 검토를 수행하였다.

경험식을 바탕으로 한 유입수량에 따른 유로홈 규격 검토 : 터널 직경 8m, 터널 길이를 1km로 가정하여 유로홈 규격 검토시 유입수량을 0.5, 1.0, 3.0㎥/min/km를 적용하여 세그먼트 폭 1.2m, 1.5m에 대해 검토하였으며, 규격검토 시에는 Manning 공식 적용하였다.

$$Q_d = AV = A \cdot 1/n \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

여기서, A = 배수로 단면적(㎡)

D = 관 지름(m)

I = 동수경사(종단경사)

V = 관내 유속(m/sec)

R = 동수반경

n = 조도 계수

표 2.4.7 기준용수량 0.5㎥/min/km적용시 유로홈 규격 검토

세그먼트폭 (m)	규 격 (mm)	유효단면적(㎡)	윤 변 P(m)	경 심 R(m)	조도계수(n)	터널경사(I)	유 속 V(m/sec)	통 수 능 Q_c(㎥/sec)	처리 요구량 Q_0(㎥/sec)	검토 결과
1.2m	20	0.0003	0.044	0.006	0.013	0.400	1.606	0.0136	0.0083	O.K
	30	0.0006	0.066	0.009	0.013	0.400	2.105	0.0401	0.0083	O.K
	40	0.0011	0.089	0.012	0.013	0.400	2.550	0.0863	0.0083	O.K
	50	0.0017	0.111	0.015	0.013	0.400	2.959	0.1565	0.0083	O.K
1.5m	20	0.0003	0.044	0.006	0.013	0.400	1.606	0.0109	0.0083	O.K
	30	0.0006	0.066	0.009	0.013	0.400	2.105	0.0321	0.0083	O.K
	40	0.0011	0.089	0.012	0.013	0.400	2.550	0.0691	0.0083	O.K
	50	0.0017	0.111	0.015	0.013	0.400	2.959	0.1252	0.0083	O.K

표 2.4.8 기준용수량 1.0㎥/min/km적용시 유로홈 규격 검토

세그먼트폭 (m)	규 격 (mm)	유효 단면적 (㎡)	윤 변 P(m)	경 심 R(m)	조도계수(n)	터널경사(I)	유 속 V(m/sec)	통 수 능 Q_c(㎥/sec)	처리 요구량 Q_0(㎥/sec)	검토 결과
1.2m	20	0.0003	0.044	0.006	0.013	0.400	1.606	0.0136	0.0167	N.G
	30	0.0006	0.066	0.009	0.013	0.400	2.105	0.0401	0.0167	O.K
	40	0.0011	0.089	0.012	0.013	0.400	2.550	0.0863	0.0167	O.K
	50	0.0017	0.111	0.015	0.013	0.400	2.959	0.1565	0.0167	O.K
1.5m	20	0.0003	0.044	0.006	0.013	0.400	1.606	0.0109	0.0167	N.G
	30	0.0006	0.066	0.009	0.013	0.400	2.105	0.0321	0.0167	O.K
	40	0.0011	0.089	0.012	0.013	0.400	2.550	0.0691	0.0167	O.K
	50	0.0017	0.111	0.015	0.013	0.400	2.959	0.1252	0.0167	O.K

표 2.4.9 기준용수량 3.0㎥/min/km적용시 유로홈 규격 검토

세그먼트폭 (m)	규 격 (mm)	유효단면적(㎡)	윤 변 P(m)	경 심 R(m)	조도계수(n)	터널경사(I)	유 속 V(m/sec)	통 수 능 Q_c(㎥/sec)	처리요구량 Q_0(㎥/sec)	검토결과
1.2m	20	0.0003	0.044	0.006	0.013	0.400	1.606	0.0136	0.0500	N.G
	30	0.0006	0.066	0.009	0.013	0.400	2.105	0.0401	0.0500	N.G
	40	0.0011	0.089	0.012	0.013	0.400	2.550	0.0863	0.0500	O.K
	50	0.0017	0.111	0.015	0.013	0.400	2.959	0.1565	0.0500	O.K
1.5m	20	0.0003	0.044	0.006	0.013	0.400	1.606	0.0109	0.0500	N.G
	30	0.0006	0.066	0.009	0.013	0.400	2.105	0.0321	0.0500	N.G
	40	0.0011	0.089	0.012	0.013	0.400	2.550	0.0691	0.0500	O.K
	50	0.0017	0.111	0.015	0.013	0.400	2.959	0.1252	0.0500	O.K

규격 검토 결과, 유입수량 0.5 ㎥/min/km일 경우 유로홈의 규격은 세그먼트 폭 1.2m, 1.5m 모두 20mm에서도 배수량을 만족하였다. 유입수량 1.0 ㎥/min/km일 경우 유로홈의 규격은 세그먼트 폭 1.2m, 1.5m 모두 30mm에서 배수량을 만족하였으며, 유입수량 3.0 ㎥/min/km일 경우 유로홈의 규격은 세그먼트 폭 1.2m, 1.5m 모두 40mm에서 배수량을 만족하였다.

나. 영향인자에 따른 배수성능 산정

배수성능 계산시 주로 사용되는 Manning공식을 적용하게 될 경우 배수성능에 영향을 미치게 되는 인자는 아래와 같다. 배수성능에 영향을 미치는 인자는 조도계수 n, 동수반경 R_h, 수로경사 S, 흐름단면적 A로 구분. 동수반경 및 흐름단면적은 배수 유로홈의 크기에 따라 달라지게 되며 그 제원이 결정될 경우 결국 주요 영향 인자는 조도계수 n이다.[5)]

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} S_0^{1/2} = C' A R_h^{2/3} \; (C' = S_0^{1/2}/n = const.)$$

표 2.4.10 관재질에 따른 Manning식의 조도계수 n

단 면 재 질			조도계수(n)
관거	시멘트관		0.011~0.015
	벽 돌		0.013~0.017
	주철관		0.011~0.015
	콘크리트	매끄러운 표면	0.012~0.014
		거친 표면	0.015~0.017
	콘크리트관		0.011~0.015
	주름형의 금속관	보통관	0.022~0.026
		포장된 인버트	0.018~0.022
	아스팔트 라이닝		0.011~0.015
	플라스틱관(매끄러운 표면)		0.011~0.015
	점토	도관	0.011~0.015
		깔판	0.013~0.017
개거	인공수로	아스팔트	0.013~0.017
		벽돌	0.012~0.018
		콘크리트	0.011~0.020
		자갈	0.020~0.035
		식물	0.030~0.040

쉴드터널 라이닝의 배수 유로홈(직경 30~50mm)에 대하여 배수 가능한 유량을 Manning 공식을 적용하여 산정하였다. 직경 30mm, 40mm, 그리고 50mm의 직경을 가지고 있는 배수 유로홈에 대하여 유로홈이 설치되는 세그먼트의 종단경사를 변화(0.001~0.030)시켜 가며 배수성능을 산정하였으며, Manning의 조도계수는 콘크리트관에서 주로 사용되는 0.013을 공통적으로 적용하였다.

표 2.4.11 영향인자에 따른 배수유로홈 배수성능 검토(D=30mm)

종단경사 S(m/m)	조도계수 n(무차원)	C' (무차원)	단면적 A(㎡)	동수반경 R_h(m)	배수성능 Q(㎥ /hr)	비 고
0.001	0.013	2.433	0.000707	0.0075	0.24	
0.002	0.013	3.440	0.000707	0.0075	0.34	
0.004	0.013	4.865	0.000707	0.0075	0.47	
0.006	0.013	5.958	0.000707	0.0075	0.58	
0.008	0.013	6.880	0.000707	0.0075	0.67	
0.010	0.013	7.692	0.000707	0.0075	0.75	
0.012	0.013	8.427	0.000707	0.0075	0.82	$Q=\frac{1}{n}AR_h^{2/3}S_0^{1/2}$
0.014	0.013	9.102	0.000707	0.0075	0.89	$=C'AR_h^{2/3}$
0.016	0.013	9.730	0.000707	0.0075	0.95	
0.018	0.013	10.320	0.000707	0.0075	1.01	$(C'=\frac{S_0^{1/2}}{n})$
0.020	0.013	10.879	0.000707	0.0075	1.06	
0.022	0.013	11.410	0.000707	0.0075	1.11	
0.024	0.013	11.917	0.000707	0.0075	1.16	
0.026	0.013	12.403	0.000707	0.0075	1.21	
0.028	0.013	12.872	0.000707	0.0075	1.26	
0.030	0.013	13.323	0.000707	0.0075	1.30	

표 2.4.12 영향인자에 따른 배수유로홈 배수성능 검토(D=40mm)

종단경사 S(m/m)	조도계수 n(무차원)	C' (무차원)	단면적 A(㎡)	동수반경 R_h(m)	배수성능 Q(㎥ /hr)	비 고
0.001	0.013	2.433	0.001257	0.01	0.51	
0.002	0.013	3.440	0.001257	0.01	0.72	
0.004	0.013	4.865	0.001257	0.01	1.02	
0.006	0.013	5.958	0.001257	0.01	1.25	
0.008	0.013	6.880	0.001257	0.01	1.44	
0.010	0.013	7.692	0.001257	0.01	1.62	$Q=\frac{1}{n}AR_h^{2/3}S_0^{1/2}$
0.012	0.013	8.427	0.001257	0.01	1.77	
0.014	0.013	9.102	0.001257	0.01	1.91	$=C'AR_h^{2/3}$
0.016	0.013	9.730	0.001257	0.01	2.04	
0.018	0.013	10.320	0.001257	0.01	2.17	
0.020	0.013	10.879	0.001257	0.01	2.28	$(C'=\frac{S_0^{1/2}}{n})$
0.022	0.013	11.410	0.001257	0.01	2.40	
0.024	0.013	11.917	0.001257	0.01	2.50	
0.026	0.013	12.403	0.001257	0.01	2.60	
0.028	0.013	12.872	0.001257	0.01	2.70	
0.030	0.013	13.323	0.001257	0.01	2.80	

표 2.4.13 영향인자에 따른 배수유로홈 배수성능 검토(D=50mm)

종단경사 S(m/m)	조도계수 n(무차원)	C' (무차원)	단면적 A(㎡)	동수반경 R_h(m)	배수성능 Q(㎥ /hr)	비 고
0.001	0.013	2.433	0.001963	0.0125	0.93	
0.002	0.013	3.440	0.001963	0.0125	1.31	
0.004	0.013	4.865	0.001963	0.0125	1.85	
0.006	0.013	5.958	0.001963	0.0125	2.27	
0.008	0.013	6.880	0.001963	0.0125	2.62	
0.010	0.013	7.692	0.001963	0.0125	2.93	$Q=\frac{1}{n}AR_h^{2/3}S_0^{1/2}$
0.012	0.013	8.427	0.001963	0.0125	3.21	
0.014	0.013	9.102	0.001963	0.0125	3.47	$=C'AR_h^{2/3}$
0.016	0.013	9.730	0.001963	0.0125	3.70	
0.018	0.013	10.320	0.001963	0.0125	3.93	
0.020	0.013	10.879	0.001963	0.0125	4.14	$(C'=\frac{S_0^{1/2}}{n})$
0.022	0.013	11.410	0.001963	0.0125	4.34	
0.024	0.013	11.917	0.001963	0.0125	4.54	
0.026	0.013	12.403	0.001963	0.0125	4.72	
0.028	0.013	12.872	0.001963	0.0125	4.90	
0.030	0.013	13.323	0.001963	0.0125	5.07	

다. 수리학적 요소를 고려한 거동 분석

(1) 배수 유로홈 적정 규격 검토 결과

이론상 NATM의 유도배수 조건과 동등한 배수 성능을 발휘하기 위해서 부직포의 집수량에 상응하는 유로홈의 규격 검토 결과 유로홈의 직경은 ∅43mm 이상이 필요한 것으로 검토되었다. 또한, 터널 내 유입수를 처리하는 배수관으로서의 유로홈의 적정 규격은 터널 내 지하수 유입수량에 따라 ∅20~40mm의 직경이 필요한 것으로 검토되었다. NATM과 동등한 배수성능 기준으로는 유로홈의 규격이 ∅43mm 이상이 필요하지만 실측 지하수량, 설계 적용사례, 관련문헌 등을 종합적으로 검토해 볼 때, 실제 유로홈의 적정 규격은 ∅20~40mm가 바람직할 것으로 판단되며, 실제 설계시 터널 배수가 원활하지 않거나 예상치 못한 다량의 용수 발생 가능성을 고려하여 기준 용수량을 3.0 ㎥/min/km로 설계에 적용하는 것을 감안하여 본 검토의 유로홈 적정 규격을 ∅40mm로 산정하였다.

(2) 수치해석을 통한 침투 수압 검토

앞서 검토된 유로홈의 규격을 적용하여 침투류 해석을 통하여 세그먼트 라이닝에 작용하는 수압을 확인하기 위하여 수치해석적 검토를 수행하였다. 해석에 사용된 프로그램은 GEO-SLOPE사의 SEEP/W로 포화 및 불포화된 지반에 대한 정상류(steady-state flow) 및 부정류(trasient flow) 흐름방정식을 유한요소법에 의하여 계산하는 프로그램이다. 해석에 사용된 해석 단면은 아래의 그림 2.4.5와 같으며 해석대상 지반의 투수계수는 1×10^{-5}cm/sec로 설정하였다.

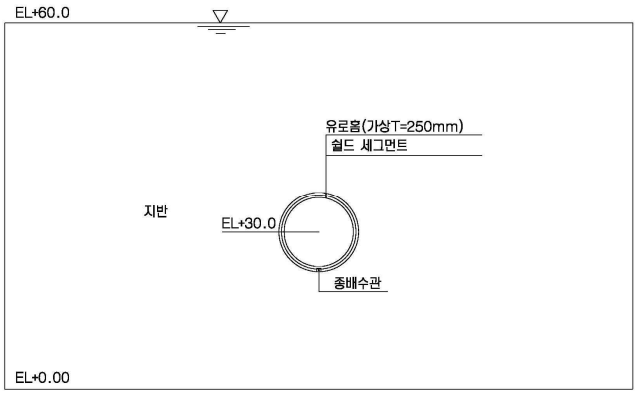


그림 2.4.12 해석 적용 단면

해석에 사용된 유로홈 규격은 40mm로 적용하였으며 유로홈은 단위폭 당 일정한 두께를 갖는 부직포로 가정하였을 때 환산두께 1.25mm로 산정하여 해석을 실시하였다. 해석에 사용된 유로홈의 투수계수는 일반적으로 사용되는 부직포의 투수계수 1×10-1cm/sec를 사용하였으며, 유로홈의 모델링은 유한요소 해석시 모델링의 용이함을 위하여 두께 250mm의 요소로 모델링하였으며, 두께 비율에 따라 투수계수를 저감시켜 해석에 적용하였다.

침투류 해석 결과 세그먼트 라이닝 배면에 간극수압은 2.24kPa로 지하수에 의한 수압은 거의 작용하지 않는 것으로 나타났으며, 유로홈에 유입되는 지하수의 유입량은 0.499㎥/min/km(8.31×10-6㎥/sec/m)로 기준 용수량인 3.0㎥/min/km를 초과하지 않는 것으로 나타났다.

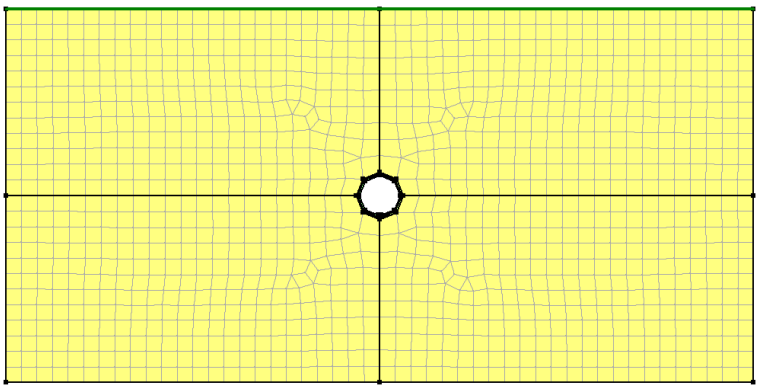


그림 2.4.13 해석 적용 모델링

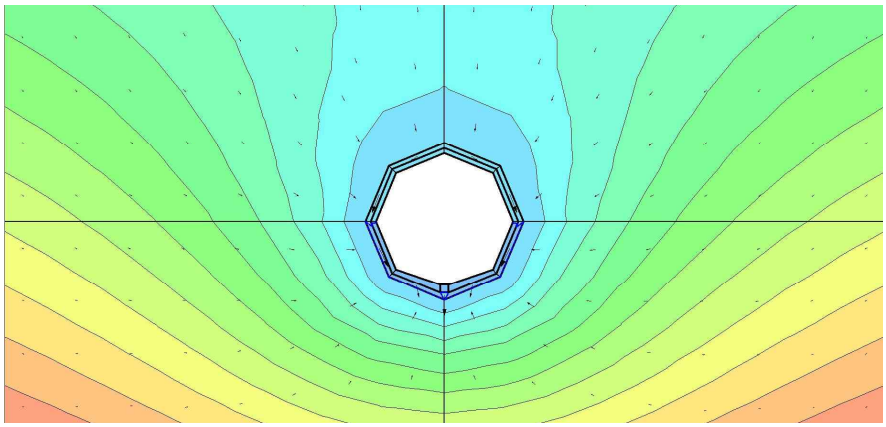


그림 2.4.14 해석 결과 - 유속 벡터

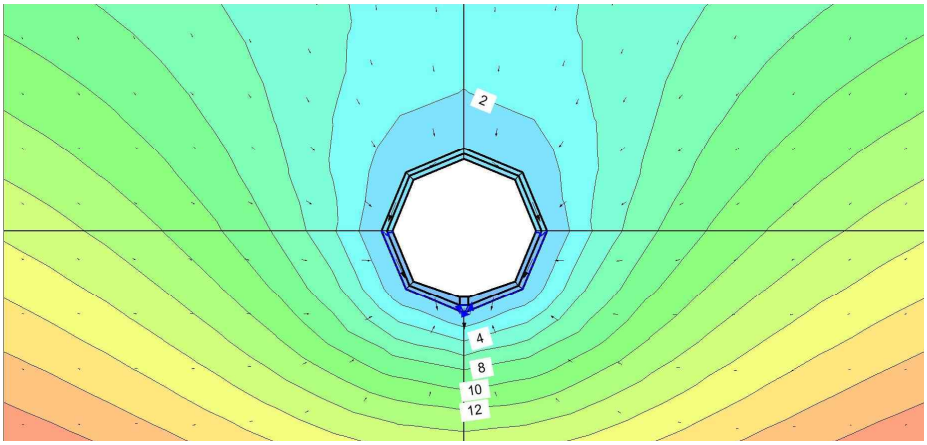


그림 2.4.15 해석 결과 - 터널 주변 수압 분포

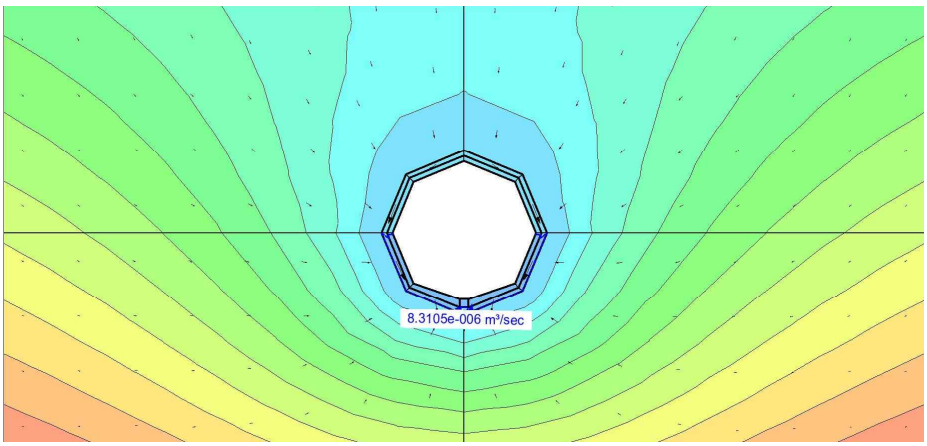


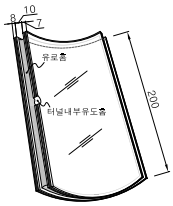
그림 2.4.16 해석 결과 - 터널 유입 용수량

4. 배수 유로홈내 지하수 이동 메커니즘의 시각적 검증

가. 모의실험 개요

배수 유로홈내 지하수 메커니즘의 시각적 검증을 위해 모의실험을 실시하였다. 배수 유로홈을 가공한 세그먼트부, 터널주변 지하수를 보관하게 될 모형수조, 그리고 수압의 변화를 고려하게 될 가압장비로 실험체를 구축하였다.

일반적인 쉴드터널은 키세그먼트를 포함하여 7~8개 정도의 세그먼트를 조합하여 하나의 링이 조립된다. 모의실험에서는 배수 유로홈내 지하수 이동의 시각적 검증이 주된 목적이기 때문에 쉴드 세그먼트 접속부의 배수 유로홈 형상과 크기, 유로홈 간의 연결구조 등을 모사하는데 중점을 두었다.

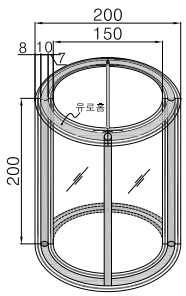


(a) 세그먼트의 제원



(b) 세그먼트의 전경

그림 2.4.17 모의 실험용 세그먼트



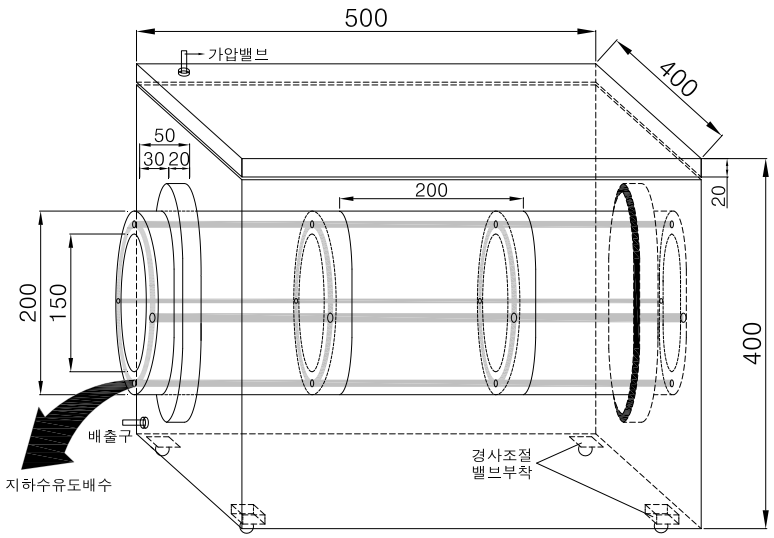
(a) 세그먼트의 제원



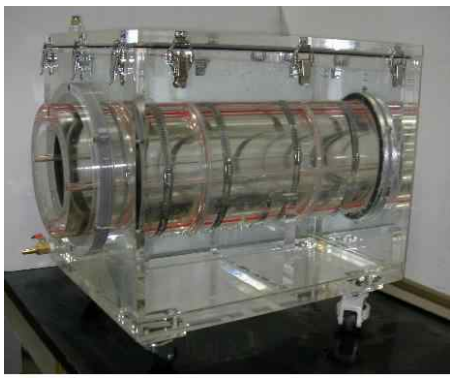
(b) 세그먼트의 전경

그림 2.4.18 모의 실험용 세그먼트 링

모형수조에는 쉴드 세그먼트가 함께 설치된 상태로서 모형수조는 높이와 폭이 각 40cm, 길이 50cm이며, 상부 덮개 분리가 가능하다. 일정량의 물이 채워진 후에는 두껑을 덮고, 가압밸브를 가압장치와 연결함으로 수조내 수압 변경이 가능하다.



(a) 수조 설계



(b) 제작된 수조 모습



(c) 수조에 물 채우는 모습

그림 2.4.19 모의 실험용 수조



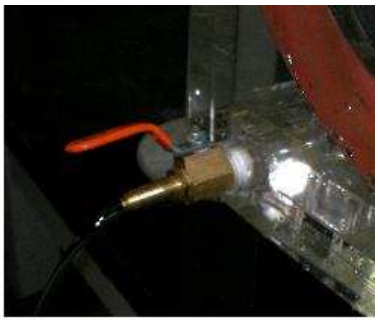
(a) 모형수조 두껑 개폐장치



(b) 모형수조 기울기 조정장치



(c) 가압용 밸브



(d) 모형수조 배출구

그림 2.4.20 모형 수조의 부속장치

모의 실험을 통한 배수 유로홈내 지하수 이동은 배수 유로홈을 통해 지하수가 유도 배수되는 것을 시각적으로 확인하는 것이며, 유로홈에 유입된 지하수는 쉴드 세그먼트의 아래 부분에 가동된 유로홈을 통해 외부로 배수 처리가 된다.

나. 모의실험 결과

○ Case-1 : 모형수조에 물을 가득히 채운상태로 가압장치를 사용하지 않은 상태에서 모형쉴드터널의 누수상태 관찰하였다. 세그먼트간의 접촉면에 전혀 손상이 없는 상태이므로 유로홈을 통한 지하수의 유출이 전혀 발생하고 있지 않는 상태이다.

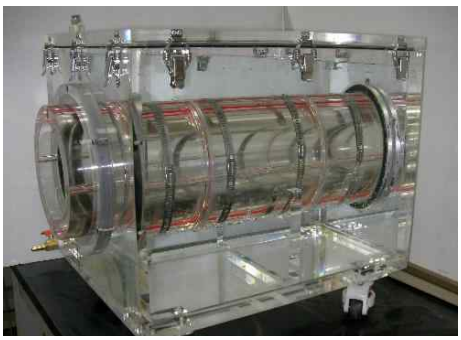


그림 2.4.21 Case-1 실험 상태

○ Case-2 : 세그먼트의 접속면에 손상을 가함으로서, 배면의 지하수가 유입되도록 하였다. 가압장치는 사용하지 않았으며, 쉴드 세그먼트의 중심에서 약 20cm 정도의 수압만이 작용하는 상태이다. 쉴드 세그먼트 하부에 설치된 유로홈을 통해 지하수가 이동되고 있는 것을 확인하였다.

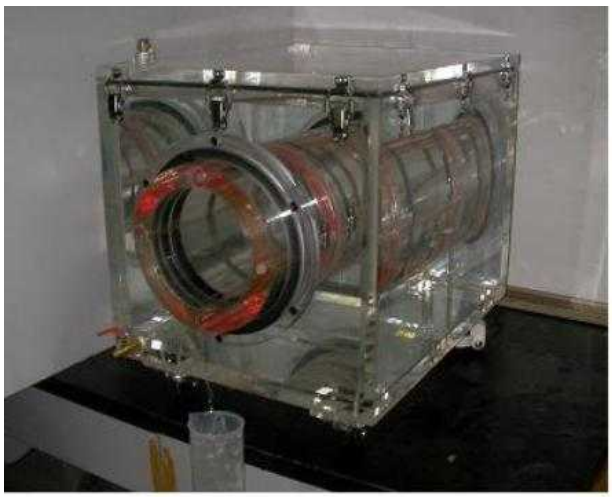


그림 2.4.22 Case-2 실험 상태

○ Case-3 : Case-2 상태에서 모형수조 상부에 가압. 공기압 0.25kg/㎠로 쉴드터널 상부에 약 2.5m 수두상태 재현하였다. 세그먼트의 접속면에 손상이 발생한 상태에서 공기압에 의해 유로홈을 통한 누수량이 증가되는 것을 확인하였다.



그림 2.4.23 Case-3 실험 상태



그림 2.4.24 Case-3에서 지하수 이동 모습

○ Case-4 : Case-3에서 가압량을 높인 것으로서, 공기압 0.5kg/㎠ 쉴드터널 상부 약 5.0m 수두상태를 재현하였다. 세그먼트의 접속면에 손상이 발생한 상태, 유로홈을 통한 누수량이 더욱 증가되는 것을 확인하였다.

○ 세그먼트 접속부를 통해 서로 연속적으로 연결된 유로홈에서 유도된 배면 지하수는 쉴드 세그먼트의 자연경사를 따라 흐르게 되며, 이때 쉴드 하부 배수 유로홈과 만나게 되는 순간, 쉴드터널 내부로 유도배수가 발생하였다. 가하는 공기압이 커짐에 따라 유로홈을 통해 누출되는 누수량이 점차 증가하는 것을 확인하였다.



그림 2.4.25 배수 유로홈내 지하수 이동의 시각적 검증

○ 국내 전력구 쉴드터널에서 터널내부로 지하수가 누출됨에 따라 발생하는 양수량은 0.24㎥/min/km로 조사되었다. 이를 환산하면 0.04㎤/sec/cm로서, 모의실험에서 누수 발생량은 더 크게 나타난다.

표 2.4.14 모의실험의 누수량

구 분	가압 크기	원지반	실험에 의한 누수량	비고
Case-2	0 kg/cm^2	0.2m	0.09cm^3/초/cm	
Case-3	0.25 kg/cm^2	2.5m	0.29cm^3/초/cm	
Case-4	0.50 kg/cm^2	5.0m	0.40cm^3/초/cm	

소결론

배수조건에 따른 터널 세그먼트 라이닝에 작용하는 수압에 대한 연구자료 조사를 통하여 배수형 쉴드터널의 이론적 배경을 정립하고, 기존 배수형 터널과의 배수성능 비교 및 안정성 검토를 통하여 배수 유로홈의 적용성 검토를 수행하였다.

(1) 일반적으로 비배수 터널의 경우는 정수압의 작용을 받고, 배수 터널의 경우 수압을 고려하지 않는 경우가 대부분이나 여러 연구결과 배수 터널의 경우에도 잔류수압등의 영향으로 수압이 작용하는 것으로 조사되었다.

(2) 배수 유로홈의 규격 검토 결과, 유입수량 0.5㎥/min/km일 경우 직경 20mm, 유입수량 1.0㎥/min/km일 경우 직경 30mm, 유입수량 3.0㎥/min/km일 경우 유로홈의 직경 40mm에서 배수량을 만족하였다. 또한 침투류 해석 결과 세그먼트 라이닝 배면에 지하수에 의한 수압은 거의 작용하지 않는 것으로 나타났으며, 유로홈에 유입되는 지하수의 유입량은 0.499㎥/min/km(8.31×10-6㎥/sec/m)로 기준 용수량인 3.0㎥/min/km를 초과하지 않는 것으로 검토되었다.

(3) 배수 유로홈을 모사한 쉴드터널 모형실험결과 수두의 위치를 모사한 가압의 크기가 증가할수록 모형에서 발생되는 누수량은 증가하였으며, 이는 국내 전력구 쉴드터널에서 지하수 누출에 따라 발생되는 양수량보다 큰 것으로 나타났다.

제 5 절 배수형 쉴드터널 최적 뒤채움재 선정

1. 쉴드터널 뒤채움재 특성

쉴드터널 시공에서의 뒤채움재 주입의 목적으로는 크게 3가지로 볼수 있는데, 지반변위 방지(주로 테일보이드에 기인함), 터널의 지수성의 향상, 굴착 후 세그먼의 외부 지반의 조기 안정성 확보(작용 외력의 균등화) 등. 최근 시공환경이 점점 중요시되어가고 있는 현실을 고려하면 지반변위의 방지의 목적이 주목적이 되고 있는 추세이다.. 이것을 달성하기 위해 주입재료, 주입시기, 주입범위, 주입방법 등을 쉴드터널 형식 혹은 굴착 대상 지반성상과의 관계에서 정확하게 파악하는 것이 중요하다.

쉴드 세그먼트에서의 누수현상은 뒤채움재 주입과 밀접한 관계가 있으며, 세그먼트 배면에 실시되는 지수공 역할도 하는 뒤채움재의 주입이 불충분하면 세그먼트 배면에서이 누수현상이 현정하게 증가되어 터널 운용이 곤란하게 될뿐만 아니라 지하수의 유동, 혹은 수위의 저하를 발생시킨다.[1)]

- 지하수위 저하에 따른 지반내 유효응력의 증가에 기인하여 압밀현상이 발생, 지반 변형.

- 지하수 유동에 따라 지반을 구성하는 토립자가 이동하거나, 토립자의 의해 구성되고 있는 공극이 압축되어 지반이 변형.

지중구조물인 쉴드터널의 세그먼트 복공체와 주변지반과의 일체화에 의해 역학적 혹은 구조적 안정성이 유지되는 구조물, 세그먼트 작용외력의 설정도 그 가정에 의거하는 것이며, 이런 의미에서 세그먼트 배면공극의 균일한 주입 및 충진은 작용외력의 균등화를 확보하는 데에 꼭 필요하며 뒤채움재 주입의 중요한 목적이다.

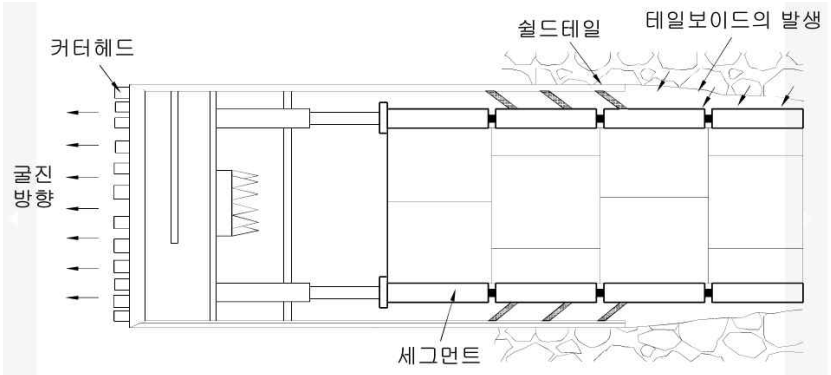


그림 2.5.1 쉴드 굴착시 테이보이드 발생 원인

가. 사용재료 특성에 의한 분류

시멘트계 뒤채움 주입재료는 일반적으로 유동성의 유지시간이 짧고 배관에 의한 장거리 압송이 어려운 점 때문에 시공성이 떨어지며, 이것을 개량한 것이 경화발현시간이 긴 슬러그 석회계로 대표되는 비시멘트계 뒤채움 주입재료이다.

사용되는 골재로서는 모래가 가장 일반적이나 최근에는 벤토나이트, 고령토, 풀라이애쉬, 채석장 등에서 생산되는 석분, 이수식·토압식 쉴드터널 시공에서 배출되는 점토, 실트를 많이 함유한 굴삭이토(액) 등이 최근 사용실적이 증가. 유동성에 뛰어나에어 뒤채움 주입재료는 그 배합에 따라 에어의 감소에 의한 유동성 저로가 있을 수 있으므로 사용에 있어 주의 필요하다.[2)]

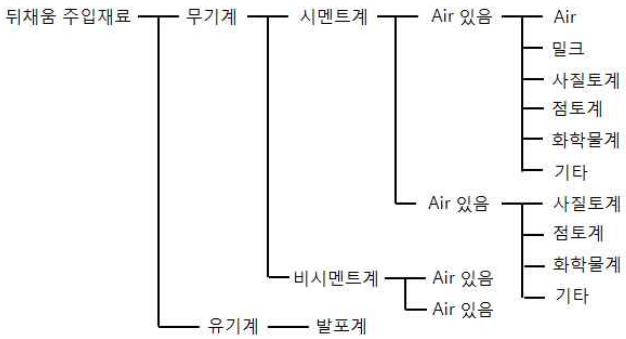


그림 2.5.2 사용재료 특성에 의한 뒤채움 주입재료의 분류

나. 주입상태에 의한 분류

쉴드터널 공법 도입시부터 상당한 기간동안 모르타르, 시멘트 벤토나이트 등으로 대표되는 일액성의 뒤채움 주입재료가 주로 사용되고 있으나, 최근에는 유동성 혹은 겔 조정에 유리한 이액성 뒤채움 주입재료의 사용이 증가하고 있다. 이액성 재료에서도 완결고결형의 뒤채움재가 겔화 시간을 이용하여 주입 및 충진되며, 순결고결형의 뒤채움재에서는 그 고결강도와 주입압력을 이용하여 주입 및 충진이 가능하다.

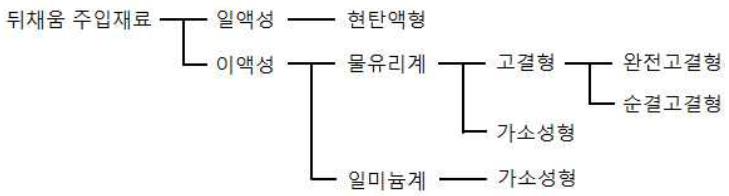


그림 2.5.3 주입상태에 의한 뒤채움 주입재료의 분류

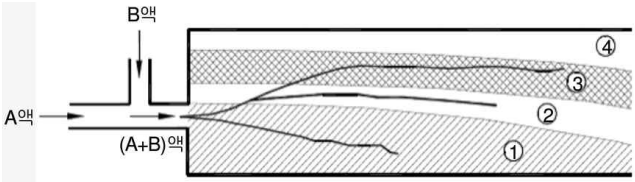
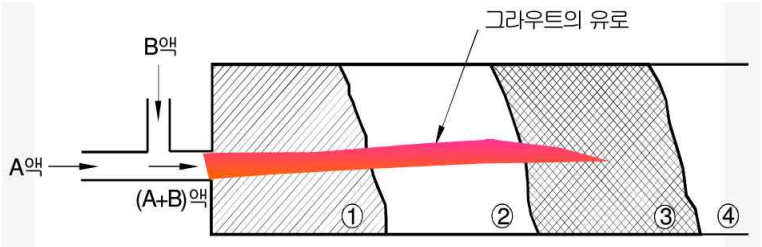
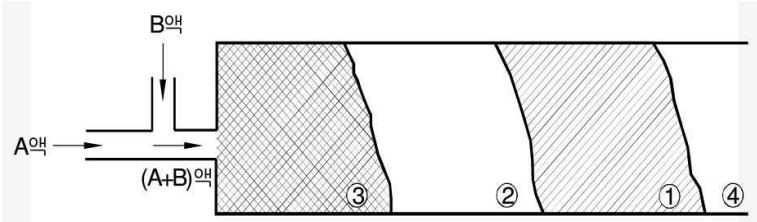


그림 2.5.4 물유리계 2액성 완결고결형 그라우트의 주입 메커니즘



① 최초의 겔화 시간+가소상 고결 영역 유지시간
② 다음의 겔화 시간+가소상 고결 영역 유지시간
③ 그 다음의 겔화 시간+가소상 고결 영역 유지시간
④ 미충전부

그림 2.5.5 순결 고결형 그라우트의 주입 메커니즘



① 최초에 주입된 그라우트
② 다음에 주입된 그라우트
③ 그 다음에 주입된 그라우트
④ 미충전부

그림 2.5.6 가소성형 그라우트의 주입 메커니즘

뒤채움 주입재료가 구비해야할 필요성질은 아래와 같으며 터널표준시방서(쉴드편)(2015) 등 참고한다.[3)]

- 블리딩 등 재료분리를 일으키지 않을 것
- 주입 후의 경화현상에 따른 체적감소율이 적을 것
- 지반에 상당한 균일한 강도가 조기에 얻어질 것
- 유동성이 뛰어날 것

- 충진성(이상적으로 한정범위 충진성)이 뛰어날 것
- 수밀성이 풍부할 것
- 무공해이며 재료비가 저렴할 것

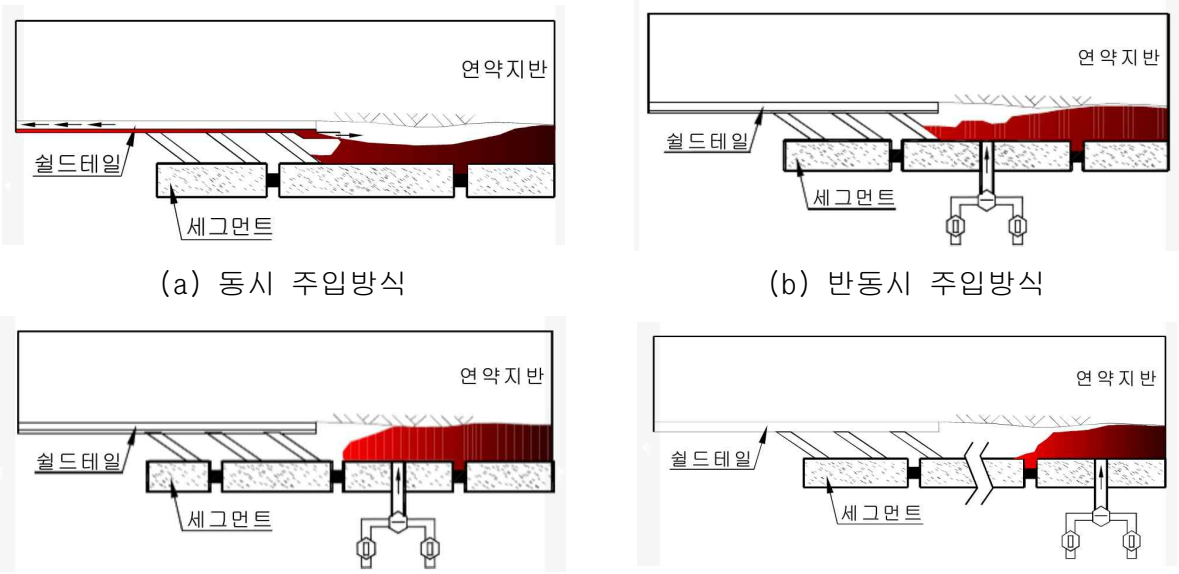
다. 뒤채움재 주입방식의 분류

○ 동시 주입방식 : 뒤채움재 주입의 목적을 고려하면 가장 이상적 방식이라고 할 수 있는 것으로 테일보이드 발생과 주입 및 충진처리가 시차 없이 실시되는 방식. 주입선단장치(주입관)는 일반적으로 쉴드 외측에 설치. 침하억제 유리, 사질지반에서는 추진저항이 크고 고가.

○ 반동시 주입방식 : 세그먼트에 설치된 그라우트홀이 쉴드테일에서 이탈함과 동시에 그라우트홀에서 뒤채움재 주입을 실시하는 방식. 테일 보이드 발생과 보이드 충진과의 시차를 될 수 있는 한 단축하는 것을 목적으로 그라우트홀의 설치위치를 연구하는 경우도 있음. 뒤채움재 주입시 쉴드내부로 유출될 우려가 있음

○ 즉시 주입방식 : 가장 시공실적이 많은 방법으로 1링의 굴진완료마다 실시하는 방식. 시공이 편리, 주변지반의 이완 가능성이 있음

○ 후방 주입방식 : 수 링의 후방의 그라우트홀에서 뒤채움재 주입을 실시하는 방식. 시공이 간다하고 경제적, 테일보이드 확보에 어려움.



(a) 동시 주입방식 (b) 반동시 주입방식

(c) 즉시 주입방식 (d) 후방 주입방식

그림 2.5.7 뒤채움재 주입방식 종류

2. 배수형 쉴드터널 적용을 위한 뒤채움재 조사

가. PS 볼 생성원리 및 특성

제강슬래그는 제철 공정 원료 중에 탄소, 규소, 인, 황 등의 불순물을 제거하기 위해 산소를 주입하면서 이들 원소들이 쉽게 제거 될 수 있도록 첨가제로 생석회(CaO) 등의 환원제를 첨가하는데, 이때 첨가되는 생석회가 황, 규소, 인 등의 산화물과 반응하여 슬래그를 형성한다.[4)]

슬래그에 함유된 금속 철을 회수하기 위해 금속 철을 파쇄 분리하는데, 이런 파쇄 공정을 한 후 자력선별을 통하여 금속 철을 제강원료로 재활용하며, 선별을 통해 남은 제강슬래그는 별도 보관장으로 이동하여 Aging절차를 거쳐 골재 등으로 사용된다.

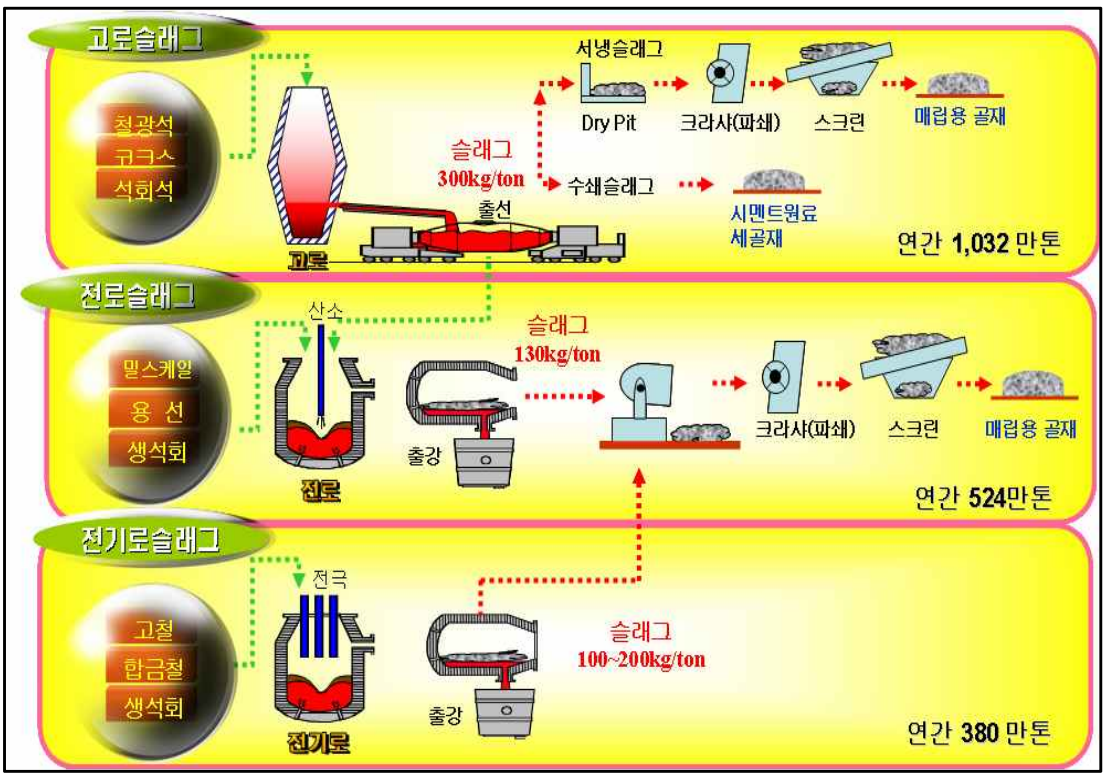
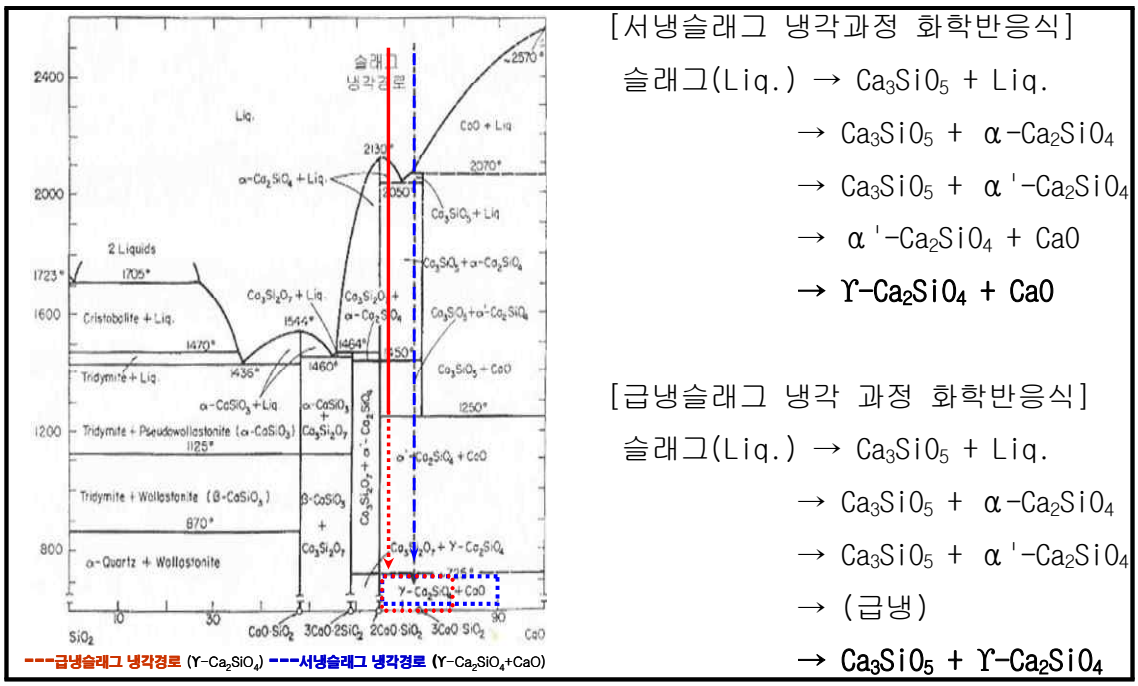


그림 2.5.8 철강슬래그의 발생공정 및 재활용

산업폐기물인 제강슬래그를 턴디시를 통해 낙하시켜, 낙하되는 제강슬래그에 고압의 가스를 분사하여 미세한 액적으로 분리하고, 미세한 액적을 분사된 가스와 주위분위기에 의해 급냉 시킴으로써, 해리되어 있던 이온들이 $(Me)_2O_2$-4 또는 X_2O-$Y_{32}O_3$으로 나타내는 스피넬(spinel) 구조의 안정한 AB_2O_4 복합산화물($CaO{\cdot}Fe_2O_3$,

$SiO_2Fe_2O_3$, $MgFe_2O3$)을 형성하게 된다.

주입된 용융슬래그를 얇고 넓게 펼치는 것이 특징인 턴디쉬에서 고루 퍼지며 턴디쉬를 통과해 흐르는 Melting 상태의 슬래그가 특징적인 각도와, 풍량, 풍압을 유지하는 Atomizing 기류와 충돌을 일으키고 이로 인해 입자화된 일정 크기의 슬래그가 기류를 따라 이동하며, 자체적인 온도강하로 인해 응고됨과 동시에 자체의 표면장력에 의하여 원형의 구형입자를 형성하게 된다. 이러한 과정을 거쳐 PS 볼이 생성되게 된다.



[서냉슬래그 냉각과정 화학반응식]

슬래그(Liq.) → Ca_3SiO_5 + Liq.

→ Ca_3SiO_5 + α-Ca_2SiO_4

→ Ca_3SiO_5 + α'-Ca_2SiO_4

→ α'-Ca_2SiO_4 + CaO

→ **Y-Ca_2SiO_4 + CaO**

[급냉슬래그 냉각 과정 화학반응식]

슬래그(Liq.) → Ca_3SiO_5 + Liq.

→ Ca_3SiO_5 + α-Ca_2SiO_4

→ Ca_3SiO_5 + α'-Ca_2SiO_4

→ (급냉)

→ **Ca_3SiO_5 + Y-Ca_2SiO_4**

그림 2.5.9 슬래그의 온도별 결합구조 변화도

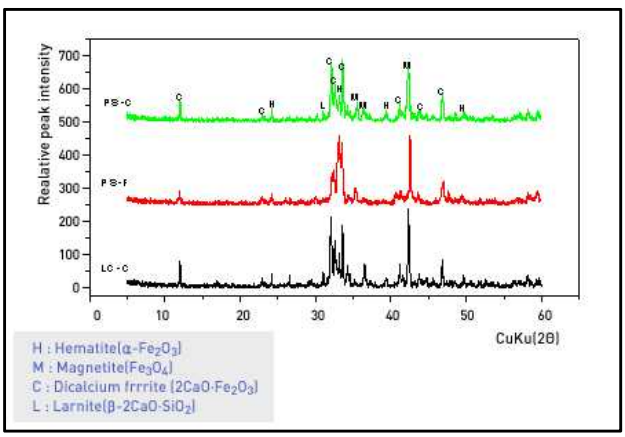


그림 2.5.10 PS Ball의 XRD 분석결과

그림 2.5.11은 PS Ball의 입형을 검토하기 위하여 광학전자현미경(Leica사의 EZ 4D)을 통해 촬영한 결과를 나타낸 것인데, 대체적으로 높은 구형율을 가지는 것으로 나타났다. 생산지별 PS Ball의 단위용적중량과 실적율을 측정 결과 천연골재인 강모래가 1,450~1,700kg/㎥이지만, PS Ball의 경우 샘플 1 2,362kg/㎥, 샘플 2 2,288kg/㎥, 샘플 3 2,618kg/㎥로 기존의 콘크리트용 골재보다 약 1,000kg/㎥ 이상 높게 나타났고, 실적율에 있어서는 강모래가 63%이나 PS Ball은 샘플-1 68%, 샘플-2 64%, 샘플-3 68%로 일반 강모래에 비해 약 5% 정도 높은 것으로 나타났다. 이런 높은 단위용적중량과 실적율은 슬래그의 입형이 구형으로 충전성이 뛰어나기 때문으로 판단된다.

PS Ball의 밀도와 흡수율 실험 결과 밀도는 천연골재(강모래:2.6g/㎤)보다 높은 3.50g/㎤ 이상으로 KS기준(2.50g/㎤ 이상)에 만족하는 것으로 나타났으며, 흡수율에서는 천연골재(강모래:1.2%)보다 낮은 수치로 나타났다.

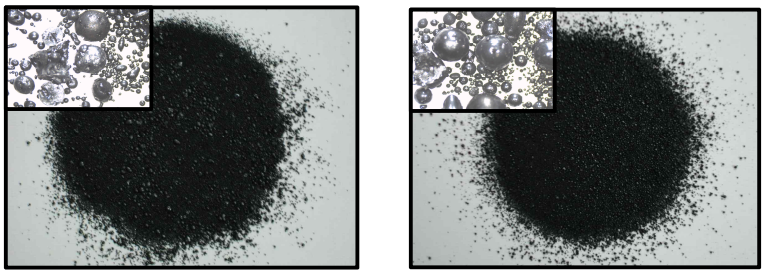


그림 2.5.11 PS Ball의 구형율

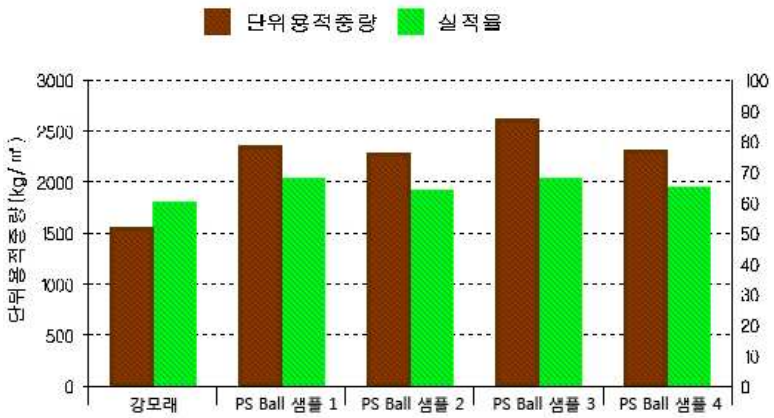


그림 2.5.12 PS Ball 실적율 측정 결과

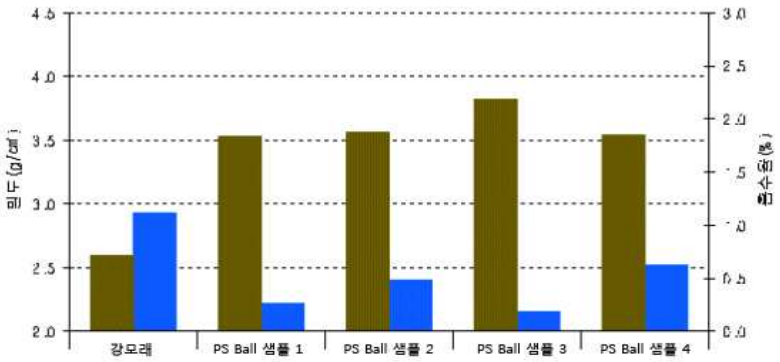


그림 2.5.13 PS Ball 밀도와 흡수율 실험 결과

나. PS 볼 생산 공정

그림 2.5.14는 PS 볼의 생산 공정을 보여주는 것이고, 표 2.5.1은 배수형 쉴드터널의 배면 투수층을 형성시키기 위해 뒤채움재로 활용할 PS 볼 1~2mm 제품에 대한 품질시험 결과를 나타낸 것이다.

PS 볼의 생산 공정을 요약하면 다음과 같다.

① 출탕 : 취련 종료 후 슬래그를 노외로 슬래그 포트에 배출하는 단계.

② 낙하 : 슬래그의 유속을 조절하기 위한 턴디시(Tundish)를 경유하여 낙하하는 단계로서 턴디시(Tundish), 턴디시 지지대(Tundish Structure)로 구성

-Tundish : 슬래그의 유속을 조절하여 위한 용융 슬래그의 단면흐름을 균일하게 유지하여 Atomizing 효율을 극대화할 수 있도록 유도하는 장치이며, 재질은 주강(SC410)으로 구성. 내열성과 고온에서 변형률을 최소화 시키는 기능.

-Tundish Base Frame : Tundish Device를 고정 및 보강해주는 구조물.

③ 가스분사(급냉) : 제강슬래그 처리장치는 급냉을 위한 핵심 시스템인 아토마이저 시스템(Atomizer System)으로 구성, 아토마이저 시스템(Atomizer System)은 크게 아토마이저(Atomizer), Nozzle, Duct, Cooling System 등이 포함. 상온, 고압의 바람을 사용하여 고온의 용융 제강슬래그를 안정한 상태의 미세한 액적으로 급냉 및 변형시킴. 장치의 구성은 본체와 In/Out 부분에 Damper 설치로 풍량과 풍압을 조절 가능하도록 되어 있음. 슬래그의 상태에 따라 물과 산소, 질소 등의 가스가 일정비율 혼입될 수 있고 유동을 일으키는 Impeller, Impeller로 들어가고 나오는 유동을 안내하는 Casing으로 이루어짐. Atomizer는 Tundish 하부에 설치된 Nozzle과 Duct에 의해 연결됨.

④ 제품 : 용융된 슬래그가 미세한 액적으로 분리되는 단계로서 PS Ball이라는 제품을 생산.

⑤ 선별 및 포장 : 제품으로 생산된 PS Ball을 3단 선별기를 통해 고객이 요구하는 사이즈로 선별 및 포장하는 단계로서 Packing system은 Innet screen, Bucket elevator, 3단 선별기, Buffer Tank, 개폐용 게이트, 이동대차로 구성.

⑥ 출하 : 생산된 제품(PS Ball)을 현장으로 출하하는 단계.



(a) 출탕



(b) 낙하



(c) 가스분사(급냉)



(d) 제품



(e) 선별 및 포장



(f) 출하

그림 2.5.14 PS 볼 생산 공정

표 2.5.1 PS 볼 품질시험 결과(직경 1~2mm)

연번	시험·검사 종목		단위	시험·검사 결과	시험·검사 방법
1	절대 건조 상태의 밀도		g/㎤	3.56	KS F 2504:2012
2	표면 건조 포화 상태의 밀도		g/㎤	3.56	
3	흡수율		%	0.14	
4	단위 용적 질량		kg/L	2.14	KS F 2505:2012
5	안정성(Na2S04, 5회 반복)		%	1.5	KS F 2507:2012
6	0.08㎜체 통과율		%	0.0	KS F 2511:2012
7	점토덩어리		%	0.0	KS F 2512:2012
8	유기불순물		-	표준색보다 연함	KS F 2510:2012
9	염화물함량(NaCl)		%	0.0011	KS F 2515:2012
10	경량편		%	0.00	KS F 2515:2012
11	체가름	10㎜체 통과율	%	100	KS F 2502:2010
		5㎜체 통과율	%	100	
		2.5㎜체 통과율	%	100	
		1.2㎜체 통과율	%	12	
		0.6㎜체 통과율	%	0	
		0.3㎜체 통과율	%	0	
		0.15㎜체 통과율	%	0	
		조립율	-	3.87	
12	용해 실리카량(Sc)		mmol/L	30.5	KS F 2545:2012
13	알칼리 농도 감소량(Rc)		mmol/L	90.7	

국내 PS 볼 생산공장에서는 적정 직경에 따라 PS 볼을 선별할 수 있는 시스템을 보유하고 있다 그림 2.5.15는 국내 생산공장의 PS 볼 선별 과정을 나타낸 것이고, 그림 2.5.16은 직경별 PS 볼 선별기 모습을 나타낸 것이다. 이와 같이 배수형 쉴드터널의 뒤채움재로 적용될 직경 1~2mm PS 볼은 생산공장에서 정확한 선별 시스템에 의해 공급된다. 따라서, 시공 현장에서는 공급되는 PS 볼의 입도에 대해서는 신뢰성을 가지고 시공할 수 있을 것으로 판단된다.

특히, 그림 2.5.17은 직경 1~2 mm PS 볼의 입도분포에 대한 공인시험성적서를 나타낸 것인데, 체가름 시험을 통해 직경 1~2mm PS 볼 제품은 97.4% 가 해당 직경 수준을 유지하고 있음을 알 수 있다.

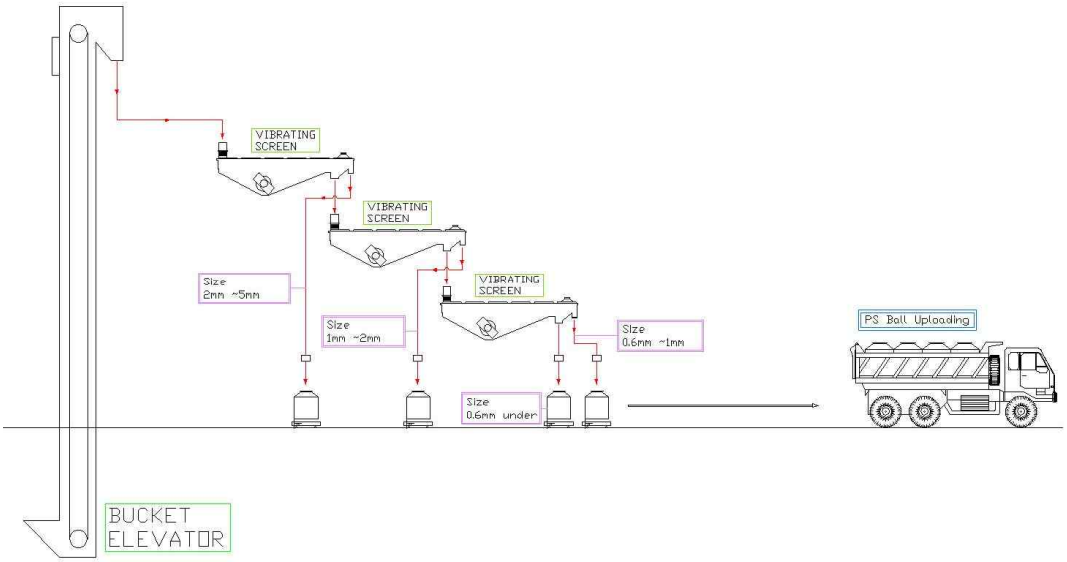
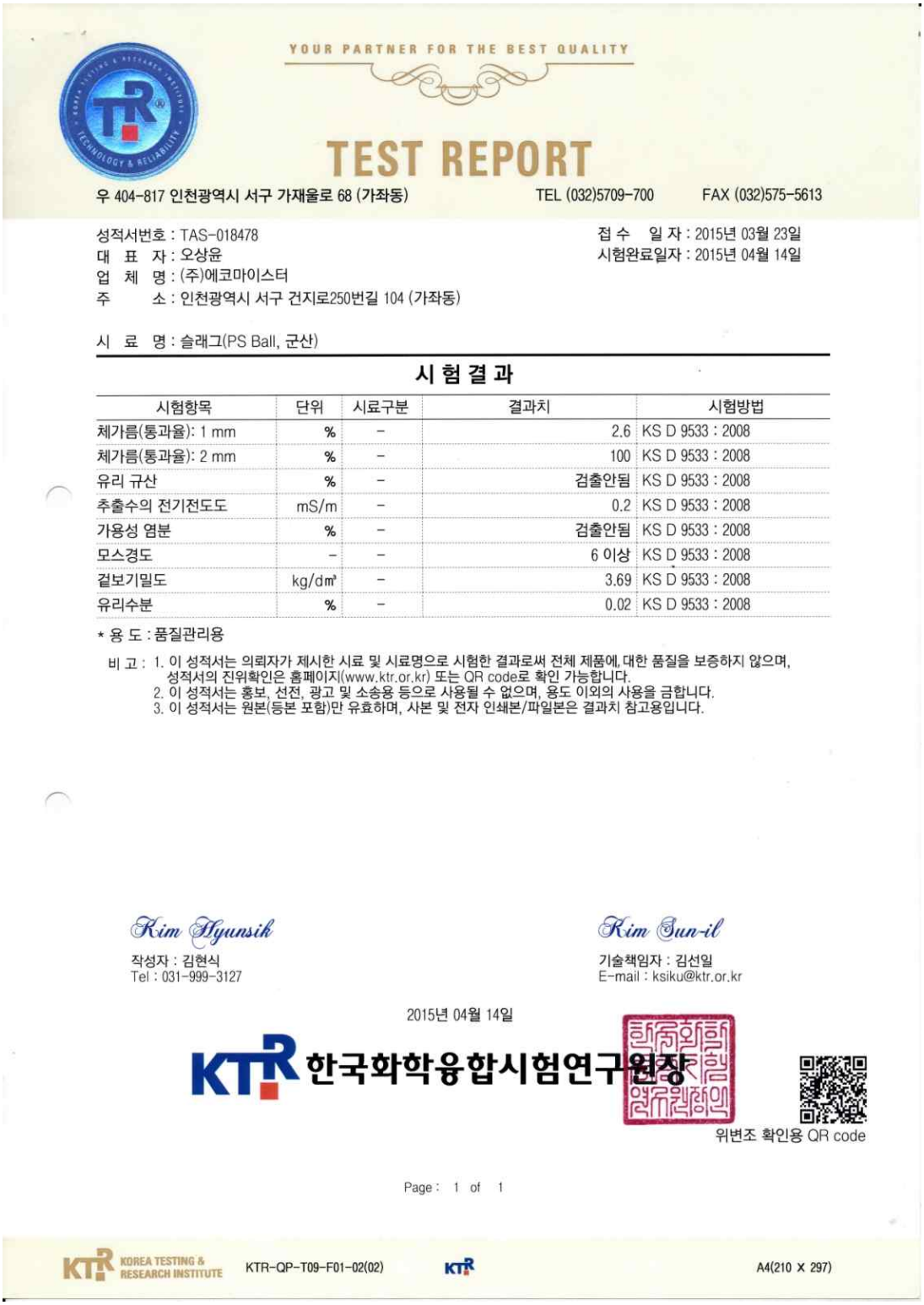


그림 2.5.15 국내 생산공장의 PS 볼 선별과정



그림 2.5.16 직경별 PS 볼 선별기



YOUR PARTNER FOR THE BEST QUALITY

TEST REPORT

우 404-817 인천광역시 서구 가재울로 68 (가좌동) TEL (032)5709-700 FAX (032)575-5613

성적서번호 : TAS-018478
대 표 자 : 오상윤
업 체 명 : (주)에코마이스터
주 소 : 인천광역시 서구 건지로250번길 104 (가좌동)

접 수 일 자 : 2015년 03월 23일
시험완료일자 : 2015년 04월 14일

시 료 명 : 슬래그(PS Ball, 군산)

시 험 결 과

시험항목	단위	시료구분	결과치	시험방법
체가름(통과율): 1 mm	%	-	2.6	KS D 9533 : 2008
체가름(통과율): 2 mm	%	-	100	KS D 9533 : 2008
유리 규산	%	-	검출안됨	KS D 9533 : 2008
추출수의 전기전도도	mS/m	-	0.2	KS D 9533 : 2008
가용성 염분	%	-	검출안됨	KS D 9533 : 2008
모스경도	-	-	6 이상	KS D 9533 : 2008
겉보기밀도	kg/dm³	-	3.69	KS D 9533 : 2008
유리수분	%	-	0.02	KS D 9533 : 2008

* 용 도 : 품질관리용

비 고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로써 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 성적서의 진위확인은 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code로 확인 가능합니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 원본(등본 포함)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/파일본은 결과치 참고용입니다.

Kim Hyunsik
작성자 : 김현식
Tel : 031-999-3127

Kim Sun-il
기술책임자 : 김선일
E-mail : ksiku@ktr.or.kr

2015년 04월 14일

KTR 한국화학융합시험연구원장

위변조 확인용 QR code

Page : 1 of 1

KTR KOREA TESTING & RESEARCH INSTITUTE KTR-QP-T09-F01-02(02) KTR A4(210 X 297)

그림 2.5.17 PS 볼 입도분포 공인시험성적서(직경 1~2mm)

나. 원형 인공경량골재

경량골재(Lightweight aggregate)는 천연경량골재와 인공경량골재로 구분되며 천연 경량골재는 부석(Pumice)이다. 이는 화산암/재(Volcano rock/ash) 등을 말하며, 인공경량골재는 출발소재에 따라서 혈암(shale). 점토(clay/mud). 산업폐기물/부산물 등을 적절한 가공과정을 경유하여 물리적 특성에 적합하도록 소성팽창(발포) 하는 방법으로 제조가 된다. 인공경량골재(Lightweight aggregate)는 사용목적에 따라서 각각의 요구되는 물리적 특성(용적중량, 압축강도, 흡수율, 열전도율, 기타)을 전제하여 내력구조용(경량콘크리트) 및 비 내력구조용(경량 패널/무기질 방음벽/흡음블록/경량블록/무기질 보-드및 심재) 그리고 Porous type(Open cell & closed cell) 및 기능부여정도 등에 의하여 환경소재(담체. 여과재. 식생 기반재. 건강용품 황토볼) 등으로 구분하여 광범위한 분야로의 적용된다. 또한 경량특성, 단열성, 흡음성, 내열성, 가공성, 경제성 등 복잡한 현대의 산업분야에서 요구되어지는 광범위한 기능을 충분하게 충족시킬 수 있는 고온(1150-1200℃)에서 소성되어진 경제성이 확보된 신 개념의 순수한 세라믹스 소재이다.

Hydro culture & hydroponics 용 pure ceramics soil 로 무균특성. 경량특성 및 보습기능과 식물생장에 필요한 미네랄을 포함한 상태로 고온에서 가공되어진 고기능성 ceramics 인공토양 재료로서, Hydro culture 제품은 아름다운 천연색상으로 구성되어진 치장의 개념을 강화시킨 제품이다.

○ 제조 Lay-out

- 출발원료 선정 : 요구되는 최종제품의 물리적 특성을 고려하여 혈암(Shale)또는 점토(Clay)를 선정.

- 원료 건조작업 : 선정되어진 출발소재를 미분상태로 가공하기위하여 함수율 7% ~ 9% 범위로 건조.

- 미분 처리공정 : 건조가 완료된 출발소재를 Grinding 처리하여 미분(80-100㎛)상태로 가공.

- 재료의 재구성 처리공정 : Flux 및 Porous 특성을 고려하여 보조첨가재료를 기준에 적합하도록 Mixing 처리.

- 성형 공정 : 설계되어진 최종제품의 입도를 고려하여 Pelletizing 또는 Extruding 작업하여 Spherical Shape Type 으로 성형 가공.

- 소성 공정 : Pelletizing 완료된 소재를 Rotary Kiln 에 투입하여 일정온도(1150-1200℃)로 소성 작업.

- Screening 공정 및 포장공정 : 소성 완료된 제품을 입도별로 선별 및 포장 작업.

○ 적용 범위

- 내력구조분야 : 건축용 경량콘크리트. 초 장Span 교량용 경량콘크리트. 경량 및 단열을 목적으로 하는 내력구조재. Deck plate topping 용 경량콘크리트.

- 비내력구조 및 2차 제품 적용분야 : 흡음/경량/보온 블-럭, 무기질 경량 보-드 및 패-널, 무기질 방음벽. 보온단열/보냉/흡음/내화 재료. 토목용 연약지반 하중경감 및 토양안정 Filling 재.

- 고기능성 환경소재 분야 : 건강관리용 황토 볼(Ball), 여과재(filter), 미생물 담체(Bio media), 식생 기반재(세라믹스 인공토양), hydro culture/hydroponics 용



그림 2.5.18 원형 인공경량골재 모습

표 2.5.2 원형 인공경량골재 물리적 특성

No.	항목	Hydro culture (DOLS-LWPCS-C)	Hydroponics	
			Closed cell type (DOLS-LWPCS-PC)	Opend cell type (DOLS-LWPCS-PC)
1	제품 색상	3 color	dark gray	dark gray
2	제품 size	10-40mm	4-25mm	2-5mm/5-8mm /8-20mm
3	제품 밀도	900kg/m^3±15%	250kg/m^3±10%	550kg/m^3±15%
4	제품 강도	3.5+Mpa	0.5+Mpa	0.7+Mpa
5	흡수율 (기건 상태)	15%+	70%+	30%+
6	연화계수	~1.00	~1.00	~1.00
7	pH	6.5-7.5	6.5-7.5	6.5-7.5
8	Packing	25l/50l/1000l	50l/100l/ 1000l/1500l	50l/100l/ 1000l/1500l

3. 실험을 통한 뒤채움재 배수성능 평가

가. 주입장치 초기모델 제작

쉴드터널 세그먼트 배면에 대한 PS 볼의 뒤채움 실험을 수행하기 위해 뒤채움재 주입장치를 개발하였다. 개발된 배면주입장치는 우선적으로 뒤채움 실험 수행을 목적으로 최소한의 주입 효율을 얻기 위해 제작되었는데, 그림 2.5.19는 뒤채움재 주입장치 초기모델의 제작 도안을 나타낸 것이고, 표 2.5.3은 초기모델의 제작 용량을 나타낸 것이다.

뒤채움재 주입장치의 최초 목표 효율은 쉴드터널에서 배면주입시공 공정의 소비시간과 최소 주입량을 고려하여 1㎥/hr로 설정하였는데, 그림 2.5.20은 뒤채움재 주입장치 초기모델의 완성 모습을 나타낸 것이다.

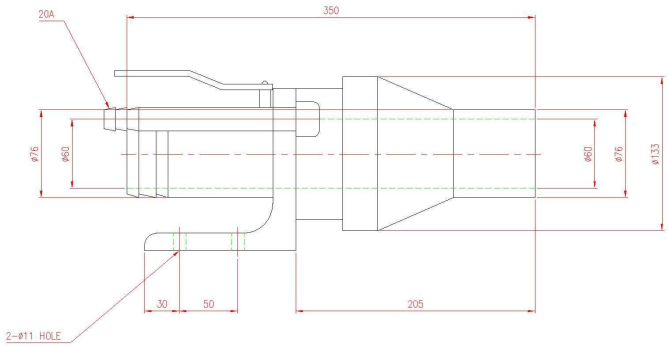


그림 2.5.19 배면주입장치 초기모델의 제작 도안

표 2.5.3 PS 볼 배면주입장치 초기모델의 제작 용량

특성	공급에어 압력 (kg/cm)	에어 소비량 (N㎥/min)	정풍량 (N㎥/min)	진공도 (CmHg)	토출량 (N㎥/min)	Comp -용량 (HP)
PS 볼 주입장치	5	2.50	9.00	6	14.0	20



(a) 전체 모습



(b) 이중관 형태의 흡입구



(c) 배출 호스 연결 모습



(d) PS 볼 흡입 모습

그림 2.5.20 배면주입장치 초기모델 모습

나. 주입실험 몰드 제작

배면뒤채움 주입장치를 이용하여 쉴드터널 배면의 뒤채움주입에 있어서 효율성을 실험하기 위하여 현재 현장에서 사용되고 있는 전력구 쉴드터널의 1/4단면의 실스케일과 뒤채움부의 형상을 모사하여 몰드를 제작하였다.

현재 사용 중인 외경 3.35m, 내경 2.85m, 세그먼트 두께 0.25m의 전력구 터널의 형상과 배면 두께 0.15m를 모사하여 배면뒤채움 주입장치의 효율성을 검토하기 위하여 수압 및 공기압 등의 압력에 대하여 안전성을 확보 할 수 있도록 강재를 사용하여 1/4 단면의 실스케일 몰드를 제작하였다.

원형 쉴드터널의 1/4단면의 형상의 특징 상 6곳의 위치에 받침대를 형성하여 균형을 맞추도록 제작안을 도출하였다.

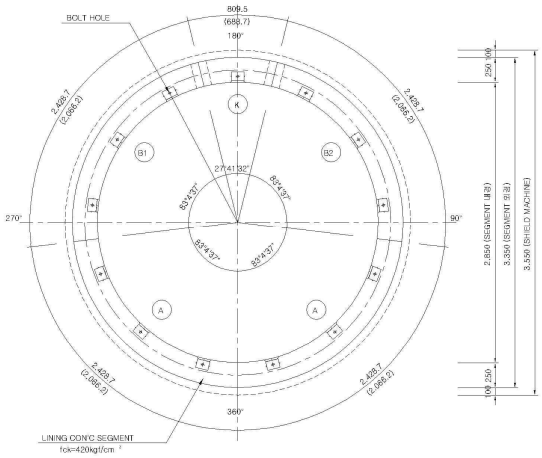


그림 2.5.21 전력구 표준단면도

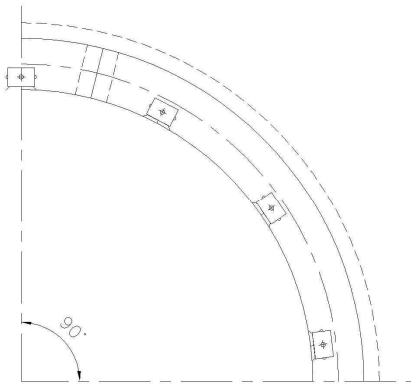


그림 2.5.22 전력구 1/4단면

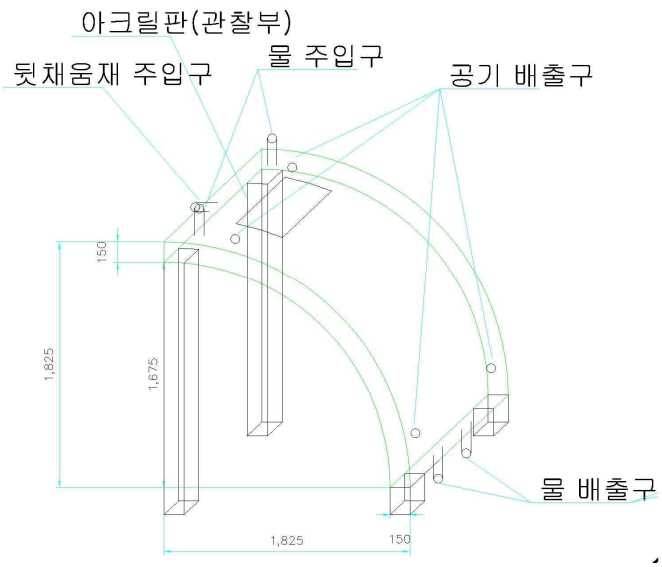


그림 2.5.23 전력구 쉴드터널 배면형상 제작안

몰드에서 세그먼트의 뒤채움 주입구를 모사하여 그림 2.5.24와 같이 직경 67mm의 주입구를 상부와 중간지점에 설치하였고, 배수 및 공기의 흐름을 파악할 수 있도록 주입구를 설치하였다. 또한, 공기의 흐름에 저해가 되지 않고 뒤채움 재료의 손실을 방지하기 위하여 거름망이 설치된 배출구를 모사하였다.

제작된 몰드는 육안을 통해 뒤채움재의 주입성능을 확인하기 위하여 그림 2.5.25와 같이 측면과 상부의 2곳에 아크릴판을 이용한 관찰부를 설치하였으며, 몰드 내부의 체적은 0.41㎥으로 실제 전력구 쉴드터널 배면의 배면두께를 150mm로 가정 시의 1/4 체적과 동일하다.



그림 2.5.24 뒤채움재 주입구 모사



그림 2.5.25 전력구 쉴드터널 배면형상 몰드

4. 종류에 따른 배면주입실험

뒤채움 주입장치를 이용하여 쉴드터널 배면형상몰드에 주입실험 시 주입장치의 효율성을 검토 및 최적의 주입재료를 선정하기 위하여 건조된 표준사와 PS 볼을 뒤채움재료로 사용하였다.

가. 표준사를 이용한 배면주입실험

표준사를 이용하여 배면주입 실험을 수행하기 위하여 배면주입장치를 콤프레셔와 연결하여 셋팅한 후, 배면주입장치의 주입부를 몰드의 배면주입구에 결합시킨 후 고정을 하였다.

시료통에 표준사를 주입한 후 주입장치의 재료주입부를 연결하고, 콤프레셔를 통하여 주입장치에 서 압력을 가해주어 뒤채움재료의 충진을 시작하였다. 이때 주입장치의 주입부는 몰드의 중간지점까지 고정되어 주입압을 이용하여 흡입되는 모래를 몰드 내 뒤채움부에 주입을 하게 되는 형식이다.

충진을 시작함과 동시에 0.01초 단위의 시간을 측정하며 실험을 수행하였으며, 그림 2.5.27은 실험진행 모습과 순서를 나타낸 것이다.



그림 2.5.26 표준사를 이용한 뒤채움 실험



(a) 주입장치와 몰드결합



(b) 주입장치와 몰드고정



(c) 재료 주입부 위치



(d) 뒤채움재료 주입



(e) 뒤채움재 주입과정



(f) 뒤채움재 주입완료

그림 2.5.27 표준사를 이용한 배면뒤채움 실험 순서

표준사를 이용하여 배면주입실험을 수행한 결과 체적 0.41㎥의 몰드 내부를 95%정도 주입 하는데 걸린 시간은 50분 정도가 소요되어 충진 속도는 0.48㎥/hr로 측정되었다. 충진에 있어서 그림 2.5.28과 같이 80% 정도까지 충진 시에는 약 35분 정도가 소요되었으나, 이후 표준사의 다양한 입도분포로 인해 공기압의 배출이 되지 않아 재료의 주입 효율이 저하되었고, 재료 주입부를 통하여 표준사의 유출이 발생하며 95%이상의 주입이 불가능하였다.

표준사를 재료로 사용한 실험 결과 가벼운 중량으로 인하여 뒤채움재로서의 다짐효과가 미흡하였고, 입자의 크기가 다양하여 공기의 투과성이 확인되지 않았다. 현장

의 밀폐된 쉴드터널 내부의 조건을 고려하였을 때 표준사는 주입재료로서 효율성이 다소 미흡한 것으로 판단된다.

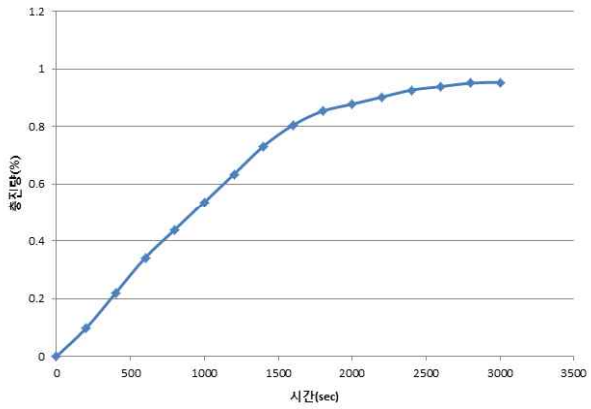


그림 2.5.28 표준사의 시간에 따른 주입효율

나. PS 볼을 이용한 배면주입실험

PS 볼을 이용하여 배면주입 실험을 수행하기 위하여 먼저 배면주입장치를 콤프레셔와 연결하여 후, 배면주입장치의 주입부를 몰드 중간 45도에 위치한 배면주입구에 결합시킨 후 고정을 하였다.

시료통에 PS 볼을 주입한 후 주입장치의 재료주입부를 연결하고, 콤프레셔를 통하여 주입장치에 서 압력을 가해주어 뒤채움재료의 충진을 몰드 중간 45도에 위치한 주입부 부근까지 충진을 한 후 배면주입장치를 분리하여, 몰드 천단부의 뒤채움재 주입부에 연결하여 주입하는 방식으로 실험을 진행하였다.



그림 2.5.29 PS 볼을 이용한 배면주입실험

PS 볼을 이용하여 배면주입실험을 수행한 결과 몰드 중간 45도에서 주입한 50%와 몰드 상부 주입구를 이용한 약 70% 정도까지 주입이 원활하였으나 , 이후 재료 주입부를 덮은 PS 볼의 무게와 주입압이 빠져나갈 수 있는 공극이 줄어 주입효율이 급격히 감소되다가 약 80% 까지 충진 후 주입재료가 역류를 하며 더 이상의 충진이 불가능 하였다. 이러한 문제를 분석한 결과 배면주입장치의 주입구 부분을 개조하여 주입 성능을 개선시키는 방안을 도출하여 개조 뒤 실험을 진행하기로 하였다.



(a) 45도 주입부를 통한 주입



(b) 상부 주입부를 통한 주입



(c) PS 볼 주입과정



(d) PS 볼 주입완료

그림 2.5.30 PS 볼을 이용한 배면주입실험



그림 2.5.31 주입재료 역류현상

다. 주입구를 개조한 PS 볼을 이용한 배면주입실험

배면주입장치의 주입구를 전면 방향으로 재료의 분사가 가능하게 개조하여, 기존과 동일한 방법으로 주입구를 몰드 중간 45도에 위치한 주입부를 통해 충진을 실시하였다. 이 후 몰드 천단의 주입구에 연결하여 주입하는 방식으로 실험을 진행하였다.

개조된 주입구를 이용하여 PS 볼 배면주입 실험을 수행한 결과 체적 0.41㎥의 몰드 내부를 99% 이상 충진 가능하였고, 충진 하는데 걸린 시간은 40분 정도가 소요되어 충진 효율은 약 0.6㎥/hr로 측정되었다.

충진 과정에서 몰드 중간 45도에서 주입한 량과 몰드 상부를 이용하여 주입한 량이 약 90% 정도였으며, 이때까지 충진 시간은 약 25분 정도가 소요되었다. 이후 재료 주입부를 덮은 PS 볼의 무게와 주입압이 빠져나갈 수 있는 공극의 감소로 주입효율이 다소 감소되는 것으로 나타났다.



그림 2.5.32 배면주입장치 기존 주입구



그림 2.5.33 배면주입장치 개조 주입구

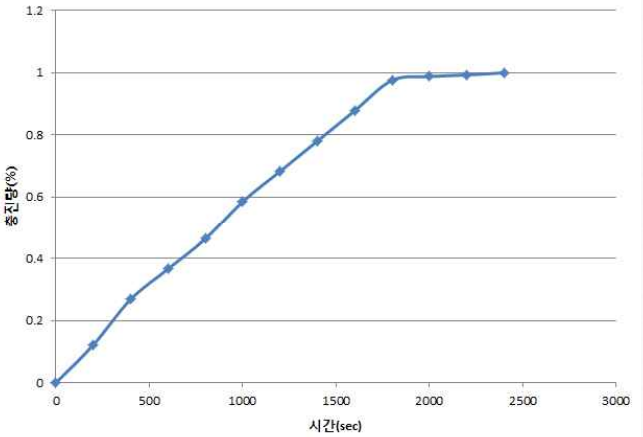


그림 2.5.34 PS 볼의 시간에 따른 주입효율



그림 2.5.35 PS 볼 공기 투과성 확인

또한, 그림 2.5.35와 같이 베면에 주입된 공기는 PS 볼의 고른 입도분포로 인해 입자 사이의 간극에서 흐름이 원활하였고, 비중이 2.5 이상인 PS 볼의 특성상 입자의 자중으로 인해 충진된 재료의 다짐효과도 우수할 것으로 예상되며, 충진시 재료의 날림 및 유출현상이 없어 뒤채움 재료로서 효과적인 것으로 판단된다.

5. 환경영향 평가

기존의 터널 배면에는 지하수 유입이 많을 것으로 예상되는 지반조건에서 터널 내부의 유입수량을 감소시키고, 상부의 하중을 경감하기 위하여 그라우팅의 시공이 많이 이루어지고 있다. 하지만 그라우팅으로 인한 지하수 오염으로 인한 피부병, 신경성 이상증세 등과 최근 시멘트에서 발암물질인 C_r^{6+}이 용출됨에 따라 사회문제화 되고 있다. 하지만 이들 그라우팅 재료에 함유된 중금속 성분에 대한 검토는 정확히 이루어지지 않고 있는 실정이다. 이에 배수터널의 뒤채움재로서 PS 볼의 환경성 평가를 수행하고자 한다.

가. 중금속 용출 시험 방법

폐기물 공정시험법에 따라 유해성분에 대한 용출 시험을 수행에서 총 6가지 중금속 성분(P_b, A_s, C_u, C_r^{6+}, H_g, C_d)에 대해 용출 시험을 실시하였는데, 용출 실험 방법은 표 2.5.4와 같다.[5)]

시험방법에서 KSLT(Korean Standard Leaching Test)는 폐기물 공정 시험법 제 2장 제 5항에 따라 바닥재, 비산재 및 용융슬래그 시료 10g을 정확히 달아 정제수에 HCl을 가하여 pH 5.8~6.3으로 한 용매 100ml를 500ml 삼각플라스크에 넣어 상온, 상압 하에서 진탕 회수가 매분당 200회, 진폭이 4~5cm인 진탕 기를 사용하여 6시간 연속 진탕한다. 진탕한 용액을 1.0㎛의 유리섬유여지로 여과한 후 검액으로 사용한다.

TCLP(Toxicity Characteristic Leaching Procedure)방법은 시료 5g에 96.5ml의 증류수를 주입 후 격렬히 교반하여 시료의 pH를 측정한다. 시료가 pH가 5이상을 나타낼 경우 용출용매로 증류수 500ml에 CH3COOH 5.7ml를 가하여 1L로 희석한 것을 사용한다. 시료 5g와 용출용매 100ml를 500ml 삼각플라스크에 넣어 22±3℃에서 30rpm으로 18시간 연속 진탕한 다음 1.0㎛의 유리섬유여지로 여과한 여과액을 검액으로 사용한다.

항목별 실험은 폐기물 공정 시험법 제 2장 제 3항의 시료 전처리방법에 따라 금액을 질산으로 전처리한 후 AAS(Atomic Absorption Spectrometry, Perkin Elmer AAnalyst 100)를 이용하여 P_b는 283.3nm, C_u는 324.7nm, C_d는 228.8nm, C_r은 357.9nm의 파장에서 분석한다.

표 2.5.4 용출시험방법

시 험 법	한국의 KSLT	미국의 EP	미국의 TCLP
개발목적	유해산업폐기물의 판정	EP유해성 폐기물의 판정	침출액의 Monitoring
시료의 전처리	5.0~5.5mm로 분쇄	9.5mm이하로 분쇄	9.5mm이하로 분쇄
진탕장치	수평왕복진탕기 진폭:4~5cm 진탕횟수:200rpm	Stirrer	Rotary Extraction Device 진탕횟수:30rpm
진탕시간	6hr	24hr	18hr
용매의 pH	증류수에 HCl첨가 pH5.8~6.3조절	증류수에 0.5N초산첨가 pH4.8~5.2유지	Fluid 1 : 4.93±0.05 Fluid 2 : 2.88±0.05
용매 : 폐기물	10:1 100g 이상	16:1 or 20:1 100g이상	20:1
고액분리	1μm 유리섬유여지 or 원심분리후상등액	0.45μm menbrane filter or 원심분리후상등액	0.6~0.8μm menbrane filter or 원심분리후상등액
용출용기	2ℓ 삼각플라스크	규정없음	2ℓ 의 Teflon or PE(Zero Headspace)

* 참고 : TCLP법의 용매 pH는 용출 전 pH측정하여 5미만이면 fluid 1, 5이상이면 fluid 2
- fluid 1 : 증류수 500mℓ에 glacial Acetic acid 5.7mℓ 가하고 1N NaOH 64.3 mℓ를 가한 후 1ℓ로 희석 한다.(pH 4.93±0.05)
- fluid 2 : 증류수에 glacial Acetic acid 5.7mℓ를 가하여 1ℓ로 한다.(pH 2.88±0.05)

표 2.5.5 분석 및 실험에 사용된 시약

Reagent	Chemical Formula	Maker
Hydrochloric acid	HCl	松野園製藥所
Acetic acid	CH3COOH	Merck
Nitric acid	HNO3	Merck

표 2.5.6 분석 및 실험기기

Analysis equipment	Maker	Model
Atomic Absorption Spectrophotometry	Perkin Elmer	AAnalyst 100
pH meter	Orion	medel 420
Shaker	Lab. companion	sk-600

나. PS 볼의 중금속 용출 시험결과

뒤채움 재료로 사용된 PS 볼의 환경영향 평가를 위하여 사회적으로 지하수나 지반과 접촉 시 문제를 빚고 있는 P_b, A_s, C_u, C_r^{6+}, H_g, C_d 등의 유해 중금속에 대하여 국내에서 생산되고 있는 PS 볼의 종류별로 몇 가지 CASE에 대하여 용출 실험을 수행하였다.

표 2.5.7에서 2.9는 PS 볼의 종류에 따른 중금속 용출 시험결과이다. 해당 중금속의 유해물질 함량기준은 “폐기물관리법시행규칙 [별표1] 지정폐기물에 함유된 유해물질”에서 P_b 3, C_u 3, A_s 1.5, H_g 0.005, C_r 0.3, C_r(VI) 1.5, 시안 1, 유기인 1 이하, 기름성분 5% 이하를 함유해야 한다.

표 2.5.7 A-Type PS 볼 용출실험 결과

시험결과				
시험항목	단위	시료구분	결과치	시험방법
C_d	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
C_u	mg/L		0.018	폐기물공정시험기준:2011
A_s	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
H_g	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
P_b	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
C_r(VI)	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
C_N^-	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
유기인	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011

표 2.5.8 B-Type PS 볼 용출실험 결과

시험결과				
시험항목	단위	시료구분	결과치	시험방법
P_b	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
C_u	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
A_s	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
H_g	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
C_N^-	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
$C_r(VI)$	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
C_d	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
유기인	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011

표 2.5.9 C-Type PS 볼 용출실험 결과

시험결과				
시험항목	단위	시료구분	결과치	시험방법
P_b	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
C_u	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
A_s	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
H_g	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
C_N^-	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
$C_r(VI)$	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
C_d	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
유기인	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011

표 2.5.10 D-Type PS 볼 용출실험 결과

시험결과				
시험항목	단위	시료구분	결과치	시험방법
P_b	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
C_u	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
A_s	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
H_g	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
C_N^-	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
$C_r(VI)$	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
C_d	mg/L		검출안됨	폐기물공정시험기준:2011
기름성분	%		0.00	폐기물공정시험기준:2011

PS 볼의 환경영향 평가를 위한 중금속 용출시험 결과 모든 타입의 PS 볼에서 P_b, A_s, C_u, C_r^{6+}, H_g, C_d 등 전 항목에서 기준 수치를 만족하며, 거의 검출되지 않았다. 따라서 PS 볼은 유해항목에 대해 환경적으로 안전할 것으로 판단된다.

중금속 용출시험 결과 PS 볼은 지하수를 터널 내부로 배수 시키는 개념의 배수 쉴드터널에서 배면 투수층으로 적용되기에 환경적으로 문제가 없을 것으로 판단된다.

6. PS 볼 팽창으로 인한 성능저하 평가

직경이 큰 입자의 재료일수록 아토마이징 효과가 작기 때문에 표면에 Free-C_aO, M_gO 등 팽창성 물질이 부착되어 팽창압력이 발생하거나, 배수 성능 저하 및 부식 등을 초래할 우려가 있다.

배수형 쉴드터널에서 배면 뒤채움재로 적용되는 PS 볼은 직경이 1~2mm로서 입경이 큰 재료로서, 팽창성 물질에 의한 압력 증가로 인한 배수성능 및 부식에 대한 영향도를 확인하기 위하여 Free-C_aO 분석을 수행하였다.[6)]

표 2.5.11은 PS 볼의 화학적 특성을 분석한 것이다. PS 볼은 EDTA 분석방법에 의한 유리석회(free-CaO) 함량이 0.2% 미만으로 팽창 붕괴성을 최소화 할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 수화 반응에 의한 팽창 압력은 무시할 수 있는 수준으로 나타났다.

표 2.5.11 PS 볼 화학적 특성 분석

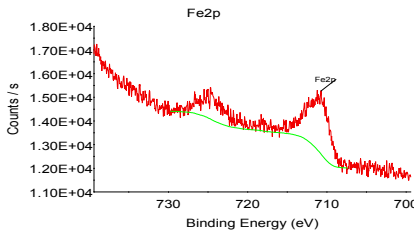
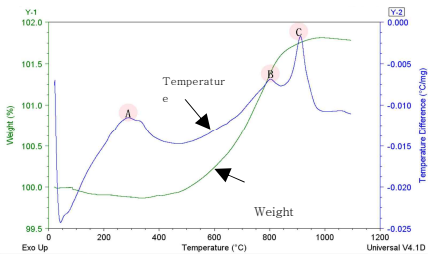
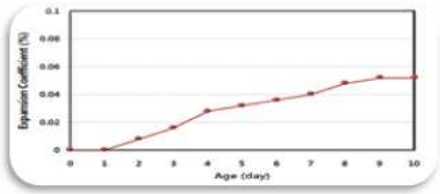
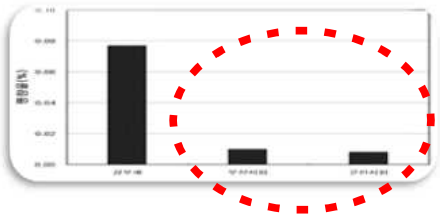
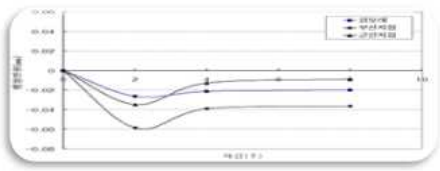
분석항목	분석방법	분석실험	분석결과
PS Ball의 화학조성 (철산화물 분석)	광전자 분광분석기		·Fe_2 Orbital Peak값이 형성되어 표면 Fe 산화물이 Fe203로 판단
PS Ball의 화학조성 (EDTA 분석)	EDTA 분석	PS Ball의 유리석회(free-CaO)에 대한 정량분석으로 시료 용액을 pH 13으로 조절하고 Dotite N.N 지시약을 가한 EDTA(Ethylene Diamine Tetracetic Acid) 표준용액으로 적정 분석을 실시	·F-C_aO 〈 0.2%
PS Ball의 화학조성 (DT-TGA 분석)	DT-TGA 분석		·시료의 FeO 산화물이 산화반응에 의해 Fe203 반응하여 중량이 증가한 것으로 추정

표 2.5.12는 PS 볼의 팽창성 시험 결과를 나타낸 것이다. PS 볼의 팽창성에 대한 안정성을 평가하기 위해 수침팽창시험, 오트클레이브 팽창도 시험, 알칼리 잠재 반응성 시험 등을 수행하였다.

수침팽창시험 결과 PS 볼의 팽창율은 재령 10일에서 국내기준(KS F 2535)인 1.5% 보다 낮은 0.048%로 나타났다. 그리고 오트클레이브 팽창도 시험에서는 천연잔골재의 팽창비인 약 0.09% 보다 더 낮은 0.01%로 나타났다[7]. 알칼리 잠재 반응성 시험에서는 재령 6개월에서 국내기준(KS F 2546)인 0.1% 보다 낮은 0.04%로 나타났다.

PS 볼의 화학적 특성 분석 및 팽창성 시험 결과를 통해 PS 볼에서 발생 가능한 체적 변화는 안정적인 것으로 판단된다. 또한, 팽창성으로 인한 배수성능 저하 및 부식 등의 문제도 큰 영향이 없을 것으로 판단된다.

표 2.5.12 PS 볼 팽창성 시험 결과

분석항목	분석방법	분석실험	결과
수침팽창시험	KS F 2580	재령 10일에 대한 팽창율은 0.048% 	KS F 2535「도로용 철강 슬래그」 1.5%기준 만족
오토클레이브 팽창도 시험	KS L 5107	천연잔골재의 팽창비는 약 0.09% PS Ball의 팽창비는 0.01%의 팽창비 	KS L 5107[시멘트의 오토클레이브 팽창도 시험 방법]의 기준만족 강모래에 비해 팽창에 의한 손실율이 적어 안정적임.
알칼리 잠재 반응성 시험	KS F 2546	재령 6개월에서 국내기준인 0.1% 보다 낮은 0.04%의 팽창율 	KS F 2546[골재의 알칼리 잠재 반응 시험 방법]의 기준 만족

소결론

배수형 쉴드터널에서의 최적의 뒤채움재를 선정하기 위하여 뒤채움재의 특성에 대한 조사를 수행하고, 배수형 쉴드터널의 배면 뒤채움재로 적용이 가능한 재료에 대하여 주입성능 및 투수성능에 대한 실험을 실시하고, 선정된 재료의 환경성을 평가하였다.

(1) 기존 쉴드터널에서의 뒤채움재는 그라우트재를 주재료로 터널 내부로 유입되는 지하수의 차단과 지반과 융합하여 강도발현을 하며, 환경성을 확보하는 재료가 사용되었다. 그러나 배수형 쉴드터널에서의 뒤채움재는 차수가 아닌 원활한 배수기능의 수행이 가능해야한다.

(2) 배수형 쉴드터널의 뒤채움재로서 표준사와 PS 볼을 사용하여 쉴드터널 배면공간을 모사한 몰드를 통하여 주입 및 배수성능에 대한 실험을 수행한 결과, PS 볼은 배면공간으로의 주입성능도 우수하였으며, 재료자체의 중량으로 인한 다짐효과 발휘 및 배수성능이 뛰어나 것으로 나타나 배수형 쉴드터널의 뒤채움재로서 효과적인 것으로 판단된다.

(3) PS 볼의 환경영향 평가를 위한 중금속 용출시험 결과 모든 타입의 PS 볼에서 P_b, A_s, C_u, C_r^{6+}, H_g, C_d 등 전 항목에서 기준 수치를 만족하며, 거의 검출되지 않았다. 따라서 PS 볼은 유해항목에 대해 환경적으로 안전할 것으로 판단된다.

(4) PS 볼이 팽창성 물질에 의한 압력 증가로 인한 배수성능 및 부식에 대한 영향도를 확인하기 위하여 free-CaO 분석을 수행하였는데, 유리석회(free-CaO) 함량이 0.2% 미만으로 팽창 붕괴성을 최소화 할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 수화 반응에 의한 팽창 압력은 무시할 수 있는 수준으로 나타났다.

(5) PS 볼의 팽창성에 대한 안정성을 평가하기 위해 수침팽창시험, 오트클레이브 팽창도 시험, 알칼리 잠재 반응성 시험 등을 수행하였는데, 수침팽창시험 결과 PS 볼의 팽창율은 재령 10일에서 국내기준(KS F 2535)인 1.5% 보다 낮은 0.048%로 나타났다. 그리고 오트클레이브 팽창도 시험에서는 천연잔골재의 팽창비인 약 0.09% 보다 더 낮은 0.01%로 나타났다. 알칼리 잠재 반응성 시험에서는 재령 6개월에서 국내기준(KS F 2546)인 0.1% 보다 낮은 0.04%로 나타났다. PS 볼의 화학적 특성 분석 및 팽

창성 시험 결과를 통해 PS 볼에서 발생 가능한 체적 변화는 안정적인 것으로 판단된다. 또한, 팽창성으로 인한 배수성능 저하 및 부식 등의 문제도 큰 영향이 없을 것으로 판단된다.

제 6 절 배수형 쉴드터널 뒤채움 시스템 개발

1. PS 볼 뒤채움 주입장치 개발

기존 쉴드터널 공법에서는 쉴드TBM 플레이트로 발생되는 세그먼트 배면 공간을 충진하고, 지하수의 유입을 차단하기 위해 쉴드터널 배면 공간을 콘크리트 그라우트재로 충진하게 된다.

그러나 배수형 쉴드터널에서는 지하수의 자유로운 유입을 유도하여야 하기 때문에 불투수층의 콘크리트 그라우트재를 배면 공간에 충진할 수 없다. 앞 절에서 살펴본 바와 같이 세그먼트 시공 오차보다 직경이 커서 세그먼트 결합면 사이로 유입되지 않고, 지하수가 정체되지 않고 흐를 수 있는 적정 투수계수를 갖고 있으며, 지반 내 충진되기 때문에 환경적으로도 지반 오염을 유발하지 않을 수 있는 최적 재료로 PS 볼을 선정하였다.

배수형 쉴드터널에서 뒤채움은 유동화된 재료인 기존 그라우트재와 달리 직경 1~2mm 의 입자들을 압력으로 뒤채움하여야 하기 때문에 기존 뒤채움 시공 장비를 사용할 수 없다.

본 연구에서는 배수형 쉴드터널에서 PS 볼 뒤채움 시공을 효과적으로 할 수 있는 새로운 장비를 개발하고자 하였다.

가. 장비 사양 결정

쉴드터널 공법에서 뒤채움 시공은 일반적으로 후속 공정으로서 실제적인 암 굴착 및 세그먼트 조립 공정에 미치는 영향은 거의 없다. 따라서, 뒤채움 시공으로 인한 공기의 영향은 거의 없기 때문에 PS 볼 뒤채움 공정도 굴착 및 조립 공정에 영향을 미치지 않는 수준의 효율을 갖으며 된다.

본 연구에서는 PS 볼 뒤채움 시공시 적정 효율을 1㎥/hr로 설정하였다. 지하철 터널 직경과 쉴드TBM의 플레이트 두께로 발생되는 배면 공간의 부피에 대해 1일 8시간 주입시공 시간을 고려하여, 1일 굴착 및 세그먼트 조립공정을 충분히 뒤따라 갈 수 있는 주입 효율을 산정하였다.

식 (2.6.1)은 공기분사량의 계산식을 나타낸 것이다. 그리고 표 2.61.은 PS 볼 이송량과 이송속도를 계산한 것이다.

$$Q = \frac{237.6}{\gamma} \times \frac{a \times c \times P1}{\sqrt{T}}$$ 식(2.6.1)

여기서, Q : 공기 분사량 (ℓ /min)

a : 노즐 단면적 (π × r × r) (㎟)

P1 : 절대압 (p+1.033) (kgf/㎠)

c : 유량 계수 (100% = 1)

T : 절대 온도 (t +273.15) (K)

r : 공기 비중량 1.2 (kg/㎤)

표 2.6.1 PS 볼 이송량과 이송속도 계산

구분	값	단위	비고
Compressor 공기유량	5.98875	㎥/sec	6kgf/㎠, bar
Connecting Pipe 단면적	0.0044	㎡	Connecting Pipe 65A
Connecting Pipe 공기속도	1355.58	m/sec	
Connecting Pipe 공기유량	5.964552	㎥/sec	
PS 볼 이송량	1	㎥/hr	
PS 볼 이송속도	6.31	m/sec	

표 2.6.1처럼 이론적으로는 공급 에어압력을 6kgf/㎠ 이상 유지할 때 주입속도가 1 ㎥/hr가 가능하다고 예측하였다. 단, 커넥트 파이프(Connecting Pipe)의 단면적은 세그먼트 뒤채움재 주입구의 직경과 동일하게 설정하였다.

나. 설계 및 제작

그림 2.6.1은 PS 볼 뒤채움 주입장치 본체에 대한 설계 개념을 나타낸 것이고, 그림 2.6.2는 제작된 주입장치 본체를 나타낸 것이다. 본체는 컴프레셔(Compressor)에서 공급되는 압축공기를 사용할 때 발생되는 압력차를 이용하여 PS 볼을 이송하는 방식으로 제작되었다. 표 2.6.2는 PS 볼 뒤채움 주입장치 본체의 사양을 나타낸 것이다.

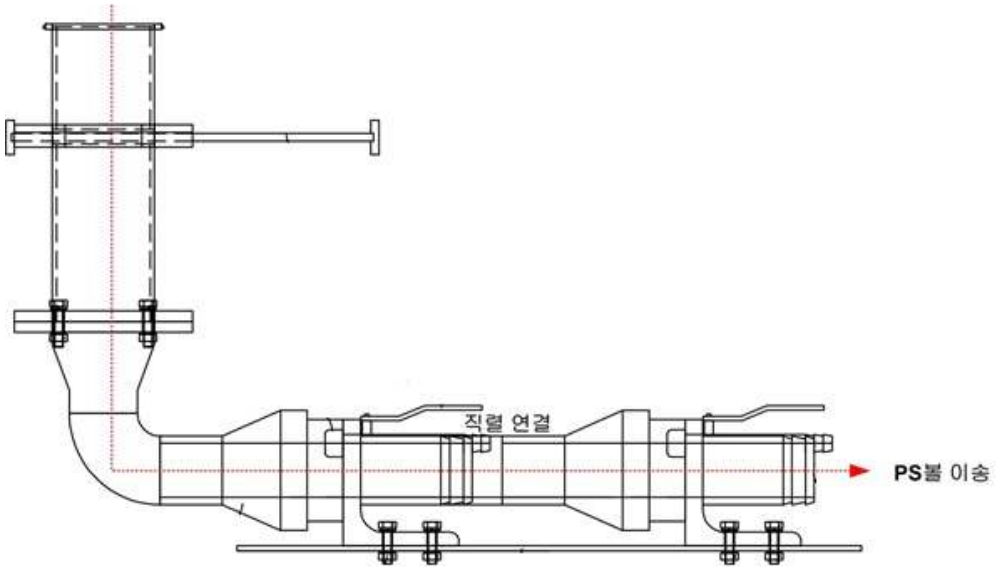


그림 2.6.1 PS 볼 뒤채움 주입장치 본체 설계 개념



그림 2.6.2 제작된 PS 볼 뒤채움 주입장치 본체

표 2.6.2 PS 볼 뒤채움 주입장치 본체 사양

공급에어압력 (kgf/㎠)	에어소비량 (N㎥/min)	정풍량 (N㎥/min)	진공도 (CmHg)
5	2.50	9.00	6

기존 쉴드터널의 뒤채움 시공의 경우에는 유동화된 재료를 주입하는 것이기 때문에 터널 외부의 교반시설에서 콘크리트 그라우트재를 교반하여 압력으로 터널 내부에 설치된 이동관을 통해 장거리를 이동시키고, 뒤채움 위치에서 배면 공간 주입까지 가능하다.

그러나 PS 볼은 고중량의 입자로 된 재료이기 때문에 터널 외부에서부터 압력으로 이동시키는 것이 현실적으로 불가능하다. 따라서, 주입장치에 PS 볼을 곧바로 공급시키기 위해서는 사일로 형식의 PS 볼 저장 공간이 필요하다.

그림 2.6.3은 터널 내부에서 PS 볼을 저장할 수 있는 사일로의 개념설계는 나타낸 것이고, 그림 2.6.4는 뒤채움 주입장치 본체와 연결된 사일로를 나타낸 것이다. 사일로의 저장 공간은 1회 시공에서 충분히 PS 볼을 공급할 수 있게 하기 위해 1.2㎥로 결정하였으며, 하부에는 게이트(Gate)를 설치하여 장비 작동 전에 뒤채움 장치 본체로 PS 볼이 이동되는 것을 방지하였다.

그림 2.6.5는 PS 볼 뒤채움 주입장치 본체에 이송호스(∅75)를 연결한 모습인데, 이송호스는 말단부 커넥트 파이프에 연결되어 있다. 이송호스는 투명한 재질을 사용하여 시공 중 PS 볼의 이송 상황을 확인할 수 있도록 하였고, 호스 내면은 평면으로 이송 중 PS 볼의 저항을 최소화 하였다.

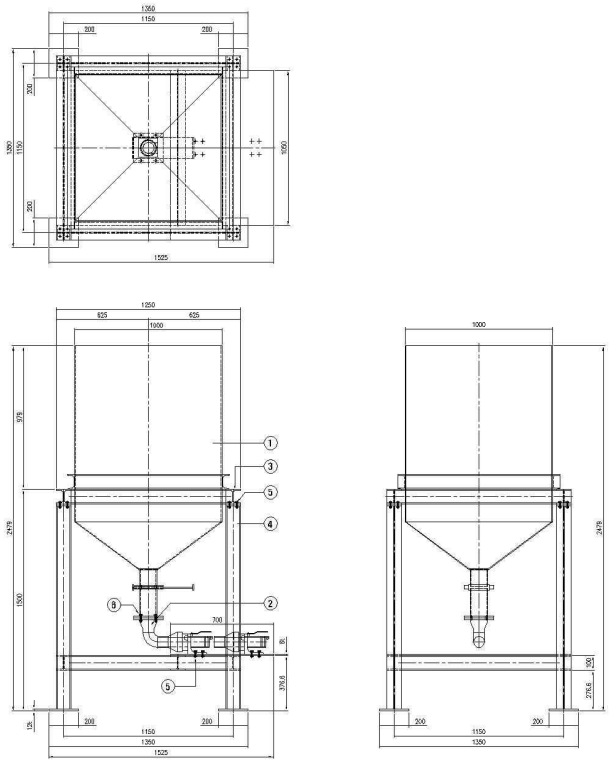


그림 2.6.3 PS 볼 저장 사일로 개념설계



그림 2.6.4 뒤채움 장치 본체와 연결된 PS 볼 저장 사일로 제작



그림 2.6.5 PS 볼 이송호스

2. PS 볼 뒤채움 주입장치 성능평가

PS 볼 뒤채움 주입장치에 대한 성능 평가는 공급되는 에어의 압력, 연결 에어 수량을 변수로 하여 수행되었다.

실험은 과정은 사일로에 PS 볼 투입, 뒤채움 주입장치 본체 연결, 이송호스 연결, 실험용 몰드에 이송호스 연결, 에어 공급의 순으로 진행되었다. 사일로의 체적은 1.2 ㎥이며 PS 볼을 사일로에 투입시킨 후 PS 볼 뒤채움 주입장치에 압축공기(5kgf/㎠ 이상)를 공급하고, 주입장치 본체의 밸브와 사일로 하부의 게이트를 개방하면 실험 몰드(0.6㎥)에 PS 볼이 채워진다. 이 때 에어의 투입부와 토출부의 압력차를 유지하기 위해서 실험 몰드에 에어 토출을 위한 볼 밸브를 설치하였다. 콘프레서의 압축공기 압력과 주입장치 본체에 공급되는 에어 수량은 다양한 조건하에 변화를 주면서 진행하였다.

그림 2.6.6은 PS 볼 뒤채움 주입장치 성능평가의 전체 흐름도를 나타낸 것이고, 그림 2.6.7은 실험 사진을 나타낸 것이다. 그리고 표 2.6.3은 PS 볼 뒤채움 주입장치 성능평가 결과를 나타낸 것이다.

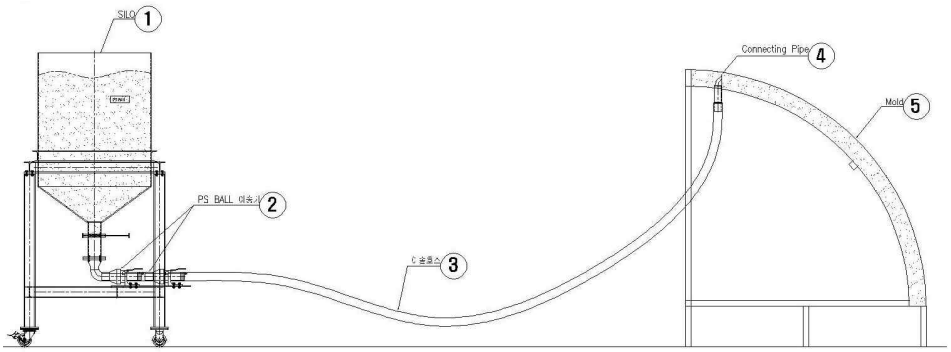


그림 2.6.6 PS 볼 뒤채움 주입장치 성능평가 흐름도



그림 2.6.7 PS 볼 뒤채움 실험 모습

표 2.6.3 PS 볼 뒤채움 주입장치 성능평가 결과

공급 에어 압력	에어 연결 수량	볼 밸브 개방 수량	실험 횟수		
			1회	2회	3회
4.5kgf/㎠ 이하	1EA	1EA	50분	51분	51분
		2EA	51분	52분	51분
		3EA	50분	50분	50분
		4EA	52분	51분	52분
5.5kgf/㎠	1EA	1EA	37분	38분	37분
		2EA	36분	37분	35분
		3EA	37분	37분	36분
		4EA	36분	36분	36분
6.8kgf/㎠	1EA	1EA	37분	36분	36분
		2EA	36분	36분	35분
		3EA	35분	37분	37분
		4EA	35분	36분	36분
5.5kgf/㎠	2EA	1EA	28분	27분	27분
		2EA	27분	26분	26분
		3EA	26분	26분	26분
		4EA	27분	26분	27분
4.5kgf/㎠	2EA	1EA	32분	33분	32분
		2EA	33분	32분	33분
		3EA	32분	31분	32분
		4EA	32분	32분	32분
3.5kgf/㎠	3EA	1EA	30분	29분	30분
		2EA	29분	30분	30분
		3EA	28분	28분	29분
		4EA	28분	29분	28분

그림 2.6.7은 PS 볼 뒤채움 이송시간을 나타낸 것인데, 공급 에어의 수량, 공급 에어 압력, 에어 토출부 볼 밸브 개방 수량에 따라 이송시간의 차이가 나타났다.

공급 에어 압력이 증가할수록 단위시간당 PS 볼 이송 속도는 증가하였으며, 동일 압력에서 공급 에어의 수량이 증가시킬수록 PS 볼 이송 속도가 증가하였다. 그러나, 동일 조건에서 압력에 의한 영향보다는 공급 에어 수량에 의한 차이가 지배적인 인자인 것으로 판단된다.

실험 결과 공급 에어 수량 2EA, 공급 에어 압력 5.5kgf/㎠ 이상을 유지할 경우 0.6㎥의 실험 몰드를 완전치 충진하는데 27~28분이 경과하여 주입 효율은 1.2~1.3㎥/hr

로 나타났다.

쉴드터널이 시공되는 지반의 종류와 연경도를 고려할 때 한 종류의 주입압으로만 배면 뒤채움을 실시할 경우 연약한 배면지반에서는 뒤채움 주입압으로 인해 지반의 파쇄나 무너짐이 발생할 가능성이 있다. 따라서 주입 효율은 유지하면서 최대한 낮은 주입압을 적용할 수 있게 추가 실험을 실시하였다.

공급 에어 수량을 3EA로 늘리고, 공급 에어 압력 최소 3.5kgf/㎠ 까지 낮추어 실험을 수행한 결과, 0.6㎥의 실험 몰드를 완전치 충진하는데 29~30분이 경과하여 주입 효율은 1.2㎥/hr로 나타났다.

따라서, 실제 현장 적용 시에는 배면지반의 종류와 연경도를 고려하여 공급 에어 압력과 공급 에어 수량을 변경 가능하며. 공급 에어 수량을 3EA 까지 증가할 경우 주입압은 3.5~5.5kgf/㎠ 범위에서 선택 적용이 가능할 것으로 판단된다.

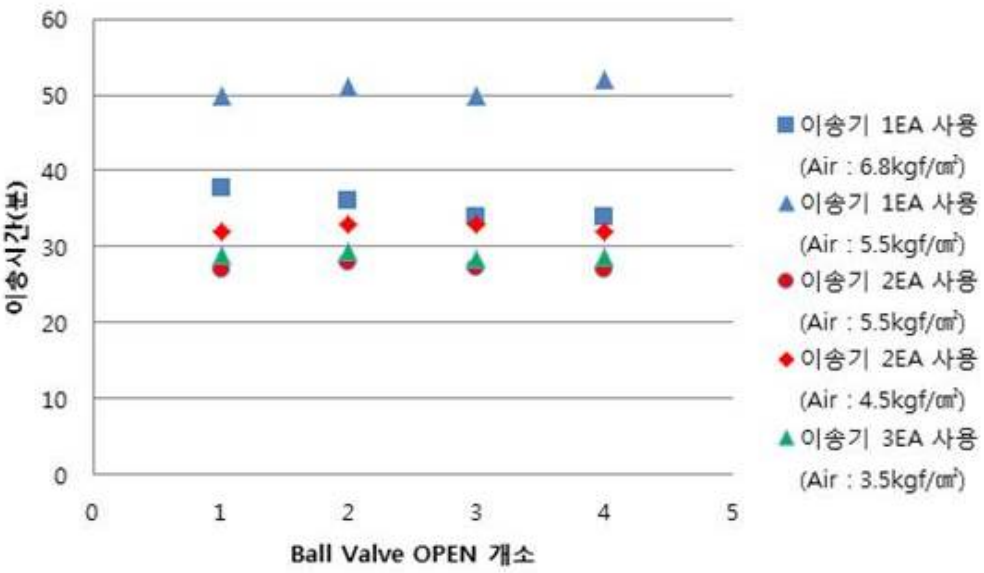


그림 2.6.8 PS 볼 뒤채움 실험결과

소결론

(1) 본 연구에서는 배수형 쉴드터널에서 PS 볼 뒤채움 시공을 효과적으로 할 수 있는 새로운 장비를 개발하였는데, 지하철 터널 직경과 쉴드TBM의 플레이트 두께로 발생되는 배면 공간의 부피에 대해 1일 8시간 주입시공 시간을 고려하여, 1일 굴착 및 세그먼트 조립공정을 충분히 뒤따라 갈 수 있는 1㎥/hr로 주입 효율을 산정하였다.

(2) 제작된 PS 볼 뒤채움 주입장치에 대한 성능평가를 실시하였는데, 콘프레서의 압축공기 압력과 주입장치 본체에 공급되는 에어 수량은 다양한 조건하에 변화를 주면서 진행하였다. 공급 에어 압력이 증가할수록 단위시간당 PS 볼 이송 속도는 증가하였으며, 동일 압력에서 공급 에어의 수량이 증가시킬수록 PS 볼 이송 속도가 증가하였다. 그러나, 동일 조건에서 압력에 의한 영향보다는 공급 에어 수량에 의한 차이가 지배적인 인자인 것으로 판단된다.

(3) 실험 결과 공급 에어 수량 2EA, 공급 에어 압력 5.5kgf/㎠ 이상을 유지할 경우, 0.6㎥의 실험 몰드를 완전치 충진하는데 27~28분이 경과하여 주입 효율은 1.2~1.3㎥/hr로 나타났다. 실제 현장 적용시에는 공급 에어 수량을 3EA 까지 증가할 수 있을 것으로 판단되고, PS 볼 주입 효율도 1.5㎥/hr 이상 높일 수 있을 것으로 예상된다.

(4) 실제 현장 적용 시에는 배면지반의 종류와 연경도를 고려하여 공급 에어 압력과 공급 에어 수량을 변경 가능하며. 공급 에어 수량을 3EA 까지 증가할 경우 주입압은 3.5~5.5kgf/㎠ 범위에서 선택 적용이 가능할 것으로 판단된다.

제 7 절 축소모형실험을 통한 배수 유로홈 성능 평가

1. 배수 유로홈 축소모형 실험장치 제작

본 연구에서는 이론적으로 검증된 배수 유로홈의 성능을 실험적으로 평가하기 위해 축소모형 실험장치를 개발하였다. 배수형 쉴드터널에서 외부에서 유입되는 지하수의 배수를 담당하는 배수 유로홈의 성능을 파악하기 위해 배수 유로홈이 구현된 세그먼트 블록을 제작하고, 수압의 조절을 통해 수압 상승에 따라 지하수가 배수 유로홈을 따라 이동하는 모습을 실제적으로 확인하고자 하였다.

축소모형 실험장치 제작을 위해 기존 전력구 쉴드터널의 단면 형상에 대해 정확한 형태를 파악하고자 하였다. 그림 2.7.1은 실제 전력구 쉴드터널에 적용되고 있는 세그먼트의 설계 단면 형상을 나타낸 것이다. 세그먼트 제작용 몰드에 수팽창 지수재 및 개스킷이 설치되는 위치가 음각 형태로 구형되어 있기 때문에 몰드 탈형시 그림 2.7.1과 같은 형상이 만들어지게 된다.

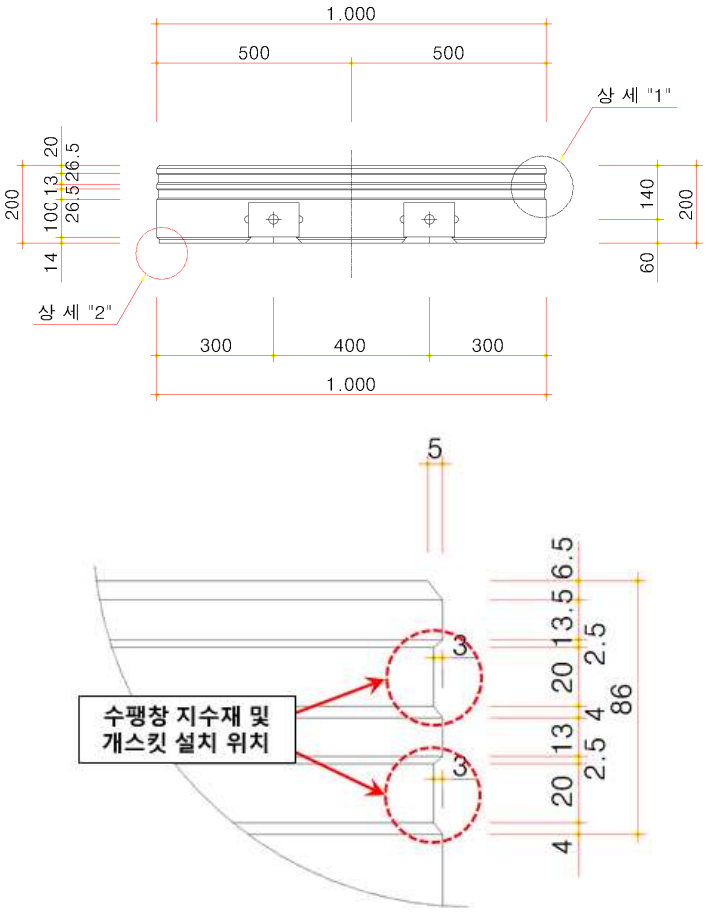


그림 2.7.1 실제 전력구 쉴드터널 단면 형상

배수형 쉴드터널에서 수팽창 지수재는 1열만 설치하고 그림 2.7.1의 2개의 음각 부분 중 세그먼트 배면에 가까운 음각 부분에 배수 유로홈을 설치하게 된다. 실험장치에 구현되는 배수 유로홈의 규격은 4절에서 검토한 결과를 바탕으로 직경 20mm로 구현하였다.



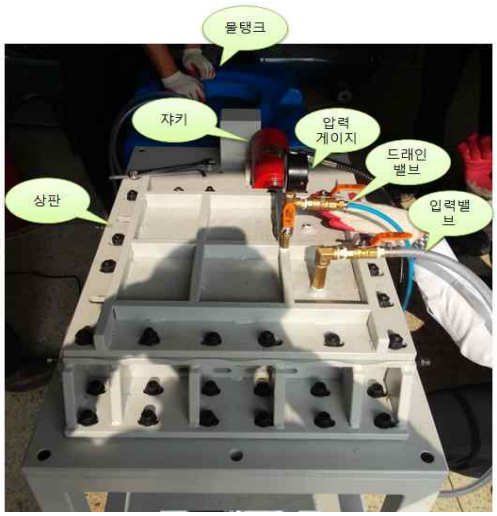
(a) 수압 펌프



(b) 블록 결합용 쟈키



(c) 수조



(d) 상판(지하수 유입밸브 및 수압계)



(e) 전체 모습

그림 2.7.2 배수 유로홈 축소모형실험장치

그림 2.7.2는 제작된 실험장치를 나타낸 것인데, 본체, 수압 장치, 블록 결합용 쟈키, 수조 등으로 구성된다.

그림 2.7.3은 세그먼트 단면에 배수 유로홈이 구현된 본체 모습을 보여주고 있다. 볼트박스가 설치된 위치, 세그먼트 블로, 배수 유로홈 위치, 수팽창 지수재 설치 모습까지 한번에 확인이 가능한데, 축소모형실험에서 가장 중요한 배수 유로홈을 통과하여 지하수의 모습을 관찰하기 위해 상판에 드래인 밸브를 설치하였다.

본 축소모형실험장치는 세그먼트 단면을 평면으로 모사한 것이기 때문에 만일 배면에 모여 있는 지하수가 수압에 의해 세그먼트 결합 틈을 통과할 경우 배수 유로홈을 따라서 위쪽 방향으로 흐르게 된다.

표 2.7.1은 실험장치 조립 및 주의 사항에 대한 내용을 나타낸 것이다.

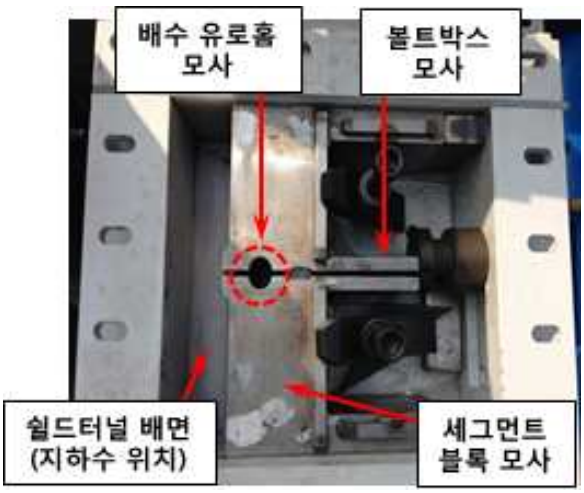
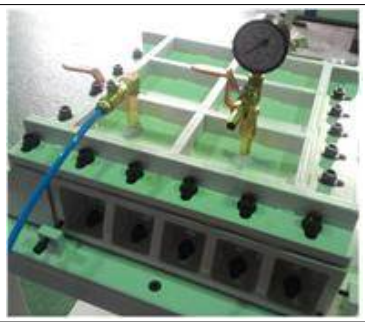


그림 2.7.3 배수 유로홈이 형성된 세그먼트 단면

표 2.7.1 축소모형 실험장치 조립과정 및 주의 사항

<table>
<tr><td>1) 조립할 판을 준비한다</td><td>2) 바닥에 방수용 판을 올린다.</td></tr>
<tr><td>  </td><td> 
* 방수용 실리콘패드를 잘 부착해야함</td></tr>
<tr><td>3) ‘ㄷ’ 자 모양의 가림판을 제작한 상태</td><td>4) 지그가 정확한 위치에 안착이 되면 볼트를 최대한 조인다.</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="2">5) 입구를 막은 다음에 쟈키를 이용하여 적절한 압을 가한다</td></tr>
<tr><td>  </td><td>볼트를 완전히 조이지 않은 상태로 채워 놓고 쟈키의 압을 가하는 정도를 이용하여 적절한 위치만큼 이동후 볼트로 고정시킨다</td></tr>
</table>

표 2.7.1 축소모형 실험장치 조립과정 및 주의 사항(계속)

<table>
<tr><td colspan="2">6) 지그가 정확한 위치에 안착이 되면 볼트를 최대한 조인다</td></tr>
<tr><td>  </td><td>방수 목적인 실리콘이
적절한 선정이 되었는지
빈틈이 없는지 확인한다</td></tr>
<tr><td colspan="2">6) 실리콘 방수막을 이용하여 전체의 판을 덮은 다음에 상판을 덮어서 마무리</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="2">7) 상판에 볼트를 태우고 게이지 및 호수를 연결한다.</td></tr>
<tr><td>  </td><td>압력을 집중적으로 받기 때문에 볼트
조임에 더욱 신경을 써야한다</td></tr>
<tr><td colspan="2">8) 압력 게이지를 보면서 원하는 압력까지 밸브를 이용하여 조절한다</td></tr>
<tr><td>  </td><td>상판에 붙어 있는 압력 게이지를 본
상태에서 밸브를 조절하여 원하는 압을
만든다.</td></tr>
</table>

2. 배수 유로홈 성능평가

가. 실험 결과

그림 2.7.4는 축소모형실험 과정을 나타낸 것이고, 표 2.7.2는 실험결과를 정리한 것이다. 모형실험에서는 세그먼트 배면에 작용하는 수압을 최초 1bar에서 최대 4bar까지 작용시켰다.

본 실험장치에 작용하는 수압 1bar는 실제 현장에서 지하수위 10m 아래에 위치한 쉴드터널 천단부에 작용하는 정수압을 의미한다. 국내 시공현장에서 실제 지하수위 40m 아래에 쉴드터널이 시공된 경우는 아직까지 사례가 없지만, 하저 및 해저터널의 경우를 예상하여 최대 4bar 까지 수압을 견딜 수 있는 축소모형 실험장치를 제작하였다

실험 수행 결과 최초 수압이 1bar일 경우 지하수의 이동은 보이지 않았는데, 세그먼트 블록의 결합력이 1bar 정도의 수압에서는 배면 지하수가 침투되는 것을 충분히 막을 수 있는 것으로 나타났다.

수압을 2bar 이상으로 증가시켰을 경우 드래인 밸브를 통해 수조로 지하수가 배출되는 현상을 확인할 수 있었는데, 2bar 이상의 수압부터는 세그먼트 블록의 결합력이 침투하는 지하수를 저지할 수 없는 것으로 판단된다.

작용 수압 2bar 부터는 세그먼트 결합 틈을 통과한 배면 지하수가 배수 유로홈에 모이기 시작하는데, 수압이 더 증가하여도 배수 유로홈에 모인 지하수가 수팽창 지수재를 통과하여 볼트박스가 위치한 터널 내부로 침투하지는 않았다. 오히려 배수 유로홈과 연결된 외부 드래인 밸브를 통과하여 수조로 다시 배출되었다.

수압 크기에 따라 배출되는 지하수의 속도 및 유량은 차이가 있는 것으로 보이지만, 최대 수압 4bar의 범위에서는 직경 20mm로 설치된 배수 유로홈이 배면에서 침투한 지하수를 외부로 충분히 배출시킬 수 있는 것으로 판단된다.

실험 후 상판을 분리했을 경우 그림 3.10(j) 에서와 같이 배수 유로홈에 지하수가 모여 있으나, 본 실험은 세그먼트 결합을 평면으로 모사한 것으로 실제 시공되었을 경우에는 중력에 의해 배수 유로홈을 따라 터널 하부로 모일 것으로 판단된다. 터널 자체 구배 혹은 펌프시설에 의해 하부로 모인 지하수는 터널 외부로 배출시킬 수 있을 것으로 판단된다.

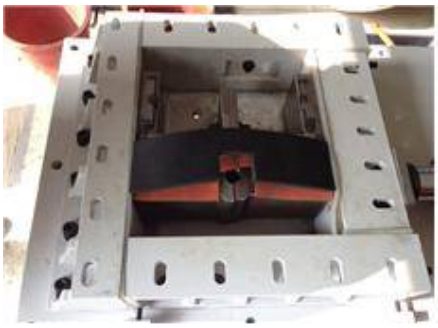
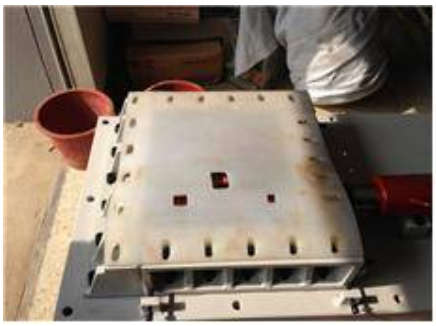
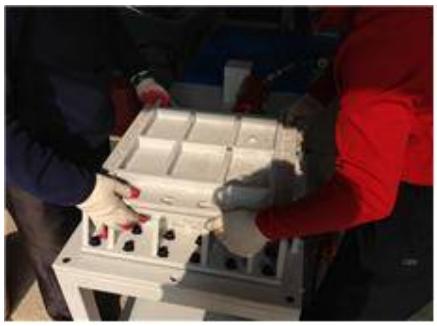
<table>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>(a) 실험장치 블록 결합</td><td>(b) 누수 방지용 고무 지수판 설치</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>(c) 상판 전면 고무 지수판 설치</td><td>(d) 상판 결합</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>(e) 수압게이지 및 주입밸스 설치</td><td>(f) 수압 밸브 작동(1bar～4bar)</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>(g) 수압 1bar 작용</td><td>(h) 최대 수압 4bar 작용</td></tr>
</table>

그림 2.7.4 배수 유로홈 축소모형실험 수행

	
(i) 드래인 밸드로 배출되는 지하수	(j) 실험 후 세그먼트 배면의 지하수 모습

그림 2.7.4 배수 유로홈 축소모형실험 수행(계속)

표 2.7.2 배수 유로홈 축소모형실험 결과

작용수압 / 드래인밸브	1bar	2bar	3bar	4bar
지하수 배출	×	○	○	○

나. 배수 유로홈 폐색 가능성 평가

본 연구에서는 배수형 쉴드터널에서 배면 투수층을 형성하는 재료로서 표준사 및 PS 볼을 검토하였다. 재료적인 성질에 대한 검토와 함께 중요한 것은 세그먼트 배면 뒤채움 후 지하수 흐름에 의해 배수 유로홈을 폐색시킬 가능성에 대한 것이다.

축소모형 실험장치 고안시 뒤채움재에 의핸 배수 유로홈의 폐색 가능성을 검토하기 위해, 뒤채움재로 채울 수 있게 세그먼트 배면 공간을 적정 크기로 고려하였다.

그림 2.7.5는 표준사와 PS 볼을 뒤채움 후 수압에 따라 배출되는 지하수를 관찰한 것이다. 표준사를 뒤채움한 경우 수압 상승에 따라 지하수가 배출될때 지하수와 함께 표준사가 배출되는 것을 확인할 수 있었지만, PS 볼의 경우 최대 수압 4bar 까지는 지하수와 함께 배출되지 않았다.

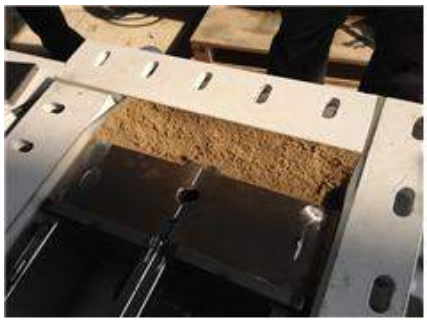
실험 후 상판을 분리했을 때 표준사를 뒤채움한 경우는 미세한 입자들로 인해 배수 유로홈이 폐색된 모습을 확인할 수 있었다.



(a) 표준사



(b) PS 볼



(c) 배면 공간 주문사 채움



(d) 배면 공간 PS 볼 채움



(e) 지하수 배출시 혼입된 표준사



(f) 지하수만 배출되는 모습



(g) 표준사에 의해 배수 유로홈이 폐색된 모습

그림 2.7.5 배수 유로홈 폐색 가능성 평가시험

배수형 쉴드터널 뒤채움재료 고려되는 표준사는 다양한 입도로 구성된 재료이며, PS 볼은 생산공장에서 1~2mm 입도로 선별되어 제품화된 재료이다. 미세한 입자까지 포함하는 표준사는 세그먼트 결합부분에 최소한의 틈이 발생하여도 지하수 흐름과 함께 결합 틈으로 침투할 가능성이 높으며, 이로 인해 배수 유로홈의 폐색 가능성도 높아질 것으로 판단된다. 반면, PS 볼은 뒤채움되는 제품의 기본 직경에 의해 세그먼트 결합 틈이 최소 1mm 이하까지에서는 수압에 의한 지하수 흐름이 발생하여도 결합 틈으로 침투되지는 않을 것으로 예상된다.

국내 쉴드터널 공사에서 세그먼트 결합 오차는 평균 0.5mm로 관리되고 있다. 즉, 시공관리만 규정대로 이루어진다면, PS 볼에 의한 배수 유로홈의 폐색은 없을 것으로 예상된다.

소결론

본 연구에서는 배수 유로홈의 성능을 실험적으로 평가하기 위해 축소모형 실험장치를 제작하였고, 수압의 조절을 통해 수압 상승에 따라 지하수가 배수 유로홈을 따라 실제적으로 이동하는 지에 대한 평가를 수행하였다. 또한, 배면에 뒤채움 되는 재료 종류에 따라 배수 유로홈 폐색 현상의 발생 여부에 대한 실험도 수행하였다.

(1) 축소모형실험장치의 세그먼트 블록 배면에 작용하는 수압이 2bar 이상 증가했을 경우 드래인 밸브를 통해 수조로 지하수가 배출되는 현상을 확인할 수 있었는데, 2bar 이상의 수압부터는 세그먼트 블록의 결합력이 침투하는 지하수를 저지할 수 없는 것으로 판단된다.

(2) 작용 수압 2bar 부터는 세그먼트 결합 틈을 통과한 배면 지하수가 배수 유로홈에 모이기 시작하는데, 수압이 더 증가하여도 배수 유로홈에 모인 지하수가 수팽창 지수재를 통과하여 볼트박스가 위치한 터널 내부로 침투하지는 않았다.

(3) 수압 크기에 따라 배출되는 지하수의 속도 및 유량은 차이가 있는 것으로 보이지만, 최대 수압 4bar의 범위에서는 직경 20mm로 설치된 배수 유로홈이 배면에서 침투한 지하수를 외부로 충분히 배출시킬 수 있는 것으로 판단된다.

(4) 배수형 쉴드터널에서 배면 투수층을 형성하는 재료로서 표준사 및 PS 볼에 대해 지하수 흐름에 의해 배수 유로홈을 폐색시킬 수 있는지 실험을 수행하였는데, 표준사를 뒤채움한 경우 수압 상승에 따라 지하수가 배출될 때 지하수와 함께 표준사가 배출되는 것을 확인할 수 있었지만, PS 볼의 경우 최대 수압 4bar 까지는 지하수와 함께 배출되지 않았다.

(5) 표준사는 다양한 입도로 구성된 재료이며, PS 볼은 생산공장에서 1~2mm 입도로 선별되어 제품화된 재료이다. 미세한 입자까지 포함하는 표준사는 세그먼트 결합부분에 최소한의 틈이 발생하여도 지하수 흐름과 함께 결합 틈으로 침투할 가능성이 높으며, 이로 인해 배수 유로홈의 폐색 가능성도 높아질 것으로 판단된다. 반면, PS 볼은 뒤채움되는 제품의 기본 직경에 의해 세그먼트 결합 틈이 최소 1mm 이하까지에서는 수압에 의한 지하수 흐름이 발생하여도 결합 틈으로 침투되지는 않을 것으로 예상된다.

제 8 절 실대형 실험을 통한 배수 유로홈 성능 평가

배수 유로홈을 이용한 쉴드터널의 배면공간에 대한 처리는 기존의 쉴드터널처럼 뒤채움재로서 그라우트재를 사용하여 지층을 통하여 유입된 지하수를 차수하는 것이 아니라 배수가 원활하도록 해야 하기 때문에 뒤채움재로서 투수성이 큰 재료인 PS 볼을 사용하여 충진한다. 지반과 뒤채움재를 통과한 지하수는 세그먼트간 간격을 통하여 터널내로 유입되게 되는데, 이때 유입된 지하수는 배수 유로홈을 통하여 중력방향으로 이동하여 내부 배수구를 통하여 배출되게 된다. 배수 유로홈의 배수성능은 배수형 쉴드터널의 배수터널로서의 기능수행에 가장 핵심적이고 중요한 기술로서 실대형 크기의 세그먼트를 이용하여 성능에 대한 검토가 필요하다.

1. 실험 계획

배수 유로홈의 배수성능을 평가하기 위해서는 1차적으로 뒤채움재층과 지층을 통하여 원활하게 세그먼트에 지하수가 도달하는지와 배수유로홈의 배수용량에 대한 평가가 필요하다. 평가를 위해서는 실제 배수 유로홈을 통한 배수용량의 계측을 위하여 배수 유로홈이 형성된 실대형의 세그먼트가 필요하며, 뒤채움재와 지층을 형성한 지반조건이 필요하다. 하지만 현실적으로 실제 지반에서 쉴드터널을 시공하고 유로홈의 배수성능을 계측하기는 불가능하다. 이에 그림 2.8.1과 같이 실제 크기의 세그먼트 1piece를 제작하고, 지층조건 형성이 가능하며 육안관찰이 가능하도록 세그먼트 상부에 투명 아크릴을 결합하였다. 상부에 결합되는 아크릴 안에는 뒤채움재 및 지층을 형상화하여 배수성능을 평가하는 실험을 수행하기로 하였다.

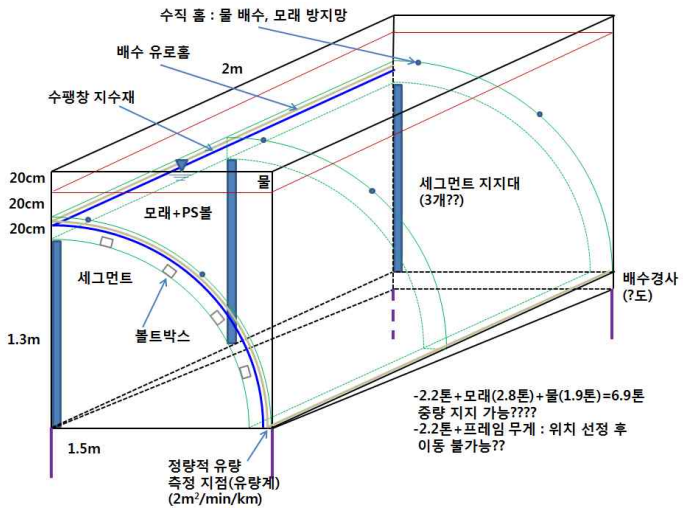


그림 2.8.1 배수 유로홈 성능평가 장치 개요도

실험용 세그먼트는 중량 및 부피를 고려하여 전력구 쉴드터널의 세그먼트를 적용하도록 하였다. 세그먼트는 자연배수를 위하여 종방향으로 일정각도의 배수구배를 가지며 세그먼트 배면에는 PS 볼을 이용한 뒤채움재층과 모래를 이용한 지반층을 형성을 계획하였다.

2. 설계 및 제작

세그먼트는 실제 설계 및 시공이 수행되어진 직경 3,600mm인 ○○전력구 터널의 A타입 세그먼트를 기본으로 하였다. A타입 세그먼트는 그림 8.2.1과 같이 세그먼트 두께 200mm, 터널 바깥쪽 호의 길이 2,609.94mm이며, 2열의 수쟁창 지수재가 설계되어있다.

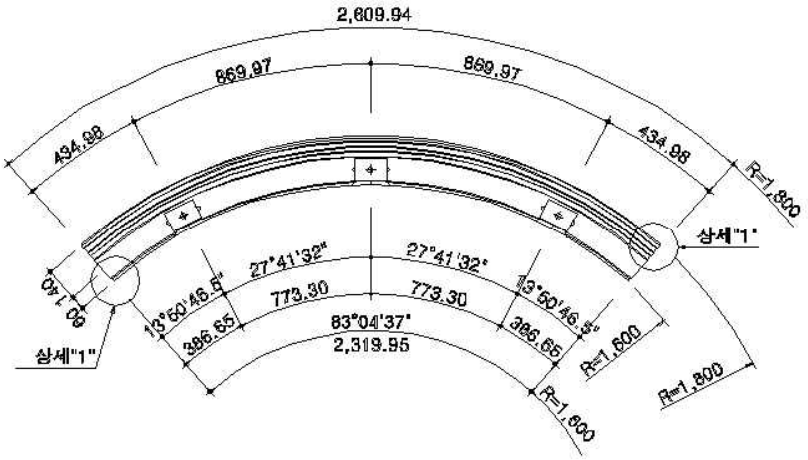


그림 2.8.2 ○○전력구 A타입 세그먼트 정면도

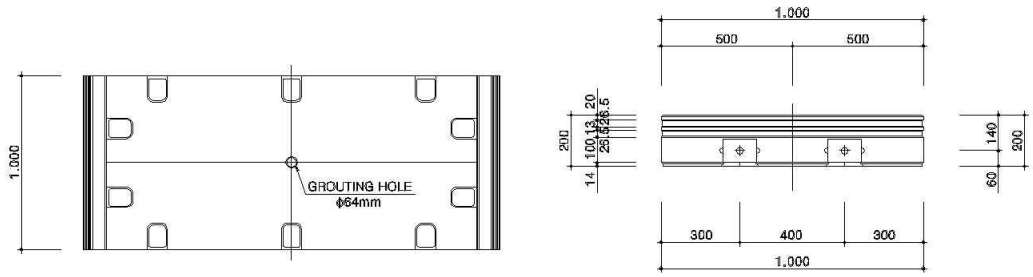


그림 2.8.3 ○○전력구 A타입 세그먼트 평면 및 측면도

배수 유로홈의 성능평가를 위하여 그림 2.8.4와 같이 세그먼트 4면의 바깥쪽 수팽창 지수재 대신에 직경 20mm의 반원의 배수 유로홈을 적용하여 지하수 유입시 배수 유도를 하도록 했다. 또한 배수 유로홈의 최대 배수용량을 분석하기 위하여 세그먼트 배면쪽에 인위적으로 반원형상의 지하수 유입구를 형성함으로서 충분한 양의 지하수 유입이 가능하도록 하였다.

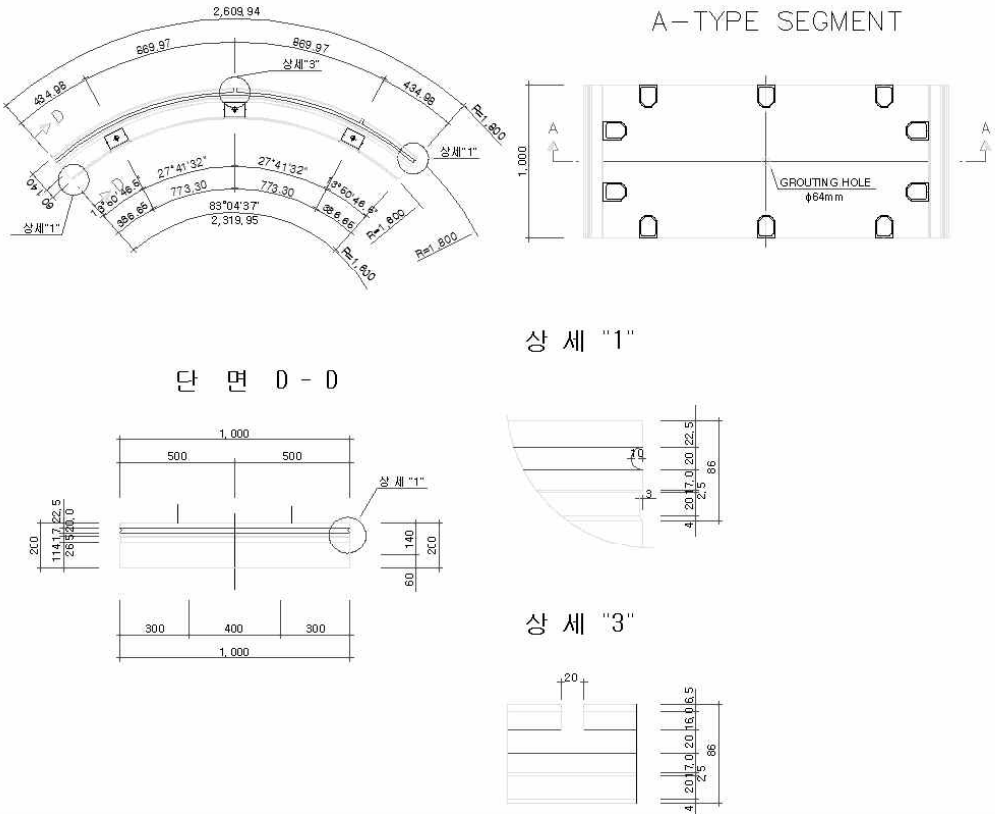


그림 2.8.4 배수 유로홈 성능평가용 세그먼트 상세도

또한 세그먼트 배면에 뒤채움재 및 지층을 모사하고 지하수의 주입을 위하여 상부 지층 형성부는 세그먼트트 모형, 뒤채움재, 지층, 물의 중량에 대하여 충분한 안정성을 확보하여야 하며, 지층 구성 및 배수 유로홈을 통한 물의 이동경로의 관찰이 가능해야 한다. 중량에 대한 안정성을 확보하기 위하여 세그먼트 하부에는 그림 2.8.5와 같이 강재 프레임(frame)으로 보강하였으며, 그림 2.8.6과 같이 지층구성 및 배수 유로홈의 관찰을 위하여 토조의 양 측면부는 투명 아크릴재질로 설계를 수행하였다.

하부에는 세그먼트의 유로홈을 통해 흘러나온 지하수의 유량을 분석하기 위하여 유량계를 설치하였다. 이를 통하여 배수홈의 배수성능의 평가가 가능하다.

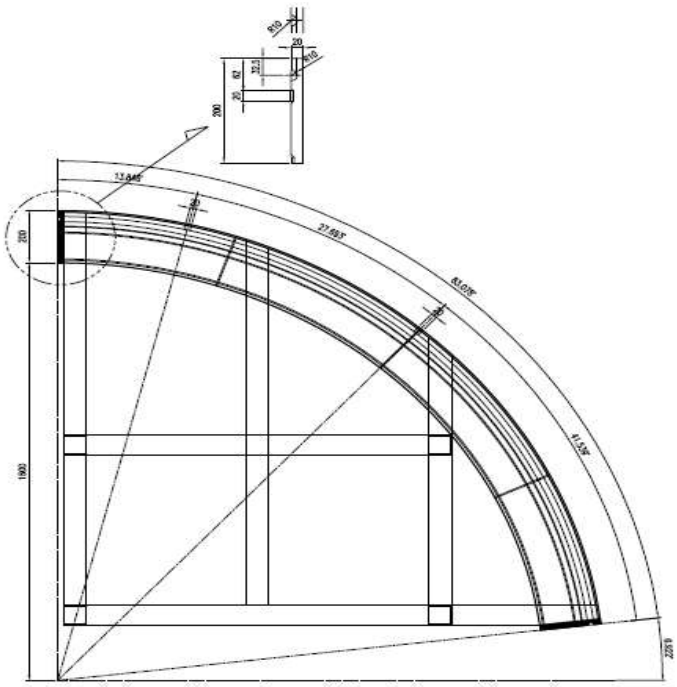


그림 2.8.5 세그먼트 하부보강 설계

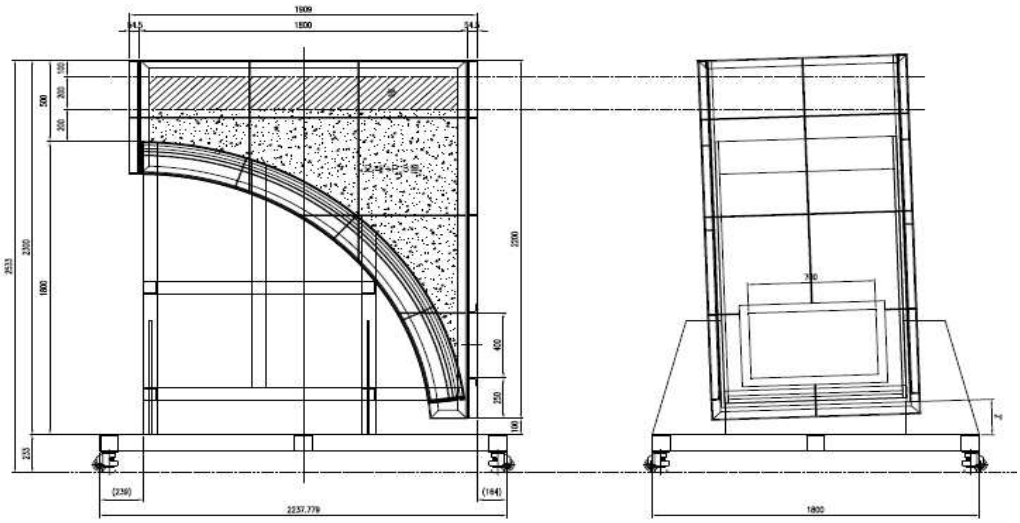


그림 2.8.6 세그먼트 하부보강 설계

쉴드터널의 세그먼트는 원래 콘크리트 제품이나, 큰 중량으로 인해 실험 수행시 제어의 어려움과 상부 지층 형성부와의 차수를 위한 부착이 어려운 재질이기 때문에 콘크리트 대신 강재를 사용하였다. 그림 2.8.7과 같이 세그먼트의 6면을 각각 가공하여 결합하는 방법을 사용하여 두께200mm, 종방향 길이 1,000mm의 세그먼트 모형을 완성하였다.



(a) 가공중인 세그먼트



(b) 세그먼트 결합



(c) 배수 유로홈 및 지수재 부착부



(d) 완성된 세그먼트 모형

그림 2.8.7 실험용 세그먼트 모형

실험시 구조물에 하중으로 작용하는 완성된 세그먼트 모형과 PS 볼, 모래의 중량에 대하여 안전한 실험수행 및 세그먼트의 종단 배수경사 1°를 기울이기 위하여 설계된대로 그림 2.8.8과 같은 하부보강 프레임을 제작하였다.



그림 2.8.8 실험체 하부보강 구조



그림 2.8.9 실험체 토조 결합

완성된 세그먼트 모형과 하부 구조물을 결합하고, 그림 2.8.9와 같이 배수 유로홈을 통한 지하수의 흐름이 육안으로 관찰이 가능하도록 세그먼트의 2면에 대하여 투명한 재질의 상부구조를 부착하여 지층 및 지하수의 모사가 가능하도록 제작하였다.

하부에는 배수 유로홈을 통하여 집수된 지하수의 유량을 분석하기 위하여 그림 2.8.10과 같이 지하수 배출관을 설치하였으며, 그림 2.8.11의 유량계를 설치하여 배수 유로홈의 최대 배수성능에 대한 계측을 수행하였다.



그림 2.8.10 실험체 지하수 배출관



그림 2.8.11 유량계

3. 실험 수행

가. 실험 방법

배수 유로홈의 배수성능을 평가하기 위하여 그림 2.8.12와 같은 순서로 실험을 수행하였다. 실험순서는 평지에 실험용 세그먼트 실험체 조립하고 지하수 배출관 및 유량계 등의 실험장비를 셋팅하였다. 조립이 완료되면 PS 볼을 세그먼트 배면의 형태에 맞춰 포설하여 뒤채움재층을 형성하고, 뒤채움재 상부에 모래를 포설하여 지반을 모사하였다. 지층의 모사가 완료된 후 수조에 담긴 물을 토조 안으로 자연배수 시켜 지하수의 조건을 만들어주고, 배수 유로홈을 통해 집수된 지하수의 양을 측정하였다.



(a) 실험 준비



(b) 셋팅 완료



(c) 유량계 셋팅



(d) 뒤채움재층 형성

그림 2.8.12 배수성능 평가를 위한 실험 순서



(e) 모래 지반층 형성



(f) 지하수 조건 조성



(g) 지하수 이동



(h) 배출구 배수량 측정

그림 2.8.12 배수성능 평가를 위한 실험 순서(계속)



그림 2.8.13 세그먼트 배면 지층 형성

뒤채움재로 사용된 PS 볼의 배수성능을 평가하기 위하여 그림 2.8.13과 같이 세그먼트 배면의 경사에 따라 뒤채움재와 지반층을 형성하였다.

나. 실험결과

실험수행결과 세그먼트 배면의 뒤채움재층을 원활하게 통과하여 유입된 지하수는 배수 유로홈을 통하여 중력방향으로 이동되어 배출구를 통하여 배수가 되었으며, 배수 유로홈에서 세그먼트 내부방향으로 세그먼트를 타고 침투하는 지하수는 육안으로 거의 확인되지 않을 정도이며 침투한 지하수는 수팽창 지수재에서 모두 차단이 가능한 것으로 관찰되었다.

배수 유로홈이 기존 이론적 계획대로 거동하는 것을 확인 후 그림 2.8.16과 같이 하부 지하수 배출구를 통해 빠져나갈 수 있는 용량이상으로 지하수의 양을 늘린 후 배출구에서 배수량을 측정하였다. 여기서 측정되는 지하수의 배수량은 직경 20mm의 배수 유로홈의 최대 배수 용량으로서 배수성능의 평가가 가능하다. 또한 배수 유로홈 내부에 지하수가 가득 차오르는 것은 뒤채움재의 배수성능이 충분한 것이다.



그림 2.8.14 배수 유로홈을 통한 지하수 이동



그림 2.8.15 집수된 지하수 배출



그림 2.8.16 가능 배수량 이상의 지하수



그림 2.8.17 유량계를 통한 계측

포화상태에서 측정된 배수 유로홈에서 배출되는 배수량은 0.402tr/min(1.0 tr=5.0 ℓ)이다. 실험에 사용된 세그먼트는 5piece로 구성된 전력구 터널로서 1링에서 가능한 배수용량은 2.1ℓ/min이다. 이를 터널 연장당 배수량으로 환산하면 2.1m^3/min/km로서 기존에 이론적으로 검토되었던 직경20mm의 배수 유로홈과 거의 같은 수치를 나타냈다. 국내 전력구 쉴드터널에서 터널내부로 지하수가 누출됨에 따라 발생하는 양수량은 0.24㎥/min/km로서 배수 유로홈은 배수형 쉴드터널로서의 기능을 수행하는데 적절할 것으로 판단된다.

소결론

배수형 쉴드터널로서 거동이 가능하기 위해서는 뒤채움재를 통한 터널로의 지하수 이동, 세그먼트 내부로 이동한 지하수를 유도 배수할수 있는 배수 유로홈의 기능이 가장 중요한 역할을 수행한다. 이에 실대형 실험을 통하여 실제 지반조건과 배수 유로홈을 통한 지하수의 배수성능 실험을 수행하여 뒤채움재와 배수 유로홈의 기능에 대한 적용성을 평가하였다.

(1) 선정된 뒤채움재와 배수 유로홈의 배수성능 평가를 위하여 배수 유로홈이 모사된 실대형 세그먼트 1Piece를 제작하고, 토조를 부착하여 뒤채움재와 지층을 형성하여 지하수의 거동을 분석하였다. 또한 토조를 투명하게 제작하여 배수 유로홈을 통한 지하수의 이동을 육안으로 확인이 가능하였다.

(2) 지하수는 지반과 뒤채움재층을 통과하여 세그먼트 내부로 유입되었으며, 배수 유로홈을 통한 이동도 원활하게 진행되었다. 지하수를 가득 채워 배수 유로홈을 통해 빠져나가는 지하수의 유량을 측정한 결과 2.1m^3/min/km로서 국내 전력구 쉴드터널에서 발생하는 양수량은 0.24㎥/min/km을 여유있게 만족하였다. 평가결과 뒤채움재와 배수유로홈의 배수성능은 배수형 쉴드터널에 적절할 것으로 판단된다.

제 9 절 배수/비배수 조건을 고려한 쉴드터널 모형실험

일반적으로 쉴드터널 라이닝 설계 시 비배수조건을 적용하고 있지만, 시공현장에서는 쉴드터널 내부로 지하수가 유입되고 유입된 지하수는 배수시설을 통해 배수되고 있다. 따라서 쉴드터널 라이닝 설계 시 배수조건을 고려할 필요가 있으며, 배수조건이 고려된다면 라이닝에 작용하는 하중이 감소되므로 세그먼트 라이닝 두께를 감소할 수 있어 보다 효율적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 배수 및 비배수 조건하에서 터널 라이닝에 작용하는 응력을 분석하기 위하여, 토질종류 및 지중응력, 배수조건을 자유롭게 변화시키며 다양한 현장조건하에서 쉴드 터널 라이닝에 작용하는 응력을 측정할 수 있는 터널모형 실험장비를 구축하였다. 이와 같이 구축된 장비를 이용하여 표준사와 화강풍화토 지반에서 토압 및 수압을 변화시키며 배수 및 비배수조건에서 쉴드터널 라이닝에 작용하는 응력을 측정하였다.

1. 모형실험장비 개발

가. 국내외 터널모형 실험장비 및 실험현황 파악

개발된 터널모형 실험장비는 다양한 지반종류의 모사가 가능하고, 배수 및 비배수조건에서 쉴드터널 라이닝에 작용하는 응력을 분석하기 위한 실내실험을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 개발된 터널모형 실험장비를 이용하여 지중응력 및 배수조건을 자유롭게 변화시키며 다양한 현장조건에서 터널 라이닝에 작용 응력 및 내부 응력을 분석하는 것을 목적으로 한다.

국내·외 터널모형 실험장비의 경우, 대부분 터널의 변형이나 라이닝의 응력을 측정하기 위해 지반모사 방법 및 실험체 형상을 변화시키며 실험 목적에 따라 제작하여 사용하고 있다.

전석원 등(2003)은 터널 부근에 석회암 공동이 존재할 경우, 공동의 크기, 터널과의 이격거리, 공동의 위치, 공동의 충진 여부 등 공동의 제반 특성이 터널의 안전성에 미치는 영향을 실험적으로 검토·분석하였다.[1)] 연구 결과, 공동의 크기가 큰 경우 인접한 터널의 안전성이 더 크게 저하되었고, 공동과 연결되는 부분에서 균열이 발생하고 파괴가 일어남으로써 공동에 의한 영향이 확연히 관찰되었다. 터널과의 이격거리가 미치는 영향을 살펴보면, 변형의 형태는 비슷하나 변형량에 있어서 큰 차이를 보여 공동

의 위치가 터널에 가까우면 터널 주변에서의 변형량이 많은 것으로 나타났다. 공동의 위치가 미치는 영향을 살펴보면, 공동이 터널 좌상부에 있는 경우가 역학적으로 가장 불안정한 것으로 나타났다. 또한 공동의 충진 여부가 미치는 영향을 살펴보면, 충진된 공동 부근에 응력집중이 거의 발생하지 않아 석회암 공동을 충진하면 보강효과가 클 것이라고 하였다.

김종우(2004)는 단층대의 위치 및 경사가 서로 다른 네 가지의 경우에 대해 모형실험을 실시하였고, 그에 대한 수치해석을 동시에 실시하여 터널 안정성에 대한 단층대의 영향을 검토하였다.[2] 연구에서의 변수로는 터널과의 이격거리 및 위치, 경사 등을 선정하였고, 검토 결과 단층대가 터널의 하부 보다는 상부에, 바로 위에 위치하기 보다는 45°의 경사로, 1.0D 만큼 이격되어 있는 경우에 비교적 안전성을 갖는 것으로 나타났다.

이재호 등(2007)은 저토피 터널 상부의 토압을 산정하기 위하여 2차원 실내 터널모형 실험과 변형률 연화모델을 기본으로 한 비선형 수치해석을 실시하여 굴착에 따른 터널 토압과 지반의 변형거동에 대해 연구하였다.[3] 양형식 등(2007)은 모형실험에 적정한 재료를 찾기 위해 시멘트, 석고, 아크릴을 재료로 균질암반에서 정밀제어발파에 의한 손상영역을 평가하기 위한 모형실험을 실시하여 파괴 유형을 검토하였다.[4] 그 결과, 동일 실험조건의 전제하에 시멘트가 유사한 결과를 나타냈고, 석고의 경우에는 배합비 및 모형의 길이 등을 적절히 조정하여 모형을 선택해야 한다고 하였다. 유광호 등(2008)은 터널의 주 지보재인 숏크리트의 파괴거동을 규명하기 위해 실제 터널과 유사한 크기의 마제형 터널을 제작하여 터널모형실험을 수행하였고, 3차원 수치해석을 통해 이를 검증하였다.[5]

이성원 등(2009)은 해저터널과 같은 고수압 조건에서 쉴드터널 세그먼트간 수팽창 지수재의 가이드라인을 제시하기 위하여, 수압변화에 따른 수팽창 지수재의 방수성능 변화에 대하여 모형실험을 수행하였다(그림 2.9.1 참조).[6] 그 결과 고수압 조건에서 누수현상이 크게 발생하지만, 시간경과에 따라 수팽창 지수재의 팽창에 의하여 지수효과가 높아지는 것을 확인하였다. 또한 쉴드터널 세그먼트간 접합부의 변형을 모사한 실험을 통하여 외측의 수팽창 지수재보다 내측에 위치한 수팽창 지수재의 팽창이 지수효과를 높이는 것을 확인하였다.

이동석(2011)은 연약대층에 근접하여 터널을 건설할 때 굴착과정 시 발생하는 상호 거동 양상을 분석하기 위하여 2차원 축소모형실험을 수행하였다(그림 2.9.2 참조).[7] 지반 모사를 위해 모형실험에 사용된 배합비는 원지반의 경우 모래:석고:물의 배합비를 3:1:2로 하였고, 연약대층의 경우 공시체를 제작하고 일축압축강도 실험결과를 토대로 모래:석고:물의 배합비를 1:1:3로 하여 지반을 모사하였다. 연약대층이 지표

면과 이루는 각도 및 이격거리에 대하여 4가지 및 5가지로 각각 상세화하여 실험하였으며, 모형에 상재하중을 가압한 후 충분한 안정화 시간을 거쳐 실제 지반과 같은 조건 하에서 터널을 굴착하여 실험하였다. 또한 터널 변형은 사진 측량 소프트웨어인 PhotoMoleler Pro 5를 사용하여 측정하였다. 그 결과 연약대층이 지표면과 이루는 각도가 클수록 연약대층의 영향을 더 많이 받고 변위량이 커지는 것을 확인하였다. 또한 연약대층과의 이격거리에 따른 변위량을 분석하여 1.5D 이상의 이격거리를 확보하는 것이 터널의 초기 균열 및 최종 파괴에 대한 안정성을 증대시킨다는 것을 확인하였다.

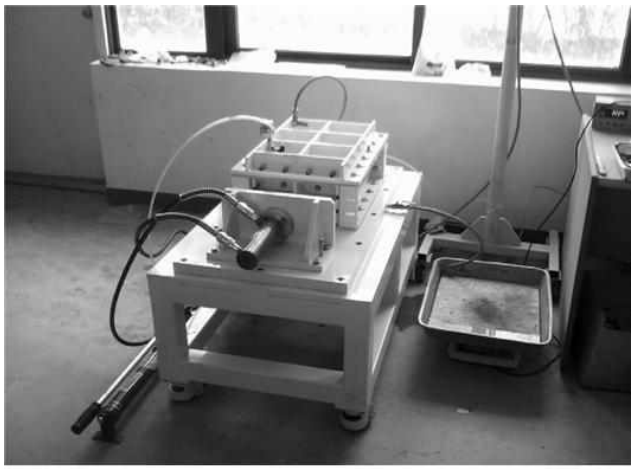


그림 2.9.1 수팽창 지수재 팽창성능 모형실험장비

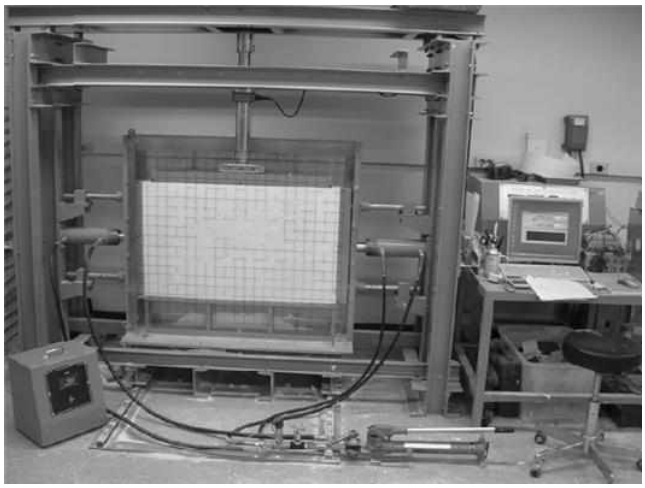


그림 2.9.2 2차원 축소모형 실험장비

조재호(2011)는 터널 상부의 토압을 산정하기 위하여 모래:석고:물의 배합비가 3:1:2인 50 cm × 25 cm의 지반을 모사하였다.[8] 제작된 터널모형 단면을 일축압축 시

험기를 이용하여 단면의 상하부에 일정한 응력이 작용되도록 압축시험을 수행하였고, 유한요소해석을 이용하여 원형터널을 모델링하여 터널 상부 토압을 비교·검토하였다. 이를 통해 터널상부에 응력 및 전단력이 집중되어 상부에 변형이 집중되는 것을 확인하였다.

김경열 등(2012)은 사질토 지반에 설치한 원형수직터널에서 아칭효과로 인해 발생하는 토압의 거동특성을 분석하기 위하여 원심모형실험을 수행하였다(그림 2.9.3 참조).[9] 직경 6.0 m, 높이 15.0 m의 원형수직터널을 1/75로 축소하여 모형화하였고, 지반굴착에 따른 토압의 거동을 분석하기 위하여 수직벽체를 2단으로 분리하고 상단과 하단에 각각 4개의 토압계를 설치하여 토압을 측정하였다. 굴착효과를 위한 벽체의 이동(변위)제어는 변속모터를 이용하여 1 mm/140 sec으로 설정하여 주동변위를 모사하였다. 이를 통해 지반의 심도가 깊어질수록 굴착에 따른 수평토압의 감소율이 커진다는 것과 대부분의 수평토압이 이론 토압식에 비해 작거나 비슷한 값의 분포를 나타내는 것을 확인하였다. 또한 모든 해석에서 원형 수직터널에 작용하는 전 수평토압은 초기 Ko 수평토압에 비해 약 70% 가량 저감되는 것을 확인하였고, 이는 평면변형 조건의 옹벽에 작용하는 토압과 달리 원형구조물은 3차원 아칭효과가 토압의 거동을 지배하는 주인자임을 확인하였다.

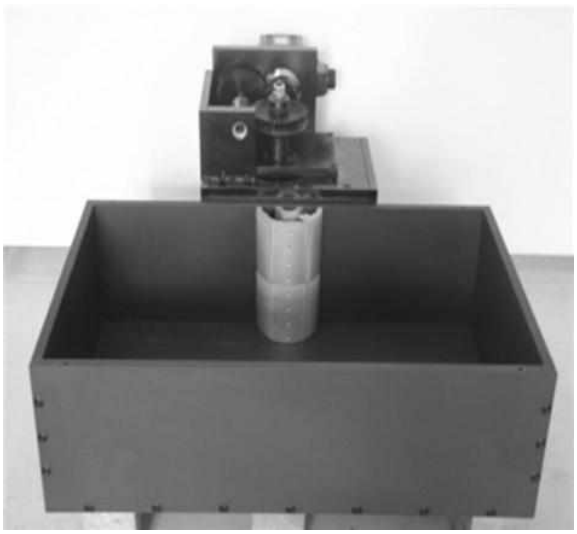


그림 2.9.3 원심모형실험장비

Jukes 등(1983)은 철재 아치 지보만을 축소모형으로 제작하여 아치 정상부에 집중하중을 가하는 실험을 실시하였다.[10] 이때 지보재의 물성은 그대로 유지한 상태로 3차원 지보모형에서 지보의 파괴 강도와 이음 철판 및 절장의 영향 등을 연구하였다. Sakurai 등(1994)과 Sterpi(1999)은 저토피 터널 상부의 토압을 산정하기 위하여 알루

미늄 바를 이용하여 모래를 재현하고 원형 에어백을 이용하여 공기압을 줄이는 것으로 터널 굴착을 재현하였다.[11), 12)] Adhikary 등(1997)은 암반사면에서의 토플링 파괴 메커니즘을 규명하기 위하여 취성재료(brittle material)로서 모래와 석고의 혼합물을, 연성재료(ductile material)로서 fiber-cement sheeting을 사용하였다.[13)] Chu 등(2007)은 모래, 석고, 활석분(talc powder)의 혼합물을 사용하여 지반조건이 다른 다양한 지층을 모사하여 여러 지층을 가진 병설 터널의 거동을 규명하였다.[14)]

나. 모형실험장비 구성

지반조건 및 배수조건에 따른 쉴드터널 라이닝에 작용하는 압력을 분석하기 위하여 개발된 터널모형 실험장비는 토조, 유압장치, 외관, 내관 및 계측장치로 구성되었다(그림 2.9.4 참조). 토조는 지중에 시공된 쉴드터널을 모사하기 위하여 표준사 또는 화강풍화토를 채우는 부분으로 지하수위 모사가 가능하도록 제작되었다. 토조의 규모는 폭 0.6 m, 길이 0.6 m, 높이 1.0 m, 부피 0.36 ㎥이며, 토조의 하단부에는 쉴드터널 모형을 삽입할 수 있는 구멍이 설치되었다. 토조의 상부판 중앙에는 심도에 따른 토압 변화를 모사하기 위하여 시료에 가해지는 하중을 측정하고 조절하기 위한 유압장치와 로드셀을 설치하였고, 로드셀 하부에는 시료에 고르게 하중을 가하기 위하여 가압판을 설치하였다. 또한 가압판에는 20개의 구멍을 천공하여 하중이 가해질 때 토조내에서 물이 자유롭게 이동할 수 있도록 하였으며, 수압조절장치를 통해 토조 외부에서 토조의 수압 조절이 가능하도록 하였다. 수압조절장치는 토조 상부판 측면에 설치하였으며 실험시 토조에 가해지는 수압의 변화를 확인하고 조절할 수 있도록 하였다.

현장에서 쉴드터널 시공 시 굴착면 주위의 지반이 이완되는 현상이 발생하는데, 이를 모사하기 위하여 외경 100 ㎜, 내경 80 ㎜ 규격의 외관을 설계하였고, 배수 및 비배수 조건의 쉴드터널 라이닝을 모사하기 위하여 외경 75 ㎜, 내경 60 ㎜ 규격의 내관을 각각 설계하였다. 또한 배수조건의 내관에는 직경 4 ㎜의 구멍을 30개 설치하였고, 각 구멍은 육각민머리볼트를 이용하여 개폐가 가능하도록 하여 내관으로 유입되는 물의 양을 조절하도록 하였으며, 비배수조건의 내관은 구멍을 설치하지 않아 내관으로 유입되는 물이 없도록 각각 설계되었다.

계측장치는 토조와 배수 및 비배수 조건의 내관에 작용하는 토압을 측정하기 위한 토압계, 내관에 작용하는 간극수압을 측정하기 위한 간극수압계, 배수 및 비배수 조건 내관의 거동을 측정하기 위한 변형률계로 구성되었다. 토압계는 배수 및 비배수 조건 내관과 동일한 높이로 토조의 측면에 설치하였고, 간극수압계는 지반의 지하수가 쉴드터널 하부로 유입되고[15)] 현장에 시공되는 터널에서 배수구 및 집수장치가 쉴드터널

하단에 설치되는 것을 고려하여 내관 하면부에 2개를 설치하였다. 변형률계는 배수 및 비배수 내관의 변형을 측정하기 위하여 내관의 상면부 중앙 및 측면에 각각 2개씩 설치하였다(그림 2.9.6 참조).



그림 2.9.4 터널모형 실험장비 전체 외관



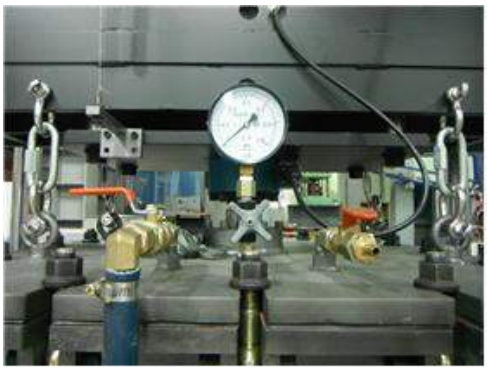
(a) 외관



(b) 내관 (배수조건)



(c) 내관 (비배수조건)



(d) 수압조절장치



(e) 가압판



(f) 다짐판

그림 2.9.5 터널모형 실험장비 구성 장비

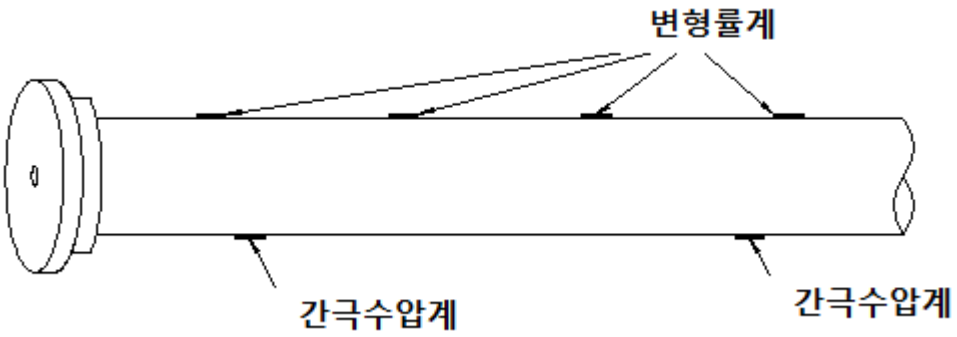


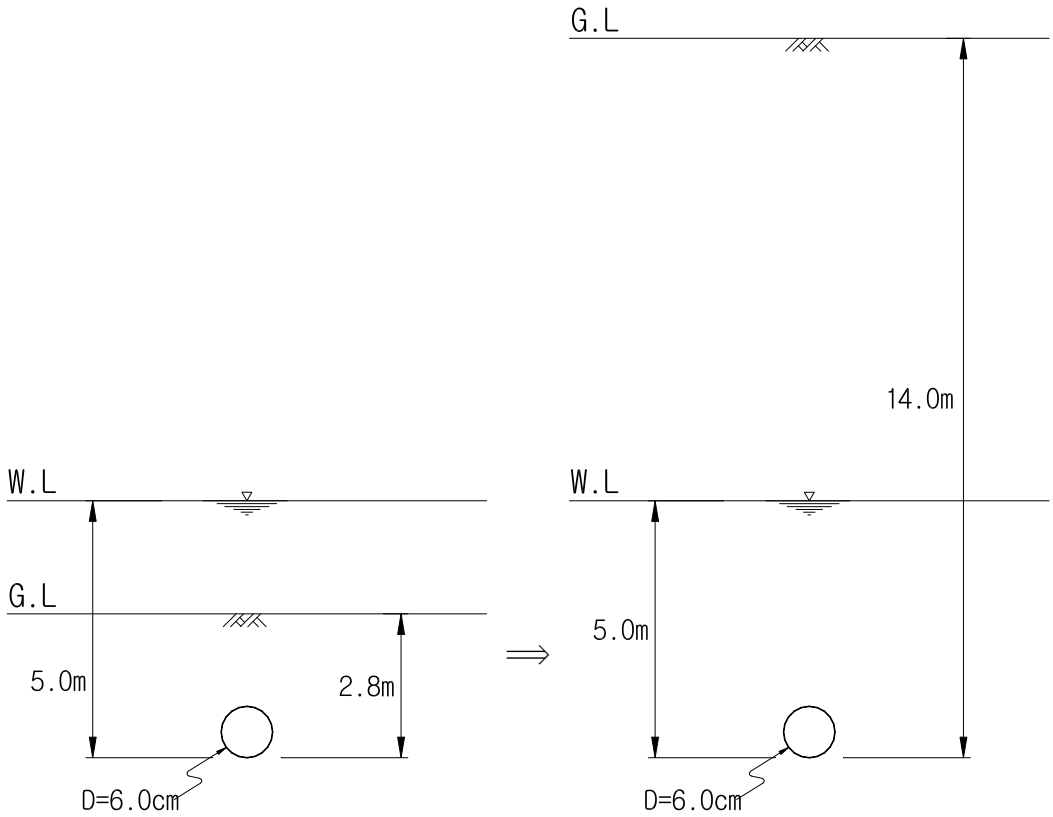
그림 2.9.6 내관 및 계측장비 배치도

다. 실험 방법 및 조건

잔류수압 및 지반조건을 고려한 터널모형의 실험방법은 다음과 같다. 토조 본체를 하부판과 16개의 볼트로 체결하고, 토조와 하부판 사이에는 고무판을 삽입하여 실험 중 토조의 수압으로 인한 누수를 방지하였다. 토조와 하부판을 체결하고 나서 토압계가 설치되지 않은 나머지 2개 측면에 지반이완 고려를 위한 외관을 삽입한 후, 토조에 시험사를 0.30 m 높이로 쌓고 다짐판을 이용하여 15회의 다짐을 하고 다시 시험사를 0.30 m 높이로 쌓은 후 다짐판을 이용한 다짐을 실시하였다. 토조에 시험사를 0.30 m 높이로 3회에 걸쳐 쌓고 다져서 최종 높이 0.90 m까지 쌓았다.

토조에 시험사를 채운 후 토조와 상부판을 하부판과 마찬가지로 16개의 볼트와 고무판을 이용하여 체결하였다. 로드셀에 가압판(0.60 m × 0.60 m)을 부착하고 0.0278 ㎫의 하중으로 토조의 시험사를 균등하게 압축하고 가해진 하중을 제하한 후, 외관을 제거하고 배수 및 비배수 조건에서의 쉴드터널을 구현하기 위하여 내관을 삽입하였다. 지하수위 아래에 시공된 쉴드터널을 모사하기 위하여 시험사가 표준사인 경우에는 상부판의 수압조절장치를 이용해 물을 주입하여 토조의 시험사를 포화시키고, 시험사가 화강풍화토인 경우에는 토조의 하부에 설치된 배수밸브에 호스를 연결하여 포화시켰다. 그 후에 토조의 수압이 0.05 ㎫이 되도록 가압하였다.

실험은 시험사를 변경하며 4종류의 수압 하에서 5종류의 토압을 가하며 수행되었다. 첫 번째 실험단계는 수압을 0.05 ㎫로 가압하고 유지한 상태에서, 토압을 1분당 0.0278 ㎫씩 증가시켜 0.1390 ㎫까지 가압하며 데이터를 측정하였다(그림 2.9.7 참조).

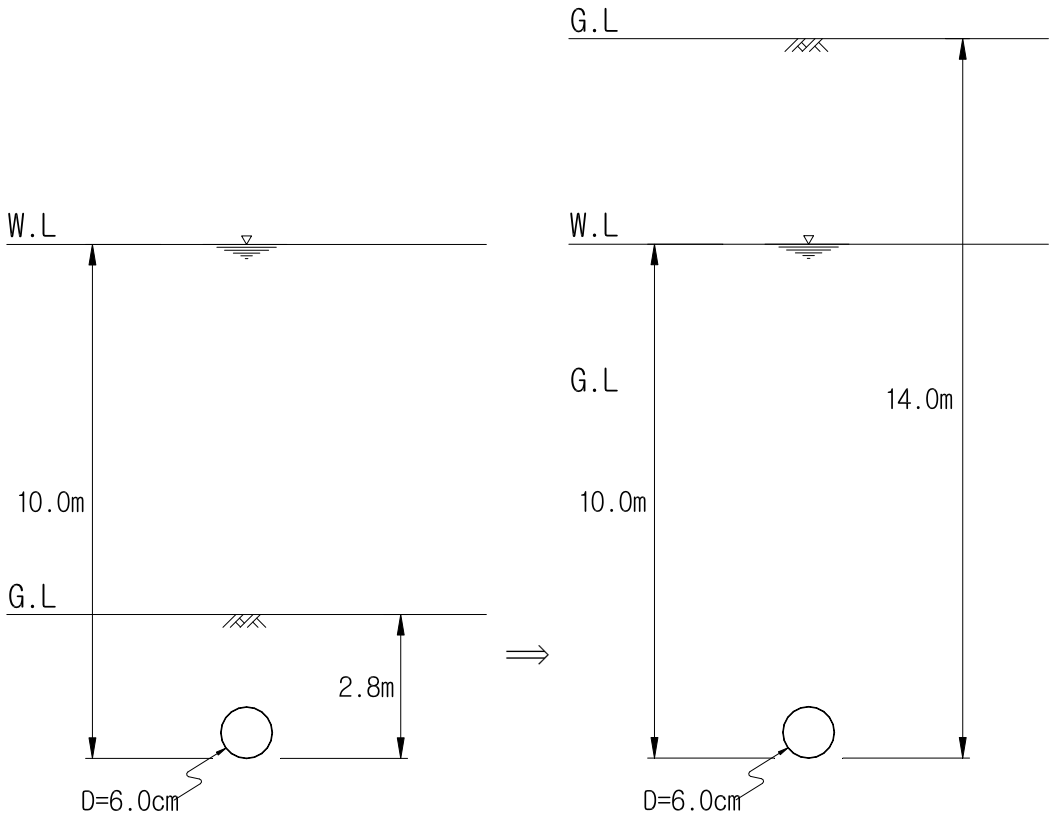


(a) 수압: 0.05 MPa, 토압: 0.0278 MPa (b) 수압: 0.05 MPa, 토압: 0.1390 MPa

그림 2.9.7 수압: 0.05 ㎫, 토압: 0.0278 → 0.1390 ㎫

토조에 가해진 0.05 ㎫의 수압은 쉴드터널 하부에서 지하수의 높이가 5.0 m인 지반을 모사한 것이고, 토조의 하중을 0.0278 ㎫ 가한 것은 쉴드터널 하부에서 지반의 높이가 2.8 m인 것을 모사한 것이며, 하중을 0.1390 ㎫ 가한 것은 쉴드터널 하부에서 지반의 높이가 14.0 m인 지반을 모사한 것이다.

첫 번째 단계가 완료된 후 토조의 수압을 0.10 ㎫로 가압하고 유지한 상태에서, 토압을 1분당 0.0278 ㎫씩 증가시켜 0.1390 ㎫까지 가압하며 두 번째 단계를 수행하여 데이터를 측정하였다(그림 2.9.8 참조).

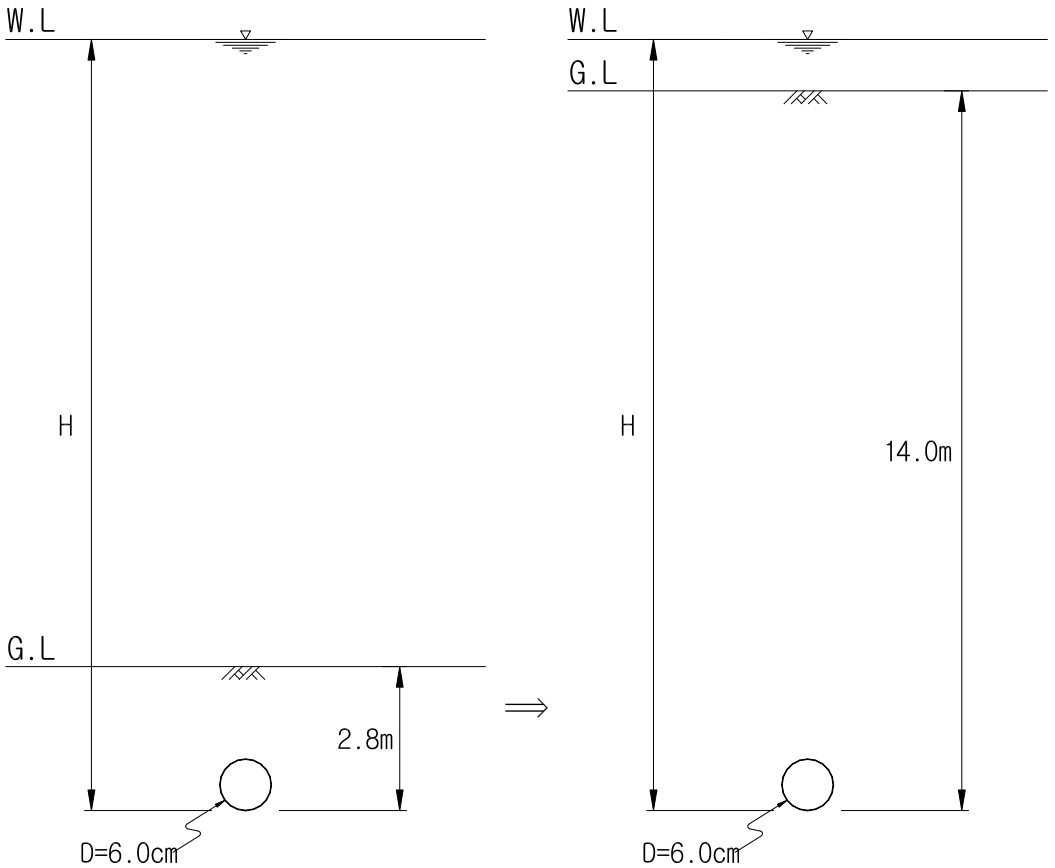


(a) 수압: 0.10 MPa, 토압: 0.0278 MPa (b) 수압: 0.10 MPa, 토압: 0.1390 MPa

그림 2.9.8 수압: 0.10 ㎫, 토압: 0.0278 → 0.1390 ㎫

두 번째 단계에서 토조에 가해진 0.10 ㎫의 수압은 쉴드터널 하부에서 지하수의 높이가 10.0 m인 지반을 모사한 것이며, 토조의 하중을 0.0278 ㎫ 가한 것은 쉴드터널 하부에서 지반의 높이가 2.8 m인 것을 모사한 것이며, 하중을 0.1390 ㎫ 가한 것은 쉴드터널 하부에서 지반의 높이가 14.0 m인 지반을 모사한 것이다.

두 번째 단계가 완료된 후 토조의 수압을 0.15 ㎫로 가압하고 유지한 상태에서, 토압을 1분당 0.0278 ㎫씩 증가시켜 0.1390 ㎫까지 가압하며 세 번째 단계를 수행하였고, 다시 수압을 0.20 ㎫로 가압하고 유지한 상태에서 토압을 1분당 0.0278 ㎫씩 증가시켜 0.1390 ㎫까지 가압하며 네 번째 단계를 수행하고 데이터를 측정하였다(그림 2.9.9 참조).



(a) 수압: 0.15 MPa(H=15 m) ~ 0.20 MPa(H=20 m), 토압: 0.0278 MPa

(b) 수압: 0.15 MPa(H=15 m) ~ 0.20 MPa(H=20 m), 토압: 0.1390 MPa

그림 2.9.9 수압: 0.15~0.20 MPa, 토압: 0.0278 → 0.1390 MPa

세 번째 단계에서 토조에 가해진 0.15 MPa의 수압은 쉴드터널 하부에서 지하수의 높이가 15.0 m인 지반을 모사한 것이고, 마지막 단계에서 토조에 가해진 0.20 MPa의 수압은 쉴드터널 하부에서 지하수의 높이가 20.0 m인 지반을 모사한 것이다. 토조의 하중을 0.0278 MPa 가한 것은 쉴드터널 하부에서 지반의 높이가 2.8 m인 것을 모사한 것이며 하중을 0.1390 MPa 가한 것은 쉴드터널 하부에서 지반의 높이가 14.0 m인 지반을 모사한 것이다.

터널모형 실험의 측정시간별 실험조건은 다음 표 2.9.1과 같다.

표 2.9.1 측정시간별 실험조건

측정시간(초)	수압(MPa)	토압(MPa)	측정시간(초)	수압(MPa)	토압(MPa)	비 고
00 ~ 60		0.0278	721 ~ 780		0.0278	
61 ~ 120		0.0556	781 ~ 840		0.0556	
121 ~ 180	0.05	0.0834	841 ~ 900	0.15	0.0834	
181 ~ 240		0.1112	901 ~ 960		0.1112	
241 ~ 300		0.1390	961 ~ 1,020		0.1390	
301 ~ 360	0.05 → 0.10	0.0000	1,021 ~ 1,080	0.15 → 0.20	0.0000	수압변화구간
361 ~ 420		0.0278	1,081 ~ 1,140		0.0278	
421 ~ 480		0.0556	1,141 ~ 1,200		0.0556	
481 ~ 540	0.10	0.0834	1,201 ~ 1,260	0.20	0.0834	
541 ~ 600		0.1112	1,261 ~ 1,320		0.1112	
601 ~ 660		0.1390	1,321 ~ 1,380		0.1390	
661 ~ 720	0.10 → 0.15	0.0000			0.0000	수압변화구간

라. 실험에 사용된 시료 특성

본 실험에서 지반조성에 사용된 시료는 표준사와 강원도 강릉지역에서 채취한 화강풍화토이다. 시료는 비중실험(KS F 2308), 입도실험(KS F 2302), 다짐실험(KS F 2312), 함수비실험(KS F 2306), 삼축투수실험(KS F 2322)의 실험방법에 근거하여 실험을 실시하였으며, 결과분석을 통해 토질역학적 특성을 파악하였다.

(1) 실험종류별 목적 및 방법

(가) 비중실험(Specific Gravity Test, KS F 2308)

○ 실험목적 및 필요성

흙 입자의 비중이란 흙덩이의 골조를 이루고 있는 흙입자군의 평균적인 비중을 말한다. 비중은 흙의 기본적인 성질인 간극비와 포화도를 아는데 필요할 뿐만 아니라 흙의 견고한 정도나 유기질토에 있어서 유기물 함량을 구하는데 이용된다. 또한 간극비, 포화도와 함께 흙의 습윤단위중량, 건조단위중량을 구하여 지반의 침하량이나 토압

등을 구하는 토질정수로서 사용된다.

○ 실험방법

무게를 측정한 시료를 흘리지 않도록 조심해서 피크노미터에 넣고 증류수를 병의 약 1/2이 차도록 채우고, 피크노미터 안의 기포를 없애기 위하여 10분 이상 끓인다. 이때 이따금 피크노미터를 흔들어서 기포가 빨리 제거되도록 한다. 가열된 시료는 실내온도가 될 때까지 식히고 나서 피크노미터에 증류수를 채우고 외부를 잘 닦고 건조시킨 후 전 중량과 내용물의 온도를 측정한다.



그림 2.9.10 비중시험 전경

(나) 입도실험(Particle-size Analysis, KS F 2302)

○ 실험목적 및 필요성

흙의 입도분포를 결정하는 것은 조립토의 분류 및 재료로서의 적정성 등 그 흙의 공학적 성질을 판단하는데 이용된다. 흙입자의 입경별 함유율 분포를 입도(Gradation)라 하며, 이 분포상태는 전체 흙 중량에 대한 입경별 중량 백분율로 나타낸다. 입도실험은 유기질이 다량 함유된 고유기질토 이외의 흙을 대상으로 한다. 흙의 입도분포는 입경이 아주 미세한 것으로부터 비교적 조립에 이르기까지 분포하게 되므로, 입경 0.075 mm 이상의 흙입자의 입도분포는 체분석을 이용하고, 이보다 작은 입경의 흙은 침강분석(비중계법)을 이용한다. 흙의 입도를 알면 그 흙이 사질토인지 점성토인지 등의 흙의 공학적 분류가 가능하게 된다.

○ 실험방법

입도분석(체분석)에서는 먼저 사용할 체를 준비하고(No.4, No.10, No.20, No.40, No.60, No.100, No.200), 각 체의 중량을 측정한 후, 체눈의 크기 순서로 체를 포갠 다

음 No.200체 밑에는 Pan을 놓는다. 노건조된 시료를 최상단에 있는 체 속으로 붓고 뚜껑을 씌운 다음 진동기를 사용하여 5분 이상 진동을 실시한 후, 각 체를 분리하고 체에 남은 흙의 중량을 측정한다.



그림 2.9.11 입도실험 전경

(다) 다짐실험(Compaction Test, KS F 2312)

○ 실험목적 및 필요성

이 실험의 목적은 함수비를 변화시키면서 일정량의 다짐에너지를 흙에 가함으로써 흙의 건조단위체적중량과 함수비 사이의 관계를 구하고, 흙의 최적함수비와 최대건조단위중량을 구하는데 있다.

흙시료의 함수비를 조절하는 방법이나 다짐 시 재사용 여부에 따라 다짐실험은 건조법, 비건조법, 반복법 및 비반복법으로 분류할 수 있다. 즉, 다짐 시 건조한 흙시료에 점차 물을 첨가하면서 필요한 함수비로 조절해가는 건조법과 자연함수비에서 건조 또는 물을 가해서 필요한 함수비로 조절하는 습윤법, 시료의 함수비를 변경하면서 재사용하는 반복법, 시험할 때마다 새로운 시료를 함수비를 달리해서 사용하는 비반복법이 있다. 시료를 건조하는 경우 다짐결과에 영향을 미치면 습윤법을 사용하며, 그 이외의 흙은 건조법을 적용한다. 또한 다짐에 의해 흙입자가 파쇄되기 쉬운 흙이나 물을 가한 후에 물과 섞이는데 시간이 걸리는 흙에는 비반복법, 그 이외의 흙에는 반복법을 적용한다.

○ 실험방법

다짐실험은 4분법 또는 시료채취기를 이용하여 시료를 준비하고, 몰드와 밑판의 질량을 측정한 후 시료를 몰드에 넣고 소정의 방법으로 다짐을 실시한다. 이후 칼라를 떼어내고 상부의 흙을 깍아낸다. 구멍은 잔입자로 메우며, 외부에 묻은 흙을 떼어낸 후 질량을 측정한다. 시료를 몰드에서 꺼내 함수비를 측정하며, 사용한 흙은 버리고 준비된 시료에 물을 첨가하여 반복실험을 실시한다.



그림 2.9.12 다짐실험 전경

(라) 함수비실험(Water Content Test, KS F 2306)

○ 실험목적 및 필요성

이 실험은 흙에 함유되어 있는 물이 양(함수량)을 구하기 위한 실험으로서 실험결과를 함수비 ω(%)로 나타낸다. 자연상태의 흙은 함수량의 차이에 따라서 공학적 성질이 매우 크게 다르기 때문에, 흙의 함수비를 파악하는 것은 흙구조물의 설계와 시공조건의 결정시 필요하다. 또한 흙의 상태를 나타내는 특성 중에서 흙의 함수비는 가장 기본이 되는 값이다.

○ 실험방법

함수비 실험에서는 자연상태 시료를 용기에 넣어 중량을 측정하고 용기채로 항온건조로(110 ± 5℃)에서 24시간 건조한 후, 실온이 될 때까지 식히고 건조한 시료의 중량을 측정하여 W_W와 W_S를 구하여 함수비를 계산한다.



그림 2.9.13 함수비실험 전경

(마) 삼축투수실험(Triaxial Permeability Test, KS F 2322)

○ 실험목적 및 필요성

지반 중에 지하수가 흐를 때 흐름의 난이성을 흙의 투수성이라 하며, 흙의 투수성은 투수계수 κ값으로 나타낸다. 흙의 투수계수를 구하는 방법은 현장실험과 실내실험으로 대별할 수 있으며, 실내실험에서는 공급되는 물의 수위변동 여부에 따라서 정수위 투수실험과 변수위 투수실험으로 구분된다. 일반적으로 정수위 투수실험은 투수성이 높은 흙에, 변수위 투수실험은 투수성이 낮은 흙에 적용된다. 실내투수실험은 흙댐이나 제방, 도로, 토지조성 등과 같이 조성되는 인공으로 만들어지는 지반의 투수성을 예측할 때 다짐 공시체에 대하여 행하는 경우가 많다.

○ 실험방법

삼축투수 몰드에 필터를 깔고 금속망을 설치한 후 시료를 넣으며 다짐을 실시한다. 그 위에 필터를 깔고 금속망을 설치하고 고무막을 씌워 밀봉한다. 삼축실을 설치한 후 하중 축을 제자리에 위치시키고 삼축실에 물을 가득 넣어 시료를 위치를 고정시킨 후 시료를 포화하고 하부에서 물을 투입하며 유출되는 물의 양과 시간을 측정한다.



그림 2.9.14 삼축압축실험 전경

(2) 실험결과

(가) 비중실험(Specific Gravity Test, KS F 2308)

표준사의 비중값 Gs=2.65로 나타났고, 화강풍화토 시료 1의 평균 비중값은 Gs=2.68로 측정되었고, 시료 2의 평균 비중값은 Gs=2.67로 측정되었다. 전형적인 흙의 비중이 2.60~2.80 범위이므로, 실험치와 이론적 수치가 유사함을 알 수 있었다.

표 2.9.2 비중실험 결과

측정 수	시료 1		시료 2	
	1	2	1	2
피크노미터 무게 (g) : W_f	25.70	23.82	23.67	24.55
건조 시료의 무게(g) : W_s	29.72	29.74	27.81	26.27
비중병 + 건조시료 무게(g) : W_o	55.42	53.56	51.48	50.82
비중병 + 증류수 무게(g) : $W_{a'}$	76.68	74.52	74.54	75.52
비중병 + 건조시료 + 증류수 무게(g) : W_b	95.30	93.42	91.93	92.09
$W_{a'}$ 측정 시 온도 : T' ℃	24	23	24	24
W_b' 측정 시 온도 : T	29	29	27	27
비중 (Gs)	2.65	2.71	2.65	2.69

(나) 입도실험(Particle-size Analysis, KS F 2302)

표준사의 입도분석 결과 입도분포가 나쁜 모래(SP)로 나타났고, 화강풍화토 시료는 입도분포가 좋은 모래(SW), 입도분포가 나쁜 모래(SP)로 나타났다.

표 2.9.3 시료 1의 첫 번째 입도실험 결과

체 (㎜)	용기중량 (g)	(시료+용기) 중량 (g)	시료중량 (g)	잔류율 (%)	가적잔류율 (%)	가적통과율 (%)
4.750	525	714	189	10.79	10.79	89.21
2.000	482	1,007	525	29.97	40.75	59.25
0.850	413	963	550	31.39	72.15	27.85
0.425	375	623	248	14.16	86.30	13.70
0.250	377	479	102	5.82	92.12	7.88
0.150	358	425	67	3.82	95.95	4.05
0.075	354	403	49	2.80	98.74	1.26
pan	262	284	22	1.26	100.00	0.00
총중량		1,752				

표 2.9.4 시료 1의 두 번째 입도실험 결과

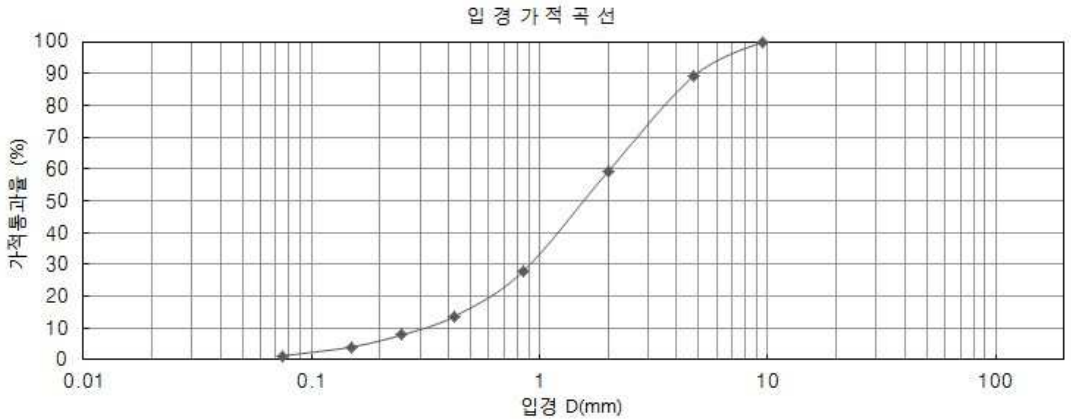
체 (㎜)	용기중량 (g)	(시료+용기) 중량 (g)	시료중량 (g)	잔류율 (%)	가적잔류율 (%)	가적통과율 (%)
4.750	525	647	122	7.29	7.29	92.71
2.000	482	926	444	26.54	33.83	66.17
0.850	413	1,000	587	35.09	68.92	31.08
0.425	375	640	265	15.84	84.76	15.24
0.250	377	491	114	6.81	91.57	8.43
0.150	358	427	69	4.12	95.70	4.30
0.075	354	406	52	3.11	98.80	1.20
pan	262	282	20	1.20	100.00	0.00
총중량		1,673				

표 2.9.5 시료 2의 첫 번째 입도실험 결과

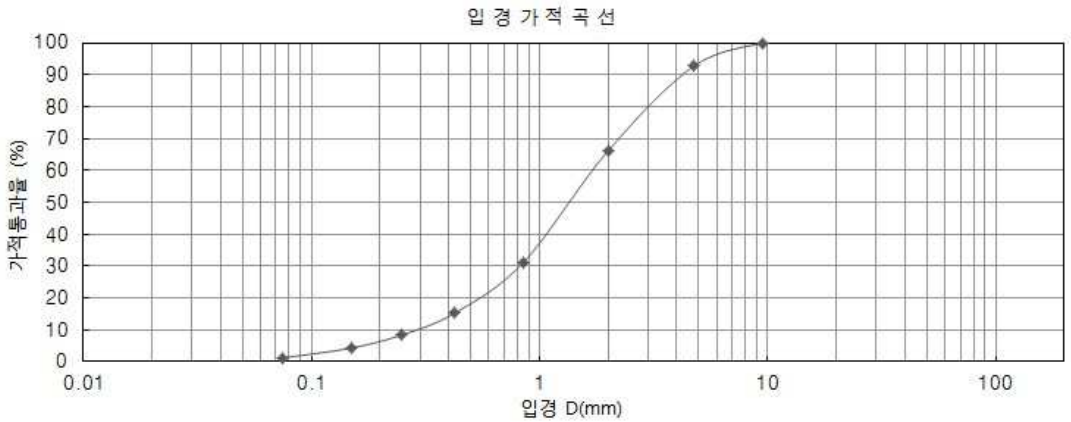
체 (㎜)	용기중량 (g)	(시료+용기) 중량 (g)	시료중량 (g)	잔류율 (%)	가적잔류율 (%)	가적통과율 (%)
4.750	525	629	104	6.54	6.54	93.46
2.000	482	756	274	17.24	23.79	76.21
0.850	413	889	476	29.96	53.74	46.26
0.425	375	749	374	23.54	77.28	22.72
0.250	377	554	177	11.14	88.42	11.58
0.150	358	454	96	6.04	94.46	5.54
0.075	354	416	62	3.90	98.36	1.64
pan	262	288	26	1.64	100.00	0.00
총중량		1,589				

표 2.9.6 시료 2의 두 번째 입도실험 결과

체 (㎜)	용기중량 (g)	(시료+용기) 중량 (g)	시료중량 (g)	잔류율 (%)	가적잔류율 (%)	가적통과율 (%)
4.750	525	671	146	7.79	7.79	92.21
2.000	482	860	378	20.17	27.96	72.04
0.850	413	1,012	599	31.96	59.93	40.07
0.425	375	811	436	23.27	83.19	16.81
0.250	377	540	163	8.70	91.89	8.11
0.150	358	441	83	4.43	96.32	3.68
0.075	354	399	45	2.40	98.72	1.28
pan	262	286	24	1.28	100.00	0.00
총중량		1,874				

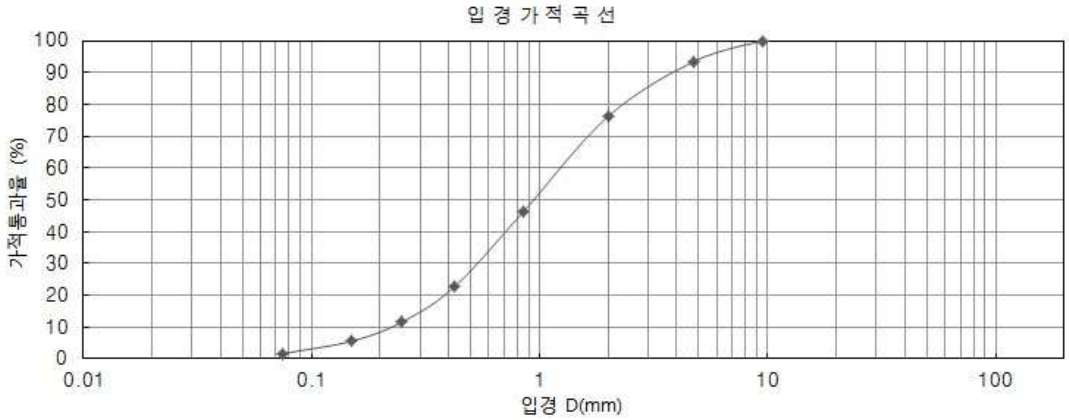


⒜ 시료 1의 첫 번째 입도분포곡선

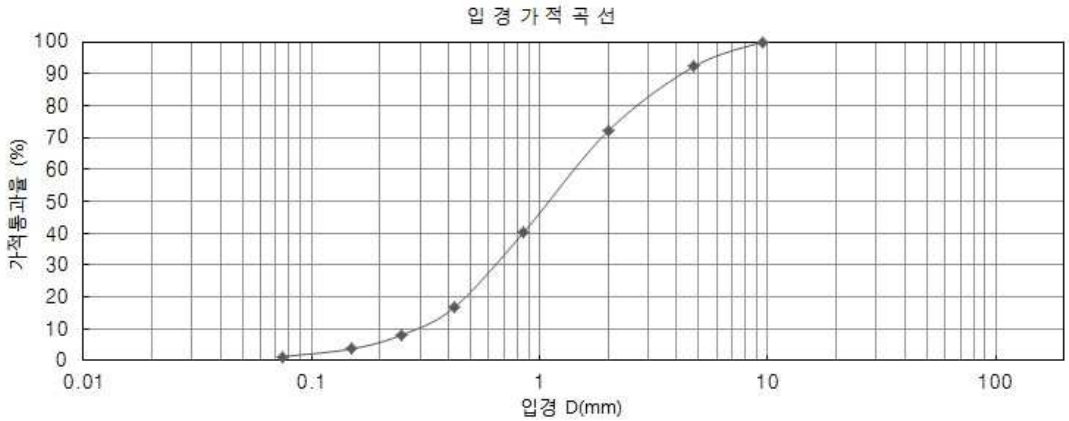


⒝ 시료 1의 두 번째 입도분포곡선

그림 2.9.15 시료별 입도분포곡선



(c) 시료 2의 첫 번째 입도분포곡선



(d) 시료 2의 두 번째 입도분포곡선

그림 2.9.15 시료별 입도분포곡선(계속)

(다) 다짐실험(Compaction Test, KS F 2312)

다짐실험을 통하여 최대 건조단위중량을 측정한 결과, 표준사는 1.786 g/㎤으로 나타났다. 화강풍화토 시료 1은 1.846 g/㎤, 1.807 g/㎤로 측정되었고, 시료 2는 1.808 g/㎤, 1.769 g/㎤로 측정되었다.

표 2.9.7 다짐실험 결과

측정 수	시료 1		시료 2	
	1	2	1	2
몰드무게(g)	4,314	4,314	4,314	4,314
몰드 체적(cm^3)	988.4	988.4	988.4	988.4
(용기+시료) 무게(g)	6,334	6,317	6,392	6,371
건조 후 (용기+시료) 무게(g)	6,139	6,100	6,101	6,062
건조 시료의 무게(g)	1,825	1,786	1,787	1,748
습윤 시료의 무게(g)	2,020	2,003	2,078	2,057
함수비(%)	10.67	12.16	16.28	17.65
최대 건조단위중량(g/cm^3)	1.846	1.807	1.808	1.769

(라) 함수비실험(Water Content Test, KS F 2306)

함수비를 측정한 결과, 표준사는 10.00%로 나타났다. 화강풍화토 시료 1은 10.67%, 12.16%로 측정되었고, 시료 2는 16.28%, 17.65%로 측정되었다.

표 2.9.8 함수비실험 결과

측정 수	시료 1		시료 2	
	1	2	1	2
용기 + 습윤 시료무게(g)	119	119	138	138
용기 + 건조 시료무게(g)	111	110	125	123
용기 무게(g)	18	18	19	19
물 무게(g)	8	9	14	15
습윤 시료의 무게(g)	101	101	119	119
건조 시료의 무게(g)	93	92	105	104
함수비 (%)	10.67	12.16	16.28	17.65

(마) 삼축투수실험(Triaxial Permeability Test, KS F 2322)

삼축투수실험을 통하여 투수계수를 측정한 결과, 표준사는 0.0271 ㎝/sec으로 나타났다. 화강풍화토 시료 1은 0.005680 ㎝/sec, 0.005594 ㎝/sec로 측정되었고, 시료 2는 0.005508 ㎝/sec, 0.005766 ㎝/sec로 측정되었다.

표 2.9.9 삼축투수실험 결과

측정 수	시료 1		시료 2	
	1	2	1	2
시료 길이 L (cm)	10.00	10.00	10.00	10.00
시료 단면적 A (cm2)	19.63	19.63	19.63	19.63
뷰렛 단면적 a (cm2)	19.63	19.63	19.63	19.63
실험 시간 $t_2 - t_1$ (sec)	60	60	60	60
t_1에서의 수위 $h_1\ (cm)$	20.00	20.00	20.00	20.00
t_2에서의 수위 $h_2\ (cm)$	19.330	19.340	19.350	19.320
$h_1\ /\ h_2$	1.035	1.034	1.034	1.035
$\log_{10}(h_1\ /\ h_2)$	0.015	0.015	0.014	0.015
aL	196.300	196.300	196.300	196.300
$A\ \times\ (t_2\ -\ t_1)$	1,177.800	1,177.800	1,177.800	1,177.800
$k_T = 2.303\frac{aL}{A}\frac{1}{t_1 - t_2}log_{10}\frac{h_1}{h_2}$	0.00568002	0.00559381	0.00550763	0.00576628

2. 배수조건에 따른 쉴드터널 모형실험결과

가. 표준사 지반

(1) 전응력 변화

전응력 변화를 측정하기 위하여 각 단계에 따라 수압을 0.05 ㎫, 0.10 ㎫, 0.15 ㎫ 및 0.20 ㎫로 가압하여 일정하게 유지시킨 상태에서, 상부 재하응력을 1분에 0.0278 ㎫씩 단계적으로 증가시켜 0.1390 ㎫까지 증가시키면서 토조 벽면에 설치된 토압계에서 측정된 응력의 변화량을 측정하였다. 이때 토압계에서는 토조내의 토압에 의한 시험사의 유효응력과 수압에 의한 간극수압이 함께 측정되었다.

(가) 비배수조건 1차

토조에 비배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 토압계에 측정된 전응력을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.16 참조).

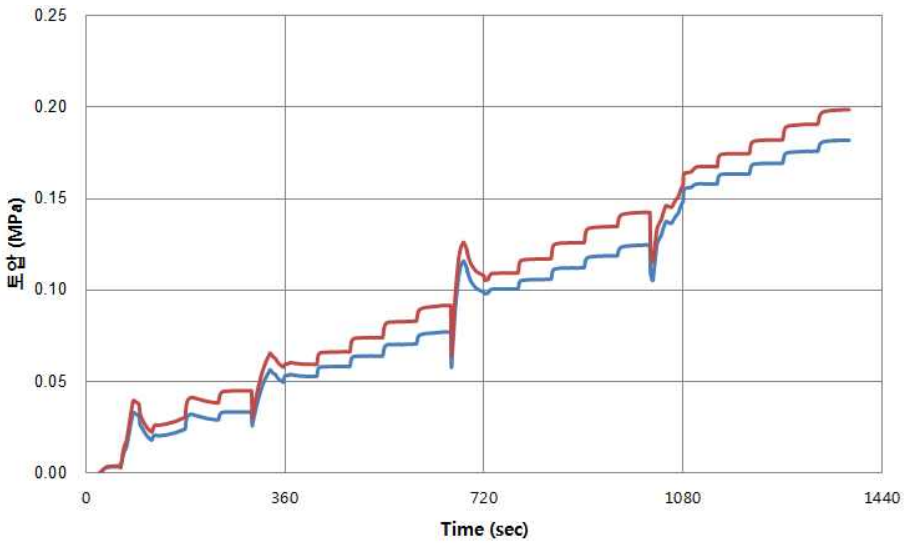


그림 2.9.16 비배수조건 1차에서의 전응력 변화

0.05 ㎫의 수압이 토조에 가해지고 유지되는 상태를 0으로 하여 전응력을 측정하였기 때문에 첫 번째 단계에서 측정된 전응력은 0으로 나타났다. 첫 번째 단계에서 초기

에 가해지는 토압이 0.0556 ㎫ 보다 작은 120 sec 이하 구간에서는 전응력의 변화가 크게 나타났는데, 이는 토조내로 유입되는 유량조절이 일정하지 않아 발생한 것으로 판단된다. 토압이 0.0834 ㎫ 이상인 구간부터는 2개의 토압계에서 토압이 증가함에 따라 전응력의 크기도 함께 증가하는 것으로 나타났다. 또한 단계별로 수압이 증가하였기 때문에 측정된 전응력도 함께 증가하는 것으로 나타났다.

토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 첫 번째 단계에서 두 번째 단계로 변화하는 구간과 두 번째 단계에서 세 번째 단계로 변화하는 구간에서는 전응력이 크게 발생하였다가 안정되는 양상을 보였으나, 세 번째 단계에서 네 번째 단계로 변화하는 구간은 점증적으로 증가하였다. 이것은 토조의 수압변화가 수동식으로 이루어져 수압을 조절하는 실험자에 의해 차이가 발생한 것으로 판단된다.

(나) 비배수조건 2차

토조에 비배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 토압계에 측정된 전응력을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.17 참조).

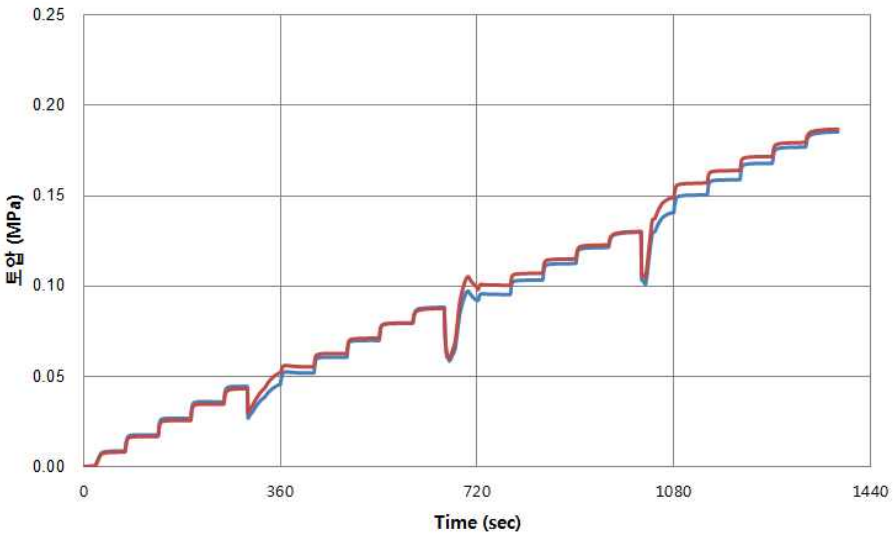


그림 2.9.17 비배수조건 2차에서의 전응력 변화

비배수조건 1차와 달리 전체 구간에서 2개의 토압계에서 토압이 증가함에 따라 전응력의 크기도 함께 증가하였다. 또한 단계별로 수압이 0.05 ㎫ 씩 증가하였기 때문에 측정된 전응력도 함께 증가하는 것으로 나타났다.

토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 첫 번째 단계에서 두 번째 단계로

변화하는 구간과 세 번째 단계에서 네 번째 단계로 변화하는 구간에서 전응력이 점증적으로 증가하는 것으로 나타났고, 두 번째 단계에서 세 번째 단계에서는 전응력이 크게 발생하였다가 안정되는 양상을 보였다. 각 단계에서 0.1390 ㎫의 토압이 작용하더라도 다음 단계의 초기 전응력 값보다는 작게 발생하였다.

(다) 배수조건 1차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 토압계에 측정된 전응력을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.18 참조).

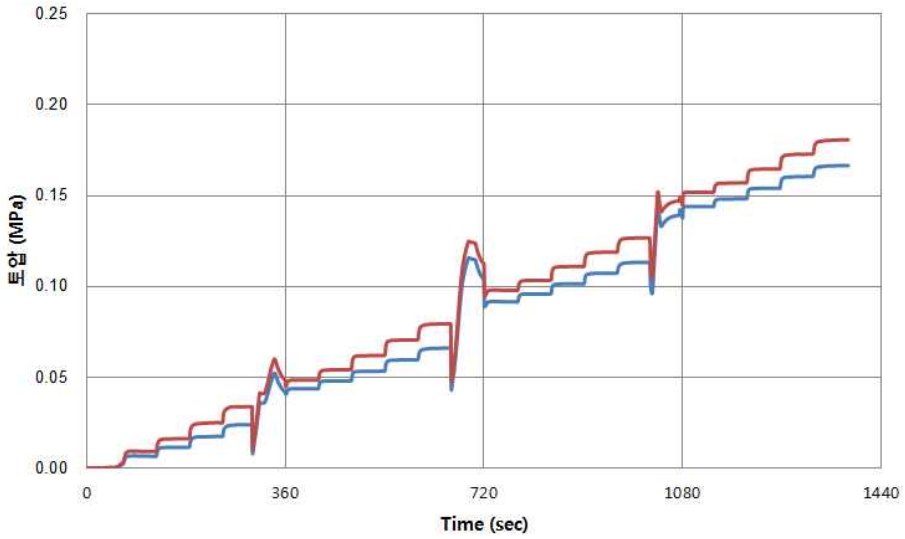


그림 2.9.18 배수조건 1차에서의 전응력 변화

비배수조건과 마찬가지로 전체 구간에서 2개의 토압계에서 토압이 증가함에 따라 전응력의 크기도 함께 증가하였다. 단계별로 수압이 증가하였기 때문에 측정된 전응력도 함께 증가하는 것으로 나타났고, 최종단계에서의 전응력은 배수조건에서의 전응력 약 0.18 ㎫ 보다 작은 값을 나타냈다.

토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 각 단계에서 전응력이 크게 발생하였다가 안정되는 양상을 나타냈다. 0.1390 ㎫의 토압이 작용한 경우의 전응력 값이 다음 단계의 초기 전응력 값보다는 작게 발생하였고, 토압증가에 따른 전응력 증가비율 또한 비배수조건 실험보다 작게 나타났다.

(라) 배수조건 2차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 토압계에 측정된 전응력을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.19 참조). 전체 구간에서 2개의 토압계에서 토압이 증가함에 따라 전응력의 크기도 함께 증가하였고, 다른 실험결과들보다 두 그래프의 차이가 크게 나타났다. 이는 토조의 시험사를 다짐할 때 두 개의 토압계 부근에서 다짐차이에 의하여 발생한 것으로 판단된다.

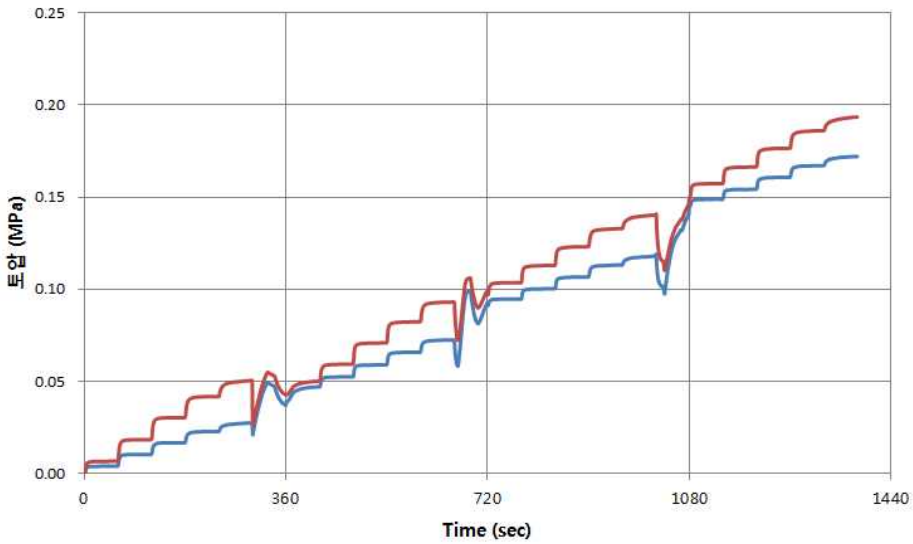


그림 2.9.19 배수조건 2차에서의 전응력 변화

단계별로 수압이 증가하였기 때문에 측정된 전응력도 함께 증가하는 것으로 나타났고, 배수조건 1차와 같이 최종단계에서의 전응력은 배수조건에서의 전응력 약 0.18 ㎫ 보다 작은 값을 나타냈다.

토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 첫 번째 단계에서 두 번째 단계로 변화하는 구간과 두 번째 단계에서 세 번째 단계로 변화하는 구간에서 전응력이 크게 발생하였다가 안정되는 것으로 나타났고, 세 번째 단계에서 네 번째 단계로 변화하는 구간에서는 전응력이 점증적으로 증가하는 것으로 나타났다. 각 단계에서 0.1390 ㎫의 토압이 작용하더라도 다음 단계의 초기 전응력 값보다는 작게 발생하였다.

(마) 배수조건 3차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 토압계에

측정된 전응력을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.20 참조). 전체 구간에서 2개의 토압계에서 토압이 증가함에 따라 전응력의 크기도 함께 증가하였고, 배수조건 2차 실험결과와 달리 두 그래프의 차이는 크지 않았다.

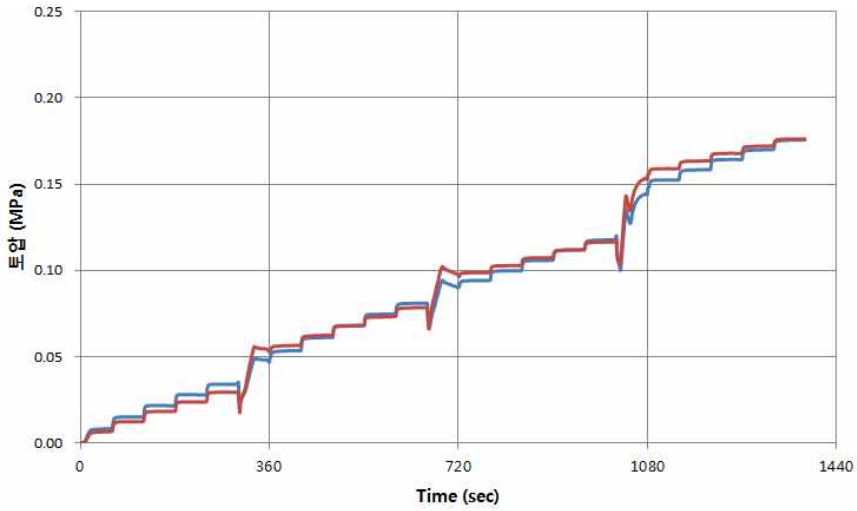


그림 2.9.20 배수조건 3차에서의 전응력 변화

단계별로 수압이 증가하였기 때문에 측정된 전응력도 함께 증가하는 것으로 나타났고, 배수조건 1차 및 2차와 유사하게 최종단계에서의 전응력은 배수조건에서의 전응력 약 0.18 ㎫ 보다 작은 값을 나타냈다.

토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 모든 단계에서 전응력이 점증적으로 증가하는 것으로 나타났다.

(바) 배수조건 4차

배수조건의 내관을 토조에 설치한 후 실험을 수행하여 토압계에 측정된 전응력을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.21 참조). 전체 구간에서 2개의 토압계에서 토압이 증가함에 따라 전응력의 크기도 함께 증가하면서 두 그래프가 매우 유사한 값을 나타냈다. 앞의 배수조건 실험에서와 같이 최종단계의 전응력 값이 배수조건의 전응력 값보다 작은 것으로 나타났다.

토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 첫 번째 단계에서 두 번째 단계로 변화하는 구간과 세 번째 단계에서 네 번째 단계로 변화하는 구간에서는 전응력이 크게 발생하였다가 안정되었고, 두 번째 단계에서 세 번째 단계로 변화하는 구간은 점증적으로 증가하였다.

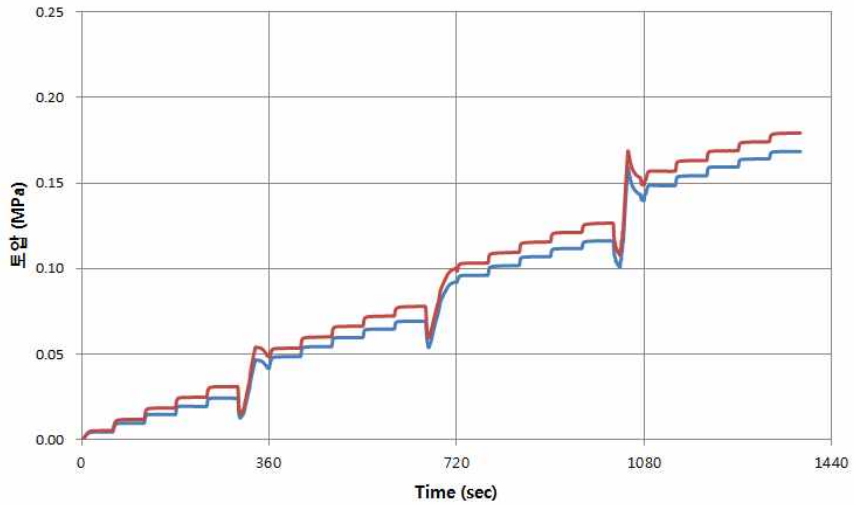


그림 2.9.21 배수조건 4차에서의 전응력 변화

(사) 배수조건 5차

배수조건의 내관을 토조에 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 토압계에 측정된 전응력을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.22 참조). 전체 구간에서 2개의 토압계에서 토압이 증가함에 따라 전응력의 크기도 함께 증가하였다. 앞의 배수조건 실험에서와 같이 최종단계에서의 전응력은 배수조건에서의 전응력 약 0.18 ㎫ 보다 작은 값을 나타냈다.

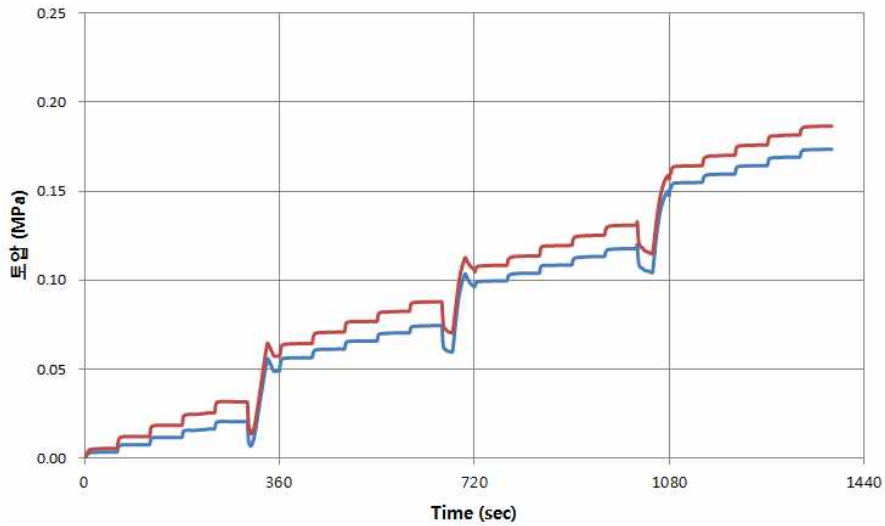


그림 2.9.22 배수조건 5차에서의 전응력 변화

토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 첫 번째 단계에서 두 번째 단계로

변화하는 구간과 두 번째 단계에서 세 번째 단계로 변화하는 구간에서는 전응력이 크게 발생하였다가 안정되었고, 두 번째 단계에서 세 번째 단계로 변화하는 구간은 점증적으로 증가하였다. 토압을 0.1390 ㎫까지 재하한 후 다음 단계의 실험을 준비하면서 토압을 0.00 ㎫까지 제하하여 각 단계별로 전응력이 감소하였다가 증가하는 양상을 나타냈다.

(아) 배수조건 6차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 토압계에 측정된 전응력을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.23 참조). 전체 구간에서 2개의 토압계에서 토압이 증가함에 따라 전응력의 크기도 함께 증가하였고, 다른 실험들과 달리 두 그래프의 거의 유사하게 나타났다. 이는 토압계 전면에 다짐이 거의 동일하고 토조내 시험사의 공극이 매우 적어 가해지는 토압이 시험사 및 간극수를 통해 토압계에 전달이 잘 되었기 때문으로 판단된다.

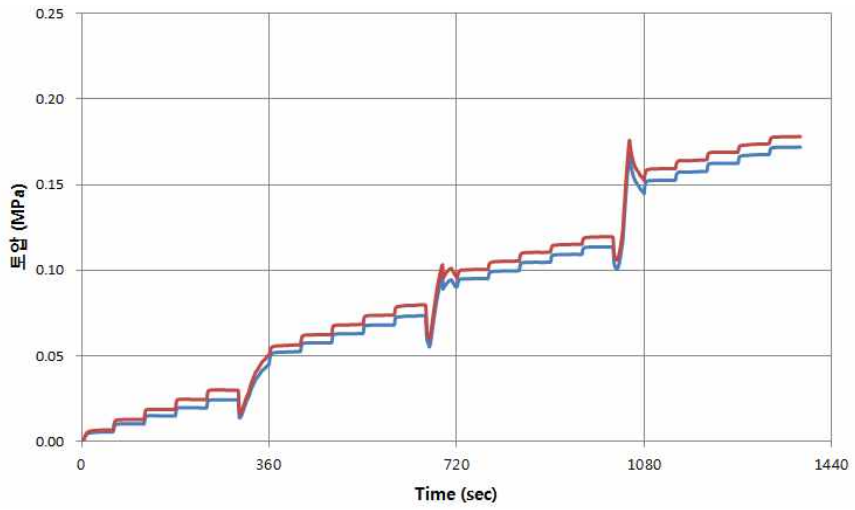


그림 2.9.23 배수조건 6차에서의 전응력 변화

토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 첫 번째 단계에서 두 번째 단계로 변화하는 구간에서는 점증적으로 증가하였고, 두 번째 단계에서 세 번째 단계로 변화하는 구간과 세 번째 단계에서 네 번째 단계로 변화하는 구간에서는 전응력이 크게 발생하였다가 안정되었다.

(차) 전응력 변화 검토

모형실험에서 토조에 부착된 토압계를 통하여 쉴드터널 라이닝의 전응력 변화를 검토한 결과, 토압계 전면부의 다짐상태에 따라 계측 값이 다소 상이하였으나 압력이 0.0278 ㎫씩 단계적으로 0.1390 ㎫까지 증가함에 따라 전응력도 함께 증가하였다. 표 2.2.10에서 수압 0.05 ㎫과 재하응력 0.00 ㎫이 작용할 때 모든 조건에서 0.05 ㎫로 동일하였으나, 재하응력이 점차 증가하여 0.1390 ㎫이 작용할 때에는 0.0949 ㎫, 0.0932 ㎫, 0.0838 ㎫, 0.1004 ㎫, 0.0794 ㎫, 0.0809 ㎫, 0.0816 ㎫, 0.0799 ㎫로 나타났다. 배수조건 2차 실험을 제외한 다른 실험에서 비배수조건에서의 실험에서 배수조건 실험때보다 값이 크게 나타났다. 이때 토압계에서 측정되는 압력이 유효응력과 수압의 합이고, 이론적으로는 배수조건에서 수압이 감소하는 만큼 지반의 유효응력이 증가하기 때문에 비배수조건과 배수조건에서의 압력증가량이 같아야 하지만, 측정된 압력은 비배수조건에서 측정된 압력증가량이 배수조건보다 더 크게 나타나 실제로는 배수조건에서 수압이 감소한 만큼 유효응력이 증가하지 않은 것으로 나타났다.

표 2.9.10에서 수압 0.05 ㎫과 재하응력 0.1390 ㎫이 작용할 때 토조에 가해진 전체 압력은 수압과 재하응력을 합한 0.1890 ㎫이지만 측정된 값은 그보다 작게 나타났다. 수압 0.10 ㎫, 수압 0.15 ㎫ 및 수압 0.20 ㎫의 조건에서도 전체 가한 압력보다 측정된 값이 작게 나타났다. 측정된 응력이 상부에서 가한 응력보다 작게 나타난 이유는 토조 벽면마찰과 입자간의 아칭으로 인한 영향이 일부 있었던 것으로 판단되며, 가장 중요한 이유는 토압계가 토조 벽면에 설치되어 있어 횡방향 응력을 측정하였기 때문으로 판단된다. 일반적으로 지반에서 정지토압 상태에서의 횡방향 토압은 마찰각에 좌우되며, Jacky의 공식에 따르면 마찰각이 증가할수록 토압계수는 감소하여 마찰각이 30° 이상인 경우 토압계수는 0.5 이하로 감소한다.[16)]

터널모형 실험에서 전응력 증가분을 재하응력 증가분으로 나눈 전응력증가율은 표 2.9.11과 같이 나타난다. 수압 0.05 ㎫에서 평균값은 0.323, 0.311, 0.243, 0.363, 0.212, 0.222, 0.227, 0.215로써 배수조건 2차를 제외한 다른 실험들에서 비배수조건일 때 응력증가율이 배수조건일 때 응력증가율보다 크게 나타났다. 실험조건별 전체 평균값은 비배수조건일 때 0.270, 0.263으로 배수조건의 0.237, 0.172, 0.209, 0.206, 0.190보다 큰 것으로 나타났다.

표 2.9.10 배수 및 비배수조건에 따른 전응력 변화량

수 압 (MPa)	재하응력 (MPa)	비배수 1차	비배수 2차	배수1차	배수2차	배수3차	배수4차	배수5차	배수6차
0.05	0.00	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500
	0.0278	0.0539	0.0581	0.0531	0.0566	0.0566	0.0552	0.0554	0.0566
	0.0556	0.0724	0.0667	0.0592	0.0683	0.0623	0.0618	0.0622	0.0627
	0.0834	0.0802	0.0756	0.0661	0.0802	0.0683	0.0684	0.0684	0.0686
	0.1112	0.0882	0.0846	0.0749	0.0917	0.0738	0.0747	0.0755	0.0744
	0.1390	0.0949	0.0932	0.0838	0.1004	0.0794	0.0809	0.0816	0.0799
0.10	0.00	0.1083	0.1021	0.0950	0.0928	0.1032	0.0984	0.1080	0.1013
	0.0278	0.1093	0.1053	0.0985	0.1000	0.1065	0.1035	0.1143	0.1064
	0.0556	0.1161	0.1128	0.1043	0.1093	0.1123	0.1100	0.1209	0.1124
	0.0834	0.1240	0.1212	0.1120	0.1209	0.1179	0.1163	0.1268	0.1183
	0.1112	0.1329	0.1296	0.1206	0.1323	0.1232	0.1222	0.1325	0.1238
	0.1390	0.1416	0.1377	0.1293	0.1431	0.1284	0.1279	0.1378	0.1298
0.15	0.00	0.1554	0.1481	0.1448	0.1480	0.1462	0.1484	0.1547	0.1454
	0.0278	0.1593	0.1505	0.1478	0.1536	0.1487	0.1533	0.1584	0.1504
	0.0556	0.1671	0.1571	0.1534	0.1629	0.1528	0.1595	0.1637	0.1554
	0.0834	0.1759	0.1652	0.1609	0.1731	0.1574	0.1656	0.1695	0.1606
	0.1112	0.1848	0.1731	0.1688	0.1829	0.1620	0.1712	0.1753	0.1651
	0.1390	0.1925	0.1802	0.1768	0.1904	0.1665	0.1766	0.1810	0.1695
0.20	0.00	0.2137	0.2017	0.1992	0.1990	0.2056	0.2014	0.2095	0.2049
	0.0278	0.2176	0.2071	0.2018	0.2074	0.2090	0.2070	0.2144	0.2094
	0.0556	0.2247	0.2140	0.2071	0.2165	0.2135	0.2132	0.2201	0.2145
	0.0834	0.2321	0.2217	0.2146	0.2266	0.2178	0.2189	0.2260	0.2190
	0.1112	0.2406	0.2295	0.2229	0.2361	0.2222	0.2242	0.2316	0.2239
	0.1390	0.2486	0.2368	0.2307	0.2435	0.2262	0.2292	0.2366	0.2281

표 2.9.11 배수 및 비배수조건에 따른 전응력 증가율

수압(MPa)	비배수1차	비배수2차	배수1차	배수2차	배수3차	배수4차	배수5차	배수6차
0.05	0.323	0.311	0.243	0.363	0.212	0.222	0.227	0.215
0.10	0.240	0.256	0.247	0.362	0.181	0.212	0.214	0.205
0.15	0.267	0.231	0.230	0.305	0.146	0.203	0.189	0.173
0.20	0.251	0.253	0.227	0.320	0.148	0.200	0.195	0.167
평 균	0.270	0.263	0.237	0.338	0.172	0.209	0.206	0.190

(2) 간극수압 변화

간극수압 변화를 측정하기 위하여 각 단계에 따라 수압을 0.05 ㎫, 0.10 ㎫, 0.15 ㎫ 및 0.20 ㎫로 가압하여 일정하게 유지시킨 상태에서 상부 재하응력을 1분에 0.0278 ㎫씩 단계적으로 증가시켜 0.1390 ㎫까지 증가시키면서 배수 및 비배수 내관 하부에 설치된 간극수압계를 통하여 간극수압의 변화량을 측정하였다.

(가) 비배수조건 1차

토조에 비배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 하부의 간극수압계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.24 참조). 초기에 0.05 ㎫의 수압이 토조에 가해지고 유지되는 상태를 0으로 하여 측정하였기 때문에 첫 번째 단계에서 측정된 간극수압은 0으로 나타났다.

첫 번째 단계에서 초기에 가해지는 토압이 0.0556 ㎫ 보다 작은 120 sec 이하 구간에서 간극수압의 변화가 크게 발생하였는데, 이는 수동식 수압조절장치를 이용함에 있어 실험자의 조작실수 등에 의해 토조에 일정한 수압이 주입되지 않아 발생한 것으로 판단된다. 그러나 첫 번째 단계를 제외한 다른 단계에서 간극수압은 일정하게 유지되었다.

토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 첫 번째 단계에서 두 번째 단계로 변화하는 구간과 두 번째 단계에서 세 번째 단계로 변화하는 구간에서는 간극수압이 크게 발생하였다가 안정되는 양상을 보였으나, 세 번째 단계에서 네 번째 단계로 변화하는 구간은 점증적으로 증가하였다.

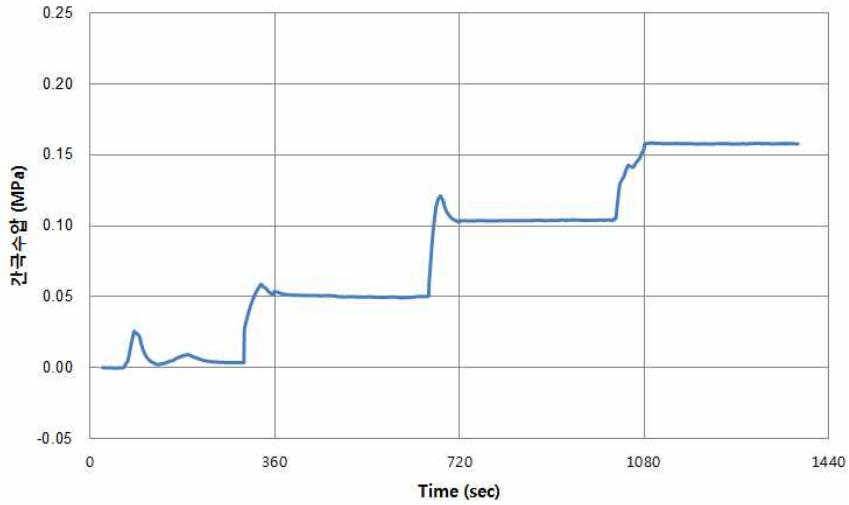


그림 2.9.24 비배수조건 1차에서의 간극수압 변화

(나) 비배수조건 2차

토조에 비배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 하부의 간극수압계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.25 참조). 각 단계에서 간극수압은 미소하게 감소 또는 일정한 값으로 유지되었다.

토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 첫 번째 단계에서 두 번째 단계로 변화하는 구간과 세 번째 단계에서 네 번째 단계로 변화하는 구간에서 간극수압이 점증적으로 증가하는 것으로 나타났고, 두 번째 단계에서 세 번째 단계에서는 간극수압이 크게 발생하였다가 안정되었다.

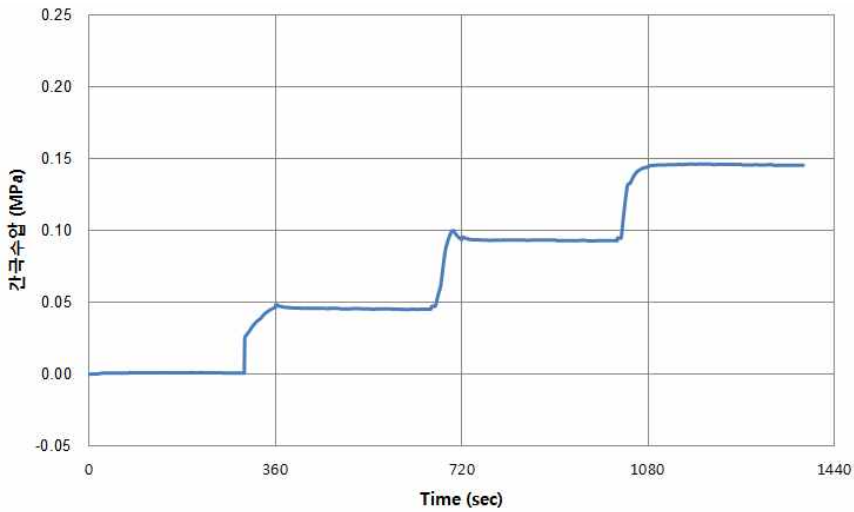


그림 2.9.25 비배수조건 2차에서의 간극수압 변화

(다) 배수조건 1차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 하부의 간극수압계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.26 참조). 각 단계에서 간극수압은 비배수조건과 상이하게 토압이 증가함에 따라 일정한 기울기로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 첫 번째 단계에서 두 번째 단계로 변화하는 구간, 두 번째 단계에서 세 번째 단계로 변화하는 구간 및 세 번째 단계에서 네 번째 단계로 변화하는 구간 모두에서 수동식 수압조절장치의 이용으로 인하여 간극수압이 크게 발생하였다가 점차적으로 안정되었다.

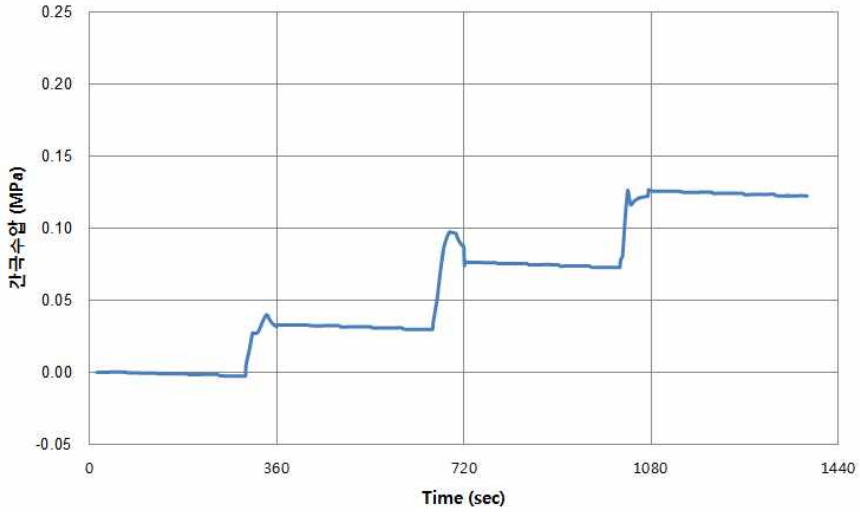


그림 2.9.26 배수조건 1차에서의 간극수압 변화

(라) 배수조건 2차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 하부의 간극수압계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.27 참조). 각 단계에서 간극수압은 비배수조건의 실험에서 일정하게 유지되는 양상이나 배수조건 1차 실험에서 감소하는 양상과는 다르게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 토조내 시험사 다짐부족 등 실험방법이나 계측기의 오작동에 의한 것으로 판단된다. 토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 첫 번째 단계에서 두 번째 단계로 변화하는 구간 및 두 번째 단계에서 세 번째 단계로 변화하는 구간에서는 간극수압이 크게 발생하였다가 점차적으로 안정되었고, 세 번째 단계에서 네 번째 단계로 변화하는 구간 모두에서는 점증적으로 증가하는 것으로 나타났다.

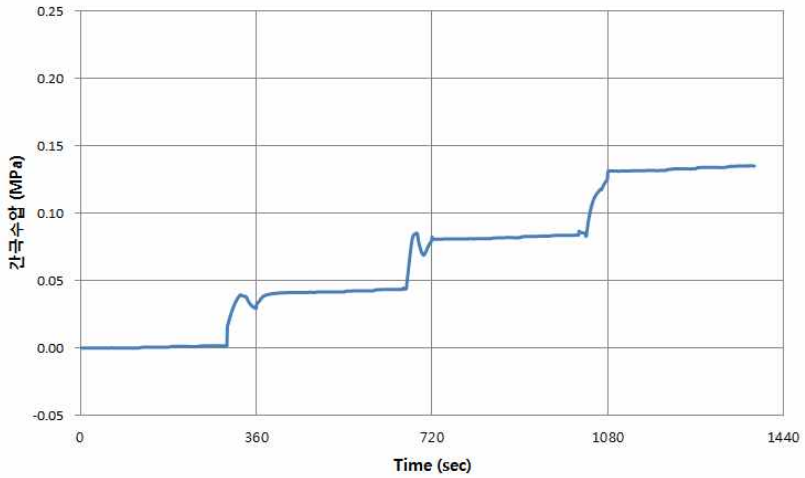


그림 2.9.27 배수조건 2차에서의 간극수압 변화

(마) 배수조건 3차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 하부의 간극수압계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.28 참조). 각 단계에서 간극수압은 배수조건 1차와 같이 압력이 증가함에 따라 일정한 기울기로 감소하는 것으로 나타났다. 토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 첫 번째 단계에서 두 번째 단계로 변화하는 구간, 두 번째 단계에서 세 번째 단계로 변화하는 구간 및 세 번째 단계에서 네 번째 단계로 변화하는 구간 모두에서 점증적으로 증가하는 것으로 나타났다.

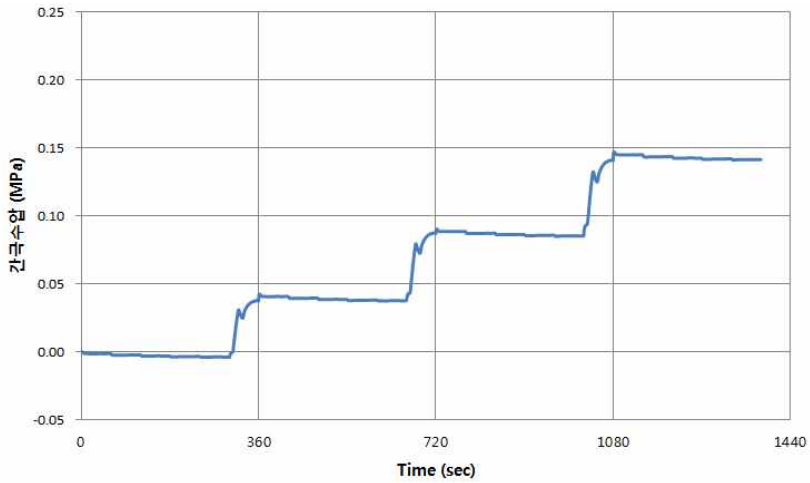


그림 2.9.28 배수조건 3차에서의 간극수압 변화

(바) 배수조건 4차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 하부의 간극수압계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.29 참조). 첫 번째 단계에서는 간극수압이 거의 일정하게 유지되었고, 나머지 단계에서는 압력이 증가함에 따라 간극수압이 일정한 기울기로 감소하는 것으로 나타났다. 토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 첫 번째 단계에서 두 번째 단계로 변화하는 구간 및 세 번째 단계에서 네 번째 단계로 변화하는 구간에서는 간극수압이 크게 발생하였다가 점차적으로 안정되었고, 두 번째 단계에서 세 번째 단계로 변화하는 구간 모두에서는 점증적으로 증가하는 것으로 나타났다.

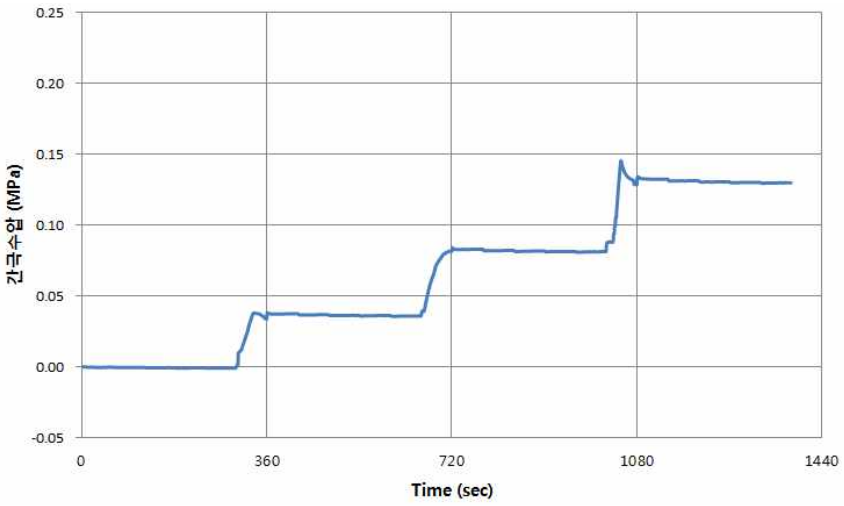


그림 2.9.29 배수조건 4차에서의 간극수압 변화

(사) 배수조건 5차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 하부의 간극수압계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.30 참조). 각 단계에서 토조에 가해지는 압력이 단계적으로 증가함에 따라 간극수압이 단계적으로 감소하는 것으로 나타났다. 토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 첫 번째 단계에서 두 번째 단계로 변화하는 구간, 두 번째에서 세 번째 단계로 변화하는 구간 및 세 번째 단계에서 네 번째 단계로 변화하는 구간 모두에서 간극수압이 크게 발생하였다가 점차적으로 안정되는 양상이 나타났다.

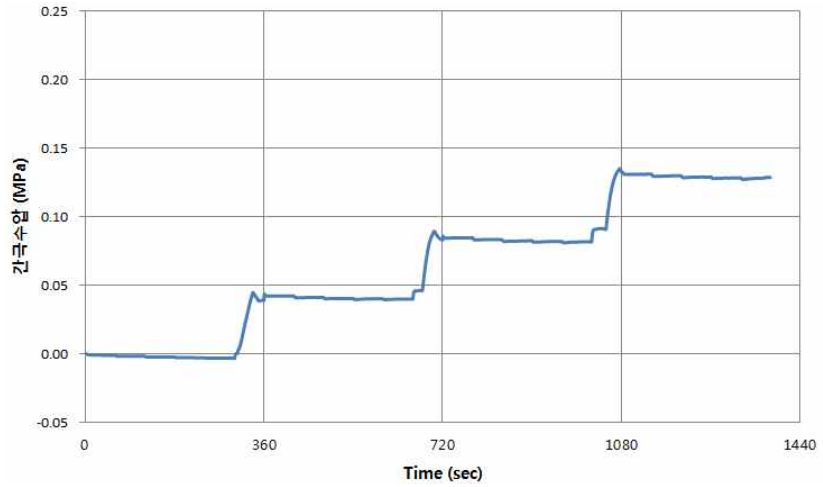


그림 2.9.30 배수조건 5차에서의 간극수압 변화

(아) 배수조건 6차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 하부의 간극수압계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.31 참조). 각 단계에서 토조에 가해지는 압력이 단계적으로 증가함에 따라 간극수압이 단계적으로 감소하는 것으로 나타났다. 토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 첫 번째 단계에서 두 번째 단계로 변화하는 구간에서는 간극수압이 약간 크게 발생하였다가 점차적으로 안정되게 나타났고, 두 번째에서 세 번째 단계로 변화하는 구간 및 세 번째 단계에서 네 번째 단계로 변화하는 구간에서 간극수압이 크게 발생하였다가 점차적으로 안정되는 양상이 나타났다.

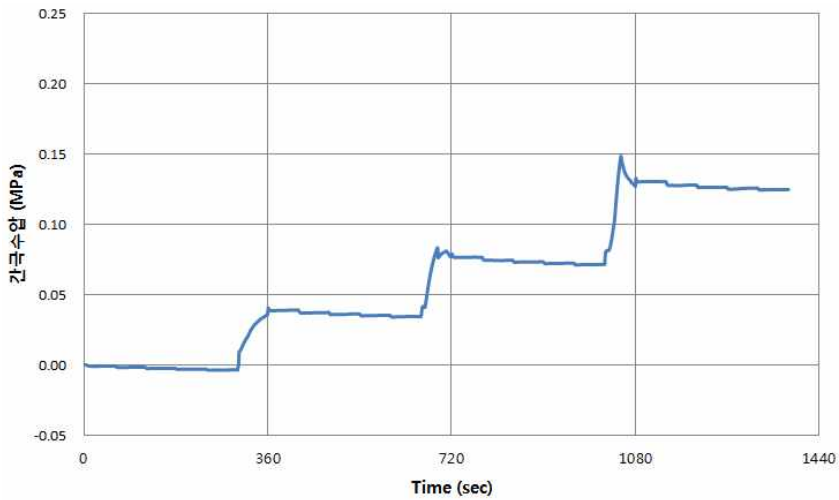


그림 2.9.31 배수조건 6차에서의 간극수압 변화

(차) 간극수압 변화 검토

모형실험에서 배수 및 비배수조건 내관에 부착된 간극수압계를 통하여 쉴드터널 라이닝의 간극수압 변화를 검토한 결과, 동일한 수압 구간에서 토조의 압력이 0.0278 ㎫씩 단계적으로 0.1390 ㎫까지 증가함에 따라 비배수조건에서는 거의 일정하게 유지되거나 다소 증가하였고 배수조건에서는 배수조건 2차를 제외한 다른 실험에서 감소하였다. 표 2.9.12에서 초기 수압 0.05 ㎫로 인하여 모든 실험조건에서 초기에 0.05 ㎫의 값을 나타내지만 같은 수압조건에서 재하응력이 증가하여 0.1390 ㎫이 작용하게 되면 배수조건에 따라 상이한 결과를 나타냈다. 비배수조건에서는 0.0535 ㎫, 0.0508 ㎫로 다소 증가하는 것으로 나타났지만, 배수조건에서는 0.0476 ㎫, 0.0516 ㎫, 0.0462 ㎫, 0.0492 ㎫, 0.0469 ㎫, 0.0467 ㎫로 배수조건 2차를 제외한 다른 실험조건에서는 모두 감소하는 것으로 나타났다. 각 단계에서 재하응력이 0.1390 ㎫일 때, 비배수조건 1차 실험에서는 수압 0.05 ㎫일 때 0.0535 ㎫, 수압 0.10 ㎫일 때 0.1003 ㎫, 수압 0.15 ㎫일 때 0.1539 ㎫, 수압 0.20 ㎫일 때 0.2078 ㎫로 간극수압이 다소 증가하는 것으로 나타났다. 비배수조건 2차 실험에서는 수압 0.05 ㎫일 때 0.0508 ㎫, 수압 0.10 ㎫일 때 0.0952 ㎫, 수압 0.15 ㎫일 때 0.1430 ㎫, 수압 0.20 ㎫일 때 0.1955 ㎫로 수압 0.05 ㎫일 때에는 거의 동일하였으나, 다른 수압조건에서는 다소 감소하는 것으로 나타났다. 배수조건에서는 작용수압이 0.05 ㎫일 때 배수조건 2차를 제외한 다른 실험조건에서 0.0476 ㎫, 0.0462 ㎫, 0.0492 ㎫, 0.0469 ㎫, 0.0467 ㎫로 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 수압 0.10 ㎫일 때 0.0800 ㎫, 0.0935 ㎫, 0.0877 ㎫, 0.0859 ㎫, 0.0899 ㎫, 0.0845 ㎫로 나타났고, 수압 0.15 ㎫일 때 0.1229 ㎫, 0.1338 ㎫, 0.1353 ㎫, 0.1314 ㎫, 0.1318 ㎫, 0.1217 ㎫로 나타났으며, 수압 0.20 ㎫일 때 0.1726 ㎫, 0.1852 ㎫, 0.1915 ㎫, 0.1799 ㎫, 0.1787 ㎫, 0.1749 ㎫로 나타나 배수조건에서는 재하응력 증가에 따라 간극수압이 감소하는 것을 보였다. 결론적으로 수압이 일정하게 유지된 상태에서 상부 재하응력을 1분마다 0.0278 ㎫씩 단계적으로 증가시켜 0.1390 ㎫까지 증가시켰을 때, 동일한 수압이 작용하는 조건에서 비배수조건일 때에는 간극수압이 거의 일정하거나 다소 증가하였고 배수조건에서는 간극수의 유출과 함께 수압이 점차 감소하였다. 단, 완전배수조건에서는 간극수압이 0으로 감소해야 하지만 이 실험에서의 배수조건은 완전배수가 아니고 적은 양만 유출되도록 부분배수조건을 적용하였기 때문에 간극수압의 감소량이 적었고, 완전히 0으로 감소하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

표 2.9.12 배수 및 비배수조건에 따른 간극수압 변화량

수 압 (MPa)	재하응력 (MPa)	비배수 1차	비배수 2차	배수1차	배수2차	배수3차	배수4차	배수5차	배수6차
0.05	0.00	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500
	0.0278	0.0499	0.0508	0.0499	0.0500	0.0487	0.0497	0.0490	0.0493
	0.0556	0.0541	0.0510	0.0496	0.0501	0.0477	0.0496	0.0483	0.0485
	0.0834	0.0581	0.0511	0.0492	0.0506	0.0469	0.0495	0.0478	0.0478
	0.1112	0.0542	0.0509	0.0486	0.0511	0.0466	0.0493	0.0472	0.0472
	0.1390	0.0535	0.0508	0.0476	0.0516	0.0462	0.0492	0.0469	0.0467
0.10	0.00	0.1036	0.0984	0.0832	0.0831	0.0923	0.0883	0.0938	0.0906
	0.0278	0.1009	0.0960	0.0830	0.0910	0.0907	0.0875	0.0923	0.0892
	0.0556	0.1005	0.0958	0.0825	0.0913	0.0895	0.0868	0.0913	0.0875
	0.0834	0.0997	0.0956	0.0818	0.0916	0.0886	0.0864	0.0905	0.0864
	0.1112	0.0997	0.0953	0.0810	0.0925	0.0882	0.0862	0.0903	0.0854
	0.1390	0.1003	0.0952	0.0800	0.0935	0.0877	0.0859	0.0899	0.0845
0.15	0.00	0.1535	0.1455	0.1269	0.1325	0.1402	0.1342	0.1358	0.1292
	0.0278	0.1536	0.1434	0.1262	0.1309	0.1386	0.1330	0.1348	0.1267
	0.0556	0.1537	0.1435	0.1256	0.1312	0.1373	0.1322	0.1333	0.1247
	0.0834	0.1539	0.1434	0.1248	0.1319	0.1363	0.1318	0.1326	0.1236
	0.1112	0.1540	0.1432	0.1240	0.1330	0.1358	0.1314	0.1321	0.1225
	0.1390	0.1539	0.1430	0.1229	0.1338	0.1353	0.1314	0.1318	0.1217
0.20	0.00	0.2077	0.1949	0.1769	0.1807	0.1968	0.1839	0.1828	0.1828
	0.0278	0.2081	0.1961	0.1758	0.1816	0.1951	0.1825	0.1812	0.1805
	0.0556	0.2079	0.1964	0.1753	0.1820	0.1937	0.1814	0.1799	0.1782
	0.0834	0.2078	0.1961	0.1744	0.1830	0.1925	0.1806	0.1792	0.1765
	0.1112	0.2078	0.1958	0.1738	0.1840	0.1921	0.1803	0.1785	0.1760
	0.1390	0.2078	0.1955	0.1726	0.1852	0.1915	0.1799	0.1787	0.1749

모형실험에서 간극수압 증가분을 재하응력 증가분으로 나눈 간극수압증가율을 표 2.9.13에 나타냈다. 비배수 1차 실험에서 간극수압증가율은 0.025, -0.024, 0.003, 0.001로 수압 0.10 ㎫에서는 다소 감소하였으나 대부분 증가하는 것으로 나타났고, 평균 간극수압증가율은 0.001로 증가하는 것으로 나타났다. 비배수 2차 실험에서 간극수압증가율은 0.006, -0.023, -0.018, 0.004로 수압 0.05 ㎫과 수압0.20 ㎫의 조건에서는 증가하고 수압 0.10 ㎫과 수압 0.15 ㎫의 조건에서는 감소하는 것으로 나타났으며, 평균 간

극수압증가율은 -0.008로 감소하는 것으로 나타났다. 배수조건의 실험에서는 배수조건 2차를 제외한 나머지 실험에서 -0.025, -0.033, -0.018, -0.027, -0.045로 간극수압증가율이 감소하는 것으로 나타났다.

표 2.9.13 배배수 및 비배수조건에 따른 간극수압 증가율

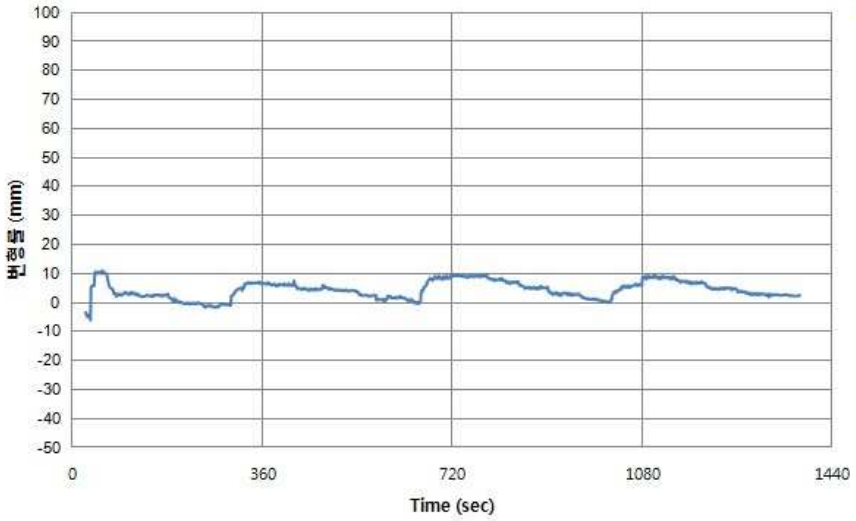
수압(MPa)	비배수1차	비배수2차	배수1차	배수2차	배수3차	배수4차	배수5차	배수6차
0.05	0.025	0.006	-0.017	0.012	-0.027	-0.006	-0.022	-0.024
0.10	-0.024	-0.023	-0.023	0.075	-0.033	-0.017	-0.028	-0.044
0.15	0.003	-0.018	-0.029	0.009	-0.035	-0.020	-0.029	-0.054
0.20	0.001	0.004	-0.031	0.032	-0.038	-0.029	-0.029	-0.057
평 균	0.001	-0.008	-0.025	0.032	-0.033	-0.018	-0.027	-0.045

(3) 변형률 변화

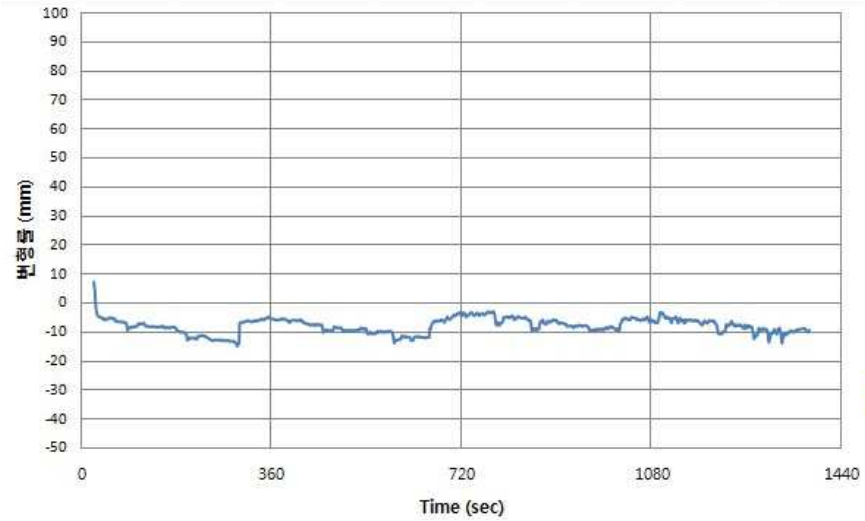
수압을 각 단계에 따라 0.05 ㎫, 0.10 ㎫, 0.15 ㎫ 및 0.20 ㎫로 가압하여 일정하게 유지시킨 상태에서 상부 재하응력을 1분에 0.0278 ㎫씩 단계적으로 증가시켜 0.1390 ㎫까지 증가시키면서 배수 및 비배수 내관 상부에 설치된 변형률계를 통하여 변형률계의 변화량을 측정하였다. 4개의 변형률계 중에서 외측부 2개의 변형률계는 원통형 모형 터널의 둘레방향으로 설치하여 내관의 원주방향 변형을 반영하도록 계획하였고, 내측부 2개의 변형률계는 원통형 모형터널의 길이방향으로 설치하여 터널의 처짐과 모멘트의 영향을 반영하도록 계획하였다.

(가) 비배수조건 1차

토조에 비배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 상부의 변형률계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.32 참조). 원주방향의 변형을 반영하도록 계획된 외측부 변형률계는 초기 단계에서 (-)값을 보였으나 점차 변형이 증가하여 (+)값을 나타냈으며 재하응력 증가에 따라 값이 변화하였다. 터널의 처짐과 모멘트의 영향을 계획된 중앙부 변형률계는 외측부와 반대로 초기 단계에서 (+)값을 나타내다가 (-)값을 나타냈으며 재하응력 증가에 따라 값이 (-)측에서 변화하였다.



ⓐ 외측부 변형률 변화(비배수조건 1차)



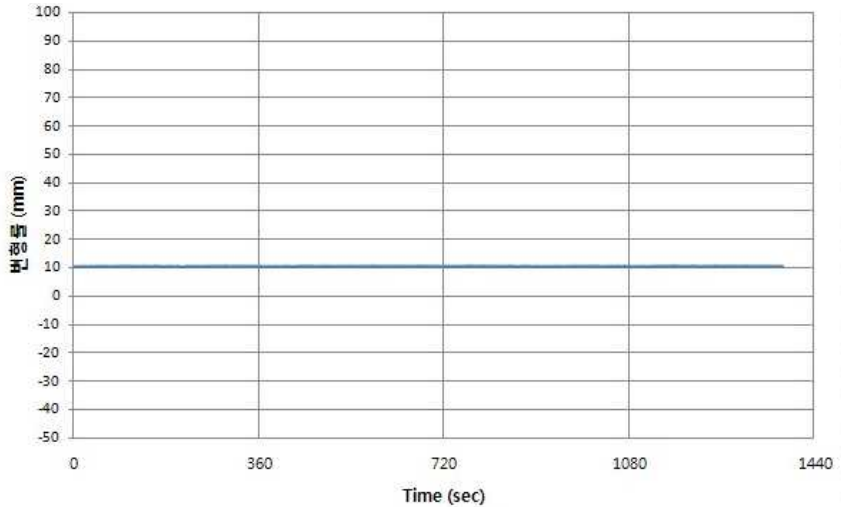
ⓑ 내측부 변형률 변화(비배수조건 1차)

그림 2.9.32 비배수조건 1차에서의 변형률 변화

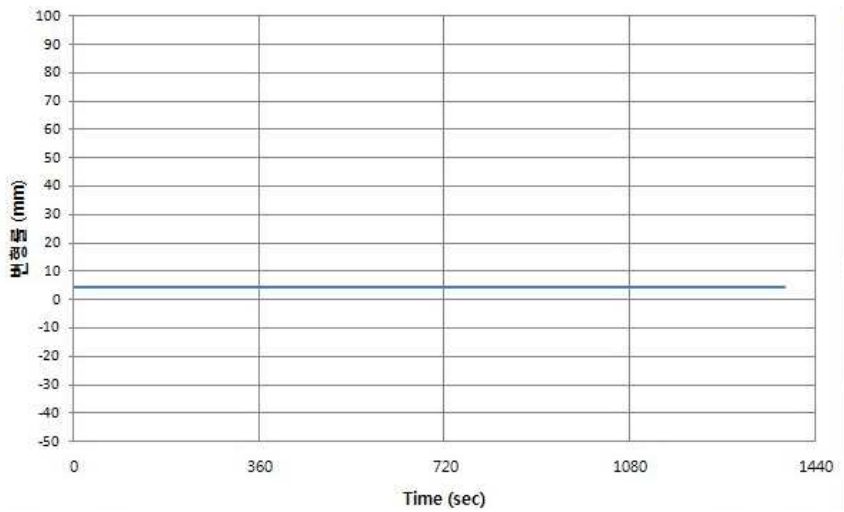
(나) 비배수조건 2차

토조에 비배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 상부의 변형률계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.33 참조). 원주방향의 변형을 반영하도록 계획된 외측부 변형률계는 약 10.0 ㎜의 변형을 나타냈으며 재하응력의 증가와 관계없이 값의 변화가 미소하였으며, 터널의 처짐과 모멘트의 영향을 계획된 중앙부 변형률계는 약 4.0 ㎜의 변형을 나타내 외측부 변형률보다 작은 것으로 나타났다. 비배수조건 1차에서는 재하응력의 증가에 따라 변형률 값이 변화하는 양상을

보였으나, 비배수조건 2차 실험에서는 재하응력의 증가와 관계없이 변형률 값이 일정하게 나타났다.



ⓐ 외측부 변형률 변화(비배수조건 2차)

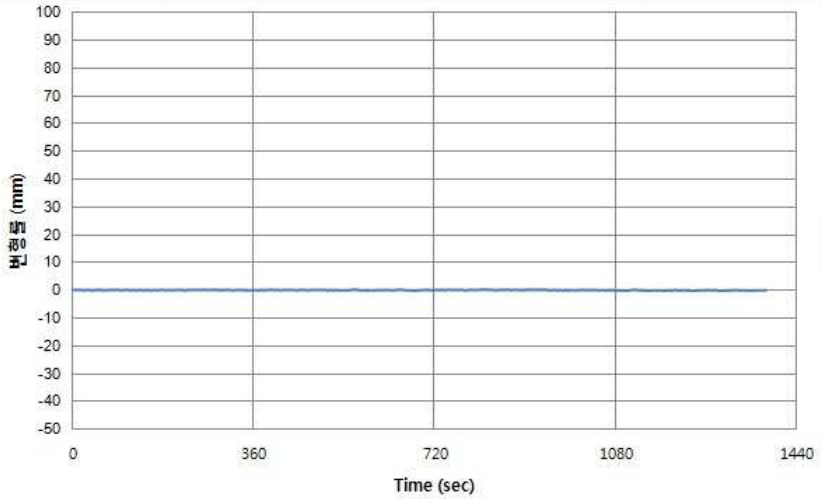


ⓑ 내측부 변형률 변화(비배수조건 2차)

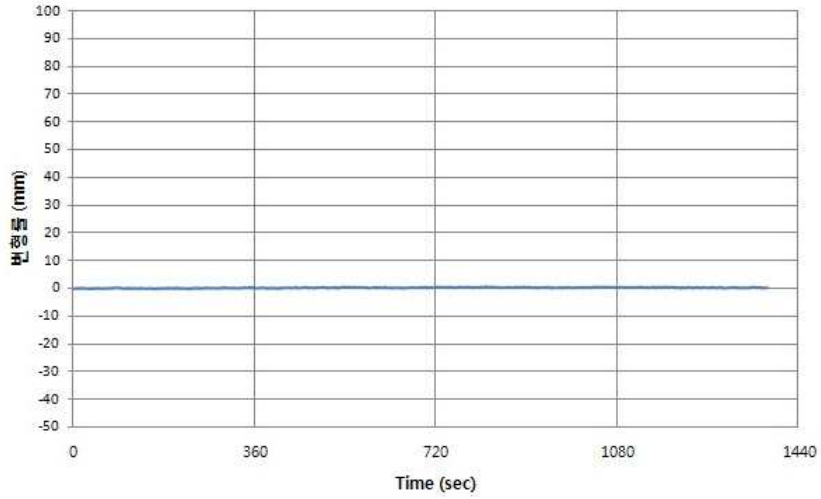
그림 2.9.33 비배수조건 2차에서의 변형률 변화

(다) 배수조건 1차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 상부의 변형률계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.34 참조).



ⓐ 외측부 변형률 변화(배수조건 1차)



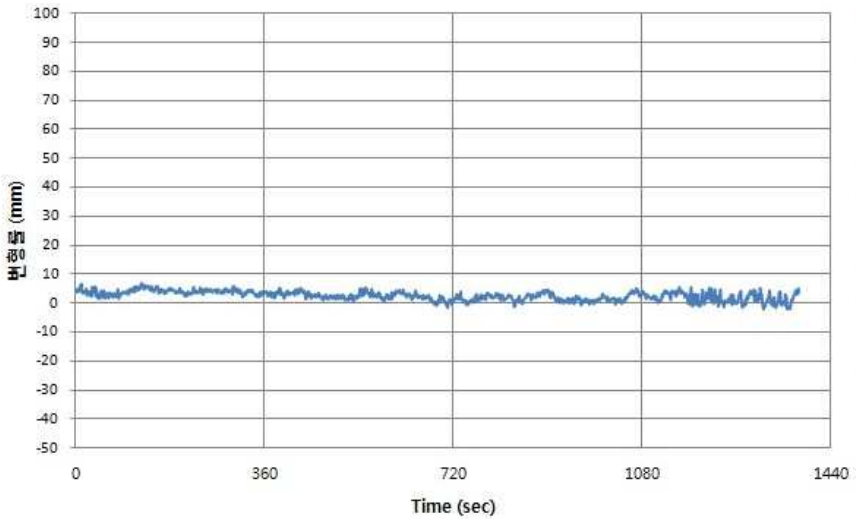
ⓑ 내측부 변형률 변화(배수조건 1차)

그림 2.9.34 배수조건 1차에서의 변형률 변화

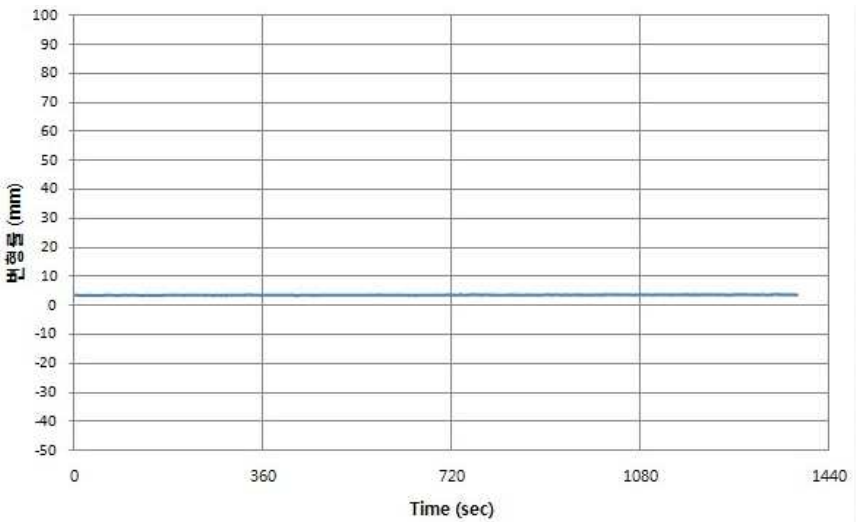
원주방향의 변형을 반영하도록 계획된 외측부 변형률계는 비배수조건 2차와 유사하게 재하응력의 증가와 관계없이 변형률계 값의 변화가 미소하고 일정하게 나타났으며 그 값은 약 0.0 ㎜로 나타났다. 터널의 처짐과 모멘트의 영향을 계획된 중앙부 변형률계의 값 또한 재하응력의 증가와 관계없이 변형률계 값의 변화가 미소하고 일정하였으며 그 값은 약 0.0 ㎜으로 나타났다. 배수조건 1차 실험에서는 외측부 및 내측부 변형률계 값이 재하응력의 증가와 관계없이 거의 0.0 ㎜로 나타났는데 이는 내관의 작용하는 압력이 작았다기 보다는 변형률계의 손상으로 인하여 데이터를 제대로 측정하지 못했던 것으로 판단된다.

(라) 배수조건 2차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 상부의 변형률계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.35 참조). 원주방향의 변형을 반영하도록 계획된 외측부 변형률계는 재하응력이 증가함에 따라 초기 단계에서 (+)값을 갖다가 최종 단계에서 (-)값을 갖으며 변화하였다. 터널의 처짐과 모멘트의 영향을 계획된 중앙부 변형률계는 재하응력이 증가함에 따라 약 3.5 ㎜의 값을 나타내며 변화하였다. 배수조건 2차 실험에서는 외측부 및 내측부 변형률계 값이 재하응력의 증가에 따라 (+)값을 갖으며 변화하였다.



ⓐ 외측부 변형률 변화(배수조건 2차)

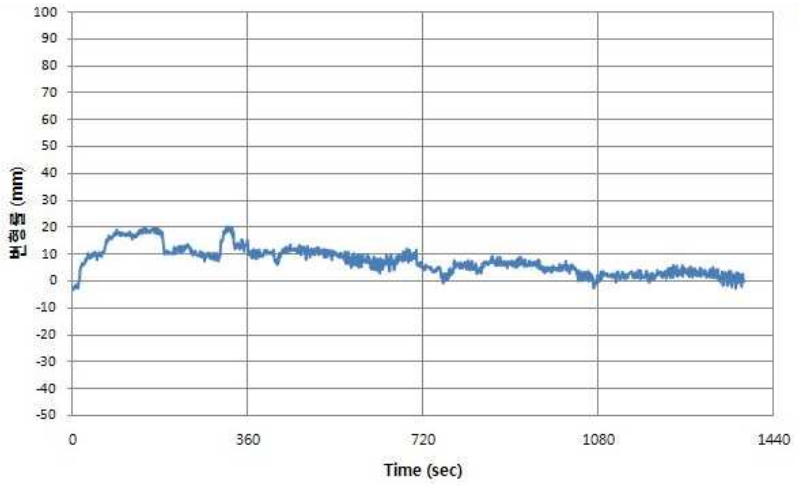


ⓑ 내측부 변형률 변화(배수조건 2차)

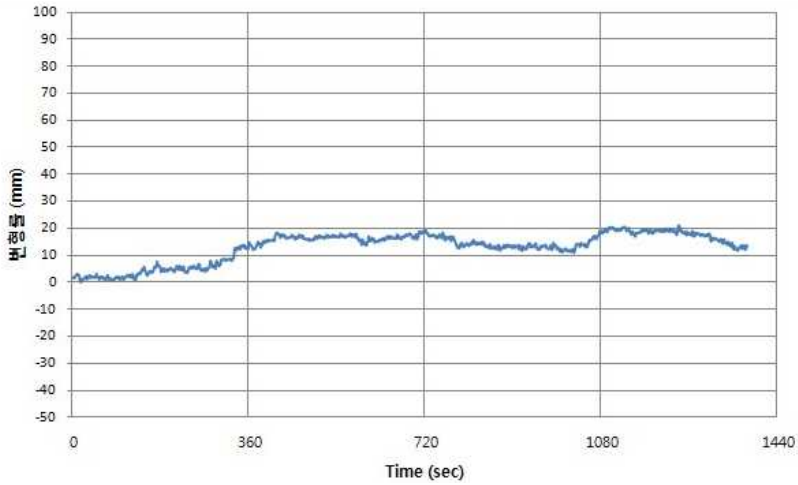
그림 2.9.35 배수조건 2차에서의 변형률 변화

(마) 배수조건 3차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 상부의 변형률계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.36 참조). 원주방향의 변형을 반영하도록 계획된 외측부 변형률계는 초기 단계에서 (-)값을 갖다가 약 20.0 ㎜까지 변형률계 값이 증가하였으나 재하응력이 증가함에 따라 변형률계 값이 점차적으로 감소하여 최종단계에서는 다시 (-) 값을 보였다. 터널의 처짐과 모멘트의 영향을 계획된 중앙부 변형률계는 초기 단계에서는 거의 0.0 ㎜의 값을 갖다가 재하응력이 증가함에 따라 변형률계 값이 점차적으로 증가하여 약 20.0 ㎜까지 변형률계 값이 증가하였다. 외측부 변형률계 값은 재하응력이 증가함에 따라 점차로 감소하였고, 내측부 변형률계 값은 재하응력이 증가함에 따라 점차로 증가하는 반대양상을 나타냈다.



ⓐ 외측부 변형률 변화(배수조건 3차)

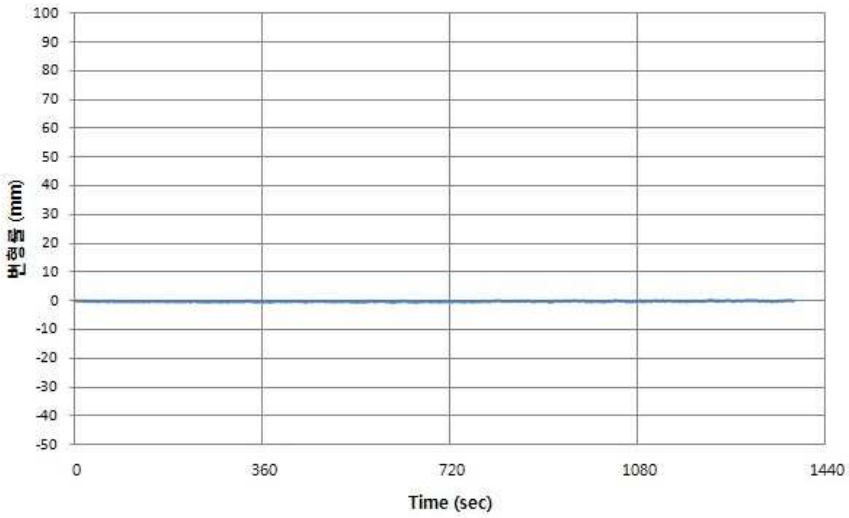


ⓑ 내측부 변형률 변화(배수조건 3차)

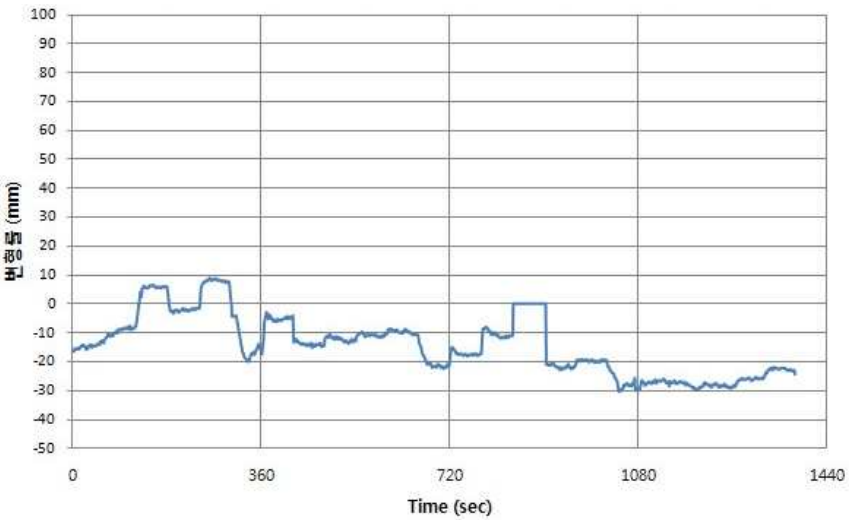
그림 2.9.36 배수조건 3차에서의 변형률 변화

(바) 배수조건 4차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 상부의 변형률계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.37 참조). 원주방향의 변형을 반영하도록 계획된 외측부 변형률계는 배수조건 1차와 유사하게 재하응력의 증가와 관계없이 변형률계 값의 변화가 미소하고 일정하게 나타났으며 그 값은 약 0.0 ㎜로 나타났다. 터널의 처짐과 모멘트의 영향을 계획된 중앙부 변형률계는 초기 단계에서 (-)값을 나타내다가 재하응력의 증가와 함께 약 10.0 ㎜까지 증가하고 최종 단계에서는 다시 (-) 값을 나타내었다. 중앙부 변형률계 값은 일정한 경향성 없이 변화하는 양상을 나타냈다.



ⓐ 외측부 변형률 변화(배수조건 4차)

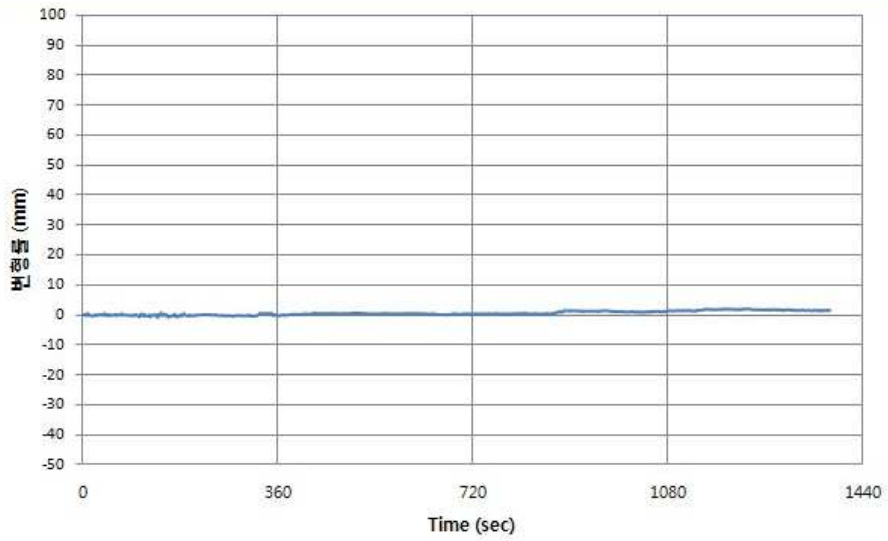


ⓑ 내측부 변형률 변화(배수조건 4차)

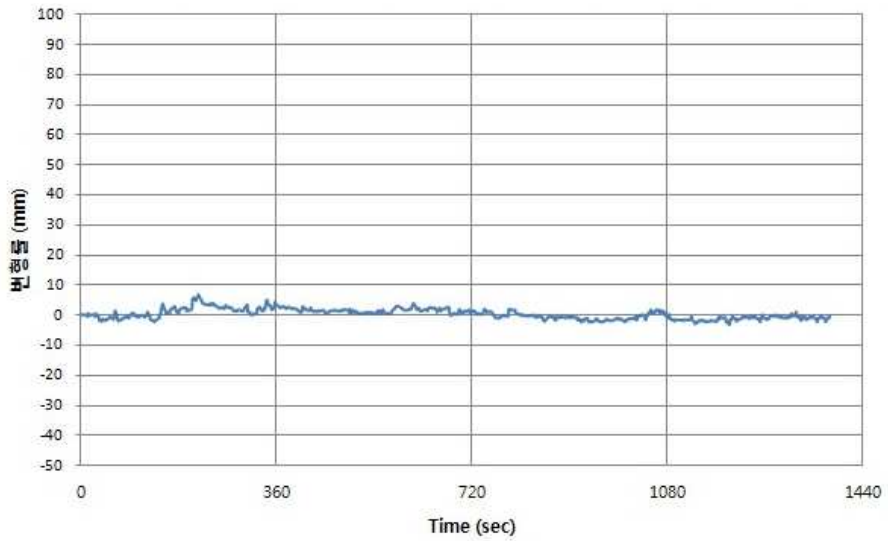
그림 2.9.37 배수조건 4차에서의 변형률 변화

(사) 배수조건 5차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 상부의 변형률계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.38 참조). 원주방향의 변형을 반영하도록 계획된 외측부 변형률계 값은 초기 단계에서 약 0.0 ㎜의 값을 나타내다가 재하응력이 증가함에 따라 0.0 ㎜ 부근에서 미소한 양의 변화를 나타냈다. 터널의 처짐과 모멘트의 영향을 계획된 중앙부 변형률계 또한 초기 단계에서 약 0.0 ㎜의 값을 나타냈으며 재하응력이 증가함에 따라 0.0 ㎜ 부근에서 변형률계의 변화를 보였으며 그 값은 외측부의 변형률계 값보다 크게 나타났다.



(a) 외측부 변형률 변화(배수조건 5차)

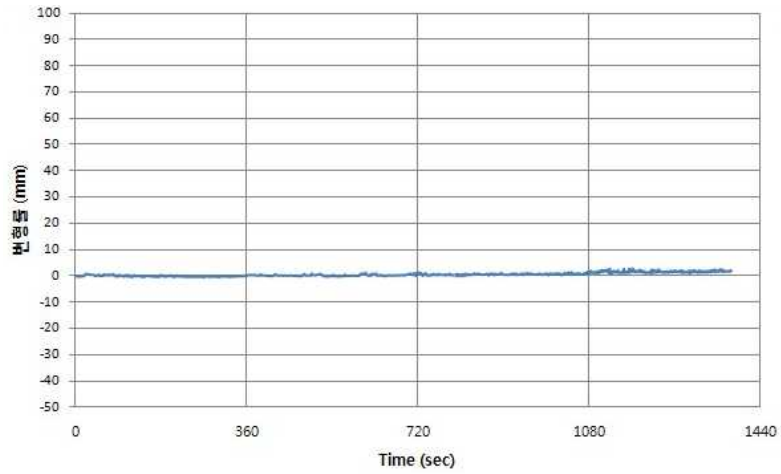


(b) 내측부 변형률 변화(배수조건 5차)

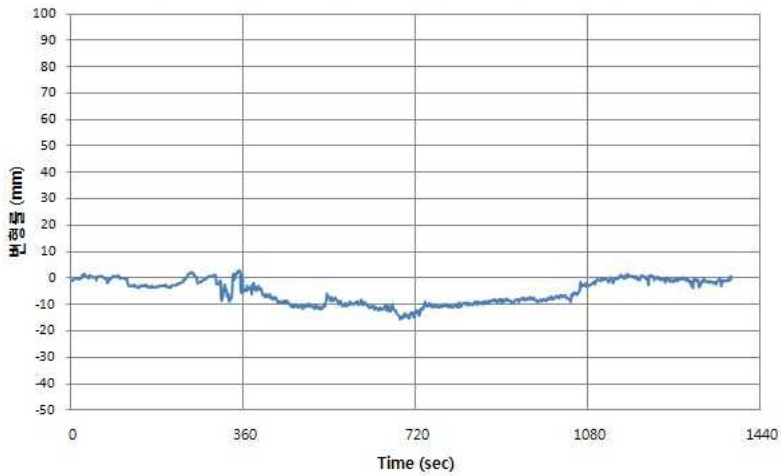
그림 2.9.38 배수조건 5차에서의 변형률 변화

(아) 배수조건 6차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 상부의 변형률계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.39 참조). 원주방향의 변형을 반영하도록 계획된 외측부 변형률계 값은 초기 단계에서 약 0.0 ㎜의 값을 나타내다가 재하응력이 증가함에 따라 0.0 ㎜ 부근에서 미소한 양의 변화를 나타냈으며 최종 단계에서 변화량이 크게 나타났다. 터널의 처짐과 모멘트의 영향을 계획된 중앙부 변형률계는 초기 단계에서 약 0.0 ㎜의 값을 나타내다가 재하응력이 증가함에 따라 (-)값을 나타냈으며, 최종 단계에서는 다시 0.0 ㎜ 부근에서 변형률계의 변화를 나타냈다. 내측부의 변형률계 값이 외측부의 변형률계 값보다 다소 크게 변화하였다.



ⓐ 외측부 변형률 변화(배수조건 6차)



ⓑ 내측부 변형률 변화(배수조건 6차)

그림 2.9.39 배수조건 6차에서의 변형률 변화

(자) 변형률 변화 검토

수압이 일정하게 유지된 상태에서 재하응력을 증가시키면서 내관 상부 외측부 및 중앙부 변형률 측정한 결과를 표 2.9.14에 나타냈다. 변형률계의 최대값을 비교하면 외측부의 경우 비배수조건 1차에서 10.9 ㎜, 비배수조건 2차에서 10.6 ㎜로 나타나 배수조건 3차를 제외한 다른 배수조건의 변형률 값보다 크게 나타났다. 내측부의 경우 비배수조건 1차에서 7.2 ㎜, 비배수조건 2차에서 4.6 ㎜로 나타나 배수조건의 변형률 값과 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 비배수조건 2차에서 외측부 변형률 값이 10.2~10.6 ㎜로 나타나 내측부 변형률 값인 4.2~4.6 ㎜보다 크게 나타났고, 배수조건 1차에서는 외측부 변형률 값이 -0.2~0.3 ㎜로 내측부 변형률 값인 -0.1~0.5 ㎜와 유사하게 나타났다. 변형률 값은 내관 상부 외측부에서는 비배수조건에서의 변형률이 배수조건보다 변형률 값보다 크게 나타났고, 내측부에서는 거의 유사하였다. 또한 비배수조건 2차와 배수조건 1차에서 외측부의 변형률 값이 내측부보다 크게 나타났다. 하지만 수압과 재하응력변화에 따른 터널 작용응력과 모멘트 등의 변화를 분석하기 위해서는 이론적, 수치적 분석과 병행하여 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

표 2.9.14 배수 및 비배수조건에 따른 내관 상부 변형률 변화량(mm)

구 분		비배수1차	비배수2차	배수1차	배수2차	배수3차	배수4차	배수5차	배수6차
외측	Min	-5.7	10.2	-0.2	-2.0	-3.2	-0.5	-1.0	-0.3
	Max	10.9	10.6	0.3	6.7	20.4	0.1	1.9	3.1
내측	Min	-14.9	4.2	-0.1	3.4	-0.2	-30.3	-3.4	-15.6
	Max	7.2	4.6	0.5	3.8	21.2	8.8	7.1	3.0

(4) 유출량 변화

수압을 각 단계에 따라 0.05 ㎫, 0.10 ㎫, 0.15 ㎫ 및 0.20 ㎫로 가압하여 일정하게 유지시킨 상태에서 상부 재하응력을 1분에 0.0278 ㎫씩 단계적으로 증가시켜 0.1390 ㎫까지 증가시키면서 배수조건 내관 내부로 유출되는 유출량을 측정하였다. 각 단계별로 재하응력을 1분간 적용하였기 때문에 유출량은 30초만 측정하여 1분간 유출량 및 단계별 평균 유출량을 산정하고 이를 이용하여 분당 유출량을 산출하였다.

(가) 배수조건 1차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관의 내부로 유출되는 유출량을 측정하고 측정된 값을 표로 나타냈다(표 2.9.15 참조).

표 2.9.15 배수조건 1차에서의 유출량 변화량

수 압	토 압	유출량 (30 sec)	유출량 (1 min)	㎤/km/min (1 min)	㎤/km/min (5 min)
0.05 MPa	0.0278 MPa	70 cc	140 cc	65,066,120	50,193,864
	0.0556 MPa	50 cc	100 cc	46,475,800	
	0.0834 MPa	50 cc	100 cc	46,475,800	
	0.1112 MPa	50 cc	100 cc	46,475,800	
	0.1390 MPa	50 cc	100 cc	46,475,800	
0.10 MPa	0.0278 MPa	100 cc	200 cc	92,951,600	79,938,376
	0.0556 MPa	90 cc	180 cc	83,656,440	
	0.0834 MPa	90 cc	180 cc	83,656,440	
	0.1112 MPa	80 cc	160 cc	74,361,280	
	0.1390 MPa	70 cc	140 cc	65,066,120	
0.15 MPa	0.0278 MPa	110 cc	220 cc	102,246,760	92,951,600
	0.0556 MPa	105 cc	210 cc	97,599,180	
	0.0834 MPa	100 cc	200 cc	92,951,600	
	0.1112 MPa	95 cc	190 cc	88,304,020	
	0.1390 MPa	90 cc	180 cc	83,656,440	
0.20 MPa	0.0278 MPa	125 cc	250 cc	116,189,500	109,682,888
	0.0556 MPa	120 cc	240 cc	111,541,920	
	0.0834 MPa	120 cc	240 cc	111,541,920	
	0.1112 MPa	115 cc	230 cc	106,894,340	
	0.1390 MPa	110 cc	220 cc	102,246,760	

수압이 일정하게 유지되는 상태에서 재하응력이 증가함에 따라 배수조건 내관으로 유출되는 유출량은 수압 0.05 ㎫일 때 140 ㏄에서 100 ㏄로, 수압 0.10 ㎫일 때 200 ㏄에서 140 ㏄로, 수압 0.15 ㎫일 때 220 ㏄에서 180 ㏄로, 수압 0.20 ㎫일 때 250 ㏄에서 220 ㏄로 감소하는 것으로 나타났다. 이를 이용하여 평균 유출량을 산출하면 수압 0.05 ㎫일 때 108 ㏄, 수압 0.10 ㎫일 때 172 ㏄, 수압 0.15 ㎫일 때 200 ㏄, 수압 0.20 ㎫일 때 236 ㏄로 계산되어 수압이 증가함에 따라 유출량이 증가하는 것으로 나타났다. 평균 유출량을 Froude의 상사법칙을 적용하여 ㎞당 유출량을 산정하면 수압 0.05 ㎫일 때 50.19 ㎥/㎞/min, 수압 0.10 ㎫일 때 79.94 ㎥/㎞/min, 수압 0.15 ㎫일 때 92.95 ㎥/㎞/min, 수압 0.20 ㎫일 때 109.68 ㎥/㎞/min로 계산되었다.

(나) 배수조건 2차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관의 내부로 유출되는 유출량을 측정하고 측정된 값을 표로 나타냈다(표 2.9.16 참조).

수압이 일정하게 유지되는 상태에서 재하응력이 증가함에 따라 배수조건 내관으로 유출되는 유출량은 수압 0.05 ㎫일 때 140 ㏄에서 140 ㏄로, 수압 0.10 ㎫일 때 220 ㏄에서 220 ㏄로 유출량의 변화가 없었고, 수압 0.15 ㎫일 때에는 280 ㏄에서 260 ㏄로, 수압 0.20 ㎫일 때 400 ㏄에서 380 ㏄로 다소 감소하는 것으로 나타났다. 이를 이용하여 평균 유출량을 산출하면 수압 0.05 ㎫일 때 140 ㏄, 수압 0.10 ㎫일 때 220 ㏄, 수압 0.15 ㎫일 때 276 ㏄, 수압 0.20 ㎫일 때 384 ㏄로 계산되어 수압이 증가함에 따라 유출량이 증가하는 것으로 나타났다. 평균 유출량을 Froude의 상사법칙을 적용하여 ㎞당 유출량을 산정하면 수압 0.05 ㎫일 때 65.07 ㎥/㎞/min, 수압 0.10 ㎫일 때 102.25 ㎥/㎞/min, 수압 0.15 ㎫일 때 128.27 ㎥/㎞/min, 수압 0.20 ㎫일 때 178.47 ㎥/㎞/min로 계산되었다.

표 2.9.16 배수조건 2차에서의 유출량 변화량

수 압	토 압	유출량 (30 sec)	유출량 (1 min)	㎤/km/min (1 min)	㎤/km/min (5 min)
0.05 MPa	0.0278 MPa	70 cc	140 cc	65,066,120	65,066,120
	0.0556 MPa	70 cc	140 cc	65,066,120	
	0.0834 MPa	70 cc	140 cc	65,066,120	
	0.1112 MPa	70 cc	140 cc	65,066,120	
	0.1390 MPa	70 cc	140 cc	65,066,120	
0.10 MPa	0.0278 MPa	110 cc	220 cc	102,246,760	102,246,760
	0.0556 MPa	110 cc	220 cc	102,246,760	
	0.0834 MPa	110 cc	220 cc	102,246,760	
	0.1112 MPa	110 cc	220 cc	102,246,760	
	0.1390 MPa	110 cc	220 cc	102,246,760	
0.15 MPa	0.0278 MPa	140 cc	280 cc	130,132,240	128,273,208
	0.0556 MPa	140 cc	280 cc	130,132,240	
	0.0834 MPa	140 cc	280 cc	130,132,240	
	0.1112 MPa	140 cc	280 cc	130,132,240	
	0.1390 MPa	130 cc	260 cc	120,837,080	
0.20 MPa	0.0278 MPa	200 cc	400 cc	185,903,201	178,467,073
	0.0556 MPa	190 cc	380 cc	176,608,041	
	0.0834 MPa	190 cc	380 cc	176,608,041	
	0.1112 MPa	190 cc	380 cc	176,608,041	
	0.1390 MPa	190 cc	380 cc	176,608,041	

(다) 배수조건 3차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관의 내부로 유출되는 유출량을 측정하고 측정된 값을 표로 나타냈다(표 2.9.17 참조).

수압이 일정하게 유지되는 상태에서 재하응력이 증가함에 따라 배수조건 내관으로 유출되는 유출량은 수압 0.05 ㎫일 때 310 cc에서 220 cc로, 수압 0.10 ㎫일 때 310 cc에서 240 cc로, 수압 0.15 ㎫일 때에는 330 cc에서 280 cc로, 수압 0.20 ㎫일 때 360 cc에서 300 cc로 감소하는 것으로 나타났다. 이를 이용하여 평균 유출량을 산출하면 수압 0.05 ㎫일 때 266 cc, 수압 0.10 ㎫일 때 278 cc, 수압 0.15 ㎫일 때 310 cc, 수압 0.20 ㎫일 때 320 cc로 계산되어 수압이 증가함에 따라 유출량이 증가하는 것으로 나타났다. 평균 유출량을 Froude의 상사법칙을 적용하여 ㎞당 유출량을 산정하면 수압 0.05 ㎫일 때 123.63 ㎥/㎞/min, 수압 0.10 ㎫일 때 129.20 ㎥/㎞/min, 수압 0.15 ㎫일

때 144.07 ㎥/㎞/min, 수압 0.20 ㎫일 때 148.72 ㎥/㎞/min로 계산되었다.

표 2.9.17 배수조건 3차에서의 유출량 변화량

수 압	토 압	유출량 (30 sec)	유출량 (1 min)	㎤/km/min (1 min)	㎤/km/min (5 min)
0.05 MPa	0.0278 MPa	155 cc	310 cc	144,074,980	123,625,628
	0.0556 MPa	140 cc	280 cc	130,132,240	
	0.0834 MPa	130 cc	260 cc	120,837,080	
	0.1112 MPa	130 cc	260 cc	120,837,080	
	0.1390 MPa	110 cc	220 cc	102,246,760	
0.10 MPa	0.0278 MPa	155 cc	310 cc	144,074,980	129,202,724
	0.0556 MPa	150 cc	300 cc	139,427,400	
	0.0834 MPa	140 cc	280 cc	130,132,240	
	0.1112 MPa	130 cc	260 cc	120,837,080	
	0.1390 MPa	120 cc	240 cc	111,541,920	
0.15 MPa	0.0278 MPa	165 cc	330 cc	153,370,141	144,074,980
	0.0556 MPa	160 cc	320 cc	148,722,560	
	0.0834 MPa	160 cc	320 cc	148,722,560	
	0.1112 MPa	150 cc	300 cc	139,427,400	
	0.1390 MPa	140 cc	280 cc	130,132,240	
0.20 MPa	0.0278 MPa	180 cc	360 cc	167,312,881	148,722,560
	0.0556 MPa	160 cc	320 cc	148,722,560	
	0.0834 MPa	155 cc	310 cc	144,074,980	
	0.1112 MPa	155 cc	310 cc	144,074,980	
	0.1390 MPa	150 cc	300 cc	139,427,400	

(라) 배수조건 4차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관의 내부로 유출되는 유출량을 측정하고 측정된 값을 표로 나타냈다(표 2.9.18 참조).

표 2.9.18 배수조건 4차에서의 유출량 변화량

수 압	토 압	유출량 (30 sec)	유출량 (1 min)	㎤/km/min (1 min)	㎤/km/min (5 min)
0.05 MPa	0.0278 MPa	175 cc	350 cc	162,665,301	152,440,625
	0.0556 MPa	170 cc	340 cc	158,017,721	
	0.0834 MPa	165 cc	330 cc	153,370,141	
	0.1112 MPa	160 cc	320 cc	148,722,560	
	0.1390 MPa	150 cc	300 cc	139,427,400	
0.10 MPa	0.0278 MPa	320 cc	640 cc	297,445,121	163,594,817
	0.0556 MPa	260 cc	520 cc	241,674,161	
	0.0834 MPa	125 cc	250 cc	116,189,500	
	0.1112 MPa	95 cc	190 cc	88,304,020	
	0.1390 MPa	80 cc	160 cc	74,361,280	
0.15 MPa	0.0278 MPa	335 cc	670 cc	311,387,861	235,167,549
	0.0556 MPa	335 cc	670 cc	311,387,861	
	0.0834 MPa	330 cc	660 cc	306,740,281	
	0.1112 MPa	185 cc	370 cc	171,960,461	
	0.1390 MPa	80 cc	160 cc	74,361,280	
0.20 MPa	0.0278 MPa	210 cc	420 cc	195,198,361	125,484,660
	0.0556 MPa	160 cc	320 cc	148,722,560	
	0.0834 MPa	115 cc	230 cc	106,894,340	
	0.1112 MPa	100 cc	200 cc	92,951,600	
	0.1390 MPa	90 cc	180 cc	83,656,440	

배수조건 1차, 2차 및 3차의 실험들과 달리 유출량의 변화가 크게 발생하였으나, 수압이 일정하게 유지되는 상태에서 재하응력이 증가함에 따라 배수조건 내관으로 유출되는 유출량은 수압 0.05 ㎫일 때 350 ㏄에서 300 ㏄로, 수압 0.10 ㎫일 때 640 ㏄에서 160 ㏄로, 수압 0.15 ㎫일 때에는 670 ㏄에서 140 ㏄로, 수압 0.20 ㎫일 때 420 ㏄에서 180 ㏄로 감소하는 것으로 나타났다. 이를 이용하여 평균 유출량을 산출하면 수압 0.05 ㎫일 때 328 ㏄, 수압 0.10 ㎫일 때 352 ㏄, 수압 0.15 ㎫일 때 502 ㏄로 계산되어 수압이 증가함에 따라 유출량이 증가하였으나, 수압 0.20 ㎫일 때는 270 ㏄로 계산되어 다른 실험조건과 달리 유출량이 감소하는 것으로 나타났다. 평균 유출량을 Froude의 상사법칙을 적용하여 ㎞당 유출량을 산정하면 수압 0.05 ㎫일 때 152.44 ㎥/㎞/min, 수압 0.10 ㎫일 때 163.59 ㎥/㎞/min, 수압 0.15 ㎫일 때 233.31 ㎥/㎞/min, 수압 0.20 ㎫일 때 125.48 ㎥/㎞/min로 계산되었다.

(마) 배수조건 5차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관의 내부로 유출되는 유출량을 측정하고 측정된 값을 표로 나타냈다(표 2.9.19 참조).

표 2.9.19 배수조건 5차에서의 유출량 변화량

수 압	토 압	유출량 (30 sec)	유출량 (1 min)	㎤/km/min (1 min)	㎤/km/min (5 min)
0.05 MPa	0.0278 MPa	440 cc	880 cc	408,987,041	382,031,077
	0.0556 MPa	420 cc	840 cc	390,396,721	
	0.0834 MPa	420 cc	840 cc	390,396,721	
	0.1112 MPa	390 cc	780 cc	362,511,241	
	0.1390 MPa	385 cc	770 cc	357,863,661	
0.10 MPa	0.0278 MPa	580 cc	1,160 cc	539,119,282	526,106,058
	0.0556 MPa	580 cc	1,160 cc	539,119,282	
	0.0834 MPa	580 cc	1,160 cc	539,119,282	
	0.1112 MPa	565 cc	1,130 cc	525,176,542	
	0.1390 MPa	525 cc	1,050 cc	487,995,902	
0.15 MPa	0.0278 MPa	665 cc	1,330 cc	618,128,142	596,749,274
	0.0556 MPa	660 cc	1,320 cc	613,480,562	
	0.0834 MPa	660 cc	1,320 cc	613,480,562	
	0.1112 MPa	635 cc	1,270 cc	590,242,662	
	0.1390 MPa	590 cc	1,180 cc	548,414,442	
0.20 MPa	0.0278 MPa	740 cc	1,480 cc	687,841,842	673,899,102
	0.0556 MPa	740 cc	1,480 cc	687,841,842	
	0.0834 MPa	730 cc	1,460 cc	678,546,682	
	0.1112 MPa	710 cc	1,420 cc	659,956,362	
	0.1390 MPa	705 cc	1,410 cc	655,308,782	

앞의 배수조건 실험들과 달리 유출량의 변화가 매우 크게 발생하였으나, 수압이 일정하게 유지되는 상태에서 재하응력이 증가함에 따라 배수조건 내관으로 유출되는 유출량은 수압 0.05 ㎫일 때 880 ㏄에서 770 ㏄로, 수압 0.10 ㎫일 때 1160 ㏄에서 1050 ㏄로, 수압 0.15 ㎫일 때에는 1330 ㏄에서 1180 ㏄로, 수압 0.20 ㎫일 때 1480 ㏄에서 1410 ㏄로 감소하는 것으로 나타났다. 이를 이용하여 평균 유출량을 산출하면 수압 0.05 ㎫일 때 822 ㏄, 수압 0.10 ㎫일 때 1132 ㏄, 수압 0.15 ㎫일 때 1284 ㏄, 수압 0.20 ㎫일 때 1450 ㏄로 계산되어 수압이 증가함에 따라 유출량이 증가하는 것으로 나타났

다. 평균 유출량을 Froude의 상사법칙을 적용하여 ㎞당 유출량을 산정하면 수압 0.05 ㎫일 때 382.03 ㎥/㎞/min, 수압 0.10 ㎫일 때 526.11 ㎥/㎞/min, 수압 0.15 ㎫일 때 596.75 ㎥/㎞/min, 수압 0.20 ㎫일 때 673.90 ㎥/㎞/min로 계산되었다.

(바) 배수조건 6차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관의 내부로 유출되는 유출량을 측정하고 측정된 값을 표로 나타냈다(표 2.9.20 참조).

표 2.9.20 배수조건 6차에서의 유출량 변화량

수 압	토 압	유출량 (30 sec)	유출량 (1 min)	㎤/㎞/min (1 min)	㎤/㎞/min (5 min)
0.05 ㎫	0.0278 ㎫	190 cc	380 cc	176,608,041	161,735,785
	0.0556 ㎫	190 cc	380 cc	176,608,041	
	0.0834 ㎫	170 cc	340 cc	158,017,721	
	0.1112 ㎫	160 cc	320 cc	148,722,560	
	0.1390 ㎫	160 cc	320 cc	148,722,560	
0.10 ㎫	0.0278 ㎫	225 cc	450 cc	209,141,101	173,819,493
	0.0556 ㎫	200 cc	400 cc	185,903,201	
	0.0834 ㎫	180 cc	360 cc	167,312,881	
	0.1112 ㎫	170 cc	340 cc	158,017,721	
	0.1390 ㎫	160 cc	320 cc	148,722,560	
0.15 ㎫	0.0278 ㎫	160 cc	320 cc	148,722,560	139,427,400
	0.0556 ㎫	150 cc	300 cc	139,427,400	
	0.0834 ㎫	150 cc	300 cc	139,427,400	
	0.1112 ㎫	145 cc	290 cc	134,779,820	
	0.1390 ㎫	145 cc	290 cc	134,779,820	
0.20 ㎫	0.0278 ㎫	125 cc	250 cc	116,189,500	108,753,372
	0.0556 ㎫	125 cc	250 cc	116,189,500	
	0.0834 ㎫	120 cc	240 cc	111,541,920	
	0.1112 ㎫	110 cc	220 cc	102,246,760	
	0.1390 ㎫	105 cc	210 cc	97,599,180	

수압이 일정하게 유지되는 상태에서 재하응력이 증가함에 따라 배수조건 내관으로 유출되는 유출량은 수압 0.05 ㎫일 때 380 ㏄에서 320 ㏄로, 수압 0.10 ㎫일 때 450 ㏄에서 320 ㏄로, 수압 0.15 ㎫일 때에는 320 ㏄에서 290 ㏄로, 수압 0.20 ㎫일 때 250 ㏄

에서 210 cc로 감소하는 것으로 나타났다. 이를 이용하여 평균 유출량을 산출하면 수압 0.05 ㎫일 때 348 cc, 수압 0.10 ㎫일 때 374 cc로 계산되어 수압이 증가함에 따라 유출량이 증가하였으나, 수압 0.15 ㎫일 때 300 cc, 수압 0.20 ㎫일 때 234 cc로 계산되어 수압이 증가에 따라 평균 유출량이 감소하였다. 평균 유출량을 Froude의 상사법칙을 적용하여 ㎞당 유출량을 산정하면 수압 0.05 ㎫일 때 161.74 ㎥/㎞/min, 수압 0.10 ㎫일 때 173.82 ㎥/㎞/min, 수압 0.15 ㎫일 때 139.43 ㎥/㎞/min, 수압 0.20 ㎫일 때 108.75 ㎥/㎞/min로 계산되었다.

(사) 유출량 변화 검토

배수조건 내관에서 재하응력 증가에 따른 1분간 유출량 변화는 표 2.9.21 및 표 2.9.22과 같다. 토압이 0.139 ㎫로 동일한 경우 유출량은 배수조건 1차일 때 100 → 220 cc, 배수조건 2차일 때 140 → 380 cc, 배수조건 3차일 때 220 → 300 cc, 배수조건 4차일 때 300 → 180 cc, 배수조건 5차일 때 770 → 1,410 cc, 배수조건 6차일 때 320 → 210 cc과 같이 배수 4차 실험을 제외한 다른 실험조건에서 증가하는 것으로 나타났고, 수압이 0.20 ㎫로 동일한 경우 유출량은 배수조건 1차일 때 250 → 220 cc, 배수조건 2차일 때 400 → 380 cc, 배수조건 3차일 때 360 → 300 cc, 배수조건 4차일 때 420 → 180 cc, 배수조건 5차일 때 1,480 → 1,410 cc, 배수조건 6차일 때 250 → 210 cc와 같이 감소하는 것으로 나타났다.

Froude의 상사법칙($\frac{Q_p}{Q_m} = L_r^{5/2}$)을 적용하여 단계별로 산정한 유출량은 표 2.9.23이 나타났다. 각 단계별로 구분하면 50.0~100.0 ㎥/㎞/min 구간에 4곳, 100.0~ 200.0 ㎥/㎞/min 구간에 15곳, 200.0 ㎥/㎞/min 이상 구간이 5곳에 나타났다.

유출량별 전응력 및 간극수압 변화를 검토하면, 유출량이 증가할수록 평균 전응력 증가율은 0.226에서 0.207, 0.182로 점증적으로 감소하는 것으로 나타났고 평균 간극수압증가율은 -0.053에서 -0.014, -0.012로 점증적으로 증가하는 것으로 나타났다(표 2.9.24 참조).

표 2.9.21 토압 0.1390MPa 일 때 1분간 유출량(㎤)

수압(MPa)	배수1차	배수2차	배수3차	배수4차	배수5차	배수6차
0.05	100	140	220	300	770	320
0.10	140	220	240	160	1,050	320
0.15	180	260	280	160	1,180	290
0.20	220	380	300	180	1,410	210

표 2.9.22 수압 0.20MPa 일 때 1분간 유출량(㎤)

재하응력 (MPa)	배수1차	배수2차	배수3차	배수4차	배수5차	배수6차
0.0278	250	400	360	420	1,480	250
0.0556	240	380	320	320	1,480	250
0.0834	240	380	310	230	1,460	240
0.1112	230	380	310	200	1,420	220
0.1390	220	380	300	180	1,410	210

표 2.9.23 상사법칙을 이용한 유출량 산정(㎥/㎞/min)

수압(MPa)	배수1차	배수2차	배수3차	배수4차	배수5차	배수6차
0.05	50.19	65.07	123.63	152.44	382.03	161.74
0.10	79.94	102.25	129.20	163.59	526.11	173.82
0.15	92.95	128.27	144.07	235.17	596.75	139.43
0.20	109.68	178.47	148.72	125.48	673.90	108.75

표 2.9.24 유출량별 평균 전응력 및 간극수압증가율

유출량(㎥/㎞/min)	평균 전응력증가율	평균 간극수압증가율	비 고
100 미만	0.226	-0.053	
100 ~ 200	0.207	-0.014	
200 초과	0.182	-0.012	

(5) 유효응력 변화

(가) 수압 0.05 MPa

수압 0.05 MPa이고 재하응력이 0.1390 MPa일 때 유효응력을 계산한 결과(표 2.9.25 참조), 비배수조건에서 0.0414 MPa, 0.0424 MPa로 나타나 평균 0.0419 MPa였고 배수조건에서는 0.0362 MPa, 0.0488 MPa, 0.0332 MPa, 0.0317 MPa, 0.0347 MPa, 0.0332 MPa로 나타나 배수조건 2차를 제외하면 평균 0.0338 MPa로 나타났다. 배수조건 2차를 제외한 다른 실험에서 비배수조건일 때 배수조건보다 유효응력이 큰 것으로 나타났다.

비배수 및 배수조건에 따른 전응력과 유효응력의 변화는 그림 2.9.40과 같으며 위쪽의 그래프는 전응력을 아래의 그래프는 유효응력을 도시하였다. 재하응력 0.1390 MPa에서 전응력과 유효응력 모두에서 배수조건 2차의 값이 가장 크게 나타났지만 대부분 비배수조건에서 배수조건보다 전응력 및 유효응력 값이 크게 나타났다.

표 2.9.25 수압 0.05MPa일 때 배수 및 비배수조건에 따른 유효응력 변화량

수 압 (MPa)	재하응력 (MPa)	비배수1차	비배수2차	배수1차	배수2차	배수3차	배수4차	배수5차	배수6차
0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.0278	0.0040	0.0073	0.0032	0.0066	0.0079	0.0055	0.0064	0.0073
	0.0556	0.0183	0.0157	0.0096	0.0182	0.0146	0.0122	0.0139	0.0142
	0.0834	0.0221	0.0245	0.0169	0.0296	0.0214	0.0189	0.0206	0.0208
	0.1112	0.0340	0.0337	0.0263	0.0406	0.0272	0.0254	0.0283	0.0272
	0.1390	0.0414	0.0424	0.0362	0.0488	0.0332	0.0317	0.0347	0.0332

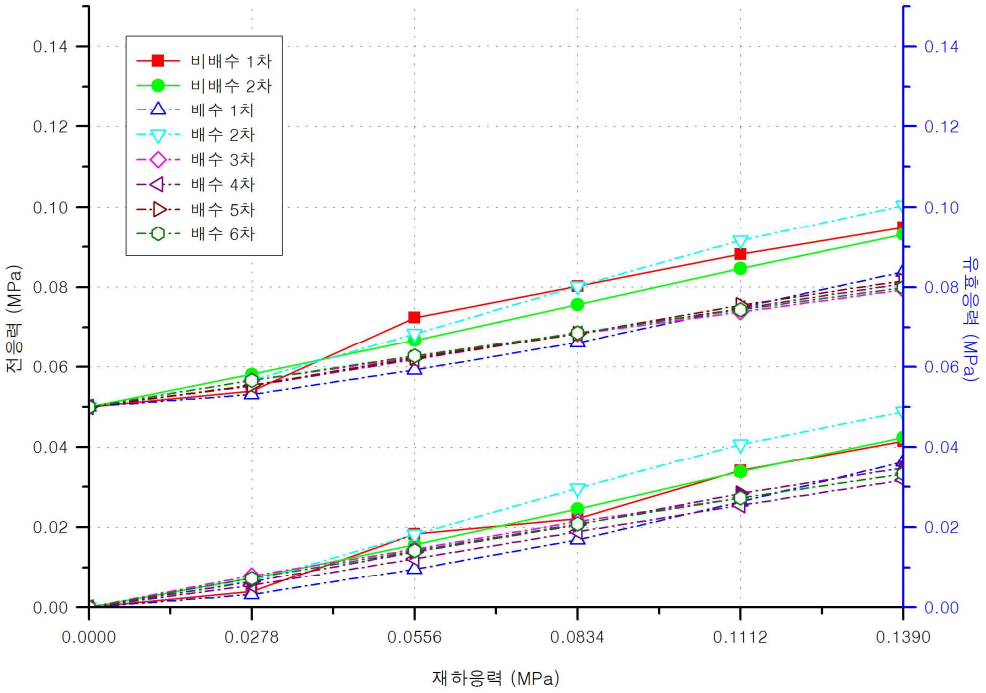


그림 2.9.40 수압 0.05 MPa일 때 전응력과 유효응력의 변화

(나) 수압 0.10 MPa

수압 0.10 MPa이고 재하응력이 0.1390 MPa일 때 유효응력을 계산한 결과(표 2.9.26 참조), 비배수조건에서 0.0413 MPa, 0.0425 MPa로 나타나 평균 0.0419 MPa였고 배수조건에서는 0.0493 MPa, 0.0496 MPa, 0.0407 MPa, 0.0420 MPa, 0.0479 MPa, 0.0453 MPa로 평균 0.0458 MPa로 나타나 배수조건일 때 비배수조건보다 유효응력이 큰 것으로 나타났다.

표 2.9.26 수압 0.10MPa일 때 배수 및 비배수조건에 따른 유효응력 변화량

수 압 (MPa)	재하응력 (MPa)	비배수1차	비배수2차	배수1차	배수2차	배수3차	배수4차	배수5차	배수6차
0.10	0.00	0.0047	0.0037	0.0118	0.0097	0.0109	0.0101	0.0142	0.0107
	0.0278	0.0084	0.0093	0.0155	0.0090	0.0158	0.0160	0.0220	0.0172
	0.0556	0.0156	0.0170	0.0218	0.0180	0.0228	0.0232	0.0296	0.0249
	0.0834	0.0243	0.0256	0.0302	0.0293	0.0293	0.0299	0.0363	0.0319
	0.1112	0.0332	0.0343	0.0396	0.0398	0.0350	0.0360	0.0422	0.0384
	0.1390	0.0413	0.0425	0.0493	0.0496	0.0407	0.0420	0.0479	0.0453

비배수 및 배수조건에 따른 전응력과 유효응력의 변화는 그림 2.9.41과 같으며 위쪽의 그래프는 전응력을 아래의 그래프는 유효응력을 도시하였다. 재하응력 0.1390 MPa일 때, 전응력의 경우 배수조건 2차에서 가장 크게 나타났으나 대체적으로 비배수조건에서 배수조건보다 크게 나타났다. 유효응력의 경우 배수조건 5차에서 가장 크게 나타났고 배수조건에서 비배수조건보다 크게 나타났다.

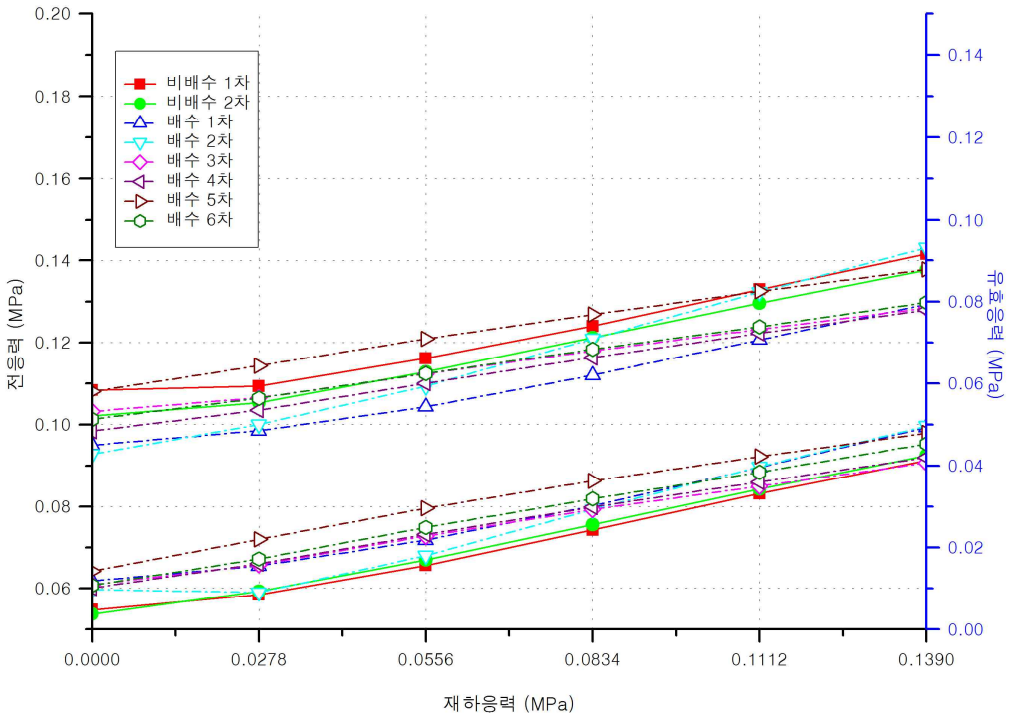


그림 2.9.41 수압 0.10 MPa일 때 전응력과 유효응력의 변화

(다) 수압 0.15 MPa

수압 0.15 MPa이고 재하응력이 0.1390 MPa일 때 유효응력을 계산한 결과(표 2.9.27 참조), 비배수조건에서 0.0386 MPa, 0.0372 MPa로 나타나 평균 0.0379 MPa였고 배수조건에서는 0.0539 MPa, 0.0566 MPa, 0.0312 MPa, 0.0452 MPa, 0.0492 MPa, 0.0478 MPa로 평균 0.0473 MPa로 나타나 배수조건일 때 비배수조건보다 유효응력이 큰 것으로 나타났다. 비배수조건의 경우 수압 0.05 MPa, 수압 0.10 MPa일 때 보다 유효응력이 감소하는 것으로 나타났고, 배수조건의 경우 수압 0.05 MPa, 수압 0.10 MPa일 때 보다 유효응력이 증가하는 것으로 나타났다.

비배수 및 배수조건에 따른 전응력과 유효응력의 변화는 그림 2.9.42와 같으며 위쪽의 그래프는 전응력을 아래의 그래프는 유효응력을 도시하였다. 재하응력 0.1390 MPa

일 때, 전응력의 경우 비배수조건 1차에서 가장 크게 나타났고 배수조건 2차, 배수조건 5차, 비배수조건 2차의 순으로 나타나 대체적으로 비배수조건에서 배수조건보다 크게 나타났다. 유효응력의 경우 배수조건 2차에서 가장 크게 나타났고 배수조건 3차에서 가장 작게 나타났으나 대체적으로 배수조건에서 비배수조건보다 크게 나타났다.

표 2.9.27 수압 0.15MPa일 때 배수 및 비배수조건에 따른 유효응력 변화량

수 압 (MPa)	재하응력 (MPa)	비배수1차	비배수2차	배수1차	배수2차	배수3차	배수4차	배수5차	배수6차
0.15	0.090	0.0019	0.0026	0.0179	0.0155	0.0060	0.0142	0.0189	0.0162
	0.0278	0.0057	0.0071	0.0216	0.0227	0.0101	0.0203	0.0236	0.0237
	0.0556	0.0134	0.0136	0.0278	0.0317	0.0155	0.0273	0.0304	0.0307
	0.0834	0.0220	0.0218	0.0361	0.0412	0.0211	0.0338	0.0369	0.0370
	0.1112	0.0308	0.0299	0.0448	0.0499	0.0262	0.0398	0.0432	0.0426
	0.1390	0.0386	0.0372	0.0539	0.0566	0.0312	0.0452	0.0492	0.0478

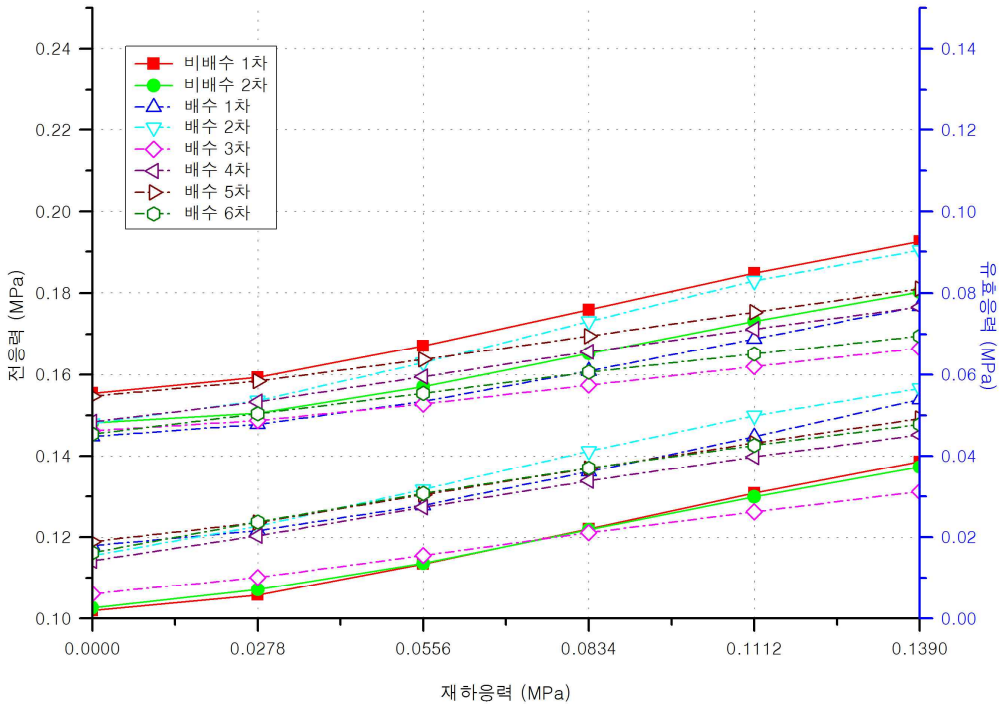


그림 2.9.42 수압 0.15 MPa일 때 전응력과 유효응력의 변화

(라) 수압 0.20 MPa

수압 0.20 MPa이고 재하응력이 0.1390 MPa일 때 유효응력을 계산한 결과(표 2.9.28 참조), 비배수조건에서 0.0408 MPa, 0.0413 MPa로 나타나 평균 0.0411 MPa였고 배수조건에서는 0.0581 MPa, 0.0583 MPa, 0.0347 MPa, 0.0493 MPa, 0.0579 MPa, 0.0532 MPa로 평균 0.0519 MPa로 나타나 배수조건일 때 비배수조건보다 유효응력이 큰 것으로 나타났다. 배수조건의 경우 수압 0.05 MPa, 수압 0.10 MPa, 수압 0.15 MPa일 때 보다 유효응력이 증가하는 것으로 나타났다.

비배수 및 배수조건에 따른 전응력과 유효응력의 변화는 그림 2.9.43과 같으며 위쪽의 그래프는 전응력을 아래의 그래프는 유효응력을 도시하였다. 재하응력 0.1390 MPa일 때, 전응력의 경우 비배수조건 1차에서 가장 크게 나타났고 배수조건 2차, 비배수조건 2차의 순으로 나타나 대체적으로 비배수조건에서 배수조건보다 크게 나타났다. 또한 유효응력의 경우 배수조건 2차에서 가장 크게 나타났고 배수조건 3차에서 가장 작게 나타났으나 대체적으로 배수조건에서 비배수조건보다 크게 나타났다.

표 2.9.28 수압 0.20MPa일 때 배수 및 비배수조건에 따른 유효응력 변화량

수 압 (MPa)	재하응력 (MPa)	비배수1차	비배수2차	배수1차	배수2차	배수3차	배수4차	배수5차	배수6차
0.20	0.00	0.0060	0.0068	0.0223	0.0183	0.0088	0.0175	0.0267	0.0221
	0.0278	0.0095	0.0110	0.0260	0.0258	0.0139	0.0245	0.0332	0.0289
	0.0556	0.0168	0.0176	0.0318	0.0345	0.0198	0.0318	0.0402	0.0363
	0.0834	0.0243	0.0256	0.0402	0.0436	0.0253	0.0383	0.0468	0.0425
	0.1112	0.0328	0.0337	0.0491	0.0521	0.0301	0.0439	0.0531	0.0479
	0.1390	0.0408	0.0413	0.0581	0.0583	0.0347	0.0493	0.0579	0.0532

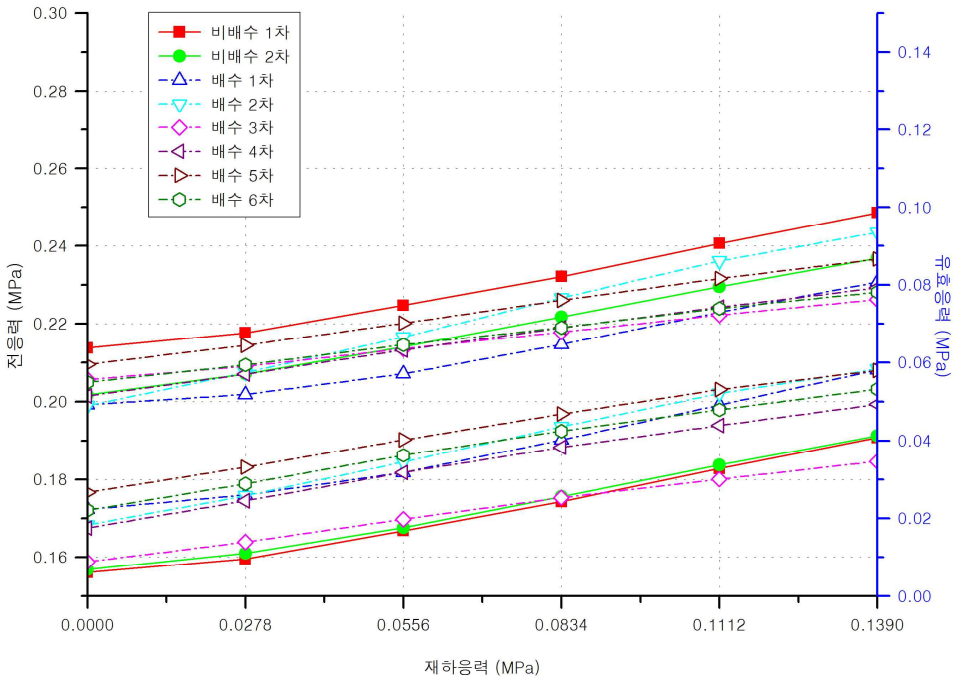


그림 2.9.43 수압 0.20 MPa일 때 전응력과 유효응력의 변화

(마) 유효응력 변화 검토

모형실험에서 수압이 0.05 MPa로 작은 조건에서는 비배수조건의 유효응력이 배수조건보다 크게 나타났으나, 대체적으로 수압이 증가함에 따라 배수조건의 유효응력이 비배수조건보다 크게 나타났다. 배수조건의 경우 수압이 0.05 MPa에서 0.20 MPa로 증가할수록 유효응력의 값도 증가하는 것으로 나타났다. 전응력과 유효응력을 함께 도시한 그래프에서 재하응력 증가에 따른 전응력의 증가량은 비배수실험이 크고, 유효응력 증가량은 배수실험이 큰 경향성을 보여주고 있다. 결국 터널에 작용하는 토압과 수압의 합인 전응력은 배수조건보다 비배수조건에서 더 크며, 이러한 결과를 토대로 토압과 수압을 고려하는 터널 설계에서 터널의 배수조건을 고려하면 터널 작용 하중을 감소시킬 수 있으므로[17] 보다 경제적인 터널 설계가 가능할 것으로 판단된다. 다만 본 실험은 제한된 토질 및 하중조건에서 실시한 모형실험이므로, 추후 실제 설계에 적용하기 위해서는 다양한 조건을 고려한 심도 있는 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

나. 화강풍화토 지반

(1) 전응력 변화

전응력 변화를 측정하기 위하여 각 단계에 따라 수압을 0.05 ㎫, 0.10 ㎫, 0.15 ㎫ 및 0.20 ㎫로 가압하여 일정하게 유지시킨 상태에서, 상부 재하응력을 1분에 0.0278 ㎫씩 단계적으로 증가시켜 0.1390 ㎫까지 증가시키면서 토조 벽면에 설치된 토압계에서 측정된 응력의 변화량을 측정하였다. 이때 토압계에서는 토조내의 토압에 의한 시험사의 유효응력과 수압에 의한 간극수압이 함께 측정되었다.

(가) 비배수조건 1차

토조에 비배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 토압계에 측정된 전응력을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.44 참조). 0.05 ㎫의 수압이 토조에 가해지고 유지되는 상태를 0으로 하여 전응력을 측정하였기 때문에 첫 번째 단계에서 측정된 전응력은 0으로 나타났다. 전체 구간에서 상부 재하응력이 증가함에 따라 전응력의 크기도 함께 증가하였고, 단계별로 수압이 0.05 ㎫ 씩 증가하였기 때문에 측정된 전응력도 함께 증가하는 것으로 나타났다.

토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 앞의 단계에서 다음 단계로 변화하는 구간에서 전응력이 점증적으로 증가하는 것으로 나타났다. 각 단계에서 0.1390 ㎫의 상부 재하응력이 작용하더라도 다음 단계의 초기 전응력 값보다는 작게 발생하였다. 또한 최종 단계에서의 전응력 값은 0.1637 ㎫로 측정되었다.

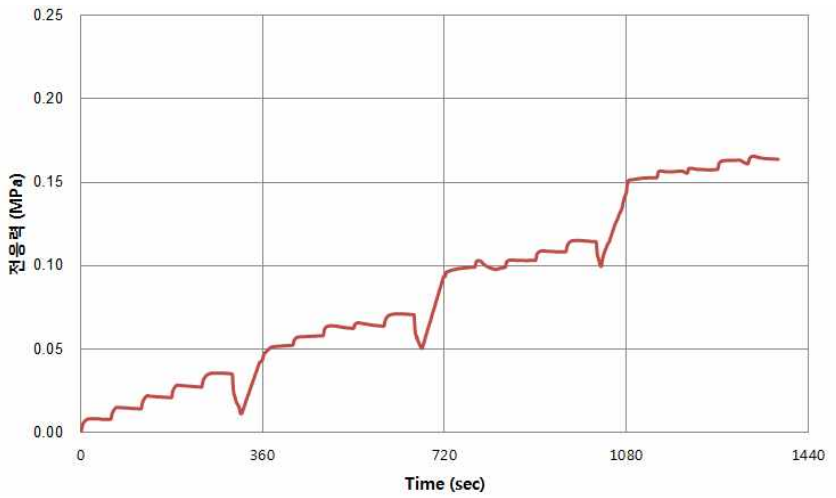


그림 2.9.44 비배수조건 1차에서의 전응력 변화

(나) 비배수조건 2차

토조에 비배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 토압계에 측정된 전응력을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.45 참조). 전체 구간에서 상부 재하응력이 증가함에 따라 전응력의 크기도 함께 증가하였고, 단계별로 수압이 0.05 ㎫ 씩 증가하였기 때문에 측정된 전응력도 함께 증가하는 것으로 나타났다.

토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 앞의 단계에서 다음 단계로 변화하는 구간에서 전응력이 점증적으로 증가하는 것으로 나타났다. 표준사의 경우와 마찬가지로 각 단계에서 0.1390 ㎫의 상부 재하응력이 작용하더라도 다음 단계의 초기 전응력 값보다는 작게 발생하였다. 또한 최종 단계에서의 전응력 값은 0.1778 ㎫로 측정되었다.

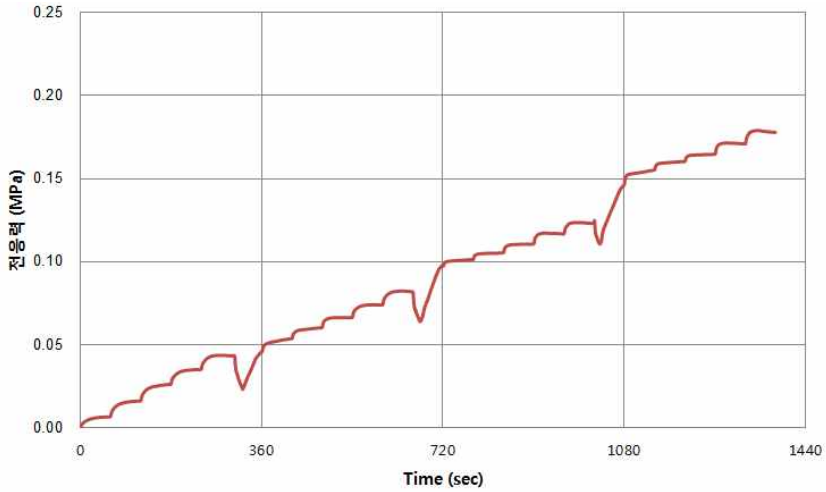


그림 2.2.45 비배수조건 2차에서의 전응력 변화

(다) 배수조건 1차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 토압계에 측정된 전응력을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.46 참조). 전체 구간에서 상부 재하응력이 증가함에 따라 전응력의 크기도 함께 증가하였고, 단계별로 수압이 0.05 ㎫ 씩 증가하였기 때문에 측정된 전응력도 함께 증가하는 것으로 나타났다.

토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 앞의 단계에서 다음 단계로 변화하는 구간에서 전응력이 점증적으로 증가하는 것으로 나타났다. 다른 실험들과 달리 각 단계에서 0.1390 ㎫의 상부 재하응력이 작용할 때 다음 단계의 초기 전응력 값보다는

크게 발생하였다. 이는 화강풍화토의 투수계수 작아 앞의 단계에서 빠져나간 물이 완전히 보충되지 않아 발생한 것으로 판단된다. 또한 최종 단계에서의 전응력 값은 0.1154 MPa로 측정되어 비배수조건보다 작게 측정되었다.

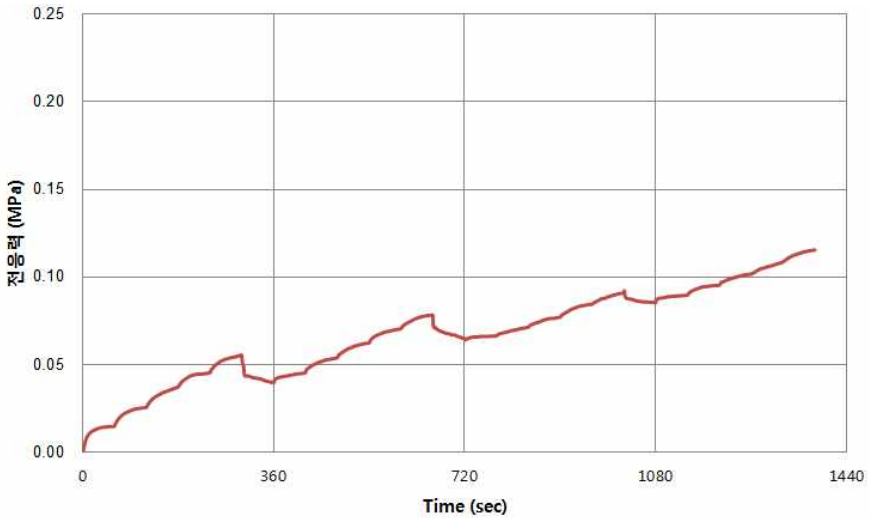


그림 2.9.46 배수조건 1차에서의 전응력 변화

(라) 배수조건 2차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 토압계에 측정된 전응력을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.47 참조). 전체 구간에서 상부 재하응력이 증가함에 따라 전응력의 크기도 함께 증가하였고, 단계별로 수압이 0.05 MPa 씩 증가하였기 때문에 측정된 전응력도 함께 증가하는 것으로 나타났다.

토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 앞의 단계에서 다음 단계로 변화하는 구간에서 전응력이 점증적으로 증가하는 것으로 나타났다. 첫 번째 단계에서 두 번째 단계로 변화할 때와 두 번째 단계에서 세 번째 단계로 변화할 때에는 0.1390 MPa의 상부 재하응력이 작용할 때 다음 단계의 초기 전응력 값보다는 크게 발생하였도, 세 번째 단계에서 네 번째 단계로 변화할 때에는 유사한 값을 나타냈다. 이는 화강풍화토를 이용한 배수조건 1차와 마찬가지로 화강풍화토의 투수계수 작아 앞의 단계에서 빠져나간 물이 완전히 보충되지 않아 발생한 것으로 판단된다. 또한 최종 단계에서의 전응력 값은 0.1057 MPa로 측정되어 실험들 중에서 가장 작은 값을 나타냈다.

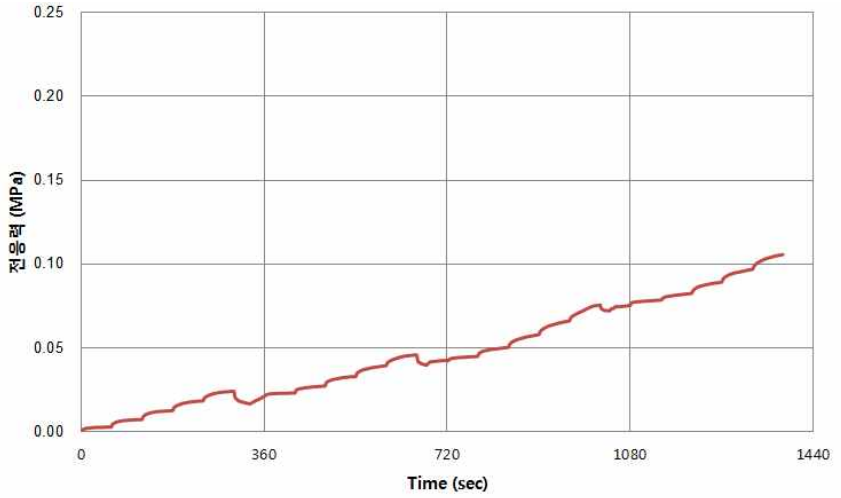


그림 2.9.47 배수조건 2차에서의 전응력 변화

(마) 전응력 변화 검토

쉴드터널 모형실험에서 토조에 부착된 토압계를 통하여 쉴드터널 라이닝에 작용하는 전응력 변화를 검토한 결과, 배수조건 및 지반조건에 따라 상부 재하응력이 0.0278 ㎫씩 단계적으로 0.1390 ㎫까지 증가하면 전응력도 함께 증가하는 것으로 나타났다. 앞의 그림에서 수압 0.05 ㎫, 상부 재하응력 0.0000 ㎫일 때의 전응력 값을 0.0000 ㎫로 하여 도시하였으나, 실제 전응력 값은 표 2.2.29와 같이 수압 0.05 ㎫, 상부 재하응력 0.0000 ㎫일 때 0.0500 ㎫으로 계산된다. 수압 0.05 ㎫, 상부 재하응력 0.0000 ㎫일 때 모든 조건에서 0.05 ㎫로 동일하였으나, 상부 재하응력이 점차 증가하여 0.1390 ㎫이 작용할 때에는 0.0851 ㎫, 0.0932 ㎫, 0.1055 ㎫, 0.0741 ㎫로 나타났다. 토압계에서 측정되는 압력이 유효응력과 수압의 합이고 이론적으로는 배수조건에서 수압이 감소하는 만큼 지반의 유효응력이 증가하기 때문에 비배수조건과 배수조건에서의 압력증가량이 같아야 하지만, 측정된 전응력 값이 비배수조건에서 더 큰 것으로 나타나 배수조건일 때 전응력이 작게 발생하는 것으로 나타났다.

표 2.9.29에서 수압 0.05 ㎫과 재하응력 0.1390 ㎫이 작용할 때 토조에 가해진 전체 압력은 수압과 재하응력을 합한 0.1890 ㎫이지만 측정된 값은 그보다 작게 나타났다. 수압 0.10 ㎫, 수압 0.15 ㎫ 및 수압 0.20 ㎫의 조건에서도 전체 가한 압력보다 측정된 값이 작게 나타났다. 측정된 응력이 상부에서 가한 응력보다 작게 나타난 이유는 토조 벽면마찰과 입자간의 아칭으로 인한 영향이 일부 있었던 것으로 판단되며, 가장 중요한 이유는 토압계가 토조 벽면에 설치되어 있어 횡방향 응력을 측정하였기 때문으로 판단된다. 일반적으로 지반에서 정지토압 상태에서의 횡방향 토압은 마찰각에 좌우되

며, Jacky의 공식에 따르면 마찰각이 증가할수록 토압계수는 감소하여 마찰각이 30° 이상인 경우 토압계수는 0.5 이하로 감소한다.

터널모형 실험에서 전응력 증가분을 상부 재하응력 증가분으로 나눈 전응력증가율을 표 2.9.30에 나타냈다. 각 수압단계의 전응력증가율을 평균하면 비배수조건에서 0.177, 0.241, 배수조건에서 0.268, 0.200로 나타나 배수조건에 따른 뚜렷한 차이는 발생하지 않는 것으로 나타났다.

표 2.9.29 배수 및 비배수조건에 따른 전응력 변화량

수 압	재하응력	비배수1차	비배수2차	배수1차	배수2차
0.05	0.0000	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500
	0.0278	0.0578	0.0566	0.0648	0.0527
	0.0556	0.0642	0.0661	0.0755	0.0572
	0.0834	0.0708	0.0760	0.0870	0.0625
	0.1112	0.0772	0.0850	0.0953	0.0683
	0.1390	0.0851	0.0932	0.1055	0.0741
0.10	0.0000	0.0947	0.0958	0.0902	0.0712
	0.0278	0.1022	0.1037	0.0952	0.0730
	0.0556	0.1080	0.1102	0.1038	0.0772
	0.0834	0.1123	0.1163	0.1123	0.0828
	0.1112	0.1136	0.1239	0.1205	0.0893
	0.1390	0.1205	0.1319	0.1283	0.0958
0.15	0.0000	0.1433	0.1474	0.1141	0.0922
	0.0278	0.1491	0.1512	0.1164	0.0949
	0.0556	0.1489	0.1553	0.1213	0.1002
	0.0834	0.1532	0.1606	0.1271	0.1078
	0.1112	0.1583	0.1667	0.1344	0.1160
	0.1390	0.1643	0.1731	0.1409	0.1254
0.20	0.0000	0.1976	0.1989	0.1370	0.1267
	0.0278	0.2027	0.2052	0.1397	0.1285
	0.0556	0.2054	0.2103	0.1454	0.1324
	0.0834	0.2077	0.2146	0.1516	0.1392
	0.1112	0.2110	0.2209	0.1587	0.1468
	0.1390	0.2137	0.2278	0.1654	0.1557

표 2.9.30 배수 및 비배수조건에 따른 전응력 증가율

수 압	화강풍화토			
	비배수1차	비배수2차	배수1차	배수2차
0.05	0.253	0.311	0.399	0.173
0.10	0.186	0.260	0.274	0.177
0.15	0.151	0.185	0.193	0.239
0.20	0.116	0.208	0.204	0.209
평 균	0.177	0.241	0.268	0.200

(2) 간극수압 변화

간극수압의 변화를 측정하기 위하여 수압을 각 단계에 따라 0.05 ㎫, 0.10 ㎫, 0.15 ㎫ 및 0.20 ㎫로 가압하여 일정하게 유지시킨 상태에서 상부 재하응력을 1분에 0.0278 ㎫씩 단계적으로 0.1390 ㎫까지 증가시키면서 배수 및 비배수 내관 하부에 설치된 간극수압계를 통하여 간극수압의 변화량을 측정하였다.

(가) 비배수조건 1차

토조에 비배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 하부의 간극수압계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.48 참조).

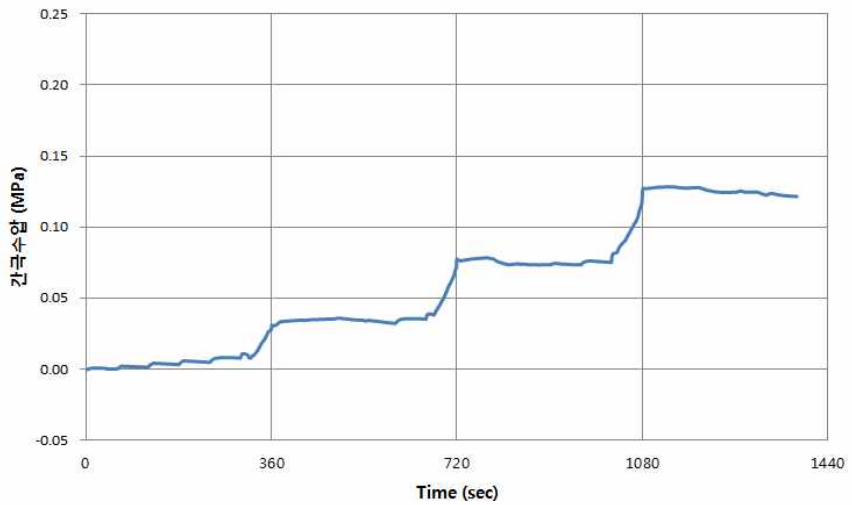


그림 2.9.48 비배수조건 1차에서의 간극수압 변화

초기에 0.05 MPa의 수압이 토조에 가해지고 유지되는 상태를 0으로 하여 간극수압을 측정하였기 때문에 첫 번째 단계에서 측정된 간극수압은 0.0000 MPa로 나타났다. 초기 단계에서는 간극수압이 다소 증가하였으나, 다른 단계에서는 간극수압이 거의 유지되거나 감소하는 것으로 나타났다. 토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 앞의 단계에서 다음 단계로 변화하는 구간에서 간극수압이 점증적으로 증가하는 것으로 나타났다. 또한 최종 단계에서 간극수압 값은 0.1215 MPa로 측정되었다.

(나) 비배수조건 2차

토조에 비배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 하부의 간극수압계에 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.49 참조). 모든 단계에서 간극수압은 다소 증가하는 것으로 나타났다.

토조의 수압이 변화하는 수압변화구간의 경우, 앞의 단계에서 다음 단계로 변화하는 구간에서 간극수압이 점증적으로 증가하는 것으로 나타났다. 또한 최종 단계에서 간극수압 값은 0.1364 MPa로 측정되었다.

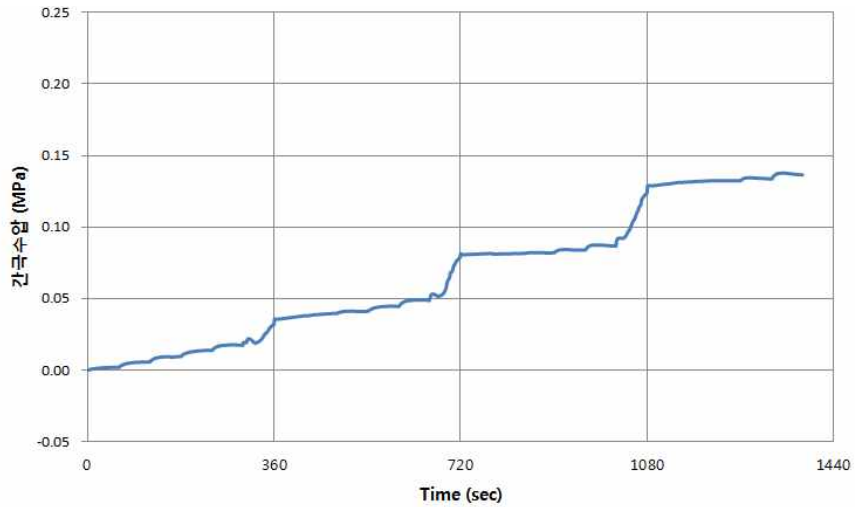


그림 2.9.49 비배수조건 2차에서의 간극수압 변화

(다) 배수조건 1차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 하부의 간극수압계로 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.50 참조).

각 단계에서 간극수압은 증가하는 것으로 나타났다. 토조의 수압이 변화하는 수압

변화구간의 경우, 앞의 단계에서 다음 단계로 변화하는 구간에서 간극수압이 감소하였다가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 최종 단계에서 간극수압 값은 0.0312 ㎫로 측정되었다.

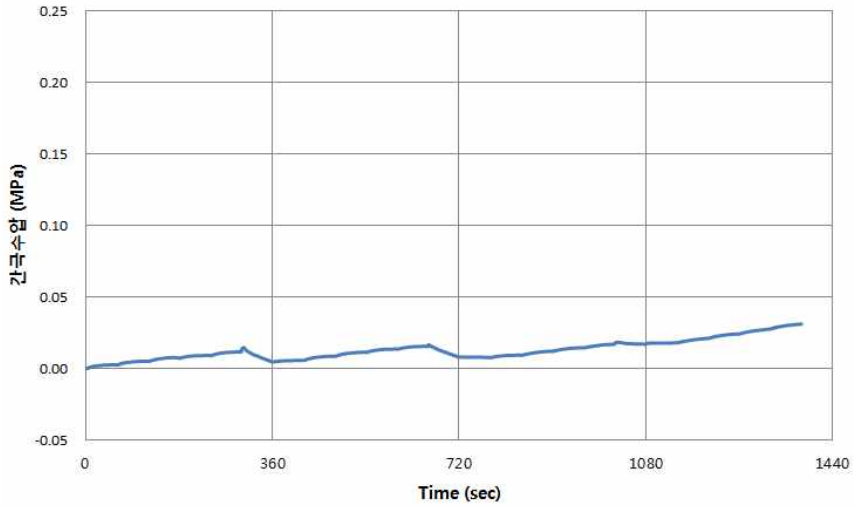


그림 2.9.50 배수조건 1차에서의 간극수압 변화

(라) 배수조건 2차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 하부의 간극수압계로 측정된 값을 그래프로 나타냈다(그림 2.9.51 참조).

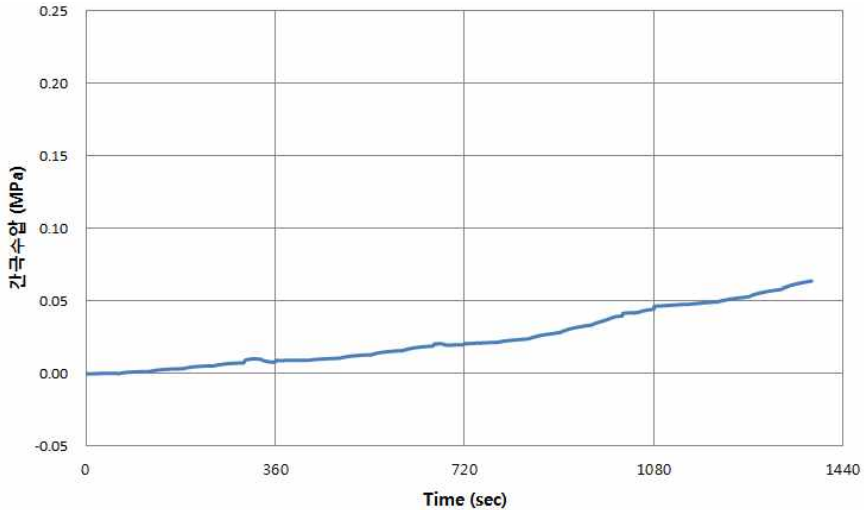


그림 2.9.51 배수조건 2차에서의 간극수압 변화

각 단계에서 간극수압은 증가하는 것으로 나타났다. 토조의 수압이 변화하는 수압 변화구간의 경우, 앞의 단계에서 다음 단계로 변화하는 구간에서 간극수압이 거의 일정한 것으로 나타났다. 또한 최종 단계에서 간극수압 값은 0.0637 ㎫로 측정되었다.

(마) 간극수압 변화 검토

쉴드터널 모형실험에서 배수 및 비배수조건 내관에 부착된 간극수압계를 통하여 쉴드터널 라이닝의 간극수압 변화를 검토한 결과, 동일한 수압 구간에서 토조의 압력이 0.0278 ㎫씩 단계적으로 0.1390 ㎫까지 증가함에 따라 비배수조건 1차에서는 다소 감소하는 것으로 나타났으나, 비배수조건 2차와 배수조건에서 다소 증가하는 것으로 나타났다.

표 2.9.31에서 초기 수압 0.05 ㎫로 인하여 모든 실험조건에서 초기에 0.05 ㎫의 값을 나타내지만 같은 수압조건에서 재하응력이 증가하여 0.1390 ㎫이 작용하게 되면 배수조건에 따라 상이한 결과를 나타냈다. 비배수조건 1차에서 수압이 0.05 ㎫와 0.10 ㎫일 때에는 0.0577 ㎫, 0.0851 ㎫로 증가하는 것으로 나타났고, 수압이 0.15 ㎫와 0.20 ㎫일 때에는 0.1251 ㎫, 0.1715 ㎫로 감소하는 것으로 나타났다. 비배수조건 2차에서는 모든 수압 단계에서 0.0673 ㎫, 0.0988 ㎫, 0.1367 ㎫, 0.1864 ㎫로 증가하는 것으로 나타났다. 또한 배수조건 1차에서는 0.0616 ㎫, 0.0655 ㎫, 0.0670 ㎫, 0.0812 ㎫로 증가하였고, 배수조건 2차에서는 0.0572 ㎫, 0.0688 ㎫, 0.0896 ㎫, 0.1137 ㎫로 증가하는 것으로 나타났다.

결론적으로 수압이 일정하게 유지된 상태에서 상부 재하응력을 1분마다 0.0278 ㎫씩 단계적으로 증가시켜 0.1390 ㎫까지 증가시켰을 때, 동일한 수압이 작용하는 조건에서 비배수조건 1차에서는 낮은 수압단계에서는 다소 증가하였고, 수압이 높아질수록 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 다른 실험조건에서는 모두 증가하는 것으로 나타났다. 단, 완전배수조건에서는 간극수압이 0으로 감소해야 하지만 이 실험에서의 배수조건은 완전배수가 아니고 적은 양만 유출되도록 부분배수조건을 적용하였기 때문에 간극수압의 감소량이 적었고, 완전히 0으로 감소하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

터널모형 실험에서 간극수압 증가분을 상부 재하응력 증가분으로 나눈 간극수압 증가율을 표 2.9.32와 같이 나타냈다. 수압 0.05 ㎫에서 평균값은 0.055, 0.124, 0.083, 0.052로써 배수조건과 관계없이 증가하는 것으로 나타났고, 각 수압단계에서 간극수압증가율을 평균해보면 증가하는 것으로 나타났다.

표 2.9.31 배수 및 비배수조건에 따른 간극수압 변화량

수 압	재하응력	비배수1차	비배수2차	배수1차	배수2차
0.05	0.0000	0.0500	0.0500	0.0500	0.0500
	0.0278	0.0501	0.0519	0.0527	0.0500
	0.0556	0.0513	0.0557	0.0552	0.0513
	0.0834	0.0532	0.0594	0.0574	0.0532
	0.1112	0.0548	0.0638	0.0591	0.0552
	0.1390	0.0577	0.0673	0.0616	0.0572
0.10	0.0000	0.0811	0.0859	0.0549	0.0591
	0.0278	0.0845	0.0880	0.0556	0.0591
	0.0556	0.0853	0.0896	0.0586	0.0605
	0.0834	0.0842	0.0910	0.0614	0.0627
	0.1112	0.0822	0.0945	0.0636	0.0656
	0.1390	0.0851	0.0988	0.0655	0.0688
0.15	0.0000	0.1274	0.1312	0.0582	0.0706
	0.0278	0.1284	0.1315	0.0578	0.0713
	0.0556	0.1242	0.1316	0.0594	0.0737
	0.0834	0.1235	0.1320	0.0622	0.0781
	0.1112	0.1235	0.1338	0.0646	0.0832
	0.1390	0.1251	0.1367	0.0670	0.0896
0.20	0.0000	0.1773	0.1790	0.0677	0.0963
	0.0278	0.1784	0.1811	0.0681	0.0976
	0.0556	0.1768	0.1822	0.0712	0.0993
	0.0834	0.1745	0.1824	0.0742	0.1028
	0.1112	0.1726	0.1836	0.0777	0.1078
	0.1390	0.1715	0.1864	0.0812	0.1137

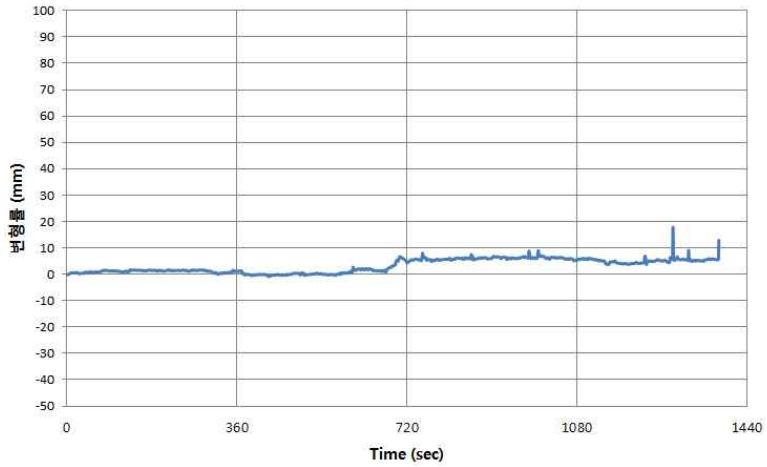
표 2.9.32 배수 및 비배수조건에 따른 간극수압 증가율

수 압	화강풍화토			
	비배수1차	비배수2차	배수1차	배수2차
0.05	0.055	0.124	0.083	0.052
0.10	0.029	0.093	0.076	0.070
0.15	-0.017	0.040	0.063	0.137
0.20	-0.042	0.053	0.097	0.125
평 균	0.006	0.078	0.080	0.096

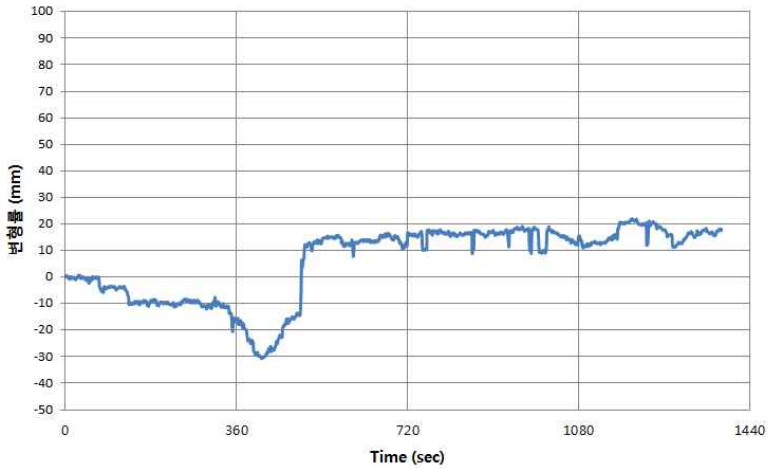
(3) 변형률 변화

(가) 비배수조건 1차

토조에 비배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 상부의 변형률계에 측정된 값을 그래프로 나타내면 다음과 같다(그림 2.9.52 참조).



(a) 외측부 변형률 변화(비배수조건 1차)



(b) 내측부 변형률 변화(비배수조건 1차)

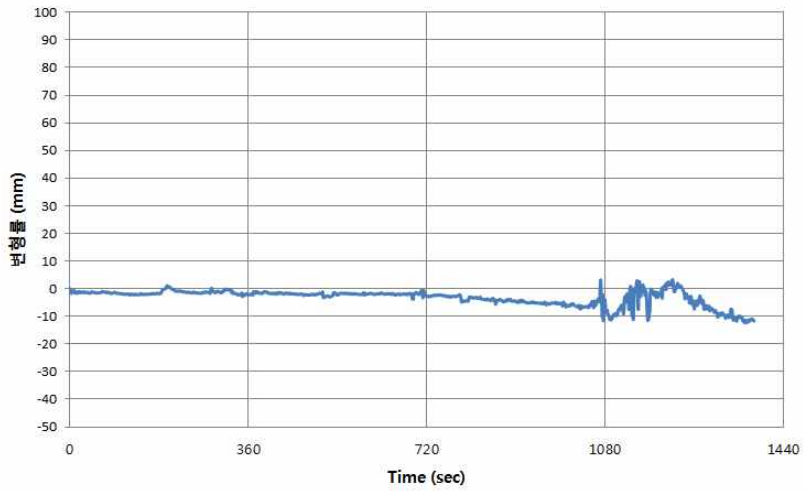
그림 2.9.52 비배수조건 1차에서의 변형률 변화

원주방향의 변형을 반영하도록 계획된 외측부 변형률계 값은 초기 단계에서 약 0.0 ㎜ 근처의 값을 나타내다가 재하응력이 증가함에 따라 약 5.0 ㎜ 부근에서 변화하는 것으로 나타났다. 터널의 처짐과 모멘트의 영향을 계획된 중앙부 변형률계는 초기 단

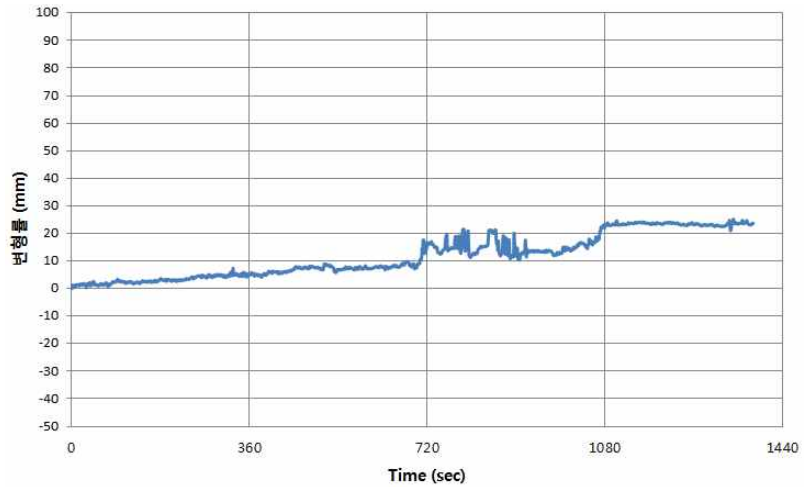
계에서 약 0.0 ㎜의 값을 나타내다가 상부 재하응력이 증가함에 따라 (-)값을 나타냈으며, 점차 증가하여 최종 단계에서는 20.0 ㎜ 부근에서 변형률계의 변화를 나타냈다. 여기서 외측부의 변형률계 값은 측정에 오류를 포함하고 있는 것으로 판단되었다.

(나) 비배수조건 2차

토조에 비배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 상부의 변형률계에 측정된 값을 그래프로 나타내면 다음과 같다(그림 2.9.53 참조).



ⓐ 외측부 변형률 변화(비배수조건 2차)



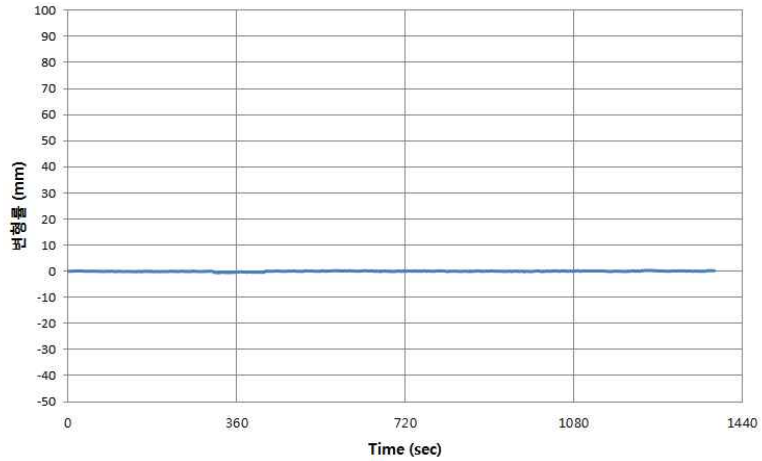
ⓑ 내측부 변형률 변화(비배수조건 2차)

그림 2.9.53 비배수조건 2차에서의 변형률 변화

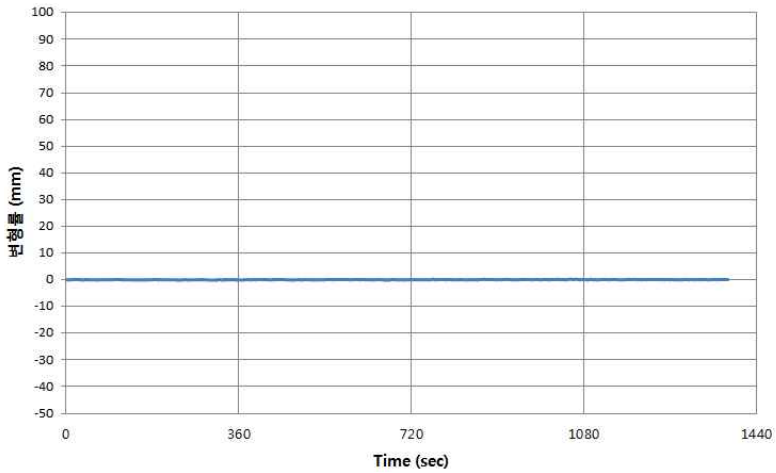
원주방향의 변형을 반영하도록 계획된 외측부 변형률계 값은 초기 단계에서 약 0.0 ㎜ 근처의 값을 나타내다가 상부 재하응력이 증가함에 따라 점차로 감소하다가 0.0~(-)10.0 ㎜ 부근에서 변화하는 것으로 나타났다. 터널의 처짐과 모멘트의 영향을 계획된 중앙부 변형률계는 초기 단계에서 약 0.0 ㎜의 값을 나타내다가 상부 재하응력이 증가함에 따라 점차 증가하여 최종 단계에서는 약 23.0 ㎜ 부근에서 변형률계의 변화를 나타냈다.

(다) 배수조건 1차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 상부의 변형률계에 측정된 값을 그래프로 나타내면 다음과 같다(그림 2.9.54 참조).



ⓐ 외측부 변형률 변화(배수조건 1차)



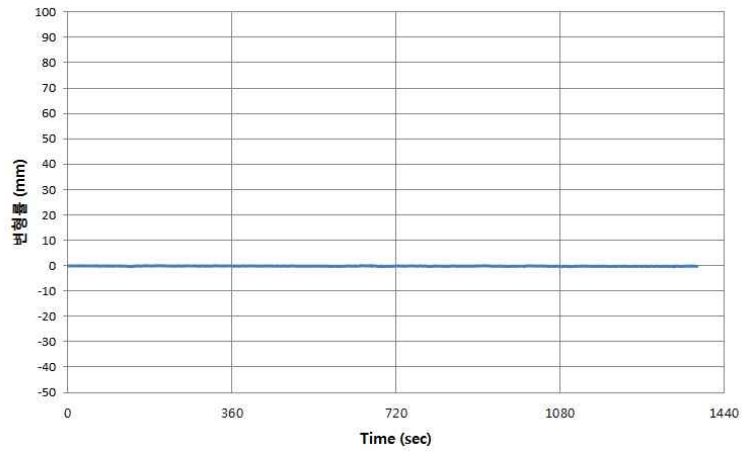
ⓑ 내측부 변형률 변화(배수조건 1차)

그림 2.9.54 배수조건 1차에서의 변형률 변화

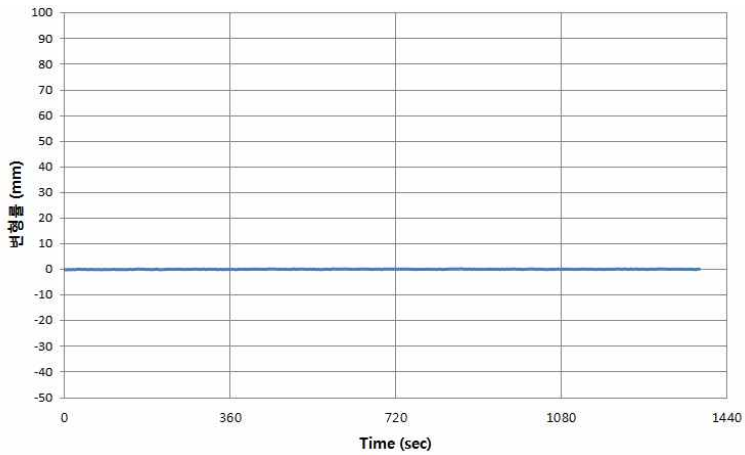
원주방향의 변형을 반영하도록 계획된 외측부 변형률계 값은 초기 단계에서 최종 단계까지 약 0.0 ㎜ 근처에서 미소하게 변화하는 것으로 나타났다. 터널의 처짐과 모멘트의 영향을 계획된 중앙부 변형률계에서도 초기 단계에서 최종 단계까지 약 0.0 ㎜ 근처에서 미소하게 변화하는 것으로 나타났다. 쉴드터널 모형실험에 사용된 내관의 경우 다수의 실험을 위하여 강도가 강한 재질을 사용하였기 때문에 이번 실험과 같이 변형률 값의 변화가 적은 것이 맞는 경향이라고 판단되었다.

(라) 배수조건 2차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관 상부의 변형률계에 측정된 값을 그래프로 나타내면 다음과 같다(그림 2.9.55 참조).



ⓐ 외측부 변형률 변화(배수조건 2차)



ⓑ 내측부 변형률 변화(배수조건 2차)

그림 2.9.55 배수조건 2차에서의 변형률 변화

원주방향의 변형을 반영하도록 계획된 외측부 변형률계 값은 화강풍화토를 이용한 배수조건 1차에서와 같이 초기 단계에서 최종 단계까지 약 0.0 ㎜ 근처에서 미소하게 변화하는 것으로 나타났다. 또한 터널의 처짐과 모멘트의 영향을 계획된 중앙부 변형률계에서도 초기 단계에서 최종 단계까지 약 0.0 ㎜ 근처에서 미소하게 변화하는 것으로 나타났다. 화강풍화토의 배수조건 1차에서와 같이 쉴드터널 모형실험에 사용된 내관의 경우 다수의 실험을 위하여 강도가 강한 재질을 사용하였기 때문에 이번 실험과 같이 변형률 값의 변화가 적은 것이 맞는 경향이라고 판단되었다.

(마) 변형률 변화 검토

수압이 일정하게 유지된 상태에서 상부 재하응력을 증가시키면서 내관 상부 외측부 및 중앙부 변형률 측정한 결과를 표 2.9.33에 나타냈다.

비배수조건 실험에서는 (+)와 (-)로의 변화가 심하여 결과의 신뢰도가 떨어지는 것으로 판단되었다. 배수조건 1차에서는 외측부의 최대 변형률 값이 -0.6 ㎜로 나타났고, 내측부의 최대 변형률 값이 0.4 ㎜로 나타나 외측부의 변형이 크게 나타났다. 배수조건 2차에서는 외측부의 최대 변형률 값이 -3.2 ㎜로 나타났고, 내측부의 최대 변형률 값이 -0.4 ㎜로 나타나 외측부의 변형이 크게 나타났다. 따라서 표준사를 이용한 배수조건 1차를 제외한 다른 실험들에서 비배수조건에서의 변형률 값이 배수조건에서의 변형률 값보다 대부분 크게 나타났고, 외측부의 값이 내측부의 값보다 크게 나타났다. 하지만 수압과 재하응력변화에 따른 터널 작용응력과 모멘트 등의 변화를 분석하기 위해서는 이론적, 수치적 분석과 병행하여 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

표 2.9.33 배수 및 비배수조건에 따른 내관 상부 변형률 변화량

구 분		비배수1차	비배수2차	배수1차	배수2차
외측부	Min	-1.0	-15.7	-0.6	-3.2
	Max	37.3	10.5	0.4	0.2
내측부	Min	-30.7	-15.9	-0.3	-0.4
	Max	22.0	25.2	0.4	0.3

(4) 유출량 변화

(가) 배수조건 1차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관의 내부로 유출되는 유출량을 측정하고 측정된 값을 표로 나타냈다(표 2.9.34 참조).

표 2.9.34 배수조건 1차에서의 유출량 변화량

수 압	토 압	유출량 (30 sec)	유출량 (1 min)	㎤/km/min (1 min)	㎤/km/min (5 min)
0.05 MPa	0.0278 MPa	220 cc	440 cc	204,493,521	174,749,009
	0.0556 MPa	170 cc	340 cc	158,017,721	
	0.0834 MPa	180 cc	360 cc	167,312,881	
	0.1112 MPa	180 cc	360 cc	167,312,881	
	0.1390 MPa	190 cc	380 cc	176,608,041	
0.10 MPa	0.0278 MPa	150 cc	300 cc	139,427,400	141,286,432
	0.0556 MPa	150 cc	300 cc	139,427,400	
	0.0834 MPa	150 cc	300 cc	139,427,400	
	0.1112 MPa	150 cc	300 cc	139,427,400	
	0.1390 MPa	160 cc	320 cc	148,722,560	
0.15 MPa	0.0278 MPa	150 cc	300 cc	139,427,400	139,427,400
	0.0556 MPa	150 cc	300 cc	139,427,400	
	0.0834 MPa	150 cc	300 cc	139,427,400	
	0.1112 MPa	150 cc	300 cc	139,427,400	
	0.1390 MPa	150 cc	300 cc	139,427,400	
0.20 MPa	0.0278 MPa	150 cc	300 cc	139,427,400	145,004,496
	0.0556 MPa	150 cc	300 cc	139,427,400	
	0.0834 MPa	160 cc	320 cc	148,722,560	
	0.1112 MPa	160 cc	320 cc	148,722,560	
	0.1390 MPa	160 cc	320 cc	148,722,560	

수압이 일정하게 유지되는 상태에서 재하응력이 증가함에 따라 배수조건 내관으로 유출되는 유출량은 수압 0.05 ㎫일 때 440 ㏄에서 380 ㏄로 감소하는 것으로 나타났고, 수압 0.10 ㎫일 때 300 ㏄에서 320 ㏄로 미소하게 증가하는 것으로 나타났으며, 수압 0.15 ㎫일 때에는 300 ㏄에서 300 ㏄로 일정하게 유지되었고, 수압 0.20 ㎫일 때 300 ㏄에서 320 ㏄로 미소하게 증가하는 것으로 나타났다. 이를 이용하여 평균 유출량

을 산출하면 수압 0.05 ㎫일 때 376 ㏄, 수압 0.10 ㎫일 때 304 ㏄, 수압 0.15 ㎫일 때 300 ㏄로 계산되어 수압이 증가함에 따라 평균 유출량이 감소하였으나, 수압 0.20 ㎫일 때 312 ㏄로 계산되어 수압이 증가함에 따라 평균 유출량이 감소하였다. 평균 유출량을 Froude의 상사법칙을 적용하여 ㎞당 유출량을 산정하면 수압 0.05 ㎫일 때 174.75 ㎥/㎞/min, 수압 0.10 ㎫일 때 141.29 ㎥/㎞/min, 수압 0.15 ㎫일 때 139.43 ㎥/㎞/min, 수압 0.20 ㎫일 때 145.00 ㎥/㎞/min로 계산되었다.

(나) 배수조건 2차

토조에 배수조건의 내관을 설치한 후 실험조건에 따라 실험을 수행하여 내관의 내부로 유출되는 유출량을 측정하고 측정된 값을 표로 나타냈다(표 2.9.35 참조).

표 2.9.35 배수조건 2차에서의 유출량 변화량

수 압	토 압	유출량 (30 sec)	유출량 (1 min)	㎤/㎞/min (1 min)	㎤/㎞/min (5 min)
0.05 MPa	0.0278 MPa	70 cc	140 cc	65,066,120	79,938,376
	0.0556 MPa	80 cc	160 cc	74,361,280	
	0.0834 MPa	90 cc	180 cc	83,656,440	
	0.1112 MPa	90 cc	180 cc	83,656,440	
	0.1390 MPa	100 cc	200 cc	92,951,600	
0.10 MPa	0.0278 MPa	100 cc	200 cc	92,951,600	104,105,792
	0.0556 MPa	105 cc	210 cc	97,599,180	
	0.0834 MPa	110 cc	220 cc	102,246,760	
	0.1112 MPa	115 cc	230 cc	106,894,340	
	0.1390 MPa	130 cc	260 cc	120,837,080	
0.15 MPa	0.0278 MPa	110 cc	220 cc	102,246,760	107,823,856
	0.0556 MPa	110 cc	220 cc	102,246,760	
	0.0834 MPa	120 cc	240 cc	111,541,920	
	0.1112 MPa	120 cc	240 cc	111,541,920	
	0.1390 MPa	120 cc	240 cc	111,541,920	
0.20 MPa	0.0278 MPa	110 cc	220 cc	102,246,760	105,964,824
	0.0556 MPa	110 cc	220 cc	102,246,760	
	0.0834 MPa	110 cc	220 cc	102,246,760	
	0.1112 MPa	120 cc	240 cc	111,541,920	
	0.1390 MPa	120 cc	240 cc	111,541,920	

수압이 일정하게 유지되는 상태에서 재하응력이 증가함에 따라 배수조건 내관으로 유출되는 유출량은 수압 0.05 ㎫일 때 140 ㏄에서 200 ㏄로, 수압 0.10 ㎫일 때 200 ㏄에서 260 ㏄로, 수압 0.15 ㎫일 때에는 220 ㏄에서 240 ㏄로, 수압 0.20 ㎫일 때 220 ㏄에서 240 ㏄로 미소하게 증가하는 것으로 나타났다. 이를 이용하여 평균 유출량을 산출하면 수압 0.05 ㎫일 때 172 ㏄, 수압 0.10 ㎫일 때 224 ㏄, 수압 0.15 ㎫일 때 232 ㏄로 계산되어 수압이 증가함에 따라 평균 유출량이 증가하였으나, 수압 0.20 ㎫일 때 228 ㏄로 계산되어 수압이 증가함에 따라 평균 유출량이 감소하였다. 평균 유출량을 Froude의 상사법칙을 적용하여 ㎞당 유출량을 산정하면 수압 0.05 ㎫일 때 79.94 ㎥/㎞/min, 수압 0.10 ㎫일 때 104.11 ㎥/㎞/min, 수압 0.15 ㎫일 때 107.82 ㎥/㎞/min, 수압 0.20 ㎫일 때 105.96 ㎥/㎞/min로 계산되었다.

(다) 유출량 변화 검토

배수조건 내관에서 재하응력 증가에 따른 1분간 유출량 변화는 표 2.9.36 및 표 2.9.37과 같다. 본 실험에서는 배수조건 내관의 배수구멍을 8곳을 열어 실험을 수행하였다. 토압이 0.1390 ㎫로 동일한 경우 유출량은 배수조건 1차일 때 380 → 320 ㏄, 배수조건 2차일 때 200 → 240 ㏄와 같이 화강풍화토 배수조건 2차를 제외한 나머지 실험에서 수압이 증가함에 따라 유출량이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 수압이 0.20 ㎫로 동일한 경우 유출량은 배수조건 1차일 때 300 → 320 ㏄, 배수조건 2차일 때 220 → 240 ㏄와 같이 증가하는 것으로 나타났다.

Froude의 상사법칙($\frac{Q_p}{Q_m} = L_r^{5/2}$)을 적용하여 단계별로 산정한 유출량은 표 2.9.38과 같이 나타났다. 각 단계별로 구분하면 50.0 ~ 100.0 ㎥/㎞/min 구간에 1곳, 100.0 ~ 200.0 ㎥/㎞/min 구간에 7곳으로 나타났다.

표 2.9.36 토압 0.1390 MPa 일 때 1분간 유출량(㎤)

수압(MPa)	배수1차	배수2차
0.05	380	200
0.10	320	260
0.15	300	240
0.20	320	240

표 2.9.37 수압 0.20 MPa 일 때 1분간 유출량(㎤)

재하응력 (MPa)	배수1차	배수2차
0.0278	300	220
0.0556	300	220
0.0834	320	220
0.1112	320	240
0.1390	320	240

표 2.9.38 상사법칙을 이용한 유출량 산정(㎥/㎞/min)

수압(MPa)	배수1차	배수2차
0.05	174.75	79.94
0.10	141.29	104.11
0.15	139.43	107.82
0.20	145.00	105.96

(5) 유효응력 변화

(가) 수압 0.05 ㎫

수압 0.05 ㎫이고 상부 재하응력이 0.1390 ㎫일 때 유효응력을 계산한 결과(표 2.9.39 참조), 비배수조건에서 0.0274 ㎫, 0.0259 ㎫로 나타나 평균 0.0267 ㎫였고 배수조건에서 0.0439 ㎫, 0.0169 ㎫로 나타나 평균 0.0304 ㎫였다. 배수조건에서 비배수조건보다 평균 유효응력이 큰 것으로 나타났다.

배수조건에 따른 전응력과 유효응력의 변화는 그림 2.9.56와 같으며 위쪽의 그래프는 전응력을 아래의 그래프는 유효응력을 도시하였다. 재하응력 0.1390 ㎫에서 전응력과 유효응력 모두에서 배수 1의 값이 가장 크게 나타났다.

표 2.9.39 수압 0.05 MPa일 때 배수조건에 따른 유효응력 변화량

수 압	재하응력	비배수1차	비배수2차	배수1차	배수2차
0.05	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.0278	0.0077	0.0047	0.0121	0.0027
	0.0556	0.0129	0.0104	0.0203	0.0059
	0.0834	0.0176	0.0166	0.0296	0.0093
	0.1112	0.0224	0.0212	0.0362	0.0131
	0.1390	0.0274	0.0259	0.0439	0.0169

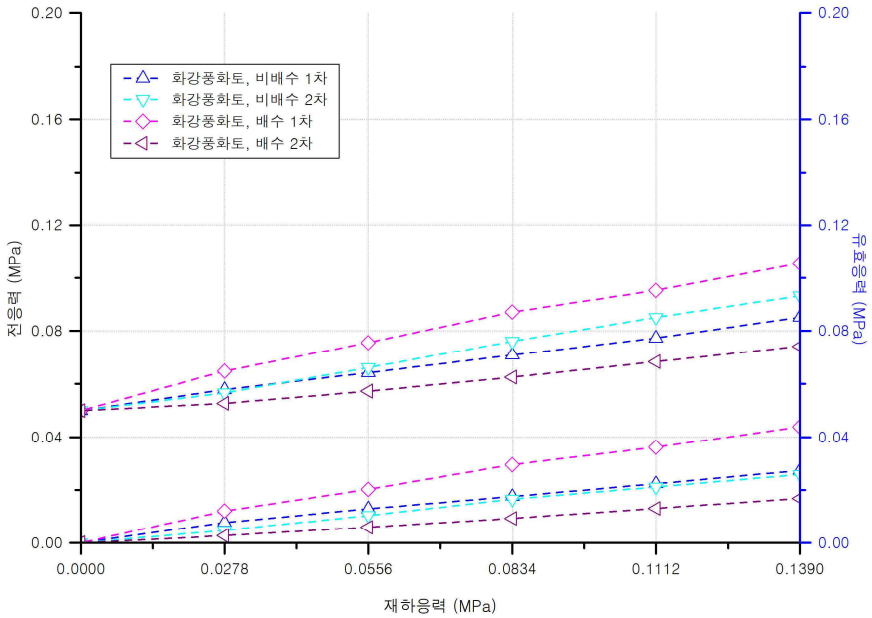


그림 2.9.56 수압 0.05 MPa일 때 전응력과 유효응력의 변화

(나) 수압 0.10 MPa

수압 0.10 MPa이고 상부 재하응력이 0.1390 MPa일 때 유효응력을 계산한 결과(표 2.9.40 참조), 비배수조건에서 0.0354 MPa, 0.0331 MPa로 나타나 평균 0.0343 MPa였고 배수조건에서 0.0628 MPa, 0.0270 MPa로 나타나 평균 0.0449 MPa였다. 배수조건에서 비배수조건보다 유효응력이 큰 것으로 나타났다.

배수조건에 따른 전응력과 유효응력의 변화는 그림 2.9.57과 같으며 위쪽의 그래프는 전응력을 아래의 그래프는 유효응력을 도시하였다. 상부 재하응력이 낮은 단계에서는 화강풍화토일 때의 유효응력이 표준사일 때보다 다소 크게 나타났으나, 상부 재

하응력이 증가함에 따라 상부 재하응력이 0.1390MPa에서는 전응력 및 유효응력 모두에서 표준사일 때가 화강풍화토일 때보다 큰 것으로 나타났다.

표 2.9.40 수압 0.10 MPa일 때 배수조건에 따른 유효응력 변화량

수 압	재하응력	비배수1차	비배수2차	배수1차	배수2차
0.10	0.0000	0.0136	0.0099	0.0353	0.0121
	0.0278	0.0177	0.0157	0.0396	0.0139
	0.0556	0.0227	0.0206	0.0452	0.0167
	0.0834	0.0281	0.0253	0.0509	0.0201
	0.1112	0.0314	0.0294	0.0569	0.0237
	0.1390	0.0354	0.0331	0.0628	0.0270

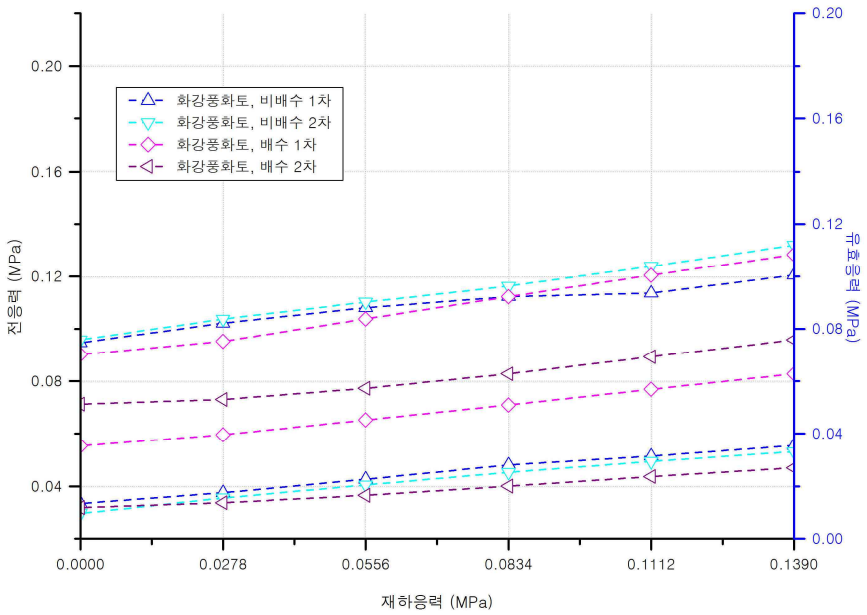


그림 2.9.57 수압 0.10 MPa일 때 전응력과 유효응력의 변화

(다) 수압 0.15 MPa

수압 0.15 MPa이고 상부 재하응력이 0.1390 MPa일 때 유효응력을 계산한 결과(표 2.9.41 참조), 비배수조건에서 0.0392 MPa, 0.0364 MPa로 나타나 평균 0.0378 MPa였고 배수조건에서 0.0739 MPa, 0.0358 MPa로 나타나 평균 0.0549 MPa였다. 수압 0.10 MPa일 때와 마찬가지로 배수조건에서 비배수조건보다 유효응력이 큰 것으로 나타났다.

배수조건에 따른 전응력과 유효응력의 변화는 그림 2.9.58과 같으며 위쪽의 그래프

는 전응력을 아래의 그래프는 유효응력을 도시하였다. 전체적으로 전응력 값은 비배수조건일 때 배수조건일 때 보다 큰 것으로 나타났고, 유효응력 값은 비배수조건일 때 배수조건일 때 보다 작은 것으로 나타났다.

표 2.2.41 수압 0.15MPa일 때 배수조건에 따른 유효응력 변화량

수 압	재하응력	비배수1차	비배수2차	배수1차	배수2차
0.15	0.0000	0.0159	0.0162	0.0559	0.0216
	0.0278	0.0207	0.0197	0.0586	0.0236
	0.0556	0.0247	0.0237	0.0619	0.0265
	0.0834	0.0297	0.0286	0.0649	0.0297
	0.1112	0.0348	0.0329	0.0698	0.0328
	0.1390	0.0392	0.0364	0.0739	0.0358

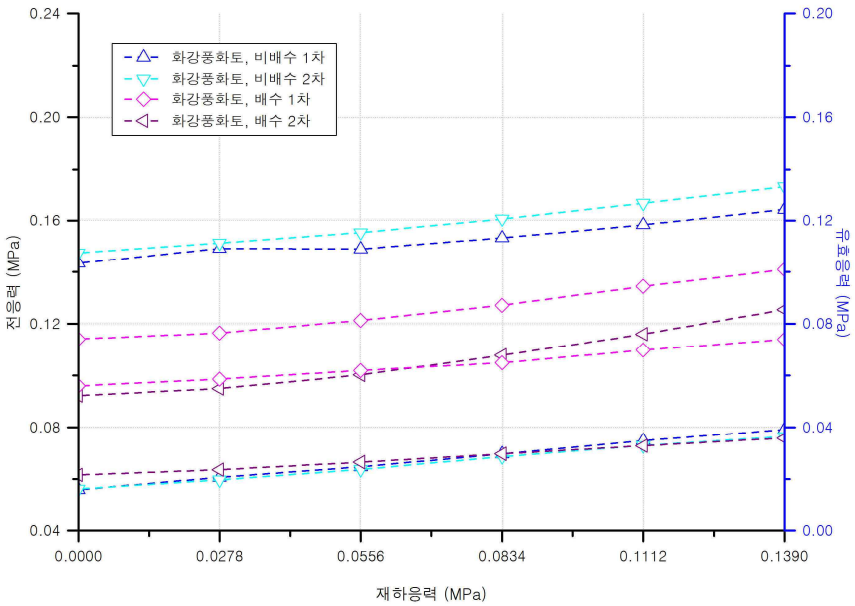


그림 2.9.58 수압 0.15 MPa일 때 전응력과 유효응력의 변화

(라) 수압 0.20 MPa

수압 0.20 MPa이고 상부 재하응력이 0.1390 MPa일 때 유효응력을 계산한 결과(표 2.9.42 참조), 비배수조건에서 0.0422 MPa, 0.0414 MPa로 나타나 평균 0.0418 MPa였고 배수조건에서 0.0842 MPa, 0.0420 MPa로 나타나 평균 0.0631 MPa였다. 수압 0.10 MPa과 0.15 MPa일 때와 마찬가지로 배수조건에서 비배수조건보다 유효응력이 큰 것으로 나타났다.

배수조건에 따른 전응력과 유효응력의 변화는 그림 2.9.59와 같으며 위쪽의 그래프는 전응력을 아래의 그래프는 유효응력을 도시하였다. 전체적으로 전응력 값은 비배수조건일 때 배수조건일 때 보다 큰 것으로 나타났고, 유효응력 값은 비배수조건일 때 배수조건일 때 보다 작은 것으로 나타났다. 또한 수압 0.15㎫일 때와 마찬가지로 표준사 비배수조건 1차의 경우 전응력 값은 비교적 큰 것으로 나타났고, 유효응력 값은 다른 실험조건에서 보다 작은 것으로 나타났다.

표 2.9.42 수압 0.20 ㎫일 때 배수조건에 따른 유효응력 변화량

수 압	재하응력	비배수1차	비배수2차	배수1차	배수2차
0.20	0.0000	0.0203	0.0199	0.0693	0.0304
	0.0278	0.0243	0.0241	0.0716	0.0309
	0.0556	0.0286	0.0281	0.0742	0.0331
	0.0834	0.0332	0.0322	0.0774	0.0364
	0.1112	0.0384	0.0373	0.0810	0.0390
	0.1390	0.0422	0.0414	0.0842	0.0420

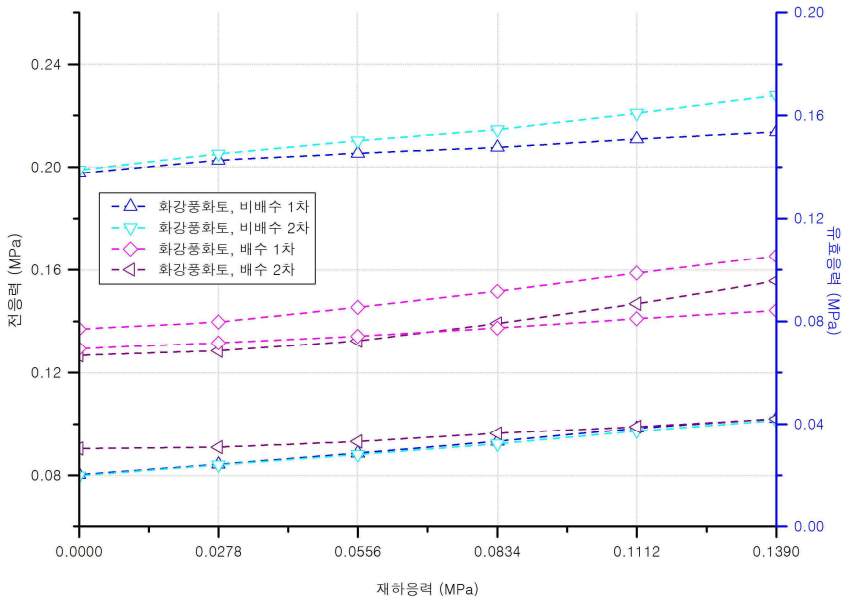


그림 2.9.59 수압 0.20 ㎫일 때 전응력과 유효응력의 변화

(마) 유효응력 변화 검토

쉴드터널 모형실험에서 수압 0.50 ㎫일 때 배수조건에서의 유효응력 값이 비배수조건일 때 보다 큰 것으로 나타났다. 또한 상부 재하응력이 0.1390 ㎫인 경우를 비교해보면, 수압이 0.05 ㎫에서 0.20 ㎫로 증가함에 따라 유효응력 값도 증가하는 것으로 나타났다.

전응력과 유효응력을 함께 도시한 그래프에서 재하응력 증가에 따른 전응력의 증가량은 비배수조건 실험에서 대체적으로 크게 나타났고, 유효응력 증가량은 배수조건 실험에서 대체적으로 큰 것으로 나타났다. 결국 터널에 작용하는 토압과 수압의 합인 전응력은 배수조건보다 비배수조건에서 더 크며, 이러한 결과를 토대로 토압과 수압을 고려하는 터널 설계에서 터널의 배수조건을 고려하면 터널 작용 하중을 감소시킬 수 있으므로[17] 보다 경제적인 터널 설계가 가능할 것으로 판단된다.

다. 수압감소 검토

(1) 표준사 지반

배수조건에서 각 토압단계에서 간극수압 값을 정리하면 표 2.9.43과 같고, 표 2.9.43을 이용한 각 토압단계에서의 평균 수압감소비율은 표 2.9.44와 같다.

각 토압별 평균 간극수압 감소비율 산정에 있어서, 표 2.9.43에서 다른 실험들과 달리 초기 수압 값이 가해준 수압보다 크게 나타난 배수조건 2차는 제외하였다.

수압이 감소하지 않는 비배수조건을 가정하여 토압과 수압을 산정하면 표 2.9.45와 같이 계산할 수 있다.

표 2.9.43 표준사 지반의 각 토압별 간극수압(MPa)

토 압	수 압	배수 1차	배수 2차	배수 3차	배수 4차	배수 5차	배수 6차
0.0278	0.05	0.0499	0.0500	0.0487	0.0497	0.0490	0.0493
	0.10	0.0830	0.0910	0.0907	0.0875	0.0923	0.0892
	0.15	0.1262	0.1309	0.1386	0.1330	0.1348	0.1267
	0.20	0.1758	0.1816	0.1951	0.1825	0.1812	0.1805
0.0556	0.05	0.0496	0.0501	0.0477	0.0496	0.0483	0.0485
	0.10	0.0825	0.0913	0.0895	0.0868	0.0913	0.0875
	0.15	0.1256	0.1312	0.1373	0.1322	0.1333	0.1247
	0.20	0.1753	0.1820	0.1937	0.1814	0.1799	0.1782
0.0834	0.05	0.0492	0.0506	0.0469	0.0495	0.0478	0.0478
	0.10	0.0818	0.0916	0.0886	0.0864	0.0905	0.0864
	0.15	0.1248	0.1319	0.1363	0.1318	0.1326	0.1236
	0.20	0.1744	0.1830	0.1925	0.1806	0.1792	0.1765
0.1112	0.05	0.0486	0.0511	0.0466	0.0493	0.0472	0.0472
	0.10	0.0810	0.0925	0.0882	0.0862	0.0903	0.0854
	0.15	0.1240	0.1330	0.1358	0.1314	0.1321	0.1225
	0.20	0.1738	0.1840	0.1921	0.1803	0.1785	0.1760
0.1390	0.05	0.0476	0.0516	0.0462	0.0492	0.0469	0.0467
	0.10	0.0800	0.0935	0.0877	0.0859	0.0899	0.0845
	0.15	0.1229	0.1338	0.1353	0.1314	0.1318	0.1217
	0.20	0.1726	0.1852	0.1915	0.1799	0.1787	0.1749

표 2.9.44 표준사 지반의 토압별 평균 간극수압 감소비율

구 분	토압 (MPa)	0.0278	0.0556	0.0834	0.1112	0.1390
	심도 (m)	2.8	5.6	8.4	11.2	14.0
평균 수압감소비율		-11.8%	-12.7%	-13.4%	-13.8%	-14.3%

표 2.9.45 비배수조건에서 표준사 지반의 토압 및 수압

심 도 (m)	토 압 (kPa)	수 압 (kPa)	합 계 (kPa)
0	0.00	0.00	0.00
5	48.60	50.00	98.60
10	97.20	100.00	197.20
15	145.80	150.00	295.80
20	194.40	200.00	394.40
25	243.00	250.00	493.00
30	291.60	300.00	591.60
35	340.20	350.00	690.20
40	388.80	400.00	788.80
45	437.40	450.00	887.40
50	486.00	500.00	986.00

비배수조건에서 토압 및 수압을 심도별로 일정하게 증가하는 것으로 계산하면, 표준사의 Gs = 2.63, 간극비(e) = 0.677이므로 식(2.9.1)과 같이 계산할 수 있다.

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \times \gamma_w = \frac{2.63 + 0.677}{1+0.677} \times 10.0 = 19.72 kPa. \qquad 식(2.9.1)$$

토조 내의 표준사는 포화된 시료이므로 $\gamma_{sub} = 9.72 kPa$를 적용하고, 심도(H)는 대심도와 쉴드터널의 직경을 고려하여 50.0 m로 적용하였다.

배수조건의 수압은 표 2.9.44의 평균 간극수압 감소비율을 이용하여 계산하였다. 토압은 비배수조건과 같이 변하지 않는 것으로 가정하였고, 심도별 수압감소비율을 적용하여 수압을 계산하면 표 2.9.46의 결과를 얻을 수 있다.

표 2.9.46 배수조건에서 표준사 지반의 수압 산정

심 도 (m)	수압감소비율	수 압 (kPa)
2.80	-11.80%	2.8*10*(1-0.118)=24.696
5.60	-12.70%	5.6*10*(1-0.127)=48.888
8.40	-13.40%	8.4*10*(1-0.134)=72.744
11.20	-13.80%	11.2*10*(1-0.138)=96.544
14.00	-14.30%	14.0*10*(1-0.143)=119.980

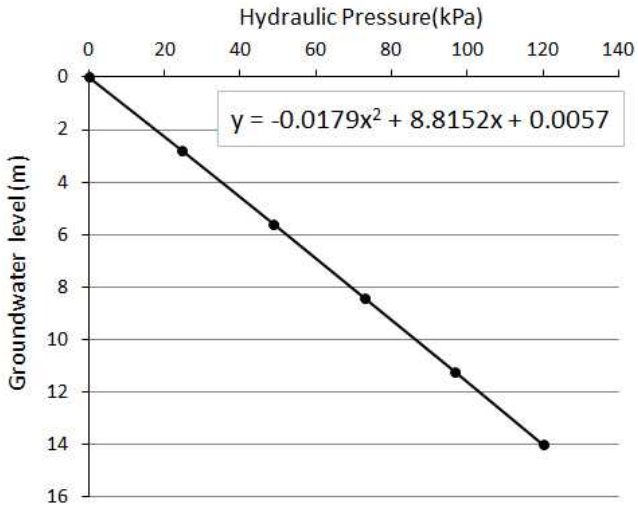


그림 2.9.60 표준사 지반의 심도별 수압

표 2.9.46에서 각 심도별 수압을 고려하여 추세식을 산정하면 그림 2.9.60과 같으며, 그림 2.9.60에서 심도(x)와 수압(y)과의 관계식을 구하면 식(2.9.2)와 같다.

$$y = -0.0179\ x^2 + 8.8152\ x + 0.0057 \qquad \text{식(2.9.2)}$$

배수조건에서 $\gamma_{sub} = 9.72 kPa$를 적용하고 앞의 식을 이용하여 심도(H)를 50.0 m까지 고려하면 표 2.9.47과 같이 나타낼 수 있다. 식(2.9.2)를 이용하여 지하수위 50.0 m까지 비배수 및 배수조건에서의 수압을 도시하면 그림 2.9.61과 같다.

표 2.9.47 배수조건에서 표준사 지반의 토압 및 수압

심 도 (m)	토 압 (kPa)	수 압 (kPa)	합 계 (kPa)
0	0.00	0.00	0.00
5	48.60	43.69	92.29
10	97.20	86.42	183.62
15	145.80	128.26	274.06
20	194.40	169.20	363.60
25	243.00	209.25	452.25
30	291.60	248.40	540.00
35	340.20	286.66	626.86
40	388.80	324.03	712.83
45	437.40	360.49	797.89
50	486.00	396.07	882.07

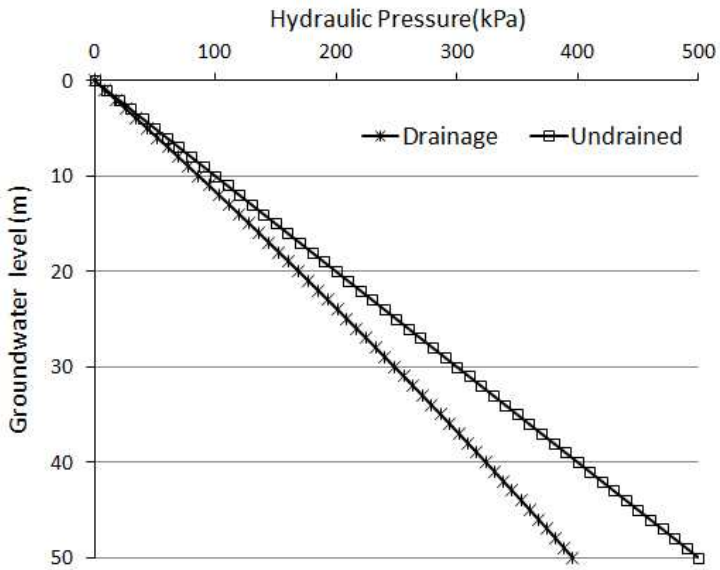


그림 2.9.61 비배수 및 배수조건에서의 수압 변화(표준사 지반)

(2) 화강풍화토 지반

화강풍화토 지반에서는 배수 및 비배수조건의 간극수압을 검토하여 비배수조건에서의 간극수압 값에 대한 배수조건의 간극수압 값을 검토하였다. 각 토압단계에서 간극수압 값을 정리하면 표 2.9.48과 같다.

표 2.9.48을 이용하여 각 토압단계에서 비배수조건에서의 평균 값에 대한 배수조건에서의 평균 값의 비율을 구하면 표 2.9.49와 같다.

표 2.9.49에서 심도가 깊어질수록 배수조건 고려시 간극수압은 비배수조건일 때의 간극수압 값의 평균 33.0%로 나타났다.

비배수조건의 경우에는 표 2.9.50의 값을 적용하고, 배수조건의 경우에는 비배수조건의 수압의 평균 33.0%를 적용하여 대심도와 쉴드터널의 직경을 고려하여 심도(H)를 50.0 m까지 토압 및 수압을 계산하면 표 2.9.51과 같다. 그리고 표 2.9.51을 그래프로 도시하면 그림 2.9.62와 같다.

표 2.9.48 화강풍화토 지반의 토압별 간극수압(MPa)

토 압	수 압	비배수 1차	비배수 2차	비배수 평균	배수 1차	배수 2차	배수 평균
0.0278	0.05	0.0384	0.0402	0.0393	0.0154	0.0127	0.0141
	0.10	0.0728	0.0763	0.0746	0.0183	0.0218	0.0201
	0.15	0.1167	0.1198	0.1183	0.0205	0.0340	0.0273
	0.20	0.1667	0.1694	0.1681	0.0308	0.0603	0.0456
0.0556	0.05	0.0396	0.0440	0.0418	0.0179	0.0140	0.0160
	0.10	0.0736	0.0779	0.0758	0.0213	0.0232	0.0223
	0.15	0.1125	0.1199	0.1162	0.0221	0.0364	0.0293
	0.20	0.1651	0.1705	0.1678	0.0339	0.0620	0.0480
0.0834	0.05	0.0415	0.0477	0.0446	0.0201	0.0159	0.0180
	0.10	0.0725	0.0793	0.0759	0.0241	0.0254	0.0248
	0.15	0.1118	0.1203	0.1161	0.0249	0.0408	0.0329
	0.20	0.1628	0.1707	0.1668	0.0369	0.0655	0.0512
0.1112	0.05	0.0431	0.0521	0.0476	0.0218	0.0179	0.0199
	0.10	0.0705	0.0828	0.0767	0.0263	0.0283	0.0273
	0.15	0.1118	0.1221	0.1170	0.0273	0.0459	0.0366
	0.20	0.1609	0.1719	0.1664	0.0404	0.0705	0.0555
0.1390	0.05	0.0460	0.0556	0.0508	0.0243	0.0199	0.0221
	0.10	0.0734	0.0871	0.0803	0.0282	0.0315	0.0299
	0.15	0.1134	0.1250	0.1192	0.0297	0.0523	0.0410
	0.20	0.1598	0.1747	0.1673	0.0439	0.0764	0.0602

표 2.9.49 화강풍화토 지반의 토압별 간극수압 감소비율

구 분	토압 (MPa)	0.0278	0.0556	0.0834	0.1112	0.1390
	심도 (m)	2.8	5.6	8.4	11.2	14.0
배수/비배수		28.2%	30.3%	33.0%	35.5%	37.8%

표 2.9.50 비배수조건에서 화강풍화토 지반의 토압 및 수압

심 도 (m)	토 압 (kPa)	수 압 (kPa)	합 계 (kPa)
0	0.00	0.00	0.00
5	48.60	50.00	98.60
10	97.20	100.00	197.20
15	145.80	150.00	295.80
20	194.40	200.00	394.40
25	243.00	250.00	493.00
30	291.60	300.00	591.60
35	340.20	350.00	690.20
40	388.80	400.00	788.80
45	437.40	450.00	887.40
50	486.00	500.00	986.00

표 2.9.51 배수조건에서 화강풍화토 지반의 토압 및 수압

심 도 (m)	토 압 (kPa)	수 압 (kPa)	합 계 (kPa)
0	0.00	0.00	0.00
5	48.60	33.50	82.10
10	97.20	67.00	164.20
15	145.80	100.50	246.30
20	194.40	134.00	328.40
25	243.00	167.50	410.50
30	291.60	201.00	492.60
35	340.20	234.50	574.70
40	388.80	268.00	656.80
45	437.40	301.50	738.90
50	486.00	335.00	821.00

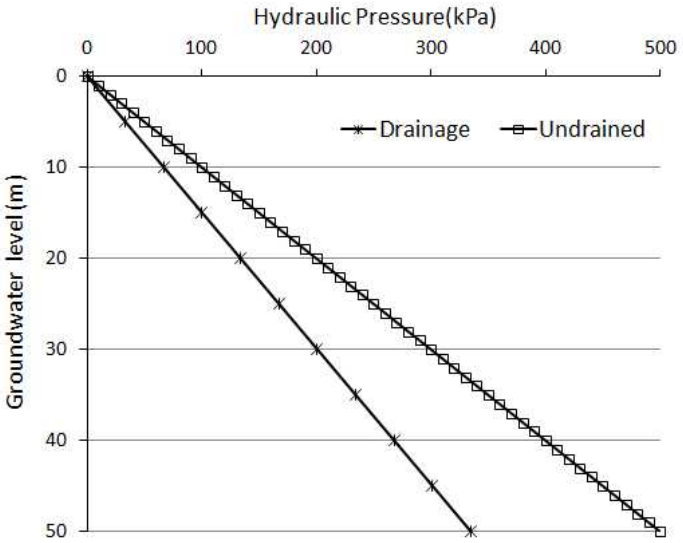


그림 2.9.62 비배수 및 배수조건에서의 수압 변화(화강풍화토 지반)

(3) 지반종류에 따른 수압감소 검토

토조 내의 실험사의 종류에 따른 배수 및 비배수 조건에서의 수압을 검토하였고, 심도(H)는 대심도와 쉴드터널의 직경을 고려하여 50.0 m로 적용하였다. 대심도는 토지소유자의 통상적 이용행위가 예상되지 않으며, 지하시설물 설치로 인해 일반적인 토지이용에 지장이 없는 한계심도를 뜻하며, 서울시의 경우 조례에서 고층시가지의 대심도를 40.0 m로 규정하고 있다. 실험사의 지반을 표준사 지반으로 하여 모형실험을 수행한 결과 심도 50.0 m에서 비배수조건 대비 배수조건의 경우 약 20.8%의 수압감소가 있는 것으로 나타났다. 그리고 실험사의 지반을 화강풍화토 지반으로 모형실험을 수행한 결과는 심도 50.0 m에서 비배수조건 대비 배수조건의 경우 약 33.0%의 수압 감소가 있는 것으로 나타났다. 이것은 터널 내부로 지하수가 유출되는 경우, 투수계수가 작은 지반에서는 터널로 빠져나간 지하수의 양만큼 다시 지하수가 채워지지 않아 수압이 감소되어 발생하는 것으로 판단된다.

소결론

일반적으로 쉴드터널 라이닝 설계 시 비배수조건을 적용하고 있지만 시공현장에서는 쉴드터널 내부로 지하수가 유입되고 유입된 지하수는 배수시설을 통해 배수되고 있어서 쉴드터널 라이닝 설계 시 배수조건을 고려할 필요가 있으며, 배수조건이 고려된다면 라이닝에 작용하는 하중이 감소되므로 세그먼트 라이닝 두께를 감소할 수 있다. 기존 국내·외 터널모형 실험장비의 경우, 대부분 터널의 변형이나 라이닝의 응력을 측정하기 위해 지반모사 방법 및 실험체의 형상을 변화시키며 실험 목적에 따라 제작하여 사용하고 있다.

본 연구에서는 다양한 지반조건에서 배수조건에 따른 쉴드터널 라이닝의 작용 응력을 분석하기 위하여 터널모형 실험장비를 개발하였다. 또한 개발된 터널모형 실험장비를 이용하여 지중응력 및 배수조건을 자유롭게 변화시키며 다양한 현장조건에서 쉴드터널 라이닝에 작용 응력 및 내부 응력을 분석하였다.

(1) 개발된 터널실험 실험장비는 토조, 유압장치, 외관, 내관 및 계측장치로 구성되었다. 토조는 지중을 모사하기 위해 실험사가 채워지는 부분이며, 유압장치는 시료에 가해지는 하중을 측정하고 조절하기 위한 장치이며, 현장에서 쉴드터널 시공 시 굴착면 주위의 지반이 이완되는 현상을 모사하기 위한 외관, 배수 및 비배수 조건의 쉴드터널 라이닝을 모사하기 위한 내관, 내관에 작용하는 토압을 측정하기 위한 토압계, 내관에 작용하는 간극수압을 측정하기 위한 간극수압계 및 내관의 거동을 측정하기 위한 변형률계로 구성되었다.

(2) 터널모형 실험은 시험사(표준사 또는 화강풍화토)를 변화시키며 4종류의 수압하에서 5종류의 토압을 가하며 수행되었다. 수압은 지하수위 5.0 m, 10.0 m, 15.0 m, 20.0 m를 모사하였고, 토압은 2.8 m, 5.6 m, 8.4 m, 11.2 m, 14.0 m를 모사하였다. 또한 각 실험단계는 60 sec간 유지하며 토압, 간극수압, 변형률 및 내관으로 유입되는 유입량을 측정하였다.

(3) 터널모형실험에서 지반을 조성하기 위하여 표준사와 강원도 강릉지역에서 채취한 화강풍화토를 이용하였다. 또한 시료는 비중실험(KS F 2308), 입도실험(KS F 2302), 다짐실험(KS F 2312), 함수비실험(KS F 2306), 삼축투수실험(KS F 2322)의 표준 실험방법에 근거하여 실험을 실시하였으며, 결과분석을 통해 토질역학적 특성을 파악하였다. 그 결과, 표준사는 밀도 15.70 kN/㎥, 비중 2.63, 투수계수 2.71×10^{-4}

m/sec, 균등계수 1.46, 입도가 불량하고, 통일분류법상 SP에 해당하였다. 화강풍화토는 밀도 18.80 kN/㎥, 비중 2.68, 투수계수 5.64 × 10^{-5} m/sec, 균등계수 6.56, 입도분포가 좋고, 통일분류법상 SW에 해당하였으며, No. 200번체 통과량이 1.26%로 나타났다.

(4) 토압계에서는 토조내의 토압에 의한 시험사의 유효응력과 수압에 의한 간극수압이 함께 측정되어 전응력을 측정하는 것으로 나타났다. 전응력 변화를 측정하기 위하여 각 단계에 따라 수압을 0.05 ㎫, 0.10 ㎫, 0.15 ㎫ 및 0.20 ㎫로 가압하여 일정하게 유지시킨 상태에서, 상부 재하응력을 1분에 0.0278 ㎫씩 단계적으로 증가시켜 0.1390 ㎫까지 증가시키면서 토조 벽면에 설치된 토압계에서 측정된 응력의 변화량을 측정하였다.

표준사 및 화강풍화토를 이용한 경우 모두에서 토압계 전면부의 다짐상태에 따라 계측 값이 다소 상이하였으나 재하응력이 증가함에 따라 전응력도 증가하였다. 또한 전응력의 증가율은 화강풍화토보다 표준사에서 더 크게 나타났다. 이때 토압계에서 측정되는 압력이 유효응력과 수압의 합이고, 이론적으로는 배수조건에서 수압이 감소하는 만큼 지반의 유효응력이 증가하기 때문에 비배수조건과 배수조건에서의 압력증가량이 같아야 하지만, 측정된 압력은 비배수조건에서 측정된 압력증가량이 배수조건보다 더 크게 나타나 실제로는 배수조건에서 수압이 감소한 만큼 유효응력이 증가하지 않은 것으로 나타났다.

(5) 각 실험단계에서 토압계에 측정된 전응력은 가해진 수압과 재하응력의 합보다 작게 나타났다. 측정된 응력이 상부에서 가한 응력보다 작게 나타난 이유는 토조 벽면 마찰과 입자간의 아칭으로 인한 영향이 일부 있었던 것으로 판단되며, 가장 중요한 이유는 토압계가 토조 벽면에 설치되어 있어 횡방향 응력을 측정하였기 때문으로 판단된다. 일반적으로 지반에서 정지토압 상태에서의 횡방향 토압은 마찰각에 좌우되며, Jacky의 공식에 따르면 마찰각이 증가할수록 토압계수는 감소하여 마찰각이 30° 이상인 경우 토압계수는 0.5 이하로 감소한다.

(6) 배수 및 비배수조건 내관 하부에 부착된 간극수압계를 통하여 쉴드터널 라이닝의 간극수압 변화를 검토하였다. 표준사의 경우, 동일한 수압 구간에서 재하응력이 증가함에 따라 비배수조건에서는 거의 일정하게 유지되었고 배수조건에서는 대체적으로 감소하였다. 간극수압 증가분을 재하응력 증가분으로 나눈 간극수압증가율을 비교하면, 비배수조건에서는 뚜렷한 양상이 나타나지 않았으나 배수조건에서는 대체적으

로 감소하는 것으로 나타났다. 화강풍화토의 경우, 동일한 수압 구간에서 재하응력이 증가함에 따라 비배수조건 1차에서는 다소 감소하는 것으로 나타났으나, 비배수조건 2차와 배수조건에서 다소 증가하는 것으로 나타났다. 표준사에서 간극수압 변화양상이 화강풍화토 보다 잘 나타났다. 이때, 완전배수조건에서는 간극수압이 0으로 감소해야 하지만 이 실험에서의 배수조건은 완전배수가 아니고 적은 양만 유출되도록 부분배수조건을 적용하였기 때문에 간극수압의 감소량이 적었고, 완전히 0으로 감소하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

(7) 배수 및 비배수조건 내관의 상부 외측부 및 중앙부에서 변형률을 측정하였다. 4개의 변형률계 중에서 외측부 2개의 변형률계는 원통형 모형 터널의 둘레방향으로 설치하여 내관의 원주방향 변형을 반영하도록 계획하였고, 내측부 2개의 변형률계는 원통형 모형터널의 길이방향으로 설치하여 터널의 처짐과 모멘트의 영향을 반영하도록 계획하였다. 최대 변형률을 비교한 결과, 표준사 및 화강풍화토를 이용한 경우 모두에서 비배수조건일 때 배수조건일 때보다 크게 나타났으며, 외측부가 중앙부보다 크게 나타났다. 하지만 수압과 재하응력변화에 따른 터널 작용응력과 모멘트 등의 변화를 분석하기 위해서는 이론적, 수치적 분석과 병행하여 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

(8) 배수조건의 내관에서 재하응력에 따른 유출량의 변화를 측정하였다. 배수조건 내관의 배수구멍은 육각민머리볼트를 이용하여 개폐하면서 유출량을 조절하였다. 배수구멍은 표준사일 때에는 2개, 6개 및 8개로 조절하였고, 화강풍화토일 때에는 유출량이 적어 8개로 조절하여 실험을 수행하였다. 표준사의 경우에는 동일한 토압조건에서 수압이 증가할수록 유출량이 증가하였고, 동일한 수압조건에서 토압이 증가할수록 유출량이 증가하였다. 유출량이 증가할수록 전응력은 대체로 감소하였고, 간극수압은 증가하였다. 또한 유출량별 전응력 및 간극수압 변화를 검토하면, 유출량이 증가할수록 평균 전응력 증가율은 0.226에서 0.207, 0.182로 점증적으로 감소하는 것으로 나타났고, 평균 간극수압은 -0.053에서 -0.014, -0.012로 점증적으로 증가하는 것으로 나타났다. 화강풍화토의 경우에는 동일한 토압조건에서 수압이 증가할수록 수압이 증가할수록 유출량은 감소하였고, 동일한 수압조건에서 토압이 증가할수록 유출량은 증가하였다.

(9) 측정된 전응력과 간극수압을 이용하여 유효응력의 변화를 계산하였다. 재하응력 증가에 따른 전응력의 증가량은 비배수조건 실험에서 크게 나타났고, 유효응력 증

가량은 배수조건 실험에서 크게 나타났다. 또한 표준사 및 화강풍화토를 이용한 경우 모두에서 수압이 증가할수록 배수조건에서의 유효응력이 비배수조건보다 크게 나타났다. 결국 터널에 작용하는 토압과 수압의 합인 전응력은 배수조건보다 비배수 조건에서 더 크며, 이러한 결과를 토대로 토압과 수압을 고려하는 터널 설계에서 터널의 배수조건을 고려하면 터널 작용 하중을 감소시킬 수 있으므로 보다 경제적인 터널 설계가 가능할 것으로 판단된다. 다만 본 실험은 제한된 토질 및 하중조건에서 실시한 모형실험이므로, 추후 실제 설계에 적용하기 위해서는 다양한 조건을 고려한 심도 있는 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

제 10 절 수치해석을 통한 쉴드터널 구조안정성 검토

쉴드터널에서 세그먼트 라이닝은 지반하중과 수압하중 등을 지지하는 일반 지하구조물 기능과 쉴드기 추진을 위한 반력대 기능을 하며, 공장에서 제작되어 쉴드기 내에서 설치되는 과정들 중에도 다양한 하중조건에 노출되므로 이에 대해서 구조안정성이 검토되어야 한다. 또한 라이닝 자체의 구조설계 시 구조해석 위치는 지반조건이 불량한 곳을 선정하되, 토피가 가장 낮은 구간, 수압이 가장 높은 구간, 지반자립성이 낮은 구간, 상재하중이 큰 구간 등과 같이 대표적 특징이 있는 구간은 반드시 포함하여야 한다.[1)]

본 연구에서는 지중에 건설된 배수조건이 적용된 쉴드터널을 모사하고 터널 라이닝의 단면력, 작용응력, 지반침하 및 터널내 지하수 유출량 등을 확인하기 위하여 범용프로그램인 MIDAS GTS를 이용해 실제 현장조건을 고려한 유한요소해석을 수행하였다. 이를 통해 지하수위, 터널심도, 지반종류 및 뒤채움(PS 볼) 변화에 따라 터널 라이닝에 미치는 영향 등에 대하여 비교·검토하였다.

1. 수치해석 개요

가. 현장조건 및 수치해석 재료 특성

(1) 현장조건

해석에 적용된 현장조건 및 구성된 유한요소망은 그림 2.10.1 및 그림 2.10.2와 같다. 쉴드터널 상부의 지반은 매립토와 풍화토이며, 수치해석 프로그램의 자동 Mesh 기능을 이용하여 길이 200.0 m 및 높이 100.0 m로 모델링하였다. 쉴드터널 라이닝은 Beam 요소의 탄성(Elastic)재료를 적용하였고, 지반은 Mohr Coulomb 재료를 적용하였다. 또한 쉴드터널의 외경은 7.22 m이며, 라이닝의 두께는 0.30 m이다. 쉴드터널을 모사하고 다양한 영향인자에 대한 분석을 통하여 터널 라이닝 작용응력 및 유출량 등을 확인하기 위하여 상용프로그램인 MIDAS GTS를 사용하였다(표 2.10.1 참조).

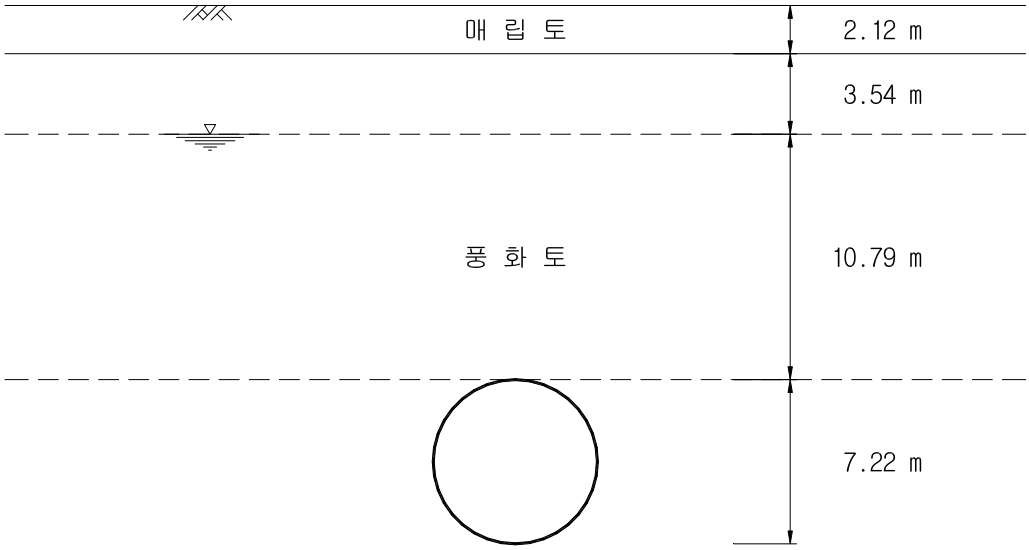


그림 2.10.1 현장지반조건

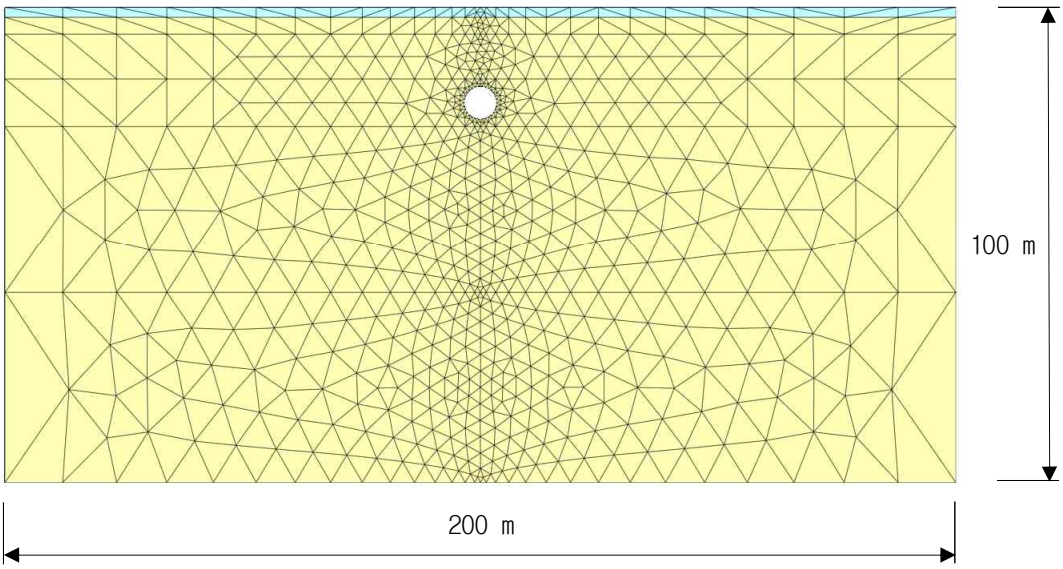


그림 2.10.2 유한요소망

표 2.10.1 적용프로그램

프로그램명	개 요	비 고
MIDAS GTS	- 한국 MIDAS IT 개발 - 2/3차원 범용구조해석 프로그램 - 침투해석 및 응력-침투 연계해석 가능	침투량 산정 라이닝 응력 산정

(2) 쉴드터널 라이닝 및 지반 물성치

매립토 및 풍화토 지반의 투수계수는 1.0×10^{-6} m/sec로 동일하게 적용하였고 등방적인 투수성을 갖는 것으로 가정하였으며, 하중은 지반 하중, 수압 하중 및 세그먼트 라이닝의 자중에 의한 하중을 고려하였다. 수치해석을 위한 라이닝 및 지반의 물성치는 서울지하철 7호선 연장(온수～부평구청) 703공구 건설공사 터널해석보고서[2]를 참고하여 적용하였으며, 그 값은 다음 표 2.10.2 및 표 2.10.3과 같다.

표 2.10.2 쉴드터널 라이닝 물성치

구 분	단 위 중 량	탄 성 계 수	강도(fck)
세그먼트 라이닝	25 kN/㎥	3.2×10^4 MPa	42 MPa
	허용압축응력(f_{ca})	허용인장응력(f_{ta})	허용전단응력(V_a)
	16.8 MPa	0.84 MPa	0.52 MPa

표 2.10.3 지반 물성치

구 분	단위중량	포아송비(υ)	변형계수	내부마찰각	점착력
매립토	18 kN/㎥	0.35	12 MPa	30 °	-
풍화토	19 kN/㎥	0.30	40 MPa	32 °	0.02 MPa

나. 수치해석 결과

(1) 비배수조건

지표면에서 터널직경 D의 2배인 지중에 시공된 쉴드터널을 현장조건(2D조건)으로 적용하여 모델링하였다(그림 2.10.3 참조). 모델링의 좌측부와 우측부는 수평방향에 대하여 구속조건을 적용하였고, 하단부는 수평방향과 수직방향에 대하여 구속조건을 적용하였다. 비배수조건의 쉴드터널에서 매립토 및 풍화토 지반의 투수계수를 1.0×10^{-6} m/sec로 적용하였고, 쉴드터널 라이닝의 두께만큼 2차원 평면요소 모델링하여 투수계수를 1.0×10^{-9} m/sec로 적용하였다.

비배수조건에서 최대 전단력은 쉴드터널 라이닝 상부 및 하부 측면에서 발생하였고, 최대 모멘트는 상부 및 측면부 중앙에서 발생하였다. 쉴드터널 라이닝의 상부 및

하부 측면에서 압축 전단력 146.87 kN과 인장 전단력 152.59 kN이 발생하였다(그림 2.3.3 참조). 또한 쉴드터널 라이닝 상부 및 측면부 중앙에서 인장 모멘트 259.82 kN·m와 압축 모멘트 225.86 kN·m가 발생하였다(그림 2.10.4 참조). 쉴드터널 내부로 유입되는 유출량은 0.00 ㎥/m/sec 로 나타났다(그림 2.10.5 참조).

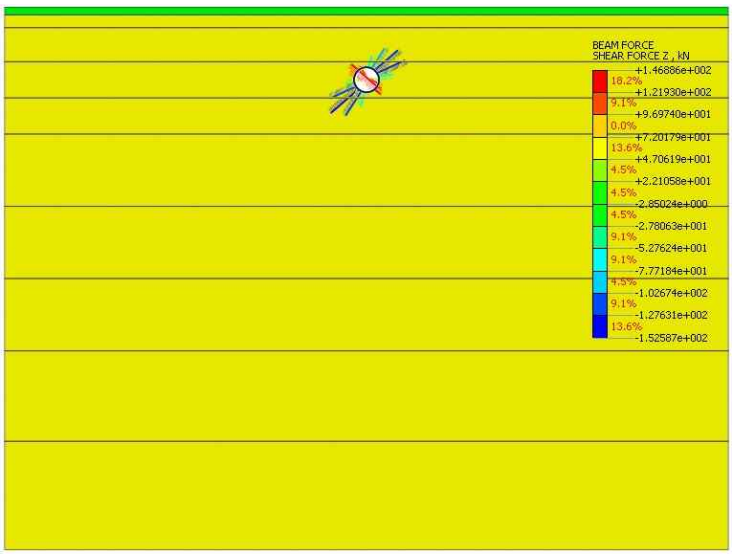


그림 2.10.3 비배수조건의 전단력(현장조건)

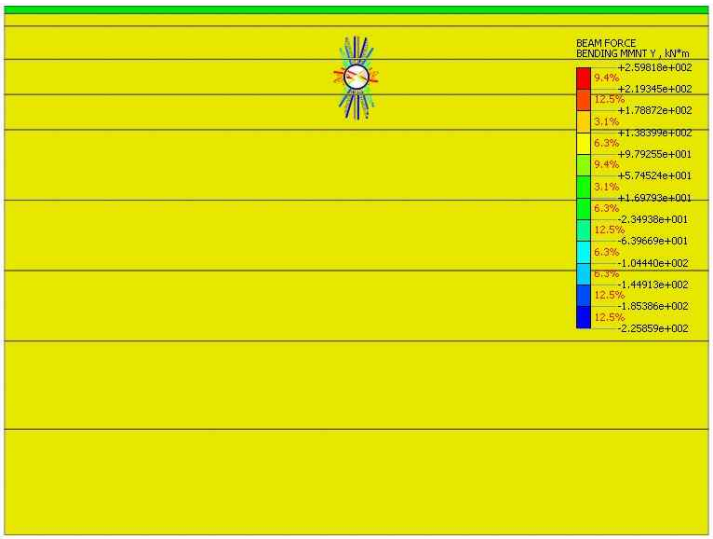


그림 2.10.4 비배수조건의 모멘트(현장조건)

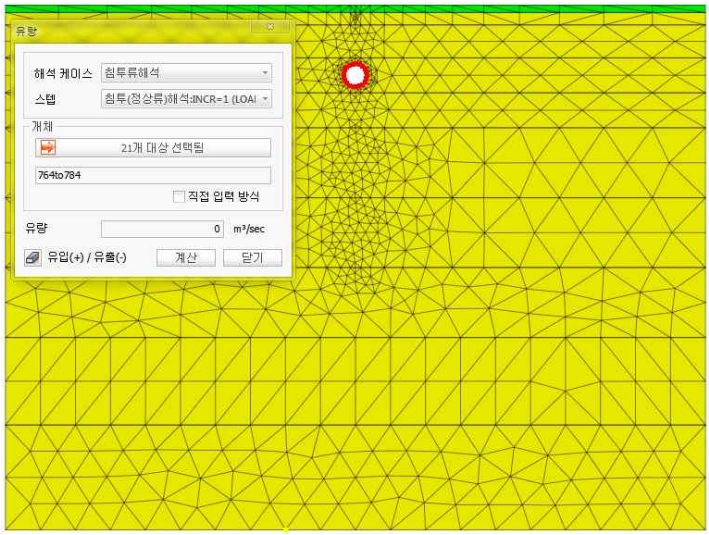


그림 2.10.5 비배수조건의 유출량(현장조건)

(2) 배수조건

배수조건에서는 지반 및 라이닝을 모델링한 평면요소의 투수계수를 1.0×10^{-6} m/sec로 동일하게 적용하여 검토하였다. 배수조건일 때 최대 전단력은 쉴드터널 라이닝 상부 및 하부 측면에서 발생하였고, 최대 모멘트는 상부 및 측면부 중앙에서 발생하였다. 쉴드터널 라이닝의 상부 및 하부 측면에서 압축 전단력 108.14 kN과 인장 전단력 111.79 kN이 발생하였다(그림 2.10.6 참조).

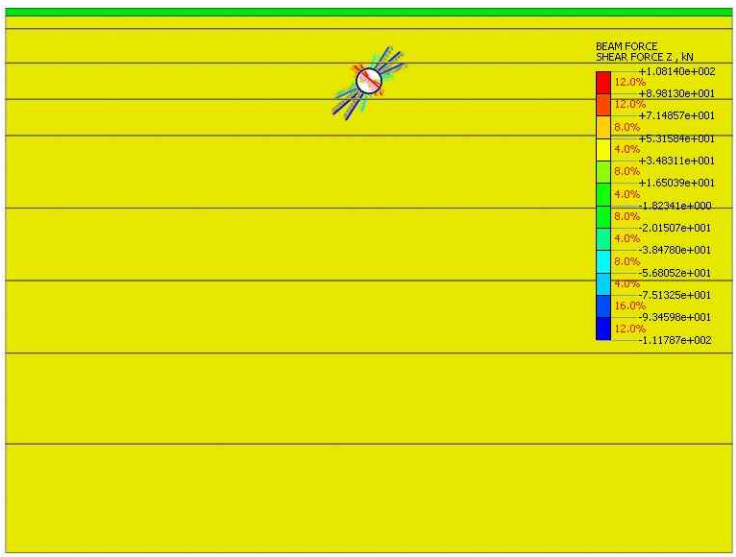


그림 2.10.6 배수조건의 전단력(현장조건)

또한 쉴드터널 라이닝 상부 및 측면부 중앙에서 인장 모멘트 184.11 kN·m와 압축 모멘트 179.87 kN·m가 발생하였다(그림 2.10.7 참조). 쉴드터널 내부로 유입되는 유출량은 1.9678 × 10^{-5} ㎥/m/sec 로 나타났다(그림 2.10.8 참조).

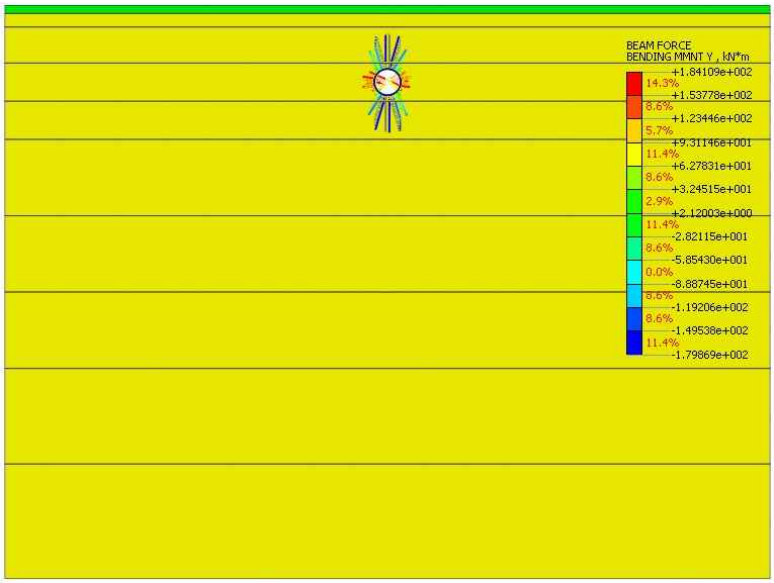


그림 2.10.7 배수조건의 모멘트(현장조건)

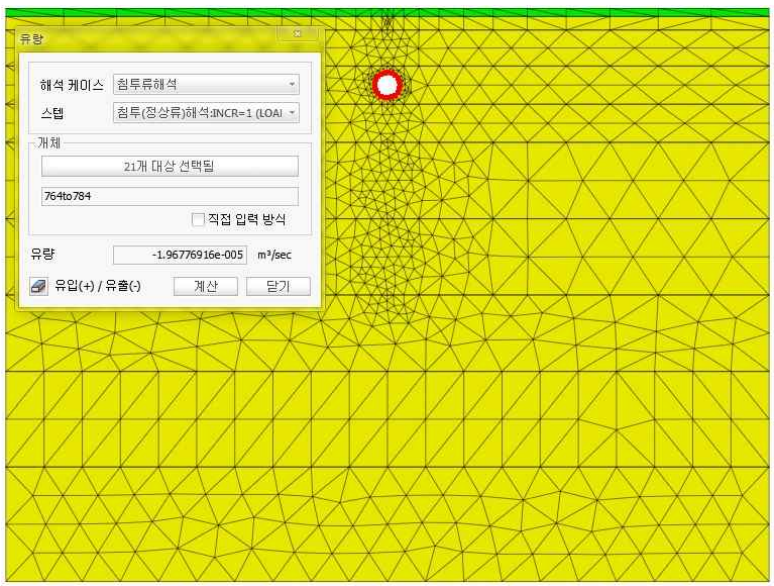


그림 2.10.8 배수조건의 유출량(현장조건)

다. 검토결과

쉴드터널이 시공되는 현장조건을 고려하여 배수조건 고려에 따른 단면력 변화를 검토한 결과는 다음과 같다.

(1) 최대 전단력을 검토한 결과, 비배수조건에서 152.59 kN로 나타났고 배수조건에서 111.79 kN로 나타났다. 그러므로 현장조건(2D조건)에서 배수를 고려하면 전단력이 약 26.7% 감소하는 것으로 나타났다.

(2) 최대 모멘트를 검토한 결과, 비배수조건에서 259.82 kN·m로 나타났고 배수조건에서 184.11 kN·m로 나타났다. 그러므로 현장조건에서 배수를 고려하면 모멘트가 약 29.1% 감소하는 것으로 나타났다.

2. 지하수위 변화 해석

지하수위의 변화를 고려하기 위하여 현장조건에서 우기시, 평상시, 시공중 및 건기시로 구분하여 지하수 침투 및 응력연계해석을 수행하였다. 우기시 지하수위는 지표면 상단으로 적용하였고, 평상시 지하수위는 현장조건인 지표면 아래 5.66 m로 적용하였으며, 시공중 및 건기시 지하수위는 터널 하단으로 적용하였다. 시간경과를 고려하여 지하수위 변화 전·후를 검토하였다.

가. 우기시

우기시 세그먼트 라이닝에 작용하는 축력의 경우 지하수위 변화에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 모멘트의 경우 라이닝 상부에서는 -154.2 kN・m에서 -154.8 kN・m로 감소하였고, 하부에서는 -178.2 kN・m에서 -177.8 kN・m로 증가하였다. 세그먼트 라이닝 중앙부에서는 188.90 kN・m로 지하수위 변화와 관계없이 일정하였다. 지하수위 변화에 따른 축력 및 모멘트는 그림 2.10.9 ~ 그림 2.10.12 및 표 2.10.4와 같다.

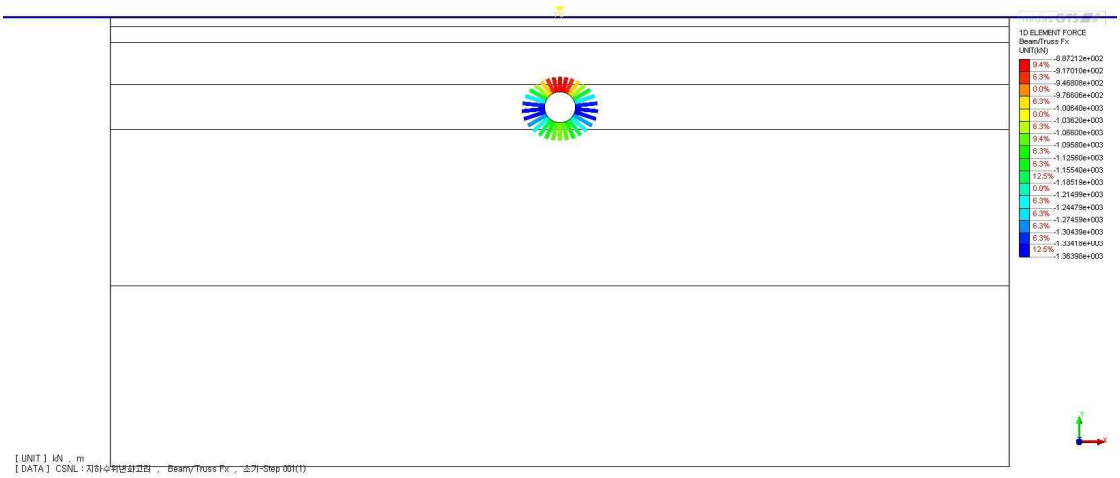


그림 2.10.9 지하수위 변화 전 축력(우기시)

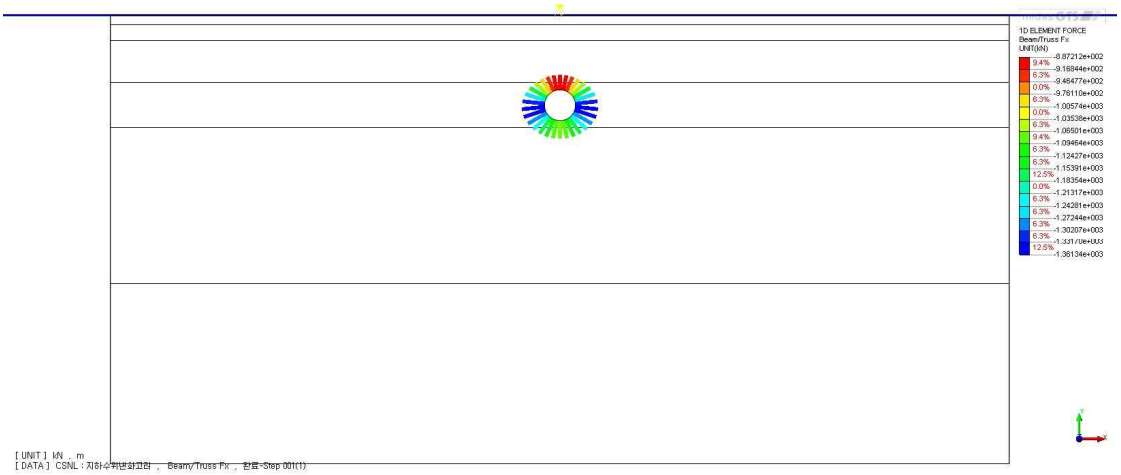


그림 2.10.10 지하수위 변화 후 축력(우기시)

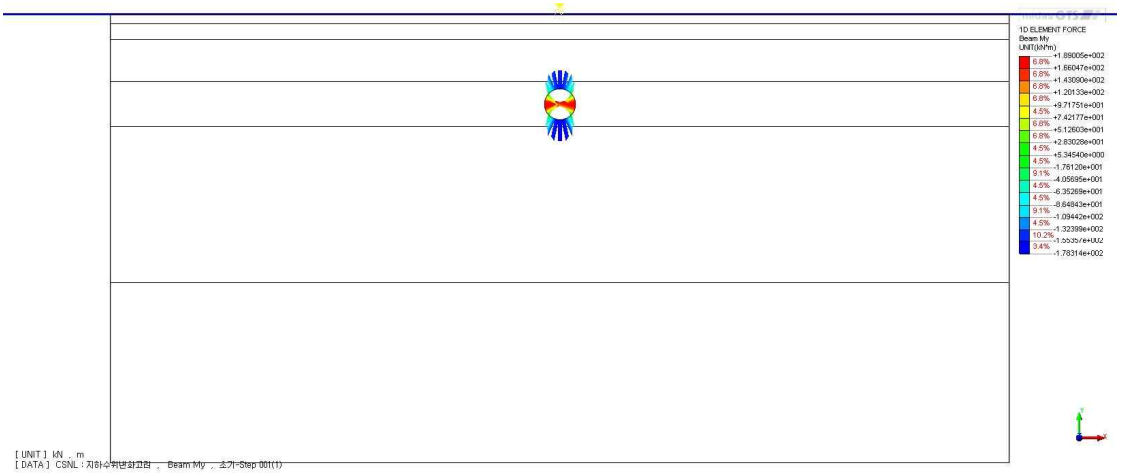


그림 2.10.11 지하수위 변화 전 모멘트(우기시)

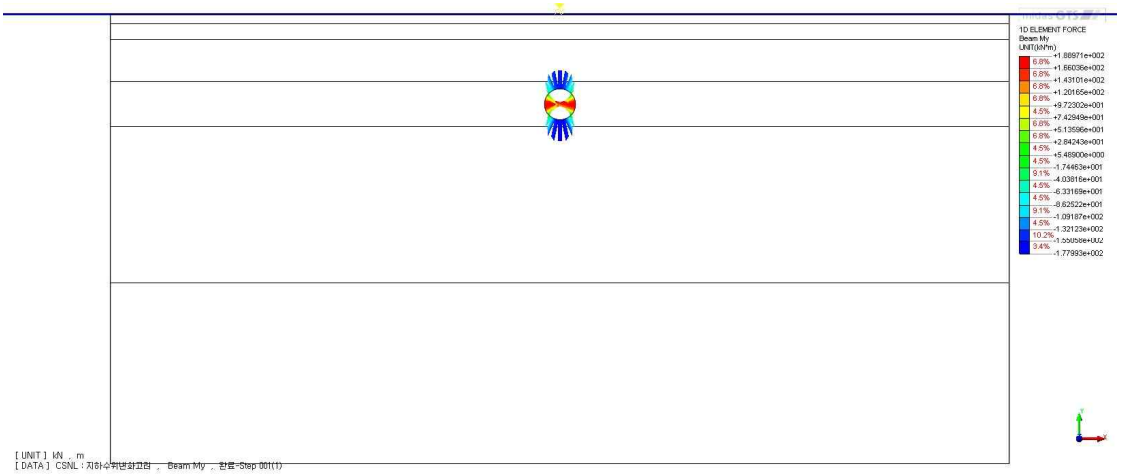


그림 2.10.12 지하수위 변화 후 모멘트(우기시)

표 2.10.4 우기시 세그먼트 라이닝에 작용하는 응력

구 분			축 력(kN)	모 멘 트(kN·m)
우기시	지하수위 변화 전	상 부	- 887.2	- 154.2
		중앙부	- 1,350.0	188.9
		하 부	- 1,070.0	- 178.2
	지하수위 변화 후	상 부	- 887.2	- 154.8
		중앙부	- 1,350.0	188.9
		하 부	- 1,070.0	- 177.8

나. 평상시

평상시 세그먼트 라이닝에 작용하는 축력의 경우 지하수위 변화에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 모멘트의 경우 라이닝 상부에서는 -209.2 kN·m에서 -209.5 kN·m로 감소하였고, 하부에서는 -233.2 kN·m에서 -232.8 kN·m로 증가하였다. 세그먼트 라이닝 중앙부에서는 251.1 kN·m로 지하수위 변화와 관계없이 일정하였다. 지하수위 변화에 따른 축력 및 모멘트는 그림 2.10.13 ~ 그림 2.10.16 및 표 2.10.5와 같다.

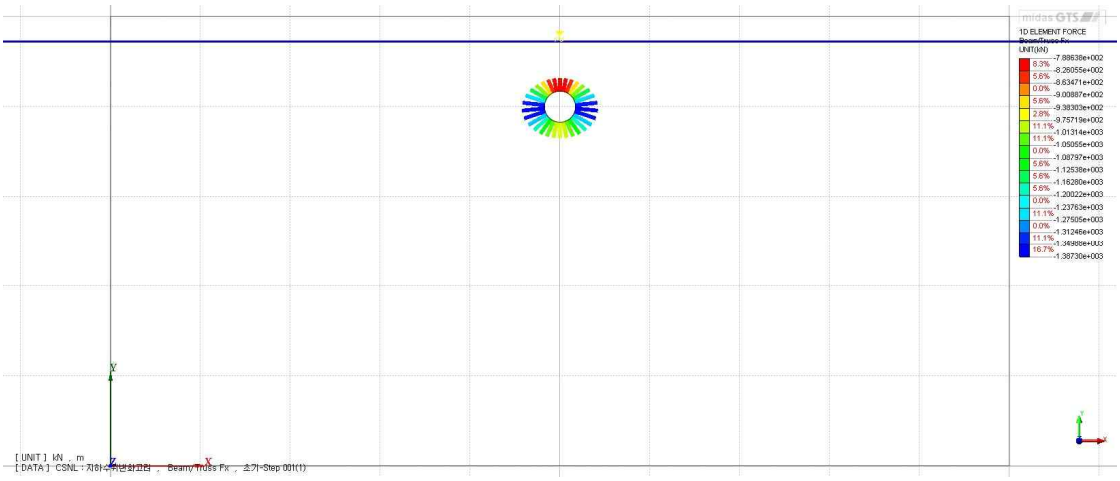


그림 2.10.13 지하수위 변화 전 축력(평상시)

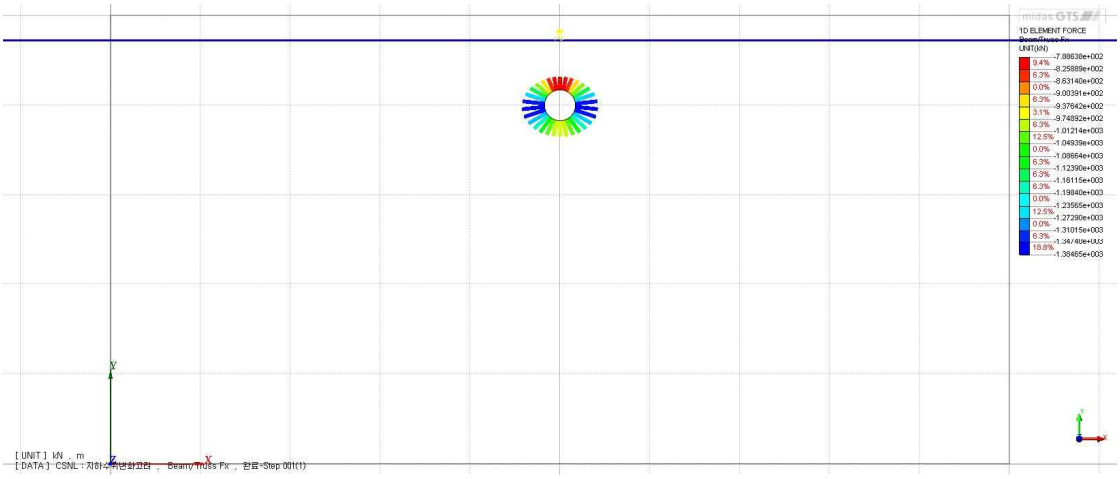


그림 2.10.14 지하수위 변화 후 축력(평상시)

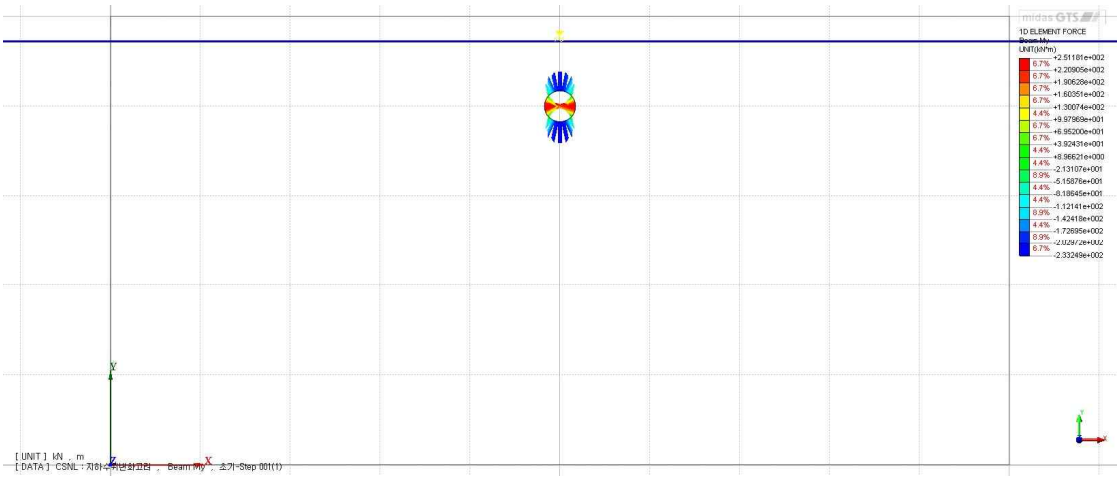


그림 2.10.15 지하수위 변화 전 모멘트(평상시)

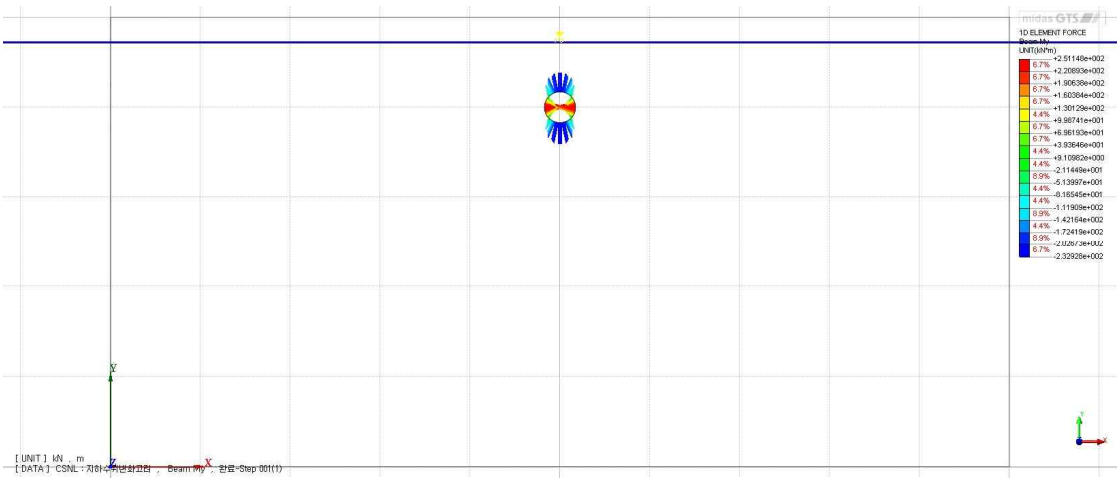


그림 2.10.16 지하수위 변화 후 모멘트(평상시)

표 2.10.5 평상시 세그먼트 라이닝에 작용하는 응력

구 분			축 력(kN)	모 멘 트(kN・m)
평상시	지하수위 변화 전	상 부	- 788.6	- 209.2
		중앙부	- 1,380.0	251.1
		하 부	- 974.3	- 233.2
	지하수위 변화 후	상 부	- 788.6	- 209.5
		중앙부	- 1,380.0	251.1
		하 부	- 974.3	- 232.8

다. 시공중 및 건기시

시공중 및 건기시 지하수위 변화에 따른 축력 및 모멘트의 변화는 표 2.10.6과 같다. 세그먼트 라이닝에 작용하는 축력의 경우 지하수위 변화에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 모멘트의 경우 라이닝 상부에서는 -338.7 kN・m에서 -339.0 kN・m로 감소하였고, 하부에서는 -380.7 kN・m에서 -380.4 kN・m로 증가하였다. 세그먼트 라이닝 중앙부에서는 407.0 kN・m로 지하수위 변화와 관계없이 일정하였다. 지하수위 변화에 따른 축력 및 모멘트는 그림 2.10.17 ~ 그림 2.10.20과 같다.

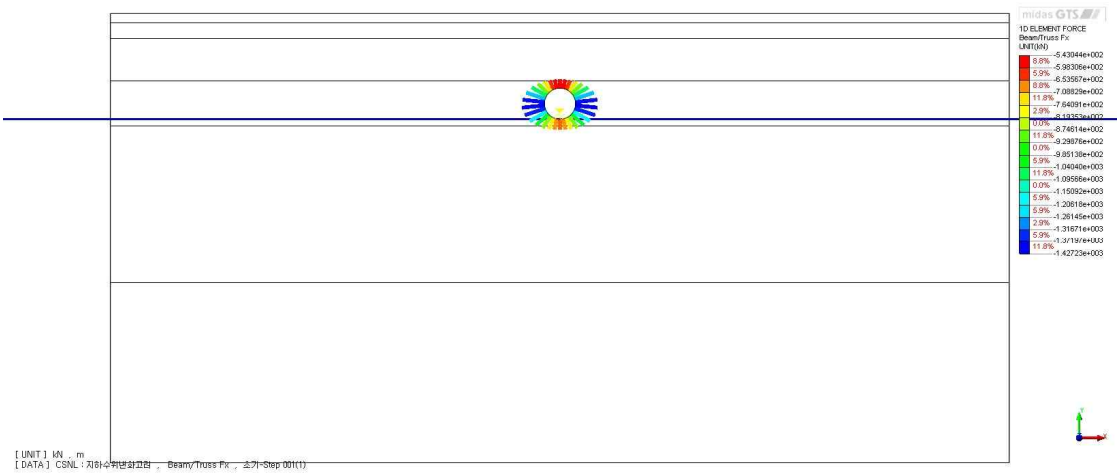


그림 2.10.17 지하수위 변화 전 축력(시공중 및 건기시)

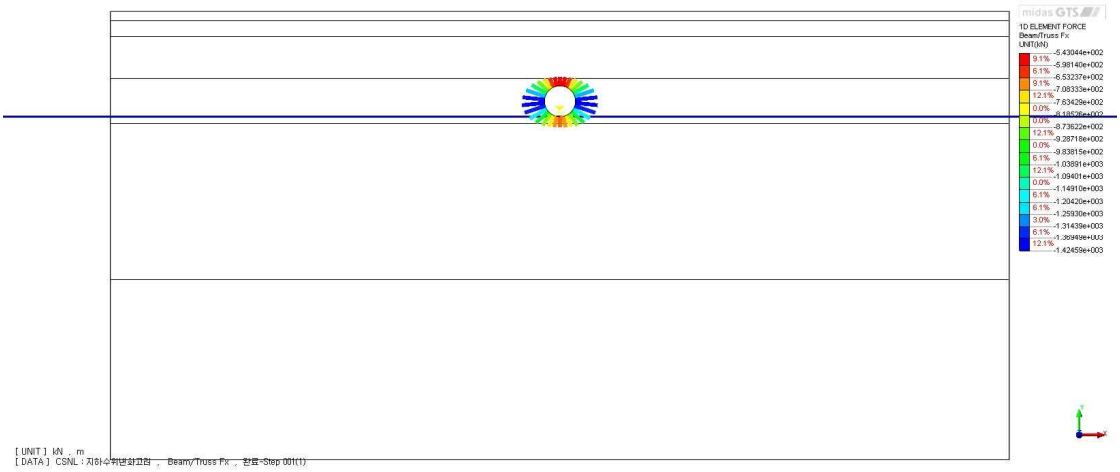


그림 2.10.18 지하수위 변화 후 축력(시공중 및 건기시)

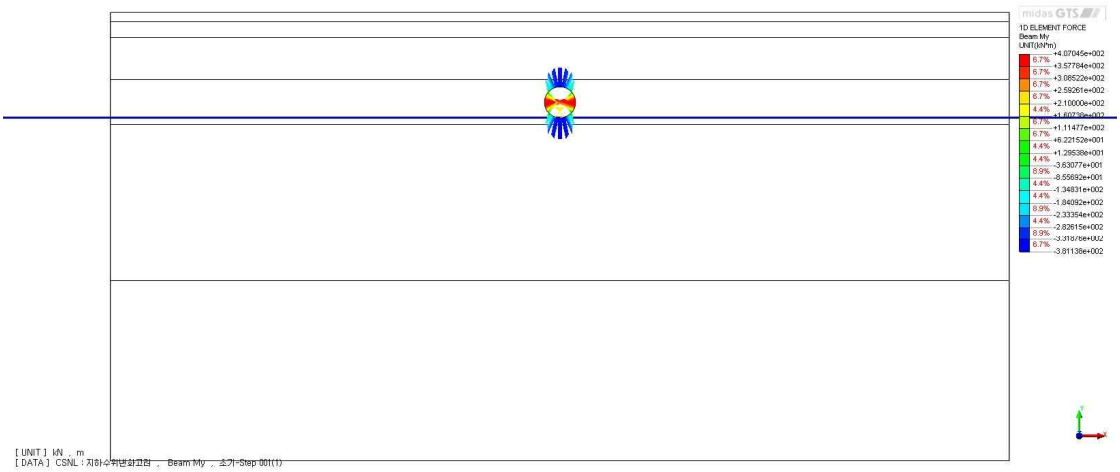


그림 2.10.19 지하수위 변화 전 모멘트(시공중 및 건기시)

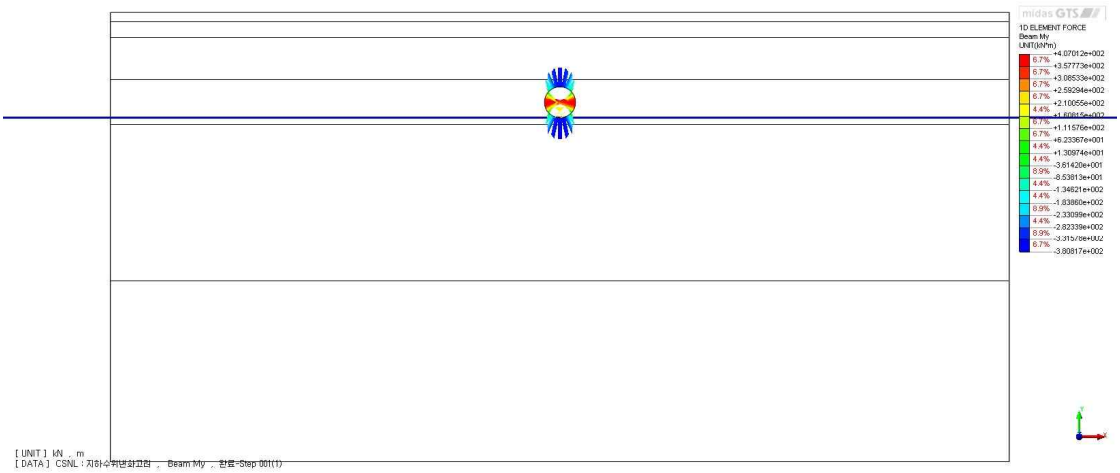


그림 2.10.20 지하수위 변화 후 모멘트(시공중 및 건기시)

표 2.10.6 시공중 및 건기시 세그먼트 라이닝에 작용하는 응력

구 분			축 력(kN)	모 멘 트(kN·m)
시공중 및 건기시	지하수위 변화 전	상 부	- 543.0	- 338.7
		중앙부	- 1,420.0	407.0
		하 부	- 658.6	- 380.7
	지하수위 변화 후	상 부	- 543.0	- 339.0
		중앙부	- 1,420.0	407.0
		하 부	- 658.6	- 380.4

라. 검토결과

지하수위 변화에 따른 쉴드터널 라이닝에 작용하는 응력을 검토한 결과는 다음과 같다.

(1) 지하수위 감소에 따른 터널 라이닝의 축력의 변화는 발생하지 않았다.

(2) 지하수위 감소에 따라 터널 라이닝의 상부의 모멘트는 감소하였고 하부의 모멘트는 증가하였으며 중앙부의 모멘트는 변화하지 않았다.

(3) 지하수위 높이가 우기시 → 평상시 → 시공중 및 건기시로 낮아짐에 따른 축력 및 모멘트의 변화를 검토하였다. 터널 라이닝에 작용하는 축력의 경우, 상부와 하부에서는 증가하였고 중앙부에서는 감소하는 것으로 나타났다. 터널 라이닝에 작용하는 모멘트의 경우, 상부와 하부에서는 감소하였고 중앙부에서는 증가하는 것으로 나타났다.

3. 터널심도 해석

해석에 적용된 쉴드터널은 지표면에서 터널직경 D의 2배가량 하부에 위치하고 있어 현장조건을 2D조건으로 하였고, 수치해석 모델링의 좌측부, 우측부 및 하단부의 절점들에 구속조건을 적용하여 쉴드터널 라이닝에 작용하는 축력 및 모멘트를 앞 절에서 검토하였다. 터널심도에 따른 쉴드터널의 안정성을 평가하기 위하여 터널의 심도를 지표면에서 터널직경 D의 4배인 4D조건과 터널직경 D의 6배인 6D조건으로 검토하였다. 또한 배수조건의 영향을 고려하기 위하여 쉴드터널의 두께를 2차원 평면요소로 모델링하여 투수계수를 변화시키면서 배수 및 비배수조건에 따른 쉴드터널 라이닝의 단면력을 검토하였다.

가. 4D조건

지표면에서 터널직경 D의 4배인 지중에 시공된 쉴드터널을 4D조건으로 모델링하였다(그림 2.10.21 참조). 비배수조건의 쉴드터널은 매립토 및 풍화토 지반에 투수계수는 1.0×10^{-6} m/sec를 적용하였고, 현장조건(2D조건)과 비교하기 위하여 쉴드터널 두께만큼의 2차원 평면요소 투수계수를 1.0×10^{-9} m/sec로 적용하였다.

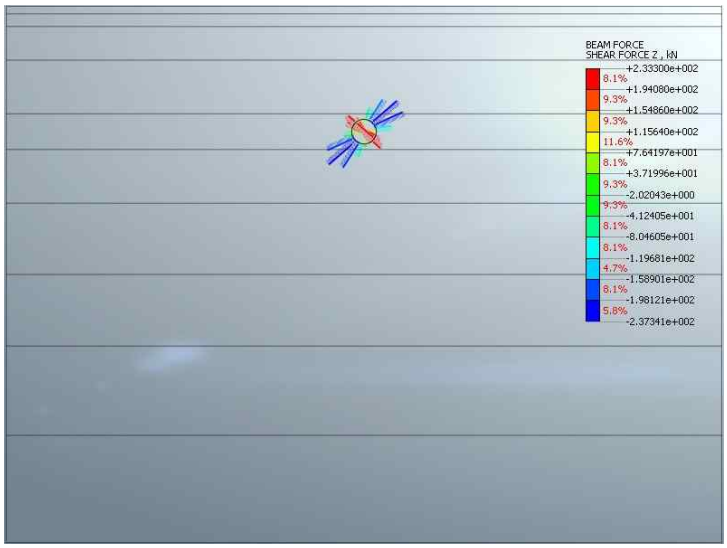


그림 2.10.21 비배수조건의 전단력(4D조건)

비배수조건일 때 최대 전단력은 쉴드터널 라이닝 상부 및 하부 측면에서 발생하였고, 최대 모멘트는 상부 및 측면부 중앙에서 발생하였다. 쉴드터널 라이닝의 상부 및

하부 측면에서 압축 전단력 233.30 kN과 인장 전단력 237.34 kN이 발생하였다(그림 2.10.21 참조). 또한 쉴드터널 라이닝 상부 및 측면부 중앙에서 인장 모멘트 429.08 kN·m와 압축 모멘트 359.03 kN·m가 발생하였다(그림 2.10.22 참조). 쉴드터널 내부로 유입되는 유출량은 2.9693 × 10^{-7} ㎥/m/sec로 나타났다(그림 2.10.23 참조).

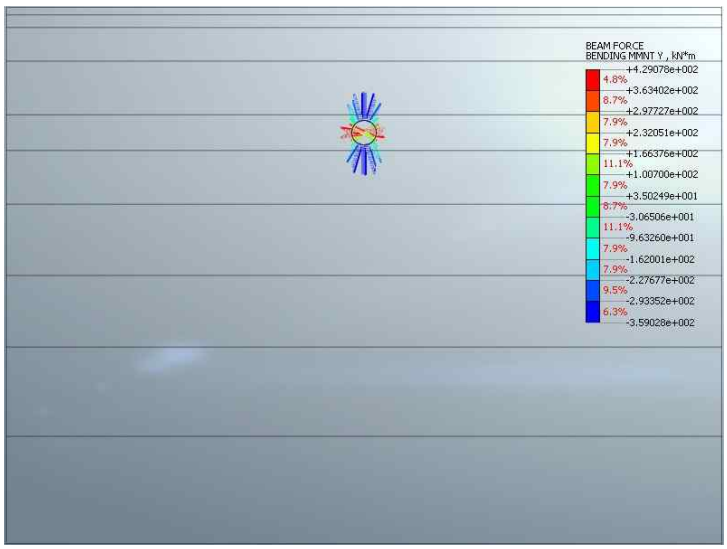


그림 2.10.22 비배수조건의 모멘트(4D조건)

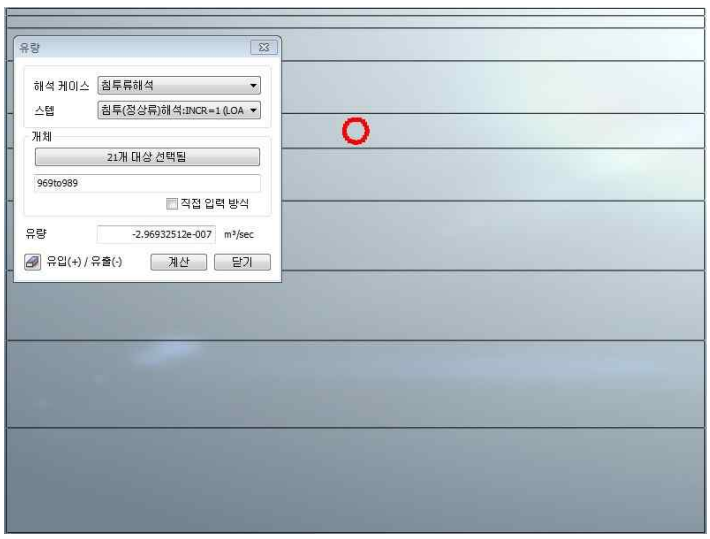


그림 2.10.23 비배수조건의 유출량(4D조건)

배수조건은 지반 및 라이닝을 모델링한 평면요소의 투수계수를 1.0 × 10^{-6} m/sec로 동일하게 적용하여 검토하였다. 배수조건일 때 최대 전단력은 쉴드터널 라이닝 상부

및 하부 측면에서 발생하였고, 최대 모멘트는 상부 및 측면부 중앙에서 발생하였다. 쉴드터널 라이닝의 상부 및 하부 측면에서 압축 전단력 170.80 kN과 인장 전단력 174.01 kN이 발생하였다(그림 2.10.24 참조). 또한 쉴드터널 라이닝 상부 및 측면부 중앙에서 인장 모멘트 312.92 kN·m와 압축 모멘트 285.32 kN·m가 발생하였다(그림 2.10.25 참조). 쉴드터널 내부로 유입되는 유출량은 4.4165 × 10^{-5} m^3/m/sec로 나타났다(그림 2.10.26 참조).

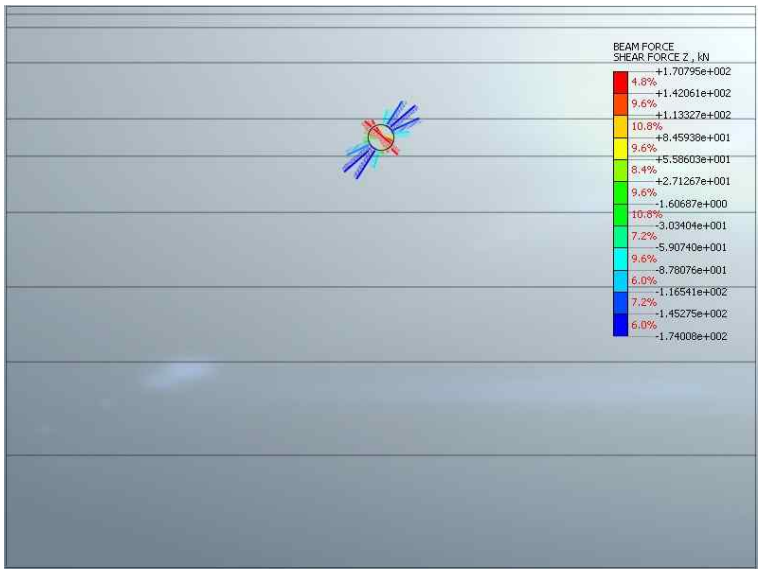


그림 2.10.24 배수조건의 전단력(4D조건)

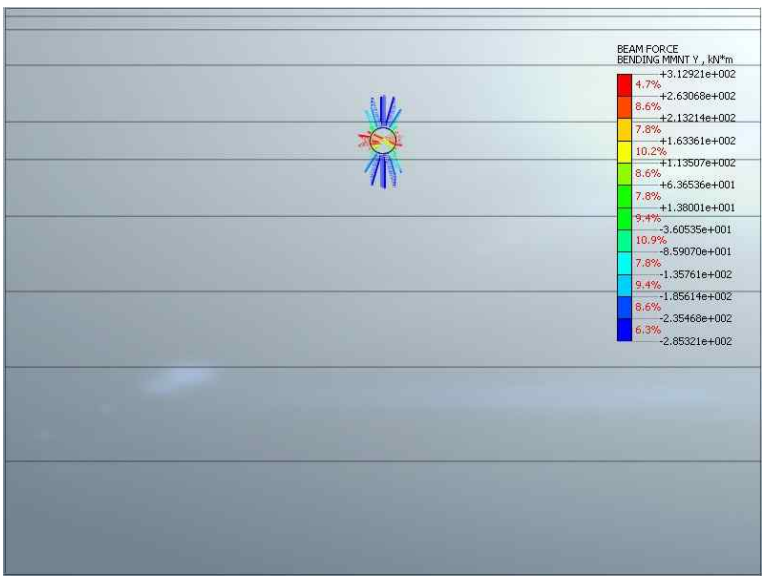


그림 2.10.25 배수조건의 모멘트(4D조건)

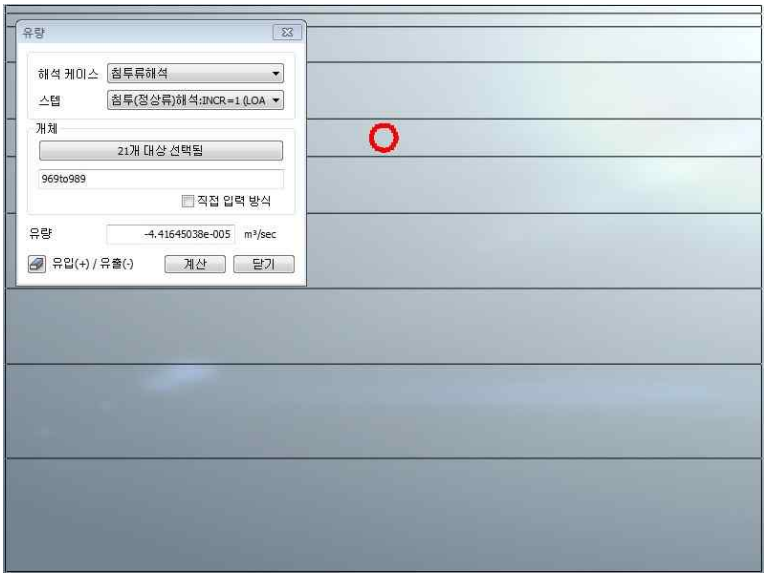


그림 2.10.26 배수조건의 유출량(4D조건)

나. 6D조건

지표면에서 터널직경 D의 6배인 지중에 시공된 쉴드터널을 6D조건으로 모델링하였다(그림 2.10.27 참조). 비배수조건의 쉴드터널은 매립토 및 풍화토 지반에 투수계수는 1.0×10^{-6} m/sec를 적용하고, 현장조건(2D조건)과 비교하기 위하여 쉴드터널 두께만큼의 2차원 평면요소 투수계수를 1.0×10^{-9} m/sec로 적용하였다.

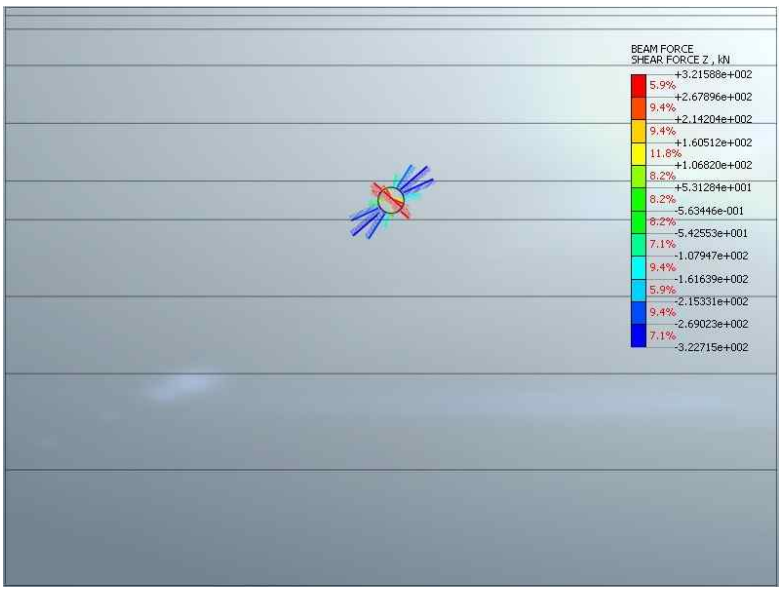


그림 2.10.27 비배수조건의 전단력(6D조건)

비배수조건일 때 최대 전단력은 쉴드터널 라이닝 상부 및 하부 측면에서 발생하였고, 최대 모멘트는 상부 및 측면부 중앙에서 발생하였다. 쉴드터널 라이닝의 상부 및 하부 측면에서 압축 전단력 321.59 kN과 인장 전단력 322.72 kN이 발생하였다(그림 2.10.27 참조). 또한 쉴드터널 라이닝 상부 및 측면부 중앙에서 인장 모멘트 589.97 kN·m와 압축 모멘트 488.59 kN·m가 발생하였다(그림 2.10.28 참조). 쉴드터널 내부로 유입되는 유출량은 2.7340 × 10^{-7} ㎥/m/sec로 나타났다(그림 2.10.29 참조).

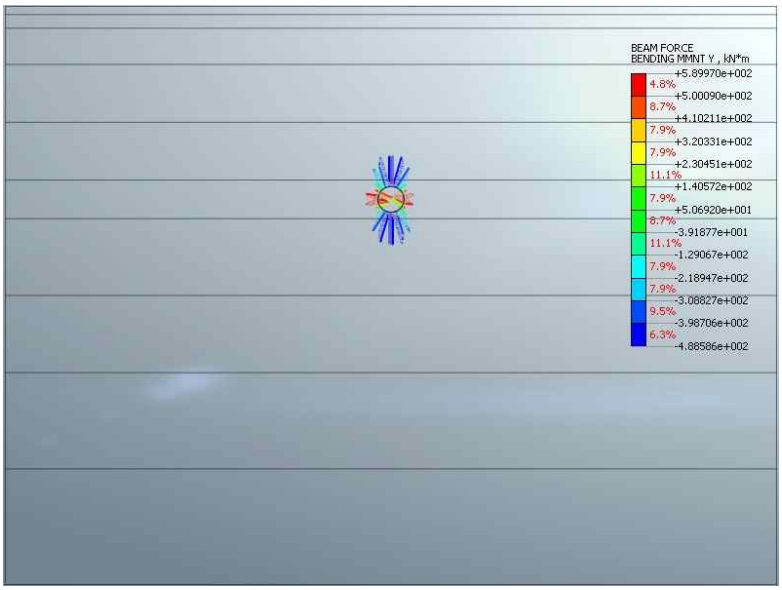


그림 2.10.28 비배수조건의 모멘트(6D조건)

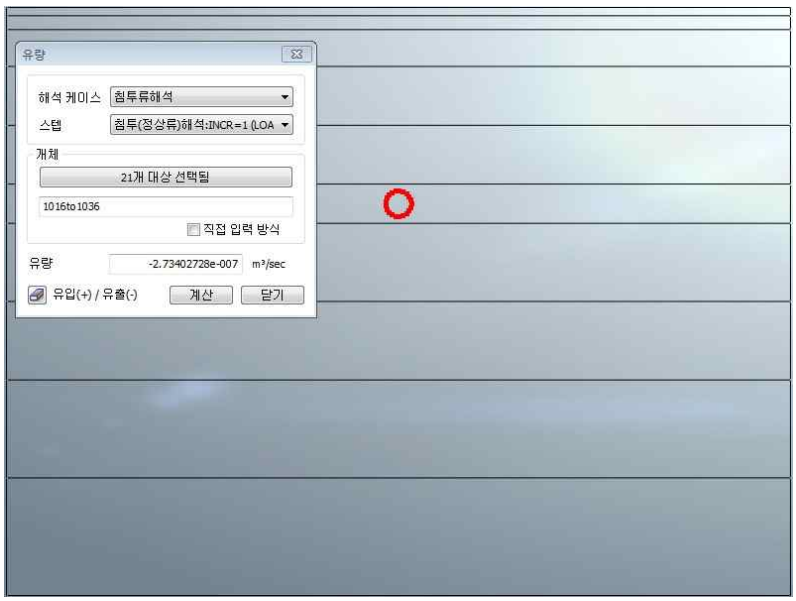


그림 2.10.29 비배수조건의 유출량(6D조건)

배수조건은 지반 및 라이닝을 모델링한 평면요소의 투수계수를 1.0 × 10^{-6} m/sec로 동일하게 적용하여 검토하였다. 배수조건일 때 최대 전단력은 쉴드터널 라이닝 상부 및 하부 측면에서 발생하였고, 최대 모멘트는 상부 및 측면부 중앙에서 발생하였다. 쉴드터널 라이닝의 상부 및 하부 측면에서 압축 전단력 233.79 kN과 인장 전단력 235.76 kN이 발생하였다(그림 2.10.30 참조). 또한 쉴드터널 라이닝 상부 및 측면부 중앙에서 인장 모멘트 429.75 kN·m와 압축 모멘트 388.60 kN·m가 발생하였다(그림 2.10.31 참조). 쉴드터널 내부로 유입되는 유출량은 7.1613 × 10^{-5} m^3/m/sec로 나타났다(그림 2.10.32 참조).

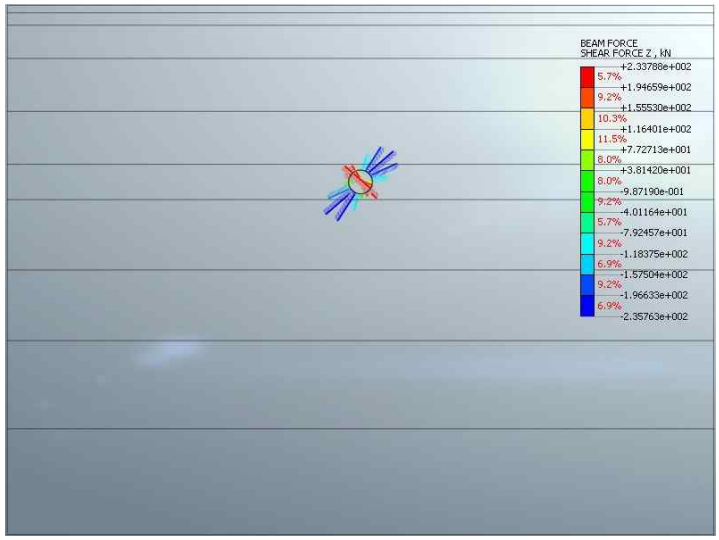


그림 2.10.30 배수조건의 전단력(6D조건)

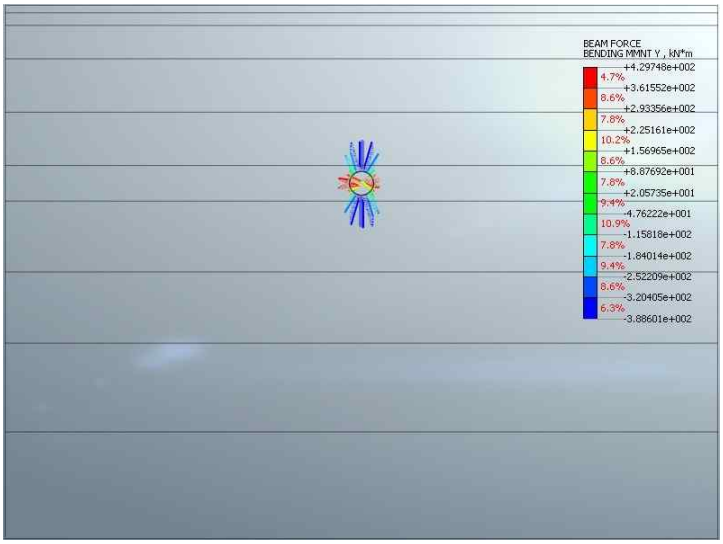


그림 2.10.31 배수조건의 모멘트(6D조건)

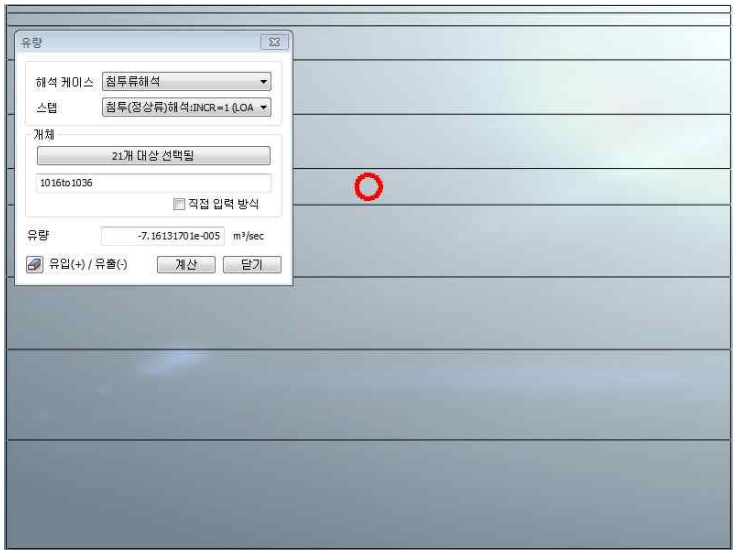


그림 2.10.32 배수조건의 유출량(6D조건)

다. 터널심도 및 배수조건 검토

해석에 적용된 쉴드터널은 지표면에서 터널직경 D의 2배가량 하부에 위치하고 있어 현장조건(2D조건)으로 하였고, 터널심도에 따른 쉴드터널의 안정성을 평가하기 위하여 터널의 심도를 지표면에서 터널직경 D의 4배인 4D조건과 터널직경 D의 6배인 6D조건으로 검토하였다. 또한 배수조건의 영향을 고려하기 위하여 쉴드터널의 두께를 2차원 평면요소로 모델링하여 투수계수를 변화시키면서 배수 및 비배수조건에 따른 쉴드터널 라이닝의 단면력을 검토하였다(표 2.10.7 참조).

현장조건(2D조건)일 때 쉴드터널 라이닝에 작용하는 축력은 비배수조건의 144.40 kN에서 배수조건의 106.97 kN로 25.92% 감소하였고, 라이닝에 작용하는 모멘트는 비배수조건의 252.72 kN·m에서 배수조건의 180.83 kN·m로 28.45% 감소하였다. 4D조건일 때 쉴드터널 라이닝에 작용하는 축력은 비배수조건의 233.30 kN에서 배수조건의 170.80 kN로 26.79% 감소하였고, 라이닝에 작용하는 모멘트는 비배수조건의 429.08 kN·m에서 배수조건의 312.92 kN·m로 27.07% 감소하였다. 6D조건일 때 쉴드터널 라이닝에 작용하는 축력은 비배수조건의 321.59 kN에서 배수조건의 233.79 kN로 27.30% 감소하였고, 모멘트는 비배수조건의 589.97 kN·m에서 배수조건의 429.75 kN·m로 27.07% 감소하였다.

쉴드터널의 유출량을 산정하기 위하여 해석모델의 좌측, 우측 및 하단 절점들의 구속조건을 투수계수로 적용하였다. 2D조건일 때 쉴드터널의 유출량은 비배수조건일 때 0.00 ㎥/km/min였고, 배수조건일 때 1.181 ㎥/km/min로 계산되었다(표 2.10.8 참

조). 4D조건일 때 쉴드터널의 유출량은 비배수조건일 때 0.018 ㎥/km/min였고, 배수조건일 때 2.650 ㎥/km/min로 계산되었다. 또한 6D조건일 때 쉴드터널의 유출량은 비배수조건일 때 0.016 ㎥/km/min였고, 배수조건일 때 4.297 ㎥/km/min로 계산되었다.

표 2.10.7 터널심도 및 배수조건에 따른 단면력 검토

터널심도	구 분	축 력(kN)	모멘트(kN · m)	비 고
2D	비배수조건	144.40	252.72	
	배수조건	106.97	180.83	
	증 감 율	- 25.92 %	-28.45 %	
4D	비배수조건	233.30	429.08	
	배수조건	170.80	312.92	
	증 감 율	- 26.79 %	-27.07 %	
6D	비배수조건	321.59	589.97	
	배수조건	233.79	429.75	
	증 감 율	- 27.30 %	-27.16 %	

표 2.10.8 터널심도 및 배수조건에 따른 유출량 검토

터널심도	구 분	유 출 량	비 고
2D	비배수조건	0.00 ㎥/km/min	
	배수조건	1.181 ㎥/km/min	
4D	비배수조건	0.018 ㎥/km/min	
	배수조건	2.650 ㎥/km/min	
6D	비배수조건	0.016 ㎥/km/min	
	배수조건	4.297 ㎥/km/min	

매립토 및 풍화토 지반의 투수계수를 1.0×10^{-6} m/sec로 적용하고 쉴드터널 두께만큼의 2차원 평면요소 투수계수를 1.0×10^{-9} m/sec로 적용하였을 때, 2D조건에서는 유출량이 발생하지 않았으나 4D조건에서는 0.018 ㎥/km/min, 6D조건에서는 0.016 ㎥/km/min로 미량의 유출량이 발생하였다. 또한 4D조건에서 6D조건보다 유출량이 많이 발생하여 터널심도가 깊어져 토피가 증가하면 수압이 점차로 감소하는 것을 보여주었다. 매립토 및 풍화토 지반의 투수계수를 1.0×10^{-6} m/sec로 적용한 배수조건에서는 토피가 증가할수록 유출량이 증가하였다. 그러므로 토압과 수압을 함께 고려하는 터널 설계에서 터널의 배수조건을 고려하면 터널에 작용하는 하중을 감소시킬 수 있어 보다 경제적인 터널설계가 가능할 것으로 판단된다.

라. 검토결과

지표면에서 터널직경 D의 2배가량 하부에 위치하고 있는 쉴드터널에 대하여 현장조건(2D조건)으로 적용하였고, 터널심도에 따른 쉴드터널의 안정성을 평가하기 위하여 터널의 심도를 지표면에서 터널직경 D의 4배인 4D조건과 터널직경 D의 6배인 6D조건으로 검토하였다. 또한 각각에서 배수조건의 영향을 고려한 결과는 다음과 같다.

(1) 현장조건(2D조건)일 때 배수조건을 고려하면 축력은 약 25.9% 감소하였고, 모멘트는 약 28.5% 감소하였다. 4D조건일 때 배수조건을 고려하면 축력은 약 26.8% 감소하였고, 모멘트는 약 27.1% 감소하였다. 6D조건일 때 배수조건을 고려하면 축력은 약 27.3% 감소하였고, 모멘트는 약 27.1% 감소하였다.

(2) 터널심도에 따른 유출량을 검토한 결과, 심도가 2배 깊어지면 1.181 ㎥/km/min에서 2.650 ㎥/km/min로 약 124.3% 증가하였고, 심도가 3배 깊어지면 4.297 ㎥/km/min로 약 263.8% 증가하였다.

4. 터널심도에 따른 지반침하

배수조건 쉴드터널의 터널심도에 따른 지반의 침하를 현장조건인 2D조건, 지표면에서 터널직경 D의 4배인 4D조건 및 터널직경 D의 6배인 6D조건으로 검토하였다. 4D조건과 6D조건에서 비배수조건일 때 유출량이 발생하고 미소한 지반침하가 발생하였으나, 비배수조건일 때 2D조건에서 지반침하가 발생하지 않았으므로 배수조건일 때 지반침하만을 고려하였다.

가. 현장조건(2D조건)

현장조건(2D조건)에서 수직방향 최대침하량은 5.404 ㎜이고, 전체 최대침하량은 5.407 ㎜로 나타났다(표 2.10.9 참조). 터널의 연직방향 지표면에서의 수직방향 침하량은 5.363 ㎜로 나타났고, 터널의 연직한 지표면에서 1.515 m가 이격된 지점에서 최대침하가 발생하였다. 해석모델은 쉴드터널의 중심에서 수평방향으로 100.0 m 이격된 지점까지 모델링하였으며, 현장조건에서 100.0 m가 이격된 지점에서도 1.954 ㎜의 전체침하량이 발생하여 배수조건으로 인한 침하영향이 100.0 m 이상인 것으로 나타났다.

표 2.10.9 현장조건(2D조건)에서 침하량 검토

이 격 거 리	전체침하량(㎜)	수평침하량(㎜)	수직침하량(㎜)	비 고
0.000 m	5.382	0.450	5.363	
1.515 m	5.407	0.182	5.404	
4.270 m	5.360	-0.277	5.353	
8.264 m	5.268	-1.136	5.144	
13.499 m	4.794	-1.639	4.506	
19.972 m	3.652	-1.931	3.100	
27.686 m	2.805	-2.091	1.870	
36.639 m	2.077	-1.939	0.744	
46.832 m	1.652	-1.631	-0.266	
58.264 m	1.677	-1.253	-1.115	
70.937 m	2.128	-0.923	-1.917	
84.848 m	2.281	-0.565	-2.210	
100.000 m	1.954	0.196	-1.944	

나. 4D조건

4D조건에서 수직방향 최대침하량은 3.556 ㎜이고, 전체 최대침하량은 3.580 ㎜로 나타났다(표 2.10.10 참조). 터널의 연직방향 지표면에서의 수직방향 침하량은 3.466 ㎜로 나타났고, 터널의 연직한 지표면에서 7.343 m가 이격된 지점에서 최대침하가 발생하여 2D조건보다 이격거리가 증가하였다. 해석모델은 쉴드터널의 중심에서 수평방향으로 100.0 m 이격된 지점까지 모델링하였으며, 4D조건에서 100.0 m가 이격된 지점에서도 1.895 ㎜의 전체침하량이 발생하여 배수조건으로 인한 침하영향이 100.0 m 이상인 것으로 나타났다.

표 2.10.10 4D조건에서 침하량 검토

이 격 거 리	전체침하량(㎜)	수평침하량(㎜)	수직침하량(㎜)	비 고
0.000 m	3.474	0.236	3.466	
1.399 m	3.486	0.008	3.486	
3.846 m	3.507	-0.173	3.503	
7.343 m	3.580	-0.412	3.556	
11.888 m	3.401	-0.890	3.283	
17.483 m	2.962	-1.536	2.532	
24.126 m	2.608	-1.701	1.977	
31.818 m	1.905	-1.673	0.911	
40.559 m	1.628	-1.627	-0.047	
50.350 m	1.434	-1.204	-0.779	
61.189 m	1.380	-0.934	-1.016	
73.077 m	1.796	-1.057	-1.451	
86.014 m	2.168	-0.993	-1.927	
100.000 m	1.895	-0.032	-1.894	

다. 6D조건

6D조건에서 수직방향 최대침하량은 2.942 ㎜이고, 전체 최대침하량은 2.960 ㎜로 나타났다(표 2.10.11 참조). 터널의 연직방향 지표면에서의 수직방향 침하량은 2.859 ㎜로 나타났고, 터널의 연직한 지표면에서 3.846 m가 이격된 지점에서 최대침하가 발생하였다. 해석모델은 쉴드터널의 중심에서 수평방향으로 100.0 m 이격된 지점까지

모델링하였으며, 6D조건에서 100.0 m가 이격된 지점에서도 1.526 ㎜의 전체침하량이 발생하여 배수조건으로 인한 침하영향이 100.0 m 이상인 것으로 나타났다.

표 2.10.11 6D조건에서 침하량 검토

이 격 거 리	전체침하량(㎜)	수평 침하량(㎜)	수직 침하량(㎜)	비 고
0.000 m	2.861	0.100	2.859	
1.399 m	2.896	0.210	2.888	
3.846 m	2.960	0.332	2.942	
7.343 m	2.782	0.621	2.711	
11.888 m	2.410	0.978	2.203	
17.483 m	2.223	1.314	1.793	
24.126 m	1.934	1.600	1.086	
31.818 m	1.667	1.655	0.201	
40.559 m	1.513	1.400	-0.574	
50.350 m	1.470	1.176	-0.882	
61.189 m	2.044	1.359	-1.527	
73.077 m	2.620	1.373	-2.232	
86.014 m	2.400	0.246	-2.388	
100.000 m	1.526	0.000	-1.526	

라. 지반침하량 평가

배수조건 쉴드터널의 터널심도에 따른 지반의 전체반침하량을 해석한 결과, 2D조건에서 5.407 ㎜, 4D조건에서 3.580 ㎜, 6D조건에서 2.960 ㎜가 발생하였다. 그리고 이 값은 표 2.10.12와 같이 Wahls(1981)가 제시한 여러 건물의 형태에 따른 평균 허용침하량 기준을 만족하여 지하수위 저감에 따른 주변 구조물의 영향은 허용기준 이내인 것으로 나타났다.

또한, 터널심도 및 배수조건에 따른 유출량(표 2.10.8 참조) 결과에서, 2D조건에서 1.181 ㎥/km/min, 4D조건에서 2.650 ㎥/km/min, 6D조건에서 4.297 ㎥/km/min로 터널심도가 깊어질수록 유출량이 증가하는 것으로 나타났고, 유출량이 증가할수록 지하수위 저감 및 이로 인한 주변 구조물의 침하를 유발할 수 있으므로 지하철의 배수 펌핑시설 및 터널배수시설의 설계기준에 제시된 3.00 ㎥/km/min 이하로 유출량이 유지되도록 관리하여야 한다.

만약 허용누수량을 초과하여 지하수위 저감으로 인해 지반의 압밀현상이 촉진되어

지반침하가 우려된다면 Recharge 공법 등을 적용하여야 지하수위 복원 등의 방법을 강구하여야 할 것으로 판단된다.

표 2.10.12 여러 건물의 형태에 따른 평균 허용침하량(Wahls, 1981)

건물의 형태	평균 허용침하량 ㎜(in)
벽돌벽체로만 축조된 건물	
L/H ≥ 2.5	80 (3)
L/H ≤ 1.5	100 (4)
철근콘크리트 또는 보강벽돌로 보강된 벽돌벽체의 건물	150 (6)
뼈대로 축조된 건물	100 (4)
굴뚝,사일로,탑 등 견고하게 보강된 철근콘크리트 기초	300 (12)

마. 검토결과

배수조건 쉴드터널의 터널심도에 따른 지반침하를 2D조건, 4D조건 및 6D조건으로 검토한 결과는 다음과 같다.

(1) 전체침하량은 2D조건에서 5.407 ㎜, 4D조건에서 3.580 ㎜, 6D조건에서 2.960 ㎜가 발생하여 터널심도가 깊어질수록 침하량이 줄어드는 것으로 나타났다.

(2) 최대침하량은 터널의 연직한 지표면에서 2D조건에서 1.515 m, 4D조건에서 7.343 m, 6D조건에서 3.846 m 이격되어 발생하여 터널심도가 깊어질수록 영향범위가 커지는 것으로 나타났다. 그러나 지표침하는 각각의 조건에서 100.0 m 이상 영향을 주어 최대 영향범위는 확인되지 않았다.

5. 지반종류에 따른 세그먼트 라이닝 두께

해석에 적용된 쉴드터널은 지표면에서 터널직경 D의 2배가량 하부에 위치하고 있으므로 2D조건을 기준으로 구조해석을 실시하여 세그먼트 두께를 검토하였다. 현장의 지표부근에 위치한 매립토는 그대로 사용하였고, 하부에 위치한 풍화토를 풍화암과 연암으로 변경시키면서 지반종류별 세그먼트 두께를 검토하였다. 구조해석에 이용된 지반의 물성치는 표 2.10.13과 같다.

표 2.10.13 세그먼트 두께 산정을 위한 지반 입력물성치

구 분	매 립 토	풍 화 토	풍 화 암	연 암
탄성계수(E)	1.2×10^4 kN/㎡	4.0×10^4 kN/㎡	5.0×10^5 kN/㎡	2.0×10^6 kN/㎡
포아송비(ν)	0.35	0.30	0.30	0.25
단위중량(γ)	18.0 kN/㎥	19.0 kN/㎥	23.0 kN/㎥	25.0 kN/㎥
Ko	0.45	0.45	0.70	1.00
초기공극비(eo)	0.5	0.5	0.5	0.5
점착력(C)	-	20.0 kN/㎡	20.0 kN/㎡	200.0 kN/㎡
마찰각(°)	30.0	32.0	33.0	35.0

가. 현장조건(2D조건)

현장조건(2D조건)에서 배수조건일 때 계산된 단면력 Pu = 1,579.87 kN, δMu = 158.96 kN·m, Vu = 22.72 kN을 적용하고, 비배수조건일 때 계산된 단면력 Pu = 1,359.93 kN, δMu = 213.61 kN·m, Vu = 40.23 kN을 적용하여 계산한 결과, 라이닝 세그먼트의 소요두께는 350.0 ㎜이며 배면철근은 H29@150, 전면철근은 H25@150이 필요하였다. 또한 전단철근은 H13@125으로 계산되었으며, 배수 및 비배수 조건에서 계산된 단면 및 소요철근량은 다음과 같다.

1.1 설계단면력

▶ **설계 단면력**

구 분	P_u (kN)	δM_u (kN·m)	V_u (kN)	비 고
Drain	-1579.87	158.96	22.72	
Undrain	-1359.93	213.61	40.23	

1.2 벽체 단면 설계조건

1) 설계조건

설계기준강도	f_{ck} = 42.00 MPa	부재폭 (단위폭)	B = 1000.00 mm
인장철근항복강도	f_y = 400.00 MPa	부재의 총두께	H = 350.00 mm
전단철근항복강도	f_{yt} = 400.00 MPa		

사용철근량

배면 철근 (A_{sb}) = 4282.67 mm²

1 단 : H29@150 = 4282.67 mm²

전면 철근 (A_{sf}) = 3378.00 mm²

1 단 : H25@150 = 3378.00 mm²

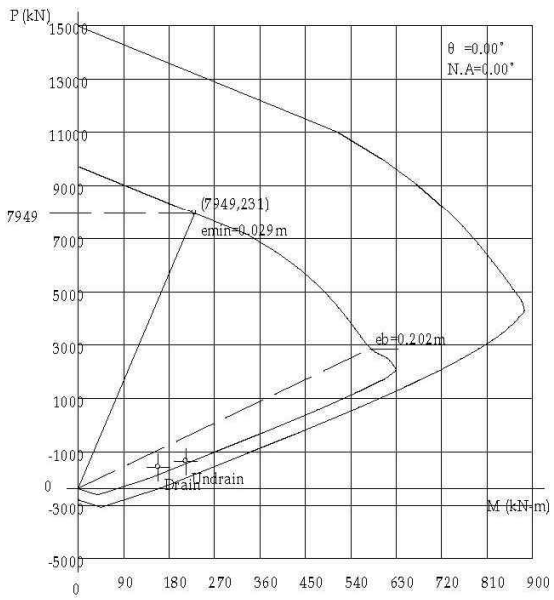
2) 최소 수직철근비 검토

ρ_{min} = 0.0015 ≤ ρ_{use} = 0.0219 ..... **OK**

1.3 벽체 단면 검토

▶ **ALL**

1) P-M상관도

검토단면 : 충실사각형 하중조합 : ALL	검토조건
	f_{ck} = 42.00 MPa f_y = 400.00 MPa E_c = 31314 MPa E_s = 205000 MPa l_{uy} = - k_y = - ρ = 0.0219

▶ **Drain**

1) 작용하중

계수 모멘트	M_u =	158.96 kN·m	계수 축력	P_u =	-1579.87 kN
계수 전단력	V_u =	22.72 kN	편심거리	e =	-100.62 mm

2) 평형상태 계산

$c_b = \frac{0.003}{0.003+f_y/E_s} \times d$ = 181.77 mm : 중립축

$P_b = C_c + C_s + T_s$ = 4397.50 kN : 균형 하중

$M_b = M_{cc} + M_{cs} + M_{ts}$ = 888.42 kN·m : 균형 모멘트

$e_b = M_b / P_b$ = 202.03 mm : P_u < 0 ..... **인장지배**

3) 단면강도검토

중립축을 가정하여 Trial & Error Method 로 검토한다.

$e' = M_n / P_n$ = -101.00 mm ≒ e = -100.62 mm ..... **OK**

$P_n = C_c + C_s + T_s$ = -2038.96 kN

$M_n = M_{cc} + M_{cs} + M_{ts}$ = 205.93 kN·m

Φ = 0.850

공칭축하중 : ΦP_n = -1733.12 kN ≥ P_u ..... **OK**

공칭모멘트 : ΦM_n = 175.04 kN·m ≥ M_u ..... **OK**

4) 단면 전단 검토

인장철근들의 도심과 압축연단까지의 거리

d = 300.00 mm

경량콘크리트 계수

λ = 1.00

콘크리트 공칭전단강도

$$V_c = \frac{1}{6}\left(1 + \frac{N_u}{3.5A_g}\right)\lambda\sqrt{(f_{ck})} \cdot b_0 \cdot d = 0.000\ kN$$

φV_c	φV_c/2	V_u (V_{max})	비 고
0.00 kN	0.00 kN	22.72 kN	

∴ $\Phi V_c < V_u$ 이므로 전단보강 필요

$$_{req}A_v = \frac{(V_u - \Phi V_c) \cdot s}{\Phi \cdot f_{yt} \cdot d} = 31.56\ mm^2$$

$$_{min}A_{v1} = 0.35 \cdot \frac{b_w \cdot s}{f_{yt}} = 109.38\ mm^2$$

$$_{min}A_{v2} = \frac{0.0625 \cdot \sqrt{(f_{ck})} \cdot b_w \cdot s}{f_{yt}} = 126.58\ mm^2$$

$_{min}A_v$ = max [$_{min}A_{v1}$, $_{min}A_{v2}$] = 126.58 mm²

필요철근량 $_{applied}A_v$ = max [$_{req}A_v$, $_{min}A$ = 126.58 mm²

사용철근량 A_v = H13 - 5.00 Legs = 633.50 mm² ≥ $_{applied}A_v$ ..... **OK**

수평간격 s = 125.0 mm ≤ min[0.5d, 600mm] = 150.0 mm ..... **OK**

최대철근전단강 V_{smax} = $2/3 \cdot \sqrt{(f_{ck})} \cdot b_w \cdot d$ = 1296.148 kN

철근설계전단강 ΦV_s = $\Phi \cdot A_v \cdot f_{yt} \cdot d/s$ = 456.120 kN

설계전단강도 ΦV_n = $\Phi \cdot (V_c + V_s)$ = 456.120 kN ≥ V_u = 22.720 kN ..... **OK**

▶ **Undrain**

1) 작용하중

계수 모멘트	M_u = 213.61 kN·m	계수 축력	P_u = -1359.93 kN
계수 전단력	V_u = 40.23 kN	편심거리	e = -157.07 mm

2) 평형상태 계산

$$c_b = \frac{0.003}{0.003 + f_y/E_s} \times d = 181.77\ mm$$: 중립축

$P_b = C_c + C_s + T_s$ = 4397.50 kN : 균형 하중

$M_b = M_{cc} + M_{cs} + M_{ts}$ = 888.42 kN·m : 균형 모멘트

$e_b = M_b / P_b$ = 202.03 mm : P_u < 0 ..... **인장지배**

3) 단면강도검토

중립축을 가정하여 Trial & Error Method 로 검토한다.

e' = M_n / P_n = -157.15 mm ≒ e = -157.07 mm ..... **OK**

$P_n = C_c + C_s + T_s$ = -1640.99 kN

$M_n = M_{cc} + M_{cs} + M_{ts}$ = 257.89 kN·m

Φ = 0.850

공칭축하중 : ΦP_n = -1394.84 kN ≥ P_u ..... **OK**

공칭모멘트 : ΦM_n = 219.20 kN·m ≥ M_u ..... **OK**

4) 단면 전단 검토

인장철근들의 도심과 압축연단까지의 거리

$d = 300.00$ mm

경량콘크리트 계수

$\lambda = 1.00$

콘크리트 공칭전단강도

$$V_c = \frac{1}{6}\left(1 + \frac{N_u}{3.5A_g}\right)\lambda\sqrt{f_{ck}}\cdot b_0 \cdot d = 0.000 \text{ kN}$$

ϕV_c	$\phi V_c/2$	V_u (V_{max})	비 고
0.00 kN	0.00 kN	40.23 kN	

$\therefore\ \Phi V_c < V_u$ 이므로 전단보강 필요

$$_{req}A_v = \frac{(V_u - \Phi V_c)\cdot s}{\Phi \cdot f_{yt} \cdot d} = 55.88 \text{ mm}^2$$

$$_{min}A_{v1} = 0.35 \cdot \frac{b_w \cdot s}{f_{yt}} = 109.38 \text{ mm}^2$$

$$_{min}A_{v2} = \frac{0.0625 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot s}{f_{yt}} = 126.58 \text{ mm}^2$$

$_{min}A_v = \max[\ _{min}A_{v1},\ _{min}A_{v2}\ ] = 126.58 \text{ mm}^2$

필요철근량 $_{applied}A_v = \max[\ _{req}A_v,\ _{min}A = 126.58 \text{ mm}^2$

사용철근량 $A_v = $ H13 - 5.00 Legs $= 633.50 \text{ mm}^2 \geq\ _{applied}A_v$ ..... **OK**

수평간격 $s = 125.0$ mm $\leq \min[0.5d, 600\text{mm}] = 150.0$ mm ..... **OK**

최대철근전단강 $V_{smax} = 2/3\cdot\sqrt{f_{ck}}\cdot b_w\cdot d = 1296.148$ kN

철근설계전단강 $\Phi V_s = \Phi\cdot A_v\cdot f_{yt}\cdot d/s = 456.120$ kN

설계전단강도 $\Phi V_n = \Phi\cdot(V_c + V_s) = 456.120 \text{ kN} \geq V_u = 40.233$ kN ..... **OK**

나. 풍화암 적용

풍화토를 풍화암으로 적용하였을 때, 현장조건(2D조건)의 배수에서 계산된 단면력 Pu = 1,580.93 kN, δMu = 9.89 kN·m, Vu = 16.72 kN을 적용하고, 비배수조건일 때에 계산된 단면력 Pu = 1,480.24 kN, δMu = 6.32 kN·m, Vu = 26.57 kN을 적용하여 계산한 결과, 라이닝 세그먼트의 소요두께는 300.0 ㎜이며 배면철근은 H22@150, 전면철근은 H22@150이 필요하였다. 또한 전단철근은 H13@125으로 계산되었으며, 배수 및 비배수 조건에서 계산된 단면 및 소요철근량은 다음과 같다.

1.1 설계단면력

▶ **설계 단면력**

구 분	P_u (kN)	δM_u (kN·m)	V_u (kN)	비 고
Drain	-1580.93	9.89	16.72	
Undrain	-1480.24	6.32	26.57	

1.2 벽체 단면 설계조건

1) 설계조건

설계기준강도	f_{ck} =	42.00 MPa	부재폭 (단위폭)	B =	1000.00 mm
인장철근항복강도	f_y =	400.00 MPa	부재의 총두께	H =	300.00 mm
전단철근항복강도	f_{yt} =	400.00 MPa			

사용철근량

배면 철근 (A_{sb}) = 2580.67 mm²

1 단 : H22@150 = 2580.67 mm²

전면 철근 (A_{sf}) = 2580.67 mm²

1 단 : H22@150 = 2580.67 mm²

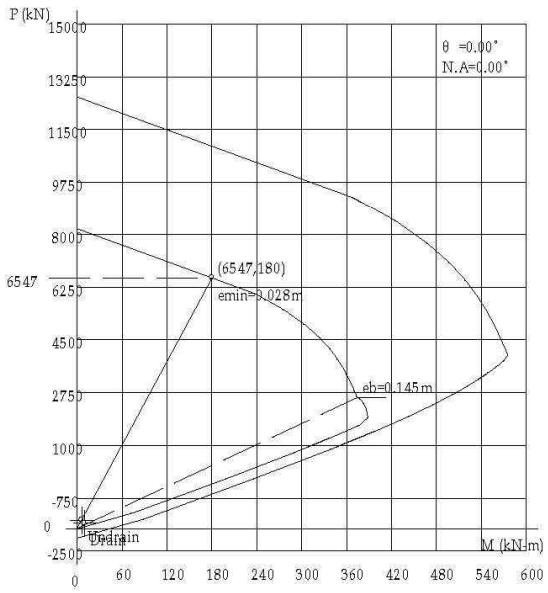
2) 최소 수직철근비 검토

ρ_{min} = 0.0015 ≤ ρ_{use} = 0.0172 ..... OK

1.3 벽체 단면 검토

▶ **ALL**

1) P-M상관도

검토단면 : 중실사각형 하중조합 : ALL	검토조건
	f_{ck} = 42.00 MPa f_y = 400.00 MPa E_c = 31314 MPa E_s = 205000 MPa I_{uy} = - k_y = - ρ = 0.0172

▶ **Drain**

1) 작용하중

계수 모멘트	M_u = 9.89 kN·m	계수 축력	P_u = -1580.93 kN
계수 전단력	V_u = 16.72 kN	편심거리	e = -6.25 mm

2) 평형상태 계산

$c_b = \frac{0.003}{0.003+f_y/E_s} \times d$ = 151.48 mm : 중립축

$P_b = C_c + C_s + T_s$ = 3974.50 kN : 균형 하중

$M_b = M_{cc} + M_{cs} + M_{ts}$ = 575.62 kN·m : 균형 모멘트

$e_b = M_b / P_b$ = 144.83 mm : $P_u < 0$ ..... **인장지배**

3) 단면강도검토

중립축을 가정하여 Trial & Error Method 로 검토한다.

$e' = M_n / P_n$ = -6.20 mm ≒ e = -6.25 mm ..... **OK**

$P_n = C_c + C_s + T_s$ = -1981.95 kN

$M_n = M_{cc} + M_{cs} + M_{ts}$ = 12.29 kN·m

Φ = 0.850

공칭축하중 : ΦP_n = -1684.66 kN ≥ P_u ..... **OK**

공칭모멘트 : ΦM_n = 10.45 kN·m ≥ M_u ..... **OK**

4) 단면 전단 검토

인장철근들의 도심과 압축연단까지의 거리

$d = 250.00$ mm

경량콘크리트 계수

$\lambda = 1.00$

콘크리트 공칭전단강도

$$V_c = \frac{1}{6}\left(1 + \frac{N_u}{3.5A_g}\right)\lambda\sqrt{f_{ck}}\cdot b_0 \cdot d = 0.000 \text{ kN}$$

ϕV_c	$\phi V_c/2$	V_u (V_{max})	비 고
0.00 kN	0.00 kN	16.72 kN	

$\therefore\ \Phi V_c < V_u$ 이므로 전단보강 필요

$$_{req}A_v = \frac{(V_u - \Phi V_c)\cdot s}{\Phi \cdot f_{yt} \cdot d} = 27.86 \text{ mm}^2$$

$$_{min}A_{v1} = 0.35 \cdot \frac{b_w \cdot s}{f_{yt}} = 109.38 \text{ mm}^2$$

$$_{min}A_{v2} = \frac{0.0625 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot s}{f_{yt}} = 126.58 \text{ mm}^2$$

$_{min}A_v = \max[\ _{min}A_{v1},\ _{min}A_{v2}\ ] = 126.58 \text{ mm}^2$

필요철근량 $_{applied}A_v = \max[\ _{req}A_v,\ _{min}A = 126.58 \text{ mm}^2$

사용철근량 A_v = H13 - 5.00 Legs = 633.50 mm² ≥ $_{applied}A_v$ ..... **OK**

수평간격 s = 125.0 mm ≤ min[0.5d, 600mm] = 125.0 mm ..... **OK**

최대철근전단강 $V_{smax} = 2/3\cdot\sqrt{f_{ck}}\cdot b_w\cdot d = 1080.123$ kN

철근설계전단강 $\Phi V_s = \Phi\cdot A_v\cdot f_{yt}\cdot d/s = 380.100$ kN

설계전단강도 $\Phi V_n = \Phi\cdot(V_c + V_s) = 380.100$ kN ≥ V_u = 16.716 kN ..... **OK**

▶ **Undrain**

1) 작용하중

계수 모멘트	M_u = 6.32 kN·m	계수 축력	P_u = -1480.24 kN
계수 전단력	V_u = 26.57 kN	편심거리	e = -4.27 mm

2) 평형상태 계산

$$c_b = \frac{0.003}{0.003 + f_y/E_s} \times d = 151.48 \text{ mm} \quad : \text{ 중립축}$$

$P_b = C_c + C_s + T_s = 3974.50$ kN : 균형 하중

$M_b = M_{cc} + M_{cs} + M_{ts} = 575.62$ kN·m : 균형 모멘트

$e_b = M_b / P_b = 144.83$ mm : $P_u < 0$ ..... **인장지배**

3) 단면강도검토

중립축을 가정하여 Trial & Error Method 로 검토한다.

$e' = M_n / P_n = -4.24$ mm ≒ e = -4.27 mm ..... **OK**

$P_n = C_c + C_s + T_s = -2007.51$ kN

$M_n = M_{cc} + M_{cs} + M_{ts} = 8.51$ kN·m

$\Phi = 0.850$

공칭축하중 : ΦP_n = -1706.38 kN ≥ P_u ..... **OK**

공칭모멘트 : ΦM_n = 7.23 kN·m ≥ M_u ..... **OK**

4) 단면 전단 검토

인장철근들의 도심과 압축연단까지의 거리

d = 250.00 mm

경량콘크리트 계수

λ = 1.00

콘크리트 공칭전단강도

$$V_c = \frac{1}{6}\left(1 + \frac{N_u}{3.5A_g}\right)\lambda\sqrt{(f_{ck})} \cdot b_0 \cdot d = 0.000\ kN$$

φV_c	φV_c/2	V_u (V_{max})	비 고
0.00 kN	0.00 kN	26.57 kN	

∴ $\Phi V_c < V_u$ 이므로 전단보강 필요

$$_{req}A_v = \frac{(V_u - \Phi V_c) \cdot s}{\Phi \cdot f_{yt} \cdot d} = 44.28\ mm^2$$

$$_{min}A_{v1} = 0.35 \cdot \frac{b_w \cdot s}{f_{yt}} = 109.38\ mm^2$$

$$_{min}A_{v2} = \frac{0.0625 \cdot \sqrt{(f_{ck})} \cdot b_w \cdot s}{f_{yt}} = 126.58\ mm^2$$

$_{min}A_v = \max[\ _{min}A_{v1},\ _{min}A_{v2}\ ] = 126.58\ mm^2$

필요철근량 $_{applied}A_v = \max[\ _{req}A_v,\ _{min}A = 126.58\ mm^2$

사용철근량 A_v = H13 - 5.00 Legs = 633.50 mm^2 ≥ $_{applied}A_v$ ..... **OK**

수평간격 s = 125.0 mm ≤ min[0.5d, 600mm] = 125.0 mm ..... **OK**

최대철근전단강 $V_{smax} = 2/3 \cdot \sqrt{(f_{ck})} \cdot b_w \cdot d$ = 1080.123 kN

철근설계전단강 $\Phi V_s = \Phi \cdot A_v \cdot f_{yt} \cdot d/s$ = 380.100 kN

설계전단강도 $\Phi V_n = \Phi \cdot (V_c + V_s)$ = 380.100 kN ≥ V_u = 26.565 kN ..... **OK**

다. 연암 적용

풍화토를 연암으로 적용하였을 때, 현장조건(2D조건)의 배수조건일 때에 계산된 단면력 Pu = 1,234.24 kN, δMu = 3.14 kN·m, Vu = 6.82 kN을 적용하고, 비배수조건일 때에 계산된 단면력 Pu = 1,352.92 kN, δMu = 0.25 kN·m, Vu = 8.68 kN을 적용하여 계산한 결과, 라이닝 세그먼트의 소요두께는 250.0 ㎜이며 배면철근은 H22@150, 전면철근은 H22@150이 필요하였다. 또한 전단철근은 H13@125으로 계산되었으며, 배수 및 비배수 조건에서 계산된 단면 및 소요철근량은 다음과 같다.

1.1 설계단면력

▶ **설계 단면력**

구 분	P_u (kN)	δM_u (kN·m)	V_u (kN)	비 고
Drain	-1234.24	3.14	6.82	
Undrain	-1352.92	-0.25	8.68	

1.2 벽체 단면 설계조건

1) 설계조건

설계기준강도	f_{ck} =	42.00 MPa	부재폭 (단위폭)	B =	1000.00 mm
인장철근항복강도	f_y =	400.00 MPa	부재의 총두께	H =	250.00 mm
전단철근항복강도	f_{yt} =	400.00 MPa			

사용철근량

배면 철근 (A_{sb}) = 2580.67 mm²

1 단 : H22@150 = 2580.67 mm²

전면 철근 (A_{sf}) = 2580.67 mm²

1 단 : H22@150 = 2580.67 mm²

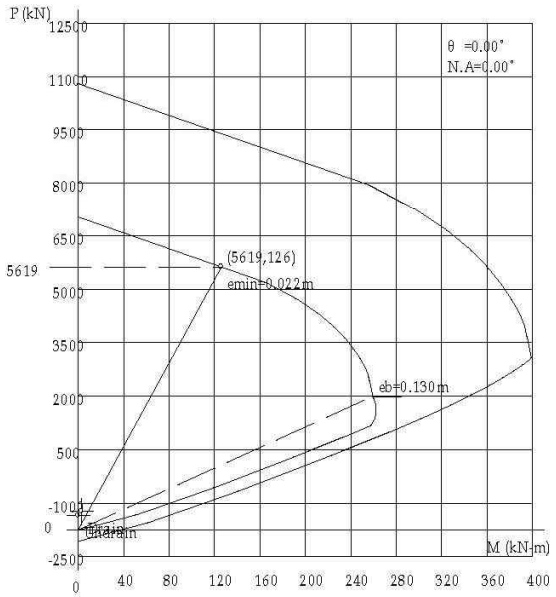
2) 최소 수직철근비 검토

ρ_{min} = 0.0015 ≤ ρ_{use} = 0.0206 ..... OK

1.3 벽체 단면 검토

▶ **ALL**

1) P-M상관도

검토단면 : 중실사각형 하중조합 : ALL	검토조건
	f_{ck} = 42.00 MPa f_y = 400.00 MPa E_c = 31314 MPa E_s = 205000 MPa l_{uy} = - k_y = - ρ = 0.0206

▶ **Drain**

1) 작용하중

계수 모멘트	M_u = 3.14 kN·m	계수 축력	P_u = -1234.24 kN
계수 전단력	V_u = 6.82 kN	편심거리	e = -2.54 mm

2) 평형상태 계산

$c_b = \frac{0.003}{0.003+f_y/E_s} \times d$ = 121.18 mm : 중립축

$P_b = C_c + C_s + T_s$ = 3061.18 kN : 균형 하중

$M_b = M_{cc} + M_{cs} + M_{ts}$ = 398.86 kN·m : 균형 모멘트

$e_b = M_b / P_b$ = 130.30 mm : P_u < 0 ..... **인장지배**

3) 단면강도검토

중립축을 가정하여 Trial & Error Method 로 검토한다.

$e' = M_n / P_n$ = -2.52 mm ≒ e = -2.54 mm ..... **OK**

$P_n = C_c + C_s + T_s$ = -2023.57 kN

$M_n = M_{cc} + M_{cs} + M_{ts}$ = 5.10 kN·m

Φ = 0.850

공칭축하중 : ΦP_n = -1720.03 kN ≥ P_u ..... **OK**

공칭모멘트 : ΦM_n = 4.33 kN·m ≥ M_u ..... **OK**

4) 단면 전단 검토

인장철근들의 도심과 압축연단까지의 거리

d = 200.00 mm

경량콘크리트 계수

λ = 1.00

콘크리트 공칭전단강도

$V_c = \frac{1}{6}\left(1 + \frac{N_u}{3.5A_g}\right)\lambda\sqrt{(f_{ck})} \cdot b_0 \cdot d$ = 0.000 kN

φV_c	$\varphi V_c/2$	V_u (V_{max})	비 고
0.00 kN	0.00 kN	6.82 kN	

∴ $\Phi V_c < V_u$ 이므로 전단보강 필요

$_{req}A_v = \frac{(V_u-\Phi V_c)\cdot s}{\Phi \cdot f_{yt} \cdot d}$ = 11.36 ㎟

$_{min}A_{v1} = 0.35 \cdot \frac{b_w \cdot s}{f_{yt}}$ = 87.50 ㎟

$_{min}A_{v2} = \frac{0.0625 \cdot \sqrt{(f_{ck})} \cdot b_w \cdot s}{f_{yt}}$ = 101.26 ㎟

$_{min}A_v = \max[\,_{min}A_{v1}, \,_{min}A_{v2}\,]$ = 101.26 ㎟

필요철근량 $_{applied}A_v = \max[\,_{req}A_v, \,_{min}A$ = 101.26 ㎟

사용철근량 A_v = H13 - 6.00 Legs = 760.20 ㎟ ≥ $_{applied}A_v$ ..... **OK**

수평간격 s = 100.0 mm ≤ min[0.5d, 600mm] = 100.0 mm ..... **OK**

최대철근전단강 V_{smax} = $2/3\cdot\sqrt{(f_{ck})}\cdot b_w\cdot d$ = 864.099 kN

철근설계전단강 ΦV_s = $\Phi\cdot A_v\cdot f_{yt}\cdot d/s$ = 456.120 kN

설계전단강도 ΦV_n = $\Phi\cdot(V_c+V_s)$ = 456.120 kN ≥ V_u = 6.815 kN ..... **OK**

▶ **Undrain**

1) 작용하중

계수 모멘트	M_u = -0.25 kN·m	계수 축력	P_u = -1352.92 kN
계수 전단력	V_u = 8.68 kN	편심거리	e = -0.19 mm

2) 평형상태 계산

$c_b = \frac{0.003}{0.003+f_y/E_s} \times d$ = 121.18 mm : 중립축

$P_b = C_c + C_s + T_s$ = 3061.18 kN : 균형 하중

$M_b = M_{cc} + M_{cs} + M_{ts}$ = 398.86 kN·m : 균형 모멘트

$e_b = M_b / P_b$ = 130.30 mm : P_u < 0 ..... **인장지배**

3) 단면강도검토

중립축을 가정하여 Trial & Error Method 로 검토한다.

$e' = M_n / P_n$ = -0.20 mm ≒ e = -0.19 mm ..... **OK**

$P_n = C_c + C_s + T_s$ = -2061.26 kN

$M_n = M_{cc} + M_{cs} + M_{ts}$ = 0.41 kN·m

Φ = 0.850

공칭축하중 : ΦP_n = -1752.07 kN ≥ P_u ..... **OK**

공칭모멘트 : ΦM_n = 0.35 kN·m ≥ M_u ..... **OK**

4) 단면 전단 검토

인장철근들의 도심과 압축연단까지의 거리

d = 200.00 mm

경량콘크리트 계수

λ = 1.00

콘크리트 공칭전단강도

$V_c = \frac{1}{6}\left(1 + \frac{N_u}{3.5A_g}\right)\lambda\sqrt{f_{ck}} \cdot b_0 \cdot d$ = 0.000 kN

ϕV_c	$\phi V_c/2$	V_u (V_{max})	비 고
0.00 kN	0.00 kN	8.68 kN	

∴ $\Phi V_c < V_u$ 이므로 전단보강 필요

$_{req}A_v = \frac{(V_u-\Phi V_c)\cdot s}{\Phi \cdot f_{yt} \cdot d}$ = 14.47 ㎟

$_{min}A_{v1} = 0.35 \cdot \frac{b_w \cdot s}{f_{yt}}$ = 87.50 ㎟

$_{min}A_{v2} = \frac{0.0625 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot s}{f_{yt}}$ = 101.26 ㎟

$_{min}A_v = \max[\,_{min}A_{v1}, {}_{min}A_{v2}\,]$ = 101.26 ㎟

필요철근량 $_{applied}A_v = \max[\,_{req}A_v, {}_{min}A$ = 101.26 ㎟

사용철근량 A_v = H13 - 6.00 Legs = 760.20 ㎟ ≥ $_{applied}A_v$ ..... **OK**

수평간격 s = 100.0 mm ≤ min[0.5d, 600mm] = 100.0 mm ..... **OK**

최대철근전단강 V_{smax} = $2/3\cdot\sqrt{f_{ck}}\cdot b_w\cdot d$ = 864.099 kN

철근설계전단강 ΦV_s = $\Phi\cdot A_v\cdot f_{yt}\cdot d/s$ = 456.120 kN

설계전단강도 ΦV_n = $\Phi\cdot(V_c+V_s)$ = 456.120 kN ≥ V_u = 8.685 kN ..... **OK**

라. 지반종류에 따른 단면력 및 단면 두께

지하수위가 동일한 배수조건의 현장조건(2D조건)에서 지중의 풍화토를 변경시키며 지반종류에 따른 쉴드터널 세그먼트 라이닝의 두께를 계산하였다(표 2.10.14 참조). 풍화토 지반에서 요구되는 세그먼트 두께는 350.0 ㎜이지만 지반의 강도가 강해질수록 세그먼트 두께는 풍화암일 때 300.0 ㎜, 연암일 때 250.0 ㎜로 감소하였다. 소요철근의 경우 풍화토일 때 배면철근 H29@150와 전면철근 H25@150가 요구되었으나, 풍화암 또는 연암일 때 소요철근은 배면철근 H22@150와 전면철근 H22@150로 감소하였다.

표 2.10.14 지반종류별 세그먼트 두께 검토

구 분	소요두께	필요철근량		
		배면철근	전면철근	전단철근
풍화토일 경우	350.0 ㎜	H29@150	H25@150	H13@125
풍화토를 풍화암으로 변경시	300.0 ㎜	H22@150	H22@150	H13@125
풍화토를 연암으로 변경시	250.0 ㎜	H22@150	H22@150	H13@125

마. 검토결과

현장조건에서 지하수위를 동일하게 적용하고 지중의 풍화토를 풍화암 및 연암으로 변경시키며 세그먼트 라이닝의 두께를 계산한 결과는 다음과 같다.

(1) 풍화토를 원지반으로 적용하였을 때에는 세그먼트 두께가 350.0 ㎜, 풍화암으로 변경하였을 때에는 300.0 ㎜, 연암으로 변경하였을 때에는 250.0 ㎜로 감소하였다.

(2) 풍화토를 원지반으로 적용하였을 때에는 배면의 소요철근은 H29@150로 계산되었고, 풍화암 및 연암의 소요철근은 H22@150로 감소되었다. 전면의 소요철근은 H25@150로 계산되었고, 풍화암 및 연암의 소요철근은 H22@150로 감소되었다.

(3) 쉴드터널 설계 시 지반의 강도가 강해질수록 소요두께 및 철근량 감소되기 때문에 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

6. PS 볼 뒤채움

수치해석에 적용된 쉴드터널은 지표면에서 터널직경 D의 2배가량 하부에 위치하고 있으며, 배면 0.15 m에 뒤채움 되는 PS 볼(입경 1.0~2.5 ㎜, 단위중량 23 kN/㎥)을 고려하여 배수조건에 따른 쉴드터널의 안정성을 고려하였다.

가. 비배수조건

지표면에서 터널직경 D의 2배인 지중에 시공된 쉴드터널 주변에 PS 볼 그라우트를 고려(0.15 m)하여 모델링하였다(그림 2.10.33 참조). 비배수조건의 쉴드터널은 매립토 및 풍화토 지반에 투수계수는 1.0×10^{-6} m/sec를 적용하고 쉴드터널 두께만큼의 2차원 평면요소 투수계수를 1.0×10^{-9} m/sec로 적용하였다.

비배수조건일 때 최대 전단력은 쉴드터널 라이닝 상부 및 하부 측면에서 발생하였고, 최대 모멘트는 상부 및 측면부 중앙에서 발생하였다. 쉴드터널 라이닝의 상부 및 하부 측면에서 압축 전단력 155.05 kN과 인장 전단력 155.28 kN이 발생하였다(그림 2.3.33 참조). 또한 쉴드터널 라이닝 상부 및 측면부 중앙에서 인장 모멘트 252.66 kN·m와 압축 모멘트 262.89 kN·m가 발생하였다(그림 2.10.34 참조). 또한 비배수조건에서 쉴드터널에 유출되는 유출량은 0.00 ㎥/m/sec로 나타났다(그림 2.10.35 참조).



그림 2.10.33 비배수조건의 전단력



그림 2.10.34 비배수조건의 모멘트



그림 2.10.35 비배수조건의 유출량

나. 배수조건

지표면에서 터널직경 D의 2배인 지중에 시공된 쉴드터널 주변에 PS 볼 그라우트를 고려(0.15 m)하여 모델링하였다(그림 2.10.36 참조). 모델링의 좌측부와 우측부는 수평방향에 대하여 구속조건을 적용하고 하단부는 수평방향과 수직방향에 대하여 구속조건을 적용하였다. 배수조건은 지반 및 라이닝을 모델링한 평면요소의 투수계수를 1.0×10^{-6} m/sec로 동일하게 적용하여 검토하였다.

배수조건일 때 최대 전단력은 쉴드터널 라이닝 상부 및 하부 측면에서 발생하였고, 최대 모멘트는 상부 및 측면부 중앙에서 발생하였다. 쉴드터널 라이닝의 상부 및 하부 측면에서 압축 전단력 115.94 kN과 인장 전단력 116.07 kN이 발생하였다(그림 2.10.36 참조). 또한 쉴드터널 라이닝 상부 및 측면부 중앙에서 인장 모멘트 196.07 kN·m와 압축 모멘트 186.62 kN·m가 발생하였다(그림 2.10.37 참조). 또한 배수조건에서 쉴드터널에 유출되는 유출량은 1.9595×10^{-6} ㎥/m/sec로 나타났다(그림 2.10.38 참조).



그림 2.10.36 배수조건의 전단력



그림 2.10.37 배수조건의 모멘트



그림 2.10.38 배수조건의 유출량

다. PS 볼 뒤채움에 따른 단면력

해석에 적용된 쉴드터널은 지표면에서 터널직경 D의 2배가량 하부에 위치하고 있으며, 배면 0.15 m에 뒤채움 되는 PS 볼(입경 1.0~2.5 ㎜, 단위중량 23 kN/㎥)을 고려하여 쉴드터널의 안정성을 고려하였다. 배수조건의 영향을 고려하기 위하여 쉴드터널의 두께를 2차원 평면요소로 모델링하여 투수계수를 변화시키면서 배수 및 비배수조건에 따른 쉴드터널 라이닝의 단면력을 검토하였다(표 2.10.15 및 표 2.10.16 참조).

비배수조건일 때 쉴드터널 라이닝에 작용하는 축력은 원지반조건의 152.59 kN에서 PS 볼 하중조건의 155.28 kN로 1.76% 증가하였고, 모멘트는 원지반조건의 259.82 kN·m에서 PS 볼 하중조건의 262.89 kN·m로 1.18% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 배수조건일 때 쉴드터널 라이닝에 작용하는 축력은 원지반조건의 111.79 kN에서 PS 볼 하중조건의 116.07 kN로 3.83% 증가하였고, 모멘트는 원지반조건의 184.11 kN·m에서 PS 볼 하중조건의 196.07 kN·m로 6.50% 증가하는 것으로 나타났다.

또한 원지반조건일 때 쉴드터널 라이닝에 작용하는 축력은 비배수조건의 152.59 kN에서 배수조건의 111.79 kN로 26.74% 감소하였고, 모멘트는 비배수조건의 259.82 kN·m에서 배수조건의 184.11 kN·m로 29.14% 감소하는 것으로 나타났다. PS 볼 뒤채움을 고려하였을 때 비배수조건의 155.28 kN에서 배수조건의 116.07 kN로 25.25% 감소하였고, 모멘트는 비배수조건의 262.89 kN·m에서 배수조건의 196.07 kN·m로 25.42% 감소하는 것으로 나타났다.

표 2.10.15 PS 볼 하중에 따른 단면력 검토

구 분		축 력(kN)	모멘트(kN · m)	비 고
비배수조건	원지반	152.59	259.82	
	PS 볼 하중고려	155.28	262.89	
	증 감 율	+ 1.76%	+ 1.18%	
배수조건	원지반	111.79	184.11	
	PS 볼 하중고려	116.07	196.07	
	증 감 율	+ 3.83%	+ 6.50%	

표 2.10.16 배수조건에 따른 단면력 검토

구 분		축 력(kN)	모멘트(kN · m)	비 고
원지반	비배수조건	152.59	259.82	
	배수조건	111.79	184.11	
	증 감 율	- 26.74%	- 29.14%	
PS 볼 하중 고려	비배수조건	155.28	262.89	
	배수조건	116.07	196.07	
	증 감 율	- 25.25%	- 25.42%	

라. 검토결과

현장조건에서 배면 0.15 m 두께에 PS 볼을 뒤채움을 고려하여 세그먼트 단면력을 고려한 결과는 다음과 같다.

(1) 비배수조건으로 검토 시 축력은 약 1.76%, 모멘트는 약 1.18% 증가하였고, 배수조건으로 검토 시 축력은 약 3.83%, 모멘트는 약 6.50% 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 배면의 뒤채움을 PS 볼로 적용 시 축력은 평균 약 2.80%, 모멘트는 평균 약 3.84% 증가하는 것으로 나타났다.

(2) 원지반에서 배수조건 고려 시 비배수조건보다 축력은 약 26.74%, 모멘트는 약 29.14% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 PS 볼 뒤채움에서 배수조건 고려 시 비배수조건보다 축력은 약 25.25%, 모멘트는 약 25.42% 감소하는 것으로 나타났다.

7. 모형실험 지반조건

지표면에서 터널직경 D의 2배인 지중에 시공된 쉴드터널의 지반을 모형실험에서 사용한 표준사와 화강풍화토를 적용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 통한 쉴드터널 라이닝의 단면력을 비교·검토한 결과는 다음과 같다.

가. 표준사 지반

모델링의 좌측부와 우측부는 수평방향에 대하여 구속조건을 적용하였고, 하단부는 수평방향과 수직방향에 대하여 구속조건을 적용하였다. 지반은 터널모형실험에 이용된 표준사의 특성(밀도 15.7 kN/㎥, 투수계수 2.71 × 10^{-4} m/sec)을 적용하였다.

(1) 비배수조건

비배수조건의 쉴드터널은 매립토 및 풍화토 지반에 투수계수는 1.0 × 10^{-6} m/sec를 적용하고 쉴드터널 두께만큼의 2차원 평면요소 투수계수를 1.0 × 10^{-9} m/sec로 적용하였다.

비배수조건일 때 최대 전단력은 쉴드터널 라이닝 상부 및 하부 측면에서 발생하였고, 최대 모멘트는 상부 및 측면부 중앙에서 발생하였다. 쉴드터널 라이닝의 상부 및 하부 측면에서 압축 전단력 171.82 kN과 인장 전단력 176.51 kN이 발생하였다(그림 2.10.39 참조).

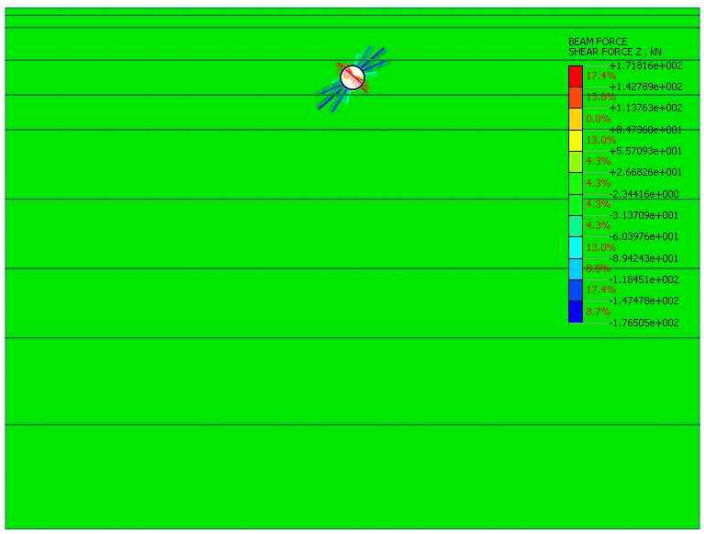


그림 2.10.39 비배수조건의 전단력

또한 쉴드터널 라이닝 상부 및 측면부 중앙에서 인장 모멘트 305.67 kN·m와 압축 모멘트 268.45 kN·m가 발생하였다(그림 2.10.40 참조). 쉴드터널 내부로 유입되는 유출량은 0.0 ㎥/m/sec로 나타났다(그림 2.10.41 참조).

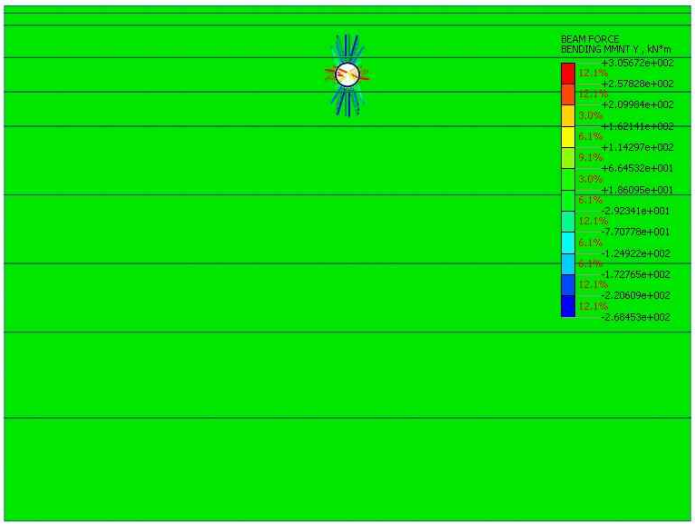


그림 2.10.40 비배수조건의 모멘트

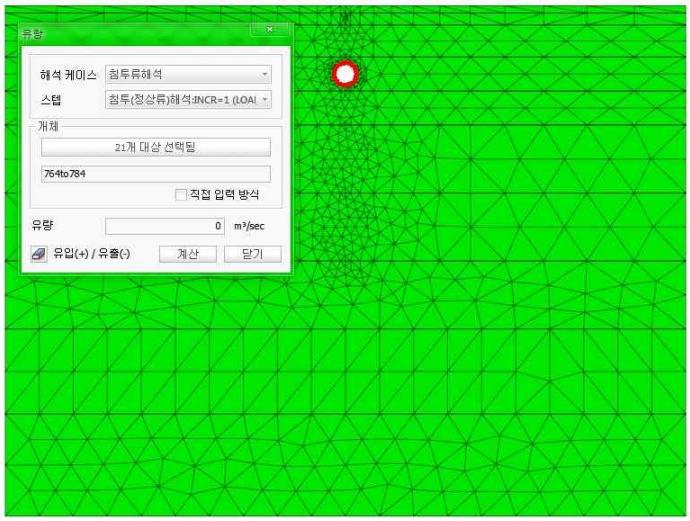


그림 2.10.41 비배수조건의 유출량

(2) 배수조건

배수조건의 쉴드터널을 모사하기 위해 쉴드터널 두께만큼의 2차원 평면요소에 표준사 투수계수 2.71×10^{-4} m/sec로 적용하였다.

배수조건일 때 최대 전단력은 쉴드터널 라이닝 상부 및 하부 측면에서 발생하였고, 최대 모멘트는 상부 및 측면부 중앙에서 발생하였다. 쉴드터널 라이닝의 상부 및 하부 측면에서 압축 전단력 146.95 kN과 인장 전단력 148.81 kN이 발생하였다(그림 2.10.42 참조). 또한 쉴드터널 라이닝 상부 및 측면부 중앙에서 인장 모멘트 251.26 kN·m와 압축 모멘트 244.90 kN·m가 발생하였다(그림 2.10.43 참조). 쉴드터널 내부로 유입되는 유출량은 5.3327 × 10^{-3} ㎥/m/sec로 나타났다(그림 2.10.44 참조).

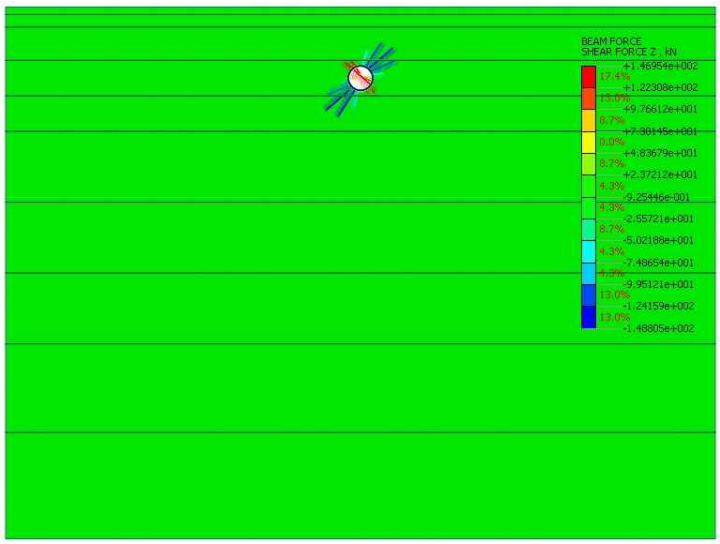


그림 2.10.42 배수조건의 전단력

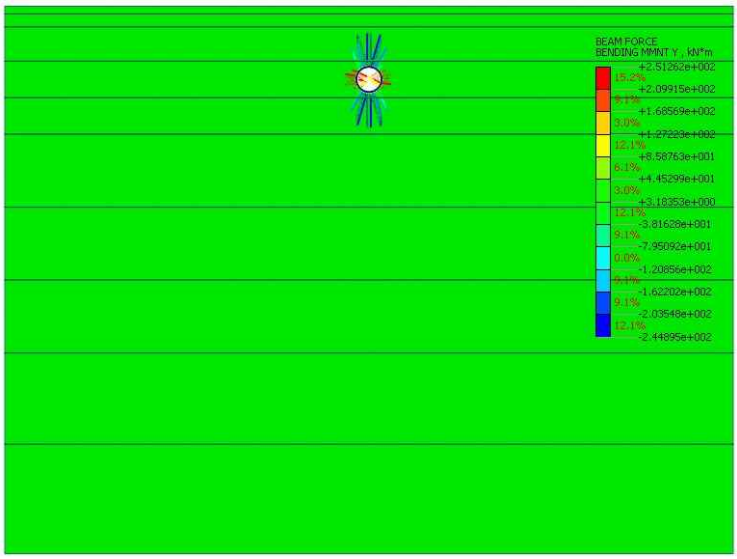


그림 2.10.43 배수조건의 모멘트

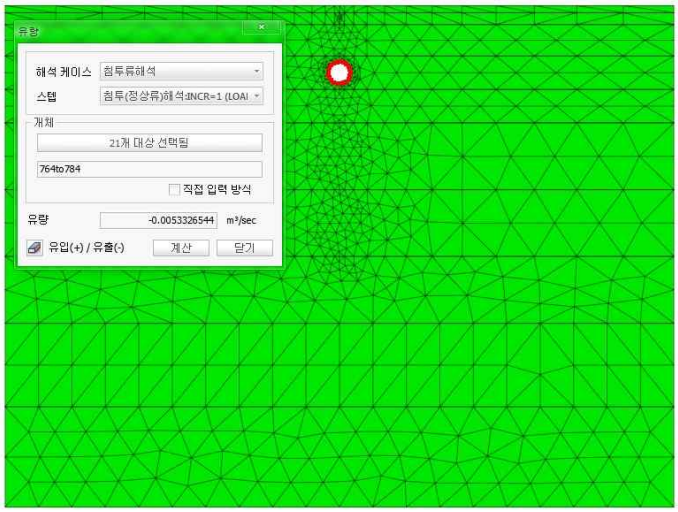


그림 2.10.44 배수조건의 유출량

나. 화강풍화토 지반

모델링의 좌측부와 우측부는 수평방향에 대하여 구속조건을 적용하였고, 하단부는 수평방향과 수직방향에 대하여 구속조건을 적용하였다. 지반은 터널모형실험에 이용된 화강풍화토의 특성(밀도 18.8 kN/㎥, 투수계수 5.64 × 10^{-5} m/sec)을 적용하였다.

(1) 비배수조건

비배수조건의 쉴드터널은 매립토 및 풍화토 지반에 투수계수는 1.0 × 10^{-6} m/sec를 적용하였고 쉴드터널 두께만큼의 2차원 평면요소 투수계수를 1.0 × 10^{-9} m/sec로 적용하였다. 비배수조건일 때 최대 전단력은 쉴드터널 라이닝 상부 및 하부 측면에서 발생하였고, 최대 모멘트는 상부 및 측면부 중앙에서 발생하였다.

쉴드터널 라이닝의 상부 및 하부 측면에서 압축 전단력 134.70 kN과 인장 전단력 140.05 kN이 발생하였다(그림 2.10.45 참조). 또한 쉴드터널 라이닝 상부 및 측면부 중앙에서 인장 모멘트 242.89 kN·m와 압축 모멘트 196.65 kN·m가 발생하였다(그림 2.10.46 참조). 쉴드터널 내부로 유입되는 유출량은 0.0 ㎥/m/sec로 나타났다(그림 2.10.47 참조).

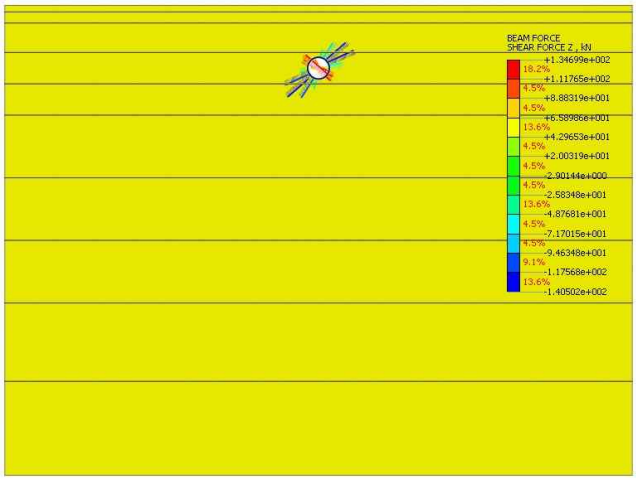


그림 2.10.45 비배수조건의 전단력

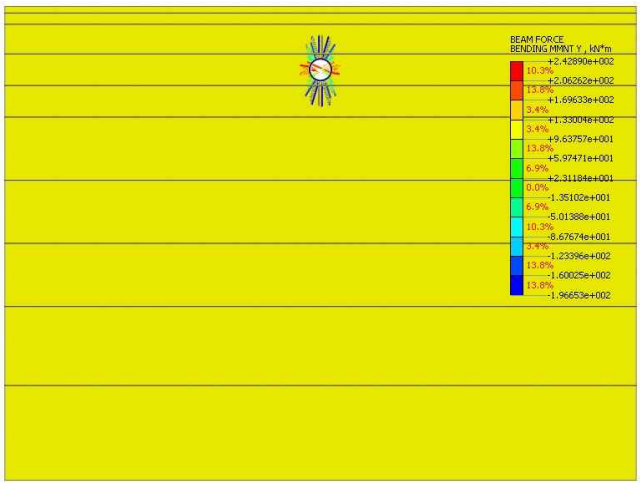


그림 2.10.46 비배수조건의 모멘트

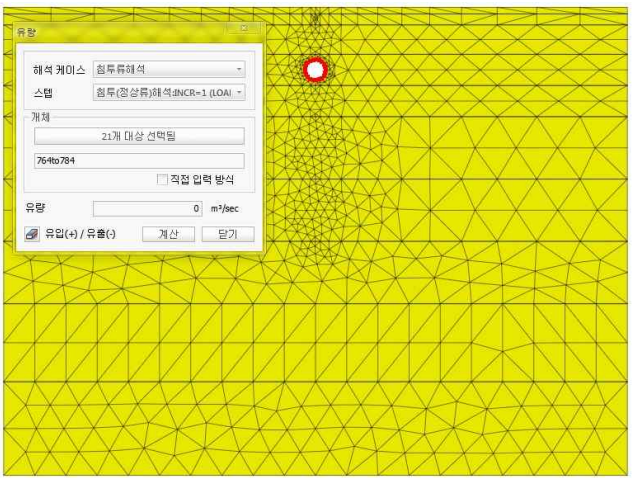


그림 2.10.47 비배수조건의 유출량

(2) 배수조건

배수조건의 쉴드터널을 모사하기 위해 쉴드터널 두께만큼의 2차원 평면요소에 표준사 투수계수 5.64×10^{-5} m/sec로 적용하였다.

배수조건일 때 최대 전단력은 쉴드터널 라이닝 상부 및 하부 측면에서 발생하였고, 최대 모멘트는 상부 및 측면부 중앙에서 발생하였다. 쉴드터널 라이닝의 상부 및 하부 측면에서 압축 전단력 101.93 kN과 인장 전단력 104.59 kN이 발생하였다(그림 2.10.48 참조). 또한 쉴드터널 라이닝 상부 및 측면부 중앙에서 인장 모멘트 170.60 kN·m와 압축 모멘트 168.78 kN·m가 발생하였다(그림 2.10.49 참조). 쉴드터널 내부로 유입되는 유출량은 1.1098×10^{-3} ㎥/m/sec로 나타났다(그림 2.10.50 참조).

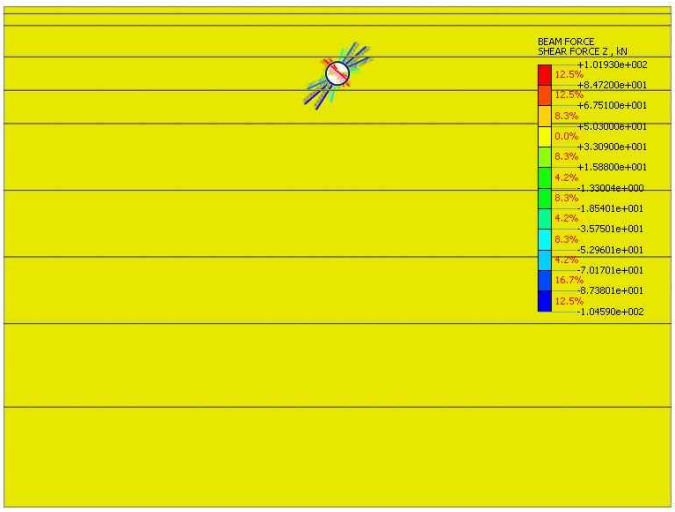


그림 2.10.48 배수조건의 전단력

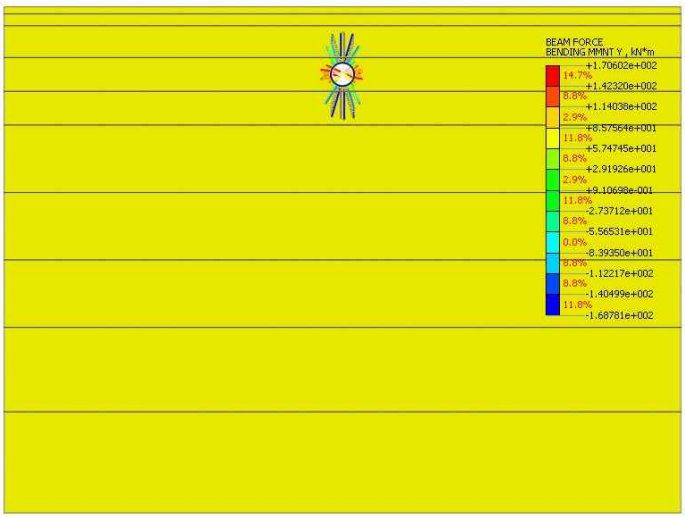


그림 2.10.49 배수조건의 모멘트

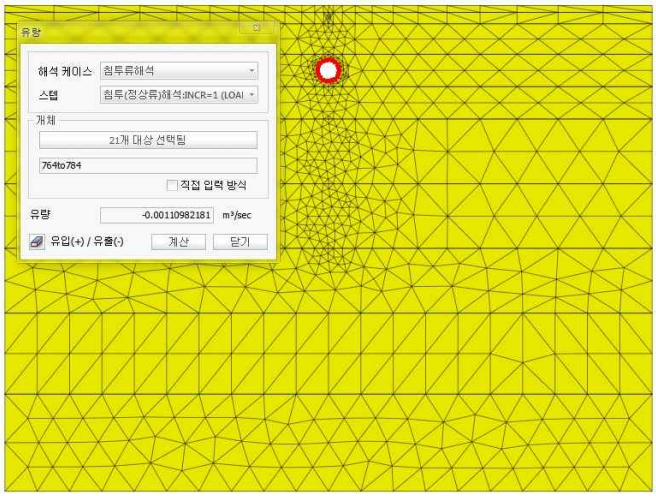


그림 2.10.50 배수조건의 유출량

다. 지반조건 고려 단면력

지반을 터널모형 실험에서 사용한 표준사(밀도 15.7 kN/㎥, 투수계수 2.71 × 10^{-4} m/sec) 및 화강풍화토(밀도 18.8 kN/㎥, 투수계수 5.64 × 10^{-5} m/sec)의 특성을 적용하여 쉴드터널의 안정성을 고려하였다. 배수조건의 영향을 고려하기 위하여 쉴드터널의 두께를 2차원 평면요소로 모델링하여 투수계수를 변화시키면서 배수 및 비배수조건에 따른 쉴드터널 라이닝의 단면력을 검토하였다(표 2.10.17, 표 2.10.18 참조).

비배수조건일 때 쉴드터널 라이닝에 작용하는 축력은 표준사 조건의 176.51 kN에서 화강풍화토 조건의 140.05 kN로 20.66% 감소하였고, 모멘트는 표준사 조건의 305.67 kN·m에서 화강풍화토 조건의 242.89 kN·m로 20.54% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 배수조건일 때 쉴드터널 라이닝에 작용하는 축력은 표준사 조건의 148.81 kN에서 화강풍화토 조건의 104.59 kN로 29.72% 감소하였고, 모멘트는 표준사 조건의 251.26 kN·m에서 화강풍화토 조건의 170.60 kN·m로 32.10% 감소하는 것으로 나타났다.

또한 표준사조건일 때 쉴드터널 라이닝에 작용하는 축력은 비배수조건의 176.51 kN에서 배수조건의 148.81 kN로 15.69% 감소하였고, 모멘트는 비배수조건의 305.67 kN·m에서 배수조건의 251.26 kN·m로 17.80% 감소하는 것으로 나타났다. 화강풍화토 조건일 때 비배수조건의 140.05 kN에서 배수조건의 104.59 kN로 25.32% 감소하였고, 모멘트는 비배수조건의 242.89 kN·m에서 배수조건의 170.60 kN·m로 29.76% 감소하는 것으로 나타났다.

표 2.10.17 지반종류에 따른 단면력 검토

구 분		축 력(kN)	모멘트(kN · m)	비 고
비배수조건	표준사	176.51	305.67	
	화강풍화토	140.05	242.89	
	증 감 율	- 20.66%	- 20.54%	
배수조건	표준사	148.81	251.26	
	화강풍화토	104.59	170.60	
	증 감 율	- 29.72%	- 32.10%	

표 2.10.18 배수조건에 따른 단면력 검토

구 분		축 력(kN)	모멘트(kN · m)	비 고
표준사	비배수조건	176.51	305.67	
	배수조건	148.81	251.26	
	증 감 율	- 15.69%	- 17.80%	
화강풍화토	비배수조건	140.05	242.89	
	배수조건	104.59	170.60	
	증 감 율	- 25.32%	- 29.76%	

라. 검토결과

지표면에서 터널직경 D의 2배가량 하부에 위치하고 있는 쉴드터널에 대하여 지반조건을 터널모형 실험에서 사용한 표준사 및 화강풍화토의 특성을 적용하여 쉴드터널의 안정성을 고려한 결과는 다음과 같다.

(1) 비배수조건으로 검토 시 화강풍화토일 때 표준사일 때 보다 축력은 약 20.66% 감소하였고, 모멘트는 약 20.54% 감소하는 것으로 나타났다. 배수조건으로 검토 시에는 화강풍화토일 때 축력은 약 29.72% 감소하였고, 모멘트는 약 32.10% 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같이 표준사 보다 밀도가 크고 투수계수가 작은 화강풍화토를 이용하면 축력은 평균 약 25.19% 감소하고, 모멘트는 평균 약 26.32% 감소하는 것으로 나타났다.

(2) 표준사조건일 때 배수조건을 고려하면 축력은 약 15.69%, 모멘트는 약 17.80% 감소하였고, 화강풍화토일 때 배수조건을 고려하면 축력은 약 25.32%, 모멘트는 약 29.76% 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같이 화강풍화토일 때 축력과 모멘트의 감소량이 표준사일 때 보다 더 크게 나타났다.

소결론

본 연구에서는 지중에 건설된 쉴드터널을 모사하고 터널 라이닝의 단면력, 작용응력, 지반침하 및 터널내 지하수 유출량 등을 확인하기 위하여 현장조건을 고려한 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 지하수위, 터널심도, 지반종류 및 뒤채움(PS 볼) 변화에 따른 터널 라이닝의 영향을 비교·검토하였다.

(1) 현장에 시공된 비배수조건의 쉴드터널에서 배수조건을 고려하면, 최대 전단력은 약 26.7% 감소하였고 최대 모멘트는 약 29.1% 감소하는 것으로 나타났다.

(2) 지하수위 높이 변화에 따른 쉴드터널 라이닝 작용응력을 검토하기 위하여 우기시, 평상시, 시공중 및 건기시를 검토하였다. 지하수위 감소에 따라 축력의 변화는 발생하지 않았다. 또한 터널 라이닝의 상부의 모멘트는 감소하였고 하부의 모멘트는 증가하였으며 중앙부의 모멘트는 변화하지 않았다.

지하수위 높이가 우기시 → 평상시 → 시공중 및 건기시로 변화함에 따라 세그먼트 터널 라이닝에 작용하는 축력은 상부와 하부에서는 증가하였고, 중앙부에서는 감소하는 경향을 보였다. 터널 라이닝에 작용하는 모멘트의 경우, 상부와 하부에서는 감소하고 중앙부에서는 증가하는 경향을 보였다.

(3) 터널심도에 따른 쉴드터널의 안정성을 평가하기 위하여 현장조건(2D조건), 터널직경 D의 4배인 4D조건, 터널직경 D의 6배인 6D조건으로 검토하였다. 현장조건일 때 배수조건을 고려하면 축력은 약 25.9% 감소하였고, 모멘트는 약 28.5% 감소하였다. 4D조건일 때 배수조건을 고려하면 축력은 약 26.8% 감소하였고, 모멘트는 약 27.1% 감소하였다. 6D조건일 때 배수조건을 고려하면 축력은 약 27.3% 감소하였고, 모멘트는 약 27.1% 감소하였다. 유출량을 검토한 결과, 심도가 2배 깊어지면 약 124.3% 증가하였고, 심도가 3배 깊어지면 약 263.8% 증가하였다.

(4) 터널심도에 따른 지반침하 영향을 현장조건(2D조건), 4D조건 및 6D조건으로 하여 검토하였다. 전체침하량을 검토하면 터널심도가 깊어질수록 적어지는 것으로 나타났고, 최대침하량을 검토하면 터널심도가 깊어질수록 영향범위는 넓어지는 것으로 나타났다.

(5) 현장조건의 지하수위를 동일하게 적용하고 지중의 풍화토를 풍화암 및 연암으

로 변경시키며 검토하였다. 세그먼트 두께는 원지반인 풍화토일 때 350.0 ㎜, 풍화암일 때 300.0 ㎜, 연암일 때 250.0 ㎜로 감소하는 것으로 나타났다. 배면의 소요철근은 풍화토일 때 H29@150로 계산되었고, 풍화암 및 연암의 소요철근은 H22@150로 감소되었다. 또한 전면의 소요철근은 H25@150로 계산되었고, 풍화암 및 연암의 소요철근은 H22@150로 감소되었다.

(6) 현장조건에서 배면 뒤채움을 0.15 m 두께로 PS 볼을 적용하여 검토하였다. 비배수조건일 때 축력은 약 1.76%, 모멘트는 약 1.18% 증가하였고, 배수조건일 때 축력은 약 3.83%, 모멘트는 약 6.50% 증가하였다. 그러므로 뒤채움을 PS 볼로 적용하면 축력은 평균 약 2.80%, 모멘트는 평균 약 3.84% 증가하는 것으로 나타났다.

(7) 현장조건 쉴드터널의 지반조건을 터널모형 실험에서 사용한 표준사 및 화강풍화토의 특성을 적용하여 검토하였다. 비배수조건으로 검토 시 화강풍화토일 때 표준사일 때 보다 축력은 약 20.66% 감소하였고, 모멘트는 약 20.54% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 배수조건으로 검토 시에는 화강풍화토일 때 축력은 약 29.72% 감소하였고, 모멘트는 약 32.10% 감소하는 것으로 나타났다. 표준사조건일 때 배수조건을 고려하면 축력은 약 15.69%, 모멘트는 약 17.80% 감소하였고, 화강풍화토일 때 배수조건을 고려하면 축력은 약 25.32%, 모멘트는 약 29.76% 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같이 화강풍화토일 때 축력과 모멘트의 감소량이 표준사일 때 보다 더 크게 나타났다.

제 11 절 현장 계측을 통한 쉴드터널 작용 압력 평가

현재 국내외 쉴드터널은 비배수 개념으로 설계 및 시공되고 있기 때문에, 배수형 쉴드터널에서 지하수의 유입 및 흐름으로 나타나는 수압 저감을 현장계측으로 평가하는 것은 불가능한 상황이다. 비배수 개념에서 세그먼트 설계시 단면 두께는 토압과 수압을 모두 고려하여 산정되는데, 여기서 고려되는 수압은 쉴드 세그먼트면에 작용하는 수압을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 세그먼트면이 아닌 지반 내 지하수의 흐름이 자유로운 위치에서의 수압이 비배수 개념에서 산정되는 수압(r_w·H)과 유사한지 현장계측을 통해 평가하고자 하였다.

1. 계획 수립

가. 현장 개요

현장계측은 동해○○화력발전소 전력구 쉴드터널 시공현장에서 수행되었는데, 그림 2.11.1은 대상 현장의 종평면도를 나타낸 것이다.

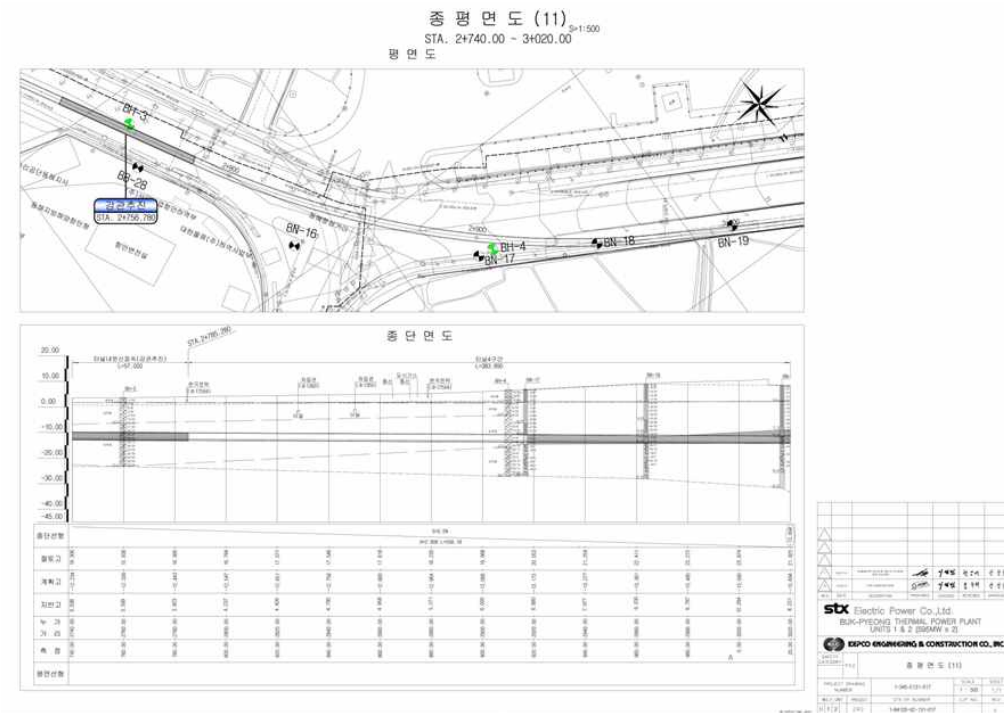


그림 2.11.1 쉴드터널 계측기 설치 현장 종평면도

그림 2.11.2는 쉴드터널 구간에서 계측기를 설치한 지점을 나타낸 것이다. A, B지점에는 간극수압계를 설치하였는데, 설치지점의 지하수위는 각각 12.34m, 13.98m이다. 간극수압계 설치 지점인 A 지점 전까지는 스틸 세그먼트가 시공된 구간이며, C, D 지점에는 토압계를 설치하였다.

계측 현장의 지반은 매립층과 퇴적층으로 구성되어 있는데 정확한 투수계수는 산정하지 못 하였으나, 모형실험에서 사용한 사질토에 비해서는 투수계수가 더 작을 것으로 예상된다.

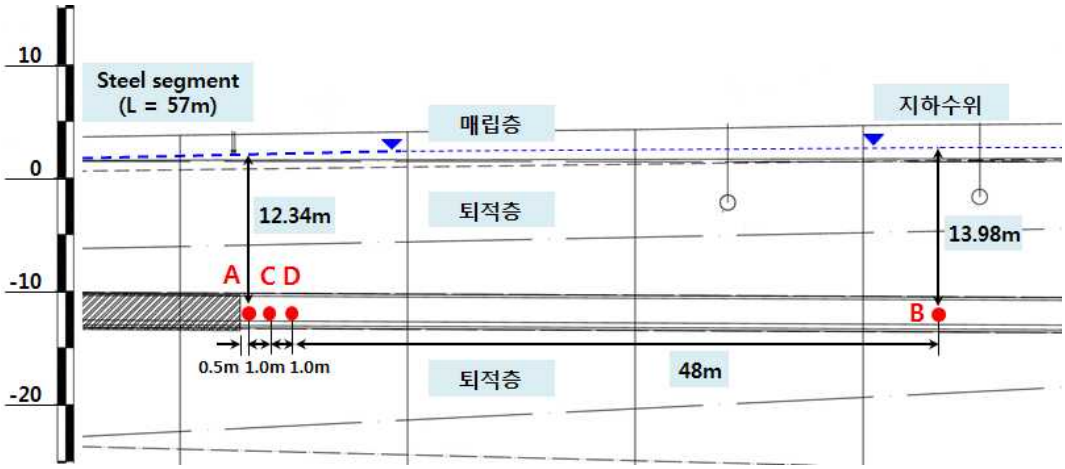


그림 2.11.2 쉴드터널 계측기 설치 위치

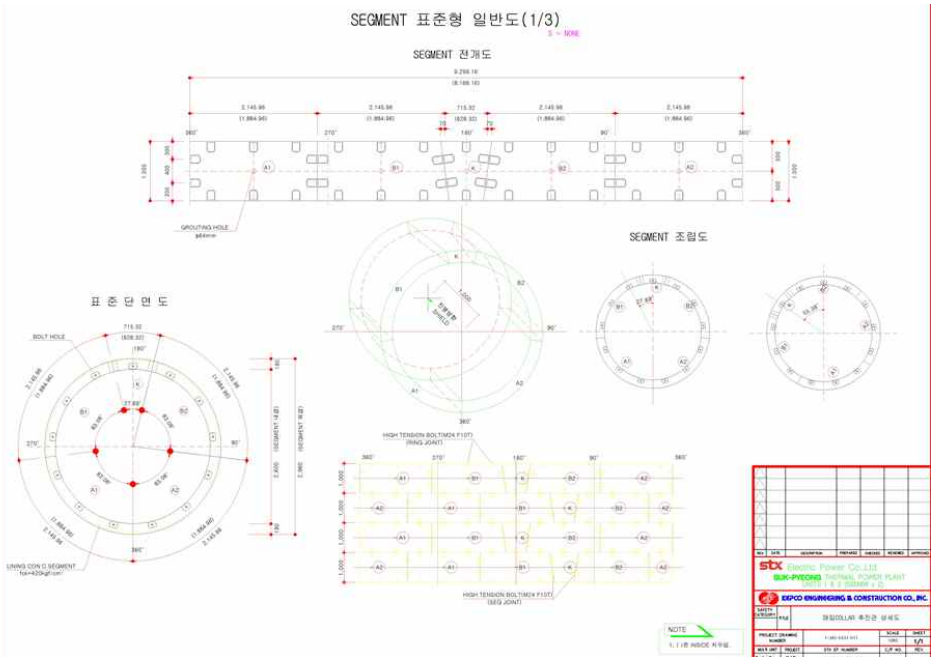


그림 2.11.3 계측 현장 쉴드터널 일반도

그림 2.11.3은 계측 현장에 설치되는 쉴드터널의 일반도를 나타낸 것이다. 본 현장에 적용되는 쉴드터널은 내경 2.6m로서 쉴드 세그먼트의 단면 두께는 180mm이다. 그리고 체결방식은 직경이 작은 전력구 쉴드터널에 일반적으로 적용되는 볼트 박스 형식이다

나. 계측 계획

표 2.11.1은 현장 계측에 사용될 계측기 종류에 대해 나타낸 것이고, 표 2.11.2는 계측기 사양을 나타낸 것이다.

표 2.11.1 설치 계측기 종류

항 목		계측구성	계측내용	수량(ea)	사진
계측센서	정적	토압계	·부재가 받는 토압상태 및 변형파악	2	
		간극수압계	·토양의 간극수압 및 수위변화 파악	2	
측정장비		정적 D/L	·정적 DATA 측정	1	

표 2.11.2 설치 계측기 사양

구 분	센서명	모델명	제작사	사 양	계측방법
계측센서	토압계	KDE-500KPA	일본 TML	· 측정방식: 전기저항식 · 측정범위: 500kPa · 정격출력: 0.5mV/V · 사용온도범위 : -20 ~ +60℃	정적
	간극 수압계	KPD-500KPA	일본 TML	· 측정방식: 전기저항식 · 측정범위: 500kPa · 정격출력: 1mV/V · 사용온도범위: 0℃ ~ 60℃	
측정장비	정적 데이터 로거			· 자동계측 : 4개월 · 수동계측 : 현장 필요시까지	

쉴드터널과 관련된 국내외 연구 중 현장계측과 관련된 내용은 세그먼트 내부에 계측기를 설치한 경우가 대부분인데[1], 세그먼트 내부에 설치된 계측기는 실제 지반 응력을 백퍼센트 반영하는데 한계가 있다. 특히, 세그먼트 배면에 토압계를 설치한 경우는 뒤채움재가 충진되어 토압계를 덮게 되어 실제 지반에 접할 수가 없고, 뒤채움재 양생 후에는 세그먼트 배면에 토압을 지지하는 하나의 지지층이 생성되는 결과를 가져온다. 따라서, 본 연구에서는 실제 쉴드터널 배면 지반 내에 작용하는 수압을 최대한 정확히 측정하기 위해 새로운 방법을 고안하였다.

(1) 토압계 설치 방법

쉴드 세그먼트 배면에 실제적으로 작용하는 토압을 효과적으로 측정하기 위해 세그먼트 중심부에 설치되어 있는 주입홀을 이용하는 새로운 방법을 고안하였다.

그림 2.11.4는 세그먼트 주입홀을 이용하여 토압계를 설치하는 방법을 나타낸 것이다. 토압계 설치하는 방법은 다음과 같다.

1단계는 공장에서 세그먼트 제작시 기존 주입홀 대신 금형으로 제작된 동일 직경의 삽입관을 제작하여 설치한다. 삽입관 내부에는 나사선을 설치하여 세그먼트 배면으로 토압계가 설치된 접시를 전진시킬 수 있게 한다. 토압계 머리 부분의 직경을 고려하여 세그먼트 배면 부분에는 미리 나무판 등을 이용하여 토압계 자리를 확보한다(그림 2.11.4(a)).

2단계는 나사선이 형성된 강관이 설치된 토압계 접시에 토압계를 설치하고 계측선을 강관 내부를 통과하여 일정 길이를 확보해 둔다. 그리고 토압계가 설치된 토압계 접시를 삽입관이 설치된 세그먼트에 나사선을 돌려서 설치한다(그림 2.11.4(b)).

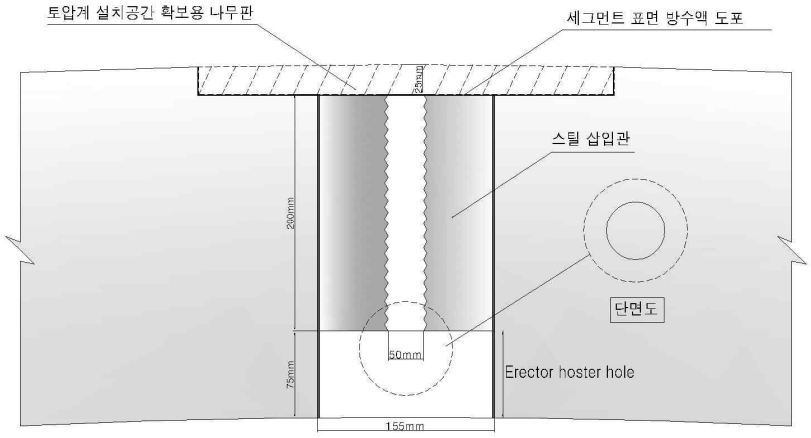
토압계는 설치 작업의 난이도와 데이터 획득의 용이성을 고려하여 그림 2.11.3의 일반도에서 B1 세그먼트에 설치하였다. 쉴드 세그먼트는 링 단위로 키 세그먼트(K-type)를 기준으로 지그재로 설치되기 때문에, 동일한 위치에 2개의 토압계를 설치하기 위해 첫 번째 링과 세 번째 링에 설치하였다. 이렇게 토압계 및 토압계 접시가 설치된 세그먼트는 시공 현장 내부로 운반하여 조립하게 된다.

3단계는 세그먼트가 링으로 조립된 후 토압계 접시의 나사선을 전진 방향으로 돌리게 되면, 토압계면이 세그먼트 배면 지반까지 전진하여 지반에 밀착하게 된다(그림 2.11.4(c)). 이런 방법은 토압계가 배면 뒤채움재에 묻히는 것을 방지하고, 실제 배면 지반에 확실하게 밀착할 수 있기 때문에 측정되는 데이터의 신뢰성을 더 높일 수 있다.

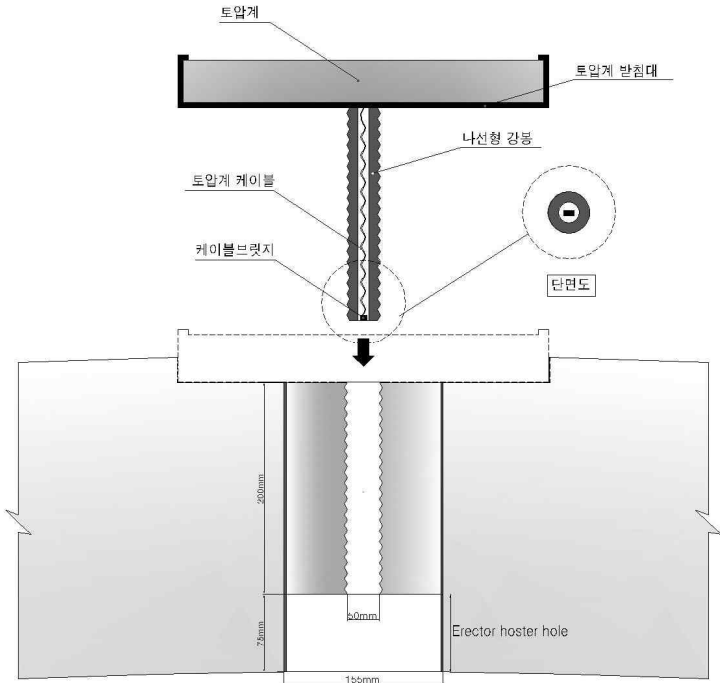
마지막 단계는 주입홀 내부를 급결 모르타르로 완전히 충진시켜 혹시나 토압계 접

시가 역방향으로 밀리는 것으로 방지하게 된다. 모르타르 충진 전에 계측선을 연장시키고 충진 후 캡으로 주입홀(삽입관)을 닫아 완전히 밀봉하게 된다(그림 2.11.4(d)).

그림 2.11.5는 공장에서 세그먼트 제작시 삽입관을 설치하는 모습을 나타낸 것이다.

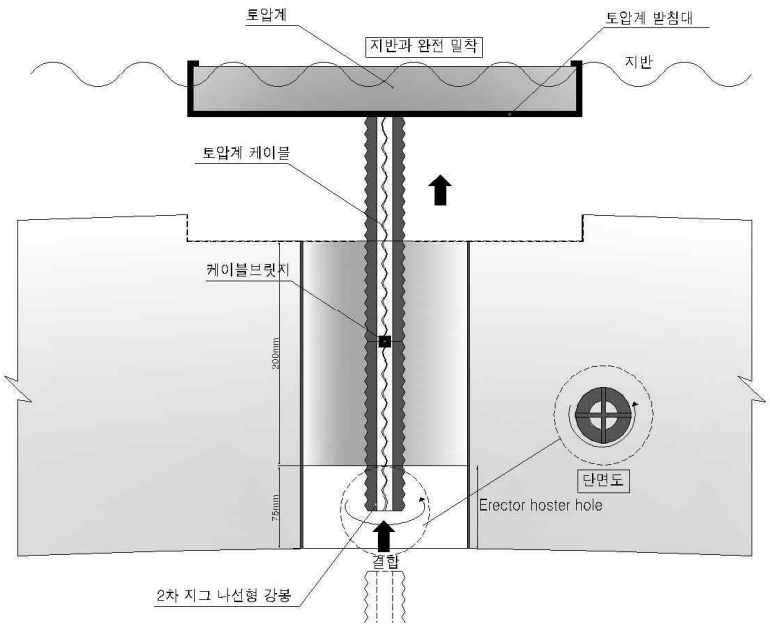


(a) 주입홀 설치 위치에 스틸 삽입관 설치

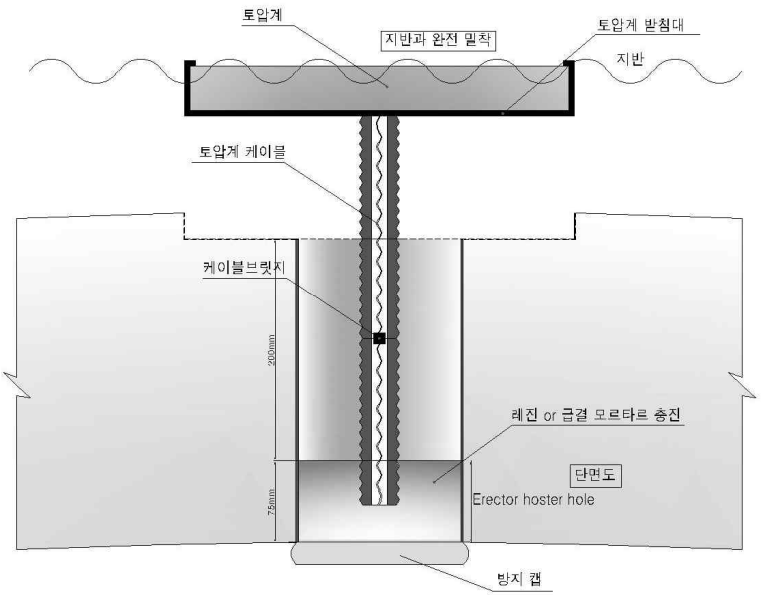


(b) 나사선이 설치된 토압계 접시 및 토압계 설치

그림 2.11.4 세그먼트 주입홀을 이용한 토압계 설치 방법



(c) 세그먼트 조립 후 나사선 접시 전진 및 배면 지반 토압계 밀착



(d) 주입홀 내부 급결 모르타르 충진 및 캡 설치

그림 2.11.4 세그먼트 주입홀을 이용한 토압계 설치 방법(계속)



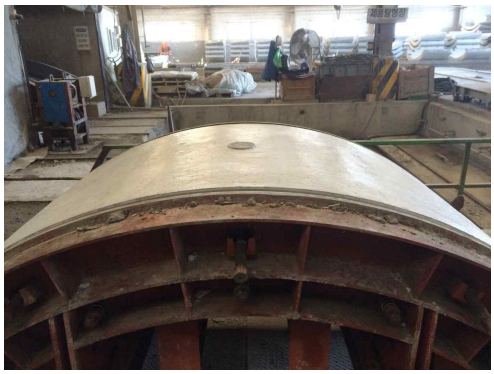
(a) 제작된 토압계 접시



(b) 콘크리트 타설 전 삽입관 설치



(c) 콘크리트 타설



(d) 증기 양생 완료



(e) 세그먼트 탈형



(f) 현장 운반 준비 완료

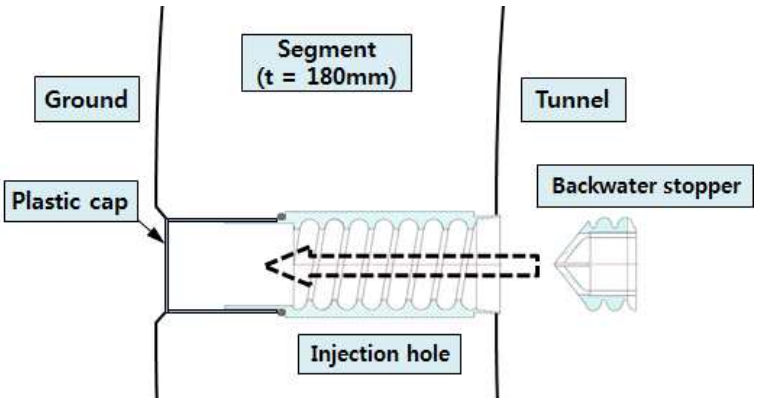
그림 2.11.5 계측용 세그먼트 제작 모습

(2) 간극수압계 설치 방법

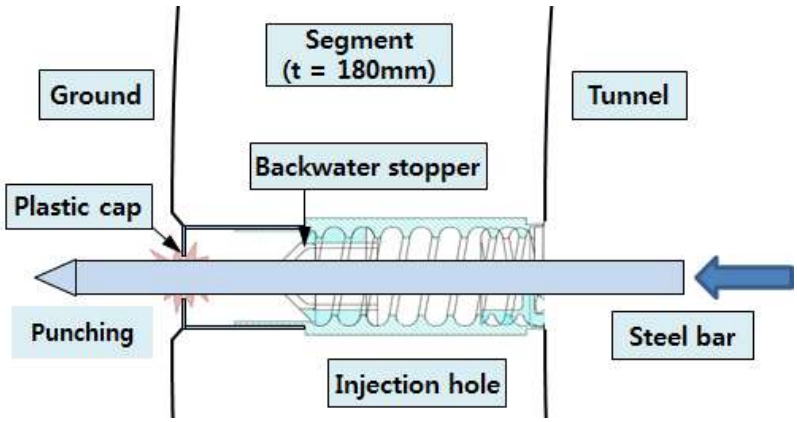
그림 2.11.6은 세그먼트 주입홀을 이용하여 간극수압계를 설치하는 방법을 나타낸 것이다. 간극수압계를 설치한 강관으로 주입홀을 관통시켜 지반 내에 설치하는 방법이다. 먼저, 주입홀과 세트로 설치되는 역류방지마개(backwater stopper)를 설치하여 주입홀 마개(plastic cap)를 관통했을 때 지반 내 지하수가 터널 내부로 과도하게 유입되는 것을 방지한다(그림 2.11.6(a)).

다음에는 강봉(steel bar)을 이용하여 주입홀 마개를 관통시키고(그림 2.11.6(b)), 곧바로 간극수압계(piezometer)가 설치된 강관(steel pipe)을 쉴드터널 배면 지반 내에 깊숙이 밀어 넣는다(그림 2.11.6(c)).

주입홀 마개(plug)를 설치하여 뒤채움 시공시 강관이 움직이거나 터널 내부로 밀리는 것을 방지하고, 주입홀 내부에 지수 그라우팅을 실시하여 지하수의 누수를 완전히 차단할 수 있도록 하였다(그림 2.11.6(d)).

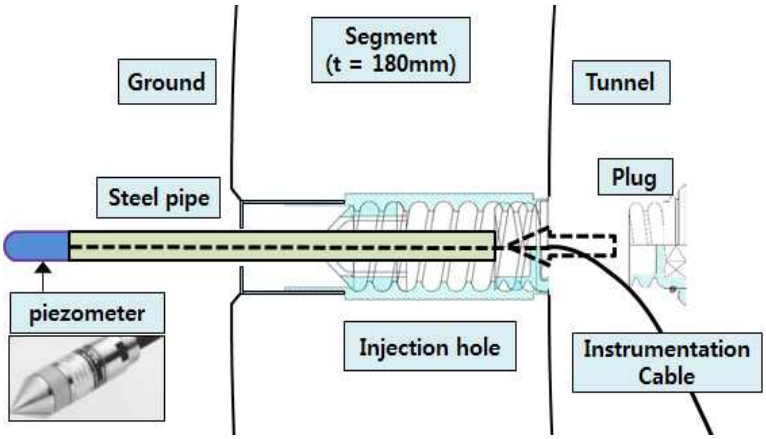


(a) 주입홀 내 역류방지마개 설치

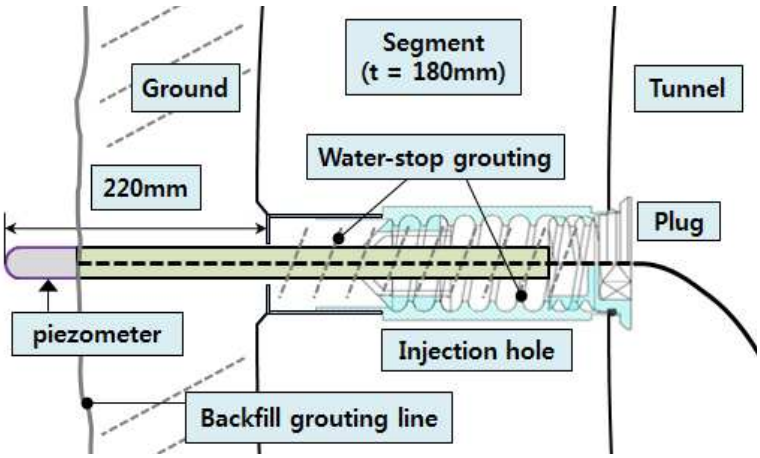


(b) 강봉을 이용하여 주입홀 외부 플라스틱 캡 관통

그림 2.11.6 세그먼트 주입홀을 이용한 간극수압계 설치 방법



(c) 간극수압계가 설치된 강관을 지반 내 삽입



(d) 주입홀 내부 차수 그라우팅

그림 2.11.6 세그먼트 주입홀을 이용한 간극수압계 설치 방법(계속)

이와 같은 방법으로 간극수압계를 설치하는 이유는 계측기가 지반 내에 완전히 삽입되게 하기 위해서이다. 따라서, 뒤채움재 주입시 간극수압계가 묻히지 않도록 현장 의견을 수렴하여 강관 길이를 세그먼트 배면에서 200mm 이상 충분히 떨어지도록 길이를 확보하였다.

계측기를 지반 내에 삽입시에도 배면 빈 공간을 통과한 강관이 흙 속에 들어가는 느낌이 들 때까지 삽입하였다. 그리고 간극수압계가 설치되는 주입홀 위치 선정은 설치 작업의 난이도를 고려하여 터널 단면에서 수평 방향으로 결정하였다. 그림 2.11.7은 쉴드터널에서 간극수압계가 설치된 주입홀의 위치는 나타낸 것이다.

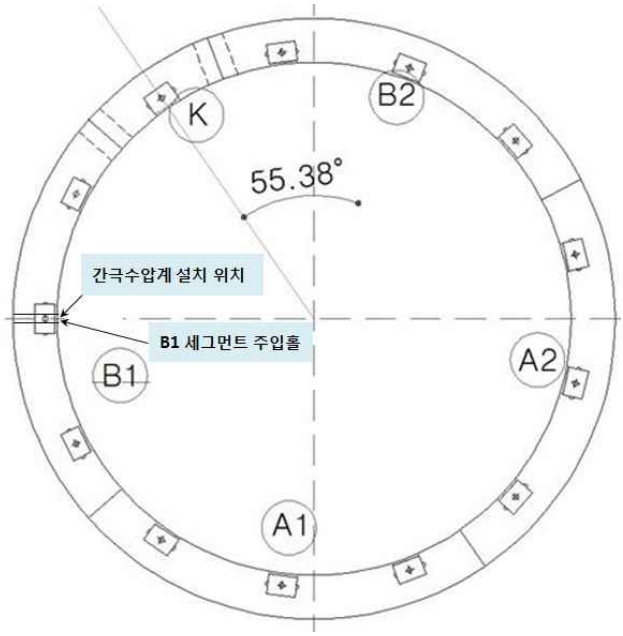


그림 2.11.7 쉴드터널 내 간극수압계 설치 위치

(3) 계측기 설치

그림 2.11.8은 현장 야적장에서 세그먼트에 토압계를 설치하는 모습을 나타낸 것인데, 미리 삽입관을 설치한 B1 세그먼트에 조립하기 전 주입홀 위치에 토압계를 설치하였다.

그림 2.11.9는 조립이 완료된 세그먼트 주입홀에 간극수압계를 설치하는 과정을 보여 주고 있다. 계측기점 A에서 뒤채움재를 충진하기 전 주입홀 마개를 관통시켰을 때 그림 2.11.9(b)처럼 상당량의 지하수가 터널 내로 유입되는 상황이 발생하였다.

본 시공현장이 바다에 인접해 있고 그림 2.11.2에서 확인할 수 있듯이 지하수위가 높기 때문에 지하수 차수방안 없이 주입홀을 관통할 경우 터널 내로 유입되는 지하수로 인해 계측기 설치 작업에 상당한 어려움이 있었다.

특히, 터널 내 과도한 지하수 유입으로 작업인부의 안전문제, 감리단의 점검, 시공사의 요청 등의 이유로 계측지점 B에서는 뒤채움재 충진 후 뒤채움재 내부에 간극수압계를 설치하기로 하였다. 따라서 B 지점에 설치되는 강관은 세그먼트면에서 150mm를 제작하여 계측기를 설치하였다.



(a) 삽입관 내부 정리



(b) 연장 나사관 삽입



(c) 계측선 연장



(d) 나사선 회전으로 삽입관 내 삽입



(e) 설치된 토압계

그림 2.11.8 세그먼트 내 토압계 설치 모습



(a) 주입홀 플라스틱 캡 관통



(b) 배면 지하수 유입 모습



(c) 간극수압계가 설치된 강관 삽입



(d) 주입홀 캡 설치



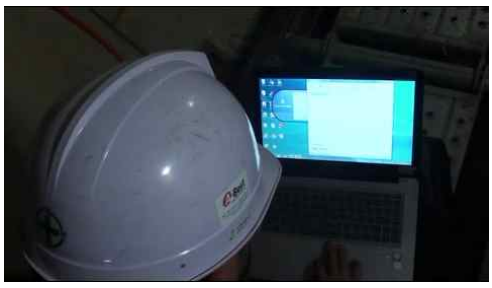
(e) 주입홀 내부 차수 그라우팅



(f) 계측선 연장



(g) 장기 계측용 박스 설치



(h) 초기 데이터 측정

그림 2.11.9 세그먼트 내 간극수압계 설치 모습

2. 계측 결과

가. 토압

토압 및 수압 계측은 4개월간 진행되었다. 그림 2.11.10은 계측 지점 C의 토압 계측 결과를 나타낸 것이다. 그림 2.11.2의 계측 지점의 지질도를 살펴보면 계측 지점 C는 매립층 두께가 2.24m, 퇴적층 두께가 12.06m 이다. 현장에서 조사된 포화단위중량(γ_{sat})는 1.8t/㎥ 으로서 이론적인 설계 토압을 계산해 보면 다음 식(2.11.1)과 같이 계산할 수 있다.

$$P_e = \gamma_{sat} \times h = (1.8 \times 2.24m) + (1.8 \times 12.06m) = 25.7\, t/m^2 \qquad \text{식(2.11.1)}$$

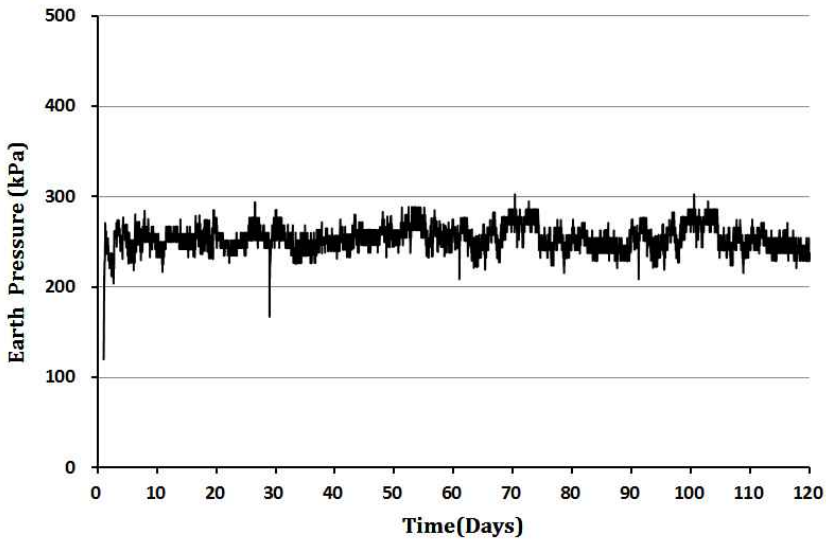


그림 2.11.10 계측 지점 C의 토압 계측 결과

그림 2.11.10을 살펴보면 계측된 토압 결과는 데이터가 넓은 범위에 분포하고는 있으나 약 250 kPa 전후로 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 이론적으로 계산된 토압 257 kPa(25.7 t/㎥)과 거의 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 2.11.2의 계측 지점의 지질도를 살펴보면 계측 지점 D는 매립층 두께가 2.93m, 퇴적층 두께가 12.18m 이다. 포화단위중량(γ_{sat}) 1.8t/㎥ 을 적용하여 이론적인 설계 토압을 계산해 보면 다음 식(2.11.2)과 같이 계산할 수 있다.

$$P_e = \gamma_{sat} \times h = (1.8 \times 2.93m) + (1.8 \times 12.18m) = 27.2\, t/m^2 \qquad \text{식(2.11.2)}$$

그림 2.11.11은 계측 지점 D의 토압 계측 결과를 나타낸 것이다. 계측된 토압 결과는 데이터가 넓은 범위에 분포하고는 있으나 약 270 kPa 전후로 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 이론적으로 계산된 토압 272 kPa(27.2 t/㎥)과 거의 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

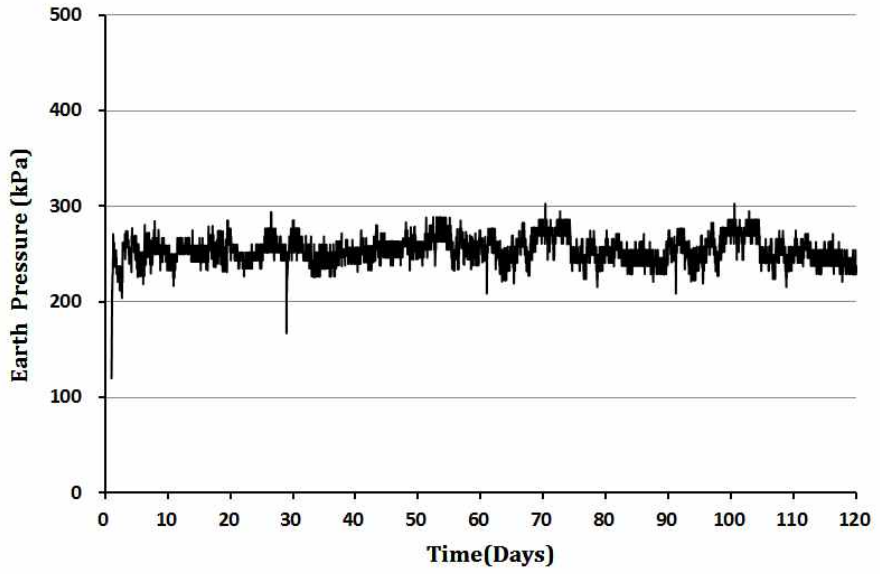


그림 2.11.11 계측 지점 D의 토압 계측 결과

나. 수압

그림 2.11.12와 그림 2.11.13은 계측 지점 A, B에서의 간극수압 계측결과를 나타낸 것이다.

A 지점의 경우에는 뒤채움재가 충진되기 전 간극수압계가 설치되었다. 그림 2.11.12의 K 구간은 설치 후 약 30일 정도 경과 후이며, 이때 현장에서는 쉴드터널 배면 뒤채움 시공이 실시되었다.

뒤채움재 주입과 함계 수압이 일시적으로 급격히 감소한 후 다시 증가하였고, 이후부터 넓은 범위가 변동되다가 수렴하는 것으로 나타났다. K 구간은 뒤채움재의 주입압의 영향으로 배면 지반까지 뒤채움재가 침투하면서 일시적으로 계측기에 영향을 미친 것으로 판단된다. 그리고 수압이 급격히 감소한 후 3~4일 안에 다시 증가하면서 지반 내 지하수의 흐름이 원상태로 회복된 것으로 판단된다.

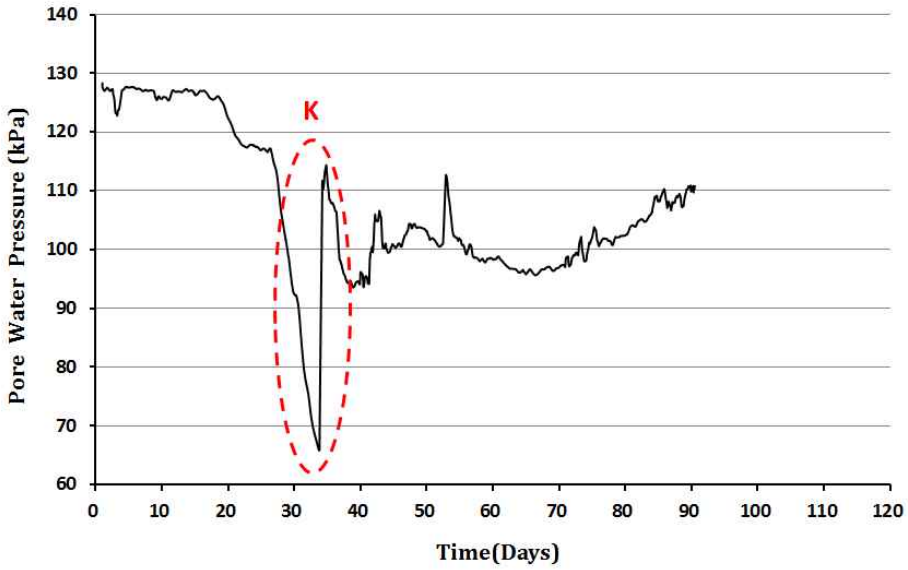


그림 2.11.12 계측 지점 A의 간극수압 계측 결과

A 지점에서 측정된 수압은 설치 경과 90일 이후부터 110kPa 전후로 수렴되는 것으로 나타났다. A 지점의 지하수위는 그림 2.11.2에서 약 12.34m (123.4kPa)로서 계측된 결과와 이론적인 수압(r_w·H)을 비교할 때 약 11% 정도 차이가 있는 것을 나타났다.

B 지점의 경우는 현장 상황으로 인해 뒤채움재가 충진된 직후 뒤채움재 내부에 간극수압계를 설치한 지점인데, 그림 2.11.13에서와 같이 계측 초기부터 108kPa 정도의 수압이 측정되었다. B 지점의 지하수위는 그림 2.11.2에서 약 13.98m (139.8kPa)로서 계측된 결과와 이론적인 수압(r_w·H)을 비교할 때 약 22% 정도 차이가 있는 것을 나타났다.

뒤채움재 내부에 간극수압계가 설치되었기 때문에 계측된 수압이 거의 없거나 상당히 낮을 것으로 예상하였으나, A 지점과 유사한 결과를 나타내었다. 또한, 뒤채움재가 양생되면서 지하수의 유입을 차단할 경우 수압이 점차 감소할 것으로 예상하였으나, 계측 종료 시점까지 일정하게 유지되고 있는 것으로 나타났다.

일반적으로 배면 뒤채움재는 쉴드TBM의 외벽으로 발생되는 공간을 채우는 역할과 함께, 비배수 공법인 쉴드터널의 1차적인 지하수 차수 방안으로 알려져 있다. 그러나 현장계측 결과에서는 균열, 충진상태 등의 원인으로 고려하더라도 뒤채움재 내부에 지하수가 지속적으로 존재하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 쉴드터널에서 세그먼트 결합력 및 지수재만이 유효한 차수 대책이라는 것을 보여주고 있다고 판단된다. 또한, 시공 오차, 장기적인 지수재 기능 상실 등이 발생할 경우 완전한 비배수 터널로서의 운영이 불가능할 수도 있다고 판단된다.

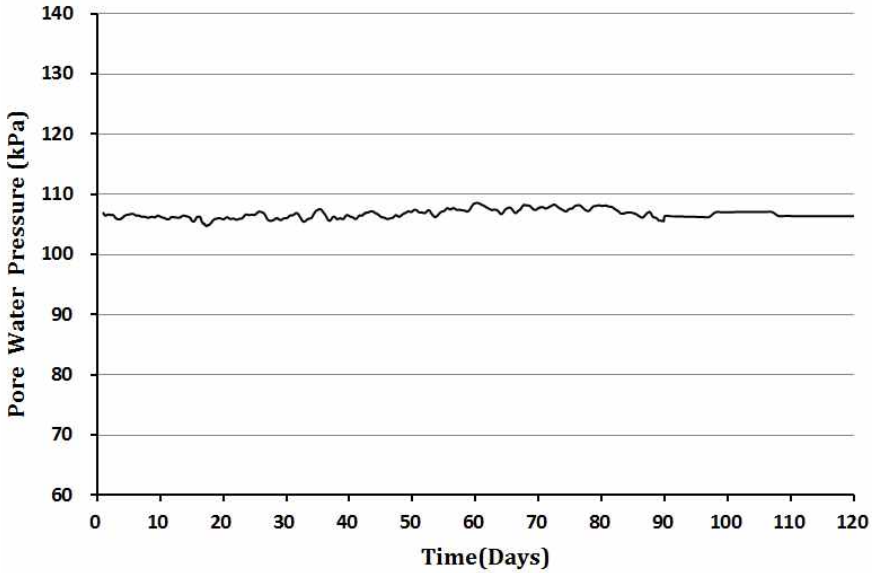


그림 2.11.13 계측 지점 B의 간극수압 계측 결과

본 연구에서 계측기가 설치된 지점은 앞에서 언급하였듯이 세그먼트면이 아닌 지반 내 지하수의 흐름이 자유로운 지점이다. 배수 및 비배수라는 용어는 구조물에 대한 개념으로 지반 내 지하수 상태를 표현하는 것은 아니지만, 지하수의 흐름이 자유롭다는 의미에서 터널 내부로 배수되는 조건으로 고려해 볼 수 있을 것으로 판단된다. 현장계측 결과 지반 내 지하수의 흐름이 자유로운 지점에서의 작용수압은 이론적인 설계 수압보다 11~22% 정도 작은 것으로 나타났다.

쉴드터널 모형실험 결과 배수 및 비배수 조건에서 지하수위에 따른 작용수압은 지하수위 12m 에서 수압 감소율이 약 14%로 나타난다. 모형실험에서 지반을 조성한 사질토 및 화강풍화토는 본 계측 현장의 지반 종류 및 투수계수와는 차이가 있지만, 현장계측과 유사한 결과를 보이고 있다고 판단된다.

본 연구는 배수 및 비배수 조건에서 쉴드터널에 작용하는 수압의 변화에 대한 초기연구로서 더 다양한 지반 종류, 유효응력 증가량 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것을 판단된다. 그러나 배수 조건에서의 작용수압이 비배수 조건과는 분명한 차이가 있음을 확인할 수 있으며, 비배수 쉴드터널을 배수 조건으로 변경할 경우 기존 설계수압과는 다른 수압을 적용하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 수압 감소를 통해 세그먼트 단면 축소도 충분히 가능할 것으로 판단된다.

소결론

본 연구에서는 실제 쉴드터널 배면에서 작용하는 토압 및 수압을 측정하기 위해 쉴드터널 시공현장에서 세그먼트 내에 계측기를 설치하여 현장 계측을 실시하였다.

(1) 쉴드터널과 관련된 국내외 연구 중 현장계측과 관련된 내용은 세그먼트 내부에 계측기를 설치한 경우가 대부분인데, 세그먼트 내부에 설치된 계측기는 실제 지반 응력을 백퍼센트 반영하는데 한계가 있다. 특히, 세그먼트 배면에 토압계를 설치한 경우는 뒤채움재가 충진되어 토압계를 덮게 되어 실제 지반에 접할 수가 없고, 뒤채움재 양생 후에는 세그먼트 배면에 토압을 지지하는 하나의 지지층이 생성되는 결과를 가져온다. 따라서, 본 연구에서는 실제 쉴드터널 배면 지반 내에 작용하는 수압을 최대한 정확히 측정하기 위해 새로운 방법을 고안하였다.

(2) 쉴드터널 배면 지반에 작용하는 토압을 측정한 결과 데이터가 넓은 범위에 분포하고는 있으나, 지층 두께와 단위중량을 고려하여 이론적으로 계산된 토압과 유사한 경향을 보였다.

(3) 지하수위 12.34m의 위치에서 계측된 수압은 약 110kPa로 이론적인 수압(r_w·H) 123.4kPa 보다 약 11% 정도 적게 나타났고, 지하수위 13.98m의 위치에서 계측된 수압은 약 108kPa로 이론적인 수압(r_w·H) 1139.8kPa 보다 약 22% 정도 적게 나타났다.

(4) 모형실험 및 현장계측 결과에서 배수 및 비배수 조건의 이론적인 설계수압과 작용수압의 차이가 나타났는데, 배수형 쉴드터널 적용시 기존 설계수압보다 감소된 수압을 적용하는 것이 가능할 것으로 판단되며, 수압 감소를 통해 세그먼트 단면 축소도 가능할 것으로 판단된다.

제 12 절 배수형 쉴드터널 표준단면 제안

1. 안정성 검토를 통한 단면 축소 가능성 평가

가. 기존 쉴드터널 조건의 해석결과 및 안전율 검토

본 연구에서는 먼저 배수 모델을 적용하여도 비배수 조건과 비교하였을 때 세그먼트 두께 감소와 철근량 감소가 불가능한 수위의 한계를 검토하였다. 기준 안전계수를 기존 설계된 쉴드터널에서 산출된 안전계수를 목표로 설정하고, 임의로 수위를 지표위 30m 수위까지 조정하여 단면력 산출 후 기준 안전계수에 근접하도록 세그먼트 두께와 철근량을 조절하였다.

본 보고서에서 사용한 안전계수는 그림 2.11.1의 P-M 상관도와 강도감소계수에 의해 산출된 설계단면력과 하중조건 및 하중조합에 따른 극한단면력의 비로 정의하며, 산정식은 다음과 같다.

$$\text{S.C (Safety Coefficient)} = \frac{a}{b}$$

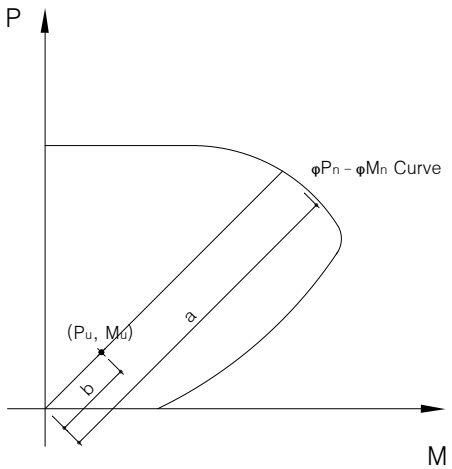


그림 2.12.1 안전계수 개념도

기존에 설계되었던 설계조건대로 비배수 수압모델을 적용하여 단면력을 산정하여고, 안전계수를 검토하였다.

검토에 사용된 쉴드터널의 표준단면은 그림 2.12.2와 같으며 지층조건은 그림 2.12.3에 나타나 있다.

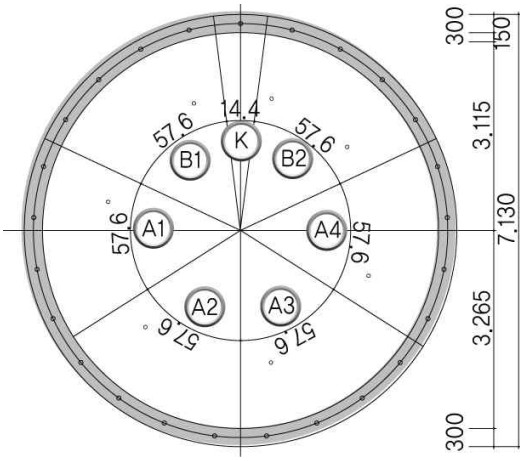


그림 2.12.2 기존 쉴드터널 표준단면도

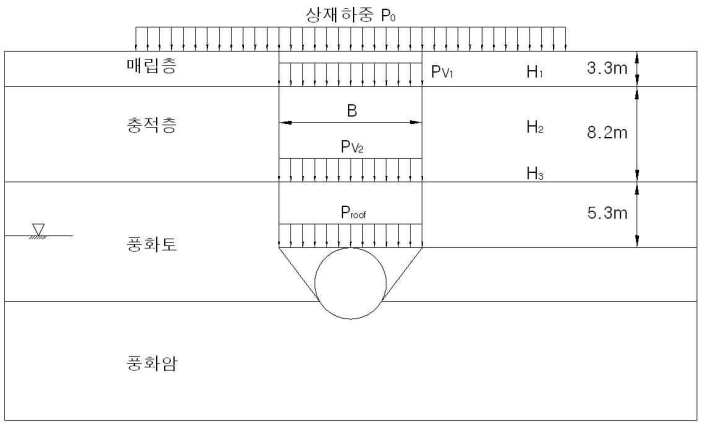


그림 2.12.3 기존 설계의 지층조건

표준단면은 세그먼트 라이닝 외경 7.13m, 내경 6.53m, 두께 0.3m이며 세그먼트 콘크리트 설계기준 강도를 48 MPa, 철근의 항복강도를 400 MPa 고정하였다.

검토결과 세그먼트의 두께는 300mm이며 천근의 규격은 H19로 만족하였으며 세그먼트 검토단면은 그림 2.12.4와 같고 단면력 산정결과는 표 2.12.1에 나타나있다.

그림 2.12.5의 P-M상관도에서 계산된 안전계수는 7.0이며, 계산된 안전계수는 목표안전계수이다.

표 2.12.1 단면력 산정결과

구 분		축 력(kN)			모 멘 트(kN·m)			전 단 력(kN)		
		조합 I	조합 II	조합III	조합 I	조합 II	조합III	조합 I	조합 II	조합III
1st ring	천단	1,448.	1,318.	817.95	9.9	45.2	14.0	102.2	80.6	62.1
	바닥	1,975.	1,830.	1,107.	63.6	102.6	25.3	136.5	119.4	80.0
	좌측	1,872.	1,414.	1,134.	116.6	46.7	82.0	169.4	134.1	102.9
	우측	1,871.	1,415.	1,134.	113.6	50.3	79.2	152.1	133.6	89.4
2nd ring	천단	1,448.	1,318.	818.22	9.6	45.0	14.2	102.3	81.6	62.2
	바닥	1,976.	1,830.	1,108.	63.5	102.5	25.3	137.3	119.4	80.8
	좌측	1,864.	1,409.	1,128.	111.9	46.0	78.6	150.7	128.5	89.2
	우측	1,880.	1,421.	1,139.	118.4	50.6	82.9	170.7	140.0	102.9

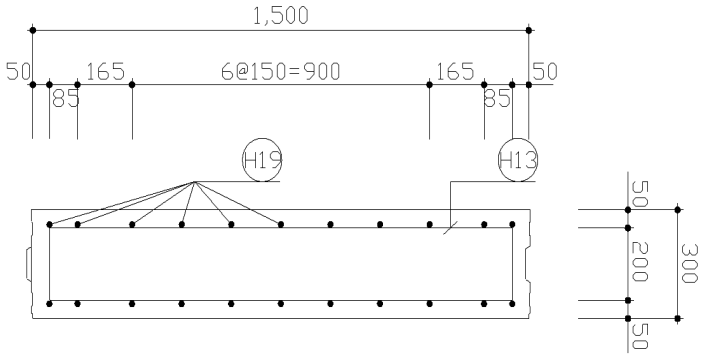


그림 2.12.4 세그먼트 검토단면

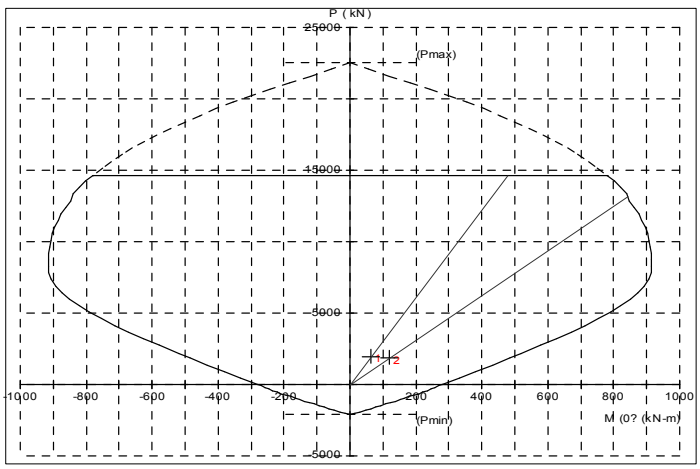


그림 2.12.5 P-M 상관도

나. 세그먼트 두께 및 철근량 감소의 한계수위 검토

부분배수 모델 적용시 세그먼트 두께 감소 및 철근량 감소가 가능한 조건을 알기 위하여 그림 2.12.6과 같이 지하수위가 터널 상단 10m 위에 위치하는 지층조건에 대하여 비배수 조건과 부분배수 조건에 대하여 검토한 결과 비배수 조건과 부분배수 조건 모두 철근규격 H19에 세그먼트두께 350mm로서 차이가 크지 않았고, 표 2.12.2와 2.12.3의 단면력 산정결과도 최대축력 5%, 최대 모멘트는 1%로 감소로 차이가 크지 않았다. 그림 2.12.7과 2.12.8의 P-M상관도를 통한 안전계수 검토결과는 비배수 모델 6.8, 부분배수 모델 7.0으로 유사한 결과를 나타냈다. 따라서 터널 상단에서 최소 10m 이상의 수위가 존재해야 수압저감효과가 나타날 것으로 판단된다.

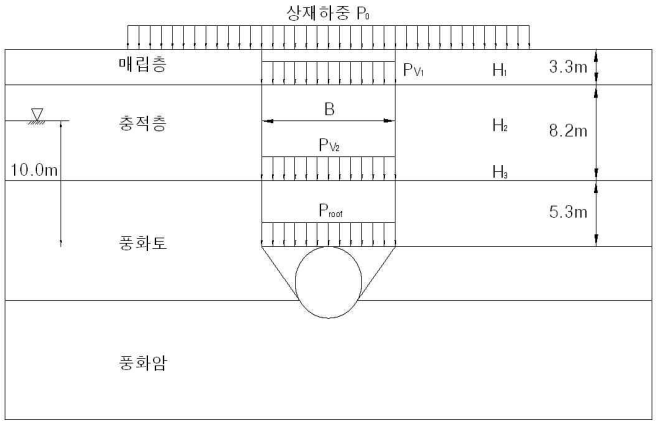


그림 2.12.6 지층조건

표 2.12.2 비배수 모델의 단면력 산정결과

구 분		축 력(kN)			모 멘 트(kN·m)			전 단 력(kN)		
		조합 I	조합 II	조합 III	조합 I	조합 II	조합 III	조합 I	조합 II	조합 III
1st ring	천단	1967.4	1847.9	1103.6	14.6	59.7	27.0	136.3	114.8	80.8
	바닥	2492.6	2364.4	1390.9	62.5	127.6	18.3	168.1	153.0	97.1
	좌측	2415.7	1947.0	1439.8	127.6	34.9	93.5	209.1	175.1	125.3
	우측	2408.6	1943.1	1434.8	128.4	35.4	94.1	194.0	172.2	113.7
2nd ring	천단	1947.5	1847.9	1103.7	14.5	59.7	26.9	136.2	114.9	80.7
	바닥	2492.9	2364.0	1391.2	62.5	127.6	18.3	166.7	151.6	97.6
	좌측	2408.2	1943.2	1434.5	128.4	35.4	94.1	194.0	172.2	113.7
	우측	2415.2	1947.1	1439.4	127.5	34.9	93.5	209.1	175.1	125.2

표 2.12.3 배수 모델의 단면력 산정결과

구 분		축 력(kN)			모 멘 트(kN·m)			전 단 력(kN)		
		조합 I	조합 II	조합 III	조합 I	조합 II	조합 III	조합 I	조합 II	조합 III
1st ring	천단	1961.1	1841.7	1100.1	10.4	68.2	22.6	141.3	121.3	83.6
	바닥	2375.9	2247.6	1326.1	55.6	120.7	14.4	153.1	138.0	89.4
	좌측	2354.1	1885.4	1405.6	127.8	35.2	93.7	196.5	162.5	118.3
	우측	2348.1	1882.6	1401.2	128.6	35.5	94.2	181.8	160.0	106.9
2nd ring	천단	1961.2	1841.7	1100.2	10.4	68.2	22.5	141.3	121.3	83.5
	바닥	2376.2	2247.2	1326.3	55.6	120.7	14.5	152.8	137.7	89.6
	좌측	2347.7	1882.7	1400.8	128.5	35.5	94.2	181.8	160.0	106.9
	우측	2353.7	1885.5	1405.2	127.8	35.2	93.7	194.5	162.5	118.2

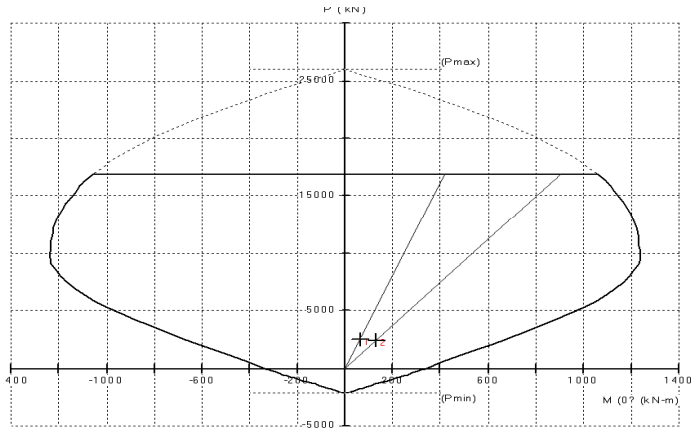


그림 2.12.7 비배수 모델 P-M 상관도

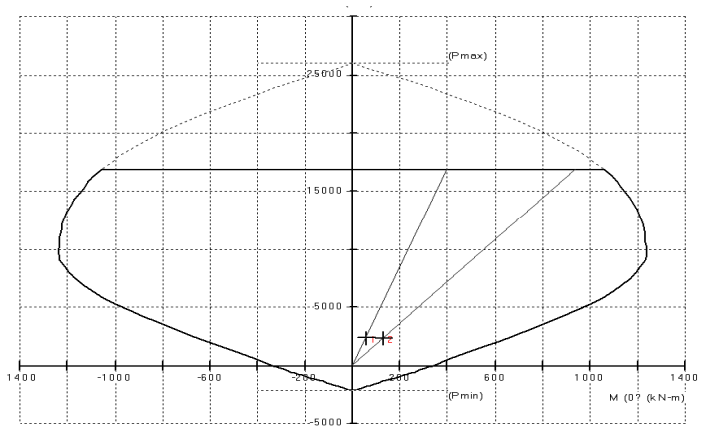


그림 2.12.8 부분배수 모델 P-M 상관도

다. 수위 변화에 따른 배수 및 부분배수 조건의 안전계수 검토

부분배수 모델 적용 시 세그먼트 두께 및 철근량 감소를 검토하기 위하여 그림 2.12.9의 지층조건과 같이 수위가 지표 위 30m로 상승한 조건에 대하여 비배수 및 부분배수 조건에 대하여 검토를 수행하였다.

비배수 조건에 대하여 검토한 결과 단면력 산정결과는 표 2.12.4와 같았고, 철근규격 H25로 그림 2.12.10과 같이 배근되었으며, 세그먼트두께 650mm까지 증가했고, 그림 2.12.11의 P-M상관도 분석결과 기준 안전계수 7.0에 근접하는 6.7의 안전계수를 갖는 것으로 검토되었다.

부분배수 조건에 대하여 철근규격을 H25로 고정하고 세그먼트 두께를 조정하여 검토했을 때 단면력 산정결과는 표 2.12.5와 같았고 세그먼트의 두께는 400mm까지 감소가 가능하였고, 그림 2.12.12의 P-M상관도 분석결과 비배수 조건에서 검토되었던 안전계수 6.7과 같게 나타났다.

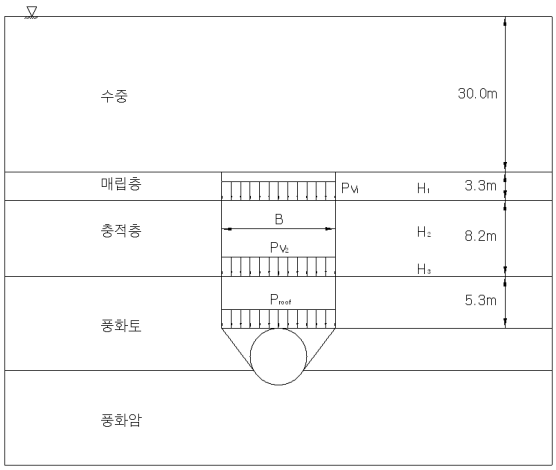


그림 2.12.9 지층조건

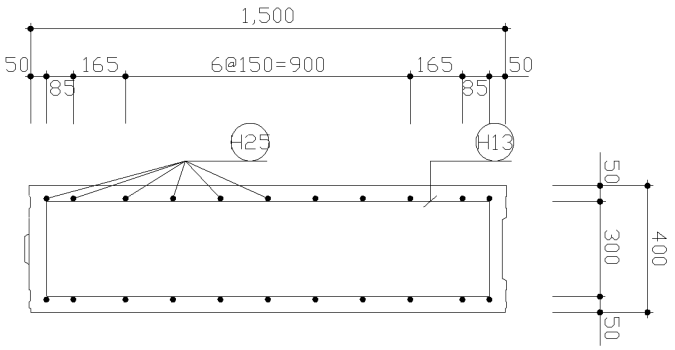


그림 2.12.10 세그먼트 검토단면

표 2.12.4 비배수 모델의 단면력 산정결과

구 분		축 력(kN)			모 멘 트(kN·m)			전 단 력(kN)		
		조합 I	조합 II	조합 III	조합 I	조합 II	조합 III	조합 I	조합 II	조합 III
1st ring	천단	4,118.	4,065.	2,280.	113.4	127.9	122.3	273.4	259.1	153.6
	바닥	4,672.	4,604.	2,586.	57.3	203.4	89.7	296.3	291.3	166.3
	좌측	4,670.	4,132.	2,710.	252.6	39.5	204.7	360.5	311.2	213.8
	우측	4,668.	4,132.	2,708.	253.6	39.1	205.4	356.4	271.2	210.4
2nd ring	천단	4,117.	4,064.	2,280.	113.6	127.8	122.4	273.9	258.5	153.9
	바닥	4,673.	4,604.	2,586.	57.5	203.4	89.8	297.0	289.8	167.1
	좌측	4,668.	4,132.	2,708.	253.5	39.3	205.3	356.4	311.4	210.5
	우측	4,670.	4,132.	2,709.	252.8	39.3	204.8	360.4	270.8	213.7

표 2.12.5 배수 모델의 단면력 산정결과

구 분		축 력(kN)			모 멘 트(kN·m)			전 단 력(kN)		
		조합 I	조합 II	조합 III	조합 I	조합 II	조합 III	조합 I	조합 II	조합 III
1st ring	천단	2,536.	2,428.	1,416.	26.8	78.0	40.8	177.1	156.6	103.0
	바닥	3,001.	2,882.	1,670.	47.8	140.5	10.7	194.1	181.1	112.4
	좌측	2,969.	2,488.	1,750.	152.3	31.5	114.5	241.9	204.9	144.4
	우측	2,964.	2,486.	1,746.	153.1	31.9	115.1	229.6	203.7	134.7
2nd ring	천단	2,537.	2,428.	1,417.	26.8	78.0	40.8	177.1	156.6	103.0
	바닥	3,001.	2,882.	1,670.	47.8	140.5	10.7	193.4	180.2	112.9
	좌측	2,964.	2,486.	1,746.	153.1	31.9	115.1	229.5	203.8	134.6
	우측	2,969	2,488.	1,750.	152.2	31.5	114.5	241.9	204.9	144.3

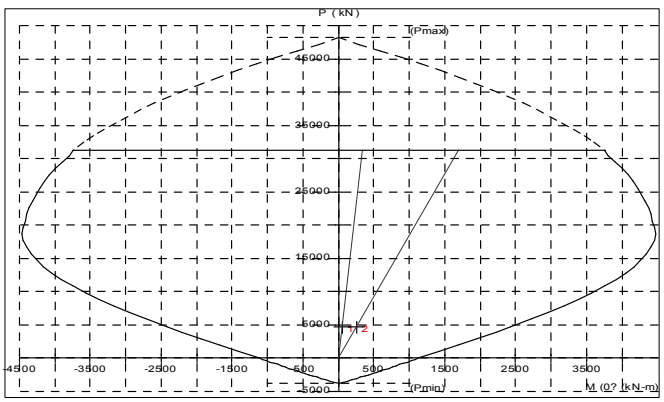


그림 2.12.11 비배수 모델 P-M 상관도

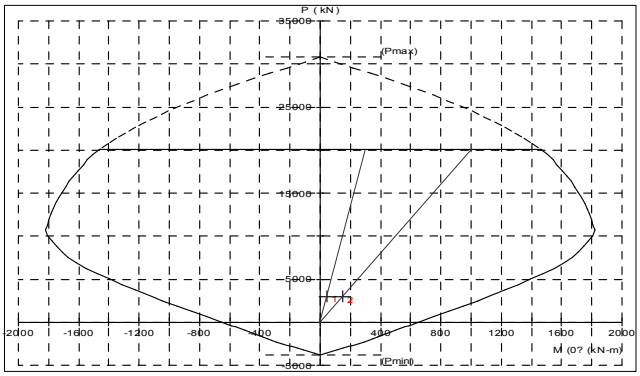


그림 2.12.12 부분배수 모델 P-M 상관도

또한 현장조건에 따라 최적의 설계가 가능하도록 경우의 수를 고려하기 위하여 동일한 지층조건에 대하여 부분배수 조건 시 철근량 감속에 따른 세그먼트 두께의 변화 검토를 수행하였다.

먼저 부분배수개념을 적용하고 철근량이 25%감소된 H22를 적용하여 기준안전계수를 만족시키기 위한 검토단면은 그림 2.12.13과 같으며 단면력 산정결과는 표 2.12.6과 같다. 이때 세그먼트 두께는 450mm로 검토되었으며 그림 2.12.14의 P-M상관도 분석결과 안전계수는 기준안전계수보다 좀 더 안전한 7.3으로 검토되었다.

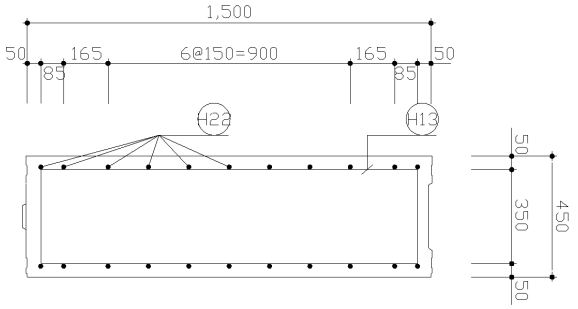


그림 2.12.13 세그먼트 검토단면

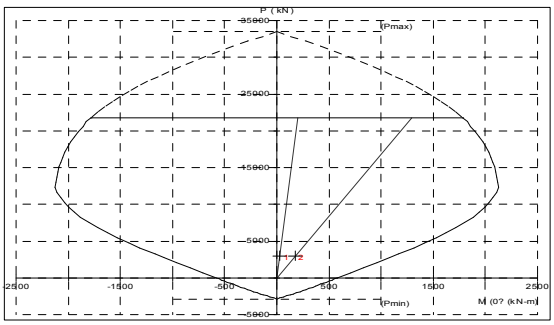


그림 2.12.14 P-M 상관도

표 2.12.6 철근량 25% 감소 시 단면력 산정결과

구 분		축 력(kN)			모 멘 트(kN·m)			전 단 력(kN)		
		조합 I	조합 II	조합 III	조합 I	조합 II	조합 III	조합 I	조합 II	조합 III
1st ring	천단	2,531.	2,435.	1,410.	43.8	88.5	57.6	177.0	157.3	102.4
	바닥	3,000.	2,893.	1,667.	31.4	153.2	27.0	192.1	180.8	111.2
	좌측	2,982.	2,489.	1,761.	176.1	23.3	133.7	244.1	204.3	146.4
	우측	2,978.	2,487.	1,758.	174.0	23.7	134.3	234.1	203.9	138.4
2nd ring	천단	2,531.	2,435.	1,410.	43.8	88.5	57.6	177.0	157.3	102.4
	바닥	3,001.	2,893.	1,667.	31.4	153.2	27.1	192.4	180.0	111.7
	좌측	2,978.	2,487.	1,757.	174.0	23.7	134.3	234.1	204.0	138.4
	우측	2,982.	2,489.	1,760.	173.1	23.3	133.6	244.1	204.3	146.4

부분배수개념을 적용하고 철근량이 50%감소된 H19를 적용하여 기준안전계수를 만족시키기 위한 검토단면은 그림 2.12.15와 같으며 단면력 산정결과는 표 2.12.7과 같다. 이때 세그먼트 두께는 500mm로 검토되었으며 그림 2.12.16의 P-M상관도 분석결과 안전계수는 기준안전계수에 근접한 6.7로 검토되었다.

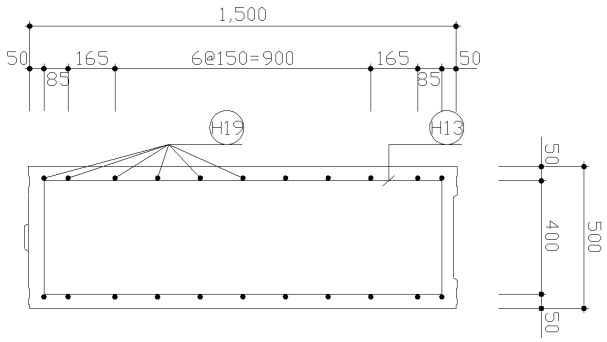


그림 2.12.15 세그먼트 검토단면

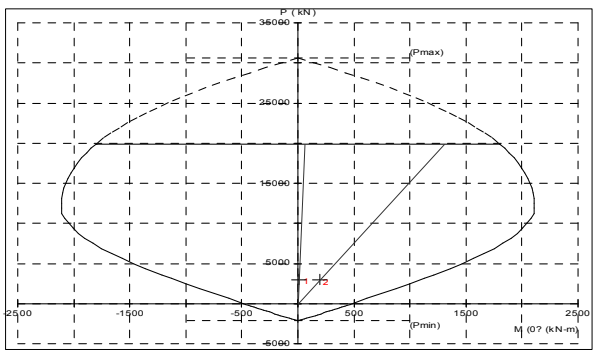


그림 2.12.16 P-M 상관도

표 2.12.7 철근량 50% 감소 시 단면력 산정결과

구 분		축 력(kN)			모 멘 트(kN·m)			전 단 력(kN)		
		조합 I	조합 II	조합 III	조합 I	조합 II	조합 III	조합 I	조합 II	조합 III
1st ring	천단	2,525.	2,440.	1,403.	60.6	99.0	74.2	176.5	158.0	101.5
	바닥	2,999.	2,902.	1,664.	13.7	164.4	44.0	190.1	180.6	109.7
	좌측	2,994.	2,488.	1,770.	193.2	14.8	152.3	245.8	203.3	148.1
	우측	2,991.	2,487.	1,768.	194.1	15.1	152.9	237.7	203.3	141.6
2nd ring	천단	2,525.	2,440.	1,404.	60.6	99.0	74.2	176.5	158.0	101.5
	바닥	2,999.	2,902.	1,664.	13.7	164.4	44.1	190.9	179.8	110.1
	좌측	2,991.	2,487.	1,768.	194.1	15.1	152.9	237.7	203.3	141.6
	우측	2,994.	2,488.	1,770.	193.2	14.8	152.3	245.7	203.3	148.1

2. 슬림형 세그먼트 상세설계

가. 단면 축소범위 검토

실제 많이 쓰이고 있는 지하철 쉴드터널 표준단면(t=300mm)에 대해서 배수형 쉴드터널을 적용하면 단면축소 가능범위를 검토하기 위하여 동일한 지층을 가정하고 기존 비배수 형식의 쉴드터널과 배수 형식의 배수형 쉴드터널에 대하여 단면력을 산정하여 단면의 축소범위를 검토하였다. 가정한 조건은 그림 2.12.17과 같이 포화토를 터널천단에서부터 10m 상부에 위치하도록 하였으며, 수위조건은 하천을 가정하여 지표로부터 5m 상부에 위치하도록 하였다.

지하철 단면(t=300mm)에 대하여 부재력을 검토한 결과는 표 2.12.8과 같이 검토되었으며, 결과를 바탕으로 P-M상관도에서 안전율을 산출한 결과 14.3%의 안전율을 갖는 것으로 검토되었다.

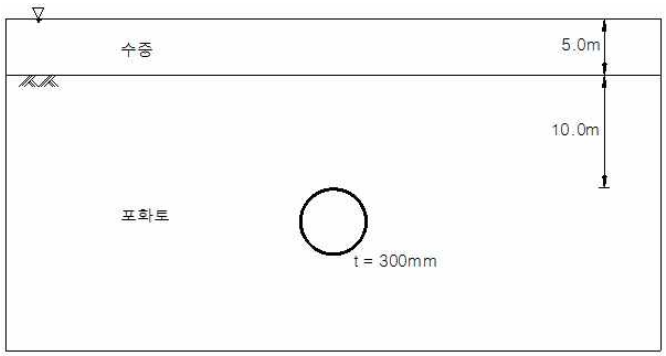


그림 2.12.17 단면 축소 검토 단면

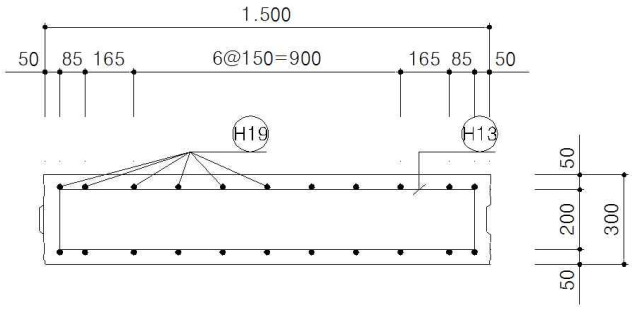


그림 2.12.18 세그먼트 검토단면

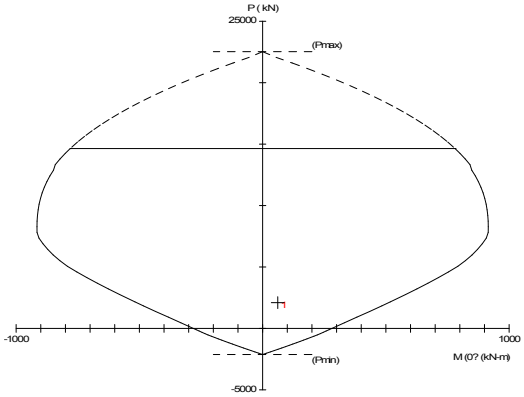


그림 2.12.19 P-M 상관도

표 2.12.8 t=300mm 지하철 단면 단면력

구 분		축 력(kN)			모 멘 트(kN·m)			전 단 력(kN)		
		조합 I	조합 II	조합 III	조합 I	조합 II	조합 III	조합 I	조합 II	조합 III
1st ring	천단	1800.8	1697.5	1027.6	17.29	11	17.03	115.22	96.24	69
	바닥	2209.3	2097.6	1256.7	27.91	60.89	6.84	174.44	148.76	103.66
	좌측	2263.5	1899.9	1353.0	111.56	60.03	75.51	110.42	117.22	59.56
	우측	2269.2	1903.8	1356.6	115.4	60.43	78.55	123.42	121.47	69.08
2nd ring	천단	1802.5	1698.2	1028.7	17.11	11.12	16.92	107.17	96.28	62.4
	바닥	2210.1	2097.6	1257.3	27.86	60.87	6.81	174.46	155.75	101.84
	좌측	2272.5	1906.0	1358.7	116.61	61.45	79.27	123.52	121.53	69.15
	우측	2262.0	1898.5	1352.1	110.4	59.03	74.82	110.26	117.17	59.44

같은 조건에서 배수식에 따른 수압을 적용하여 P-M상관도에서 비교단면과 비슷한 안전율을 갖는 단면 두께에 대해서 검토한 결과 세그먼트의 두께가 20%감소한 t=240mm에서 비슷한 안전율인 15.4%를 갖는 것으로 검토되었다. 세그먼트 두께 240mm의 단면력 검토결과는 표 2.12.9와 같다.

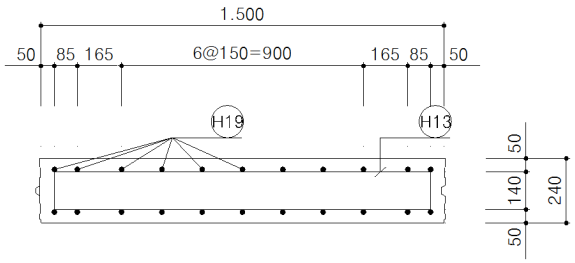


그림 2.12.20 세그먼트 검토단면

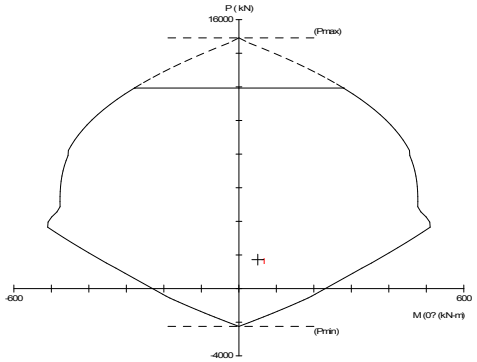


그림 2.12.21 P-M 상관도

표 2.12.9 t=240mm 지하철 단면 단면력

구 분		축 력(kN)			모 멘 트(kN·m)			전 단 력(kN)		
		조합 I	조합 II	조합 III	조합 I	조합 II	조합 III	조합 I	조합 II	조합 III
1st ring	천단	1532.9	1421.7	880.81	7.54	19.52	1.04	97.88	79.34	59.25
	바닥	1840.8	1722.4	1053.8	35.64	50.3	15.95	140.97	114.86	85.18
	좌측	1931.4	1576.7	1166.2	74.04	42.87	49.32	84.54	89.97	45.54
	우측	1937.3	1581.2	1169.8	78.92	44.59	52.86	96.4	94.28	54.11
2nd ring	천단	1534.0	1422.1	881.68	7.76	19.65	1.19	97	84.29	57.22
	바닥	1841.4	1722.6	1054.2	35.64	50.29	15.95	145.06	123.89	86.15
	좌측	1939.3	1582.4	1171.1	79.27	44.82	53.09	96.61	94.41	54.25
	우측	1930.2	1575.8	1165.4	73.7	42.65	49.1	84.4	89.87	45.45

나. 슬림형 세그먼트 표준단면 설계

검토된 결과에 따라 배수형 쉴드터널은 지하철 표준단면을 기준으로 세그먼트 두께 240mm로 설계를 수행하였다. 일반적으로 지하철 쉴드터널 정도의 대단면 터널은 체결방식을 곡볼트나 경사볼트에 의한 체결방식을 많이 사용하나, 배수 유로홈의 간섭으로 인하여 볼트박스를 적용하였다. 그림 2.12.22는 기존 지하철 쉴드터널의 표준단면이고, 그림 2.12.23은 세그먼트의 상세도이다.

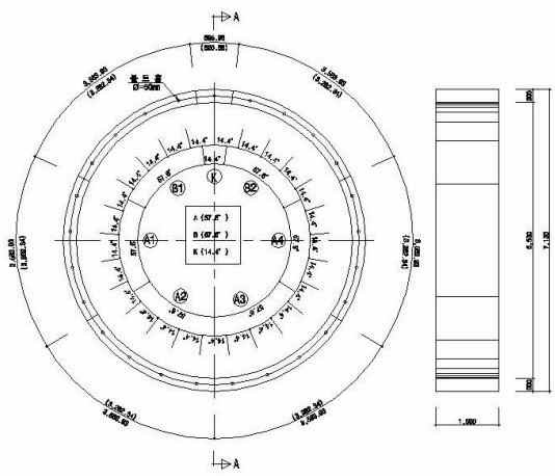


그림 2.12.22 지하철 표준단면도

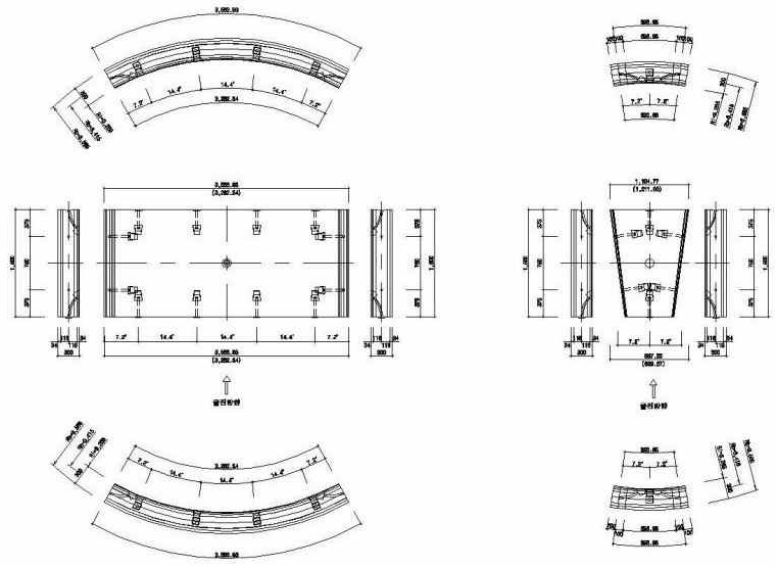


그림 2.12.23 지하철 표준단면 세그먼트도

배수형 쉴드터널은 그림 2.12.24와 같이 기존 쉴드터널 세그먼트보다 두께가 감소하였고, 세그먼트의 체결방식이 볼트박스로 설계가 되었다. 또한 기존의 세그먼트는 볼트 체결부외에 2열의 수팽창 지수재가 배치되었지만 슬림형 세그먼트는 배수 유로홈과 배구수가 설계되었다.

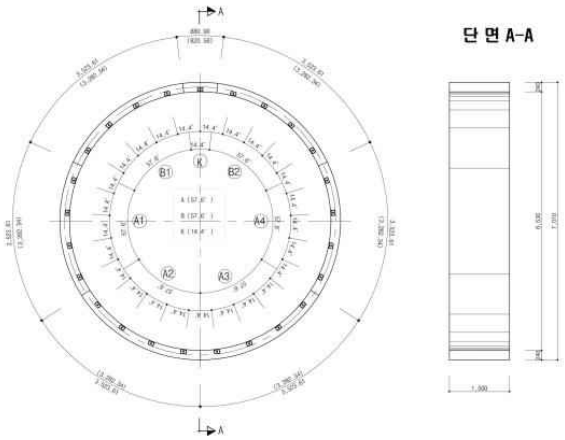


그림 2.12.24 배수형 쉴드터널 표준단면도

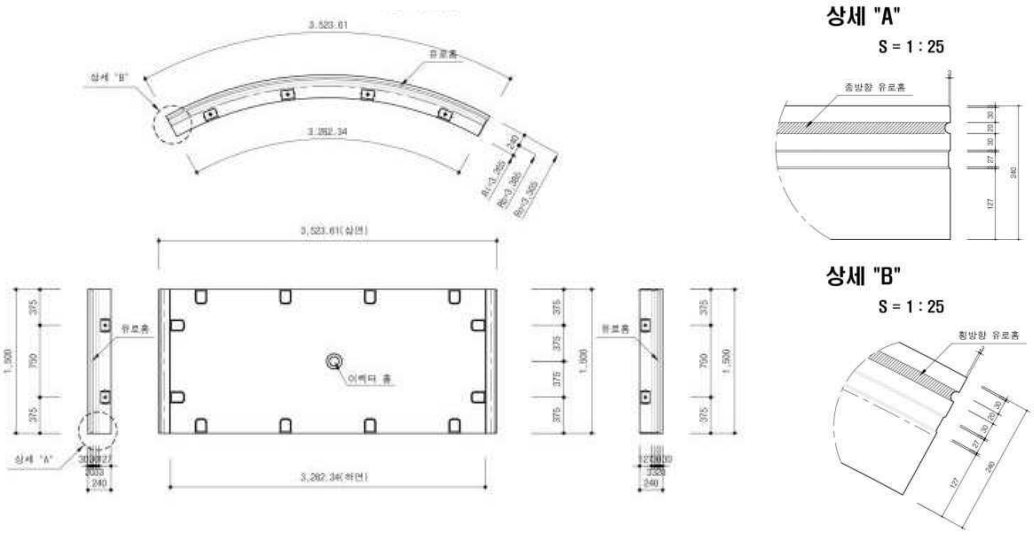


그림 2.12.25 배수형 쉴드터널 표준단면 세그먼트도

3. 배수형 쉴드터널 세그먼트 제작

가. 슬림형 세그먼트 몰드 제작

슬림형 세그먼트를 제작하기 위해서는 콘크리트 제품을 가공할 수 있는 세그먼트 몰드가 필요하다. 일반적으로 쉴드터널 세그먼트 몰드는 강재를 통으로 절삭하여 가공하는 방식으로 제작이 되며, 사용되는 재료는 표 2.12.1과 같다.

슬림형 세그먼트의 몰드는 그림 2.12.26에 형성되어 있는 배수 유로홈과 A, B타입의 링 별로 위치하고 있는 내부 배수구의 제작이 가능해야한다. 또한 세그먼트 몰드의 특성상 여러차례 세그먼트를 생산하더라도 균일한 규격의 세그먼트 생산이 가능하도록 일정수준의 강도확보 및 제작오차를 최소화 해야한다.

표 2.12.10 몰드 사용 재료의 규격

종 별	규격(JIS)	
강 재	G 3101	일반 구조용 압연 강재
	G 3106	용접 구조용 압연 강재
주조 품	G 5101	탄소강 주강품
	G 5501	회 주철 품
	G 5502	구사 흑연 주철 품

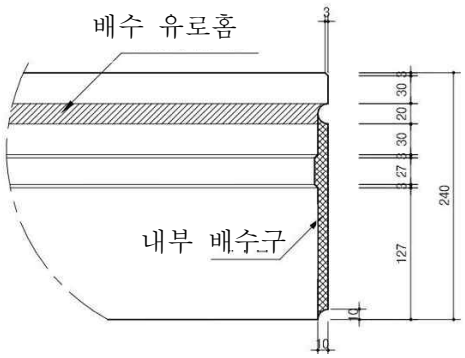


그림 2.12.26 세그먼트 구성

지하철 쉴드터널 규격의 슬림형 세그먼트는 그림 2.12.27과 같이 1링은 A타입 세그먼트4개와 K타입 1개, B타입 2개로 총7조각의 세그먼트로 구성되어 있으며, 다음에 조립되는 링은 기존 링과 엇갈려서 조립되기 때문에 세그먼트에 형성되는 내부 배구

수의 위치가 다르게 형성되기 때문에 A,B 두가지 타입의 링이 필요하다.

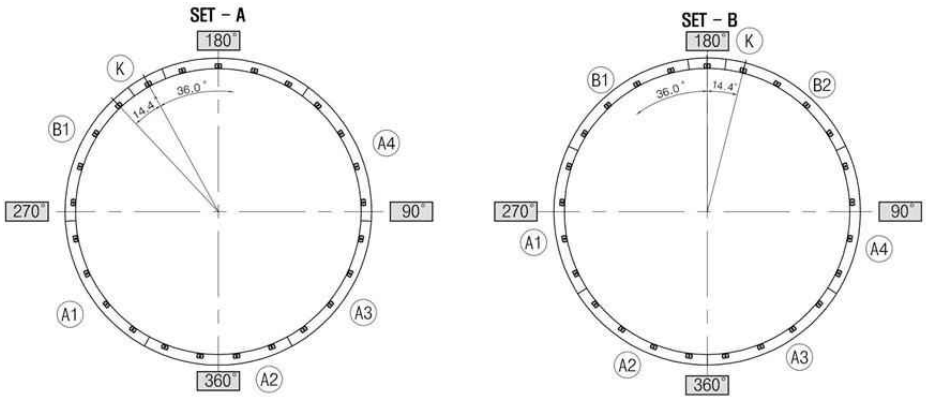


그림 2.12.27 쉴드터널 조립방식

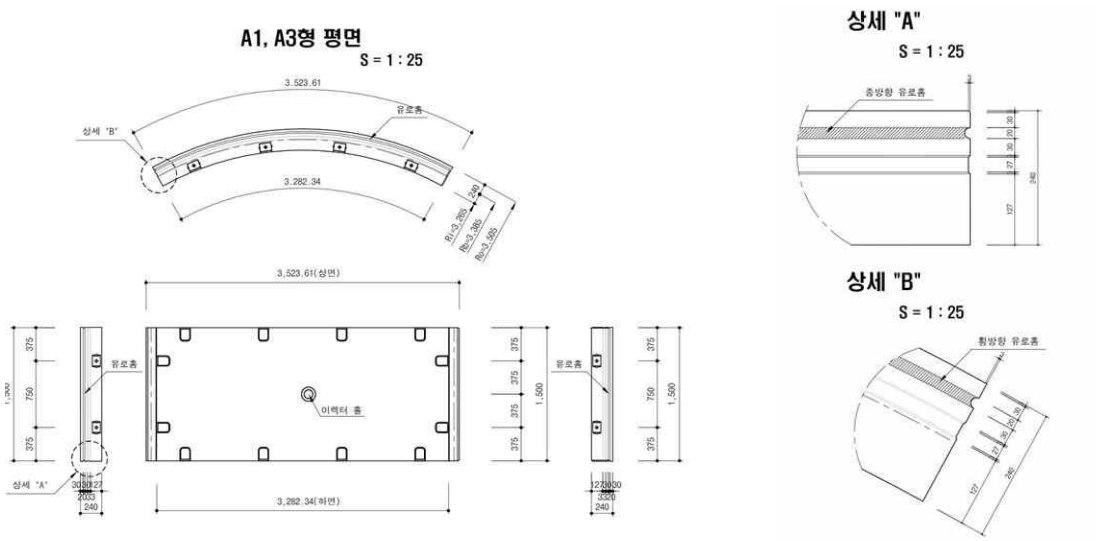


그림 2.12.28 A타입 세그먼트 설계도

실제 슬림형 세그먼트를 생산하기 위하여 가장 기본 형태인 A타입 세그먼트 몰드를 설계하였다. 그림 2.12.28은 제작하고자 하는 A타입 세그먼트의 설계도이다.

그림 2.12.29는 A타입 세그먼트를 제작하기 위한 몰드의 설계도이며, 제작된 몰드는 그림 2.12.3와 같다. 몰드는 세그먼트 탈형이 가능하도록 4면의 분리가 가능하며, 그림 2.12.31과 같이 볼트박스의 탈부착이 가능하도록 부품이 설계되어 있다. 그림 2.12.32와 같은 형태로 뒤채움재 주입홀을 부착하는 고정부가 설치되어있다.

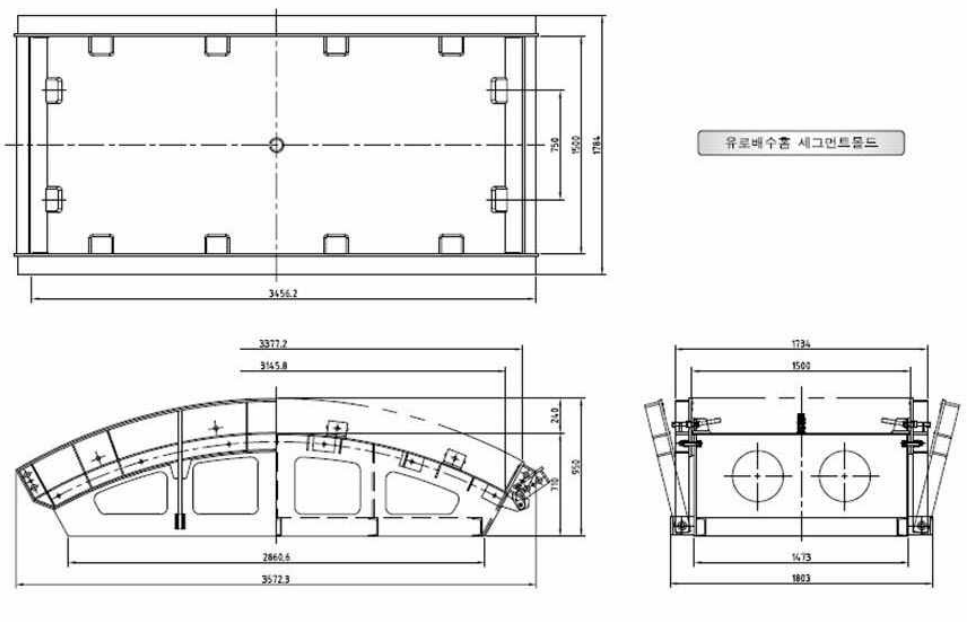


그림 2.12.29 A타입 세그먼트 몰드 설계도

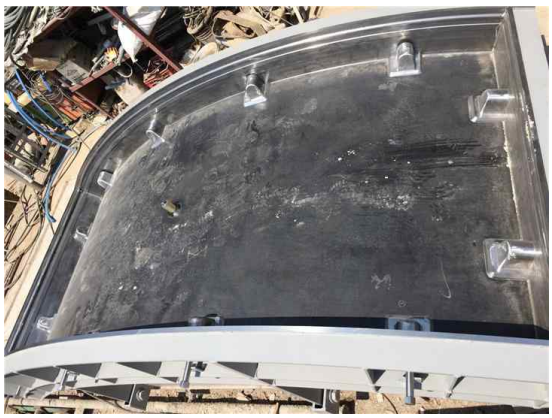


그림 2.12.30 슬림형 세그먼트 몰드



그림 2.12.31 볼트박스 탈부착 시스템



그림 2.12.32 뒤채움재 주입홀 고정부

나. 세그먼트 제작

(1) 세그먼트 일반

세그먼트의 제작에 사용하는 재료는 규격에 적합한 것을 원칙으로 하며 무근 및 철근 콘크리트의 탄성계수 및 허용응력은 대해서는 [콘크리트 표준시방서]의 규정을 준수해야 한다.

표 2.12.11 Concrete 탄성계수

설계기준강도(kgf/cm^2)	420	450	480
탄성계수(kgf/cm^2)	3.3×10^5	3.6×10^5	3.9×10^5

표 2.12.12 Concrete 허용 응력도(kgf/cm^2)

설계기준강도	42	45	48
허용 굽힘 압축 응력도	150	160	170
허용 전단 응력도	5.5		
허용 부착 응력도	20(이형철근)		

표 2.12.13 세그먼트 사용 재료의 규격

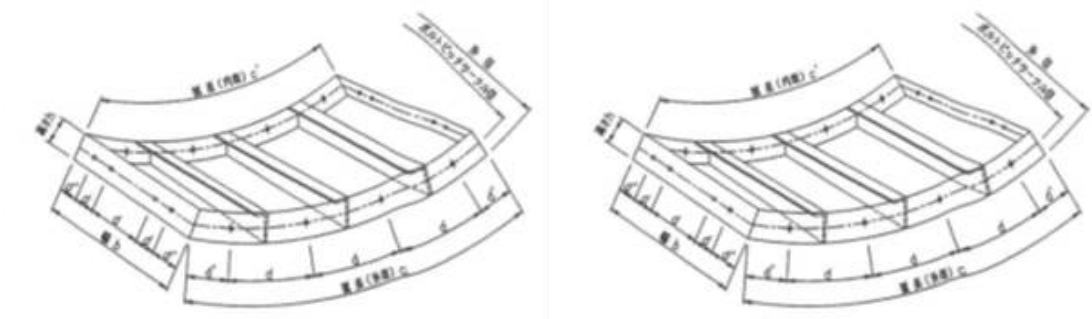
종 별	규격(JIS)	
Cement	R 5210	Portland Cement
	R 5211	고로 시멘트 A, B, C 3종
	R 5212	Silica Cement A, B, C 3종
	R 5213	Fly Ash Cement A, B, C 3종
강 재	G 3101	일반 구조용 압연 강재
	G 3106	용접 구조용 압연 강재
봉강 및 강선	G 3112	철근 콘크리트용 봉강
	G 3521	경 강선
	G 3532	철선
	G 3505	연강 선재
	G 3506	경강 선재
	G 3536	PC강선 및 PC강 꼬인선
Bolt Nut 및 Washer	B 1180	육각 볼트
	B 1192	육각 너트
	B 1186	마찰 접합용 고력 볼트, 유각 너트, 평 Washer 셋트
	B 1256	Plane Washer
강관 기타	B 2301	나사 끼움식 가단 주철제 계수
	B 2302	나사 끼움식 강관제 계수
	G 3444	일반 구조용 탄소강 강관
	G 3445	기계 구조용 탄소강 강관
	G 3452	배관용 탄소강 강관
	G 3454	압력 배관용 탄소강 강관
	G 3455	고압 배관용 탄소강 강관
용접봉 및 용접 Wire	Z 3211	연강용 피복 Arc 용접봉
	Z 3212	고장력 강용 피복 Arc 용접봉
	Z 3311	강 Sub Merge Arc 용접재료
	Z 3312	연강 및 고장력강용 Arc 용접 Solid 입 Wire
	Z 3313	연강 및 고장력강용 Arc 용접 Flux 입 Wire

세그먼트의 치수 정밀도는 세그먼트의 종류, 사용 재료, 제작 방법, 사용 목적에 따라 다르며 각각 특징이 있기 때문에 통일적으로 정하기는 어려우나 현행 치수 허용차의 예를 표 2.12.14를 참조한다. 또한 합성 세그먼트의 치수 정밀도는 콘크리트계 세그먼트를 참고로 해도 좋다.

치수의 계측에는 게이지판, 강자나 강줄자 등을 이용한다. 또한 도로 터널과 같이 외경이 12m 넘는 대구경 세그먼트나 특수 형상의 세그먼트, 세그먼트 자동 조립 장치를 채용하는 경우에는 미리 검토한 후 치수 허용차를 별도로 정하는 것이 바람직하다.

표 2.12.14 세그먼트 치수 허용 차(예)

구분	콘크리트계 세그먼트	강제 세그먼트
세그먼트 높이h(㎜)	+ 5.0 - 1.0	± 1.5
세그먼트 b(㎜)	± 1.0	± 1.5
아치 길이c	± 1.0	± 1.5
볼트 구멍 피치	± 1.0	± 1.0
각 부분의 두께	- 1.0	-



(a) 콘크리트계 세그먼트 (b) 강재 세그먼트

그림 2.12.33 세그먼트 치수의 측정

(2) 시제품 세그먼트 제작

제작된 몰드를 이용하여 1piece의 슬림형 세그먼트를 제작하였다. 설계단계에서는 그림 2.12.33과 같이 세그먼트의 철근배근도까지 완료가 되었지만 하중을 받는 조립구조물에 사용되는 목적이 아니기 때문에 무근으로 콘크리트로 세그먼트를 제작하였다.

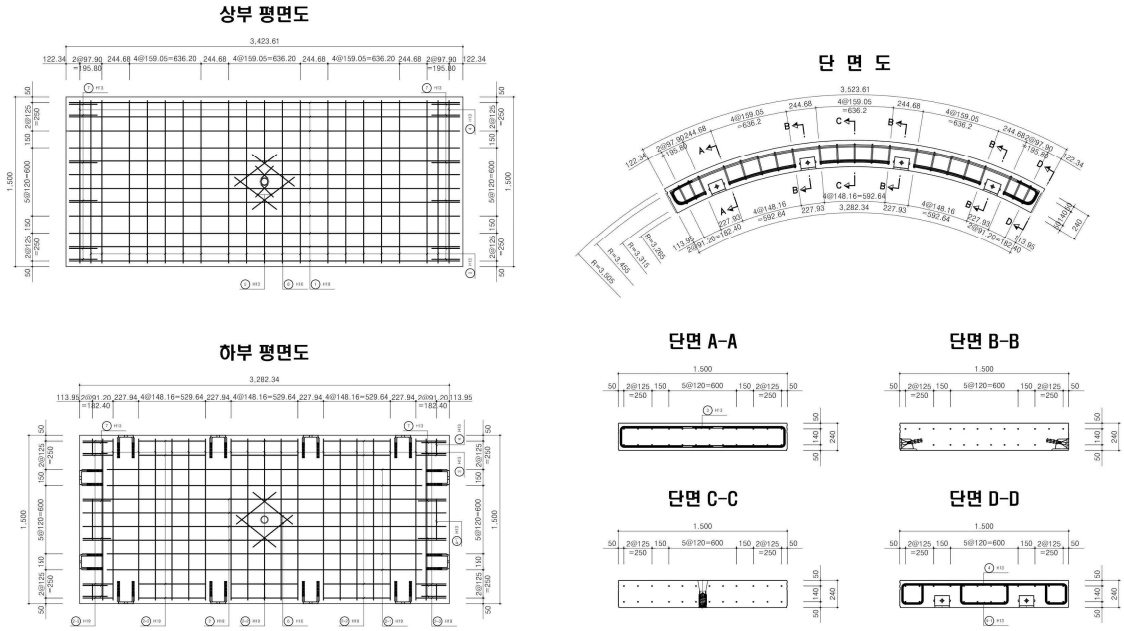


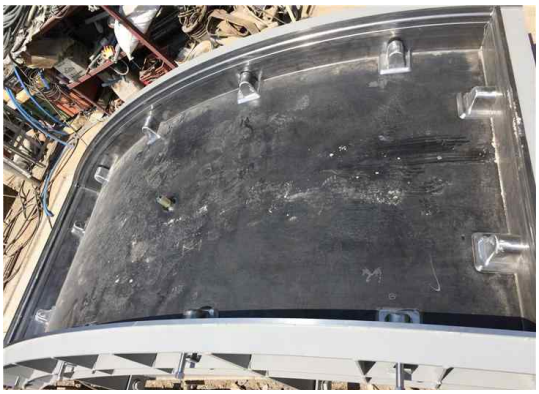
그림 2.12.34 세그먼트 철근 배근도

슬림형 세그먼트의 핵심 기술인 배수기능을 담당하는 배수 유로홈과 배수구는 그림 2.12.34와 같이 세그먼트에 형성되며, 2.12.35는 슬림형 세그먼트 제작과정이다.



(a) 배수 유로홈 (b) 배수구

그림 2.12.35 슬림형 세그먼트 배수기능 부분



(a) 세그먼트 몰드 셋팅



(b) 볼트박스 부착



(c) 뒷채움재 주입홀 부착



(d) 콘크리트 타설



(e) 세그먼트 타설 완료



(f) 세그먼트 미장



(g) 세그먼트 탈형



(h)완성된 세그먼트

그림 2.12.36 슬림형 세그먼트 제작과정

소결론

본 연구에서는 안정성 검토를 통하여 배수형 쉴드터널의 축소가능성에 대하여 검토를 수행하였으며, 축소 비율을 산정하여 표준단면까지 설계를 수행하였다.

(1) 세그먼트에 배수식을 적용해 쉴드터널 단면축소방안 연구결과, 철근량이 고정될 경우 배수개념의 쉴드터널의 세그먼트 두께는 비배수개념의 쉴드터널보다 약 40% 감소하였고, 세그먼트 두께와 철근량을 현장조건을 고려하여 조건별로 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

(2) 기존 설계되었던 지하철 쉴드터널에 대하여 동일조건에서 배수식을 적용한 결과 20%의 단면감소가 가능한 것으로 평가되어, 배수형 쉴드터널 세그먼트에 대한 표준단면 설계를 수행하였다.

(3) 설계된 배수형 쉴드터널의 세그먼트의 시제품 생산을 위하여, 세그먼트 제작용 몰드를 설계 및 제작하였고, 제작된 몰드를 이용하여 배수형 쉴드터널 세그먼트 1piece를 제작하였다.

제 13 절 배수형 쉴드터널 시공성 평가

배수형 쉴드터널은 기존 쉴드터널이 비배수 터널임에도 불구하고 발생되는 누수 등의 단점을 보완하기 위하여 쉴트터널 시공시 터널내부로 배수가 가능하도록 유로홈을 설치한 세그먼트를 적용한 터널이다.

슬림형 세그먼트와 기존 쉴드터널의 시공프로세스는 기본적으로 동일하나, 기존에 뒷채움재로 적용하던 정재모래 또는 혼화재를 대신하여 원활한 투수가 가능하도록 PS 볼을 적용한 것이 특징이다.

1. 공통 시공프로세스 분석

쉴드공법은 Shield라고 불리는 강제 원통 굴착기를 지중에 밀어 넣고 그 내부에서 토사의 붕괴, 유동을 방지하면서 안전하게 굴착작업 및 복공작업을 하여 터널을 구축하는 공법이다. 개착공법을 대신할 수 있는 도시터널의 시공수단으로서 지하철, 상하수도, 전기통신시설 등에 널리 이용되는 공법이다.

쉴드공법의 특징은 시공관리 및 품질관리가 용이하며, 안정성을 확보한 공법으로 지하매설물의 이동과 방호가 불필요하다. 또한 광범위한 지반에 적용이 가능하나, 토피가 얇은 터널의 시공이 곤란하며 급곡선부 시공이 어렵다는 단점이 있다.

쉴드터널의 시공프로세스는 9개의 세부공정으로 진행되며, 쉴드장비 조립 후 굴진공정은 4단계로 진행된다. 세그먼트 체결공정은 5개 공정이 반복되어 진행된다.

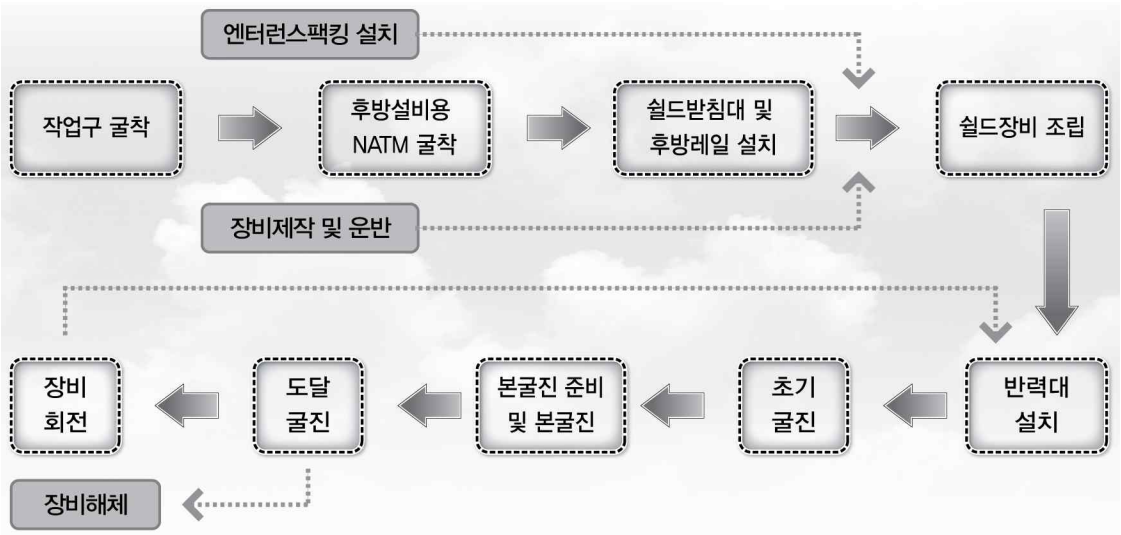


그림 2.13.1 쉴드공법 굴진 시공프로세스[1)]

시공단계별 관리방안은 표 2.13.1과 같다.

표 2.13.1 시공단계별 관리방안[2)]

<table>
<tr><th>단계</th><th>관리방안</th></tr>
<tr><td>굴진</td><td>- 발진시 지반계측 형상과 굴진데이터를 통한 굴착면 이수압 조절
- 이수압을 가하여 굴착면의 토압, 수압에 저항하여 굴착면의 변형억제
- 이수안에 포함되어 있는 흙입자로 불침투성막을 형성하여 이수압력 작용
- 유체라인에 긴급 압력누출 밸브를 설치하여, 엔트란스 파킹의 내력이상으로 굴착면 이수압 상승억제
- 이수물성을 조절하여 지하수와 토사의 갱구유입 방지
→ 엔트란스 파킹의 뒤집힘 방지
- 발진갱구 주변에 감시원을 배치하여 이상여부 감시</td></tr>
<tr><td>세그먼트 조립</td><td>- 내면 콘크리트면의 크랙이나 흡집, 박리 등의 손상 재점검을 하여 콘크리트면 크랙, 파손 방지
- 세그멘트 외경, 터널선형 및 지반조건 등을 고려, 테이퍼링의 형상결정
- 세그멘트링의 변형 및 콘크리트면 크랙 방지를 위한 자키 편압 최소화
- 세그멘트링에 편재를 주지 않도록 주의
- 사행수정
- 이형 세그멘트 사용으로 신속히 방향수정
- 쉴드 자키의 편압에 의한 무리한 수정 주의</td></tr>
<tr><td>백필 주입</td><td>- 테일보이드 충진성의 향상 및 초기강도 확보, 가소성 백필 주입제 사용
- 동시 주입방식 → 굴삭경과 세그멘트 외경과의 차에 의해 발생하는 테일보드에 백필제를 굴진과 동시에 주입
<table>
<tr><td rowspan="3">1㎥당 배합</td><td rowspan="2">A액</td><td>고화재</td><td>250kg</td><td>안정제</td><td>3.0L</td></tr>
<tr><td>B액</td><td>60kg</td><td>물</td><td>813L</td></tr>
<tr><td rowspan="2">상정압축강도</td><td colspan="2">급경제</td><td colspan="2">80L</td></tr>
<tr><td colspan="2">1시간 압축강도
28일 압축강도</td><td colspan="2">0.5kgf/㎠
20.0kgf/㎠</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>방수</td><td>- 링 및 세그멘트간 각 접합면의 누수방지
- 누수방지를 위한 씰재 및 RC세그멘트 건입시 세그멘트 파손 방지를 위한 완충재 사용</td></tr>
<tr><td>반력벽</td><td>- 가조립 세그멘트의 균등접촉 및 추진반력에 충분히 견딜수 있는 내구력</td></tr>
<tr><td>가조립</td><td>- 압기 및 약액주입으로 막장면의 붕괴방지</td></tr>
<tr><td>엔트란스</td><td>- 쉴드와 입갱구조물과의 간극으로부터 이수 및 백필제 누수방지
- 가조립 세그멘트 철거 시 철거</td></tr>
<tr><td>H강 말뚝 절단,철거</td><td>- 쉴드의 발진 직전에 갱구에 타설된 SMW항 철거
- 누수 발생시 보정주입을 통한 누수차단</td></tr>
</table>

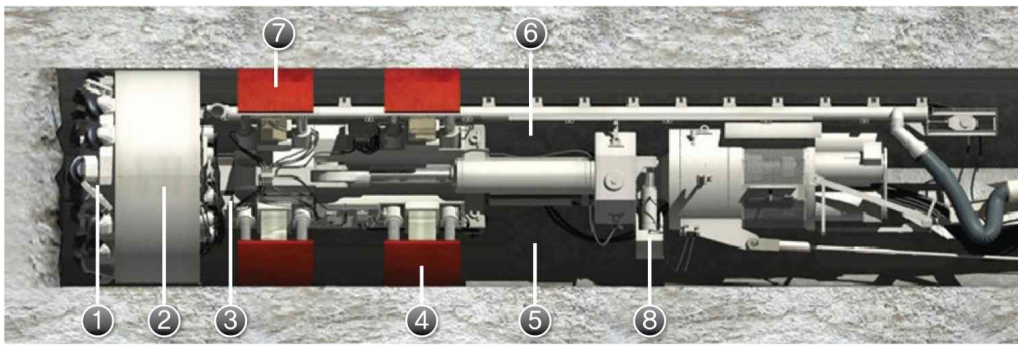
가. TBM(Tunnel Boring machine)

쉴드공법은 TBM장비로 굴착하며 TBM은 기계본체와 기계본체를 작동하기 위한 각종 실내설비를 적재할 수 있는 후속트레일러, 버력반출을 위한 후속설비(Back up)로 구성되어 있다.

Cutter Head란 배열 장착된 각종 Cutter의 압축력과 회전력에 의해 암석을 압쇄시켜 굴착하부에서 Scraper 및 Bucket으로 버력을 상부 또는 Inner Kelly내에 설치된 Belt Conveyor에 적재하여 후방으로 배출시키며 Inner Kelly의 전진 작동으로 전진한다. Cutter Head Jacket : Cutter Head 및 Bucket을 둘러싸고 있으며, 터널 벽면으로부터 떨어지는 낙반을 방지하여 Cutter Head 뒷면에서 지보재 설치작업을 용이하게 해주며, TBM Clamping 및 Resetting 시 본체 전방지지대 역할과 굴진 중 Cutter Head를 지지하여 본체의 진동을 감소시켜 준다.

Inner Kelly 및 Outter Kelly : lnner Kelly는 Advance Cylinder의 유압작동으로 Cutter Head를 전진시키며 Cutter Head를 회전시키는 Cutter Head Drive가 있다. 전방의 주 구동부는 유압 클런치에 의해 메인 베어링과 직접 연결된며 후반부는 본체굴진방향을 조정할 수 있는 Rear Support와 연결되어 있다. Outter Kelly는 Inner Kelly를 감싸고 있으며 굴착운행 시 본체를 지지하기 위한 Clamping Pad장치가 있어 기굴착된 터널벽면에 Pad로 압착 지지하여 TBM을 굴착 전진시킨다.

후속 트레일러는 견인 롯드 또는 체인에 의하여 기계본체에 끌려다니며 Cutter Head 구동에 필요한 전동모타와 전동모터에 의해서 작동되는 각종 유압펌프, 굴진시 발생한 분진을 처리하기 위한 집진기가 장착되어 있으며, 상부에는 버력반출을 위한 Belt Conveyor가 설치되어 있다.



①Cutter Head ②Cutter Head Jacket ③Inner Kelly ④Outter Kelly
⑤Advance Cylinder ⑥Cutter Head Drive ⑦Clamping Pad ⑧Rear Support

그림 2.13.2 TBM 본체 개요도

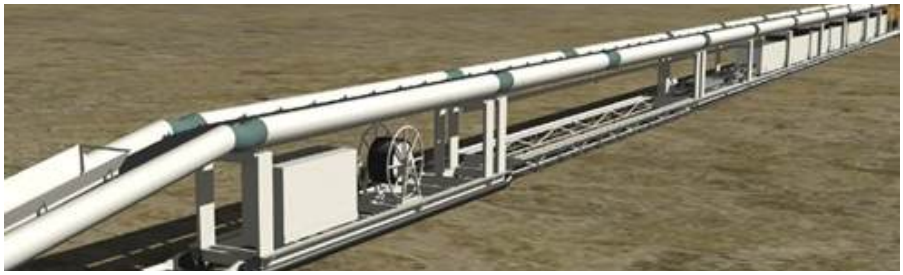


그림 2.13.3 TBM 장비의 후속설비

후속설비는 갱내에서 버력처리를 위해 Locomotive와 광차(Muck Car)가 진행할 수 있도록 여러 개의 Deck로 구성되며, 상부에는 Belt Conveyor가 설치되어 버력이 이송된다.

나. 주요공정별 공사기간 및 현황

굴착시간은 풍화암, 연암, 경암에 따라 표와 같이 소요공기가 달라진다. 쉴드공법 굴진 소요공기는 초기굴진, 본굴진, 도달굴진 별로 달르며 각 굴진의 표준 일굴진량은 초기굴진 2.51m/일, 본굴진 5.01m/일, 도달굴진 2.51m/일로 분석되었다. 굴진이외 공정의 소요공기는 굴진기운반+조립+발진준비 기간이 60일, 도달 후 해체+운반+재조립+발진준비 기간이 30일, 도달굴진완료 후 장비해체 기간이 45일 정도 소요되는 것으로 분석되었다.

굴진 후 세그먼트 체결에 필요한 공정은 5개 공정이 반복되어 시공된다. 쉴드터널의 시공프로세스 분석결과 세그먼트공급, 세그먼트고정, Erector회전, 세그먼트 Tilting, 세그먼트체결 5개공정으로 구분되어 각 공정별 소요공기를 분석하였다. 분석결과 세그먼트 공급에서 세그먼트 체결 까지 1개의 세그먼트 설치 시 420초의 소요공기가 필요한 것으로 분석되며, 이중 세그먼트 Tilting공정에서 가장 많은 소요되는 것으로 분석된다.

표 2.13.2 쉴드공법 암별 굴착시간

구 분	Cycle time (1링 기준)	시간당 굴 진장	본 굴진 일 진량 (20hr/일)
풍화암	164.0분	0.3567m/hr	7.13m/일
연 암	227.6분	0.2540m/hr	5.14m/일
경 암	236.4분	0.2457m/hr	4.95m/일



그림 2.13.4 쉴드터널 단위공종별 시공프로세스

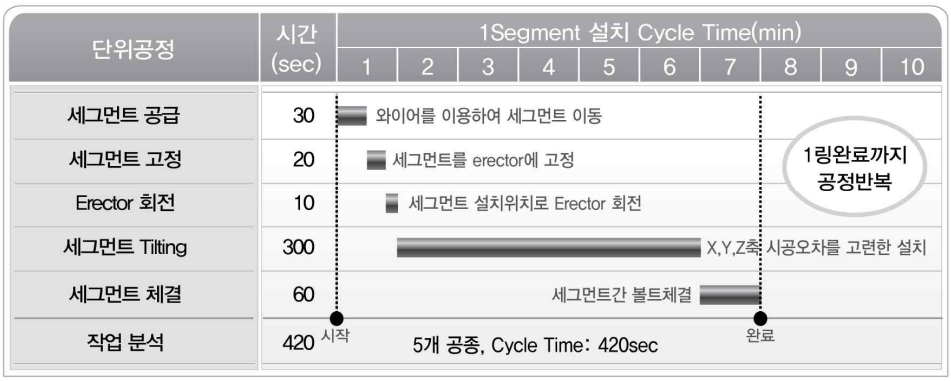


그림 2.13.5 세그먼트 조립 소요공기 분석

다. 뒤채움 시공 비교

배수형 쉴드터널은 기존 쉴드터널의 세그먼트 대신에 유로홈이 적용된 슬림화된 세그먼트를 적용한 쉴드터널로 일반적인 시공프로세스는 동일하나 기존 뒤채움재로 정재모래나 혼화재를 적용하던 방식에서 투수성을 유지하기 위한 PS 볼을 적용하여 뒤채움재 시공 방식에 차이가 발생한다.

(1) 기존 쉴드터널

쉴드터널의 뒤채움 주입의 목적은 크게 지반침함의 영향방지, 세그먼트의 이음매와 볼트구멍 등의 누수방지, 세그먼트 복공의 조기안정성 3가지로 구분할 수 있다. 뒤채움 주입은 세그먼트의 배면에서 실시되는 지수공 역할을 하는데, 주입이 불충분하면 세그먼트 배면에서의 누수현상이 현저하게 증가되어 터널의 사용이 곤란하게 될 뿐만 아니라 지하수의 유동 및 수위의 저하를 일으키게 된다.

뒤채움 주입방식은 실시시기에 의하여 동시주입방식, 반동시주입방식, 즉시주입방식, 후방주입방식 4가지로 구분할 수 있다. 이중 일반적으로 즉시주입방식이 시공실적이 가장 많으며, 한링의 굴진완료마다 실시하는 방식이다.

뒤채움 주입재료가 구비해야하는 필요성질은 아래의 조건을 만족하여야 한다.

· 블리딩 등 재료분리를 일으키지 않아야 한다.
· 주입후의 경화현상에 따른 체적감소율이 적어야 한다.
· 지반상당의 균일한 강도가 조기에 얻어져야 한다.
· 유동성 및 충진성이 뛰어나야 하며, 수밀성이 우수해야 한다.
· 주입지에 지하수에 의한 희석이 적어야 한다.
· 무공해이며 값이 경제적이어야 한다.

뒤채움 재료로는 모래가 일반적이나 최근에는 벤토나이트, 고령토, 플라이애쉬 등이 적용된다. 쉴드 공법 초창기에는 몰탈, 시멘트 벤토나이트 등 일액성 뒤채움 주입재료가 주로 사용하였으나, 최근에는 유동성이 유리한 이액성의 뒤채움 주입재료의 사용이 늘어나고 있다.

뒤채움 주입 대상의 공극은 쉴드 굴진시 발생되는 세그먼트 배면의 전공극을 대상으로 하여 실주입량(뒤채움 충진율 = 주입량 × 유효율/전공극량)을 결정한다.

뒤채움 주입압력은 0.2~0.4MPa이 일반적이며, 최근 점성토 지반에서 뒤채움주입의 연구가 진행되고 있다.

(2) 배수형 쉴드터널

배수형 쉴드터널은 기존 쉴드터널의 뒤채움재와 다르게 배수가 가능하도록 뒤채움재로 PS 볼을 적용하였다.

PS 볼을 이용한 배면주입방식은 새로운 방식의 뒤채움재로 본 연구과정에서 배면주입실험을 통하여 시공성을 검토하였다. 원활한 시공성을 확보하기 위하여 배면주입장치를 개발하고 주입구를 전면 방향으로 재료의 분사가 가능하도록 개조하여 실험한 결과 99%이상 충진이 가능한 것으로 검토되었으며 충진효율은 약 0.6㎥/hr인 것으로 측정되었다. 또한 배면에 주입된 공기는 PS 볼의 고른 입도분포로 인해 입자 사이의 간극에서 흐름이 원활하였고, 비중이 2.5 이상인 PS 볼의 특성상 입자의 자중으로 인해 충진된 재료의 다짐효과도 우수할 것으로 예상되며, 충진시 재료의 날림 및 유출현상이 없어 뒤채움 재료로서 효과적인 것으로 검토 되었다.

2. 시공 및 운영 위험도 평가

가. 위험도 평가 일반사항

위험도 평가(Risk Assessment)란 건설공사에 내재되어 있는 위험요소의 분류 및 파괴경로 규명, 위험요소들 간의 인과관계 분석, 위험요소들의 발생확률, 경제적 손실 비용의 산정 등을 수행하여 각각의 위험요소들의 발생경로와 발생확률, 그리고 경제적 손실 등을 체계적이고 합리적인 방법으로 평가하는 과정이다.[3)]

위험도 평가의 목적은 구조물의 시공 및 공용 간 발생될 수 있는 위험요소와 위험경로를 분석하여 구조계획, 설계의 적정성과 신뢰성에 대한 검토와 주요부재의 파괴/붕괴 발생확률 및 그에 따른 경제적 손실로부터 위험도를 평가하여 평가결과로부터 집중적인 관리방안 및 방지대책 계획 수립을 위한 자료를 확보하고 최종적으로 발생가능한 위험으로부터 소중한 인명과 재산의 보호하는데 목적이 있다.[3)]

신공법 적용 및 장비운영 자동화 추세로 증가되는 위험도는 관리가 필요하다. 특히 건설공사의 특성상 사고발생 시 막대한 인명과 재산손실을 막기 위해 시공 및 운영 중 사고경로에 대한 분석과 사전 예방 및 대책을 수립해야 할 필요성이 요규되고 있다. 따라서 내재된 위험에 대한 체계적인 분석/평가를 위해서 중요 위험요소를 고려한 분석모형 제시와 주관적 평가까지 포함한 확률적 위험도분석이 필요하다.



그림 2.13.6 위험도 평가 시스템 개요도

표 2.13.3 위험도 평가절차

평가단계		단계별 구성내용
위험요소 규명	예비조사	- 설정된 범위에 해당하는 시공계획/공법 검토 - 지장물 / 주변환경 / 시공조건 등 제반조사결과 고려
	위험요소 분류	- 공정별/자연재해별/부재별 분류 - 일반적 위험요소의 분류 및 현장상황에 따른 특징적 분류
위험경로 모델링	가능사건 분류	- 계획 및 설계단계에 대한 분석 - 시공/계측/품질 등에 관한 고려 - 유지관리/자연재해에 대한 분석
	Event tree 구성	- 위험경로에 대한 시나리오 작성 - 시나리오에 따른 퍼지사건수 모형구상 및 작성
위험도 분석	확률산정	- 각 촉발/발생사건의 언어학적 변량 결정 - 퍼지기법을 이용한 위험경로별 최대 소속도 산출 - 위험경로별 퍼지확률 산정
	예상손실 평가	- 위험경로별 파괴에 따른 경제적 손실에 대한 비용평가
위험요소 관리	위험요소 고려	- 위험도가 큰 부분에 대한 위험요소의 관리 및 대책을 마련 후 설계에 반영하도록 유도함
	집중관리	- 위험도에 따른 등급화 및 분류 - 집중 유지관리 대상의 특별선정 - 공사 및 유지관리 시 관리대상 정보제공

나. E.T.A(Event Tree Analysis) 분석

사고의 안전도를 사용한 시스템의 안전도를 나타내는 시스템 모델의 하나로서 귀납적 이기는 하나 정량적인 분석기법으로 종래의 지나치기 쉬웠던 재해의 확대요인의 분석의 적합한 기법이다.[3)]

Tree 구성은 제일 먼저 발생하는 유발사건(Triggering events)인 초기사건과 경로 중간에 초기사건과 이어지는 발생가능사건(Enabling events)으로 구성되어 있으며, 구성요소의 파괴와 직접 관련이 있으며 실제로 경제적 손실에 직접적인 영향을 줄 수 있는 위험사건이 각각의 경로 끝에 위치하게 구성된다.

또한, 동일한 위험사건이라도 경로에 따라서 최종결과나 중간단계에 적용될 수 있으며, 초기사건을 뒤따르는 발생가능 사건들을 규명하고 여러 사건들의 발생할 수 있는 사건의 조합을 찾을 수 있는 분석 기법이다.

시스템의 상호작용과 기능향상을 위한 시스템 성능을 향상시키는 척도를 검증함과 유용하고 분석자로 하여금 위험요소를 감지하여 감소시키는데 유용한 수단을 규명함에 유용하고, 시공 및 유지관리 시 위험요소에 대한 유용한 절차에 대한 기본 정보 획득에 용이한 분석 기법이다.

일반적으로 발생 가능한 잠재적인 위험사건들은 어떤 초기사건 발생 후 이어지는 하위사건들의 발생단계로 진행되므로 이런 과정을 Event tree diagram를 이용하여 체계적이고 효과적인 분석수행이 가능하다.

다양한 결과에 영향을 미칠 수 있는 초기사건을 분석하는데 용이하며, 초기원인을 강조하고 사건의 초기부터 마지막까지 영향을 가지는 구조로 독립적인 사건이나 동시발생적인 사건을 다루는데 적합하다. 또한 사건의 순서를 기술하는데 가장 효과적이고 설계단계에서 가정한 초기사건들로부터 발생되는 내재사건들을 평가하는데 매우 효율적인 기법으로 4단계로 구분하여 해석된다.

일반적인 사건수의 구성은 초기사건과 이어지는 하위의 발생가능사건, 그리고 최후 발생되는 최종 결과들인 $C_{ij\cdots k}$ 로 이루어진다.

표 2.13.4 E.T.A 분석의 단계별 주요내용

해석단계	단계별 내용
1단계	- 유발가능사건과 발생가능사건의 분류
2단계	- 사건수(Event Tree) 구성
3단계	- 확률분석기법을 이용하여 각 사건들의 경로에 해당하는 발생확률 계산
4단계	- 발생확률과 경제적 손실을 곱하여 각 경로의 위험지수를 평가

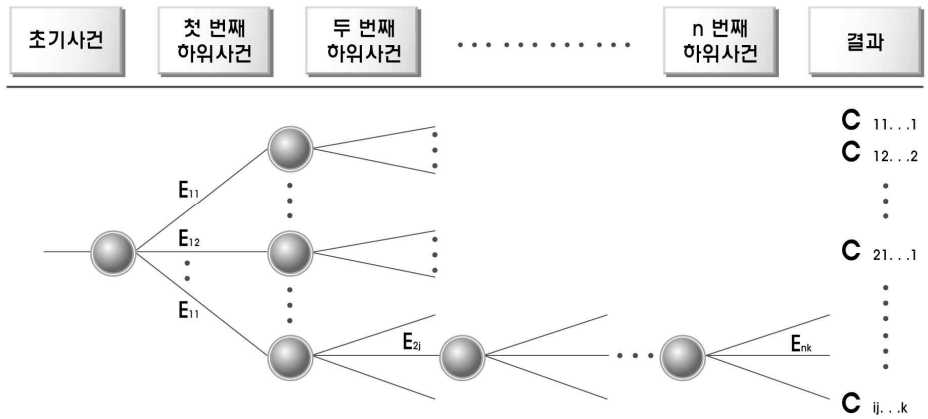


그림 2.13.7 Event Tree 구성의 예시

특정결과는 초기사건에 연이어 발생하는 하위사건(발생가능사건)에 의존하며, 하위사건들은 통계적 독립(Statistically Independent) 즉, 상관관계(Correlation)가 전혀 없는 사건으로 가정한다. 각각의 경로들은 어떤 사건이 발생하였을 경우 연이어 발생할 수 있는 하위 사건으로 구성되어 있고, 특정 경로의 발생확률은 그 경로에 존재하는 촉발가능사건과 이어지는 모든 하위사건의 확률들의 곱으로 산출한다.

$$P(C_{ij\cdots k}|E) = P(E_{1i}|E)\ P(E_{2j}|E_{1i}E)\ \cdots\ P(E_{nk}|E_{1i}E_{2j}\cdots E) \qquad \text{식(2.13.1)}$$

초기사건에서 발생가능사건들로 Tree Model를 구성하여 위험지수를 산출한다.

표 2.13.5 E.T.A 분석 예시

초기사건	발 생 가 능 사 건				발생확률 Pti	경제적 손실(Li)	위험지수
T9	E15	E16	E17	E20			
P(T9)	P(E15)	P(E16)	P(E17)	P(E20)	Pf1	L1	RF1
				1-P(E20)	Pf2	L2	RF2
			1-P(E17)	P(E20)	Pf3	L3	RF3
				1-P(E20)	Pf4	L4	RF4

다. 위험도 분석 수행

재해요소별 위험요소는 지진/태풍/홍수 등의 자연재해와 열차탈선 등의 인적재해로 위험요소를 분류할 수 있으며, 자연재해와 시공부량에 의함 위험요소 관리가 중요하다.

공정별 위험요소는 계획 및 조사, 설계, 시공, 유지관리 4가지로 구분할 수 있으며, 설계과정상 오류 및 부실과 안전진단의 오류 및 부실 발생 시 위험요소가 크다.

표 2.13.6 재해별 위험요소

구분	위 험 요 소	발생가능성	중요도
자연재해	- 설계하중을 넘는 자연재해 발생	매우 낮음	매우 높음
인적재해	- 차량/열차 전복에 의한 쉴트터널 세그먼트 파손	낮 음	높 음
	- 건설장비 운용 미숙에 의한 공사지연	보 통	높 음
	- 시공불량에 의한 세그먼트 및 부착물 탈락	매우 낮음	매우 높음

표 2.13.7 공정별 위험요소

구분	위 험 요 소	발생가능성	중요도
계획 및 조사	- 미흡한 지반조사 및 현장조사	보 통	높 음
	- 부적적한 가설계획, 무리한 공정계획	낮 음	높 음
설 계	- 설계과정상 오류 및 부실	다소낮음	다소높음
	- 계산서와 도면의 불일치	보 통	높 음
	- 가설 및 상세설계의 미비/오류	낮 음	높 음
시 공	- 시공품질관리 및 감독소홀	다소낮음	높 음
	- 건설장비 선정 및 운용 오류	낮 음	보 통
	- 미숙련자에 의한 작업오류 및 부실	보 통	높 음
유지관리	- 상시 및 정기점검 소홀	다소낮음	높 음
	- 안전진단의 오류 및 부실	낮 음	다소높음
	- 보수보강의 오류 및 부실	낮 음	높 음

시공단계에서 위험요소로는 시공관리, 세그먼트 제작, 세그먼트 운반차에 의한 적재 및 운반, 세그먼트 조립으로 구분할 수 있으며, 운영 중 위험요소는 도로, 철도, 전력구로 구분하여 정의 할 수 있다.

표 2.13.8 시공단계 위험요소

구분	위 험 요 소	발생가능성	중요도
시공관리	- 시공관리 미숙으로 공기연장	보 통	보 통
	- 품질관리 불량으로 세그먼트 불량	낮 음	높 음
	- 관리불량으로 인한 설계와 시공 불일치	보 통	보 통
세그먼트 제작	- 세그먼트 설계도면과의 치수 오류	낮 음	높 음
	- 세그먼트 허용강도 부적합	다소낮음	다소높음
세그먼트 운반차에 적재 및 운반	- 지하로 세그먼트 인양 중 크레인 전도	낮 음	높 음
	- 터널내 운반 중 세그먼트 파손	보 통	낮 음
세그먼트 조립	- 장비운영 미숙에 의한 공기연장	보 통	높 음
	- 볼트풀림에 의한 세그먼트 탈락	보 음	높 음

표 2.13.9 운영 중 위험요소

구분	위 험 요 소	발생가능성	중요도
도로쉴드터널	- 차량운전 미숙에 의한 터널 충돌	다소낮음	높 음
	- 상시 및 정기점검 소홀에 의한 지하수 누수	낮 음	높 음
철도쉴드터널	- 열차탈선에 의한 터널 충돌	다소낮음	높 음
	- 상시 및 정기점검 소홀에 의한 지하수 누수	낮 음	높 음
전력구	- 누전에 의한 화재발생	다소낮음	매우높음
	- 상시 및 정기점검 소홀에 의한 지하수 누수	낮 음	높 음

(1) 기존 철도교통 위험도자료 분석

2007년~2011년 5개년 간 철도사고 현황(국토해양부 철도안전종합정보포탈 자료)을 이용하여 철도사고 발생빈도를 분석한 결과 철도사고 발생 및 피해현황은 철도사고 중 철도교통사상사고가 발생빈도의 62.2%로 가장 많이 차지하고, 인명피해 중 사망이 41.4%를 차지하고 있는 것으로 분석되었다.

표 2.13.10 2007년~2011년 철도사고 현황

[단위 : 건, 명, 백만원]

구분 \ 연도			2007	2008	2009	2010	2011	평균	%
발생현황	계(건)		429	408	382	317	277	362.6	100.0
	철도교통사고	열차사고	6	7	3	4	2	4.4	1.2
		건널목사고	24	24	20	17	14	19.8	5.5
		철도교통사상사고	272	251	238	204	170	227.0	62.6
	철도안전사고	철도화재사고	1	1	2	2	2	1.6	0.4
		철도안전사상사고	126	125	119	90	87	109.4	30.2
		철도시설파손사고	-	-	-	-	2	0.4	0.1
		기타철도안전사고	-	-	-	-	-	-	-
피해현황	인명피해	계(명)	431	410	395	350	275	372.2	100
		사 망	192	159	161	135	124	154.2	41.4
		중 상	145	167	134	136	87	133.8	36.0
		경 상	94	84	100	79	64	84.2	22.6
	재산피해(백만원)		5,016	1,418	1,335	533	382	1,737	-
선로연장(km)			3,739	3,770	3,812	3,973	4203	3899	-

※ 국토해양부「철도안전종합정보포탈, 2012」자료 참조

위험도(Risk)는 사고의 심각도와 발생빈도를 조합한 것이며, 항상 사고확률과 사고결과라는 두 가지 요소로 구성된다.

위험도 = 발생빈도 x 심각도 - 등가사망자수

⇒ 1 사망자 = 10 중상자 = 200 경상자

위험도 : 등가사망자/년　　발생빈도 : 건수/년

심각도 : 등가사망자/건수

등가사망자수(FWL) : Fatalities and weighted Injures)

2007년~2011년 5개년 간의 종합위험도 분석결과는 전체 철도사고에 대한 사고대비 사망자비율이 42.53%이며, 이 중 철도교통사상사고 위험도 751.56으로 가장 큼으

로 이에 대한 위험관리가 요구된다.

표 2.13.11 2007년~2011년 기존철도 위험도 평가 사항

[단위 : 건, 심각도, 명, %]

구 분			사고 발생 빈도	피해 심각도	위험도	인명피해			사고대비 사망자비 (%)
						사망	중상	경상	
철도사고	계		1813	0.463	840.02	771	669	421	42.53%
	철도교통사고	열차사고	22	0.005	0.12	-	1	4	0.00%
		건널목사고	99	0.235	23.33	21	22	26	21.21%
		철도교통사상사고	1135	0.664	751.56	720	308	151	66.22%
	철도안전사고	철도화재사고	8	-	-	-	-	-	0.00%
		철도안전사상사고	547	0.118	65.01	30	338	240	11.88%
		철도시설파손사고	2	-	-	-	-	-	0.00%
		기타철도안전사고	-	-	-	-	-	-	0.00%

※ 국토해양부「철도안전 성능 보고서, 2012」 자료 참조

우리나라 철도에 터널구조물은 약 362km(2010년 기준)로 철도 전체 연장의 10%정도인 실정이나, 대부분 NATM 터널로 구성되어 있으며, 현 운영 중인 쉴드 터널의 사고통계자료 취득이 어렵고 기존터널의 사고통계자료 또한 세분화 되어 있지 않은 실정이다. 본 연구과제와 관련된 쉴드터널 시공 및 운영 중 발생가능 시나리오 및 위험도 평가는 쉴드터널 전문가의 경험과 지식에 의한 판단을 기초로 하여 세부 종합위험도 평가를 수행해야 할 것으로 분석된다.

(2) 기존 도로교통 위험도자료 분석

2007년~2011년 5개년 간 도로사고 현황(경찰청 경찰통계연보 자료)을 이용하여 도로사고 발생빈도 분석한 결과 도로사고 발생 및 피해현황은 5년간 평균 221,612건이 발생되고 있으며, 인명피해 중 사망자 비율이 1.63%를 차지하고 있는 것으로 분석되었다.

표 2.13.12 2007년~2011년 도로사고 현황

[단위 : 건, 명, %]

구분 \ 연도			2007	2008	2009	2010	2011	평균	%
발생현황	교통사고발생(건)		211,662	215,822	231,990	226,878	221,711	221,613	-
	자동차(천대)		16,428	16,794	17,325	17,941	18,437	17,385	-
피해현황	인명피해	계(명)	342,072	344,832	367,713	357,963	346,620	351,840	100
		사망자(명)	6,166	5,870	5,838	5,505	5,229	5,722	1.63
		부상자(명)	335,906	338,962	361,875	352,458	341,391	346,118	98.37
도로연장(km)			103,019	104,236	104,983	105,565	105,931	104,747	-

※ 경찰청「경찰통계연보, 2012」자료 참조

사고유형 및 도로형태별 도로사고 현황 분석결과 단일로의 기타를 제외한 교차로내 사고가 25.34%로 가장 높으며, 터널사고는 0.29%로 발생되는 것으로 분석되었다.

표 2.13.13 2007년~2011년 사고유형별 도로사고 건수

[단위 : 건, %]

도로형태 \ 사고유형		차vs사람	차vs차	차량단독	건널목	계	비율(%)
계		49,701	161,681	10,319	10	221,711	100.00
교차로	교차로내	5,191	50,415	579	0	56,185	25.34
	교차로부근	6,930	34,639	1,332	0	42,901	19.35
단일로	횡단보도상	7,829	2,056	20	0	9,905	4.47
	횡단보도부근	1,675	1,920	69	0	3,664	1.65
	터 널	19	541	92	0	652	0.29
	교 량	146	1,527	192	0	1,865	0.84
	기 타	25,252	66,847	7,639	0	99,738	44.99
건널목		0	0	0	10	10	0.01
기타불명		2,659	3736	396	0	6,791	3.06

※ 경찰청「경찰통계연보, 2012」자료 참조

2007년~2011년 5개년 간의 종합위험도 분석결과는 도로사고 위험도는 45,913.92이며, 사고대비 사망자비율은 2.58%로 분석된다.

표 2.13.14 2007년~2011년 기존도로 위험도 평가 사항

[단위 : 건, 심각도, 명, %]

구 분 / 연 도		사고 발생빈도	피해 심각도	위험도	인명피해		사고대비 사망자비 %
					사망자	부상자	
도로 사고	계	1,108,063	0.041	45,914	28,608	1,730,592	2.58%
	평 균	221,612	0.041	9,183	5,721.6	346,118.4	2.58%
	2007년	211,662	0.045	9,525	6,166	335,906	2.91%
	2008년	215,822	0.043	9,260	5,870	338,962	2.72%
	2009년	231,990	0.041	9,457	5,838	361,875	2.52%
	2010년	226,878	0.040	9,030	5,505	352,458	2.43%
	2011년	221,711	0.039	8,643	5,229	341,391	2.36%

도로관리청 기준 약 105,931km(2011년 기준) 총 도로연장 중 터널 구조물은 약 974km로 전체 도로연장의 0.9%를 차지하고 있으며, 대부분 NATM 터널로 구성되어 있으며, 철도와 동일하게 운영 중인 쉴드 터널의 사고자료 취득이 어렵고 사고통계자료 또한 세분화 되어 있지 않은 실정이다. 사고유형 및 도로형태별 도로사고 현황 분석결과 터널사고는 전체사고 대비 0.29%로 미미하게 발생하고 있는 것으로 분석되었고, 기존 도로 위험도 평가 자료 분석결과 철도와 동일하게 쉴드터널과 관련된 통계자료가 부족하여 쉴드터널 시공 및 운영 중 발생가능 시나리오 예측, 위험도 평가는 쉴드터널 전문가의 경험과 지식에 의한 판단을 기초로 세부 종합위험도 평가를 수행하였다.

(3) 기존 터널 위험도 평가 시나리오 구성

기존 교통수단별 위험도 평가 자료 분석결과 자료 범위가 광범위하고 쉴드터널에 대한 사건사고에 대한 구체적인 세부통계자료가 없어 일반적 터널사업의 시공단계 및 운영단계 위험사건 시나리오로 각각 구분하여 시나리오 구성하였다. 일반적 터널사업(도로, 철도)의 시나리오를 통하여 배수홈 쉴드터널위 세부 종합적인 위험도 평가의 평가 수행하였다.

일반적 터널사업(도로, 철도)의 성격에 부합되는 사건들로 각 단계별 촉발사건과 발생가능사건을 구성한 결과 시나리오 유형은 각 단계별로 시공단계는 21개, 운영단계는 23개로 구성하여 분석하였다.

표 2.13.15 일반적 터널의 단계별 시나리오 유형

구 분	시공단계	운영단계
Primary event trees (촉발사건)	8개	6개
Secondary event trees (발생가능사건)	43개	53개
Consequence (위험시나리오 유형)	21개	23개

※ 영국의 RSSB, 국토해양부의 철도안전정보포탈, 경찰청의 경찰통계연보 등을 참고하여 시나리오를 작성

표 2.13.16 일반적 터널의 시공단계 및 운영단계의 촉발사건

구분	시공단계	운영단계
T1	지반조사 오류	차량 터널충돌
T2	사전설계검토 미비	차량 터널내 이탈/전복
T3	지반조건 분석 미비	터널화재
T4	건설장비 운용 불량	자연재해
T5	세그먼트시공관리 불량	정치/재정문제 발생
T6	터널시공관리 불량	작업자사고
T7	체결시공관리 불량	-
T8	정치/재정문제 발생	-



그림 2.13.8 일반적 터널의 시공단계 시나리오 구성



그림 2.13.9 일반적 터널의 운영단계 시나리오 구성

(4) 배수형 쉴드터널 주요 발생 시나리오 구성

일반적 터널사업(도로, 철도)의 시나리오에서 배수형 쉴드터널에 대한 위험도 평가는 전문가의 주관적 판단을 기초로 하여 가상시나리오를 구성하고 세부 종합적 평가를 실시하고 세부 가상시나리오는 배수형 쉴드터널에 대한 세부 촉발사건 및 발생가능사건을 각각 성격에 부합되는 사건들로 구성한 결과 세부 위험도 평가 시나리오 유형은 8개로 구성하여 분석하였다.

표 2.13.17 배수형 쉴드터널 위험도 평가 시나리오 유형

구 분	체결위험도 평가
Primary event trees (촉발사건)	5개
Secondary event trees (발생가능사건)	14개
Consequence (위험시나리오 유형)	8개

표 2.13.18 배수형 쉴드터널 위험도 평가 촉발사건

구 분	사 건 내 용	구 분	사 건 내 용
T1	지반조건 분석 미비	T4	차량 사고
T2	시공관리 불량	T5	유지관리 불량
T3	세그먼트 구조적 결함		

표 2.13.19 배수형 쉴드터널 위험도 평가 발생가능 사건

구 분	사 건 내 용	구 분	사 건 내 용
E1	용출수 대비 부족	E8	구조물 기능상실
E2	이음부 누수	E9	정전 및 교통사고 발생
E3	Operator 숙련도 부족	E10	터널구조물 파손
E4	체결방식 구조적 결함	E11	시설대체 및 복구
E5	세그먼트 지수재 불량	E12	세그먼트 및 부착물 탈락
E6	세그먼트간 누수	E13	차량충동사고
E7	지하수 대거 유입	E14	인명피해



그림 2.13.10 배수형 쉴드터널 위험도 평가 시나리오 구성

라. 위험도 평가 분석결과 및 대책

표 2.13.20 배수형 쉴드터널 위험도 평가 단계별 주요내용

구 분	내 용
위험사건 수집	- 대상사업의 사건유형 자료수집 - 통계자료 및 전문가 자문을 통한 위험사건 유형 분석
위험사건 규명	- 위험사건 분류 →촉발사건 : 5개 →발생가능사건 : 14개 - 위험사건 시나리오 유형 : 8개 유형
위험도 분석	- 위험사건별 언어학적 변량 결정 - 퍼지사건수 분석기법을 활용한 위험확률 산출 ·공종별 발생비용 산출
위험관리	- 위험등급의 분류 →집중관리 : RF ≥ 1.0 →주의관리 :0.1 ≤ RF < 1.0 →일반관리 : RF < 0.1

표 2.13.21 배수형 쉴드터널 위험도 평가 결과

경로	촉발 사건	발생가능사건			퍼지확률	발생비용 (백만원)	위험도
1	T1	E1	E2	E3	0.0017700	30	0.05
2	T2	E4	E2	E3	0.0017700	20	0.04
3		E5	E6	E3	0.0235000	10	0.24
4	T3	E7	E8	E9	0.0028200	50	0.14
5	T4	E10	E11	-	0.0040900	20	0.08
6	T5	E12	E11	-	0.0005100	30	0.05
7		-	E2	E3	0.0000344	15	0.06
8		-	E13	E14	0.0029700	5	0.08

표 2.13.22 위험도 평가 결과에 따른 대책

등급	관리형태	분류범위	관리대상
A	집중관리	R.F ≥ 1.0	-
B	주의관리	0.1 ≤ R.F <1.0	경로 3, 4
C	일반관리	R.F < 0.1	경로 1, 2, 5, 6, 7, 8

위험도 평가 분석결과 집중관리 대상은 없으나 주의관리 대상은 경로 3, 4로써 특별히 주의가 필요하며, 일반관리 대상 유형은 경로 1, 2, 5, 6, 7, 8로 분석되었다. 경로 3 (시공관리 불량-세그먼트 지수재 불량)은 세그먼트간 누수현상을 발생시키며, 경로 4(세그먼트 구조적 결함-지하수 대거 유입)으로 인한 정전 및 교통사고 발생 시 발생되는 복구비용으로 인하여 위험도가 0.1을 초과하는 것으로 분석되었으나 배수형 쉴드터널 방식은 지하수 유입을 고려하여 세그먼트 제작시 누수에 대한 대책이 있는 공법으로 세그먼트 누수위험에 따른 경제적 손실이 감소 될 수 있을 것으로 분석된다.

소결론

(1) 쉴드공법 굴진 소요공기는 초기굴진, 본굴진, 도달굴진 별로 달르며 각 굴진의 표준 일굴진량은 초기굴진 2.51m/일, 본굴진 5.01m/일, 도달굴진 2.51m/일로 분석되었다. 굴진이외 공정의 소요공기는 굴진기운반+조립+발진준비 기간이 60일, 도달 후 해체+운반+재조립+발진준비 기간이 30일, 도달굴진완료 후 장비해체 기간이 45일 정도 소요되는 것으로 분석되었다. 1링의 체결시간은 약 420초가 소요되는 것으로 분석되었다.

(2) 기존 쉴드터널과 배수형 쉴드터널의 시공 중 가장 큰 차이는 기존 비배수에서 부분배수가 가능하도록 설계되는 세그먼트로 인한 뒤채움 재료의 변경이다. 기존에 정재모래 또는 혼화재를 사용하였으나, 부분배수를 위하여 PS 볼 적용하였으며 PS 볼 주입실험을 통하여 시공성이 양호한 것으로 검토되었다. 뒤채움 공정은 전체 공정에서 주공정을 차지하고 있는 공정이 아니어서 뒤채움 시간 등으로 인하여 전체공정에 영향을 주지는 않는 것으로 분석되었고, 뒤채움 재료로 PS 볼을 적용한 배수형 쉴드터널의 시공성은 기존 쉴드터널과 동일한 시공성을 확보할 수 있는 것으로 분석된다.

(3) 위험도 분석을 위하여 위험요소를 분류하고 기존 철도교통(터널) 위험도 자료와 기존 도로교통(터널) 위험도 자료를 분석하여 기존 터널에서 발생 가능한 위험도 평가 시나리오를 구성하고 이를 기초로 배수형 쉴드터널의 위험도 분석을 수행하였다. 배수형 쉴드터널의 위험도 평가 분석결과 집중관리 대상은 없으나 주의관리 대상은 경로3 (시공관리 불량-세그먼트 지수재 불량)과 경로4 (세그먼트 구조적 결함-지하수 대거 유입)로 나타났는데, 배수형 쉴드터널 방식은 지하수 유입을 고려하여 세그먼트 제작시 누수에 대한 대책이 있는 공법으로 세그먼트 누수위험에 따른 경제적 손실이 감소 될 수 있을 것으로 분석된다.

제 14 절 배수형 쉴드터널 경제성 평가

1. 원가 비교분석

본 연구에서는 배수형 쉴드터널의 객관적인 경제성 분석을 위하여 기초단가를 통일하여 분석하였다.

일반적으로 쉴드터널에 적용하는 세그먼트 두께는 터널 관경에 따라 달라지나 기존 도로터널(거마대교 민간투자사업)[2]과 지하철터널(신분당선(용산～강남) 복선전철 민간투자사업)[1]의 공사비 내역서를 입수하여 분석하였다.

표 2.14.1 기초단가 적용기준[1]

구분	적용기준
환률 및 유류대	조달청 『20115년 시설공사 환율 및 유류단가 공지』
노임	대한건설협회 『2015년 상반기 적용 건설업 임금실태 조사 보고서』
자재비	2015년 1월 물가정보 및 물가자료 최저가 적용
실적단가	국토교통부 『2015년 상반기 건설공사 실적공사비 적용 공종 및 단가』

가. 기존 도로 쉴드터널 비교

도로 쉴드터널(내경 ∅11,500)의 공종은 수량내역서의 분석결과 쉴드 굴진작업공, 쉴드 갱내작업공, 쉴드 갱외작업공 등 크게 15개의 대분류로 구성되어 있다.

표 2.14.2 도로 쉴드터널 공종구분

공종구분	규격
쉴드굴진 작업공	단선암반 초기굴진
	단선 암반 본굴진
쉴드갱내 작업공	단선암반 초기굴진
	단선 암반 본굴진
	뒷채움 주입공
	압기작업공
쉴드갱외 작업공	단선암반 초기굴진
	단선암반 본굴진

표 2.14.2 도로 쉴드터널 공종구분(계속)

공종구분		규격
쉴드이수처리작업공		단선암반 초기굴진
		단선암반 본굴진
쉴드기계관리공	쉴드중앙제어관리공	단선암반 초기굴진
		단선암반 본굴진
	쉴드기계기구손료공	2set
	비트교체공	굴착비트용
	후방설비손료	2set
	굴착측량공	추진관리용
갱내정비공		유체수송식
쉴드수채공		굴진용
		작업구용
쉴드설비공		발진갱구공
		도달갱구공
		지압벽공
		작업상공
		발진받침대공
		인상받침대공
		쉴드기 거치공
		쉴드기 회전공
		회전받침대공
		쉴드기 가발진공
		쉴드기 반출공
		쉴드기 해체공
		레일설비공
		후속대차공
갱내설비공		배관설비공
		환기설비공
		통신배선공
갱외설비공		크레인 설비공
		가설 울타리공
입갱설비공	크레인설비공	크레인설비 및 설치
	입갱설비공	가설 계단공
		엘레베이터공
이수설비공		송배니관 설비공
		송배니 펌프설비공
		중앙감시 조작설비공
		이수처리 설비공
		작니재 및 이수처리재공
		기계손료공
세그먼트공		표준형 Con'c용 S1
		표준형 Con'c용 S2
		편 Taper형 Con'c용
		세그먼트 조립공
		수팽창지수재공

표 2.14.2 도로 쉴드터널 공종구분(계속)

공종구분	규격
부대공	버력처리 상차 및 인양
	발파암(육상운반 20km)
	TAIL SEALER(WR-90)
	수전설비설치공
	물사용료
실드계측	실드계측

기존 쉴드터널과 배수형 쉴드터널의 전체공사비 분석에서 주요변수는 쉴드 굴진작업공, 세그먼트공, 부대공(버럭처리)에서 차이가 있는 것으로 분석되었다. 슬림형 세그먼트(T=24cm)는 기존 쉴드터널 세그먼트(T=30cm) 두께의 20%가 감소된 세그먼트로 전체 굴진외경의 축소로 인한 쉴드 굴진작업공 비용절감, 세그먼트 재료비 절감과 발생되는 버럭량 감소로 버럭 처리 비용이 절감되는 것으로 분석되었다.

일반적으로 쉴드터널 뒤채움재는 정제모래(규사) 또는 혼화재(시멘트 + 시멘트운반 + 벤토나이트 + 안정제 + 물 + 급결제)를 사용하고 있으나, 배수형 쉴드터널은 뒤채움재로 PS 볼의 적용하였다.

뒤채움재 원가분석을 위하여 각각의 뒤채움재의 필요량을 산정하였다. 정재모래는 시공할증 6%를 적용하였고, 혼화재는 손실율 2%와 할증률 90%를 고려한 93.8%를 적용하여 산정하였다. PS 볼의 할증률은 정재모래와 동일하게 적용하였다.

뒤채움재 필요량 산정 결과 정재모래는 6.116m3, 혼화재는 11.182m3, PS 볼은 터널 굴착외경의 축소로 인해 6.063m3 가 필요한 것으로 분석되었고, 이를 근거로 하여 각각의 뒤채움재에 대하여 원가분석를 실시하였다.

뒤채움재에 대한 원가분석 결과 배수형 쉴드터널 적용시 뒤채움 수량 감소와 재료비 감소로 인해 정재모래 대비 약 1.9%, 혼화재 대비 약 12.2%의 절감 효과가 있는 것으로 분석되었다.

전체공사비 분석을 위하여 입수한 기존 도로 쉴드터널(거마대교 민간투자사업)2)은 전체공사 중 일부 구간에 쉴드터널(L=12,490m)이 포함된 공사로서 전체 내역서에서 쉴드터널과 관련된 공정을 발취하여 원가분석을 수행하였다. 이중 쉴드 기계관리공은 제외하고 공사비 비교분석을 수행하였다.

배수형 쉴드터널은 기존 세그먼트 두께보다 20% 축소된 슬림형 세그먼트를 적용하게 된다. 따라서 제작공장 견적서를 기준으로 표준형이 약 8.7백만원/링, 테이퍼형이 약 9.5백만원/링 으로 결정되어, 기존 세그먼트 제작비에 74% 수준으로 제작이 가능한 것으로 조사되었다. 또한, 전체공사비는 약 10.89% 절감되는 것으로 분석되었다.

표 2.14.3 뒤채움재 원가분석(도로 쉴드터널)

구분		원가분석
정 재 모 래		6.116㎥ x 100,000원/㎥ = 611,600원
혼화재	시 멘 트	230kg x 11.182㎥ x 75,000원/1000 = 192,890원
	시멘트운반	230kg x 11.182㎥ x 12,007원/1000 = 30,880원
	벤토나이트	25kg x 11.182㎥ x 262.5원 = 73,382원
	안 정 제	2.0kg x 11.182㎥ x 4,305원 = 96,277원
	물	834kg x 11.182㎥ x 890원/1000 = 8,300원
	급 결 제	80 ℓ x 11.182 * 315 = 281,786원
	소 계	683,515원
P S 볼		6.063㎥ x 99,000원/㎥ = 600,237원

표 2.14.4 기존 도로 쉴드터널과의 전체공사비 비교

(단위 : 백만원)

공종명	기존 도로 쉴드터널 (T=300)	배수형 쉴드터널 (T=240)	공사비 절감률
쉴드굴진작업공	10,040	10,040	-
쉴드갱내작업공	14,227	14,085	1.00%
쉴드갱외작업공	4,662	4,662	-
쉴드이수처리작업공	5,771	5,771	-
갱내정비공	1,649	1,649	-
쉴드수채공	1,181	1,181	-
쉴드설비공	6,934	6,934	-
갱내설비공	3,792	3,792	-
갱외설비공	115	115	-
입갱설비공	162	162	-
이수설비공	70,341	70,341	-
세그먼트공	95,660	70,501	26.30%
부대공	18,006	17,694	1.73%
쉴드계측	2,561	2,561	-
전체합계	235,102	209,489	10.89%

주) Φ11,500(도로터널) L=12490m 기준 분석

나. 기존 철도 쉴드터널 비교

기존 철도 쉴드터널(내경 ∅7200) 공종은 수량 내역서 분석결과 쉴드 굴진작업공, 쉴드 갱내작업공, 쉴드 갱외작업공 등 크게 18개의 대분류로 구성되어 있다.

표 2.14.5 철도 쉴드터널의 공종구분

공종구분	규격
쉴드굴착작업공	초기굴진
	본굴진
	도달굴진
쉴드갱내작업공	초기굴진
	본굴진
	도달굴진
	뒷채움 주입공 (정제모래주입)
	뒤채움주입설비
	첨가재주입설비
쉴드갱외작업공	초기굴진
	본굴진
	도달굴진
쉴드기계관리공	쉴드기계손료공
	비트커터교체공
	테일실교체공
	후방설비손료공
	굴착측량공
갱내정비공	갱내정비공
쉴드설비공	발진갱문설치
	도달갱문설치
	발진갱구
	도달갱구
	ENTRANCE PACKING
	발진기지 받침대 설치철거
	도달기지 받침대 설치철거
	이동받침대 설치철거
	작업구 받침대 설치철거
	레일받침대 설치철거
	1차반력대 설치철거
	실드기운반
	쉴드기투입
	쉴드기반출
	쉴드기해체
	레일 설치철거
	후속대차 설치철거

표 2.14.5 철도 쉴드터널의 공종구분(계속)

공종구분	규격
갱내설비공	배관설비
입갱설비공	크레인설치철거
	고화처리시설 설치철거
	스테이징 설치철거
	토사반출설비 설치철거
	점성부여설비 설치철거
	토사HOPPER 설치철거
세그먼트공	표준형
	Taper형
	사행보정용
	가설세그먼트
	가설강재 세그먼트
	수평창지수재
	일액형실런트
	완충재
	코너씰
검사원통로 및 인버트	콘크리트 타설
	합판거푸집 3회
	합판거푸집 4회
	철근가공 및 조립
부대공	막장주입공(Polymer)
	Tail Sealer
	고화처리설비
	토사 Hopper
	버력처리 상차 및 인양
	갱외버럭처리
	궤도분기부설 및 해체
	지상작업장 설치철거
	열차 대피용 손잡이(스테인레스)
	방화문(대인용)
공사중 기계 및 전기공사	공사중 전기설비
	비상설비
갱내그라우팅	갱내그라우팅 천공
	갱내그라우팅 Packer설치
	갱내그라우팅 보조재
	시멘트 운반
	시멘트
발진갱구보강공	강관다단그라우팅
도달갱구보강공	강관다단그라우팅
매입전 설치	매입전 설치
쉴드 계측	쉴드 계측

철도 쉴드터널의 전체공정은 대분류 18개 공정에 소분류 76개로 나눠지며, 이중 뒤채움 주입공, 세그먼트 제작공, 완충재, 막장 주입공, Tail Sealer, 버력처리, 상차 및 인양, 갱외 버력처리 공정 등에서 기존 철도 쉴드터널과 배수형 쉴드터널과의 공사비 차이가 나는 것으로 분석되었다.

뒤채움주입공은 재료변경에 의한 것이며 세그먼트 제작공과 완충재, 버력처리 관련 공종은 세그먼트 두께 감소로 인한 차이인 것으로 분석되었다. 뒤채움재는 도로 쉴드터널과 동일하게 정재모래는 시공할증 6% 를 적용하였고, 혼화재는 손실율 2%와 할증률 90%를 고려한 93.8%를 적용하여 산정하였다.

뒤채움재 필요량 산정 결과 정재모래는 6.116m^3, 혼화재는 11.182m^3, PS 볼은 터널 굴착외경의 축소로 인해 6.063m^3 가 필요한 것으로 분석되었고, 이를 근거로 하여 각각의 뒤채움재에 대하여 원가분석를 실시하였다.

뒤채움재에 대한 원가분석 결과 슬림형 세그먼트 적용시 뒤채움 수량 감소와 재료비 감소로 인해 정재모래 대비 약 2.8%, 혼화재 대비 약 13.0%의 절감 효과가 있는 것으로 분석되었다.

전체공사비 분석을 위하여 입수한 기존 철도 쉴드터널(신분당선(용산～강남) 복선전철 민간사업)[1)]은 쉴드터널 연장이 2,998m 로서 쉴드터널과 관련된 공정을 구분하여 원가분석을 수행하였다. 이중 쉴드 기계관리공은 제외하고 공사비 비교분석을 수행하였다.

표 2.14.6 뒤채움재 원가분석(철도 쉴드터널)

구분		원가분석
정재모래		3.964m3 x 100,000원/m3 = 396,400원
혼화재	시멘트	230kg x 7.248m3 x 75,000원/1000 = 125,028원
	시멘트운반	230kg x 7.248m3 x 12,007원/1000 = 20,016원
	벤토나이트	25kg x 7.248m3 x 262.5원 = 47,565원
	안정제	2.0kg x 7.248m3 x 4,305원 = 62,405원
	물	834kg x 7.248m3 x 890원/1000 = 5,380
	급결제	80 ℓ x 7.248 * 315 = 182,650원
	소 계	443,044원
PS 볼		3.892m3 x 99,000원/m3 = 385,308원

배수형 쉴드터널은 기존 세그먼트 두께보다 20% 축소된 슬림형 세그먼트를 적용하게 된다. 따라서 제작공장 견적서를 기준으로 표준형이 약 6.7백만원/링, 테이퍼형이 약 7.3백만원/링 으로 결정되어, 기존 세그먼트 제작비에 76% 수준으로 제작이 가능한 것으로 조사되었다. 또한, 전체공사비는 약 10.95% 절감되는 것으로 분석되었다.

표 2.14.7 기존 철도 쉴드터널과의 전체공사비 비교

(단위 : 백만원)

공종명	기존철도쉴드터널 (T=300)	슬림형 세그먼트 (T=240)	공사비 절감률
쉴드굴착작업공	1,305	1,305	-
쉴드갱내작업공	2,180	2,146	1.55%
쉴드갱외작업공	561	561	-
갱내정비공	2,306	2,306	-
쉴드설비공	4,160	4,160	-
갱내설비공	72	72	-
입갱설비공	443	443	-
세그먼트공	19,233	14,772	23.19%
검사원통로 및 인버트	406	406	-
부대공	8,406	8,224	2.16%
공사중 기계 및 전기공사	1,744	1,744	-
발진갱구보강공	186	186	-
도달갱구보강공	186	186	-
매입전 설치	65	65	-
쉴드계측	1,475	1,475	-
전체 합계	42,727	38,050	10.95%

주) 내경 Φ,7200(철도터널) L=2,998m 기준 분석

다. 원가분석 결과

기존 도로터널(내경 ∅11,500)과 철도터널(내경 ∅7,200)의 내역서를 슬림형 세그먼트를 적용하여 공사비를 분석한 결과 세그먼트 재료비 절감률은 24%~26% 정도로 분석되었다. 전체공사비는 각각 10.89%(도로터널) 및 10.95%(철도터널) 절감되는 것으로 분석되었다.

또한, 기존 쉴드터널에서는 뒤채움재로 혼화재나 정재모래를 사용하였으나, 배수형 쉴드터널에서는 PS 볼을 사용하기 때문에 정재모래 대비 약 1.85%, 혼화재 대비 약 12% 이상 재료비 절감이 되는 것으로 분석되었다.

쉴드터널은 쉴드설비공, 갱구부 보강공 등 공사 연장과 상관없이 발생하는 비용과 쉴드 굴착작업공, 세그먼트공, 부대공 등 쉴드 연장에 의해 변화하는 공사비로 구분할 수 있다. 규모 및 공사 연장에 따른 공사비를 분석한 결과 내경 ∅11,500의 도로터널은 4.0km 이상부터 10% 이상의 절감효과가 있으며, 내경 ∅7,200의 철도터널은 2.0km 이상부터 10% 이상의 공사비 절감 효과가 있는 것으로 분석되었다.

배수형 쉴드터널 적용시 기존 쉴드터널과 비교하여 세그먼트 재료비 절감, 뒤채움 재료비 절감, 버력 처리비용 절감 등으로 전체공사비가 절감 가능하며 경제적 타당성이 있는 것으로 분석되었다.

표 2.14.8 쉴드터널 연장에 따른 전체공사비 변화

(단위 : 백만원)

공사 연장	도로쉴드터널(내경 Φ11,500)			철도쉴드터널(내경 Φ7,200)		
	기존터널	슬림형	절감률	기존터널	슬림형	절감률
2km	42,186	38,085	9.72%	30,083	26,963	10.37%
4km	78,771	70,568	10.41%	55,374	49,134	11.27%
6km	115,434	103,130	10.66%	80,669	71,309	11.60%
8km	152,183	135,777	10.78%	105,969	93,488	11.78%
10km	189,028	168,521	10.85%	131,274	115,674	11.88%
12km	225,979	201,371	10.89%	156,585	137,864	11.96%
14km	263,050	234,340	10.91%	181,900	160,059	12.01%

라. 공기단축에 의한 공사비 변화

기존 도로터널(내경 ∅11,500mm)과 철도터널(내경 ∅7,200mm)의 시공프로세스를 분석하여 슬림형 세그먼트 적용시 공기단축에 의한 공사비 변화를 분석하였다.

도로 쉴드터널과 철도 쉴드터널 시공프로세스에서 주공정은 모두 굴진을 위한 준비공정, 굴진공정, 세그먼트 설치공정으로 구분 할 수 있다.

TBM 굴진을 위한 준비공정은 ①작업구 굴착 ②후방설비용 NATM 굴착 ③쉴드받침대 및 후방레일 설치 ④쉴드장비 조립 4공정으로 구분되며, TBM 굴진공정은 ①반력대설치 ②초기굴진 ③본 굴진준비 및 본 굴진 ④도달굴진 ⑤장비회전의 5공정으로 목표굴진 완료까지 TBM 굴진공정이 반복적으로 수행된다. 또한, 1cycle 굴진 후 세그먼트 설치를 위한 공정은 ①세그먼트공급 ②세그먼트 이렉터에 고정 ③이렉터 회전 ④세그먼트 틸팅 ⑤세그먼트체결 5개 공정이 반복 시공된다.

일반적인 TBM의 일일 굴진장은 암질상태와 TBM 장비 규격에 따라 달라지며 TBM 장비는 굴착외경에 따라 규격이 결정된다.

배수형 쉴드터널은 기존 쉴드터널과 비교하여 세그먼트 두께가 최대 20%까지 축소가 가능하기 때문에 전체 굴착외경은 기존 도로터널(내경 ∅11,500mm)이 ∅12,400mm에서 ∅12,280mm로 축소되어 굴착단면적이 120.8㎡에서 118.4㎡로 2.0% 축소 가능하고, 기존 철도터널(내경 ∅7,200mm)은 ∅8,100mm에서 ∅7,980mm로 축소되어 굴착단면적이 51.5㎡에서 50.0㎡로 2.9% 축소 가능한 것으로 분석되었다.

쉴드터널 시공을 위한 TBM 선정시 기존 쉴드터널과 배수형 쉴드터널의 굴진외경 차이가 매우 미비하기 때문에 동일한 성능 및 직경의 TBM을 적용하는 것이 유리할 것으로 분석되었고, 동일한 성능의 TBM과 동일한 조건의 지반에서의 일일 굴진량의 차이는 없는 것으로 평가되었다.

전체 주공정 소요공기의 변화가 없어 전체공사의 소요공기는 기존 쉴드터널과 배수형 쉴드터널이 동일한 것으로 평가되었는데, 배수형 쉴드터널이 기존 쉴드터널과 비교하여 굴착단면 축소로 버력발생량은 감소할 수 있고, 이에 따른 버력처리 소요시간은 절감되는 것으로 검토되었다. Pilot 프로젝트 도로 쉴드터널(내경 ∅11,500mm)과 철도 쉴드터널(내경 ∅7,200mm)의 버력처리를 위한 장비 운용시간을 분석하고, 버력량 감소에 따른 연장별 소요공기 절감과 공사비 절감을 분석하였다.

장비운용에서 도로 쉴드터널과 철도 쉴드터널 모두 적재는 무한궤도 로우더(1.72㎥), 인양은 호이스트 크레인(12ton)과 버켓(3.00㎥)을 적용하였고, 버력처리(상차)에 소요되는 시간은 크레인 1회 인양시간, 로우더 1회 적재시간, 버켓 1회 적재시간으로 구성되어 이에 따른 소요공기와 공사비를 분석하였다.

표 2.14.9 버력처리 1㎥ 당 소요공기 분석

구분	세부내용
T1	기본동작시간 = (33 + 41) / 2 = 37sec
T2	사이로에 넣는 시간 = (5 + 6) / 2 = 5.50sec
T3	인양시간 = S x G = 26 sec S : 굴착깊이 1m마다의 추가시간 (0.8sec) G : 지상에서 갱내까지의 깊이 (32.5m)
CM1	크레인 작업시간 = (T1 + T2 + T3) x F = 53.43sec F : 선회각도(45도)에 따른 보정계수 (0.78)
CM2	로우더 1회 적재시간 = 2.0 x 8 + 9 + 14 = 39.00sec 로우더의 적재회수(N) = 3.00 / (1.72 x 0.7) = 2.49회 ※크레인 1회 인양시 로우더의 추가 시간은 크레인 1회 인양하는 동안 로우더의 버켓에 토량이 담겨져 있는 상태 이므로 실체 추가되는 시간은 크레인 인양 시간에서 로우더 편도 Cycle Time을 제한 시간임
CM3	실 버켓 적재 시간 = CM1 - (2.0 x (8/2) + 9) = 36.43sec
CM4	39 + (36.43 / 2.49) = 53.63sec 로우더 실제 작업시간 = 로우더의 1회 작업시간 + 로우더의 1회당 추가시간
CM5	53.43 + (39 x 2.49) = 150.54sec 크레인 작업시간 + 로우더 작업시간

표 2.14.10 도로터널(내경 Φ11,500) 연장별 버력처리 소요공기 및 공사비 분석

구분	소요공기(h)			공사비(백만원)		
	기존	배수형	절감	기존	배수형	절감
2km	13,702	13,430	272	929	910	18
4km	27,404	26,860	544	1,858	1,821	37
6km	41,106	40,290	817	2,787	2,731	55
8km	54,808	53,719	1,089	3,716	3,642	74
10km	68,510	67,149	1,361	4,645	4,552	92
12km	82,212	80,579	1,633	5,574	5,463	111
14km	95,915	94,009	1,906	6,503	6,373	129

표 2.14.9는 버력처리 1㎥ 당 소요공기를 분석한 것인데, 버력 1㎥ 당 소요시간 분석을 적용하여 공사비를 산출한 결과 버켓 적재비(무한궤도 로우더 1.72㎥)는 2,068.6원, 버켓 인양비(호이스트 크레인 12ton + 버켓 3.0㎥)는 1,776.4원으로 전체 3,845원이 소요되는 것으로 분석되었다.

표 2.14.11 철도터널(내경 Φ7,200)연장별 버력처리 소요공기 및 공사비 분석

구분	소요공기(h)			공사비(백만원		
	기존	배수형	절감	기존	배수형	절감
2km	5,842	5,671	170	396	385	12
4km	11,683	11,343	340	792	769	23
6km	17,525	17,014	510	1,188	1,154	35
8km	23,366	22,686	681	1,584	1,538	46
10km	29,208	28,357	851	1,980	1,923	58
12km	35,049	34,028	1,021	2,376	2,307	69
14km	40,891	39,700	1,191	2,772	2,692	81

표 2.14.10과 표 2.14.11은 pilot 프로젝트의 연장별 버력처리 소요공기 및 공사비를 분석한 결과를 나타낸 것이다.

배수형 쉴드터널 적용시 기존 쉴드터널과 비교 분석한 결과 일일 굴진량, 세그먼트 설치 등 주공정의 소요공기가 동일하여 전체공사 소요공기의 변화는 없는 것으로 분석되었으나, 배수형 쉴드터널의 굴착단면 축소로 발생되는 버력량이 감소하고, 이에 따라 버력처리에 소요되는 공기와 공사비는 절감되는 것으로 분석되었다.

소요공기 및 공사비는 비례식으로 절감되는 것으로 분석되어 내경 Φ11,500의 도로 쉴드터널은 소요공기 및 공사비가 2.0% 절감하는 효과가 있으며, 내경 Φ7,200의 철도 쉴드터널은 소요공기 및 공사비가 2.9% 절감하는 효과가 있는 것으로 분석되었다.

2. VE(Value Engineering) 분석

가. VE 정의

VE 란 소정의 성능, 신뢰성 및 안전성을 만족하거나 보다 품질을 향상시켜 가면서 최소의 생애주기비용으로 필요한 기능을 확보하기 위해 발주처, 용역업체, 외부전문가 등이 VE팀을 구성한 후 체계적이고 조직적인 개선활동을 하는 것이다.[3)]

다양한 분야의 전문기술을 보유하고 경험이 풍부한 전문팀을 구성하여 가치를 향상시키는 체계적인 검토기법으로 기능 및 기능발휘의 소요비용을 검토하고 해당 기능발휘가 가능한 대안발굴에 초점을 맞추는 기능 중심적 접근법이다.[4)] 또한, 최소의 생애주기비용으로 필요한 기능을 확보하기 위하여 경제성 및 현장 적용의 타당성을 기능별, 대안별로 검토하는 기법이다. 표 2.14.12는 VE 수행시 기본적으로 고려되어야 할 핵심요소 나타낸 것이다.

표 2.14.12 VE 핵심요소

구분	주요내용
생애주기 비용	- 초기비용, 유지관리비용, 교체비용, 해체비용, 잔존가치를 포함한 대상 시설물의 소요되는 모든 비용을 말한다.
가치향상	- VE의 최종 목표는 비용절감이 아닌 가치향상으로 요구성능이나 서비스 수준의 저하가 없다면 생애주기비용 절감도 가치향상을 의미한다.
기능중심적 사고	- VE에서는 “그것은 무엇을 하는가?” 라는 기능을 파악하는 기능중심적 사고로 창조적 아이디어의 개발하는 독특한 접근방법이다.
전문분야의 협력	- VE는 주요세부분야에 전문지식을 가진 팀 또는 그룹에 의해 수행되며, 최상의 아이디어는 발주처, 외부전문가, 연구팀, 사용자 등 대상프로젝트 구성원 상호간의 시너지 효과에 의해 창출된다.
체계적 프로세스	- VE는 Job Plan이라 불리는 시작과 끝이 분명한 체계적 프로세스로 진행된다. 준비 → 정보수집 → 기능분석 → 아이디어창출 → 아이디어평가 → 대안의 구체화 → 발표 → 이행의 절차에 의해 수행된다

다음은 VE 평가의 용어를 정의한 것이다.

- 가치(Value) : 기능이 가지는 성능과 이를 얻기 위한 비용 사이의 관계를 정성적

이며 정량적인 수치로 나타낸 것이다. (V=F/C)

- 기능(Function) : VE대상 시설물이 행하는 주요기능을 기능분석을 통하여 수치로 환산한다.
- 기능계통도 : FAST도라고도 하며 Function Analysis System Technique Diagram의 약자이다. FAST도는 기능을 정의하고 정의된 기능을 수평적으로는 "HOW", "Why"의 질문을 수직적으로는 "When" 통해 좌측의 고차기능에서 우측의 저차기능까지를 논리적으로 분류하고 각 기능간의 논리적 상관관계를 표현한다.
- 기능분석(Function Analysis) : 기능을 정의하고, 구분 평가하는 과정이다.
- 기본기능(Basic Analysis) : VE대상의 핵심기능으로 발주처 및 사용자의 필요사항, 핵심요구사항이 기본기능이 되며 하나이상은 반드시 존대한다.
- 브레인스토밍(Brain-storming) : 정신적으로 속박 받지 않는 자유로운 분위기에서 최대한 많은 아이디어를 발굴하는데 활용되는 대표적인 기법이다.
- 비용·성능평가 : 비용·성능평가표를 작성하고, 각 항목별 비용측면의 비중과 성능측면의 비중을 분포도 형태로 작성하여 이를 기준으로 VE대상을 선정한다.
- 연등가법(Annualized Method) : 현재와 미래의 지출을 등비율의 연간비용으로 변환하는 경제성 분석 방법이다.
- 품질모델(Quality Model) : 관련자들의 요구 및 기대수준을 조사하고 이를 바탕으로 대응수준을 결정하여 도시한 것이다.
- 할인계수(Discount Factor) : 특정 미래기간 동안 발생할 예상비용이나 이득을 현재시점의 가치로 변환하기 위한 특정 할인율을 위한 계수로서 물가상승을 고려한 실질할인율 적용을 원칙으로 한다.
- 현재가치화법(Present -Worth Method) : 현재와 미래의 모든 비용을 기본적인 현재의 비용으로 변환시키는 경제적 방법론이다.
- VE팀리더(VE Team Leader) : VE수행절차에 대한 이해도가 높고 팀리딩 능력을 보유하여 VE팀원간 의사소통을 극대화시켜 팀시너지를 이끌어 내는 자를 말한다.
- VE팀원(VE Team Member) : VE팀리더의 리딩에 따라 각 기술분야, 사용자, 이해관계자 등의 자격으로 아이디어 및 대안을 검토하는 역할을 수행하는 자이다.
- VE퍼실리테이터(VE Facilitator) : VE프로세스 전문가로 VE팀 활동시 각 VE참여자의 원활한 의사소통과 적극적 참여를 유도하여 성공적인 VE검토수행을 지원하는 자를 말한다.
- VE활동 : VE프로세스 전체를 의미하며, VE의 준비단계, 분석단계, 실행단계까

지 각 VE 대상에 따라 팀 작업을 하는 활동을 의미한다.

나. 단계별 VE 분석 절차

VE Job Plan 표준절차에 따라 준비단계(Pre-study), 분석단계(VE Study), 실행단계(Post-Study)를 거쳐서 사후관리단계(Follow-up Phase)로 진행하며, 사후관리 단계는 VE제안에 대한 모니터링 단계로 실제 선정(안) 적용여부를 지속적으로 관리 검토하는 단계이다.

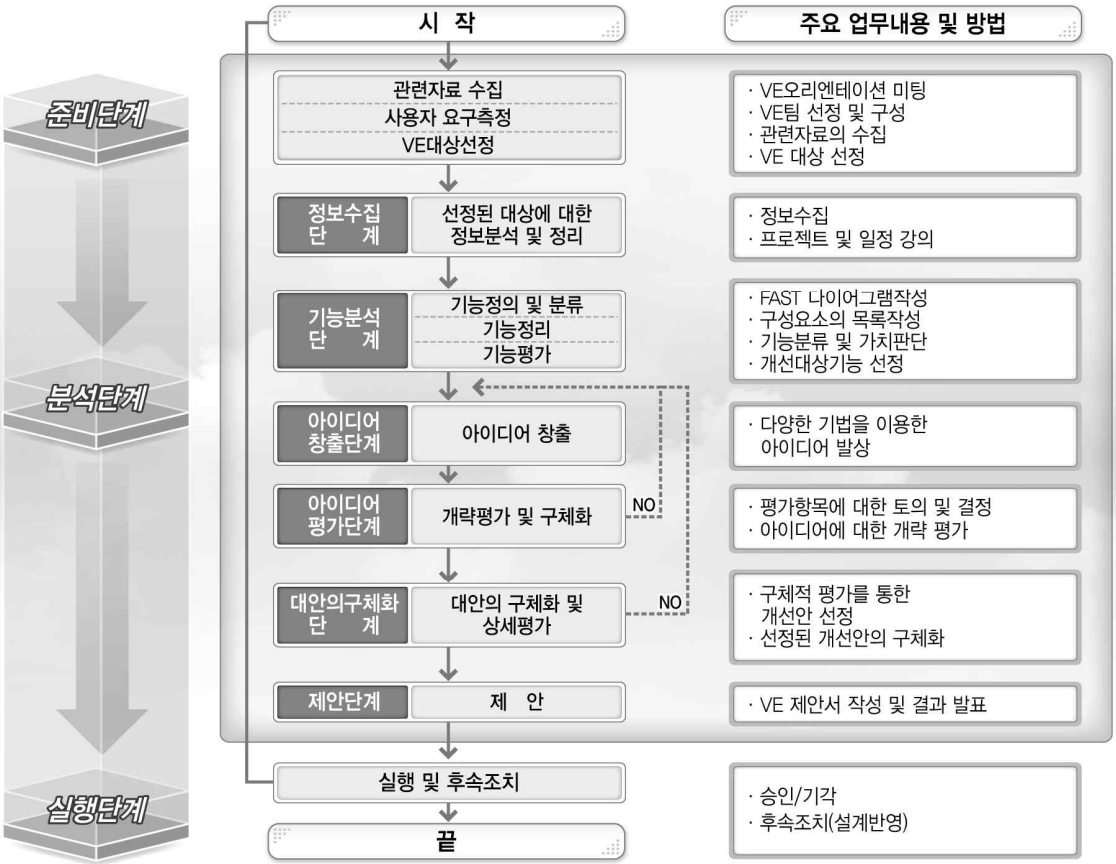


그림 2.14.1 VE 분석 절차

준비단계의 주요 목적은 원활한 VE 수행을 위하여 관련된 집단의 협력체계를 구축하고 VE 수행을 위한 공동목표 설정 및 이해, 충분한 자료 확보, VE팀 구성, VE팀 구성, VE 워크샵 수행계획 수립 등에 있다. 준비단계에서는 체크리스트를 작성하여 원활한 진행을 할 수 있도록 하는데, 다음은 주요 체크 리스트이다.

- VE 수행방향을 설정하기 위한 과업수행계획서를 작성하였는가?

- 프로젝트 규모를 고려하여 VE 팀을 구성하였는가?
- VE 워크숍 이전에 오리엔테이션 미팅을 선정하였는가?
-사용자 요구를 반영하여 VE 대상을 선정하였는가?
-VE 대상에 대한 사전정보를 충실하게 준비하였는가?
-VE 활동장소는 실질적이고 효율적인 워크숍이 가능한 장소를 선정하였는가?

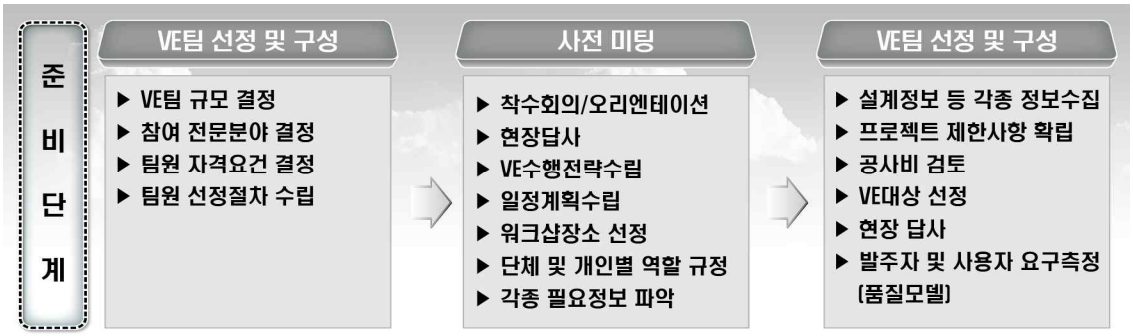


그림 2.14.2 준비단계 주요업무

분석 단계에서는 VE Job Plan에 따라, 선정한 대상의 정부수집, 기능분석, 아이디어 창출, 아이디어 평가, 대안구체화, 제안발표를 단계별로 수행하는 단계이다. 분석단계에서 항목별로 체크리스트를 작성하여 효율적이며 원활한 VE를 수행하는데, 표 2.14.13은 분석단계의 항목별 체크리스트를 나타낸 것이다.



그림 2.14.3 분석단계 주요업무

표 2.14.13 분석단계 항목별 체크리스트 항목

구분	체크리스트 항목
정보수집 단계	- VE대상 관련정보들이 충분히 수집되었고 기본적 정보는 숙지하고 이해 하였는가? - 검토대상 관련 정책, 절차, 규정들은 검토는 충분히 되었는가? - 모든 요구기능 및 환경요건들은 반드시 필요한 것이며, 그 내용은 충분 또는 과도하거나 부족한 내용은 없는가? - 모든 사양들은 목적에 맞게 설정되어 있는가? - 바람직한 성능평가 속성의 채택과 이의 합리적인 측정을 위하여 기능한 정량적 평가척도를 적용하였는가?
기능분석 단계	- 모든 기능들이 파악되었는가?, 누락된 기능들은 없는가? - 불필요한 기능들이 파악되었는가? - 과도하거나 부족한 기능들은 파악되었는가? - 각 기능별 가치지수가 설정되었는가? - 과도한 기능들을 요구하는 요인은 없는가? - 기능요건이 지나치게 설정되어 있지는 않은가? - 불필요한 특성들은 없는가? - 특정 기능을 전체 혹은 부분적으로 제거하여도 무방한가? - 기본기능과 부기능이 명확히 구분되었는가? - How - Why 논리에 모순은 없는가? - 범위선 왼쪽에 가장 높은 수준의 기능이 있는가?
아이디어 창출단계	- 창의적인 아이디어발상 기술이 사용되었나? - 아이디어 발표분위기는 적절하였는가? - 팀원들이 가능한 수많은 아이디어를 얻으려 노력해왔나? - 타인의 아이디어에 가능한 편성하여 아이디어를 추가 개발하려 노력하였나?
아이디어 평가단계	- 모든 아이디어가 평가되었나? - 기능적/물리적 속성들이 충족될 수 있는 방법을 확인가능 하도록 아이디어가 수정보완 되었나? - 평가 기준이 설정되었나? - 상대적인 장점에 따라 각 아이디어의 점수가 일관성 있게 산정되었나? - 아이디어들이 성능/비용 최적화를 달성하기 위해 추가적으로 개선할 여지는 없는가? - 개별 아이디어 중 실행가능하고 시너지효과를 일으킬 수 있도록 아이디어를 조합하였나?

표 2.14.13 분석단계 항목별 체크리스트 항목(계속)

구분	체크리스트 항목
대안의 구체화 단계	- 선정된 모든 아이디어에 대한 대안은 구체화되었는가? - 대안 개발시 장단점, 스케치, 개략적 도면, 성능속성별 등급평가 및 비용 산정근거를 고려되었는가? - 각 대안의 기술적 장단점 및 실현가능성에 대하여 검토되었는가? - LCC산정 근거는 객관적인가? - 성능평가시 성능평가속성별 척도에 따라 일관성 있게 평가되었나? - 성능평가 결과에 대하여 VE팀원의 전체적인 합의가 이루어 졌는가?
제안단계	- VE팀의 가치를 향상하고자 하는 의지가 충분히 반영되었나? - 제안의 내용이 간결하게 표현되었나? - 관련 조사정보들이 모두 포함되었나? - 비용절감이 포함되었나? - 모든 제약사항이 고려되었나? - 결정권자가 결정을 내리기 위한 정보가 충분히 포함되어 있는가? - 발표전 연구단과의 충분한 교감이 이루어 졌는가?

실행단계(Post-Study) 및 사후관리는 분석단계에서 제시된 VE 제안에 대한 면밀한 재검토 후 실행을 위한 최종처리 단계로서 VE 활동을 마무리하는 중요한 단계이다. 실행단계에서도 체크리스트를 작성하여 VE 수행의 마무리를 확실히 하는데, 다음은 실행단계에서의 주요 체크리스트이다.

- 실행회의를 실시하였나?
- 실행회의에 프로젝트 주요 의사결정권자, VE침, 연구팀 등의 주요 이해관계자가 함께 참여 하였나?
- 예상되는 결과가 검토되었나?
- 기술 적용성 검토는 수행되었나?
- 추후 모니터링 계획은 수립되었나?

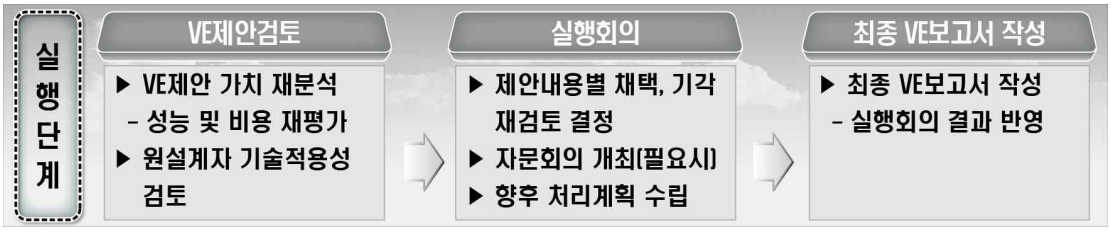


그림 2.14.4 실행단계 주요업무

다. VE 수행결과

(1) 품질모델 가중치 산정

본 연구에서는 기존 쉴드터널과 슬림형 세그먼트를 적용한 쉴드터널에 대해 두 공법의 주요 특성을 고려하여 품질모델을 제시하였으며, 제시된 각각의 품질모델의 가중치 산정을 위하여 전문가대상으로 쌍대비교를 수행하였다.

표 2.14.14와 표 2.14.15는 가중치에 대한 평가위원의 설문결과를 나타낸 것이다. 그리고 가중치 산정을 위하여 가중치 설문서 점수의 기하평균을 산출하여 쌍대비교 매트릭스로 분석하고 가중치 산정을 수행하였다.

표 2.14.14 가중치 설문결과(평가의원 1~5)

품질모델		평가자 1			평가자 2			평가자 3			평가자 4			평가자 5		
A	B	A	B	점수	A	B	점수	A	B	점수	A	B	점수	A	B	점수
경제성	안정성	4		4.00		3	0.33	4		4.00		2	0.50	5		5.00
	시공성	5		5.00		2	0.50	4		4.00		4	0.25	2		2.00
	민원성	6		6.00	3		3.00		2	0.50		3	0.33	6		6.00
	환경성	4		4.00	3		3.00	3		3.00	3		3.00	3		3.00
	제작성	2		2.00		4	0.25		3	0.33	3		3.00	4		4.00
안정성	시공성	3		3.00	2		2.00	2		2.00		3	0.33		4	0.25
	민원성	4		4.00	5		5.00		4	0.25		2	0.50	2		2.00
	환경성	2		2.00	4		4.00		2	0.50	3		3.00		3	0.33
	제작성		2	0.50		2	0.50		5	0.20	4		4.00		2	0.50
시공성	민원성	2		2.00	4		4.00		5	0.20	2		2.00	5		5.00
	환경성		2	0.50	3		3.00		3	0.33	5		5.00	2		2.00
	제작성		4	0.25		3	0.33		6	0.17	6		6.00	3		3.00
민원성	환경성		3	0.33		2	0.50	3		3.00	4		4.00		4	0.25
	제작성		5	0.20		6	0.17		2	0.50	5		5.00		3	0.33
환경성	제작성		3	0.33		5	0.20		4	0.25	2		2.00	2		2.00

표 2.14.15 가중치 설문결과(평가의원 6~10)

품질모델		평가자 6			평가자 7			평가자 8			평가자 9			평가자 10		
A	B	6	B	점수	A	B	점수	A	B	점수	A	B	점수	A	B	점수
경제성	안정성	-	2	0.50	3	-	3.00	-	3	0.33	3	-	3.00	-	3	0.33
	시공성	2	-	2.00	5	_	5.00	2	-	2.00	-	2	0.50	-	5	0.20
	민원성	-	3	0.33	4	_	4.00	3	-	3.00	-	3	0.33	-	4	0.25
	환경성	3	-	3.00		2	0.50	4	-	4.00	-	5	0.20	-	6	0.17
	제작성	4	-	4.00	3	_	3.00	-	2	0.50	-	4	0.25	-	2	0.50
안정성	시공성	3	-	3.00	4	_	4.00	4	-	4.00	-	3	0.33	-	3	0.33
	민원성	-	2	0.50	3	-	3.00	5	-	5.00	-	4	0.25	-	2	0.50
	환경성	4	-	4.00	-	3	0.33	6	-	6.00	-	6	0.17	-	4	0.25
	제작성	5	-	5.00	2	-	2.00	2	-	2.00	-	5	0.20	2	-	2.00
시공성	민원성	-	4	0.25	-	2	0.50	2	-	2.00	-	2	0.50	2	-	2.00
	환경성	2	-	2.00	-	6	0.17	3	-	3.00	-	4	0.25	-	2	0.50
	제작성	3	-	3.00	-	3	0.33	-	3	0.33	-	3	0.33	4	-	4.00
민원성	환경성	5	-	5.00	-	5	0.20	2	-	2.00	-	3	0.33	-	3	0.33
	제작성	6	-	6.00	-	2	0.50	-	4	0.25	-	2	0.50	3	-	3.00
환경성	제작성	2	-	2.00	4		4.00	-	5	0.20	2	-	2.00	5	-	5.00

표 2.14.16 쌍대비교 매트릭스

품질모델	경제성	안정성	시공성	민원성	환경성	제작성
경제성	1.00	1.21	1.26	1.20	1.52	1.04
안정성	0.83	1.00	1.18	1.17	1.03	0.98
시공성	0.79	0.85	1.00	1.15	0.95	0.80
민원성	0.84	0.86	0.87	1.00	0.80	0.71
환경성	0.66	0.97	1.05	1.25	1.00	1.01
제작성	0.96	1.02	1.25	1.41	0.99	1.00

표 2.14.17 가중치 산정결과

품질모델	가로 행렬곱	Eigen Vector	Priority Vector	계산(%)	적용(%)
경제성	2.88	1.193	0.197	19.7	20
안정성	1.15	1.023	0.169	16.9	17
시공성	0.59	0.916	0.152	15.2	15
민원성	0.35	0.841	0.139	13.9	14
환경성	0.84	0.972	0.161	16.1	16
제작성	1.72	1.094	0.181	18.1	18

주) 산출 예시 (경제성 기준)

가로 행렬곱 경제성=1.00 × 1.21 × 1.26 × 1.20 × 1.52 1.04 = 2.88

Eigen Vector = 2.88^1/N = 1.193 (N : 품질모델 개수)

Priority Vector = 1.193 / (Eigen Vector 합) = 0.197

(2) 성능평가

기존 쉴드터널과 배수형 쉴드터널의 성능평가를 위하여 전문가를 대상으로 설문조사를 수행하였다. 평가점수(1점~10점)는 각 평가항목별로 각각 전문지식을 근거로 채점한 점수이다. 가중치를 고려한 성능평가 결과 기존 쉴드터널의 성능점수는 70.8로 분석되었고, 배수형 쉴드터널은 75.9점으로 분석되었다.

표 2.14.18 성능평가 설문조사

평가항목		설문1	설문2	설문3	설문4	설문5	설문6	설문7	설문8	설문9	설문10
경제성	기존	7	6	7	6	8	7	7	7	7	6
	슬림형	9	9	9	7	9	8	9	8	6	8
안정성	기존	7	7	8	8	7	8	8	8	7	8
	슬림형	7	7	7	8	6	7	7	8	7	8
시공성	기존	7	8	7	7	8	8	7	8	8	8
	슬림형	7	8	7	7	8	8	7	8	8	8
민원성	기존	7	7	7	8	7	7	8	7	7	7
	슬림형	7	8	7	8	7	7	8	7	8	7
환경성	기존	6	6	7	6	6	7	7	6	7	7
	슬림형	8	7	8	7	8	8	8	7	9	9
제작성	기존	7	7	8	8	8	7	8	7	8	8
	슬림형	7	6	7	8	7	7	7	7	7	7

표 2.14.19 성능평가 결과

구분	가중치	대안			제시안		
		등급	점수	비율	등급	점수	비율
경제성	20%	6.4	12.8	18.1%	8.4	16.8	22.1%
안정성	17%	7.6	12.9	18.2%	7.4	12.6	16.6%
시공성	15%	7.4	11.1	15.7%	7.4	11.1	14.6%
민원성	14%	7.2	10.1	14.2%	7.4	10.4	13.6%
환경성	16%	6.4	10.2	14.5%	7.8	12.5	16.4%
제작성	18%	7.6	13.7	19.3%	7.0	12.6	16.6%
합 계	100%	70.8			75.9		

(3) 생애주기비용(LCC) 분석

모든 시설물의 기획, 설계 및 건설공사로 구분되는 초기투자단계를 지나 유지관리 단계 및 폐기처분 단계로 이어지는 일련의 과정에 소요되는 모든 비용의 총 합계를 생애주기비용(LCC)라 한다.

LCC 분석은 대상시설물에 대하여 경제적 수명 전반에 걸쳐 발생하는 제비용의 합, 즉 총비용을 비교하기 편리한 일정한 시점으로 등가 환산한 가치를 가지고 경제성을 평가하는 방법이다. LCC 분석 방법은 확정적 분석 방법과 확률적 분석 방법 등으로 구분할 수 있으며 일반적으로 상대비교가 목적인 경우 생애비용 중 동일한 비용은 LCC에서 제외하여도 무방하다.

본 연구에서는 확정적 분석 방법에 의하여 분석을 수행하였으며, 기존 쉴드터널과 배수형 쉴드터널 모두 시설물의 안전관리에 관한 특별법을 적용하여 유지관리비용을 산출하며, 시설물의 안전관리에 관한 특별법은 종별로 유지관리비를 산출하게 되어 있기 때문에 기존 쉴드터널 및 배수형 쉴드터널 모두 동일하게 산출되며, 폐기처분 비용 산출 또한 동일하게 산출되기 때문에 LCC 비교대상에서 제외하였다.

(4) VE 평가결과

전문가를 대상으로 가중치는 경제성 > 제작성 > 안전성 > 환경성 > 시공성 > 민원성 순으로 조사되었으며, 비용은 기존 쉴드터널과 배수형 쉴드터널의 공사비는 기존 철도 쉴드터널과 도로 쉴드터널 중 점감률이 적은 도로 쉴드터널 공사를 기준으로

산정하였다.

VE 평가결과 기존 쉴드터널의 성능점수는 경제성 12.8, 안전성 12.9, 시공성 11.1, 민원성 10.1 환경성 10.2 제작성 13.7로 전체 70.8로 분석되었고, 비용은 1.12로 분석되어 가치평가결과(성능/비용)는 63.2로 분석되었다.

배수형 쉴드터널은 경제성 16.8, 안전성 12.3, 시공성 11.1, 민원성 10.4 환경성 12.5 제작성 12.6으로 전체 성능점수는 75.9로 분석되었고, 비용은 1.00로 분석되어 가치평가결과(성능/비용)는 75.9로 분석되었다.

배수형 쉴드터널은 세그먼트 두께 감소로 인하여 세그먼트 제작에 필요한 콘크리트량 감소 및 굴착량 감소로 기존 쉴드터널과 비교하여 경제성, 환경성, 민원성이 향상되며, 제작성 및 안정성이 감소되는 것으로 분석되었다.

제작성 및 안정성이 감소하나 공사비 절감, 콘크리트량 감소, 버력량 감소 등으로 인해 공사비 및 환경성이 증가하여 성능 향상률 7.2%(▲), 비용절감률 10.7%(▼)로 20.1%(▲)의 가치가 향상된 가치혁신형 공법으로 분석되었다.

기존 세그먼트 쉴드터널			배수형 쉴드터널		
					
F	C	V	F	C	V
70.8	1.12	63.2	75.9	1.00	75.9

그림 2.14.5 VE 평가 분석결과

3. CO_2 배출 저감 평가

가. 전과정 평가 개요

전과정 평가(LCA)는 정의된 시스템의 전과정(Life cycle)에 관련된 투입물과 산출물의 목록을 취합하여 처리하고 이러한 투입물 및 산출물과 관련된 잠재적 환경영향들을 평가하며 위의 두과정을 통해 얻은 결과를 연구의 목적에 맞게 해석함으로써 제품이나 서비스와 관련된 환경적 영향과 잠재적 영향을 평가하는 기술이다.[5)]

사회기반시설의 경우 건설단계의 자재 및 설비의 제조로부터 시공, 시설의 운영단계의 최종폐기단계에 이르기까지의 전과정에서의 투입물과 산출물 관련 잠재적 환경부하를 평가 대상으로 한다.



그림 2.14.6 전과정 평가 기본구조

전과정 평가를 통하여 자원 및 에너지 고갈, 산성화, 지구온난화(온실가스 배출) 등 다양한 환경영향들에 대한 종합 분석을 통하여 대안을 비교하고 최적안을 선택할 수 있다. 전과정평가의 특징은 4가지로 제시 할 수 있다.

- 공정 시스템 관점에서 전과정사고 중심으로 전환한다.
- 환경오염에 대한 사후 처리에서 사전 예방으로 전환한다.
- 지역 규모에서 지구적 규모의 환경영향을 고려한다.
- 토양, 대기, 수계에 미치는 다양하고 종합적인 환경영향을 고려한다.

전과정 평가는 목적 및 범위 정의, 전과정 목록 분석, 전과정 영향 평가, 전과정 해석의 4단계로 나누어진다.

목적 및 범위 정의는 전과정 평가의 수행 목적 및 전과정 단계와 범위를 설정하는 단계이다. 전과정 목록 분석은 공정별 데이터 수집과 데이터 할당 및 계산을 통해 전

과정의 투입물/산출물 목록을 작성하는 단계이다.

전과정 영향 평가는 전과정 목록을 이용하여 물질별/공정별/단계별로 각종 환경 이슈의 환경 부하를 평가하는 단계이다. 마지막으로 전과정 해석은 환경 이슈 평가 결과를 해석하고 전과정 평가 결과를 검토 및 분석하는 단계이다.

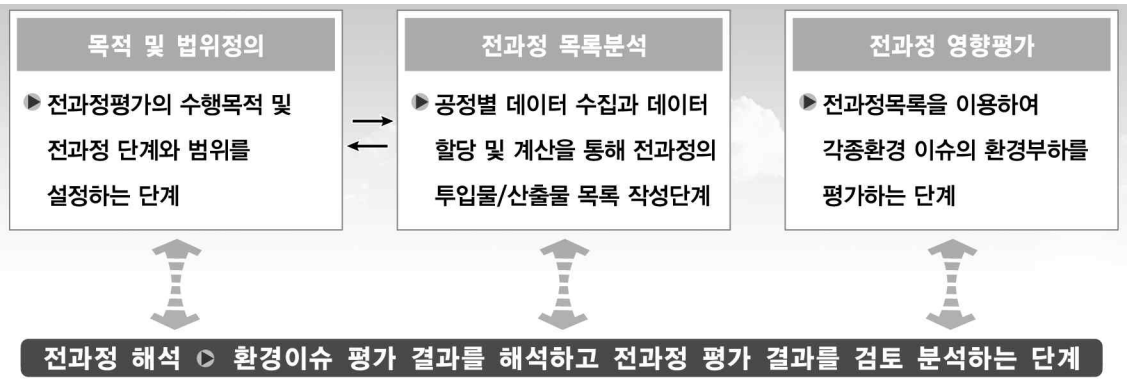


그림 2.14.7 전과정 평가의 기본절차

4가지 단계 중 첫 번째 단계는 목적 및 범위설정 단계로 연구의 목적, 범위, 기능단위 등을 정하는 단계이다. LCA는 그 사용목적에 다라 수집하는 자료, 분석방법, 결과가 다르기 때문에 우선 LCA를 어떤 목적으로 사용할 것인가를 명확히 해야 한다. 또한 모든 연구의 결과들이 도출된 이후에도 항상 연구수행 시 정한 목적에 부합되는가를 살펴보아야 한다. 데이터 부족이나 설정된 가정의 오류 발견 시 목적 정의 단계에 부합하도록 다시 수정하여야 한다.

두 번째 단계는 목록분석을 만드는 것으로 상품, 포장, 공정, 물질, 원료 및 활동에 의해 발생하는 에너지 및 천연원료 요구량, 대기오염물질, 수질오염물질, 고형폐기물 배출량 등의 환경오염부하량 등에 대한 기술적, 통계적 자료 구축과정이다.

세 번째 단계는 영향평가 단계로 목록에서 제시된 항목에 가중치를 제시하는 과정으로 특정한 잠재적인 환경영향들과 목록 데이터를 연결하고 이들 영향들을 이해하는 것을 포함하나, 아직 특정한 잠재적인 환경영향들과 목록 데이터를 일관되고 정확하게 연결시킬 수 있는 방법론들이 개발되지 못한 상황이므로 아래의 4가지 일반적인 영향평가 단계를 따라서 수행한다.

- 영향범주에 따른 목록 데이터의 분류 (Classification)
- 영향범주들 내에서 목록 데이터의 모델링 (Characterization)
- 영향 범주의 정규화 (Normalization)
- 필요시에 결과들의 종합적인 가중치 부여 (Weighting)

마지막으로 전과정 결과 해석 단계는 신뢰성을 주기 위해 설계된 정보가 의사결정자에게 원활히 전달되도록 연결시켜 주는 단계이다. 전과정평가의 해석단계의 적용에서 그이전의 단계로 다시 돌아가는 반복적인 절차가 진행된다.

결과해석 단계는 아래의 3단계를 포함하여 진행된다.

- 규명화 (Identification) : 가장 중요한 출입물과 잠재적 영향을 규명하는 단계로 다음에 이어지는 평가단계(Evaluation)와 상호보완적으로 이루어진다.
- 평가(Evaluation) : 보다 과학적이고 객관적인 해석을 위해 필요한 단계로 연구가 의도하고 있는 적용방향인 최종적 이용을 고려하면서 목적 및 정의단계에 부합되게 구성되어야 한다. 이 단계에서는 완전성 검사(Completness check), 민감도 분석 검사(Sensitivity analysis check), 일관성 검사(Consistency check)등의 검사를 통해 강화된다.
- 결론, 건의, 보고(Conclusion, Recommendation, Reporthing) : 위의 단계들을 거친 후 최종적 결론을 내리고 보다 권장할 만한 방향을 제시하고 이를 적절한 방법으로 보고하는 단계이다.

나. 배수형 쉴드터널 LCA 평가

쉴드터널 시공시 기존 세그먼트를 슬림형 세그먼트로 교체하여 적용할 경우에 대하여 LCA 평가를 수행하였다. 슬림형 세그먼트 적용시 기존 세그먼트 두께의 80% 적용이 가능하고 세그먼트 제작에 필요한 레미콘량 감소, 굴착외경 축소, 버럭처리 운반량 절감 등에 의해 경유 사용량이 절감되는 것으로 확인되었다. 이에 따른 레미콘과 경유 사용에 의하여 배출되는 탄소배출 절감량을 분석하였다.

탄소배출량 산출을 위하여 기존 철도 쉴드터널과 도로 쉴드터널을 적용하여 2가지 재료에 대하여 탄소배출량을 산출하였다. 버럭 처리시 여러 가지 장비를 사용하고 있지만 그 중 15톤 덤프트럭에 대하여 산출하였으며, 세그먼트 제작과 관련해서도 레미콘에 대한 탄소배출량을 산출하였다.

기초 자료인 탄소 배출계수와 CO_2 1ton당 나무 수 및 거래가격은 표 2.14.17과 같다. 분석을 위하여 철도쉴드터널인 「신분당선(용산～강남) 복선전철 민간투자사업」와「거마대교 민간투자사업」의 m당 레미콘과 경유사용량을 산출하여 시공연장에 따른 탄소배출량을 산출하여 슬림형 세그먼트 적용에 따른 효과를 검증하였다.

표 2.14.20 탄소배출계수 및 기초자료

구분	적용단위	값
레미콘	m3	3.46E+02kg CO_2
경유(수송)	L	2.62E+02kg CO_2

구분	값
CO_2 1ton당 나무수	348 그루
CO_2 1ton당 거래가격	10,100

주) 탄소배출계수는 한국환경산업기술원(http://www.edp.or.kr) 적용
거래가격은 한국거래소(http://ets.krx.co.kr) 2015년 4월 6일 종가 적용

표 2.14.21 기존 및 배수형 쉴드터널의 탄소배출가격 산출(철도터널)

구분	연장 (m)	탄소배출량(ton CO_2)			식생효과	탄소배출가격
		레미콘	경유	합계		
기존 쉴드터널	500	1.22E+03	2.85E+02	1.51E+03	52.5 만그루	15.2 백만원
	1000	2.45E+03	5.69E+02	3.02E+03	104.9 만그루	30.5 백만원
	1500	3.67E+03	8.54E+02	4.52E+03	157.4 만그루	45.7 백만원
	2000	4.89E+03	1.14E+03	6.03E+03	209.9 만그루	60.9 백만원
	2500	6.11E+03	1.42E+03	7.54E+03	262.3 만그루	76.1 백만원
	3000	7.34E+03	1.71E+03	9.05E+03	314.8 만그루	91.4 백만원
	3500	8.56E+03	1.99E+03	1.06E+04	367.3 만그루	106.6 백만원
	4000	9.78E+03	2.28E+03	1.21E+04	419.7 만그루	121.8 백만원
슬림형 쉴드터널	500	9.70E+02	2.76E+02	1.25E+03	43.4 만그루	12.6 백만원
	1000	1.94E+03	5.53E+02	2.49E+03	86.8 만그루	25.2 백만원
	1500	2.91E+03	8.29E+02	3.74E+03	130.2 만그루	37.8 백만원
	2000	3.88E+03	1.11E+03	4.99E+03	173.6 만그루	50.4 백만원
	2500	4.85E+03	1.38E+03	6.23E+03	216.9 만그루	63.0 백만원
	3000	5.82E+03	1.66E+03	7.48E+03	260.3 만그루	75.6 백만원
	3500	6.79E+03	1.93E+03	8.73E+03	303.7 만그루	88.2 백만원
	4000	7.76E+03	2.21E+03	9.97E+03	347.1 만그루	100.7 백만원

표 2.14.22 기존 및 배수형 쉴드터널의 연장별 탄소배출량 산출(철도터널)

연장 (km)	탄소배출량(ton CO_2)		탄소배출가격(백만원)		
	기존	슬림형	기존	슬림형	절감액
0.5	1.51E+03	1.25E+03	15.2	3.0	12.2
1.0	3.02E+03	2.49E+03	30.5	25.2	5.3
1.5	4.52E+03	3.74E+03	45.7	37.8	7.9
2.0	6.03E+03	4.99E+03	60.9	50.4	10.5
2.5	7.54E+03	6.23E+03	76.1	63.0	13.2
3.0	9.05E+03	7.48E+03	91.4	75.6	15.8
3.5	1.06E+04	8.73E+03	106.6	88.2	18.4
4.0	1.21E+04	9.97E+03	121.8	100.7	21.1

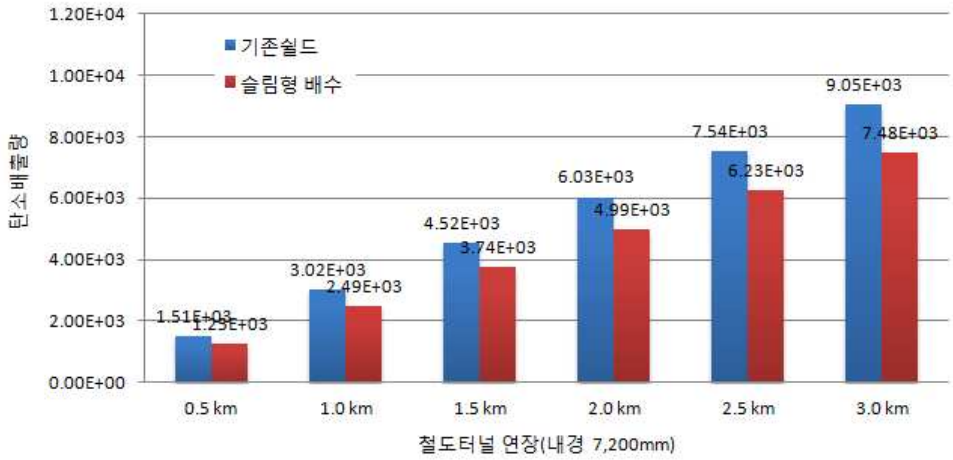


그림 2.14.8 기존 및 배수형 쉴드터널 탄소배출량 비교(철도터널)

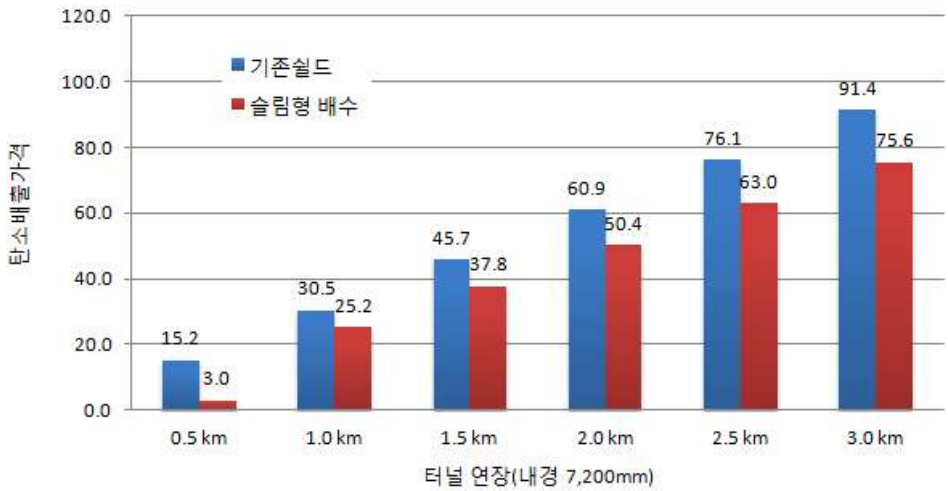


그림 2.14.9 기존 및 배수형 쉴드터널 탄소배출가격 비교(철도터널)

표 2.14.23 기존 및 배수형 쉴드터널의 탄소배출가격 산출(도로터널)

구분	연장 (m)	탄소배출량(ton CO_2)			식생효과	탄소배출가격
		레미콘	경유	합계		
기존 세그먼트	500	1.92E+03	6.35E+02	2.56E+03	89.1 만그루	25.8 백만원
	1000	3.85E+03	1.27E+03	5.12E+03	178.1 만그루	51.7 백만원
	1500	5.77E+03	1.91E+03	7.68E+03	267.2 만그루	77.5 백만원
	2000	7.70E+03	2.54E+03	1.02E+04	356.3 만그루	103.4 백만원
	2500	9.62E+03	3.18E+03	1.28E+04	445.3 만그루	129.2 백만원
	3000	1.15E+04	3.81E+03	1.54E+04	534.4 만그루	155.1 백만원
	3500	1.35E+04	4.45E+03	1.79E+04	623.5 만그루	180.9 백만원
	4000	1.54E+04	5.08E+03	2.05E+04	712.5 만그루	206.8 백만원
슬림형 세그먼트	500	1.53E+03	6.23E+02	2.15E+03	75.0 만그루	21.8 백만원
	1000	3.06E+03	1.25E+03	4.31E+03	149.9 만그루	43.5 백만원
	1500	4.59E+03	1.87E+03	6.46E+03	224.9 만그루	65.3 백만원
	2000	6.13E+03	2.49E+03	8.62E+03	299.9 만그루	87.0 백만원
	2500	7.66E+03	3.11E+03	1.08E+04	374.8 만그루	108.8 백만원
	3000	9.19E+03	3.74E+03	1.29E+04	449.8 만그루	130.5 백만원
	3500	1.07E+04	4.36E+03	1.51E+04	524.8 만그루	152.3 백만원
	4000	1.23E+04	4.98E+03	1.72E+04	599.7 만그루	174.1 백만원

표 2.14.24 기존 및 배수형 쉴드터널의 연장별 탄소배출량 산출(도로터널)

연장 (km)	탄소배출량(ton CO_2)		탄소배출가격(백만원)		
	기존	슬림형	기존	슬림형	절감액
0.5	2.56E+03	2.15E+03	25.8	21.8	4.1
1.0	5.12E+03	4.31E+03	51.7	43.5	8.2
1.5	7.68E+03	6.46E+03	77.5	65.3	12.3
2.0	1.02E+04	8.62E+03	103.4	87.0	16.4
2.5	1.28E+04	1.08E+04	129.2	108.8	20.5
3.0	1.54E+04	1.29E+04	155.1	130.5	24.6
3.5	1.79E+04	1.51E+04	180.9	152.3	28.6
4.0	2.05E+04	1.72E+04	206.8	174.1	32.7

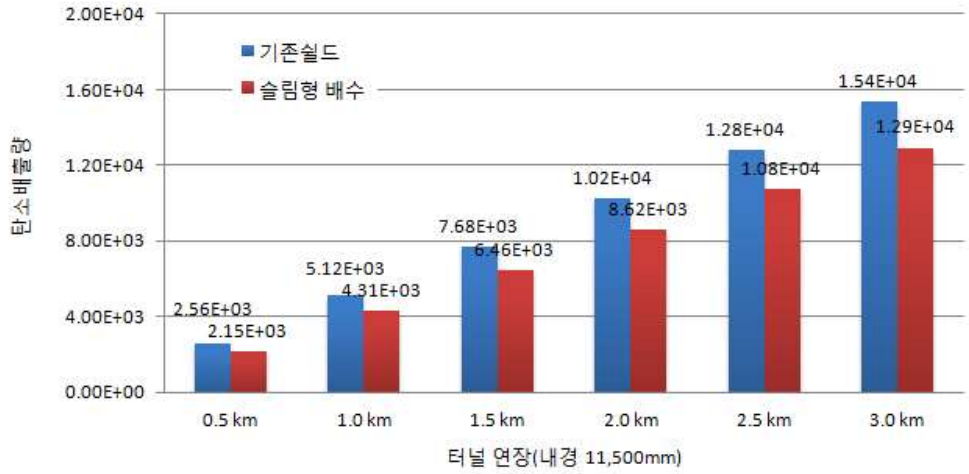


그림 2.14.10 기존 및 배수형 쉴드터널 탄소배출량 비교(도로터널)

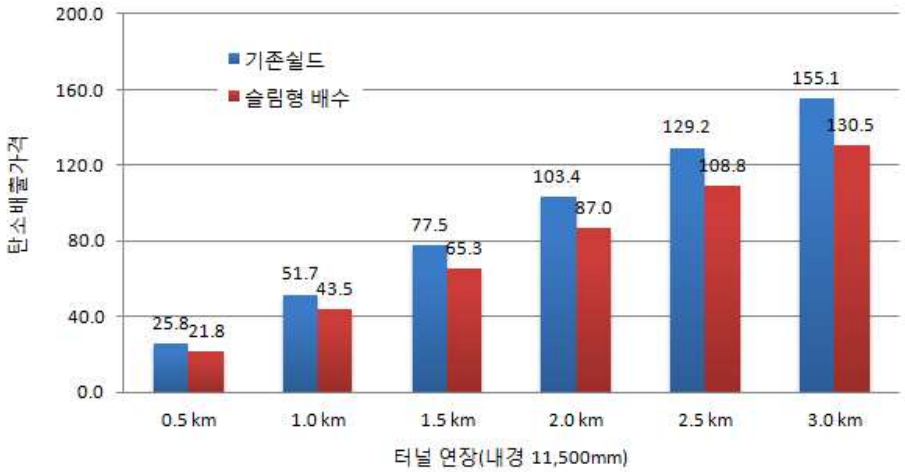


그림 2.14.11 기존 및 배수형 쉴드터널 탄소배출가격 비교(도로터널)

철도터널(내경 ∅7,200)에 대한 분석결과 탄소배출량이 17.3% 정도 감소되는 것으로 나타났고, 터널 시공연장 2km 기준으로 탄소배출량이 1,040ton 감소하여 36.3만 그루의 식생효과와 10.5백만원의 탄소배출가격의 확보가 가능한 것으로 나타났다.

도로터널(내경 ∅11,500)에 대한 분석결과 탄소배출량이 15.8% 정도 감소되는 것으로 나타났고, 터널 시공연장 2km 기준으로 탄소배출량이 1,620ton 감소하여 56.4만 그루의 식생효과와 16.4백만원의 탄소배출가격의 확보가 가능한 것으로 분석되었다.

기존 세그먼트를 슬림형 세그먼트로 변경시 레미콘 및 경유사용량 절감으로 15% 이상의 탄소배출량을 저감시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

소결론

(1) 기존 도로터널(내경 ∅11,500)과 철도터널(내경 ∅7,200)의 내역서를 슬림형 세그먼트를 적용하여 공사비 분석결과 세그먼트 재료비 절감률은 24%~26%로 수준이며, 전체공사비는 10.89%(도로터널)와 10.95%(철도터널)의 절감되는 것으로 분석되었다. 또한 기존 쉴드터널에서는 뒤채움재로 혼화재나 정재모래를 사용하였으나, 슬림형 세그먼트 실드터널에서는 PS 볼 사용으로 정재모래대비 약 1.85%, 혼화재 대비 12% 이상의 재료비 절감이 되는 것으로 분석되었다.

쉴드터널은 쉴드설비공, 갱구부 보강공 등 공사 연장과 상관없이 발생하는 비용과 쉴드 굴착작업공, 세그먼트공, 부대공 등 공사 연장에 의하여 변화는 공사비로 구분할 수 있다. 규모 및 공사연장에 따른 공사비를 분석한 결과 내경 ∅11,500의 도로터널은 4.0km이상부터 10% 이상의 절감효과가 있으며, 내경 ∅7,200의 철도터널은 2.0km이상부터 10% 이상의 공사비 절감 효과가 있는 것으로 분석되어 배수형 쉴드터널 적용시 기존 쉴드터널 대비하여 세그먼트 재료비 절감, 뒤채움재료비 절감, 버력처리비용 절감으로 공사비가 절감되어 경제적 타당성이 있는 것으로 분석되었다.

(2) 배수형 쉴드터널이 세그먼트 두께 감소로 인하여 세그먼트 제작에 필요한 콘크리트량 감소 및 굴착량 절감으로 기존 세그먼트 쉴드터널과 비교하여 경제성 환경성, 민원성이 향상되며, 제작성 및 안정성이 감소되는 것으로 분석되었다.

제작성 및 안정성이 감소하나 공사비 절감 및 콘크리트량 감소 및 버력량 감소로 인한 공사비 및 환경성 증가 등으로 인하여 성능 향상률 7.2%(▲), 비용절감률 10.7%(▼)로 20.1%(▲)의 가치가 향상된 가치혁신형 공법으로 분석되었다.

(3) 철도터널(내경 ∅7,200)에 대한 분석결과 탄소배출량이 17.3% 정도 감소되는 것으로 나타났고, 터널 시공연장 2km 기준으로 탄소배출량이 1,040ton 감소하여 36.3만 그루의 식생효과와 10.5백만원의 탄소배출가격의 확보가 가능한 것으로 나타났다. 또한, 도로터널(내경 ∅11,500)에 대한 분석결과 탄소배출량이 15.8% 정도 감소되는 것으로 나타났고, 터널 시공연장 2km 기준으로 탄소배출량이 1,620ton 감소하여 56.4만 그루의 식생효과와 16.4백만원의 탄소배출가격의 확보가 가능한 것으로 분석되었다. 특히, 기존 세그먼트를 슬림형 세그먼트로 변경시 레미콘 및 경유사용량 절감으로 15%이상의 탄소배출량을 저감시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

제 15 절 배수형 쉴드터널 유지관리 방안

1. 배수 유로홈 유지관리 방안

배수형 쉴드터널 배면 공간에는 기본적으로 고투수성의 PS 볼이 충진되게 된다. 충진되는 PS 볼은 직경이 1~2mm 로서 세그먼트 시공 오차 관리치인 0.5mm 보다 더 크다. 따라서, 지하수가 수압에 의해 세그먼트 결합면 사이로 유입될 때 PS 볼이 유입될 가능성은 극히 적다. 그러나 지반 종류에 따라 다양한 유기물, 부유물, 흙입자 등이 유입될 가능성은 충분히 있으며, 이에 대해 배수 유로홈의 유지관리 방안이 필수적으로 요구된다.

특히, 쉴드터널이 완성되어 지하철 혹은 전력구로서 운용되는 상황에서 장기간에 걸치 침적물로 배수 유로홈이 막힐 수 있고, 터널 운용 상황에서 최소한의 비용과 인력으로 배수 유로홈을 유지관리 하여야 한다.

그림 2.15.1은 배수형 쉴드터널이 완공된 후 정상적으로 운용 중일 때 배수 유로홈을 통한 지하수 흐름을 나타낸 것이다. 정상 운용 중 유지관리 방안에서 최우선으로 고려해야할 부분은 내부 유입구의 막힘 현상이다. 내부 유입구는 모든 세그먼트 링 마다 구현되는 구조이기 때문에 몇 개의 내부 유입구가 막힌다고 하여 배수성능이 급결하게 저하 하거나, 터널 운용에 막대한 영향을 미치지는 않을 것이다. 그러나 정기적인 유지관리를 통해 내부 유입구의 막힘을 방지할 필요성이 있다.

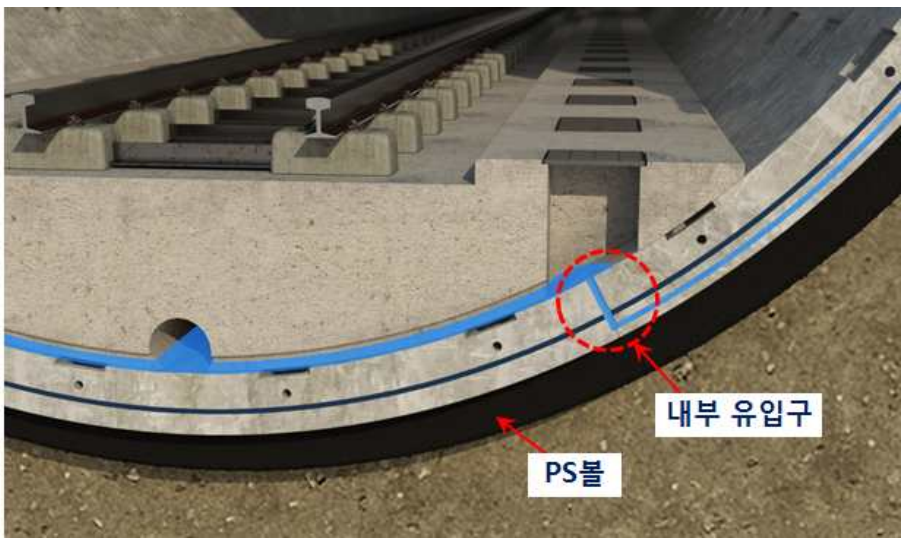


그림 2.15.1 배수 유로홈 운용 모습

본 연구에서는 내부 유입구의 유지관리를 위해 에어를 이용한 석션건을 도입하였다. 먼저, 정상 운용 중인 터널 내부에서 자유롭게 이동이 가능한 크기 및 부피를 가지면서, 충분한 압력으로 내부 유입구의 막힘을 방지할 수 있는 방안으로 고려하였다.

배수 유로홈 유지관리용 에어석션건에 대한 계념설계를 위해 기능 및 적정 사양에 대한 검토를 수행하였다. 그리고 시제품으로 기능 및 적정 사양이 검토된 에어 석션건에 대한 개념설계를 도면화 하고, 도면화된 설계 내용을 바탕으로 주요 성능을 설명할 수 있는 모델링을 도출하였다.



그림 2.15.2 에어석션건 개념설계 수행 과정

에어석션건 개념설계에서는 배수 유로홈 연결과 분리가 용이한 에어석션건의 설계와 함께 이물질의 강력한 흡입을 위한 내부 덕트(duct)의 설계 및 펌프 선정, 쉴드터널 내부 이동이 편리하도록 손잡이 및 바퀴 설계, 흡입한 이물질 적재하고 쉽게 분리 배출 할 수 있는 용기 설계 등을 모두 고려하였다.

그리고 쉴드터널(지하철 단면 기준) 내부에서 유지관리용 에어석션건이 작동되는 과정을 단계별로 나타내는 모델링을 통해 실제 환경에서의 적용성을 검토하였다.

다음은 에어석션건 개념설계을 위해 도출한 세부 고려사항이다.

① 배수 유로홈 연결과 분리가 용이한 에어석션건 기본 설계

- 현장에서의 유로홈 관리 시, 유로홈에 누적된 이물질을 효과적으로 배출시키기 위해서는 유로홈 입구와 에어 석션건이 기밀을 유지함으로써 석션의 압력이 유로홈 내부에 제대로 걸릴 수 있도록 유로홈과의 연결구조에 대한 설계가 필요함.

- 이를 위해 유로홈 입구와 건이 기밀을 유지하면서도 연결과 분리가 용이한 석션건의 설계가 필요함.

② 이물질의 강력한 흡입을 위한 내부 덕트(duct)의 설계 및 펌프 선정

- 흙입자, 유기물, 부유물 등의 이물질을 강력하게 흡입하기 위해서는 압의 흐름을 저해하지 않은 덕트구조와 이물질 흡입에 충분한 펌프의 선정이 필요함.

- 이를 위해 건설용의 동종 주변제품의 기술에 대한 검토를 통해 덕트구조를 설계

하고 강력한 흡입력을 구현할 수 있는 펌프를 선정, 설계 반영이 필요함.



그림 2.15.3 기존 산업용 석션 제품 검토

③ 쉴드 터널 이동이 편리하도록 손잡이 및 바퀴 설계

- 협소한 쉴드터널 내부에서 작업이 용이하기 위해서는 작업편리성을 고려해야 하며, 그 중 쉴드 터널 내에서의 이동성이 가장 중요한 요소를 차지함.

- 에어석션건의 이동성을 구성하는 요소 중 손잡이와 바퀴의 중요성이 높으며, 사용하기 편리한 손잡이의 위치와 크기, 형상 및 바퀴의 직경 및 재질 등에 대한 면밀한 검토가 필요함.

- 대구경의 바퀴 사용이 유리하며, 가급적이면 고무타이어 등을 적용하여, 노면으로부터의 충격과 이동을 저해하는 요소에 대응 가능한 설계가 필요함.

④ 흡입한 이물질 적재하고 쉽게 분리 배출 할 수 있는 용기 설계

- 터널의 유로홈에 발생하는 이물질은 젖어있는 상태의 이물질로 습식 사용에 대해 고려되어야 하며, 이물질이 흡입되어 적재되고 분리 배출할 때 습식 이물질의 무게와 부피, 작업량을 고려한 크기와 용기의 모양이 설계에 고려되어야 함.

- 습식 이물질을 적재하고 쉽게 분리 배출이 가능한 용기 설계가 필요하며, 용기의 크기도 1회 작업량과 시간을 고려하여 최적의 크기로 설계가 되어야 함.

2. 에어석션건 개념설계

본 연구에서는 다양한 세부 고려사항에 대한 검토를 통해 배수 유로홈 유지관리용 에어석션건의 개념설계를 수행하였다. 그림 2.15.4에서 그림 2.15.8은 개념설계가 완료된 에어석션건을 나타낸 것이다.

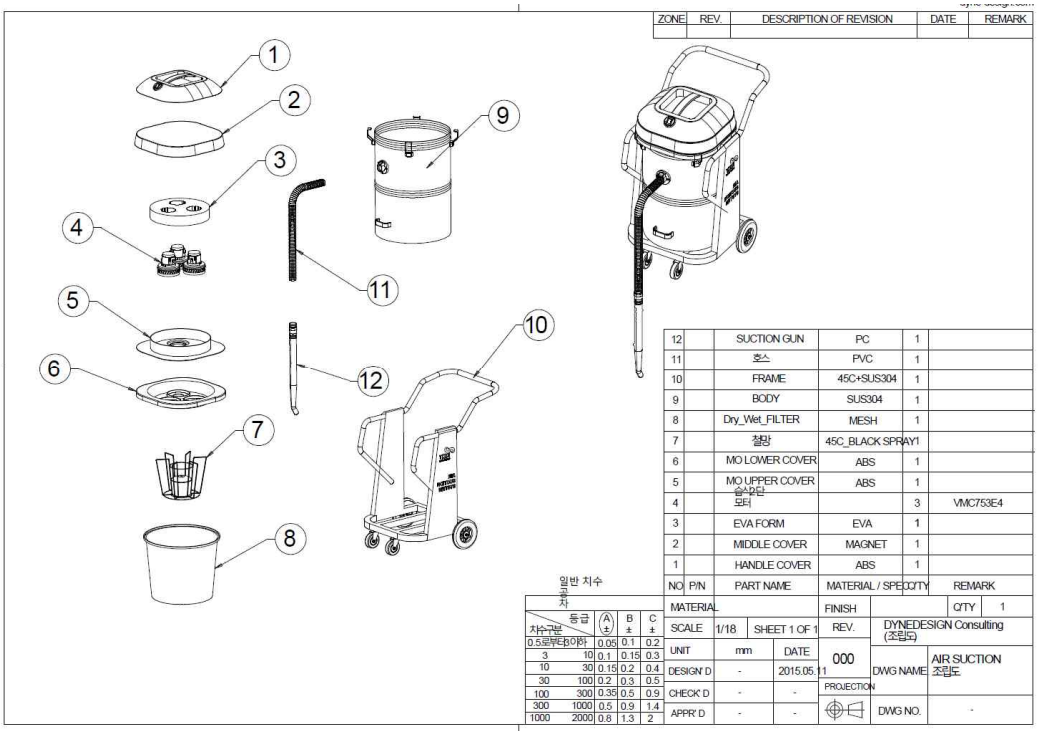


그림 2.15.4 에어석션건 부품도a

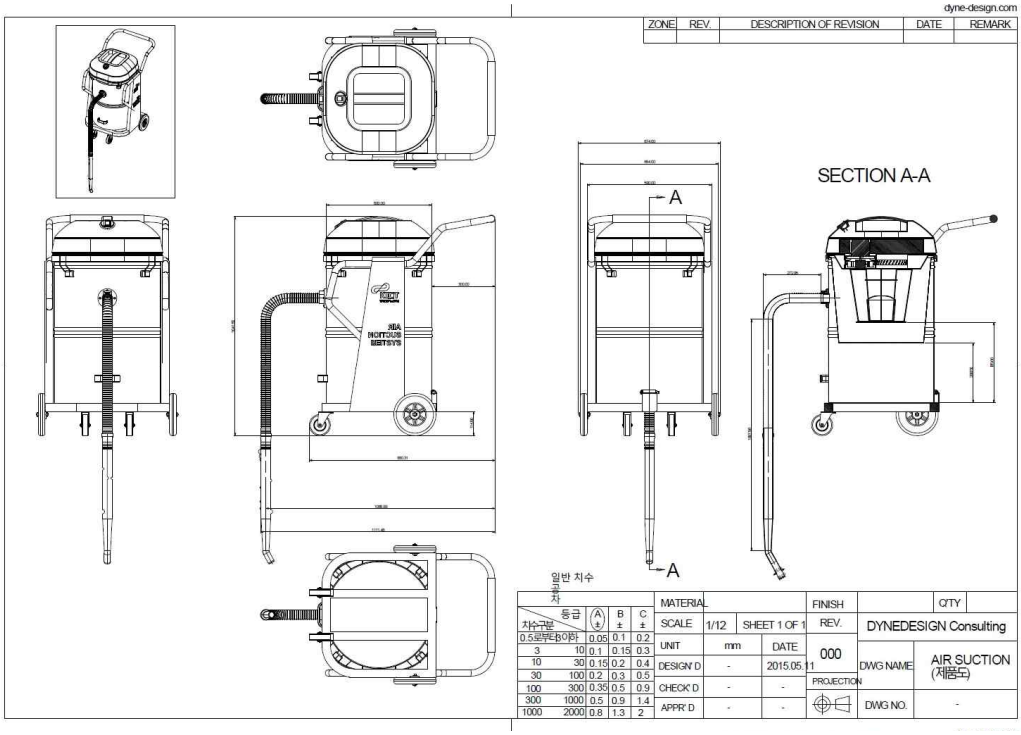
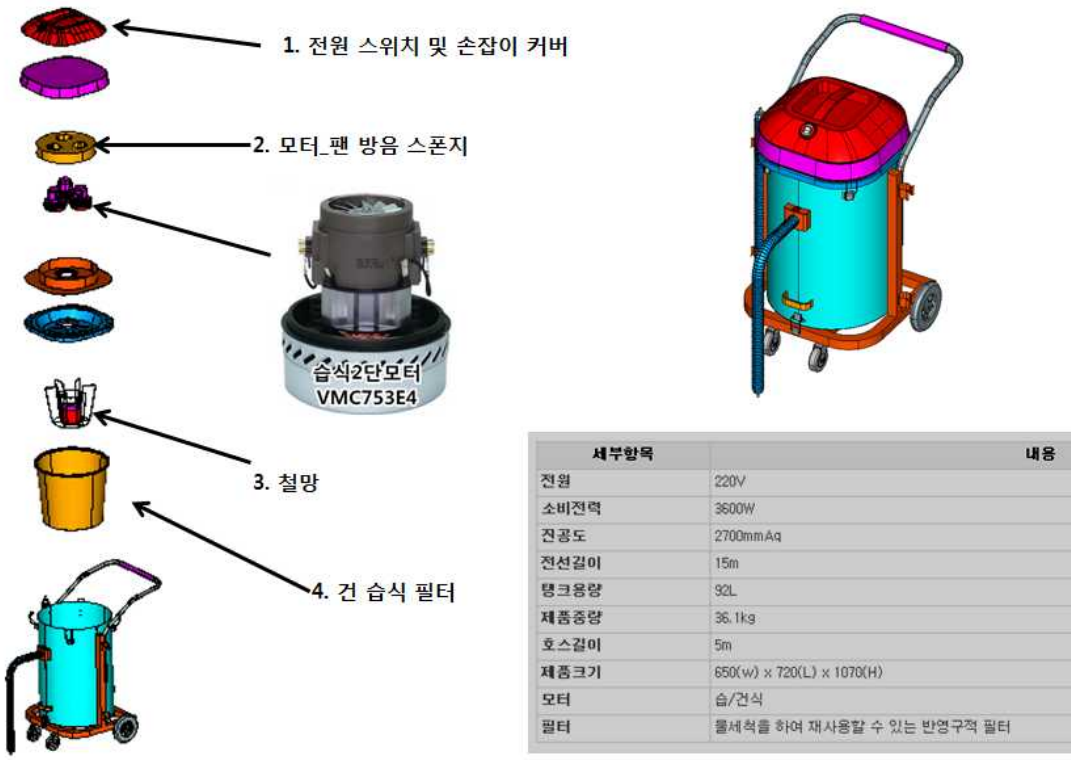


그림 2.15.5 에어석션건 부품도b



세부항목	내용
전원	220V
소비전력	3600W
진공도	2700mmAq
전선길이	15m
탱크용량	92L
제품중량	36.1kg
호스길이	5m
제품크기	650(w) x 720(L) x 1070(H)
모터	습/건식
필터	물세척을 하여 재사용할 수 있는 반영구적 필터

그림 2.15.6 도출된 에어석션건 사양

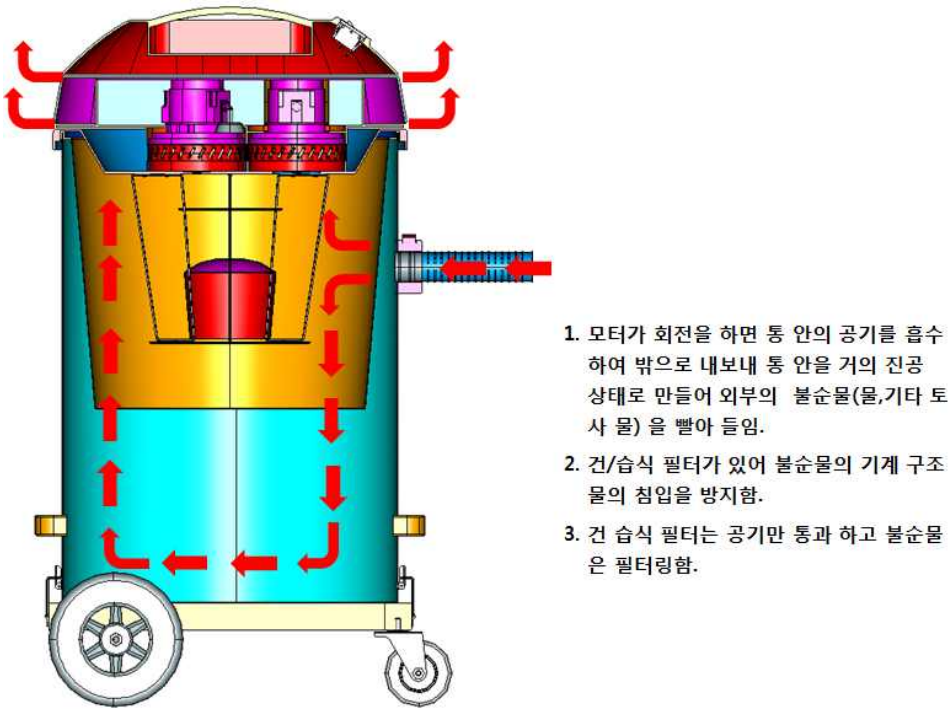


그림 2.15.7 도출된 에어석션건 구조

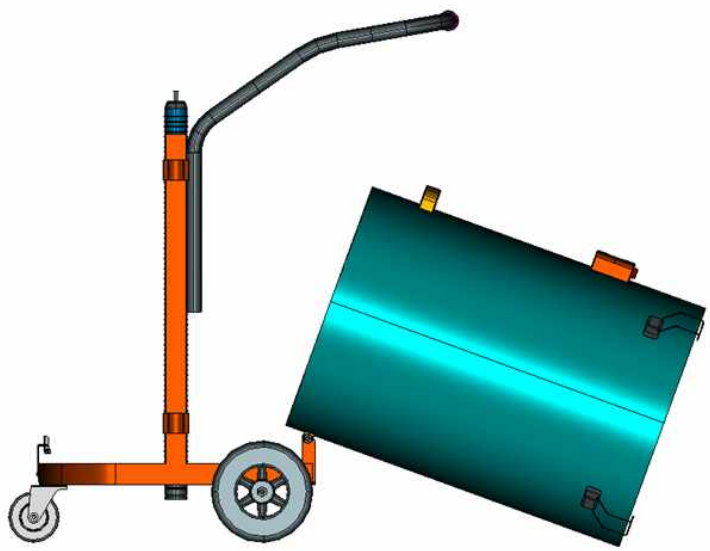


그림 2.15.8 에어석션건의 이물질 배출 방안

그림 2.15.9는 실제 운용되는 쉴드터널(지하철 단면 기준) 내부에서 에어석션건이 작동되는 과정을 단계별로 나타내는 모델링을 통해 실제 환경에서의 적용성을 검토한 것이다.



(a) 배수 유로홈 및 내부 유입구 정상 운용



(b) 이물질로 인한 배수 유로홈 막힘 발생



(c) 에어석션건 터널 내부 이동

그림 2.15.9 에어석션건 단계별 작동과정 모델링



(d) 에어석션 호스 내부 유입구 내부 투입



(e) 에어로 이물질 흡입



(f) 배수 유로홈 및 내부 유입구 정상 운용 회복

그림 2.15.9 에어석션건 단계별 작동과정 모델링(계속)

소결론

(1) 지하수가 수압에 의해 세그먼트 결합면 사이로 유입될 때 지반 종류에 따라 다양한 유기물, 부유물, 흙입자 등이 유입될 가능성은 충분히 있으며, 이에 대해 배수 유로홈의 유지관리 방안이 필수적으로 요구된다.

(2) 본 연구에서는 내부 유입구의 유지관리를 위해 에어를 이용한 석션건을 도입하였고, 배수 유로홈 유지관리용 에어석션건에 대한 계념설계를 위해 기능 및 적정 사양에 대한 검토를 수행하였다. 그리고 시제품으로 기능 및 적정 사양이 검토된 에어 석션건에 대한 개념설계를 도면화 하고, 도면화된 설계 내용을 바탕으로 주요 성능을 설명할 수 있는 모델링을 도출하였다.

(3) 에어석션건 개념설계에서는 배수 유로홈 연결과 분리가 용이한 에어석션건의 설계와 함께 이물질의 강력한 흡입을 위한 내부 덕트(duct)의 설계 및 펌프 선정, 쉴드터널 내부 이동이 편리하도록 손잡이 및 바퀴 설계, 흡입한 이물질 적재하고 쉽게 분리 배출 할 수 있는 용기 설계 등을 모두 고려하였다.

제 16 절 배수형 쉴드터널 미래 수요예측 및 시장성 평가

1. 국내외 세그먼트 생산시스템 조사

가. 국내 세그먼트 생산업체

국내외 세그먼트 생산업체 및 업체별 생산역량 검토를 위하여 국내 세그먼트 쉴드터널의 적용현황과 세그먼트 생산업체를 조사하였으며, 세그먼트 생산업체별 생산 현황, 생산 프로세스, 최근 3개년 경영상태, 업체별 특허 및 등을 조사 분석하여 업체별 생산역량 검토를 수행하였다.

(1) 국내 현황

세그먼트 터널은 1987년에 부산 광복동 전력구 공사에서 약 1km 구간에 처음 적용을 시작하여 1995년부터는 도심지 터널구간에 적용이 증가하였다. 그림과 같이 1998년 이전까지는 굴진외경이 소규모인 관로공사 위주로 시공하였으나, 1998년 이후부터 굴진외경 8.0m 내외인 지하철에 적용되었고 현재의 대구경 세그먼트 터널로 점차 증가하였다.

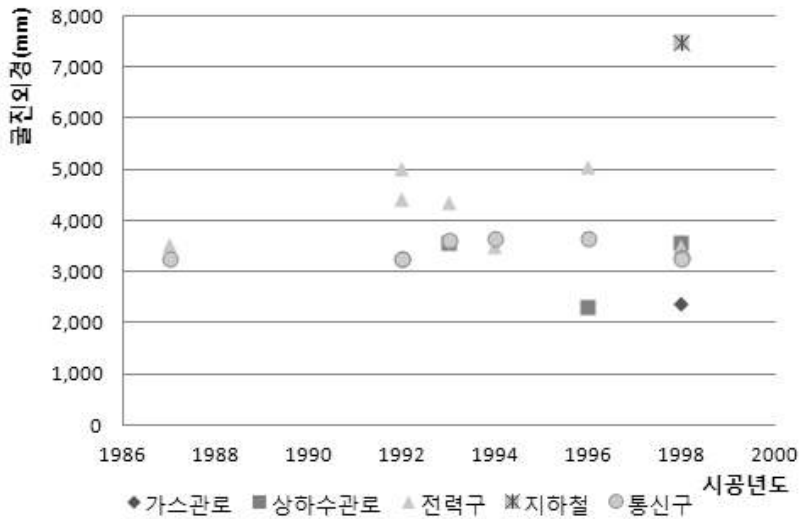


그림 2.16.1 2000년 이전 국내 세그먼트 터널 현황

국내 세그먼트 터널 적용현황 조사결과 아래 표와 같이 2000년 이전은 연장 1~3km 내외의 전력구, 통신구, 상·하수도 관로공사 등에 주로 적용되었으며 광주 도시철도 1호선을 기점으로 대구경 세그먼트 터널의 시공이 시작되었다.

표 2.16.1 2000년 이전 국내 세그먼트 터널 시공현황

PROJECT 명	공사기간	기계형식	기계 외경 (mm)	터널 연장 (m)	세그먼트(mm)	
					외경	두께
부산 광복동 전력구 공사	87.12~90.04	EPB	3,280	1,033	2,850	150
부산 법원 앞 통신구 공사	88.12~90.04	EPB	3,280	416	2,850	150
남부 하수처리장 공사 (차집관로 1공구)	91.12~97.03	EPB + TBM	3,550	5,903	3,050	150
부산 구포 전력구 공사(154KV)	90.12~96.09	EPB	4,350	940	3,800	200
부산 구포 전력구 공사(345KV)	90.12~96.09	EPB	5,030	6,750	4,500	200
부산 사상 통신구 공사(1차)	93.07~97.12	EPB	3,630	905	3,100	200
남천안 통신구 공사	94.05~96.08	EPB	3,650	1,802	3,100	200
안산 전화국 인입 통신구 공사	95.03~96.11	EPB	3,260	873	2,750	200
신당~한남 전력구 공사	94.09~	EPB + TBM	3,500	3,900	2,800	250
마산 통신구 공사	95.10~	EPB	3,250	560	2,850	150
마산 지중T/L 전력구 공사(154KV)	95.04~99.09	EPB	3,510	2,330	2,850	200
		EPB + TBM	3,550			
엄궁~인출 전력구 공사(154KV)	96.07~98.12	EPB	4,410	706	3,800	200
남부 하수처리장 방류관로 설치공사	96.09~97.08	EPB + TBM	3,550	490	3,050	150
남부권 주배관제 3공구공사	97.11~99.06	SLY + TBM	2,300	1,354	1,900	76
부산 사상 통신구 공사(2차)	97.05~02.02	EPB + TBM	3,650	976	3,100	200

표 2.16.1 2000년 이전 국내 세그먼트 터널 시공현황(계속)

PROJECT 명	공사기간	기계형식	기계 외경 (mm)	터널 연장 (m)	세그먼트(mm)	
					외경	두께
한남~원효 전력구 공사	98.	EPB + TBM	3,500	3,000	2,800	250
영서~영등포 전력구 공사	98.	EPB + TBM	5,000	3,300	4,500	200
광주 도시철도 1호선	97.10~01.12	EPB + TBM	7,500	1,799	6,600	300
금강 횡단 가스관로 공사	98.10~99.08	SLY	2,370	1,140	-	-
북수원 통신구 공사	98.10~00.12	EPB + TBM	3,260	920	-	-
서대전 통신구 공사	99.05~01.12	EPB + TBM	3,260	818	-	-

서울 및 수도권에서는 터널공사 시 소음, 진동, 분진 발생의 대책으로 세그먼트 쉴드터널 적용이 점차 증가되었으며 2000년 이후에 서울 및 수도권의 세그먼트 쉴드터널의 전체 현황은 표 2.16.2와 같다.

표 2.16.2 서울 및 수도권의 2000년 이후 세그먼트 터널 전체 현황(2010년 기준)

공사명	연장(Km)	비고
지하철 909 공구	1.8	개통
인천국제공항철도	1.9	개통
분당성 왕십리-청담간 복선 전철	1.7	시공 완료
인천지하철 3개 공구	7.5	설계 완료/시공중
지하철 7호선	4.5	시공중
지하철 9호선 3개 공구	6.0	시공중
부전-마산 복선전철	5.0	설계 완료/시공 예정
대곡-소사 복선전철	2.5	2011년 설계/2012년 시공 예정
신분당선 연장(용산-강남)	1.5	2011년 설계/2012년 시공 예정
수도권 대심도 광역급행철도	147.0	시공 예정
서울시 U-Smartway	8.0	시공 예정
서부간선도로 확장공사	15.0	시공 예정
서울시내 경전철 공사	3.0	2012년 설계/2013년 시공 예정
동부간선도로 당현4교-대치 구간	17.2	시공 예정
고속도시철도(GTX), 고속전철, 도심지 고속화도로	70.0	시공 예정
한중 해저터널	220.3	검토 진행
한일 해저터널	145.0	검토 진행

서울시 지하철 909공구의 일부가 개통되었으며, 분당선 왕십리～청담 복선전철(연장 1.7km) 및 서울시 지하철 7호선 703/704공구(연장 약 4.5km)와 인천국제공항철도(연장 1.9km)도 세그먼트 터널로 2010년 기준 시공 중이거나 완료 상태이다[1)]

서울시 지하철 919～921공구(Shield TBM 3대, 3개 공구 연장 4.3km), 부전-마산 복선전철(Shield TBM 2대, 총연장 32.6 km 중 낙동강 하저 5 km구간), 대곡-소사 복선전철(Shield TBM 1대, 총연장 19.5 km 중 한강 하저 2.5 km구간)이 현재(2010년) 설계 완료된 상태이다. 최근 국내 세그먼트 터널은 주로 지하철과 지하도로의 터널에 많이 적용되고 있다.

표 2.16.3 국내 세그먼트 터널 시공 현황

공사명	시공사	터널		세그먼트		
		연장 (km)	외경 (m)	분할방식	두께 (mm)	지수방식
분당선 제3공구	대우건설	1,691	7,800	7(6+1key)	400	수팽창지수재 (내외측 2열)
서울지하철 703공구	대우건설	3,188	7,220	7(6+1key)	300	수팽창지수재 (외측2열)
서울지하철 704공구	삼성물산	1,387	7,130	7(6+1key)	300	수팽창지수재 (내외측 2열)
서울지하철 909공구	두산산업 개발	3,614	7,450	7(6+1key)	350	수팽창지수재 (내외측 2열)
인천공항 도시철도 2-5B공구	삼환기업	1,935	7,580	8(7+1key)	350	수팽창지수재 (내외측 2열)
광주지하철 T/K 1공구	성원건설	1,798	7,200	7(6+1key)	300	수팽창지수재 (외측1열)
부산지하철 230공구	두산산업 개발	842	7,100	7(6+1key)	300	수팽창지수재 (외측1열)

최근 국내 세그먼트 터널은 굴진외경이 7m 이상의 계획되어 대부분 7m 이상 대단면 세그먼트 외경으로 시공되었으며, 현재 설계완료 된 세그먼트 터널로는 마산~거제 연결도로(연장 약 12.6km), 신분당선 용산~강남(연장 3km) 있다.

표 2.16.4 국내 설계 완료된 세그먼트 터널 현황

공사명	터널		세그먼트		
	연장	외경	분할방식	두께	지수방식
분당선 제3공구	12,570	12,500	10(9+1key)	500	수팽창지수재 복합형가스켓
서울지하철 703공구	3,003	8,000	7(6+1key)	400	복합 지수판 설치

조사된 국내 세그먼트 터널현장 중 시공 완료 및 진행 중인 현장의 세그먼트 생산업체를 조사하고 각 업체별 역량을 분석하였다. 국내 세그먼트 터널 공사 대상으로 조사결과 생산업체는 태명실업, IS동서 2개 업체와 지금까지 생산 실적은 없으나 새롭게 세그먼트 생산사업 시작하는 삼표이앤씨까지 3개 업체가 있는 것으로 조사되었다.

표 2.16.5 서울 및 수도권의 2000년 이후 세그먼트 터널의 생산업체

공사명	시공사	세그먼트 생산업체
분당선 제3공구	대우건설	IS동서
서울지하철 703공구	대우건설	IS동서
서울지하철 704공구	삼성물산	IS동서
서울지하철 909공구	두산산업개발	태명실업
인천공항 도시철도 2-5B공구	삼환기업	
광주지하철 T/K 1공구	성원건설	
부산지하철 230공구	두산산업개발	

국내 세그먼트 생산을 주도하는 태명실업, IS동서, 삼표이앤씨 3개 업체의 업체별 생산현황, 세그먼트 생산 프로세스, 경영상태 등을 분석하여 업체별 생산 역량 검토를 수행하였다.

(2) 태명실업

서울특별시 강남구 역삼동에 본사가 위치하며, 생산공장은 이천공장, 천안공장, 제천공장 3개로 이천공장은 경기도 이천시 대월면, 천안공장은 충청남도 천안시 동남구 동면, 제천공장은 충청북도 제천시 장락동에 각각 위치하여 있다.

1963년 부산 콘크리트 공업합명회사로 창업하여 1983년에 주식회사 태명실업을 설립하였으며 1995년 부산 세그먼트 공장 준공을 시작으로 세그먼트 생산 사업에 국내 입지를 확고히 하고 있는 업체이다.

국내 최초로 한국통신과 수직구용 세그먼트 개발 및 납품하였으며, 또한 최대구경 세그먼트 Φ9,800을 국내 최초로 제작하여 일본 동경지하철에 제작 납품한 실적을 가지고 있으며 세그먼트 이외로는 침목, 세그먼트, PC암거, PC저류조, T형파일, IPC분절거더, PCL Composite, 지대 생산 사업을 진행하는 업체이다.

전력구, 통신구 등의 관로 공사용 세그먼트 생산을 주로 하였으나 현재는 서울지하철 909현장 등 지하철 공사의 세그먼트도 생산 가능 업체로 국내 프로젝트 현장에 납품건수는 42건이 있으며 그중 20건이 1,000링 이상의 세그먼트를 납품한 실적이 있으며, 해외실적으로는 일본, 인도네시아, 싱가폴 3개국에 총 7개 납품실적이 있다.

표 2.16.6 태명실업 세그먼트 실적(1,000링 이상)

프로젝트	발주처	납품 년도	납품 수량	규격
용호하수 차집 관로 현장 (1차)	부산시청	1992	2,712	Ø3,350× 900×150
용호하수 차집 관로 현장 (2차)	부산시청	1993	1,137	Ø3,350× 900×150
부산 구포전력구 현장	한국전력공사	1994	1,040	Ø4,900× 900×200
마산 전력구 현장	한국전력공사	1995	2,576	Ø3,250× 900×200
북수원 통신구 현장	한국통신	1998	1,072	Ø3,150× 900×200
금강 하저 가스관로 현장	한국가스공사	1999	1,278	Ø3,350× 900×150
시흥-독산 전력구 현장	한국전력	2001	1,815	Ø3,350×1,000×250
한강하저통신구 현장	한국통신	2002	2,127	Ø2,600× 900×200
대림 분기 전력구 현장	한국전력공사	2002	2,663	Ø3,350×1,000×250
INDONESIA RENUN HYDROELECTRIC POWER PROJECT	인도네시아	2003	4,200	Ø3,750×1,200×200 Ø3,400×1,200×200
서울지하철 909현장	지하철공사	2004	1,497	Ø7,450×1,200×350
한강하류권 급수체계구축 제1공구 현장	수자원공사	2006	1,305	Ø3,600×1,000×200
신양산-동부산 4차 전력구 현장	한국전력공사	2006	3,494	Ø4,800×1,200×250
인천신공항철도 2-5B 공구 현장	신공항철도주식회사	2006	1,215	Ø7,580×1,200×350
거여-가락 전력구 현장	한국전력공사	2007	2,048	Ø4,300×1,000×250
군산복합화력발전소 현장	한국서부발전공사	2007	1,445	Ø4,200× 900×200
대구 봉무전력구 현장	한국전력공사	2008	2,091	Ø3,350×1,000×250
대구 봉무전력구 현장	한국전력공사	2008	2,091	Ø3,350×1,000×250
영동-양재 통신구 현장	KT(구 한국통신)	2008	1,642	Ø2,600× 900×200
신성남 전력구 현장	한국전력공사	2009	1,916	Ø4,300×1,000×200

표 2.16.7 태명실업 세그먼트 해외 납품 실적

프로젝트	발주처	납품년도	납품수량	규격
일본 동경전력구 현장	일본	1996.05	210	Ø3,600×900×200
水島 コンビナート 海底 Shield 공사현장	일본 Kajima건설(주)	2001.04	331	Ø4,950×1,200×225
Tonen General Sekiyu K.K. Kawasaki Renassance Project	일본	2001.07	767	Ø2,950×1,000×225
싱가폴 DTSS-KIM CHUAN PROJECT용 SEGMENT MOULD	싱가폴	2002.07	1	Ø3,200×1,200×150
INDONESIA RENUN HYDROELECTRIC POWER PROJECT	인도네시아	2003.08	4,200	Ø3,750×1,200×200 Ø3,400×1,200×200
동경지하철 13호선 현장	일본	2004.01	153	Ø9,800×1,600×400
Taisei Saitama SHIN-OHKUBO Project SEGMENT	일본	2005.09	397	Ø3,550×1,200×175

자금 및 손익실태조사를 위하여 최근 3개년간의 재무정보를 분석한 결과 2013년 이후 약 6000억원의 년매출액이 발생하였으며 매출총이익이 매출액대비 15%이상 유지하고 있는 매우 우량한 기업으로 분석 된다.

특허 1건, 실용신안등록 1건, 디자인등록 2건, 유사디자인등록 2건을 보유하고 있는 업체이다.

표 2.16.8 태명실업 최근 3개년 재무정보

구 분	금 액 (천원)		
	2012	2013	2014
① 매출액	28,356,365	64,266,017	59,378,182
② 매출총이익	1,609,032	9,864,161	10,454,182
③ 영업이익	-2,317,187	4,174,586	4,309,396
④ 영업외 이익	1,169,338	302,270	1,313,532
⑤ 영업외 비용	1,465,670	1,359,729	1,125,737
⑥ 당기순이익	-2,613,519	3,117,127	3,820,744

주) worknet 통합기업정보 재무정보 참조

표 2.16.9 태명실업의 세그먼트 관련 기술현황

구 분	명칭	등록일
특허	쉴드 터널용 세그먼트	2011.12.01
실용신안등록	쉴드 터널용 세그먼트 조립구조	2002.05.17
디자인등록	터널용 세그먼트의 연결핀	2003.05.27
	쉴드터널용 세그먼트 연결구	2005.11.28 2011.03.18
유사디자인등록	쉴드 터널용 세그멘트 연결구 (유사 제1호)	2011.10.17
	쉴드 터널용 세그멘트 연결구 (유사 제2호)	2011.10.17

(3) 아이에스동서(주)

서울특별시 강남구 청담동에 본사가 위치하며, 생산공장은 이천공장, 천안공장, 청양공장 창년공장 4개로 이천공장은 경기도 이천시 부발읍, 천안공장은 충청남도 천안시 구룡동, 제천공장은 충청남도 청야군 남양면, 창녕공장은 경상남도 창녕군 대합면에 위치하여 있으며 이중 세그먼트는 천안공장에서 생산 중인 것으로 조사되었다.

1975년 백제콘크리트(주)로 창업하여 1976년에 동서산업주식회사로 상호변경 후 1982년 이천종합콘크리트공장 준공 1994년 청녕공장 및 괴산공장 인수, 1995년 세그먼트와 침목을 생산하는 천안콘크리트공장을 준공하여 2008년 아이에스동서(주)로 상호를 변경하였으며 현재는 태명실업과 함께 국내를 대표하는 세그먼트 생산업체이다.

표 2.16.10 아이에스 동서(주) 생산 및 납품실적

발주처	시공회사	제작 및 납품기간
한국전력공사	삼성건설(주)	1992년 ~ 1993년
한국전력공사	삼성건설(주)	1993년 ~ 1995년
한국전력공사	삼성건설(주)	1996년 ~ 1996년
일본동경전력	청수건설(주)	1996년 ~ 1996년
일본동경전력	서송건설(주)	1996년 ~ 1997년
한국전력공사	선경건설(주)	1996년 ~ 1997년
한국전력공사	선경건설(주)	1999년 ~ 1999년
한국전력공사	SK건설(주)	2000년 ~ 2003년
철도시설공단	대우건설(주)	2006년 ~
서울지하철건설본부	대우건설(주)	2007년 ~
한국전력공사	현대건설(주)	2010년 ~

국내 최초로 코아 PC관을 생산하였으며 PC콘크리트 제품을 일본에 수출하였고, PHC Pile, 세그먼트, 일반PC, PC침목, Ext-R Pile, 건축부재, 토목부재 등을 생산하는 업체이다. 1992년부터 매년 한국전력공사, 일본 동경전력 등 꾸준한 생산실적을 가지고 있다. 2006년 이전까지는 전력구 공사에 적용되는 세그먼트를 주로 제작 생산하였으며, 철도시설공단에서 발주된 프로젝트를 시작으로 지하철공사에 적용되는 세그먼트를 제작 생산하고 있으며, 세그먼트 생산 프로세스 몰드청소로 하여 수평가조립시험까지 8개 공정으로 진행된다.

자금 및 손익실태조사를 위하여 최근 3개년간의 재무정보를 분석한 결과 2012년 이후 약 5,000억원의 매출액이 발생하였으며 매출총이익이 매출액대비 16%이상 유지하며 당기순이익이 2012년 98억으로 해서 2014년에는 488억에 달하는 업체이다.

표 2.16.11 아이에스동서(주) 최근 3개년 재무정보

구 분	금 액 (천원)		
	2012	2013	2014
① 매출액	527,221,717	564,608,916	664,247,895
② 매출총이익	84,161,225	110,189,031	156,082,196
③ 영업이익	22,301,552	41,179,506	70,295,353
④ 영업외 이익	4,504,716	4,030,767	7,740,265
⑤ 영업외 비용	12,159,640	14,008,053	10,428,050
⑥ 경상이익	14,646,627	31,202,221	67,607,569
⑥ 당기순이익	9,878,308	22,997,760	48,879,497

주) worknet 통합기업정보 재무정보 참조

표 2.16.12 아이에스동서(주) 천안공장현황

구 분	주 요 내 용
취득자격	- 품질경영체제 인증서 획득(KS A ISO 9001) - 2004년 10년 05월 - 철도용품 품질인정서 획득 (KRS TR 0008-07R) - 2008년 12월 15일
생산능력	- BATCH PLANT 생산능력 - 15㎥/hr - 제품생산능력 - 300ton/일
원 · 부재료 저장능력	- 시멘트 Silo - 225ton- 혼합재 - 75ton - 잔골재 - 500㎥ - 굵은골재 - 1,000㎥ - 혼화제 탱크 - 20ton
원 · 부재료 구입처 및 산지	- 시멘트 - 라피즈한라시멘트, 쌍용양화공업 - 잔골재(강사) - 원성골제, 아산만 - 굵은골재(쇄석) - 원성골재, 아산만 - PC강연선 - 태산인더스, 동일제강 - 철근 - 동경강업, 동국제강, 현대제철 - 혼화제 - 대동 마보스
제품야적장	10,560㎡

(4) 삼표이앤씨

서울특별시 종로구 수송동에 본사가 위치하며, 생산공장은 오송공장, 포항공장, 제천공장, 청주공장 4개로 오송공장은 충청북도 청원군 강외면, 포항공장은 경상북도 포상시 남구 대송면, 제천공장은 충청북도 제천시 봉양읍, 청주공장은 충청북도 청원군 남이면에 각각 위치하여 있다.

1952년 강원산업(주)로 설립 후 1994년 삼표궤도 주식회사 설립하였으며, 그 후 2004년 삼표케이알티(주)을 거쳐 2005년에 삼표이앤씨(주)로 상호변경 하였으며, 주요 생산사업으로는 교량사업, 건축사업, 파일사업, 토목PC사업을 하는 업체이다.

철도용품 및 철도유지보수, 슬래브 궤도 시스템 등의 사업영역을 진행하던 업체로 현재까지는 세그먼트 생산실적 및 경험이 없으나, 새롭게 세그먼트 생산사업에 참여하는 업체이다.

표 2.16.13 삼표이앤씨 주요 생산품목

구 분	생산품목
교량사업	Turn Over Girder, PPC, A-PF, Precast Pier, HPC Rahmen, HyPC Girder
건축사업	Preflex, MPS, CPS, TPS
파일사업	무용접복합 말뚝, 대구경 말뚝
토목PC사업	침목

자금 및 손익실태조사를 위하여 최근 3개년간의 재무정보를 분석한 결과 2013년 매출액 574억 원에서 2014년 2,831억 원으로 매출이 증가하였으며, 매출총이익이 매출액대비 14%이상이며, 단기순이익이 32억 원에서 230억 원으로 증가되는 경영상태가 매우 양호한 것으로 분석되었다.

표 2.16.14 삼표이앤씨 최근 3개년 재무정보

구 분	금 액 (천원)		
	2012	2013	2014
① 매출액	-	57,470,921	283,150,944
② 매출총이익	-	7,774,636	51,315,172
③ 영업이익	-	4,268,273	29,139,869
④ 영업외 이익	-	165,483	2,227,674
⑤ 영업외 비용	-	155,564	1,547,354
⑥ 경상이익	-	4,278,192	29,820,189
⑥ 당기순이익	-	3,287,126	23,056,847

주) worknet 통합기업정보 재무정보 참조

(5) 국내 조사 결과

국내의 세그먼트 터널의 시공실적은 2000년 이전 대부분 관로공사와 같은 소규모 세그먼트 터널에 초점이 맞추어 졌으나, 2000년 이후 철도 및 도로터널에 세그먼트 터널을 적용하는 사례가 늘어나고 있는 것으로 조사 되었으며, 국내 세그먼트 생산업체는 과거에는 태명실업과 아이에스동서(주)가 국내 발생되는 수요의 대다수를 생산하였으며 현재는 삼표이앤씨가 세그먼트 생산 사업에 참여하는 것으로 조사되었다.

태명실업, 아이에스동서(주) 조사·분석결과 현재 국내 세그먼트 생산 사업은 태명실업과 아이에스동서(주)가 주도하며 과거 생산실적 및 최근 3개년 경영상태 분석결과 세그먼트 생산 기술 역량 충분한 것으로 판단되나, 삼표이앤씨는 현재까지 세그먼트 생산사업 실적이 적은관계로 세그먼트 개관적인 생산기술의 역량평가를 할 수 없는 상태이다. 과거 세그먼트는 전력구 등에 적용되는 한정적인 수요로 여러 업체의 참여가 없는 실정이었으나, 현재 지하철공사에 쉴드 터널이 적용되며 세그먼트 수요 증가로 삼표이앤씨와 같이 기존 PC제품을 생산 인프라 구축이 되어있는 여러 업체들의 참여가 증가 할 것으로 분석된다.

나. 국외 세그먼트 생산업체

(1) 국외 현황

국내 터널설계에 세그먼트 터널을 도입하기 시작한 시기보다 훨씬 이전에 유럽, 일본은 세그먼트 터널을 철도 및 도로 터널에 적용하였으며, 유럽은 시공성, 경제성, 환경성 측면에서 유리한 세그먼트 터널공법이 증가하는 추세이고 일본 도심지 또한 80% 이상이 세그먼트 터널공법 적용으로 지속적인 증가 추세이다.

중국은 최근에 들어서 시공 중이거나 계획 중인 터널을 세그먼트 터널공법으로 적극 채택하고 있는 실정으로 현재 계획 및 시공 중인 장대터널 중 산악터널의 60% 이상, 도심터널의 80% 이상, 하저·해저 터널의 80% 이상이 세그먼트 터널로 적용되고 있다.

일본의 경우 쉴드공법 적용이 전체의 약 40% 정도로서 NATM의 50%에 비하여 약간 떨어지나 쉴드공법 기술력이 우수하여 지속적으로 증가추세에 있으며 도심지의 경우 80% 이상이 적용되고 있다. 또한, 중국은 최근 들어 시공 중이거나 계획 중인 터널에 쉴드공법을 적극 채택하고 있으며 도심지구간에도 상당부분 활용되고 있다.

표 2.16.15 해외 장대터널중 대구경 TBM의 적용사례

구 분	개 소	국 명	터널명	TBM 직경	터널 연장	비고
도심지 도로터널	2개소	스페인	M30	Φ 15.2m	3.65Km	2007년 준공
		프랑스	A86	Φ 11.6m	5.5Km	2010년까지 단계별 개통
산악도로 터널	2개소	대 만	Pinglin	Φ 11.8m	12.9Km	2004년 준공
		일 본	Hida	Φ 12.8m	10.7Km	2008년 준공
하저도로 터널	1개소	중 국	Chongming	Φ 15.4m	9.0Km	2008년 준공

이와 같이 도심지 및 산악 장대터널을 중심으로 쉴드공법의 수요가 급증하고 있는 추세에서 2008년 기준으로 전세계 쉴드장비 시장규모는 약 4조 4,350억원에 이르고 있다. 그리고 매년 약 22%씩 쉴드장비 시장규모가 확대될 것으로 가정하면 2015년에는 전세계 시장규모는 약 17조 8,407억원 정도로 추정된다.

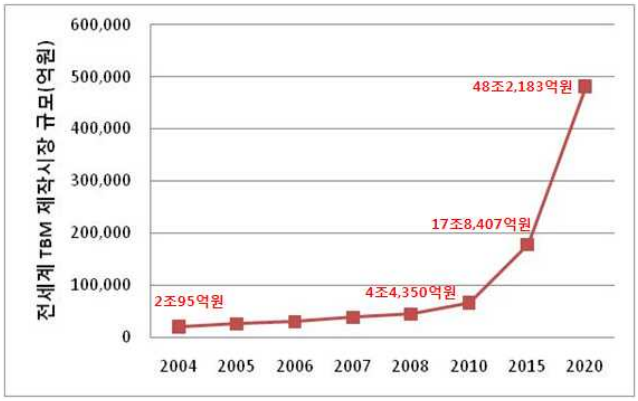


그림 2.15.2 전세계 TBM 제작시장 규모(추정)

(2) 국외 세그먼트 생산업체

국외 세그먼트 생산업체는 현재 싱가폴 세그먼트 턴널 현장에 많은 세그먼트를 공급하고 있는 SPC(Your Strategic Parther in Construction)를 조사 분석하였다.

표 2.16.16 SPC Precast Tunnel Lining Segments 주요 실적

프로젝트	발주처	제품(직경)	기간
Singapore MRT Circle Line Contract 828	LTA Singapore	Φ 5.8m	2008
Singapore MRT Down Town Line Contract 905	LTA Singapore	Φ 5.8m	2008～2009
Singapore MRT Down Town Line Contract 902	Shanghai Tunnel Engineering	Φ 5.8m	2008～2009
Pantai Trunk Sewerage Bored Tunnel	Sewerage Services Department (Malaysia)	Φ 2.9m Φ 3.2m	2008～2009
Singapore MRT Down Town Line Contract 916	LTA Singapore	Φ 5.8m	2012
Singapore MRT Down Town Line 2 Contract 915	LTA Singapore	Φ 5.8m	2012
Singapore MRT Down Town Line 2 Contract 917	LTA Singapore	Φ 5.8m	2013
Singapore MRT Down Town Line 2 Contract 921	LTA Singapore	Φ 5.8m	2012
Newater Infrastructure Plant Extension (NIPE C4)	PUB Singapore	Φ 6.0m	2012
Singapore MRT Down Town Line 3 Contract 929A	LTA Singapore	Φ 5.8m	2013

2002년에 말레이시아에 설립된 프리캐스트 콘크리트 전문 회사로 최근 싱가폴에서 진행 중인 다운타운 2호선, 3호선의 프리캐스트 터널 세그먼트를 제조등 세그먼트 제조경험이 많은 회사로 주요생산 제품으로는 콘크리트 파이프, 세그먼트, 프리캐스트 중공 코어 슬라브, 프리캐스트 보 등이 있다.



그림 2.15.3 SPC 주요 생산 제품

표 2.16.17 SPC Precast Tunnel Lining Segments 기술 현황

구 분	인증
RMC Certificate: Batching Plant 1	SS EN 206-1 SS 544:Part 1&2 and SAC CT 06
RMC Certificate: Batching Plant 2	SS EN 206-1 SS 544:Part 1&2 and SAC CT 06
IBS Status Company Verification-CIDB Malaysia	MS ISO 9001:2000
Manufacturing of Precast Concrete Products and Ready Mix Concrete	ISO 9001:2008
Occupational Safety and Health Management Systems	OHSAS 18001:2007
HDB: Approved Supplier for Precast Concrete Components	HDB Standard

(3) 국외 조사 결과

유럽과 일본은 철도 및 도로터널에 세그먼트 터널의 도입이 국내의 경우보다 빠르고 많은 시공실적과 시공기술을 갖추고 있어, 세계적으로 우수한 기술력을 확보하고 있으며, 유럽, 일본 등 선진국은 국내보다 세그먼트 터널 도입이 빠르고 수요가 많아 생산업체가 체계화 되었으며 생산역량이 우수한 것으로 조사되었다. 또한, 현재 공사 진행 중인 싱가폴 현장의 세그먼트 공급업체 조사결과 2002년에 설립되어 많은 실적을 보유하며 업체 생산제품 및 규모는 국내업체보다는 적은 것으로 조사되었다.

2. 개발기술 수요예측 및 시장성 평가

가. 국내 터널시장 수요예측

국내 터널 수주액의 8년간의 동향을 조사한 결과 2,007년이 28,519억원으로 가장 많은 발주가 이루어졌으며 2,012년 13,076억원의 발주된 것을 확인할 수 있었다. 2013년의 터널발주 증가율이 -87.1%로 큰 폭으로 감소하였으나, 이는 2012년 큰 폭의 증가율에 따른 것이며, 평균적으로 국내의 터널발주는 9,700억원에 이르는 큰 시장규모를 확보하고 있는 것으로 확인되었다. 또한, 국내터널의 개소 및 연장 증가율로 시장동향을 분석한 결과 터널공사가 계속 증가하는 추세로 조사되었다.[2)]

표 2.16.18 국내터널의 8년간 발주현황(2006년~2013년)

년도	도로터널		철도터널		전체터널	
	발주금액(억)	증감율	발주금액(억)	증감율	발주금액(억)	증감율
2006년	7,361	-	722	-	8,083	-
2007년	27,218	369.8%	1,301	180.2%	28,519	352.8%
2008년	4,733	-82.6%	2,803	215.4%	7,536	-73.6%
2009년	5,219	110.3%	1,124	-59.9%	6,343	-15.8%
2010년	6,599	126.4%	1,057	-6.0%	7,656	120.7%
2011년	4,615	-30.1%	111	-89.5%	4,726	-38.3%
2012년	13,037	282.5%	39	-64.9%	13,076	276.7%
2013년	1,509	-88.4%	181	464.1%	1,690	-87.1%
평균	8,786		917		9,704	

국내 터널 개소는 2006년 1,064개소에서 2013년 1,659개소로 595개소가 증가하였으며, 전체연장은 2006년 755km에서 2013년 1,208km로 160%가 증가된 것으로 조사되었다. 터널적용이 증가하는 원인은 산간지역 자연환경 파괴 최소화로 인한 환경 친화적인 도로 건설, 도로 이용자의 안전을 고려한 도로계획, 도심지 교통 혼잡 해소 및 친환경적인 경관계획에 따른 지하 도로화에 기인하는 것으로 분석되었다.

도로 종류별로는 고속국도 793개(48%), 일반국도 461개(28%)로 나타나 고속국도와 일반국도 터널이 전체터널의 75% 이상을 차지하는 것으로 조사되었다.

철도 터널의 경우 2008년을 기점 철도터널 발주금액이 점차 줄어들었으나, 2013년에 2012년 대비 464.1%의 증가를 보이며 증가세로 돌아서는 것을 확인할 수 있었다.

과거 국내 터널 시장은 도시간 연결용 도로터널이나 철도건설이 주였으나, 최근에는 수도권 및 대도시내 고속화, 순환, 관통도로 등으로 그 수요처가 바뀌고 있다. 또한, 경제발전에 의한 국민소득 향상 등으로 도심지 교통체계 건설시 진동, 소음, 침하 등에 대한 국민 기대치가 선진국 수준으로 높아가고 있고, 2014년 여러 가지 국가 재난에 의하여 국민들의 안전의식도가 높아지고 있어 터널공사시 발파 굴착에서 기계굴착으로 빠르게 전환되고 있다.

특히, 쉴드터널에 대한 수요는 지속적으로 높아가고 있는 실정으로 2000년 이후 서울 및 수도권의 쉴드터널 현황은 표 2.16.19와 같다. 이외에도 제2강변북로, 서부간선도로 지하화, 동부간선도로 지하화, GTX와 같은 대규격 쉴드사업도 진행될 예정이다.

년도	개소	연장(km)
2006년	1,064	755
2007년	1,064	755
2008년	1,152	806
2009년	1,287	910
2010년	1,382	975
2011년	1,465	1,053
2012년	1,578	1,149
2013년	1,659	1,208

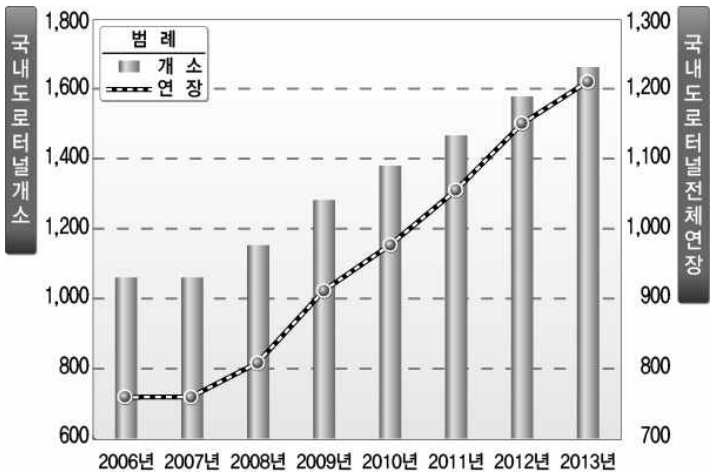


그림 2.16.4 8년간(2006년~2013년) 국내 도로터널의 발주개소 및 전체 연장

표 2.16.19 서울 및 수도권의 2000년 이후 쉴드터널 시공현황

공사명	연장(Km)	공사명	연장(Km)
지하철 909 공구	1.8	인천국제공항철도	1.9
분당성 왕십리-청담간 복선 전철	1.7	인천지하철 3개 공구	7.5
지하철 7호선	4.5	지하철 9호선 3개 공구	6.0
부전-마산 복선전철	5.0	대곡-소사 복선전철	2.5
신분당선 연장(용산-강남)	1.5	수도권 대심도 광역급행철도	147.0
서울시 U-Smartway	8.0	서부간선도로 확장공사	15.0
서울시내 경전철 공사	3.0	동부간선도로 당현4교-대치 구간	17.2
고속도시철도(GTX), 고속전철, 도심지 고속화도로	70.0	한중 해저터널	220.3
한일 해저터널	145.0	목포-제주 해저터널	167.0

나. 국외 터널시장 수요예측

(1) 국외 시공현황

유럽의 경우 2009년 기준 전체 터널 중 80%가 쉴드터널로 시공되고 있으며, 일본 60%, 미국 50%, 중국 40%, 대만의 경우 30%가 쉴드터널로 시공되고 있다. 이와 관련하여 미국, 유럽, 일본 등에서는 지난 30년간의 터널분야 연구에서 쉴드터널과 관련된 기술개발이 상당한 비중을 차지하고 있다. 반면, 국내의 경우 전력구 및 수로터널을 제외한 전체 터널 중 쉴드터널의 경우 1% 정도에 불과하고 터널분야 연구에서도 쉴드터널에 대한 연구가 부족한 실정이다.

국외 시장의 경우 유럽 선진국 지역에서는 쉴드터널 시장이 마무리 되어 가고 있는 반면, 싱가포르 등 아시아 개발도상국에서는 쉴드터널 사업이 약 70여개 공구로 진행되거나 향후 발주될 계획이며 특히, 중국의 쉴드터널 사업은 2500여개 공구의 발주가 시작되어 향후 30년간 진행될 예정이며, 인도시장은 약 1,000여개 쉴드터널 공구의 발주가 예상된다.

전 세계의 교통터널의 시장은 표 2.16.20과 같으며 이중 중국에서 건설 계획된 터널은 세계 2위인 일본보다 8배 많은 것으로 조사되었다.

유럽의 쉴드터널은 대단면화, 대심도화, 고속화, 장대화가 가능한 쉴드터널 장비기술력을 확보하고 있으며, 대표적인 터널로는 프랑스 파리의 A86, 영국-프랑스 유로터널, 독일의 엘베터널, 그리고 가장 최근의 이스탄불 해협 도로터널 등이 있다.

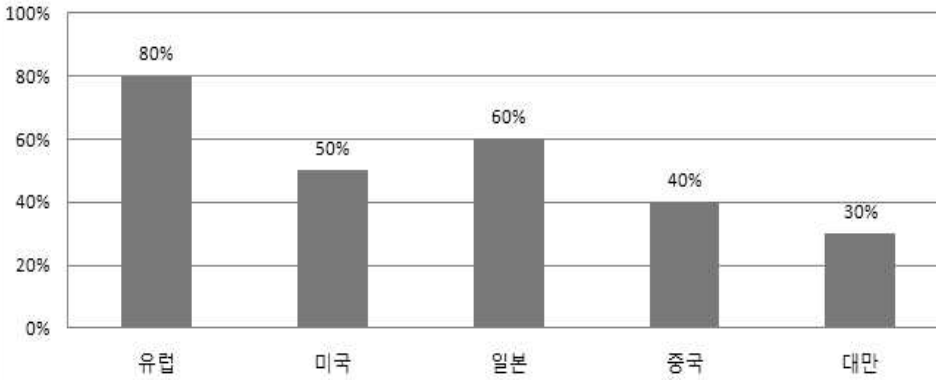


그림 2.16.5 2009년 기준 나라별 전체 터널 대비 쉴드터널 시공현황

표 2.16.20 전세계 교통터널의 계획수요(2004년~2014년)

국가	교통터널의 수요	국가	교통터널의 수요
중국(향후 20년간)	20,000개소	일본	2,500개소
오스트리아+스위스+독일	800개소	북아메리카	650개소
남아메리카	500개소	노르웨이+스웨덴+핀란드	500개소
스페인+포르투칼	500개소	프랑스+이탈리아	350개소
영국	250개소	네덜란드+벨기에	100개소

① 프랑스 파리 A86

파리의 제2외곽순환도로인 A86의 미연결 구간을 연결하는 2층 지하도로 터널로 연장은 10km이며, 건설비는 24억 유로이다. A86은 승용자 전용의 2층 도시고속도로로서 지하 20~90m 깊이에 건설되어 각 층은 2차로 일방통행으로 운영되고 있다.

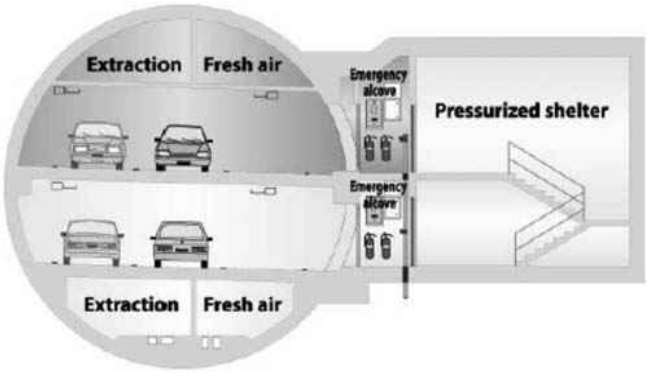


그림 2.16.6 프랑스 파리의 도시고속도로 구조

② 영국-프랑스 유로터널

유럽 통합의 차원에서 범유럽 교통네트워크 형성을 위해 추진된 유로터널은 영국의 포크스턴(Folkstone)과 프랑스의 칼레(Calais)를 연결하는 터널로 총연장은 50.45km이고, 이 중 38km는 도버해협을 통과하는 해저터널이다. 터널은 총 3개로 이루어져 있고, 양편의 2개 터널은 철도 터널이며, 중앙 1개의 터널은 서비스 터널로 주로 자동차 등의 화물 운송을 담당한다.

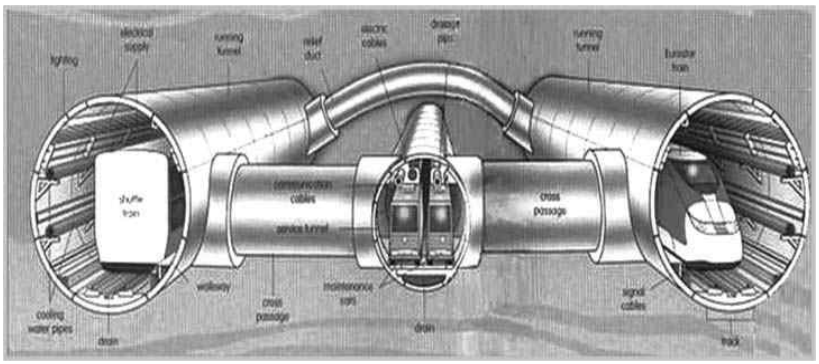


그림 2.16.7 유로터널의 구조

③ 엘베(ELBE) 터널

New 엘베터널 4th Tube는 총연장 4.4km로 독일 엘베강을 횡단하여 함부르크 남북을 연결하는 지하도로이다.

④ 이스탄불 해협 도로터널

유럽 대륙과 아시아 대륙을 해저터널로 연결하는 역사적인 사업으로 총연장은 14.6km, 예산 10억 달러의 대규모 공사로서, 세그먼트 터널의 단면형식은 단선 복층터널(Single Double Deck Tunnel)로 설계되었다

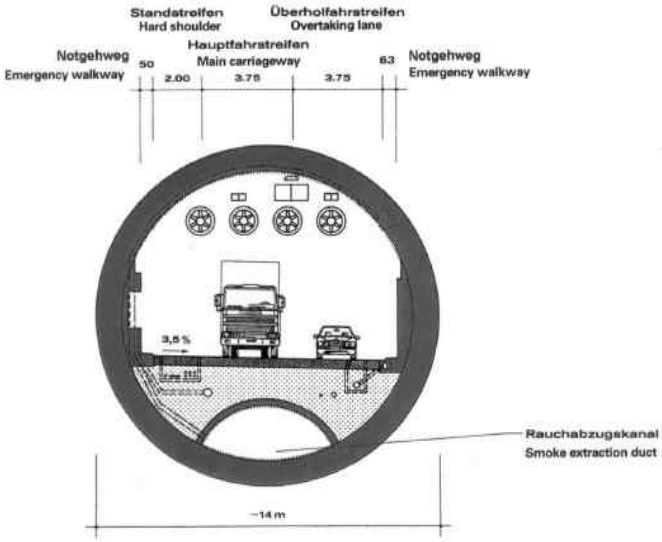


그림 2.16.8 엘베터널 4th Tube 단면도

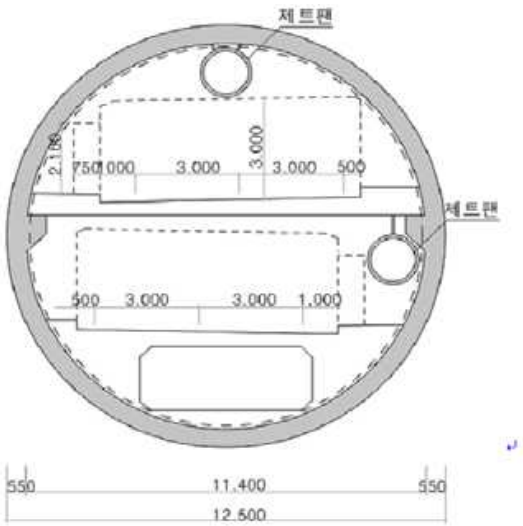


그림 2.16.9 이스탄블 해협 단선복층터널 단면

⑤ 일본의 시공현황

1999년부터 2006년까지 일본의 쉴드터널 공사 건수는 약 1,086건인데, 이 중 하수도 공사가 절반이 넘는 610건으로서 일본의 쉴드TBM 기계화 시공을 견인했다고 할 수 있다.

일본의 쉴드터널은 철도나 도로 분야보다 상·하수도 공사 등 물과 관련된 공사가 주로 이루어 졌고, 대표적인 교통터널로 동경만 아쿠아라인 해저터널이 있다. 1997년에 개통된 동경만 아쿠아라인 해저터널은 가나가와현의 가와사키에서 동경만을 관통

하여 지바현의 기사라즈까지 연결되는 4차선 도로로 총연장은 15.1km이며, 가와사키 쪽의 9.5km는 해저터널(폭 13.9m)로 건설하였다.

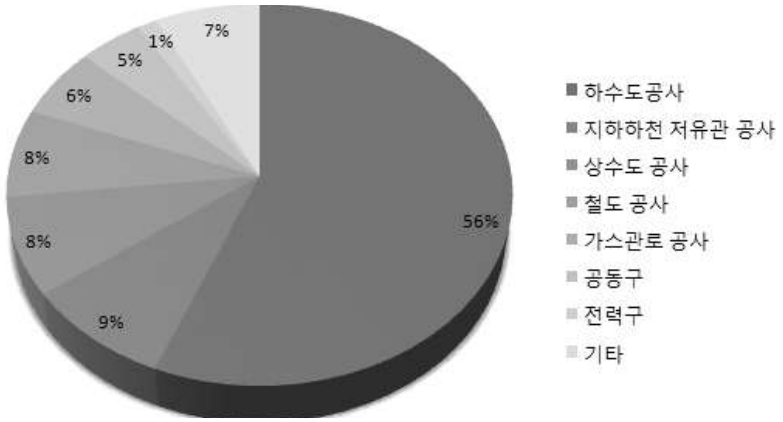


그림 2.16.10 일본의 쉴드터널 현황

(2) 중국시장

중국은 급속한 경제발전과 도시화에 따라 세계에서 가장 활발히 터널 및 지하공간 프로젝트를 수행하고 있으며, 2007년 이후로 2,500km 이상의 철도터널 시공을 계획하였으며 이중 1/3이상인 760km 구간이 초장대 터널로 계획되었다. 또한 10,000km의 신규 도로구간의 터널 건설에 약 100대 이상의 TBM이 발주될 것으로 전망되었다.[3)]

2001년부터 2006년까지 중국에 도입된 TBM은 138대이며 시공연장은 600km 달하는 것으로 보고되고 있으며, 이는 연간 23대의 TBM과 100km에 해당되는 쉴드터널 공사가 진행되는 것으로 확인되었다.[3)]

건설투자 규모는 2006년 건설투자액 5,627억불(Global Insight)로 세계 3위시장이며 2006년 고정자산투자액 1조 4,084억불(설비투자포함)중 SOC투자는 8,193억불 부동산개발은 1,940억불로 발표되었으며, 중국내 통계를 이용하여 건설투자와 근접한 수치를 분석하면 고정자산 투자 중 직접 건설투자와 밀접한 건설안장공사(建築安裝工程)투자는 2006년 6조 6,776억위앤(8,550억불)으로 통계되어 GDP의 25.1% 차지하고 있다. 또한, 4종 4횡의 여객전용철도 건설계획으로 종방향으로는 7,360km, 횡방향으로는 4,950km가 표 2.17.4와 같이 운행 및 건설 계획되어 있다. 특히, 2030년까지 중국 총 도로망은 40만 1,000km이며 이는 국가 고속도로망이 11만 8,000km, 일반도로망 26만 5,000km, 기타도로망 1만 8,000km로 계획되어 있다.

표 2.16.21 중국 4종 4횡 계획

계획	과업명	연장(km)	비고
4종	베이징(북경) - 상하이(상해)	약 1,300	개통 운행 중
	베이징(북경) - 광조우(광주) - 선전(심천)	약 2,230	2,020년 완공 목표
	베이징(북경) - 선양(심양) - 하얼빈(할빈) 하얼빈(할빈) -따렌(대련)	약 1,309 약 921	2,020년 완공 목표 개통 운행 중
	항저우(항주) - 닝보 - 푸조우(북주) - 선전(심천)	약 1,600	2,020년 완공 목표
4횡	쉬조우(서주) - 란조우(정주) - 쩡조우	약 1,400	
	항조우(항주) - 난창(남창) - 창사(장사)	약 880	
	칭따오(청도) - 시쟈장(석가장) - 타이웬(태원)	약 770	
	난징(남경) - 우한(무한) - 충칭(중경) - 청두(청도)	약 1,900	

(3) 인도시장

인도는 전반적으로 열악한 인프라 상황이 인도 경제성장의 발목을 잡고 있으며, 현재와 같이 빠른 속도로 인구가 증가하는 가운데 높은 경제성장률을 유지하기 위해서는 인프라 확충이 절실히 필요한 상황이다.

인도의 외국인 직접투자 유치금액은 중국에 비해 상당히 낮은데, 외국인투자자들은 인도에서의 사업 활동 저해요소로 미정비 도로·잦은 정전·혼잡한 항만과 공항 등을 꼽고 있어, 외국인투자유치를 위해서도 인프라 개선이 시급하다.

인프라를 포함한 인도 건설시장은 과거 몇 년간 괄목할만한 성장세를 보여 왔으나, 2008년 하반기 글로벌금융위기로 인한 극심한 유동성 부족과 경기침체로 많은 대형 프로젝트가 지연됨으로써 성장률이 둔화되어 이에 인도정부는 경기부양책을 통해 인프라 프로젝트에 추가예산을 배정하고, 2009~2010년 예산안에서도 인프라에 더 많은 예산을 할당하여 인프라 건설을 촉진하고 있다.

BMI(Business Monitor International)는 인도 인프라 보고서를 통해, 인도 건설시장의 '09년 실질성장률은 전년대비 2.6% 성장에 그치는 매우 낮은수준에 머무는 반면, '10년은 시장이 다시 활기를 띠며 9.4%의 실질성장률을 보일 것으로 전망된다.

2009~2010년 예산안에서 가장 큰 비중이 인프라 부분으로 인도정부는 예산의 50~60%를 인프라분야에 할당하고 있지만, GDP에서 인프라 부문 예산이 차지하는 비

중은 아직 3~4%수준에 불과하여, 인프라 개선 촉진을 위해 인프라관련 예산규모를 2014년까지 GDP의 9%이상으로 끌어올리겠다는 목표를 설정하여 진행하고 있다.

인도는 고속도로·연방국도·주국도·주요 지방도로·시골도로를 모두 포함한 인도 도로의 총 연장길이는 332만㎞로 세계2위 규모이나, 총 연장도로의 2%에 불과한 연방국도가 총 교통량의 40%를 담당하며, 이 연방국도의 30%는 1차선 구간이고, 53%가 2차선, 나머지 17%만이 4·6·8차선 구간으로 구성되어 있다.

도로는 인도 화물수송의 65% 이상, 승객수송의 85% 이상을 담당하고 있는데, 자동차가 연간 약 7~10%의 속도로 증가하는데 비해, 도로 확충은 이에 미치지 못 해 인도 주요도시들의 교통체증은 날로 심해지고 있다.

표 2.16.22 인도정부의 인프라부문 투입 예산액 및 비중

연도	인프라부문 예산				전체 예산	전체예산 중 인프라 비중(%)	GDP	GDP 대비 인프라 예산비중 (%)
	에너지	수송	통신	소계				
2000/01	29,793	20,992	19,455	70,240	117,334	59.9	2,102,314	3,3
2001/02	33,788	22,570	20,289	76,647	130,181	58.9	2,278,952	3,4
2002/03	36,306	32,041	19,540	87,887	144,038	61.0	2,454,561	3,6
2003/04	43,379	28,784	14,903	87,066	147,893	58.9	2,754,620	3,2
2004/05	46,571	29,676	11,740	87,987	156,428	56.2	3,149,407	2.8
2005/06	46,788	30,696	11,730	89,214	163,720	54.5	3,586,743	2.5
2006/07	69,593	48,614	19,884	138,091	254,041	54.4	4,129,173	3.3
2007/08	79,158	71,589	25,812	176,559	319,992	55.2	4,723,400	3.7
2008/09	93,815	84,177	21,937	199,929	375,485	53.2	5,321,753	3.8

표 2.16.23 인도의 도로망

도로구분	길이(km)	비중
고속도로(Expressways)	200	-
연방도로(National Highways)	70,548	2%
주 국도(State Highways)	131,899	4%
주요지방도로(Major District Roads)	467,763	14%
시골도로(Rural and Other Roads)	2,650,000	80%
합 계	3,320,410	100%

표 2.16.24 현재 진행 중인 철도 인프라 프로젝트[4)]

구분	진행건수	길이(km)	비용(천만 Rp) (승인비용기준)
신규노선건설	109	11,985	50,405
괘간변경	51	7,380	17,309
복선화	126	4,822	11,748
전력화	21	3,201	2,766
화물전용철도 프로젝트	2	3,289	50,000
MTP	7	-	10,912
합계	316	-	143,140

2009년 9월 발표된 도로운송국도부(Ministry of Road, Transport and Highways)의 용역보고서에 따르면, 13차 5개년 경제개발계획 말기인 2022년까지 3단계에 걸쳐 18,637km에 달하는 고속도로망을 BOT와 Annuity 방식을 통해 건설하는 방안이 제시되었다.

인도철도는 총 연장길이 64,099㎞에 달하여 길이 면에서 세계 4위, 아시아에서 2위이며, 단일로 경영되는 철도 중 세계 3위이나 인도철도는 높은 화물운임으로 승객운임을 보전하고 있고, 시설 노후화로 인한 잦은 지연과 충돌·탈선·화재 등 빈번한 철도사고 등의 문제를 안고 있어, 운송수요가 도로로 지속 이동하고 있는 현실이다.

현재 진행 중인 철도 인프라 프로젝트는 316개로 전체비용 143,140Rp로 진행되고 있으며 세부적인 계획은 표와 같다.

다. 개발기술 성과 확보 및 가치 평가

(1) 기술 및 연구동향

최근의 쉴드터널 기술의 특징은 대심도화, 대단면화, 고속화, 장대화 4가지가대표적이라 할 수 있다. 현재 각 나라별로 도로는 포화상태를 이루어 도로의 효율을 극대화하기 위해 대심도화로 지하 60m~90m에 지하도로를 건설하는 추세이다. 국외의 경우 프랑스 A86 지하도로, 일본 동경만 아쿠아라인 해저터널, 영국-프랑스 유로터널 등이 있으며, 국내의 경우도 U-SMARTWAY와 GTX 등 지하 교통터널을 건설계획 중에 있다. 또한, 최근의 쉴드터널 시공은 경제성과 시공성을 고려하여 이스탄불 해협 도로터널, 일본의 아쿠아라인과 같이 점차 대단면화 되어 시공되고 있다. 스위스의 Gotthard 터널, Loetschberg 터널, 영국-프랑스 유로터널, 이스탄불해협 도로터널과 같이 산악이나 해저를 통한 장대화 쉴드터널도 완공되었거나 계획, 시공 중에있다. 쉴드터널공법은 소음·진동 및 분진이 매우 적고, 지하수위 교란을 최소화 할 수 있는 친환경적인 터널공사로 환경측면에서도 유리하다.

국내 대부분의 터널에 적용되는 NATM공법에 비해 쉴드터널의 연구는 2000년 이전에는 거의 이루어지지 않아 향후 국내 쉴드터널 관련하여 보다 많은 연구 개발 활동이 요구되고 있다. 또한 현재 관련연구 또한 세그먼트 터널 시공 시 문제점을 파악하는 수준에 머무르고 있다

현재 세그먼트 관련 특허는 대부분 유럽, 일본, 미국에서 오래전부터 연구 개발되었으나, 최근에는 특허활동이 감소하고 있는 추세에 있다. 특히, 쉴드터널 굴착공법의 원천기술에 대한 특허권은 획득하기 어려울 것으로 판단된다. 그러나 국내의 쉴드터널 연구는 굴착에 관련된 연구 외 세그먼트 체결이나 쉴드터널 시공 시 문제점의 해결에 관하여 꾸준히 진행되고 있다.

표 2.16.25 국내 쉴드터널 연구논문 현황

발행년도	논문명	발행처
1999	쉴드터널 라이닝 사다리꼴 세그먼트의 연결방법 개선에 관한 연구	한국지반공학회
2000	쉴드터널 세그먼트 연결부 부속재에 대한 안정성 평가	대한토목학회
2001	대도심 연직구에서 쉴드터널 굴진을 위한 특수벽체 및 차수공법	동아대학교
2003	연약 점토층에서 쉴드터널 굴진시 차단벽의 지반침하 제어효과에 대한 연구	대한토목학회
2003	사건수목분석기법을 이용한 쉴드터널 굴착시의 위험도 분석 사례	대한토목학회
2003	쉴드터널 콘크리트 세그먼트의 내화특성 연구	대한토목학회
2004	Shield-TBM 공법 적용성에 관한 연구	수원대학교
2004	쉴드터널에서 굴착속도가 지표침하에 미치는 영향에 관한 연구	중앙대학교
2005	대구경 Shield TBM의 시공사례 연구 : 서울지하철909공구를 중심으로	대한토목학회
2005	서울지하철 7호선연장 703공구 대구경 쉴드터널 설계	한국철도학회
2005	폴리프로필렌 섬유 혼입 쉴드터널 철근 콘크리트 라이닝의 내화성능 평가	대한토목학회
2006	구조해석모델을 이용한 쉴드터널 라이닝의 이음부 특성에 관한 연구	대한토목학회
2007	하저터널 쉴드 TBM 설계를 위한 사건수 분석 기법 기반 확률분석 위험도 분석 사례 연구	대한토목학회
2009	E.P.B(Earth Pressure Balance) Shield TBM 공사의 공기지연 사례연구	대한토목학회
2009	TBM에 의한 도심지 지하도로의 건설 사례	한국지반공학회
2009	슬러리 쉴드TBM의 막장안정성에 대한 연구	상명대학교
2010	도심지 복합지반 EPB 쉴드TBM 터널 설계사례	한국철도학회
2010	지하철공사에서 풍화대용 쉴드 TBM의 경암 구간 굴진 시 대체공법에 대한 사례연구	대한토목학회

표 2.16.26 국내외 쉴드터널 관련 특허

특허명	출원인	국적	보유자	출원 및 등록번호
포스트텐션 터널 공법	삼보굴착(주)	한국	이원희	국내특허등록 (제101057003호)
잭킹유닛 및 이를 이용한 포스트텐셔닝 보강공법	채흥석	한국	채흥석	국내특허등록 (제10-0750762호)
방수시트를 이용한 프리캐스트 콘크리트 세그먼트 블록의 이음부 방수 구조	주식회사 케이티	한국	김정윤 박용면	국내특허등록 (제10-0316853호)
배수로를 이용한 프리캐스트 콘크리트 세그먼트 블록의 이음부 방수 구조	주식회사 케이티	한국	이혁 한자경	국내특허등록 (제10-0316852호)
집수 세그먼트 및 집수터널 구축방법	가부시키가이샤 마츠무라구미	일본	오이와 다다오	국내특허출원 (10-2008-0044392)
저판 세그먼트 및 이를 이용한 쉴드공법	강릉건설 주식회사	한국	정성남 정병철	국내특허출원(10-2009-0097543)
지하구조물의 루프 구조물 및 그 시공방법	주식회사동일 기술공사	한국	김선권	국내특허등록 (제10-1013627호)
배수 구조를 갖는 세그먼트에 의한 원형 지보공 구조체 및 이를 이용한 실드터널을 시공하는 방법	한국건설기술 연구원	한국	마상준 김동민	국내특허등록 (제10-0936471호)
프리캐스트 구조물	이소라	한국	박정규	국내특허등록 (제101059457호)
터널용 라이닝 세그먼트	보림기계공업 주식회사	한국	조용교	국내특허등록 (제10-0964205호)
터널 관벽용 세그먼트	주식회사 코아이엔씨	한국	구자갑	국내특허등록 (제10-0914044호)

표 2.16.26 국내외 쉴드터널 관련 특허(계속)

특허명	출원인	국적	보유자	출원 및 등록번호
강관과 세그먼트를 이용한 지하구조물 축조방법	유필수	한국	유필수	국내특허등록 (제10-0904857호)
프론트 잭킹공법을 이용한 터널 구축방법	주식회사 특수건설	한국	김종온	국내특허등록 (제10-0800028호)
프론트 잭킹공법을 이용한 터널 및 이의 구축방법	유근무	한국	유근무	국내특허등록 (제10-0959413호)
합성세그먼트	구보다 코포레이션	일본	사토히로시	국내특허등록 (제10-0565813호)
조립식 프리캐스트 콘크리트 암거	아이에스동서 주식회사	한국	박영식	국내특허등록 (제10-1027078호)

(2) 향후 사업추진 계획

(가) 국내 사업추진 계획

국내 건설경기 악화와 발주 물량 급감에 따른 공공 건설시장의 위축에 대응하기 위해서는 새로운 기술의 도입 또는 특정기술의 독점적인 전용실시권을 통한 신규시장 개척이 절실히 필요한 시기이다.

쉴드터널의 세그먼트 관련기술은 쉴드공법의 세그먼트에 대한 경제성 문제를 일부 해소하는 기술로 향후 예정된 쉴드공법을 적용한 사업에 본 개발기술의 직접적인 적용을 통한 신규시장 진입을 고려하는 것을 1차적인 사업모델로 추진하거나, 본 기술 적용을 담보로 수주영업 측면에서 타사업과 연계하거나, 수주교환을 할 수 있는 레버리지로도 활용하는 전략도 추진할 수 있을 것으로 기대된다.

(나) 국외 사업추진 계획

중국 시장 환경의 변화를 감안할 때, 우리 기업의 재진출 준비를 단기적으로 서두를 필요가 있으며, 단계별 및 전문 부문별 체계적인 전략 수립이 시급하다.

중국 건설시장의 투자 규모는 증가하고 있으나, 사회체제와 시장의 불확실성이 여전히 남아 있고 이미 진출한 선진 기업들의 선점 효과가 크게 작용하고 있으므로 체계적인 진출 전략을 수립하여 사업추진을 계획하였다.

- 제조업 부문의 진출 사례로부터 성공 노하우 습득 필요
- 소규모 pilot 프로젝트를 수행함으로써 경험 축적.

· 현지화 전략을 보다 적극적으로 추진.
· 선진업체 및 현지 업체와의 전략적 제휴 강화.
· 중장기적으로 영향력 있는 현지 고급 인력과의 유대관계 강화
· 현지업체에 대한 기술 이전 확대하여 시장 확보 여건 확대

인도정부가 요구하는 인도 국내수주실적 또는 해외수주실적이 많기 때문에 대기업을 제외하고는 인프라 프로젝트 수주가 어려우므로, 단독 입찰보다는 컨소시엄 입찰이 바람직 한 것으로 검토되며, 과거 인도가 구소련과 가깝게 지낸 관계로, 동구기업들이 인도 내 수주실적을 보유하고 있는 경우가 많으므로, 인도 국내실적이 요구될 경우, 현재 자금문제로 해외수주 활동을 활발히 못하는 기업들과 조인트벤처 설립 또는 전략적 제휴를 통한 공동입찰에 참여하는 방법도 가능하다.

인도정부는 아직까지 국내외 공기업과 정부에 대해 높은 신뢰를 하고 있어, 민간기업과 공기업이 합작 수주를 할 경우 유리한 경우가 있으며, 특히 발전이나 송배전 분야는 우리 민간기업의 수주 실적이 공기업에 비해 낮은 경우가 많아 공동 입찰로 진행하는 방법도 가능하다.

이러한 국외시장 진출을 위하여 정부의 지원 대책이 필요할 것으로 조사되며, 정부지원 대책으로는 중국 건설시장의 환경변화를 체계적이고 효율적으로 파악하기 위한 종합적인 정보망 구축, 소수 인력에 의해 운영되고 있는 해외정보센터 기능 확충, 대외협력기금(EDCF)을 확충하고 보다 효율적인 운영이 필요하다.

또한, 중장기적으로 서부 지역 진출을 확대하기 위해, 주요 지점에 총 영사관 또는 공공 연락 사무소를 개설하여 상설 건설 외교 창구와 시장 조사 분석 기능을 담당하도록 할 필요하며, 외국 선진기업들의 진출도 점증할 것으로 전망되므로 EDCF 자금을 활용해 우선 특정 사업에 대한 진출 활로를 열고 점진적으로 경쟁력을 제고해 나아가는 방안이 적극적으로 검토되어야 할 것이다.

(3) 상용적 비즈니스 모델

쉴드터널 공사는 기존에 수행경험이 있는 업체들 위주로 시장을 선점하고 있는 실정으로 본 개발기술을 서울지하철 9호선, 한강하저터널 등의 공사를 수행하는 삼성물산, 대우건설, 두산건설, 코오롱건설 등을 중심으로 적용을 추진하고 있다.

쉴드터널 공사는 국내기준으로 연간 평균 1건 이상의 발주가 이뤄지고 있는데, 향후 신분당선 지하철, 소사원시, GTX 등을 중심으로 도심지 지하철 및 철도공사에 광범위하게 적용될 것으로 예상된다.

현재 개발 기술의 연구성과에 대해 중국 Shenzhen metro(심천 메트로 : 선전시 지하철 발주기관)와 Huadong Engineering Corporation Limited(상해 소재 설계회사)에서 관심을 가지고 있어, 2015년 2월 연구책임자 등이 방문하여 설명회를 열었다. 또한, 중국 시장에서 개발기술의 현장 적용을 위해 상해시 “화동설계원”과 국제공동연구를 추진 중이며, 상호기관의 주요 연구내용을 교환하였고 2016년 추진을 계획 중이다.

국제공동연구를 통해서 시험적용 환경이 좋은 중국에서 1차 시험적용을 추진하고 그 결과물을 중국시장과 국내 시장 적용을 추진할 계획이다.

중국 사업 추진과는 별도로 국내에서는 공동연구기관인 ㈜케이씨씨건설과 본 기술개발 성과에 대한 기술실시계약을 진행 중이다.

소결론

(1) 유럽과 일본은 철도 및 도로터널에 세그먼트 터널의 도입이 국내의 경우보다 빠르고 많은 시공실적과 시공기술을 갖추고 있어, 세계적으로 우수한 기술력을 확보하고 있으며, 유럽, 일본 등 선진국은 국내보다 세그먼트 터널 도입이 빠르고 수요가 많아 생산업체가 체계화 되었으며 생산역량이 우수한 것으로 조사되었다. 또한, 현재 공사 진행 중인 싱가폴 현장의 세그먼트 공급업체 조사결과 2002년에 설립되어 많은 실적을 보유하며 업체 생산제품 및 규모는 국내업체보다는 적은 것으로 조사되었다.

(2) 국내 터널 시장이 과거 도시간 연결도로 및 철도건설에서 수도권 및 대도시내의 고속화, 순환, 관통도로 및 철도체계 등으로 그 수요처가 바뀌고 있으며, 경제발전에 의한 국민소득 향상 등으로 도심지 교통체계의 건설시 진동, 소음, 침하 등에 대한 국민 기대치가 선진국 수준으로 높아가고 있고, 2014년 여러 가지 국가 재난에 의하여 국민들의 안전의식도가 높아지고 있어 터널공사시 발파 굴착에서 기계굴착으로 빠르게 전환되고 있다.

(2) 중국은 급속한 경제발전과 도시화에 따라 세계에서 가장 활발히 터널 및 지하공간 프로젝트를 수행하고 있으며, 2007년 이후로 2,500km 이상의 철도터널 시공을 계획하였으며 이중 1/3이상인 760km 구간이 초장대 터널로 계획되었다. 또한 10,000km의 신규 도로구간의 터널 건설에 약 100대 이상의 TBM이 발주될 것으로 전망되었다

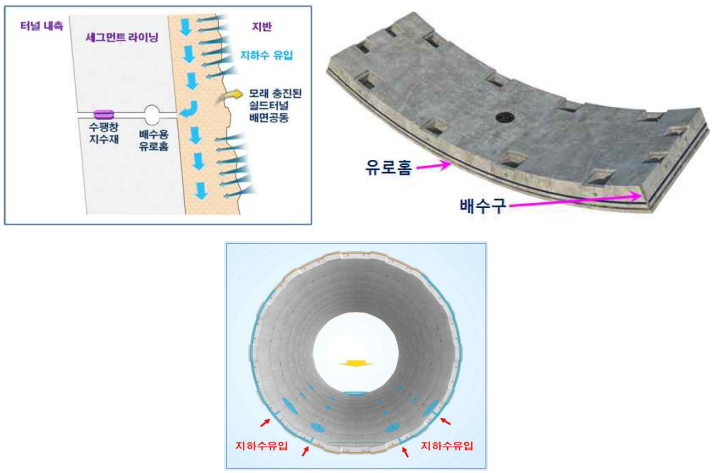
(3) 쉴드터널의 세그먼트 관련기술은 쉴드공법의 세그먼트에 대한 경제성 문제를 일부 해소하는 기술로 향후 예정된 쉴드공법을 적용한 사업에 본 개발기술의 직접적인 적용을 통한 신규시장 진입을 고려하는 것을 1차적인 사업모델로 추진하거나, 본 기술 적용을 담보로 수주영업 측면에서 타사업과 연계하거나, 수주교환을 할 수 있는 레버리지로도 활용하는 전략도 추진할 수 있을 것으로 기대된다.

제 3 장 최종 연구성과 및 적용실적

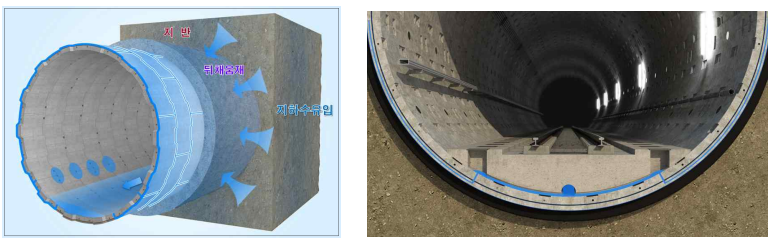
제 1 절 핵심요소기술

(1) 배수 유로홈 적용 배수형 쉴드터널 공법

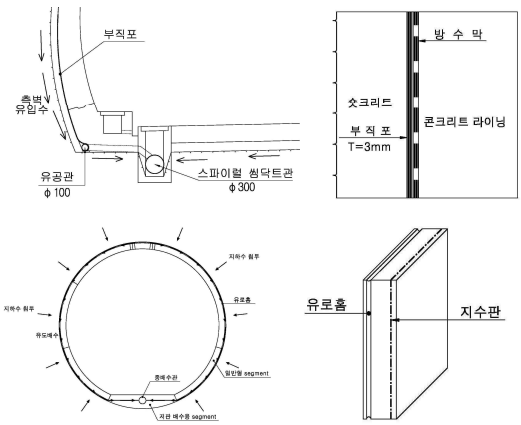
관련 그림 / 사진



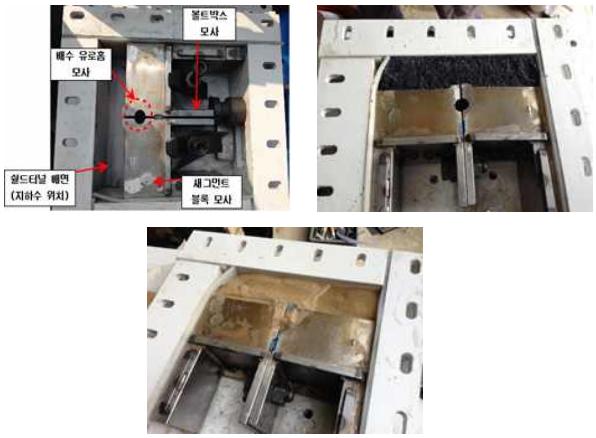
[그림 1] 배수 유로홈 구조 및 세그먼트 배치



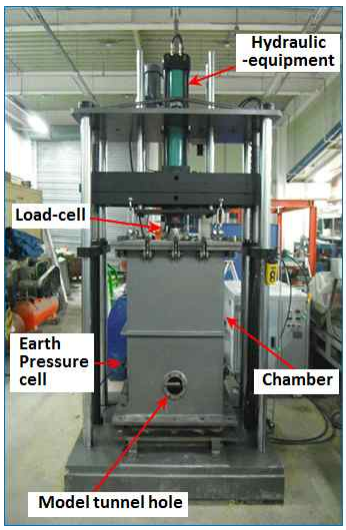
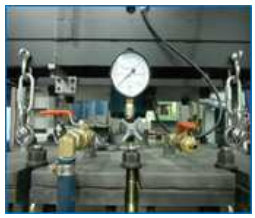
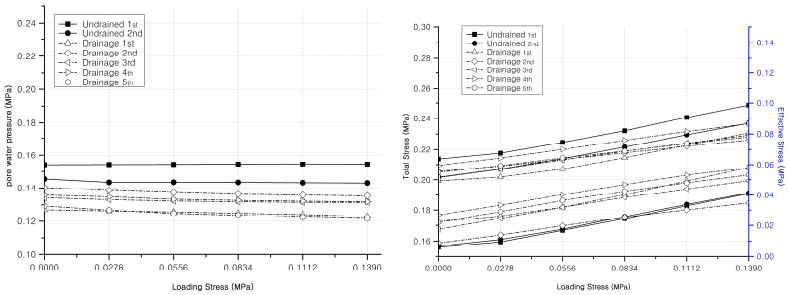
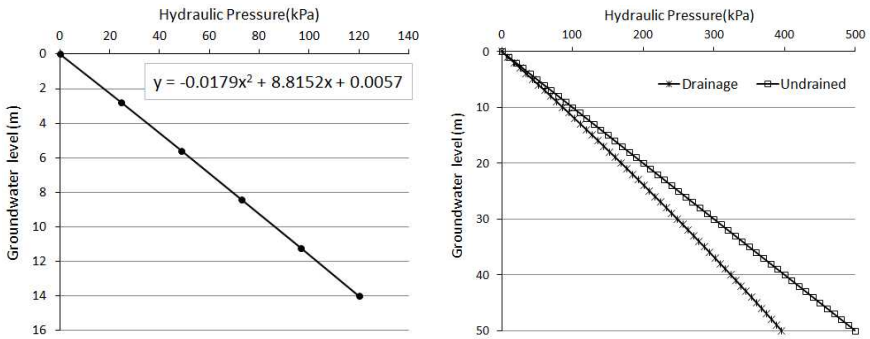
[그림 2] 배수 유로홈을 통한 지하수 유입 및 배수 과정



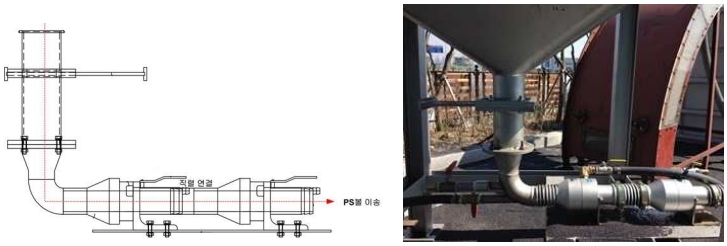
[그림 3] NATM 터널 배수용량과 동등한 배수 유로홈 직경 검토

관련 그림 / 사진	 [그림 4] 뒤채움재에 의한 배수 유로홈 폐색 현상 실험  [그림 5] 실대형 세그먼트에서의 배수 유로홈 성능 평가
정의	• 기존 비배수 쉴드터널의 세그먼트면에 배수 유로홈을 형성하여 쉴드 세그먼트 접합면으로 침투하는 지하수를 자연배수 시키는 배수개념 쉴드터널의 적용 기술
목적	• 쉴드터널은 일률적인 비배수 설계임에도 불구하고 고질적인 지하수 유입 문제 발생 • 지하수 유입 방지를 위한 뒤채움 시공비 상승, 장기적인 누수 관리 불가능, 유입된 지하수 처리 비용 발생, 터널 내부 시설 손상 가능성 증가 • 배수 유로홈의 최적 직경, 세그먼트내 최적 배치 결정이 필요하여, 실제적으로 배수 유로홈을 통해 지하수 흐름이 발생하는지에 대한 평가가 요구됨.

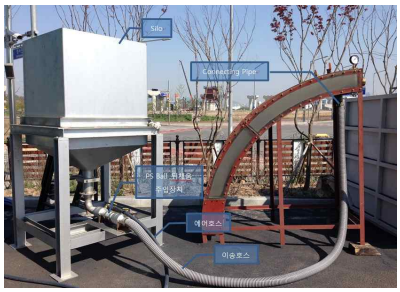
(2) 배수/비배수 조건 쉴드터널 모형실험

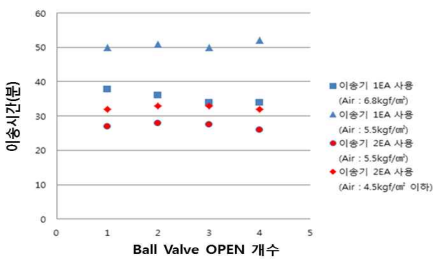
관련 그림 / 사진	   [그림 1] 배수/비배수 조건 쉴드터널 모형실험장치 구축  [그림 2] 배수/비배수 조건에서의 수압 및 전응력 결과  [그림 3] 배수 조건에서 지하수위에 따른 수압 저감 현상(제안식)
정의	• 배수 및 비배수 조건에서 쉴드터널 라이닝에 작용하는 압력을 측정 및 분석할 수 있는 모형실험장치
목적	• 배수형 쉴드터널에서 지하수 배수로 인해 쉴드 세그먼트에 작용하는 수압의 저감 현상을 실험적으로 검증 • 실험결과를 바탕으로 지하수 저감율을 도출하여 실제 세그먼트 단면 축소 범위를 제안 • 지하수위에 따른 수압 저감 현상에 대한 관계식을 제안하고, 실제 배수형 쉴드터널 설계시 세그먼트 단면 축소율을 반영

(3) 배수형 쉴드터널 배면 뒤채움 주입시스템

<table>
<tr><td>관련 그림
/ 사진</td><td>


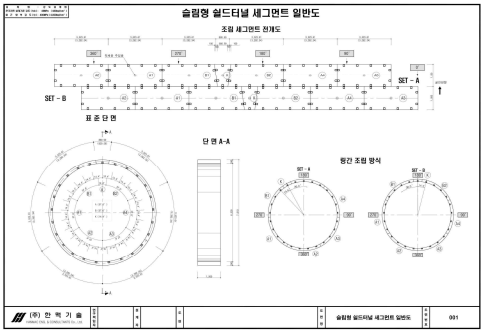
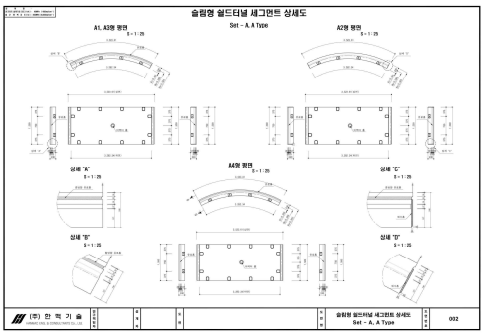
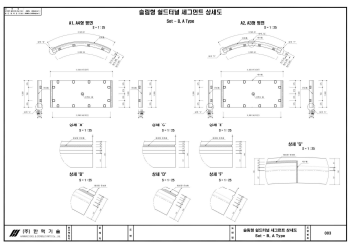
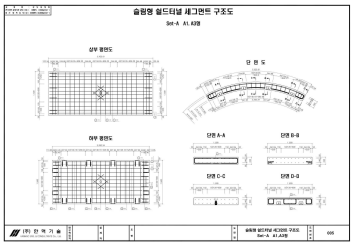
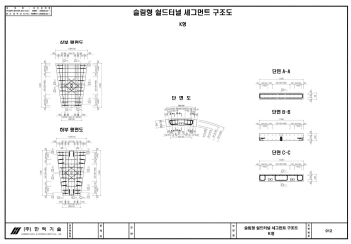
[그림 1] PS 볼 뒤채움재 주입장치 본체

[그림 2] PS 볼 저장용 사일로


[그림 3] PS 볼 뒤채움재
주입시스템


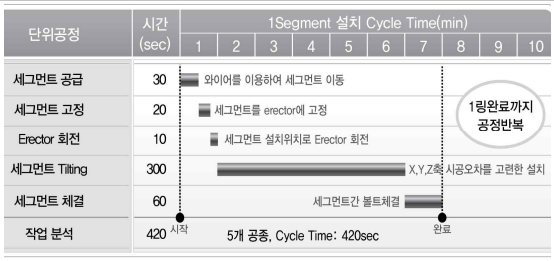
[그림 4] PS 볼 뒤채움 최적효율
평가</td></tr>
<tr><td>정의</td><td>• 배수형 쉴드터널에서 세그먼트 배면에 기존의 불투수층의 그라우트재가 아닌, 일정 직경을 가진 투수층의 PS 볼을 뒤채움할 수 있는 장치 및 시스템</td></tr>
<tr><td>목적</td><td>• 지하수가 통과할 수 있는 투수층이면서 세그먼트 시공 오차 이상의 직경을 가진 최적 뒤채움 재료 선정
• 유동화된 재료가 아닌 건조된 재료를 쉴드 세그먼트 배면에 효과적으로 주입할 수 있는 뒤채움 주입 장치 개발
• 쉴드터널 배면 공간, 쉴드TBM 굴진속도, 세그먼트 조립 속도, 후방 뒤채움 시공공정 등을 고려하여 PS 볼 뒤채움 주입시공의 최적효율 도출</td></tr>
</table>

(4) 배수형 쉴드터널 표준단면 설계

관련 그림 / 사진	     [그림 1] 배수형 쉴드터널 표준단면
정의	• 현장 적용시 실시설계 반영이 가능한 배수형 쉴드터널 및 슬림형 세그먼트의 표준단면
목적	• 배수 유로홈 구조 및 위치, 슬림형 세그먼트 단면 축소 적용, 세그먼트 체결방식의 변경, 축소 단면 세그먼트의 배근도 등 배수형 쉴드터널 표준단면 제시

(5) 슬림형 쉴드터널 경제성 및 성능 평가

관련 그림 / 사진

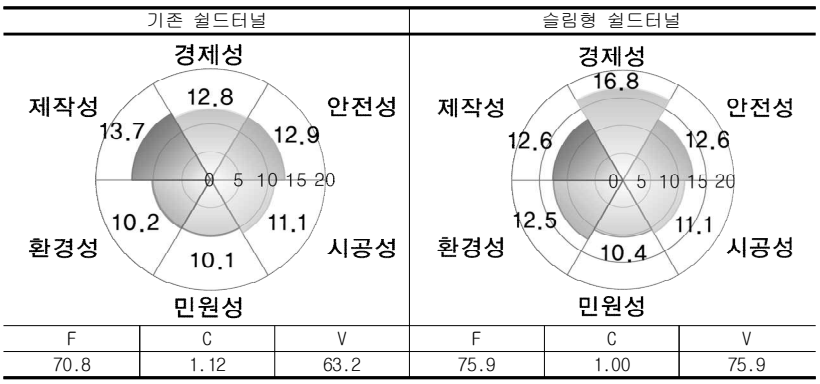


[그림 1] 슬림형 쉴드터널 소요공기 분석

[표 1] 터널연장에 따른 경제성 평가

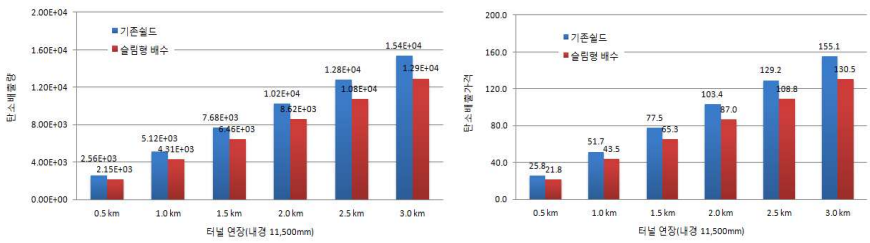
(단위 : 백만원)

공사 연장	도로터널(내경 Φ11,500)			철도터널(내경 Φ7,200)		
	기존	슬림형	절감률	기존	슬림형	절감률
2 k m	42,186	38,085	9.72%	30,083	26,963	10.37%
4 k m	78,771	70,568	10.41%	55,374	49,134	11.27%
6 k m	115,434	103,130	10.66%	80,669	71,309	11.60%
8 k m	152,183	135,777	10.78%	105,969	93,488	11.78%
10km	189,028	168,521	10.85%	131,274	115,674	11.88%
12km	225,979	201,371	10.89%	156,585	137,864	11.96%
14km	263,050	234,340	10.91%	181,900	160,059	12.01%



기존 쉴드터널			슬림형 쉴드터널		
F	C	V	F	C	V
70.8	1.12	63.2	75.9	1.00	75.9

[그림 2] 슬림형 쉴드터널 VE 평가



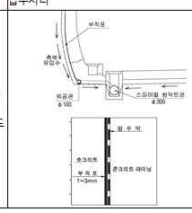
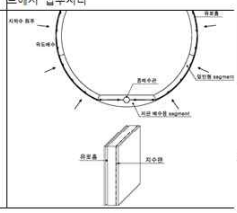
[그림 3] 쉴드터널 공법의 CO_2 배출량 및 탄소배출가격 비교

정의	• 기존 쉴드터널과 비교되는 슬림형 쉴드터널의 경제적 효과 및 성능 평가 결과
목적	• 개발 기술의 경제적 우수성 및 쉴드터널 공법으로서의 성능 우수성 평가

(6) 배수형 쉴드터널 설계·시공·유지관리 매뉴얼(안)

관련 그림 / 사진

표 1.1 유도배수 원리 비교

구분	NATM 터널	배수형 쉴드터널
원리	콘크리트라이닝 배면의 부직포 전면을 통해 유입되는 지하수를 종방향 유공관에서 집수처리	세그먼트에 설치된 배수 유로홈을 통해 침투된 지하수를 종배수관이 설치된 저부 세그먼트에서 집수처리
개요 및 상세도		

나. 내부 배수구

배수 유로홈은 아래의 그림에서와 같이 세그먼트 내부에 형성되어 있기 때문에 배수 유로홈을 통하여 배수된 지하수의 배수를 위하여 터널 하부에 위치한 세그먼트에는 별도의 내부 배수구를 설계하여야한다. 내부 배수구는 배수 유로홈에서 집수되는 지하수의 유입량을 고려하여 개수 및 규격을 설계해야한다.



그림 1.1 지하수 배출을 위한 내부 배수구

2.2 배수형 쉴드터널 시공 방법

(1) 배수형 쉴드터널의 세그먼트는 일반 쉴드터널의 세그먼트와 같은 방식으로 시공이 수행되어진다.
(2) 터널 하부에 내부 배수구가 위치하기 때문에 세그먼트는 크게 2개의 Set로 나누어지므로 시공 시 계획된 순서 및 구조에 따라 세그먼트 조립이 수행되어져야 한다.
(3) 배수 유로홈 및 내부 배수구의 손상에 주의하여 시공하여야한다.

※해설

배수형 쉴드터널의 세그먼트는 아래의 그림과 같은 2개 Set의 순서에 따라 반복되어 조립이 되며 시공이 수행된다. 배수 유로홈을 통하여 유도된 지하수의 배출을 위한 내부 배수구는 설계된 개수만큼 터널의 하단부에 위치하게 된다. 세그먼트는 격자로 조립이 되어지므로 배수구는 홀수열의 세그먼트에서는 모서리부에 1/4 원으로 형성되어 있지만, 조립되어지는 다음열의 세그먼트에서는 중앙부에 1/2원으로 조립이 수행되어 진다. 설계 시 작성되어진 세그먼트의 조립 순서도대로 세그먼트의 시공이 수행되어야 한다.

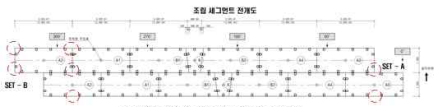


그림 2.5 평면도의 내부 배수구 위치

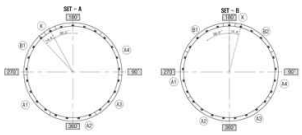


그림 2.5 Set별 세그먼트 위치

2.1.2 세그먼트제작

(1) 배수형 쉴드터널 세그먼트는 충분한 강도를 발휘할 수 있도록 제작해야 한다.
(2) 배수형 쉴드터널 세그먼트의 운반 중 손상이 없도록 한다.
(3) 세그먼트는 필요한 치수 정밀도를 확보해야 한다. 또한 필요한 치수 정밀도는 세그먼트의 제작에 앞서 사전에 정해두어야 한다.
(4) 배수 유로홈 및 내부 배수구는 제작오차를 최소화하여 규격을 유지하여야 한다.

※해설

세그먼트에 사용하는 재료는 규격에 적합한 것을 원칙으로 하며 무근 및 철근 콘크리트의 탄성계수 및 허용응력은 대해서는 [콘크리트 표준시방서]의 규정에 의한다.

표 2.2 Concrete 탄성계수

설계기준강도(kgf/cm²)	420	450	480
탄성계수(kgf/cm²)	3.3×10^5	3.6×10^5	3.9×10^5

표 2.3 Concrete 허용 응력도(kgf/cm²)

설계기준강도	42	45	48
허용 굽힘 압축 응력도	150	160	170
허용 전단 응력도	5.5		
허용 부착 응력도	20(이형철근)		



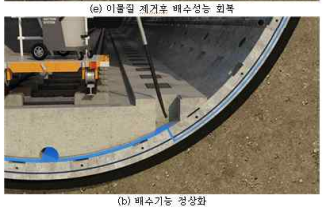
그림 2.6 배수형 쉴드터널 세그먼트(예)



(d) 이물질 제거



(e) 이물질 제거후 배수성능 회복



(b) 배수기능 정상화

그림 3.6 에어석션건을 이용한 배수 유로홈 관리(계속)

정의	• 기존 비배수 쉴드터널과 다른 배수형 쉴드터널에서 배수 유로홈의 구조, 설계, 배치, 슬림형 세그먼트 제작, 에어석션건을 활용한 유지관리 방안 등에 대한 종합적인 매뉴얼(안)
목적	• 현재까지 국내외에서 배수형 쉴드터널에 대한 개발 및 적용 선례가 전무하여 실제적인 설계 반영 및 현장 적용을 위해서 가이드 라인 필요

제 2 절 주요 연구성과

1. 학술적 성과

가. 학술지 논문

○ 한국지반공학회 제30권 제5호

· 배수조건에 따른 쉴드터널 라이닝의 거동연구를 위한 모형실험

한국지반공학회논문집 제30권 5호 2014년 5월 pp. 55 ~ 65
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.30, No.5, May 2014 pp. 55 ~ 65

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2014.30.5.55

배수조건에 따른 쉴드터널 라이닝의 거동연구를 위한 모형실험

A Physical Model Test on Behavior of Shield-tunnel Lining according to Drain Conditions

최 규 문[1] Choi, Gou-Moon
윤 찬 영[2] Yune, Chan-Young
마 상 준[3] Ma, Sang-Joon

Abstract

Most shield tunnels are designed based on the assumption of a undrained condition. But they are operated as drained tunnels in which underground water flows and passes through a drainage facility. Therefore, it is necessary that the drainage condition be considered in the shield tunnel design. In this research, new testing device which can simulate the underground tunnel located below ground water level, was developed. Total stress and pore water pressure were examined and an inflow water into an inner pipe was measured using the testing device. Test results showed that the total stress, which was the sum of effective stress and pore pressure, increased more in an undrained condition and an inflow water into an inner pipe was proportional to the water pressure but inversely proportional to the loading stress. Consequently, if the drainage is considered in the shield tunnel design, the more economical design can be expected because of the stress reduction of the lining.

요 지

대부분의 쉴드터널은 비배수조건으로 설계되지만 현장에서 터널 내부로 지하수가 유입되고 배수시설을 통하여 배출되는 배수터널처럼 작동하기 때문에 쉴드터널 설계에서 배수조건이 고려될 필요가 있다. 본 연구에서는 배수조건과 응력조건 조절을 통하여 지하수면 아래에 위치한 터널을 모사할 수 있는 실험장비를 개발하였다. 모형실험을 통하여 지중내에 작용하는 전응력 및 간극수압을 조사하였고 배수내관의 유입유량을 측정하였다. 실험결과 간극수압과 유효응력의 합으로 나타나는 전응력의 증가율이 비배수조건에서 더 크게 나타났고, 유입유량은 수압에 비례하고 재하응력에 반비례하였다. 결과적으로 쉴드터널에서 배수를 고려한다면 응력이 감소되기 때문에 보다 경제적인 설계가 가능할 것으로 예상된다.

Keywords : Shield tunnel design, Underground water, Total stress, Water pressure, Drain condition

1 정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D Student, Dept. of Civil Engrg., Gangneung-Wonju National Univ.)
2 정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Gangneung-Wonju National Univ., Tel: +82-33-640-2423, Fax: +82-33-646-1391, yune@gwnu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)
3 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2014 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

○ 한국지반공학회 제31권 제6호

· 화강풍화토 지반에서 배수조건에 따른 쉴드터널 라이닝의 거동연구를 위한 모형실험

한국지반공학회논문집 제31권 6호 2015년 6월 pp. * ~ *
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.31, No.6, June 2015 pp. * ~ *

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X(Online)
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2015.31.6.**

화강풍화토 지반에서 배수조건에 따른 쉴드터널 라이닝의 거동연구를 위한 모형실험

A Physical Model Test on Behavior of Shield-tunnel Lining According to Drained Conditions in Weathered Granite Soil

최 규 문[1] Choi, Gou-Moon
윤 찬 영[2] Yune, Chan-Young
마 상 준[3] Ma, Sang-Joon

Abstract

Recently, due to the expansion of urban infrastructure for the citizen convenience, the shield tunnel construction has increased considering the civil complaints minimization and construction stability. Most shield tunnels are designed based on the assumption of the undrained condition that underground water does not inflow, but they are operated in the field as drained tunnels with drainage facility to drain underground water. Therefore, the drained condition needs to be considered in the shield tunnel design. It is also necessary to consider the weathered granite soil that is widely distributed throughout the country and consequently is encountered in most of the construction site. In this paper, the model test which can control total stress and pore water pressure and simulate the underground tunnel located in the weathered granite soil below ground water level is conducted. Total stress, pore water pressure and an inflow water into an inner pipe were measured using the testing device. Test results showed that the total stress in a drained condition was smaller than in an undrained condition because pore water pressure decreased in a drained condition and an inflow water into an inner pipe was proportional to the loading stress in a drained condition. As a result, if a drained condition is considered in the shield tunnel design, the more economical design can be expected because of the stress reduction of the lining.

요 지

최근 시민편의를 위한 도심지 사회기반시설의 확충으로 인하여 민원최소화와 시공안정성을 고려한 쉴드터널 시공이 증가하고 있다. 대부분의 쉴드터널은 지하수가 유입되지 않는 비배수조건으로 가정하여 설계되지만 현장에서는 배수시설을 설치하여 지하수를 배출하는 배수터널처럼 운영되므로 설계 시 배수조건이 고려될 필요가 있다. 또한 우리나라 전역에 넓게 분포하고 가장 많이 이용되는 화강풍화토 지반에 대한 고려도 필요하다. 본 논문은 배수 및 응력조건을 조절할 수 있고 지하수면 아래 화강풍화토 지반에 위치한 터널을 모사할 수 있는 실험장비를 이용하여 실험하였으며, 전응력, 간극수압 및 배수내관의 유입유량을 측정하였다. 실험결과 배수조건 시 간극수압 감소로 인하

1 정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 박사수료 (Member, Ph. D Candidate, Dept. of Civil Eng., Gangneung-Wonju National Univ.)
2 정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Eng., Gangneung-Wonju National Univ., Tel: +82-33-640-2423, Fax: +82-33-646-1391, yune@gwnu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)
3 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2015 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

○ 대한토목학회 제35권 제2호

· 축소모형실험을 통한 부분배수 쉴드터널의 세그먼트 단면 축소 가능성 평가

Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 35, No. 2: 387-396/ April, 2015
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2015.35.2.0387

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Tunnel Engineering 터널공학

축소모형실험을 통한 부분배수 쉴드터널의 세그먼트 단면 축소 가능성 평가

마상준* · 이영섭** · 김동민***
Ma, Sang Joon*, Lee, Young Sub**, Kim, Dong Min***

Evaluation of Reducing Cross Section of the Partial Drainage Shield Tunnel Segment using the Model Experiments

ABSTRACT

The existing shield tunnel has constructed in the concept of non-drainage uniformly, but the leak has become a problem in the construction and management. The Shield tunnel design allowed for the water and earth pressure bring about the increasing segment thickness and the construction costs. In order to improve these problems, the study of the partial drainage shield tunnel is in progress. In this study, th model experiment was performed to confirm the possibility of the partial drainage shield tunnel. And the water and earth pressure was measured in drainage and undrained condition. Based on the results of model experiments, the effect of water pressure reduction was confirmed by reviewed the structure stability of the real design case.

Key words : Shield tunnel, Cross section of segment, Partial drainage, Water pressure reduction

초 록

기존 쉴드터널은 일률적으로 비배수 개념이 적용되고 있지만 시공 및 운영 과정에서 고질적인 누수 발생이 문제가 되고 있으며, 쉴드 세그먼트의 경우 토압 및 수압까지 고려한 설계로 인해 단면이 과다하게 증가되고 세그먼트 재료비 상승을 유발하고 있다. 이러한 문제점들을 개선하기 위해 쉴드터널에 배수 개념을 적용한 부분배수형 쉴드터널에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 부분배수 쉴드터널의 적용 가능성을 평가하기 위해 축소모형실험을 통해 배수 및 비배수 조건에서의 토압 및 수압 변화를 측정하였다. 실험 결과를 통해 도출된 수압 저감 효과를 바탕으로 지하수위 아래 위치한 쉴드터널 설계사례에 적용하여 구조 안정성을 검토하였고, 수압 저감을 통한 세그먼트 단면 축소 효과에 대해 평가하였다.

검색어 : 쉴드터널, 세그먼트 단면, 부분배수, 수압 저감

1. 서 론

최근 국가 교통망의 도심지 통과시 민원, 환경, 기존 노선과의 접속, 구조물 근접 등의 이유로 하저, 퇴적층, 경암 등의 복합지반에서의 터널공법의 적용이 요구되고 있으며, 이들 조건에서도 안전하게 시공이 가능한 쉴드(Shield) TBM에 대한 적용이 증가하고 있다(Jue et al., 2012). 쉴드터널 공법은 비교적 연약한 지반에서 원형단면의 쉴드라 불리는 강재로 된 통을 지중으로 밀어올리고, 그 내부에서 토사의 붕괴유동을 막으면서 굴착과 동시에 세그먼트라는 터널 라이닝을 조립하며 전진해 가는 비배수 방식의 터널공법을 말한다(Kim

* 정회원 · 한국건설기술연구원 지반연구소 연구위원 (KICT · sjma@kict.re.kr)
** 한국건설기술연구원 지반연구소 전임연구원 (KICT · youngsublee@kict.re.kr)
*** 정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 지반연구소 전임연구원 (**Corresponding Author** · KICT · dmkim@kict.re.kr)

Received March 3, 2014/ **revised** May 12, 2014/ **accepted** February 6, 2015

Copyright ⓒ 2015 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

○ 한국터널지하공간학회 2015년 게재확정

· 모형실험 및 현장계측을 통한 배수형 쉴드터널의 작용수압 저감 평가

J of Korean Tunn Undergr Sp Assoc 15(1)1-7(2014)
http://dx.doi.org/10.9711/KTAJ.2014.15.1.001

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

모형실험 및 현장계측을 통한 배수형 쉴드터널의 작용수압 저감 평가

김동민[1] · 마상준[1]* · 이영섭[1]
[1]한국건설기술연구원

The Study on the Hydraulic Pressure Reduction of Drainage Shield Tunnel using Model Test and Field Instrumentation

Dong-min Kim[1], Sang-joon Ma[1]*, Young-sub Lee[1]
[1]Korea, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Goyang-Si 411-712

ABSTRACT: In this study, model test equipment was developed to evaluate the hydraulic pressure reduction in appling the drainage shield tunnel and the model test for hydraulic pressure difference was performed in case of drainage and undrained conditions. In the result of model test, increase ratio of pore water pressure was decreased in drainage condition and total stress in drainage condition was smaller than that in undrained condition, so the hydraulic pressure was reduced by the groundwater inflow into the model tunnel. In the result of field instrumentation, the hydraulic pressure in the back ground of shield tunnel was small by 11~22% in comparison with the calculated hydraulic pressure(r_w·H) in same groundwater level. In the result of model test and field instrumentation, it was appeared in drainage and undrained conditions that the difference between the theoretical hydraulic pressure and the real hydraulic pressure. It shows that it is possible to apply the reduced hydraulic pressure in applying the drainage shield tunnel and to reduce the segment section due to hydraulic pressure reduction.

Keywords: Drainage shield tunnel, Drainage furrow, Model test, Field instrumentation, Hydraulic pressure reduction

초 록: 본 연구에서는 배수형 쉴드터널 적용시 작용수압의 저감을 평가하기 위해 모형실험장치를 개발하여 배수 및 비배수 조건에서 작용수압 차이를 실험하였다. 모형실험 결과 배수 조건에서 간극수압 증가율이 감소하는 경향을 보였고, 비배수 조건에 비해 전응력이 더 작게 나타나 모형터널 내 지하수 유입에 의해 작용수압이 저감되는 것으로 나타났다. 현장계측 결과 쉴드터널 배면 지반 내 작용수압은 지하수위로 계산되는 수압(r_w·H)보다 약 11~22%정도 적게 나타났다. 모형실험 및 현장계측 결과에서 배수 및 비배수 조건의 이론적인 설계수압과 작용수압의 차이가 나타났는데, 배수형 쉴드터널 적용시 기존 설계수압보다 감소된 수압을 적용하는 것이 가능할 것으로 판단되며, 수압 감소를 통해 세그먼트 단면 축소도 가능할 것으로 판단된다.

주요어: 배수형 쉴드터널, 배수 유로홈, 모형실험, 현장계측, 수압 저감

1. 서 론

최근 국가 기간 철도망이 도심지를 통과하게 되면서 민원, 환경, 기존 노선과의 접촉 등의 문제가 발생되어 근접 구조물이나 하저 통과 구간, 다양한 복합지반 구간과 같이 더 가혹한 현장상황에서 터널공법 적용이 요구되고 있다(Jue et al., 2012). 근래 들어 가장 많이 사용되고 있는 터널 공법 중의 하나인 쉴드터널(shield tunnel) 공법은 대심도 지하공간을 효율적으로 이용할 수 있는 지하 공간 구축기술로, 세계 각국에서 공법 적용과 함께 관련 기술의 개발이 이루어지고

*Corresponding author: Sang-joon Ma
E-mail: sjma08@hanmail.net
Received June 2, 2015; Revised June 12, 2015; Accepted June 16, 2015

Copyright ©2014, Korean Tunnelling and Underground Space Association
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/license/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

나. 학술회의 발표

○ 한국지반공학회

- 배수조건에 따른 쉴드터널 라이닝 응력에 대한 연구 / 2012년 가을학술발표회
- 배수조건에 따른 쉴드터널 라이닝 거동연구를 위한 모형실험 / 2013년 가을 학술발표회
- 토질 및 배수조건을 고려한 쉴드터널 라이닝 거동에 관한 모형실험 / 2015년 봄 학술발표회

○ 대한토목학회

- 배수 유로홈을 이용한 쉴드터널의 부분 배수개념 적용 가능성 평가 / 2012년 정기학술대회
- 배수조건에 따른 침투유량과 터널 라이닝 하중에 대한 수치해석 검토 /2013년 정기학술대회
- 부분배수 쉴드터널에서의 배수 유로홈의 적정 규격 검토 /2013년 정기학술대회

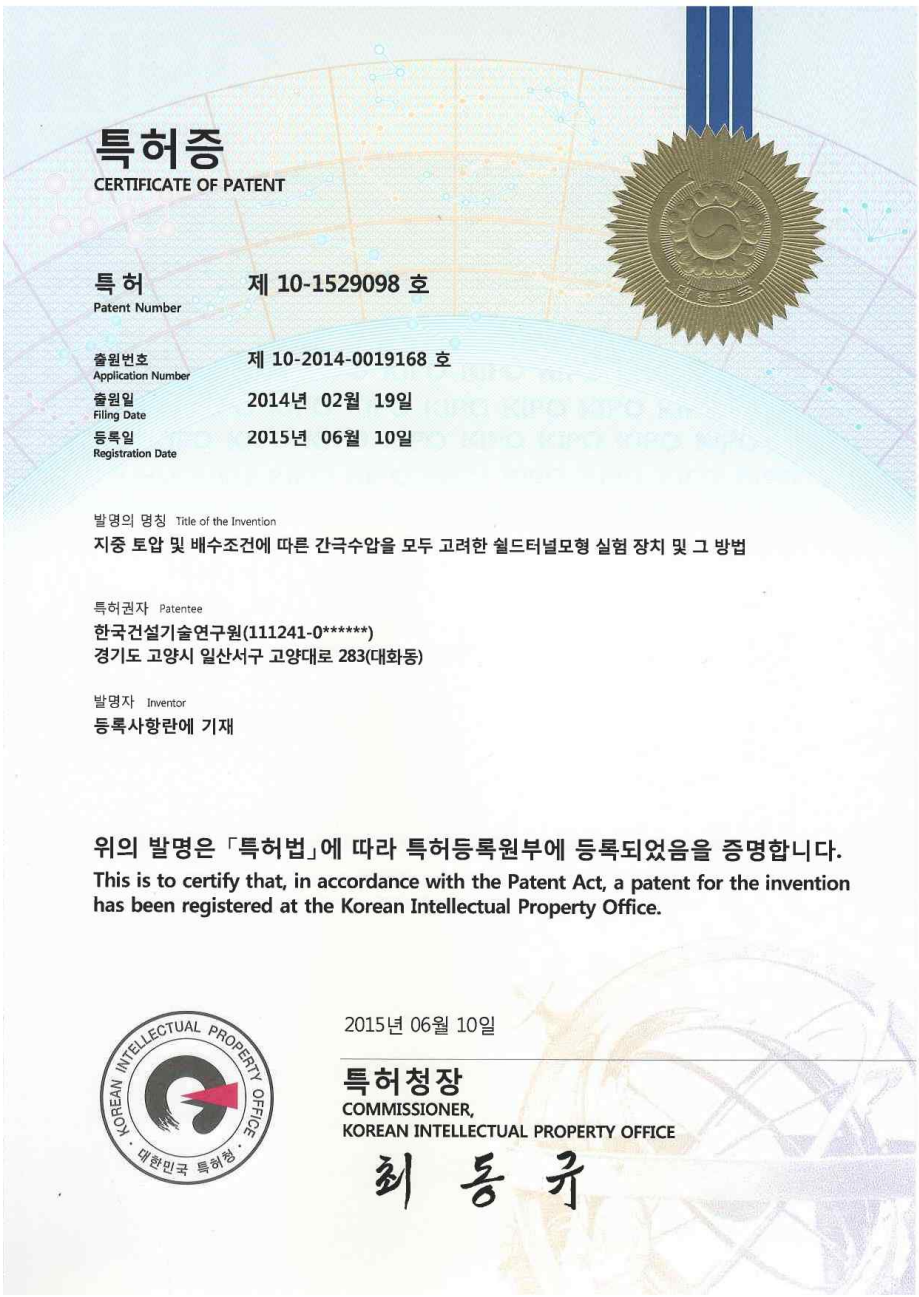
○ 한국터널지하공간학회

- 모형실험을 통한 부분배수 쉴드터널에서의 배수 유로홈 성능 평가 /2015년 봄 학술대회
- 부분배수 쉴드터널의 뒤채움재 적용성 평가 /2015년 봄 학술대회

2. 기술적 성과

가. 국내특허등록

○ 지중 토압 및 배수조건에 따른 간극수압을 모두 고려한 쉴드터널모형 실험장치 및 그 방법 / 제10-152908호



특허증
CERTIFICATE OF PATENT

특 허 Patent Number: 제 10-1529098 호

출원번호 Application Number: 제 10-2014-0019168 호
출원일 Filing Date: 2014년 02월 19일
등록일 Registration Date: 2015년 06월 10일

발명의 명칭 Title of the Invention
지중 토압 및 배수조건에 따른 간극수압을 모두 고려한 쉴드터널모형 실험 장치 및 그 방법

특허권자 Patentee
한국건설기술연구원(111241-0******)
경기도 고양시 일산서구 고양대로 283(대화동)

발명자 Inventor
등록사항란에 기재

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
This is to certify that, in accordance with the Patent Act, a patent for the invention has been registered at the Korean Intellectual Property Office.

KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE · 대한민국 특허청 ·

2015년 06월 10일

특허청장
COMMISSIONER,
KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE
최 동 규

나. 국내특허출원

○ 피에스볼을 이용한 배수형 쉴드터널 라이닝용 뒤채움재 주입장치 및 그 방법 / 제10-2015-0073724호

관 인 생 략

출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자	2015.05.27
특 기 사 항	심사청구(무) 공개신청(무)
출 원 번 호	10-2015-0073724 (접수번호 1-1-2015-0507404-55)
출원인 명칭	한국건설기술연구원(3-1998-007750-1)
대 리 인 성 명	송세근(9-2002-000122-3)
발 명 자 성 명	마상준 김동민 이영섭
발 명 의 명 칭	피에스볼을 이용한 배수형 실드터널 라이닝용 뒤채움재 주입 장치 및 그 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), 정정신고서]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·디사인은 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.

발급일자 : 20150526

제 3 절 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

1. 국내 시장 전망

국내 터널 수주액의 지난 8년 간의 동향을 조사한 결과 2007년이 28,519억원으로 가장 많은 발주가 이루어졌으며 2,012년 13,076억원의 발주된 것을 확인할 수 있었다. 2013년의 터널발주 증가율이 -87.1%로 큰 폭으로 감소하였으나, 이는 2012년의 큰폭에 증가율에 따른 것이며, 평균적으로 국내의 터널발주 9,700억원에 이르는 큰 시장규모를 확보 하고 있는 것으로 확인되었다. 또한, 국내터널의 개소 및 연장 증가율로 시장동향을 분석한 결과 터널공사가 계속 증가하는 추세로 조사되었다.

국내 터널 개소는 2006년 1,064개소에서 2013년 1,659개소로 595개소가 증가하였으며, 전체연장은 2006년 755km에서 2013년 1,208km로 160%가 증가된 것으로 확인되었다. 터널적용이 증가하는 원인은 산간지역의 자연환경 파괴의 최소화 등 환경 친화적인 도로 건설과 도로 이용자의 안전을 고려한 도로계획과 도심지의 교통 혼잡 해소와 친환경적인 경관계획에 따른 도로의 지하화에 기인하는 것으로 분석되었다.

도로 종류별로는 고속국도 793개(48%), 일반국도 461개(28%)로 나타나 고속국도와 일반국도 터널이 전체터널의 75% 이상을 차지하는 것으로 조사되었다.

철도 터널의 경우 2008년을 기점 철도터널 발주금액이 점차 줄어들었으나, 2013년에 2012년 대비 464.1%의 증가를 보이며 증가세로 돌아서는 것을 확인할 수 있었다.

국내 터널 시장이 과거 도시간 연결도로 및 철도건설에서 수도권 및 대도시내의 고속화, 순환, 관통도로 및 철도체계 등으로 그 수요처가 바뀌고 있으며, 경제발전에 의한 국민소득 향상 등으로 도심지 교통체계의 건설시 진동, 소음, 침하 등에 대한 국민 기대치가 선진국 수준으로 높아가고 있고, 2014년 여러 가지 국가 재난에 의하여 국민들의 안전의식도가 높아지고 있어 터널공사시 발파 굴착에서 기계굴착으로 빠르게 전환되고 있다. 특히, 쉴드터널에 대한 수요는 지속적으로 높아가고 있는 실정으로 2000년 이후 서울 및 수도권의 쉴드터널 현황은 표 2.17.2와 같다. 이외에도 제2강변북로, 서부간선도로 지하화, 동부간선도로 지하화, GTX와 같은 대규격 쉴드사업도 진행될 예정이다.

2. 국외 시장 전망

유럽의 경우 2009년 기준 전체 터널 중 80%가 쉴드터널로 시공되고 있으며, 일본 60%, 미국 50%, 중국 40%, 대만의 경우 30%가 쉴드터널로 시공되고 있음. 이와 관련하여 미국, 유럽, 일본 등에서는 지난 30년간의 터널분야 연구에서 쉴드터널과 관련된 기술개발이 상당한 비중을 차지하고 있다. 반면, 국내의 경우 전력구 및 수로터널을 제외한 전체 터널 중 쉴드터널의 경우 1% 정도에 불과하고 터널분야 연구에서도 쉴드터널에 대한 연구가 부족한 실정이다.

국외 시장의 경우 유럽 선진국 지역에서는 쉴드터널 시장이 마무리 되어 가고 있는 반면, 싱가포르 등 아시아 개발도상국에서는 쉴드터널 사업이 약 70여개 공구로 진행되거나, 향후 발주될 계획이며, 특히 중국의 쉴드터널 사업은 2500여개의 공구가 발주 시작되어 30년간 진행될 예정이며, 인도시장은 1,000여개 공구의 발주가 예상된다.

가. 중국시장

중국은 급속한 경제발전과 도시화에 따라 세계에서 가장 활발히 터널 및 지하공간 프로젝트를 수행하고 있으며, 2007년 이후로 2,500km 이상의 철도터널 시공을 계획하였으며 이중 1/3이상인 760km 구간이 초장대 터널로 계획되었다. 또한 10,000km의 신규 도로구간의 터널 건설에 약 100대 이상의 TBM이 발주될 것으로 전망되었다.

2001년부터 2006년까지 중국에 도입된 TBM은 138대이며 시공연장은 600km 달하는 것으로 보고되고 있으며, 이는 연간 23대의 TBM과 100km에 해당되는 쉴드터널 공사가 진행되는 것으로 확인되었다.

건설투자 규모는 2006년 건설투자액 5,627억불(Global Insight)로 세계 3위시장이며 2006년 고정자산투자액 1조 4,084억불(설비투자포함)중 SOC투자는 8,193억불 부동산개발은 1,940억불로 발표되었으며, 중국내 통계를 이용하여 건설투자와 근접한 수치를 분석하면 고정자산 투자 중 직접 건설투자와 밀접한 건설안장공사(建築安裝工程)투자는 2006년 6조 6,776억위앤(8,550억불)으로 통계되어 GDP의 25.1% 차지하고 있다. 또한, 4종 4횡의 여객전용철도 건설계획으로 종방향으로는 7,360km, 횡방향으로는 4,950km가 표 2.17.4와 같이 운행 및 건설 계획되어 있다. 특히, 2030년까지 중국 총 도로망은 40만 1,000km이며 이는 국가 고속도로망이 11만 8,000km, 일반도로망 26만 5,000km, 기타도로망 1만 8,000km로 계획되어 있다.

나. 인도시장

인도는 전반적으로 열악한 인프라 상황이 인도 경제성장의 발목을 잡고 있으며, 현재와 같이 빠른 속도로 인구가 증가하는 가운데 높은 경제성장률을 유지하기 위해서는 인프라 확충이 절실히 필요한 상황이다.

인도의 외국인 직접투자 유치금액은 중국에 비해 상당히 낮은데, 외국인투자자들은 인도에서의 사업 활동 저해요소로 미정비 도로·잦은 정전·혼잡한 항만과 공항 등을 꼽고 있어, 외국인투자유치를 위해서도 인프라 개선이 시급하다.

인프라를 포함한 인도 건설시장은 과거 몇 년간 괄목할만한 성장세를 보여 왔으나, 2008년 하반기 글로벌금융위기로 인한 극심한 유동성 부족과 경기침체로 많은 대형 프로젝트가 지연됨으로써 성장률이 둔화되어 이에 인도정부는 경기부양책을 통해 인프라 프로젝트에 추가예산을 배정하고, 2009~2010년 예산안에서도 인프라에 더 많은 예산을 할당하여 인프라 건설을 촉진하고 있다.

BMI(Business Monitor International)는 인도 인프라 보고서를 통해, 인도 건설시장의 '09년 실질성장률은 전년대비 2.6% 성장에 그치는 매우 낮은수준에 머무는 반면, '10년은 시장이 다시 활기를 띠며 9.4%의 실질성장률을 보일 것으로 전망된다.

2009~2010년 예산안에서 가장 큰 비중이 인프라 부분으로 인도정부는 예산의 50~60%를 인프라분야에 할당하고 있지만, GDP에서 인프라 부문 예산이 차지하는 비중은 아직 3~4%수준에 불과하여, 인프라 개선 촉진을 위해 인프라관련 예산규모를 2014년까지 GDP의 9%이상으로 끌어올리겠다는 목표를 설정하여 진행하고 있다.

인도는 고속도로·연방국도·주국도·주요 지방도로·시골도로를 모두 포함한 인도 도로의 총 연장길이는 332만㎞로 세계2위 규모이나, 총 연장도로의 2%에 불과한 연방국도가 총 교통량의 40%를 담당하며, 이 연방국도의 30%는 1차선 구간이고, 53%가 2차선, 나머지 17%만이 4·6·8차선 구간으로 구성되어 있다.

제 4 장 연구 목표 달성 및 효과

1. 연구개발 최종목표 달성도

터널 건설시장이 도심지 시공으로 이전되면서 굴착시 소음 및 진동 최소화로 민원 해결, 굴착에 따른 지반붕락 대비, 안정성 우수, 공기단축, 인접 구조물 영향 최소화 등의 장점으로 인해 쉴드터널에 대한 적용 확대 요구가 높아지고 있지만, 도심지 및 열악한 지반조건에서 NATM 터널에 비해 전체 공사비가 110~120% 정도로서 아직까지 경제성 면에서 부족한 상황이다. 따라서 쉴드터널 전체 공사비를 절감할 수 있는 대안을 통해 NATM 터널과의 경쟁력 확보, 안정성 및 환경성 등 사회적 요구를 충족시킬 수 있는 방안이 절실히 요구되고 있다.

기존의 토압 및 수압까지 고려한 비배수 설계에서는 안정성 확보 방안으로 쉴드 세그먼트 단면을 증가시키게 되는데, 이로 인해 시멘트, 철근 등의 재료 투입량도 증가하게 되어 쉴드 세그먼트 재료비 상승을 유발하고 있으나 현실적으로 비배수 터널로서의 기능은 전혀 감당하지 못하고 있는 상황이다.

본 연구에서는 배수 유로홈 기술 개발을 통해 쉴드터널에 유입되는 지하수를 자연배수 시킬 수 있는 배수형 쉴드터널을 개발하였다. 또한, 지하수 유입으로 인한 수압 저감 현상을 평가하고, 쉴드 라이닝에 작용하는 하중 감소를 통해 기존 세그먼트 단면을 20% 축소시킬 수 있는 슬림형 쉴드터널을 개발하였다. 본 연구개발을 통해 최종적으로는 쉴드 세그먼트 재료비 20% 절감, 쉴드터널 전체공사비 10% 절감을 달성하였으며, 장기적으로는 쉴드터널의 공사비 절감을 통해 기존 터널공법과의 가격 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

표 4.1.1 연구개발 최종목표 달성도

연구개발 최종	계획대비 달성도(%)
·쉴드터널에서의 배수설계개념 적용 가능성 및 안정성 검증 ·배수 유로홈 개발 및 세그먼트 단면 10~20% 슬림(Slim)화 실현 ·건설재료 사용 절감을 통한 제조단계의 CO_2 배출 20% 저감 ·세그먼트 제조단가 20% 및 터널 총공사비 10% 절감 ·쉴드터널의 경제성 및 기술력 향상을 통해 NATM 터널과의 경쟁력 확보	100

2. 연구개발 성과의 기술적 및 경제적 효과

■ 선진 터널공법으로서 쉴드터널 공법의 경쟁력 향상

- 본 연구를 통해 개발된 슬림형 쉴드터널은 기존 쉴드터널 체결부에서 발생되는 누수를 절감 가능할 것으로 판단된다.
- 기존 NATM 터널 대비 향상된 품질 및 경제성에서 우위를 가지고, 배수형 터널로서 수압을 경감시켜 세그먼트의 슬림화가 가능하여, 앞으로 예상되는 쉴드터널 수요에 맞추어 국내 시공능력 향상에 크게 기여하게 될 것으로 판단된다.
- 본 연구를 통하여 축적된 슬림형 쉴드터널 기술은 터널 시공현장에서의 민원발생을 최소화하고, 자연훼손을 최소화하여 친환경적인 생태 도시건설(Eco-City)과 같은 정부정책에도 부응할 수 있으며, 미래 지향적이고 인간 중심의 도시 복원 및 건설에 이바지 할 것으로 예상된다.
- 2010년 기준 국내 세그먼트 터널 시장은 전력구 및 수로터널에 한정되어 약 1천억원 규모이나, 향후 서부간선도로 지하화, 서울시 스마트 하이웨이, 수도권 대심도 광역급행 철도, 강변북로 확장공사 지하화, 동부간선도로 지하화, 신분당선 연장, 도심지 고속화 도로 등 대규모 건설계획이 수립되어 2020년에는 3조원 정도의 시장 규모가 될 것으로 예상된다.
- 시장 확대 및 세그먼트 터널 건설 증가와 더불어 경제적이고 효과적인 설계 및 시공기술 개발이 더욱 필요한 현 시점에서 슬림형 쉴드터널 기술은 터널 시공 분야의 국내 기술 축적과 설계 자립화를 통해 건설기술력 향상을 가져올 것으로 판단된다.
- 배수 유로홈 시스템의 개발은 기존 쉴드터널의 라이닝 단면 두께감소를 가능케 하여, 향후 구조물 슬림화 연구 추진으로 연결됨으로써 경제적인 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

■ 기술력 향상을 통한 쉴드터널 공법의 적용성 확대

- 기존 쉴드터널 공법은 하저터널 및 천층 연약지반에 적용되어 왔으나 장비의 개발과 시공 기술의 축적으로 현재는 거의 모든 지질에 시공이 가능하게 되었으며 향후 민원의 최소화, 구조물 안정성 확보, 공기단축 등의 장점을 가지고 있어 도심지내 대심도 터널 시공시 널리 적용될 것으로 판단된다.
- 본 개발 기술은 향후 기하급수적으로 증가 할 것으로 예상되는 쉴드터널 수요에 맞추어 경제성이 향상된 세그먼트로 널리 적용 될 것으로 예상된다.
- 본 개발 기술은 기존 쉴드터널 방식에 비해 터널 내부 누수량을 대폭 저감시킬 수 있으며, 향후 대규모 시공이 계획 중인 목포-제주, 한-중 해저터널, 한일 해저터널 등 해저터널 시공시 적용될 경우 세그먼트 누수방지 및 내구성 유지에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.
- 강연선 긴장력을 이용한 세그먼트 체결 기술은 기존 볼트 체결방식에 비해 더 높은 체결력을 발휘하며, 쉴드터널의 연결성 및 강성 증진을 통한 안정성 향상에 기여할 것으로 판단된다.

■ 경제성 향상을 통한 쉴드터널 공법의 적용성 확대

- 본 연구를 통해 개발된 배수 유로홈 기술은 세그먼트의 재료비를 약 20% 절감할 수 있으며, 쉴드터널 전체로 보면 공사비를 10% 이상 절감 가능하다. 또한, 세그먼트의 재료 사용량 절감으로 인하여 CO_2 가스발생량을 20% 저감할 수 있다.
- 기존 쉴드터널은 비배수 개념으로서 정수압을 모두 고려해야 하지만, 슬림형 쉴드터널은 배수개념의 터널로서 작용수압의 경감으로 인하여 세그먼트 단면의 슬림화가 가능하여, 향후 쉴드터널 세그먼트 단면 축소로 인한 구조물 슬림화의 근간을 이루는 기술이다.
- 개발 기술의 우수한 시공성 및 경제성의 장점을 바탕으로 국외 기술 수출 및 해외사업 참여가 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

제 1 장 연구개발과제 개요

제 1 절 연구개발의 배경 및 필요성

1) 이영섭, 마상준, 김동민 (2014) 강연선의 긴장력과 아일랜드 전단키를 이용한 쉴드터널에 관한 연구, 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp. 932-937.

2) 마상준, 길후정, 김동민 (2013), 실대형 실험을 통한 쉴드터널의 강연선 체결방식에 대한 역학적 거동 분석, 한국지반공학회 논문집, 제29권, 제6호, pp. 33-54.

3) 두산산업개발(주) (2004), 대구경 쉴드공법 I

4) 김용일, 추석연, 김동현, 박영진, 홍석균, 이두화 (2003) “세그먼트 방수재의 방수성능 평가”, 한국터널공학회 학술발표회 논문집

5) 최우용, 이현필, 전기찬 (2014), “수팽창 지수재의 방수 성능 및 내구성 평가”, 한국터널지하공간학회 논문집, Vol. 16, no. 2, pp.117-124.

6) M. Ramoni, G. Anagnostou (2011), “The Effect of Consolidation on TBM Shield Loading in Water-Bearing Squeezing Ground“ Rock Mech Rock Eng 44:63 - 83

제 3 절 국내외 기술개발 현황

1) 한국건설신문 ‘14.09.22

2) 엔지니어데일리 2013.11.22.

3) 엔지니어링데일리 ‘12.09.19

4) 도시미래신문 ’14.02.10

제 2 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 국내외 쉴드터널 현황 조사 및 문제점 분석

1) 두산산업개발(주) (2004), 대구경 쉴드공법(국내외 시공사례 및 논문) I

2) 이영섭, 마상준, 김동민 (2014) 강연선의 긴장력과 아일랜드 전단키를 이용한 쉴드터널에 관한 연구, 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp. 932-937.

3) 전기찬(2009), "쉴드 TBM 터널 설계시 주요 고려사항에 대한 사례연구 : 이스탄불해협 도로터널 횡단 프로젝트", 터널공학회지, 터널공학회

4) 조응래(2009), 지하터널과 해저터널의 기술발전 전망, 국토, 국토연구원

5) 신희순 박의섭(2006), "외국 해저터널의 사례를 통한 설계경향분석", 한국암반공학회 창립 25주년기념 특별심포지엄 논문집, pp. 184~193

5) Japan Society of Civil Engineers(2006), Standard specifications for tunneling : Shield Tunnels

6) NIKKEI Construction(1997), 동경만 횡단도로의 모든 것, NIKKEI Construction Books, pp. 81

7) 마상준, 길후정, 김동민 (2013), 실대형 실험을 통한 쉴드터널의 강연선 체결방식에 대한 역학적 거동 분석, 한국지반공학회 논문집, 제29권, 제6호, pp. 33-54.

8) 김용일, 추석연, 김동현, 박영진, 홍석균, 이두화 (2003) “세그먼트 방수재의 방수성능 평가”, 한국터널공학회 학술발표회 논문집

9) 최우용, 이현필, 전기찬 (2014), “수팽창 지수재의 방수 성능 및 내구성 평가”, 한국터널지하공간학회 논문집, Vol. 16, no. 2, pp.117-124.

10) 오진우, 강형우, 노우성, 박상태 (2000), 토목구조물 설계 표준 동해설 실드터널편, 과학기술

11) 임영국 편저 (1999), 쉴드공법, 원기술, 서울

제 2 절 쉴드터널 누수실태 파악 및 방수대책

1) 서울메트로 펌핑량 조사자료

2) 부산교통공사 펌핑량 조사자료

3) 대구도시철도공사 펌핑량 조사자료

4) 인천교통공사 펌핑량 조사자료

5) 광주광역시 도시철도공서 펌핑량 조사자료

6) 정형식(2007), 국내외 해저터널 건설동향 및 관련기술의 발전과제

7) 김용일, 추석연, 김동현, 박영진, 홍석균, 이두화 (2003) “세그먼트 방수재의 방수성능 평가”, 한국터널공학회 학술발표회 논문집

8) 최우용, 이현필, 전기찬 (2014), “수팽창 지수재의 방수 성능 및 내구성 평가”, 한국터널지하공간학회 논문집, Vol. 16, no. 2, pp.117-124.

9) M. Ramoni, G. Anagnostou (2011), “The Effect of Consolidation on TBM Shield Loading in Water-Bearing Squeezing Ground“ Rock Mech Rock Eng 44:63 - 83

10) 신종호, 신용석, 박동인, 채성은, 최규훈 (2009), “수치해석을 이용한 세그먼트 라이닝의 수리거동과 누수제어 연구” 한국터널지하공간학회 논문집 Vol. 11, No. 2, pp.131-140.

11) 동아지질, 반석건설, 한국에스이씨(주) (1997), SEGMENT 토목기술자를 위한 쉴드 기술자료(4)

12) 이성원, 정재형, 황재홍 (2009), “모형실험을 이용한 고수압 시 수팽창 지수재의 방수성능 검증”, 한국지반환경공학회 학술발표회논문집 pp.389-392.

제 3 절 쉴드터널 누수실태 파악 및 방수대책

1) 김용일, 추석연, 김동현, 박영진, 홍석균, 이두화 (2003) “세그먼트 방수재의 방수성능 평가”, 한국터널공학회 학술발표회 논문집

2) 최우용, 이현필, 전기찬 (2014), “수팽창 지수재의 방수 성능 및 내구성 평가”, 한국터널지하공간학회 논문집, Vol. 16, no. 2, pp.117-124.

3) 이성원, 정재형, 황재홍 (2009), “모형실험을 이용한 고수압 시 수팽창 지수재의 방수성능 검증”, 한국지반환경공학회 학술발표회논문집 pp.389-392.

4) Datwyler (2003), The Report of the Watertightness Test for the Segment Sealing Gasket

5) KS기준 (한국 산업규격)

6) Wagner, H, Kolic D (2002), Joint design requirements for advanced TBM - tunnelling, pp.470-477

7) Datwyler (2003), The Report of the Watertightness Test for the Segment Sealing Gasket

8) 임영국 편저 (1999), 쉴드공법, 원기술, 서울

9) 대륭공업주식회사 (2003) 분당선 왕십리～선릉간 복선전철 제 3 공구 노반 신설공사 방수성능실험보고서

10) ISO 11346(2007), Rubber, vulcanized or thermoplastic - Estimation of life-time and maximum temperature of use

11) ASTM D6973 Standard Test Method for Indicating Wear Characteristics of Petroleum Hydraulic Fluids

제 4 절 배수 유로홈을 적용한 쉴드터널 세그먼트 제안

1) 김승렬, 박광준, 박봉기 (1993), “배수형 터널과 방수형 터널의 설계와 시공”, 한국지반공학회 학술발표 및 세미나 자료집, no. 1, pp.49-58.

2) 신종호, 안상로, 신용석 (2005), “배수형터널의 수압작용메카니즘과 지속가능한 터널설계”, 2005년도 대한토목학회 정기 학술대회, Vol.10, 2958-2965.

3) 이인모, (1999), “터널에서의 지하수 문제 고찰”, 대한토목학회지, Vol. 47, no. 6, pp.5-14.

4) 대륭공업주식회사 (2003) 분당선 왕십리～선릉간 복선전철 제 3 공구 노반 신설공사 방수성능실험보고서

5) 정경환, 정문식, 안국일, 김동해(2002), “Shield TBM", 한국터널공학회 터널기술학회지, Vol. 4, No. 4, pp. 20～48

제 5 절 배수형 쉴드터널 최적 뒤채움재 선정

1) 한국터널공학회(2008), 터널공학시리즈 3 터널기계화시공 설계편, 씨아이알, 서울, pp. 255～313

2) 한국콘크리트학회 (2012), 콘크리트 구조설계기준

3) 한국터널지하공간학회, 터널표준시방서(쉴드편) (2015)

4) http://www.ecomaister.com/ (에코마이스터 홈페이지)

5) JIS K 0102 55 (일본 산업규격)

6) 김진만, 조성현, 오상윤, 곽은구 (2007), “아토마이징 공정에 의한 급랭 제강슬래그의 특성”, 한국콘크리트학회지, Vol. 19, No. 6, pp. 39-45.

7) 김진만, 곽은구, 한상일 (2009), “급랭 전기로 산화슬래그잔골재 체적안정성에 관한 기초적 연구”, 한국콘크리트학회 2009년 가을학술대회 논문집, pp. 491492-45.

제 9 절 배수/비배수 조건을 고려한 쉴드터널 모형실험

1) 전석원, 김종우, 홍창우, 김영근 (2003), “석회암 공동이 터널 안정성에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국지구시스템공학회지, 제 40권, 제 3호, pp.147～158.

2) 김종우, 박지용 (2004), “쌍굴터널 주변 지반의 변형거동에 관한 모형실험 연구”, 한국암반공학회, Vol. 14, No. 5, pp.381～390.

3) 이재호, 아쿠타가와 신니치, 김영수, 문홍득 (2007), “미고결 저토피 터널에 작용

하는 토압에 관한 연구", 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol. 17, No. 6, pp.453~463.

4) 양형식, 하태욱, 김원범, 김종관, 류창하, 최병희 (2007), "축소모형실험을 위한 기초 연구", 대한화약발파공학회, 제 25권, 제 1호, pp.79~84.

5) 유광호, 정지성, 박연준 (2008), "강섬유 보강 숏크리트의 터널모형실험 및 수치해석적 검증", 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제 18권, 제 2호, pp.107~117.

6) 이성원, 정재형, 황재홍 (2009), "모형실험을 이용한 고수압 시 수팽창 지수재의 방수성능 검증", Korean Geo-Environmental Conference 2009, pp.389~392.

7) 이동석 (2011), "축소모형실험을 이용한 연약대층 근접 터널의 거동", 건국대학교 대학원 공학석사학위논문.

8) 조재호 (2011), "상부 토압에 의한 터널 지보재의 거동 해석", 금오공과대학교 대학원 공학박사학위논문.

9) 김경열, 이대수, 정상섬 (2012), "아칭효과를 고려한 원형수직터널의 토압 특성 분석 (1)", 한국지반공학회논문집, 제 28권, 제 2호, pp.23~31.

10) Jukes, S.G., F.P. Hassani, B.N. Whittaker (1983), "Characteristics of steel arch support systems for mine roadways, part 1. Modeling theory, Instrumentation and preliminary result", Mining Science and Technology, Vol. 1, Issue 1, pp.43~58.

11) Sakurai, S., kaeashima, I., Kawabata, Y., Saragai, A. (1994), "Model tests on deformation and loosing pressure of shallow tunnel", Journal of Geotechnical Engineering, JSCE, No. 487, Ⅲ-26, pp.271~274.

12) Sterpi, D. (1999), "An analysis of geotechnical problems involving strain softening effect", Int. J. Num. Analyt. Meth. Geomech., 23, pp.1427~1454.

13) Adhikary, D.P. (1997), "A study of the mechanism of flexural toppling failure of rock slopes", Rock mechanics and rock engineering, Vol. 30, No. 2, pp.75~93.

14) Chu, B.L., Hsu, S.C., Chang, Y.L., Lin, Y.S. (2007), "Mechanical behavior of a twin-tunnel in multi-layered formations", Tunnelling and underground space technology, Vol. 22, No. 3, pp.351~362.

15) 신종호, 안상로, 신용석 (2005), "배수형터널의 수압작용메카니즘과 지속가능한 터널설계", 2005 대한토목학회 정기 학술대회, pp.2958~2965.

16) 최규문, 윤찬영, 마상준 (2014), "배수조건에 따른 쉴드터널 라이닝의 거동연구를 위한 모형실험", 한국지반공학회논문집, 제 30권, 제 5호, pp.55~65.

17) 이인모, 김용진, 이명제, 남석우 (1993), "터널설계시 지하수의 고려방안 연구",

한국지반공학회 학술발표 및 세미나 자료집, pp.1～8.

제 10 절 수치해석을 통한 쉴드터널 구조안정성 검토

1) 한국터널공학회 2008, “터널공학회 시리즈3, 터널 기계화시공-설계편”
2) 서울특별시지하철건설본부 2005, 서울지하철 7호선 연장 704공구 건설공사 터널해석보고서.

제 11 절 현장 계측을 통한 쉴드터널 작용 압력 평가

1) 고성일, 추석연, 노병국 (2012), “운용중 쉴드터널 계측결과를 이용한 응력 및 하중상태 변화추이 고찰”, 2012년 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, 한국철도학회, pp. 919-925.

제 13 절 슬림형 쉴드터널 시공성 평가

1) 분당선 한강하저 터널 쉴드 TBM 설계·시공 사례
2) 한국시설안전공단(2013.12) 「특수굴착터널(쉴드터널) 성능평가기준 및 유지관리 매뉴얼 개발」
3) 김광섭 (1997), “퍼지기법을 이용한 건설공사의 확률적 위험도 분석평가” 한양대학교 석사학위논문

제 14 절 슬림형 쉴드터널 경제성 평가

1) 신분당선 (용산～강남) 복선전철 민간투자사업
2) 거마대교 민간투자사업
3) 노순규 (2008), 건설업의 VE가치공학의 품질경영
4) 국토해양부 (2009) 「국도건설 설계VE 업무매뉴얼」
5) 이미홍 (2007)「LCA의 소개와 사례」서울대 환경대학원 박사과정

제 16 절 슬림형 쉴드터널 미래 수요예측 및 시장성 평가

1) 이성원 외 12명(2010), “기계화·자동화 터널건설을 위한 TBM 기술개발 기획연구”, 한국건설교통기술평가원 기획연구보고서, 한국건설교통기술평가원

2) http://kostat.go.kr (통계청 홈페이지)

3) 지왕률, 장수호, 배규진, 이상주 (2008), “중국의 TBM 현황 및 전망”, 자연, 터널 그리고 지하공간, Vol. 10, No. 3, pp.40-49.

4) Government of India Ministry of Railway (2009). Indian Railways Vision 2020

부 록

1. 배수형 쉴드터널 설계·시공·유지관리 매뉴얼(안)
2. 배수형 쉴드터널 표준단면
3. 배수/비배수 조건 쉴드터널 모형실험장치 매뉴얼
4. PS 볼 뒤채움 주입장치 매뉴얼
5. 국외출장복명서
6. 해외과학기술정보

배수형 쉴드터널
설계·시공·유지관리 매뉴얼(안)

2015. 06

한국건설기술연구원

[목 차]

제1장 설계 매뉴얼 1
1.1 배수형 쉴드터널 세그먼트 설계 일반 1
1.1.1 세그먼트 종류 및 재질 1
1.1.2 세그먼트 구조 및 형상설계 1
1.1.3 세그먼트 배수 유로홈 및 내부 배수구 5
1.1.4 방수설계 7
1.1.5 배수설계 9
1.1.6 세그먼트 체결 9
1.2 배수형 쉴드터널 세그먼트라이닝의 구조해석 11
1.2.1 구조해석 일반 11
1.2.2 세그먼트 라이닝 구조해석 12
1.2.3 터널 횡단면의 구조계산 13
1.2.4 터널 종단면의 구조계산 15
1.2.5 설계하중 16

제2장 시공 매뉴얼 21
2.1 배수형 쉴드터널 세그먼트 제작 21
2.1.1 세그먼트 몰드 제작 21
2.1.2 세그먼트 제작 24
2.2 배수형 쉴드터널 시공 방법 28
2.3 배수형 쉴드터널 시공 관리 29

제3장 시공 · 유지 관리 32
3.1 쉴드터널 유지관리 항목별 기준 선정 32
3.2 배수형 쉴드터널 유지관리 항목 34
3.3 쉴드터널의 유지관리 방법(예) 41
3.3.1 점검 및 건전도 평가 41
3.3.2 조사 42

제1장 설계 매뉴얼

1.1 배수형 세그먼트 설계 일반

1.1.1 세그먼트 종류 및 재질

세그먼트의 종류는 재질에 따라 콘크리트, 강재, 합성(콘크리트+강재 또는 주철) 세그먼트로, 형상에 따라 상자형, 평판형 세그먼트 등으로 분류하며, 터널의 용도, 세그먼트의 강도, 내구성, 내화성, 시공성 및 경제성 등을 고려하여 선정한다.

세그먼트에 사용하는 재료는 한국산업규격(KS)을 표준으로 하는 것을 원칙으로 하며, 무근 및 철근 콘크리트에 관해서는 국토교통부 제정 '콘크리트 구조설계기준' 및 '콘크리트 표준시방서'의 규정에 따라야 한다.

※해설

쉴드TBM 터널의 적용 초기에는 강재 세그먼트가 많이 사용되었으나 콘크리트의 성능이 향상되면서 최근에는 철근보강 콘크리트 세그먼트가 일반적으로 사용되고 있다. 배수형 세그먼트의 재질은 철근보강 콘크리트계로서 경제성이 뛰어나며, 강성이 크고 내압축성이 뛰어나기 때문에 토압 및 수압, 잭 추력, 뒤채움 주입압 등에 의한 좌굴이 발생하지 않는다. 또한, 내구성이 좋고 주의하여 시공할 경우 수밀성도 뛰어나기 때문에 배수 유로홈을 통한 유도배수에 적합하다. 그 반면, 중량이 크고 인장에 대한 저항성이 작아 세그먼트 단부가 파손되기 쉬우므로 탈형, 운반 및 시공 시에 충분한 주의가 필요하다.

1.1.2 세그먼트 구조 및 형상설계

세그먼트 구조 및 형상설계는 다음 사항을 고려하여야 한다.

(1) 세그먼트의 강도, 구조, 형상 등은 터널의 용도, 지반조건, 시공법 등을 고려하여 선정하여야 한다.

(2) 상자형 또는 평판형 세그먼트를 볼트이음으로 조립한 링구조는 강성이 같은 링으로 취급할 수 있으며, 재질에 따라 콘크리트, 강재, 합성 세그먼트로 구별하여 설계하여야 한다.

(3) 세그먼트의 형상치수는 사용목적, 시공성, 경제성을 고려하여 설계하여야 한다.

(4) 세그먼트의 이음구조는 소요강도와 강성을 가짐과 동시에 조립의 확실성, 작업성 및 지수성을 고려하여 설계하여야 하며, 볼트 체결방식의 경우 적정 토오크치를 산정하여야 한다.
(5) 세그먼트는 원칙적으로 수밀성을 확보하여야 한다.
(6) 뒤채움주입을 균등하게 행하기 위하여 각 세그먼트에는 1개소 이상의 주입공을 설치하고, 주입공의 직경은 사용하는 주입재를 고려하여 결정하나 일반적으로 내경 50mm를 기준으로 하며, 주입공을 고리로 사용하는 경우는 작업성은 물론, 작업의 안정성과 자체 하중에 대한 인발력을 고려하여 주입공의 직경과 위치를 결정하여야 한다.
(7) 테이퍼링은 터널 선형, 지반조건, 보조공법, 이음의 강성, 세그먼트의 제작성, 시공성 등을 고려하여 그 수, 폭, 테이퍼량을 설계하여야 한다.

※해설

가. 세그먼트의 구조 및 치수

1) 세그먼트 두께

세그먼트의 두께는 터널 단면의 크기, 지반조건, 토피, 하중조건 등에 따라서 결정되지만, 터널의 사용목적이나 세그먼트의 시공성에 좌우되는 경우도 있다. 현재까지의 시공 실적에 의하면, 세그먼트의 두께는 일반적으로 세그먼트 외경의 4% 전후 범위이며, 최근 경질 지반에서는 4%를 밑도는 것도 사용되고 있다. 이 경우, 내구성이나 잭추력, 뒤채움 주입압 등의 시공 중 발생하는 하중에 대해 최대 응력, 변형이 생기지 않는 두께가 필요하다. 특히, 콘크리트계 세그먼트의 두께가 극단적으로 얇은 경우에는 시공 시 균열 등의 손상이 발생하기 쉬우며 구조적으로 불안정해지는 경우가 있기 때문에 주의를 요한다. 배수형 쉴드터널 세그먼트는 수압작용 방지 및 유입수의 유도 배수를 위한 배수 유로홈이 설치되므로 유로홈 적용 규격을 고려하여 최소 두께이상을 확보해야 한다.

2) 세그먼트 폭

세그먼트의 폭은 운반, 조립의 용이성, 곡선부의 시공성, 쉴드 테일의 길이 등의 측면에서는 작은 것이 유리하지만, 터널 연장당 세그먼트 제작비의 저감, 누수 등의 약점이 되기 쉬운 이음개소나 볼트구멍의 감소, 그리고 시공속도의 향상 측면에서는 큰 것이 유리하다. 세그먼트 폭을 결정할 때에는 터널 단면에 따른 시공실적을 감안하여 경제성과 시공성을 고려하여 결정하여야 한다. 세그먼트 폭을 확대할 경우 세그먼트의 비틀림 강성이 충분히 확보되지 않으면 응력집중 등으로 세그먼트의 폭 방향으로의 응력 분포가 고르지 않아 빔 부재로서 평가할 수 없는 경우도 있으므로 설계시 충분한 주의가 필요하다. 또한 치수 뿐 아니라 폭에 비례하여 중량도 증가하기 때문에

세그먼트의 제조설비, 현장까지의 운송 방법, 갱내의 운반이나 이렉터에 대하여 충분히 검토해야 한다.

3) 세그먼트 분할

일반적으로 세그먼트 링은 여러 개의 A세그먼트와 B세그먼트 및 마지막으로 조립되는 K형 세그먼트로 구성된다. K형 세그먼트는 터널 내측에서 삽입하는 반경방향 삽입형과 터널 축방향으로 삽입하는 축방향 삽입형 또는 이 2가지를 겸용하여 사용하는 것도 있으며, 최근에는 하부에서 삽입하는 독일식 방식이 개발되어 효율적으로 사용되고 있다. 터널 내측에서 삽입하는 K형 세그먼트(반경방향 삽입형)의 길이는 A 및 B 세그먼트와 비교해서 작게 하는 것이 좋다.

세그먼트의 분할 수는 제작비 절감, 조립속도 향상, 지수성 향상 측면에서는 분할 수가 적을수록 유리하지만, 분할 수가 극단적으로 적을 경우 세그먼트의 중량이나 치수가 확대되어 세그먼트의 제작성, 운반성, 터널 갱내에서의 취급 및 조립성에 영향을 주므로 터널 직경에 따라 적절한 수의 분할이 이루어지도록 검토해야 한다.

나. 세그먼트 이음구조

세그먼트 이음에는 세그먼트를 원통방향으로 결합하는 세그먼트 이음과 종단방향으로 연결하는 링 이음이 있다. 세그먼트라이닝의 주 구조가 되는 세그먼트 본체 및 이음구조는 터널 공용 후에 필요한 기능은 물론 시공 중의 안전을 만족할 수 있도록 설계하여야 한다. 볼트 이음의 경우 갱구부를 제외한 구간은 체결을 풀어 지반 내에서 세그먼트가 자연스럽게 구속되도록 하는 경우도 있다. 갱구부의 영구 체결용 볼트 스텐리스 재료를 사용하여 부식을 방지하도록 한다.

1) 세그먼트의 이음은 세그먼트 링의 단면력 계산방법에 따라 계산하여야 한다.

2) 링 이음은 시공시 하중 등을 고려하여 터널축방향의 연속성이 확보될 수 있도록 검토하여야 한다.

3) 볼트이음의 경우 볼트 직경에 비하여 볼트 구경이 너무 크면 세그먼트에 큰 결함을 발생시켜 시공 시 하중 증가의 원인이 될 수도 있으므로 주의하여야 한다.

다. 세그먼트라이닝의 수밀성

1) 세그먼트의 이음면에는 터널의 지수성을 확보하기 위해 지수공에 지수재를 설치하여야 한다.

2) 작업구나 터널 갱구부 등 터널과 다른 구조물과의 접속부에는 지수성을 확보하기 위해 지수공을 설치하여야 한다.

3) 세그먼트에 발생하는 균열은 수밀성의 저하나 누수 및 그에 따른 철근의 부식으로 세그먼트라이닝의 내구성을 저하시키는 원인이 될 수 있다. 건습이 반복되는 조건에서의 터널 균열은 세그먼트라이닝의 내구성에 영향을 미치므로 발생하는 균열이 쉴드터널의 기능, 사용기간이나 목적에 손상이 없도록 검토하여야 한다.

4) 지수재는 재료의 성질에 따라 재료의 점착성을 이용하는 것, 탄성 반발력을 이용하는 것, 수팽창에 의한 팽창압을 이용하는 방법 등이 있다. 수팽창 지수재는 팽창압에 의해 지수가 되는 것이 특징이며, 적당한 강성이나 경도를 갖도록 하는 것도 가능하므로 그 탄성반발력도 충분히 기대할 수 있으며, 어느 정도의 수압이나 틈까지는 탄성반발력으로 대응하고, 그것을 넘는 것에 대하여는 팽창압으로 대응하는 등 세그먼트의 설계조건이나 시공조건 등에 따라 실(seal)재를 설계할 수 있기에 실(seal) 홈의 용적에 대한 실(seal)재의 체적의 비가 적게 되며 조립시의 탈락 등에 대하여 유리하다. 최근 들어 TBM 터널의 세그먼트 라이닝의 차수를 위해 터널 세그먼트 개스킷을 적용하는 방법이 수행되고 있으며, 개스킷은 각 세그먼트 접합면에 미리 성형된 홈에 설치하여 세그먼트가 볼트로 접합되는 즉시 개스킷 라이닝 접합부를 폐합하여 방수의 역할을 하도록 하는 기본 원리를 갖고 있다.

5) 배수개념의 터널 설계 시 배수재의 성능저하는 수압의 작용으로 이어져 구조물의 안정성을 위협할 수 있으며 배수재의 통수능력 부족, 막힘 현상 등에 의해 원활한 배수가 이루어지지 않으면, 라이닝에 수압이 작용할 수 있으므로 이를 고려하여 설계하여야 한다.

1.1.3 세그먼트 배수 유로홈 및 내부 배수구

세그먼트 배수 유로홈의 설계는 다음 사항을 고려하여야 한다. (1) 설계대상구역에서 예상되는 유입수량을 산정하여 적합한 배수 유로홈의 규격을 설계하여야 한다. - 동일 설계조건에서의 배수형 NATM터널의 배수량 산정식 참조한다. - 쉴드터널 내 지하수유입조건을 고려하여 산정한다. (2) 유로홈에 의해 집수된 지하수의 배수를 위하여 쉴드터널 하단부 세그먼트에 별도의 내부 배수구를 적용하여야 한다. - 내부 배수구의 규격은 전체 유입수량을 고려하여 설계한다 - 내부 배수구의 위치 및 개수는 배수펌프 및 터널의 용도에 따른 시설을 고려하여 변경이 가능하다.

※해설

가. 배수 유로홈

1) 세그먼트라이닝의 배수 유로홈은 예상되는 최대 유입수량에 대하여 충분한 배수능력을 확보하도록 설계되어져야한다. 같은 설계조건의 NATM터널의 유입수량 검토방법에 의거하여 동등 이상의 배수성능을 확보하여야한다. 터널 내로 유입되는 지하수량은 지질적, 지형적 조건 등의 영향에 의해 그 정확한 양을 산출하기는 매우 어렵다. 일반적으로 터널내로 유입되는 수량은 아래의 Manning 공식을 이용하여 유입수량이 산정된다.

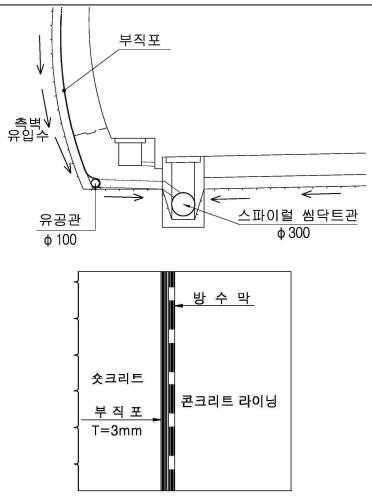
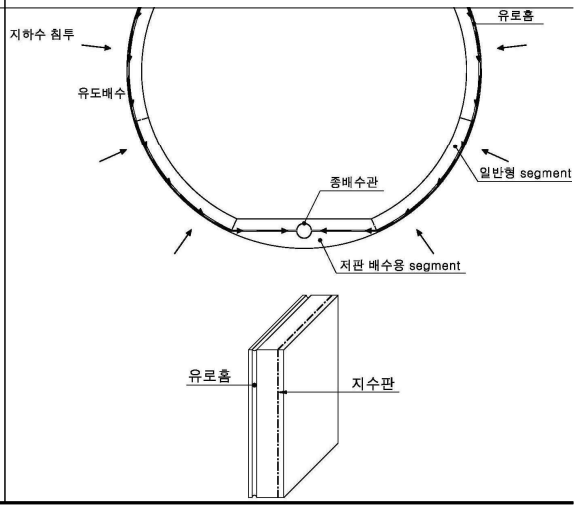
$$Q_d = AV = A \cdot 1/n \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

여기서, A = 배수로 단면적(㎡), D = 관 지름(m), I = 동수경사(종단경사)
V = 관내 유속(m/sec), R = 동수반경, n = 조도 계수

2) 동일조건에서의 NATM터널과 동등 이상의 배수성능을 확보하기 위해서는 배수 유로홈의 설계규격에 대한 검토가 수행되어야 한다. 배수 유로홈의 직경을 구하는 공식은 아래에 제시된 식을 참조하여 설계한다. 그러나 현장의 지반조건 및 지하수위, 터널의 규격 등을 고려하여 설계자의 판단에 의하여 충분한 배수가 가능할시 적절한 규격의 설계가 가능하다.

$$Q_2 = \frac{\pi \times D^2}{4} \times 2EA \quad (D : 유로홈\ 직경)$$

표 1.1 유도배수 원리 비교

구분	NATM 터널	배수형 쉴드터널
원리	콘크리트라이닝 배면의 부직포 전면을 통해 유입되는 지하수를 종방향 유공관에서 집수처리	세그먼트에 설치된 배수 유로홈을 통해 침투된 지하수를 종배수관이 설치된 저부 세그먼트에서 집수처리
개요 및 상세도		

나. 내부 배수구

배수 유로홈은 아래의 그림에서와 같이 세그먼트 내부에 형성되어 있기 때문에 베수 유로홈을 통하여 배수된 지하수의 배수를 위하여 터널 하부에 위치한 세그먼트에는 별도의 내부 배수구를 설계하여야한다. 내부 배수구는 배수 유로홈에서 집수되는 지하수의 유입량을 고려하여 개수 및 규격을 설계해야한다.



그림 1.1 지하수 배출을 위한 내부 배수구



그림 1.2 배수형 쉴드터널 세그먼트 구성

1.1.4 방수설계

세그먼트 라이닝의 방수설계는 다음 사항을 고려하여야 한다. (1) 세그먼트 라이닝은 지하수압에 견딜 수 있고 방수가 될 수 있도록 반드시 세그먼트 간의 이음부, 뒤채움주입구 등에 방수설계를 하여야 한다. (2) 방수방법의 선정 시에는 쉴드 TBM 터널의 사용목적과 작업환경에 적합한 방법을 선정하여야 한다. (3) 방수는 실(seal), 코킹, 볼트 등이 있으며, 사용목적과 현장여건에 부합하도록 한 가지 또는 여러 가지의 방법을 조합하여 설계할 수 있다. (4) 실(seal)재는 합성고무계, 복합고무계, 수팽창고무계 등이 있으며, 현장조건을 고려하여 수밀성, 내구성, 압착성, 복원성, 시공성 등이 우수한 재료를 선택하여 설계하여야 한다. (5) 코킹재는 에폭시, 치오클계, 요소수지계 등의 재료가 있으며, 현장조건을 고려하여 적합한 재료로 설계하여야 한다. (6) 세그먼트 라이닝의 배수유로홈 내부쪽에 방수를 위한 처리를 하여야 한다.

※해설

가. 세그먼트라이닝은 터널의 구조적 기능과 방수기능을 가져야 한다. 세극먼트 이음부의 방수, 배면 뒤채움 등으로 대표되는 쉴드 TBM 터널의 방수공사는 터널굴진 중 거치작업과 동시에 이루어진다. 쉴드 TBM 터널의 방수품질은 방수재료의 성능, 방수공정 외에도 굴진정밀도와 세그먼트 조립 상태 등의 모든 공장에도 관련성이 깊다. 허용오차범위 내에서 세그먼트 조립은 구조적 측면이나 방수측면에서도 매우 중요하다.

나. 세그먼트라이닝에서 지하수의 침투경로는 뒤채움주입층, 세그먼트, 콘크리트라이닝의 3단계로 구성된다. 뒤채움주입은 효과적인 차수방법이지만 품질관리가 어려워

통상 설계단계에서 차수효과를 고려하지는 않는다. 세그먼트 이음부의 방수기술이 미흡했던 과거에는 2차라이닝이 적용되었지만, 최근에는 차수목적으로는 거의 사용하지 않는다. 다만, 수로터널인 경우 표면의 조도계수를 향상시키기 위하여 적용되는 사례는 있다.

다. 방수공은 터널의 사용목적에 따라 작업환경에 적합한 방법으로 계획하여야 한다. 터널은 지하수위 하부에 구축되는 경우가 많으므로 세그먼트이 이음면에는 지하수압에 견딜 수 있는 방수공이 필요하다. 터널 내부로의 누수는 완성된 터널의 기능이나 유지관리에 문제를 발생시키므로 주의가 필요하다. 쉴드 TBM의 방수공에는 실(seal), 코킹(cocking) 및 볼트(bolt) 등이 있으며, 목적에 따라 실(seal)공만 하는 경우와 실(seal)공과 다른 방수공을 조합하여 계획하는 경우가 있다.

라. 실(seal)재는 다음과 같은 특성을 가져야 한다.

1) 설계상 허용되는 이음부 오차에 대하여 수밀성을 확보하여야 한다.

2) 설계상 고려되는 작용수압에 대하여 수밀성을 확보하여야 한다.

3) 쉴드잭에 의한 반복 추력이나 세그먼트의 변형에 따라서 수밀성을 잃지 않아야 한다.

4) 쉴드잭의 추력 및 볼트 체경에 내력을 가져야 한다.

5) 세그먼트 조립의 정밀도에 영향을 미치지 않아야 한다.

6) 세그먼트 조립시 및 완성 후에 세그먼트 자체에 영향을 미치지 않아야 한다.

7) 내후성, 내약품성이 우월한 것이어야 한다.

8) 부착 시의 작업성이 좋아야 한다.

마. 코킹방수 : 실재로는 완전방수가 되지 않고 터널 완성 후 누수발생의 가능성이 있는 세그먼트 이음줄눈에 코킹재를 충전하여 방수한다. 2열 실재 방수가 적용되는 세그먼트에는 코킹방수를 생략할 수도 있다. 코킹방수는 내측 이음부에 폭 3~10mm, 깊이 10~20mm의 홈을 설치하고 방수재를 압입하는 방식이다. 일반적으로는 운영 중 누수가 발생하는 경우에 누수량을 감소시킬 목적으로 사용된다.

바. 세그먼트 내부방수 : 배수유로홈을 통하여 배수되지 않고 내부로 침투되는 지하수의 유입을 막기 위하여 별도의 씰재를 이용한 방수처리가 필요하다. 씰재의 규격은 세그먼트의 크기와 유로홈의 규격 및 유로홈의 결합도를 고려하여 정하도록 한다.

1.1.5 배수설계

배수형 쉴드터널 설계시에는 다음 사항을 고려하여야 한다. (1) 터널을 통한 배수가 주변 구조물이나 시설에 구조적 영향을 미치지 않도록 대책 수립이 가능하여야 한다. (2) 배수형 터널은 배수를 통하여 수압을 저감시키는 개념이 설계수명 동안 유지되도록 하여야 하며, 배수와 수압을 배분한 부분 배수형 방수 형식을 채택할 수 있다. (3) 배수시스템은 자연흐름이 가능하도록 0.2% 이상의 기울기를 유지하여야 한다. (4) 배수 유로홈 및 내부 배수구를 통한 배수성능 유지가 가능해야 한다.

※해설

가. 터널내 배수로 인해 주변지반과 구조물의 침하 및 손상, 지반환경 변화에 영향이 미치지 않도록 방수형식을 선정해야하며 도심지의 미고결 지반 등의 터널시공에는 지하수 배출에 따른 지반침하가 발생할 수 있으므로 이를 고려하여 대책을 수립하여야 한다.

나. 배수형 쉴드터널에서의 지하수 거동은 배수재의 성능 저하로 인해 부분 배수조건으로 거동하므로 지반 및 라이닝, 배수재간 수리상호작용을 고려하여 이를 관리 가능한 수준으로 설계하여야 된다. 배수형 쉴드터널 설계시 유입수량을 배수할 수 있는 충분한 용량의 배수 유로홈의 설치로 배수기능 확보가 가능하며, 배수재의 성능저하로 인한 수압작용을 방지할 수 있다.

다. 터널의 기울기와 배수로의 기울기가 같을 경우에는 0.2%이상 되로록 하고, 터널의 기울기가 0.2% 미만일 경우에는 배수로 기울기를 터널과 별도로 계획할 수 있다.

라. 배수유로홈 및 배수로를 통하여 터널 내부로 유입된 지하수 집수를 위하여 종단 구배 등을 고려하여 배출을 위한 펌프용량을 산정해야 한다.

1.1.6 세그먼트 체결

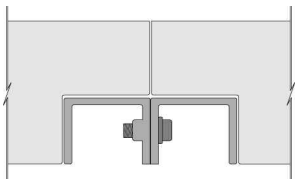
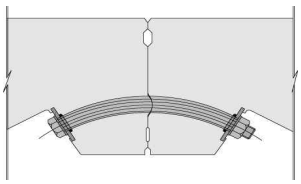
배수형 쉴드터널 세그먼트 체결 설계시에는 다음 사항을 고려하여야 한다. (1) 세그먼트 체결방식은 배수 유로홈 및 내부 배수구에 간섭하지 않아야 한다. (2) 유로홈의 형상체결을 위하여 세그먼트 체결시 일정이상의 체결력을 발휘하여야 한다.

※해설

가. 기존 쉴드터널 세그먼트 체결방식은 대부분 아래의 표와 같이 볼트박스 방식과, 곡볼트, 경사볼트 등으로 적용되었다. 그러나 배수 유로홈은 세그먼트의 4면을 따라 형성되어 있으므로 곡볼트 및 경사볼트로 인한 체결은 불가능하다.

나. 그림과 같이 세그먼트 체결방식으로서 볼트박스를 적용하여야하며, 배수 유로홈 및 내부 배수구에 간섭할 수 있는 사항에 대해서는 검토가 필요하다.

표 1.2 쉴드터널 주요 체결방식

구분	볼트박스 방식	곡볼트 방식
단면 형상		
체결력	-체결력 아주 높음	-체결력 높음
조립성	-조립공정 간편, 시공성 좋음	-조립공정 비교적 복잡
정밀도	-조립 정밀도 양호	-조립 정밀도 보통
체결부 누수대책	-볼트 및 볼트박스 연결부 누수대책 필요	-볼트 및 볼트구멍 연결부 누수대책 필요
누수 발생	-주기적인 누수 발생	-주기적인 누수 발생
안정성	-볼트박스 설치로 구조적 취약 -Jack 추진력에 대한 대응성 좋음	-안정성 높음 -Jack 추진력에 대한 대응성 좋음

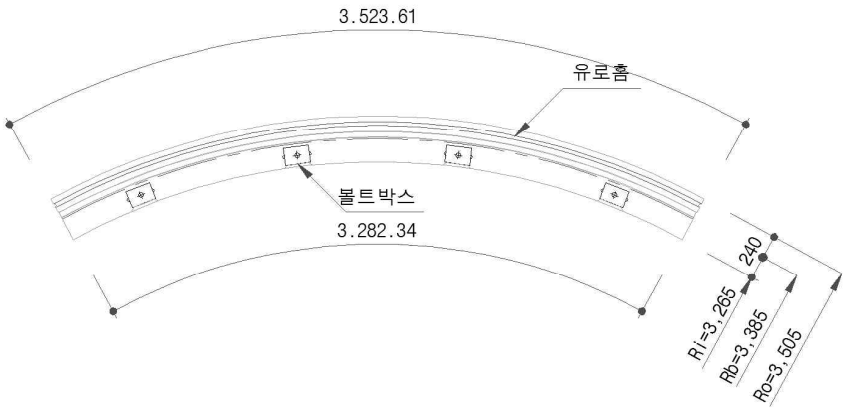


그림 1.3 배수형 쉴드터널 체결방식 단면도(예)

1.2 배수형 세그먼트 라이닝의 구조해석

1.2.1 구조해석 일반

배수형 세그먼트의 설계시에는 다음 사항을 고려하여야 한다. (1) 세그먼트라이닝은 추진잭의 추력, 주변지반의 토압, 수압 등의 하중에 견딜수 있어야 하며, 소정의 터널내공을 확보함과 동시에 터널의 사용목적 및 시공조건에 따른 역할과 기능을 보유할 수 있도록 안전하고 견고하게 설계하여야 한다. (2) 쉴드 TBM 터널에서는 지반의 조건 및 터널의 단면형상, 시공법 등에 따라 터널의 역학적 거동이 상이하므로 세그먼트라이닝의 설계 시 이를 고려하여야 한다. (3) 세그먼트 라이닝의 설계 계산서에는 계산상의 제반조건, 가정 및 계산과정을 명기하여야 한다. (4) 세그먼트 라이닝은 허용응력설계법으로 설계하는 것을 원칙으로 하며, 필요시 검증된 유사 설계법도 적용할 수 있다.

※해설

가. 세그먼트의 특징

현장타설 콘크리트라이닝과 달리 쉴드 TBM 터널의 세그먼트라이닝은 공장이나 작업장에서 미리 제작하여 터널 내에서 조립·설치하는 라이닝을 의미한다. 세그먼트라이닝은 공사 중 안정성 확보는 물론이고 영구적인 터널라이닝의 역할을 한다. 또한 세그먼트 설계·제작 시에는 지반하중과 수압을 지지하는 일반적인 구조적 기능 이외에도 운반 및 적치와 관련된 하중, 쉴드 이렉터에 의한 설치 시 하중, 쉴드 TBM의 추진을 위한 반력대로 활용할 수 있도록 고려해야 한다. 세그먼트의 제작비는 일반적으로 터널 공사비의 약 20~40%에 이르고, 세그먼트의 치수 및 크기는 쉴드 TBM의 굴진율 및 작업시간에 미치는 영향이 크므로 쉴드 TBM 터널의 설계에서 중요한 부분이다.

나. 세그먼트의 역할

1) 터널에 작용하는 하중에 대해 내력을 가지면서 터널 내공을 확보할 수 있어야 한다.

2) 터널의 사용목적에 적합한 기능과 내구성을 가져야 한다.

3) 터널의 시공조건에 적합한 세그먼트 구조를 가져야 한다.

4) 장대산악터널인 경우에는 지반의 상태에 따라서 무근 세그먼트, 단철근 세그

먼트, 복철근 세그먼트 등을 적용할 수 있으며 파일럿 TBM 등에는 공사용 가설 세그먼트도 사용될 수 있다.

5) 연장이 비교적 짧은 연약지반에서는 가장 불리한 조건에 대해 설계된 세그먼트를 전 구간에 사용한다.

다. 설계계산서의 명기사항

설계계산서에는 계산조건, 가정사항, 검토방법, 계산과정, 설계결과 등을 명기하여야한다.

1) 지반 및 지하수 조건
2) 설계하중
3) 사용재료의 종류 및 특성
4) 허용응력도 또는 안전율

라. 설계방법

일본에서는 허용응력설계법 이외에도 비록 실적은 적지만 설계법의 합리화를 위하여 한계상태설계법에 의한 세그먼트라이닝의 설계를 허용하고 있다. 우리나라에서는 한계상태설계법에 대한 기준이 아직 마련되어 있지 않으므로 허용응력설계법으로 설계하는 것을 원칙으로 하되, 향후의 기술발전을 고려하여 허용응력설계법 이외에도 한계상태설계법등을 적용할 수 있다.

1.2.2 세그먼트 라이닝 구조해석

세그먼트라이닝의 구조해석은 다음 사항을 고려하여야 한다.

(1) 세그먼트라이닝의 구조계산방법은 간편법, 스프링 모델 및 수치해석법등이 있으며, 구조계산은 횡단면과 종단면으로 나누어 수행하고, 시공 도중의 각 단계 및 완성 후의 상태에 작용하는 하중을 고려하여 수행하여야 한다.
(2) 터널횡단면의 설계하중은 설계의 대상이 되는 터널구간 내의 가장 불리한 조건을 대상으로 결정하여야 한다.
(3) 세그먼트 단면력은 그 구조특성을 고려하여 계산한다.
(4) 종단면해석 시에는 시공단계 및 완성 후의 하중 상태와 세그먼트의 구조특성 등을 고려하여야 한다.

1.2.3 터널 횡단면의 구조계산

세그먼트라이닝의 구조해석은 다음 사항에 따르며 빔-스프링 모델을 이용해 산정하는 것을 기본으로 한다.

(1) 터널 횡단면 방향의 단면력은 세그먼트 본체를 빔으로 하고 세그먼트의 이음을 스프링으로 하여 인접한 링 두 개 이상을 고려한 구조모델을 이용해 산정한다.

(2) 세그먼트 이음은 회전 스프링으로 하고 링 이음은 전단스프링으로 하여 모델화하며, 그 스프링 정수는 세그먼트의 구조 특성 및 하중 조건을 고려하여 정한다.

(3) 복공 횡단방향의 단면력을 산정하는 경우에는 지반과의 상호작용을 고려하도록 한다.

(4) 세그먼트 본체의 설계용 단면력은 산정된 최대 휨모멘트와 그 위치의 축력을 조합한 것 과 최대 전단력으로 한다.

(5) 세그먼트 이음부의 설계용 단면력은 산정된 이음부의 최대 휨모멘트와 그 위치의 축력을 조합한 것 과 최대 전단력으로 한다.

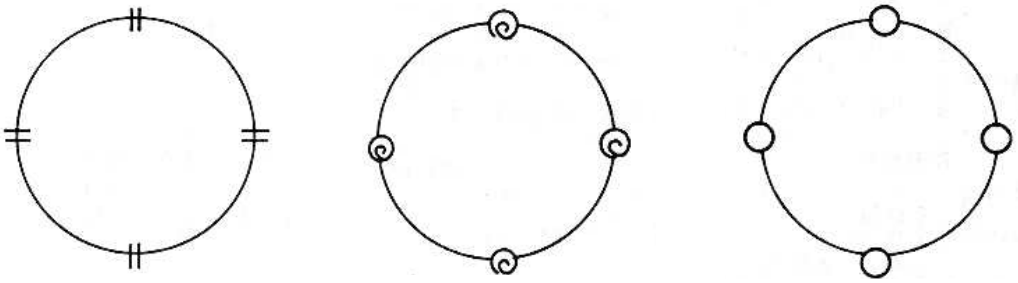
(6) 링 이음부의 설계용 단면력은 산정된 이음부의 최대 전단력으로 정한다.

※해설

가. 구조해석 모델

구조해석 방법에는 해석적 방법, 수치 해석방법이 있으나, 근래에는 수치 해석방법의 발달로 수치해석의 비중이 증대되고 있다. 수치 해석방법에는 지반을 반력스프링으로 고려하는 빔-스프링 모델과 탄소성 요소로 고려하는 연속체 모델이 있는데, 세그먼트라이닝의 구조해석에는 빔-스프일 모델이 주로 사용되고 지반침하거동과 같은 해석에는 후자의 방법이 사용되는 것이 일반적이다. 본 지침에서는 세그먼트의 분할 수나 분할 위치, 이음의 강성 등을 평가할 수 있는 빔-스프링 모델을 이용한 계산법을 이용하는 것을 기본으로 한다.

빔-스프링 모델은 이음부를 고려하는 방법에 따라 강성일체법, 회전스프링법, 힌지법 등으로 구분된다. 강성일체법은 이음부를 고려하지 않고 연속된 부재로 계산하는 방법으로 모멘트가 가장 크게 산출된다. 반면에 힌지법은 이음부에서 모멘트가 해소되기 때문에 모멘트가 가장 작세 산출된다. 회전스프링법은 두 방법의 중간 정도의 모멘트가 산정되기 때문에 일반적으로 많이 사용된다.



(a) 강성일체법 (b) 회전스프링법 (c) 힌지법

그림 1.4 세그먼트라이닝의 빔-스프링 모델 예

최근 국내 설계 시에는 이보다 더 발전된 2링 빔-스프링모델이 적용되고 있는데, 반경방향 이음부는 회전스프링으로 고려하고 링 이음부는 전단스프링을 이용하여 지그재그로 연결된 2개 링의 구속조건을 고려하며 세그먼트에는 지반반력스프링을 연직으로 설치하여 해석한다.

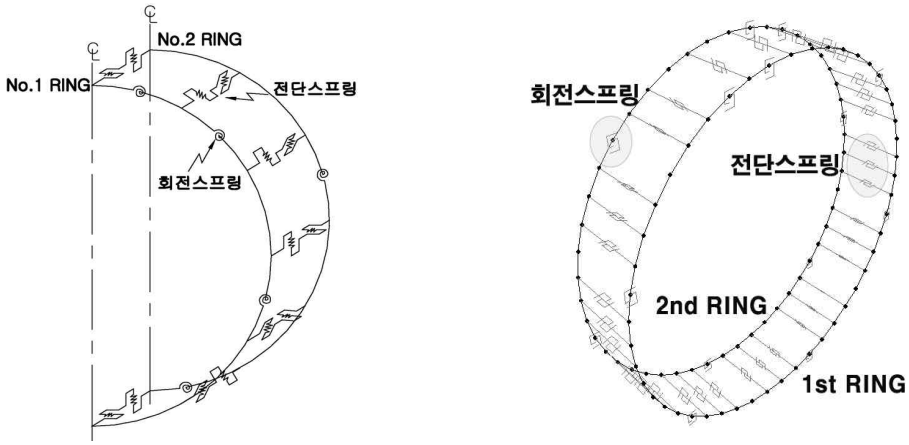


그림 1.5 2링 빔-스프링모델

세그먼트의 구조적 특징을 고려하는 측면에서 2링-빔 스프링 모델이 적합하나, 기본계획과 같이 세그먼트의 세부 설계가 이루어지지 않은 초기 설계단계에서는 세그먼트 두께 산정과 같은 기본적인 설계항목으로 산정하기 위해 단순한 강성일체법을 이용할 수 있다.

나. 지반반력스프링계수 및 회전스프링계수

지반반력계수(K)는 주변지반탄성계수(E)와 터널반경(R)으로부터 다음 식으로 구할 수 있다.

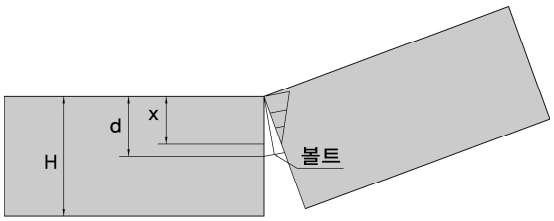
$$K = \frac{E}{R}$$

반경방향 이음부의 회전스프링계수(Km)는 해설그림-3의 조건에 대해 다음 식으로 구할 수 있다.

$$Km = \frac{M}{\theta} = \frac{x(3h-2x)bEc}{24}$$

위 식에서 $x = \frac{nA_b}{b}(-1+\sqrt{\frac{2bd}{nA_b}})$이고, 각 기호는 다음과 같다.

여기서, M : 휨모멘트
b : 세그먼트 폭
A_b : 볼트의 단면적
Θ : 회전각
x : 압축외연에서 중립축까지의 거리
h : 세그먼트의 두께
d : 유효깊이
n : 영계수비



링 이음부의 전단스프링계수(Ks)는 이음부의 전단키와 관련이 있으나, 관용적으로 40MN/m 정도를 사용한다.

1.2.4 터널 종단면의 구조계산

터널 축방향의 구조계산은 필요에 따라 실시하며 이음의 특성을 적절하게 평가하여 실시하도록 한다.

※해설

세그먼트 링으로 되는 터널 종단방향의 구조계산은 필요에 따라 다음과 같은 항목을 검토한다.

1) 급곡선 시공 및 급기울기 시공
2) 지진의 영향을 받는 경우
3) 병설터널의 영향을 받는 경우
4) 근접시공 및 지반침하의 영향을 받는 경우
5) 내부하중의 영향을 받는 경우

종단방향으로 이음을 가진 터널의 구조 모델에는 세그먼트 1 링을 하나의 빔으로

하고 링 이음부를 하나의 회전 스프링, 축 방향 스프링, 전단 스프링으로 바꾸어 연속시킨 모델(빔-스프링계 모델), 터널 전체를 이음부의 변형 특성을 고려하여 하나의 등가 강성 스프링으로 바꾸는 모델(등가 강성 치환 빔 모델)이 있다. 터널 축 방향의 상세한 검토가 필요한 경우에는 전자의 모델을 이용하며 지진의 영향을 검토하는 경우에는 후자의 모델을 이용하는 경우가 많다.

터널 종단방향의 검토는 터널 종단방향 구조 모델의 설정, 지반 스프링의 스프링 정수 설정, 하중계의 평가, 구조 해석, 이음부의 안전성 조사의 순서로 실시한다. 이음부의 안전성은 부재 각 부분의 응력도를 조사할 뿐 아니라 이음부의 벌어짐이 장기적으로 발생하는 경우의 누수에 대해서도 검토할 필요가 있다.

빔-스프링계 모델은 링 이음을 스프링으로 바꾸기 때문에 이 스프링 정수를 적절하게 평가할 필요가 있다. 특히 급곡선 시공의 영향을 검토하는 경우에는 터널 종단방향으로 발생하는 축력에 따라 스프링을 비선형 부재로 취급하는 등 주의가 필요하다.

등가 강성 치환 빔 모델은 본체부와 이음부의 강성을 등가로 치환하는 등가 강성 치환 빔 모델로 해설그림-3과 같이 등가 강성 치환 빔과 복수의 지반 스프링으로 구성된다.

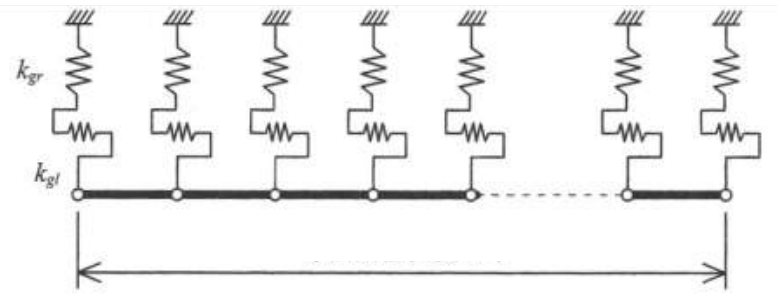


그림 1.6 등가 강성 치환 빔과 지반 스프링

1.2.5 설계하중

세그먼트라이닝에 걸리는 하중 산정 시에는 추진잭의 추력, 연직 및 수평지반압, 수압, 자중, 상재하중의 영향, 지반반력, 내부하중, 시공시 하중, 병설터널의 영향, 지반침하의 영향 등을 고려하여야 한다.

※해설

세그먼트 설계 시에 고려되는 하중은 다음과 같으며, 콘크리트 구조설계기준(국토교통부, 2012)에서 제시한 하중계수와 하중조합을 고려하여 세그먼트 보강을 수행하여야 한다. 세그먼트라이닝의 작용중들은 일반적으로 정적하중으로 고려되지만, 지진

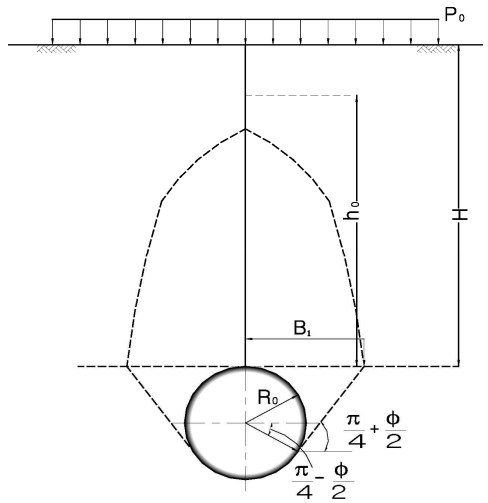
이나 동적하중을 고려하는 특수조건에서는 동적해석수법을 적용할 수 있다.

(1) 기본하중

가. 지반하중(또는 토압)

토피가 낮고 연약한 지반의 연직하중은 전토피(total overburden)를 적용하여 산정한다. 양호한 지반조건에서는 이완하중 개념을 도입하여 전토피보다 작은 연직하중을 적용한다. 수평하중은 연직하중에 토압계수 또는 측압계수를 곱한다. 이완하중의 산정은 Terzaghi법이 보수적이며, 지반의 강도 및 심도를 고려할 수 있는 장점이 있기 때문에 많이 적용된다. 다음 그림은 연직 이완하중(Pv)을 산정하는 개념도이며, 산정식은 다음과 같다.

$$Pv = \frac{\gamma B}{2K_0 \tan \varnothing}(1 - e^{-K_0 \tan \varnothing \frac{2H}{B}}),\ B = 2[\frac{b}{2} + m\tan(45 - \frac{\varnothing}{2})]$$



여기서, P_v : 연직암반이완하중
K_0 : 수평토압과 연직토압의 비
Ø : 흙의 내부마찰각
m : 터널높이
b : 터널 폭
H : 토피(이완하중고)
ɣ : 지반단위중량

나. 수압

일반적으로 비배수형 쉴드 TBM에 작용하는 수압은 터널시공 중이나 향후 유지관리시의 지하수위 변동을 고려하여 안전한 설계가 되도록 공용기간 중에 발생할 수 있는 최악의 조건을 산정하여 적용한다.

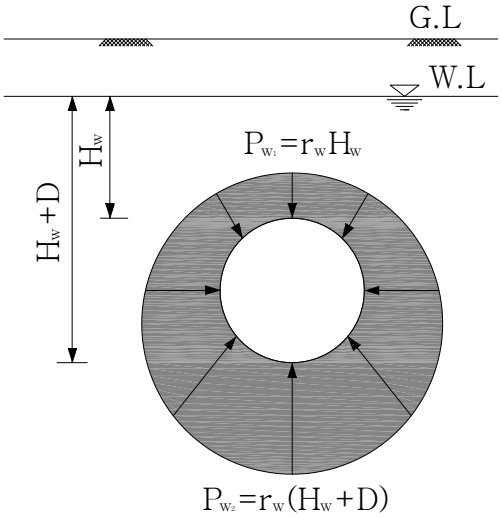


그림 1.7 수압 작용도

배수형 쉴드 TBM에서의 수압은 축소모형실험 결과를 통하여 얻어진 결과에 따라 다음의 산정식을 이용할 수 있다.

$$P_w = -\frac{2.4635}{H}x^2 + 9.0726x - 0.0009H$$

다. 세그먼트라이닝의 자중

라이닝의 도심선을 따라 분포하는 연직하향의 하중으로 고려한다.

라. 상재하중

터널상부 지표면(또는 자중)에 작용하는 교통하중, 건물하중, 성토하중 등에 의한 상재하중의 영향을 필요에 따라 재현하는 것이 바람직하다.

마. 지반반력

구조계산방법에 따라 다르지만, 최근에는 널리 활용되고 있는 빔-스프링 모델을 이용한 수치해석에서는 지반반력을 별도로 산정할 필요가 없다. 빔-스프링 모델에서는 상응하는 지반반력스프링을 고려하면, 세그먼트 변형량에 비례하는 반력이 자동적으로 고려된다. 지반반력은 압축력만 발생하므로 압축스프링 요소를 적용하거나 또는 인장부의 스프링을 제거하여야 한다.

바. 내부하중

터널완성 후에 라이닝 내측에 작용하는 하중으로서 라이닝에 영향을 미치는 경우

에 검토해야 한다. 터널 내부하중에는 노반, 인버트 등의 고정하중과 차량에 의한 활하중이 있다. 일반적으로 이러한 하중은 세그먼트 구조설계에 미치는 영향은 작지만 연약지반인 경우에는 검토가 필요할 수 있다.

(2) 별도 검토를 위한 하중

가. 시공시 하중

세그먼트 조립 시부터 뒤채움주입재가 경화될 때까지, 즉 조립 중인 세그먼트와 조립된 세그먼트에는 여러 가지 하중이 작용한다. 곡선부에서는 주입재의 경화 후에도 잭 추력이나 그에 따라 발생하는 지반반력 등의 영향을 받는다. 대단면이나 대심도터널인 경우는 잭 추력이나 뒤채움주입압 등의 영향이 커지므로 주의가 필요하다. 최근에 증가하는 2차 라이닝의 생략, 세그먼트의 광폭화 및 분할수 저감에 의한 세그먼트의 대형화, 특수연결고리에 의한 간편화, 급곡선 및 급기울기 등의 터널선형 채용에 따른 시공 시 하중으로 세그먼트가 손상될 우려가 있으므로 주의해야 한다. 세그먼트 검토 시 고려할 시공 시 하중은 다음과 같다.

1) 쉴드잭 추력 : 쉴드굴진시 잭 추력에 대한 반력으로서 일시적으로 작용하는 하중이나 시공시 하중 중에는 가장 큰 하중이다. 일반적으로 평판형 철근콘크리트 세그먼트에서는 별 문제가 없으나, 상자형 세그먼트에서는 면밀한 검토가 필요하다.

2) 뒤채움주입압 : 세그먼트 튀채움 압력은 이상적으로 주입되는 경우에는 정수압조건으로 작용한다. 그러나 실제 시공시에는 균등하게 주입되지 않기 때문에 뒤채움 주입공 주변에 국부적으로 압력이 가해지는 조건을 상정한다.

3) 운반 및 취급하중 : 세그먼트는 운반 및 취급 중 적치되는 경우가 있다. 이때, 세그먼트에는 축력은 없고 오로지 휨응력만 작용하므로 구조검토가 필요하다.

나. 근접시공 및 병설터널의 영향

1) 근접터널 : 쉴드터널은 도심지에서 건설되는 경우가 많기 때문에 장래 근접굴착 계획이 있는 경우에는 이에대한 추가하중을 산정해 기본하중 시 보강량의 적정성을 검토해야 한다.

2) 병설터널 : 병설터널로 건설되는 경우 두 터널의 간격이 작을수록 지반하중은 증가한다. 일본 철도협회에 따르면, 터널폭이 D이고 순이격거리(또는 필라폭)가 d이면, 이격거리별 할증계수를 다음과 같이 산정할 수 있다. 할증하중은 연직하중에 할증계수를 곱한 후 본래의 연직하중에 더해진다.

다. 지진의 영향

지진의 영향이 예상된다고 판단되는 경우에는 사용목적이나 중요도에 따라 입지조건, 지반조건, 지진동의 규모, 터널의 구조와 형상 및 기타 필요한 조건을 고려하여 터널내진설계 기준에 의거하여 검토한다. 암반이 양호한 경우에는 고려하지 않을 수 있다.

제2장 시공 매뉴얼

2.1 배수형 쉴드터널 세그먼트 제작

2.1.1 세그먼트 몰드 제작

(1) 배수형 쉴드터널 세그먼트 제작용 몰드는 세그먼트의 4면에 배수 유로홈의 제작이 가능하여야 한다. (2) 쉴드터널 하부 내부 배수구의 위치별 A, B-Set의 생산이 가능해야 한다. (3) 배수 유로홈 및 내부 배수구의 규격의 정확도를 유지하기 위해서는 제작오차의 범위를 최소화 해야한다.

※해설

가. 세그먼트 제작

배수형 세그먼트에서의 배수 유로홈은 매우 중요한 역할을 수행하므로 세그먼트 제작시 유로홈의 형상 및 사이즈 유지는 매우 중요한 제작과정이다. 몰드는 아래의 그림과 같이 양각으로 배수 유로홈과 내부 배수구가 형성되어 있으며, 세그먼트 제작과정에서 탈형시에 세그먼트의 배수 유로홈과 내부 배수구에 손상이 없도록 제작한다.



그림 2.1 배수형 쉴드터널 세그먼트(예)

나. 종류별 세그먼트 몰드

쉴드터널은 각각의 세그먼트가 하나의 링으로 폐합되고 나서 세그먼트가 맞물리도록 체결되는 형식이다. 이에 터널 하부에 내부 배수구가 형성되기 위해서는 홀수열

의 A-Set와 짝수열의 B-Set가 각각 다르게 내부 배수구가 형성되어야 한다.

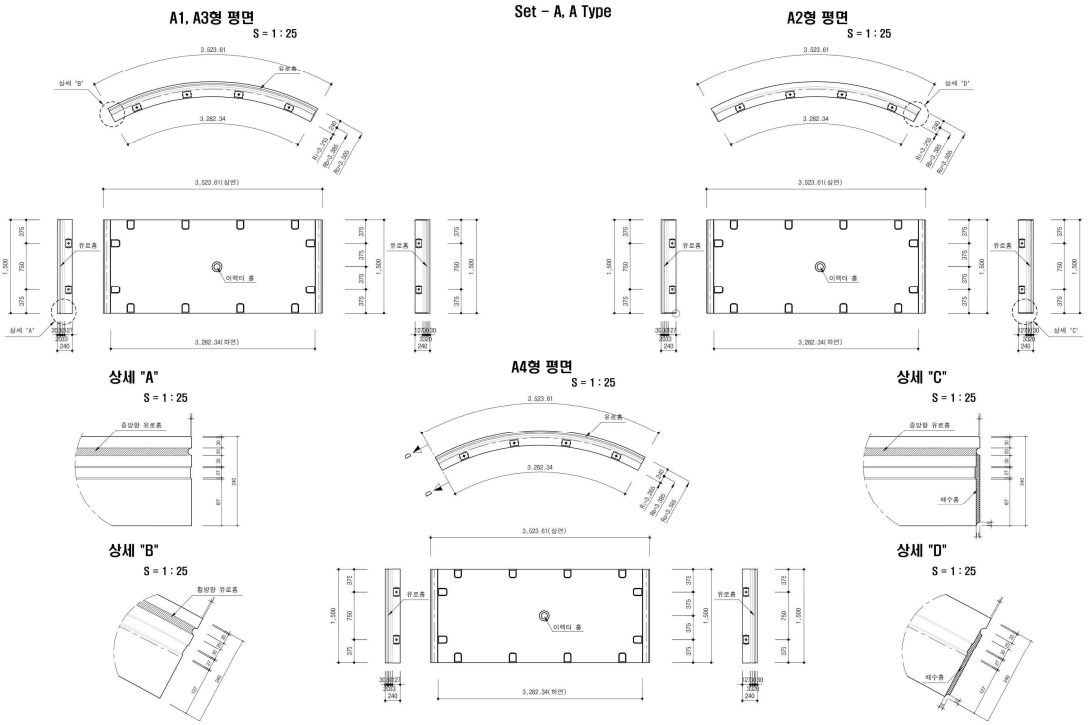


그림 2.2 배수형 쉴드터널 세그먼트 A-Set(예)

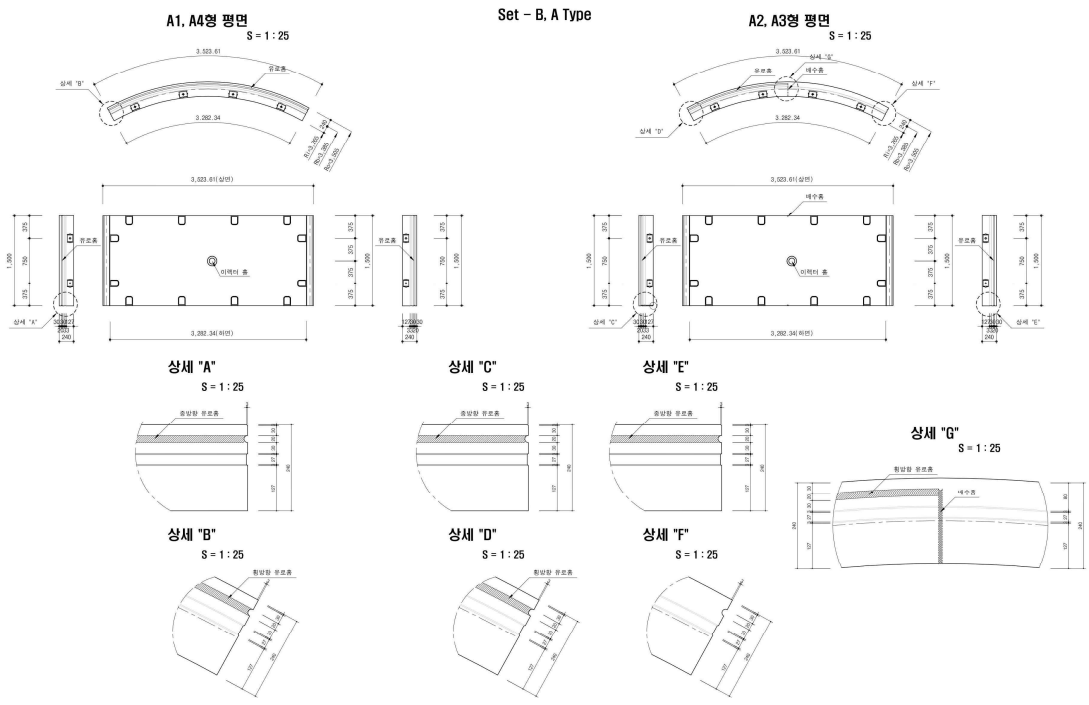


그림 2.3 배수형 쉴드터널 세그먼트 B-Set(예)

표 2.1 몰드 사용 재료의 규격

종 별	규격(JIS)	
강 재	G 3101	일반 구조용 압연 강재
	G 3106	용접 구조용 압연 강재
주조 품	G 5101	탄소강 주강품
	G 5501	회 주철 품
	G 5502	구사 흑연 주철 품

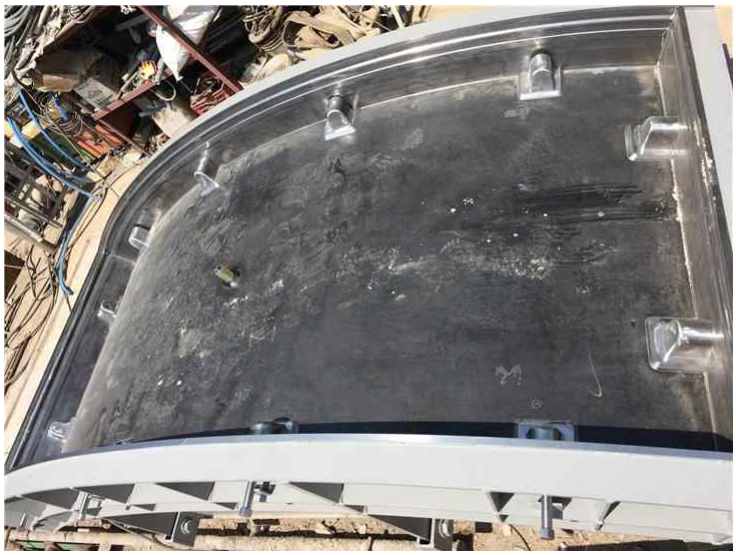


그림 2.4 배수형 쉴드터널 세그먼트 몰드(예)



그림 2.5 배수형 쉴드터널 세그먼트 몰드(예)

2.1.2 세그먼트 제작

(1) 배수형 쉴드터널 세그먼트는 충분한 강도를 발휘할 수 있도록 제작해야 한다.

(2) 배수형 쉴드터널 세그먼트의 운반 중 손상이 없도록 한다.

(3) 세그먼트는 필요한 치수 정밀도를 확보해야 한다. 또한 필요한 치수 정밀도는 세그먼트의 제작에 앞서 사전에 정해두어야 한다.

(4) 배수 유로홈 및 내부 배수구는 제작오차를 최소화하여 규격을 유지하여야 한다.

※해설

세그먼트에 사용하는 재료는 규격에 적합한 것을 원칙으로 하며 무근 및 철근 콘크리트의 탄성계수 및 허용응력은 대해서는 [콘크리트 표준시방서]의 규정에 의한다.

표 2.2 Concrete 탄성계수

설계기준강도(kgf/cm^2)	420	450	480
탄성계수(kgf/cm^2)	3.3×10^5	3.6×10^5	3.9×10^5

표 2.3 Concrete 허용 응력도(kgf/cm^2)

설계기준강도	42	45	48
허용 굽힘 압축 응력도	150	160	170
허용 전단 응력도	5.5		
허용 부착 응력도	20(이형철근)		



그림 2.6 배수형 쉴드터널 세그먼트(예)



그림 2.7 배수형 쉴드터널 세그먼트 배수 유로홈(예)



그림 2.8 배수형 쉴드터널 세그먼트 내부 배수구(예)

표 2.4 세그먼트 사용 재료의 규격

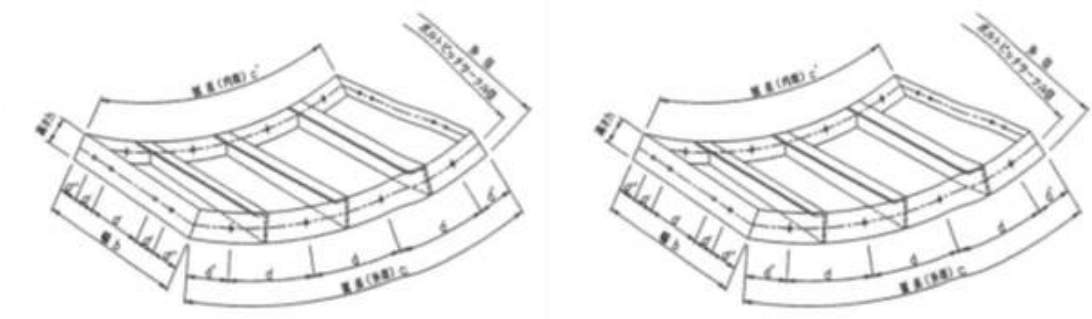
종 별	규격(JIS)	
Cement	R 5210	Portland Cement
	R 5211	고로 시멘트 A, B, C 3종
	R 5212	Silica Cement A, B, C 3종
	R 5213	Fly Ash Cement A, B, C 3종
강 재	G 3101	일반 구조용 압연 강재
	G 3106	용접 구조용 압연 강재
봉강 및 강선	G 3112	철근 콘크리트용 봉강
	G 3521	경 강선
	G 3532	철선
	G 3505	연강 선재
	G 3506	경강 선재
	G 3536	PC강선 및 PC강 꼬인선
Bolt Nut 및 Washer	B 1180	육각 볼트
	B 1192	육각 너트
	B 1186	마찰 접합용 고력 볼트, 유각 너트, 평 Washer 셋트
	B 1256	Plane Washer
강관 기타	B 2301	나사 끼움식 가단 주철제 계수
	B 2302	나사 끼움식 강관제 계수
	G 3444	일반 구조용 탄소강 강관
	G 3445	기계 구조용 탄소강 강관
	G 3452	배관용 탄소강 강관
	G 3454	압력 배관용 탄소강 강관
	G 3455	고압 배관용 탄소강 강관
용접봉 및 용접 Wire	Z 3211	연강용 피복 Arc 용접봉
	Z 3212	고장력 강용 피복 Arc 용접봉
	Z 3311	강 Sub Merge Arc 용접재료
	Z 3312	연강 및 고장력강용 Arc 용접 Solid 입 Wire
	Z 3313	연강 및 고장력강용 Arc 용접 Flux 입 Wire

세그먼트의 치수 정밀도는 세그먼트의 종류, 사용 재료, 제작 방법, 사용 목적에 따라 다르며 각각 특징이 있기 때문에 통일적으로 정하기는 어려우나 현행 치수 허용차의 예를 표 2.5를 참조한다. 또한 합성 세그먼트의 치수 정밀도는 콘크리트계 세그먼트를 참고로 해도 좋다.

치수의 계측에는 게이지판, 강자나 강줄자 등을 이용한다. 또한 도로 터널과 같이 외경이 12m 넘는 대구경 세그먼트나 특수 형상의 세그먼트, 세그먼트 자동 조립 장치를 채용하는 경우에는 미리 검토한 후 치수 허용차를 별도로 정하는 것이 바람직하다.

표 2.5 세그먼트 치수 허용 차(예)

구분	콘크리트계 세그먼트	강제 세그먼트
세그먼트 높이h(mm)	+ 5.0 - 1.0	± 1.5
세그먼트 b(mm)	± 1.0	± 1.5
아치 길이c	± 1.0	± 1.5
볼트 구멍 피치	± 1.0	± 1.0
각 부분의 두께	- 1.0	-



(a) 콘크리트계 세그먼트 (b) 강재 세그먼트

그림 2.9 세그먼트 치수의 측정

2.2 배수형 쉴드터널 시공 방법

(1) 배수형 쉴드터널의 세그먼트는 일반 쉴드터널의 세그먼트와 같은 방식으로 시공이 수행되어진다.

(2) 터널 하부에 내부 배수구가 위치하기 때문에 세그먼트는 크게 2개의 Set로 나누어지므로 시공 시 계획된 순서 및 구조에 따라 세그먼트 조립이 수행되어져야 한다.

(3) 배수 유로홈 및 내부 배수구의 손상에 주의하여 시공하여야한다.

※해설

배수형 쉴드터널의 세그먼트는 아래의 그림과 같은 2개 Set의 순서에 따라 반복되어 조립이 되며 시공이 수행된다. 배수 유로홈을 통하여 유도된 지하수의 배출을 위한 내부 배수구는 설계된 개수만큼 터널의 하단부에 위치하게 된다. 세그먼트는 격자로 조립이 되어지므로 내부 배수구는 홀수열의 세그먼트에서는 모서리부에 1/4 원으로 형성되어 있지만, 조립되어지는 다음열의 세그먼트에서는 중앙부에 1/2원으로 조립이 수행되어 진다. 설계 시 작성되어진 세그먼트의 조립 순서도대로 세그먼트의 시공이 수행되어야 한다.

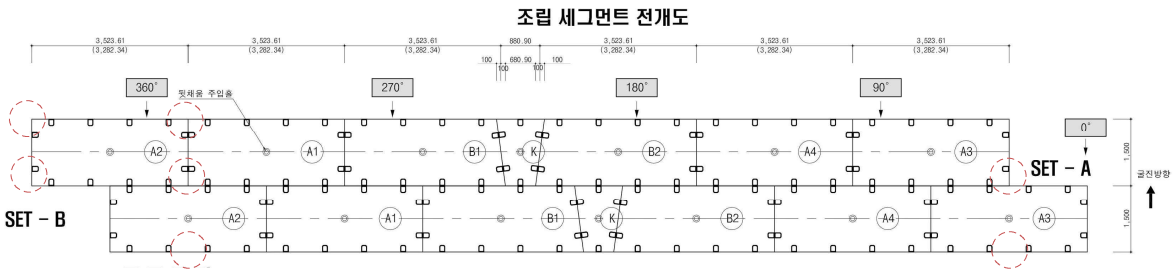


그림 2.5 평면도의 내부 배수구 위치

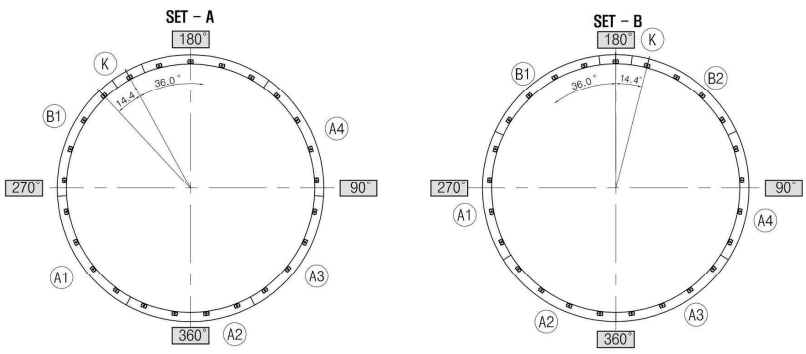


그림 2.5 Set별 세그먼트 위치

2.3 배수형 쉴드터널 시공 관리

배수형 쉴드터널 시공 관리는 아래 항목에 대하여 신중히 실시하도록 한다 (1) 공정관리 (2) 품질관리 (3) 선형관리 (4) 쉴드 및 쉴드 설비의 유지관리 (5) 작업 관리 (6) 완성형 관리

※해설

가. 공정 관리

공정 관리는 끊임없이 작업 상태와 실적을 파악하여 계획 공정과 대조한 후 전체 공정이 원활하게 무리 없이 진척되도록 해야 한다. 계획 공정 및 시공 설비는 착공 전에 실시한 토질 조사 결과, 접근 구조물이나 장애물의 상황 조사 결과를 토대로 결정되며 공사 실시를 위해 계획하는 공정과 일치한다고는 할 수 없다. 따라서 항상 계획과의 차이를 분석하여 문제점을 파악해 공정 관리를 실시해야 한다. 공정표는 작업 상호의 관련과 위험요소를 명확하게 파악할 수 있는 것으로 해야 한다.

나. 품질 관리

품질 관리는 터널 구축에 사용하는 주요 재료 및 제품에 대해 실시해야 한다. 사용하는 주요 재료 및 제품은 필요한 시험이나 검사를 통해 품질, 형상, 치수, 강도가 적합함을 확인한 후에 사용해야 한다. 주요 재료 및 제품이란 세그먼트, 볼트, 실드, 뒤채움 주입재, 실재, 인버트 콘크리트, 상판 등이 있다. 특히 세그먼트는 보존에서 운반, 조립까지 각 단계에서 신중한 취급이 필요하며 최종적으로 진원으로 조립하여 그 상태를 유지해야 한다. 터널의 변형, 세그먼트의 손상과 균열, 누수 등은 터널의 기능상 문제가 되기 때문에 만일의 경우에는 적절한 보수, 보강을 실시해야 한다.

다. 선형 관리

선형 관리는 실드 터널을 건조하기 위한 기본이 되며 시공 후에 터널 선형의 수정은 거의 불가능에 가깝기 때문에 신중하고 정확하게 실시해야 한다. 선형 측량은 크게 갱외 측량, 갱내 측량, 굴진 관리 측량으로 나눌 수 있다.

1) 갱외 측량

시공에 착수할 때에는 이미 공사 계획을 위한 측량이 계획 설계 시점에서 실시되며 공사 계획 시의 측량 결과 재확인 및 시공 상 필요로 하는 기준점의 정비를 위해 새로 측량할 필요가 있다.

기준점은 지상에서 중심선 측량, 종단 측량으로 설정하고 터널의 길이와 지형의 상황에 따라 GPS 측량 또는 트레버스 측량을 실시한다. 수준 기점은 견고한 장소에 설치하여 정기적으로 검측해야 한다.

2) 갱내 측량

갱내 측량은 갱외 측량을 토대로 갱내 기준점을 설치하여 검측하는 것으로 굴진 관리 측량의 기본이 된다.

입갱으로의 중심선 도입은 연직기, 추나 트랜싯을 통해 실시하며 입갱 깊이에 따라 적절한 방법을 선택할 필요가 있다. 지상에서 지하로 도입하는 중심 기선의 거리가 짧은 경우, 진북 측정기 (자이로 컴퍼스)로 방향을 확인하는 것이 효과적이다.

기준점을 추력 등의 영향을 받지 않는 곳에 설치하고 정기적으로 검측해야 한다. 지상 기준점과 갱내 기준점의 위치를 확인하고 측량 정밀도를 향상시키기 위해서는 관측 구멍을 설치하는 것이 바람직하다. 중간에 통과하는 입갱이 있는 경우에는 이를 이용하여 지상의 기준점과의 검측을 실시하는 것이 효과적이다. 그러나 지상에 관측 구멍을 설치할 장소가 없는 경우나 대심도로 관측 구멍을 설치하기 어려운 경우에는 고정밀도 진북 측정기 (자이로 컴퍼스)를 통해 관측 구멍을 설치하지 않고 정밀도를 높이는 방법을 검토해야 할 필요가 있다.

3) 굴진 관리 측량

굴진 관리 측량은 구축되는 터널의 선형이 일정한 시공 오차 이내가 되도록 실드 굴진 시에 갱내 측량을 토대로 실시한다. 원칙적으로 1일 2회 이상 실시하며 실드와 조립된 세그먼트에 대하여 실시한다. 계획 선형과의 오차를 초기에 파악하여 실드 굴진 궤도를 지체 없이 수정하도록 한다. 굴진 관리 측량은 조립된 세그먼트에 대한 실드의 상대 위치 측정, 실드의 피칭, 요잉, 롤링, 중절 각도, 테일 클리어런스, 상하좌우 잭 스트로크 차이 등을 측정하여 실드의 위치와 자세를 파악하는 것이다. 최근에는 북진 측정기 (자이로 컴퍼스)나 자동 측량 시스템을 이용하여 실시간으로 실드 위치, 자세를 파악할 수 있게 되었다.

라. 실드 및 실드 설비의 유지 관리

실드 및 실드 설비의 유지 관리 (유지, 저검, 정비)는 실드의 성능을 충분히 발휘하도록 하고 사고를 미역에 막기 위해 정기적, 수시로 실시해야 한다. 특히 굴진 거리

가 긴 경우나 고속 굴진을 실시하는 경우에는 더욱 중요하며 시공 사이클에 유지 관리 일정을 넣는 것도 검토해 보아야 한다. 일반적으로 실시해야 할 유지 관리는 다음과 같다.

① 일상 점검, 정비
② 정기 점검, 정비
③ 장기 가동 휴지 시의 유지, 관리

마. 작업 관리

작업관리는 일상 작업중에 막장의 상황이나 지반침하에 유의하여 필요한 계측, 조사, 관측 등을 실시하면서 안전하고 효과적으로 공사를 진행해 나가야 한다.

바. 완성형 관리

완성형 관리는 사양서나 시공 계획서에 정한 관리 기준값을 이용해 설계값과 실측값을 대비하여 요구되는 사양을 만족시키도록 관리하는 것이다. 실드 공사에서는 굴진 기간 중에 일정 거리마다 실측값의 경향 등 시공 기술을 평가하여 필요에 따라 시공 방법의 개선, 시공 관리 체제의 검토를 더해 그 결과를 완성형 관리에 활용하는 것이 중요하다. 측정 결과는 매번 완성형도나 완성형표 등에 기록하고 시공 후 확인이 어려운 것은 사진으로 기록해야 한다.

제3장 시공 · 유지 관리

3.1 쉴드터널 유지관리 항목별 기준 선정

(1) 쉴드터널의 유지관리는 대부분 NATM터널의 유지관리항목과 유사하다.
(2) 쉴드터널의 세그먼트간 단차, 체결재에 대한 유지관리가 필요하다.

※해설

쉴드터널의 유지관리 항목으로는 한국시설안전공단에서 제시한 "특수굴착터널(쉴드터널) 성능평가기준 및 유지관리 매뉴얼 개발"에서 기존 NATM터널의 관리 항목중에서 균열, 누수, 파손, 박리, 박락/층분리, 백태, 철근노출, 탄산화, 품질상태, 배수상태, 지반상태, 접속부상태, 공동구상태를 쉴드터널의 유지관리 항목으로 제시하고 단차와 볼트상태에 대한 항목을 추가하였다. 제시된 항목에 대한 전문가의 자문의견을 취합한 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 균열

균열은 콘크리트 구조물에서 가장 빈번하게 발생하는 변상으로 쉴드TBM 터널의경우 그 발생위치에 따라 위험 수준이 다르다. 이에 대한 전문가 의견 조사결과 쉴드TBM 터널에서 균열 항목을 평가할 때 세그먼트 중앙부, 세그먼트 모서리부, 볼트 연결부로 구분하여 평가해야한다는 의견이 가장 많았다.

나. 누수

쉴드TBM 터널에서 누수 항목을 평가할 때 세그먼트 라이닝 사이 누수, 볼트 연결부 누수, 뒤채움 주입공 누수로 구분할 것인지에 대하여 자문을 수행하였으며 그 결과는모두 동일한 기준을 적용하는 것이 적합하다는 의견이 다수였다.

다. 파손

파손 항목의 유지관리 평가는 손상면적을 기준으로 하는 국내 NATM 터널의 콘크리트 라이닝 평가기준에 쉴드TBM 터널의 세그먼트는 제작 세그먼트임을 감안하여 기존의 범위를 1/4로 줄여(면적 기준) 평가한다.

라. 재질열화

앞서 유지관리 항목 선정 시 재질열화는 박리, 박락/층분리, 백태, 철근노출, 탄산화 잔여깊이, 품질상태로 구분되었다. 여기서 품질상태란 쉴드TBM 세그먼트 라이닝의 특성을 고려하여 기존의 "재료분리"와 "염화물 변상" 항목을 변경하여 통합한 것이다. 일반적으로 재질열화는 콘크리트의 재료적 성질에 의해 발생하는 변상으로 NATM 터널에서의 콘크리트 라이닝이나 쉴드TBM 터널에서의 세그먼트 라이닝 구분 없이 발생 가능하므로 국내 터널에 적용되고 있는 평가기준을 쉴드TBM 터널 유지관리 기준을 적용하였다.

마. 터널주변 상태

앞서 유지관리 항목 선정 시 터널주변 상태는 배수상태, 지반상태, 접속부 상태, 공동구상태로 구분하였다. 배수상태 항목에서는 누수 등에 따른 배수 시 배수상태(오염, 막힘 등)를 평가하고 지반상태 항목에서는 지반조사 결과 등을 활용하여 주변지반의 풍화변질 구간이나 단층대를 확인하고 평가한다. 또한 접속부 상태 항목은 입출구부와 연결되는 접속부분에서 손상상태를 평가하고 공동구상태 항목에서는 케이블 등이 들어가는 공동구의 상태를 평가한다.

바. 단차

일반적으로 쉴드TBM 터널 현장에서 단차가 발생하게 되면 세그먼트 라이닝 사이의 볼트 조립 어려워진다. 따라서 시공 시 세그먼트 라이닝 조립이 가능한 단차의 허용범위는 볼트박스 체결방식의 경우는 6mm, 직볼트나 곡볼트의 경우는 3mm 정도이며 이를 세그먼트 허용단차로 사용한다. 국내에서는 세그먼트 제작 허용정확도를 제시하였는데 세그먼트 두께의 경우는 1.5~5.0mm이고 세그먼트의 폭이나 길이의 경우는 1.0~1.5mm이다.

사. 볼트상태

볼트손상과 볼트미체결 항목에 대한 전문가 자문을 바탕으로 연구진들과 검토한 결과 이 두 항목을 "볼트상태" 항목으로 통합하여 적용하고 볼트상태 평가 기준은 한 링당 불량 볼트의 비율로 선정하였다.

3.2 배수형 쉴드터널 유지관리 항목

(1) 배수형 쉴드터널은 세그먼트 중간 배수 유로홈 내부에서 배수를 유도하므로 터널 내부로의 누수에 유의하여야 한다.

(2) 배수 유로홈의 폐색을 방지하기 위하여 주기적인 관리가 필요하다.

※해설

가. 쉴드터널 누수원인 및 허용 누수량

- 볼트 체결부의 누수 : 세그먼트 연결을 위해 구조상 체결부가 밖으로 노출되어 있고 체결부의 공간도 커서 이를 통한 누수발생이 일반적이다. 특히 경사볼트의 경우 수팽창 지수재 사이를 통과하여 연결되므로 볼트 자체가 통수경로가 되며, 외부로 노출된 볼트의 녹 발생 및 볼트 홀은 통한 누수가 발생한다. 또한 볼트 삽입부분에 발생하는 균열로 인한 누수도 발생한다.

- 세그먼트 조립 시 단차 발생에 따른 누수 : 세그먼트는 5개 또는 7개로 공장에서 제작, 운반하여 현장 터널 내부에서 볼트를 이용하여 조립하고 있으나, 중량이 무겁고 기계로 조립함에 따라 세그먼트 사이에 단차가 발생한다. 또한 가장 상단에 설치되는 세그먼트는 상재하중, 토압 및 자체 중량으로 인하여 처짐 및 단차가 발생하여 세그먼트 간 완전한 진원이 형성되지 않아 상단에 위치한 세그먼트를 통해 지하수가 유입된다.

- 기타 구조적인 누수 원인 : 쉴드터널은 터널내부로 누수되는 지하수의 유입을 방지하기 위하여 세그먼트와 터널 굴진단면 사이를 그라우팅 처리를 하고 있으나, 그라우팅이 밀실하게 채워지지 않아 미세하게 누수되는 수량은 불가피하게 발생하고 있으며 우레탄을 이용하여 유입량을 차단하고 있는 실정이다.

터널설계기준(2007)에서는 방수설계 시 터널의 용도에 적합한 방수등급을 정하고 다음 표 3.1과 같이 각 방수등급별로 허용 누수량을 정하고 있다. 그러나 배수설계 시 허용 배수량에 대한 기준은 없는 실정이며, 유지관리를 위한 허용 배수량은 지하철의 배수 펌핑시설 및 터널배수시설의 설계기준인 1 km당 박스구조물 2 ㎥/min, 터널구조물 3 ㎥/min을 적용하고 있는 실정이다.

표 3.1 터널의 방수등급별 허용 누수량(단위: ℓ/㎡/day)

방수 등급	내부상태	용 도	상 태 정 의	터널연장을 기준한 허용누수량	
				10m	100m
1	완전건조	주거공간, 저장실, 작업실	벽면에 수분의 얼룩이 검출되지 않을 정도의 누수 상태	0.02	0.01
2	거의건조	동결위험이 있는 교통터널, 정거장터널	벽면의 국부적인 장소에 약간의 수분얼룩이 검출될 수 있는 정도, 수분얼룩을 건조한 손으로 접촉하여도 손에 물이 묻지 않을 정도, 흡수지 또는 신문지를 붙여 보아도 붙여진 부분이 습기로 인하여 변색되지 않을 정도의 누수	0.1	0.05
3	모관습윤	방수 2등급 이상의 방수가 요구되지 않는 교통터널구간	벽면의 국부적인 장소에 수분얼룩이 검출되는 정도, 수분얼푹에 흡수지 또는 신문지를 붙였을 경우 습기로 인하여 변색되지만 수분이 방울져 떨어지지 않을 정도의 누수	0.2	0.1
4	물방울이 가끔 떨어짐	시설물 터널	독립된 장소에서 물방울이 가끔 떨어지는 정도의 누수	0.5	0.2
5	물방울이 자주 떨어짐	하수 터널	독립된 장소에서 물방울이 자주 떨어지거나 방울져 흐르는 정도	1.0	0.5

배수형 쉴드터널이 내구연한 동안 성능을 유지하도록 하기 위해서는 시공 시 세그먼트 접합면에 대한 방수(실(Seal)재에 의한 방수, 볼트공 방수, 뒤채움 주입구 방수, 개착구조물 연결부 방수 등)를 철저히 하고, 운용 시 허용배수량을 초과하지 않도록 철저한 유지관리대책이 수립되어야 한다.

나. 배수 유로홈 폐색방지 방안

배수형 쉴드터널의 사용중 배수 유로홈에 이물질 등의 침입으로 인하여 폐색될 경우, 배수형 터널로서의 거동이 불가능 하므로 주기적인 관리가 필요하다. 배수 유로홈은 폐합된 세그먼트 내부에 위치하기 때문에 일반적인 방법으로는 관리가 불가능하다. 이를 해결하기 위하여 특수 제작된 에어석션건을 이용하여 배수 유로홈 내부를 흡입하여 공기와 물은 내보내고 이물질만 걸러내는 장치를 이용하여 유지관리가 필요하다.

다음은 배수형 쉴드터널의 유지관리용으로 설계된 에어 석션건이다.

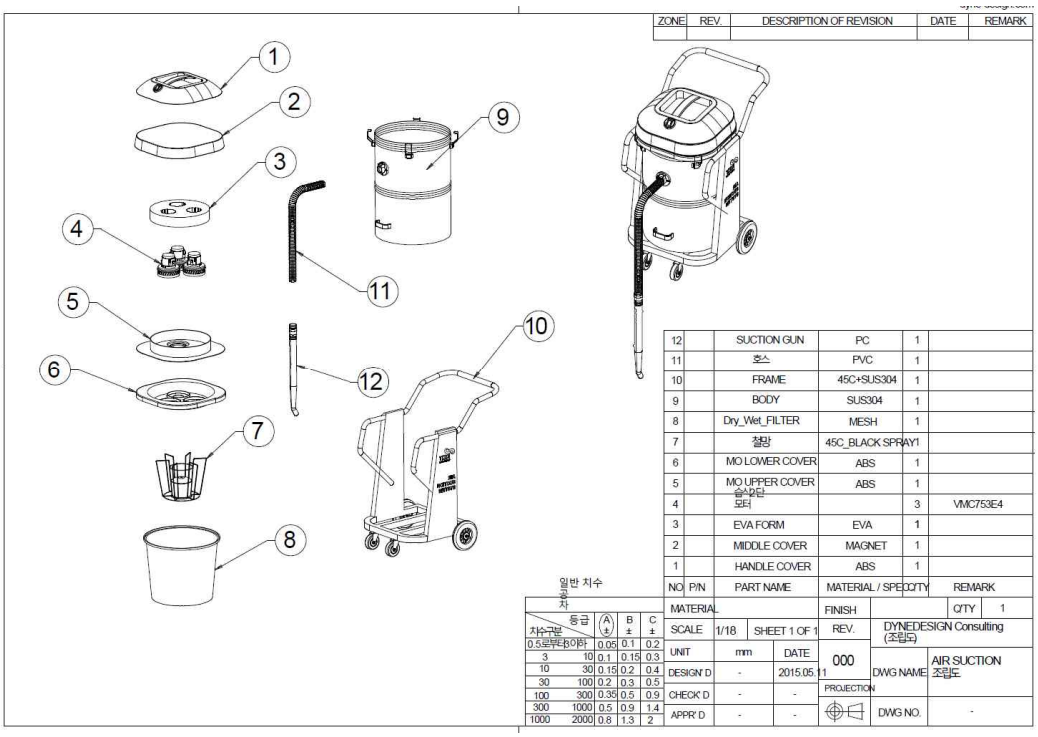


그림 3.1 에어석션건 부품도a

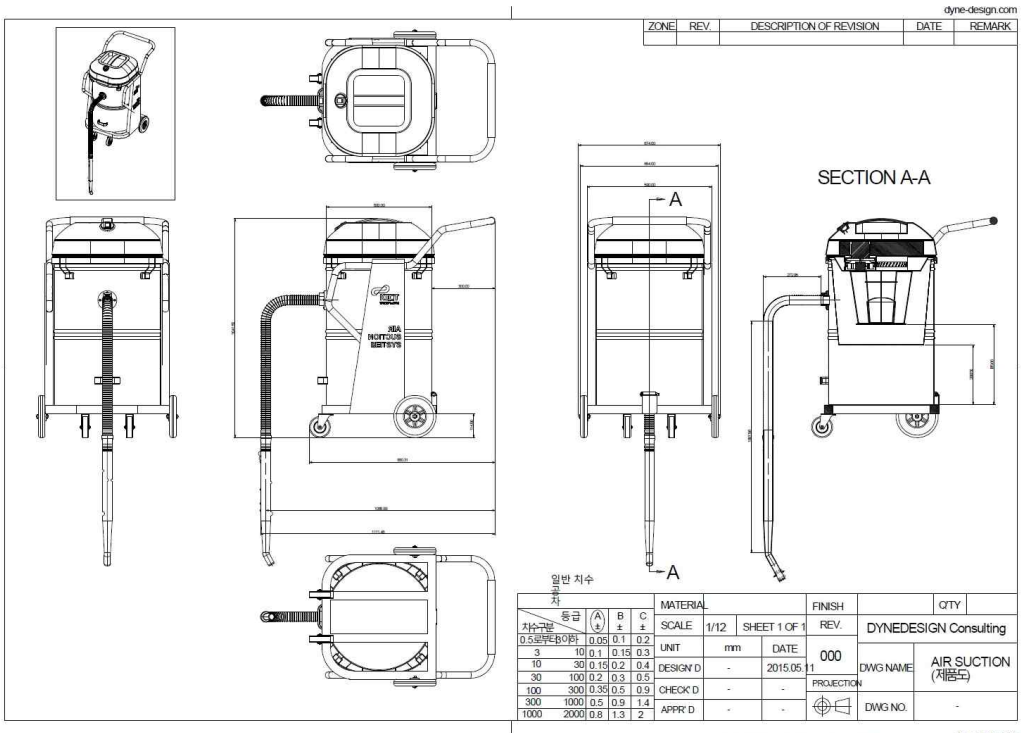


그림 3.2 에어석션건 부품도b

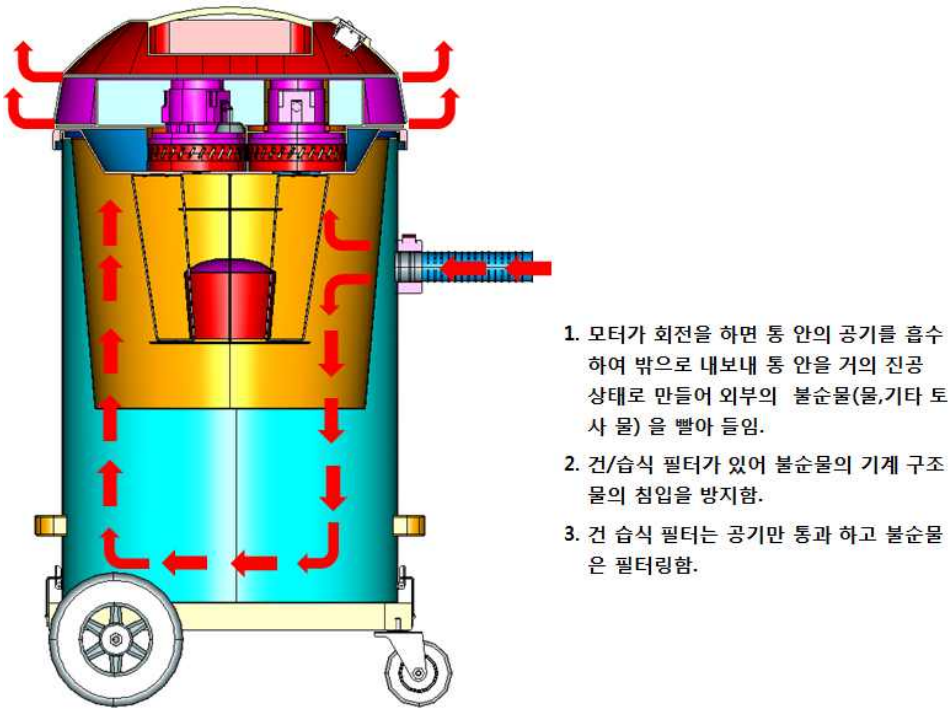


그림 3.3 도출된 에어석션건 구조

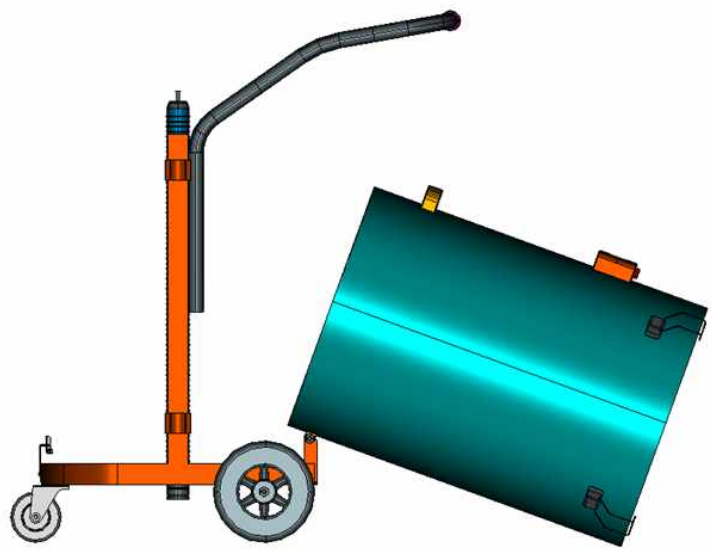


그림 3.4 에어석션건의 이물질 배출 방안

다음은 특수 제작된 배수형 쉴드터널용 에어석션건으로 배수 유로홈 내부 이물질을 제거하는 방법이다.

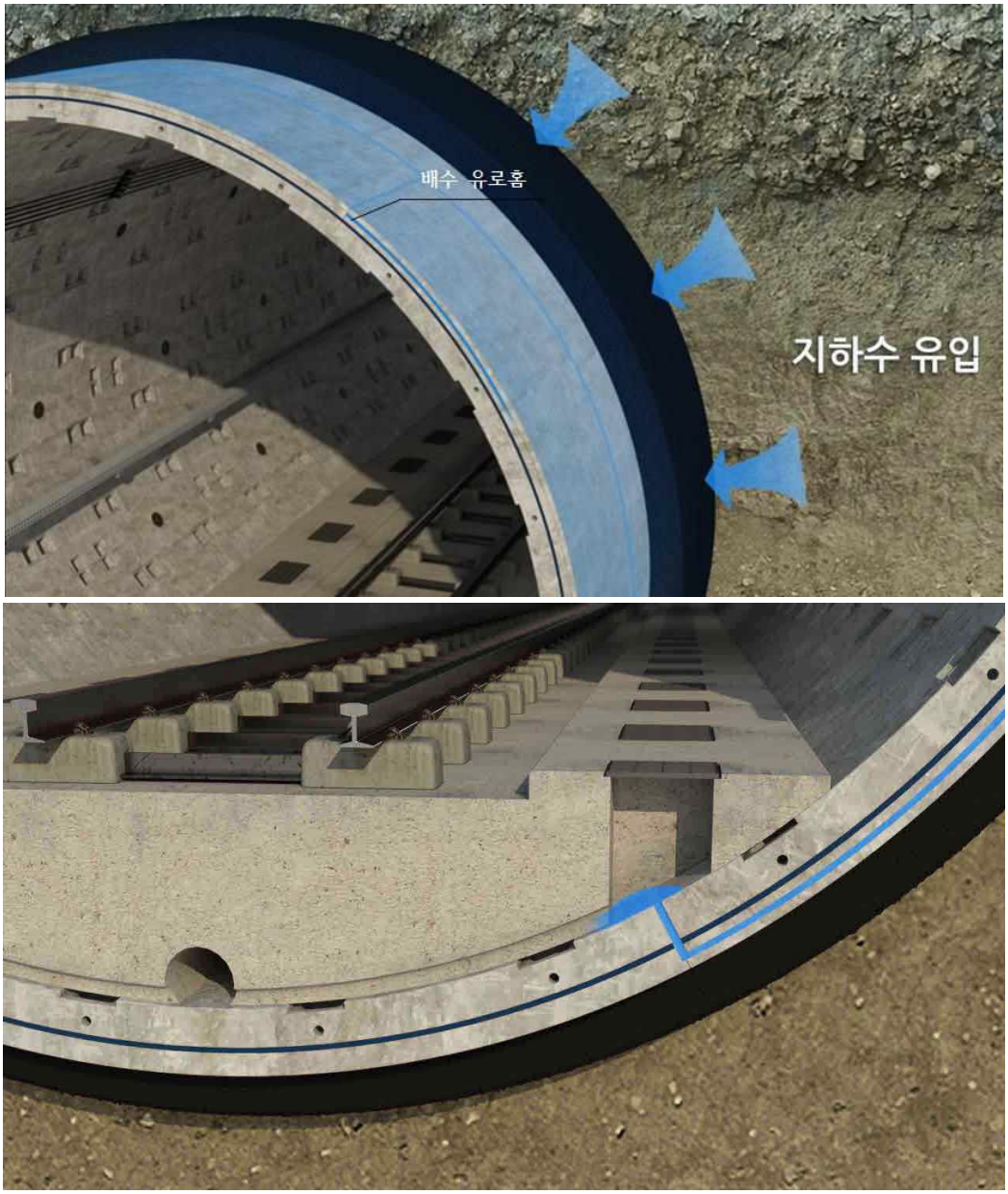


그림 3.5 배수 유로홈 지하수 이동경로



(a) 지하수 배수



(b) 배수 유로홈 폐색

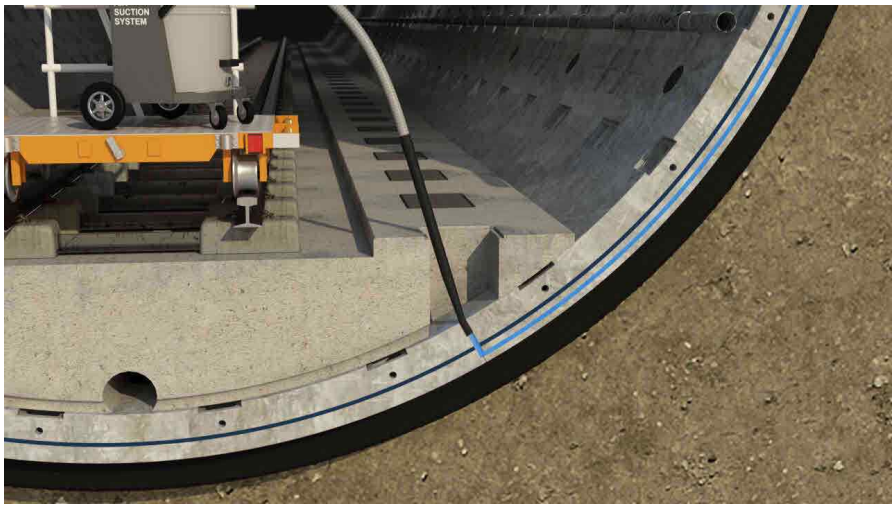


(c) 에어섹션건 투입

그림 3.6 에어섹션건을 이용한 배수 유로홈 관리



(d) 이물질 제거



(e) 이물질 제거후 배수성능 회복



(f) 배수기능 정상화

그림 3.6 에어석션건을 이용한 배수 유로홈 관리(계속)

3.3 쉴드터널의 유지관리 방법(예)

3.3.1 점검 및 건전도 평가

쉴드터널을 유지관리하기 위해서는 정기적으로 터널 상황을 점검하고 상태를 파악하는 것이 중요하다. 일본의 경우 점검 방법이나 항목은 도로, 철도, 전력, 상하수도, 가스, 통신, 공동구 등 사용 목적에 따라 다르지만 개략적인 상태를 파악하여 변상 개소를 추출 (일점 점검)한 후에 정밀한 점검, 조사 (이차 점검)를 실시하는 것이 일반적이다. 그림 3.3은 철도터널에 있어 점검흐름을 정리한 것으로 2년마다 전반 검사를 실시하여 이를 토대로 건전도를 판정해 건전도 A, B, C, S로 구분하도록 하고 있다. 철도터널의 경우, 박락에 대한 안전도 판정도 실시하고 있으며 안전을 위협하는 박락이 발생할 우려가 있는 경우에는 처치를 실시하고 있다.

쉴드터널을 유지관리하는 데에 있어 미래를 내다보고 면밀한 유지 관리 계획을 책정하여 점검, 조사, 보수 및 보강을 실시하는 것이 중요하다. 최근에는 구조물의 건설에서 폐기까지 총 비용을 의식하여 적절한 보수 및 보강, 교환을 검토하는 라이프 사이클 비용 평가 방법과 합리적인 유지 관리비의 운용을 목표로하는 방법이 검토되고 있다. 이러한 기술은 아직 검토해야 할 점이 남아 있으나 이를 도입하여 보다 합리적인 유지 관리가 가능한 방법으로서 확립될 것이다.

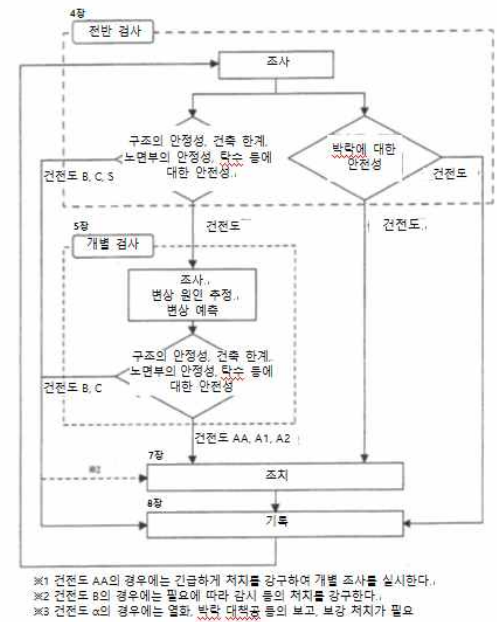


그림 3.7 건전도 평가 순서도

3.3.2 조사

가. 조사의 목적

터널의 건전도를 판정하는 데에는 먼저 터널 조사가 필요하다. 터널 관리자는 조사를 '점검', '검사' 등으로 부르며 구조물이 대략적으로 완성됐을 때에 실시하는 초회 조사, 터널에 발생하는 열화나 이상을 파악하기 위해 정기적으로 실시하는 일차 조사, 건전도에 문제가 있는 부분에 대해 실시하는 이차 조사로 크게 나뉜다. 이들 조사를 통해 변상 현상을 정확하게 파악하여 원인 추정, 건전도 판정, 대책공 입안을 실시한다.

나. 조사의 종류

조사를 분류하면 자료 조사, 환경 조사, 갱 내 조사로 크게 나뉜다.

ⅰ) 자료 조사

설계 도서, 사양서, 시공 계획서, 공사 기록 등을 조사하여 구조물의 기본적인 제원이나 구조 조건, 시공 이력을 조사하는 것이다.

ⅱ) 환경 조사

구조물의 열화에 대해 주변 환경이 미치는 영향은 매우 크기 때문에 지형이나 지질, 지하수 환경 (수압과 수질), 해안으로부터의 거리, 갱 내 온도, 토지 이용 상황 (지상 이용과 근접 시공) 등 외적 요인을 조사하는 것이다.

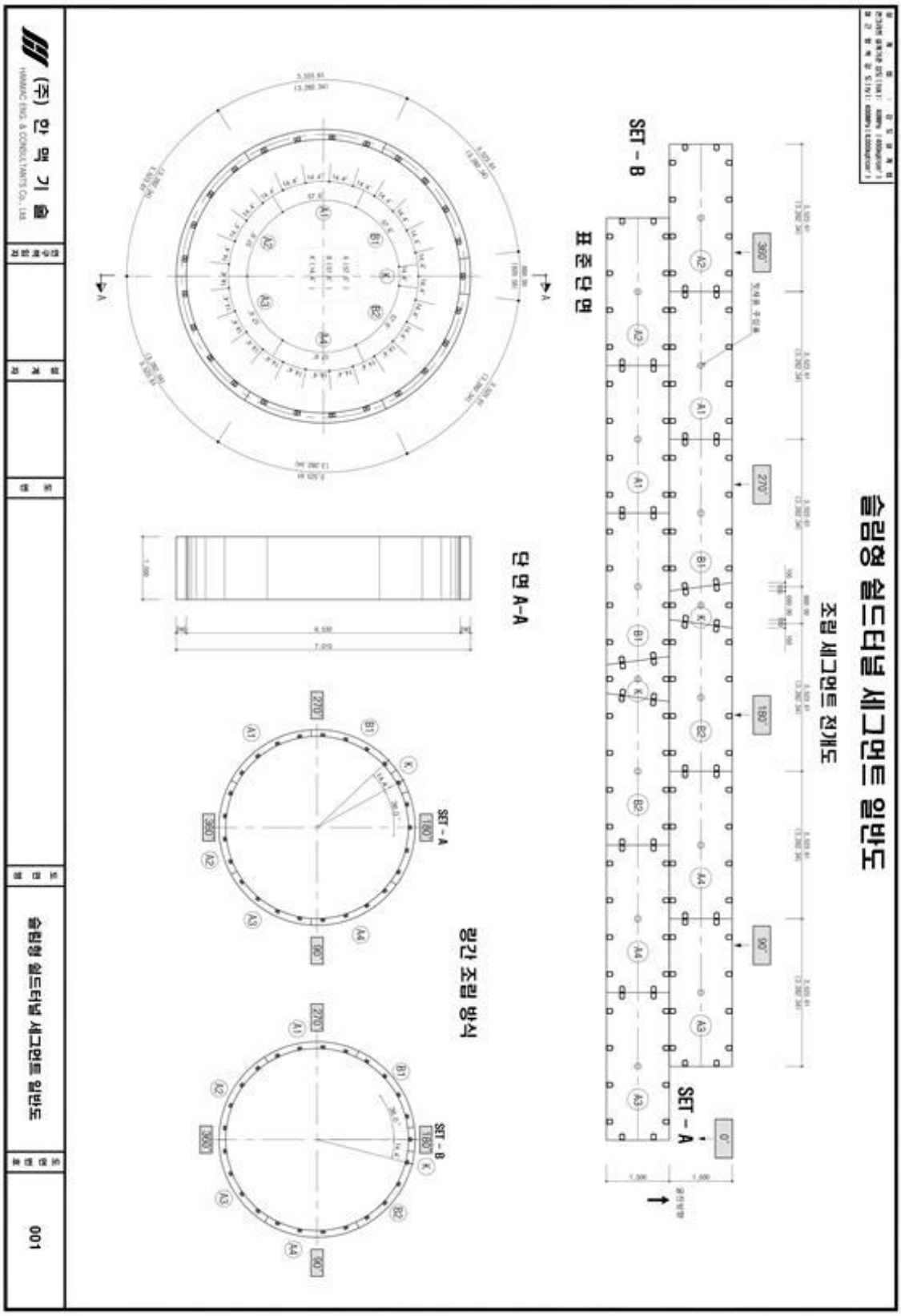
ⅲ) 갱 내 조사

터널 갱 내에 있어 구조물에 나타나는 열화 현상을 직접 파악하기 위한 것으로 목시 확인, 타음 검사, 누수량 측정 등을 통해 조사하는 것이다. 조사 결과는 균열 상황이나 박락, 목지부의 손상, 누수의 유무, 녹물, 변색, 유리 석회 등을 도면 상에 기록하고 사진 촬영을 실시하여 기록으로 남긴다. 필요에 따라서는 배면 공동 조사, 계측기에 의한 경시 변화 측정을 실시한다

배수형 쉴드터널 표준단면 설계

-배수형 쉴드터널(t=260mm)

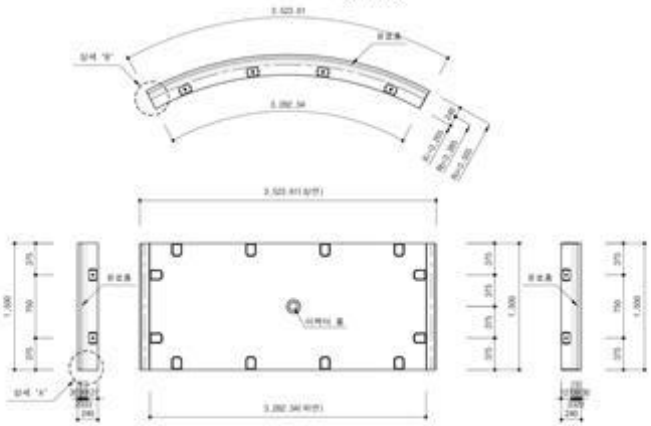
배수형 지하철 쉴드터널(t=240mm)



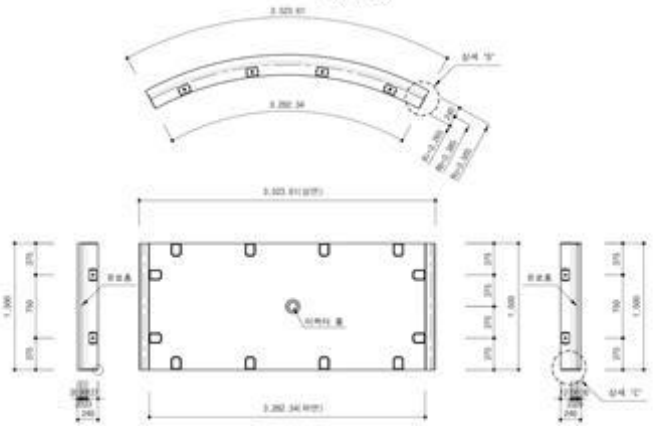
슬림형 쉴드터널 세그먼트 상세도

Set - A, A Type

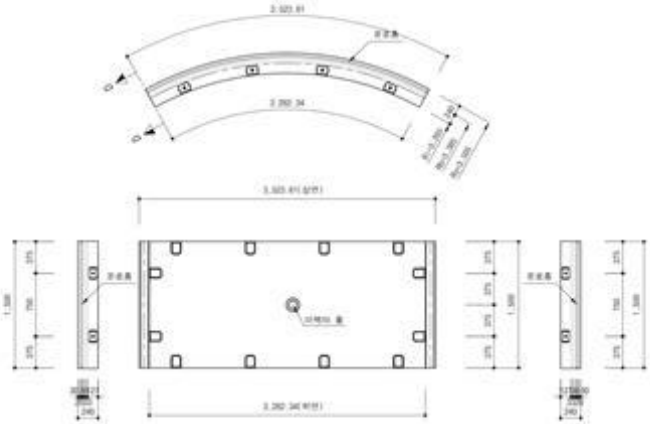
A1, A3형 평면
S = 1 : 25



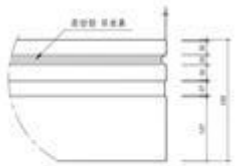
A2형 평면
S = 1 : 25



A4형 평면
S = 1 : 25



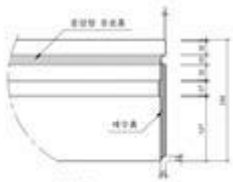
상세 "A"
S = 1 : 25



상세 "B"
S = 1 : 25



상세 "C"
S = 1 : 25



상세 "D"
S = 1 : 25

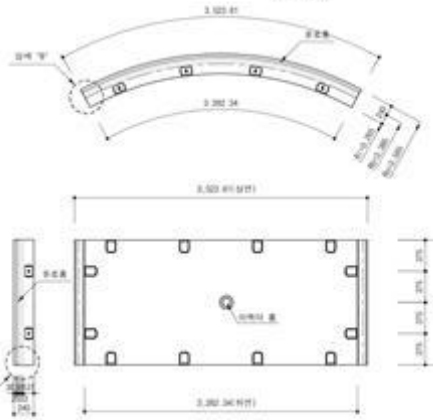


(주) 한 맥 기 술 HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.	연구책임자		설계자		도면		도면명	슬림형 쉴드터널 세그먼트 상세도 Set - A, A Type	도면번호	002

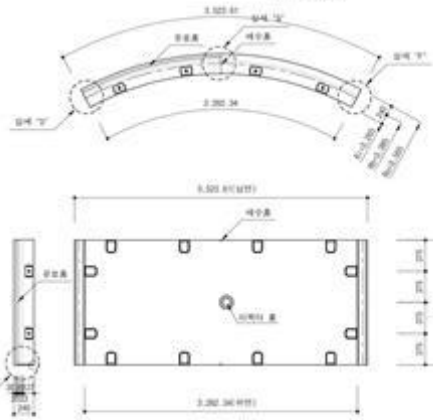
슬림형 쉴드터널 세그먼트 상세도

Set - B, A Type

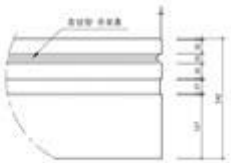
A1, A4형 평면
S = 1 : 25



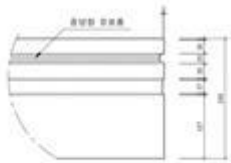
A2, A3형 평면
S = 1 : 25



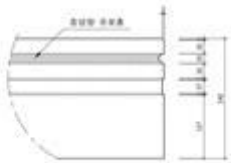
상세 "A"
S = 1 : 25



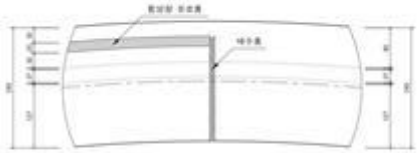
상세 "C"
S = 1 : 25



상세 "E"
S = 1 : 25



상세 "G"
S = 1 : 25



상세 "B"
S = 1 : 25



상세 "D"
S = 1 : 25



상세 "F"
S = 1 : 25

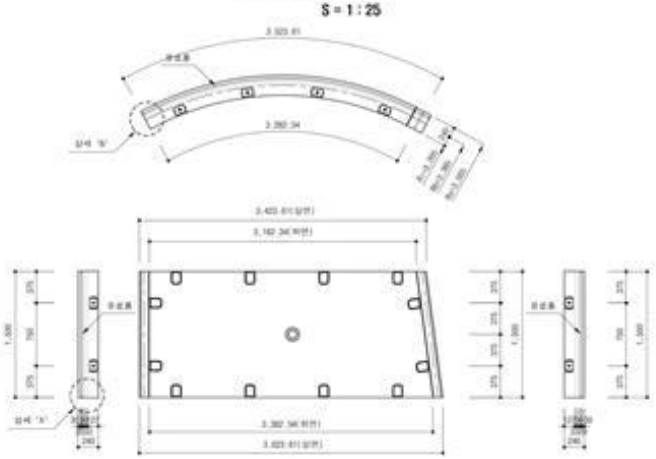


(주) 한 맥 기 술 HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.	연구책임자		설계자		도면		도면명	슬림형 쉴드터널 세그먼트 상세도 Set - B, A Type	도면번호	003

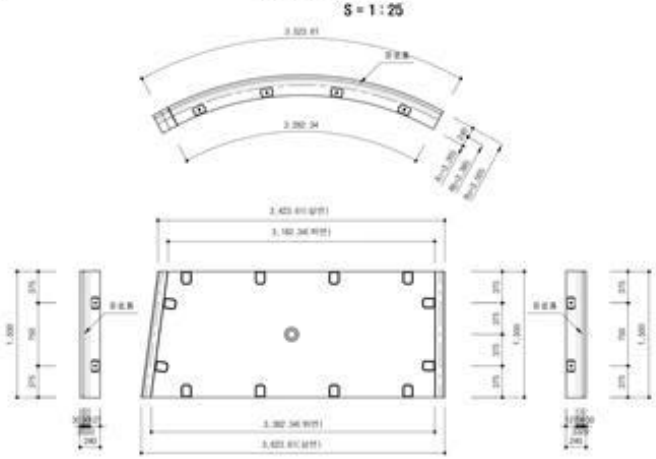
슬림형 쉴드터널 세그먼트 상세도

B, K Type

B1형 평면
S = 1 : 25



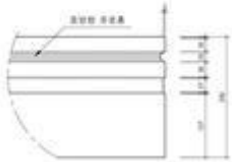
B2형 평면
S = 1 : 25



K형 평면
S = 1 : 25



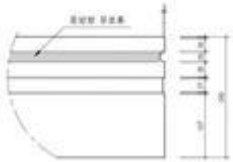
상세 "A"
S = 1 : 25



상세 "B"
S = 1 : 25



상세 "C"
S = 1 : 25



상세 "D"
S = 1 : 25

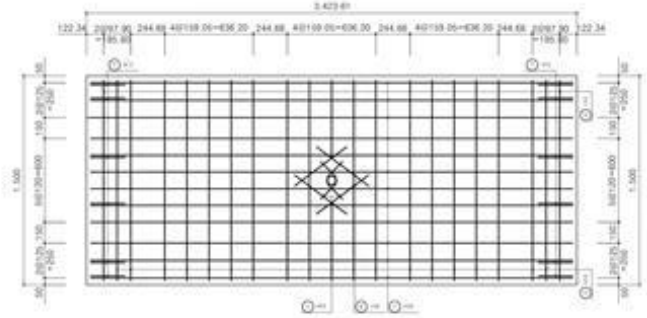


(주) 한 맥 기 술 HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.	연구책임자		설계자		도면		도면명	슬림형 쉴드터널 세그먼트 상세도 B, K Type	도면번호	004

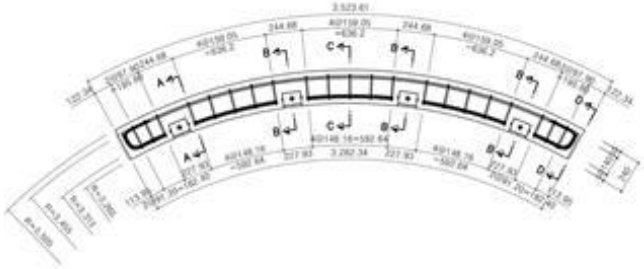
슬림형 쉴드터널 세그먼트 구조도

Set-A A1, A3형

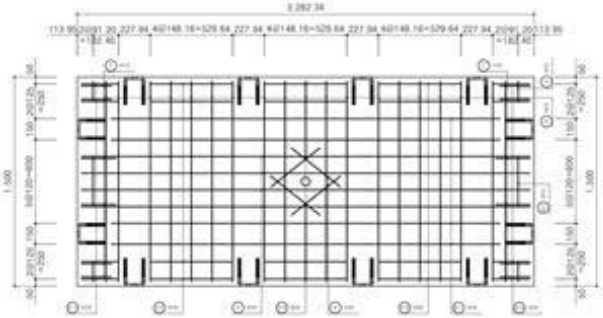
상부 평면도



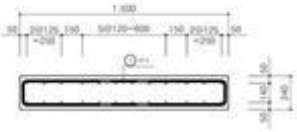
단 면 도



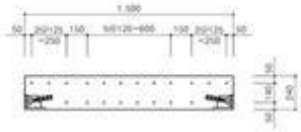
하부 평면도



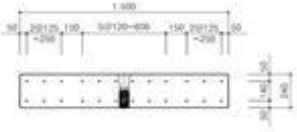
단면 A-A



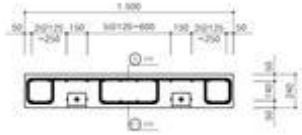
단면 B-B



단면 C-C



단면 D-D

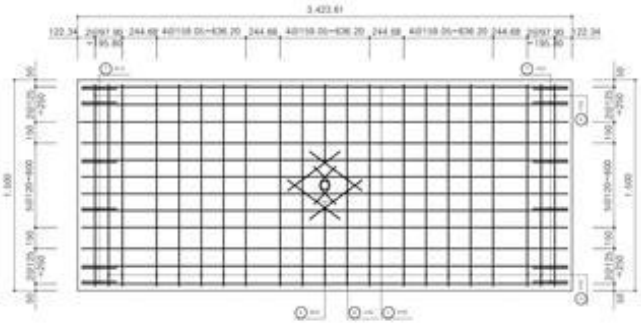


(주) 한 맥 기 술 HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.	연구책임자		설계자		도면		도면명	슬림형 쉴드터널 세그먼트 구조도 Set-A A1,A3형	도면번호	005

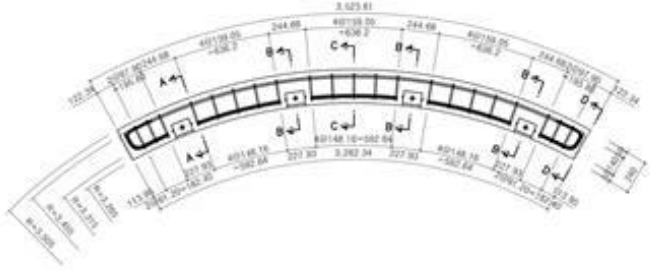
슬림형 쉴드터널 세그먼트 구조도

Set-A A2형

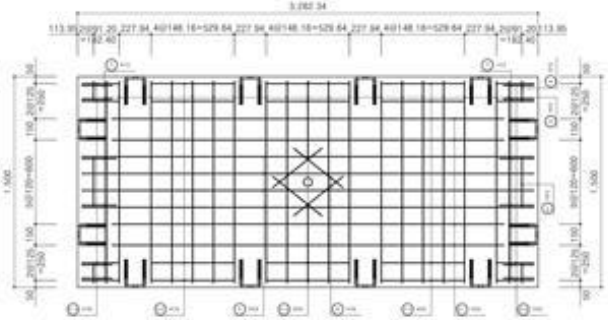
상부 평면도



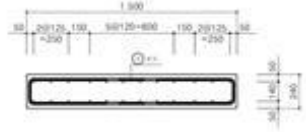
단 면 도



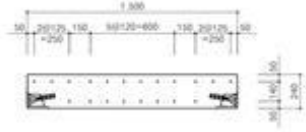
하부 평면도



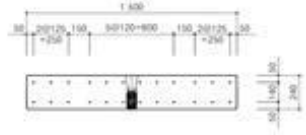
단면 A-A



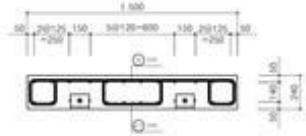
단면 B-B



단면 C-C



단면 D-D



(주) 한 맥 기 술 HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.	검토자		설계자		도면		도면명	슬림형 쉴드터널 세그먼트 구조도 Set-A A2형	도면번호	006

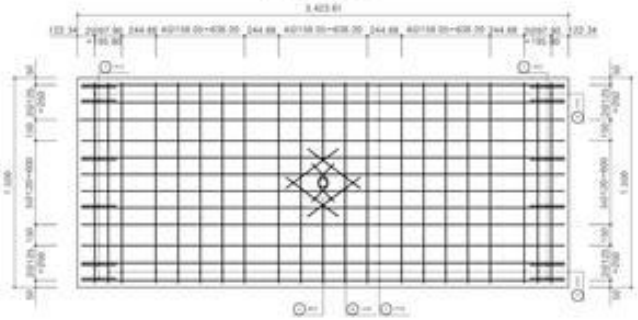
(주) 한 맥 기 술
HANMAC ENG. & CONSULTANTS CO., Ltd.
설계
검토
검토
검토
검토
승인
007
슬림형 원드터빈 세그먼트 구조도
Set-A A4형
슬림형 윈드터빈 세그먼트 구조도
Set-A A4형
상부 평면도
하부 평면도
단면 A-A
단면 B-B
단면 C-C
단면 D-D
조 감 도

(주) 한 목 기 술
HANMOK ENG & CONSULTANTS Co., Ltd.
승용차량 슬림형 세그먼트 교량 구조도
Set-B A1,A4용
008
슬림형 슬래브타입 세그먼트 구조도
Set-B A1, A4용
상부 평면도
하부 평면도
조감도
단면 A-A
단면 B-B
단면 C-C
단면 D-D

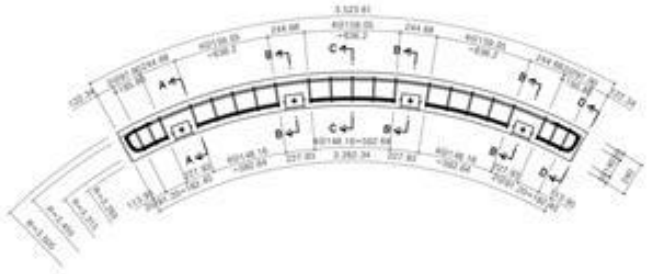
슬림형 쉴드터널 세그먼트 구조도

Set-B A2, A3형

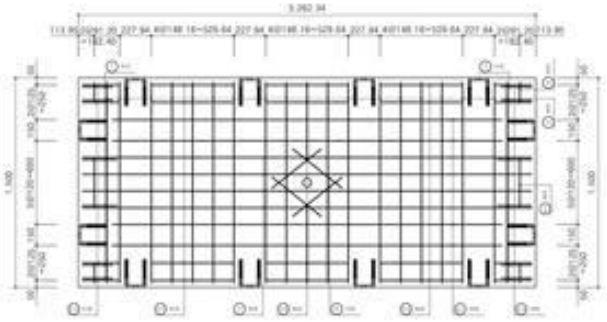
상부 평면도



단 면 도



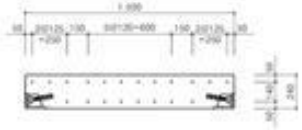
하부 평면도



단면 A-A



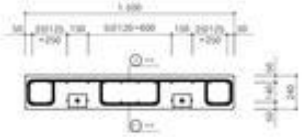
단면 B-B



단면 C-C



단면 D-D



(주) 한 맥 기 술 HANMAC ENG. & CONSULTANTS Co., Ltd.	연구책임자		설계자		도면		도면명	슬림형 쉴드터널 세그먼트 구조도 Set-B A2, A3형	도면번호	009

지중 토압 및 배수조건에 따른 간극수압을 고려한 쉴드터널모형 실험 장비

사용설명서

2015. 06

목 차

제 1 장 일반사항 ····· 1

제 1 절 안전상 주의사항 ····· 1

제 2 절 주요 사양 및 성능 ····· 6

1. 개요 ····· 6

2. 특징 ····· 6

3. 시험 가능 항목 ····· 7

제 2 장 장비제원 ····· 8

제 1 절 장비 사용 목적 ····· 8

제 2 절 토조 및 부속 장치 ····· 9

1. 토조 ····· 9

2. 로드셀 ····· 9

3. 토압계 ····· 9

4. 변형률계 ····· 9

5. 간극수압계 ····· 10

6. 유량측정장비 ····· 10

7. 가압판 ····· 10

8. 롤러 ····· 10

제 3 절 유압장치 및 부속장비 ····· 11

1. 유압장치 ····· 11

2. 펌프 및 펌프모터 ····· 11

3. 전기판넬부 ····· 12

4. 밸브 ····· 12

제 4 절 터널모형 투입구 ····· 13

1. 내통 ····· 13

2. 외통 ····· 13

제 3 장 장비 조작 설명 ····· 14
제 1 절 장비 이동시 주의사항 ····· 14
제 2 절 기계의 위험 부위 및 사용 시 주의사항 ····· 15
1. 스크류 기둥 ····· 15
2. 로드셀과 상부덮개 ····· 16
3. 내통 조립 및 외통 제거 ····· 17
4. 가압판 ····· 17
5. 수압펌프 및 모터 ····· 18
6. 유압유니트 ····· 19
제 3 절 실험 순서 및 프로그램 작동 방법 ····· 20
1. 실험 준비 및 순서 ····· 20
2. 프로그램 작동 방법 ····· 22

제 4 장 예상문제점 및 조치사항 ····· 24
제 1 절 매일 작업 전 사전 정비사항 ····· 24
제 2 절 주의사항 ····· 24
제 3 절 Trouble Sheet ····· 25

제 5 장 장비 도면 및 부품도 ····· 28
제 1 절 장비 도면 ····· 28
제 2 절 부품 상세설명도 ····· 30
1. 로드셀 ····· 30
2. Servo solenoid valves ····· 31
제 4 절 DA CONNECTOR ····· 37
제 5 절 컨트롤 스위치 판넬 ····· 38

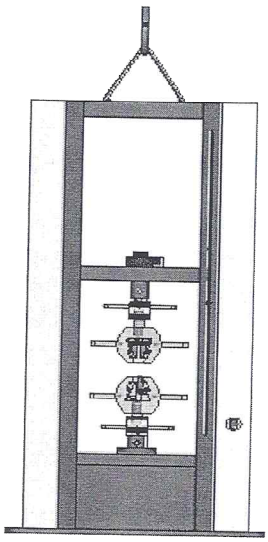
제 1 장 일반사항

제 1 절 안전상 주의사항

사용전에 안전에 관한 주의사항을 잘 읽어주시고 올바르게 사용하여 주십시오. 설명서에 표시된 주의사항은 중요도에 따라 위험, 경고, 주의 심벌로 구분하고 있습니다.		
	**주의**	지키지 않았을 경우, 경미한 상해나 재산상의 손해가 발생할 가능성이 예상되는 내용을 표시하고 있습니다.
	**위험**	지키지 않았을 경우, 사망 또는 중상이 발생할 가능성이 예상되는 내용을 표시하고 있습니다.
	**경고**	지키지 않을 경우, 사망 또는 중상에 이르는 결과를 낳는 절박한 위험 상황을 표시하고 있습니다.

	**경고**	지키지 않을 경우, 사망 또는 중상에 이르는 결과를 낳는 절박한 위험 상황을 표시하고 있습니다.

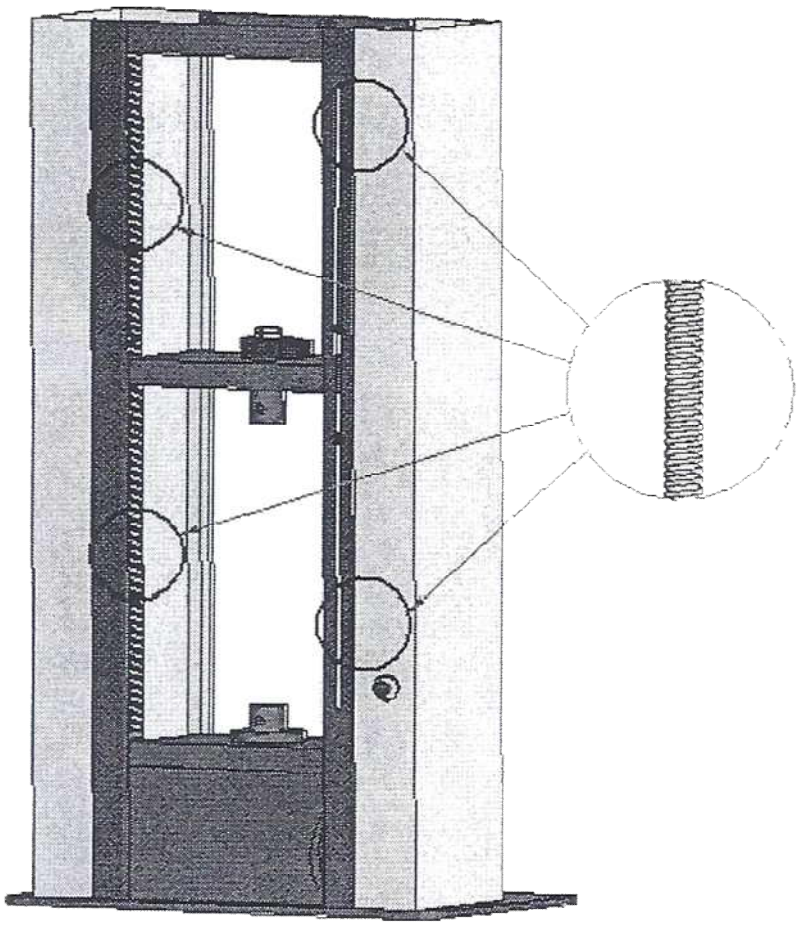
장비의 무게가 사망 또는 중상을 초래할 정도로 매우 무거우니 장비 이동 시 이동 중인 장비의 밑 부분에는 절대 사람이 위치해서는 안 됩니다.





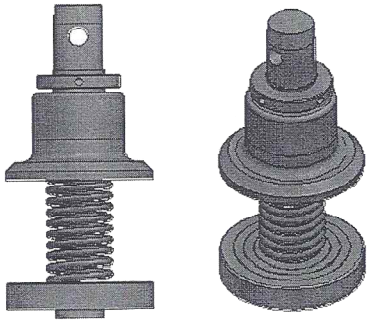
	**위험**	지키지 않았을 경우, 사망 또는 중상이 발생할 가능성이 예상되는 내용을 표시하고 있습니다.

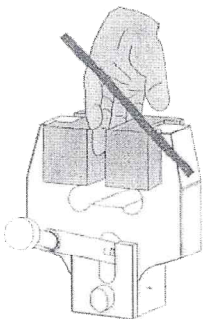
장비의 스크류 부분은 매우 빠르게 작동됩니다. 장비의 스크류에 손이나 옷가지 등을 집어넣으면 상해의 위험이 있습니다.

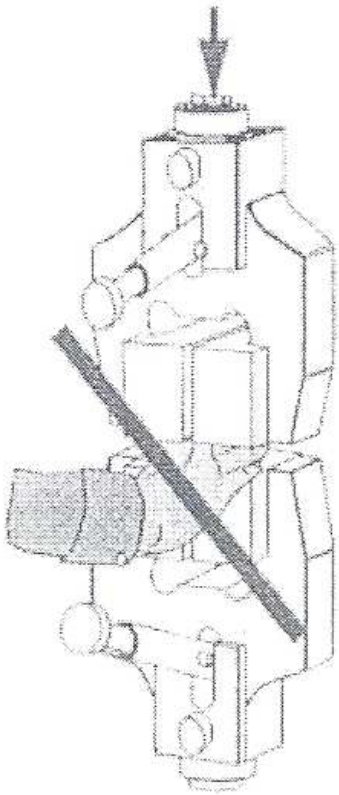


	**주의**	지키지 않았을 경우, 경미한 상해나 재산상의 손해가 발생할 가능성이 예상되는 내용을 표시하고 있습니다.

장비의 스프링 부위나 지그에 손을 넣으면 상해의 위험이 있습니다.

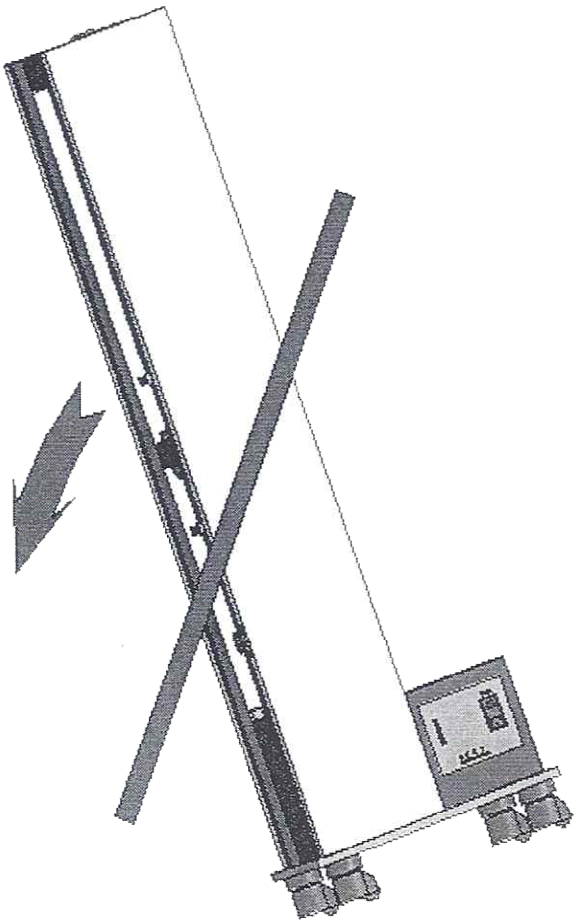






	**주의**	지키지 않았을 경우, 경미한 상해나 재산상의 손해가 발생할 가능성이 예상되는 내용을 표시하고 있습니다.

장비의 무게가 사망 또는 중상을 초래할 정도로 매우 무거우니 장비의 이동시 무게 중심을 잡아 쓰러짐에 주의하십시오.



제 2 절 주요 사양 및 성능

1. 개요

이 제품은 다양한 조건에서 쉴드터널 라이닝의 간극수압, 변형률, 토압 및 배수 조건 시 유출되는 유량을 측정하여 배수 및 비배수 조건에서 쉴드터널 라이닝에 작용하는 압력 및 내부 응력 측정을 시현하는데 그 목적이 있습니다.

본 기기는 안전성과 내구성을 고려하여 설계·제작된 배수형 쉴드터널 라이닝의 수압 및 토압 분석 모형실험장치로써, 본 설명서는 컴퓨터 프로그램에 의해 컨트롤되는 시험기로써 설정 속도에 따라 자동으로 일정한 속도로 하중을 가하여 주며 실험 결과값을 가져올 수 있는 시험기이다.

2. 특징

○ 유압 전자식 하중을 컴퓨터 모니터에 직접 표시함으로 측정 시 개인적인 오차가 발생하지 않으며 사용하여 펌프 압력의 상승 시에도 소음이 아주 적게 발생한다.

○ 하중을 고정도의 로드셀로 감지해 나타내므로 정도가 뛰어날 뿐만 아니라 토조 윗면에 장착하여 온도 상승에도 하중에 영향을 주지 않는다.

○ 유압 서보 또는 비례제어에 의해 일정한 속도를 하중을 가하여 줄 뿐만 아니라 하중 변화 속도를 컴퓨터 프로그램에 의해 임의로 설정 할 수 있다.

○ 속도조절은 수동 Knob로만 작동하고 모든 시험자료는 수신형 컴퓨터에서 시험자료를 수집하는 기능을 갖는 시험기이다.

○ 시험이 끝난 후 필요한 객관적인 자료를 얻을 수 있고, 데이터의 유지 관리가 용이하다.

3. 시험 가능 항목

○ 배수 및 비배수 조건 시 쉴드터널 라이닝의 간극수압

○ 배수 및 비배수 조건 시 쉴드터널 라이닝의 변형률

○ 배수 및 비배수 조건 시 쉴드터널 라이닝의 토압

○ 배수 조건 시 유출되는 유량을 측정

제 2 장 장비제원

제 1 절 장비 사용 목적

배수 및 비배수 조건하에서 터널 라이닝에 작용하는 응력 분석을 위한 실내시험을 수행하는 것이 목적이며, 이를 위하여 지중응력 및 배수조건을 자유롭게 변화시키면서 다양한 현장조건에서 터널 라이닝 작용 압력 및 내부 응력을 분석할 수 있는 장비입니다.



< 터널모형 실험장비 형상 >

제 2 절 토조 및 부속 장치

1. 토조

1) 기능 : 지하수위 아래 지중에 시공된 터널을 모사하기 위한 장비이다.

2) 규격 : 600 mm X 600 mm X 1,000 mm (B X L X H)

3) 실험방법 : 다양한 흙 시료를 이용하여 지반을 모사하고 지중응력은 상부 가압판을 이용하여 하중재하를 모사한다. 또한 지반을 포화시키고 토조 내부에 수압을 가하여 지하수위 아래 위치한 터널에 작용하는 수압을 모사할 수 있다.

2. 로드셀

1) 기능 : 심도에 따른 토압의 증가를 모사하기 위하여 시료에 가해지는 하중을 측정하고 조절하는 역할을 한다.

2) 실험방법 : 로드셀의 측정값을 확인하여 유압장치에서 전달되는 하중을 상부 가압판에 작용시켜 토조의 압력을 조절한다.

3. 토압계

1) 기능 : 토조내의 토압의 변화를 측정하기 위한 장비이다.

2) 실험방법 : 토조 외부벽면에 부착하여 토압을 측정하며, 데이터로거로 실험데이터를 전송한다.

4. 변형률계

1) 기능 : 토조내 터널모사 장비에 작용하는 응력을 측정하기 위한 장비이다.

2) 실험방법 : 모형터널의 외부에 부착하여 터널 라이닝에 발생하는 변형을 측정하고, 이를 라이닝 작용 응력으로 변환한다.

5. 간극수압계

1) 기능 : 배수조건에서 터널주변에서의 간극수압 변화를 측정하기 위한 장비이다.

2) 실험방법 : 모형터널의 외부에 부착하여 간극수압의 변화를 측정하며, 데이터로거로 실험데이터를 전송한다.

6. 유량측정장비

1) 기능 : 배수조건시 터널모사장비를 통하여 유출되는 유량을 측정하기 위한 장비이다.

2) 실험방법 : 메스실린더 및 전자저울을 사용하여 배수형 터널에서 유출되는 유량을 측정하고 자료는 데이터로거로 전송한다.

7. 가압판

1) 기능 : 터널모사장비를 통하여 실제 형상과 유사한 압력을 전달하도록 하는 장비이다.

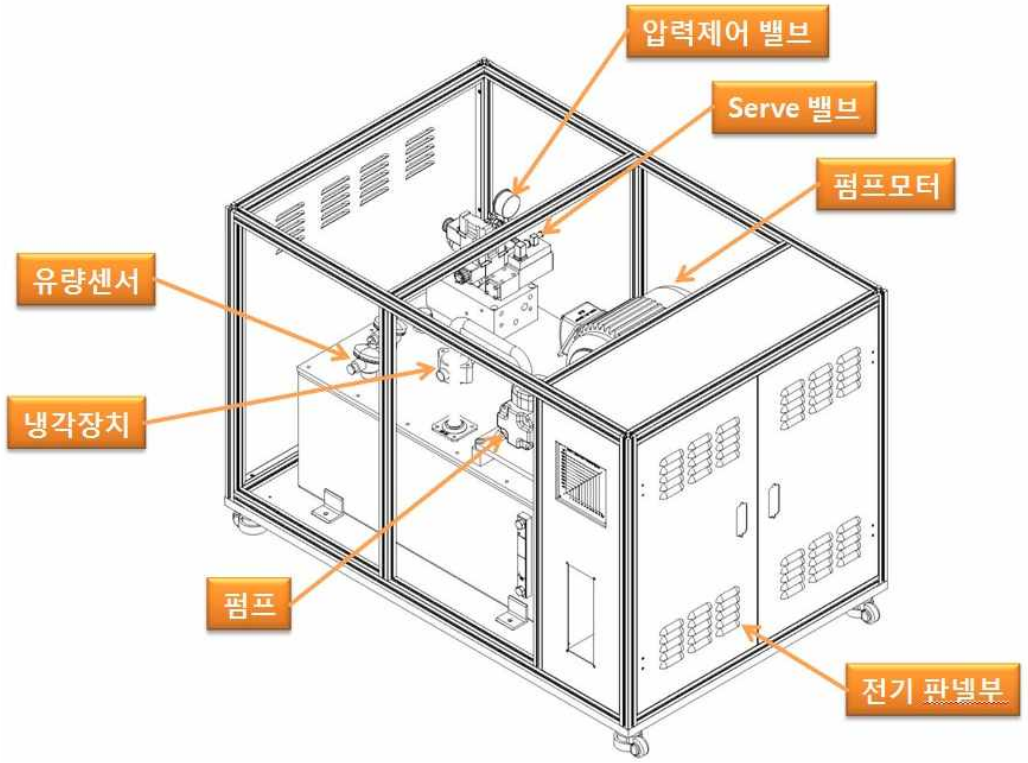
2) 실험방법 : 로드셀에 연결하여 터널모사장비 토조에 압력을 가하도록 제작되고 운반이 용이하고 압력을 견딜 수 있도록 알루미늄으로 제작되어 있다.

8. 롤러(선택사항)

1) 기능 : 터널모사장비 시험 시 무거운 토조의 운반 및 철거를 위한 장비이다.

2) 실험방법 : 롤러에 토조를 올려 흙 채움 및 흙 비움을 위해 사용된다.

제 3 절 유압장치 및 부속장비



< 유압장치 >

1. 유압장치

1) 기능 : 실험모형에 토압을 가하기 위한 장비이다.
2) 실험방법 : 최대 5 ton ± 0.1%의 압력으로 24시간동안 토조에 가한다.

2. 펌프 및 펌프모터

1) 기능 : 유압장치에 기름을 전달하기 위한 장비이다.
2) 종류 : Vane 펌프, Gear 펌프, Piston 펌프

3. 전기판넬부

1) 기능 : 유압장치를 통해 가해지는 하중 및 압력을 확인하기 위한 장비이다.

2) 작동방법 : 측면에 표시되는 하중-압력선도를 이용하여 수동 또는 자동으로 유압을 조절한다.

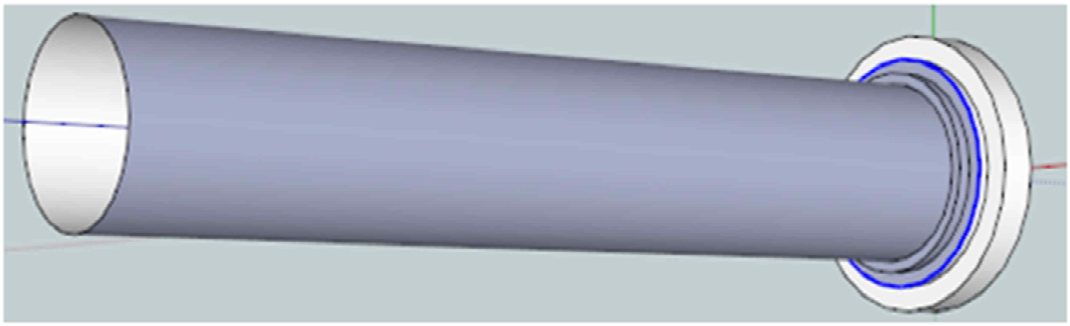
4. 밸브

유압장치에 사용되는 밸브들의 종류와 기능은 표 1과 같다.

< 밸브의 종류 및 기능 >

종 류	기 능
압력제어 밸브	- 유압장치의 압력 조절
방향제어 밸브	- 전후·상하 방향변화 조절
유량제어 밸브	- 유압장치의 속도 조절
적층 밸브	- 밸브를 쌓아서 전자회로 구성
비례제어 밸브	- 전기신호에 따라 압력, 유량 및 방향 변화 조절
Serve 밸브	- 전기신호에 따라 압력, 유량 및 방향에 대한 피드백 연산

제 4 절 터널모형 투입구



< 터널모형 투입구(외통) >

1. 내통

1) 기능 : 터널모형에 가해지는 토압, 수압 및 터널의 변형율을 측정하기 위한 각종 센서를 부착하는 실제 터널모형이다.

2) 작동방법 : 터널모형 내부 및 외부에 센서 설치 위치에 센서를 설치하고 외통에 끼워 필요한 데이터를 취득한다.

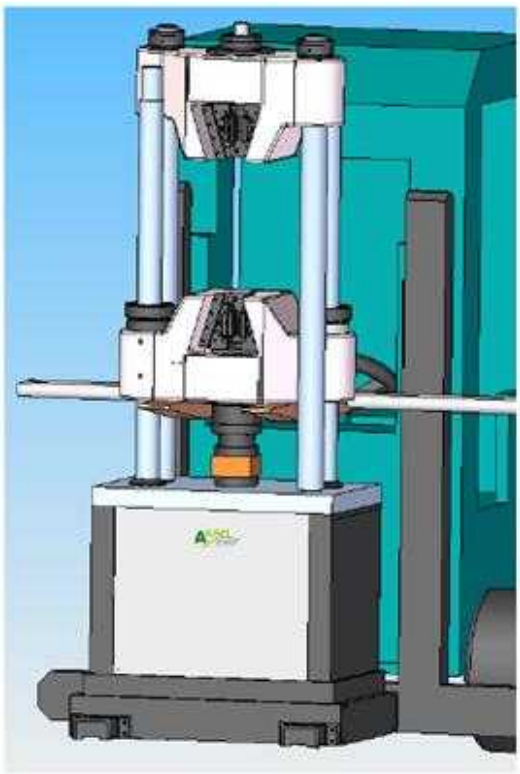
2. 외통

1) 기능 : 터널모형인 내통의 장착 및 탈착이 용의하도록 공간 확보를 위한 장비이다.

2) 작동방법 : 내통이 들어갈 자리에 미리 장착하고 토조의 흙 채움 후 내통을 장착한 후에 제거한다.

제 3 장 장비 조작 설명

제 1 절 장비 이동시 주의사항





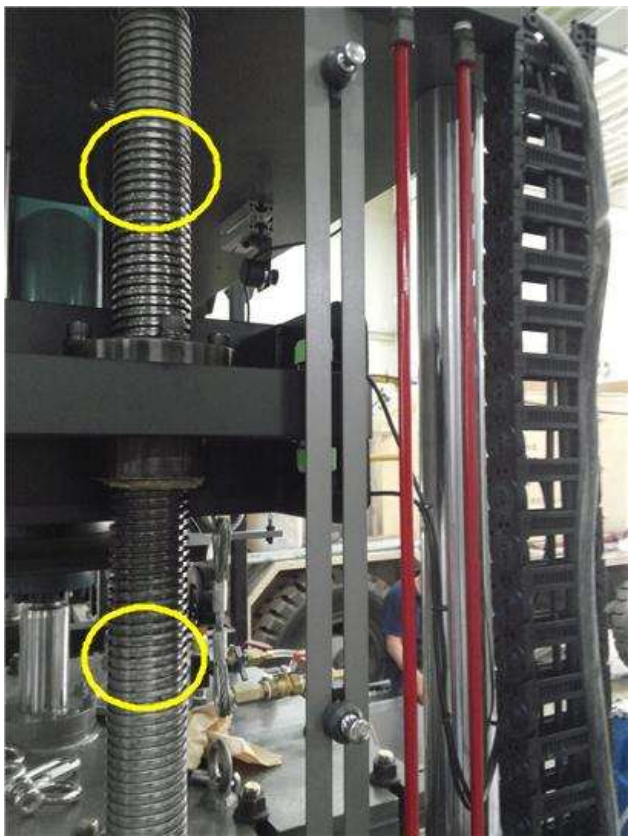
○ 장비의 이동시 장비무게의 최소 2배 이상의 FOLK LIFTER(지게차)를 사용하여야 하며, 이 경우 중간 크로스헤드를 들어 이동하는 것이 좋습니다.

○ 기계 전면이나 옆쪽에 서지 마십시오.

○ 이동시 급하게 들거나 밀지 마시고 천천히 이동을 시켜주십시오.

제 2 절 기계의 위험 부위 및 사용 시 주의사항

1. 스크류 기둥



○ 크로스헤드의 이동 및 실험 시 위 스크루의 틈 사이에 손이나 옷깃 등이 끼어들어 가지 않도록 특별한 주의가 필요합니다.

○ 긴 머리카락이나 늘어진 장신구 또는 옷 등은 특히 위험한 요소가 될 수 있습니다.

○ 작업자는 실험 시 위와 같은 복장을 피하시고, 장신구등은 반드시 빼두어야 합니다.

○ 필요시 안전모를 착용하도록 하십시오.

2. 로드셀과 상부덮개



○ 상부덮개의 체결 시 절대로 사이에 손을 넣지 마십시오.

○ 토조 밖으로 물이 새어나올 수 있으므로 너트를 단단히 체결하시오.

○ 로드셀과 상부덮개의 체결 볼트가 맞닿지 않도록 주의 하십시오. 로드셀 파손의 위험성이 있습니다.

3. 내통 조립 및 외통 제거




○ 내통 조립 시 반대 방향의 외통 체결 볼트를 적당히 풀어 주면서 양쪽의 밸런스가 맞게 조절하여야 조립이 용이합니다(2인 동시 작업).

○ 시료 투입 후 외통을 제거한 후 내통 연결 덮개를 연결할 시에도 동일합니다.

4. 가압판



○ 가압판 체결 후 상부덮개 체결을 위해 상부덮개를 내릴 때 가압판과 토조의 정확한 삽입을 위해 아주 천천히 하강시켜줍니다.

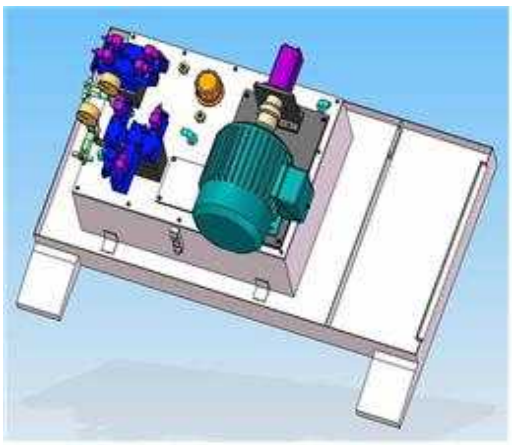
5. 수압펌프 및 모터

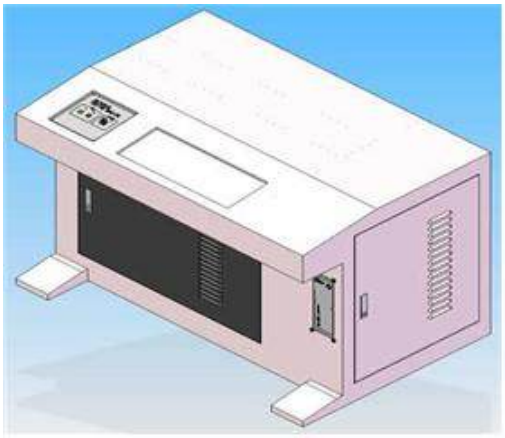


○ 수압 펌프는 장비의 압력계를 확인 하며 일정 수압에 맞게 토조에 유량을 공급하고, 이후 수압의 변화가 없도록 공급되는 유량을 일정하게 한다.

○ 수압 펌프의 과열 시 방열판 주위에는 손이나 기타 물품이 놓이지 않게 하여 화상의 위험이나 화재의 위험을 방지해야 한다.

6. 유압 유니트







현재 제품에 사용되는 유압유는 국제규격 ISO의 점도 등급 46번입니다.

유압유의 교체시기는 사용 빈도수에 따라 달라 지므로 특정한 교체주기가 있는 것은 아니나 통상적으로 최소 3년에 한번 정도는 갈아주시는 것이 좋습니다.

교환주기는 오일탱크 전면부에 보이는 투명한 창으로 오일이 갈색으로 변했을때 교환하여주십시오.

가동시간 기준으로는 약 1000 시간 정도 사용후 교체를 해주십시오.
통상적으로 15℃ ~ 60℃ 이내의 온도에서 사용하는 것을 권장합니다.

점도 등급 ISO 46 (#46)				
밀도 (kg/L@15℃)	인화점(℃)	유동점(℃)	동점도,mm2/s	
			@40℃	@100℃
0.858	229	-33	44.5	7

제 3 절 실험 순서 및 프로그램 작동 방법

1. 실험 준비 및 순서

터널모형 실험을 위한 준비는 다음과 같은 순서로 실시된다.

○ 토조를 하부판과 볼트로 체결하고 외관 삽입



< 외관 삽입 모습 >

○ 토조에서 상부판 분리
○ 토조에 표준사를 투입하고 30cm 높이마다 15회씩 다짐 수행
○ 유압잭 하단에 가압판을 부착하고 토조의 상부판 볼트 체결
○ 토조에 토압 1ton을 재하시켜 토조 내의 표준사 압축



< 가압하기 전 가압판의 모습 >



< 가압하는 모습 >

○ 외관 탈착 및 내관 삽입
○ 토조에 물을 유입시켜 토조 내의 공기 제거

터널모형 실험 순서는 다음과 같다.

○ 수압을 0.05 MPa까지 가압 후 유지

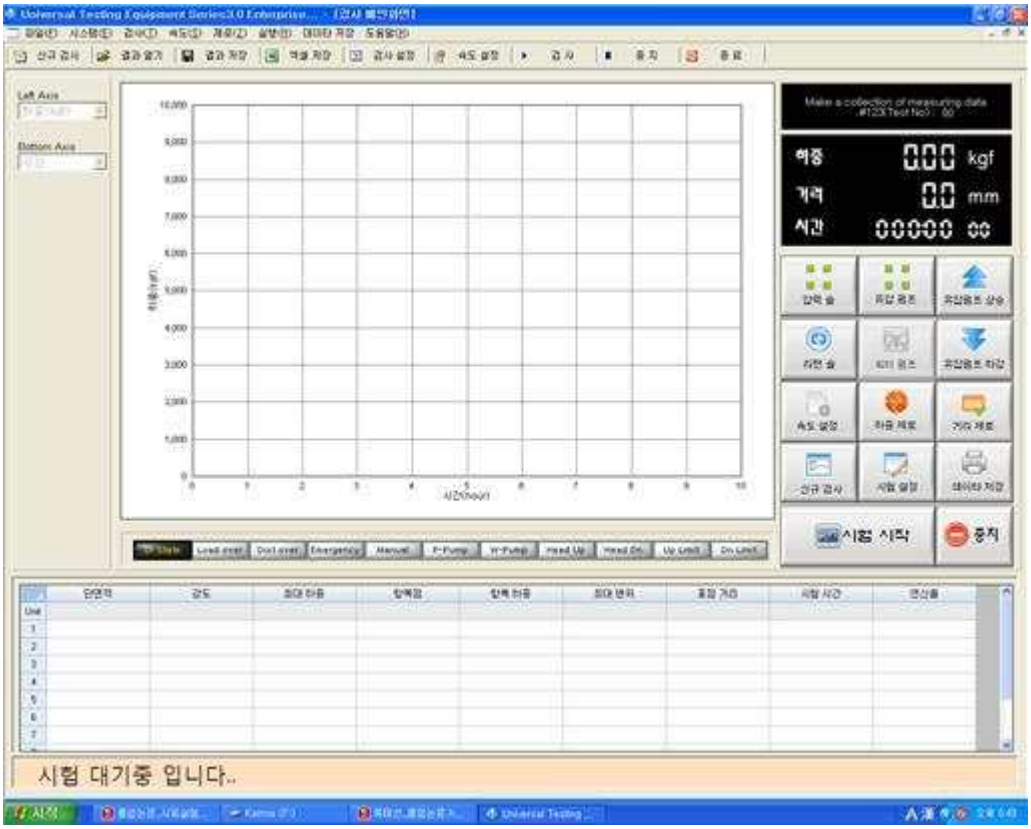


< 수압을 0.50 MPa로 유지하는 모습 >

○ 토압을 1분당 0.0278 MPa(1ton) 증가, 0.139 MPa(5ton)까지 가압. 데이터 측정
○ 수압을 0.10 MPa까지 가압 후 유지
○ 토압을 1분당 0.0278 MPa(1ton) 증가, 0.139 MPa(5ton)까지 가압. 데이터 측정
○ 수압을 0.15 MPa까지 가압 후 유지
○ 토압을 1분당 0.0278 MPa(1ton) 증가, 0.139 MPa(5ton)까지 가압. 데이터 측정
○ 수압을 0.20 MPa까지 가압 후 유지
○ 토압을 1분당 0.0278 MPa(1ton) 증가, 0.139 MPa(5ton)까지 가압. 데이터 측정

2. 프로그램 작동 방법

○ ECLAT를 실행하고 신규검사 클릭



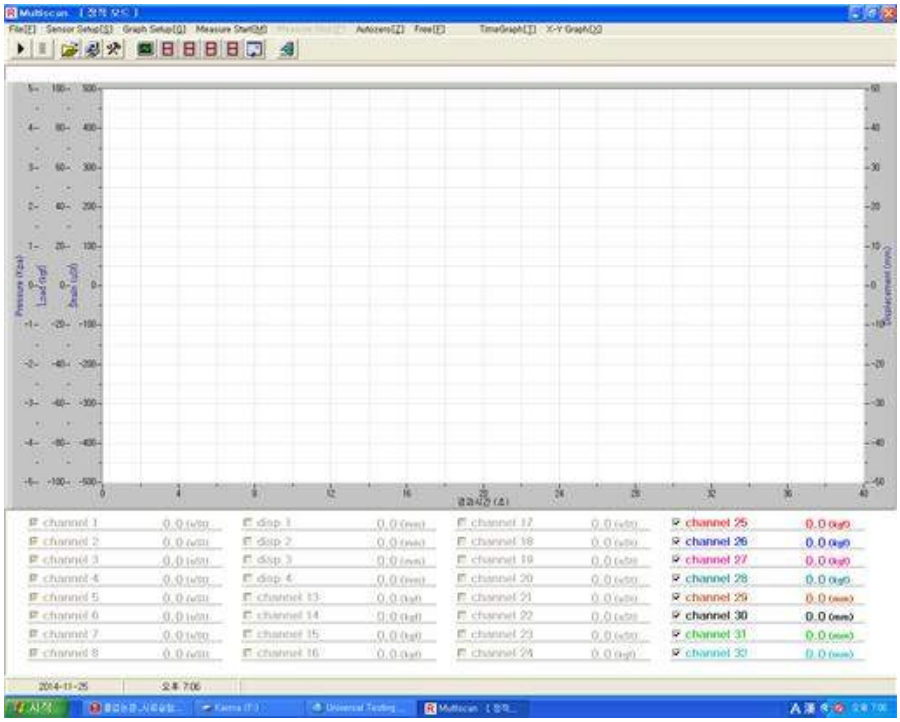
< ECLAT 실행화면 >

○ 시험설정을 클릭하여 시험설정 파일을 확인한 후, 유압펌프, 압력솔, 리턴솔의 순서로 유압 작동(정지 시 역순)

○ 속도설정을 클릭하여 하중제어모드나 전압제어모드를 이용해 유압잭 작동

○ 수압펌프를 수동으로 작동시켜 토조의 시료 포화

○ Multiscan을 클릭하여 센서, 저장간격 및 환경을 설정하고, 정적모드 시험 클릭



< Multiscan 실행화면 >

○ Multiscan에서 Start를 클릭하여 실험에 의해 얻어지는 Data를 확인하고 값들의 초기화를 위해 Autozero 클릭

○ 수압을 0.05 MPa로 맞추고, ECLAT의 하중제로 및 거리제로를 클릭하고 가해지는 하중을 확인하며 실험순서에 맞춰 수압 및 유압을 증가시키며 실험 수행

제 4 장 예상문제점 및 조치사항

제 1 절 매일 작업 전 사전 정비사항

○ 조작 버튼 및 프로그램은 확실히 작동 하는가?
○ 볼트 너트가 풀린 곳은 없는가?
○ 작동 전 슬라이드 부분 및 메탈부의 윤활유 급유는 충분한가?
○ 기계 부근에 작업에 장해가 되는 물건은 없는가?

제 2 절 주의사항

○ 본 시험기를 분해, 개조하지 마십시오. 고장 및 수리는 구입처나 당사 A/S 지원팀으로 의뢰하시기 바랍니다.

○ 본 시험기는 AC 220V/1P에서 동작되므로 젖은 손으로 조작하지 마십시오. 고장 및 감전의 위험이 있습니다.

○ 본 시험기 전자부 내부에 물이 들어간 경우는, 신속하게 전원(AC 220V)을 분리하십시오. 그리고 구입처나 당사 A/S지원팀으로 수리를 의뢰하십시오.

○ 이동설치 할 경우는 전원을 끈 후 이동설치 하십시오.

○ 본 기계의 사양에 나와 있는 최대 능력 이상은 어떠한 경우라도 초과하는 작업을 하여서는 안 됩니다.

○ 동작 중에는 신체의 일부라도 시험기내에 넣어서는 안 됩니다.

○ 긴급 상태가 발생하였을 경우에는 당황하지 말고 전원을 내리고 기기에는 손을 대지 마십시오.

○ 기계 주위에 기름걸레 등은 없어야 하며, 분진이 일어나지 않도록 주의하여 주십시오.

○ 작업 중 편심 하중의 작용은 각종 UNIT의 파손 원인이 될 수 있으며, 기계수명에 직접적인 영향을 미치므로 주의하여 주십시오.

○ 작업 중 장시간 자리를 비울 경우에 반드시 전원을 내려 주십시오.

○ 기타 상세한 사항은 취급 설명서의 각 부분을 참고 하십시오.

제 3 절 Trouble Sheet

Q : 기계가 작동하지 않습니다.

A : 기계가 작동하지 않는 경우는 여러 가지 원인이 존재할 수 있습니다.
(일단 아래와 같은 순서로 확인을 해 주십시오.)

1. 기계가 시험이 한번 끝난 후 시간이 한참 지난 후 다시 작동이 되는 경우

- 이 경우는 제품 내에 있는 실린더의 최대 스트로크까지 시험이 이루어져서 발행하게 됩니다.

- 매번 시험이 종료되면 항상 스트로크를 최대로 낮춰주십시오.

2. 리모컨과 기계 모두 작동하지 않는 경우

- 기계와 컴퓨터, DSP 컨트롤러의 전원이 모두 켜져 있는지 확인해 주십시오.

- 전원이 모두 켜져 있다면, 전원을 차단 후 재시동을 해 주십시오. 만일 그래도 이상이 지속된다면 바로 뉴원시스템에 문의를 주십시오.

- 시험 속도가 지나치게 빠르게 설정 되어 있는지 확인해 주십시오. 제품의 최대 시험하중에 가까운 하중이 걸리는 경우 시험 속도가 지나치게 빠른 경우 과부하로 인해 서보모터가 멈추는 경우가 발생 할 수 있습니다.

Q : 프로그램에 하중이 '0' 이나 'LOAD ERROR' 로 표시가 됩니다.

A : 위와 같은 경우 아래와 같은 순서로 확인을 해주십시오.

1. 상부 또는 하부 지그를 손으로 움직일 때 DSP 컨트롤러의 전면부에 녹색, 빨간색 불이 점멸되는지 확인합니다.

- 만일 불이 점멸되지 않는다면 로드셀과 DSP 컨트롤러 사이의 연결을 다시 확인합니다.

- 불이 점멸 되지 않는 경우 로드셀의 파손일 가능성이 높습니다. 이런 경우 뉴원시스템에 문의를 주십시오.

2. 바탕 화면에 저장되어 있는 그림 파일을 열어서 교정프로그램에 있는 GAIN 값과 동일한지 확인합니다.

- 함께 출고되는 컴퓨터의 바탕화면에는 정확한 GAIN 값이 저장되어 있습니다. 그 값을 실제 교정 프로그램의 값과 비교해서 차이가 있다면 로드셀이 파손 된 것으로 진단할 수 있습니다.

3. 프로그램이 이중으로 켜있지 않은지 확인합니다.

- 프로그램이 실행중인 상태에서 또다시 아이콘을 더블클릭하면 로드가 정상적으로 작동하지 않습니다.

- 반드시 프로그램이 이중으로 켜지지 않도록 주의해 주십시오.

Q : 그래프의 떨림이 심합니다.

A : 위와 같은 경우 아래와 같은 순서로 확인을 해주십시오.

1. 시료가 시험 중 미끄러지지 않았는지 시험 종료 후 시료의 물림부를 확인해 주십시오.

- 시료가 강하여 미끄러지는 슬립현상이 발생 되는 경우 그래프가 심하게 떨리는 현상이 일어날 수 있습니다. 이런 경우에는 시료에 맞는 새로운 인장용 Jaw가 필요합니다. 자세한 내용은 뉴원시스템에 문의하여 주십시오.

2. 시료가 미끄러지지 않는 경우.

- 특정 시료들은 떨림현상이 발생되는 경우가 있습니다. 이 경우, 교정 프로그램에서 필터링을 통하여 해결이 가능합니다.

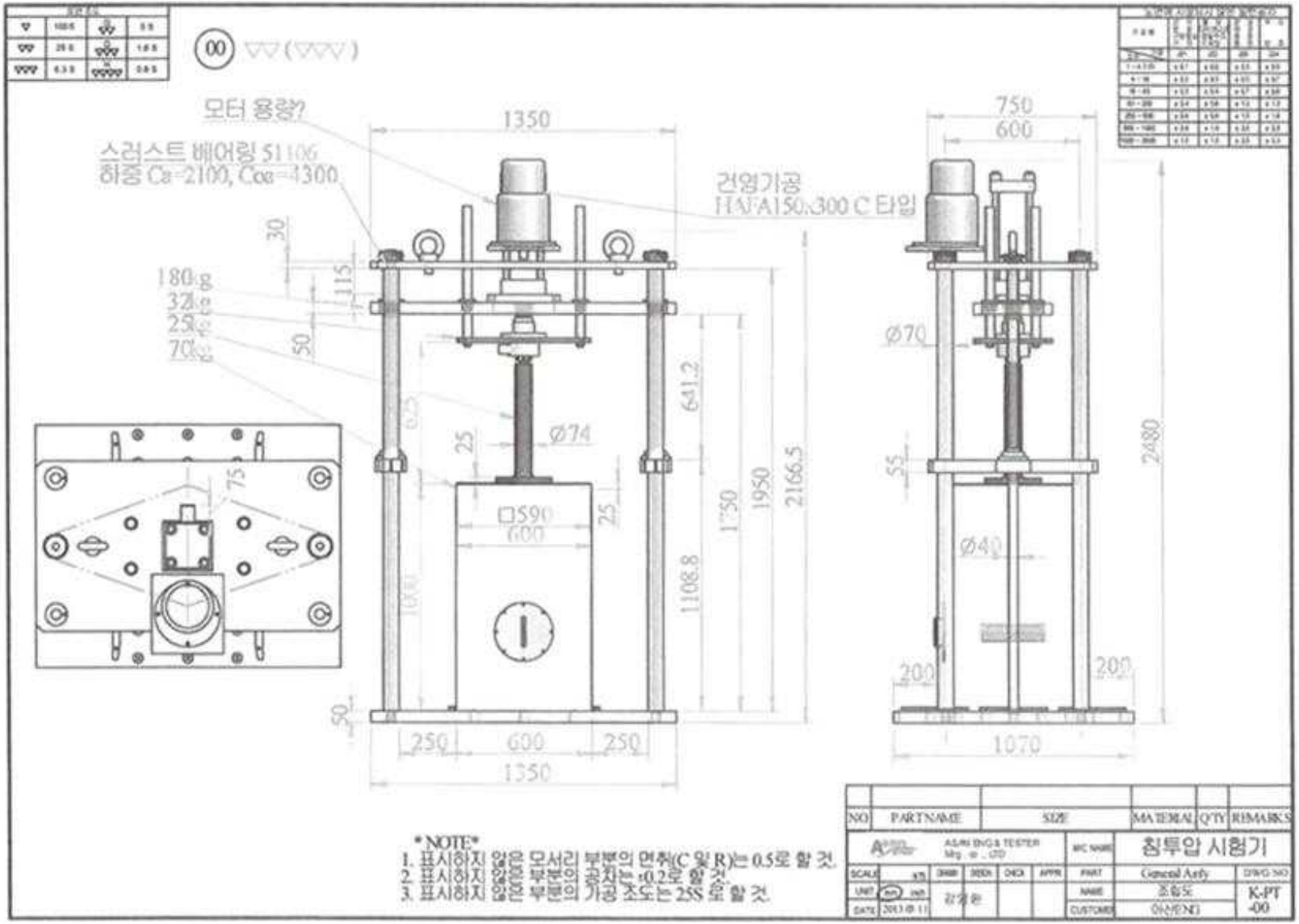
교정 프로그램 - 필터링 항목에서 설정을 점차 높게 실험하여 안정적인 그래프가 나오도록 반복 실험하여 주십시오.

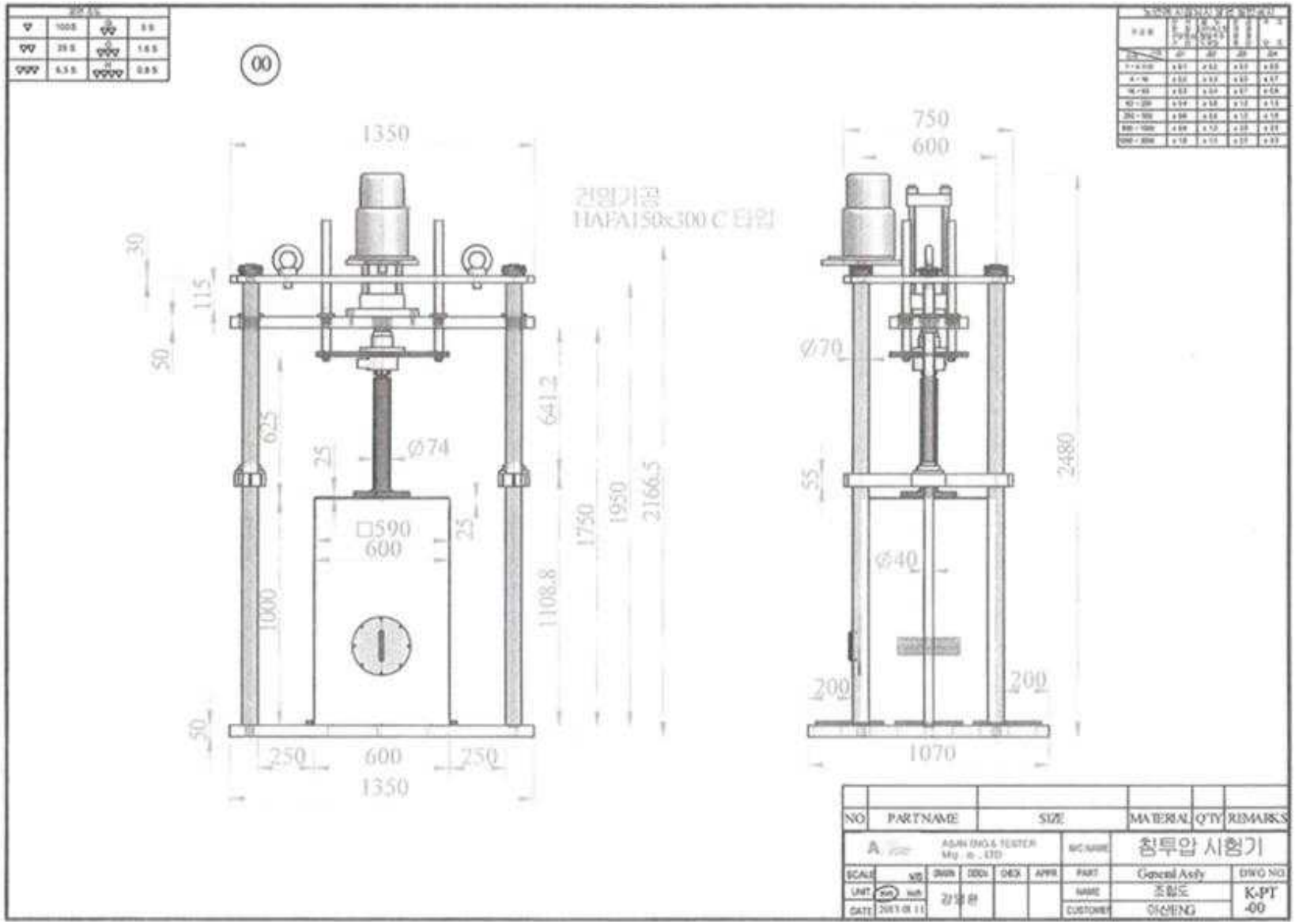
3. 컴퓨터를 DSP 컨트롤러 보다 먼저 켠 경우.

- 간혹 컴퓨터를 DSP 컨트롤러 보다 먼저 켰을 경우 위와 같은 문제가 발생할 수 있습니다. 이 경우 모든 프로그램을 종료하고 DSP 컨트롤로가 켜진 상태에서 컴퓨터를 재부팅하면 해결 될 수 있습니다.

제 5 장 장비 도면 및 부품도

제 1 절 장비 도면




00
1350
750
600
30
115
50
625
25
Ø74
641.2
□590
600
1108.8
1000
50
250
600
250
1350
1750
1950
2166.5
Ø70
55
2480
Ø40
200
200
1070
NO
PART NAME
SIZE
MATERIAL
Q'TY
REMARKS
A
ASIN ENG.& TESTER Mfg. co., LTD
M/C NAME
참투압 시험기
SCALE
DRWN
DSGN
CHCK
APPR
PART
General Assly
DWG NO
UNIT
mm inch
NAME
조립도
K-PT -00
DATE
2013.08.11
CUSTOMER
아신ENG

제 3 절 부품 상세설명도

1. 로드셀

	모델 : DSCS (로드셀) 용량 : 200, 500, 1000kg 출력 : 3mV/V 로드셀은 모든 작업 중에 항상 주의를 기울여 취급하여 주십시오. 충격에 민감한 제품이기 때문에 작업 중 시료등과 부딪치는 일이 없도록 주의를 해 주십시오. 지정된 최대 용량 이상의 하중은 곧바로 고장으로 이어질 수 있습니다. UTM에 부착된 로드셀은 정확하게 센터에 설치되어 있습니다. 임의로 탈부착시 센터의 흔들림으로 인해 데이터에 영향을 미칠 수 있습 니다. * 로드셀의 파손 시는 수리가 불가능 하므로 신품으로 교체하여야 합니다.

2. Servo solenoid valves

Rexroth
Bosch Group

Servo solenoid valves with on-board electronics (OBE)

RE 29035/01.05 1/12
Replaces 11.03

Type 4WRPEH6



Size 6
Unit series 2X
Maximum working pressure P, A, B 315 bar, T 250 bar
Nominal flow rate 2...40 l/min (Δp 70 bar)

List of contents

Contents	Page
Features	1
Ordering data and scope of delivery	2
Preferred types	2
Function, sectional diagram	3
Symbols	3
Technical data	4 to 6
On-board trigger electronics	7 and 8
Performance curves	9 and 10
Unit dimensions	11

Features

- Directly operated servo solenoid valve NG6, with control piston and sleeve in servo quality
- Actuated on one side, 4/4 fail-safe position when switched off
- Control solenoid with integral position feedback and on-board electronics (OBE), calibrated at the factory
- Electrical connection 6P+PE
  Signal input difference amplifier with interface
  A1 ±10 V, or interface F1 4...20 mA (R_i 200 Ω)
- Suitable for electrohydraulic controllers in production and testing systems
- For subplate attachment, mounting hole configuration to ISO 4401-03-02-0-94
- Subplates as per catalogue section RE 45053 (order separately)
- Line sockets to DIN 43563-AM6, see catalogue section RE 08008 (order separately)

Variants on request

- For standard applications
- Special symbols for plastic machines
- Possible valve electronics with 11P+PE line socket and extension of module

Ordering data and scope of delivery

4WRP	E	H	6		B		-2X/G24	K0/	M	*

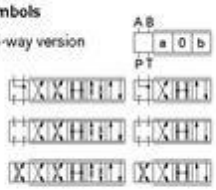
With **on-board** trigger electronics = **E**

Control piston/sleeve = **H**

Size 6 = **6**

Symbols

4/4-way version



= C3, C5

= C4, C1

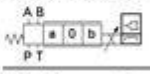
= C

With symbols C5 and C1:[3]

P → A: q_v B → T: $q_v/2$

P → B: $q_v/2$ A → T: q_v

Side of inductive position transducer



(Standard) = **B**

[1] Only in connection with flow characteristic "P"

[2] Kink 60% for NG6 with nominal flow rate "15" and "25", otherwise kink 40

[3] q_v 2:1 only with nominal flow rate = 40 l/min

Further information in plain text

M = NBR seals, suitable for mineral oils (HL, HLP) to DIN 51524

Interface for trigger electronics

A1 = Setpoint input ±10 V

F1 = Setpoint input 4...20 mA

Electrical connection

K0 = **without** line socket, with plug to DIN 43563-AM6

Order line socket separately

Voltage supply of trigger electronics

G24 = +24 V DC

2X = Unit series 20 to 29 (installation and connection dimensions unchanged)

Flow characteristic

L = Linear

P = Non-linear curve[2]

Nominal flow rate at 70 bar valve pressure difference (35 bar/metering notch)

Size 6

02 = 2 l/min **12** = 12 l/min **24** = 24 l/min **40**[3] = 40 l/min

04 = 4 l/min **15**[1] = 15 l/min **25**[1] = 25 l/min

Preferred types (available at short notice)

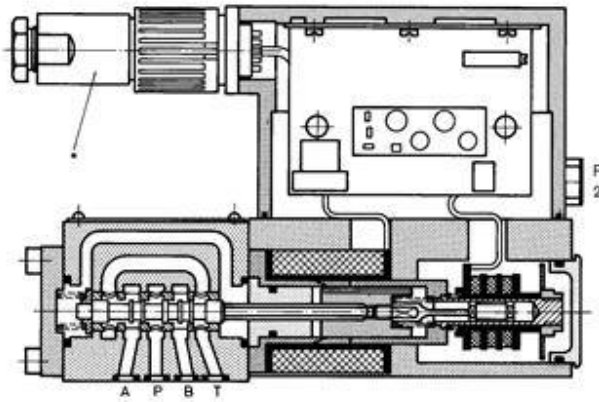
Type 4WRPEH 6	Material No.
C3 / C5	
4WRPEH 6 C3B02L -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 744**
4WRPEH 6 C3B04L -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 600**
4WRPEH 6 C3B12L -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 601**
4WRPEH 6 C3B24L -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 602**
4WRPEH 6 C3B40L -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 603**
4WRPEH 6 C5B40L -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 746**
4WRPEH 6 C3B15P -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 642**
4WRPEH 6 C3B25P -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 643**
4WRPEH 6 C3B40P -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 644**
4WRPEH 6 C5B40P -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 648**
4WRPEH 6 C3B04L -2X/G24K0 / F1M	**0 811 404 631**
4WRPEH 6 C3B12L -2X/G24K0 / F1M	**0 811 404 632**
4WRPEH 6 C3B24L -2X/G24K0 / F1M	**0 811 404 633**
4WRPEH 6 C3B40L -2X/G24K0 / F1M	**0 811 404 634**
4WRPEH 6 C5B40L -2X/G24K0 / F1M	**0 811 404 749**

Type 4WRPEH 6	Material No.
C1 / C4	
4WRPEH 6 C4B02L -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 641**
4WRPEH 6 C4B04L -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 610**
4WRPEH 6 C4B12L -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 611**
4WRPEH 6 C4B24L -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 612**
4WRPEH 6 C4B40L -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 613**
4WRPEH 6 C1B40L -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 738**
4WRPEH 6 C4B15P -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 645**
4WRPEH 6 C4B25P -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 646**
4WRPEH 6 C4B40P -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 647**
4WRPEH 6 C1B40P -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 649**
4WRPEH 6 C4B04L -2X/G24K0 / F1M	**0 811 404 350**
4WRPEH 6 C4B12L -2X/G24K0 / F1M	**0 811 404 351**
4WRPEH 6 C4B24L -2X/G24K0 / F1M	**0 811 404 352**
4WRPEH 6 C4B40L -2X/G24K0 / F1M	**0 811 404 353**
4WRPEH 6 C1B40L -2X/G24K0 / F1M	**0 811 404 354**
C..	
4WRPEH 6 C B04L -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 741**
4WRPEH 6 C B24L -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 355**
4WRPEH 6 C B40L -2X/G24K0 / A1M	**0 811 404 639**
4WRPEH 6 C B40L -2X/G24K0 / F1M	**0 811 404 640**

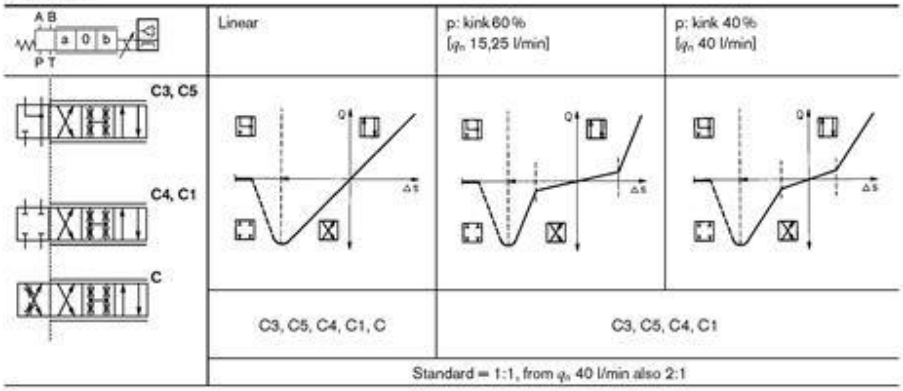
Function, sectional diagram

Servo solenoid valve 4WRPEH6

CE EN 61000-6-2
EN 61000-6-3



Symbols



Accessories, not included in scope of delivery

(4 x) ⊏ M5 x 30 DIN 912–10.9	Fastening screws		2910151166
* 	Line sockets 6P+PE, see also RE 08008	KS	1834482022
		KS	1834482026
		MS	1834482023
		MS	1834482024
		KS 90°	1834484252

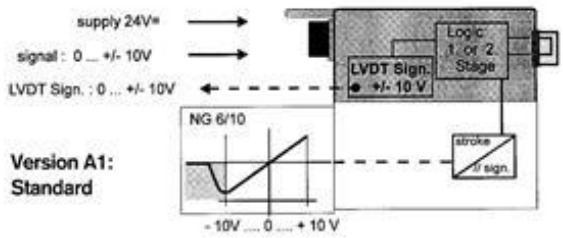
Testing and service equipment

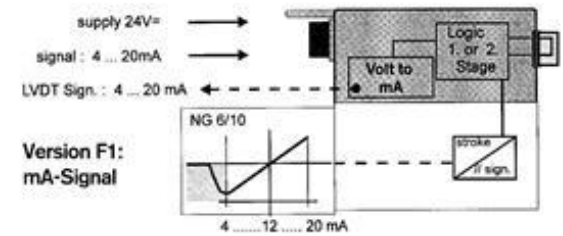
- Test box type VT-PE-TB3, see RE 30065
- Test adapter 6P+PE type VT-PA-2, see RE 30068

Technical data

Electrical, trigger electronics integrated in the valve

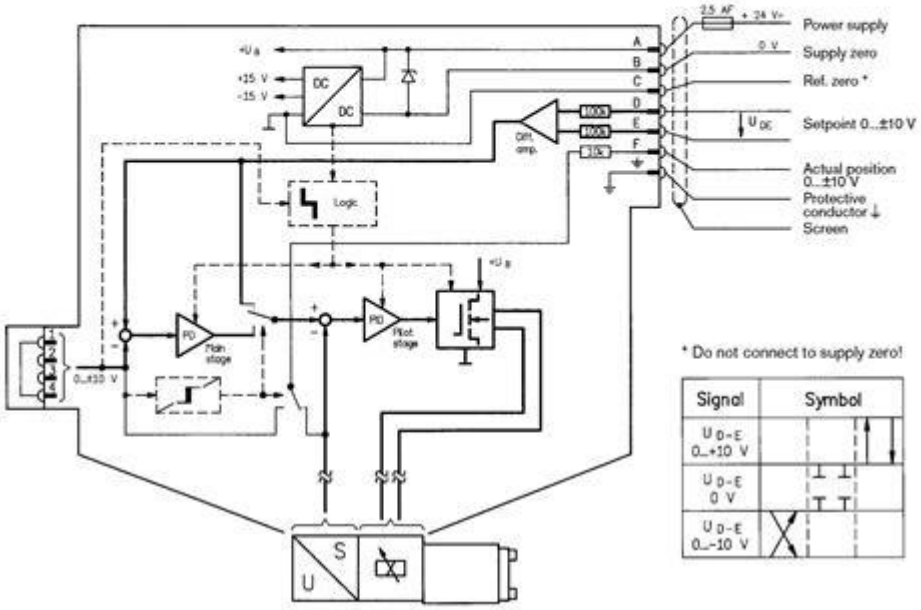
Cyclic duration factor %	100
Degree of protection	IP 65 to DIN 40050 and IEC 14434/5
Connection	Line socket 6P+PE, DIN 43563
Power supply Terminal A: Terminal B: 0 V	24 DC_{nom} min. 21 V DC/max. 40 V DC Ripple max. 2 V DC
Power consumption	Solenoid ⌀ 45 mm = 40 VA max.
External fuse	2.5 A_F
Input, "Standard" version Terminal D: U_E Terminal E:	Difference amplifier, R_i = 100 kΩ 0 ... ±10 V 0 V
Input, "mA-Signal" version Terminal D: I_{D-E} Terminal E: I_{D-E}	Burden, R_{sh} = 200 Ω 4 ... (12) ... 20 mA Current loop I_{D-E} feedback
Max. differential input voltage at 0 V	D → B E → B } max. 18 DC
Test signal, "Standard" version Terminal F: U_{Test} Terminal C:	LVDT 0 ... +10 V Reference 0 V
Test signal, "mA-Signal" version Terminal F: I_{F-C} Terminal C: I_{F-C}	LVDT signal 4 ... 20 mA at external load 200 ... 500 Ω max. 4 ... 20 mA output Current loop I_{F-C} feedback
Protective conductor and screen	See pin assignment (installation conforms to CE)
Recommended cable	See pin assignment up to 20 m 7x0.75 mm² up to 40 m 7x1 mm²
Calibration	Calibrated at the factory, see valve performance curve



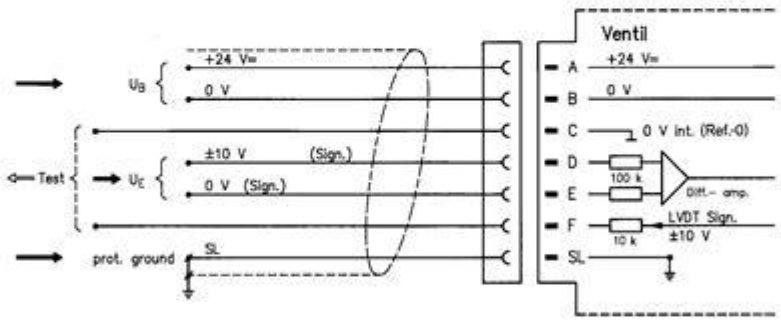


On-board trigger electronics

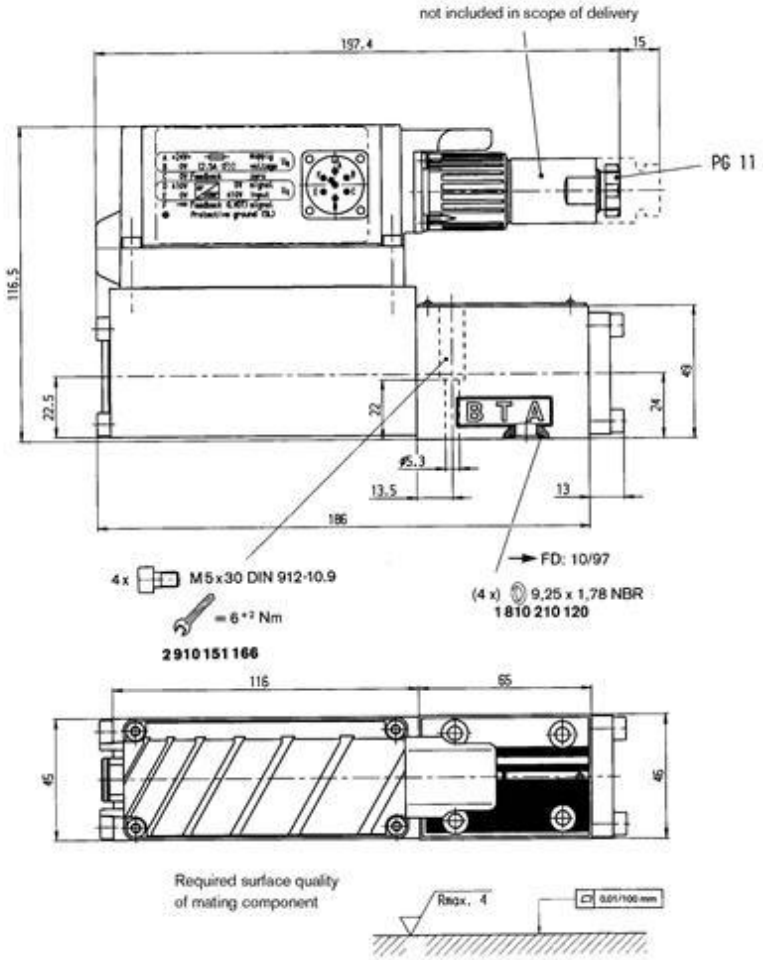
Block diagram/pin assignment
Version A1: U_{D-E} ±10 V



Pin assignment 6P + PE
Version A1: U_{D-E} ±10 V
(R_L = 100 kΩ)

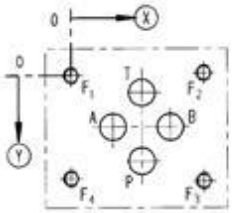


Unit dimensions (Nominal dimensions in mm)



Mounting hole configuration: NG6
(ISO 4401-03-02-0-94)
For subplates, see catalogue section RE 45053

[1] Deviates from standard
[2] Thread depth:
Ferrous metal 1.5 x Ø
Non-ferrous 2 x Ø



	P	A	T	B	F_1	F_2	F_3	F_4
⊗	21.5	12.5	21.5	30.2	0	40.5	40.5	0
Ⓨ	25.9	15.5	5.1	15.5	0	−0.75	31.75	31
∅	8[1]	8[1]	8[1]	8[1]	M5[2]	M5[2]	M5[2]	M5[2]

제 4 절 DA CONNECTOR

DA AD669 2CH

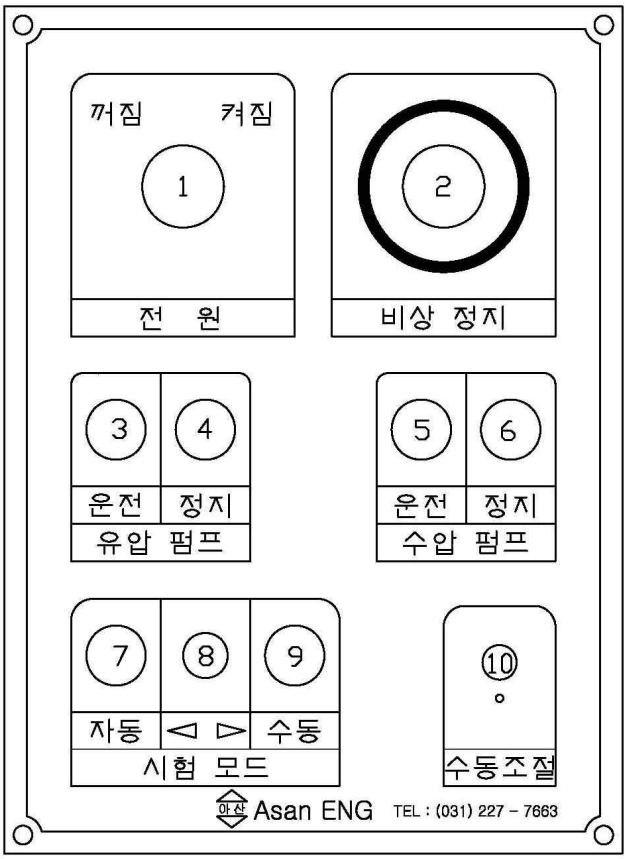
DA DB1-15P

PIN	사용 용도	선색깔
1	DC24V GND	갈, 회
2	SOL2 압력	황, 자
3	SOL1 RETURN	백, 적-
4	PC GND	
5	PC GND	흑
6	PC GND	
7	PC-RY A접전	청
8		
9	DC24V GND	등
10	SOL2 압력	황-
11	SOL1 RETURN	백-
12	DA 10V 1CH	적
13	PEED BACK (P OUT)	녹
14	PEED BACK (LVDT)	녹-
15	PC-RY A접전	청

DA DB2-15P

PIN	사용 용도	선색깔
1		
2		
3		
4	STROKE A	녹
5	STROKE B	백
6	GND	흑
7		
8	POWER 5V	적
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		

제 5 절 컨트롤 스위치 판넬



1. 전원 ON / OFF 스위치
2. 비상정지 스위치(유압펌프 & 수압펌프 정지)
3. 유압펌프 운전 스위치
4. 유압펌프 정지 스위치
5. 수압펌프운전 스위치
6. 수압펌프 정지 스위치
7. 자동 모드 표시등
8. 자동 수동 전환 스위치

   자동모드시 하중 유지가 설정한 하중값에 의해 자동으로 유지됨

   수동모드시 10번 볼륨에 의해 하중이 유지됨
9. 수동모드 표시등
10. 수동모드시 하중 설정 볼륨 스위치

PS 볼 뒤채움 주입장치

장비 매뉴얼

2015. 06

목 차

제 1 장 개요 및 특징 ····· 1

1. 개요 ····· 1
2. 특징 ····· 1

제 2 장 주요설비 ····· 2

1. Silo ····· 2
2. PS Ball 뒤채움 주입장치 ····· 4
3. 이송호스 ····· 4
4. Connecting Pipe ····· 5

제 3 장 장비 조작 설명 ····· 6

1. 운전 절차 ····· 6

제 4 장 정비사항 및 주의사항 ····· 8

1. 작업 전 사전 정비사항 ····· 8
2. 주의사항 ····· 8

제 5 장 장비 도면 ····· 9

1. 장비도면 ····· 9

제 1 장 개요 및 특징

1. 개요

본 제품은 기존 뒤채움재로 인해 발생되는 비배수 쉴드터널의 문제점을 부분배수 쉴드터널화로 해결하기 위해 고안된 장치이다.

부분배수 쉴드터널화를 위해 사용되는 뒤채움재인 PS Ball은 SAP 기술을 이용하여 제강공정 중 발생하는 제강슬래그로부터 탄생된다. 이렇게 탄생되는 PS Ball을 뒤채움재로 사용하기 위해 고안된 장치가 PS Ball 뒤채움 주입장치이다.

2. 특징

○ 작동원이 압축에어라 작동이 쉽고 성능이 일정하다.

○ 구조가 간단하여 고장요소가 적고 유지 보수가 용이하다.

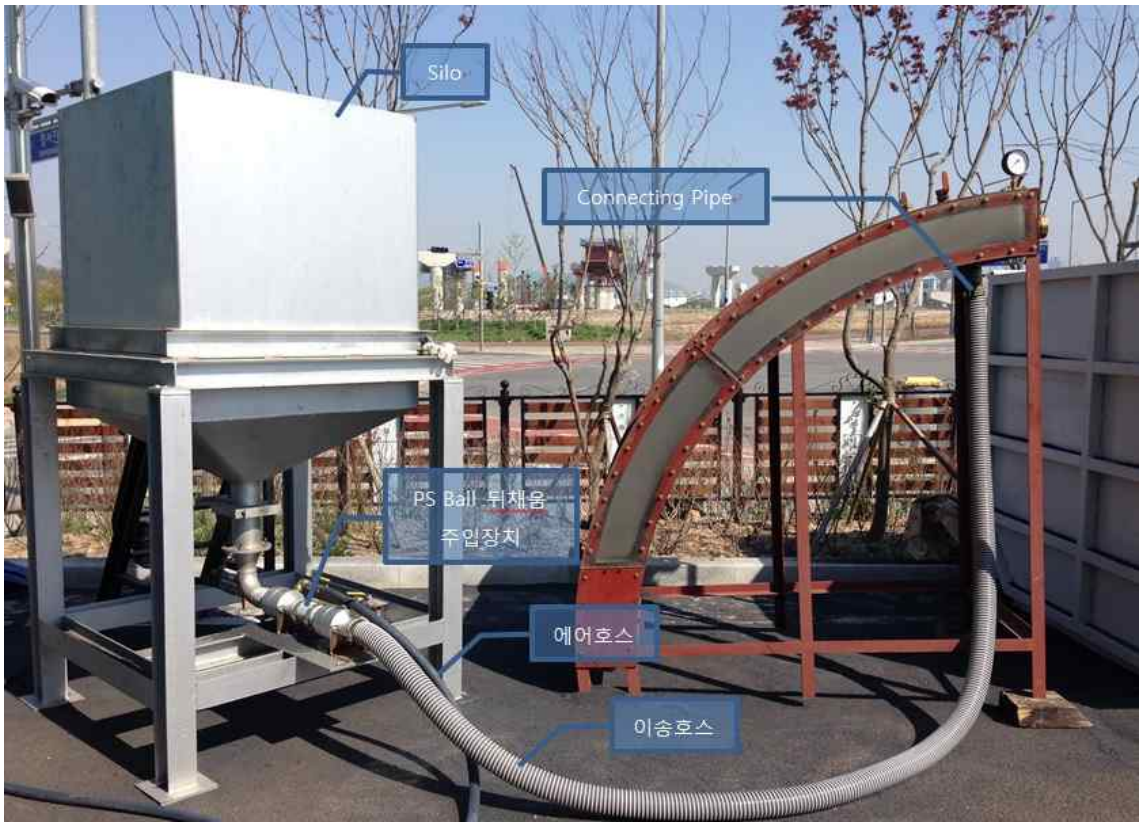
○ 가동부가 없어 윤활이 필요 없다.

○ 공급에어는 Valve를 통해 조절이 가능하다.

○ 설치가 용이하다.

○ 사용 후 보관이 간단하다.

제 2 장 주요설비



< 실험설비 >

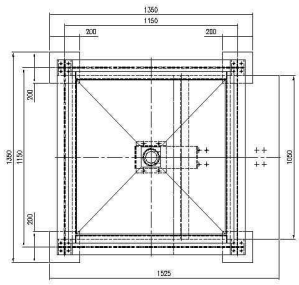
1. Silo

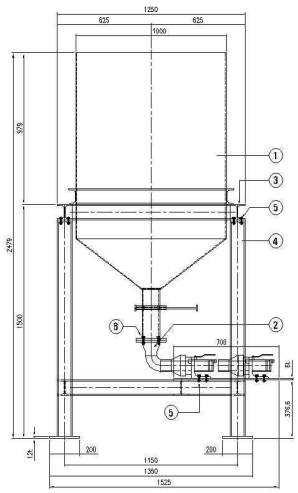
1) 기능 : 뒤채움재인 PS Ball을 주입 전 저장하는 역할을 한다.

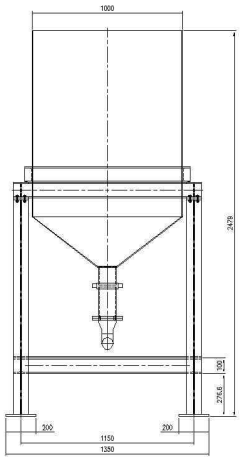
2) 규격 : 1,000 mm X 1,000 mm X 1,200 mm (B X L X H)

3) 방법 : 1.2㎥의 PS Ball 저장이 가능하고 하부의 Gate를 개방/폐쇄가 가능하고 PS Ball 뒤채움 주입장비로 전달할 수 있다.




1350
1150
200
200
1380
1150
350
1525


1250
625
625
1000
578
2479
1500
700
81
376,6
126
200
200
1150
1350
1525


1000
2479
276,6
200
200
1150
1350

2. PS Ball 뒤채움 주입장치

1) 기능 : Silo에 저장되어 있는 PS Ball을 세그먼트 배면으로 주입하는 역할을 한다.

2) 사양 :

공급에어압력 (kg/㎠)	에어소비량 (N㎥/min)	정풍량 (N㎥/min)	진공도 (CmHg)
5	2.50	9.00	6

3) 방법 : Compressor의 압축공기를 투입한 후 PS Ball 뒤채움 주입장치에 있는 Ball Valve를 개방한다.



3. 이송호스

1) 기능 : PS Ball 뒤채움 주입장치와 Connecting Pipe를 연결하는 역할을 한다.

2) 규격 : ∅75

3) 방법 : PS Ball 뒤채움 주입장치 토출부와 Connecting Pipe의 주입구에 연결 후 클램프로 고정한다.

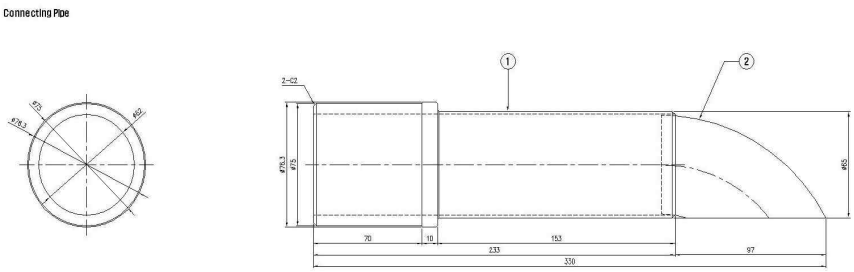
4. Connecting Pipe

1) 기능 : 몰드와 연결되어 PS Ball의 최종 토출부 역할을 한다.

2) 규격 : 65A

2) 방법 : 이송호스와 몰드에 연결 후 클램프로 고정한다.





제 3 장 장비 조작 설명

1. 운전 절차

PS Ball 뒤채움 작업은 다음과 같은 순서로 실시된다.

○ PS Ball을 Silo에 투입





< Silo와 내부에 PS Ball이 투입된 모습 >

○ PS Ball 뒤채움 주입장치와 이송호스 연결



< PS Ball 뒤채움 주입장치 이송호스 연결 모습 >

○ 이송호스와 Connecting Pipe 연결 후 몰드에 연결



< 이송호스, Connecting Pipe와 몰드 연결 모습 >

○ Compressor와 PS Ball 뒤채움 주입장치를 에어호스로 연결



< 에어호스 연결 모습 >

○ PS Ball 뒤채움 주입장치에 압축공기 투입 후 Valve 개방
○ Silo 하부에 있는 Gate 개방
○ PS Ball이 몰드에 채워지는 시간 측정

제 4 장 정비사항 및 주의사항

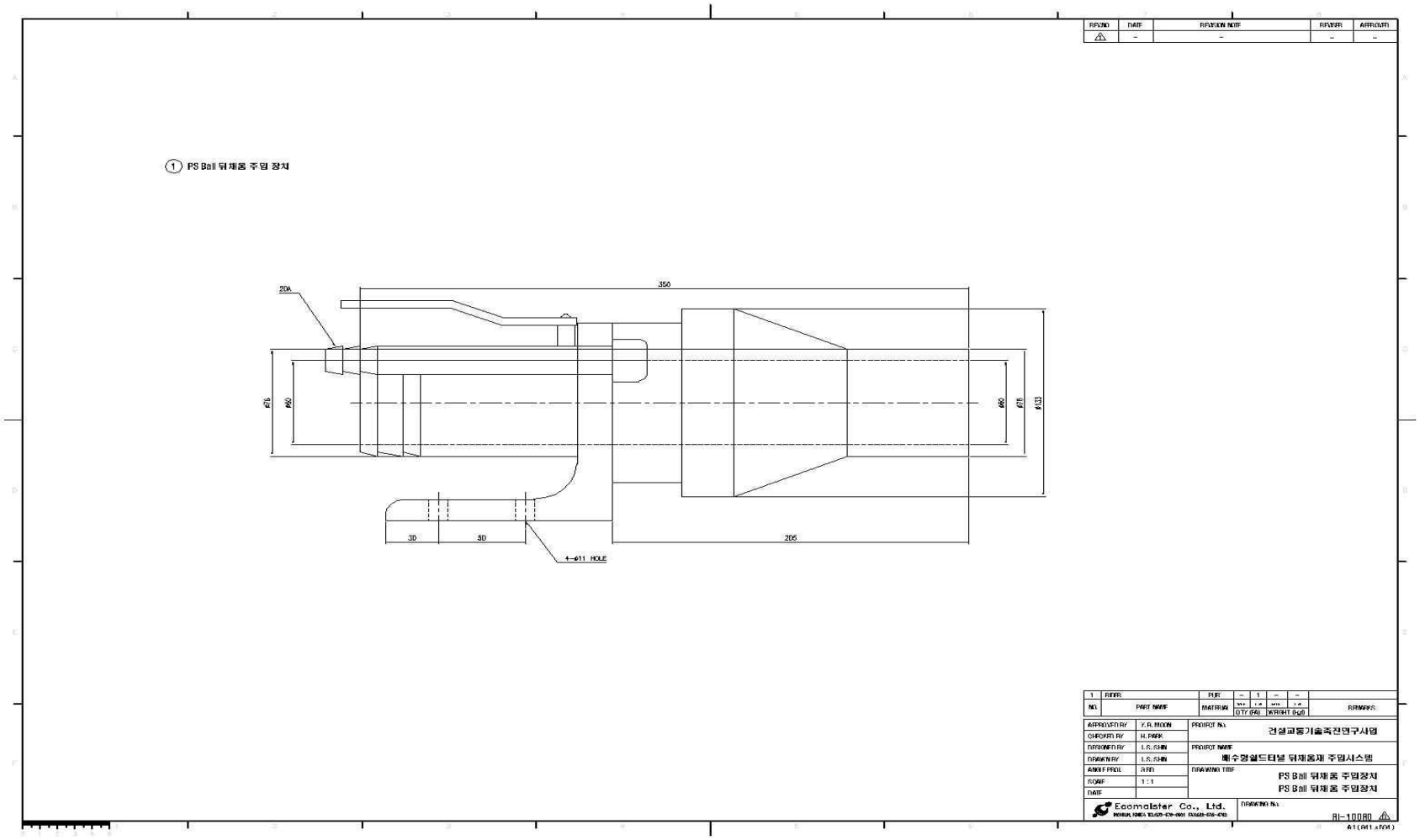
1. 작업 전 사전 정비사항

○ PS Ball 투입 전 Silo 하부 Gate는 잠겨있는가?
○ 각종 호스 연결은 잘 되어 있는가?
○ 에어 투입 전 Valve는 잘 잠겨 있는가?
○ 설비 부근에 작업에 장해가 되는 물건은 없는가?

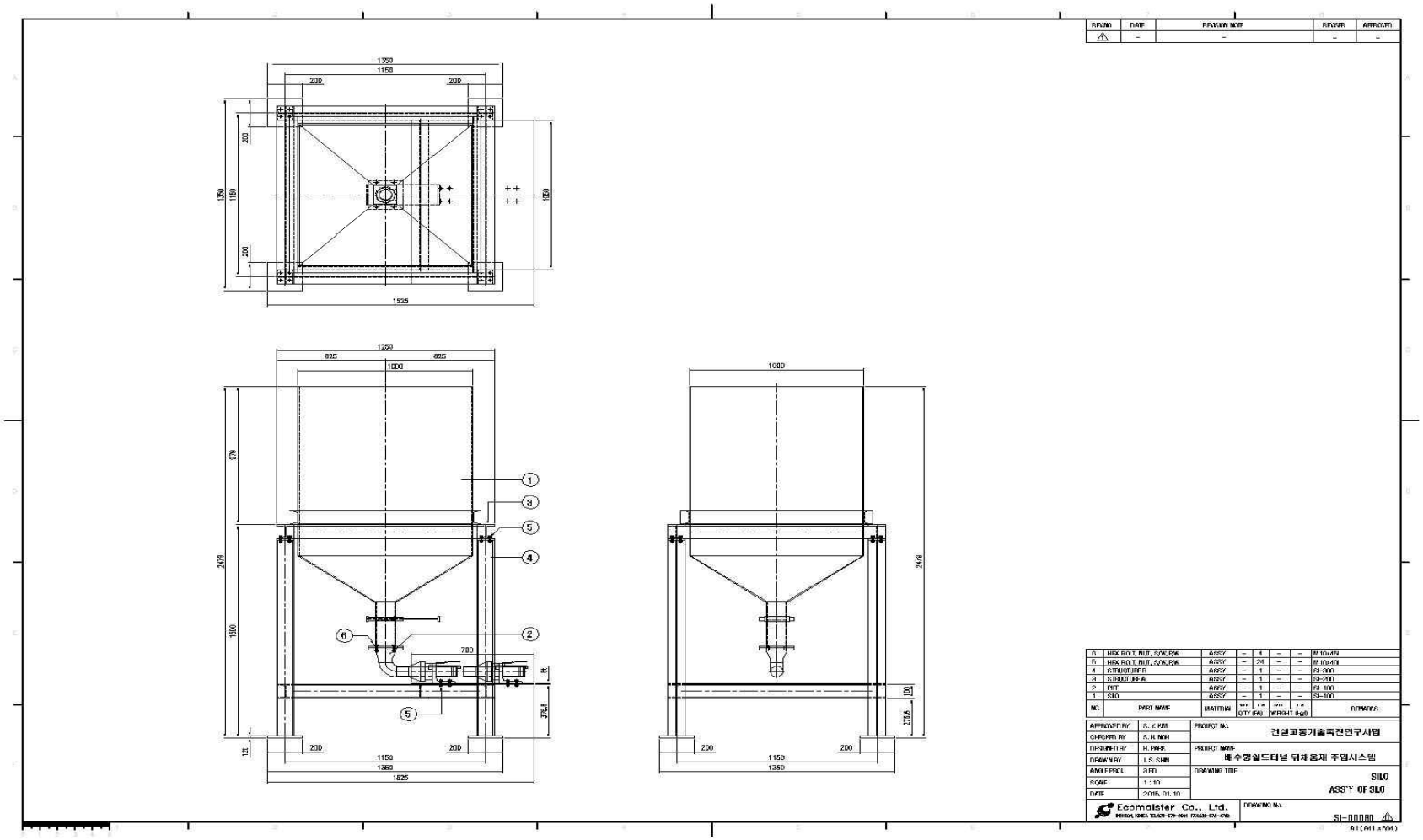
2. 주의사항

○ 본 설비를 분해, 개조하지 마십시오. 고장 및 수리는 구입처나 당사 A/S 지원팀으로 의뢰하시기 바랍니다.
○ 이동설치 할 경우는 내부를 비운 상태에서 이동설치 하십시오.
○ 호스와 클램프의 체결상태를 주기적으로 확인하십시오.
○ 작업 중 설비에서 안전거리를 유지하십시오.
○ 장시간 사용하지 않을 경우 에어호스는 분리해서 보관 하십시오.

제 5 장 장비 도면

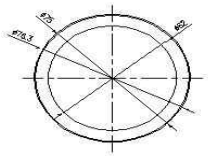

① PS Ball 뒤채움 주입 장치
350
205
30
50
205
4-ø11 HOLE
ø75
ø60
ø89
ø75
ø133
REV.NO
DATE
REVISION NOTE
DRAWN
APPROVED
-
NO.
PART NAME
MATERIAL
QTY (PC)
WEIGHT (kg)
REMARKS
APPROVED BY
Y.S. MOON
CHECKED BY
H. PARK
DESIGNED BY
I.S. SHIN
DRAWN BY
I.S. SHIN
ANGLE PROJ.
3RD
SCALE
1 : 1
DATE
PROJECT NO.
건설교통기술촉진연구사업
PROJECT NAME
배수영설드터널 뒤채움재 주입시스템
DRAWING TITLE
PS Ball 뒤채움 주입장치
PS Ball 뒤채움 주입장치
Ecomaster Co., Ltd.
DRAWING No.
A1-10080
A1 (841 x 594)

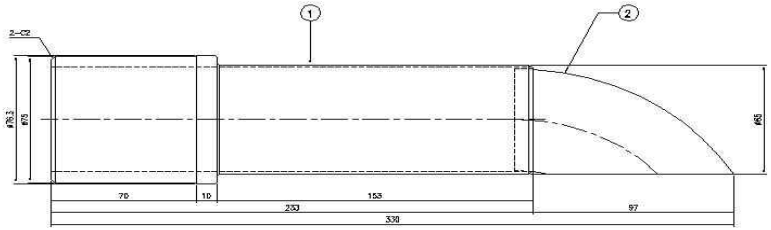
1. 장비 도면


REVNO
DATE
REVISION NOTE
REVISR
APPROVR
1350
1150
200
1325
1250
625
1000
979
2479
1500
780
278.6
100
1150
1350
1525
NO.
PART NAME
MATERIAL
QTY (EA)
WEIGHT (kg)
REMARKS
6 HEX BOLT, NUT, SOC.PW ASSY 4
5 HEX BOLT, NUT, SOC.PW ASSY 24
4 STRUCTURE B ASSY 1 SI-300
3 STRUCTURE A ASSY 1 SI-200
2 PIP ASSY 1 SI-100
1 SILO ASSY 1 SI-100
APPROVED BY S. Y. KIM
CHECKED BY S. H. NOH
DESIGNED BY H. PARK
DRAWN BY I. S. SHIN
ANGLE PROJ. 3RD
SCALE 1 : 10
DATE 2019. 01. 10
PROJECT NO.
건설교통기술촉진연구사업
PROJECT NAME
빗수평셀드터널 덕체통제 주입시스템
DRAWING TITLE
SILO
ASSY OF SILO
Ecomaster Co., Ltd.
DRAWING NO.
SI-00000
A1 (841 x 594)

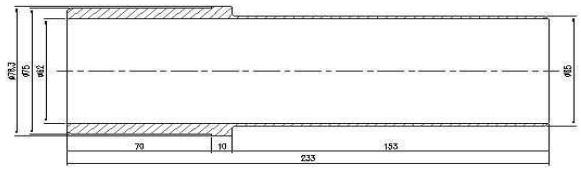
REV.NO	DATE	REVISION NOTE	REVIEW	APPROVE
⚠	-	-	-	-

Connecting Pipe

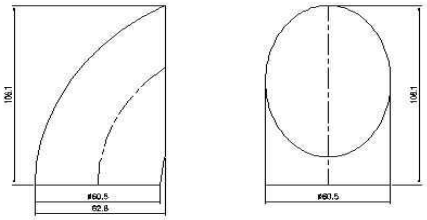




① PIPE



② ELBOW



NO.	PART NAME	MATERIAL	QTY (EA)	WEIGHT (kg)	REMARKS
2	Elbow	SGP	-	1	-	-	5045.007
1	Pipe	STPG	-	1	-	-	0745x3.1mmx233

APPROVED BY	S. Y. KIM	PROJECT NO.	건설교통기술촉진연구사업
CHCKED BY	S. H. NOH		
DRAWED BY	H. PARK	PROJECT NAME	배수형쉴드터널 뒤채충재 주입시스템
DRAWN BY	I. S. SHIN	DRAWING TITLE	CONNECTING PIPE CONNECTING PIPE
ANGLE PROJ.	3RD		
SCALE	1:1		
DATE	2015. 02. 28		

Ecomaister Co., Ltd.

DRAWING NO. PI-1008D ⚠

A1 (841 x 594)

국외출장복명서

(출장제목 : 연구성과물 시험적용을 위한 과제 설명회 개최 및 실용화 협의와 쉴드터널 시공현장 및 세그먼트 제작사 방문을 위한 국외 출장)

2015. 2.

지반연구소

마 상 준

목 차

Ⅰ. 출장개요

Ⅱ. 일정별 방문기관 및 주요내용

Ⅲ. 출장내용
1. 심천 메트로공사 방문
2. Shenzhen Gangchuang Buliding Material 세그먼트 제작사
3. Huadong Eng. Corp. Ltd.(화동설계원) 및 紫之隧道 (Zizhi Tunnel) 도로터널 시공 현장 방문

Ⅳ. 출장결과

Ⅴ. 면담자 명함

Ⅵ. 해외출장계획서 사본

Ⅶ. 부록
- 항공권, 여권사본 및 출입국 날인 사본 첨부.

Ⅰ. 출장개요

1. 출장자

- Geo-인프라연구실 마상준 연구위원

2. 출장기간

- 2015. 1. 26 ~ 2015. 1. 31 (5박 6일)

3. 출장지

- 중국(심천, 항주)

4. 출장 목적

- 전 세계적으로 가장 많은 쉴드공법을 적용한 사업을 발주할 중국 발주처 및 설계사와 연구성과 설명회 개최 및 시험시공 적용, 비즈니스 모델을 협의하기 위해 방문 목적임.
- 연구개발 성과에 대해서 중국 쉴드전문가과의 토의 및 중국 시장 적용 가능성 타진
- 중국에서 적용되고 있는 쉴드터널 공법 파악과 세그먼트 제조 업체를 방문하여 중국의 쉴드터널 기술 현황을 파악하기 위함.

Ⅱ. 일정별 방문기관 및 주요내용

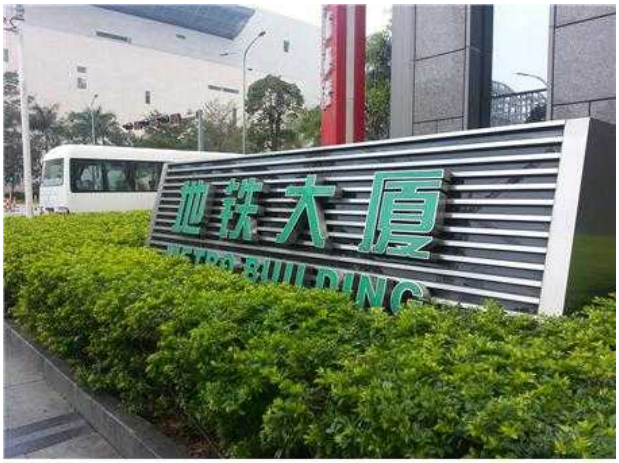
월 일 (요일)	출발지	도착지	방문기관	주요업무 (수집할 자료목록, 질의할 내용 등)	면담예정인물 (직책포함)
1월 26일 (월요일)	인천	심천	출국	이동(인천→심천)	- OZ 371
1월 27일 (화요일)		심천	심천 메트로공사	- 개발 공법 설명 및 테크니컬 미팅 (본 공법 설명 기술적 토론 및 적용을 위한 협의)	Dr. Song Tiantian Research Manager -현지인 통역활용 : 한계옥 (AM 9:00 ~ PM 5:00)
1월 27일 (화요일)		심천	Shenzhen Gangchuang Building Material Co., Ltd	- Shenzhen Gangchuang Buliding Material Co., Ltd (세그먼트 제작과정 견학 및 중국 세그먼트 제작 관련 미팅)	Mr. Liu Changbao Chief Manager 현지인 통역활용 : 한계옥 (AM 9:00 ~ PM 5:00)
1월 28일 (수요일)	심천	항주	이동	- 이동 (심천-항주)	- CA 1732
1월 29일 (목요일)		항주	Huadong Eng. Corp. Ltd.	- 개발 공법 설명 및 테크니컬 미팅 (본 공법 설명 기술적 토론 및 적용을 위한 협의)	Dr. Daping XIAO Geo. Research Div. Header 현지인 통역활용 : 김원미 (AM 9:00 ~ PM 5:00)
1월 30일 (금요일)		항주	Huadong Eng. Corp. Ltd.	- 현장방문: 紫之隧道 (Zizhi Tunnel, 항주 인근 소재)	Ms. Chen Juan(터널 안내)
1월 31일 (토요일)	항주	인천	이동	- 이동(항주-인천) 인천도착(18:00)	- OZ 360

Ⅲ. 출장내용

금번 출장은 중국 쉴드터널 시장 현황 파악과 동시에 본 연구과제 성과물을 중국 현장에 적용 가능성에 대한 타진을 위한 출장이었다. 특히 중국의 쉴드터널 시장에 과제 성과품 및 시스템을 적용하는데 있어 중국 기술자와 토의 및 중국에 적용하는데 있어 문제점등 관련 검토가 있었다. 특히 중국 화동설계원에서는 쉴드터널 기술에 관련해서 본 연구원과 MOU체결등 기밀한 연구체계를 구축하길 희망하였다. 중국 세그먼트 제작 업체를 방문하여 세그먼트 제작수준과 세그먼트 가격을 파악 하였으며, 중국 쉴드터널의 시공속도등 전체적인 시공관리에 대한 수준을 파악 할 수 있었다. 추가로 중국 NATM터널 시공현장을 방문하여 중국 터널 보강재 및 터널 시공 환경등을 파악뿐만 아니라 국내 터널 보강재 부품을 중국에 기술수출 가능성도 볼 수 있었다.

1. 심천 메트로공사 방문

심천 메트로는 전체 지하철을 5개 라인 180km을 운영 또는 시공이 완료된 상태이며, 향후 지하철 건설계획은 720km를 건설할 예정으로 잔여 연장에 70%는 쉴드터널 공법으로 시공할 예정이다. 지하철 건설은 시에서 50%, 금융권에서 차입이 50%로 지하철 건설 제원을 마련하고 있다. 중국내 쉴드머신 제작사는 22개 업체로 그중 1개 업체가 최근 4년동안 쉴드장비 250대 납품를 납품하는등 쉴드장비 수요가 많다.
심천메트로 쉴드터널은 외경 6m 내경 5.4m, 세그먼트 두께는 30cm로 국내 지하철 직경과 비교해서는 작을 뿐만 아니라 세그먼트 두께도 국내보다는 얇다. 항주에 적용된 쉴드터널은 외경 6.2m 내경 5.6m, 세그먼트 두께는 30cm로 중국 지하철 직경은 대동소이하며, 지하철 궤도는 표준궤를 적용하고 있다. 반면 상해 지하철 쉴드터널 직경은 11.3m로 궤도가 광괘를 적용하고 있으며, 시공비는 15-16만RMB(2800-3000만원) 이다.



심천지하철 본사 간판

현재 심천 뿐만 아니라 항주메트로에서도 쉴드터널 시공시 20링/일 시공하고 있어 국내 쉴드터널 시공속도가 3-4배 정도 빠른데, 중국 자체 제작한 쉴드장비가 유럽사에 비해서 추진력이 25% 높아 굴진 효율이 높다고 한다. 이 부분에 대해서는 터널 공학적으로 검토를 해야 할 것으로 판단된다. 심천 메트로는 굴진을 위한 쉴드장비 운영을 일일 21-22시간 운영하고 있으며, 쉴드장비 정비는 하루 2-3시간 소요되고 있다. 특히 세그먼트 한링 조립하는데 30분 굴진, 30분 조립등 총 1시간 소요되며, 2008년 심양메트로에서는 일일 40링 조립 시공한 사례도 있다고 한다.

심천 메트로에서는 단선 병열로 운영하고 있는데 600m마다 피난연결통로를 확보하고 있어, 쉴드터널 시공시 세그먼트 조립 완료후 피난연결통로 위치의 세그먼트를 제거 한후 횡갱을 일반 굴착공법으로 시공을 하고 있다. 특히 중국 메트로는 정거장간 거리가 3-6km로 상대적으로 연장이 길어 피난연락갱이 필요하다.



그림-2. 심천지하철에서 과제 설명 및 토의

심천메트로는 지하철 공사발주 및 감독, 지하철 운영을 하고 있으며, 조직도는 공사발주본부, 운영본부로 구성되어 있고 직원 인원은 1만명이며, 운영본부는 터널km당 60명정도가 지하철을 운영하고 있어 국내 지하철 보다는 운영 효율이 떨어지고 있다. 지하철 설계는 공사성격의 설계원에서 수행하고 있으며 시공사도 대부분 국영기업이다.

현재 심천메트로가 시공할 일부 구간에 수압이 높게 형성되어 있어 세그먼트 두께 45-50cm에 대한 연구를 진행중에 있다. 이 부분에 대해서 본 연구원에서 개발중인 배수유로홈 공법 적용에 대해서 공법 소개 세미나를 실시하였으며, 향후 심천지하철에서 공법 적용에 대해서 검토할 예정이다. 심천메트로 지하철에 유입는 지하수에 이물질이 많이 섞여있어 배수구를 폐색이 예측 되는 것에 대해서 본 공법은 유로홈이 폐색 된다 해도 또 다른 유로홈을 개설 될 수 있을 뿐 만 아니라 폐색 된다 해도 유로홈에 침적된 이물질이 터널 하부 유로홈으로 축적 될것으로 예상됨으로 이를 공기흡입 방식으로 이물질 제거가 가능하다고 설명하였다.

쉴드터널 시공비가 터널 미터당 3-5만RMB로 원화로 환산하면 570-950만원 정도이다. 현재 심천 메트로에서는 쉴드터널 장비가 70대가 운영중에 있으며, 대부분 EPB쉴드공법을 적용하고 있다. 그 외 중국 청도메트로에서는 쉴드터널이 800km, 성도는 1000km가 시공 예정이다.

2. Shenzhen Gangchuang Buliding Material 세그먼트 제작사

Shenzhen Gangchuang Building Material 세그먼트 제작사는 심천 도심부에서 30km 떨어진 있으며, 제작 설비 체계가 그리 좋게 보이지는 않는다. 심천 인근에서 시공되고 있는 쉴드터널 현장에 세그먼트를 공급하고 있으며 몰드 1조의 가격은 60만RMB, 원화로는 1.14억 정도로 국내와 유사한 금액으로 납품을 받고 있다, 세그먼트 몰드의 사용 횟수는 1800링이나 800링 제작후 검사를 실시하여 재사용 여부 결정하는 것이 500회를 적용하고 있는 국내와는 다르다. 세그먼트 제작 공장에서는 일일 2교대로 75링/일 생산하고 있으며 지하철 기준(6m기준)으로는 링당 가격이 8천RMB(150만원), 물류비와 볼트값 포함시는 1.4만RMB(266만원)이다. 몰드제작사는 심천에만 6개 제작사가 있으며, 방문 Shenzhen Gangchuang Building Material 세그먼트 제작사는 심천 메트로물량에 40%(14개 공구)를 납품하고 있는 대형 업체이다.

중국 세그먼트 제작사에 세그먼트 제작 공정은 국내와 유사하나, 특히 마감처리가 국내 세그먼트와 비해서 미흡한 면이 있다. 세그먼트 단부에 설치되는 지수재는 개스켓이 1열 적용되어 있으며, 단부면 40% 면적에 일반 고무패드를 설치한 것이 국내와는 상이하며, 이와같은 지수시스템으로는 완벽한 지수체계를 확보하기에는 어려울 것으로 판단된다. 세그먼트 외부면(터널 지반측)은 방수를 위해서 방수페인트를 포설하였다. 공장내에 제작된 세그먼트에 대해서 진원확인을 위해서 수직방향으로 세그먼트를 조립하는 시험체계도 구축하고 있는 것이 인상적이었다. 특히 터널 측방 어깨부에 전기 및 통신 케이블 거취대를 세그먼트 철근에 거취한후 콘크리트 타설후 조립을 하는 것이 인상적이었다.



그림-3. 세그먼트 제작공장-몰드



그림-4. 세그먼트 가조립 상태 점검



그림-5. 세그먼트 단부 지수재 설치 상태

3. Huadong Eng. Corp.(화동설계원) 방문 및 紫之隧道 (Zizhi Tunnel) 도로터널 시공 현장

화동설계원은 중국 수력발전개발의 자회사로 설계, 설계 감리 및 시공감리를 수행하는 국영설계사로 중국에서 설계 물량 순위로는 20위정도 이다. 회사의 전체 인원수는 3800명이며 금번 방문한 방문부서는 도로&철도부로 인원수는 약 200명이다. 화동설계원은 회사 전체 예산중 R&D 차지하는 비율은 10% 내외로 많은 연구를 주로 외주를 주고 있다. 특히 화동 설계원에서 관심을 가지고 있는 신기술 분야는 경제성, 안전성, 환경성에 중점을 두고 있다. 2020년까지 항주 지하철이 250km 추진 예정이며, 현재 시공 잔여 물량은 쉴드터널로 예정되어 추진하고 있다.

항주와 상해 지하철은 쉴드터널로 시공되었는데도 불구하고 지하철 운행시 장기적으로 완만한 침하가 발생이 되어 지하철 운행에 문제가 되고 있어, 화동설계원에서 쉴드터널에 대해서는 침하문제에 많은 관심을 가지고 있다. 특히 상해지하철에서는 준공후 10년 경과된 터널에 대해서 침하가 발생 되었다고 한다. 금번 방문에도 배수쉴드공법과 강연선 체결장치 공법에 대한 세미나에서도 침하방지에 대한 질문이 상당부분 있었다.



그림-6. 화동설계원 연구원 간판



그림-7. 화동설계원 과제 설명 및 토의

연구원에서 개발된 배수체계 시스템을 적용하기에는 무리가 있는 것으로 판단되며, 강연선 체결 방식은 강연선 체결력과 전단키의 전단력을 이용하여 충분히지지 할 것으로 판단되어, 침하에 대한 연구를 강연선 및 전단키의 전단력을 이용하여 쉴드터널 침하부분을 상당부분 해소할것으로 예상됨으로 화동설계원에서 쉴드터널 기술 전반에 대한 MOU 체결에 대한 제안도 받았다. 향후 본 공법을 적용 시키기 위해서 지속적인 연계를 추진해야 할 것으로 판단된다.

Zizhi터널은 항주에서 2시간 정도 떨어진 도로터널 건설현장으로 Zizhi터널-1, Zizhi터널-2 구성되어 있다. Zizhi터널-1의 시점부 100m 구간는 초연약층(뻘층)으로 지층구조가 형성되어 있으나 이후로는 경암이 존재함으로 시점부는 초연약대인데도 불구하고 쉴드공법 대신 NATM공법을 선택하였다. 시점부는 연약층이므로 4분할로 하여 각 분할에서 중심부 코어핵을 남겨두고 터널 외곽부를 선 굴착후, 코어핵을 굴착하는 방식으로 시공하였다. 각 분할은 H빔으로 분할되어 지반을 지지토록 하였으며, H빔의 플렌지(연결 조인트부) 접촉상태가 불량하여도 용접으로 적당히 시공하는등 시공불량이 상당부분 눈에 보인다.

굴착방식은 브레카를 이용한 기계굴착을 채택하여 터널의 안정성을 최대한 확보하였으며, 강지보재는 H빔을 적용하여 간격은 0.5-1.0m로 유지하였으

며, 와이어 메쉬를 강지보재와 용접으로 체결한후 숏크리트를 타설하였다. 국내와는 다르게 강섬유를 적용하지 않고 와이어메쉬를 용접으로 체결하는 것이 특이 하였는데, 국내에서는 터널내에서 용접 강재의 강도저하로 인해 규정상 용접을 못하게 되어 있는 것이 상이하였다.

NATM 공법으로 시공을 하는 Zizhi터널-2은 굴진이 1km이상 진행된 상태로 막장으로 들어가보니 흡기구는 있는데 배기구는 없는등 환기상 문제가 있으며, 중국터널에서는 장약장 천공 및 록볼트 천공을 점보드릴 장비가 아닌 크로러드릴을 사용하는등 아직 까지는 국내 터널기술 보다는 낙후된 면이 있다.

동행한 Ms Chen, 현장을 안내한 여성기술자가 터널 막장에는 들어갈수 없는등 20년전 한국을 보는 듯 하였다.



그림-8. Zizhi터널-1 시점부 전경



그림-9. Zizhi터널-1 4분활 굴착



그림-10. 코로라드릴으로 록볼트공 천공



그림-11. 강지보재에 와이어 메쉬를 용접하는 모습

Ⅳ. 출장결과

○ 중국의 쉴드터널 시장 현황과 세그먼트 및 쉴드터널 시공기술을 파악할 수 있는 기회였음.

○ 본 연구과제의 연구성과물을 중국 쉴드시장에 적용시키기 위해서는 중국 현지 문제점인 쉴드터널 침하와 연계하여 중국 시장에 접근하는 것이 최선책으로 판단됨.

○ 이를 이를 위해서 화동설계원와 MOU 체결과 국내 R&D사업 또는 화동설계원 자체 연구사업을 통해 빠른 시간내 공동 연구를 수행해야 할 것으로 판단됨.

○ 화동 설계원의 연구예산은 매 10월에 시청하여 차년도 5월에 연구예산이 집행됨으로 2016년도 한국국토교통과학진흥원, 글로벌협력사업에 공동연구기관으로 신청하기로 합의 하였음.

○ 중국쉴드터널 뿐만 아니라 NATM터널 보강재 부품시장에 국내에서 국가R&D 사업으로 개발된 보강재 시장을 중국 국영기업체를 통해서 충분히 진출 가능성이 있는 것으로 판단됨.

○ 세그먼트 공장 방문은 중국 쉴드기술 수준을 파악 할 수 있는 좋은 기회였으며, 충분히 중국 세그먼트 시장에 국내 세그먼트 제조 및 품질관리 기술이 진출 가능성이 있으며, 문제는 어떤식으로 진출하는 것이 관건으로 판단됨.

○ NATM터널 현장 방문은 본 연구원에서 추진하고 있는 NATM터널 보강재 연구과제와 부함되는 면이 있으며, 향후 연구 성과를 중국시장 진출을 고려하여 향후 실용화 전략 수립에 많은 도움을 받았음.

○ 중국에 쉴드터널 전문가 집단과 교류체계를 구축하였음.

○ 쉴드장비 시장이 중국과 독일 시장으로 재편되고 있으며, 일본은 주요부품만 생산 및 공급하는 체계로 가고 있음.

Ⅴ. 면담자 명함


华东勘测设计研究院有限公司
HUADONG ENGINEERING CORPORATION LIMITED
刘长宝
高级工程师
交通与市政工程院综合管理室
主任
地址：浙江省杭州市河东路222号
邮编：310014
网址：www.ecidi.com
E-mail: Liu_cb@ecidi.com
传真：(0571)56553990
电话：(0571)56553829
手机：15906610823
韩桂玉
Cindy.Han
Korean/Chinese
Interpreter
深圳市地铁集团有限公司
SZMC
陈湘生
总工程师
研究员·博士
深圳市福田区福中一路1016号
地铁大厦30层 邮编：518026
电话：0755-23992909
传真：0755-23992919
手机：18923890015 13928490015
邮箱：eldchan@163.com
微信：bjchan5678
华东勘测设计研究院有限公司
邹金杰
高级工程师
一级建造师
交通与市政工程院
隧道工程所
所长
地址：浙江省杭州市河东路222号
邮编：310014
网址：www.ecidi.com
E-mail: zou_j@ecidi.com
传真：(0571)56553990
电话：(0571)56553953
手机：13819187368
深圳市地铁集团有限公司
朱益海
设计部副部长
深圳市福田区福中一路1016号
地铁大厦7层 邮编：518026
电话：0755-23992991
传真：0755-23992864
手机：18603857569
邮箱：szdtzyhai@shenzhenmc.com
深圳市地铁集团有限公司
7号线建设分公司
宋天田
项目一部部长
高级工程师
工学博士
国家注册安全工程师
深圳市福田区福中一路1016号
地铁大厦12层 邮编：518026
电话：0755-8276 9626
传真：0755-2399 2558
手机：158 1551 0770
邮箱：stt5@163.com
史成东
总工程师
港创建材
深圳港创建材股份有限公司
地址：深圳市南山区蛇口路11号
电话：0755-26971740
传真：0755-26974125
手机：13922879853
邮箱：408540278@qq.com
Q Q：408540278
张硕
产品开发高级专员
HVCC
汉拿伟世通空调(上海)有限公司
上海市中山西路1602号宏汇国际广场21楼 邮编：200235
电话：(86 21) 3325 4337 传真：(86 21) 3363 5132
手机：(86) 185 0160 1233 电子邮件：shang16@hvccglobal.com
www.hvccglobal.com

Ⅵ. 해외출장계획서 사본

<별표 제4호 서식>(개정 2013. 11. 25)

국외출장계획서

1. 출장개요

출장명	연구성과물 시험적용을 위한 과제 설명회 개최 및 실용화 협의와 쉴드터널 시공현장 및 세그먼트 제작사 방문을 위한 국외 출장			
출장자	소 속	직 급	성 명	출장경비 부담기관
	지반연구소	연구위원	마상준	연구원 자체 (초청 승인 공문 및 관련 서류 첨부 필수)
	계		1명	
출장기간	2015. 1. 26 ~ 2015. 1. 31 (5박 6일)			
출장국가 및 도시(방문지)	중국(심천, 항주)			

※ 첨부 : 초청 승인 공문

2. 출장목적 및 배경

- 전 세계적으로 가장 많은 쉴드공법을 적용한 사업을 발주할 중국 발주처 및 설계사와 연구성과 설명회 개최 및 시험시공 적용, 비즈니스 모델을 협의하기 위해 방문 목적임.

- 연구개발 성과에 대해서 중국 쉴드전문가과의 토의 및 중국 시장 적용 가능성 타진

- 중국에서 적용되고 있는 쉴드터널 공법 파악과 세그먼트 제조 업체를 방문하여 중국의 쉴드터널 기술 현황을 파악하기 위함.

3. 출장일정 및 세부출장내용

월 일 (요일)	출발지	도착지	방문기관	주요업무 (수집할 자료목록, 질의할 내용 등)	면담예정인물 (직책포함)
1월 26일 (월요일)	인천	심천	출국	이동(인천→심천)	- OZ 371
1월 27일 (화요일)		심천	심천 메트로공사	- 개발 공법 설명 및 테크니컬 미팅 (본 공법 설명 기술적 토론 및 적용을 위한 협의)	Dr. Song Tiantian Research Manager -현지인 통역활용 : 한계옥 (AM 9:00 ~ PM 5:00)
1월 27일 (화요일)		심천	Shenzhen Gangchuang Buliding Material Co., Ltd	- Shenzhen Gangchuang Buliding Material Co., Ltd (세그먼트 제작과정 견학 및 중국 세그먼트 제작 관련 미팅)	Mr. Liu Changbao Chief Manager 현지인 통역활용 : 한계옥 (AM 9:00 ~ PM 5:00)
1월 28일 (수요일)	심천	항주	이동	- 이동 (심천-항주)	- CA 1732
1월 29일 (목요일)		항주	Huadong Eng. Corp. Ltd.	- 개발 공법 설명 및 테크니컬 미팅 (본 공법 설명 기술적 토론 및 적용을 위한 협의)	Dr. Daping XIAO Geo. Research Div. Header 현지인 통역활용 : 김원미 (AM 9:00 ~ PM 5:00)
1월 30일 (금요일)		항주	Huadong Eng. Corp. Ltd.	- 현장방문: 紫之隧道 (Zizhi Tunnel, 항주 인근 소재)	Ms. Chen Juan(터널 안내)
1월 31일 (토요일)	항주	인천	이동	- 이동(항주-인천) 인천도착(18:00)	- OZ 360

4. 출장경비 및 예산과목

○ 예산과목 : 배수 유로홈을 이용, 수압 저감을 통한 공사비 절감 슬림형 세그먼트 터널 라이닝 기술 개발(3차년도) (과제번호 : 2014-0309)

출장자	항 목	산출내역	금액 (단위:원)	비 고
마상준	체재비	근거 일 비 : 35($)×6일×1인=210($) 숙박비 : 95($)×5일×1인)=475($) 식 비 : 58($)×6일×1인)=348($)	1,187,950	급/다등급 (환율:1150원)
	부대경비	여행자보험료	40,000	
마상준	항공료	인천공항 → 심천 심천→항주 항주→인천공항	1,100,000	Economy
마상준	회의비	-쉴드터널 시공기술 관련 전문가 협의 (참석자 : 마상준, 전종식(씨엠어), 宋天田박사 (심천 메트로공사)외, Dr. Daping XIAO(항주, Huadong Eng. Corp. Ltd.)외	600,000	카드사용예정
마상준	통역비	심천: 한계옥,(200($)×1일)×1150원/$ (AM 09:00 ~ PM 05:00 / 8시간) 항주: 김원미 (200($)×1일)×1150원/$(AM 09:00 ~ PM 05:00 / 8시간) 400($)	460,000	일반지출예정
	합계		3,387,950	

5. 출장기대효과

- 중국에서의 연구성과물 실용화
- 개발공법에 대한 기술적 문제점 토의
- 중국 쉴드터널 설계기준 및 시공 기술 현황 파악
- 최근들어 건설교통평가원에서 국내 건설기업의 해외사업 진출 지원을 위한 애로기술 파악 및 지원등을 위한 연구개발 적용성 여부 검토
- 중국 쉴드시장 파악 및 쉴드시공 기술 파악

- 중국내 개발 공법의 시험시공을 위한 협의

6. 동일목적/동일기관 출장 검토
-해당사항 없음

7. 반출자료 목록 및 반출방법
-해당사항 없음

8. 기타관련자료(논문 및 세미나, 회의자료, 학회일정 프로그램, 항공여정표, 이메일 서신 자료 등)

(1) 국외 방문기관 초청 관련 메일

- Huadong Eng. Corp. Ltd 방문 초청 메일



- 심천메트로 방문 초청 메일



메일읽기

交流邀请函

发件人 "宋天田" <st5@163.com> [주소록 일괄등록]

发送日期 Mon, 15 Dec 2014 19:10:13 +0900 (CST)

收件人 "sms" <sms@kict.re.kr>, "zhuangjl" <zhuangjl@kict.re.kr>

韩国技术建设研究院：

深圳地铁集团公司邀请韩国技术建设研究院的马相準博士（正高职）和CMer公司的老总Jun Jong Sik（全钟植先生），前来针对盾构隧道中的新技术进行交流，并商讨研究合作等事宜。

联系人：宋天田 博士。

深圳市地铁集团有限公司

此

礼！

宋天田

工学博士，高级工程师

深圳市地铁集团有限公司

深圳市福田区福中一路1016号地铁大厦1215A

电话：0755-82769626　　传真：0755-23992558

手机：158 1551 0770

(2) 항공여정표(항공기 예약 티켓)

대산이엔티

승객 여정표 Passenger Itinerary

담당자 : 대산여행사 TEL : 82-2-730-8520 FAX : 82-2-730-3688 E-MAIL : 17308520@nate.com 2014 / 12 / 22

※ 본 승객 여정표의 모든 정보는 항공사 / 현지공항 / 호텔 / 렌터카회사 사정에 따라 사전 공지 없이 변동될 수 있습니다.

승객 정보 (Passenger Information)

•승객 성명 (Passenger Name) : MA/SANGJOONMR

•예약 번호 (Booking Reference) : OZ-73DXJT, CA-PDZDM8 (1B-UUDRUX)

여정 정보 (Itinerary Information)

OZ 371 ASIANA AIRLINES

	도시/공항	일자/시각	터미널	클래스	비행시간	상태
출발	SEOUL INCHEON INT	26JAN(월) 09:55		ECONOMY	04:05	OK
도착	SHENZHEN	26JAN(월) 13:00				

경유지(Via) : 좌석(Seat Number) : 기종(Aircraft) : AIRBUS A330-30

CA 1732 AIR CHINA LIMITED

	도시/공항	일자/시각	터미널	클래스	비행시간	상태
출발	SHENZHEN	28JAN(수) 11:10		ECONOMY	02:00	OK
도착	HANGZHOU	28JAN(수) 13:10				

경유지(Via) : 좌석(Seat Number) : 기종(Aircraft) : AIRBUS A320

OZ 360 ASIANA AIRLINES

	도시/공항	일자/시각	터미널	클래스	비행시간	상태
출발	HANGZHOU	31JAN(토) 14:50		ECONOMY	02:10	OK
도착	SEOUL INCHEON INT	31JAN(토) 18:00				

경유지(Via) : 좌석(Seat Number) : 기종(Aircraft) : AIRBUS A330-30

드리는 말씀 (Remarks)

(1인기준/ KRW기준)
항공요금 : 항공료775,900 + TAX121,800 + 취급수수료59,740 = KRW 957,440 (유류할증료 포함)
중국비자FEE : 별도

•• 중국국내선 구간은 발권 당일 CNY VS KRW환율에 따라 금액이 상이할 수 있습니다.

Ⅶ. 부록

- 항공권, 중국비자 및 중국출입국 날인 사본 첨부.





연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1 절 일본의 쉴드터널 기술 조사(시공사례 중심으로)

1. 지하철 12호선 록본기역(가칭) 공구 건설공사

가. 공사 개요

록본기역(가칭) 공구는 지상의 교통 및 지하 매설물에 미치는 영향을 줄이기 위해 역 양단의 97m 구간을 개삭 공법으로 시공하여, 쉴드기의 발진 및 도달 수직갱도로 설정하고, 중앙의 역 홈부 118m를 4심원 이수식 쉴드기(상하 2단)로 굴진하고 박스 거더를 장착한 세그먼트를 조립하여 역을 구축하는 공법이 적용되었다.

현장 시공 조건으로는 심도가 27m(상단)~37m(하단) 정도이고, 토질은 자갈혼합 모래, 세사, 사질이암층으로 조사되었다. 곡선 및 경사는 R=500m, i=0.2% 정도 되고, 지하수위는 지표면 이하 12m에서 조사되었다.



그림 a-1.1 록본기역 공구에 적용된 쉴드장비



그림 a-2. 록본기역 공구의 평면도(4심원 이수식 쉴드구간)

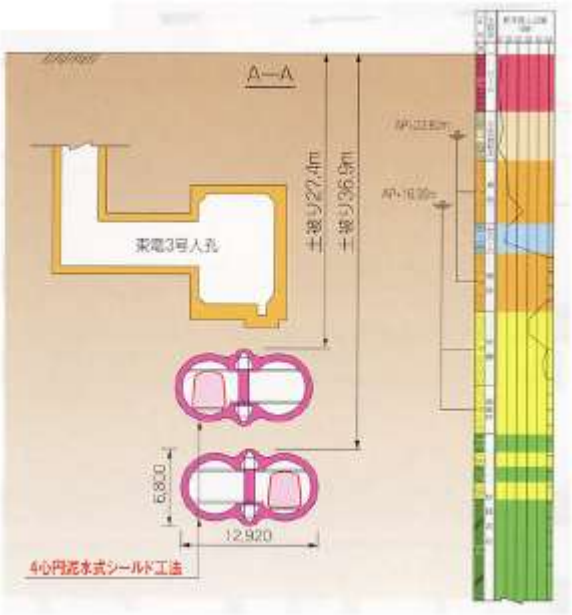


그림 a-3. 록본기역 공구의 횡단도

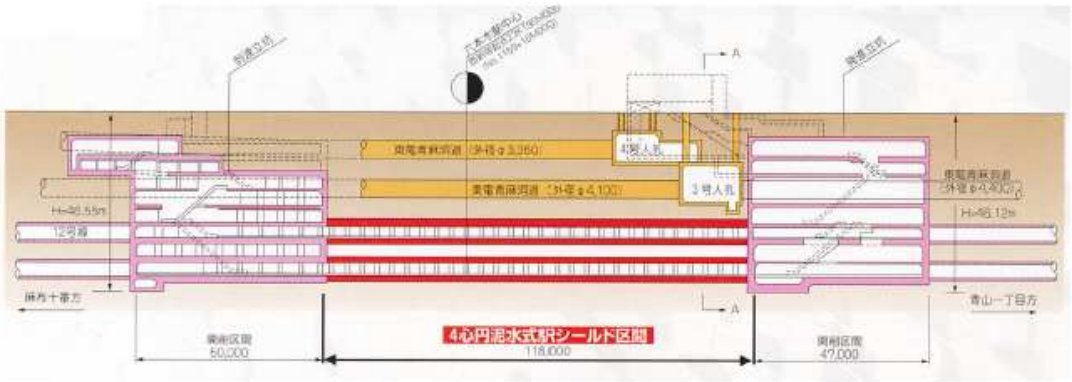
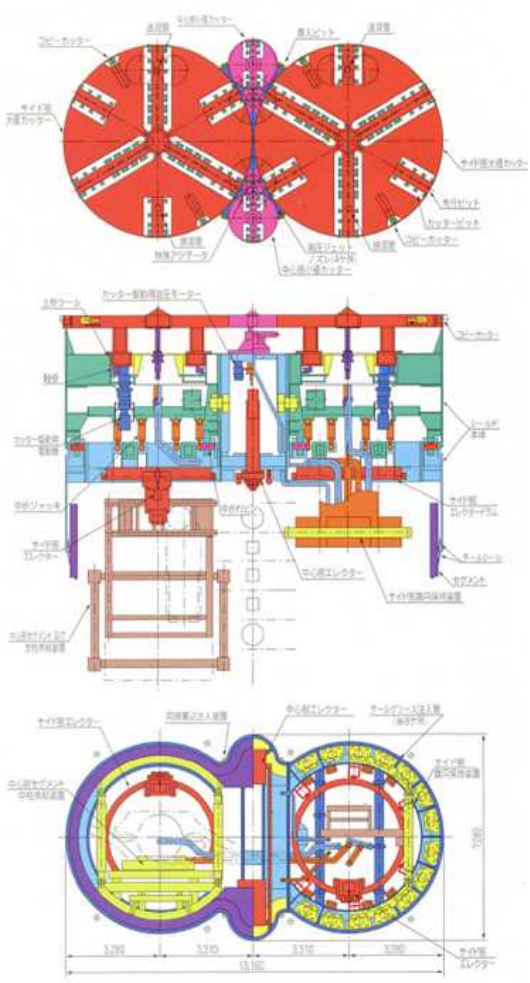


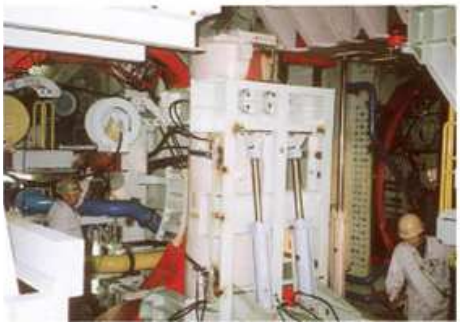
그림 a-4. 록본기역 공구의 단면도

나. 4심원 이수식 쉴드장비(H&V 쉴드머신)

본 쉴드장비는 좌우 회전 커터(∅6,560)와 중앙의 상하부에 회전 커터(∅1,720)를 갖는 높이 7.06m, 폭 13.18m의 쉴드머신이다. 쉴드머신의 사행을 수정하기 위해 좌우의 쉴드 동체에 상하 굴곡형 중절(H&V)기구를 장비하고 있다. 측부 커터와 중앙부 커터 간의 잔여 굴진 부분은 챔버 내에 장비한 에지데이터(커터 겸용) 등으로 절삭하게 된다. 또한 수직갱도로부터 반송된 중앙부 세그먼트는 상하 이동식 이렉터로 조립하고 좌우 기둥 및 중간 기둥은 기둥용 특수 공급 장치로 조립한다.



(a) 쉴드장비 상세도



(b) 중간 기둥 공급 장치



(c) 이렉터

그림 a-5. 4심원 이수식 쉴드장비

다. 터널 구조(NM 세그먼트)

본 세그먼트는 시공 시에는 좌우 기둥(1m 간폭) 및 중간 기둥(4m 간폭)으로 지지되고 있으나, 완성 시에는 4m 간폭의 중간 기둥만으로 지지된다. 이에 박스 거더를 장착한 특수 세그먼트를 기둥의 상하부에 배치하고 그 박스 거더를 1링마다 접합하여 터널 축 방향의 양부재를 형성하는 구조로 되어 있다. 따라서 중앙부 세그먼트는 터널 횡단면의 통상의 세그먼트 기능과 터널 종단 방향의 양부재의 기능을 겸비한 구조로 이루어져 있다.

공사에 사용된 세그먼트 종류는 NM 세그먼트(중앙부는 박스 거더 내장식)로서 크기는 6,800mm×12,920mm이고, 측원부 두께는 300mm, 폭 1,000mm, 분할 수는 12분할이다.

기존 터널 구조와 달리 터널 종단 방향에 양부재 및 기둥을 갖는 특수한 구조이기 때문에 기존 설계 방법(2차원 해석) 외에 각종 구조 적재 시험, 시공성 시험 및 3차원 FEM 해석 등에 의해 안전성의 확인을 실시하였다.

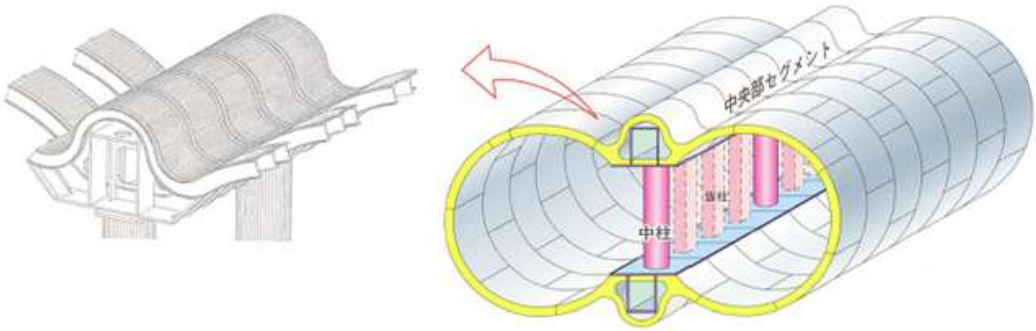


그림 a-6. NM 세그먼트 구조



(a) 중앙부 세그먼트 (b) 측부 NM 세그먼트 (c) 가조립 상태(3링)

그림 a-7. NM 세그먼트 모습



(a) 중앙부 세그먼트 성능 확인 시험 (b) 전체 링 적재시험 (c) FEM 해석

그림 a-8. 구조 안정성 시험 모습

시공시 세그먼트 조립순서는 그림 6.1.9와 같은데, ① 중앙부 하부 이렉터로 견지, ② 중앙부 상부 이렉터로 견지, ③ 공급 장치로 중간 기둥을 삽입하고 상하부 세그먼트를 조립, ④ 양측 원부 이렉터로 하부 세그먼트부터 조립, ⑤ 양측 원부 이렉터로 상부 세그먼트 조립, ⑥ 양측 원부의 키 세그먼트를 조립 하는 순서로 시공된다.

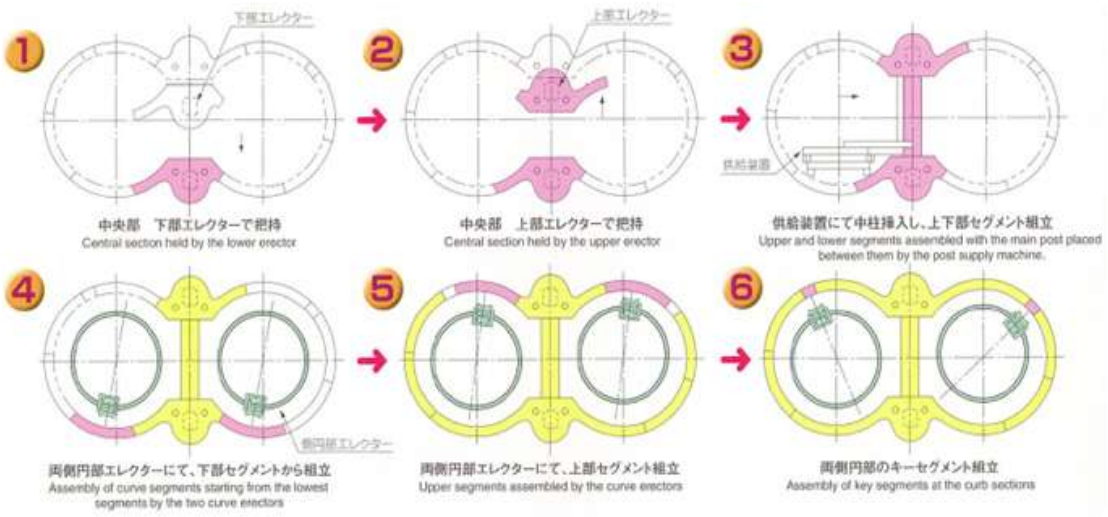


그림 a-9. 세그먼트 조립 순서

라. 쉴드 발진공(NOMST 공법, MJS 공법)

쉴드 굴진은 하단부를 선행한 후에 상단부를 실시하는데, 쉴드 발진 및 도달부의 일부에서 NOMST 공법(신소재 콘크리트를 사용한 쉴드 발진 공법)을 채용하고 있다. NOMST부 자재는 도로 아래의 주열침(∅900)에 세운 후 압착재로 접합한다. 또한, 갱

구 지수 씰은 고수압 사층, 4심원이라는 특수성을 고려하여 슬라이드 플레이트와 에어백을 병용한 2단 구조로 하였으며 충분한 수밀성을 부여하였다.

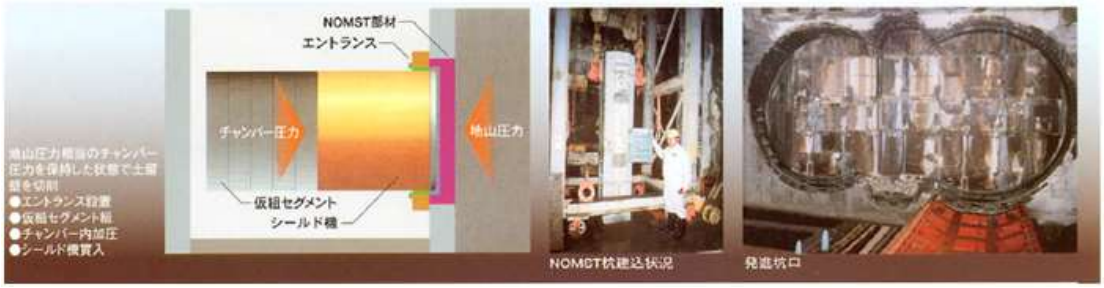


그림 a-10. NOMST에 의한 발진 개념도

그리고 쉴드 발진부 바로 상부에 토쿄전력의 맨홀과 송전선이 있기 때문에 굴진에 앞서 방호를 위해 MJS 공법(전방위 고압 분사 공법)에 기초한 강력한 지반 개량을 실시하였다. MJS 공법은 강제 배이 회수 기구를 장착함으로써 인접 구조물 대책과 대심도 시공에 대한 대응을 해결하고, 나아가 지금까지 불가능했던 고압 분사 공법의 수평 시공을 가능케 하였다.

2. 마고메 간선 건설공사

가. 공사 개요

마고메 간선 공사는 오타쿠 히가시마고메, 나카마고메 및 미나미마고메지역(모리가사키 처리구, 유역면적 394ha)의 호우 시의 우수를 끌어들인 후 잠정 저류시켜 침수피해를 경감하고자 실시하는 공사이다. 본 공사는 이케가미도리 도로와 우스다자카도리 도로의 밑을 지나 미나미마고메 4쵸메(오타쿠립 미나미우마고에 우에다이공원)에 이르는 길이 약 1,300m를 내경 4,500mm의 이토압식 쉴드 공법으로 건설한다. 도달부 부근에 예정되어 있는 초 급곡선 시공에 대응하기 위해 최첨단 기술을 채용한 시공이다. 공사에 사용되는 쉴드장비는 이토압식으로 직경 5,240mm, 길이 5,535mm~6,925mm이며, 최대 중절각은 17도이다.

도달부 부근에서는 곡률 반경 8m의 초 급곡선 시공이 예정되고 있는데, 쉴드공법으로서는 시공 실적이 전혀 없는 곡률로, 기존 공법에서는 대응 불가능이었던 것을 최첨단 기술인 워깅 커터 공법(진동식 쉴드)의 채용과 테일 본체부의 교체 조립 기능에 따른 기장 단축으로 시공을 가능케 하였다.



그림 b-1. 도달부 부근의 초 급곡선 구간



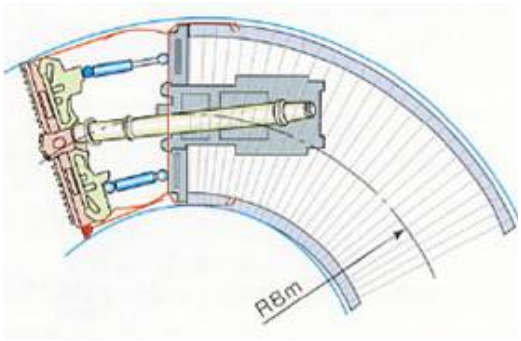
(a) 쉴드장비 전경 (b) 쉴드장비 중절 상황

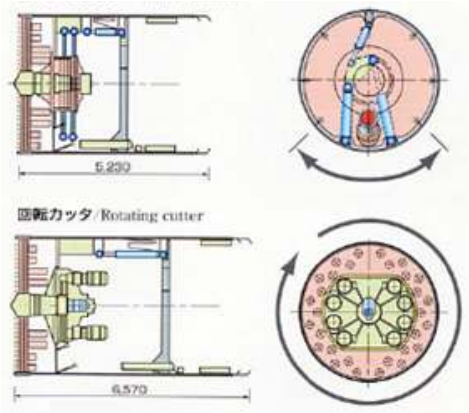
그림 b-2. 마고메 간선 건설공사에 사용된 쉴드장비

나. 워깅 커터 공법(요동식 쉴드공법)

쉴드장비는 선단의 커터 헤드로 굴삭한 범위 안에서만 기체의 방향을 변경할 수 있다. 따라서 시공 가능한 곡률 반경은 주로 기장에 의해 한정된다. 다수의 모터를 복잡하게 배치하여 커터 헤드를 회전시켰던 기존의 회전 커터식 쉴드 머신으로는 기장의 단축에 한계가 있다. 이에 반해 워깅 커터 공법에서는 커터 헤드를 소수의 요동 잭으로 구동하기 때문에 머신 내부의 기기가 간소화되어 최대한의 기장 단축을 실현 가능하다.

발진 수직갱도는 이케가미도리 도로와 우스다자카도리 도로의 교차점 지하에서 설치된다. 교차점 아래에는 매설물이 많기 때문에 인접 용지를 포함한 보조 수직갱도로서 지하 18.5m까지 굴삭하여 도로 밑 시공 공간을 확보하였다. 그 위치에 지중 연속벽을 도로 밑 시공으로 축조한 것을 굴삭해 내려가면서, 콘크리트 구체를 제조하여 쉴드 발진을 위한 본 수직갱도로 하였다.





(a) 급곡선 시공 상황도 (b) 쉴드장비 커터 구조 설명도

그림 b-3. 요동식 쉴드공법

통상의 하수도 파이프에서는 세그먼트를 조립해서 지산에 저항하는 1차 복공과 내면 평활성 확보, 누수 방지, 부식 방지를 위해 콘크리트로 내면을 사상하는 2차 복공으로 구성되어 있다. 본 건설공사에서는 1차 복공에 집중함으로써 2차 복공을 생략하는 기술을 적용하였다.

본 조건이 가능한 현장 특징으로는 다음과 같다.

① 평활성 : 볼트 박스를 프리케스트 파트로 충진함으로써 내면 평활성을 확보

② 내부식성 : 부식 환경 하에서 철근 콘크리트 씌우기를 확보한 상태에서 사상내에 금속 부분이 노출되지 않는 볼트식 세그먼트를 채용하여 내부식성을 강화

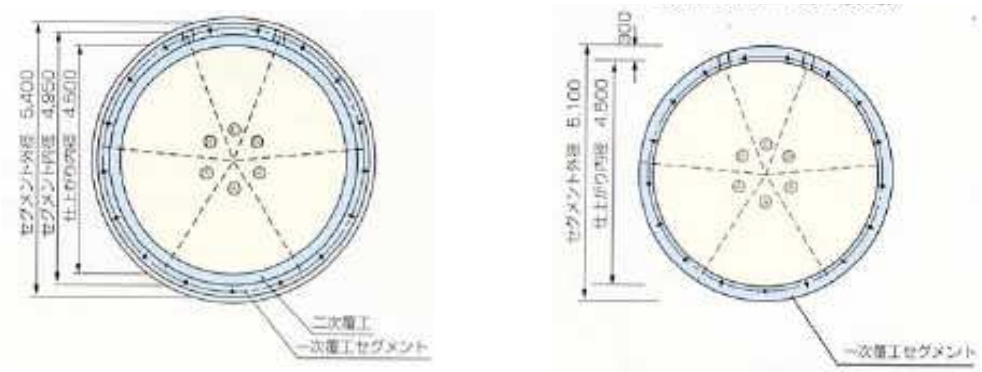
③ 내수압 : 잠정 저류관으로서 내수압에 견딜 수 있는 구조로 설계

④ 접합부 : 내수압과 외수압 양방향의 반복 하중에 대하여 장기간에 걸쳐 안정적으로 견딜 수 있도록 하기 위해 접합은 모두 긴 볼트 구조로 시공

⑤ 볼트 : 긴 볼트를 사용하여 높은 강성에 비례하는 편하중 발생 시의 응력 집중을 억제하고 높은 내진성을 확보

⑥ 볼트 박스 : 볼트 박스의 세그먼트 본체 측에 앵커를 설치하여 볼트로 고정해서 충진하는 프리케스트 파트를 영구 구조물로 확보(특허 신청 중).

이와 같이 2차 복공 생략형 세그먼트의 이점으로는 통상의 파이프 구조와 비교하면 같은 내경이라도 2차 복공 생략분 만큼 외경이 작아지고, 콘크리트 단면이 축소된다. 이로 인해 굴삭토량이 저감되고, 사용 콘크리트양을 절감할 수 있고, 2차 복공에 필요한 공기를 줄여 전체 공사기간을 단축시킬 수 있다.



(a) 기존형(1차+2차 복공)　　(b) 2차 복공 생략형

그림 b-4. 2차 복공 생략형 세그먼트

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 건설기술혁신사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

본 보고서와 관련하여 문의를 원하시는 분은 아래의 문의처로 연락을 주시기 바랍니다.

■ 문의처 : 국토교통과학기술진흥원 TEL 031)389-6451
한국건설기술연구원 TEL 031)910-0482

R&D / 12기술혁신E01