국토교통기술촉진연구사업 R&D-11기술혁신E07

강선 체결 조립방식을 이용한 세그먼트 터널 라이닝 기술 개발 최종보고서

2015. 09. 01.

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 한국건설기술연구원
공동연구기관 / ㈜케이씨씨건설
㈜씨엠어
㈜이원이엔지

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 “강선 체결 조립방식을 이용한 세그먼트 터널 라이닝 기술 개발” 연구과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2015. 09. 01.

주관연구기관명 : 한국건설기술연구원
주관연구책임자 : 연구 위원 마 상 준
연 구 원 : 수석연구원 김 상 근
〃 : 전임연구원 김 동 민
〃 : 전임연구원 이 영 섭
〃 : 전임연구원 길 후 정
〃 : 연구보조원 박 지 은
〃 : 연구보조원 이 채 민

공동연구기관명 : (주)케이씨씨건설
공동연구책임자 : 부 장 장 송 엽
연 구 원 : 이 사 김 동 식
〃 : 부 장 김 량 균
〃 : 사 원 유 제 웅

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

공동연구기관명 : (주)이원이엔지
공동연구책임자 : 전 무 정 치 광
연 구 원 : 과 장 서 동 주
〃 : 대 리 유 재 호

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>11기술혁신E07</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2013.04.23
~2014.12.22</td><td>단 계 구 분</td><td>3차년/3차년</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="5">건설교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>최 상 위
과 제 명</td><td colspan="4">강선 체결 조립방식을 이용한
세그먼트 터널 라이닝 기술 개발</td></tr>
<tr><td>단위
과제명</td><td colspan="4"><table><tr><td>㈜케이씨씨건설</td><td>강선 체결 기술의 현장 적용성 평가를 통한 실용화 기반 확보</td></tr><tr><td>㈜씨엠어</td><td>강선 체결 기술의 시공성 평가 및 최적 시공시스템 도출</td></tr><tr><td>㈜이원이엔지</td><td>강선 체결 기술을 적용한 세그먼트 라이닝 터널 설계기술 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 : 15명
내부 : 12명
외부 : 3명</td><td>총연구비</td><td>정부: 963,000천원
기업: 404,000천원
계: 1,367,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명
및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한국건설기술연구원
지반연구소</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">(주)케이씨씨건설
(주)씨엠어
(주)이원이엔지</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="2">상대국명 :</td><td colspan="3">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="2">연구기관명 :</td><td colspan="3">연구책임자 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">쉴드터널 공법은 NATM 공법 보다 고가의 시공비로 인해 지금까지 국내에서는 하저터널, 연약지반의 전력구 및 통신구 등에 한정되어 적용되어왔으나, 최근 다양한 시공 장비 및 새로운 기술의 개발로 앞으로 그 적용성이 점차 확대되고 있다. 쉴드터널 세그먼트를 연결하는 방법으로는 국내에서는 볼트 체결방식이 가장 일반적으로 적용되고 있지만, 볼트 직경과 통과공간 직경의 차이로 인한 시공오차 발생 가능성이 있고, 쉴드머신의 추력과 굴착 진동으로 인한 볼트 풀림현상이 발생되고 있다. 또한, 볼트 체결 위치가 터널 내측에 치우쳐 있어 세그먼트 외측에서의 이격을 유발할 수 있다.
본 연구에서는 강연선의 긴장력을 적용하여 쉴드 세그먼트를 체결할 수 있는 기술을 개발하였다. 본 기술은 기존 볼트 체결방식보다 더 높은 체결력 확보가 가능하여 세그먼트간 연결 안정성을 증대할 수 있고, 개발된 아일랜드형 전단키 세그먼트는 조립 가이드 기능으로 시공성 향상과 쉴드터널 전단 안정성을 높일 수 있다. 또한, 실제 전력구 규모의 시험시공과 쉴드TMB과 연동된 강연선 자동공급 시스템 개발을 통해 개발 기술의 현장 적용성을 확보하였다. 본 연구개발을 통해 최종적으로는 쉴드터널 체결부 재료비 50% 절감, 세그먼트 체결력 10% 증대, 쉴드터널 전체공사비 2% 절감을 달성할 수 있었다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">쉴드터널, 세그먼트, 강연선, 아일랜드형 전단키, 체결력, 경제성</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Shield tunnel, Segment, Strand, Island shear key, Connection Force, Economic Effects</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

강선 체결 조립방식을 이용한 세그먼트 터널 라이닝 기술 개발

Ⅱ. 연구개발 목적 및 필요성

국외의 경우 쉴드터널 세그먼트의 연결 방법에 대한 지속적인 연구가 진행되어 다양한 체결방식이 적용되고 있으나, 국내의 경우에는 종류의 차이는 있으나 거의 대부분이 볼트 체결방식을 적용하고 있다.

볼트 체결방식은 구조가 간단하고 국외에서 새로 개발되고 있는 체결방식들에 비해 경제적으로 저렴한 장점이 있지만, 볼트 직경과 통과구간 직경과의 유격 차이로 인해 세그먼트 조립시 시공오차를 유발할 가능성이 있다. 또한, 시공 과정에서의 쉴드머신 추력, 암반 굴착시 발생되는 진동 등으로 인해 후방에서는 이미 조립된 볼트가 풀리는 현상이 실제 시공현장에서 발생되고 있다. 특히, 볼트가 체결되는 위치는 세그먼트 단면에서 터널 내측에 치우쳐 있기 때문에 중심축을 기준으로 한쪽으로 치우진 체결력을 받게 되어, 터널 외측에서는 세그먼트간의 이격을 유발할 수 문제점도 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 볼트 체결방식의 고질적인 문제점을 개선하고, 세그먼트간 체결력을 향상시킬 수 있는 새로운 쉴드 세그먼트 체결 기술을 개발하고자 다음과 같은 최종목표 설정하였다.

○ 쉴드터널에서 강연선을 활용한 새로운 세그먼트 체결기술 개발
- 기존 볼트체결 방식 대비 체결부 누수량 발생 50% 저감
- 기존 볼트체결 방식 대비 세그먼트 체결부 재료비 50% 절감
- 기존 볼트체결 방식 대비 세그먼트 체결력 10% 증대
- 기존 볼트체결 방식 대비 쉴드터널 전체공사비 2% 절감

Ⅲ. 연구개발 목적 및 필요성

■ 1차년도 연구내용 및 범위

(1) 세그먼트 터널의 체결방식 분석
- 기존 세그먼트 터널의 체결방식 조사
- 국내외 건설 분야의 긴장재 활용 현황 조사
- 기존 체결방식 및 강연선 체결방식의 비교 분석
- 강연선 체결방식의 세그먼트 터널 적용 가능성 평가

(2) 세그먼트 터널 누실실태 파악 및 방수대책 조사
- 국내·외 시공 및 운용중인 세그먼트 터널의 누수 실태 및 지하수 유입수량 분석사례 조사
- 기존 세그먼트 터널의 방수 대책 조사 및 효율성 평가

(3) 국내외 세그먼트 체결부 설계기준 조사 및 분석
- 세그먼트 구조해석방법 및 설계법 조사
- 세그먼트 터널 구조 성능의 영향 변수 도출

(4) 재료실험을 통한 세그먼트 체결용 강연선의 긴장력 향상 방안 제시
- 세그먼트 체결용 강연선 재료 조사
- 재료실험을 통한 강연선의 최대인장력 및 긴장력 손실 평가
- 강연선 체결의 상세 정착 및 접속방법 결정
- 강연선 정착단 구조의 성능 실험 평가
- 도출 방안의 강연선 긴장력 향상 검토

(5) 강연선 체결방식의 전단 및 회전저항력 확보 방안 도출
- 전단키 설치를 통한 세그먼트 안정성 검토
- 경험식을 통한 전단키 세그먼트의 전단 저항력 검토

(6) 강연선 체결방식 적용을 위한 세그먼트 구조형식(안) 도출

- 강연선 및 세그먼트 구조검토를 통한 세그먼트의 강연선 배치 및 정착 위치 결정
- 강연선 체결용 전단키 세그먼트 설계 및 제작도면 작성

(7) 기존 세그먼트 터널의 국내외 수요 현황 및 미래 시장 전망 조사 분석

- 국내 및 국외 적용사례 및 시공실적
- 국내 세그먼트 터널 추진사업 조사
- 국외 (중국,인도,중동 등) 추진사업 예비 조사

■ 2차년도 연구내용 및 범위

(1) 국외 세그먼트 체결방식 및 연구 동향 파악

- 국외 세그먼트 체결방식 조사
- 세그먼트 단면연결부의 지수재 설치방법 및 재료 조사
- 국외 쉴드터널 체결방식 관련 연구 동향 파악

(2) 쉴드터널 곡선부에서의 강연선 긴장력 손실 평가 및 긴장력 유지 방안 도출

- 터널 곡선부의 강연선 체결력 및 손실율 검토
- 터널 곡선부의 강연선 긴장력 유지 방안 도출
- 체결된 강연선의 장기거동 및 유지관리 조사분석

(3) 수치해석을 통한 강연선체결 쉴드터널의 구조 안정성 평가

- 지반 조건에 따른 강연선 체결 쉴드터널의 구조적 안정성 검토 (전단키 기능 검토)
- 연장방향 부등침하 및 세그먼트 이음부의 탈리현상 예측 및 분석
- 시간이력 해석을 통한 내진성능 평가

(4) 강연선 및 세그먼트의 일체화 거동 방안 도출

- 강연선용 쉬즈관 적용 방법 검토
- 강연선 시공시 손상 방지 및 녹 방지 대책 검토
- 모르타르 재료에 의한 세그먼트 및 강연선 일체화 방안 제시
- 풀아웃(pull-out) 테스트를 통한 일체화된 강연선의 파괴 강도 평가

(5) 현장 조사·계측을 통한 볼트 체결방식의 문제점 파악 및 체결부에서의 누수량 측정

- 볼트 체결방식에서의 시공오차에 대한 이론적 검토
- 시공현장 계측을 통한 볼트 체결력 측정 및 볼트 풀림현상 파악
- 세그먼트 체결부에서의 누수량 측정
- 조사·계측·측정 결과를 통한 볼트체결방식의 문제점 검증

(6) 세그먼트 시공 정확도 향상 방안 제시

- 강연선 정착단 구조형상 개선 방안 검토
- 전단키 형태에 따른 가이드 기능 검토 및 전단력 발휘 능력 평가
- 반력벽을 통한 세그먼트 가이드 라인 설치방안 검토

(7) 강연선 체결 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

(8) 강연선 체결 쉴드터널의 시공성 평가

- 강연선 체결 쉴드터널의 단위공종별 소요공기 분석 및 시공 프로세스 정립
- 터널 전체에 대한 소요공기 분석, 전체 시공프로세스 분석 및 비교 평가
- 시공성 및 시공품질 확보방안 제시

■ 3차년도 연구내용 및 범위

(1) 강연선 공급장치 제작 및 활용 시험 수행

- BIM 수행결과를 바탕으로 강연선 공급장치 제작 계획 수립
- 강연선 공급장치 시제품 제작
- 강연선 공급장치를 활용한 긴장 시험 수행

(2) 체결방식에 따른 세그먼트 체결부의 내화성능 평가

- 볼트 및 강선 체결 방식의 내화 시험체 제작
- 체결부에서의 내화성능 비교 평가
- 화재로 인한 체결부에서의 긴장력 손실 예측

(3) 전단키 세그먼트에서의 수팽창 지수재의 거동 평가

- 지수재 및 개스킷의 성능 자료 조사 및 재료시험 수행
- 전단키에서의 지수재 부착, 접합, 변형 형상 검토
- 세그먼트 체결력 증가에 따른 전단키에서의 지수재 거동 평가

(4) 세그먼트 체결방식에 따른 방수 성능 비교 평가

- 쉴드터널 누수 실태 조사
- 수압시험을 통한 수팽창 지수재 성능 검토
- 세그먼트 체결방식별 시험체 제작
- 실험을 통한 체결부 누수량 측정
- 강연선 체결방식의 체결부 누수량 50% 저감 효과 검증

(5) 강연선 체결 쉴드터널의 시공 프로세스 정립을 위한 단계별 시험시공 수행

- 상세설계에 의한 강연선 체결 세그먼트 시제품 제작
- 시공 프로세스에 따른 단위 체결 세그먼트의 강연선 긴장 및 정착 과정 수행
- 시공 단계별 문제점 파악 및 개선안 제시

(6) 강연선 체결 방식의 체결력 증대 효과 검증

- 체결력 정의 규정 및 평가 지표 설정(파괴강도 증가율, 긴장력 증가율, 재료 강도 증진율 등)
- 기존 체결 방식 대비 체결력 10% 증대 효과 검증

(7) 강연선 체결 쉴드터널의 경제성 평가

- 기존 및 강연선체결방식에 대한 원가분석 및 비교평가(시공비 및 재료비)
- 세그먼트 체결부 재료비 50% 절감 효과 검증
- VE평가(비용평가) 및 LCC평가(유지관리비용 분석)를 통한 경제성 향상 방안 제시
- 터널 용도, 연장, 시공여건에 따른 경제성 검토 및 기존방식과의 경제적 임계점 분석
- 강연선 체결방식 개발에 따른 경제적 기대효과 간접계산

(8) 강연선 체결 쉴드터널의 설계 매뉴얼(안) 제안

- 쉴드터널에서 강선 체결 방식의 구조 안정성 검토
- 전단키 세그먼트 및 강선 배치에 대한 세부 설계 지침 제시
- 전단키 형상 최종결정 및 전단키 세그먼트 상세설계
- 강선 체결 쉴드터널 표준단면 설계

(9) 강연선 체결 쉴드터널의 시공 매뉴얼(안) 및 품질규정(안) 제안

- 시공 단계에 따른 시공지침서 작성
- 강연선 체결 쉴드터널 유지 관리 방안
- 유지관리 매뉴얼(안) 제안

(10) 강연선 체결 쉴드터널의 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 시장성 조사
- 개발 기술의 국내외 미래 시장 경쟁력 분석

(11) 개발 기술의 성과 확보 및 가치 평가

- 개발 요소기술의 산업재산권 확보
- 사업화 추진방안, 시장 확보 방안, 설비 및 업무 지원 방안에 대한 상용적 비지니스 모델 제시

Ⅳ. 연구개발결과

■ 쉴드터널 체결방식 분석

국내외 쉴드터널의 기존 체결방식 및 새로운 체결방식 연구동향에 대한 조사를 수행하였고, 강연선 긴장력으로 쉴드터널 세그먼트를 체결하는 방법의 적용성을 고찰하였다.

■ 볼트 체결방식 문제점 분석

기존 쉴드터널의 볼트 체결방식은 볼트 직경과 통과구간의 직경 차이로 인해 시공오차가 발생하여 세그먼트간의 단차가 발생할 수 있으며, 쉴드머신의 추력 및 진동 등의 외부하중으로 인해 볼트풀림현상이 발생할 수 있다. 이러한 문제의 해결을 위하여 새로운 체결기술의 개발이 요구되고 있다.

■ 쉴드터널 누수실태 파악 및 방수대책

쉴드터널에 유입되는 누수량은 계절에 따른 강수량보다는 지하수의 분포가 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 그리고, 터널내 지하수 유입량 조사결과는 모두 허용수량을 만족하였으나 쉴드터널에서 발생하는 누수량은 볼트연결부에서 67%, 세그먼트 연결부에서 27%로 체결방식의 개선을 통해 누수량을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

■ 실대형 실험을 통한 강연선 체결 성능 검토

강연선 쉴드터널의 체결력을 검토하기 위하여 실대형 세그먼트에 대한 강연선 체결방식과 볼트 체결방식의 체결력에 평가 실험을 수행한 결과, 강연선 체결방식의 체결력이 91.4% 더 높은 것으로 나타났다. 또한 쉴드터널 시공단계에서 발생하는 조립가압, 풀추력 등을 고려한 실험에서도 강연선 체결방식의 체결력이 더 높은 것으로 평가되었다.

■ 쉴드터널 곡선부에서의 강연선 긴장력 손실평가

강연선의 긴장력을 이용하여 쉴드터널의 곡선부를 체결함에 있어서 외부의 추가하중이 작용하지 않는 이상 곡선배치로 인하여 발생되는 긴장력 손실은 거의 영향

이 없는 것으로 검토되었으며, 세그먼트의 장기거동으로 인한 손실은 매우 미소하여 강연선 긴장력에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 검토되었다.

■ 강연선 및 세그먼트 일체화 거동 방안

강연선과 세그먼트간의 일체화 거동을 평가하기 위해서 체결부재인 강연선의 부식으로 인한 성능저하를 검토한 결과 부식은 강연선의 성능에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 강연선과 세그먼트사이에 별도의 그라우팅 처리가 없더라도 강연선의 강성만으로 충분한 내구성 유지가 가능할 것으로 판단된다.

■ 쉴드 세그먼트 설계기준 조사 및 영향변수 도출

강연선 체결방식 쉴드터널 구조안정성 검토를 위해서는 지반하중, 수압, 상재하중, 세그먼트의 자중 등의 하중에 대하여 고려하여야 한다. 그리고 잭 추력, 뒤채움 압력, 운반 및 취급하중, 부력 등에 대한 검토시 별도의 하중을 고려해야 한다.

■ 수치해석을 통한 강연선 쉴드터널 구조안정성 검토

강연선 쉴드터널의 시공단계를 고려한 구조안정성과 내진에 대한 안정성 검토를 수행하였다. 시공단계를 고려한 3차원 유한요소법 검토결과 변위량은 모두 허용범위 이내로 안정되게 나타났으며, 내진 안정성 검토결과 변위 및 응력에 대하여 허용범위 이내로서 구조적으로 안정한 것으로 판단된다.

■ 아일랜드형 전단키 세그먼트 개발

쉴드터널에 작용하는 전단력에 대해 저항하며 응력분배 및 체결 공정에서 가이드 기능이 가능한 아일랜드형 전단키를 세그먼트에 적용하였다. 기존 체결방식과의 비교 결과 아일랜드형 전단키의 전단성능이 더 우수한 것으로 평가되었고, 검토된 전단키를 적용하여 실제 전력구 쉴드터널에 대한 표준단면을 작성하였다.

■ 세그먼트 체결방식에 따른 방수 성능 비교

강연선 체결방식과 볼트 체결방식에 따른 방수성능에 대한 검토를 수행하기 위하여 실제 세그먼트 체결부를 실험모형으로 제작하여 누수시험을 수행하였다. 모형에 인위적인 시공 오차부를 형성하고 수압을 상승시키며 누수량 실험을 수행한 결과,

강연선 체결방식이 볼트 체결방식에 비해 체결부에서의 누수량이 약 68~75% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

■ **세그먼트 체결방식에 따른 지수재 거동 평가**

세그먼트간 체결력이 지수재에 미치는 영향을 평가하기 위해 세그먼트 단면을 실험체로 제작하고, 수팽창 지수재와 개스킷을 부착하고 체결방식별 체결력을 가한 후 시간경과에 따른 변화를 평가하였다. 실험결과 수팽창 지수재와 개스킷 모두 변형에 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 강연선 긴장력으로 인해 세그먼트 체결력이 증가하더라도 수팽창 지수재 및 개스킷은 탄성범위 내에서 거동하며, 체결방식 변화로 인해 영향을 미치지 않음을 보여주고 있다.

■ **강연선 체결방식의 체결력 증대효과 검증**

세그먼트의 체결방식에 따른 체결성능 검토결과 곡볼트 및 직볼트 체결방식과 비교할 경우 압축성능 91.4%, 인장성능 8배, 전단성능 32% 증가하였고, 볼트박스 체결방식과 비교할 경우 인장성능 6배, 전단성능 87% 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 내화 성능에서도 강연선의 체결력 저하가 고인장 볼트에 비해 더 적은 것으로 나타났다.

■ **현장 조립 시험시공**

본 연구에서 개발된 강연선 쉴드터널의 현장 적용성과 시공성 향상 방안 도출을 위하여 전력구 터널 규모의 시험시공을 지상에서 실시하였다. 세그먼트 조립시 틸팅(Tilting) 과정에서 아일랜드형 전단키의 가이드 기능으로 조립 시간이 단축되었고, 이로 인해 전체 소요공기가 단축되는 것으로 나타났다. 실제 현장에 적용하기 위해서는 강연선의 공급 및 긴장을 자동화할 수 있는 시스템의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

■ **강연선 자동공급장치 초기모델 개발**

강연선 쉴드터널의 시공성 향상을 위하여 강연선 자동공급장치의 초기모델을 제작하였다. 세그먼트의 불록아웃부를 모형으로 제작하여 강연선 삽입 실험을 수행하였고, 자동공급장치의 공급능력을 평가하였다.

■ 세그먼트 시공 정확도 향상 방안

강연선 쉴드터널의 특성에 맞는 정착구 형상을 선정하였고, 아일랜드형 전단키를 이용한 틸팅 공정 분석을 수행하였다. 그리고, BIM 기법을 활용하여 쉴드TBM과 연동 가능한 강연선 자동화 시스템에 대한 3D 모델링을 수행하였다. 강연선의 공급/긴장/절단이 가능한 자동화 시스템 적용시 시공성 향상 및 소요공기 단축으로 인해 경제성 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

■ 시공성 및 경제성 평가

강연선 쉴드터널의 시공 공정에 대한 검토 결과 자동화 시스템을 적용하였을 경우 기존 볼트 체결방식보다 1개의 세그먼트 체결에 소요되는 시간이 60초 감소되는 것으로 분석되었다. 또한 체결재의 재료비는 약 51.62%가 절감 가능하며, 터널 연장이 2km 이상부터는 소요공기 단축 효과로 인해 전체 공사비가 2% 이상 절감 가능하며 약 3.5%의 공기단축 효과가 있는 것으로 분석되었다.

■ 개발 기술의 수요예측 및 시장성 평가

국내 터널 시장은 국민소득 향상 등으로 국민 기대치가 선진국 수준으로 높아지며 터널공사시 발파 굴착에서 기계굴착으로 빠르게 전환되고 있으며, 중국은 급속한 경제발전과 도시화에 따라 10,000km의 신규 도로구간의 터널 건설에 약 100대 이상의 TBM이 발주될 것으로 전망되었다. 강연선 쉴드터널 공법은 신규시장 진입 또는 타사업과 연계 등의 전략 추진이 가능할 것으로 기대된다.

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 강연선 체결 쉴드터널은 기존 쉴드터널 체결부에서 발생되는 누수를 절감 가능할 것으로 판단된다.
- 기존 NATM 터널 대비 향상된 품질 및 경제성에서 우위를 가지고, 높은 체결력을 통해 터널 안정성의 증대를 기대할 수 있으며, 앞으로 예상되는 쉴드터널 수요에 맞추어 국내 시공능력 향상에 크게 기여하게 될 것으로 판단된다.
- 본 연구를 통하여 축적된 강연선 체결 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 강연선 체결 쉴드터널 기술은 터널 시공 분야의 국내 기술 축적과 설계 자립화를 통해 건설기술력 향상을 가져올 것으로 판단된다.
- 강연선 체결 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 향상된 세그먼트 체결방식으로 널리 적용 될 것으로 예상된다.
- 본 개발 기술은 기존 볼트 체결방식에 비해 터널 내부 누수량을 50% 이상 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 강연선 체결 기술은 체결재의 재료비를 약 50% 절감할 수 있으며, 세그먼트 조립 공정에서의 공기 단축으로 인해 터널 연장 2km 이상부터 전체 공사비를 2% 이상 절감 가능하다. 또한, 3.5%의 공기단축 효과를 얻을 수 있다.
- 기존 볼트 체결방식의 경우 체결부 설치를 위해 세그먼트 단면 크기의 제한을 받게 되지만, 강연선 체결 기술은 체결부 설치가 필요하지 않기 때문에 세그먼트 단면 크기의 제한을 받지 않기 때문에, 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.

○ Development of segment tunnel lining clamping technology that can decrease the occurrence rate of leakage by 50%, reduce the material costs of segment joints by more than 50% and increase the clamping force by more than 10% by replacing the existing bolt clamping methods that cause more than 60% of leaks in the tunnel linings through new segment clamping technology applying cable

-More than 50% reduction of leakage rate in bolt joints compared to the existing bolt clamping methods

-More than 50% reduction in material costs of segment joints compared to the existing bolt clamping methods

-More than 10% increase in segment clamping force compared to the existing bolt clamping methods

-Suggestion of detailed design guidelines for cable clamping segment tunnels and design of standard sections

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) Analysis on the clamping methods of segment tunnel

- Research on the clamping methods of the existing segment tunnels
- Survey on the status of tendon utilization in construction sector at home and abroad
- Comparative analysis between the existing clamping methods and cable clamping methods
- Evaluation on the applicability to segment tunnels of cable clamping methods

(2) Identification of leakage status on the segment tunnels and survey on the waterproofing measures

- Survey on the leakage status of segment tunnels constructed and operated

at home and aborad and case study of analyzing the groundwater inflow
- Research on the waterproofing measures of the existing segment tunnels and efficiency evaluation

(3) Analysis and survey on the design criteria of segment joints at home and abroad
- Research on the segment structural analysis methods and design techniques
- Deduction of variables affecting the structural performance of segment tunnels

(4) Suggestion of plans to improve prestress of the cable for clamping segment through material experiments
- Survey on the cable materials for clamping segment
- Evaluation on the maximum tensile strength of the cable and prestress loss through material experiments
- Determination on the detailed fixation of cable clamping and connection methods
- Evaluation on the performance tests of cable fixation platform structures
- Review on the cable prestress improvement of deduced measures

(5) Deduction of methods to secure resistance to rotation and shear of cable clamping methods
- Review on the segment safety through shear key installation
- Review on the shear resistance of shear key segments through empirical equation

(6) Deduction of segment structural form (plans) for application of cable clamping methods
- Determination of cable placement and fixation locations of segments

through structural review on the cables ad segments

- Creation of shear key segment design for clamping cables and production drawings

(7) Analysis on the status of domestic and international demands for segment tunnels and survey on the future market prospects

- Applications and construction results at home and abroad
- Survey on the segment tunnel promotion projects in Korea
- Preliminary survey on the promotion projects abroad (China, India and Middle East, etc.)

■ Contents and range of research in the 2nd year

(1) Identification of segment clamping methods and research trends abroad

- Research on the segment clamping methods abroad
- Investigation of re-installation methods and materials of the index of the segment connecting part
- Identification of research trends related to shield tunnel clamping methods abroad

(2) Evaluation on the cable prestress loss in the curved section of shield tunnel and deduction of methods to maintain the prestress

- Review on the cable clamping force and loss rate of tunnel curved section
- Deduction of methods to maintain the cable prestress of tunnel curved section
- Survey analysis on the maintenance and long-term behavior of clamped cables

(3) Evaluation on the structural stability of cable-clamp shield tunnel through numerical analysis

- Review on the structural stability of cable-clamp shield tunnels according

to ground conditions(Review on the shear key functions)

- Analysis and prediction of differential settlement in the direction of extension and separation phenomenon of segment connections
- Seismic performance assessment through time history analysis

(4) Deduction of methods for integration behavior of cables and segments

- Review on the methods for application of sheath tube for cables
- Review on the damage prevention in cable construction and rust prevention measures
- Suggestion of methods for integration of segments and cable by mortar materials
- Evaluation on the fracture strength of integrated cables through pull-out test

(5) Identification of problems of bolt clamping methods through field survey and instrumentation and measurement of leakage in connections

- Theoretical review on the construction errors of bolt clamping methods
- Measurement of bolt clamping force trough construction site measurements and identification of bolt loosening phenomenon
- Measurement of leakage in segment joints
- Verification of problems of bolt clamping methods through survey/instrumentation/measurement results

(6) Suggestion of plans to improve accuracy of segment construction

- Review on the plans to improve structural shape of cable fixation platform
- Review on the guide key functions according to the form of shear key and evaluation on the ability to exert shearing force
- Review on the methods for segment guide line installation through reaction wall

(7) Construction of cable-clamp shield tunnel and the operational risk assessment

- Prediction of possible scenarios in the construction process and risk matrix assessment on the accident risk
- Prediction of possible scenarios in the operating period and risk matrix assessment on the accident risk

(8) Evaluation on the constructability of cable-clamp shield tunnels

- Analysis on the construction period required by construction type of cable-clamp shield tunnels and establishment of construction process
- Analysis on the construction period required for the entire tunnel, analysis on the entire construction process and comparative evaluation
- Suggestion of constructability and plans to secure construction quality

■ Contents and range of research in the 3rd year

(1) Production and utilization and the test of the supply device of cable

- Production plan of the cable supply based on BIM execution results
- Prototyping of cable supply
- Tension test using the cable supply

(2) Evaluation on the fire resistance performance of segment joints according to clamping methods

- Fabrication of fire resistance specimens of bolt and cable clamping methods
- Comparative evaluation on the fire resistance performance of joints
- Prediction of fracture behavior and cable prestress loss due to a fire

(3) Evaluation of the behavior of the index material in the segment

- Performance materials research and material testing of index material and gasket

- Study of the adhesion between the bonding and deformation of index material
- Evaluation of index re-behavior of the share-key with increasing clamping force

(4) Comparative evaluation on the waterproof performance according to segment clamping methods
- Deduction of methods to measure leakage of segment joints
- Fabrication of specimens by segment clamping method
- Comparative analysis on the waterproof performance and measurement of leakage in joints through laboratory experiments
- Verification on the effects of reduction in leakage in joints of cable clamping methods by 50%

(5) Implementation of step-by-step test construction for establishing construction process of cable-clamp shield tunnels
- Design of cable-clamp shield tunnels of actual scale and production of the prototype
- Step-by-step test construction of shield tunnels according to the construction processes
- Identification of problems by construction step and suggestion of improvement plans

(6) Study of verification of the tightening force increasing effect of the cable fastening system
- Set of indicators of definition provision and evaluation of clamping force (rate of increase of breaking strength, rate of increase of tensible force, rate of increase of strength of material)
- Verification on the effects of increase in clamping force of cable clamping methods by 10%

(7) Evaluation on the economic feasibility of cable shield tunnels

- Cost analysis on the existing methods/cable clamping methods and comparative evaluation (construction and material costs)
- Deduction of reduction in material costs of segment joints by 50% compared to the existing methods
- Suggestion of plans to improve the economic feasibility through VE evaluation(cost evaluation) and LCC evaluation (analysis of maintenance costs)
- Review on the economic feasibility according to the tunnel usage, length and construction conditions and analysis on the economic threshold with the existing methods
- Economic expectations effect through the development of cable conclusion method

(8) Suggestion of design manual (plans) of cable shield tunnels

- Review on the structural stability of cable clamping methods in shield tunnels
- Presenting the detailed design guidelines on the shear key segment and cable placement
- final decision of sheae-key and detailed design of segment
- Designing standard sections of cable-clamp shield tunnels

(9) Suggestion of construction manual (plans) and quality requirements(plans) of cable shield tunnels

- Drawing up the guidelines according to construction phase
- Maintenance plan of cable shield Tunnel
- Suggestion of Maintenance manual (plans) of cable shield tunnels

(10) Prediction of demand for cable-clamp shield tunnels and marketability assessment

- Survey on the marketability: Discovery of the applicable businesses such as roads, railways, electricity and sewage, etc. and marketability assessment
- Survey on the marketability aborad: Survey on the demand by country and marketability
- Analysis on the competitiveness of developed technology in the future market at home and abroad

(11) Securing the accomplishment of developed technology and value assessment

- Securing industrial property rights of developed element technology
- Presenting commercial business models on the market expansion methods and facilities/business support measures and Presenting technology road map for promoting the commercialization

Ⅳ. Research and Development Results

■ Analysis of assembling system of shield tunnel

The survey of research trends in the past and the new assembling method of shield tunnel was carried out. and the Study of the Application of the assembling method of the shield tunnel segments to the tensible force of the strands was performed.

■ Problem Analysis of bolting system

Bolting system of the shield tunnel can result in gap between the segments construction errors caused by the size difference between the bolt and the slot. and the loosening of the bolt can be caused by an external load, such as thrust and vibration of the shield machine. In order to solve the problem, it is necessary to develop a new assembling system.

■ Investigation of the leak of shield tunnel and water protection

The leakage quantity entering the shield tunnel is likely that the distribution of ground-water greater influence than seasonal rainfall. incoming groundwater quantity in the tunnel was satisfied allowed quantity but Leakage amount generated in the shield tunnel is 67% by bolts connecting portion, 27% from the connecting portion of the segment. It is determined to be able to reduce the amount of leakage through the improvement of assembling system.

■ Review of Strand signed performance through experiments full scale test

To examine the clamping force of the cable shield tunnel was fabricated segments of actual size. result of the tightening force of cable fastening system and bolt system experiment, cable concluded method has superior performance than 91.4%. Clamping force of the study of the assembly pressure generated by a shield tunnel construction stage results cable fastening system has been

evaluated as more excellent.

■ Tension loss evaluation of cable in the curved portion of the shield

By utilizing the tension of the cable, when fastening the curved portion of the shield tunnel, when there is no additional load is not loss of tension by the placement of the curve and loss due to long-term behavior of the segment is expected to be very small.

■ Integrated action plan of Strand and segments

To evaluate the behavior of the cable and segment were examined performance degradation due to corrosion of the liner. corrosion is determined to have little effect on the performance of the cable. Additional grout treated liners and segments is also judged to be the maintenance of sufficient durable strength of the cable without.

■ Investigation of design criteria of shield segment and deduction of Influence Variable

In order to examine the structural stability of the cable fastening method shield tunnel, should be considered for the load(ground load, water pressure, overburden load, self-load). Jack thrust, backfill pressure, transportation and handling load, at the time of the buoyancy consideration, must be taken into account separately.

■ Examination of the structural stability of cable shield tunnel by numerical analysis

Study construction stage of the cable shield tunnel stability considerations structural stability and seismic were made. Result of the three-dimensional finite element method in consideration of the construction process, the displacement is stable within any tolerance and study of the stability of seismic result, the displacement and stress within a permissible range, it is determined that

structurally stable.

■ Development of island-type shear key segments

Stress distribution by the shear resistance in the cable shield tunnel capable Island Jondanki made in segments. Island-type shear key was evaluated as the shear performance than bolt system is more excellent. Typical cross-sectional view of a shield tunnel is created examined key is applied.

■ Comparison of the waterproof performance according to the coupling method of the segment

Discussion of waterproof performance by the conclusion method of cable and bolts have been performed and leakage test was conducted is manufactured as the actual size of the fastening portion of the experimental model of the segment. Results of experiments of the leak rate increases the water pressure, generation of leak rate was reduced by about 68-75% compared to cable fastening system is a bolt fastening method.

■ Evaluation of the behavior of the index material according to the coupling method of the segment

Fastening force is installed a swell index material and the gasket can be in the experimental model to evaluate the effect on the index member and after addition of fastening force, and analyzed the behavior over time. Deformation amount of it can be expanded index material and gasket be were similar. fastening force is increased, index material is evaluated as the difference in behavior is little.

■ Verification of the tightening force the effect of increasing the cable assembly method

Result of examining the fastening performance of the fastening system of the

segment, was 91.4% better compression performance than the bolt fastening method and The tensile performance is excellent about 8 times and 32% of the shear performance was better. Clamping force of the cable also in a fire has been confirmed that the better.

■ **Field assembly test construction**

The segments for the applicability workability improvement in the field shield tunnel developed in this study were prepared and tested construction on the ground. Assembly time is shortened for the Tilting Ireland type during construction, the overall construction period is shortened. In order to apply to the actual scene, it is necessary to develop a system that can supply and pressure of the steel wire automatically.

■ **Development of initial model of automatic cable feeding device**

The initial model of the automatic cable feeding device for the construction of the improvement of cable shield tunnel was produced. The segment model was produced for the experiments and Experimental results smooth supply of the supply capacity of the automatic feeding device it was possible. but research is needed in the automatic feeder in conjunction with the shield machine in the future.

■ Accuracy improvement measures of segment assembly

Anchorage device of shield tunnel was chosen and analysis of slope process using the key has been made. During construction of the cable applied automatically supplied / pulling / cutting device, it is determined to be able to ensure economic efficiency in reducing the workability and the required construction period.

■ Evaluation of construction and economy

Results Study shield tunnel construction process is performed, applying the automated system, the time that one segment than existing bolt fastening method is fastened has been analyzed to decrease 60 seconds. Material costs of the fastening material is reduced to about 51.62%, the extension of the tunnel is not less than 2km, it was analyzed that there is reduction of about 3.5% of the construction period shortening effect of 2% or more of the construction costs.

■ Evaluation of demand forecasting and market of development technology

Domestic tunnel market has changed rapidly in the machine excavation method in tunnel construction demolition excavation method of the rise of the expectations of the people. China is in response to the rapid economic development and urbanization, about 100 or more units of TBM in tunnel construction of new road section of 10,000km is expected to be ordered.

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 new segment cross-sectional shape and cable clamping methods of segment tunnel lining developed through this study.

- Enhancement of tunnel safety is expected through high clamping force, 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 cable-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 cable-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 cable clamping 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 a clamping method of 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 by more than 50% compared to the existing bolt clamping systems, 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.
- The segment clamping system using tensile force of cables exerts superior clamping force compared to the existing bolt clamping systems, and it helps to improve the stability through increase in strength and connectivity of segment tunnels.

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

- In the existing bolt clamping systems, the size of segment sections is to be designed to be more than 30cm at the minimum for bolt installation, but the technology developed through this study has no restrictions on the thickness of segments. Accordingly, the thickness of the clamping device ends can be reduced to more than 30%, and the clamping system introduced to deep tunnel

in which loads are not applied to segment lining significantly and shallow tunnel can lead to reducing the direct construction costs through reduction in the thickness of lining sections.

- It is expected to contribute to reduction in construction costs when applied to the construction of longitudinal tunnels planned at home and abroad in the near future since it can reduce the construction unit price of joints by more than 50% compared to the existing bold clamping systems.

- 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 ····· 5

1. Objective of study ····· 5

2. Contents of study ····· 7

III. State of Technical Development ····· 13

1. Status of Development in Domestic ····· 13

2. Status of Development in Foreign ····· 17

Chapter 2. Accomplishment Content and Results ····· 23

I. Analysis of Assembling method of Shield tunnel ····· 23

1. Existing Assembling method of Shield tunnel ····· 23

2. Assembling Method and Research Rrends of Segment ····· 27

3. Cable Assembling Method of Shield tunnel ····· 57

Conclusion of Chapter ····· 71

II. Problem Analysis of bolting methods ····· 72

1. Gap Difference of Joint ····· 72

2. Loosening Bolts ····· 77

3. Location of Joint ····· 79

Conclusion of Chapter ····· 80

III. Water Leaking and Waterproof of Shield tunnel ····· 81

1. Analysis of Underground Water flow in Tunnel ····· 81

2. Investigation and Evaluation of Waterproof of Shield Tunnel ····· 91

3. Leakage in Connections ····· 96

Conclusion of Chapter ····· 102

IV. Evaluation of Cable Assembling Method by Real-scale Test ····· 103

1. 1st Experiment ····· 103

2. 2nd Experiment ····· 121

Conclusion of Chapter ····· 131

V. Evaluation on the Cable PrestressLoss in the Curved Section of Shield Tunnel ····· 132
1. Review on the Cable Clamping Force and Loss Rate of Tunnel Curved Section ····· 132
2. Deduction of Methods to Maintain the Cable Prestress of Tunnel Curved Section ····· 139
3. Survey Analysis on The Maintenance and Long-term Behavior of Clamped Cables ····· 143
Conclusion of Chapter ····· 155
VI. Deduction of Methods for Integration Behavior of Cables and Segments · 156
1. Review on the Damage Prevention in Cable Construction and Rust Prevention Measures ····· 156
2. Behavior of an Integrated Cable ····· 162
Conclusion of Chapter ····· 167
VII. Investigation of Design standard and Influencing factor for Segment ····· 168
1. Structure Analysis of Segment Lining ····· 168
2. Investigation of Design standard ····· 175
3. Deduction of Influencing factor for Structural Performance ····· 179
Conclusion of Chapter ····· 187
VIII. Examination of the Structural Stability of Cable Shield Tunnel by Numerical Analysis ····· 188
1. 2D Analysis ····· 188
2. 3D Analysis ····· 199
Conclusion of Chapter ····· 206
IX. Development of Island-type Shear Key segments ····· 207
1. Shear and Rotational Resistance of Cable System ····· 207
2. Island-type Shear Key ····· 210
3. Standard Cross-section and Placement of Segments ····· 226
Conclusion of Chapter ····· 233
X. The Waterproof Performance Comparison by Segment Entered into System ····· 234
1. Investigation of the Waterproof Test ····· 235
2. Planning of the Experiment ····· 238

3. Perform Experiments and Result ····· 241
4. Leakage reduction effect of cable shield tunnel ····· 243
Conclusion of Chapter ····· 245
XI. Evaluation of the Behavior of the Index Material in the Segment ····· 246
1. Performance Materials Research and Material Testing of Index Material and Gasket ····· 246
2. Evaluation of Index Re-behavior of the Shear key with Increasing Clamping Force ····· 249
Conclusion of Chapter ····· 261
XII. Increasing effect of Cable Assembling Method ····· 262
1. Evaluation Index for Increasing effect ····· 262
2. Increasing effect of Connection Force ····· 264
2. Investigation of Fire Resistance Efficiency ····· 272
Conclusion of Chapter ····· 276
XIII. Field Test Construction ····· 277
1. Plan of Test Construction ····· 277
2. execution of Test Construction ····· 284
Conclusion of Chapter ····· 287
XIV. Development of Prototype of Cable Automatic Feeder ····· 288
1. Manufacturing Plan ····· 288
2. Manufacturing of Prototype ····· 290
3. Test of Cable Supply ····· 294
Conclusion of Chapter ····· 297
XV. Improvement of Construction Accuracy of Segment ····· 298
1. Improvement Fixedness Shape of Cable ····· 298
2. Study on Fixedness Shape ····· 300
3. Study on Guide Facility of Shear Key ····· 310
2. Design of Cable automated system and 3D Modeling ····· 313
Conclusion of Chapter ····· 322
XVI. Evaluation of Construct ability and Economic Feasibility ····· 323
1. Analysis of Construction Process ····· 323
2. Risk Evaluation ····· 327
3. VE Evaluation of Cable Assembling Technology ····· 338

4. Analysis of Economic Feasibility ····· 349
Conclusion of Chapter ····· 354
XVII. Demanding Forecasting of Development Technology and marketability Evaluation ····· 355
1. Demanding Forecasting of Domestic Tunnel Market ····· 355
2. Demanding Forecasting of Overseas Tunnel Market ····· 358
3. Achievement Securing of Technology and Value Evaluation ····· 366
Conclusion of Chapter ····· 371

Chapter 3. Final Research Achievement and Application ····· 372
I. Key Element Technology ····· 372
II. Major Research Achievement ····· 377
1. Scholarly Achievement ····· 377
2. Technical Achievement ····· 379
III. Analysis of Demand and Future Market of Shield tunnel ····· 381
1. Prospect of Domestic Market ····· 381
2. Prospect of Overseas Market ····· 382

Chapter 4. Achievement of Research Goal and Effect ····· 384

References ····· 387

Appendix ····· 395

목 차

제 1 장 연구개발과제 개요 ····· 1

제 1 절 연구개발의 배경 및 필요성 ····· 1

제 2 절 연구개발의 내용 및 범위 ····· 5

1. 연구개발 최종목표 ····· 5

2. 연구개발 내용 ····· 7

제 3 절 국내외 기술개발 현황 ····· 13

1. 국내기술개발 현황 ····· 13

2. 국외기술개발 현황 ····· 17

제 2 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 23

제 1 절 쉴드터널 체결방식 분석 ····· 23

1. 기존 쉴드터널 체결방식 ····· 23

2. 국외 세그먼트 체결방식 및 연구동향 파악 ····· 27

3. 강연선을 이용한 쉴드터널 체결방식 ····· 57

소결론 ····· 71

제 2 절 볼트 체결방식 문제점 분석 ····· 72

1. 체결부 유격 차이 ····· 72

2. 볼트 풀림현상 ····· 77

3. 체결부 위치 ····· 79

소결론 ····· 80

제 3 절 쉴드터널 누수실태 파악 및 방수대책 ····· 81

1. 터널 지하수 유입수량 조사 ····· 81

2. 쉴드터널 방수대책 및 효율성 ····· 91

3. 세그먼트 체결부 누수 ····· 96

소결론 ····· 102

제 4 절 실대형 실험을 통한 강연선 체결 성능 검토 ····· 103
1. 1차 실험 ····· 103
2. 2차 실험 ····· 121
소결론 ····· 131
제 5 절 쉴드터널 곡선부에서의 강연선 긴장력 손실평가 ····· 132
1. 강연선 체결력 및 손실율 검토 ····· 132
2. 곡선부의 강연선 긴장력 유지 방안 ····· 139
3. 체결된 강연선의 장기거동 및 유지관리 ····· 143
소결론 ····· 155
제 6 절 강연선 및 세그먼트 일체화 거동 방안 ····· 156
1. 강연선 손상 및 녹 방지 대책 ····· 156
2. 일체화된 강연선 거동 평가 ····· 162
소결론 ····· 167
제 7 절 쉴드 세그먼트 설계기준 조사 및 영향변수 도출 ····· 168
1. 세그먼트 라이닝 구조해석 ····· 168
2. 국내외 설계기준 조사 ····· 175
3. 쉴드터널 구조성능 영향변수 도출 ····· 179
소결론 ····· 187
제 8 절 수치해석을 통한 강연선 쉴드터널 구조안정성 검토 ····· 188
1. 2D 해석 ····· 188
2. 3D 해석 ····· 195
소결론 ····· 206
제 9 절 아일랜드형 전단키 세그먼트 개발 ····· 207
1. 강연선 체결방식의 전단 및 회전 저항력 확보 ····· 207
2. 아일랜드형 전단키(Island type) ····· 210
3. 표준단면 및 세그먼트 배치 ····· 226
소결론 ····· 233

제 10 절 세그먼트 체결방식에 따른 방수 성능 비교 ····· 234
1. 방수 성능 실험 조사 ····· 235
2. 실험계획 ····· 238
3. 실험수행 및 결과 ····· 241
4. 강연선 쉴드터널 누수 감소효과 검토 ····· 243
소결론 ····· 245
제 11 절 세그먼트 체결방식에 따른 지수재 거동 평가 ····· 246
1. 수팽창 지수재 및 개스킷 품질 규정 ····· 246
2. 체결력 증가에 따른 지수재 거동 평가 ····· 249
소결론 ····· 261
제 12 절 강연선 체결방식의 체결력 증대효과 검증 ····· 262
1. 체결성능 정의 및 평가지표 설정 ····· 262
2. 체결력 증대효과 검증 ····· 264
3. 체결방식에 따른 내화성능 검토 ····· 272
소결론 ····· 276
제 13 절 현장 조립 시험시공 ····· 277
1. 시험시공 계획 ····· 277
2. 시험시공 수행 ····· 284
소결론 ····· 287
제 14 절 강연선 자동공급장치 초기모델 개발 ····· 288
1. 제작 계획 ····· 288
2. 초기모델 제작 ····· 290
3. 강연선 공급 시험 ····· 294
소결론 ····· 297
제 15 절 세그먼트 시공 정확도 향상 방안 ····· 298
1. 강연선 정착단 구조형상 개선 ····· 298
2. 정착단 구조형상 검토 ····· 300
3. 전단키 가이드 기능 검토 ····· 310
4. 강연선 자동화 시스템 상세설계 및 3D 모델링 ····· 313
소결론 ····· 322

제 16 절 시공성 및 경제성 평가 ····· 323
1. 시공프로세스 분석 ····· 323
2. 위험도 평가 ····· 327
3. 강연선 체결 기술 VE 평가 ····· 338
4. 경제성 분석 ····· 349
소결론 ····· 354
제 17 절 개발 기술의 수요예측 및 시장성 평가 ····· 355
1. 국내 터널시장 수요예측 ····· 355
2. 국외 터널시장 수요예측 ····· 358
3. 개발기술의 성과 확보 및 가치 평가 ····· 366
소결론 ····· 371

제 3 장 최종 연구성과 및 적용실적 ····· 372
제 1 절 핵심요소기술 ····· 372
제 2 절 주요 연구성과 ····· 377
1. 학술적 성과 ····· 377
2. 기술적 성과 ····· 379
제 3 절 기술개발 성과의 국내외 시장 전망 ····· 381
1. 국내 시장 전망 ····· 381
2. 국외 시장 전망 ····· 382

제 4 장 연구 목표 달성 및 효과 ····· 384

참고문헌 ····· 387

부 록

1. 쉴드터널 강연선 체결기술 설계·시공·유지관리 매뉴얼(안)
2. 강연선 체결 쉴드터널 표준단면
3. 국외출장복명서
4. 해외 수집 과학기술정보

그 림 차 례

그림 1.1.1 기존 쉴드터널의 누수발생 ····· 3
그림 1.1.2 쉴드터널 발생 누수량 분포 ····· 3
그림 1.1.3 건설환경 및 터널시공 패러다임 변화 ····· 4
그림 1.2.1 최종목표 달성을 위한 로드맵 ····· 6
그림 1.2.2 국내 TBM 시공현황 ····· 13
그림 1.2.3 연도별 TBM 적용현황a ····· 14
그림 1.2.4 연도별 TBM 적용현황b ····· 14
그림 1.2.5 군장터널 위치도 ····· 16
그림 1.2.6 전세계 TBM 제작시장 규모(추정) ····· 18
그림 1.2.7 일본의 쉴드터널 시공직경 변화 추이 ····· 19
그림 1.2.8 일본의 쉴드터널 시공연장 변화 추이 ····· 19
그림 1.2.9 일본의 쉴드장비 생산업체 제작실적 ····· 20
그림 1.2.10 난징~양쯔강 터널단면도 ····· 21
그림 1.2.11 Alaskan way viaduct and seawall Replacement 복층터널 ····· 21
그림 1.2.12 말레이시아 SMART터널 개요도 ····· 22
그림 2.1.1 세그먼트 조립부 명칭 ····· 24
그림 2.1.2 경사볼트 방식 ····· 25
그림 2.1.3 곡볼트 방식 ····· 25
그림 2.1.4 볼트박스 방식 ····· 26
그림 2.1.5 조립핀 방식 ····· 26
그림 2.1.6 X형 앵커 ····· 28
그림 2.1.7 체결된 P&PC 세그먼트 라이닝 ····· 28
그림 2.1.8 P&PC 공법 개략도 ····· 29
그림 2.1.9 세그먼트 연결 배치도 ····· 29
그림 2.1.10 P&PC 공법의 시공순서 ····· 30
그림 2.1.11 벌집 세그먼트 터널 ····· 32
그림 2.1.12 벌집 세그먼트 체결 순서 ····· 32
그림 2.1.13 벌집 세그먼트 체결 모식도 ····· 33
그림 2.1.14 곡터 조인트(세그먼트 조인트) 방식 ····· 34
그림 2.1.15 퀵 조인트(링 조인트) 방식 ····· 34
그림 2.1.16 CR 방식과 CS 방식의 조립 순서 ····· 34
그림 2.1.17 현장 시공 사진 ····· 35
그림 2.1.18 체결 부재의 성능 실험 ····· 35
그림 2.1.19 수팽창성 실란트지수재의 팽창률 곡선 ····· 40

그림 2.1.20 Gap(δ)과 Offset(△) 개념도 ····· 44
그림 2.1.21 Gap-Offset 관계 그래프 ····· 44
그림 2.1.22 FAKT 세그먼트의 링조립 조감도 ····· 44
그림 2.1.23 FAKT 세그먼트 개략도 ····· 45
그림 2.1.24 FAKT 세그먼트 체결 모습 ····· 45
그림 2.1.25 세그먼트 조인트 전개도 ····· 46
그림 2.1.26 너클 조인트 결합부 ····· 46
그림 2.1.27 중앙부 자조인트와 단편부의 웅조인트 체결 이미지 ····· 47
그림 2.1.28 중앙부 웅조인트와 단편부의 웅조인트 체결 이미지 ····· 47
그림 2.1.29 환상 스프링의 개략도 ····· 48
그림 2.1.30 중앙부 웅조인트와 단편부의 웅조인트 체결 이미지 ····· 48
그림 2.1.31 원주방향 체결 개요도 ····· 49
그림 2.1.32 볼트체결력 개요 ····· 50
그림 2.1.33 감합시험 모습 ····· 50
그림 2.1.34 원주방향 체결부의 감합시험 결과 ····· 51
그림 2.1.35 원주방향 체결부의 인장시험결과 ····· 51
그림 2.1.36 원주방향 체결부의 휨시험 결과 ····· 52
그림 2.1.37 링간 체결부의 인장시험 개요도 ····· 52
그림 2.1.38 링간 체결부의 전단시험 결과 ····· 52
그림 2.1.39. 주입식 지수재의 쉴드 세그먼트 접속부 모식도 ····· 54
그림 2.1.40 주입식 지수재와 경질고무 샐재를 병용한 지수실험 ····· 54
그림 2.1.41 지수실험장치와 지수갱 ····· 55
그림 2.1.42 링 형성을 위한 세그먼트간의 구성 상태 ····· 64
그림 2.1.43 Key 세그먼트의 삽입방식 ····· 65
그림 2.1.44 강연선 체결 세그먼트 형상 ····· 66
그림 2.1.45 강연선 체결 세그먼트의 구성 ····· 67
그림 2.2.1 세그먼트 연결부 상세도면(서울지하철 7호선 연장 703 공구) ····· 73
그림 2.2.2 곡볼트 체결방식의 시공오차 발생 가능성 ····· 73
그림 2.2.3 세그먼트 연결부 상세도면(분당선 왕십리~선릉간) ····· 74
그림 2.2.4 경사볼트 체결방식의 시공오차 발생 가능성 ····· 74
그림 2.2.5 볼트박스 상세도면 ····· 75
그림 2.2.6 볼트박스 시공오차 발생가능 단면 ····· 75
그림 2.2.7 나사 풀림 메커니즘 ····· 77
그림 2.2.8 쉴드머신 굴진에 따른 볼트 풀림현상 ····· 78
그림 2.2.9 체결부 위치로 인한 세그먼트 이격 발생 ····· 79
그림 2.3.1 쉴드터널 누수 발생 요인 ····· 91

그림 2.3.2 씰재의 소성변형 ····· 92
그림 2.3.3 씰재 형상(예) ····· 92
그림 2.3.4 씰재에 의한 지수조건 ····· 93
그림 2.3.5 쉴드터널 발생 누수량 분포 ····· 96
그림 2.3.6 세그먼트 볼트 부분 누수 ····· 97
그림 2.3.7 세그먼트간 단차를 통한 지하수 유입 ····· 97
그림 2.3.8 세그먼트 지수재 탈락 ····· 98
그림 2.3.9 그라우팅 주입구를 통한 누수 ····· 98
그림 2.3.10 쉴드터널 체결부 누수 사례 ····· 99
그림 2.3.11 시공 중인 쉴드터널의 월강수량 대비 월평균 지하수 유입량 ····· 101
그림 2.4.1 세그먼트 체결 시험 모식도 ····· 104
그림 2.4.2 경사 볼트 연결부 상세 도면 ····· 105
그림 2.4.3 세그먼트 설계 단면(분당선 3공구) ····· 108
그림 2.4.4 실험에 사용된 세그먼트 설계단면(분당선 3공구, A 타입) ····· 108
그림 2.4.5 A 타입 세그먼트 제작 몰드(분단선 3공구) ····· 109
그림 2.4.6 실험체 설계도면 ····· 109
그림 2.4.7 철근 게이지 부착 작업 ····· 110
그림 2.4.8 철근 게이지 설치 위치(첫번째 세그먼트 : 32EA) ····· 110
그림 2.4.9 철근 게이지 설치 위치(두번째 세그먼트 : 22EA) ····· 111
그림 2.4.10 철근 게이지 설치 위치(세번째 세그먼트 : 12EA) ····· 111
그림 2.4.11 철근 게이지 설치 위치(네번째 세그먼트 : 24EA) ····· 111
그림 2.4.12 실험용 세그먼트 제작 과정 ····· 112
그림 2.4.13 수팽창 지수재의 시험체 부착 ····· 113
그림 2.4.14 1차 실대형 실험 준비 상황 ····· 113
그림 2.4.15 세그먼트 체결 실험 모습 ····· 114
그림 2.4.16 체결 단계에 따른 세그먼트 접합부 이격 변화 ····· 115
그림 2.4.17 강연선 체결로 인한 볼트 풀림현상 ····· 115
그림 2.4.18 볼트 체결시 철근 게이지의 변형률 ····· 117
그림 2.4.19 강연선 체결시 철근 게이지의 변형률 ····· 119
그림 2.4.20 체결방식에 따른 세그먼트 위치별 변형율 ····· 120
그림 2.4.21 실험체 제작을 위한 몰드 및 도면(2차 실험) ····· 122
그림 2.4.22 계측장비 설치 도면(2차 실험) ····· 123
그림 2.4.23 계측 장비 설치 사진(2차 실험) ····· 123
그림 2.4.24 완성된 세그먼트 실험체(2차 실험) ····· 124
그림 2.4.25 세그먼트 체결 실험 모습(2차 실험) ····· 125
그림 2.4.26 계측기 종류별 시간-변위 곡선(2차 실험) ····· 126

그림 2.4.27 실험 단계별 90cm 철근 응력계 변화(2차 실험) ····· 127
그림 2.4.28 실험 단계별 30cm 철근 응력계 변화(2차 실험) ····· 129
그림 2.4.29 실험 단계별 콘크리트 응력계의 변화(2차 실험) ····· 130
그림 2.5.1 정착장치의 활동이 긴장력에 미치는 영향 ····· 133
그림 2.5.2 곡률마찰에 의한 손실 ····· 134
그림 2.5.3 마찰손실의 근사계산 ····· 134
그림 2.5.4 탄성단축으로 인한 프리스트레스의 감소(프리텐션 부재) ····· 136
그림 2.5.5 긴장력 유지를 위한 강연선 정착부 개선 ····· 141
그림 2.5.6 일반적으로 적용되는 강연선 정착단의 쐐기 형상 ····· 141
그림 2.5.7 지속 하중 하에서 콘크리트의 총변형률 ····· 144
그림 2.5.8 크리프 변형률에서 콘크리트 재령의 영향 ····· 145
그림 2.5.9 크리프 변형률에 대한 중첩의 원리 ····· 147
그림 2.5.10 크리프 및 건조수축에 의한 손실 계산 프로세스 ····· 150
그림 2.5.11 중앙부의 장기거동 변형률 ····· 154
그림 2.6.1 강연선 부식 방지를 위한 에폭시 도막 강연선 ····· 157
그림 2.6.2 강연선 부식정도 및 강도발현에 대한 연구 ····· 158
그림 2.6.3 포스트텐션(post-tension) 시스템에서의 쉬스관 ····· 159
그림 2.6.4 실구조물에 설치된 쉬즈관 모습 ····· 159
그림 2.6.5 주름진 쉬스관 형상 ····· 161
그림 2.6.6 강연선 일체화 거동 평가를 위한 몰드 제작 계획 ····· 163
그림 2.6.7 강관내 그라우트재 주입 및 늘임량 측정 계획 ····· 163
그림 2.6.8 강연선 일체화 거동 실험 수행 모습 ····· 164
그림 2.7.1 세그먼트 라이닝 구조모델 ····· 169
그림 2.7.2 2링 빔-스프링 모델 ····· 169
그림 2.7.3 해석모델에 따른 단면력 분포(철도시설공단, 2003) ····· 170
그림 2.7.4 회전스프링 산정조건 ····· 170
그림 2.7.5 Terzaghi 이완하중 ····· 172
그림 2.7.6 뒤채움 주입압 (ITA WG 2, 2000) ····· 173
그림 2.7.7 적재 중인 세그먼트 ····· 173
그림 2.7.8 쉴드 세그먼트 주요 설계 검토 항목 ····· 179
그림 2.7.9 쉴드터널 사례 : 세그먼트 직경과 두께 ····· 180
그림 2.7.10 세그먼트 조인트 단면도 ····· 182
그림 2.7.11 링 조인트 단면 및 잭 추력에 의한 파손 ····· 183
그림 2.7.12 2링 Beam-Spring Model ····· 183
그림 3.7.13 세그먼트 강성 산정 ····· 184
그림 2.7.14 세그먼트 지수재 ····· 184

그림 2.8.1 검토 단면 및 모델링 형상(2D 해석) ····· 188
그림 2.8.2 2D 해석 모델링 ····· 192
그림 2.8.3 2D 해석 결과 ····· 192
그림 2.8.4 해석 단면 및 모델링 ····· 196
그림 2.8.5 해석 모델링 ····· 196
그림 2.8.6 수평변위(최종단계) ····· 197
그림 2.8.7 연직변위(최종단계) ····· 197
그림 2.8.8 해석결과 측정 위치 ····· 198
그림 2.8.9 시공단계별 연직변위 해석결과 ····· 198
그림 2.8.10 시공단계별 수평변위 해석결과 ····· 199
그림 2.8.11 내진설계 프로세스 ····· 200
그림 2.8.12 Hachinohe 지진파의 가속도-시간 이력 ····· 203
그림 2.8.13 Ofunato 지진파의 가속도-시간 이력 ····· 203
그림 2.8.14 내진해석 경계조건 개요도 ····· 203
그림 2.8.15 표준응답스펙트럼 ····· 204
그림 2.8.16. 세그먼트 천단부 변위이력곡선 ····· 204
그림 2.8.17 세그먼트 내공 변위이력곡선 ····· 205
그림 2.9.1 전단키를 이용한 세그먼트 전단강성 증대 ····· 207
그림 2.9.2 세그먼트 설계 도면 ····· 208
그림 2.9.3 세그먼트 부재 구성 ····· 210
그림 2.9.4 전단키 형상 검토 ····· 214
그림 2.9.5 아일랜드형 전단키 전단성능 검토 ····· 215
그림 2.9.6 볼트 체결방식 전단성능 검토 ····· 216
그림 2.9.7 아일랜드형 전단키 세그먼트 3차원 모델링 ····· 218
그림 2.9.8 아일랜드형 전단키 세그먼트 경계조건 ····· 218
그림 2.9.9 아일랜드형 전단키 세그먼트 하중재하도 ····· 219
그림 2.9.10 아일랜드형 전단키 세그먼트 압축력 도입 ····· 219
그림 2.9.11 경사볼트 전단성능 검토 모델링 ····· 219
그림 2.9.12 볼트박스 전단성능 검토 모델링 ····· 220
그림 2.9.13 아일랜드형 전단키 세그먼트 갱구측 검토 결과(하중 120kN 재하시) ····· 221
그림 2.9.14 아일랜드형 전단키 세그먼트 막장측 검토 결과(하중 200kN 재하시) ····· 222
그림 2.9.15 아일랜드형 전단키 세그먼트의 하중-철근량 관계 ····· 223
그림 2.9.16 경사볼트 세그먼트 전단응력 검토 결과(하중 50kN 재하시) ····· 223
그림 2.9.17 경사볼트 세그먼트의 하중-전단응력 관계 ····· 224
그림 2.9.18 볼트박스 세그먼트 전단응력 검토 결과(하중 35kN 재하시) ····· 224
그림 2.9.19 볼트박스 세그먼트의 하중-전단응력 관계 ····· 224

그림 2.9.20 아일랜드형 전단키 세그먼트 표준단면(전력구 터널) ····· 227
그림 2.9.21 아일랜드형 전단키 세그먼트의 시공 배치(안) ····· 229
그림 2.10.1 쉴드터널의 방수 개요 ····· 234
그림 2.10.2 내수압 시험 장치의 개요도 ····· 235
그림 2.10.3 수팽창 지수재의 비팽창 내수압 시험 예 ····· 236
그림 2.10.4 고무 개스킷의 비팽창 내수압 시험 예 ····· 236
그림 2.10.5 수팽창 지수재 팽창성능 모형실험 장치 ····· 237
그림 2.10.6 전력구 터널 세그먼트 단면 ····· 238
그림 2.10.7 체결부 구조 형상화(A-A' 단면) ····· 239
그림 2.10.8 체결방식에 따른 누수량 측정 실험장치 ····· 240
그림 2.10.9 체결방식에 따른 체결부 단면체 ····· 240
그림 2.10.10 체결방식에 따른 누수량 측정실험 과정 ····· 242
그림 2.10.11 체결방식별 쉴드터널 1링 단면도 ····· 244
그림 2.11.1 EPDM 개스킷 표준형상 ····· 248
그림 2.11.2 개스킷 압출기계 ····· 248
그림 2.11.3 지수재 거동 평가 실험장치 도안 ····· 249
그림 2.11.4 지수재 거동 평가를 위한 실험장치 ····· 250
그림 2.11.5 강연선 체결 전력구 쉴드터널 표준단면 ····· 251
그림 2.11.6 A-Type 세그먼트 단면도(아일랜드형 전단키 세그먼트) ····· 251
그림 2.11.7 지수재 거동 평가를 위한 실험 순서 ····· 253
그림 2.11.8 실험용 지수재 ····· 254
그림 2.11.9 강연선 체결력 재하시 수팽창 지수재 변형율 ····· 257
그림 2.11.10 볼트 체결력 재하시 수팽창 지수재 변형율 ····· 257
그림 2.11.11 강연선 체결력 재하시 개스킷 변형율 ····· 260
그림 2.11.12 볼트 체결력 재하시 개스킷 변형율 ····· 260
그림 2.12.1 강연선 체결방식의 체결성능 평가 지표 ····· 263
그림 2.12.2 인장저항 성능 검토를 위한 하중 재하도 ····· 266
그림 2.12.3 강연선 체결방식에서 인장력 작용시 하중 - 변위 관계 ····· 267
그림 2.12.4 경사볼트 체결방식에서 인장력 작용시 콘크리트 응력분포 ····· 267
그림 2.12.5 인장력 작용시 경사볼트의 인장응력 ····· 268
그림 2.12.6 볼트박스 체결방식에서 인장력 작용시 콘크리트 응력분포 ····· 269
그림 2.12.7 인장력 작용시 볼트박스의 인장응력 ····· 269
그림 2.12.8 가열. 냉각에 따른 인장강도와 체결력 변화 ····· 273
그림 2.12.9 가열중 강연선 긴장력의 변화 ····· 274
그림 2.12.10 온도상승에 따른 강도저하 곡선 ····· 274
그림 2.13.1 시험시공용 쉴드터널 설계 ····· 277

그림 2.13.2 강연선을 이용한 세그먼트 체결 순서 ····· 279
그림 2.13.3 시험시공 준비를 위한 반력링 설치 ····· 280
그림 2.13.4 지게차와 크래인을 이용한 시험시공 계획 ····· 281
그림 2.13.5 아일랜드형 전단키 세그먼트 몰드 제작 ····· 282
그림 2.13.6 아일랜드형 전단키 세그먼트 제작 ····· 282
그림 2.13.7 현장 조립 시험시공 ····· 285
그림 2.13.8 개발 기술의 공개시연회 개최 ····· 286
그림 2.14.1 강연선 자동공급장치 제작 개념(전력구 터널 대상) ····· 289
그림 2.14.2 이동용 테이블 리프트 ····· 290
그림 2.14.3 상부 강연선 삽입장치 ····· 290
그림 2.14.4 하부 유압모터 ····· 290
그림 2.14.5 강연선 자동공급장치 ····· 291
그림 2.14.6 강연선 삽입기 연결관 ····· 292
그림 2.14.7 가이드 강관 ····· 292
그림 2.14.8 가이드 강관 연결 ····· 292
그림 2.14.9 강연선 자동공급장치 ····· 292
그림 2.14.10 강연선 자동공급장치 사용순서 ····· 293
그림 2.14.11 아일랜드형 저단키 세그먼트의 블록아웃 ····· 294
그림 2.14.12 강연선 공급 시험을 위한 블록아웃 모형 제작 ····· 295
그림 2.14.13 강연선 반발력으로 인한 휨 현상 ····· 295
그림 2.14.14 강연선 자동공급장치 가이드 강관 기능 실험 ····· 296
그림 2.15.1 모노잭(Mono-Jack) 종류 및 규격 ····· 299
그림 2.15.2 세그먼트 이음부에 정착구 설치 개요도 ····· 300
그림 2.15.3 고정 정착구의 블록아웃 및 최소단면 두께 ····· 301
그림 2.15.4 인장 정착구의 블록아웃 및 작업공간 확보 ····· 302
그림 2.15.5 세그먼트 중앙부에 정착구 설치 개요도 ····· 303
그림 2.15.6 정착구의 블록아웃 및 세그먼트 최소단면 두께 ····· 304
그림 2.15.7 긴장기 헤드 부분의 곡선형 노즈 연결 ····· 304
그림 2.15.8 세그먼트 중앙부에 경사 정착구 설치 개요도 ····· 305
그림 2.15.9 PS 강연선의 최소곡률반경 및 최소직선길이 ····· 306
그림 2.15.10 경사 정착구 설치 ····· 306
그림 2.15.11 세크먼트 중앙부에 정착구 설치 개요도 ····· 308
그림 2.15.12 고정 정착구의 블록아웃 및 최소단면 두께 ····· 308
그림 2.15.13 기존 쉴드터널 세그먼트의 조립 과정 ····· 311
그림 2.15.14 아일랜드형 전단키의 가이드 기능 ····· 312
그림 2.15.15 BIM을 완성시키는 여러 가지 Tool ····· 313

그림 2.15.16 쉴드TBM 3D 모델링 ····· 314
그림 2.15.17 강연선 공급 및 긴장 자동화 시스템 개발 1단계 ····· 315
그림 2.15.18 강연선 공급 및 긴장 자동화 시스템 개발 2단계 ····· 316
그림 2.15.19 강연선 공급 및 긴장 자동화 시스템 개발 3단계 ····· 317
그림 2.15.20 강연선 자동공급 원리 ····· 318
그림 2.15.21 강연선 자동화 시스템 3D 모델링(독립된 모습) ····· 320
그림 2.15.22 강연선 자동화 시스템 3D 모델링(쉴드TBM 연동) ····· 321
그림 2.16.1 쉴드공법 굴진 시공프로세스 ····· 323
그림 2.16.2 쉴드공법 굴진작업 ····· 324
그림 2.16.3 쉴드터널 단위공종별 시공프로세스 ····· 324
그림 2.16.4 볼트 체결방식 쉴드터널의 세그먼트 조립공정 소요공기 분석 ····· 325
그림 2.16.5 강연선 쉴드터널의 세그먼트 조립공정 소요공기 분석(인력 작업) ····· 326
그림 2.16.6 강연선 쉴드터널의 세그먼트 조립공정 소요공기 분석(자동화 시스템) ····· 326
그림 2.16.7 위험도 평가 시스템 흐름도 ····· 327
그림 2.16.8 사건 수(Event Tree) 구성 예시 ····· 330
그림 2.16.9 일반터널 시공단계 시나리오 구성 ····· 333
그림 2.16.10 일반터널 운영단계 시나리오 구성 ····· 334
그림 2.16.11 강연선 쉴드터널 시나리오(시공 및 운영단계) 구성 ····· 336
그림 2.16.12 VE 분석 절차 ····· 340
그림 2.16.13 준비단계 주요엄무 ····· 341
그림 2.16.14 분석단계 주요업무 ····· 341
그림 2.16.15 실행단계 주요업무 ····· 343
그림 2.16.16 성능점수 그래프 ····· 348
그림 2.17.1 8년간(2006년~2013년) 국내 도로터널의 발주개소 및 전체 연장 ····· 356
그림 2.17.2 2009년 기준 나라별 전체 터널 대비 쉴드터널 시공현황 ····· 358
그림 2.17.3 프랑스 파리의 도시고속도로 구조 ····· 359
그림 2.17.4 유로터널의 구조 ····· 360
그림 2.17.5 엘베터널 4th Tube 단면도 ····· 360
그림 2.17.6 이스탄블 해협 단선복층터널 단면 ····· 361
그림 2.17.7 일본의 쉴드터널 현황 ····· 361

표 차 례

표 1.3.1 해외 장대터널의 굴착공법 적용현황 ····· 17
표 1.3.2 해외 장대터널중 대구경 TBM의 적용사례 ····· 18
표 2.1.1 국내 쉴드터널 체결방식(조사현장 수 : 32개소) ····· 24
표 2.1.2 수팽창성 고무지수재의 물리적 성질 ····· 38
표 2.1.3 벤토나이트 수팽창지수재의 물리적 성질 ····· 39
표 2.1.4 벤토나이트 수팽창지수재의 규격 ····· 39
표 2.1.5 수팽창 지수재의 표준형상 및 규격(신공항 철도터널공사) ····· 41
표 2.1.6 수팽창성 지수재의 시험방법 및 시험값(신공항 철도터널공사)10) ····· 41
표 2.1.7 수팽창성 지수재의 시험값(철도공사, 2001)10) ····· 41
표 2.1.8 수팽창 지수재의 시험 항목과 기준 ····· 42
표 2.1.9 개스킷 지수재의 시험방법 및 기준값 ····· 42
표 2.1.10 지수재의 형상과 물성 ····· 54
표 2.1.11 프리스트레스 손실 ····· 59
표 2.1.12 기존 주요 체결방식과 강연선식 체결시스템 비교9) ····· 68
표 2.2.1 볼트 체결방식의 유격 차이 ····· 76
표 2.2.2 쉴드머신 굴진에 따른 볼트 회전 각 ····· 78
표 2.3.1 서울 지하철 1~4호선 지하수 유출 현황 ····· 81
표 2.3.2 부산 지하철 1~4호선 지하수 유출 현황 ····· 84
표 2.3.3 대구 지하철 1, 2호선 지하수 유출 현황 ····· 86
표 2.3.4 인천 지하철 1호선 지하수 유출 현황 ····· 88
표 2.3.5 광주 지하철 지하수 유출 현황 ····· 88
표 2.3.6 노르웨이 해저 및 장대 도로터널 ····· 89
표 2.3.7 씰재에 의한 방수 ····· 94
표 2.3.8 기타 방수공 ····· 95
표 2.3.9 시공 중인 쉴드터널 수직구 유량 일지 ····· 100
표 2.3.10 운용 중인 쉴드터널 지하수 유입량 ····· 101
표 2.4.1 볼트 체결시 세그먼트 상면의 변형률 ····· 116
표 2.4.2 볼트 체결시 세그먼트 하면의 변형률 ····· 116
표 2.4.3 강연선 체결시 세그먼트 상면의 변형률 ····· 118
표 2.4.4 강연선 체결시 세그먼트 하면의 변형률 ····· 118
표 2.4.5 계측기 종류별 발생 응력 결과(2차 실험) ····· 127
표 2.5.1 k 및 μ 의 값(콘크리트 설계기준) ····· 135
표 2.5.2 k 및 μ 의 값(도로교 및 철도교 설계기준) ····· 135

표 2.5.3 재료 구성에 따른 장기거동 비교 ····· 148
표 2.5.4 강합성 구조(콘크리트+강재, 콘크리트+강연선)의 손실 메커니즘 ····· 152
표 2.5.5 강합성구조(콘크리트+강재+강연선)의 손실 메커니즘 ····· 153
표 2.6.1 부식 차이가 나는 강연선의 인장실험 결과 ····· 158
표 2.6.2 쉬스 직경 및 연결 커플러 사이즈 ····· 161
표 2.6.3 강연선 긴장력 해제시 늘임량 변화 ····· 166
표 2.7.1 병설터널 간격과 연직지반하중의 할증계수 ····· 174
표 2.7.2 해외 세그먼트 분할 ····· 181
표 2.7.3 국내 세그먼트 제작업체의 표준 분할 예 ····· 181
표 2.7.4 세그먼트 구조해석시 필요 요소 ····· 186
표 2.8.1 시공순서에 따른 단계별 해석과정 ····· 196
표 2.8.2 국내 주요 지진 발생 내용(1995년 이후) ····· 199
표 2.8.3 내진등급 ····· 201
표 2.8.4 내진 성능 목표 ····· 201
표 2.8.5 지진구역계수 ····· 201
표 2.8.6 위험도 계수 ····· 202
표 2.8.7 지진파 종류에 따른 터널 변위 ····· 205
표 2.8.8 세그먼트 부재력 검토 결과 ····· 205
표 2.9.1 블록아웃 검토 형상 ····· 212
표 2.9.2 전단성능 검토 결과 ····· 216
표 2.9.3 아일랜드형 전단키 세그먼트 전단성능 해석 결과 ····· 222
표 2.9.4 3차원 수치해석 검토 결과 ····· 225
표 2.9.5 프리캐스트 콘크리트의 최소 피복 두께 규정 ····· 226
표 2.9.6 특수 환경에 노출되는 콘크리트의 피복 두께 ····· 227
표 2.10.1 수압 변화에 따른 체결방식별 누수량 측정결과(단위 : ㎖) ····· 243
표 2.10.2 체결부 수량에 따른 누수량 비교 ····· 243
표 2.11.1 수팽창 지수재 KS실험항목 및 기준치 ····· 247
표 2.11.2 수팽창 지수재 시편 물성표(LH공사) ····· 247
표 2.11.3 EPDM 개스킷의 물리적 특성 ····· 248
표 2.11.4 지수재 거동 실험에 적용한 볼트 및 강연선 체결력 ····· 252
표 2.11.5 강연선 체결력 재하시 수팽창 지수재 길이 변화 ····· 254
표 2.11.6 볼트 체결력 재하시 수팽창 지수재 길이 변화 ····· 255
표 2.11.7 강연선 체결력 재하시 수팽창 지수재 변형 ····· 255
표 2.11.8 볼트 체결력 재하시 수팽창 지수재 변형 ····· 256
표 2.11.9 강연선 체결력 재하시 개스킷 길이 변화 ····· 258
표 2.11.10 볼트 체결력 재하시 개스킷 길이 변화 ····· 258

표 2.11.11 강연선 체결력 재하시 개스킷 변형 ····· 259
표 2.11.12 볼트 체결력 재하시 개스킷 변형 ····· 259
표 2.12.1 실대형 체결 실험의 세그먼트 변형률 결과 ····· 264
표 2.12.2 강연선 체결방식의 인장력 증대 효과 ····· 270
표 2.12.3 강연선 체결방식의 전단력 증대 효과 ····· 271
표 2.12.4 강연선 체결방식의 체결력 증대효과 ····· 271
표 2.12.5 볼트 시험편의 기계적 성질 ····· 272
표 2.12.6 볼트 완성품의 기계적 성질 ····· 272
표 2.12.7 7연선 강연선의 기계적 성질 ····· 273
표 2.14.1 가이드 강관 상세 ····· 289
표 2.15.1 정착구 설치위치에 따른 특징 비교 ····· 309
표 2.15.2 강연선 자동화 시스템 2단계 문제점 ····· 315
표 2.15.3 강연선 자동공급 장치 단계별 세부내용 ····· 319
표 2.16.1 위험도 평가 단계별 평가절차 ····· 328
표 2.16.2 E.T.A(Event Tree Analysis) 분석 단계 ····· 329
표 2.16.3 트리 모델(Tree model) 예시 ····· 330
표 2.16.4 위험요소 분류 ····· 331
표 2.16.5 일반터널의 단계별 시나리오 유형 ····· 332
표 2.16.6 일반터널의 시공 단계 및 운영단계에서의 촉발사건 ····· 332
표 2.16.7 강연선 쉴드터널 위험도 평가 시나리오 ····· 335
표 2.16.8 강연선 쉴드터널 위험도 평가 촉발사건(T) ····· 335
표 2.16.9 강연선 쉴드터널 위험도 평가 발생가능사건(E) ····· 335
표 2.16.10 위험도 평가 분석 세부내용 ····· 336
표 2.16.11 강연선 쉴드터널 위험도 평가 분석결과 ····· 337
표 2.16.12 VE 핵심요소 ····· 338
표 2.16.13 분석단계 항목별 체크리스트 항목 ····· 342
표 2.16.14 가중치 설문결과(평가의원 1~5) ····· 344
표 2.16.15 가중치 설문결과(평가의원 6~10) ····· 345
표 2.16.16 쌍대비교 매트릭스 ····· 346
표 2.16.17 가중치 산정결과 ····· 346
표 2.16.18 성능평가 설문조사 ····· 347
표 2.16.19 성능평가 결과 ····· 347
표 2.16.20 기초단가 적용기준 ····· 349
표 2.16.21 개당 곡볼트 공사비 ····· 349
표 2.16.22 볼트 체결 1링당 공사비 ····· 350
표 2.16.23 m당 강연선 재료비 ····· 350

표 2.16.24 강연선 쉴드터널 1링당 공사비 ····· 351
표 2.16.25 재료비 분석 결과 ····· 351
표 2.16.26 쉴드터널 연장별 공사비 비율 ····· 352
표 2.16.27 전체공사비 및 공기분석결과 ····· 353
표 2.17.1 국내터널의 8년간 발주현황(2006년-2013년) ····· 355
표 2.17.2 서울 및 수도권의 2000년 이후 쉴드터널 시공현황 ····· 357
표 2.17.3 전세계 교통터널의 계획수요(2004년～2014년) ····· 358
표 2.17.4 중국 4종 4횡 계획 ····· 362
표 2.17.5 인도정부의 인프라부문 투입 예산액 및 비중 ····· 364
표 2.17.6 인도의 도로망 ····· 364
표 2.17.7 현재 진행 중인 철도 인프라 프로젝트4) ····· 364
표 2.17.8 국내 쉴드터널 연구논문 현황 ····· 367
표 2.17.9 국내외 쉴드터널 관련 특허 ····· 368
표 4.1.1 연구개발 최종목표 달성도 ····· 384

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.

쉴드터널 라이닝(lining)은 여러 개의 세그먼트(segment)로 구성되고, 각 세그먼트는 일체화된 구조물이 아니기 때문에 각종 이음방식으로 하나의 일체화된 링을 형성하게 된다. 따라서, 세그먼트와 링 사이의 이음방식은 쉴드 세그먼트에서 상당히 중요한 요소 중의 하나이다[4]. 또한, 세그먼트의 볼트 체결 작업은 쉴드터널 시공 프로세스 중 적지 않은 시간을 차지하므로 새로운 체결 기술 개발을 통해 세그먼트 체결 속도를 증진시킬 수 있다면 시공성의 증가를 가져올 수 있다[5].

국외의 경우 쉴드터널 세그먼트의 연결 방법에 대한 지속적인 연구가 진행되어 다양한 체결방식이 적용되고 있으나, 국내의 경우에는 종류의 차이는 있으나 거의 대부분이 볼트 체결방식을 적용하고 있다. 볼트 체결방식은 구조가 간단하고 국외에서 새로 개발되는 체결방식들에 비해 경제적으로 저렴한 장점이 있지만, 볼트 직경과 통과구간 직경과의 유격 차이로 인해 세그먼트 조립 시 시공오차를 유발할 가능성이 있다. 또한, 시공 과정에서의 쉴드머신의 추진력, 암반 굴착 시 발생되는 진동 등으로 인해 후방에서 이미 조립된 볼트가 풀리는 현상[6]이 실제 시공현장에서 발생되고 있다. 특히, 볼트가 체결되는 위치는 세그먼트 단면에서 터널 내측에 치우쳐 있기 때문에 중심축을 기준으로 한쪽으로 치우친 체결력을 받게 되어 터널 외측에서는 세그먼트간의 이격을 유발할 수 있는 문제점도 가지고 있다.

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 해결하고, 세그먼트 라이닝 체결력을 10% 이상 향상시킬 수 있는 세그먼트 터널 라이닝의 강연선 체결 기술의 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 실정이다.[7)]

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.[8)]

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.

쉴드터널의 경우 설계개념상 비배수 터널로 설계 및 시공되고 있으나, 비배수 설계임에도 불구하고 터널 내부로 누수되는 지하수를 완전히 방수하지 못하여 시공 및 운용단계에서 계속적인 누수가 발생되고 있는 상황이다. 쉴드터널은 배면 뒤채움 그라우트 주입, 세그먼트 연결부 방수, 뒷채움 주입공 방수, 볼트구멍 방수, 코킹 방수, 도막방수 등의 방수대책을 실시함에도 터널 내부로의 누수를 완전히 제어하지 못하고

있다. 특히, 쉴드터널에서 발생되는 누수량 전체의 60% 이상은 볼트 체결부에서 발생[9]되고 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, 체결된 볼트의 틈 등으로 인해 계속적인 누수발생은 불가피한 상황이다.[9]



그림 1.1.1 기존 쉴드터널의 누수발생

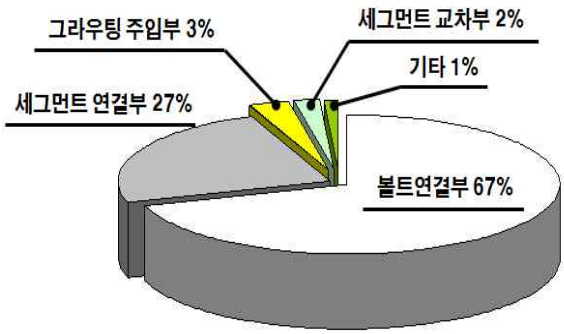


그림 1.1.2 쉴드터널 발생 누수량 분포

세그먼트 조립 시 강연선 체결방식을 사용할 경우 볼트방식에 비해 연결부 단면적이 대폭 감소하므로 누수의 발생이 거의 없을 것으로 예상되며, 강연선 체결부에 방수를 위한 별도의 방수 고무 패킹등의 사용을 통해 연결부를 통한 누수의 가능성을 배제시킬 수 있다.

과거 쉴드터널 공법은 기존의 다른 공법 대비 경제성 면에서 충분조건을 갖추지 못하여 국내에서는 하저터널 및 천층 연약지반에 전력구나 통신구 등의 한정된 대상으로 적용되었으나, 시공 장비의 개발과 기술의 축적으로 현재는 거의 모든 지질에 대해 시공이 이루어지고 있다. 특히, 최근에는 종래의 재래식 터널 공법 적용 시 야기되는 각종 소음 및 진동 등의 건설공해를 줄여 민원을 최소화시킴과 더불어 건설 환경 및 터널시공 패러다임의 변화, 안정성 우수, 공기단축 등의 장점으로 인해 수요가 증가하고 있으며 향후 도심지 터널 시공시 폭넓게 활용될 것으로 예상된다.[1)]

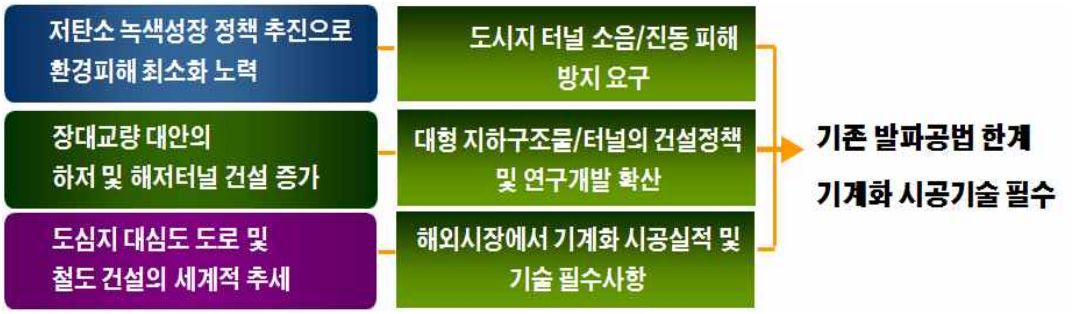


그림 1.1.3 건설환경 및 터널시공 패러다임 변화

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. 강연선 쉴드터널의 개발로 체결부재의 재료비를 50%이상 절감하며, 시공기간 단축으로 인해 전체공사비의 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 체결력을 10% 이상 향상시킬 수 있는 세그먼트 터널 라이닝의 강연선식 체결 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 세그먼트 터널 라이닝의 연결력을 최대한 유지하고 볼트체결부에서의 과다한 누수 발생을 원천적으로 봉쇄하기 위해 강연선 체결시스템을 제안하고자 한다. 본 연구개발을 위해 설정한 최종목표는 다음과 같다.

○ 강연선을 응용한 새로운 세그먼트 체결기술 개발을 통해 세그먼트 터널 라이닝 누수량의 60% 이상을 유발하는 기존 볼트체결방식을 대체하여 누수량 발생을 50% 이상 저감하고, 세그먼트 체결부 재료비의 50% 이상 절감 및 체결력 10% 이상 증대 가능한 세그먼트 터널 라이닝 체결 기술 개발

-기존 볼트 체결방식 대비 세그먼트 체결부에서의 누수량 50% 이상 저감

-기존 볼트 체결방식 대비 세그먼트 체결부 재료비 50% 이상 절감

-기존 볼트 체결방식 대비 세그먼트 체결력 10% 이상 증대

-기존 볼트 체결방식 대비 쉴드터널 전체공사비 2% 이상 절감

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 : 체결부에서의 누수량 50% 이상 저감, 세그먼트 체결부 재료비 단가 50% 절감, 세그먼트 체결력 10% 향상

- 시작품 및 제품 개발 : 강연선 체결 세그먼트 라이닝 터널 설계도면, 전단키 세그먼트 시제품, 설계 및 시공 매뉴얼(안)

- 공정개발 : 강연선 체결 세그먼트 터널 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) 세그먼트 터널의 체결방식 분석
- 기존 세그먼트 터널의 체결방식 조사
- 국내외 건설 분야의 긴장재 활용 현황 조사
- 기존 체결방식 및 강연선 체결방식의 비교 분석
- 강연선 체결방식의 세그먼트 터널 적용 가능성 평가

(2) 세그먼트 터널 누실실태 파악 및 방수대책 조사
- 국내·외 시공 및 운용중인 세그먼트 터널의 누수 실태 및 지하수 유입수량 분석사례 조사
- 기존 세그먼트 터널의 방수 대책 조사 및 효율성 평가

(3) 국내외 세그먼트 체결부 설계기준 조사 및 분석
- 세그먼트 구조해석방법 및 설계법 조사
- 세그먼트 터널 구조 성능의 영향 변수 도출

(4) 재료실험을 통한 세그먼트 체결용 강연선의 긴장력 향상 방안 제시
- 세그먼트 체결용 강연선 재료 조사
- 재료실험을 통한 강연선의 최대인장력 및 긴장력 손실 평가
- 강연선 체결의 상세 정착 및 접속방법 결정
- 강연선 정착단 구조의 성능 실험 평가
- 도출 방안의 강연선 긴장력 향상 검토

(5) 강연선 체결방식의 전단 및 회전저항력 확보 방안 도출

- 전단키 설치를 통한 세그먼트 안정성 검토
- 경험식을 통한 전단키 세그먼트의 전단 저항력 검토

(6) 강연선 체결방식 적용을 위한 세그먼트 구조형식(안) 도출

- 강연선 및 세그먼트 구조검토를 통한 세그먼트의 강연선 배치 및 정착 위치 결정
- 강연선 체결용 전단키 세그먼트 설계 및 제작도면 작성

(7) 기존 세그먼트 터널의 국내외 수요 현황 및 미래 시장 전망 조사 분석

- 국내 및 국외 적용사례 및 시공실적
- 국내 세그먼트 터널 추진사업 조사
- 국외 (중국,인도,중동 등) 추진사업 예비 조사

나. 2차년도 연구내용 및 범위

(1) 국외 세그먼트 체결방식 및 연구 동향 파악

- 국외 세그먼트 체결방식 조사
- 세그먼트 단면연결부의 지수재 설치방법 및 재료 조사
- 국외 쉴드터널 체결방식 관련 연구 동향 파악

(2) 쉴드터널 곡선부에서의 강연선 긴장력 손실 평가 및 긴장력 유지 방안 도출

- 터널 곡선부의 강연선 체결력 및 손실율 검토
- 터널 곡선부의 강연선 긴장력 유지 방안 도출
- 체결된 강연선의 장기거동 및 유지관리 조사분석

(3) 수치해석을 통한 강연선체결 쉴드터널의 구조 안정성 평가

- 지반 조건에 따른 강연선 체결 쉴드터널의 구조적 안정성 검토 (전단키 기능 검토)
- 연장방향 부등침하 및 세그먼트 이음부의 탈리현상 예측 및 분석

- 시간이력 해석을 통한 내진성능 평가

(4) 강연선 및 세그먼트의 일체화 거동 방안 도출
- 강연선용 쉬즈관 적용 방법 검토
- 강연선 시공시 손상 방지 및 녹 방지 대책 검토
- 모르타르 재료에 의한 세그먼트 및 강연선 일체화 방안 제시
- 풀아웃(pull-out) test를 통한 일체화된 강연선의 파괴 강도 평가

(5) 현장 조사·계측을 통한 볼트 체결방식의 문제점 파악 및 체결부에서의 누수량 측정
- 볼트 체결방식에서의 시공오차에 대한 이론적 검토
- 시공현장 계측을 통한 볼트 체결력 측정 및 볼트 풀림현상 파악
- 세그먼트 체결부에서의 누수량 측정
- 조사·계측·측정 결과를 통한 볼트체결방식의 문제점 검증

(6) 세그먼트 시공 정확도 향상 방안 제시
- 강연선 정착단 구조형상 개선 방안 검토
- 전단키 형태에 따른 가이드 기능 검토 및 전단력 발휘 능력 평가
- 반력벽을 통한 세그먼트 가이드 라인 설치방안 검토

(7) 강연선 체결 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

(8) 강연선 체결 쉴드터널의 시공성 평가
- 강연선 체결 쉴드터널의 단위공종별 소요공기 분석 및 시공 프로세스 정립
- 터널 전체에 대한 소요공기 분석, 전체 시공프로세스 분석 및 비교 평가
- 시공성 및 시공품질 확보방안 제시

다. 3차년도 연구내용 및 범위

(1) 강연선공급장치 제작 및 활용 시험 수행

- BIM 수행결과를 바탕으로 강연선공급장치 제작 계획 수립
- 강연선공급장치 시제품 제작
- 강연선공급장치를 활용한 긴장 시험 수행

(2) 체결방식에 따른 세그먼트 체결부의 내화성능 평가

- 볼트 및 강선 체결 방식의 내화 시험체 제작
- 체결부에서의 내화성능 비교 평가
- 화재로 인한 체결부에서의 긴장력 손실 예측

(3) 전단키 세그먼트에서의 수팽창 지수재의 거동 평가

- 지수재 및 개스킷의 성능 자료 조사 및 재료시험 수행
- 전단키에서의 지수재 부착, 접합, 변형 형상 검토
- 세그먼트 체결력 증가에 따른 전단키에서의 지수재 거동 평가

(4) 세그먼트 체결방식에 따른 방수 성능 비교 평가

- 쉴드터널 누수 실태 조사
- 수압시험을 통한 수팽창 지수재 성능 검토
- 세그먼트 체결방식별 시험체 제작
- 실험을 통한 체결부 누수량 측정
- 강연선 체결방식의 체결부 누수량 50% 저감 효과 검증

(5) 강연선 체결 쉴드터널의 시공 프로세스 정립을 위한 단계별 시험시공 수행

- 상세설계에 의한 강연선 체결 세그먼트 시제품 제작
- 시공 프로세스에 따른 단위 체결 세그먼트의 강연선 긴장 및 정착 과정 수행
- 시공 단계별 문제점 파악 및 개선안 제시

(6) 강연선 체결 방식의 체결력 증대 효과 검증

- 체결력 정의 규정 및 평가 지표 설정(파괴강도 증가율, 긴장력 증가율, 재료 강도 증진율 등)
- 기존 체결 방식 대비 체결력 10% 증대 효과 검증

(7) 강연선 체결 쉴드터널의 경제성 평가

- 기존 및 강연선체결방식에 대한 원가분석 및 비교평가(시공비 및 재료비)
- 세그먼트 체결부 재료비 50% 절감 효과 검증
- VE평가(비용평가) 및 LCC평가(유지관리비용 분석)를 통한 경제성 향상 방안 제시
- 터널 용도, 연장, 시공여건에 따른 경제성 검토 및 기존방식과의 경제적 임계점 분석
- 강연선 체결방식 개발에 따른 경제적 기대효과 간접계산

(8) 강연선 체결 쉴드터널의 설계 매뉴얼(안) 제안

- 쉴드터널에서 강선 체결 방식의 구조 안정성 검토
- 전단키 세그먼트 및 강선 배치에 대한 세부 설계 지침 제시
- 전단키 형상 최종결정 및 전단키 세그먼트 상세설계
- 강선 체결 쉴드터널 표준단면 설계

(9) 강연선 체결 쉴드터널의 시공 매뉴얼(안) 및 품질규정(안) 제안

- 시공 단계에 따른 시공지침서 작성
- 강연선 체결 쉴드터널 유지 관리 방안
- 유지관리 매뉴얼(안) 제안

(10) 강연선 체결 쉴드터널의 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

(11) 개발 기술의 성과 확보 및 가치 평가

- 개발 요소기술의 산업재산권 확보
- 사업화 추진방안, 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.

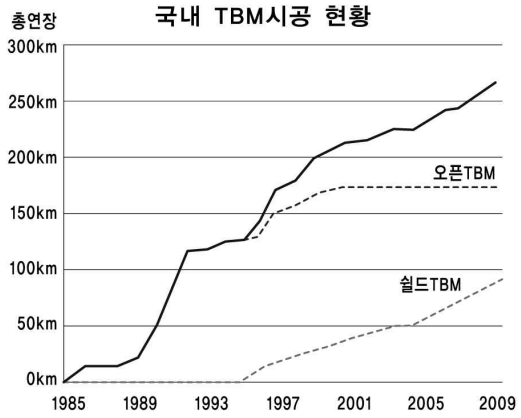


그림 1.2.2 국내 TBM 시공현황

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 쉴드TBM 현황분석결과 2000년 이전은 통신구에 적용사례가 많이 보이며 2000년 이후 전력구 현황과 대구경 TBM장비를 적용하여 시공되는 지하철의 시공사례가 많아지는 것으로 분석되었다.

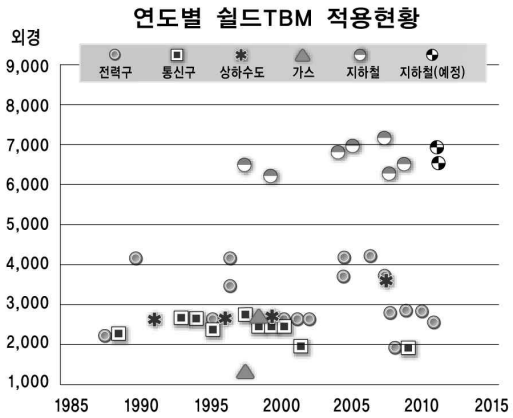
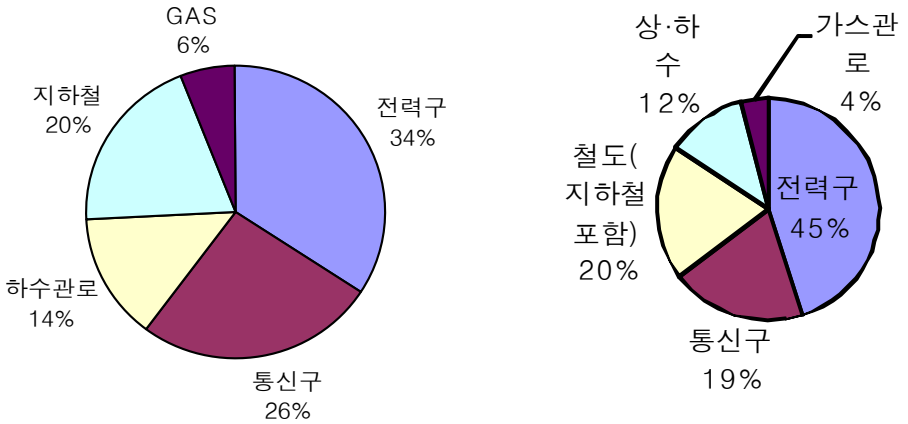


그림 1.2.3 연도별 TBM 적용현황a



(a) 2000년 이전 (b) 2010년

그림 1.2.4 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-SMARTWAY(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 1.2.5 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.

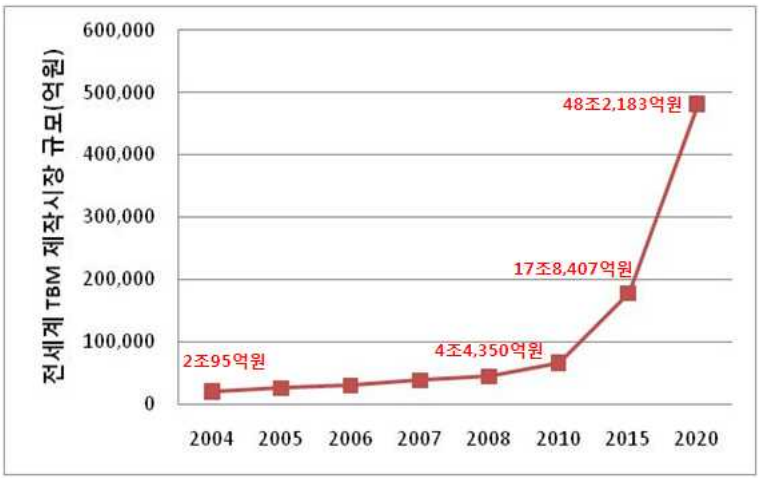


그림 1.2.6 전세계 TBM 제작시장 규모(추정)

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 1.2.7과 그림 1.2.8은 일본의 쉴드터널 시공직경과 시공연장의 변화를 나타낸 것이다.

그림 1.2.9는 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.

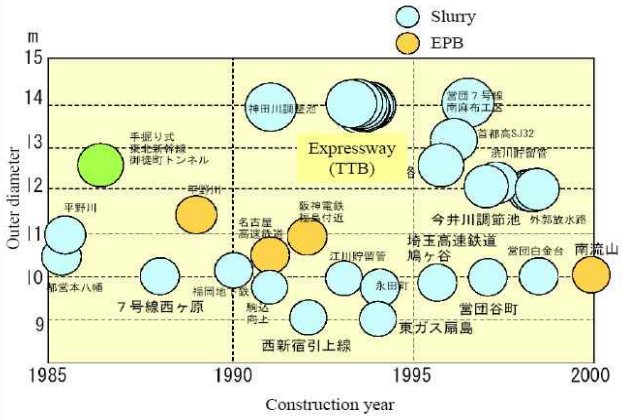


그림 1.2.7 일본의 쉴드터널 시공직경 변화 추이

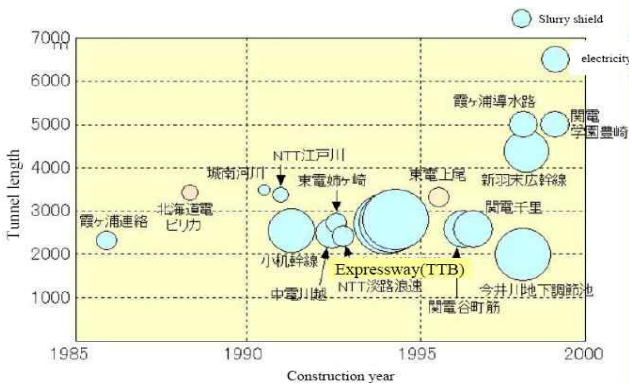


그림 1.2.8 일본의 쉴드터널 시공연장 변화 추이

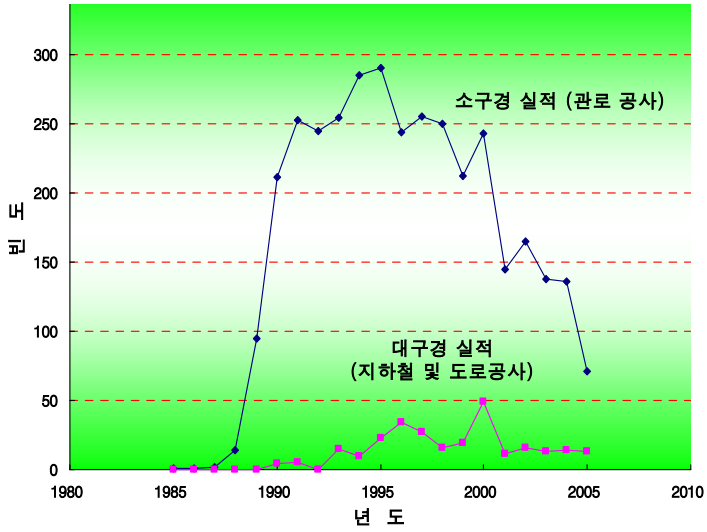


그림 1.2.9 일본의 쉴드장비 생산업체 제작실적

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)]

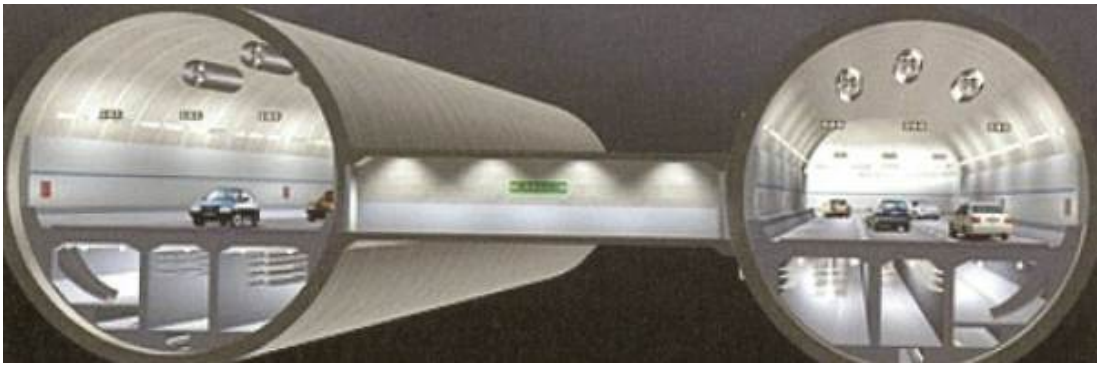


그림 1.2.10 난징~양쯔강 터널단면도

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 1.2.11 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)]

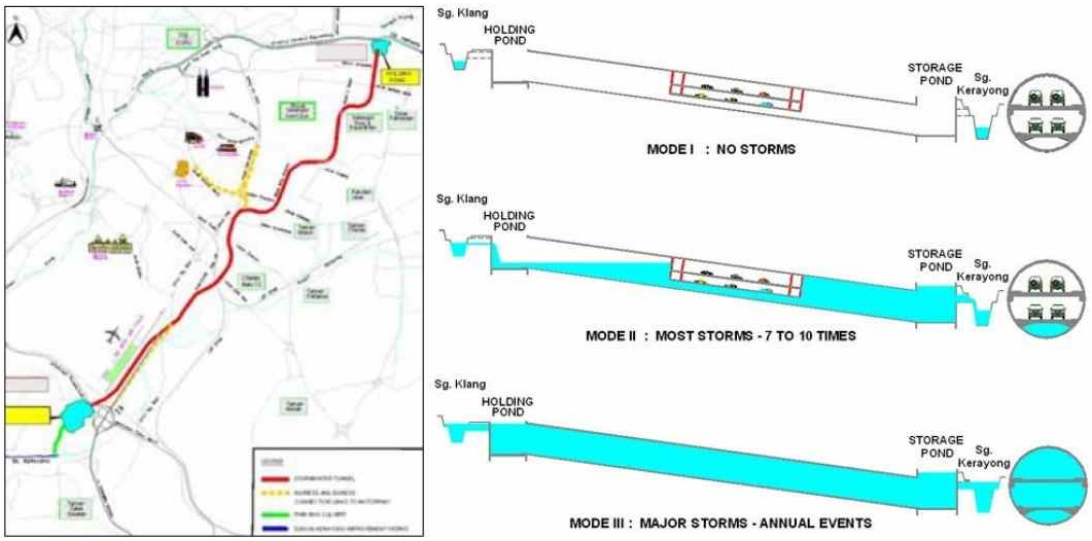


그림 1.2.12 말레이시아 SMART터널 개요도

제 2 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 쉴드터널 체결방식 분석

본 연구에서는 쉴드터널의 강연선 체결방식 개발을 위해 기존 쉴드터널 의 설계도서 및 관련서적, 논문 등을 조사함으로써 국내외 시공사례를 바탕으로한 기초 연구가 진행되었다. 먼저 기존 쉴드터널의 체결방식에 대해 조사하고, 각 체결방식에 대한 특성을 비교 분석 하였으며, 강재의 긴장력을 이용하는 쉴드터널의 강연선 체결방식 도입을 위해 국내·외 건설 분야에서 활용중인 긴장재에 대한 조사가 진행되었다. 또한, 개발된 강연선 체결방식과 기존에 사용되고 있는 여러 체결방식과의 비교를 통해 강연선 체결방식의 쉴드터널 적용 가능성을 평가하였다.

1. 기존 쉴드터널 체결방식

쉴드터널의 시공은 단위 세그먼트를 연결하여 하나의 링을 형성하는 과정을 반복하면서 이루어진다. 일반적인 세그먼트 라이닝의 이음부에는 개개의 세그먼트를 연결하여 하나의 링을 형성하는 링방향 이음(반경방향 이음)과 터널의 축방향으로 앞뒤 세그먼트를 연결하는 링간 이음이 있다.[1)]

본 연구에서 개발 중인 강연선 체결방식은 쉴드터널의 연장방향 세그먼트 체결을 개선하는 링간 이음 방식의 개발에 해당한다. 통상적으로 세그먼트는 서로 인접하는 링의 세그먼트 연결이 터널 축방향으로 일치하지 않도록 비켜서 조립하는 이른바 교차구조로 되어있다. 세그먼트의 연결 방법은 세그먼트본체의 구성재료 및 단면 형상에 따라 다양한 방식이 있으며, 일반적으로 많이 사용되고 있는 연결 방식으로는 경사볼트 방식, 곡볼트 방식, 볼트박스 방식, 조립핀 방식 등이 있다. 볼트 체결방식은 상재하중, 수압, 세그먼트의 규격, TBM의 추력 등 다양한 조건을 고려하여 적정 토크치를 산정하며, 나사선끼리의 접합으로 인한 마찰이 체결을 유지하는 힘을 갖게 된다.[2)]

표 2.1.1은 국내 쉴드터널 32개소 현장에서 적용된 세그먼트의 체결방식을 나타낸 것이다. 연결 방식 중 최근에는 안전성 면에서 우수한 경사볼트나 곡볼트 방식이 가장 많이 적용되고 있으며, 전력구와 같은 중소규모 단면에서는 볼트박스 방식 등이 사용되고 있다.

표 2.1.1 국내 쉴드터널 체결방식(조사현장 수 : 32개소)

합계		볼트박스		경사볼트		조립핀		곡볼트	
터널수	연장(m)	터널수	연장(m)	터널수	연장(m)	터널수	연장(m)	터널수	연장(m)
32	63,986	19	32,385	8	18,061	2	7,300	3	6,240
100%		60%	51%	25%	28%	6%	11%	9%	10%



그림 2.1.1 세그먼트 조립부 명칭

가. 경사볼트

경사볼트 방식은 세그먼트 및 링 이음부에 미리 너트를 삽입하고 세그먼트 조립 시 경사볼트로 체결하는 방식이다. 경사 볼트는 삽입너트와 볼트를 이용하여 조립하므로 공정이 짧아 비교적 조립시간이 짧고 철물 노출이 적어 부식에 대하 우려가 적으며, 볼트는 국내생산이 가능하므로 가격이 저렴하다. 또한 이음부가 볼트로 강결되므로 곡선 시공시 안정성 확보에 유리하고 조립 후 제거 및 해체 작업이 용이하다. 그러나 볼트 체결력이 적어 세그먼트 조립 후 쉴드 추진력을 제거했을 때 세그먼트가 밀착되지 않거나 틈새가 발생하여 진원형성이 어려워 세그먼트 모서리 부분에 균열이 발생할 우려가 있다. 외부로 노출된 볼트에 대한 부식 가능성과, 지수재를 외측 1열에만 설치할 수밖에 없으므로 볼트 주변을 통한 누수 발생 가능성이 있다. 또한 세그먼트 조립시 발생하는 작은 오차에도 볼트 매입이 어려워지는 단점이 있다.[3)]

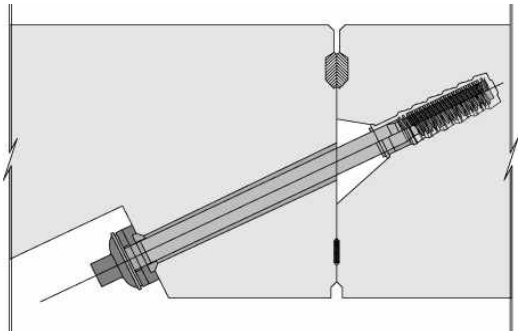


그림 2.1.2 경사볼트 방식

나. 곡볼트

볼트 체결에 필요한 이격을 줄이고 세그먼트에 볼트 정착부분을 만들어 볼트를 체결하는 곡볼트 방식은 이음부가 볼트로 강결되어 구조적 안정성이 높고 쉴드 추진에 따른 잭(Jack)의 추진력에 대한 대응성이 좋다. 또한 세그먼트 이음 및 링이음을 삽입너트와 볼트를 이용하여 조립하므로 공정이 비교적 간단하다는 장점이 있으나, 경사볼트에 비해서 작업이 복잡하고 변형에 대한 허용 여유가 크며, 지수재를 외측 1열에만 설치할 수밖에 없으므로 볼트 주변을 통한 누수 발생우려가 높다.[3)]

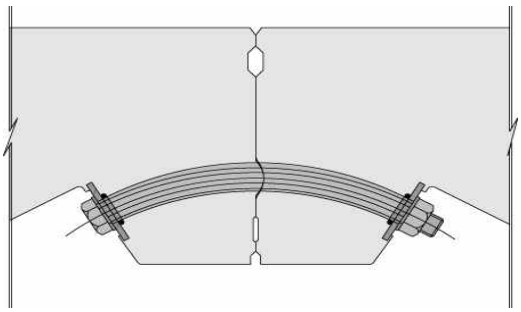


그림 2.1.3 곡볼트 방식

다. 볼트박스

국내의 경우, 기 시공된 세그먼트 이음방식의 68%를 차지하는 볼트박스 방식은 이음부에 볼트박스를 설치하여 볼트 체결 공간을 확보하고 직볼트로 체결한다. 볼트박스 방식은 조립이 간편하고 시공성이 좋아 세그먼트의 조립과 해체작업이 용이하여 조립오차가 비교적 적다. 또한 연결부인 볼트박스가 수팽창 지수재 2열 내측에 설치되어 누수를 최대한 억제할 수 있고, 세그먼트 제작사 및 시공사의 경험이 축적되어

있다는 장점이 있다.

반면에 볼트 박스 매입부분이 구조적으로 취약부가 될 수 있고 부식발생의 우려가 있다. 2차 라이닝을 생략할 경우 세그먼트의 조립 완료 후 내면의 볼트 박스 홈이 많아 도수로의 경우 별도의 채움작업이 필요하며 제작비용이 경사볼트보다 다소 비싸다는 단점이 있다.[3)]

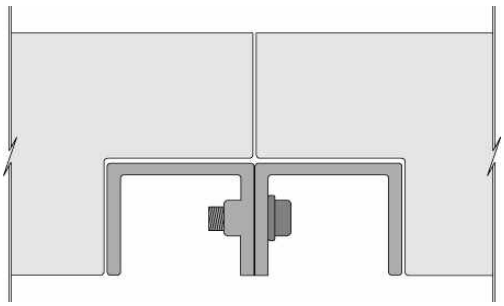


그림 2.1.4 볼트박스 방식

라. 조립핀

볼트 홈이 적어 조립 후 세그먼트 내면이 미려한 조립핀 방식은 제작비용이 가장 저렴하고 자동 조립이 가능하다는 장점이 있으나 링간 조립시 핀체결 위치 선정이 어려워 조립시간이 많이 소요되며 체결력이 약하여(매입부가 우레탄 재질로 유동성이 많음) 세그먼트 조립정도가 불량하다. 또한 쉴드 Jack 후진 시 조립부가 벌어질 우려가 있으며 지수재를 외측 1열에만 설치하게 되어 누수의 우려가 있고 급곡선 시공 시 세그먼트의 마찰 및 조립틈의 발생으로 안정성 확보에 불리하다. 연결핀과 조립봉이 외국산으로 고가의 가격으로 경제성이 덜어지며 조립 후 제거 및 해체작업이 불가능한 단점을 가지고 있다.[3)]

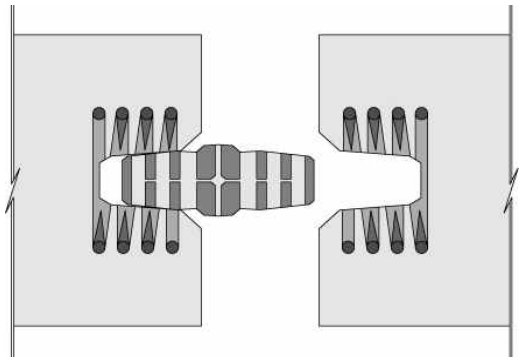


그림 2.1.5 조립핀 방식

2. 국외 세그먼트 체결방식 및 연구동향 파악

가. 세그먼트 체결방식 조사

(1) Prestressed and Precast Concrete Segmental Liming

본 공법은 세그먼트 제작과정에서 강연선 주입을 위한 쉬스관을 설치하고, 강연선을 주입한 후 긴장력을 작용시킴으로써 세그먼트 링을 조립하고 링 조립 후 링과 링 간의 연결 또한 강연선의 긴장력을 통해 이루어 지며 P&PC 공법으로 부르기도 한다. 본 공법은 일본의 스미토모건설 주식회사(SUMITOMO)에서 발명되어 현재 특허로 등록된 상태이다.[4)]

일반적으로 쉴드 터널은 공장에서 생산된 세그먼트를 갱내에서 조립함으로써 구축된다. 조립된 세그먼트는 터널에 작용하는 토압 및 수압에 견딜 수 있도록 강고하게 일체화 되어야 하는데, 조립 수단으로는 볼트를 이용해 조이는 방법을 사용하고 있다. 그러나, 볼트 조립의 경우 세그먼트 제작 시 미리 볼트 체결구를 매설하여야 하는 번거로움이 있고, 체결구 제조에 많은 비용이 들어 제작비 또한 증가하며 볼트 체결 과정에 있어 세그먼트의 조립 작업이 복잡하다. 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 강연선을 프리스트레스를 통해 긴장함으로써 세그먼트를 일체화 시키는 기술인 P&PC공법이 개발되었다. 이 공법은 짝수개의 세그먼트를 관통하도록 강연선을 배치하고, 이것을 긴장하여 각 세그먼트를 일체로 단단하게 체결하는 것으로, 터널의 원주방향으로 프리스트레스를 도입함으로써, 세그먼트는 1개의 링으로 일체화되며, 토압 또는 수압에 저항할 수 있는 구조가 된다. 그리고 링 모양이 된 세그먼트의 단위조립체가 연장방향으로 배열되며, 연장방향으로 배열된 세그먼트도 상기와 비슷하게 프리스트레스에 의해 체결된다. 특히, 지반 조건이 변동하는 부분이나, 지진동에 의해 축선 방향의 큰 인장력 또는 굽힘 모멘트가 작용할 우려가 있는 경우에는 프리스트레스에 의해 긴장해 두는 것이 바람직하다. 즉, 세그먼트의 접합 단면에 압축 응력을 항상 작용하게 해 둠으로써, 인장력이나 큰 휨 변형이 생겼을 경우에도 세그먼트의 접합부에서 틈새가 생기는 것을 저감시킬 수 있으며, 누수 등을 효과적으로 억제할 수 있게 된다. 링방향의 연결은 아래 그림 2.16과 같이 교차식으로 주입이 가능한 X형 앵커라고 불리는 관입로를 세그먼트 제작시 삽입하여 이를 통해 강연선을 주입하고 긴장 재하를 통해 체결이 이루어진다.

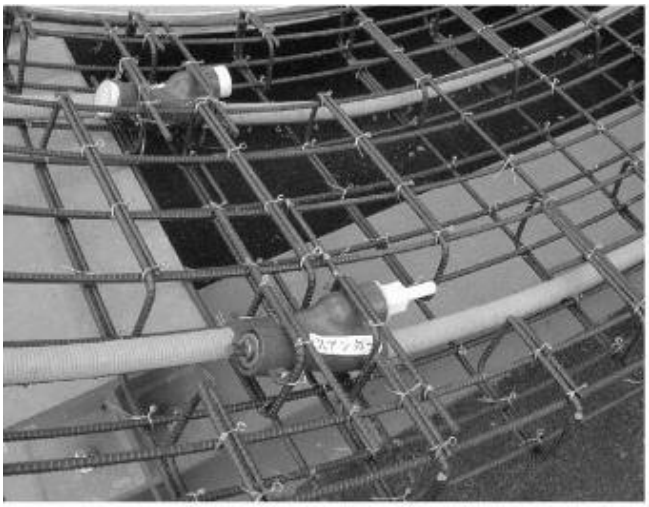


그림 2.1.6 X형 앵커

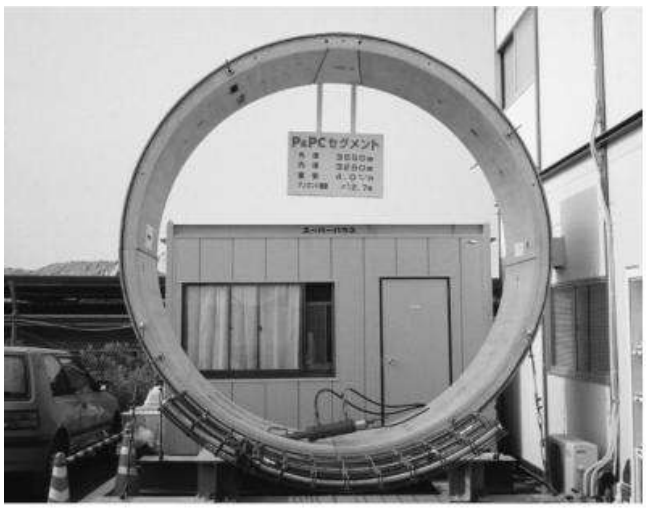


그림 2.1.7 체결된 P&PC 세그먼트 라이닝

그림 2.1.7은 강연선을 이용하여 하나의 링으로 체결이 완료된 세그먼트 조립체를 보여주고 있다. 링의 연결에는 마찰에 의한 손실을 최소화 하기 위해 비부착 프리스트레싱 강연선을 적용하며 이를 통해 강연선하나로 링 전체에 충분한 긴장력을 적용한다. 특히 본 공법에 사용된 X형 앵커는 긴장재의 정착부와 긴장력을 재하하는 긴장력 재하부를 한 부분에 설치 할 수 있도록 제작함으로 써 시공성과 워커빌리티를 개선시켰다. 세그먼트 체결 후에는 라이닝의 내구성 향상을 위해 높은 점도의 그라우팅 재료를 강연선과 쉬즈관 사이의 공간에 주입하며, 무수축 몰탈을 이용해 콘크리트 표면부분을 처리해 준다.

그림 2.1.8은 공법 체결을 위한 개략 도면을 나타내고 있는데, 링 방향의 강연선 체

결은 세그먼트 한 단면에 두 번씩 이루어 지게 되며, 이렇게 체결된 단위체결 링과 링은 연장 방향의 강연선 주입 및 긴장력 재하에 의해 일체화 하게 된다. 그림 2.1.9는 연장방향 체결을 위한 체결 모식도를 보여준다. 연장방향의 체결은 링의 중간에서 이루어 지며 세 개의 링 또는 네 개의 링을 한번에 체결하는 것을 원칙으로 한다. 그러나 연장방향 체결을 위해서는 먼저 단위 링 체결이 선행 되어야 하는데, 쉴드 터널의 경우 한 개의 링을 조립하고 그 터널체를 반력대로 사용함으로써 추력을 얻는 시공 특성을 가지고 있으므로 연장방향의 체결은 사실상 비효율적이며, 시공 과정도 매우 복잡하고 어렵게 되는 단점을 가지고 있다.

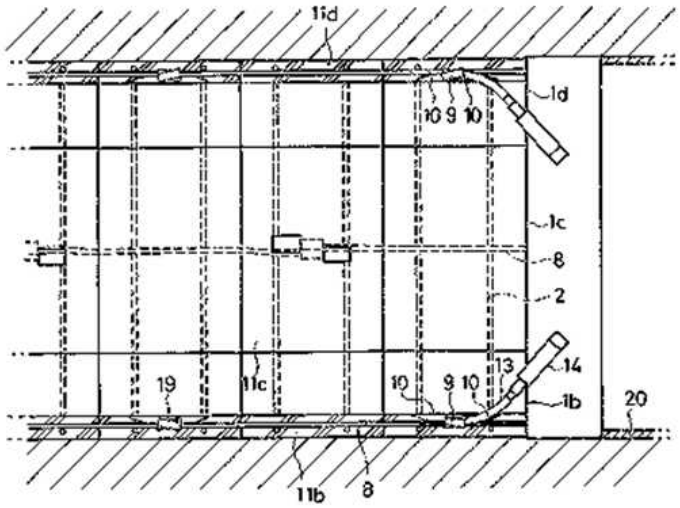


그림 2.1.8 P&PC 공법 개략도

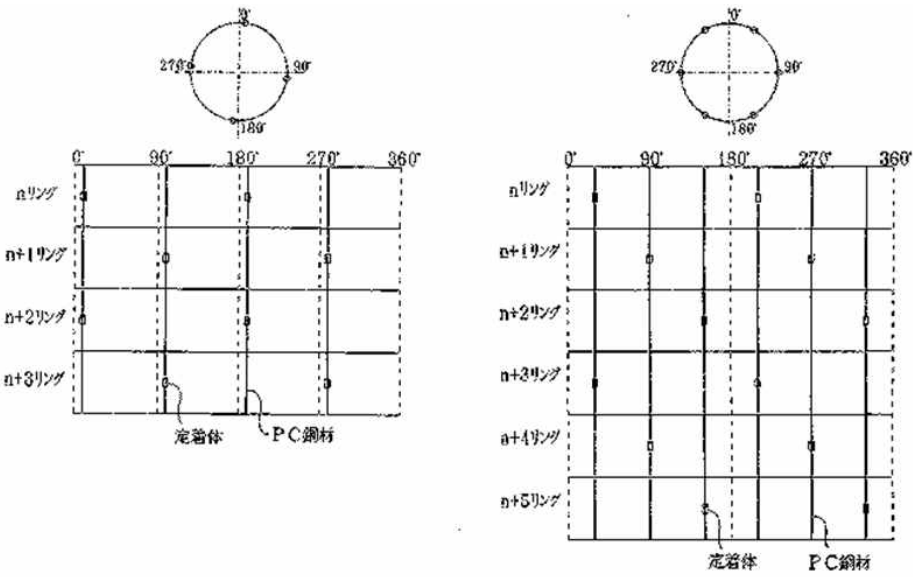
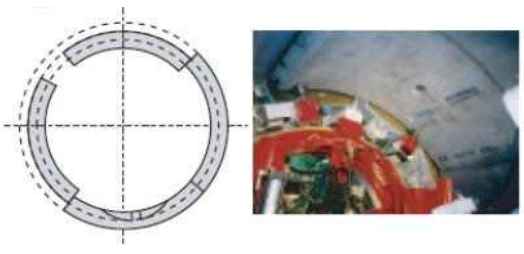
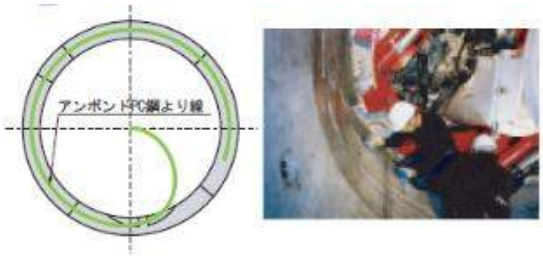


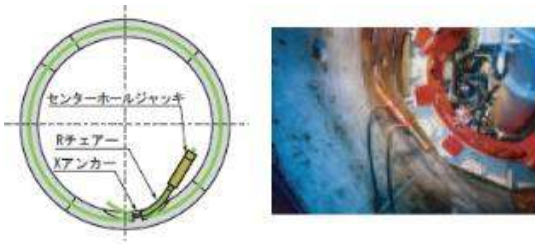
그림 2.1.9 세그먼트 연결 배치도



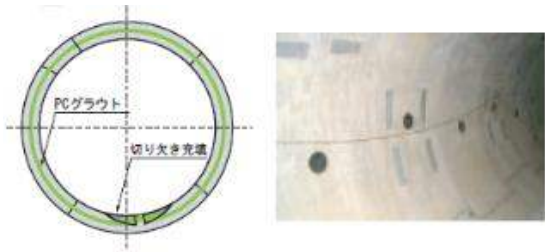
(a) 세그먼트 조립



(b) 원주 방향 긴장



(c) PC 강연선 삽입



(d) 복공 완료

그림 2.1.10 P&PC 공법의 시공순서

P&PC 공법은 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

① 경제성

-연결부 볼트를 제거함으로써 경제성 확보

-프리스트레스를 이용해 기존 보강 철근량을 줄여 경제성 확보 가능

-세그먼트 두께를 줄일 수 있음

-2차 라이닝 제거로 터널의 외부직경이 감소 할 수 있어 총 공사비 감소효과

② 품질

P&PC공법을 사용할 경우 프리스트레싱에 의해 콘크리트에 발생되는 크랙이 저감되며 프리스트레싱에 의해 원주 방향의 이격과 세그먼트 간의 공간이 줄어들어 정밀도와 방수성능이 우수하다. 또한 체결 후 체결부를 몰탈채움함으로써 비부착 프리스트레스 콘크리트 구조물에 비해 안정적이고 체결부가 높은 하중에도 견딜 수 있다. 그리고 터널 종방향으로는 강연선 재료의 탄성 특성으로 인해 동하중에 대한 내구성이 향상을 기대할 수 있다.

③ 시공성

볼트를 사용하지 않고 강연선 하나로 터널 1링을 고정하므로 시공성이 매우 우수

하며 1지점에서 체결이 이루어지므로 시공기간이 매우 단축된다.

④ 표면구조

볼트를 사용하지 않으므로 터널 내부가 매끈하고 프리스트레스를 가함으로써 방수효과 및 크랙 발생 억제 효과가 뛰어나다. 따라서 2차 라이닝이 필요없는 single-pass sturucture에 적합하다.

⑤ 내부 압력에 대한 저항

높은 수압이 내부에서 외부로 작용되는 콘크리트 구조물의 경우 프리스트레스에 의해 안정성과 방수성을 확보할 수 있다.

(2) Honeycomb Segment(벌집모양 세그먼트)

최근 들어 지하하천이나, 도시 근방의 하천을 연결하는 도수로 터널이 계획되고 실용화 단계에 있으며, 이는 모두 대단면의 장거리 터널로 종래의 시공 방식에 비해 급속한 시공과 코스트 다운이 요구되고 있다. 또한, 통상의 쉴드 터널과는 달리 일시적 또는 항구적으로 터널에 내수압이 작용하기 때문에 세그먼트에 작용하는 하중이 일반적인 터널과는 달라 영구 구조물로서의 신뢰성과 내력 확보가 어려운 실정이다. 이에 (주)오쿠무라쿠미는 이시카와지마건재공업(주)와 공동으로 급속시공과 코스트 다운이 가능한 내수압대항형 벌집 세그먼트를 개발했다.[5)]

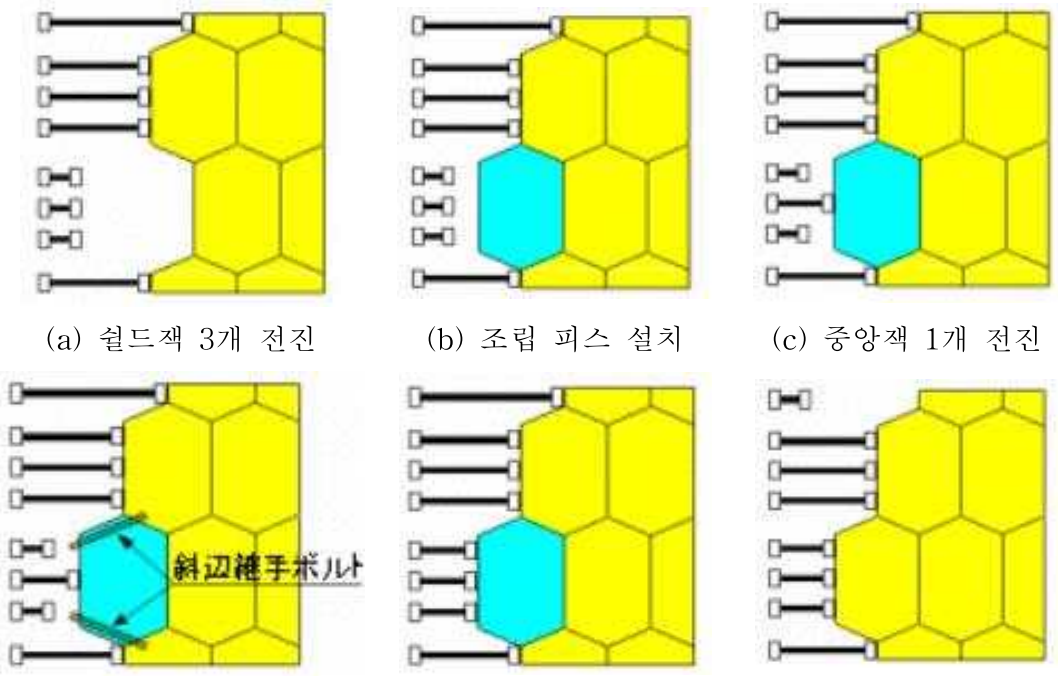
벌집 세그먼트는 육각형의 특징을 살려 쉴드기의 굴진과 세그먼트의 조립을 동시에 시공한다. 구형 세그먼트를 이용해 굴진한 후 세그먼트를 조립하고 이러한 과정을 교대로 실시하는 종래의 시공법에 비해 대폭적인 시공 사이클 타임의 단축이 가능하여 장거리 쉴드 터널의 급속화 시공이 가능하다. 조립 후의 모습이 벌집의 모습과 비슷하여 벌집 세그먼트라 부르는 이 세그먼트는 터널에 사용되는 전체의 세그먼트가 동일한 형상이므로 보통 키세그먼트 사용으로 인해 적어도 4개의 다른 세그먼트 형상을 갖는 일반 구형 세그먼트에 비해 제작 몰드의 설계도 간단하며, 복공체의 내면이 평활한 특징을 갖는다. 그림 2.1.11은 벌집 세그먼트로 시공된 터널을 보여주고 있다.

그림 2.1.12는 벌집 세그먼트 1개의 조립순서를 보여준다. 먼저 조립될 부분을 제외한 다른 세그먼트는 쉴드 추력을 위한 반력을 얻기 위해 잭이 단면에 접지된다. 터널 전면에서는 터널 굴착과 함께 세그먼트가 새롭게 조립되며, 한 세그먼트에는 세 개의 유압잭을 통해 조립 및 시공이 되는데 이때 조립을 위해 세그먼트 가운데 위치한 유압잭은 조립을 위한 유압을 재하하고 양 단부의 유압잭은 접지하지 않은 채로 쉴드머

신에 설치된 자동 조립장치를 통한 볼트 조립이 이루어 진다. 조립이후 새로 조립된 세그먼트는 추력을 위해 세 개의 유압잭이 모두 접지되어 반력체로써의 기능을 새로이 하며 다음 설치될 세그먼트 부분의 유압잭은 설치를 위해 공간을 비우게 된다. 이러한 방식으로 조립과 함께 터널의 굴진이 가능하다. 그림 2.1.13는 체결 모식도를 나타내고 있다.



그림 2.1.11 벌집 세그먼트 터널



(a) 쉴드잭 3개 전진 (b) 조립 피스 설치 (c) 중앙잭 1개 전진

(d) 사변 이음새 볼트 조립 (e) 나머지 쉴드잭 전진 (f) 과정 반복

그림 2.1.12 벌집 세그먼트 체결 순서

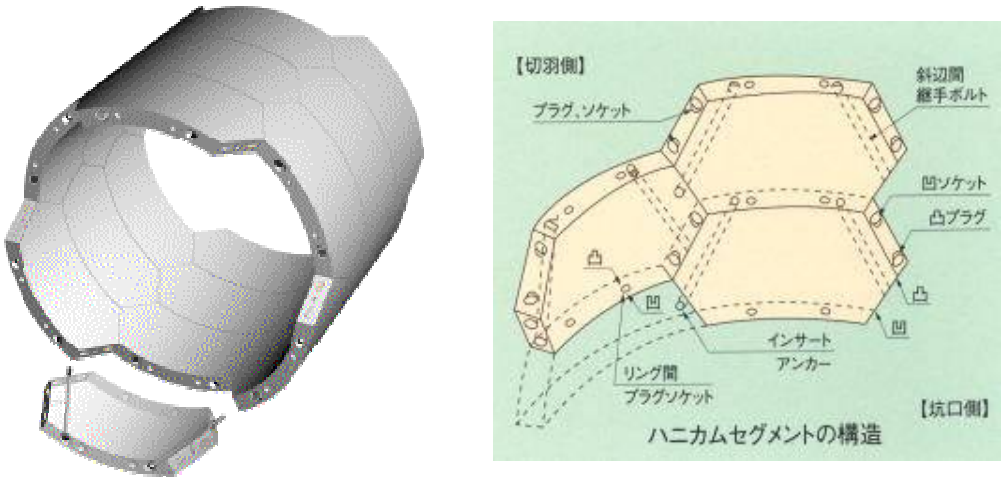


그림 2.1.13 벌집 세그먼트 체결 모식도

(3) 곡터-쿽-조인트 세그먼트(쐐기체결방식에 의한 조립공법)

곡터-쿽-조인트 세그먼트(쇄기체결방식에 의한 세그먼트 조립공법)은 조인트에 쇄기의 원리를 사용한 특수 조인트 금속물의 활용을 통해 세그먼트를 조인트 체결을 하는 기술공법이다. 본 공법은 일본 국토개발기술연구센터(국토기술연구센터)터)의 「민간개발건설기술의 기술심사 · 증명사업에 의한 일반토목 · 심사증명요령」에서 확인 할 수 있다.[6)]

곡터-쿽-조인트 세그먼트 공법에 사용되는 곡터 조인트(세그먼트 조인트)는 CR방식과 CS방식이 있으며 쿽 조인트(링 조인트)는 QT 방식과 QS 방식이 있다. 터널의 선형 터널의 용도 경제성 등에 따라 현장마다 달리 적용되고 있다. 그림 2.1.14는 곡터 조인트의 타입별 형상, 그림 2.1.15는 링 조인트의 타입별 형상을 나타내고 있다. 또한, 그림 2.1.16은 CR 방식과 CS 방식의 세그먼트 조립 순서를 나타내고 있다.

곡터-쿽-조인트 공법의 특징은 다음과 같다.

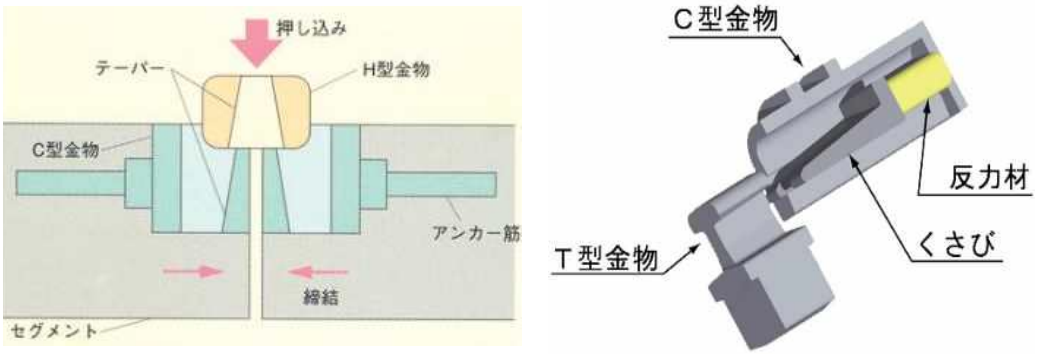
① 조립작업의 고속화 : 세그먼트의 위치결정 및 체결동작의 간소화를 통해 조립작업의 용이화 및 고속화의 실현이 가능함. 특히, 콕터 조인트의 CS방식은 세그먼트의 위치결정과 세그먼트 조인트, 링 조인트를 동시에 체결하기 때문에 조립시간의 대폭적인 단축이 가능함.

② 품질의 향상 : 세그먼트를 차지하는 면적이 작으므로 배근에 유리하고 시공중 세그먼트의 손상이 적음.

③ 터널 단면의 미관 : :CR 방식의 경우 덮개를 통해 단면 미관처리를 실시하며 볼트 방식에 배해 미관처리 단면이 대폭 감소됨, CS 타입은 체결부의 노출이 없어 체결

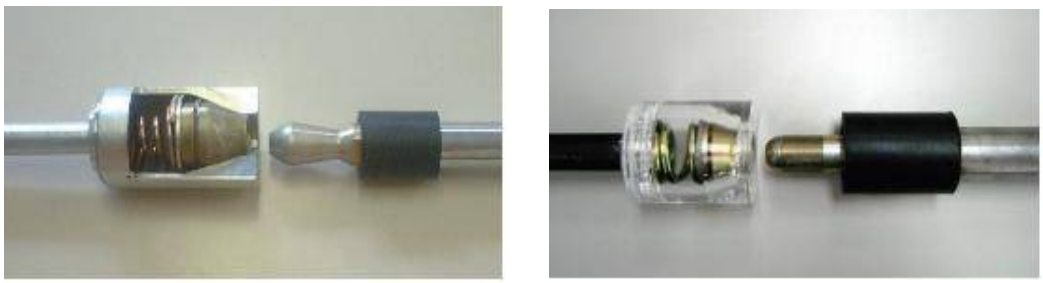
부의 미관처리불필요

④ 체결의 안정성 향상



(a) CR(Radius) 방식 (b) CS(Slice) 방식

그림 2.1.14 곡터 조인트(세그먼트 조인트) 방식



(a) QT(Taper) 방식 (b) QS(Screw) 방식

그림 2.1.15 쿽 조인트(링 조인트) 방식

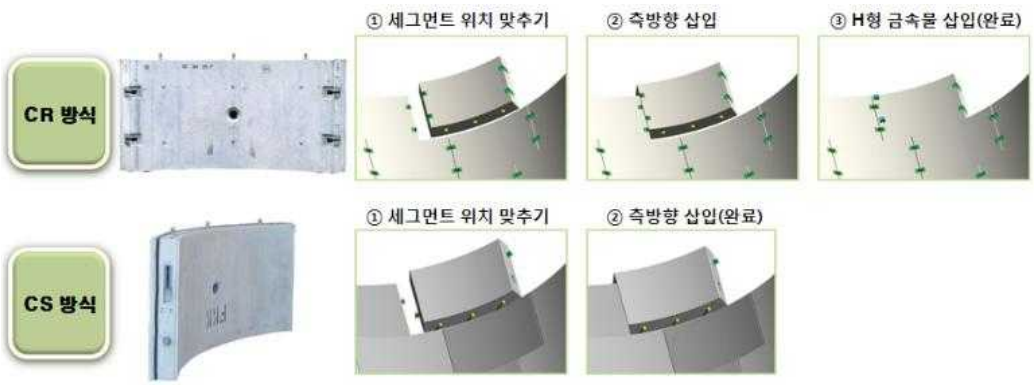
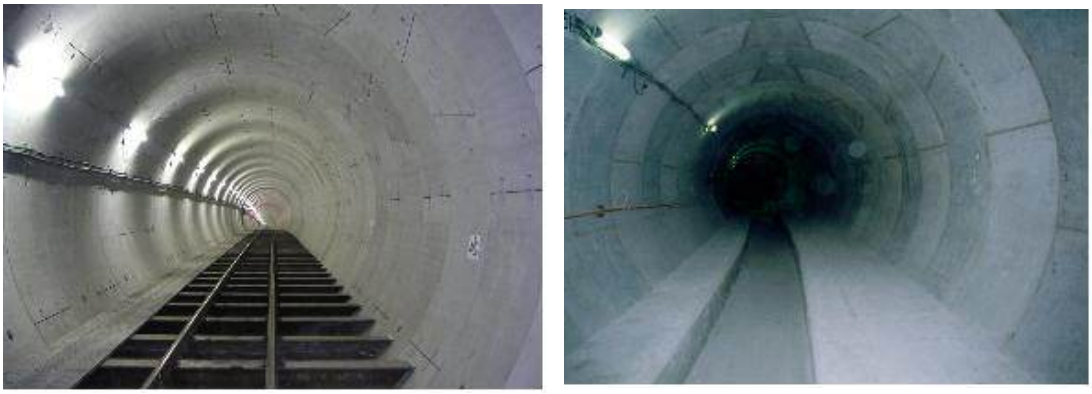


그림 2.1.16 CR 방식과 CS 방식의 조립 순서



(a) CR 방식 (b) CS 방식

그림 2.1.17 현장 시공 사진



(a) 조인트 삽입시험 (b) 조립부재 휨시험

그림 2.1.18 체결 부재의 성능 실험

그림 2.1.17은 CR 방식과 CS 방식을 이용해 시공한 현장 사진을 보여주고 있다. 시공 실적을 통해 작업시간이 종래의 볼트 체결에 비해 체결시간이 짧고 작업성 및 안정성이 우수함을 확인하였다. 또한, 콕터 조인트 삽입시험을 수행한 결과 소정의 체결력을 확보하는 것을 확인하였으며, 곡터 조인트의 인장시험을 통해 설계 인장강도 이상의 내력을 갖는 것을 확인하였다. 퀵조인트 인장시험을 통해 설계 인장강도를 확보하는 것으로 나타났으며 세그먼트와 세그먼트 사이의 이격이 1.0mm 이내인 것으로 나타났다. 그림 2.1.18은 체결 부재의 성능 실험 수행 모습을 보여준다.

나. 세그먼트 단면부 지수재 설치 및 재료실험 방법

(1) 수팽창 지수재

지수재는 재료의 성질에 따라 재료의 점착성을 이용하는 것, 탄성 반발력을 이용하는 것, 수팽창에 의한 팽창 압을 이용하는 방법 들이 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.[7] 수팽창 지수재는 다른 지수재보다 가격은 비교적 비싸지만, 이것을 적용한 터널에서의 누수량은 매우적고, 방수효과도 좋은 것으로 보고되고 있다.

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.

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 억제됨으로서 콘크리트의 이탈현상을 방지하는 목적으로 쓰인다. 한편, 항만, 발전소, 조선소 등의 구조물에서 해수로 인한 누수를 차단하기 위해 사용되는 해수 팽창형 등이 있다.[8]

(가) 수팽창성 고무지수재

수팽창성 고무지수재는 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.

수팽창성 고무지수재의 특성은 다음과 같다.[7)]

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.

수팽창성 고무지수재의 기능은 다음과 같다.

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.

수팽창성 고무지수재의 용도는 다음과 같다.

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

수팽창성 고무지수재의 시공방법은 다음과 같다.

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

② 요철이 심한 경우에는 몰탈시공이나 급결시멘트로 시공처리하여 평활하게 한다.

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.

표 2.1.2 수팽창성 고무지수재의 물리적 성질

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

(나) 벤토나이트 수팽창지수재

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.

벤토나이트 수팽창지수재의 특성은 다음과 같다.[7)]

① 독특한 수화팽창 능력 : 고팽창성 천연산 벤토나이트 만을 재료로 하여 물과 접

촉하면 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.

벤토나이트 수팽창지수재의 시공방법은 다음과 같다.

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.

표 2.1.3 벤토나이트 수팽창지수재의 물리적 성질

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

표 2.1.4 벤토나이트 수팽창지수재의 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

(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.

수팽창성 실란트지수재의 특성은 다음과 같다.[7)]

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

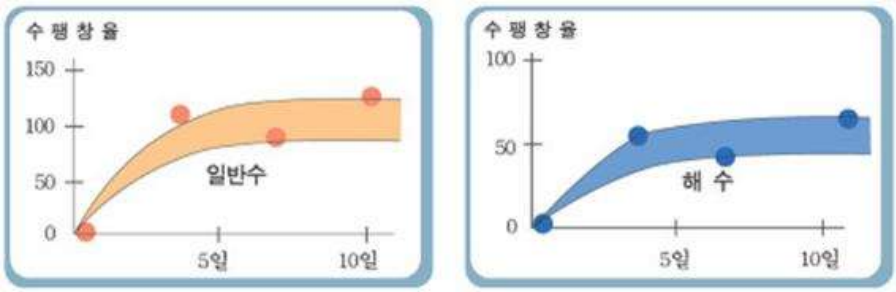


그림 2.1.19 수팽창성 실란트지수재의 팽창률 곡선

(2) 시방규정 및 재료실험 방법

(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 2.1.5와 같고, 시험 방법 및 시험값은 표 2.1.6에 의한다.[9)]

표 2.1.5 수팽창 지수재의 표준형상 및 규격(신공항 철도터널공사)

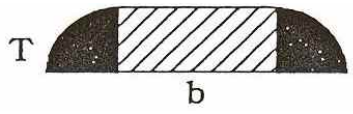
종 류	형 상	b	t	비 고
수팽창 지수재		25㎜	5㎜	

표 2.1.6 수팽창성 지수재의 시험방법 및 시험값(신공항 철도터널공사)[10)]

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

표 2.1.7 수팽창성 지수재의 시험값(철도공사, 2001)[10)]

특 성		허 용 치
경 도		45 이상
인 장 강 도		25 이상
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

② 철도공사 수팽창 지수제 규정[10)]

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 2.1.7에 나타난 값 이상이어야 한다.

고무탄성이 수팽창 상태에서도 충분히 유지되며 건조와 습도가 반복되어도 수팽창을 유지하며 내후성이 일반 천연고무 제품과 동등하여야 하며, 내수압을 5kg/㎠ 이상이어야 한다.

③ 쉴드터널용 규정[10)]

쉴드터널용 수팽창 지수재의 시험방법과 시험값을 표 2.1.8에 나타내었다. 개스킷 지수재의 경우 재질은 탄성고무(EPDM)으로 하며 시험방법 및 기준값은 표 2.1.9에 따른다.

표 2.1.8 수팽창 지수재의 시험 항목과 기준

차례	시 험 항 목	시 험 방 법	시 험 값	비 고
1	인장강도(kgf/cm2)	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:20mm 평탄형: 4.0mm	

* KS M 6518 『가황 고무 물리 시험 방법(2001)』

표 2.1.9 개스킷 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 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.[7)]

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.

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 개스킷을 사용하기 때문에 고무의 기본물성시험과 개스킷의 압축응력시험, Gap과 Offset에 따른 내수압 시험이 이루어지고 있다.

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 2.1.20과 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.

Gap과 Offset에 대한 관리기준치는 방수재의 필요 접면응력, σ에 대한 Gap-Offset 관계 그래프 상에서 구할 수 있다. 그림 2.1.21은 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.

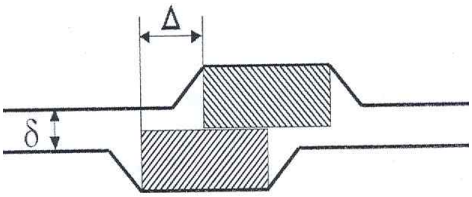


그림 2.1.20 Gap(δ)과 Offset(△) 개념도

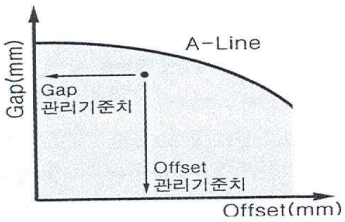


그림 2.1.21 Gap-Offset 관계 그래프

다. 쉴드터널 세그먼트 관련 해외 연구 사례

(1) 자체 체결식 세그먼트(FAKT) 개발

일본의 후지키이쿠오, 오오니시 케이지 등은 세그먼트조인트에 역학적인 체결장치를 사용하지 않고 자웅너클조인트의 사용과 신설세그먼트의 삽입을 통해 세그먼트가 자동적으로 체결되고 링 조인트에 연결재를 사용함으로써 체결반력을 세그먼트본체에 전달시키지 않는 자체체결식 세그먼트를 개발하였다.[11)]

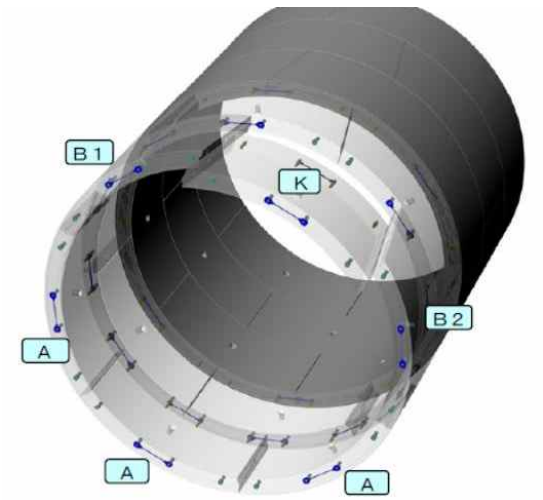


그림 2.1.22 FAKT 세그먼트의 링조립 조감도

그림 2.1.22 FAKT 세그먼트의 링조립 조감도를 나타내고 있으며 앞쪽을 반투명하게 하여 조인트부를 가시화하였다. 세그먼트는 등분할로 설계되었으며 K세그먼트는 축방향 삽입형이다.

그림 2.1.23은 FAKT 세그먼트 한 피스의 개략도를 나타내고 있다. 세그먼트 조인트는 역학적 체결부재를 사용하지 않는 자웅의 감합조인트로 되어 있으며 링 조인트

는 중앙부의 웅조인트, 중앙부의 자조인트, 단부의 웅조인트 및 단부의 자조인트의 4종류로 되어 있고, 중앙부 조인트에 관해서는 2개의 조인트가 연결재에 의해 연결되어 있다. 중앙부조인트 및 단부조인트는 각각 2개 1조로 등간격으로 배치되어 있다.

그림 2.1.24는 체결 모습을 나타내고 있다. 중앙부조인트의 간격은 단부조인트 간의 간격보다 좁게 구성되어 있고 신설세그먼트의 삽입과 동시에 중앙부조인트와 단부조인트가 감합하여 세그먼트조인트가 자동적으로 조여지는 구조를 하고 있다.

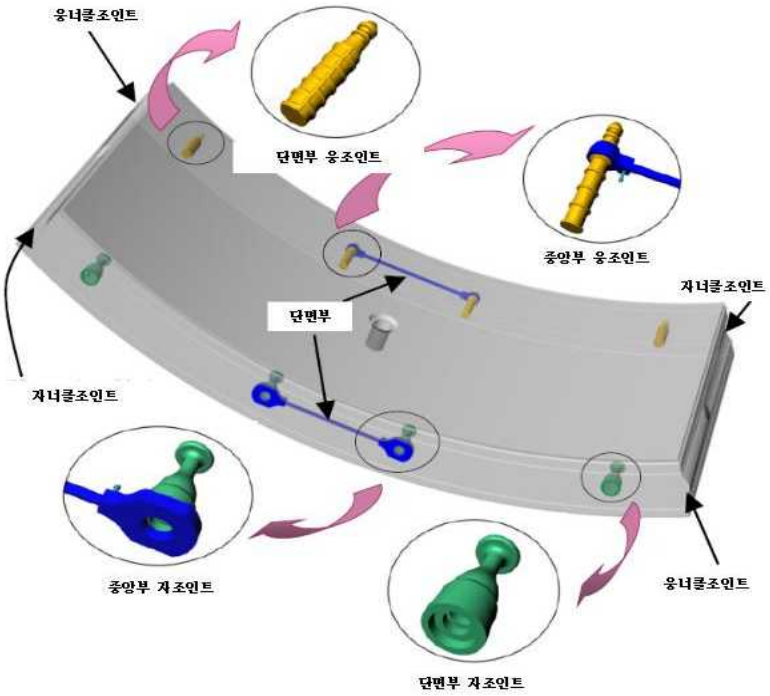


그림 2.1.23 FAKT 세그먼트 개략도

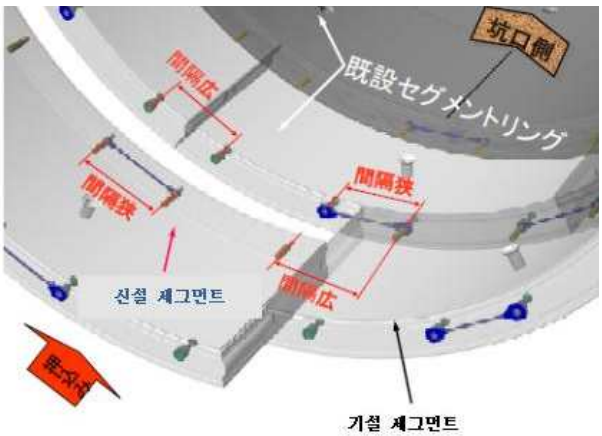


그림 2.1.24 FAKT 세그먼트 체결 모습

그림 2.1.25는 세그먼트 조인트의 전개측면도를 나타내고 있다. 세그먼트조인트는 전술하였듯이 역학적 체결부재를 사용하지 않는 자웅너클조인트이며, 휨모멘트에 저항하지 않는 구조이다. 세그먼트 조인트의 단부에서 폭의 중앙을 향해 너클의 폭과 높이가 점차 감소하는 테이퍼형상을 하고 있다. 너클조인트에 테이퍼를 설치함으로써 자웅의 너클조인트가 상호적으로 가이드역할을 하고 신설세그먼트의 링축방향으로의 끼워넣기와 동시에 기설의 링조인트의 세그먼트끼리 혹은 원주방향으로 배열된 세그먼트간에서의 원주방향조인트에서의 인장접합을 단면형상이 변하지 않는 평행너클보다 보다 원활하게 실시할 수 있음과 동시에 실드재의 손상을 방지하고 있다.

그림 2.1.26은 너클 조인트의 결합상태를 나타내고 있다. 세그먼트 조인트의 내외면은 간격이 형성되어 있고 너클부만이 접촉하여 이 부분을 통해 축력이 전달되는 구조로 되어 있다. 이를 통해 세그먼트 조인트의 연단부에서의 균열, 파손을 확실하게 막을 수 있으며 이격된 공간에는 실 홈이 설치되어 있어 씰재를 부착하여 지수성을 확보할 수 있다.

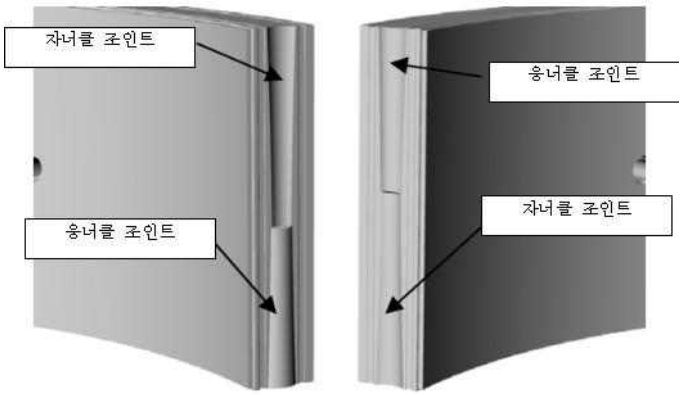


그림 2.1.25 세그먼트 조인트 전개도

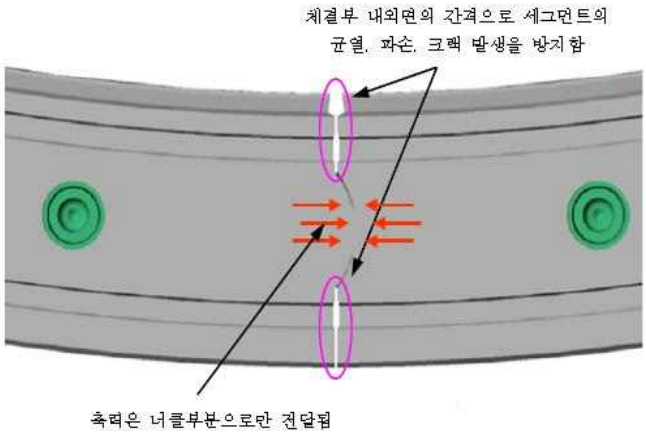


그림 2.1.26 너클 조인트 결합부

단부의 자웅조인트와 중앙부의 자웅조인트의 체결이미지를 그림 2.1.27에, 중앙부의 자웅조인트와 단부조인트의 이미지를 그림 2.1.28에 나타내었다. 자조인트의 내부에서는 2단의 환상형 홈이 설치되어 있고 그 홈부에는 사전에 단면이 타원형인 심재를 내장한 환상스프링이 셋팅되어 있다. 웅조인트도 마찬가지로 2단의 환상형 홈이 설치되어 있고 웅조인트의 삽입을 통해 그 홈에 환상스프링이 끼워져 인발력에 저항하는 구조로 되어 있다.

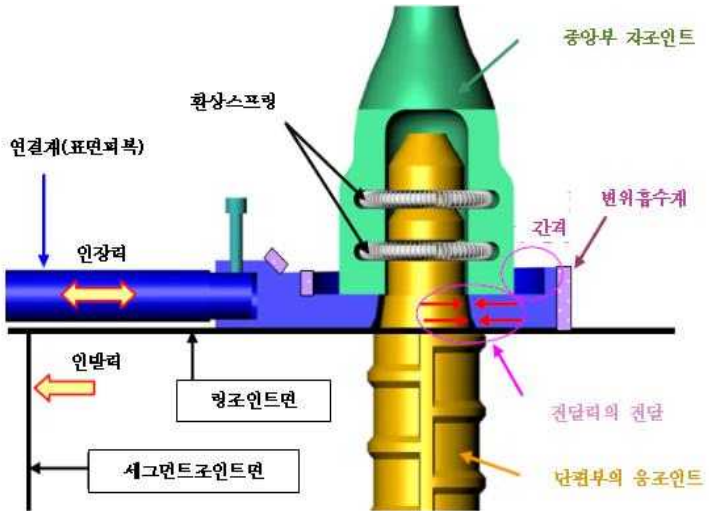


그림 2.1.27 중앙부 자조인트와 단편부의 웅조인트 체결 이미지

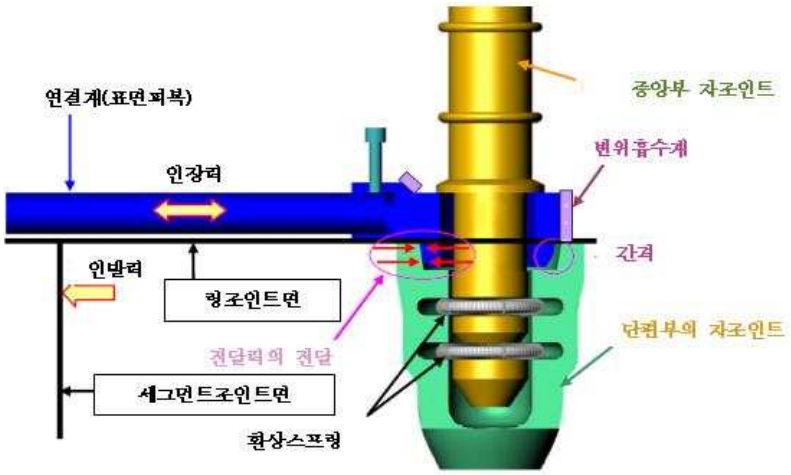


그림 2.1.28 중앙부 웅조인트와 단편부의 웅조인트 체결 이미지

조인트의 삽입시에는 2개 1조의 단부 웅조인트의 테이퍼부의 외측과 중앙부의 자조인트의 연결재의 테이퍼부의 외측이 접촉하여 단부의 웅조인트간 또는 단부의 자조인트간의 세그먼트조인트에 당겨짐이 발생하여 그 반력을 통해 연결재에는 인장력이 작용한다. 연결재에 인장력이 작용하면 연결재가 늘어나 콘크리트에 균열이 생길 우

려가 있다. 이를 막기 위해 연결재와 중앙부의 웅조인트 및 중앙부의 자조인트에는 세그먼트선형방향에 간격을 두어 연결재의 인장과 함께 콘크리트을 지압하는 장소에는 변위흡수재(발포재재료)를 장착하여 연결재의 봉부분은 열압축튜브에 의한 피복처리를 실시하여 콘크리트와의 부착방지를 도모하고 있다.

그림 2.1.29는 환상스프링의 개략도를 나타낸다. 환상스프링의 내부에는 스프링의 축경 및 확경에 대응하기 위하여 5등분한 심재가 장착되어 있다. 환상스프링을 2단계로 설치하고 있는 것은 시공오차에 의해 링조인트간이 완전하게 접합되지 않아 간격이 생겼을 경우에도 1단에서 웅조인트가 홈부에 확실하게 끼워져 터널축방향의 인장력에 저항할 수 있도록 하기 위해서이다. 그림 2.1.30은 링 조인트의 간격에 따른 스프링의 움직임을 나타내고 있다. 링조인트에 벌어짐이 발생하지 않을 경우는 주로 자조인트의 안쪽에 배치되는 2단째의 환상스프링이 저항하고 1단째의 환상스프링도 저항한다. 한편 링조인트에 벌어짐이 발생할 경우에는 1단째의 환상스프일만이 끼워져 인장력을 1단째 만으로 저항한다.

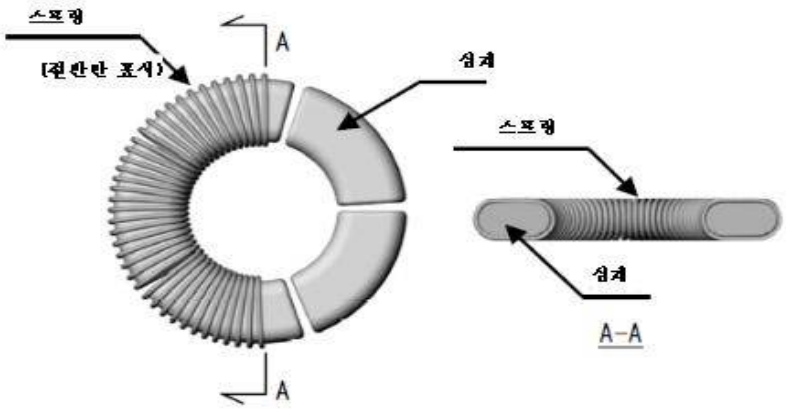
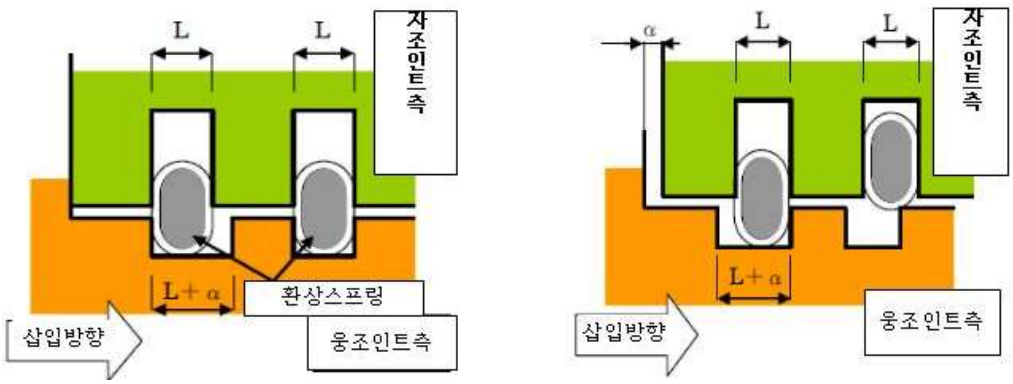


그림 2.1.29 환상 스프링의 개략도



(a) 간격이 있는 경우 (b) 간격이 없는 경우

그림 2.1.30 중앙부 웅조인트와 단편부의 웅조인트 체결 이미지

(2) 슬라이드 락 조인트 개발

일본의 마사노리 고바야시, 노리유키 아라이 등은 슬라이드 락 조인트라고 하는 새로운 세그먼트 체결기술을 개발하고 시험을 통해 체결기술의 성능 확인을 수행하는 연구를 수행하였다. 슬라이드 락 조인트는 고속시공과 매끄러운 내면의 터널을 구축할 수 있도록 하는 세그먼트 체결방식으로 이 연구에서는 종래의 볼트 체결방식과 대비해 동급이상의 내구력 확보를 목표로 하고 개발한 세그먼트조인트 및 링 조인트에 관한 성능확인 시험을 실시하였다.[12)]

원주방향의 체결은 웅체(雄体)금속물(이하 웅금물)을 자체(雌体)금속물(이하 자금물)에 끼워넣는 방식으로 이루어진다. 자체 금속물측에 탄성부재(고무)를 설치함으로써 웅체금속물 볼트를 안정적으로 감합하는 것이 가능하고 체결력을 발생시킬 수 있다. 웅금물은 볼트의 머리부분이 세그먼트면에서 나오는 구조이다. 이 웅금물의 볼트는 자금물의 가이드에 따라 슬라이드 시키면서 자금물측에 끌려들어간다. 또한 볼트의 체결력을 발생시킬 수 있도록 자금물은 테이퍼 구조로 되어 있다. 이러한 체결방식을 사용하면 종래의 볼트 체결방식의 볼트 조임 작업 및 재조임 작업이 불필요하고 체결부 노출이 없게 된다.

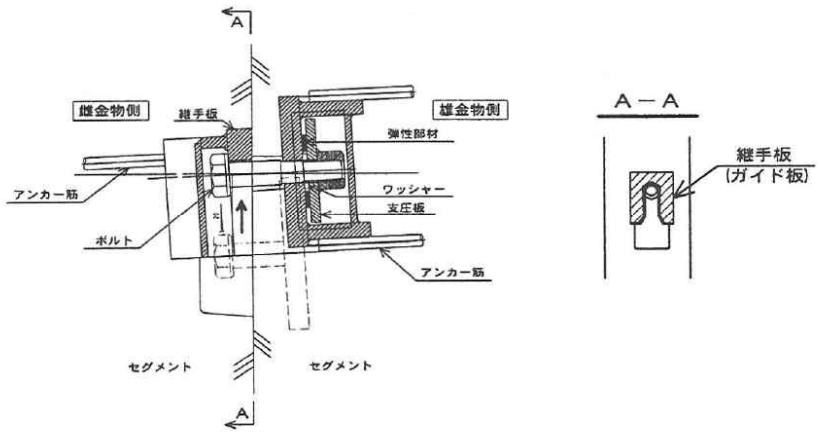


그림 2.1.31 원주방향 체결 개요도

링간 체결은 웅조인트의 머리부분을 자조인트에 삽입하면 락링(Lock Ling)이 조금 열리므로써 삽입가능한 상태가 되고 더욱 삽입하면 락링이 웅조인트의 홈에 끼워지는 구조로 되어있다. 홈에 끼워진 락링이 백업고무에 의해 자조인트내의 테이퍼부분에 밀려들어감에 따라 강고한 체결상태가 만들어진다. 인발력이 여기에 추가되면 락링이 자조인트내의 테이퍼에 걸려 저항하게 되기 때문에 인발을 저지할 수 있다. 웅조인트에는 축심오차용의 클리어렌스(±1.5mm)가 비어 있기 때문에 그 클리어렌스분량만큼

웅조인트가 움직일 수 있고, 이에따라 자웅형조인트부재간의 축심이 조금 틀어져도 조인트를 삽입하고 체결 가능한 것이 큰 특징이라 할 수 있다.

그림 2.1.32에서 확인할 수 있는 것처럼 탄성부재는 세그먼트 조립전의 볼트고정 및 세그먼트 조립시의 완충재로서 최종적으로 미치는 볼트 체결력은 금속 와셔에 의한 반발력이 된다. 이러한 체결기구로부터 볼트에 작용하는 축력을 확인하기 위해 원주방향 체결부의 체결장치를 대상으로 조인트 감합시험을 실시하였다.

세그먼트 조인트 금속물을 재하장치에 고정한 단계에서 볼트가 1/20의 각도를 형성하도록 하였다. 웅금물측의 고정박스 하단에 리니어 가이드를 설치하는 것으로 회전력을 구속하였고, 능력 100kN의 유압젝키로 웅금물측을 슬라이드시키며 자금물과 감합시키는 재하장치를 마련하였다.

감합 전에 볼트를 회전시켜서 내부에 도입된 고무재(Φ95/Φ44, t=8)를 1.5mm 변형시켜 볼트의 초기축력을 받으면서 감합시험을 시작한다. 감합시에 발생하는 볼트의 축력, 축의 비틀림, 축방향의 변위량 및 지압판, 왓셔의 변위량을 측정하였다.

재하방법으로는 재하장치에 감합시험용조인트 금속물(웅금물)을 고정한 뒤 웅금물측을 유압젝키로 슬라이드시키면서 감합을 실시하고 젝키스트로크에 따른 변위제어를 통해 가압하였다. 시험결과 그림 2.1.34에 나타난 것처럼, 조인트 금속물(자금물과 웅금물)의 감합시에서젝키스트로크는 90mm 축력은 60kN이상을 확보하였다.

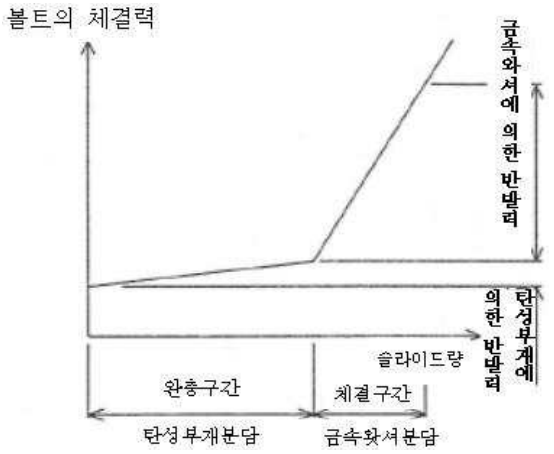
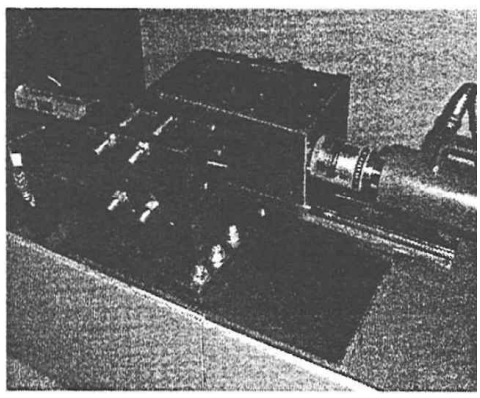


그림 2.1.32 볼트체결력 개요


그림 2.1.33 감합시험 모습

원주방향 체결부의 내력을 파악하는 것을 목적으로 체결부 금속물을 대상으로 인장시험을 실시하였다. 시험체의 앵커철근에 인장 시험용 장비를 용접하여 능력 2000kN의 암슬러 시험기를 통해 가압하였다. 재하방향으로는 인장시험용 조인트 금속물에 부착한 PC강봉(Φ32)를 능력 2000kN의 암슬러 시험기에 장착하여 조인트 금

속물에 인장력을 가하였다. 가력은 암슬러 시험기의 하중 제어로 하고 파괴까지 5kN 단계로 재하를 실시하였다. 원주방향 체결부의 인장시험 결과 얻은 인장력과 볼트에 발생한 비틀림의 관계를 그림 2.1.35에 나타내었다. 볼트(M24, 8.8)의 허용인장하중(100kN)을 충분히 확보하고 있는 것을 확인하였다.

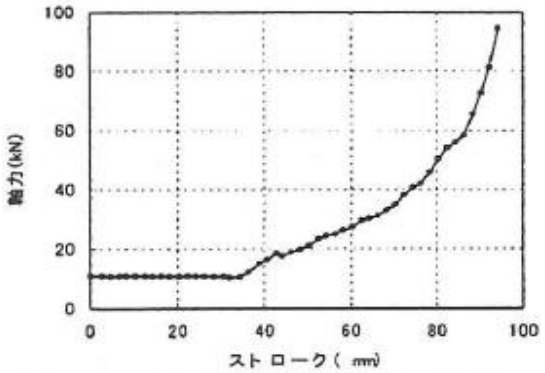


그림 2.1.34 원주방향 체결부의 감합시험 결과

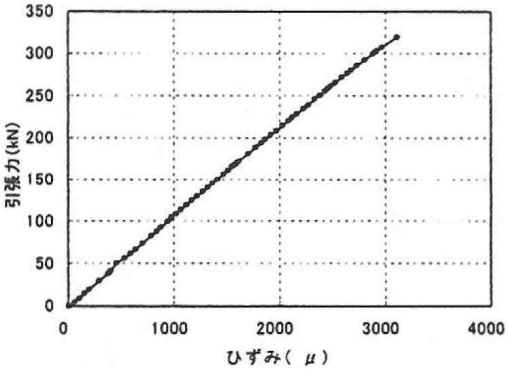


그림 2.1.35 원주방향 체결부의 인장시험결과

슬라이드 락 조인트를 사용한 원주방향 체결부의 휨에 대한 성능을 확인하는 것을 목적으로 평판형 세그먼트(시험체 한 피스의 형상은 2500×200×100 mm)를 사용하여 휨시험을 실시하였다. 재하방법은 RC 평판모델의 두 점에 선하중을 재하하되 10kN까지의 사전재하를 통해 장치와 시험체를 길들여 놓은 후 파괴하중까지 점차적으로 증재하하는 방식으로 이루어졌다. 한편, 재하의 스팬은 900mm, 지점간격은 3600mm로 하였다. 실험 결과 체결부에 작용하는 휨모멘트는 평균 60.3kN·m이고, 이는 설계값인 45.3kN·m을 충분히 확보하고 있음을 확인 가능하였다. 시험체의 파괴상태로부터 파괴모드는 자금물 앵커철근의 정착파괴에 인한 것으로 판단된다. 금속물자체의 강성은 높고, 특히 자금물 면판에서는 거의 변형이 발생하지 않았다. 또한, 설계모멘트시(18.1kN·m)에서의 조인트의 회전탄력정수를 구하면, kΘ=4500kN·m/rad였고 이는 일반적인 볼트체결식조인트 금속물의 회전탄력정수와 동등한 수준이었다.

링간 체결부재의 내력을 파악하는 것을 목적으로 링 조인트금속물 개체를 대상으로 인장시험을 실시하였다. 웅조인트와 자조인트를 삽입한 후, 파괴될 때까지 재하하는 방법으로 세 차례에 걸쳐 수행하였다. 시험결과, 링간 체결 부재의 인장내력은 평균 168kN이었고, 세 경우 모두 M22(6.8)의 볼트 항복인장 하중값 150kN 이상을 확보하고 있음을 파악할 수 있었다.

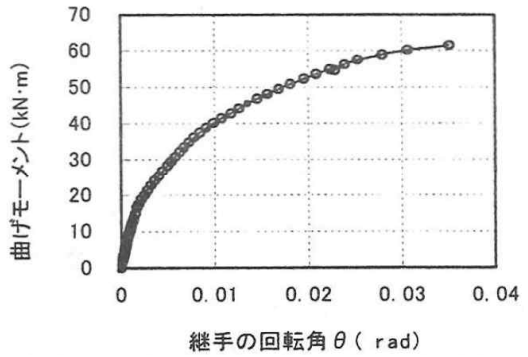


그림 2.1.36 원주방향 체결부의 휨시험 결과

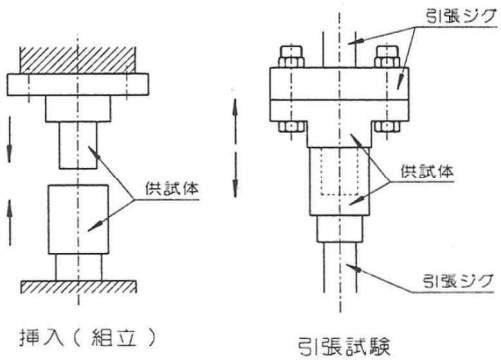


그림 2.1.37 링간 체결부의 인장시험 개요도

링간 체결부 부재의 조립성 및 전단내력을 확인하는 것을 목적으로 전단시험을 수행하였다. 3피스로 구성되는 시험체를 링간 체결하고 최대하중 5000kN의 재하장치를 통해 자하하였다. 링 체결부를 사이에 두고 조합한 3 피스로 구성되는 공시체 중, 양단의 공시체를 고정하고 중앙의 공시체의 상면을 쐐키를 통해 등분포하중이 되도록 가압하여 링 조인트의 전단하중 및 파괴상황을 조사하였다. 시험결과, 전단내력은 510kN이 되었고, M22(6.8)의 볼트 4개의 전단내력은 421kN이상을 확보하고 있음을 확인하였다.

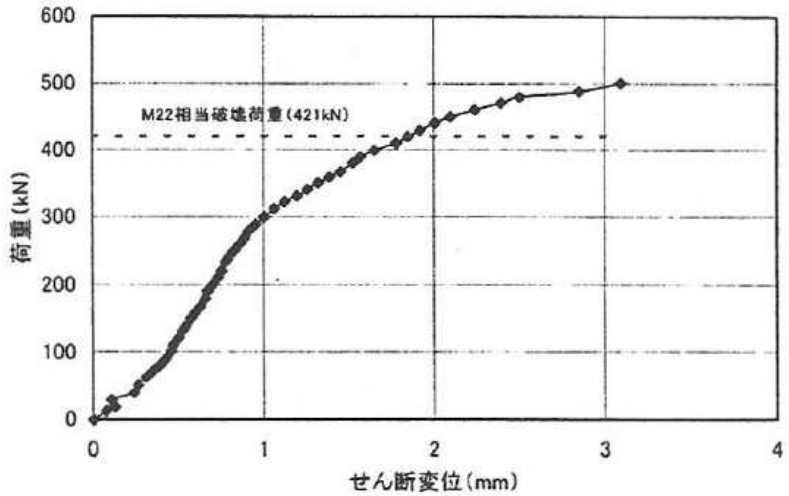


그림 2.1.38 링간 체결부의 전단시험 결과

(3) 압축저항에 의한 경질고무 실재의 한계지수압에 관한 연구

복잡한 지하구조물의 조인트면에서 확실하게 지수할 수 있는 주입식수 팽창성 고무지수재를 사용한 주입식 지수공법이 개발되었다. 지금까지 이 주입식 지수식 수팽창성 고무지수재를 사용한 조인트부의 지수의 메커니즘을 실재 실드세그먼트를 모델화한 플랜지형 지수실험장치를 통해 조사해 왔다. 그 결과 지수재를 통해 조인트부분에서 압축저항에 의해 지수작용을 하는 새로운 메커니즘을 발견할 수 있었다. 이 메커니즘은 구조물의 조인트부분 간에 정형지수재를 끼워넣어 작용수압보다 큰 접면응력까지 단단히 조이는 것으로 지수성을 확보해왔던 종래의 지수방법과는 다르다. 이 압축저항을 이용한 지수방법은 접면응력을 크게할 수 없는 쉽게 변형되는 고무탄성재로도 10MPa이상의 지수능력을 발휘하였다. 이 연구에서는 조인트면에 설치된 지수갱에 주입된 수팽창성 고무재가 젤화 될 때까지 리크방지재로 사용되고 있는 틈마개 실재에서도 지수기능이 있는 것을 추정할 수 있었다. 이 틈마개 실재는 얇은 경질고무로 만들어져 있다. 이 경질고무의 인장강도는 수팽창성고무재보다 50배 이상 강하다. 만약 이러한 견고한 고무재를 통해 지수가 가능하다면 그 지수성능은 비약적으로 커질 것으로 추측한다.[13)]

조사된 연구에서는 경질고무재로 만든 경질고무 실재로도 압축저항을 이용한 지수방법의 활용이 가능한 지를 조사하였다. 그 결과, 경질고무 실재로도 충분히 압축저항을 이용할 수 있도록 설치함으로써 큰 지수능력을 얻을 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 경질고무 실재로도 압축고무 실재로도 압축저항에 의해 지수능력을 발휘할 수 있는 것이 밝혀졌다. 실제로 실드세그먼트는 주입식수팽창성구재지수재가 젤화될 때까지 경질고무 틈마개 고무 실재가 사용되고 있다. 이 경질고무 틈마개실재에서도 압축저항에 의한 지수능력이 있을 것이라 생각되어 왔다. 따라서 이 한계지수압의 예측도 동시에 이루어졌다.

그림 2.1.39는 주입식 수팽창성 고무재를 사용한 실제로 사용된 실드세그먼트의 모식도를 나타낸다. 주입식 수팽창성고무재는 부정형지수재라고도 불리기도 하며 그림과 같이 지수갱에 주입된다. 이 지수갱의 상하부에는 주입재가 젤화될 때까지 리크방지로서 틈마개고무실재라 불리는 두겹의 고무재가 설치된다. 이러한 경우의 지수 메커니즘을 조사하기 위해 틈마개고무 실재를 단순화한 한 장형의 (두께 0.2~2mm) 얇은 경질고무 실재와 수팽창성고무재를 병용한 것을 그림 1.36에 나타낸 것처럼 설치하고 지수실험을 수행한 결과 얇은 경질고무 틈마개 실재가 지수효과를 증가시키는 것을 알 수 있었다. 따라서 경질고무만으로 이루어진 실재에 대한 실험을 실시하였다.

그림 2.1.40은 경질고무 실재의 모식도를 나타낸다. 경질고무 실재는 두께와 높이

를 바꾸어 지수실험에 사용하였다. 두께는 내경을 조절하여 바꾸었다. 최소 두께는 자립성이 필요하므로 3.1mm로 하였다. 최대 두께는 10.1mm이다. 이들의 형상과 물성을 표 2.1.10의 재료 No. T0에 나타내었다. 또한 경질고무 실재 혹은 스테인레스제의 실재도 제조하였다. 그 형상과 물성은 표 2.1.10의 재료 No. T1～T4와 같다. 한편 경질고무를 틈마개재로 사용할 경우에는 경질고무 틈마개 실재라 하고, 지수재로 사용한 경우는 경질고무 실재라 부른다.

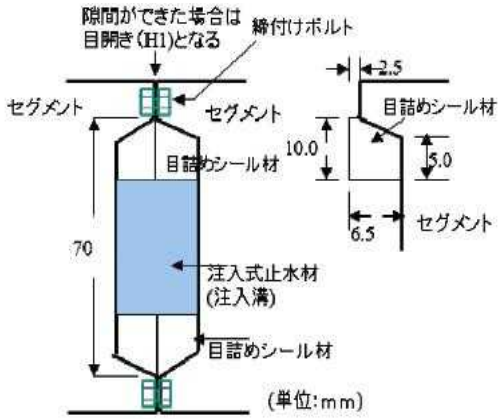


그림 2.1.39. 주입식 지수재의 쉴드 세그먼트 접속부 모식도

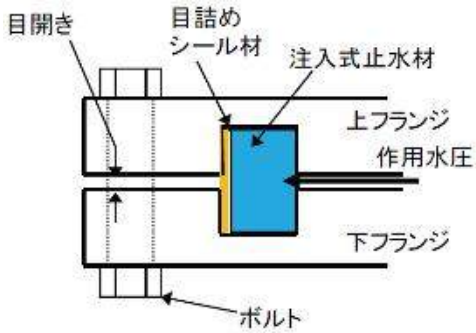


그림 2.1.40 주입식 지수재와 경질고무 샐재를 병용한 지수실험

표 2.1.10 지수재의 형상과 물성

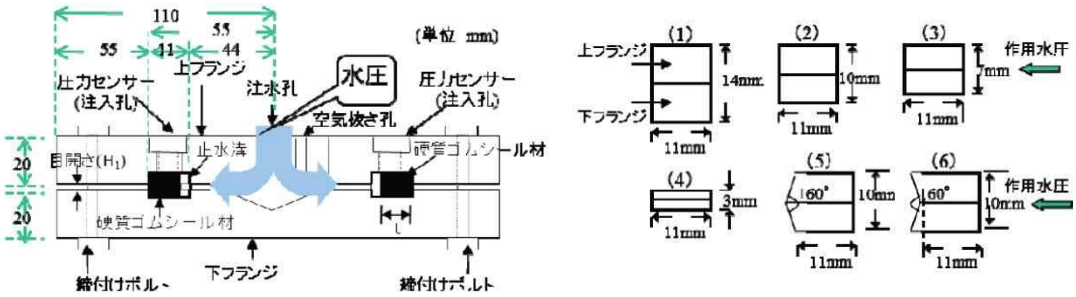
재료 No	재질	형태	인장강도(MPa)	두께(mm)	높이(mm)
T0	고무	한장	5.908	3.1, 5.1, 10.1	4.0～19.0
T1	고무	한장	6.252	5.0	15.6
T2	고무	한장	6.252	10.0	15.6
T3	스테인리스	한장	-	0.3	10.0
T4	고무	두겹	6.252	10.0	15.2

지수실험은 실드터널의 세그먼트의 조인트부를 모델화한 원형 플랜지형의 지수실험장치를 제작하여 실시하였다. 지수실험장치는 지금까지의 연구결과에서 사용한 것과 동일하지만 사용한 경질고무 실재의 최대두께는 10.1mm이므로 한계지수압도 클 것으로 예상하였다. 따라서 지수실험장치의 능력을 약 10MPa 크게하여 최대 35MPa까지 실험 가능하도록 하였다. 지수실험장치의 개요는 그림 2.1.41(a)와 같다. 지수실

험장치는 상하의 원형플랜지로 구성되어 있으며 상부 플랜지에는 주수공, 공기제거공 및 주입공이 장착되어 있다. 이번 실험에서는 주입공을 사용하지 않으므로 이 주입공에 압력센서를 장착하여 경질 실재의 접면응력을 측정하였다. 또한 상하 플랜지에는 경질공무 실재를 설치하는 지수갱이 장착되어 있다. 또한 지수갱의 형상차이에 따른 지수능력을 조사하기 위해 갱의 높이를 바꾼 것과 이번에 처음으로 제작한 티퍼를 장착한 것, 총 6종류의 지수실험장치를 준비하였다.

쉴드터널 세그먼트 등 지하구조물의 조인트부의 종래의 지수방법에서는 구조물의 조인트부분에 경질고무재를 설치하여 수압보다 큰 압력으로 단단히 죄어 지수성을 발휘한다. 따라서 경질고무 실재와 같은 재질로 이 보다 한층 더 큰 외형 130mm, 내경 110mm의 링상의 고무를 준비하였다. 이 링상의 구무 두께(t)는 100mm, 높이(H0)는 5mm이다. 이 링상의 고무를 정형지수재로 사용하기 때문에 지수갱부분을 플랜지의 지수갱의 외주에 설치하였다. 그 후 볼트를 장착하여 접면응력을 크게하여 지수실험을 실시하였다.

볼트의 조임력은 정형지수재와 플랜지 간의 초기접면응력(Pi)가 0.5~1.5MPa의 범위가 되도록 하였다. 이 경우 지수갱의 형상은 지수능력에 영향을 미치지 않을 것이라 판단되기 때문에 그림 2.1.41(b)의 (2)에서 나타내듯 깊이 10mm의 지수갱을 갖는 지수실험장치를 사용하였다.



(a) 지수시험 장치 (b) 지수갱의 형상

그림 2.1.41 지수실험장치와 지수갱

압축저항에 의한 지수실험은 경질고무 실재를 지수갱에 설치하여 주수공으로부터 수압을 가하여 한계지수압을 측정하였다. 경질고무 실재의 지수능력은 틈새(H1)와 지수재의 두께(t)를 바꾸어가며 파악하였다. 볼트의 조임력에 대해서는 실시하지 않았으므로 상하 플랜지와 경질고무 실재간에 작용하는 초기접면응력은 0이다.

압축저항에 의한 지수실험 결과는 다음과 같다.

① 경질고무 실재는 틈새를 막기 위해 설치함으로써 압축저항을 이용한 지수기능

을 발휘하는 것이 가능하다.

② 부드러운 주입식 지수재의 한계지수압을 통일적으로 나타내는 주이론식은 경질고무 실재의 한계지수압에도 적용이 가능하였다.

③ 초기접면응력과 압축정항을 병용한 한계지수는 초기접면응력에 의하여 틈새가 작아지므로 압축저항이 커지는 경향을 보이나, 압축저항은 초기접면응력을 증가시켜도 커지지 않는 경향을 보였다.

④ 두 겹으로 합친 경질 고무실재는 한장의 경질고무실재와 마찬가지로 틈새로 경질고무 실재의 일부분이 밀려나와 지수능력을 상실한다. 두 장을 합친 면으로부터의 누수현상은 없는 것을 확인하였는데 이를 통해, 두 장을 합친 경질고무 실재의 접면은 지수기능에 있어서 장애가 되지 않는다는 것을 판단할 수 있었다.

⑤ 실제의 틈마개재는 틈새를 막기 위해 설치되는 것이므로 지수기능을 발휘한 경우에 큰 지수능력을 갖을 수 있을 것이라고 사료된다.

3. 강연선을 이용한 쉴드터널 체결방식

가. 국내외 건설 분야의 긴장재 활용

본 연구에서 개발 중인 강연선 체결방식은 강연선에 프리스프레스를 도입하여 각 세그먼트를 연결 시키는 방식으로 기존에 사장교, 현수교, 아치교 등 거대 교량의 케이블로 많이 사용되는 강연선의 우수한 인장력과 유압잭의 높은 압력을 이용하여 시공하게 된다. 특히 강연선을 이용하는 프리스트레스는 구조분야에서는 활발히 사용되는 기술로 교량이나 건축물, 암거 등 다양한 분야에 활용되고 있다. 따라서 강연선 체결방식 개발을 위해 국내외 건설 분야에서 사용되고 있는 긴장재 활용 및 기술개발 현황을 조사하였다.

(1) 프리스트레스

(가) 프리스트레스의 개념 및 역사

프리스트레스의 기본 개념은 하중에 의하여 발생하는 인장응력을 상쇄하기 위해 미리 압축응력을 도입하는 것으로 건설용으로 주로 활용되고 있다. 대표적인 건설재료인 강재와 콘크리트 중, 강재는 압축력 재하 시 좌굴의 위험을 가지게 되므로 강재에 프리스트레스를 활용하는 경우는 드물고, 압축에는 강하지만 인장에는 약한 콘크리트와의 조화가 쉽기 때문에 콘크리트 부재에 주로 활용되고 있다.

프리스트레스의 초기개념은 1872년에 미국의 P.H.Jackson이 프리스트레싱 시스템을 착상하여, 철근으로 화분 등에 프리스트레스를 도입하는 것으로 시작되었다. 1888년 독일의 C.W.Doehring이 프리스트레스트 슬래브를 개발하였으나 콘크리트의 고유의 성질인 크리프와 건조수축에 의해 시간경과에 따른 프리스트레스트의 감소로 실패함에 따라 실용화가 되지 못하고 있었으나, 1900년대 초반 미국의 R.E.Dill이 응력손실 극복을 위해선 고강도 강재가 필요하고, 콘크리트의 건조수축 및 크리프로 인해 응력손실이 발생한다는 사실을 알아내었으며, 포스트 텐셔닝(Post Tensioning)의 개념을 제시하였다. 이에 미국의 스트롱홀드사에서 고강도 강연선을 개발하여 현수교 사장교 등에 활용하기 시작했으며, 1928년 프랑스의 E.Freyssinet이 연성이 큰 고강도 강재에 의해 응력손실을 극복할 수 있는 방법을 제시하고 1940년에 원추형 쐐기로 된 PS강재 정착장치를 포함한 프레시넷(Freyssinet) 시스템을 발표함으로써 콘크리트에 고강도 강연선을 적용하여 프리스트레스 콘크리트를 개발하기 시작하였다. 이후 1945

년 제2차 세계대전후 전후복구 과정에서 PSC교량의 건설이 급속하게 확산되었으며 최초로 프리스트레스 개념을 도입한 정식교량은 1950년대에 시공되었다.[14)]

(나) 프리스트레스의 도입을 위한 요건

프리스트레스를 구조물에 도입하기 위해서는 다음과 같은 요건이 필요하다.

① 기본재료 : PS 강재, 콘크리트 : 프리스트레스를 도입하기 위해서는 기본적으로 PS강재와 콘크리트가 있어야 한다. PS강재는 소선 7가닥을 꼬아서 만든 강연선인 7연선을 사용하고 있으며, 주로 활용되는 7연선은 직경 별로 12.7mm, 15.2mm, 15.7mm 이 있다. PS강재의 강도는 극한 강도로 표현되며, 가장 보편적인 1900MPa급 강연선이 있고 최근에 2100MPa급과 2400MPa급이 개발되어 적용되기 시작하고 있다.

② 추가재료 : 이 외에도 프리스트레스를 원활히 적용하기 위해서는 쉬즈, 프리스트레스를 도입하기 위한 잭, 프리스트레스를 정착하기 위한 정착구, PS강재의 부식을 막기 위한 그라우트재 등의 장비들이 필요하다.

(다) 프리스트레스의 구분

① 힘의 방향에 따른 구분 : 프리스트레스는 주로 인장재를 활용하여 콘크리트에 압축프리스트레스를 도입하는 포스트텐션 프리스트레스가 있고, 이와 반대되는 개념인 컴프레션 프리스트레스가 바이프레, 바이콘 등의 공법에서 활용되고 있으며, 강재의 휨 복원력을 이용하는 휨프리스트레스를 프리플렉스 거더공법에서 활용하고 있다.

② PS강재 긴장시기에 따른 구분 : 프리스트레스가 도입되는 콘크리트가 굳기 전에 PS강재긴장하면 프리텐션 공법이 되는데, 프리텐션공법은 쉬즈가 불필요하지만, PS강재에 도입되는 프리스트레스를 지지할 수 있는 반력대가 필요하다. 이에 반해 포스트텐션 공법은 도입되는 콘크리트가 굳은 후에 PS강재긴장하는 것으로 쉬즈가 필요하지만, 콘크리트 자체가 반력대의 역할을 한다

③ 프리스트레스 도입후, PS강재와 콘크리트의 부착상태 : 프리스트레스를 도입하고 난 후에 강연선을 비부착 상태로 유지하는 공법이있는데, 여기에서는 구리스 등을 활용하여 PS강재의 부식 방지하여야 한다. 이에 반해 부착 강연선은 정착후 그라우팅을 통하여 PS강재와 콘크리트가 부착이 되도록 한다.

(라) 프리스트레스의 손실

프리스트레스에서는 다양한 종류의 손실이 발생한다. 즉 긴장력의 100%가 남아 있는 것이 아니라 다양한 이유에 의해 긴장력이 손실되는데, 긴장력을 도입하는 과정에서 발생하는 즉시손실이 있으며, 긴장력을 도입한 후 장기간에 걸쳐서 발생하는 장기

손실이 있다. 즉시손실은 긴장단계에서 고려하여 힘을 증가해서 당이고, 장기손실의 경우 장기손실량을 미리 예측하여 설계 단계에서 고려하여야 한다. 긴장단계에서 고려하여 적용하는 손실은 아래의 표 2.1.11과 같이 구분할 수 있다.

표 2.1.11 프리스트레스 손실

즉시손실	► 마찰손실: 강연선과 쉬즈사이의 마찰에 의한 손실 ► 탄성수축: 프리스트레스력에 대한 콘크리트수축에 의한 손실 ► 정착장치 슬립: 웨지의 슬립에 의한 손실
장기손실	► 콘크리트의 크리프: 콘크리트 고유의 성질 ► 콘크리트의 건조수축: 콘크리트 고유의 성질 ► PS강재의 릴렉세이션

프리스트레스의 손실은 강연선의 입장에서가 아닌 콘크리트의 입장에서 표현하는 것으로, 잘못 이해할 경우 '콘크리트가 건조수축에 의해 수축하며, 강연선이 그만큼 수축하여 도입된 프리스트레스가 손실된다'고 생각할 수 있으나 보다 정확하게 이해하기 위해서는 '콘크리트의 내력과 PS강재의 힘이 평형을 이루고 있는 상태에서 콘크리트가 응력의 변화가 없이 수축하려고 하므로, PS강재의 힘도 어느 정도 손실되고, 콘크리트도 수축하고 싶은 것보다 덜 수축하여 손실이 발생한다'고 표현할 수 있다.

프리스트레스의 손실은 강재의 단면이 클수록 손실이 크고(고강도 강연선의 중요성), 어린 재령의 콘크리트에 프리스트레스를 도입할수록 손실의 양이 증가하며, 도입되는 힘이 아닌, 유지되는 힘이 클수록 크다(크리프).[15)]

(2) 국내 건설 분야 긴장재 활용

국내에서 외부 긴장재를 이용한 보강공법은 콘크리트교량에 먼저 적용되어 적지 않은 시공사례가 소개된 상태이며, 강교량의 경우는 근래에 외부 긴장재를 통한 보강공법이 소개되어 정적인 하중에 대한 보강효과가 검토되고 있는 상황이다.

콘크리트교량은 일찍부터 PSC의 원리를 이용하여 기존 교량에 대한 보강공법으로 외부 긴장재를 이용하였으나, 다양한 텐던 모양에 대한 역학적인 특성과, 프리스트레싱 강재의 극한응력과 해석방법에 대한 연구들이 거의 이루어지지 못했다.

특히 아쉽게도 현재까지 내부 부착 프리스트레싱 강재와 외부 비부착 프리스트레싱 강재를 함께 갖는 콘크리트 보의 극한 휨 거동 해석을 위한 공인된 모델은 없으며 그 연구 또한 매우 드물다. 다만, 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력에 대한 연구로

는 국내에서 몇몇 연구가 있다. 그러나 외부 FRP 긴장재를 이용한 보강공법은 아직 시도되지 못하고 있으며, 이를 실용화하기 위한 정착 장치의 개발 같은 요소기술이나 내부 보강재를 고려한 FRP의 극한응력 예측식 같은 설계기술 개발에 대한 연구는 아직 발표된 바가 없다.

강교의 경우 I형 강재거더와 콘크리트 슬라브로 이루어진 강합성교량에 대한 연구가 진행되었으며, 정적하중에 대한 보강효과가 입증되었다. 1995년 이후에는 후긴장을 이용한 단순 합성 격자형교와 연속 합성 격자형교의 보강방법에 관한 연구가 이루어져 외부 후긴장에 의한 횡분배 효과와 연속교의 정·부 모멘트 구간에 긴장재 설치 위치에 관한 이론식을 제안하였다. 2000년 이후에는 외부 후긴장의 적용에 따른 공용중인 판형교에 대한 거동을 실험적으로 연구하였고, I형 강재와 강합성보 이외에도 강상자형과 트러스교량에서 후긴장을 이용하는 보강방법을 제시하였다. 또한 텐던의 기하배치 형상에 따른 휨거동의 특성과 횡분배에 대한 실험적 연구가 수행되었고, 외부 후긴장 보강 공법을 도입할 경우, 효율성 측면에서 증가 프리스트레스력을 고려한 강합성교량의 장기거동에 대하여 연구되었다.

최근에는 외부 후긴장 공법에 의한 강박스거더 연속교의 부모멘트부의 균열 제어, 증가 프리스트레스력의 산정 방법과 교량의 강성을 고려한 외부 후긴장공법의 보강설계에 관한 연구가 진행되고 있다.[16] 그러나 긴장재의 정착장치를 설치함으로써 발생하는 국부 좌굴이나 정착구의 안정성과 긴장재의 피로문제에 대한 연구가 이루어지지 않은 상황이다.

(3) 국외 건설 분야 긴장재 활용

외부 프리스트레싱으로 보강된 콘크리트 부재의 해석에 있어서 ACI시방서(1995)의 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력식은 주인장재로서 프리스트레싱 강재를 사용하였을 때 내부 철근이나 프리스트레싱 강재의 영향을 고려하지 않은 예측식으로 이를 외부 비부착 텐던을 함께 갖는 콘크리트 보에 적용하는 것은 적합하지 않다. 왜냐하면 외부 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력은 내부철근의 영향을 받기 때문이다.[15]

Du와 Tao(1985), Campbell과 Chouinard(1991)는 최소 철근량 이상을 갖는 비부착 프리스트레스트 콘크리트 보에서 비부착 프리스트레싱 텐던의 극한응력은 철근의 양이 증가함에 따라 감소한다는 사실을 실험연구로부터 확인하였고 철근의 영향을 포함한 총 보강지수가 극한응력의 예측에 합리적인 변수임을 주장하였다. AASHTO LRFD 시방서(2002)와 Canada 시방서(1984) CAN3-A23.3-M84는 비부착 프리스트레

싱 강재의 극한응력은 텐던과 중립축의 깊이 차의 함수로 표현하였다.[17)]

한편, 프리스트레싱 강재가 콘크리트에 부착되어 있지 않을 때에는 극한하중 상태에서 보의 휨 거동 해석은 어려움에 부딪친다. 이 경우 프리스트레싱 강재와 주위 콘크리트의 완전부착 가정은 더 이상 유효하지 않게 되어, 보의 변형은 단면종속(section dependent)이 아니라 부재종속(member dependent)이 된다. 완전부착 가정을 사용할 수 없음은 많은 연구자들로 하여금 실험 결과들을 곡선추정(curve fitting)함으로써 문제를 해결하게끔 이끌었다. 이는 그들로 하여금 극한상태에서 비부착 프리스트레싱 강재의 응력을 실험식을 기초로 하여 예측하였고, ACI시방서(1995)도 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력을 예측하는데 실험식을 채용하고 있다.

강교량의 경우는 강재거더와 콘크리트 슬라브가 결합된 강합성거더의 외부 긴장보강법에 관한 연구가 진행되어 왔다. 즉 Szilard(1959)은 지간을 따라서 포물선 형태의 텐던을 후긴장한 강합성 구조에 관한 연구를 발표하였다. 이 연구에서 콘크리트 슬라브와 강재빔이 완전히 일체 거동한다고 가정하였다. 그리고 지속하중 하의 최종응력을 계산하기 위해서 "increased modular ratio method"방법을 사용하였다. Tachibana et al.(1963)은 bent-un 텐던으로 보강된 두 개의 강합성교량의 거동을 연구하였으며 이 연구를 통하여 외부 프리스트레싱으로 보강된 강합성교량은 post-tensioned된 강합성교량과 거의 유사한 내하력을 가짐을 밝혀내었다. Reagan(1966)은 외부 프리스트레싱으로 보강된 강합성거더를 해석하기 위해서 "simple strain method"를 제안하였다. 이 연구에서 그는 강재빔과 콘크리트 슬래브의 응력이 선형분포한다고 가정하고 연결부의 응력의 불연속성을 배제하였다. 많은 건물과 교량의 빔 거더의 분석을 통해서 구조물의 파괴는 텐던의 파괴보다는 콘크리트 슬래브의 파괴로부터 발생한다고 결론지었다. Hoadly(1963)는 경간을 따라서 고강도 텐던에 의해서 직선형으로 pre-tensioned된 단순지지 강합성 보의 거동을 연구하여 pre-tensioned 강재보가 구조물의 사하중을 지탱한다는 사실을 밝혔다. Abbott(1960)은 수평방향으로 설치된 텐던의 영향을 연구하였다. 그의 연구에서 경간을 따라서 발생하는 응력을 계산하고, 윗방향 변위, 하부 플렌지의 좌굴문제를 고려하기 위해서 탄성보이론을 사용하였으며 이론에 의해 계산된 응력과 변위값을 실제 실험값과 비교하였다.[18)]

이후로도 강합성거더에 대한 외부 긴장에 대한 연구는 계속되어, Saadatmanesh et al.(1989)은 직접 실험을 통하여 얻은 데이터를 통해서 구조물의 변형을 예측하였다. 그리고 연속 합성거더의 정모멘트 구간과 부모멘트 구간에 각각의 외부 긴장도입을 위한 기준을 제시하고 그에 따른 식을 유도하였다.[19)] Troitsky et al.(1989)은 연속합성거더의 정밀해석을 통해서 연속교의 내부힌지에서의 부모멘트를 효과적으로 감소시킬 수 있다는 사실을 밝혔다.

1990년대에 이르러 외부 긴장방법을 실 교량에 적용하기 위한 고려사항으로 피로문제가 대두되었다. Li et al. (1995)은 외부 프리스트레싱으로 보강된 강합성보의 피로거동을 연구하였으며 긴장재의 피로문제를 고려한 적절한 긴장력의 크기를 제안하였다. 그리고 하부 플렌지에 cover plate를 용접한 후 강합성보의 피로실험을 통해서 cover plate의 피로파괴 메커니즘을 밝혔다. 그리고 최근에는 강봉이나 강연선 외의 신소재를 긴장재로 사용하려는 연구가 진행되고 있다.

(4) 기술동향 분석

외부 긴장재를 이용한 기존 교량의 보강으로 내하력을 향상시킴으로써 현 설계기준을 만족시키거나 교량의 수명을 연장시킬 수 있다면 경제·산업적 측면에서 보다 긍정적인 효과를 얻을 수 있을 것이다. 이를 위해서는 강교 및 콘크리트 교량에서의 정확한 보강설계방안과 보강 후의 유지관리 시스템 개발이 시급한 실정이다. 또한 비부식성의 FRP 봉이나 FRP 텐던이 철근이나 긴장 강재의 대용으로써 매우 이상적인 재료로 기대되고 있다.

외부 긴장재로 보강된 콘크리트 보는 외부 비부착 강재를 가진 부분 프리스트레스트 콘크리트 보로 분류될 수 있는데, 이 부재는 철근이나 내부 프리스트레싱 강재 및 외부 비부착 프리스트레싱 강재로 보강되어 있다(Naaman,1987). 그러나 이러한 다른 종류의 강재를 조합하여 사용하는 것은 부재의 해석과 설계를 보다 복잡하고 어렵게 만든다. 비록 외부 프리스트레싱 보강공법이 시공의 단순성과 경제적인 이유로 선호되지만 외부 프리스트레싱 텐던으로 보강된 콘크리트 보의 휨모멘트 강도 계산을 위한 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측식은 아직 우리나라 콘크리트 구조 설계기준이나 미국 ACI시방서에 마련되어 있지 못하다. 따라서 내부 철근과 부착 및 외부 비부착 프리스트레싱 강재를 갖는 콘크리트 부재의 통합된 거동에 대한 이해와 강도해석과 예측에 대한 모델이 필요하다.[20)]

현재 국내에서는 아직까지 체계적인 연구가 진행되지 못하여, 외부 강연선 보강공법이 몇몇 현장에 적용되고 있으나, 적정한 도입 긴장력의 산정, 정착브라켓의 내하력 검토, 정착브라켓에 따른 원 콘크리트 구조물의 '내하력 검토에 대한 연구수행이 미미하므로 보강된 구조물의 경우 실제 도입된 긴장력, 강연선 및 정착브라켓과 정착구 주변 콘크리트의 안전율 등에 대한 자료가 체계적으로 분석·정리되고 있지 못한 실정이다.

강교량의 경우 외국에서는 일찍부터 외부 긴장재의 보강효과를 인식하고 정적하중에 대한 극한하중, 응력분포 등에 대한 정밀한 해석과 실제 실험을 통한 비교검토가

이루어 졌으며 나아가 동적하중에 대한 거동, 피로문제에 대한 연구가 이루어졌다. 그리고 탄소섬유나 FRP 등의 신소재를 외부 긴장공법에 적용하려는 시도가 이루어지고 있다. 그러나 국내의 경우에는 외부 후긴장으로 보강된 강합성거더의 정적하중에 대한 해석과 실험을 통해서 그 효과가 입증되었음에도 불구하고 실제 교량에 대한 적용은 미미한 실정이다. 따라서 외부 후긴장을 통한 강교량의 보강을 위해서는 정적하중 및 동적하중 하에서 외부 긴장으로 보강된 강합성거더의 거동에 대한 연구와 국부응력해석, 좌굴에 대한 안정성에 관한 연구가 필요하다. 실제 교량에 외부 후긴장 보강공법의 적용을 위한 보강량 산정 및 다양한 배치형상의 역학적 특성을 고려한 정착부의 상세설계가 요구 되어지고 있다. 최근에 국내에서는 강합성 도로교에 대한 외부 후긴장 보강 공법을 적용하여 기존 공용중인 교량의 보강을 유도하는 방안에 대하여 적극적으로 연구되고 있다. 한편, 외부 후긴장 보강 공법에 있어서 긴장재 배치형태 및 정착단 상세, 도입 긴장력의 합리성 및 지속성, 외부 긴장 전·후의 정·동적 거동 변화 등에 대한 연구가 합리적으로 이루어 질 경우 신설 교량의 장대화를 유도하여 경제적 효과를 유도 할 수 있다. 특히, 외부 후긴장 보강에 있어서 긴장재를 절곡 또는 곡선으로 보강 할 경우 휨보강 뿐만 아니라 전단보강까지 유도 할 수 있어 경제적인 효과를 극대화 할 수 있다. 강합성 도로교에 대한 기존 연구 결과를 살펴보면, 외부 후긴장 보강공법 적용에 의하여 명확한 보강이 이루어지고 보강 효과의 지속성이 매우 뛰어난 것으로 분석되고 있다.[21)]

나. 강연선 체결방식 개념 도출

(1) 일반적인 세그먼트의 구성

세그먼트 링을 여러 개의 세그먼트로 분할하여 조립할 때 기하학적 원인으로 인하여 마지막 세그먼트의 조립이 어렵게 된다. 이를 해결하기 위하여 마지막에 조립되는 세그먼트는 특수한 형상을 하게 되는데 이를 Key 세그먼트(또는 K 세그먼트)라고 부른다. 또한 Key 세그먼트와 직접 연결되는 세그먼트 또한 Key 세그먼트의 측면부 형상과 일치하도록 다른 세그먼트와는 다른 형상을 하게 된다. 이를 B 세그먼트라 부르며, 나머지 일반적인 세그먼트는 A 세그먼트라 부른다. 따라서 하나의 세그먼트 링을 구성하는 세그먼트의 종류는 여러 개의 A 세그먼트와 두 개의 B 세그먼트 그리고 한 개의 Key 세그먼트로 구성하는 것이 일반적이다. Key 세그먼트의 기능 중 다른 하나는 미완성 상태로 조립된(Key 세그먼트를 삽입함으로써 세그먼트 링 완성) 세그먼트 링에 테이퍼 형태의 Key 세그먼트를 삽입함으로써 링 방향으로 축력을 발생시켜 세

그먼트 이음부 사이의 벌어진 틈을 밀착시켜 준다는 것이다. 이렇게 함으로써 이음부를 견고하게 하여 세그먼트 라이닝의 방수성능이 개선된다. Key 세그먼트는 양쪽 측면에 테이퍼 형상을 한 경우가 대부분이며, 세그먼트 링을 형성하기 위해서는 여러 개의 A 세그먼트와 두 개의 B 세그먼트가 추가로 필요하게 된다.[9)]

그림 2.1.42는 링을 형성하기 위한 Key 세그먼트와 A, B 세그먼트의 구성을 보여주고 있다.

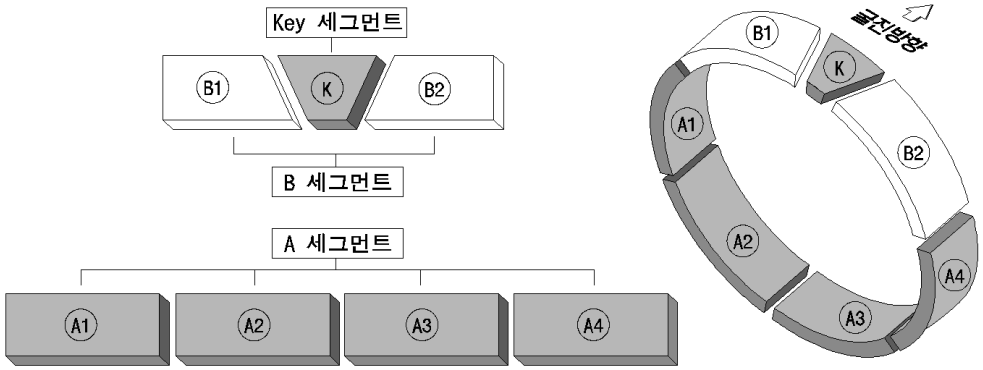
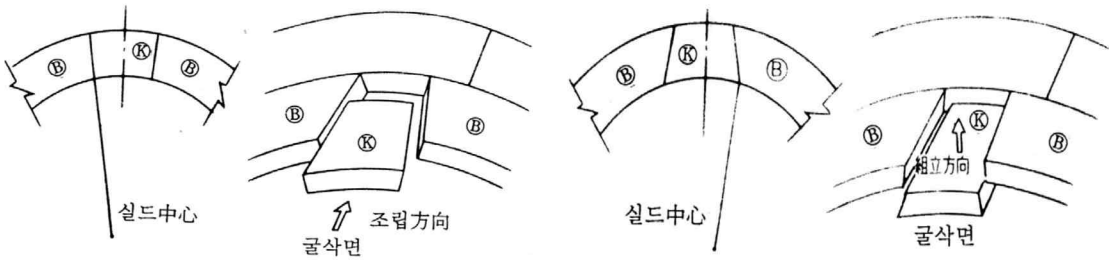


그림 2.1.42 링 형성을 위한 세그먼트간의 구성 상태

또한 세그먼트 링을 조립할 때 마지막으로 결합되는 Key 세그먼트의 삽입방향에 따라 축방향 삽입방식과 반경방향 상입방식으로 구분된다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 마지막 세그먼트의 조립이 일반적인 방법으로는 어렵기 때문이다. K형 세그먼트의 삽입방식에는 그림 2.1.43과 같이 축방향 또는 반경방향 삽입방식이 있다. 축방향 삽입방식의 경우에 K형 세그먼트는 그림 2.1.43(a)와 같이 사다리꼴 형상이고, 세그먼트 간 연결부인 횡이음부 면은 반경방향을 향하고 있다. 쉴드기 전방에서 종방향으로 삽입되어 조립방법은 다소 복잡하지만, 세그먼트 외측에 작용하는 하중에 강한 저항성을 갖는다. 반면에, 반경방향 삽입방식의 경우에 K형 세그먼트는 그림 2.1.43(b)와 같이 직사각형 형상이고 횡이음부 면이 내측으로 열린 형상을 하고 있다. 다른 세그먼트와 동일한 방식으로 설치하므로 시공성은 양호하나 세그먼트 축력에 의해 내측으로 밀리는 경향이 있다.

강연선 체결 세그먼트는 세그먼트간의 횡방향 체결이 생략되는 시스템이다. 따라서 세그먼트 외측하중에 대한 저항성 확보가 용이한 축방향 삽입방식을 적용하는 것이 적합할 것으로 판단한다.



(a) 축방향 삽입방식 (b) 반경방향 삽입방식

그림 2.1.43 Key 세그먼트의 삽입방식

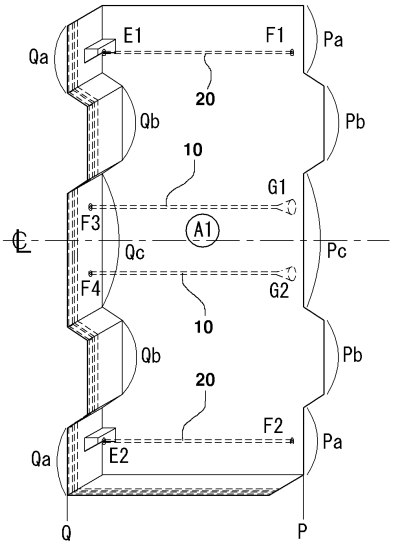
(2) 강연선 체결방식을 위한 세그먼트 구성

세그먼트 링의 분할 수는 세그먼트 제작, 양생, 운반 및 조립의 편이성과 관련되며, 한 개의 링을 구성하는 세그먼트의 개수가 적을수록 조립시간이 단축되고, 이음부의 총길이가 짧아져서 방수 측면에서는 유리하나, 분할되는 세그먼트의 크기가 커지게 되면 제작, 운반, 조립 등에서는 불편하며 세그먼트에 발생하는 단면력도 증가하게 된다. 또한 TBM 내부의 작업 공간, 운반 장비(지게차 등) 및 조립 장비(이렉터) 등의 용량에 따라 세그먼트 크기가 제한될 수 있으므로 세그먼트는 터널직경 등을 고려하여 적절한 개수로 분할하는 것이 바람직하다.[9] 상세한 세그먼트 링의 분할과 세그먼트의 치수는 프로젝트 특정 요구사항을 고려한 세부적인 설계를 통하여 결정되어야 하나, 기존 설계사례를 참고하면 본 연구에서 고려하고 있는 내경 7m 정도인 터널의 경우 세그먼트 링은 6개에서 8개 정도의 세그먼트로 분할되는 것이 바람직할 것으로 판단하여 강연선 체결 세그먼트의 경우 7분할을 기준으로 하였다.

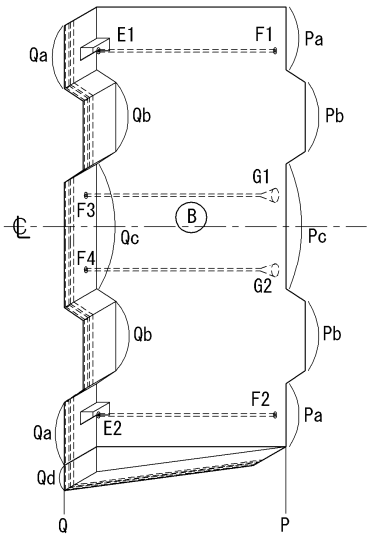
본 연구를 통해서 개발하고자 하는 강연선 체결 세그먼트는 2개의 센터관 통로와 2개의 단부관 통로가 형성된 각 세그먼트를 종방향으로 배열하여 체결하는 방식으로, 4개의 종방향 세그먼트를 한 세트의 체결단위로 하고있다. 연구에서 고안된 세그먼트의 형태는 크게 A(A1,A2,A3,A4)세그먼트, B 세그먼트, C 세그먼트, K 세그먼트로 구분할 수 있으며 각 세그먼트의 형상은 다음 그림 3.1.8과 같다. 특히, K 세그먼트는 키 세그먼트로서 쐐기형태를 가지고 있다.

세그먼트 조립 시 A1 세그먼트와 A4 세그먼트를 하단부에 위치시키고 A2, A3 세그먼트를 접면시킨 다음, A2 세그먼트에는 B 세그먼트, A3 세그먼트에는 C 세그먼트를 각 각배열한 후, 마지막으로 B 세그먼트와 C 세그먼트사이에 K 세그먼트를 삽입한다. 특히, 각 세그먼트의 횡방향에는 전단키가 형성되어 있고, 종방향으로는 각 열의 세그먼트를 지그재그 형태로 배열하고 강연선으로 체결함으로써 전단키에 의한 전단응력 및 강연선에 의한 강성 중첩으로 강성의 증대효과를 기대할 수 있다. 강연선

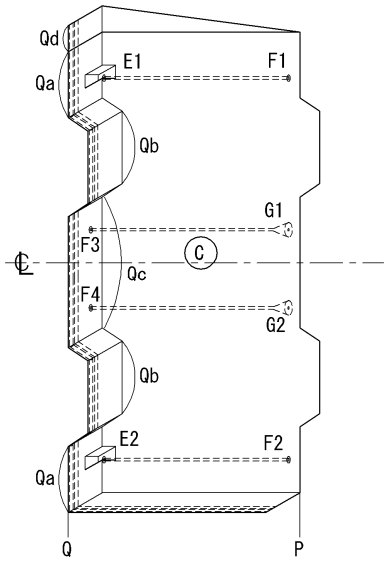
체결시 4개열의 종방향 세그먼트를 하나의 체결단위로 하여 강연선을 삽입하여 긴장시킨 후 정착하게 되며, 각 세그먼트에는 하나의 강연선만 정착되고, 나머지 3개의 강연선은 관통로를 거쳐 다른 열에 위치한 세그먼트와 동일한 방법으로 조립한다.



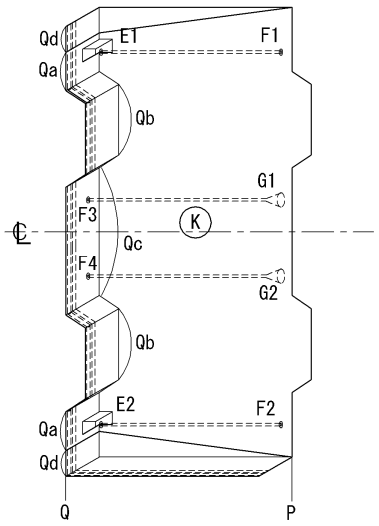
(a) A 세그먼트(A1, A2, A3, A4는 동일)



(b) B 세그먼트

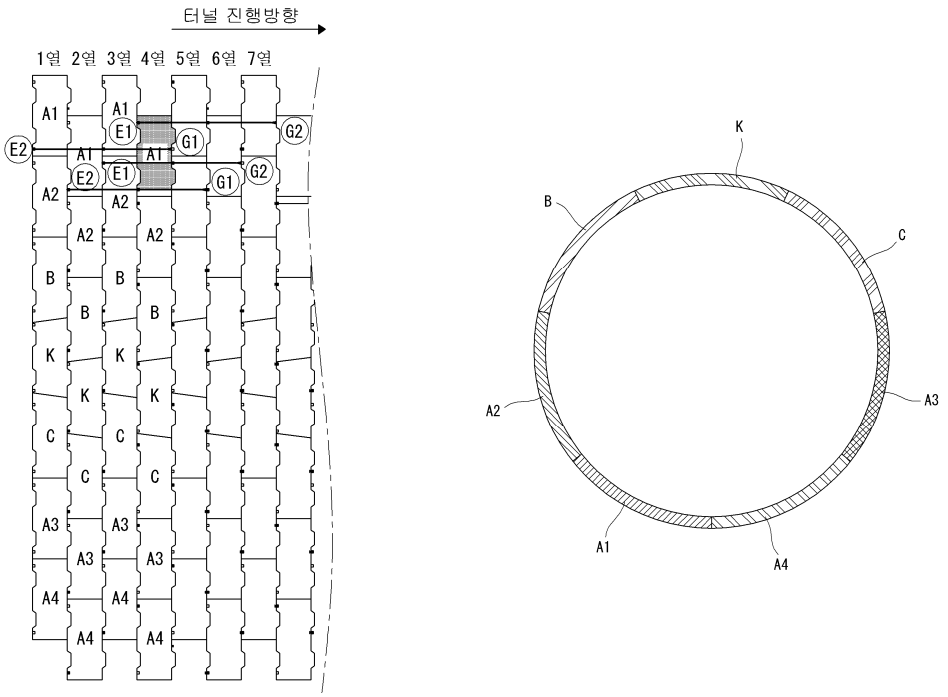


(c) C 세그먼트



(d) K 세그먼트

그림 2.1.44 강연선 체결 세그먼트 형상



(a) 세그먼트 배열 모식도 (b) 세그먼트 조립위치

그림 2.1.45 강연선 체결 세그먼트의 구성

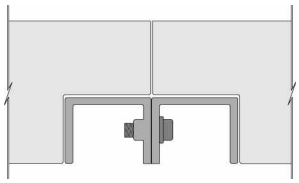
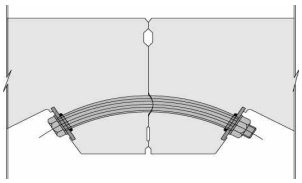
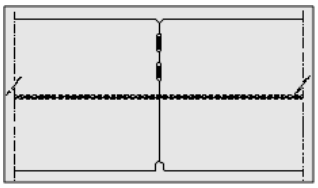
(3) 기존 체결방식 및 강연선 체결방식 비교

일반적으로 기존 체결에 사용하는 볼트 방식은 볼트의 탄성범위 내의 조임력과 볼트 축력이 비례한다는 것을 원리로 하며, 고장력 볼트의 체결은 너트에 소정의 토크를 작용시켜 볼트에 축력을 도입함으로써 체결력을 얻는 방법이다. 따라서 세그먼트 부재와 부재의 연결에 있어 볼트의 체결력은 볼트 연결이 완료된 후 볼트의 인장력으로 부재가 서로 이격하려고 하는 힘에 대해 저항하는 메카니즘으로 설명할 수 있다.

강연선 체결방식은 강재의 프리스트레스를 이용하는 방식이며 세부적으로는 포스트텐션 방식에 해당된다. 강연선체결방식은 세그먼트 부재와 부재 양끝에서 유압잭을 이용한 압축력과 강연선의 긴장에 따라 체결이 이루어진다.

체결력을 발휘하는데 있어서 볼트 체결방식은 볼트 체결 후 볼트의 나사선에 의한 마찰 및 도입축력으로 외부의 힘에 저항하는 간접적인 체결방식이며, 강연선에 유압을 재하하여 세그먼트 부재들을 연결시키는 강연선 체결방식은 체결력 발휘에 있어 직접적인 압축력 재하 및 정착 후에는 강연선에 도입된 긴장력으로 저항하게 되므로 볼트 체결에 비해 더 효과가 뛰어날 것으로 판단된다.

표 2.1.12 기존 주요 체결방식과 강연선식 체결시스템 비교[9)]

구분	볼트박스 방식	곡볼트 방식	강연선식 체결시스템
단면 형상			
체결력	-체결력 아주 높음	-체결력 높음	-체결력 아주 높음
조립성	-조립공정 간편, 시공성 좋음	-조립공정 비교적 복잡	-조립공정 간편, 시공성 좋음
정밀도	-조립 정밀도 양호	-조립 정밀도 보통	-조립 정밀도 양호
체결부 누수 대책	-볼트 및 볼트박스 연결부 누수대책 필요	-볼트 및 볼트구멍 연결부 누수대책 필요	-추가적인 누수대책 필요 없음
누수 발생	-주기적인 누수 발생	-주기적인 누수 발생	-누수 가능 요인 완전 차단
안정성	-볼트박스 설치로 구조적 취약 -Jack 추진력에 대한 대응성 좋음	-안정성 높음 -Jack 추진력에 대한 대응성 좋음	-안정성 높음 -Jack 추진력에 대한 대응성 아주 좋음

(4) 강연선 체결방식의 쉴드터널 적용성 검토

강연선을 이용하는 프리스트레스는 구조분야에서는 활발히 사용되는 기술이나, 쉴드터널에는 활용된 적이 전무한 상황이다. 이러한 강연선을 쉴드 쉴드터널에 적용하기 위하여는 구조안전성과 시공성 등을 종합적으로 고려한 검증과 상세개발이 이루어져야 한다. 쉴드터널에 강연선을 이용한 프리스트레스를 적용하기 위해 고려해야할 주요 사항은 다음과 같다.

- 세그먼트 내에 강연선 삽입은 원활하기 될 것인가
- 정착부는 세그먼트에 적절하게 설치할 수 있는가?
- 긴장용 유압잭 및 유압펌프를 시공 공간이 협소한 쉴드터널 시공에 적용할 수 있는가?
- Prestress를 적용할 경우 곡볼트, 경사볼트 등 기존의 체결방식을 활용하는 것

보다 초기체결력이 좋을 것인가?

- Prestress적용시 체결력 이완은 없을 것인가?
- 부착강연선을 사용하는 경우 철근량 경감이 가능할 것인가?

(가) 강연선 삽입의 문제

개별 강연선의 삽입은 세그먼트 내에 개별강연선 삽입을 위한 주입구만 설치될 수 있으면 원활하게 삽입할 수 있으므로 큰 우려가 없다. 본 연구에서 개발된 강연선 체결방식 적용을 위한 세그먼트에는 강연선 주입을 위해 직경 2cm의 강파이프를 삽입하였으며, 현재 일반적으로 사용되는 7연선의 단면은 12.7mm, 15.2mm, 15.7mm 가 있으므로 강연선 삽입 및 긴장에 있어 충분한 단면을 확보 할 수 있으므로 쉴드터널에의 강연선 적용은 문제가 없는 것으로 판단된다. 또한, 강연선 재료를 좁은 터널 내에서 원활하게 운송할 수 있는 방법이 필요하며 시공 시에도 협소한 터널 안에서 원활히 시공이 가능한가에 대한 고려가 필요하다. 강연선은 제조 후 필요한 길이에 따라 절삭하여 운반하게 되는데 이 때 통상적으로 강연선 이동 시 원형으로 말아서 운반하며 이 직경은 약 1.5m 가량이 되므로 부피는 문제가 되지 않으며, 강연선 체결에 필요한 강연선의 길이는 세그먼트 부재의 길이에 따라 결정되는데, 일반적으로 세그먼트의 길이는 1.2~1.5m로 강연선 체결방식 도입 시 4개를 체결하면 강연선의 길이는 약 5~7m 가량으로 그 무게 역시 운반에 큰 어려움이 없을 것으로 판단된다. 또한 현재 좁은 터널 시공 공간의 해결을 위해 개발되고 있는 강연선 삽입기를 적용한다면 강연선의 삽입의 문제는 쉽게 해결될 것으로 판단된다.

(나) 정착부재 설치

Prestress를 활용할 경우 정착부 설치가 중요한데, 정착부는 강연선량에 따라 다르다. 본 연구에서처럼 1개의 강연선을 활용하는 경우 정착구 설치에 큰 문제가 없을 것으로 판단되며 유사한 구조물인 프리캐스트 암거를 참고 하였을 때 정착부재 설치를 위한 공간만 세그먼트에 제작이 된다면 시공과정 및 운용시에도 어려움이 없을 것으로 판단된다.

(다) 유압 잭 및 유압 펌프

프리스트레스 도입을 위해서는 유압잭과 유압펌프는 필수적인데, 협소한 공간에서 유압잭과 유압펌프를 설치하고 활용하는데 어려움이 있을 것으로 예상되었으나 굴착을 위한 실드 머신은 충분한 압력을 가지고 있으며 쉴드머신에서 유압을 얻어 시공하는 것은 큰 어려움이 없으며, 긴장에 필요한 유압잭은 길이가 약 30cm로 작아 사용성

이 좋으므로 터널 적용에 문제가 없을 것으로 판단된다.

(라) 초기 체결력

일반적으로 강연선의 체결력은 유압 펌프와 잭을 이용하여 동일한 긴장력으로 체결하게 되므로 볼트의 체결력보다 신뢰도가 높고, 설계 체결력을 얼마로 설정하는지에 따라 원하는 체결력을 도입할 수 있어 볼트 이용 보다 더 좋을 것으로 판단된다. 또한 4장에 나와있는 세그먼트 실험 시에 이에 대한 검토 수행을 계획하였다.

(마) 체결력 이완

Prestress에 의한 체결력 이완은 장기거동에 의해 발생할 수 있지만, 본 구조물의 경우 강연선량에 비해 콘크리트 량이 많으므로 체결력 이완의 발생 량은 매우 적을 것으로 평가된다. 또한 체결장치 중 정착부의 이완이 없으면, 체결력 이완이 발생하지 않으므로 볼트를 활용하는 것보다 유지관리에 더 편리할 것으로 판단된다. 또한, 쉴드머신 추진 시 조립된 세그먼트는 반력대의 역할을 하게 되는데 이때 세그먼트 조립체가 받는 압력은 체결부재를 통해 결합되어 있는 세그먼트간의 체결을 더욱 결속히 하게 되므로 체결장치는 세그먼트 조립체의 이탈이 되지 않을 정도의 저항력을 확보하면 체결력의 이완은 큰 문제가 되지 않으며, 강연선의 경우 볼트에 배해 역학적인 거동이 탄력적이므로 볼트보다 더 유리할 것으로 판단된다.

(바) 철근의 경감

고강도 강연선을 활용하는 경우 철근량 감소는 가능하지만, 강연선과 콘크리트의 사이가 비부착(unbonded)인 경우는 문제가 발생할 수 있으므로, 철근량을 줄이기 위해서는 강연선 긴장력 재하 후 강연선 주입구에 콘크리트와 강연선의 부착을 위한 추가 그라우팅을 해야 하며 이때, 터널내에서 그라우팅 작업의 용이성 여부를 판단할 필요가 있다. 따라서 차후년도 연구를 통해 그라우팅 작업의 용이성과 철근량 감소에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

소결론

국내외 쉴드터널의 기존 체결방식 및 연구동향에 대한 조사를 수행하고, 새롭게 강연선을 이용하여 쉴드 세그먼트를 체결하기 위하여 적용성 검토를 수행하였다.

(1) 기존 시공된 대부분의 쉴드터널은 경사볼트, 곡볼트, 볼트박스, 조립핀을 이용하여 체결을 수행하였다. 국외에서는 새로운 쉴드터널의 체결공법으로서 원주방향으로 강선을 통과시켜 긴장하는 방식의 P&PC 공법, 벌집모양의 세그먼트를 이용하여 시공하는 Honeycomb Segment, 조인트부에 볼트대신 쐐기체결을 이용하는 곡터-퀵-조인트 세그먼트 공법 등이 개발되었다.

(2) 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.

(3) 쉴드 세그먼트에 대한 연구는 일본에서 가장 활발히 진행 중이다. 세그먼트의 체결방식에 대해서는 중앙부의 자조인트와 단부의 웅조인트를 이용하여 체결함으로서 세그먼트에 체결반력을 세그먼트 본체에 전달시키지 않는 자체체결식 세그먼트(FAKT)공법과 세그먼트에 슬라이트부를 만들고, 락 조인트를 만들어 체결하는 방식인 슬라이드 락 조인트 방식공법의 개발이 이루어지고 있으며. 팽창성 고무 지수재를 이용해 조인트부를 지수하는 공법을 개발하고 그에 대한 한계지수압에 대한 연구를 수행하였다.

(4) 강연선은 프리스트레싱을 도입하기 위하여 국내외에서 가장 널리 사용되는 건설재료로서, 이를 쉴드터널 세그먼트의 체결부재로 적용하기 위한 사전검토를 수행하였다. 검토결과 터널 내부에서의 시공성, 정착부재 설치, 초기 체결력 등에 있어서 기존 체결방식보다 유리할 것으로 판단되나, 체결력, 누수 등의 문제에 대해 기존 체결방식과의 비교검토가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

제 2 절 볼트 체결방식 문제점 분석

1. 체결부 유격 차이

쉴드터널 라이닝은 세그먼트와 세그먼트를 연결함으로써 하나의 복공체를 형성하게 된다.[1] 이에 세그먼트 부재들은 원주방향 및 링간 연결이 필요하며 쉴드 터널의 체결 기술로 여러 가지 새로운 공법들이 개발 중에 있다. 현재 일반적으로 가장 많이 사용하는 방식은 볼트 체결 방식으로 세그먼트 제작시 볼트 체결에 필요한 부분을 세그먼트 경계부에 매입하여 콘크리트 양생과 함께 체결부를 형성하게 된다.[2] 볼트 체결에는 형상 및 연결 방식에 따라 곡볼트 방식, 경사볼트 방식, 볼트 박스 방식을 대표적으로 들 수 있으며, 본 장에서는 현장에 적용되어 있는 각 방식별 설계 자료를 바탕으로 볼트 체결부의 세그먼트 단차 발생 가능성에 대해 분석하였다.

가. 곡볼트

볼트 체결에 필요한 이격을 줄이고 세그먼트에 볼트 정착부분을 만들어 볼트를 체결하는 곡볼트 방식은 이음부가 볼트로 강결되어 구조적 안정성이 높고 쉴드 추진에 따른 Jack추진력에 대한 대응성이 좋다. 또한 세그먼트 이음 및 링이음을 삽입너트와 볼트를 이용하여 조립하므로 공정이 비교적 간단하다는 장점이 있으나, 경사볼트에 비해서 작업이 복잡하고 변형에 대한 허용 여유가 크며, 지수재를 외측 1열에만 설치할 수밖에 없으므로 볼트 주변을 통한 누수 발생우려가 높다.

그림 2.2.1은 '서울지하철 7호선 연장 703 공구'에 적용된 세그먼트 연결부의 상세도면을 나타낸 것인데, 곡볼트의 경우 세그먼트 제작시 볼트 주입을 위한 볼트 주입홀이 설계 되어 있다.

사례 현장의 경우 볼트 주입홀의 직경은 ϕ30mm, 볼트 직경은 ϕ24mm로 설계되어 있다. 작업자의 관점에서는 볼트가 두 개의 세그먼트를 통과하여 정상적으로 체결된 것으로 보이지만, 그림 2.2.2와 같이 볼트는 통과 공간의 양 끝에 치우쳐서 체결될 가능성이 충분히 있고, 이로 이해 터널 배면 혹은 내부에는 세그먼트 간의 시공 오차가 발생하게 된다. 이러한 경우에는 세그먼트 면에 부착된 수팽창 지수재나 개스킷(Gasket)도 서로 어긋하게 접하게 되어 지수 기능이 저하되고, 누수가 발생할 가능성도 높아지게 되며, 시공 오차가 누적될 경우에는 시공성에도 큰 문제를 야기시키게 된다.

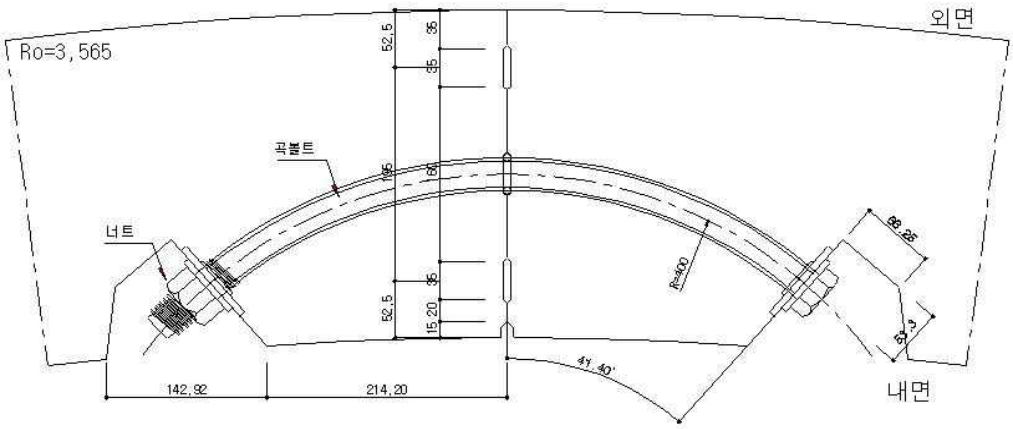


그림 2.2.1 세그먼트 연결부 상세도면(서울지하철 7호선 연장 703 공구)

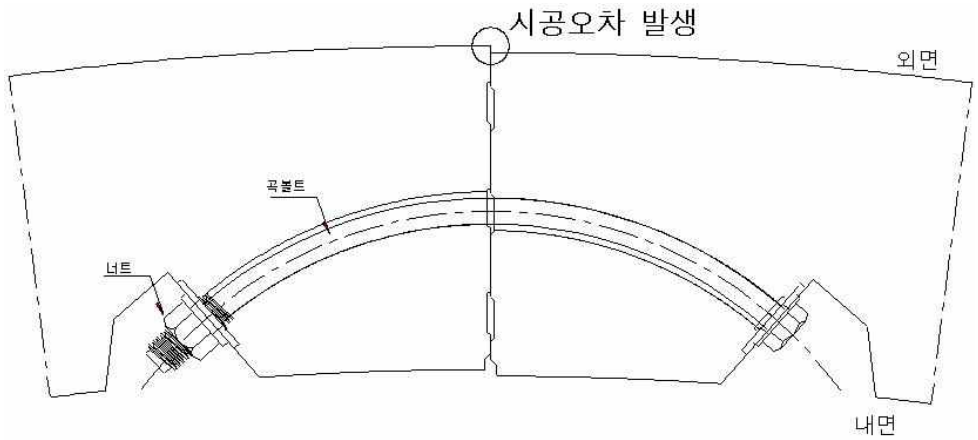


그림 2.2.2 곡볼트 체결방식의 시공오차 발생 가능성

나. 경사볼트

경사볼트 방식은 세그먼트 및 링 이음부에 미리 너트를 삽입하고 세그먼트 조립시 경사볼트로 체결하는 방식이다. 경사 볼트는 삽입너트와 볼트를 이용하여 조립하므로 공정이 짧아 비교적 조립시간이 짧고 철물 노출이 적어 부식에 대하 우려가 적으며, 볼트는 국내생산이 가능하므로 가격이 저렴하다. 또한 이음부가 볼트로 강결되므로 곡선 시공시 안정성 확보에 유리하고 조립 후 제거 및 해체 작업이 용이하다. 그러나 볼트 체결력이 적어 세그먼트 조립 후 쉴드 추진력을 제거했을 때 세그먼트가 밀착되지 않거나 틈새가 발생하여 진원형성이 어려워 세그먼트 모서리 부분에 균열이 발생할 우려가 있다. 외부로 노출된 볼트에 대한 부식 가능성과, 지수재를 외측 1열에만 설치할 수밖에 없으므로 볼트 주변을 통한 누수 발생 가능성이 있다. 또한 세그먼트 조립시 발생하는 작은 오차에도 볼트 매입이 어려워지는 단점이 있다.

그림 2.2.3은 '분당선 왕십리~선릉간 복선전철 제3공구 노반 신설공사'에 적용된 체결부의 상세 도면을 나타낸 것이다. 볼트 주입홀의 직경은 ϕ30mm, 사용 볼트의 직경은 ϕ28mm로 설계되어 있으며, 곡볼트의 경우와 동일하게 경사볼트도 통과 공간의 양 끝에 치우쳐서 체결될 가능성이 충분히 있고, 이로 이해 그림 2.2.4와 같이 터널 배면 혹은 내부에는 세그먼트 간의 시공 오차가 발생하게 된다.

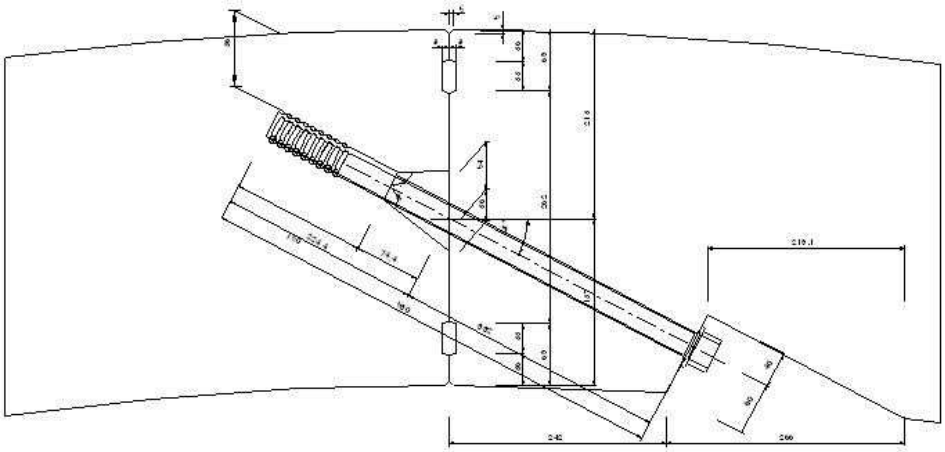


그림 2.2.3 세그먼트 연결부 상세도면(분당선 왕십리~선릉간)

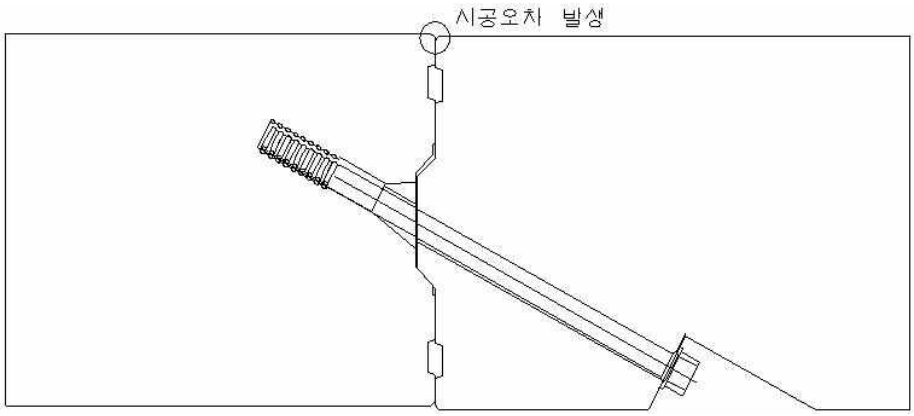


그림 2.2.4 경사볼트 체결방식의 시공오차 발생 가능성

다. 볼트박스

국내의 경우 전력구 공사와 같은 소구경 쉴드터널에 주로 이용되고 있는 볼트박스 방식은 이음부에 볼트박스를 설치하여 볼트 체결 공간을 확보하고 직볼트로 체결한다. 볼트박스 방식은 조립이 간편하고 시공성이 좋아 세그먼트의 조립과 해체작업이 용이하여 조립오차가 비교적 적다. 또한 연결부인 볼트박스가 수팽창 지수재 2열 내

측에 설치되어 누수를 최대한 억제할 수 있고, 세그먼트 제작사 및 시공사의 경험이 축적되어 있다는 장점이 있다. 반면에 볼트 박스 매입부분이 구조적으로 취약부가 될 수 있고 부식발생의 우려가 있다. 2차 라이닝을 생략할 경우 세그먼트의 조립 완료 후 내면의 볼트 박스 홈이 많아 도수로의 경우 별도의 채움작업이 필요하며 제작비용이 경사볼트보다 다소 비싸다는 단점이 있다.

그림 2.2.5는 '의정부 전기공급시설 전력구공사'에 적용된 체결부의 상세 도면을 나타낸 것이다. 볼트 주입홀의 직경은 ϕ29mm, 볼트 직경은 ϕ22mm로 설계되어 있으며, 작업자의 숙련도, 세그먼트 제작 오차, 시공 상황 등에 의해 볼트가 한쪽으로 치우쳐 체결될 경우 세그먼트의 시공오차를 유발하게 된다.

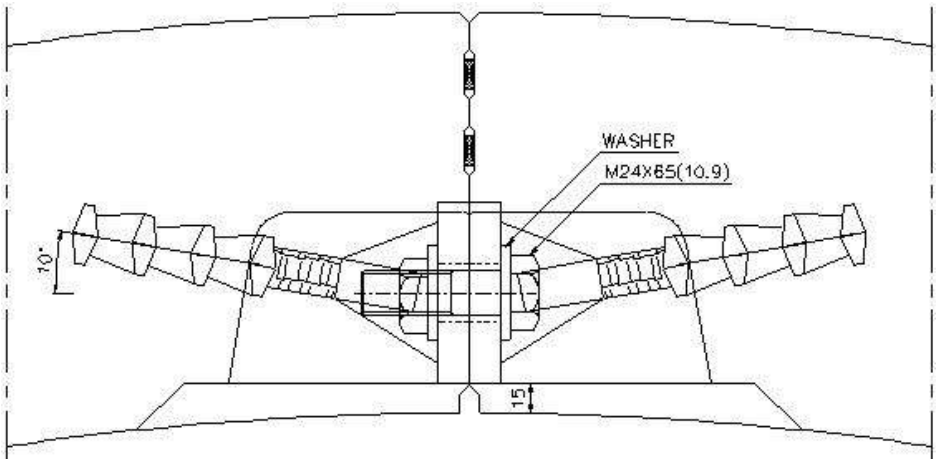


그림 2.2.5 볼트박스 상세도면

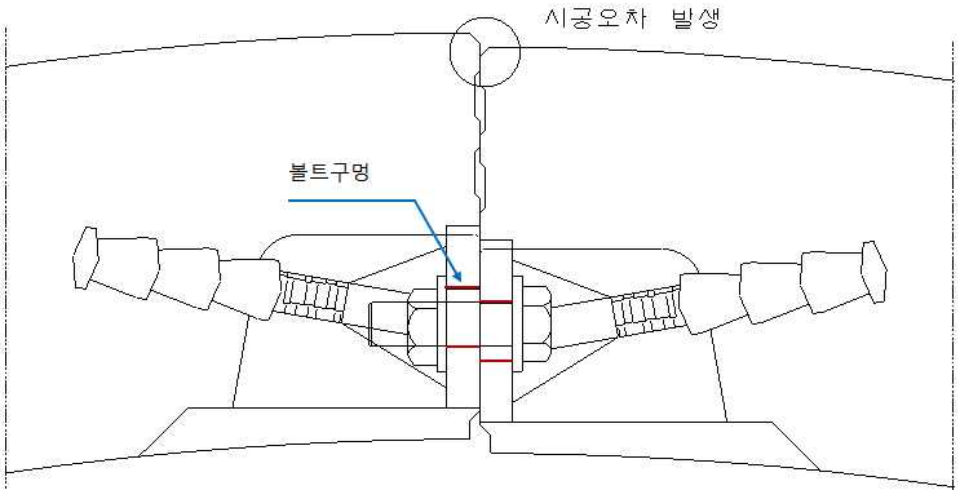


그림 2.2.6 볼트박스 시공오차 발생가능 단면

표 2.2.1은 볼트 체결방식의 유격 차이를 나타낸 것이다. 쉴드공법의 이론 및 설계 단계에서는 1링으로 조립된 세그먼트가 정 원으로 하나의 구심을 이루고, 여기에 수많은 링이 연결되어 하나의 일체화된 원통의 구조물이 완성된다고 정의된다. 그러나 실제 시공 단계에서는 시공 오차가 0 이라고 확신할 수 없으며 1링 당 0.01mm 씩의 시공 오차가 누적되어도 100링 째에서는 1mm의 시공오차가 발생하게 되고, 평균 400~500링이 조립되는 터널 연장을 고려하면 최소 3~4mm의 시공오차가 발생하게 된다. 그렇지만 기존 볼트 체결 방식에서는 3~4mm 혹은 그 이상, 그 이하의 시공오차가 발생하여도 세그먼트 조립이 불가능하지 않다. 이미 볼트 체결부의 유격 공간이 2~7mm 정도의 차이를 가지고 있기 때문에 통과 공간이 어긋나 있더라도 볼트를 체결할 수 있게 된다. 그러나 세그먼트 단면이나 수팽창 지수재의 관점에서는 오차가 발생되게 되고, 분명 이론이나 설계와는 다른 시공 결과를 가져오게 되는 것이다. 비록 시공 오차가 발생된 모든 부분에서 터널 운영이 불가능할 정도의 누수나 기타 문제가 발생되지 않더라도, 체결 공간의 유격 문제는 볼트 체결방식이 가지고 있는 구조적인 문제점으로 판단된다.

표 2.2.1 볼트 체결방식의 유격 차이

체결방식	볼트 및 통과공간의 직경	직경 차이
곡볼트	-볼트 통과공간 직경 : ∅30㎜ -볼트 직경 : ∅24㎜	6㎜
경사볼트	-볼트 통과공간 직경 : ∅30㎜ -볼트 직경 : ∅28㎜	2㎜
볼트박스	-볼트 통과공간 직경 : ∅29㎜ -볼트 직경r : ∅22㎜	7㎜

2. 볼트 풀림현상

일반적으로 볼트 체결은 상재하중, 수압, 세그먼트의 규격, 머신의 추력 등 다양한 조건을 고려하여 적정 토크치를 산정해 이루어지도록 되어있다. 볼트 체결은 나사 체결 원리로 설명되어 지며 나사부의 틈을 통해 나사 체결이 이루어 지는데, 나사산 한쪽 사면끼리의 접합으로 인한 마찰이 체결을 유지하는 힘을 갖게 된다.[3] 그러나, 그림 2.2.7에 나타난 것과 같이 나사를 완전히 체결하여도 나사의 한쪽 접함면에서의 마찰이 작용하고 있고, 볼트 회전을 위한 틈새는 여전히 빈공간으로 체결되게 된다. 이때 접촉부의 마찰력보다 진동이나 충격 등의 큰 외력(특히, 축의 직각방향 진동, 충격)이 가해지면 나사산 접촉부의 공간차이가 발생하여 볼트의 머리밑 좌면부위가 벌어지게 된다. 또한 한번 벌어진 틈은 나사 체결방향으로 다시 외력이 가해져야만 기존의 체결 상태로 돌아가게 된다. 즉, 진동, 충격의 반복은 볼트의 머리부 마찰력을 떨어뜨리며 이로 인해 풀림 현상이 발생 할 수 있다.

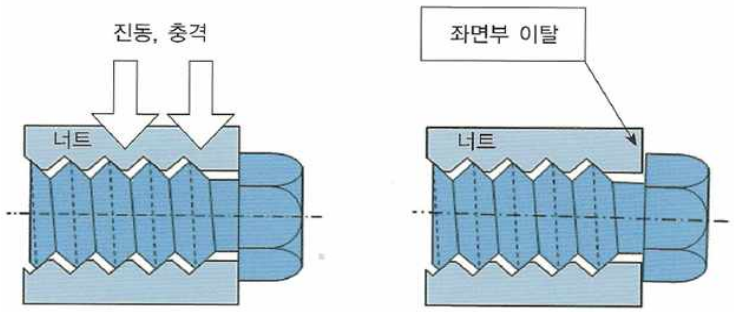


그림 2.2.7 나사 풀림 메커니즘

실제로 쉴드 터널의 굴착현장에서는 세그먼트 조립시 조립가압을 작용시켜 세그먼트 접합부가 벌어지지 않은 상태로 볼트를 최대한으로 체결하게 된다. 그러나 조립된 세그먼트는 추가 굴착을 위한 반력벽의 역할을 하며, 이 때 쉴드머신의 추력과 굴착 진동으로 인해 볼트가 풀리는 현상이 발생한다.

쉴드터널 시공 중 기체결된 세그먼트 부재 연결부의 볼트 풀림 현상 확인을 위하여 싱가폴의 OO 쉴드터널 현장에서 세그먼트 굴진에 따른 볼트 거동을 조사하였다. 그림 2.2.8은 세그먼트를 1링 조립한 후 링과 링 사이를 연결하는 볼트의 굴진 거리에 따른 변화 모습을 나타낸 것이다.



(a) 굴진거리 0.4m (b) 굴진거리 0.8m (c) 1.2m

그림 2.2.8 쉴드머신 굴진에 따른 볼트 풀림현상

측정을 위해 볼트 끝부분과 너트, 와셔 그리고 세그먼트에 일자의 기준선을 표시하고 굴진 거리별로 표시부분의 변화를 확인하였다. 표 2.2.2는 조사 결과를 나타낸 것이다.

표 2.2.2 쉴드머신 굴진에 따른 볼트 회전 각

굴진거리	0.4m	0.8m	1.2m
회전각	70 °	30 °	10 °

0.4m 굴진된 경우 볼트의 표식은 초기 위치에서 시계방향으로 약 70° 회전한 위치에 있었으며, 굴진거리가 0.8m, 1.2m로 진행됨에 따라 볼트 표식 전 단계와의 추가적인 변화위치가 30°, 10° 만큼 발생함을 확인하였다. 볼트의 풀림은 반시계방향으로 이루어지고 쉴드머신의 굴착 공정에서는 안전상의 문제로 내부 진입 및 촬영이 불가능하여 초기 체결 위치에서 나사선 기준으로 몇 바퀴가 풀렸는지 판단은 어려우나, 쉴드머신의 추력 및 진동에 의해 볼트의 풀림 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

실제로 일반적인 쉴드 터널 현장에서는 볼트의 풀림현상을 보완하기 위해 세그먼트 조립을 위한 볼트 체결 후, 추가적인 굴착을 진행함에 따라 볼트의 재조임을 실시하고 있다. 또한 현장 확인 결과, 위에 보이는 것처럼 링과 링사이의 볼트 풀림은 시각적으로 확인 될 만큼 이루어지나, 원주방향을 연결하는 볼트의 풀림은 거의 없는 것을 관찰하였는데 이를 통해 볼트의 풀림 메커니즘에 부합하는 현상임을 판단할 수 있다.

특히, 볼트 풀림은 쉴드머신을 통한 추력과 진동이 주원인이기 때문에 상대적으로 굴착 대상 지반이 단단할수록 굴진으로 인한 진동이 더 크게 발생하며 볼트 풀림현상도 더 증가할 것으로 판단된다.

3. 체결부 위치

그림 2.2.9는 일반적인 볼트박스 체결방식에서 체결부의 위치를 나타낸 것이다. 그림에서 볼트가 체결되는 위치는 세그먼트 접합면을 기준으로 중심축에서 아래쪽으로 치우쳐 있다. 즉 터널 내측에 치우쳐 있는 것이다.

볼트박스 체결방식에서는 체결력이 작용하는 위치가 세그먼트 단면을 기준으로 터널 내측으로 치우쳐 있기 때문에 세그먼트 단면 전체를 완전하게 체결할 수 있을지는 의문이다. 세그먼트 단면이 클 경우에는 상황에 따라서 터널 외측부에서 세그먼트 접합면 사이에 이격이 발생할 가능성도 충분히 고려해야 한다.

그림 2.2.9의 볼트 체결방식 뿐만 아니라 그림 2.2.2의 곡볼트 체결방식이나 그림 2.2.4의 경사볼트 체결방시의 경우에도 너트가 체결되는 실제 위치는 터널 내측면이기 때문에 체결력을 지지하는 부분은 터널 내부 세그먼트면이 된다. 가장 이상적인 체결력 작용 위치는 세그먼트 단면의 중심축을 통과하는 것이고, 그럴 경우 가장 완전하게 체결력이 작용할 수 있을 것으로 판단된다.

이러한 볼트 체결방식의 문제점을 해결하기 위해서는 세그먼트 단면의 중심축의 최대한 가까운 위치에서 체결력이 작용할 수 있는 새로운 체결 기술이 필요하다고 판단된다.

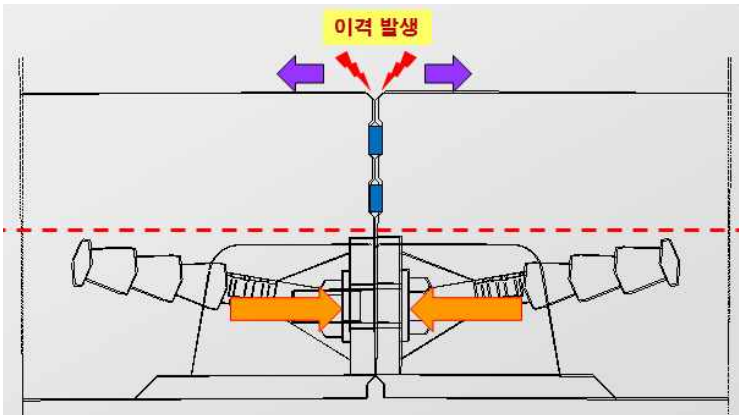


그림 2.2.9 체결부 위치로 인한 세그먼트 이격 발생

소결론

쉴드터널의 볼트 체결방식에서 발생하는 문제점에 대하여 조사를 수행하였으며, 실대형 실험을 통하여 세그먼트의 체결방식에 대한 평가를 수행하였다.

(1) 기존 설계, 시공되어진 볼트 체결방식 쉴드터널의 도면을 통한 조사결과, 체결되는 볼트와 볼트의 삽입구간에 차이로 인하여 곡볼트 최대 12mm, 경사볼트 3.5mm, 볼트박스 7mm의 시공오차가 발생할 수 있다.

(2) 볼트 체결방식은 나사산끼리의 접합으로 인한 마찰이 체결을 유지하는 힘을 갖게 되는데 진동이나 충격 등에 의해 접촉부의 마찰력보다 큰 외력이 가해지면, 나사산 접촉부의 공간 차이가 발생하여 볼트 풀림 현상이 발생 할 수 있다. 실제 싱가폴의 OO쉴드터널 현장의 세그먼트 굴진에 따른 볼트 거동을 조사결과, 쉴드 머신의 추력 및 진동에 의해 볼트의 풀림현상을 확인할 수 있었다. 모든 쉴드터널에서 볼트풀림 현상이 발생한다고 할 수는 없지만 가능성은 충분한 것으로 판단된다.

(3) 세그먼트의 가장 이상적인 체결방법은 세그먼트 단면의 중심축에서 체결이되는 것으로서, 최대한 중심축에 가까운 위치에서 체결이 가능한 새로운 체결기술의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

제 3 절 쉴드터널 누수실태 파악 및 방수대책

1. 터널 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 2.3.1은 서울메트로에서 관리하는 지하철 역사와 각 역사의 평균 지하수 유출 현황을 나타내고 있다.

표 2.3.1 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 2.3.1 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 2.3.1 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 2.3.2는 집수정이 설치된 부산 지하철 역사와 각 역사의 평균 지하수 유출 현황을 나타낸 것이다.

표 2.3.2 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 2.3.2 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 2.3.3은 집수정이 설치된 부산 지하철 역사와 각 역사의 평균 지하수 유출 현황을 나타내고 있다.

표 2.3.3 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 2.3.3 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 2.3.4는 집수정이 설치된 인천 지하철 역사와 각 역사의 평균 지하수 유출 현황을 나타낸 것이다.

표 2.3.4 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 2.3.5는 집수정이 설치된 광주 지하철 역사와 각 역사의 평균 지하수 유출 현황을 나타낸 것이다.

표 2.3.5 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 2.3.6은 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 2.3.6 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 부분배수를 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. 쉴드터널 방수대책 및 효율성

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

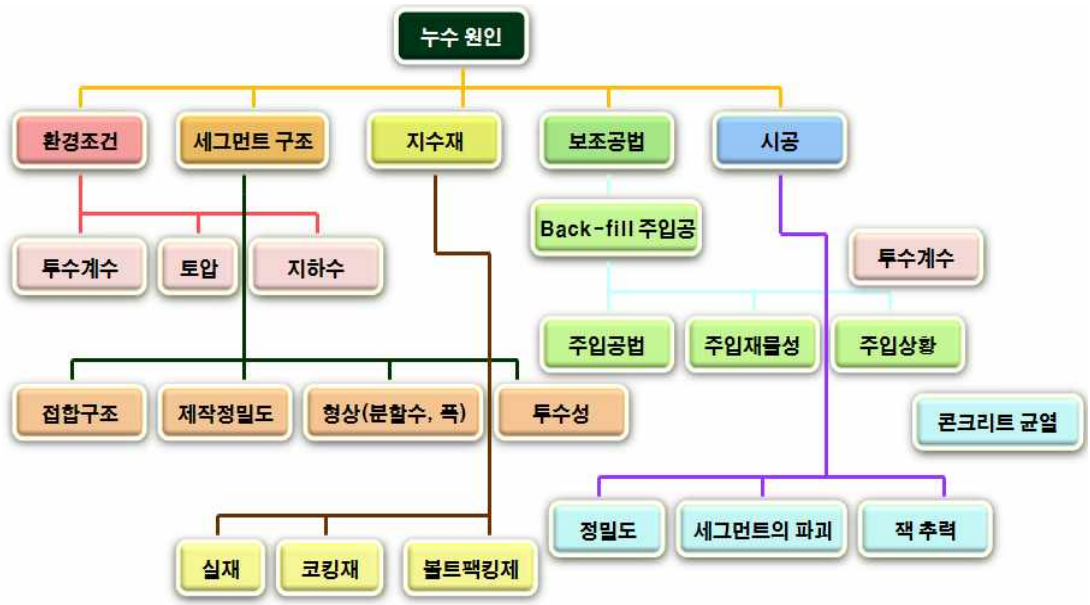


그림 2.3.1 쉴드터널 누수 발생 요인

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.

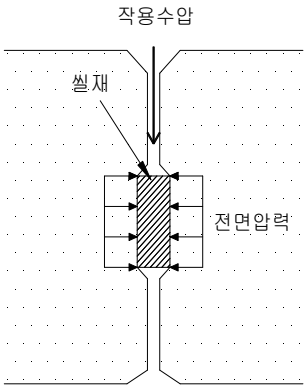
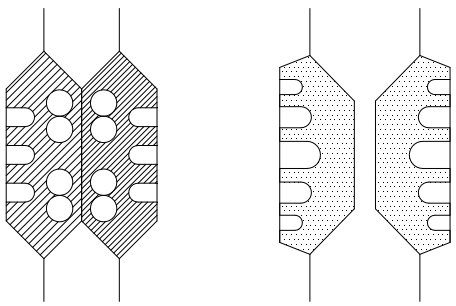


그림 2.3.2 씰재의 소성변형


그림 2.3.3 씰재 형상(예)

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 2.3.3과 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, 조립

정밀도나 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 2.3.4 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 경도를 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 적게되며 조립시의 탈락 등에 대해 유리하다.[8)]

표 2.3.7은 최근에 사용되고 있는 씰재에 의한 세그먼트 접합면의 방수 방법을 보여주고 있다.

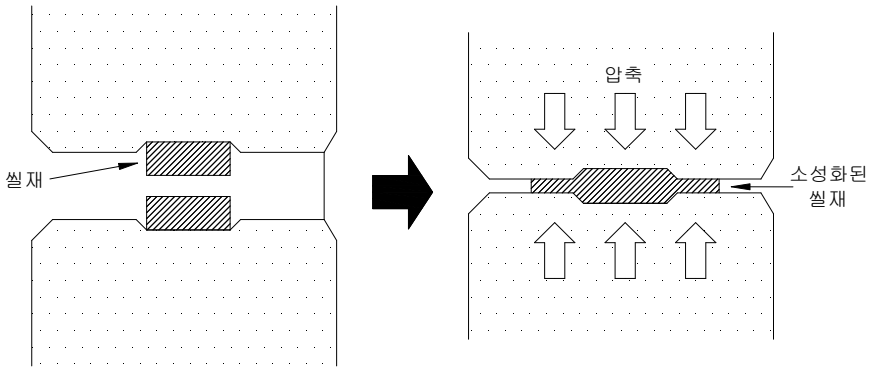
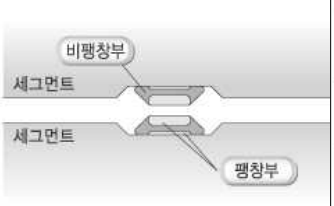
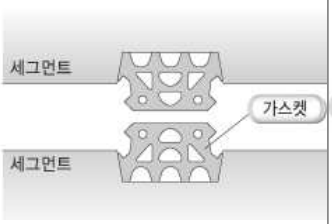
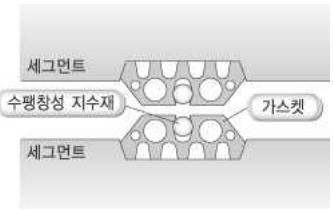


그림 2.3.4 씰재에 의한 지수조건

표 2.3.7 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

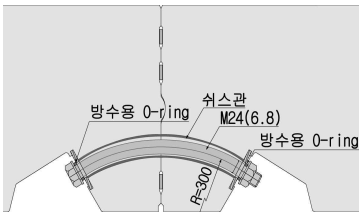
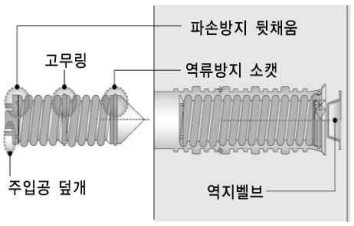
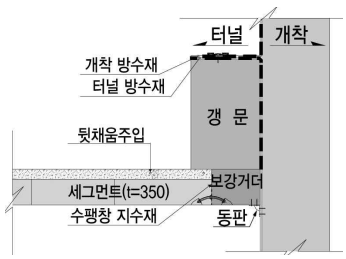
씰재에 의한 지수는 시간이 경과함에 따라 씰재의 특성 상실에 따른 누수가 발생할 우려가 많다. 이는 씰재의 압축으로 발현하는 접면응력이 시간이 경과하면서 저하되기 때문이다. 그러므로 씰재의 접면응력은 장기적으로도 설계수압이상이 되어야 한다. 씰재가 갖추어야 할 조건은 다음과 같다.

- 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 뒷채움 주입공을 설치한 부분은 지수면에서 취

약하게 된다. 뒷채움주입후 주입공을 폐쇄하여도 주입공 외주벽과 콘크리트사이에 분리면이 발생하고, 이틈으로 누수가 발생하므로 고무로 된 링(O 링)을 끼워 지수를 한다. 근래에는 이 고무링에도 팽창성을 적용하기도 한다. 기타, 세그먼트 접합면에 설치하는 방수공으로, 콘크리트계 세그먼트나 덕타일 세그먼트에 코팅을 하기도 하고, 뒷채움 주입공에서 침투하는 물을 지수할 목적으로 그라우트용 팩킹재로 사용하기도 한다. 표 2.3.8은 세그먼트 접합면의 기타 방수공을 보여주고 있다.

표 2.3.8 기타 방수공[7)]

볼트공 방수	뒷채움 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. 세그먼트 체결부 누수

가. 누수발생 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 이물질이0 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)]

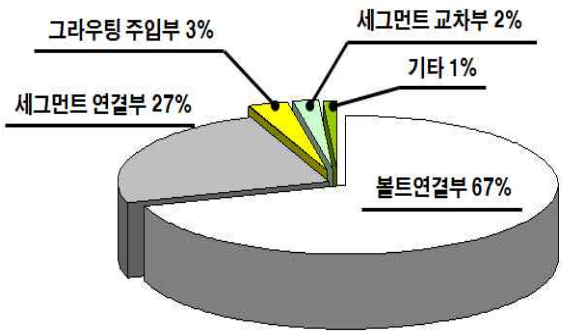


그림 2.3.5 쉴드터널 발생 누수량 분포

(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 2.3.6은 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 2.3.7은 세그먼트 단차를 통해 지하수가 유입되는 모습을 보여주고 있다.



그림 2.3.6 세그먼트 볼트 부분 누수



그림 2.3.7 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 유입

량을 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 2.3.8은 시공 중에 지수재가 바깥으로 노출되는 모습을 보여주고 있다.

세그먼트 주입구의 경우 세그멘트 뒷채움 주입구를 따라 유로가 형성되어 이부분으로 누수가 발생 한다. 그라우팅제 주입 후 주입홀 내부가 밀실하게 채워지지 않아 발생하는 부분도 있으며 주입구 마개 고무 패킹재가 뒷채움재와의 화학반응 등의 이유로 시간이 경과 함에 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 2.3.8 세그먼트 지수재 탈락



그림 2.3.9 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 2.3.10은 손상 현황을 보여주고 있다. 터널상부에 수영강이 흐르고 있어 누수개소가 많고, 세그먼트 이음부와 볼트부, 뒷채움재 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 뒷채움재를 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 2.3.10 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 2.3.9는 쉴드터널 공법으로 시공 중인 터널의 수직구 유량 일지를 나타낸 것이다. 그리고 그림 2.3.11은 표 2.3.9를 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 2.3.9에서 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 2.3.9 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

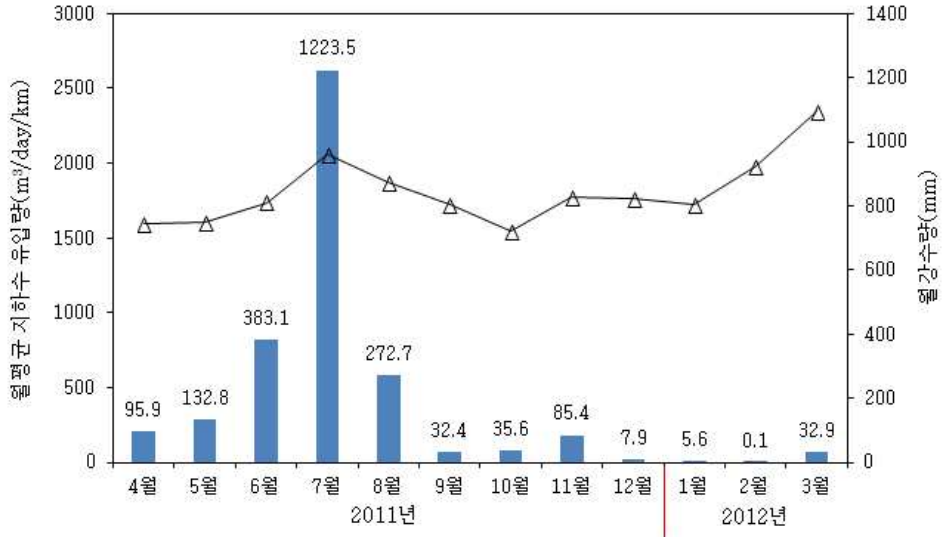


그림 2.3.11 시공 중인 쉴드터널의 월강수량 대비 월평균 지하수 유입량

표 2.3.10은 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.

표 2.3.10 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) 서울, 부산, 대구, 인천, 광주 지역의 지하철 터널의 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 압축시 반발력, 부착 후 시간경과에 따른 응력완화 및 열화에 대한 충분한 검토가 있어야 한다.

(3) 쉴드터널에서 발생하는 누수량 조사 결과 볼트연결부에서 67%, 세그먼트 연결부에서 27%로 전체 누수량의 대부분을 차지하는 것으로 조사되었다. 볼트 체결부에서의 누수는 삽입부의 크랙 및 볼트의 녹 등으로 인하여 발생하며, 세그먼트 연결부의 누수는 세그먼트간 단차로 인해 지수재 틈으로 누수가 발생하기 때문에 체결방식 개선을 통해 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

쉴드터널 3개 현장에 대해 내부 유입수량을 조사한 결과 모두 허용 유입수량에 비해 충분한 안전율을 가지는 것으로 나타났고, 쉴드터널 누수량은 강수량보다는 지반의 성질 및 지하수의 분포에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

제 4 절 실대형 실험을 통한 강연선 체결 성능 검토

쉴드터널의 시공은 쉴드 막장부에서 쉴드머신을 유압잭으로 추진하면서 세그먼트 1링 길이에 대한 굴착을 진행하고, 이렉터를 통해 굴착 부에 세그먼트 1링을 조립해 나가는 순서로 진행된다. 이때 쉴드머신은 조립된 세그먼트를 반력대로 이용하여 굴착을 하게 되므로 조립된 세그먼트는 유압잭의 추력에 대하여 안정성을 확보하여야 한다.[1)] 또한 세그먼트는 터널에 작용되는 토압과 수압에 저항하는 구조체의 역할을 하므로 터널 완공 후 발생하는 인발력, 압축력, 전단력에 대한 충분한 강성을 가지고 있어야 한다. 따라서 조립을 통해 라이닝을 형성하는 쉴드터널은 체결시 세그먼트 간의 정밀 시공 및 세그먼트 이음부의 체결력 확보가 중요하다.

본 연구에서는 실제 지하철 현장에 시공된 것과 동일한 세그먼트를 이용하여 세그먼트 체결 시험을 실시하였다. 세그먼트 체결은 기존에 사용되고 있는 볼트 체결방식과 본 연구에서 개발 중인 강연선 체결방식을 적용하였고, 각각의 체결방식에 대해 체결력을 비교 평가하였다. 또한 세그먼트 내 강연선 삽입의 원활성을 비롯한 각종 시공성을 파악하였다.

1. 1차 실험

가. 실험 계획

본 시험은 기존의 볼트 체결방식과 개발 중인 강연선 체결방식을 동일한 조건에서 체결하여 두 체결방식의 시공 정밀도 및 체결력을 비교하는데 목적을 두고 있다. 따라서, 국내의 분당선 지하철 현장에 적용된 쉴드터널의 제작 몰드를 이용해, 세그먼트 시험체를 제작하였고 볼트 및 강연선 체결을 실시하였다. 세그먼트 체결은 링을 형성하기 위한 원주방향 이음과 링과 링 사이를 연결하는 연장방향 이음이 있는데, 본 실험에서는 연장방향 이음만을 고려하였다.

본 연구에서 개발 중인 세그먼트 체결방식은 4개의 세그먼트를 하나의 강연선으로 연결시키는 방법이므로, 총 4개의 세그먼트 시험체를 제작하였다. 그림 2.4.1은 세그먼트 체결 시험 모식도를 나타내고 있다. 쉴드터널의 시공에서는 일반적으로 세그먼트가 지그재그로 교차 배치가 되도록 조립 하는 것이 원칙이나, 본 실험에서 얻고자 하는 결과는 체결방식에 따른 체결력의 비교이므로 세그먼트를 일렬로 배치하여 실험을 수행하였다.

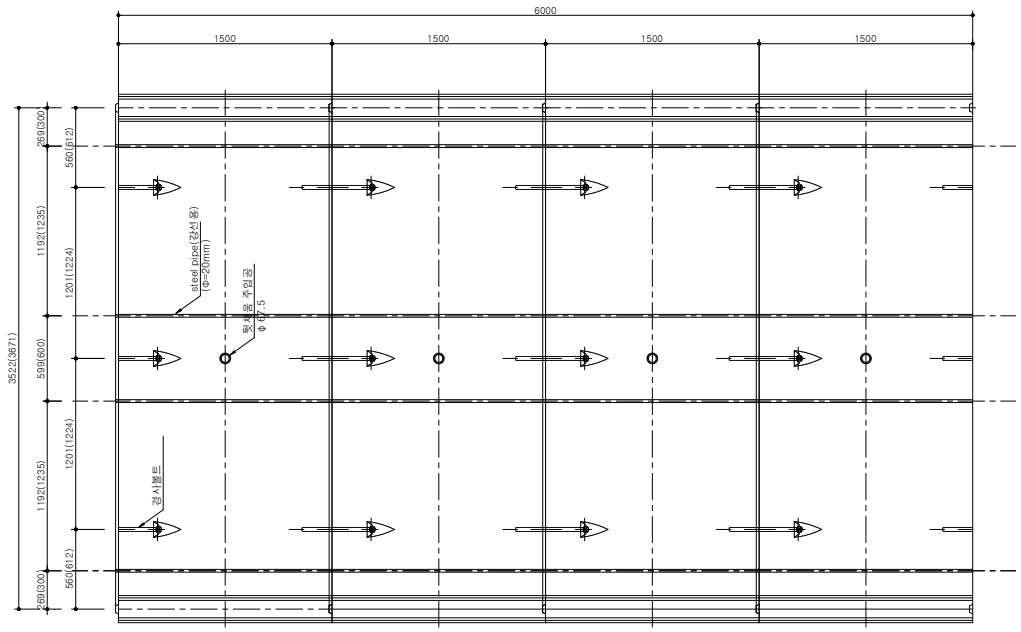


그림 2.4.1 세그먼트 체결 시험 모식도

계획된 실험의 상세 시나리오는 다음과 같다

• 수팽창 지수재가 부착된 조건의 체결 시험

① 경사볼트 조립 : 세그먼트 4개를 설계토크에 맞추어 총 9개의 경사볼트를 모두 조립한다. 조립 시 설계 토크치는 측정용 토크렌치를 사용하여 확인한다.

② 경사볼트 체결응력 측정 : 볼트 조립 시작과 동시에 철근 게이지로부터 데이터를 수집한다.

③ 경사볼트 시공 정밀도 계측 : 볼트 체결 전 세그먼트의 초기 위치를 측정하고, 볼트 체결이 끝난 후 세그먼트의 이동 위치를 측정한다.

④ 강연선 긴장 : 세그먼트 4개에 하나의 강연선을 통과시킨 다음 유압펌프와 유압잭을 가지고 긴장력을 재하한다.

⑤ 강연선 체결응력 측정 : 강연선 긴장 시작과 동시에 철근 게이지로부터 데이터를 획득한다

⑥ 강연선 시공 정밀도 계측 : 광파기를 이용하여, 긴장전 초기값과 긴장력을 재하함에 따라 단계별로 세그먼트 위치 계측을 실시한다.

⑦ 강연선 긴장력 해제 및 볼트 해체

• 수팽창 지수재를 제거한 조건의 체결 시험은 수팽창 지수재가 부착된 조건과 동일하게 ①에서 ⑦번 과정 까지 수행한다.

본 시험의 볼트 체결은 분당선 구간에 적용된 체결조건을 그대로 적용하였다. 세그먼트 연결 시 경사볼트 방식을 사용하는 방식은 체결 토오크치에 대한 정량적인 기준이 없기 때문에 조립공의 경험에 의해 체결됨에 따라 과다 조임에 의한 조립부 세그먼트 균열, 과소 조임에 의한 누수 제어 곤란 등의 문제가 발생한다. 이에 분당선 구간에서는 현장 시험을 통해 경사볼트의 토오크치 기준을 산정하였다. 분당선 현장의 체결토크 기준 설정 시험 보고서를 요약하면 다음과 같다.

- 볼트 소켓부 내력시험(볼트 소켓 나사산 강도에 대한 테스트 시행) 수행
- 제조공장에서는 최대 150kg·m 이내의 힘을 권고.
- 세그먼트를 대상으로 2명이 최대 110kg·m까지 압력을 가해보았으나, 볼트 소켓에 발견되지 않았음.
- 세그먼트 피스를 대상으로 토크렌치를 사용하여 1인이 인력으로 50kg·m 까지 체결한 결과 이상이 없었음.
- 최종 조립된 세그먼트를 대상으로 시행
- 에어 임팩트렌치로 조인 상태에서 토크렌치로 토오크치 측정
- 개스킷 반발력을 견디면서 세그먼트간 유격이 없었음.
- 순수 소켓 나사산 강도를 테스트 하기 위해 1인이 50kg·m까지 조인 결과 볼트 소켓에는 이상이 없음
- 조립된 세그먼트에 의한 테스트 결과 임팩트 렌치로 조였을 때 세그먼트 유격이 발생하지 않았고, 추가로 40kg·m까지 조여 본 결과도 이상이 없었음.
- 임팩트렌치로 조였을 때의 토크값은 30kg·m 정도 이므로, 과다 조임에 의한 세그먼먼트 손상을 방지하기 위하여 향후 현장운영은 30～40kg·m로 관리할 계획이며, 임팩트렌치로 조인 후 토크렌치로 확인하여 관리기준을 준수하고자 함.

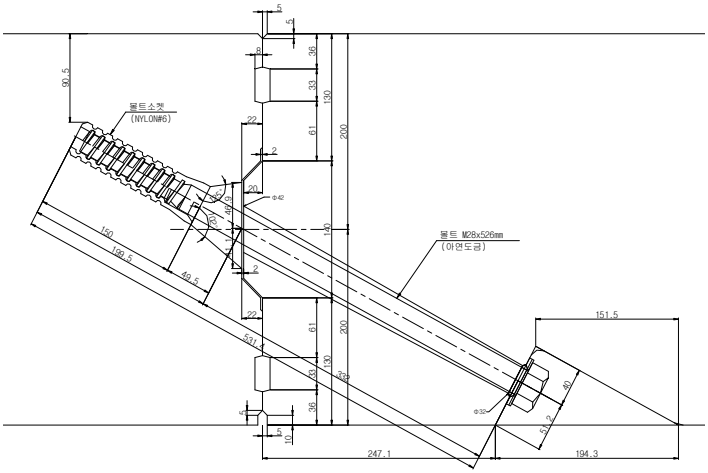


그림 2.4.2 경사 볼트 연결부 상세 도면

볼트 체결 시험에서는 분당선 현장에서 사용한 관리 토크치인 40kg·m를 기준으로 하여 경사볼트 체결을 수행하였다. 그림 2.4.2는 볼트 체결 시 사용된 경사볼트의 설계 도면을 나타내고 있다. 경사볼트는 M28로 설계 되었으며 볼트 길이는 526mm이다. 또한, 볼트는 인장강도 40MPa, 항복강도 240MPa 이상의 탄소강으로 이루어져 있으며 볼트 소켓은 볼트와 동일한 재질로 만든 것을 사용하였다.

실험에 사용할 강연선은 7연선 12.7mm 규격을 사용하였다. KS D 7002-1995의 PC 강연선 및 PC 강연선의 기계적 특성치에 나와 있는 항복강도는 1600Mpa, 극한강도는 1900Mpa 이며, 이를 통해 계산한 강연선의 허용응력은 다음과 같다.

- 강연선 면적 : 98.71mm2 (12.7mm 강연선)
- 긴장시 허용응력 : 0.9 × 1600 = 1440Mpa ⇒ 142kN
- 사용시 허용응력 : 0.8 × 1600 = 1280Mpa ⇒ 127kN

강연선 체결 시 긴장력은 다음과 같이 6단계에 거쳐 하중을 재하 하는 것으로 계획하였다.

- 1단계 : 50bar ⇒ 11.4kN
- 2단계 : 200bar ⇒ 45.8kN
- 3단계 : 300bar ⇒ 68.75kN
- 4단계 : 430bar ⇒ 98.54kN
- 5단계 : 500bar ⇒ 114.58kN
- 6단계 : 610bar ⇒ 139.79kN
- 긴장단위 : bar(kgf·cm^2), 잭 피스톤 면적 : 23.36cm^2

강연선 긴장시에는 중앙부 강연선 긴장시 응력의 분포(종·횡방향)와 단부 강연선 긴장시 중앙부에의 영향, 경사볼트 대비 체결력 증가분을 계측하여야 하며, 긴장압은 가능한 천천히 올리고, 다음 단계 긴장 전에는 계측 단계 확인 후 작업을 수행하기로 하였다

강연선의 예상 신장량은 30mm이며, 콘크리트 탄성변형은 무시할 정도로 작다(콘크리트 탄성 수축량(세그먼트당) : 0.02mm). 이에 따라 유압잭 내의 신장량과 마찰력을 무시하고 결과를 예상할 수 있으나, 실구조물에서는 개스킷 등에 의하여 신장량이 예상과 동일하게 나타나기는 힘들 것으로 판단된다.

강연선의 긴장은 총 4개의 강연선을 좌측부터 1, 2, 3, 4번으로 구분하여 2번(중앙부) → 4번(단부) → 3번(중앙부) → 1번(단부) 순으로 각각 1~4단계까지 진행(50bar ~430bar)한 후 다시 2번 강연선부터 순차적으로 5~6단계(500bar~610bar)를 진행하

였다.

볼트 체결방식과 강연선 체결방식의 정밀도 비교를 위해 광파계측기를 이용하여 세그먼트 위치의 변화를 계측하였다. 각 세그먼트 마다 계측 타겟을 두 개씩 부착하여 총 8개의 계측 점을 설정하고, 각 단계별로 계측 하는 것으로 하였으며 계측 단계는 다음과 같다.

① 조립 전 초기값 계측 → ② 볼트 설계 토크치까지 체결 후 계측 → ③ 강연선 긴장 4단계 까지 진행 후 계측 → ④ 강연선 긴장 5단계 까지 진행 후 계측 → ⑤ 강연선 긴장 해체 후 계측

세그먼트 접합부에서는 직접적인 체결압 측정이 어려우므로 콘크리트 내부의 철근에 응력게이지를 부착하여 체결에 따라 발생하는 게이지의 변형률을 통해 산정해 내는 방법을 선택하였다. 철근 게이지는 세그먼트 양 끝단에 총 90개를 설치하였으며, 테이터 획득은 실험이 시작되는 순간부터 끝날 때까지 일련의 데이터를 얻는 것으로 계획하였다.

나. 세그먼트 제작

(1) 설계

체결 시험에 사용된 세그먼트는 분당선 왕십리~선릉간 복선전철 3공구 노반신설공사 현장에 실제로 적용된 세그먼트로 표준단면은 그림 2.4.3과 같다. 터널 외경은 7,800mm로 계획되었으며, 세그먼트 단면 두께는 400mm, 세그먼트 폭은 1,500mm로 K 타입을 포함하여 A, B, C의 7개 단면으로 설계되었다. 세그먼트와 세그먼트의 연결은 직볼트가 적용되었으며, K 타입의 경우 링방향 1개, 원주방향 2개로 설계되었고, K 타입을 제외한 나머지 세그먼트는 링방향 3개, 원주뱡항 2개의 볼트 연결이 계획되었다.

체결 시험에는 여러 가지 세그먼트 타입 중 단면이 직사각형 형상인 A-타입을 선정하였으며, 그림 2.4.4는 시험에 사용된 세그먼트의 설계 형상을 나타낸 것이다. 세그먼트의 콘크리트 설계기준 강도는 450kgf/cm^2, 철근의 항복강도는 4,000 kgf/cm^{2}로 설계되었다.

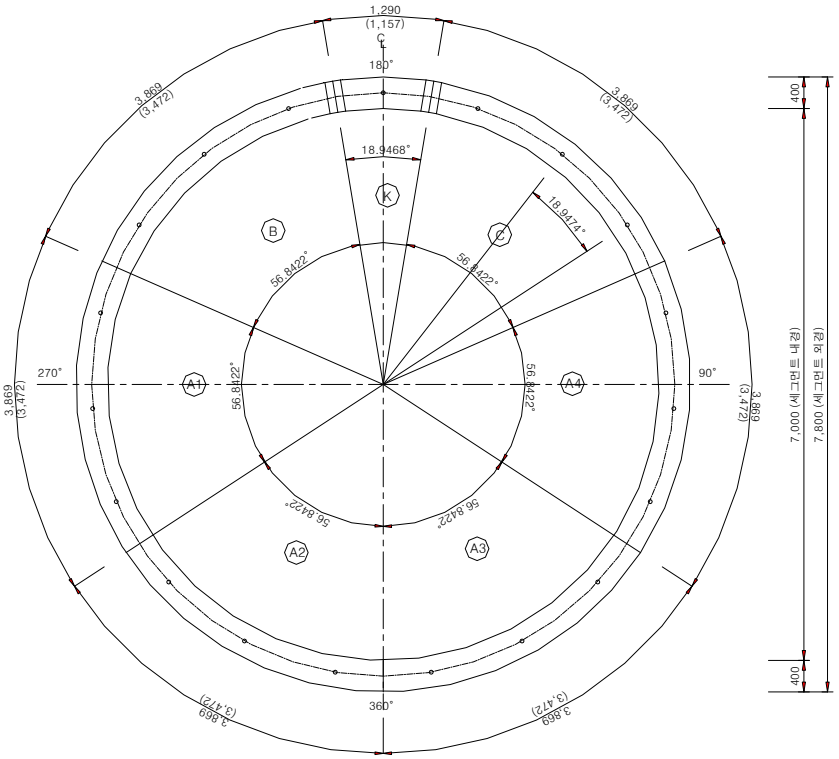


그림 2.4.3 세그먼트 설계 단면(분당선 3공구)

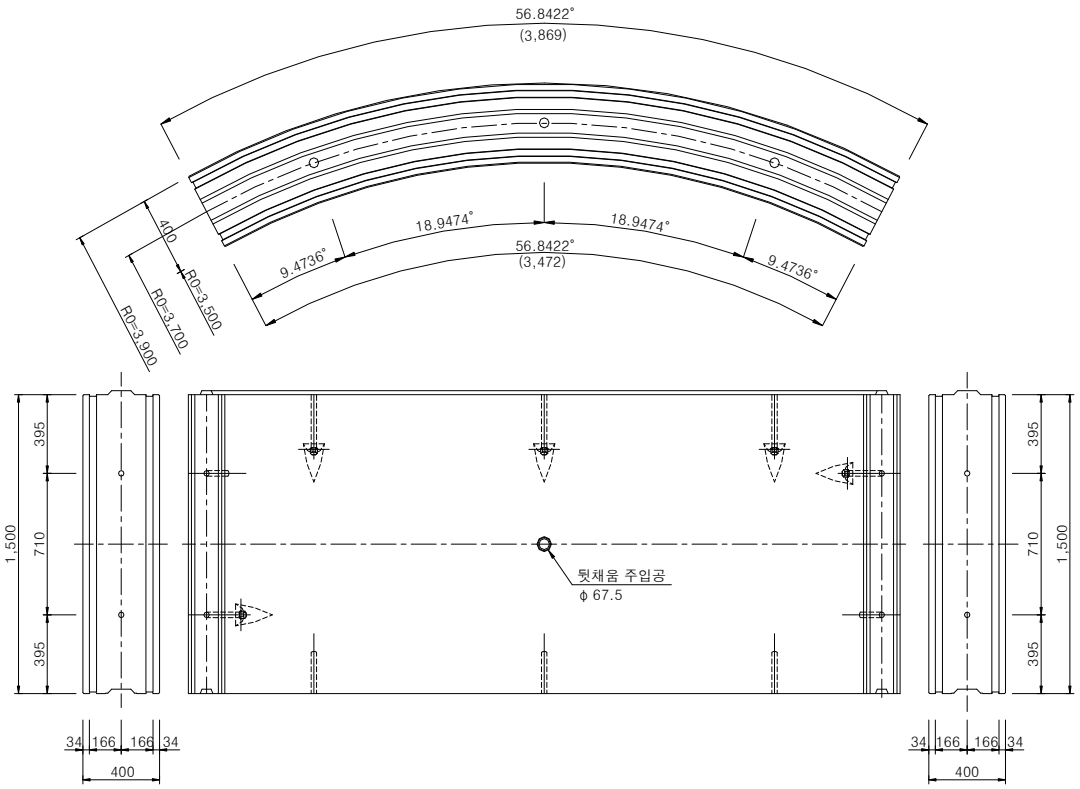


그림 2.4.4 실험에 사용된 세그먼트 설계단면(분당선 3공구, A 타입)

그림 2.4.5는 공사에 사용된 후 천안의 ○○사 공장에 보관하고 있던 A 타입 세그먼트 제작 몰드를 나타낸 것이다. 실험체 제작을 위해 A 타입 세그먼트 설계도면을 바탕으로 도면을 수정하였는데, 그림 2.4.6은 수정된 도면을 나타낸 것이다.

체결을 위해 강연선이 통과하는 주입구는 직경 2cm의 스틸파이프로 설계하였다. 강연선이 통과되는 위치는 세그먼트 중심으로부터 300mm 떨어진 위치에 두 개, 세그먼트 양 끝단에서 300mm 떨어진 위치에 두 개로 총 4열의 강연선이 통과 할 수 있도록 하였다. 세그먼트의 철근 배근은 기존 분당선 현장에서 사용된 것과 동일하게 사용하였으며, 강연선이 통과하는 강관과 홈이 배근된 철근은 겹치지 않도록 하였다.



그림 2.4.5 A 타입 세그먼트 제작 몰드(분단선 3공구)

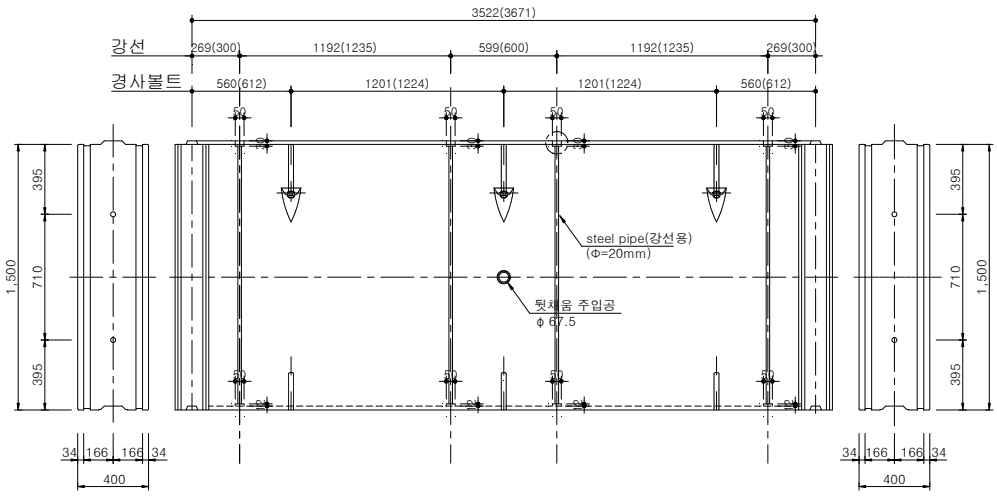


그림 2.4.6 실험체 설계도면

(2) 계측기 설치

세그먼트 시험체 제작을 위해 철근망 4개를 제작하고, 볼트 체결 및 강연선 체결시 세그먼트 체결부에 발생하는 응력 계측을 위해 계획된 철근 게이지의 부착 작업을 실시하였다. 철근 게이지는 4개의 세그먼트에 응력 분석 목적 및 체결부를 고려하여 총 90개를 계획하였다.

그림 2.4.7은 철근 게이지를 철근망에 부착하는 모습을 나타낸 것이다. 콘크리트 타설시 철근 게이지의 손상을 방지하기 위해 철근 부착 후 방수 실링처리를 실시하였으며, 정확한 데이터 확보를 위해 철근 게이지와 데이터 로거 사이의 연결 케이블을 최대한 짧게 배선하여 선에서 발생하는 저항을 최소화하였다. 그림 2.4.8에서 그림 2.4.11은 제작된 4개의 세그먼트에 설치된 철근 게이지의 위치를 나타낸 것이다.



(a) 철근 게이지 부착 (b) 게이지 케이블 배선 작업

그림 2.4.7 철근 게이지 부착 작업

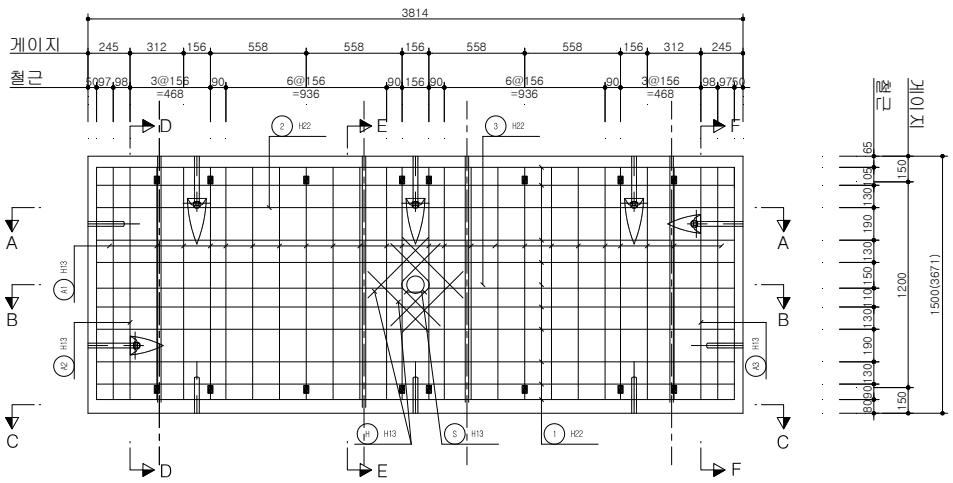


그림 2.4.8 철근 게이지 설치 위치(첫번째 세그먼트 : 32EA)

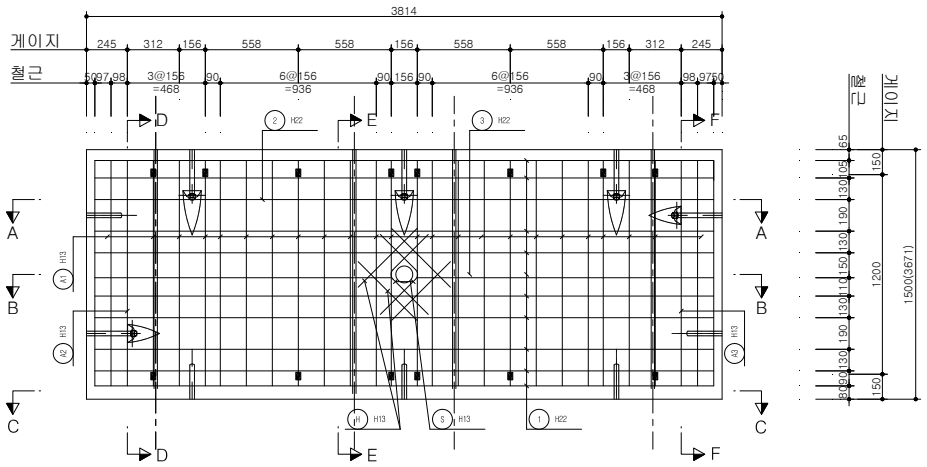


그림 2.4.9 철근 게이지 설치 위치(두번째 세그먼트 : 22EA)

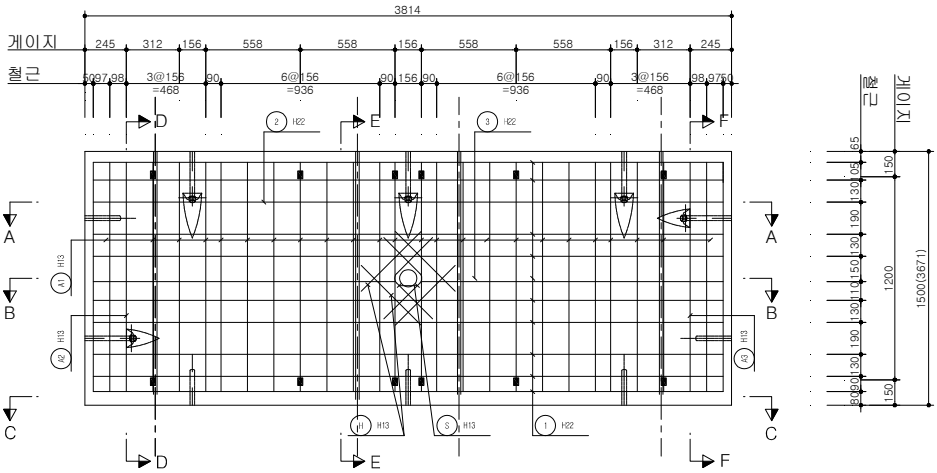


그림 2.4.10 철근 게이지 설치 위치(세번째 세그먼트 : 12EA)

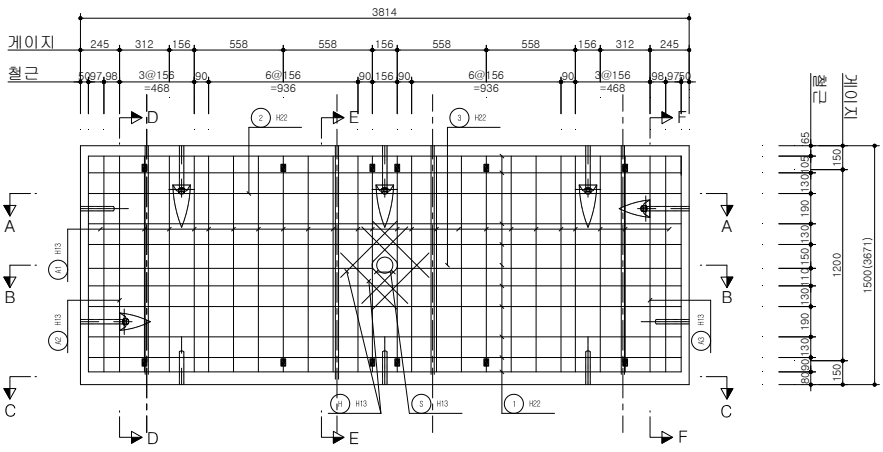


그림 2.4.11 철근 게이지 설치 위치(네번째 세그먼트 : 24EA)

(3) 제작

세그먼트 몰드에 강연선 삽입용 파이프 설치를 위해 몰드 개조 작업을 실시하였다. 각각의 세그먼트 제작시 동일한 위치에 강관을 설치하기 위해 강관이 설치되는 위치에 동일한 내경의 강재를 조립하여 기준이 되는 점들을 측면에 4개 형성하였다.

그림 2.4.12는 실험용 세그먼트의 제작과정을 나타낸 것이다. 몰드 내에 철근망을 삽입하는 과정에서는 몰드와 철근 사이에 일정한 간격으로 충분한 피복두께를 확보할 수 있도록 정확한 위치를 잡는 작업을 진행하였다. 또한, 강연선 삽입용 파이프는 세그먼트간 연결시 체결 정밀도에 큰 영향을 미치므로 고정된 강재에 파이프가 정확히 설치 될 수 있게 하였다.

그림 2.4.13은 수팽창 지수재를 실험용 세그먼트에 부착하는 모습을 나타낸 것인데, 수팽창 지수재는 세그먼트 단면 위와 아래 2열을 부착되었다.



(a) 몰드내 철근망 안착



(b) 진동 다짐



(c) 표면마감작업



(d) 완성된 세그먼트 실험체

그림 2.4.12 실험용 세그먼트 제작 과정



그림 2.4.13 수팽창 지수재의 시험체 부착

다. 실험 수행

실대형 세그먼트에 대한 강연선 체결 실험을 세그먼트 전문 제작 회사인 ○○사의 지원을 받아 천안에 있는 공장 야적장에서 진행되었다. 그림 2.4.14에 나타난 것처럼 세그먼트 받침대를 야적장에 제작하였고, 받침대에 세그먼트 안착을 위한 레일을 설치하였다. 실제 시공 현장에서는 세그먼트 조립시 세그먼트와 세그먼트를 쉴드머신의 유압잭을 이용하여 부착시킨 후 볼트 조립을 하게 된다. 따라서 세그먼트 안착시 최대한 세그먼트 사이가 이격되지 않도록 조정하였다.



(a) 실험용 받침대 제작 및 설치



(b) 실험용 세그먼트 안착

그림 2.4.14 1차 실대형 실험 준비 상황

볼트 체결시 세그먼트 사이에 3개씩 총 9개의 경사 볼트를 2차에 걸쳐 나눠 조립하였다. 1차 조립 시에는 설계 체결력의 60%까지 볼트 체결을 실시하였고, 2차 조립시에는 토크 측정이 가능한 다이얼 부착 토크렌치를 이용하여 설계 토크치인 40kg·m까지 체결을 수행하였다.[2)]

볼트 체결 완료 후 유압펌프 및 유압잭을 이용하여 강연선 체결을 수행하였으며, 유압 재하는 계획된 것과 동일하게 단계별로 긴장 후 각 단계에서 강연선의 늘음량을 측정하였다. 그리고 볼트 체결 및 강연선 체결 진행에 따라 철근에 부착된 철근 게이지의 변형을 지속적으로 계측하였다. 그림 2.4.15는 세그먼트 체결 실험 모습을 나타낸 것이다.



(a) 볼트 체결 및 체결 강도 확인



(b) 강연선 긴장 및 늘음량 측정



(c) 데이터 수집

그림 2.4.15 세그먼트 체결 실험 모습

라. 실험 결과

(1) 세그먼트 변화 관찰

그림 2.4.16은 체결 단계에 따른 세그먼트 접합부의 모습을 나타낸 것이다. 최초 체결 전 단계에서 경사볼트 설계 토크치까지 체결한 후, 강연선을 통해 추가적인 긴장을 적용시켰을 경우 세그먼트 접합부의 이격이 줄어들고 있음을 시각적으로 확인하였다.

경사볼트 체결방식은 각각의 세그먼트 접면부에 위치하여 두 세그먼트의 접합부만을 체결하는 역할을 하지만, 강연선 체결방식은 4개의 세그먼트를 관통하여 체결되기 때문에 4개의 세그먼트를 하나로 묶는 역할을 담당한다. 따라서 체결부재로 인한 세그먼트의 조립 안정성과 신뢰성은 더 높다고 할 수 있다.



(a) 체결 전 (b) 경사볼트 체결 (c) 강선 체결

그림 2.4.16 체결 단계에 따른 세그먼트 접합부 이격 변화



(a) 최초 볼트 체결 완료 상태 (b) 추가 강연선 체결로 인한 볼트 풀림현상

그림 2.4.17 강연선 체결로 인한 볼트 풀림현상

그림 2.4.17은 볼트 체결 완료 후 추가적인 강연선 체결을 실시하였을 때 체결된 볼트가 풀리는 현상을 나타낸 것이다. 볼트로 인해 설계 토크치까지 완전히 조립되었다

하더라도 세그먼트에 추가적인 체결력이 작용함으로서 볼트와 세그먼트의 이격이 발생한 것이다. 이것은 강연선 체결력이 볼트 체결력보다 더 우수하다는 것을 정성적으로 보여주는 것과 동시에 실제 시공 현장에서 쉴드머신 추력에 의해 볼트 풀림현상이 발생된다는 사실을 보여 주는 것으로 판단된다.

(2) 볼트 체결시 변형률 분포

표 2.4.1과 표 2.4.2는 볼트 체결에 따른 세그먼트 상면과 하면에 설치된 철근 게이지의 변형률 분포를 나타낸 것인데, 상면의 경우 첫 번째 세그먼트에 설치된 게이지 중 1개가 손상되어 데이터 값을 획득하지 못하였다.

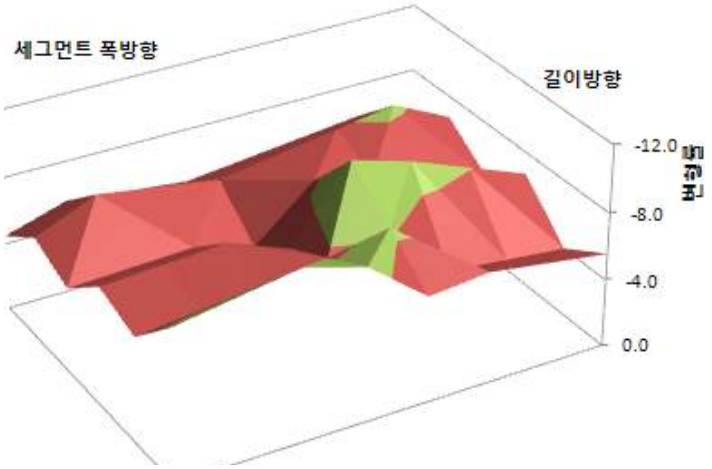
표 2.4.1 볼트 체결시 세그먼트 상면의 변형률

구분		1	2	3	4	5	6	7	8
Seg1	A	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	손상
	B	-4.8	-6.0	-5.6	-5.2	-4.8	-5.2	-5.6	-4.5
Seg2	C	-6.7	-8.4	-7.8	-7.3	-6.7	-7.3	-7.8	-6.3
	D	-4.8		-6.8	-7.5	-4.5	-5.5		-5.2
Seg3	E	-6.7		-9.5	-10.5	-6.3	-7.7		-7.3
	F	-4.0	-	-4.8			-7.3	-	-6.4
Seg4	G	-5.6		-6.7	-6.3	-9.1	-10.2		-9.0
	H	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0		0.0

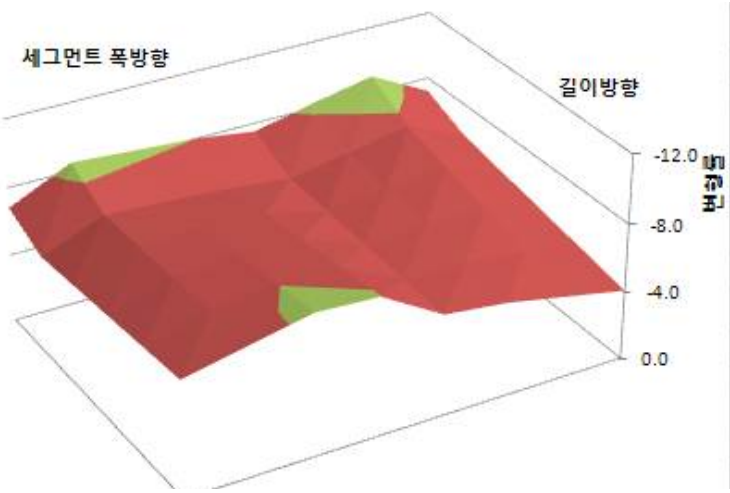
표 2.4.2 볼트 체결시 세그먼트 하면의 변형률

구분		1	2	3	4	5	6	7	8
Seg1	A	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	B	-7.2	-9.0	-8.3	-7.5	-8.0	-8.3	-8.5	-6.8
Seg2	C	-6.1	-7.7	-7.0	-6.4	-6.8	-7.0	-7.2	-5.8
	D								
Seg3	E				-				
	F								
Seg4	G	-4.1	-	-5.5	-6.0	-8.1	-8.3	-	-6.8
	H	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0		0.0

그림 2.4.18은 볼트 체결시 발생한 게이지의 변형률을 나타낸 것이다. 계측 결과 볼트 체결에 의한 체결력은 볼트 위치별로 크게 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 특히, 경사볼트를 적용하여 세그먼트 상면은 볼트 머리부의 값이 크고, 하면은 볼트 단부의 값이 더 커서 상하면의 변형률 분포차이가 큰 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 세그먼트 상면



(b) 세그먼트 하면

그림 2.4.18 볼트 체결시 철근 게이지의 변형률

(3) 강연선 체결시 변형률 분포

표 2.4.3과 표 2.4.4는 강연선 체결에 따른 세그먼트 상면과 하면에 설치된 철근게이지의 변형률 분포를 나타낸 것이고, 그림 2.4.19는 강연선 체결시 발생한 게이지의

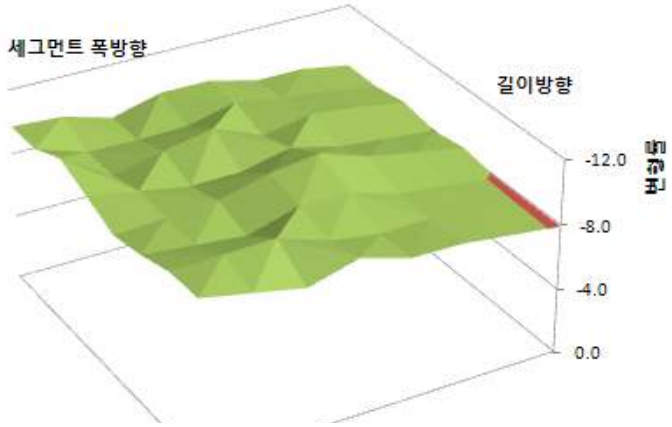
변형률을 나타낸 것이다. 계측 결과 강연선 긴장에 의한 체결력은 볼트의 체결에 비해 안정적인 값의 분포를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 특히, 세그먼트 전체적으로 상하면의 변형률 차이도 작고, 접합부 양측의 변형률 차이도 크지 않은 경향을 보였다.

표 2.4.3 강연선 체결시 세그먼트 상면의 변형률

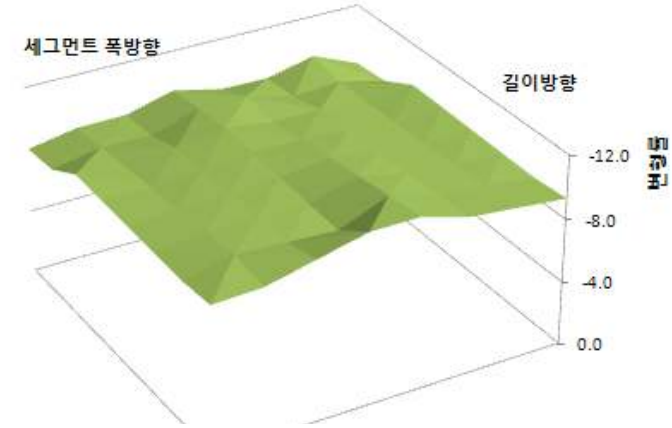
구분		1	2	3	4	5	6	7	8
Seg1	A	-8.1	-8.6	-8.6	-9.4	-9.4	-8.6	-9.5	-
	B	-8.0	-8.6	-8.9	-9.4	-8.7	-8.7	-8.7	-9.7
Seg2	C	-8.4	-8.9	-9.2	-8.7	-10.0	-9.4	-8.7	-10.6
	D	-8.0	-	-8.6	-9.4	-8.7	-8.7	-	-9.8
Seg3	E	-8.3	-	-9.5	-10.5	-10.1	-9.3	-	-9.0
	F	-7.9	-	-8.6	-	-	-8.7	-	-9.4
Seg4	G	-7.9	-	-8.6	-8.6	-9.1	-10.2	-	-10.0
	H	-7.9	-	-8.7	-8.7	-9.6	-8.8	-	-10.1

표 2.4.4 강연선 체결시 세그먼트 하면의 변형률

구분		1	2	3	4	5	6	7	8
Seg1	A	-8.1	-9.4	-8.7	-8.7	-9.4	-8.6	-8.6	-8.1
	B	-8.3	-9.0	-8.8	-9.6	-9.6	-8.7	-8.8	-8.2
Seg2	C	-9.4	-9.0	-9.4	-9.4	-9.8	-9.4	-9.0	-9.4
	D	-	-	-	-	-	-	-	-
Seg3	E	-	-	-	-	-	-	-	-
	F	-	-	-	-	-	-	-	-
Seg4	G	-9.1	-	-9.7	-10.6	-9.4	-9.5	-	-9.1
	H	-9.3	-	-9.9	-10.8	-10.8	-10.1	-	-9.2



(a) 세그먼트 상면



(b) 세그먼트 하면

그림 2.4.19 강연선 체결시 철근 게이지의 변형률

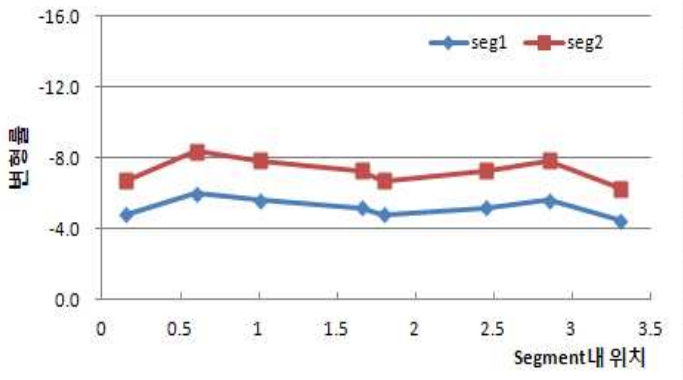
(4) 결과 분석

실험 결과 볼트 체결방식의 경우 결합 위치별로 변형율의 분포가 큰 경향을 보였으나 강연선 체결방식의 경우 체결부 전체적으로 변형율의 분포가 고른 경향을 나타내어 볼트 체결방식에 비해 신뢰도가 높은 체결 성능 확보가 가능할 것으로 판단된다.

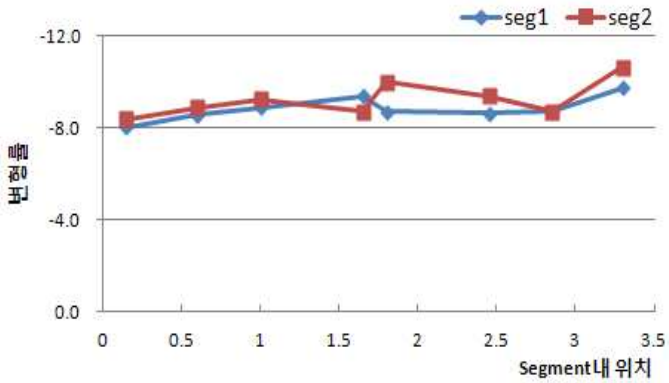
또한, 현장 시공시 설계값과 동일하게 시공관리가 가능할 수 있을 것으로 판단되며, 볼트 체결의 경우 추가 체결력 도입이 어려운데 반해, 강연선은 유압잭의 압력 증가 만으로도 추가 긴장이 가능하므로 탄력적인 긴장력 주입이 가능할 것으로 판단된다.

그림 2.4.20은 체결방식에 따라 세그먼트 접합부에서 철근의 변형률을 나타낸 것이다. 강연선 체결시 볼트 경우보다 동일한 철근 게이지 위치에서 변형률의 약 1.8배 이상 크게 나타났는데, 이것은 작용하는 체결력이 강연선이 더 크다는 것을 의미한다. 체결력에 대한 비교 평가시 강연선 체결방식이 기존 볼트 체결방식보다는 더 우수하

는 것으로 확인할 수 있었다.



(a) 볼트 체결시 세그먼트 접합부 변형률



(b) 강연선 체결시 세그먼트 접합부 변형률

그림 2.4.20 체결방식에 따른 세그먼트 위치별 변형율

2. 2차 실험

실제 쉴드터널 시공 프로세스의 경우 세그먼트 조립시 정밀한 시공을 위해 이렉터에 거치된 세그먼트를 정확한 조립위치에 놓기 위한 정교한 작업을 수행하며, 조립될 세그먼트가 정확한 조립 위치에 놓인 뒤에는 쉴드머신의 유압잭으로부터 조립을 위한 조립가압을 받는 상태에서 볼트 체결이 수행된다.

또한, 한 링 조립 후 굴진시 쉴드머신은 완성된 세그먼트 라이닝을 반력벽으로 하여 추력을 받게 된다. 따라서 체결 방식에 따른 세그먼트 내부의 역학적인 거동 분석을 위한 시험에서는 조립될 세그먼트 부재에 쉴드머신으로부터 조립가압을 받는 조건과 쉴드머신 추력을 모사하여 실제와 가까운 실험을 수행하였다.

현장에서는 기조립되어 원으로 형성된 세그먼트 라이닝이 반력벽의 역할을 하며 조립될 세그먼트는 쉴드머신을 통해 유압을 받음으로서, 세그먼트와 세그먼트 사이의 연결부가 밀실하게 접합할 수 있다. 따라서 2차 실대형 실험에서는 다발 강연선의 긴장을 이용해 볼트 조립 및 강연선 긴장 전에 세그먼트에 작용해야할 조립가압과 세그먼트 조립이 끝난 후 세그먼트에 작용하는 쉴드머신의 추력을 모사하였다.

조립가압 및 추력을 모사하여 실시한 본 실험에서는 세그먼트 시험체 두 개를 제작하여 세그먼트 체결시 접합면 주변의 응력 분포를 검토하였고, 볼트 체결 및 강연선 체결에 따라 세그먼트 내부에 작용 하는 힘의 역학적 거동을 분석하였다. 또한 추력이 발생된 이후의 세그먼트 내부 응력거동 분석을 통해 쉴드머신 추력이 각각의 체결력에 미치는 영향을 파악하였다.

가. 실험 계획

실험에 사용된 세그먼트 시험체는 부산 동래지역 전기공급시설 전력구공사(미남~동래)를 위해 제작된 A 타입 세그먼트 몰드를 개조하여 사용하였다. 동래 전력구의 터널 외경은 3,350mm로 계획되었으며, 세그먼트 단면 두께는 250mm, 세그먼트 폭은 1,000mm로 K 타입을 포함하여 A, B, C의 5개 분할로 설계되었다. 세그먼트의 연결은 볼트박스 형식이 적용되었으며, 실험에 사용된 A 타입의 경우 링방향 3개, 원주방향 2개로 설계되었다. 세그먼트의 콘크리트 설계기준 강도 및 철근의 항복강도는 분당선과 동일하게 설계되어 시험체 제작에는 분당선과 동일한 콘크리트 배합비를 사용하였다.

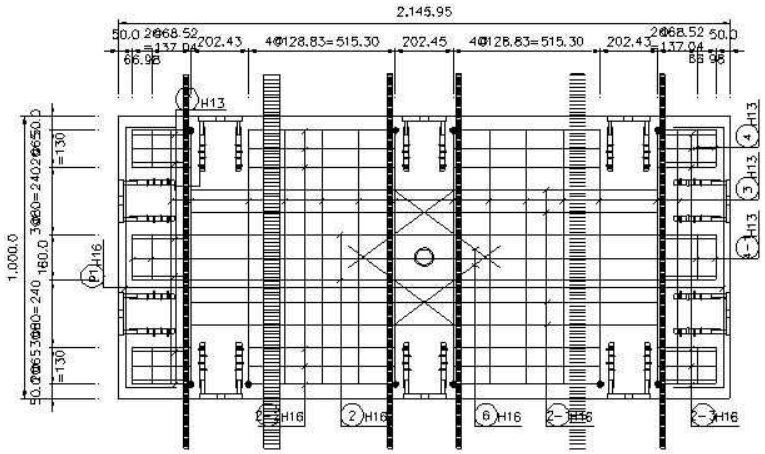
그림 2.4.21은 시험체 제작에 사용된 몰드와 시험체 제작 도면을 나타낸 것이다. 강

연선 삽입 홀은 실험에 사용할 강연선의 제원을 고려하여 직경 2cm의 스틸파이프로 설계하였다. 강연선이 통과되는 위치는 볼트박스 위치를 고려하여 세그먼트 중심으로부터 120mm 떨어진 위치에 두 개, 835mm 떨어진 위치에 두 개로 총 네 가닥의 강연선이 통과 할 수 있도록 하였다. 특히, 체결을 위한 강연선 삽입구 4개 이외에 쉴드머신 조립가압 및 추력 모사를 위한 다발 강연선 통과용으로 세그먼트 중심에서 530mm 떨어진 위치에 직경 5cm의 쉬즈관을 설치하였다.

세그먼트 시험체 제작을 위해 철근망 2개를 제작하고, 계획된 계측기를 부착하였다. 그림 2.4.22는 실험에 계획된 계측 장비 설치 도면을 나타낸 것이다.



(a) 세그먼트 제작 몰드



(b) 실험체 제작 도면

그림 2.4.21 실험체 제작을 위한 몰드 및 도면(2차 실험)

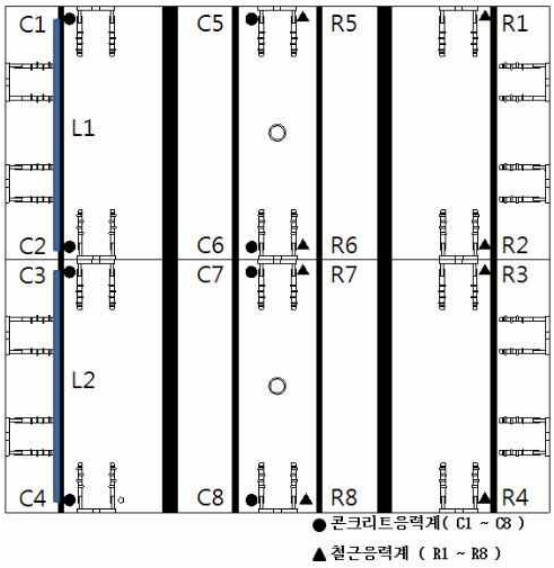
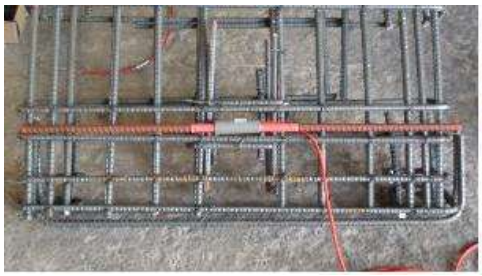
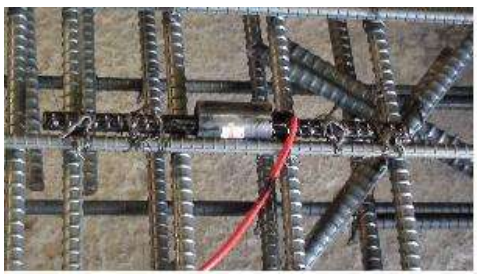


그림 2.4.22 계측장비 설치 도면(2차 실험)



(a) 90cm 철근 응력계



(b) 30cm 철근 응력계



(C) 콘크리트 응력계



(d) 하중계

그림 2.4.23 계측 장비 설치 사진(2차 실험)

그림 2.4.23은 각 응력계의 형상 및 부착 모습을 나타낸 것이다. 길이 1m의 세그먼트에서 철근에 발생하는 응력변화를 측정하기 위해 길이 90cm의 철근 응력계를 세그먼트마다 1개씩 설치하였고, 세그먼트 내부에 발생하는 응력을 위치별로 계측하기 위해 콘크리트 응력계와 길이 30cm의 철근 응력계를 설치하였다. 특히, 계획한 강연선의 긴장력과 실제 실험에서 발생하는 힘을 비교하기 위해 그림 2.4.23(d)에 보이는 것

과 같이 강연선 긴장단에 하중계를 설치하였다.

그림 2.4.24는 완성된 세그먼트 시험체를 나타낸 것인데, 사용된 시험체는 수팽창 지수재와 개스킷이 2열 배열로 설계되었다.



(a) 수팽창 지수재 및 개스킷 부착



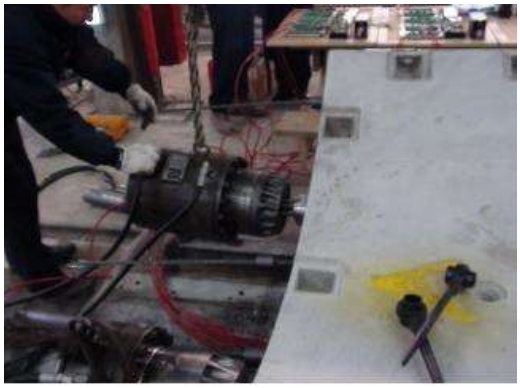
(b) 실험 준비 완료

그림 2.4.24 완성된 세그먼트 실험체(2차 실험)

나. 실험 수행

2차 실험은 조립가압 적용, 볼트 체결, 체결용 강연선 긴장, 풀추력 모사, 풀추력 해제, 체결용 강연선 긴장 해제 순으로 진행되었다. 그림 2.4.25는 실험 과정을 나타낸 것이다. 조립가압은 현장상황에 따라 조금씩 다르나 일반적으로 20ton 정도의 힘을 재하 한다. 따라서 추력모사를 위한 다발 강연선 긴장을 통해 20ton의 힘을 재하 하였다. 볼트박스에 대한 별도의 설계 토크치가 없으므로, 볼트 조립은 수동식 토크렌치를 이용하여 인력으로 가능한 최대치까지 체결하였다. 강연선 체결에는 앞서 수행한 시험과 동일하게 7연선 12.7mm 규격을 사용하였으며, 총 4열의 강연선을 각각 10ton씩 긴장하였다.

실제 현장에서 터널 굴진시 세그먼트에 작용하는 쉴드머신의 추력은 풀추력의 50% 정도 수준이며, 본 실험에서 모사한 풀추력은 양쪽의 다발 강연선에 각각 50ton 씩 재하 하여 총 100ton의 힘을 적용시켰다.



(a) 조립가압 재하



(b) 볼트 조립



(c) 강연선 긴장



(d) 풀추력 모사



(e) 풀추력에 의한 세그먼트 손상



(f) 데이터 수집

그림 2.4.25 세그먼트 체결 실험 모습(2차 실험)

다. 실험 결과

실험 전과정에 걸쳐 계측데이터를 수집하였는데, 그림 2.4.26은 시간에 따른 계측기의 변위값을 나타낸 것이다. 그래프 상의 L1, C1, R1은 90cm 철근 응력계, 콘크리트 응력계, 30cm 철근 응력계를 나타낸다.

그래프를 통해 계측기의 종류에 관계없이 실험 과정에 따라 전체적으로 비슷한 변화 양상을 보임을 시각적으로 확인할 수 있다. 특히, 실험의 마지막 과정에서는 풀추력 모사와 해제를 반복함으로써, 실제 터널 굴착시 일어나는 반복하중에 대해 체결된 강연선의 긴장력 유지 여부를 확인하고자 하였다. 그래프의 풀추력 반복구간을 살펴보면 풀추력이 해제된 시점들에서 유사한 변위값을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

정량적인 분석을 위해 각 계측기의 변위값을 응력으로 환산하여 표 2.4.5에 정리하였는데, 실험 진행 시점의 값을 추출하여 실험 단계에 따른 응력으로 나타내었다.

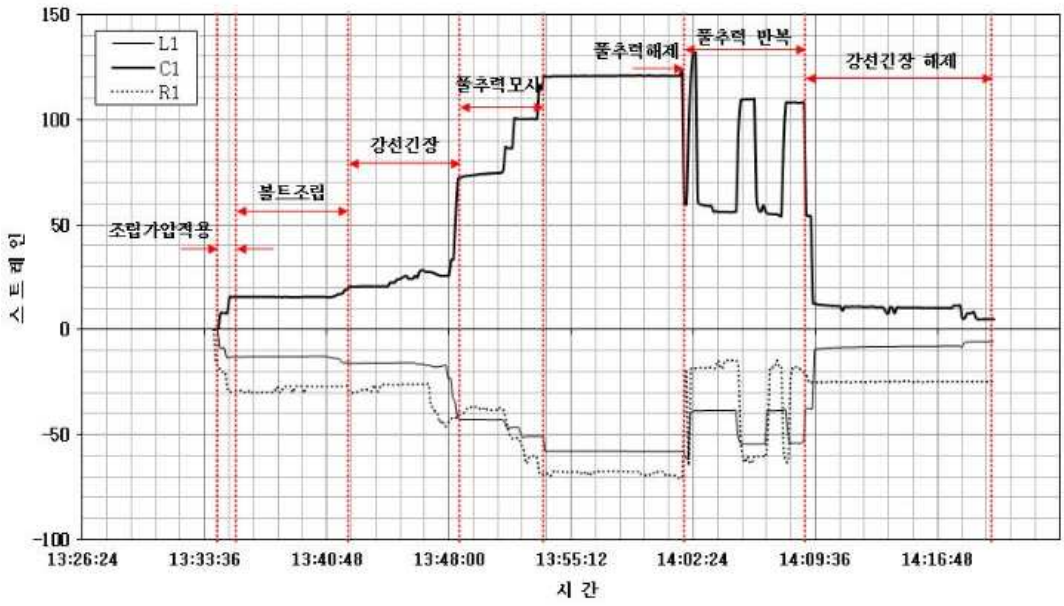


그림 2.4.26 계측기 종류별 시간-변위 곡선(2차 실험)

그림 2.4.27은 전체적인 세그먼트 응력의 변화 추이를 분석하기 위해 계측 데이터를 바탕으로 90cm 철근 응력계의 나타낸 것이다. L1은 첫 번째 세그먼트에 부착한 철근 응력계이고, L2는 두 번째 세그먼트에 부착한 철근 응력계를 의미한다. 그래프의 값을 살펴보면 조립가압 이후 모든 응력 값에 있어 L1의 절대치가 더 높은 것을 확인할 수 있는데, 이는 강연선을 긴장한 쪽이 첫 번째 세그먼트 단부이기 때문이며, 세그먼트에 가해진 힘이 콘크리트 내부 저항을 통해 조금씩 작아지는 것으로 판단된다.

표 2.4.5 계측기 종류별 발생 응력 결과(2차 실험)

(단위 : kg/㎠)

구분	조립 가압	볼트 체결	강연선 긴장	풀추력 모사	풀추력 해제	강연선 긴장 해제
L1	-26.478	-32.535	-87.322	-118.361	-81.093	-6.435
L2	-22.658	-29.637	-71.219	-87.375	-57.388	-5.045
R1	-68.208	-60.103	-87.794	-159.79	-42.463	22.19
R2	-15.073	-19.196	-65.62	-84.043	-62.154	-7.379
R3	-11.948	-17.184	-53.105	-151.432	-31.401	-11.229
R4	-46.02	-63.704	-138.492	-285.314	-96.614	21.667
R5	-106.838	-100.031	-131.211	-236.24	-92.743	-9.854
R6	-17.775	-17.674	-20.173	-127.587	8.555	21.681
R7	-11.158	-20.958	-90.852	-173.306	-77.762	-2.943
R8	-49.766	-51.2	-86.509	-181.084	-51.088	-19.406
C1	6.16	6.51	23.28	38.3	38.5	1.08
C2	2.32	2.14	12.03	15.19	15.16	1.81
C3	7.4	0.4	12.84	14.06	14.09	1.08
C4	2.74	4.34	17.71	30.03	32.11	1.05
C5	6.16	9.48	18.14	45.05	37.5	1.94
C6	0.28	0.08	19.08	20.29	20.42	0.56
C7	0.39	0.21	9.12	10.89	10.61	0.79
C8	7.32	8.28	15.17	38.52	37.03	2.39

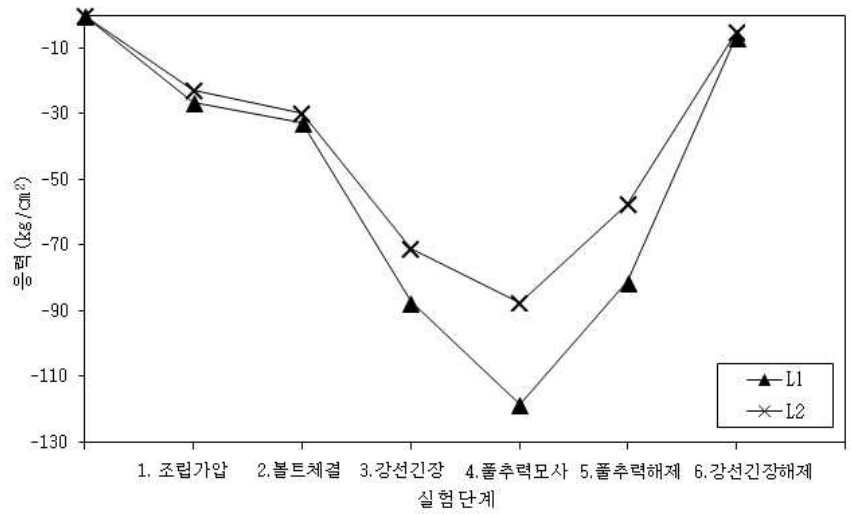


그림 2.4.27 실험 단계별 90cm 철근 응력계 변화(2차 실험)

조립가압 적용 후 볼트 체결 시 증가한 수치와 볼트 체결 이후 강연선 긴장시 증가한 수치를 살펴보면, 세그먼트에 작용하는 체결력은 강연선 긴장력이 훨씬 큰 것을 확인할 수 있다. 또한, 쉴드머신의 풀추력을 모사한 이후 해제 하였을 때의 값은 강연선을 긴장하였을 때의 응력값에 비해 조금 줄어들었으나 유사한 값을 유지하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 반복되는 쉴드 머신의 추력이나 여타 진동에도 세그먼트를 체결하고 있는 강연선의 긴장력은 유지되는 것으로 설명할 수 있다. 반면, 강연선 긴장을 해제한 경우 세그먼트는 여전히 볼트로 체결되어 있음에도 세그먼트 내부에 작용하는 응력이 거의 '0'에 가까워지는 것을 볼 수 있는데, 이는 볼트의 경우 풀추력이 모사된 이후 체결 성능을 유지하지 못하는 것으로 판단된다.

따라서 볼트의 체결보다 강연선의 체결력이 더 크며, 풀추력이 세그먼트에 재하된 이후 볼트의 체결력은 거의 소산되는데 비해 강연선 긴장력은 유지되는 것으로 보아, 체결 성능면에 있어서 강연선 체결이 더 우수한 것으로 판단된다.

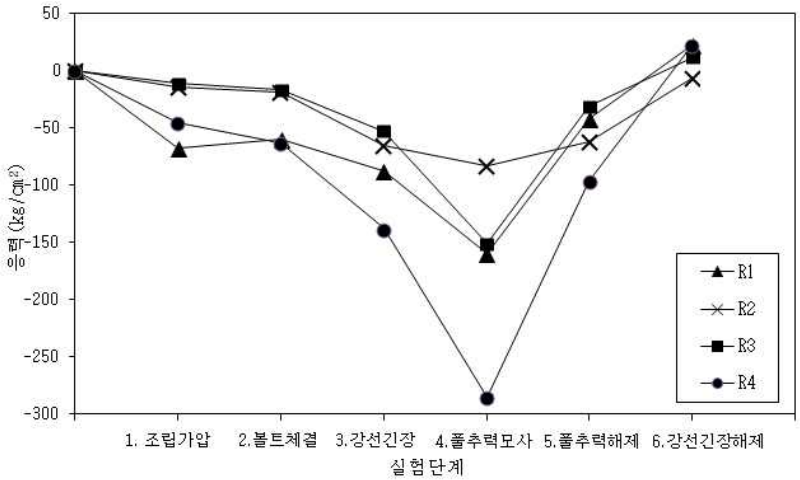
그림 2.4.28은 동일한 선상에 위치한 30cm 철근 응력계의 변화를 나타낸 것이다. 계측기 설치 도면으로 각 게이지의 위치를 확인할 수 있는데 그림 2.4.28(a)의 R1, R2, R3, R4는 세그먼트 끝단에 설치한 계측기의 변화를 나타낸 것이고, 그림 2.4.28(b)의 R5, R6, R7, R8은 세그먼트 중심부에 설치한 계측기에서 측정된 값이다.

두 그래프 모두 90cm 철근 응력계와 비슷한 변화 추이를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 특히, 강연선을 통한 긴장이 이루어지는 시점인 강연선 긴장과 풀추력 모사의 경우 세그먼트 양 끝단에 있는 R1, R4, R5, R8의 응력이 세그먼트 접촉면 가까이 설치된 계측기인 R2, R3, R6, R7의 응력보다 작은 것을 확인할 수 있는데, 이를 통해 강연선 긴장시 힘이 세그먼트 양끝단의 단부로부터 시작하여 점점 중심부로 전달되는 역학적 메커니즘을 확인할 수 있었다.

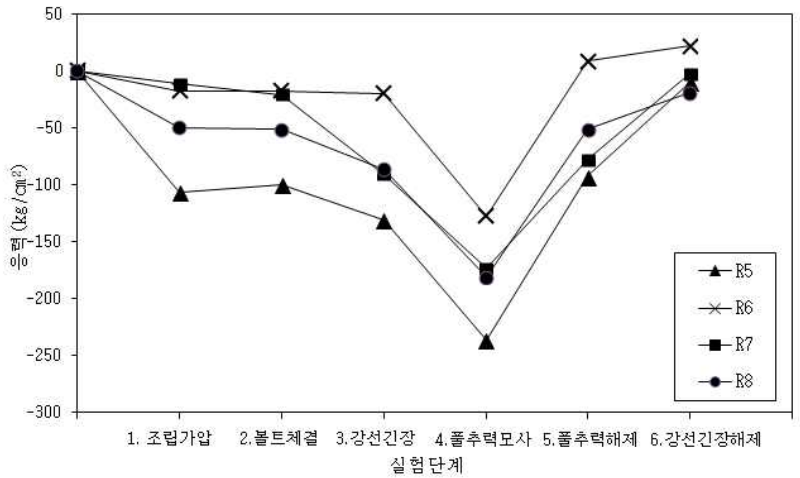
그림 2.4.29는 세그먼트 끝단과 중심부에서 같은 라인에 설치된 콘크리트 응력계의 값을 나타낸 것이다. 콘크리트 응력계의 경우 계측기의 특성상 압축이 (+)값으로 나타나며 철근 응력계와 콘크리트 응력계의 계측 부호는 다르나 둘 다 압축력을 의미한다. 그래프를 살펴보면 90cm 철근응력계의 경향과 동일하게 강연선의 긴장이 이루어지는 시점에서는 세그먼트 단부쪽에 위치한 C1, C4, C5, C8의 계측값이 더 높게 나타난 것을 확인할 수 있다.

특히, 조립가압 이후 볼트체결이 이루어지는 시점에서는 콘크리트 응력계에 미치는 응력이 거의 없거나 미미한 것을 확인할 수 있다. 콘크리트 응력계의 계측데이터를 통해 콘크리트 내부로 전달되는 체결력은 볼트 체결보다 강연선 긴장으로 인한 체결이 더 효과적이며, 세그먼트의 체결로 인해 하나의 라이닝으로 형성되는 쉴드 세그먼트의 특성상 볼트보다 강연선의 체결성능이 더 뛰어날 수 있을 것으로 판단된다.

풀추력 모사 후 풀추력을 해제한 시점에서도 콘크리트 응력계의 값은 줄어들지 않는 경향을 나타내고 있는데 이는 철근에 비해 콘크리트의 탄성계수가 낮아 압축력을 여전히 유지하는 것으로 판단된다. 그러나 강연선의 긴장력을 해제한 최종 단계에서 다시 응력이 '0'에 가까워지는 것으로 보아 풀추력으로 인해 발생되는 응력이 계측기의 계측범위보다 더 크기 때문인 것으로도 유추해 볼 수 있으며, 정확한 사실 여부는 이번 실험을 통해서 확인이 불가능한 것으로 판단된다.

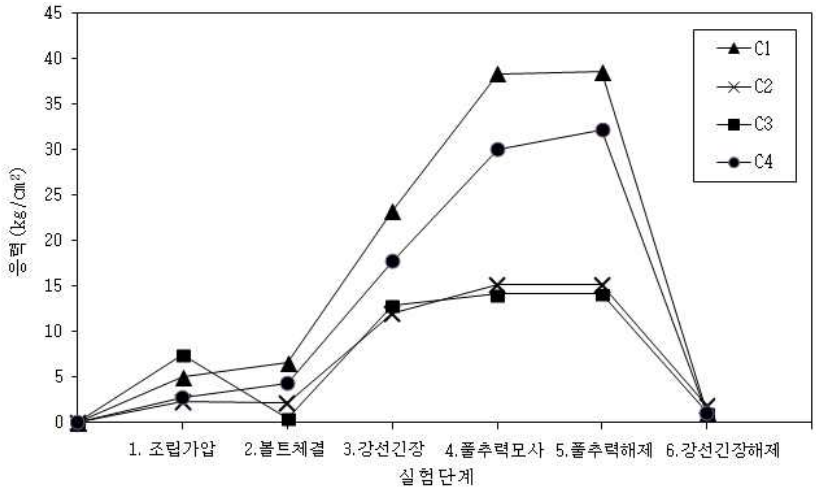


(a) 세그먼트 끝단

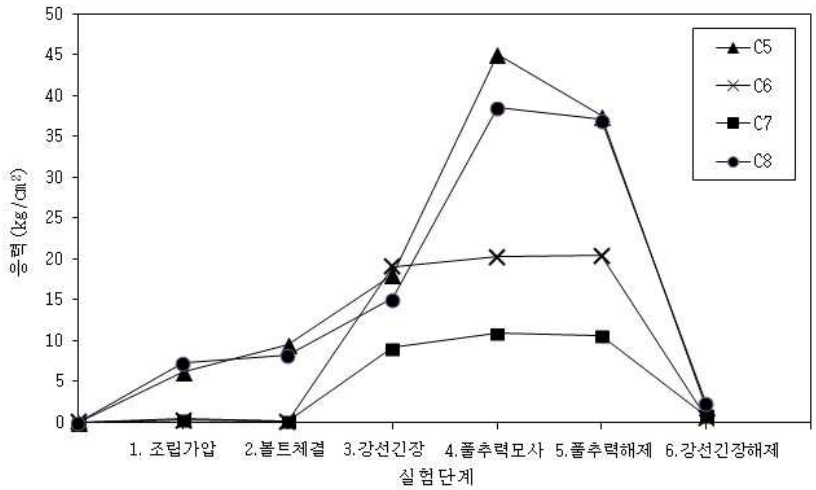


(b) 세그먼트 중심

그림 2.4.28 실험 단계별 30cm 철근 응력계 변화(2차 실험)



(a) 세그먼트 끝단



(b) 세그먼트 중심

그림 2.4.29 실험 단계별 콘크리트 응력계의 변화(2차 실험)

소결론

쉴드터널의 체결방식별 체결력의 차이에 따른 거동을 검토하기 위하여 실제 지하철 현장에 시공되었던 것과 동일한 세그먼트를 제작하여 볼트 체결방식과 강연선 체결방식의 세그먼트 거동을 분석하였다. 거동 분석 후 쉴드터널 시공 시에 발생하는 전반적인 작용력에 대한 실험을 추가로 실시하였다.

(1) 체결력에 따른 세그먼트 거동을 위하여 세그먼트 상부에 8개, 하부에 8개의 계측기를 매립하여 3개의 A타입 실대형 세그먼트를 제작하였다. 세그먼트는 강연선의 이 공급 및 체결이 가능하도록 세그먼트 내부에 강관을 삽입하였다.

(2) 실험결과는 볼트 체결방식의 경우 측정한 위치별로 발생한 응력에 큰 차이를 보이며 균일한 체결상태를 보이지 못하였으나, 강연선 체결방식의 경우 세그먼트 접합면에서 고른 응력분포를 보이며 양호한 체결상태인 것으로 검토되었다. 또한 볼트 체결방식과 강연선 체결방식에 따른 세그먼트간의 이격은 육안으로 관찰하기에도 확연한 차이를 보였다. 볼트 체결방식의 체결력 재하시 계측된 변형률은 평균 4.7%이며, 강연선 체결방식의 변형률은 평균 9.0%였다. 이를 압축력으로 인한 체결력 증가로 검토하였을 때, 강연선 체결방식이 볼트 체결방식에 비해서 91.4%더 우수한 성능을 발휘하는 것으로 판단된다.

(3) 세그먼트 체결방식의 평가를 위하여 계측기가 매설된 실대형 세그먼트를 제작하여, 조립가압 적용, 볼트 체결, 체결용 강연선 긴장, 풀추력 모사, 풀추력 해제, 체결용 강연선 긴장 해제의 과정을 실험하였다. 강연선 긴장시의 응력변화에 비해 볼트 체결이 이루어지는 시점에서 응력변화는 미비하였으며, 쉴드 풀추력 해제 시에는 강연선을 긴장하였을 때의 응력값과 유사한 값을 유지하였고, 이는 반복되는 외부힘의 작용에도 세그먼트를 체결하고 있는 강연선의 긴장력은 유지되는 것으로 볼 수 있다. 반면, 강연선 긴장을 해제한 경우 세그먼트는 여전히 볼트로 체결되어 있음에도 세그먼트 내부에 작용하는 응력이 거의 '0'에 가까워지는 것을 볼 수 있는데, 이는 볼트의 경우 풀추력이 모사된 이후 체결 성능을 유지하지 못하는 것으로 판단된다. 세그먼트의 체결로 인해 하나의 라이닝으로 형성되는 쉴드 세그먼트의 특성상 볼트보다 강연선의 체결성능이 더 뛰어날 수 있을 것으로 판단된다.

제 5 절 쉴드터널 곡선부에서의 강연선 긴장력 손실평가

1. 강연선 체결력 및 손실율 검토

가. 곡선 배치에 대한 긴장력 손실

프리스트레스(prestress)의 손실은 크게 두 가지 종류로 분류할 수 있다. 첫째는 프리스트레스를 도입할 때의 긴장력과 비교하여 도입되는 긴장력이 작은 것을 의미하고, 두 번째로는 콘크리트에 도입된 프리스트레스(압축응력)이 다양한 원인에 의해서 감소하는 것을 의미한다. 그러나 엄밀한 의미에서 프리스트레스의 손실은 강연선에 도입된 힘으로 산정하는 것이 아니라 콘크리트의 입장에서의 손실을 의미하는 것이다.

프리스트레스의 손실에는 크게 6가지 종류가 있는데, 세 가지 종류의 즉시손실이 있고, 세 가지 종류는 장기손실이다.[1] 즉시손실에는 프리스트레스를 도입하는 PS 강재와 콘크리트의 마찰에 의해서 발생하는 마찰손실이 있고, 콘크리트의 탄성수축에 의한 손실이 있으며, 정착장치 슬립에 의한 손실이 있다. 장기손실에는 콘크리트의 크리프에 의한 손실, 건조수축에 의한 손실, 강연선의 릴렉세이션(relaxation)에 의한 손실이 있다.

(1) 정착장치의 활동으로 인한 손실

긴장한 PS 강재를 정착할 때, 정착장치에서 PS 강재가 활동하거나 또는 정착장치가 변형되거나 하면 긴장재의 인장력이 감소함에 따라 발생하는 손실이다.

PS 강재와 쉬스관(sheath pipe) 사이에 마찰이 없는 경우에는 다음 식으로 산정할 수 있는데, 이는 프리텐션(pre-tension) 방식 혹은 포스트텐션(post-tension) 방식의 경우라도 그리스(grease) 등을 발라서 긴장재가 매끄럽거나 마찰이 적은 플라스틱 쉬스에 긴장재가 수용되어 있거나, 쉬스 곡률과 파상의 영향이 적어서 마찰을 무시할 수 있는 경우에 적용된다.[2]

$$\begin{cases} \Delta P = A_p E_p \dfrac{\Delta l}{l} \\ \Delta f_{an} = E_p \dfrac{\Delta l}{l} \end{cases} \qquad \text{식(2.5.1)}$$

여기서, ; ΔP; 긴장재의 인장력 감소량

A_v; 긴장재의 단면적

E_v; 긴장재의 탄성계수

Δl; 정착장치에서 긴장재의 활동량

l ; 긴장재의 길이

Δf_{an}; 긴장재의 응력 감소량($= \frac{\Delta P}{A_v}$)

PS강재와 쉬스 사이에 마찰이 있는 경우에는 다음 식(2.5.2)와 같이 산정한다.

- 정착장치의 활동량 Δl

$$\Delta l = \frac{0.5 \Delta P l_{set}}{A_p E_p} \qquad \text{식(2.5.2)}$$

- 단위 길이에 대한 마찰손실을 p 라고 하면, 인장력의 손실 ΔP

$$\Delta P = 2 p l_{set} \qquad \text{식(2.5.3)}$$

- 정착부에서 정착장치 활동의 영향을 받는 긴장재 길이 (l_{set})

$$l_{set} = \sqrt{\frac{\Delta l A_p E_p}{p}} \qquad \text{식(2.5.4)}$$

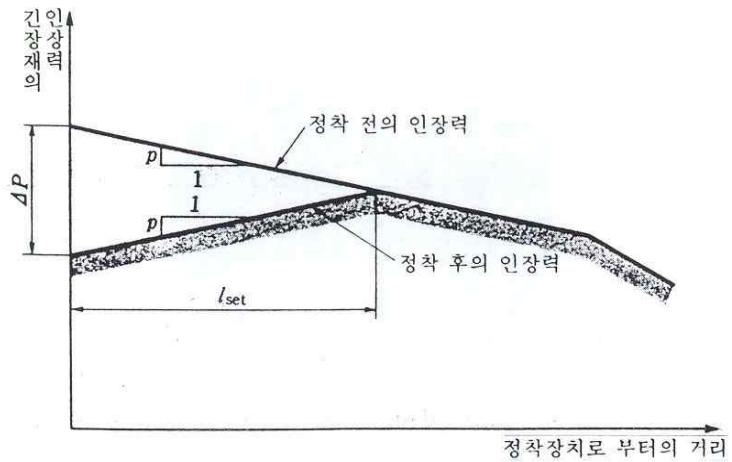


그림 2.5.1 정착장치의 활동이 긴장력에 미치는 영향

그림 2.5.1에서 보는 바와 같이 정착장치 슬립에 의한 손실은 마찰손실과 비교할 때, 변화량의 기울기는 동일한 절대값을 가지면서 방향은 반대의 형태로 발생한다.

(2) PS 강재와 쉬즈의 마찰로 인한 손실

PS 강재와 쉬즈 사이의 마찰로 인한 인장력의 감소는 긴장재의 길이에 따른 파상마찰과 곡률변화에 따른 곡률마찰이 있다. 곡률로 배치된 강연선의 미소 부분을 나타내면 그림 2.5.2와 같다. 미소한 각변화 $d\alpha$ 에 의하여 일어나는 긴장력 P 의 수직분력 N을 힘의 평형 사변형으로 나타낸 것이다.[3)]

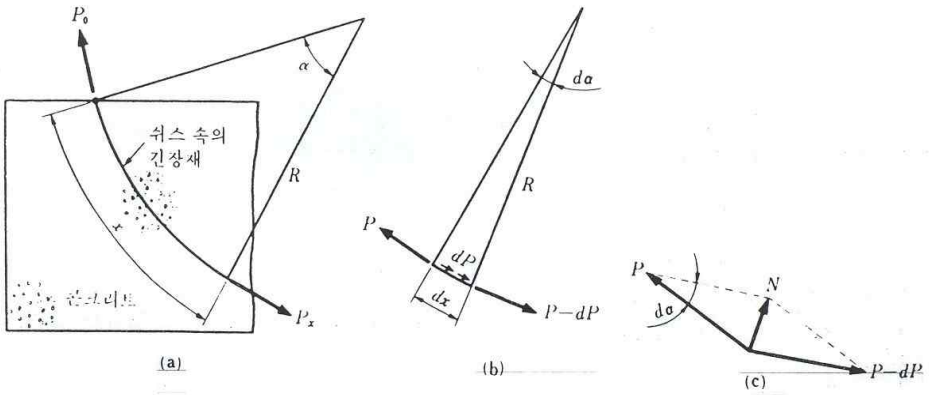


그림 2.5.2 곡률마찰에 의한 손실

PS 강재와 쉬즈 사이의 마찰계수를 μ 라고 하면, P 의 수직분력 N에 의한 마찰력은 μN이고, 이것이 dx 구간에서 PS 강재의 인장력 P 를 dP 만큼 감소시킨다. P_0 의 수직분력 N이 PS 강재의 길이 l 구간에서 일정하다고 가정하면 다음 식 (2.5.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_x - P_0 = -\mu P_0 \alpha \qquad \text{식(2.5.5)}$$

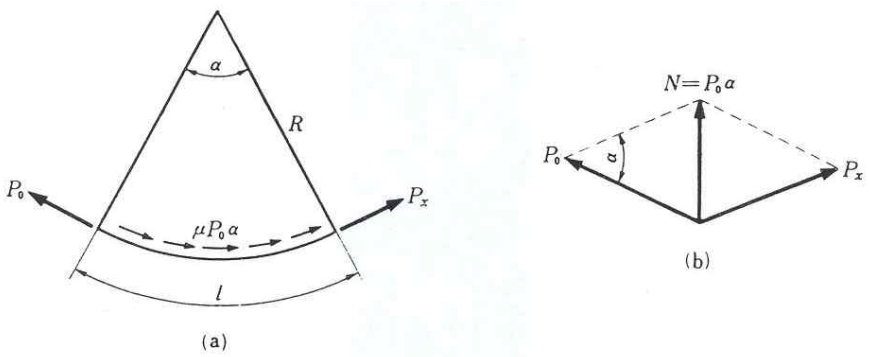


그림 2.5.3 마찰손실의 근사계산

μ 및 k 의 값은 시험에 의하여 구하는 것이 원칙이지만, 시험을 할 수 없을 경우에는 표 2.5.1 및 표 2.5.2를 이용할 수 있다. 그러나 국외 기준별로 그 값의 차이가 크기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다.

표 2.5.1 k 및 μ 의 값(콘크리트 설계기준)[4]

긴장재의 종류			k(/m)	μ(/radian)
부착시킨 긴장재		강연선	0.0033~0.0050	0.15~0.25
		강봉	0.0003~0.0020	0.08~0.30
		고강도 스트랜드	0.0015~0.0066	0.15~0.30
부착시키지 않은 긴장재	수지방수피복	강연선	0.0033~0.0066	0.05~0.15
		고강도 스트랜드	0.0033~0.0066	0.05~0.15
	그리스 도포	강연선	0.0010~0.0066	0.05~0.15
		고강도 스트랜드	0.0010~0.0066	0.05~0.15

표 2.5.2 k 및 μ 의 값(도로교 및 철도교 설계기준)[5]

긴장재의 종류	덕트의 종류	k(/m)	μ(/radian)
PS 강연선 및 PS 강연선	금속쉬스	0.0066	0.30
	아연도금 금속쉬스	0.0050	0.25
	구리스 또는 아스팔트 코팅 후 피복된 것	0.0066	0.30
	아연도금된 강성덕트(rigid duct)	0.0007	0.25
PS 강봉	금속쉬스	0.0010	0.20
	아연도금 금속쉬스	0.0007	0.15

(3) 콘크리트의 탄성변형(단축)으로 인한 손실

콘크리트에 프리스트레스를 도입하면 콘크리트는 압축되어 그만큼 부재 길이가 줄어들기 때문에 발생하는 콘크리트의 탄성수축에 의한 손실은 프리텐션 방식의 경우와 포스트텐션 방식의 경우가 서로 다르다.[6]

프리텐션에서는 프리스트레스를 도입하기 위하여 PS 강연선의 고정을 풀어 주면, 콘크리트 부재에는 압축응력이 작용하여 부재는 단축한다. PS 강연선은 콘크리트와 완전히 부착되어 있기 때문에 이 때 PS 강연선도 동시에 단축된다.

포스트텐션 방식에서는 경화한 콘크리트 부재를 받침으로 하며 긴장재를 재킹(jacking)하므로 콘크리트 부재는 단축된다. 그러나 이때 긴장재의 인장력은 콘크리트 부재가 탄성 단축된 후에 측정되기 때문에 콘크리트의 탄성변형으로 인한 인장력의 감소는 있을 수 없다.

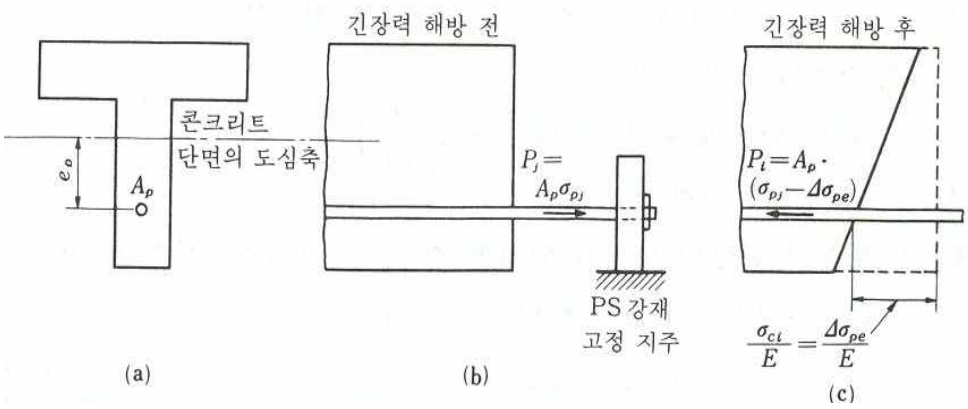


그림 2.5.4 탄성단축으로 인한 프리스트레스의 감소(프리텐션 부재)

(4) 콘크리트의 크리프로 인한 손실

콘크리트의 크리프(creep)에 의하여 긴장재의 긴장응력은 시간의 경과와 더불어 감소하는데, 이는 콘크리트의 크리프 변형률에 따라 긴장재에도 압축 변형률이 일어나서 인장응력이 감소하기 때문에 발생하는 것이지만, 콘크리트의 입장에서는 응력의 변화없이 콘크리트가 수축하려고 하지만 긴장재와의 힘의 평형을 이루어야하기 때문에 원하는 양만큼 수축하지 못하며, 이에 따라 콘크리트에 인장응력이 발생하여 프리스트레스가 손실되는 것으로 나타나게 된다.

크리프에 의한 콘크리트의 압축응력은 일정하지 않으며 크리프의 진행과 함께 진행되는 건조수축과의 릴랙세이션 때문에 시간의 경과와 더불어 감소한다. 이러한 관계를 고려하여 크리프에 의한 손실을 계산하여야 한다.

(5) 콘크리트의 건조수축으로 인한 손실

콘크리트의 건조수축 변형을 함에 따라 긴장재도 압축변형을 일으켜서 인장응력이 감소된다. 건조수축에 의한 콘크리트의 최종 변형률은 $500\times10^{-6}\sim1000\times10^{-6}$ 정도의 범위이다. 습윤양생한 콘크리트의 최종 건조수축 변형률은 800×10^{-6} 정도이고, 증기

양생한 콘크리트는 730×10^{-6} 정도로 볼 수 있다.[6)]

프리텐션 방식에서는 콘크리트를 타설하고 24시간 정도에서 프리스트레스를 도입하는 것이 보통이므로, 건조수축에 의한 손실은 그 후에 일어난다. 그러나 포스트텐션 방식에서는 콘크리트를 타설하고 7일 이전에 프리스트레스를 도입하는 일은 거의 없다. 건조수축은 재령 7일에서 최종 수축변형률의 10~15% 정도가 일어나며, 재령 28일까지 프리스트레스 도입을 하지 않을 경우에는 35~45% 정도가 일어난다고 알려져 있다.

건조수축에 의한 손실은 크리프와 같은 원리로 콘크리트가 응력변화 없이 건조수축을 하고자 하지만, 긴장재와의 힘의 평형을 이루는 수준까지만 수축하기 때문에 수축하지 못한 양만큼의 인장응력이 발생함으로 나타나게 된다.

(6) PS 강재의 릴랙세이션으로 인한 손실

PS 강재에 인장응력을 작용시켜 그 변형률을 일정하게 유지하면 PS 강재에 준 인장응력은 시간의 경과와 더불어 점차로 감소한다. 이러한 현상을 PS 강재의 릴랙세이션에 의한 인장응력의 감소라고 한다.

변형률을 일정하게 유지했을 때의 릴랙세이션을 순릴랙세이션이라고 한다. 실제의 PSC 부재에 일어나는 PS 강재의 릴랙세이션은 변형률 일정시의 순릭랙세이션이다.

나. 곡선배치에 따른 강연선 긴장력 손실 검토

쉴드터널의 단면은 근사원형이기 때문에 세그먼트의 대다수는 종방향으로는 직선이지만 횡방향으로는 곡률을 가진다. 또한 종방향 선형이 곡률을 가지는 경우가 있기 때문에 강연선을 이용하여 쉴드터널용 세그먼트를 연결하는 경우, 강연선이 곡선으로 배치되거나 혹은 곡선부재에 직선으로 강연선이 배치되게 된다.

강연선이 곡선으로 배치되거나 곡선부재에 직선으로 강연선을 배치하는 경우에는 곡선에 대한 고려가 필요하고, 이러한 사항이 연결부 설계에 반영되어야 한다. 강연선의 곡선배치에 따른 마찰손실을 고려하여 쉴드 세그먼트에 적용하면 프리스트레스의 손실을 정확하게 고려할 수가 있다.

프리스트레스를 도입하기 위한 강연선은 직선으로 배치되었으나 도입대상 세그먼트가 곡선인 경우는 각 단면별로 도입되는 프리스트레스를 계산할 수 있다. 즉 텐던(tendon)이 중앙부에 배치되는 경우는 휨성분 없이 축방향 성분만을 가지지만, 텐던이 단면의 하부 혹은 상부에 배치되는 경우는 단면의 도심과 강연선 위치의 거리에 따라

휨성분의 프리스트레스가 콘크리트에 추가로 배치되는 형상이 된다. 따라서 이 경우에 대해서는 단면별로 다른 프리스트레스가 도입되는 것으로 산정할 수 있다.

이러한 점을 고려할 때 곡선 세그먼트에 강연선을 직선으로 배치하여도 구조계산상 어려움은 없지만, 텐던의 배치에 따라 의도하지 않은 면에 응력이 발생할 수 있으므로 특별한 이유가 없다면, 세그먼트 연결용 텐던은 세그먼트의 중심을 따라 배치되는 것이 좋으며 이것이 불가능할 경우는 안전측으로 배치하는 것이 좋다.

따라서 강연선이 곡선으로 배치 적용되는 경우는 적절한 곡률마찰계수(콘크리트 구조 설계기준에서는 0.15~0.30/rad)를 적용하여 마찰손실을 고려하여 긴장력을 산정할 수 있으며, 이러한 마찰손실은 세그먼트의 곡선과는 무관하다고 할 수 있다.

이상에서 알 수 있는 것처럼 세그먼트의 단면형상과 강연선의 배치에 따라 도입되는 프리스트레스는 쉽게 계산할 수 있고, 이에 대한 것은 이론적으로 검증이 가능하기 때문에 곡선과 텐션에 따른 별도의 실험적 검증은 불필요하다고 판단된다.

2. 곡선부의 강연선 긴장력 유지 방안

가. 긴장력 도입순서 준수

도로공사 등의 프리스트레스트(prestressed) 제작 관련 규정들을 참고하면 긴장력의 손실을 최대한 줄이기 위해 정해진 순서에 따라 긴장력을 주게 된다. 일반적으로 프리스트레스는 다음의 순서로 도입한다.[8)]

① 철근 조립 및 쉬즈관 배치

철근을 조립하기 전에 청소하고 철근이음 위치가 한곳에 집중되지 않도록 적절한 위치에 배치하며, 콘크리트를 타설할 때 움직이지 않도록 조립해야 한다.

② 쉬즈관 및 강연선 배치

PS 강연선은 설계도에 나타난 형상 및 치수에 일치하도록 하고 이것을 배치할 때에는 쉬즈나 정착장치에 흠이 생기지 않도록 주의해야 한다.

③ 정착장치 및 접속장치의 조립 및 배치

정착장치 및 접속장치는 설계도에 표시된 형상 및 치수에 일치하도록 조립하고 위치 및 그 방향을 바르게 배치해야 하며, 정착장치의 지압면은 PS 강연선과 직각이 되도록 설치해야 한다.

④ 거푸집 검사 및 설치

거푸집(강재)이 반입되면 모양과 치수 및 두께(3.2mm이상), 표면 마무리 상태 ,변형여부, 연결부 접속상태 등에 대해 감독원의 검사를 받아야 하며, 콘크리트 타설 전에 감독이 거푸집의 모양, 치수, 내부 청소상태, 박리제 도포 등을 확인해야 한다.

⑤ 콘크리트 타설

진동 다짐시 철근, 쉬즈관, 강연선 등의 위치가 이탈되지 않도록 주의하여야 하며, 타설 전에 모든 쉬즈관의 막힘 여부를 확인하여야 한다. 다른 종류에 비해 강도가 높기 때문에 콘크리트의 재료 생산, 타설, 양생에 대한 품질관리를 철저하게 해야 한다.

⑥ 양 생

콘크리트 타설 후에 저온, 건조 및 급격한 온도변화 등에 의한 유해한 영향을 받지 않도록 충분히 양생 또는 충분히 경화하지 않은 콘크리트가 진동, 충격 및 하중에 의하여 손상을 받지 않도록 보호해야 한다.

⑦ 인 장

사용될 스트랜드(강연선)의 규격에 따른 생산 제조회사로부터 시험에 관한 시험성

과표를 받아 그것을 기준으로 인장관리를 실시하는 것이 원칙이나, 그렇지 못할 경우는 KS D 7002 SWPC 7B φ12.7㎜의 표준규격에 준한 인장관리 계획서를 작성하여 현장에서 시험인장 실시 후 이를 수정 보완한다.

⑧ 그라우팅(Grouting)

사용 전에 배합설계에 의해 적정 배합을 설정(W/C는 45% 이하로 관리)하여 일반적으로 교반 종료 후 주입은 45분 이내에 한다.

⑨ 운반 및 보관

바람 등에 전도되지 않도록 횡방향 지지대를 설치해야 한다. 직사광선을 피하고 방풍이 잘되도록 하며, 크로스 빔(cross-beam)의 노출 철근이 녹슬지 않도록 보호해야 한다.

상기한 순서에서 정착장치와 접속장치의 조립과 그라우팅 작업이 긴장력을 유지하기 위한 시공인데, 접속장치는 쉬즈나 텐던의 커플러(coupler)와 쉬즈와 정착구를 이어주는 장치를 의미하며, 정착장치는 콘크리트에 힘을 전달하기 위한 캐스팅(casting)과 웨지플레이트(wedge plate), 웨지(wedge) 등을 의미한다. 그라우팅이라 함은 긴장 후에 강연선의 부식을 방지하고, 콘크리트와 일체거동을 할 수 있도록 하기 위하여, 쉬즈관 내부를 시멘트 밀크 등으로 채워서 강도를 발현하도록 하는 작업을 의미한다.

나. 강연선 정착부 형상 개선

정착부에는 콘크리트 내부에 강연선을 위한 공간을 확보하는 쉬즈와 연결된 앵커 캐스팅과 쉬즈와 캐스팅을 지나서 외부에까지 연장되는 강연선이 존재하고, 강연선을 앵커 캐스팅(anchor casting)에 고정시키지 위한 웨지플레이트와 개별 강연선을 웨지플레이트에 고정시키는 웨지로 구성된다.

이러한 정착부의 형상에 따라 긴장된 강연선의 힘은 강연선 → 웨지 → 웨지플레이트 → 앵커캐스팅 → 콘크리트의 순으로 전달되게 된다. 이러한 힘의 전달에 의해서 콘크리트의 정착부에는 콘크리트 지압응력이 발생하게 되고, 지압된 위치보다 조금 깊은 위치에서는 인장응력인 파열응력이 발생하게 되며, 정착부를 따라 주변에 인장응력이 발생하게 된다.

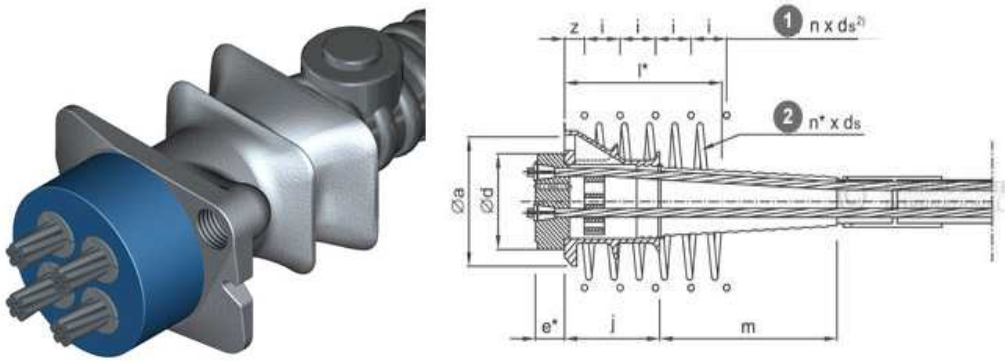


그림 2.5.5 긴장력 유지를 위한 강연선 정착부 개선

프리스트레스를 도입하는 강연선은 정착부에서 쐐기(wedge)에 의해 콘크리트 세그먼트에 정착되는데, 웨지는 프리스트레스 제품 제조사에서 충분한 검증을 거치기 때문에 프리스트레스 도입이 완료된 후에 장기적으로 웨지의 슬립에 의한 강연선 긴장력의 손실은 없다.

따라서, 강연선을 정착한 후에 긴장력을 유지한다는 것은 장기적으로 손실될 것을 미리 고려하여 추가의 힘을 도입하는 것을 의미하며, 외부적인 힘의 변화가 없다면 추가적인 손실은 발생하지 않는다.



그림 2.5.6 일반적으로 적용되는 강연선 정착단의 쐐기 형상

쉴드 세그먼트는 공장에서 제작되어 현장에서 조립되어 강연선으로 긴장력이 주어지게 될 때까지는 충분한 재령을 가진다. 이에 따라 장기거동을 발생시키는 콘크리트의 크리프 및 건조수축에 의한 변형량은 작을 것으로 예상되며, 콘크리트의 크리프 및 건조수축에 의한 프리스트레스의 손실은 콘크리트 단면적과 비교할 때 강연선의 단면적이 클수록 커지는데, 쉴드 세그먼트의 연결에 적용되는 강연선은 콘크리트의 단면

적에 비해 매우 작기 때문에 긴장력이 손실되는 양은 매우 미비하다고 할 수 있다.

교량과 건축분야 등에서는 콘크리트 면적 대비 강연선의 면적이 상당히 큼에도 불구하고 모든 손실이 발생한 후의 유효 프리스트레스는 긴장력의 80% 이상이 유지되는 것으로 평가한다. 이러한 점을 고려하면 쉴드 세그먼트에 있어서는 콘크리트 면적에 비하여 강연선의 면적이 작기 때문에 장기손실이 발생하여도 충분한 크기의 유효 프리스트레스가 남아 있게 되어, 설계내구수명 내에서 연결부와 정착장치에서의 풀림은 발생하지 않는 것으로 평가할 수 있다.

또한, 강연선의 릴렉세이션에 의한 손실은 저릴렉세이션 강연선을 적용하여 완화할 수 있기 때문에 프리스트레스가 정착된 후에 발생하는 긴장력 손실은 매우 작을 뿐만 아니라, 5% 이하의 릴렉세이션이 발생하는 것으로 가정하여 산정할 수 있다.

쉴드 세그먼트에 도입된 강연선에 의한 프리스트레스를 장기간 신뢰도 있게 유지하는데 있어서 가장 큰 관건은 그라우팅의 여부이다. 프리스트레스를 도입한 후 쉬즈 내부를 충진하는 그라우트공을 실시하는 가장 중요한 이유는 부착작용을 하는 것과 부식을 방지하는 것이다.

그러나 강연선에 부식이 발생하여도 성능이 유지되는 것은 국외에서의 수행된 기존 연구에서 어느 정도 검증이 되었으나 부식에 따른 취성파괴의 가능성이 존재하며, 강연선과 구조물의 부착성능을 확보하기 위해서 그라우팅 작업을 실시하는 것이 유리할 수 있다.

그러나 본 개발 기술의 구조에 있어서는 긴장 작업 후 그라우팅 작업에 대한 어려움이 있을 뿐만 아니라, 공법 완성 후에는 긴장력 유지가 불필요한 경우가 대부분이므로 그라우팅을 실시하지 않는 것이 보다 합리적인 것으로 판단되며, 이 경우에는 강연선의 긴장력 유지에 대한 별도의 검증은 불필요한 것으로 보인다.

이것은 강연선 체결 쉴드터널에서는 장기거동에 의한 손실이 작고 강연선은 부식에 대해서도 충분한 강도를 확보하며, 쉴드터널 시공이 완료된 후 지반이 안정된 상태에서는 더 이상의 긴장력 유지가 불필요하기 때문이다.

3. 체결된 강연선의 장기거동 및 유지관리

프리스트레스트 콘크리트는 압축응력을 도입하여 콘크리트가 인장에 저항하도록 함으로써 경쟁우위를 차지하고 있다. 그러나 프리스트레스트 콘크리트는 압축응력이 도입된 후, 시간에 따른 콘크리트의 소성변형에 의해 압축응력의 일부가 소실되는 단점이 있다. 즉, 시공 및 공용 중에 점진적으로 진행되는 콘크리트의 건조수축 및 압축응력 도입 후 발생하는 크리프에 의해 콘크리트가 변형하려는 성질에 의해 콘크리트에 인장응력이 발생하게 된다. 이러한 인장응력은 도입된 프리스트레스가 손실되는 것으로 공용 내하력과 직결되기 때문에 설계시에 정확히 고려할 필요가 있다.

콘크리트 장기거동에 의한 손실을 계산하는 것은 시간에 따른 재료 변형의 비선형성 및 구조물의 시공단계에 따라 다양한 변수를 갖기 때문에 설계시에 실제 시공될 다양한 변수를 고려하여 설계하는 것은 쉽지 않다. 따라서 국내외 설계기준에서도 실험결과를 바탕으로 시간에 따른 재료 변형에 대한 가이드(CEB-FIP, ACI, BS code모델) 및 간략한 손실계산 방법(야쓰미 해법)만을 제시하고 있을 뿐, 정확한 콘크리트의 장기거동에 의한 손실 계산방법을 제시하고 있지는 못한 실정이다. 또한, 교량에서는 콘크리트의 크리프나 건조수축에 의해 강연선의 응력변화량을 경험식으로부터 산출하여 손실율 개념으로 차감한 뒤 도입할 압축응력을 산정하고 있다.

가. 크리프 및 건조수축

콘크리트가 높은 인장강도를 가진 PS 강재의 서로 다른 재료로 구성되어 있는 경우 시간 경과에 따라 콘크리트에서는 건조수축 및 크리프가 발생하고, PS 강재에서는 릴랙세이션이 발생하게 되어 도입된 프리스트레스는 감소되어 진다. 이와 같이 손실은 구조물을 구성하는 재료의 물리상수가 다르고 각각의 장기거동 특성 또한 동일하지 않기 때문에 시공단계 및 각 단계의 시공시기에 따라 그 거동 특성은 달라지게 된다.[8)]

콘크리트는 시간이 경과함에 따라 재료성질의 변화와 더불어 추가적인 변형이 발생하게 된다. 이러한 콘크리트의 시간의존적인 성질은 3가지로 나누어 볼 수 있는데, 첫 번째는 재령현상(aging)으로 시간이 지남에 따라 수화반응으로 인하여 콘크리트의 강도 및 탄성계수가 증가하는 현상을 의미한다. 두 번째는 콘크리트에 일정한 하중이 지속적으로 가해지면 시간이 지남에 따라 변형이 증가하는 크리프(creep)가 발생한다. 세 번째는 하중과는 관계없이 수분이 외기로 발산되면서 건조수축(shrinkage)이 발생

하게 된다. 이와 같은 콘크리트의 비선형적인 장기거동 특성은 콘크리트 부재의 변형을 증가시키는 원인이 되며, 특히 강재 및 PS강재가 합성되어 있는 콘크리트에서는 이러한 변형을 구속하려는 힘에 의해 콘크리트에 인장응력이 발생하여 도입된 프리스트레스의 주요 손실 원인으로 작용하게 된다.[9)]

일정한 온도하에서 지속하중을 받고 있는 임의 시간 t 에서의 콘크리트 총변형률 ($\varepsilon(t)$)은 다음과 같은 요소들의 합으로 식(2.5.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_c(t) + \varepsilon_{sh}(t) \qquad \text{식(2.5.6)}$$

여기서, $\varepsilon_e(t)$: 탄성변형률

$\varepsilon_c(t)$: 크리프변형률

$\varepsilon_{sh}(t)$: 건조수축변형률

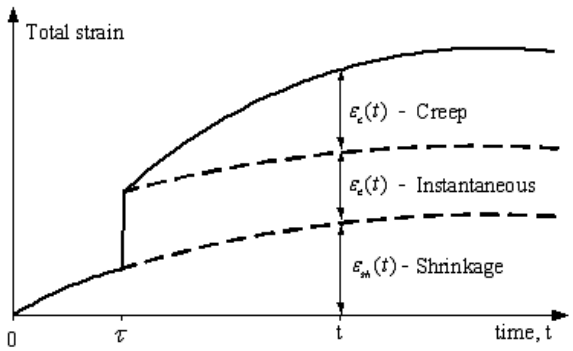


그림 2.5.7 지속 하중 하에서 콘크리트의 총변형률[9)]

그림 2.5.7은 시간 τ에서 일정한 지속하중을 받고 있는 콘크리트 부재의 시간에 따른 변형률의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 횡축의 0은 콘크리트 타설 후 습윤양생이 종료되는 시간을 나타낸 것이며, 이 시점부터 건조수축변형률은 발생하기 시작한다. 시간 τ에서 지속하중이 작용하면 탄성변형률이 발생하며, 크리프에 의한 추가적인 변형률이 점진적으로 발생하게 된다. 따라서, 콘크리트 부재의 장기거동해석은 고려되는 시간에서 이와 같은 각각의 변형률을 정확하게 예측하는 것이 요구되며, 이를 위해서는 고려되는 시간까지의 응력이력 및 사용되는 재료의 장기거동 특성을 알아야 한다.

크리프는 구조물에 작용하고 있는 일정한 응력에 의해 시간의 경과에 따라 변형률이 점진적으로 증가하는 현상을 의미한다. 일반적으로 크리프는 하중재하 후에 크리프 변형률의 증가율이 크며, 시간이 경과함에 따라 변형률의 증가율은 감소하게 된다.

① 크리프에 영향을 미치는 요인

크리프에 영향을 미치는 요인에는 콘크리트의 강도, 하중재하 시 콘크리트의 재령, 주변공기의 상대습도 및 온도, 구조물의 크기, 응력이력 등이 있다. 이와 같은 요소 중에서 콘크리트의 강도는 높을수록 크리프변형률이 작게 발생하며, 콘크리트 골재의 양이 많을수록, 골재의 크기가 클수록, 골재의 강성이 높을수록 크리프변형률은 작게 발생한다.

그림 2.5.8은 동일한 부재에 대해 하중재하 시 콘크리트의 재령에 따른 크리프변형률을 나타낸 것으로서, 하중재하 시 콘크리트의 재령이 높을수록 최종 크리프변형률은 감소한다. 또한 크리프변형률은 상대습도가 감소함에 따라 증가하게 되며, 온도가 증가함에 따라 증가하게 된다. 구조물의 크기에 대한 영향은 구조물의 크기가 큰 것보다는 작은 부재에서 크게 발생한다.

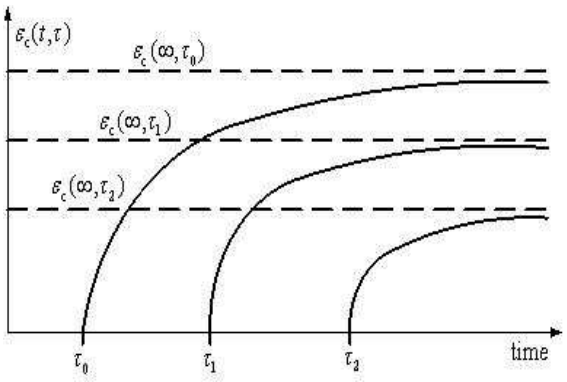


그림 2.5.8 크리프 변형률에서 콘크리트 재령의 영향[9)]

앞서 언급하였듯이 크리프는 작용응력에 의해 발생하기 때문에 작용응력의 크기에 따라 변화하게 된다. 작용응력이 콘크리트 강도의 약 50% 이하인 경우, 크리프변형률은 작용응력에 비례하며, 콘크리트 강도의 50% 이상인 높은 응력상태에서는 작용응력에 비례하지 않고 응력이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하게 된다. 그러나 일반적으로 사용하중 상태에서 콘크리트의 응력은 콘크리트 강도의 50%를 넘지 않기 때문에 크리프변형률이 작용응력에 비례하는 선형 크리프 상태로 간주한다.

② 크리프 변형[9)]

크리프에 의한 변형을 산정하기 위해 사용되는 개념에는 크리프계수(creep coefficient), 특성 크리프(specific creep)와 크리프 함수(creep function)가 있다. 먼저 크리프계수 $\phi(t,t_o)$는 시간 t_o 에서 재하된 응력에 의해 발생한 탄성변형률 $\varepsilon_e(t_o)$과

크리프에 의해 추가적으로 발생한 총 시간 t 에서의 변형률 $\varepsilon_c(t, t_o)$의 비로 정의되며 다음 식(2.5.7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi(t, t_o) = \frac{\varepsilon_c(t, t_o)}{\varepsilon_e(t_o)} \qquad \text{식(2.5.7)}$$

특성 크리프($C(t, t_o)$)는 단위응력이 재하되었을 때의 크리프변형률로 정의되며, 크리프 함수($\phi(t,t_o)$)는 단위응력이 재하되었을 때의 총변형률(탄성변형률+크리프변형률)로 정의된다. 특성 크리프 및 크리프 함수에 대한 식은 각각 다음 식(2.5.8)과 식(2.5.9)와 같다.

$$C(t, t_o) = \frac{\varepsilon_c(t, t_o)}{f} \qquad \text{식(2.5.8)}$$

$$\begin{aligned} \phi(t,t_o) &= \frac{1}{E_c(t_o)} + \frac{\phi(t,t_o)}{E_c(t_o)} \\ &= \frac{1}{E_c(t_o)} + C(t,t_o) \end{aligned} \qquad \text{식(2.5.9)}$$

③ 중첩의 원리

구조부재에는 시공단계에 따라 여러 단계의 응력이력이 발생할 수 있다. 예를 들어 그림 2.5.9(c)와 같이 시간 τ_o에서 재하된 하중에 의해 부재에는 f_o의 응력이 발생한 상태에서 시간 τ_1에서 재하된 하중에 의해 f_o의 응력이 추가로 발생하게 된다. 탄성해석에서는 이와 같이 각각의 응력에 의해 발생한 변형률을 중첩의 원리에 의해 최종단계에서의 변형률을 계산할 수 있다. 사용하중 상태에서의 크리프변형률은 탄성해석과 같이 작용응력에 비례한다. 따라서 사용하중 상태에서는 각각의 응력이력에 대해 계산된 크리프에 의한 변형률도 탄성해석과 같이 중첩의 원리에 의해 최종 크리프변형률을 계산할 수 있다.

콘크리트가 수화반응을 하는데 필요한 수량은 시멘트량의 40% 이하로 알려져 있다. 그러나 일반적으로 사용되는 콘크리트의 물/시멘트비는 45~60% 정도가 가장 많은 실정이다. 따라서 워커빌리티에 기여한 잉여수가 건조하면서 콘크리트는 수축을 하게 되는데 이러한 현상을 콘크리트의 건조수축이라 한다.

콘크리트의 건조수축에 영향을 미치는 요인으로는 주변공기의 상대습도, 온도, 부재의 형상과 크기, 물/시멘트비 등이 있다. 이와 같은 요인에서 물/시멘트비가 증가할수록 건조수축은 증가하며, 상대습도가 감소할수록, 체적에 대한 외기에 노출된 표면

의 면적 비가 증가할수록 건조수축은 증가하게 된다. 또한 온도가 올라갈수록 콘크리트 내부의 수분이 빠르게 건조되면서 건조수축은 증가하게 된다.

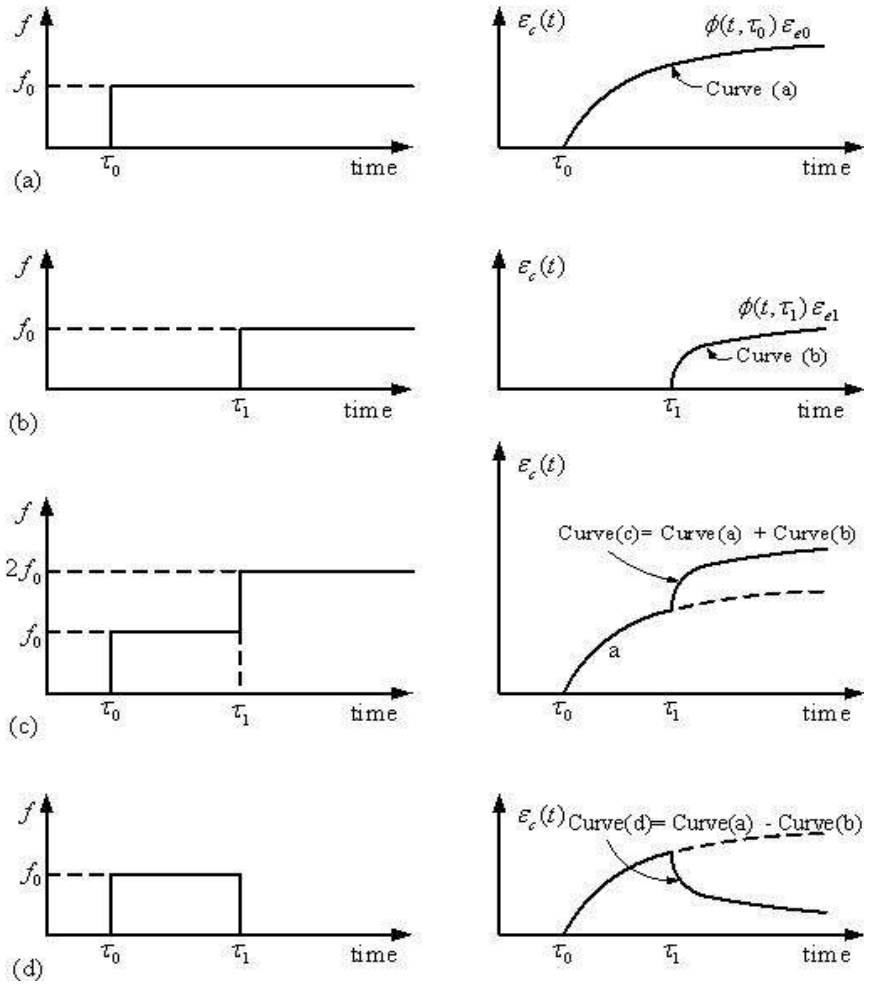


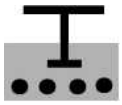
그림 2.5.9 크리프 변형률에 대한 중첩의 원리[9)]

나. 크리프 및 건조수축의 영향

(1) 재료 구성에 따른 장기거동

표 2.5.3 압축응력이 도입된 부재의 장기거동 특성을 재료의 구성에 따라 3가지 종류로 구분한 것이다.

표 2.5.3 재료 구성에 따른 장기거동 비교

구 분	Case1 콘크리트 단면	Case2 콘크리트+강연선	Case3 합성단면+강연선	비 고
단면구성				
초기상태	 L	 L	 L	
강연선 긴장	-	 L-a1	 L-a2	
장기거동 최종변형	 L-b	 L-a1-b1	 L-a2-b2	b≈b1>b2
강연선 응력	-	$f_{\pi 1} - E_p \frac{b1}{L}$	$f_{\pi 2} - E_p \frac{b2}{L}$	
강재 응력	-	-	$f_{si2} - E_s \frac{b2}{L}$	b (장기거동량)
콘크리트 응력	0	$f_{ci1} + E_c \frac{b-b1}{L}$ $= f_{ci1} - E_p \frac{b1}{L}$	$f_{ci2} + E_c \frac{b-b2}{L}$ $= f_{ci2} - E_s \frac{b2}{L} - E_p \frac{b2}{L}$	내력의 평형
Prestress 손실	-	$E_p \frac{b1}{L}$	$E_s \frac{b2}{L} + E_p \frac{b2}{L}$	
기호 정의	a1, a2 : 프리스트레스 도입 시 단면의 탄성수축량 b, b1,b2 : 장기거동에 의한 단면의 최종변형량 $f_{\pi 1}$, $f_{\pi 2}$: 초기손실을 고려한 강연선의 긴장응력 f_{ci1}, f_{ci2}: 프리스트레스 도입에 의한 콘크리트의 응력 f_{si2} : 프리스트레스 도입에 의한 강재의 응력 E_p : 강연선의 탄성계수 E_c : 콘크리트의 탄성계수 E_s : 강재의 탄성계수			

① Case1 : 단순 콘크리트로 이루어진 단면

초기상태의 길이를 L이라고 하고, 장기거동에 의한 변형량을 b라고 한다면 콘크리트의 수축에 저항하는 요인이 없으므로 콘크리트는 b만큼 수축하게 되고 응력의 변화는 없다.

② Case2 : 콘크리트+강연선으로 이루어진 단면

초기상태의 길이를 L이라고 하고, 강연선의 긴장없이 콘크리트가 수축하고자 한다면 강연선은 압축변형을 구속하지 못하므로 콘크리트는 b만큼 수축하게 되고 내부의 응력의 변화는 없게 된다. 하지만 강연선을 긴장·정착하여 콘크리트가 탄성수축변형(a1)을 하여 콘크리트가 압축응력을 받고 있는 상태에서 장기거동에 의한 변형이 발생한다면 콘크리트와 강연선은 다시 수축변형(b1)을 하게 되고, 응력의 변화가 일어나면서 프리스트레스의 손실(콘크리트의 인장응력)이 나타나게 된다.[10)]

③ Case3 : 강재+콘크리트+강연선으로 이루어진 단면

초기상태의 길이가 L인 합성단면은 강연선의 긴장으로 일정량이 탄성수축변형(a2)하여 압축응력을 받으며, 강연선은 긴장시의 신장량만큼 인장응력을 받게 되며, 내적평형을 이루게 된다. 이 상태에서 콘크리트의 장기거동에 의해 합성단면 전체에 수축변형이 발생하게 되면(Case2의 변형에 비해 작음) 강재, 콘크리트, 강연선 모두의 응력은 변하게 되고(강재와 강연선은 압축, 콘크리트는 인장응력 발생), 변형의 최종값은 내적평형을 이루는 변형(b2)이 된다.

강연선의 응력변화는 Case2가 Case3보다 커짐을 알 수 있으며, 이는 전체적인 최종 수축변형값이 크기 때문이다(b1>b2). 더욱 구체적으로는 Case3가 Case2에 비하여 콘크리트의 변형에 저항하는 강성이 크므로 장기거동에 따른 강연선의 길이 변화량이 작기 때문이다. 그러나 프리스트레스의 손실, 즉 콘크리트 단면에 발생되는 장기거동에 따른 손실응력의 크기는 강재단면의 영향으로 Case3가 Case2보다 크게 된다.

(2) 장기거동 손실 계산방법

콘크리트에 압축응력이 도입된 프리스트레스트 콘크리트 구조물은 장기거동(콘크리트의 시간에 따른 크리프 및 건조수축)에 의하여 응력의 재분배가 이루어져 콘크리트 단면에는 압축응력 손실이 발생하게 된다. 콘크리트의 장기거동 시 강연선으로 프리스트레스를 도입한 PSC는 강연선의 수축변형에 의하여 콘크리트의 압축응력이 손실된다. 그러나 강재나 강연선 모두 콘크리트의 크리프나 건조수축에 의한 소성변형을 제한하고 있으며 이러한 제한에 따른 압축응력 손실양은 내적평형을 고려하여 구할 수 있다.[11)]

크리프에 의한 손실 메카니즘은 외부하중에 의해 도입된 변형(Ⓐ)이 있을 경우 콘크리트의 크리프에 의한 소성변형(Ⓒ)하려는 힘에 의해 변형(Ⓑ)을 일으키게 된다. 따라서 강재의 구속에 의해 변형하지 못하는 양(Ⓒ-Ⓑ)만큼 콘크리트에는 인장응력이

발생하게 되는데 이를 크리프에 의한 손실이라고 한다. 건조수축에 의한 손실은 외부하중이 작용하지 않더라도 크리프와 마찬가지로 소성변형하려는 힘이 발생하기 때문에 강재가 구속하려는 양이 건조수축의 손실이 된다.

그림 2.5.10은 크리프 및 건조수축에 의한 손실 계산 프로세스를 나타낸 것이다. 장기거동에 의한 손실을 계산하기 위해서는 먼저 구조물의 단면제원, 단면계수, 하중도입 방법 및 크기를 결정하고 재료적인 주요 영향인자를 고려하여 시간의존적인 탄성계수를 계산한다. 이를 바탕으로 외력에 의한 구조물의 순간변형을 산정(Step1)하고, 이 때 발생한 콘크리트의 변형으로부터 구속이 없을 경우 콘크리트에 발생하는 소성변형을 산출(Step2)하게 된다. 여기서 산출된 소성변형을 다시 구조물에 재하하여 겉보기 변형을 산출(Step3)한 뒤 Step2와 Step3에서 계산된 변형의 차이를 계산하면 손실량이 산출된다.

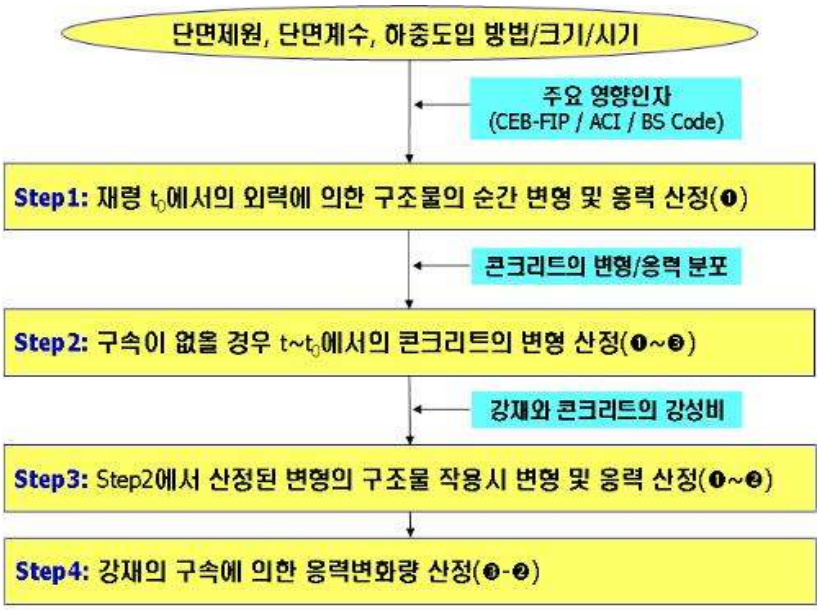


그림 2.5.10 크리프 및 건조수축에 의한 손실 계산 프로세스

표 2.5.4는 SRC와 PSC구조의 장기거동에 의한 손실응력을 수식화한 것으로 강재와 강연선의 단면적 즉 강성만 일치한다면 최종손실응력은 동일한 수식으로 표현이 됨을 보여주고 있다.

표 2.5.5에서는 콘크리트에 강재와 강연선이 동시에 매립되어 있는 강합성 구조물의 손실량을 수식화한 것이다. 평형조건 및 적합조건을 이용하여 산정한 결과를 보면 장기거동에 의한 콘크리트의 소성변형량이 같다고 가정하면, 최종손실응력은 콘크리트의 소성변형에서 겉보기 변형량의 차이만큼이 강재에 의해 구속되고 있으므로 콘크

리트에는 인장응력으로 작용하게 된다. 이에 영향을 주는 인자는 각 구성재료의 강성비이며, 이 때의 강재와 강연선은 동일하게 거동한다. 예제에서는 소성변형의 작용 위치가 단면의 중립축에 위치하고 대칭단면이므로 축강성에 대한 성분만이 표현되었으나 편심재하 또는 비대칭단면인 경우에는 휨강성의 성분이 포함되게 된다.[10)]

일반적으로 PSC구조물에서 강연선은 압축에 저항하지 않는 재료로써 콘크리트의 장기거동에 따른 소성변형에 아무런 저항없이 수축하는 것으로 오해하기 쉽지만, 이는 콘크리트가 소성변형량만큼 모두 수축하고, 강연선도 동일한 양만큼 수축변형 한다면, 콘크리트의 내력변화는 없고, 긴장 강연선의 내력은 변화한다는 의미가 되어 내적평형을 이루지 못하는 오류를 범하게 된다. 따라서 강연선이 포함된 합성구조에서 기존의 방식처럼 콘크리트의 소성변형에 의해 도입 압축응력이 손실되는 것으로 계산하는 것이나 강재를 고려하는 것과 같은 방법으로 강연선이 콘크리트의 소성변형을 구속하도록 계산하는 것은 같은 결과를 갖는다.

표 2.5.4 강합성 구조(콘크리트+강재, 콘크리트+강연선)의 손실 메커니즘

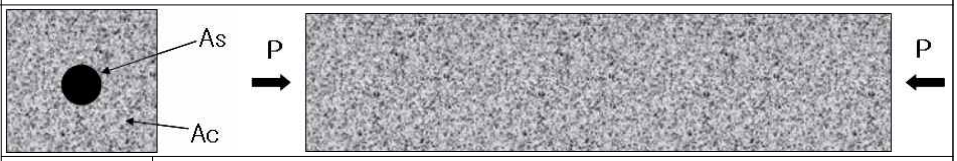
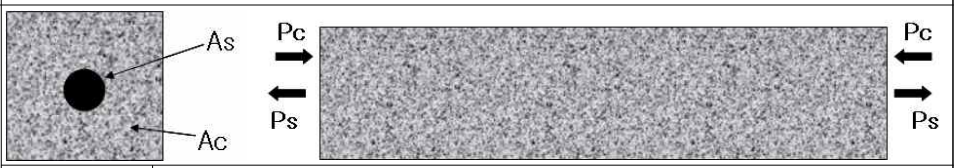
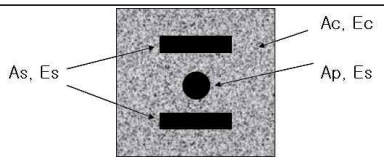
<table>
<tr><td>조건</td><td colspan="2">1. 적용대상 : 강재 및 강연선이 콘크리트 도심에 위치하는 합성보
2. 장기거동에 의한 소성변형률 : ε_p
3.( )안의 부호는 힘, 응력 또는 그 변화의 방향을 표시. (-):압축, (+):인장
4. 윗첨자 “ ‘ “ 은 최종상태의 응력 또는 힘을 나타냄.</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Case1
(강재)</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td>초기 평형</td><td>$P_c+P_s=P$, $f_s=\frac{E_s}{E_c}f_c$,
$P_c=f_cA_c$,(압축) $P_s=f_sA_s$(압축)</td></tr>
<tr><td colspan="2">강재의 압축응력 증가 : $\Delta f_s=\epsilon_pE_s$ (-)</td></tr>
<tr><td colspan="2">강재의 압축력 증가 : $\Delta P_s=A_s\Delta f_s$ (-)
콘크리트의 압축력 감소 : $\Delta P_c=\Delta P_s$ $(\because P_c'+P_s'=P)$ (+)
콘크리트의 압축응력 감소:
$\Delta f_c=\frac{\Delta P_c}{A_c}=\frac{\Delta P_s}{A_c}=\frac{A_s\Delta f_s}{A_c}=\frac{A_s\epsilon_pE_s}{A_c}$ (+)
최종 콘크리트 응력 : $f_c'=f_c-\Delta f_c$ (-)</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Case2
(강연선)</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td>초기 평형</td><td>$P_c=P_s$, $f_s=\frac{A_c}{A_s}f_c$,
$P_c=f_cA_c$(압축), $P_s=f_sA_s$(인장)</td></tr>
<tr><td colspan="2">강연선의 인장응력 감소 : $\Delta f_s=\epsilon_pE_s$ (-)
강연선의 인장력 감소 : $\Delta P_s=A_s\Delta f_s$ (-)
콘크리트의 압축력 감소 : $\Delta P_c=\Delta P_s$ $(\because P_c'=P_s')$ (+)
콘크리트의 압축응력 감소 :
$\Delta f_c=\frac{\Delta P_c}{A_c}=\frac{\Delta P_s}{A_c}=\frac{A_s\Delta f_s}{A_c}=\frac{A_s\epsilon_pE_s}{A_c}$ (+)
최종 콘크리트 응력 : $f_c'=f_c-\Delta f_c$ (-)</td></tr>
</table>

표 2.5.5 강합성구조(콘크리트+강재+강연선)의 손실 메커니즘

조건



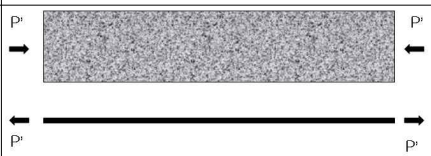
$\frac{E_s}{E_c} = n$

부재의 길이: L

콘크리트의 소성변형률 : $\epsilon_p = \frac{\Delta}{L}$

구 분	소성변형 前	소성변형 後
콘크리트의 힘, 응력	F_{c1}, f_{c1}	F_{c2}, f_{c2}
강재의 힘, 응력	F_{s1}, f_{s1}	F_{s2}, f_{s2}
강연선의 힘, 응력	F_{p1}, f_{p1}	F_{p2}, f_{p2}

초기 평형



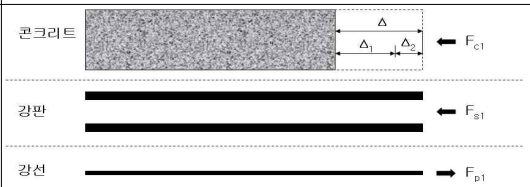
$F_{p1} = -P'$, $F_{c1} + F_{s1} = F_{P1}$

강연선의 응력 : $f_{p1} = \frac{F_{p1}}{A_p}$ (+)

콘크리트의 응력: $F_{c1} = \frac{E_c A_c}{E_c A_c + E_s A_s} F_{p1}$, $f_{c1} = \frac{F_{c1}}{A_{c1}}$ (-)

강재의 응력 : $F_{s1} = \frac{E_s A_s}{E_c A_c + E_s A_s} F_{p1}$, $f_{s1} = \frac{F_{s1}}{A_{s1}}$ (-)

소성 변형후



$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$, Δ : 콘크리트 소성변형량

Δ_2 : 합성부재의 겉보기 변형량

$$F_{c2} = F_{c1} - \frac{\Delta_1}{L} E_c A_c = \frac{A_c P}{n(A_s + A_p) + A_c} - \frac{\Delta_1}{L} E_c A_c$$

$$F_{s2} = F_{s1} + \frac{\Delta_2}{L} E_s A_s = \frac{n A_s P}{n(A_s + A_p) + A_c} + \frac{\Delta_2}{L} E_s A_s$$

$$F_{p2} = F_{p1} + \frac{\Delta_2}{L} E_s A_p = -\frac{(n A_s + A_c) P}{n(A_s + A_p) + A_c} + \frac{\Delta_2}{L} E_s A_p$$

- 위의 식들을 $F_c + F_s + F_p = 0$ 에 대입하면

$$-\frac{E_c A_c}{L} \Delta_1 + \frac{E_s (A_s + A_p)}{L} \Delta_2 = 0, \quad \therefore \Delta_1 = \frac{E_s (A_s + A_p)}{E_c A_c} \Delta_2$$

다시 $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$에 대입하여 정리하면

$$\Delta_2 = \frac{E_c A_c}{E_s (A_s + A_p) + E_c A_c} \Delta = \frac{A_c}{n(A_s + A_p) + A_c} \Delta$$

(3) 장기거동 계측사례

상기 계산 방법으로 실제 교량에서 계측을 실시한 경우 계산값에 근사된 결과를 얻을 수 있는데, 그림 2.5.11은 특정 교량에서 실시한 계산값과 계측값을 나타낸 것이다. 계산은 시공단계 및 시공일정을 고려할 수 있는 AEMM(Age-adjusted Elastic Modulus Method)을 적용하였으며 계측값을 표현한 그래프이다.

콘크리트와 강연선 및 강재로 구성된 프리스트레스트의 장기거동에 의한 손실은 강연선 및 강재가 콘크리트의 소성변형을 구속함으로 인해 인장응력이 발생한다. 장기거동에 영향을 미치는 주요인자는 강성비와 도입응력의 분포 및 곡률이다.

프리캐스트 세그먼트를 이용한 쉴드 터널에 강연선을 이용하여 도입되는 프리스트레스에 대한 장기거동값은 교량 등에서 검증된 방법을 이용하여 계산할 수 있으며, 콘크리트 면적에 비하여 상대적으로 작은 강연선을 배치하여 프리스트레스를 도입하고, 또한 충분한 재령을 가지는 콘크리트에 프리스트레스를 도입하기 때문에 장기거동에 의한 손실은 작을 것으로 예상된다.

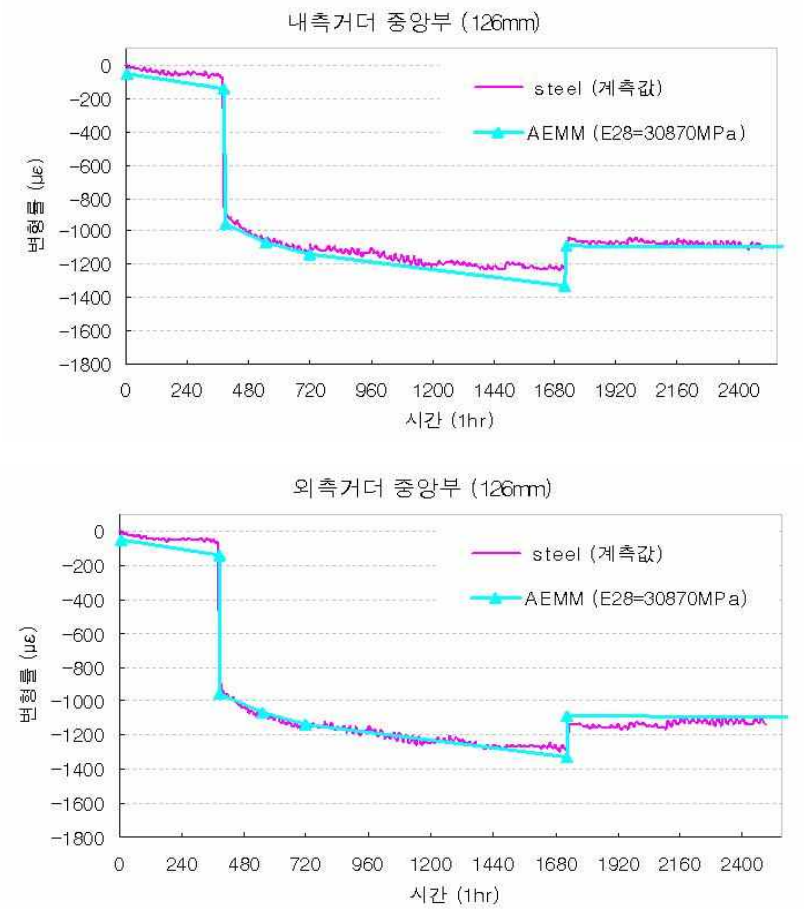


그림 2.5.11 중앙부의 장기거동 변형률

소결론

강연선의 긴장력을 이용하여 쉴드터널의 곡선부를 체결함에 있어서, 곡선배치로 인하여 발생되는 프리스트레스 도입시의 긴장력 손실, 도입된 프리스트레스의 감소에 대해 검토하고, 유지방안에 대한 고찰을 수행하였다.

(1) 프리스트레스의 손실에는 6가지 종류가 있는데, 세 가지 종류의 즉시손실이 있고, 세 가지 종류의 장기손실이 있다. 즉시손실에는 프리스트레스를 도입하는 PS 강재와 콘크리트의 마찰에 의해서 발생하는 마찰손실이 있고, 콘크리트의 탄성수축에 의해 콘크리트와 부착되어있는 강연선이 같이 거동하며 발생하는 손실이 발생하며, 정착장치에서 PS 강재가 활동하거나 또는 정착장치가 변형되면서 긴장재의 인장력이 감소함으로서 발생하는 정착장치 슬립에 의한 손실, 그리고 장기손실에는 콘크리트의 크리프에 의해 긴장재에도 압축변형이 일어나며 발생하는 손실, 건조수축에 의한 손실과 강선의 릴렉세이션에 의한 손실이 있는 것으로 검토되었다. 또한 강연선이 횡방향으로 곡선형태인 세그먼트를 종방향으로 직선으로 통과할 때의 프리스트레스의 마찰손실은 이론적을 통해 검증이 가능하여 곡선과 텐던에 따른 별도의 실험적 검증은 불필요한 것으로 판단된다.

(2) 곡선부의 강연선 긴장력을 유지하는 방안으로는 우선 제작 시 재료의 배치 및 콘크리트 타설과 양생, 그리고 인장에 있어 정해진 순서에 따라 긴장력을 주어야한다. 강연선 정착부 형상의 개선을 통하여 강연선의 힘이 전달되어 정착부에는 콘크리트 지압응력이 발생되고, 정착부를 따라 정착부 주변에 인장응력이 발생하게 된다. 또한 강연선을 정착한 후에 긴장력을 유지하는 것은 장기적인 손실에 대하여 미리 추가의 힘을 도입하는 것으로서 외부 힘의 변화가 없다면 추가적인 손실은 발생하지 않는다.

(3) 프리스트레스트 콘크리트는 압축응력이 도입된 후, 시간이 경과됨에 따라 압축응력의 일부가 콘크리트의 건조수축 및 크리프에 의해 인장응력이 발생하게 된다. 이에 대하여 건조수축 및 크리프에 대한 정의 및 영향에 대하여 조사를 수행하였다. 건조수축 및 크리프로 인해 발생하는 장기거동에 대하여, 기존 교량 등에서 검증된 방법을 통한 예측결과 본 공법의 세그먼트의 장기거동에 의한 손실은 매우 작을 것으로 예상된다.

제 6 절 강연선 및 세그먼트 일체화 거동 방안

1. 강연선 손상 및 녹 방지 대책

가. 부식 방지용 강연선 적용

철성분을 내포하고 있는 강재가 물이나 산소와 반응하는 경우 산화반응이 나타나게 되는데, 이러한 산화반응로 녹이 발생하게 되는 현상을 강재의 부식이라 한다. 프리스트레스 도입에 활용되는 PSC강연선도 철성분을 내포하고 있으므로 대기에 노출되어 있는 경우, 산화반응이 발생하게 된다. 산화반응에 의해서 발생하는 표면녹은 유효단면의 감소를 유발할 수 있지만, 이 때 발생하는 유효단면의 감소량은 극히 미미하기 때문에 문제가 되지 않는다. 다만 고강도 강연선부식이 유발하는 문제는 강연선 성능의 70%이상의 긴장력을 도입한 상태로 부식환경에 노출되어 있는 경우, 예기치 못한 강연선의 파괴가 발생할 수 있다는 것이다. 이러한 파괴의 원인은 통상적으로 산화반응시에 발생하는 온도저하에 따른 성능감소인 것으로 알려져 있다.

강연선부식에 대한 특별한 국내규정은 없으며, 유럽 등과 같은 해외 관련 규정들은 강연선의 단면손실에 대한 규정이 아니라 긴장력을 도입한 상태로 대기에 노출될 경우, 발생할 수 있는 지연파괴에 관한 것이다.[1)]

이와 관련하여 통상적으로 긴장력을 도입한 강연선에 대해서는 적절한 시간 내에 그라우팅을 실시하여, 긴장력이 도입된 상태로 부식환경에 노출되는 경우를 방지하도록 하고 있으며, 국내의 경우도 이를 감안하여 응력을 도입한 후에는 즉시 그라우팅을 주입하여 강연선이 부식되는 환경을 원천적으로 차단하고 있다.[2)]

일본, 중국 등의 외국에서는 소선 7가닥을 꼬아 사용하는 7연선에 에폭시 도막을 실시하여 강연선의 부식을 재료적으로 방지하려는 노력이 있으며 국내에도 이러한 에폭시 도막 강연선(epoxy coated strand)이 판매되고 있다.

그러나 이러한 도막을 실시한 강연선은 재료처리비가 고가이므로 경제성에 큰 영향을 줄 뿐만 아니라 현재로서는 개발 후 충분한 시간이 소요되지 않아 정확한 검증이 완료된 것으로 보기도 어렵다. 또한 부착성능 등에도 영향을 주기 때문에 에폭시 코팅을 통하여 강재부식을 방지하는 것은 타당하지 않다.



그림 2.6.1 강연선 부식 방지를 위한 에폭시 도막 강연선

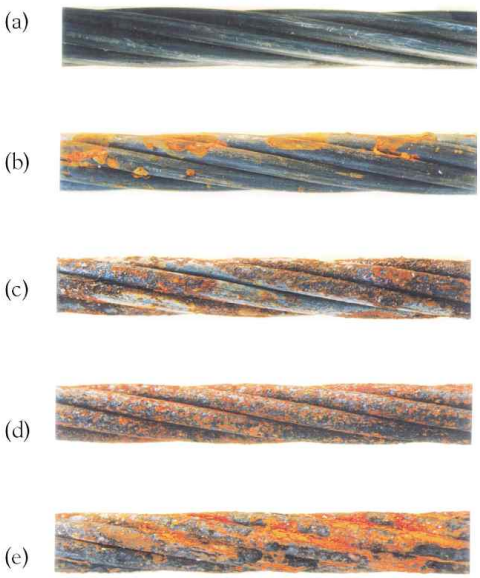
나. 국외 연구자료 활용

강연선 부식과 관련하여서는 캐나다에서 발간된 학술논문에 그 내용이 게재 됐는데 이를 요약하여 정리하면 다음과 같다.[2)]

그림 2.6.2에 기술된 바와 같이, 강연선의 부식에 따른 성능저하 현상을 평가하기 위하여 총 5가지 경우에 대하여 실험이 수행되었다. (a)의 경우는 부식이 차단된 경우, (b)의 경우는 수분접촉(tap water)에 의한 습윤과 건조를 하루주기로 반복한 경우, (c)의 경우는 소금물을 분사하는 방법으로 습윤과 건조를 하루주기로 반복한 경우, (d)의 경우는 0.5%의 염화나트륨(NaCl) 수용액에 담구는 방법으로 습윤과 건조를 하루주기로 반복한 경우, (e)의 경우는 5%의 염화나트륨(NaCl) 수용액에 담구는 방법으로 습윤과 건조를 하루주기로 반복한 경우 등 총 5가지 경우에 대해 실험이 수행되었는데, 강연선이 서로 다른 부식 환경에 놓이도록 한 연구이다.

표 2.61은 실험 결과는 정리한 것으로 결론적으로 강연선의 부식정도는 강도발현에 거의 영향을 주지 않는다는 사실을 확인할 수 있다.[3)]

압축응력의 도입 수단인 강연선의 부식을 원천적으로 방지하기 위한 또 다른 수단으로는 긴장력 도입 후 그라우팅이 불필요한 비부착 강연선을 사용하는 것도 고려될 수 있으나, 외국의 경우에도 '비부착 강연선에 의한 응력도입은 임시긴장의 수단으로만 사용되도록 제한하고 있으며, 가능한 부착강연선을 사용하도록 권장하고 있으며, 국내의 철도설계기준에서도 '대표되는 시편에 대한 동적실험을 수행하여야 한다. …' 등과 같이 규정하여, 실물수준의 실험검증 후에야 비부착 강연선의 구조를 사용하도록 엄격하게 제한하고 있다.[4)]



Description of the experimental work

A set of strands was stored under different environmental conditions to produce various levels of corrosion (see Fig. 1). Some of the strands were well protected against corrosion, oiled and (or) stored in a dry place (Fig. 1*a*), but the remaining strands were exposed to environments with different levels of aggressiveness achieved by varying storage conditions, such as daily cycles of wet/dry immersion operations using tap water (Fig. 1*b*); daily cycles of wet/dry operations using spray techniques to wet the strands with salt water (Fig. 1*c*); daily cycles of wet/dry immersion operations using salt water with a concentration of 0.5% of NaCl (Fig. 1*d*); and daily cycles of wet/dry immersion operations using salt water with a concentration of 5% of NaCl (Fig. 1*e*).

Tension test

Tension tests were undertaken on 400 mm long specimens. The exact length (error less than 1%) of the effective zone, L_c, was determined before each test. A tension apparatus SERVOSIS ME 404/60 together with the software ICA-2056 were used for these tests. The displacement speed of the apparatus head anchors was 0.2 mm/s (nearly 100 MPa/s during the initial elastic phase and taking into consideration the length of the specimens). This rate was in conformity with standard NP-EN 10 002-1 (IPQ 1990*c*). In some tests a two-jaw system (Stronghold type) was used. In other tests a three-jaw system (VSL type) was used. In the remaining tests the apparatus jaws were used. The results obtained from the three different systems were similar.

Results of the tension tests are presented in Table 1. As can be seen, the influence of the corrosion level on the ultimate load is not noticeable because the amount of the cross section reduced by corrosion was negligible even for the so-called highly corroded strands.

그림 2.6.2 강연선 부식정도 및 강도발현에 대한 연구

표 2.6.1 부식 차이가 나는 강연선의 인장실험 결과

Level of aggressivety	Sample	Tensile strength (kN)	Sample	Tensile strength (kN)
Clean (Fig. 1*a*)	2A	285	2B	—
Clean (Fig. 1*a*)	3A	261	3B	280
Clean (Fig. 1*a*)	4A	271	4B	273
Oiled (Fig. 1*a*)	7A	237	7B	269
Oiled (Fig. 1*a*)	8A	281	8B	281
Oiled (Fig. 1*a*)	9A	265	9B	205
Wet (Fig. 1*b*)	11A	267	11B	277
Wet (Fig. 1*b*)	13A	293	13B	289
Wet (Fig. 1*b*)	15A	287	15B	290
Salt spray (Fig. 1*c*)	16A	241	16B	264
Salt spray (Fig. 1*c*)	18A	287	18B	261
Salt spray (Fig. 1*c*)	20A	258	20B	272
0.5% NaCl (Fig. 1*d*)	22A	272	22B	291
0.5% NaCl (Fig. 1*d*)	23A	275	23B	293
0.5% NaCl (Fig. 1*d*)	24A	223	24B	290
0.5% NaCl (Fig. 1*d*)	25A	286	25B	246
5% NaCl (Fig. 1*e*)	26A	282	26B	281
5% NaCl (Fig. 1*e*)	27A	286	27B	293
5% NaCl (Fig. 1*e*)	28A	283	28B	292
5% NaCl (Fig. 1*e*)	30A	253	30B	255

다. 강연선 쉬스(sheath)관 적용

(1) 쉬스관 개요

프리스트레스는 일반적으로 강연선을 긴장하여 콘크리트에 정착시킴으로써 콘크리트에 도입되는 응력을 의미한다. 프리스트레스의 도입방법은 크게 프리텐션과 포스트텐션으로 나눌 수 있다.

프리텐션이라 함은 콘크리트가 타설되기 전에 강연선을 긴장하여 고정해두고, 강연선의 둘레로 콘크리트를 타설한 후, 콘크리트의 강도가 충분한 수준에 도달하면, 강연선의 고정을 해제하여 프리스트레스를 도입하는 방법을 의미한다. 포스트 텐션은 콘크리트를 타설하고, 양생을 통하여 충분한 강도가 발현된 후에 프리스트레스용 강재인 강연선을 삽입하고, 긴장력을 도입하여 정착함으로써 프리스트레스를 도입하는 방법이다.[5] 이에 따라 포스트 텐션 방법에서는 콘크리트가 타설되기 전에 강연선을 콘크리트에 배치하기 위한 공간을 확보하여야 콘크리트의 강도가 발현될 때까지 유지할 수 있어야 하는데, 이러한 역할을 하는 것이 쉬스관이다.



그림 2.6.3 포스트텐션(post-tension) 시스템에서의 쉬스관



그림 2.6.4 실구조물에 설치된 쉬즈관 모습

(2) 쉬스관 요구 성능

쉬스관의 주요 역할은 강연선이 삽입될 수 있는 공간을 확보하는 것뿐만 아니라 긴장단계에서는 콘크리트와 강연선사이의 마찰을 최소화하여 프리스트레스 도입단계의 마찰손실을 최소화 하여야 하며, 긴장이 완료된 후에는 그라우팅 밀크로 충진되어 강연선을 부식 등으로부터 보호하여 내구성을 확보할 수 있도록 하여야 할 뿐만 아니라 최종단계에서는 부착성능을 발휘하여 콘크리트와 PS강재가 일체화 거동을 할 수 있도록 하여야 한다.[6)]

따라서 쉬스는 구조계산 단계에서 PS강재(강연선)의 배치를 설계한 대로 배치할 수 있도록 하기 위하여 적합한 연성을 확보하고 있어야 하며, 콘크리트 타설 단계에서 발생하는 콘크리트 타설압 및 다짐작업 하중 등에 변형을 최소화할 수 있는 강성을 확보하여야 한다. 또한 PS강재를 추후에 삽입할 수 있는 내부공간을 확보하여야 하며, 콘크리트와 부착이 원활히 이루어질 수 있는 성능을 확보하여야 한다.

쉬스에 요구되는 이러한 성능은 시공단계에 따라 반대의 성능을 확보하여야 하기 때문에 다양한 재료와 형태를 가진 쉬스가 적용되어 왔지만, 최근에는 주름진 아연도금강판(KSD 3506)이나 냉연압연강판(KSD 3512) 쉬스를 많이 사용하고 있다.

최소한의 두께를 적용하여 곡선배치가 가능한 연성을 확보함과 동시에 콘크리트 타설 단계에 발생하는 타설압, 다짐하중 등에도 큰 변형없이 견딜 수 있는 강성을 확보하도록 하기 위해서이다. 이때 사용되는 재질은 일반적으로 냉간압연강판이나 용융아연도금강판이며 두께는 0.25mm가 주로 사용된다.

쉬스는 주름을 가지도록 만들어 작은 두께의 강판으로도 콘크리트가 타설되는 압력을 견디도록 제작하며, 일반적인 경우 쉬스의 외경은 쉬스의 외경에 비해 4mm정도 크다. 쉬스 내경의 크기는 그라우팅이 가능하여야 하므로 통상 강연선 단면적과 비교한 쉬스 내부 직경이 2배 이상이 되도록 하며, 긴장재의 전체 지름에 비해 6mm이상 크도록 규정하고 있다.

교량용으로 사용되는 쉬스의 최소 내경은 통상 42mm로 보는 것이 타당한데, 이는 주름관 제작시 제작이 가능한 최소직경을 고려하여야 하기 때문이다. 최대직경에 대한 제한은 최소직경보다 제한이 작지만 대략적으로 150mm 이상의 직경을 가지는 쉬스는 사용되는 경우가 드물다.

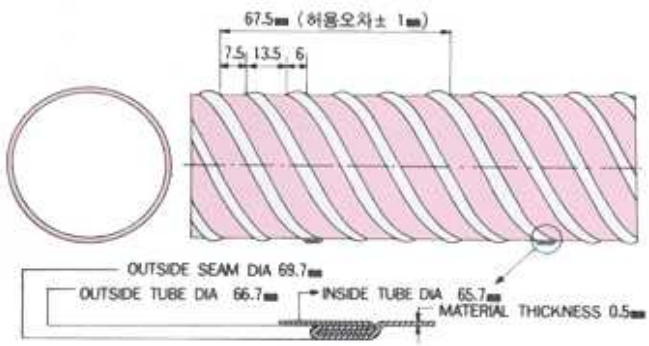


그림 2.6.5 주름진 쉬스관 형상[7)]

표 2.6.2 쉬스 직경 및 연결 커플러 사이즈

쉬스관		연결 커플러	
내경/외경(Ø)	재료두께(㎜)	내경/외경(Ø)	길이(㎜)
45/49	0.25(0.3)	50/54	200
50/54	0.25(0.3)	55/59	200
55/59	0.25(0.3)	60/64	200
60/64	0.25(0.3)	65/69	200
65/69	0.25(0.3)	70/74	200
70/74	0.30	75/79	200
75/79	0.30	80/84	250
80/84	0.30	85/89	250
85/89	0.30	90/94	250
90/94	0.30	95/99	250
95/99	0.35	100/104	250
100/104	0.35(0.40)	105/109	300(400)
105/109	0.35	110/114	300
110/114	0.35	115/119	300
115/119	0.35	120/124	300
120/124	0.35	125/129	300
125/129	0.35	130/134	300
130/134	0.40	135/139	300
135/139	0.40	140/144	300
140/144	0.40	145/149	400
145/149	0.40	150/154	400
150/154	0.40	155/159	400

2. 일체화된 강연선 거동 평가

가. 실험 개요

긴장된 강연선의 녹방지 및 긴장력의 손실을 방지하기 위한 또 하나의 방법으로는 긴장된 강연선과 강연선이 통과하는 강관 혹은 쉬스관과 일체화 시키는 방법이 있다. 강연선이 통과하는 강관 내에 모르타르 혹은 그라우트재를 주입하여 양생시켜 강연선과 강관을 일체화 시킬 경우, 지하수 유입이나 습윤 현상 등으로 인한 녹방지를 사전에 방지시킬 수 있고, 만일 강연선 긴장력이 해제되었을 경우에는 강연선 긴장량이 원위치로 돌아오지 않게 하는 효과도 기대할 수 있다.

교량 분야에서는 프리스트레스를 준 강연선을 그라우트재를 주입하여 교대 및 교각과 일체화 시키는 방법이 일반적으로 적용되고 있다. 그러나 교량분야에서 적용되고 있는 강연선 직경(강연수 다발수) 및 쉬스관의 직경은 강연선체결 쉴드터널에서 적용하고자 하는 강연선 직경의 수배에서 수십배 이상 차이가 있다. 따라서 교량분야에서는 그라우트재로 쉬스관을 충진시켜 강연선과 일체화 시킬 경우 그 효과를 충분히 기대할 수 있으나, 강연선 체결 쉴드터널에서는 단연선의 강연선과 작은 직경의 강관으로 인해 그라우트재가 충진량도 미비하여 일체화 거동을 기대하기 어렵다.

특히, 앞 절에서도 살펴보았듯이 긴장된 강연선에서 발생된 녹이나 부식정도는 강도 발현에 거의 영향을 주지 않는다는 주장도 국외 연구결과를 통해 확인할 수 있다.

본 연구에서는 쉴드세그먼트 제작시 강관을 설치하여 그 안으로 강연선을 통과시켜 긴장력을 주게 되는 강연선 체결 방식에서 강연선과 강관을 그라우트재로 일체화 시켰을 경우, 강연선의 긴장력이 풀리더라도 그라우트재와 강연선이 일체화 거동을 하는지에 대해 실제 실험을 통해 검증하고자 하였다.

본 실험 결과는 크게 2가지로서 예측될 수 있다. 첫째는 강연선 체결 쉴드터널에 적용되는 강연선 및 강관에서는 그라우트재를 주입하여 일체화 시키더라도, 긴장력이 해제되었을 경우 긴장된 늘임량이 다시 줄어들게 되는 것이다. 이런 결과는 강연선과 그라우트재 경계에서 다양한 원인으로 파괴가 발생되었고 결국 일체화 거동을 하지 못한다는 것이다.

둘째는 긴장력이 해제되어도 강연선의 긴장된 늘임량이 다시 줄어들지 않는 것이다. 이런 결과는 그라우트재의 접착력 및 구속력이 강연선 긴장력을 유지시킬 수 있을 정도로 충분히 크며, 강연선과 강관이 일체화 거동을 한다는 것이다.

최초 실험 계획시 강관을 거치시키는 강재 프레임을 별도로 제작할 계획이었으나,

강재 프레임이 강연선 긴장력에 변형이 일어나지 않게 하기 위해서는 강재 두께가 많이 증가될 것으로 예상되었다. 따라서, 강재 프레임을 별도로 제작하는 것보다 I형강을 이용하는 경우 제작비를 절감할 수 있고, I형강 양편에 서로 다른 직경의 강관 및 쉬스관을 적용할 수 있어 실험체 개수도 줄일 수 있다고 판단되었다.

그림 2.6.6 및 그림 2.6.7은 강연선 일체화 거동 실험 계획을 나타낸 것이다. 강관은 3종류를 사용하여 주입되는 그라우트재의 양을 다양하게 시도하였다. 현재 강연선 체결 쉴드터널에 적용되고 있는 직경 2cm 강관에 추가로 직경 3.6cm, 4.4cm 강관을 각각 설치하였다. 강연선은 실대형 체결 실험에 적용했었던 직경 12.7mm의 7연선을 적용하였다.

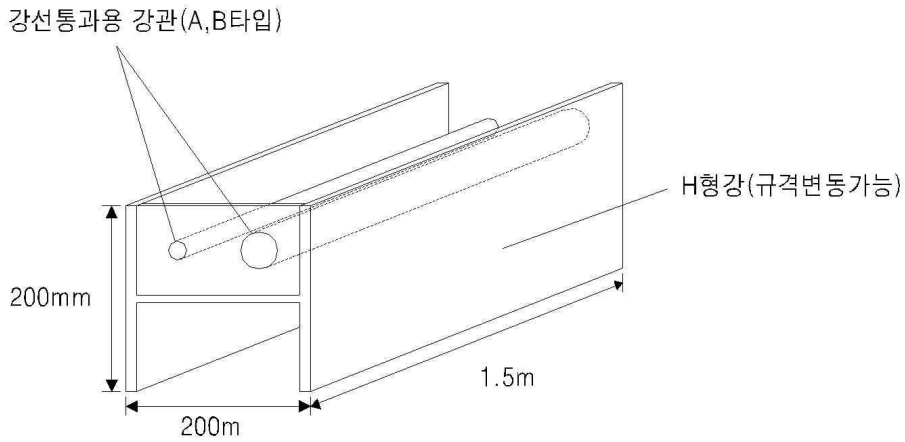


그림 2.6.6 강연선 일체화 거동 평가를 위한 몰드 제작 계획

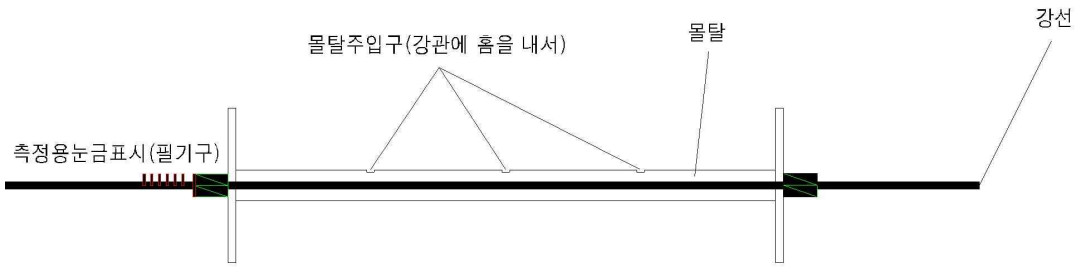


그림 2.6.7 강관내 그라우트재 주입 및 늘임량 측정 계획

나. 실험 수행 및 결과

그림 2.6.8은 제작된 실험 장치와 실험 수행 모습을 나타낸 것이다. I형강을 이용하여 강연선 긴장력을 충분히 견디게 틀을 제작하였고, 그라우트재 주입이 원활하게 각 강관에 주입구를 용접하여 고무호스를 연장시켰다.



(a) 제작된 실험 장치



(b) 강연선 정착콘



(c) 그라우트재 주입 호스



(d) 강연선 긴장



(e) 초속경시멘트로 정착콘 결속



(f) 그라우트재 주입

그림 2.6.8 강연선 일체화 거동 실험 수행 모습



(g) 강연선 긴장량 표시



(h) 그라우트 양생 후 긴장력 해제



(i) 그라우트재 양생으로 휘어진 강관

그림 2.6.8 강연선 일체화 거동 실험 수행 모습(계속)

강연선 긴장력 해제시 정착콘을 직접 절단할 경우 작업이 어렵고, 강연선, 강관, 그라우트재에 영향이 미칠 것으로 예상되어 몰드 한쪽면에 추가로 연장 바를 설치하여 콘 안쪽 강연선 부분을 절단할 수 있게 제작하였다.

표 2.6.3은 강연선 일체화 거동 실험 결과를 나타낸 것이다. 최초 14톤의 긴장력을 주어 3cm의 늘임량 변화가 발생하였다. 그라우트재 주입 후 충분한 양생기간이 경과한 후 연장바 부분의 강연선을 절단하여 긴장력을 해제 하였다.

긴장력을 해제한 후 표시된 눈금을 측정한 결과 강관 직경에 상관없이 최초 늘임량 모두가 다시 줄어든 결과를 보였다. 표 2.6.3에서 긴장력 해제시 변화량이 3cm가 되지 않는 것은 그라우트재가 강연선을 부착하고 있다기보다는 실험 전반을 통해 소실된 긴장력 및 늘임량으로 판단된다. 또한, 그라우트재의 양생 과정에서 강관이 휘어지는 것을 확인할 수 있었는데, 교량의 경우 쉬스관이 콘크리트에 매립되기 때문에 변형이 억제되지만, 본 실험에서는 강관이 외부에 노출되어 있어 압축력이 작용하는 동안 좌굴 등에 의해 처짐이 발생하는 것으로 판단된다.

강연선과 그라우트재의 일체화 거동 실험에서 본 연구에서 적용하는 강연선 및 강관 직경에서는 그라우트재를 주입하더라도 교량 분야와는 달리 일체화 거동이 어려울 것으로 판단된다. 그러나 그라우트재가 없다고 하더라도 개별 강연선에 작용하는 힘이 충분히 크기 때문에, 긴장 후 강연선은 충분한 내구성을 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 세그먼트 체결 부재로 적용되는 강연선의 길이는 교량 분야에서 적용되는 대직경 강연선 다발과 달리 6m 이하이고, 전구간에 있어서 정착부와의 거리(세그먼트 4링 통과 거리 : 약 4~6m)가 짧기 때문에 그라우팅 유무에 따라 긴장력 손실이나 구조 성능 차이는 거의 없을 것으로 판단된다.

표 2.6.3 강연선 긴장력 해제시 늘임량 변화

CASE	강관 직경	강연선 직경	긴장력	최초 늘임량	긴장력 해제시 변화량
1	2.0cm	12.7mm	14톤	3cm	2.6cm
2	3,6cm	12.7mm	14톤	3cm	2.5cm
3	4.4cm	12.7mm	14톤	3cm	2.6cm

소결론

강연선 체결방식의 쉴드 세그먼트에서 강연선과 세그먼트간의 일체화 거동을 극대화하기 위해 강연선의 성능을 저하시키는 부식방지에 대한 대책검토를 수행하고, 세그먼트와의 일체화 방안에 대한 실험을 수행하였다.

(1) 강연선의 부식으로 인하여 강도가 감소한다면 일체화 거동의 성능에 저하가 있을 수 있다. 그러나 산화반응에 의해서 발생하는 표면녹은 유효단면의 감소를 유발할 수 있지만, 부식이 차단된 강연선과 각종 부식환경에 노출된 4가지 케이스의 강연선 등 5가지 케이스의 강도실험을 수행한 논문의 결과 성능의 차이는 매우 미미하며, 부식은 강연선의 성능에 영향을 미치지 않는 것으로 검토되었다.

(2) 교량 분야에서는 프리스트레스를 준 강연선을 그라우트재를 주입하여 교대 및 교각과 일체화 시키는 방법이 일반적으로 적용되고 있으나 강연선 체결방식 쉴드터널에서는 단연선의 강선과 작은 직경의 강관으로 인해 그라우트재가 충진되는 양도 미비하여 일체화 거동이 어려울 것으로 판단된다. 이를 검증하기 위하여 강연선 체결방식 세그먼트에 적용이 가능한 3가지 크기의 강관에 강연선을 긴장하고 그라우트재로 채운 후 긴장력을 해제한 결과 예상대로 일체화 거동은 어려울 것으로 판단된다. 그러나 공법의 특성상 정착부와의 거리가 4~6m로 짧아 강연선의 강성만으로 충분한 내구성을 유지할 것으로 판단된다.

제 7 절 쉴드 세그먼트 설계기준 조사 및 영향변수 도출

1. 세그먼트 라이닝 구조해석

쉴드터널에서 세그먼트 라이닝의 구조적 기능은 지반하중과 수압을 지지하는 일반 지하구조물의 기능 외에 쉴드머신 추진을 위한 반력대 기능을 수행하여야 한다. 또한, 공장에서 제작되어 쉴드머신 내에서 설치되는 과정 중에 발생하는 다양한 하중조건 등에 노출된다. 일반적으로 세그먼트 라이닝 자체의 강성은 매우 높아 대심도 연약지반에 적용되는 경우를 제외하면 지반하중에 의한 변형이 매우 작아 세그먼트 라이닝의 변형에 따른 지반침하는 무시할 수 있다. 그러나 쉴드터널의 경우 굴착면과 세그먼트 라이닝 사이에 간극(테일 보이드)이 발생하게 되며, 이 테일 보이드에 의해 대부분의 지반침하가 발생하게 된다.

본 절에서는 세그먼트 라이닝 자체의 구조설계에 대한 내용만을 간단히 소개한다.[1] 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.

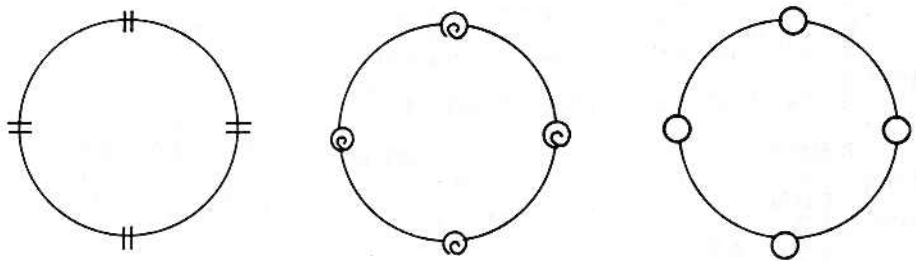
가. 구조해석 모델

구조해석 방법에는 해석적 방법과 수치해석 방법이 있으나, 근래에는 수치해석 방법의 발달로 전자의 방법은 실무에서는 거의 사용되지 않는다. 수치해석 방법에는 지반을 반력스프링으로 고려하는 빔-스프링모델과 탄소성 요소로 고려하는 연속체모델이 있다. 현재까지는 세그먼트 라이닝의 구조해석에는 전자의 방법이 사용되고 지반침하 거동과 같은 해석에는 후자의 방법이 사용되는 것이 일반적이다. 본 장에서는 세그먼트 라이닝의 구조설계에 관한 내용을 다루기 때문에 빔-스프링 모델에 대해서 설명토록 한다.[1]

빔-스프링 모델은 이음부를 고려하는 방법에 따라 그림 2.7.1과 같이 강성일체법, 회전스프링법, 힌지법이 있다. 강성일체법은 이음부를 고려하지 않고 연속된 부재로 구조계산하는 방법으로 모멘트가 가장 크게 계산된다. 반면에, 힌지법은 이음부에서 모멘트가 해소되기 때문에 모멘트가 가장 작게 계산된다. 회전스프링법은 두 방법의 중간 정도의 모멘트가 산정되기 때문에 일반적으로 많이 사용된다.

최근 국내 설계 시에는 그림 2.7.2와 같은 2링 빔-스프링 모델이 적용되고 있다. 반

경방향 이음부는 회전스프링으로 고려하고 링 이음부는 전단스프링을 이용하여 지그재그로 연결된 2개 링의 구속조건을 고려하며 세그먼트에는 지반반력 스프링이 연직으로 설치된다.



(a) 강성일체법 (b) 회전스프링법 (c) 힌지법

그림 2.7.1 세그먼트 라이닝 구조모델[2)]

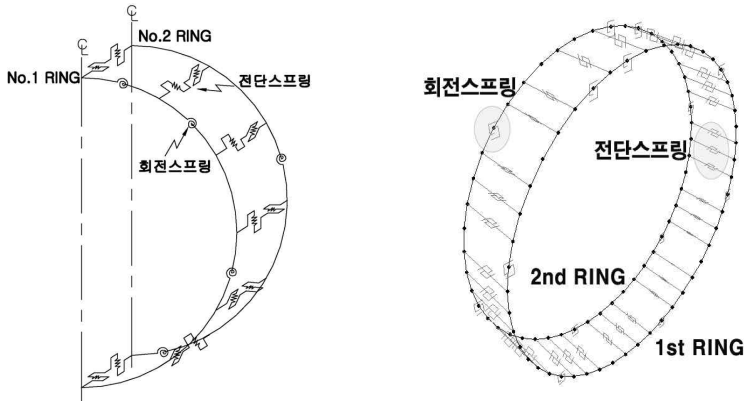
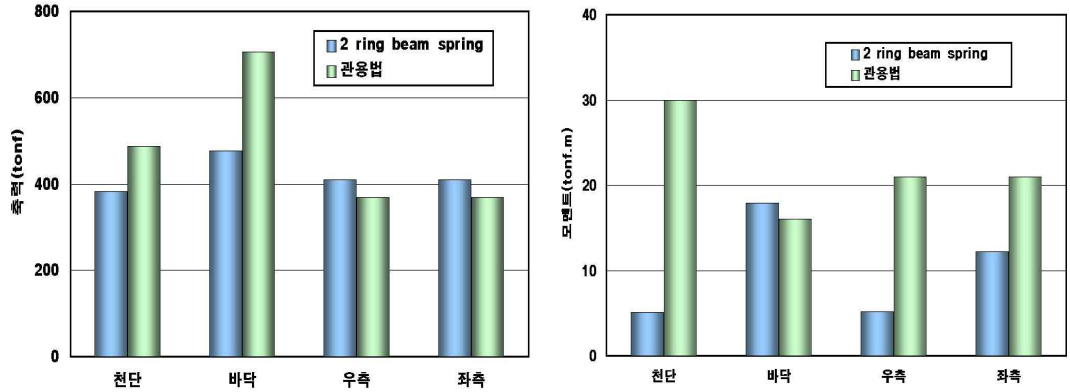


그림 2.7.2 2링 빔-스프링 모델[2)]

동일한 조건에 대해 강성일체법(또는 관용법)과 2링 빔-스프링 모델을 적용한 해석을 비교할 경우 대체로 후자의 모델이 단면력이 적게 발생한다. 특히 축력에 비해 모멘트는 발생 양상 자체가 큰 차이가 있다. 전자의 모델은 세그먼트 링의 강성이 일정하기 때문에 하중이 제일 큰 천정부에서 최대모멘트가 발생하였지만, 후자는 천정부의 K형 세그먼트로 인해 이음부가 집중되어 오히려 적은 단면력이 발생하였다. 따라서 구조모델이 복잡하지만, 세그먼트의 구조적 특징을 고려하는 측면에서는 2링 빔-스프링 모델이 적합하다고 할 수 있다. 다만 세그먼트의 세부 설계가 이루어지지 않은 초기 설계단계에서는 세그먼트 두께산정과 같은 기본적인 설계 항목들을 산정하기 위해 단순한 강성일체법을 이용할 수 있다.



(a) 축력분포 (b) 모멘트 분포

그림 2.7.3 해석모델에 따른 단면력 분포(철도시설공단, 2003)

나. 지반반력 스프링계수 및 회전 스프링계수

지반반력계수(k)는 주변지반탄성계수(E)와 터널반경(R)로부터 식(2.7.1)로 구해진다.

$$k = \frac{E}{R} \qquad \text{식(2.7.1)}$$

반경방향 이음부의 회전스프링계수(km)은 그림 2.7.4의 조건에 대해 식(2.7.2)로 구할 수 있다.

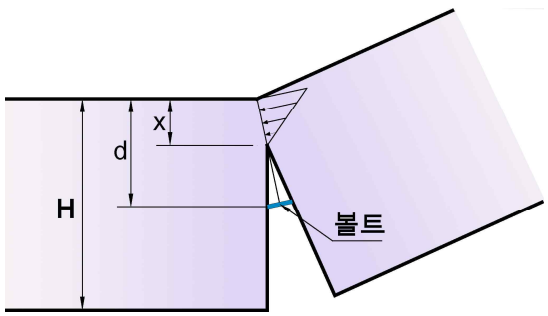


그림 2.7.4 회전스프링 산정조건

$$km = \frac{M}{\theta} = \frac{x(3h-2x)bEc}{24} \qquad \text{식(2.7.2)}$$

위 식에서 $x = \frac{n \cdot A_b}{b}(-1+\sqrt{\frac{2 \cdot b \cdot d}{n \cdot A_b}})$이고, 각 기호는 다음과 같다.

M : 휨 모멘트

b : 세그먼트 폭

A_b: 볼트의 단면적

θ : 회전각

x : 압축외연에서 중립축까지의 거리

h : 세그먼트 두께

d : 유효깊이

n : 영계수비

링 이음부의 전단스프링계수(ks)는 이음부의 전단키와 관련이 있으나, 관용적으로 40 MN/m 정도를 사용한다.

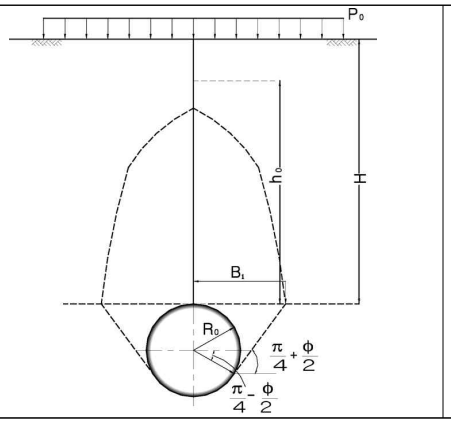
다. 적용하중

(1) 기본하중

다음의 하중에 대해서는 콘크리트 구조설계기준에서 제시한 하중계수와 하중조합을 고려하여 세그먼트 보강을 수행하여야 한다.[3)]

- 지반하중(또는 토압) : 토피가 6~20m 정도로 얕고 지반조건이 불량한 경우에 연직하중은 전 토피(Total overburden)를 적용하여 산정한다. 양호한 암반의 경우에는 이완하중 개념을 도입하여 전 토피보다 작은 연직하중을 적용한다. 수평하중은 연직하중에 토압계수 또는 측압계수를 곱하여 구한다. 이완하중의 산정은 Terzaghi법이 보수적이며, 지반의 강도 및 심도를 고려할 수 있는 장점이 있기 때문에 많이 적용되고 있다. 그림 2.7.5는 연직 이완하중(Pv)을 산정하는 개념도이며 산정식은 식(2.7.3)과 같다.

$$P_v = \frac{\gamma B}{2Ko\tan\phi}(1-e^{-Ko\tan\phi\frac{2H}{B}}),\ B = 2[\frac{b}{2}+m\cdot\tan(45-\frac{\phi}{2})] \qquad \text{식(2.7.3)}$$



Pv : 연직암반이완하중
Ko : 수평토압과 연직토압의 비
ϕ : 흙의 내부마찰각
m : 터널높이
b : 터널 폭
H : 토피(이완하중고)
ɣ : 지반단위중량

그림 2.7.5 Terzaghi 이완하중

- 수압 : 수압은 최대지하수압에 공용기간 중 발생할 수 있는 최악의 조건을 추가하여 산정한다. 하저터널의 경우에는 홍수 시 발생할 수 있는 최대수위를 고려하고 침수가 빈번한 지역은 침수 시 수위를 최대지하수위에 추가하여 수압을 산정한다.
- 상재하중 : 터널상부 지표면(또는 지중)에 있는 구조물 및 교통 등의 하중은 작용지점으로부터 지중에 분포하는 하중분포를 고려하여 산정한다. 상재하중의 분포특성별 지중응력은 터널설계기준을 참조한다.[2)]
- 세그먼트 자중 : 세그먼트 자중은 연직으로 작용하도록 한다.
- 지진하중 : 지진하중은 터널설계기준에 의거하여 산정한다. 암반이 양호한 경우에는 고려하지 않을 수 있다.[2)]
- 지반반력 : 구조계산 방법에 따라 차이가 있으나, 최근에는 빔-스프링 모델을 이용한 수치해석을 수행하므로 별도로 산정할 필요는 없다. 본 모델에서는 지반반력계수에 상응하는 지반반력스프링을 고려하면, 세그먼트 변형량에 비례하는 반력이 자동적으로 고려된다. 다만, 지반반력은 압축력만 발생하므로 압축스프링 요소를 적용하거나 또는 인장부의 스프링을 제거하여야 한다.
- 내부시설 : 터널 내부에는 노반, 인버트 등의 고정하중과 차량에 의한 활하중이 있다. 일반적으로 이러한 하중은 세그먼트 구조설계에 미치는 영향은 매우 낮으나, 지반이 매우 연약한 경우에는 검토가 필요하다.

(2) 별도 검토를 위한 하중

다음의 하중은 기본 하중과는 별개로 검토되거나, 필요시 기본하중의 크기 조정으로 검토된다.[4)]

- 잭 추력 : 쉴드 굴진시 잭추력에 대한 반력으로서 일시적으로 작용하는 하중이나 시공하중 중에는 가장 큰 하중이다. 일반적으로 평판형 철근콘크리트 세그먼트에서는 별문제가 없으나, 상자형 세그먼트에서는 면밀한 검토가 필요하다.
- 뒤채움 압력 : 세그먼트 뒤채움 압력은 이상적으로 주입되는 경우에는 정수압 조건으로 작용한다. 그러나 실제 시공 시에는 균등하게 주입되지 않기 때문에 그림 2.7.6과 같이 뒤채움 주입공 주변에 국부적으로 압력이 가해지는 조건을 상정한다.
- 운반 및 취급하중 : 세그먼트는 그림 2.7.7과 같이 운반 및 취급 중 적치되는 경우가 있다. 이때, 세그먼트에는 축력은 없고 오로지 휨응력만이 작용하므로 구조검토가 필요하다.

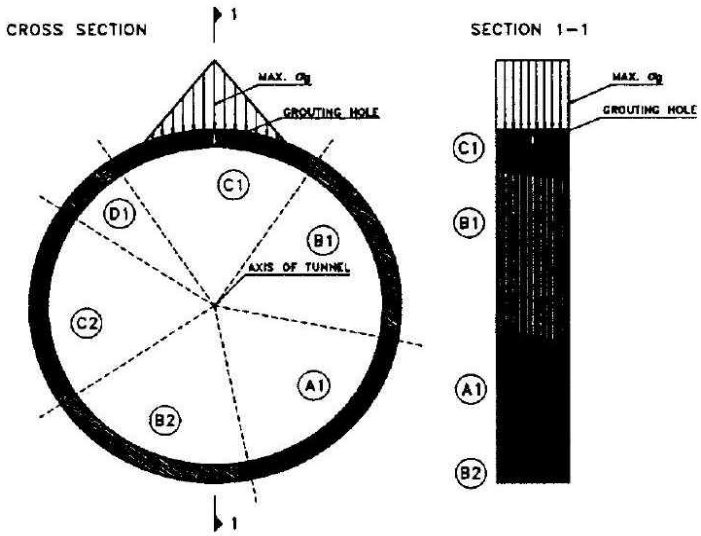


그림 2.7.6 뒤채움 주입압 (ITA WG 2, 2000)

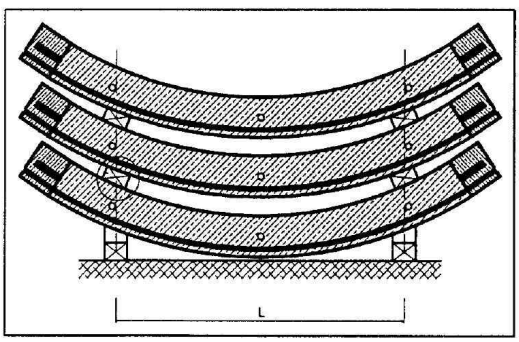


그림 2.7.7 적재 중인 세그먼트

- 부력 : 쉴드터널은 방수터널로 건설되는 경우가 일반적이므로 토피가 낮은 구간은 부력에 대한 안정검토를 수행해야 한다.
- 병설터널 : 병설터널로 건설되는 경우 두 터널의 간격이 작을수록 지반하중은 증가한다. 일본철도협회(1983)에 따르면, 터널 폭이 D이고 순 이격거리(또는 필라 폭)가 d이면, 이격거리별 할증계수를 표 2.7.1과 같이 산정할 수 있다. 할증하중은 연직하중에 할증계수를 곱한 후 본래의 연직하중에 더해진다.
- 근접굴착 : 쉴드터널은 도심지에서 건설되는 경우가 많기 때문에 장래 근접굴착 계획이 있는 경우에는 이에 대한 추가하중을 산정하여 기본하중 시 보강량의 적정성을 검토해야 한다.

표 2.7.1 병설터널 간격과 연직지반하중의 할증계수

d/D=a	a >1	0.9≤a≤1	0.8≤a≤0.9	0.7≤a≤0.8	0.6≤a≤0.7	0.5≤a≤0.6
할증계수	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5

2. 국내외 설계기준 조사

쉴드터널의 주요 구조물인 세그먼트는 토압, 수압 및 여러 하중에 대해 안정해야하며, 이러한 세그먼트는 다음과 같은 역할을 만족하여야 한다.

- 세그먼트는 주 지보재로 터널에 작용되는 하중에 대해 안정성을 확보해야 한다.
- 잭추력, 뒤채움 그라우팅 압력 등 시공중 하중에 대해 안정성을 확보해야 한다.
- 계획된 기간 동안 유지관리가 가능해야하며, 이를 위해 지수성, 내부식성, 내화성 등의 내구성 확보가 설계에 반영되어야 한다.

세그먼트는 위의 항목들이 만족되도록 설계해야 하며 이를 위해 설계시 수행되는 주요 설계항목(검토항목)을 파악하기 위해 국내외 관련 문헌을 조사하였다.

가. 국내 설계기준

(1) 터널설계 기준(2007)

터널설계 기준에는 세그먼트에 관하여 간략하게 언급되어 있고, 설계시 고려사항으로 다음과 같이 기술되어 있다.

- 하중 : 추진 잭의 추력, 연직 및 수평 토압, 수압, 자중, 상재하중의 영향, 지반반력, 내부하중, 시공 시 하중, 병설터널의 영향, 지반침하의 영향 등을 고려하여야 한다.
- 설계방법 : 허용응력 설계법으로 설계하는 것을 원칙으로 한다.
- 구조해석 모델 : 구조계산은 간편법, 스프링모델, 수치해석법 등을 적용한다.
- 세그먼트 타입 : 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 선정하여야 함. 상자형 또는 평판형 세그먼트를 볼트이음으로 조립한 링구조는 강성이 같은 링으로 취급할 수 있으며, 재질에 따라 콘크리트, 강재, 합성 세그먼트로 구별하여 설계하여야 한다.
- 세그먼트 이음: 세그먼트의 이음구조는 소요 강도와 강성을 가짐과 동시에 조립의 확실성, 작업성 및 지수성을 고려하여 설계하여야 하며, 볼트 체결방식의 경우 적정 토오크치를 산정하여야 한다.

(2) 터널 표준시방서(2009)

터널 표준시방서에는 세그먼트 제작시 고려사항, 저장 및 운반, 재료 성능 관리, 시공에 관하여 간략하게 언급하고 있다. 특히 세그먼트 라이닝 제작시 품질관리를 위한 치수 허용정확도 및 검사 항목을 기술하고 있다.

(3) 도로설계편람(2010)

터널편 TBM 터널에서 TBM 장비 외에도 세그먼트 설계에 대해 타입 및 구조 설계, 하중, 기타 고려사항 및 이음방식에 대해 기술하고 있다. 세그먼트 구조 및 형상 설계는 터널설계 기준과 동일하고, 세그먼트 설계시 고려 하중은 일본 쉴드터널 시방서 하중편 내용과 동일하게 기술되어 있다.

나. 국외 설계기준

(1) ITA-Working Group Research(2000)

국제 터널학회 Working group research에서 Guidelines for Design of Shield Tunnel Lining편은 설계 시작단계의 하중산정, 콘크리트 세그먼트 재료특성, 해석모델 및 해석결과 안정성 판단에 대하여 기술하고 있다. 기술된 항목들은 예제와 함께 세그먼트 설계 단계에 맞추어 서술되어 있으며, 항목들의 내용은 다음과 같다.[5)]

- 하중 : 세그먼트 설계시 토압, 수압, 사하중, 상재하중은 항상 고려되어야 하며, 프로젝트 특성에 따라 필요시 터널 내부의 하중, 시공중 하중, 지진하중, 인접터널, 침하 등의 하중도 고려해야 한다.
- 재료 : 콘크리트 세그먼트 재료 물성은 JIS, DIN, ACI 등의 콘크리트 시방서를 준용하기를 추천하고 있으며, JSCE내용을 참조하여 콘크리트 강도, 탄성계수 값을 제시하고 있다.
- 안전계수 : 안전계수는 반드시 code에 근거하여 산정해야 한다.
- 구조해석 : 구조해석은 극한한계상태 해석과 허용응력 해석을 적용하며, 각 하중조합에 따른 내력을 계산하여 세그먼트 및 세그먼트 조인트의 안정성을 판단한다. 일반적으로 TBM 잭 추력이 가장 큰 외력이므로 이에 대한 안정성을 검토한다.
- 세그먼트 상세 : 구조적 안정성이 확보되면 지수재, 그라우팅 홀, 키 세그먼트

제원, 테이퍼 량 등 세그먼트 상세 제원을 결정한다.

- 시공 : 제작 및 시공시 오차를 결정한다.
- 2차 라이닝 : 2차 라이닝 적용시 안정성을 평가한다.

(2) AFTES(1997)

AFTES는 프랑스 설계 규정으로, TBM 장비뿐만 아니라, 세그먼트에 대해서도 용어 및 설계방법에 대하여 상세하고 명확하게 기술하고 있어, 유럽지역에서 세그먼트 설계시 많이 적용되고 있다. AFTES에 기술된 항목은 다음과 같다.

- 세그먼트 라이닝 개념 및 용어 : 시공 및 시공 후 세그먼트의 기능, 조립, 터널 선형을 위한 테이퍼 링, 링의 폭, 수량, 제원 등을 기술하고 있다.
- 세그먼트의 제원 : 제작, 운반, 조립을 고려하여 적정 세그먼트 제원 산정하고. 구조계산을 위한 필요 물성을 산정한다.
- TBM 특성을 고려한 구조해석 : TBM 구속압, 과굴착, 장비 모양, 길이, 추력, 그라우팅 방식을 고려하여 물성을 산정하고 구조해석을 수행한다.
- 세그먼트 설계시 추천 code 제시
- 하중 : 자중, 사하중, 토압과 같은 영구하중 및 운영중 또는 시공중 하중과 같은 임시하중 적용한다.
- 하중조합 제시
- 해석방법 : 세그먼트는 극한한계상태 조건에서 적용된 모든 하중에 안정해야 하고, 서비스 한계상태에서 균열, 콘크리트 허용압축 응력 등의 기준을 만족해야 한다.
- 세그먼트 조인트 : 조인트 적용 하중 및 하중조합에 따른 해석을 수행하거나, 실험결과를 적용한다.

(3) JSCE(2007)

일본토목학회(JSCE)에서 발간한 Standard Specifications for Tunneling은 개착터널, 산악터널, 쉴드터널로 3편으로 구성되어 있으며, 쉴드터널편 라이닝편에 세그먼트에 관하여 항목별로 상세하게 정리되어 있다. JSCE에 기술된 항목은 다음과 같다.[6)]

- 세그먼트 관련 용어
- 하중 : 토압, 수압, 사하중, 상재하중, 지진 하중 등을 적용함.
- 재료 : 물성 및 재료 실험

- 허용응력 설계
- 세그먼트 모양 : 설계조건에 따라 세그먼트 및 세그먼트 조인트 제원, 테이퍼량을 산정함.
- 구조해석 : 횡방향 하중에 대한 구조해석, 종방향 하중에 대한 구조해석, 세그먼트 및 세그먼트 조인트 응력 산정함.
- 세그먼트 상세 : 하중, 시공성, 지수성을 고려하여 세그먼트를 설계함.
- 세그먼트 내구성 : 지수성, 균열, 부식작용을 고려하여 설계함.
- 세그먼트 제작 : 적정한 오차범위 내에서 제작되어야 하고 시공전 적절한 실험을 수행함.
- 세그먼트 적치, 보관 운송

3. 쉴드터널 구조성능 영향변수 도출

기존 문헌 분석결과 세그먼트 주요 설계 검토항목은 세그먼트 본체설계와 구조안정성 검토로 크게 구분되며 세그먼트 본체설계는 재질, 제원(폭, 두께 등), 연결부(이음부), 방수설계로 세분되고, 구조안정성 검토는 하중, 해석방법, 구조모델 등으로 세분되는 것으로 분석되었다.

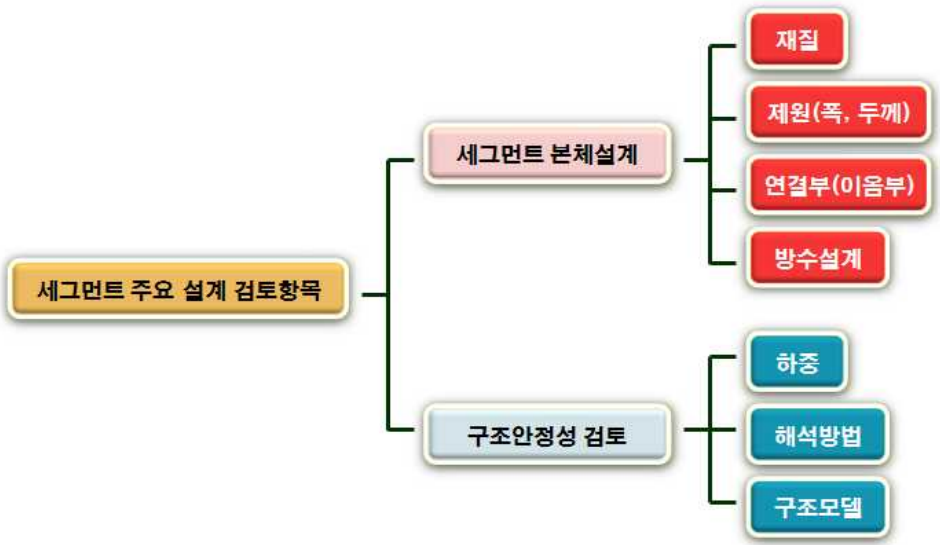


그림 2.7.8 쉴드 세그먼트 주요 설계 검토 항목

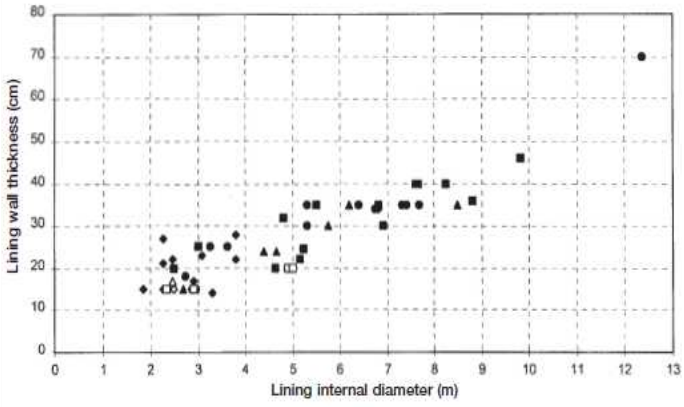
가. 세그먼트 라이닝 물성(재질)

콘크리트 강도의 경우 세그먼트 강성과 직접적인 관계를 갖고 있는 요소이나, 세그먼트 라이닝은 축력과 전단력에 강한 원형 구조로 설계되고, 프리캐스트 라이닝으로 콘크리트의 강도가 40MPa 이상이 대부분으로 구조적으로 충분한 강성을 보이게 된다. 프리캐스트 세그먼트 라이닝은 제작과정에서 품질관리가 용이하므로 콘크리트 강도에 의한 구조적인 문제점은 거의 발생하지 않고 있으며, 콘크리트 강도조정을 위한 배합비 조정이 용이하고 배합비 변화에 따른 비용차도 미미하므로 설계자의 적절한 판단에 따라 강도를 결정한다.

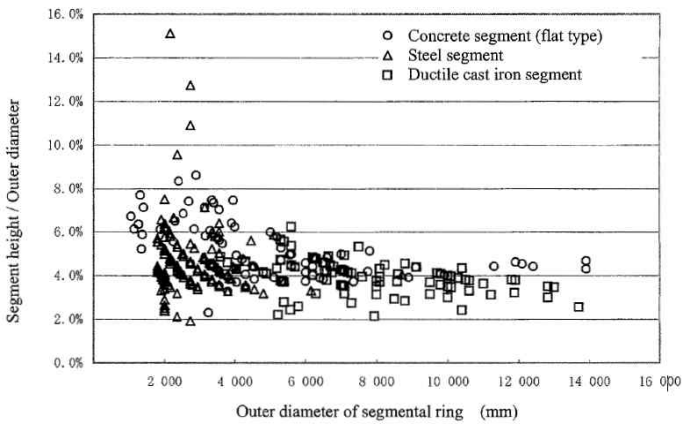
나. 세그먼트 두께

세그먼트 라이닝은 축력과 전단력에 강한 구조이나, 콘크리트 부재의 특성상 휨에 의한 인장력에 취약한 특성을 보인다. 따라서 휨강성과 관련된 세그먼트 두께는 철근

배근과 함께 세그먼트 본체 설계에서 가장 중요한 요소중 하나이다. 그러나 세그먼트 두께의 결정은 구조적인 성능 이외에도 조인트부 형상 및 제원, 지수재 치수, 터널 등급별 피복두께 등을 모두 고려해야 한다. 일반적으로 설계 시에는 그림 2.7.9와 같이 기존 사례 등을 이용하여 경험적으로 두께를 가정하고, 세그먼트 두께가 세그먼트 구조성능과 여러 요인들을 동시에 만족하는지 확인하며 최적화된 세그먼트 두께를 결정하게 된다.



(a) AFTES



(b) JSCE

그림 2.7.9 쉴드터널 사례 : 세그먼트 직경과 두께

다. 세그먼트 분할 및 폭원

세그먼트의 분할의 경우 분할 개수가 증가할수록 세그먼트에 발생하는 부재력이 감소하므로 구조적인 이점이 있으나, 조인트 개수가 증가하여 지수성에 취약하게 된다. 세그먼트의 폭은 길어질수록 연결 개수가 감소하여 지수성에 이점이 있고, 체결시

간이 감소하여 시공성이 높아지나, 세그먼트 한 개당 무게가 증가하여 이렉터의 요구 성능도 동시에 증가하게 된다. 따라서 세그먼트의 분할 및 폭은 구조적인 특성 보다는 시공성, 경제성에 초점이 맞추어져 있고, 일본의 경우 구조적 안정성 확보를 위해 경험적으로 폭원/두께 길이 비를 5이하로 하는 경향이 있다.

표 2.7.2는 추천하는 세그먼트 분할 수를 나타내고 있으며, 표 2.7.3은 국내 세그먼트 제작업체의 표준 분할 예를 보여주고 있다.

표 2.7.2 해외 세그먼트 분할

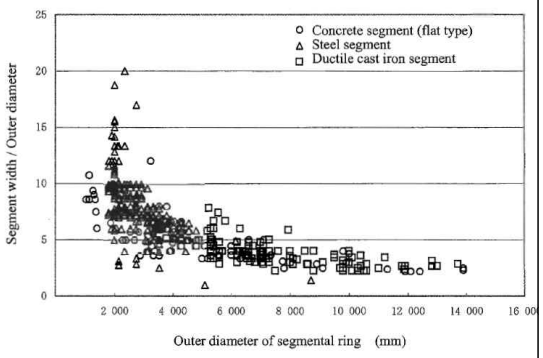
구분	JSCE		유럽 등
적용 현황	철도 : 6~13분할의 범위, 일반적으로 6, 7, 8분할을 적용 상하수도, 전력·통신구 : 5~8분할 세그먼트 한 조각의 중량을 고려하여 결정 (현재는 중요사항이 아님) 원주방향으로 3~4m로 분할이 일반적		5분할 이상

표 2.7.3 국내 세그먼트 제작업체의 표준 분할 예

종류	외경 (㎜)	길이 (㎜)	세그먼트의 분할	종별	구분
1	1,800~2,000	900~1,200	5분할	I, II	표준
2	2,150~3,350	900~1,200	5분할	I, II	표준
3	3,350~4,800	900~1,200	6분할	I, II	표준
4	5,100~6,000	900~1,200	6분할	I, II	표준
5	6,300~6,900	900~1,200	7분할	I, II	표준
6	7,250~8,300	900~1,200	8분할	I, II	표준

라. 세그먼트 조인트

(1) 세그먼트 조인트 단면 제원

세그먼트 조인트부 설계의 경우 작용 하중에 대한 단면 전체의 파괴보다는 응력 집중 등에 의한 국소파괴에 초점을 맞추어 구조성능을 평가한다. 세그먼트 조인트 접촉면은 세그먼트 본체 두께에서 지수재, 연결부재 등의 두께를 뺀 값으로 본체보다 면적이 감소하므로 응력집중이 발생하여 이에 대한 안정성을 확보해야 한다. 또한, 설계시 구조해석에서 얻어진 각 조인트부에서 발생하는 부재력을 적용하여, 지압강도, 할렬강도 등 국소파괴에 대한 강성이 확보되었는지 확인한다.[1)]

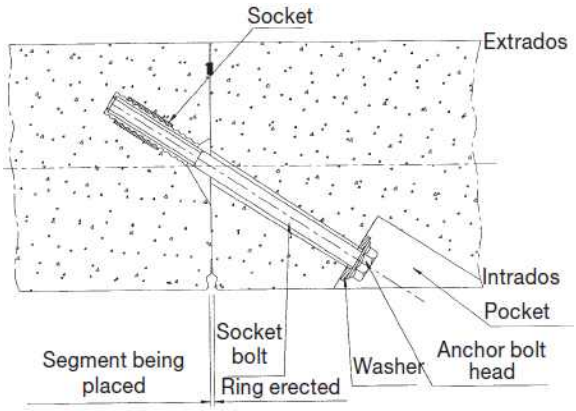


그림 2.7.10 세그먼트 조인트 단면도

(2) 링 조인트 단면 제원

세그먼트의 두께를 결정하는 가장 중요한 요소는 쉴드의 잭 추력의 크기라고 할 수 있다. 잭 추력은 실린더를 통해 세그먼트에 전해지고, 링 조인트부와 접촉면인 실린더슈 부분에 응력이 집중되어 세그먼트의 파손을 발생시킨다. 잭 추력에 대한 안정성을 판단하기 위해서는 우선 잭 추력의 크기, 실린더와 세그먼트의 편심을 정확히 산정한 후, 지압강도와 할렬강도에 대해 검토하여 두께를 결정하고 필요에 따라 철근을 보강해야 한다.

일반적으로 세그먼트 조인트의 경우 상시하중으로 발생되는 축력으로 인하여 조인트부의 회전강성 및 전단강성이 유지된다. 그러나 링간 조인트의 경우 잭 추력이 제거된 후에는 별다른 축력이 발생하지 않아 조인트 연결부재 자체가 강성을 가져야 한다. 설계시 링간 발생하는 부재력을 계산하고 링간 연결부재가 이를 저항할 수 있는지 확

인한다. 2링 beam-spring 모델의 경우, 지그재그 배열된 링 간에 발생하는 부재력을 산정하기가 용이하다.[7)]

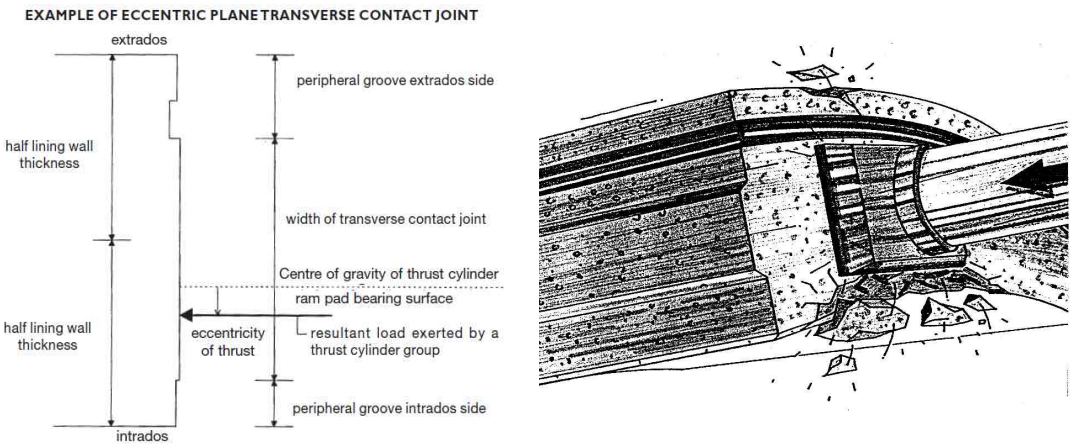


그림 2.7.11 링 조인트 단면 및 잭 추력에 의한 파손

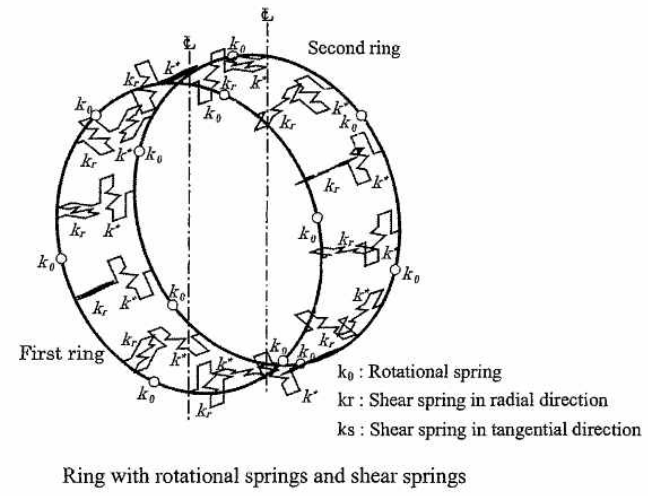


그림 2.7.12 2링 Beam-Spring Model

(3) 조인트 강성

조인트 강성은 연결부재 종류에 의해 결정되고, 연결부재의 종류로는 경사볼트 방식, 곡볼트 방식, 볼트박스 방식, 연결핀 방식 등이 있음. 볼트식 연결부재의 경우 볼트박스 방식과 같은 경우를 제외하고는, 구조해석시 강성을 무시하고 안전측으로 해석을 수행하고 설계함이 일반적이다. 구조해석시 세그먼트 조인트부의 강성에 따라 부재력의 차이가 발생하므로 적절한 방법으로 강성을 산정했는지, 실험 등을 통해 검

증이 이루어 졌는지 확인한다.

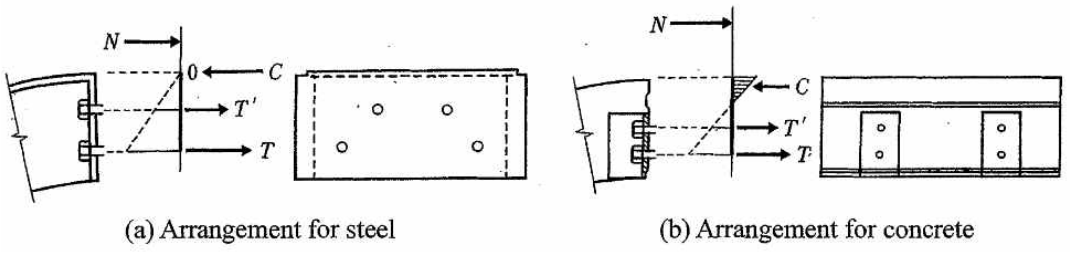
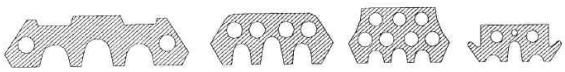


그림 3.7.13 세그먼트 강성 산정

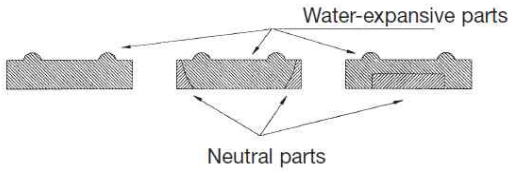
마. 세그먼트 지수재

세그먼트 라이닝 지수재로는 수팽창성 지수재와 개스킷 지수재가 널리 사용되고 있다. 지수재는 조인트부에 설치되므로 조인트부의 부재력을 산정하여 압축율 및 열림량 등을 계산하여 지수재 성능 조건을 결정하게 된다. 지수재는 일반적으로 전문 업체에서 제작되어 규격화된 제품으로 공급되고 있으며, 지수재에 대한 성능실험 결과가 동시에 제공되므로 설계조건에 맞는 제품을 결정하게 된다.[8)]

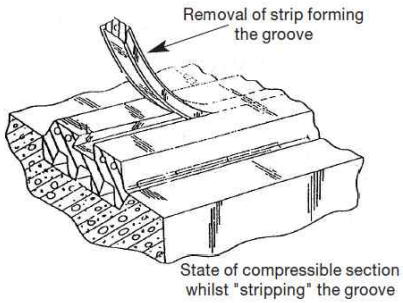
잭추력 및 작용하중에 따른 링의 변형으로 지수재에 추가 변형이 발생할 경우, 지수능력이 유지되는지 확인해야 할 필요가 있으며, 또한 이 경우 지수재의 압축률에 따라 응력이 발생하여 세그먼트 외측에 집중되므로 세그먼트의 국소파괴의 안정성도 검토되어야 한다



(a) 개스킷 지수재



(b) 수팽창성 지수재



(c) 복합형 지수재

그림 2.7.14 세그먼트 지수재

바. 세그먼트 구조안정성 고려항목

세그먼트 설계는 각종 지반조건에 대하여 하중을 산정하고, 적절한 하중조합을 가정하여 각 조건별 세그먼트의 구조 안정성을 확인하는 단계를 따른다. 따라서 세그먼트의 구조 안정성을 확인하기 위해서는 지반 조건부터 하중, 재료 특성, 세그먼트 종류 등 다양한 요소들을 복합적으로 고려하여야 한다. 표 2.7.4는 세그먼트 구조해석에 필요한 요소들을 나타낸 것이다.[9)]

① 설계지반운동

- 내진성능수준 (붕괴방지수준 / 기능수행수준)
- 설계지진 (설계응답스펙트럼 / 시간이력 가속도)
- 설계하중 (관성력, 지진시 토압, 지진시 수압), 하중조합

② 지반의 동적 특성

- 단위중량, 전단파 속도, 동프아송비
- 비선형 변형특성(전단탄성계수, 감쇠비)

③ 동적 해석방법

- 응답변위법
- 시간이력해석법

④ 쉴드터널 내진해석방법

일반적인 터널의 내진해석과 마찬가지로 쉴드터널 역시 동적 구조검토시 응답변위법을 기본으로 한다. 지진이 발생하는 동안 쉴드터널은 주변 지반의 변위에 순응하므로, 반드시 지반-구조물 상호작용을 고려한 설계 및 해석이 수행되어야 한다.

- 횡방향 검토 : 횡방향 동적 안정성 검토는 1차원 지반응답해석에서 산정한 지반변위를 빔 스프링 모델에 적용하여 검토하는 응답변위법과 2차원 동적 연속체 수치해석(FEM, FDM)을 이용하는 방법 등이 있음. 횡방향 응답변위법 검토시 주의할 점은 지반응답해석에서 산정한 자유장 변위는 원지반의 변위가 아닌 터널에 해당하는 공동이 존재할 때의 변위 값을 적용해야 한다는 점임.
- 종방향 검토 : 종방향 동적 안정성 검토는 3차원 지반응답해석에서 산정한 지반변위를 빔 스프링 모델에 적용하여 검토하는 응답ㅊ변위법과 3차원 동적 연속체 수치해석(FEM, FDM)을 이용하는 방법 등이 있음.

표 2.7.4 세그먼트 구조해석시 필요 요소

구 분	적용 항목		필요 요소
하중	터널의 목적, 종류, 지반조건 등을 고려하여 터널에 적용이 예상되는 하중종류와 크기를 산정		토압 수압 세그먼트 자중 교통하중 폭발하중 지진하중 시공중하중(잭 추력, 뒷채움 그라우팅, 적치, 운반)
하중조합	설계조건과 해당 code 적용		콘크리트 설계 기준 등을 준수한 하중조합
구조검토	적정 해석 모델 결정	관용설계법	지반물성: 지반 반력계수 세그먼트 재료물성: 콘크리트 강도, 철근 강도 세그먼트 단면 제원: 세그먼트 두께 세그먼트 조인트 제원: 전단 및 회전 강성
		다힌지계 모델	
		2 링 빔-스프링 모델	
		연속체 모델	
	조인트	세그먼트 조인트 강도	콘크리트 강도 철근 강도 조인트 부재 강도
		조인트 종류 및 치수	조인트 종류: plane contact, concave-convex cylidrical contact, convex-convex contact, contact joint incorporating a guide rod 조인트 제원: 두께, 폭
		연결부재 종류 및 치수	볼트 연결방식: 볼트 치수 및 강성 플러그, 스터트 및 기타 연결부재: 치수 및 강성
		지수재 종류 및 치수	가스캣 지수재: 치수 및 지수성능(수압) 수팽창성 지수재: 치수 및 지수성능
		검토 하중	상시하중에 대한 지압강도 및 할렬강도 잭 추력에 대한 지압강도 및 할렬강도 수압에 대한 지수재 성능
	시공중 구조 안정성 검토	적치시 안정성	운반, 저장 시 적치 방법에 따른 세그먼트 파손 검토 백필 그라우팅 주입시 하중 이렉터 연결시 자중 및 충격하중
		뒤채움 그라우팅 압력	
		이렉터 연결부	

소결론

강연선 체결방식 쉴드터널의 구조안정성 검토를 위하여 세그먼트 라이닝의 구조해석 모델, 경계조건, 하중에 대하여 조사를 수행하고, 세그먼트 구조성능의 영향변수를 도출하였다.

(1) 세그먼트 라이닝의 구조해석을 수행하기 위해서는 먼저 수치해석 방법으로 강성일체법, 회전스프링법, 힌지법이 있다. 터널 부재의 단면력을 검토하기 위해서는 지반반력에 대한 스프링계수를 구하여 경계조건을 형성해야 한다. 하중조건은 콘크리트 구조설계기준에 준하여 잭 추력, 뒤채움 압력을 고려하여야하며, 잭 추력, 뒤채움 압력, 운반 및 취급하중, 부력 등에 대한 검토 시 별도의 하중을 고려하여야한다.

(2) 기존 문헌 및 설계기준을 검토한 결과 쉴드터널 구조성능 검토항목은 본체의 재질, 제원, 연결부, 방수설계와 하중, 해석방법, 구조모델에 따른 구조안정성 검토가 있다.

세그먼트 구조안정성 검토 시 지반조건, 하중, 재료특성 등을 하중조합에 따라 고려하여 검토를 수행하고, 내진에 대한 검토에서 횡방향 동적 안정성 검토는 응답변위법과 2차원 동적 연속체 수치해석(FEM, FDM)을 이용하는 방법 등이 있으며, 종방향 동적 안정성 검토는 3차원 지반응답해석에서 산정한 지반변위를 빔 스프링 모델에 적용하여 검토하는 응답변위법과 3차원 동적 연속체 수치해석(FEM, FDM)을 이용하는 방법 등이 있다.

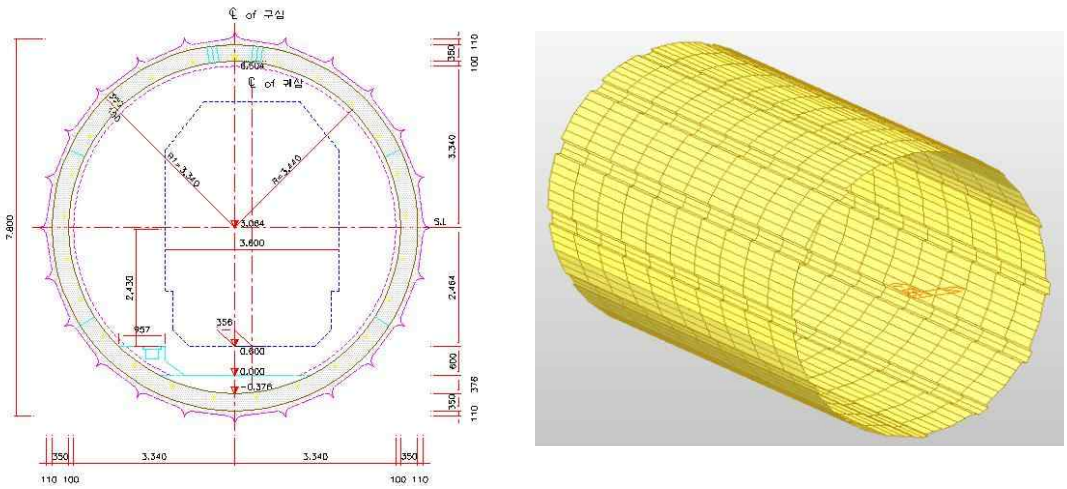
제 8 절 수치해석을 통한 강연선 쉴드터널 구조안정성 검토

1. 2D 해석

가. 검토 방법

본 연구에서 제안된 강연선 체결 쉴드 터널의 안정성 검토를 위해 구조해석 프로그램인 MIDAS-CIVIL을 이용하여 세그먼트 응력 특성 및 안정성을 분석하고 결과를 제시하였다.

터널 단면의 해석 모델은 구조 시스템 분석을 위한 해석 방식과 지반과의 상호작용을 분석을 위한 방식으로 분류되며, 본 검토는 구조물 자체의 하중에 의한 안정성 검토 이므로 구조시스템에 의한 방식을 채택하였다. 특히, 구조시스템에 의한 방식의 해석 모델에는 세그먼트를 콘트리트관처럼 생각하여 강성을 평가한 선형 구조 시스템인 완전강성 동일링 모델과 세그먼트의 이음 및 링간의 이음을 실제에 가깝게 모델링하기 위한 비선형 구조시스템인 보-스프링 모델이 있다. 보-스프링 모델은 이음의 효과에 의해 모멘트의 일부만이 구조체에 전달되어 이음부에 대한 정확한 모델링이 되지 않으면 단면력이 과소평가 되는 단점을 가지고 있으므로 본 검토에서는 구조시스템에 의한 방식 중에서도 완전강성 동일링 모델을 적용하여 해석을 수행하였다. 그림 3.8은 검토 단면 및 모델링 형상을 보여주고 있다.



(a) 해석 단면 (b) 모델링 형상

그림 2.8.1 검토 단면 및 모델링 형상(2D 해석)

① 지반물성치

지층	단위중량 (ton/㎥)	변형계수 (ton/㎡)	점 착 력 (ton/㎡)	내부마찰각 (°)	포아송비
연암층	2.5	160,000	48.0	36	0.27

② 사용재료 물성치

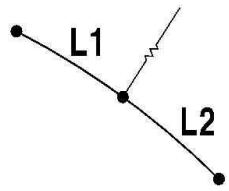
콘크리트 설계기준강도 (fck, MPa)	철근 항복강도 (fy, MPa)	철근 탄성계수 (Es, MPa)	세그먼트 단위중량 (γc, t/㎥)
45	400	2.9×10^5	2.5

③ 세그먼트 제원

내공단면	세그먼트 두께 (㎜)	굴착경 (㎜)	기준강도 (kg/㎠)
Φ7,230㎜	350㎜	Φ7,800㎜	450kg/㎠

④ 지반 스프링 계수

검토 시 지반 스프링을 터널 주변에 설치하여 모델링 하였으며 터널주변의 지반 스프링계수는 Wolfler 공식[1)]에 의해 산정하였다. Wolfler 공식은 다음과 같다



$$K_S = \frac{E}{R}\cdot L, \qquad R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

Ks : 단위접선길이당 스프링 계수
E : 주변지반의 변형계수
R : 등가라이닝 콘크리트의 반경
L1, L2 : 부재의 길이

⑤ 적용 하중

○ 자중 : 부재의 자중은 프로그램 내에서 자동 환산됨
- 무근콘크리트 : 23.5kN/m^3
- 철근콘크리트 : 25.0kN/m^3

○ 수압 : 지하수압의 경우 정수압을 고려하여 적용하였다.

○ 토압 : 암반에 대한 이완하중고를 산정 후 적용하중을 결정하였으며. 암반층(연

암층)은 수정 Terzaghi 암반분류 하중식을 적용하여 검토하였다.

○ 암반층 이완하중 산정 -이완하중 산정

암 종	Terzaghi암반분류(Rose, 1982)[2]	
	이완하중고(m)	적용하중(tf/m2)
연 암 층	12.886m	32.215tf/m2

-수정 Terzaghi 암반분류하중(Rose, 1982)[2]

암반상태	RQD	암반하중 H (ft)	적용
1. 경질의 무결암	95~100	0	
2. 경질의 층상 혹은 편상	90~99	0~0.5B	
3. 괴상, 보통정도 절 리가 발달	85~95	0~0.25B	
4. 보통정도의 블록상, 균열상	75~85	0.25B~0.20(B+Ht)	
5. 심한 블록상, 균열상	30~75	(0.20~0.60)(B+Ht)	0.40(B+Ht) : 경암층
6. 완전히 파쇄되었으나 화학적으로 신선암	3~30	(0.60~1.10)(B+Ht)	0.85(B+Ht) : 연암층
6a. 모래와 자갈	0~3	(1.10~1.40)(B+Ht)	1.25(B+Ht) : 풍화암층
7. 압착성 암반, 보통정도 심도	NA	(1.10~2.10)(B+Ht)	
8. 압착성 암반, 대심도	NA	(2.10~4.50)(B+Ht)	
9. 팽창성 암반	NA	(B+Ht)값에 관계없이 250ft까지	

○ 온도하중

- 건조수축 온도변화 하중 : 터널 횡단면상에서 건조수축 및 온도변화에 의한 영향을 고려 -15℃

- 계절별 온도변화 하중 : ±20℃

- 내외면 온도차 하중 : ±5℃

○ 하중 조합

-강도설계법[2)]

구 분	자 중	이완 하중	수압	계절별 온도하중		내외면 온도차		건조 수축	비 고
				+20℃	-20℃	+5℃	-5℃	-15℃	
Case.1	1.4								단 면 검 토
Case.2	1.2	1.6		1.2		1.2			
Case.3	1.2	1.6			1.2		1.2	1.2	
Case.4	1.2	1.2	1.2						
Case.5	1.2	1.6	1.6	1.2		1.2			
Case.6	1.2	1.6	1.6		1.2		1.2	1.2	

케이스별 하중조합에 따라 구조해석 수행 후 축력, 모멘트, 전단력에 대하여 상세 검토를 수행하였다.

나. 해석결과 및 안전성 검토

그림 2.8.2는 해석에 사용된 모델링 파일을 나타내고 있다. 해석 모델 구축 시 강연선 체결 방식을 위해 새로 고안된 전단키를 모사하였다.

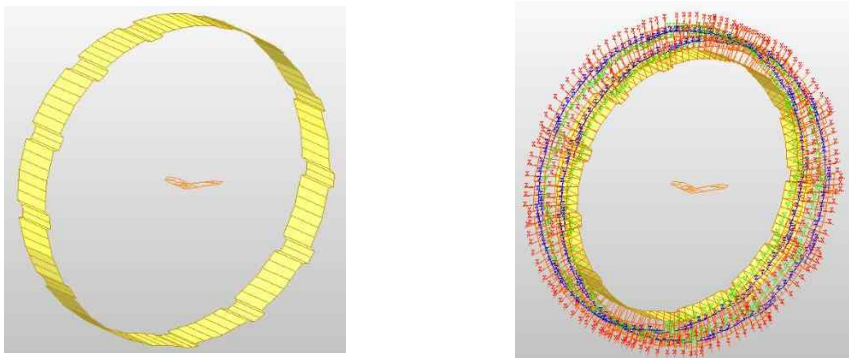
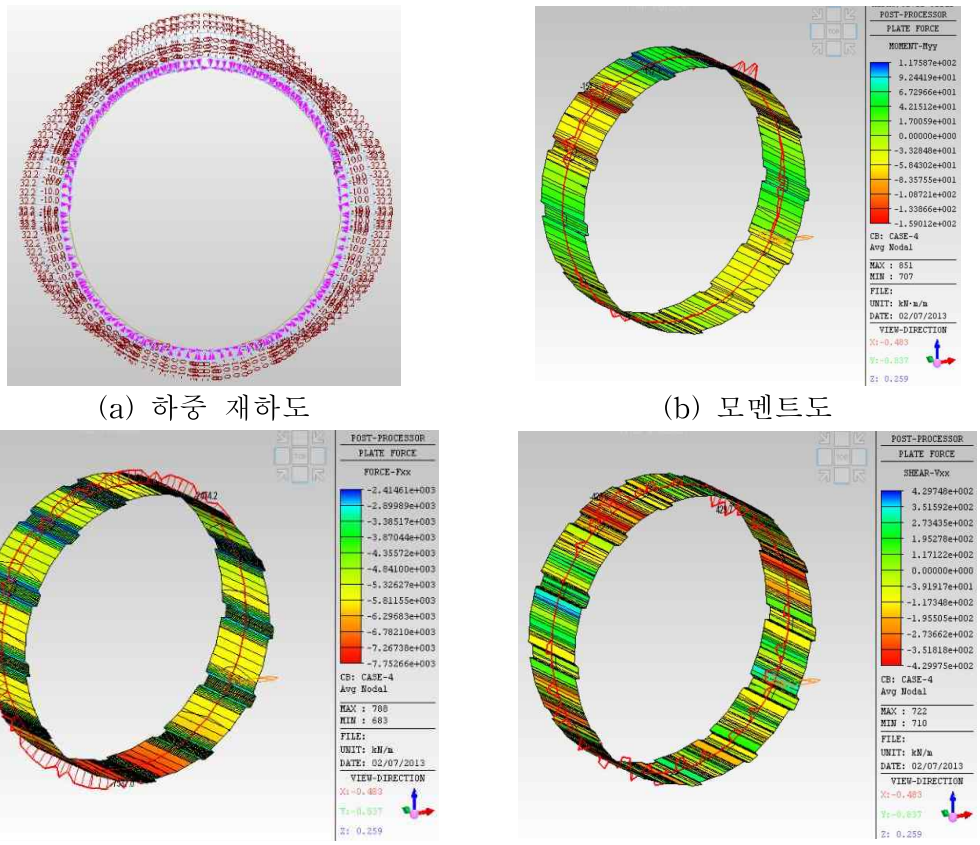


그림 2.8.2 2D 해석 모델링



(a) 하중 재하도 (b) 모멘트도

(c) 축력도 (d) 전단력도

그림 2.8.3 2D 해석 결과

해석 결과 네 가지 하중 케이스 중 가장 큰 작용력이 발생한 CASE 4 결과를 안정성 검토에 이용하였다. 그림 2.8.3은 하중 조건 CASE 6의 해석 결과를 보여주고 있다. 해석결과, 발생한 최대 모멘트는 159.012 kN·m, 축력은 7,572.660 kN, 전단력은 429.975 kN으로 나타났다.

해석 결과를 통해 나타난 발생력을 이용하여 설계된 단면에 대한 안정성 검토를 수행하였다. 강도설계법을 이용하여 수행하였으며 검토 상세는 다음과 같다.

① 검토조건

- fck = 45.0 MPa
- fy = 400.0 MPa
- Øc = 0.70
- Øv = 0.80
- α = 0.80
- 극한 모멘트, Mu = 159.012 KN·m
- 극한 축력, Pu = 7572.660 KN
- 단면의 두께, H = 350.000 mm
- 단위폭, B = 1200.000 mm
- 유효깊이, D = 295.000 mm
- 피복두께, Dc = 55.000 mm
- 작용편심, e = 20.998 mm
- 인장측 철근, Ast = 2292.000㎟ : 1단 (dc = 55mm) : H 19 @ 150 mm
- 압축측 철근, Asc = 2292.000㎟ : 1단 (dc = 55mm) : H 19 @ 150 mm

② 평형상태 검토

- c = 600/(600+fy)*d = 177.000 mm
- k1 = 0.731
- a = k1·c = 129.39 mm
- Cck = 0.85·fck·B·H = 16065000.0 N
- 소성중심, x = (Cck·H/2 + fy·Asc·dc + fy·Ast·d)/(Cck + fy·Asc + fy·Ast)
  = 175.00 mm
- 콘크리트, Cc = 0.85·fck·a·b = 5938864.0 N
- 압축철근, Cs = (fs-0.85·fck)·Asc = 829131.0 N
  (εsc > εy --> fs = fy = 400.00 MPa)
- 인장철근, Ts = fy·Ast = 916800.0 N
- 평형축력, Pb = Cc + Cs - Ts = 5851195.0 N
- 평형모멘트, Mb = Cc(x-a/2) + Cs(x-dc) + Ts(d-x) = 864607000.0 N·mm
- 평형편심, eb = Mb / Pb = 147.77 mm
  e < eb -------> **압축파괴영역**

③ 기둥 강도 검토

- e_min = 34.75 mm ≥e = 21.00 mm

편심이 최소편심보다 작으므로,

- Pn = 0.85·fck·(Ag - As) + fy·As = 17723260.0 N
- Mn = Pn · e_min = 615846900.0 N·mm
- Ø = 0.700
- α = 0.800
- αØPn = 9925.027 KN ≥ Pu = 7572.660 KN ∴**O.K**
- ØMn = 344.874 KN·m ≥ Mu = 159.012 KN·m ∴**O.K**

④ 전단력 검토

- 작용전단력 Vu = 429.975 KN
- ØVc =Øv·1/6·(1+Pu/(14·Ag))·√(fck)·B·D/1000 = 724.401 KN
- Øv·Vc = 724.401 KN > Vu ∴**전단철근 필요없음**.

검토 결과 모멘트, 축력, 전단력 모두 안전한 것으로 확인되었으며, 설계값과 비교해 보았을 때, 모멘트는 216%, 축력은 131%, 전단력은 168%의 충분한 여용률을 가지고 있는 것으로 나타났다.

2. 3D 해석

터널 설계의 초기 단계는 터널 주변 지반의 이완 영역을 가정하여 터널에 가해지는 하중의 개념으로 설계하거나 또는 기존 시공사례를 통하여 암질, 지질 구조, 절리계, 지하수량 등으로 분류한 경험 통계적 방법으로 터널을 설계하였으나 최근에는 복잡한 지반 공학적 문제를 단시간내 수치적으로 해석할 수 있는 수치해석에 의한 터널 설계가 보편화되고 있으며, 그 중에서 지반을 연속체 개념으로 가정한 유한요소법(Finite Element Method)에 의한 해석이 가장 많이 적용되고 있다

가. 시공단계 고려 안정성 검토

강연선 체결 쉴드터널 적용시 지반 거동 및 구조물의 안정성 검토를 목적으로, 범용유한요소해석 프로그램인 MIDAS GTS를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 일반적으로 지반 공학에 넓게 사용되는 파괴 기준인 Mohr-Coulomb 모델을 사용하여, 탄소성 해석을 수행하였으며, 지반 및 세그먼트는 솔리드 요소로 형성하였다. 특히, 해석 경계조건으로 좌우 및 하부를 구속하였고 측압계수는 1.0을 적용하였다. 또한, 터널 굴착전 상태에서의 지반변위는 0으로 하고 굴착에 따라 발생하는 지반의 변위를 예측하는 것이 실제 현장과 유사한 조건이므로 변위를 초기화시킨 다음 굴착하도록 하였으며, 각 조건별 시공순서를 고려하여 지반변형에 대한 해석을 수행하였다.

본 해석단면의 지층구분선 및 지반특성치는 예비시추 및 타 기관 시추자료를 토대로 종합적으로 분석하여 적용하였으며, 격자 형성 시 요소의 분할수 및 크기로 인한 영향을 최소화하기 위하여 구조물 주변 영역의 요소망은 충분히 작게하고 주변경계 영역은 요소망을 점점 크게 모델링하였다. 해석영역의 지반형상 및 지층조건은 실제 지반형상을 고려하여 모델링하였으며, 터널 및 지중구조물의 시공조건에 따라 실제 단계별로 시공단계해석을 실시하였다.

그림 2.8.4는 해석에 사용된 단면과 해석 형상을 보여주고 있다. 총 34번의 시공단계를 모사하여 해석을 수행하였으며, 표 2.8.1은 시공순서에 따른 단계별 해석 과정을 나타내고 있다.

해석이 수행된 지반은 연암층으로, 단위중량 2.5ton/㎥ 탄성계수 160,000ton/㎥ 점착력 48.0 ton/㎡, 내부마찰각 36°, 포아송비 0.27의 값을 각각 해석에 적용하였다. 콘크리트의 설계 기준 강도는 45MPa값을 사용하였으며, 철근의 항복강도는 400MPa, 세그먼트의 단위중량은 2.5ton/㎥를 적용하였다. 세그먼트의 내공 단면 및 세그먼트

두께는 7,230mm, 350mm를 각각 적용하였으며, 터널의 굴착경은 7,800mm을 적용하였다.

그림 2.8.5는 해석이 수행된 지반 및 세그먼트의 해석 형상을 보여주고 있고, 그림 2.8.6은 최종 단계의 수평변위 값을 나타내며, 그림 2.8.7은 최종 단계에서의 연직변위 값을 나타내고 있다.

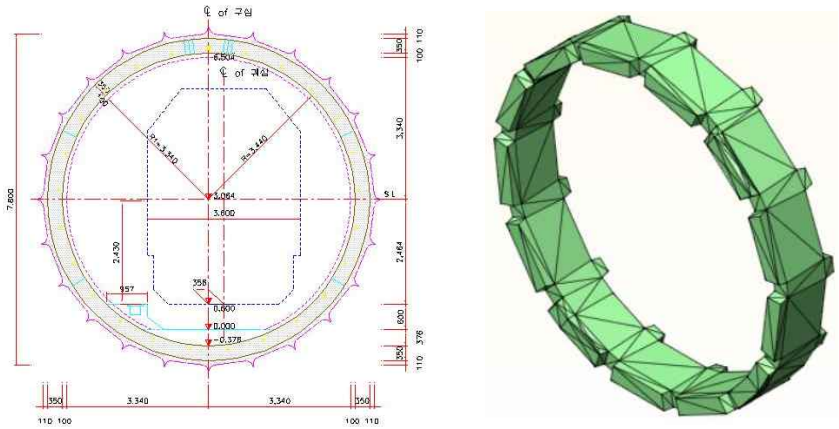
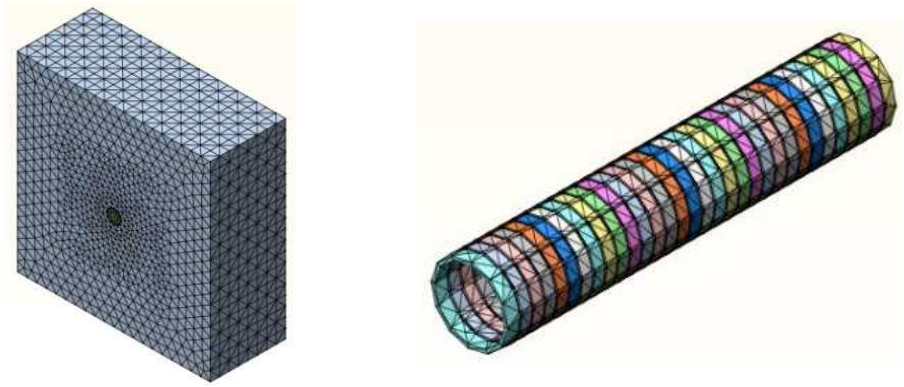


그림 2.8.4 해석 단면 및 모델링

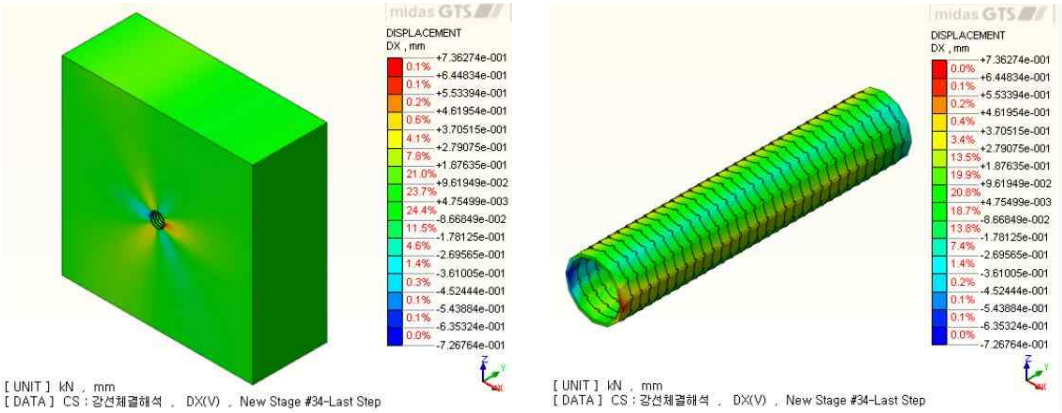
표 2.8.1 시공순서에 따른 단계별 해석과정

구 분	STEP	해 석 과 정
세그먼트 안정해석	1	지반 모델링 및 초기화(원지반 응력상태 재현)
	2	1.2m 터널굴착
	3~33	세그먼트 설치 후 1.2m 터널굴착(반복)
	34	세그먼트 설치(시공완료)



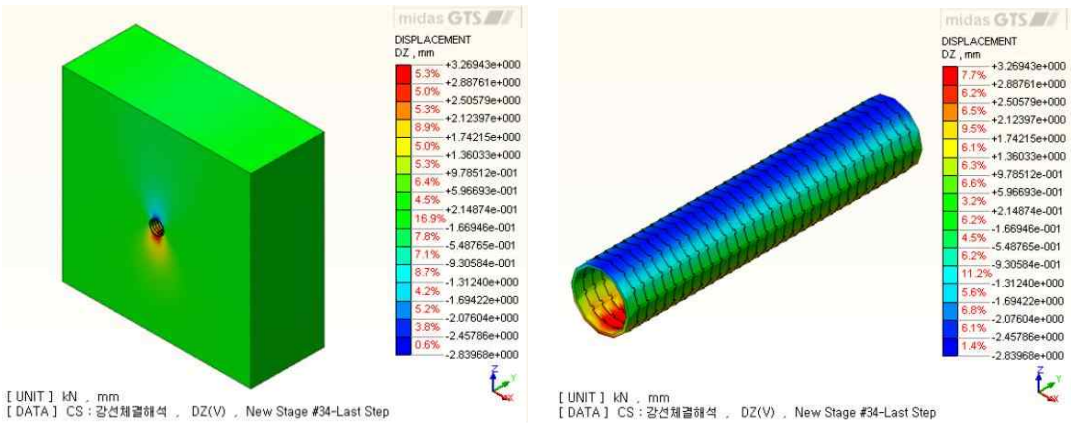
(a)지반 (b)세그먼트

그림 2.8.5 해석 모델링



(a)지반 (b)세그먼트

그림 2.8.6 수평변위(최종단계)

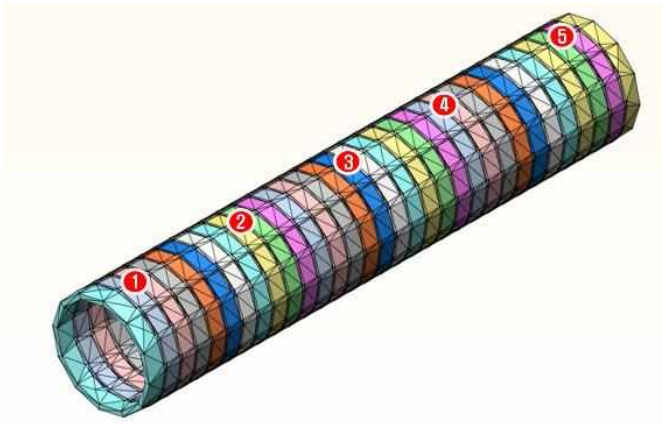


(a)지반 (b)세그먼트

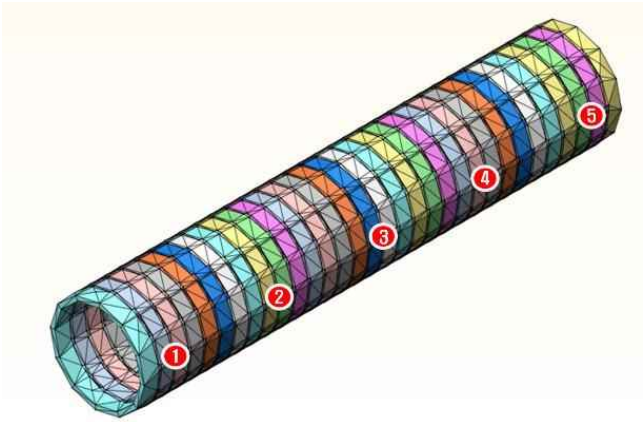
그림 2.8.7 연직변위(최종단계)

그림 2.8.8은 해석 결과의 측정 위치를 나타내고 있으며, 그림 2.8.9와 그림 2.8.10은 각 측정 위치에서의 연직 및 수평변위 결과를 나타낸 것이다.

총 5개 지점에서의 연직 및 수평변위량 측정결과 시공단계 중 굴착단계에서 변위가 크게 발생 하였으며, 이후 일정한 값으로 수렴하는 것으로 나타났다. 터널 굴착에 따른 세그먼트 안정성을 확인하기 위하여 3차원 유한요소 해석을 수행한 결과 연직변위량은 최대 2.70mm가 발생되었으며, 이는 허용침하량(5mm) 이내로 터널의 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 최대 수평변위량 역시 0.24mm로 허용침하량(5mm) 이내로 안정성기준 이내로 나타났다.



(a) 연직변위량 측정위치



(b) 수평변위량 측정 위치

그림 2.8.8 해석결과 측정 위치

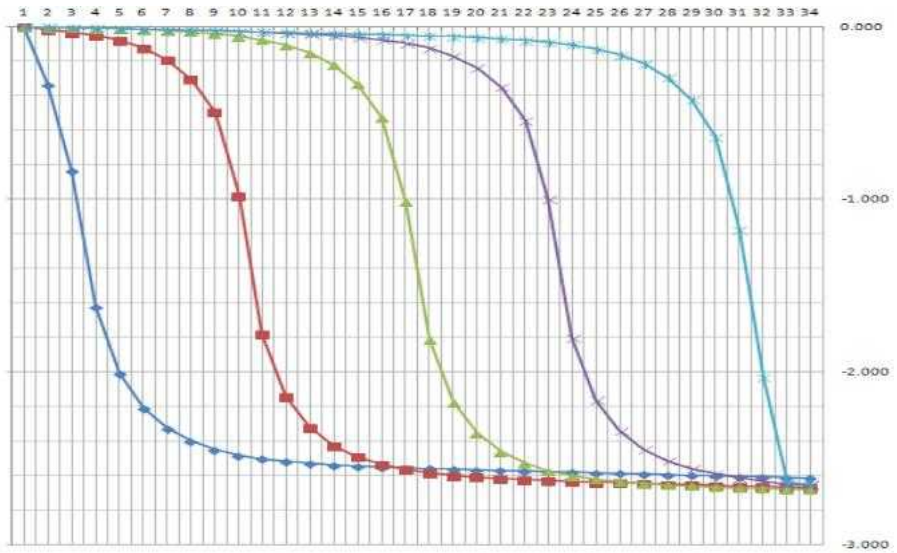


그림 2.8.9 시공단계별 연직변위 해석결과

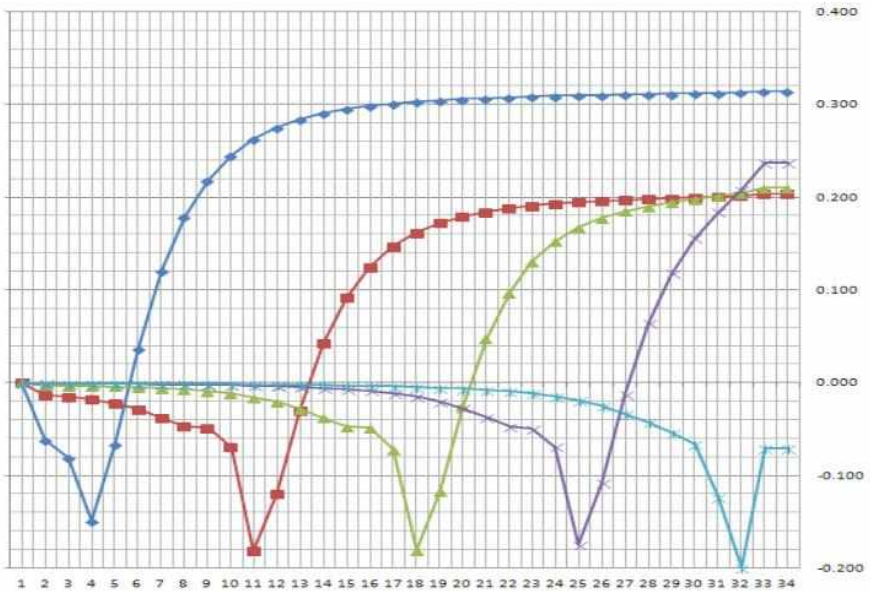


그림 2.8.10 시공단계별 수평변위 해석결과

나. 시간이력 해석을 통한 내진성능 평가

최근 각지에서 발생한 진도 6.0 이상의 대규모 지진은 수많은 인명과 경제적인 피해를 가져오고 있다. 국내에서는 연평균 17회 이상의 지진이 발생하며 피해발생 우려가 있는 규모 5.0이상의 지진은 8~10년에 1회 빈도로 발생하였다. 표 2.8.2는 1995년 이후에 국내에 발생한 규모 4.0이상의 지진을 정리한 것이다.

표 2.8.2 국내 주요 지진 발생 내용(1995년 이후)

일 시	진 앙 지	규모
1997.6.26	경주 남동쪽 9km 해역	4.2
1999.1.11	속초 북동쪽 15km 해역	4.2
2001.11.24	울진 남동쪽 50km 해역	4.1
2002.8.10	흑산도북서쪽 195km 해역	4.0
2003.3.23	홍도 북서쪽 약 50km 해역	4.9
2003.3.30	백령도 남서쪽 약 80km 해역	5.0
2003.6.9	군산 서쪽 약 280km 해역	4.0
2004.5.29	울진 동쪽 약 80km 해역	5.2
2008.5.30	제주시 서쪽 약 78km 해역	4.2

(1) 내진설계 개요

내진설계는 지진과 같은 동적하중이 가해질 경우 지반-구조물에 발생하는 응력과 변형거동을 해석이론을 통하여 분석하고 이들이 지반-구조물의 강도(특히 전단강도)와 허용변위보다 작도록 구조물의 제원과 형식을 결정하는 과정이다. 지진으로 인한 구조물의 피해정도를 최소화할 수 있도록 대상구간의 중요도와 지역현황을 고려하여 내진설계수준 및 목표를 선정하여야 한다.

내진해석방법은 유사정적해석법, 응답변위법, 동적해석법으로 크게 구분되며, 구조물의 중요도 및 거동 등을 세심하게 고려하여 해석방법을 채택한다. 일반적인 정적해석과 내진설계를 위한 동적해석은 크게 하중의 적용방법, 변형의 크기에 부합하는 지반의 강도정수 산정, 해석대상의 경계조건설정 등에 차이가 있으며 합리적인 설계를 위해서는 이러한 차이점들을 설계형식에 부합하도록 반영해야 한다. 또한, 대표 구조물에 대한 내진 검토결과, 허용 안전율에 미달하거나 과대한 변위가 발생되는 경우에는 합리적인 보강공법을 적용해야 한다. 그림 2.8.11은 내진설계 프로세스를 나타낸 것이다.

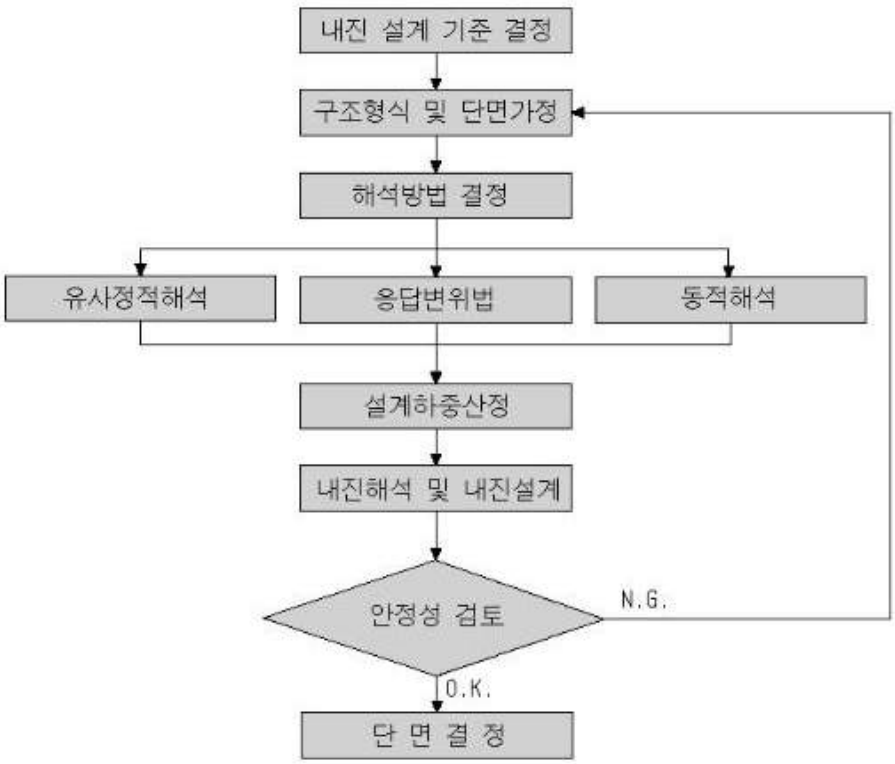


그림 2.8.11 내진설계 프로세스

구조물 설계시 지진의 발생빈도와 지반운동의 세기, 구조물의 중요도 등에 따라 요구되는 내진성능을 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 구분하여 만족시키도록 규정하고 있으며, 표 2.8.3은 시설물에 따른 내진 등급을 나타낸 것이고, 표 2.8.4는 내진 성능 목표를 나타낸 것이다.

시설물에 따라 설계성능수준은 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 나눌 수 있으며 기능수행수준이란, 구조물에 심각한 구조적 손상이 발생하지 않고 지진시나 지진경과 후에도 구조물의 기능은 정상적으로 유지될 수 있는 성능수준을 말하며, 붕괴방지수준은 구조물에 제한적인 구조적 피해는 발생하나 긴급보수를 통해 단시간에 구조물로서의 기능이 발휘될 수 있는 수준을 의미한다.

표 2.8.3 내진등급[2)]

구 분	시 설 물
내진 특등급	· 파괴시 큰 재난이 초래될 수 있는 시설물 · 기능이 마비될 경우 사회적으로 큰 영향을 줄 수 있는 시설물
내진 Ⅰ등급	· 사회 국가적으로 중요한 시설물
내진 Ⅱ등급	· 일반 시설물

표 2.8.4 내진 성능 목표[2)]

재현주기 / 성능수준	50년	100년	200년	500년	1,000년	2,400년
기능수행수준	Ⅱ등급	Ⅰ등급	특등급	-	-	-
붕괴방지수준	-	-	-	Ⅱ등급	Ⅰ등급	특등급

표 2.8.5 지진구역계수[2)]

지진구역	행 정 구 역		지진구역계수
Ⅰ	시	서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 울산, 광주	0.11
	도	경기도, 강원도남부, 충청남도, 충청북도, 경상도, 전라도, 전남북동부	
Ⅱ	시	강원도북부, 전남남서부, 제주	0.07

표 2.8.6 위험도 계수[2)]

재현주기	50년	100년	200년	500년	1000년	2,400년
위험도계수	0.4	0.57	0.73	1.0	1.4	2.0

설계지진계수는 최대지반가속도라고도 하며, 지진발생지역을 분류하여 지역에 따른 적용 가속도값인 지진구역계수 결정한다. 내진성능목표에 따라 지진의 재현주기에 따른 유효최대지반가속도를 의미하는 위험도계수 결정하고 지진구역계수와 위험도계수를 곱하여 기반암(보통암)에서의 최대지반가속도를 산출한다. 표 2.8.5는 지진구역계수를 나타낸 것이고, 표 2.8.6은 위험도 계수를 나타낸 것이다.

(2) 해석 수행

쉴드터널의 경우 지반구조물의 특성상 지진시 지반내부의 변위, 변형 등이 중요한 요소이므로 지진파의 작용에 따른 굴착면의 변위 양상을 검토해야 한다. 지진하중은 내진설계 기준에 따른 지반분류 결과 및 도로교 시방서에 따른 설계용 스펙트럼을 사용하여 지진응답스펙트럼을 산정하게 되며 장주기파, 단주기파와 인공지진파의 가속도 시간이력곡선을 입력 데이터로 사용하여 시간이력 동적해석을 수행한다.

내진설계기준은 1등급 붕괴방지수준이며, 과업구간은 지진구역 Ⅰ구역에 해당되므로 본 설계적용 지반운동수준은 재현주기 1000년, 구역 가속도 0.11g, 위험도 계수 1.4를 고려하면 0.154g이다.

지반의 동적 물성치의 경우 현장시험(DHT, SPS검층) 및 실내시험(공진주시험)결과에 따라 산정된다. 또한, 내진해석시 설계 지반 운동수준 및 표준 응답 스펙트럼에 부합하는 입력지진파를 결정해야 하며 입력지진파의 주기특성에 따른 지반 및 구조물계의 반응특성을 파악하기 위하여 실지진파 중 장주기파(Hachinohe파) 및 단주기파(Ofunato파)를 설계지반 최대가속도 0.154g에 따라 조정하여 적용해야 한다. 설계응답스펙트럼에 부합하는 인공지진파 생성에는 SIMQKE가 사용되며 실지진파와 함께 입력지진파로 활용된다.[2)]

그림 2.8.12는 해석에 사용된 Hachinohe 지진파의 가속도-시간 이력을 나타낸 것이고, 그림 2.8.13은 Ofunato 지진파의 가속도-시간 이력을 나타낸 것이다.

해석에는 MADIS/GTS를 사용하였고 해석에 적용한 모델은 탄성 모델이다. 그림 2.8.14는 경계조건 개요도를 나타낸 것이며, 그림 2.8.15는 감쇠비 5%의 표준응답스펙트럼을 나타낸 것이다.

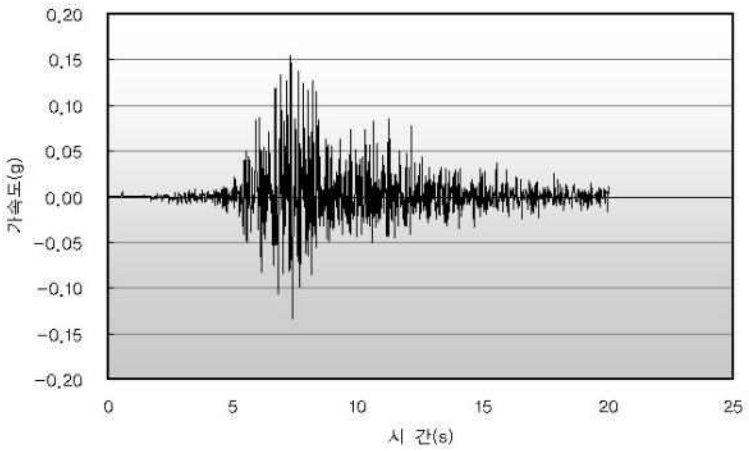


그림 2.8.12 Hachinohe 지진파의 가속도-시간 이력[2)]

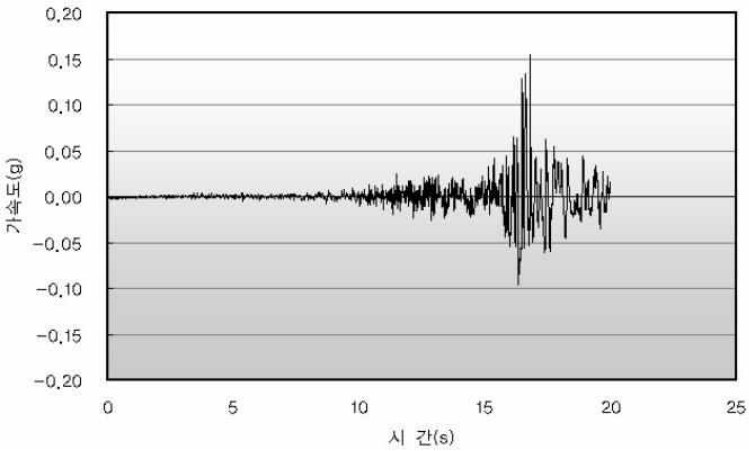


그림 2.8.13 Ofunato 지진파의 가속도-시간 이력[2)]

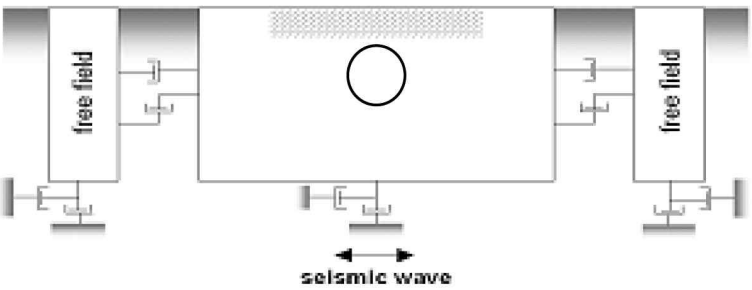


그림 2.8.14 내진해석 경계조건 개요도

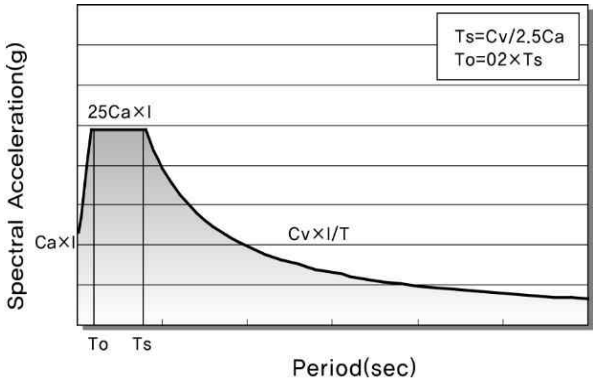


그림 2.8.15 표준응답스펙트럼

내진해석에 사용한 수치해석 요소망은 앞서 수행한 3D 안정성 해석과 동일한 것을 사용하였다. 입력 특성치의 경우 탄성경계를 사용하여 지점조건을 정의하며 Spring상수는 도로설계기준(하부구조편)[3]의 지반반력계수에 따라 산정하며 유한요소망 좌·우측 및 바닥은 점성경계를 적용하여 지진파 반사효과를 최소화하였다. 또한 동적해석에 사용되는 입력지진파는 지진응답해석을 통해 기반암으로부터 지표면으로 전달되는 지진파를 적용하였으며, 동적해석 시 요소수의 차이로 인한 이산화를 최소화하기 위하여 터널 및 터널주변 영역의 간격을 조정하였다.

(3) 해석 결과

그림 2.8.16은 세그먼트 천단부의 변위 이력곡선을 나타낸 것이며, 그림 2.8.17은 세그먼트 내공 변위이력곡선을 나타낸 것이다. 이것을 지진파의 종류에 따라 나타내면 표 2.8.7과 같다. 또한, 표 2.8.8은 세그먼트 부재력의 검토 결과를 나타낸 것이다.

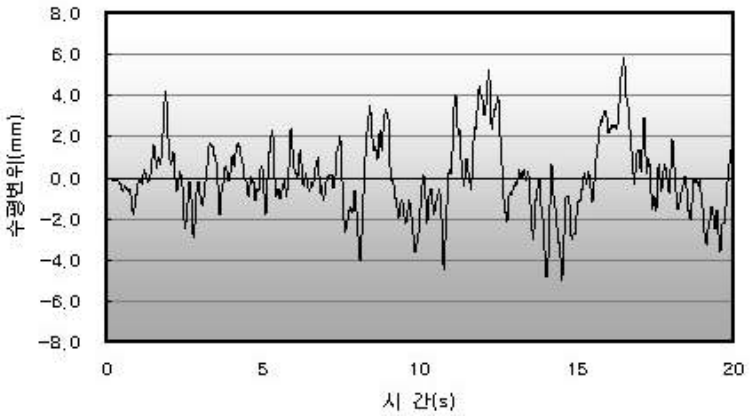


그림 2.8.16. 세그먼트 천단부 변위이력곡선

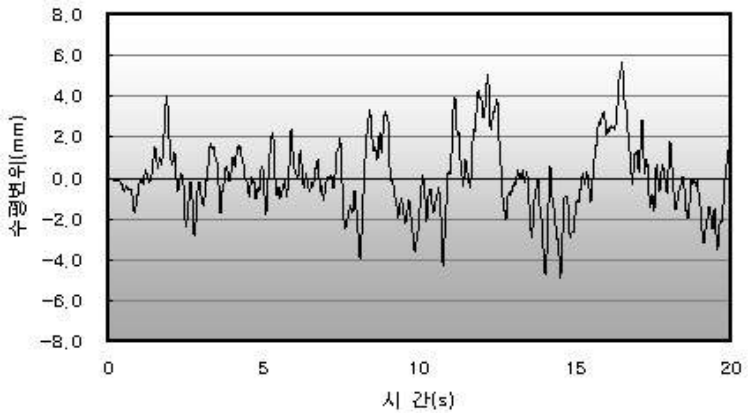


그림 2.8.17 세그먼트 내공 변위이력곡선

표 2.8.7 지진파 종류에 따른 터널 변위

구 분	터널천단변위(mm)	내공변위(mm)
장주기파	1.860	1.812
단주기파	3.577	3.467
인공지진파	5.797	5.653

표 2.8.8 세그먼트 부재력 검토 결과

구 분	휨압축응력(MPa)	전단응력(MPa)	검토결과
장주기파	0.0188 < 223.4	0.0323 < 31.35	O. K
단주기파	0.0336 < 223.4	0.0499 < 31.35	O. K
인공지진파	0.0378 < 223.4	0.0680 < 31.35	O. K

강연선 체결 쉴드터널의 내진에 대한 안정성 검토 결과 해석구간에서의 터널 천단 최대 발생 수평변위량은 5.797mm로 인공지진파 적용시 나타났으며, 터널 벽체 최대 수평변위량은 5.653mm로 변위량은 극히 미소하여 터널의 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

또한, 해석구간의 세그먼트 응력검토 결과, 최대 작용 휨압축응력은 0.0378MPa로 최대 허용 휨압축응력 223.4MPa를 충분히 만족하는 범위로 나타났으며, 최대 작용 전단응력은 0.0680MPa로 최대 허용 전단응력 31.35MPa을 만족하는 것으로 나타나 세그먼트의 구조적 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

소결론

본 연구에서 개발된 강연선 체결방식의 쉴드터널에 대하여 시공단계를 고려한 구조 안정성검토 및 내진시의 안정성에 대한 검토를 수행하였다.

(1) 검토조건은 수압, 자중, 토압, 지반하중에 대하여 구조물설계기준에 준하여 검토를 수행하였으며, 이완하중을 산정하여 외경 7.8m, 내경 7.1m, 두께 0.35m인 지하철 쉴드터널 단면에 대하여 2D 수치해석 결과 발생한 최대 모멘트는 159.012 kN·m, 축력은 7,572.660 kN, 전단력은 429.975 kN으로서, 배근 계획된 철근에 대하여 모두 안정한 것으로 검토되었다.

(2) 3차원 유한요소법을 이용하여 굴진장 1.2m씩 총 34단계의 시공단계를 고려하여 구조해석을 수행하였으며, 변위가 많이 발생했을 것으로 추정되는 구간에 대하여 천단부에서 연직변위, 측벽에서 수평변위에 대한 검토 결과 최대 연직변위량 2.7mm, 최대 수평변위량 0.24mm로 모두 허용침하량 5mm 이내로 안정한 것으로 검토되었다.

(3) 장주기파와 단주기파, 인공지진파에 대한 내진 안정성의 검토를 수행한 결과, 인공지진파 적용 시 천단부에서 최대 수평변위량은 5.797mm, 측벽부에서 5.653mm로 허용변위 이내로 안정한 것으로 검토되었다. 또한 세그먼트 응력검토 결과, 최대 작용휨압축응력은 허용 최대휨압축응력인 223.4MPa이내인 0.0378 MPa, 최대작용 전단응력은 0.0680MPa 으로 허용전단응력인 31.35 MPa이내로서 세그먼트의 구조적 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

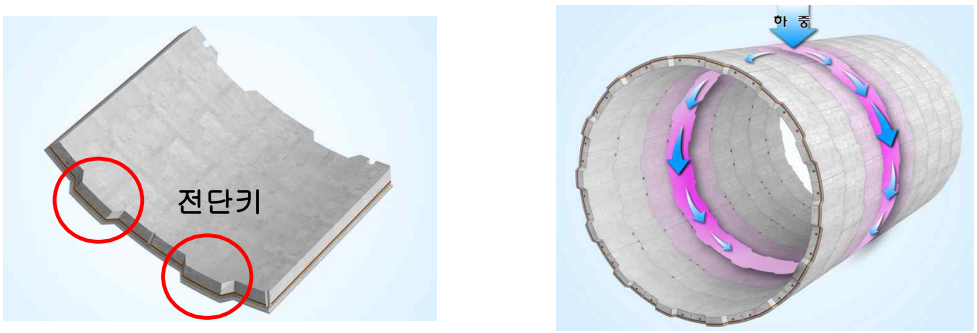
제 9 절 아일랜드형 전단키 세그먼트 개발

1. 강연선 체결방식의 전단 및 회전 저항력 확보

가. 전단키 설치

기존의 쉴드터널에서는 터널에 작용하는 하중에 대한 전단 저항을 연결 볼트가 담당하였으나, 본 연구에서 개발한 체결 방식은 링방향 연결 시 볼트부재를 사용하지 않고 강선으로 체결을 하는데, 이 때 강선은 전단부재가 아니므로 별도의 방안이 필요하다.

본 연구에서는 강선체결방식의 전단력에 대한 문제 해결을 위해 세그먼트의 횡방향에 전단키가 형성되어 있으며, 상부 하중 및 측면 하중 발생 시 전단키를 통해 응력을 분배하는 메커니즘을 가지고 있다. 그림 2.9.1은 새로 고안된 전단키와 전단키를 통한 응력분배 효과를 나타내고 있다.[1)]



(a) 세그먼트 전단키 (b) 전단키를 통한 응력 분배 매커니즘

그림 2.9.1 전단키를 이용한 세그먼트 전단강성 증대

전단키의 경우 돌출 방향이 외부에서 발생하는 하중과 직각 방향으로 형성되어 있으므로 향후 연구에서 하중에 대한 직접적인 전단이나 휨저항 역할에 대해서는 추가적인 검증과정이 필요하다. 본 연구에서 개발된 전단키를 통해 조립의 정밀도 향상과 세그먼트 Ring간의 상대적 변위 제어 역할을 할 것으로 판단되며, 향후 연구에서 모형실험과 수치해석을 통한 역학적인 거동 분석 수행을 계획하고 있다.

현재 일반적인 세그먼트 구조 해석시, 세그먼트 Ring 이음부의 전단스프링계수(ks)는 이음부의 체결재료 및 방식, 요철, 종방향 압축력이 고려된 마찰저항 등 여러

가지 요소와 관련이 있으며 해외설계 적용사례에 근거하여 관용적으로 40MN/m 정도를 사용하고 있다. 세그먼트 Ring간의 종방향 이음 역시 연결재료에 대한 요소가 저항에 있어 많은 부분을 차지할 것으로 사료되며[2] 본 과제의 강선 체결 세그먼트는 연결재료가 연성의 강선이므로, 이에 대한 검토와 함께 강선에 도입된 인장력으로 세그먼트 Ring간의 마찰저항이 향상되는 현상에 대해 여러 가지 검증 결과를 통해 적절한 전단스프링계수를 산정할 계획이다.

나. 경험식을 통한 전단키 세그먼트의 전단 저항력 검토

그림 2.9.2는 본 연구에서 고안된 전단키의 설계도면을 나타내고 있다. 본 연구에서 수행하는 전단키에 대한 검토는 아직 초기 단계이며, 수치해석과 현장 실험 등의 상세 연구에 앞서 전단키에 대한 세그먼트 전단 저항력 검토를 수행하고, 곡볼트의 사례와 비교 분석을 수행하였다.

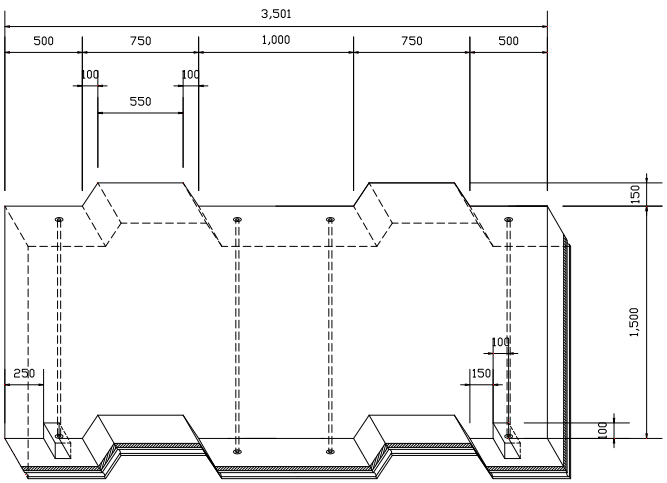


그림 2.9.2 세그먼트 설계 도면

전단키에 대한 전단력 산정 내용은 다음과 같다.[3]

- 가정

- 세그먼트 두께 : 30cm
- 전단키 길이 : 75cm
- 강도 : 45MPa
- 강연선은 전단저항력은 있을 것이나 기본적으로 전단저항 부재가 아니므로 검토에서 제외

- 수직스터럽의 경우 철근 H13 1가닥 가정.

• 전단저항력검토

- 콘크리트 전단 저항력: $V_c = \frac{1}{6}\sqrt{f_{ck}}\, b_w d = \frac{1}{6}\sqrt{45} \cdot (0.75 \times 0.25) = 209.63kN$

- 수직스터럽 전단저항력:

$$V_S = \frac{A_v f_y d}{s} = \frac{(2 \times 0.00013273) \times (400MPa) \times (0.25)}{0.15} = 176.97kN$$

- 전단키 전단저항력:

$$\phi V = \phi V_c + \phi V_s = 0.8 \times 209.63 + 0.8 \times 176.97 = 309.28kN$$

경험식을 통한 전단키의 전단저항력과 곡볼트의 전단 저항력을 비교한 결과 세그먼트 전단키를 활용한 강선 체결 시스템의 경우 허용 전단력은 309.28kN으로, 기존 곡볼트식 체결 시스템에 대비 비슷한 수준 혹은 그 이상의 전단저항력을 확보 할 수 있는 것으로 나타났다. 고장력 볼트와 세그먼트 전단키에 대한 전단저항력 계산 결과는 다음과 같다.

• 고장력 볼트 전단저항력

볼트 종류	허용 장기전단 응력(MPa)	단면적(cm2)	허용 축력(kN)	허용 전단력(kN)
F10T M24	150	4.52	140.12	67.8

• 세그먼트 전단키 전단 저항력

전단키 크기	단면적(m2)	세그먼트 강도(MPa)	콘크리트 전단 저항력(kN)	전단철근 전단 저항력(kN)	허용 전단력 (kN)
30×75cm	0.225	45	209.63	176.97	309.28

2. 아일랜드형 전단키(Island type)

가. 세그먼트 형상 도출

기존 볼트체결을 통한 연결법은 연결부가 단순히 볼트연결로만 지지되므로 전단저항 성능이 좋지 않으며, 볼트 체결시 부재간 밀착이 확실하지 않아 라이닝의 성능이 저하될 우려가 있다.

강선체결 방법을 이용한 세그먼트 접합 시에는 세그먼트에 전단키를 설치하여 전단성능을 향상시키고, 강선 긴장력 도입으로 체결력을 향상시켰다. 체결용 강선 정착과 강선삽입을 위한 Block out은 부재 규모를 고려하여 최소화 하였다.

(1) 부재 두께

전력구 터널을 기준으로 세그먼트 단면에서 20mm폭의 방수재 1열, 저면폭 150mm의 전단키, 5×5규격의 모따기 적용 등을 고려하여 부재 두께를 가정하였다.

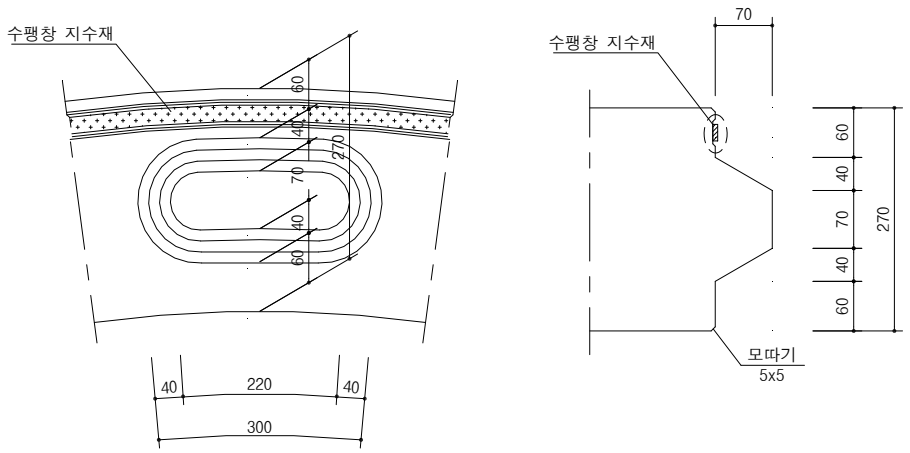


그림 2.9.3 세그먼트 부재 구성

(2) 블록아웃(Block out)

세그먼트 강선체결을 위해서 세그먼트 내부에 강선을 삽입하고 정착구를 설치 후 긴장력을 도입하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 갱구측에서 강선을 삽입하고, 상대적으로 Jacking 작업공간 확보가 용이한 막장측에서 강연선 긴장작업을 시행하는

것으로 계획하였다. 블록아웃은 긴장재의 삽입 및 정착구 설치를 위하여 필요한 공간으로 부재의 연속성이 단절될 수 있으며, 철근배근 등의 어려움이 있으므로 최소화하는 것이 바람직하다.

긴장재는 세그먼트 체결을 위하여 설치되므로 일반적인 텐던과 같이 큰 프리스트레스를 도입할 필요는 없다. 따라서 0.5"(SWPC 7A)규격의 긴장재 1가닥을 설치하는 것으로 하고 긴장력 도입시 편심에 의한 인장이 발생하여 부재사이가 벌어지지 않는 위치(전단면 압축응력이 도입될 수 있는 위치)를 선정하였다.

① 적용 긴장력[3)]

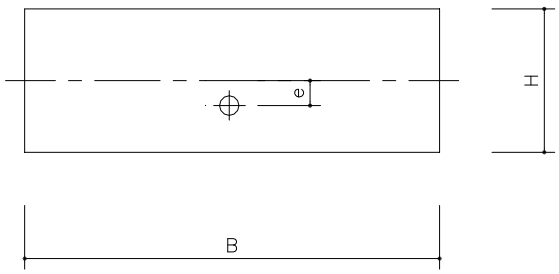
긴장재 단면적 : 0.5" - 1가닥, A= 98.71mm2

긴장력 : fpu (1900MPa)의 80%로 Jacking력을 도입하고, fpj(1900Mpa × 80%)의 80%로 유효프리스트레싱력으로 가정함.

Pe = 1900MPa × 0.80 × 0.80 × 98.71mm2 = 120031(N)

도입 긴장력은 120kN으로 적용

② 편심량 결정



B=1,000mm
H = 270mm
y = 270/2 = 135mm
I = 1640250000mm^4
Pe = 120kN
e : 편심량

상단에 인장응력이 생기지 않는 편심량(e)을 산정한다.

상연응력 $f_t = -\frac{P_e}{A} + \frac{P_e \cdot e}{I} y$ 이므로 상연응력이 0일 때 e를 산정

$$0 = -\frac{120 \times 1000}{1000 \times 270} + \frac{120 \times 1000 \times e}{1640250000} \times 135$$

e = 45mm

긴장력에 의하여 부재의 단면에 인장응력이 발생하지 않는 최대 편심은 45mm로 산정되었다. 따라서 부재중심에서 아래쪽으로 45mm 위치에 텐던을 배치하여 블록아웃의 크기를 축소시키고, 부재간의 밀착효과가 저하되지 않도록 하였다.

③ 블록아웃 형상 검토

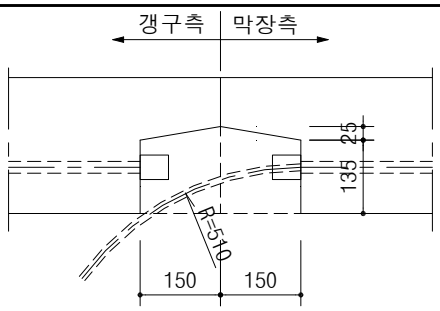
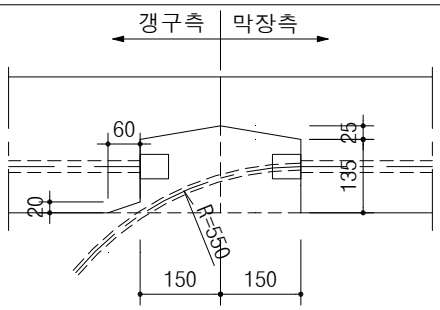
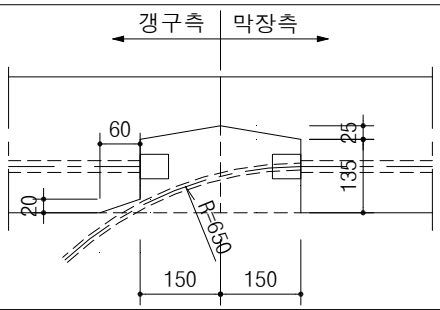
블록아웃은 긴장재의 삽입시 작업공간이며, 긴장 후 정착구가 설치되는 공간으로서 작업이 가능한 범위내에서 최소의 크기가 되도록 하였다. 이때 작업가능한 범위는 긴장재의 단면내 위치와 구부림 반경을 고려하여 결정하였다.

강연선 체결방식에 적용되는 긴장재는 φ=0.5”(12.7mm)이며, 블록아웃 위치에서는 쉬스관이 배치되지 않으므로 강재의 최소 곡률반경은 PS강재 직경의 40배로 하였다.

Rmin = 12.7 × 40 = 508(mm)

실제 긴장재를 이용하여 인력으로 구부릴 수 있는 곡선반경을 검토한 결과 곡선반경 500mm이하로 작업이 가능하여 최소곡선반경 510mm이하인 경우부터 550mm, 650mm인 경우에 대하여 블록아웃의 크기를 검토하였다.

표 2.9.1 블록아웃 검토 형상

긴장재의 곡선반경	블록아웃 형상	비고
R=510mm		•최소의 곡선반경 적용으로 여유값 없음. •블록아웃만으로 삽입 가능
R=550mm		•곡선반경에 최소의 여유 •갱구측 Seg에 20×60의 V-Cut적용
R=650mm		•곡선반경에 여유 •갱구측 Seg에 25×75의 V-Cut적용

긴장재의 곡선반경이 550mm 이상일 경우 세그먼트 개소당 150mm이상의 공간이 필요한 것으로 검토되었다. 블록아웃 종방향 크기를 150mm로 고정시킨다면 별도의 V컷 형상을 적용하여야 긴장재 삽입이 가능하였다. 따라서 블록아웃의 형상을 단순화하면서도 크기를 최소화할 수 있도록 긴장재의 곡선반경은 510mm를 적용하고, 첫 번째 형상의 블록아웃을 적용하는 것으로 하였다.

(3) 전단키 규격

전단키는 막장측에 凹자 형상과 갱구측에 凸자 형상을 각 세그먼트의 종방향에 설치하게 된다. 순차적인 프리캐스트 부재 설치시 세그먼트간 접합 작업 효율을 향상시키며, 지반 절리 등 불균등한 하중 발생시 전단키간 맞물림 효과로 전단성능을 발휘할 수 있게 하였다. 전단키의 형상은 부재두께 일부에 凹凸형상을 도입하는 방법을 검토하였다. 그림 2.9.4는 아일랜드형(Island type) 전단키의 검토 도면을 나타낸 것이다.

(4) 전단성능 비교

아일랜드형 전단키와 기존 볼트 체결방식에 대해 전단성능을 비교 검토하였다. 일반적으로 쉴드터널 라이닝이 직접적인 전단력에 저항하는 경우는 없으나, 지반의 절리 등으로 인하여 전체 단면에 대하여 연직방향의 힘이 작용할 경우를 가정하여 각각의 연결방법에 의하여 전단성능을 비교하였다.[3)]

터널 진행방향에 대하여 직각방향으로 작용하는 힘이 라이닝 단면 전체에 작용하는 것으로 가정하므로 각각의 전단키 하나 또는 볼트 하나의 전단성능은 의미가 없으며 가정단면에 설치된 전체 전단키 또는 볼트가 함께 저항하는 것으로 검토하였다.

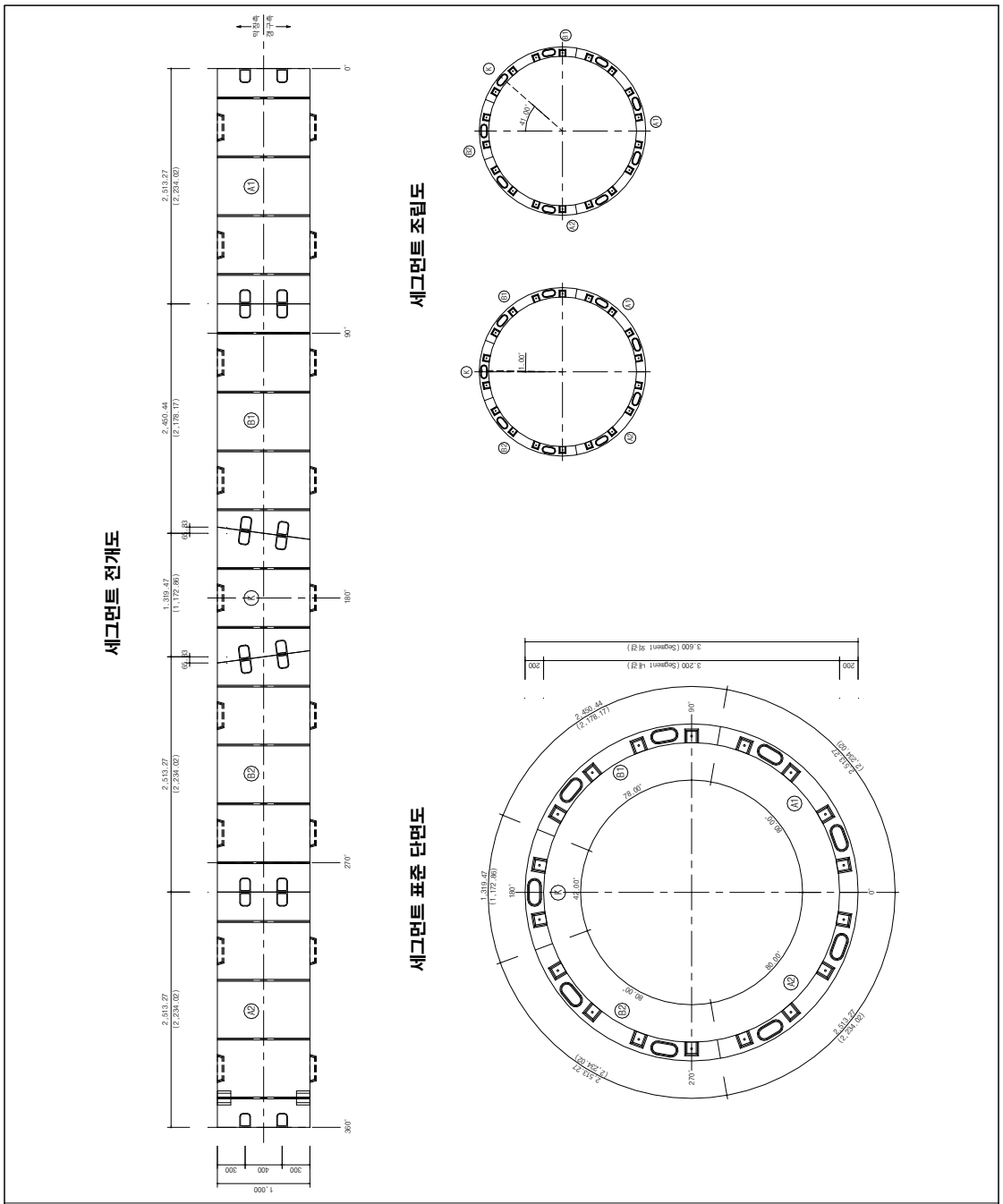
① 적용 재료

콘크리트 설계 강도 : fck=45MPa

볼트 재질 및 규격 : SS400, Φ24

② 검토 방법

전단키를 브래킷으로 가정하여 콘크리트의 전단강도 및 강재의 허용전단력을 산출하여 비교 검토하였다. 콘크리트 부재의 두께는 모든 조건을 동일하게 검토하기 위하여 250mm로 가정한 값을 산정하여 볼트와 비교하였다.



- 부재 일부구간에 전단키 형성(Island type)
- 凸자형 부재 돌출부 및 凹자형 부재의 외곽부로 전단성능 결정

그림 2.9.4 전단키 형상 검토

● 콘크리트 전단강도

보통 중량 콘크리트에 대한 전단강도 Vn은 0.2fckbwd , (3.3+0.08fck)bwd , 11bwd 중 가장 작은 값을 초과할 수 없다[4)]

● 볼트의 전단강도

SS400의 기준항복점(240MPa)에, von mises의 항복조건 υy=fy/√3을 적용한 허용전단응력(138MPa) × 볼트단면적

● 허용 전단력

콘크리트 : 허용전단응력(0.08√fck) × 전단키단면적

볼트 : 앵커볼트(SS400)의 허용전단응력(60MPa) × 볼트단면적

③ 아일랜드형 전단키 전단성능

● 전단강도

1) 0.2fckbwd = 0.2 × 45 × 150 × 268 = 361.800 kN

2) (3.3+0.08fck)bwd = (3.3 + 0.08 × 45) × 150 × 268 = 277.380 kN

3) 11bwd = 11 × 150 × 268 = 442.200 kN

최소값 = 277.380kN

강도감소계수 Ø=0.75 ⟹ 0.75 × 277.380 = 208.035 kN

∴ 208.035kN × 9EA = 1872.315 kN

● 허용전단력

콘크리트의 허용전단응력 : 0.08√fck = 0.08 × 45 = 0.537 MPa

개소당 전단력 : 0.537 × 150 × 268 = 21.587 kN

∴ 21.587kN × 9EA = 194.287 kN

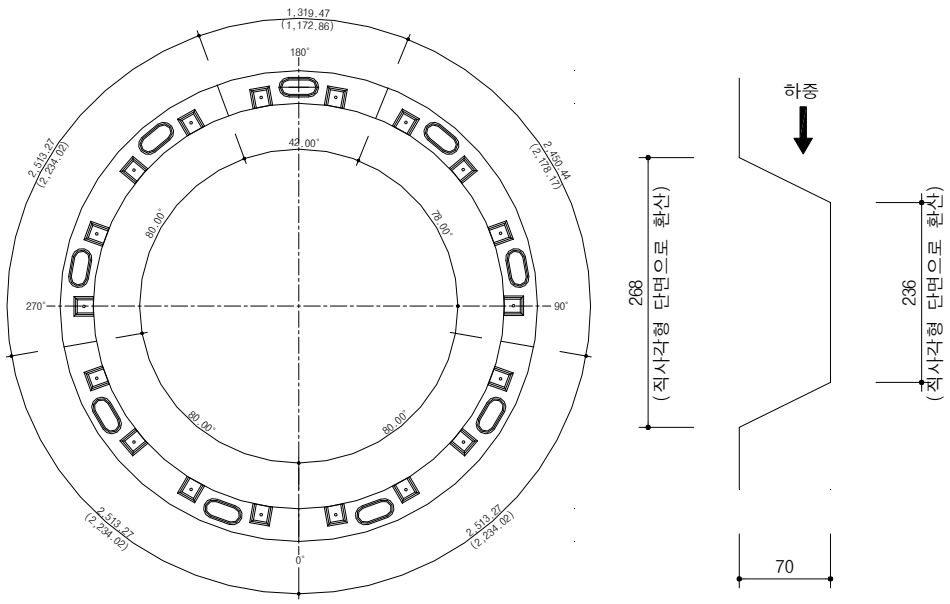


그림 2.9.5 아일랜드형 전단키 전단성능 검토

④ 볼트 체결방식 전단성능

● 전단강도

SS400의 전단강도 : 240 ÷ √3 = 138MPa

138 × π × 242 ÷ 4 = 62.430 kN

∴ 62.430 × 13EA = 811.590 kN

● 허용전단력

SS400의 앵커볼트 허용전단응력 : 60MPa

60 × π × 242 ÷ 4 = 27.143 kN

∴ 27.143 × 13EA = 352.859 kN

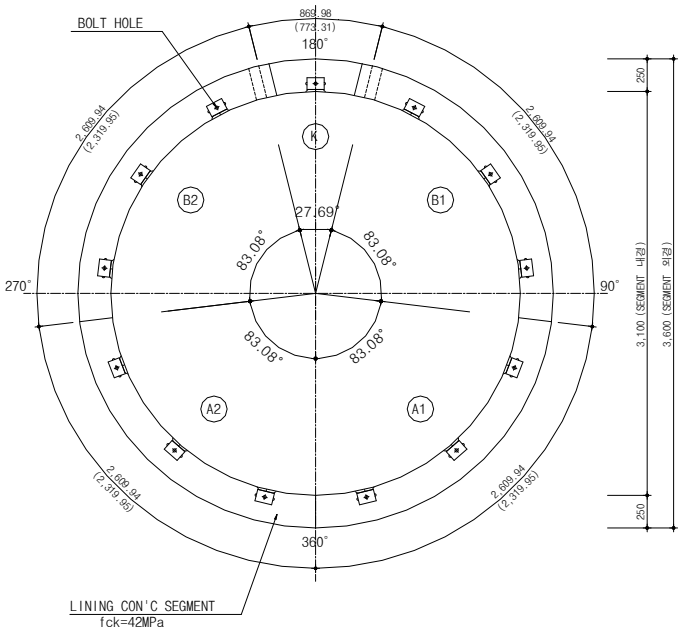


그림 2.9.6 볼트 체결방식 전단성능 검토

⑤ 전단성능 비교

표 2.9.3은 아일랜드형 전단키와 볼트 체결방식의 전단성능을 검토한 결과이다. 아일랜드형 전단키가 볼트 체결방식에 비해 매우 큰 전단강도를 확보하고 있는 것으로 검토되었다.

표 2.9.2 전단성능 검토 결과

구분		전단강도(kN)	허용전단력(kN)
개소당	전단키	208.0	21.6
	볼트	62.4	27.1
총 단면	전단키	1872.3	194.3
	볼트	811.6	352.9

나. 3차원 해석을 통한 성능비교

(1) 검토 개요

3차원 해석은 아일랜드형 전단키 세그먼트와 볼트로 체결된 세그먼트에 대해 전단에 대한 단면성능을 보다 명확히 검토하기 위하여 수행되었는데, 관용해석법에서 고려하지 못한 부재내부의 응력발생 등을 면밀히 고려하여 전단성능을 검토하였다.

① 적용 재료

- 콘크리트 설계 강도 : fck=45MPa
- 볼트 재질 및 규격 : SS400, Φ30
- 텐던 : fpu = 1900MP, 0.5” - 1EA
- 도입 긴장력 Pj = 0.8fpu × 98.71㎟ = 150kN
- 유효 긴장력 Pe = Pj의 80% 가정 = 150kN × 0.8 = 120kN

② 검토 방법

- 강연선 체결 프리캐스트 라이닝[5)]

갱구측과 막장측 라이닝을 각각 일부구간 모델링하고 콘크리트 전단키로 서로 연결될 수 있도록 요소 형상을 모델링 하였는데, 전단에 대한 저항능력을 검토하기 위해 전단키에 부재 직각 방향력이 작용하도록 하였다. 또한, 갱구측과 막장측 라이닝이 전단키로 연결되는 형상을 모사하기 위해 연결 부위인 전단키의 요소들을 압축 전담 스프링으로 연결하였다.

프리스트레스 강연선의 영향을 고려하기 위해 갱구측 및 막장측 라이닝 부재에 압축력을 도입하였는데, 갱구측과 막장측 라이닝의 연결부 주위에 발생하는 주응력 분포를 분석하여 각 요소에 가장 불리하게 작용하는 경우에 대하여 검토하였다.

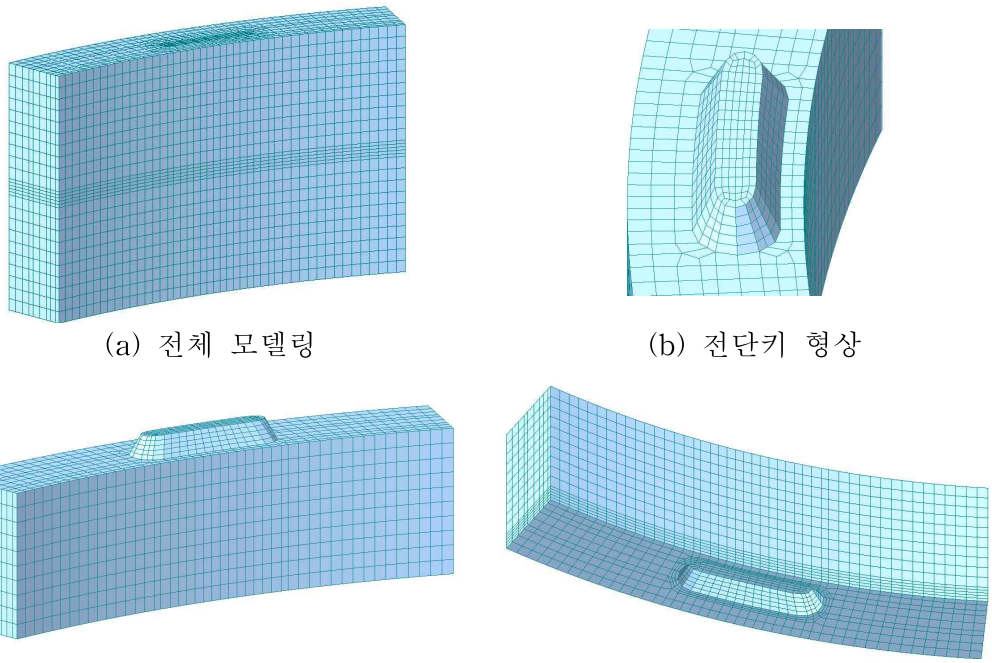
- 직볼트 타입, 볼트박스 타입

갱구측과 막장측 라이닝이 볼트로 연결되어있는 형상을 모델링하기 위해 연결부인 볼트를 BEAM 요소로 모델링하여 각 라이닝에 연결하였다. 볼트박스 타입의 경우 PLATE 요소를 적용하여 볼트와 라이닝이 연결되는 형상을 모델링하였는데, 볼트의 전단에 대한 저항능력을 검토하기 위해 연결부인 볼트에 부재 직각 방향력이 가해지도록 하였다. 그리고 볼트가 허용전단응력을 초과하게 하는 하중을 산출하여 강연선 체결 프리캐스트 라이닝검토에서 산출된 값과 비교 검토하였다.

(2) 해석 모델링

① 아일랜드형 전단키 세그먼트

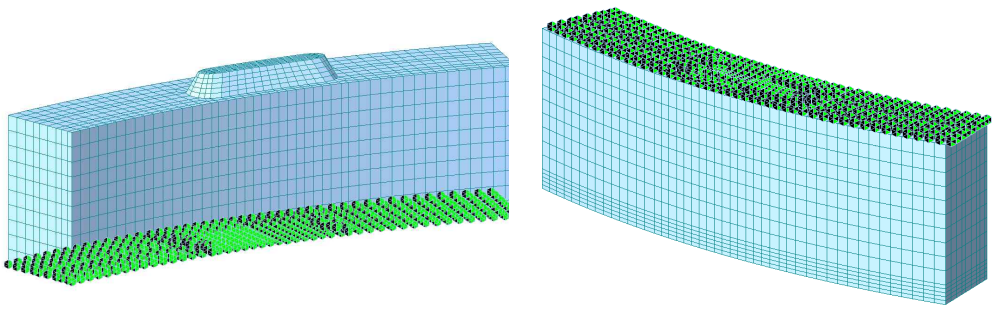
압축전담 스프링으로 연결된 전단키로 하중이 전달되도록 갱구측과 막장측의 경계조건을 설정하였으며 막장측 라이닝에 부재 직각방향 하중을 재하, 갱구측으로 전달되도록 모델링하였다. 해당 모델링 범위 내에 0.5” 강연선 2EA가 배치되며 프리스트레스 영향을 고려하기 위해 잭킹력 0.8fpu의 80%를 부재에 등분포하중으로 환산하여 적용하였다.



(a) 전체 모델링 (b) 전단키 형상

(c) 갱구측 (d) 막장측

그림 2.9.7 아일랜드형 전단키 세그먼트 3차원 모델링



(a) 갱구측 (b) 막장측

그림 2.9.8 아일랜드형 전단키 세그먼트 경계조건

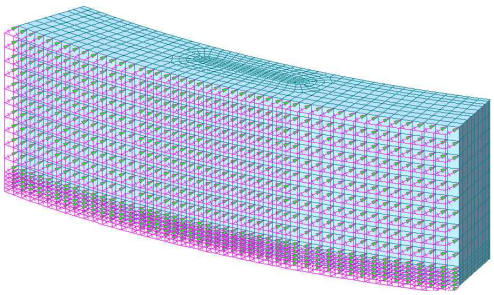
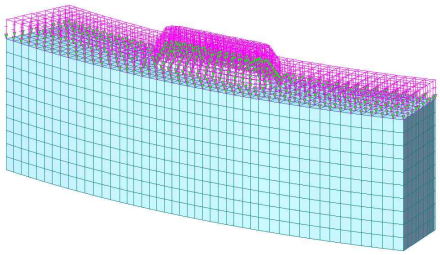
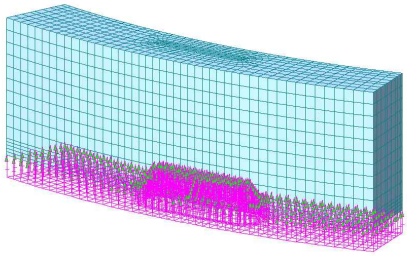


그림 2.9.9 아일랜드형 전단키 세그먼트 하중재하도

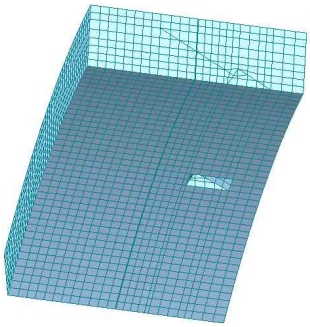


(a) 갱구측

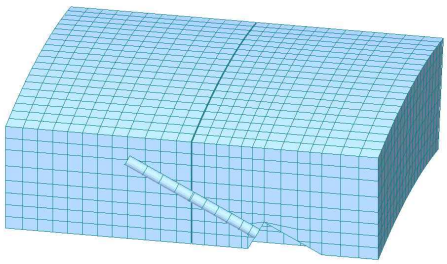


(b) 막장측

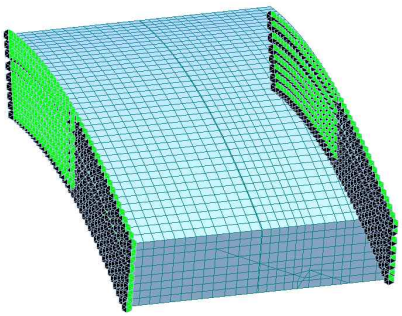
그림 2.9.10 아일랜드형 전단키 세그먼트 압축력 도입



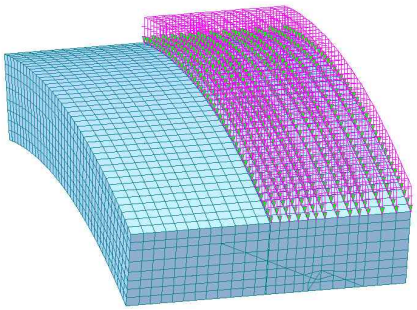
(a) 전체 모델링



(b) 볼트 연결 단면



(c) 경계조건

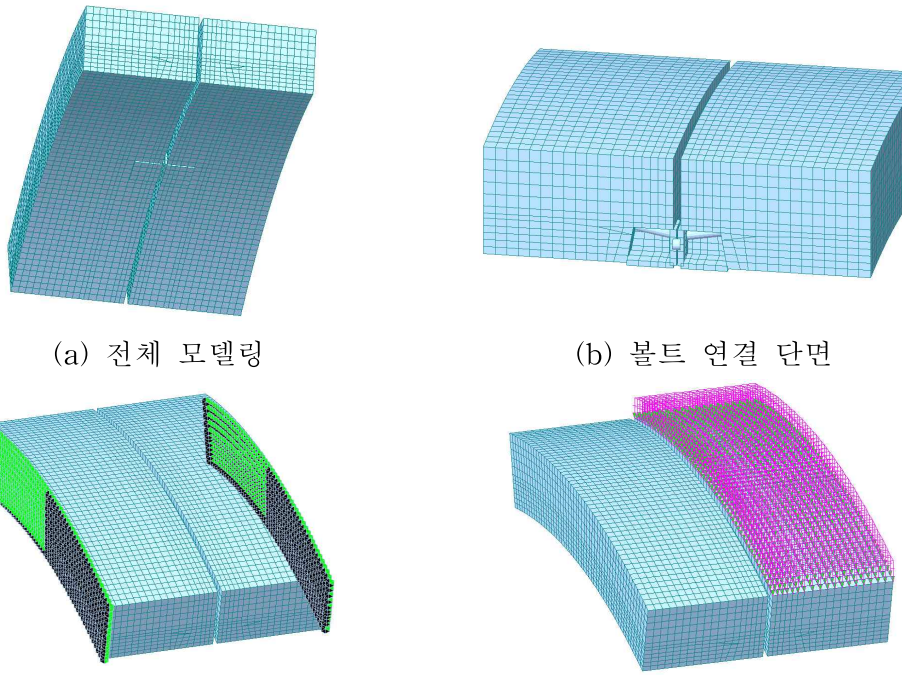


(d) 하중 재하도

그림 2.9.11 경사볼트 전단성능 검토 모델링

② 경사볼트 및 볼트박스

BEAM 요소로 모델링 된 볼트와 PLATE 요소인 볼트박스로 갱구측과 막장측이 연결되는 형상을 모델링하였고, 볼트에 부재 직각 방향력이 가해지도록 갱구측과 막장측의 경계조건을 설정하였다.



(a) 전체 모델링 (b) 볼트 연결 단면

(c) 경계조건 (d) 하중 재하도

그림 2.9.12 볼트박스 전단성능 검토 모델링

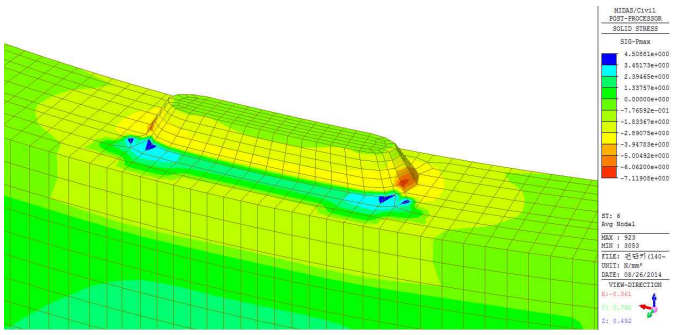
(3) 해석 결과

① 아일랜드형 전단키 세그먼트

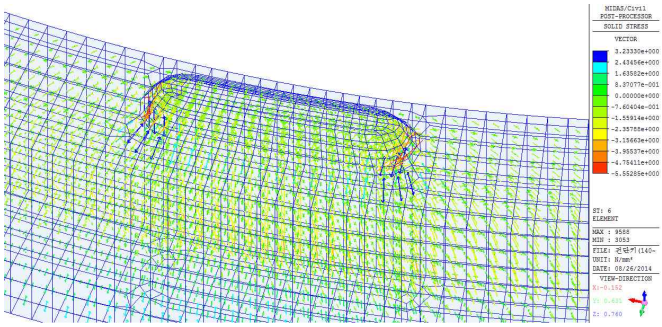
그림 2.9.13은 아일랜드 전단키 세그먼트의 갱구측 검토 결과를 나타낸 것이다. 전단키 부재는 무근 콘크리트이며 그 외의 부재는 철근 콘크리트 부재이다. 최대 압축응력은 전단키 부재, 최대 인장응력은 전단키 주변 라이닝부재에 발생하는, 전단키 부재에는 압축응력만이 발생하므로 발생 최대 압축응력을 콘크리트 압축강도와 비교하여 검토하였다. 전단키 이외의 부재에 발생하는 최대인장응력의 방향과 크기를 고려하여 인장력을 산출, 철근량 검토를 수행하여 철근 콘크리트 부재 검토를 수행하였다.

인장응력의 방향은 전단키 축에 수직방향, 즉 하중재하 방향이고 이에 저항하도록 배근된 철근은 H13으로 가정하였다. H13 철근 1가닥이 담당하는 범위는 연직 및 수

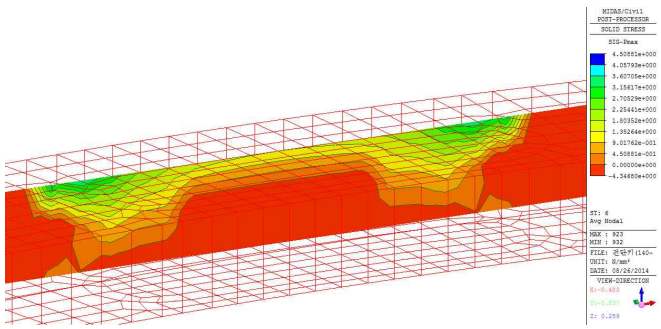
평간격을 고려하여 125mm×140mm로 보고 철근량 검토를 수행하였다. 주인장응력의 방향을 고려하여 검토단면 선정 후 단면의 인장응력 분포로 인장력을 산출하여 필요 철근량을 산출하였다.



(a) 주응력 분포



(b) 응력 벡터



(c) 검토단면 응력분포

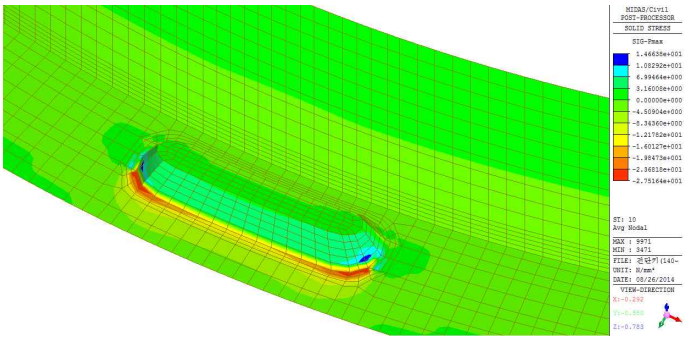
그림 2.9.13 아일랜드형 전단키 세그먼트 갱구측 검토 결과(하중 120kN 재하시)

그림 2.9.14는 아일랜드 전단키 세그먼트의 막장측 검토 결과를 나타낸 것이다. 막장측 라이닝은 철근이 배근된 철근콘크리트 부재이며 갱구측과 전단키로 연결되는 부위에 국부적으로 최대 인장 및 압축응력이 발생한다.

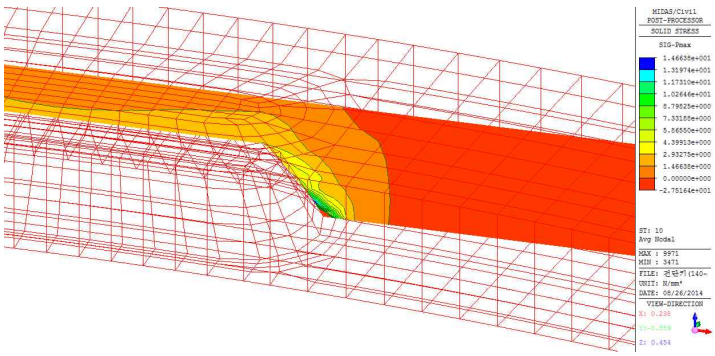
최대 발생 압축응력은 콘크리트 압축강도와 비교하여 검토하였고, 인장응력은 발생하는 주인장응력의 방향을 고려하여 배근된 철근이 발생한 인장응력에 저항할 수

있는 지에 대한 검토를 수행하였다.

인장응력의 방향은 전단키 축에 수직방향, 즉 하중재하방향이며 응력의 크기는 연결부에 매우 국한되는 형태를 보인다. 인장응력에 저항하도록 배근된 철근은 H13 으로 가정하였으며 1가닥이 담당하는 범위는 연직 및 수평간격을 고려하여 125mm× 140mm로 보고 철근량 검토를 수행하였다.



(a) 주응력 분포



(b) 검토단면 응력분포

그림 2.9.14 아일랜드형 전단키 세그먼트 막장측 검토 결과(하중 200kN 재하시)

표 2.9.3 아일랜드형 전단키 세그먼트 전단성능 해석 결과

구분	갱구측 (120kN 재하시)	막장측 (200kN 재하시)
압축응력 검토	최대 발생 압축응력 : 7.1 MPa < 45MPa ∴ O.K	최대 발생 압축응력 : 27.5 MPa < 45MPa ∴ O.K
인장 철근량 검토	필요 철근량 : 127.6mm2 > 사용 철근량 : 126.7mm2 ∴N.G	필요 철근량 : 138.4mm2 > 사용 철근량 : 126.7mm2 ∴N.G
허용력(kN)	119.1	183.2

표 2.9.3은 3차원 해석을 통한 아일랜드형 전단키 세그먼트의 전단성능 해석 결과를 나타낸 것이다. 갱구측과 막장측 모두 발생 압축응력은 콘크리트 압축강도 45MPa에 크게 미치지 못함으로 인장응력에 의한 인장파괴가 지배하는 것으로 나타났다. 갱구측의 전단저항력은 119.1kN으로 막장측 183.2kN 보다 작게 해석되었다.

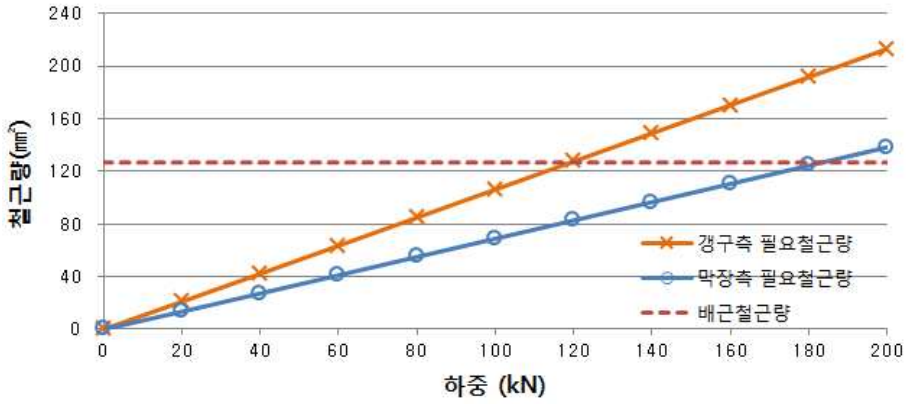


그림 2.9.15 아일랜드형 전단키 세그먼트의 하중-철근량 관계

② 경사볼트

그림 2.9.16은 경사볼트 세그먼트의 전단응력 검토 결과를 나타낸 것이다. 하중을 5kN 간격으로 증가시키면서 발생하는 전단응력을 검토하였으며, 50kN의 하중을 재하시 허용응력을 초과하는 응력이 발생하였다. 45kN의 하중이 재하 되었을 때 발생응력이 허용응력에 달하는 것으로 확인되었다.

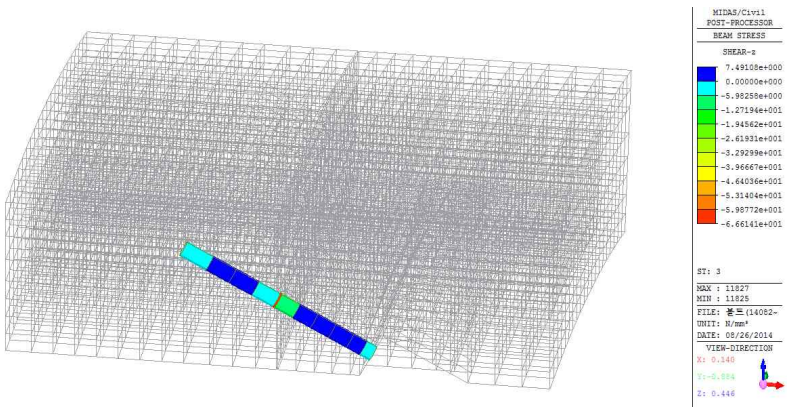


그림 2.9.16 경사볼트 세그먼트 전단응력 검토 결과(하중 50kN 재하시)

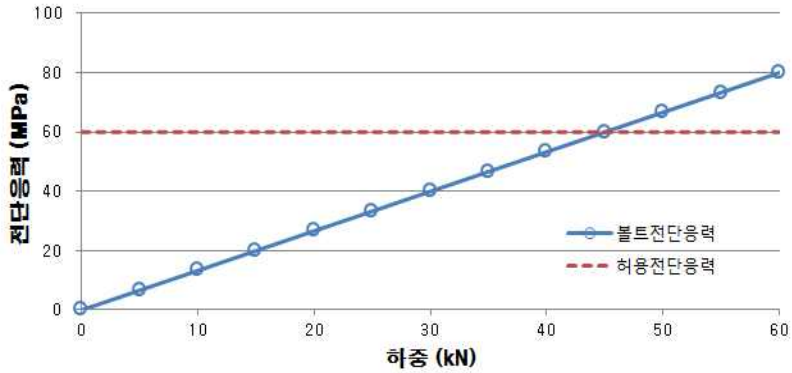


그림 2.9.17 경사볼트 세그먼트의 하중-전단응력 관계

③ 볼트박스

그림 2.9.18은 볼트박스 세그먼트의 전단응력 검토 결과를 나타낸 것이다. 하중을 5kN 간격으로 증가시키면서 발생하는 전단응력을 검토하였으며, 35kN의 하중 재하시 허용응력을 초과하는 응력이 발생하였다. 31.8kN의 하중이 재하되었을 때 발생응력이 허용응력에 달하는 것으로 확인되었다.

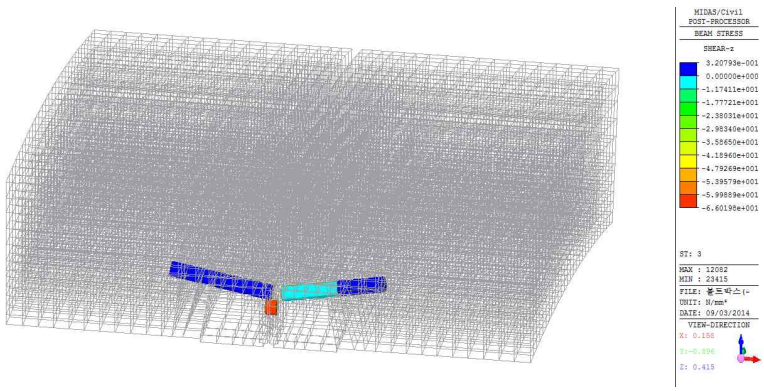


그림 2.9.18 볼트박스 세그먼트 전단응력 검토 결과(하중 35kN 재하시)

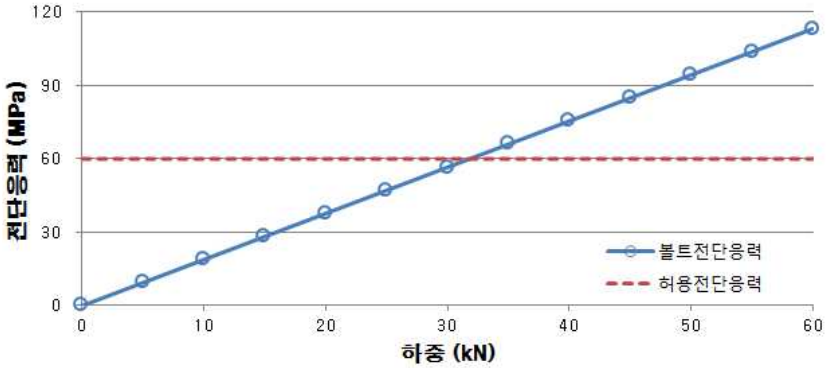


그림 2.9.19 볼트박스 세그먼트의 하중-전단응력 관계

(4) 검토결과

표 2.9.4는 아일랜드형 전단키 세그먼트, 경사볼트 세그먼트, 볼트박스 세그먼트에 대한 3차원 수치해석 검토 결과를 나타낸 것이다. 아일랜드형 전단키 세그먼트의 경우 갱구측은 119.1 kN, 막장측은 183.2 kN이 재하 되었을 때 콘크리트가 극한하중에 도달하는 것으로 나타나, 갱구측의 인장파괴가 지배하는 것으로 검토되었으며 전단저항력은 119.1 kN으로 나타났다.

경사볼트 세그먼트의 경우 45.0kN의 하중을 재하 하였을 때 볼트의 발생 전단응력이 허용전단응력에 도달하는 것으로 검토되었고, 전단저항력은 45.0kN으로 나타났다.

볼트박스 세그먼트의 경우 31.8kN의 하중을 재하 하였을 때 볼트의 발생 전단응력이 허용전단응력에 도달하는 것으로 검토되었고, 전단저항력은 31.8kN으로 나타났다.

아일랜드형 전단키 1개 담당하는 면적과 비교하면 경사볼트 및 볼트박스의 볼트는 2개에 해당되므로, 전단키 1 개의 전단저항력은 119.1kN, 경사볼트 2개의 전단저항력은 90.0kN, 볼트박스 2개의 전단저항력은 63.6kN으로 전단키가 경사볼트 및 볼트박스의 볼트보다 각각 32% 및 87% 정도 더 큰 전단성능을 가지는 것으로 해석되었다.

표 2.9.4 3차원 수치해석 검토 결과

구분	허용력 (kN)
강선 체결	119.1
직볼트 타입	45.0
볼트 박스 타입	31.8

3. 표준단면 및 세그먼트 배치

가. 표준단면 선정

세그먼트 형상 도출과정을 통하여 전단키와 블록아웃의 크기를 결정하였다. 결정된 요소를 적용하여 전력구 표준단면을 구성하였다. 표준단면에 대한 세그먼트는 5개를 배치하였으며, 세그먼트의 형상, 전단키의 배치, 블록아웃의 배치 등을 최대한 표준화하여 프리캐스트 부재 제작 효율성을 향상시켰다. 현장세그먼트 배치시 동일한 작업의 반복으로 시공성을 향상시키도록 하였다.

세그먼트에 철근 배근시에는 설계기준을 만족하는 콘크리트 덮개를 적용하여야 하는데, 표 2.9.5는 프리캐스트 콘크리트의 최소 피복 두께 규정을 나타낸 것이다.

표 2.9.5 프리캐스트 콘크리트의 최소 피복 두께 규정[4)]

구분		D19이상, D35이하	D16 이하
흙에 접하거나 옥외의 공기에 직접 노출된 콘크리트	벽체	20㎜	
	기타부재	40㎜	30㎜
옥외의 공기나 흙에 직접 접하지 않는 콘크리트	슬래브/벽체	20㎜	15㎜
	쉘/절판부재	15㎜	10㎜

특수 환경에 노출되는 콘크리트에서는 다음과 같은 특수 환경에 노출되는 경우에는 표 2.9.6에서 제시하는 콘크리트의 피복 두께를 적용하여야 한다고 규정되어 있다.

① 고내구성이 요구되는 구조체의 경우

② 해안 250m 이내 위치하는 구조체로서 추가의 표면처리 공사를 수행하지 않고 직접 외부에 노출되어 염해를 받는 경우

③ 유수 등에 의한 심한 침식 또는 화학작용을 받는 경우

일반적인 쉴드터널 라이닝의 경우 특수 환경에 노출되는 콘크리트에 해당되지 않으므로, 본 연구에서는 흙에 접하거나 옥외 공기에 직접 노출된 콘크리트로서 16mm 이하의 철근이 배근되는 경우에 해당하는 30mm를 최소 덮개로 결정하였다.

표 2.9.6 특수 환경에 노출되는 콘크리트의 피복 두께[4)]

구분	벽체/슬래브	기타부재
프리캐스트 콘크리트	40㎜	50㎜

그림 2.9.20은 전력구 터널에 대해 본 연구에서 개발된 아일랜드형 전단키 세그먼트를 적용시킨 표준단면을 나타낸 것이다. 세그먼트의 세부 상세단면과 지하철 터널에 대한 표준 및 세부 상세단면은 본 보고서의 부록편에 포함하였다.

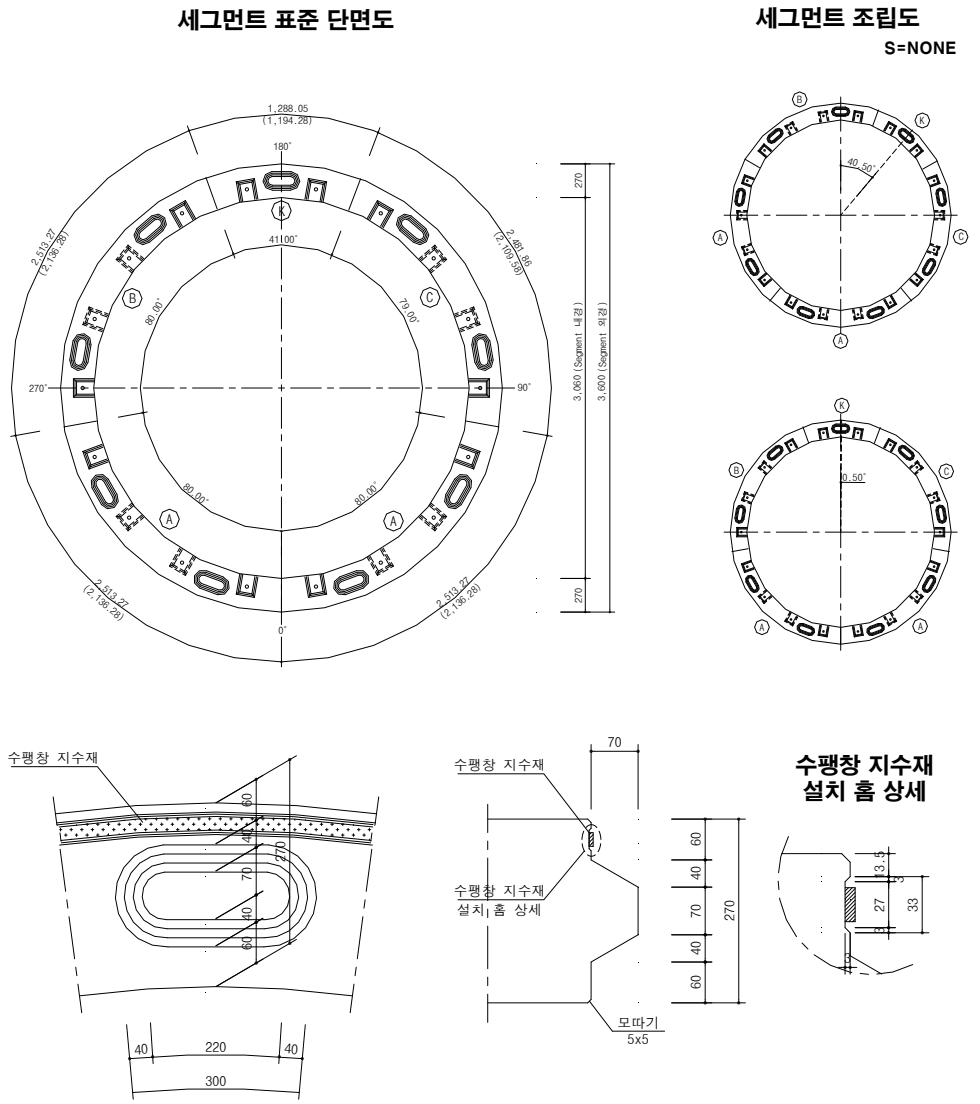


그림 2.9.20 아일랜드형 전단키 세그먼트 표준단면(전력구 터널)

나. 세그먼트 배치

개발된 아일랜드형 전단키 세그먼트의 단면 형상을 이용하여 쉴드터널 라이닝을 구성하기 위해서 세그먼트의 배치 방안을 고려하였다. 세그먼트 배치는 각각의 세그먼트 규격과 관련되므로 세그먼트 규격 결정시 배치형상을 고려하여 규격을 결정하였다. 세그먼트 배치시 검토사항은 다음과 같다.[6)]

① 세그먼트 모서리 부위 집중 최소화

동일한 패턴으로 세그먼트 배치시 전열과 후열링의 세그먼트 모서리 부분 4곳이 한곳에 집중되어 취약부가 형성될 우려가 있다. 따라서 세그먼트 규격을 조정하여 모서리 부분이 한곳에 집중되지 않도록 한다.

② 강연선 정착 패턴 통일화

세그먼트 접합을 위한 강연선의 배치가 각각의 세그먼트에 1번씩만 정착되도록 하고 정착위치 및 패턴이 반복될 수 있게 배치한다.

③ 세그먼트 통일화

세그먼트 종류를 최소화하여 프리캐스트 부재 제작시 효율성을 향상시키고, 현장 부재 조립시 시공성을 고려하도록 한다.

④ 강연선 길이 통일화

강연선의 길이가 동일하게 구성되도록 세그먼트를 배치하여 작업의 효율성을 향상시킨다.

⑤ 부속물과의 간섭 최소화

세그먼트를 구성하는 전단키, 볼트박스(실험체의 링구성 초반부), 긴장재 등이 서로 간섭을 일으키지 않도록 하며, 세그먼트 제작시 철근배치의 간소화를 고려한다.

그림 2.9.21은 아일랜드형 전단키 세그먼트의 시공 배치(안)을 나타낸 것이다.

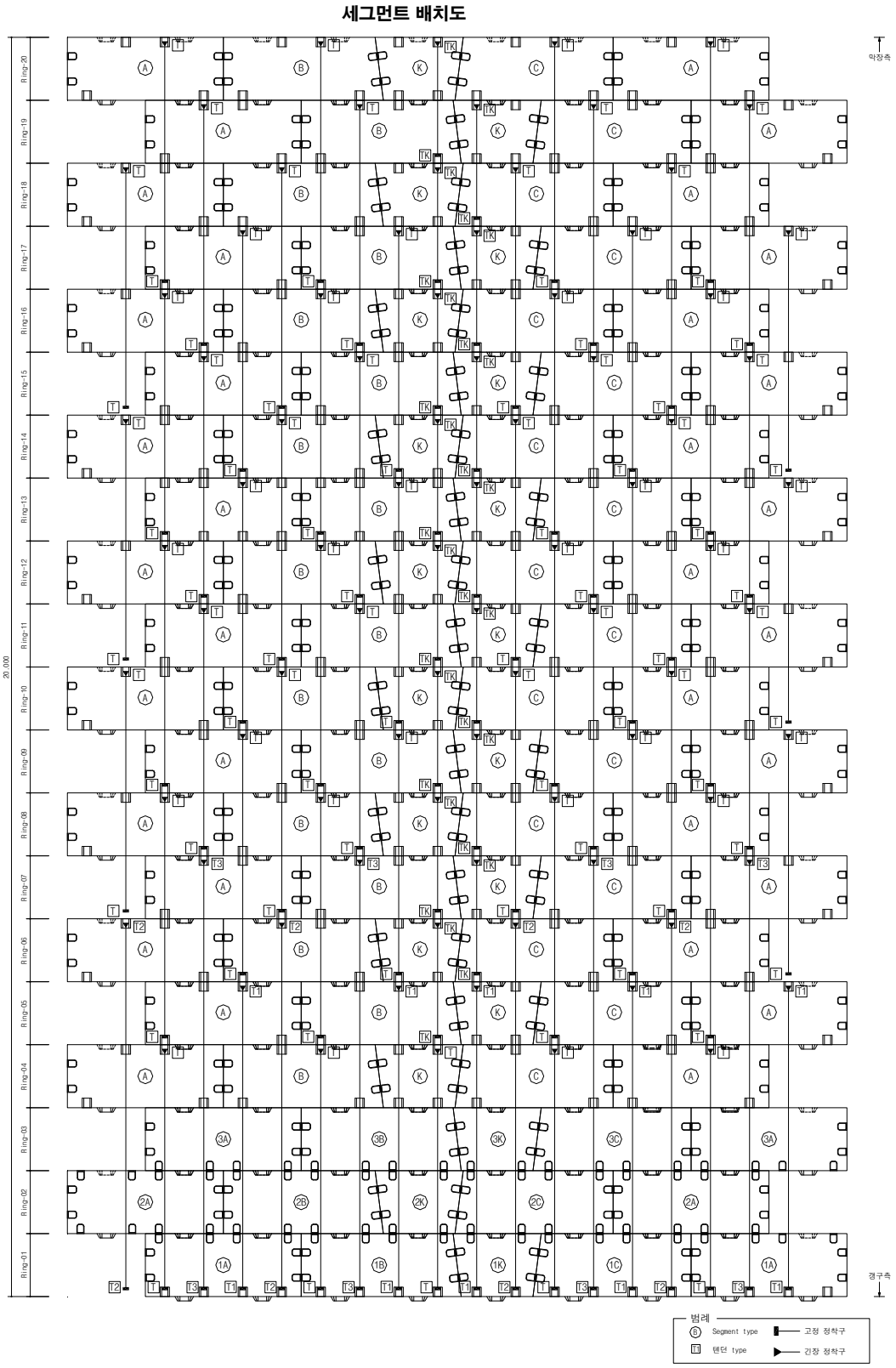


그림 2.9.21 아일랜드형 전단키 세그먼트의 시공 배치(안)

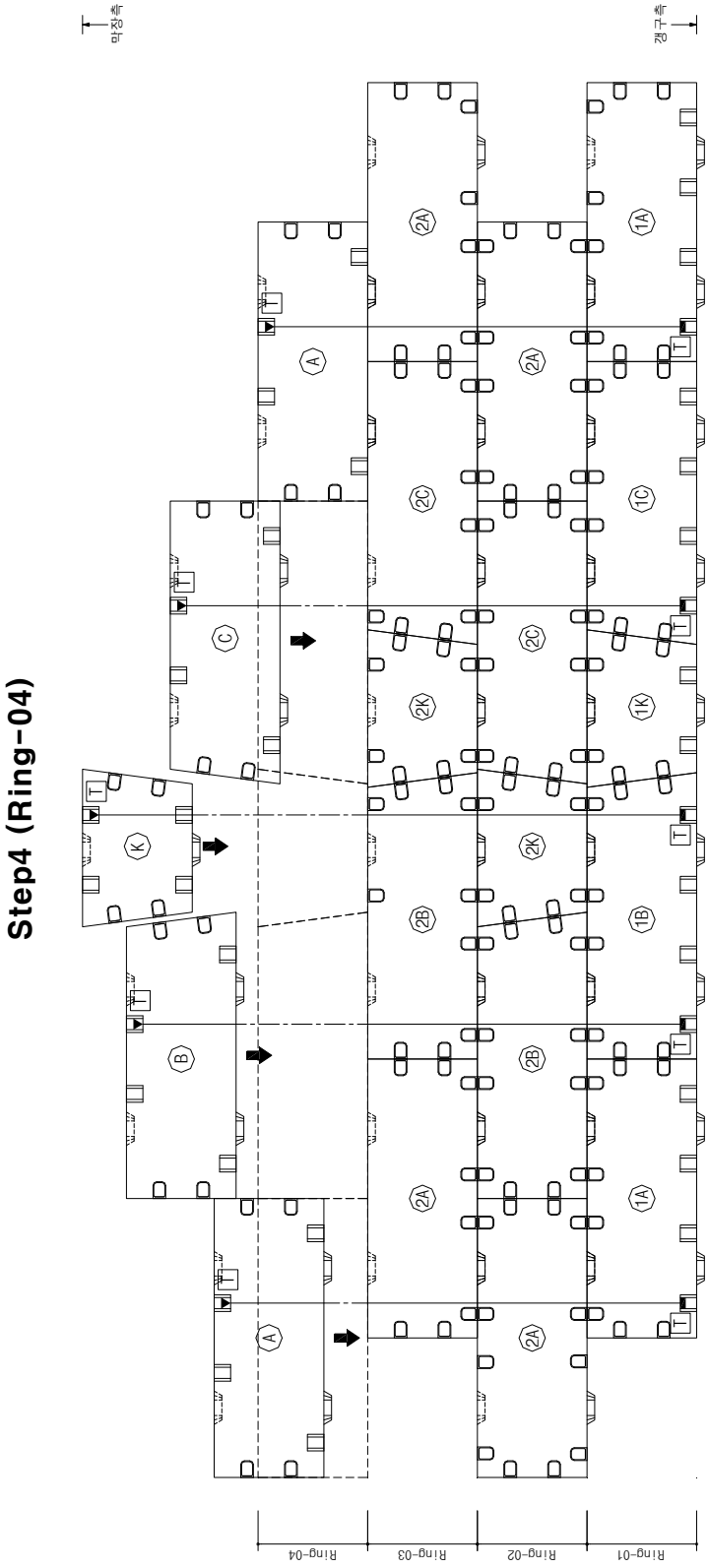


그림 2.9.21 아일랜드형 전단키 세그먼트의 시공 배치(안)(계속)

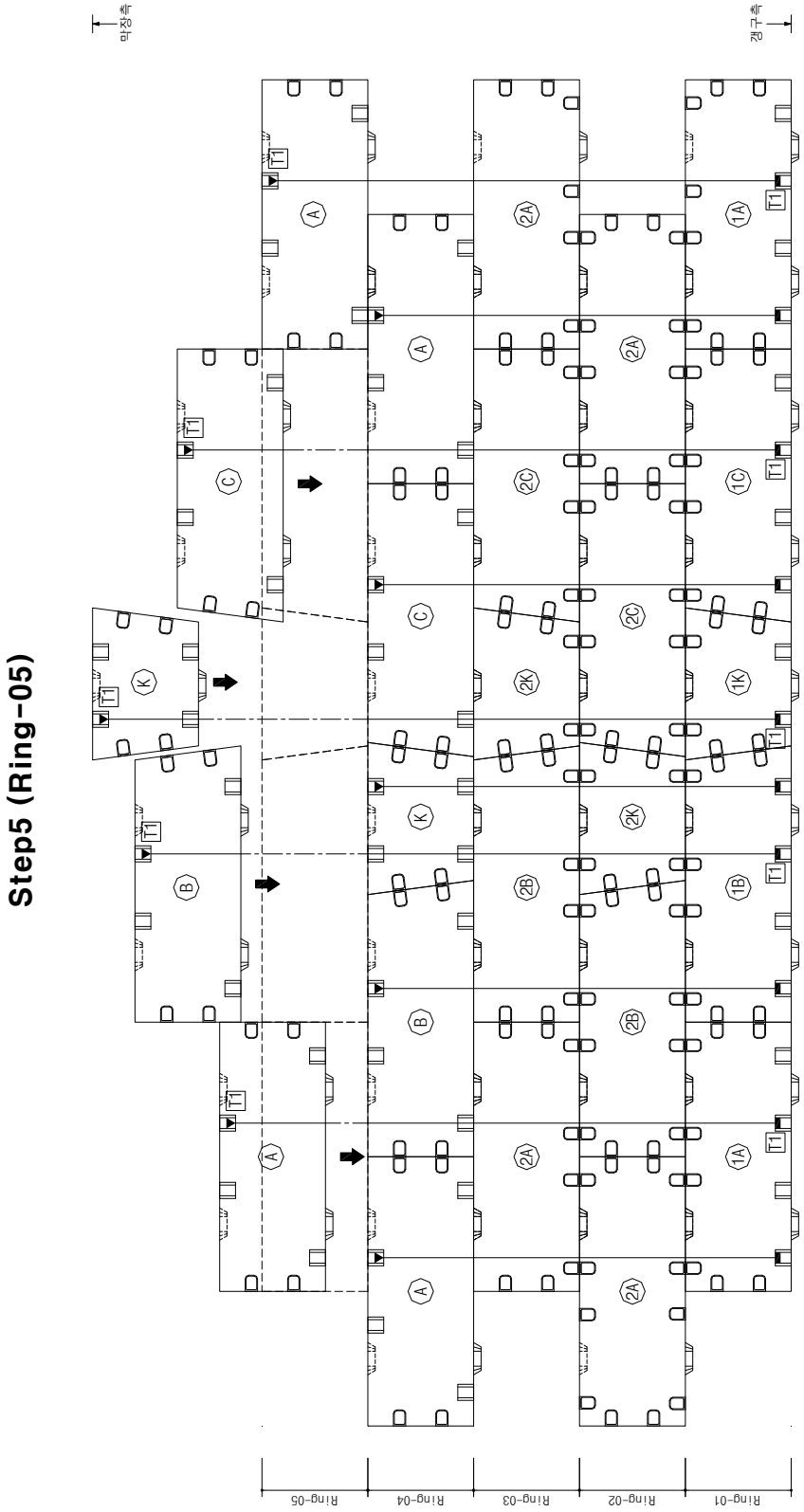


그림 2.9.21 아일랜드형 전단키 세그먼트의 시공 배치(안)(계속)

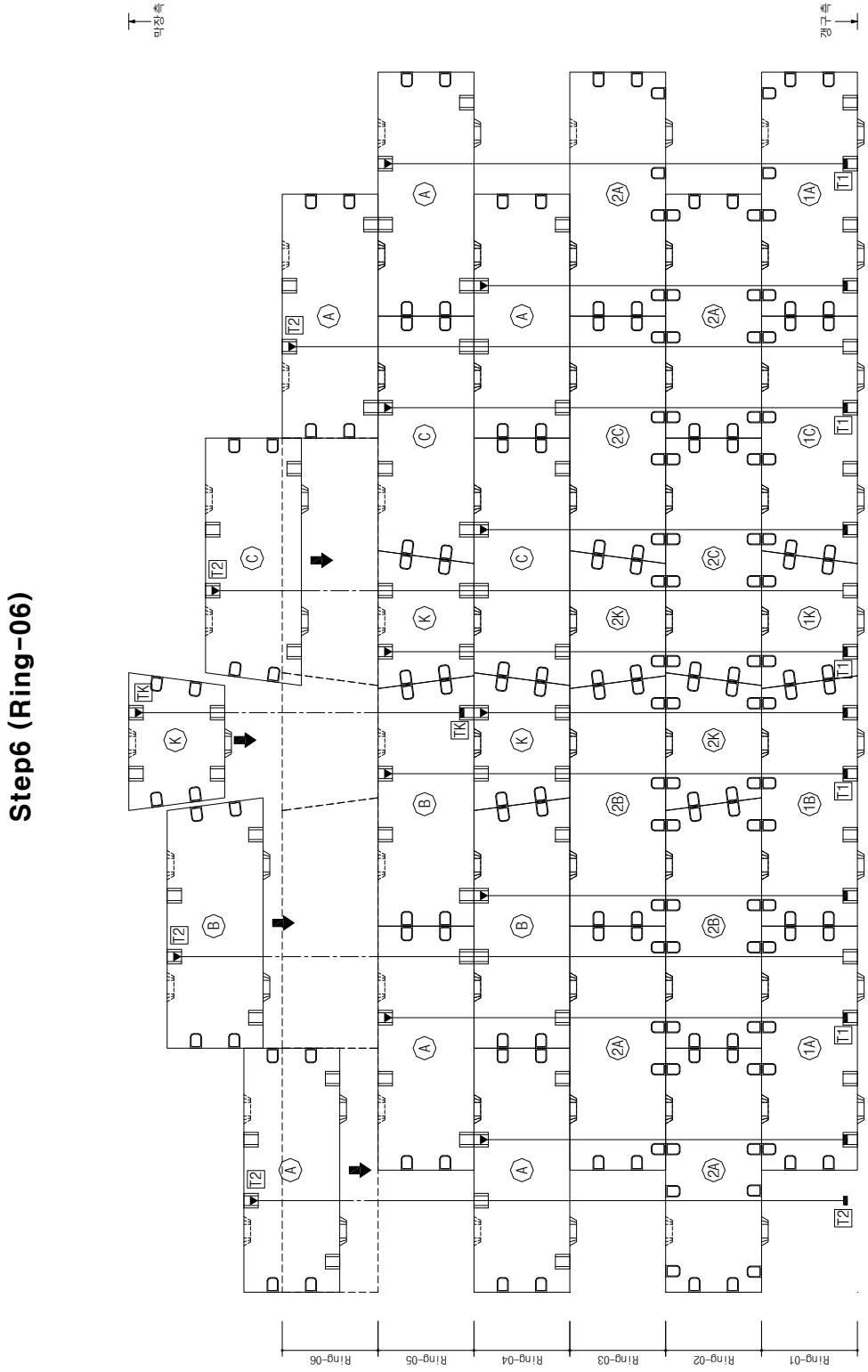


그림 2.9.21 아일랜드형 전단키 세그먼트의 시공 배치(안)(계속)

소결론

강연선 쉴드터널에서 발생하는 전단력에 저항하기 위하여 세그먼트에 전단키를 형성하는 방안에 대한 검토를 수행하였고, 전단키 적용 시의 안정성검토 및 표준단면을 작성하였다.

(1) 강연선 쉴드터널에 작용하는 전단력에 저항하기 위하여 세그먼트에 전단키를 형성하도록 계획하였다. 응력분배 및 세그먼트 체결시 가이드기능을 수행할 수 있는 아일랜드형 전단키를 적용하였고, 이를 기존 볼트박스 체결방식의 단면에 적용하여 전단성능에 대한 관용해석적 방법으로 검토결과 단면에서의 아일랜드형 전단키는 전단강도가 1872.3kN, 볼트박스는 811.6kN으로서 아일랜드형 전단키의 전당성능이 2.3배 우수한 것으로 검토되었다.

(2) 관용해석법에서 고려하지 못한 부재 내부에서 발생하는 응력 등을 고려하기 위하여 3차원 수치해석을 수행하여 하중증가에 따른 전단성능을 검토하였다. 검토결과 아일랜드형 전단키는 전단키 자체의 파괴보다는 전단키 주변부재의 인장파괴에 지배받는 것으로 검토되었다. 아일랜드형 전단키의 전단저항력은 119.4kN이고, 같은 면적에서 저항하는 볼트 체결방식과 비교하였을 때 경사볼트보다 32%, 볼트박스보다 87% 더 전단성능이 우수한 것으로 평가되었다.

(3) 본 연구에서 검토된 사항을 적용하여 아일랜드형 전단키를 설계하였고, 전단키와 블록아웃의 위치를 고려하여 세그먼트를 분할하였다. 분할된 세그먼트에 철근배근 및 피복두께를 고려하여 실제 전력구 쉴드터널에 대한 표준단면과 체결순서도를 작성하였다.

제 10 절 세그먼트 체결방식에 따른 방수 성능 비교

제 3 절에서는 쉴드터널 세그먼트 체결부에서의 누수발생 현황에 대해 검토를 수행하였다. 볼트 체결방식의 경우 시공 오차 등으로 인한 누수 발생시 볼트 체결부가 지하수의 경로로 이용되기 때문에, 수팽창 지수재, 고무 패킹 등으로 세그먼트 접합부의 방수 대책을 적용하더라도 체결부에서의 누수가 취약하기 마련이다.

그림 2.10.1은 쉴드터널의 방수 개요를 나타낸 것이다. 기본적인 배면 뒤채움 그라우트 주입과 함께 세그먼트 연결부 방수(수팽창 지수재), 뒷채움 주입공 방수, 볼트 구멍 방수, 코킹 방수, 도막방수 등의 방수대책을 실시함에도 터널 내부로의 누수를 완전히 제어하지 못하고 있음.[1)]

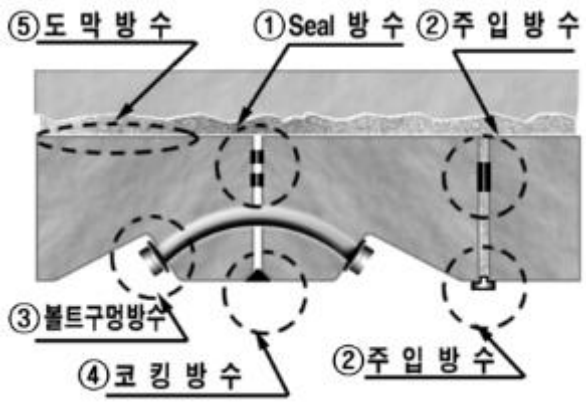


그림 2.10.1 쉴드터널의 방수 개요

특히, 제 2 절에서 살펴본 볼트 체결방식의 문제점에서 체결부의 유격 차이로 인해 시공 오차가 발생할 경우, 수팽창 지수재의 접합이 불완전하게 된다. 이러한 경우 세그먼트 접합부 사이로 지하수가 유입되면, 그림 2.10.1에서 보이는 것처럼 볼트 체결 구멍을 경로로 지하수가 흐르게 된다.

볼트 구멍에 대한 방수는 링 형태의 패킹재를 볼트 와셔 및 구멍 사이에 설치하는 것에 불과하기 때문에, 패킹재의 장기적인 마모, 장기적인 지하수 접촉으로 인한 볼트의 부피팽창, 볼트 구멍에서의 크랙 발생, 볼트 연결의 갭(Gap) 및 오프셋(Offset) 등으로 인해 누수발생이 불가피한 상황이다.

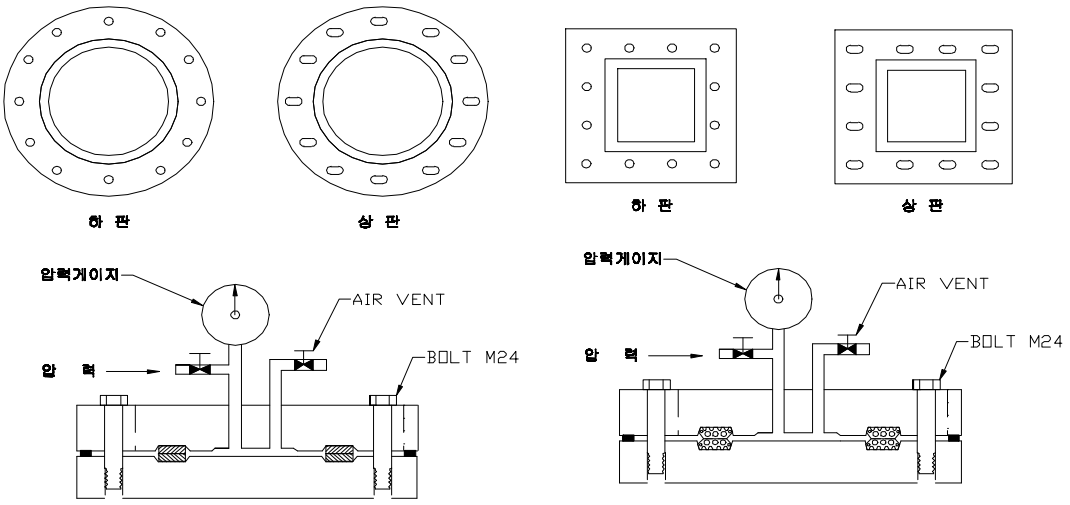
본 연구를 통해 개발된 강연선 체결방식은 볼트 체결부가 존재하지 않고 강연선 정착콘의 위치가 터널 내측으로 향해 있지 않기 때문에, 지하수 침투시 볼트 체결방식에 비해 구조상으로 누수량 저감이 가능하다

본 연구에서는 수압 작용으로 세그먼트 접합부 사이로 지하수가 침투했을 경우 체결방식에 따라 발생되는 누수량의 차이를 확인하기 위해 실험장치를 고안하여 실험을 수행하였다.

1. 방수 성능 실험 조사

가. 세그먼트 지수재 내수압 시험

대단면에 있어서 조립 정도의 저하에 의한 초기의 갭(Gap)과 오프셋(Offset)이 상당히 있는 경우 완성 후의 재하 중에 의한 틈새량의 증가를 고려하여 갭과 오프셋에 따른 내압성능을 시험하게 된다. 내압 성능의 확인은 터널에서 작용하는 수압을 설정하고, 시공시의 뒷채움 주입압, 안전율의 영향을 고려하여 최대 수압을 설정하게 된다.[1] 그림 2.10.2는 내수압 시험 장치의 개요도를 나타낸 것이다.



(a) 수팽창 지수재 내수압 시험기 (b) 개스킷 내수압 시험기

그림 2.10.2 내수압 시험 장치의 개요도

내수압 시험은 크게 비팽창 시험과 수침팽창 시험으로 진행되는데, 일반적으로 수팽창 지수재와 개스킷에 따라 시험기 형태가 다르다. 기본원리는 지수재를 구속시킨 후 수압을 작용시켜 지수재의 반력 및 접연압력(탄성압+팽창압)에 의한 내압 성능을 평가하는 것이다. 그림 2.10.3와 그림 2.10.4는 비팽창 내수압 시험의 예를 보여주고 있다.



그림 2.10.3 수팽창 지수재의 비팽창 내수압 시험 예[2)]



그림 2.10.4 고무 개스킷의 비팽창 내수압 시험 예[2)]

나. 수팽창 지수재 팽창성능 모형실험

국내에서는 현재 고수압 또는 내압이 작용하는 경우에 일관된 기준이 없이 실링재를 이중으로 설치하거나, 세그먼트 우각부의 밀착성을 확보하기 위하여 심이 없도록 가공하여 시공한다. 따라서 해저터널과 같이 고수압이 발생하는 터널에서의 실방수공에 대한 가이드라인 제시가 필요하다[3].

부등침하, 시공불량, 지진 등에 의하여 쉴드터널의 라이닝간 접합구간에 변상이 발생하였을 때 유발되는 누수현상과 수팽창 지수재의 팽창에 의한 지수효과, 그리고 수팽창 지수재의 성능 및 규격기준을 검토하기 위하여 모형 투수실험이 실시되었다[2].

그림 2.10.5는 수팽창 지수재 팽창성능 모형실험 장치를 나타낸 것인데, 라이닝의 변형각도를 5도로 설정하여 수팽창 지수재의 설치개수 및 단면크기에 따른 지수효과를 확인하였다.

본 실험의 결과로는 세그먼트 외측에 1단으로 설치한 경우보다 수팽창 지수재를 2단으로 설치한 경우에 괄목할 만한 지수효과를 나타내었다. 수압이 높을수록 많은 누수가 발생하였으며, 시간경과에 따라 수팽창 지수재의 팽창에 의하여 지수효과가 발생하여 2주가 경과한 시점에서는 지수효과를 보이며, 특히 저수압시에는 완벽하게 지수효과를 나타내었다. 또한, 2주 경과후의 수팽창 지수재를 검토한 결과, 외측의 수팽창 지수재보다 내측에 위치한 수팽창 지수재의 팽창에 의하여 지수효과가 발휘된 것을 알 수 있어 위치에 따른 수팽창 지수재의 설치조건에 대하여 추가 검토해야 할 것으로 나타났다[3].



(a) 모형실험 모습 (b) 실험 모형박스 내부전경

그림 2.10.5 수팽창 지수재 팽창성능 모형실험 장치[2]

2. 실험계획

가. 체결부 단면체

실제 세그먼트 체결방식에 따른 구조형태를 모사하여 지하수가 터널 내부 침투시 발생되는 누수량을 비교하기 위해 실험장치를 제작하고자 하였다. 그림 2.10.26은 전력구 터널의 세그먼트 단면을 나타낸 것이다. 그림에서 A - A' 단면을 정면도로 형상화할 경우 강연선 및 볼트 체결방식의 체결부 구조를 가장 특징적으로 표현할 수 있을 것으로 판단된다.

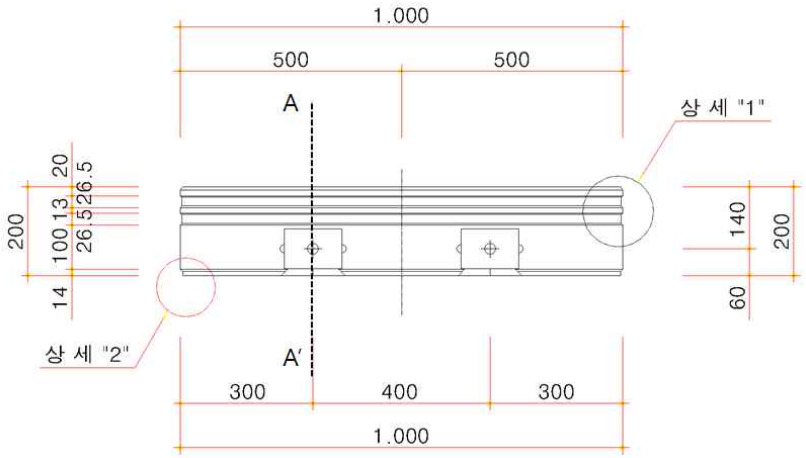
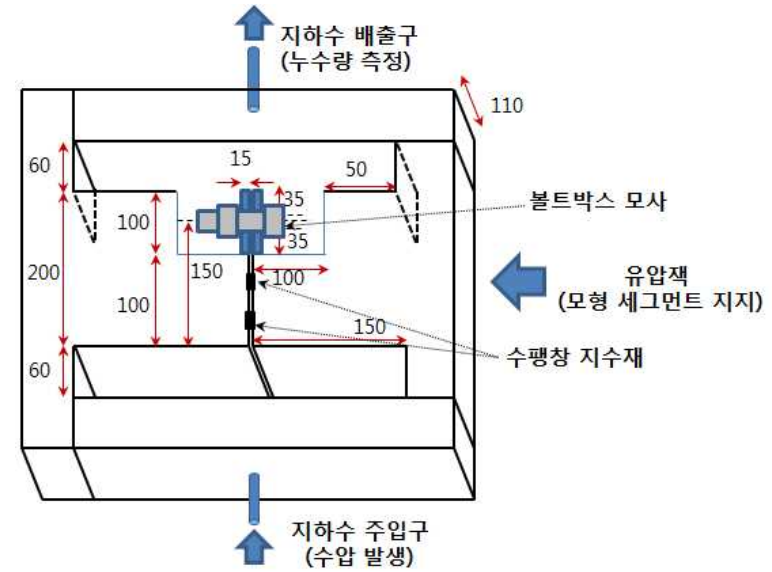


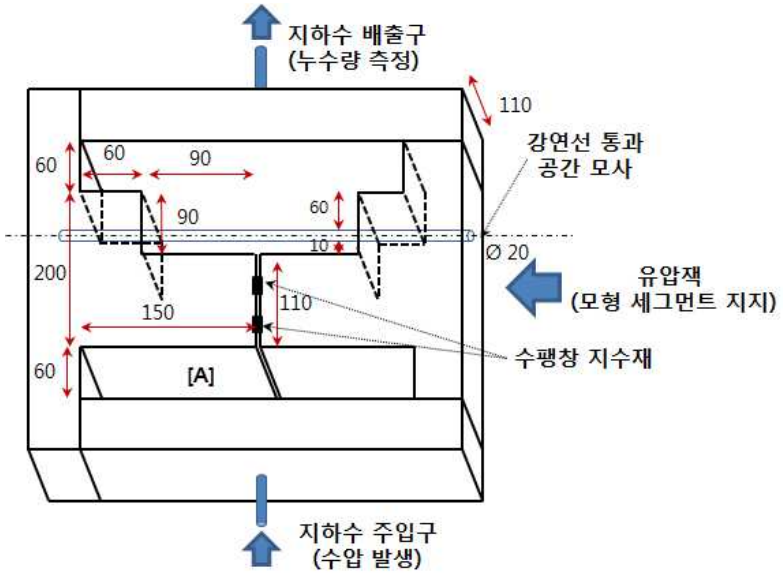
그림 2.10.6 전력구 터널 세그먼트 단면

그림 2.10.7은 강연선 및 볼트 체결방식의 세그먼트 단면에서 체결부 구조를 그림 2.10.6의 A-A' 단면을 정면도로 두고 형상화한 것이다. 세그먼트 단면 두께는 일반적인 전력구 터널 단면을 고려하여 200mm로 고려하였고, 터널 외부에 물을 주입할 수 있는 공간을 만들어서 수압 작용이 가능하도록 계획하였다. 지하수가 세그먼트 접합부를 통과하여 터널 내부로 침투할 경우에는 배출구를 형성하여 누수량을 측정 가능하도록 고안하였다.

세그먼트 단면에는 체결방식 모두 동일하게 2열의 수팽창 지수재가 설치될 수 있도록 하였고, 각각 볼트박스와 강연선이 통과하는 공간을 표현하였다.



(a) 볼트 체결방식 체결부



(b) 강연선 체결방식 체결부

그림 2.10.7 체결부 구조 형상화(A-A' 단면)

나. 실험장치 제작

그림 2.10.8은 체결부 구조를 형상화한 도안을 바탕으로 제작된 체결방식에 따른 누수량 측정 실험장치 모습을 나타낸 것인데, 제작된 실험장치는 크게 본체, 수압 장치, 블록 결합용 쟈키, 수조 등으로 구성된다. 본체에는 체결방식에 따른 체결부 형상이 설치되고, 입력 수압 조절 밸브로 지하수의 수압을 모사하게 되며 압력 게이지에 작용하는 수압을 눈금으로 확인이 가능하다.

그림 2.10.9는 본체 안에 설치되는 체결부의 단면체를 나타낸 것인데, 볼트박스 및 강연선 체결 상태를 모사하였고, 터널 외부 공간에 채워진 물이 수압에 의해 터널 내부로 침투하게 되면 실험장치 바닥에 부착된 고무호스를 따라 준비된 비이커에 담겨져 누수량을 측정할 수 있게 하였다.

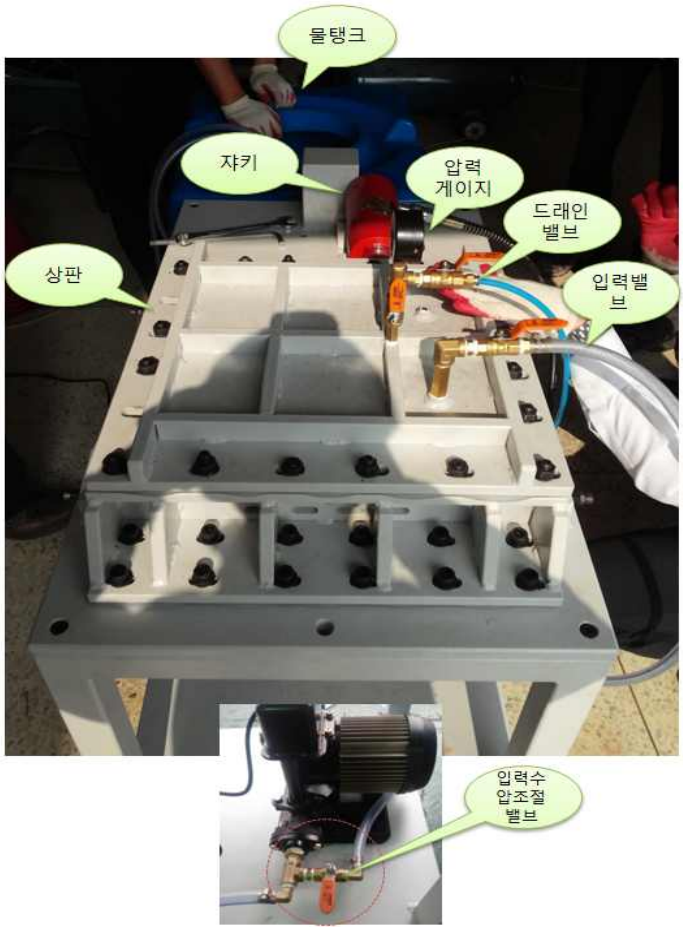
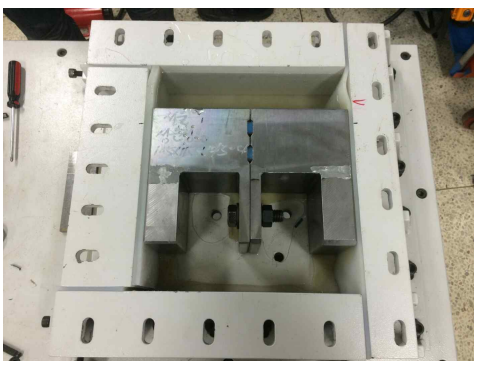
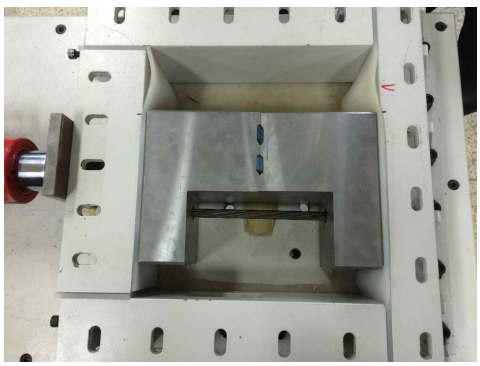


그림 2.10.8 체결방식에 따른 누수량 측정 실험장치



(a) 볼트 체결방식 체결부



(b) 강연선 체결방식 체결부

그림 2.10.9 체결방식에 따른 체결부 단면체

3. 실험수행 및 결과

그림 2.10.10은 체결방식에 따른 누수량 실험을 수행하는 과정을 나타낸 것이다. 실험에서는 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 4bar까지 수압을 작용시켰다.

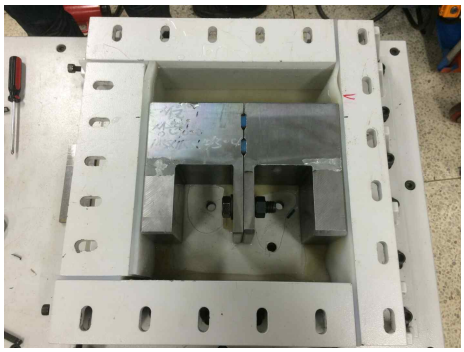
수압을 컨트롤을 필요로 하는 실험에서는 정확한 수압을 작용시키기 위해서 물의 누수를 방지하는 것이 가장 중요하다. 본 실험에서는 실험장치의 본체를 결속시키기 위해 체결부 단면체를 설치한 후, 수십 개의 볼트와 너트로 상판과 본체를 구속시켰다. 또한 유압잭을 이용하여 세그먼트 블록을 옆면에서 지지하였다.

이론적으로 쉴드터널에서는 시공 오차 등이 발생하지 않거나 수압이 상당히 높지 않을 경우에는 누수가 발생되지 않는다. 본 실험은 볼트 체결방식과 강연선 체결방식 두 가지 경우에서 동일한 수압 및 시공 오차의 조건에서 발생되는 누수량에 대한 상대비교가 목적이다. 따라서, 세그먼트 블록 조립시 누수가 전혀 발생되지 않을 경우에는 체결방식에 따른 발생 누수량의 상대 비교가 불가능하기 때문에, 본 실험에서는 세그먼트 블록 결합시 누수가 발생될 수 있도록 인위적인 시공 오차가 생기게 하였다.

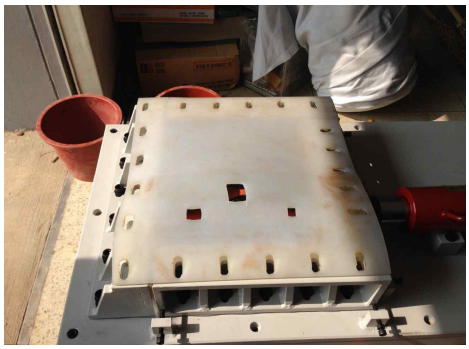
표 2.10.1은 수압 변화에 따른 체결방식별 누수량 측정결과를 나타낸 것이다. 최초 수압이 1bar일 경우에서 강연선 및 볼트 체결방식 모두 누수량이 발생하지 않았다. 수압을 2bar로 높였을 경우 볼트 체결방식에서 누수가 발생되었는데, 측정시간 5분 동안 약 160㎖가 측정되었다.

수압을 3bar로 높였을 경우에는 강연선 체결방식에서는 5분 동안 105㎖, 볼트 체결방식에서는 420㎖ 누수량이 발생하였고, 수압을 최대 4bar까지 높였을 경우에는 강연선 체결방식에서는 240㎖, 볼트 체결방식에서는 750㎖의 누수량이 발생하였다. 실험결과 동일한 시공 오차 및 수압에서 강연선 체결방식이 볼트 체결방식에 비해 누수량 발생이 약 68~75% 정도 경감되는 것을 확인할 수 있었다.

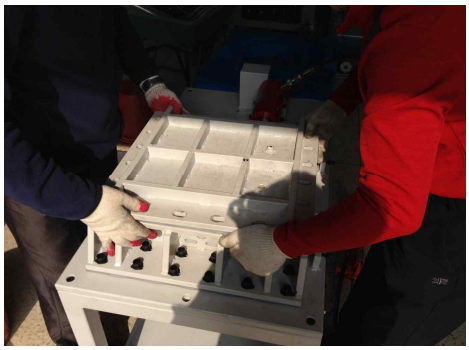
본 실험 결과는 두 가지 체결방식에 대해 서로 상대 비교한 결과로서 실제 시공 현장에서의 측정할 경우 가장 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 세그먼트 접합부의 방수 성능 한계치보다 수압이 더 높을 경우에는 두 가지 체결방식의 차이가 미비할 수도 있을 것으로 판단된다. 그러나 세그먼트 접합부 및 수압 조건이 동일한 경우에는 강연선 체결방식이 기존 볼트 체결방식에 비해 발생 누수량 저감에 유리할 것으로 판단된다.



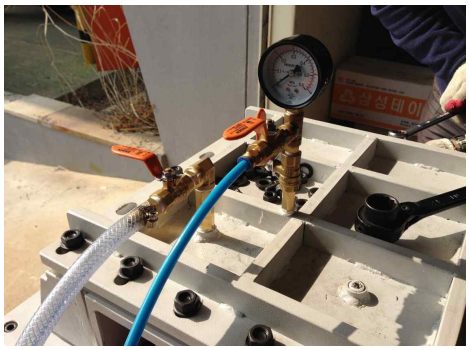
(a) 실험장치 블록 결합



(b) 상판 전면 고무 지수판 설치



(c) 상판 결합



(d) 수압게이지 및 주입밸스 설치



(e) 수압 밸브 작동(1bar~4bar)



(f) 최대 수압 4bar 작용



(g) 드래인 밸드로 배출되는 지하수



(h) 누수량 측정

그림 2.10.10 체결방식에 따른 누수량 측정실험 과정

표 2.10.1 수압 변화에 따른 체결방식별 누수량 측정결과(단위 : ㎖)

작용수압 / 체결방식	1bar	2bar	3bar	4bar
볼트 체결방식(A)	×	160	420	750
강연선 체결방식(B)	×	×	105	240
비교(B/A)	-	-	0.25	0.32
주) 누수량 측정시간 : 5분				

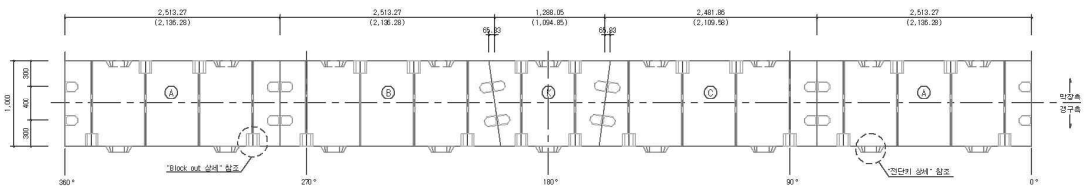
4. 강연선 쉴드터널 누수 감소효과 검토

실험 결과 강연선 체결방식이 기존 볼트 체결방식보다 체결부에서의 누수량이 약 68~75% 감소하는 것으로 나타났지만, 강연선 쉴드터널에서 종방향은 강연선으로 체결되지만 횡방향은 기존 쉴드터널과 동일하게 볼트로 체결된다. 따라서 실제 누수량 차이를 보이는 것은 종방향 세그먼트 접합부이며, 종방향 세그먼트 접합부의 경우 기존 쉴드터널과 발생 누수량의 차이가 없다고 할 수 있다.

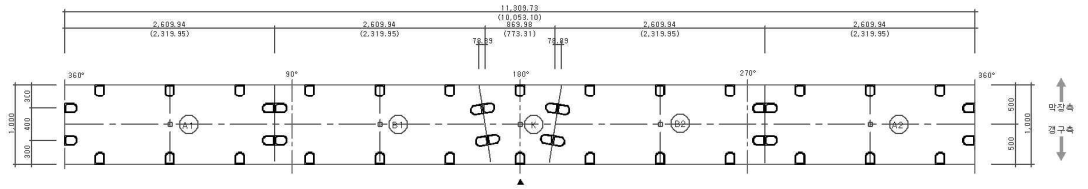
그림 2.10.11 은 강연선 및 볼트 체결방식 쉴드터널의 단면도를 나타낸 것이다. 동일 단면도에서 볼 때 강연선 체결 쉴드터널은 강연선 체결 부위가 18ea, 볼트 체결 부위가 8ea이며, 기존 쉴드터은 볼트 체결 부위가 총 21ea이다.

표 2.10.1의 실험 결과를 바탕으로 최대 수압이 작용할 경우 볼트 체결부의 발생 누수량을 1, 강연선 체결부의 발생 수량을 0.32로 가정하고, 동일 단면에 대해 비교 하면 표 2.10.2와 같이 강연선 체결방식이 볼트 체결방식에 비해 세그먼트 체결부에서 약 35% 정도 누수량이 저감한다고 할 수 있다.

따라서, 강연선 체결부위가 터널 종방향에만 존재하지만 터널 전구간을 고려하였을 경우 체결방식 변화로 인한 누수량 저감 효과가 적지 않을 것으로 판단된다.



(a) 강연선 체결방식



(b) 볼트 체결방식

그림 2.10.11 체결방식별 쉴드터널 1링 단면도

표 2.10.2 체결부 수량에 따른 누수량 비교

단면 구분	볼트 체결부(ea)	강연선 체결부(ea)	발생 누수량	비고
볼트 체결방식	21	-	21×1 = 21	100%
강연선 체결방식	8	18	8×1+18×0.32 = 13.76	65.5%

소결론

(1) 본 연구에서는 세그먼트 지수재 내수압 시험, 수팽창 지수재 팽창성능 모형실험 등 기존 방수 성능 실험을 조사하고, 강연선 및 볼트 체결방식에 따라 발생되는 누수량의 차이를 확인하기 위해 실험장치를 고안하여 실험을 수행하였다.

(2) 실제 세그먼트 체결방식에 따른 구조 형태를 모사하여 체결부재를 관통하는 단면을 정면도로 형상화하여 강연선 및 볼트 체결방식의 체결부 구조를 가장 특징적으로 표현할 수 있는 체결부 단면체를 제작하였다.

(3) 볼트 및 강연선 체결방식에서 동일한 수압 및 시공 오차의 조건에서 발생되는 누수량을 상대 비교하기 위해 실험장치를 제작하였고, 수압을 1bar에서 4bar까지 달리하면서 체결부에서 발생하는 누수량을 측정하였는데, 발생 누수량의 상대 비교를 위해서 세그먼트 블록 결합시 인위적인 시공 오차가 생기게 하였다.

(4) 체결방식에 따른 발생 누수량 측정 결과 볼트 체결방식에서는 수압이 2bar일 때 측정시간 5분 동안 약 160㎖, 3bar일 때 420㎖, 4bar일 때 750㎖의 누수량이 발생하였고, 강연선 체결방식에서는 3bar일 때 105㎖, 4bar일 때 240㎖의 누수량이 발생하여 동일한 시공 오차 및 수압에서 강연선 체결방식이 볼트 체결방식에 비해 누수량 발생이 약 68~75% 정도 경감되는 것을 확인할 수 있었다. 터널 전체에서 발생하는 누수량은 약 35%정도 경감되는 것으로 검토되었다.

제 11 절 세그먼트 체결방식에 따른 지수재 거동 평가

쉴드터널의 시공은 쉴드TBM을 이용하여 수행되어 진다. 볼트 체결방식의 쉴드터널 시공 프로세스는 먼저 이렉터를 사용하여 지수재가 부착되어 있는 세그먼트를 체결 위치에 두고, 쉴드머신 유압잭을 이용하여 조립가압(10~20톤)으로 볼트 체결을 통해 조립된다. 이후 기 조립된 세그먼트에 굴진 추력(200~500톤)이 가해져서 막장 전방으로 쉴드머신이 굴착진행하게 된다. 강연선 체결방식 쉴드터널의 시공 프로세스에서는 쉴드머신 유압잭을 이용하여 조립가압을 가한 세그먼트에 볼트 체결대신 12~3톤의 긴장력을 가하여 조립되어 진다. 이러한 시공과정에서 세그먼트에 부착되어 있는 지수재에 문제가 발생할 경우 향후 누수 등의 문제를 초래할 수 있다.[1] 이에 볼트 체결 방식과 강연선 체결방식 때 발생하는 체결력에 따른 지수재의 거동을 분석하였다.

1. 수팽창 지수재 및 개스킷 품질 규정

가. 수팽창 지수재 품질 규정

지수재는 재료의 성질에 따라 재료의 점착성을 이용하는 것, 탄성 반발력을 이용하는 것, 수팽창에 의한 팽창 압을 이용하는 방법 들이 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 엷게되어 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.[2]

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 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 대하여 유리하다.

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 억제함으로서 콘크리트의 이탈현상을 방지하는 목적으로 쓰인다. 한편, 항만, 발전소, 조선소 등의 구조물에서 해수로 인한 누수를 차단하기 위해 사용되는 해수 팽창형 등이 있다.

표 2.11.1은 수팽창 지수재의 KS 실험항목 및 기준치를 나타낸 것이고, 표 2.11.2는 LH공사의 수팽창 지수재 시편의 물성표를 나타낸 것이다.

표 2.11.1 수팽창 지수재 KS실험항목 및 기준치

시험 항목		단위	규격치	시험조건
경도(HS)		-	50±10	KS M 6793:2010
인장강도		kgf/㎠(MPa)	2.5이상	
신장율		%	450이상	
촉진 노화 시험	인장강도 변화율	%	±25이내	
	신장율 변화율	%	±25이내	
	경도 변화	-	±10이내	
침지시험	체적 변화율	%	200이상	
	팽창후 성상	-	이상없을것	
반목침지 건조시험	최대부피변화율	%	200이상	
	최소부피변화율	%	100이상	

표 2.11.2 수팽창 지수재 시편 물성표(LH공사)

시험 항목	시험기준	시험조건
경도(HS)	40~60	LH주택공사
팽창 후 성상	이상없음	
수팽창률(%)	300이상	

나. 개스킷 지수재 품질 규정

고무 개스킷은 탄성반발력에 의한 접면압력으로 방수하는 재료로서 유럽에서 가장 널리 이용되고 있는 세그먼트용 방수재이다. EPDM 개스킷은 사용 실적이 많고, 응력 완화나 장기적인 내구성에 대해서도 충분히 검토 및 평가되었다. 최근에는 수팽창성 지수재와 결합된 복합형 EPDM 개스킷도 개발되어 국내외에서 사용되고 있다.

그림 2.11.1은 표준타입의 EPDM 개스킷의 형상을 나타낸 것이고, 그림 2.11.2는 개스킷의 압출기계를 나타낸 것이다. 개스킷은 장기내구성이 우수하며 시공오차에 대한 대응성이 우수하여 대구경 터널에 적합하다. 국내에서는 시흥-독산 전력구 터널, 대림 분기 전력구 터널에 적용이 되었으며, 유럽에서 주로 적용하고 있다. 그러나 비교적 지수재의 두께가 두꺼워 제작 및 조립 시 정밀 시공이 요구되며, 2차 방수대책이 부족한 실정이다.[2)]

표 2.11.3은 EPDM 개스킷의 물리적 특성을 나타낸 것인데, 표준 시험절차는 독일의 DIN 규정에 준하여 진행된다.[3)]

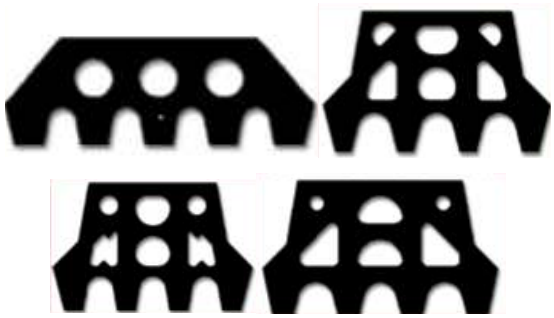


그림 2.11.1 EPDM 개스킷 표준형상

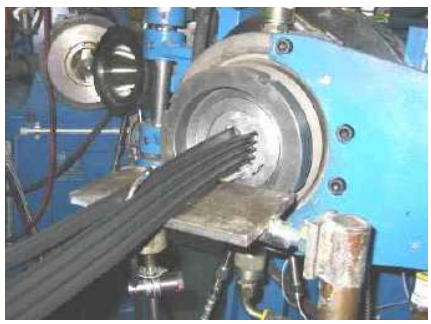


그림 2.11.2 개스킷 압출기계

표 2.11.3 EPDM 개스킷의 물리적 특성

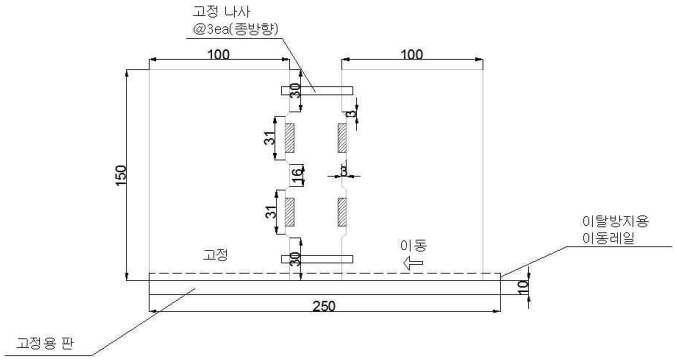
항목	기준
경도	55~65
인장강도	120kg/㎠ 이상
연신율	300% 이상
인열저항	25kg/㎝

2. 체결력 증가에 따른 지수재 거동 평가

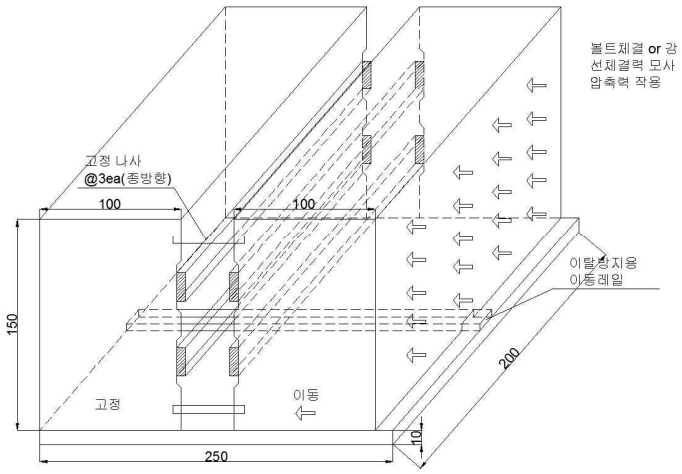
가. 실험장치 제작 및 계획

쉴드터널의 체결방식에 따른 지수재의 거동을 평가하기 위해서는 각기 다른 체결력을 받은 지수재의 장기 및 단기적인 분석이 필요하다. 이에 기존 볼트를 이용한 체결방식과 강연선을 이용한 체결방식에 따른 고무 수팽창 지수재와 개스킷의 거동을 비교를 통해 평가를 수행하였다.

그림 2.11.3은 지수재 거동평가를 위해 제작하고자 하는 실험장치의 도안을 나타낸 것이다. 스틸 재질의 강판에 실제 세그먼트 단면과 같이 수팽창 지수재와 개스킷을 부착할 수 있는 홈을 형성하고, 한쪽 강판은 고정된 지지를 받으면서 다른 쪽 강판에 강연선 및 볼트 체결방식과 동일한 체결력을 줄 수 있게 설계되었다.



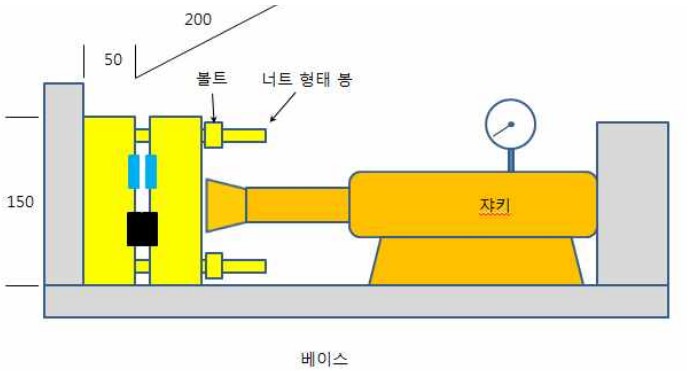
(a) 정면도



(b) 입체도

그림 2.11.3 지수재 거동 평가 실험장치 도안

체결력은 쟈키(jockey)를 이용하여 본 연구에서 수행된 세그먼트 체결 실험에서 실제로 적용한 볼트 및 강연선의 체결력을 압력으로 환산하여 적용하고자 하였다. 그리고 2개의 강판을 관통하는 너트와 너트를 조립할 수 있는 볼트를 구상하여 재하된 체결력이 소실되는 것을 방지하고자 하였다. 그림 2.11.4는 지수재 거동 평가를 위한 실험장치의 개요도를 나타낸 것이다.





(a) 개요도 (b) 제작 모습

그림 2.11.4 지수재 거동 평가를 위한 실험장치

나. 실험 수행

지수재 거동 실험은 그림 2.11.3의 구성을 1세트로 규정하여 각각 볼트 및 강연선 체결력을 재하한 6세트(총 12세트)에 대해 15일 간격으로 체결력을 해제하고, 지수재의 체적 변형을 조사하는 방법으로 진행되었다.

본 실험에 적용한 체결력은 제 4 절 실대형 실험에서 강연선과 볼트에 적용한 체결력을 강판의 면적에 대해 환산하여 적용하였다.

1개의 세그먼트에는 4개의 강연선이 통과하게 되며 강연선은 각각 13ton의 힘으로 세그먼트를 긴장하게 된다. 이는 전력구 및 대단면 쉴드터널 모두 동일하게 적용되기 때문에, 지수재가 받는 최대 체결력 조건을 고려하기 위해 더 큰 힘을 받는 전력구 터널 단면에 대해 검토를 실시하였다.

그림 2.11.5는 강연선 체결방식의 전력구 쉴드터널로 설계된 표준단면을 나타낸 것이다. 가장 일반적인 A-Type 세그먼트는 그림 2.11.6과 같으며 이 때 세그먼트의 총

면적은 4929.9㎠으로서 4개의 강연선이 총 52ton의 체결력으로 조립된다. 따라서 면적을 고려하여 등분포 하중으로 환산하면 세그먼트에는 10.5kg/㎠ 압력이 작용하게 된다.

실험장치의 강판의 크기는 가로 20cm, 세로 15cm로서 면적은 300㎠이며, 세그먼트에 작용하는 압력이 10.5kg/㎠이 되게 체결력을 재하할 경우 강판에는 3.15ton의 강연선 체결력이 주어지게 된다.

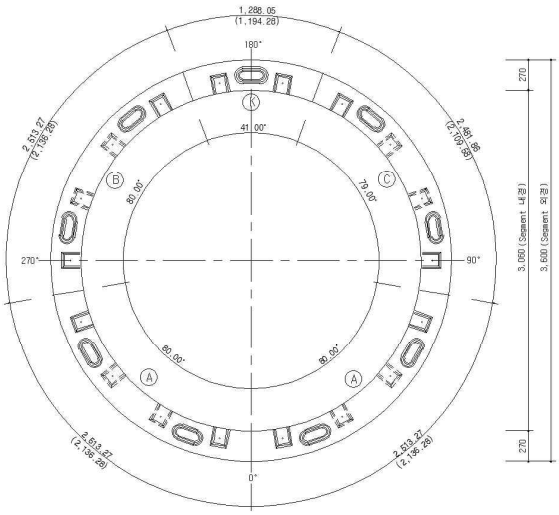


그림 2.11.5 강연선 체결 전력구 쉴드터널 표준단면

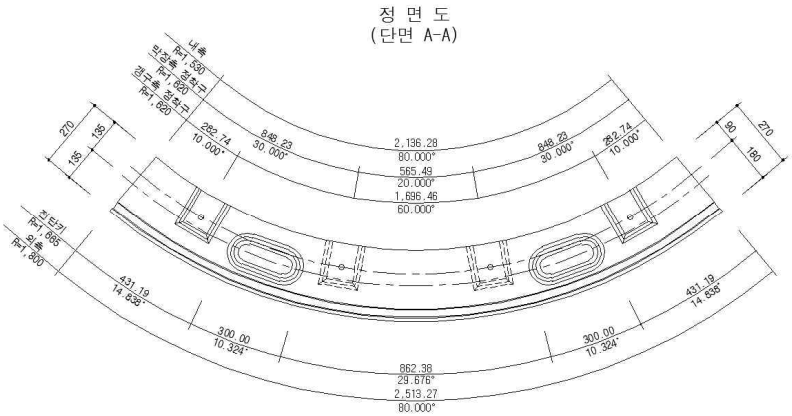


그림 2.11.6 A-Type 세그먼트 단면도(아일랜드형 전단키 세그먼트)

볼트 체결력의 경우에도 본 연구에서 수행한 실대형 체결 실험의 체결력을 고려하여 적용하였다. 실대형 실험에서 볼트의 조립 가압은 토크측정이 가능한 다이얼이 부착된 토크렌치(JIS 규격, JIS B4650 수동식 토크렌치)를 이용하여 인력으로 체결하기

때문에 정확한 기준을 제시하기는 어려웠다. 따라서 수동식 토크렌치를 이용하여 인력으로 줄 수 있는 최대치까지 체결을 실시했었다.

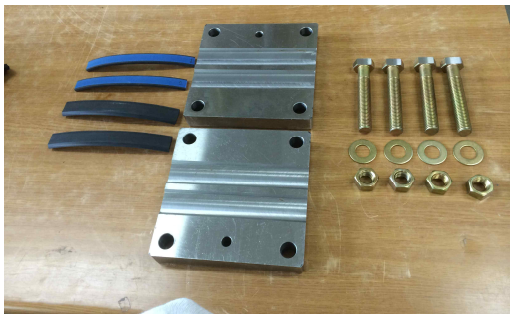
실대형 체결 실험에서 사용한 세그먼트의 두께는 250mm, 면적은 5364.9㎠로서 52ton에 대하여 등분포 하중으로 환산시 9.7kg/㎠의 압력이 가해지게 된다. 계측된 결과 중 가장 유사하게 측정된 계측 값은 강연선 체결시 8.7kg/㎠, 볼트 체결시 3.3kg/㎠으로서. 강연선 체결력은 볼트 체결력보다 약 2.6배 정도 높게 측정되었다.

따라서 이 비율을 고려하면 강연선 체결력은 3.15ton 이므로 지수재 거동 실험에 적용할 볼트 체결력은 1.2ton으로 가정하여 실험을 수행하였다. 표 2.11.4는 지수재 거동 실험에서 볼트 및 강연선의 체결력을 나타낸 것이다.

표 2.11.4 지수재 거동 실험에 적용한 볼트 및 강연선 체결력

	강연선 체결력 계산	볼트 체결력 계산
세그먼트 면적(A)	4929.9㎠	
4열 강연선 체결력(B)	52ton	
등분포 하중 환산(C=B/A)	10.5kg/㎠	
실험용 강판 면적(D)	300㎠	
실험용 강연선 체결력(E=C×D)	**3.15ton**	
실대형 실험결과 강연선 체결력 비율(F)	2.6	
실험용 볼트 체결력(G=E/F))		**1.2ton**

그림 2.11.7은 지수재 거동 실험 순서를 나타낸 것이다. 총 12세트의 강판에 대해 볼트 및 강연선 체결력을 6세트씩 각각 재하하고, 15일 단위로 강판을 해체하여 최대 90일까지의 지수재 변형량을 측정하였다.



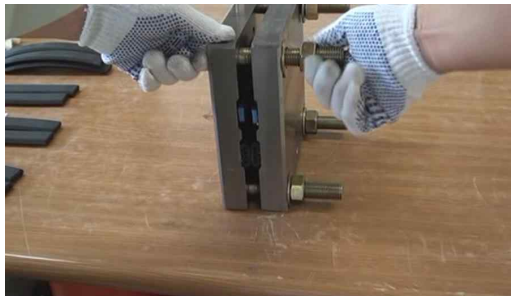
(a) 실험 준비



(b) 지수재 부착



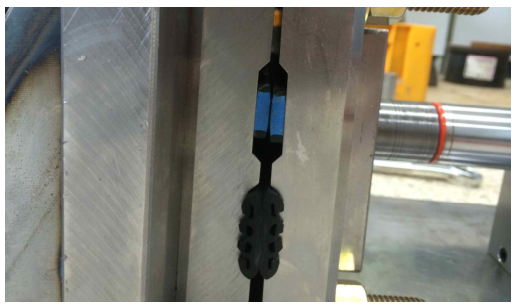
(c) 몰드 결합



(d) 고정 볼트 가조립



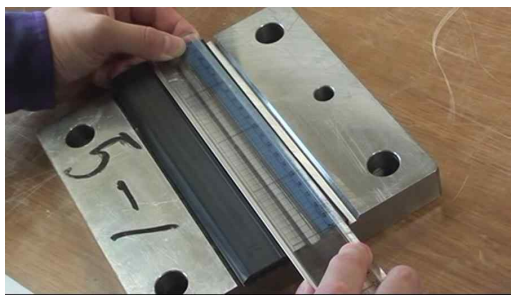
(e) 체결력 재하



(f) 체결력에 따른 지수재 변형



(g) 체결력 유지(최대 90일)



(h) 해체 및 지수재 변형량 측정

그림 2.11.7 지수재 거동 평가를 위한 실험 순서

다. 실험결과

(1) 수팽창 지수재 거동

실험 진행 전 그림 2.11.8와 같은 지수재에 숫자 표식을 하고 각각의 초기 길이(윗변, 아랫변, 높이, 두께)에 대하여 측정을 실시하였다. 표 2.11.5와 표 2.11.6은 재하 시간 경과 후 강연선 및 볼트 체결력에 따른 수팽창 지수재의 길이 변화를 나타낸 것이다.



(a) 수팽창 지수재



(b) 개스킷

그림 2.11.8 실험용 지수재

표 2.11.5 강연선 체결력 재하시 수팽창 지수재 길이 변화

구분	재하기간 (day)	초기 측정치(cm)				재하후 측정치(cm)			
		윗변	아랫변	높이	두께	윗변	아랫변	높이	두께
1Set	15	20.2	20.2	2.0	0.5	20.25	20.26	2.08	0.499
		20.3	20.1	2.0	0.5	20.36	20.16	2.08	0.498
2Set	30	20.0	20.0	2.0	0.5	20.1	20.11	2.11	0.498
		20.0	20.0	2.0	0.5	20.19	20.33	2.11	0.497
3Set	45	20.0	20.0	2.0	0.5	20.18	20.21	2.17	0.495
		20.0	20.1	2.0	0.5	20.27	20.37	2.16	0.494
4Set	60	19.5	20.1	2.0	0.5	19.91	20.41	2.18	0.494
		20.0	20.1	2.0	0.5	20.53	20.55	2.18	0.494
5Set	75	20.0	20.0	2.0	0.5	20.59	20.57	2.18	0.493
		19.0	20.0	2.0	0.5	19.6	20.58	2.18	0.492
6Set	90	20.0	20.0	2.0	0.5	20.63	20.55	2.18	0.491
		20.0	20.0	2.0	0.5	20.65	20.56	2.18	0.491

표 2.11.6 볼트 체결력 재하시 수팽창 지수재 길이 변화

구분	재하기간 (일)	초기 측정치(cm)				재하후 측정치(cm)			
		윗변	아랫변	높이	두께	윗변	아랫변	높이	두께
1Set	15	20.0	20.0	2.0	0.5	20.0	20.0	2.0	0.5
		19.9	20.0	2.0	0.5	20.0	20.0	2.0	0.5
2Set	30	20.0	20.0	2.0	0.5	20.02	20.08	2.05	0.5
		19.9	20.0	2.0	0.5	20.02	20.11	2.03	0.49
3Set	45	19.9	20.0	2.0	0.5	20.04	20.14	2.03	0.49
		20.0	20.0	2.0	0.5	20.13	20.14	2.04	0.49
4Set	60	20.0	20.0	2.0	0.5	20.13	20.15	2.04	0.49
		19.9	20.0	2.0	0.5	20.05	20.15	2.04	0.49
5Set	75	20.0	20.0	2.0	0.5	20.14	20.15	2.04	0.49
		20.0	19.9	2.0	0.5	20.14	20.06	2.05	0.49
6Set	90	20.0	20.0	2.0	0.5	20.16	20.16	2.06	0.49
		19.9	20.0	2.0	0.5	20.06	20.16	2.06	0.49

표 2.11.7과 표 2.11.8은 강연선 및 볼트 체결력 재하시 길이 변화에 따른 지수재의 변형율을 나타낸 것이다.

표 2.11.7 강연선 체결력 재하시 수팽창 지수재 변형

구분	재하기간 (day)	변형량(cm)				변형율(%)			
		윗변	아랫변	높이	두께	윗변	아랫변	높이	두께
1Set	15	0.050	0.060	0.080	-0.001	0.2	0.3	4.0	-0.2
		0.060	0.060	0.080	-0.002	0.3	0.3	4.0	-0.4
2Set	30	0.100	0.110	0.110	-0.002	0.5	0.5	5.5	-0.4
		0.190	0.330	0.110	-0.003	1.0	1.6	5.5	-0.6
3Set	45	0.180	0.210	0.170	-0.005	0.9	1.1	8.5	-1.0
		0.270	0.270	0.160	-0.006	1.4	1.3	8.0	-1.2
4Set	60	0.410	0.310	0.180	-0.006	2.1	1.5	9.0	-1.2
		0.530	0.450	0.180	-0.006	2.7	2.2	9.0	-1.2
5Set	75	0.590	0.570	0.180	-0.007	3.0	2.9	9.0	-1.4
		0.600	0.580	0.180	-0.008	3.2	2.9	9.0	-1.6
6Set	90	0.630	0.550	0.180	-0.009	3.2	2.8	9.0	-1.8
		0.650	0.560	0.180	-0.009	3.2	2.8	9.0	-1.8

표 2.11.8 볼트 체결력 재하시 수팽창 지수재 변형

구분	재하기간 (day)	변형량(cm)				변형율(%)			
		윗변	아랫변	높이	두께	윗변	아랫변	높이	두께
1Set	15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.10	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00
2Set	30	0.02	0.08	0.05	0.00	0.10	0.40	2.50	0.00
		0.12	0.11	0.03	-0.01	0.60	0.55	1.50	-2.00
3Set	45	0.14	0.14	0.03	-0.01	0.70	0.70	1.50	-2.00
		0.13	0.14	0.04	-0.01	0.65	0.70	2.00	-2.00
4Set	60	0.13	0.15	0.04	-0.01	0.65	0.75	2.00	-2.00
		0.15	0.15	0.04	-0.01	0.75	0.75	2.00	-2.00
5Set	75	0.14	0.15	0.04	-0.01	0.70	0.75	2.00	-2.00
		0.14	0.16	0.05	-0.01	0.70	0.80	2.50	-2.00
6Set	90	0.16	0.16	0.06	-0.01	0.80	0.80	3.00	-2.00
		0.16	0.16	0.06	-0.01	0.80	0.80	3.00	-2.00

그림 2.11.9는 강연선 체결력 재하시 수팽창 지수재의 변형율을 나타낸 것인데, 높이의 변형율이 가장 크게 나타났으나 최대 9% 정도로서 모든 변형량이 60일 이후부터 수렴하는 경향을 보이고 있다.

그림 2.11.10은 볼트 체결력 재하시 수팽창 지수재의 변형량을 나타낸 것인데, 높이 변형율이 최대 3%까지 발생하였지만 다른 변형율은 역시 45일을 기점으로 수렴하는 경향을 보였다.

체결방식에 따른 수팽창 지수재의 변형율은 강연선 체결방식이 지수재 높이에서 최대 3배까지의 변형율을 보였으나 실제 변형량은 1.2mm 차이이며, 수팽창 지수재의 KS신장률 기준인 450%에 크게 못 미치는 것으로 검토되었다. 이것은 강연선 체결방식의 적용으로 세그먼트에 기존 볼트보다 증가된 체결력이 재하되더라도, 수팽창 지수재는 탄성 범위 안에서 거동하며 체결력 증가가 지수재의 변형에는 영향이 없을 것으로 판단된다.

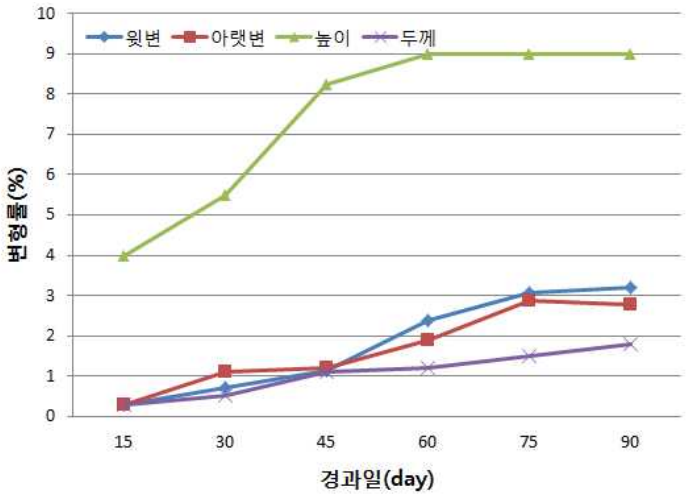


그림 2.11.9 강연선 체결력 재하시 수팽창 지수재 변형율

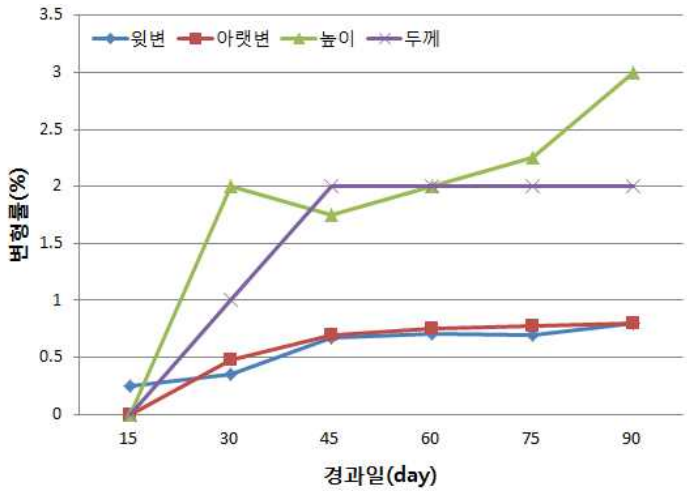


그림 2.11.10 볼트 체결력 재하시 수팽창 지수재 변형율

(2) 개스킷 거동

표 2.11.9와 표 2.11.10은 재하 시간 경과 후 강연선 및 볼트 체결력에 따른 개스킷의 길이 변화를 나타낸 것이고, 표 2.11.11과 표 2.11.12는 강연선 및 볼트 체결력 재하시 길이 변화에 따른 개스킷의 변형율을 나타낸 것이다.

표 2.11.9 강연선 체결력 재하시 개스킷 길이 변화

구분	재하기간 (day)	초기 측정치(cm)				재하후 측정치(cm)			
		윗변	아랫변	높이	두께	윗변	아랫변	높이	두께
1Set	15	20.00	20.00	3.00	1.00	20.49	20.49	3.04	1.00
		20.00	20.50	3.00	1.00	20.55	21.07	3.05	1.00
2Set	30	20.00	20.50	3.00	1.00	20.68	20.97	3.08	0.97
		20.50	20.10	3.00	1.00	21.13	20.71	3.09	0.94
3Set	45	20.00	20.00	3.00	1.00	20.62	20.60	3.10	0.97
		20.00	19.90	3.00	1.00	20.61	20.53	3.12	0.97
4Set	60	21.00	20.20	3.00	1.00	21.62	20.85	3.11	0.96
		21.00	20.10	3.00	1.00	21.63	20.75	3.12	0.96
5Set	75	20.00	20.10	3.00	1.00	20.67	20.81	3.13	0.95
		20.00	20.00	3.00	1.00	20.65	20.71	3.14	0.96
6Set	90	19.90	19.90	3.00	1.00	20.60	20.61	3.13	0.94
		20.00	20.00	3.00	1.00	20.68	20.72	3.15	0.94

표 2.11.10 볼트 체결력 재하시 개스킷 길이 변화

구분	재하기간 (day)	초기 측정치(cm)				재하후 측정치(cm)			
		윗변	아랫변	높이	두께	윗변	아랫변	높이	두께
1Set	15	19.90	19.90	3.00	1.00	20.32	20.30	3.03	1.00
		20.10	20.00	3.00	1.00	20.55	20.41	3.04	1.00
2Set	30	20.00	20.00	3.00	1.00	20.52	20.45	3.04	0.98
		20.00	20.10	3.00	1.00	20.52	20.55	3.05	0.97
3Set	45	20.00	20.00	3.00	1.00	20.58	20.47	3.04	0.96
		20.00	20.10	3.00	1.00	20.59	20.58	3.05	0.95
4Set	60	20.10	20.10	3.00	1.00	20.60	20.60	3.06	0.96
		20.00	20.10	3.00	1.00	20.50	20.61	3.06	0.95
5Set	75	19.90	20.00	3.00	1.00	20.45	20.59	3.07	0.96
		20.00	20.00	3.00	1.00	20.53	20.60	3.08	0.95
6Set	90	20.00	20.00	3.00	1.00	20.57	20.61	3.09	0.94
		20.00	20.10	3.00	1.00	20.59	20.72	3.09	0.95

표 2.11.11 강연선 체결력 재하시 개스킷 변형

구분	재하기간 (day)	변형량(cm)				변형율(%)			
		윗변	아랫변	높이	두께	윗변	아랫변	높이	두께
1Set	15	0.49	0.49	0.04	0.00	2.45	2.45	1.33	0.00
		0.55	0.57	0.05	0.00	2.75	2.78	1.67	0.00
2Set	30	0.68	0.47	0.08	-0.03	3.40	2.29	2.67	-3.00
		0.63	0.61	0.09	-0.06	3.07	3.03	3.00	-6.00
3Set	45	0.62	0.60	0.10	-0.03	3.10	3.00	3.33	-3.00
		0.61	0.63	0.12	-0.03	3.05	3.17	4.00	-3.00
4Set	60	0.62	0.65	0.11	-0.04	2.95	3.22	3.67	-4.00
		0.63	0.65	0.12	-0.04	3.00	3.23	4.00	-4.00
5Set	75	0.67	0.71	0.13	-0.05	3.35	3.53	4.33	-5.00
		0.65	0.71	0.14	-0.04	3.25	3.55	4.67	-4.00
6Set	90	0.70	0.71	0.13	-0.06	3.52	3.57	4.33	-6.00
		0.68	0.72	0.15	-0.06	3.40	3.60	5.00	-6.00

표 2.11.12 볼트 체결력 재하시 개스킷 변형

구분	재하기간 (day)	변형량(cm)				변형율(%)			
		윗변	아랫변	높이	두께	윗변	아랫변	높이	두께
1Set	15	0.42	0.40	0.03	0.00	2.11	2.01	1.00	0.00
		0.45	0.41	0.04	0.00	2.24	2.05	1.33	0.00
2Set	30	0.52	0.45	0.04	-0.02	2.60	2.25	1.33	-2.00
		0.52	0.45	0.05	-0.03	2.60	2.24	1.67	-3.00
3Set	45	0.58	0.47	0.04	-0.04	2.90	2.35	1.33	-4.00
		0.59	0.48	0.05	-0.05	2.95	2.39	1.67	-5.00
4Set	60	0.50	0.50	0.06	-0.04	2.49	2.49	2.00	-4.00
		0.50	0.51	0.06	-0.05	2.50	2.54	2.00	-5.00
5Set	75	0.55	0.59	0.07	-0.04	2.76	2.95	2.33	-4.00
		0.53	0.60	0.08	-0.05	2.65	3.00	2.67	-5.00
6Set	90	0.57	0.61	0.09	-0.06	2.85	3.05	3.00	-6.00
		0.59	0.62	0.09	-0.05	2.95	3.08	3.00	-5.00

그림 2.11.11은 강연선 체결력 재하시 개스킷의 변형률 나타낸 것인데, 두께 변형률이 최대 6% 정도로 가장 크게 발생하였지만, 다른 측정 부분의 변형률은 75일 이후부터 점차 수렴하는 경향을 나타내었다. 그리고 그림 2.11.12는 볼트 체결력 재하시 개스킷의 변형률을 나타낸 것인데, 강연선 체결력 재하시와 같이 두께 변형률이 최대

5.5% 정도로 가장 크게 발생하였지만 다른 변형률은 75일 이후부터 4% 이하에서 수렴하는 경향을 나타내었다.

표 2.11.3의 EPDM 개스킷의 물리적 특성을 살펴보면 연신율의 경우 300% 이상을 기준으로 하고 있는 것을 알 수 있는데, 여기서 연신율은 길이의 변화량에 대한 정의이고 변형률은 체적 전체의 변화량에 대한 정의이다. 연신율이 300% 이상인 개스킷 재료에 있어서 두께 변형률 6%는 재료의 물리적 성질에 거의 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 이러한 실험 결과를 통해 수팽창 지수재와 동일하게 개스킷의 경우에도 강연선 체결방식을 적용함으로서 체결력이 증가하더라도, 개스킷은 탄성 범위 안에서 거동하며 체결력 증가가 지수재의 변형에는 영향이 없을 것으로 판단된다.

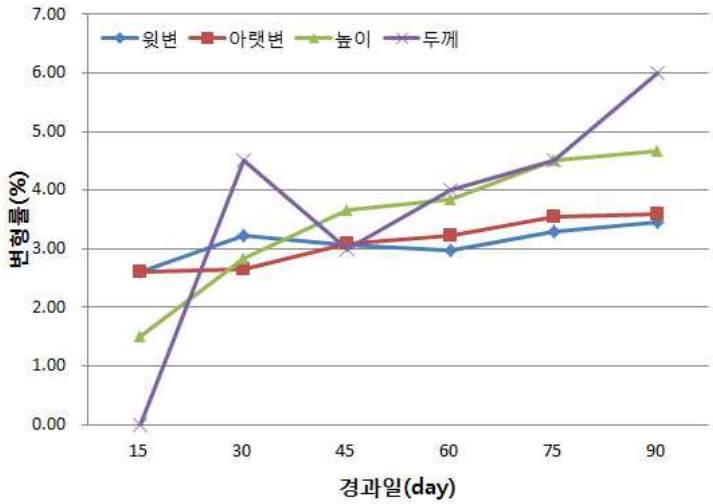


그림 2.11.11 강연선 체결력 재하시 개스킷 변형율

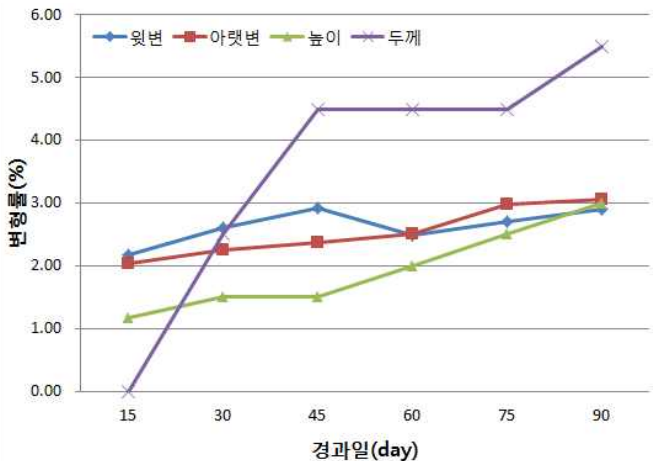


그림 2.11.12 볼트 체결력 재하시 개스킷 변형율

소결론

(1) 강연선 체결방식의 적용으로 세그먼트 체결력이 증가하는 경우 세그먼트 접합부에 설치되는 수팽창 지수재 및 개스킷에 미치는 영향을 평가하기 위해, 실험장치를 고안하였고 강연선 및 볼트 체결력을 환산하여 시간의 경과에 따른 변형 거동을 평가하였다.

(2) 체결방식에 따른 수팽창 지수재의 변형율은 강연선 체결방식이 지수재 높이에서 최대 3배까지의 변형율을 보였으나 실제 변형량은 1.2mm 차이이며, 수팽창 지수재의 KS신장률 기준인 450%에 크게 못 미치는 것으로 검토되었다. 이것은 강연선 체결방식의 적용으로 세그먼트에 기존 볼트보다 증가된 체결력이 재하되더라도, 수팽창 지수재는 탄성 범위 안에서 거동하며 체결력 증가가 지수재의 변형에는 영향이 없을 것으로 판단된다.

(3) 강연선 체결력 재하시 개스킷의 두께 변형률은 최대 6% 정도로 가장 크게 발생하였지만, 다른 측정 부분의 변형률은 75일 이후부터 점차 수렴하는 경향을 나타내었고, 볼트 체결력 재하시 개스킷의 두께 변형률이 최대 5.5% 정도로 강연선 체결방식과 거의 차이를 보이지 않았다.

(4) EPDM 개스킷의 물리적 특성을 살펴보면 연신율의 경우 300% 이상을 기준으로 하고 있는 것을 알 수 있는데, 여기서 연신율은 길이의 변화량에 대한 정의이고 변형률은 체적 전체의 변화량에 대한 정의이다. 연신율이 300% 이상인 개스킷 재료에 있어서 두께 변형률 6%는 재료의 물리적 성질에 거의 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

(5) 지수재 거동 실험 결과 강연선 체결방식을 적용함으로서 체결력이 증가하더라도 지수재는 탄성 범위 안에서 거동할 것으로 예측되며, 지수재의 변형 및 거동은 볼트 체결방식과 거의 차이가 없을 것으로 판단된다.

제 12 절 강연선 체결방식의 체결력 증대효과 검증

1. 체결성능 정의 및 평가지표 설정

볼트 체결방식의 쉴드터널에서 고장력 볼트를 사용한 마찰접합 성능은 이음부 전단면의 표면 상태에 따른 마찰계수뿐만 아니라 볼트의 체결력에 의해 결정된다. 볼트의 체결력은 볼트 체결 후 시간이 흐름에 따라 감소하는데, 그 원인으로는 볼트의 풀림, 각 요소 접촉면 사이 요철의 평탄화를 통한 밀착도 증가, 모재와 이음판 사이의 접촉면에 있는 도막의 크리프 변형, 기타 연결부의 릴렉세이션, 외력에 의한 부재의 단면 수축 등이 있다.[1)]

볼트 머리 또는 너트 밑의 접촉부와 볼트와 너트의 나사산 접촉부에는 볼트 축력으로 인해 마찰저항이 유발된다. 한편 볼트 나사부는 볼트 축에 직각인 방향에 대해 일정한 경사각을 이루므로 볼트의 축력과 나사 경사각에 의한 나사 풀림 모멘트가 발생하나, 일반적으로 나사 경사각의 크기가 작으므로 이 풀림모멘트는 충분히 작아서 마찰 저항력을 극복할 수 없다. 외력에 의해 볼트의 접합부에 일정크기 이상의 미끄러짐이 발생하여 볼트 풀림을 방지하고 있는 마찰 저항력이 거의 사라지게 되면 볼트가 풀릴 가능성도 있다.[2)]

본 연구에서는 싱가폴 지하철 현장에서 굴진거리에 따른 볼트의 회전을 측정한 결과 굴진거리가 커짐에 따라 볼트와 너트가 동시에 풀리는 것을 확인하였다. 이는 분명한 볼트 체결력의 저하로 이어지지만, 쉴드터널 세그먼트의 경우 설계단계에서 볼트는 조립재료로서의 역할을 수행하고 작용하는 하중에 대해서는 구조체가 담당하는 것으로 보고 있다. 또한, 모든 쉴드터널 현장에서 볼트의 풀림현상이 발생한다고 볼 수는 없기 때문에 볼트 체결력의 저하가 없는 것으로 보고, 강연선 체결방식과 체결력에 대한 비교를 수행하였다.

세그먼트의 체결성능을 정의함에 있어 체결재로 사용되는 강연선과 고장력 볼트는 단순히 재료 강도 측면에서만 비교되어서는 안되며, 체결 방법 및 배치에 따른 특성을 고려하여야 할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 강연선 체결방식과 볼트 체결방식에 대하여 인장, 압축, 전단력이 작용할 때의 거동 분석을 통해 체결성능을 평가하고자 하였다. 그림 2.12.1은 본 연구에서 정의한 체결성능의 평가지표를 나타낸 것이다.



그림 2.12.1 강연선 체결방식의 체결성능 평가 지표

2. 체결력 증대효과 검증

가. 압축력 증대

세그먼트를 조립하는데 높은 체결력을 가할수록 체결력은 압축력으로서 세그먼트에 작용하여 이격거리가 좁아지고 일체화거동이 가능하다. 본 연구에서는 이미 실제 세그먼트를 제작하여 경사볼트 체결방식과 강연선 체결방식의 실대형 실험을 수행하여 역학적 거동을 분석하였다.

실험에서는 내부 철근에 응력게이지가 부착된 실대형 사이즈의 세그먼트 4열에 대하여 경사볼트 체결방식의 체결력과 강연선 체결방식으로 조립하며 체결상태를 분석하였다. 경사볼트 체결방식에 대해서는 토크측정이 가능한 다이얼이 부착된 토크렌치(JIS 규격, JIS B4650 수동식 토크렌치)를 이용하여 설계 토크치인 40kg·m 까지 체결하였으며, 강연선 체결방식에 대해서는 7연선 두께 12.7mm규격을 사용하여 항복강도 1600Mpa로 긴장하여 체결을 수행하였다.

실험결과 경사볼트 체결방식의 경우 측정한 위치별로 발생한 응력에 큰 차이를 보이며 균일한 체결상태를 보이지 못하였으나, 강연선 체결방식의 경우 세그먼트 접합면에서 고른 응력분포를 보이며 양호한 체결상태인 것으로 검토되었다. 또한 체결력의 차이로 인하여 그림 2.4.16에서와 같이 경사볼트보다 강연선 체결방식의 경우의 세그먼트 접합이 육안으로 관찰하기에도 확연한 차이를 보였다.

이는 세그먼트 직선방향으로 작용하는 힘에 의한 것으로서, 경사볼트 체결방식은 볼트와 너트의 조입으로 인한 회전력이 결국 세그먼트끼리 압축시키는 압축하중으로 작용한 것이며, 강연선 체결방식에서 강연선의 긴장력 역시 세그먼트에는 압축하중으로 작용한다. 표 2.12.1은 실대형 체결 실험에서 세그먼트 상하부에 부착된 계측기에서 발생한 변형률을 재정리한 것이다.

표 2.12.1 실대형 체결 실험의 세그먼트 변형률 결과

구분		Seg 1	Seg 2	Seg 3	Seg 4
볼트 체결방식	상부	5.2	6.6	7.1	7.8
	하부	7.9	6.8	-	6.5
강연선 체결방식	상부	8.9	9.1	9.1	9.0
	하부	8.8	9.3	-	9.8

경사볼트 체결력 재하시 계측된 변형률은 평균 4.7% 이며, 강연선 체결력 재하시 변형률은 평균 9.0%를 나타내었다. 이러한 결과는 압축력 증대 측면에서 체결력 증대 효과를 검토 하였을 경우, 강연선 체결방식은 볼트 체결방식에 비해서 91.4% 더 뛰어난 성능을 발휘한다고 평가된다.

나. 인장력 증대

쉴드터널의 시공이 완료되면 일반적으로 터널 종방향에 대한 거동은 존재하지 않는 것으로 판단하지만 지진 S-파 등에 의한 종방향 하중발생이 가능하며, 시공 중 발생하게 되면 더 큰 위험이 존재한다. 이에 세그먼트 종방향으로의 인장하중이 발생 할 경우의 체결성능에 대한검토를 3차원 수치해석을 통하여 수행하였다.

(1) 검증 방법

강연선 체결 쉴드터널은 강연선 긴장을 통하여 여러 세그먼트들을 조립하게 됨으로 세그먼트 부재에 강연선에 의한 압축력이 도입된다. 강연선 체결 효과를 검토하기 위하여 기존 볼트 체결방식과의 비교 검토를 수행하였다.

① 적용 재료

- 콘크리트 설계 강도 : fck=45MPa
- 볼트 재질 및 규격 : SS400, Φ30
- 강연선 : fpu = 1900MP, 0.5” - 1EA

  도입긴장력 Pj = 0.8fpu × 98.71㎟ = 150kN

  유효긴장력 Pe = Pj의 80% 가정 = 150kN × 0.8 = 120kN

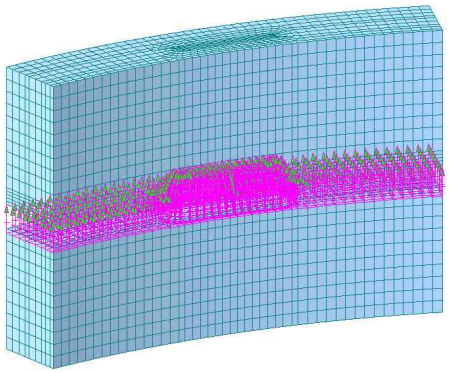
강연선 체결방식은 프리스트레싱 강연선에 의한 압축력 도입을 고려하고 압축력의 방향과 반대방향으로 하중을 재하하였으며, 작용하중을 점진적으로 증가시키며 부재의 변위 거동 추이를 통해 인장저항성능 검토를 수행하였다.

경사볼트 , 볼트박스 타입의 경우 볼트의 인장에 대한 저항능력을 검토하기 위해 연결부인 앵커볼트에 부재 축 방향력이 가해지도록 하였으며, 볼트에 발생하는 인장응력과 볼트 및 볼트박스 주위 콘크리트에 발생하는 응력형상으로 부재의 인장저항성능을 검토하였다.

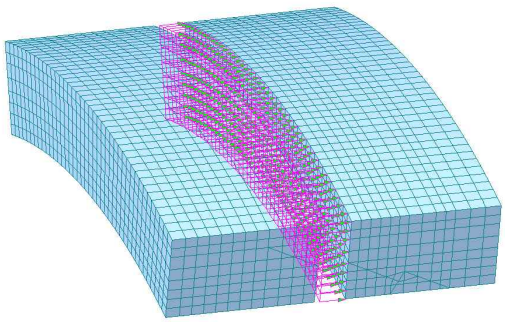
(2) 해석 모델링

강연선 체결방식 세그먼트는 강연선에 의한 압축력 도입을 고려하고 압축력의 방향과 반대방향으로 하중을 재하 하였다. 강연선은 0.5" - 1EA 강연선 2열을 배치되며 잭킹력 0.8fpu의 80%를 적용하였다.

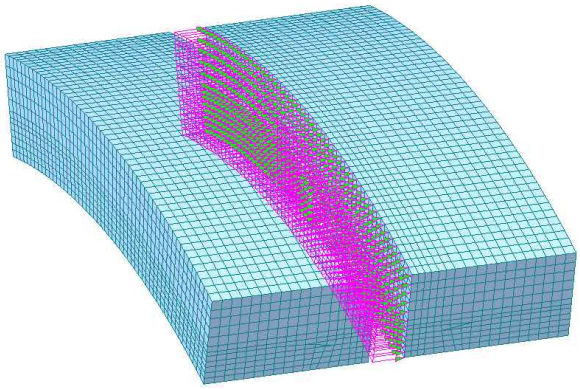
경사볼트 및 볼트박스의 경우에는 인장저항 성능 검토를 위해 볼트에 부재 축 방향력이 가해지도록 갱구측과 막장측의 하중 및 경계조건을 적용하였다. 그림 2.12.2는 각 체결방식의 인장저항 성능 검토를 위한 하중 재하도를 나타낸 것이다.



(a) 강연선 체결방식



(b) 경사볼트



(c) 볼트박스

그림 2.12.2 인장저항 성능 검토를 위한 하중 재하도

(3) 해석 결과

그림 2.12.3은 강연선 체결방식에서 인장력 작용시 하중-변위를 나타낸 것인데, 강연선에 의해 도입된 압축력보다 작은 인장력을 재하하면 변위는 발생하지 않았다 반면 압축력보다 큰 인장력 작용 시에는 큰 변위가 발생하게 되는데, 이것은 강연선 체결 프리캐스트 라이닝의 인장저항 성능은 강연선의 유효 긴장력과 동일한 것임을 알 수 있다.

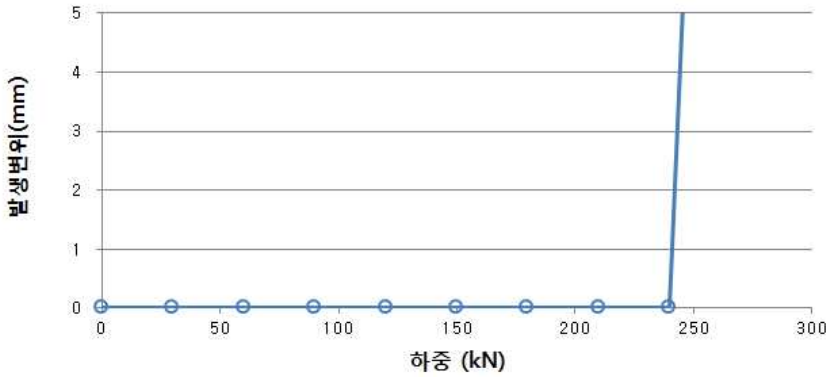


그림 2.12.3 강연선 체결방식에서 인장력 작용시 하중 - 변위 관계

그림 2.12.4는 경사볼트 체결방식에서 인장력 작용시 콘크리트 응력 분포를 나타낸 것이다. 인장력이 작용하면 라이닝을 연결하는 볼트 부재에 인장응력이 발생하며, 볼트 응력으로 인해 볼트 주변 콘크리트에 국부적인 응력이 발생한다. 그러므로 볼트의 인장응력과 볼트 주변 콘크리트의 응력 중 불리한 조건으로 경사볼트 체결방식의 인장저항 성능을 판단하였다.

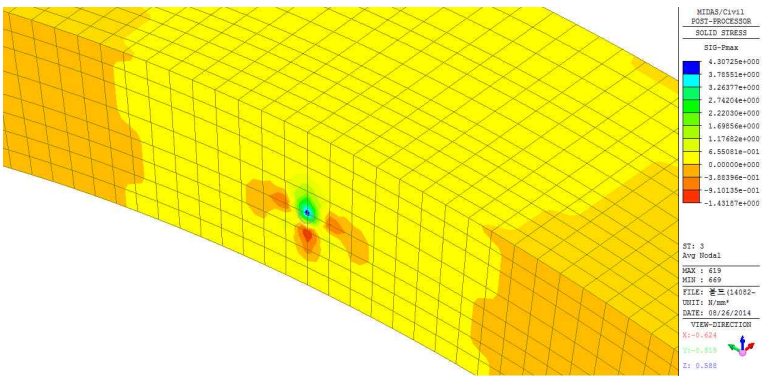


그림 2.12.4 경사볼트 체결방식에서 인장력 작용시 콘크리트 응력분포

볼트 주위 콘크리트는 볼트가 기울어져 있는 형상의 영향으로 상하면에 인장 및 압축응력이 발생하며, 압축응력은 콘크리트 압축강도에 크게 못 미치는 값으로 인장응력에 의한 인장 파괴가 지배할 것으로 나타났다.

하중을 5kN 간격으로 증가시키면서 볼트 주변 콘크리트의 최대 인장응력이 콘크리트의 파괴강도에 도달하는 하중으로 인장저항성능을 평가하였으며 ,콘크리트의 허용휨강도(파괴계수)는 $0.63 \times \sqrt{f_{ck}} = 4.226\,MPa$을 적용하였다.[3)]

그림 2.12.5는 인장력 작용시 경사볼트의 인장응력을 나타낸 것인데, 하중을 15kN 재하 하였을 때 허용응력을 초과하는 응력이 발생하였으며, 14.7kN의 하중이 재하 되었을 때 발생응력이 파괴강도에 도달하는 것으로 확인되었다.

볼트 주변 콘크리트의 인장응력이 파괴강도를 초과하는 15kN 재하시 볼트의 응력은 23.5MPa로서 SS400의 허용응력 140MPa에 크게 못 미치는 결과를 보였으며, 콘크리트의 인장에 의한 파괴가 지배하는 것으로 나타나 경사볼트 타입의 인장저항력은 14.7kN으로 검토 되었다.

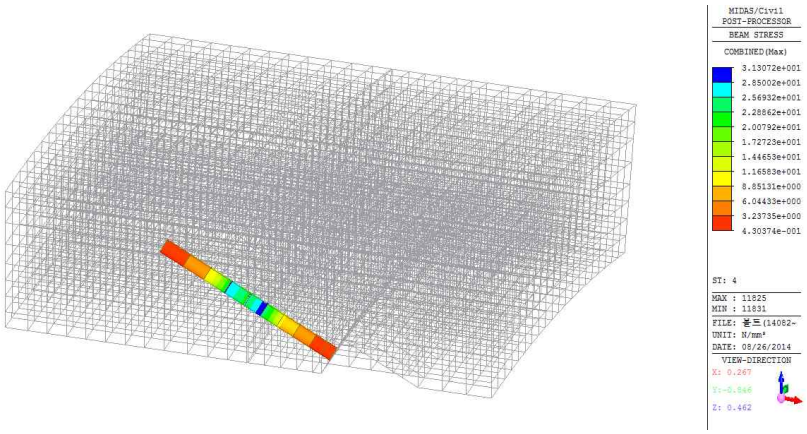


그림 2.12.5 인장력 작용시 경사볼트의 인장응력

그림 2.12.6은 볼트박스 체결방식에서 인장력 작용시 콘크리트 응력분포를 나타낸 것이다. 인장력이 작용하면 라이닝을 연결하는 볼트와 볼트박스 플레이트 부재에 인장응력이 발생하며, 볼트의 응력으로 인해 볼트박스 주변 콘크리트에 국부적인 응력이 발생한다. 따라서 볼트 및 볼트박스의 인장응력과 볼트박스 주변 콘크리트의 응력 중 불리한 조건으로 볼트박스 체결방식의 인장저항 성능을 판단하였다.

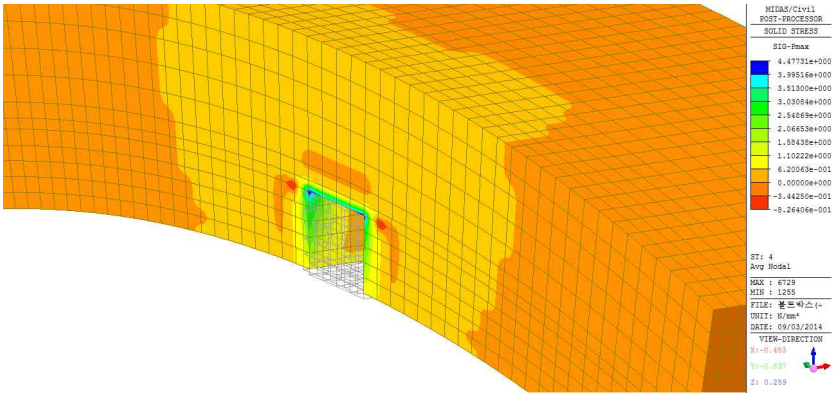


그림 2.12.6 볼트박스 체결방식에서 인장력 작용시 콘크리트 응력분포

볼트박스와 콘크리트 연결부에는 인장 및 압축응력이 발생하며, 볼트박스의 압축응력은 콘크리트 압축강도에 크게 못 미치는 값으로 인장응력에 의한 인장파괴가 지배할 것으로 나타났다.

하중을 5kN 간격으로 증가시키면서 발생하는 볼트 주변콘크리트의 최대 인장응력이 콘크리트의 파괴강도에 도달하는 하중으로 인장저항 성능을 평가하였다.

그림 2.12.7은 인장력 작용시 볼트박스의 인장응력을 나타낸 것인데, 하중을 20kN 재하 하였을 때 허용응력을 초과하는 응력이 발생하였으며, 18.9kN의 하중이 재하 되었을 때 발생응력이 파괴강도에 도달하는 것으로 검토되었다.

볼트박스 주변 콘크리트의 인장응력이 파괴강도를 초과하는 20kN 재하시 볼트의 응력은 8.4MPa로서, SS400의 허용응력 140MPa에는 크게 못 미치며 콘크리트의 인장에 의한 파괴가 지배하는 것으로 나타나 볼트박스 체결방식의 인장저항력은 18.9kN으로 검토되었다.

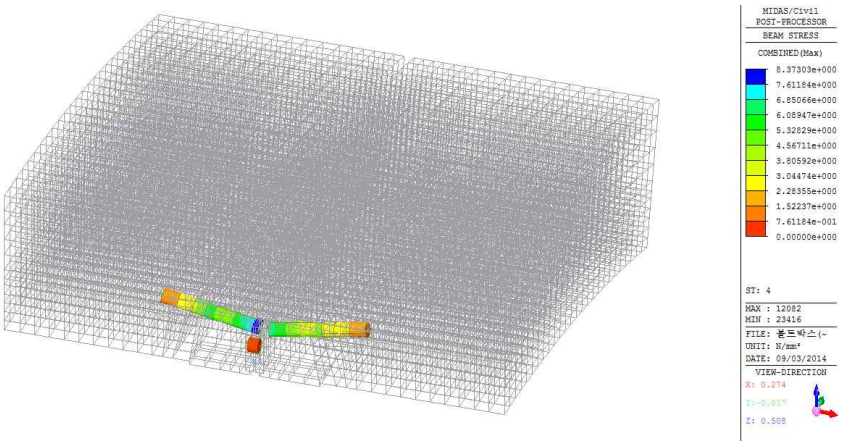


그림 2.12.7 인장력 작용시 볼트박스의 인장응력

(4) 검토 결과

강연선 체결방식에서 강연선 2열이 담당하는 세그먼트 면적은 경사볼트 및 볼트박스 체결방식에서 볼트 2개가 담당하는 면적과 동일하다. 따라서 강연선 2열, 경사볼트 2개, 볼트박스 2개의 인장저항력을 비교함으로서 강연선 체결방식의 체결력 증대효과를 검증할 수 있을 것으로 판단된다.

표 2.12.2는 3차원 수치해석결과를 통해 검토된 각 체결방식의 인장저항력과 동일 세그먼트 면적에 작용하는 인장저항력을 나타낸 것이다. 강연선의 인장저항력은 경사볼트의 8배, 볼트박스의 6배 정도 더 큰 것으로 검토되어, 인장력 증대 측면에서 강연선 체결방식의 체결력 증대효과를 검증할 수 있었다.

표 2.12.2 강연선 체결방식의 인장력 증대 효과

구분	수치해석 결과 인장저항력(kN)	동일 세그먼트 면적에 작용하는 인장저항력(kN)	강연선 체결방식 체결력 증대효과
강연선	240.0	240.0(2열)	경사볼트의 8배 볼트박스의 6배
경사볼트	14.7	29.4(2개)	
볼트박스	18.9	37.8(2개)	

다. 전단력 증대

본 연구에서 개발된 강연선 체결방식은 강연선의 긴장력을 이용하여 세그먼트를 조립하는 기술이며, 동시에 세그먼트에 형성된 아일랜드형 전단키가 외부에서 작용하는 전단력에 저항하는 구조이다.

본 연구에서는 아일랜드형 전단키 세그먼트 개발 과정에서 볼트 체결방식과 전단강도에 대한 비교검토를 수행하였다. 이론식을 이용한 검토에서는 강연선 체결방식은 세그먼트단면 전체의 전단강도가 1872.3kN로 계산되었고, 볼트박스 체결방식은 811.6kN으로 계산되어 강연선 체결방식의 전단성능이 약 130% 정도 우수한 것으로 검토되었다.

표 2.12.3은 3차원 수치해석결과를 통해 검토된 각 체결방식의 전단저항력과 동일 세그먼트 면적에 작용하는 전단저항력을 나타낸 것이다. 강연선 체결방식에서 아일랜드형 전단키의 전단저항력은 경사볼트의 1.32배, 볼트박스의 1.87배 정도 더 큰 것으

로 검토되어, 전단력 증대 측면에서 강연선 체결방식의 체결력 증대효과를 검증할 수 있었다.

표 2.12.3 강연선 체결방식의 전단력 증대 효과

구분	수치해석 결과 전단저항력(kN)	동일 세그먼트 면적에 작용하는 전단저항력(kN)	강연선 체결방식 체결력 증대효과
아일랜드형 전단키	119.1	119.1(1개)	경사볼트의 1.32배 볼트박스의 1.87배
경사볼트	45.0	90.0(2개)	
볼트박스	31.8	63.6(2개)	

라. 체결력 증대효과

표 2.12.4는 본 절에서 검증한 강연선 체결방식의 체결력 증대효과를 비율로 확인하기 위해 볼트 체결방식의 체결력을 100%로 기준하여 나타낸 것이다. 압축 성능, 인장 성능, 전단 성능의 3가지 평가지표를 설정하고 각각에 대해 검토한 결과 강연선 체결방식은 기존 볼트 체결방식보다 최소 87%에서 최대 534% 정도 더 우수한 체결력을 갖고 있음을 확인하였다.

표 2.12.4 강연선 체결방식의 체결력 증대효과

평가지표	볼트 체결방식		강연선 체결방식
	볼트박스	경사볼트	
압축성능(%)	-	100	191.4
인장성능(%)	100	77.8	634.9
전단성능(%)	100	141	187.0

3. 체결방식에 따른 내화성능 검토

근래들어 터널 대형 화재사고가 빈번해 지며 발생한 터널 화재 사례에서 최대 표면온도가 1,000~1,200℃까지 나타났다. 이러한 온도는 쉴드터널 세그먼트와 체결부에에 심각한 피해를 발생시킬 수 있다.[4] 이에 본 연구에서 개발한 강연선 쉴드터널의 체결부의 내화 안정성에 대한 검토를 위하여 화재에 노출될 경우 체결재로 사용되는 고장력 볼트와 강연선에 대하여 내화성능에 대한 고찰을 수행하였다.

가. 고장력 볼트의 특성

고장력 볼트라 함은 주로 KS B 1010(마찰접합용 고장력 6각볼트,6각 너트,평와셔의 세트)[5]에 근거하여 건축물이나 교량과 같은 강 구조물의 이음쇠로 사용되는 볼트로서, 마찰접합은 고장력 볼트로 이음부재를 조여 부재간에 발생한 마찰력에 의해 접합하는 방법이다.[6] 일본에서는 JIS B 6188[7]에서 고장력 볼트의 규격을 규정하고 있으나, 항복강도, 인장강도, 연신율, 단면 수축률에 대한 정의만 하고 있을 뿐 내화성능에 대한 규정은 없다. 표 2.12.5와 표 2.12.6은 볼트의 기계적 성질에 대한 정리이다.

표 2.12.5 볼트 시험편의 기계적 성질[5]

볼트의 기계적 성질에 따른 등급	항복강도 N/mm^2	인장강도 N/mm^2	연신율 %	단면 수축률 %
F8T	640이상	800~1000	16 이상	45 이상
F10T	900이상	1000~1200	14 이상	40 이상
F11T	990이상	1100~1300	14 이상	40 이상
F13T	1170이상	1300~1500	12 이상	35 이상

표 2.12.6 볼트 완성품의 기계적 성질[5]

볼트 등급	최소 인장 하중 kN							경도
	볼트사이즈							
	M12	M16	M20	M22	M24	M27	M30	
F8T	67.4	125.4	195.8	242.7	282.0	367.0	449.0	HRC 18~31
F10T	84.3	156.7	244.8	303.4	352.5	458.8	561.3	HRC 27~38
F11T	92.7	172.4	269.3	333.7	387.8	504.7	617.4	HRC 30~40
F13T	109.6	203.7	318.2	394.4	458.3	596.4	729.7	HRC 40~45

고장력 볼트용 재료는 열처리를 시행하여 필요로 하는 강도, 경도, 인성, 연신율 등과 같은 기계적 성질을 확보한다. 이 열처리는 통상 퀜칭-템퍼링으로 이루어지며 퀜칭 온도는 800~900°C, 템퍼링은 400~600°C에서 수행되어진다. 그림 2.12.8은 고장력 볼트를 가열하여 최고온도에서 약 1 시간 유지한 후 냉각시킨 경우 인장강도와 잔류체결력의 변화이다.[8)]

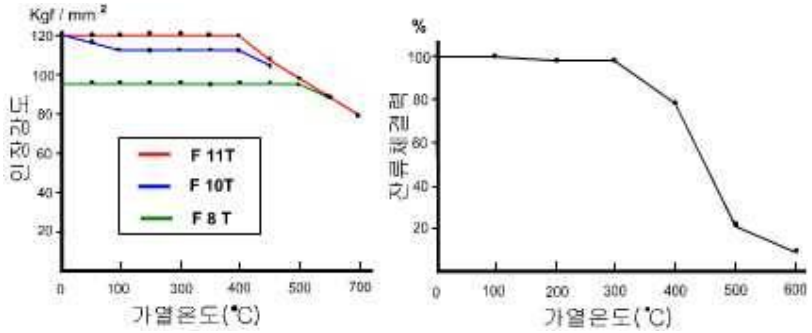


그림 2.12.8 가열. 냉각에 따른 인장강도와 체결력 변화

나. 강연선의 특성

강연선에 대한 요구성능은 KS D 7002, JIS G3536, ASTM A416 등에서는 강도, 연신율, 릴랙세이션에 대한 규정만 제시하고 있으며, 강연선의 내화성능에 대한 규정이나 언급은 없다. 본 연구에서 적용되는 강연선은 7연선으로서 12.7mm와 15.32mm를 적용하였으며 7연선 강연선의 기계적 성질은 표 2.12.7과 같다.

표 2.12.7 7연선 강연선의 기계적 성질[5)]

기호	표준 지름 (mm)	단면적 (mm^2)	단위 중량 (kg/km)	인장시험			릴렉세이션(%)	
				0.2% 영구 연신율에 대한 하중(kN)	인장 하중 (kN)	연신율 (%)	N	L
SWP C7B	9.5	54.84	432	86.8이상	102이상	3.5이상	8.0이하	2.5이하
	11.1	74.19	580	118이상	138이상	3.5이상	8.0이하	2.5이하
	12.7	98.71	774	156이상	183이상	3.5이상	8.0이하	2.5이하
	15.2	138.7	1,101	222이상	261이상	3.5이상	8.0이하	2.5이하
SWP C7C	12.7	98.71	774	182이상	214이상	3.5이상	-	2.5이하
	15.2	138.7	1,101	255이상	300이상	3.5이상	-	2.5이하
SWP C7D	12.7	98.71	774	202이상	237이상	3.5이상	-	2.5이하
	15.2	138.7	1,101	283이상	333이상	3.5이상	-	2.5이하

강연선은 교량분야에서 활발히 적용되고 있으며, PSC 슬래브의 내화 거동연구 결과에 따르면, 100kN의 긴장력을 도입한 슬래브 부재에 400°C, 600°C, 800°C의 온도를 가열하여 화재시의 강연선 긴장력에 대한 검토결과 그림 2.12.9와 같은 강연선의 강도와 체결력의 변화를 보였다.[9)]

PSC슬래브 가열 중 강연선 긴장력 변화는 그림 2.12.9와 같이 시간 경과에 따라 감소하는 경향을 나타냈다.

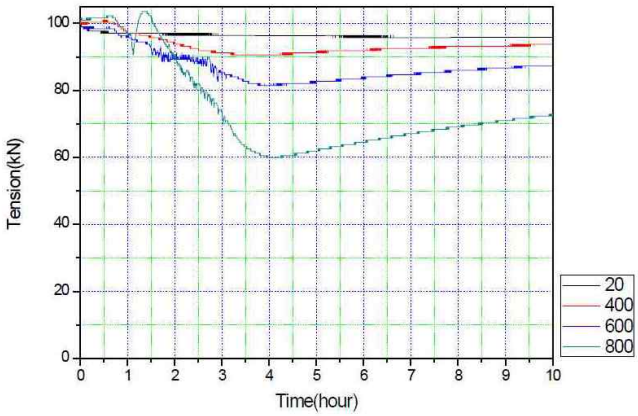
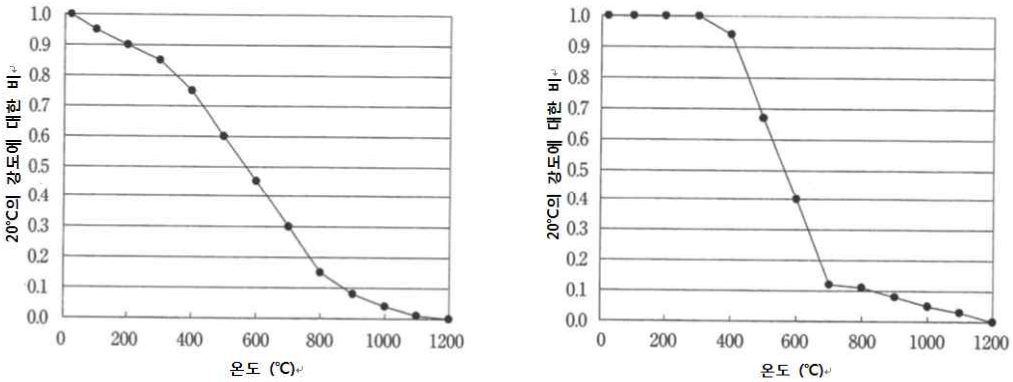


그림 2.12.9 가열중 강연선 긴장력의 변화

다. 내화성능 검토

화재 발생시 구조물의 내력이 저하하는 주요 요인은 재료의 강도 저하와 콘크리트의 폭렬현상 때문이다. 그림 2.12.10은 콘크리트와 강재에서 온도상승에 따른 강도저하 현상을 나타낸 것인데, 콘크리트는 400°C에서 강도가 75%로 저하되었고, 강재는 250~350°C에서 급격한 강도저하가 시작되고 있다.[10)]



(a) 콘크리트 (b) 강재

그림 2.12.10 온도상승에 따른 강도저하 곡선

고장력 볼트의 가열, 냉각에 따른 인장강도와 체결력의 결과를 보면 500°C 부근에서 상온에서의 체결력에 비해 20% 정도 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 터널 내부에 화재 발생시 세그먼트 라이닝과 별도로 체결부재인 볼트는 체결력의 저하로 인해 이미 체결부재로서의 기능을 발휘하지 못할 것으로 판단된다.

강연선의 경우 4시간 가열 후 긴장력을 상온 20°C 에서의 긴장력과 비교하여 살펴보면, 400°C에서는 6% 감소, 600°C에서는 24.2% 감소, 800°C에서는 39.2% 감소되는 것으로 나타났다. 반면, 고장력 볼트의 경우에는 400°C로 가열했을 때 상온 20°C에서의 체결력에 비해 20% 정도 감소하는 경향을 나타내었다.

이러한 결과는 동일 온도 400°C에서 강연선의 긴장력이 고장력 볼트에 비해 더 높게 유지되고 있음을 알 수 있다. 따라서, 내화성능 측면에서 체결부재만으로 비교할 경우 강연선은 고장력 볼트에 비해 조금 더 우수한 내화성능을 가질 것으로 판단된다.

특히, ITA 터널 가이드라인에서는 쉴드터널 세그먼트의 허용 온도를 380°C,[11] 터널의 연결재에 대한 허용 온도는 200°C로 규정하고 있다.

국외 규정에서 제시하고 있는 허용 온도 측면에서 비교할 경우에는 200°C 이상에서 체결력 감소가 발생하지 않는 강연선 및 고장력 볼트는 모두 내화 측면에서 문제가 없다고 할수도 있을 것이다.

소결론

세그먼트의 체결성능을 평가하기 위해서는 재료의 강도보다는 세그먼트와의 체결방법 및 배치에 따른 특성을 고려하여야한다. 세그먼트의 배치 및 공법의 특성을 고려하여 강연선 체결방식과 볼트 체결방식에 대하여 인장, 압축, 전단력이 작용할 시의 거동을 분석을 통하여 체결성능을 평가하였다.

(1) 압축력 측면에서의 체결성능 검토결과 볼트 체결방식의 체결력 작용 시 계측된 변형률은 평균 4.7%, 강연선 체결방식의 변형률은 평균 9.0%로, 강연선 체결방식이 볼트 체결방식에 비해서 91.4%더 뛰어난 성능을 발휘하는 것으로 판단된다.

(2) 인장력 측면에서의 체결성능 검토결과 경사볼트 타입의 경우 14.7kN의 하중을 재하했을 때 볼트 연결부 주위의 콘크리트 응력이 허용휨강도를 초과하고 볼트의 인장응력은 23.5MPa이었고 볼트박스 타입 의 경우 18.9kN의 하중을 재하했을 때 볼트박스 주위의 콘크리트 응력이 허용휨강도를 초과하고 볼트의 인장응력은 8.4MPa이었다. 두 가지 체결방식 모두 허용응력 140MPa에 크게 못 미치므로 콘크리트의 인장파괴가 지배하는 것으로 검토되었다. 최종적으로 강연선 체결방식의 인장 저항력은 240.0kN으로서 경사볼트 타입보다 약 8배, 볼트박스 타입의 약 6배 더 큰 인장 성능을 가진 것으로 검토되었다.

(3) 인장력 측면에서의 체결성능평가의 수식에 의한 검토에서 강연선 체결방식의 경우 단면 전체의 전단강도가 1872.3kN, 볼트박스 체결방식의 경우는 811.6kN으로 강연선 체결방식의 전단성능이 약 130%정도 우수한 것으로 검토되었다. 3차원 수치해석을 통해 강연선 체결방식, 경사볼트 체결방식, 볼트박스 체결방식에 대한 검토 결과는 강연선 체결방식의 경우 허용 하중이 119.1kN로서 90.0kN으로 검토된 경사볼트 체결방식보다 32%, 63.6kN으로 검토되어진 볼트박스 체결방식보다 87% 더 우수한 전단성능을 가진 것으로 검토되었다

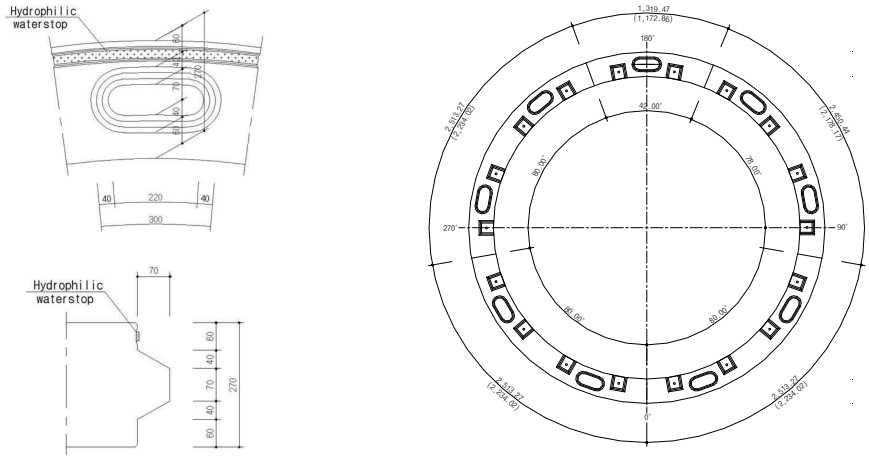
(4) 강연선의 400°C에서는 긴장력의 6%가 감소한 반면, 고장력 볼트는 400°C에서 체결력이 20% 정도 감소하는 경향을 나타내어, 동일 온도 400°C에서 강연선의 긴장력이 고장력 볼트에 비해 더 높게 유지되고 있음을 알 수 있었고, 내화성능 측면에서 체결부재만으로 비교할 경우 강연선은 고장력 볼트에 비해 조금 더 우수한 내화성능을 가질 것으로 판단된다.

제 13 절 현장 조립 시험시공

1. 시험시공 계획

가. 조립 방법 검토

강연선 체결 쉴드터널의 현장 적용성을 평가하고 시공 과정에서 발생 가능한 문제점을 파악하여 시공성 향상 방안을 도출하기 위해 현장 조립 시험시공을 수행하였다. 시험시공은 실험비용, 시공 장소, 운반 및 거치, 안전사고 등의 이유로 전력구 터널 규모로 계획하였고, 본 연구에서 개발한 전력구 쉴드터널의 표준단면을 적용하기로 하였다. 그림 2.13.1은 시험시공을 위한 강연선 체결 쉴드터널의 설계단면을 나타낸 것이다.



(a) 아일랜드형 전단키 세부 (b) 시험시공 터널 단면

그림 2.13.1 시험시공용 쉴드터널 설계

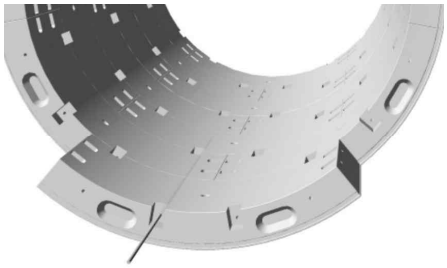
그림 2.13.2는 강연선 체결 기술에서 세그먼트의 체결 순서를 나타낸 것이다. 첫 번째 링을 기준으로 굴진 방향은 강연선으로 조립되고, 원주 방향은 기존 볼트 방식으로 조립된다. 강연선 체결 방식에서는 1열의 강연선은 총 4링에 걸쳐 세그먼트를 관통하게 되고, 1개의 세그먼트에는 4열의 강연선이 통과하게 된다. 이런 방법으로 그림 2.13.2(a)부터 그림 2.13.2(d)까지의 과정을 계속 반복하게 된다. 따라서 그림 2.13.2(e)는 전후 3링까지 총 7링에 걸쳐 강연선이 연결되어 있기 때문에, 어느 한 열의 강연선이 체결력을 소실하여도 그물망처럼 연결된 강연선 형태로 인해 구조물의 안전성은

유지할 수 있게 된다.

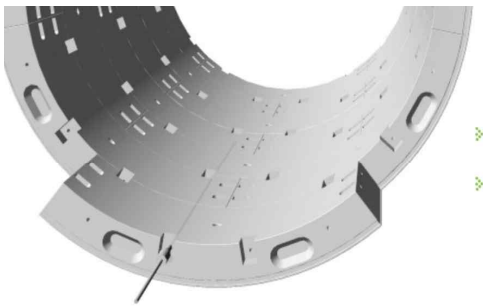
그림 2.13.2의 (e)에서 4번째 링의 세그먼트는 이미 후방 3개의 세그먼트를 통과한 강연선에 의하여 긴장력을 받은 상태이다. 첫 번째 링의 세그먼트를 체결하기 위해서는 4번째 링의 세그먼트에서 강연선을 긴장하게 되는데, 이는 기존에 체결된 3열의 강연선 긴장력과 반대방향의 힘으로 작용하여 긴장력 손실의 가능성이 있다. 하지만 강연선을 체결하는 긴장력은 모두 동일하게 적용되기 때문에 기존 체결력의 30%정도의 반력에 의하여 발생하는 체결력 저하는 미미할 것으로 예상되며, 각 세그먼트는 그물망형태로 얽혀 종, 횡방향으로 체결되어 있기 때문에 실질적인 긴장력 손실은 하나의 세그먼트에서 발생하는 손실량보다 적을 것으로 예상된다.



(a) 세그먼트 거치



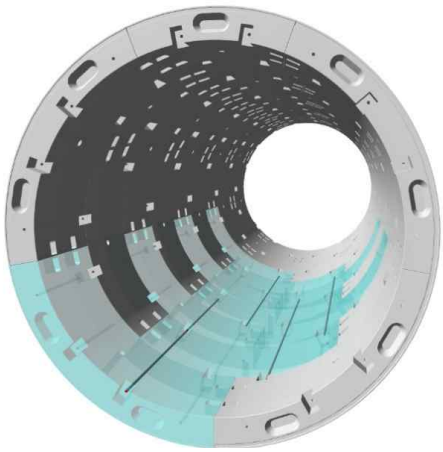
(b) 강연선 통과



(c) 강연선 긴장



(d) 강연선 절단



(e) 세그먼트 7링을 통과하는 강연선 4열

그림 2.13.2 강연선을 이용한 세그먼트 체결 순서

나. 지상 조립 방안

실제 시공 중인 쉴드터널의 일정 구간에 개발된 기술을 직접 적용하는 것이 가장 이상적인 시험시공이라고 할 수 있겠지만, 국내에서 진행되고 있는 쉴드터널 공사가 많지 않고 새로운 개발 기술을 바로 시공 현장에 적용시키기에는 발주처, 시공사 및 감리단 등의 반발을 이해시키는 것이 또한 쉽지 않은 것이 국내 현실이다. 따라서, 본 연구에서는 부득이하게 쉴드머신을 지상에 설치하여 체결 시험시공을 수행하였다.

비록 동일한 쉴드TBM을 운용하여 세그먼트 조립을 진행하더라도 지상에서 시공되는 쉴드터널은 실제 지하에서 시공되는 쉴드터널과는 차이가 있을 수밖에 없다고 판단된다. 시험시공은 쉴드TBM을 보유하고 있는 전문 세그먼트 체결 업체인 ○○건설의 아산공장 야지에서 수행되었다.

그림 2.13.3은 시험시공에 사용된 쉴드TBM과 준비상황을 보여주고 있다. 쉴드TBM은 후방의 반력대를 지지하면서 전방의 암반을 굴착해 나가는 장비이기 때문에 그림 2.13.3(b)와 같이 후방에 반력대를 설치하였다. 또한, 반력대가 반원으로 상부 세그먼트에 대해 지지할 수 없기 때문에 그림 2.13.3(c), (d)와 같이 반력대 역할을 담당할 최초 2개의 링을 지상에서 체결하여 미리 설치하였다.



(a) 쉴드TBM 이동



(b) 반력벽 설치



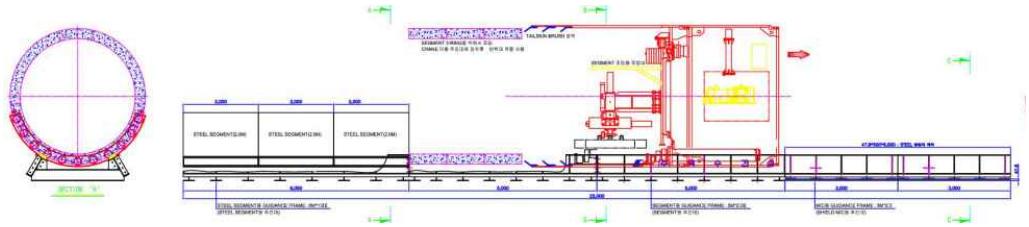
(c) 지상 2링 조립



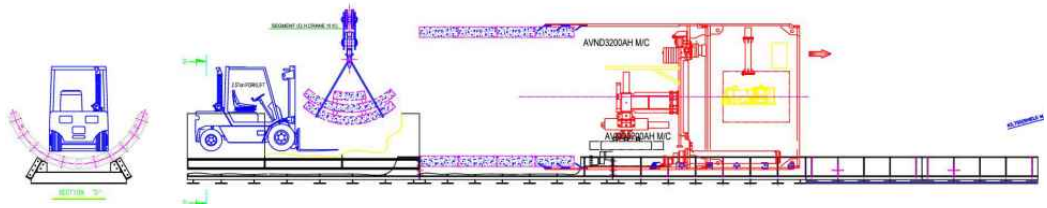
(d) 2링 설치

그림 2.13.3 시험시공 준비를 위한 반력링 설치

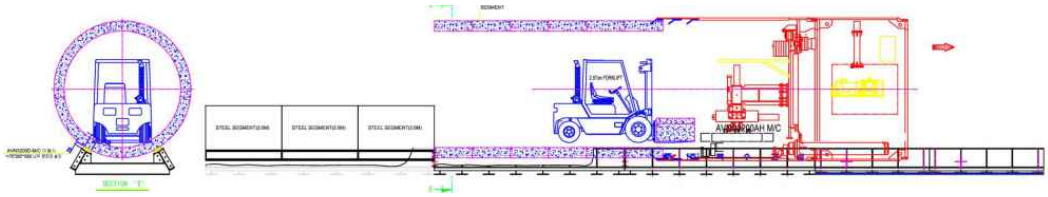
실제 쉴드터널 시공프로세스에서는 레일 위를 이동하는 대차에 의해 세그먼트가 막장 면까지 운반되고, 쉴드TBM에 설치되어 있는 빔(Beam)에 의해 이렉터(Erector) 앞까지 이동된다. 지상에서 수행되는 시험시공에서는 대차 및 빔의 구현이 불가능하기 때문에 크레인(Crane)으로 세그먼트를 반력대 위까지 운반하고, 이렉터까지는 지게차로 운반하는 방법을 사용하였다. 그림 2.13.4는 시험시공 진행 계획을 도안으로 나타낸 것이다.



(a) 반력대 설치



(b) 크레인을 이용한 세그먼트 운반



(c) 지게차를 이용한 세그먼트 운반

그림 2.13.4 지게차와 크레인을 이용한 시험시공 계획

다. 몰드 및 세그먼트 제작

설계된 도면에 따라 세그먼트 제작용 몰드를 제작하였다. 그림 2.13.2(e)에서 살펴본 바와 같이 강연선 체결 방식에서 1열의 강연선은 효과적인 긴장력을 갖기 위해 세그먼트 4링을 통과할 수 있는 길이로 계획되었기 때문에, 반력대 앞에서 조립되는 최초 세 링은 강연선의 긴장력으로 조립하는 것이 불가능하다. 따라서, 최초 세 링까지는 기존 볼트 체결 방식으로 조립할 수 있도록 몰드 제작시 볼트박스 및 강관을 모두 설치할 수 있는 구조로 제작하였다.



(a) 아일랜드형 전단키



(b) 배면 주입구



(c) 볼트박스 및 강관 설치



(d) 완성된 몰드

그림 2.13.5 아일랜드형 전단키 세그먼트 몰드 제작



(a) 철근 배근



(b) 콘크리트 타설



(c) 표면 마감



(d) 완성된 세그먼트

그림 2.13.6 아일랜드형 전단키 세그먼트 제작

그림 2.13.5는 제작된 몰드의 모습을 나타낸 것인데, 그림 2.13.5(c)와 같이 볼트박스 및 강관을 같이 설치하여 한 종류의 세그먼트로 강연선 및 볼트박스 조립이 가능하도록 제작하였다.

그림 2.13.6은 완성된 몰드를 이용하여 세그먼트를 제작하는 모습을 나타낸 것인데, 시험시공용 세그먼트는 총 10링을 생산하였다. 철근 배근부터 탈형, 양생까지의 생산 과정은 일반적인 쉴드 세그먼트의 과정과 동일하게 진행되었다. 증기양생 후 수침, 야적장에서 2주간 양생 후 시험시공 현장으로 운반하였다.

2. 시험시공 수행

가. 조립 순서에 따른 세그먼트 체결

그림 2.13.6은 현장 조립 시험시공의 과정들을 나타낸 것이다. 앞에서 설명한 바와 같이 크레인을 이용하여 반력대 위에 내려진 세그먼트는 지게차로 쉴드TBM의 이렉터(erector)까지 운반하였고, 이렉터를 이용하여 각각의 설치 위치에 놓여졌다. 원주방향은 기존 볼트박스 체결방식으로 조립하였고, 굴진 방향은 유압잭을 이용하여 긴장력을 준 강연선으로 조립되었다.

지상에서 수행된 시험시공이기 때문에 굴진 및 기타 공정은 실제 쉴드터널 시공과정과 차이가 있을 수 있으나, 세그먼트가 이렉터와 연결된 후 볼트 및 강연선으로 조립이 완료될 때까지의 과정은 실제 쉴드TBM 내에서 진행되는 공정과 동일하다고 판단된다. 따라서, 조립 시험시공을 진행하면서 시공성 평가를 위해 각 소요공기의 사이클 타임(cycle time)을 측정하였고, 개발 기술의 시공성 향상을 위한 방안을 시험시공을 통해 도출하고자 하였다.

아일랜드형 전단키 세그먼트는 그림 2.13.6(d)와 같이 이렉터를 이용하여 정확한 세그먼트 조립 위치를 찾는 틸팅(tilting) 과정에서 전단키가 가이드 역할을 하는 것을 확인할 수 있었는데, 최초 볼트박스 체결방식으로 조립된 세 링의 틸팅 과정보다 시간이 더 단축되었다.

반면, 아직까지 강연선에 긴장력을 주는 방법이 모노잭(mono-jack)이라는 단열 강연선 긴장장치를 이용할 수 밖에 없는 상황이어서, 그림 2.13.6(f)와 같이 작업 인부가 직접 장비를 들고 강연선을 긴장하는 방법으로 세그먼트 조립을 진행하였다. 따라서 인력에 의해 강연선을 긴장하는 공정은 최초 세 링 조립시 고장력 볼트를 인력이 체결하는 공정과 비교할 때, 소요공기가 더 길어지는 것으로 나타났다.

세그먼트 강연선 체결 기술의 적용성을 확대하고 개발 기술의 시공성 향상을 위해서는 강연선을 긴장시키는 공정을 자동화하는 것이 반드시 필요할 것으로 판단되었다. 또한, 시험시공에서는 후속 설비가 없이 쉴드TBM의 전방 부분을 이용하였기 때문에, 실제 시공 현장에서처럼 터널 내부가 복잡한 상태가 아니었고, 작업자가 자유롭게 이동하면서 강연선 긴장 공정을 할 수 있었다. 따라서, 다양한 후속 설비가 있는 실제 쉴드터널 내부의 상황도 고려하여 강연선의 공급 및 긴장을 자동화할 수 있는 시스템의 개발이 필요하다고 판단되었다.



(a) 세그먼트 적재



(b) 크래인 이용 세그먼트 운반



(c) 지게차 이용 세그먼트 운반



(d) 이렉터 이용 세그먼트 거치



(e) 횡방향 볼트박스 체결



(f) 종방향 강연선 체결



(g) 완성된 쉴드터널 외부



(h) 완성된 쉴드터널 내부

그림 2.13.7 현장 조립 시험시공

나. 공개시연회 개최

조립 시험시공은 세그먼트 9링의 터널 연장에 대해 진행되었는데, 국내 최초로 지상에서 진행되는 쉴드터널 조립 시공이라는 특수성과 함께 개발 기술의 적극적인 홍보를 위해 공개시연회를 개최하였다.

공개시연회에는 서울시 도시기반시설본부, 한국전력공사 전력연구원, 한국철도시설공단 및 국내 주요 건설사에서 30여명의 기술자들이 참석하였고, 실스케일의 전력구 쉴드터널에 적용된 강연선 체결 기술의 조립 시공 과정을 참관하였다. 그림 2.13.8은 공개시연회 모습을 나타낸 것이다.



그림 2.13.8 개발 기술의 공개시연회 개최

소결론

(1) 본 연구에서는 강연선 체결 쉴드터널의 현장 적용성을 평가하고 시공 과정에서 발생 가능한 문제점을 파악하여 시공성 향상 방안을 도출하기 위해 현장 조립 시험시공을 수행하였는데, 설계된 도면에 따라 세그먼트 제작용 몰드를 제작하였고, 최초 세 링까지는 기존 볼트 체결 방식으로 조립할 수 있도록 몰드 제작시 볼트박스 및 강관을 모두 설치할 수 있는 구조로 제작하였다.

(2) 조립 시험시공을 진행하면서 시공성 평가를 위해 각 소요공기의 사이클 타임(cycle time)을 측정하였고, 개발 기술의 시공성 향상을 위한 방안을 시험시공을 통해 도출하고자 하였다. 아일랜드형 전단키 세그먼트는 이렉터를 이용하여 정확한 세그먼트 조립 위치를 찾는 틸팅(tilting) 과정에서 전단키가 가이드 역할을 하는 것을 확인할 수 있었는데, 최초 볼트박스 체결방식으로 조립된 세 링의 틸팅 과정보다 시간이 더 단축되었다.

(3) 강연선은 모노잭(mono-jack)을 이용하여 작업 인부가 긴장하는 방법으로 세그먼트 조립을 진행하였는데, 인력에 의해 강연선을 긴장하는 공정은 최초 세 링 조립시 고장력 볼트를 인력이 체결하는 공정과 비교할 때, 소요공기가 더 길어지는 것으로 나타났다.

(4) 세그먼트 강연선 체결 기술의 적용성을 확대하고 개발 기술의 시공성 향상을 위해서는 강연선을 긴장시키는 공정을 자동화하는 것이 반드시 필요할 것으로 판단되며, 다양한 후속 설비가 있는 실제 쉴드터널 내부의 상황도 고려하여 강연선의 공급 및 긴장을 자동화할 수 있는 시스템의 개발이 필요하다고 판단된다.

제 14 절 강연선 자동공급장치 초기모델 개발

1. 제작 계획

본 연구에서는 조립 시험시공을 통해 강연선 체결 쉴드터널의 더 효과적인 현장 적용을 위해서는 강연선의 자동공급 방안이 필요할 것으로 판단되었다. 터널 내부에서 자동으로 강연선을 적정 위치에 공급하는 공정은 세그먼트 조립 공정에서 중요한 역할이다.

본 개발 기술이 실제 현장에 적용될 경우 보다 전문화된 강연선 자동공급장치가 개발될 것으로 판단되나, 기본적으로 적정 위치로의 강연선의 공급 개념을 설정하기 위해 본 연구에서는 강연선 자동공급장치의 초기모델을 개발하였다.

강연선 자동공급장치로서 기능을 수행하기 위해서는 쉴드터널 굴진에 따라서 터널 진행 방향으로의 이동을 위한 이동성을 갖추어야 하며, 아일랜드형 전단키 세그먼트에 형성된 블록아웃 부분에 원활하게 강연선을 공급하여야 한다.

그림 2.14.1은 강연선 자동공급장치의 제작 개념을 나타낸 것이다. 터널 내부에서 이동을 위해 바퀴를 장착하고 소형 포크리프트에 강연선의 전, 후방 이동이 가능한 유압장치와 유압공급과 중심을 잡아줄 수 있는 유압펌프를 설치하는 방안을 계획하였다. 본 장치는 리프트의 상,하 이동을 통하여 장치의 강연선 주입부 중심을 터널 중심 높이에 위치하여 터부내부 360°에 걸쳐 형성되어 있는 세그먼트의 강연선 주입구로의 공급이 같은 위치에서 작용하도록 하였다.

강연선의 특성을 고려하였을 때 강연선의 공급경로에서 변화구간이 많아질수록 공급능력이 저하되게 된다. 또한 유압장치를 이용한 공급장치이므로 강연선의 반발에 의한 안전사고발생의 위험이 있으므로, 이를 예방하기 위하여 공급장치로부터 세그먼트의 강연선 삽입부까지의 경로를 강제하는 가이드 강관을 제작하여 부착하였다.

표 2.14.1은 가이드 강관의 상세를 나타낸 것이다. 강연선 삽입시의 충격에 안전하도록 강관재질로서 직선부와 곡선부로 이루어져 있으며, 조립 및 분리가 가능한 형태로서 터널 직경에 따라 직선부의 길이, 개수의 변화를 통해 터널 중심에 위치할 수 있다.

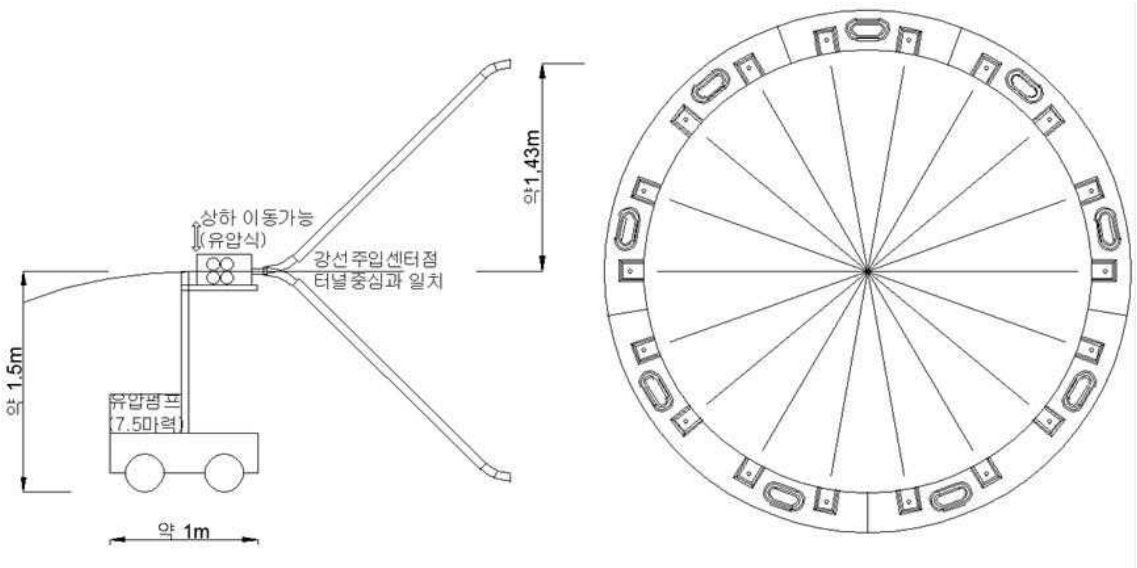
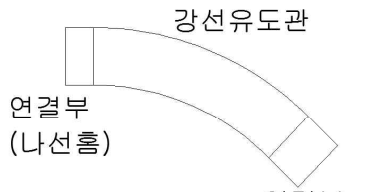
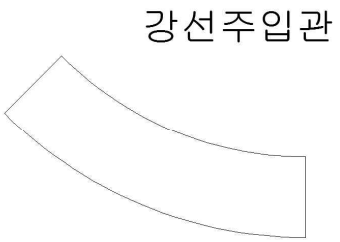


그림 2.14.1 강연선 자동공급장치 제작 개념(전력구 터널 대상)

표 2.14.1 가이드 강관 상세

삽입기 연결관	강연선 유도관	강연선 삽입관
		
R=600㎜의 관으로서 나선형 홈을 통해 주입기에 부착(360° 회전가능)	0.6m 정도의 직선관 연결 터널직경에 따라 2~3개 연결(1.2~1.8m)	R=600㎜의 관으로서 강연선의 최종위치 결정

2. 초기모델 제작

강연선 자동공급장치의 제작은 그림 2.14.2와 같이 바퀴로 이동이 가능하며 리트프 가능을 갖추고 있는 이동용 테이블 리프트를 기초로 제작하였다. 리프트 상부에는 그림 2.14.3과 같은 강연선 삽입장치가 장착되고, 하부에는 2.14.4와과 같은 유압모터가 동력을 공급해주는 역할을 한다.

그림 2.14.5는 설계에 따라 제작된 강연선 자동공급장치로서 외부에서의 전력의 공급만 있으면 작동이 가능하도록 강연선을 컨트롤하는 유압장치와 유압모터 등이 모두 하나의 리프트 내에 탑재되어있다.



그림 2.14.2 이동용 테이블 리프트



그림 2.14.3 상부 강연선 삽입장치



그림 2.14.4 하부 유압모터

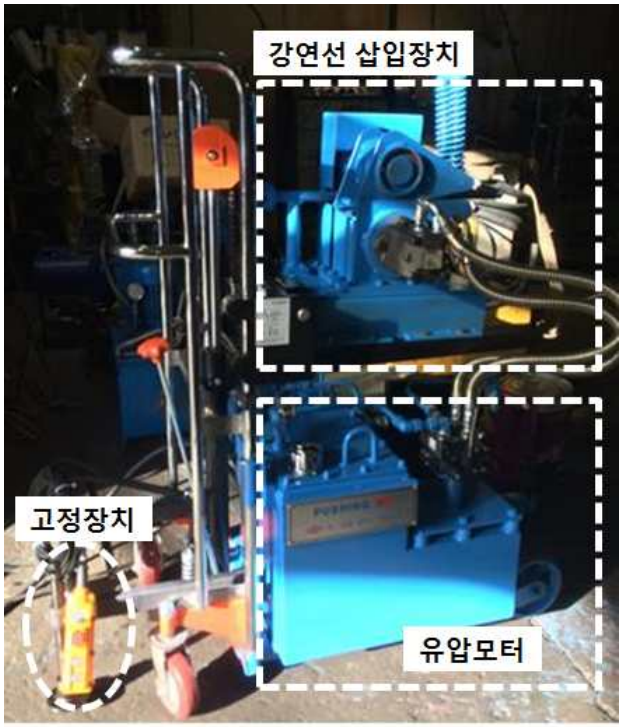


그림 2.14.5 강연선 자동공급장치

제작된 강연선 자동공급장치는 상부 강연선 삽입장치는 상하이동을 통해 터널의 중심에 위치하며, 하부의 유압모터는 삽입장치의 동력원 제공 및 무게중심을 잡게된다. 또한 강연선 공급 시 장애물 등으로 인해 강연선이 걸리게 되면 반발력으로 인해 공급장치 자체의 전도를 예방하기 위하여 추가 고정장치를 전, 후방에 제작하였다.

곡선부의 가이드강관은 공법에 적용된 0.5inch 강연선의 주입이 가능한 최대곡선반경을 고려하여 동일한 R=600의 곡선반경을 적용하였다. 강연선 공급용 유압장치와 연결되는 삽입기 연결관은 그림 2.14.6처럼 360도 회전이 가능하여 가이드강관 전체의 회전이 가능하며, 삽입점에 위치 후 고정나사를 통해 고정 후 강연선의 삽입을 시작한다.

강연선 유도관은 직선 형태로서 강연선의 이탈방지 및 터널 직경에 따른 길이 변화를 통해 가이드강관이 세그먼트의 강연선 삽입구에 위치하는 것을 담당한다. 마지막으로 강연선 삽입관은 직선으로 공급된 강연선을 재료의 곡선반경에 맞춰 유도하여 원활한 공급을 가능하게 한다.

그림 2.14.7은 가이드 강관을 나타낸 것이고, 조립된 가이드 강관은 그림 2.14.8과 같이 강연선 자동공급장치에 연결된다.



그림 2.14.6 강연선 삽입기 연결관



그림 2.14.7 가이드 강관



그림 2.14.8 가이드 강관 연결



그림 2.14.9 강연선 자동공급장치

최종적으로 완성된 강연선 자동공급장치는 그림 2.14.9와 같은 형태로 이동시에는 가이드 강관을 탈착한 상태로 이동하며, 작업시 고정바를 이용하여 정착 시킨 후 사용하게 된다. 그림 2.14.10은 강연선 자동공급장치의 사용순서를 나타낸 것이다.



(a) 삽입기 중심점 위치



(b) 강연선 공급



(c) 스위치 조작으로 강연선 전진



(d) 강연선 통과

그림 2.14.10 강연선 자동공급장치 사용순서

3. 강연선 공급 시험

제작된 강연선 자동 공급장치의 목적은 쉴드터널을 형성하는 세그먼트의 강연선 삽입구를 통해 4링 뒤의 세그먼트까지 공급하여 체결시키는 것이다. 그러나 강연선의 강도로 인하여 그림 2.14.11과 같이 세그먼트의 내부에 형성되어 있는 삽입구에서의 공급이 중요한 문제이다.

이러한 문제를 해결하기 위해 설계단계에서 강연선의 곡선반경을 고려하여 블록아웃부의 크기를 결정하였으나, 실제 실험을 통한 공급능력의 확인이 필요하다. 우선적으로 세그먼트 삽입구로 강연선의 공급이 완료된다면 다음 4링 뒤까지는 직선으로서 강연선의 진입에 문제가 없을 것으로 예상된다.

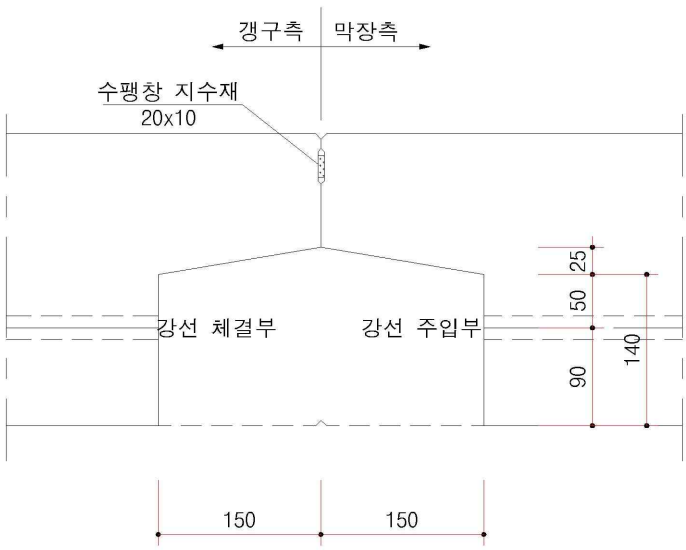


그림 2.14.11 아일랜드형 저단키 세그먼트의 블록아웃

강연선 자동 공급장치를 이용한 세그먼트 삽입구로의 공급능력 확인을 위하여, 그림 2.14.12와 같이 전력구 터널 세그먼트의 블록아웃부 형상을 제작하였다.

제작된 실험체는 전, 후방에 위치하는 두 세그먼트의 블록아웃부의 간격(1세그먼트의 종방향 폭은 150mm) 300mm를 형상화 하였으며, 터널 내측에서부터 90mm 안쪽에 위치하고 있는 강연선 삽입구의 형상을 제작하였다. 삽입구는 실제 설계에 사용된 외경 27.2mm(t=2mm)의 강관을 사용하여 세그먼트의 삽입관과 동일한 조건으로 제작하였다. 또한 설계된 블록아웃 부의 크기의 적정성을 확인하기 위하여 폭의 길이가 조절이 가능하도록 제작하였다.



그림 2.14.12 강연선 공급 시험을 위한 블록아웃 모형 제작

제작된 강연선 자동 공급장치를 이용하여 블록아웃 모형에 강연선의 공급능력을 확인하기 위하여 우선적으로 가이드 강관을 부착하지 않고 유압장치로 인한 공급만을 실시하였다.

우선 인력을 통해 강연선의 끝부분을 세그먼트의 주입관까지 위치한 후 유압장치를 통해 강연선을 공급하는 방식으로 실험을 진행하였다. 이 경우 중간에 강연선의 처짐 발생으로 인하여 더 이상 강연선의 삽입이 불가능한 경우가 많이 발생하였으며, 작업자의 부상의 우려도 매우 컸다.

그림 2.14.13은 강연선이 실험용 몰드의 주입관으로 공급되지 못하고 내부 주입관에 걸려 바깥쪽으로 크게 휘어지는 모습을 나타낸 것이다. 이는 설계단계에서 고려된 강연선의 곡선반경 때문에 블록아웃부를 통과하여 직선으로 만들어진 주입관으로 공급이 원활하지 않았기 때문으로 판단된다.



그림 2.14.13 강연선 반발력으로 인한 휨 현상

그림 2.14.14는 강연선 자동공급장치에 가이드 강관을 부착하여 실험한 모습을 나타낸 것이다. 강연선은 블록아웃을 통과하여 직선 주입관으로 원활하게 공급되었는데, 제작된 강연선 자동공급장치와 가이드 강관을 활용하여 강연선의 곡률 반경 및 강성에 제한을 받지 않고 세그먼트 블록아웃부에 위치한 주입관에 공급함을 확인하였다.



(a) 강연선의 몰드 주입관 통과 (b) 몰드 주입관내 강연선

그림 2.14.14 강연선 자동공급장치 가이드 강관 기능 실험

소결론

(1) 쉴드터널 내부에서의 이동성과 강연선의 강성 등을 고려하여 강연선 자동공급장치 초기모델의 설계를 수행하고, 시제품을 제작하였다. 시제품으로 제작된 공급장치는 4열의 세그먼트를 통과하기에 충분한 출력을 갖추기 위하여 유압식으로 제작되었으며, 강연선의 공급경로의 확보와 작업자의 안정을 위하여 강연선의 곡선반경을 고려한 가이드 강관을 부착하였다.

(2) 세그먼트의 강연선 삽입을 위한 블록아웃부와 강연선 삽입관을 부분 실험용 몰드로 제작하여 공급실험을 수행하였다. 강연선 자동공급장치에서 가이드 강관이 없을 경우 원활한 공급이 이루어지지 않았으나, 가이드 강관 부착 시, 원활하게 공급이 가능하였다. 향후, 본 연구의 공법의 시공성 및 경제성의 확보를 위해서는 강연선, 전단 및 용접기능을 갖춘 발전된 공급장치의 지속적인 개발이 필요할 것이다.

제 15 절 세그먼트 시공 정확도 향상 방안

1. 강연선 정착단 구조형상 개선

가. 개요

본 연구에서는 기존의 교량 등 여러 분야에서 축척된 강연선 정착구 보조 재료의 기술 및 공법을 검토하여, 시행착오를 최소화하고 강연선 체결 쉴드터널 공법의 특성에 맞는 정착구를 선정하고, 터널 현장 적용성을 감안한 정착단의 구조형상 개선하기 위한 방안을 검토하였다.

강연선 체결 쉴드터널 공법은 콘크리트 세그먼트를 공장 제작하여 각각의 세그먼트를 PS 강재를 이용하여 긴장하여 조립하는 공법으로 프리스트레스 콘크리트 제조방법으로 분류할 때 포스트텐션(Post-tension) 공법으로 분류할 수 있다.

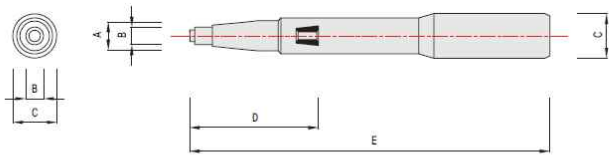
PS 강재과 콘크리트의 그라우팅에 의한 견고한 부착력이 생성되는지의 여부에 따라서 부착(Bonded)공법과 비부착(Unbonded)공법으로 구분되며, 부착시키지 않은 PSC 부재는 그라우팅이 필요하지 않으며 PS 강연선재의 재긴장도 가능하나, 부착시키지 않은 PSC 부재는 부착시킨 PSC 부재에 비하여 파괴강도가 낮고 균열폭이 커지는 등 역학적 성능이 떨어진다.[1)]

콘크리트 세그먼트 부재의 종방향 구조적 거동에 의한 역학적 향상 효과보다는 세그먼트 이음부의 밀착에 의한 누수를 최소화할 수 있는 긴장력 정도만 요구되어 재긴장의 필요성은 없을 것으로 판단되며, 정착구 형상 개선방안에서 언급하겠지만 세그먼트 정착구의 연결 특성상 본 구조체에 적용 가능한 정착장치는 재긴장이 어려운 상황이다.

정착장치, 정착방법에 따라 쐐기식, 지압식(너트식)으로 나뉘며 쐐기식은 PS 강재와 정착장치 사이의 마찰력을 이용하는 쐐기작용 정착방식으로 PS강연선에 가장 널리 사용되고 있으며, 너트식은 PS 강봉의 끝에 전조나사를 만들어 정착하는 방식으로 PS 강봉에 주로 사용된다.[2)] 터널내 작업으로 작업공간이 협소하여 PS강재의 삽입의 용이성, PS 강재의 신장률과 긴장력을 고려할 때 PS 강봉 보다 PS 강연선이 우수하며 쐐기식 정착장치가 유리하다.

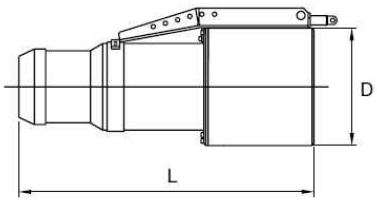
나. 긴장장비 검토

포스텐셔닝 시스템의 긴장력을 도입하기 위하여 PS 강연선의 인장이 필요하며 이때 장비를 인장기라고 한다. 인장기는 인장력 및 작업공간을 고려하여 선정이 필요하며 제조사별로 형상 및 약간의 규격 차이가 있다. 그림 2.15.1은 모노잭(mono-jack)의 제조사별 형상 및 규격을 나타낸 것이다.



인장기	A	B	C	D	E
(kN)	(mm)				
300	48	42	105	300	850

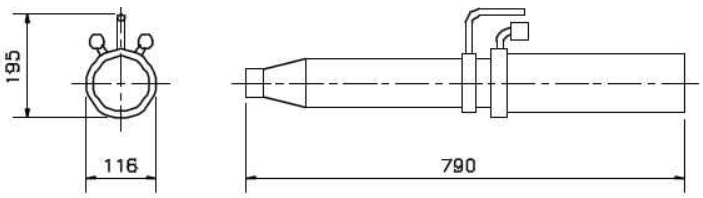
(a) 한국 PC[3]



▶ Technical Data

jack type[1]	length L	diameter D	stroke	piston area	capacity[2]	weight
	mm	mm	mm	cm^2	kN	kg
SM 200	842	98	200	47.13	198	19
HoZ 950/100	621	203	100	161.98	972	65
HoZ 1,700/150	803	280	150	298.45	1,745	160
HoZ 3,000/250	1,137	385	250	508.94	3,054	400
HoZ 4,000/250	1,271	482	250	894.57	4,204	600
6,800	1,150	560	300	1237.01	6,803	1,185
9,750	1,170	680	300	1772.45	9,748	1,770

(b) Dywidag Systems International[4]



스트로크 : 200㎜ 피스톤면적 : 47.10㎠
최대인장력 : 23TON 무게 : 23kg

(c) VSL Korea[5]

그림 2.15.1 모노잭(Mono-Jack) 종류 및 규격

2. 정착단 구조형상 검토

프리스트레스 콘크리트 포스트텐션 공법의 PS 긴장력 도입 정착시스템은「고정(Dead)정착구 ⇔ 연결(Coupler)정착구 ⇔ 인장(Live)정착구」으로 이루어져 있으며 강연선체결 쉴드터널 공법은 4개의 세그먼트를 연결하는 한 개의 긴장 시스템으로 PS 강연선 길이가 약 4m~6m 정도로 연결(Coupler)정착구가 필요 없는「고정(Dead)정착구 ⇔ 인장(Live)정착구」의 시스템이 적정하다고 판단된다.

정착단의 형상 및 정착단의 위치는 정착구 설치 및 PS 긴장력 도입 공간 확보, 구조물의 안정성 확보, 본 연구과제의 목표인 누수 저감효과에 유리한 구조 등으로 현장 적용이 가능한 구조형상으로 검토하여 형상에 따른 장단점을 비교 검토하였다. 정착구 설치위치에 따라 세그먼트 이음부에 설치하는 방법, 세그먼트 내에 설치하는 방법 및 정착구 설치를 위한 블록아웃 방법에 따라 특징을 검토하였다.

가. 방안 1 : 세그먼트 이음부에 정착구 설치

세그먼트 양측 단부에 고정(Dead) 정착구 및 인장(Live) 정착구를 각각 설치하고 단면 중심으로 쉬스관을 매입하여 부재의 중심축 방향으로 PS강연선을 긴장하는 방법이다. 한 개의 세그먼트에 PS 강연선을 4선 배치하는 단면을 계획하였을 경우 정착구 설치 위치상 PS 강연선 4선 중 1선은 연속화 할 수 없어 실제 세그먼트의 PS 긴장력 도입 효과는 3선에 의한 긴장효과를 고려하여야 한다.

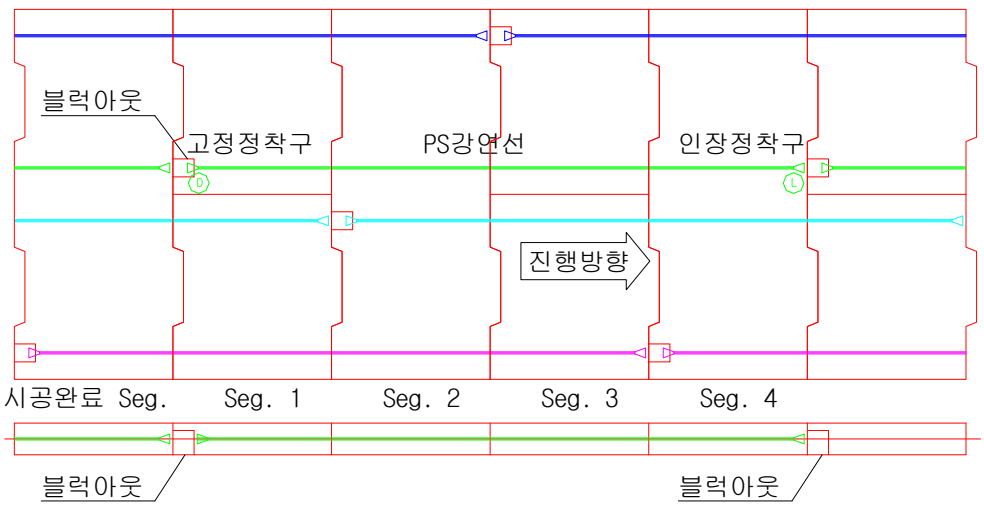


그림 2.15.2 세그먼트 이음부에 정착구 설치 개요도

4개의 세그먼트를 조립 후 PS 강연선을 삽입하여 양단 정착구에 강연선을 고정하여야 하므로 작업공간이 필요하며, 터널 굴착 진행방향 쪽은 세그먼트 설치 전으로 필요 작업공간 확보가 충분하나 반대쪽은 세그먼트 설치가 완료되어 정착구 작업공간 확보를 위한 세그먼트 내에 Block out이 필요하다.

정착장치는 고정(Dead)정착구와 인장(Live)정착구로 고정 정착구는 PS 강연선 정착을 위한 정착쐐기 설치할 수 있는 비교적 작은 작업공간이 소요되며, 인장 정착구는 정착쐐기 설치 및 PS 강연선 긴장을 위한 인장기 운용 공간까지 필요하므로 터널 굴착 진행방향 쪽에 인장 정착구를 설치하고 반대편에 고정 정착구를 설치하는 방법이 유리하다.

고정 정착구의 작업공간은 정착판 및 정착쐐기의 규격에 의하여 결정되며 15.2mm(0.6“) 강연선 규격에 맞는 정착구의 정착판은 제조사별로 약간의 차이는 있으나 75mm×105mm의 내외정도로 핸드워크의 공간으로 H150mm×W200mm× L150mm 블록아웃이 필요하다. 강연선 체결을 고려한 최소단면 두께는 콘크리트 피복(50mm)과 블록아웃 깊이(H150mm)으로 최소 필요단면 두께는 200mm 정도로 단면 최적화에 매우 유리한 것으로 판단되나, 외력에 의한 구조물 단면 두께 또는 쉴드 추진을 위한 지지반력 두께와 비교하여 단면두께를 결정하여야 한다.

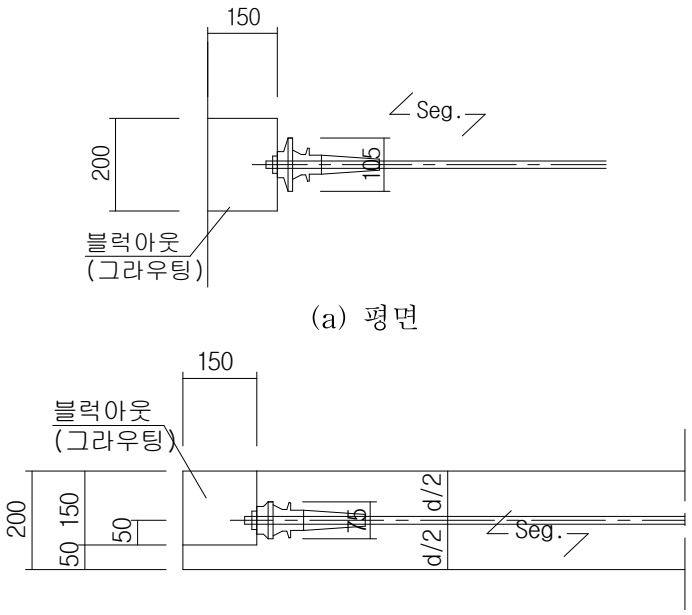


그림 2.15.3 고정 정착구의 블록아웃 및 최소단면 두께

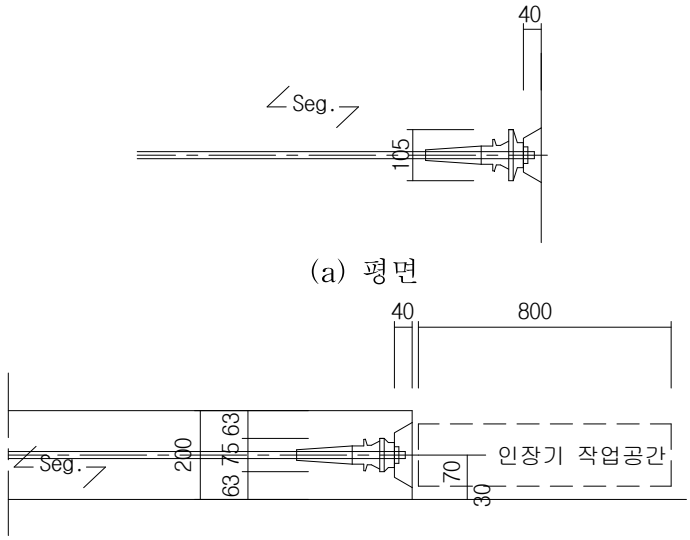


그림 2.15.4 인장 정착구의 블록아웃 및 작업공간 확보

인장 정착구의 블록아웃은 정착구 헤드부분을 매입할 수 있도록 40mm정도가 필요하며, 작업공간은 인장기 운용을 고려한 여유공간을 포함하여 정착구 중심에서 70mm정도의 깊이가 필요하며 세그먼트 두께를 140mm 이상이면 가능하고, 인장기를 이용한 긴장작업의 공간 여유폭은 최소 800mm 정도를 요구하나 세그먼트 설치 전 단계로 충분한 공간 확보가 가능한 것으로 판단된다.

본 방안은 부재단면 중심에서 정착구를 설치하여 PS강연선을 긴장하므로 세그먼트 내 콘크리트에 작용하는 응력분산 효과가 유리하여 응력집중을 최소화할 수 있다.

그리고 지수재로 마무리하고 PS 강연선을 긴장하여 세그먼트와 세그먼트의 밀착력으로 일반구간에서의 누수 차단효과는 우수하나, 정착구 설치 구간에서는 세그먼트를 일부 블록아웃으로 인하여 지수재가 불연속화 되어 정착구 설치구간에서의 누수방지에 대한 방안이 필요하다.

나. 방안 2 : 세그먼트 중앙부에 정착구 설치

세그먼트의 이음부에 정착구 설치를 피하여 세그먼트 중앙부에 블록아웃하여 고정(Dead) 정착구 및 인장(Live) 정착구를 각각 설치하고 단면 중심으로 쉬스관을 매입하여 부재의 중심축 방향으로 PS강연선을 긴장하는 방법이다.

한 개의 세그먼트에 PS 강연선을 4선 배치하는 단면을 계획하였을 경우 정착구를 세그먼트 중앙부 설치함으로 세그먼트와 세그먼트가 연결되는 위치에서 PS 강연선 4

선을 모두 연속화 할 수 있으므로 긴장재 및 긴장력의 효율적 활용이 가능하다.

4개의 세그먼트를 조립 후 PS 강연선을 삽입하여 양단 정착구에 강연선 긴장 및 고정을 위한 작업공간을 세그먼트 중심부에 블록 아웃하여 고정(Dead)정착구와 인장(Live)정착구를 설치하는 방법으로 블록아웃 내에서 인장 정착구의 PS 긴장력 도입 시 작업공간이 많이 필요하므로 인장 정착구의 작업완료 후 고정 정착구를 설치하는 순서가 세그먼트의 블록아웃을 최소화 할 수 있다.

블록아웃의 크기는 정착구 규격 및 인장기 운용공간에 의하여 결정되며, 정착구 규격은 제조사별로 약간의 오차는 있으나 정착판은 75mm×105mm의 내외정도로 작아 블록아웃의 크기에 큰 영향을 미치지 않으며, PS 강연선의 긴장력 도입을 위한 인장기의 규격 및 작업성을 고려한 운용공간이 블록아웃의 크기로 세그먼트의 단면 두께의 최소화를 위한 인장기 형식 선정이 필요하다. 인장기는 제조사별로 약간의 차이는 있으나 세그먼트의 단면두께를 최소화 수 있는 제품의 경우 단면 두께 방향으로는 정착구 중심에서부터 콘크리트 면까지 7cm(인장기 두께 : 4cm + 운용 공간 : 3cm)정도이다.

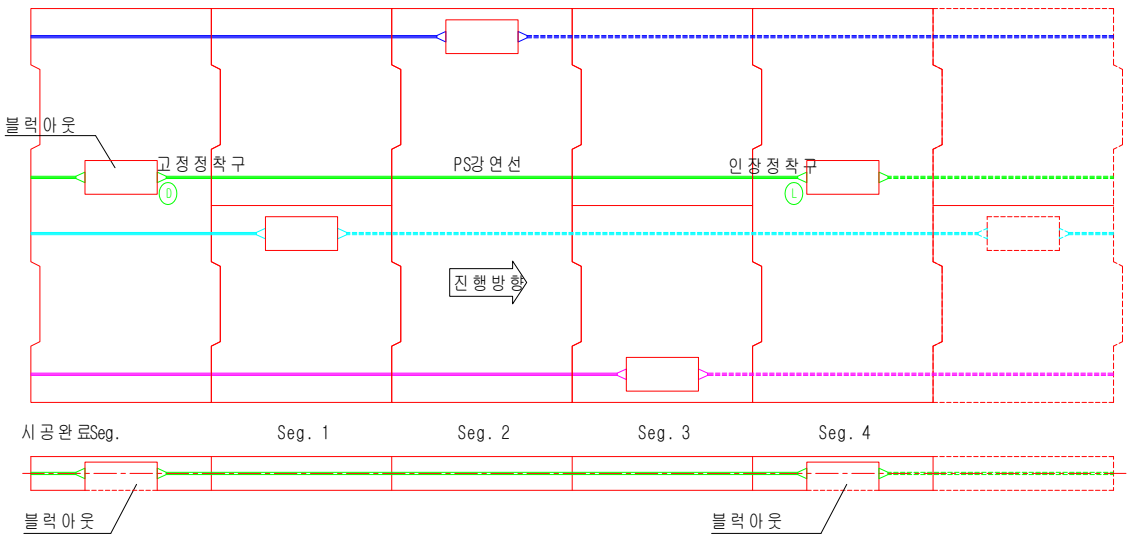


그림 2.15.5 세그먼트 중앙부에 정착구 설치 개요도

정착구 설치 및 PS 긴장력 도입 공간 확보를 위한 블록아웃의 크기는 H190mm×W300mm×L800mm이며 세그먼트의 최소두께는 240mm 정도로 외력에 의한 구조물 단면 두께 또는 쉴드 추진을 위한 지지반력 두께와 비교하여 단면두께를 결정하여야 한다.

○ 깊이(H190mm) = 1/2·단면높이(120mm) + 정착구 중심에서 인장기 외면(40mm)

+ 인장기 운용공간(30mm)

○폭 (W300mm) = 인장기 폭(210mm) + 인장기 좌·우 운용공간(90mm)

○길이(L800mm) = 인장기 길이(707mm) + 인장기 운용공간(93mm)

○세그먼트 두께(D240mm) = 블록아웃 깊이(190mm) + 콘크리트 피복두께(50mm)

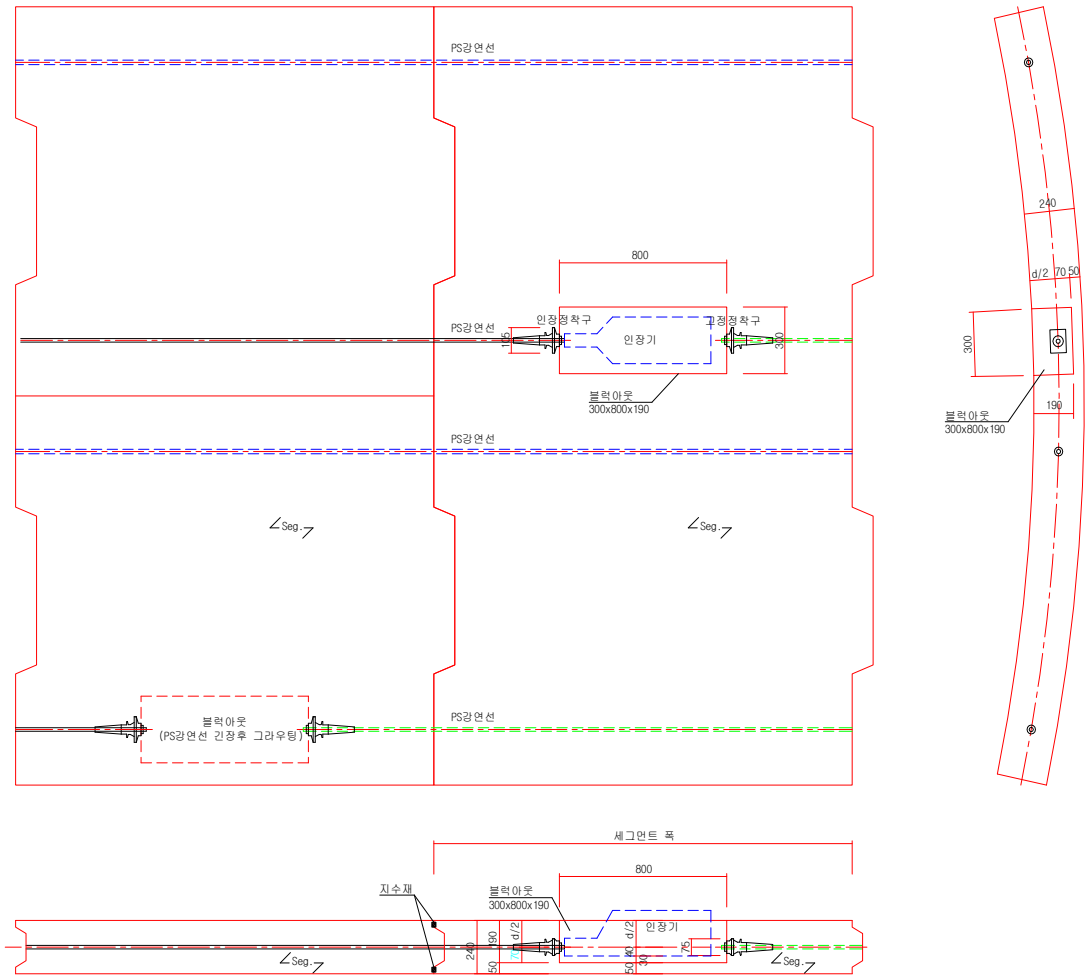


그림 2.15.6 정착구의 블록아웃 및 세그먼트 최소단면 두께

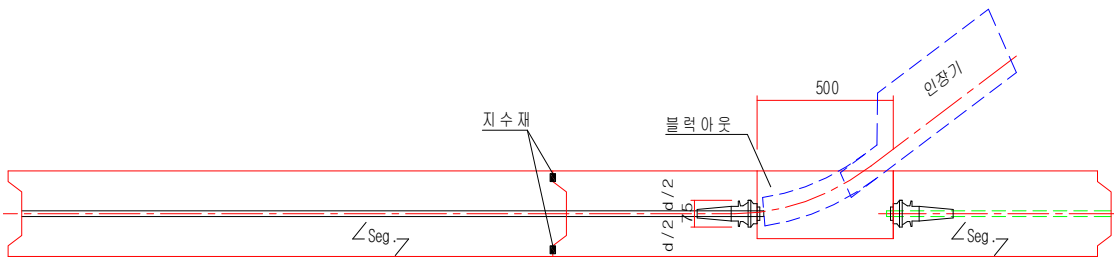


그림 2.15.7 긴장기 헤드 부분의 곡선형 노즈 연결

긴장기의 헤드 부분에 곡선형의 특수한 노즈를 연결하여 긴장할 경우 블록아웃의

규격을 H150mm×W200mm×L500mm 정도까지 축소할 수 있다. 블록아웃 부분에서 터널 진행방향으로 양단에서 긴장하므로 콘크리트에 인장응력이 발생이 예상되므로 상세 응력검토를 통한 균열발생이 일어나지 않을 최소 단면두께 검토가 필요하다.

블록아웃에 의한 횡방향 단면손실이 발생하며, 단면손실을 고려한 토압, 수압 등 외부하중에 대한 터널 구조물의 안정성 확보가 필요하며 세그먼트 운반 중 파손에 대한 검토가 이루어져야 한다.

본 방안은 세그먼트와 세그먼트의 종방향 연결부에서 정착구 설치를 배제하여 지수재의 연속화 설치가 가능하고 PS 강연선을 긴장하여 세그먼트의 밀착력으로 향상시킬 수 있어 누수 차단 효과가 매우 우수할 것으로 판단된다.

다. 방안 3 : 세그먼트 중앙부에 경사 정착구 설치

세그먼트의 이음부에 정착구 설치를 피하여 블록아웃에 의한 단면손실을 최소화되도록 경사방향으로 블록아웃하여 고정(Dead) 정착구 및 인장(Live) 정착구를 각각 설치하는 방법으로 정착구가 설치되는 구간에서는 PS 강연선의 곡률이 필요하며 세그먼트의 단면 중심으로 쉬스관을 매입하여 경사 블록아웃된 정착단에서 PS강연선을 긴장하는 방법이다.

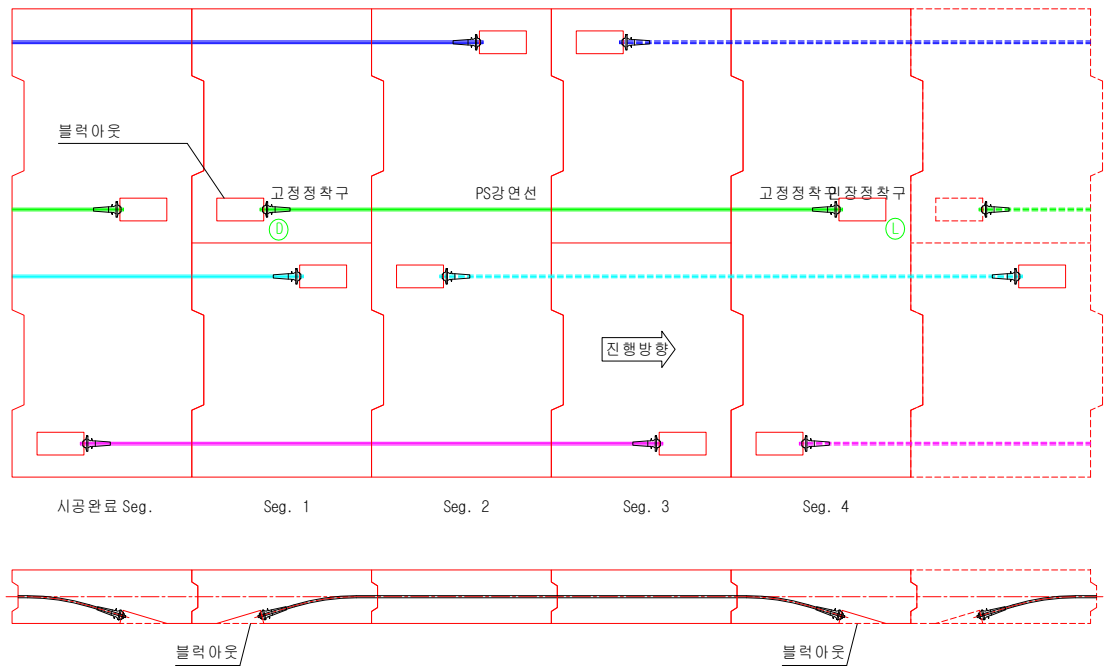


그림 2.15.8 세그먼트 중앙부에 경사 정착구 설치 개요도

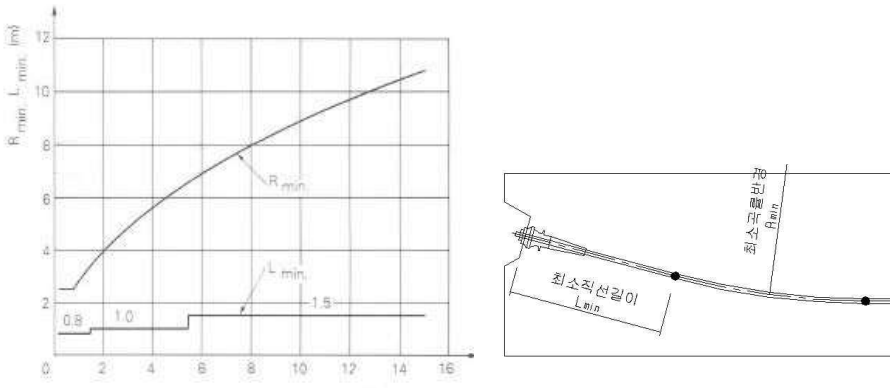


그림 2.15.9 PS 강연선의 최소곡률반경 및 최소직선길이

한 개의 세그먼트에 PS 강연선을 4선 배치하는 단면을 계획하였을 경우 정착구 설치 위치상 PS 강연선 4선 중 1선은 연속화 할 수 없어 실제 세그먼트의 PS 긴장력 도입 효과는 3선에 의한 긴장효과를 고려하여야 한다.

PS 긴장력 작용 시 경사정착구 설치 및 PS 강연선의 곡률로 인한 세그먼트 콘크리트에 균등한 긴장력 전달 및 국부적인 응력집중 방지를 위하여 PS 강연선의 최소곡률반경 및 최소직선거리에 대한 구조 세목을 만족하여야 한다.

세그먼트를 조립 후 터널 내부에 경사 블록아웃 된 정착구에서 PS 강연선을 삽입하여 강연선 긴장 및 고정하므로 PS 긴장력 도입을 위한 공간 확보는 충분하다.

블록아웃의 크기는 정착구 규격 및 핸드워크 공간에 의하여 결정되며, 정착구 규격은 제조사별로 약간의 오차는 있으나 정착판은 75mm×105mm의 내외정도로 작아 블록아웃의 깊이는 약 100mm, 폭은 200mm 정도 이상 요구되며 길이(L)은 경사각도에 따라 결정되나 400mm 내외면 만족할 것으로 판단된다.

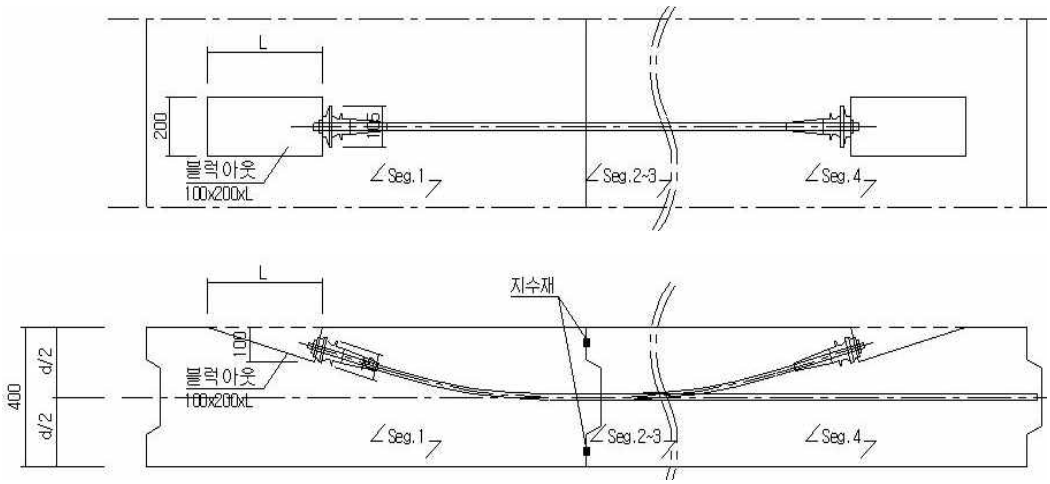


그림 2.15.10 경사 정착구 설치

경사 정착구 설치 방법에 의한 라이닝체결 방법의 단면 두께는 크기에 경사 정착구 설치각도, 최소 직선길이(Lmin=800mm) 및 PS 강연선의 최소 곡률반경(R=2,500mm)에 의한 강연선 배치를 검토하여 단면두께 결정이 필요하며 강연선의 직경에 따라 다소 변경될 수 있다.

PS 강연선(15.2mm)의 경우, 세그먼트 내측면에서 강연선 중심까지 거리(d/2)는 200mm로 전체 단면두께(d)는 400mm 내외 필요할 것으로 판단되어 다른 방법과 비교하여 세그먼트의 두께(d)는 두꺼워져야 하여 정착구 설치를 위한 단면의 효율성 측면에서 불리하나, 외력에 의한 구조물 단면 두께 또는 쉴드 추진을 위한 지지반력 두께와 비교하여 단면두께를 결정하여야 한다.

본 방안은 일부구간에서 PS 강연선 배치가 세그먼트의 중심축에서 벗어나 일부 국부응력집중이 발생될 수 있으나, 교량분야 등에서 PS 긴장력 도입 및 정착구 설치 형상에 따른 많은 실험과 현장 적용성과를 가지고 있다. 구조세목(최소곡선반경, 최소직선길이)을 만족하도록 정착구 계획으로 구조물의 안정성 확보가 가능한 것으로 판단된다.

그리고 세그먼트와 세그먼트의 종방향 연결부에서 정착구 설치를 배제하여 지수재의 연속화 설치가 가능하고 PS 강연선을 긴장하여 세그먼트의 밀착력으로 향상시킬 수 있어 누수 차단 효과가 매우 우수할 것으로 판단된다.

라. 방안 4 : 세그먼트 중앙부 및 이음부에 정착구 설치

세그먼트의 이음부에서 정착구의 블록아웃 발생을 피하여 고정 정착구를 세그먼트 내에 설치하고 인장 정착구를 세그먼트 단부에 설치하여 단면 중심으로 쉬스관을 매입하여 부재의 중심축 방향으로 PS강연선을 긴장하는 방법이다.

한 개의 세그먼트에 PS 강연선을 4선 배치하는 단면을 계획하였을 경우 정착구 설치 위치상 PS 강연선 4선 중 1선은 연속화 할 수 없어 실제 세그먼트의 PS 긴장력 도입 효과는 3선에 의한 긴장효과를 고려하야야 한다.

4개의 세그먼트를 조립 후 PS 강연선을 삽입하여 양단 정착구에 강연선을 고정 및 긴장하여야 하므로 작업공간이 필요하며, 터널 굴착 진행방향 쪽은 세그먼트 설치 전으로 필요 작업공간 확보가 충분하나 고정 정착구 쪽은 세그먼트 설치가 완료되어 정착구 작업공간 확보를 위한 세그먼트 내에 블록아웃 한다.

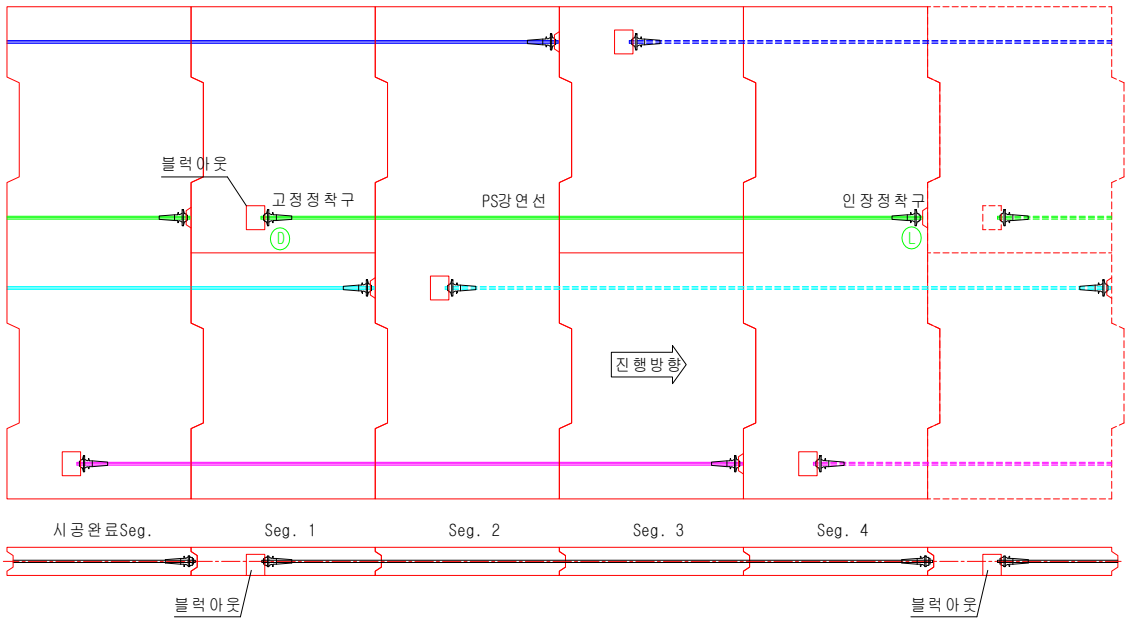


그림 2.15.11 세크먼트 중앙부에 정착구 설치 개요도

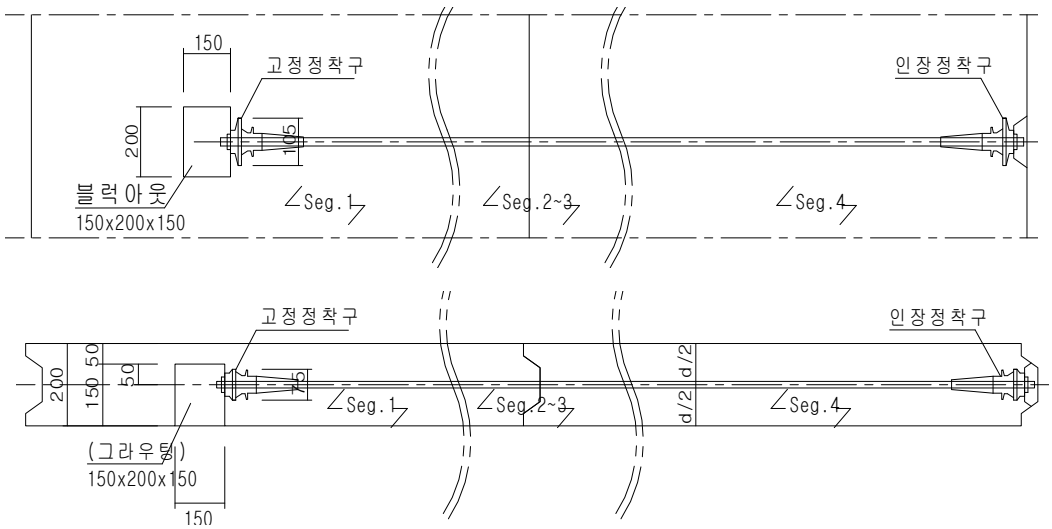


그림 2.15.12 고정 정착구의 블록아웃 및 최소단면 두께

고정 정착구의 작업공간은 정착판, 정착쐐기의 규격 및 핸드워크 공간확보에 의하여 결정되며 15.2mm(0.6“) 강연선 규격에 맞는 정착구의 정착판은 제조사별로 약간의 오차는 있으나 75mm×105mm의 내외정도로 핸드워크의 공간으로 H150mm×W200mm×L150mm 블록아웃이 필요하다. 강연선 체결을 고려한 최소단면 두께는 콘크리트 피복(50mm)과 블록아웃 깊이(H150mm)으로 최소 필요단면 두께는 200mm 정도로 단면 최적화에 매우 유리한 것으로 판단되나, 외력에 의한 구조물 단면 두께 또는 쉴드 추진을 위한 지지반력 두께와 비교하여 단면두께를 결정하여야 한다.

인장 정착구의 블록아웃은 정착구 헤드 부분을 매입할 수 있도록 40mm정도가 필요하며, 작업공간은 인장기 운용을 고려한 여유공간을 포함하여 정착구 중심에서 70mm정도의 깊이가 필요하며 세그먼트 두께를 140mm 이상이면 가능하고, 인장기를 이용한 긴장작업의 공간 여유폭은 최소 800mm 정도를 요구하나 세그먼트 설치 전 단계로 충분한 공간 확보가 가능한 것으로 판단된다.

본 방안은 부재단면 중심에서 정착구를 설치하여 PS강연선을 긴장하므로 세그먼트 내 콘크리트에 작용하는 응력분산 효과가 유리하여 응력집중을 최소화할 수 있다.

고정 정착구를 세그먼트 내에 설치하여 세그먼트 연결부에서 블록아웃을 배제하여 누수차단 효과를 개선하였으나, 인장 정착구를 단부에 설치하고 그라우팅으로 마무리하는 부분에서 누수차단에 다소 불리할 수 있으므로 그라우팅시 주의가 필요하다.

표 2.15.1은 정착구 설치위치에 따른 정착구 설치 작업공간, 세그먼트의 필요단면두께, 구조물의 안전성, 누수저감 효과는 위에 미치는 영향 등의 세그먼트에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

정착구 설치 위치 등 적용방안은 작업공간 확보 가능여부, 세그먼트의 단면두께, 지하수위영향 등을 종합적으로 검토하여 터널이 가설되는 지형조건에 따라 적절한 정착구의 형상을 개선하여 적용하는 방법이 필요하다고 판단된다.

표 2.15.1 정착구 설치위치에 따른 특징 비교

구 분	방안 1 세그먼트 이음부에 정착구 설치	방안 2 세그먼트 중앙부에 정착구 설치	방안 3 세그먼트 내에 경사정착구 설치	방안 4 세그먼트 중앙부 및 이음부에 정착구 설치
정착구 설치공간	작업공간 확보 유리	블록아웃으로 작업공간 확보 가능	블록아웃으로 작업공간 확보 가능	작업공간 확보 유리
단면 최소두께	약 200mm 필요	약 240mm 필요	약 400mm 필요	약 200mm 필요
구조물의 안전성	안전성 확보 유리	블록아웃이 커져 구조물 단면손실로 인한 안전성 불리	블록아웃에 의한 구조물 단면손실 최소화로 안전성 유리	블록아웃에 의한 구조물 단면손실 최소화로 안전성 유리
누수저감 효과	세그먼트 이음부 설치로 누수에 불리	세그먼트 이음부 설치 배제로 누수저감 효과 유리	세그먼트 이음부 설치 배제로 누수저감 효과 유리	세그먼트 이음부에 정착구 설치 최소화로 누수저감 효과 보통

3. 전단키 가이드 기능 검토

강연선 체결 쉴드터널은 강연선의 긴장력을 이용하여 4개의 세그먼트를 일체로 긴장시키는 기본 개념과 함께 아일랜드형 전단키 세그먼트로 인해 터널 조립 단계에서의 시공성 향상 개념이 있다.

본 연구에서 수행한 현장 조립 시험시공에서도 확인하였지만, 세그먼트 조립 공정에서 아일랜드형 전단키는 기 설치된 세그먼트 뒷면의 전단키 홈 부근에 위치하게 되면, 전단키의 가이드 기능으로 장시간의 틸팅 과정 없이 바로 정확한 조립 위치를 찾을 수 있었다.

전단키가 없는 기존 세그먼트의 경우에는 세그먼트 틸팅 공정시 X, Y, Z축 모든 방향으로 시공오차가 발생 가능하며, X, Y, Z축 방향에 대한 시공오차를 최소화 하기 위해 쉴드머신의 이렉터를 이용한 틸팅 공정시 소요시간이 많이 소모된다.

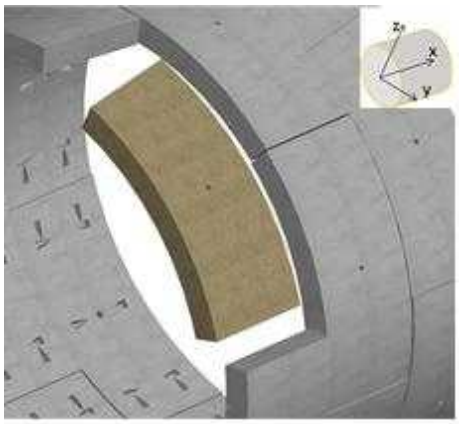
반면, 아일랜드형 전단키 세그먼트의 경우에는 X, Y, Z 축 방향에 대해서는 전단키가 형성되어 있어, 전면 세그먼트의 전단키 홈에 전단키를 위치시키게 되면 X, Y, Z 축 방향으로의 움직임을 제한하여 틸팅 공정의 소요되는 시간을 절감할 수 있다.

그림 2.15.13은 기존 쉴드공법에서 세그먼트 조립 과정을 모사한 것이다. 쉴드머신의 이렉터는 유압에 의해 작동되는 정밀한 기계식 거동장비이긴 하지만, 운전자의 조정 실력과 세그먼트 정밀도에 따라 시공오차를 유발시키게 된다.

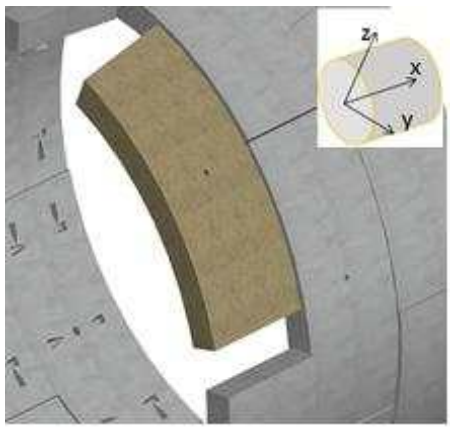
그림 2.15.13의 각 단계를 살펴보면 세그먼트 1피스를 접속하기 위해 x, y, z축 방향으로의 계속적인 틸팅 작업을 하여야만 비로서 세그먼트 1피스의 위치를 최대한 정확히 잡을 수 있게 된다. 이것은 구조물의 면과 면으로만 위치를 선정해야 되기 때문에 필연적으로 발생되는 문제라도 판단된다.

반면, 그림 2.15.14는 아일랜드형 전단키 세그먼트의 조립 과정을 모사한 것이다. 아일랜드형 전단키는 X, Y, Z 축 방향으로 구속되어 있기 때문에 X, Y, Z 축 방향의 시공 오차 없이 단시간에 설치 위치에 접속이 가능하게 된다.

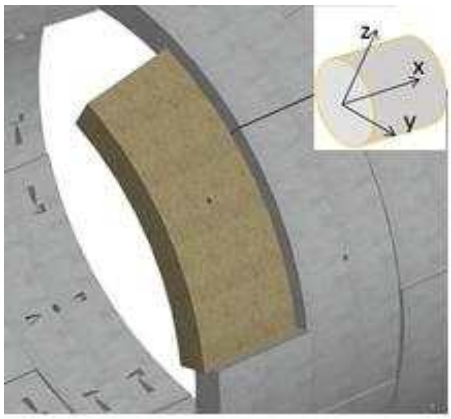
본 연구에서 개발된 강연선 체결 쉴드터널에서 아일랜드형 전단키 세그먼트는 매우 중요한 요소이며, 시공성 향상, 공기 단축, 간접비 절감으로 인한 경제성 향상 등 개발 기술의 특징 및 장점을 극대화시키는 중요한 요소 기술이라고 판단된다.



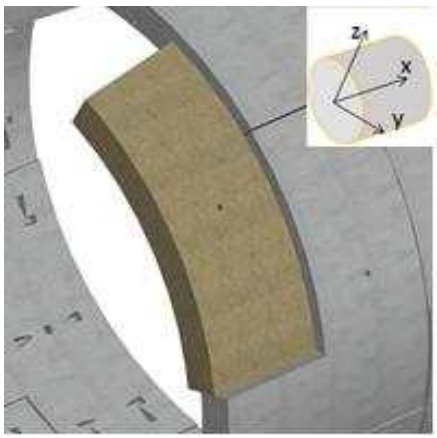
(a) 체결을 위한 세그먼트 접근 (터널내부→외부방향)



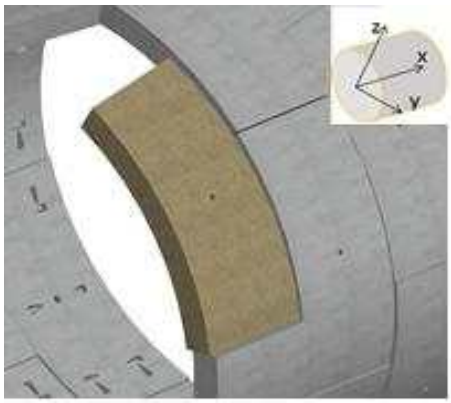
(b) x축 방향의 시공오차 발생



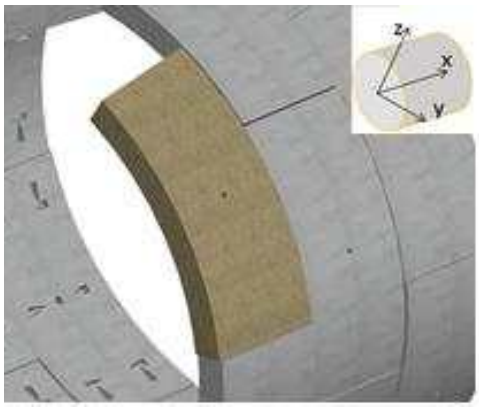
(c) y축 방향의 시공오차 발생



(d) z축 방향의 시공오차 발생

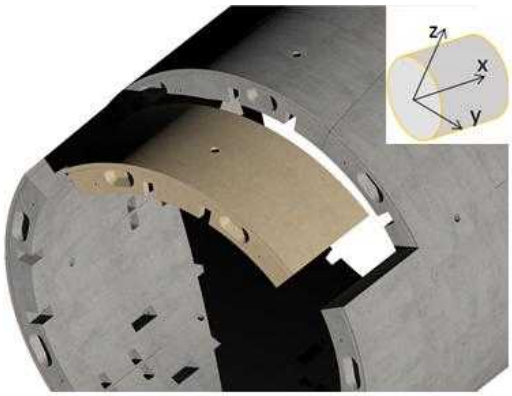


(e) x, y, z축 방향 모두 시공오차 발생(뒤틀림)

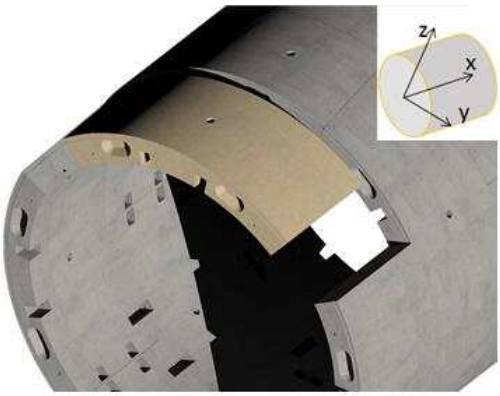


(f) 세그먼트 1피스 접속 완료

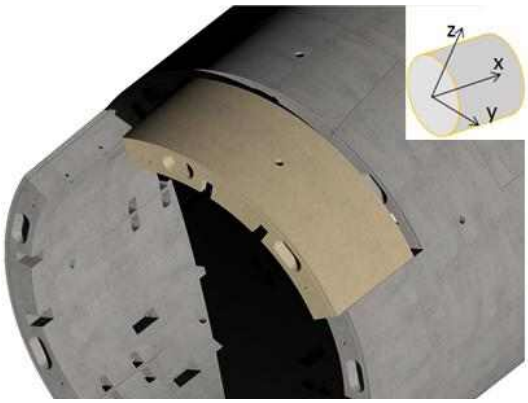
그림 2.15.13 기존 쉴드터널 세그먼트의 조립 과정



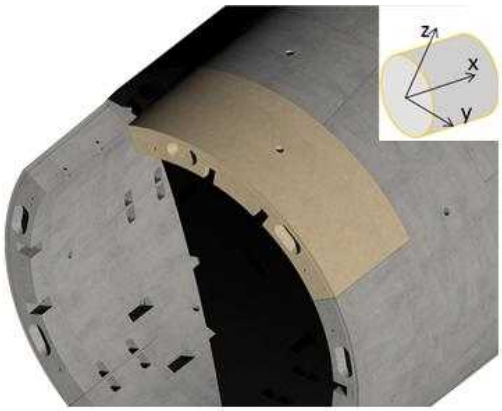
(a) 체결을 위한 세그먼트 접근
(터널내부→외부방향)



(b) 전단키가 전단키 홈에 위치



(c) 전단키 홈을 따라 가이드 기능 발휘



(d) 세그먼트 1피스 접속 완료

그림 2.15.14 아일랜드형 전단키의 가이드 기능

4. 강연선 자동화 시스템 상세설계 및 3D 모델링

가. BIM 개요

BIM(Building Information Model)은 프로젝트의 단계별 생성되는 디지털 모델을 통합하여 단계별로 이해 당사자들에게 통합되고 일관된 정보를 공유하여 협업할 수 있는 프로세스이다. BIM은 완성되는 특정한 형태의 모델 또는 시스템으로 간주할 수 없으며, 프로젝트의 최종 목적을 위한 다양한 도구들의 결합이다. 이러한 결합의 최종 성과물이 BIM의 형태로 제시된다. 본 연구에서는 Microstaion을 사용하고 검토하였다.

2D cad →D cad →D maxs →IM Tools + (?)

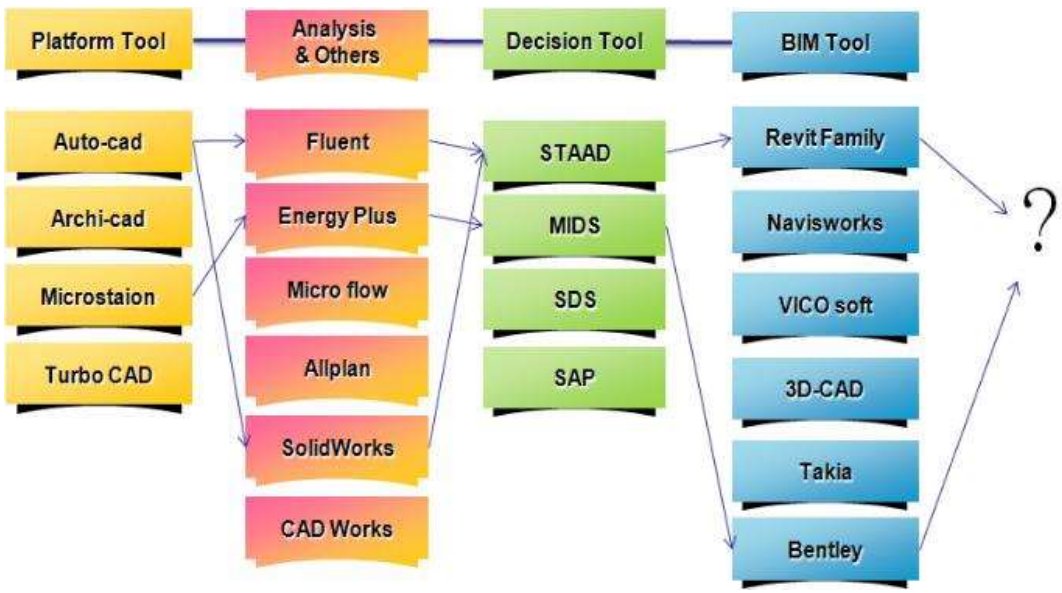


그림 2.15.15 BIM을 완성시키는 여러 가지 Tool

BIM의 적용 기대효과로는 크게 협업(Collaboration), 통합화(Integration), 시각화(Visualization)이다. 협업 효과란 시뮬레이션 Modeling을 통해 전후 공정간, 작업 주체 간 협업이 활성화대 원활한 의사소통이 이루어지는 것으로, 주요 구조물간의 Interface 검증도 가능하다. 통합화란 구조와 설계, 설계와 견적 또는 설계와 시공까지도 원 스톱으로 진행. 분야별 기술융합에 따른 설계오류가 최소화되고 재시공을 방지할 수 있다. 시각화 측면에서는 3차원 또는 4차원 정보를 활용, 발주자 등 고객의 요구에 신속하게 대응한다.

BIM은 시공프로세스 및 소용공기 분석결과와 위험도 평가 분석에서 제시되는 문제점으로 강연선체결 쉴드터널의 소요공기와 인력시공에 따른 오류로 인하여 강연선 자동 공급장치의 필요성이 제시되었다. BIM의 기대효과인 인터페이스(Interface) 검토와 시각화 측면의 장점을 적용면 고가장비의 시험제작상에서 발생할 수 있는 risk를 BIM적용으로 미연에 방지가 가능하다. 다양한 검토가 가능하며 장비작동에 따를 소요공기분석이 가능하고 향후 장비관리 및 유지관리가 유용하다. 그림 2.15.16 쉴드 TBM 장비의 3D 모델링을 나타낸 것이다.

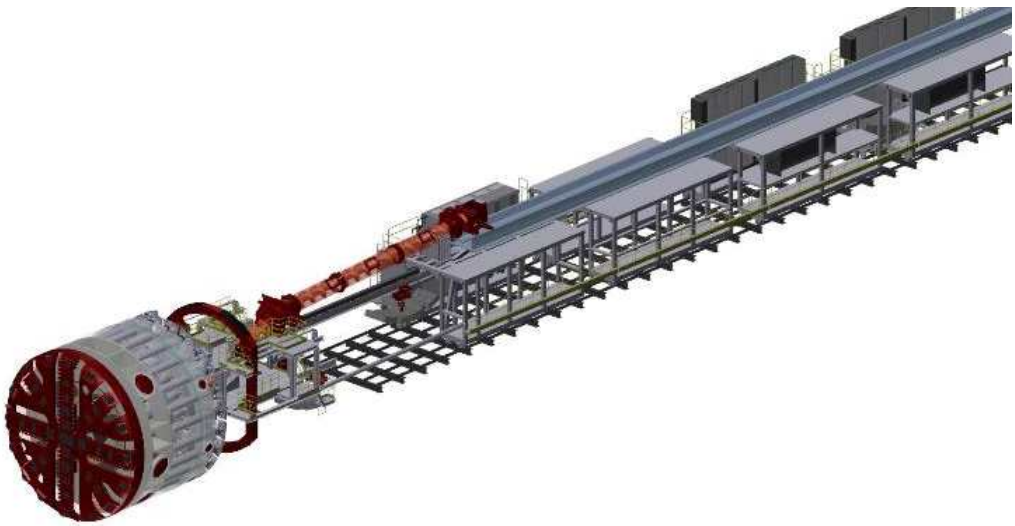


그림 2.15.16 쉴드TBM 3D 모델링

나. 강연선 자동화 시스템 개발

강연선 공급 및 인장의 소요공기 단축을 위하여 자동화 시스템 적용을 검토하였는데, 강연선 공급 및 인장의 자동시스템 구축시 기존 장비(쉴드TBM)와 인터페이스, 사용자 안전성, 제작가능성을 확보하여야 한다.

① 1단계 기본 개념 검토

그림 2.15.18은 강연선공급의 기본 개념의 1단계 검토를 나타낸 것이다.

-이렉터(Erector) 회전을 고려하여 강연선공급을 2가지 경로로 공급한다.

-강연선 유도 파이프를 설치하여 광차에 보관된 강연선을 이렉터까지 유도한다.

-세그먼트에 강연선공급 장치는 이렉터에 부착하여 고정한다.

-세그먼트 설치위치에 따른 강연선길이 보정을 위하여 와이어 드럼(Wire Drum)을 설치한다.

-강연선은 유연한 파이프 설치로 작업자의 안전성을 확보한다.

-세그먼트 체결을 위하여 이렉터 회전시 스크류 및 기존장비와의 인터페이스 중복 현상이 발생하여 문제점 해결을 위하여, 레일박스(Rail Box)에 여러 개의 강연선 공급 경로가 필요한 것으로 검토된다.

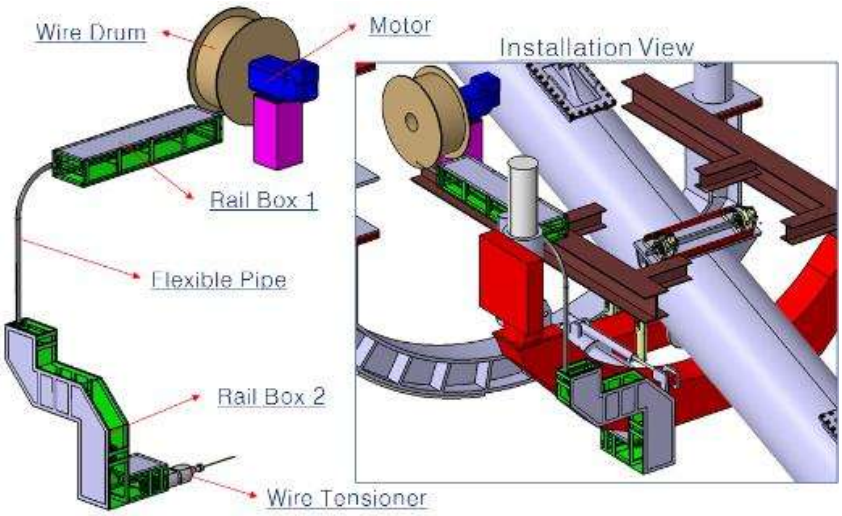


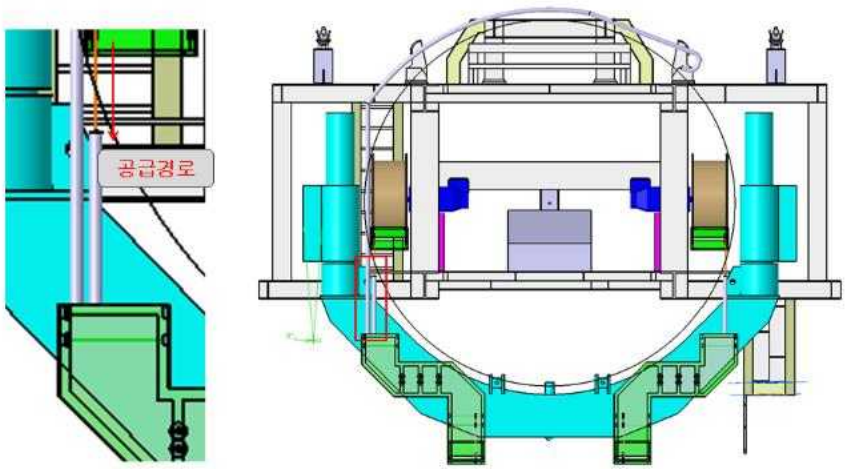
그림 2.15.17 강연선 공급 및 긴장 자동화 시스템 개발 1단계

② 2단계 기본 개념 검토

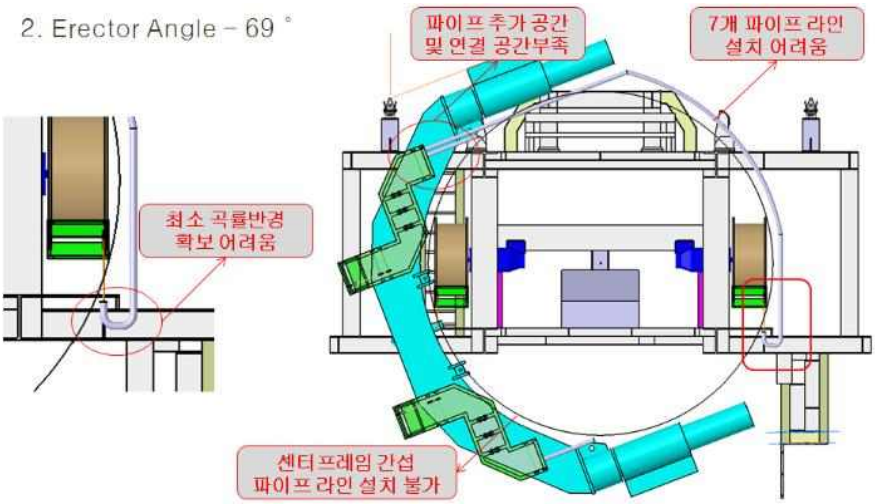
1단계의 문제점 개선을 위하여 세그먼트의 설치에 필요한 이렉터 회전각을 검토하여 레일박스에 여러 개의 공급 경로 설치를 검토하였다. 그림 2.15.19는 이렉터 회전을 0°와 69°로 가정하여 검토한 결과이다. 기본 개념은 1단계와 동일하나 레일 박스에 여러 개의 강연선 공급 파이프 설치를 검토하였다. 검토결과 문제점은 표 2.15.2와 같다.

표 2.15.2 강연선 자동화 시스템 2단계 문제점

구분	문 제 점
설치공간	-터널에 따라 세그먼트의 수량이 변경되며 6+1조합을 가정하여 검토 결과 Rail Box2의 여러개의 Pipe 공급경로 확보공간이 부족한 것으로 분석됨
강연선특성	-근거리의 공급라인에서는 강연선 최소곡률반경 확보가 불가능함 -강연선 고정부 공급장치와 Pipe 라인 끝단 정렬이 어려움
형상 및 강도	-최소 1~8m 길이 파이프를 복잡한 형상의 구조로 제작이 어려움 -파이프 설치 가능공간의 부족으로 파이프의 구조적 안정을 위한 두께 확보 곤란



(a) 이렉터 각도 0°



(b) 이렉터 각도 69°

그림 2.15.18 강연선 공급 및 긴장 자동화 시스템 개발 2단계

③ 3단계 기본 개념 검토

3단계 기본 개념은 2단계 검토에서 발생한 문제점 해결을 위하여 기존 TBM 장비에 강연선을 공급할 수 있는 원형구조물을 설치하였다. 3단계 기본 개념의 레이아웃은 그림 2.15.19와 같다.

3단계 기본 concept은 원형구조물 설치로 세그먼트 개수 및 설치위치 변화에 유연하게 대처할 수 있는 것으로 분석되었고, 강연선은 2개의 경로로 공급되며 강연선 공급박스에 연결되어 고정되어 있다. 그림 2.15.20은 강연선 자동공급 원리를 나타낸 것이다.

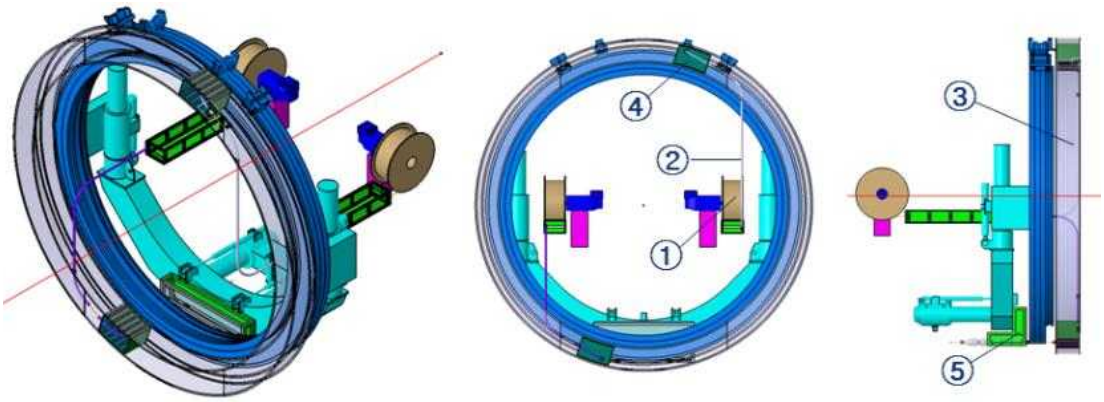


그림 2.15.19 강연선 공급 및 긴장 자동화 시스템 개발 3단계

① 서브모터 및 와이어드럼 : 강연선 공급 및 강연선 위치 제어
② 가이드 파이프 : 강연선의 공급장향 유도
③ 원형구조물 : 강연선 공급 박스 가이드
④ 강연선 공급박스 : 일정한 위치로 회전 강연선공급
⑤ 강연선 주입장치 : 세그먼트에 따른 공급 지점 조정

강연선 자동공급 장치 작동 프로세스는 총 6단계로 구성되며 단계별 세부내용은 표 2.15.3와 같다.

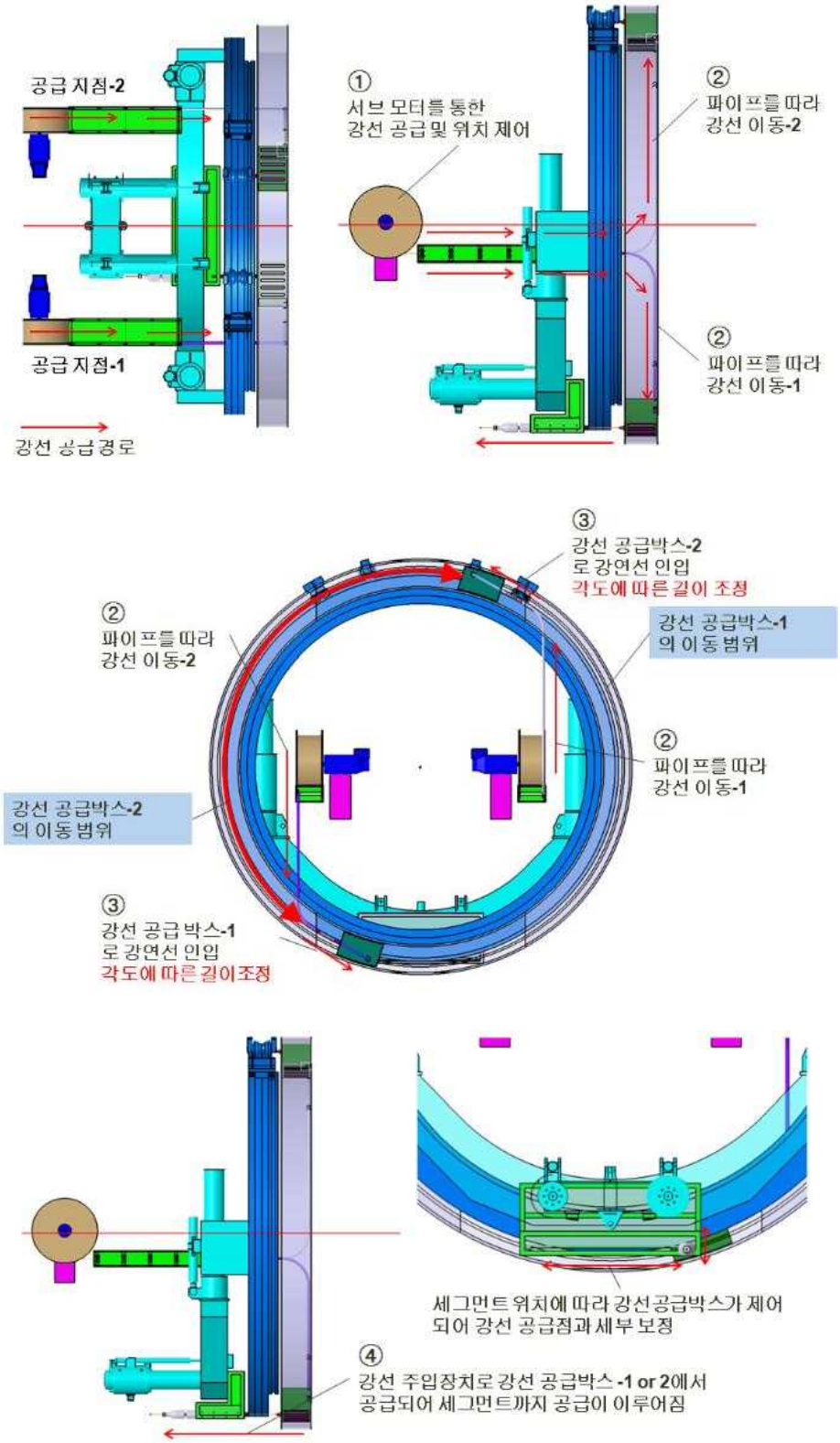


그림 2.15.20 강연선 자동공급 원리

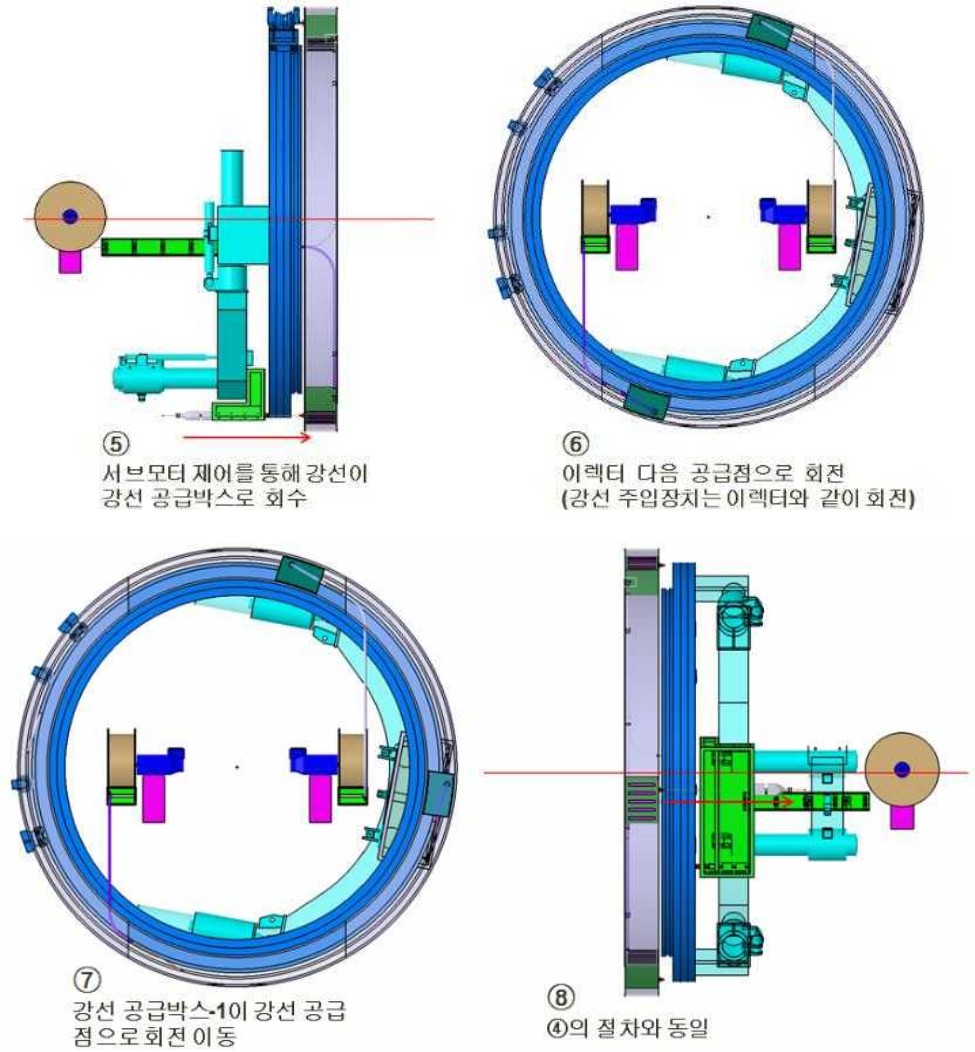


그림 2.15.20 강연선 자동공급 원리(계속)

표 2.15.3 강연선 자동공급 장치 단계별 세부내용

단계	단계별 세부내용
1단계	· 서브모터를 제어를 통한 강연선공급
2단계	· 이렉터로 강연선 주입 세그먼트 설치 위치까지 회전
3단계	· 세그먼트 설치위치로 회전 가능한 강연선공급박스 원형구조물을 따라 이동
4단계	· 세그먼트 강연선 공급홀에 공급가능 하도록 강연선주입장치 세부 보정
5단계	· 강연선공급박스에서 강연선주입장치로 강연선공급
6단계	· 강연선인장 및 절단 후 강연선 공급장치까지 강연선 회수

그림 2.15.22 및 그림 2.15.23은 강연선 자동화 시스템의 3D 모델링 수행 결과를 나타낸 것이다. 강연선 자동 공급 장치 적용으로 강연선공급 및 인장, 절단에 따른 소요 공기 감소로 시공성 및 경제성을 확보 할 수 있는 것으로 분석된다.

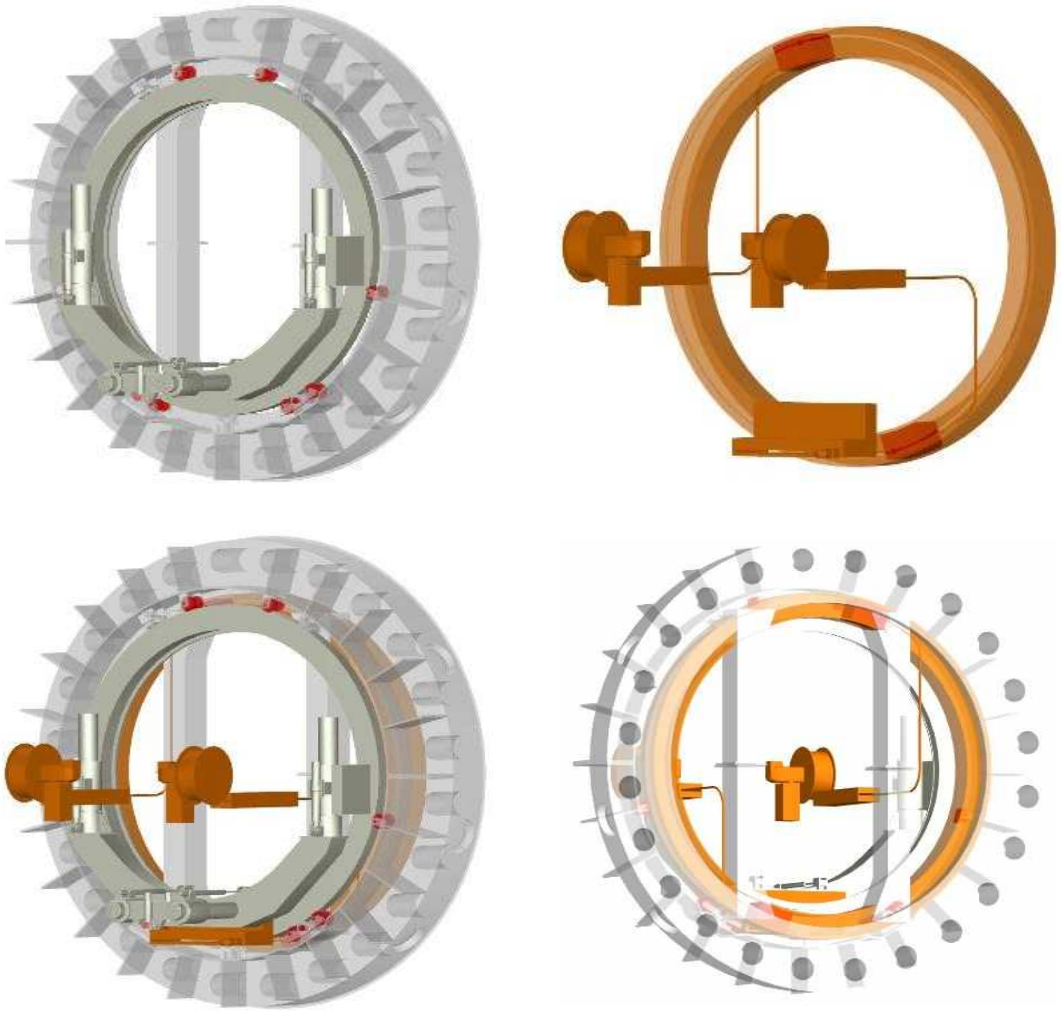


그림 2.15.21 강연선 자동화 시스템 3D 모델링(독립된 모습)

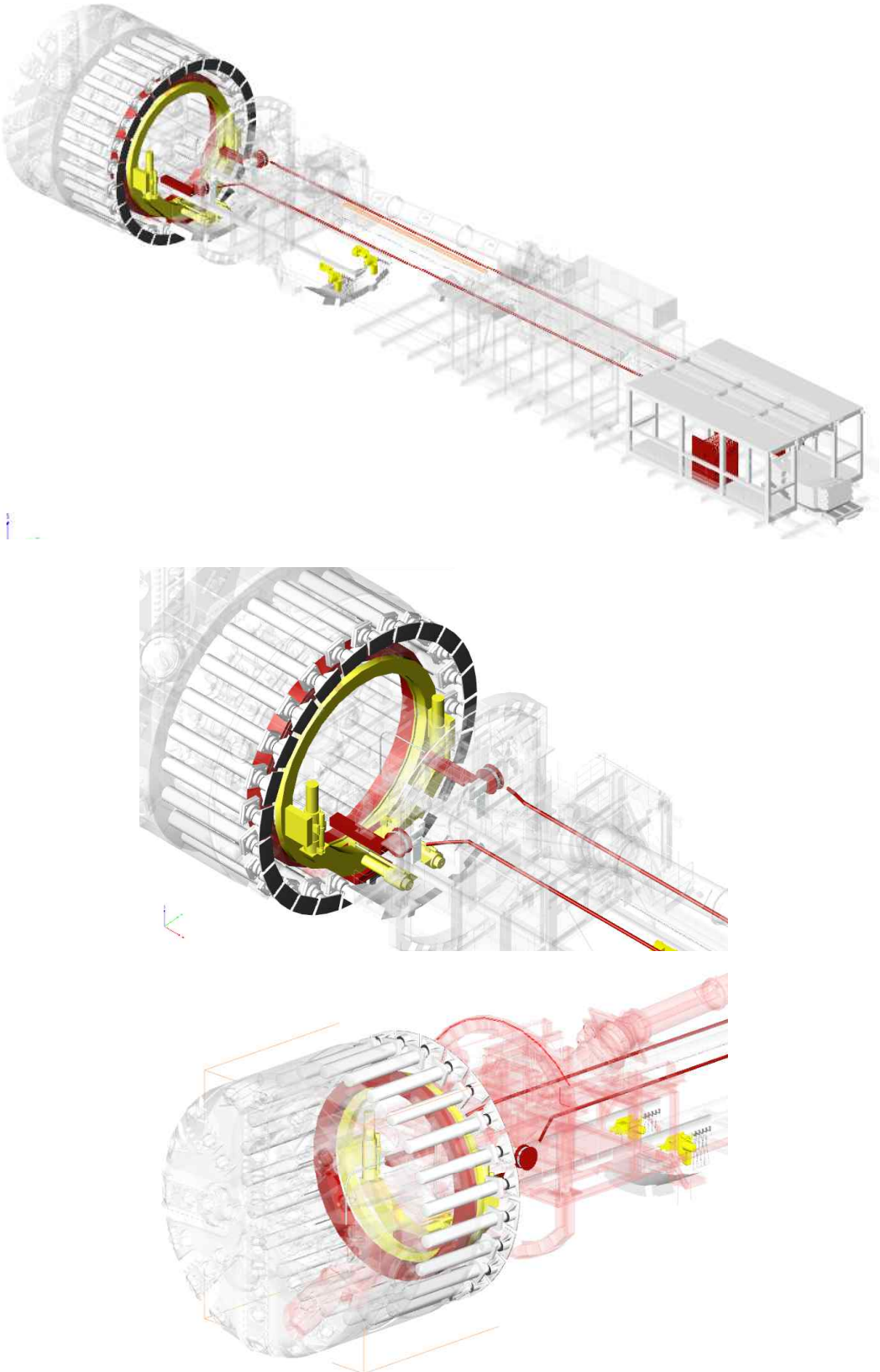


그림 2.15.22 강연선 자동화 시스템 3D 모델링(쉴드TBM 연동)

소결론

(1) 본 연구에서는 기존의 교량 등 여러 분야에서 축척된 강연선 정착구 보조 재료의 기술 및 공법을 검토하여, 시행착오를 최소화 하고 강연선 체결 쉴드터널 공법의 특성에 맞는 정착구를 선정하고, 터널 현장 적용성을 감안한 정착단의 구조형상 개선하기 위한 방안을 검토하였다.

(2) 기존 세그먼트의 경우에는 세그먼트 틸팅 공정시 X, Y, Z축 모든 방향으로 시공오차가 발생 가능하며, X, Y, Z축 방향에 대한 시공오차를 최소화하기 위해 쉴드머신의 이렉터를 이용한 틸팅 공정시 소요시간이 많이 소모되지만, 아일랜드형 전단키 세그먼트의 경우에는 X, Y, Z 축 방향에 대해서는 전단키가 형성되어 있어, 전면 세그먼트의 전단키 홈에 전단키를 위치시키게 되면 X, Y, Z 축 방향으로의 움직임을 제한하여 틸팅 공정의 소요되는 시간을 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 본 연구에서는 BIM 기법을 활용하여 강연선 자동화 시스템의 3D 모델링 수행하였는데, 강연선 자동 공급 장치 적용으로 강연선공급 및 인장, 절단에 따른 소요공기 감소로 시공성 및 경제성을 확보 할 수 있는 것으로 분석된다.

제 16 절 시공성 및 경제성 평가

1. 시공프로세스 분석

가. 쉴드터널 시공프로세스

쉴드터널 강연선 체결 기술은 기존 볼트 체결 방식을 보완 및 개선한 것으로 세그먼트 조립 공정에서의 시공 프로세스를 제외하면 기존 쉴드터널과 기본적인 시공프로세스는 동일하다. 현장 조립 시험시공을 통해 세그먼트 운반, 이렉터(Erector) 연결, 이렉터 회전, 틸팅, 조립 등의 공정에서 강연선 체결 기술만의 특성을 파악하고자 하였다. 그리고 기존 볼트 체결방식과의 비교를 통해 시공성 개선 방안을 도출하고자 하였다.

일반적인 쉴드터널의 시공프로세스는 9개의 세부공정으로 그림 2.16.1과 같이 진행되며, 쉴드TBM 조립 후 굴진 작업량 도달까지는 5개 공정이 반복되어 진행된다. 그리고 쉴드터널의 굴진은 그림 2.16.2와 같이 굴진준비→초기굴진→본굴진→장비회전의 4단계로 진행된다[1].

그림 2.16.3은 일반적인 쉴드터널의 단위공정별 시공 프로세스를 나타낸 것이다. 쉴드머신 굴진 후 세그먼트 공급에서 1링 체결 완료까지의 5개 단위공종이 반복하여 진행하게 되는데, 볼트 체결 방식은 1개의 세그먼트당 종방향 체결시 3~4개의 볼트 연결이 필요하나, 강연선 체결 방식은 1열의 강연선만 연결하게 된다.

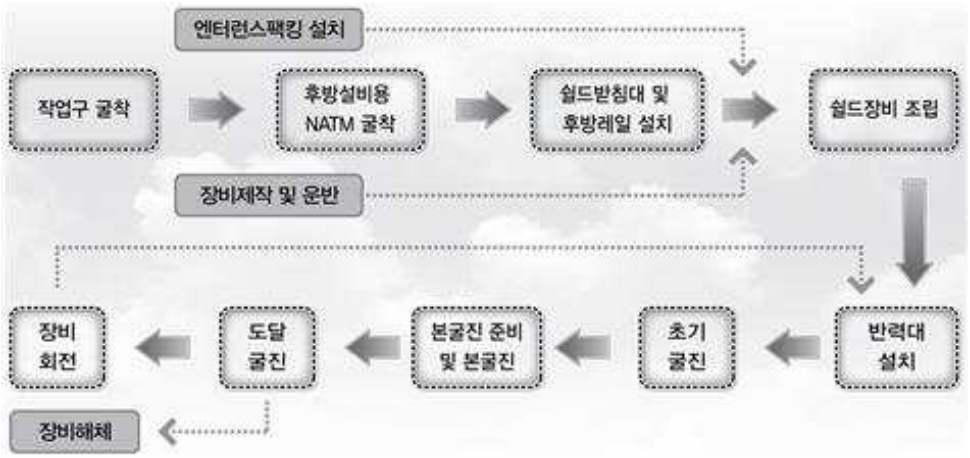


그림 2.16.1 쉴드공법 굴진 시공프로세스

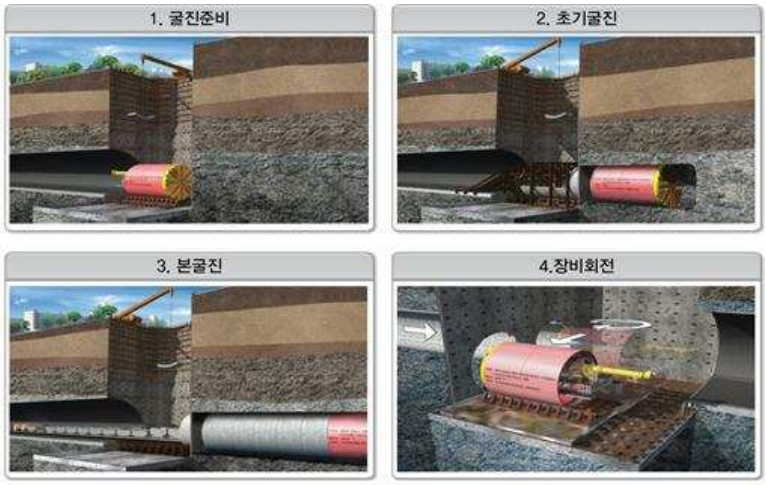


그림 2.16.2 쉴드공법 굴진작업



그림 2.16.3 쉴드터널 단위공종별 시공프로세스

쉴드터널의 시공은 TBM 제작, 수직구를 이용한 장비 및 세그먼트 반입, TBM을 이용한 굴진 및 세그먼트 조립, 볼트체결 등의 작업이 진행된다. 본 굴진 후 시공프로세스는 세그먼트 공급에서 1링 체결을 위하여 5개 공종이 반복적으로 진행되어 전체 쉴드터널이 시공된다.

나 . 쉴드터널 소요공기 분석

(1) 기존 쉴드터널

쉴드터널의 시공프로세스 분석 결과 세그먼트 공급, 세그먼트 고정, 이렉터(Erecto) 회전, 세그먼트 틸팅(Tilting), 세그먼트 체결 등의 6개 공정으로 구분되어 각 공정별 소요공기를 분석하였다. 그림 2.16.4는 기존 볼트 체결방식 쉴드터널에서 세그먼트 조립 단위공정에 대한 소요공기(cycle time)를 분석한 결과이다.

세그먼트 공급에서 체결까지 1개의 세그먼트 설치시 420초의 소요공기가 필요한 것으로 분석되었으며, 이중 세그먼트 틸팅 공정에서 가장 많은 시간이 소요되는 것으

로 분석 되었다.

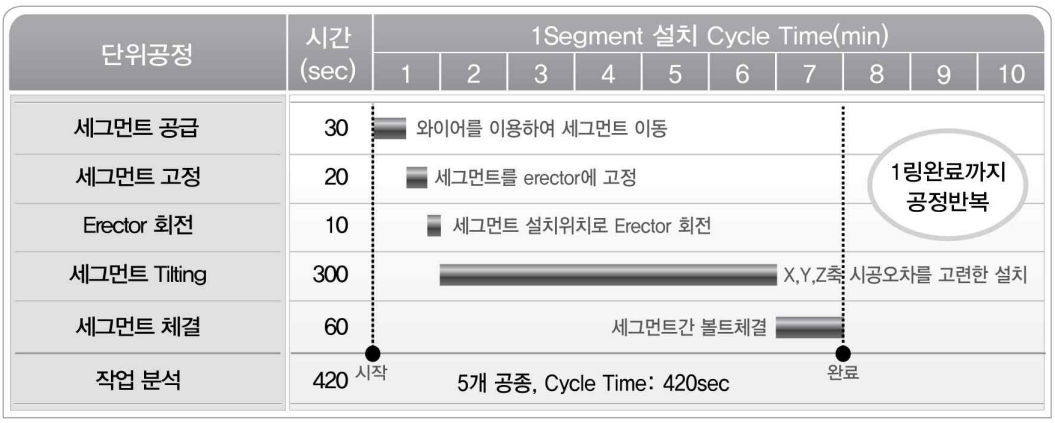


그림 2.16.4 볼트 체결방식 쉴드터널의 세그먼트 조립공정 소요공기 분석

(2) 강연선 쉴드터널

그림 2.16.5는 현장 조립 시험시공을 통해 측정된 강연선 쉴드터널의 세그먼트 조립공정에 대한 소요공기를 분석한 것인데, 강연선 설치시 인력에 의해 작업하는 것으로 고려하였다. 그리고 세그먼트 체결은 강연선의 주입, 긴장, 절단 작업 등이 모두 포함된 시간을 나타낸다. 1개의 세그먼트 공급에서 체결까지 400초의 소요공기가 필요한 것으로 분석되었으며, 강연선 설치 과정(segment assembling)은 인력 작업으로 분석했기 때문에 100초로 나타나 볼트 체결 방식의 60초보다 40초가 더 소모되는 것으로 나타났다.

그러나 이렉터를 이용하여 세그먼트 체결 위치를 선정할 때는 시험시공에서도 확인하였다시피 앞 링에 설치된 전단키 홈과 뒤링의 돌출된 전단키가 가이드 역할을 하여, 세그먼트 틸팅 공정(segment tilting)은 240초로 나타나 볼트 체결 방식의 300초에 비해 60초가 단축되어 전체 공정에서는 20초가 단축되는 것으로 분석되었다.

그림 2.16.6은 강연선 체결 공정을 인력이 아닌 자동 공급, 긴장 및 절단할 수 있는 장치를 적용하였을 경우 단위공정별 소요공기를 분석한 결과이다.

1개 세그먼트 설치에 360초가 필요한 것으로 분석되어 기존 볼트 체결 방식과 비교해서는 60초의 소요공기 감소효과가 있는 것으로 나타났다. 쉴드터널 공사기간 전체를 대상으로 확대했을 경우 세그먼트 조립 공정에서 상당한 소요공기 감소효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

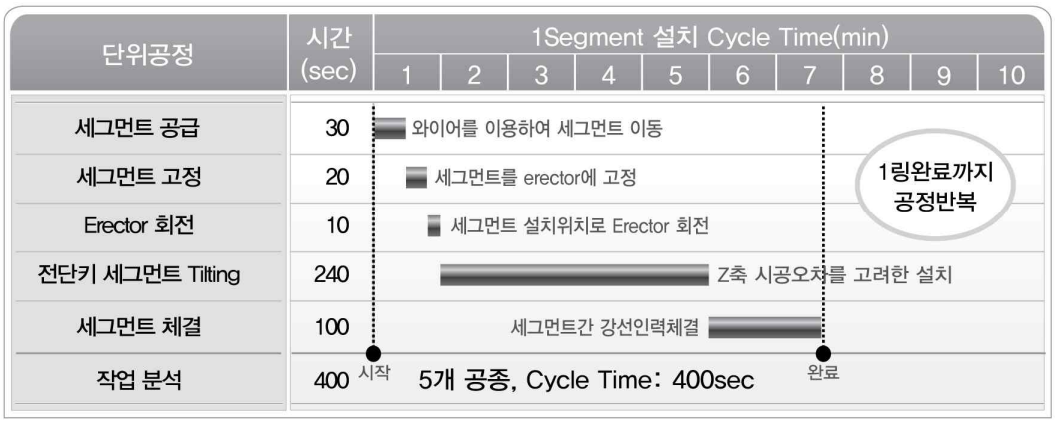


그림 2.16.5 강연선 쉴드터널의 세그먼트 조립공정 소요공기 분석(인력 작업)

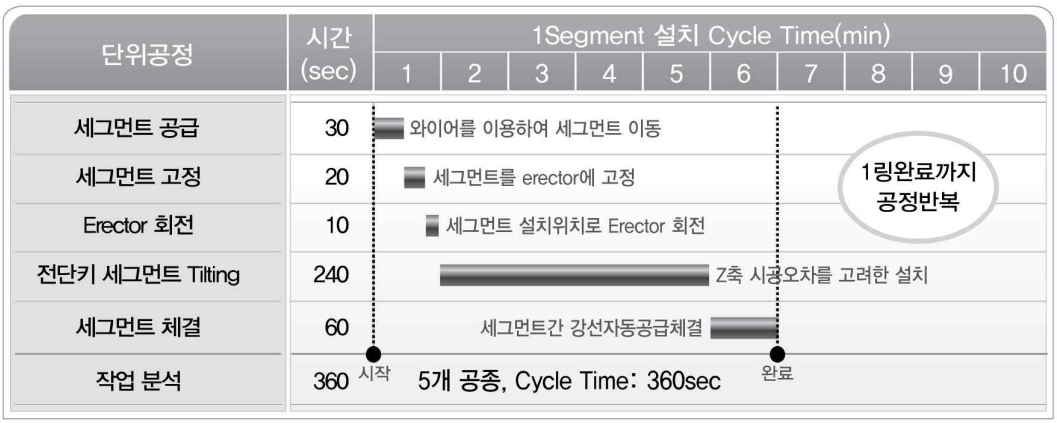


그림 2.16.6 강연선 쉴드터널의 세그먼트 조립공정 소요공기 분석(자동화 시스템)

2. 위험도 평가

가. 위험도 평가 정의

위험도 평가(Risk Assessment)는 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.[2)]

위험도 평가는 구조물의 시공 및 공용기간에 발생될 수 있는 위험요소와 위험경로를 사전에 분석하여 사전에 예방할 수 있도록 한다. 또한, 구조계획, 설계의 적정성과 신뢰성에 대해 검토하여 잠재적 위험요소를 사전에 예방한다. 그리고 주요부재의 파괴/붕괴 발생확률 및 그에 따른 경제적 손실로부터 위험도를 평가한다.

위험도 평가는 분석결과로부터 집중적인 관리방안 및 방지대책/계획의 수립을 위한 자료를 확보하며, 최종적으로 발생 가능한 위험으로부터 소중한 인명과 재산의 보호한다.

신공법 적용 및 장비 운영의 자동화 추세에 따른 위험도의 증가에 따라 관리가 필요하며, 건설공사의 특성상 사고발생 시 막대한 인명과 재산손실을 막기 위해 시공 및 운영 중 사고경로에 대한 분석과 사전 예방 및 대책을 수립해야 할 필요성이 증대되고 있다.

내재된 위험에 대한 체계적인 분석/평가를 위해서 중요 위험요소를 고려한 분석모형 제시와 주관적 평가까지 포함한 확률적 위험도 분석과정이 필요하다. 그림 2.16.7은 위험도평가 시스템의 흐름도를 나타낸 것이고, 표 2.16.1은 위험도 평가의 단계별 평가절차를 나타낸 것이다.



그림 2.16.7 위험도 평가 시스템 흐름도

표 2.16.1 위험도 평가 단계별 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 퍼지사건 수 모형구상 및 작성
위험도 분석	확률산정	- 각 촉발/발생사건의 언어학적 변량 결정 - 퍼지기법을 이용한 위험경로별 최대 속도 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)

사고의 안전도를 사용하여 시스템의 안전도를 나타내는 시스템 모델의 하나로서 귀납적 이기는 하나 정량적인 분석기법으로 종래에 지나치기 쉬웠던 재해의 확대요인 분석에 적합한 기법이다.

트리(Tree) 구성은 제일 먼저 발생하는 유발사건(Triggering events)인 초기사건과 경로 중간에 초기사건과 이어지는 발생가능사건(Enabling events)으로 구성되어 있다. 구성요소의 파괴와 직접 관련이 있으며 실제로 경제적 손실에 직접적인 영향을 줄 수 있는 위험사건이 각각의 경로 끝에 위치한다. 그리고 동일한 위험사건이라도 경로에 따라서 최종결과나 중간단계에 적용될 수 있다.

E.T.A 분석은 초기사건을 뒤따르는 발생가능사건들을 규명하고 여러 사건들의 발생할 수 있는 사건의 조합을 찾으며, 시스템의 상호작용과 기능향상을 위한 시스템 성

능을 향상시키는 척도를 검증하고, 분석자로 하여금 위험요소를 감지하여 감소시키는데 유용한 수단을 규명한다. 또한, 시공 및 유지관리 시 위험요소에 대한 유용한 절차에 대한 기본 정보 획득에 목적이 있다. E.T.A 분석 기법의 특징은 다음과 같은데, 표 2.16.3은 E.T.A(Event Tree Analysis) 분석 단계를 나타낸 것이다.

· 일반적으로 발생 가능한 잠재적인 위험사건들은 어떤 초기사건 발생 후 이어지는 하위사건들의 발생단계로 진행되므로 이런 과정을 Event tree diagram을 이용하여 체계적이고 효과적인 분석을 수행한다.

· 다양한 결과에 영향을 미칠 수 있는 초기사건을 분석하는데 용이하다.

· 초기원인을 강조하고 사건의 초기부터 마지막까지 영향을 가진다.

· 독립적인 사건이나 동시 발생적인 사건을 다루는데 적합하다.

· 사건의 순서를 기술하는데 가장 효과적이다.

· 설계단계에서 가정한 초기사건들로부터 발생되는 내재사건들을 평가한다.

표 2.16.2 E.T.A(Event Tree Analysis) 분석 단계

해석단계	단계별 내용
1단계	- 유발가능사건과 발생가능사건의 분류
2단계	- 사건 수(Event Tree) 구성
3단계	- 확률분석기법을 이용하여 각 사건들의 경로에 해당하는 발생확률 계산
4단계	- 발생확률과 경제적 손실을 곱하여 각 경로의 위험지수를 평가

일반적인 사건수의 구성은 초기사건과 이어지는 하위의 발생가능사건, 그리고 최후 발생되는 최종 결과들인 Cij····k로 이루어지고, 특정결과는 초기사건에 연이어 발생하는 하위사건(발생가능사건)에 의존한다. 하위사건들은 통계적 독립(Statistically Independent) 즉, 상관관계(Correlation)가 전혀 없는 사건으로 가정한다. 그림 2.16.9는 사건 수(Event Tree)의 구성 예시를 나타낸 것인데, 각각의 경로들은 어떤 사건이 발생하였을 경우 연이어 발생할 수 있는 하위 사건으로 구성되어 있다. 그리고 표 2.16.3은 트리 모델(Tree model)의 예시를 나타낸 것이다.

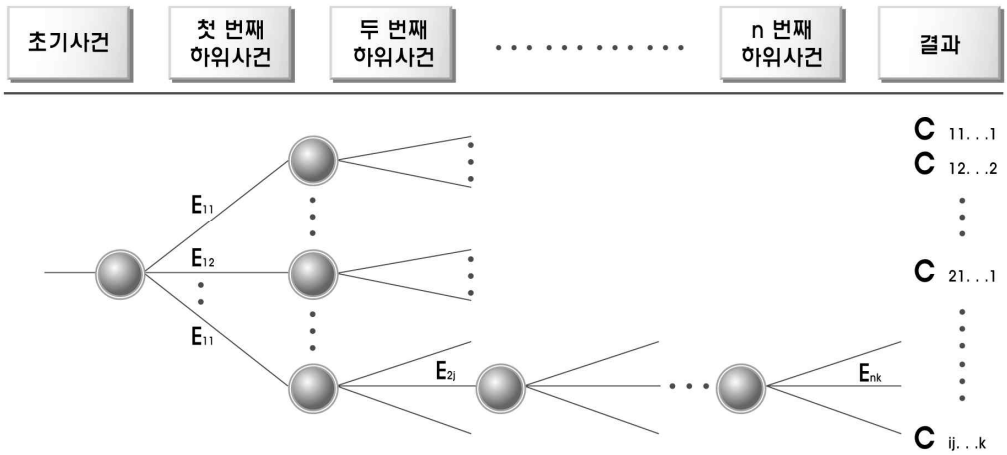


그림 2.16.8 사건 수(Event Tree) 구성 예시

표 2.16.3 트리 모델(Tree model) 예시

초기사건	발 생 가 능 사 건				발생확률	경제적손실	위험지수
T9	E15	E16	E17	E20	Pfi	Li	RFi
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

위험요소는 재해요소별, 공정별, 시공 및 유지관리 중 발생가능한 시나리오로 분류되는데, 표 2.16.4는 위험요소를 분류한 것이다.

표 2.16.4 위험요소 분류

구분		위 험 요 소	발생가능성	중요도
재해 요소별	자연재해	- 설계하중을 넘는 자연재해 발생	매우 낮음	매우 높음
	인적재해	- 차량/열차 전복에 의한 쉴드터널 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
공정별	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
시공 중 세부공정	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
운영 중 세부공정	도로쉴드 터널	- 차량운전 미숙에 의한 터널 충돌	다소낮음	높 음
		- 상시 및 정기점검 소홀에 의한 지하수 누수	낮 음	높 음
	철도쉴드 터널	- 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

기존 교통수단에 대한 위험도평가 분석결과 자료 범위가 광범위하고 사건사고에 대한 구체적인 세부통계자료가 없으므로, 부득이하게 일반적 터널사업(도로, 철도)의 시공단계 위험사건 시나리오와 운영단계 위험사건 시나리오로 구분하여 시나리오를 구성하였다. 그리고 일반적 터널사업(도로, 철도)의 시나리오를 통하여 세그먼트 체결장치에 대한 위험도평가 가상시나리오를 구성하고 세부 종합적 평가 실시하였다.

표 2.16.5는 일반터널의 단계별 시나리오 유형을 나타낸 것이고, 표 2.16.6은 일반터널 시공 단계 및 운영단계의 촉발사건을 나타낸 것이다.

표 2.16.5 일반터널의 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 2.16.6 일반터널의 시공 단계 및 운영단계에서의 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	세그먼트 시공관리 불량	정치/재정문제 발생
T6	터널 시공관리 불량	작업자사고
T7	체결 시공관리 불량	-
T8	정치/재정문제 발생	-



그림 2.16.9 일반터널 시공단계 시나리오 구성



그림 2.16.10 일반터널 운영단계 시나리오 구성

일반적 터널사업(도로, 철도)의 시나리오에서 세부 체결에 대한 위험도평가는 전문가의 주관적 판단을 기초로 하여 가상시나리오를 구성하고 종합적으로 평가를 실시하였다. 따라서, 세부 가상시나리오는 쉴드터널 체결에 대한 세부 촉발사건 및 발생가능사건을 각각 성격에 부합되는 사건들로 구성하였고, 세부 체결 위험도평가 시나리오 유형은 8개로 구성하여 분석하였다.

표 2.16.7 강연선 쉴드터널 위험도 평가 시나리오

구 분	체결위험도 평가	비고
Primary event trees (촉발사건)	5개	
Secondary event trees (발생가능사건)	15개	
Consequence (위험시나리오 유형)	8개	

표 2.16.8 강연선 쉴드터널 위험도 평가 촉발사건(T)

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 2.16.9 강연선 쉴드터널 위험도 평가 발생가능사건(E)

구 분	사 건 내 용	구 분	사 건 내 용
E1	용출수 대비 부족	E9	시설대체/복구
E2	체결수 누수	E10	세그먼트 및 부착물 탈락
E3	Operator 숙련도 부족	E11	차량 충돌사고
E4	체결방식 구조적 결함	E12	비용과다발생
E5	체결 불량	E13	재시공
E6	세그먼트 단차	E14	보수보강
E7	품질 불량	E15	인명피해
E8	터널 구조물 파손		



그림 2.16.11 강연선 쉴드터널 시나리오(시공 및 운영단계) 구성

표 2.16.10 위험도 평가 분석 세부내용

경로	촉발사건	발생가능사건			퍼지확률	발생비용 (백만원)	위험도
1	T1	E1	E2	E12	0.0017700	30	0.05
2	T2	E3	E2	E12	0.0017700	10	0.02
3		E4	E5	E13	0.2950000	3	0.89
4	T3	E6	E7	E14	0.0159000	10	0.16
5	T4	E8	E9		0.0040900	20	0.08
6	T5	E10	E9		0.0005100	3	0.05
7			E2	E12	0.0000344	15	0.06
8			E11	E15	0.0029700	5	0.08

위험도 평가는 다음과 같은 순서로 진행되었다.

① 위험사건 수집 : 대상사업의 사건유형 자료수집과 통계자료 및 전문가 자문을 통한 위험사건 유형을 분석한다.

② 위험사건 규명 : 촉발사건 5개와 발생가능사건 15개의 위험사건을 규명하여 분석결과 8가지 경로의 위험사건 시나리오가 구성되었다.

③ 위험도 분석 : 위험사건별 언어학적 변량을 결정하고, 퍼지사건 수 분석기법을 활용하여 위험확률을 하여 위험도에 따르는 발생비용을 산출한다.

④ 위험관리 : 위험등급을 분류하여 향후 관리방법을 결정한다.

(집중관리 : RF ≥ 1.0 / 주의관리 : 0.1 ≤ RF < 1.0 / 일반관리 : RF < 0.1)

라. 위험도 평가 분석결과 및 대책

표 2.16.11은 강연선 쉴드터널의 위험도 평가 분석결과를 나타낸 것이다. 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-체결방식 구조적 결함)은 기존 세그먼트 체결방식을 볼트체결에서 강연선 체결 방식으로 개선시 체결부 누수위험에 따른 경제적 손실이 감소 될 수 있을 것으로 분석되었다.

그리고 경로 4(세그먼트 구조적 결함-세그먼트 단차)는 기존 일반적 세그먼트 형식을 전단키가 설치된 세그먼트 형식으로 개선시 품질불량에 의한 보수보강 비용을 감소 할 수 있을 것으로 분석되었다.

표 2.16.11 강연선 쉴드터널 위험도 평가 분석결과

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

3. 강연선 체결 기술 VE 평가

가. VE 정의

VE란 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 2.16.12는 VE 수행시 기본적으로 고려되어야 할 핵심요소 나타낸 것이다.

표 2.16.12 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 정성적이며 정량적인 수치로 나타낸 것이다(V=F/C).

· 기능(Function) : VE 대상 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 하나 이상은 반드시 존재한다.

· 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 VE 대상을 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.

· VE 팀리더(VE Team Leader) : VE 수행절차에 대한 이해도가 높고 Team-leading 능력을 보유하여 VE 팀원간 의사소통을 극대화시켜 팀시너지를 이끌어 내는 자를 말한다.

· VE 팀원(VE Team Member) : VE 팀리더의 리딩에 따라 각 기술분야, 사용자, 이해관계자 등의 자격으로 아이디어 및 대안을 검토하는 역할을 수행하는 자이다.

· VE 퍼실리테이터(VE Facilitator) : VE 프로세스 전문가로 VE 팀 활동시 각 VE참여자의 원활한 의사소통과 적극적 참여를 유도하여 성공적인 VE 검토수행을 지원하는 자를 말한다.

· VE 활동 : VE 프로세스 전체를 의미하며, VE의 준비단계, 분석단계, 실행단계까지 각 VE 대상에 따라 팀 작업을 하는 활동을 의미한다.

나. 단계별 VE 분석 절차

그림 2.16.12는 VE 분석 절차를 나타낸 것이다. VE Job Plan 표준절차에 따라 준비단계(Pre-study), 분석단계(VE Study), 실행단계(Post-Study)를 거쳐서 사후관리 단계(Follow-up Phase)로 진행하며, 사후관리 단계는 VE 제안에 대한 모니터링 단계로 실제 선정(안) 적용여부를 지속적으로 관리 검토하는 단계이다.

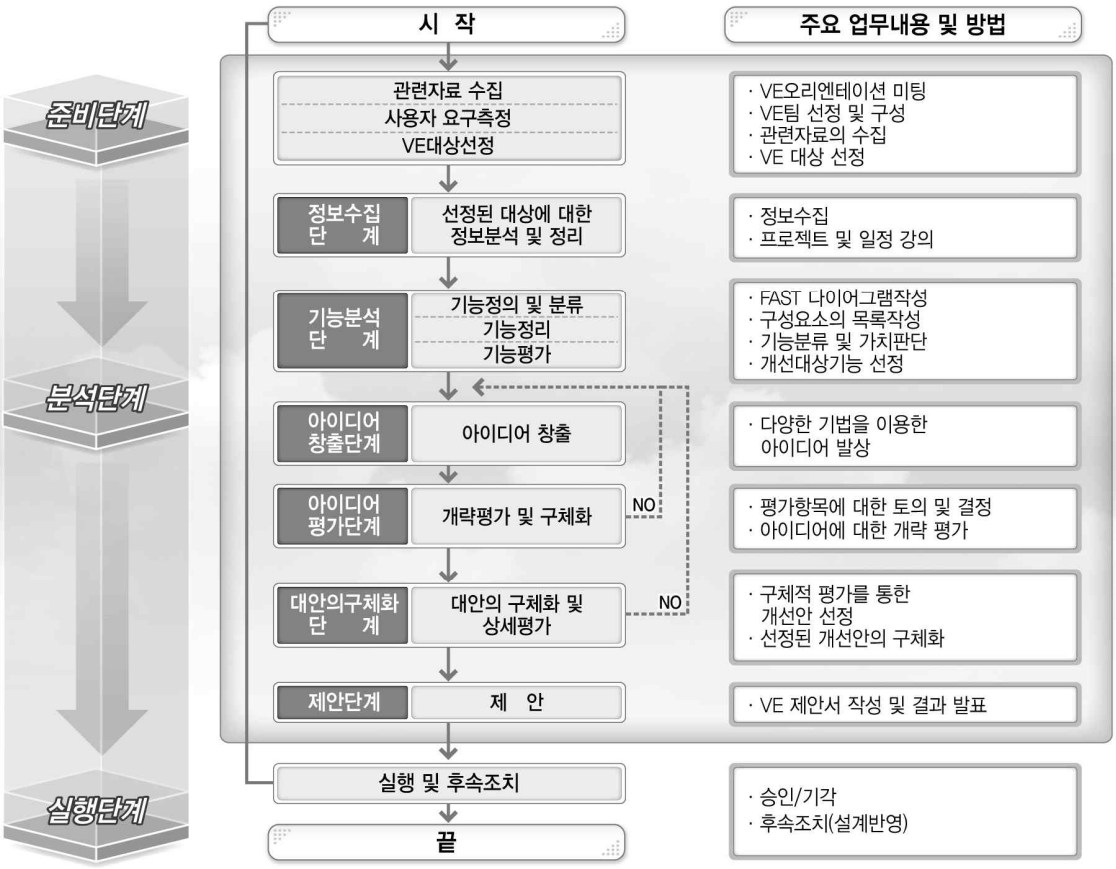


그림 2.16.12 VE 분석 절차

준비단계의 주요 목적은 원활한 VE수행을 위하여 관련된 집단의 협력체계를 구축하고 VE 수행을 위한 공동목표 설정 및 이해, 충분한 자료 확보, VE 팀 구성, VE 워크샵 수행계획 수립 등에 있다. 준비단계에서는 체크리스트를 작성하여 원활한 진행을 할 수 있도록 하는데 다음은 주요 체크리스트이다.

- 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?

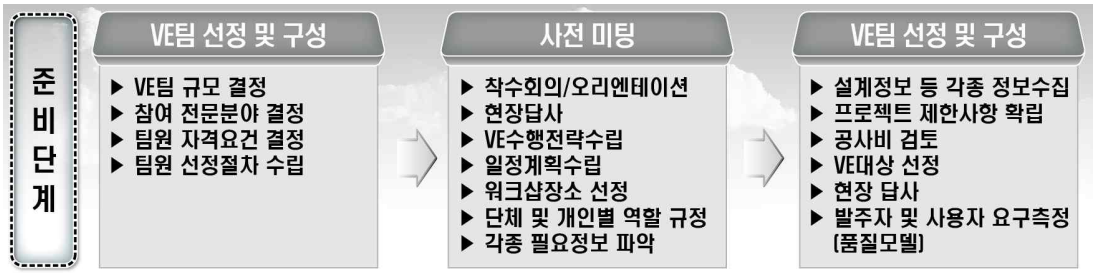


그림 2.16.13 준비단계 주요엄무

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 2.16.13은 분석단계의 항목별 체크리스트를 나타낸 것이다.



그림 2.16.14 분석단계 주요업무

표 2.16.13 분석단계 항목별 체크리스트 항목

구분	체크리스트 항목
정보수집 단계	- VE 대상 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 아이디어 발상 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 수정보완되었나? - 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?
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? - LCC 산정 근거는 객관적인가? - 성능평가시 성능평가속성별 척도에 따라 일관성 있게 평가되었나? - 성능평가 결과에 대하여 VE 팀원의 전체적인 합의가 이루어 졌는가?
제안단계	- VE 팀의 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, VE 팀, 연구팀 등의 주요 이해관계자가 함께 참여 하였나?

· 예상되는 결과가 검토되었나?

· 기술 적용성 검토는 수행되었나?

· 추후 모니터링 계획은 수립되었나?

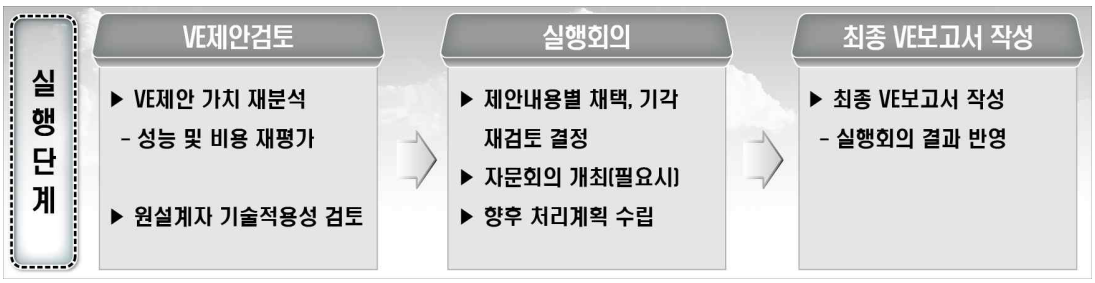


그림 2.16.15 실행단계 주요업무

다. VE 수행결과

(1) 품질모델 가중치 산정

본 연구에서는 기존 볼트 체결방식 쉴드터널과 강연선 쉴드터널에 대해 두 공법의 주요 특성들을 고려하여 품질모델을 제시하였으며, 제시된 각각의 품질모델의 가중치 산정을 위하여 전문가대상으로 쌍대비교를 수행하였다.

표 2.16.14와 표 2.16.15는 가중치에 대한 평가위원의 설문결과를 나타낸 것이다. 그리고 가중치 산정을 위하여 가중치 설문서 점수의 기하평균을 산출하여 쌍대비교 매트릭스로 분석하고 가중치 산정을 수행하였다.

표 2.16.14 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	2	-	2.00	2	-	2.00	-	2	0.50	-	2	0.50	2	-	2.00
	시공성	2	-	2.00	2	-	2.00	2	-	2.00	-	3	0.33	3	-	3.00
	민원성	3	-	3.00	4	-	4.00	2	-	2.00	-	2	0.50	4	-	4.00
	환경성	4	-	4.00	3	-	3.00	3	-	3.00	2	-	2.00	4	-	4.00
	제작성	4	-	4.00	4	-	4.00	-	2	0.50	2	-	2.00	2	-	2.00
안정성	시공성	2	-	2.00	-	2	0.50	2	-	2.00	-	2	0.50	1	-	1.00
	민원성	2	-	2.00	2	-	2.00	3	-	3.00	-	2	0.50	2	-	2.00
	환경성	3	-	3.00	2	-	2.00	4	-	4.00	2	-	2.00	3	-	3.00
	제작성	4	-	4.00	3	-	3.00	-	2	0.50	3	-	3.00	-	2	0.50
시공성	민원성	2	-	2.00	3	-	3.00	2	-	2.00	2	-	2.00	2	-	2.00
	환경성	2	-	2.00	2	-	2.00	2	-	2.00	4	-	4.00	2	-	2.00
	제작성	3	-	3.00	4	-	4.00	-	3	0.33	4	-	4.00	-	2	0.50
민원성	환경성	2	-	2.00	-	2	0.50	2	-	2.00	3	-	3.00	2	-	2.00
	제작성	2	-	2.00	2	-	2.00	-	4	0.25	4	-	4.00	-	3	0.33
환경성	제작성	2	-	2.00	2	-	2.00	-	4	0.25	2	-	2.00	-	4	0.25

표 2.16.15 가중치 설문결과(평가의원 6~10)

품질모델		평가자 6			평가자 7			평가자 8			평가자 9			평가자 10		
A	B	A	B	점수	A	B	점수	A	B	점수	A	B	점수	A	B	점수
경제성	안정성	2	-	2.00	2	-	2.00	-	2	0.50	-	2	0.50	2	-	2.00
	시공성	2	-	2.00	2	-	2.00	2	-	2.00	-	2	0.50	2	-	2.00
	민원성	-	2	0.50	4	-	4.00	2	-	2.00	-	3	0.33	-	2	0.50
	환경성	-	2	0.50	3	-	3.00	3	-	3.00	-	4	0.25	-	2	0.50
	제작성	3	-	3.00	4	-	4.00	-	2	0.50	2	-	2.00	3	-	3.00
안정성	시공성	-	2	0.50	-	2	0.50	3	-	3.00	2	-	2.00	2	-	2.00
	민원성	-	4	0.25	2	-	2.00	4	-	4.00	-	2	0.50	-	3	0.33
	환경성	-	3	0.33	2	-	2.00	4	-	4.00	-	2	0.50	-	2	0.50
	제작성	2	-	2.00	3	-	3.00	-	2	0.50	3	-	3.00	2	-	2.00
시공성	민원성	-	3	0.33	3	-	3.00	2	-	2.00	-	2	0.50	-	4	0.25
	환경성	-	2	0.50	2	-	2.00	2	-	2.00	-	3	0.33	-	3	0.33
	제작성	2	-	2.00	4	-	4.00	-	2	0.50	2		2.00	2	-	2.00
민원성	환경성	2	-	2.00	-	2	0.50	2	-	2.00	-	2	0.50	2	-	2.00
	제작성	4	-	4.00	1	-	1.00	-	3	0.33	4	-	4.00	4	-	4.00
환경성	제작성	4	-	4.00	2	-	2.00	4	-	4.00	-	4	0.25	4	-	4.00

표 2.16.16 쌍대비교 매트릭스

품질모델	경제성	안정성	시공성	민원성	환경성	제작성
경제성	1.00	1.15	1.52	1.41	1.66	2.02
안정성	0.87	1.00	1.12	1.15	1.58	1.66
시공성	0.66	0.90	1.00	1.28	1.30	1.62
민원성	0.71	0.87	0.78	1.00	1.37	1.40
환경성	0.60	0.63	0.77	0.73	1.00	1.32
제작성	0.49	0.60	0.62	0.72	0.76	1.00

표 2.16.17 가중치 산정결과

품질모델	가로 행렬곱	Eigen Vector	Priority Vector	계산(%)	적용(%)
경제성	8.29	1.423	0.230	23.0	23
안정성	2.93	1.196	0.194	19.4	19
시공성	1.61	1.082	0.175	17.5	18
민원성	0.92	0.987	0.160	16.0	16
환경성	0.28	0.809	0.131	13.1	13
제작성	0.10	0.680	0.110	11.0	11

주) 산출 예시 (경제성 기준)

가로 행렬곱 경제성=1.0 × 1.15 × 1.52 × 1.41 × 1.66 × 2.02 = 8.29

Eigen Vector = 8.29/N = 1.423 (N : 품질모델 개수)

Priority Vector = 1.423 / (Eigen Vector 합) = 0.230

(2) 성능평가

기본 볼트 체결방식과 강연선 체결 기술이 성능평가를 위하여 설문조사를 수행하였다. 평가점수는 각 평가항목별로 설문자 각각 전문지식을 근거로 채점한 점수이다. 가중치를 고려한 성능평가 결과 볼트 체결방식은 성능점수 72.2, 강연선 체결 기술은 77.7점으로 분석되었다.

표 2.16.18 성능평가 설문조사

평가항목		설문1	설문2	설문3	설문4	설문5	설문6	설문7	설문8	설문9	설문10
경제성	볼트	6	6	7	7	7	7	7	7	7	6
	강연선	9	9	9	7	9	8	9	8	6	8
안정성	볼트	7	7	8	8	7	8	8	8	7	8
	강연선	9	8	9	8	8	9	8	9	8	9
시공성	볼트	7	8	7	7	8	8	7	8	8	8
	강연선	9	9	8	9	7	7	8	8	7	8
민원성	볼트	7	7	7	8	7	7	8	7	7	7
	강연선	7	7	7	7	7	6	7	7	8	7
환경성	볼트	8	7	6	8	6	8	7	8	7	7
	강연선	6	7	5	6	5	8	7	5	9	9
제작성	볼트	8	7	8	9	8	9	8	9	8	8
	강연선	6	6	7	6	7	6	6	6	5	6

표 2.16.19 성능평가 결과

구분	가중치	대안			제시안		
		등급	점수	비율	등급	점수	비율
경제성	23%	6.4	14.7	20.4%	8.4	19.3	24.9%
안정성	19%	7.6	14.4	20.0%	8.6	16.3	21.0%
시공성	18%	7.4	13.3	18.5%	8.6	15.5	19.9%
민원성	16%	7.2	11.5	16.0%	7.0	11.2	14.4%
환경성	13%	7.2	9.4	13.0%	6.6	8.6	11.0%
제작성	11%	8.0	8.8	12.2%	6.2	6.8	8.8%
합계	100%	72.2			77.7		

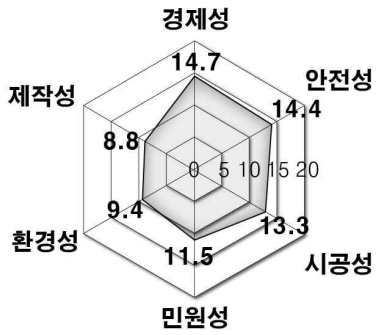
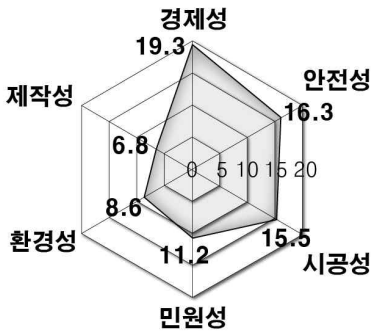
볼트체결			강연선체결		
					
F	C	V	F	C	V
72.2	1.02	70.7	77.7	1.00	77.7

그림 2.16.16 성능점수 그래프

볼트 체결과 강연선 체결의 생애주기 비용은 초기 공사비에서는 차이가 있으나, 모두 최종 구조물이 쉴드터널로 유지관리비 및 잔존가치, 해체비가 동일한 것으로 분석되어 생애주기 비용은 초기비용으로 비교하였다.

볼트 체결방식과 강연선 체결방식간의 초기 공사비는 2km 공사를 기준으로 산정하였으며, 각각의 공사비는 6,424백만원과 6,285백만원으로 산출되어 강연선 체결방식이 전체공사비에 약 2% 정도 절감되는 것으로 분석되었다.

라. VE 평가 결론

강연선 체결방식이 재료비 절감 및 공기 단축으로 터널 연장 2km 공사시 전체공사비의 2% 절감으로 경제성 향상이 가능한 것으로 검토되었다. 강연선 체결방식이 아일랜드 전단키 및 강연선 통과부로 인하여 세그먼트 제작에 어려움이 있으나, 전단키 적용으로 틸팅 시간 감소 및 안정성 확보가 가능한 것으로 분석되었다.

세그먼트 제작의 어려움, 강연선 절단부에 의한 폐기물 발생 등으로 제작성 및 환경성은 감소하나 공사비 절감 및 틸팅 시간 감소, 전단키로 인한 편하중에 대한 안정성 증대 등으로 인하여 성능 향상률 7.7%(▲), 비용 향상률 2.0%(▼), 가치 향상률 9.9%(▲)로 가치혁신형 공법으로 분석되었다.

4. 경제성 분석

가. 재료비 분석

본 연구에서는 강연선 쉴드터널의 객관적인 경제성 분석을 위하여 기초단가를 통일하여 분석하였다.

표 2.16.20 기초단가 적용기준

구분	적용기준
환률 및 유류대	조달청 『2014년 시설공사 환율 및 유류단가 공지』
노임	대한건설협회 『2014년 상반기 적용 건설업 임금실태 조사 보고서』
자재비	2014년 1월 물가정보 및 물가자료 최저가 적용
실적단가	국토교통부 『2014년 상반기 건설공사 실적공사비 적용 공종 및 단가』

쉴드터널의 체결은 일반적으로 소구경 쉴드터널은 고장력 볼트를 적용하며, 지하철 등의 대구경 쉴드터널 시공시 곡복트와 경사볼트를 적용하고 있는 것으로 확인되었다. 볼트 체결방식에 적용되는 볼트는 일반적으로 견적가를 적용하므로, 최근 준공된 쉴드터널 현장의 공사비 내역서[7]를 입수하여 분석하였다.

개당 곡볼트 비용은 재료비와 볼트 조이기 비용을 합하여 42,276원으로 분석되었으며, 쉴드터널 1링(6+1key)에 소요되는 곡볼트는 종방향 6×4+2×1=26ea, 횡방향 2×7=14ea로 총 40ea으로 1링에 소요되는 비용은 1,691,040원으로 분석되었다.

표 2.16.21 개당 곡볼트 공사비

산 출 근 거	합 계	재 료 비	노 무 비	경 비	비 고
산근 # 138 쉴드터널볼트조이기 /1개	42,276	40,425	1,851		K025060100
◈ 곡선볼트조이기 : 개당					
1. 곡선볼트 : 38,500 * 1.05 ea = 40,425.0	40,425.0	40,425.0			
소계	40,425.0	40,425.0			
2. 조이기 : 1,851 * 1 개 =1,851.0	1,851.0		1,851.0		# 155
소계	1,851.0		1,851.0		
계	42,276.0	40,425.0	1,851.0		
전체 합계	42,276	40,425	1,851		

표 2.16.22 볼트 체결 1링당 공사비

산 출 근 거	합 계	재 료 비	노 무 비	경 비	비 고
산근 # 49 세그먼트 제작공 : 견적서 표준형 S1 /1링	11,468,231	11,394,191	74,040		HA0J10100
※ 견적서 참조					
1. 재료비					
곡선볼트 : 40 ea * 42,276 = 1,691,040.0	1,691,040.0	1,617,000.0	74,040.0		# 138
세그먼트 : 1 링 * 9,777,191 = 9,777,191.0	9,777,191.0	9,777,191.0			
소 계 :	11,468,231.0	11,394,191.0	74,040.0		
전체 합계	11,468,231	11,394,191	74,040		

강연선 체결 쉴드터널의 일반 세그먼트에는 4개의 강연선이 소요되며 Key 세그먼트에는 2개의 강연선이 소요된다. 또한, 모든 세그먼트에는 PC콘이 2개씩 소요된다.

결론적으로 강연선 체결 쉴드터널의 1링당 소요되는 강연선은 [6(일반세그먼트) × 4(강연선) + 1(Key세그먼트) × 2(강연선)] × 1.5 = 39m 가 소요되어 강연선 쉴드터널에 1링당 소요되는 총재료는 강연선 42.94kg와 PC콘 14ea가 소요된다.

비용 산정은 법인 한국물가정보 2014년 1월을 가격을 기준으로 PC 강연선 단가를 산출하였으며, PC 강연선 조립 및 설치비는 쉴드터널 자동화설비에 포함되는 것으로 계상하였다.

표 2.16.23 m당 강연선 재료비

산 출 근 거	합 계	재 료 비	노 무 비	경 비	비 고
산근 # 138 PC강연선조립설치 D15.2mm×7mm /1Ton	1,935,500	1,935,500			K02502010E
◈ PC강연선조립설치(D15.2mm×7mm) : Ton당					
1. 재료비					
1) PC강연선(D12.7mm×7): 1,860*1.05 할증 *1000 kg =1,953,000.0	1,953,000.0	1,953,000.0			
2) 고재대: -350*0.05*1000 kg =-17,500.0	-17,500.0	-17,500.0			
계	1,935,500.0	1,935,500.0			
2. 조립설치 : 자동화시스템에 포함					
계					
전체 합계	1,935,500	1,935,500			

표 2.16.24 강연선 쉴드터널 1링당 공사비

산 출 근 거	합 계	재 료 비	노 무 비	경 비	비 고
산근 # 49 세그먼트 제작공 : 견적서 표준형 S1 /1링	10,741,959	10,741,959			HA0J10100
※ 견적서 참조					
1. 재료비					
PC강연선 : P = 1.5 m * 26 ea * 1.101 단위중량 =42.94 kg					
42.94 kg / 1000 * 1,935,500 = 83,110.3	83,110.3	83,110.3			# 139
PC콘 : 14 ea * 52,500 = 735,000.0	735,000.0	735,000.0			# 140
세그먼트 : 1 링 * 9,923,848.865 = 9,923,848.8	9,923,848.8	9,923,848.8			
소 계 :	10,741,959.1	10,741,959.1			
전체 합계	10,741,959	10,741,959			

표 2.16.25 재료비 분석 결과

구분	금액
볼트 체결(A)	1,691,040원
강연선 체결(B)	818,110원
차이(B-A)	-872,930원
비율(%)(B/A)	51.62%

볼트 체결방식과 강연선 체결방식에서 체결부의 재료비 비교 분석결과 강연선 체결 방식이 약 51.62% 정도 절감 효과가 있는 것으로 나타났다. 볼트 체결에는 볼트 재료비와 조이기품이 포함된 금액이며, 강연선 체결은 강연선 재료비와 PC콘 재료비가 포함된 금액으로 분석하였다.

나. 조건별 경제성 분석

고장력 볼트는 소구경 쉴드터널에서 볼트박스와 적용되고 있으나, 강연선 체결 쉴드터널의 경우 아일랜드 형태의 전단키로 인하여 최소 세그먼트 두께가 현재 적용되고 있는 소구경 쉴드터널보다 더 크기 때문에, 강연선 체결공법을 소구경에 적용시 세그먼트 재료비 증가로 경제성이 낮아지는 것으로 검토되어 별도의 경제성 분석은 수행하지 않았다.

볼트 체결과 강연선 체결 쉴드터널의 연장별 공사비를 산정하여 연장변화에 따른 주요 공사비 비율을 검토하였다

쉴드터널 공사는 쉴드TBM 제작비 및 기계 손료가 있는 쉴드기계 관리공과 세그먼트 제작공이 전체공사비에 가장 민감하게 작용하며, 공사연장이 짧으면 공사초기 쉴드TBM 장비 제작에 의하여 쉴드기계 관리공의 비중이 크나, 연장이 길어질수록 세그먼트 제작공에 비중이 커지는 것으로 확인되었다.

볼트 체결과 강연선 체결을 Pilot Project에 대입하여 분석한 결과 최소 공사연장이 2km 이상에서 2% 이상의 공사비 절감 효과와 약 3.5%의 공기단축 효과가 있는 것으로 분석되었다.

표 2.16.26 쉴드터널 연장별 공사비 비율

연장(m)		쉴드기계 관리공	세그먼트 제작공	쉴드설비공	부대공	기타
볼트 체결	500	61.91%	14.69%	9.74%	5.09%	8.58%
	1,000	49.87%	22.68%	7.81%	7.86%	11.78%
	1,500	42.76%	27.47%	6.55%	9.52%	13.71%
	2,000	**38.02%**	**30.68%**	**5.69%**	**10.63%**	**14.99%**
	2,500	34.53%	33.03%	5.07%	11.44%	15.93%
	3,000	31.55%	34.98%	4.63%	12.12%	16.73%
	3,500	29.51%	36.36%	4.26%	12.59%	17.28%
	4,000	27.93%	37.43%	3.96%	12.97%	17.71%
강선 체결	500	62.82%	13.86%	9.78%	5.12%	8.43%
	1,000	50.96%	21.56%	7.90%	7.96%	11.63%
	1,500	43.87%	26.23%	6.64%	9.69%	13.57%
	2,000	**39.10%**	**29.39%**	**5.78%**	**10.85%**	**14.88%**
	2,500	35.58%	31.70%	5.16%	11.71%	15.85%
	3,000	32.56%	33.64%	4.71%	12.42%	16.66%
	3,500	30.49%	35.01%	4.34%	12.93%	17.24%
	4,000	28.87%	36.09%	4.04%	13.33%	17.68%

표 2.16.27 전체공사비 및 공기분석결과

연장(m)	전체 공사비 분석(백만원)				공사기간 분석(개월)			
	볼트 체결 (A)	강연선 체결 (B)	차이 (B-A)	비율 (%)	볼트 체결 (C)	강연선 체결 (D)	차이 (D-C)	비율(%)
500	33,528	33,313	-216	-0.64%	13.1	12.8	-0.3	-2.29%
1,000	43,522	42,918	-604	-1.39%	18.1	17.6	-0.5	-2.76%
1,500	53,965	52,967	-998	-1.85%	23.4	22.6	-0.8	-3.42%
2,000	64,476	63,091	-1,385	-2.15%	28.7	27.7	-1.0	-3.48%
2,500	74,925	73,153	-1,773	-2.37%	34.0	32.8	-1.2	-3.53%
3,000	84,955	82,789	-2,167	-2.55%	39.2	37.7	-1.5	-3.83%
3,500	95,402	92,847	-2,554	-2.68%	44.5	42.8	-1.7	-3.82%
4,000	105,922	102,973	-2,949	-2.78%	49.8	47.8	-2.0	-4.02%

다. 경제성 분석 결론

쉴드터널 공사비의 가장 큰 비중을 차지하는 요소가 쉴드TBM 관리비와 세그먼트 제작비인 것으로 분석되었는데, 전력구 등의 소구경 쉴드터널에서는 강연선 체결방식을 적용시 아일랜드형 전단키로 인한 세그먼트 단면증가 때문에 기존 볼트 체결방식보다 세그먼트 제작비 측면에서 불리하다.

따라서, 지하철 등의 대구경 쉴드터널에 적용하는 것을 전제로 재료비 분석결과 1링당 강연선은 818,110원 볼트는 1,691,040원으로 약 51.62% 절감효과가 있는 것으로 분석되었다. 강연선 체결 쉴드터널은 강연선 자동공급장치가 초기 공사비에 투입되어야 하는 부담을 가지고 있으나, 강연선 자동공급장치 적용시 공기단축으로 인한 공사비 절감효과를 얻을 수 있는 것으로 분석되었다.

또한, 기존 쉴드터널과 비교하여 2.0% 이상의 공사비 절감효과를 확보하기 위해서는 터널 연장 2.0km 이상의 공사 진행시에 강연선 체결방식을 적용하는 것이 적정한 것으로 분석되었다.

소결론

(1) 기존 볼트 체결방식 쉴드터널에서 세그먼트 조립 단위공정에 대한 소요공기(cycle time)를 분석한 결과 세그먼트 공급에서 체결까지 1개의 세그먼트 설치시 420초의 소요공기가 필요한 것으로 분석되었으며, 이중 세그먼트 틸팅 공정에서 가장 많은 시간이 소요되는 것으로 분석 되었다.

(2) 강연선 쉴드터널에서 인력에 의한 세그먼트 조립공정에 대해 소요공기를 분석한 결과 1개의 세그먼트 공급에서 체결까지 400초의 소요공기가 필요한 것으로 분석되었으며, 강연선 설치 과정(segment assembling)은 인력 작업으로 분석했기 때문에 100초로 나타나 볼트 체결 방식의 60초보다 40초가 더 소모되는 것으로 나타났다.

(3) 강연선 체결 공정을 인력이 아닌 자동화 시스템을 적용하였을 경우 1개 세그먼트 설치에 360초가 필요한 것으로 분석되어 기존 볼트 체결 방식과 비교해서는 60초의 소요공기 감소효과가 있는 것으로 나타났다. 쉴드터널 공사기간 전체를 대상으로 확대했을 경우 세그먼트 조립 공정에서 상당한 소요공기 감소효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 강연선 쉴드터널의 위험도 평가 분석결과 집중관리 대상은 없으나 주의관리 대상은 경로 3(시공관리 불량-체결방식 구조적 결함)과 경로 4(세그먼트 구조적 결함-세그먼트 단차)로 나타났는데, 기존 세그먼트를 전단키가 설치된 세그먼트로 개선시 품질불량에 의한 보수·보강 비용을 감소 할 수 있을 것으로 분석되었다.

(5) 강연선 체결방식에 대한 VE 평가결과 세그먼트 제작의 어려움, 강연선 절단부에 의한 폐기물 발생으로 제작성 및 환경성은 감소하나, 공사비 절감 및 틸팅 시간 감소, 전단키로 인한 편하중에 대한 안정성 증대 등으로 인하여 성능 향상률 7.7%(▲), 비용 향상률 2.0%(▼), 가치 향상률 9.9%(▲)로 가치혁신형 공법으로 분석되었다.

(6) 강연선 쉴드터널에 대한 경제성 분석 결과 체결부 재료비는 약 51.62% 정도 절감 효과가 있는 것으로 나타났고, 기존 쉴드터널과 비교하여 최소 공사연장이 2km 이상에서 2% 이상의 공사비 절감 효과와 약 3.5%의 공기단축 효과가 있는 것으로 분석되었다.

제 17 절 개발 기술의 수요예측 및 시장성 평가

1. 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.[1)]

표 2.17.1 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.

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

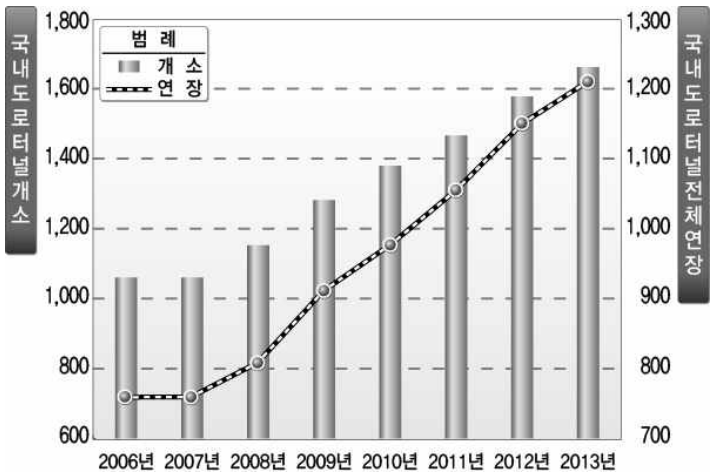


그림 2.17.1 8년간(2006년~2013년) 국내 도로터널의 발주개소 및 전체 연장

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 2.17.2와 같다. 이외에도 제2강변북로, 서부간선도로 지하화, 동부간선도로 지하화, GTX와 같은 대규격 쉴드사업도 진행될 예정이다.

표 2.17.2 서울 및 수도권의 2000년 이후 쉴드터널 시공현황

공사명	연장(Km)	공사명	연장(Km)
지하철 909 공구	1.8	인천국제공항철도	1.9
분당성 왕십리-청담간 복선전철	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-대치구간	17.2
고속도시철도(GTX), 고속전철, 도심지 고속화도로	70.0	한중 해저터널	220.3
한일 해저터널	145.0	목포-제주 해저터널	167.0

2. 국외 터널시장 수요예측

가. 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.

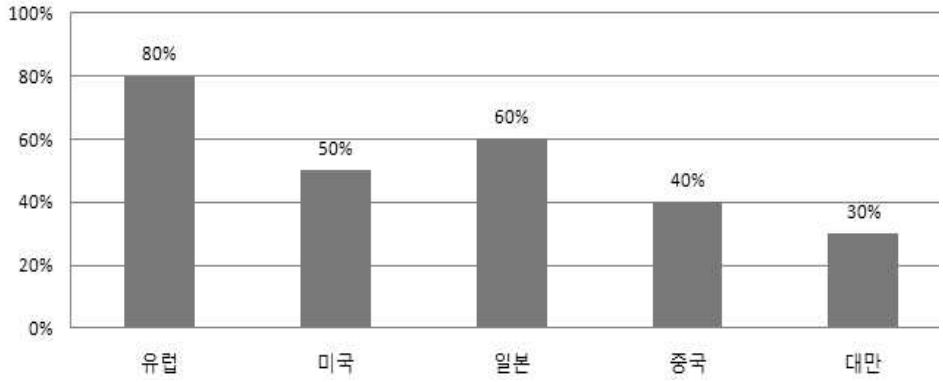


그림 2.17.2 2009년 기준 나라별 전체 터널 대비 쉴드터널 시공현황

표 2.17.3 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

국외 시장의 경우 유럽 선진국 지역에서는 쉴드터널 시장이 마무리 되어 가고 있는 반면, 싱가포르 등 아시아 개발도상국에서는 쉴드터널 사업이 약 70여개 공구로 진

행되거나 향후 발주될 계획이며 특히, 중국의 쉴드터널 사업은 2500여개 공구의 발주가 시작되어 향후 30년간 진행될 예정이며, 인도시장은 약 1000여개 쉴드터널 공구의 발주가 예상된다.

전 세계의 교통터널의 시장은 표 2.17.3과 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.

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.

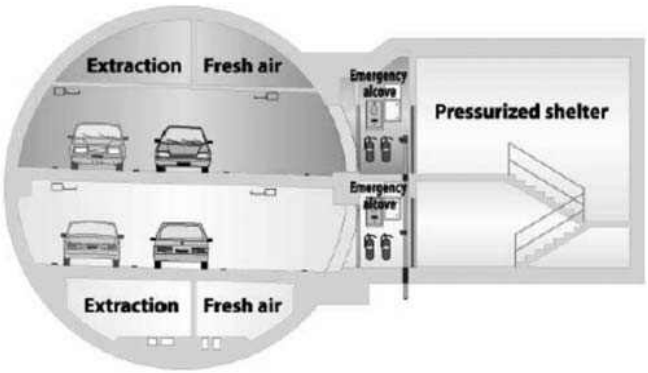


그림 2.17.3 프랑스 파리의 도시고속도로 구조

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.

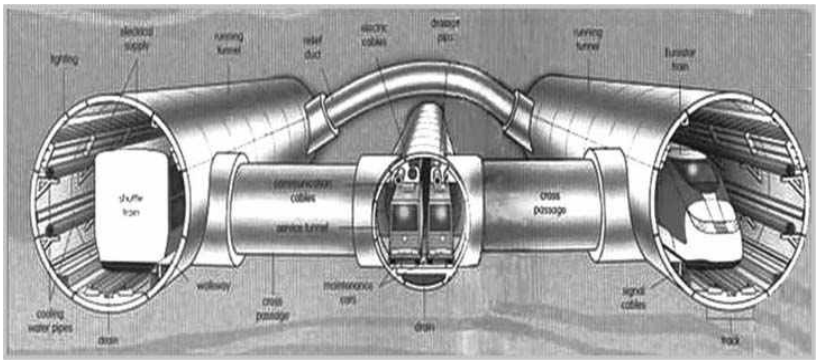


그림 2.17.4 유로터널의 구조

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

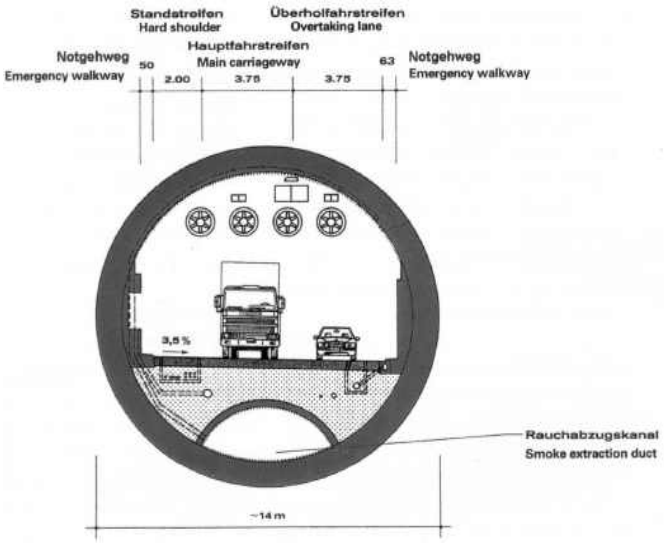


그림 2.17.5 엘베터널 4th Tube 단면도

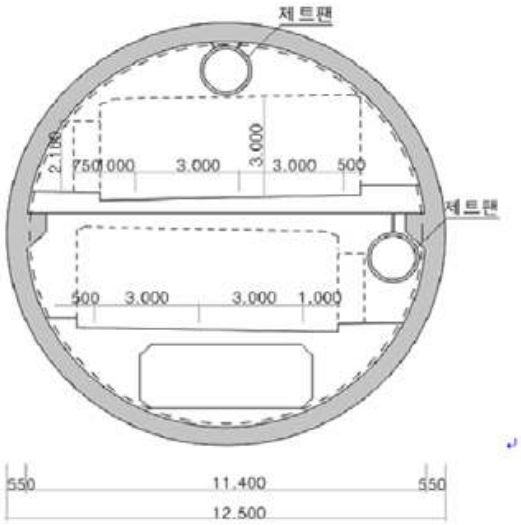


그림 2.17.6 이스탄블 해협 단선복층터널 단면

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 관통하여 지바현의 기사라즈까지 연결되는 4차선 도로로 총연장은 15.1km이며, 가와사키 쪽의 9.5km는 해저터널(폭 13.9m)로 건설하였다.

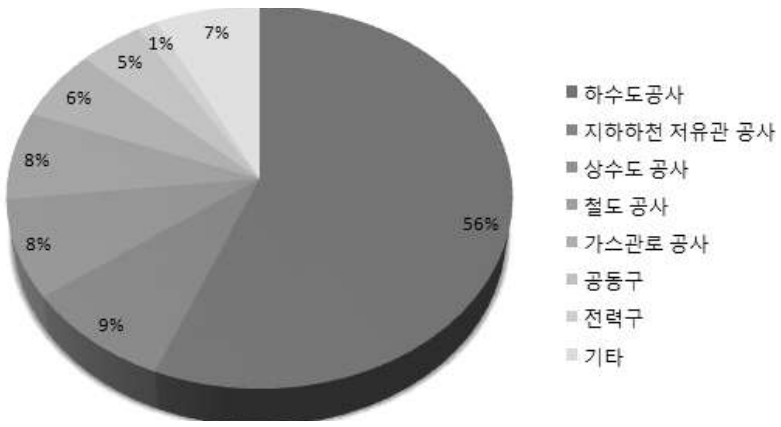


그림 2.17.7 일본의 쉴드터널 현황

나. 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.[2)]

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 2.17.4 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	

다. 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.

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 2.17.5 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 2.17.6 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 2.17.7 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.

3. 개발기술의 성과 확보 및 가치 평가

가. 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 2.17.8 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 2.17.9 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	주식회사동일기술공사	한국	김선권	국내특허등록 (제10-1013627호)
배수 구조를 갖는 세그먼트에 의한 원형 지보공 구조체 및 이를 이용한 실드터널을 시공하는 방법	한국건설기술연구원	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)
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)

나. 향후 사업추진 계획

(1) 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.

(2) 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, 정부 지원 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.

다. 상용적 비즈니스모델

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 강연선 체결공법 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 1월 연구책임자등이 방문하여 사업 설명회를 계획 중이다. 사업 설명회를 통해서 시험적용 환경이 좋은 중국에서 1차 시험적용을 추진하고 그 결과물을 중국시장과 국내 시장 적용을 추진할 계획이다.

중국 사업 추진과는 별도로 국내에서는 쉴드터널 세그먼트 몰드 제작업체인 ㈜유니슨 이테크 및 세그먼트 제작사인 ㈜KC산업과 본 기술개발 성과물을 가지고 국외 진출을 위한 기술협약에 대해서 협의를 진행하고 있다.

소결론

(1) 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) 강연선 자동화 시스템 도출

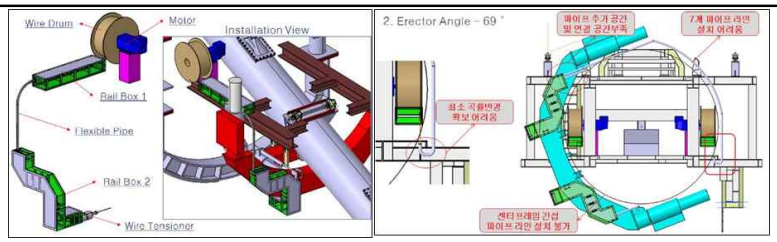
<table>
<tr><td>관련 그림
/ 사진</td><td>


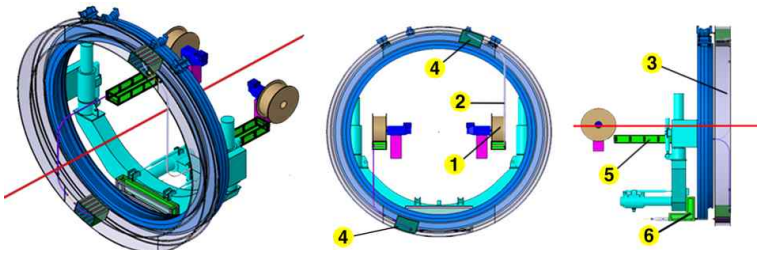
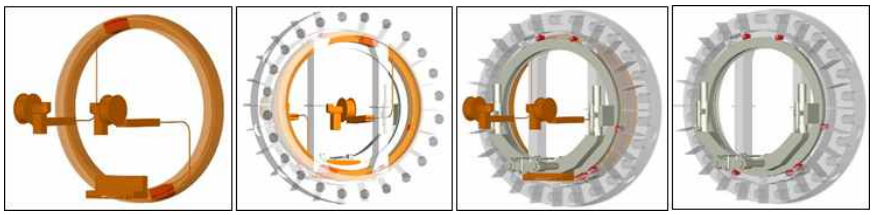
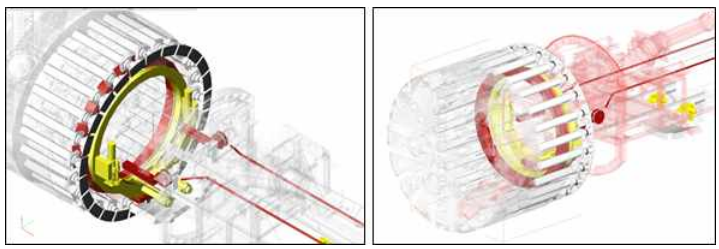
그림 1-1. 강연선 자동공급장치 개념 설계


그림 1-2. 강연선 자동화 시스템 3D 모델링

그림 1-3. 강연선 쉴드터널 시공 시스템(단독 활용)

그림 1-4. 강연선 쉴드터널 시공 시스템(쉴드TBM 연동)</td></tr>
<tr><td>정의</td><td>• 강연선의 자동 공급 및 긴장을 통해 강연선 쉴드터널 시공을 가능케 하는 기본 시스템</td></tr>
<tr><td>목적</td><td>• 강연선 체결을 위해서는 세그먼트조립 시 유압펌프와 유압잭을 이용한 긴장력 재하가 필요하며, 쉴드공법 특성상 굴착면과 쉴드머신 사이의 제한된 공간에서의 체결이 이루어져야함. 개발된 장치를 쉴드머신에 장착하여 강연선 공급 및 긴장력 재하 작업을 자동화 하는 시스템을 개발하는 것을 목적으로 함.</td></tr>
</table>

(2) 아일랜드형 전단키 세그먼트

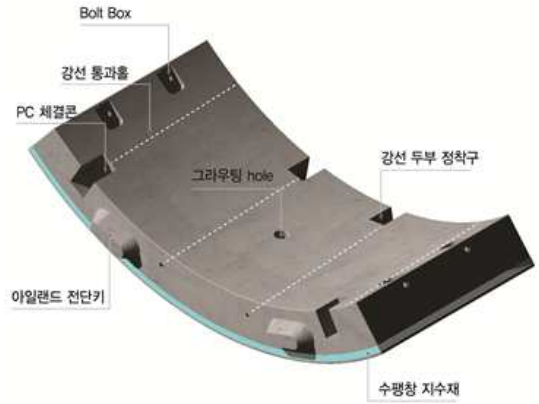
<table>
<tr><td>관련 그림
/ 사진</td><td>


그림 2-1. 아일랜드형 전단키 세그먼트 개요

그림 2-2. 전단키에 의한 쉴드터널 상재하중 저항 개요

그림 2-3. 아일랜드형 전단키 세그먼트 제작몰드 및 시제품
</td></tr>
<tr><td>정의</td><td>• 기존 체결방식과 차별화되는 강선 체결방식 및 아일랜드형 전단키 세그먼트을 적용한 쉴드터널의 종합적인 시공 기술</td></tr>
<tr><td>목적</td><td>• 강연선을 활용한 새로운 세그먼트 체결기술과 전단키를 적용한 세그먼트의 개발을 통해 세그먼트 체결부 재료비의 50% 이상을 절감시키고, 세그먼트 체결력을 10% 이상 증가시킬 수 있는 쉴드터널 체결기술을 개발하고자 함</td></tr>
</table>

(3) 강연선 체결방식의 체결력 증대효과

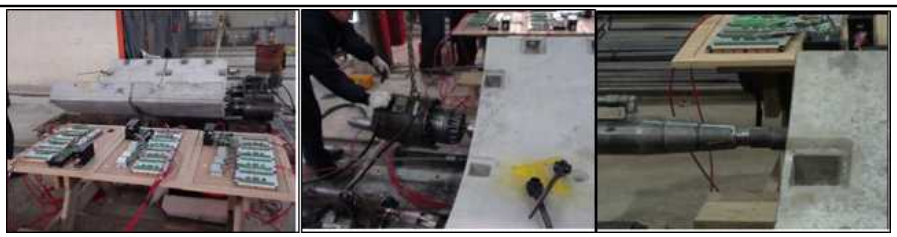
<table>
<tr><td>관련 그림
/ 사진</td><td>

그림 3-1. 실대형 세그먼트 체결 성능평가 실험

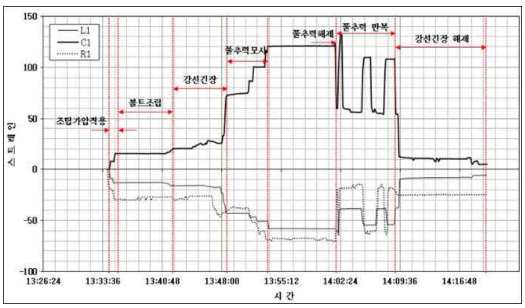
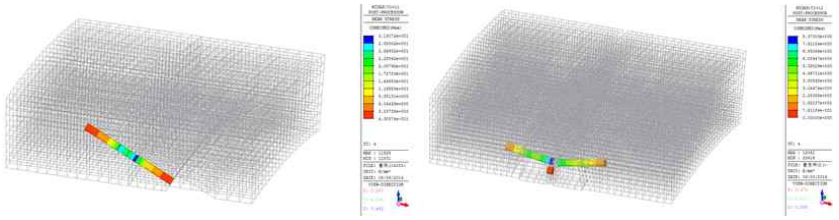
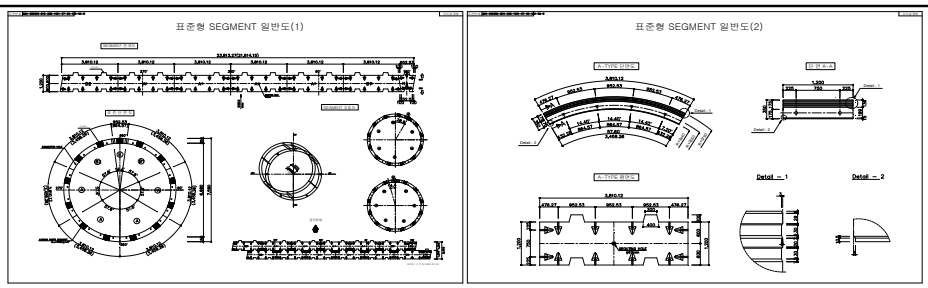
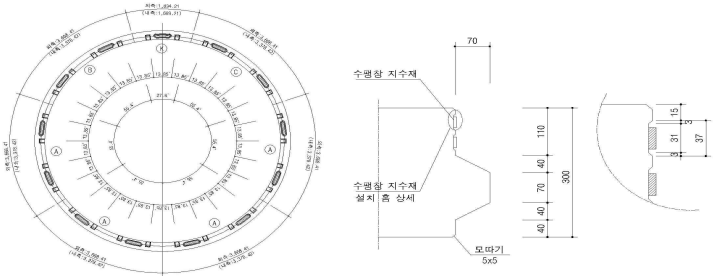

그림 3-2 체결력에 의한 볼트 풀림 현장


그림 3-3. 데이터 분석을 통한 강연선 긴장력 우수성 평가

그림 3-4. 경사볼트 및 볼트박스 인장성능 비교 평가</td></tr>
<tr><td>정의</td><td>• 강연선 체결방식의 체결력 10% 이상 증대효과</td></tr>
<tr><td>목적</td><td>• 기존 볼트 체결방식과 비교하여 강연선 체결방식의 압축, 전단, 인장성능 면에서의 우수성 검증
• 연구개발의 최종 목표 달성(기존 볼트 체결방식 대비 체결력 10% 증대)</td></tr>
</table>

(4) 강연선 쉴드터널 표준단면 설계

관련 그림 / 사진	 그림 4-1. 강연선 쉴드터널 표준단면(전력구)  그림 4-2. 강연선 쉴드터널 표준단면(지하철)
정의	• 설계 반영이 가능한 강연선 쉴드터널 표준단면
목적	• 세그먼트 배열, 세그먼트 형상(전단키 각도, 간격, 비율 등), 강연선 체결관련(강연선 통과홀, 정착단)부 등 개발 기술의 쉴드터널 표준단면 제시

(5) 강연선 쉴드터널 현장 조립 시험시공

관련 그림 / 사진	 그림 5-1. 강연선 쉴드터널 현장 조립 시험시공  그림 5-2. 강연선 쉴드터널 공개시연회
정의	• 강연선 체결방식 및 전단키 세그먼트를 이용한 쉴드터널의 단계별 조립 시험시공
목적	• 개발된 강연선 체결 방식을 이용하여 세그먼트 몰드 제작, 세그먼트 제작, 쉴드장비 개조, 세그먼트 조립의 일련의 단계별 시공을 통해 개발 기술의 성능 규명 및 시공성 확인

(6) 강연선 쉴드터널 설계·시공·유지관리 매뉴얼(안)

관련 그림 / 사진	 그림 6-1. 강연선 쉴드터널 설계·시공·유지관리 매뉴얼(안)
정의	• 기존 볼트체결 방식과 달리 강연선 긴장력을 이용한 체결방식을 적용한 쉴드터널에서 세그먼트 제작, 세그먼트 조립, 시공관리 등에 대한 종합적인 시공지침서(안)
목적	• 개발된 강선체결 쉴드터널의 시공 시 고려해야하는 제반사항(세그먼트 몰드 제작, 운반비, 시공시나리오 등)을 제시하고, 개발공법의 시공에 있어 현장 적용기준이 될수 있는 지침(안) 제안을 목적으로 함.

제 2 절 주요 연구성과

1. 학술적 성과

가. 학술지 논문

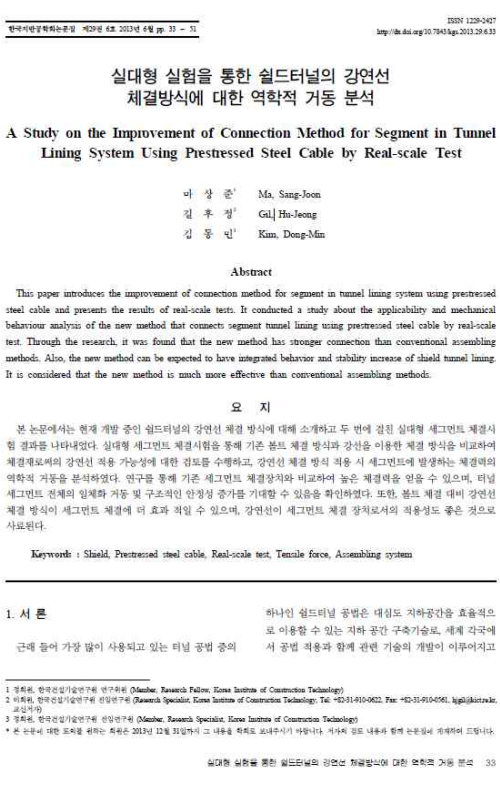
○ 한국지반공학회

· 실대형 실험을 통한 쉴드터널의 강연선 체결방식에 대한 역학적 거동 분석

· 강연선과 아일랜드타입 전단키를 이용한 쉴드터널 체결기술 연구

○ 한국터널지하공간학회

· 현장 조립 시험시공을 통한 쉴드터널 강연선 체결 기술의 적용성 평가



한국지반공학회논문집 제29권 6호 2013년 6월 pp. 33 ~ 51

ISSN 1229-2427
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2013.29.6.33

실대형 실험을 통한 쉴드터널의 강연선 체결방식에 대한 역학적 거동 분석

A Study on the Improvement of Connection Method for Segment in Tunnel Lining System Using Prestressed Steel Cable by Real-scale Test

마 상 준[1] Ma, Sang-Joon
길 후 정[2] Gil, Hu-Jeong
김 동 민[3] Kim, Dong-Min

Abstract

This paper introduces the improvement of connection method for segment in tunnel lining system using prestressed steel cable and presents the results of real-scale tests. It conducted a study about the applicability and mechanical behaviour analysis of the new method that connects segment tunnel lining using prestressed steel cable by real-scale test. Through the research, it was found that the new method has stronger connection than conventional assembling methods. Also, the new method can be expected to have integrated behavior and stability increase of shield tunnel lining. It is considered that the new method is much more effective than conventional assembling methods.

요 지

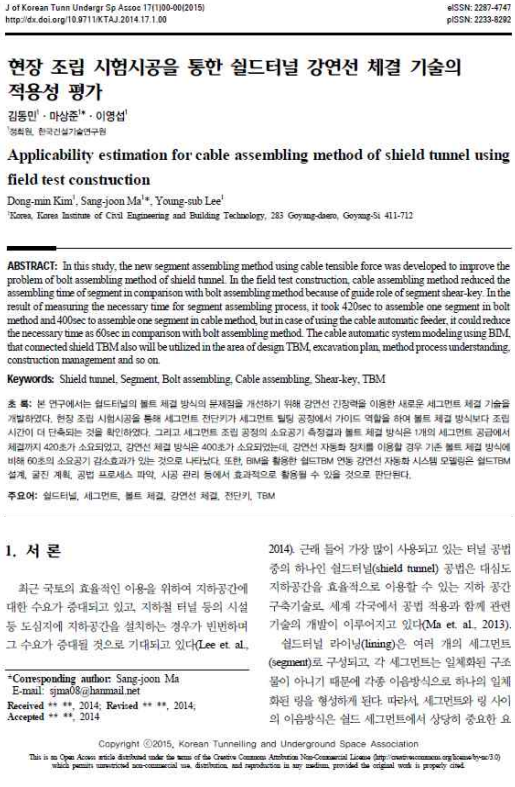
본 논문에서는 현재 개발 중인 쉴드터널의 강연선 체결 방식에 대해 소개하고 두 번에 걸친 실대형 세그먼트 체결시험 결과를 나타내었다. 실대형 세그먼트 체결시험을 통해 기존 볼트 체결 방식과 강선을 이용한 체결 방식을 비교하여 체결계로써의 강연선 적용 가능성에 대한 검토를 수행하고, 강연선 체결 방식 적용 시 세그먼트에 발생하는 체결력의 역학적 거동을 분석하였다. 연구를 통해 기존 세그먼트 체결장치와 비교하여 높은 체결력을 얻을 수 있으며, 터널 세그먼트 전체의 일체화 거동 및 구조적인 안정성 증가를 기대할 수 있음을 확인하였다. 또한, 볼트 체결 대비 강연선 체결 방식이 세그먼트 체결에 더 효과 적일 수 있으며, 강연선이 세그먼트 체결 장치로서의 적용성도 좋은 것으로 사료된다.

Keywords : Shield, Prestressed steel cable, Real-scale test, Tensile force, Assembling system

1. 서 론

근래 들어 가장 많이 사용되고 있는 터널 공법 중의 하나인 쉴드터널 공법은 대심도 지하공간을 효율적으로 이용할 수 있는 지하 공간 구축기술로, 세계 각국에서 공법 적용과 함께 관련 기술의 개발이 이루어지고

1 정회원, 한국건설기술연구원 연구위원 (Member, Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology)
2 비회원, 한국건설기술연구원 선임연구원 (Research Specialist, Korea Institute of Construction Technology, Tel: +82-31-910-0622, Fax: +82-31-910-0561, hjgil@kict.re.kr, 교신저자)
3 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원 (Member, Research Specialist, Korea Institute of Construction Technology)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.



J of Korean Tunn Undergr Sp Assoc 17(1)00-00(2015)
http://dx.doi.org/10.9711/KTAJ.2014.17.1.00

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

현장 조립 시험시공을 통한 쉴드터널 강연선 체결 기술의 적용성 평가

김동민[1] · 마상준[1]* · 이영섭[1]
[1]정회원, 한국건설기술연구원

Applicability estimation for cable assembling method of shield tunnel using field test construction

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, the new segment assembling method using cable tensible force was developed to improve the problem of bolt assembling method of shield tunnel. In the field test construction, cable assembling method reduced the assembling time of segment in comparison with bolt assembling method because of guide role of segment shear-key. In the result of measuring the necessary time for segment assembling process, it took 420sec to assemble one segment in bolt method and 400sec to assemble one segment in cable method, but in case of using the cable automatic feeder, it could reduce the necessary time as 60sec in comparison with bolt assembling method. The cable automatic system modeling using BIM, that connected shield TBM also will be utilized in the area of design TBM, excavation plan, method process understanding, construction management and so on.

Keywords: Shield tunnel, Segment, Bolt assembling, Cable assembling, Shear-key, TBM

초 록: 본 연구에서는 쉴드터널의 볼트 체결 방식의 문제점을 개선하기 위해 강연선 긴장력을 이용한 새로운 세그먼트 체결 기술을 개발하였다. 현장 조립 시험시공을 통해 세그먼트 전단키가 세그먼트 웰링 공정에서 가이드 역할을 하여 볼트 체결 방식보다 조립 시간이 더 단축되는 것을 확인하였다. 그리고 세그먼트 조립 공정의 소요공기 측정결과 볼트 체결 방식은 1개의 세그먼트 공급에서 체결까지 420초가 소요되었고, 강연선 체결 방식은 400초가 소요되었는데, 강연선 자동화 장치를 이용할 경우 기존 볼트 체결 방식에 비해 60초의 소요공기 감소효과가 있는 것으로 나타났다. 또한, BIM을 활용한 쉴드TBM 연동 강연선 자동화 시스템 모델링은 쉴드TBM 설계, 굴진 계획, 공법 프로세스 파악, 시공 관리 등에서 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 쉴드터널, 세그먼트, 볼트 체결, 강연선 체결, 전단키, TBM

1. 서 론

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(Lee et. al., 2014). 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(Ma et. al., 2013).

쉴드터널 라이닝(lining)은 여러 개의 세그먼트(segment)로 구성되고, 각 세그먼트는 일체화된 구조물이 아니기 때문에 각종 이음방식으로 하나의 일체화된 링을 형성하게 된다. 따라서, 세그먼트와 링 사이의 이음방식은 쉴드 세그먼트에서 상당히 중요한 요

*Corresponding author: Sang-joon Ma
E-mail: sjma08@hanmail.net
Received ** **, 2014; Revised ** **, 2014;
Accepted ** **, 2014

Copyright ©2015, 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

○ 3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geothechnical Engineering

· A Study on the improvement of connection for segment tunnel lining using prestressd steel cable

○ 대한토목학회

· 강연선의 긴장력을 이용한 쉴드터널의 세그먼트 체결방식에 관한 연구

· 강연선 쉴드터널 시공성 향상을 위한 강연선 자동화 시스템 개발

· 강연선 쉴드터널에서 강연선과 세그먼트의 일체화 거동 방안 연구

· 조립 시험시공을 통한 강연선 쉴드터널의 현장 적용성 평가

○ 한국지반공학회

· 실대형 시험을 통한 쉴드터널의 강선 체결 성능 평가

· 강연선의 긴장력과 아일랜드 전단키를 이용한 쉴드터널에 관한 연구

2. 기술적 성과

가. 국내특허등록



특 허 증

CERTIFICATE OF PATENT

특 허 제 10-1333096 호
(PATENT NUMBER)

출원번호 (APPLICATION NUMBER) 제 2013-0061040 호
출 원 일 (FILING DATE:YY/MM/DD) 2013년 05월 29일
등 록 일 (REGISTRATION DATE:YY/MM/DD) 2013년 11월 20일

발명의명칭 (TITLE OF THE INVENTION)
실드터널의 세그먼트 조립을 위한 강선체결 장치 및 그 방법

특허권자 (PATENTEE)
한국건설기술연구원(111241-0******)
경기도 고양시 일산서구 고양대로 283(대화동)

발명자 (INVENTOR)
마상준(640813-1******)
경기도 고양시 일산서구 강선로 96 강선마을 504-1204

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE.)

2013년 11월 20일

특허청장 김 영 민
COMMISSIONER, THE KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE



년차등록료 납부일은 설정등록일 이후 4년차부터 매년 11월 20일까지이며 등록원부로 권리관계를 확인바랍니다.

나. 국내특허출원

관 인 생 략

출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자	2014.12.19
특 기 사 항	심사청구(유) 공개신청(무)
출 원 번 호	10-2014-0184314 (접수번호 1-1-2014-1235824-59)
출원인 명칭	한국건설기술연구원(3-1998-007750-1)
대 리 인 성 명	송세근(9-2002-000122-3)
발 명 자 성 명	김동민 마상준 이영섭
발 명 의 명 칭	아일랜드형 전단키 및 종방향 강연선을 구비한 실드터널용 세그먼트 구조체

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·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000

7. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

제 3 절 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

1. 국내 시장 전망

국내 터널 수주액의 지난 8년 간의 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 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 1000여개 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.[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.

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

쉴드터널 공법은 NATM 공법 보다 고가의 시공비로 인해 지금까지 국내에서는 하저터널, 연약지반의 전력구 및 통신구 등에 한정되어 적용되어왔으나, 최근 다양한 시공 장비 및 새로운 기술의 개발로 앞으로 그 적용성이 점차 확대되고 있다. 쉴드터널 세그먼트를 연결하는 방법으로는 국내에서는 볼트 체결방식이 가장 일반적으로 적용되고 있지만, 볼트 직경과 통과공간 직경의 차이로 인한 시공오차 발생 가능성이 있고, 쉴드머신의 추력과 굴착 진동으로 인한 볼트 풀림현상이 발생되고 있다. 또한, 볼트 체결 위치가 터널 내측에 치우쳐 있어 세그먼트 외측에서의 이격을 유발할 수 있다.

본 연구에서는 강연선의 긴장력을 적용하여 쉴드 세그먼트를 체결할 수 있는 기술을 개발하였다. 본 기술은 기존 볼트 체결방식보다 더 높은 체결력 확보가 가능하여 세그먼트간 연결 안정성을 증대할 수 있고, 개발된 아일랜드형 전단키 세그먼트는 조립 가이드 기능으로 시공성 향상과 쉴드터널 전단 안정성을 높일 수 있다. 또한, 실제 전력구 규모의 시험시공과 쉴드TMB과 연동된 강연선 자동공급 시스템 개발을 통해 개발 기술의 현장 적용성을 확보하였다. 본 연구개발을 통해 최종적으로는 쉴드터널 체결부 재료비 50% 절감, 세그먼트 체결력 10% 증대, 쉴드터널 전체공사비 2% 절감을 달성할 수 있었다.

표 4.1.1 연구개발 최종목표 달성도

연구개발 최종	계획대비 달성도(%)
·기존 볼트체결 방식 대비 체결부 누수량 발생 50% 저감 ·기존 볼트체결 방식 대비 세그먼트 체결부 재료비 50% 절감 ·기존 볼트체결 방식 대비 세그먼트 체결력 10% 증대 ·기존 볼트체결 방식 대비 쉴드터널 전체공사비 2% 절감	100

2. 연구개발 성과의 기술적 및 경제적 효과

■ 선진 터널공법으로서 쉴드터널 공법의 경쟁력 향상

- 본 연구를 통해 개발된 강연선 체결 쉴드터널은 기존 쉴드터널 체결부에서 발생되는 누수를 절감 가능할 것으로 판단된다.
- 기존 NATM 터널 대비 향상된 품질 및 경제성에서 우위를 가지고, 높은 체결력을 통해 터널 안정성의 증대를 기대할 수 있으며, 앞으로 예상되는 쉴드터널 수요에 맞추어 국내 시공능력 향상에 크게 기여하게 될 것으로 판단된다.
- 본 연구를 통하여 축적된 강연선 체결 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 강연선 체결 쉴드터널 기술은 터널 시공 분야의 국내 기술 축적과 설계 자립화를 통해 건설기술력 향상을 가져올 것으로 판단된다.
- 강연선 체결 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 향상된 세그먼트 체결방식으로 널리 적용 될 것으로 예상된다.
- 본 개발 기술은 기존 볼트 체결방식에 비해 터널 내부 누수량을 50% 이상 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 강연선 체결 기술은 체결재의 재료비를 약 50% 절감할 수 있으며, 세그먼트 조립 공정에서의 공기 단축으로 인해 터널 연장 2km 이상부터 전체 공사비를 2% 이상 절감 가능하다. 또한, 3.5%의 공기단축 효과를 얻을 수 있다.
- 기존 볼트 체결방식의 경우 체결부 설치를 위해 세그먼트 단면 크기의 제한을 받게 되지만, 강연선 체결 기술은 체결부 설치가 필요하지 않기 때문에 세그먼트 단면 크기의 제한을 받지 않기 때문에, 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) 정경환, 유창도, 조성호, 황부성, 한경태, 김태효, 정두희 (2004), 일본과 국내의 쉴드세그먼트 경향 비교, 한국터널공학회 제5차 터널 기계화 시공기술 심포지엄 논문집, pp. 175-196.

5) Masanori K., Ikuo OE, Noriyuki A., Masaaki N. (2002), Development of New Type Segment Joint., Proc. of the Symposium on Underground Space, Vol 7, JSCE.

6) 조재병, 성택룡 (2009), “시간에 따른 F13T 고장력 볼트의 체결력 감소”, 대한토목공학회 논문집 Vol. 29, No. 4, pp.291-297.

7) 한국건설신문 ‘14.09.29

8) 건설경제신문 ‘12.10.05

9) 최우용,이현필,전기찬,이석원 (2014), “수팽창 지수재의 방수 성능 및 내구성 평가” 한국터널지하공간학회 논문집 Vol. 16, No 2, pp.117-124.

제 3 절 국내외 기술개발 현황

1) 한국건설신문 2014.09.22

2) 엔지니어데일리 2013.11.22.

3) 엔지니어링데일리 2012.09.19

4) 도시미래신문 2014.02.10

제 2 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 쉴드터널 체결방식 분석

1) 김정현, 강경진 (2007), “세그먼트 터널의 사다리꼴 세그먼트라이닝 배열방법 개선에 대한 연구”, 한국터널공학회논문집 Vol. 9, No. 1, pp.1～18.

2) 동부건설 기술연구소 (1994), 고장력 볼트 및 T/S 볼트 시공지침

3) Masanori KOBAYASHI, Ikuo OE, Noriyuki ARAI, Masaaki NOMOTO, “Developement of New Type Segment Joint“, Prc of the Symposium on Underground Space Vol.7, JSCE

4) シールド工法技術協會, P&PCセグメント工法

5) http://www.okumuragumi.co.jp (오쿠무라쿠미사 홈페이지)

6) http://www.nilim.go.jp/ (일본국토기술정책종합연구소 홈페이지)

7) 김용일, 추석연, 김동현, 박영진, 홍석균, 이두화 (2003), “세그먼트 방수재의 방수성능 평가”, 한국터널공학회 학술발표회 논문집

8) 최우용,이현필,전기찬,이석원 (2014), “수팽창 지수재의 방수 성능 및 내구성 평가” 한국터널지하공간학회 논문집 Vol. 16, No 2, pp.117-124.

9) 오진우, 강형우, 노우성, 박상태 (2000), 토목구조물 설계 표준 동해설 실드터널편, 과학기술

10) http://www.standard.go.kr (국가표준인증종합저정보센터)

11) 藤木 育雄, 大石 敬司, 齊藤 正幸, 高木 勝央 (2011) “自分の締結式セグメントの開發と施工” 土木學會論文集F1 (トンネル工學) , Vol. 67, No. 1 pp.16-34.

12) www.nishimatsu.co.jp (Nishimatsu Constructio 홈페이지)

13) 加賀 宗彦 (2011), “押出し抵抗による硬質ゴムシール材の限界止水壓”, 土木學會論文集F1 (トンネル工學) , Vol. 67, No. 1, pp.35-45.

14) 이병철 (1995), 프리스트레스 콘크리트 교

15) 한국콘크리트학회 (2009). 콘크리트 표준시방서 해설

16) 오병환, 양인환 (1998), “재료특성치의 변화에 따른 캔틸레버 공법 프리스트레스 콘크리트 박스거더 교량의 장기거동 분석” 콘크리트학회 논문집 Vol.10, No. 1, pp.179-188.

17) AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (2010). AASHTO LRFD bridge design specifications. AASHTO, Washington, USA.

18) Dong-Ho Choi, Yong-Sik Kim and Hoon Yoo (2008), “External Post-tensioning of Composite Bridges by a Rating Equation Considering the Increment of a Tendon Force Due to Live Loads”, Steel Structures 8, pp.109-118.

19) Saadatmanesh, H., Albrecht, P. and Ayyub, B. M. (1989). “Analytical study of prestressed composite beams.” Journal of Sturctural Engineering, ASCE, 115 (9), pp.2364-2381.

20) Christian U. Grosse (2007), Advances in Construction Materials 2007

21) 이영학, 김민숙, 정보나, 김희철, 김관수 (2009), “프리캐스트 콘크리트 세그먼트 접합부의 구조거동에 관한 실험적 연구” 한국지진공학회 논문집 vol. 13, No. 6, pp.59-65.

22) 임영국 편저 (1999), 쉴드공법, 원기술, 서울

제 2 절 볼트 체결방식 문제점 분석

1) 오진우, 강형우, 노우성, 박상태 (2000), 토목구조물 설계 표준 동해설 실드터널편, 과학기술

2) 임영국 편저 (1999), 쉴드공법, 원기술, 서울

3) 조재병, 성택룡 (2009), “시간에 따른 F13T 고장력 볼트의 체결력 감소”, 대한토목공학회 논문집 Vol. 29, No. 4, pp.291-297.

제 3 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 4 절 실대형 실험을 통한 강연선 체결 성능 검토

1) 오진우, 강형우, 노우성, 박상태 (2000), 토목구조물 설계 표준 동해설 실드터널편, 과학기술

2) JIS 규격, JIS B4650 수동식 토크렌치

제 5 절 쉴드터널 곡선부에서의 강연선 긴장력 손실평가

1) AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (2010). AASHTO LRFD bridge design specifications. AASHTO, Washington, USA.

2) David P. Billington (2004). “Historical perspective on prestressed concrete”, PCI Journal Vol1. pp.14~30.

3) Nawy EG (1990), Reinforced Concrete, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J, USA.

4) 한국콘크리트학회 (2009). 콘크리트 표준시방서 해설

5) 국토교통부 (2011), 철도설계기준

6) Nawy EG (1996). Prestressed Concrete, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J, USA.

7) 신현묵 (2008). 프리스트레스트 콘크리트, 동명사.

8) 한국콘크리트학회(2009). 콘크리트 표준시방서 해설

9) 한국콘크리트학회 (2011). 콘크리트공학

10) 김세훈, 오병환 (1999), “크리프 회복 거동을 고려한 철근콘크리트 및 프리스트레스트 콘크리트 부재의 장기거동해석에 관한 연구”, 콘크리트학회 논문집, Vol. 11, No. 1, pp. 279-288

11) 김한수, 신승학 (2014), “콘크리트의 장기거동을 고려한 건조수축 균열진전해석”, 대한건축학회 논문집 - 구조계, Vol. 30, No. 6, pp.35-42.

제 6 절 강연선 및 세그먼트 일체화 거동 방안

1) Indiana DOT (2009). Inspection Manual for Precast Prestressed Structural Members, Indiana Department of Transportation.

2) 박영하, 박민석, 길흥배 (2005). PSC I 거더교의 최적설계 및 표준화 연구, 연구보고서, 한국도로공사 도로교통기술원.

3) S.M.R. Lopes, L.M.L.P. Simoes (1999), “Influence of corrosion on prestress strands”, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.26, pp.782-788.

4) 국토교통부 (2011), 철도설계기준

5) Nawy EG (1996). Prestressed Concrete, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J, USA.

6) David P. Billington (2004). “Historical perspective on prestressed concrete”, PCI Journal Vol1. pp14~30.

7) http://www.ktas.kr/ (KTA 홈페이지)

제 7 절 쉴드 세그먼트 설계기준 조사 및 영향변수 도출

1) 한국터널공학회 (2008), 터널공학회 시리즈3, 터널 기계화시공-설계편

2) 한국터널공학회 (2007), 터널설계기준

3) 건설교통부 (2005), 콘크리트 구조설계기준

4) 한국터널공학회 (2009), 터널표준시방서

5) ITA(2000), Working Group Research

6) JSCE (2007), Standard Specifications for Tunneling

7) Wagner, H, Kolic D (2002), Joint design requirements for advanced TBM - tunnelling, pp.470-477

8) Datwyler (2003), The Report of the Watertightness Test for the Segment Sealing Gasket

9) International Tunnelling Association Working Group No. 2. (2000), “Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 15, No. 3, pp.303~331.

제 8 절 수치해석을 통한 강연선 쉴드터널 구조안정성 검토

1) 한국터널공학회 (2007), 터널설계기준
2) 건설교통부 (2005), 콘크리트 구조설계기준
3) 대한토목학회 (2001), 도로교 설계기준 해설(하부구조편)

제 9 절 아일랜드형 전단키 세그먼트 개발

1) 김익현, 김재관, 임현우, 전귀현 (1999), “전단키를 이용한 다경간 연속교의 내진성능 향상 방법”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.577-580.
2) 장승필, 김영진, 김종희, 심창수 (1997), “프리캐스트 바닥판 교량의 female - to - female 타입 전단키의 거동 연구”, 대한토목학회 학술발표대회 자료집 pp.199-202.
3) 한국콘크리트학회 (2012), 콘크리트 구조설계기준
4) 국토해양부 (2012), 콘크리트구조기준
5) 한국터널공학회(2007), 터널설계기준
6) 오진우, 강형우, 노우성, 박상태(2000), 토목구조물 설계 표준 동해설 실드터널편, 과학기술

제 10 절 세그먼트 체결방식에 따른 방수 성능 비교

1) 김용일, 추석연, 김동현, 박영진, 홍석균, 이두화 (2003) “세그먼트 방수재의 방수성능 평가”, 한국터널공학회 학술발표회 논문집
2) 대륭공업주식회사 (2003) 분당선 왕십리~선릉간 복선전철 제 3 공구 노반 신설공사 방수성능실험보고서
3) 국토해양부 (2010) 해저시설물 차폐기술 개발 연구단 최종보고서, 한국지질자원연구원

제 11 절 세그먼트 체결방식에 따른 지수재 거동 평가

1) 최우용, 이현필, 전기찬 (2014), “수팽창 지수재의 방수 성능 및 내구성 평가”, 한국터널지하공간학회 논문집, Vol. 16, no. 2, pp.117-124.

2) 김용일, 추석연, 김동현, 박영진, 홍석균, 이두화 (2003) “세그먼트 방수재의 방수성능 평가”, 한국터널공학회 학술발표회 논문집

3) 독일공업규격, DIN 18540-F

제 12 절 강연선 체결방식의 체결력 증대효과 검증

1) Sedlacek, G. and Kammel,C. (2001), “Zum Dauerverhalten von GV - Vebindungen in verzinkten - Erfahrungen mit Vorspannkraftverlusten”. Stahlb며, Ernst & Shon, Vol. 70, No. 12, pp.917-926.

2) Hasselmann, U. and Valtinat, G (2005), “Gesechraubte Verbindum-gen”, Stahlbaukalender, pp.378-380.

3) 한국도로교통협회 (2010), 도로교설계기준

4) 한병찬, 하라다카즈노리, 권영진, 김윤용 (2014), “쉴드 터널용 프리캐스트 세그먼트 콘크리트 라이닝의 내화성능”, 대한토목학회논문집, Vol. 34, No. 1, pp.95-105.

5) KS기준 (한국 산업규격)

6) 한국터널공학회(2007), “터널설계기준”

7) JIS기준 (일본 산업규격)

8) http://www.dacro.co.kr (한국다르코 홈페이지)

9) 최광호, 이중원, 박병천 (2014), “PSC 슬래브의 내화 거동연구”, 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, pp.219-220.

10) ITA (2004), GUIDELINES FOR STRUCTURAL FIRE RESISTANCE FOR ROAD TUNNELS

11) 일본지반공학회 (2012), 실드터널

제 14 절 세그먼트 시공 정확도 향상 방안

1) 이창홍, 김연진, 진원종, 최은석 (2011), “접합 조건 및 횡구속 조건에 따른 초고성능 프리캐스트 PSC 교량 접합부의 전단 거동에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집, Vol. 31, No. 5A, pp.379-387.

2) 조병완, 태기호, 오세준 (2006), “PSC 교량 정착부의 강선긴장순서에 대한 수치해석 연구”, 한국구조물진단유지관리공학회지, Vol. 10, No. 5, pp.97-105.

3) http://www.hkpc.co.kr (한국pc 홈페이지)

4) http://www.dywidag-systems.com/ (디비닥 그룹 홈페이지)

5) http://www.vslkorea.co.kr/kr/ (VSL Korea 홈페이지)

제 16 절 시공성 및 경제성 평가

1) 김기철 (2009), “분당선 한강하저 터널 쉴드 TBM 설계·시공 사례”, 철도시설 통권 No, 109, pp.104-116.

2) 김광섭 (1997), “퍼지기법을 이용한 건설공사의 확률적 위험도분석평가” 한양대학교 석사학위논문

3) 노순규 (2008), 건설업의 VE가치공학의 품질경영

4) 신분당선 (용산~강남) 복선전철 민간투자사업 외 8개

제 17 절 개발 기술의 수요예측 및 시장성 평가

1) http://kostat.go.kr (통계청 홈페이지)

2) 지왕률, 장수호, 배규진, 이상주 (2008), “중국의 TBM 현황 및 전망”, 자연, 터널 그리고 지하공간, Vol. 10, No. 3, pp.40-49.

3) Government of India Ministry of Railway (2009). Indian Railways Vision 2020

부 록

1. 강연선 체결 쉴드터널 설계·시공·유지관리 매뉴얼(안)
2. 강연선 체결 쉴드터널 표준단면
   -전력구 터널
   -지하철 터널
3. 국외출장복명서
4. 해외과학기술정보

강연선 체결 쉴드터널

설계·시공·유지관리 매뉴얼(안)

2015. 03

한국건설기술연구원

[목 차]

제1장 설계 매뉴얼 1
1.1 강연선 쉴드터널 세그먼트 구조 1
1.1.1 일반사항 1
1.1.2 세그먼트 구성요소 2
1.2 세그먼트의 설계 7
1.2.1 아일랜드형 전단키 설계 7
1.2.2 세그먼트의 두께 설계 9
1.2.3 세그먼트의 배합 11
1.2.4 강재 세그먼트의 적용 11
1.3 세그먼트 체결 설계 13
1.3.1 체결부재 13
1.3.2 블록아웃(Block out) 14
1.3.3 콘크리트 덮개 16
1.4 세그먼트 내화 17
1.5 표준단면 20
1.5.1 단면 작성 20
1.5.2 철근배근도 27
1.5.3 체결순서도 28

제2장 시공 매뉴얼 31
2.1 쉴드 세그먼트 제작 31
2.1.1 세그먼트 몰드제작 31
2.1.2 세그먼트제작 33
2.2 세그먼트 조립방법 36
2.2.1 강연선 공급 36
2.2.2 강연선 긴장력 38
2.2.3 강연선 그라우팅 40
2.2.4 조립 순서 42
2.2.5 시공 사례 44

제3장 시공 · 유지관리 45
3.1 시공관리 45
3.2 유지관리 항목 46
3.3 강연선 유지관리 48

참고문헌 49

제1장 설계 매뉴얼

1.1 강연선 쉴드터널 세그먼트 구조

1.1.1 일반사항

(1) 강연선 쉴드터널 세그먼트는 강연선에 의해 체결되는 부재로서 긴장력에 안정하여야 한다.

(2) 강연선 쉴드터널 세그먼트의 아일랜드형 전단키는 충분한 전단강성을 확보하고, 응력전달이 가능해야 한다.

※해설

기존에는 세그먼트라 불리는 원형 모양의 공장에서 제작되는 프리캐스트 부재를 볼트 등을 이용한 체결방식으로 연결하여 세그먼트 링을 구축하는 것이 일반적이었으나, 강연선 실드터널의 세그먼트 일반적으로 그림 1.1과 같이 세그먼트에 강연선 삽입 및 체결을 위한 블록아웃(Block out)부와 조립성능 향상 및 응력분배를 위한 아일랜드형 전단키(Island-type share-key)가 형성되어 있다.

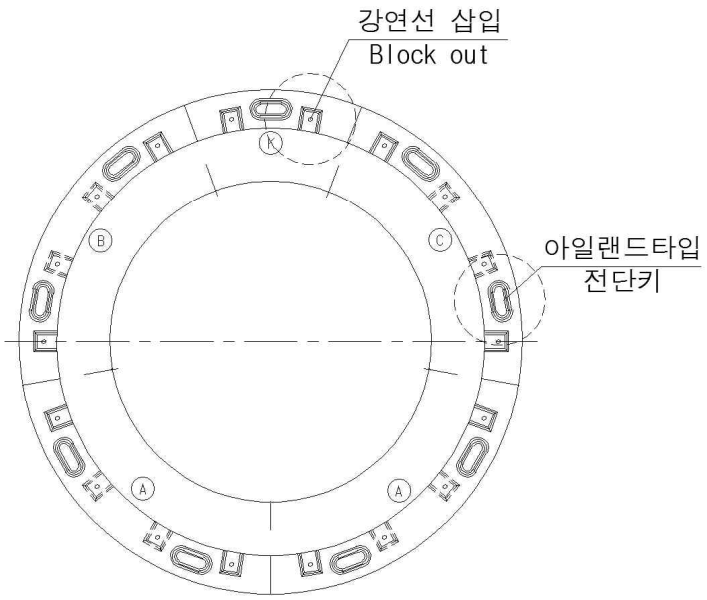


그림 1.1 강연선 쉴드터널 개요

1.1.2 세그먼트 구성요소

(1) 강연선 쉴드터널 세그먼트의 재질은 콘크리트로서 탈형, 운반 및 시공에 충분한 주의를 필요로 한다.

(2) 강연선 쉴드터널 세그먼트의 두께는 하중조건에 의해 결정되며, 아일랜드형 전단키와 수팽창지수재를 고려한 최소 두께를 고려해야 한다.

(3) 강연선 쉴드터널 세그먼트의 폭은 운반성, 응력집중, 시공 시 작업반경을 고려하여야 한다.

(4) 강연선 쉴드터널 세그먼트는 완전한 구형을 이루도록 조립되어야 한다.

(5) 강연선 쉴드터널 세그먼트는 강연선 체결을 위한 삽입구, 아일랜드형 전단키의 체결에 문제가 없도록 분할되어야 한다.

(6) 강연선 쉴드터널 세그먼트는 강연선이 통과할 수 있는 공간과 긴장 시 안정성에 문제가 없어야 한다.

※해설

가. 세그먼트의 종류

강연선 쉴드터널의 세그먼트의 재질은 콘크리트계로서 경제성이 뛰어나 일반적으로 중대구경 터널에서 사용 실적이 많다. 또한 강성이 크고 내압축성이 뛰어나기 때문에 토압 및 수압, 잭 추력, 뒤채움 주입압 등에 의한 좌굴이 잘 발생하지 않으며 내구성이 뛰어나고 주의하여 시공할 경우에는 수밀성도 뛰어나다. 그 반면, 중량 이 크고 인장에 대한 강도가 작기 때문에 세그먼트 단부가 파손되기 쉽기 때문에 탈형, 운반 및 시공 시의 취급에는 충분한 주의가 필요하다.

나. 세그먼트 두께

세그먼트의 두께는 터널 단면의 크기와 세그먼트의 종류에 대해 주로 토질 조건, 토피 등으로 산정되는 하중 조건에 의해 결정되며 터널의 사용 목적이나 내구성에 따라 결정되는 경우도 있다. 현재까지의 시공 실적에 따르면 콘크리트계 세그먼트의 두께는 세그먼트 외경의 4% 전후였으며 최근 경질 지반에서의 시공에서는 4%를 밑도는 것도 사용되고 있다. 이 경우, 내구성이나 시공 시의 잭 추력, 뒤채움 주입압 등의 시공 시 하중에 대해 최대 응력, 변형이 생기지 않는 두께가 필요하다. 특히 콘크리트계 세그먼트로 그 두께가 극 단적으로 얇은 경우에는 시공 시에 균열 등의 손상이 발생하기 쉬우며 구조적으로 불안정해지는 경우가 있기 때문에 주의를 요한다.[1)]

강연선 쉴드터널의 세그먼트는 아일랜드 전단키와 수팽창 지수재의 크기를 고려하여 세그먼트의 최소 두께를 유지하여야한다. 자세한 내용은 1.2.2.절의 세그먼트 두께를 참조한다.

다. 세그먼트 폭

세그먼트의 폭은 운반, 조립의 용이성, 곡선부의 시공성, 실드 테일의 길이가 작은 것이 유리하지만 세그먼트의 제작비 절감, 조립 횟수 절감에 따른 시공속도의 향상 및 누수의 원인이 되는 체결 저감에 따른 지수성 향상의 측면에서는 큰 것이 유리하다. 세그먼트 폭을 결정할 때에는 이러한 조건, 실드의 길이에 대해서도 고려해야 한다. 세그먼트 폭을 확대한 경우에는 세그먼트의 비틀림 강성이 충분히 확보되지 않으면 응력 집중 등의 영향이 커져 세그먼트의 폭 방향으로의 응력 분포가 고르지 않아 빔 부재로서 평가 할 수 없는 경우도 있으니 설계 시에 충분한 주의가 필요하다. 또한 치수뿐 아니라 폭에 비례하여 중량도 커지기 때문에 세그먼트의 제조 설비, 현장까지의 운송 방법, 갱내의 운반이나 이렉터에 대하여 충분히 검토해야 한다.

라. 세그먼트 링

강연선 쉴드터널의 세그먼트 링은 전력구는 그림 1.2와 같이 A, B, C 및 K 세그먼트로 구성 되고, 지하철 터널같은 대단면은 그림 1.3과 같이 형성된다. A 세그먼트는 양 끝의 세그먼트 체결에 체결 각도가 없는 세그먼트이다. B와C 세그먼트는 한 쪽의 세그먼트 체결에 체결 각도 또는 삽입 각도, 또는 이 둘 모두를 가진 세그먼트이다. K 세그먼트는 양쪽의 세그먼트 체결에 체결 각도나 삽입 각도, 또는 이 둘 모두를 가지며 세그먼트 링을 폐합시키는 세그먼트이다. K 세그먼트는 그림 1.4와 같이 터널의 반경방향과 축방향에서의 두 가지 삽입방식이 있다.[1)]

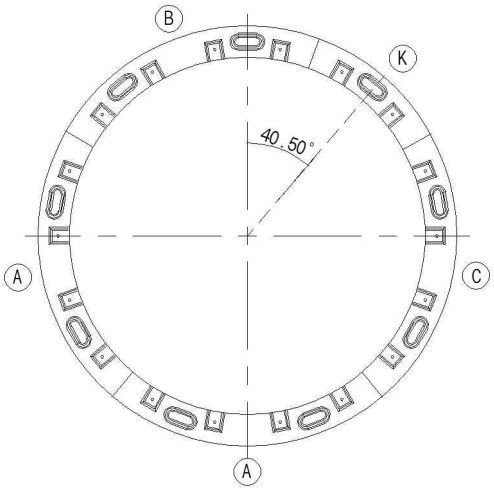


그림 1.2 전력구 쉴드터널

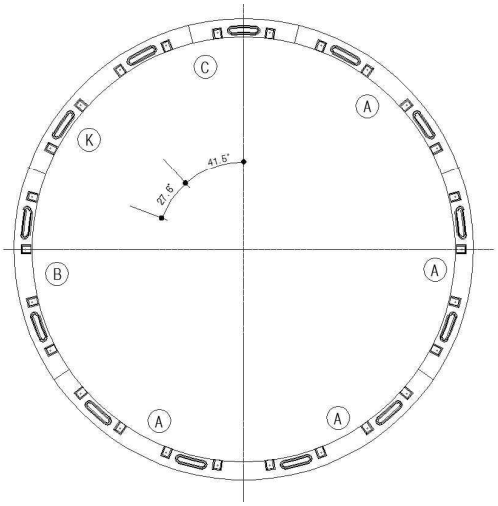
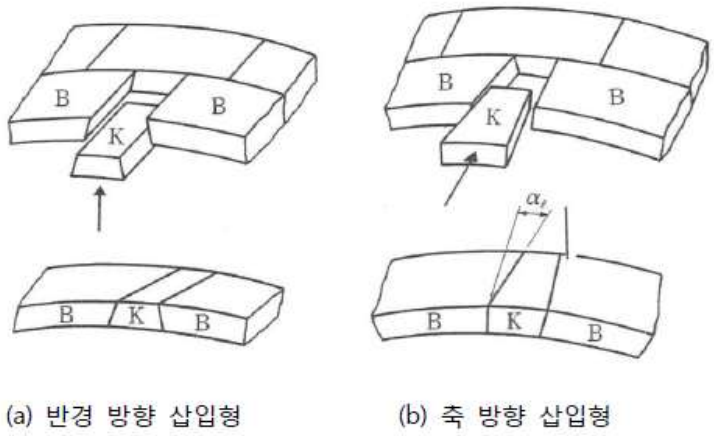


그림 1.3 대단면 쉴드터널



(a) 반경 방향 삽입형 (b) 축 방향 삽입형

그림 1.4 K 세그먼트의 삽입방식

마. 세그먼트의 분할 수

세그먼트의 분할 수는 1링을 구성하는 세그먼트의 수를 말한다. 제작비 절감, 조립 속도 향상, 지수성 향상 면에서는 분할 수가 적은 쪽이 유리하지만 분할 수가 극단적으로 적으면 세그먼트 단체의 중량이나 치수가 확대되기 때문에 세그먼트의 제작성, 운반성, 터널 갱내에서의 취급 및 조립성에 영향을 준다. 강연선 쉴드터널의 세그먼트 분할은 일반적인 세그먼트 분할과 같은 방식이지만 그림 1.5와 같이 체결되는 링에서 아일랜드형 전단키와 강연선 블록아웃(Block out)이 결합될 수 있는 등분포배치가 되도록 분할수를 결정할 때에 이를 충분히 검토해야 한다.

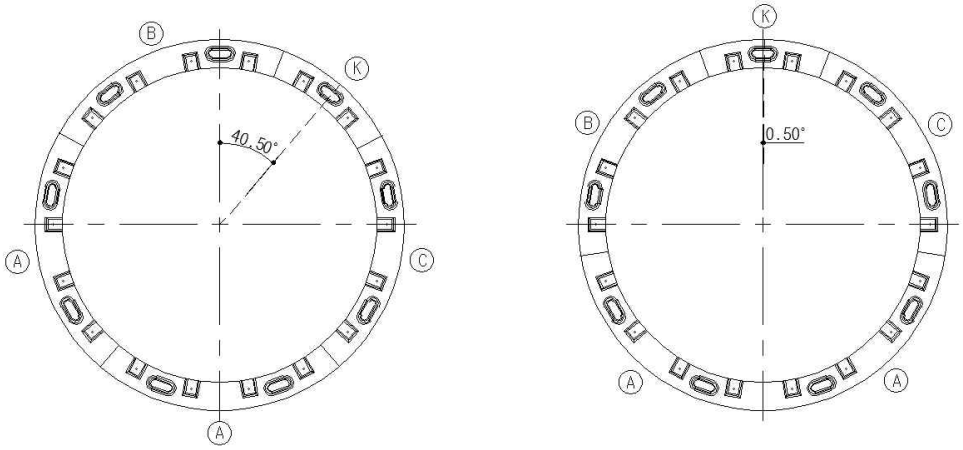


그림 1.5 전단키와 강연선 블록아웃(Block out)의 등분포 분할

바. 세그먼트의 체결 구조

쉴드터널의 세그먼트 구조에는 연약한 지반 속에서 자립할 수 있도록 높은 강성을 부여하는 경향이 있다. 이 경우 세그먼트를 강성이 높은 체결로 단단하게 연결하는 것이 일반적이다. 강연선 쉴드터널의 세그먼트는 터널 횡방향에 대해서는 기존의 볼트 박스 체결방식을 적용하였고, 종방향의 체결 구조는 그림 1.6과 같이 세그먼트에 형성된 강관을 통하여 강연선을 통과시킨 후 긴장을 가하여 세그먼트의 체결을 하게 된다. 일반 세그먼트에는 4개의 강연선이 통과할 수 있고 K세그먼트에는 2개의 강연선이 통과할 수 있는 구조로서 그림 1.7과 같이 일반 세그먼트는 통과하는 강연선 하나마다 한번씩, 총 4번의 긴장력을 받게 되는 구조이다.

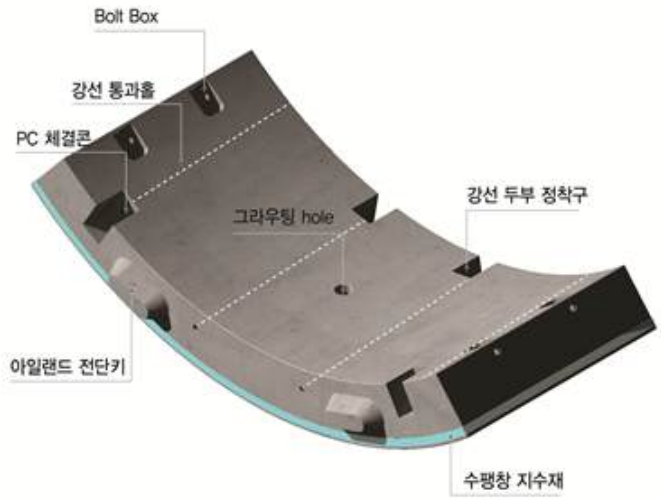


그림 1.6 세그먼트 체결부 구조

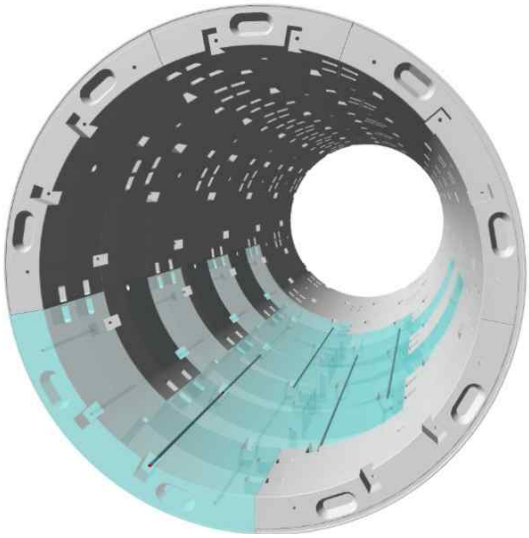


그림 1.7 강연선 통과 개요도

1.2 세그먼트의 설계

강연선 쉴드터널 세그먼트의 설계는 기존 쉴드터널 세그먼트와 같이 추진잭의 추력, 주변지반의 토압, 수압 등의 하중에 견딜 수 있어야 하며, 소정의 터널내공을 확보함과 동시에 터널의 사용목적 및 시공조건에 따른 역할과 기능을 보유할 수 있도록 안전하고 견고하게 설계되어야 한다.[2] 본 매뉴얼에서는 기존 쉴드터널 세그먼트와 다르게 검토해야하는 사항에 대해서만 언급하도록 한다.

1.2.1 아일랜드형 전단키

(1) 강연선 쉴드터널 세그먼트의 아일랜드형 전단키는 기존 볼트체결방식보다 전단성능이 향상되어야 한다.

(2) 전단성능의 검토는 안전측으로 검토되어야 한다.

(3) 전단성능의 비교는 전체단면에 대해 수행되어야 한다.

※해설

가. 아일랜드형 전단키 설계 개요

아일랜드형 전단키는 쉴드터널의 응력 재분배 기능 및 시공시의 틸팅(Tilting) 시간의 감소를 위한 가이드 기능을 고려하여 확정된 형상이며, 전단키의 개수는 세그먼트 분할 및 배치 및 설계강도를 고려하여 전단키의 크기를 결정한다. 전단키의 설계강도는 기존 볼트 체결방식과 전단성능비교를 통해 설계된다.

나. 전단성능검토

전단성능은 두 가지 체결방식에 따른 전단강도를 비교하여 산정한다. 아일랜드형 전단키는 콘크리트 구조체로서 전단강도는 아래의 식에 의해 검토된 값 중 가장 작은 값을 초과할 수 없다.[3]

$$V_n = 0.2f_{ck} \cdot b_w \cdot d \quad \text{식(1)}$$

$$V_n = (3.3+0.08f_{ck}) \cdot b_w \cdot d \quad \text{식(2)}$$

$$V_n = 11b_w \cdot d \quad \text{식(3)}$$

여기서, V_n : 전단강도

f_{ck} : 재령강도

b_w : 전단키 하부 폭

d : 전단키 상부 폭

검토는 그림 1.8과 같이 아일랜드 전단키의 갱구측과 막장측에 대하여 모두 검토하여 불리한 작은 값을 적용하며, 형성되어 있는 모든 전단키의 강도를 하나씩 검토되어 쉴드터널 단면 전체의 전단강도에 대하여 볼트 체결방식 쉴드터널 단면의 전단력과 비교를 통해 결정된다.

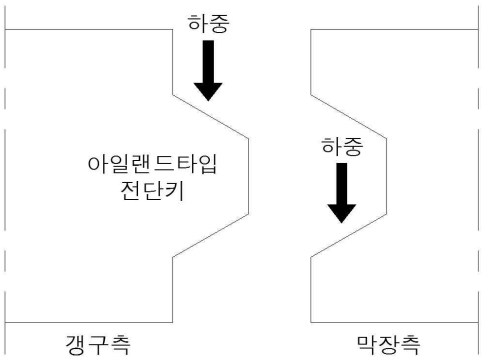


그림 1.8 전단강도 검토 개요도

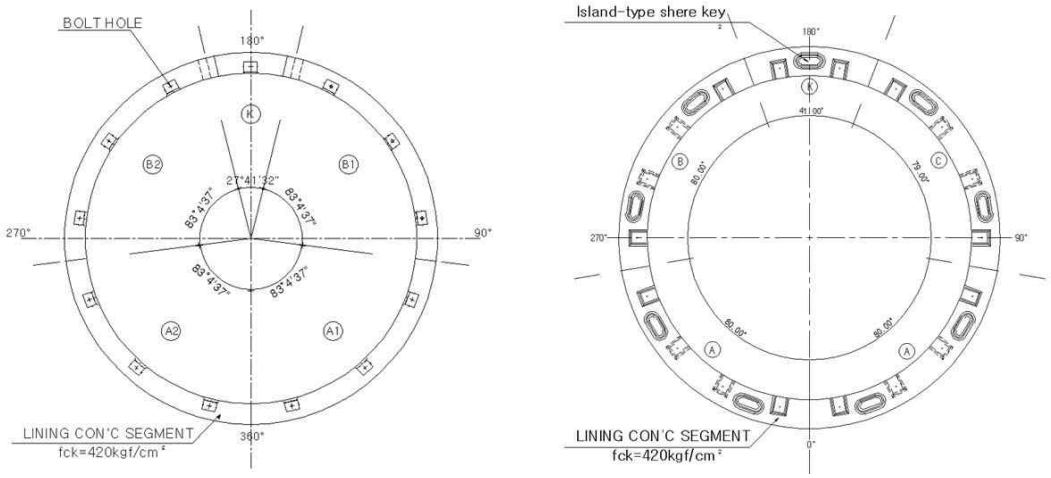
볼트 체결방식의 전단강도는 볼트의 전단강도로 검토하며, 방법은 아래의 식과 같다.[3)]

볼트재질의 기준항복점에, von mises의 항복조건 υy=fy/√3을 적용

$$V_n = \text{허용전단응력} \times \text{볼트단면적} \qquad \text{식(4)}$$

다. 전단성능 비교

그림 1.9와 같이 쉴드터널 단면 전체의 전단키와 볼트에 대한 전단강도를 비교하여 아일랜드형 전단키의 전단강도가 볼트의 전단강도 이상이 되도록 아일랜드형 전단키의 설계를 한다.



(a) 볼트 체결방식 (b) 강연선 체결방식

그림 1.9 전단성능 비교단면

1.2.2 세그먼트의 최소 두께

(1) 강연선 쉴드터널 세그먼트의 두께는 설계된 아일랜드형 전단키의 두께를 고려한 최소두께를 고려해야 한다. (2) 아일랜드형 전단키와세그먼트 두께를 축소하고자 하는 경우는 현장에서 발생 가능한 전단력에 대하여 충분한 검토가 수행되어야 한다.

※해설

강연선 쉴드터널 세그먼트는 단면에 세그먼트 체결시 가이드라인의 역할과 시공완료 후 응력재분배의 효과를 기대할 수 있도록 그림 1.10과 같은 아일랜드형 전단키가 형성되어있다. 아일랜드형 전단키의 형상과 두께는 검토를 통하여 형성된 것이므로 하중에 대한 검토결과 세그먼트의 두께가 얇게 검토되더라도 전단키의 두께 및 지수재의 위치를 고려하여 최소 두께이상을 확보해야한다.

볼트는 구조적 성능을 발휘하는 구조재가 아닌 세그먼트 조립에 사용하는 체결재로서의 역할을 수행하며, 세그먼트가 링으로 폐합되면 세그먼트 자체로서 구조적 성능을 담당하게 되어 해체하는 사례도 다수 존재한다. 그러나 기존 체결방식보다 높은 전단강도를 확보하기 위하여 아일랜드형 전단키는 그림 1.10에 제시된 표준크기를 참조하여 동일조건에서의 볼트와 전단력을 비교, 검토하여 설계하는 것을 권고한다.

단, 전단키의 최소 크기로 인하여 필요 세그먼트의 두께보다 필요 이상으로 두께가 증가되어야 할 경우 세그먼트 두께의 축소 등을 목적으로 전단키 사이즈의 축소 등에 대한 검토가 필요하다. 검토 방법에 대해서는 적용 현장에서 가장 불리한 단면을 대표

단면으로 선정하여, 발생 가능한 최대 전단력의 작용시에 대하여 그림 1.11과 같이 설계된 전단키의 암수부분이 맞물리는 세그먼트를 모델링하여 예상되는 전단력을 작용하여 수치 해석적 구조검토가 수행되어야 하며, 충분한 안정성 확보가 가능한 것으로 판단 시 전단키의 축소 적용이 가능하다.

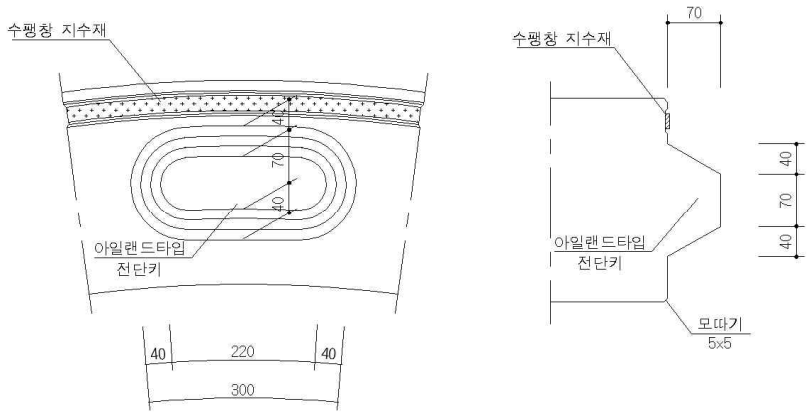


그림 1.10 세그먼트 두께결정 요소

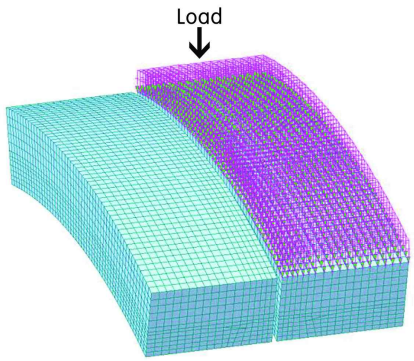
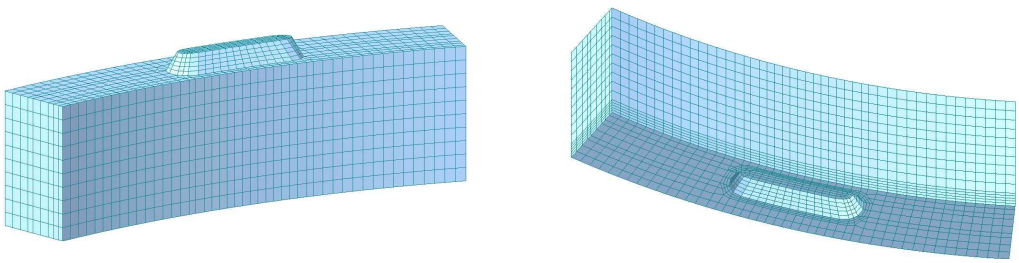


그림 1.11 전단력 작용도(예)



(a) 갱구측 (b) 막장측

그림 1.12 전단키 모델링(예)

1.2.3 세그먼트의 배합

(1) 강연선 쉴드터널 세그먼트의 배합은 표 1.1의 제시 기준을 적용하되, 현장에 적용하고자 하는 강도에 맞게 배합한다.

※해설

현장 시험시공에서 사용되었던 420kgf/cm^2 강도의 콘크리트 배합강도에 대하여 표준 기준을 제시한다. 제시된 표 1.1을 참고하여 현장 상황과 설계된 세그먼트에서 요구되는 강도를 충족하도록 배합비를 산정하여 세그먼트 설계를 실시한다.

표 1.1 420kgf/cm^2 강도 콘크리트 제안 배합비

구분	W/B (%)	S/a (%)	단위량(kg/m^3)				AD (%)
			W	C	S	20G	
세그먼트 표준배합	33.9	40.1	138	407	731	1,113	4.88

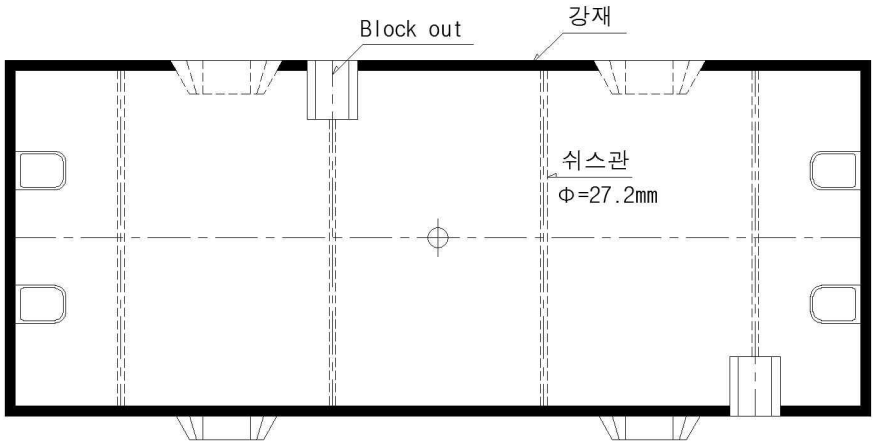
1.2.4 강재 세그먼트의 적용

(1) 터널 선형에서 급 굴곡부 존재 시, 혹은 압축력으로 인한 세그먼트의 손상이 우려되는 경우에 대하여 강재 세그먼트를 적용한다.

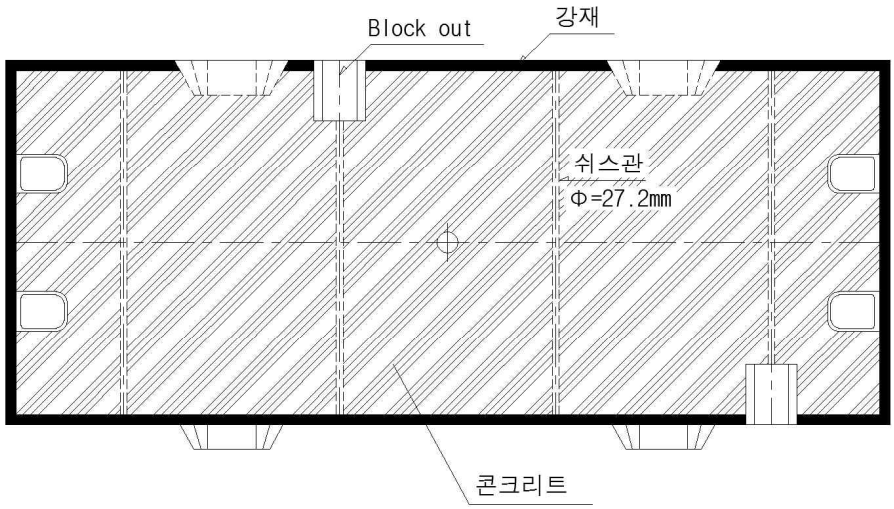
※해설

콘크리트의 압축강도로 인하여 강연선의 긴장력과 굴진 추력 등의 압축력으로 인하여 세그먼트의 구조성능이 저하되거나 파괴가 발생하는 경우는 없으나, 급굴곡부 등의 특수한 상황에 대하여 안정성을 향상하기 위해서는 강재 세그먼트로 대체 시공한다. 강재 세그먼트는 일반적으로 소구경 터널에 있어 경제성이 뛰어나며 중대구경 터널에서는 콘크리트계 세그먼트의 적용이 어려운 급곡선부 등 특수한 환경에서 적용된다.[3)]

현장여건을 반영하여 터널선형의 세그먼트 각도 등을 고려하여 구조적 성능을 만족하여야 하며, 강재 세그먼트만으로 안정성 확보가 어려운 경우 그림 1.12와 같이 합성 세그먼트에 대한 검토를 수행 후 적용한다.



(a) 강재 세그먼트



(b) 합성 세그먼트

그림 1.12 굴곡부 적용 세그먼트

1.3 세그먼트 체결 설계

1.3.1 체결부재

(1) 강연선 쉴드터널 세그먼트의 체결재는 목적에 맞도록 기준을 만족하는 강연선을 이용하여 체결해야 한다.

※해설

강연선 쉴드터널 세그먼트의 체결 재료로서 사용되는 강연선은 7가닥의 강선을 꼬아 직경 0.5"(12.7mm, SWPC 7A) 또는 0.6"(15.2mm, SWPC 7B) 규격으로 구성되며, 터널의 목적에 맞도록 강연선의 긴장력을 고려하여 선택하도록 한다.

강연선은 통상 소요되는 긴장력에 따라 강연선 7~30개를 한 다발로 구성하여 정착시키게 된다. 그림 1.13과 표 1.2는 긴장재의 성능을 유지하기 위하여 정착구에서의 최소직선길이 및 배치 시 최소곡률 반경이다.[4)]

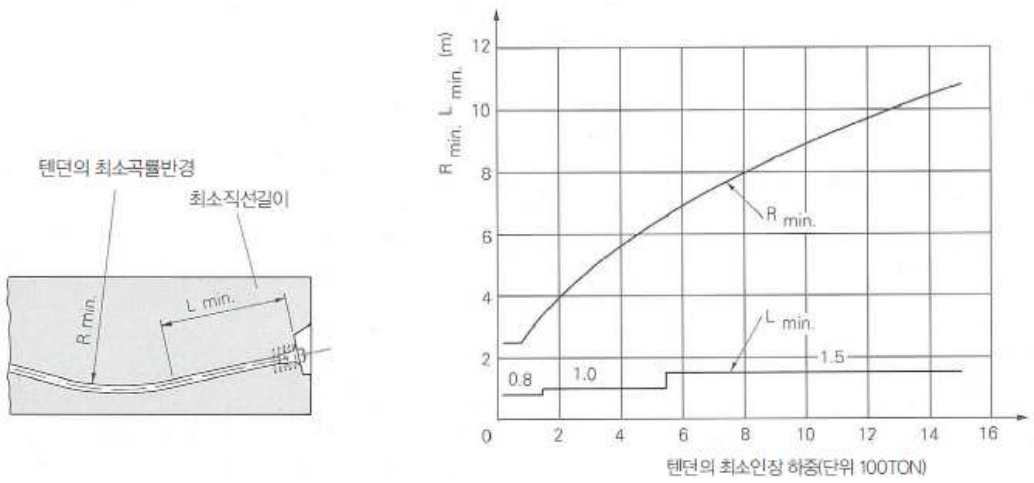


그림 1.13 최소 직선길이와 텐던 곡률반경의 상관관계도

표 1.2 강연선의 주입을 위한 최소조건

Lmin	0.6"(15.2mm)		0.5"(12.7mm)	
	R	L	R	L
4H	4.5	0.4	4.0	0.4
7H	6.0	0.45	5.5	0.5
12H	7.5	0.5	6.5	0.5
14H	8.5	0.8	7.0	0.7
19H	9.5	0.9	8.0	0.8
24H	11.0	1.1	9.0	0.9
27H	12.0	1.2	9.5	1.1
31H	13.0	1.3	10.0	1.2

1.3.2 블록아웃(Block out)

(1) 강연선 쉴드터널 세그먼트의 강연선 삽입구는 세그먼트 체결 시, 세그먼트에 편심이 발생하지 않아야 한다.

(2) 강연선 쉴드터널 세그먼트에는 강연선의 최소 곡률 반경을 고려한 삽입이 가능해야 한다.

※해설

강연선을 이용하여 세그먼트를 체결을 위해서 세그먼트 내부에 강연선을 삽입하고 정착구를 설치 후 긴장력을 도입하는 과정이 필요하다. 갱구측에서 강연선을 삽입하고, 상대적으로 잭킹(Jacking) 작업공간 확보가 용이한 막장측에서 강연선 긴장작업을 시행한다.

블록아웃(Block out)은 긴장재의 삽입 및 정착구 설치를 위하여 필요한 공간으로 부재의 연속성이 단절될 수 있으며, 철근배근 등의 어려움이 있으므로 최소화하도록 한다.

가. 강연선 삽입구 설계

강연선은 세그먼트 체결을 위하여 설치되므로 큰 프리스트레싱(Prestessing)을 도입할 필요는 없다. 따라서 적용하고자 하는 강연선 1가닥을 설치하는 것으로 하고 긴장력 도입 시 편심에 의한 인장이 발생하여 부재사이가 벌어지지 않는 위치(전단면

압축응력이 도입될 수 있는 위치)를 선정한다.

① 적용 긴장력

P_e = fpu × 0.80 × 0.80 × A

A : 적용 강연선의 단면적

f_{pu} : 긴장력

긴장력의 80%로 잭킹(Jacking)력을 도입하고, 잭킹력의 80%로 유효 프리스트레싱력으로 가정.

② 편심량 결정

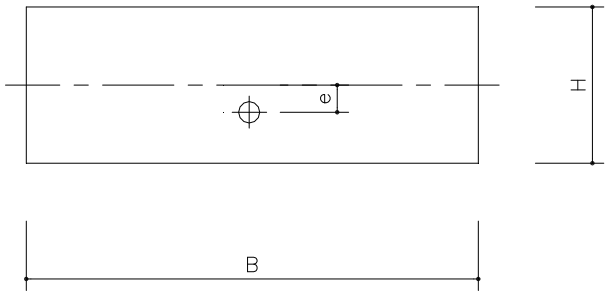


그림 1.14 편심량 개요도

상단에 인장응력이 생기지 않는 편심량(e)을 산정한다.

상연응력 $f_t = -\frac{P_e}{A} + \frac{P_e \cdot e}{I} y$ 이므로 상연응력이 0일 때를 가정하여 e를 산정

나. 블록아웃(Block out) 형상 설계

블록아웃은 강연선의 삽입 시 작업공간이며, 긴장 후 정착구가 설치되는 공간으로서 작업이 가능한 범위 내에서 최소의 크기로 한다. 이때 작업이 가능한 범위는 적용하고자 하는 강연선의 단면 내 위치와 구부림 반경을 고려하여 결정한다.

블록아웃에 대한 설계 예로서 Φ=0.5"(12.7mm)의 강연선에 대해 다음에 정리하였다. 블록아웃 위치에서는 쉬스관이 배치되지 않으므로 강재의 최소 곡률반경은 PS강재 직경의 40배로 하였다.

R_{min} = 12.7 × 40 = 508(mm)

검토된 결과에 따라 블록아웃은 강연선의 최소 곡률반경을 만족할 수 있도록 그림 1.15와 같은 크기로 결정되었다. 이와 같이 블록아웃의 형상은 강연선의 최소 곡률반경을 고려하여 설계하도록 한다.

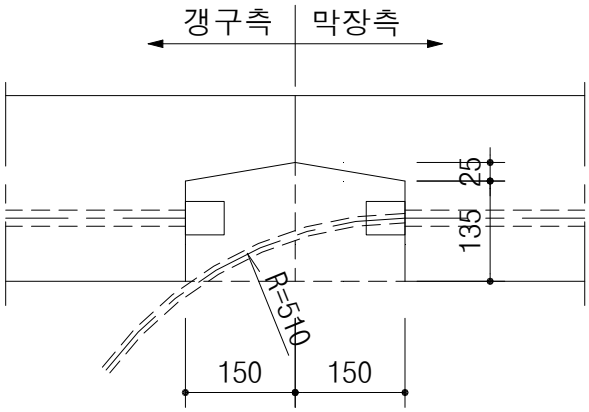


그림 1.15 0.5" 강연선의 블록아웃

1.3.3 콘크리트 덮개

(1) 강연선 쉴드터널 세그먼트의 철근배근시에는 설계기준을 만족해야 한다.

※해설

강연선 쉴드터널 세그먼트는 지하구조물로서 흙에 직접 접하는 콘크리트의 기타부재로서 표 1.2의 규정에 따라 최소피복두께 30mm를 적용하였다.[6)]

표 1.2 프리캐스트 콘크리트의 덮개

구분		D19이상, D35이하	D16 이하
흙에 접하거나 옥외의 공기에 직접 노출된 콘크리트	벽체	20mm	
	기타부재	40mm	30mm
옥외의 공기나 흙에 직접 접하지 않는 콘크리트	슬래브/벽체	20mm	15mm
	쉘/절판부재	15mm	10mm

1.4 세그먼트 내화

(1) 쉴드터널 내의 화재 등에 대한 터널의 기능을 확보할 수 있는 내화 성능을 가진 구조로 해야 한다.

※해설

내화 구조의 설계 시에 고려할 화재 규모 (온도, 시간)는 터널에 요구되는 기능과 서비스 수준, 통행 차량의 종류, 주변 환경 및 방화 설비 등을 고려해 설정해야 한다. 화재 규모 및 화재 온도-시간 곡선은 아래와 같이 선정한다.[3)]

가. 화재 규모 선정

화재 규모는 해당 터널에 관한 다음의 사항을 종합적으로 고려하여 선정한다.

① 해당 터널의 위치, 도로 규격 등
② 터널의 주변 환경
③ 터널 방재 설비의 규모, 수준
④ 위험물 적재 차량의 통행 유무 또는 제한
⑤ 통행 차량의 종류와 교통량
⑥ 화재 시의 소화 활동까지의 대응 시간

나. 화재 온도-시간 곡선 설정

화재 온도-시간 곡선은 해당 터널에서 발생이 예상되는 화재 규모에 따라 설정하며, 그림 1.16은 각 기준별 제시하고 있는 화재 온도-시간 곡선이다.

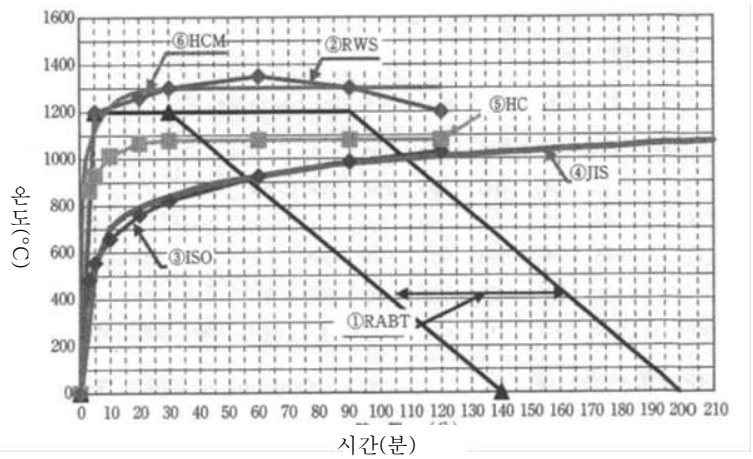
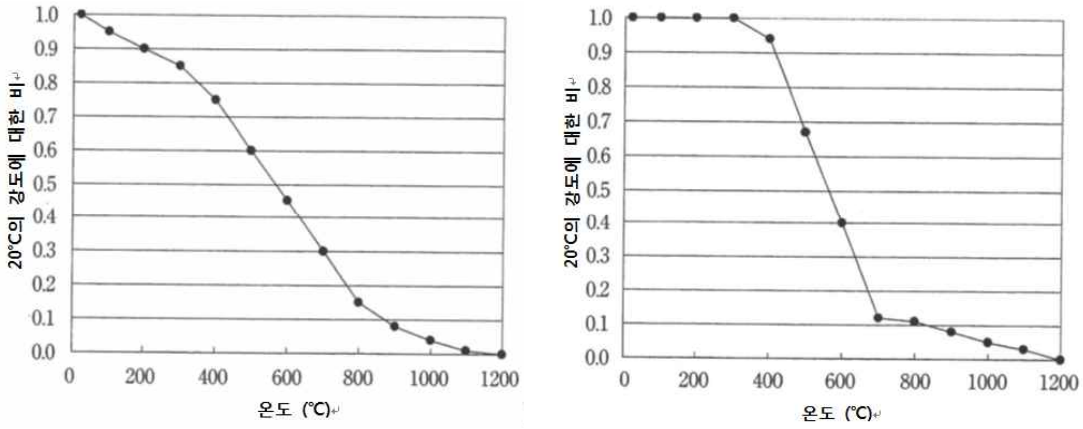


그림 1.16 기준별 화재 온도-시간 곡선

화재 시에 구조물의 내력이 저하하는 주요 요인은 재료의 강도 저하와 콘크리트의 폭렬이다. 구조 부재의 내화성 조사는 주요 부재의 강도가 터널 구조물의 구조 안정성을 유지할 수 있는 범위 이하로 저하되지 않도록 허용 내화 온도를 설정하고, 화재 시에 주요 부재의 온도가 허용 온도 이내인지와 콘크리트의 폭렬을 확인해야한다. 그림 1.17은 콘크리트와 강재의 온도 상승에 따른 강도저하를 나타내며, 콘크리트는 400℃에서 강도가 75%로 저하하고 강재는 250~350℃에서 급격한 강도 저하가 시작된다.



(a) 콘크리트 (b) 강재

그림 1.17 온도상승에 따른 강도저하 곡선

강연선 쉴드터널의 체결부에서의 강연선 내화성능은 그림 1.13과 같이 400°C에서 최대 10%, 600°C에서 최대 20%정도의 긴장력 손실이 발생한다. ITA에서 제시한 가이드 라인에 따르면 연결재는 최대 200°C의 온도 내에서 관리하여야 한다.[7)]

결론적으로 세그먼트 콘크리트의 강도는 400°C에서 약 25% 감소하며 큰폭으로 강도감소 현상을 보이며 폭렬등으로 파괴가 발생한다. 체결재로 사용되는 강연선은 400°C에서 약 10%정도의 긴장력 감소를 보이고 있으며, 기존 터널의 연결부 관리기준인 200°C를 크게 웃돌며, 연결부의 파괴가 발생하기 전에 세그먼트부에서의 파괴가 발생하므로 세그먼트에 대한 내화성능 관리가 우선시 되어야 한다.

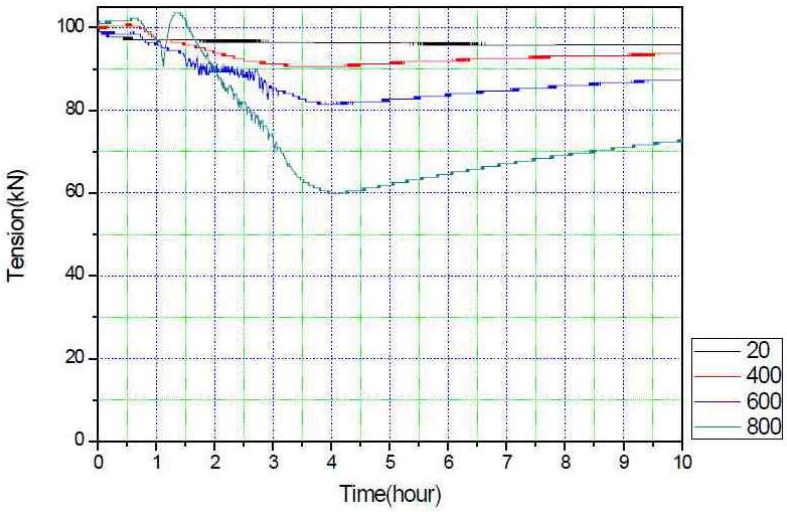


그림 1.18 가열중 강연선 긴장력 변화

1.5 표준단면

1.5.1 단면 작성

(1) 강연선 쉴드터널 세그먼트의 표준단면도는 설계요소가 반영되고, 세그먼트의 제작이 가능해야 한다.

※해설

세그먼트 설계 과정을 통하여 전단키와 블록아웃(Block out)의 크기를 결정하였다. 결정된 요소를 적용하여 전력구 표준단면을 구성하였다.

표준단면에 대한 세그먼트는 5개의 세그먼트를 배치하였으며, 세그먼트의 형상, 전단키의 배치, 블록아웃의 배치 등을 최대한 표준화하여 프리캐스트 부재 제작 효율성을 향상시키고, 현장세그먼트 배치 시 동일한 작업의 반복으로 시공성을 향상시키도록 하였다. 아래 그림 1.19~1.21은 전력구 터널에 적용된 강연선 쉴드터널의 표준단면 예이며, 그림 1.22~1.24는 지하철 터널에 적용된 강연선 쉴드터널의 표준단면 예이다.

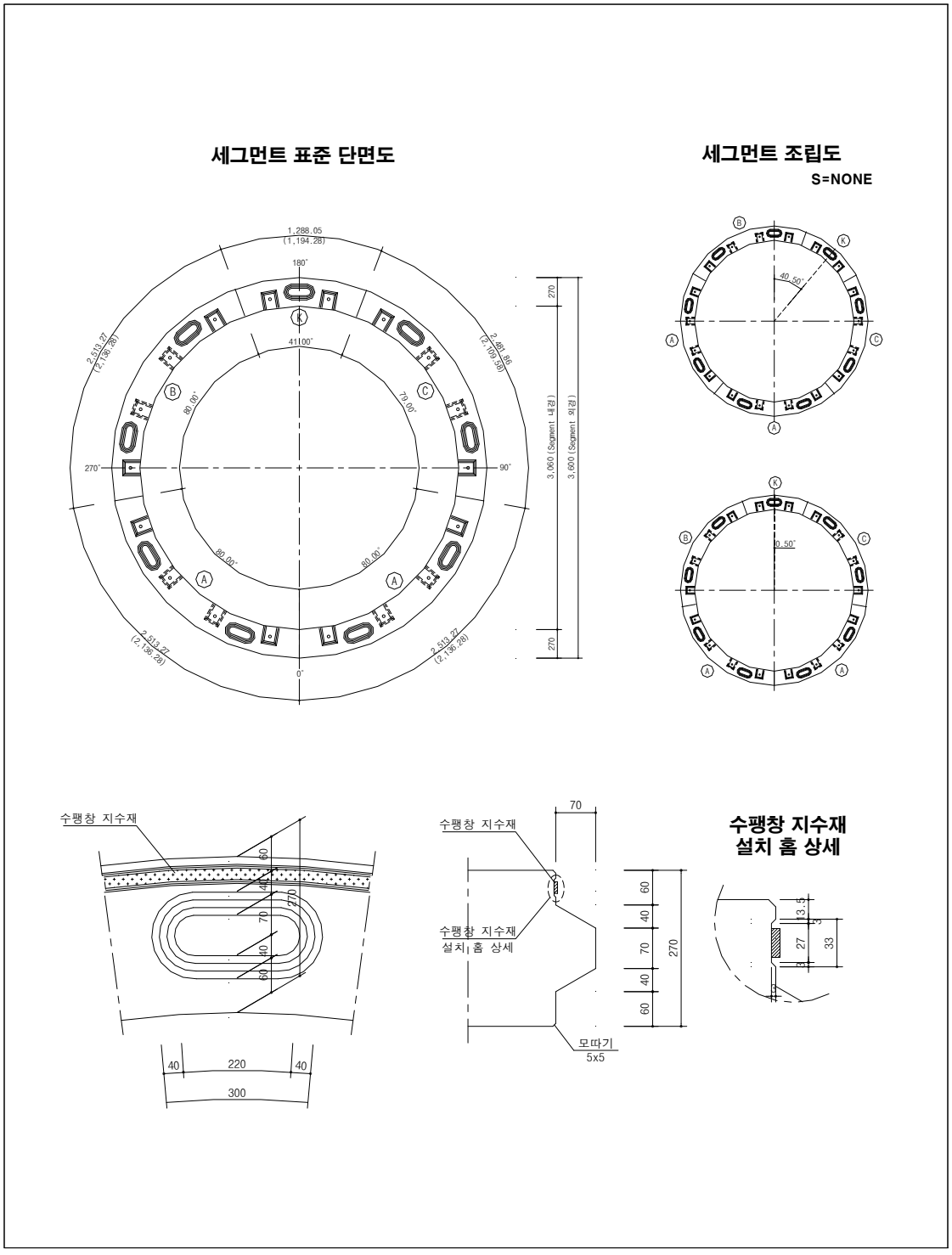


그림 1.19 강연선 쉴드터널 전력구 표준단면도

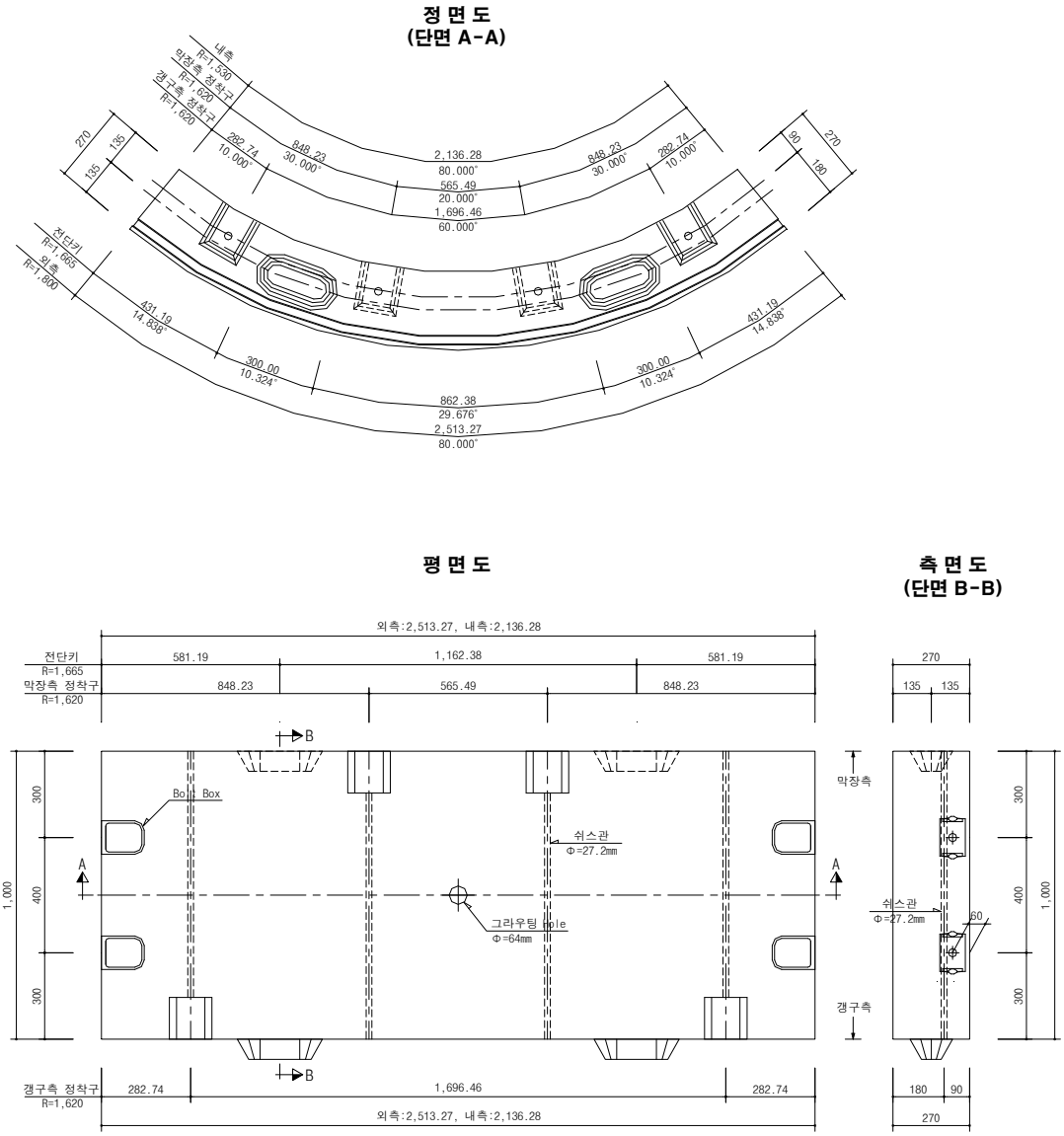
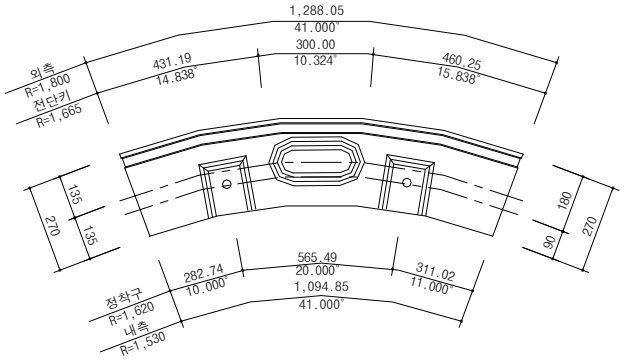


그림 1.20 강연선 쉴드터널 전력구 A세그먼트 상세도

TYPE-K

정 면 도
(단면 C-C)



평 면 도

측 면 도
(단면 D-D)

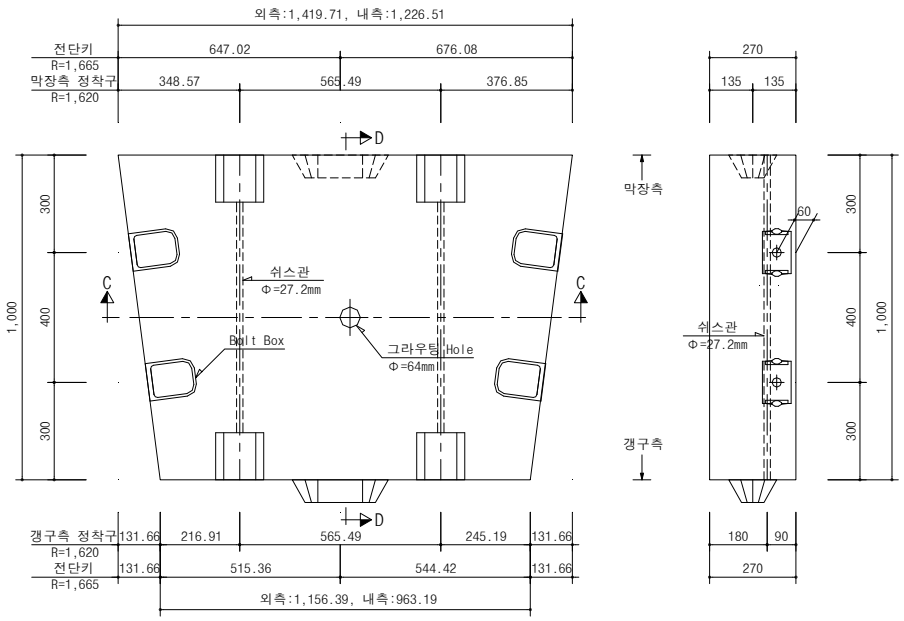


그림 1.21 강연선 쉴드터널 전력구 K세그먼트 상세도

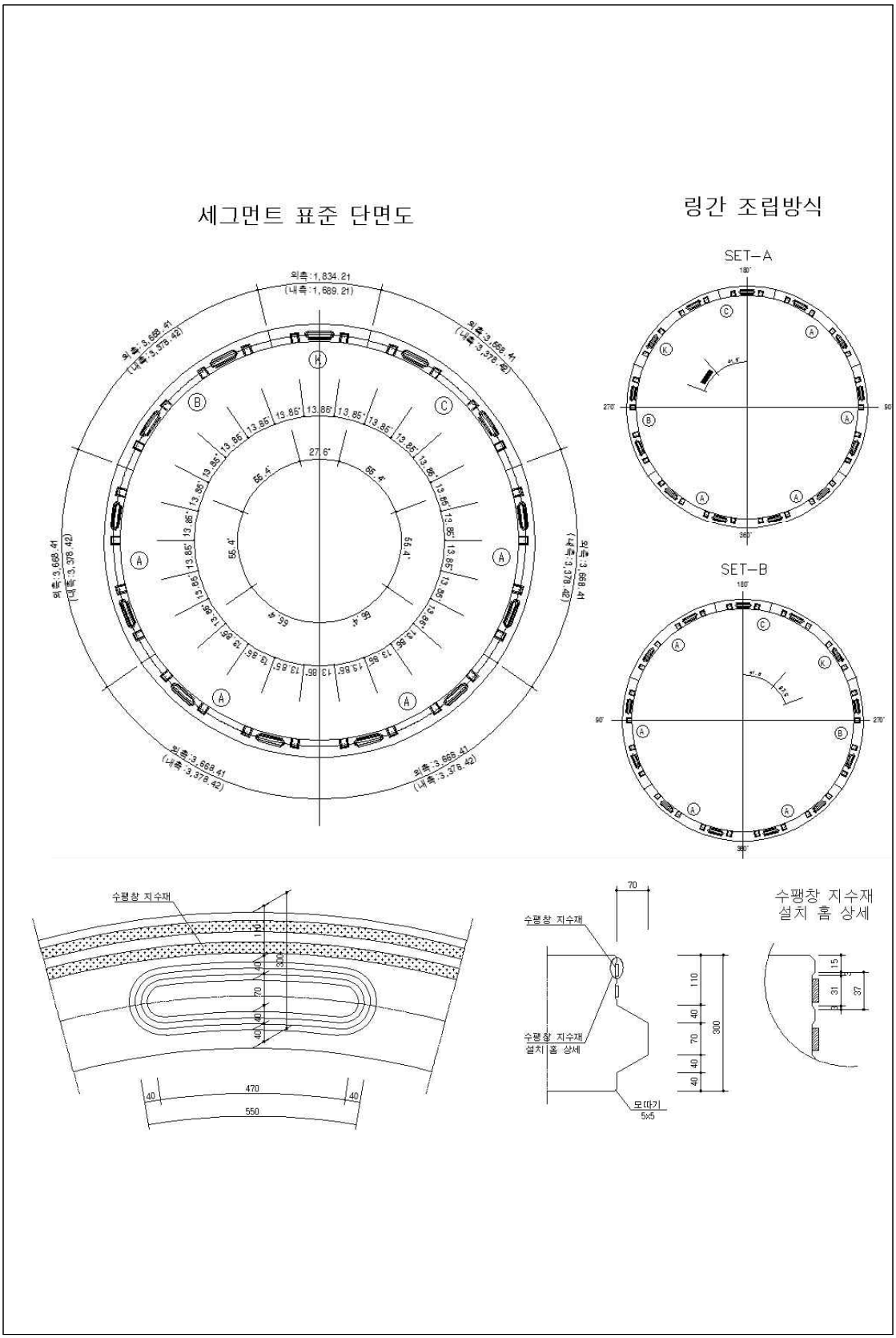


그림 1.22 강연선 쉴드터널 지하철 표준단면도

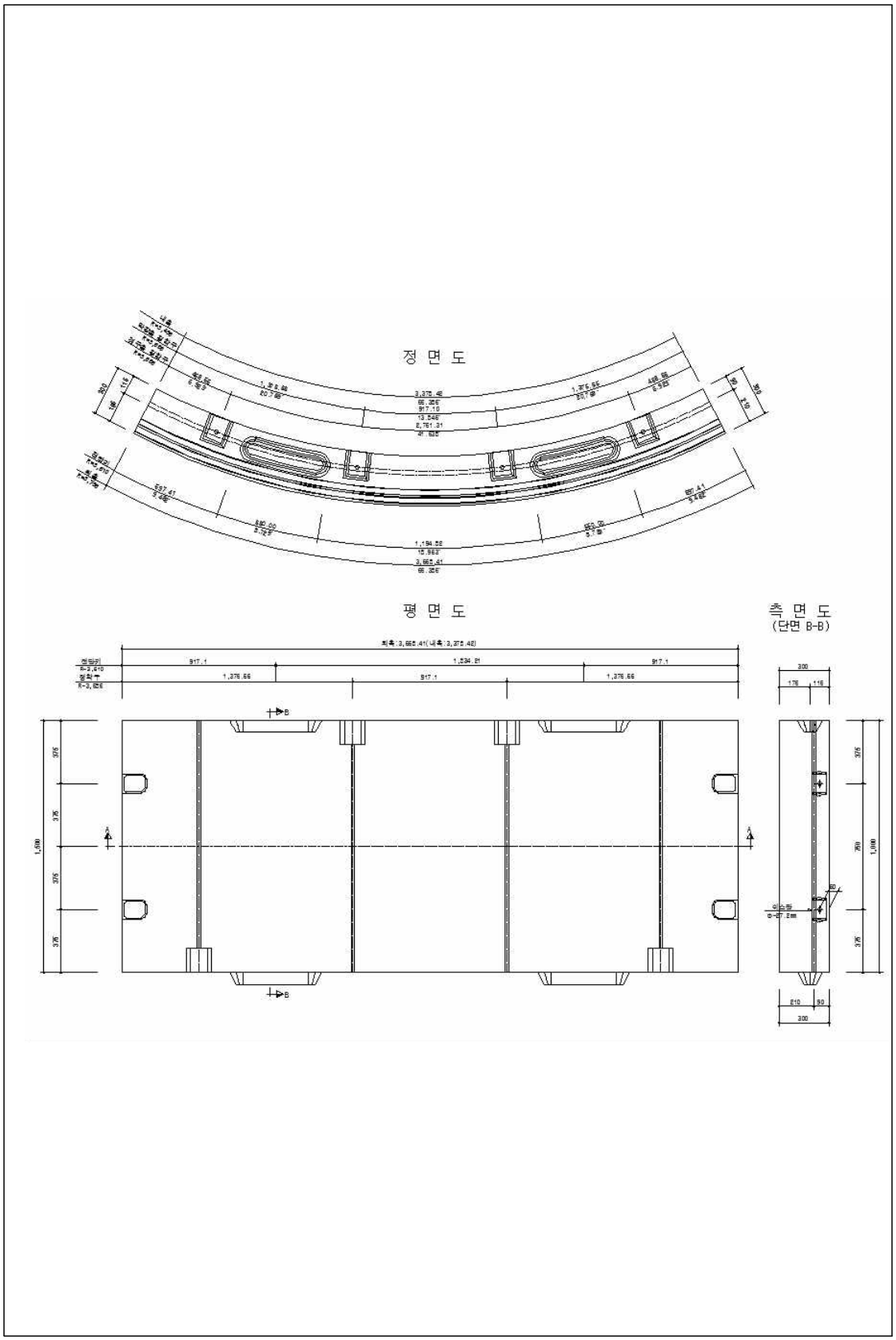


그림 1.23 강연선 쉴드터널 지하철 A세그먼트 상세도

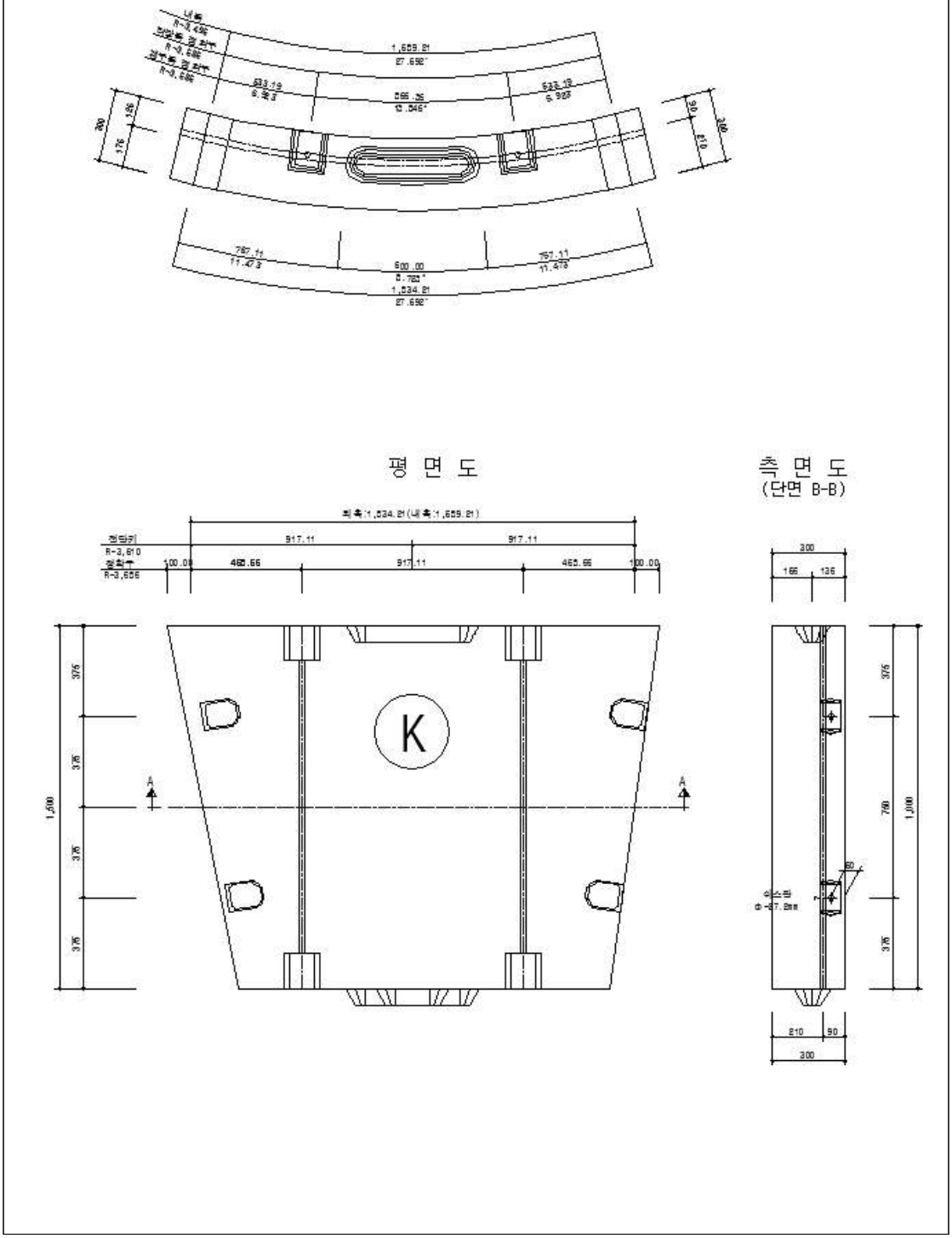


그림 1.24 강연선 쉴드터널 지하철 K세그먼트 상세도

1.5.2 철근배근도

(1) 강연선 쉴드터널 세그먼트의 철근배근도는 하중에 대해 안정하여야 하고, 설계기준에 의해 피복두께와 철근간격을 배치해야 한다.

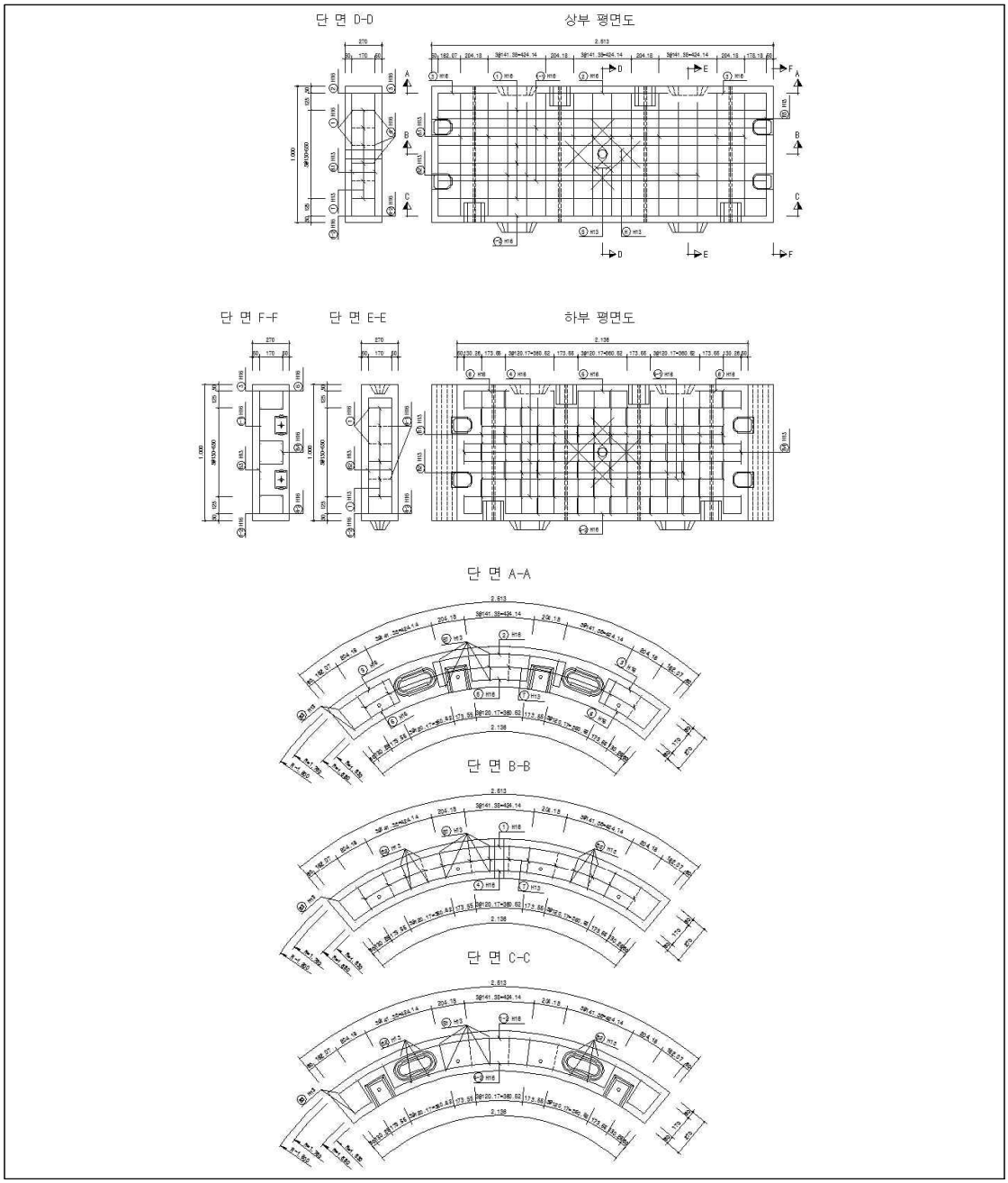


그림 1.25 강연선 쉴드터널 전력구 A세그먼트 배근도

1.5.3 체결순서도 작성

(1) 강연선 쉴드터널 세그먼트의 체결순서도는 모든 세그먼트에 강연선이 통과할 수 있도록 작성되어야 한다.

※해설

1열의 세그먼트는 체결할 기존 세그먼트가 없으므로, 3열까지는 기존의 볼트 체결 방식대로 체결 후 , 4열부터 강연선 체결이 수행된다. K세그먼트는 강연선 2열이 통과하고, 나머지 세그먼트에는 4열의 강연선이 통과하게 된다. 이에 시공순서를 설계단계에서 도면으로 작성하여야 한다.

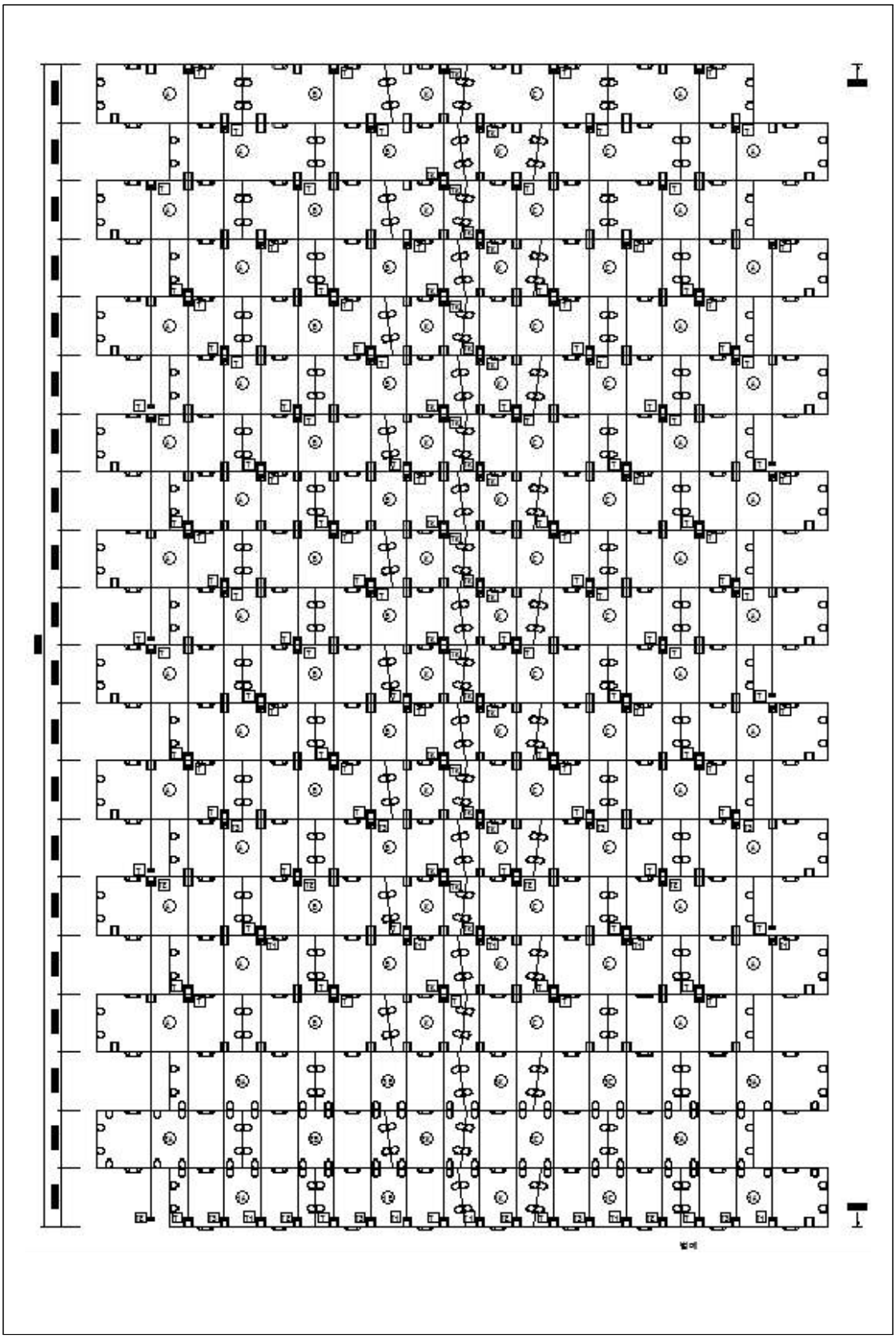


그림 1.26 강연선 쉴드터널 전력구 체결순서도

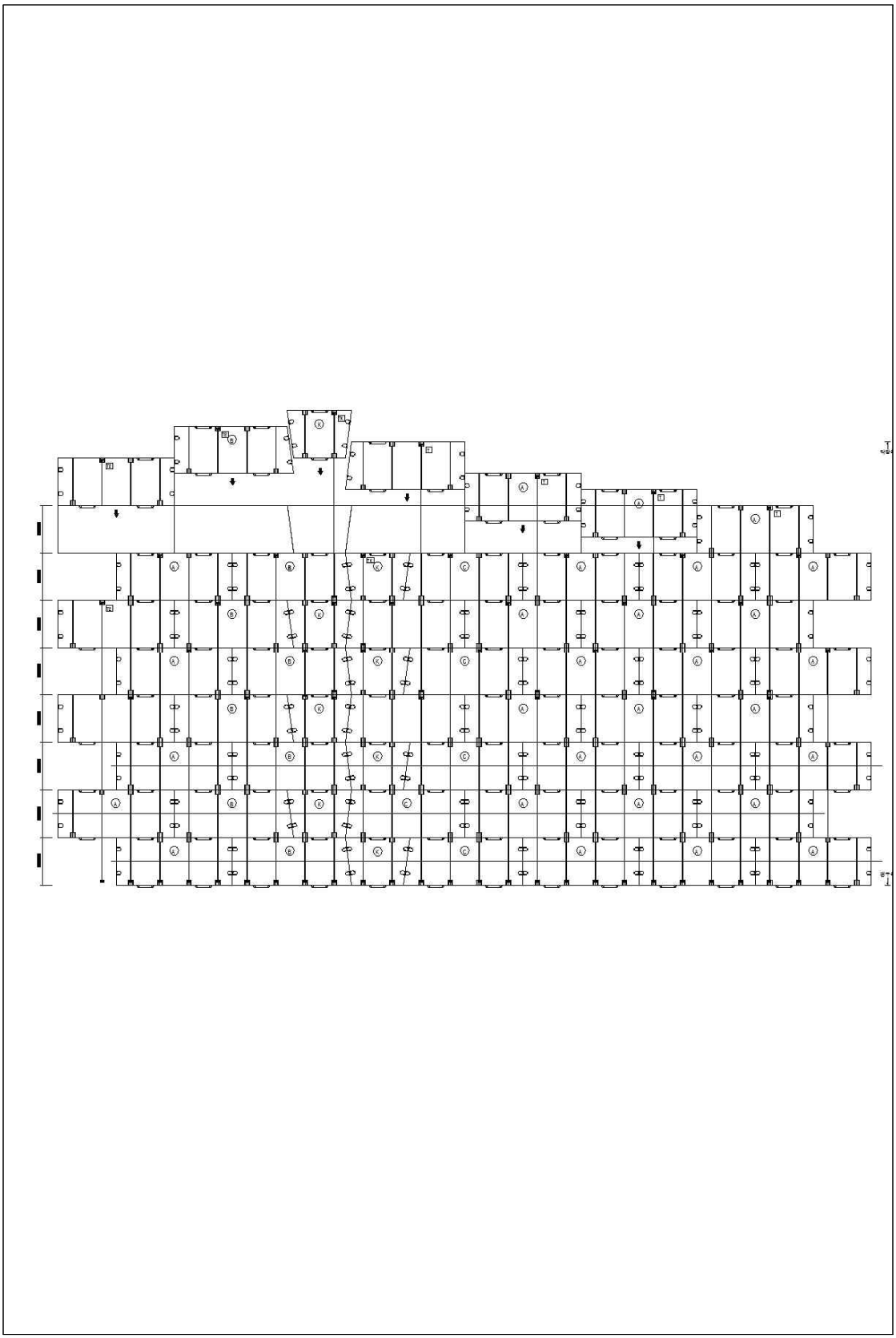


그림 1.27 강연선 쉴드터널 지하철 체결 순서도

제2장 시공 매뉴얼

2.1 쉴드 세그먼트 제작

2.1.1 세그먼트 몰드 제작

(1) 강연선 쉴드터널 세그먼트 제작용 몰드는 아일랜드형 전단키와 강연선의 통과를 위한 공간의 제작이 가능해야한다. (2) 세그먼트의 타입별 생산이 가능해야 한다..

※해설

설계된 도면에 기초하여 세그먼트 제작용 몰드를 제작한다. 강연선 체결 방식에서 1열의 강연선은 효과적인 긴장력을 갖기 위해 세그먼트 4링을 통과할 수 있는 길이로 계획되어야 한다.

반력대 앞에서 조립되는 최초 세 링은 강연선의 긴장력으로 조립하는 것이 불가능하기 때문에 최초 세 링까지는 기존 볼트 체결 방식으로 조립할 수 있도록 몰드 제작 시 볼트박스 및 강관을 모두 설치할 수 있는 구조로 제작한다.

계획된 볼트 체결방식의 세그먼트의 수량이 적을 경우 같은 몰드에서 탈부착을 통하여 볼트 체결방식과 강연선체결방식의 세그먼트의 생산이 가능하도록 제작한다.



(a) K-Type 몰드 (b) A-Type 몰드

그림 2.1 강연선 쉴드터널 세그먼트 제작용 몰드

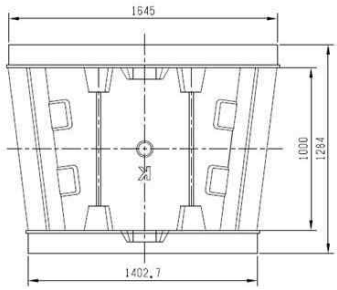


(a) 볼트박스

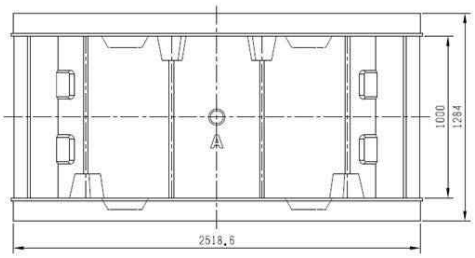


(b) 강연선 체결 블록아웃

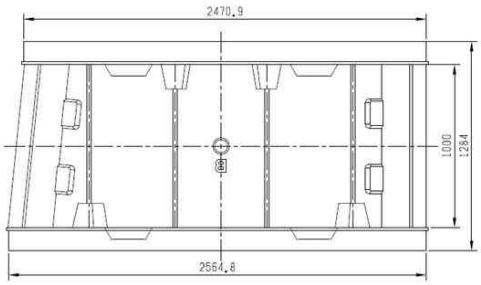
그림 2.2 세그먼트 체결방식 변경에 따른 제작 몰드 부품



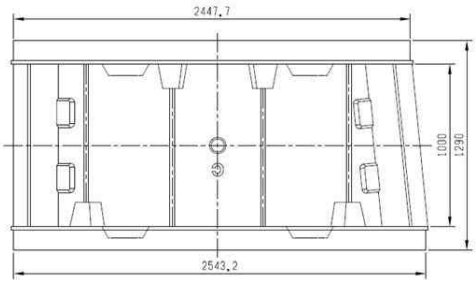
(a) K-Type 몰드 설계도



(b) A-Type 몰드 설계도



(c) B-Type 몰드 설계도



(d) C-Type 몰드 설계도

그림 2.3 타입별 몰드 설계도

표 2.1 몰드 사용 재료의 규격[1)]

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

2.1.2 세그먼트 제작

(1) 강연선 쉴드터널 세그먼트는 충분한 강도를 발휘할 수 있도록 제작해야 한다.

(2) 강연선 쉴드터널 세그먼트의 운반 중 손상이 없도록 한다.

(3) 세그먼트는 필요한 치수 정밀도를 확보해야 한다. 또한 필요한 치수 정밀도는 세그먼트의 제작에 앞서 사전에 정해두어야 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[2)]

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)[2)]

설계기준강도	42	45	48
허용 굽힘 압축 응력도	150	160	170
허용 전단 응력도	5.5		
허용 부착 응력도	20(이형철근)		



K-Type 세그먼트



일반Type 세그먼트

그림 2.3 강연선 쉴드터널 세그먼트(예)

표 2.4 세그먼트 사용 재료의 규격[1)]

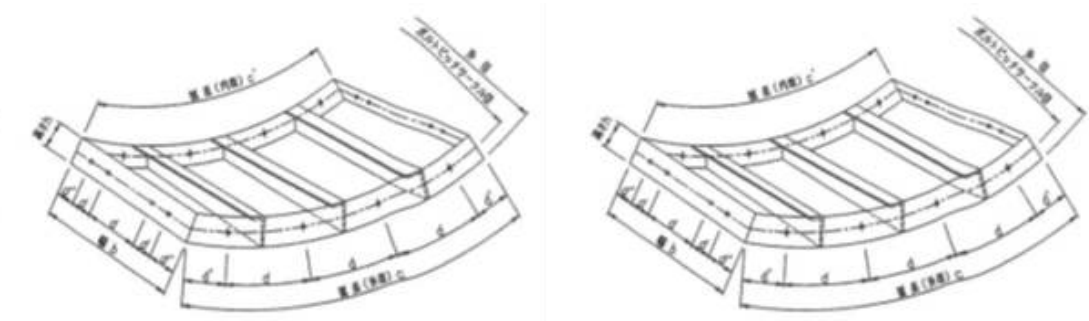
종 별	규격(JIS)	
Cement	R 5210	Portland Cement
	R 5211	고로 시멘트 A, B, C 3종
	R 5212	Silica Cement A, B, C 3종
	R 5213	Fly Ash Cement A, B, C 3종
강 재	G 3101	일반 구조용 압연 강재
	G 3106	용접 구조용 압연 강재
봉강 및 강선	G 3112	철근 콘크리트용 봉강
	G 3521	경 강선
	G 3532	철선
	G 3505	연강 선재
	G 3506	경강 선재
	G 3536	PC강선 및 PC강 꼬인선
Bolt Nut 및 Washer	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.[3)]

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	-
아일랜드형 전단키	± 1.0	-



(a) 콘크리트계 세그먼트 (b) 강재 세그먼트

그림 2.4 세그먼트 치수의 측정

2.2 세그먼트 조립방법

2.2.1 강연선 공급

(1) 강연선 쉴드터널 세그먼트의 강연선 공급은 자동 공급장치를 통해 수행되어야 한다.

(2) 강연선 자동 공급에 있어 쉴드 TBM의 작업에 영향을 미치지 않아야 한다.

(3) 터널의 연장 및 현장 여건을 고려하여 충분한 협의를 거친 경우 강연선의 인력 및 수동 공급이 가능하다.

※해설

강연선 쉴드터널의 효율적인 시공을 위해서는 쉴드TBM과 연계된 강연선 자동화 시스템이 필요하다. 이를 위해서는 쉴드TBM에 강연선 자동공급장치를 갖추어야 한다.

강연선 자동공급장치는 이렉터 회전을 고려하여 강연선을 2가지 경로로 공급될 수 있어야 하며, 강연선 유도 파이프(pipe)를 설치하여 후방 대차에 적재되어 있는 강연선을 이렉터까지 유도할 수 있어야 한다.

또한, 막장면에서는 이렉터의 움직임으로 대부분의 공정이 수행되기 때문에, 강연선 공급장치는 이렉터에 부착되도록 한다.

그림 2.5는 강연선 자동공급의 원리를 나타낸 것으로 시공시 필요한 사항들이다.

현장의 여건을 고려하여 터널의 연장이 짧거나, 공기의 여유가 충분할 경우, 자동공급장치의 사용이 불가능할 경우, 충분한 협의를 거쳐 강연선의 수동공급으로 작업수행이 가능하다.

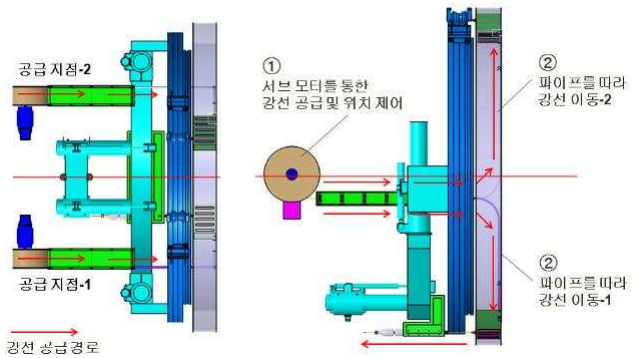


그림 2.5 강연선 자동공급 원리

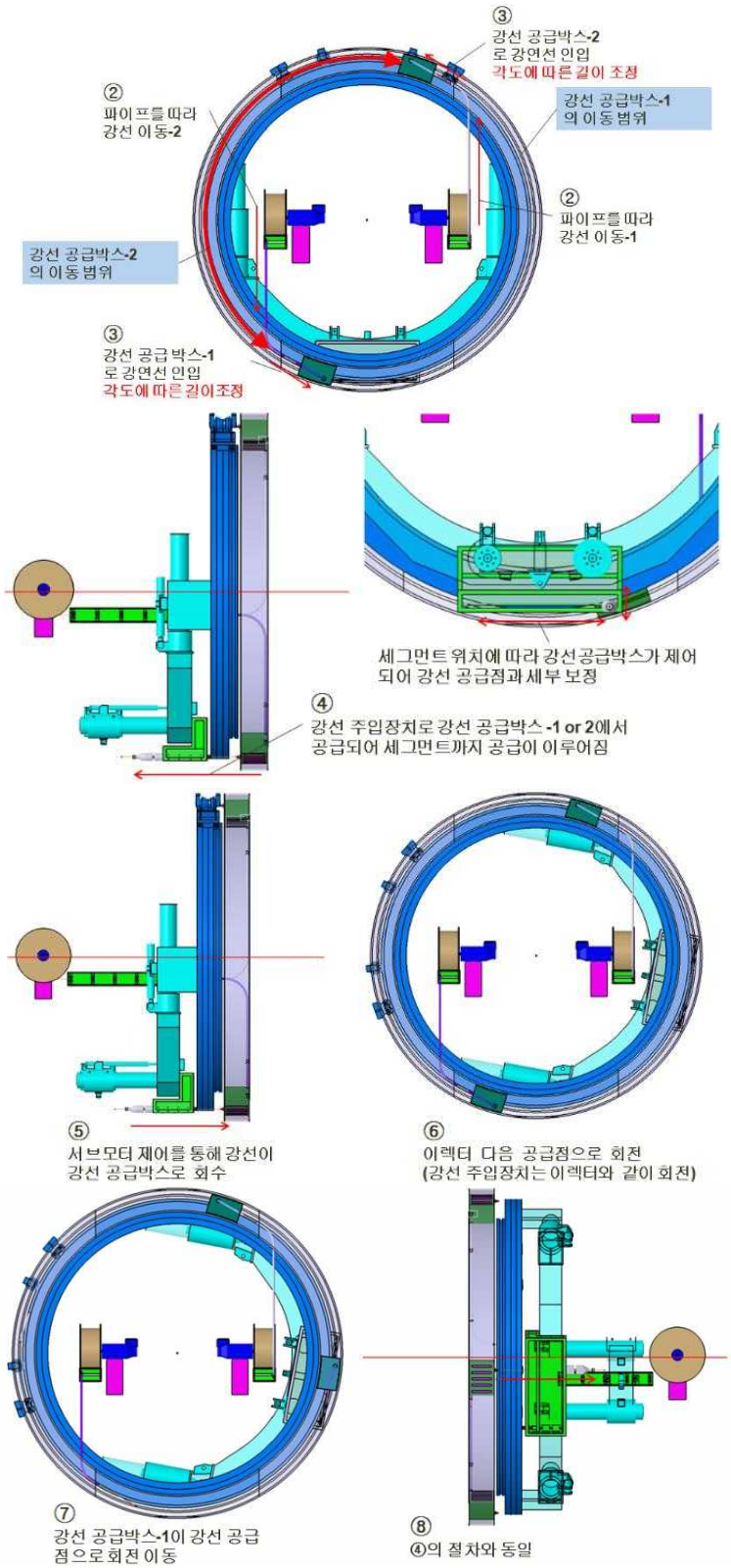


그림 2.5 강연선 자동공급 원리(계속)

2.2.2 강연선 긴장력

(1) 터널 구간내에서 가장 불리한 조건의 설계 하중에 대하여 산정된 세그먼트 단면 두께에 따라 강연선 긴장 시 제시된 긴장력을 참고하도록 한다.

(2) 제시된 세그먼트 긴장력 이상의 긴장력이 필요하다고 판단될 경우, 설계자와 구조검토 등의 충분한 협의를 거친 후 수행하도록 한다.

※해설

터널의 완성 후 장기간에 걸쳐 작용하는 토압, 수압, 세그먼트의 자중, 상재하중, 지반반력 등의 설계하중을 고려하여 세그먼트의 설계가 수행된다. 토피 및 지반의 조건 등은 구간내에서 터널의 축방향에 대하여 가장 불리한 조건을 대표 단면으로 선정하여 세그먼트를 설계하여 적용한다.[3] 또한 접속부 및 지층변화 구간, 파쇄대 구간에 대하여는 별도의 대표단면을 선정하여 설계되어 진다.

표 2.6은 조건에 따라 설계된 세그먼트의 강연선을 이용한 긴장 시 적용할 수 있는 긴장력에 대하여 가이드라인을 제시한다. K 세그먼트를 제외한 일반적인 세그먼트에는 강연선이 4열이 통과하며 긴장을 하게 되며, 0.5inch 7연선의 강연선 1열 당 적용되는 긴장력에 대하여 제시하였다.

쉴드터널의 목적이나 지반조건 등에 따라 제시된 조건보다 높은 긴장력의 적용 시, 강연선의 항복강도 내에서 수행하며, 충분한 구조검토와 협의가 이루어져야한다.

표 2.6 세그먼트 두께에 따른 강연선 긴장력 제시

세그먼트 두께 (mm)	100~150	150~200	200~250	250 초과
1열 당 긴장력 (Ton)	10	11	12	13

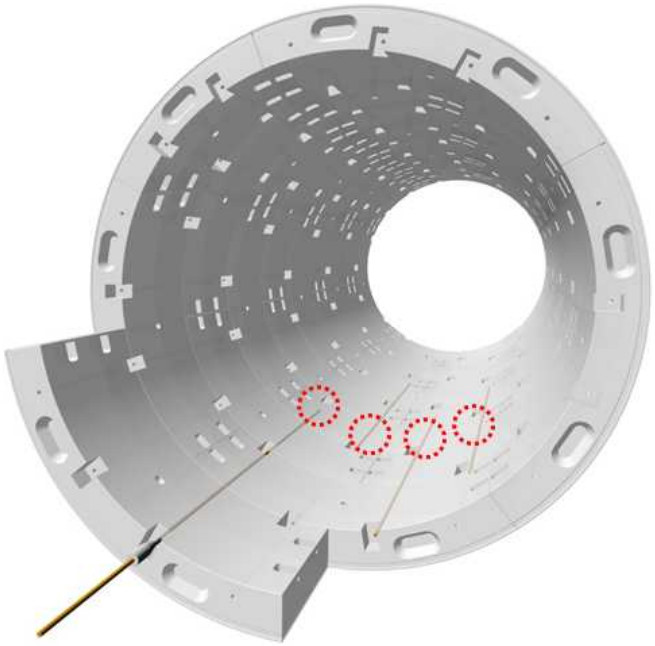


그림 2.6 4번의 긴장력이 작용한 세그먼트

2.2.3 강연선 그라우팅

(1) 터널의 사용 목적에 따라 녹방지 가 필요한 경우 시공이 완료된 후에 강연선에 그라우팅 처리 및 녹방지 처리가 된 강연선을 사용하여 시공한다.

(2) 녹발생으로 인한 강연선의 기능저하는 극히 미미하므로 현장의 상황 및 터널의 목적을 고려하여 녹방지 처리에 대한 적용 여부를 결정한다.

※해설

배수터널 등의 터널의 사용 목적에 따라서 강연선의 부식을 차단하거나, 터널의 일체화를 통한 강성 증진 및 강연선 체결부의 긴장력 손실을 줄이고자 하는 경우 세그먼트 제작 시 그림 2.7과 같이 그라우트 주입홀을 형성하여 강연선의 긴장이 완료된 후 그라우트재를 주입한다. 그라우팅을 통하여 강연선의 부식 방지 및 강연선과 강관의 일체화로 인하여 터널 전체의 일체거동효과가 상승한다. 녹발생으로 인한 강연선의 강도저하는 극히 미미[3]하므로 특수한 목적에 의한 경우가 아니면 선택하여 시공이 가능하다.

그라우트 주입홀은 세그먼트의 블록아웃이 있는 부분에만 형성하여 4개의 세그먼트 당 주입홀과 배출홀 2개로 형성된다. 세그먼트를 통과하는 모든 강연선에 대하여 작업이 수행되어 진다. K 세그먼트는 2개의 세그먼트, 일반 세그먼트는 4개의 세그먼트마다 그라우트가 주입된다. 또한 작업자의 안정성을 확보하기 위하여 현재 조립중인 링에서 최소 4링의 간격을 두고 그라우팅 처리를 하기를 권고한다.

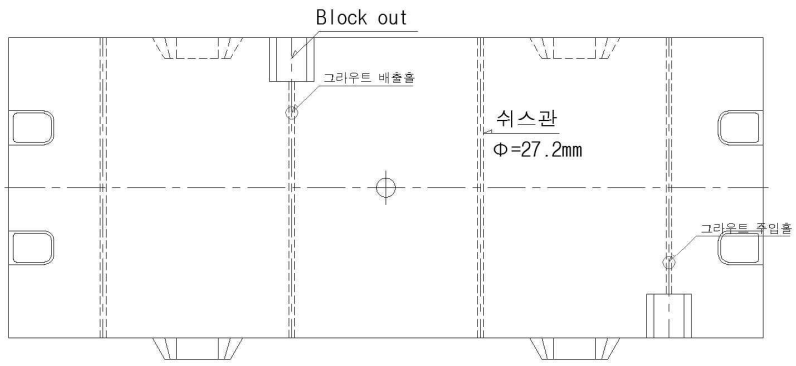


그림 2.7 세그먼트에 형성된 그라우트 홀

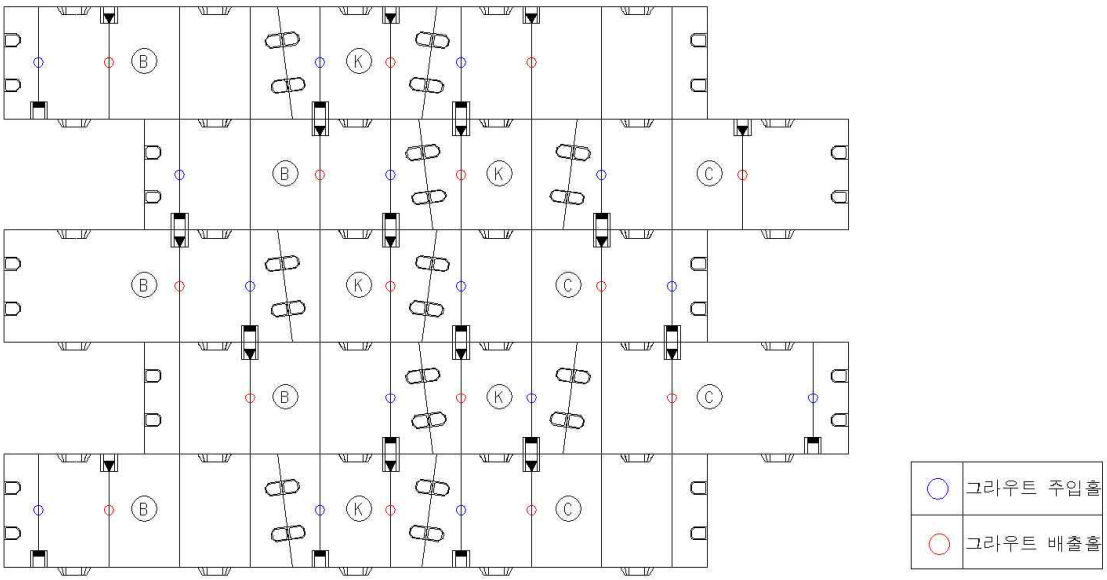


그림 2.8 그라우트 홀 배치도

국내시방규정은 그라우트의 품질을 유동성, 블리딩률, 팽창률, 압축강도, 염화물 함유량의 5개 시험항목으로 나누고 있다. 시방규정에 의하면 그라우트의 유동성은 시공계획서에 따라 결정되며 블리딩 수의 발생을 0%로 제한하고 있다. 또한, 그라우트의 팽창을 최대 10%까지 허용하며 재료팽창에 따른 강도저하를 허용하고 있다. 표 2.7은 그라우트 품질에 관한 국내시험항목 및 허용치로서 그라우트 처리 시 참조하여 사용한다.[4)]

표 2.7 그라우트 품질 시험항목 및 허용치

구 분	방 법	기 준
Fluidity	KS F 2432	시공 규정
Bleeding	KS F 2433	0%
Volume change	KS F 2433	Expansive type : 0~10% Non-expansive type : no requirement
Compressive strength	KS F 2426	Expansive type : 20 MPa@28 days Non-expansive type : 30 MPa@28 days
Chloride ion contents	KS F 4009 appendix 1	0.08% by weight of cement (or 0.3 kg/m^3)

2.2.4 조립 순서

(1) 강연선 쉴드터널 세그먼트의 체결은 강연선공급, 긴장, 절단의 순서가 반복되어야 한다.

(2) 강연선 자동공급자치는 쉴드TBM과 연계하여 작업이 가능해야 한다.

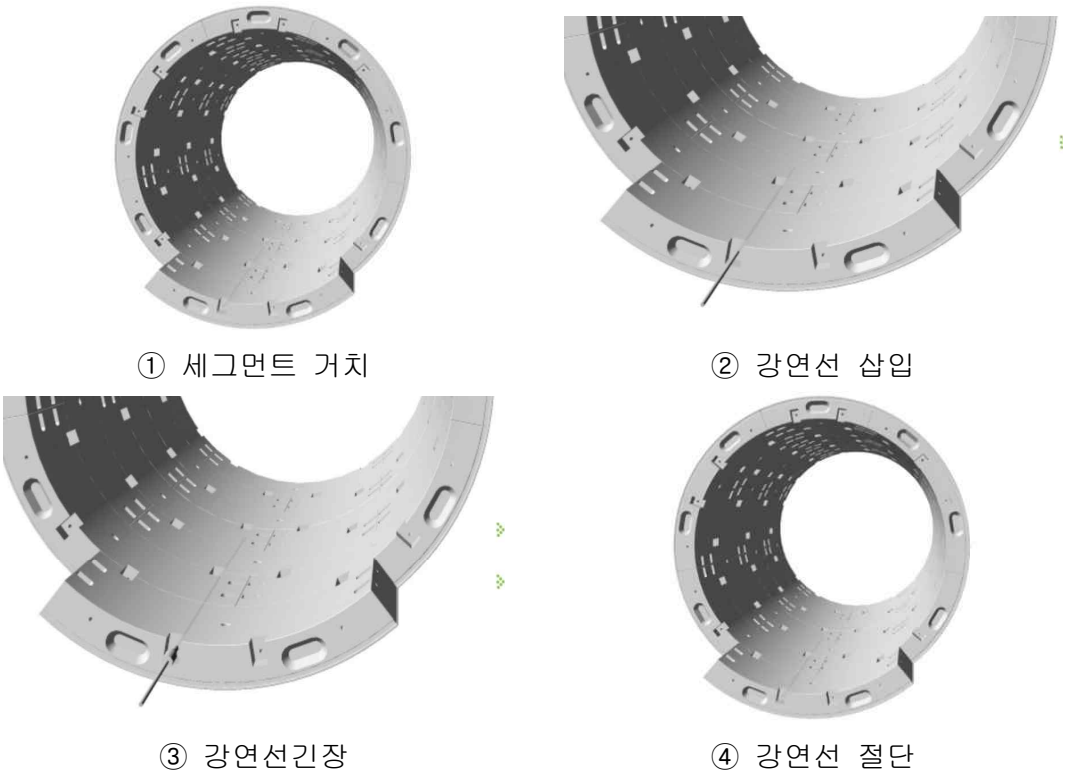
(3) 현장상황에 따라 강연선 공급방식은 변경이 가능하다.

※해설

세그먼트 조립 순서는 기존 볼트 체결방식 쉴드터널과 같은 과정으로 진행하며, 종방향 세그먼트간 체결 과정에서 볼트 대신 강연선을 긴장하여 체결한다.

그림 2.9와 같은 순서를 반복하여 하나의 링이 형성되며, 다음 링도 같은 방법으로 조립이 수행되어진다. 하나의 강연선은 그 4개의 세그먼트를 통과하여 체결시켜야 한다. 4열의 강연선의 의하여 4번의 긴장력으로 체결되어야한다.

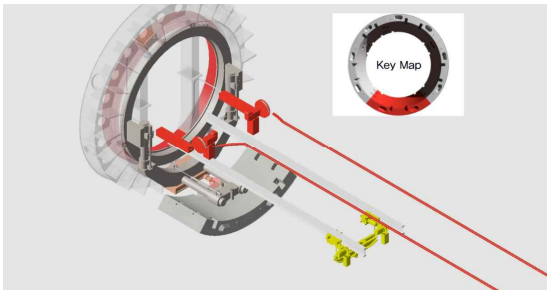
그림 2.10은 쉴드TBM 연동 강연선 자동화 시스템의 세그먼트 조립 순서이다.



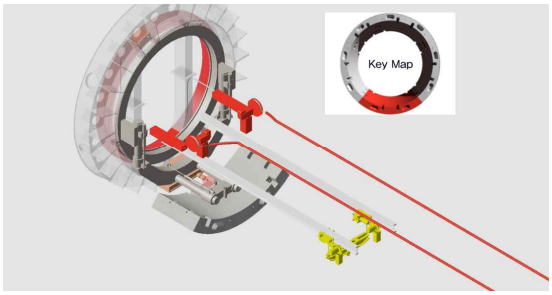
① 세그먼트 거치　② 강연선 삽입

③ 강연선긴장　④ 강연선 절단

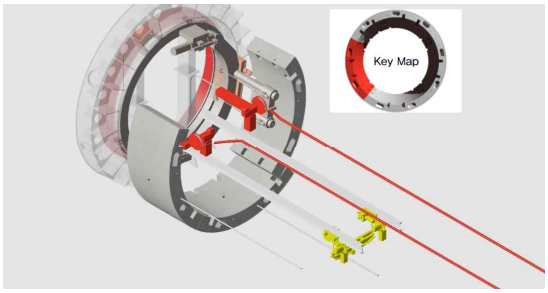
그림 2.9 강연선 쉴드터널 세그먼트 조립 순서



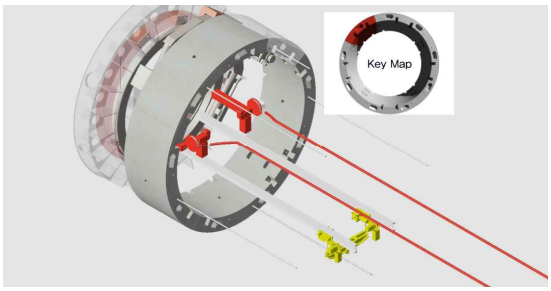
① 세그먼트 거치



② 강연선 공급



③ K세그먼트 거치



④ 강연선 공급

그림 2.10 쉴드TBM 연동 강연선 자동화 시스템

2.2.5 시공 사례

그림 2.11은 지상에서의 수행된 강연선 쉴드터널 시공 사례로서 시공공정에 대하여 보여준다.



(a) 세그먼트 적재



(b) 크래인 이용 세그먼트 운반



(c) 지게차 이용 세그먼트 운반



(d) 이렉터 이용 세그먼트 거치



(e) 횡방향 볼트박스 체결



(f) 종방향 강연선 체결



(g) 완성된 쉴드터널 외부



(h) 완성된 쉴드터널 내부

그림 2.11 강연선 쉴드터널 시공 사례

제3장 시공 · 유지 관리

3.1 시공관리

강연선 쉴드터널 시공 관리는 아래 항목에 대하여 신중히 실시하도록 한다 (1) 공정관리 (2) 품질관리 (3) 선형관리 (4) 쉴드 및 쉴드 설비의 유지관리 (5) 작업 관리

※해설

가. 공정 관리[1)]

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 기능 상 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.

3.2 유지관리 항목

(1) 쉴드터널의 유지관리는 대부분 NATM 터널의 유지관리 항목과 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.[2)] 제시된 항목에 대한 전문가의 자문의견을 취합한 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 균열

균열은 콘크리트 구조물에서 가장 빈번하게 발생하는 변상으로 쉴드터널의 경우 그 발생위치에 따라 위험 수준이 다르다. 이에 대한 전문가 의견 조사결과 쉴드터널에서 균열 항목을 평가할 때 세그먼트 중앙부, 세그먼트 모서리부, 볼트 연결부로 구분하여 평가해야한다는 의견이 가장 많았다.

나. 누수

쉴드터널에서 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.[3)]

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.

3.3 강연선 유지관리

(1) 강연선 쉴드터널의 유지관리는 체결재를 제외하고는 기존 쉴드터널 유지관리항목과 유사하다.

(2) 강연선의 긴장력에 대한 지속적인 유지관리가 필요하다.

※해설

가. 강연선의 녹방지

강연선 쉴드터널 역시 기존 쉴드터널과 유지관리 항목은 같으며, 강연선의 상태에 대한 항목이 추가되어야 한다.

KS D 7002기준[2]에 따르면 강연선의 기계적 성질에 대한 규정만 있을 뿐, 부식으로 인한 성능저하에 대한 내용은 없다. 교량분야에서는 통상적으로 긴장력을 도입한 강연선에 대해서는 적절한 시간 내에 그라우팅을 실시하여, 긴장력이 도입된 상태로 부식환경에 노출되는 경우를 방지하도록 하고 있으며, 국내의 경우도 이를 감안하여 응력을 도입한 후에는 즉시 그라우팅을 주입하여 강연선이 부식되는 환경을 원천적으로 차단하고 있다.[3]

강연선의 녹방지 방안으로서 그림 3.1에서와 같이 에폭시 코팅을 한 강연선을 사용하여 강연선 부식을 사전에 차단하는 방법과 그림 3.2에서와 같이 시공이 완료된 후에 초속경 특수 시멘트를 사용하여 블록아웃(Block out)부를 매립하여 강연선 부식 및 긴장력 손실을 통해 유지관리가 가능하다.



그림 3.1 부식방지용 에폭시 도막 강연선

참고문헌

제1장 설계 매뉴얼

1) 오진우, 강형우, 노우성, 박상태 (2000), 토목구조물 설계 표준 동해설 실드터널 편, 과학기술

2) 한국터널공학회 (2007), 터널설계기준

3) 한국콘크리트학회 (2007), 콘크리트구조설계기준

4) 일본지반공학회 (2012) 실드터널

5) http://www.ktas.kr/ (KTA 홈페이지)

6) 한국콘크리트학회 (2012), 콘크리트구조기준

7) ITA (2004), GUIDELINES FOR STRUCTURAL FIRE RESISTANCE FOR ROAD TUNNELS

제2장 시공 매뉴얼

1) JIS기준 (일본 산업규격)

2) 한국콘크리트학회 (2009), 콘크리트 표준시방서

3) David P. Billington (2004). "Historical perspective on prestressed concrete", PCI Journal Vol1. pp.14~30.

4) KS기준 (한국산업규격)

제3장 쉴드터널의 유지 관리

1) 일본지반공학회 (2012) 실드터널

2) 한국시설안전공단 (2013), 특수굴착터널(쉴드터널) 성능평가기준 및 유지관리 매뉴얼 개발

3) 한국터널공학회(2009), "터널표준시방서"

강연선 체결 쉴드터널 표준단면 설계

-전력구 터널

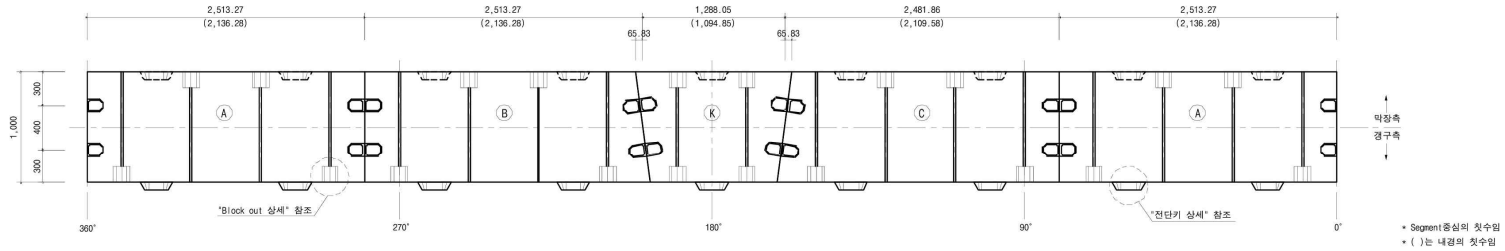
-지하철 터널

표준 세그먼트 일반도(1)

표준 세그먼트 일반도 (1)

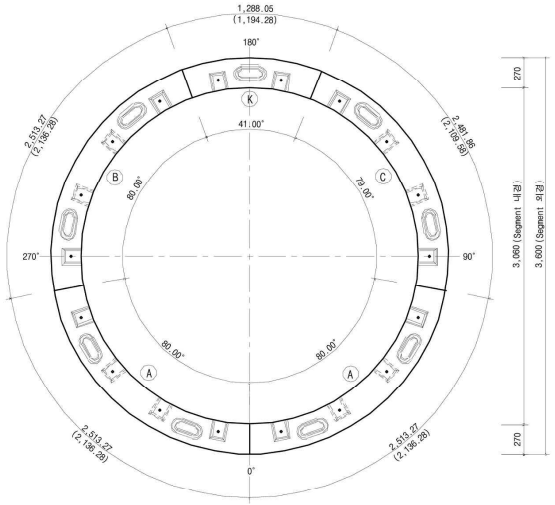
S=1:20

세그먼트 전개도



* Segment중심의 칫수임
* ( )는 내경의 칫수임

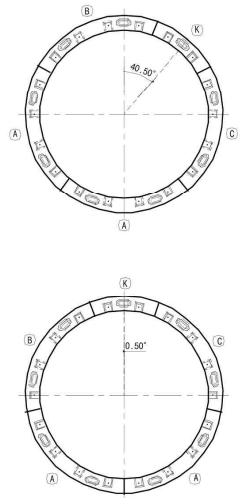
세그먼트 표준 단면도



* ( )는 내경의 칫수임

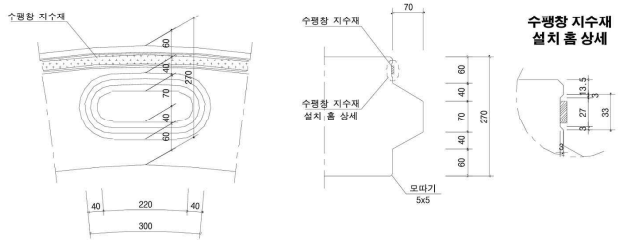
세그먼트 조립도

S=NONE



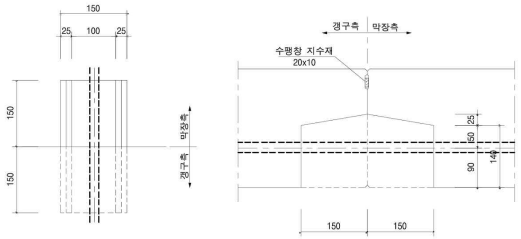
전단키 상세

S=NONE



Block out 상세

S=NONE



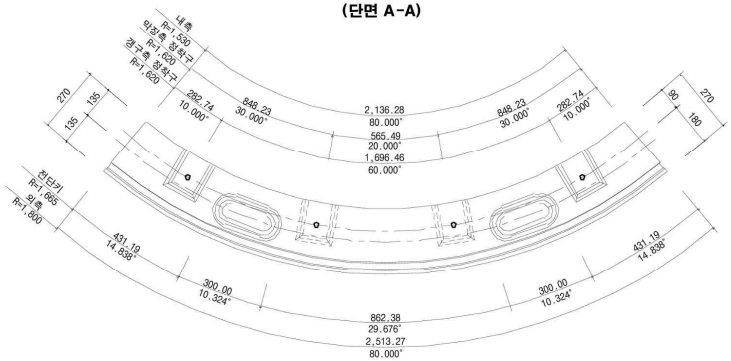
* 모든 구조물의 모서리는 5x5mm의 모따기를 수행한다.
* 수팽창 고무지수재의 규격을 고려하여 설치위치에 미리 홈을 설치하도록 한다.
* 시공전 세그먼트 제작도를 작성하여야 하며, 접합이 원활하도록 시험을 실시하도록 한다.
* 정착구, 볼트박스 등 부속자재는 세그먼트 제작전에 제원을 확인하고 제작도면에 반영하여야 한다.

표준 세그먼트 일반도 (2)

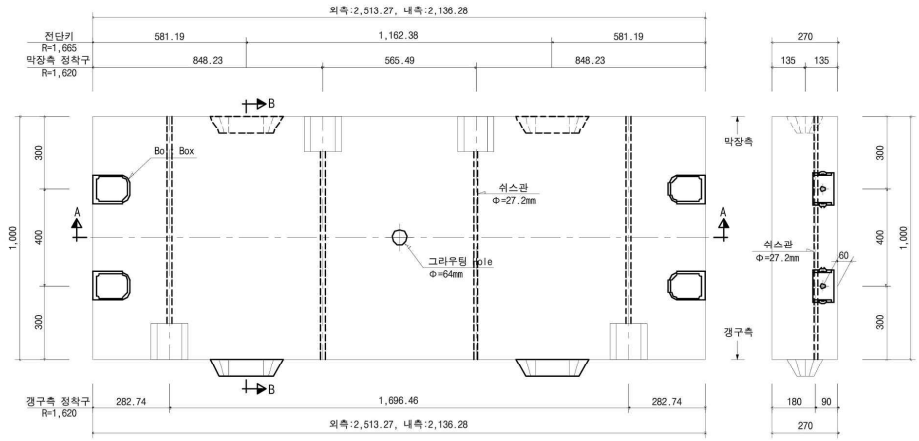
S=1:10

TYPE-A
(Ring-04 ~ 20)

정 면 도
(단면 A-A)



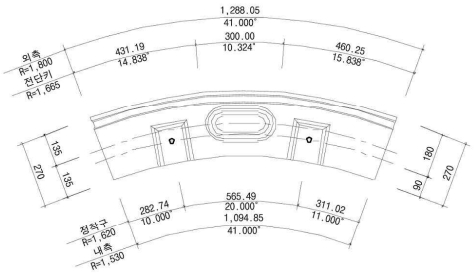
평 면 도



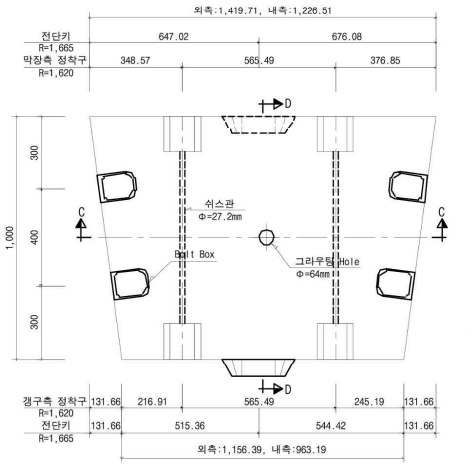
측 면 도
(단면 B-B)

TYPE-K
(Ring-04 ~ 20)

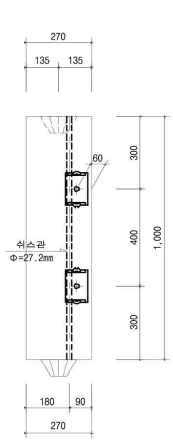
정 면 도
(단면 C-C)



평 면 도



측 면 도
(단면 D-D)

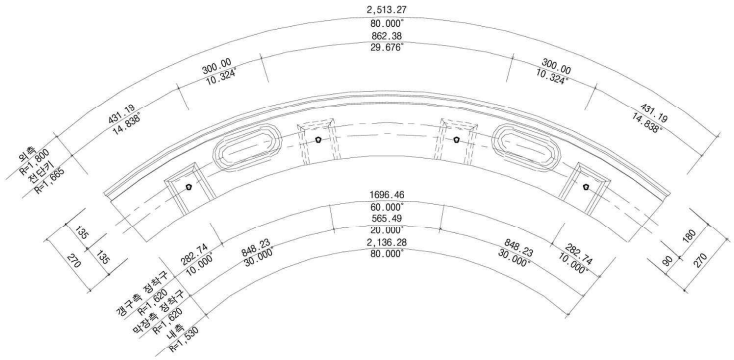


표준 세그먼트 일반도 (3)

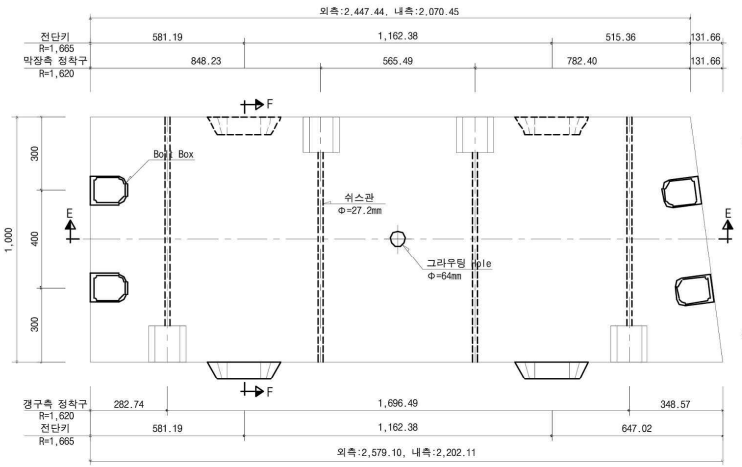
S=1:10

TYPE-B
(Ring-04 ~ 20)

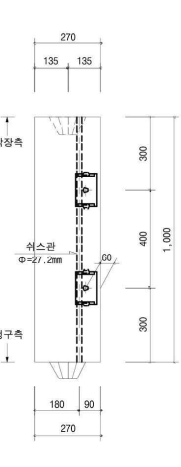
정면도
(단면 E-E)



평면도

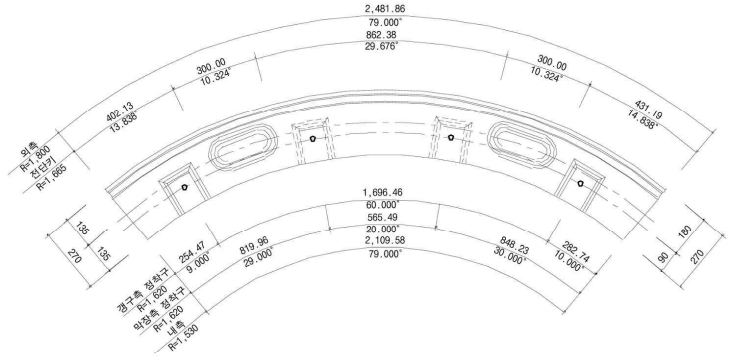


측면도
(단면 F-F)

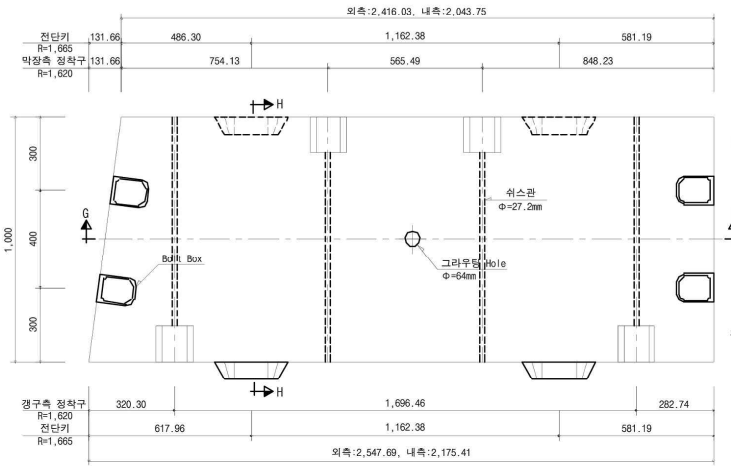


TYPE-C
(Ring-04 ~ 20)

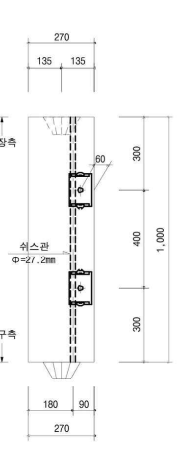
정면도
(단면 G-G)



평면도



측면도
(단면 H-H)

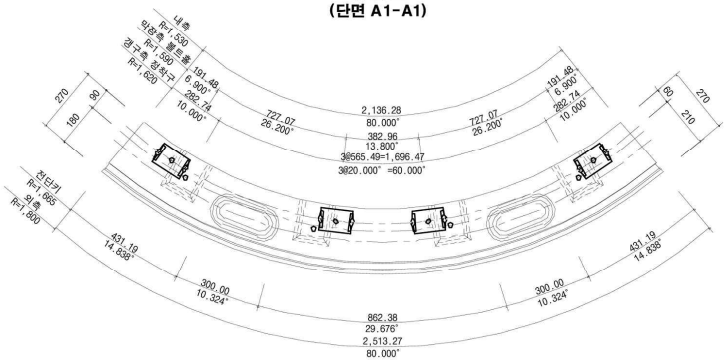


표준 세그먼트 일반도 (4)

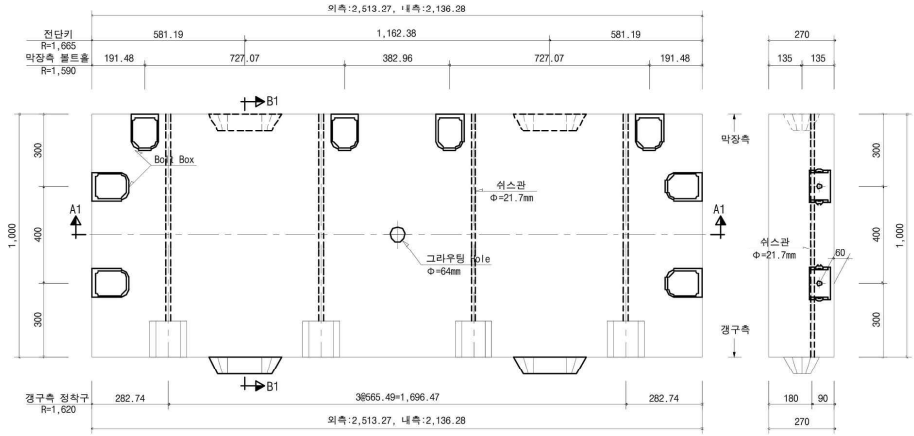
S=1:10

TYPE-1A
(Ring-01)

정면도
(단면 A1-A1)



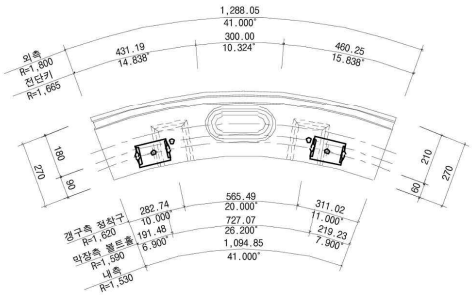
평면도



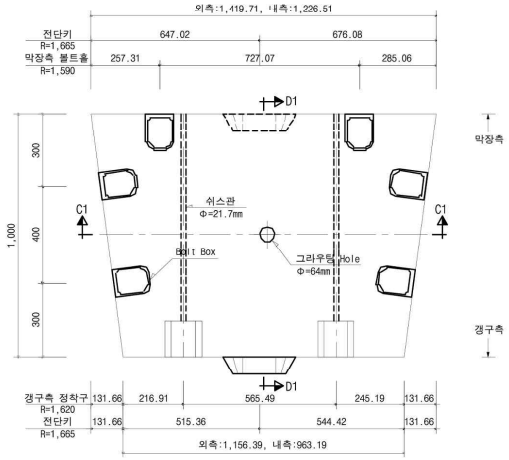
측면도
(단면 B1-B1)

TYPE-1K
(Ring-01)

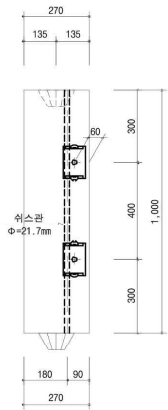
정면도
(단면 C1-C1)



평면도



측면도
(단면 D1-D1)

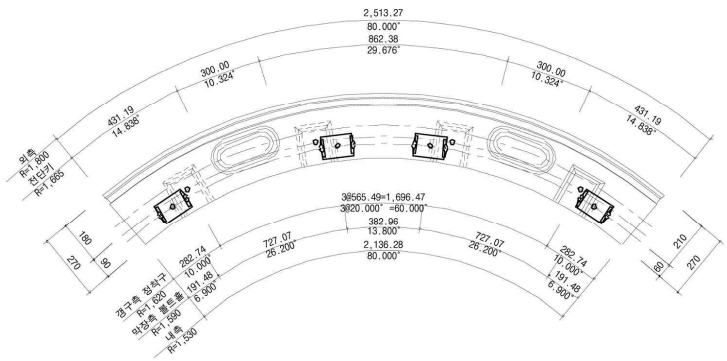


표준 세그먼트 일반도 (5)

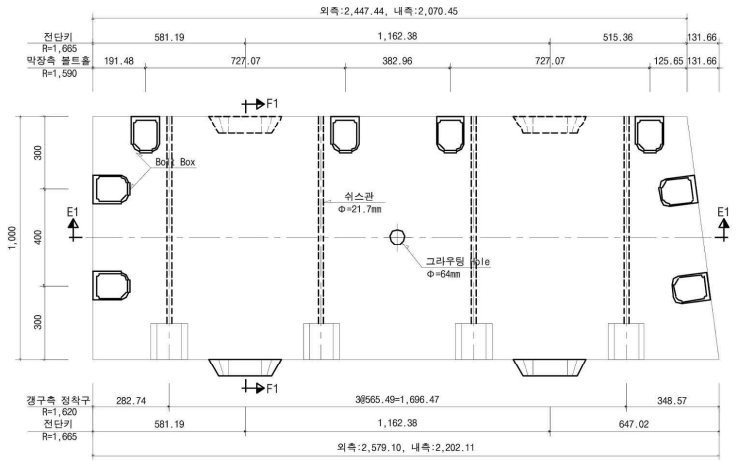
S=1:10

TYPE-1B
(Ring-01)

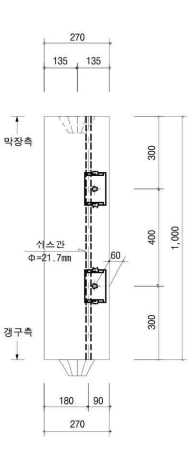
정 면 도
(단면 E1-E1)



평 면 도

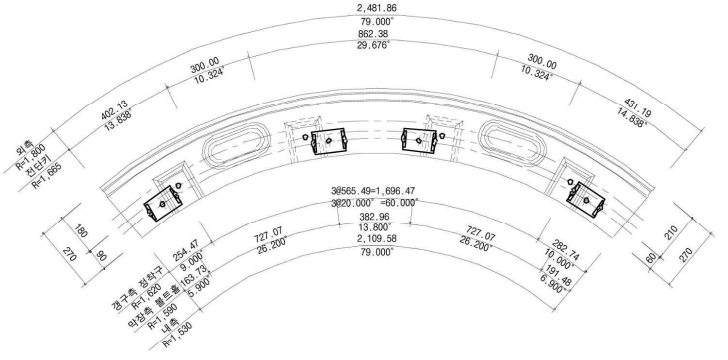


측 면 도
(단면 F1-F1)

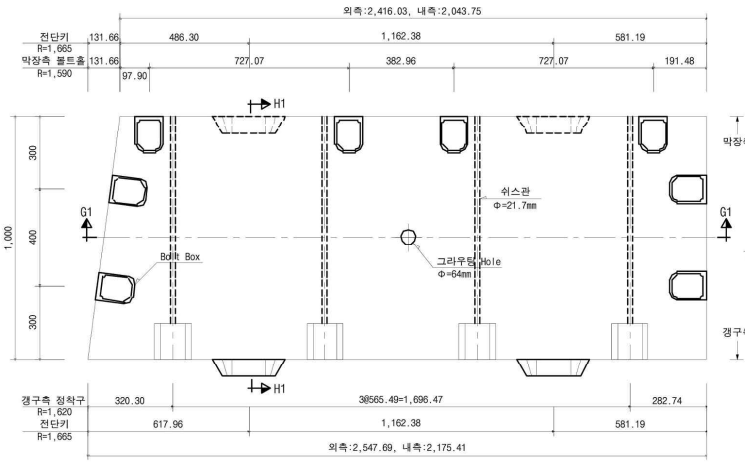


TYPE-1C
(Ring-01)

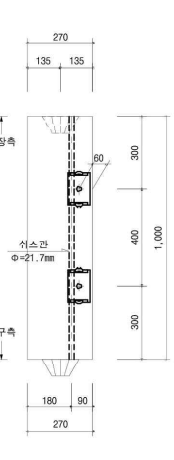
정 면 도
(단면 G1-G1)



평 면 도



측 면 도
(단면 H1-H1)

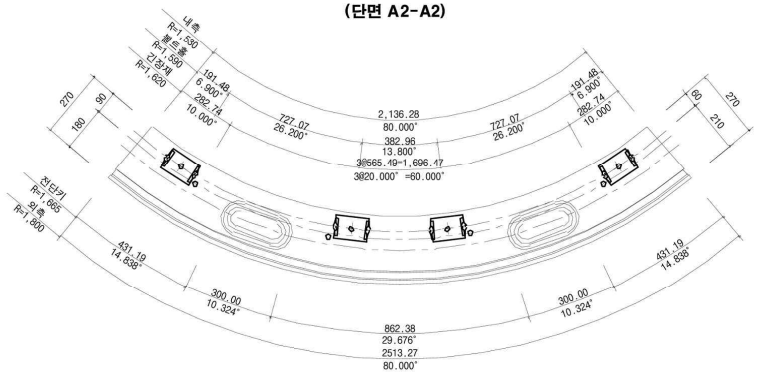


표준 세그먼트 일반도 (6)

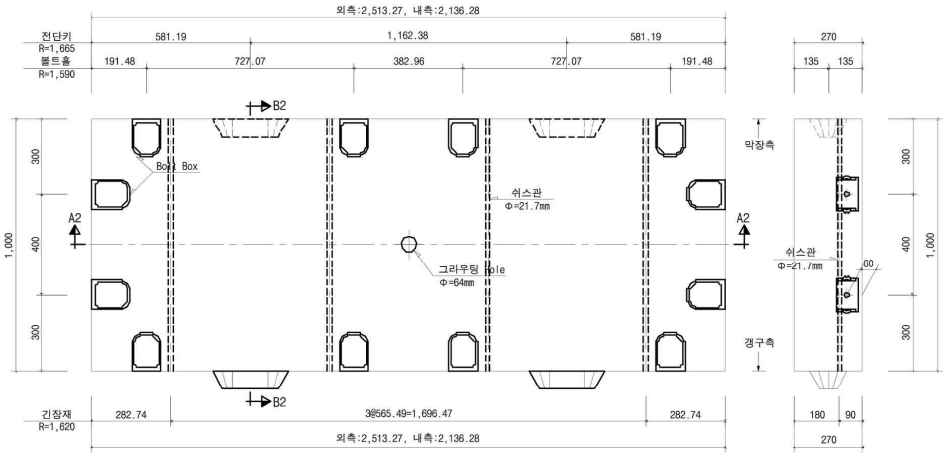
S=1:10

TYPE-2A
(Ring-02)

정면도
(단면 A2-A2)



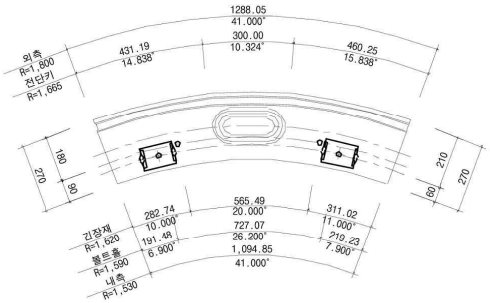
평면도



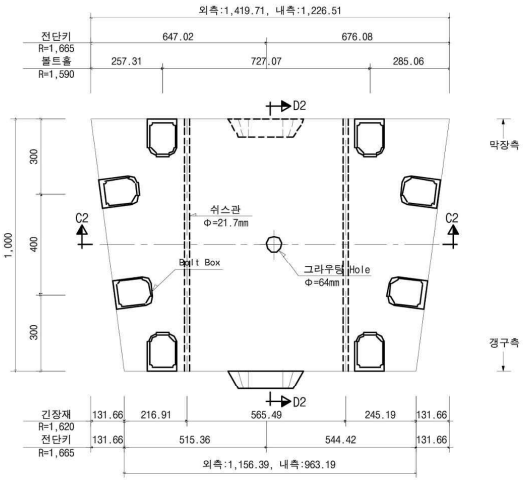
측면도
(단면 B2-B2)

TYPE-2K
(Ring-02)

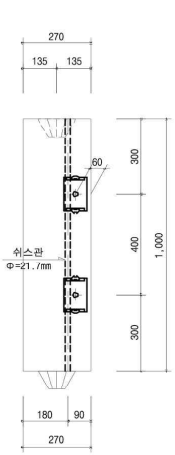
정면도
(단면 C2-C2)



평면도



측면도
(단면 D2-D2)

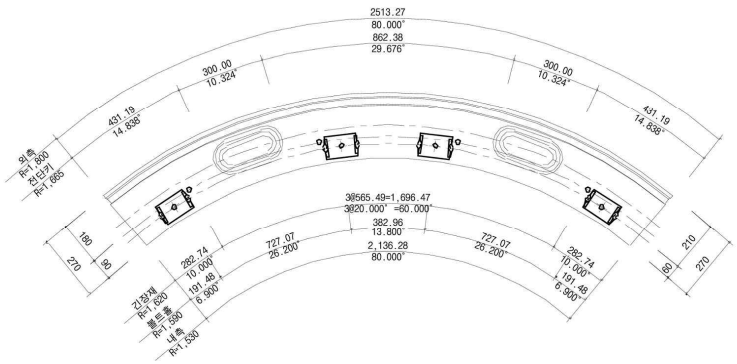


표준 세그먼트 일반도 (7)

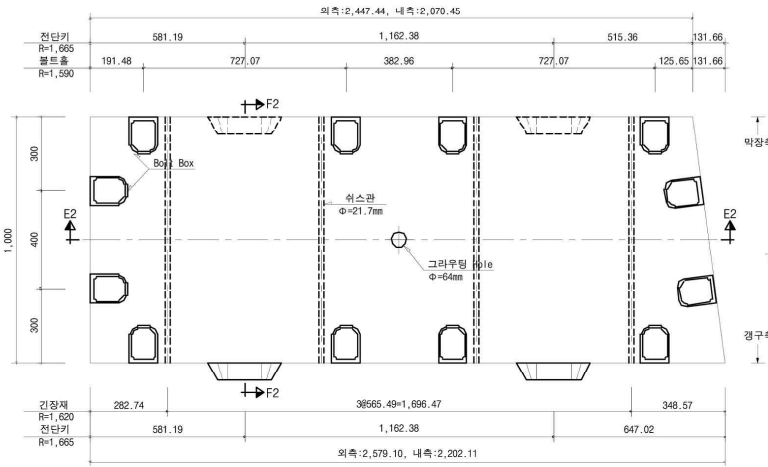
S=1:10

TYPE-2B
(Ring-02)

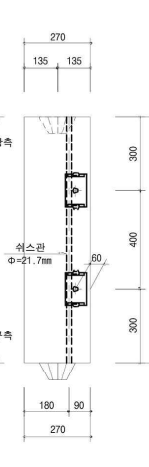
정 면 도
(단면 E2-E2)



평 면 도

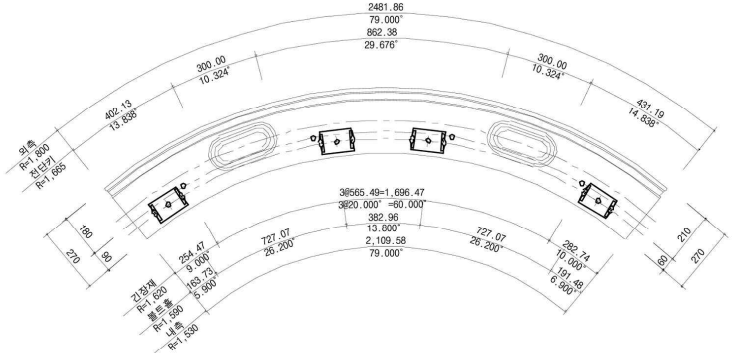


측 면 도
(단면 F2-F2)

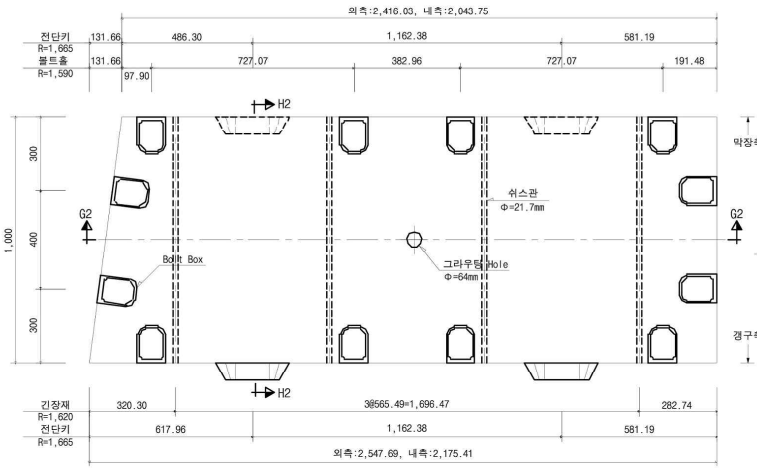


TYPE-2C
(Ring-02)

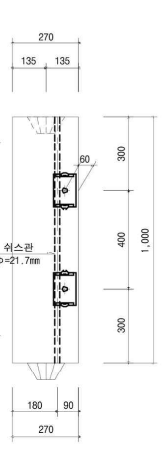
정 면 도
(단면 G2-G2)



평 면 도



측 면 도
(단면 H2-H2)

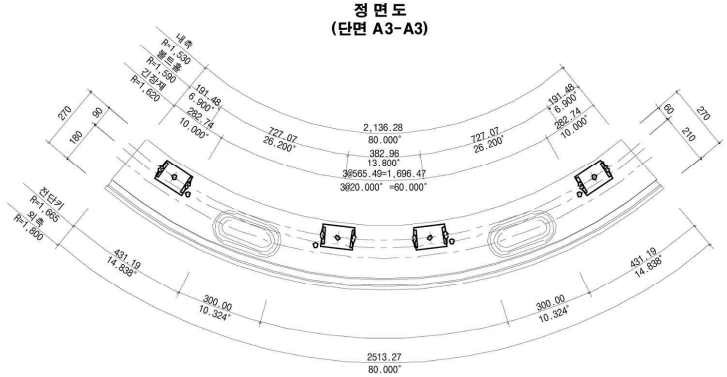


표준 세그먼트 일반도 (8)

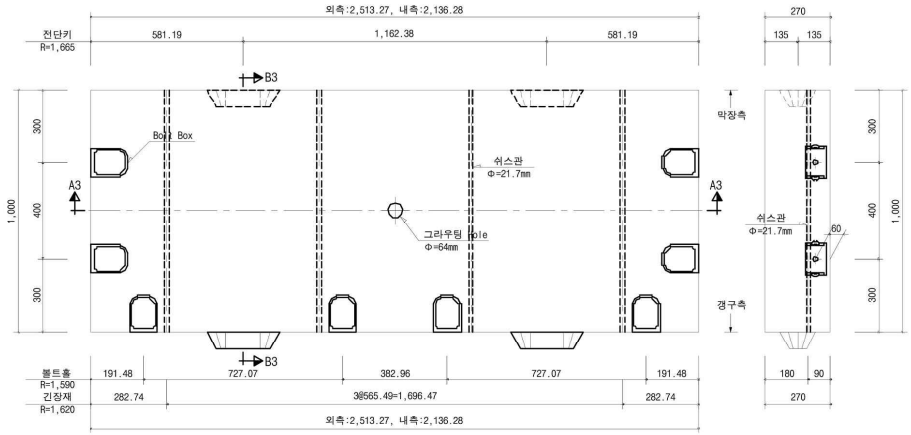
S=1:10

TYPE-3A
(Ring-03)

정 면 도
(단면 A3-A3)



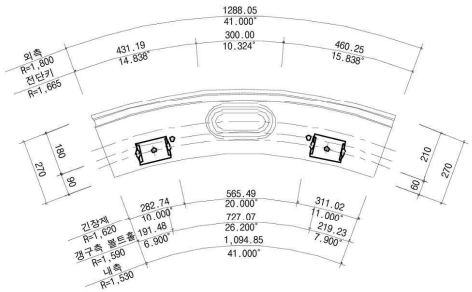
평 면 도



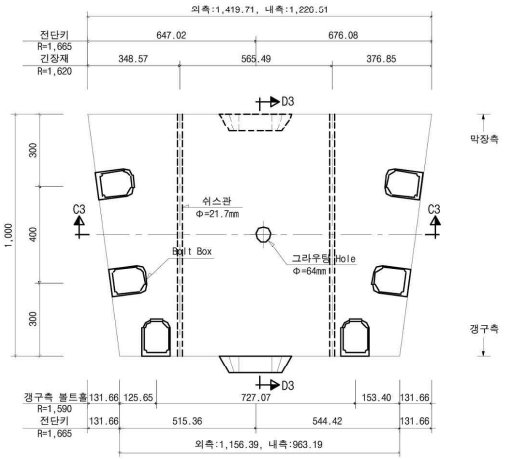
측 면 도
(단면 B3-B3)

TYPE-3K
(Ring-03)

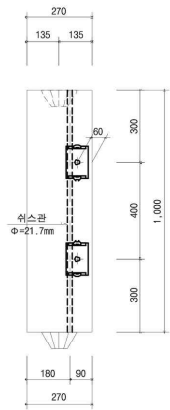
정 면 도
(단면 C3-C3)



평 면 도



측 면 도
(단면 D3-D3)

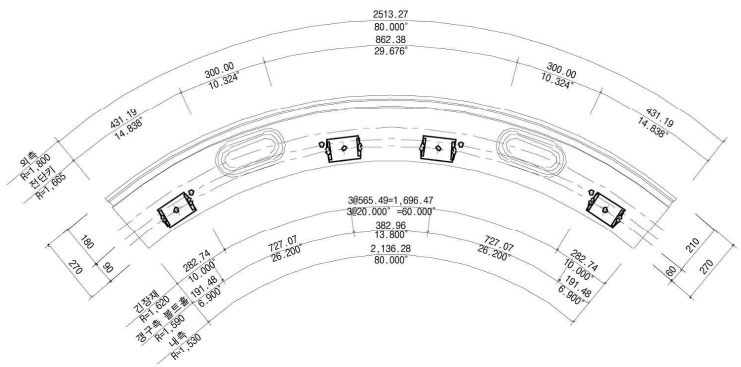


표준 세그먼트 일반도 (9)

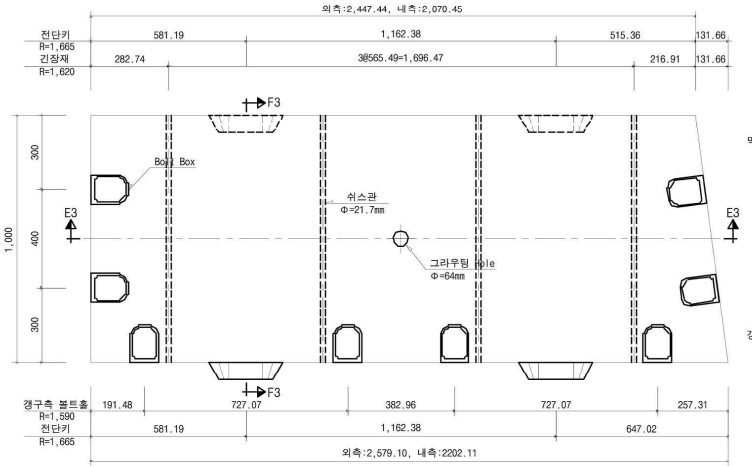
S=1:10

TYPE-3B
(Ring-03)

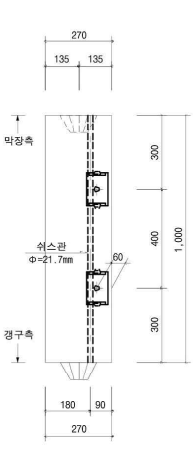
정면도
(단면 E3-E3)



평면도

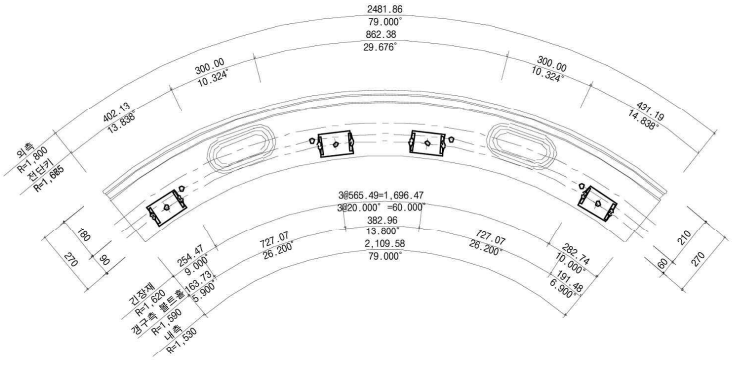


측면도
(단면 F3-F3)

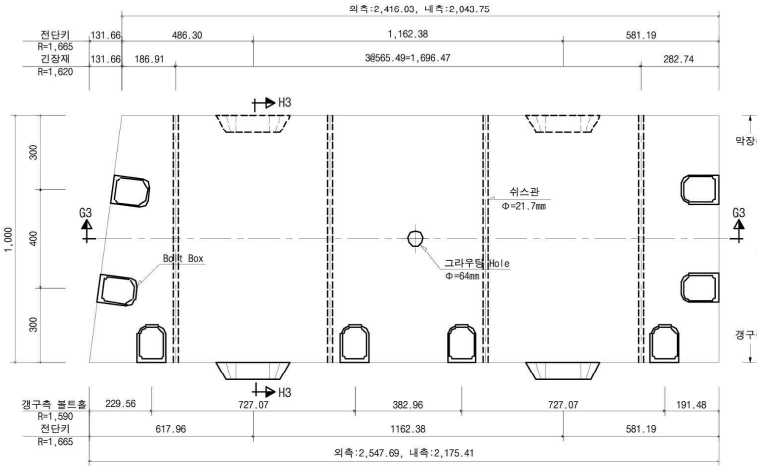


TYPE-3C
(Ring-03)

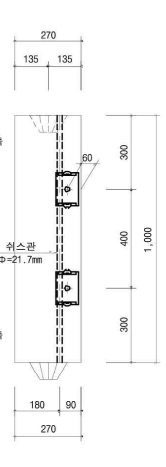
정면도
(단면 G3-G3)



평면도



측면도
(단면 H3-H3)



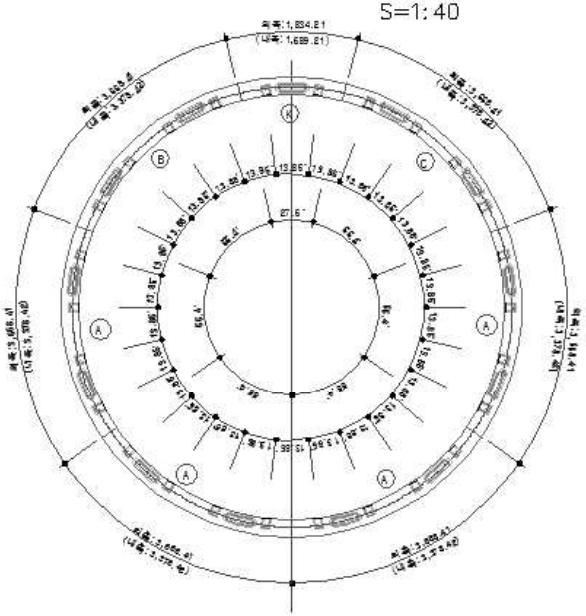
표준 세그먼트 일반도(1)

표준 세그먼트 일반도 (1)

S=1:40

세그먼트 표준 단면도

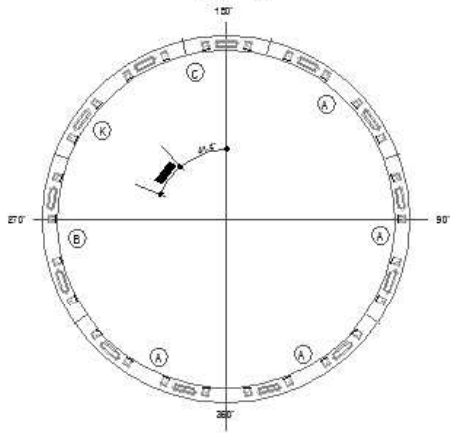
S=1:40



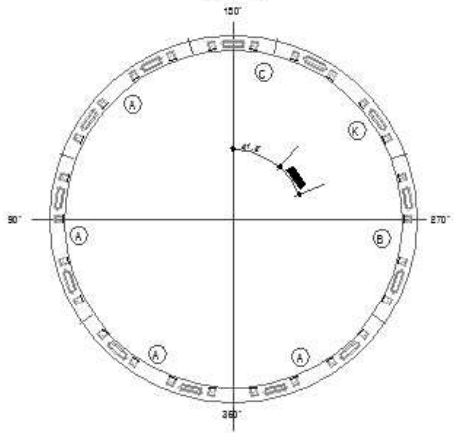
링간 조립방식

S=1:50

SET-A

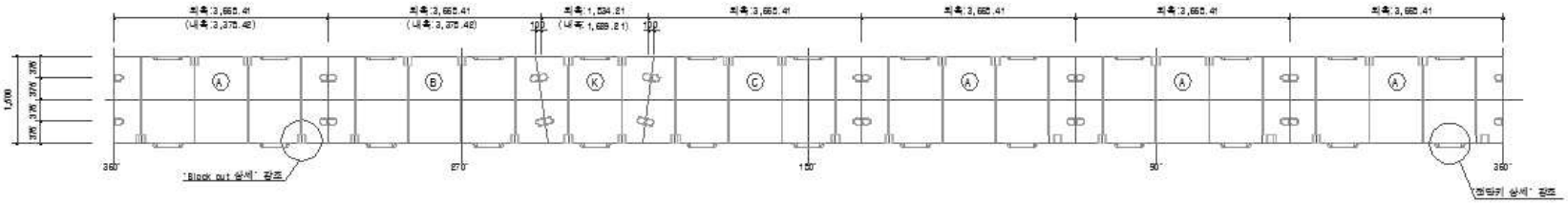


SET-B



조립 세그먼트 전개도

S=1:40

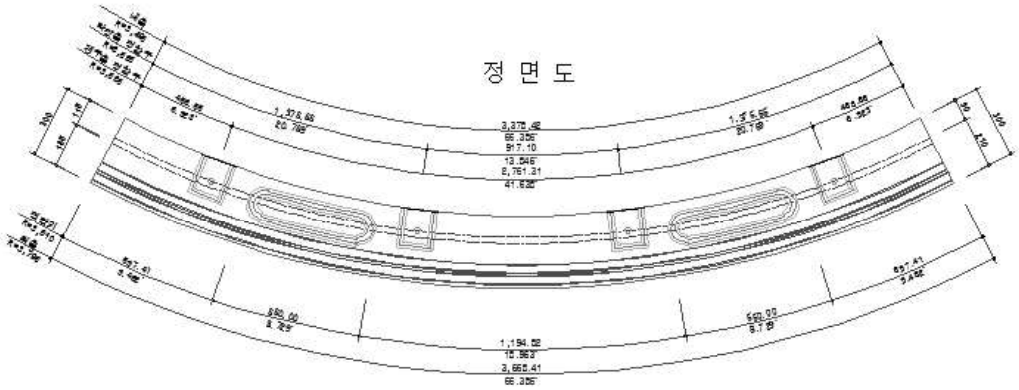


표준 세그먼트 일반도 (2)

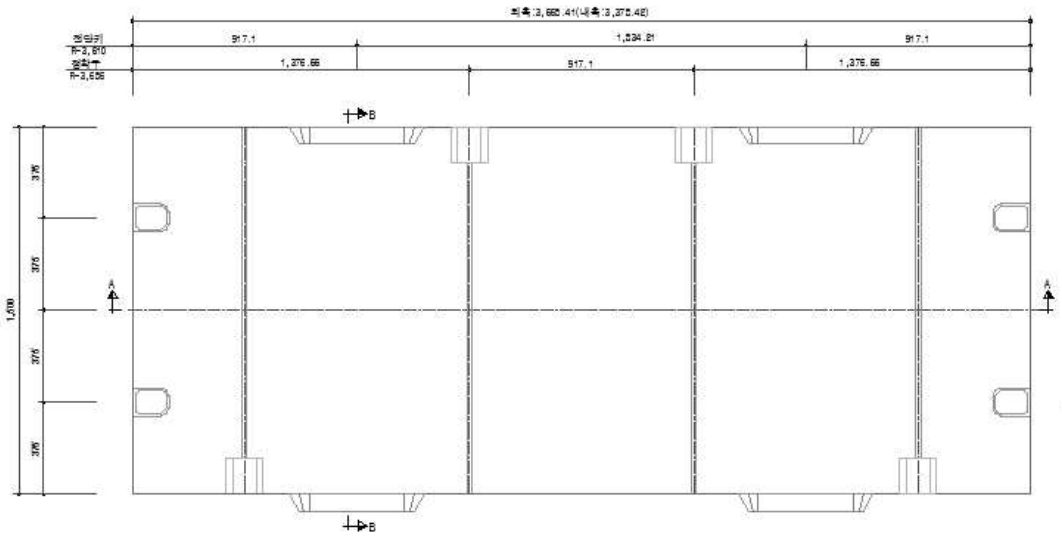
S=1:10

TYPE-A
(단면 A-A)

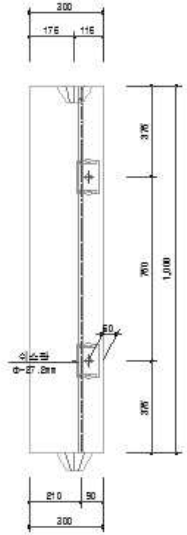
정 면 도



평 면 도



측 면 도
(단면 B-B)

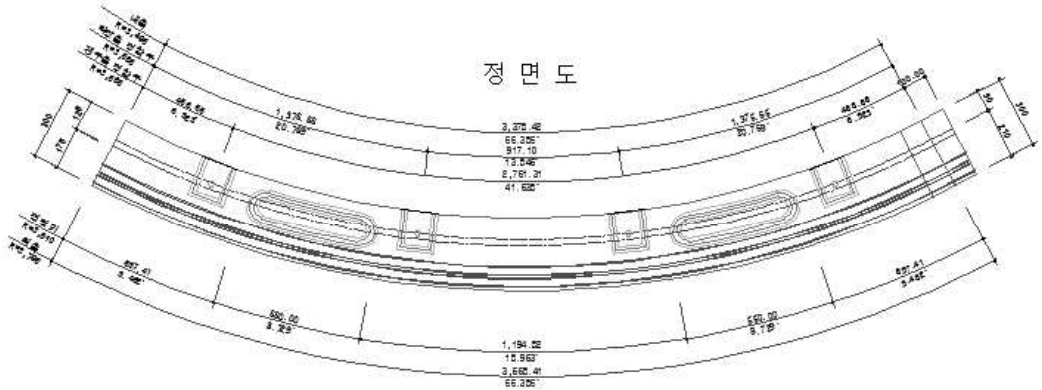


표준 세그먼트 일반도 (3)

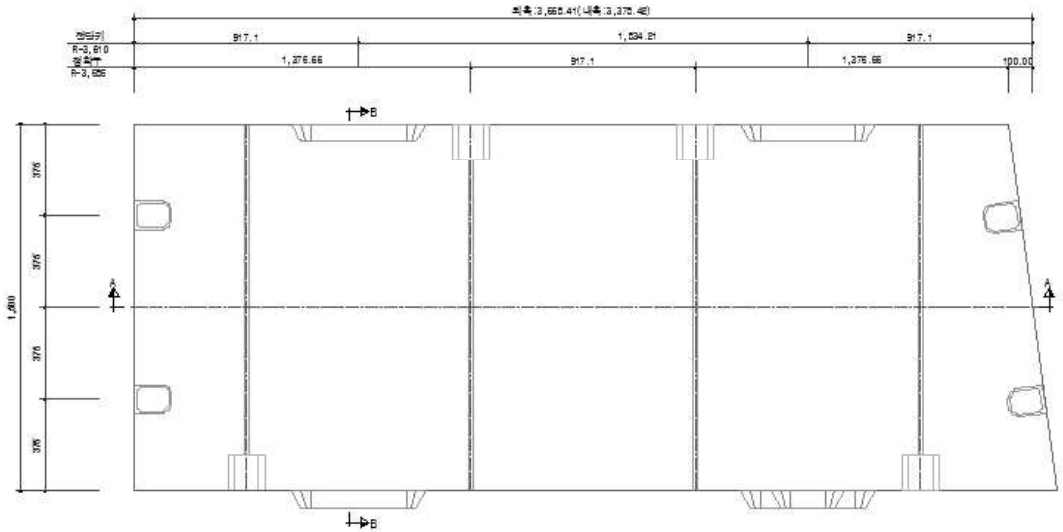
S=1:10

TYPE-B
(단면 A-A)

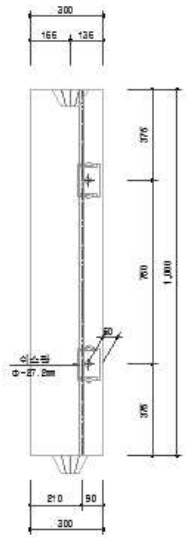
정 면 도



평 면 도



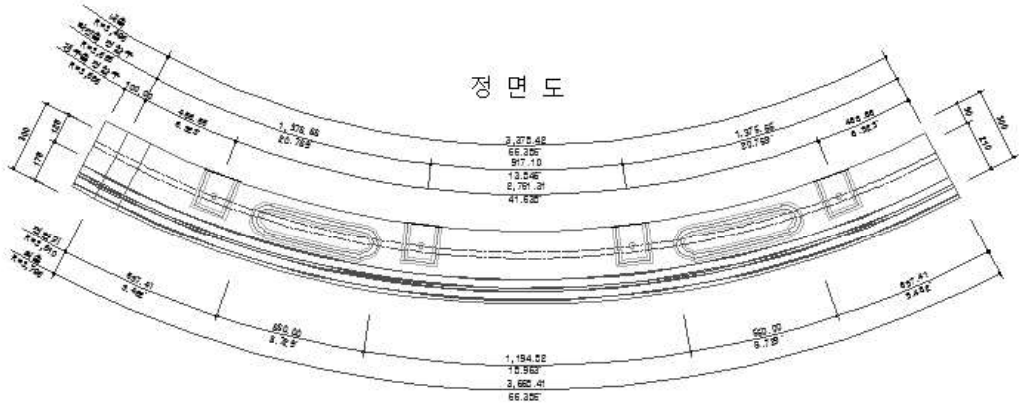
측 면 도
(단면 B-B)



표준 세그먼트 일반도 (4)

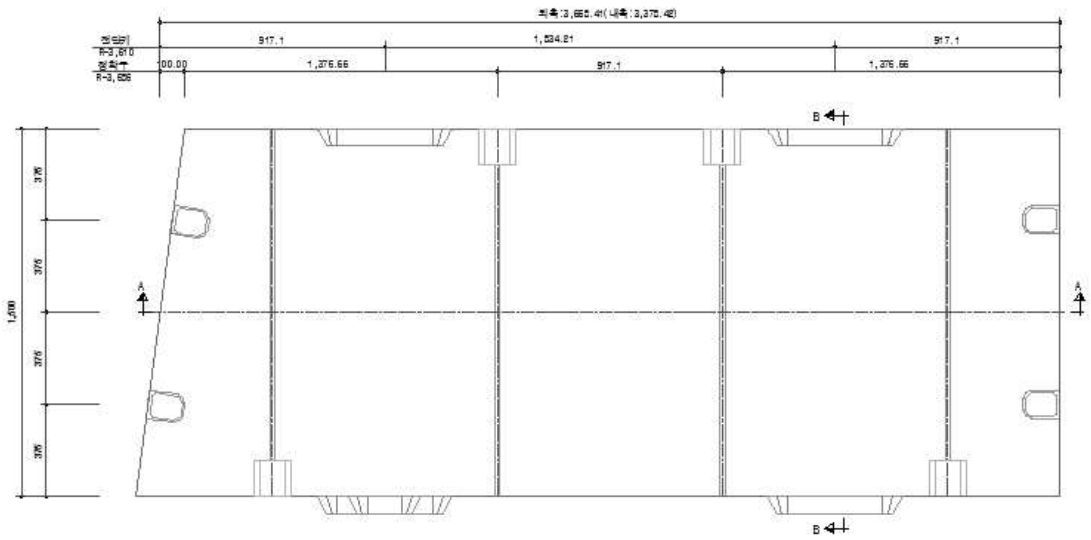
S=1:10

TYPE-C
(단면 A-A)

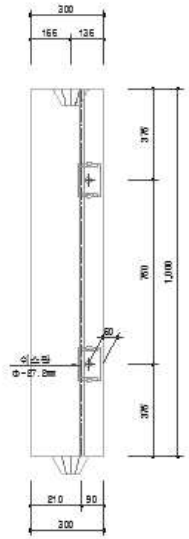


정 면 도

평 면 도



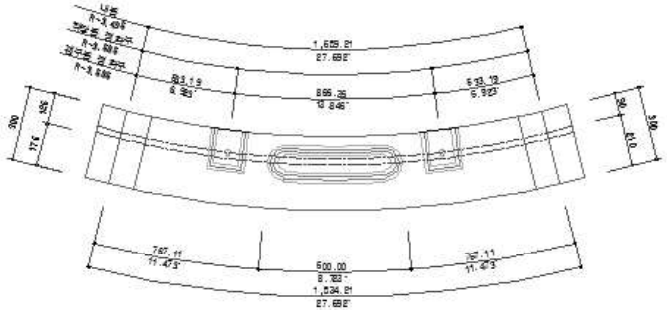
측 면 도
(단면 B-B)



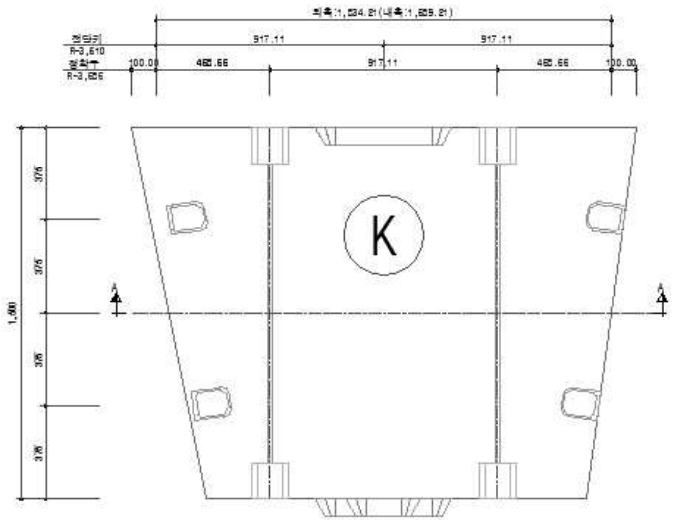
표준 세그먼트 일반도 (5)

S=1:10

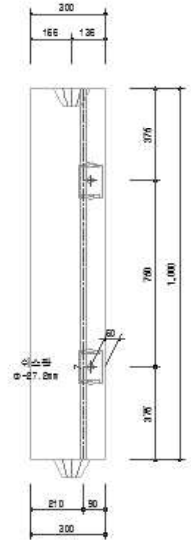
TYPE-K
(단면 A-A)



평 면 도



측 면 도
(단면 B-B)



국외출장복명서

(출장제목 : 강연선 주입장치 제작 및 개발공법의
해외시장 적용을 위한 쉴드장비 제작사 및 시공사와의
협의와 쉴드터널 시공현장 방문을 위한 국외 출장)

2013. 7.

SOC성능연구소
Geo-인프라연구실
마 상 준

목 차

Ⅰ. 출장개요

Ⅱ. 일정별 방문기관 및 주요내용

Ⅲ. 출장내용
1. 미쓰비시 중공업 방문
2. 오바야시 본사 및 요코하마 환상 도로 건설 현장
3. Herrenknecht사 방문 및 Berlin 지하철 쉴드 시공 현장

Ⅳ. 출장결과

Ⅴ. 수집자료 목록

Ⅵ. 면담자 명함

Ⅶ. 해외출장계획서 사본

Ⅷ. 부록
- 항공권, 여권사본 및 출입국 날인 사본 첨부.

Ⅰ. 출장개요

1. 출장자

- Geo-인프라연구실 마상준 연구위원

2. 출장기간

- 2013. 6. 18 ~ 2013. 6. 27 (9박 10일)

3. 출장지

- 일본, 독일

4. 출장 목적

- 본 연구과제의 현장시험시공을 위해 세그먼트에 강선 삽입시 강연선 주입장치에 대한 제작을 위해 쉴드장비 제작사와 본 주입장치에 대한 기작성된 기본설계(안)을 가지고 협의 및 추후 제작 발주에 대한 협의.
- 본 강연선 체결방식에 대한 시공방법에 대해서 테크니컬 미팅을 통해 본 공법의 문제점 및 해외 현장에 적용에 대해서 협의.
- 해외 쉴드터널 수요 예측 및 시공성 평가를 위한 자료 수집 및 쉴드터널 시공실적 파악.

Ⅱ. 일정별 방문기관 및 주요내용

월 일 (요일)	출발지	도착지	방문기관	주요업무	면담예정인물 (직책포함)
6월 18일 (화요일)	김포	오사카	출국	이동(김포→오사카) 이동(오사카→고베)	
6월19일 (수요일)		고베	미쓰비시 중공업	- 공장방문, 쉴드장비제작공장 견학 - 테크니컬 미팅 (본 공법 설명 기술적 토론 및 강연선 주입장치 제작 관련 협의)	hiroshi Maruta(차장) Akira Hatakoshi(임원) Atsushi Yagi Joji Uemura(차장)
6월 20일 (목요일)	고베	동경	이동		-
6월 21일 (금요일)		동경	오바야시	-쉴드터널 시공현장 방문 -오바야시 본사 (테크니컬 미팅-본 공법 설명 및 기술적 토론)	
6월 22일 (토요일)	동경 인천	인천 Frankfurt		이동 (동경-인천) 이동 (인천-Frankfurt)	
6월 23일 (일요일)	Frankfurt			이동(Frankfurt-Schwanau)	-
6월 24일 (월요일)		Schwanau	Herrenknecht AG	- 공장방문, 쉴드장비제작공장 견학 - 테크니컬 미팅 (본 공법 설명 기술적 토론 및 강연선 주입장치 제작 관련 협의)	Peter Schmah(Grad Engineer) Robert Kolotilo(Grad Engineer) Thorsten Reich(Grad Engineer-Design)
6월 25일 (화요일)	Schwanau	Berlin	Herrenknecht AG	-이동(Schwanau-Berlin) -터널 시공현장 방문 -실제 시공 과정 견학-테크니컬 미팅 - 테크니컬 미팅 (본 공법 설명 기술적 토론) -이동(Berlin-Frankfurt)	Robert Kolotilo(Grad Engineer)
6월 26일 (수요일)	Frankfurt	Frankfurt 인천		이동(Frankfurt-인천)	
6월 27일 (목요일)				인천도착(13:05)	

Ⅲ. 출장내용

금번 출장은 쉴드장비 제작사와 쉴드 시공실적이 많은 해외 시공사 설계 및 시공팀에게 본 연구공법의 타당성에 대한 검토와 시공시 문제점 도출이 있다. 또한 쉴드장비 제작사에게 현재 강연선 공급 장치를 시공상 적용 가능성과 특히 기존 장비에 강연선 공급 장치를 설치하는 것에 대해서 심도 있게 논의하였다. 그리고 해외 쉴드터널 수요 예측 및 시공성 평가를 위한 자료 수집 및 쉴드터널 시공실적 파악을 하였다.

1. 미쓰비시 중공업 방문

일본 미쓰비시 중공업의 쉴드사업부는 지금까지 쉴드장비 제작건수로는 1720대로 전 세계 쉴드장비 제작사중 2위를 차지하는 업체이다. 타입별로 보면 슬러리타입이 477대, EPP 타입이 613대 그 Hard-rock TBM등 기타 장비가 639대로 제작하였다. 쉴드장비는 1955년대부터 제작하기 시작하였으며 일본 최초의 쉴드터널은 Kanmon 터널로 스킨플레이트가 있는 쉴드터널 형태이지만 굴착은 사람이 직접 들어가 굴착하는 인력굴착 이였다. 미쓰비시 공장에는 지난달에 제작하여 배송한 상태로 현재는 발주를 받은 것이 없어 제작중인 쉴드장비가 없는 상태이다.

다음은 미쓰비시 설계팀에서 미팅한 결과를 정리한 것이다. 미쓰비시 설계팀과의 미팅에서 본 강연선 체결장치에 대한 평가는 아이디어는 참신하나 강연선 체결시 시공성이 떨어질 것으로 의견을 제시하였다. 그러나 개념 설계로 제시한 강연선 공급 장치에서 원활하게 강연선을 공급 및 인장, 절단을 시켜 준다면 시공공정을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

미쓰비시 장비의 특징은 세그먼트 이렉터 부분이 드럼형태로 되어 있어 쉴드장비의 이렉터 제작에 있어 장비 구성상 저렴하게 되어 있으나 세그먼트 조립에 있어 공간적인 측면에서는 여유가 없는 단점이 있다. 강연선 공급장치를 세그먼트 조립부에 충분한 작업공간을 확보하기 어려우므로 미쓰비시에서 제시한 강연선 공급장치는 3링 전방에서 강연선을 공급하고 세그먼트 조립부에서는 PC콘만 삽입해 기존 쉴드 이렉터부에 변경을 최소화 하는 쪽으로 강연선 공급장치 설치를 제시하였다.



그림-1. 미쓰비시 중공업 미팅 모습

현재 미쓰비시 중공업에서 쉴드사업부가 차지하는 부분은 1~3% 정도로 전체 회사 규모에서 미미한 실적이나 전 세계적으로 실적상 2위를 차지하고 있는 등 쉴드TBM 장비에서는 뛰어난 실적을 가지고 있다. 특히 특수 형태의 쉴드장비를 많이 개발하여 현장에 적용시킨 것으로는 2심원 쉴드와 3심원 쉴드장비로 이와 같은 장비는 2-아치 터널 또는 3-아치 터널에서 한번에 터널 시공이 가능하게 만들 수 있는 장비이다. 그 외 직사각형 쉴드장비로 기존 터널에서 확공을 할 때 적용되는 장비로 금번에 방문하는 요코하마 환상도로 현장에서 분기구에 적용하고 있다.

최근에 와서 미쓰비시 중공업에서는 완제품 형태의 쉴드장비 제작 및 납품보다는 중국에서 쉴드장비 제작사에 쉴드장비의 주요부품인 구동엔진과 면판설계, 이렉터만을 제작 공급하고, 중국 쉴드업체가 완제품을 조립 및 제작, 판매하는 전략을 수립하여, 부품별로 제작 판매하는 쪽으로 사업전략이 수정하여 추진하고 있다. 즉, 쉴드장비의 조립이나 스킨플레이트(일명 캔), 후방대차시설 같은 고급기술이 들어가지 않는 부분은 신생 중국 쉴드장비 제작사가 미쓰비시 주요부품을 가지고 쉴드 장비를 제작하는 사업 전략이다. 즉 값싼 중국 인력을 이용하여 미쓰비시 중공업의 취지인 핵심부품만 제작 판매하여 최종 생산품이 중국산 쉴드장비를 제작 거대시장으로 부상되는 중국 쉴드 시장에 판매를 하겠다는 전략이다.

그 외 미쓰비시 중공업의 전시실에는 과거 미쓰비시 중공업의 역사와 현재의 미쓰비시 중공업의 사업방향을 볼 수 있는 곳으로 과거 1910대부터 함선과 잠수함 등을 제작하는 등 미쓰비시 중공업의 일본 침략사와 함께한 것으로 볼 수 있다. 그러나 최근에 와서는 원자로 설계 및 제작, 심해잠수정 제

작 등 첨단산업 분야로 그 사업역량을 확대하는 것으로 보여진다.
금번 미쓰비시 출장에서 중국의 거대시장을 쉴드 주요부품만 판매하겠다는 미쓰비시 중공업의 사업전략으로 인해 강연선 공급 및 체결장치 개발에는 관심이 없는 것으로 판단되어진다. 금번 출장에서 일본의 다양한 쉴드장비의 개발 및 적용에 큰 놀라웠으며, 지금까지의 쉴드 시공 실적 등 다양한 쉴드 터널 정보를 수집하였다.

2. 오바야시 본사 및 요코하마 환상 도로 건설 현장

오바야시사는 일본 3대 시공사중 하나로 그중 쉴드터널에 가장 특화되어 있는 회사이다. 일본은 우리나라와는 달리 시공사가 설계까지 하는 구조로 되어 있다. 그래서 시공사가 건설하는 구조물의 기능 성능, 시공 효율까지 책임을 지는 시스템으로 운영되고 있다. 일본의 지반특성상 도심지 및 외각 지역까지 터널 시공이 되어야 할 경우 70~80%가 쉴드터널로 시공되어 지고 있다. 그만큼 다른 나라에 비해 쉴드터널 시공경험이 많다.



그림-2. 오바야시에서 과제 설명 및 토의

오바야시사에는 쉴드전담팀이 있으며 도시부 재개발부서에서도 쉴드팀이 있어 상호 유기적인 협조가 이루어져 있다. 오전에 오바야시사를 방문하여 강연선 연구와 배수형 쉴드과제에 대해서 발표와 이에 대한 논의를 하였다. 오바야시 쉴드전문가들과의 회의는 주로 시공 측면에서의 질의 및 문제점을 제시 하였는데, 대부분의 질문이 3개링이 체결이 되어 있는 상태에서 조립되어질 세그먼트 한 조각을 강연선으로 체결시 어느 정도 시공 정밀도를 가질

수 있는지에 대해서 많은 의구심을 가지고 있었다. 그러나 강연선과 전단키에 대한 안정성 및 경제성에 대해서는 참석자 전원이 동의하였다. 그리고 전단키 조립시와 링 폐합후 추진 유압 실리더 잭의 추진 가압을 가할 때 전단키 암수 부분이 부분 파괴가 일어날 것으로 예상된다.
일본 세그먼트 체결방식에서는 볼트식 보다는 터널 종방향 뿐만 아니라 횡방향으로도 핀타입이 적용되고 있다. 핀타입 적용으로 시공 효율이 높아 경제성을 극복하는 것으로 판단된다. 오바야시에 핀타입 적용시 한링 폐합시간 분석을 요청 하였다.
일본에서는 많은 다양한 쉴드터널 형상으로 시공되어 졌으며 그중 확대 시공공법이 적용한 요코하마 북부환상도로터널(Yokahama Circular Northern Route Shield Tunnel Construction) 사업이다.

다음은 본 사업의 개략적인 현황이다.

발주처: 수도고속도로주식회사
시공사: Obayashi, Okumura, Seibu
쉴드 장비종류: EPB-Type
쉴드장비 외경: 12,490mm
총 터널 연장: 5.5km
세그먼트 종류: RC Fireproof SFRC 세그먼트
세그먼트 외경 및 두께: 12,300mm / 400mm
세그먼트 종단길이: 2,000mm



그림-3. 요코하마 환상도로 쉴드터널 현장



그림-4. 세그먼트 핀타입 체결장치 및 터널 종방향 소형 전단키



그림-5. 세그먼트 단차를 측정하는 모습



그림-6. 쉴드터널 확폭후 현장타설 철근 콘크리트 라이닝 타설

표-1. 국가별 세그먼트 시공 단차 기준

타입별 단차	한국	독일	일본	싱가폴
볼트타입 단차(mm)	5	-	-	3
핀타입 단차(mm)	-	3	2	-

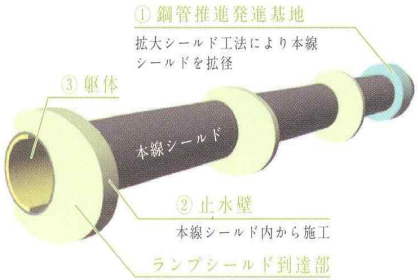
특히 본 터널에서 도로 분기점에서는 터널 형상이 확폭이 되므로 기존 쉴드 굴착완료 후 터널 원주방향으로 직사각형 쉴드장비를 돌려 터널 단면부를 확폭하는 방법으로 시공하였다. 한단면 확폭 후, 강관다단 그라우팅 공법으로 전방부를 보강후 굴착하는 방법으로 확공을 실시하였다(그림-7. 참조). 본 현장에서 사용한 세그먼트는 스틸파이바(Steel Fiber)를 넣어준 세그먼트로 주철근만 배근을 하고 배력근은 전량 넣어주지 않고 스틸파이바로 대체하였으나 스틸파이바 양을 상당히 줄여 기존 세그먼트와 경제성을 맞추었다. 배력 철근을 스틸파이바로 대체한 목적은 헤어크렉을 줄이기 위해서이다. 세그먼트 표면에 스틸파이바가 부분적으로 노출되어 있으나 시멘트에 코팅되어 있어 부분적으로 녹이 보이긴 해도 전체적으로는 세그먼트 면이 깨끗하다. 그러나 지반 특히 지하수에 노출되어 있는 면에서는 향후, 스틸파이바가 어떻게 부식이 진행되는지에 대해서는 중장기적인 측면에서 검토해야 할 것으로 판단된다. SFRC 세그먼트가 기존 RC세그먼트에 비해서 대등한 경제성이 있는 부분에서는 좀 다른 시각이 있다. 국내 RC 콘크리트 기준은 철근량과 기준강도에 의해서 관리가 되는데 해외 RC 콘크리트 기준은 기준강도, 인장강도에 의해서 관리가 됨으로 국내 기준에는 저촉된다.

쉴드터널 현장 방문시 전날 쉴드터널 막장 Back-fill 그라우팅을 치는 과정에서 주입액이 상부로 누액이 되어 터널 직상부 지표면이 히빙이 되는 사고가 터져 막장이 폐쇄되어 세그먼트 조립하는 막장 부근에는 가보질 못했다. 금번 현장에 분기구 접속부 확폭한 지점과 세그먼트가 조립된 구간만 현장견학을 하였다. 확폭구간은 확폭후 쉴드장비를 철수한 상태로 현장을 봐서는 확폭했다는 감이 잘 오질 않았다. 그러나 아주 특이한 시공공법을 적용한 현장으로 방문시 강관그라우팅을 준비하고 있었으며, 후방 지역에서는 확폭후 현장타설 철근콘크리트 라이닝을 이어치기를 실시하고 있는 중 이였다.

■ 構造概要

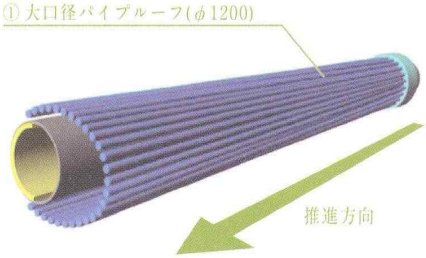
Step 1

① 鋼管推進発進基地の築造
② 薬液注入で止水壁を造成（トンネル軸方向の止水性確保）
③ 本線シールド内の躯体を先行構築（工期短縮を目的）



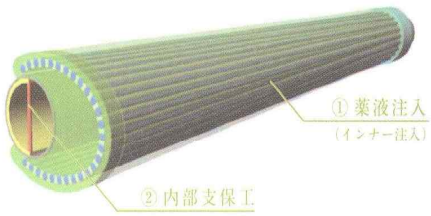
Step 2

① 鋼管推進工法により大口径パイプルーフを施工



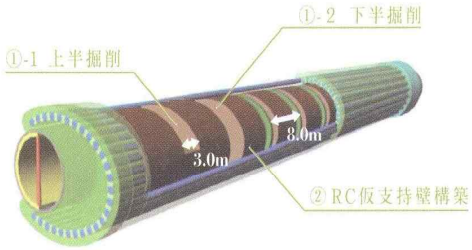
Step 3

① パイプルーフの中からインナー注入
② 内部支保工の設置



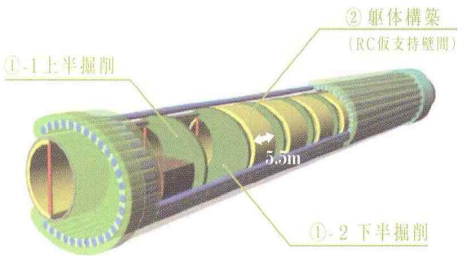
Step 4

① トレンチ掘削
② RC仮支持壁の構築



Step 5

① RC仮支持壁間の掘削
② RC仮支持壁間の躯体構築



Step 6

① RC仮支持壁の撤去
② RC仮支持壁撤去部の躯体構築
③ 内部支保工の撤去

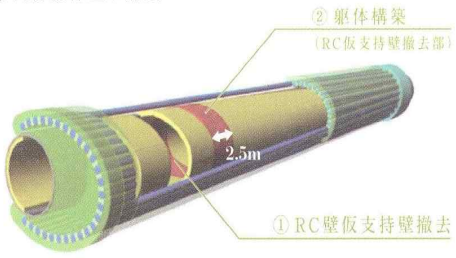


그림-7. 요코하마 터널 확폭 공정도

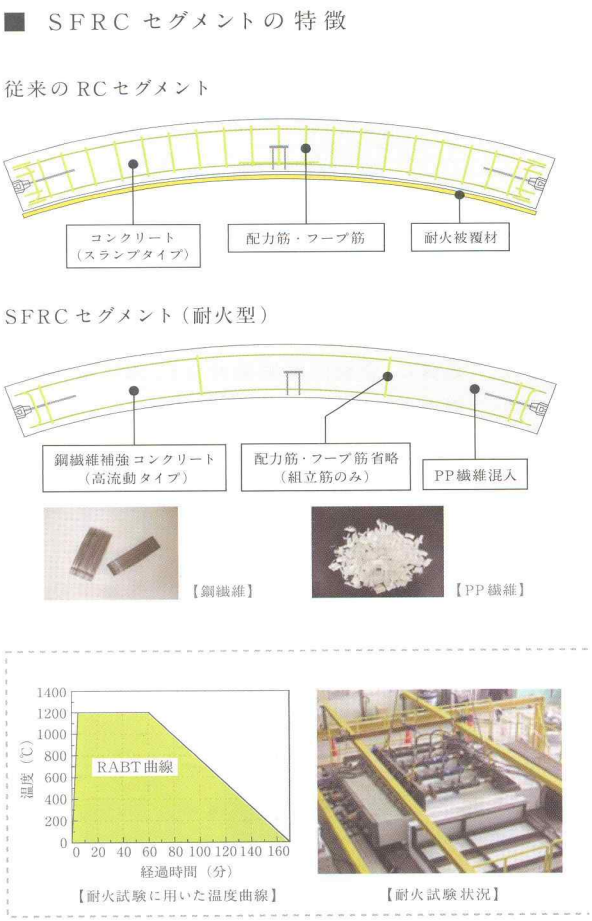


그림-8. SFRC 세그먼트 배근도 및 관련 사진

3. Herrenknecht사 방문 및 Berlin 지하철 쉴드 시공 현장

Herrenknecht사는 세계적으로 쉴드장비를 가장 많은 제작 및 납품실적을 가지고 있는 업체로 지금까지 쉴드장비를 제작 및 납품 실적이 2800여건 이다. 금번 출장에서 Herrenknecht 본사 공장 방문시 제작중인 쉴드장비가 7대이고 납품 대기중인 장비가 1대이고 중국 공장에는 10대가 제작중 이다. 오전에 공장 현황에 대해서 설명을 듣고 현장 견학을 하였으며, 본 연구원에서 현재 수행중인 연구과제, 강연선 공법에 대해서 설명을 하였다. 오후에는 Herrenknecht 기술자들과 강연선 주입장치에 대해서 질의, 응답을 받았으며, 향후 특수건설에서 보유하고 있는 쉴드장비(AVND 3200AH)에 강연선 부착에 대해서 심도있는 토론을 하였다. 특히 강연선 부착 위치에 대해서 세그먼트 조립지점 또는 3열 후방지점에 설치하는 것에 대해서 다음과 같이 검토하였다.



그림-9. 강연선 체결 공법 설명

세그먼트 조립 지점: 세그먼트 이송하는데 브릿지 형태로 공간적으로 크게 문제는 없을 것으로 예상되나 세그먼트 조립 위치가 작업 여건상 공간을 차지하는 등 작업공정상 최적의 위치는 아니며, 강연선의 삽입 작업에 위치적으로 좋음. 그러나 세그먼트 위치를 잡는 동안에 강연선 삽입 작업을 할 수 없으므로 작업 공정상으로는 불리함.

3열 후방 지점: 세그먼트 조립 위치로부터 3열 후방에 블록아웃을 시킨 강연선 주입구로 강연선 주입장치를 설치하는데, 이 위치는 공간적으로 여유가 있을 뿐만 아니라 세그먼트 조립공정에도 간섭을 받지 않음. 3열 후방 지점은 세그먼트 조립지점에서 세그먼트 위치를 잡는 공정에 강연선 주입장치는 후방에서 강연선 주입위치를 잡으므로 작업공정에 많은 시간을 줄일 수 있는 장점이 있음.



그림-10. Herrenknecht사 공장 방문

금번 출장에서 일본과 독일의 쉴드장비, 이렉터부에서 많은 차이를 보이고 있다. 일본 쉴드장비의 이렉터부는 세그먼트를 잡고 회전부가 원통형으로 되어 있어 적은 비용으로 세그먼트를 회전 및 위치 선정이 가능한데 반해 독일식은 이렉터 중심축인 브릿지를 중심으로 세그먼트를 회전 및 위치를 잡은 역할을 한다. 두 방법의 장단점은 있으나 작업 환경등 공간적으로는 측면에서는 독일방식이 좋으나 장비의 경제적인 측면은 일본식이 뛰어난 듯하다. 하여튼 본 연구과제에서 현장실험은 공간적인 제약이 자유스러운 독일 쉴드장비를 사용할 예정이다.

베르린 지하철 S-788공구 현장을 방문하였는데, 쉴드장비 설치를 위한 수직구를 완성한 후 장비 발진을 위해서 설치 및 점검중으로 터널 및 장비의 재원은 다음과 같다. 터널과 쉴드장비의 재원은 다음과 같다.

표-2. 요코하마 터널 재원 및 쉴드장비 재원

터널의 재원	쉴드장비 재원
Tunnel Diameter: 6670 mm Total Tunnel Length: 2900 m Maschine type: Mix shield Use: Metro Status: Launching	Max. operating pressure: 3 bar Drive type: Electric Power: 450 kW Speed: 2.7 rpm Thrust force: 21500 kN Torque: 1950 kNm Max. torque: 2321 kNm Total weight: 700 t Total length: 74 m Min. curven radius: 300 m Ring type: 6+1 Ring length: 1500 mm Segment ID: 5700 mm Segment OD: 6400 mm

본 현장의 특이점은 세그먼트를 잡아주는 이렉터가 볼트체결방식이 아니라 공기 흡착방식으로 유럽에서는 직경 6-7m 이상의 지하철 현장 또는 직경 10m이상인 도로 쉴드터널 현장에서는 공기흡착 방식을 적용하고 있다. 세그먼트 조립에서도 보조장치로 세그먼트 터널 횡방향으로는 직경 5cm정도의 원통형 홈이 있어 암석코아와 같은 삽입재를 이용하여 세그먼트 조립시 가이드바 역할을 하는 보조 장치를 이용한다(그림-12. 참조).



그림-11. 베르린 지하철 S-788공구 쉴드터널 시공 현장



그림-12. 세그먼트 체결 보조장치



그림-13. 세그먼트 체결 핀



그림-14. 핀이 삽입되는 홀

Ⅳ. 출장결과

○ 현재 쉴드터널 제조사의 현황을 파악할 수 있는 기회였음.

○ 특히 쉴드장비 시장은 중국과 독일 시장으로 재편되고 있으며, 일본은 주요부품만 생산 및 공급하는 체계로 가고 있음.

○ 세그먼트 체결장치는 일본에서는 핀타입을 채택하고 있으며, 유럽은 종방향은 핀타입, 횡방향은 볼트타입으로 경제성을 찾고 있음. 선진국에서는 부속자재의 비용보다는 시공성 향상을 통한 공사기간 단축 및 인건비 절감의 효과가 큰 것으로 판단됨.

○ 일본에서는 다양한 형태의 쉴드터널이 시공되어 왔으며 그에 따른 쉴드 굴착 장비도 개발 되고 있음.

○ Herrenknecht사와 본 연구과제에서 현장 시험시공시 강연선 체결을 위한 강연선 삽입 및 긴장 자동화 장치(Cable Strand Feeding System) 설계 및 제작에 대해서 협의 중임.

○ 또한 Herrenknecht사 시험시공에 사용할 쉴드장비(AVND 3200AH)에 대해서 두 번째 Can(동력장치)부까지 조립을 해야 이렉터 조작에 문제가 없을 것으로 제시하였음.

○ 일본 미쓰비시와 Herrenknecht와의 회의에서 본 연구과제인 강연선 체결장치에 대해서 공통적으로 터널 안정성 및 경제성에 대해서는 인정하데 시공성인 측면에서는 문제가 있을 것으로 제시하였으나 강연선 주입장치를 어떻게 효율적으로 제작하여 시공에 효율성을 높이느냐가 관건으로 제시하였음.

○ 해외 쉴드터널 수요 예측 및 시공성 평가를 위한 자료 수집 및 쉴드터널 공법별, 용도별, 연도별 쉴드터널 시공 실적등과 같은 자료를 취득하였음.

○ 일본 및 독일에 쉴드터널 전문가 집단과 교류체계를 구축하였음.

Ⅴ. 수집자료 목록



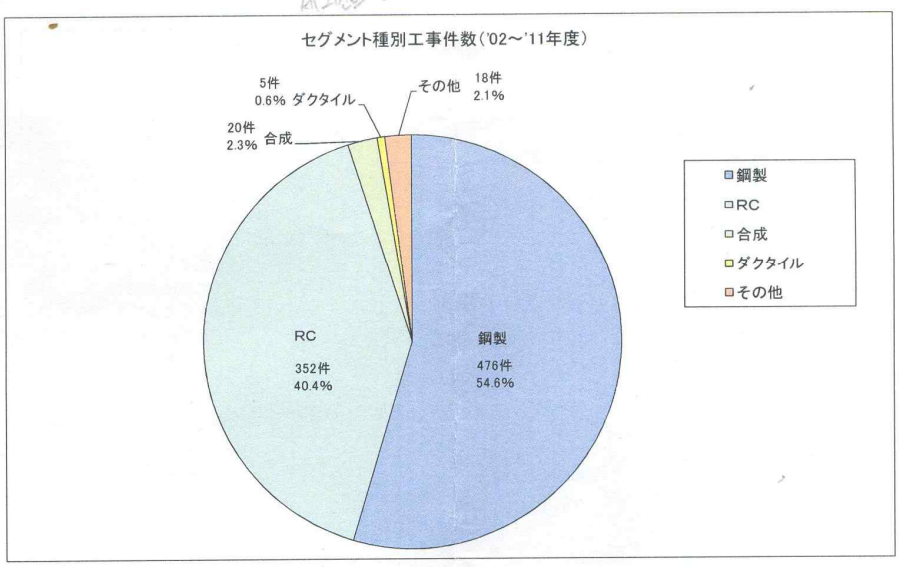
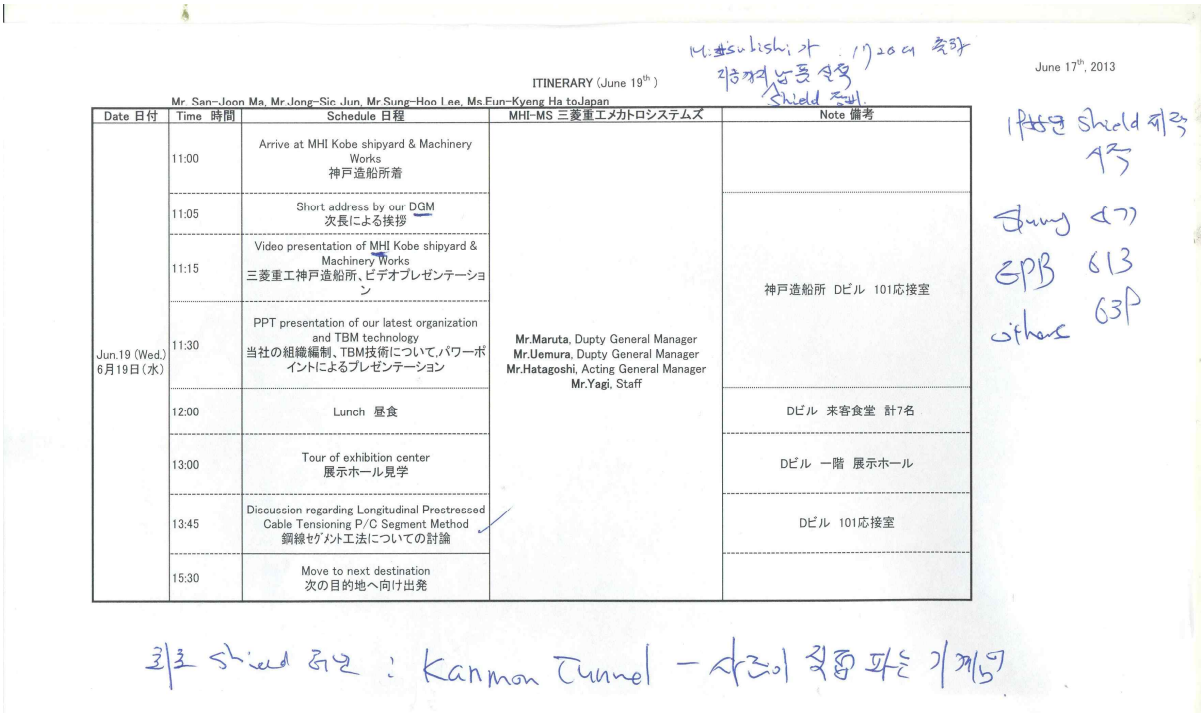


그림-15. 일본 쉴드터널 공법별, 용도별, 연도별 쉴드터널 시공 실적등 현황 도표



ITINERARY (June 19th)

Mr. San-Joon Ma, Mr.Jong-Sic Jun, Mr.Sung-Hoo Lee, Ms.Eun-Kyeng Ha to Japan

June 17th, 2013

Date 日付	Time 時間	Schedule 日程	MHI-MS 三菱重工メカトロシステムズ	Note 備考
Jun.19 (Wed.) 6月19日(水)	11:00	Arrive at MHI Kobe shipyard & Machinery Works 神戸造船所着	Mr.Maruta, Dupty General Manager Mr.Uemura, Dupty General Manager Mr.Hatagoshi, Acting General Manager Mr.Yagi, Staff	
	11:05	Short address by our DGM 次長による挨拶		神戸造船所 Dビル 101応接室
	11:15	Video presentation of MHI Kobe shipyard & Machinery Works 三菱重工神戸造船所、ビデオプレゼンテーション		
	11:30	PPT presentation of our latest organization and TBM technology 当社の組織編制、TBM技術について、パワーポイントによるプレゼンテーション		
	12:00	Lunch 昼食		Dビル 来客食堂 計7名
	13:00	Tour of exhibition center 展示ホール見学		Dビル 一階 展示ホール
	13:45	Dicuscion regarding Longitudinal Prestressed Cable Tensioning P/C Segment Method 鋼線セグメント工法についての討論		Dビル 101応接室
	15:30	Move to next destination 次の目的地へ向け出発		

그림-16. 미쓰비시 방문 일정표



그림-17. 오코하마 환상도로 쉴드터널 브로셔



그림-18. 요코하마 환상도로 쉴드구간 확폭용 직각 쉴드장비 브로셔
(미쓰비시 제공)

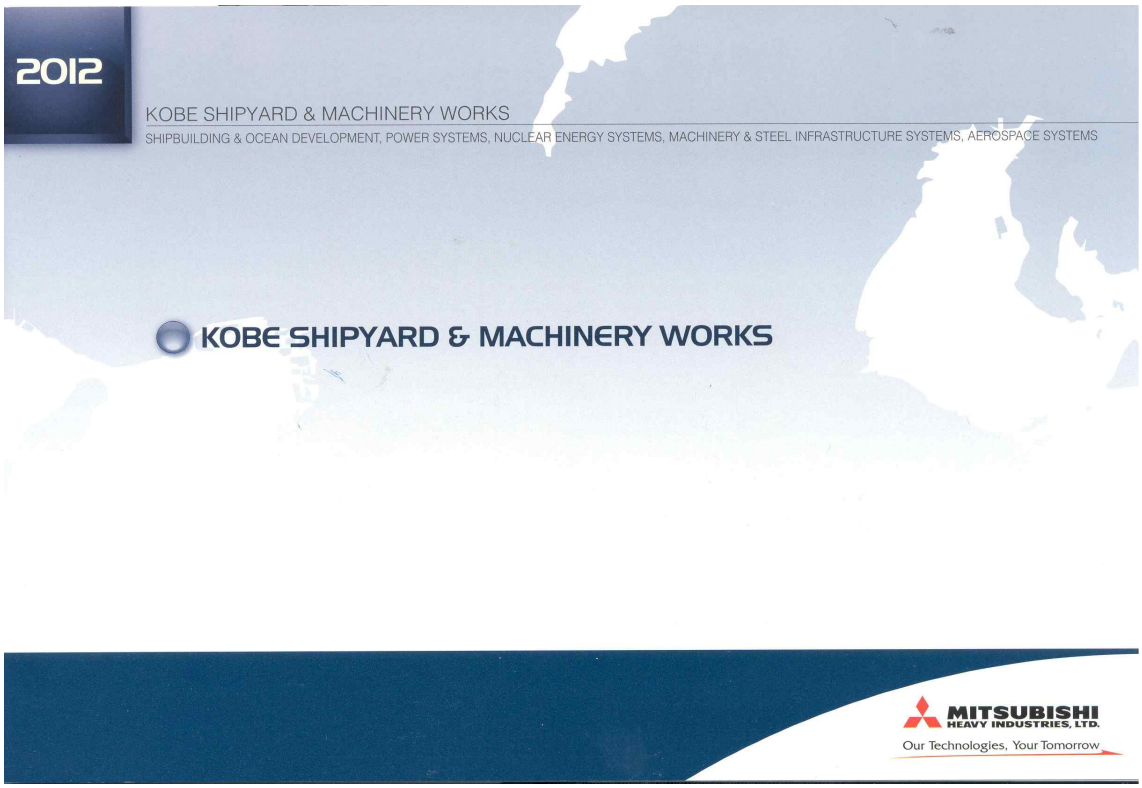


그림-19. 미쓰비시 쉴드장비 제작공장 브로셔

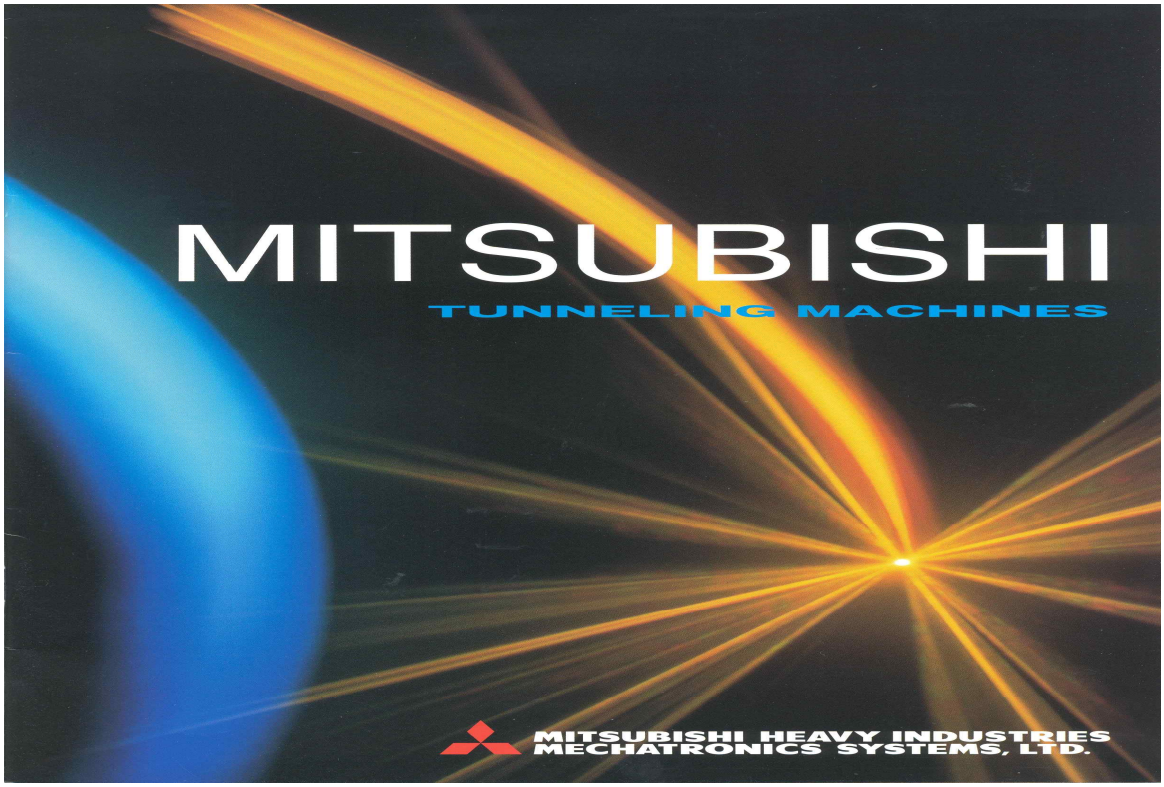


그림-20. 미쓰비시 쉴드장비 소개 브로셔

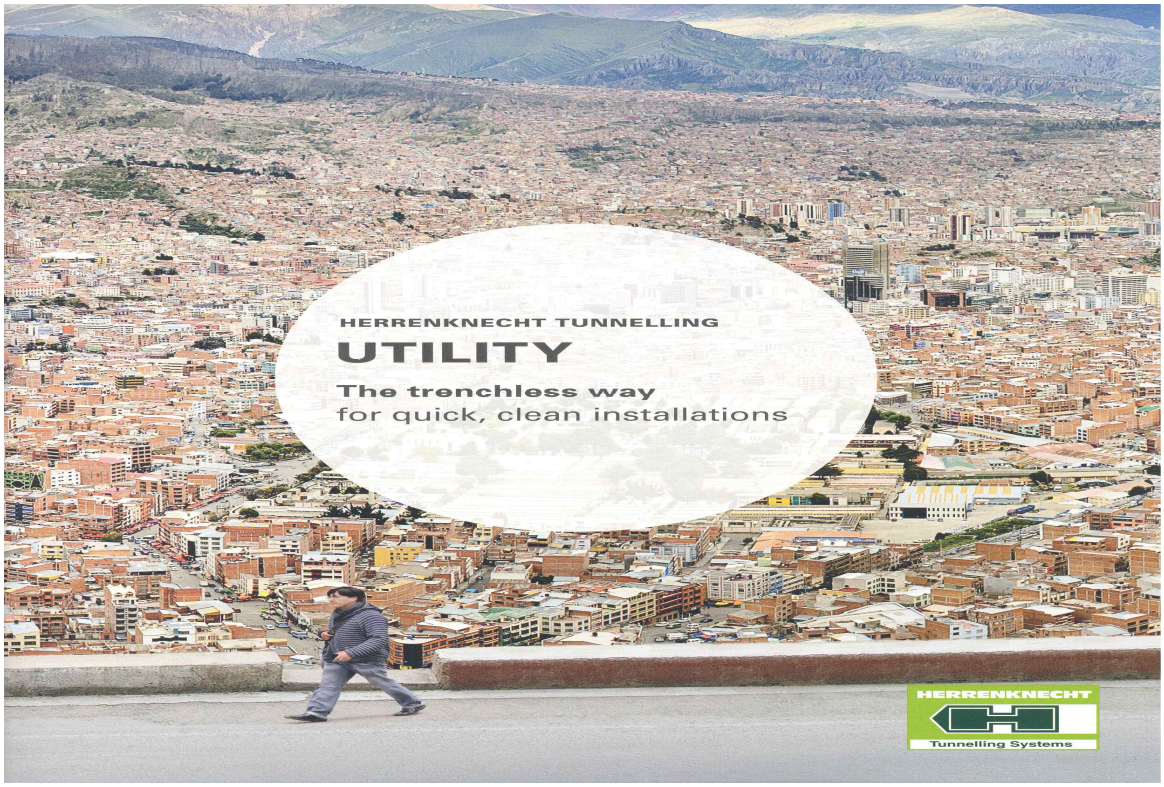


그림-21. Herrenknecht Utility Tunnel 브로셔



그림-22. Herrenknecht 회사 소개 브로셔



그림-23. Herrenknecht 쉴드장비 적용 Project 소개 CD

Ⅵ. 면담자 명함



株式会社 大林組

生産技術本部
シールド技術部
部長

守 屋 洋 一

技術士（総合技術監理部門・建設部門）

東京都港区港南2-15-2 〒108-8502
品川インタ シティB棟
電話 (03)5769-1318
FAX (03)5769-1924
E-mail: moriya.yoichi@obayashi.co.jp

株式会社 大林組

生産技術本部
シールド技術部
副部長

今 倉 和 彦

技術士（建設部門・総合技術監理部門）

東京都港区港南2-15-2 〒108-8502
品川インターシティB棟
電話 (03)5769-1318
FAX (03)5769-1924
E-mail: imakura.kazuhiko@obayashi.co.jp

株式会社 大林組

生産技術本部
シールド技術部
技術第三課長

香 川 敦

東京都港区港南2-15-2 〒108-8502
品川インターシティB棟
電話 (03)5769-1318
FAX (03)5769-1924
E-mail: kagawa.atsushi@obayashi.co.jp

株式会社 大林組

生産技術本部
シールド技術部
技術第一課 課長

山 元 寛 哲

東京都港区港南2-15-2 〒108-8502
品川インターシティB棟
電話 (03)5769-1318
FAX (03)5769-1924
E-mail: yamamoto.hiro@obayashi.co.jp

大林・奥村・西武 横浜環状北線シールドトンネル
特定建設工事共同企業体

首都高新横浜JV工事事務所

工事長（土木） 高 浜 達 矢

技術士（建設部門）

工事事務所 神奈川県横浜市港北区北新横浜2-7-13 〒223-0059
電話（045）540-1260 FAX（045）540-1261
PHS直通（045）540-1526 内線509
E-mail：takahama.tatsuya@obayashi.co.jp
所属会社 株式会社 大林組 東京本店

株式会社 大林組

生産技術本部
設計第一部
設計第三課
主任

三 倉 寛 明

技術士（建設部門）

東京都港区港南2-15-2 〒108-8502
品川インターシティB棟
電話 (03)5769-1317
FAX (03)5769-1973
E-mail: mikura.hiroaki@obayashi.co.jp

株式会社 大林組

生産技術本部
設計第一部
設計第三課
課長

吉 田 公 宏

技術士（建設部門）

東京都港区港南2-15-2 〒108-8502
品川インターシティB棟
電話 (03)5769-1317
FAX (03)5769-1973
E-mail: yoshida.masahiro@obayashi.co.jp

株式会社 大林組

生産技術本部
設計第一部
設計第三課
主任

黄 再 弘
ファン ゼ ホン

博士（工学）

東京都港区港南2-15-2 〒108-8502
品川インターシティB棟
電話 (03)5769-1305 FAX (03)5769-1973
E-mail: hwang.jaehong@obayashi.co.jp

三菱重工メカトロシステムズ株式会社

機械装置事業部　都市開発業務部

次長

丸　田　浩

〒652-0863
神戸市兵庫区和田宮通５丁目４番２２号
第５菱興ビル３Ｆ
TEL (078)672-2872　FAX (078)672-2869
E-mail:hiroshi_maruta@mhims.mhi.co.jp
URL:http://www.mhi-ms.co.jp/

三菱重工メカトロシステムズ株式会社

機械装置事業部　都市開発業務部
管理グループ

八　木　敦　史

〒652-0863
神戸市兵庫区和田宮通５丁目４番２２号
第5菱興ビル3F
TEL (078)672-2873　FAX (078)672-2869
E-mail:atsushi_yagi@mhims.mhi.co.jp
URL:http://www.mhi-ms.co.jp/

三菱重工メカトロシステムズ株式会社

機械装置事業部　都市開発設計部
機械設計グループ　計画設計チーム

波　多　腰　明

〒652-0863
神戸市兵庫区和田宮通５丁目４番２２号
第5菱興ビル3F
TEL (078)672-2862　FAX (078)672-2869
E-mail:akira1_hatakoshi@mhims.mhi.co.jp
URL:http://www.mhi-ms.co.jp/

三菱重工メカトロシステムズ株式会社

機械装置事業部　都市開発設計部

次長

上　村　城　司

〒652-0863
神戸市兵庫区和田宮通５丁目４番２２号
第5菱興ビル3F
TEL (078)672-2888　FAX (078)672-2869
E-mail:joji_uemura@mhims.mhi.co.jp
URL:http://www.mhi-ms.co.jp/

HERRENKNECHT
Tunnelvortriebstechnik

Herrenknecht AG
Tunnelvortriebstechnik

Schlehenweg 2
77963 Schwanau-Allmannsweier
DEUTSCHLAND
Telefon: +49 7824 302 197
Telefax: +49 7824 302 379
reich.thorsten@herrenknecht.de
www.herrenknecht.de

Thorsten Reich
Dipl.-Ing. (FH)
Konstruktion
Business Unit Utility Tunnelling

HERRENKNECHT
Tunnelling Systems

Herrenknecht Asia
Headquarters Pte Ltd

152 Beach Road #17-05/08 Gateway East
Singapore 189721
Phone: +65 6590 9191
Fax: +65 6590 9181
Mobile: +65 8157 9372
DID: +65 6590 9190
duhme.ruben@herrenknecht.de
www.herrenknecht.com

Ruben Duhme
Research Engineer

HERRENKNECHT
Tunnelling Systems

Herrenknecht AG
Tunnelling Systems

Schlehenweg 2
77963 Schwanau-Allmannsweier
GERMANY
Phone: +49 7824 302-3590
Fax: +49 7824 302-3640
Mobile: +49 171 7911500
schmaeh.peter@herrenknecht.de
www.herrenknecht.com

Peter Schmäh
Grad. Engineer (TH)
Member of the Executive Board
Business Unit Utility Tunnelling

HERRENKNECHT
Tunnelling Systems

Herrenknecht AG
Tunnelling Systems

Schlehenweg 2
77963 Schwanau-Allmannsweier
GERMANY
Phone: +49 7824 302-7870
Fax: +49 7824 302-364
Mobile: +49 151 52750551
kolotilo.robert@herrenknecht.de
www.herrenknecht.com

Robert Kolotilo
Grad. Engineer (TH)
Product Manager
Business Unit Utility Tunnelling

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)

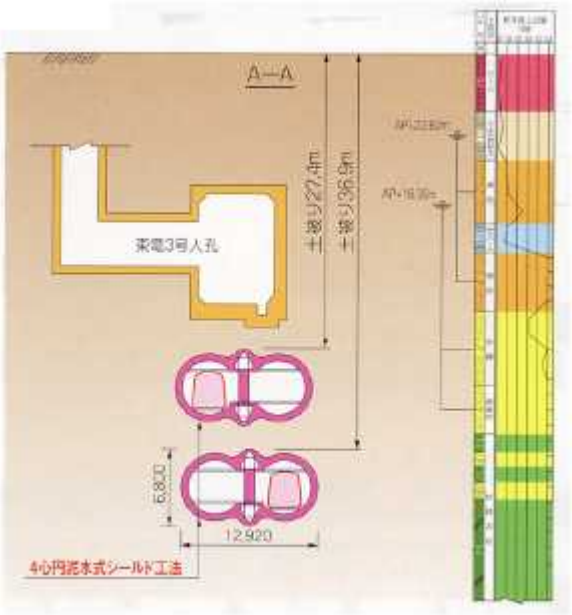


그림 a-3. 록본기역 공구의 횡단도

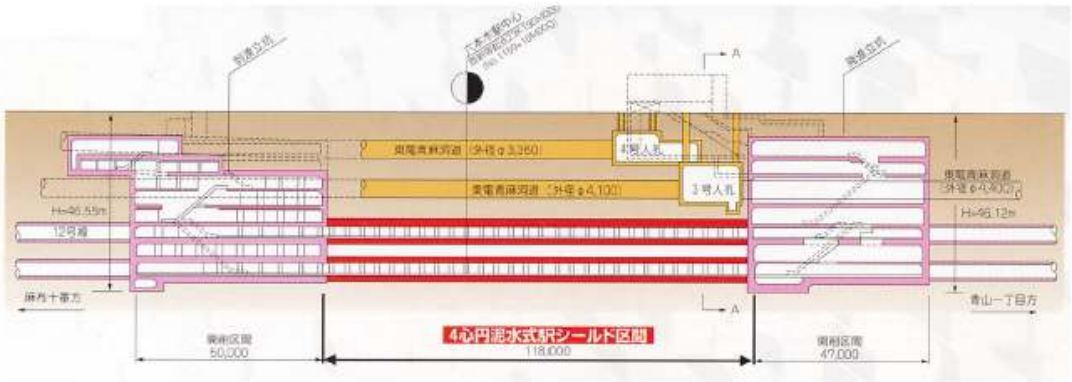
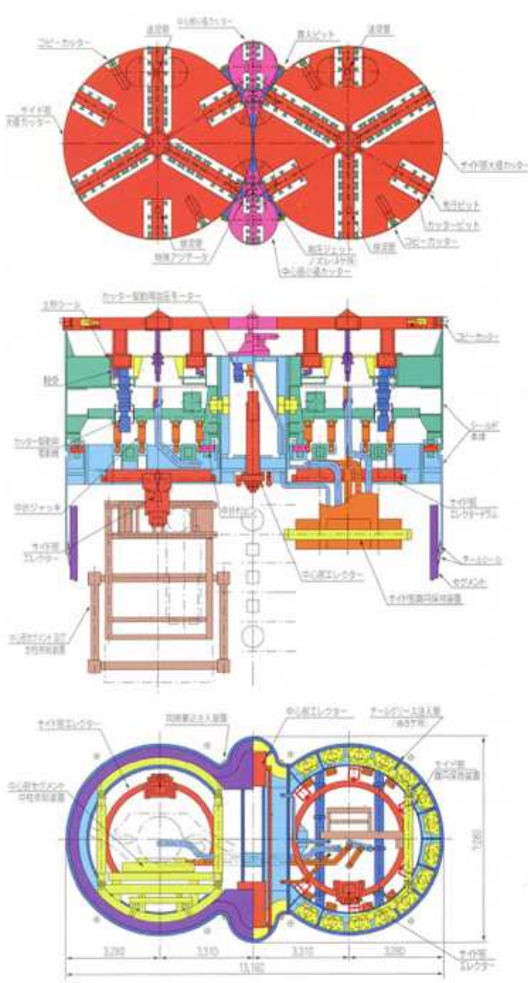


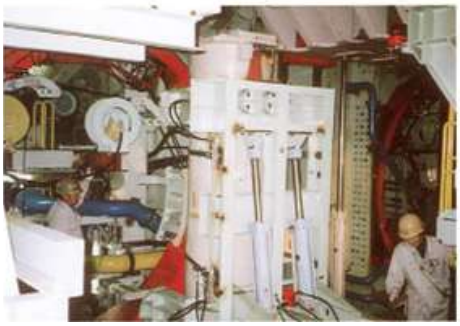
그림 a-4. 록본기역 공구의 단면도

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.

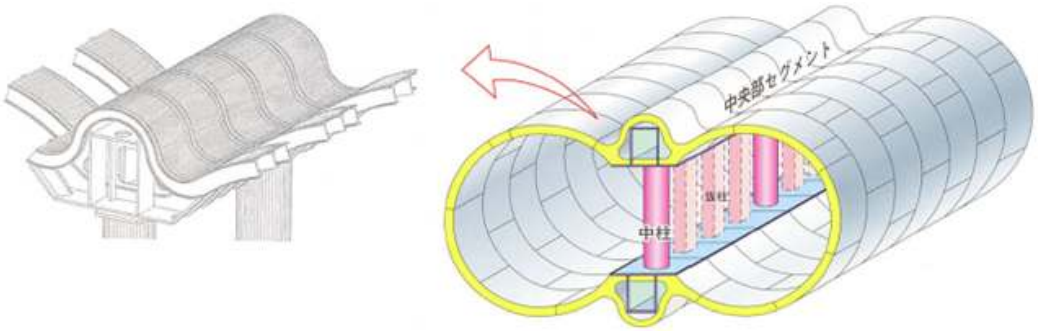


그림 a-6. NM 세그먼트 구조



(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.

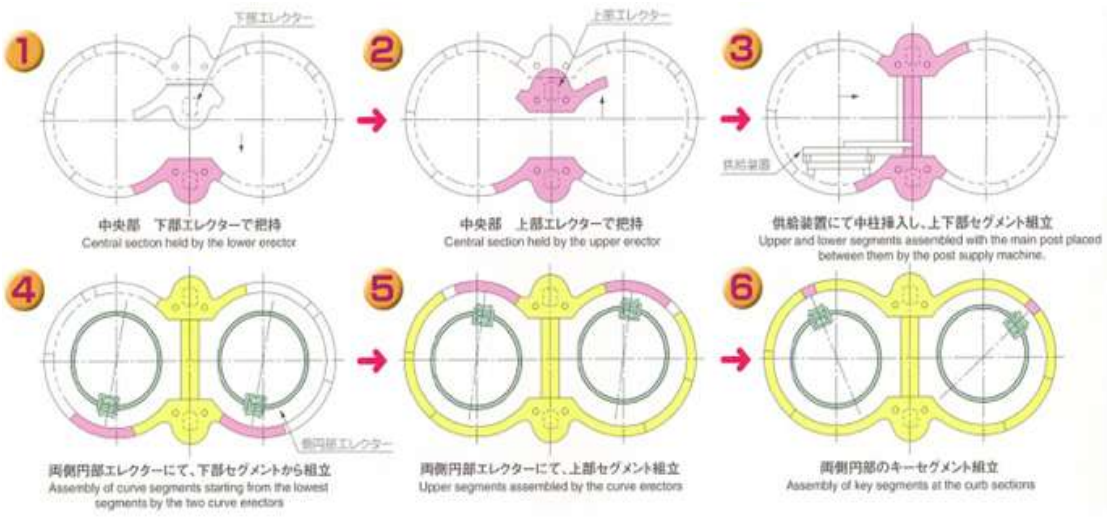


그림 a-9. 세그먼트 조립 순서

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, 갱구 지수 씰은 고수압 사층, 4심원이라는 특수성을 고려하여 슬라이드 플레이트와 에어백을 병용한 2단 구조로 하였으며 충분한 수밀성을 부여하였다.

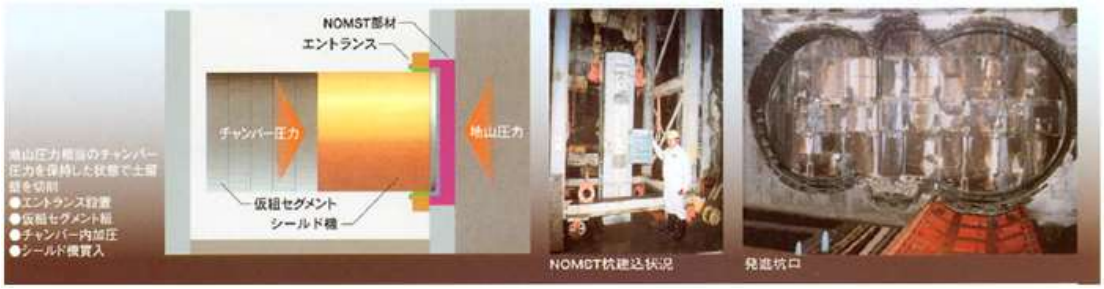


그림 a-10. NOMST에 의한 발진 개념도

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

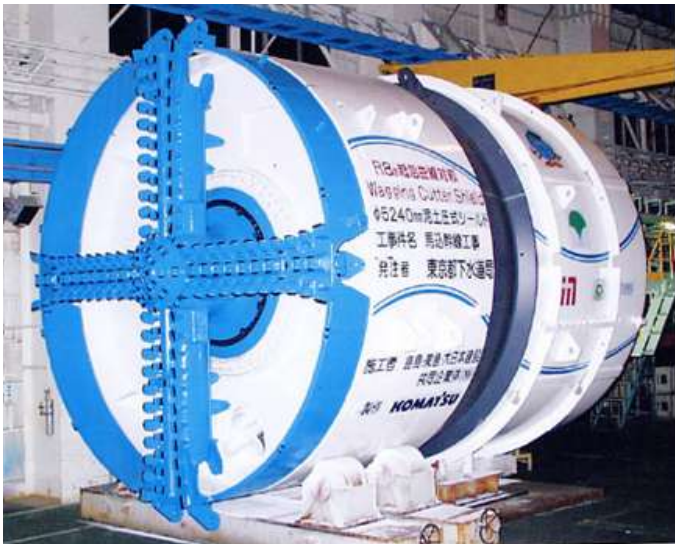
가. 공사 개요

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



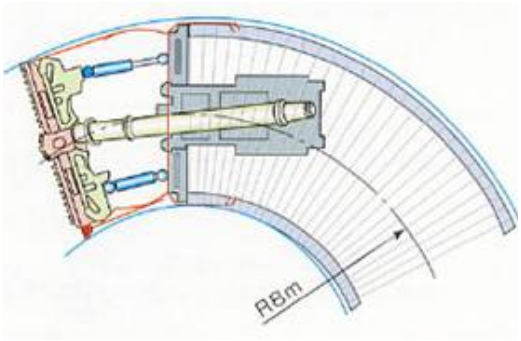
(b) 쉴드장비 중절 상황

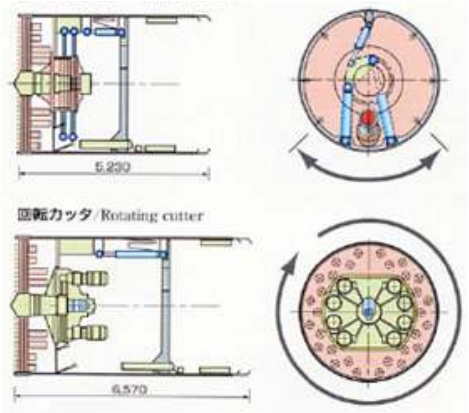
그림 b-2. 마고메 간선 건설공사에 사용된 쉴드장비

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

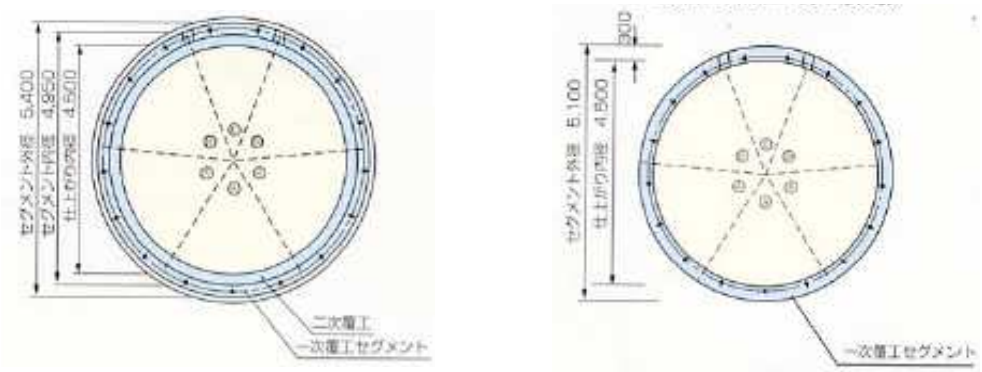
③ 내수압 : 잠정 저류관으로서 내수압에 견딜 수 있는 구조로 설계

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 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.