건설기술혁신사업

R&D10기술혁신E04

복합지하공간 수해방지를 위한 지하저류공동건설기술 개발 최종보고서

2014. 11.

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / (주)서영엔지니어링
공동연구기관 / 동서대학교 산학협력단
위탁연구기관 / 건국대학교 산학협력단
고려대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 “복합지하공간 수해 방지를 위한 지하 저류공동 건설기술 개발“의 최종보고서로 제출합니다.

2014. 11. 13.

주관연구기관명 : (주)서영엔지니어링
주관연구책임자 : 한 신 인
연 구 원 : 이 광 모
“ : 정 영 욱
“ : 이 희 경
공동연구기관명 : 동서대학교 산학협력단
공동연구책임자 : 조 덕 준
연 구 원 : 이 나 은
“ : 전 병 훈
“ : 손 경 원
“ : 박 성 호
“ : 류 성 현
“ : 강 창 하
“ : 이 재 현
“ : 유 동 남
“ : 지 진 수
“ : 안 성 호
위탁연구기관명 : 고려대학교 산학협력단
위탁연구책임자 : 이 인 모
연 구 원 : 서 형 준
“ : 권 영 삼
위탁연구기관명 : 건국대학교 산학협력단
위탁연구책임자 : 이 석 원
연 구 원 : 박 종 덕
“ : 정 다 운
“ : 최 우 용

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>10기술혁신
E04</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2012.08.29.~
2013.08.28</td><td>단 계 구 분</td><td>3차년도 /
3차년도</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">건설교통기술연구개발사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">건설기술혁신사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="4">복합지하공간 수해 방지를 위한 지하 저류공동 건설기술 개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">복합지하공간 수해 방지를 위한 지하 저류공동 건설기술 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">한 신 인</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 25명
내부 : 16명
외부 : 9명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td>정부 : 276,000천원
기업 : 92,000천원
계 : 368,000천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 80명
내부 : 42명
외부 : 38명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 750,000천원
기업 : 272,000천원
계 : 1,022,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">(주)서영엔지니어링
연구소</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">(주)서영엔지니어링/(주)도담이엔씨
종합건축사사무소/제영종합건설(주)</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 :</td><td colspan="2">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="3">연구기관명 :</td><td colspan="2">연구책임자 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요 약</td><td>보고서면수</td><td>349</td></tr>
<tr><td colspan="6">본 연구과제는 복합지하공간의 침수재해 저감을 위한 대단면 지하저류공동의 건설기술개발, 복합지하공간의 침수위험도 평가기술 개발 및 최적규모 설계기법에 따른 지하 저류공동 배수시스템 개발로 구성되어 있으며 주요 연구개발 내용은 아래와 같음
□ 지하저류공동 건설기술 개발
○ 지하 저류공동 건설을 위한 건설기술 설계 가이드라인 개발
○ 지하 저류공동 지보 및 안정성 확보를 위한 보강기술 개발
○ 구조물 손상도 평가를 통한 개착부 굴착 및 보강공법 선정기술 개발
□ 지하공간 침수 위험도 평가기법 개발
○ 지하공간 침수 위험도 평가기법 개발
○ 지하공간 침수위험도 평가 및 유입수 유도처리방안 설정
□ 최적규모 설계기법에 따른 지하 저류공동 배수 시스템 개발
○ 지하저류공동의 설계 저류량 및 수리영향 인자 분석
○ 지하저류공동의 침수저감효과 분석
○ 기존 배수 체계와 지하저류공동의 연계 방안</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">지하 저류공동, 언더피닝, 필라, 침수위험도 평가, 최적설계</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Underground Retention Cavern, Pillar, Adjacent Construction, Inundation Risk Assessment, Optimal Design</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

복합지하공간 수해 방지를 위한 지하 저류공동 건설기술 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

최근 기후변화에 의한 이상기후로 인해 전 세계적으로 집중호우로 인한 하천범람 등 많은 홍수재해가 발생하고 있으며, 우리나라도 돌발성 집중호우에 인한 인명과 재산 피해가 2000년대 들어 급격히 증가하고 있음. 국내외의 기상, 생태 및 지구환경 전문가에 따르면 지속적으로 지구적인 기후변화 자연재해가 가속될 것으로 전망함. 더구나 인구밀도가 높은 도시의 경우, 도시화에 따른 불투수 면적 증가에 의한 지표유출량의 증가로 집중호우에 따른 수재해에 매우 취약하여 위험성이 증가함.

도심지의 급격한 산업화·도시화로 인하여 지상 여유부지가 없어 지상공간이 부족하고 토지가상승 등의 문제점이 있는 반면, 최근 대형•대심도화, 다기능화로 발전하고 있는 도심지 지하복합공간 건설 분야 측면에서 그 활용정도가 지속적으로 증가할 것으로 예측되나, 반면에 폐쇄 공간으로 구성되는 지하공간은 홍수 침수 시 재산적 피해와 치명적인 대규모의 인명피해 등이 예상됨.

이에 대하여 도시수방시설의 하나로 빗물 저류시설은 도심지내 대규모 지상 빗물저류시설의 입지여건 제한성에 대한 대안이 될 수 있고 관련된 홍수유발 빗물유출 저감 및 빗물 재활용에 있어 매우 효과적인 방법으로 평가되고 있음. 그러나 기존 연구는 주로 임의 유역 내 도시홍수에 대한 연구나 홍수저감 목적의 지상 수공구조물에 주로 초점이 맞추어져 있고, 지하 저류 시설의 적용을 위한 종합적인 설계 및 건설기술 개발 관련 연구는 미흡함. 그러므로 날로 심화되고 있는 기후변화, 도심지 돌발 홍수재해에 의해 발생할 수 있는 지하공간의 침수재해에 대하여, 안전한 시민의 복합지하공간의 확보와 개발 등을 위하여 보다 적극적인 구조적 수방재시설과 같은 침수피해 대응기술이 필요함.

따라서 본 연구 과제를 통하여 도심지에서 지하저류 공동 건설을 위한 핵심 요소기술을 확보하고, 복합지하공간의 수재해 위험성을 평가할 수 있는 방안과 지하공간내로 빗

물 유입 시 유입 유출수의 동적 흐름거동을 분석함으로써 지하공간 침수 비상 시 대피체계의 기본 자료를 제공함. 또한 최적 설계기법에 기반하여 빗물저류공동 배수체계와 지하공간을 포함한 주변 유역의 배수체계와의 연계 방안을 고려하여 복합지하공간과 주변 유역의 침수피해를 예방 할 수 있는 방법을 개발하고, 이를 이용하여 적절하고 종합적인 지하공간 수재해 방재방안을 제안하고자 함.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구과제는 복합지하공간의 침수재해 저감을 위한 대단면 지하저류공동의 건설기술 개발, 복합지하공간의 침수위험도 평가기술 개발 및 최적규모 설계기법에 따른 지하 저류공동 배수시스템 개발로 구성되어 있으며 주요 연구개발 내용은 아래와 같음

□ 지하저류공동 건설기술 개발
- ○ 지하 저류공동 건설을 위한 건설기술 설계가이드라인 개발
- ○ 지하 저류공동 지보 및 안정성 확보를 위한 보강기술 개발
- ○ 구조물 손상도 평가를 통한 개착부 굴착 및 보강공법 선정기술 개발

□ 지하공간 침수 위험도 평가기법 개발
- ○ 지하공간 침수 위험도 평가기법 개발
- ○ 지하공간 침수위험도 평가 및 유입수 유도처리 방안 설정

□ 최적규모 설계기법에 따른 지하 저류공동 배수 시스템 개발
- ○ 지하저류공동의 설계 저류량 및 수리영향 인자 분석
- ○ 지하저류공동의 침수저감효과 분석
- ○ 기존 배수 체계와 지하저류공동의 연계 방안

전체적인 기술개발 과제 및 목표별로 저류공동 배수체계를 고려한 빗물저류공동 건설기술 개발을 위하여 각 연구 개발단계별 세부과제별 연구목표와 주요 연구내용을 설정하였으며 요약하면 다음과 같음.

가. 1차년도 기술개발 단계

○ 지하 저류공동 및 인접구조물 안정성 확보 방안 수립

- 지하 저류공동의 건설기술 기본 개념 정립
- 언더피닝을 통한 필라구조의 하중 저감효과 규명 및 필라 지보시스템의 이론적규명
- 근접시공에 의한 구조물 손상도 평가기법 구축

○ 지하공간 침수위험도 평가 방안 수립

- 지하공간 침수위험도 정의 및 평가개념 정립
- Risk Analysis 기법 설정
- 지하공간내 유입수 동적 거동 평가 방안의 설정

○ 지하 저류공동의 개략적인 위치선정에 따른 배수 시스템 효과 분석

- 개략적인 위치선정에 따른 지하저류공동의 설계저류량 및 수리영향 인자 분석
- 개략적인 위치선정에 따른 지하 저류공동의 침수저감효과 분석
- 기존 배수 체계와 지하 저류공동의 연계 사례 분석

나. 2차년도 기술개발 단계

○ 지하 저류공동 건설 핵심요소기술 개발

- 개착공법 및 공동·터널 공법에서의 핵심요소기술의 적용성 사전평가
- 필라 지지구조체 개발 및 효과규명
- 개착부 굴착공법 및 지하저류공동 시공단계별 기존 구조물에 대한 손상도 평가

○ 지하공간의 침수위험인자 분석 및 정성적•정량적 평가 기준 수립

- 침수 위험인자의 정성적•정량적 평가 수행
- 수치시뮬레이션 방법에 의한 지하공간내 유출해석, 동적거동 분석
- 수리모형실험 방법에 의한 지하공간내 유출 비교평가

○ 지하 저류공동시설 설치 및 연계시나리오를 고려한 배수시스템 효과 분석

- 지하 저류공동의 설계저류량 및 수리영향 인자 평가기법 개발
- 지하 저류공동의 침수저감효과 분석
- 기존 배수체계와 지하저류공동의 연계 시나리오 검토

다. 3차년도 기술개발 단계

○ 지하 저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인 개발

- 지하 저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인 수립
- 필라의 형상 및 구조에 대한 연구
- 구조물 손상도 평가를 통한 개착부 굴착공법 선정 및 보강공법 기술 개발

○ 지하공간 침수위험도 평가기법 및 가이드라인 설정

- 지하공간 침수위험도 평가기법의 검증 및 가이드라인 작성
- 지하공간 침수억제 및 유입수 유도처리 방안 수립

○ 최적규모 설계기법에 따른 지하 저류공동 배수 시스템 개발

- 지하 저류공동의 최적설계기법 기반 설계저류량 및 수리영향인자 평가분석
- 최적규모 설계기반 지하 저류공동의 침수저감효과 분석
- 기존 배수체계와 지하 저류공동 연계방안

Ⅳ. 연구개발결과

전체적인 기술개발 과제 및 목표 당해 연도(3차년도)의 저류공동 배수체계를 고려한 빗물저류공동 건설기술 개발과 관련하여 각 세부과제 연구목표별 주요 연구개발 결과를 요약하면 다음과 같음.

1. 지하 저류공동 건설기술 개발

가. 지하 저류공동 건설기술 기본개념

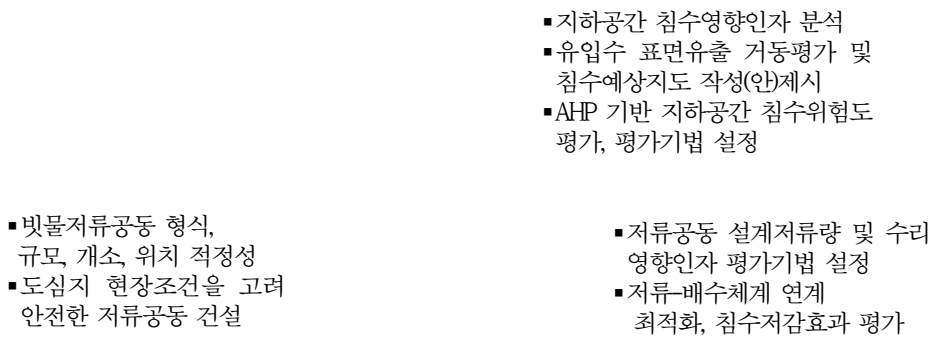
해외의 대표적인 수해방재용 지하 빗물저류 공동•터널 시스템으로 미국 시카고 지하저류터널, 유럽의 경우 프랑스파리의 대규모 우수배수터널, 일본 칸다가와 지하조절지, 사이타마현 수도권 외곽방수로, 말레이시아 쿠알라룸푸르시의 SMART터널 등이 조사되었음. 조사된 해외의 도심지 수방시설, 시스템은 기후변화 대비 도심지의 집중호우에 따른 침수피해에 대하여 비상시 원활한 시스템운영을 통하여 적극적인 구조적 수방체계로 분석됨.

도심지 중대단면 지하 빗물저류공동을 건설함에 있어서 근접시공은 불가피하며, 이는 인접한 구조물의 변형 및 손상의 주요 요인이 되고 있음. 따라서 도심지 지하저류공동의

건설을 위한 개착구간 및 터널구간의 안정성확보방안이 필요하고, 관련된 요소기술에 대한 조사 분석 및 선정이 요구됨. 또한, 복합지하공간 및 주변지역의 침수피해를 저감하기 위해서 기존 및 신설 배수체계와의 연계방법이 중요하며, 지하 저류공동의 적용과 보급을 위해 저감효과에 대한 검증, 최적위치 및 규모산정기법에 대한 연구가 선행되어야 함.

나. 지하 저류공동 건설을 위한 핵심요소기술 체계

개발하는 수방재 지하저류공동은 지하시설물 간섭이나 입지조건, 저류배수연계방안이 고려된 중대규모의 복수개소의 공동 건설임. 그러므로, 안정성확보 및 확인을 위해 필라부지지구조체 신공법을 개발, 개착공법 종류별 손상도평가 방안을 설정, 분석하였음. 또한, 도심지 홍수시에 복합지하공간의 침수취약성과 위험도 분석을 하였고, 지하저류공동과 저류-배수체계 최적화설계기법 개발 및 활용을 통해 침수저감효과를 평가 등을 핵심요소기술로 선정하여 빗물저류 Cavern-수방재 시스템에 대한 연구사항을 설정하였음.



다. 필라 지지구조체 개발 및 효과규명

제시하는 신개념의 필라지지 시스템은 원지반 암반강도를 이용하여 지하구조물 기둥구조체로 활용하기 위해 필라부를 3축응력 상태로 적극적으로 유도하는 구조임. 일차적으로 구조체로의 성능을 가질 수 있는 지보시스템을 고안하였고, 연구 단계별 필라부 보강에 따른 지반의 응력상태변화를 시공단계별로 하중메카니즘을 연계하여 실험적 방법과 수치해석적 방법을 사용하여 규명하였음. 선행터널과 후행터널의 필라부 측벽에서의 응력변화와 변형거동을 파악하였으며, 터널 굴착후 타이로드 등에 의한 프리스트레스를 가하여 횡방향의 구속압의 증가로 인해 필라부 지반부의 위험한 응력상태가 안정화됨을 검증함. 개발된 필라지지구조체는 가압패널을 이용하여 효과적인 횡방향 구속압력체계를 구축할 수 있고, 터널사이에 있는 필라부를 병설 공동터널의 주요 연직지보구조체로 직

접적으로 사용할 수 있는 결론을 얻었음.

라. 근접시공 시 구조물 손상도평가와 개착부 복합 보강공법 선정

근접시공 시의 구조물 손상도 평가 개념에 기초하여 4개 종류의 복합 흙막이 지보형식을 고안하였고, 관련한 개착부 흙막이 복합 보강공법 설명서(안)을 제시하였음. 실내 축소모형실험을 이용한 방법을 통하여 근접 시공 시의 기존 시설물 및 배면 지반에 대하여 흙막이 벽체를 모의한 벽체 세그먼트의 변형 형태를 달리하고, Trapdoor를 이용하여 하부 공동 굴착에 따른 침하 변형을 모의실험을 수행함으로써 축소모형을 이용한 위치별 지표침하거동을 파악하였음. 또한 해석적 방법으로 조적식 상부구조물을 설정하여 블록모델에 적합한 개별요소법 프로그램인 UDEC을 이용하였으며, 시공단계별 이격거리에 따른 수평 및 각 변위를 검토하여 지표침하 양상에 따른 인접구조물의 손상정도를 파악하였음. 해석결과에 따라 흙막이굴착에 연이은 하부 터널 시공 단계별 설정한 복합 지보공법별 인접구조물의 정량적 손상도 평가를 위한 그래프를 분석하였으며, 결과는 흙막이 공법별 벽체변형제어가 가능할 경우 설계 또는 시공단계에서 손상도평가 그래프를 이용한 인접구조물의 안정성 확보안을 제시할 수 있을 것임.

2. 지하공간의 침수 위험도 평가기법 개발

가. 침수 위험인자의 정성적•정량적 평가 수행

AHP(Analytic hierarchy process)기법을 기반으로 하여 지하공간 시설물에서의 침수 위험도 평가기법의 체계를 설정하였음. 침수위험인자의 분류, 분석과 중요도 분석을 수행하였고, 수재해/터널 분야 총 60부의 전문가 설문조사를 통해 인자의 중요도 분석을 실시하였음. 침수위험인자 중요도 분석 결과, 강우특성외의 사람이 제어 가능한 영향인자중 구조물의 적극적인 배수시설조건, 그 중에서 특히 저류공동•배수로터널 등의 구조적 수방시설이 상대적으로 중요한 것으로 나타났음. 또한 지하공간 침수위험도를 산정하는 방안과 5개범주의 종합적인 침수위험지수 등급을 구분하여 제시하였고, 임의의 실제 가상현장을 정하여 침수위험도 조사표(안)을 이용하여 각 인자별 침수위험도를 시험평가를 수행하였음.

나. 수치시뮬레이션 방법에 의한 지하공간내 동적 유출분석 및 수리모형실험 방

법에 의한 지하공간내 유출 비교평가

수치시뮬레이션에 의한 지하공간내 유입된 빗물의 동적유출거동분석으로, 부산지역내 임의의 현장을 가상선정하여 수행하였음. 침수위험인자에 대한 민감도 분석을 위해 침수방지턱 유무, 높이에 따른 영향 등 인자변화 시나리오에 따라 1D-2D연계 빗물유출거동을 분석하였으며, 분석 결과 특히 저류공간 설치를 통한 빗물배수 효과로 인해 지하공간내 침수심이 약 절반 이하로 감소되어 침수억제 효과를 확인하였음. 선정된 지하공간 시설에 대하여 1/20 축척의 축소모형을 제작하였고 이에 따른 수리모형실험과 함께 비교분석결과 전반적 경향이 수치해석 시뮬레이션과 유사한 결과가 나타났음. 침수방지턱이 없는 경우와 방지턱의 높이 증가에 따른 검토결과, 지하공간내 침수심 0.5m에 도달하는 시간은 침수방지턱의 높이증가에 따라 증가하여 침수방지턱 설치 및 높이증가에 따른 침수지연 효과를 확인하였음.

다. 지하공간 침수위험도 평가 가이드라인 개발

과제의 연구성과에 기초하여 집중호후 시 도심지 침수취약성이 큰 복합지하공간에 대한 침수위험도 평가 및 침수재해 저감, 기타 사항 등 평가기법에 대한 가이드라인(안)을 작성, 제시하였음. 가이드라인(안) 구성은 도심지내 임의 유역의 홍수 발생시 복합지하공간의 침수취약성에 대하여 침수원인과 침수위험인자에 대한 사항을 언급하였고, AHP 기법 기반의 침수위험도 평가 기법 및 기준을 제시하고 관련 침수위험인자 평가에 대한 종합적인 침수위험도 등급과 조사 평가방법을 제시함. 또한 침수위험도 평가기법(안)에 근거하여 복합지하공간에서의 침수예상분석과 침수예상지도 작성방안을 제시하였고, 이에 대한 침수예방 및 저감시설, 기타 피난체계 등 비구조적 수방사항에 대하여 명시하였음.

3. 최적규모 설계기법에 따른 지하 저류공동 배수 시스템 개발

가. 배수체계 연계 저류공동 설계저류량 및 수리영향인자 평가

종합적인 맨홀, 관거, 펌프, 지하 저류공동 연계에 따른 저류량과 수리영향인자 평가는, 유량 추적을 위한 관거•맨홀과 유출량을 위한 소유역 특징 및 배수 특성과 같은 자료를 필요로 하는 도시 유출 모형인 SWMM을 이용하여 평가할 수 있음. 침수가 발생한 실 강우량을 기존 배수 체계를 기본으로 구축된 도시 유출 모형에 적용하여, 부산시 센텀시티 및 서울시 올림픽공원 지역에 대하여 종합적인 맨홀, 관거, 펌프, 지하 저류공동 연계 고려에 따른 저류량과 수리영향인자를 평가함. 올림픽공원 지역의 경우 모형 분석

한 결과 설치 전 71곳의 침수 구역에서 설치 후 52곳으로 19곳의 침수 피해가 저감 되었으며 약 27%의 저감 효과가 나타났음.

나. 지하 저류공동의 최적규모 설계기법에 따른 침수저감효과 분석

SWMM 모형과 다목적 최적화 알고리즘을 연계하여 목적함수 설정을 위해 집중 호우에 의한 침수발생지점들을 도시 유출모형을 이용하여 모의하고, 침수발생규모가 큰 지점들을 대상으로 저류지 설치 후보지와 저류지의 규모를 선정한 후, 최소비용과 월류저감의 최대화를 목적 함수로 취하여 최적 저류지 설치 및 용량을 결정하는 과정을 통해 침수를 저감을 모의하였음. 분석 단계에서 대상 지역에 대하여 종합적으로 기존의 맨홀, 관거, 펌프 및 지하저류공동 연계에 따라 침수저감 효과를 파악하고, 지역내 저류조 설치 후보지점에 대하여 지하저류시설이 없을 경우, 1개소 또는 2개소 설치 조합에 따라 목적함수별 침수저감효과를 확인하였음. 도출 결과들은 저류공동을 설계시 강우사상별 공동 설치에 따른 최대의 침수저감효과를 파악함으로써 공동 규모•위치•개소 등을 결정할 수 있는 기본 자료로 활용될 것임.

다. 기존 배수체계와 지하저류공동의 연계방안

지하저류공동 설치 시나리오를 고려한 기존 및 신규 배수체계연계 방안으로 내배수시스템의 주요 운영체계중 하나인 유수지 및 배수펌프장에 대하여 실제적인 적정 펌프운영을 위한 문제점과 개선안을 분석하였으며, 내배수시스템의 실시간 운영모형 개발의 필요성을 제시함. 내배수시스템의 운영에서는 하류부의 수위를 고려한 유출량을 결정이 되어야하고 유수지 수문 개폐여부 및 빗물펌프장의 운영을 실시간으로 하류 수위와 연계하는 모형이 필요함. 기존 배수 관망체계를 포함하여 하류단 관망체계를 개선하였을 경우에 대하여 지하저류 시설을 설치하였을 때 월류 침수의 영향을 검토하였음.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

국내 지형 및 도시지역 특성을 고려한 배수 이론 체계의 구축과 도시 우수 배수 시설의 설계 기술에 기반한 지하 저류공동 최적 설계 기술을 확보하여 방재 대책 수립에 기여할 수 있음. 또한 논문, 세미나 발표 및 언론기고 등을 통하여 지하 저류공동의 필요성

을 환기시키고 관련 정부부처에 본 연구개발의 성과를 홍보하여 지하 저류공동을 정책적인 도시지역 수방재 대책으로 반영함.

기후변화로 인한 도시지역 침수피해 발생 위험이 증가하고 있는 추세로 이에 대한 대책의 일환으로 지하 저류공동의 설계 기술은 방재시설물 설계 기준의 기초자료로 활용될 수 있으며, 도시 지역의 내수 침수 예방을 위한 기존 도시 우수 배수 시스템의 지하저류공간을 활용한 침수방지 기능을 합리적으로 도출할 수 있는 이론적 근거를 제시함으로써 국토해양부 및 환경부의 현재 제도 및 설계 지침서의 개선을 위하여 활용될 수 있음

연구개발 성과 중 개발 공법을 대상으로 기술실시계약 등에 의한 실용화, 사업화를 추진할 계획임. 현재 국내외 필라(Pillar)보강 기술은 콘크리트 구조물을 벽체 또는 기둥으로 사용하는 것이 대부분이나, 본 연구에서 원지반을 보강한 신공법의 개발을 통해서 지하 저류공동 시공 시 굴착공정 및 시공단계가 줄어들어 기술적 경쟁력 향상뿐만 아니라 핵심기술의 수출을 통해서 국내 시공기술의 우수성을 인정받을 수 있을 것으로 기대됨. 지하 저류공간 시공에 따른 명확하고 합리적인 인접구조물의 거동특성을 규명하고, 지하구조물 및 인접구조물의 내구성 및 안정성을 향상시키며 인접구조물의 영향을 최소화하는 공법 적용시나 신공법 개발시 활용성이 우수함.

과제 참여기업의 축적된 경험과 실적을 바탕으로 본 과제의 종료 후, 참여기업의 프로젝트에 본 연구개발을 통해 개발된 요소기술을 우선 적용하고 시험 시공함으로써 기술의 우수성을 확인할 계획임. 또한 방재안전대책수립 대행 지정 회사로서, 과제의 성과를 활용하여 방재안전대책 수립에 적극 적용하여 기술의 반영률을 높일 수 있을 것으로 예상됨.

SUMMARY

Ⅰ. Title

Development of Construction Technology of Rainwater Storage Cavern for Preventing the Inundation in Multi-complex Underground Spaces

Ⅱ. Purpose and Necessity of Research

Recently, frequent flood disasters (e.g. river flooding, urban inundation, etc.) have been caused by localized torrential downpours due to abnormal climate resulting from global climate change. In Korea, there have been a rapid increase in the loss of life and damage property due to sudden localized heavy rainfall since the 2000s. According to the fourth report of IPCC (2007), abnormal climate of the earth is caused by artificial factors. The report analyzed that it results from greenhouse gas emissions due to human activities and industrialization and from the green house effect. Weather and global environmental experts are expecting that these global climate changes and natural disasters will accelerate.

In cities of high population density, there is an increase in the risk of flood disaster resulting from localized torrential downpours caused by increased surface runoff volume due to urbanization. When a rapid inflow of a lot of water follows heavy rainfall exceeding the drainage capacity of the basin, the followings are greatly vulnerable to inundation damages: (1) shopping and residential areas located in low-lying areas in a city and (2) medium- and large-scale closed underground spaces and underground infrastructures. When

surface runoff water flows into underground space after any inland floods, the damage spreads in a short time and there is high probability of causing huge losses of lives, great property damage and massive social costs.

In order to provide warnings and measures about these kinds of large scale flood disasters, the presented research is carried out for the development of the construction technologies of rainwater storage cavern for preventing the inundation in multi-complex underground spaces. This research includes: (1) the development of construction technologies of the retention cavern, (2) the inundation risk analysis based on AHP in underground space, and (3) the improved drainage system for the flood mitigation in urban area.

Ⅲ. Research topics and Results

In this study, the research has categorized into three subjects, they are: (1) Construction technologies of the rainwater storage cavern, (2) Inundation risk analysis in underground space, and (3) Integrated improved drainage and management system for the flood mitigation sing optimization technique in urban area. The research topics and results are as follow:

(1) Construction technologies of the rainwater storage cavern

The main core subjects are selected through a examination process of existing domestic and overseas technologies, which were greatly developed during the past couples of decades in tunnelling construction and R&D fields. And technical feasibility study was carried out, that can present the ultimate objective, scope, and achievement by analyzing validity of research procedure.

An improved reinforced pillar structure using tie-rods and pressurizing panels is proposed to construct multi-placed rainwater detention caverns in urban area. It is designed for the development of construction methods of

reinforced pillar system to improve the rock strength based on a confining pressure and global arching concepts. Stress concentration cannot be avoided during the excavation of the following tunnel, and might lead to an unstable condition in the pillar. The applicability of the reinforced pillar system is verified through an experimental approach. Applying the pre-stress (or the confining pressure) will switch the pillar stress back to an elastic state and secure the stability of the pillar. It has been shown that the proposed pillar system has a practical advantage of exerting the strength of in-situ ground, as a time and cost-saving structure, without relying on pre-cast concrete structure. This research provides a pillar design guidelines, including other general specifications of tunnelling, which are developed through the theoretical, experimental methods and numerical simulations. The guides will be presented so that tunnel & cavern planners, engineers could recognize fundamental factors that should be considered in pillar design.

Adjacent excavation of urban area require deliberate analysis not only safety of inherent retaining wall but also influence on ground and structure. To control damage or mitigate their effects on nearby structures, it is essential to recognize the whole mechanism of the behavioof structure and its surrounding ground during construction. In this study, model test is carried out by verifying the measured surface settlement according to ground and tunnel excavation. And numerical analysis for deriving construction settlement is conducted. The purpose of this approach is to investigate the effects of excavation- or tunneling-induced ground movement on nearby structures, considering soil-structure interactions, and to provide a procedure to estimate reasonably the structure's damages before construction. And this research will provide rational methods of assessment for structure's damage from the result of experimental and numerical analyses, and appropriate measures such as underpinning or reinforcing structures etc.

(2) Inundation risk assessment in underground space

A modern urban flood disaster is caused by a heavy rainfall resulting from climate changes in a highly developed downtown area. This disaster can be defined as the so-called 'Natural-Technological (Na-Tech) Disaster' in that natural disasters (e.g. typhoon, flood, earthquake, etc.) are accompanied by technical disasters resulting from mankind's construction development or industrialization or the damage grows due to complex aspects of those technical disasters. With the increased number of underground facilities, safety issues of underground spaces against natural disasters have become an important aspect of urban safety. Underground facilities located in flood prone areas are very vulnerable to flood disasters. And in order to implement counter-measures to resolve this problem, the flood risk in underground spaces should be properly assessed.

Considering Na-tech events, one of the main current efforts is the definition of a risk assessment methodology for flood and technological events. This vulnerability estimation can be performed by analyzing a series of parameters that pertain to physical, systemic, and functional aspects through the Analytical Hierarchy Process methodology (Saaty, 2006a, 2006b). AHP is a methodology to support decision-making processes by defining possible alternatives within a weighed multi-criteria framework. The factors are weighted from the responses of 60 experts to questionnaire. In this study, the AHP approach is used with four criteria to estimate the importance of factors as criteria with three or four alternatives relatively related to the inundation of underground structures: (i) local topography and site condition, (ii) local precipitation condition, (iii) drainage system of facility, and (iv) inundation-vulnerability, safety and evacuation system of facility.

The AHP result of weights on the influence factors shows that 'Local precipitation condition' factor is the most preferred, followed by 'Drainage system of facility' on the second ranked level. 'Drainage system of facility' on a

structure can be assessed as one of the most important flooding factors, considering that the 'Local precipitation condition' is an uncontrollable, meteorological factor. At the third-level assessment of influence factors, 'Rainwater drainage tunnel, storage cavern' is the most important factor for the criterion of 'Drainage system of facility.' And it is shown that 'The amount of rainfall, rainfall intensity' and 'Capacity of drainage system in a site' have the highest value for each criterion of 'Local precipitation condition' and 'Local topography and site condition,' respectively.

The scope of works includes detailed computational modelling to more clearly define the flood risk resulting from surface and sub-surface pipe flow interactions. In the characteristics of the flood risk areas, the more detailed hydraulic modelling needs to be able to represent the following characteristics: (a) Improved analysis of inundation flows via better definition of physical situations and hence improved accuracy and confidence in results. (b) Prediction of flood hazards through parameters such as the velocity depth product and flood duration.

For these reasons, in the case of the underground inundation study, it is decided to research one dimensional - two dimensional (1D-2D) modelling systems and select one for carrying out the more detailed hydraulic modelling. Continuity and momentum equations are used as basic equations in the model. An improved numerical model is used, which can treat both surface flow on the underground space and inundation behavior, for the simulation of an inundation flood assumed in an underground space. A 1D-2D linked model is applied, with the consideration of rainwater water storage and inundation hazard parameters, such as the flow velocity, duration, and depth of inundation in underground spaces. This results provide detailed information on parameters and deliver the required strategic information for evacuation planning.

An experimental approach is also conducted using a 1/20-scaled hydraulic model of an underground space in the city of Busan, in order to study the

behavior of surface flow in the area. The test result shows that the time to reach the immersion depth of 0.5 m is delayed, compared to a scenario for a simulated storage cavern. This can be used to secure the evacuation time in a flooding emergency. The general aspects of surface flow of the experimental model show the similar behavior as that of the numerical model.

(3) Integrated improved drainage and management system using optimization technique in urban area

Urban floods are closely related to changes in the urban environment. They are influenced by urban area characteristics, and flooding occurs also when flows exceed the designed capacity of drainage system and probably causes great damage to property and human life, especially in the urban area with the underground spaces such as underground shopping malls, subway stations, etc. The primary purpose of the improved drainage system is to provide the newly operating and maintenance of drainage system linked with the existing sewer system to mitigate inland flooding in the urban area and the underground space.

Rational and reliable simulation model for inflow and inundation behaviors are developed in this study to predict inundation processes due to floods in underground spaces. And the simulation is to identify the intensity of rainfalls that could cause water entry into the underground space, paths of water entering the underground structure, flooding depth etc.

For the purpose of evaluating the mitigation effect of inundation, numerical simulation is performed using a 'Storm Water Management Model', which considers discharge with rainwater storage facilities in a new-town area. The simulation reveals the applicability of a flood mitigation system. The results show a newly drainage system linked with the existing sewer system to mitigate inland flooding, and to assess the mitigation effect of inundation when installing an underground rainwater storage cavern in an urban area.

The Integrated improved drainage and management system based on optimization design concept provides the applicability for the ensemble flood control and mitigation system, and shows the best place to be located and the appropriate size of the underground retention cavern, then give improvements of laws, guidelines related to flood control in urban area.

Ⅳ. Application

By conducting this research, it will be expected that the development of high-tech system for flood forecasting, enforcement of flood disaster protection ability by securing advanced planing and design technologies, and minimization of inundation disaster damage in the underground spaces and urban area. And the results of these research will upgrade its control and maintenance system through the newly and improved technology level against flooding disaster, make possible by the creation of the rainwater storage cavern facilities and systems.

The results of this study can contribute to the construction of a high accuracy integrated flood damage management system for flood disaster prevention and mitigation of multi-complex underground spaces. The new system and technologies will contribute to the establishment of the national integrated flood disaster prevention system and protect lowland management system in urban area, and improve the existing flood control system of the Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, the National Emergency Management Agency, and local governments, and would be essential for their decision making process for flood disaster prevention system.

목 차

제 출 문 ····· i

보고서 요약서 ····· ii

요 약 문 ····· iii

SUMMARY ····· xii

제 1 장 연구개발과제의 개요 ····· 1

제 1 절 연구개발의 배경 및 필요성 ····· 1

1. 연구개발의 배경 ····· 1

가. 기후변화와 기상재해 동향 ····· 1

나. 도시지역 수재해 특징 및 대책 ····· 2

2. 연구개발의 필요성 ····· 6

가. 지하공간의 개발과 수재해 ····· 6

나. 지하 저류시설 건설의 문제점 및 극복과제 ····· 7

다. 연구개발의 기본개념 ····· 8

제 2 절 연구개발의 목표 및 범위 ····· 9

1. 연구개발의 최종목표 ····· 9

가. 최종목표 ····· 9

나. 최종목표의 성격 및 설정 근거 ····· 9

2. 연차별 연구목표 및 내용 ····· 10

가. 연구목표 및 내용 총괄 ····· 10

나. 1차년도 연구목표 및 내용 ····· 12

다. 2차년도 연구목표 및 내용 ····· 15

라. 3차년도 연구목표 및 내용 ····· 18

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 21

제 1 절 국내 기술 및 산업 동향 ····· 21

제 2 절 국외 기술 및 산업 동향 ····· 25

제 3 장 연구개발 주요내용 ····· 29
제 1 절 지하 저류공동 건설기술 ····· 29
1. 지하 저류공동 및 인접구조물 안정성 확보방안 수립 [1차년도] ····· 29
가. 지하 저류공동 건설기술 기본개념 정립 ····· 29
나. 언더피닝을 통한 필라구조의 하중 저감효과 규명 ····· 40
다. 필라 지보시스템의 이론적 규명 ····· 46
라. 근접시공에 의한 구조물 손상도 평가기법 구축 ····· 50
2. 지하 저류공동 건설 핵심 요소기술 개발 [2차년도] ····· 61
가. 빗물 지하저류공동 건설에서의 핵심요소기술 적용성 사전평가 ····· 61
나. 필라 지지구조체 개발 및 효과 규명 ····· 72
다. 개착부 굴착공법 및 저류공동 시공단계별 기존구조물에 대한 손상도평가 ···· 82
3. 지하 저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인 개발 [3차년도] ····· 91
가. 필라의 형상 및 구조에 대한 검토 ····· 91
나. 구조물 손상도 평가를 통한 개착부 굴착공법 선정 및 보강공법 기술 ····· 111
다. 지하 저류공동의 건설을 위한 설계가이드라인(안) 수립 ····· 130

제 2 절 지하공간 침수위험도 평가기법 ····· 135
1. 지하공간 침수위험도 평가 방안 수립 [1차년도] ····· 135
가. 지하공간 침수위험 취약성과 평가기법 설정 ····· 135
나. 지하공간내 유입수 동적거동 평가방안의 설정 ····· 140
2. 지하공간의 침수위험인자 분석 및 정성적•정량적 평가기준 수립 [2차년도] ····· 145
가. 침수 위험인자의 정성적•정량적 평가 수행 ····· 145
나. 수치시뮬레이션 방법에 의한 지하공간내 유출해석, 동적거동 분석 ····· 158
3. 지하공간 침수위험도 평가가이드라인(안) 설정 [3차년도] ····· 167
가. AHP기반 침수위험도 평가에 따른 빗물유입수 침수억제, 수위저하 체계 ····· 167
나. 지하공간 침수예상 분석을 통한 침수예상지도 작성(안) ····· 171
다. 지하공간 침수위험도 평가기법 가이드라인(안) ····· 179

제 3 절 최적규모 설계기법에 따른 지하 저류공동 배수시스템 ····· 182
1. 지하 저류공동의 개략적 위치선정에 따른 배수시스템 효과 분석 [1차년도] ····· 182
가. 초과우량 대상강우 선정 ····· 182
나. 지하 저류공동 저류량 산정 ····· 184

다. 지하 저류공동 설치에 따른 침수저감효과 분석 ····· 186
라. 지하 저류공동 설치에 따른 수리영향인자 분석 및 도시유역에 적합한
수리수문해석 모형의 검토 ····· 188
마. 지하 저류공동 설계를 위한 최적화 기법의 검토 및 선정 ····· 190
바. 도시유역 기존 배수체계 분석 ····· 191
2. 지하 저류공동시설 설치 및 연계 시나리오를 고려한 배수시스템
효과의 정량적 분석 [2차년도] ····· 195
가. 지하 저류공동의 설계 저류량 및 수리영향 인자 평가기법 개발 ····· 195
나. 지하 저류공동의 침수저감효과 분석 ····· 201
다. 기존 및 신규 배수체계와 지하 저류공동의 연계방안 ····· 221
3. 최적규모 설계기법에 따른 지하 저류공동 배수시스템 [3차년도] ····· 232
가. 지하 저류공동의 설계저류량 및 수리영향 인자 평가기법 ····· 232
나. 지하 저류공동의 침수저감효과 분석 ····· 235
다. 기존 배수체계와 지하 저류공동의 연계방안 ····· 252

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 ····· 267

제 1 절 연구성과 목표 달성도 ····· 267
1. 1차년도 연구 성과목표 대비 실적 ····· 267
가. 연구성과 목표 달성 실적 ····· 267
나. 특허출원 ····· 268
다. 국내외 학술지 논문 ····· 268
라. 국내외 학술발표 ····· 268
마. 수치해석 ····· 269
2. 2차년도 연구 성과목표 대비 실적 ····· 270
가. 연구성과 목표 달성 실적 ····· 270
나. 특허출원 ····· 271
다. 국내외 학술지 논문 ····· 271
라. 국내외 학술발표 ····· 272
3. 3차년도 연구성과 목표 대비 실적 ····· 275
가. 연구성과 목표 달성 실적 ····· 275
나. 특허출원, 등록 ····· 276
다. 국내외 학술지 논문 ····· 277

라. 국내외 학술발표 ····· 278
마. 가이드라인 및 매뉴얼 ····· 280
제 2 절 연구개발 수행진도율 및 목표의 달성도[3차년도] ····· 289
제 3 절 관련분야에의 기여도 ····· 290
1. 기술적 측면 ····· 290
2. 경제•산업적 측면 ····· 290
3. 사회•문화적 측면 ····· 292

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 293
제 1 절 연구성과의 활용방안 ····· 293
1. 활용 분야 ····· 293
2. 기대 효과 ····· 294
3. 타 산업 및 국내외 연계, 협력 가능성 ····· 295

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 296
제 1 절 대형 빗물저류터널 및 지하저류공동 사례 ····· 296
1. 일본 칸다가와 지하조절지 ····· 296
2. 미국 시카고 TARP(Tunnel And Reservoir Plan) ····· 298
3. 프랑스 빗물저장터널(4 tunnels and reservoirs) ····· 300
4. 일본 사이타마현 ; 수도권 외곽 방수로 ····· 302
5. 말레이시아 스마트터널 사례 ····· 304
제 2 절 교토대 방재연구소 수방재 연구사례 ····· 307
1. 수리모형실험을 통한 지하공간 침수 시뮬레이션 ····· 307
2. 지하공간 침수시 극한 피난조건에 대한 실규모 시험 ····· 308

참고 문헌 ····· 310

CONTENTS

Chapter 1. Introduction ····· 1

Sec 1. Background and needs of research ····· 1

1. Background of research ····· 1

가. Trends of climate change and climatic damage ····· 1

나. Flood control measure for considering features of urban area ····· 2

2. Needs of research ····· 6

가. Development of underground space and flood damage ····· 6

나. Problem solving plan in construction of underground rainwater storage facilities ····· 7

다. Basic concept of research ····· 8

Sec 2. Goals and scopes of research ····· 9

1. Final goals of research ····· 9

가. Final goals ····· 9

나. Features and basis of final goals ····· 9

2. Anual goals and contents of research ····· 10

가. Goals and contents ····· 10

나. Goals and contents in the 1st yearly research plan ····· 12

다. Goals and contents in the 2nd yearly research plan ····· 15

라. Goals and contents in the 3rd yearly research plan ····· 18

Chapter 2. Domestic & International Technology Trends ····· 21

Sec 1. Domestic techonology trends ····· 21

Sec 2. International techonology trends ····· 25

Chapter 3. Research Development Contents and Results ····· 29

Sec 1. Construction techonology of rainwater storage cavern ····· 29

1. Stabilizing measures of rainwater storage cavern, adjacent structures ····· 29

가. Basic concept of construction techonlogy
of underground rainwater storage cavern ····· 29
나. Load reduction effect of underpinning in pillar structure ····· 40
다. Theoretical investigation of pllar structure system ····· 46
라. Evaluation techque of damage degree of adjacent structure ····· 50
2. Development of key technique in construction of
the underground rainwater storage cavern ····· 61
가. Preliminary evaluation of key technique in rainwater storage cavern ····· 61
나. Development and effect of pillar structure ····· 72
다. Evaluation of damage degree for existing structure ····· 82
3. Development of guidelines for the construction technology of
the underground rainwater storage cavern ····· 91
가. Research of pillar shape and structure ····· 91
나. Retaining wall system and reinforcement method based on
the evaluation of damage degree ····· 111
다. Establisment of guidelines for the construction technology
of the underground rainwater storage cavern ····· 130

Sec 2. Assessment techonology of inundation risk of underground space ····· 135
1. Establishment of technique of inundation risk assessment
in underground space ····· 135
가. Inundation vulnerability of undergroud space and
development of risk assessment technique ····· 135
나. Development of surface water flow analysis
by numerical approach in underground space ····· 140
2. Standard establishment of quantitative and qualitative assessment
in analyzing inundation risk-factors in underground spaces ····· 145
가. Execution of quantitative and qualitative assessment ····· 145
나. Runoff analysis by numerical approach in underground space ····· 158
3. Development of guidelines of inundation risk assessment, and
guidelines of waterproof•drainage system in underground spaces ····· 167

가. Inundation proof and mitigation system according to
inundation risk assessment ····· 167
나. Mapping method of Inundation hazard-map of underground space ····· 171
다. Establisment of guidelines of inundation risk assessment, and
guidelines of waterproof•drainage system in underground spaces ····· 179

Sec 3. Drainage system of rainwater storage cavern
based on optimal design method ····· 182
1. Effect analysis of drainage system according to
approximate locations of rainwater storage cavern ····· 182
가. Determination of excessive rainfall ····· 182
나. Analysis of retention-storage of rainwater storage cavern ····· 184
다. Effect of innudation damage mitigation according to installation
rainwater storage cavern ····· 186
라. Analysis of hydraulic influence factors, and best-fit model of hydralic and
hydraulogic analysis according to rainwater storage cavern ····· 188
마. Establishment of optimal design method for design of
underground rainwater storage cavern ····· 190
바. Analysis of existing drainage system of urban area ····· 191

2. Qualitative analysis of drainage system by considering
the underground rainwater storage cavern and linked scenario ····· 195
가. Evaluation method of design retention-storage and hydraulic influence
factors in underground rainwater storage cavern ····· 195
나. Effect of innudation damage mitigation according to installation
underground rainwater storage cavern ····· 201
다. Connection plan between drainage system and underground
rainwater storage cavern ····· 221
3. Drainage system of rainwater storage cavern based on
the optimization desingn method ····· 232
가. Evaluation method of design retention-storage and hydraulic influence
factors based on the optimization design method ····· 232

나. Effect of innudation damage mitigation of rainwater storage cavern based on the optimization design method ····· 235
다. Connection plan between drainage system and underground rainwater storage cavern based on the optimization design method ····· 252

Chapter 4. Goal Achievement, Contribution to Related Branches ····· 267
Sec 1. Goal achievement in the 1st yearly research ····· 267
1. Output of the 1st yearly research ····· 267
가. Report of the goal achievement ····· 267
나. Patent application and registration ····· 268
다. Publication of the research results ····· 268
라. Conference presentation of the research results ····· 268
마. Numerical Analysis ····· 269
2. Output of 2nd yearly research ····· 270
가. Report of the goal achievement ····· 270
나. Patent application and registration ····· 271
다. Publication of the research results ····· 271
라. Conference presentation of the research results ····· 272
3. Output of 3rd yearly research ····· 275
가. Report of the goal achievement ····· 275
나. Patent application and registration ····· 276
다. Publication of the research results ····· 277
라. Conference presentation of the research results ····· 278
마. Guidelines and manuals ····· 280
Sec 2. Execution progress and goal achievement [3rd yearly step] ····· 289

Sec 3. Contribution to related field ····· 290
1. Aspects of technology ····· 290
2. Aspects of economy and industry ····· 290
3. Aspects of society and culture ····· 292

Chapter 5. Plan for Application of the Results ····· 293
Sec 1. Application plan of the results ····· 293
1. Application fields ····· 293
2. Expectation effects ····· 294
3. Possibilities of the connective cooperation to other industries ····· 295

Chapter 6. Overseas advanced technologies ····· 296
Sec 1. Case study for rainwater drainage-retention system ····· 296
1. Underground regulating reservoir of rainwater, Kandagawa, Japan ····· 296
2. TARP(Tunnel and reservoir plan), Chicago, USA ····· 298
3. Underground reservoirs, France (Ivry-Massena,
Ru de Chatenay, Blagis Cachan, Cachan Charenton) ····· 300
4. Water dischar tunnel, Saitama, Japan ····· 302
5. SMART project, Kuala Lumpur, Malaysia ····· 304

Sec 2. Case study for DPRI (Disaster Prevention Research Institute)
in Kyoto University, Japan ····· 307
1. Inundation test in underground space using hydraulic model ····· 307
2. Real-size model tests of evacuation in critical evacuation conditions ····· 308

Reference ····· 310

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 배경 및 필요성

1. 연구개발의 배경

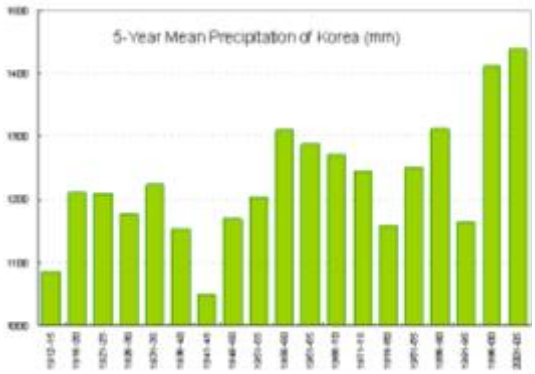
가. 기후변화와 기상재해 동향

(1) 우리나라의 기후변화 양상 및 기상재해

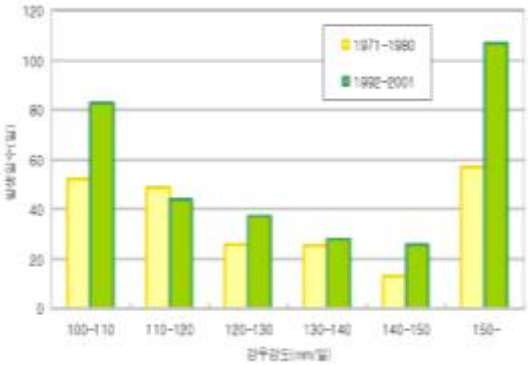
○ 이산화탄소 등의 온실가스에 의한 전 지구적인 기온상승으로 인해 기후변화가 나타나고 있으며, 우리나라의 경우 지난 100년간 1.5℃의 평균기온이 상승하여 세계 평균인 0.74℃의 두 배가 넘는 높은 온도 상승을 나타내고 있음. 기상청은 2020년대 0.9℃, 2050년대 2.0℃의 추가적인 기온상승을 예측하고 있으며 이와 같은 경우, 약 800조원이 넘는 경제적인 피해가 발생할 것으로 예상함. 기후변화로 인한 피해양상은 폭염에 의한 국민의 건강, 집중호우로 인한 수재해의 빈도 및 피해 증가, 곡물가 상승, 산림자원 훼손, 해수면 상승과 수온 변화로 인한 어업피해 증가 등과 같이 국가 전체에 위기상황을 야기하고 있으며 이로 인한 적극적인 대처가 절박한 시점임.

(2) 기후변화 적응을 위한 적극적 수재해 방재 대책의 필요성

○ 기후변화로 인한 물관련 재해는 그 규모와 발생빈도 측면에서 더 심화될 것으로 예측되고 있음. 1997~2006년간 집중호우 발생일수는 연평균 40일 이상으로 80년대 대비 1.5배 증가된 양상을 나타내고 있으며, 1980년대 후반부터 여름철 호우재해 발생빈도가 연평균 5.3회(1940~70년대)에서 8.8회이상(1980~1999년)으로 증가하는 양상을 나타내었음. 2000년대 들어 이와 같은 수재해 양상은 더욱 심화되어 2000년대의 기상재해로 인한 피해액은 연평균 2.6조원으로 1990년대의 0.7조 대비 약 3.7배 증가된 것으로 나타나고 있음.



<그림 1.1.1 한반도의 강우량 변화추이(1912~2005)>



<그림 1.1.2 1971~1980과 1992~2001년의 강우강도별 발생일수>



<그림 1.1.3 연평균 기상재해 피해액>

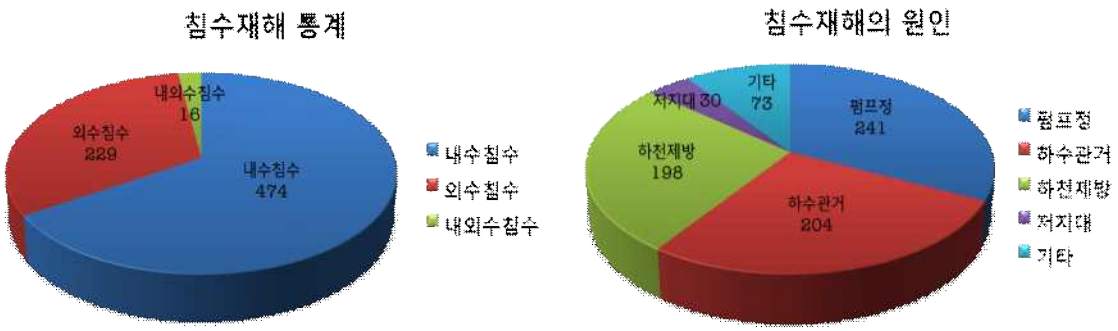
○ 이와 같이 기후변화에 의한 수재해의 피해는 막심한 실정이며 정부는 2080년에 2000년 대비 홍수피해액이 3배증가 할 것으로 예측하고 있어 이를 저감할 적극적인 대책의 마련이 절실한 실정임.

나. 도시지역 수재해 특징 및 대책

최근의 수재해에서 주목할 만한 사실은 인구가 밀집되고, 기반시설이 집중된 도시에서 수해에 의한 피해가 빈발하고 있다는 것이며, 최근의 홍수피해에서 90%이상이 도시지역에서 발생하고 있어 도시지역의 적절한 수재해 방재체계 구축은 매우 시급한 실정이라고 할 수 있음.(심우배, 2006.9)

도시지역의 홍수피해의 원인은 외수의 범람에 의한 침수와 내수배제 불량에 의한 침수피해로 구분할 수 있는데, 최근 발생하는 홍수피해는 외수의 범람에 의한 피해보다는 각종 수리구조물의 배제능력 부족이나 방류지점에서 배수위의 영향으로 인한 내수의 배제불량에 의한 피해가 증가하는 추세를 보이고 있음. 최근 국내 도시 홍수 발생 양상을 요약하면 아래와 같음.

○ 최근 국내 도시 홍수 발생 양상
- 인구 및 시설이 밀집된 도심의 수해발생 빈발
- 홍수량 증가 및 도시화로 인한 피해액 증가
- 제방위주의 구조적 치수대책에 지나치게 의존하여 홍수피해잠재능 지속적으로 증가
- 하천변의 집중개발로 하도의 홍수소통능력 감소



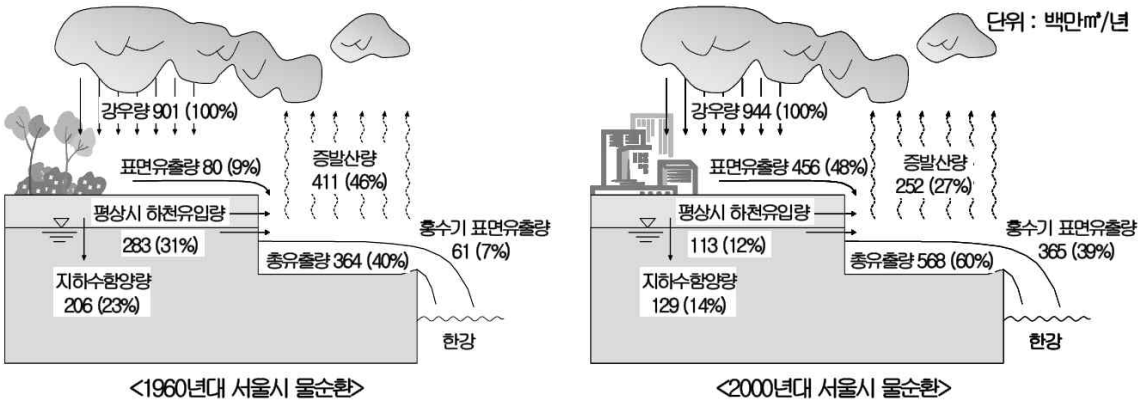
<그림 1.1.4 침수재해 통계, 수해백서 (2002)>

(1) 도시화와 수재해

○ 우리나라의 도시화 현황 : 2009년 말 현재, 도시지역의 면적은 전 국토의 16.5%인 17,420㎢이며, 도시지역의 거주 인구는 45,182,006명으로 전체 인구의 90%이상이 도시지역에 거주하고 있는 등 높은 도시화율을 나타내고 있음. 도시화가 수재해에 미치는 영향은 아래와 같이 정리 할 수 있음.
- 기상변화에 의한 이상홍수와 유역의 도시화로 인한 불투수면의 증가는 홍수시 유출량을 증가시켜 기존 하도의 적정 통수능을 초과하는 홍수 발생
- 토지의 고도 이용으로 하도의 확폭이 제한된 도시유역의 구조적 홍수관리방안으로 제방증고, 저류지 설치, 방수로 설치 등을 들 수 있음.
- 도시지역의 홍수피해 직접적인 원인으로는 외수의 범람에 의한 침수와 내수 배제불량으로 침수피해로 구분할 수 있으며 최근 도시지역에 발생하는 홍수피해의 대부분

은 외수의 직접범람에 의한 피해보다는 각종 수리구조물의 배제능력 부족이나 방류지점에서의 배수위의 영향으로 인한 내수의 배제불량에 기인한 피해가 증가하는 추세임

○ 서울의 경우, 도시화로 인해 지표유출량이 1960년대 평균 502천㎥/day 에서 2008년 2,990천㎥/day로 거의 6배 정도가 증가였으며 연간 강우량 대비 홍수기 표면유출량이 1960년대 7%에서 2000년대 39%로 증가하여 도시화가 홍수피해의 위험을 가중시키고 도시 배수시설의 부하를 야기하는 주요 요인임.



<그림 1.1.5 도시화에 따른 서울시 물순환 양상 변화>

(2) 국내 도시지역 수재해 사례 및 원인 분석

○ 도시 지역내 상습수해지구는 전국적으로 2003년 12월을 기준으로 719개소이며, 이 지역들을 주요 피해원인을 기준으로 분류하면 내수침수가 524개소로 전체의 73%이며, 외수범람이 나머지 23%를 차지하고 있음. 내수침수 중에서는 지형적인 저지대 문제(22%)와 배수능력 부족(14%), 하천의 수위상승으로 인한 배수불량(14%), 하수역류 노면배수(13%), 하수관거 용량부족(11%) 등으로 분류할 수 있음. 외수에 의한 침수피해는 주로 하천에서 발생하는 피해가 대부분으로 낮은 제방 높이로 인한 하천범람(74%), 미정비하천에서 발생하는 하천범람(12%)이 주요 요인으로 나타나고 있음.

○ 1990년대부터 최근까지 국내에서 발생한 주요 도시 침수피해사례는 다음과 같으며, 집중강우와 도시화에 따른 불투수면적의 증가가 주요 원인임을 알 수 있음. 기후변화에 의해 기록적인 집중강우의 발생빈도가 지속적으로 증가할 것으로 예측되므로 도시지역에 대한 침수피해 저감을 위한 적극적인 대응방안의 모색이 절실히 요구되며, 종래의 제방 축조 및 보수와 빗물펌프장 건설과 같은 구조적 대책과 더불어 극

한 상황을 대비한 적극적인 수해방지 시설의 건설을 위한 기술개발이 필요함.

<표 1.1.1 도시지역 주요 침수피해 현황>

지역	일시	강우현황	주요 피해	피해원인
파주시 (문산읍)	1996.7.26.~28	598.7mm	사망 19명 이재민 19,785명 피해액 3,544억	집중강우 저지대 지형 불투수면적 증가
	1999.7.31.~8.2	488~837mm		
서울시 (신림동)	2001.7.15.	시간최대 99.5mm	사망 44명 재산피해 584억	집중강우 불투수면적 증가 하천복개
김해시	2002.8.4~17	500~611mm	제방 11개소 유실 도로 16개소 침수 가옥/공장 1100여동 침수	집중강우 제방붕괴 배수펌프장 침수
강릉시	2002.8.30	일강우량 870.5mm	인명피해 48 이재민 23,328명 재산피해 8,064억	집중강우 도시내수배제불량
마산시	2003.9.11	강풍, 일강우량 157mm	인명피해 18 이재민 7,204명 재산피해 5,800억	집중강우,강풍
제주시	2007.9.15.~16	397mm	사망 12명 재산피해 900억	집중강우 만조시 강우집중 불투수면적 증가 하천복개 한라산 개발
부산시	2009.7.16.	266mm	인명피해 3명 주택 등 635개소 침수 절개지 등 147개소 붕괴 재산피해 90여억	집중강우 지하공간 침수 해일
서울시	2010.9.21	269~293mm	이재민 10,415명 정전피해 1894세대 건물 침수피해 10,034개소 지하철역사 5개소 침수	집중강우 불투수면적 증가

*참조1; 국토해양부(2006), 도시홍수관리를 위한 제도개선방안 연구

*참조2; 국토해양부(2008), 도시 침수피해 방지를 위한 효율적 실행방안 연구

*참조3; 소방방재청 재난관리 종합상황(2010.9.24)

2. 연구개발의 필요성

가. 지하공간의 개발과 수재해

우리나라는 지속적으로 도심지로 인구 밀집 현상이 발생하고 있어 새로운 공간 개발 필요성이 날로 심화되고 있으며, 이로 인해 다양한 복합지하공간에 대한 개발이 활발히 추진되고 있는 추세임. 21세기 산업과 생활환경은 1) 경제규모의 거대화/광역화에 따른 세계 경제(global economy)의 출현, 2) 환경보존이 가능한 지속가능한 발전(sustainable development)의 요구, 3) 산업시스템 및 생활문화 변화에 따른 급속한 도시화(rapid urbanization)라는 문제점 해결이 요구되고 있음. 따라서 복합지하공간 수해 방지를 위한 지하 저류공동 건설기술 개발은 상기 2), 3)의 요구에 대한 환경보존과 신공간창출 측면에서 매우 유용한 대안으로 대두되고 있으며, 교통(도로, 철도), 전력, 통신, 수로터널 등 사회간접시설의 지하공간 건설을 통한 효율적인 사회시스템 구축으로 1)항의 요구에도 부응해야 하는 시기임.

기후변화로 인해 기록적인 폭우의 발생이 증가하고 있으며, 이 경우 기존의 설계빈도에 의해 구축된 도시지역 배수시설은 침수피해를 막을 수 없는 것이 현실임. 더욱이 지하공간은 지표유출수가 지하공간으로 유입될 경우 그 피해가 단시간에 확산되고 많은 인명 및 재산피해가 발생하게 되므로 지하공간의 활용도를 높이기 위해서 적극적인 수방시설물의 구축이 절실히 요구된다고 할 수 있음.

최근, 기존의 선개념에서 면개념의 분산형 빗물관리로 패러다임이 옮겨지고 있으며, 침투시설, 저류시설, 방수로, 빗물 재활용시설 등을 적용하고 있음. 이 중에서 저류시설은 홍수재해 방재 측면에서 대단히 효과적인 시설로 국내에서 공공시설과 공원 등의 천부에 콘크리트 박스 형태의 저류지를 구축하는 사례가 증가하고 있음. 서울의 경우 중랑구 망우산과 중구 한옥마을에 소규모 저류조를 설치하였으며 부산의 경우 2009년 센텀시티의 침수피해 이후 현재 약 30,000㎥ 규모의 저류시설 공사가 진행중에 있음.

서울과 같은 과밀화된 도시지역의 경우 천부에 저류지를 설치할 만한 여유부지가 매우 부족하기 때문에 저류지를 조성하기 위해서는 지하에 대규모의 지하 저류공동을 건설하는 것은 먼저 공간 활용, 용지비 절감 및 저류용량의 극대화 등의 공간확보라는 측면에서 이점이 있음. 두 번째로, 심부에 건설되는 지하 저류공동은 지하공간으로 유입되는 지

표수를 별도의 펌핑 장치 없이 중력에 의해 쉽게 배수시킬 수 있어 도시지역의 침수피해 경감과 지하공간의 수재해 안정성 확보가 가능한 이점이 있음. 마지막으로 지하 저류공동 시설은 하도의 첨두 홍수량을 감소시켜 홍수피해 잠재능을 완화시킨다는 측면에서 인명과 재산상의 큰 피해가 발생할 수 있는 도시지역의 홍수방어 수단으로 효용성이 크기 때문에 지하 저류공동의 건설기술개발이 필요함.

나. 지하 저류시설 건설의 문제점 및 극복과제

지표 유출량이 높고 도달시간이 짧은 도시지역의 수문유출특성 때문에 도시지역에 건설되는 지하 저류공동은 분담 유역면적을 대상으로 침수위험시 많은 양의 지표유출수를 저류할 수 있도록 대단면의 지하공동 구축이 필요함. 그러나 관련한 기술개발은 미흡한 실정임. 구체적으로 지하 저류공동은 지하철, 통신구, 건물 등의 각종 시설물의 하부에 위치하므로 인접 시설물에 대한 안정성 확보 방안이 개발되어야 하며 지하 저류공동의 설계 용량과 침수저감효과 분석 및 지하공간의 안전 확보를 위한 침수피해의 위험도 분석 등에 대한 연구개발이 필요한 실정임. 또한 국내에 대규모 지하 저류공동은 적용된 사례가 없으므로 지하 저류공동 건설을 위한 설계가이드라인의 마련이 필요한 상황임.

‘터널설계기준’에 의하면 터널의 단면 크기와 굴착대상 지반의 공학적 특성을 감안하여, 터널 굴착공사로 인한 주변 지반거동 및 발파진동이 인접 터널에 나쁜 영향을 미치지 않도록 상호 충분히 이격시켜야 한다’라고 언급되어 있음. 또한 터널 상호간의 영향에 대해서는 지반이 완전탄성체일 경우에는 중심 간격이 굴착폭(D)의 2배, 지반이 연약지층인 경우 5배 이상으로 하면 거의 두 터널이 상호간에 영향을 미치지 않는 것으로 보고되어 있으며, 통상적으로 터널 중심 간격을 2.5D로 적용하여 설계하는 적이 일반적임. 하지만 도심지 구조물 하부에 지하 저류공동을 건설하려면 주변 구조물에 의해 공간의 제약을 받게 되며 이를 고려했을 때 터널 중심 간격을 2.5D 이내로 시공해야하는 문제점을 가지게 됨. 따라서 협소한 공간에서 지하 저류공동을 건설하기 위해서는 각각의 저류공동사이의 지보시스템에 대한 연구가 필수적이며 필라(Pillar) 구조에 대한 연구는 도심지 협소한 공간에서 발생 가능한 문제를 극복할 수 있는 대안이 됨.

현재 저류지는 개발사업에 의해 발생하는 추가적인 유출을 조절하는 개념으로 도시홍수 재해경감의 목적으로 활용하기에는 설계기준 및 기술상에 한계가 있음.

기본 저류지의 용량 결정방법은 국립방재연구소의 “방재조절지의 설계지침 개발(I),

(II)”, “개발에 따른 토사유출량산정에 관한 연구(I),(II)”, 소방방재청의 ”사전재해영향성검토협의 실무지침서“ 등에서 제시되어 있으나 지하 저류공동 시설에 적용하기에는 한계가 있으며, 특정 유역면적의 용량을 결정할 수 있는 지침이 필요한 실정이다.

수리학적 접근방식이 필요한 지하 저류공동 형식 및 규모 결정에 대한 부분은 불분명한 부분이 많으며, 도시지역에 적용에 대해서는 초보적인 접근 단계임.

다. 연구개발의 기본개념

복합지하공간의 활용을 촉진하기 위해 해결해야 할 문제 중, 날로 심화되고 있는 기후변화에 의한 도시지역 홍수재해에 의해 발생할 지하공간의 침수피해 대응기술이 필요함. 따라서 본 연구 과제를 통하여 지하 저류공동 건설을 위한 핵심 요소기술을 확보하고 지하 저류공동과 지하공간 및 주변 유역의 배수체계와의 연계 방안을 마련하여 복합지하공간과 주변유역의 침수피해를 저감할 수 있는 방법을 개발하고자 함. 아울러, 지하공간의 침수피해 발생시 유입수의 동적거동을 분석하고 이를 이용하여 복합지하공간의 수재해의 위험성을 평가하여 적절한 지하공간의 수재해 방재방안을 제안하고자 함.

제 2 절 연구개발의 목표 및 범위

1. 연구개발의 최종목표

가. 최종목표

본 연구개발의 최종목표는 점차적으로 증가하고 있는 기후변화에 따른 도시지역의 침수피해, 특히 복합지하공간과 주변 지역의 침수피해를 저감하기 위하여 지하 저류공동시설물의 계획, 설계 및 시공기술을 개발하는 것으로 세부과제별 연구목표는 다음과 같음.

(1) 지하 저류공동 건설기술 개발

① 지하 저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인 개발

② 지하 저류공동 지보 및 안정성 확보를 위한 보강기술 개발

③ 구조물 손상도 평가를 통한 개착부 굴착공법 선정 및 보강공법 기술 개발

(2) 지하공간 침수 위험도 평가기법 개발

① 지하공간 침수 위험도 평가기법 개발

② 지하공간 침수위험도 평가 가이드라인 개발

(3) 최적규모 설계기법에 따른 지하 저류공동 배수 시스템 개발

① 지하 저류공동의 설계 저류량 및 수리영향 인자 분석

② 지하 저류공동의 침수저감효과 분석

③ 기존 배수 체계와 지하 저류공동의 연계 방안

나. 최종목표의 성격 및 설정 근거

(1) 최종 목표의 성격

본 기술은 지하 저류공동의 건설을 위한 아이디어 개발과 이의 구체화를 통한 실용기술 개발 및 개발 기술의 보급 및 적용을 위한 가이드라인 개발의 성격을 가지고 있음.

(2) 최종 목표의 설정 근거

○ 급속한 도시화의 진행으로 도심지 불투수면적의 증가와 첨두유량의 도달시간 감소 등으로 도시 침수재해 위험성이 가중되고 있으며, 경향성이 예측되지 않는 국지성

집중호우의 빈번한 발달은 기존의 도시배수 시스템의 개선을 필요로 함. 또한 도심지에서의 복합 지하공간의 활용 필요성이 증대되고 있으므로 복합지하공간에 대한 침수피해 저감 대책이 절실히 요구됨. 따라서 토지이용이 제한적인 도심지에서 지하공간을 이용한 침수저감 시설물의 설치는 향후 도시재해 방재 대책 수립에 지대한 영향을 미침.

○ 도심지 대단면 지하 저류공동을 건설함에 있어, 근접시공은 불가피하며 이는 인접한 구조물의 변형 및 손상의 주요 요인이 되고 있음. 따라서 도심지 지하 저류공동의 건설을 위한 개착공사 및 지하 저류공동 건설을 위한 지보 및 안정성 확보를 위한 보강기술 개발에 관련된 연구가 필요함.

○ 복합 지하공간 및 주변지역의 침수피해를 저감하기 위해서 기존 및 신설 배수체계와의 연계방법이 중요하며 지하 저류공동의 적용 및 보급을 위해 저감효과에 대한 검증, 최적 위치 및 규모 산정 기법에 대한 연구가 반드시 선행되어야 함. 국내에 지하 저류공동에 대한 적용 사례가 없으므로 이의 건설을 위한 표준화된 설계 및 시공가이드라인의 개발이 필요함.

○ 본 연구진은 지반 및 터널, 수자원 분야의 산업계와 학계의 전문가들로서 각 분야에서 다양한 프로젝트와 연구 과제를 성공적으로 수행한 경험을 갖추고 있음. 또한 관련 연구에 대해 축적된 기술과 연구경험 및 성과를 다수 보유하고 있기에 최종 목표의 달성 가능성이 매우 높다고 판단됨.

○ 지하 저류공동에 대한 체계적인 연구는 국내에서 최초로 수행되는 것으로 관련 기술의 완성도를 높이기 위해서는 2년 8개월의 기술개발 기간이 필요함.

2. 연차별 연구목표 및 내용

가. 연구목표 및 내용 총괄

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	■ 지하 저류공동 및 인접구조물 안정성 확보 방안 수립	■ 지하 저류공동의 건설기술 기본 개념 정립 ■ 언더피닝을 통한 필라구조의 하중 저감효과 규명 및 필라 지보시스템의 이론적 규명 ■ 근접시공에 의한 구조물 손상도 평가기법 구축
	■ 지하공간 침수위험도 평가 방안 수립	■ 지하공간 침수위험도 정의 및 평가개념 정립 ■ Risk Analysis 기법 설정 ■ 지하공간내 유입수 동적 거동 평가 방안의 설정
	■ 지하 저류공동의 개략적인 위치선정에 따른 배수 시스템 효과 분석	■ 개략적인 위치선정에 따른 지하 저류공동의 설계 저류량 및 수리영향 인자 분석 ■ 개략적인 위치선정에 따른 지하 저류공동의 침수저감효과 분석 ■ 기존 배수 체계와 지하 저류공동의 연계 사례 분석
2차년도	■ 지하 저류공동 건설 핵심요소기술 개발	■ 지하 저류공동 건설 계획 및 요소기술 사전평가 ■ 필라 보강을 위한 신공법 개발 ■ 개착부 굴착공법별 기존 구조물에 대한 손상도 평가
	■ 지하공간 침수 위험인자 분석 및 정성적/정량적 평가 기준 수립	■ 수치시뮬레이션 방법에 의한 지하공간내 유출해석, 동적거동 분석 ■ 침수 위험인자의 정성적/정량적 평가 수행 ■ 수리모형실험 방법에 의한 지하공간내 유출 비교평가
	■ 지하 저류공동시설 설치 및 연계 시나리오를 고려한 배수 시스템 효과 분석	■ 지하 저류공동시설 설치 및 연계 시나리오에 따른 설계 저류량 및 수리영향 인자 분석 ■ 지하 저류공동시설 설치 및 연계 시나리오에 따른 침수저감효과 분석 ■ 기존 배수 체계와 지하 저류공동의 연계 시나리오 검토

연 차	연구목표	주요 연구내용
3차년도	■ 지하 저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인 개발	■ 지하 저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인 수립, 작성 ■ 필라의 형상 및 구조에 대한 연구 ■ 구조물 손상도 평가를 통한 개착부 굴착공법 선정 및 보강공법 기술 개발
	■ 지하공간 침수위험도 평가기법 및 가이드라인 작성	■ 지하공간 침수위험도 평가기법의 검증 및 평가 가이드라인 작성 ■ 지하공간 침수억제 및 유입수 유도처리 방안 수립
	■ 지하 저류공동의 최적규모 설계기법에 따른 배수 시스템 개발	■ 지하 저류공동 최적규모 설계 기법에 따른 설계저류량 및 수리영향 인자분석 ■ 지하 저류공동 최적규모 설계 기법에 따른 침수저감효과 분석 ■ 지하 저류공동 최적규모 설계 기법에 따른 배수체계 연계 방안 제시

나. 1차년도 연구목표 및 내용

(1) 정량적 성과목표

성과목표	성과지표	측 정 방 법	목표치	가중치
지하 저류공동 및 인접구조물 안정성 확보방안 수립	필라지보 시스템의 이론적 규명	파괴규준-하중메카니즘 연계 이론적 규명 제시 여부	1건	20%
	근접시공에 따른 지하공동의 거동 규명	근접시공의 모형시험 수행 및 거동평가 여부	1건	15%
지하공간 침수위험도 평가방안 수립	지하공간 침수위험도 평가 방안 설정	지하공간 침수위험도 영향인자/평가방안 설정 여부	1건	10%
	지하공간내 유입수 동적거동 평가	수치시뮬레이션을 통한 빗물유입수의 거동평가 여부	1건	15%
지하 저류공동의 개략적인 위치선정에 따른 배수시스템 효과 분석	초과우량 대상 강우 분석 및 선정	초과우량 대상 강우분석 방안 절차제시 및 분석여부	1건	30%
	지하 저류공동 설계를 위한 최적화 기법의 도입방안 검토 및 선정	지하 저류공동 설계를 위한 최적화 기법 방안 검토 및 선정여부	1건	10%
질 적 성 과 지 표 소 계				100%

성과목표	성과지표	측 정 방 법	목표치	가중치
지하 저류공동 및 인접구조물 안정성 확보방안 수립	학술회의 발표논문 건수	학술회의에 참가해 발표한 건수	2건	25%
	특허출원 건수	특허출원 건수	1건	20%
지하공간 침수위험도 평가방안 수립	수치해석 건수	총 수치해석 건수	1건	20%
지하 저류공동의 개략적인 위치선정에 따른 배수시스템 효과 분석	학술지 게재논문 건수	논문 게재 건수	2건	20%
	학술회의 발표논문 건수	학술회의에 참가해 발표한 건수	2건	15%
양 적 성 과 지 표 소 계				100%

(2) 연구내용

(가) 지하 저류공동 및 인접구조물 안정성 확보 방안 수립

① 지하 저류공동 건설기술 기본 개념 정립

- 수해방재 지하 저류공동 건설기술 기술동향 조사 분석
- 도심지 지하 저류공동 건설핵심 요소기술 조사 및 분석

② 언더피닝을 통한 필라구조의 하중 저감효과 규명

- 국내외 언더피닝공법 적용사례 소개 및 연구
- 도심지 지하공간 하부에 적용가능한 언더피닝 공법 제시
- 상부구조물과의 이격거리에 따른 언더피닝 공법의 적용성 검토

③ 필라지보시스템의 이론적 규명

- 필라보강에 따른 지반의 응력상태 변화에 대한 연구
- 필라 보강 시 주변지반의 보강효과에 대한 연구

④ 근접시공에 의한 구조물 손상도 평가기법 구축

- 개착부 굴착공법에 대한 분류 체계 정립
- 구조물 손상도 평가 기법 구축
- 개착부 굴착공법별 기존구조물에 대한 손상도 예비 평가
- 손상도 평가를 위한 모형 실험 장비 개발

(나) 지하공간 침수위험도 평가 방안 수립

① 지하공간 침수위험도 정의 및 평가개념 정립

- 도심지 대규모 지하공간 및 시설물 분류, 기능적 및 공간적 평가
- 도심지 도시유출에 따른 대규모 지하공간 침수위험 취약성 평가
- 지하공간 수방재 체계의 조사 및 분석

② Risk Analysis 기법 설정

- 복합지하공간내 구성시설과 지반조건 등 위험도평가군(Group)별 침수위험인자 분석
- 위험도 평가군별 지하공간 침수위험 영향인자의 도출

③ 지하공간내 유입수 동적 거동 평가 방안의 설정

- 설정된 침수위험 영향인자 고려, 수치시뮬레이션에 의한 해석적 동적거동 분석 방안 설정
- 침수위험 영향인자, 수해방재 시설물의 형상, 위치, 규모 반영 방법 강구
- 적용 모델링 방안, 적정 프로그램의 선정

(다) 지하 저류공동의 개략적인 위치선정에 따른 배수 시스템 효과 분석

① 지하 저류공동의 설계 저류량 및 수리영향 인자 평가기법 개발

- 도시유역에 적합한 수리·수문 해석 모형의 검토
- 시험유역 선정
- 초과우량 대상 강우 선정
- 침수분석을 위한 지형자료 구축
- 개략적인 위치선정에 따른 지하 저류공동 설계 저류량 산정
- 개략적인 위치선정에 따른 지하 저류공동 설치에 따른 수리영향 인자 분석

② 지하 저류공동의 침수저감효과 분석

- 지하 저류공동 설계를 위한 최적화 기법의 검토 및 선정
- 개략적인 지하 저류공동 설치에 따른 침수저감효과 분석

③ 기존배수체계와 지하 저류공동의 연계방안

- 도시유역 지하 저류공동 설치 사례 분석
- 도시유역 기존 배수체계 분석

다. 2차년도 연구목표 및 내용

(1) 정량적 성과목표

성과목표	성과지표	측 정 방 법	목표치	가중치
지하 저류공동 건설핵심 요소기술 개발	필라보강 신공법의 지보효과 규명	지보효과 규명의 적정성 (이론20%, 실내실험40%, 수치해석40%)	90%	20%
	개착부 굴착공법/시공단계별 상부구조물 손상도 평가	실내실험 수행횟수와 결과의 타당성 평가(70%), 수치해석적 타당성 증명(30%)	90%	20%
지하공간 침수 위험인자 분석 및 정성적/정량적 평가기준 수립	신뢰도 있는 지하공간 침수위험도 평가방안	전문가 설문조사 응답횟수 (설문 10건 응답조사당 20%)	90%	10%
	지하공간내 유입수 동적거동 평가	수치해석시 침수위험인자의 민감도분석 수행반영률 (1개 위험인자 적용당 20%)	90%	10%
지하 저류공동시설 설치 및 연계 시나리오를 고려한 배수시스템 효과 분석	수리모형실험을 통한 지하공간내 유입수의 동적거동 평가	동적거동 평가결과의 적정성 (침수위험인자를 반영한 수리모형실험75%, 평가결과25%)	90%	25%
	기존 배수체계 연계 시나리오에 따른 설계 저류량 및 수리영향 인자 분석	분석결과의 적정성 (기존 배수체계 연계 시나리오의 적정성70%, 기존 배수체계 연계방안 제시30%)	90%	15%
질 적 성 과 지 표 소 계				100%
지하 저류공동 건설핵심 요소기술 개발	학술지 게재 논문건수	논문 게재 건수	2건	20%
	학술회의 발표논문 건수	학술회의에 참가해 발표한 건수	2건	15%
	특허출원 건수	특허출원 건수	1건	10%
지하공간 침수 위험인자 분석 및 정성적/정량적 평가기준 수립	학술회의 발표논문 건수	학술회의에 참가해 발표한 건수	1건	20%
지하 저류공동시설 설치 및 연계 시나리오를 고려한 배수시스템 효과 분석	학술지 게재 논문건수	논문 게재 건수	3건	20%
	학술회의 발표논문 건수	학술회의에 참가해 발표한 건수	3건	15%
양 적 성 과 지 표 소 계				100%

(2) 연구내용

(가) 지하 저류공동 건설 핵심 요소기술 개발

① 지하 저류공동 건설계획 및 요소기술 사전평가

- 개착공법 및 공동/터널 공법에서의 핵심요소기술의 적용성 사전평가
- 도심지 주변 구조물 안정성확보 방안 적용성 사전평가
- 지상 및 지하 민간/공공 구조물 및 시설물의 간섭 안정성을 고려한 적정 저류공동 입지조건 제시
- 침수위험도 분석 기반 지하 저류공동 및 저류-배수 체계의 구성방안 설정

② 필라(Pillar)보강을 위한 신공법 개발

- 록볼트, 앵커가 결합된 가압주입이 가능한 신공법 개발
- 신공법의 이론적 규명
- 신공법의 실험적 규명
- 신공법의 수치해석적 규명

③ 개착부 굴착공법별 기존 구조물에 대한 손상도 평가

- 개착부 굴착공법별 수치해석 수행 및 상부구조물 손상도 평가
- 실내 모형실험 수행 및 상부구조물 손상도 평가

④ 지하 저류공동 시공단계별 기존 구조물에 대한 손상도 평가

- 시공단계별 수치해석 수행 및 상부구조물 손상도 평가
- 시공단계별 실내 모형실험 수행 및 상부구조물 손상도 평가
- 시공 단계별 안정성 취약 구간 파악

(나) 지하공간의 침수 위험인자분석 및 정성적/정량적 평가기준 수립

① 침수 위험인자의 정성적/정량적 평가 수행

- 복합지하공간 정성적/정량적 위험도 평가 등급의 설정
- AHP 기법 등의 전문가 설문조사 수행 및 분석결과에 따른 침수위험인자의 평가기준 보완
- 위험인자의 정성적/정량적 침수위험 평가기준과 등급 설정
- 가상위치 선정 복합지하공간의 침수위험도 정성적/정량적 분석

② 수치시뮬레이션 방법에 의한 지하공간내 유출해석, 동적거동 분석

- 침수 위험인자를 고려한 지하공간내 침수의 양상, 유출거동 수치해석 수행
- 가상위치 선정 지하공간 수재해 발생 가능한 시나리오 설정, 분석
- 유입수 양상 및 공간내 거동을 지배하는 영향인자를 고려한 분석

- 시간별, 위치별 유출수 속도 및 도달/지체시간, 유량 및 침수위의 평가
- 침수위 선정, 배수 시설 설치 위치 용량 등의 평가
- 지하공간 침수예상지도, 침수시 대피/대비체계(비상대피, 침수방지, 침수억제) 등을 고려한 침수예상분석
- 공동연구기관(동서대학교) 주관 수리모형실험 모형화 방안 공동 연구
- 지하공간내 침수 위험인자 규모, 위치 등 설치조건 반영방안 강구
- 수리모형실험 수행결과에 따른 지하공간내 유출수 거동 파악
- 수치해석법 및 수리모형실험 결과의 종합분석, 평가

(다) 지하 저류공동 시설 설치 및 연계 시나리오를 고려한 배수 시스템 효과 분석

① 지하 저류공동의 설계 저류량 및 수리영향 인자 평가기법 개발
- 지하 저류공동 설치 시나리오 분석
- 지하 저류공동 설치 시나리오에 따른 설계 저류량 및 수리영향 인자 분석
- 기존 배수체계 연계 시나리오에 따른 설계 저류량 및 수리영향 인자 분석

② 지하 저류공동의 침수저감효과 분석
- 지하 저류공동 최적위치 선정 기법
- 지하 저류공동 설치 시나리오에 따른 침수저감 효과 분석 및 검증
- 기존 배수체계 연계 시나리오에 따른 침수저감 효과 분석 및 검증
- 수리모형실험을 통한 지하공간내 유입수의 동적거동 평가

③ 기존 및 신규 배수체계와 지하 저류공동의 연계방안
- 기존 및 신규 배수체계 연계 시나리오 분석 및 검증

라. 3차년도 연구목표 및 내용

(1) 정량적 성과목표

성과목표	성과지표	측 정 방 법	목표치	가중치
지하 저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인 개발	필라구조의 형상 및 구조에 따른 안정성 검증	실내실험 및 수치해석에 의한 안정성 검증의 적정성 (실내실험50%, 수치해석50%)	90%	20%
	선정된 저류공동 건설기술의 타당성 분석	복합보강공법 개발기술의 적정성(70%), 최적의 개착부 굴착공법 방안제시(30%)	90%	20%
지하공간의 침수위험도 평가기법 개발	지하공간 침수위험도 평가가이드라인 완성도	침수위험도 평가 가이드라인 적정성 (침수예상지도가이드라인30%, 위험도 평가기준40%, 침수억제안30%)	90%	20%
지하 저류공동의 최적규모 설계기법에 따른 배수시스템 개발	지하 저류공동의 설계 저류량 및 수리영향 인자 평가기법 개발	우수배제시스템을 고려한 수리영향인자 분석(50%), 평가기법 개발 및 방향 제시(50%)	90%	20%
	기존 배수체계와 지하 저류공동의 연계 방안 평가	지하저류공동 설계절차 제시(50%), 지하저류공동 요소기술별 적용방안 제시(50%)	90%	20%
질 적 성 과 지 표 소 계				100%
지하 저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인 개발	학술지 게재 논문 건수	논문 게재 건수	2건	5%
	학술회의 발표논문 건수	학술회의에 참가해 발표한 건수	2건	3%
	SCI급 학술지 게재 논문건수	논문 게재 건수	1건	15%
	특허출원 건수	특허출원 건수	1건	3%
	특허등록 건수	특허등록 건수	1건	4%
	지침/매뉴얼의 개발 및 보급	가이드라인 개발 건수	2건	15%
지하공간의 침수위험도 평가기법 개발	학술회의 발표논문 건수	학술회의에 참가해 발표한 건수	1건	5%
	지침/매뉴얼의 개발 및 보급	가이드라인 개발 건수	1건	15%
지하 저류공동의 최적규모 설계기법에 따른 배수시스템 개발	학술지 게재 논문 건수	논문 게재 건수	3건	20%
	학술회의 발표논문 건수	학술회의에 참가해 발표한 건수	3건	15%
양 적 성 과 지 표 소 계				100%

(2) 연구내용

(가) 지하 저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인 개발

① 필라의 형상 및 구조에 대한 연구

- 필라 지보시스템의 안정성 검증을 위한 실내시험 실시
- 필라 지보시스템의 안정성 검증을 위한 수치해석 실시
- 임의 시범위치에서의 필라 지보의 검증을 위한 수치해석 실시
- 안정성이 확보되는 필라의 형상 및 구조 제안

② 구조물 손상도 평가를 통한 개착부 굴착공법 선정 및 보강공법 기술 개발

- 복합 보강공법 및 굴착공법 선정 방안 제시
- 개착부 굴착공법 선정 및 복합 보강공법 개발

③ 지하 저류공동의 건설을 위한 설계 가이드라인 수립, 작성

- 개착공법 및 공동/터널 공법에서의 인접구조물 안정성 확보를 위한 대단면 지하 저류공동 기술 가이드라인 설정
- 지하 저류공동의 현장조건에 따른 방·배수 시스템의 설정
- 침수위험도 분석 기반 지하 저류공동 및 집수갱 등 위치선정, 계획 규모의 적정성, 저류-배수체계 및 침수저감효과의 종합적 평가
- 시공중 구조물 안정성 확인을 위한 Monitoring, 정보화시공 계획 수립
- 도심지 지하저류공동 건설을 위한 지반조사 및 지반속성 평가 방안 설정

(나) 지하공간 침수위험도 평가기법 및 평가가이드라인 작성

① 지하공간 침수위험도 평가기법의 검증 및 평가 가이드라인 작성

- 시범 위치에 대한 침수위험도 평가에 의한 실제 현장조건 적용분석
- 실제 현장조건 적용 검증 후 평가기법 수정 보완
- 현장조건별 침수 위험인자의 선정, 정성적/정량적 평가 방안 제시
- 지하공간내 침수예상지도의 작성방법 제시

② 지하공간 침수억제 및 유입수 유도처리 방안 수립

- 침수위험도 평가를 통한 조건별 빗물 유출수 유입 억제, 차단 등 침수억제 방안 제시
- 위험도 평가 결과에 따른 지하공간내 유입수 유도처리, 수위저하 방안 제시
- 위험도 지표에 따른 수재해 대응, 침수억제 및 유입수 유도처리 체계 제시

(다) 최적규모 설계기법에 따른 지하 저류공동 배수 시스템 개발

① 지하 저류공동의 설계 저류량 및 수리영향 인자 평가기법 개발

- 지하 저류공동 최적규모 설계기법에 따른 설계 저류량 평가
- 지하 저류공동 최적규모 설계기법에 따른 수리영향 인자 분석

② 지하 저류공동의 침수저감효과 분석
- 침수저감효과를 고려한 목적함수 도출
- 지하 저류공동의 최적규모 설계기법
- 지하 저류공동의 최적규모 설계기법에 따른 침수저감효과 분석

③ 기존 배수체계와 지하 저류공동의 연계방안
- 지하 저류공동 최적규모 설계기법에 따른 배수체계 연계 운영 방안 평가
- 시스템 설계를 위한 전문가 활용
- 지하 저류공동 배수체계 설계 가이드라인 제시
- 저류 빗물의 처리방안 검토

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술 및 산업 동향

○ 엘리뇨, 라니냐 등 지구온난화에 따른 전 세계적인 기상이변으로 인해 소방방재청에서는 자연재해대책법 제16조에 의거하여 각 지자체별로 풍수해저감 종합계획안을 마련토록 하였음. 이에 따라 서울시를 비롯한 지자체에서는 풍수해에 노출되어 있거나 잠재해 있는 위험요소를 도출하여 이를 예방경감하기 위하여 현실적 대책을 제시하고 이에 따른 개략공사비 등의 산정을 토대로 투자 우선순위를 결정하여 지방자치단체 방재계획의 총괄 로드맵을 작성하고 있음.

○ 정부에서도 기후변화대응 침수대책을 마련하고자 노력 중에 있는데, 그 예로 국토해양부의 도시홍수재해관리기술연구단에서는 도시 우수배수시설의 배수능력에 관한 연구를 수행하고 있고, 환경부에서는 하수관거 정비사업을 추진 중이며 다기능 하수저류시설 기본계획(안)을 2011년에 수립하여 검토 중에 있음.

○ 서울시에서는 2010년 9월의 집중호우로 인한 광화문광장 침수사례를 계기로 2011년 2월에 기후변화대응 침수피해 저감대책을 발표하였는데, 이에 따르면 대심도 지하공간에 빗물배수터널을 설치함으로써 광화문광장 배수능력을 기존 10년에서 50년으로 향상시키고, 2014년까지 6,693억원을 집중 투자하여 수해취약지역 기습폭우대응 능력을 기존 10년에서 30년으로 향상시킴은 물론 수해취약지역 9개구 7개소에 방재시설물을 확충하기로 되어 있음.

○ 따라서, 전국 시군구의 수해방재를 위한 지하 저류지 설치 시장은 꾸준하게 발생될 것으로 예상되므로 본 연구과제인 지하 저류공동 건설기술 개발은 향후 건설될 지하 저류지의 안정성, 경제성을 동시에 실현하는 기술이라 할 수 있음.

○ 홍수 유출저감 기술은 현재 교육과학기술부 21세기 프론티어 사업단에서 “수자원의 지속적 확보기술 사업”의 일환으로 치수 기능보다는 ‘우수 이용 및 활용 기술 개발’을 중점으로 하여 연구 개발 중임.

○ 도시 내배수시설 운영 및 유지관리는 지자체에서 주관하고 있으나, 운영 및 유지관리 지침이 유역 홍수 대응 방안과 연계되거나 구체적으로 제정되어 있지 않아 홍수기 내수 침수의 원인이 되는 등 적정 운영과 시설의 유지관리 또한 어려운 상태임.

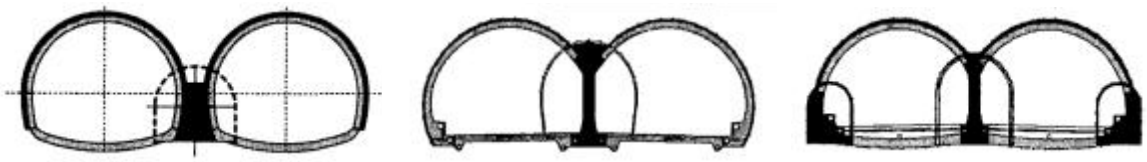
○ 현재 저류지는 개발사업에 의해 발생하는 추가적인 유출을 조절하는 개념으로 이용하고 있으며 도시홍수 재해경감의 목적으로 활용하기에는 설계기준 및 기술상에 한계가 있음.

○ 기본 저류지의 용량 결정방법은 국립방재연구소의 “방재조절지의 설계지침 개발(Ⅰ), (Ⅱ)”, “개발에 따른 토사유출량산정에 관한 연구(Ⅰ), (Ⅱ)”, 소방방재청의 ”사전재해영향성검토협의 실무지침서“ 등에서 제시되어 있으나 지하 저류공동 시설에 적용하기에는 한계가 있음.

○ 도시홍수재해관리기술연구사업단의 “다목적 지하저류지 설계기술 현황 조사 및 개발방향 수립”, “다목적 지하 저류지 설계 가이드라인” 등에서는 하천을 통해 소통되는 홍수량을 저류 할 수 있는 다목적 유수지의 운영상의 안전도 향상을 위한 설계 기술 개발 및 수리 실험 검증을 수행함.

○ 국내의 경우 수문학적·수리학적 해석 및 침수분석을 포함한 지하저류시설에 대한 종합적인 설계 절차와 이에 따른 기법을 제시하기 보다는 지하저류시설에 대한 요소기술에 대한 설계에 주안점을 주어 해석을 수행함.

○ 지하 저류공동은 필연적으로 도심지에 존재하는 다른 구조물들과 근접하여 설치되며 공간의 제약으로 인한 문제들이 발생함. 그러므로 이를 극복하기 위해 기존 지하구조물 하부에 추가적인 공간 창출을 위한 언더피닝(Underpinning)공법의 적용과 한정된 공간으로 인하여 지하공동 사이의 간격이 좁아짐에 따라 필라(pillar)의 보강공법에 대한 연구가 필요함. 지금까지 수행되어온 연구 및 실제 시공사례에서는 대부분의 경우 다음 그림과 같이 중앙필러부에 콘크리트 구조체를 설치하여 보강을 실시하였음. 이 방법들은 필라(Pillar)의 폭을 좁혀 시설 공간을 최소화 할 수 있는 장점이 있어 국내 대부분의 지하철 터널에 적용되고 일본에서도 30개소 이상 다수의 프로젝트 사례가 존재함. 하지만 이 방법들은 중앙 Pilot 터널을 추가적으로 굴착함에 따라 작업공정이 복잡해지고 비용과 공기가 증가함.

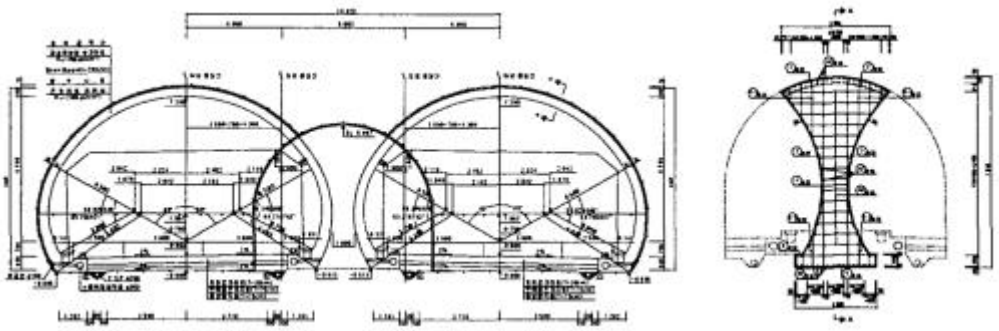


2Arch 1-Pilot, 중앙필러부　　2Arch 1-Pilot, 중앙벽체부　　2Arch 3-Pilot

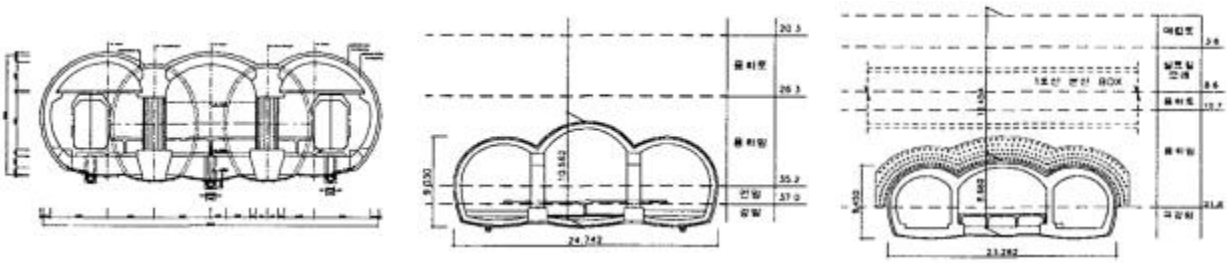
<그림 2.1.1 중앙필러부 안정성 확보를 위한 콘크리트 구조체 형성 예>

○ 국내의 경우 일반도로 및 고속도로 터널, 그리고 대부분의 지하철역사에 근접병설계획시에는 중앙부에 터널을 주로 설치하였음. 특히 제 2·3기 지하철 및 대전지하철 등의 정거장 설계 및 시공시 대단면 형태의 터널이 적용된 사례가 많이 있으며,

대부분의 터널에서 중앙 필라부를 기둥 또는 벽체로 계획하여 구조부재로 활용하였음.



<그림 2.1.3 국내 고속도로 터널 단면 및 중앙필러부 철근배근도>



대전도시철도 1호선　　서울 지하철 5호선　　서울 지하철 6호선

<그림 2.1.4 국내 지하철의 대단면터널 형성 예>

○ 중앙벽체부를 콘크리트 구조물로 설치함에 따라 중앙벽체부 상단과 본터널 상단부 라이닝 콘크리트 연결부로 터널 배면수가 유입되어 누수되면서 노면 결빙 및 천단부에 고드름 발생으로 통행 차량의 안전운행 저해 및 주변부 콘크리트의 추가저인 부식을 유발하게 됨. 그러므로 이를 해결하기 위한 개선방안에 대한 연구가 이루어지고 있음.

○ 국내에서의 근접병설터널 적용례는 선형계획상에서 지형적인 요인이나 교량근접부, 철도 분기부 등 현장조건에 따라 불가피하게 근접하여 병설되는 구간에서 주로 적용되며 시험위험구간으로 분류하여 가지반 및 지보보강 등을 이용한 통과공법으로 적용하고 있음.

○ 국내 특허 또는 건설신기술의 대표적인 적용사례로 ‘충격차단공과 철근-숏크리트를 이용한 근접터널 시공방법(특허 10-1391218, 건설신기술 729호)’ 등이 있으며, 여기서는 임의 특정한 제어발파공법을 통하여 주변 암반손상을 작게하나, 철근과

연계된 일반 타이볼트를 이용한 기술로 선행 터널 전진 및 후행터널 시공에 따라 전이된 굴착하중을 수동적으로 보강하는 기존 국내 기술과 유사한 역학적 구조로 분석됨.

○ 기존의 일반 근접터널 공법은 터널공사시에 보강을 통한 안전한 시공을 목적으로 적정 지보방법을 사용하는 것으로써, 중앙에 위치하는 필라부 원지반의 거동양상과 필라지보체에 대한 상호작용거동을 종합적으로 반영하여 적극적인 주요 터널 지지 구조로 활용한 설계와 설계방안 설정이 다루어지지 않고 있음. 그러므로 도심지내 하부에 위치하는 병설터널 입지조건에서 보다 효과적인 중앙 필라부 원지반의 활용 방안을 고려하고 매우 중요한 구조물인 중앙 필라에 작용 하중 및 단면, 역학적 구조파악 등에 대한 설계방법 설정이 필요함.



근접분리터널　　근접분리터널, 라이닝두께증가

<그림 2.1.2 중앙필러부 안정성 확보를 위한 원지반 강도 활용 예>

○ 기존 개착 수직구 시공에 관련된 굴착공법 및 보강공법은 그 특징별로 현장에 적용되고 있음. 그러나 수직구 공법의 시공기준이 명확하지 않음으로 인해 현장 전문가들이 다양한 보강공법들에 대한 중첩을 통해서 과대한 안정성을 확보하고 있음. 이러한 명확한 기준이 없는 수직구 보강공법의 시공은 현장의 불안요소 증대는 물론 국가 경제적인 측면에도 대치함.

○ 최근, 더욱 과 밀집되고 있는 국내 도심지 상황을 볼 때, 기존 구조물 하부의 다용도의 복합적 공간 확보 수요가 점차 증대될 것이라 예측됨. 현 상황에서 기존 구조물에 대한 비점유 시공 및 최소 공간점유의 시공성 확보를 위해서 개착 수직구가 특히 고려할 수 있는 공법임. 수직구 공법 및 보강에 대한 도심지 중요 구조물의 상호작용 해석을 통한 손상도 평가와 동시에 안전하고 경제적인 시공기술 및 보강기술에 관한 수요 역시 점차 증대될 것으로 기대됨.

○ 개착부의 설계와 시공을 수행함에 있어 과거의 주된 관심사는 토류벽의 안전에 관한 것이었으나 도심지 근접시공이 증가함에 따라 주변지반의 침하로 인한 인접 구조물의 피해 및 이로 인한 주민들의 민원 등과 같은 굴착으로 발생된 복합적인 문

제에 관심이 증가되고 있음. 따라서 토류벽의 안전뿐만 아니라 토류벽의 변형으로 발생되는 여러 가지 문제를 해결하기 위해서 손상도 평가 기법을 이용한 중요 인접 구조물의 거동예측을 통한 관리시공과 실제 시공단계별 계측자료의 비교 및 검토를 통하여 시공관리가 이루어지고 있음. 그러나 실제 토류벽의 거동은 구조물-지반 상호작용, 배면지반의 초기응력상태 및 응력이완 등의 변수에 따라 하중-변위 관계가 서로 상이하게 나타나며 그 외 불확실한 요인들이 시공단계에 따른 토류벽의 거동에 영향을 미치게 되므로 그 거동을 예측하기가 매우 어려움.

○ 개착 수직구의 흙막이벽의 적정 선정에 관한 연구 현황으로, “Neural Network를 이용한 흙막이 공법 선정 시스템에 관한 연구(김광렬, 2000)” 에서 도심지 공사가 가진 제한조건을 중심으로 신경망이론에 의한 공법선정을 실시함. “사례기반추론을 이용한 흙막이공법 선정모델에 관한 연구(김재엽, 2004)” 에서는 흙막이 공법의 선정에 있어 가능한 대안을 함께 제시해 주는 시스템을 연구함.

○ 개착부 굴착으로 인한 중요 인접 구조물의 영향에 대한 국내 연구 현황으로, “도심지 근접시공에서 지반굴착에 따른 공해 및 대책(천병식, 1991)” 에서 지반 굴착깊이와 폭에 따른 균열거리와 침하량 및 침하영향과의 관계를 토류공의 종류와 지반굴착 공법별로 문헌을 통해 이론적으로 규명함. “도심지 깊은 굴착시 인접지반 거동에 대한 분석(양구승, 1996)” 에서는 토류벽의 변위 및 지보 축력 변위의 변화에 따라 인접지반과 인접 구조물에 미치는 피해도를 시간의 경과로 인해 변화하는 양을 연구함. “도심지에서의 지반 및 터널굴착에 따른 지반변위가 인접건물에 미치는 영향 및 손상도 예측(손무락, 2005)” 에서 지반-구조물 상호작용을 고려, 지반 및 터널굴착으로 인해 발생된 지반변위가 인접구조물에 미치는 영향을 조사하고, 인접 구조물의 손상도를 미리 예측할 수 있는 방법을 제시함.

제 2 절 국외 기술 및 산업 동향

○ 미국의 BMPs(Best Management Practices)에서는 유출, 수질, 생태 등 종합시스템 구축에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 홍수로 인한 유출의 측면에 있어서 특히 도심지의 경우 우수저류방법의 중요성이 강조되고 있고, 또한 환경 친화적인 측면에서 우수에 의한 수질의 처리 및 대책으로 습지에 대한 연구가 진행되고 있으

며, 기존의 불투수지역들을 환경친화적으로 복원하고 관리하는 측면의 연구가 강조되고 있음.

○ 미국 교통국의 FHWA(Federal Highway Administration)에서는 도시 우수의 유출, 집수, 이송에 관한 도시 배수 시스템의 설계 가이드라인을 제시하였으며, 작성된 설계 가이드라인을 이용하여 각 주 정부의 도시 특성에 맞는 도시 우수 배수 설계 가이드라인을 개발하고 있음. 연구 대상은 학술 및 실험을 배경으로 도시유출구조 해석 및 홍수량 배분 기술, 홍수모의 및 제방 붕괴와 확산 기술, 방수로(지하 포함)나 다목적 저수지 등 구조적 대책의 수리·수문·실험검증·피해경감 효과 분석 및 설계 기술, 홍수범람 위험지도 작성 기술, 홍수를 고려한 자연형 하천설계기법 등을 개발, 보급하는 것이었음.

○ 중국 IWHR(China Institute of Water Resources & Hydropower Research)에서는 하수관거 해석과 도시침수를 연계한 독자적인 연구기법을 개발하여, 중국내 주요 도시지역에 적용할 수 있는 자체적인 시스템을 확립하고 있음.

○ 유럽 EU국가에서는 국가간 연합 연구개발 사업을 통해서 배수체계와 침수해석을 고정확도 해석기법에 근거한 도시홍수예 · 경보 프로그램을 개발하여 이에 대한 기술을 공유하고 있음.

○ 일본의 경우 와타라세 저류지와 같은 대규모 저류지는 지상에 설치하고 칸다가와와 묘소지가와와 같은 저규모 저류지는 지하에 설치하여 지상 저류지와 지하저류지가 서로 다른 특성을 보이고 있음. 지상 저류지는 규모가 크고 홍수조절용량이 상당한 규모에 이르며 이수 및 환경 측면의 다목적 이용이 가능하도록 설계함. 지하 저류지는 도심에 설치되는 특성을 가지며 월류량과 총용량은 작은 규모를 가지게 되며 다목적 이용 측면에서는 이수목적으로 주로 이용되나 지하저류지가 설치되는 하천의 설계홍수량은 작으나 저류지로 월류되는 유량은 설계홍수량의 50% 정도로서 도심에서 홍수저감 효과 상당함.

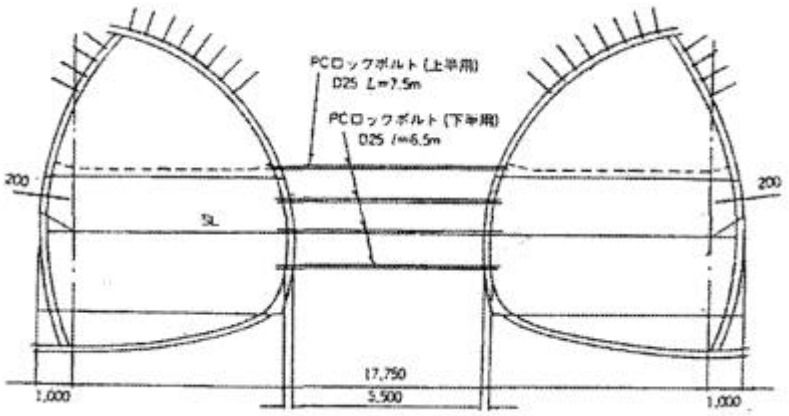
○ 미국은 각 지방자치단체마다 해당지역의 특성에 맞는 저류지 관련 각종 조례를 제정하고 있으며 홍수터관리, 현지저류, 지체, 침식과 퇴적조절, 개방행위 규제, 수질오염 등에 해당하는 EPA 기준안을 규정하고 있음.

○ 영국의 홍수조절용 저류지 설계기준은 환경청의 국가물관리위원회에 1981년 제시한 Wallingford Procedure를 적용하고 있으며 소규모 개발사업에 대한 홍수조절용 저류지 설계기준은 1976년 건설연구정보협회의 기준을 적용하고 있음.

○ 일반적으로 근접병설터널은 일본 등과 같이 지반조건이 상대적으로 취약하거나 주변 건물이 밀집한 지역에서 시공사례를 많이 볼 수 있음. 근래에는 중앙터널의 굴

착단면적을 축소하여 시공초기에 대두되었던 시공성 및 누수 문제를 개선한 굴착단면을 적용하는 경향이 있으며, 굴착대상 지반조건에 따라 중앙벽체설치, 원지반 활용, 선행터널 라이닝 두께 증진 등의 방안을 적용하여 터널의 안정성을 확보하고 있음.

○ 일본은 병설터널 및 근접병설터널에 대한 연구 및 시공 실적이 다수 존재함. 특히 국내와는 달리 중앙필러부에 콘크리트 구조체를 형성하는 단면이 아닌, 원지반의 강도를 최대한 살려 시공한 사례들이 존재함. 일본 후쿠오카현의 카타큐슈시에 건설된 이토즈 터널은 두 터널간의 이격거리가 1m 정도 내외로 터널 통과구간 상부에는 많은 지장물(빌딩, 주거지역, 학교, 사원 등)이 분포하고 있으며 필러부의 보강을 위해 터널의 라이닝 두께를 증가시키는 방법을 사용하였음. 또한 동경에 위치한 연장 389m의 오야마다이리터널은 도심지의 용지폭제한(30m)으로 인해 근접병설터널로 계획되었으며, 필라부 보강을 위해 수평 PC 록볼트를 설치하였음.



<그림 2.2.1 필라부의 보강공법, Kobayashi(1994)>

○ 지반 굴착으로 인해 발생하는 지반 변위를 중심으로 경험적인 연구가 진행됨. Terzaghi와 Peck(1967)이 최대 지표 침하량과 굴착 깊이 간 상관관계를 언급하였으며, O'Rourke(1975)는 최대 침하 영향거리를 제안하였고, 가설 스트러트 해체시의 침하량을 분석함. 또한 언더피닝에 대한 기준을 제시함.

○ Goldberg등(1976)은 미국 도로 연방국(FHA)에 제출한 문건에서 버팀굴착에 관한 다양한 내용을 제시함. 다만, 지반조건, 지보종류, 토류벽의 종류를 구별하지 않고 종합적으로 분석하였음.

○ 최근 도심지에서 적용되는, 규모나 심도 등이 작은 경향의, 폭이 좁고 길이가 긴 트렌치 굴착으로 인한 지반변위에 관해 Fry등(1983)은 현장 측정을 통해 지반 거동을 예측하고 이를 제어할 수 있는 방법을 영국의 WRC와의 공동연구에서 제시하였음.

○ 지반 변위에 대한 해석적, 반경험적인 연구로써 Caspe(1966)는 굴착에 따른 인접 지표의 침하량과 분포에 대한 산정방법을 대수나선형의 활동면을 영향권 토체의 일정한 띠로 나누어 토류벽의 수평 변위와 지반의 포아송비를 이용하여 제시하였음.

○ 유한요소해석과 현장 측정치에 근거하여 Mana와 Clough는(1981) 중간 ~ 연약한 점토 지반에서 버팀굴착 시 변위 예측을 위한 간편법을 제시하였음.

○ 북 유럽권은 산악지형이 다수 존재함으로, 터널 등 지하공간창출 분야에서 지속적으로 기술력이 축적 및 개발되고 있는 상황임.

제 3 장 연구개발 주요내용

제 1 절 지하 저류공동 건설기술

1. 지하 저류공동 및 인접구조물 안정성 확보방안 수립 [1차년도]

가. 지하 저류공동 건설기술 기본개념 정립

(1) 건설기술 기술동향 조사

○ 기후변화로 인한 기록적인 폭우의 발생은 지속적으로 증가하고 있으며, 이 경우기존의 설계빈도에 의해 구축된 도시지역 배수시설은 침수피해를 막을 수 없는 것이 국내외의 현실임. 더욱이 지하공간은 지표유출수가 지하공간으로 유입될 경우 그 피해가 단시간에 확산되고 많은 인명 및 재산피해가 발생하게 되므로 지하공간의 활용도를 높이기 위해서 적극적인 수방 시설물의 구축이 절실히 요구된다고 할 수 있음.

○ 서울과 일본의 동경과 같은 과밀화된 도시지역의 경우 천부에 저류지를 설치할 만한 여유부지가 매우 부족하기 때문에, 저류지를 조성하기 위해서는 지하에 대규모의 지하 저류공동을 건설하는 것이 필요함. 이는 먼저 공간 활용, 용지비 절감 및 저류용량의 극대화 등의 공간확보라는 측면에서 이점이 있음. 두 번째로, 심부에 건설되는 지하 저류공동은 지하공간으로 유입되는 지표수를 별도의 펌핑 장치 없이 중력에 의해 쉽게 배수시킬 수 있어 도시지역의 침수피해 경감과 지하공간의 수재해 안정성 확보가 가능한 이점이 있음. 마지막으로 지하 저류공동 시설은 하도의 첨두 홍수량을 감소시켜 홍수피해 잠재능을 완화시킨다는 측면에서 인명과 재산상의 큰 피해가 발생할 수 있는 도시지역의 홍수방어 수단으로 효용성이 크기 때문에 지하 저류공동의 건설기술개발이 필요함.

○ 국내의 경우에는 지하 저류시설 사례가 전무한 실정이었으나, 서울 광화문광장의 침수사고를 계기로 “기후변화대응 침수피해 저감대책”을 수립하였고, 광화문광장과 강서구 신월동 유역 등 서울시내의 상습적인 침수에 대비하여 배수능력을 향상시키기 위한 빗물배수터널을 계획하고 있음.

○ 국외에서는 미국의 경우, 대규모, 대심도 빗물저류터널사업을 시카고, 아틀란타, 밀워키, 오스틴, 보스톤, 클리블랜드, 휴스톤, 뉴욕 등 에서 진행 중에 있고, 유럽에서도 대규모, 대심도 빗물저류터널사업을 스웨덴의 스톡홀름, 영국의 런던, 리버풀, 벨패스트, 프리스톤, 브라이튼, 이탈리아의 네플즈, 오스트리아의 비엔나, 프랑스의 파리, 스페인의 바르셀로나 등에서 진행 중에 있음. 아시아에서는 말레이시아의 SMART터널

이 도로기능 뿐만 아니라 침수방지를 목적으로 건설되었고, 일본의 칸다가와 지하조절지, 와다야요이 우수저류터널, 가와사키시 우수저류터널 및 사이마타현과 가셍카베를 잇는 수도권외곽 방수로 등이 지하 저류공동 및 저류터널로 잘 알려져 있음. 주요 사례는 <표 3.1.1> 및 <그림 3.1.1>과 같음.

<표 3.1.1 지하 저류공동 또는 저류터널개발 주요 사례>

구 분	주 요 내 용
미국 시카고 (TARP)	■ 목적 : 상습침수해소, 수질개선 ■ 용량 및 규격 : 직경3.0 ~ 11.0m, 연장176km (저류용량 3,783천m3)
영국 런던 템즈터널	■ 목적 : 수질개선 ■ 용량 및 규격 : 직경7.2m, 연장32.2km
프랑스 파리	■ 목적 : 수질개선 ■ 용량 및 규격 : 4개의 하수터널(저류용량 260천m^3)
스페인 바르셀로나(CLABSA)	■ 목적 : 상습침수해소, 수질개선 ■ 용량 및 규격 : 10개의 저류조(저류용량 2,634천m^3)
싱가폴 (DTSS)	■ 목적 : 수자원의 재이용, 하수도 시스템 개선 ■ 용량 및 규격 : 직경3.3 ~ 6.0m, 연장45.7km
말레이시아 쿠알라룸프(SMART)	■ 목적 : 도로기능, 상습침수해소 ■ 용량 및 규격 : 직경11.8m, 연장9.7km(저류용량 1,000천m^3)
일본 와다야요이	■ 목적 : 상습침수해소, 수질개선 ■ 용량 및 규격 : (본선) 직경8.5m, 연장2.2km, (지선) 직경3.0m, 연장4.7km (저류용량 150천m^3)
일본 가와사키	■ 목적 : 상습침수해소, 수질개선 ■ 용량 및 규격 : 4개의 저류시설, 저류용량 89천m^3
일본 칸다가와	■ 목적 : 상습침수해소, 수질개선 ■ 용량 및 규격 : 저류용량 540천m^3
일본 사이타마현 수도권외곽방수로	■ 목적 : 상습침수해소 ■ 용량 및 규격 : (지하방수로) 직경10.0m, 연장6.3km (지하저류조) 폭78m, 높이18m, 연장177m (저류용량) 670천m^3



(a) 프랑스 파리 - 저류터널



(b) 말레이시아 - SMART터널



(c) 일본 사이타마현 - 지하저류조

<그림 3.1.1 지하 저류공동 및 저류터널 개발 사례>

○ 이상의 사례에서 본 바와 같이, 세계 주요 도시에서는 지하 저류공동 또는 저류터널을 설치함으로써 도심지 상습침수피해를 방지하고 있음.

○ 우리나라는 2000년대에 이르러 도시지역에서의 홍수피해가 증가하였는데, 이는 도시화가 진행됨에 따라 지하공간의 활용도가 높아지고 사회기반시설을 구축하는 등 불투수 면적이 증가함에 따라 첨두유량은 증가하고 홍수도달시간은 감소하기 때문임. 따라서 홍수피해를 유발하는 외적 요인에는 강우패턴이나 특성 외에도 토지이용상태가 영향을 미칠 수 있기 때문에, 토지이용이 제한적인 도심지에서 지하공간을 이용한 침수저감 시설물의 설치는 향후 도시재해 방재대책 수립에 지대한 영향을 미칠 것으로 사료됨.

○ 도심지 대단면 지하 저류공동을 건설함에 있어, 근접시공은 불가피하며 이는 인접한 구조물의 변형 및 손상의 주요 요인이 되고 있음. 따라서 도심지 지하 저류공동의 건설을 위한 개착공사 및 지하 저류공동 건설을 위한 안정성 확보기술 개발에 관련된 연구가 필요하므로 관련 요소기술에 대한 조사 및 분석이 요구됨.

○ 또한, 복합 지하공간 및 주변지역의 침수피해를 저감하기 위해서 기존 및 신설 배수체계와의 연계방법이 중요하며 지하 저류공동의 적용 및 보급을 위해 저감효과에 대한 검증, 최적 위치 및 규모 산정 기법에 대한 연구가 반드시 선행되어야 하므로, 이와 관련된 요소기술에 대해서도 조사 및 분석이 필요함.

(2) 요소기술 조사 및 분석

도시지역의 침수피해 특히 복합지하공간과 주변 지역의 침수피해를 저감하기 위한 대단면 지하 저류공동의 건설을 위한 요소기술은 크게 도심지 지하 저류공동 건설 분야, 지하공간 침수위험도 평가 분야 및 지하 저류공동의 개략적인 위치선정에 따른 배수시스템 효과분석 분야로 구분할 수 있음.

(가) 도심지 지하 저류공동 건설 분야

○ 국토해양부와 건설교통기술평가원의 지원으로 “지하공간 건설기술 연구단”에서는 대형·대단면 지하공간 창출을 위한 기술 패키지 개발을 추진하였는데, (사)한국터널지하공간학회에서는 이 연구성과를 바탕으로 대형·대단면 지하공간에서의 계획, 설계, 시공, 유지관리를 효율적으로 수행하기 위한 설계 및 시공 기술지침서인 [지하대공간 구조물 설계 · 시공 가이드]를 발간하였음.

○ [지하 대공간 구조물 설계 · 시공 가이드]에서는 계획, 부지조사 및 평가(지반조사), 해석 및 안정성 평가, 암반보강 및 지보설계, 지하 대공간 구조물의 시공 및 지하대공간 구조물의 유지관리로 구분하여 내용을 제시하였는데, 지하 저류공동의 설계 관점에서 주요 내용을 정리하면 다음과 같음.

① 계획 분야

- 사용목적과 이용도에 따라 지하공간의 기능계획 수립 및 규모 결정
- 지형, 환경, 지장물, 보상, 관계법규 등을 고려한 부지선정
- 입지환경 및 지반조사, 여론조사, 관계법규 조사 등 사전조사를 바탕으로 지하공간 구조물 계획 수립
- 지하수, 소음, 진동과 같은 환경영향 최소화
- 건설 과정에서 안전을 확보하기 위해 지반조사기술, 재료 및 품질관리 기술, 지보시스템 설계기술, 시공기술을 고려해야 함.

② 부지조사 및 평가 분야(지반조사)

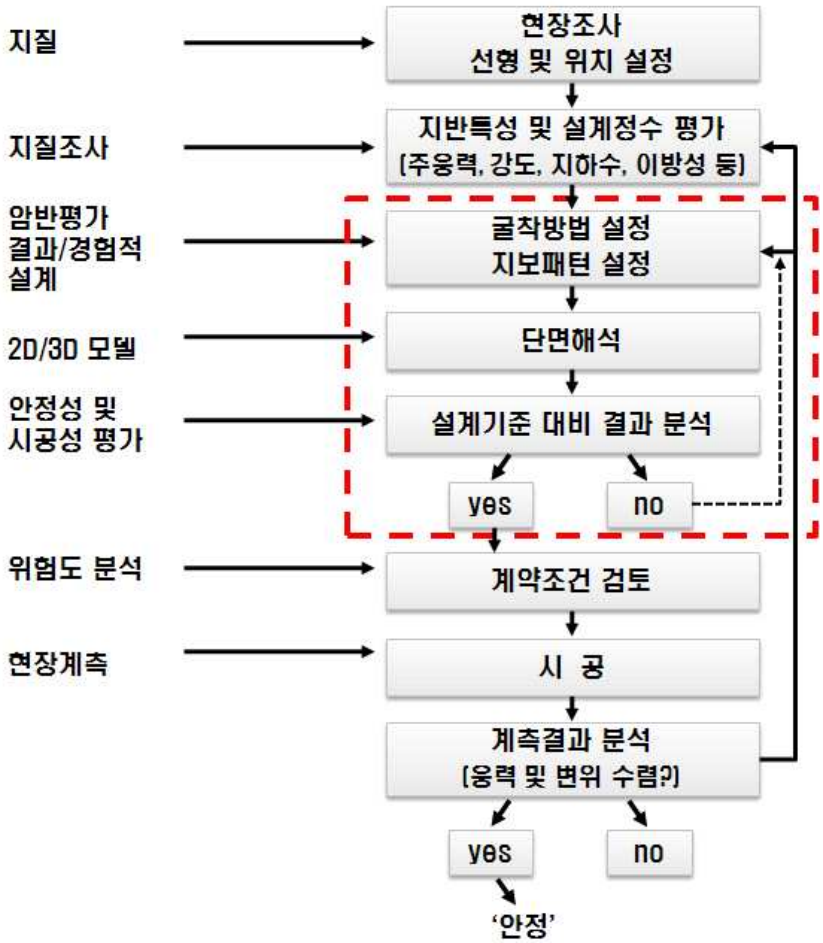
- 부지 타당성 조사 : 지형도 및 지질도, 항공사진을 통한 문헌조사, 개략적인 현장지질조사, 작업구 위치 등 주요위치 조사
- 시공 전 조사 : 시추자료를 통한 지질도 작성, 굴절법 탐사-시추코어-암반분류
- 암반투수계수 등의 현장조사, 실내시험을 통한 암반굴착과 지보방법에 대한 평가 필요
- 시공 중 조사 : 암석과 절리/연약지대 채취물에 대한 물성시험 등 시공 전 조사내용의 보완을 위한 추가조사를 바탕으로 굴착방법과 최종지보에 대한 추천사항 제시, 지하공간 지질도 작성

③ 해석 및 안정성 평가

- 시공 전 조사단계 : 대상 현장암반에 대한 조사자료를 토대로 유한요소법이나 경계요소법, 개별요소법 등 다양한 수치해석을 통해 구조물의 거동을 평가
- 설계단계 : 지보설계 및 굴착방법 등의 내용을 포함한 지하공간 구조계 해석 및 안정성 평가, 지보패턴의 타당성 검토 및 시공관리 기준치 설정, 단면해석 결과를 토

대로 지하공간 및 주변 지반 보강 필요성 여부 및 굴착영향범위 등을 파악하여 시공계획 수립에 도움을 줄 수 있는 정보 제공

- 시공단계 : 시공 중 계측된 응력 및 변위를 이용하여 지반의 역학적 특성치를 재평가하는 역해석(back analysys)을 수행하고 이를 바탕으로 지보패턴 및 굴착공법 등 기 수행된 설계를 재검토해야 함. 다음의 그림은 ITA에서 추천한 터널을 포함한 지하공간 설계흐름도이며 점선부분이 단면해석 적용단계임.



<그림 3.1.2 암반 내 지하공간 설계 흐름도(ITA, 1998)>

- 수리거동 해석 : 지하공간 구조물의 방·배수 시스템 결정 후 침투수력과 수압에 따른 지하공간의 안정성 검토, 지하수의 유입량 검토, 지하공간 건설로 인한 지하수위 변화 검토, 지하 대공간 건설로 인한 지하수 유동 분석, 차수그라우팅을 고려한 유입량 검토와 지하공간의 안정성 검토 수행
- 내진해석 : 등가정적해석법, 응답변위법 및 동적해석법(부분구조법과 직접법, 주파수영역해석과 시간영역해석, 선형해석과 비선형해석)을 이용하여 검토 수행

- 근접부에 따른 영향범위 평가 : 지하공간 굴착으로 인한 인접건물에 미치는 손상도 평가는 굴착단계별로 각변위와 수평변형율의 관계를 이용하여 검토가 가능하며 이를 토대로 문제가 예상되는 경우에 다양한 대책을 강구해야 함.

④ 암반보강 및 지보설계

- 지보설계 : 지하공간의 굴착면이 터널에 비해 2배 증가하면 이완영역은 4~8배 증가하므로, 지보량의 증가보다는 경제적인 고성능 지보재의 개발이 요구됨. 따라서 숏크리트는 높은 초기강도 및 장기강도를 확보해야 하고 단일 라이닝 구조에서는 내구성이 요구됨. 케이블 볼트/록볼트, 콘크리트 라이닝도 고성능 지보재 특성을 갖추어야 함.
- 암반그라우팅 : 암반의 투수성을 저하시키기 위해 절리면을 주입재로 충전해야 하므로, 주입재 배합 및 최대 주입압 관리에 유의해야 함.

⑤ 지하 대공간 구조물의 시공

- 굴착시공 : 인력굴착, 기계굴착, 발파굴착 및 파쇄굴착의 적용여부는 굴착대상이 되는 지반조건과 연장, 단면의 크기와 기하학적 형상 및 토피, 지장물의 위치와 규모 등 주변 여건(진동 및 소음, 지표침하 등) 및 보조공법의 적용성을 고려하여 선정하고, 굴착공법은 지하구조물 단면의 크기, 막장의 자립성, 원지반의 지보능력 등 제반여건을 고려하여 연직분할, 다단 수평분할, 선진도갱+다단분할 굴착공법 중에서 적합한 공법을 선정해야 함.
- 암반보강 및 지보 : 지하공간 굴착에 사용하는 지보재로는 강지보재, 숏크리트, 록볼트 및 케이블볼트, 콘크리트라이닝 및 그라우팅 등이 있으며, 이러한 지보재는 작업효율성 및 안정성을 고려하여 시공해야 함. 지하수위 하부에서 지하공간 굴착 공사시에는 지하수 유입 허용 정도를 고려하여 차수공법을 선정해야 함.
- 방·배수 : 지하공간의 방·배수 시스템 선정시에는 구조물의 목적 및 기능, 지반조건, 구조물의 안정성, 구조물의 시공성, 시공의 경제성 등이 고려되어야 하고, 지하공간 내부로의 유입수량을 예측하여 이를 고려한 방·배수 시스템의 배수 용량을 선정해야 함. 또한 방·배수 재료는 내구연한 동안 사용성에 문제가 없고 유지관리가 가능한 재료를 선정해야 함.
- 굴착변위 및 응력 관리 : 내공 및 지중변위, 숏크리트 응력, 록볼트 축력 및 인발력을 측정하여 설계자료와의 비교 및 안정성 분석의 기초 자료로 활용해야 함.

⑥ 지하 대공간 구조물의 유지관리

- 점검 및 진단 : 「시설물안전관리에 관한 특별법」(건설교통부, 1987) 및 「안전점검 및 정밀안전진단 세부지침」(한국시설안전기술공단, 1997)에 의거 시행해야 함.

- 구조물의 변상 평가 및 대책 : 점거 및 진단에 의해 얻어진 결과를 종합적으로 판단하여 변상에 대한 원인을 추정하여 건전도를 평가하고 대책의 필요성이 인정되는 경우에 대하여 보수, 보강을 실시함.
- 유지관리 계측 : 지하공간 구조물 시공과 더불어 설치된 각종 지하구조물(비상 구조물 및 배수시설)에 대한 유지관리를 수행해야 하며 아울러 장기적 관리를 위한 유지관리 계측도 수행할 필요가 있음. 유지관리는 장기간의 다양한 거동정보를 관리하여 구조물의 열화거동을 적절히 판단, 평가하고 즉시 보수, 보강을 위하여 유지관리 체계를 정보화 시스템으로 운영할 수 있도록 노력해야 함.

○ 지하 저류공동 및 인접구조물의 안정성 확보를 위한 요소기술은 국내 NATM공법, Single Shell(또는 NMT)공법 및 Large Cavern(또는 Tunnel) 설계기술에 대한 사례분석과 [지하 대공간 구조물 설계 · 시공 가이드]를 참조하여 다음과 같이 설계공종 그룹별로 구분될 수 있음.

① 지하 저류공동 계획 및 단면 분야
- 구조물 목적별 기능실 배치 및 입체동선계획, 효율성 측면을 고려한 최적화
- 지하 수자원, 생태환경 변화 검토
- 화재 등 비상시 방재/피난 계획
- 암반조건별 Cavern 형상 및 단면 검토
- Cavern 목적별 부대시설 규모, 배치, 동선 계획

② 지반조사 및 암반분류 분야
- 대단면 Cavern 대상 암반평가 및 암반분류법 ; 지질구조, 암석-암반-흙의 물리적 특성, 강도 특성 및 불연속면 특성 고려
- 지반의 정적 및 동적 설계정수 평가, 선정 방법
- 불연속면의 조사 방법, 구조물 안정성과의 관계 평가 방법

③ 굴착 및 발파 분야
- 발파설계요소 ; 대단면-장심도 발파효율 검토, 미진동 제어발파 방법, 화약-심발-뇌관 등
- 시공 중 지하수 처리, 차수 및 지수 방법의 고찰
- 천층 및 연약층 구간의 터널통과방안 방법 검토
- 시공성을 고려한 Pilot 터널, 분할단면, Bench의 계획

④ 지보재 설계 및 안정성 분야
- 암반조건별 지보패턴의 설정 및 적정성 검증 ; 지보재 규격, 설치 간격, 재질, 강도 등

- 위험구간, 용출수 구간에 대한 보강방법 검토
- 복수 공동 설치 계획시 Rock-Pillar 영향 검토
- 불연속면에 대한 안정성 평가
- 내진안정성 확보
- 대심도 수압터널에 대한 침투류 해석, 안정성 평가

⑤ 계측 및 유지관리 분야
- 시공 중 계측방법 및 안정성 평가방법의 재설정
- 구조물 안전진단 ; 지보재의 기능성 유지 확인 방안
- 구조물, 지보재 열화 및 균열부 보수보강 대책

⑥ 부대시설 및 기타 분야
- 지하수 유동분석 ; 암반 불연속면, 연약대 등을 고려한 지하수 유동분석, 용출량 분석
- 운용 중 지하수 및 오폐수 처리, 배수처리, 방수처리 방법 및 시스템
- 균열 등에 의한 침출 지하수의 차수 및 배수 처리 방법
- 환기, 조명, 방재 및 피난설비 계획 ; 환기구, 기계, 전기 설비 등(전기, 기계, 건축 설계 별도 고려)
- 관련 토목 및 부대시설 일반, 상세 설계도면 자료 확보 및 작성
- 일반, 특별시방서, 공종별 내역서 자료 확보 및 작성

⑦ 지하 대공간 Renovation 및 증설 분야
- 장기 노후화 지하 대공간의 Renewal 기술 ; 기존 지하공간 기능성 및 안정성 판단을 위한 안전진단 기술 고려
- 기존 지하 대공간의 확장 및 개축 기술 ; Underpinning 등의 보수보강 대책, 기존 구조물과 인접한 개착 및 복개 터널공법에 의한 설계시공기술, 인접구조물의 영향 검토 기술 등

⑧ 건설재료, 장비, 품질관리 분야
- 한국형 고강도 숏크리트의 개발 ; 보강섬유, 급결제, 혼화재 등의 고려, 장기 열화 내구성 고려
- 내부식성 Rock-bolt, Cable-bolt, PC-라이닝의 개발
- 방수재 등 재료적인 측면
- 기계화 시공장비 개발 ; 천공장비, 대단면 쉴드TBM 등 기계굴착장비

○ 이상의 요소기술 대부분은 “대형 대단면 지하공간 창출을 위한 지하공간 건설기술/ 지하공간 용도별 지하수 처리시스템 개발-콘크리트 지보재기술 개발 과제

(2004.7~2009.6, 한국건설기술교통평가원)” 및 여러 기술개발 등을 통해 연구 개발되고 있음.

○ 그러나, 지하 저류공동의 보강과 관련된 기술개발은 지하 저류공동시설과 유사한 형태인 병설터널의 필라부 보강에 관한 사항이 대부분이며, 주로 근접병설터널의 중앙 필러부를 원지반을 사용하는 것이 아닌 콘크리트 구조물로 보강하는 방법임. 또한 도심지 지하 저류공동 설치에 따른 개착부의 보강기술에 대한 기술개발은 국내외에 상당수의 특허가 등록되어 있으나, 본 연구를 통해 개발하고자 하는 기술과 직접적인 관련이 없는 것으로 파악되었음.

○ 본 연구과제는 대상지역을 도심 지하공간에 초점을 맞춤으로써 현대 도심지 중요 구조물의 하부에 지하 저류공동을 건설함에 있어서 발생하는 시공시의 공간적 제약성, 보강공법의 제한적인 요소와 인접구조물과의 적정 이격거리 확보의 곤란에 기인한 지반변형에 상호작용하는 구조물의 안정성 불안 요소를 고려하고 있음.

○ 따라서, 지하 저류공동 및 인접구조물의 안정성 확보를 위한 핵심 요소기술은 다음과 같음.

① 기존 구조물 하부 저류공동 시공시 상부 구조물 및 저류공동의 안정성을 확보할 수 있는 언더피닝 기술

- 언더피닝을 통한 필라구조의 하중 저감효과 규명
- 필라지보시스템의 이론적 규명
- 필라보강을 위한 신공법 개발(이론적, 실험적, 수치해석적 규명)
- 지하 저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인 개발

② 개착에 의한 저류공동 시공시 인접구조물의 침하 및 변형 방지 설계기술

- 근접시공에 의한 구조물 손상도 평가기법 구축
- 개착부 굴착공법별 기존 구조물에 대한 손상도 평가
- 구조물 손상도 평가를 통한 개착부 굴착공법 선정 및 보강공법 기술개발

(나) 지하공간 침수위험도 평가 분야

○ 지하공간은 폐쇄된 공간으로서 지표수 및 지하수의 유입이 발생하면 이에 대한 처리가 매우 곤란하며, 심각한 피해를 야기할 수 있음. 따라서 지하공간을 대상으로 침수위험도 평가를 수행한 후 침수방지대책, 유입수 유도배수 방안 등의 비상대처계획의 제시가 필요함.

○ 지하공간을 대상으로 침수위험도를 평가한 연구는 김윤종 등(2005)에 의해 서울시의 지하철 역사의 침수피해 사례를 분석하여 침수위험도 평가를 수행한 사례가 있으나

지형, 과거이력, 외수 위험도, 내수 위험도의 4가지 평가항목으로 분석한 것으로서 지하공간의 특성을 반영한 관련 연구는 매우 부족한 실정임.

○ 따라서, 지하공간의 공간적 특성, 유입수의 특성, 지반특성, 공간의 목적 및 중요도 등을 고려한 위험도 평가기법을 개발하여 지하공간의 위험도를 정성적/정량적으로 평가하는 연구가 필요함. 이에 대한 요소기술은 다음과 같음.

① 지하공간 침수위험도 평가 방안 수립
- 지하공간 침수위험도 정의 및 평가개념 정립
- Risk Analysis 기법 설정
- 침수위험인자의 정성적/정량적 평가 수행

② 지하공간 침수위험인자 분석 및 정성적/정량적 평가 기준 수립
- 지하공간내 유입수의 동적거동 평가방안의 설정
- 수치시뮬레이션 방법에 의한 지하공간내 유출해석, 동적거동 분석
- 수리모형실험 방법에 의한 지하공간내 유출 비교평가

③ 지하공간 침수위험도 평가기법 및 평가 가이드라인 작성
- 지하공간 침수위험도 평가기법의 검증 및 평가 가이드라인 작성
- 지하공간 침수억제 및 유입수 유도처리 방안 수립
- 지표/지하 유입수 방·배수 시스템 및 유도처리 방안 작성

(다) 지하 저류공동의 개략적인 위치선정에 따른 배수시스템 효과분석 분야

○ 기상변화에 의한 이상홍수와 유역의 도시화로 인한 불투수면의 증가는 홍수시 유출량을 증가시켜 기존 하도의 적정 통수능을 초과하는 홍수 발생 빈도가 증가하고 있는 실정임.

○ 도시지역의 홍수피해 직접적인 원인으로는 외수의 범람에 의한 침수와 내수 배제불량으로 침수피해로 구분할 수 있으며 최근 도시지역에 발생하는 홍수피해의 대부분은 외수의 직접범람에 의한 피해보다는 각종 수리구조물의 배제능력 부족이나 방류지점에서의 배수위의 영향으로 인한 내수의 배제불량에 기인한 피해가 증가하는 추세임.

○ 본 연구는 도시유역의 치수계획의 일환으로 지하저류공동의 설계 및 시공을 계획할 경우 현재의 기술수준으로 불명확한 용량 산정 및 수리영향인자 평가기법을 개발하여 적용성을 향상시키고자 함.

○ 지하 저류공동의 개략적인 위치선정에 따른 배수시스템 효과분석을 실시하기 위하여 도시유역의 수리 · 수문해석을 위한 모형을 검토하여 선정해야하며 선정된 모형으로

침수저감효과를 분석해야 함.

○ 이에 지하저류공동의 개략적 위치선정에 따른 배수시스템 효과분석을 위한 핵심 요소기술은 다음과 같음.

① 수리·수문 해석 모형의 검토 및 선정

- 도시수문 분석을 위한 적정모형 검토 및 선정
- 우수관로 수리해석을 위한 적정 해석모형 검토 및 선정
- 선정된 모형의 지하저류 공동모의 가능여부 분석

② 지하 저류공동 설치에 따른 침수저감효과 분석

- 과거 침수 이력조사, 배수체계, 지형특성검토, 기존 배수분구 침수특성, 배수분구 침수저감효과 등을 고려한 시범배수분구 결정방안 정립
- 초과우량 대상 강우선정방법의 수립 및 한계강우 선정
- 효과적인 침수저감을 위한 지하저류 공동 저류량 산정
- 침수저감을 위한 최적화기법 분석 및 선정
- 국내외 도시유역 지하 저류공동 설치 사례 분석
- 도시유역 기존 배수체계 분석
- 지하 저류공동 설치를 위한 고려사항 분석 및 제시

○ 지하 저류공동 설치를 위한 기술은 상기의 단위요소기술 뿐만 아니라 국내 도심지내 지하철, 고속철도 건설사업 등 근래 약 30년의 시공실적으로부터도 얻을 수 있으므로, 발전된 설계시공기술과 연구결과를 본 지하 빗물저류공동건설 기술 개발 연구내용에 특히 수방재 및 배수체계를 포함하여 전체 시스템 측면에서 최종 연구성과인 설계시공 가이드라인(안)에 적극적으로 활용하여 수행하였음.

나. 언더피닝을 통한 필라구조의 하중 저감효과 규명

○ 지하 저류공동은 필연적으로 도심지에 존재하는 다른 구조물들과 근접하여 설치되며 공간의 제약으로 인한 문제들이 발생함. 그러므로 이를 극복하기 위해 기존 지하구조물 하부에 추가적인 공간창출을 위한 언더피닝 공법의 적용이 필요함.

○ 언더피닝 공법은 실제 빌딩하부, 터널, 교대, 교각의 기초 공사시에 각각의 지반 및 공사 조건에 따라 다양한 공법에 의해 시행되고 있으며, 일반적으로 다음과 같은 경우에 적용되고 있음.

- 지하구조물의 하부에 지중구조물을 만드는 경우 ; 지상구조물의 기초 또는 지하구조물 자체를 노출시킨 상태로 이것을 직접 밑받이하여 새로운 지중구조물을 기존구조물의 하부에 축조하는 경우에 해당하며 언더피닝으로는 가장 빈도가 높은 경우임.
- 기존구조물의 지지력이 부족한 경우
- 기존구조물에 근접해서 굴착을 실시하는 경우 ; 기존구조물에 근접한 굴착시 기설구조물에 변상을 줄 우려가 있는 경우에 구조물의 기초보강을 실시하는 경우임.
- 지상구조물을 이동하는 경우

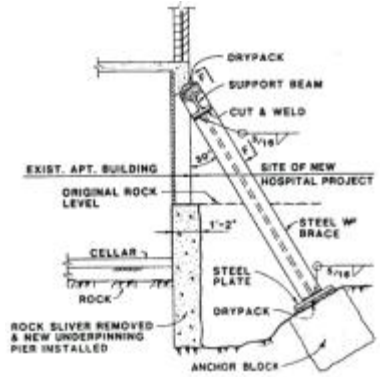
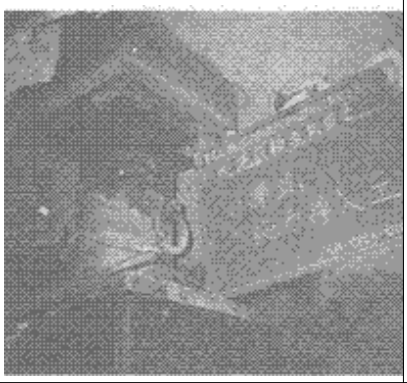
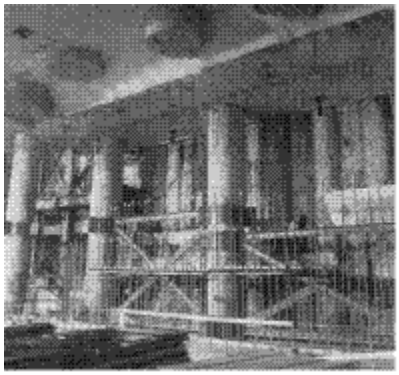
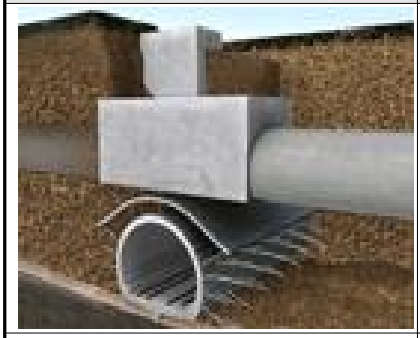
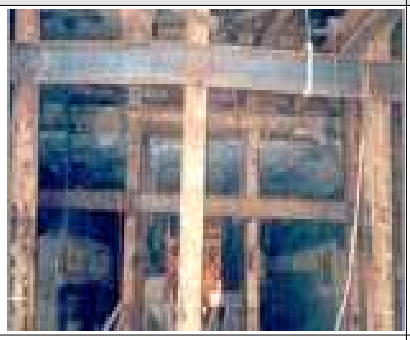
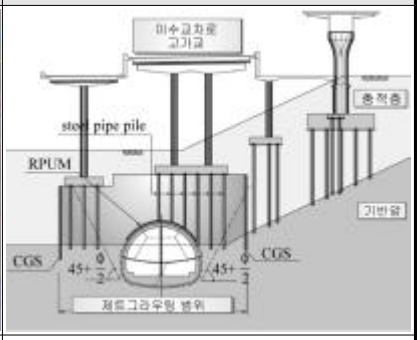
○ 언더피닝 공법의 종류는 다양하며 단순하게 분류하는 것은 곤란하지만, 다음과 같이 분류할 수 있음.

<표 3.1.2 언더피닝 공법의 분류>

지지하는 기초의 공종에 의한 분류	지지기초의 시공위치에 의한 분류	지지기초의 시공위치에 의한 분류
■ 기초말뚝을 만들고 직접 하중을 받는 방식 ■ 받침 교대에서 하중을 주는 방식 (하부 받침식, 상부 받침식, 첨 강도식)	■ 교대와 말뚝에 의해 하부에서 하중을 받는 방식 ■ 트렌치공법에 의해 하부에서 하중을 받는 방식 ■ 깊은기초말뚝에 의해 하부에서 하중을 받는 방식 ■ 파이프 루프 등에 의해 하부에서 하중을 받는 방식	■ 지지기초가 아래의 구조물의 외측일 때, 지상보다 시공과 지하에서의 시공 ■ 지지기초가 구조물의 바로 밑인 경우 ■ 관통하는 경우

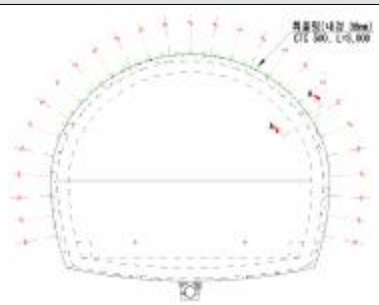
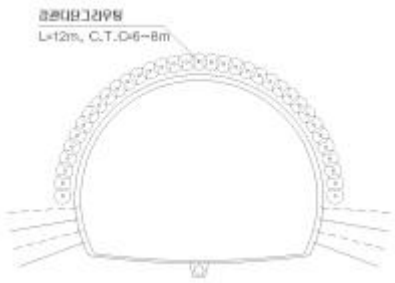
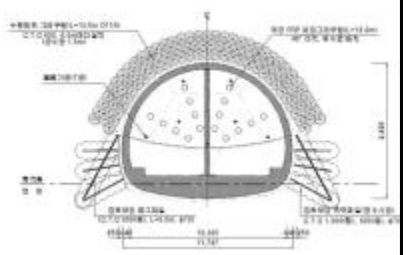
○ 국내외에서는 기존구조물의 보수공사, 도심지 지하철공사시 기설구조물과의 간섭이 발생하는 구간에서의 보강공사 등에서 언더피닝 공법을 다양하게 적용하고 있으며, 이를 정리하면 다음과 같음.

<표 3.1.3 국내외에서 적용되고 있는 언더피닝 공법의 예>

미국 뉴욕시 병원 보수공사	일본 카타후쿠선 공사	일본 수도고속도로의 교각
		
■ 기존에 지하층 아래의 벽체를 지지하고 있던 Rock Silver에서 문제가 발생하여 언더피닝 공법을 통해 보강 ■ Rock Silver를 제거하고, 새로운 콘크리트 언더피닝 피어를 통해 상부 구조물을 지지하도록 함	■ 충적층 및 연약점토가 존재하는 지하철교차점에서 언더피닝공법을 채택 ■ 수체공법용 특수유압잭을 설치하였으며, 하중 자동제어창치 8대와 전동펌프 유니트 2대를 이용한 30계통의 유압재크에 자동 제어시스템을 채용하였음	■ 차량이 주행하고 있는 수도고속도로를 언더피닝한 공사사례 ■ 교각을 언더피닝 공법으로 받쳐 교각의 기초말뚝을 절단하고 개착공법으로 지하철 터널을 구축하는 공사
서울시 지하철 9호선	**서울시 지하철 1호선(5공구)**	**서울시 지하철 912공구**
		
■ 7호선 본선급기 환기실 하부 9호선 근접통과에 대한 대책으로 언더피닝 공법 채택 ■ 터널굴착시 상부로부터 전이응력을 대구경 천공보강부로 분산 및 지지함으로 상부 7호선 및 터널 안정성 확보	■ 개착공법으로 터널시공 시 인접구조물의 부등침하를 막기 위해 언더피닝 공법 채택 ■ 가시설에서의 침하 발생구간을 말뚝을 이용해 지지하는 방식으로 지반의 침하를 최소화하였음	■ 차량이 주행하고 있는 이수고가교 하부통과구간 ■ 터널선형조건상 말뚝절단이 불가피하여 기초형식을 말뚝기초에서 직접기초 형식으로 변경하기위해 터널시공시 침하영향구간을 제트그라우팅으로 치환하였음

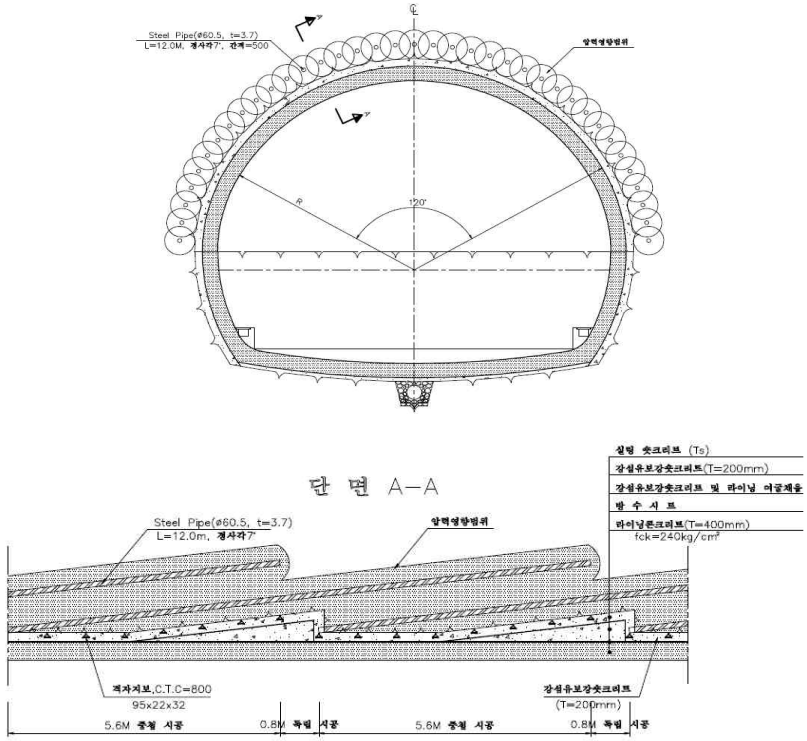
○ 도심지에서 지하 저류공동을 설치할 경우 상부구조물이 있거나 지반이 연약한 조건이면 공동 굴착 이전에 대상지반에 대한 사전보강이 필요함. 이에 대해 현재 다양한 공법이 제안되고 있으며, 도심지 지하공간 하부에 적용 가능한 갱내 사전보강공법으로서 터널 굴착공사시 적용사례가 많은 Fore Poling, 강관다단그라우팅(또는 FRP 다단그라우팅) 및 수평제트그라우팅 공법에 대해 간략히 검토해 보면 다음과 같음.

<표 3.1.4 도심지 지하공간 하부에 적용 가능한 갱내사전보강공법>

Fore Poling	강관다단그라우팅 (또는 FRP 다단그라우팅)	수평제트그라우팅
		
■ Fore Poling은 록볼트 및 강관을 주로 사용함 ■ 연약한 토사 터널에서는 터널막장 전방 굴착면에 일정 경사각으로 시공하되 시공각도는 지반조건 및 굴진장과 연계하여 적절히 조정하여 시행 ■ 매 막장마다 설치해야 하므로 Cycle time이 길어지고 굴착 길이가 길어질수록 지지효과가 감소하며 강관다단그라우팅 공법에 비해 보강효과가 낮음	■ 터널 굴착 전에 강관을 터널 굴착면을 따라 umbrella 형상으로 배열, 설치하여 보강하는 공법 ■ 주입재에 의한 지반의 고결로 인하여 강관과 지반을 일체로 만들고 강관의 빔(Beam)작용에 의해 터널에 가해지는 상재하중, 토압 등의 분산효과 및 경감효과를 얻는 공법 ■ 강관 대신에 FRP 파이프를 보강재로 설치한 경우 FRP 다단그라우팅공법을 칭함	■ 수평 제트 그라우팅 공법은 지반에 물과 시멘트를 초고압 JET류를 이용하여 회전 분사하면서 지반에 원주상의 고결체를 형성하는 연약지반 개량공법임 ■ 이중롯드(Double rod) 선단에 젯트노즐(Jet nozzle)을 장착하여 지반내에서 노즐이 한바퀴 또는 한바퀴 반을 회전하면 자동적으로 일정 높이(보통 2.5cm) 상승하도록 되어 있음

○ 상부구조물과 이격거리를 가지고 터널을 굴착할 경우 굴착 지반에 대한 보강이 요구되며, 본 연구에서는 상부구조물과 근접하여 시공할 경우 적절한 보강공법을 제안하고 그 적용성을 검토함.

○ 컴팩션 루프 공법(Compaction Roof Method)은 터널 굴착면 주변에 컴팩션 그라우팅과 유사한 효과를 유도하여 터널의 안정성을 향상시킬 수 있는 신개념의 터널보강공법임.

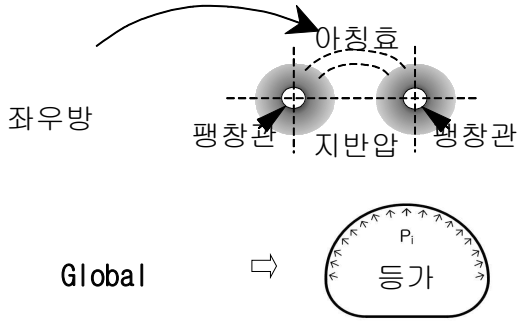


<그림 3.1.3 컴팩션 루프 공법 개략도>

○ 천공홀에 폐단면의 팽창형 관을 삽입하여 관 팽창을 시킴으로서 압의 손실없이 천공홀을 확장시키고 주변 지반으로 팽창압을 전달시키도록 함.

○ 굴착면 외곽에 Umbrella Type으로 팽창관을 배치함으로 관 주변 지반을 압축다짐하여 터널 주변으로 전체적인(Global) 아칭효과를 유도시킬 수 있음.

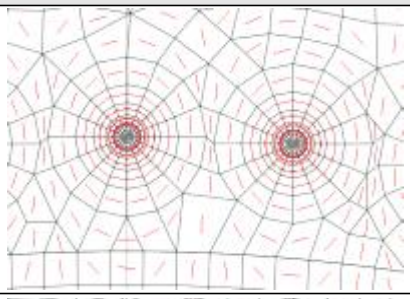
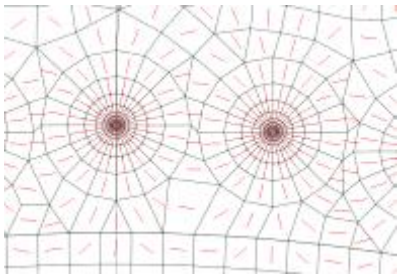
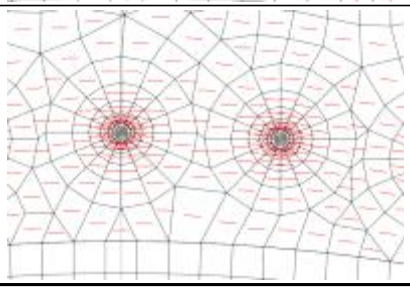
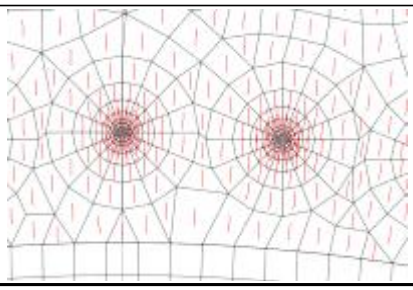
○ 또한 팽창압에 의한 등가내압 효과를 유도함으로서 터널의 안정성을 향상시킬 수 있음.



<그림 3.1.4 컴팩션 루프 공법 개념도>

○ 아래 표는 Convex 아치 형태로 강관다단 그라우팅 공법을 설치하였을 경우 터널 시공 단계에 따라서 관 주변에 발생하는 최대주응력 및 최소주응력의 상태를 나타낸 것임.

<표 3.1.5 강관다단그라우팅의 터널 시공 단계별 주응력 분포>

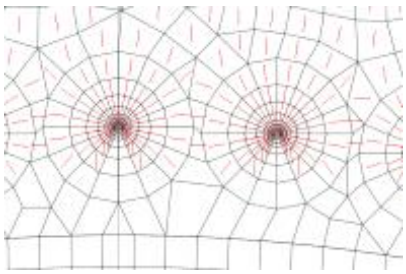
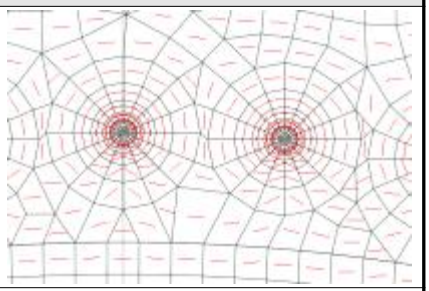
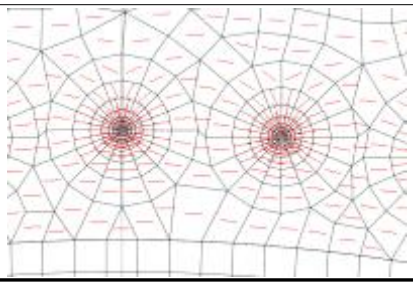
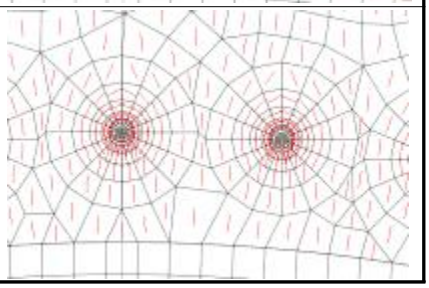
단계	최대 주응력	최소 주응력
(a) 관 설치		
(b) 터널 굴착		

○ 터널 굴착으로 인해 공동이 발생하면 굴착면 외곽에서는 접선방향응력이 최대주응력으로 작용하고 반경방향응력이 최소주응력으로 작용하게 됨.

○ 터널 굴착 후 무가압 관 주변의 응력 분포는 관의 유무와는 무관하게 터널의 굴착면 외곽 근처에서나 무가압 관 근처에서나 접선방향응력이 최대주응력, 반경방향응력이 최소주응력으로 나타나고 있어 일반적인 터널 굴착 후의 응력상태와 동일함.

○ 아래 표에서는 동일하게 Convex 아치 형태로 컴팩션 루프 공법을 적용하였을 경우 터널 시공 단계에 따라서 관 주변에 발생하는 최대주응력 및 최소주응력의 상태를 나타내었음.

<표 3.1.6 컴팩션 루프 공법의 터널 시공 단계별 주응력 분포>

단계	최대 주응력	최소 주응력
(a) 관 설치		
(b) 터널 굴착		

○ 컴팩션 루프 공법은 강관다단 그라우팅 공법과 달리 팽창관 설치 시 가압에 따른 공팽창으로 인하여 팽창관 주변에는 관을 중심으로 방사방향으로 작용하는 최대주응력이 형성되어 있음을 볼 수 있고, 특히 터널 굴착면에 직교방향으로 상향 작용하는 최대주응력이 존재하여 굴착 시 터널에 작용하는 이완하중을 떠받치면서 응력을 재분배하는 효과를 나타내고 있음을 확인할 수 있음.

○ 굴착 단계에서는 터널 공동 발생으로 인해 터널 굴착면 외곽 바로 위에서는 접선방향응력이 최대주응력으로 작용하고 있으나 팽창관 근처에서는 상, 좌, 우 방향으로 여전히 관을 중심으로 방사방향으로 작용하는 최대주응력의 영향이 남아 있음을 확인할 수 있고, 이러한 최대주응력이 관과 관 사이에서는 아칭의 형태로 연결되고 있어 굴착에 따른 변형에 저항하는 유리한 응력 조건을 형성하고 있는 것으로 판단됨.

다. 필라 지보시스템의 이론적 규명

○ 지하 저류공동은 도심지에 존재하는 다른 구조물들과 근접하여 설치되므로 공간의 제약으로 인한 문제들이 발생하므로, 기설구조물 추가적인 공간창출을 위한 언더피닝 공법뿐만 아니라 필라(Pillar) 보강공법에 대한 연구개발이 필요함.

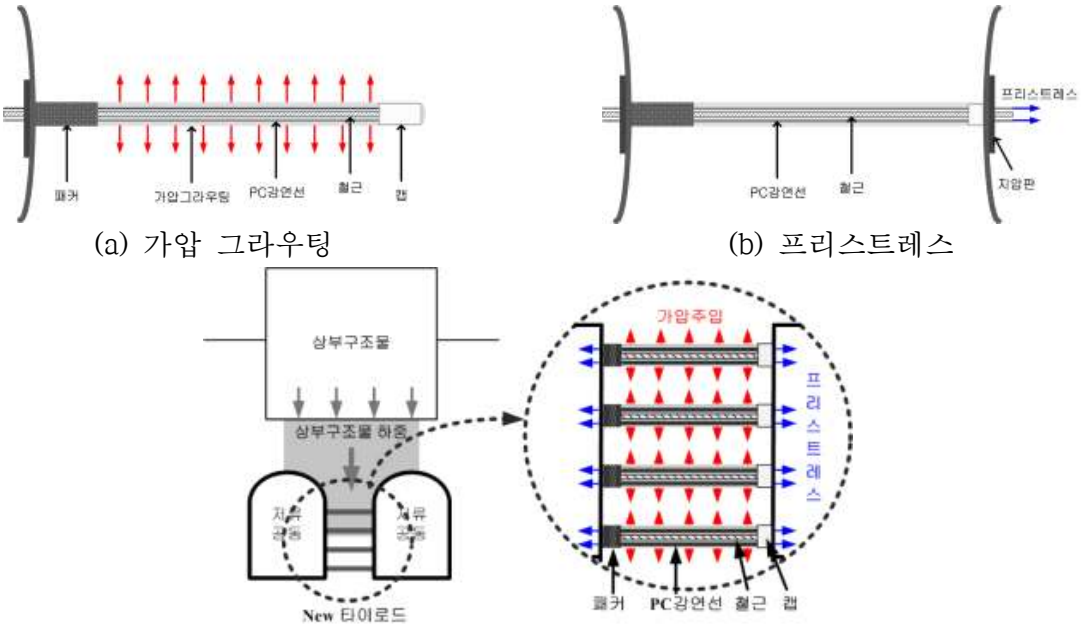
○ 본 연구에서는 원지반의 지반강도를 유지함과 동시에 필라부를 보강할 수 있는 공법을 제안하고자 하며, 필라부 보강공법은 다음의 두 단계로 구분됨.

- 가압그라우팅 단계

  필라부를 천공한 후 철근 또는 강관, PC강연선으로 구성된 보강재를 삽입하고, 패커를 통해서 가압그라우팅을 함. 가압그라우팅을 통해서 연약하거나 절리가 있는 지반의 보강효과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 보강공법에서 주면마찰력을 증진시킬 수 있음.

- 프리스트레스 단계

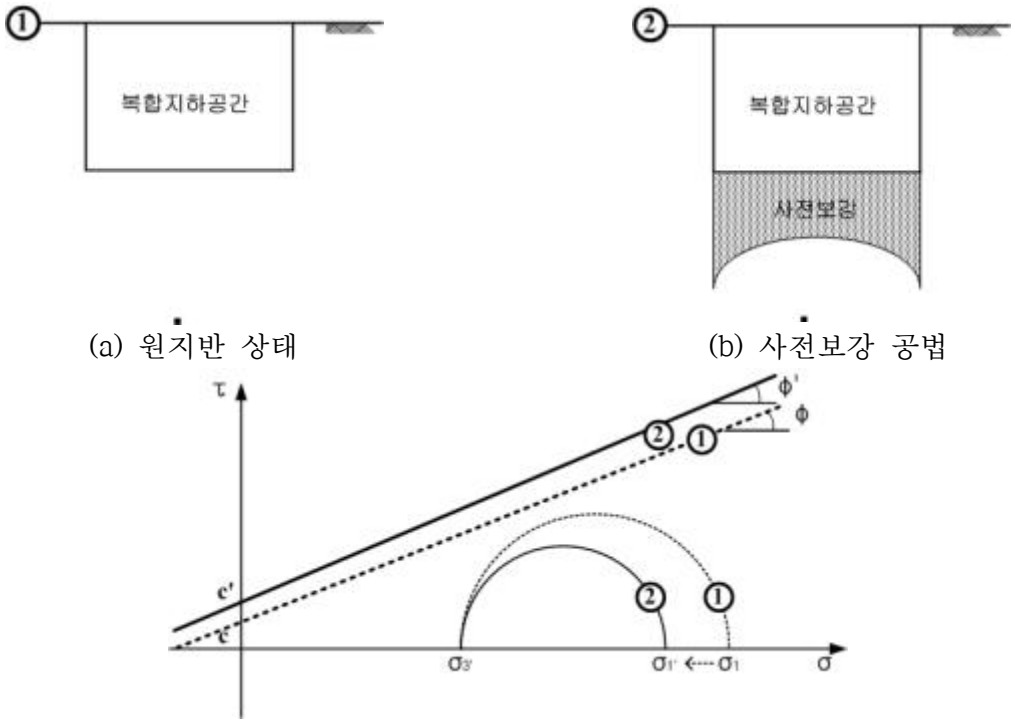
  보강재의 선단에는 후행터널 굴착 시에 프리스트레스를 가하기 위해 PC강연선을 보호할 수 있는 캡을 설치하게 되며, PC강연선을 통해 프리스트레스를 가함. 프리스트레스를 가하게 되면 터널 벽면에 내압을 가하는 효과와 동일한 효과를 얻을 수 있기 때문에 필라부의 보강이 가능할 것으로 판단됨.



<그림 3.1.5 고안된 필라부 보강공법 개념도>

○ 복합지하공간과 근접하여 지하저류공동을 시공할 경우, 강관다단공법과 같은 사전보강공법이나 언더피닝 공법을 통해서 굴착 전 지반을 보강하게 됨.

○ 초기 지중응력(σ_1, σ_3)을 받고 있던 지반은 사전보강공법에 의해 지반이 받는 하중이 감소하게 되며, 지반에 그라우팅 등의 보강공법을 실시하여 지반의 물성치(c, ϕ)가 증가하게 됨.



(a) 원지반 상태 (b) 사전보강 공법

(c) 사전보강 단계에서 지반의 거동특성

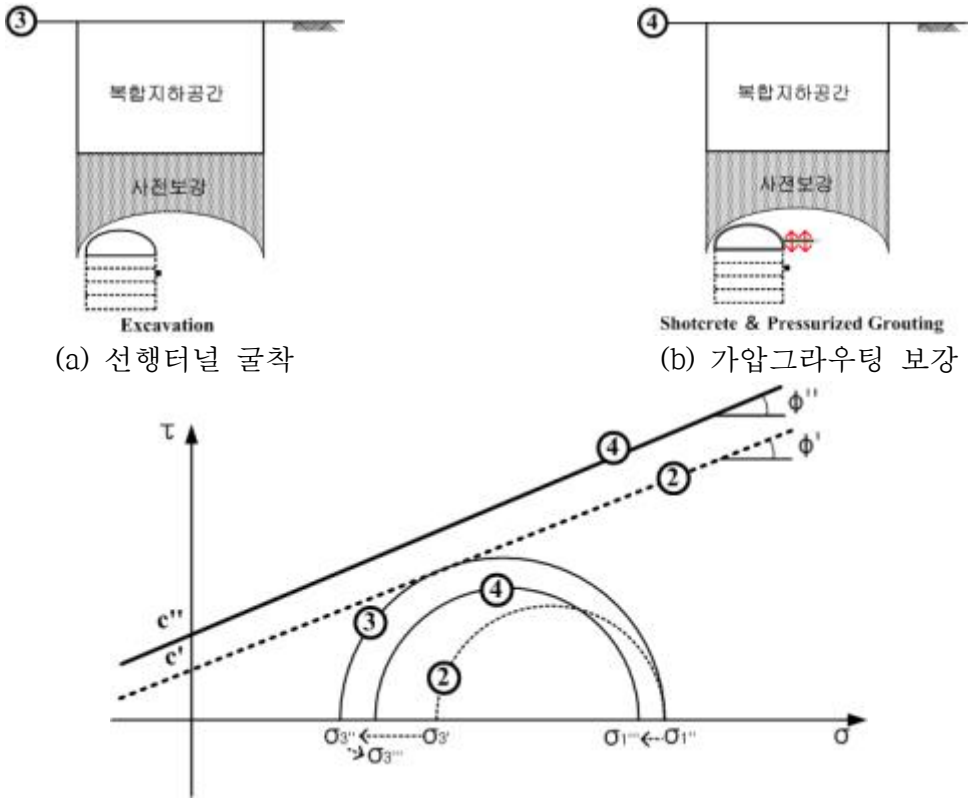
<그림 3.1.6 사전보강 단계>

○ 선행터널을 굴착한 후 필라부의 지반을 보강하기 위해 가압그라우팅을 실시하며, 보강된 지반에 후행터널을 굴착하고 프리스트레스를 가하게 됨.

○ 선행터널을 굴착하게 되면 필라부의 벽면에서 반경방향응력(σ_3)이 '0'으로 가게 되지만 숏크리트 및 록볼트와 같은 1차 지보재를 설치하여 터널의 반경방향응력을 증가시켜 터널을 안정화시킴.

○ 본 연구에서는 필라부에서 수평방향으로 필라부 보강을 위한 공법을 제안하였으며, 천공을 실시하여 보강재를 삽입한 후 가압그라우팅을 실시하게 됨.

○ 가압그라우팅을 통해서 지반의 물성치가 증가하는 효과를 얻을 수 있게 되며, 가압그라우팅에 따른 지반의 상태 및 가압하는 방향에 따라 상부하중 지지효과가 발생하여 필라부에서 가해지는 접선방향 응력이 감소하게 됨.



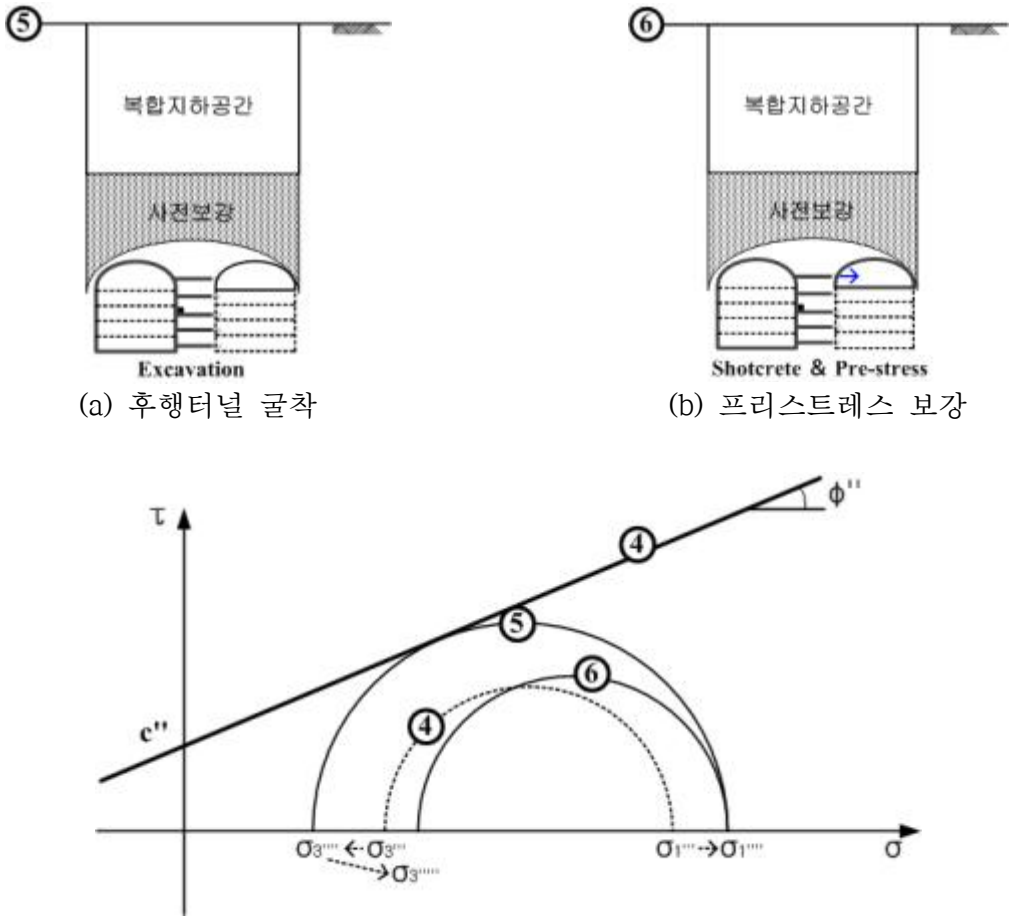
(a) 선행터널 굴착 (b) 가압그라우팅 보강

(c) 선행터널 굴착 및 보강 단계에서 지반의 거동특성

〈그림 3.1.7 선행터널 굴착 및 보강 단계〉

○ 후행터널을 굴착하게 되면 필라부에서는 터널의 접선방향으로 응력이 집중되어 최대주응력(σ_1)이 증가하게 되며, 반경방향으로 응력이 이완하게 되어 최소주응력(σ_3)은 감소하게 되어 필라부 시공단계 중 가장 큰 하중을 받게 됨.

○ 굴착 후 제거된 캡 내부에 있었던 PC강연선을 이용하여 프리스트레스를 가하게 되며, 이를 통해서 터널 반경방향으로 내압을 가하는 효과를 얻을 수 있음. 즉, 최소주응력(σ_3)증가로 인하여 필라부 반경방향 응력이완에 따른 파괴를 방지할 수 있게 됨.



(a) 후행터널 굴착 (b) 프리스트레스 보강

(c) 후행터널 굴착 및 보강 단계에서 지반의 거동특성

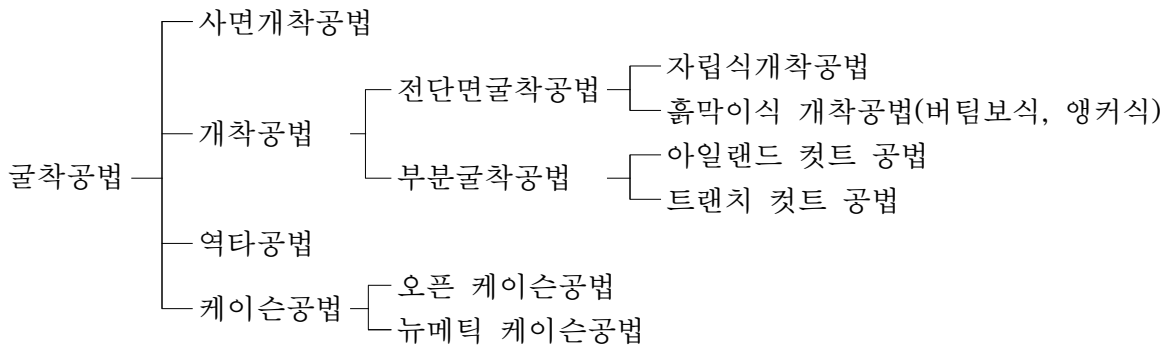
<그림 3.1.8 후행터널 굴착 및 보강단계>

○ 프리스트레스는 터널 전면에 가해지는 것이 아니라 횡방향과 종방향으로 간격을 두어 각각의 천공홀에 가해지게 되므로, 터널 전면에 가해지는 내압(P_i) 개념으로 프리스트레스를 나타낼 수 있음.

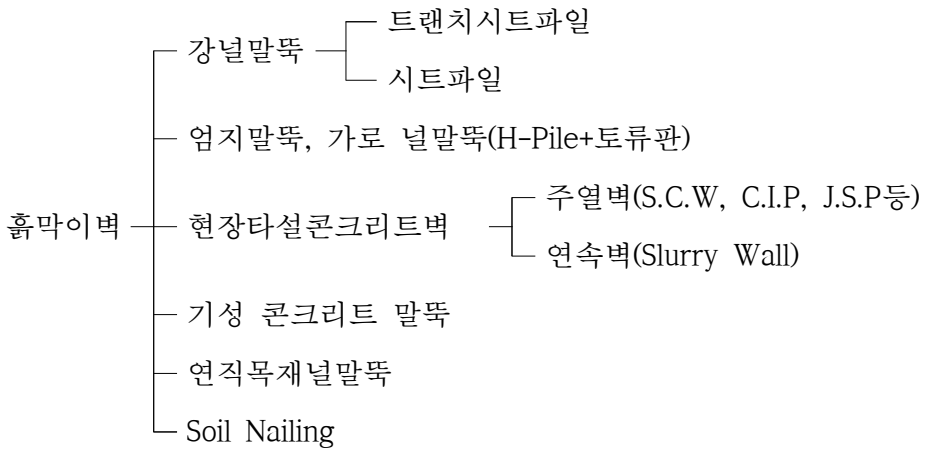
라. 근접시공에 의한 구조물 손상도 평가기법 구축

(1) 개착부 공법별 시공 특성 및 지보시스템

○ 개착부 굴착공법을 도표화하면 다음과 같음.



○ 흙막이벽의 종류를 도표화하면 다음과 같음.



< 표 3.1.7 흙막이벽의 특징 >

구분	H-Pile+토류판	C.I.P	S.C.W	강널말뚝 (Sheet Pile)	강성벽
공법 개요	• 천공하여 H-Pile 삽입 • 굴착하면서 토류판 설치	• Cast-in-Placed Pile(주열식) • 시추기로 천공 • 철근삽입 후 콘크리트 타설	• Soil Cement Wall (주열식) • 지중벽으로 계획심도까지 천공 후 주입재를 투입 벽체로 형성하고 H-Pile을 보강재로 삽입하여 토류벽으로 형성	• 강널말뚝을 설치하여 차수벽과 토류벽의 역할을 동시에 함	• Diaphragm Wall(지중연속벽) • 특수장비로 Trench굴착 • 철근망을 삽입 후 콘크리트 타설
장점	• 공사비 저렴 • 소음, 진동 영향 • 자재 재사용가능 • 시공이 간단	• 벽체강성이 좋음 • 불규칙한 평면형에 적응성 좋음 • 인접구조물에 영향 적음 • 장비 소규모	• 별도차수 필요없음 • 토사유실 매우적음 • 공기가 짧음	• 시공이 빠름 • 특별한 시공 장비가 불필요 • 수밀성 높다 • 대규모 공사에 적용	• 벽체강성이 우수 • 완전 차수 가능 • 건물벽체로 사용가능 • 대심 굴착가능
단점	• 차수성 벽체시 차수 필요 • 벽체변형 큼 • 토사유출 가능성 큼 • 토류판과 지반의 여굴로 주변지반 침하 우려	• 기둥간 연결성 불량 및 구직도 문제로 보조 차수 필요 • 암층은 공기가 길어짐	• 자갈, 암층에 시공 곤란 • H-Pile 사장 • 벽체로 이용불가 • 철저한 시공관리 요망	• 항타로 소음 발생 • 연결부가 이탈한 경우 상당히 곤란 • 사력층, 조밀한 모래지반에서는 시공 곤란	• 공사비 고가 • 장비교모 큼 • 철저한 시공 관리 요망
재질	H형강	철근콘크리트	Soil Cement	U형 강널말뚝	철근콘크리트
시공 순서	• 천공 • 케이싱 설치 • H-Pile • 토류판 설치	• 천공(Φ400) • 케이싱 설치 • 철근 설치 • 자갈주입타설 • 시멘트 Paste 주입 • 케이싱 해체	• AUGUR천공 (Φ550) • 안정제 주입혼합교란 • H-Pile 삽입	• Sheet 파일 설치 (직타) • Sheet파일 직타에 의해 설치가 가능하나 불가능 시는 천공 후 타입	• Guide Wall 설치 • 굴착 (T=60~80cm) • 철근망 삽입 • 콘크리트 타설 • 불량한 지층 (자갈, 호박돌, 전석층)에서 크렘셀로 굴착
안정성	• 강성체로서의 토류벽 역할을 할 수 있으나 벽체 변형이 큼.	• 주열식 강성체로서의 토류벽 역할을 충분히 할 수 있음. (굴착깊이 15m 이내에 적용)	• 연속변형 차수 및 토류벽의 2중 역할을 충분히 할 수 있음. (굴착깊이 25m까지 가능)	• 연속변형 강성체로서의 토류벽 역할을 충분히 할 수 있음. • 재질적인 강도와 내구성이 우월함.	• 지중 연속벽으로서 단면계수가 상대적으로 커 토류벽 및 지하층 외벽구조체로서의 역할을 할 수 있음. • 배면부 지반의 이완을 극소화 시킬 수 있음.

<표 3.1.7 흙막이벽의 특징 -계속>

구분	H-Pile+토류판	C.I.P	S.C.W	강널말뚝 (Sheet Pile)	강성벽
차수성	• 지하수위가 있는 지반에서는 별도의 차수 그라우팅이 실시되어야 함.	• 공과 공 사이의 연결부에 누수 현상발생 가능성이 있어 공과 공 사이에 누수방지용 보조 Grout를 시행	• 강곡 10cm 중첩하여 시공하므로 차수의 효과가 우월하음.	• 접촉부의 수밀성이 우월해 차수성이 양호 • 강널말뚝 재질 자체가 수밀성 재료임.	• 완전차수효과 기대 (단, Element Joint부에서 누수 대책이 요구됨)
정밀성	• 원하는 위치에 H-Pile을 설치할 수는 있으나 토질분포상 차수효과의 불확실성에 의해 정밀토류재의 형성이 어려움.	• 원하는 위치에 설계심도의 구조체를 형성시킬 수 있음.	• 원하는 위치에 대형 AUGUR에 의해 계획심도의 토류벽을 정확하게 형성시킬 수 있음.	• 소정의 위치에 연결부의 정밀성을 확보하는 상태에서 정확히 배열 설치가 됨.	• Guide Wall이 설치되므로 원하는 위치에 설계심도의 구조체를 정확하게 형성시킬 수 있음.
투입 장비	• 20ton Crane • T-4(변형 큼) • Vibro Hammer	• 보링기(또는 T-4)	• 80P Pile Driver • Cement Silo • 안정제 Plant	• 30ton Crane • Vibro Hammer	• 50ton Crane • 안정체 Plant

(2) 구조물 손상도 평가기법 조사

○ 기존의 손상도 평가 관련 문헌 조사 결과, 구조물의 수평변위 및 수평변형률, 각변위, 처짐비, 크랙 등을 기초로 하는 손상도 평가가 연구되고 있음. 기존 연구 중에 최대한 단순화된 평가방법을 찾아 도심지 건물에 최대한 근접한 개착부 시공 상에서 실용적인 손상도 평가차트를 제시하는 것임.

○ Burland(1995)는 과거 계측자료를 분석하여 다양한 손상도 평가관련 연구를 수행함. Burland의 손상도 평가 방법에는 두 가지 인자가 있음. 두 지점을 연결한 직선(Lateral distance)과 그 안에 발생한 침하 곡선 간 최대 처짐(Δ)을 비율적으로 표현한 처짐비(Deflection ratio)개념을 이용함. 또한 구조물 내 발생가능 한 인장이나 압축력에 의해 발생하는 수평변형률(Lateral strain)의 개념을 사용함. Burland는 다시 이를 토대로 하여 수평변형률과 처짐비로 수정된 손상도 평가차트를 추가적으로 제시함.

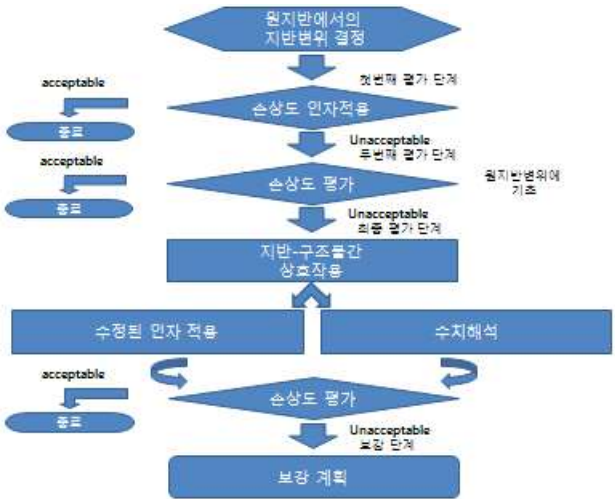
○ Boscardin and Cording(1989)은 현장계측자료 연구를 통해 손상도 평가 방법을 제시함. 이들은 수평변형률과 손상도간의 연관성을 확인하고, 손상도 평가의 인자로 각변위(Angular distortion, α)와 수평변형률을 사용함. 각변위는 구조물 하부의 경사

에서 구조물의 기울기(Tilt)를 뺀 값을 계산함으로써 구해짐.

○ Boone(1996)은 구조물을 지반과 함께 거동하는 깊은 보(Deep beam)로 단순화하고, 흙막이 굴착 시 지반거동에 따라 발생되는 구조물의 누적 균열 폭을 산정하여 구조물 손상도 평가 차트를 제시함. 총인장변형률(ϵ_t),주인장변형률(ϵ_p)에 대한 누적 균열 폭을 축으로 함.

(3) 손상도 평가기법 및 공법 보강 체계

○ 손상도 평가를 위한 차트를 중심으로 제시한 세 가지 경우를 분석한 결과, 구조물의 균열, 크기조건, 형태, 터널조건 등을 중심으로 손상도 평가를 실시함. 또한 연구들 간 상호 보완적인 부분이 많으며, 때문에 평가에 이용되는 자료들이 과거 계측자료를 중심으로 이루어졌으며 이전 연구들의 경우를 자료로써 이용함. 또한 이러한 손상도 평가는 구조물 조건을 중시하였으며, 구조물-지반간의 상호작용에 관한 내용이 오랜 연구기간에 비하여 비교적 최근에 시도되고 있으며, 때문에 본 연구에서는 이러한 부분이 부족하다고 판단함. 본 연구에서는 도심지에 초 근접한 인접 구조물의 손상도 평가를 위하여 실험적인 부분에서의 분석을 중심으로, 구조물 조건뿐만 아니라 지반조건, 구조물-지반의 상호작용에 관한 연구를 <그림 3.1.9>와 같이 실시하여 합리적인 손상도 평가를 실시함.



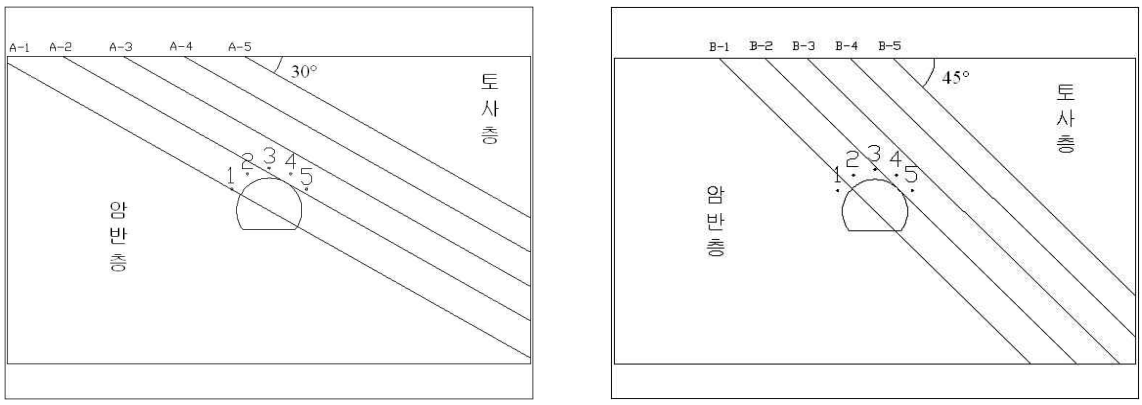
<그림 3.1.9 손상도 평가 및 개착공법 보강체계 흐름도>

(4) 지하공동 손상도 평가 (토사층에 근접한 지하공동 굴착 모형 실험)

○ 토사층에 근접한 지하공동에서 토사층이 지표면과 이루는 각도 및 토사층과의 이격거리에 따른 굴착 단계별 지하공동의 거동 양상을 축소모형실험을 통해 분석함.

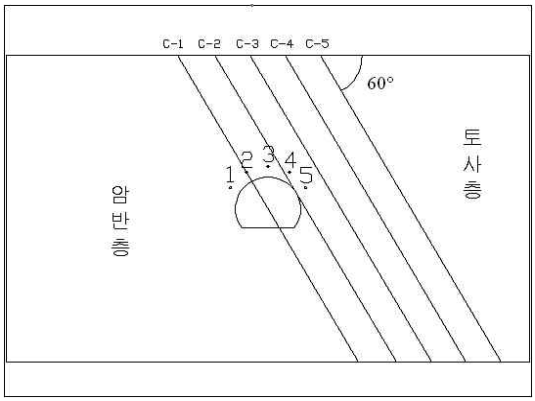
○ 이 모형실험에서는 토사층에 근접하여 지하공동을 신설할 때 굴착과정 시 발생하는 상호 거동 양상을 분석하는 것이 목표임. 이를 위하여 본 연구에서는 2차원 축소모형실험을 수행하였음. 모형 재료로는 모래, 석고, 물의 혼합물을 사용하여 지반을 모사하였는데, 암반층과 토사층의 강도 차이를 구현하기 위해 여러 가지 배합비로 혼합물을 제작한 결과 적절한 배합비를 도출함. 2차원 축소모형실험이기 때문에 평면변형률 조건을 적용하였고, 지하공동의 거동을 파악하기 위하여 주요 지점에 원형 포인트를 마킹하여 사진 측량을 통해 변위량을 측정함. 토사층이 지표면과 이루는 각도 및 이격거리가 다른 총 20가지의 모델에 대하여 실험을 수행하였음.

○ 토사층이 지표면과 이루는 각도 및 토사층과의 이격거리에 따른 신설 지하공동의 거동 양상을 검토하기 위하여, 토사층이 지표면과 이루는 각도 및 토사층과의 이격거리를 고려하여 <그림 3.1.10>과 같이 실험을 수행함. 지하공동의 거동에 영향을 미치는 다른 요소인 측압계수(K)는 모든 모델에 대하여 공통적으로 1.0을 적용하였음.

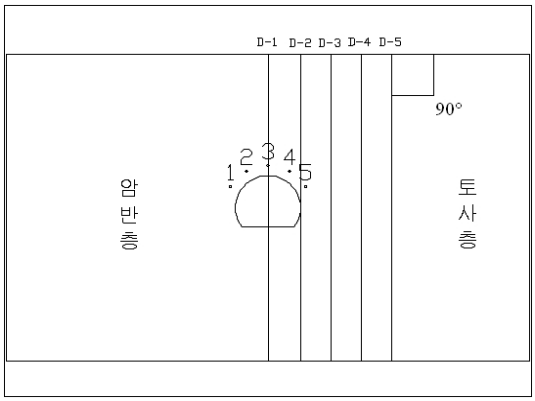


(a) 모델 A (30°)　　(b) 모델 B (45°)

<그림 3.1.10 모델별 모식도(계속)>



(c) 모델 C (60°)

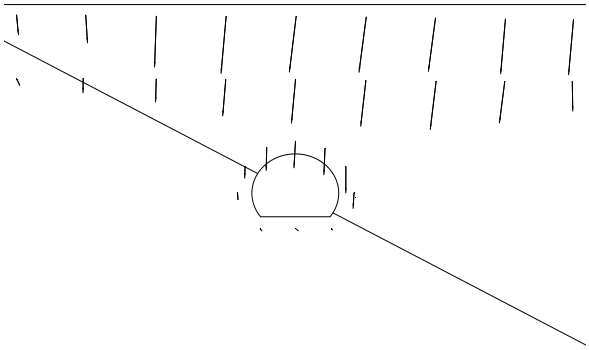


(d) 모델 D (90°)

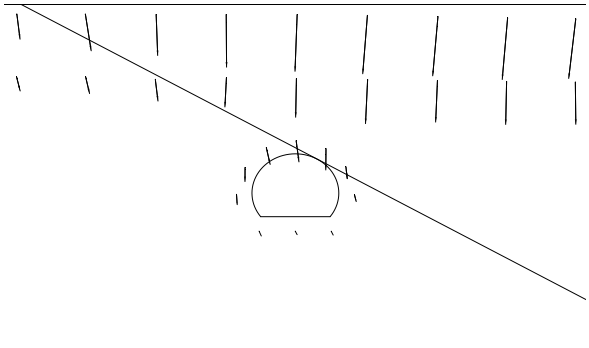
<그림 3.1.10 모델별 모식도>

○ 1.0D의 이격거리란 신설 지하공동의 정중앙부와 토사층 경계선과의 거리가 신설 지하공동의 환산 직경의 1.0배가 됨을 의미함. “암반층”이란 토사층과 비교하여 상대적으로 견고한 현장지반을 모사한 지반을 의미하고, “토사층”이란 암반층 대비 강도가 현저히 낮은 시편을 의미함.

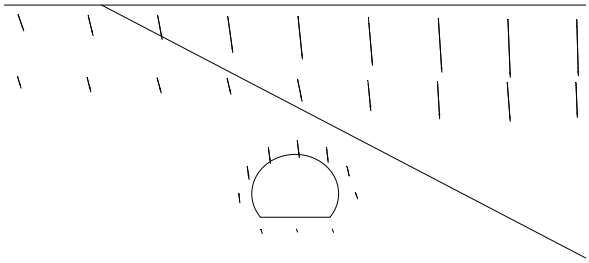
○ 총 20가지의 모델 각각에 대하여 굴착 단계에 따른 주요 측점의 누적 변위량을 <그림 3.1.11>부터 <그림 3.1.15>(Case A)와 같이 벡터로 나타내었음. 주요 측점은 지하공동 좌측 측벽부, 지하공동 좌측 상단부, 지하공동 천단부, 지하공동 우측 상단부, 지하공동 우측 측벽부의 5개 지점으로 선정하였고, 초기 상재하중 및 측압계수 조건에 따른 측 방향 하중을 가압한 후 안정화 단계를 마친 시점을 기준으로 하여 신설 지하공동 굴착 직후(상재하중 6kN 단계)로부터 각 하중 단계별로 측정된 누적 변위량을 그래프로 나타내었음. 모델 각각의 최종 파괴가 이루어진 하중 단계가 일정치 않아, 가장 빨리 파괴가 이루어진 모델을 기준으로 상재하중 13kN 단계까지의 누적 변위량을 그래프로 나타내었음.



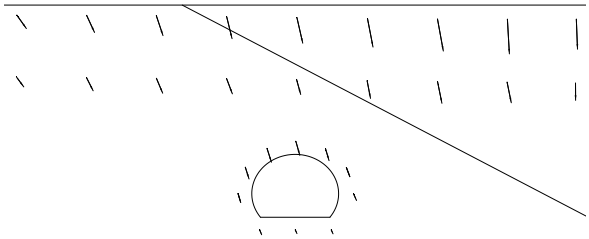
<그림 3.1.11 모델 A-1 : 이격거리 0D>



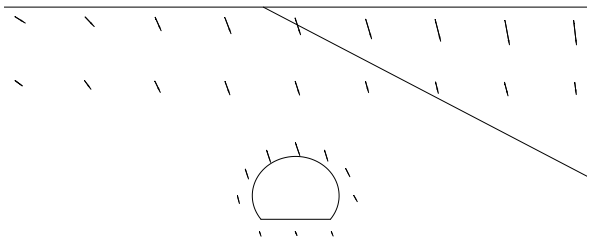
<그림 3.1.12 모델 A-2: 이격거리 0.5D>



<그림 3.1.13 모델 A-3: 이격거리 1.0D>



<그림 3.1.14 모델 A-4: 이격거리 1.5D>

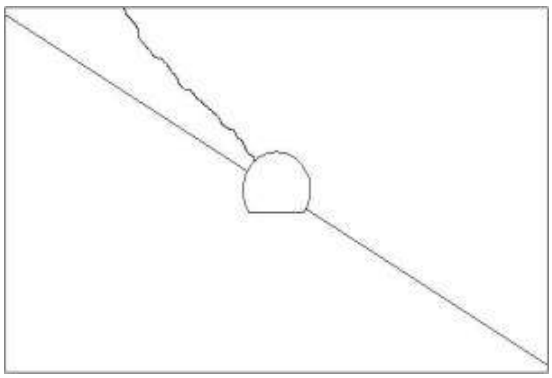


<그림 3.1.15 모델 A-5: 이격거리 2.0D>

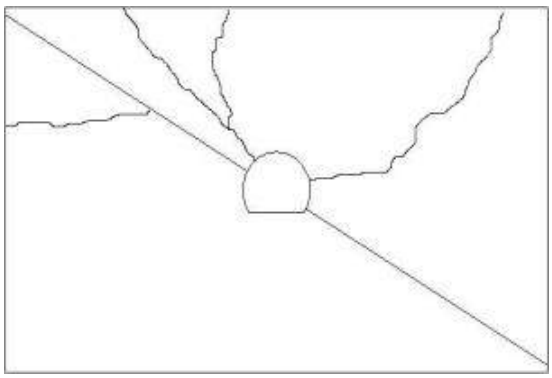
○ 굴착 단계별 변위량을 조사하여 본 결과, 신설 지하공동 굴착 직후(상재하중 6kN 단계)에서는 변위가 매우 작아 지점별로 큰 차이를 보이지 않지만 하중이 점차 증가하면서 모델에 따라 지점별로 변위량의 차이를 보였음. 모든 모델에서 공통적으로 지하공동 천단부인 3번 지점의 변위량이 가장 크지만 지하공동 상단부인 지점을 비교 했을 때, 모델 A는 토사층과 반대쪽인 지점이 더 크게 나타났고, 모델 B와 C

에서는 비슷하게, 모델 D는 토사층 쪽인 지점이 크게 나타났음. 또한, 지하공동 측벽부인 지점은 모델 A, B, C에서 토사층과 반대쪽인 지점이 더 크게 나타났으나, 모델 D에서는 토사층 쪽인 지점이 더 크게 나타났음. 이는 토사층이 지표면과 이루는 각도가 작은 모델 A에 비해 토사층이 지표면과 이루는 각도가 큰 모델 D가 토사층의 영향을 더 많이 받는다는 의미로 판단됨. 즉, 토사층이 지표면과 이루는 각도가 클 수록 토사층의 영향을 더 많이 받는 것을 의미함.

○ 총 20가지의 모델 각각에 대하여 초기 균열 및 최종 파괴 양상을 <그림 3.1.16-3.1.17(Case A-1)>와 같이 나타내었음. 균열 및 파괴 양상은 지하공동의 안정성에 대하여 평가하는데 중요한 자료로 쓰일 수 있으므로 이를 분석함.

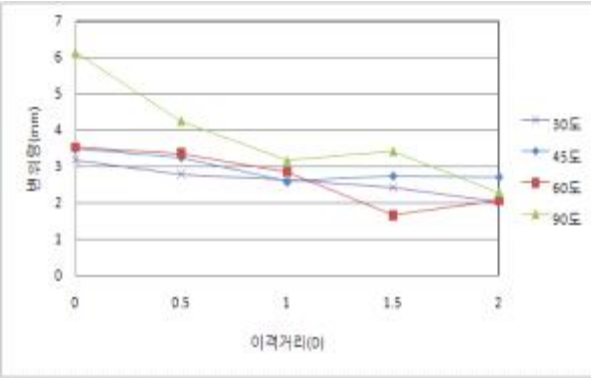


<그림 3.1.16 모델 A-1 초기 균열 양상>

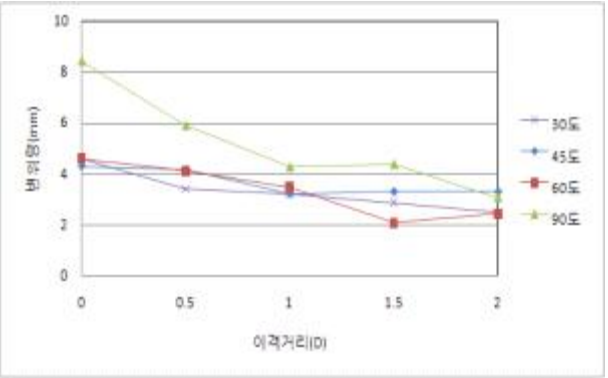


<그림 3.1.17 모델 A-1 최종 파괴 양상>

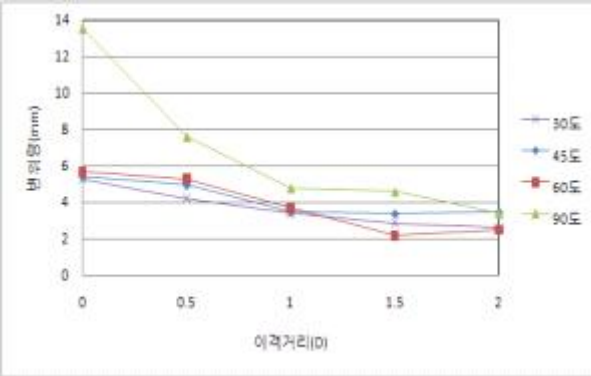
○ 토사층이 지표면과 이루는 각도에 따른 주요 측점의 변위량 분석을 위해 지하공동의 거동 양상 분석에 중요한 5개의 지점을 선정하여 상재하중 13kN 단계에서의 토사층이 지표면과 이루는 각도에 따른 총 변위량의 변화 양상을 각 지점별로 <그림 3.1.18>에 그래프로 나타내었음. 선정된 지점은 지하공동 좌측 측벽부, 지하공동 좌측 상단부, 지하공동 천단부, 지하공동 우측 상단부, 지하공동 우측 측벽부의 5개 지점임.



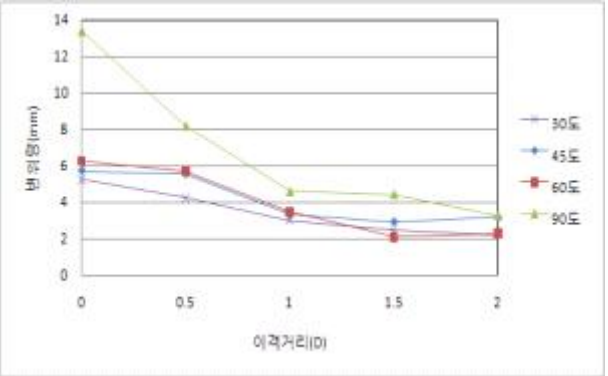
(a) 지하공동 좌측 측벽부



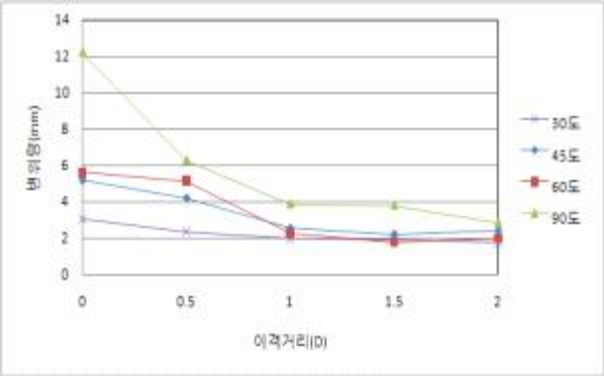
(b) 지하공동 좌측 상단부



(c) 지하공동 천단부



(d) 지하공동 우측 상단부



(f) 지하공동 우측 측벽부

<그림 3.1.18 토사층이 지표면과 이루는 각도에 따른 총 변위량의 변화 양상>
(Case A, 상재하중 13kN 단계)

(5) 결론

○ 본 연구에서의 손상도 평가는 크게 지하 저류공동 설치시 지반조건에 따른 지하공동에 대한 부분과 개착부 굴착공법별 기존구조물에 대한 부분으로 구성하여 계획하였음. 당해연도 연구에서는 토사층이 지표면과 이루는 각도 및 토사층과의 이격거리에 따른 신설 지하공동의 거동을 파악하기 위하여 축소모형실험을 수행함으로

써 공동에 대한 손상도 예비평가를 하였음. 지표면과 이루는 각도가 다른 네 가지 모형과, 토사층과의 이격거리가 다른 다섯 가지의 모형, 총 20가지의 모형으로 실험을 진행하여 그에 따른 지하공동의 거동을 분석하였음.

○ 굴착 단계별 변위량을 조사하여 본 결과, 신설 지하공동 굴착 직후(상재하중 6kN 단계)에서는 변위가 매우 작아 지점별로 큰 차이를 보이지 않지만 하중이 점차 증가하면서 모델에 따라 지점별로 변위량의 차이를 보였음. 토사층이 지표면과 이루는 각도가 작은 모델 A에 비해 토사층이 지표면과 이루는 각도가 큰 모델 D가 토사층의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났음. 즉, 토사층이 지표면과 이루는 각도가 클수록 토사층의 영향을 더 많이 받는다는 것을 알 수 있었음.

○ 토사층이 지표면과 이루는 각도에 따른 주요 측점의 변위량 분석을 위해 지하공동의 거동 양상 분석에 중요한 5개의 지점을 선정하여 상재하중 13kN 단계에서의 토사층이 지표면과 이루는 각도에 따른 총 변위량의 변화 양상을 분석해 보았음. 1.0D의 이격거리 이전에서 각도에 따른 변위량을 비교해보면, 대체로 지표면과 수직을 이루는 90° 의 경우 현저한 차이로 변위량이 가장 크고, 큰 차이는 보이지 않지만 60° , 45° , 30° 의 순으로 나타났음. 이는 토사층이 지표면과 이루는 각도가 수직에서 수평으로 작아질수록 변위 발생량이 줄어드는 경향을 보여주는 것으로 판단됨.

○ 토사층과의 이격거리에 따른 주요 측점의 변위량 분석을 위해 지하공동의 거동 양상 분석에 중요한 5개의 지점을 선정하여 상재하중 13kN 단계에서의 토사층과의 이격거리에 따른 총 변위량의 변화 양상을 각 각도별로 분석하였음. 대체로 토사층과의 이격거리가 커질수록 변위의 발생량이 감소하는 경향을 보였음. 특히 이격거리 1.0D를 기준으로 그래프의 기울기가 현저히 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 기울기는 줄어들었으나 변위의 발생량이 더 감소하는 1.5D의 이격거리를 확보한다면 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단됨.

○ 각 지점별로 변위량을 분석한 결과, 토사층과 근접한 지점인 3, 4 및 5번 지점은 대체로 토사층이 지표면과 이루는 각도 및 토사층과의 이격거리에 따라 유사한 경향을 나타냈으나, 토사층과 비교적 떨어진 지점인 1, 2번 지점은 경향을 벗어나는 결과가 다소 나타났음.

○ 초기 균열 및 최종 파괴 양상을 분석하였음. 먼저 이격거리가 1.0D로 같은 모델 A-3∼D-3에 대하여 각 모델별로 균열 및 파괴 양상을 분석한 결과, 모델 A-3과 B-3은 초기 균열이 토사층에서 시작된 반면에 모델 C-3과 D-3은 위치는 다르지만 지하공동에서 초기 균열이 발생한 후 토사층 파괴와 연결되어 차이를 보였음. 최종

파괴 양상 역시 모델 A-3과 B-3이 유사하게, 모델 C-3과 D-3이 유사하게 나타났음. 다음으로 토사층이 지표면과 이루는 각도가 60° 로 같은 모델 C-1∼C-5에 대하여 각 모델별로 균열 및 파괴 양상을 분석한 결과, 모델 C-1은 토사층으로부터 초기 균열이 발생하였지만, 그 이외의 모델들은 모두 지하공동 좌측 또는 하단부로부터 미세균열이 발생하고 토사층 파괴와 연결되며 최종 파괴가 이루어져 차이를 보였음. 최종 파괴 양상은 모델 C-1과 C-2가 유사하게, 모델 C-3과 C-4, C-5가 유사하게 나타났음.

○ 초기 균열 및 최종 파괴 하중을 분석하였음. 초기 균열 하중은 모델 C-1이 가장 낮게, 모델 C-5가 가장 높게 나타났고, 최종 파괴 하중은 모델 C-1과 C-2, C-3이 낮게, C-4가 가장 높게 나타나 대체로 토사층과의 이격거리가 커질수록 초기 균열 및 최종 파괴를 일으키는 하중이 증가함을 알 수 있었음.

○ 지하공동에 관련한 직접적인 실험을 실시함으로써 향후 저류공동을 손상도 평가에 적용성을 확인할 수 있었음.

○ 연약지반 조건, 경사, 이격거리 등의 인자들을 향후 손상도평가의 실험적인 부분에 있어서, 인자의 활용방안에 관한 정성적인 고찰이 가능했으며, 계측장비의 적용에 있어서의 경험적인 지식을 축적할 수 있었음.

2. 지하 저류공동 건설 핵심 요소기술 개발 [2차년도]

가. 빗물 지하저류공동 건설에서의 핵심요소기술 적용성 사전평가

(1) 지하공간용지 소유권 및 지장물을 고려한 지하 저류공동 건설 계획

○ 법적 측면에서의 지하공간

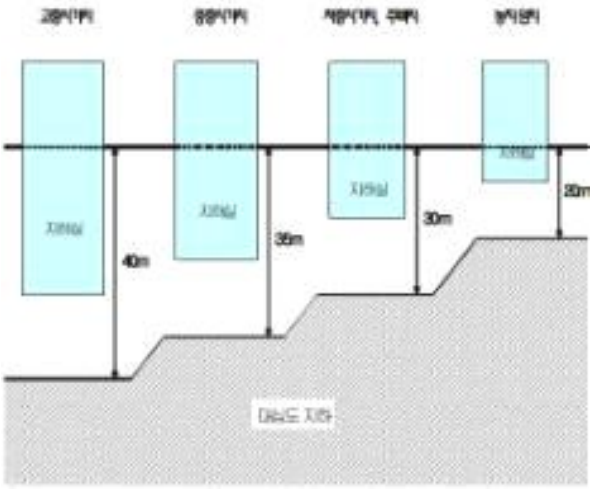
국내법에 의한 지하공간 관련 법령으로 재산권 측면에서는 민법, 공공사업관련은 토지보상법, 도시철도법, 도로법, 주차장법, 건축법, 국토의 계획 및 이용에 관한 법률과 각 지자체에서 조례 등으로 각각의 시설물별, 기능별 법령으로 나타나 있음(서울시 지하공간의 장기 이용전망과 정책 방향, 서울시정개발연구원). 또한 자연재해대책법 시행령 제15조에 의하면 지하도와 지하차도, 지하도상가, 광역전철, 지하변전소, 지하공동구, 지하다층주택 등으로 구분됨.

○ 빗물저류공동이 중대형 규모의 지하 대공간 시설물로 계획될 경우 구조물 계획 시 지형, 환경, 지장물, 사토장, 공사용 설비, 지하공간용지 소유권관련 분쟁 및 보상, 관계법규와 같은 입지조건 조사를 바탕으로 구조물의 목적 및 기능, 구조물의 안전, 시공의 경제성 등이 충분히 고려된 부지선정 절차의 합리성을 확보하도록 해야 함.

○ 지하공간용지 소유권 및 지장물을 고려한 지하 저류공동 계획심도

서울시의「지하부분 토지사용에 따른 보상기준에 대한 조례」에서는 지하공간을 사용함으로 인하여 토지의 이용이 저해되는 정도(입체이용 저해율)와 관련하여 지하시설물 설치로 인하여 일반적인 토지이용에 지장이 없는 것으로 판단되는 한계심도를 지역유역별로 차등 적용하고 있음.(서울시정개발연구원, 2007)

○ 고층시가지 40m, 중층시가지 35m, 저층시가지 및 주택지 30m, 농지 · 임지 20m로 설정하고, 한계심도를 초과하여 시설을 설치하는 경우 초과분에 대하여 최소한의 일정비율(0.2~1.0%)을 설정하여 보상하고 있음.

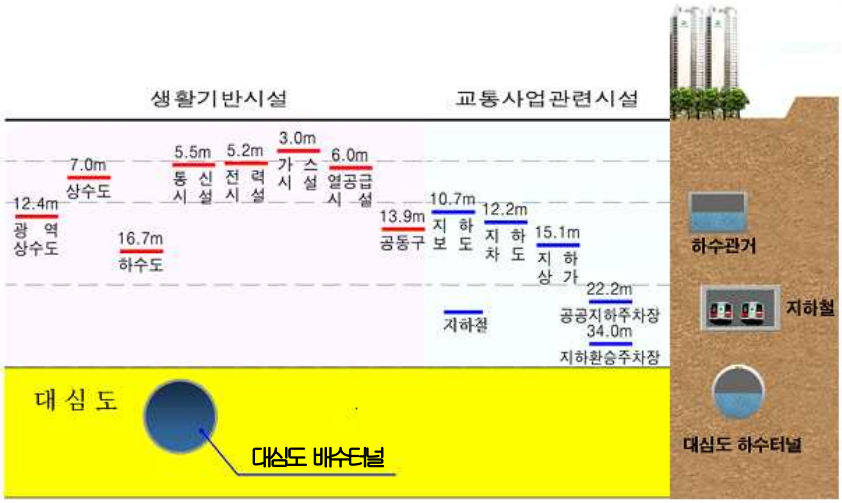


<그림 3.1.19 서울시 조례의 지하공간에 대한 법적 구분>

○ 서울시의「다기능터널 기본구상 및 타당성조사 보고서, 2010」에 의하면, 지하공간 심도별 시설물의 배치기준을 <표 3.1.8>에 제시하고, GL(-) 30m 이내에는 교통, 상업 관련시설과 생활기반시설 지하매설물이 혼재되어 있으므로 그 하부에 대심도 하수터널 계획을 제시하고 있음.

<표 3.1.8 지하공간 심도별 배치기준 - 서울시, 2010 >

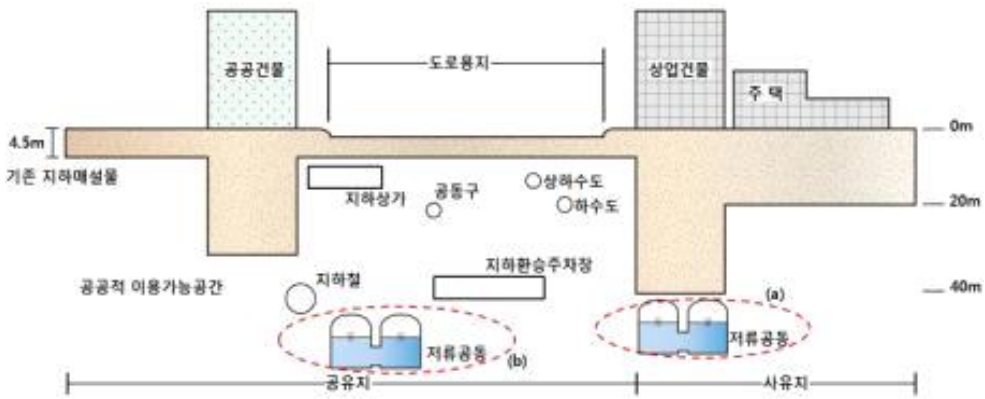
구 분	깊 이	공간 특성화	주 요 시 설
천심도	0~5m 내외	대부분의 공급처리시설이 분포하는 구간(평균심도 5.0m이내)	상하수도, 통신, 가스, 열공급설비 등
저심도	5~20m 내외	이용도가 높으며 장시간 이용되는 시설	지하상가・보도, 지하광장, 지하철역 등
중심도	20~40m 부분	대중교통수단 및 주차장 등 공간	지하철, 지하도로, 주차장 등
대심도	40m 이상	통상 사람이 이용하지 않는 지원시설 공간	지하발전소, 폐기물 수송시설, 환경오염재생시설, 저장공간 등



<그림 3.1.20 일반적인 심도별 지하매설물 현황을 고려한 배수터널 계획 - 서울시, 2010>

○ 본 연구 성과에서는 지하 저류공동 계획위치는 계획부지가 제한되는 도심지의 복합 지하공간 하부조건일 경우 서울시 조례의 고층시가지 및 중층시가지의 지역유형 조건을 반영한 GL(-)40m이상의 조건을 지하 저류공동 건설 계획심도로 하나, 공공도로 및 공공부지의 경우는 지하지장물을 고려하여 천심도 20m 이내의 위치에 필요시 계획할 수 있음.

○ 도심지 일부 구간은 GL(-)40~50m 심도까지 지하철, 지하상가, 지하주차장 등의 교통상업관련시설이나 상수도, 통신시설, 공동구 등의 생활기반시설구조물이 설치되어 있으므로 이 경우에는 그 측면에 지하 저류공동을 계획하고, 근접시공 시 지하 저류공동 설치에 따른 안전영역 등을 검토하여 기존 구조물 및 신설 저류공동의 안전에 이상이 없도록 해야 함.



<그림 3.1.21 지하 저류공동 배치계획>

(2) 인접 기존 시설물의 간섭 안정성을 고려한 적정 저류공동 입지조건

○ 지하 저류공동의 적정 입지조건을 제시하기 위해서는 지하 저류공동 건설에 영향을 미치거나 지하 저류공동 건설로 인해 영향을 받을 수 있는 모든 제반사항 또는 영향요인에 대한 검토를 통하여 최적의 부지를 합리적인 절차로 선정해야 함.

○ 지하 저류공동 계획 시에 일반적인 부지 선정 요인과 대상지역의 유역특성 등을 고려한 입지조건에 대한 사항과, 지상 및 지하의 구조물 및 시설물의 간섭 안정성을 확보하기 위한 고려사항은 다음과 같음.

(가) 부지 선정 요인

○ 지하 저류공동의 부지 선정 요인에는 사회적, 경제적 및 기술적 요인이 있음.(한국터널지하공간학회, 2009)

① 사회적 요인

부지 선정과정에서 편의시설은 적극 유치하려 하고 비선호시설은 기피하는 지역주민들의 행동특성(NIMBY 현상)을 고려해야 함. 따라서 계획단계에서 지역주민들의 요구와 여론을 수렴하는 등 주민 참여를 통한 부지 선정과정이 요구됨.

② 경제적 요인

부지 선정에 영향을 미치는 경제적 요인으로는 크게 보상 문제와 입지의 접근성을 들 수 있음. 입지의 접근성은 시설물의 경제적인 접근이 가능해야 함을 의미하고, 이는 주변 시설환경과 밀접한 관련이 있음.

③ 기술적 요인

○ 도심지 대규모 복합지하공간 구조물 하부에 지하 저류공동을 건설할 경우 기술적 요인으로는 환경영향 및 주변 구조물 손상을 들 수 있음.

- 환경영향 : 지하공간 개발이 환경에 미치는 직 · 간접적인 영향을 의미
- 주변 구조물 : 시설물의 간섭 안정성(지상 및 지중 구조물 모두를 포괄)

○ 따라서 지하 저류공동 건설이 환경과 주변 구조물에 미치는 영향을 회피할 수 있는 부지(노선)를 선택하는 것이 최선의 방법이고, 도심지와 같이 부득이한 경우 이를 최소화 할 수 있는 대책이 차선으로 요구됨. 이를 위해서 지하 저류공동 건설에 따르는 환경영향평가 및 주변 구조물 손상평가를 통해 영향범위를 미리 예측하고 그에 따른 대책을 계획단계에서 수립하는 것이 필요함.

(나) 대상지역의 유역특성 등을 고려한 입지조건 검토 사항

○ 인근 지역의 지형, 지질 등이 소요 저류량을 충분히 확보할 수 있는 곳이어야 함.

○ 입지조건이 충족되어야 함. 여기서 입지조건이라 함은 유역의 개발상황, 기득수리권 등을 사전에 충분히 조사하여 저류지 설치에 따른 영향이 없거나 최소화되는 조절지로 계획되어야 한다는 것임.

○ 이수, 치수 측면에서 안전한 조절지로 계획되어야 함. 즉, 저류지의 유효 저류량은 갈수기를 기준으로 정하며, 평시 저류량 및 기득수리권에 대한 수량 수구조물 조작실패, 파랑 등을 고려하여 여유고를 두고 계획되어야 함.

○ 시설설치로 인한 불용지역에 대한 보상 물건이 적고 처리 분구의 크기가 커야하며 수원보호 상 유리한 장소에 설치되어야 함.

○ 집중호우에 대하여 급증하는 제내지의 내수 또는 지반고가 낮은 저지대의 배수량을 하천에 배제하기 용이한 하천변 또는 주거환경을 저해하지 않는 저지대에 설치하거나 주거지역에 설치할 경우 평상시 인근 주민의 편의를 제공할 수 있는 다목적으로 계획되어야 함.

○ 저류지는 시설의 설치유역의 지형, 지질, 토지이용계획 등의 조건을 고려하여 배치계획을 수립하고 유역면적, 유로연장 및 경사 등의 유역특성에 적합한 시설로 결정하며, 배수계통을 고려하여 결정해야 함. 또한 저류시설의 방류구조에 따른 구조, 형태 및 특성을 파악하여 저류시설물의 종류를 결정해야 함.

(다) 지장물 및 지반조건을 고려한 지하 저류공동 건설 계획심도

① 지반 조건

○ 지하 저류공동이 건설될 지반조건은 현장의 위치 및 특성에 따라 풍화대층, 풍화암층, 연암 이상의 기반암층에 교호할 수 있음. 지중에 분포하는 기반암층의 불연속면(단층 또는 절리) 구조가 지하 저류공동 설치공간을 수용 가능할 때 경제적인 지하시설 계획이 가능해지나, 지반 자체의 구조적인 능력이 계획공간을 수용할 수 있어야 하며, 지반조건이 풍화대층과 같이 불리한 경우 지반보강을 통해 어느 정도 극복가능하나 경제성이 떨어지므로, 지하 저류공동 건설 계획심도의 지반조건은 풍화암층 이상으로 하는 것이 바람직할 것으로 판단됨.

○ 지하 구조물의 규모 결정방법으로서 일반적으로 사용되는 경험적인 방법은 유사 사례를 참조하도록 하고 있으나, 국내에는 기존 사례가 없으므로 지반조사를 통해 지반조건을 확인하는 과정이 필요함. (한국터널지하공간학회, 2009)

② 지상 및 지하 근접시설물을 고려한 지하 저류공동의 안전영역 검토

㉮ 근접시공 시 고려사항

○ 지하공간 굴착 시 발생되는 지반변위는 인접 구조물에 영향을 미치는데, 그 영향 정도는 지반 및 구조물의 여러 가지 조건에 따라 다르기 때문에 근접시공 시의 지하구조물의 안정은 물론 인접 구조물 손상 및 침하영향이 반드시 설계 시에 고려되어야 함.

○ 근접시공을 위해서는 사전에 기존 구조물의 상태, 지반조건과 지하수위 및 신설 구조물의 시공법 등을 정확히 파악한 후, 허용 변위량이나 허용하중, 근접공사에 의해 수반되는 주변 지반의 변위, 변형, 응력상태 변화(이완) 등을 검토하여 신설 지하공간 구조물을 설계 및 시공해야 함. (한국터널지하공간학회, 2009)

- 기존 지반의 특성 파악 : 지반의 구성상태나 역학적 특성을 파악하기 위해 지반조사가 필요함.
- 기존 구조물의 거동 파악 : 구조물의 거동은 지반과 구조물의 상호작용에 의해 나타나는 것이므로, 지반은 물론 기존 구조물의 특성(위치, 변형, 치수, 노후도 등)을 알아야 함.
- 변형해석 방법 : 근접시공 시 실제 거동은 3차원적으로 발생하므로 2차원 해석으로는 부적합할 경우도 있음. 따라서 지반조건, 시공방법, 근접도 등의 해석조건을 면밀히 고려하여 해석방법을 선정해야 함.
- 인접 구조물 거동에 대한 영향요소 : 지반변위의 크기, 기울기(부등변위에 따른 각변위), 지반변위의 진행성, 지반의 강성, 구조물의 강성 및 강도, 구조물의 형태 등을 고려해야 함.

○ 또한 시공 중에 기존 구조물이나 주변지반의 변위, 토압 등을 계측하여 관리치와 비교해서 안정성을 판단해야 함.

㈏ 근접시공에 따른 안전영역의 평가

○ 기존 구조물이 존재하는 경우 신설구조물의 근접시공에 따른 분류 중 최근 자주 발생하는 조건은 터널의 병설, 터널의 교차, 터널상부의 개착, 터널상부의 성토, 터널상부의 구조물기초의 경우이며, 각 경우에 대한 근접 정도별 안전영역의 정량적 평가방법은 다음과 같음.(서울시 도시철도공사, 2001)

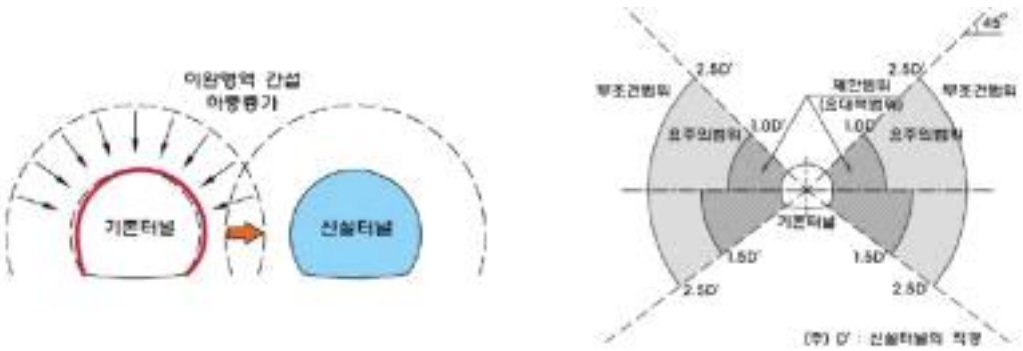
㉠ 터널의 병설에 따른 안전영역

○ 터널에 평행하게 다른 터널이 건설되는 경우로서 증설 공사 시 많이 발생함.

○ 기존 터널이 근접한 병설 터널 방향으로 당겨지듯 변형되어 병설 터널의 시공에 의해 기존 터널의 주변 지반이 완만해져 그 결과 라이닝에 작용하는 하중이 증가하게 됨.(다음 그림의 (a))

○ 터널의 위치관계에 따른 이격거리별 근접도의 구분은 다음 그림의 (b) 및 아래 표

와 같음.



(a) 개요도 (b)안전영역

<그림 3.1.22 터널의 병설 조건에 대한 개요도 및 안전영역>

<표 3.1.9 터널의 병설 조건에 대한 근접도 구분 >

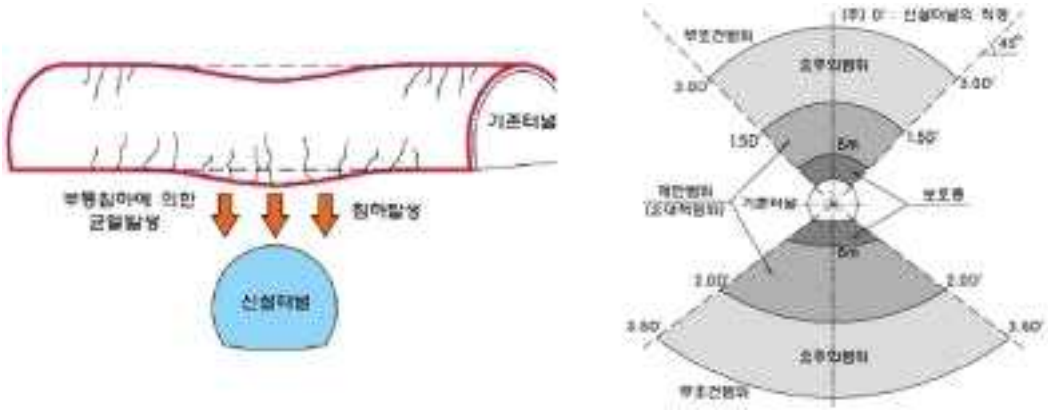
터널의 위치관계	터널이격거리	근접도 구분
신설터널이 기설터널 보다 위에 존재	1D' 미만 1~2.5D' 2.5D' 이상	제한범위(필요대책범위) 요주의 범위 무조건 범위
신설터널이 기설터널 보다 아래에 존재	1.5D' 미만 1.5~2.5D' 2.5D' 이상	제한범위(필요대책범위) 요주의 범위 무조건 범위

㉡ 터널의 교차에 따른 안전영역

○ 기존터널의 상부 또는 하부를 다른 터널이 횡단하는 경우에 발생함.

○ 신설터널이 기존터널의 상부를 통과할 경우 기존터널이 위 방향으로 변형하기도 하고 아치 작용을 할 수 없어 라이닝에 작용하는 하중이 증가하기도 하며, 신설터널이 기존터널의 하부를 통과하는 경우에는 기존터널의 침하가 발생함.(<그림 3.1.23-(a)> 참조)

○ 터널의 위치관계에 따른 터널의 이격거리별 근접도의 구분은 <그림 3.1.23>(b) 및 <표 3.1.10>과 같음.



(a) 개요도 (b)안전영역

<그림 3.1.23 터널의 교차 조건에 대한 개요도 및 안전영역>

<표 3.1.10 터널의 교차 조건에 대한 근접도 구분>

터널의 위치관계	터널이격거리	근접도 구분
신설터널이 기설터널 보다 위에 존재	1.5D’ 미만 1.5~3.0D’ 3.0D’ 이상	제한범위(필요대책범위) 요주의 범위 무조건 범위
신설터널이 기설터널 보다 아래에 존재	2.0D’ 미만 2.0~3.5D’ 3.5D’ 이상	제한범위(필요대책범위) 요주의 범위 무조건 범위

(3) 침수위험도 분석 기반 지하 저류공동 및 저류-배수 체계의 구성방안 설정

○ 이상 기후 변화에 따라 우리나라의 경우에도 최근 매년 우기시에 많은 강우가 내리고 있으며, 또한 되풀이 되어 발생하고 있는 집중호우에 의한 홍수침수에 대하여 도심지내 저지대와 지하공간 등은 침수위험 개연성을 항상 가지고 있음.

○ 그러므로, 이에 대하여 보다 적극적인 수방체계 대책의 일환으로 상습 침수(위험)지역 또는 공공/민간측면에서의 중요 지역에 지하 빗물저류공동을 건설하는 것이며, 또한 효과적이고 적절한 배수체계의 연계와 운영이 중요함.

○ 침수위험도 분석은 국내외의 기존 문헌과 관련 연구결과에 기초하여 설정된 지하공간 침수위험 영향인자의 재평가, 수방재 전문가의 자문 및 조사평가 등으로 이루어졌으며, 전체적인 침수위험 분석 결과를 종합하여 지하저류공동과 저류/배수 체계에 대한 구성안을 검토함.

(가) 지하공간 침수취약성과 침수위험 영향요인

○ 도심지 저지대위치의 도시화, 개발사업, 인구집중 지역에 건설된 지하상가나 지하철

역사의 진출입구의 경우, 주변지역의 침수고, 출입구 방지턱 등 설계시공 요소

○ 임의 유역내 하수/우수 배수시설의 기능불량, 노후화 등으로 인하여 신속하고 적절한 배수체계가 작동하지 않을 수 있어 지하공간 인접유역의 내수침수발생을 야기함.

○ 하천으로 우수를 신속하게 배제하기 위한 배수펌프장과 도심지내 대용량의 빗물을 저류시킬 수 있는 유수지 등과 같은 적극적인 구조적 수방재시설이 필요하나, 도심지 지상공간의 부족, 지가 상승 등에 의한 건설/운영 예산의 부족에 따른 수방시설물 건설 공급이 미흡함.

○ 해양성 및 대륙성 기후의 계절적 기상변화와 지형학적 위치에 의한 수문기상학적 및 지형적 침수위험 인자 (이는 사람이 조절할 수 없는 자연적 특성으로서 우기시에 집중호우에 따른 지속적인 도심지 홍수 피해 대표적인 불가항력적 침수요인 중의 하나임)

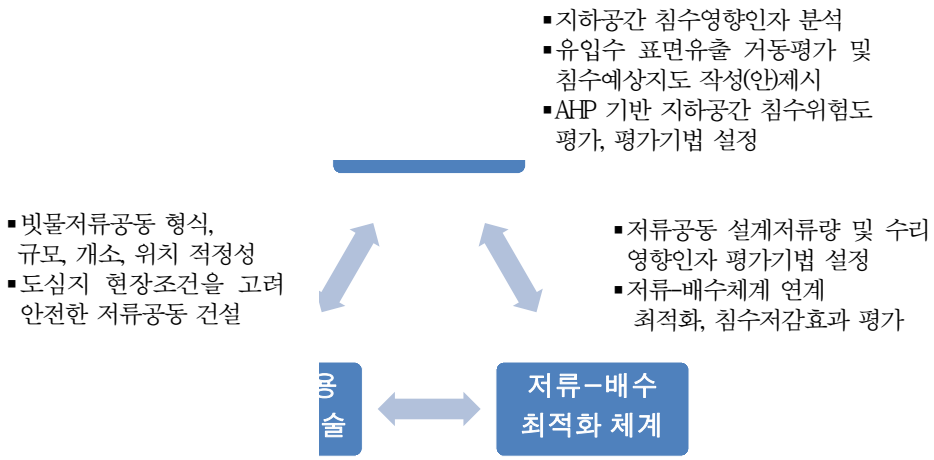
○ 지하공간내 침수에 대한 구조물내 우수 집수/배수/유도시설, 비상 대피로/대피소, 비상 · 조명등 등의 장치와 시설의 부족, 침수시간 지연대책의 확보, 비상 대비관련 정보와 교육, 홍보 등 비상대피체계 부족

(나) 침수위험 분석에 따른 지하 저류공동 및 저류/배수연계 구성 체계 검토

① 지하 저류공동 및 저류/배수연계 수방체계 구성개요

○ 지하 저류공동 및 저류/배수연계 수방체계의 구성은 <그림 3.1.24>와 같이 침수취약성 및 위험도 분석, 수해 방재 저류 공동 및 저류-배수 연계 체계로 구분됨.

○ 침수취약성 및 위험도 분석 시에는 지하공간에서의 침수영향인자를 선정하여 그 중요도를 산정하여, 우선 순위를 평가해야 하고, 수해 방재를 위한 저류공동 설치 시에는 현장조건을 고려해야 하며 저류-배수 연계 체계는 지역의 수리수문 등의 분석자료를 토대로 기능성을 평가하고 침수저감효과를 평가해야 함.



<그림 3.1.24 지하 저류공동 및 저류/배수연계 수방체계 구성개요도>

② 지하 저류공동 최적 설계 도출 방안

○ 지하 저류공동의 형식과 위치 검토 : 단일 또는 복수개소 설치, 주요 시설물 인접설치조건 또는 상류/중류/하류 설치 여부에 대한 적정성 평가사항, 대상지역의 토지이용계획이나 지형/수계 입지조건 고려

○ 수방시설 목적의 설계조건 검토

- 기준강우 및 결정변수(공동 위치, 규모 등) 선정, 목적함수 및 제약조건

○ 최적화 모듈 구축과 최적해의 산출(GA Process와 수리수문해석 모듈로 구성하여 상호 연계해석 및 설계 최적화)

- GA 프로세스: 지하저류공동 위치/규모 Case 설정 및 설계조건 조합
- 수리해석모듈: 해석모형을 이용한 유출해석, 침수분석, 공동 저류량-유출량 분석 등에 따른 최적 설계 및 효과 검증

○ 저류공동 설치 시나리오별 침수저감효과 검토

- 임의 강우량 설계조건에 따른 저류공동 단일/복수개소 설치안 및 위치를 상호 조합하여 시나리오 설정, 침수저감효과에 따른 설계사항 도출

○ 최적배수체계 연계방안, 저류공동 설치 시나리오별 침수저감효과 검토

- 지하저류공동 최적규모 설계기법에 따른 종합적인 맨홀, 관거, 펌프, 저류공동 연계방안 평가
- 기존 및 신규 배수체계와 연계하여 시나리오별 설계저류량, 이송관로 수리영향 분석 검토 필요
- 기존 및 신규 배수체계에서의 적정 Pump 운영방안(내배수시스템 실시간 상황 반영을 고려하고 배수펌프장의 운영조건을 고려한 동적운영모형 등)

- 내배수시스템 운영시 하류부 수위를 고려한 유출량 산정, 유수지 수문 및 빗물펌프장의 운영 연동 모형 필요
- 기존 배수체계의 노후화 개선을 통한 배수체계 확보(비굴착 관거정비, 비굴착 부분보수 방안 등)

○ 지하 저류공동 및 저류/배수연계 수방체계 구성안 검토

- 집중호우, 하천범람, 폭풍해일, 쓰나미 또는 복합적인 원인으로 인한 도시홍수재해의 메카니즘 분석
- 지하공간침수에 대한 합리적 예측 모형개발 ; 침수방지대책의 기준의 하나인 침수예상지도를 작성, 수리모형실험 및 지하공간 침수거동의 수치모델링 및 해석 기법 개발
- 구조적 대책(지하 공동/터널시스템 등) 에 대한 계획 및 시행;
  B/C 분석 및 시민 공익성 평가에 따른 중대규모 침수피해 대비 구조적 경감대책 계획 및 추진(침수방지시설 설치 및 촉진, 침수대책 사업의 수행 등)
- 비구조적 대책(종합적 대피 시스템 등)에 대한 수립 및 시행 ; 지하공간의 홍수에 대한 위험성 사전 통보, 하천관리자와 지하공간 관리자간의 정보전달 체계 검토, 대피체계 정비(지하공간 관리자에 의한 원활한 대피 유도 등 검토, 민간/공공 지하공간시설물 소유자/운영간 조직간 제휴 수방대책 검토, 하천관리자나 지방 자치단체와 지하공간 관리자의 공동 참여 침수재해 대비훈련 실시내용 등)

<표 3.1.11 지하공간 수방 대피체계 방안>

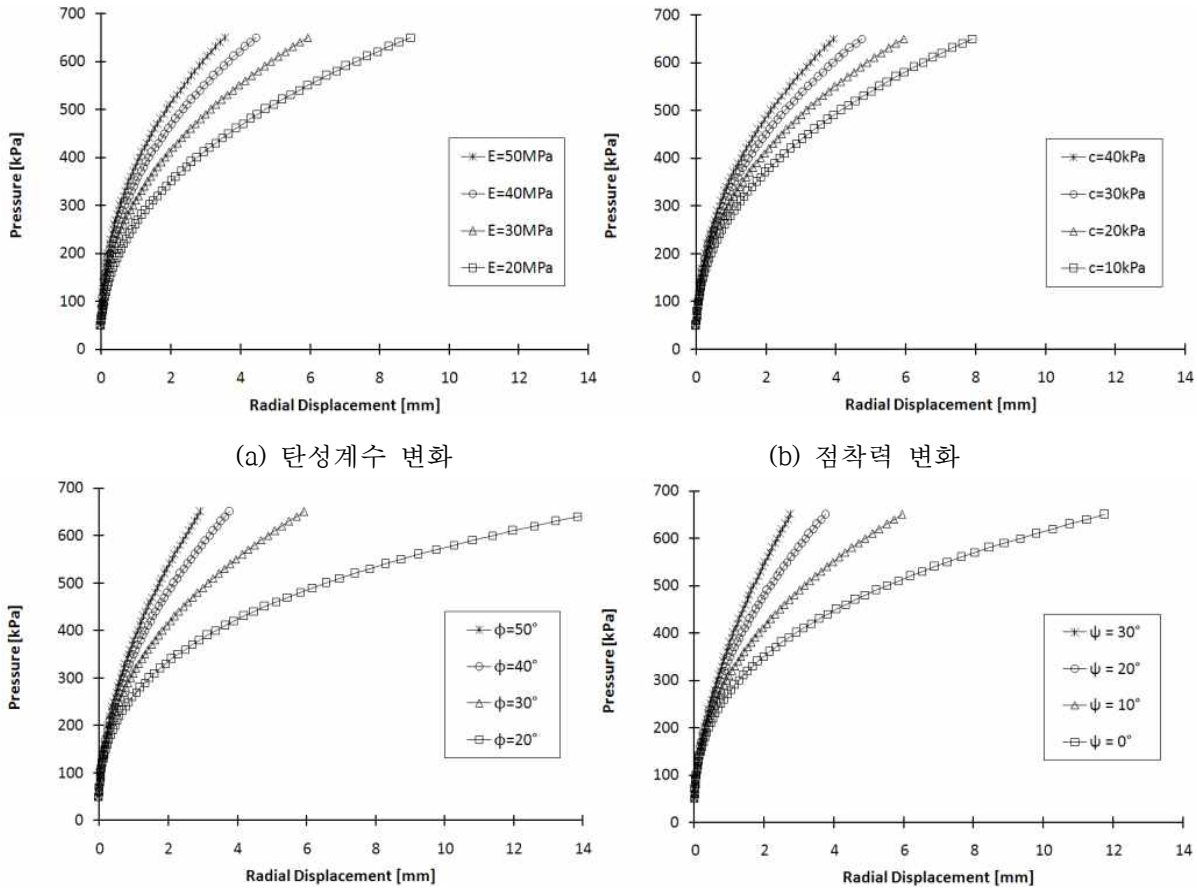
방 안	세 부 내 용
지하공간의 비상대처계획 및 시민대피체계 수립	• 지하공간의 비상대처계획 수립 • 지하공간 침수시의 시민대피체계 확립 • 지하공간에 적합한 단계별 상황기준 및 행동요령 및 지하공간 침수방지시설의 설치기준 확립
체계적인 시설설치계획 및 관련기관협력 체계 구축	• 지하공간의 침수위험도 평가를 실시하여 우선순위에 따라 각 지하공간의 특성을 고려한 침수방지시설설치 추진 • 위험도가 높은 지하공간은 인접한 하천, 하수도 사업과 연계하거나 서울시 수방차원에서의 집중관리를 하는 등 각 관련기관의 협력체계 및 연계성 필요
종합 방재 시스템 구축	• 정보시스템 기반의 방재시스템을 이용하여 침수예상규모의 파악, 안전대피로의 확보, 내부 임의공간 침수 등 상황정보를 실시간으로 전송받아 의사결정을 하는 종합 방재시스템 구축
훈련 및 교육, 홍보	• 체계적인 수방계획과 대피계획 확립을 위한 실제훈련 실시 • 지하공간 침수시 행동요령 숙지를 위한 교육활동 강화 • 일반 시민들이 지하공간 침수의 위험성 인식을 위한 홍보활동

*참조:서울시 지하공간 침수방지대책 및 대피체계 수립방안(서울시정개방연구원, 2005)

나. 필라 지지구조체 개발 및 효과 규명

○ 지하 저류공동은 도심지에 존재하는 다른 구조물들과 근접하여 설치되므로 공간의 제약으로 인하여 빗물저류공동 계획할 경우에는 복수개의 중대규모 터널이 병설 건설하게 되며, 이에 따라 인접한 터널사이에 존재하는 필라(Pillar)부에 대한 안정성확보 또는 주요지지구조체로 활용하기 위하여 보강공법에 대한 연구개발이 필요함.

○ 필라부 지지구조체화는 크게 선행터널을 굴착하기 전에 사전보강하는 단계, 선행터널 굴착 단계, 가압그라우팅 단계를 반복적으로 수행하며 굴착을 하게 됨. 그리고 이와 병행하여 일정한 간격을 두어 후행터널을 굴착하게 되며, 후행터널을 굴착한 후 프리스트레스를 가하게 됨. 이러한 거동은 공팽창 이론을 이용하여 지반의 변화에 따른 가압하는 압력대비 지반의 팽창변위를 산정할 수 있음(서형준 등, 2009).



(a) 탄성계수 변화 (b) 점착력 변화

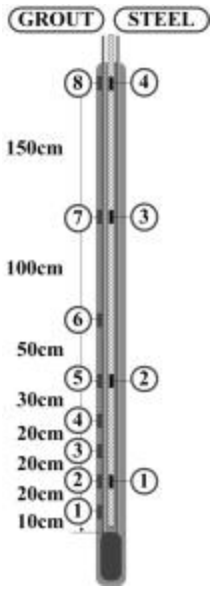
(c) 내부마찰각 변화 (d) 체적팽창각 변화

<그림 3.1.25 지반정수 변화에 따른 공벽 변위 거동>

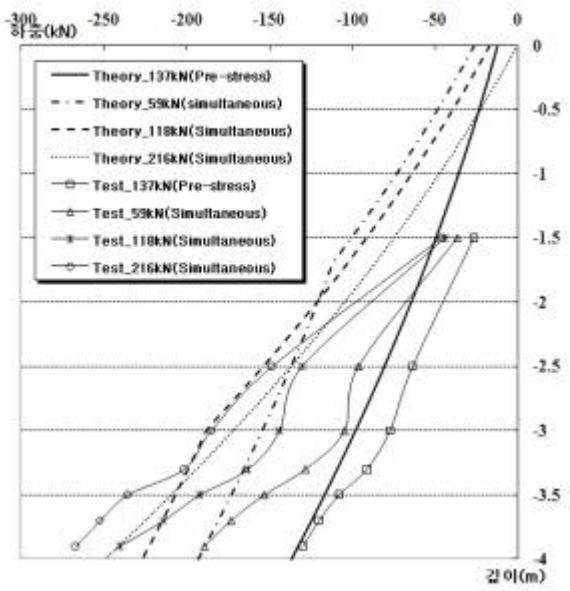
○ 필라 지지구조체는 초기 프리스트레스에 의한 압축하중, 인발거동 시 전면부에서 작용하는 인장하중 및 내하체에서 지속적으로 가해지는 압축하중에 대한 고려를 해주어야 함. 이경우 하중전이 이론을 바탕으로 프리스트레스를 가할 경우와 인발거동이 발생할 경우에 철근이 받는 압축력을 산정할 수 있음(서형준 등, 2010).

○ 현장인발시험 관련 기존문헌 결과를 바탕으로 적용된 하중전이 이론의 적정성 분석

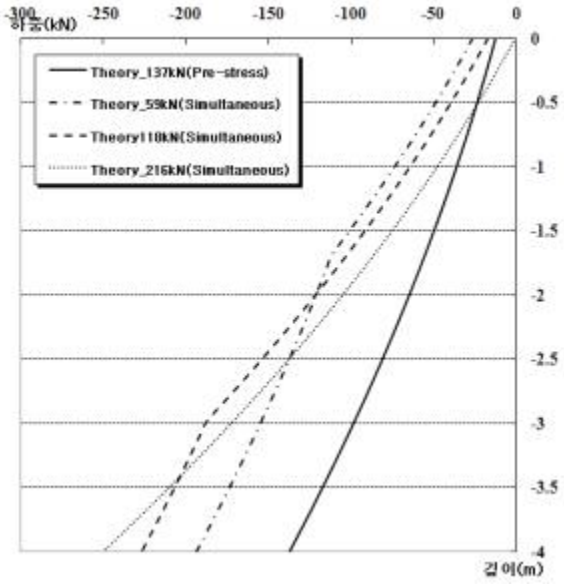
- 필라 보강공법은 쏘일네일링 공법과 앵커 공법이 결합된 공법으로 초기에는 프리스트레스를 가하고 난 후 동시인발을 하였음. 따라서 초기에는 앵커공법과 같은 거동을 보이게 되지만 프리스트레스를 모두 가한 후 동시인발을 하게 될 때에는 쏘일네일링과 앵커의 거동을 모두 보이게 됨.
- <그림 3.1.26>에서 보는 바와 같이, 프리스트레스를 단계별로 137kN까지 가하는 경우에는 앵커의 거동과 동일하게 선단에서 압축력이 크게 작용하고 압축력은 전면으로 전이됨.
- 그리고 137kN 이후에 동시인발을 하게 되면 전면에서는 인장력이 작용하고 선단에서는 압축력이 작용하게 됨. 프리스트레스에 의해 압축거동을 보이던 하중전이 양상은 전면에서 인장력이 선단으로 작용하게 되면서 선단에서 작용하던 압축력이 감소하게 됨. 이러한 압축력 감소양상은 동시인발 하중이 증가함에 따라 더 크게 나타남.
- 동시인발하중이 59kN 인 경우와 216kN 인 경우를 비교해보면 216kN 으로 인발하였을 때 인발하중은 매우 크지만 실제 작용하는 압축하중은 59kN 으로 인발하는 경우에 비해 더 작은 것을 알 수 있음. 이는 철근의 신장량이 PC강연선보다 더 작기 때문에 철근에 하중이 집중되어 동시인발 이후의 인발하중의 분배가 내하체에서 가해지는 선단의 압축력보다 철근에서 가해지는 전면의 인장력이 약 2.6배 정도로 더 크기 때문임.
- 따라서 동시인발 이후에는 전면에서 가해지는 인장력에 의해 그라우팅 구근 및 철근에 작용하고 있던 압축력이 감소하는 것을 알 수 있으며, 현장인발시험에서도 프리스트레스를 가한 후에 동시인발을 하게 되면 압축력이 크게 감소하는 것을 볼 수 있는데, 하중전이 이론을 통해 산정한 하중의 분포양상과 실제 시험 값이 유사하게 나타나는 것을 알 수 있음.
- 결론적으로 인발하중이 커질수록 전면에서 작용하는 인장력이 증가하게 되고 증가한 인장력은 선단에서 가해지는 압축력과 중첩하여 압축력을 감소시키게 됨. 따라서 하이브리드공법은 프리스트레스를 가할 때는 앵커공법과 같이 선단에서 압축력이 강하게 작용하고, 동시인발을 하게 되면 선단에서는 압축력이 우세하고 전면에서는 인장력이 우세한 것을 알 수 있음.



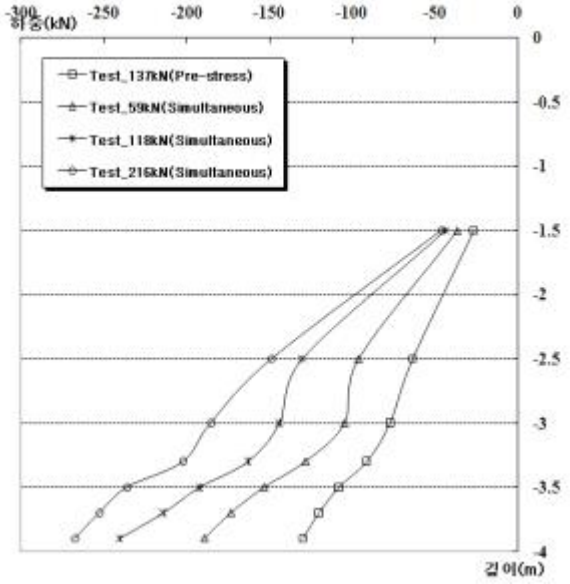
(a) 계측지점



(b) 하중전이 이론 및 인발시험 결과



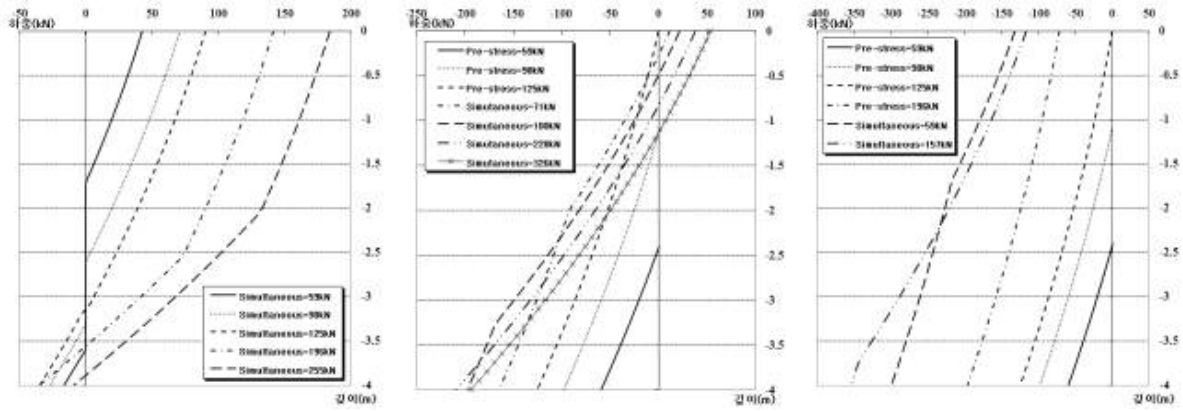
(c) 하중전이 이론 결과



(d) 하중전이 인발시험 결과

<그림 3.1.26 필라 지지구조체의 하중전이 양상>

- 프리스트레스를 가하지 않았을 경우, 전이하중으로 가하였을 경우, 그리고 전이하중에 비해 상대적으로 크게 가하였을 경우에 대해 필라 지지구조체에서 프리스트레스 하중의 강도를 정량적으로 분석함.



(a) 프리스트레스 = 0kN (b) 프리스트레스 = 125kN (c) 프리스트레스 = 196kN

<그림 3.1.27 프리스트레스 변화에 따른 하중전이 양상>

- <그림 3.1.27>에서 보는 바와 같이, 프리스트레스를 가하지 않고 동시인발을 하게 되면 철근이 PC강연선에 비해 약 2.6배의 하중을 더 받은 만큼 인장력이 전면에서 작용하게 되고, 선단의 내하체에서 전면의 인장력보다 작은 압축력을 가하게 됨.
- 동시인발 하중이 125kN 정도에서 전면에서 인장력과 선단에서의 압축력이 서로 중첩되게 되며, 이때 중첩되는 지점은 전면에서부터 3m 떨어진 지점보다 밑에 위치하는 것을 보았을 때 네일 전체에서 인장력이 우세한 것을 알 수 있으며, 인발하중이 증가할수록 전체 네일에 작용하는 인장력은 더 증가하는 것으로 나타났음. 따라서 255kN으로 동시에 인발하였을 때는 전체 네일에서 거의 인장력이 작용하는 것을 알 수 있음. 하지만 이 경우 철근의 항복하중이 약 200kN인 것을 고려해 보았을 때 거의 항복에 이른 것을 알 수 있음. 따라서 프리스트레스를 가하지 않은 필라 지지구조체는 인장하중이 전체 하중전이에 있어서 나타나게 되며, 이 경우 큰 인발하중을 얻을 수 없게 됨.
- 프리스트레스를 196kN으로 가하게 되면, 네일 전체에는 압축력이 지배하는 것을 알 수 있음. 프리스트레스를 가한 후 동시인발 상태에서 철근이 PC강연선보다 약 2.6배의 하중을 받은 만큼 네일에 인장력으로 작용하게 되나 이미 네일은 압축력을 과하게 받고 있어 인장력이 작용하기는 부족한 것으로 나타남. 따라서 PC강연선에 하중이 과하게 실리게 되어 PC강연선의 항복이 발생하는 것을 알 수 있음.
- 전이하중만큼 프리스트레스를 가한 경우, 프리스트레스를 가하는 동안 네일은 압축력에 의해 하중이 전이되는 양상을 보임. 압축력이 지배적이던 네일은 동시인발을 함에 따라 하중전이 양상이 바뀌게 됨. 선단의 압축력보다 2.6배 정도 더 큰 전면의 인장력이 동시인발 과정에서 지속적으로 작용함에 따라 인장력과 압축력

이 전체 네일에 고루 분포하는 것을 알 수 있음. 앞선 현장시험 계측결과에서 나타나는 것과 같이 전면에서는 인장력이 지배적인 양상을 나타내며, 선단에서는 압축력이 지배적인 양상을 나타내는 것을 알 수 있음. 또한 프리스트레스를 가하는 동안 압축력이 네일에 지배적으로 작용하면서 동시인발을 하게 되면 PC강연선에서 항복이 발생할 것으로 판단되었지만 동시인발을 함에 따라 철근이 하중을 집중적으로 받으면서 최종 인발하중이 크게 증가하는 것을 알 수 있음.

(1) 실내 실험을 통한 지보효과 검토

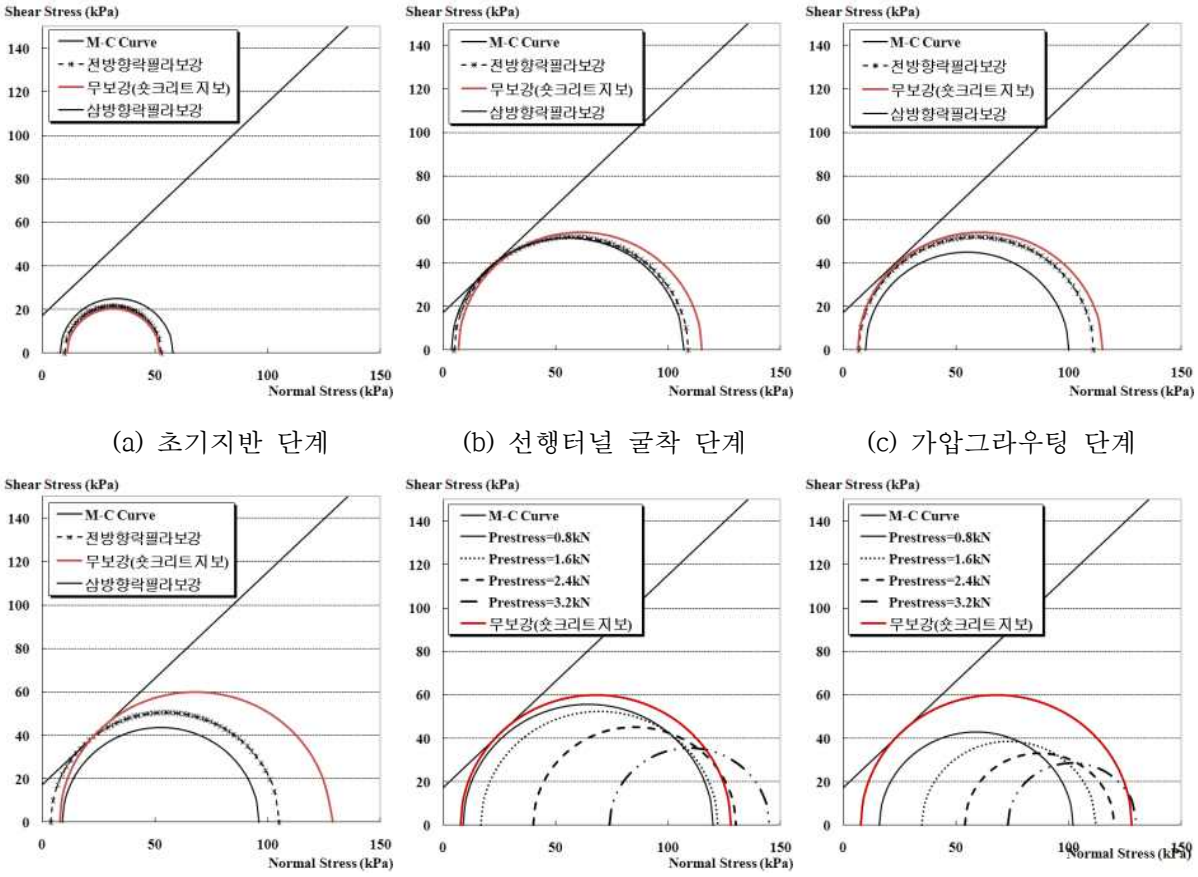
○ 필라 지지구조체는 쏘일네일링과 앵커가 결합된 공법으로써 프리스트레스를 가하는 구조체가 가장 큰 특징 중 하나임. 프리스트레스를 가하게 되면 초기 지반의 변위를 억제시킬 수 있으며, 굴착에 의해 느슨해진 지반을 다져주게 되므로 전면에서 발생할 수 있는 얕은 파괴를 방지할 수 있음.

○ 필라부의 거동특성을 파악하기 위해 필라 지지구조체를 적절히 모사하여 실내시험을 실시하였고 무보강(숏크리트 지보), 삼방향(수평 및 상방향)으로 가압그라우팅을 실시한 필라보강 공법, 전방향으로 가압그라우팅을 실시한 공법 등 세가지의 경우로 모의하여 수행하였음.

- 실내모형시험 장비는 필라부의 1막장을 모사한 것으로 가압그라우팅과 프리스트레스를 가할 수 있도록 모사하였고, 시험체의 폭은 400mm*400mm로 하여 필라부를 반단면만 모사하였음(실제 필라부의 1/5 축척). 따라서 실내 모형시험은 선행터널의 측벽부를 모사한 시험과 후행터널의 측벽부를 모사한 시험으로 두 번 실시함.
- 시험지반은 풍화토 지반으로 점착력(c)은 17kPa, 내부마찰력(ϕ)은 44 ° 로 나타났음(직접전단시험). 또한 지반의 함수비는 12%로 맞추었으며, 이때의 단위중량은 18.0kN/㎥ 로 나타났음.
- 먼저, 선행터널 측벽에서의 실내시험 결과를 보게 되면, 초기 지반상태에서는 세 가지 경우 모두 안정화 된 상태를 보이게 되나, 선행터널을 굴착함에 따라 세 가지 경우 모두 소성영역에 속한 것으로 나타남.
- 다음 단계인 가압그라우팅 단계에서는 전방향 가압그라우팅 같은 경우, 연직방향응력 증가에 의한 측벽에서의 구속효과 증가로 최소주응력이 증가하여 탄성영역으에 있은 것으로 나타남. 또한 삼방향 가압 그라우팅 같은 경우, 상부로 하중을 전달하기 때문에 연직방향응력이 줄어들어 탄성영역으로 이내로 위치하는 것으로 나타남.
- 후행터널을 굴착하게 되면 무보강조건과 전방향 필라 보강의 경우 소성영역에 들게

되나, 삼방향 필라 보강 시 탄성영역에 있는 것으로 나타남.

- 전방향 필라 보강의 경우, 프리스트레스를 0.8kN과 1.6kN으로 가하게 되면 최소 주응력 증가로 인해 소성영역에서 탄성영역으로 변화되나 이완된 지반을 다지는 데 하중이 사용되므로 최소주응력 증가량은 크지 않은 것으로 나타남. 그러나 2.4kN과 3.2kN부터는 가하는 하중만큼 정확히 지반에 응력이 증가되는 양상을 보임.
- 삼방향 필라 보강의 경우, 후행터널 굴착단계에서부터 이미 탄성영역이므로 0.8kN에서 3.2kN으로 프리스트레스를 단계별로 증가시키는 만큼 지반에 응력이 전달되는 것으로 나타나 프리스트레스를 크게 주지 않더라도 필라부가 안정화되는 것을 예측할 수 있음.



(a) 초기지반 단계 (b) 선행터널 굴착 단계 (c) 가압그라우팅 단계

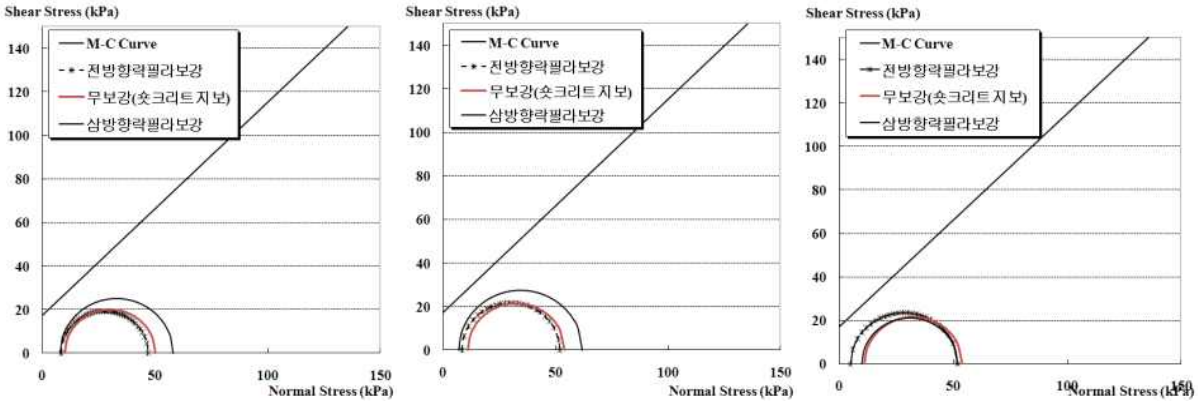
(d) 후행터널 굴착 단계 (e) 전방향 보강시 프리스트레스 (f) 삼방향 보강시 프리스트레스

<그림 3.1.28 선행터널 측벽부에서의 실내시험 결과>

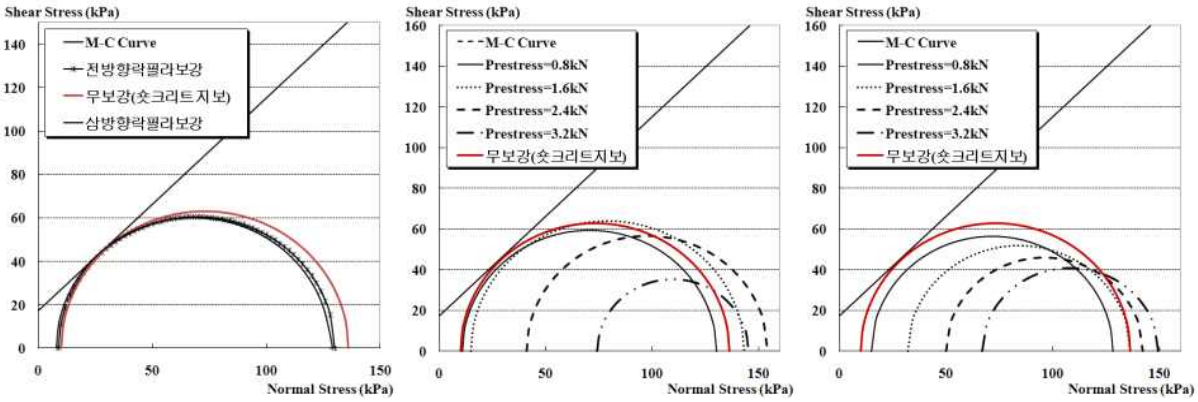
- <그림 3.1.29>에 나타낸 후행터널 측벽부에서의 실내시험 결과를 보게 되면, 초기지반 단계, 선행터널 굴착 단계, 가압그라우팅 단계 모두 후행터널 지점은 원지반 상태이기 때문에 응력의 변화가 크지 않음.
- 그러나 후행터널을 굴착하게 되면, 굴착에 따른 최소주응력 감소뿐만 아니라 필라

부가 형성되면서 최대주응력이 급격하게 증가하기 때문에 세 가지 경우 모두 소성 영역에 있는 것으로 나타남.

- 그 후 프리스트레스를 가하게 되면 선행터널 측벽지점에서의 결과와 유사하게 전방향 필라 보강과 삼방향 필라 보강의 결과가 분석하면, 전방향 필라 보강의 경우, 이완된 지반을 다지는 데 1.6kN정도 까지 하중이 들기 때문에 탄성영역으로 들어오기는 하나 최소주응력 증가가 작게 나타남. 삼방향 필라 보강의 경우, 프리스트레스 하중 증가에 따른 최소주응력 증가양상이 뚜렷하게 나타났음.



(a) 초기지반 단계 (b) 선행터널 굴착 단계 (c) 가압그라우팅 단계



(d) 후행터널 굴착 단계 (e) 전방향 보강시 프리스트레스 (f) 삼방향 보강시 프리스트레스

<그림 3.1.29 후행터널 측벽부에서의 실내시험 결과>

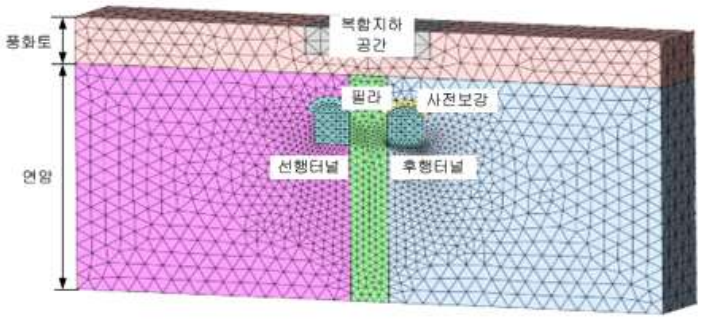
○ 복합지하공간 하부에 지하저류공동을 시공할 경우, 각각의 시공단계에 따른 필라부 지지구조체의 거동특성을 파악하기 위해서 수치해석을 실시하였음.

○ 수치해석은 세 가지 경우로 구분하여 숏크리트 지보만을 실시한 1차보강, 숏크리트 지보외에 가압그라우팅과 프리스트레스를 가하는 필라 보강으로 구분하여 수행하였음. 또한 필라 보강은 굴착공 반경방향으로 전체적으로 가압그라우팅을 실시한

경우와, 수평 및 상부측 삼방향으로 가압그라우팅을 실시한 경우로, 가압그라우팅의 방향성에 따라 두 가지로 나누어 해석을 실시하였음.

○ 가압그라우팅을 실시할 경우 필라부에 집중되는 하중 경감효과를 파악하고 이에 따라 전방향 가압그라우팅과 삼방향 가압그라우팅의 경우 최대 주응력의 크기 및 방향성 등 거동 분석을 위하여 실시하였음.

○ 복합지하공간은 천층부에 풍화대 구간에 위치하고 지하저류공동은 복합지하공간 하부의 연암구간에 위치하는 것으로 설정하여 모델링하였음.



<그림 3.1.30 3차원 해석 메쉬>

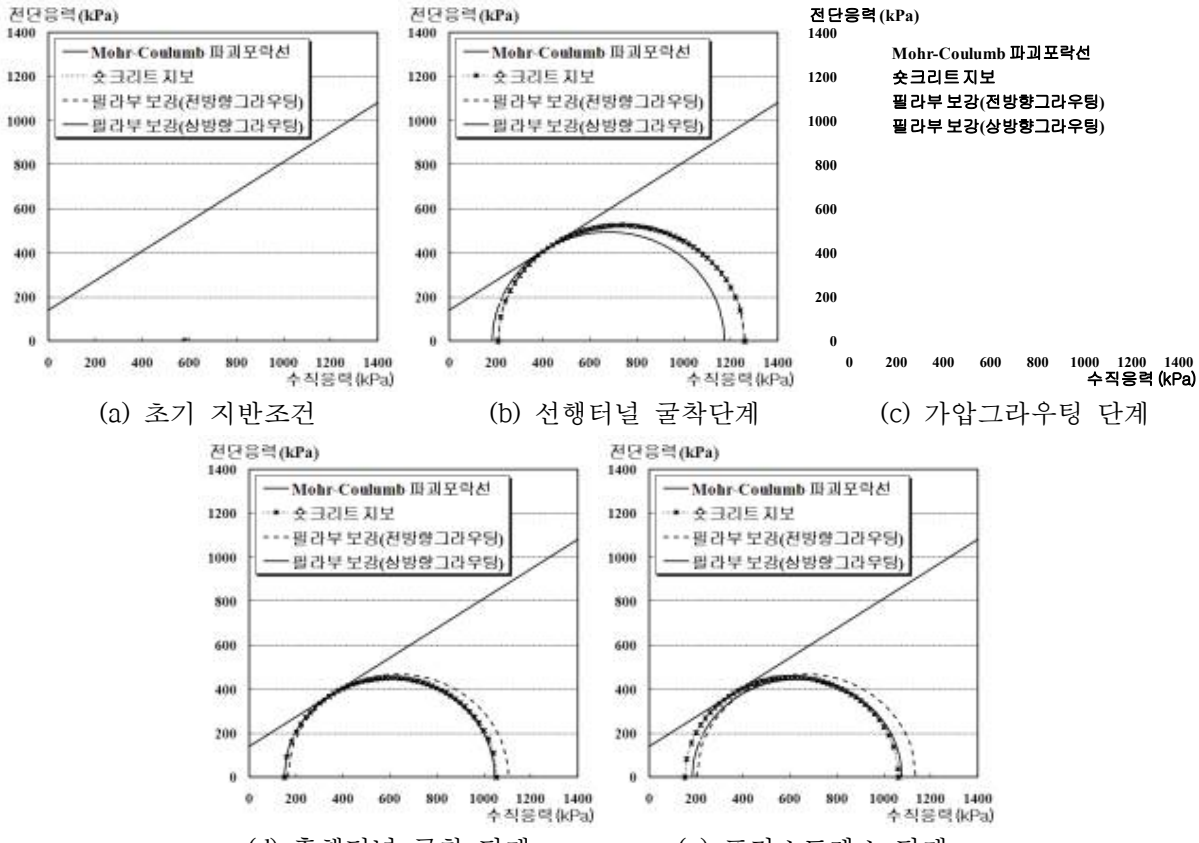
<표 3.1.12 적용지반 물성치>

대상지반	탄성계수 (MPa)	포아송비	단위중량 (kN/㎥)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	토압계수
풍화토	50	0.3	20.0	26	33	0.5
연암	1500	0.27	24.0	139	34	1.0

- <그림 3.1.31>의 선행터널 측벽에서의 수치해석 결과를 보면, 초기 지반 조건은 K_0가 1인 경우의 지반거동을 보이고, 터널 측벽 중앙지점을 굴착할 때 숏크리트만을 지보한 경우와 가압그라우팅을 한 경우 모두 소성상태에 이르는 것으로 나타남.
- 삼방향 가압그라우팅을 한 경우 선행터널 중심부(측점지점)를 굴착하기 전에 상부지반에서 삼방향으로 가압그라우팅을 실시하게 되므로, 실제로 중심부(측점지점)에서 굴착을 실시하여도 다른 경우와 비교하여 최대주응력이 감소하는 양상을 보임. 즉, 상부에서 가압그라우팅한 효과가 하부 굴착지반까지 영향을 주어 최대주응력 감소효과가 있는 것을 예상할 수 있음.
- 측점지점 하부지반을 굴착함과 동시에 숏크리트 지보 및 전방향 또는 삼방향으로 가압그라우팅을 하는 단계에서는 숏크리트 지보만 하는 경우와 달리, 필라 지지구

조체화의 경우 모두 Mohr-Coulomb 파괴포락선 안쪽으로 위치하는 것으로 나타남. 하지만 이 경우에서도 삼방향으로 가압그라우팅을 하게 되면 최대 주응력의 감소 양상이 뚜렷하게 나타났으며, 전방향으로 가압그라우팅을 하게 되었을 경우 삼방향 뿐만 아니라 하방향에도 가압그라우팅 하는 응력이 전달되므로 삼방향 가압 그라우팅에 비해 최대주응력이 큰 것으로 나타남.

- 선행터널이 10m 굴착한 후에 후행터널을 굴착하게 되면 수행한 모든 해석 경우에서 소성영역으로 나타남. 그러나 후행터널 굴착 후 프리스트레스를 가하게 되면 제안된 필라부 지지구조체화 모두 Mohr-Coulomb 파괴포락선 안쪽으로 들어오는 것으로 나타났음. 숏크리트 지보만을 한 경우는 터널 벽면의 변위를 억제하는 수동적인 보강공법이므로 최소주응력 증가효과가 크지 않으나, 전면판을 통해 프리스트레스를 가하게 되면 가하는 하중만큼 터널 벽면에서 내압을 가하는 능동적인 보강이 가능하므로 터널의 안정성을 확보할 수 있게 됨.



(a) 초기 지반조건 (b) 선행터널 굴착단계 (c) 가압그라우팅 단계

(d) 후행터널 굴착 단계 (e) 프리스트레스 단계

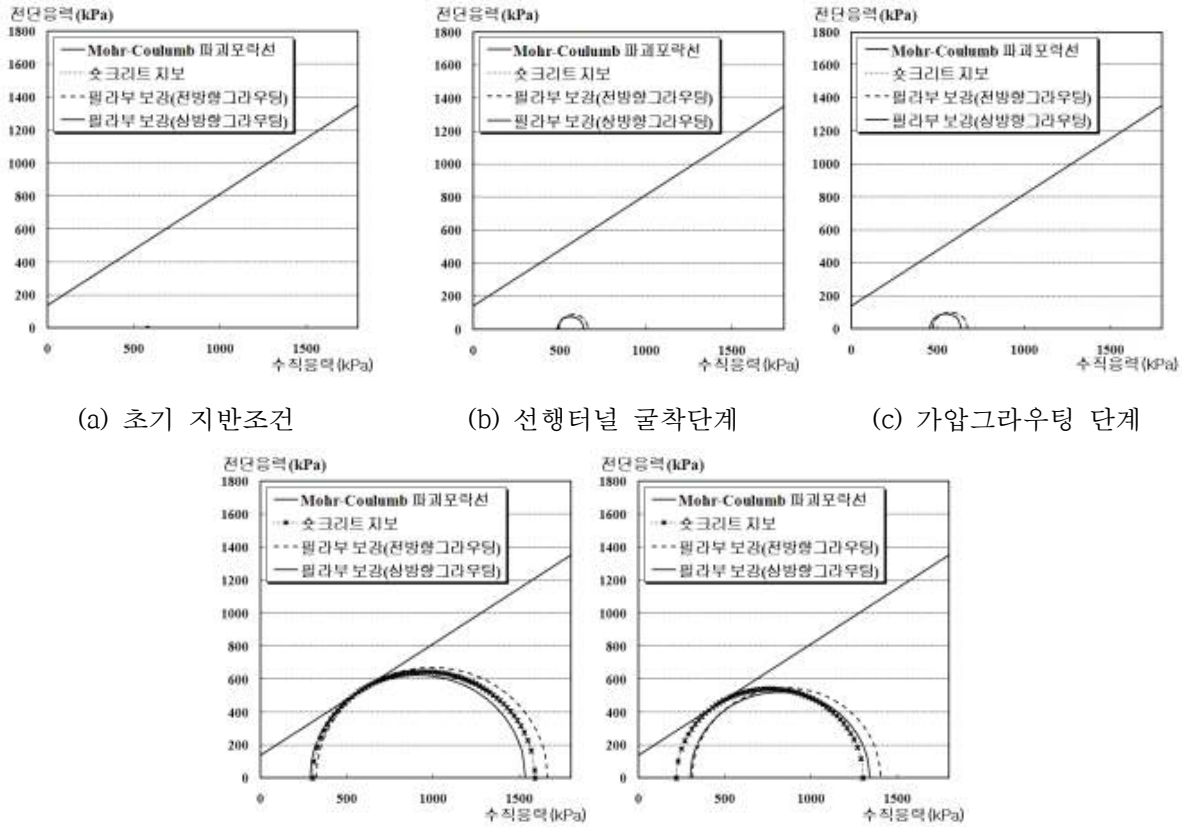
<그림 3.1.31 선행터널 측벽에서 해석결과>

(2) 수치해석을 통함 필라지보효과 검토

- <그림 3.1.32>의 후행터널 굴착전 후행터널 측벽내 지반의 상태이며 초기지반 조건, 선행터널 굴착에 이은 가압그라우팅 단계 등 각 시공단계에 대하여 큰 영향을 받지 않고 안정적인 지반 상태를 보임.
- 그러나 <그림 3.1.32>(d)에서 보는 것과 같이 후행터널을 굴착하게 되면, 필라부가 형성되면서 필라부로 하중이 집중하게 되고 최대주응력이 급격하게 증가할 뿐만 아니라 최소주응력도 감소하게 되어 세가지 경우 모두 소성영역으로 변화됨. 따라서 후행터널 굴착 단계가 필라부 시공단계에 있어서 가장 위험한 단계로 평가할 수 있음.

○ 터널보강 공법을 비교해 보았을 때, 먼저 숏크리트만을 지보한 경우, 하부지반의 굴착으로 인해 최대주응력은 조금 감소하게 되나 최소주응력의 감소로 인하여 여전히 소성영역에 분포하는 것으로 나타남.

○ 그러나, 필라부 측면에 프리스트레스를 가하는 필라부 지지구조체화 공법의 경우는 최소주응력이 증가하여 Mohr-Coulomb 파괴포락선 안쪽으로 Mohr 원이 위치하여 터널 안정성이 효과적으로 확보되는 것을 알 수 있음.



(a) 초기 지반조건 (b) 선행터널 굴착단계 (c) 가압그라우팅 단계

(d) 후행터널 굴착 단계 (e) 프리스트레스 단계

<그림 3.1.32 후행터널 측벽에서 해석결과>

다. 개착부 굴착공법 및 저류공동 시공단계별 기존구조물에 대한 손상도평가

(1) 개착부 굴착공법과 지반변위 개요

○ 지반의 굴착에 따른 지반변위는 굴착 및 지보, 지반조건 등에 영향을 받음. 이러한 지반굴착에 따른 지반변위의 분석에 관하여 과거로부터 비교적 많은 연구가 진행되었음. Peck(1969), O'rourke et al.(1976), Goldberg et al.(1976), Mana & Clough(1981), Boscardin & Coding(1989) 등은 현장 계측을 기초로 경험적인 방법을 이용한 연구를 진행하여 왔으며 Caspe(1966), Bowles(1988), Fry & Rumsey(1983) 등은 반경험적인 방법을 이용하여 지반변위에 관하여 연구함.

○ Peck(1969)은 현장 계측결과를 이용하여 점토지반을 기초로 하여 지반굴착에 따른 인접한 지표의 침하형태와 크기를 흙막이벽에서의 이격거리에 따라 굴착 깊이에 의한 무차원량으로 표시하여 크게 3영역으로 분류함.

○ O'Rourke et al.(1976)은 중간~조밀한 모래 지반과 단단한 점토가 끼여 있는 모래 지반에서, 현장 측정 결과로부터 굴착에 따른 인접 지표의 침하 포락선으로서 최대 침하량은 흙막이벽 부근에서 약 0.3H(H:굴착 깊이), 최대 침하 영향거리는 흙막이벽으로부터 2.0H를 제안함.

○ Goldberg et al.(1976)은 지지 구조체의 간격과 벽체강성이 주변지반의 거동에 영향을 미친다는 사실을 제시하였으며, 안정수와 강성계수에 대해 나타냄.

○ Mana & Clough(1981)는 FEM과 현장 측정치에 근거하여 사질토 및 점성토 지반에서 굴착 배면에서의 거리별 침하 분포를 제시함. 정규화된 지표의 침하곡선과 사질토지반일 경우의 버팀 굴착에 대한 벽체의 배면지반의 침하량을 추정함.

○ Caspe(1966)는 흙막이벽의 수평변위와 지반의 포아송비(ν)를 이용하여 굴착에 따른 인접한 지표면의 침하량과 분포에 대한 산정 방법을 제시함.

○ Bauer(1984)는 반경험적인 방법을 통하여 침하영향 폭과 사질토의 내부마찰각 및 상대밀도와 시공조건을 고려하여 사질토지반의 굴착에 적용할 수 있는 방법을 제안함. 개착식 굴착에서 벽체변위는 굴착면 주위에 발생하는 지반의 침하량과 영향범위와 직접적으로 비례하며, 지반의 하부 종방향 이동체적은 지반의 횡방향 이동체적과 같다고 서술함.

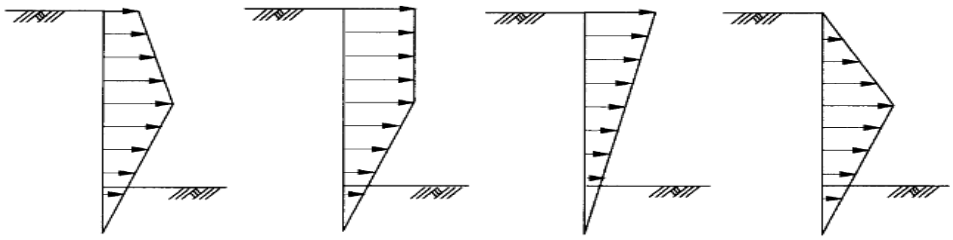
○ 양구승(1996)은 풍화토 및 모래질 충적토 지반으로 구성된 국내 도심 지역에서 깊은 굴착공사로 인한 인접지반 거동에 대해 현장 계측을 중심으로 연구함. 이를 통하여 굴착 공사에 따른 인접 지표의 침하량 및 침하 분포를 제시함.

○ 윤중만(2008)은 굴착 배면지반의 변형예측에 관한 연구에서 강제변위법을 이용하여 굴착에 따른 흙막이벽의 변형형상이 굴착 배면지반에 미치는 영향을 검토함. 흙막이벽의 거동을 유한요소법을 이용하는 방법으로 굴착이라는 외력을 응력을 해방하는 것으로 간주하여 흙막이구조물을 포함한 굴착배면지반의 변형거동을 검토하는 응력해방법과 탄소성해석이나 현장계측으로부터 얻은 흙막이벽의 수평 변위량을 입력자료로 하는 강제변위법이 개발됨.

○ 지반굴착시의 배면지반 침하에 의한 인접 구조물의 손상에 영향을 미치는 인자에는 굴착 및 지보 조건, 이격거리, 지반 조건 및 구조물의 자중, 형태, 강성 등 여러가지가 있음. 이러한 인자는 단일 인자로써의 분석이 어려운 측면이 있고, 배면지반의 침하 자체가 시공 및 지반조건에 따라 민감하게 변화하므로 인접한 구조물의 손상도 평가는 현장 계측을 중심으로 연구되고 있음.

(2) 개착부 굴착공법별 실내 모형실험 수행

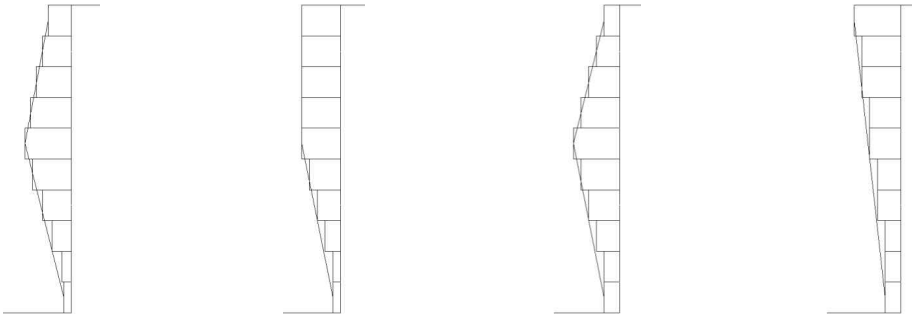
○ 강제변위법을 적용하는 과정에서 흙막이벽의 변형형상을 지보형식에 따라 스트러트, 자립식, 앵커, 상부고정앵커의 4가지 형상으로 <그림 3.1.33>과 같이 분류하였고, 변위양상을 단순화시켜 실험에 적용함.



<그림 3.1.33 강제변위법에 적용된 벽체변위의 형태>

○ 사질토 지반의 Green-field 조건에서 가시설 흙막이벽 굴착시의 지보형식에 따른 벽체변위에 대응하는 지표침하 트라프를 구하는 실험을 벽체변위의 단순화된 4가지의 지보형식으로 상부고정앵커, 스트러트, 앵커, 캔틸레버형태로 나누어 수행하였으며 그 결과를 비교 및 분석함. 또한 각각의 지보형식에 대하여 실제 시공단계를 모사하기 위하여 10단계에 걸쳐서 변위를 나누어서 적용함. 적용된 지보형식인 상부고정앵커, 스트러트, 앵커, 캔틸레버의 최종변위를 <그림 3.1.34>과 같이 도식화함. 아래의 <표 3.1.13>은 각각의 지보형식의 굴착단계별 최종적으로 적용된 변위량

을 나타냄.



(a) 상부고정앵커 (b) 스트러트 (c) 앵커 (d) 캔틸레버

<그림 3.1.34 적용된 지보형식별 최종 변위량>

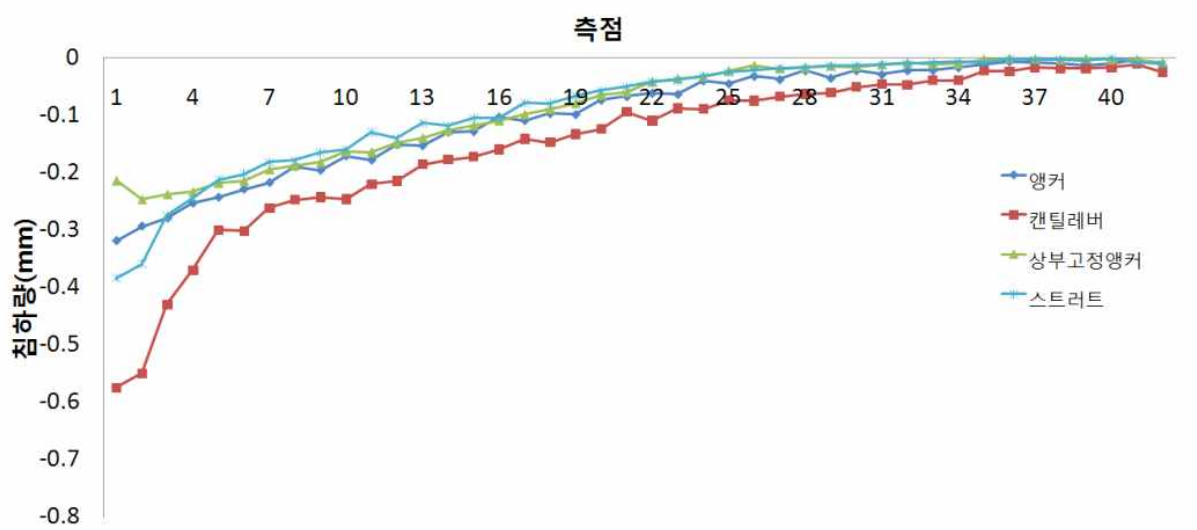
<표 3.1.13 지보형식별 굴착단계의 최종적용> (단위:mm)

	상부고정앵커	스트러트	앵커	캔틸레버
1 단계	0.2	0.5	0.3	0.6
2 단계	0.3	0.5	0.37	0.5
3 단계	0.4	0.5	0.45	0.5
4 단계	0.5	0.5	0.53	0.4
5 단계	0.6	0.5	0.6	0.4
6 단계	0.5	0.4	0.5	0.3
7 단계	0.4	0.3	0.37	0.3
8 단계	0.3	0.2	0.25	0.2
9 단계	0.2	0.1	0.13	0.2
10 단계	0.2	0.1	0.1	0.2

○ 사질토 지반의 Green-field 조건에서 가시설 흙막이벽 굴착시의 지보형식에 따른 벽체변위에 대응하는 지표침하 트라프를 구하는 실험을 모사함. 굴착공법별로 침하량을 산정하기 위해 단순화된 상부고정앵커, 스트러트, 앵커, 캔틸레버형태로 나누어 42개의 측점을 사진측량함으로써 지표 침하량을 산정함.

○ 벽체의 변형으로 인한 4가지 굴착공법별 지표침하 트라프는 <그림 3.1.35>와 같으며, 그래프의 개형은 대부분 유사함을 보임. 특히 벽체 배면으로 부터의 5번 측점을 기준으로 거의 동일한 개형을 보임. 상부고정앵커의 경우는 다른 지보형식의 그래프와는 달리 2번 변위측점에서 가장 많은 침하량을 보이고 있음. 앵커의 경우 상부고정앵커와 개형은 유사하나 1번 변위측점의 개형만 다른 양상을 보임. 스트러트의 경우는 앵커와 비교하여 3번 변위측점 이전에서 차이를 보임. 캔틸레버의 경우는

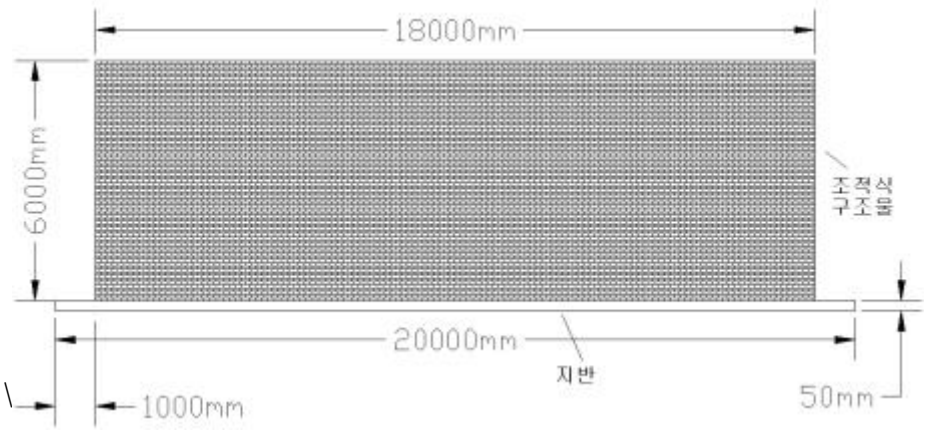
다른 지보형식과 비교적 상이한 침하량을 전체적으로 보이고 있으며 그래프의 개형도 벽체 배면 측으로부터 7번 변위측점 이전의 침하량의 변화폭이 급격한 것을 확인함. 측점 중 벽체 배면과 가장 근접한 1번 변위측점의 침하량은 캔틸레버, 스트러트, 상부고정앵커, 앵커 변위형태의 순서이며, 최대 침하량의 순서도 동일함.



<그림 3.1.35 지보형식에 따른 침하량 종합>

(3) 개착부 굴착공법별 수치해석 수행

○ 흙막이벽에 인접한 구조물의 손상도 평가를 위해 Son(2003)에 의해 제안된 지표의 침하량으로 인한 각변위와 수평변형률을 이용한 구조물의 해석 방법을 이용함. 수치해석으로 조성된 지반과 조적식 구조물은 <그림 3.1.36>과 같음.



<그림 3.1.36 수치해석 모델 개요>

○ 수치해석에 적용된 조적식 구조물의 물성은 다음 표와 같음. 조적식 구조물의 대상

은 2층 높이의 조적식 구조물이며 구조물 하부에 두께 50mm의 반무한 탄성지반을 얇게 형성함. 탄성지반 하부에 변위를 부여하여 지표 침하를 표현하였으며, 지반의 상부에는 수평변위를 부여함.

<표 3.1.14 수치해석에 적용된 조적식 구조물의 물성>

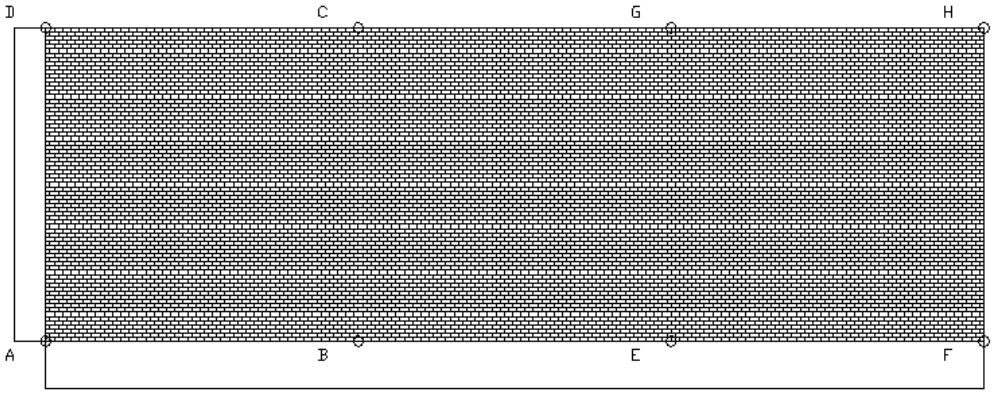
항목	탄성계수 (E, MPa)	포아송비 (υ)	단위중량 (γ, kg/㎥)	벽돌크기 (mm)
적용값	10.3E3	0.2	1917	400×200

○ 모형실험에서 얻은 지표 침하의 결과자료를 바탕으로 실제 구조물 하부의 지반으로써 반영하여 50배 확대하여 수직변위를 부여하였으며, 구조물의 수평변위는 수직변위의 약 1/3의 값으로써 반영함. 이는 터널굴착에 의한 최대침하량과 최대 수평변위의 관계에 대한 연구(손무락, 2009)를 통하여, 최대 수평 변위량은 최대 침하량 대비 약 35%임을 참고한 값임.

○ 수직변위에 대한 손상도의 현실적인 평가를 위하여 이러한 변위를 각각의 경우에 50%, 30%, 10%의 변위를 부여한 해석을 추가적으로 실시함. 또한, 실제 구조물이 도심지 중요 구조물이란 전제하에, 흙막이벽과 구조물의 이격거리가 초근접시공이 이루어질 것을 가정하여 흙막이벽과 구조물간의 이격거리를 0m, 0.5m의 두가지 경우로 나누어 변위를 부여함.

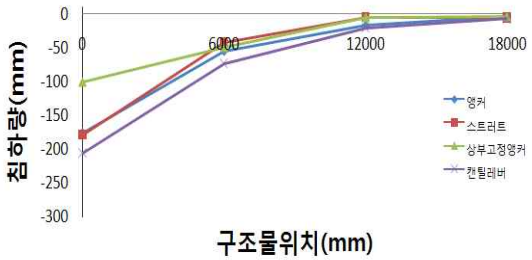
○ 이격거리, 변위 적용율의 조건들을 고려하여 수치해석에 적용함. 변위값은 UDEC의 한계로 인하여 변위로써 부여함이 불가하므로, 속도로써 부여되었으며 이를 평형상태에 가까운 해석횟수로 나누어서 부여하여 최종적으로 의도한 변위를 유발시킴.

○ 침하형태에 따른 지반 변위를 수치해석 모델에 적용시킨 후 수치해석 완료 후 <그림 3.1.37>의 A~H 지점의 변형량을 추출함.

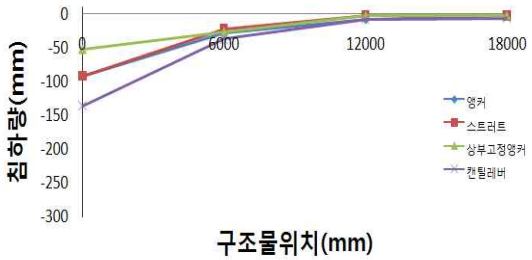


<그림 3.1.37 수치해석으로 측정한 구조물 변위량 지점>

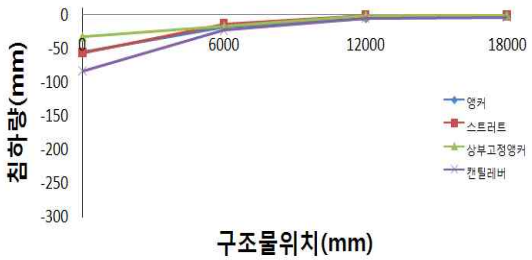
○ 이격거리 0m와 변위적용율(100%, 50%, 30%, 10%)에 따른 구조물 침하량을 각각 다음 그림과 같이 그래프로 표현함. 구조물 위치 0m에서의 침하량은 캔틸레버>스트러트>앵커>상부고정앵커의 순으로 나타남. 구조물 위치 6m에서의 침하량은 캔틸레버>앵커>상부고정앵커>스트러트의 순으로 나타남. 캔틸레버의 침하량이 나머지 침하량들에 비하여 상대적으로 많은 침하량을 보이는 것을 확인함.



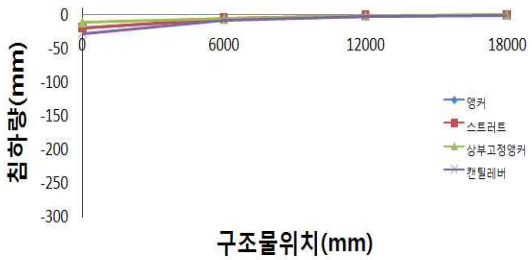
(a) 이격거리 0m, 변위적용율 100%



(b) 이격거리 0m, 변위 적용율 50%



(c) 이격거리 0m, 변위 적용율 30%

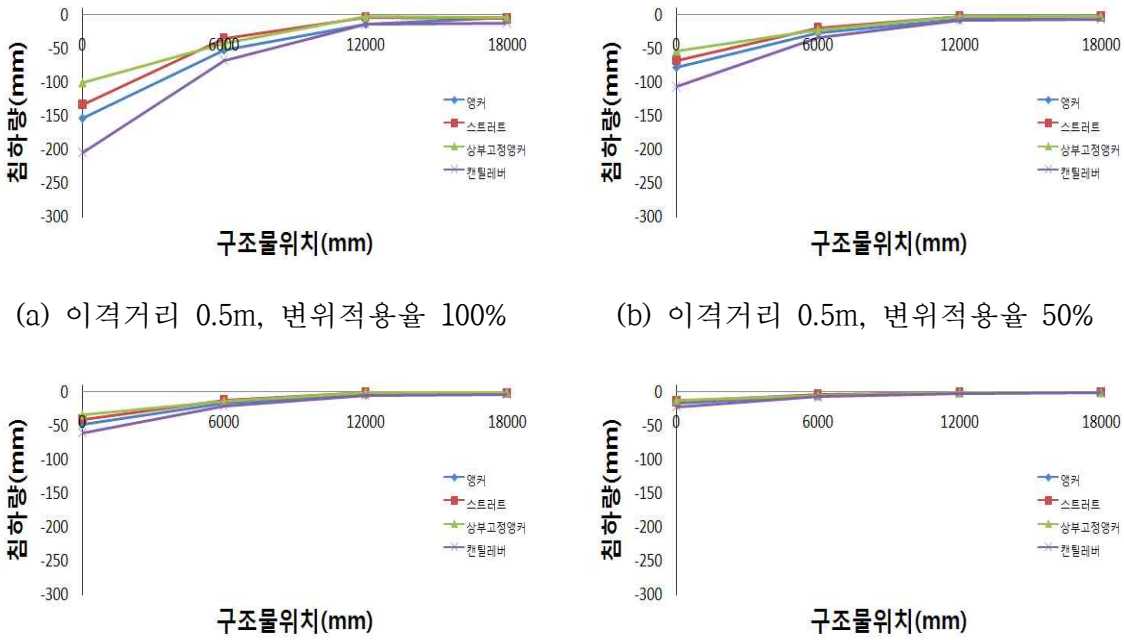


(d) 이격거리 0m, 변위 적용율 10%

<그림 3.1.38 침하형태별 구조물 침하량 (이격거리 0m)>

○ 이격거리 0.5m와 변위적용율(100%, 50%, 30%, 10%)에 따른 구조물 침하량을 다음 그림과 같이 그래프로 표현함. 구조물 위치 0m에서의 침하량은 캔틸레버>앵커>스

트러트>상부고정앵커의 순으로 나타남. 구조물 위치 6m에서의 침하량은 캔틸레버>앵커>상부고정앵커>스트러트의 순으로 나타남. 캔틸레버의 침하량이 나머지 침하량들에 비하여 상대적으로 많은 침하량을 보이는 것을 확인함.



(a) 이격거리 0.5m, 변위적용율 100%　　(b) 이격거리 0.5m, 변위적용율 50%

(c) 이격거리 0.5m, 변위적용율 30%　　(d) 이격거리 0.5m, 변위적용율 10%

<그림 3.1.39 침하형태별 구조물 침하량 (이격거리 0.5m)>

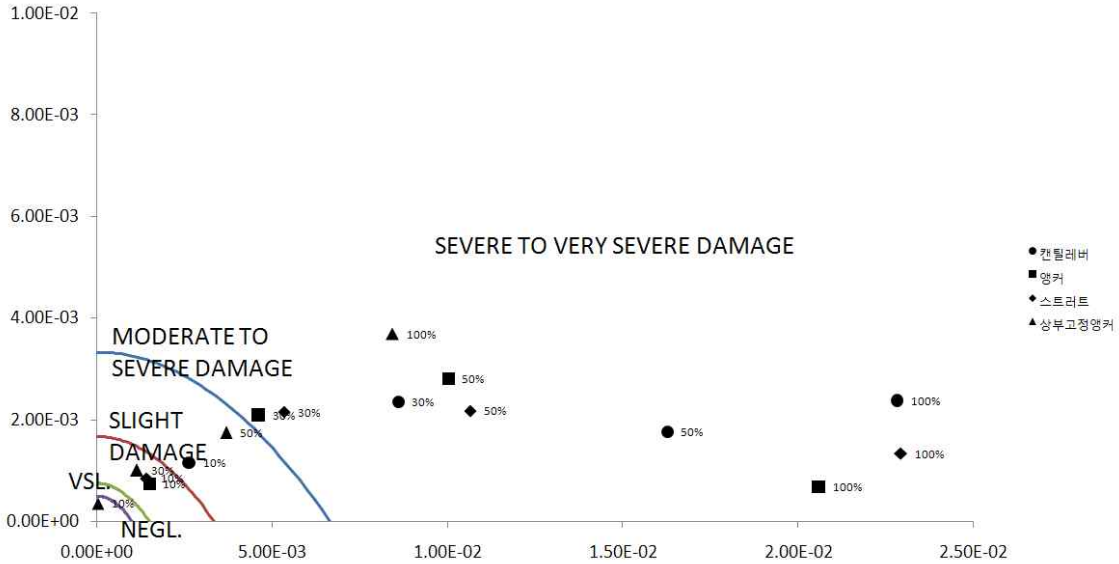
(4) 상부구조물 손상도 평가

○ 손상도 평가는 <그림 3.1.37>의 측점 A, B, C, D 지점의 구조물 변형량을 기준으로 수행함. 이격거리 0m의 손상도 평가결과는 <그림 3.1.40>과 같음, 각각의 침하형태에 대하여 변위 적용율 100%의 경우 Severe to very severe damage의 영역에 모두 포함됨. 변위 적용율이 줄어들수록 손상도 평가가 안전측으로 변화하는 것을 확인함. 변위 적용율 10%의 경우에 상부고정앵커만이 Very slight의 영역으로 진입함. 침하형태별 손상도 평가의 안전측 진입 순서는 상부고정앵커, 앵커, 스트러트, 캔틸레버 순으로 나타남.

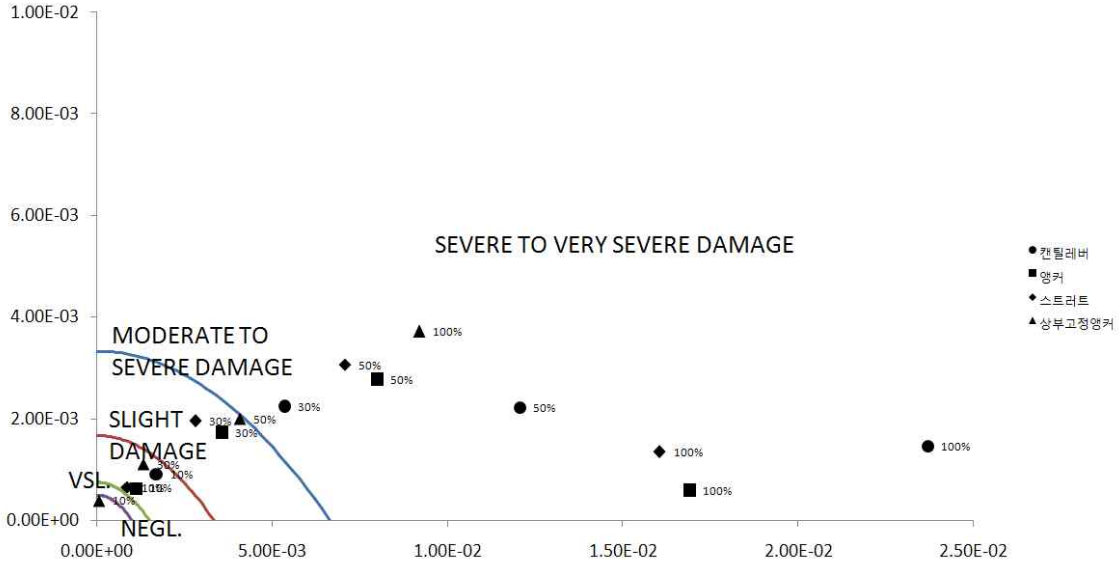
○ 이격거리 0.5m의 손상도 평가결과는 <그림 3.1.41>과 같음., 이격거리 0m와 마찬가지로 각각의 침하형태에 대하여 변위 적용율 100%의 경우 Severe to very severe damage의 영역에 모두 포함되어 있음. 변위 적용율이 줄어들수록 손상도 평가가 안전측으로 변화하는 것을 확인함. 침하형태별 손상도 평가의 안전측 진입 순서는

상부고정앵커, 앵커, 스트러트, 캔틸레버 순으로 나타남.

○ 이격거리 0m, 0.5m간의 손상도 평가를 비교한 결과, 두 경우 모두 상부고정앵커 및 앵커의 경우가 캔틸레버 및 스트러트와 비교하여 안전측 진입이 빠름을 확인함.



<그림 3.1.40 이격거리 0m일 때, 손상도 평가>



<그림 3.1.41 이격거리 0.5m일 때, 손상도 평가>

(5) 결론

○ 굴착공법 및 지하 공동부에 따른 축소모형실험을 통하여 흙막이벽의 지보형식과 지하 공동부의 존재에 따른 침하량을 분석한 결과, 굴착단계에서 상부에 해당하는 벽체의 변형이 많을시 침하량이 이격 거리에 따라 급격한 침하가 발생됨을 확인하였음.

○ 상대적으로 굴착벽체 상부의 변형을 억제하고 하부로 이어지는 벽체의 변형을 허용한다면, 상대적으로 부등침하 발생이 완만하게 유도되어 구조물의 손상도 평가 측면에서 안전성이 확보될 것으로 확인함.

○ 지하 공동부의 유무 및 각각의 흙막이벽의 변형형태를 달리하여 실험으로부터 구해진 침하량에 대하여 결과를 수치해석 방법을 통하여 조적식 구조물에 미치는 손상도를 분석한 결과, 구조물의 손상도는 지보형식에 따른 지반의 침하량 뿐만 아니라, 굴착배면과 구조물의 이격거리, 구조물의 부등침하, 구조물의 물성 등의 복합적인 요인에 의해 영향이 미칠 것으로 판단됨.

○ 근접시공시에 개착공법에 의해 발생한 흙막이벽체의 변위 거동을 벽체배면 토압작용의 관점에서 접근하여, 흙막이벽체의 상부를 수동상태로 그리고 하부를 주동상태로 하여 단계별 굴착에 따른 흙막이벽체 소정의 거동을 인위적으로 조절할 수 있는 지보 형식 및 공법을 제시함. 본 과제를 통하여 제시한 기술 개발 및 상용화 시에는 근접시공에 따른 인접 구조물 손상도 평가 및 안정성 확인 관점에서 실무에서 매우 유용할 것으로 판단됨.

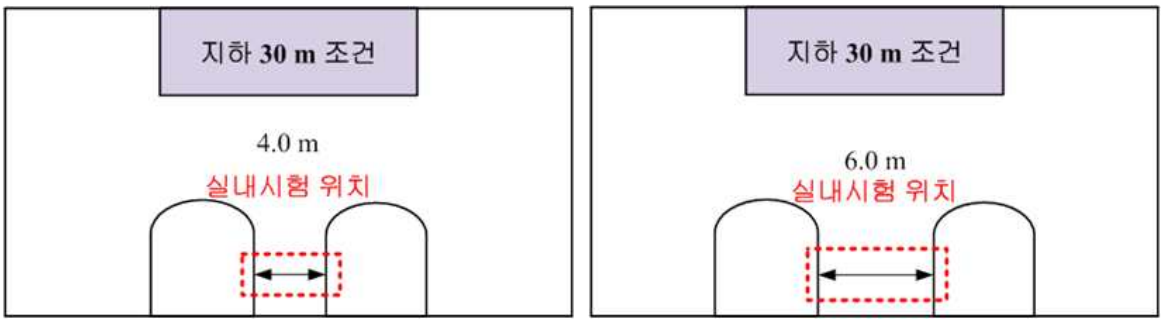
3. 지하 저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인 개발 [3차년도]

가. 필라의 형상 및 구조에 대한 검토

(1) 실내축소모형 실험을 통한 필라폭 및 보강구조

○ 당해 3차년도에는 복수개소의 터널간에 위치한 필라부를 지지구조체화하기 위하여 보강공법을 적용하였을 때, 필라부의 안정성에 미칠 수 있는 여러 가지 영향인자들에 대한 검토와 관련 영향을 실내시험 및 수치해석을 통하여 분석하였음.

○ 필라부의 간격에 대한 효과를 검토하기 위해 실내시험을 실시하였으며, 2차년도에서는 실내시험은 실제 현장 필라폭을 선행•후행측으로 둘로 나누어 2.0m (=실제 필라폭 4.0m×1/2)에 대하여 시험체폭 400mm (축소모형 적용축척 1/5)을 적용하였음. 3차년도에도 적용축척은 2차년도와 동일하며, 3.0m (=실제 필라폭 6.0m×1/2)에 대하여 시험체폭 600mm 제작하여 실험을 실시하였음.



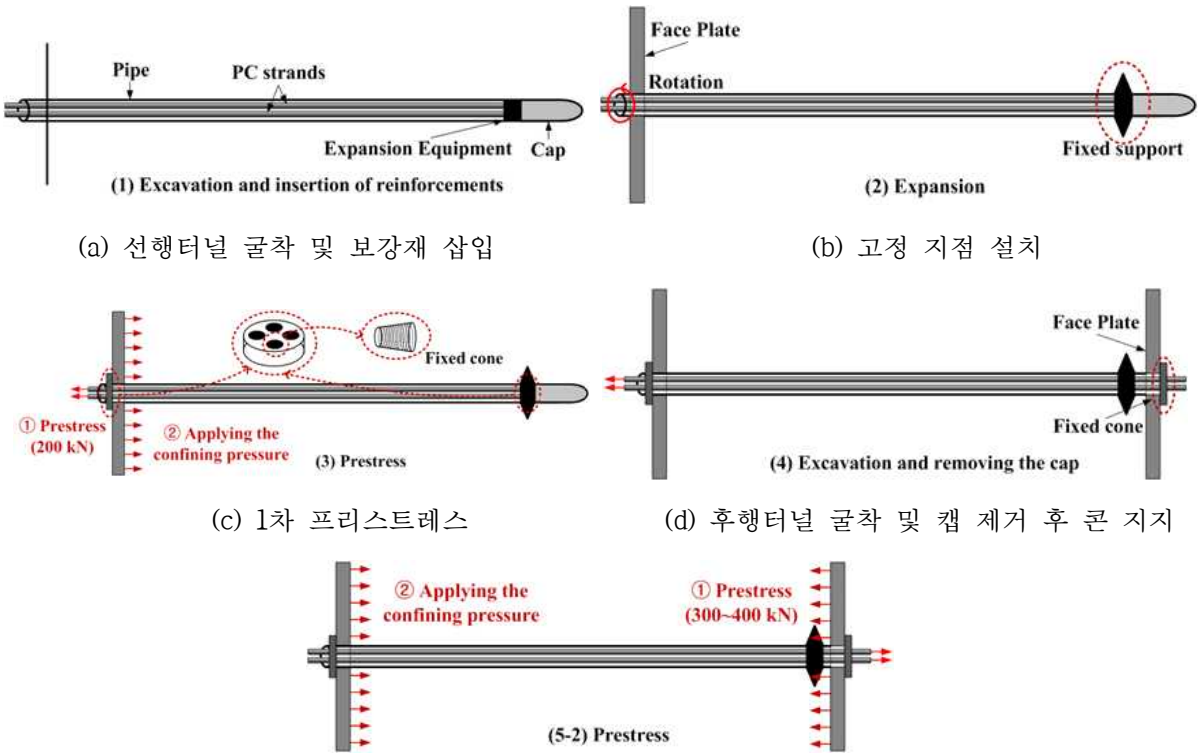
(a) 필라부 간격 4.0m　　(b) 필라부 간격 6.0m

<그림 3.1.42 필라부 간격에 따른 실내시험 케이스>

○ 필라부의 거동특성을 파악하기 위해 필라 지지구조체를 실내실험조건에서 적절히 모사할 필요가 있으며, 2차년도 단계에서 적용한 보강방법으로 무보강(숏크리트 지보), 삼방향(수평 및 연직 상부방향)으로 가압그라우팅을 실시한 필라보강 공법, 전방향으로 가압그라우팅을 실시한 공법을 적용하였음. 2차년도에서는 연구결과 필라 측벽부 프리스트레스 가압에 따른 최소주응력 증가가 필라의 안정성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타나, 당해 3차년도 연구에서는 더블 프리스트레스 공법을 제안하여 적용함.

○ 더블 프리스트레스 공법은 아래 그림과 같이 먼저 선행터널 굴착 후 보강재를 삽입함. 다음으로 선단에서 확장을 통해 선단 지지점을 확보함. 선단지지점은 철제의

확장으로 전면에서 회전을 주어 확장할 수 있도록 하였음. 그리고 난 후 1차로 프리스트레스를 가하여 지반을 안정화시킴. 다음으로 후행터널을 굴착하게 되면 캡을 제거한 후 PC강연선을 프리스트레스를 가하기 위한 전면판에 고정시킴. 그 후 2차로 프리스트레스를 가하게 됨. 따라서 선행터널을 굴착한 후에도 프리스트레스를 가하고 후행터널을 굴착한 후에도 프리스트레스를 가함으로써, 필라부의 안정성을 확보할 수 있음.



(a) 선행터널 굴착 및 보강재 삽입

(b) 고정 지점 설치

(c) 1차 프리스트레스

(d) 후행터널 굴착 및 캡 제거 후 콘 지지

(e) 2차 프리스트레스

<그림 3.1.43 필라부 보강공법>

○ 실내모형시험 장비는 필라부의 1막장을 모사한 것으로 가압그라우팅과 프리스트레스를 가할 수 있도록 모사하였고, 실험체의 폭은 600mm×600mm로 필라부를 반단면으로 하여 모사하였음(실제 필라폭 6.0m 모사, 1/5 축척 적용). 따라서 실내 모형시험은 선행터널의 측벽부를 모사한 시험과 후행터널의 측벽부를 모사한 시험으로 두 번 실시하여야 함.

○ 시험지반은 풍화토 지반으로 점착력(c)은 17kPa, 내부마찰력(ϕ)은 44 ° 로 나타났음(직접전단시험). 또한 지반의 함수비는 12%로 맞추었으며, 이때의 단위중량은 18.0kN/㎥ 로 나타났음.

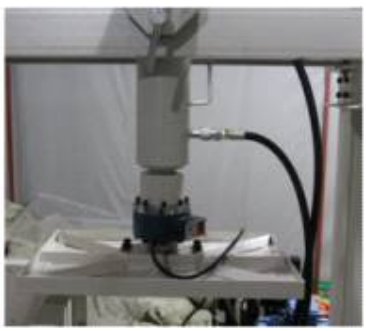



(a) 실내모형실험 장비 (b) 지반조성

<그림 3.1.44 실내모형시험 개요>

○ 하중재하 장비는 지하 30m를 모사하였으며, 축척 1/5의 축소모형 상사비율을 고려하여 재하하중을 고려하였음. 또한 각 시공단계에 따른 상재하중이 변화하므로, 이를 모사할 수 있게 상재하중 장비를 고안하였음.





(a) 상재하중 컨트롤 박스 (b) 유압펌프 (c) 유압 잭

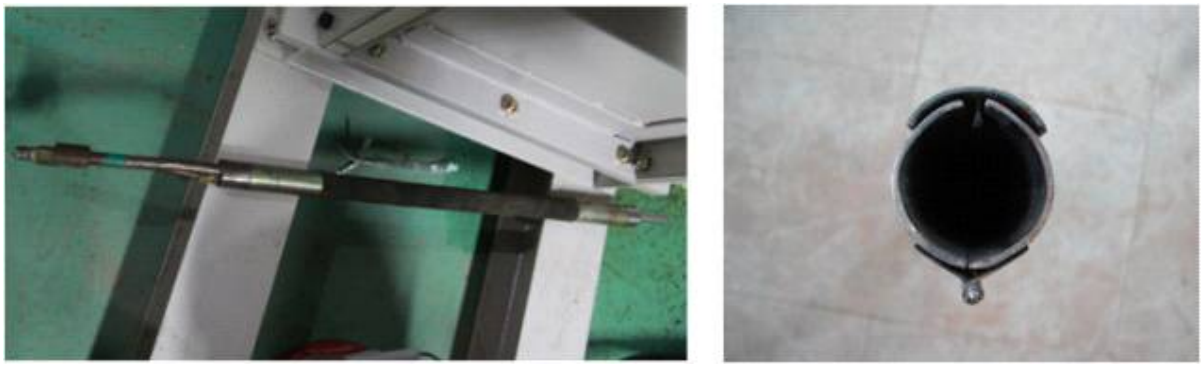
<그림 3.1.45 상재하중 장비>

○ 각 시공단계 별 필라부에서는 상재하중이 변화하게 됨. 특히 후행터널을 굴착하게 되면 필라부가 형성되면서 응력이 집중되게 됨. 따라서 각 시공단계 별 상재하중 변화를 수치해석을 통해 결정하였으며, 이를 적용하여 실내 모형시험을 실시하였음.

<표 3.1.15 초기 연직응력 대비 각 시공단계별 하중 비>

시공단계	무보강		전방향보강		삼방향집중보강		더블 프리스트레스	
	선행터널	후행터널	선행터널	후행터널	선행터널	후행터널	선행터널	후행터널
1.초기지반	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2.선행터널굴착	2.1	1.1	2.1	1.1	2.0	1.1	2.1	1.1
3.가압그라우팅 (1차 프리스트레스)	2.1	1.1	2.1	1.1	2.0	1.1	2.1	1.1
4.후행터널굴착	1.8	2.7	1.9	2.8	1.8	2.6	1.9	2.7
5.프리스트레스 (2차 프리스트레스)	1.8	2.7	1.9	2.8	1.8	2.6	1.9	2.7

○ 가압그라우팅은 천공홀 반경방향 전체로 가압이 가능한 전방향 가압그라우팅과 상부로 가압이 가능한 삼방향으로 100kPa까지 가하여 가압그라우팅을 모사하였음.



(a) 전방향 가압관 (b) 삼방향 가압관

<그림 3.1.46 가압그라우팅 개요>

○ 측벽에서는 가압과 프리스트레스가 가능하도록 변위를 줄 수 있는 장비를 고안하였음. 측벽변위 역시 수치해석을 통해 최대 5mm 까지 빼도록 하였으며, 가압그라우팅은 측벽에 전면판을 모사하여 약 0.8kN으로 가압하는 것으로 실험을 진행하였음. 전체 변위를 줄 수 있는 판은 400mm×400mm이며, 안쪽에 프리스트레스를 가하는 판은 200mm×200mm 임.

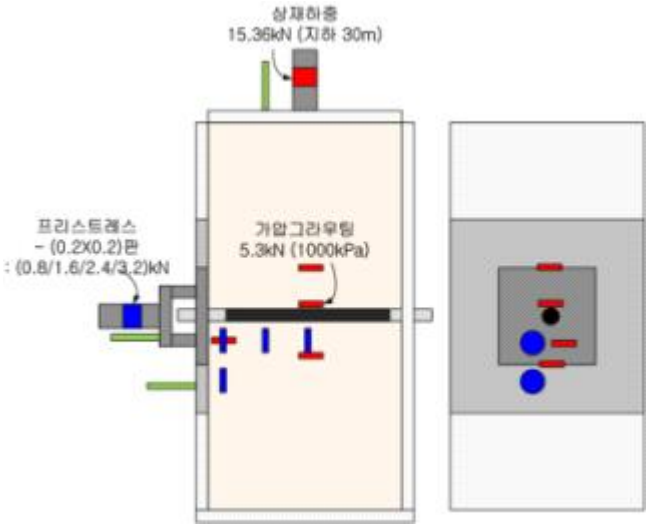


(a) 측벽 변위제어 장치 (b) 프리스트레스 장치

<그림 3.1.47 측벽 시스템의 개요>

○ 가압그라우팅에 의한 영향을 측정하기 위해 토조 내에 수평방향으로 3개의 토압계를 설치하였으며, 나머지 1개의 수평방향 토압계는 측벽에서의 최대주응력을 측정하고자 설치하였음. 굴착 및 프리스트레스에 의한 영향을 판단하기 위해 총 4개의 토압계를 연직방향으로 설치하였으며, 그 중 측벽에 설치된 토압계는 최소주응력을 측정하고자 설치하였음.

○ 상재하중 장치, 측벽 제어장치, 그리고 프리스트레스 장치에 각각 LVDT를 설치하여 변위를 측정하였음.



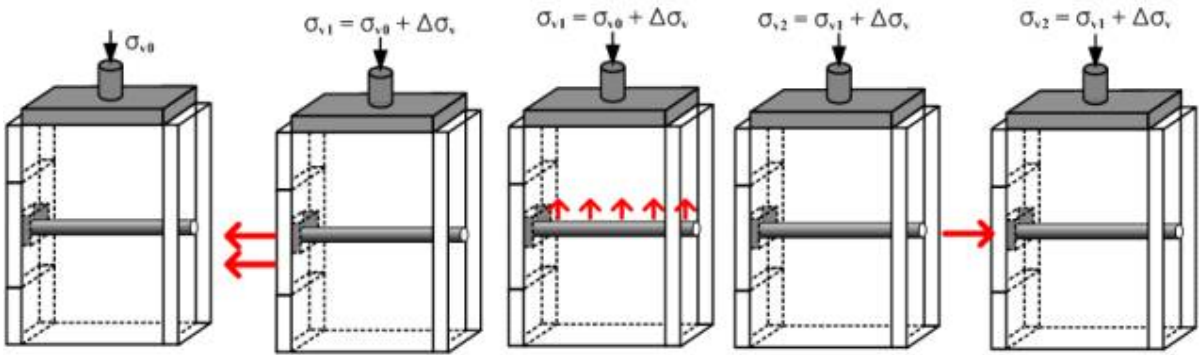
(빨강색 : 수평방향 토압계, 파랑색 : 연직방향 토압계, 초록색 : LVDT)

<그림 3.1.48 계측기 종류 및 위치>

○ 실내 모형시험 장비는 실제 필라부를 반단면만 모사하였기 때문에 선행터널 측벽부에서의 데이터와 후행터널 굴착부의 데이터를 모두 얻기 위해서는 실험을 두 번 실시하여야 함.

○ 먼저, 선행터널 측벽에서의 실험은 초기 지반상태를 모사하고 선행터널을 굴착하게 되며, 선행터널 굴착 시 굴착변위를 모사하고 상재하중을 증가시킴. 가압그라우팅 단계에서 가압을 실시하고 후행터널 굴착단계에서 수치해석을 통해 산정해놓은 상재하중을 가하게 되고 마지막으로 프리스트레스를 가하게 됨.

○ 더블 프리스트레스 공법은 모든 과정이 동일하기는 하나, 가압그라우팅을 가하는 과정에서 1차 프리스트레스를 0.8kN, 그리고 1.6kN까지 증가시키게 됨, 또한 후행터널을 굴착하고 난 후 나머지 프리스트레스 2.4kN과 3.2kN을 가하게 됨.

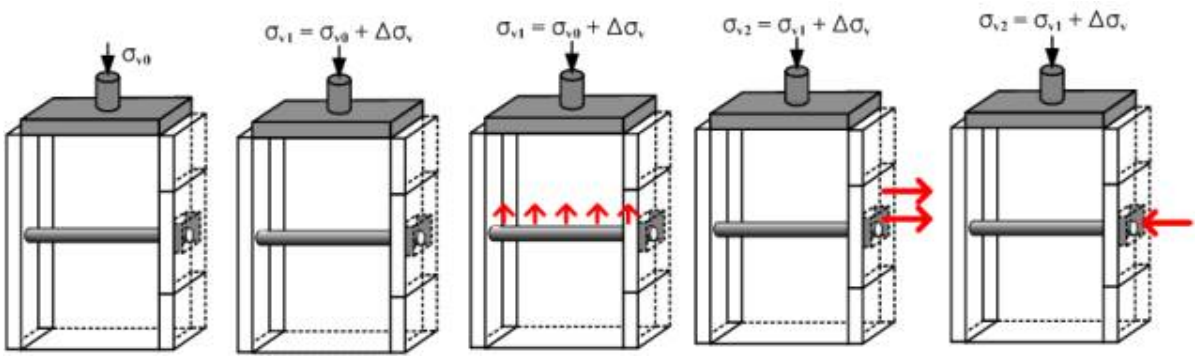


(a) 초기상태 (b) 선행터널굴착 (c) 가압그라우팅 (d) 후행터널굴착 (e) 프리스트레스

<그림 3.1.49 선행터널 측벽지점에서의 시험 방법>

○ 후행터널 측벽지점을 모사한 시험은 먼저 초기 지반상태를 모사하고 선행터널굴착에 따른 상재하중을 가하게 됨. 그 후 가압그라우팅을 실시하고, 후행터널 굴착을 모사하기 위해 상재하중을 증가시킴과 동시에 굴착변위를 준 다음, 마지막으로 프리스트레스를 가하게 됨.

○ 더블 프리스트레스 공법은 모든 과정이 동일하기는 하나, 가압그라우팅을 가하는 과정에서 1차 프리스트레스를 0.8kN, 그리고 1.6kN까지 증가시키게 됨, 또한 후행터널을 굴착하고 난 후 나머지 프리스트레스 2.4kN과 3.2kN을 가하게 됨.



(a) 초기상태 (b) 선행터널굴착 (c) 가압그라우팅 (d) 후행터널굴착 (e) 프리스트레스

<그림 3.1.50 후행터널 측벽지점에서의 시험 방법>

○ 각 시공단계 별로 선행터널 측벽 및 후행터널 측벽에서 최대 및 최소 주응력 변화 양상을 판단하였으며, 측정지점은 측벽부의 수평 및 연직 토압계를 통해서 실시하였음.

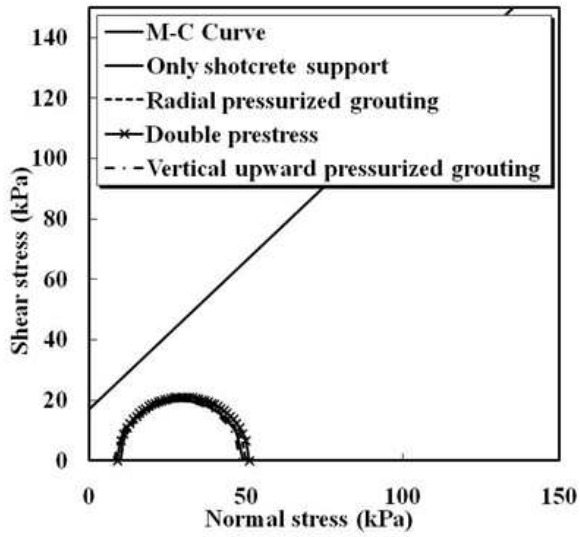
<그림 3.1.51 최대 및 최소주응력 측정지점>

○ 먼저, 선행터널 측벽에서의 실내시험 결과를 보게 되면, 초기 지반상태에서는 네 가지 경우 모두 안정화 된 상태를 보이게 되나, 선행터널을 굴착함에 따라 네 가지 케이스 모두 소성영역에 이르게 됨.

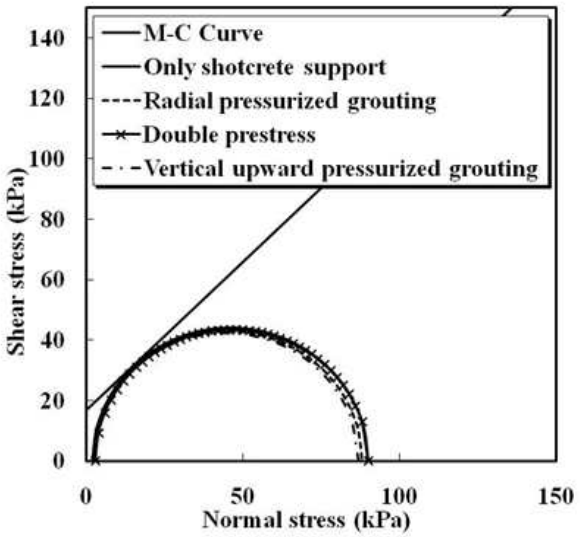
○ 그 후 가압 그라우팅을 실시하게 되면 삼방향 가압그라우팅이 전방향 가압그라우팅에 비해 최대 주응력 감소효과가 크게 나타남. 더블 프리스트레스 공법의 경우, 최대 주응력은 증가하게 되지만 최소주응력이 증가하게 되어 필라부의 안정성을 회복하게 됨.

○ 후행터널을 굴착하게 되면, 2차년도의 400mm의 실험에서는 전방향 가압그라우팅을 실시한 경우, 소성영역에 들어 왔지만 탄성영역에 머무는 것을 알 수 있음. 더블프리스트레스 공법 역시 최소주응력의 증가 효과로 인해 후행터널을 굴착한다 하더라도 필라부의 안정성을 확보하는 것을 알 수 있음.

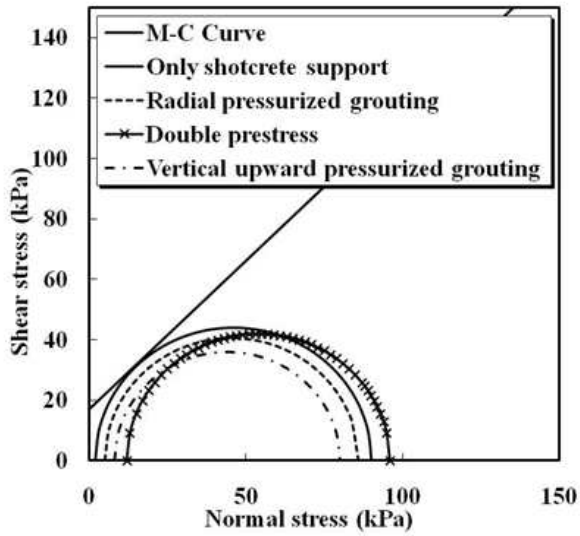
○ 프리스트레스를 가하게 되면, 전방향 가압그라우팅의 경우, 초기에는 프리스트레스에 의한 최소주응력 증가가 미비하지만 1.6kN이후부터는 효과가 확연히 나타나는 것을 알 수 있음. 삼방향 가압그라우팅의 경우 프리스트레스에 의한 효과가 초기부터 확연히 나타나는 것을 알 수 있음. 또한 더블 프리스트레스 공법의 경우 이미 초기에 1차 프리스트레스에 의해 최소주응력이 많이 증가한 상황이었으며, 추가적인 프리스트레스에 의한 효과도 확연한 것을 알 수 있음.



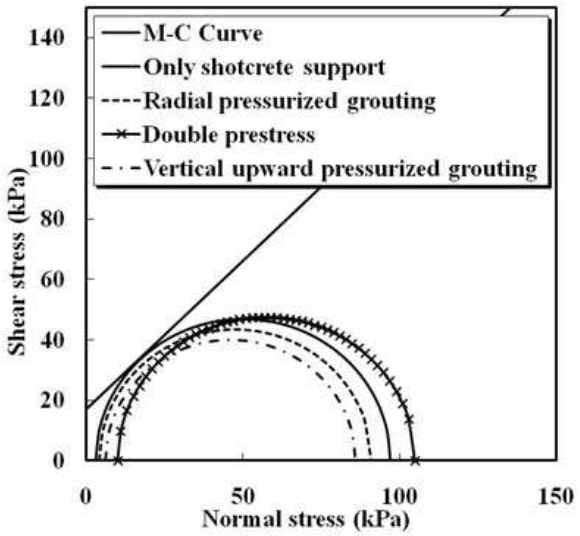
(a) 초기지반 단계



(b) 선행터널 굴착 단계

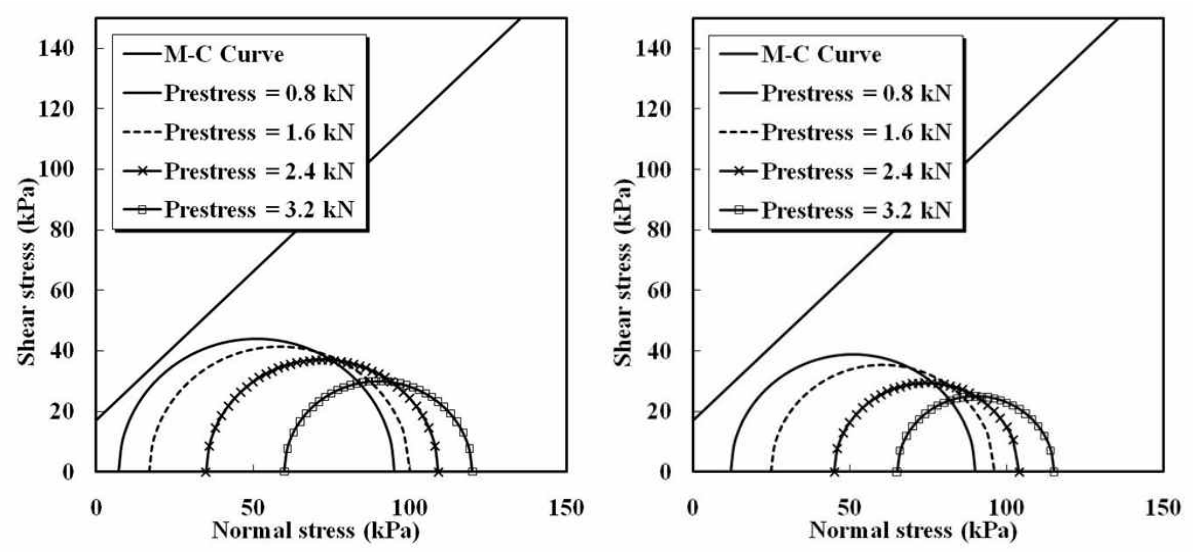


(c) 가압그라우팅 단계

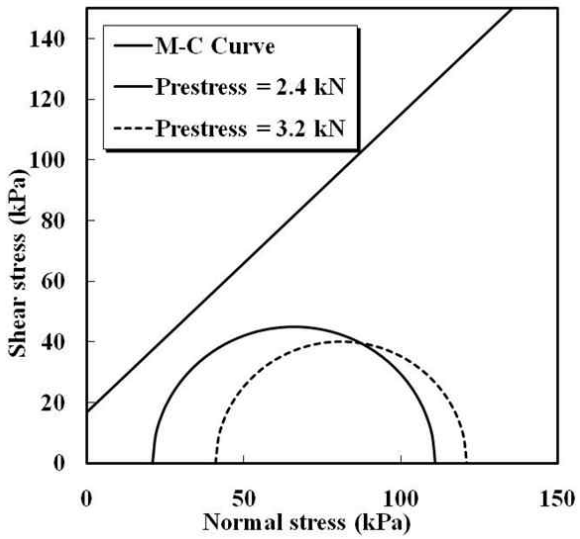


(d) 후행터널 굴착 단계

<그림 3.1.52 선행터널 측벽부에서의 실내시험 결과 - 계속>



(e) 전방향 필라 보강시 프리스트레스　　(f) 삼방향 필라 보강시 프리스트레스



(g) 더블 프리스트레스 공법

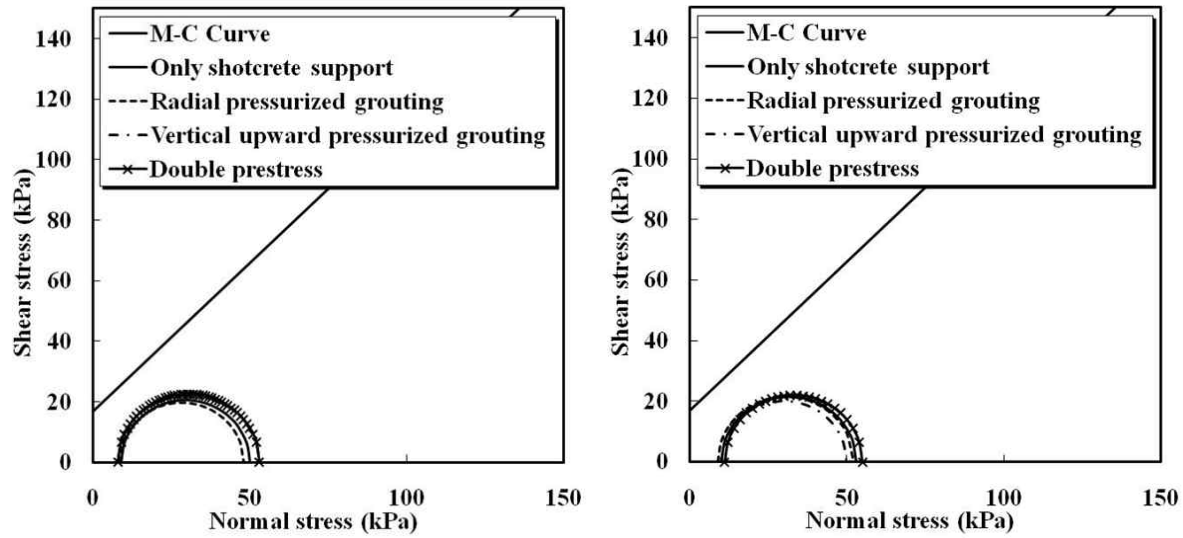
<그림 3.1.52 선행터널 측벽부에서의 실내시험 결과>

○ 후행터널 측벽에서 계측한 결과를 보게 되면, 먼저, 초기지반 단계, 선행터널 굴착 단계, 가압그라우팅 단계는 후행터널이 굴착되기 전이기 때문에 안정화된 모습을 보이게 됨.

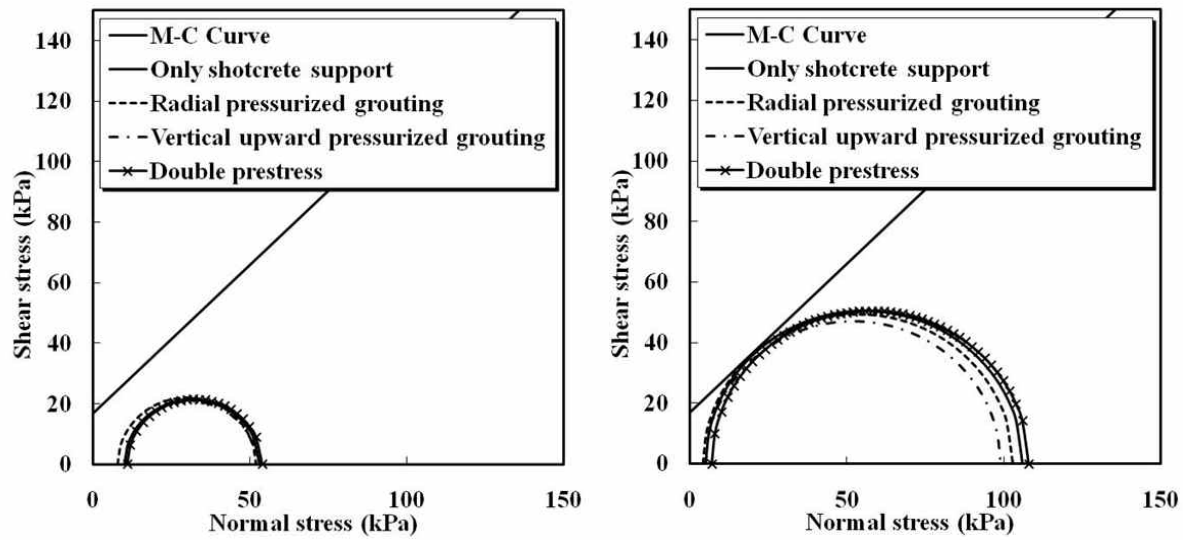
○ 하지만 후행터널을 굴착하게 되면 상당히 큰 상재하중이 필라에 작용하기 때문에 모든 케이스에서 소성영역에 들어오게 됨.

○ 이후 프리스트레스를 가하게 되면, 전방향 가압그라우팅의 경우, 초기 1.6kN까지는 최소주응력의 증가가 크지 않지만 2.4kN부터는 프리스트레스에 의한 최소주응력 증가가 큰 것을 알 수 있음. 삼방향 가압그라우팅의 경우, 1.6kN부터 최소주응력 증가가 확연히 나타나는 것을 알 수 있음. 더블프리스트레스 공법은 기존에 지반이 다

져져 있는 상태이므로 프리스트레스에 의한 효과가 초기부터 나타나는 것을 알 수 있음.

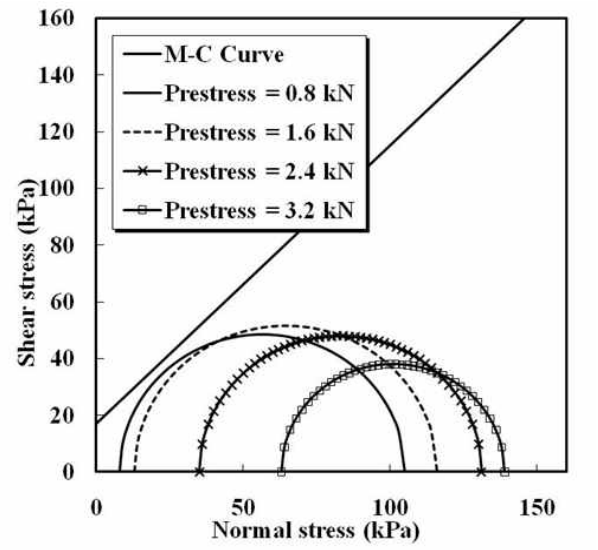


(a) 초기지반 단계 (b) 선행터널 굴착 단계

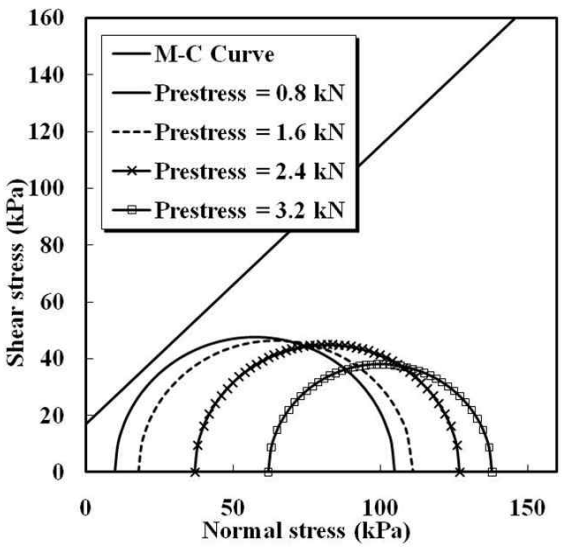


(c) 가압그라우팅 단계 (d) 후행터널 굴착 단계

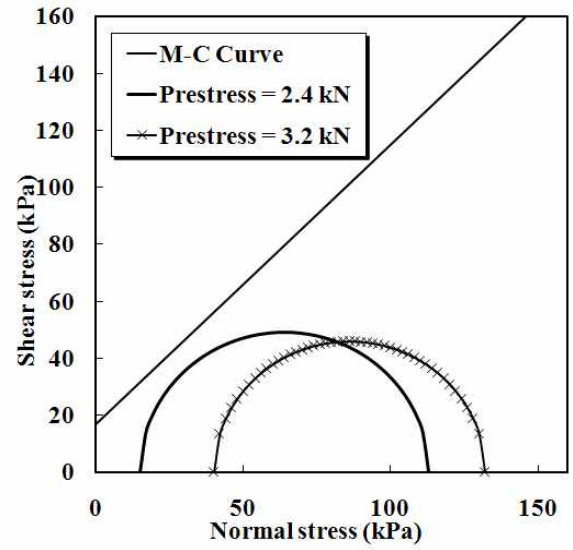
<그림 3.1.53 선행터널 측벽부에서의 실내시험 결과 - 계속>



(e) 전방향 필라 보강시 프리스트레스



(f) 삼방향 필라 보강시 프리스트레스

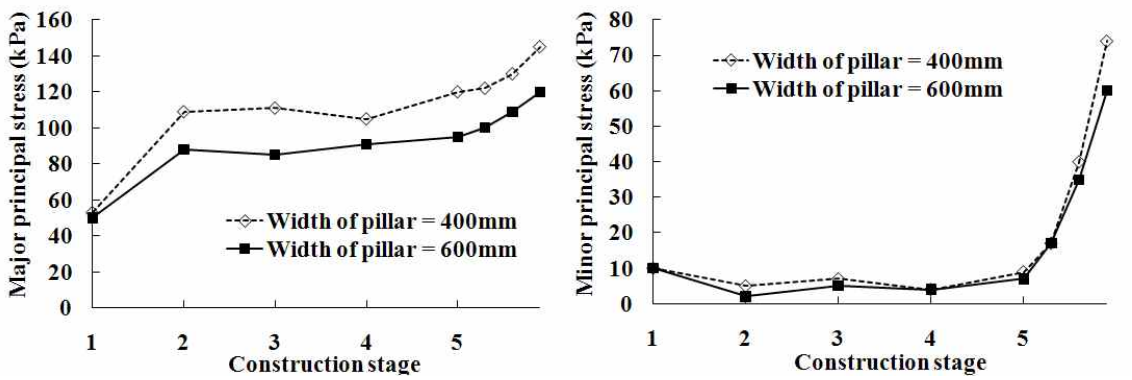


(g) 더블 프리스트레스 공법

<그림 3.1.53 선행터널 측벽부에서의 실내시험 결과>

○ <그림 3.1.54>에서 보는 것과 같이 전방향 가압그라우팅에 대해서 시험체폭이 400mm인 경우와 600mm인 경우에 대해 선행터널 측점지지점에서의 최대 및 최소 주응력 변화 양상을 비교해 보았음. 선행터널을 굴착하였을 때(시공단계 [2]), <그림 3.1.54a>에서 보는 것과 같이 시험체폭 400mm의 최대 주응력이 600mm에 비해 크게 증가하는 양상을 보이게 됨. 선행터널 굴착 단계에서 발생한 최대 주응력 차이는 마지막 프리스트레스 단계까지 계속 유지됨. 필라폭의 감소는 하중을 분배할 수 있는 면적이 줄어드는 것을 의미하며, 이로인해 발생하는 응력 집중이 400mm의 결과가 600mm에 비해 약 20%정도 나는 것을 알 수 있음.

○ <그림 3.1.54>(b)에서 보는 것과 같이 최소 주응력은 비슷한 양상을 보이나 선행터널 굴착 단계(시공단계 [2])에서 시험체폭 600mm의 최소 주응력이 더 작은 것으로 나타남. 선행터널 굴착단계에서는 시험체폭 400mm와 600mm 모두 소성영역에 들어오게 되며 이는 최대 주응력 증가에 크게 기인함. 따라서 시험체폭 600mm의 최대 주응력이 400mm의 최대 주응력에 비해 작기 때문에 최소주응력 역시 작게 나타나는 것을 알 수 있음. 프리스트레스 단계에서는 두 경우 모두 결과가 유사하게 나타남.



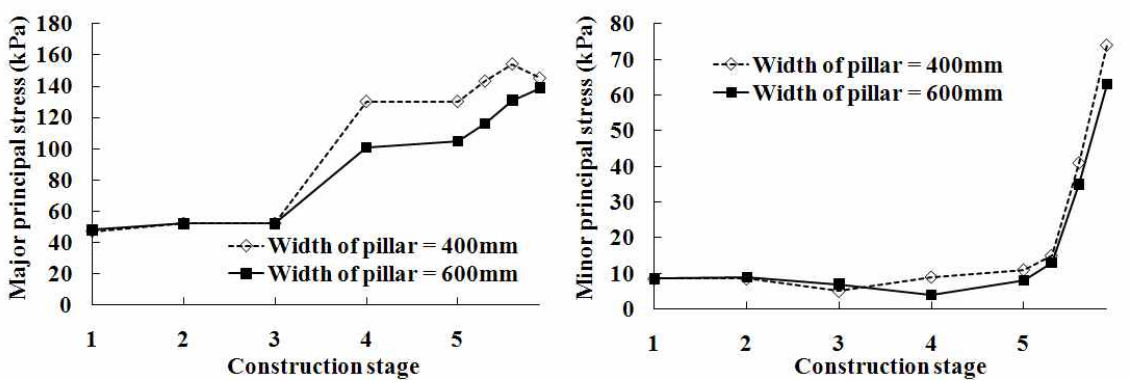
(a) 최대 주응력 (b) 최소 주응력

<그림 3.1.54 선행터널에서의 필라폭 변화 결과 분석>

○ <그림 3.1.55>는 후행터널위치에서의 필라폭 변화에 따른 주응력 분석결과를 나타며, 최대 주응력 결과를 보면 초기 지반 모사 단계, 선행터널 굴착단계, 가압 그라우팅 단계까지는 유사한 결과를 보임. 하지만 후행터널을 굴착하게 되면 필라부가 형성되면서 시공단계 중 가장 큰 응력집중 현상이 발생하게 되며, 시험체폭 400mm와 600mm의 차이 역시 차이가 크게 나타남.

○ <그림 3.1.54>(b)에서 보는 것과 같이 최소 주응력 역시 후행터널을 굴착하게 되면 시험체폭 600mm에서 더 작게 나타나는 것을 알 수 있음. 이는 앞선 선행터널 결과와 마찬가지로 소성영역이 발생하게 될 때 최소주응력은 최대 주응력과 서로 연계되기 때문인 것으로 예상됨.

○ 시험체폭 400mm와 600mm의 결과를 비교해 보았을 때, 굴착 시공 시에 각 단계별로 해당 선행 또는 후행터널 측벽 필라부에서 최대 주응력 증가량이 크게 나타났음. 또한 굴착 후 발생한 두 400mm와 600mm 간의 최대주응력 차이가 최종 굴착 단계까지 유지되는 것으로 나타남.



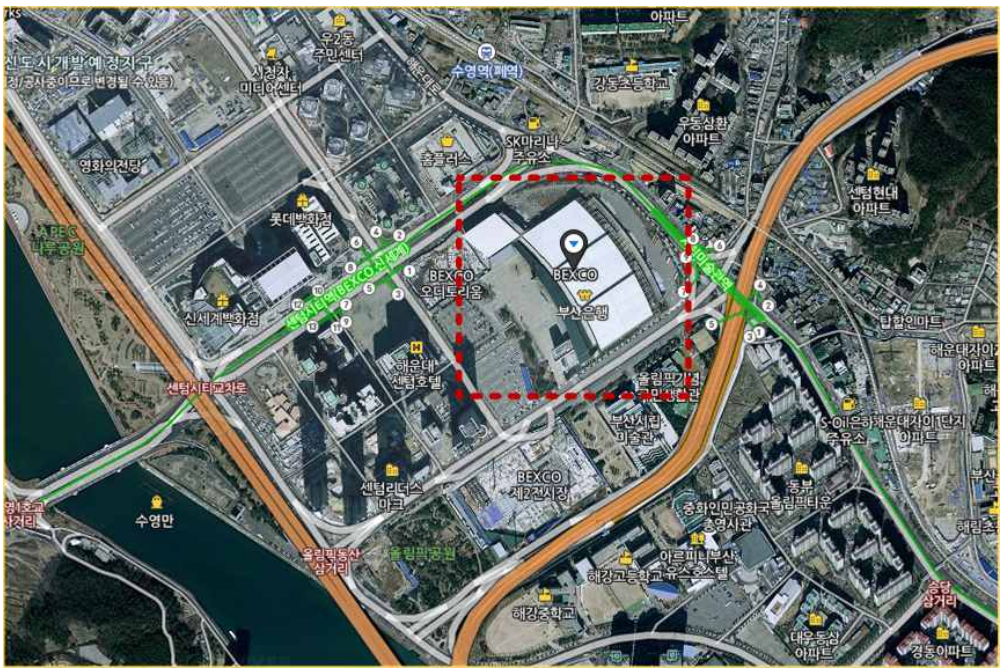
(a) 최대 주응력 (b)최소 주응력

<그림 3.1.55 후행터널에서의 필라폭 변화 결과 분석>

(2) 수치해석 방법을 통한 필라형상과 보강구조

① 개 요

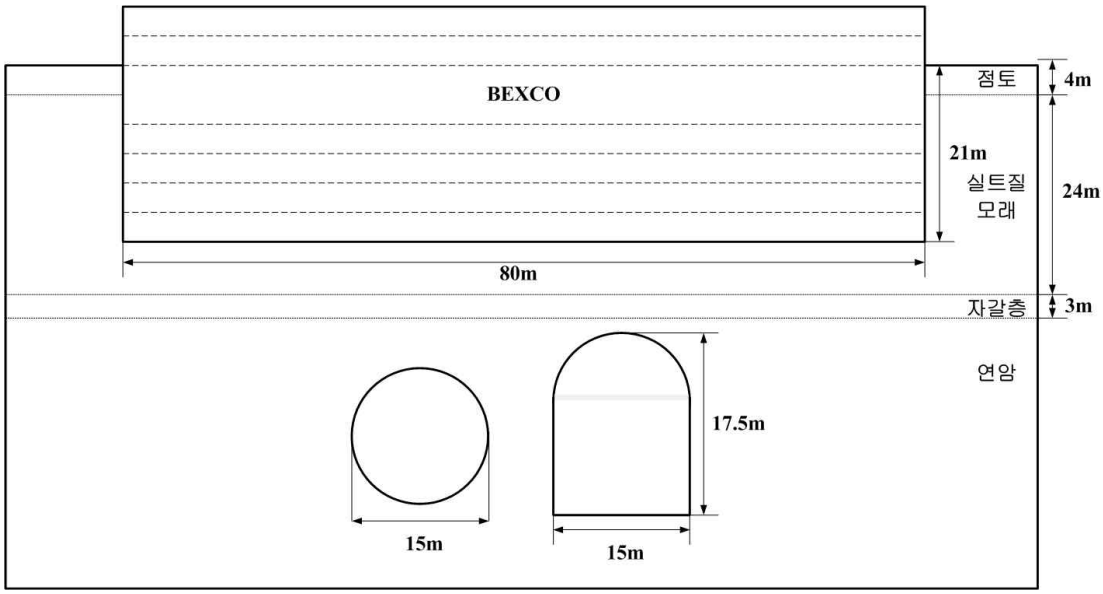
○ 본 연구에서는 필라부 안정성에 영향을 미칠 수 있는 여러 가지 영향인자들의 검토를 위하여, 임의의 실제 시범위치를 선정하여 필라지지구조체의 형상과 보강구조에 따라 안정성을 판단하기 위해 수치해석을 수행하였음. 적용된 시범 검토위치는 매년 우기시 집중호우에 따라 침수피해 이력이 있는 지역으로 부산광역시 해운대구 센텀시티지구를 선정하였으며, 해당 지역의 위치도를 다음 그림과 같음.



<그림 3.1.56 부산시 센텀시티 지역 위치도>

○ 해석위치의 기존 시설물 조사결과 폭 약 80m, 지표하 약 20m위치에 기초가 존재하는 구조물로서 부산시 사업시행 주관 ‘센텀시티 저류지 설치사업 기본 및 실시설계(2010)’ 자료를 기초로 하여 지반조사결과를 반영하였음.

○ 해당 위치의 지층조사 결과에 의하면 지표로부터 점토, 실트질 모래, 자갈층, 연암으로 구성되어 있으며, 지하저류공동은 연암지반에서 시공되는 것으로 설정하였으며 대상지반의 물성은 <표 3.1.16>과 같음. 검토를 위한 지하저류공동은 상부와의 이격거리는 5.0m로, 필라부 간격은 4.0m로 설정하여 수치해석을 수행하였음.



<그림 3.1.57 해석 단면>

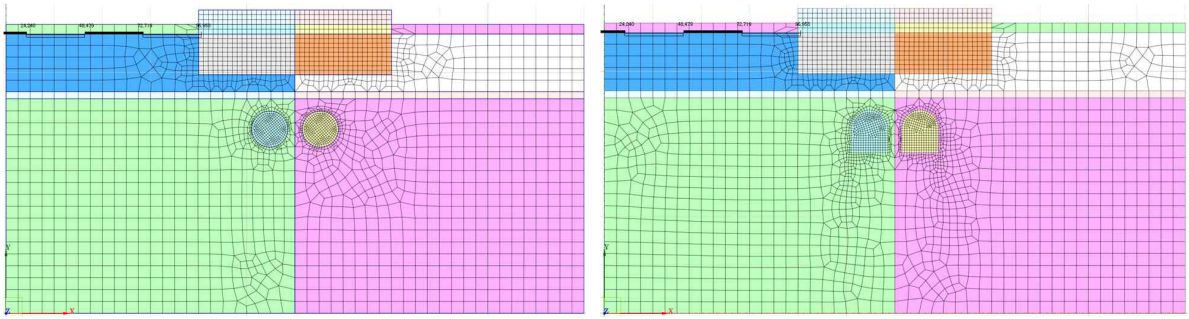
○ 해석은 FDM기반의 터널해석 전문프로그램인 MIDAS-GTS를 사용하여 수행하였으며, 지보재의 주요 설계정수는 숏크리트(두께 150mm, 연성 : 5GPa, 강성 : 15GPa), 타이로드 (간격 2.0m, E = 200GPa), 가압그리우팅 응력은 전방향 및 상방향 모두 1000kPa을 적용하였음. 또한 프리스트레스는 200kN 하중을 적용하였고, 더블스트레스 공법 적용 시에는 선행 및 후행 굴착단계에 각각 100kN, 200kN을 적용함.

<표 3.1.16 대상지반 물성치>

구분		대표 N치	단위중량 (kN/m^3)	변형계수 (MPa)	점착력 (kPa)	내부마찰각(°)	포아송비
퇴적층	점토	7/30	17	9	60	0	0.35
	실트	12/30	17	9	25	20	0.35
	자갈	47/30	19	50	0	38	0.35
연암			24	1,800	220	36	0.26

② 필라 형상, 측압계수에 따른 응력검토

○ 원형터널과 마제형 터널에 대해 해석을 실시하였으며, 지반의 측압계수(K_0)에 의한 영향을 고려하기 위해 토압계수를 0.5, 1.0, 2.0, 3.0으로 변화시켜가며 해석을 실시하였음.

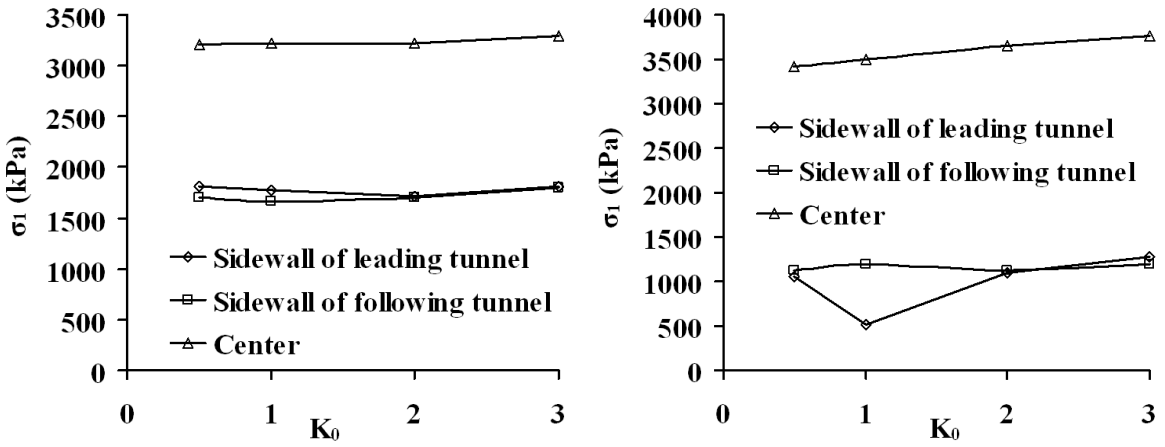


(a) 원형터널 메쉬 (b) 마제형 터널 메쉬

<그림 3.1.58 해석모델 메쉬>

○ 측압계수와 단면형상에 따른 필라부에서의 최대주응력 결과를 보면, 전체적으로 측압계수 증가에 따른 최대주응력 증가변화는 작은 것으로 나타남. 단면형상에 따른 응력상태는 필라부 중앙위치에서는 원형터널의 경우가 마제형 터널에 비해 상대적으로 다소 작은 최대주응력의 값을 보이나, 상행 및 하행 측벽 위치에서의 최대 주응력은 오히려 원형 터널이 마제형터널 경우에 비해 약 1.7배정도 더 크게 나타남.

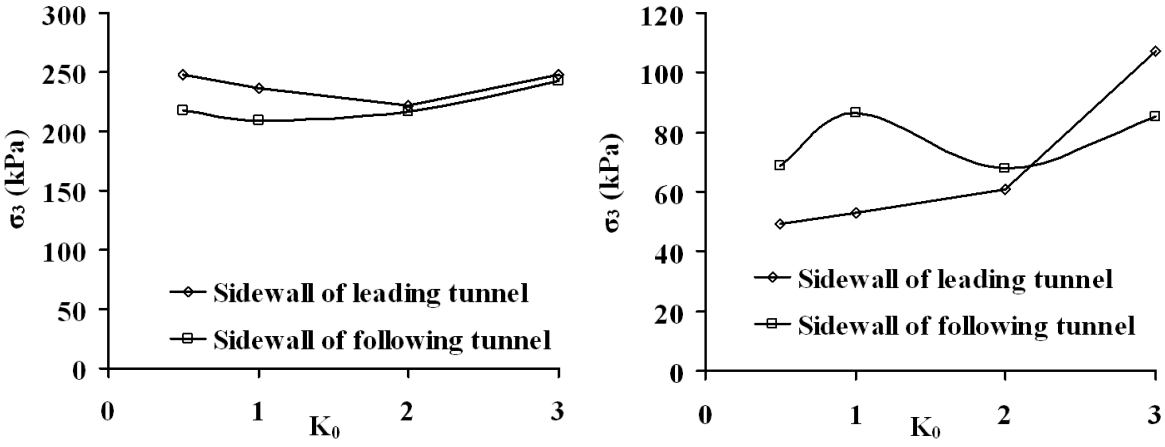
(a) 측정 지점



(b) 원형터널 (c) 마제형 터널

<그림 3.1.59 최대주응력 변화>

○ 측압계수에 따른 최소주응력은 원형터널의 경우 큰 변화가 없고, 마제형의 경우는 증가경향은 있으나 일관적인 양상은 보이지 않음. 최소 주응력의 변화양상에서는 원형터널이 마제형 터널에 비해 최소 주응력이 약 2배 이상 크게 나타나 상대적으로 보다 안정적인 것인 것으로 평가됨.



(a) 원형터널 (b) 마제형 터널

<그림 3.1.60 최소주응력 변화>

③ 시범 위치에서의 보강구조에 따른 필라지지구조체 응력 검토

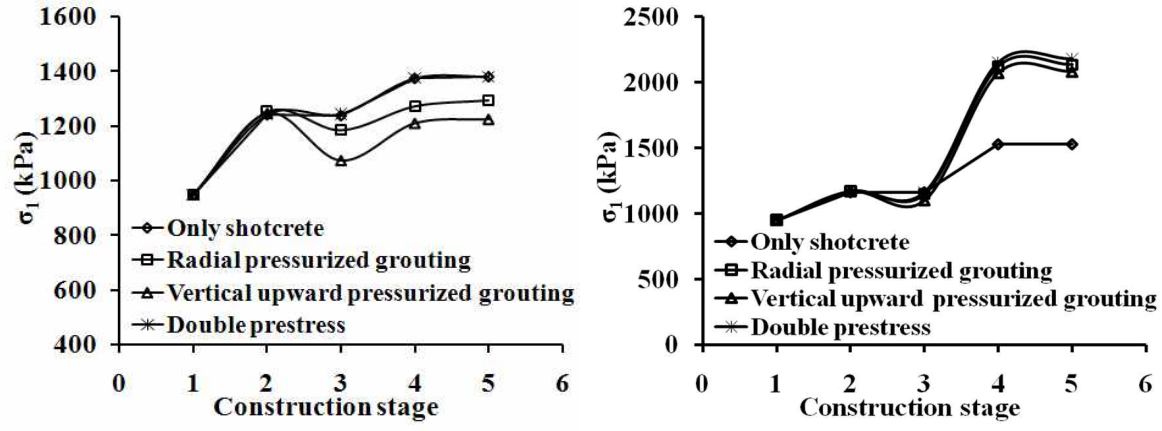
○ 부산지역 임의 실제 현장을 선정하여 터널부 지보방법에 있어서 우선 숏크리트만을 적용한 경우, 전방향 가압그라우팅을 통한 필라부 보강공법 적용, 삼방향 가압그라우팅 적용을 통한 필라부 보강공법, 그리고 더블 프리스트레스 공법을 적용 등 4가지 보강구조에 따른 필라지지 구조체의 응력검토를 위하여 수치해석을 수행하였음.

○ 해석단계는 단계적으로 초기 지중응력상태[1], 선행터널 굴착 단계[2], 가압그라우팅(또는 선행터널측에서의 1차 프리스트레스) 단계[3], 후행터널 굴착[4] 이후, 최종적으로 프리스트레스 가압 단계[5]로 구분하여 필라부 주응력 변화을 분석하였음.

○ 선행터널 및 후행터널의 측벽에서 최대 주응력을 검토하였으며, 이에 대한 결과는 <그림 3.1.61>과 같음. 먼저, 선행터널 측정지점에서 결과를 보면, 선행터널을 굴착하게 되면 모든 공법에서 최대 주응력이 급격히 증가하게 됨. 하지만 전방향 가압그라우팅과 삼방향 가압그라우팅은 최대 주응력 감소효과가 나타남. 특히 삼방향 가압그라우팅에서 최대 주응력 감소효과가 뚜렷한 것으로 나타남. 더블프리스트레스 공법은 숏크리트 지보와 함께 최대주응력의 변화가 크게 나타나지 않음.

○ 후행터널 측벽에서의 결과를 보게 되면, 초기 지중응력상태 [1], 선행터널 굴착 단계 [2], 가압그라우팅(또는 1차 프리스트레스) 단계 [3]에서는 원지반 상태이기 때문에 최대 주응력의 변화가 크지 않으나, 후행터널 굴착 [4]과 프리스트레스 단계[5]에서 최대 주응력이 크게 증가하는 양상을 보임. 숏크리트 지보의 경우 최소주응력이 작기 때문에 최대 주응력이 다른 공법에 비해 작게 나타나는 것으로 보임.

○ 선행 및 후행 터널측 필라부 모두 후행터널 굴착단계 이후에서는 최대 주응력은 프리스트레스를 가하는 단계에서도 영향이 없이 계속 유지되는 것으로 나타났음.



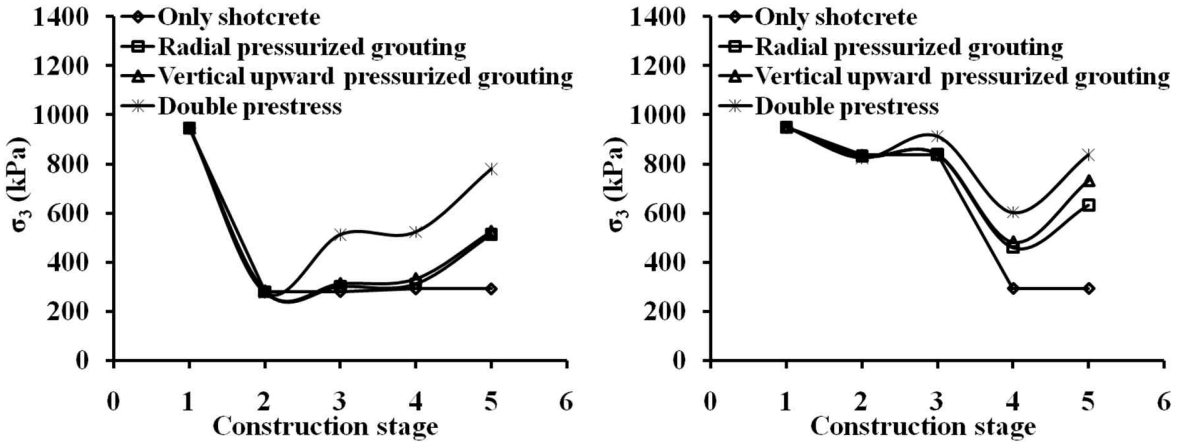
(a) 선행터널 측정지점 (b) 후행터널 측정지점

<그림 3.1.61 최대 주응력>

(1: 초기 지중응력상태, 2: 선행터널 굴착 단계, 3:가압그라우팅 / 1차프리스트레스 단계, 4: 후행터널 굴착 단계, 5: 프리스트레스 단계)

○ 선행터널 및 후행터널의 측벽에서 최소 주응력을 측정하였으며, 이에 대한 결과는 <그림 3.1.62>와 같음. 선행터널 측벽에서의 결과를 보면, 선행터널 굴착 후 모든 공법에서 최소 주응력이 급격하게 감소하게 됨. 그 후 더블프리스트레스 공법은 1차 프리스트레스에 의해 프리스트레스에 의한 최소 주응력 증가양상이 뚜렷이 나타남.

○ 후행터널 측벽에서의 응력변화 결과 결과를 보면, 최종 프리스트레스에 의해 더블프리스트레스, 삼방향 가압그라우팅, 전방향 가압그라우팅 순서로 최소주응력이 증가하는 양상을 보였음.



(a) 선행터널 측정지점 (b) 후행터널 측정지점

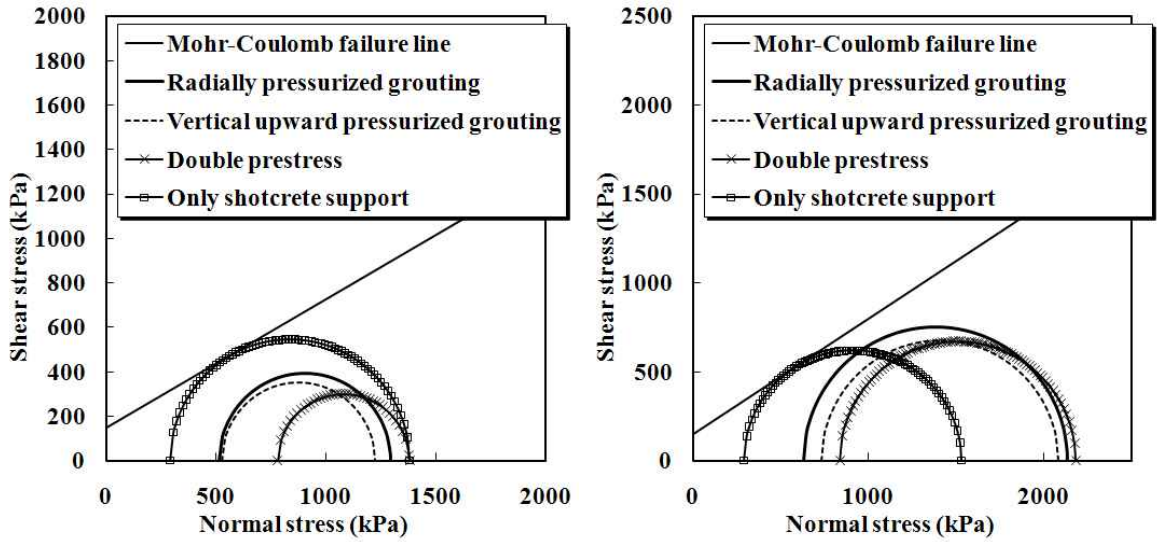
<그림 3.1.62 최소 주응력>

○ 전체적으로 보강구조에 따른 수치해석 결과에 의하면,

- 최대주응력의 경우 굴착에 의한 필라부 지중응력은 선행 및 후행터널측의 각 해당 시공단계별로 급격히 증가하였으나, 프리스트레스 가압에 따른 영향은 비교적 적음.
- 최소주응력의 경우는 굴착에 따라 응력 감소가 급격히 발생하는 것으로 나타났으며, 또한 최대주응력과 다르게 선행 또는 후행 터널측 모두 각 해당 시공단계별로 프리스트레스를 가할 경우 횡방향 최소주응력의 증가 양상이 뚜렷이 나타남. 그러므로 프리스트레스를 2차 시행한 더블스트레스공법의 효과가 가장 큰 것으로 나타남.

○ 해석 최종단계에서의 응력상태를 선행터널 및 후행터널 각 측벽에서 측정하여 <그림 3.1.63>과 같이 Morh-Coulomb 파괴기준을 적용하여 분석하였음. 숏크리트만 지보하였을 경우 모두 소성영역에 위치하는 것으로 나타남. 그러나 더블 프리스트레스 공법 적용시의 경우는 최대 주응력은 다소 증가하는 반면에 프리스트레스에 의

한 최소주응력 증가가 확연하여 나나타 가장 안정적인 상태로 변화하는 것으로 나나남. 전방향 가압그라우팅보다 삼방향의 가압그라우팅이 최대 주응력 감소효과가 보다 큰 것으로 나타났으며, 두 공법 모두 탄성영역에 속해 안정적인 양상을 보임.



(a) 선행터널 측정지점 (b) 후행터널 측정지점

<그림 3.1.63 최종단계에서의 응력상태>

나. 구조물 손상도 평가를 통한 개착부 굴착공법 선정 및 보강공법 기술

(1) 안정성 취약구간 조사를 위한 실내모형실험, 수치해석과 손상도 평가

① 시공단계를 고려한 실내모형실험

○ 실내 축소모형실험을 통하여 사질토 지반에서의 지표침하곡선을 산정하기 위하여 80×80×40cm(가로×높이×폭) 크기의 모형 토조를 다음 그림과 같이 제작하였음. 굴착으로 인한 지표의 변형 거동을 파악하기 위하여 토조 우측에 흙막이벽의 단계별 굴착을 모사하기 위한 10개의 벽체 세그먼트를 배치하였고, 토조의 하부는 터널 굴착을 모사하기 위해 Trap-door 5개를 구분하여 설치함. 총 15단계에 걸쳐 단계적으로 벽체에 변위를 발생시킴. 토조 내 지반 조성은 주문진 규사를 사용하였으며, 일정한 높이마다 다짐하여 일정한 건조단위중량($\gamma_d = 14 \pm 0.2 kN/m^3$)을 유지시킴.

○ 우측 벽체와 하부 Trap-door의 거동의 정밀한 계측을 위해 LVDT(Midori, LP-50F)와 로드셀(Bongshin, DBCM-50)을 계측기기로 사용함. 계측 데이터의 수집과 분석을 위해 다음 그림과 같이 데이터 로거(Kyowa, UCAM-550A)와 소프트웨어(Kyowa, DCS-100A)를 이용함.



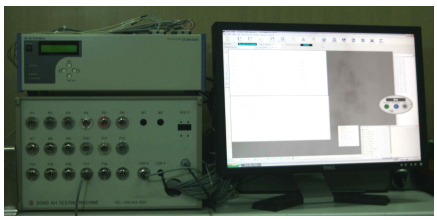
(a) 토조 전경



(b) 토조 우측 벽체



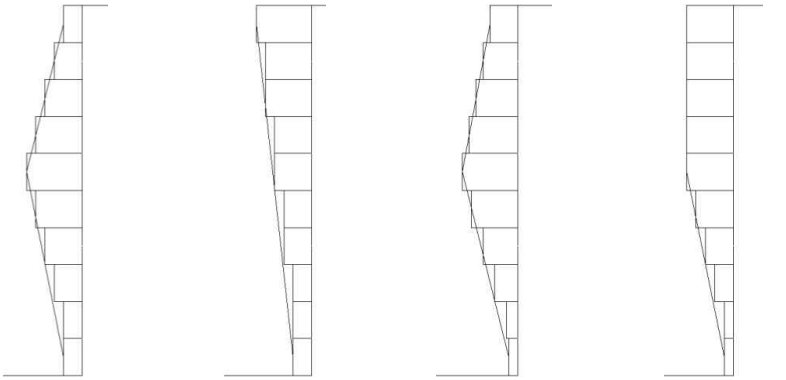
(c) 토조 하부 Trap-door



(d) 데이터로거 및 컨트롤박스

<그림 3.1.64 축소 모형 토조 >

○ 윤중만(2008)이 제시한 지보형식에 따른 벽체의 변형을 모형 토조에 적용하기 위해, 토조 우측 벽체의 변형량을 다음 그림과 같이 10단계로 나누어 일반화함.



(a)앵커 (b)캔틸레버 (c)상부고정앵커 (d)스트러트

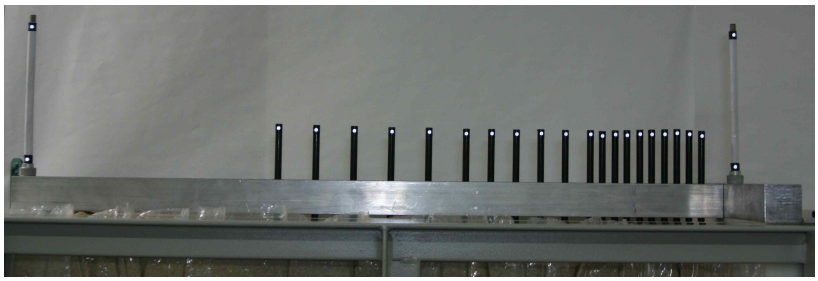
<그림 3.1.65 일반화한 지보형식에 따른 흙막이 벽체의 변형>

○ 시공단계를 모사하기 위해 구분한 벽체를 상부부터 모형 지반이 이완되는 방향으로 이동함. 총 벽체 변형량이 36mm로 동일하도록 4가지의 지보형식을 10단계로 나누어 모사하였으며, 예를 들어 앵커를 모사한 벽체 변형 순서는 다음 표와 같음. 각각의 지보형식이 최종적으로 <그림 3.1.65>와 같은 벽체의 변형 양상을 나타내도록 함. 10단계에 이르는 벽체의 변형 이후에, Trap-door를 순서대로 하부로 이동시켜 지반의 이완을 유도함. 변형량은 각 2mm로 고정하였으며, <표 3.1.17>과 같이 시공단계에 맞추어 벽체에 변위를 가함.

<표 3.1.17 지보형식에 대한 시공단계별 각 굴착단계 변위량 - 앵커> (단위:mm)

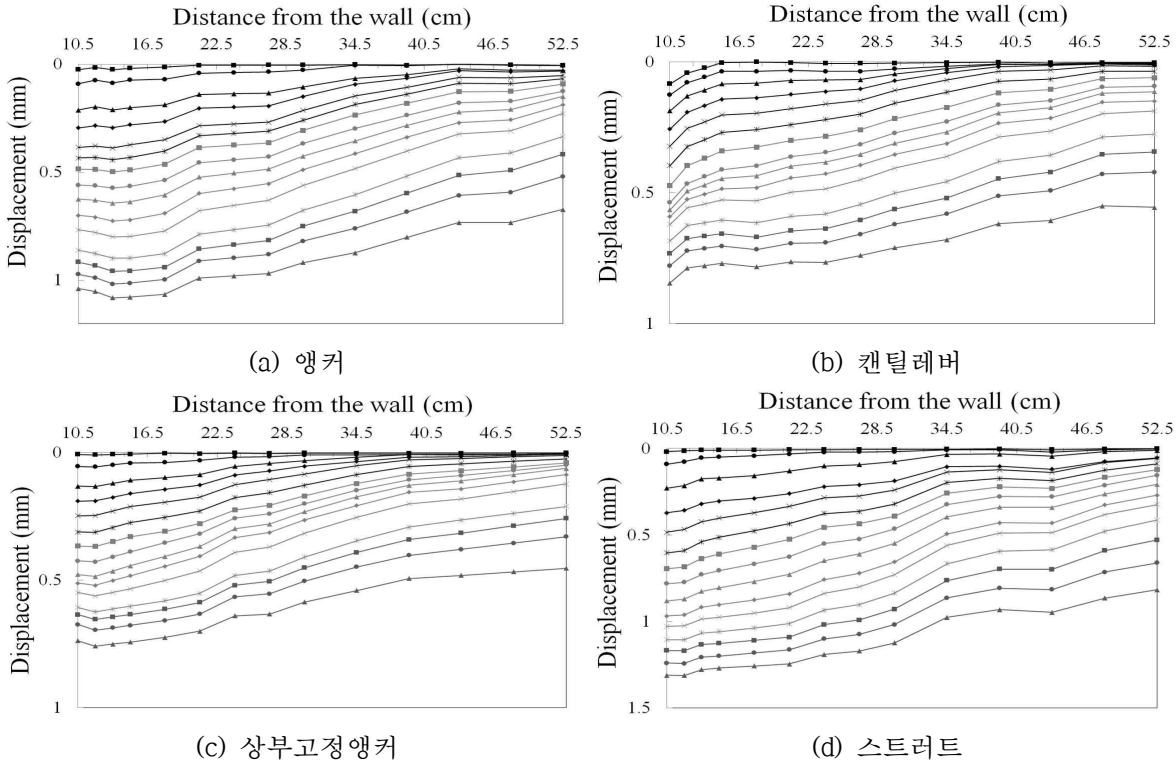
Step / 벽체	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Wall 1	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0	0	0					
Wall 2		1.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1					
Wall 3			2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2					
Wall 4				2.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4					
Wall 5					3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6					
Wall 6						2.5	0.7	0.5	0.7	0.6					
Wall 7							2	0.7	0.7	0.6					
Wall 8								1.5	0.8	0.7					
Wall 9									1	1					
Wall 10										2					
Trapdoor 1											2				
Trapdoor 2												2			
Trapdoor 3													2		
Trapdoor 4														2	
Trapdoor 5															2

○ 벽체의 변형으로 인한 지표침하곡선을 산정하기 위해서 DSLR(Canon, EOS 400D)과 사진측량 소프트웨어(Photomodeler PRO 5)를 사용함. 다음 그림과 같이 지표면 상부에 측점이 부착된 경량 재질의 플라스틱봉을 배치하여 침하량을 가하는 step마다 3장의 사진을 촬영함. 소프트웨어를 통해 각각의 사진 위치에서의 빛의 교차점을 계산하여 지표의 침하를 산출함.



<그림 3.1.66 사진측량을 통한 지표면 침하량 산정 - 정면>

○ 각 공법별로 벽체 변형을 적용했을 때, 사질토 지표면의 침하 양상은 다음 그림과 같이 나타남. 공통적으로 벽체 부근에서 지표가 최대 침하를 나타냈으며, 트랩도어의 변형이 발생하는 11단계 이후부터 벽체 부근의 침하량보다는 벽체와 먼 부분의 침하량이 다소 크게 발생함.

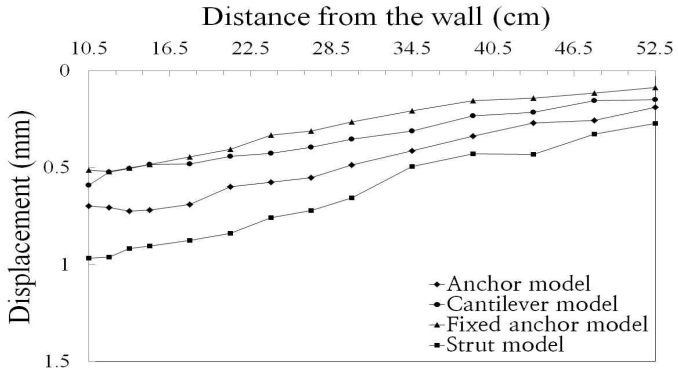


(a) 앵커 (b) 캔틸레버

(c) 상부고정앵커 (d) 스트러트

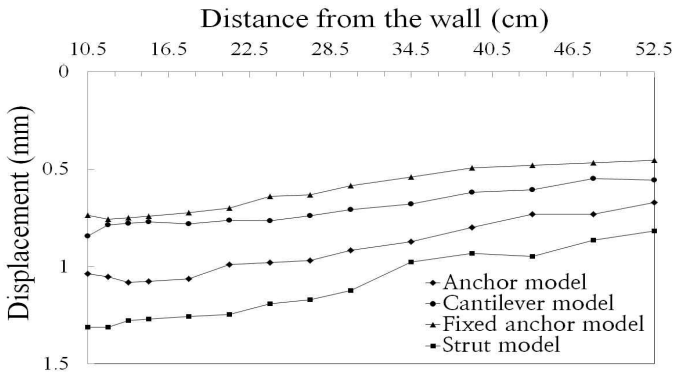
<그림 3.1.67 시공단계별 지표 침하 양상>

○ 우측 벽체의 변형만 적용하였을 때(step 1-step 10), 최종 침하량 분포는 <그림 3.1.68>과 같음. 공통적으로 벽체와의 거리가 멀어질수록 침하량이 감소되는 경향을 보였으며, 전반적인 침하의 기울기는 동일한 양상을 가짐을 확인함. 절대적인 침하량은 스트러트 모델이 제일 크게 나타났음.



<그림 3.1.68 우측 벽체의 변형만 적용한 공법별 지표 침하량>

○ 우측 벽체의 변형과 트랩도어의 변형을 적용하였을 때(step 1-step 15), 최종 침하량 분포는 다음 그림과 같음. 공통적으로 트랩도어의 변형을 통해 나타났던 부등침하 기울기가 감소하는 경향을 보임. 침하의 형태는 거의 변함이 없으나 전체적으로 기울기가 감소함으로써 벽체와의 거리와 관계없이 일정한 침하량을 가짐.

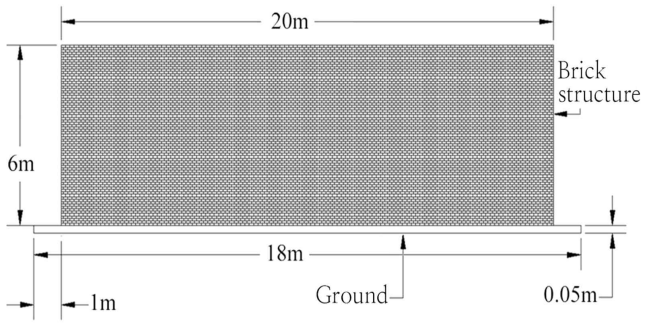


<그림 3.1.69 우측 벽체와 트랩도어의 변형을 적용한 공법별 지표 침하량>

② 시공단계를 고려한 수치해석

○ 구조물의 손상도 파악을 위하여 구조물 변형에 대한 수치해석을 실시함. 실내모형토조에서 산출한 지표 침하 양상을 수치해석상 지반에 그대로 도입하여 구조물의 변형을 파악함. 변형에 취약한 조적식 구조물을 모델링하였으며, 블록과 그에 따른 조인트의 물성을 대입하여 해석하기 위해 목적에 맞는 개별 요소법 프로그램(Itasca, UDEC4.0)을 사용함.

○ <그림 3.1.70>과 같이 모델링 하였으며, 지표 침하량을 모사하기 위해 지반을 5cm로 조성함. <표 3.1.18>과 같이 물성치를 부여하여 해석함.



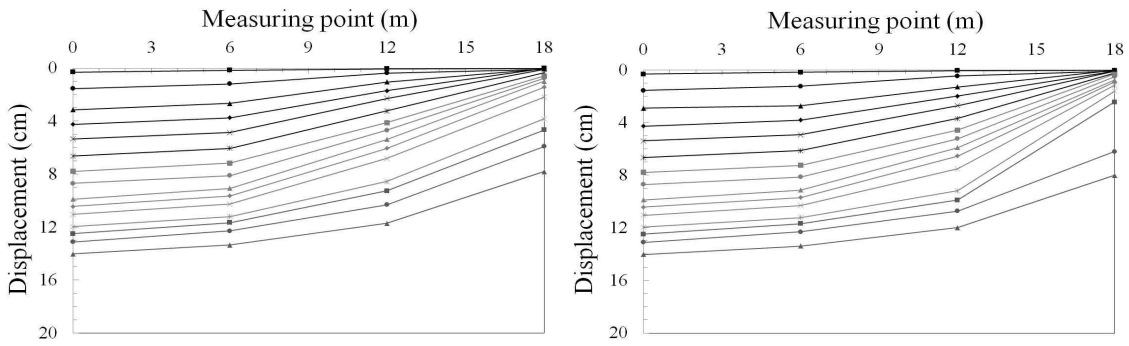
<그림 3.1.70 수치해석 모델링>

<표 3.1.18 수치해석 물성치>

Brick structure	탄성계수 (MPa)	10.3e3
	단위중량 (kN/m^3)	19.17
	포아송비 (ν)	0.2
	벽돌크기 (mm)	400×200
Ground	탄성계수 (MPa)	17.2
	포아송비 (ν)	0.34

○ 구조물의 수치해석은 총 120개의 모델에 대해 수행됨. 시공단계별 지표 침하 각각의 양상을 수치해석상 지반에 적용하여 구조물의 침하를 확인함. 벽체와의 이격 거리에 따른 구조물 변형 양상을 파악하기 위해 벽체와의 거리 0m, 0.5m에 따른 수치해석을 실시함. 축소모형실험에서 수평변위는 측정되지 않으므로 터널 굴착에 의한 최대 침하량과 최대 수평변위의 관계에 대한 연구(손무락 등, 2009)를 참고하여 수직변위의 35%를 수평변위로 적용함.

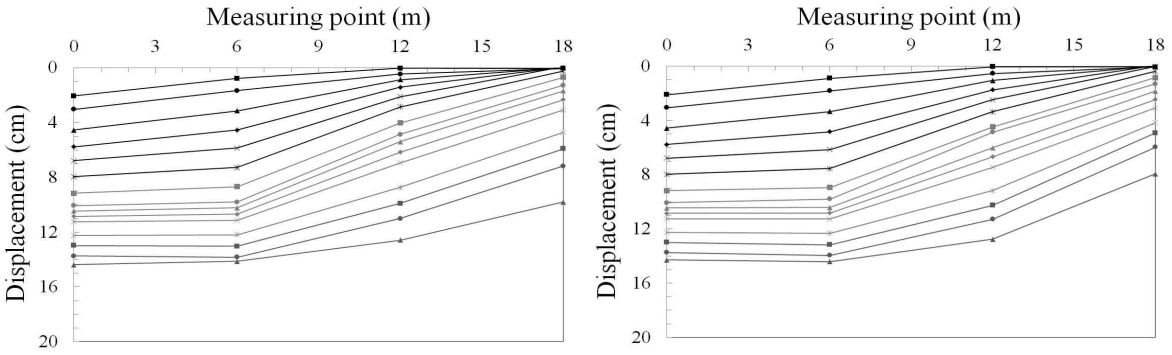
○ 이격거리에 따른 시공단계별 구조물 침하량 양상을 그래프로 표현하고자, 구조물 상부(H=6m) 4부분의 침하량을 산출함(0m, 6m, 12m, 18m). <그림 3.1.71>은 앵커를 모사한 지표 침하량을 입력하였을 때 구조물 침하를 나타냄. 트랩도어의 변형으로 인하여 기존 변형량에 비해 급격한 침하가 발생함을 확인함. 앵커의 경우, 이격거리에 따른 최종 구조물 침하량은 큰 차이를 보이지 않음.



(a) 이격거리 0.0m (b) 이격거리 0.5m

<그림 3.1.71 구조물 침하량 - 앵커>

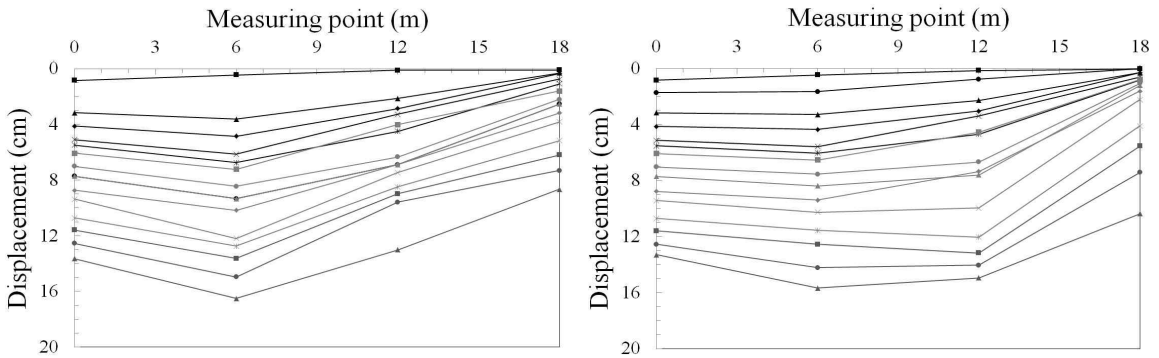
○ 다음 그림은 캔틸레버를 모사한 지표 침하량을 입력하였을 때 구조물 침하를 나타냄. 트랩도어의 변형으로 인하여 기존 변형량에 비해 급격한 침하가 발생함을 확인함. 캔틸레버의 경우, 이격거리에 따른 최종 구조물 침하량은 18m 지점에서 2cm 정도의 구조물 침하의 차이를 보임.



(a) 이격거리 0.0m (b) 이격거리 0.5m

<그림 3.1.72 구조물 침하량 - 캔틸레버>

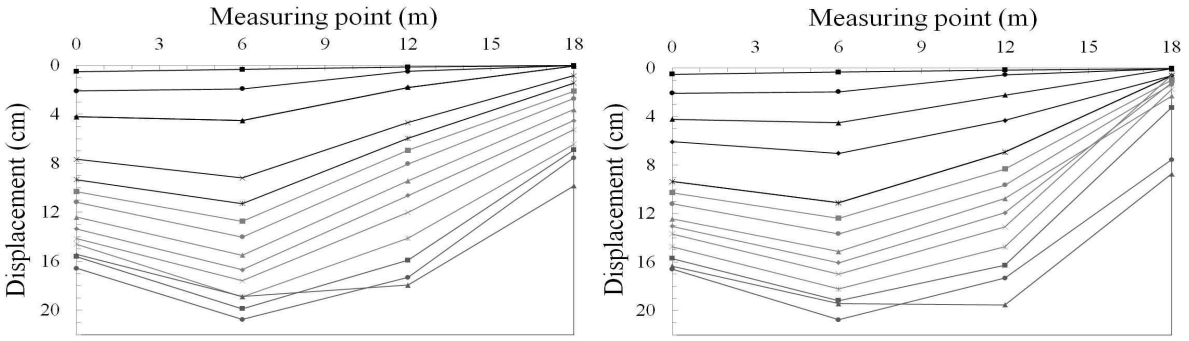
○ 아래 그림은 상부고정앵커를 모사한 지표 침하량을 입력하였을 때 구조물 침하를 나타냄. 트랩도어의 변형으로 인하여 기존 변형량에 비해 급격한 침하가 발생함을 확인함. 상부고정앵커의 경우, 구조물의 최대 침하량이 6m 지점에서 발생함을 나타냈으며, 이격거리에 따른 최종 구조물 침하량은 18m 지점에서 2cm 정도의 구조물 침하의 차이를 보임.



(a) 이격거리 0.0m (b) 이격거리 0.5m

<그림 3.1.73 구조물 침하량 - 상부고정앵커>

○ <그림 3.1.74>는 스트러트를 모사한 지표 침하량을 입력하였을 때 구조물 침하를 나타냄. 4~5단계의 침하량을 적용한 수치해석시 비교적 많은 구조물의 변형을 가짐. 트랩도어의 변형으로 인하여 18m 지점에서 급격한 침하가 발생함을 확인함. 스트러트의 경우, 구조물의 최대 침하량이 6m 지점에서 발생함을 나타냈으며, 이격거리에 따른 최종 구조물 침하량은 큰 차이를 보이지 않음.



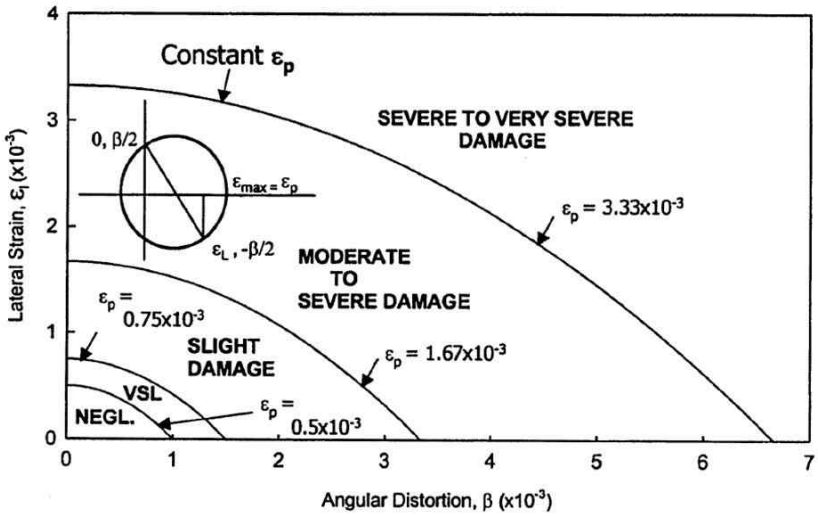
(a) 이격거리 0.0m (b) 이격거리 0.5m

<그림 3.1.74 구조물 침하량 - 스트러트>

③ 시공단계를 고려한 손상도평가

○ 축소모형실험을 통한 단계별 지표 침하량 파악과, 그 침하량을 대입한 각각의 수치해석 모델링을 통하여 한계 침하량을 파악하고자 손상도 평가를 실시함. 손상도 평가 모델은 <그림 3.1.75>과 같이 손무락(2003)의 기준을 사용함.

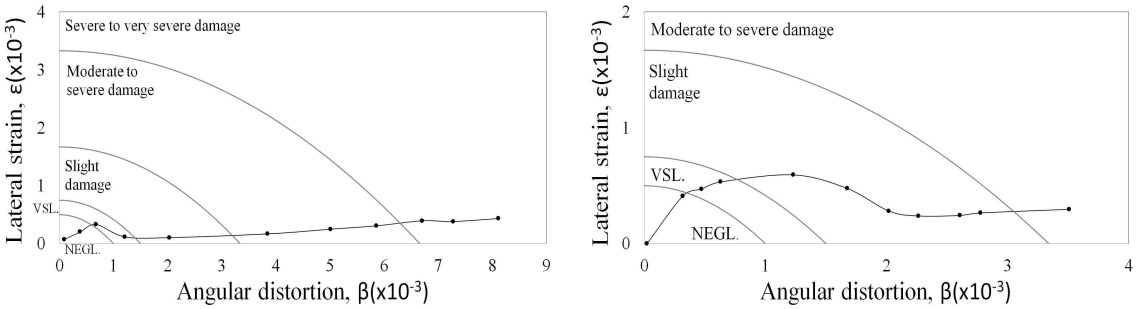
○ 해당 기준은 선행연구과 현장 계측결과에 근거하여 각 변위와 수평 변형율에 의한 손상도 기준이며, VSL(Very slight damage)영역의 한계 인장 변형율은 Polshin and Tokar(1957)와 Burland and Wroth(1974)가 제시한 처음으로 볼 수 있는 크랙이 발생할 때의 인장변형율 값임. Slight damage 영역은 Skempton and Macdonald(1956)와 Bjerrum(1963)이 제시한 자중에 의해 침하된 구조물에 있어서 하중지지벽체와 패널벽체에 첫 크랙이 발생할 때의 인장 변형율 값이며, Moderate to severe damage 영역은 Skempton and Macdonald(1956)와 Bjerrum(1963)이 제시한 자중에 의해 침하된 구조물에 있어서 심한 크랙과 구조부재의 손상이 발생할 때의 인장 변형율 값임.



<그림 3.1.75 구조물 손상도 기준 (손무락, 2003)>

○ 모델링한 구조물에서 벽체에서 0~6m 구간의 각 꼭지점 4개(상부 2개, 하부 2개)의 수직 변형량과 수평 변형량을 산출하여 기울기를 산정하고, 이로 인한 각 변위와 수평 변형율을 계산하여 손상도 기준 그래프에 도시함으로써, 이격거리에 따른 각 보강 공법별 손상도 평가를 수행함.

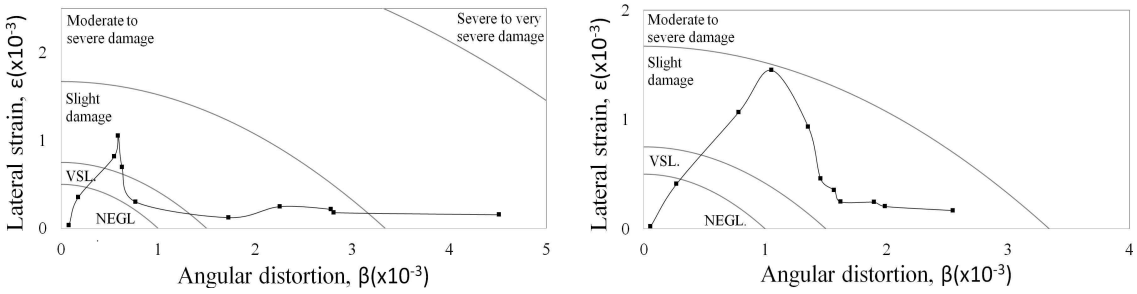
○ 다음 그림은 앵커를 모사한 지표 침하량을 입력한 수치해석 이후, 구조물 침하를 분석하여 각 시공단계별로 손상도 평가를 수행한 결과임. 벽체와의 이격거리의 차이로 최대 각 변위가 0.005정도 감소함을 보임. 벽체의 변형으로 인한 초기 손상도는 step 3까지 각 변위와 수평변형율이 동일하게 증가함. 이후 지속적인 벽체의 변형으로 인하여 수평변형은 약간 감소하며 각 변위가 증가하는 추세를 보임. 우측 벽체의 거동 이후 첫 번째 트랩도어의 거동이 발생하면서(step 11) 각 변위는 최대값을 나타냄.



(a) 이격거리 0.0m (b) 이격거리 0.5m

<그림 3.1.76 손상도 평가 - 앵커>

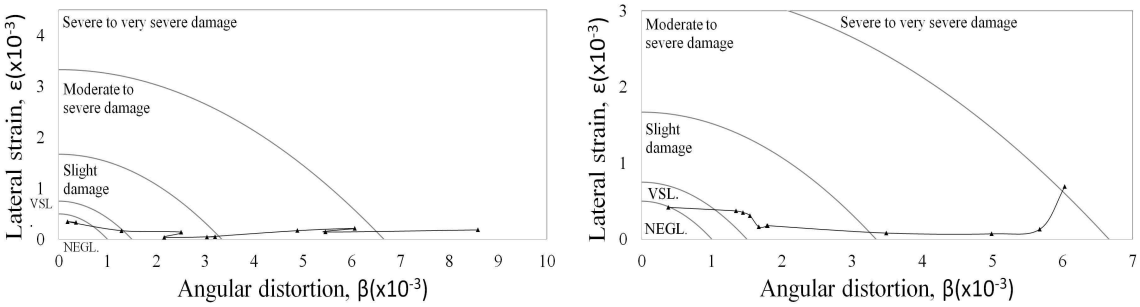
○ 다음 그림은 캔틸레버를 모사한 지표 침하량을 입력한 수치해석 이후, 구조물 침하를 분석하여 각 시공단계별로 손상도 평가를 수행한 결과임. 벽체와의 이격 거리의 차이로 최대 각 변위가 0.0025정도 감소함을 보임. 벽체의 변형으로 인한 초기 손상도는 step 4까지 각 변위와 수평변형율이 동일하게 증가하는 추세에 있으며 제일 가파른 기울기를 확인함. 이후 지속적인 벽체의 변형으로 인하여 수평변형은 감소하며 각 변위가 증가하는 추세를 보임. 우측 벽체의 거동 이후 첫 번째 트랩도어의 거동이 발생하면서(step 11) 각 변위는 최대값을 나타냄.



(a) 이격거리 0.0m (b) 이격거리 0.5m

<그림 3.1.77 손상도 평가 - 캔틸레버>

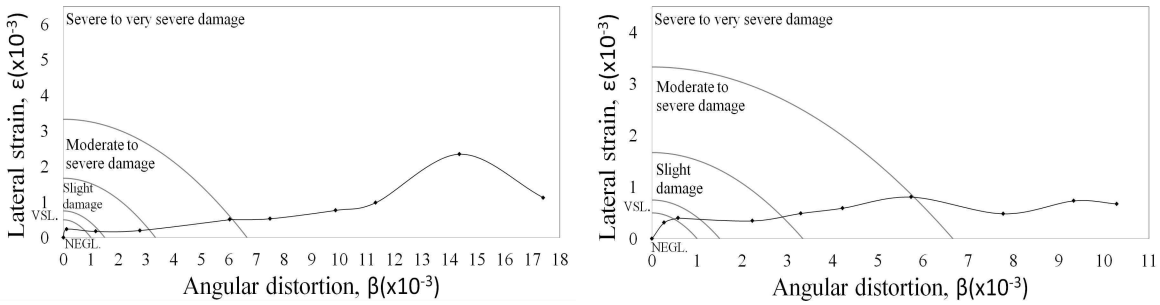
○ 아래 그림은 상부고정앵커를 모사한 지표 침하량을 입력한 수치해석 이후, 구조물 침하를 분석하여 각 시공단계별로 손상도 평가를 수행한 결과임. 벽체와의 이격거리의 차이로 최대 각 변위가 0.0035정도 감소함을 보임. 벽체의 변형으로 인한 초기 손상도는 상대적으로 수평변형이 발생하지 않아 각 변위만 증가하는 수평거동을 보임. 이는 상부고정앵커를 모사한 벽체가 상대적으로 초기 상부 변형이 작음으로 인함. 이후 지속적인 벽체의 변형으로 인하여 수평변형은 일정하며 각 변위가 증가하는 추세를 보임. 우측 벽체의 거동 이후 첫 번째 트랩도어의 거동이 발생하면서(step 11) 각 변위는 최대값을 나타냄.



(a) 이격거리 0.0m (b) 이격거리 0.5m

<그림 3.1.78 손상도 평가 - 상부고정앵커>

○ <그림 3.1.79>는 스트러트를 모사한 지표 침하량을 입력한 수치해석 이후, 구조물 침하를 분석하여 각 시공단계별로 손상도 평가를 수행한 결과임. 벽체와의 이격 거리의 차이로 최대 각 변위가 0.007정도 감소함을 보임. 다른 공법 모사와 비교하였을 때, 벽체의 변형으로 인한 초기 손상도 는 VSL 영역까지 각 변위와 수평변형율이 일정하게 증가함. 이후 지속적인 벽체의 변형으로 인하여 수평변형은 일정하며 각 변위가 증가하는 추세를 보임. 우측 벽체의 거동 이후 첫 번째 트랩도어의 거동이 발생하면서(step 11) 각 변위는 최대값을 나타냄.



(a) 이격거리 0.0m (b) 이격거리 0.5m

<그림 3.1.79 손상도 평가 - 스트러트>

○ 각 공법별 손상도 평가를 통하여 모든 구조물의 손상도 변화가 일정 굴착단계 이후부터는 각 변위만 지속적으로 증가하는 양상을 확인함. 초기 구조물 손상도를 고

려할 때, 앵커는 step 3, 캔틸레버는 step 4, 스트러트는 step 2까지는 각 변위와 수평 변형을 동시에 고려해야 하며, 그 이후의 시공단계에 있어서는 각 변위가 구조물 손상도에 대부분의 영향을 미치는 것으로 나타남.

○ 각 공법의 손상도 평가를 분석하여 손상도 영역이 변화하는 step에서의 구조물 침하량과 지표 침하 기울기를 산출함. 구조물 침하량은 해당 step에서의 수치해석 결과값으로 산출하였으며, 지표 침하 기울기는 축소모형실험에서의 지표 침하곡선의 기울기를 산정함.

○ 각 공법에 따른 이격거리 0.0m에서의 손상도 변화 추이는 다음 표와 같음. 시험을 수행한 지반조건에서는 상대적으로 캔틸레버가 변형에 안전함을 확인하였고, 스트러트가 상대적으로 작은 변형에 취약함을 확인함.

<표 3.1.19 이격거리 0.0m에서의 손상도 변화 (구조물침하량/지표침하기울기)>

공법 / 손상도변화	앵커	캔틸레버	상부고정앵커	스트러트
NEGL. → VSL.	Step 3 (3.14cm/0.00438)	Step 2-3 (3.79cm/0.00355)	Step 3 (3.16cm/0.00299)	Step 3 (4.22cm/0.00520)
VSL. → Slight	Step 5 (5.34cm/0.00794)	Step 3 (4.55cm/0.00425)	Step 4 (4.13cm/0.0044)	Step 4 (4.22cm/0.00756)
Slight → Moderate	Step 6 (6.64cm/0.00873)	Step 11 (11.24cm/0.01031)	Step 8 (7.01cm/0.00896)	Step 5 (7.68cm/0.01020)
Moderate → Severe	Step 9 (9.88cm/0.01131)	-	Step 11 (9.38cm/0.01013)	Step 6 (9.34cm/0.01227)

○ 각 공법에 따른 이격거리 0.5m에서의 손상도 변화 추이는 다음 표와 같음. 이격거리 0.0m에 비해 전반적으로 구조물이 안전측에 위치함을 나타냄. 시험을 수행한 지반조건에서는 구조물이 상대적으로 캔틸레버가 변형에 안전함을 확인하였고, 스트러트가 상대적으로 작은 변형에 취약함을 확인함.

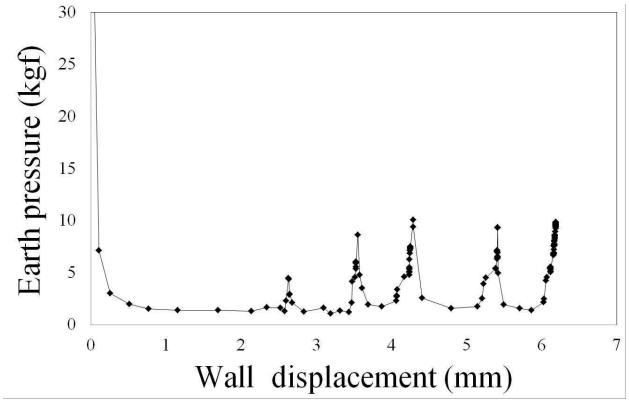
<표 3.1.20 이격거리 0.5m에서의 손상도 변화 (구조물침하량/지표침하기울기)>

공법 / 손상도변화	앵커	캔틸레버	상부고정앵커	스트러트
NEGL. → VSL.	Step 3 (2.91cm/0.00438)	Step 2-3 (3.81cm/0.00355)	Step 1-2 (1.29cm/0.00065)	Step 3 (4.23cm/0.00520)
VSL. → Slight	Step 5 (5.38cm/0.00794)	Step 3 (4.56cm/0.00425)	Step 2 (1.73cm/0.00115)	Step 4 (6.08cm/0.00756)
Slight → Moderate	Step 11 (11.05cm/0.01280)	-	Step 7 (6.09cm/0.00776)	Step 5 (9.36cm/0.01020)
Moderate → Severe	-	-	Step 10 (8.78cm/0.01013)	Step 8 (11.20cm/0.01491)

④ 시공단계별 안정성 취약구간 파악

○ 축소모형실험을 통한 단계별 지표 침하량 파악과, 그 침하량을 대입한 각각의 수치해석 모델링을 통하여 손상도를 평가함과 더불어 벽체의 이동으로 인하여 벽체에 작용하는 하중의 변화를 관찰함.

○ 복합보강공법을 적용함에 있어 제일 중요한 성과는 구조물에 작용하는 토압의 경감이므로, 축소모형실험에서 벽체의 이동으로 인한 토압의 변화를 파악하여 안정성 취약구간을 파악하고자 함. <그림 3.1.80>은 앵커를 모사한 실험 중 벽체 이동으로 인한 토압의 변화를 나타냄. 벽체가 이동하는 순간 토압은 강하함을 확인함.



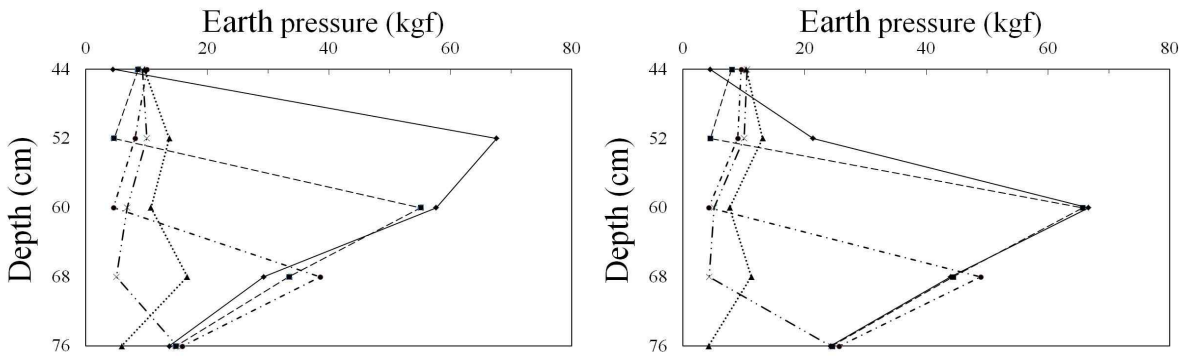
<그림 3.1.80 벽체 이동에 따른 토압 양상 - 앵커>

○ <그림 3.1.81>은 시공단계별 깊이에 따른 토압 변화 양상을 공법별로 나타냄. 벽체가 벽체 반대방향으로 이동할 때의 해당 벽체 토압은 최저값을 나타냄을 알 수 있으며, 위쪽 벽체와 아래쪽 벽체가 토압을 분담함을 확인함.

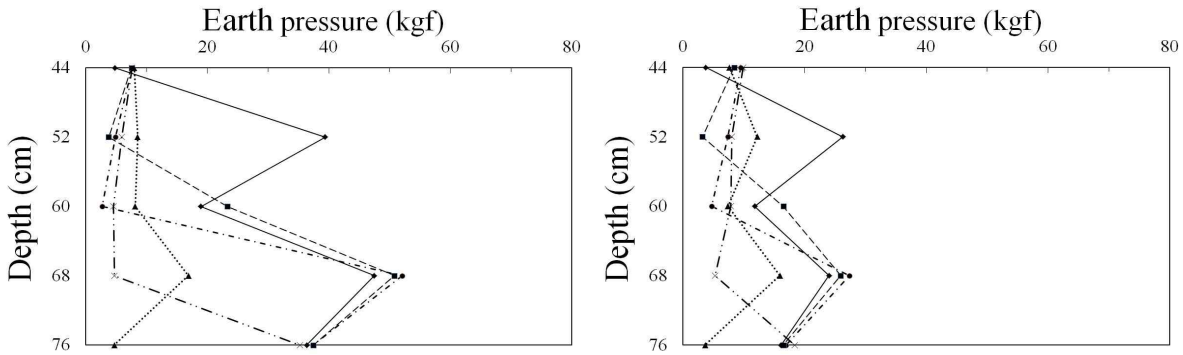
○ 토압 변화에 대한 절대적인 수치를 비교해 보았을 때 스트러트가 제일 작은 토압 분포를 보임을 확인하였으며, 이는 스트러트 공법을 모사한 벽체의 변형이 다른 공법에 비해 전반적으로 벽체 하부가 각 단계별로 지속적인 변형을 발생시키므로 작은 값을 보인 것으로 예상됨.

○ <그림 3.1.82>는 벽체 이동 이후(step 10)에 trap-door 이동으로 인하여 벽체에 작용하는 토압의 양상을 나타냄. 각 공법이 공통적으로 토압의 재분배가 일어났으며, 상부로부터 깊이 44-68cm 구간은 우측 벽체의 이동이 완료된 이후(step 10)의 토압보다 감소한 반면, 76cm 구간은 토압이 증가하여 trap-door의 변형으로 인한 토압을 분담함을 확인함.

○ Trap-door의 변형(step 11-step 15)으로 인한 토압 양상은 공통적으로 토압이 완화되는 쪽으로 나타남. 그러나 벽체 하부의 토압은 trap-door가 멀어질수록 영향 법위에서 벗어나 일정한 값으로 수렴하였으며, 상대적으로 상부에 위치한 벽체의 토압은 trap-door의 영향을 받아 토압이 감소함을 확인함.

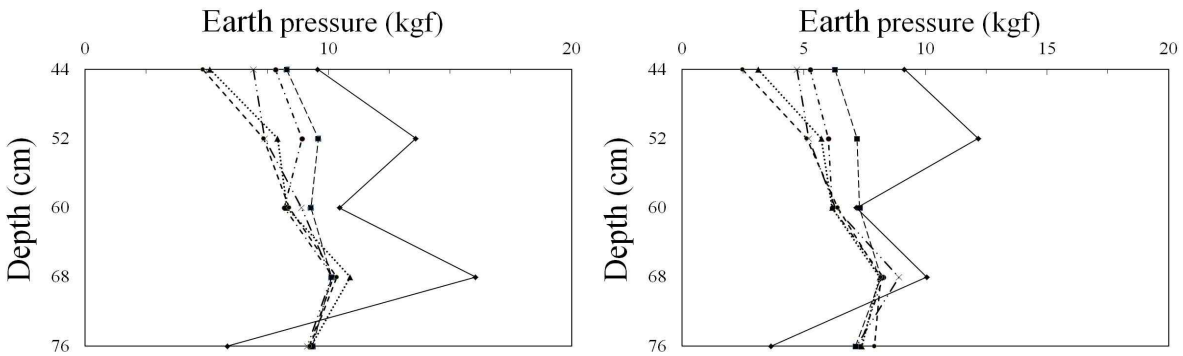


(a) 앵커 (b) 캔틸레버

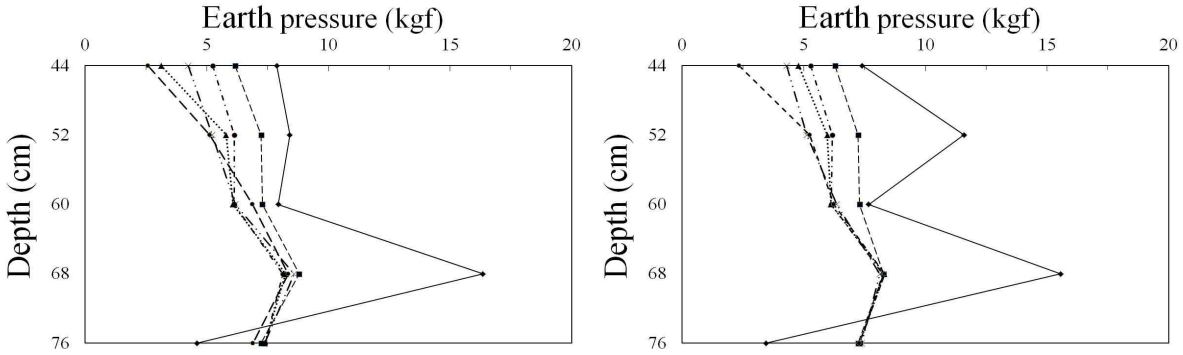


(c) 상부고정앵커 (d) 스트러트

<그림 3.1.81 시공단계별 토압 양상>
(◆: Step 6, ■: Step 7, ●: Step 8, ×: Step 9, ▲: Step 10)



(a) 앵커 (b) 캔틸레버



(c) 상부고정앵커 (d) 스트러트

<그림 3.1.82 Trap-door의 이동으로 인한 토압 양상>
(◆: Step 10, ■: Step 11, ●: Step 12, ×: Step 13, ▲: Step 14, ●: Step 15)

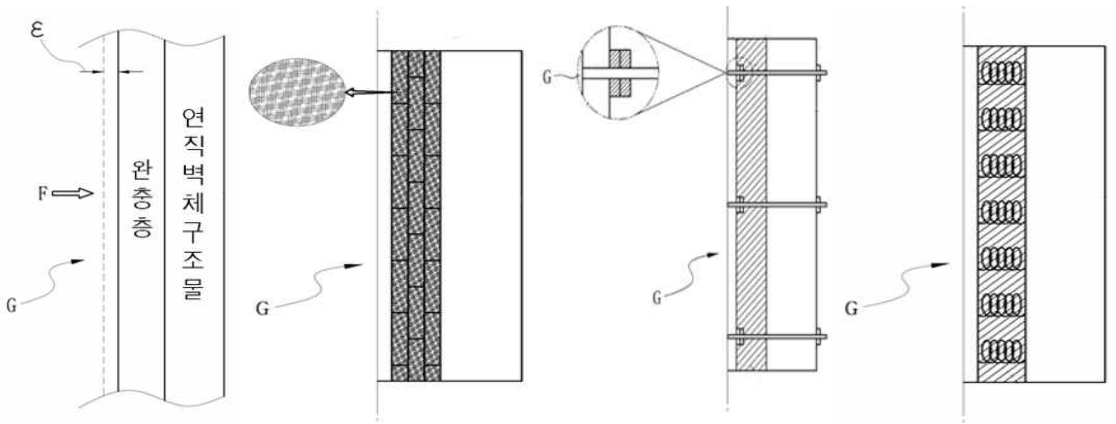
(2) 안정성 취약 구간에 대한 복합 보강공법 기술고안 개발

① 복합 보강공법 개요

○ 구조물 손상도평가에 따른 인접시설물들에 대한 안정성평가 기본 개념은 개착부 근접시공시 단계별 굴착에 따라 지반 및 지보구조물 상호작용에 의한 변형발생, 응력의 재분배 및 평형의 거동을 보이므로, 특히 구조물의 변위나 변형량 변화를 파악하므로써 안정성을 확인하거나 대책을 강구하는 과정임.

○ 그러므로 임의의 선정된 흙막이 공법적용과 함께 벽체의 변형량(또는 토압)을 요구되는 정도로 조절할 수 있는 보조 개념의 복합보강공법을 고안하여 제시함. 이에 대한 사전 평가를 침하 연직벽체 구조물을 시공함에 있어 취약 구간 발생시, 복합보강공법을 통하여 구조물의 안정성을 도모하였음. 복합보강공법이란 현장 상황에 맞추어 시공중인 벽체 배면에 주동토압과, 필요시에는 수동토압을 복합적으로 적용할 수 있는 맞춤형(flexible) 공법으로 정의함.

○ 연직벽체 구조물을 구성함에 있어 완충층을 구성하여 토체로부터 토압을 완화시켜주면서 변위가 발생되도록 하여 연직벽체 구조물에 작용하는 수평토압을 완화시키고, 이에 더하여 필요시 완충층에 충진제를 충진하여 완충층에 변위가 발생된 상태에서 경화시킴으로써 장기적으로 연직벽체 구조물이 강성벽체로서 거동이 가능하도록 하여 구조적 안정성을 향상시킴. (<그림 3.1.83> (a) 참조).



(a) 개념도 (b) 뼈대지지구조 (c) 슬라이드판구조 (d) 스프링구조

<그림 3.1.83 복합보강공법 개요>

○ 완충층을 점토로 구성하는 경우 자중에 의해 완충층의 하부가 상부보다 압밀이 진행속도가 빠르게 되며, 이러한 압밀의 진행속도의 차로 인해 하부와 상부는 변위(ε)를 형성함에 있어 차가 발생함. 완충층을 점토로 구성하는 경우 자중에 의해

상,하부에 변위차가 자동으로 형성되게 되며, 이러한 변위 차는 연직벽체 구조물에 가해지는 상, 하부의 하중의 차이를 보완할 수 있음.

② 뼈대지지구조를 통한 보강공법

○ 완충층은 뼈대구조를 이루되 복수의 층으로 구성되며, 각각의 뼈대구조 간에 유격을 형성하도록 지지구조가 형성되는 예를 <그림 3.1.83> (b)와 같이 고안함. 이에 더하여 토체와 접하는 면에는 하중전달판이 구성됨. 이러한 뼈대구조와 지지구조로 인하여 복수의 공극이 형성되며, 공극의 형성은 구조체의 탄성을 부여하면서 토압이 가해지는 경우 토압을 완화하면서 변위가 형성됨. 하중전달판은 뼈대구조만 구성되는 경우 흙입자가 유입되어 탄성이 충분히 발휘될 수 없어 하중완화 효과가 그만큼 상실될 수 있기에 뼈대구조와 토체 사이에 배치함. 추가로 토압이 비균일하게 작용하는 경우 이를 보정하는 기능도 수행할 것으로 예측됨.

○ 하중전달판과 본체사이에 충진제가 충진되도록 고안하였으며, 충진 재료는 모르타르, 우레탄 등으로 고려함. 완충층과 본체가 일체화 되도록 프리캐스트화 된 세그먼트를 연직벽체에 시공하고, 초기 토체로부터 토압에 의해 완충층에는 변형이 발생하면서 하중을 완화하게 됨. 시공초기가 지나면서 충진제가 경화되어 변형이 발생된 완충층의 경우도 강성을 발휘하게 함으로써 초기 연성거동 벽체에서 장기 강성거동 벽체로 전환을 유도함.

③ 슬라이드판구조를 통한 보강공법

○ 완충층은 본체에서 돌출 형성되는 복수의 슬라이드봉과, 관통공이 형성되어 슬라이드봉과 체결되며 봉에서 슬라이드 되는 슬라이드판으로 <그림 3.1.83> (c)와 같이 구성됨. 슬라이드봉은 본체층에 일체로 구성되어 있으며, 슬라이드판의 관통공에 삽입된 상태로 고안하였으며 토압에 의해 상기 슬라이드판이 변형을 일으키는 구조임. 여기서 슬라이드판이 토체로부터 토압을 받아 변형을 일으킴에 있어 어느 정도 토압에 대한 하중에 대해 저항성이 존재해야 하므로, 슬라이드봉에 하나 이상의 미끄럼방지패킹이 구성되도록 함. 이렇게 미끄럼방지패킹이 구성되면서 슬라이드판은 어느 정도 토압에 저항하면서 변형을 일으키게 되며, 전체적으로 연직벽체 구조물에 작용하는 토압을 완화시킴.

○ 상기 슬라이드판과 상기 본체층 사이에 충진제를 주입시 상기 충진제가 충분히 경화할 수 있는 시간적 여유를 유도토록 함으로써 충진제 경화 후 상기 슬라이드판에 변형이 발생된 상태에서 강성 벽체로서 기능을 하도록 고안함. 충진 재료는

모르타르, 우레탄 등으로 고려함. 완충층과 본체가 일체화 되도록 프리캐스트화 된 세그먼트를 연직벽체에 시공하고, 초기 토체로부터 토압에 의해 완충층에는 변형이 발생하면서 하중을 완화하게 되며, 시공초기가 지나면서 충진제가 경화되어 변형이 발생된 완충층의 경우도 강성을 발휘하게 함으로써 초기 연성거동 벽체에서 장기 강성거동 벽체로 전환을 유도함.

④ 스프링구조를 통한 보강공법

○ 완충층은 본체층에 부착되는 복수의 스프링과, 스프링에 부착되어 토체에 접하는 하중전달판으로 <그림 3.1.83> (d)와 같이 구성됨. 완충층은 본체부에 부착된 복수의 스프링을 포함하여 구성하였으며, 이러한 스프링에 의해 완충층은 탄성이 부여되면서 토체로부터 토압이 가해지는 경우 이러한 토압을 완화하면서 변위가 형성되도록 함. 완충층과 토체와 접하는 면에는 하중전달판이 구성되도록 함으로써, 토체로부터의 흙 입자가 스프링으로 유입되어 탄성이 충분히 발휘될 수 없어 하중완화 효과가 그만큼 상실될 수 있으므로 이와 같은 구성이 추가됨. 하중전달판의 재질은 탄성 및 연성이 있는 재질로 구성함으로써 토체로부터 토압이 비균일하게 작용하는 경우 이를 보정하여 하중을 완충층으로 균일하게 전달하기 위함.

○ 하중전달판과 본체층 사이에 충진제가 충진되도록 고안됨. 충진 재료는 모르타르, 우레탄 등으로 고려함으로써 완충층과 본체가 일체화 되도록 프리캐스트화 된 세그먼트를 연직벽체에 시공하고, 초기 토체로부터 토압에 의해 완충층에는 변형이 발생하면서 하중을 완화하게 됨. 시공초기가 지나면서 충진제가 경화되어 변형이 발생된 완충층의 경우도 강성을 발휘하게 함으로써 초기 연성거동 벽체에서 장기 강성거동 벽체로 전환을 유도함.

(3) 손상도 평가기법을 고려한 개착부 굴착공법의 선정방안 고찰

① 실험 및 해석적 방법을 이용한 흙막이 공법별 손상도평가 적용성

○ 개착부 근접시공 상황을 실내조건에서 축소모형 토조와 수치해석적 방법을 이용하여 모사하여, 대표적인 흙막이 공법별 변형 및 침하거동을 파악하였으며, 분석결과를 이용하여 손상도평가기법에 기반한 인접구조물의 위치별 안정성 검토, 평가기법 적용성을 검토하였음.

○ 적용한 흙막이 공법별 손상도 평가결과를 요약하면,

- 축소모형실험을 통하여 흙막이 벽체 시공시 발생할 수 있는 침하량 파악과 더불어, 흙막이 벽체 시공 이후 지하 공간 굴착시 지표 침하에 대한 연구를 수행함.

벽체 부근에서 최대 침하량을 보이고 있으며, 트랩도어의 이동으로 인해 침하의 형태는 거의 변함이 없으나 전체적으로 부등침하 기울기가 감소함으로써 벽체와의 거리와 관계없이 일정한 침하량을 가짐.

- 수치해석을 통해 구조물 침하를 파악함. 단계별 해석을 통하여 구조물 변형 양상을 상세히 알 수 있었으며, 트랩도어의 변형(지하 공간 굴착)으로 인하여 기존 변형량에 비해 급격한 침하가 발생함을 확인함.
- 구조물의 변형량을 추출하여 손상도 평가를 수행함. 단계가 진행될수록 안전측에서 멀어짐을 확인하였으며, 초기 손상도의 기울기는 우측 벽체의 상부의 초기 변형 정도와 관련이 있음.
- 취약부 파악을 위해 벽체에 작용하는 토압을 측정함. 지반이 이완되는 방향으로 벽체가 이동할 때의 이동하고 있는 벽체의 토압은 최저값을 나타냄을 알 수 있으며, 이동하는 벽체의 위쪽 벽체와 아래쪽 벽체가 토압을 분담함을 확인함.

② 손상도 평가기법을 고려한 개착부 흙막이공법의 선정(안)

○ 개착부 흙막이 공법선정시 반드시 고려할 사항은 다음과 같음.

▢ 공사 및 설계 목적에 대한 검토
- •공사구간, 공사성격에 따른 제반 법규•법령이나 규준, 도시•지역 개발계획 등
- •암반을 포함한 지층상태와 지하실 깊이와의 관계
- •시공중 작용할 수 있는 최대 하중상태의 예측
- •지지부재 (Strut, Earth Anchor 나 영구 Slab) 의 선택과 배치 방법
- •굴착 깊이와 흙막이 구조벽체의 근입깊이 설계
- •벽체의 허용 응력 (시공중과 영구적 장기, 단기 구분)
- •지하벽의 거동에 따른 토압의 변화 예측(지보재•벽체의 강성과 선행하중 영향)
- •설계 모델 선정 (연속체•불연속체, 탄성•점탄성 등)

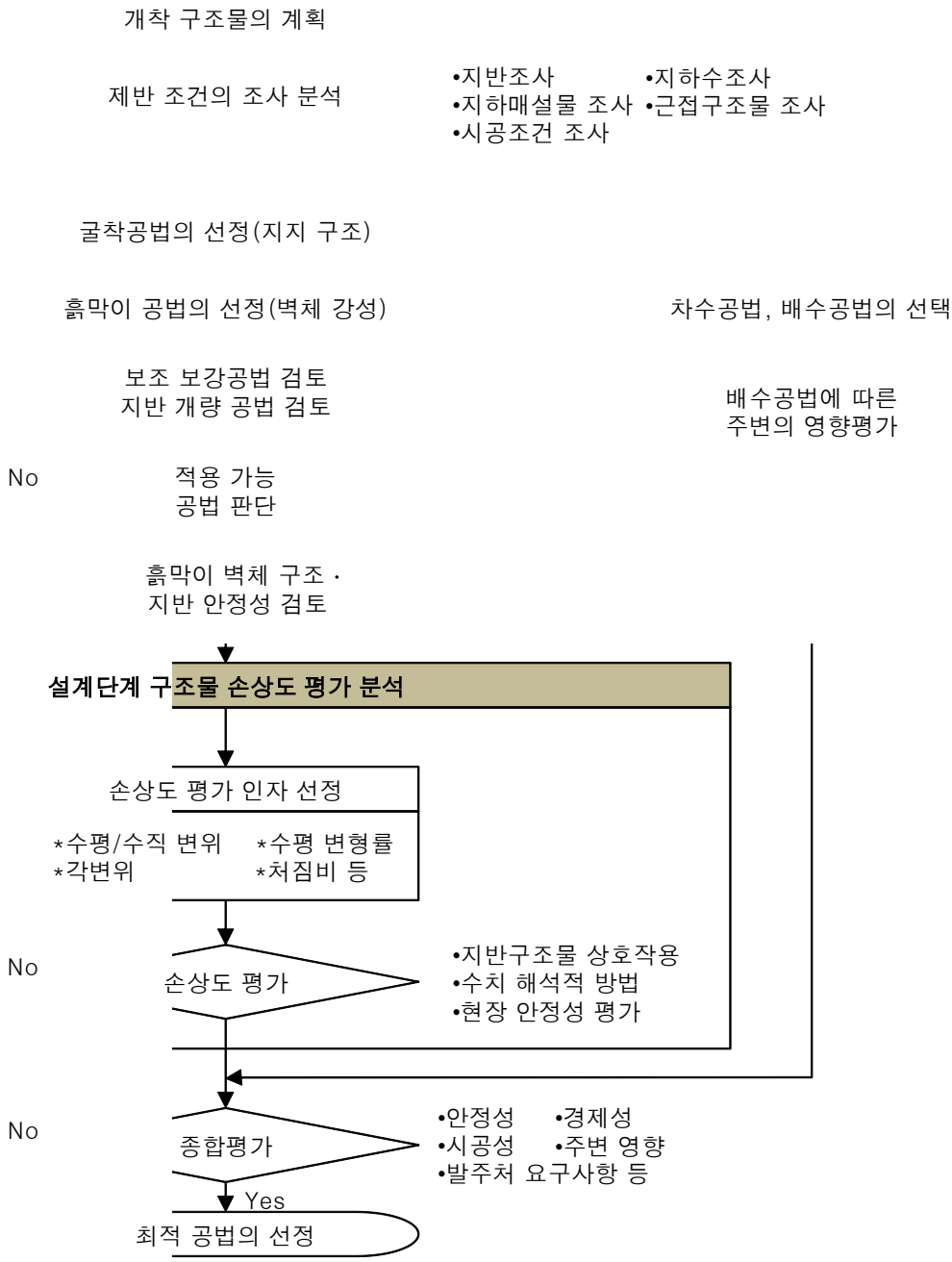
▢ 지형, 지질 등 지반조건에 관한 검토
- •지형, 지질 및 토질에 대한 선정 공법의 부합성, 문제점
- •지반설계정수를 파악목적 실내시험, 흙의 공학적 성질
- •지하수위의 높이, 지하수 용출량
- •토질에 알맞는 흙막이 가시설 형태 적용성
- •주변구조물 하중, 토압의 선정, 지층의 지지력
- •자재 운반로 유무, 도로폭원, 곡선부 상태, 교통량, 교량 등 하중•통행규제의 유무

▢ 주변구조물에 관한 검토
- •하중의 상호 영향, 지하수위 변화에 따른 영향
- •흙막이구조물의 안정에 영향 예상 범위의 지반 특성
- •인근 구조물의 특징 및 종류와 지하 매설물의 위치 파악(위치, 구조, 건측한계 등)

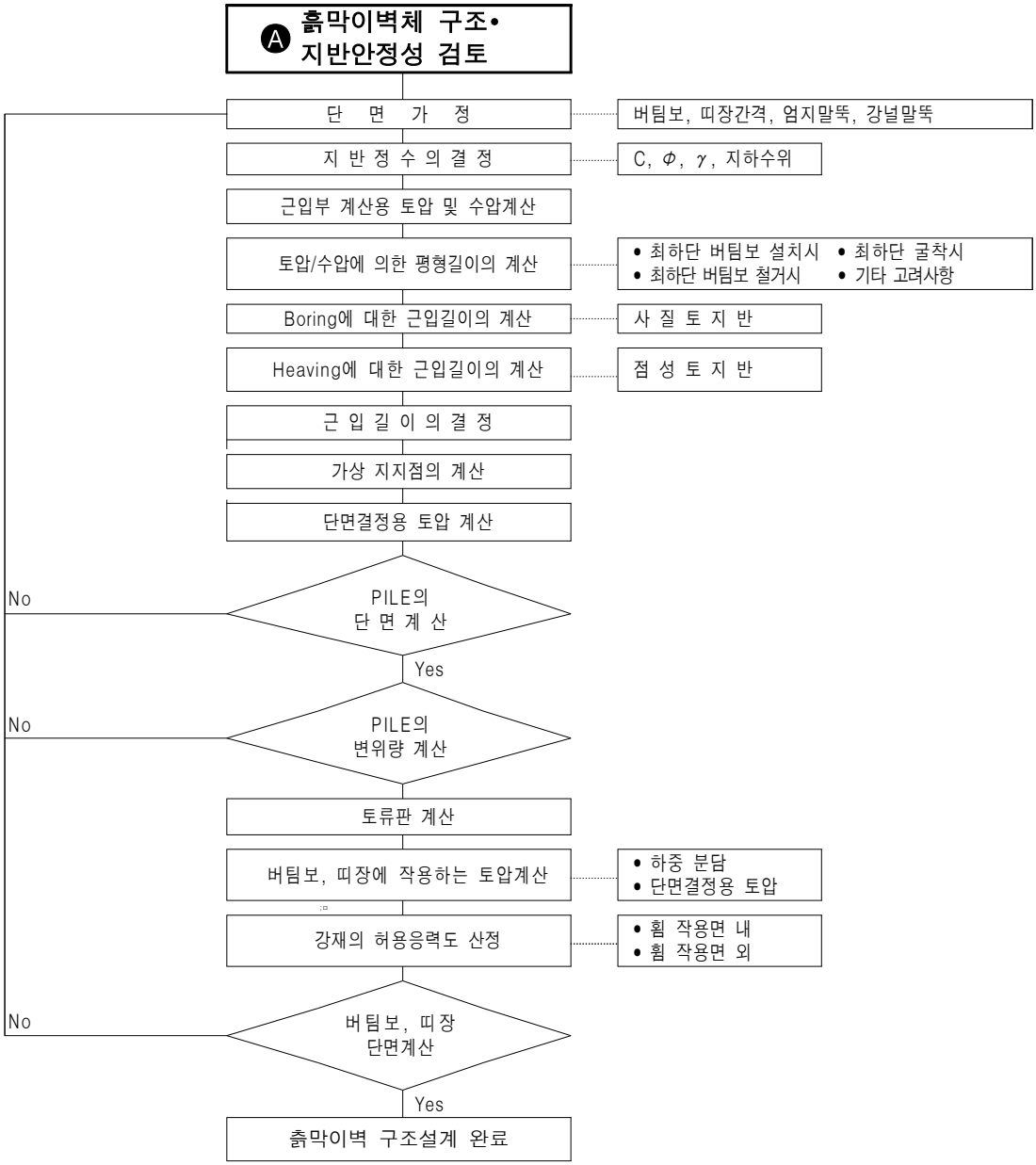
▢ 시공 환경, 공정에 관한 검토
- •지하 매설물조사(위치와 규모, 구조 및 노후도, 보안성)
- •암반의 굴착과 PILE 공사시 진동과 소음 영향, 시공조건
- •시공 난이도와 경제성 (과잉침하시 민원, 손해배상 고려)
- •현장 시공 공정관리 사항

○ 도심지내 개착부에서의 흙막이 가시설 공법 선정 시에, 발주처의 요구사항과 경제성, 시공성 및 현장 적합성 등 각종 사항에 대하여 모든 것을 완벽하게 반영할 수 있는 공법을 선정하는 것을 사실상 곤란하나, 보다 현장조건에 알맞은 안전하고 타당한 공법선정이 실제로 필요하며 이를 위하여 기술적인 종합선정 체계가 요구됨.

○ 그러므로, 본 연구에서 실험적 방법 및 수치해석적 방법에 의한 흙막이 공법별 변형거동 파악 및 손상도 평가개념을 도입하도록 하여, 시공전 설계단계에서 지반조건 및 각종 설계조건, 안정성 및 경제성 등을 고려하기 위한 선정절차 및 검토사항을 요약함.



<그림 3.1.84 손상도평가기법을 고려한 개착부 흙막이 공법의 선정(1/2) >

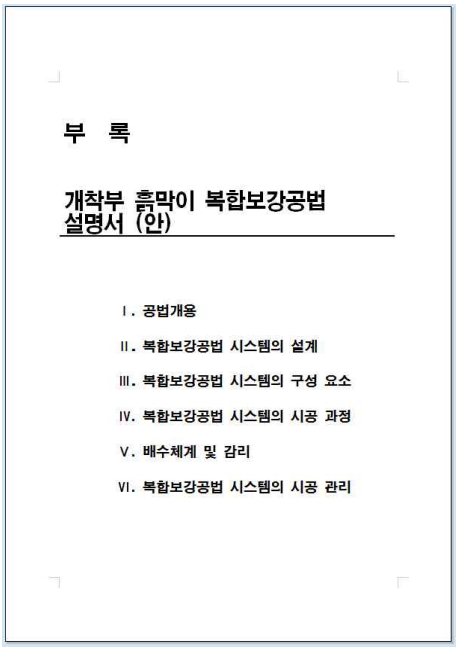


<그림 3.1.84 손상도평가기법을 고려한 개착부 흙막이 공법의 선정(2/2) >

○ 일반적으로 설계 및 시공기술자는 지하구조물 굴착공사에 대하여 우선 사전조사, 문제점 개선방안, 공법설정, 공사 안정성•적정성 평가 등 일련의 과정으로 수행하며, 이러한 설계시공 과정은 각 공사 단계별 검토 항목별로 임의의한 형태의 의사결정체계(Decision making system)에 의하여 이루어지면서 공법을 선정함. 그러나 보다 신뢰성 있고 실무에 활용 적합한 개착부 흙막이 공법선정 체계 개발을 위해서는 현장조건과 상세 조사•분석, 설계사항과 시공현황 Monitoring, 다양한 기존 건설사례에 대한 지속적인 데이터베이스 구축 등의 내용이 적합하게 반영되어야 함

(4) 개착부 흙막이 복합 보강공법 설명서(안) 제시

○ 본 설명서(안)에서 도심지 개착부에서 사용할 수 있는 새로운 개념의 흙막이 가시설 공법복합보강공법 시스템을 제시하였으며, 내용상 관련 공법 및 시스템의 기초적인 설계 또는 시공에 관한 기술사항과 항목을 명시하였음. 복합보강공법 시스템의 일반적인 설명, 복합보강공법 시스템의 설계 및 현장 시공과 성능 검사에 관련된 사항 등이 포함되어 있으며, 본 설명서내에 포함된 내용들은 기술논문, 설계회사에서 제공한 보고서 및 연구자료와 미국 FHWA에서 발간된 원서 등의 자료를 참조하였음.


부 록

개착부 흙막이 복합보강공법
설명서 (안)

Ⅰ. 공법개요
Ⅱ. 복합보강공법 시스템의 설계
Ⅲ. 복합보강공법 시스템의 구성 요소
Ⅳ. 복합보강공법 시스템의 시공 과정
Ⅴ. 배수체계 및 감리
Ⅵ. 복합보강공법 시스템의 시공 관리

<그림 3.1.85 개착부 흙막이 복합보강공법 설명서(안)>

○ 복합보강공법 시스템의 구성 요소로서는 완충층 및 배수 처리 체계로 이루어지며 간단한 장비를 이용하여 단순한 시공 과정을 거침. 복합보강공법 시스템은 현재 사용되는 많은 대심도 보강 시스템들에 대비, 단계별 시공시 배면 지반을 불교란 상태를 최대한 유지하면서, 지반의 변형을 적절히 허용 또는 조절하는 방식의 도입하였으며, 향후 공법에 대한 구조물 설계 적용과 시공이 구체화되고 활용가능성이 높은 공법으로 평가됨. 기술한 일부 사항은 관련 공법 및 기술의 발전 단계상 본 설명서(안) 작성 단계에서 해당 기술의 현실적인 상황을 반영하지 못한 사항이 있으므로 추후 본 공법에 관련한 세부 항목에 대하여 지속적인 기술적용 자료 수집 과 수정 보완이 필요함. 관련 사항은 당해 년도의 양적 연구성과 별권으로 작성하였음.

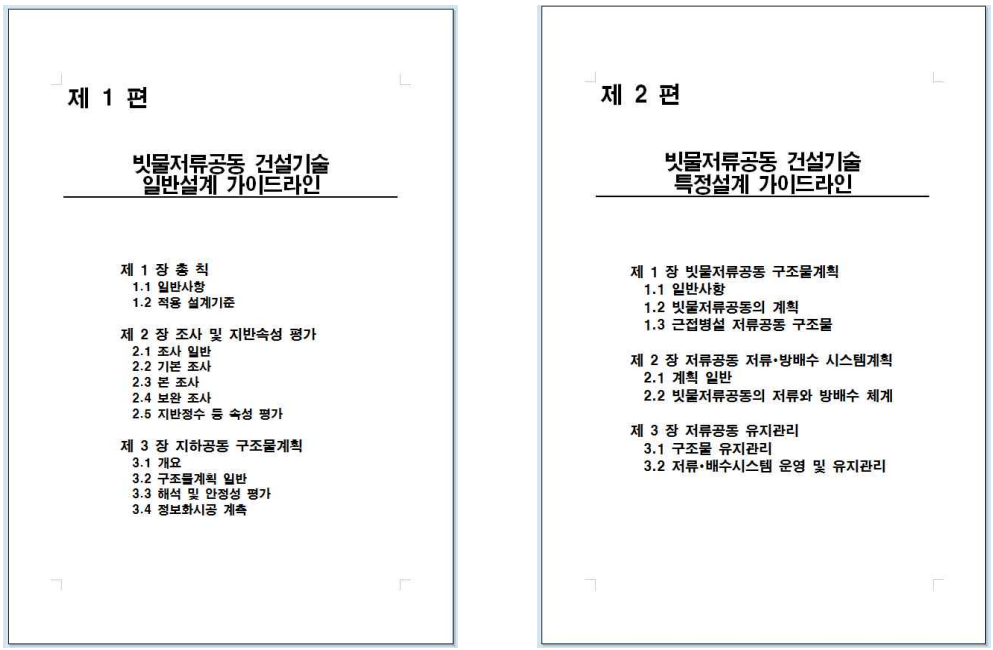
다. 지하 저류공동의 건설을 위한 설계 가이드라인(안) 제시

(1) 중대규모 빗물저류공동 건설기술 가이드라인(안) 설정

① 빗물저류공동 건설기술 가이드라인 설정

○ 도심지 복합지하공간의 수해방지 목적의 빗물지하저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인(안)을 작성 제시하였음.

○ 제시한 건설기술 가이드라인(안) 구성은 도심지내 안전한 빗물저류공동 건설을 위한 “빗물저류공동 건설기술 일반설계 가이드라인”과 지하공간 시설의 수재해 방재를 목적으로 하는 특수성을 고려한 “빗물저류공동 건설기술 특정설계 가이드라인으로 구분하여 작성함.



<그림 3.1.86 지하저류공동 건설을 위한 기술 가이드라인(안)>

○ 빗물저류공동 건설기술 일반설계 가이드라인(안)

- 일반 가이드라인상에는 도심지에서의 일반적인 중대규모 공동이나 터널 건설을 위한 일반적인 사항으로, 과거 20~30년간 도시철도 및 일반철도 공사, 고속도로 공사 사업추진에 따라 국내 터널건설기술은 양적·질적인 측면에서 세계 선진국 수준으로 매우 발전해 있으므로 이러한 기존 기술을 바탕으로 기술사항을 명시하였음. 해당 건설기술 명시내용은 다음과 같음.
- 저류공동 구조물 계획, 안정성 해석 등 일반 설계시공관련 사항
- 지하공간용지 소유권 및 지장물을 고려한 지하 저류공동 건설계획

- 지하저류공동 건설을 위한 기본적인 지반조사 및 분석, 설계 지반정수 설정 등 지반속성 평가
- 시공중 안정성 확인을 위한 Monitoring, 정보화 시공계획

<표 3.1.22 빗물저류공동 건설기술 일반가이드라인(안) 구성>

<table>
<tr><td colspan="2">제 1장 총칙</td></tr>
<tr><td colspan="2">• 일반 사항 • 적용 설계기준</td></tr>
<tr><td>제 2장 조사 및 지반속성 평가</td><td>제 3장 지하공동 구조물계획</td></tr>
<tr><td>• 조사 일반
• 기본 조사
- 자료 조사 - 개략 현장조사
- 시추 및 시굴 등에 의한 조사
- 수리지질학적 특성 조사
- 부지 평가 및 판정
• 본 조사
- 지표지질조사 - 물리탐사
- 시추 조사 - 시료 채취
- 지하수위 측정 - 현장 역학시험
- 실내시험
• 보완 조사
• 지반정수 등 속성 평가
- 지반 분류 - 조사결과의 정리
- 지반특성치의 결정</td><td>• 구조물계획 일반
- 굴착 방법 및 공법
- 지보재와 보조공법
- 콘크리트 라이닝
- 방수 및 배수

• 해석 및 안정성 평가
- 일반사항
- 안정해석방법

• 정보화시공 계측
- 일반사항
- 정보화시공 계측

• 부록: 개착부 흙막이 복합보강공법 설명서</td></tr>
</table>

○ 빗물저류공동 건설기술 특정설계 가이드라인(안)

- 특정 가이드라인 상에는 일반 지하시설물의 건설사항 외의 도심지내 불가피하게 계획해야하는 복수개의 (초)근접병설 공동터널 구조물에서의 고려사항, 방배수 시스템 등 빗물저류공동의 특수성을 고려한 건설기술 사항을 명시하였음.
- 수문학적 최적설계기법 및 지하공간 침수위험도 평가기법을 고려한 시설물 위치, 규모 등 빗물저류 공동계획 고려사항
- 저류공동 저류, 배수펌프실, 수문 및 집수시설, 관로 및 펌프 등 건설분야, 기계전기 분야의 시설, 장비 사항 등 방배수 시스템 계획
- 저류공동내외 우수유출입에 따른 공기압, 수압 해소방안
- 빗물저류공동의 구조물 안정성과 저류배수 시스테의 운영·유지관리 사항

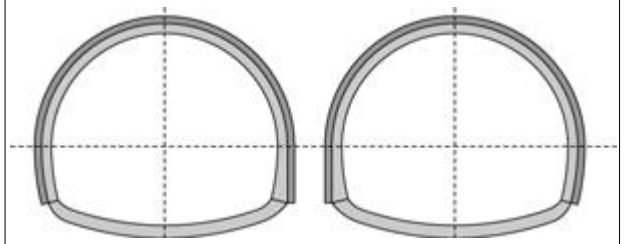
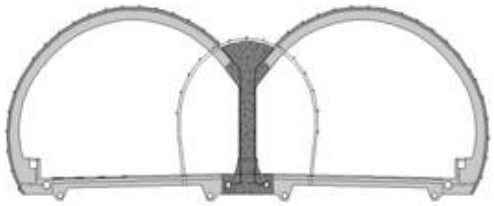
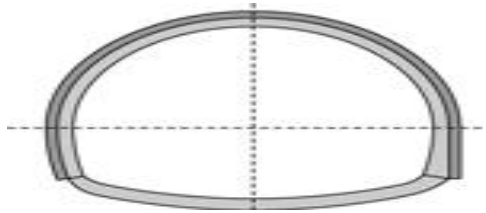
<표 3.1.23 빗물저류공동 건설기술 특정 설계가이드라인(안) 구성>

제 1장 빗물저류공동 구조물계획	제 2장 저류공동 저류 • 방배수 시스템계획	제 3 장 저류공동 유지관리
• 일반사항 • 빗물저류공동의 계획 -저류공동 입지 계획 -저류공동 단면 및 규모 • 근접병설 저류공동 구조물 -신기술신공법을 통한 경제성 등 특성분석 -저류공동 지보 체계 -굴착 방법 및 공법	• 계획 일반 -일반사항 -수리수문 분석, 검토 -저류-배수체계 연계 침수저감 효과 최적화 • 빗물저류공동의 저류와 방배수 체계 -빗물저류공동 -배수펌프실 -수문 및 집수 시설 -스크린 및 제진설비 -크레인설비 -관로 계획 -우수유출입에 따른 공기압, 수압 해소 방안	• 구조물 유지관리 -일반사항 -점검 및 진단평가 • 저류, 배수시스템 운영 및 유지관리 -시스템 운영 및 유지 관리 -구성 시설별 운영 및 유지관리

② 신기술신공법 적용 등을 통한 경제성 분석

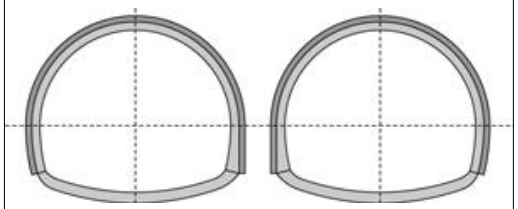
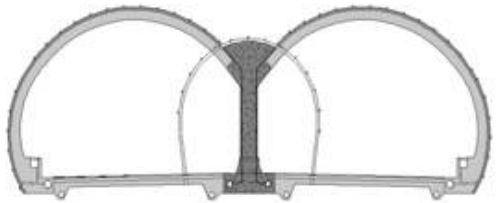
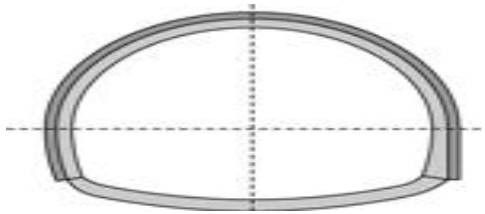
○ 본 과제 수행을 통하여 개발한 신기술신공법인 “필라지지 구조체” 건설기술을 중 빗물저류공동 건설기술에 적용하였을 경우, 현재 국내에서 중대규모의 빗물저류공동 시설물로 사용할 수 있는 대표적인 공동터널 공법과 함께 제시하여 기술의 적용성, 장단점 및 경제성을 다음 표와 같이 비교분석 하였음.

<표 3.1.24 중대단면 저류공동 건설공법 특성비교>

구분	A. 초근접병설 공동터널		B. 2 Arch 공동터널		C. 대단면 공동터널	
개요도						
단면제원	우수 (100% 기준)	◉	불리 (A안 대비 약 5 % 이상 증가)	▲	가장 불리 (A안 대비 약 20 % 이상 증가)	×
경 제 성	우수 (100% 기준)	◉	가장 불리(A안 대비 20 % 이상 증가)	×	불리(A안 대비 약 10 % 이상 증가)	×
시 공 성	시공성 양호	◉	시공성 불량	×	시공성 보통 (토피고 감소 및 분할굴착)	▲
안 정 성	주변지반 이완감소 및 필라부 보강으로 안정성 보통	▲	주변지반 이완감소 및 필라부 콘크리트 구조물지지로 안정성 보통	▲	주변지반 이완증가로 안정성 확보 불리	▲
보 상 비/ 지 장 물	용지편입 감소→ 보상비 및 민원방지 최소화	▲	용지편입 감소→ 보상비 및 민원방지 최소화	▲	용지편입 감소→ 보상비 및 민원방지 최소화	◉
유지관리	유지관리 양호	◉	유지관리 불량	×	유지관리 양호	◉
시공사례	시공실적 적음	×	시공실적 보통	▲	시공실적 적음	▲
장·단점	- 용지편입 최소화로 보상비 감소 - 복수개 터널간 분리되어 유지관리가 보통 - 필라부 보강비 발생하나 공종이 단순하고 공기, 공사비 측면에서 경제성 가장 유리 - 필라폭 감소시에 확실한 안정성 보강공법 적용필요 - 저류용량 확대 적용시 추가 병설건설 등 대응성유리		- 용지편입 최소화로 보상비 감소 - 중앙부 콘크리트벽체부 유지관리 다소 불리 - 중앙부 선진터널시공 등 공정이 매우 복잡하고, 공사비 증가에 따라 경제성불리 - 저류용량 확대 적용시 병설건설 적용곤란		- 용지편입 최소화로 보상비 감소 - 일단면으로 유지관리 비교적 양호 - 대단면적에 따른 주변지반 이완증가, 안정성 불리 - 저류 용량 확대 필요시 병설건설 적용곤란	
비 고						

주1) 적용성 평가 → ◉ : 양호, ▲ : 보통, × : 불리 주2) 상기 정확한 단면, 경제성평가는 현장, 구조물, 지반조건에 따라 별도의 검토가 필요함

<표 3.1.25 저류공동 건설공법 경제성 검토>

구분		A. 초근접병설 공동터널	B. 2 Arch 공동터널	C. 대단면 공동터널
개 요 도				
단면 제원	굴 착 단 면 적	170.1㎡	181.8㎡	218.3㎡
	높이 / 폭	7.842m / 28.567m	8.371m / 24.100m	11.627m / 22.423m
	적 용 연 장	285m	285m	285m
토 목 공사비	굴착 및 버력처리	2,170 백만원	4,319 백만원	3,876 백만원
	보강 및 안정	3,134 백만원	1,476 백만원	4,189 백만원
	콘크리트 라이닝	2,004 백만원	3,331 백만원	2,316 백만원
	방수 및 배수	476 백만원	902 백만원	443 백만원
	기 타	1,656 백만원	3,921 백만원	1,195 백만원
	필라부 보강	2,345 백만원	- 백만원	- 백만원
	소 계	**10,817 백만원**	**13,950 백만원**	**12,019 백만원**
	M당 공사비	**41 백만원**	**49 백만원**	**42 백만원**

주 1) 상기 건설공법 경제성은 대구순환고속도로 건설공사구간중 OO터널 설계조건을 기준으로 작성하였고, 보다 정확한 경제성 검토는 해당 사업 구간에서 실제 현장, 구조물 설계조건 및 지반조건에 따라 별도의 검토가 필요함.

제 2 절 지하공간 침수위험도 평가기법

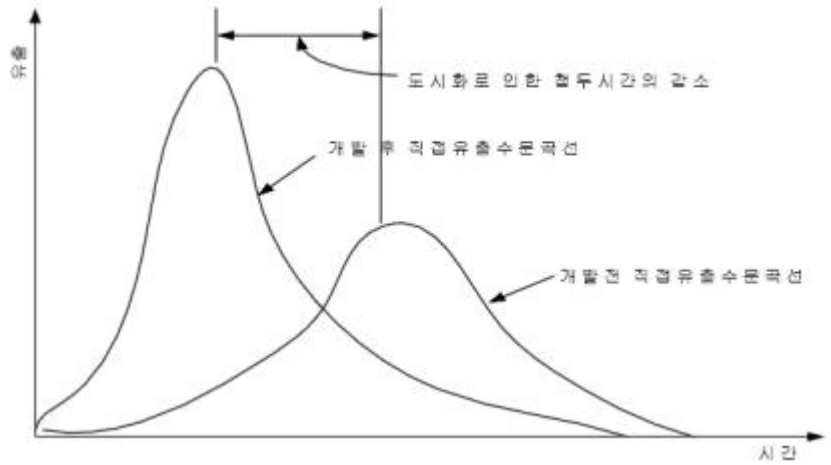
1. 지하공간 침수위험도 평가 방안 수립 [1차년도]

가. 지하공간 침수위험 취약성과 평가기법 설정

(1) 지하공간 침수위험 취약성 고찰

○ 우리나라는 매년 특히 우기시에 많은 강우가 내리고 있으며, 또한 되풀이 되어 발생하고 있는 집중호우에 의한 홍수침수에 대하여 도심지내 저지대나 지하시설물 등은 침수위험 개연성을 항상 가지고 있음.

○ 특히, 현대의 도시유출은 불투수표면이 증가하고 배수관망 부족 등은 폐쇄된 지하 거주 생활공간은 경우에 따라 대규모의 인명피해가 발생할 수 있는 잠재성을 가짐.



<그림 3.2.1 도시화에 따른 도심지 유역 수문곡선의 변화>

○ 외부적인 수문학적인 침수요인에 외에도 도심지 빗물유출량과 속도의 증가는 임의 유역내 하수/우수 배수시설의 기능불량, 노후화 등으로 인하여 신속하고 적절한 배수체계가 작동하지 않을 수 있어 지하공간 인접유역의 내수침수발생을 야기함

○ 도심지 저지대 개발 및 인구집중으로 건설된 지하상가나 지하철 역사의 진출입구의 경우 출입구 방지턱 설치시에 주변지역의 침수고를 고려하지 않고 설계시공하는 경우가 많음

○ 지하공간내 침수에 대한 비상 대피로/대피소 등 시설의 부족, 위치 적절성 검토 미흡, 비상 대비관련 정보와 교육, 홍보 등 비상대피체계 부족

○ 집중호우에 따른 빗물 유입시, 특히 설계강우 이상의 빗물침수의 경우 설치된 배수펌프의 용량 부족, 전기단전 등이 발생할 경우의 대안 설정 미흡하여 오히려 외부로부터의 역류 피해가능성

○ 최근의 도심지 집중호우의 빈번한 발생과 침수, 지하공간 빗물유입침수 등의 내수침수 위험성이 증가되나, 이를 하천으로 신속하게 배제하기 위한 배수펌프장과 도심지내 임의 위치에 대용량의 빗물을 저류시킬 수 있는 유수지와 같은 적극적인 구조적 수방재시설이 필요하나 지상공간의 부족, 지가 상승 등에 의한 공사/운영비가 증가하는 문제점을 가지고 있음

○ 이러한 지하공간 침수위험에 대한 취약성에 대하여 우수관거 설계빈도나 토지이용도별 유출계수의 적절한 이용, 지하구조물의 사전영향평가에 의한 침수대비 안전대책의 마련이 있으며, 특히 유역 내수침수를 포함하여 발생할 수 있는 지하 생활/거주공간의 침수위험성에 대하여 적극적이고 구조적인 별도의 수방시설 및 관련체계의 설정이 요구됨.

(2) 침수위험도 평가기법

○ 구조물 등의 위험도에 대한 분석과정은 다양하게 제시될 수 있으나 일반적인 통계학적 분석(부하조건 평가를 위한 매개변수), 위험도 분석(발생 가능한 불리한 결과의 감지 및 정량화), 의사 결정(시나리오 또는 입력요소가 결과에 미치는 영향을 평가)의 과정을 포함함

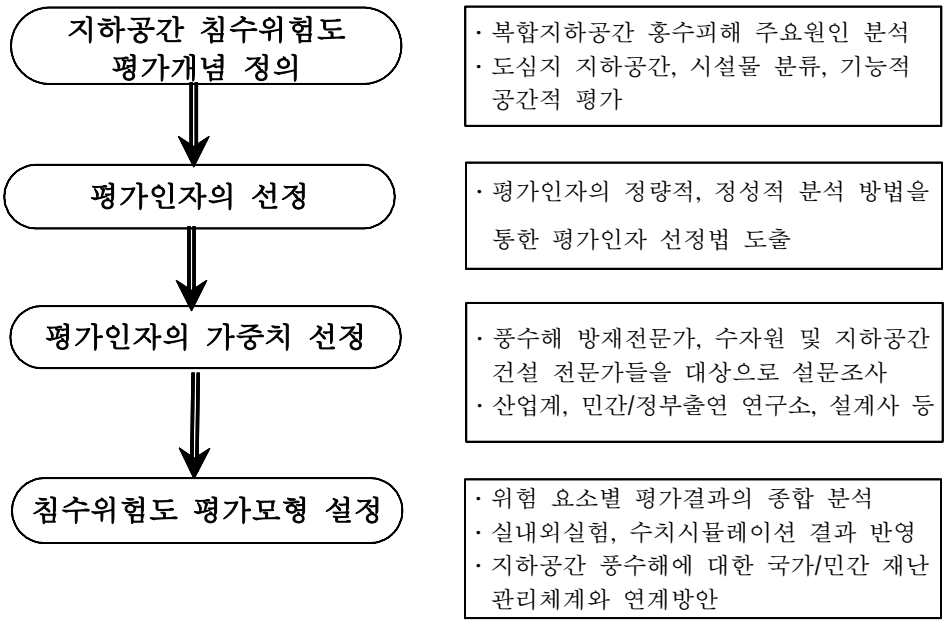
○ 국내의 홍수피해에 대한 지역의 홍수위험도 평가와 관련하여 국토해양부의 수자원 장기종합계획, 소방방재청의 지역별 안전도 평가기법 개발연구, 그리고 국토연구원의 홍수피해 특성분석 및 홍수피해지표 개발에 대한 연구 등에서 지역의 안전도에 대한 평가법을 제시하였음.

○ 침수위험도 평가와 관련하여 기존 문헌 및 사례조사 분석을 기초로 하여, 풍수해 재해위험도, 터널 및 지하공간 건설분야 전문가 설문조사와 AHP(Analytical hierarchy process) 기법을 통하여 지하공간 침수 위험도 평가를 실시함. 이때 홍수시 지하공간내 침수에 영향을 미칠 수 있는 각종 위험요소에 대한 대책에 관하여 우선순위평가 방안을 개발함으로써 체계적이고 합리적인 의사결정 수단을 제시함

○ 지하공간 침수위험 평가항목에 대한 평가기준은 지하시설물 설치에 대한 관련 법령, 규

정 및 침수안전 시설물에 관련한 건설지침, 시방기준 등을 활용하였음. 또한 도심지 지표 유출해석결과에 따른 침수위 등을 지하공간 유입수 입력특성으로 하고, 폐쇄된 지하공간내의 유입수 유출유동해석(CFD)을 신뢰도 있는 모델 등을 이용하여 설정된 각 평가항목에 대한 검증 및 보완을 계획하였음.

○ AHP 분석 알고리즘에 의해 산정된 가중치를 이용하여 임의의 지하공간에 대한 표준적인 침수위험도 평가 모델을 제시하고, 위험도 수준의 설정과 관련 위험도 평가 등급 구분을 설정 계획함.



<그림 3.2.2 지하공간 침수위험도 평가모형 설정 절차>

(3) AHP(Analytical hierarchy process) 기법

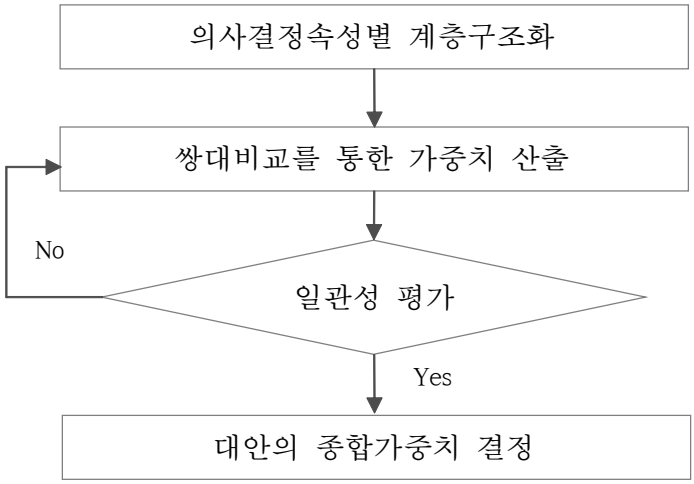
(가) 개요

○ 의사결정분석 영역에서 1980년 Saaty가 AHP(Analytical hierarchy process)를 개발한 이후, 토목분야를 포함하여 지금까지 다양한 학문 분야에서 AHP에 대한 이론 개발 및 연구가 진행되었음.

○ 건설분야에서의 기술개발 동향으로 AHP 기법을 이용한 도로유지 보수 우선순위 평가모형 개발, 절토사면의 합리적 유리관리방안, 상수도관망의 위험요소 우선순위 평가를 위한 모형 개발에서 그리고 해외의 경우 홍수위험도 관리 분야에 대하여도 활용 사례가 있음.

○ Saaty가 체계화한 AHP기법 모형 개발은 의사결정과 관련한 문제를 해결하기 위하여 일

반적으로 다음과 같은 4단계로 구분할 수 있음.



<그림 3.2.3 Procedure of AHP application>

(나) AHP 평가모형

○ 쌍대 비교를 통한 상대적 가중치 산출

상위계층의 각 목표를 달성 또는 평가하기 위하여 대표적으로 9점 척도에 따른 상호 비교하여 중요도 부여, n 개의 요소로 구성된 쌍대 비교행렬을 작성함. 각 행렬의 가중치는 고유치(eigen value)를 계산하여 구하나, 이 방법은 계산이 복잡하므로 보통 근사방법인 산술평균과 기하평균을 주로 사용함.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & 1 & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

여기서, $a_{ij} = 1/a_{ji}, a_{ii} = 1, \forall i$ 이다.

○ 영향요소간 쌍대비교 척도

- 설문에 의한 개별요소별 쌍대평가에 의한 상대적 중요도 설문시 9점 척도를 사용

<표 3.2.1 두 영향요소의 쌍대비교 척도>

중요도	정 의
1	쌍대비교 위험인자 좌(A), 우(B)가 서로 비슷함 (Eaqual importance)
3	위험인자 좌(A)가 우(B)보다 약간 중요함 (Moderate importance)
5	위험인자 좌(A)가 우(B)보다 중요함 (Strong importance)
7	위험인자 좌(A)가 우(B)보다 매우 중요함 (Very strong importance)
9	위험인자 좌(A)가 우(B)보다 극히 중요함 (Extreme importance)
2, 4, 6, 8	위에 표현된 중요 정도의 중간 개념으로 사용

○ AHP 모형을 설계할 때 전문가들의 지식에 대한 신뢰도를 평가할 수 있는 척도로 일반적으로 일관성(CR : consistency ratio)을 사용함. CR=0라는 것은 전문가들의 지식에 대한 신뢰도가 가장 완벽함을 의미하며, CR이 0보다 클수록 판단의 일관성이 나빠지고 있음을 의미함.

○ 일관성(CI)을 추정하기 위해 n개의 요소들 즉, $A_1 \cdots\cdots A_n$에 대해 일정한 기준의 특성치(중요도, 선호도 등) $W=(w_1 \cdots\cdots w_n)$의 쌍대 비교함.

$$A = \begin{array}{c} \\ A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} A_1 & & & A_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \cdots\cdots & \frac{w_1}{w_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \cdots\cdots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \end{array}$$

○ 일관성지수(consistency index)

일관성에 대한 편차는 일관성지수(consistency index), CI로 나타낸다

$$\text{일관성지수, } CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}$$

○ 일관성의 정도; CR을 사용하여 일관성의 정도를 측정함

$$CR = \frac{CI}{RI} = (\frac{\lambda_{\max} - n}{n-1})(\frac{1}{RI})$$

여기서 CI는 일관성지수로써 일관성이 클수록 0에 가까운 값을 가짐. RI는 Random Index로 1부터 9사이의 난수를 사용해서 구성한 비교행렬의 CI들의 평균값이며, RI는

비교행렬의 크기 n에 따라 다르고, Saaty의 시뮬레이션 결과에 따라 다음 표와 같이 요약됨.

<표 3.2.2 Consistency Index의 평균값>

행렬크기	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

○ 일관성 비율이 높은 경우에는 CR < 0.1의 조건을 충족시키기 위하여 응답자들을 대상으로 반복하여 설문을 실시하거나, 복잡한 문제일수록 다수의 평가자 참여할 경우 관련 신뢰성과 보편성을 가질 수 있음.

○ 최하위 계층에 있는 여러 속성에 대한 상대적 비중 또는 우선순위를 구하기 위하여 상대적 가중치를 종합함

○ 종합가중치를 구함으로써 최상위 계층에 있는 의사결정 문제의 일반적 목표를 달성함에 있어서 최하위 계층에 있는 여러 속성들이 어느 정도 영향을 미치는지 구분 가능

○ 이는 앞에서 구한 각 계층의 가중치를 종합하여 다음과 같이 산정 가능

$$W_i = \Sigma(w_j)(u_j^i)$$

여기서, W_i : I번째 대안의 종합가중치

w_j : 평가기준 j의 상대적 가중치

u_j^i : 평가기준 j에 대한 I번째 대안의 가중치

나. 지하공간내 유입수 동적거동 평가방안의 설정

(1) 유입수 해석적 동적거동 분석방안

○ 지하공간내에서 빗물유출에 대한 거동 검토와 수치•수리 시뮬레이션이 국내 일부 학계 연구기관에서 시도하고 있으나, 지하공간 침수위험평가와 연계하거나 체계적이고 합리적인 대책강구, 기법 개발측면에서는 초기 단계임.

○ 지하공간 침수재해에 대한 방지 또는 최소화, 대응체계 수립을 위하여 수치시뮬레이션에 의한 지하공간내 침수양상, 침투경로 예측, 침수심 등 유입수의 해석적, 동적 거동에 대한 체계적이고 합리적인 분석방안이 설정이 되어야 함.

○ 특히 시민의 대피경로는 지하공간내 내부 유입수 거동 및 침수예상분석 결과와 주변상

과의 연결성 등을 고려하여 침수유입위험성을 피하여 안전하게 사전에 준비하여야 하며 주대피통로 경로를 제시할 수 있어야 함.

(2) 지하공간 침수해석 기술

(가) 경험식에 의한 검토

○ 지하공간의 침수위험도를 평가하는 기존의 방법은 정성적인 방법이 주로 적용되었으나, 최근 수치해석적 방법을 사용한 동적거동 평가에 관한 연구가 국내외에서 수행되었음. 경험식을 이용한 방법은 단순히 하나의 출입구로 물이 유입되고, 침수속도를 가정하여 지하공간의 침수심을 예상하였음.

<표 3.2.3 경험식(행정자치부(2004), 김(2005))>

구 분	경 험 식
유입량	$Q(t) = 1.59BH(t)^{1.65}$
침수심	$h(t) = V(t)/A_s$
침수속도	수심 0.0~0.5m - 추정 침수속도 2㎝/분

주) B : 유입폭(m)

H(t) : t 시각의 지상의 침수고(m)

Q(t) : t 시각의 지하공간의 유입량(㎥/S)

h(t) : t 시각의 지하철 역사 내부 침수심(m)

V(t) : t 시각의 지하철 역사 내부에 유입한 용량(m)

A_s : 유입수가 지나는 지하철 역사 내부의 바닥면적(㎡)

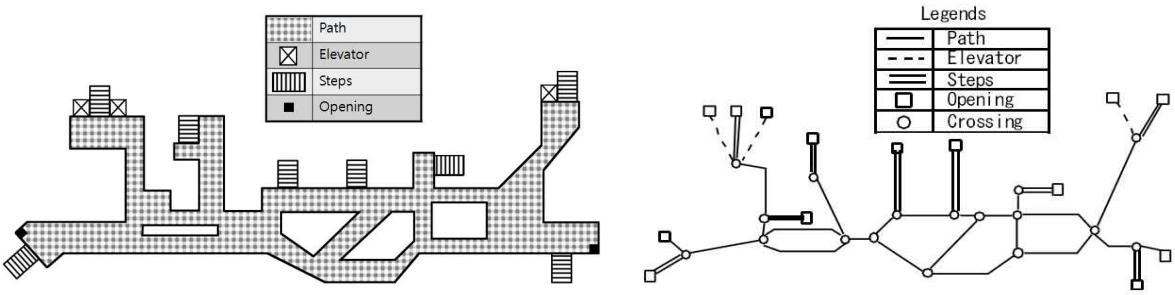
(나) 범용프로그램을 이용한 검토

○ 김 등(2005)는 과거 침수피해 이력이 있는 지하철 역사를 대상으로 XP-SWMM모형내의 EXTRAN 블록을 이용하여 시간별, 층별, 지점별 침수속도, 침수심 및 흐름방향 등을 분석하였음. 지하 3층의 역사이며, 총 33개관으로 모사, 하수관거 월류에 의한 지하철 출입구 4개에서 우수가 유입된다고 가정하여 분석하였음. 또한 이 등(2006)도 DEM 기반의 도시침수해석을 SWMM 프로그램을 이용하여 해석을 수행하였음.

○ Dutta(2003) 등은 일본내 도심지 임의의 지하철 역사내 통로, 계단, 승강기 및 출입구 등 주요 시설물을 Node와 Link 개념으로 단순화하여, 기본적인 연속방정식과 흐름방정식을

적용함으로써 지하공간내 유입수의 흐름 및 침수거동에 대한 시뮬레이션 해석을 수행하였음.

○ 이러한 방법은 지하철역사내 시간별, 층별 지점별 침수속도, 흐름방향, 침수심을 계산 및 도시하여 나타낼 수 있으며, 여러 개의 저지대 출입구로 물이 유입되는 것과 최종 침수시간을 고려할 수 있음.



<그림 3.2.4 복합지하공간 배치현황 및 복합지하공간 시설물 모델링(Dutta. 2003)>

(다) 비정형 격자기반 지하공간 침수해석모델을 이용한 검토

○ 한 등(2006)은 흐름률을 이용한 불연속적인 흐름해석이 가능한 고정확도 침수 해석모형을 개발하여 실험하도에 대하여 모형을 적용하였으며, 하천흐름과 침수해석 연계를 통하여 실제하도에 적용하였음. 지하공간에 대한 침수원인 분석, 침수해석을 위해서 기본적으로 내수침수 또는 외수 범람된 홍수류가 지하공간으로 유입되는 과정을 해석하기 위하여 고정확도 해석기법과 Link-Node-Block 기법을 연계하여 해석하였음. 여기서 지하도 및 지하철은 Link-Node기법을 이용하고, 지하상가의 경우 Link-Block기법을 이용하여 기존 홍수 발생기록과 비교 검토하였음.

(3) 지하공간내 침수예상 해석기법

(가) 지하공간 침수해석 개요

○ 기존의 지하공간 침수예상 분석사례에서는 경험에 의한 간략법이나 일차원 해석개념을 도입하였으나, 보다 실제적인 Modelling에 한계가 있으며, 특히 임의 2차원적인 기하학 평·곡면 등을 고려한 조건에서 빗물 유출 거동 분석이 곤란함. 그러므로 1D 관망 조건과 평면/곡면 2D조건상에서의 유출해석을 연계할 수 있는 '1D-2D 연계' 해석이 보다 실제적인 유출, 침수예상기법으로 점차 최근 평가되고 있음.

○ 1차년도 연구단계에서는 XP-SWMM(ver. 2010) 모형에 포함되어 있는 1D-2D 모델을 이

용하여, 침수예상해석 기법 및 해석 Tool에 대한 적정성을 평가하기 위해 지하철 역사를 해석대상으로 예비 선정, 해석하였으며, 2차년도에서는 임의의 실제 시범지역을 선정한 후, 유역 내수침수 및 배수시스템과 연계하여 집중적으로 지하공간 침수예상분석 및 주 해석을 수행하는 것으로 계획함.

○ 2차원 빗물유출해석을 위한 기본 해석엔진은 강과 연안 수리 모델 구축 외에 2차원 도시범람 모델링에 실용적인 옵션으로, 2D 모델링 패키지는 WBM Oceanics Australia 및 퀸즈랜드 대학교에서 개발한 “TUFLOW” 프로그램임. 지상 홍수유출 또는 조수파(tide) 흐름해석이 가능한 1D-2D 연계 자유평면 흐름해석(Free surface flow analysis)이며, XP-SWMM (ver. 2010)내에 링크되어 해석 가능함.

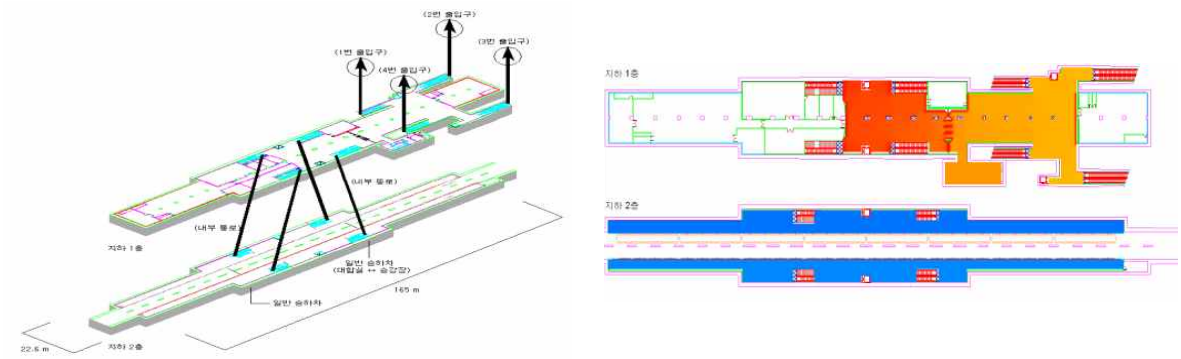
(나) 지하공간 1D-2D 표면 유출해석

○ 해석 대상 구조물

서울시 강남지역 OO배수구역내 침수이력이 있는 지역으로써, 임의의 A지하철 역사를 선정하여 지하공간 유출수 흐름 해석을 실시함. 출구와 지하 2층 연결통로가 각각 4개로 구성되어 있고, 지하 2층에는 모두 스크린도어가 설치되어 있음.

○ 지하공간 침수시나리오

- 지속적인 강우로 인근 유역 침수후, 출입구 4개소를 통한 지하공간내 빗물유입량 2,880m^{3}가 1시간 동안 유입된다고 가정
- 지하 1층 빗물유출 확산 후, 지하 연결통로를 통하여 스크리도어가 설치되어 폐쇄되어 있는 지하 2층으로 빗물 유입, 침수 조건



(a) A지하철 역사 개요도　　(b) 빗물유입 60분 후 침수위 분포

<그림 3.2.5 1D-2D 연계모형의 시간별 침수 결과>

○ 해석결과 고찰

- 지하 1층은 물이 유입 시작 2분 후 만에 개찰구까지 물이 도달하였으며, 유입 시작 5분

후에는 지하 1층 전 구간에 물이 도달하여 침수되었음. 지하 1층은 물이 유입되는 동안 최고 30cm의 침수심이 발생하였으며, 지하 2층 연결통로를 통하여 지하 1층의 빗물이 유출에 의하여 지하 1층의 침수심이 비선형적으로 감소함. 지하 2층의 경우에는 지상출입구로부터 물이 유입 시작 3분 40초 이후부터 침수가 시작하였으며, 유입 시작 9분 후에는 지하 2층의 전 구간이 침수되고, 침수위 수렴 후 지하 2층 승장장의 침수심은 최소 1.6 m 이상으로 나타남.

- 지하공간내 침수 해석결과로부터 시간별 임의 위치 침수위 변화와 유속 등의 정보를 얻을 수 있으며, 이러한 결과는 비상시 대피시간과 안전위치, 대피로의 선정 등 지하공간 수방재 대피체계의 설정에 기초자료로 활용할 수 있음.

2. 지하공간 침수위험인자 분석 및 정성적•정량적 평가기준 수립 [2, 3차년도]

가. 침수 위험인자의 정성적•정량적 평가 수행

(1) 복합지하공간 침수위험인자의 위험도 등급의 설정

(가) 복합지하공간내 위험도 평가군(Group) 선정

○ 위험도 평가군의 설정은 임의의 지역조건과 수문학적 조건, 지하공간내의 침수취약성 또는 침수위험영향을 고려하여 국내외 기존 수공/수방재관련 문헌 및 연구결과를 조사, 평가 후, 수리수문 및 수방재 전문가의 자문 등을 통하여 위험도 평가군을 설정하였음.

○ 침수위험 평가 2위계 평가군(Criteria)

지하공간 침수원인 중 자연적인 원인의 하나인 하천범람으로서 지상 및 지하공간에 대한 공통적인 원인이므로 제외하고, 지하공간 유형별 침수원인과 인위적인 침수원인에 대한 분석에 의하면 위험도 평가군을 선정함.

(나) 침수위험인자 분석 및 도출

① 주변지역 현장조건

○ 해당 지역의 지형지리 및 위치적인 조건과 내배수체계의 특성에 기인하는 것으로 지하공간이 위치하는 저지대나 토지이용특성, 그 유역내 배수체계의 문제 등으로부터 주로 홍수에 의한 내수침수가 발생하여 지하공간의 침수위험 가능성이 큼.

○ 침수위험인자 3위계 평가 항목(Alternatives)

- 저지대, 경사 등 지하공간 위치의 지형 조건;

  저지대 등에 지하공간이 위치하는 지형, 지리적 조건은 침수 위험이 큼

- 지역내 우배수 체계 및 용량;

  지역내의 내수침수에 대한 우배수시설 처리용량이나 확충조건

- 지역내 비포장률;

  지역내 토지이용 계획에 따른 지표면의 포장정도는 강우에 대한 빗물침투, 투수속성에 관계되며, 지표유출량에 직접적인 영향을 줌

- 유사(모래) 퇴적등에 따른 배수능 불량;

  지역내 유수 배수 기능에 관련된 사항으로 모래 등의 퇴적이 될 경우 통수단면 축소가 되거나 유수흐름 장애요인 특성임

② 지역 강우특성조건

○ 일차적으로 그리고 직접적으로 유역 및 지하공간의 홍수/침수 재해의 요인이 되며, 그

지역의 강우특성에 기인하는 것으로 강우강도, 지속시간, 발생빈도 등의 특성임

○ 침수위험인자 3위계 평가 항목(Alternatives)

- 집중호우 강우강도, 강우량;

  복합지하공간이 포함되어 있는 유역내 강우특성으로 집중호우나 강우강도

- 강우지속시간, 강우 발생빈도;

  해당지역의 지속적인 강우에 따라 설계빈도를 초과하여 발생할 수 있는 복합지하공간이 위치하는 지역의 강우특성임

- 지하공간의 침수이력;

  과거 여러 가지 원인에 의한 대상 지하공간의 침수이력 여부는 침수가능성의 하나의 고려인자로 볼 수 있음.

③ 지하공간구조물 침수취약성/대처체계 조건

○ 외부의 침수위험조건에 대하여 침수위험 대상 지하공간은 구조시설물 자체 또는 부대시설 조건 등에 의하여 빗물이 유입되어 침수될 수 있는 취약성을 가짐.

○ 또한, 비구조적 수해방지체계로써 침수예방, 비상시 대처, 대피 체계를 영향인자로 포함하였으며, 이 경우 예방/대비/대피 등에 대한 전반적 시스템이 필요함

○ 침수위험인자 3위계 평가 항목(Alternatives)

- 출입구, 환기구 특성;

  외부로부터 지하공간내로 빗물이 들어오는 주요 통로이며, 출입구/환기구 등이 많거나 입구턱의 높이가 낮으면 침수위험성이 커짐

- 구조물 침하, 노후화원인 유입수 침투(침하/균열/부식/방수성약화);

  외적 침수요인은 아니나, 구조물의 부등침하 또는 설계수명 이상의 시간이 경과할 경우, 콘크리트 열화 등에 의하여 구조물 균열이 있을 수 있으며, 이때 외부 빗물이나 지하수 등이 유입되어 침수영향을 미칠 수 있음. 복합지하공간시설물의 연결부나 균열을 통한 누수 및 지하수의 배수를 위한 공법은 일반적인 설계에 반영되고 있은 사항으로 시공중 이음부 차수/방수를 위하여 별도의 품질관리가 중요함

- 인접시설물 출입, 연결/환승 통로;

  침수 대상 구조물의 침수취약성보다도 인접한 건축물, 시설물과의 연결/환승 통로로부터 빗물이 유입될 수 있는 가능성인자

- 수해 비상대처시설, 방재 체계;

  지하공간 침수가 발생하여 비상시 인적/물적 손해재해를 입을 수 있으며 이에 대하여 보

다 체계적이고 신속하게 안전성을 확보할 수 있도록 대피 장소나 대피경로를 고려하여야 함. 또한 비상시 대피 경보•방송 체계와 있을 수 있는 누전방전체계 등도 영향인자로 포함하여 침수위험도 평가에 반영하였음. 침수방재 시설물이나 장치 등과 함께 복합지하공간내에 체류하여 생활하는 시민과 이용자에 대한 전반적 수방재 교육/홍보 등이 침수위험도 주인자의 하나임

④ 구조물 배수시설조건(침수안전성)

○ 외부의 침수위험조건에 대하여 침수위험 대상 지하공간은 시설물 자체 또는 부대시설 측면에서 시설물내부의 유입수 등에 대하여 배수 또는 침수방지할 수 있으며, 집수/배수/역류/차수와 관련한 시설이나 장비이고 이는 가능한한 구비가 잘 되어 있을 경우 침수위험 또는 취약성에 대한 대책, 안전성의 특성을 가짐

○ 지하공간 시설물 외부로부터 유입되는 빗물을 방지하거나 지체시키는 기능을 갖는 장치나 기구, 재료들이 빗물유입 지체/방지시설로 정의하였음

○ 침수위험인자 3위계 평가 항목(Alternatives)

- 구조물내 집수, 배수 장치 및 시설;

  시설물내에 유입수에 대한 차집과 유도, 집수시설 들을 의미하며 대표적으로 통로측면 측구나 집수정 등을 고려할 수 있고, 배수 및 하수관거와 배수펌프 등은 지하공간내 유입수를 가능한 한 빨리 배제시키는 기능을 가지는 인자임

- 외부 내수침수에 대한 역류방지시설;

  내수 침수의 경우 자주 주변 유역의 침수, 인접배수시설의 용량초과나 기능불량으로 대상지하공간으로 역류하여 구조물 내부가 침수될 수 있으며 이에 대한 역류방지시설을 설치하는 것이 침수위험성을 줄일 수 있음.

- 빗물 유입 지체/방지 시설;

  빗물이 유입되는 시설물에 주로 설치되는 장치, 재료 등이며 대표적으로 침수방지턱, 방수판, 방수문, 모래주머니 등이 있음

- 빗물 배수/방수로, 저류 터널;

  인접유역 침수 또는 지하공간내의 유입수에 대한 적극적, 구조적 수방재 시설물이며 지상의 홍수터 등과 같이 지중에 저류공동을 두거나, 배수박스구조물/방수로터널 등을 두어 많은 양의 유출수/유입수를 신속히 배제시킬 수 있음.

⑤ 도심지 복합지하공간 침수위험인자 선정

○ 1차 연구단계에서 선정하였던 침수위험인자에 대하여, 전문가의 자문 등으로 조사의 현

실성 등을 고려하여 1위계 평가 최종목표(Goal)인 ‘도심지 복합지하공간 침수위험도’ 평가를 위하여 총 4개의 2위계 평가군(Criteria), 각 3~4개의 3위계 평가항목(Alternatives)으로 선정하였으며 선정결과를 다이어그램으로 표현하면 다음과 같음.



<그림 3.2.6 복합지하공간 침수위험도 침수위험인자 체계>

(라) 위험인자별 위험도 평가등급의 설정

○ AHP 평가 기법에 의한 각 항목별 가중치 산정결과에 대하여, 각 영향 인자 항목별 위험정도별로 가변 배점 배분하며, 설정된 침수위험 인자에 대하여 침수이력, 시설의 설치여부, 설계용량 등의 현장조사사항을 기준으로 하여 상세 평가기준등급을 설정함

○ 2차년도에 자문 및 기존 문헌조사 등을 통하여 보다 객관적인 평가기준 근거를 확보하며 이에 따라 가능한 한 평가기준등급을 정량화하여 합리적인 값으로 확정한 후, 임의의 가상 지하공간을 선정한 후 침수위험도 사례평가를 실시함 (이 때, 정성적/정량적 판단에 의한 영향인자의 배점계급 구분)

<표 3.2.4 침수위험도 등급 설정 - 주변지역 현장조건>

구 분	항목별 등급설정 및 가중치
1) 저지대, 경사 등 지하공간 위치의 지형 조건	
정 의	저지대 등에 지하공간이 위치하는 지형/지리/입지 조건: 상대적으로 주변, 특정지역의 지표고보다 낮은 지역과 지형적인 표고차에 따른 경사 등을 의미하며, 지하공간이 포함된 유역에 인접하는 주요 하천의 계획홍수위를 기준으로 함
등급구분	• 계획홍수위 기준, 해당지역 지형고 차(m), 6m 이상, 6~4, 4~2, 2~0, 0m 미만
가중치 배점	범주 구분별 5개 등급
2) 지역내 내수 우배수 체계 및 용량	
정 의	유역내의 내수침수에 대한 우배수시설 처리용량이나 확충조건
등급구분	• 지하공간 해당유역 하수/배수관거 설치/용량 적정성(상중하) • 집수시설(맨홀 등)의 설치/용량 적정성(상중하) • 배수펌프장 설치, 유지관리 및 점검체계 여부(상중하)
가중치 배점	해당항목별 각 3개 등급, 총 9개 등급
3) 지역내 비포장률(침투집수 영역 포함)	
정 의	지역내 강우 지표흐름 주원인인 지표면의 빗물침투, 투수 속성과 관련한 것으로 포장율에 대한 조건
등급구분	• 임의 지역 면적기준 대비 지표의 비포장 비율 40%이상, 40%이내, 30%이내, 20% 이내 및 10%이내 (지역내 전답, 공원녹지공간, 학교 및 집투집수 영역 포함)
가중치 배점	범주 구분별 5개 등급
4) 유사(모래) 퇴적 등에 따른 배수능 불량	
정 의	지역내 유수 배수 기능에 관련된 사항으로 모래 등의 퇴적에 따른 통수단면 축소, 유수흐름 장애요인 특성
등급구분	• 우수소통에 지장을 초래하는 모래, 오니 퇴적물 등의 등의 유지관리 • 빗물받이, 집수시설에 집수흐름 장애요인 등의 유지관리
가중치 배점	해당항목별 각 3개 등급, 총 6개 등급

<표 3.2.5 침수위험도 등급 설정 - 강우특성 조건>

구 분	항목별 등급설정 및 가중치
1) 집중호우 강우강도, 강우량	
정 의	복합지하공간이 위치하는 지역의 강우특성이며 집중호우 등의 강우강도
등급구분	• 호우에 따른 일강우량 (mm/일)로 구분하며, 150 이하, 150~300, 300~450, 450~600, 600 이상
가중치 배점	강우량 기준으로 5개 등급
2) 강우 지속시간, 강우 발생빈도	
정 의	복합지하공간이 위치하는 지역의 강우특성이며 해당지역의 지속적인 강우에 따라 설계빈도를 초과하여 발생한 호우
등급구분	• 해당지역의 설계빈도를 초과한 호우 발생횟수 없음 - 없음, 1~3회, 4~5회, 6~7회, 8회 이상
가중치 배점	발생회수기준 5개 등급
3) 지하공간의 침수이력	
정 의	과거 여러 가지 원인에 의한 대상 지하공간의 침수이력 여부
등급구분	• 과거 지하공간내 빗물유입 및 침수이력 여부; 0회, 1회, 2회 이상 • 지하공간시설물 주변 유역 내수침수이력 여부; 0회, 1회, 2회 이상
가중치 배점	해당항목별 각 3개 등급, 총 6개 등급

<표 3.2.6 침수위험도 등급 설정 - 지하공간 구조물 침수취약성/대처체계 조건>

구 분	항목별 등급설정 및 가중치 배점
1) 출입구, 환기구 특성	
정 의	외부로부터 지하공간내로 빗물이 들어오는 주요 통로이며, 출입구/환기구 등의 개소수, 입구턱의 높이
등급구분	• 출입구 및 환기구의 개소수(2개소 이하, 3~5, 6개소 이상) • 출입구 방지턱 설치 및 방지턱의 유역침수심 고려 적정성(상중하)
가중치 배점	해당항목별 각 3개 등급, 총 6개 등급
2) 구조물 노후화, 부실원인 유입수 침투 (침하/균열/부식 등)	
정 의	외적 침수요인은 아니나, 지하공간 구조물의 침하, 노후화에 의한 콘크리트 열화 등에 의하여 발생한 구조물 균열, 이때의 외부 빗물이나 지하수 등이 유입 가능성
등급구분	• 구조물 (부등)침하 손괴 이력 여부 • 구조물 방수성 기능열화에 의한 누수흔적 • 균열, 구조물 연결부 등의 내부 누수흔적, 균열
가중치 배점	해당항목 여부에 따른 총 6개 등급
3) 인접시설물 출입, 연결/환승 통로	
정 의	침수 대상 구조물에 인접한 건축물/시설물과의 연결/환승 통로로부터 빗물이 유입될 수 있는 가능성 인자
등급구분	• 인접시설물의 빗물유입가능 출입/환승/연결통로 여부 • 연결부 침수확산 방지 시설/장치 여부
가중치 배점	해당항목 여부에 따른 총 4개 등급
4) 수해 비상대처시설, 대피·방재 체계	
정 의	지하공간 침수 비상시 체계적이고 신속하게 안전성을 확보할 수 있도록 하는 비상 수재해 대처시설 사항
등급구분	• 대피 장소, 대피경로 설치 여부 • 지하공간내 대피로 장애물 처리 여부 • 계단 및 에스컬레이터 등에서의 난간 설치 여부 • 비상시 대피 경보·방송 비상조명, 안내등 확보여부 • 누전방전체계 등 설정 여부 • 통제실/전력실/기능실 안전성 여부 • 유지관리 및 점검 체계여부 • 풍수해대비 대피, 방재 교육, 비상연락 및 소집체계여부
가중치 배점	해당항목 각 3개등급, 총 24개 등급

<표 3.2.7 침수위험도 등급 설정 - 구조물 배수시설조건(침수안전성)>

구 분	항목별 등급설정 및 가중치 배점
1) 구조물내 집수, 배수 장치 및 시설	
정 의	시설물내에 유입수 차집과 유도, 집수시설, 배수장치 등 (통로 측구나 집수정, 배수펌프 등) 하수/배수관거와 배수펌프 등은 지하공간내 유입수 배제기능 시설 인자
등급구분	• 내부 빗물 유로측구 설치여부(상중하) • 집수구, 집수정, 배수구 설치 여부(상중하) • (예비)배수펌프 설치 여부(상중하) • 노후배수계통, 침전물제거 등 유지관리 및 점검 여부(상중하)
가중치 배점	해당 항목별 각 3개 등급, 총 12개 등급
2) 외부 내수침수에 대한 역류방지시설	
정 의	자주 주변 유역의 내수침수, 인접배수시설의 용량초과, 기능불량으로 빗물역류에 대한 역류방지시설
등급구분	• 역류방지 밸브 등의 장치 설치 여부(상중하) • 정기관리 및 점검 여부(상중하)
가중치 배점	해당 항목별 각 3개 등급, 총 6개 등급
3) 빗물 유입 지체/방지 시설	
정 의	빗물 유입이 가능한 시설물에 주로 설치되는 장치, 재료 등이며 대표적으로 침수방지턱, 방수판, 방수문, 모래주머니 등
등급구분	• 방수판 (여부) • 차수문(여부) • 모래주머니 등 설치(상중하) • 유지관리 체계 (상중하)
가중치 배점	해당항목별 여부 및 3개등급, 총 10개 등급
4) 빗물 배수/방수로, 저류 터널	
정 의	인접유역 침수 또는 지하공간내의 유입수에 대한 적극적, 구조적 수방재 시설물
등급구분	• 지중 저류공동 또는 배수암거, 방수로터널 등 시설 설치 또는 연계운영 적정성
가중치 배점	해당항목 3개등급

(2) AHP 기반 전문가 설문조사 수행 및 분석

○ 2차년도 단계에서 예비 결정된 4개 위험도 평가군(2단계), 그리고 각각의 3~4개의 침수위험 영향요소(3단계)에 대하여 수리수문/수방재, 상하수도, 터널건설분야 10년이상의 전문가를 중심으로 전체 60부의 설문결과를 바탕으로 요소별 가중치를 분석하였음.



<그림 3.2.7 설문자 전문분야 구성 및 침수위험도 설문조사 >

○ 가중치 종합분석 결과

- 전문가 설문 응답에 따른 중요도 및 가중치 산정 결과는 응답결과를 기초로 하여 평가 항목별 가중치를 산정, 이용함으로써 전체 가중치를 분석하였음. 이 때 일관성 평가에 의하여 CR값이 0.1을 초과하는 값은 유효하지 않은 것으로 간주함.
- 2위계의 주요 위험영향인자(Criteria)에서는 해당지역의 '강우특성' 조건으로 27.4%의 값을 보이면서 가장 크게 나타났고, 그 다음으로 '구조물 배수시설' 조건이 27.0%의 값을 보임.
- 강우특성은 해당지역의 수문학적인 침수위험인자로써 사람의 인위적으로 홍수대비 대책의 설정을 위한 조절이 불가능한 기상환경적인 침수위험 인자임. 그러므로 외부의 불가항력적인 자연조건외에 구조물 배수시설조건이 가장 큰 중요도를 갖고 있고, 그 다음으로는 해당지역의 현장조건의 순서로 볼 수 있음.
- 3위계 위헝영향인자 평가에서는 강우특성조건에서는 '집중호우의 강우강도와 강우량'이 45.7%, 지하구조물 배수시설 조건에서 '빗물 배수/방수로, 저류 터널', '빗물유입지체/방지 시설'이 각각 36.7%, 23.6%로 나타났음. 또한, 주변지역 현장조건에서 '지역내 내수 우배수체계 및 용량'이 45.4%, 지하구조물 침수취약성 조건에서는 '수해비상대처시설, 대피/방재체계'가 38.3%의 중요도를 갖는 것으로 분석되었음.

<표 3.2.8 중요도 종합분석에 따른 가중치 산정 결과>

1단계(Goal)	2단계(Criteria)	3단계(Alternatives)	가중치(비율)	비고
복합 지하 공간 침수 위험도	주변지역 현장조건	-	0.246	
	강우특성 조건	-	0.274	
	지하공간 구조물 침수취약성/대처체계	-	0.210	
	구조물 배수시설 조건 (침수안전성)	-	0.270	
	주변지역 현장조건	저지대, 경사 등 지형 조건	0.188	
		지역내 내수 우배수체계 및 용량	0.454	
		지역내 비포장률(침투집수 영역 포함)	0.133	
		유사(모래) 퇴적등에 따른 배수능 불량	0.224	
	강우특성 조건	집중호우 강우강도, 강우량	0.457	
		강우지속시간, 강우발생빈도	0.208	
		지하공간 침수이력(집중호우 원인)	0.335	
	지하공간 구조물 침수취약성, 대처체계 조건	출입구, 환기구 특성	0.230	
		구조물 노후화, 부실원인 유입수 침투 (침하, 균열, 부식 등)	0.191	
		인접시설물 출입/연결/환승 통로	0.195	
		수해 비상대처시설, 대피·방재 체계	0.383	
	구조물 배수시설 조건 (침수안전성)	구조물내 집수, 배수장치와 시설	0.200	
		외부 내수침수에 대한 역류방지시설	0.197	
		빗물 유입 지체/방지 시설	0.236	
		빗물 배수/방수로, 저류 터널	0.367	

(3) 위험인자의 정성적/정량적 침수위험 평가기준과 등급 설정

○ AHP 기반 지하공간 침수위험도 평가기준(안) 설정

계층분석법에서 선정된 각 위계별 위험인자의 배점계급에 따라 실제 지하공간 시설물이 위치하는 현장에서 위험도를 평가할 수 있도록 <그림 3.2.8>과 같이 '지하공간 침수위험도 현장조사표(안)'를 작성, 제시하였음

○ 선정된 위험인자별 배점계급에 따라 임의 평가 대상 지하공간 시설물에 대하여 평가한 후, 인자별 평가결과의 가중치에 따른 가중합으로 종합 점수화 평가함.

지하공간 침수위험도, $RCI_{UI} = \sum_{i=1}^{N} \left[(QV_{i,j}) \bullet (WV_{i,j}) \right]$

여기서, $QV_{i,j}$는 각 Alternative 별 현장상태 조사후의 평가점수 ($QV_{i,j} \geq 0$)이고, $WV_{i,j}$는 AHP 기반으로 사전 평가한 Alternative 별 가중치 결과 ($0 \leq WV_{i,j} \leq 1$)임.

○ 지하공간 침수위험도의 등급 구분 평가

산정된 종합점수의 범주를 5개의 등급으로 구분하여 점수구분을 하였으며, 이에 따라 종합적인 상태를 나타내는 침수위험도 등급을 결정하며, 결정된 침수위험도에 따라 적정 조치의 가중과 우선 순위를 제시함.

<표 3.2.9 침수위험도 등급 및 침수 대책(안)>

침수위험도 등급 구분	종합 상황	대 책
Ⅰ (20 이하)	매우 위험: 내적·외적 침수위험 요인, 전반적인 수방시설 미비, 침수요인에 대하여 무방비 상태	- 즉시 침수위험도 상세 평가, 전반적 수방재 체계 분석 후, 적절한 조치 계획, 비상 대피시설, 적극적 구조적 수방시설/장치 설치 - 지하공간 관리자, 한전/하수도 관련 기관 및 부처 협력을 통한 종합대책 필요 - 비상시 대응계획 및 시민대피체계 철저 수립
Ⅱ (21~40)	위 험: 수방시설 및 장치가 미비하여 외부침수위험 요인에 대하여 지하공간의 방재능력 적음	
Ⅲ (41~60)	보 통: 일반적인 수방시설/장치가 마련되어 일반적 강우 등에는 방재능력 있으나 폭우 강우 등 외부 침수위험 요인에 대하여 별도 방재시설 필요	- 경제성평가 및 침수위험도 평가 후 필요한 적절 수방재 조치 및 시설/장치 설치 - 침수방지 시설 및 장치 설치 (방지턱, 방수판, 차수문 등) - 비상시 대응계획 및 시민대피체계 수립
Ⅳ (61~80)	안 전: 수방시설/장치, 관련 수재해체계가 잘 갖추어 있음. 폭우 강우 등 외부 침수요인에 대해 방재능력 있음	- 즉각적인 침수재해 대비 조치는 필요 없음 - 갖추어진 침수방지 시설/장치 및 체계의 유지관리, 점검 - 비상시 대응계획 및 시민대피체계 수립
Ⅴ (81 이상)	매우 안전: 지하공간시설물 입지조건 우수, 수방시설/장치 및 관련 수재해 체계가 매우 잘 갖추어 있음	

(4) 가상위치 선정 복합지하공간의 침수위험도 분석 (시험평가)

(가) 복합지하공간 가상위치의 선정 및 분석결과

○ 2차년도 연구단계에서 제시된 지하공간 침수위험도 위험인자 각각에 대하여 침수위험도 평가기준에 따라 현장조사표(안)를 작성하여, 부산광역시 해운대구 내에 수영강에 인접하여 위치하는 ○○○건물을 임의의 가상현장으로 침수위험도를 시험평가하였음

○ 해당지역은 신도시 계획지구로써 2012년 7월을 포함하여 대상 구조물이 위치하는 유역에서 과거 5회 이상의 호우에 의한 침수이력을 가지고 있으며, 2011년 7월 약 20,000톤의 저류용량을 가지는 지하저류조를 설치하였음.

○ 침수위험인자와 관련한 현장내외 및 구조물내부의 조사현황에 따른 조사결과는 <그림 3.2.8>과 같으며, 침수위험도 조사에 따른 대상현장내 각각의 국부위치 전경 및 시설에 대한 현장기록 사진은 <그림 3.2.9>와 같음.

○ 침수위험도 시험평가 분석결과

현장조사결과에 대하여 각 위험인자별 평가후 위험도 종합상태점수(RCI)화 한 결과, 주변지역 현장조건에서 종합점수 $RCI_{Crit.I}$ = 20.6점, 강우특성조건에서 $RCI_{Crit.II}$ = 12.0점, 지하공간 침수취약성 조건에서 $RCI_{Crit.III}$ = 15.9점, 구조물 배수조건에서 종합점수 $RCI_{Crit.IV}$ = 17.4점 을 나타내어, 시험평가 대상 지하공간의 전체적인 위험도 상태점수 RCI는 65.9점으로 산정되었음. 이는 본 연구단계에서 제시된 위험도 등급 판정기준(안)에 의할 경우, 점수범위 61~80가 안전등급인(IV)에서 비교적 점수가 낮은 값을 보여 안전하다하더라도 수재해 침수재해 대책에 주의해야 할 것으로 판단됨

(나) AHP 기반 침수위험도 평가모형(안) 활용방안과 평가

○ 평가 모형은 평가자의 주관적 의견이 배제되고, 사용이 용이하며, 신속한 판단이 가능함. 단, 평가결과의 타당성을 확보하고 표준적인 평가 항목 및 가중치를 결정할 수 있는 검증방법이 필요함. 이 경우 평가 시 정량적 및 정성적 분석이 고려되므로 현 상태의 위험수준을 보다 정확히 평가할 수 있을 것임

○ 제시한 방법론은 도심지 복합지하공간 실제 현장에서 다양한 위험 영향요인들을 고려하여 정량적, 정성적으로 위험도를 산정함으로써 안전에 대한 인식제고 및 안전관리의 효율을 높이는 데 기여할 것임.

○ 지하공간 침수위험도(또는 안전도) 평가결과를 기존 도심지를 포함하여 신도시의 설계, 재개발 계획 등에 반영하여 재해위험지역을 사전에 파악하여 비상시 대피 계획 수립 등과 같은 도시 방재계획 수립의 기초자료를 제공

지하공간 침수위험도평가 현장조사표(시험평가)

■ 현장현황

○ 조사 현장 : 부산 OO 신도시 지역내 OOO빌딩 원대		
○ 조사 위치 : 부산광역시 해운대구 OO동 OOO번지 일대	○ 조사 일자 : 2012 년 5 월 일 ~ 2012 년 5 월 일 (날씨 : 맑음)	
○ 조사 기관 : ㈜서영엔지니어링	○ 조 사 자 : 한OO, 정OO	(확인 :)

1. 주변지역 현장조건

평가항목 (Alternative)	세부 평가항목	평가 등급 조사 등급 기준	등급별 점수기준	평가 점수
1) 저지대, 경사 등 지하공간 위치의 지형 조건	지하공간 인접 계획홍수위 기준(m) 대비, 또는 해당지역 최고지형고 대비 지형고차(m)	□ 6m 이상 □ 6~4 ■ 4~2 □ 2~0 □ 0m 미만	각 10/5	6.00
2) 지역내 내수 우배수 체계 및 용량	지하공간 해당유역 하수/배수관거 설치/용량 적정성	■ 상 □ 중 □ 하	각 10/9	3.33
	집수시설(맨홀 등)의 설치/용량 적정성	■ 상 □ 중 □ 하	각 10/9	3.33
	배수펌프장, 저류조/지 설치, 유지관리 및 점검체계 여	□ 상 ■ 중 □ 하	각 10/9	2.22
3) 지역내 비포장률 (침투집수 영역 포함)	임의 지역 면적기준 대비 지표의 비포장 비율(%)	■40% 이상 □ 40~30 □ 30~20 □ 20~10 □ 10% 미만	각 10/5	10.00
4) 유사(모래) 퇴적 등에 따른 배수능 불량	우수소통 저장 조래 모래, 오니 퇴적물 등의 유지관리	□ 상 ■ 중 □ 하	각 10/6	3.33
	빗물받이, 집수시설 집수호름 장애요인 등의 유지관리	■ 상 □ 중 □ 하	각 10/6	5.00

2. 강우특성 조건

평가항목 (Alternative)	세부 평가항목	평가 등급 조사 등급 기준	등급별 점수기준	평가 점수
1) 집중호우 강우강도, 강우량	호우에 따른 기왕 년 일최대강우량 (mm/24hr)	□ ~100 □ 100~200 □ 200~300 □ 300~400 ■ 400~	각 10/5	2.00
2) 강우 지속시간, 강우 발생빈도	해당지역의 설계빈도 설계강우량 초과호우 발생회수	□ ~5회 □ 6~15회 ■ 16~25회 □ 26~35회 □ 36회~	각 10/5	6.00
3) 지하공간의 침수이력	과거 지하공간내 빗물유입 및 침수이력 여부	■ 없음 □ 1회 □ 2회 이상	각 10/6	5.00
	지하공간시설물 주변 유역 내수침수이력 여부	□ 없음 □ 1~3회 ■ 4회 이상	각 10/6	1.67

3. 지하공간 구조물 침수취약성/대처체계 조건

평가항목 (Alternative)	세부 평가항목	평가 등급 조사 등급 기준	등급별 점수기준	평가 점수
1) 출입구, 환기구 특성	출입구 및 환기구의 개소수	□ 2개소 이하 ■ 3~5개소 □ 6개소 이상	각 10/6	3.33
	출입구 방지턱 설치 및 유역침수심 고려 적정성	□ 상 □ 중 ■ 하	각 10/6	1.67
2) 구조물 노후화, 부실점의 유입수 침투 (침하/균열/부식 등)	구조물 (부등)침하 손괴 이력 여부	■ 없음 □ 있음	각 10/6	3.33
	구조물 방수성 기능열화에 의한 누수존적 여부	■ 없음 □ 있음	각 10/6	3.33
	균열, 구조물연결부 등의 내부 누수존적 여부	■ 없음 □ 있음	각 10/6	3.33
3) 인접시설물 출입, 연결/환승 통로	인접시설물의 빗물유입가능 출입/환승/연결통로 여부	□ 없음 ■ 있음	각 10/4	2.50
	연결부 침수확산 방지 시설/장치 설치 여부	■ 있음 □ 없음	각 10/4	5.00
4) 수해 비상대처시설, 대피/방재 체계	대피 장소, 대피경로 설치 여부, 적정성	■ 상 □ 중 □ 하	각 10/24	1.25
	지하공간내 대피로 장애물 처리 여부, 적정성	□ 상 ■ 중 □ 하	각 10/24	0.83
	계단 및 에스컬레이타 등에서의 난간 설치 적정성	■ 상 □ 중 □ 하	각 10/24	1.25
	비상시 대피 경보·방송 비상조명, 안내등 등 적정성	■ 상 □ 중 □ 하	각 10/24	1.25
	누전방전체계 등 설정 여부, 적정성	□ 상 ■ 중 □ 하	각 10/24	0.83
	통제실/전력실/기능실 안전성 여부, 적정성	□ 상 ■ 중 □ 하	각 10/24	0.83
	유지관리 및 점검 체계여부, 적정성	□ 상 ■ 중 □ 하	각 10/24	0.83
	풍수해대비 대피, 방재 교육, 비상연락 체계 적정성	□ 상 ■ 중 □ 하	각 10/24	0.83

4. 구조물 배수시설 조건(침수안전성)

평가항목 (Alternative)	세부 평가항목	평가 등급 조사 등급 기준	등급별 점수기준	평가 점수
1) 구조물내 집수, 배수 장치 및 시설	내부 빗물 유로측구 설치여부, 적정성	□ 상 ■ 중 □ 하	각 10/12	1.67
	집수구, 집수정, 배수구 설치 여부, 적정성	□ 상 ■ 중 □ 하	각 10/12	1.67
	(예비)배수펌프 설치 여부, 적정성	□ 상 ■ 중 □ 하	각 10/12	1.67
	노후배수계통, 침전물제거 등 유지관리, 점검 적정성	■ 상 □ 중 □ 하	각 10/12	2.50
2) 외부 내수침수에 대한 역류방지시설	역류방지 밸브 등의 장치 설치 여부, 적정성	□ 상 ■ 중 □ 하	각 10/6	3.33
	정기관리 및 점검 여부, 적정성	□ 상 ■ 중 □ 하	각 10/6	3.33
3) 빗물 유입 지체/방지 시설	방수판 설치 여부, 적정성	□ 상 □ 중 ■ 하	각 10/12	0.83
	자수문 설치 여부, 적정성	□ 상 ■ 중 □ 하	각 10/12	1.67
	모래주머니 설치 여부, 적정성	□ 상 □ 중 ■ 하	각 10/12	0.83
	유지관리 체계 적정성	□ 상 ■ 중 □ 하	각 10/12	1.67
4) 빗물 배수/방수로, 저류 터널	지중 저류공동 설치 또는 배수암거, 방수로터널 등 시설 설치 또는 연계운영 적정성	□ 상 ■ 중 □ 하	각 10/3	6.67

■ 조사자 소견, 고려사항	• 해당구조물 조건 : 평가항목대상 구조물일 경우에 한하며, 불필요시는 평가항목에서 제외하여 평가합수 보정하여 계상함.

<그림 3.2.8 지하공간 침수위험도 평가 현장조사표(시험평가)>



(a) 출입구, 환기구 특성



(b) 인접구조물 환승통로



(c) 빗물유입 지체, 방지 체계



(d) 수해비상대처, 방재 체계



(e) 지하공간 방화문(차수문)



(f). 구조물내 집수, 배수시설

<그림 3.2.9 지하공간 침수위험도 평가 현장조사 사진(시험평가)>

나. 수치시뮬레이션 방법에 의한 지하공간내 유출해석, 동적거동 분석

(1 지하공간내 침수거동 해석기법의 방법

○ 본 연구에서는 추후 침수재해 대비 및 대응기술의 일환, 조건별 수방재 대피계획 설정에 활용할 수 있도록 하기 위해서 1-2차원 연계해석이 가능하며 요소 Cell 개수에 제한이 없는 TUFLOW 프로그램을 이용하여 침수억제를 위한 침수방지턱, 지하 저류공동 등의 침수영향인자를 고려한 시뮬레이션 및 민감도 분석을 수행하였음.

○ TUFLOW는 홍수로 인한 범람과 해안 조수파(tide)로부터 발생되는 자유면 흐름을 깊이방향으로 평균화하는 시뮬레이션 프로그램으로서 본래 2차원 흐름을 모델링하기 위해 WBM Oceanics Australia 및 퀸즈랜드 대학교에서 개발되었고 대표적으로 2차원 부정류흐름을 모사할 수 있음. TUFLOW내의 1차원 관망해석 기법의 ESTRY 또는 1차원 자유흐름의 ST Venant 흐름 방정식에 기초한 유사 2차원 모델링체계의 기능과 연계분석이 가능함. 또한 ISIS 및 XP-SWMM 1차원 해석기법과도 연계할 수 있으므로, 2차원 평면모델에 1차원 관망을 연결시켜 전체를 하나로 모델링할 수 있음.

○ TUFLOW에서 이용하고 있는 2차원의 지표수 유출 방정식(shallow water equation, SWE)은 다음과 같이 수평면에서의 X, Y방향으로 연속 및 운동량 편미분방정식으로 표현됨

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial (Hu)}{\partial x}+\frac{\partial (Hv)}{\partial y}=0 \qquad \text{(2D Continuity)} \qquad \text{(식 20)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}-c_f v+g\frac{\partial \zeta}{\partial x}+gu\left(\frac{n^2}{H^{4/3}}+\frac{f_l}{2g\triangle x}\right)\sqrt{u^2+v^2}-\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}=F_x$$

(X Momentum) (식 21)

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+c_f u+g\frac{\partial \zeta}{\partial y}+gv\left(\frac{n^2}{H^{4/3}}+\frac{f_l}{2g\triangle y}\right)\sqrt{u^2+v^2}-\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)+\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}=F_y$$

(Y Momentum) (식 22)

여기서, $\zeta = Water\,surface\,elevation$
$u \text{ and } v = Depth\,averaged\,velocity\,components \in X \text{ and } Y\,directions$
$H = Depth\,of\,water$
$t = Time$
$x \text{ and } y = Distance \in X \text{ and } Y\,directions$
$\triangle x \text{ and } \triangle y = Cell\,Dimensions\,in\,X \text{ and } Y\,directions$
$c_f = Coriolis \text{ force}\,coefficient$
$n = Manning's\,n$
$f_l = Form\,(Energy)\,Loss\,coefficient$
$\mu = Horizontal\,diffusion\,of\,momentum\,coefficient$
$p = Atmospheric\,pressure$
$\rho = Density\,of\,water$
$F_x \text{ and } F_y = \sum of\,components\,of\,external \text{ forces}\,(eg.\,wind) \in X \text{ and } Y\,directions$

(2) 대상지역 선정

(가) 개 요

○ 침수이력이 있는 도심지역을 대상으로 하였으며, 대상유역에 대한 유출분석모형을 구축한 후 침수량을 분석하여 빗물유입량 산정 시 반영하였음.

○ 대상 지하구조물은 상기 대상지역내의 지하1층 규모의 현장을 선정하였으며, 개략적인 지하구조물 현황은 아래의 그림과 같음.

○ 지하구조물은 지하주차공간, 지하활용공간(상가) 및 개방형 지하광장(Sunken)으로 구분되며, 3개의 지하공간 사이를 연결하는 출입구는 총 8개소이고, 지상으로부터 빗물이 유입되는 곳은 총 3개소(Inflow1~3)임.

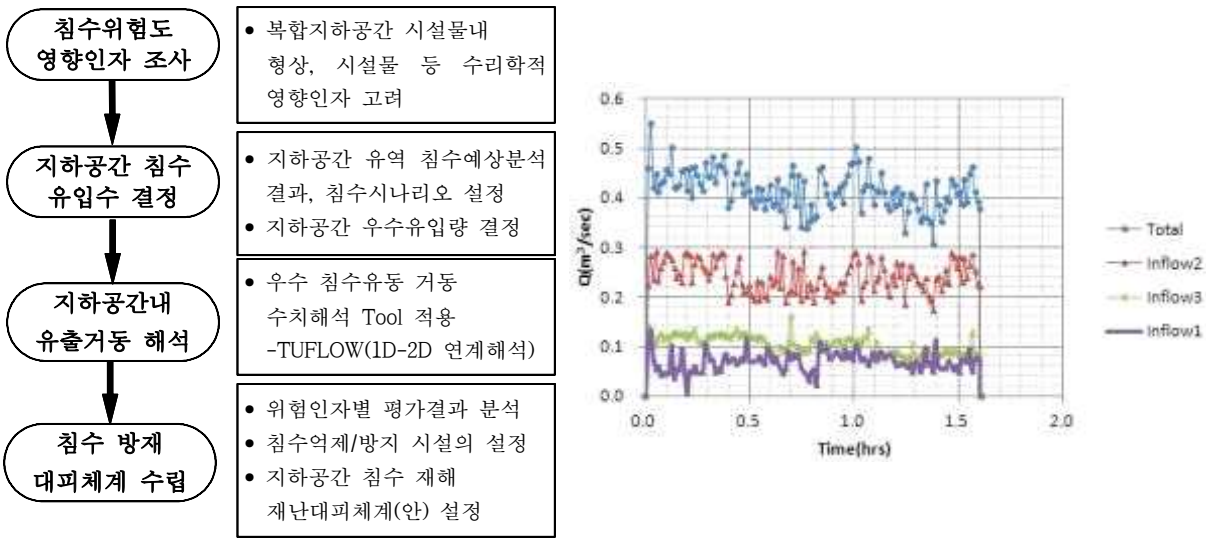


<그림 3.2.10 대상 지하구조물 평면도>

(3) 침수위험인자를 고려한 지하공간내 동적거동 시뮬레이션 수행

(가) 지하공간 침수시나리오와 해석조건

○ 부산시 임의 대상지역에 대해 지하공간 유입수 거동해석을 TUFLOW를 이용한 1D-2D 연계해석 모델 침수예상분석을 수행하였음.



(a) 동적유출해석 순서도 (b) 시간에 따른 빗물유입량

<그림 3.2.11 지하공간내 유입수의 동적거동해석 순서도와 시간에 따른 빗물유입량(수리모형실험조건에 반영)>

① 1단계 ; 유역 배수불량, 관거용량 초과 등에 의한 지하공간 출입구 유역 침수발생

② 2단계

○ 지속적인 강우로 지하공간 출입구 3개소(차량 출입구 2개소 및 개방형 지하광장인 Sunken 1개소)를 통한 지하공간내 빗물 홍수량 유입

○ 집중강우에 의하여 지하공간 출입구를 통해 총 유량 0.477m^3/sec의 빗물 유입

- Inflow1(차량 진입구) : 0.090m^3/sec
- Inflow2(차량 출구) : 0.261m^3/sec
- Inflow3(Sunken) : 0.125m^3/sec
- 3개소 총 빗물유입량 2,748m^3가 96분(1.6시간) 동안 유입되는 것으로 입력 (수리모형실험 조건 반영)

③ 3단계 ; 지하공간 출입구를 통하여 지하공간내로 유입된 빗물은 빠르게 지하주차장 공간의 기둥 및 상가시설의 통로·벽면 등을 통해 전체면적으로 확산, 침수심도(water depth, d) 증가

④ 4단계 ; 지하공간의 침수방지를 위한 수방재시설로서 침수방지턱(0.5m, 1.0m, 1.5m)을 지하주차장과 지하상가 연결통로 입구부에 설치조건을 가정하고, 침수방지턱 높이에 따른 민감도 분석 수행

⑤ 5단계 ; 지하공간의 침수방지를 위한 수방재시설로서 지하 저류공간을 고려한 경우로서, 지하 저류공간과의 연결지점을 지하공간의 유입부(지하주차장) 또는 후면부(지하상가)에 설치조건을 가정하고, 유입부 및 후면부 조건에 대한 민감도 분석 수행

⑥ 조도계수(지하공간 바닥면 및 연결 channel 내부면)

- 지하공간 바닥면 및 연결 channel 내부면의 조도계수는 「도시유역 홍수량 산정 가이드라인」(도시홍수재해관리기술연구단, 2007)에 의거하여 적용함.
- 지하주차장 출입구 2개소 : 아스팔트로 가정하여 0.013 적용
- 지하주차공간 : 매끄러운 콘크리트로 가정하여 0.012 적용
- 개방형 지하광장(Sunken) : 콘크리트로 가정하여 0.013 적용
- 지하상가 통로 : 대리석 조건을 고려하여 플라스틱관(매끄러운 표면)의 최소값인 0.011 적용

(나) 지하공간 내부 침수예상 해석결과 및 고찰

○ 지하공간 침수에 대한 동적거동 시뮬레이션 결과, <그림 3.2.12>에서 보는 바와 같이 집중호우에 의한 빗물이 대상 지하공간의 3개소를 통해 유입된 후 약 1분 후에 지하주차장 및 Sunken까지 0~0.2m의 침수심으로 점차 확산되어 약 6분경과 후에는 지하공간 전체면적이 침수되었고, Inflow2와 인접한 지하주차장 공간 및 Sunken 구간에서 최대 0.4m 깊이까지 침수되었음.

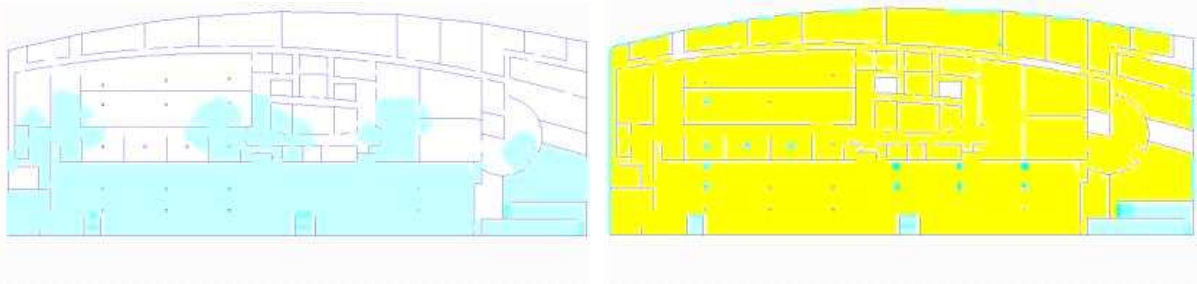
○ 약 19분 경과 후에는 0.5~0.8m의 침수심이 지하공간 전체 면적으로 확산되는 것으로 평가되었고 침수심 0.5m이내까지의 도달시간은 약 18분이므로, 침수 시 즉각적인 대피가 가능한 시간은 약 18분으로 판단됨.(지하공간 침수방지를 위한 수방기준

(안)(소방방재청)에서 제시한 보행곤란수심은 아래와 같음)

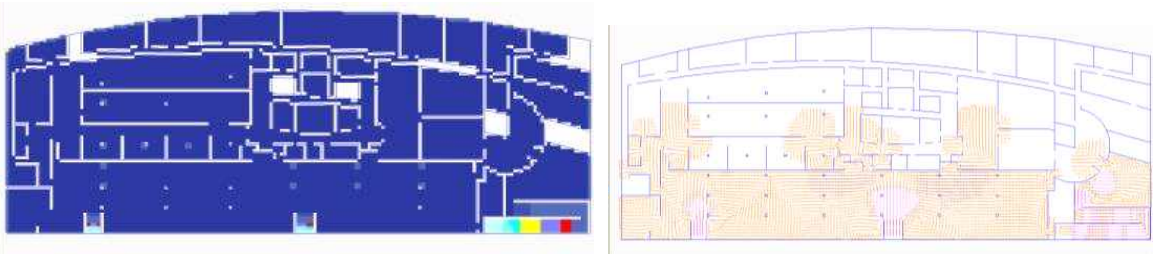
- 성인 여성의 보행곤란수심 : 0.5m(대피가능 참고치로 가정)
- 성인 남성의 보행곤란수심 : 0.7m

○ 약 1시간 경과 후에는 1.6m의 침수위가 전체 면적으로 확산되었고, 집중호우로 인한 빗물유입량이 종료되는 약 1시간 36분 후에는 침수위가 2.4m까지 확산되는 것으로 나타났음.

○ 본 해석조건과 같이 대상 지하공간의 침수심 증가 방지 또는 침수억제를 위한 대책으로서 침수방지턱 또는 차수턱, 지하 저류공간 등의 수방재시설이 없는 경우에는 시간에 따른 침수심이 지속적으로 증가할 것으로 판단됨.



(a) 유입 1분 후 - 침수위(0~0.2m)　　(b) 유입 19분 후 - 침수위(0.5~0.8m)



(c) 유입 1시간 36분 후 - 침수위(2.4m)　　(d) 유입 1분 후, 유속변화

<그림 3.2.12 2D 2D 모형의 시간별 침수변화 및 시간별 유속 분포도>

(5) 지하공간의 침수거동을 지배하는 영향인자를 고려한 민감도 분석

○ 본 연구에서는 수치시뮬레이션을 통해 시간별 침수심 분포 등을 파악하고, 소방방재청에서 제시한 '지하공간 침수방지를 위한 수방기준(안)' 을 참고하여 지하공간 침수 시 성인여성의 보행곤란심도 0.5m를 대피가능 참고치로 적용하여, 빗물 유입지체 효과를 위한 여러 침수영향인자를 다각적으로 검토함으로써 그 영향정도를 평가하고자 함.

○ 도심지 지하공간에서 고려할 수 있는 주변지역의 현장조건을 반영한 강우특성(집중호우로 인한 강우량), 구조물 배수시설 조건(빗물유입 지체를 위한 침수방지턱, 빗물배수를 위한 지하 저류공간 및 대상지하공간과 지하 저류공간의 연결 channel)을

고려하였음. 구조물 배수시설 조건에 따른 민감도 분석 시나리오 구성은 아래의 <표 3.2.10>과 같고, 이에 따른 민감도 분석결과는 <표 3.2.11>과 같음.

<표 3.2.10 구조물 배수시설 조건에 따른 민감도 분석 시나리오>

구분	지하 저류공간		침수방지턱 높이(m)			연결Channel 폭(m)			비 고
	유입부	후면부	0.5	1.0	1.5	0.8	1.6	2.4	
1-1*,**	-	-	-	×	-	-	-	-	•지하 저류공간 없음 •침수방지턱 유무에 따른 분석
1-2*	-	-	-	○	-	-	-	-	
2-1*	-	-	○	×	×	-	-	-	•지하 저류공간 없음 •침수방지턱 높이에 따른 분석 (1-2 조건 → 2-2)
2-3*	-	-	×	×	○	-	-	-	
3-1	-	-	-	○	-	-	-	-	•지하 저류공간 없음 •침수방지턱 부분 설치 시 위치에 따른 분석(좌측, 중간, 우측으로 구분하여 1개 구간씩 미설치 조건 시 검토)
3-2	-	-	-	○	-	-	-	-	
3-3	-	-	-	○	-	-	-	-	
4-2*	○	×	-	-	-	○	-	-	•지하 저류공간 유무에 따른 분석(1-1 조건 → 4-1**)
5-2*	×	○	-	-	-	○	-	-	•지하 저류공간과 연결지점의 위치에 따른 분석 (4-2 조건 → 5-1)
6-2	○	-	-	-	-	×	○	×	•지하 저류공간 있음 •연결Channel 폭에 따른 분석 (4-2 조건 → 6-1)
6-3	○	-	-	-	-	×	×	○	

<표 3.2.11 시나리오별 민감도 분석결과 요약>

구 분	분 석 내 용	비 고
시나리오1	•침수방지턱 유무에 따른 분석결과, 침수방지턱(1.0m)을 지하공간 출입구에 설치한 시나리오1-2에서 시간별 침수심이 시나리오1-1보다 작게 나타나, 빗물유입 지체 효과가 있는 것으로 판단됨.	
시나리오2	•침수방지턱 높이에 따른 분석결과, 높이증가 효과가 있는 것으로 나타났음. •따라서 침수거동 특성에 따른 대피시간을 고려한다면 적절한 침수방지턱의 높이 산정이 가능할 것으로 판단됨.	
시나리오3	•침수방지턱 설치위치 변화에 따른 분석결과, 침수방지턱 미설치 구간의 통수단면 크기와 빗물유입부와의 근접거리에 영향을 받는 것으로 나타났음. •따라서 통로의 통수단면이 크고 통로의 위치가 빗물유입부와 가까울수록 시급히 침수방지턱을 설치해야 함을 알 수 있음.	
시나리오4	•지하 저류공간 유무에 따른 분석결과, 지하 저류공간은 침수억제 효과가 큰 것으로 나타났으며, 본 가상지역의 경우 침수방지턱 또는 지하 저류공간이 없을 때는 침수 시 신속한 대피가 필요할 것으로 판단됨.	
시나리오5	•지하 저류공간과의 연결지점에 따른 침수거동 차이는 측정지점의 위치와 도 관련이 있다고 판단되나, 본 연구에서의 측정지점에 대한 침수심의 차이는 미소한 것으로 평가되었음.	
시나리오6	•지하 저류공간과 연결된 배수Channel의 폭에 따른 분석결과, channel의 통수단면이 클수록 대상 지하공간에 잔류하는 침수심은 낮아지는 것으로 판단됨.	

(6) 지하공간 침수 시 대피체계를 고려한 침수예상 분석

(가) 개 요

○ 본 연구에서는 지하공간 침수 시 대피체계 수립을 위한 하나의 방법으로서 국외의 연구자료를 이용하여 침수심(d), 유속(v) 및 DF(Debris Factor)를 고려한 Flood Hazard output을 도출함으로써 침수예상 분석을 수행하고자 함.

○ 국외의 영국에서 연구과제로 수행된 'Framework and Guidance for Assessing and Managing Flood Risk for New Development(FD2320/TR2)' 보고서에 의하면 홍수에 노출된 사람의 직접적인 위험성을 고려한 HR(Hazard Rating, 홍수 위험도 등급)을 다음과 같이 산정하고 <표 3.2.12>와 같이 제시하고 있음.

$$HR = d \cdot (v+n) + DF \quad \text{(식 4)}$$

여기서, HR : (flood) hazard rating, d : depth fo flooding(m)

v : velocity of floodwaters(m/sec) n : a constant 0.5

DF : debris factor(0, 0.5, 1 depending on probability that debris will lead to a hazard)

< 표 3.2.12 HR에 따른 특성 분류 >

구 분	홍수 위험도	특 성
HR1(0.75 >HR)	Low(낮음)	주의 ; 얕은 깊이의 유수 또는 정수에서의 홍수 영역
HR2(0.75 < HR < 1.25)	Moderate(보통)	어린이(이동제약자 포함) 위험 ; 깊거나 빠른 유속의 유수에서의 홍수 영역
HR3(1.25 < HR < 2.5)	Significant(높음)	대부분의 사람 위험 ; 깊고 빠른 유속의 유수에서의 홍수 영역
HR4(2.5 < HR)	Extreme(매우 높음)	모든 사람(구급요원 포함) 위험 ; 깊고 빠른 유속의 유수에서의 홍수 영역

(나) 분석 조건

○ 대상 지하공간에 대한 침수시나리오는 앞선 민감도 분석과 달리 지하주차공간과 지하활용공간 사이의 출입구 7개소는 열려 있고, Sunken(개방형 지하광장)과 연결된 출입구는 차수벽 조건의 유리 출입문으로서 가정하여 높이 2.5m까지 빗물이 누적된 후 일시에 빗물이 유입되는 조건으로 가정하였음.(Case-1)

- 1차 해석 후 Sunken구간에서의 침수심 2.5m까지 누적되는 시간 확인
- 2차 해석 시 1차 해석에서 확인된 시간 이후 time step에서 Sunken구간의 침수심 2.5m까지의 유량 일시 load 후 시간별 침수심 분포 확인

○ Case-1(지하 저류공간이 없는 경우)과 HR(홍수 위험도 등급)의 비교, 분석을 위해 지하 저류공간의 설치조건(Case-2)을 가정하고, 지하활용공간에 연결지점 3개소를 두어 해석하여 상기 2차 해석결과와 비교, 분석함.

(다) 분석 결과

○ <그림 3.2.13>은 각각 Case-1과 Case-2에서의 시간별 HR Contour 분포 결과를 나타내며, 두 가지 Case에 대한 비교표는 <표 3.2.13>과 같음.

○ Case-1의 시뮬레이션 결과, 약 6분경과 시까지 대부분 구간에서 HR1(홍수 위험도 낮음)으로 나타났으며, Case-2에서는 지하 저류공간으로의 배수 효과로 인해 약 12분 30초경과 시까지 Sunken을 제외한 구간에서 HR1으로 평가되었음.

○ 경과 시간 12분 30초는 Sunken구간에서의 침수심 2.5m까지 누적되는 시간임.

○ Case-1의 경우, 유량 일시 재하조건에 따라 14분경과 후에는 지하활용공간의 전체 면적으로 HR2~3 Contour가 급속히 확산되는 것으로 평가되었으며, Case-2에서는 역시 배수효과로 인해 대부분 구간에 HR1 Contour가 분포하고 Sunken 주변부에는

HR2~3이 분포하는 것으로 나타났음.

○ 어린이까지 대피 가능한 HR1(홍수 위험도 낮음)을 기준으로 할 때는 Case-1의 대피 가능시간이 침수 시작 후 6분정도이고, HR2(홍수 위험도 보통)까지의 도달시간은 약 12분 30초로 평가되는 것을 알 수 있으며, Case-2에서는 빗물유입 지체효과(배수효과)로 인해 대피가능시간이 증가하는 것을 알 수 있음.

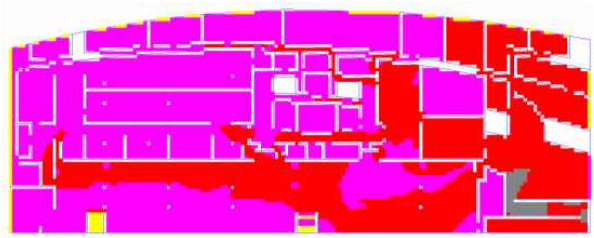
○ 따라서 HR을 이용한 침수예상 분석은 침수심, 유속 등을 고려하므로 지하공간에서의 대피체계 수립에 보다 현실적인 방법을 제공할 수 있을 것으로 판단됨.

<표 3.2.13 시간별 HR Contour 분포 결과 비교>

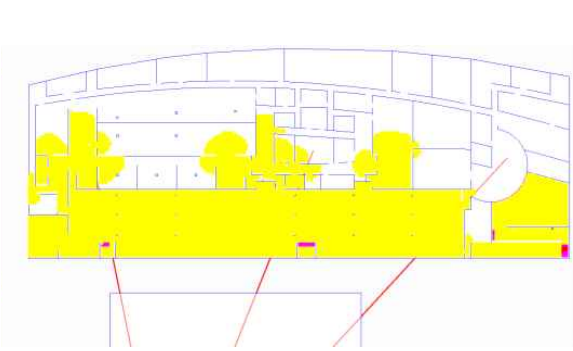
구 분		Case-1 (지하 저류공간 없음)	Case-2 (지하 저류공간 있음)
빗물 유입 후 경과 시간	1분	HR1 Contour 점차 확산	HR1 Contour 점차 확산
	6분	HR1 Contour 전체 분포, Sunken HR3 분포	HR1 Contour 전체 분포, Sunken HR3 분포
	12분 30초	HR1~2 Contour 전체 분포, Sunken HR3분포(침수심 2.5m이하)	HR1 Contour 전체 분포, Sunken HR3분포(침수심 2.5m이하)
	14분	HR2~3 Contour 급속 확산, Sunken 일부 HR4분포	HR1 대부분 분포, HR2~3 급속 확산, Sunken 일부 HR4분포
	21분	HR2~3 Contour 전체 분포	HR1 대부분 분포, HR2~3 일부 분포



(a) 유입 시작 1분 후, Case-1



(b) 유입 시작 14분 후, Case-1



(c) 유입 시작 1분 후, Case-1



(d) 유입 시작 14분 후, Case-1

<그림 3.2.13 지하 저류공간 있음, 시간별 HR 분포 결과>

3. 지하공간 침수위험도 평가 가이드라인(안) 설정 [3차년도]

가. AHP기반 침수위험도 평가에 따른 빗물유입수 침수억제, 수위저하 체계

(1) 지하공간내 침수위험 대비체계 평가

○ AHP 기법 기반 전문가 설문 응답에 따른 중요도 및 가중치 평가 결과, 2위계 위험도 평가군(Criteria)에서 첫 번째로 가장 침수위험에 영향을 줄 수 있는 인자로 평가된 강우특성은 해당지역의 수문학적인 침수위험인자로써 사람의 인위적으로 홍수대비 대책의 설정을 위한 조절이 불가능한 기상환경적인 침수위험 인자임.

○ 또한 세 번째 침수위험 영향인자로 해당지역 현장조건의 경우, 지형경사•저지대 지역 특성은 침수위험저감을 위해 신규 개발시에 고려해야할 사항이거나 기존 지역의 경우 재개발이 곤란한 사항이거나 해당지역의 우배수체계와 함께 임의 대상지역에 대한 개발정책에 맞추어 대책을 강구해야하는 특성을 가짐

○ 그러므로 외부의 불가항력적인 위치적, 자연적 조건에 비하여 기존 및 신설 시설물의 경우, 위치 및 규모, 부대시설의 조절이 가능한 구조적 수방시설로 ‘빗물 배수/방수로, 저류 터널’ 배수시설조건,이나, 침수턱 등 여러 가지 ‘빗물유입 지체/방지시설’이 빗물유입 방지 수위저감 시설장치’ 체계 등이 큰 중요도를 갖는 것으로 평가됨.

(2) 침수위험인자 반영 빗물 유입수 차단, 유도 등 수위저하 방안

○ 대표적인 침수억제, 침수위 저감시설에 대하여 지하공간 내 설치시 일반적 기준을 표현하면 다음과 같음.

<표 3.2.14 침수억제, 침수위 저감시설 검토 기준>

구 분	내용 설명
빗물 저류 및 배수공동터널, 빗물저류조	■ 대규모 지하공간의 침수 방지, 유역 내수침수 대비를 위한 가장 효과적이고 확실한 대표적인 구조적 수방시설으 하나로, 사회 기간시설 인프라나 대상 시설물의 수재해 대비, 시민의 안전성 확보 목적으로 사용됨. ■ 침수위험도 평가 및 공공목적성, 사업 투자대비 효과, 입지조건, 지자체 정책 및 시민의 요구 등 전반적 사항을 검토하여 건설계획 설정 필요 ■ 규모와 위치, 입지 조건 검토시 해당 지역의 조사 및 평가, 지역의 우배수체계와 연계된 수리수문학적 효과 검토, 검증 등에 따라 효과를 종합적으로 결정함.
출입구 방지턱의	■ 지하공간의 침수위험도 평가 결과를 바탕으로 외수에 대비해야 할 것인지, 내수에 대비해야 할 것인지를 판단

높이	■ 내수에 대비해야 할 역사인 경우에는 내수 예상 침수심을 감안한 출입구 방지턱의 높이를 결정(예상치 못한 외수에 대한 대비는 모래주머니나 방수판 등을 준비) - 지하공간의 출입구, 지형적 여건을 고려하여 방지턱을 설치(저지대와 하천 방향의 출입구쪽은 반드시 예상 침수심보다 높게 방지턱을 설치)
환기구 및 채광용 창 위치	■ 예상 침수심보다 높은 지점에 환기구를 설치하거나, 천막 등을 이용하여 방수가 되도록 해야 함. - 기타 사항은 출입구 방지턱 높이 검토내용에 준함.
방수판, 모래주머니	■ 방수판 또는 모래주머니를 준비 - 방지턱을 설치하여도 지하침수를 방지하지 못하는 경우 또는 예상치 못한 홍수에 대비하기 위하여 방수판 또는 모래주머니를 준비 - 방수판은 자동운행이 가능하도록 설치하는 것이 좋으나, 이동식인 경우 사람이 운반하기에 적정한 규모가 되도록 크기와 재질을 결정 - 지하공간의 출입구 여건을 고려하여 저지대와 하천 방향의 출입구 등 침수에 취약한 출입구에 가까운 곳을 중심으로 방수판, 모래주머니 등을 준비
배수구 역류방지	■ 지하시설로부터 외부로 배수하기 위하여 설치한 배수구를 통한 역류를 방지하기 위하여 역류방지 밸브를 설치
배수펌프 및 집수정 설치	■ 배수펌프, 예비배수펌프 및 집수정 설치 - 집수정내에는 토사나 불순물 유입 방지를 위해 침사지를 설치하거나 예비 배수펌프를 추가 설치 - 배수펌프의 용량 결정은 반드시 역사 주변 침수예상분석을 하여 역사내로 유입되는 유입총량을 기준으로 펌프의 용량 및 개수를 결정
침수피해 확산 방지시설	■ 지하층 계단통로와 엘리베이터 이동통로, 환기 등을 차단 방안 - 대피경로가 결정되면 안전한 대피경로를 확보하기 위한 차수문 등의 침수확산 방지시설을 대피경로 중심으로 설치

○ 기타 구조적, 비구조적 지하공간 침수재해 방지 대책

지하공간의 홍수에 대한 위험성 사전 통보, 하천관리자와 지하공간 관리자간의 정보전달 체계 검토, 대피체계 정비(지하공간 관리자에 의한 원활한 대피 유도 등 검토, 민간/공공 지하공간시설물 소유자/운영간 조직간 제휴 수방대책 검토, 하천관리자나 지방 자치단체와 지하공간 관리자의 공동 참여 침수재해 대비훈련 실시내용 등)

<표 3.2.15 기타 구조적/비구조적 지하공간 침수 재해 방지대책>

구 분	내용 설명
난간 설치	■ 계단 및 탑승구, 에스컬레이터 등에 난간을 설치 - 특히 주대피경로, 보조대피경로를 중심으로는 반드시 설치
대피경로의 확보	■ 지하공간 내부 침수 예상분석을 통한 대피경로 설정 - 예상 침수심 및 물의 이동경로 등 흐름특성을 파악하여 안전한 주대피경로를 설정하고, 예상치 못한 경우에 대비하기 위하여 보조대피경로를 설정하여, 이를 도면에 도시하여 일반시민들이 쉽게 알아 볼 수 있도록 해야 함. ■ 대피경로를 중심으로 지하공간의 조명과 대피로의 안전이 충분히 보장되어야 함. ■ 침수상황 발생시 즉각적인 경보방송과 함께 대피경로에 대한 안내방송이 가능하도록 시설이 설치
누전 및 정전 방지	■ 누전 차단장치 설치 및 접지 ■ 콘센트 등 출력단자는 지하공간 내부 예상침수심 이상에 설치 - 지하 최하층의 경우에는 가급적 설치를 안하거나 부득이 한 경우에는 상단부에 설치하고 방수캡으로 보호해야 함. ■ 전기공급 시설(배전반, 콘센트 등 전기시설)의 침수고 이상에 설치
지하공간 침수모형개발	■ 침수방지대책의 기준이 되는 침수예상지도를 작성하기 위한 수리모형실험 및 수치해석기법의 연구개발 실시
비상조명 및 안내표시	■ 지하공간 내부 침수시 인지가 가능하도록 비상조명과 안내표시 설치 - 정전시 최소 1시간 이상 표시가 가능해야 하며, 침수방지캡을 설치하거나 야광판을 이용 - 전력공급장치가 지하에 설치되었을 경우, 비상용 조명 및 안내표지 등의 전기시설은 옥상 및 침수가능성이 적은 곳에 설치하여 운영
지령실	■ 지령실 침수방지대책 - 침수시에도 활용하기 위하여 지상의 예상 침수심 이상 지역에 위치해야 하나, 부득이 한 경우에는 지상 최상층에 위치하도록 해야하며, 예상 침수심 이상으로 출입구의 높이를 높여 침수피해가 발생되지 않도록 설치해야 함.
경보방송	■ 경보방송 시설 설치 - 지하공간 시설물의 관리자는 경보방송 시설을 설치하고 정전에 대비하여 확성기 등을 준비해 두어야 함. - 경보방송시설은 예상침수고 이상에 위치하도록 하며, 부득이 한 경우에는 침수방지시설을 설치 - 경보방송 시설이 설치된 사무소는 가능한 한 지상에 위치토록 하고 지하시설내 상황을 파악할 수 있도록 CCTV 등을 설치함
전력실, 기계실	■ 전력실 및 기계실 침수가 되지 않는 안전한 곳에 위치
방재교육 및 훈련	■ 평상시 대피훈련을 실시하고 침수시 대피경로, 대피장소 등을 인지하도록 방재교육 실시

	- 유인물이나 언론을 통한 교육을 실시하여 행동요령을 숙지 ■ 지하철 침수피해 사진전 등을 역사에서 개최하는 등 시민의 경각심을 유발시키고 행동요령을 숙지할 수 있는 이벤트 등을 기획
대피방송	· 근무자들에 대한 교육 및 모의 훈련 - 수시로 도상훈련 실시를 통해 대피경로와 근무자의 역할을 숙지 - 대피방송이 불가능한 경우에 대피한 확성기 및 정확한 비상 연락체계의 구축이 필요

○ 비구조적 지하공간 침수 재해 방지대책에서 지하공간에 적합한 단계별 상황기준, 행동요령 등 요약하면 다음과 같음.

<표 3.2.16 지하공간 수방계획 개선방안>

개 선 방 안	세 부 내 용
지하공간의 비상대처계획 및 시민대피체계 수립	● 지하공간의 비상대처계획 수립 ● 지하공간 침수시의 시민대피체계 확립 ● 지하공간에 적합한 단계별 상황기준 및 행동요령 및 지하공간 침수방지시설의 설치기준 확립
체계적인 시설설치계획 및 관련기관 협력체계 구축	● 지하공간의 침수위험도 평가를 실시하여 우선순위에 따라 각 역사의 특성을 고려한 침수방지시설설치 추진 ● 위험도가 높은 지하공간은 인접한 하천, 하수도 사업과 연계하거나 수방차원에서의 집중관리를 하는 등 각 관련기관의 협력체계 및 정보전달 등 연계성 필요 ● 대피체계 정비 ; 지하공간 관리자에 의한 원활한 대피 유도 등 검토, 지하공간과 개별빌딩이 일체가 된 경우 각 조직의 제휴 방책 검토, 하천관리자나 지방 자치단체와 지하공간의 관리자가 공동으로 참여하는 침수 재해 훈련 실시내용 검토
종합 방재시스템 구축	● 정보시스템 기반의 방재시스템을 이용하여 침수예상규모의 파악, 안전대피로의 확보, 철도침수 등 상황정보를 실시간으로 전송받아 의사결정을 하는 종합 방재시스템 구축
훈련 및 교육, 홍보	● 체계적인 수방계획과 대피계획 확립을 위한 실제훈련 실시 ● 지하공간 침수시 행동요령 숙지를 위한 교육활동 강화 ● 일반 시민들이 지하공간 침수의 위험성 인식을 위한 홍보활동

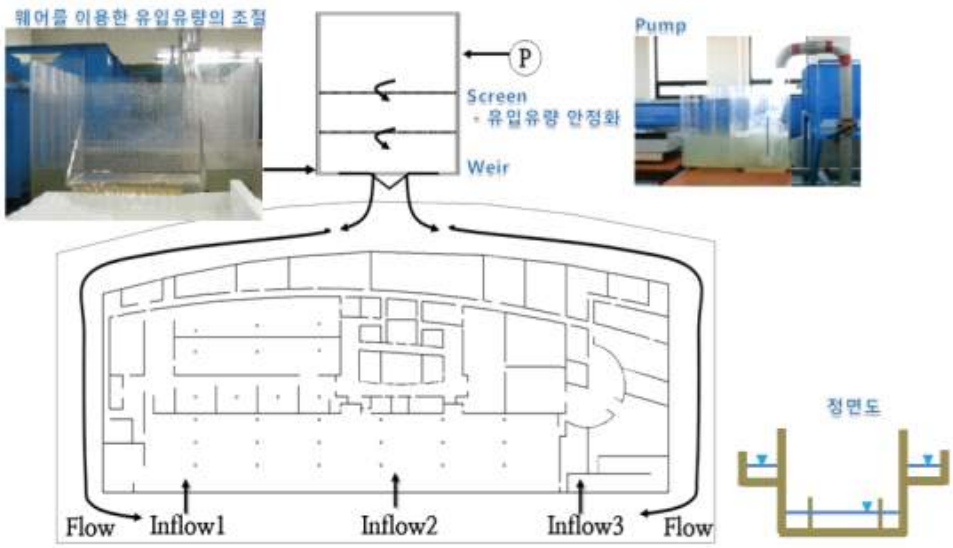
*출처 : 서울시 지하공간 침수방지대책 및 대피체계 수립방안(서울연구원, 2005) 등

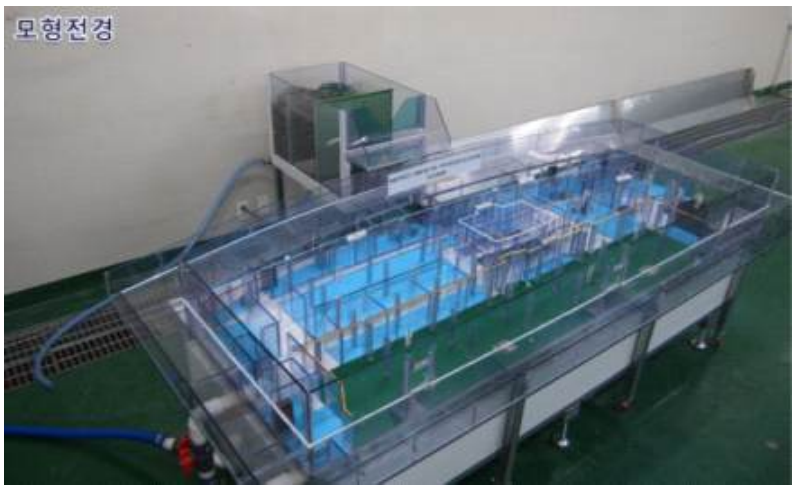
나. 지하공간 침수예상 분석을 통한 침수예상지도 작성(안)

(1) 지하공간 수리모형 실험과 수치시뮬레이션 고찰

○ 집중호우로 인한 지하공간내로 빗물이 유입되는 침수거동을 파악하기 위해서는 빗물의 유입량 등의 침수위험인자를 반영한 침수거동, 침수심 등에 대하여 종합적인 분석이 이루어져야 함.

○ 본 연구에서 고려한 침수위험인자는 아래의 그림과 같이 1/20 축척으로 제작된 축소 수리모형실험상의 제약조건을 우선적으로 고려하고, 수치시뮬레이션에서 구현 가능하도록 실제 지하공간에서의 침수방지 또는 침수억제 기능을 할 수 있는 수해방지 시설물을 계획하여 침수거동을 분석하고자 하였음.





<그림 3.2.14 수리모형실험을 위한 지하공간 축소모형>

<표 3.2.17 수리모형실험 및 수치시뮬레이션에서 고려한 수해방지 시설물>

구 분	수리모형실험	수치시뮬레이션
침수방지턱	•지하공간내 지하주차공간과 지하활용공간(상가)의 연결 출입구 8개소에 설치(침수방지턱 높이 변화 고려) •모래주머니(sand bag)도 침수방지턱과 동일한 위치에 적용	•수리모형실험과 비교분석이 가능하도록 동일 조건으로 적용하였고, 모래주머니는 모델링 제약으로 미적용 •침수방지턱을 3개의 구간으로 구분하여 구간별 미설치 시 영향 검토 수행
지하 저류공간	•모형실험체 외에 별도의 저류조를 설치하여 저류조와의 연결지점(Inlet hole) 위치를 달리하여 검토 수행	•지하 저류공간과 연결된 배수channel을 모델링하여 지하 저류공간과의 연결node 위치에 따른 검토 수행

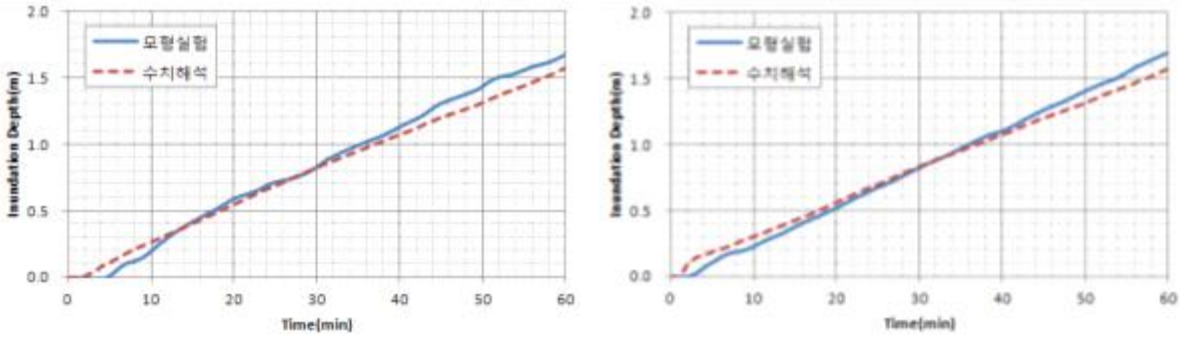


<그림 3.2.15 지하공간 평면도 및 수해방지 시설물 조건 현황>

(가) Case-1(수해방지 시설물이 없는 경우)

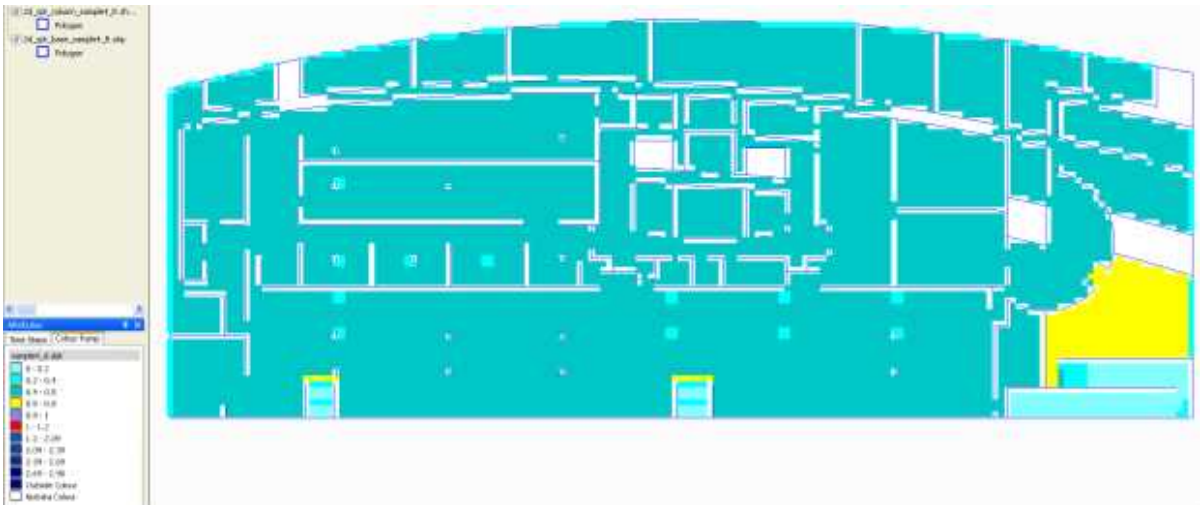
○ 대상 지하공간내에 수해방지 시설물이 없는 경우 3개의 빗물유입구(Inflow1~3)를 통해 유입된 유출수의 거동파악을 위해 대표지점의 시간에 따른 침수심을 분석한 결과는 <그림 3.2.16>에서와 같이 미소한 차이는 있으나 유사한 경향을 나타내고 있음.

○ 빗물 유입부와 직접 연결된 지하주차공간을 제외한 지하활용공간(Live Space)에서의 대피가능 침수심 0.5m까지의 소요시간은 모형실험에서 약 19분으로 평가되었으며, 수치해석에서는 <그림 3.2.17>과 같이 약 17분 30초로 평가되므로 Case-1에서의 대피가능 시간은 보수적으로 17분을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단됨.



<지점 위치(Point1-2)> <지점 위치(Point5-2)>

<그림 3.2.16 수해방지 시설물이 없는 경우 시간-침수심 비교>

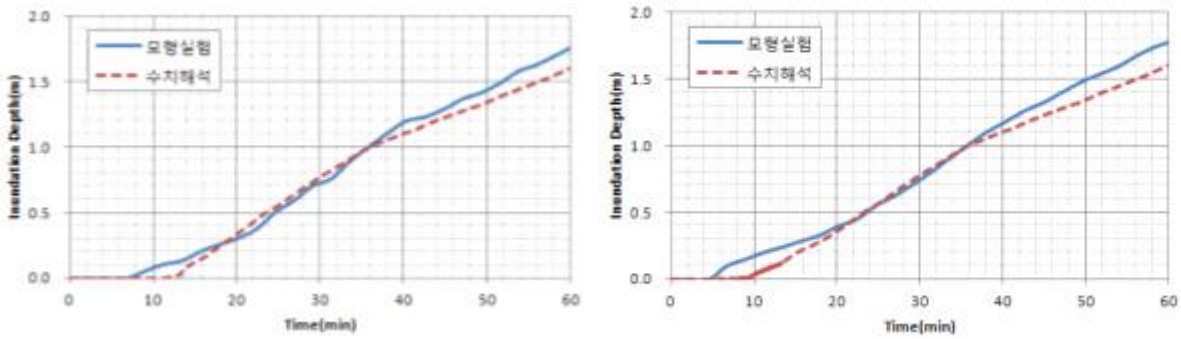


<그림 3.2.17 수치시뮬레이션 결과 -
유입 시작 후 17분 30초까지 지하활용공간의 침수심 0.4~0.5m 분포>

(나) Case-2(수해방지 시설물로서 침수방지턱이 있는 경우)

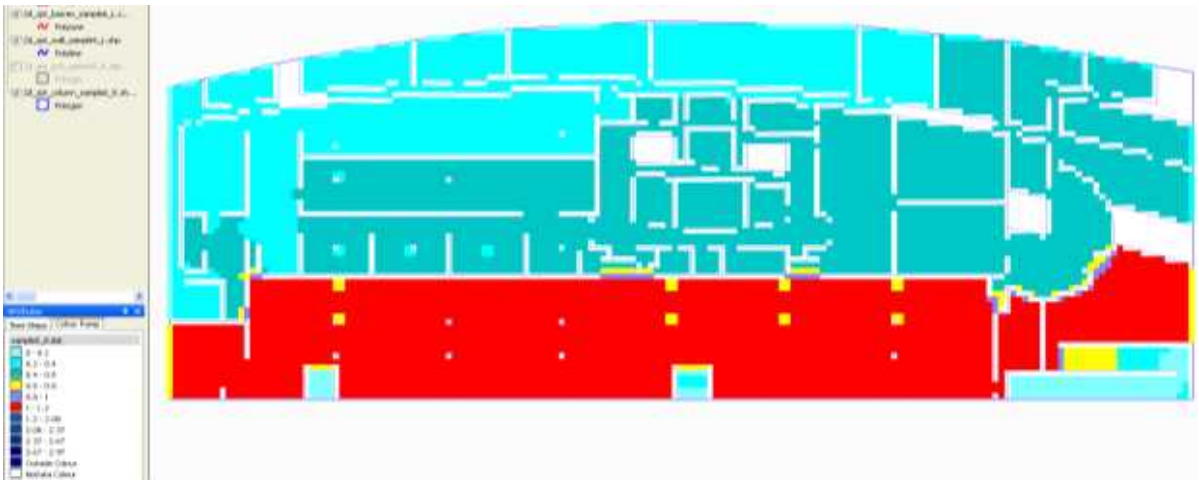
○ 대상 지하공간내에 수해방지 시설물로서 출입구 8개소에 침수방지턱(높이 1.0m)을 설치한 경우 3개의 빗물유입구(Inflow1~3)를 통해 유입된 유출수의 거동파악을 위해 대표지점의 침수심을 분석한 결과는 <그림 3.2.18>에서와 같이 미소한 차이는 있으나 유사한 경향을 나타내고 있음.

○ 빗물 유입부와 직접 연결된 지하주차공간을 제외한 지하활용공간(Live Space)에서의 대피가능 침수심 0.5m까지의 소요시간은 모형실험에서 약 25분으로 평가되었으며, 수치해석에서는 <그림 3.2.19>과 같이 약 21분 30초로 평가되므로 Case-2에서의 대피가능 시간은 보수적으로 21분을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단됨.



<지점 위치(Point1-2)> <지점 위치(Point4-2)>

<그림 3.2.18 침수방지턱이 있는 경우 시간-침수심 비교>



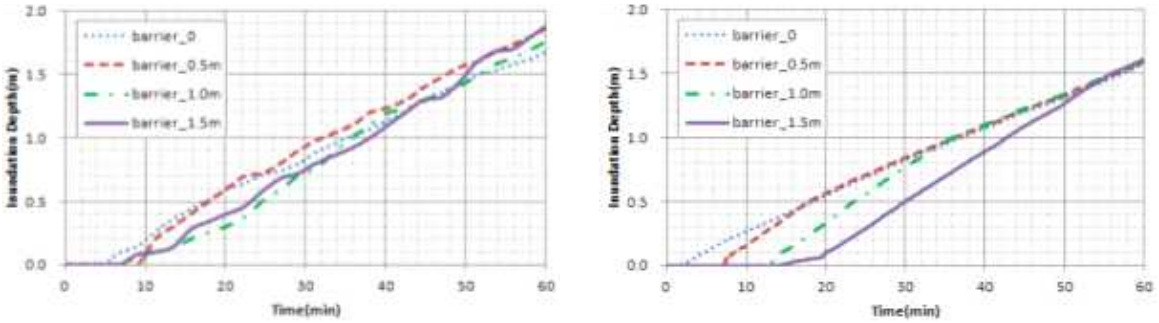
<그림 3.2.19 수치시뮬레이션 결과 -
유입 시작 후 21분 30초까지 지하활용공간의 침수심 0.2~0.5m 분포>

(다) Case-3(수해방지 시설물로서 침수방지턱의 높이변화에 따른 영향 검토)

○ 대상 지하공간내에 수해방지 시설물로서 침수방지턱이 없는 경우(barrier_0)에 대해 출입구 8개소에 침수방지턱을 설치하되 barrier_0.5m,_1.0m,_1.5m의 조건으로 높이 변화를 준 경우를 비교한 분석결과는 <그림 3.2.20>과 같음.

○ 대표지점 Point1-2에서 측정된 결과에 의하면 수치해석에서는 침수방지턱의 높이 증가에 따라 빗물유입 지체현상이 뚜렷하게 관찰되는 것을 알 수 있음.

○ 침수방지턱의 높이를 1.5m로 할 경우 지하활용공간(Live Space)에서의 대피가능 침수심 0.5m까지의 소요시간은 수치해석에서 <그림 3.2.21>과 같이 약 28분으로 평가되므로 Case-2(침수방지턱 1.0m)보다 대피가능시간을 약 7분 정도 지연시킬 수 있는 것으로 판단됨.

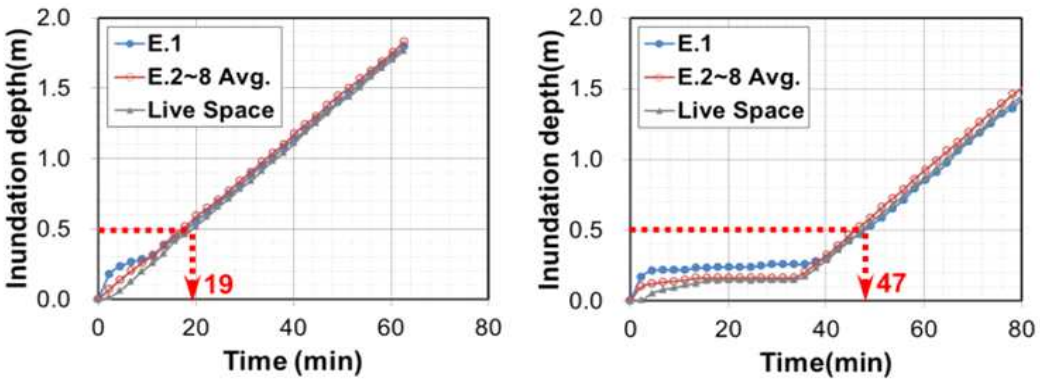


a. 지점 위치(Point1-2)에서의 모형실험 b. 지점 위치(Point1-2)에서의 수치해석

<그림 3.2.20 침수방지턱의 높이변화에 따른 시간-침수심 비교>



<그림 3.2.21 수치시뮬레이션 결과 -
유입 시작 후 28분까지 지하활용공간의 침수심 0.2~0.5m 분포>



a. 빗물저류시설 미설치시 b. 빗물저류시설 설치시

<그림 3.2.22 지하빗물저류시설 설치여부에 따른 침수저감 효과 >

(라) 종합 검토결과

○ 앞서 검토된 Case-1 ~ Case-3의 결과로부터 침수방지턱의 빗물유입 지체 효과는 대피 가능한 침수심 0.5m까지의 도달시간을 통해 파악할 수 있었음.

○ 침수방지턱이 없는 경우(Case-1) 보다 침수방지턱(1.0m)을 설치(Case-2)함으로써 약 4분의 대피시간을 확보할 수 있으며, 높이를 1.5m로 적용할 경우(Case-3)에는 약 7분의 대피시간을 추가로 확보할 수 있는 것으로 평가되었음.

○ 따라서 실제 현장조건에서 집중호우로 인한 침수가 예상될 때는 사전에 수립된 방재시나리오에 준하여 신속히 출입구에 침수방지턱을 가능한 한 높게 설치하는 것이 수해 방지 대책으로서 효과가 있을 것으로 판단됨.

○ 침수방지턱 외에 보다 침수방지 또는 침수억제 효과가 탁월한 지하 저류공동과 같은 시설 설치가 가능하며, 수리모형실험에서는 대상 지하공간의 유입수를 배수시키기 위해 지하공간의 유입부(전면부) 또는 후면부에 Inlet hole을 설치하고 지하 저류공간의 저류용량을 정한 후 저류용량 이상으로 배수되는 것을 억제하여 지하공간 내 침수거동을 파악하였음. 지하 저류공간 설치로 인해 침수심 0.5m의 도달시간을 침수방지턱 1.0m 설치조건 대비 약 2배에 가까운 46~47분으로 지연시키는 효과를 파악할 수 있었으며, 침수방지턱과 병행하여 수해방지 시설을 갖출 경우에는 더 큰 침수시간 지연 효과를 얻을 수 있는 것으로 평가됨.

(2) 침수위험지도(Inundation hazard map) 작성(안)

(가) 개요

○ 지하공간 침수 시 대피체계 수립을 위한 하나의 방법으로서 국외의 연구 자료를 이용하여 침수심(d), 유속(v) 및 DF(Debris Factor)를 고려한 Flood Hazard Map Output을 도출함으로써 침수예상지도 작성 방법(안)을 제시함.

HR	Depth of flooding - d (m)												
	DF = 0.5				DF = 1								
Velocity v (m/s)	0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00	1.50	2.00	2.50
0.0	0.03 + 0.5 = 0.53	0.05 + 0.5 = 0.55	0.10 + 0.5 = 0.60	0.13 + 0.5 = 0.63	0.15 + 1.0 = 1.15	0.20 + 1.0 = 1.20	0.25 + 1.0 = 1.25	0.30 + 1.0 = 1.30	0.40 + 1.0 = 1.40	0.50 + 1.0 = 1.50	0.75 + 1.0 = 1.75	1.00 + 1.0 = 2.00	1.25 + 1.0 = 2.25
0.1	0.03 + 0.5 = 0.53	0.06 + 0.5 = 0.56	0.12 + 0.5 = 0.62	0.15 + 0.5 = 0.65	0.18 + 1.0 = 1.18	0.24 + 1.0 = 1.24	0.30 + 1.0 = 1.30	0.36 + 1.0 = 1.36	0.48 + 1.0 = 1.48	0.60 + 1.0 = 1.60	0.90 + 1.0 = 1.90	1.20 + 1.0 = 2.20	1.50 + 1.0 = 2.55
0.3	0.04 + 0.5 = 0.54	0.08 + 0.5 = 0.58	0.15 + 0.5 = 0.65	0.19 + 0.5 = 0.69	0.23 + 1.0 = 1.23	0.30 + 1.0 = 1.30	0.38 + 1.0 = 1.38	0.45 + 1.0 = 1.45	0.60 + 1.0 = 1.60	0.75 + 1.0 = 1.75	1.13 + 1.0 = 2.13	1.50 + 1.0 = 2.50	1.88 + 1.0 = 2.88
0.5	0.05 + 0.5 = 0.55	0.10 + 0.5 = 0.60	0.20 + 0.5 = 0.70	0.25 + 0.5 = 0.75	0.30 + 1.0 = 1.30	0.40 + 1.0 = 1.40	0.50 + 1.0 = 1.50	0.60 + 1.0 = 1.60	0.80 + 1.0 = 1.80	1.00 + 1.0 = 2.00	1.50 + 1.0 = 2.50	2.00 + 1.0 = 3.00	2.50 + 1.0 = 3.50
1.0	0.08 + 0.5 = 0.58	0.15 + 0.5 = 0.65	0.30 + 0.5 = 0.80	0.38 + 0.5 = 0.88	0.45 + 1.0 = 1.45	0.60 + 1.0 = 1.60	0.75 + 1.0 = 1.75	0.90 + 1.0 = 1.90	1.20 + 1.0 = 2.20	1.50 + 1.0 = 2.50	2.25 + 1.0 = 3.25	3.00 + 1.0 = 4.00	3.75 + 1.0 = 4.75
1.5	0.10 + 0.5 = 0.60	0.20 + 0.5 = 0.70	0.40 + 0.5 = 0.90	0.50 + 0.5 = 1.00	0.60 + 1.0 = 1.60	0.80 + 1.0 = 1.80	1.00 + 1.0 = 2.00	1.20 + 1.0 = 2.20	1.60 + 1.0 = 2.60	2.00 + 1.0 = 3.00	3.00 + 1.0 = 4.00	4.00 + 1.0 = 5.00	5.00 + 1.0 = 6.00
2.0	0.13 + 0.5 = 0.63	0.25 + 0.5 = 0.75	0.50 + 0.5 = 1.00	0.63 + 0.5 = 1.13	0.75 + 1.0 = 1.75	1.00 + 1.0 = 2.00	1.25 + 1.0 = 2.25	1.50 + 1.0 = 2.50	2.00 + 1.0 = 3.00	3.50	4.75	6.00	7.25
2.5	0.15 + 0.5 = 0.65	0.30 + 0.5 = 0.80	0.60 + 0.5 = 1.10	0.75 + 0.5 = 1.25	0.90 + 1.0 = 1.90	1.20 + 1.0 = 2.20	1.50 + 1.0 = 2.50	1.80 + 1.0 = 2.80	3.40	4.00	5.50	7.00	8.50
3.0	0.18 + 0.5 = 0.68	0.35 + 0.5 = 0.85	0.70 + 0.5 = 1.20	0.88 + 0.5 = 1.38	1.05 + 1.0 = 2.05	1.40 + 1.0 = 2.40	1.75 + 1.0 = 2.75	3.10	3.80	4.50	6.25	8.00	9.75
3.5	0.20 + 0.5 = 0.70	0.40 + 0.5 = 0.90	0.80 + 0.5 = 1.30	1.00 + 0.5 = 1.50	1.20 + 1.0 = 2.20	1.60 + 1.0 = 2.60	3.00	3.40	4.20	5.00	7.00	9.00	11.00
4.0	0.23 + 0.5 = 0.73	0.45 + 0.5 = 0.95	0.90 + 0.5 = 1.40	1.13 + 0.5 = 1.63	1.35 + 1.0 = 2.35	1.80 + 1.0 = 2.80	3.25	3.70	4.60	5.50	7.75	10.00	12.25
4.5	0.25 + 0.5 = 0.75	0.50 + 0.5 = 1.00	1.00 + 0.5 = 1.50	1.25 + 0.5 = 1.75	1.50 + 1.0 = 2.50	2.00 + 1.0 = 3.00	3.50	4.00	5.00	6.00	8.50	11.00	13.50
5.0	0.28 + 0.5 = 0.78	0.60 + 0.5 = 1.10	1.10 + 0.5 = 1.60	1.38 + 0.5 = 1.88	1.65 + 1.0 = 2.65	3.20	3.75	4.30	5.40	6.50	9.25	12.00	14.75

Flood Hazard Rating (HR)	Colour Code	Hazard to People Classification
Less than 0.75		Very low hazard - Caution
0.75 to 1.25		Danger for some – includes children, the elderly and the infirm
1.25 to 2.0		Danger for most – includes the general public
More than 2.0		Danger for all – includes the emergency services

<그림 3.2.23 위험비율(HR)을 이용한 대상지역의 침수위험등급 구분 예>

(나) 위험비율(HR) 해석결과에 따른 시간별 Hazard Map 분석과 작성예시

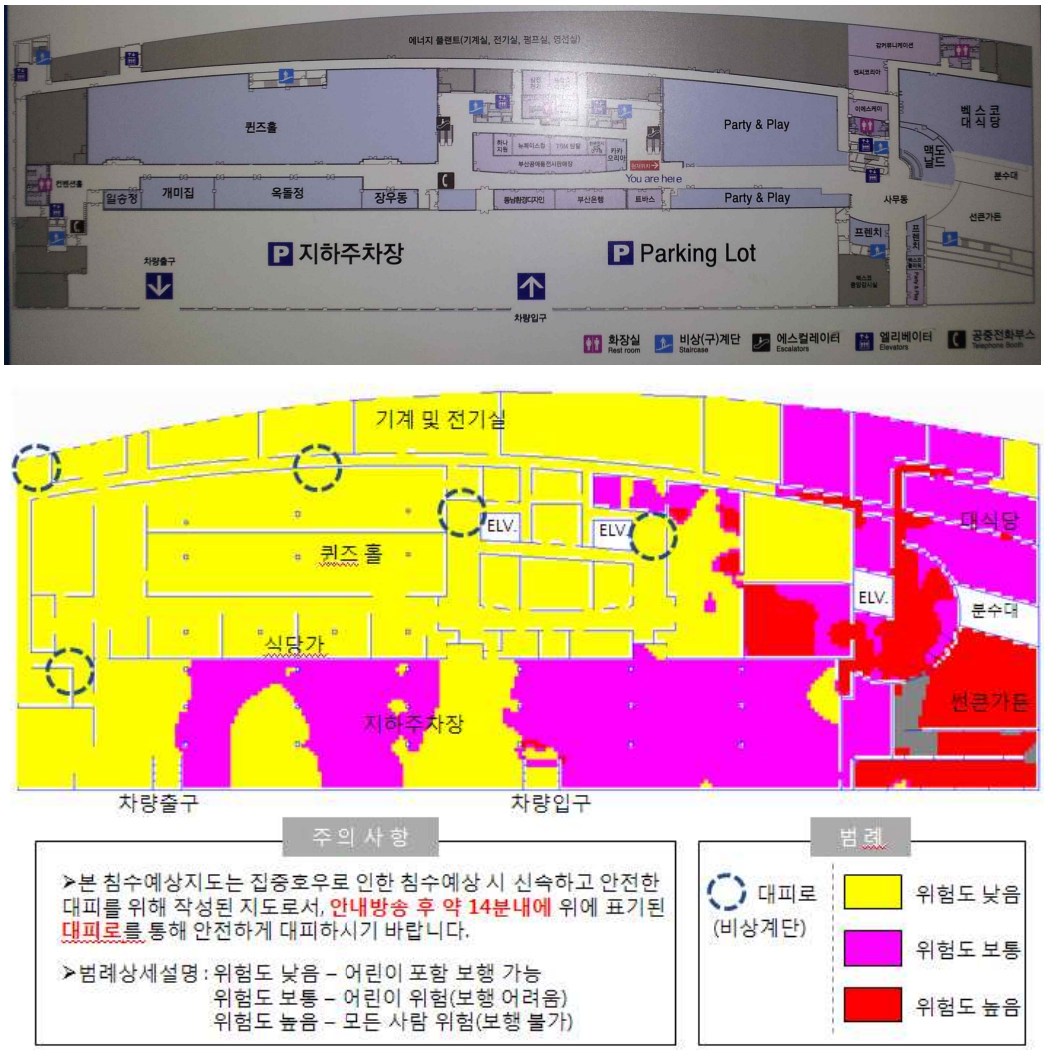
○ 지하공간내 빗물유입수의 1D-2D연계 표면유출 동적거동 해석결과에 따라 시간별 HR Contour 분포 결과를 구조물평면상에 표현할 수 있으며, 이 결과를 기초로 지하공간내 침수위험에 대한 등급을 산정함.

○ 지하공간 수해방재를 위한 별도의 구조적 수방시설인 빗물저류공동/터널이나 유이부 배제용 펌프 등 설치여부에 따라, 시간에 따른 지하공간내 위치별 침수 깊이와 유속을 파악하여 침수지체 효과에 따른 비상시 대피위치 및 대피가능시간을 파악할 수 있음.

○ 본 침수예상지도 작성 예의 사례는 대상 지하공간이 지하1층으로서 침수 발생은 지하주자창의 차량 진출입로에서 시작되며, 대피공간인 지상1층은 방수문이 설치되어 있어 안전하게 피난처로 활용될 수 있음.

○ 침수예상지도의 작성 시에는 효율적인 피난정보 제공과 신속하고 안전한 대피를 위하여 다음의 사항을 포함하도록 함.

- 계단, 출입구 등 대피로, 비상등, 통신설비 등 피난대피시설의 명시
- 시설 위치도 : 침수예상지도의 각 대피로 및 시설위치를 확인 가능
- 주의사항 : 침수예상지도의 목적과 대피시간을 표기하고
- 범례 : 침수예상지도의 침수위험등급을 알리는 설명과 색깔등급 표기
- 비상전기, 기계, 통신 설비 등



<그림 3.2.24 지하공간 침수예상지도 작성 예 >

다. 지하공간 침수위험도 평가기법 가이드라인(안),

○ 본 가이드라인(안)은 '복합지하공간 수해방지를 위한 지하저류공동 건설기술 개발' 연구과제의 성과에 따라, 도심지 침수취약성이 큰 복합지하공간에 대한 침수위험도 평가 및 침수재해 저감, 기타 사항 등 평가기법에 대한 가이드라인(안)을 작성, 제시하였음.

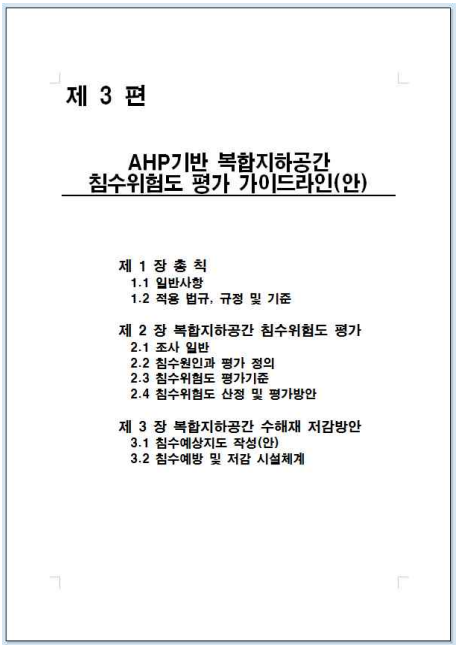
○ 가이드라인(안) 목적대상 시설

도심지 집중호우에 의한 저지대로의 유출과 유역 침수양상에 따라 지표 아래에 위치하고 있는 지하공간시설로 유입될 수 있는 가능성이 있음. 여러 가지 목적별로 건설 또는 계획된 도심지 지하공간 시설 중, 도심지 생활 공간으로써 시민의 체류시간이 길어지고 있는 반면에, 폐쇄된 구조의 지하공간은 침수재해 시 인적, 물적(재산) 피해가 상대적으로 클 것으로 예상되는 지하상가 등 폐쇄형 복합지하공간

시설물을 원칙적으로 적용 대상으로 설정함.

○ 가이드라인(안) 구성

- 가이드라인(안) 구성은 도심지내 임의 유역의 홍수 발생시 복합지하공간의 침수취약성에 대하여 침수원인과 침수위험인자에 대한 사항을 언급하였고, AHP 기법 기반의 침수위험도 평가 기법 및 기준을 제시하고 관련 침수위험인자 평가에 대한 종합적인 침수위험도 등급과 조사 평가방법을 제시함.
- 침수위험도 평가기법(안)에 근거하여 복합지하공간에서의 침수예상분석과 침수예상지도 작성방안을 제시하였고, 이에 대한 침수예방 및 저감시설, 기타 피난체계 등 비구조적 수방사항에 대하여 명시하였음.


제 3 편

AHP기반 복합지하공간
침수위험도 평가 가이드라인(안)

제 1 장 총 칙
1.1 일반사항
1.2 적용 법규, 규정 및 기준

제 2 장 복합지하공간 침수위험도 평가
2.1 조사 일반
2.2 침수원인과 평가 정의
2.3 침수위험도 평가기준
2.4 침수위험도 산정 및 평가방안

제 3 장 복합지하공간 수해재 저감방안
3.1 침수예상지도 작성(안)
3.2 침수예방 및 저감 시설체계

<그림 3.2.25 지하공간 침수위험도 평가기법 가이드라인(안)>

○ AHP기반 복합지하공간 침수위험도 평가 가이드라인(안) 제시

- 복합지하공간 시범위치 침수위험도 평가 결과, 검증에 기초한 침수원인과 침수위험인자 분류
- AHP기법 기반 현장조건에 따른 침수 위험인자선정과 침수위험도 평가기준 및 평가방안
- 복합지하공간 1D-2D연계 빗물유출 동적거동분석에 기초한 침수예상분석과 침수예상지도 작성방번(안) 설정
- AHP기법 기반 침수위험도 기법을 고려한 빗물유입수 침수억제, 침수위 저감시설 및 장치, 기타 비구조적 방안 제시
- 지중구조물내로의 우수, 지하수 침투유입수의 방배수 체계, 시설물연결부의 누수취약성, 지반조건 및 지하수 침투특성에 따른 침투유입 방지 처리 방안
- 복합지하공간의 수재해 방지를 위한 적극적인 구조적 수방체계인 빗물저류공동을 계획하였을 경우의 유입수 유도•배수 체계, 운영 및 유지관리에 대한 사항

<표 3.2.18 AHP기반 복합지하공간 침수위험도 평가 가이드라인(안)구성>

<table>
<tr><th colspan="2">제 1장 총칙</th></tr>
<tr><td colspan="2">• 일반 사항 • 적용 법규, 규정 및 기준</td></tr>
<tr><th>제 2장 침수위험도 평가</th><th>제 3장 수재해 저감 방안</th></tr>
<tr><td>• 일반 사항
- 지하공간 침수취약성
- 침수위험도 정의
• 침수원인과 위험인자
- 침수원인
- 침수위험인자
• 침수위험도 평가기준
- 개요
- 평가기준
• 침수위험도 산정, 평가방안
- 침수위험도 조사표
- 침수위험도 등급</td><td>• 침수예상지도 작성(안)
- 침수예상 분석과 침수 예상지도
- 침수예상지도 작성방법(안)

• 침수예방 및 저감 시설체계
- 침수억제•침수위저감 시설
- 기타 구조적, 비구조적 방안</td></tr>
</table>

제 3 절 최적규모 설계기법에 따른 지하 저류공동 배수시스템

1. 지하 저류공동의 개략적 위치선정에 따른 배수시스템 효과분석 [1차년도]

가. 초과우량 대상강우 선정

(1) 연구대상지역의 선정 및 방법

○ 본 연구에서는 국내 주요 7개 도시(1개특별시-서울, 6개광역시-인천, 대전, 대구, 부산, 울산, 광주)에 대하여 초과우량 대상강우를 분석. 대상강우는 기상청의 자료로, 각각 1961년(대전 1969년)부터 2010년까지의 자료를 이용.

<표 3.3.1 대상강우 현황>

분석대상지역	강우분석기간	자료형태	소재지
서울	1961년 - 2010년	시자료	서울특별시 종로구 송월동
인천	1961년 - 2010년	시자료	인천광역시 중구 전동
대전	1969년 - 2010년	시자료	대전광역시 유성구 구성동
대구	1961년 - 2010년	시자료	대구광역시 동구 신암동
부산	1961년 - 2010년	시자료	부산광역시 중구 대청동1가
울산	1961년 - 2010년	시자료	울산광역시 중구 북정동
광주	1961년 - 2010년	시자료	광주광역시 북구 운암동

○ 분석대상지역을 선정하고 대상지역에 대한 확률강우량을 산정한 뒤 재현기간별, 지속시간별 확률강우량을 초과하는 강우사상을 추출함.

○ 확률강우량을 초과하는 강우사상에 대하여 강우계급을 분석한 뒤 계급구간별 상대도수 및 누가빈도 분포를 분석함.

○ 위의 분석 결과에 대하여 한계강우선정을 위한 추세선 분석 및 추세선에 따른 계수를 산정하고 한계강우를 결정함.

(2) 재현기간별 지속시간별 확률강우량 초과사상 분석

○ 분석대상지역의 확률강우량을 산정하고 확률강우량을 초과하는 사상을 분석.

○ 분석을 위한 재현기간은 7개의 재현기간(2년, 5년, 10년, 20년, 30년, 50년, 100년)이며 지속시간은 24시간으로 분석.

<표 3.3.2 재현기간별 대상지역 초과강우 사상수>

재현기간 (year)	초과강우사상 수(24시간)						
	서울	인천	대전	대구	부산	울산	광주
2	617	567	488	427	521	440	634
5	184	206	84	144	169	150	267
10	79	100	56	72	57	71	161
20	23	40	74	25	20	58	95
30	12	28	35	15	18	49	56
50	7	19	22	0	16	36	37
100	4	0	5	0	12	29	21

(3) 대상지역 한계강우량 산정

○ 각 지역의 매개변수 산정결과를 이용하여 누가계수 0.5의 값을 한계강우량으로 정의하고 지속시간 24시간의 한계강우량을 산정.

○ 산정된 한계강우는 아래 표와 같으며, 인천 재현기간 100년, 대구 재현기간 50년, 100년의 경우 확률강우를 초과하는 강우발생은 없는 것으로 분석됨.

<표 3.3.3 한계강우량 및 확률강우의 비교>

대상지역		지역별 한계강우량 및 확률강우량(지속시간 - 24시간)						
		2 년	5 년	10 년	20 년	30 년	50 년	100 년
서울	한계강우	**176.1**	**251.4**	**288.9**	**333.4**	**360.9**	**412.5**	**434.6**
	확률강우	162.7	234.0	281.3	326.7	352.7	385.3	429.3
	비교	+13.4	+17.4	+7.6	+6.7	+8.2	+27.2	+5.3
인천	한계강우	**166.9**	**229.6**	**265.0**	**317.8**	**342.1**	**372.7**	**-**
	확률강우	144.5	213.2	258.7	302.3	327.4	358.8	401.1
	비교	+22.4	+16.4	+6.3	+15.5	+14.7	+13.9	-
대전	한계강우	**143.4**	**234.5**	**283.5**	**300.2**	**309.2**	**325.5**	**352.6**
	확률강우	140.4	195.6	232.1	267.2	287.3	312.5	346.5
	비교	+3.0	+38.9	+51.4	+33.0	+21.9	+13.0	+6.1
대구	한계강우	**128.0**	**170.8**	**227.6**	**230.7**	**233.5**	**-**	**-**
	확률강우	115.6	154.8	180.7	205.6	219.9	237.8	261.9
	비교	+12.4	+16.0	+46.9	+25.1	+13.6	-	-
부산	한계강우	**187.63**	**238.6**	**283.3**	**398.7**	**404.8**	**414.3**	**442.2**
	확률강우	161.1	226.7	270.1	311.8	335.7	365.7	406.1
	비교	+26.53	+11.9	+13.2	+86.9	+69.1	+48.6	+36.1
울산	한계강우	**148.0**	**210.2**	**329.1**	**355.4**	**375.0**	**407.6**	**441.8**
	확률강우	144.1	206.9	248.5	288.4	311.3	340.0	378.7
	비교	+3.9	+3.3	+80.6	+67.0	+63.7	+67.6	+63.1
광주	한계강우	**156.6**	**218.7**	**242.7**	**272.3**	**301.5**	**331.8**	**347.0**
	확률강우	138.8	189.1	222.4	254.4	272.8	295.8	326.8
	비교	+17.8	+29.6	+20.3	+17.9	+28.7	+36.0	+20.2

나. 지하 저류공동 저류량 산정

(1) 연구대상지역의 선정

○ 대상지역 선정을 위하여 침수위험지구를 조사, 분석 실시.

○ 최근 침수발생이 다수 일어난 부산 해운대 센텀시티를 대상유역으로 결정하였음.

○ 본 대상지역은 최근 10년간 5회의 침수피해가 발생하였으며 2008년도부터 침수 피해가 발생하였음.



<그림 3.3.1 대상유역 현황>

(2) 침수모형(SWMM)의 구축

○ 본 시범유역을 분석하기 위하여 EPASWMM5.0을 이용하여 모형을 구축.

○ 대상유역에 SWMM을 이용한 유역자료의 구축을 위해 측량, 지장물, 평면 및 노선계획 등의 대상유역 내 관망 자료 및 대상관거에 대한 수리 매개변수자료와 대상유역의 상류로부터 유입되는 유출량을 고려하기 위해 상류지역의 유역 현황도를 활용.

○ 저류량 산정을 위하여 대상지역의 시나리오별 저류량을 산정.

<표 3.3.4 연구시나리오>

시나리오 구분	강 우	지하저류시설	비 고
시나리오 1	한계강우 분석결과	없 음	기후변화적용
시나리오 2	한계강우 분석결과	적 용	기후변화강우적용+저류시설
시나리오 3	2009.07 대상지역침수강우	없 음	침수강우적용
시나리오 4	2009.07 대상지역침수강우	적 용	기후변화강우적용+저류시설

(3) 시나리오별 분석결과

○ 시나리오별 침수량을 분석한 결과 다음과 같은 결과를 보임.

○ 본 대상지역은 관정고와 관저고가 -1.57m와 -3.57m로 비강우시에도 조위영향을 받는 방류하천 수위가 관저고 이상으로 상승하여 관거로의 유입 등의 문제가 발생

○ 따라서 주관로에 저류지로 연결되는 관을 구성하여 침수를 저감하기 보다는 지표유출을 유입시키는 측구를 추가하여 저류지로 유도하였음.

○ 분석결과 상류지역은 저류지 설치로 인하여 침수가 다소 해소되었으나, 하류부는 유출불량으로 침수가 쉽게 발생하는 것으로 분석됨.

○ 따라서 하류부의 침수의 직접적인 원인은 측구의 집수불량이고 하천수위는 침수 발생 후 배수에 영향을 주는 것으로 판단됨.

<표 3.3.5 시나리오별 침수지역 유입량 및 침수량>

Node	침수량 (ton)				Node	침수량 (ton)			
	시나리오1	시나리오2	시나리오3	시나리오4		시나리오1	시나리오2	시나리오3	시나리오4
N02	-	-	-	-	NG05	-	-	-	-
N03	-	-	-	-	NG08	2	-	6	-
N031	-	-	-	-	NG09	-	-	-	-
N04	-	-	-	-	NG10	-	-	-	-
N041	-	-	-	-	NG11	18	18	17	17
N05	-	-	-	-	NG13	40	41	40	40
N07	-	-	-	-	NG14	-	-	-	-
N08	-	-	-	-	NG15	-	-	-	-
N09	-	-	-	-	N11	608,653	-	-	-
N10	-	-	-	-	NG03	-	-	-	-
N44	-	-	-	-	N06	-	-	174,840	-
N45	-	-	-	-	N12	616,854	-	176,927	-
NG01	38	-	16	2	NG06	-	-	-	-
NG02	669	-	319	-	NG07	-	-	-	-
NG04	7	7	6	7	N01	-	-	-	-

다. 지하 저류공동 설치에 따른 침수저감효과 분석

(1) 시나리오 1,2의 침수저감효과 비교 · 분석

○ 시나리오 1,2의 강우조건은 앞 절에서 산정한 한계강우 재현기간 50년, 지속시간 24시간의 강우임.

○ 시나리오 1의 경우에는 지하 저류지를 설치하지 않았으며 시나리오2의 경우에는 대상유역 내 벡스코 주차장 부지에 지하 저류지의 설치를 전제하였음.

○ 시나리오 1,2의 모형구축 조건은 아래와 같음

<표 3.3.6 시나리오별 모형구축 조건>

시나리오 구분	강 우	지하저류시설	비 고
시나리오 1	한계강우 분석결과	없 음	기후변화적용
시나리오 2	한계강우 분석결과	적 용	기후변화강우적용+저류시설

<표 3.3.7 시나리오 1,2에 대한 침수량 및 저감효율 비교>

Node 명	Node 유입량 (ton)	침수량(ton), 저감효율(%)			Node 명	Node 유입량 (ton)	침수량(ton), 저감효율(%)		
		시나리오1	시나리오2	저감효율			시나리오1	시나리오2	저감효율
N02	1,110,037	-	-	-	NG05	559	-	-	-
N03	1,121,154	-	-	-	NG08	531	2		-
N031	1,122,670	-	-	-	NG09	1,121	-	-	-
N04	1,132,963	-	-	-	NG10	1,041	-	-	-
N041	533,670	-	-	-	NG11	833	18	18	0%
N05	606,042	-	-	-	NG13	861	40	41	0%
N07	54,269	-	-	-	NG14	2,006	-	-	-
N08	44,560	-	-	-	NG15	997	-	-	-
N09	44,535	-	-	-	N11	608,814	608,653	0	100%
N10	44,535	-	-	-	NG03	1,399	-	-	-
N44	1,611	-	-	-	N06	61,117	-	-	-
N45	799	-	-	-	N12	616,937	616,854	0	100%
NG01	711	38	-	100%	NG06	1,077	-	-	-
NG02	1,183	669	-	100%	NG07	1,068	-	-	-
NG04	1,023	7	7	0%	N01	1,102,740	-	-	-

○ 시나리오 1,2 침수저감효율을 분석한 결과 NG01, NG02, N11, N12의 경우에는 100%의 저감효율을 나타냈으며 NG04, NG11, NG13에서는 저감효율이 나타나지 않았음.

○ 이는 하류단의 조위의 영향으로 인하여 하류부의 통수능이 부족하여 주 관로로의 유입불능으로 인한 침수이기 때문에 상류지역의 저류지 설치로 인한 저감효과를 나타내지 못함.

○ 따라서 침수저감효과를 나타내기 위해서는 하류단에 별도의 소규모의 저류시설이 필요한 것으로 판단됨.

(2) 시나리오 3,4의 침수저감효과 비교 · 분석

○ 시나리오 3,4의 강우조건은 2009년의 대상지역 침수이력 실강우임.

○ 시나리오 3,4의 모형구축 조건은 아래와 같음.

<표 3.3.8 시나리오별 모형구축 조건>

시나리오 구분	강 우	지하저류시설	비 고
시나리오 3	대상지역 침수이력 실강우	없 음	
시나리오 4	대상지역 침수이력 실강우	적 용	

<표 3.3.9 시나리오 3,4에 대한 침수량 및 저감효율 비교>

Node 명	Node 유입량 (ton)	침수량(ton)			Node 명	Node 유입량 (ton)	침수량(ton), 저감효율(%)		
		시나리오 1	시나리오 2	저감효율			시나리오 1	시나리오 2	저감효율
N02	295,185	-	-	-	NG05	297	-	-	-
N03	300,371	-	-	-	NG08	283	6	-	100%
N031	300,432	-	-	-	NG09	594	-	-	-
N04	305,568	-	-	-	NG10	554	-	-	-
N041	135,297	-	-	-	NG11	458	17	17	0%
N05	172,322	-	-	-	NG13	485	40	40	0%
N07	27,955	-	-	-	NG14	1,066	-	-	-
N08	22,797	-	-	-	NG15	527	-	-	-
N09	22,773	-	-	-	N11	174,990	-	-	-
N10	22,773	-	-	-	NG03	779	-	-	-
N44	869	-	-	-	N06	32,053	174,840	-	100%
N45	429	-	-	-	N12	177,009	176,927	-	100%
NG01	379	16	2	87.5%	NG06	574	-	-	-
NG02	626	319	-	100%	NG07	568	-	-	-
NG04	553	6	7	-16.6%	N01	291,347	-	-	-

○ 시나리오 3,4 침수저감효율을 분석한 결과 NG01의 경우 87.5%, NG02, NG08, N06, N12의 경우에는 100%의 저감효율을 나타냈으며 NG04, NG11, NG13에서는 저감효율이 나타나지 않았음.

○ 또한 NG04의 경우에는 하류부의 조위로 인하여 침수량이 늘어나는 것으로 분석됨.

○ 이는 하류단의 조위의 영향으로 인하여 하류부의 통수능이 부족하여 주 관로로의

유입불능으로 인한 침수이기 때문에 상류지역의 저류지 설치로 인한 저감효과를 나타내지 못함.

○ 따라서 침수저감효과를 나타내기 위해서는 하류단에 별도의 소규모의 저류시설이 필요한 것으로 판단됨.

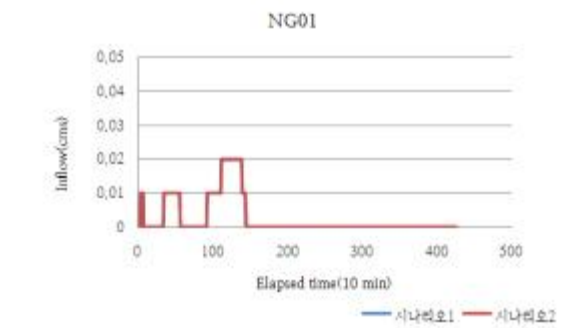
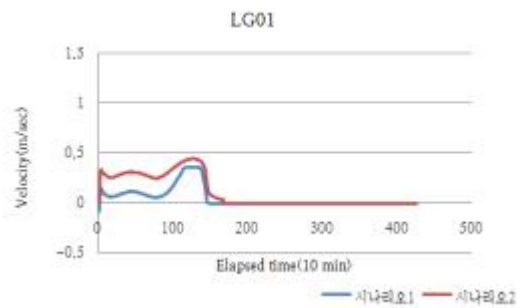
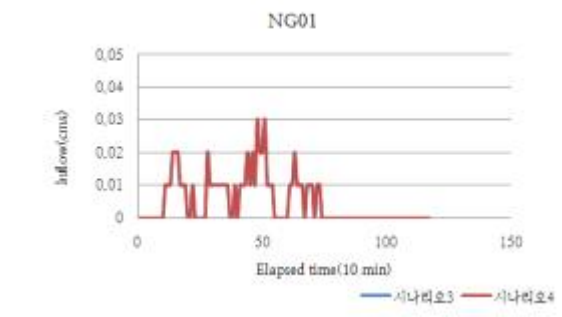
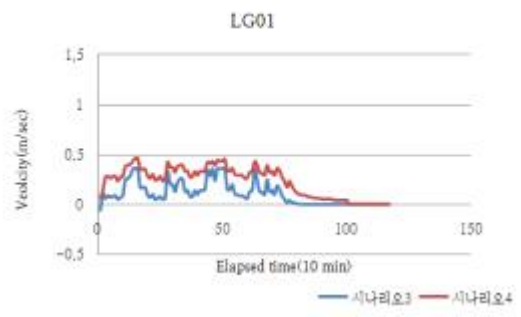
라. 지하 저류공동 설치에 따른 수리영향인자 분석 및 도시유역에 적합한 수리수문해석 모형의 검토

(1) 주요지점별 수리인자 분석

○ 본 연구에서는 한계 강우 사상과 실제 침수가 발생한 강우 사상에 대하여 저류지 설치 전·후의 관거에 대한 수리인자 분석을 실시하였음.

○ 분석은 주 관로에 대하여 실시하였으며 주 관로의 Node별 유입량과 Node에 연결되어 있는 관거의 유속을 분석함.

○ 시나리오별 수리영향 인자 분석 및 비교를 실시한 결과 시나리오 1,2와 3.4의 비교를 통하여 시나리오별 유입량 및 유속의 변화를 분석하였음.

시나리오1,2 유입량분석	시나리오1,2 유속분석
	
시나리오3,4 유입량분석	**시나리오3,4 유속분석**
	

<그림 3.3.2 시나리오별 수리영향인자 분석결과(Node : NG01, 연결관 : LG01>

(2) 도시유역에 적합한 수리·수문해석 모형의 검토

○ 도시유역에 적합한 수리수문해석의 모형을 검토함.

○ 아래 표는 도시유역에 적합한 유출모형을 검토하였으며 본 연구에서는 SWMM모형을 선정하여 연구를 실시함.

<표 3.3.10 수리·수문모형의 기능검토>

모형	기관	형태		복잡성		수문기능				수질기능							최적관리기법의형태				
		현장조사	최적관리기법	일반적	세부적	저류지	월류	여과	홍수추적	사용자지정	유사	인	질소	농약	중금속	미생물	유역의소유	여과지조사	작물조사	습지	기타구조물
AnnAGNPS	USDA-ARS	●	●	●	-	-	-	●	●	-	●	●	●	●	-	-	●	-	●	-	-
BASINS	EPA	●	●	●	●	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	●	-	●	-	●
EPIC	Texas A&M	●	-	-	●	●	●	●	-	-	●	●	●	●	-	-	●	●	-	●	-
KINEROS2	USDA-ARS	●	-	-	●	-	-	●	●	-	●	-	-	-	-	-	●	-	●	-	●
MUSIC	Monash Univ.	-	●	-	●	●	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	●
REMM	USDA-ARS	-	●	-	●	-	-	●	●	-	●	●	●	●	-	-	-	-	●	-	-
SWAT	USDA-ARS	●	●	●	●	●	●	●	●	-	●	●	●	●	-	-	●	●	●	-	●
SWMM	**EPA**	-	●	-	●	●	●	●	●	●	●	-	●	-	-	-	●	●	-	-	-
WEPP	USDA-ARS	●	●	●	-	-	●	●	-	-	●	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-
WinHSPF	EPA	●	●	●	-	-	-	-	-	●	●	●	●	●	●	●	-	-	-	-	-

<표 3.3.11 수리·수문모형의 요소검토>

모형	기관	형태		수준			시간 간격				수문요소		수질 요소						
		격자기반	하도추적기법포함	전문적인변수	부하함수	물리적기법기반	반일간격	일간격	월간격	연간격	유역표층	표층수와지하수	사용자정의	유사	영양물질	독성/농약	중금속	BOD	미생물
AnnAGNPS	USDA-ARS	-	●	-	-	●	-	●	-	-	●	-	-	●	●	●	-	-	-
BASINS	EPA	-	●	●	●	●	●	●	-	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●
EPIC	Texas A&M	-	-	-	-	-	-	●	-	-	●	-	-	●	●	●	-	-	-
KINEROS2	USDA-ARS	-	●	-	-	●	●	-	-	-	●	-	-	●	-	-	-	-	-
MUSIC	Monash Univ.	-	-	-	-	●	●	-	-	-	●	-	●	-	-	-	-	-	-
SWAT	USDA-ARS	-	●	-	-	●	-	●	-	-	-	●	-	●	●	●	●	-	-
SWMM	**EPA**	-	●	-	-	●	●	●	●	-	-	●	●	●	●	●	●	●	●
TOPMODEL	Lankester Univ.(UK)	-	-	-	-	●	●	●	-	-	-	●	-	-	-	-	-	-	-
WEPP	USDA-ARS	-	-	-	-	●	-	●	●	●	-	●	-	●	-	-	-	-	-
WinHSPF	EPA	-	●	-	-	●	●	-	-	-	-	●	●	●	●	●	●	●	●

마. 지하 저류공동 설계를 위한 최적화 기법의 검토 및 선정

○ 본 연구에서는 지하 저류공동의 최적설계를 위하여 관련분야에서의 적용성이 입증된 다양한 최적화 기법들에 대하여 검토함.

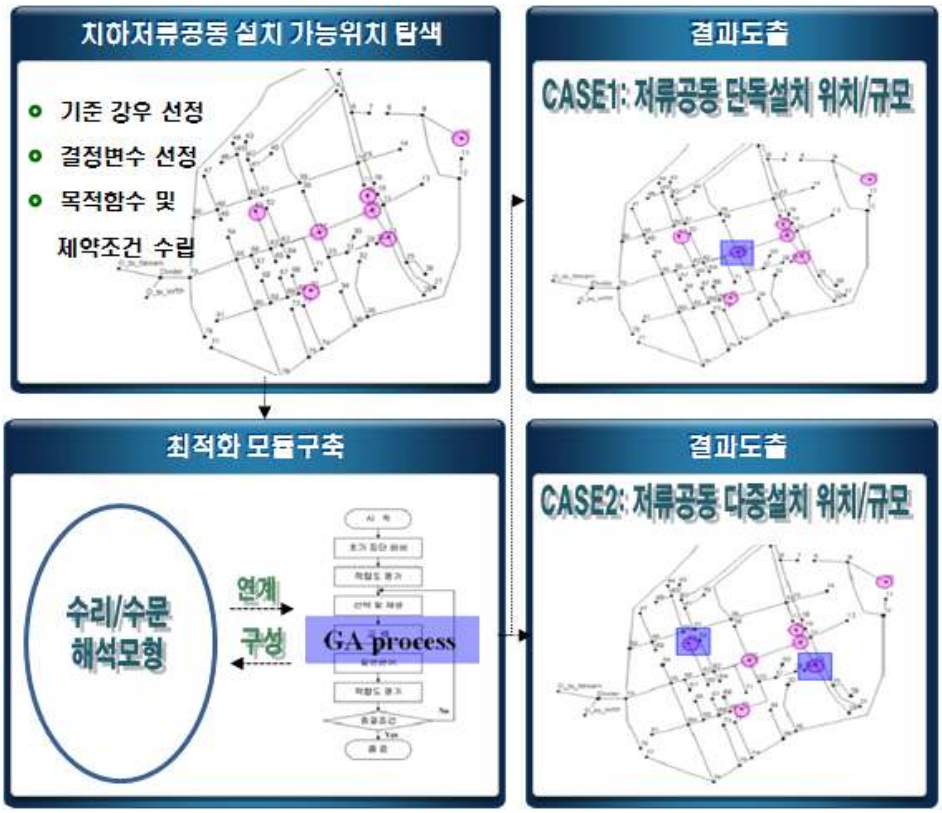
○ 다양한 최적화 기법들 중 LP, NLP, DP 등의 수리계획법은 문제에 대한 적용이 간편하고 정확한 해의 산출이 가능하다는 장점을 가지고 있음.

○ 그러나 수리계획법의 가장 큰 단점은 적용하고자 하는 문제의 변수가 복잡할 경우 문제 자체의 수식화가 어렵고 해의 도출이 불가능한 경우가 많다는 것임.

○ 이러한 요소를 만족시키는 최적화 기법으로 Meta-heuristics의 하나인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)은 HS(Harmony Search)와 함께 다른 기법들에 비하여 그 적용성이 매우 우수하며, 해의 탐색 속도 및 정확성이 뛰어나다고 할 수 있음.

○ GA는 수많은 연구자들을 통하여 매우 폭 넓고 다양한 유형의 문제들에 적용된 바가 있으며 특히, 최적의 위치 선정, 최적 규모의 설계 등 보편적인 조합의 문제 해결에 탁월한 성능을 발휘하는 것으로 평가되고 있음.

○ 따라서 본 연구에서는 지하 저류공동의 최적의 위치 및 규모를 설계하기 위한 최적화 기법으로서 유전자 알고리즘(GA)을 선정함.



<그림 3.3.3 지하 저류공동 최적설계 개념도>

바. 도시유역 기존 배수체계 분석

(1) 국내외 도시유역 지하저류 공동설치 사례조사

○ 국내에서 도시 침수 예방을 위해 지하 저류조를 설치한 곳 중 대표적인 지역은 서울시임. 서울시는 청계천 상류 등에 총 6개소 68,000여 톤을 저류할 수 있는 시설을 설치한 바 있는데, 이는 2006년 7월 200mm/일 이상의 강우가 2회에 걸쳐 발생했을 때 하류지역 침수예방에 큰 효과가 있었음.

<표 3.3.12 국내 지하저류조 현황>

구분		시설개요		공사기간
		위치	용량(ton)	
1	망우산	중랑구 망우동 망우산 체육공원	30,000	03.04.21 ~ 04.11.30
2	석관동	성북구 석관동 샛별 놀이터	2,700	03.09.18 ~ 04.08.17
3	예장동	중구 예장동 숭의여대 뒤	2,165	05.04.22 ~ 06.04.21
4	삼청동	종로구 삼청동 중학천 상류 삼청공원내 테니스장	7,300	06.03.24 ~ 06.09.19
5	성북동	성북구 성북동 성북천 상류	12,119	06.06.21 ~ 07.07.11
6	마들근린공원	노원구 상계동 마들근린 공원내	14,100	06.02.27 ~ 07.08.31
계			68,384	

○ 미국의 지하저류지의 설치는 주로 상대적으로 지가가 높은 신설 개발단지에 우선 설치하고 있으며, 기존 시가지에는 설치를 재현하고 있는 실정임. 또한 지하 저류지는 주차장 및 상업, 공업, 주거지의 포장지역에 설치하고 있음.

○ 미국 내 설치되어 운영 중인 지하저류지 시설의 일부를 아래의 표에 나타내었음.

<표 3.3.13 미국 내 지하저류지 설치사례>

구분 / 시설명	재질	관길이 (ft)	관경 (inches)	최대 저류량 (m^3)	공사비($)
Jordan Lading Mall West Jordan, UT	알루미늄	20,000	48	7,120	1.200.000
Hause Homestead State Park,Everett,WA	콘크리트	350	36	81	28.190
Homestead Village Hotel Brookfield, WI	콘크리트	549	72	454	267.000
Car Dealership, Knoxville,TN	콘크리트 암거	156	6×4	106	85.000

(2) 도시유역 기존 배수체계 분석

○ 도시유역에서의 우수관거 시스템은 강우에 의한 지표 유출을 수집하여 빗물펌프장 및 하천으로 이송함으로써 원활한 내수 배제를 목적으로 함.

- 그러나 근래 들어 빈번히 발생하는 국지성 집중호우는 단시간 내 많은 강우량을 동반하므로 유역 내 우수관거의 통수능력을 초과함으로써 내수침수 피해를 유발하고 있음.
- 또한 도시화에 따른 불투수면적의 증가는 유출량을 증가시킬 뿐만 아니라 도달시간의 감소로 첨두 홍수량을 증가시켜 도시유역에서의 침수피해 발생 위험도를 가중시키고 있음.

○ 현재 도시유역에서의 우수관거의 설계는 최단거리의 관거 노선 설정에 따라 최소비용의 공사비가 소모되도록 설계되고 있음.

- 즉, 유역 내 맨홀의 위치를 설정하고 맨홀 간 최단거리의 노선을 설정한 뒤 강우-유출 관계를 분석하여 맨홀별 유입량을 산정한 후 맨홀 간 관거의 경사 및 관경을 설계하는 것이 일반적임.
- 또한 이것을 바탕으로 유역 출구에서의 유출량에 따른 유수지 및 빗물펌프장의 규모 및 운영 기준을 결정하게 됨.

○ 우수관거의 최적 설계에 대한 기존의 연구들 또한 수리학적 조건을 만족시키는 범위 내에서 최소의 비용을 위한 관거 설계에 초점을 맞추어왔음.

- 그러나 이러한 기존의 연구들에서 우수관망 및 관거의 설계란 고정된 유입량으로부터 결과 되는 부산물로서의 고려대상이 될 뿐이었음. 즉, 관거 시스템의 설계에 있어서 고정된 유입량에 대한 통수용량을 만족시키는 범위 내에서 관경 및 관 경사에 대한 최적화 문제를 해결하는 것이 기존 연구들에서의 대상 범위였음.

○ 여기서 주목해야 할 점은 관망 및 관거의 설계에 따른 부산물로서의 관내 흐름임. 즉 관망의 구성 형태가 달라짐으로써 관내 흐름 양상이 변화될 수 있으며 따라서 관내 흐름 양상을 고려한 관망의 설계가 이루어져야 한다는 것임.

- 도시유역에서 맨홀이 위치할 수 있는 지점이란 한정되어있음. 도시유역에서의 맨홀 지점은 주로 도로변을 따라 관거가 교차되어야 하는 지점에 주로 위치하게 되며, 맨홀별 유역 면적은 고정되어짐.
- 따라서 설계 강우에 따른 맨홀별 유입량은 고정되어지며, 맨홀별로 유입된 우수는 맨홀 간 연결 관거에 의하여 유출구로 이송되어짐.
- 이때 관내 흐름의 양상은 관거의 맨홀 간 연결 방향의 변화에 따라서 달라지며, 이 같은 현상은 관망의 형성에 따라서 맨홀별 유입된 유출수문곡선의 중첩효과

(superposition effect)가 달라지는 것이 원인이라 할 수 있음.

○ 기존의 연구들에서 최적의 우수관거 설계는 최소의 충족 요건을 만족시키면서 최소의 비용을 위한 설계를 의미함. 따라서 기존의 연구들에서 최적화된 우수 관거는 설계 강우에 대한 통수용량을 만족함에도 불구하고 흐름의 중첩효과를 고려하지 않음으로써 관내 흐름의 집중화에 따른 내수침수 위험성은 오히려 증가할 수도 있음.

○ 최적의 우수관거 설계는 우수관거의 근본적 목적인 내수배제를 최대화 하고자 하는 것일 것이며, 우수관거 시스템 유출구에서의 최소 첨두 유출량을 목적으로 해야 할 것임.

- 유출구에서의 첨두 유출량은 관거 시스템 내 흐름의 중첩효과를 변화시킴으로써 제어될 수 있는 요소이며, 흐름의 중첩효과를 변화시키기 위해서는 관망의 구성을 변화시킴으로써 가능함.
- 즉, 관망 구성을 변화시킴으로써 시스템 내부에서 흐름의 중첩효과를 감소시킬 수 있다면 그 결과로서 유출구에서의 첨두 유출량은 감소될 수 있으며, 또한 이것은 우수관거 시스템 내부에서 전반적으로 흐름을 분산시켰음을 의미함.
- 따라서 유출구에서의 첨두 유출량 감소는 시스템 전반적인 첨두 유출량 감소를 나타내므로 관내 부하량 및 월류의 위험도를 저감시키는 효과를 발휘할 수 있음.

(3) 지하 저류공동 설치를 위한 고려사항 분석

○ 지하 저류공동의 설치를 위한 고려사항을 분석하였으며, 설계절차는 아래 그림과 같음.



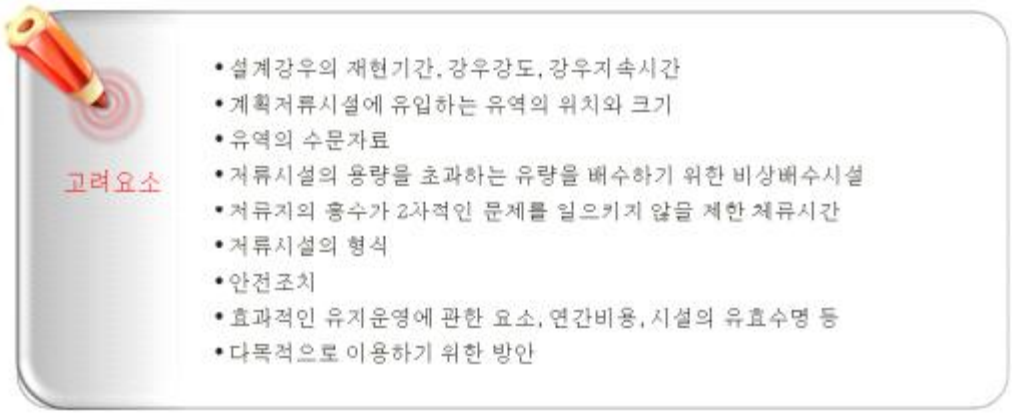
<그림 3.3.4 지하 저류공동 설계절차>

○ 다목적 저류지 설치 목적은 하류부의 통수능 용량을 초과하는 유량을 조절하기 위한 것이기 때문에 시설의 설치는 집중호우로 인하여 급증하는 제내지의 내수가 저지대의 배수량을 하천으로 배제시키기 쉬운 하천변이나 주거환경을 저해하지 않는 저지대에 설치하거나 주거지역에 설치할 경우 평상시 인근 주민의 편의를 제공할 수 있는 다목적으로 계획되어야 함.

○ 이러한 점 등을 고려하여 저류지 설치 시 고려되어야 할 주요 항목을 정리하면 다음과 같음.

- 인근 지역의 지형, 지질 등이 소요 저류량을 충분히 확보할 수 있는 곳이어야 함.
- 입지조건이 충족되어야 함. 여기서 입지조건이라 함은 유역의 개발상황, 기득수리권 등을 사전에 충분히 조사하여 저류지 설치에 따른 영향이 없거나 최소화되는 조절지로 계획되어야 한다는 것임.
- 이수, 치수 측면에서 안전한 조절지로 계획되어야 함. 즉, 저류지의 유효 저류량은 갈수기를 기준으로 정하며, 평시 저류량 및 기득수리권에 대한 수량 수구조물 조작실패, 파랑 등을 고려하여 여유고를 두고 계획되어야 함.
- 시설설치로 인한 불용지역에 대한 보상물건이 적고 처리분구의 크기가 커야하며 수원보호 상 유리한 장소에 설치되어야 함.
- 집중호우에 대하여 급증하는 제내지의 내수 또는 지반고가 낮은 저지대의 배수량을 하천에 배제하기 용이한 하천변 또는 주거환경을 저해하지 않는 저지대에 설치하거나 주거지역에 설치할 경우 평상시 인근 주민의 편의를 제공할 수 있는 다목적으로 계획되어야 함.

○ 이와 같은 고려사항으로부터 저류지 설계 시 고려해야 할 요소를 정리하면 다음과 같음



<그림 3.3.5 지하 저류공동 설계 시 고려해야 할 주요요소>

2. 지하 저류공동시설 설치 및 연계 시나리오를 고려한 배수시스템 효과의 정량적 분석 [2차년도]

가. 지하 저류공동의 설계 저류량 및 수리영향 인자 평가기법 개발

(1) 지하 저류공동 설치 시나리오 분석

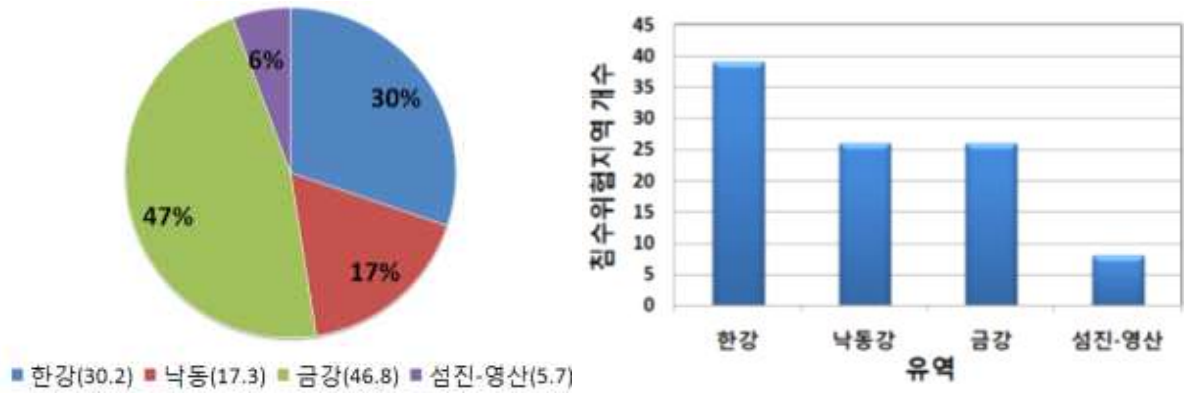
(가) 국내 주요도시 침수위험지구 조사

○ 홍수발생빈도에 따른 홍수 규모의 증대와 같이 강우 패턴이 과거와 달라지고, 극한 호우의 발생가능성이 증가하여 홍수발생시 피해의 규모가 증가하고 있음.

○ 토지이용이 고도화되고 유역의 상류를 비롯한 많은 부분이 불투수지역으로 변모하면서 유역의 저류 능력이 감소하여 직접유출이 증가.

○ 이로 인하여 도시를 관통하는 하천에서 첨두홍수량이 증가하고 도달시간도 단축되고 있으며 이와 같이 홍수는 그 시기와 크기 등을 예측하는 것이 어려움.

○ 홍수를 막기 위한 대비책으로 홍수예보 및 방재활동, 홍수터 관리 및 토지이용규제, 수공구조물 설치 등이 있지만 홍수발생지역을 파악하여 반복되는 홍수피해를 막는 것이 최우선이므로 본 연구는 홍수발생 지역을 산정하기 위하여 국내 유역별(한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강) 침수위험지역을 조사하였음.



(a) 유역별 침수면적(%)　　(b) 유역별 침수위험지역 개수

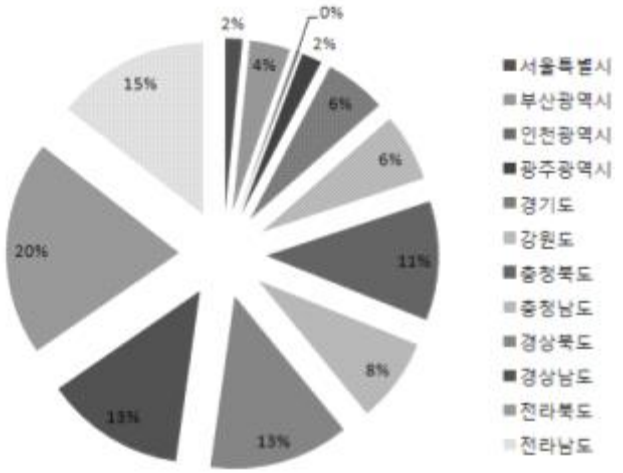
<그림 3.3.6 전국 주요 하천유역별 침수피해도>

(나) 국내 재해위험지구 조사 및 분석

○ 국내 재해위험지구 조사는 국가수자원관리종합정보시스템(http://wamis.go.kr)에서 조사하였으며 전국에는 312개소의 재해위험지구가 있는 것으로 분석되었음.

<표 3.3.14 전국 재해위험지구 현황>

재해위험지구		
지역명	개소	비율
서울특별시	5	1.6
부산광역시	12	3.8
인천광역시	1	0.3
광주광역시	6	1.9
경기도	18	5.8
강원도	20	6.4
충청북도	35	11.2
충청남도	25	8.0
경상북도	41	13.1
경상남도	41	13.1
전라북도	63	20.2
전라남도	45	14.4
전국	312	100.0



*참조: 국가수자원관리종합정보시스템(http://wamis.go.kr)

(2) 지하 저류공동 설치 시나리오에 따른 설계 저류량 및 이송관로의 수리영향 인자 분석

○ 본 연구에서는 한계 강우 사상에 대하여 저류시설 증대에 따른 관거의 수리인자 분석을 실시하였음.

○ 분석은 주 관로에 대하여 실시하였으며 주 관로의 Node별 유입량과 Node에 연결되어 있는 관거의 유속을 분석.

(가) 지하 저류공동 설치 시나리오별 설계 저류량 및 이송관로의 수리영향 인자 분석

○ 대상유역은 Line.1, Line.2, Line.3 로 나뉘어 있음.

○ Line.2 의 경우 최상단 유입부의 침수가 발생하였으나 주요 침수지역인 벡스코와의 거리 및 지형을 고려, 저류시설의 추가 설치가 필요 없다고 판단됨.

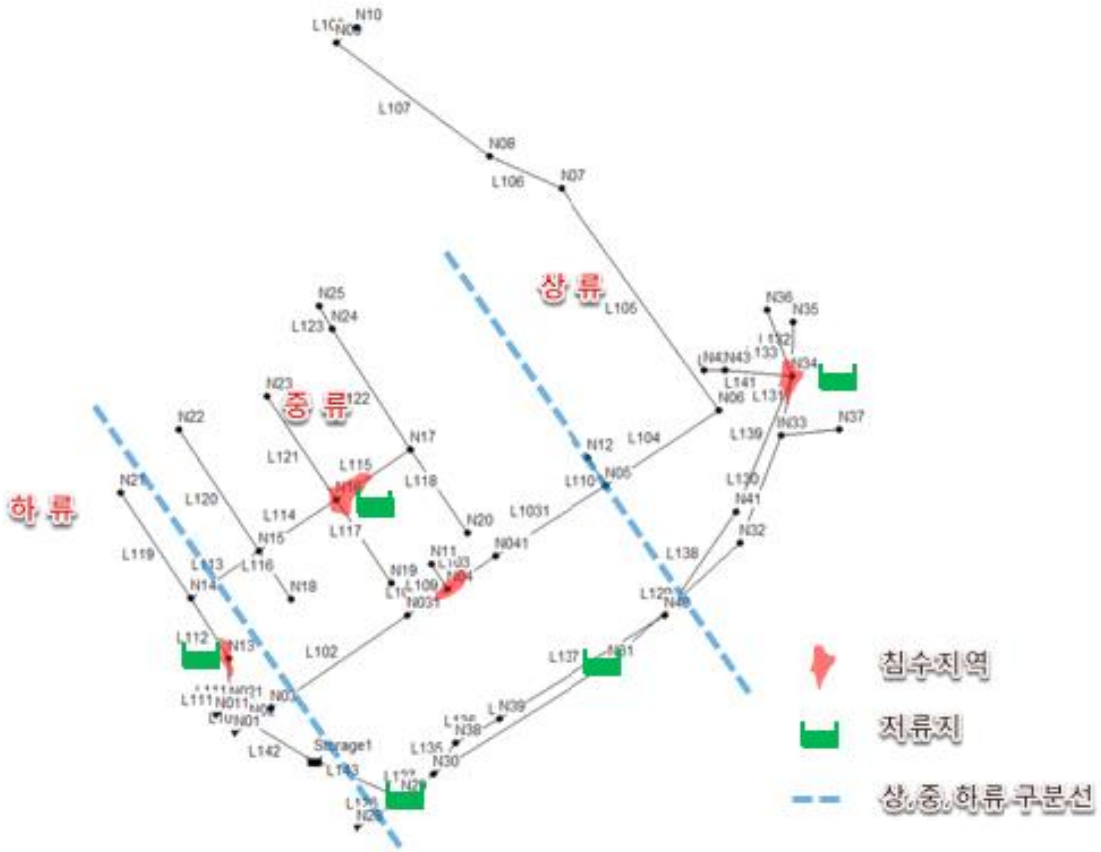
○ Line.별 저류시설 1대~3대까지 설치했을 경우의 관거 유입량과 유속을 분석하여 수리영향인자 값을 분석.

① Line.1 의 분석

○ 시나리오 1의 모형구축 조건은 아래와 같음.

<표 3.3.15 Line.1 시나리오별 모형구축 조건>

시나리오 구분	강 우	지하저류시설	비 고
시나리오 1-1	한계강우 분석결과	실제 저류시설	기후변화적용 + 실제 저류시설(Line.1)
시나리오 1-2	한계강우 분석결과	추가 적용(+1)	기후변화적용 + 저류시설(Line.1)
시나리오 1-3	한계강우 분석결과	추가 적용(+2)	기후변화적용 + 저류시설(Line.1)
시나리오 1-4	한계강우 분석결과	추가 적용(+3)	기후변화적용 + 저류시설(Line.1)



<그림 3.3.7 대상유역 최적저류지 설치 예상 위치>

○ Line 2는 Line1과 Line 3보다 유역의 폭이 작으며 그로인해 Line3보다 하류부에 설치된 저류조까지의 도달시간이 짧아 침수발생이 되지 않아 Line2에서는 추가적인 저류시설의 설치가 고려되지 않음.

○ 따라서 위의 각 Line의 상·중·하류의 분석과 같이 최소 한 개소 이상의 저류조를

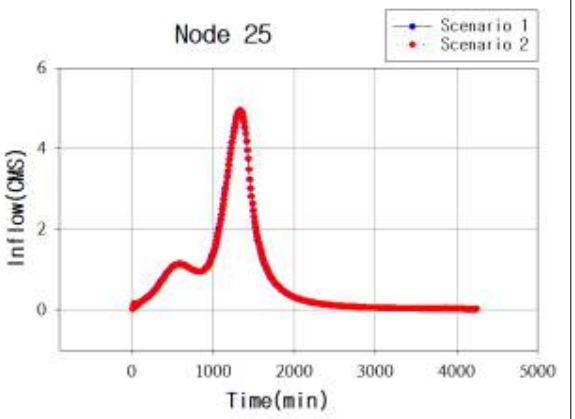
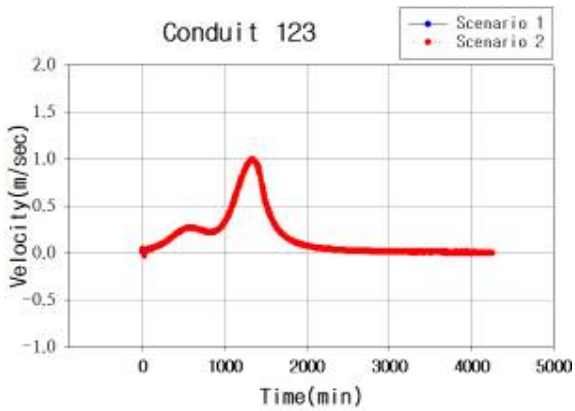
설치하게 되면 기존의 배수체계에 의한 침수발생이 현저히 저감될 것으로 판단되어짐.

(3) 기존 배수체계 연계 시나리오에 따른 설계 저류량 및 이송관로의 수리영향 인자 분석

○ 설치된 저류조가 각 이송관로에 미친 침수 저감효과를 알아보기 위한 것으로 저류조를 설치하지 않은 기존 배수체계와 저류조를 설치하였을 때의 경우를 비교하였으며 기존 배수체계는 Line2와 Line3 사이에 저류조 또한 설치하지 않은 상태로 대상지역에 저류조가 전혀 설치되지 않은 것을 의미함.

(가) 기존 및 신규 배수체계 연계 시나리오별 설계 저류량 및 이송관로의 수리영향 인자 분석

○ 시나리오1은 저류조를 전혀 설치하지 않았을 경우이며 시나리오2는 Line2와 Line3 사이의 하류부에 지하저류조를 설치하였을 경우임.

시나리오1,2 유입량분석	시나리오1,2 유속분석
	

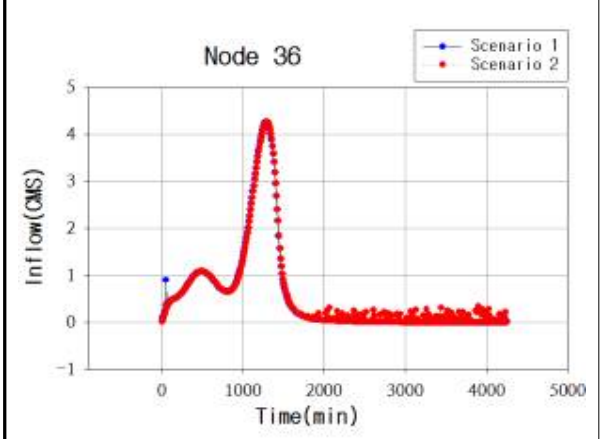
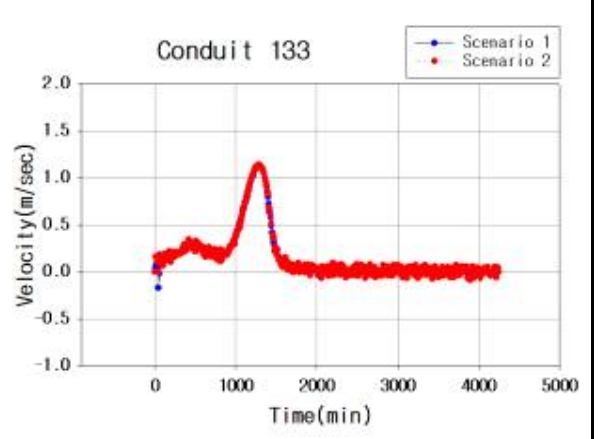
<그림 3.3.8 시나리오별 수리영향인자 분석결과(Node : N25, 연결관 : L123>

○ Node 25는 Line1의 상단 유입부로서 현재 대상유역의 하류부에 설치된 지하저류시설이 설치되어도 기존배수체계와 동일한 유입량과 유속을 나타냄.

○ 이는 하류부에 설치된 지하저류시설이 Line.2 와 Line.3 에는 직접적인 침수저감효과의 영향을 받지만 관로가 분리된 Line.1 은 지하저류시설의 침수저감효과의 영향을 받지 못하는 것으로 보임. 따라서 Line.1 의 관로에 직접적으로 연결되는 저류시설의 설치가 필요한 것으로 사료됨.

○ Line 2는 대상 유역내의 저류조 설치 전·후의 유입량에서는 변화가 없으나, 관거의 유속은 저류조 설치 전의 경우 하류부에서의 배수영향으로 인한 유속상쇄효과로 저류조 설치 후 보다 유속이 더 느린 것을 알 수 있었음.

○ Node 09는 Line2의 상단 유입부로 하류부에 설치된 지하저류조와의 거리차로 인해 유입량과 유속은 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단됨.

시나리오1,2 유입량분석	시나리오1,2 유속분석
	

<그림 3.3.9 시나리오별 수리영향인자 분석결과(Node : N36, 연결관 : L133>

○ Node 36은 Line3의 최상단 유입부로 Line1의 Node 25와 Line2의 Node 9와 마찬가지로 저류조와의 거리차로 인해 저류조 설치 전·후를 비교해보아도 유입량이나 유속의 뚜렷한 변화를 보이지 않는 것을 알 수 있음.

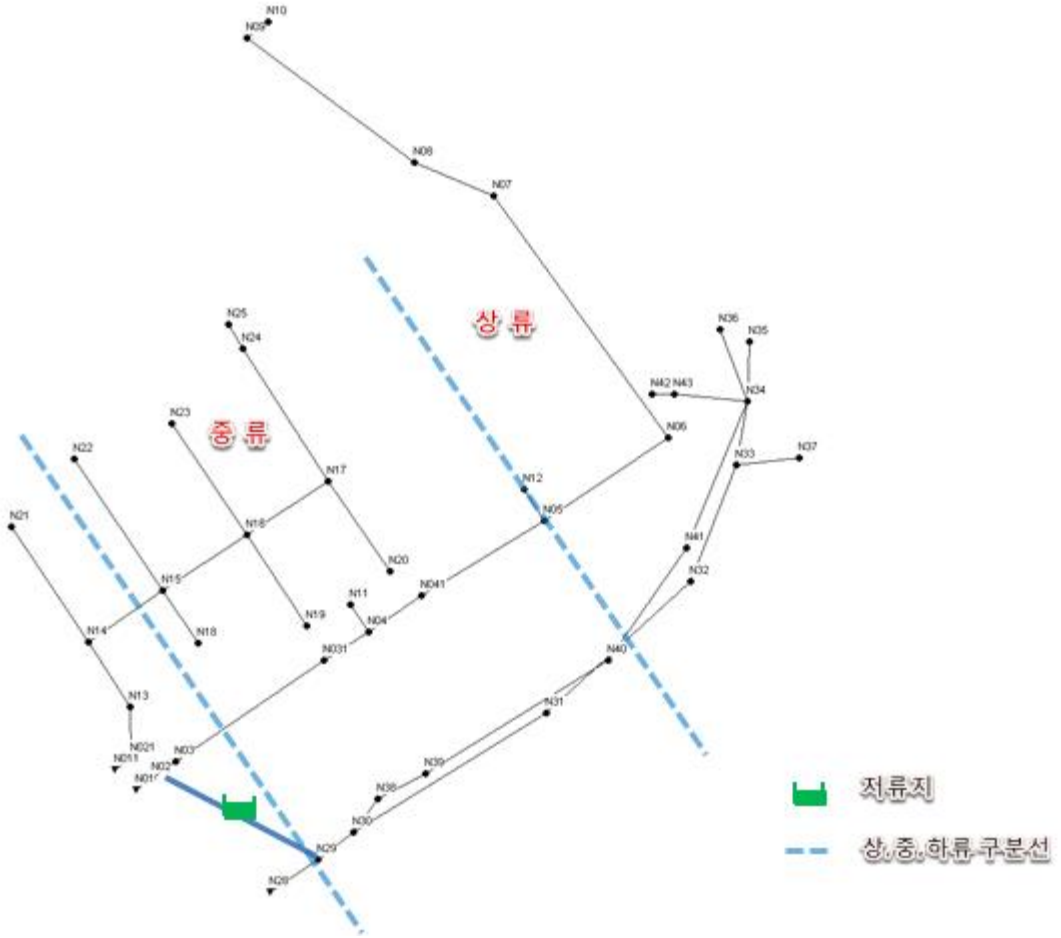
(나) 최적 배수체계 연계 방안 검토

○ 기존 배수체계의 Line 1은 Line2와 Line3과 같은 저류조설치가 되어있지 않아 침수발생에 대한 방지책이 없는 상태임.

○ 이에 관련하여 SWMM을 이용한 저류조 설치에 따른 침수 저감 효과를 모의한 결과 Line 1의 이송관로에 침수가 발생하지 않으려면 Line1에 저류조의 설치를 고려해야함.

○ <그림 3.3.10>은 저류조와 연결된 Node의 직상류에 위치한 Node N041의 분석 결과를 나타내고 있음. 그림에서 나타난 바와 같이 저류조를 설치하는 경우 하류관거에서의 배수불량이 개선되며 이로 인해 관 내 유속이 빨라지는 것을 알 수 있었음.

○ 또한 Line 1의 N25, Line2의 N09와 Line N36은 공통적으로 각 Line의 상단 유입부로 저류조를 설치하는 경우 직접적인 설치 외에는 침수 저감 효과의 영향을 받지 않는 것으로 보였으며 이러한 경우 상단 유입부의 침수에 관한 별도의 대책마련이 필요할 것으로 판단됨.



<그림 3.3.10 기존 배수체계에 저류조 설치를 한 신규 배수체계>

○ Line 3은 Line 1과 달리 위의 <그림 3.3.10>과 같이 하류부에 설치된 저류조로 인해 침수피해지역을 줄였으며 유속 또한 크게 저감시킨 것으로 나타남.

○ 따라서 기존 배수체계의 Line2와 Line3사이의 저류조를 설치하여 신규 배수체계를 갖추었을 경우 차집관거의 원활한 배수로 인해 유속이 증가 하였으며 침수 저감효과를 가져왔으나 Line 1의 침수에 영향을 미치지 못 함으로 별도의 저류조 설치가 필요하며 각 Line의 상단유입부 또한 중류와 하류부에 설치하는 저류조로 침수를 저감시킬 수 없으므로 저류조의 설치가 필요할 것임.

나. 지하 저류공동의 침수저감효과 분석

(1) 지하 저류공동 설치 시나리오에 따른 침수저감 효과 분석 및 검증

(가) 지하 저류공동 설치 시나리오에 따른 침수저감 효과 분석

○ 분석모형 시나리오 설정

- 모형의 저류조 설치에 대하여 4개의 시나리오로 모의를 실시. 시간은 10분 간격

○ 분석을 위한 모형 시나리오는 다음과 같음.

<표 3.3.16 시범지역 분석 시나리오>

시나리오 구분	강 우	지하저류시설	비 고
시나리오 1	한계강우 분석결과	실제 저류시설	기후변화적용+실제 저류시설(Line.1)
시나리오 2-1	한계강우 분석결과	추가 설치(+1)	기후변화적용+저류시설(Line.1)
시나리오 2-2	한계강우 분석결과	추가 설치(+2)	기후변화적용+저류시설(Line.1)
시나리오 2-3	한계강우 분석결과	추가 설치(+3)	기후변화적용+저류시설(Line.1)
시나리오 3-1	한계강우 분석결과	추가 설치(+1)	기후변화적용+저류시설(Line.3)
시나리오 3-2	한계강우 분석결과	추가 설치(+2)	기후변화적용+저류시설(Line.3)
시나리오 3-3	한계강우 분석결과	추가 설치(+3)	기후변화적용+저류시설(Line.3)
시나리오 4	한계강우 분석결과	추가 설치(Total)	기후변화적용+저류시설(Line.1+Line.3)

<표 3.3.17 시나리오 1,2에 대한 침수량 및 저감효율 비교>

Node명	시나리오별 침수량 (ton)				저감 효율	Node명	시나리오별 침수량 (ton)				저감 효율
	1	2-1	2-2	2-3			1	2-1	2-2	2-3	
N02	-	-	-	-	-	N22	12	-	-	-	100%
N021	326	326	326	329	0%	N23	-	-	-	-	-
N03	-	-	-	-	-	N24	17	-	-	-	100%
N031	-	-	-	-	-	N25	61	-	-	-	100%
N04	-	-	-	-	-	N29	166,640	192,057	185,352	191,356	0%
N041	-	-	-	-	-	N30	8,581	382	2,456	391	0%
N05	-	-	-	-	-	N31	598	601	595	590	0%
N06	-	-	-	-	-	N32	399	407	393	387	0%
N07	-	-	-	-	-	N33	266	290	276	321	0%
N08	-	-	-	-	-	N34	-	-	-	-	-
N09	-	-	-	-	-	N35	-	-	-	-	-
N10	607	607	607	607	0%	N36	129	127	131	131	0%
N11	-	-	-	-	-	N37	73	50	43	42	43%
N12	-	-	-	-	-	N38	7,438	14,201	11,892	14,551	0%
N13	240	240	240	-	100%	N39	275	291	278	273	0%
N14	-	-	-	-	-	N40	119	116	116	124	0%
N15	28	23	-	-	100%	N41	54	64	60	57	0%
N16	87	-	-	-	100%	N42	8	8	8	8	0%
N17	9	-	-	-	100%	N43	-	-	-	-	-
N18	4	2	-	-	100%	N01	-	-	-	-	-
N19	17	-	-	-	100%	N011	-	-	-	-	-
N20	266	-	-	-	100%	N28	-	-	-	-	-
N21	-	-	-	-	-						

<표 3.3.18 시나리오 1,3에 대한 침수량 및 저감효율 비교>

Node명	시나리오별 침수량 (ton)				저감 효율	Node명	시나리오별 침수량 (ton)				저감 효율
	1	3-1	3-2	3-3			1	3-1	3-2	3-3	
N02	-	-	-	-	-	N22	12	11	12	12	0%
N021	326	326	326	326	0%	N23	-	-	-	-	-
N03	-	-	-	-	-	N24	17	17	31	21	0%
N031	-	-	-	-	-	N25	61	61	59	65	0%
N04	-	-	-	-	-	N29	166,640	24,123	174	-	100%
N041	-	-	-	-	-	N30	8,581	204	146	-	100%
N05	-	-	-	-	-	N31	598	-	-	-	100%
N06	-	-	-	-	-	N32	399	-	-	-	100%
N07	-	-	-	-	-	N33	266	-	-	-	100%
N08	-	-	-	-	-	N34	-	-	-	-	-
N09	-	-	-	-	-	N35	-	-	-	-	-
N10	607	607	607	607	0%	N36	129	64	31	17	87%
N11	-	-	-	-	-	N37	73	-	-	-	100%
N12	-	-	-	-	-	N38	7,438	403	-	-	100%
N13	240	240	240	240	0%	N39	275	225	-	-	100%
N14	-	-	-	-	-	N40	119	-	-	-	100%
N15	28	28	28	28	0%	N41	54	-	-	-	100%
N16	87	87	87	86	0%	N42	8	-	-	-	100%
N17	9	9	9	8	0%	N43	-	-	-	-	-
N18	4	4	4	4	0%	N01	-	-	-	-	-
N19	17	17	18	18	0%	N011	-	-	-	-	-
N20	266	266	259	265	0%	N28	-	-	-	-	-
N21	-	-	-	-	-						

(나) 최대 침수저감효과 발생 설치 시나리오 선정

○ 현재 설치된 지하 저류조는 대상유역의 하류부에 설치되어 있으며 위치상 Line.1의 침수저감에 영향을 주지 않음.

○ 이에 Line.1 의 침수를 방지하기위한 지하저류조를 설치하였으며, 저류조를 추가하여 침수저감효과를 분석하였음.

○ 또한 현재 설치된 지하저류조는 유역이 작아 도달시간이 빠른 Line.2의 유입량이 집중적으로 저류되므로 Line.3 의 유입량을 저류시키지 못하므로 Line.3 에 저류시설을 추가로 설치하여 분석하였음.

○ 따라서 Line.1 과 Line.3 의 지하저류시설을 모두 설치하였을 때와 대상유역의 하류부에 설치된 지하저류조의 침수저감효과를 비교 분석하였음.

○ 최대 침수저감효과 모형구축 시나리오 및 저류시설 설치지점은 아래와 같음.

<표 3.3.19 시범지역 분석 시나리오>

시나리오 구분	강 우	지하저류시설	비 고
시나리오 1	한계강우 분석결과	실제 저류시설	기후변화적용+실제 저류시설(Line.1)
시나리오 4	한계강우 분석결과	추가 적용(Total)	기후변화적용+저류시설(Line.1+Line.3)

<표 3.3.20 시나리오 1,4에 대한 침수량 및 저감효율 비교>

Node명	시나리오별 침수량 (ton)		저감 효율	Node명	시나리오별 침수량 (ton)		저감 효율
	1	4			1	4	
N02	-	-		N22	12	-	100%
N021	326	329	0%	N23	-	-	
N03	-	-		N24	17	-	100%
N031	-	-		N25	61	-	100%
N04	-	-		N29	166,640	-	100%
N041	-	-		N30	8,581	-	100%
N05	-	-		N31	598	-	100%
N06	-	-		N32	399	-	100%
N07	-	-		N33	266	-	100%
N08	-	-		N34	-	-	
N09	-	-		N35	-	-	
N10	607	607	0%	N36	129	17	87%
N11	-	-		N37	73	-	100%
N12	-	-		N38	7,438	-	100%
N13	240	-	100%	N39	275	-	100%
N14	-	-		N40	119	-	100%
N15	28	-	100%	N41	54	-	100%
N16	87	-	100%	N42	8	-	100%
N17	9	-	100%	N43	-	-	
N18	4	-	100%	N01	-	-	
N19	17	-	100%	N011	-	-	
N20	266	-	100%	N28	-	-	
N21	-	-					

○ 시나리오 1,4 침수저감효율을 분석한 결과 Line.1 과 Line.3에 추가로 설치한 저류시설로 인해 N021, N10, N36을 제외한 경우에는 100%의 저감효율을 나타냄.

○ Line.2의 N10과 Line.3의 N36의 경우 각 관로의 상부유입부로써 관거유입량보다 큰 유역유출량으로 인해 강우가 신속히 배제되지 못하여 물의 정체현상 인한 침수가 발생한 것으로 판단됨.

○ 이는 기존 관로의 확장, 또는 우수관로 개설 등으로 보강이 필요하다고 판단됨.

○ N021는 Line.1과 Line.3의 하류부로 하류단의 조위의 영향으로 인하여 하류부의 통

수능이 부족하여 주 관로로의 유입불능으로 인한 침수이기 때문에 상류지역의 저류조 설치로 인한 저감효과를 나타내지 못함.

○ 따라서 침수저감효과를 나타내기 위해서는 수로의 확장등 하류단의 조위를 낮추는 방법을 모색할 필요가 있다고 판단됨.

(2) 기존 배수체계 연계 시나리오에 따른 침수저감 효과 분석 및 검증

○ 대상유역의 기존 배수체계는 침수피해를 방지할 수 있는 지하저류시설이 없음.

○ 따라서 현 배수체계와 위절에서 분석된 저류시설 설치에 따른 침수저감효과를 기존 배수체계와 비교하여 침수저감효과를 보다 정밀히 분석하고자 함.

(가) 기존 배수체계 연계 시나리오에 따른 침수저감 효과 분석

○ 대상유역의 기존배수체계분석은 지하저류시설이 없는 상태로 앞절과 동일하게 한계강우분석결과를 이용(100년 빈도, 지속시간 24시간)하여 분석하였음.

○ 저류시설이 없는 기존관망의 소유역에서 발생하는 유출분석결과는 아래와 같음.

<표 3.3.21 소유역별 유출현황분석(시나리오4)>

소유역명	총유출량 (ton)	첨두유출량 (CMS)	소유역명	총유출량 (ton)	최대유출량 (CMS)
sub02	3,980	0.12	sub19	4,280	0.13
sub03	1,740	0.05	sub20	27,030	0.81
sub031	230	0.01	sub21	4,490	0.14
sub04	10,870	0.34	sub22	20,330	0.61
sub041	6,850	0.21	sub23	4,320	0.13
sub05	12,580	0.39	sub24	8,260	0.25
sub06	6,620	0.2	sub25	185,270	4.94
sub07	10,900	0.33	sub29	9,420	0.28
sub10	54,910	1.7	sub30	19,170	0.56
sub11	2,560	0.08	sub31	31,430	0.94
sub12	12,310	0.37	sub33	10,070	0.31
sub13	5,410	0.17	sub35	344,460	10.37
sub14	3,990	0.12	sub36	140,640	4.26
sub15	11,360	0.34	sub37	166,420	5.08
sub16	8,010	0.25	sub39	7,090	0.22
sub17	6,330	0.19	sub42	29,640	0.87
sub18	3,730	0.12			

○ 분석 결과 기존 배수체계의 대상유역은 대다수 지역에 침수가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며 현재 설치된 지하저류시설과의 침수저감효과 비교는 다음과 같음.

○ 기존배수체계와 현 배수체계를 분석한 결과 Line.2에서 최대 저감효과가 발생함.

<표 3.3.22 시나리오 1,4에 대한 침수량 및 저감효율 비교>

Node명	시나리오별 침수량 (ton)		저감효율	Node명	시나리오별 침수량 (ton)		저감효율
	기존 배수체계	현 배수체계			기존 배수체계	현 배수체계	
N02	92	-	100%	N22	12	12	0%
N021	320	326	0%	N23	-	-	-
N03	878	-	100%	N24	30	17	43%
N031	26	-	100%	N25	62	61	0%
N04	14	-	100%	N29	1,827	166,640	0%
N041	31	-	100%	N30	121	8,581	0%
N05	41	-	100%	N31	846	598	0%
N06	-	-	-	N32	585	399	0%
N07	-	-	-	N33	651	266	0%
N08	-	-	-	N34	-	-	-
N09	-	-	-	N35	-	-	-
N10	607	607	0%	N36	162	129	20%
N11	64	-	100%	N37	18	73	0%
N12	110	-	100%	N38	516	7,438	0%
N13	231	240	0%	N39	465	275	41%
N14	-	-	-	N40	148	119	20%
N15	36	28	0%	N41	134	54	60%
N16	80	87	0%	N42	11	8	27%
N17	11	9	0%	N43	-	-	-
N18	3	4	0%	N01	-	-	-
N19	18	17	0%	N011	-	-	-
N20	262	266	0%	N28	-	-	-
N21	-	-	-				

(나) 최대 침수저감효과 발생 연계 시나리오 선정

○ 기존배수체계는 대상지역의 대다수 지역에서 침수가 발생하였음.

○ 하지만 이러한 침수피해를 방지하기 위해 설치된 현 지하저류시설 역시 곳곳에서 침수가 발생하는 것으로 나타났으며 따라서 기존배수체계의 분석 결과와 저류시설의 설치에 따른 침수저감효과를 분석 결과를 비교하여 최대 침수저감효과를 검토하고자 함.

○ 각 배수체계에 따른 분석 결과는 다음과 같음.

<표 3.3.23 시나리오 1,3에 대한 침수량 및 저감효율 비교>

Node 명	시나리오별 침수량(ton)			저감 효율	Node 명	시나리오별 침수량 (ton)			저감 효율
	기존 배수체계	현 배수체계	저류시설 추가설치			기존 배수체계	현 배수체계	저류시설 추가설치	
N02	92	-	-	100%	N22	12	12	-	100%
N021	320	326	329	0%	N23	-	-	-	-
N03	878	-	-	100%	N24	30	17	-	100%
N031	26	-	-	100%	N25	62	61	-	100%
N04	14	-	-	100%	N29	1,827	166,640	-	100%
N041	31	-	-	100%	N30	121	8,581	-	100%
N05	41	-	-	100%	N31	846	598	-	100%
N06	-	-	-	100%	N32	585	399	-	100%
N07	-	-	-	100%	N33	651	266	-	100%
N08	-	-	-	100%	N34	-	-	-	100%
N09	-	-	-	100%	N35	-	-	-	100%
N10	607	607	607	0%	N36	162	129	17	87%
N11	64	-	-	100%	N37	18	73	-	100%
N12	110	-	-	100%	N38	516	7,438	-	100%
N13	231	240	-	100%	N39	465	275	-	100%
N14	-	-	-	-	N40	148	119	-	100%
N15	36	28	-	100%	N41	134	54	-	100%
N16	80	87	-	100%	N42	11	8	-	100%
N17	11	9	-	100%	N43	-	-	-	-
N18	3	4	-	100%	N01	-	-	-	-
N19	18	17	-	100%	N011	-	-	-	-
N20	262	266	-	100%	N28	-	-	-	-
N21	-	-	-	-					

○ 분석 결과 현재 대상유역 하류부에 설치된 지하저류시설로 인하여 Line.2 의 침수저감효율이 높은 것으로 나타났음.

○ 하지만 이는 기존배수체계의 침수피해에 비해 침수저감효율이 낮으므로 Line.1 과 Line.3 의 침수피해를 고려하여 추가적인 침수저감대책이 마련되어야 함.

○ 저류시설을 각 Line.별 상·중·하류에 추가로 설치했을 경우 Line.1 의 N021, Line.2 의 N10, Line.3 의 N36을 제외한 경우에는 100%의 저감효율을 나타냄.

○ Line.2의 N10과 Line.3의 N36의 경우 각 관로의 상부유입부로써 관거유입량보다 큰 유역유출량으로 인해 강우가 신속히 배제되지 못하여 물의 정체현상으로 인한 침수가 발생한 것으로 판단됨.

○ 이는 기존 관로의 확장, 또는 우수관로 개설등으로 보강이 필요하다고 판담됨.

○ 따라서 침수저감효과를 나타내기 위해서는 수로의 확장등 하류단의 조위를 낮추는 방법을 모색할 필요가 있다고 판단됨.

(3) 지하 저류공동 최적위치 선정기법

○ 최근 들어 지속적으로 진행된 도시화로 인하여 토지이용변화와 도로포장률 증가 등으로 인한 불투수성 면적의 증가는 도시유출에 있어 유출량 증가 및 도달시간 단축 등 내수침수의 위험성을 가중시키고 있는 상황임.

○ 이러한 내수침수의 위험성에 대처하기 위해 근래 들어 도심 지하 저류조 등과 관련된 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 이에 대한 최적의 위치와 규모에 대한 적합한 조합과 같은 기준이 마련되어 있지 않아 내수침수의 피해방지에 대한 효율을 충분히 발휘하지 못하고 있는 실정임

○ 본 연구에서는 이러한 관점 하에 복합적인 지하저류조에 관한 최적 설계 모형을 개발하였으며, 개발된 모형은 지하저류조 설치를 위한 적정 위치, 설치 개수 및 규모에 대하여 최적화하며, 지하저류공간 최적화 모형은 저류조 설치에 따른 침수저감 효과를 극대화하기 위해 최적화 기법의 하나인 GA(Genetic Algorithm)를 이용하였으며 도시유출해석모형인 SWMM (Storm Water Management Model) DLL과 연계하여 구성하였음.

(가) 침수저감을 위한 도심 지하 저류공동 최적위치 선정 알고리즘 개발

○ 본 연구에서는 지하 저류공동의 최적위치 및 규모를 설정하기 위하여 최적화 기법으로 유전자알고리즘(Genetic Algorihtm, GA)를 이용하였으며, 적절한 목적함수와 제약조건의 설정을 통하여 도시 배수구역 내에서 침수저감 효과를 최대화할 수 있는 지하 저류공동의 최적 위치 및 규모 선정을 위한 최적화알고리즘을 개발하였음.

○ 본 연구에서의 목적과 같이 도시유역에서의 저류공동에 관한 직접적인 문제의 해결사례는 찾아볼 수 없으나, 이와 관련하여 자연 유역에서의 저류지의 최적위치 및 규모 설계라는 매우 유사한 형태의 관련 연구들은 국내·외적으로 많은 사례를 찾아볼 수 있음

○ 본 연구에서는 최적화 기법을 적용한 지하 저류공동의 위치 및 규모에 관한 최적해를 도출함에 있어서 개념을 수립하였음.

○ 본 모형에서는 최적 해를 결정하기 위한 반복과정을 최소화하기 위해 GA를 사용하였고 수리해석모듈은 수리·수문 해석을 위하여 미국 환경보전국(EPA)에서 개발된 도시우수관망 해석 모형인 SWMM(Storm Water Management Model)을 연계 구성.

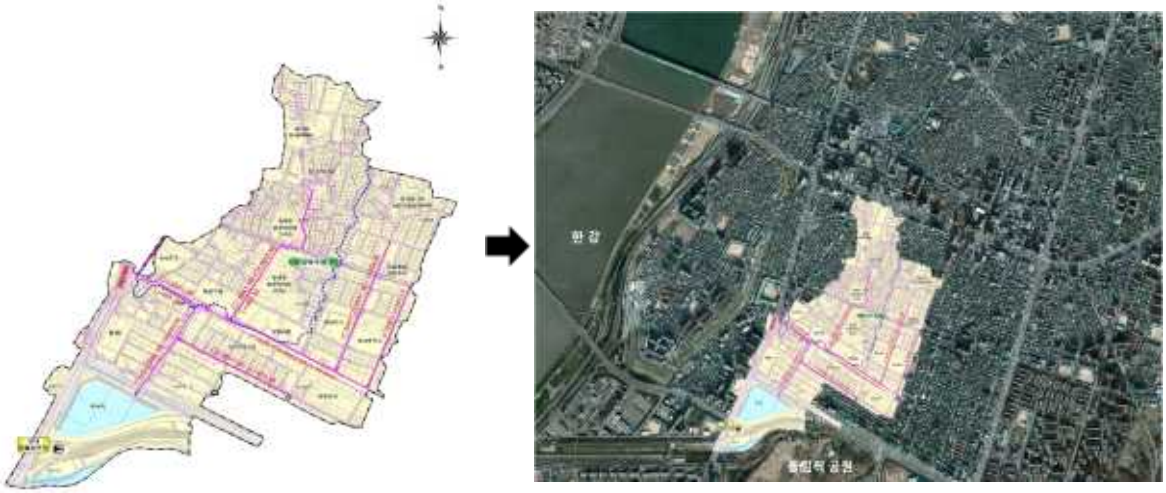
(나) 지하 저류공동 최적위치 선정에 따른 침수 저감효과 검토

○ 본 연구에서 개발된 최적화모형은 도시유역에서 호우 발생 시 월류 발생량을 최소

화할 수 있는 설치위치와 규모에 대한 최적의 조합을 찾는 것에 목적을 두고 있음.

○ 모의 적용을 위한 대상 유역으로는 서울시 성내배수분구 일부 유역을 선정하였으며, 해당 유역에서 지하 저류공동 설치 가능 지점들을 가정하고 여러 가지 강우 형태를 적용하여 내수침수 저감 효과를 최대화할 수 있는 최적의 저류공동 위치 및 규모를 도출해 보았음.

① 적용 대상 유역



<그림 3.3.11 적용대상 유역 현황(서울시 성내동)>

○ 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 통한 지하 저류공동의 최적 위치·규모 선정을 위한 적용유역은 부산 이외 유역인 서울시의 성내배수분구에 모의 적용하였음.

○ 해당 성내배수분구 유역의 면적은 96.55ha이며, 소유역은 총 26개로 구분되어 있음.

○ 성내배수분구 유역에 유출구를 제외한 전체 26개 맨홀지점에 지하 저류공동이 모든 위치에 설치될 수 있다고 가정하였음.

○ 이에 따라 모든 위치에서 다양한 규모의 지하 저류공동이 설치되는 경우의 수가 발생하게 됨.

○ 지하 저류공동의 설치개수는 최소 1개에서 최대 3개 까지 설치해보았음.

○ 본 연구에서는 해당유역에서 설치가 가능한 전체 26개 맨홀지점에서 설치 개수를 1개에서부터 3개까지 증가시켜가면서 각 설치 개수마다 최저 월류량을 발생시키는 최적 위치, 규모를 선정하였음.

② 지하 저류공동 최적위치 선정

○ 일반적인 도시유역에서 하류지역에 집중형 저류지가 설치되었을 때 상류지역에서 이미 만관에 따른 월류 현상이 발생하는 경우라면, 하류에 설치된 저류조는 상류의 월류 발생에 별다른 저감효과를 발휘하지 못함.

<표 3.3.24 저류공동 설치 개수에 따른 침수저감량 비교>

저류공동 설치개수	지점	규모(㎥)	지점	규모(㎥)	월류량(10^3㎥)	
					설치전	설치후
1EA	13	20,000	-	-	25.537	22.267
2EA	10	3,600	18	12,000		8.341

○ 이상의 분석결과와 같이 하류 13번 유역을 일반적으로 저류지를 설치하는 하류 저지대 구역으로 가정했을 때, 1개로 집중된 저류지에서는 그 규모를 극단적으로 크게 하더라도 이미 상류에서 상당량의 월류가 발생하므로 전체 도시유역에서의 침수저감 효과는 매우 작게 나타나고 있음.

○ 반면, 전에 우수관망에서 중·상류에 위치한 10번 및 18번 지점에 저류공동을 복수로 설치하는 경우 전체 설치 용량은 1개 설치 시보다 작은 15,600㎥임에도 불구하고 월류 발생량은 약 38% 가량 감소하였음.

○ 또한 저류공동을 1개 설치 시 설치전에 비하여 월류 발생량은 약 13% 감소하는데 그친 반면, 2개의 복수 저류공동을 설치할 경우 설치전에 비하여 월류 발생량이 약 67%나 감소하는 것으로 나타났음.

○ 따라서 일반적으로 생각하는 하류 저지대에 대한 유수지의 설치는 인근 지역에 대한 내수침수는 방재할 수 있다 하더라도, 전체 유역에서의 내수침수 방재 효과는 그리 크지 않게 나타나는 경우가 얼마든지 발생할 수 있음.

○ 따라서 이러한 문제의 해결은 복수개의 저류 공간을 최적화 알고리즘을 통하여 도출함으로써 해결할 수밖에 없음.

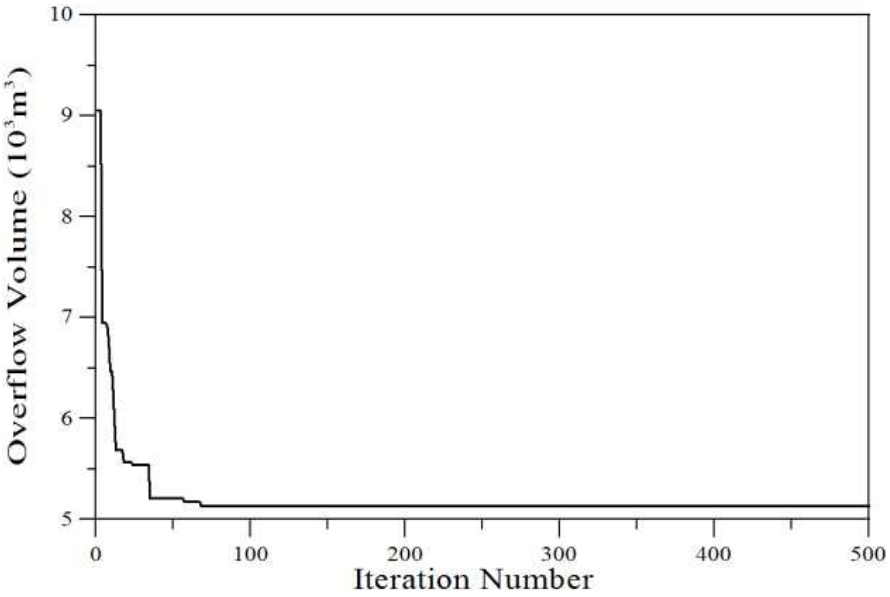
○ 본 연구에서는 최근 발생하고 있는 돌발적이고 국지적인 집중호우를 고려해 50년, 80년 및 100년 빈도를 선정하였으며, 강우의 지속기간은 60분, 120분 및 180분의 초과강우사상을 적용하였음.

○ 강우사상들을 해당유역에 적용한 결과 지하저류조 설치 개수마다 최적의 위치는 다음의 표에 나타나는 바와 같음.

<표 3.3.25 지하저류공간 설치 가능 개수별 최적위치>

설치개수	설치지점		
1EA	12	-	-
2EA	2	12	-
3EA	2	12	15

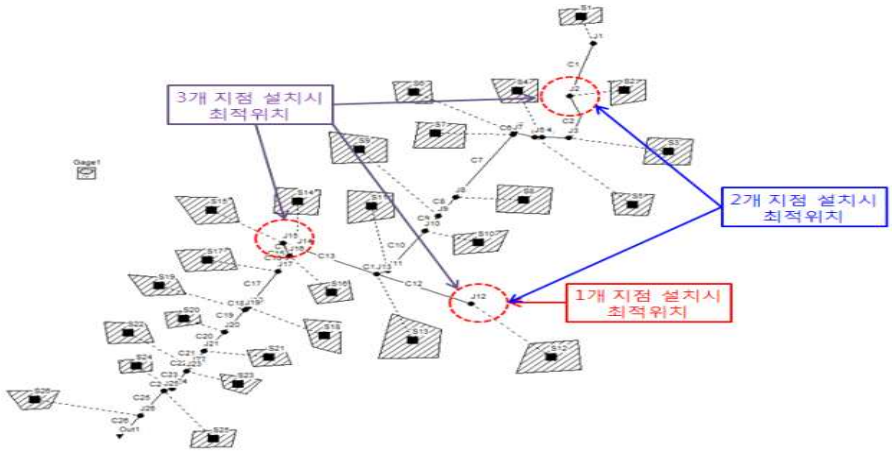
○ 또한 GA 수행에 따른 최적해의 탐색 과정에서 월류 발생량의 저감양상을 아래의 그림에 나타내었음. 지하 저류공동의 위치·규모 결정을 위한 최적화 알고리즘의 매개변수는 개체군의 경우 50개, 교배확률은 70%, 돌연변이 확률은 5%로 하였음.



<그림 3.3.12 GA 수행결과(저류공간 3EA 설치시)>

○ 지하 저류공동 설치개수 각 case에 따른 최적의 해로서 도출된 설치 지점은 아래의 그림과 같이 전체 우수관망의 중상류나 관이 합류 되는 지점에서 선정되는 것을 볼 수 있었음.

○ 여기서 나타나는 최적의 설치 위치는 일반적으로 우수관망의 전체 유역 대비 상대적으로 많은 비율의 소유역들로부터 우수가 합류되는 지점을 나타냄.



<그림 3.3.13 지하저류공간 설치 가능 개수별 최적위치(서울시 성내동)>

③ 지하 저류공동 내수침수 저감효과

<표 3.3.26 지하 저류공동 설치 규모 정리>

			1개 설치시	2개 설치시		3개 설치시		
최적 설치 지점			13번	10번	18번	9번	13번	18번
재현기간	강우지속기간	저류공동 설치전 월류량 (10^3㎥)	설치규모	설치규모	설치규모	설치규모	설치규모	설치규모
			월류량 (10^3㎥)	월류량 (10^3㎥)		월류량 (10^3㎥)		
50년	60분	25.537	5,7000	3,600	12,000	1,100	6,100	12,000
			22.267	8.341		3.370		
	120분	32.370	8,200	5,600	12,000	1,000	11,600	12,000
			27.226	7.648		1.479		
	180분	31.865	11,600	5,800	12,000	100	3,800	11,200
			25.351	4.167		0.038		
80년	60분	30.130	5,900	3,700	12,000	1,200	9,000	12,000
			26.156	11.403		5.133		
	120분	38.007	8,400	6,300	12,000	1,200	12,000	12,000
			32.709	11.813		3.434		
	180분	39.533	12,000	7,500	12,000	400	12,000	12,000
			31.718	7.260		0.603		
100년	60분	32.197	6600	3,800	12,000	1,500	9,100	12,000
			28.075	13.047		6.159		
	120분	40.842	10,200	6,600	12,000	1,600	11,900	12,000
			35.441	14.145		4.687		
	180분	42.089	12,000	7,600	12,000	700	12,000	12,000
			34.177	9.213		1.176		

○ 다음의 표는 지하 저류공동 설치 케이스에 따른 적용 강우사상별 월류 발생 저감 효과를 정리하여 나타내고 있음.

<표 3.3.27 지하 저류공동 설치 케이스에 따른 적용 강우사상별 월류 발생 저감 효과>

			1개 설치시			2개 설치시			3개 설치시		
최적 설치 지점			13번			10번, 18번			9번, 13번, 18번		
재현기간	강우지속기간	저류공동 설치전 월류량 (10^3㎥)	설치후 월류량 (10^3㎥)	월류 저감량 (10^3㎥)	저감 비율 (%)	설치후 월류량 (10^3㎥)	월류 저감량 (10^3㎥)	저감 비율 (%)	설치후 월류량 (10^3㎥)	월류 저감량 (10^3㎥)	저감 비율 (%)
50년	60분	25.537	22.267	3.270	12.8	8.341	17.196	67.3	3.370	22.167	86.8
	120분	32.370	27.226	5.144	15.9	7.648	24.722	76.4	1.479	30.891	95.4
	180분	31.865	25.351	6.514	20.4	4.167	27.698	86.9	0.038	31.827	99.9
80년	60분	30.130	26.156	3.974	13.2	11.403	18.727	62.2	5.133	24.997	83.0
	120분	38.007	32.709	5.298	13.9	11.813	26.194	68.9	3.434	34.573	91.0
	180분	39.533	31.718	7.815	19.8	7.260	32.273	81.6	0.603	38.930	98.5
100년	60분	32.197	28.075	4.122	12.8	13.047	19.150	59.5	6.159	26.038	80.9
	120분	40.842	35.441	5.401	13.2	14.145	26.697	65.4	4.687	36.155	88.5
	180분	42.089	34.177	7.912	18.8	9.213	32.876	78.1	1.176	40.913	97.2

○ 이때 저류공동 설치 개수에 따라 침수저감효과가 많은 차이를 보이고 있으며, 특히 저류공동의 설치로 관거 내 흐름이 원활해짐에 따라 하류부 월류 영향에 의하여 상류에 발생 했던 월류량까지 감소하고 있음.

○ 따라서 저류공동의 설치크기 규모보다 더 많은 침수저감효과를 나타내고 있음.

○ 이상의 결과들은 지하 저류공동을 설계하는데 있어 강우사상별 저류공동 설치 시 나타나는 월류량 저감효과를 제공함으로써 설계자가 설치 개수나 위치 및 규모를 결정하는데 있어서 기본 자료로 활용될 수 있음.

(4) 수리모형실험을 통한 지하공간내 유입수의 동적거동 평가

○ 증가한 집중호우에 따른 유출량 증대로 인해 지하공간의 침수에 대한 안정도가 낮아지게 됨.

○ 이런 피해를 경감시키기 위하여 침수의 흐름을 분석하는 수리모형실험으로 침수에 대한 대책방안을 마련하고자함.

<표 3.3.28 Froude 모형법칙하의 물리량비>

기하학적 상사		운동학적 상사		동력학적 상사	
물리량	비	물리량	비	물리량	비
길이	L_r	시간	$L_r^{1/2}$	힘	L_r^3
면적	L_r^2	속도	$L_r^{1/2}$	질량	L_r^3
체적	L_r^3	가속도	1	일	L_r^4
		유량	$L_r^{5/2}$	동력	$L_r^{7/2}$
		각속도	$L_r^{-1/2}$		
		각가속도	L_r^{-1}		

○ 모형에서 적용한 전체 축소의 비는 대상건물의 1/20이며, 길이, 면적, 시간 등을 비롯한 물리량적 축소의 비는 아래와 같이 계산하여 수리모형실험에 적용하였음.

<표 3.3.29 수리모형실험 시 적용된 물리량비>

Item	Scale	relational expression	Equivalent value of the scale
Length	L_r	L_r	1 / 20
Area	A_r	L_r^2	1 / 400
Time	T_r	$L_r^{1/2}$	1 / 4.472136
Velocity	V_r	$L_r^{1/2}$	1 / 4.472136
Flow	Q_r	$L_r^{5/2}$	1 / 1788.854

○ 지하 공간 침수에 대한 전반적인 대책 마련을 위해서는 유입 경로, 침수과정, 침수심등의 파악에 의한 통합적인 분석이 이루어져야 함.

○ 이를 위하여 기후변화로 인하여 최근 10년간 5회 이상의 침수이력이 발생한 지역에 대하여 EPA SWMM5.0 모형을 이용하여 유역유출모의를 실시하고 100년 빈도, 지속시간 24시간의 강우 시 대상지역의 침수량을 분석한 뒤 유출량을 산정함.

○ 유역 내 침수의 영향이 가장 큰 독립건물을 선정하여 건물지하모형을 대상으로 축소된 모형을 제작하였음.

○ 본 연구에서의 수리모형실험의 수리영향인자는 저류시설의 유무, 저류시설의 위치, 침수방지턱, 모래주머니, 저류지 유입부의 역류방지벨브 등을 이용하였으며 적정 시나리오를 설정하여 지하 시설물의 시간에 따른 침수경향을 시나리오별로 분석함.

(나) 지하 공간내로 유입되는 유량의 제어 방안

○ 지하 공간 침수방지를 위한 수방기준」과 「도시 지하공간 긴급대응방안」에 대한 연구에 언급된 많은 방재방안은 수리모형실험에 적용시키기 어려운 점이 있음.

○ 위에 주로 언급된 턱 높이를 설정 한다는 부분도 모형에서는 「도시 지하공간 긴급대응방안」의 주택 지역 침수 대책 방안에서 언급한 30cm를 넣었을 시에 모형에서는 높이가 아주 작아지기 때문에 수리모형을 통해 얻을 수 있는 데이터 값에는 영향을 줄 수 없음.

○ 그 외의 다른 방안들도 수리모형실험을 함에 있어 침수 대책에 효과적인 결과를 줄 수 있는 영향 인자가 되지 않음.

○ 따라서 여러 대책방안 중 모형비와 같은 축소 시에도 결과 데이터가 설치 유무 시에 큰 차이를 보일 것이라 판단되는 모래주머니와 침수방지턱 그리고 저류조 설치를 본 실험에 적용하였음.

(다) 축소모형의 규모(면적, 층 구성, 시설물의 반영 수준 등) 결정

○ 연구의 대상유역 지역은 북측에는 벡스코가 위치해있고, 남측에는 남해와 접하고 있으며 서쪽으로는 수영강이 위치하고 동측에는 장산과 우동천이 위치함.

○ 본 연구에서의 대상지역 내 유입유량을 산정하기 위하여 SWMM모형을 구축하여 유역유출분석을 실시.

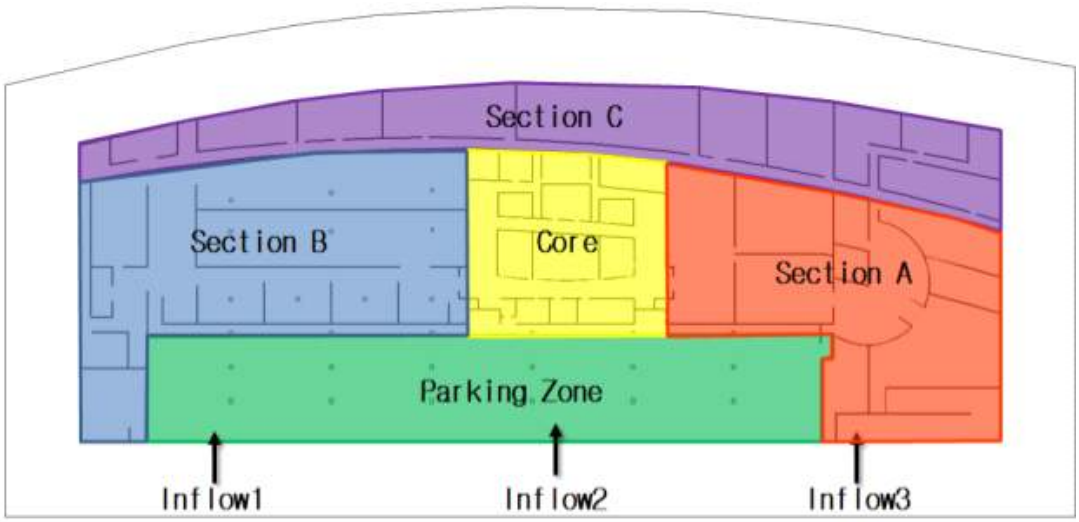
○ 대상지역의 SWMM 모형 구축을 위하여 선정된 대상유역에 대해 하수도 대장 평면도(1:1000)로부터 간선관거를 분리하여 관망을 구성하였음.

○ 구성된 관망으로부터 간선관거의 합류점 및 크기가 큰 맨홀을 기준으로 유출량 산정 지점을 선정한 후, 유역 내 지형과 각 지역의 인위적인 배수계통에 따라서 전체 대상유역을 소유역으로 분할하였음.

○ 각 분할된 소유역으로부터 유역면적, 유역 폭, 유역 평균경사, 불투수율 등의 매개변수 산정하고, 유역의 배수특성을 나타내는 조도계수, 표면저류, 침투손실 등에 대한 매개변수를 산정함.

○ 본 실험에서 실제 존재하는 대상건물의 실제 면적은 61.2㎡이며 선정된 건물을 1/20의 스케일로 축소하고 공간 내부의 설계도면 또한 간소화하여 제작.

○ 모형은 크게 Section 1-3으로 나누었으며 엘리베이터를 비롯한 전기시설이 밀집해 있는 Core공간과 주차장으로 나누어 설계하였음.



<그림 3.3.15 수리모형의 SITE구성>



(a) 월류장치 (b) 수리모형 전면부

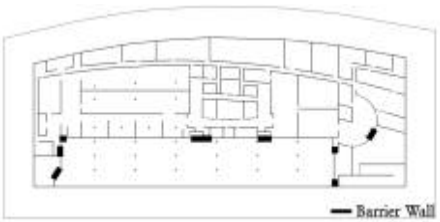
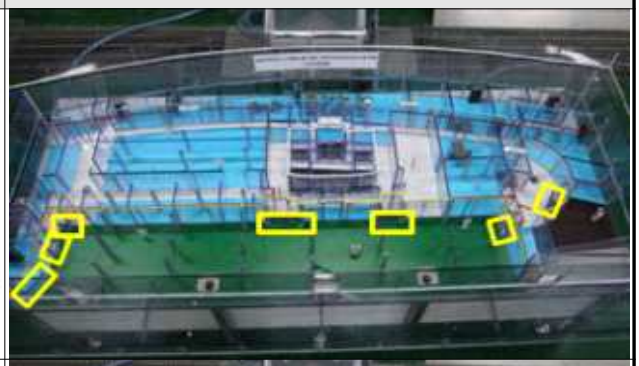
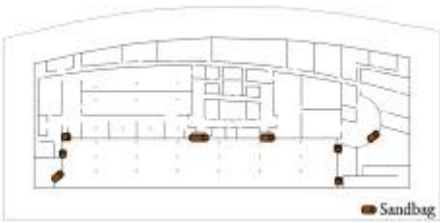
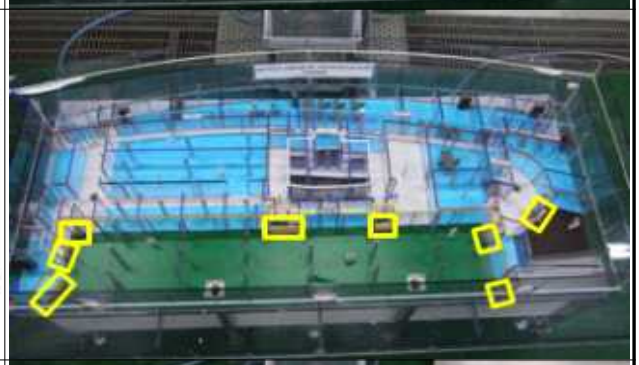
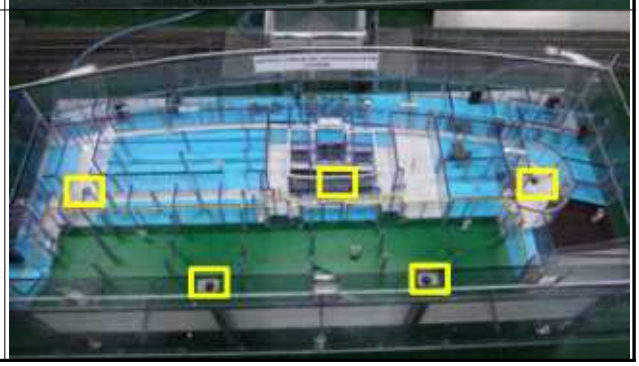
<그림 3.3.16 수리모형의 구성>

○ 본 모형실험에서는 저류조 설치와 침수방지턱을 이용하여 지하복합공간의 침수 방지에 가장 효과적인 방재 시설물을 모색하고자함.

<표 3.3.30 모형실험 시나리오>

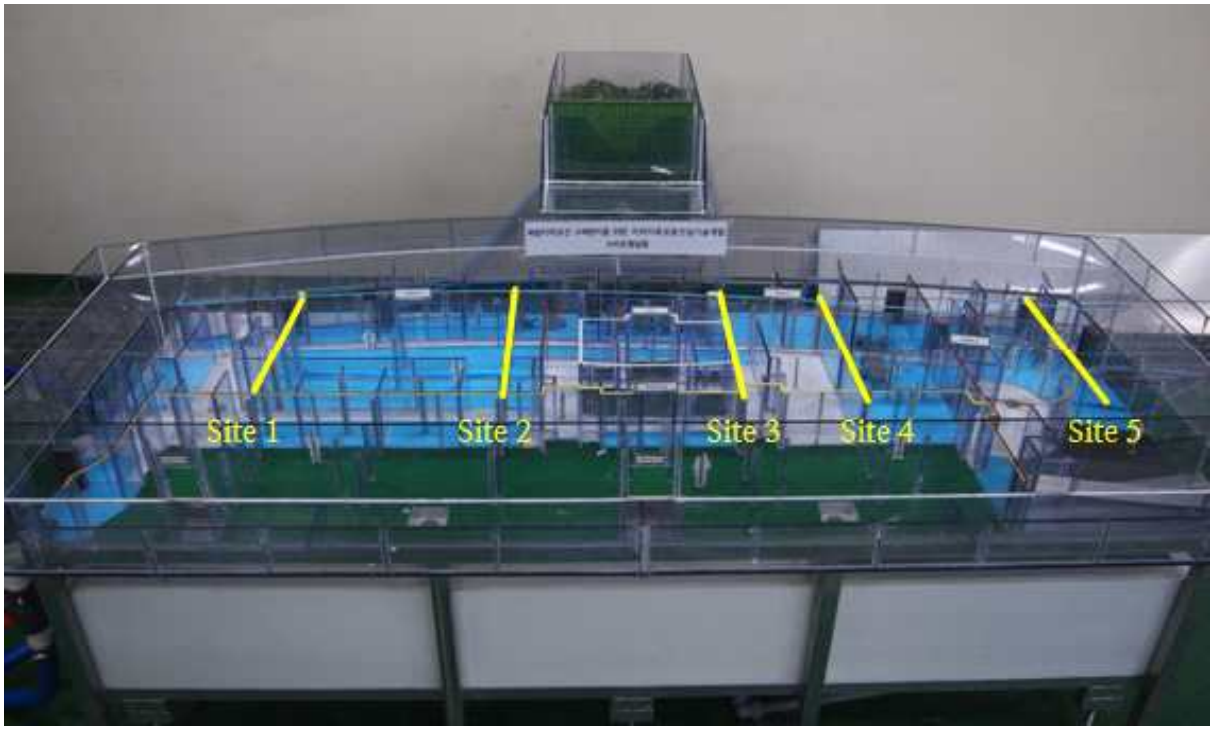
저류조 조건	Flood Protection Facilities	시나리오 #
저류조 설치 전	설치 전	시나리오 1-1
	모래주머니	시나리오 1-2
	침수방지턱	시나리오 1-3
저류조 입구 #1, #2	설치 전	시나리오 2-1
	모래주머니	시나리오 2-2
	침수방지턱	시나리오 2-3
저류조 입구 #3, #4, #5	설치 전	시나리오 3-1
	모래주머니	시나리오 3-2
	침수방지턱	시나리오 3-3

<표 3.3.31 모형실험 시나리오별 설치안>

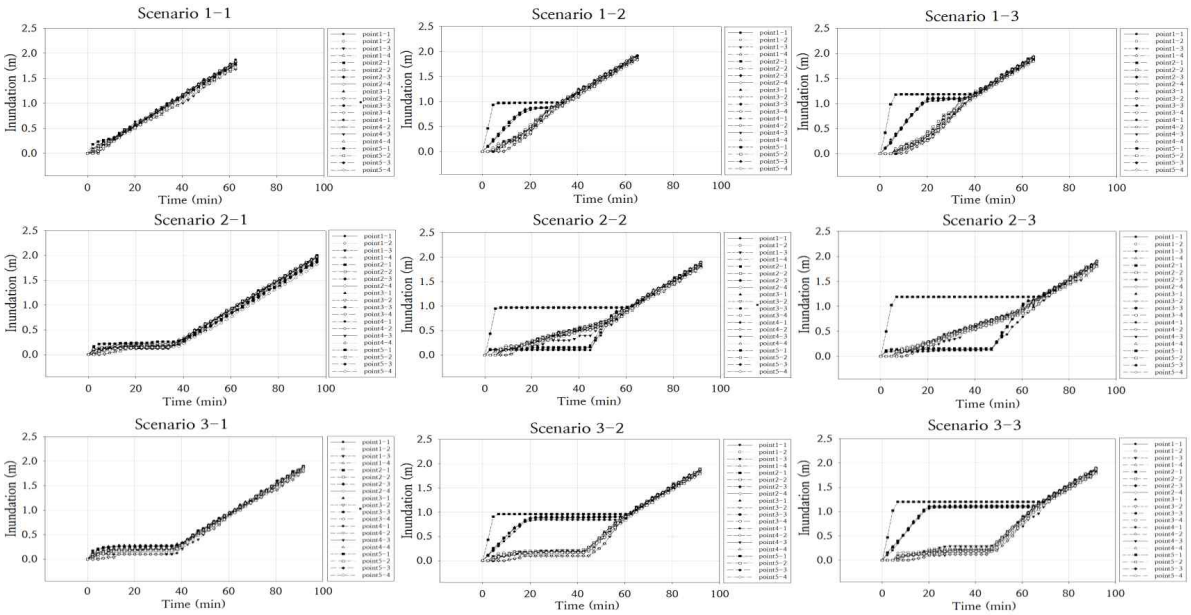
분류	수방재 시설 배치도	실제 수방재 시설 배치 모습
침수 방지턱		
모래 주머니		
저류조 위치		

○ 5개의 사이트별 4지점을 선정하여 총 20개의 포인트를 사이트별로 분석한 것임.

○ 그래프에서 나타난 바와 같이 저류조를 설치하지 않은 시나리오 1과 저류조 위치와 개수는 틀리나 저류조가 설치된 시나리오 2과 3는 침수위 1.8m에 도달하는 시간이 30분 이상인 것으로 분석됨.



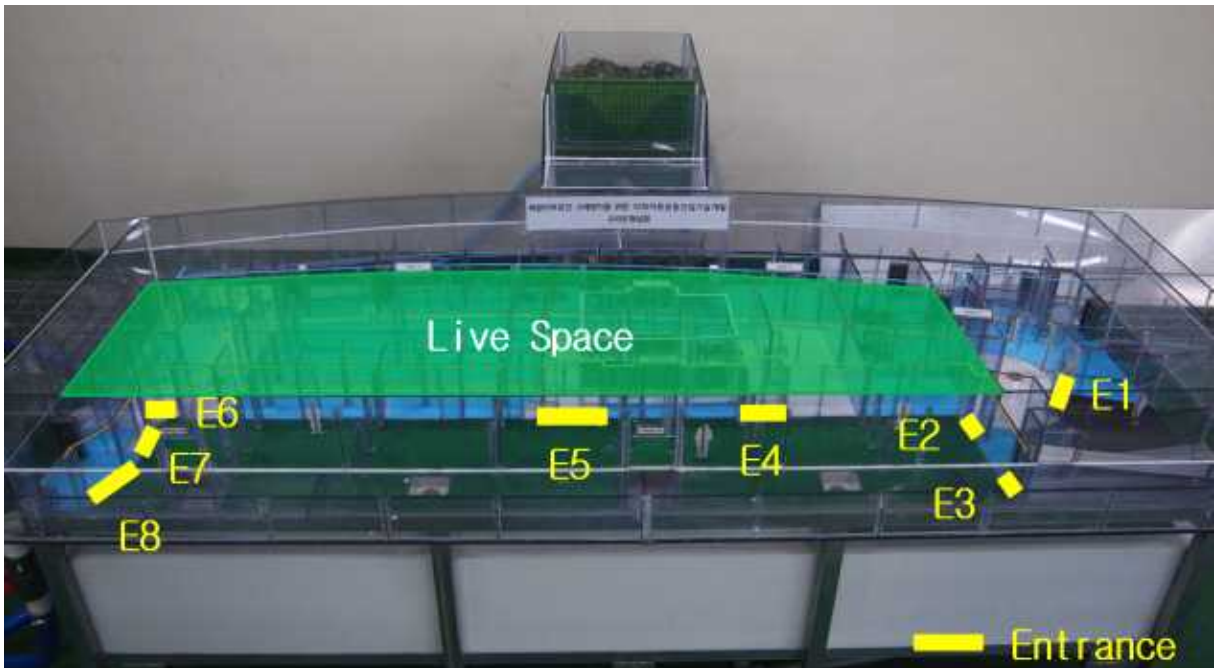
<그림 3.3.17 사이트별 측정 지점>



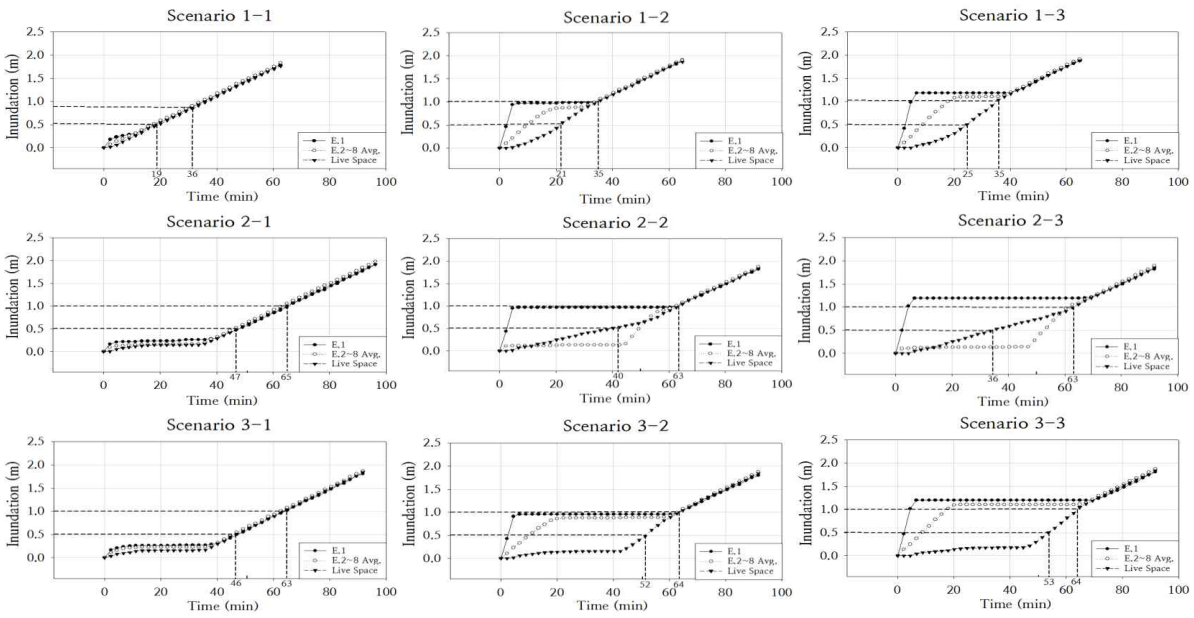
<그림 3.3.18 시나리오별 실험 결과>

○ 외부에서 건물로 출입이 가능하도록 설치되어 있는 출입구 E1, 주차장에서 건물로 출입이 가능한 E2에서 E8와 실제로 사람들이 상주할 수 있는 공간인 Live Space를 비교한 그래프임.

○ 따라서 저류조를 설치하였을 경우 Live Space의 침수가 다른 공간의 침수보다 지연되었음을 알 수 있으므로 침수 발생 시에 최소 30분 이상의 대피시간을 확보 할 수 있을 것으로 분석됨.



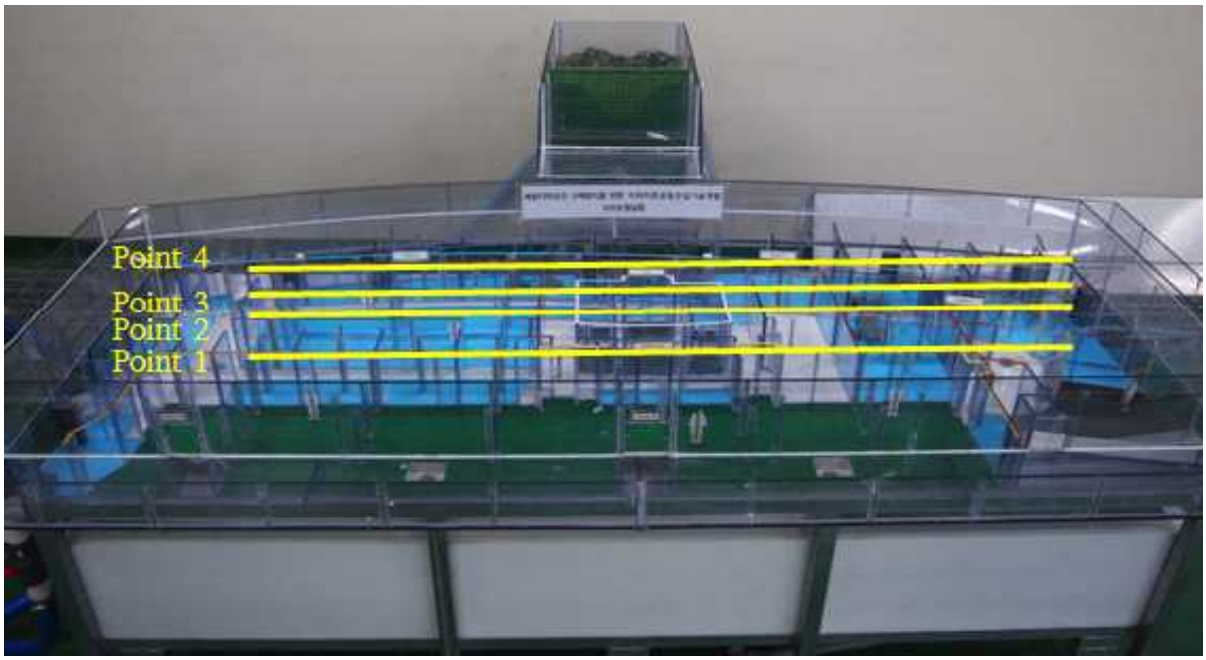
<그림 3.3.19 Gate vs Others 침수위 측정 지점>



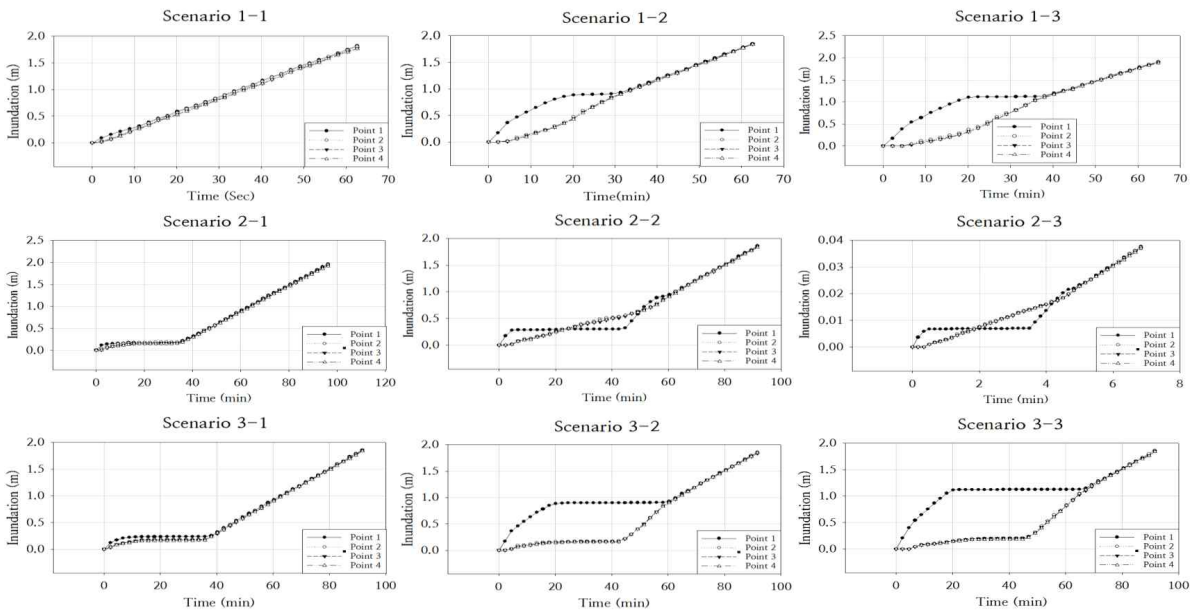
<그림 3.2.20 Gate vs Others 침수위 측정 결과>

○ 사이트 5개 별 지점 4개를 위치별로 묶어 비교한 그래프임.

○ 시나리오 2와 3이 설치된 저류조에 의해 지하공간의 홍수량이 저류조가 만수위가 되기 전까지 배수되다가 만수위에 도달하며 갑자기 차기 시작하는 반면 시나리오 1은 저류조가 설치되지 않아 계속 꾸준히 침수되기 때문에 완만한 곡선을 그리는 것으로 분석됨.



<그림 3.3.21 포인트별 침수위 측정 지점>



<그림 3.2.22 시나리오별 포인트 실험 결과>

(라) 지하공간 침수방지/억제시설 등 영향인자 반영 방안

○ 모형에 적용하기에는 제약이 따르나 실제 지하공간의 침수를 방지하고 억제시킬 수 있는 시설을 설치하는 방안을 모색하였음.

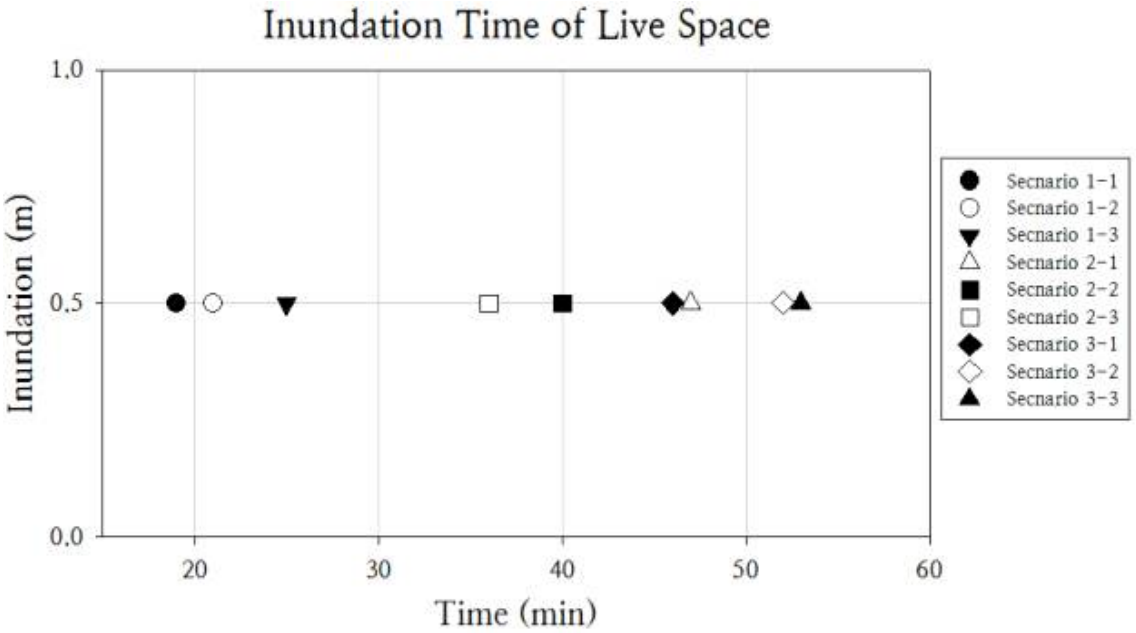
○ 침수유량의 유입부 전단과 후단에 지하저류조로 유입되는 배수구를 각각 설치함으로써 지하저류시설 유입부의 위치에 따른 침수경향을 분석하였음.

(마) 지하공간내 빗물 유입 · 유출 유량검토

○ 대상지역의 100년 빈도, 지속시간 24시간의 이상강우를 적용하여 실험을 수행한 결과, 면적 24,480㎡, 높이 7m인 지하활용공간의 침수심이 0.5m에 도달하는 침수시간은 시나리오1-1 19분, 시나리오2-1 47분, 시나리오3-1은 46분이 소요되었음.

<표 3.3.32 모형실험 시나리오별 결과>

침수위 (m)	시간 (분)								
	시나리오 1			시나리오 2			시나리오 3		
	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3
0.5	19	21	25	47	40	36	46	52	53
1.0	36	35	35	65	63	63	63	64	64
1.5	54	52	52	82	80	80	81	80	80



<그림 3.3.23 침수심 0.5m 도달시간>

다. 기존 및 신규 배수체계와 지하 저류공동의 연계방안

(1) 지하 저류공동 설치 시나리오를 고려한 기존 및 신규 배수체계 연계 방안 제시

(가) 내배수시설 운영에 관한 국내·외 연구동향 및 기술 분석

① 빗물펌프장 운영

○ 빗물펌프장의 운영에 관한 연구는 도시화율이 높고 여름철에 대부분의 강우가 높은 강우강도로 발생하는 국내와 일본에서 주로 수행되고 있음.

○ 특히 국내의 경우 빗물펌프장에 관한 연구는 침수피해의 발생빈도가 증가하는 1990년대에 들어 주로 연구되기 시작했음.

○ 이원환 등(1992)은 한강수위가 계획홍수위에 도달했다는 가정하에 펌프에 의해서만 유입량을 배제하는 경우에 대해 펌프의 조작기준이 서울시 유수지의 안정성에 미치는 영향에 대하여 검토하여 서울시의 기준이 급작스런 유입량의 증가에 대처하는 능력이 미흡함을 강조하였음.

○ 이원환 등(1992)은 내수침수 방지를 위한 배수펌프 가동 수위의 결정에 관한 연구에서 기존의 배수펌프장의 펌프가동수위에 대해 연구하였음.

○ 기존의 펌프가동수위는 하상의 토사가 펌프로 유입되지 않은 수위로 결정하였으나 재현기간 10년, 30년, 50년의 지속기간 120분의 강우를 Huff 2분위법과, 순간 강우강도법에 의해 분포시켜 모의하여 펌프의 최적 가동수위를 결정하였음.

○ 또한 이원환 등(1992)은 도림과 한남 빗물펌프장에 대해서 평상시 펌프가동규칙과 위험시의 가동규칙을 설정하여 가상으로 모의한 결과 역시 발표하였음.

○ 심재현 등(1992)은 기존의 빗물펌프장의 시설용량으로 적절히 홍수에 대처하기 위한 자기 조정능력을 가진 펌프제어 기법을 개발하였음.

○ 심재현 등(1993)은 유수지의 수위, 유입량, 도달시간 이전 시간의 강우량, 도달시간 이전의 유입량과 현재 유입량의 차이, 조작시각 이전의 강우량과 수위의 차이 등의 자료를 이용하여 상이한 제원을 가진 펌프장에도 적용이 가능한 펌프제어 모형을 개발하였음.

○ 윤세의와 이종태(1995)는 SWMM모형을 이용하여 Petri Net Diagram과 종합지표를 이용한 배수펌프의 효율적 조작모형을 개발하였음.

○ 윤세의 등(1995)은 4년간 내배수체계가 보강된 뚝도 등의 서울지역 18개 지점에 대해 강우-유출모형인 ILLUDAS 모형과 RRL방법을 사용하여 모의된 유출량을 수문곡선 상승시 유입량을 전량 배제하도록 펌프를 가동하고 수위 하강시 수위에 따른 펌프가동을 실시한 모형과, 펌프별로 운전 상하한 수위를 설정하여 상한수위 이상은

가동하고 하한 이하에서는 정지하는 모형 및 펌프 운영의 경제성을 고려하여 앞의 운영조건에 유입량이 증가한 후 감소하는 경우 펌프의 가동 대수를 그대로 유지하는 모형을 비교하여 기존의 수위에 의한 운영보다 안정된 결과를 도출하였음.

○ 심호(1998)는 홍수피해를 최소화하기 위해 ILLUDAS 모형을 이용하여 재현기간별 강우사상에 대한 유출수문곡선을 모의하여 강우지속기간에 따른 펌프가동 대수를 결정하고 서울지방의 IDF 곡선식으로부터 강우강도와 지속기간에 따른 펌프가동대수를 결정하는 빗물펌프장 운영기준을 제시하였음.

○ 이길성과 김학수(2002)는 SWMM 모형의 Extran Block을 이용하여 도림천 유역의 하수관거와 하도를 결합한 모형을 통해 하천하류에서의 수위 산정시 시간에 따른 유출을 통한 계산이 아니라 배수펌프장을 통해 유출되는 지역은 시간에 따른 펌프토출량을 고려하는 것이 정확함을 강조하였음.

○ 최근 길경익 등(2005)은 ArcView와 HEC-HMS 모형을 결합하여 홍수유출수문곡선의 재현을 통한 도시소유역 빗물펌프장의 운영을 개선하는 방안을 제시하였음.

○ 특히 ArcView와 수치지도 툴을 이용하여 유역특성분석, 토지이용분석, 토양의 수문학적 분류, 유출곡선지수 산정, 홍수도달시간 산정, 하도추적계수 산정 등을 수행하여 주관적인 판단이 개입될 여지가 많은 매개변수의 산정을 객관적이고 일관성 있게 수행할 수 있도록 하였음.

② 내배수시설 운영

○ Yagi 와 Shiba(1999)는 Fuzzy모형과 GA모형을 결합하여 강우량과 유수지의 수위자료를 입력자료로 하여 빗물펌프장의 펌프 토출량을 결정하는 연구를 수행하였음.

○ Yuri A. 등(2002)은 기존의 상수관망에 주로 적용되던 신뢰도에 대한 지표를 내배수시스템에 적용하여 펌프장의 능력을 동일시간동안 유입되는 오수량에 대한 펌프의 고장에 의한 처리되지 못할 것으로 기대되는 오수량의 비를 이용하여 0과 1사이의 지표로 제시하였음.

○ Weyand(2002)는 CSOs의 조절을 위한 독일의 기존 양적인 자료만을 바탕으로 운영되던 내배수시설에 대한 운영을 수질의 오염물의 농도, 하천 및 하류 수역의 농도와 양을 함께 고려해서 운영하는 내배수시설에 대한 실시간 운영방안을 제시하였음.

○ Dabrovin 등(2002)은 Fuzzy모형을 이용한 저수지의 실시간 운영에 대한 연구를 진행하였음.

○ 연구에서 제안하는 Total Fuzzy Similarity와 기존의 대표적 Fuzzy모형중 하나인 Sugeno-Style 방법을 이용하여 모형을 도출한 결과 유사한 저수지 운영 결과를 도

출하였음.

○ Zacharf 등(2003)은 CSOs배출과 관련한 하수관거의 실시간 운영을 위해 여러 실시간 운영 알고리즘을 개발하여 국부적이거나 총괄적인 실시간 운영에 대하여 적용하고자 SYNOPSIS모형을 개발하였음.

○ Schütze 등(2004)은 현재의 하수관거 시스템의 실시간 운영에 대해 관찰한 논문을 발표하였음.

○ 이는 하수관거 시스템과 하수처리장 및 방류수역까지 고려한 실시간 운영 연구들에 대한 관찰과 현재의 시스템에서의 실시간 운영이 어려운 점 등에 대해서 언급하였음.

○ Schroeder와 Pawlowsky(2005)는 Berlin의 하수관거 시스템을 기반으로 70년대 이후의 내배수시설의 실시간 운영에 관한 개념의 변화와 현재의 여러 요소에 의한 실시간 운영의 부재에 대해 현재의 관점과 미래의 관점에서 필요한 사항에 대한 연구를 수행하였음.

③ 내수침수 분석

○ 이창희 등(2006)은 SWMM모형의 Extran Block과 DEM을 연계하여 내배수시설의 과부하로 인한 도시지역의 침수심을 계산하기 위해 시간에 따른 유역의 침수지도를 작성하는 모형을 개발하였음.

○ Shinan Flung Chen 등(2004)은 도시유역에 적용가능한 동적 수리모형을 개발하였으며 이는 SWMM 모형을 이용한 Flow Routing과 GIS를 결합하여 2차원 침수모형을 개발함.

○ Guo(1998)는 기 시공된 내배수시설, 비용-통수능 곡선, 비용-위험도 곡선, 공사기간에 의해 유도되는 임시 내배수시설물의 설계 홍수량을 위험도-비용(Risk-Cost)의 접근법에 의해 모의하였음.

○ Hsu 등(2000)은 빗물펌프장의 고장이나 하수관거의 통수능 부족에 의해 발생하는 도시유역의 침수해석을 SWMM과 2차원 수리해석모형을 통해 실시하였음.

○ Strecker 등(2001)은 도시개발에 따라 발생하는 오염물 발생량을 저감시키기 위해 호우처리지침의 자료를 개발하였음. 이는 다른 지역의 호우처리지침과도 비교할 수 있도록 하였고 또한 초기의 수질에 대해서 더욱 철저히 조사하도록 하는 등의 내용을 포함함.

○ Corr 등(2001)은 하수관거의 만관흐름을 방지하고 기저통수를 감소시키기 위해 도로를 이용한 저류시스템에 대해 연구하였음.

○ 그 결과 내배수시스템의 첨두유량을 급격히 감소시키는 결과를 가져왔음.

○ Pingel과 Ford(2004)는 유역내의 유역과 하천, 확률 강우, 경제적 모형 등을 복합적으로 고려하여 Standard - of Practice 모형을 이용하여 홍수위험도를 줄이는 방안에 대한 연구를 수행하였음.

○ C. Martin 등(2006)은 여러 목적을 동시에 만족시키기 위한 도시 내배수시스템의 관리 방안을 제시하였음.

○ Elliot과 Trowsdale(2005)은 기존의 발표된 도시유출해석모형의 장단점과 현재의 도시유출해석모형의 연구 진행방향 등에 관한 논문을 발표하였음.

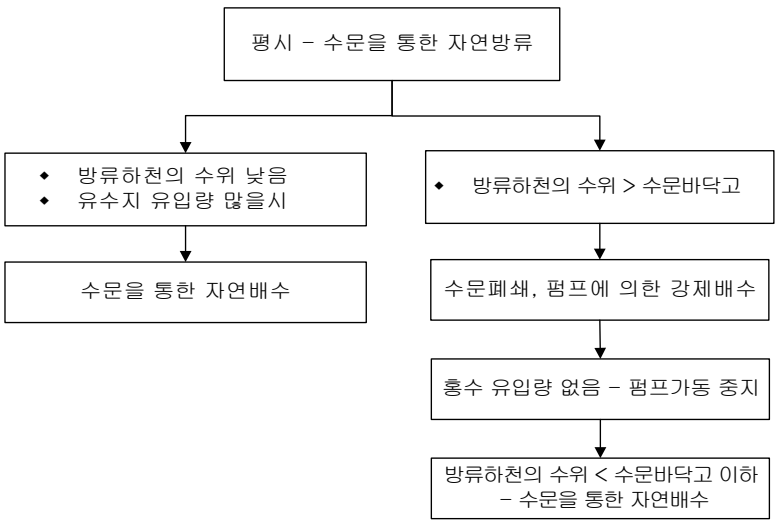
○ Duchesne 등(2001)은 내배수시스템의 실시간 운영에서 포함하고 있는 포괄적 예측제어를 위해 연속방정식과 모멘텀 방정식을 풀기위해 함축적 분할 개념을 이용한 모형을 개발하여 SWMM모형의 Extran Block 과 비교하였음.

(나) 유수지 및 배수펌프장의 국내 운영 기준 조사 및 분석

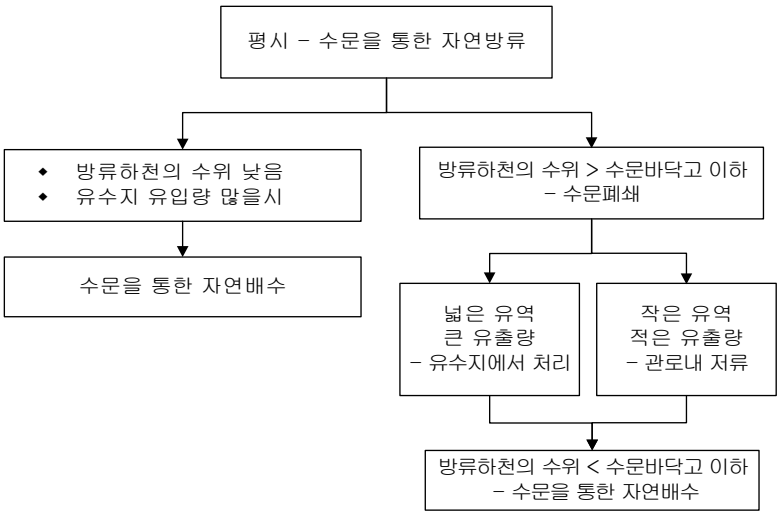
○ 현행 내배수시스템의 운영체계는 크게 2가지로 요약할 수 있으며 이는 배수문의 개폐여부와 빗물펌프장의 운영여부임.

○ 반면 배수유역이 하류부나 하천 연변에 위치하고 있어 자연적으로 외수측으로 방류할 수 없는 경우에는 유수지와 빗물펌프장 등의 강제배수 방식을 사용함.

○ 다음의 그림들은 각각 유수지 배수문의 내배수 처리 체계와 하천으로 직접 방류되는 수문의 내배수 처리 체계를 나타냄(행정자치부, 2000).



<그림 3.3.24 유수지 배수문의 내배수 처리체계>



<그림 3.3.25 하천으로 직접 방류되는 수문의 내배수처리 체계>

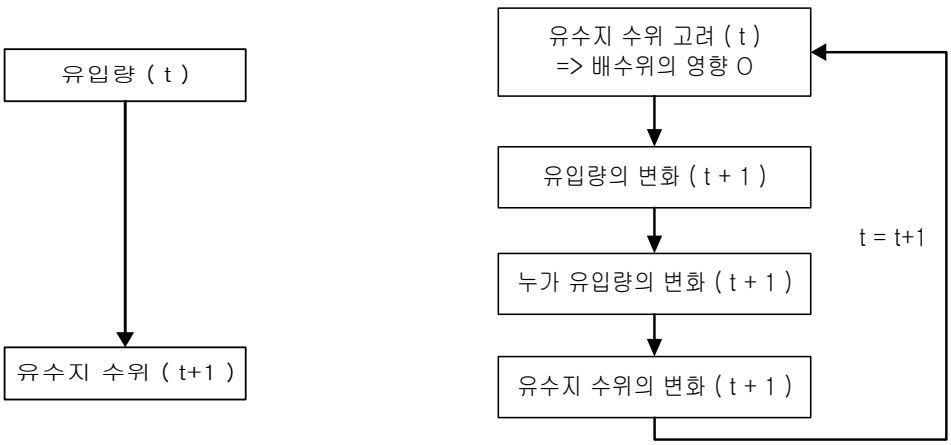
(2) 기존 및 신규 배수체계에서의 적정 Pump 운영 방안 분석

(가) 기존 운영시스템의 문제점

○ 기존의 운영모형의 가장 큰 문제점은 현재의 내배수시스템의 상황은 고려하지 않고 있다는 것임.

○ 특히 침수시의 유입유량 산정은 하류부의 수위에 의해 발생하는 배수효과를 고려하지 않고 산정되고, 펌프의 운영은 상류의 침수발생 위험도 등에 대한 고려 없이 운영되고 있음.

○ 기존의 운영모형의 흐름은 다음의 그림과 같이 유출수문곡선을 산정 한 후 빗물펌프장 모의 운영에 적용하였음.



(a) 기존 모형의 유량 - 수위 계산 (b) 실제 유량 - 수위 관계

<그림 3.3.26 기존 모형과 실제 유수지 유입유량-수위 관계 비교>

(나) 개선방안 (내배수시스템의 역할 및 한계)

○ 설계빈도 이상의 강우사상이 발생한 경우와 소유역별로 다른 강우사상이 발생한 경우 내배수시스템은 역할의 한계에 봉착할 수 있음.

○ 우선 설계 빈도 이상의 강우사상이 발생한 경우 각각의 소유역에서 발생하는 유출량은 우수관거를 통해 하류로 이송되지만 적정 통수능 이상의 강우량은 침수로 이어지도록 되어 있음.

○ 이때, 지선 관거는 5년 빈도로 설계 되어 있기 때문에 그 5년 빈도 이상의 강우량은 하류로 이송하지 못하게 됨.

○ 따라서 상류관거의 경우 만관흐름이 발생하고 있다고 하더라도 하류의 간선 관거는 일정 수심을 유지하는 흐름을 나타낼 수 있음.

○ 또한 소유역별로 다른 강우사상이 발생한 경우, 만약 유역의 최상류부에만 100mm의 강우가 5분간 발생했다고 가정하면, 상류부의 우수관거의 설계빈도인 5년 빈도의 강우량만을 하류로 이송시키고 나머지의 우수량은 유역의 침수현상으로 이어짐과 함께 하류부에서 빗물펌프장은 유입되는 유량이 없기 때문에 어떠한 역할도 수행하지 못함.

○ 따라서 위와 같이 상류지역에만 극한의 강우사상이 발생한 경우 내배수시스템은 각자의 역할을 충실히 수행하였지만 유역에서는 침수피해가 발생하게 됨.

○ 실제 국내에서 발생하는 대부분의 침수피해는 하천의 제방 붕괴 및 하천의 수위가 제한수위 이상에 의해 발생되는 침수피해가 아닌 우수관거의 설계빈도이상의 강우사상에서 발생하는 침수피해가 대부분으로 알려져 있으며, 이는 우수관거의 지속적인 개량 등을 통하여 충분한 통수능을 확보해주어야 해결이 가능 한 것으로 알려져 있음.

○ 하지만 실제 배수펌프장의 운영은 운영자의 정성적인 경험에 의해 초기 가동수위를 제외한 운영조건에 따라 운영되고 있는 실정임.

○ 따라서 보다 실제적인 배수펌프장의 정량적 운영을 위해서는 배수펌프장의 운영조건을 고려한 내배수시스템의 실시간 운영 모형이 개발되어야 함.

(3) 지하 저류공동 설치 시나리오에 따른 기존 및 신규 우수관망 연계 절차 분석

(가) 국내 운영 기준의 문제점

○ 기존 빗물펌프장 운영의 문제점은 다음과 같음.

- 초기가동수위만 존재
- 최대펌프가동수위 등에 대한 고려 없음

- 상류 하수관거의 상태 등에 대한 고려 없음
- 내배수침수를 고려한 동적 연계운영이 없음

○ 기존의 운영체계의 문제점은 내수침수를 목적으로 하는 빗물펌프장의 운영 기준에서 초기 가동수위만 존재하고 내수침수에 대한 고려는 없이 빗물펌프장의 수위만을 기준으로 유수지의 수위에 따라 펌프의 순차적 가동이 이루어짐.

○ 펌프의 순차적 가동에 대한 기준은 현장 운영자의 경험을 바탕으로 설정되나 이는 상류관거의 상태나 유역의 상황, 현재의 내배수시스템의 상황을 고려하지 않고 운영됨.

○ 이는 펌프의 가동에 대한 정량화된 기준이 없으며, 내배수시스템의 총괄적인 상황이 아닌 제한된 자료만을 바탕으로 운영되는 문제점이 있음.

○ 특히, 내배수시스템에 설계빈도를 초과하는 강우사상의 발생으로 인하여 과도한 부하가 발생할 때에는 내수침수의 발생 또는 유수지 수위 증가로 인하여 유수지로의 유입 관거에 배수위 영향이 발생하게 됨.

(나) 국내·외 내배수시설 운영과 관련한 시스템 및 기술 조사 분석

① 국내 내배수시설 운영과 관련한 시스템 및 기술 조사 분석

○ 현재 국내에 적용되고 있는 내배수시스템의 운영 모형은 빗물펌프장의 운영 모형이 대부분을 차지하고 있음.

○ 국외의 경우 CSOs조절을 위한 모형 등이 설치되고 운영되고 있지만 우리나라의 강우 특성상 빗물펌프장의 운영 모형이 대부분을 차지함.

○ 기존의 빗물펌프장 운영 모형은 빗물펌프장의 적절한 운영을 통해 내수침수에 대한 위험성을 줄이고자 국내와 일본 등지에서 내수침수 방지를 위한 목적으로 연구되었음.

② 국외 내배수시설 운영과 관련한 시스템 및 기술 조사 분석

○ 미국의 경우 국내의 경우처럼 배수펌프장에 대한 종합적인 유지관리에 대한 지침이 별도로 준비되어 있지는 않고 호우에 대한 포괄적인 설계 및 관리지침에 유수지(Retention pond, basin) 또는 저류지(Detention pond, basin)항으로 포함되어 있음.

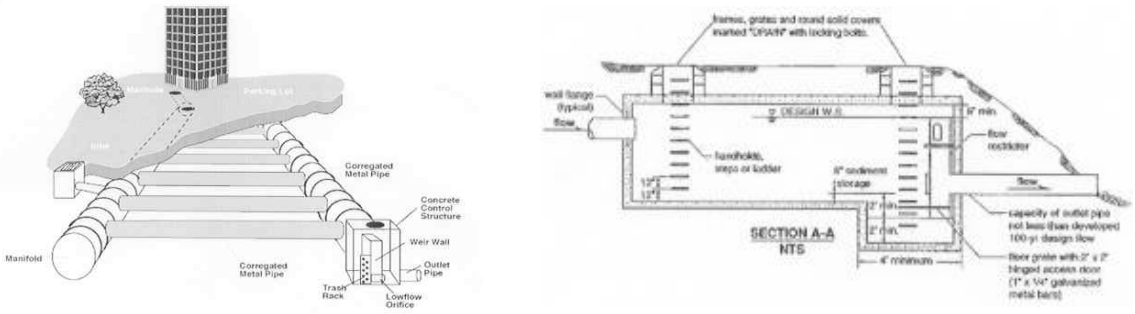
○ New York주의 호우관리설계지침(Stormwater Management Design Manual)에는 우리나라의 빗물펌프장 개념에 해당하는 항목으로 호우연못(Stormwater Ponds)과 호우습지(Stormwater Wetlands)에 대한 설계 및 관리에 대한 내용이 포함되어 있음.

○ Virginia주의 호우관리편람(Stormwater Management Handbook)에는 유수지(retention

basin)와 저류지(detention basin)를 구분하여 설명하고 있지만 그 기능은 거의 같으며 다만 비가 내리지 않는 평상시에도 물이 항상 존재하고 있는 경우에는 유수지, 비가 내리지 않은 경우에는 건조한 상태로 존재하다 비가 오면 물을 일시 저류하여 후에 흘려보내는 경우를 저류지로 구분하고 있음.

○ 서부 Washington주의 호우관리지침(Stormwater Management Manual)에는 저류지(detention pond)와 지하저류수조(detention tank 또는 vault)로 구분하여 설명하고 있으며 비가 오면 물을 일시 저류하여 후에 흘려보내도록 하고 있음.

○ 저류수조는 비가 올 때 지하에 임시로 물을 저장하는 공간으로 콘크리트를 이용한 사각형의 저류공간(detention vault)이나 대형의 금속 또는 플라스틱관으로 이루어진 저류탱크(detention tank)로 이루어져 있음.

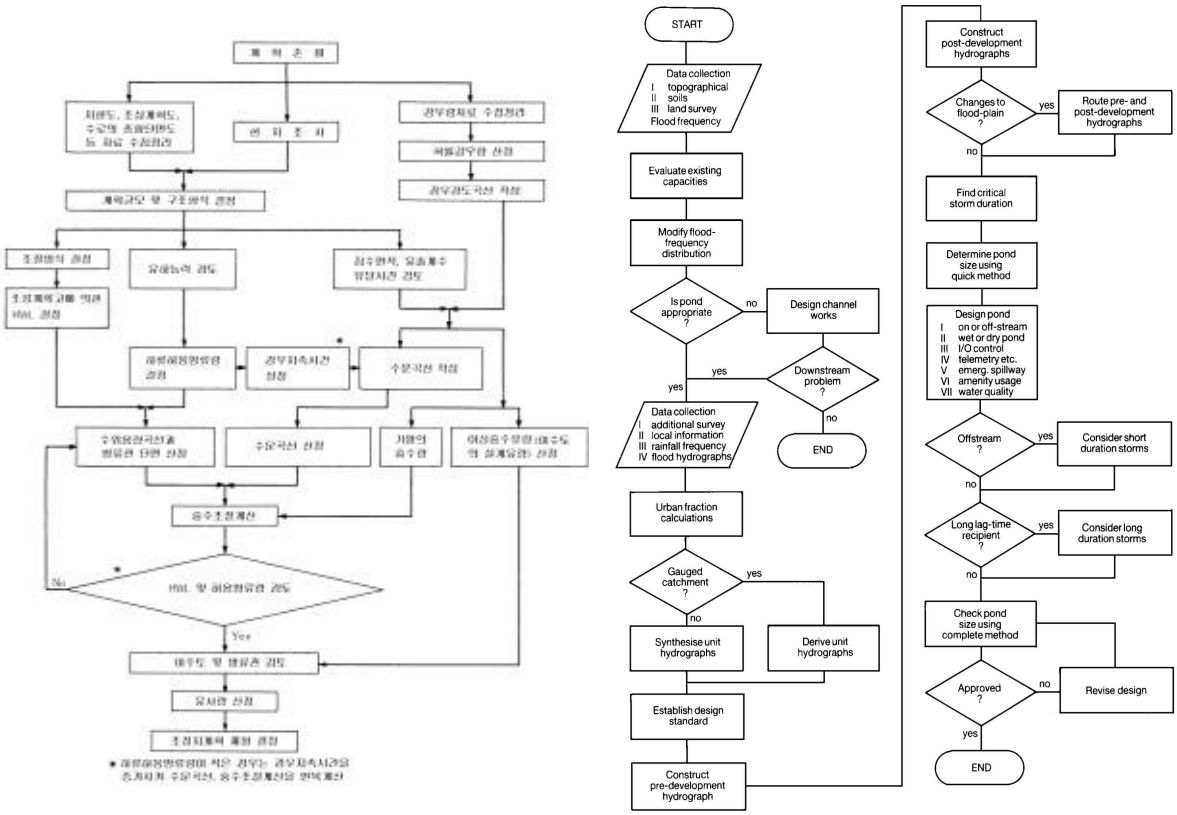


(a) 저류저류공동 시스템 (b) 지하저류공동 공간

<그림 3.3.27 지하저류공동 시스템도 및 공간도>

○ 일본의 경우 택지개발에 따른 우수처리시설로 설치되는 방재조절지 등의 기본계획의 입안 및 설계에 사용되는 각종 기술들에 대한 기준이 수립되어 있음.

○ 방재조절지 등에 의한 필요조절용량은 개발후의 유출량을 하류에서 허용될 수 있는 유량으로 저감시키는데 필요한 홍수조절용량이 되도록 설계하고 있으며, 방재조절지 등의 유출억제시설은 유역면적이 적고 홍수도달시간이 짧아 인위적인 조작을 하지 않는 자연방류방식에 의한 조절을 원칙으로 함.



(a) 방재조절지 기본계획의 일반적 절차(일본) (b) 홍수조절용 지하저류지 설계절차 흐름도(영국)

<그림 3.3.28 국외 지하저류공동 설계절차>

(다) 기존 및 신규 우수관망 연계 개선방안 분석

○ 현재 강우에 따라 발생하는 도시유역의 하수관거는 강우시 하천으로 직접 방류되거나 혹은 유수지를 통하여 하천으로 방류되는 시스템으로 구성되어 있음.

○ 특히 내수침수가 주로 발생하는 지역이나 강우시 외수위의 증감 폭이 큰 경우는 주로 유수지를 통하여 하천으로 방류되고 있음.

○ 현재 서울시내에 빗물펌프장이 106개소 설치되어 있는 것은 외수위의 증가에 대비해서 내수침수를 방지하고자 하는 노력으로 풀이됨.

○ 그러나 현재 유수지를 가지고 있는 빗물펌프장의 구조는 대부분 다음의 그림과 같은 구조로 되어있음.

○ 유입관거의 관저고는 유수지의 하단고와 일치하고 유수지의 관 상단고에 비해 유수지의 H.W.L(High Water Level)은 높게 설정되어 있음.

(4) 기존 배수체계의 노후화에 따른 문제 해결방안 검토

(가) 비굴착 정비공법

○ 런던이나, 파리, 뉴욕과 같은 도시들은 1850년대에 이미 완벽한 지하 하수관망을 구축하고 있었음.

○ 이러한 하수관망을 보유한 국가나 도시는 노후관의 보수나 교체 문제가 대두되었으며, 비굴착 정비공법은 이의 대안 기술로 개발되기 시작하였음.

○ 비굴착공법은 본래 관거 매설에 사용되는 통상적인 굴착 공사가 불가능한 고속도로, 철도 또는 하천 아래를 통과하는 경우 관거를 매설할 필요가 있는 곳을 위해 개발 되였으며 Pipe jacking, Microtunnelling, Moling과 같은 공법은 1960년대에 신관 매설을 위해 개발되었음.

○ 이러한 기술들에 대한 지식과 응용기술이 발달됨에 따라 기술의 적용 범위가 확장되어, 굴착식 관거공사가 교통에 방해가 된다든지, 기존 건물에 영향을 미친다든지, 또는 지반 상태로 보아 위험 요소가 내포될 수 있는 경우에까지 그 적용 범위가 확대되었음.

<표 3.3.33 하수관 비굴착 전체보수공법의 특성>

구분	사용재료	적용관경	장점	단점
신관삽입공법Slip 라이닝 (Continuous pipes공법,Iscrete pipes공법)	PE, PP, GRP	63mm ~ 2,500mm	•빠른 삽입 •회전 반경이 큰 관에 적용가능	•그라우팅으로 인한 단면손실이 크므로 유수단면적이 줄어듦 •그라우팅동안 부양발생가능 •연결과 재연결이 어려움 •다른 공법에 비해 많은 노동력 소요
보강튜브경화공법 Cured in place pipes 라이닝	폴리에스터수지 (Polyester resin)	75mm ~ 2,500mm	•빠른 시공 •관의 변형이나 손실에 구애받지 않고 설치가능 •일반적으로 그라우팅을 필요로 하지 않음 •관경의 변화가 있는 경우도 설치가능 •시공후 연결관 재연결이 용이 •통수용량의 최대화	•여러 가지 장비사용에 따른 숙련된 기술자 필요 •침입수 조절이 어려움(완벽한 물돌리기 필요) •연결관 천공후 작업부위에 대한 표면처리가 필요함 •설치비용이 높음
변형관삽입공법 Close-fit pipes 라이닝	PE, PVC	100mm ~ 315mm	•빠른 시공 •통수용량의 최대화 •회전 반경이 큰 관에 적용가능 •그라우팅 불필요	•원형관의 경우에만 적용가능 •연결관 재연결시 외부 개착에 의함 •기존관의 변형과 평면에 따라 문제점 유발 가능성 높음
제관공법 Spirally wound pipes 라이닝	PVCu, PE	100mm ~ 2,500mm	•회전 반경이 큰 관에 적용가능 •빠른 삽입	•원형관의 경우에만 적용 가능 •제관장비 사용에 따른 숙련된 기술자 필요 •연결관 재연결시 외부 개착에 의함

(나) 비굴착 부분보수 공법

○ 비굴착 부분보수공법이란 노후 된 하수관거를 부분적으로 정비할 때 지면을 굴착하지 않고 하수본관과 연결 접합부, 연결관, 본관 이음부 등의 파손부위에 그라우트 재료를 보수기재 혹은 보수전용로봇 등의 장비를 이용하여 보수하거나, 보강체를 사용하여 구조적인 강도를 높이는 작업을 선택적으로 수행하는 공법.

○ 현재 우리나라의 경우 균열, 단차, 토사의 유입, 유화수소 등에 의한 벽면 부식 등의 관거가 상당히 존재하며 이러한 관거의 성능유지를 위해서는 관거의 유지보수가 매우 중요하다고 할 수 있음.

○ 세계 선진 외국에서는 이미 많은 종류의 비굴착 부분보수공법들이 개발 및 개량되어 현장에 적용되고 있으며, 이들 중 범용성이 넓은 공법들이 국내에 도입되었음.

○ 그러나 도입기간이 짧아 각 공법에 따른 세부적인 기술 축적이 부족한 실정임.

○ 따라서 부분보수공법의 효과를 극대화 하기 위해서는 국내 하수관거 여건에 맞는 기술개발이 이루어져야 함.

3. 최적규모 설계기법에 따른 지하 저류공동 배수시스템 [3차년도]

가. 지하 저류공동의 설계저류량 및 수리영향 인자 평가기법

(1) 종합적인 맨홀, 관거, 펌프, 지하 저류공동 연계에 따른 저류량 평가

○ 종합적인 맨홀, 관거, 펌프, 지하 저류공동 연계에 따른 저류량 평가는 유량 추적을 위한 관거 및 맨홀과 유출량을 위한 소유역 특징 및 배수 특성과 같은 자료를 필요로 하는 도시 유출 모형인 SWMM을 이용하여 저류량을 평가 할 수 있음.

○ 이를 통해 종합적인 맨홀, 관거, 펌프, 지하 저류공동 연계에 따른 저류량 평가를 하였음.

○ 두 개의 모형을 분석한 결과 설치 전 71곳의 침수 구역에서 설치 후 52곳으로 19곳의 침수 피해가 저감 되었으며 26.76%의 저감 효과가 나타났음.

○ 이를 통해 우수 관거의 확장 및 하류의 빗물펌프 포장신성 등과 비교하여 저류지 및 펌프를 설치 시 공사비용의 최소화, 월류저감율의 최대화와 같은 침수 저감 효과가 크므로 효율적인 침수 저감 방안이 될 것으로 판단됨.

○ 따라서 SWMM 모형과 최적화 알고리즘을 연계하여 최적 저류지 설치 및 용량을 결정하는 연구를 통해 침수 저감을 모의하였음.

(2) 지하 저류공동 최적규모 설계기법에 따른 수리영향 인자 분석

(가) 종합적인 맨홀, 관거, 지하 저류공동 연계에 따른 수리영향 인자 평가

○ 종합적인 맨홀, 관거, 지하 저류공동 연계에 따른 수리영향 인자 평가를 위해 맨홀, 관거, 지하 저류지의 연계를 하여 유출을 모의 할 수 있는 수리 모형의 수리영향 인자 평가를 함.

○ 수리영향 인자는 최적 저류지 설치 전과 후를 대상으로 맨홀, 관거, 지하 저류지에 대하여 비교・분석하였음.

① 맨홀의 수리영향 인자 비교

○ 저류지 설치 전・후의 맨홀의 총 유량을 비교하였음.

○ <그림 3.3.30>은 대상유역의 맨홀 수리영향인자 분석를 위한 노드 N24지점을 나타낸 것임.

○ 상류측의 모든 유량은 하류측 유출구로 나감에 있어 노드 N24를 거쳐서 지나가게 되며 맨홀의 수리영향 인자를 비교함에 있어 가장 적합한 지점이라고 판단됨.

② 관거의 수리영향 인자 비교

○ 관거 L122, L123와 L151는 맨홀의 수리영향인자 평가를 하였던 N24에 연결된 관거임.

○ 따라서 관거 L122, L123와 L151로 상류측의 전체 유입량이 지나가 수리영향 평가에 적합하다 판단됨.

○ 관거의 유량, 깊이, 유속에 대하여 지속시간 2시간의 30, 50, 100년 빈도와 기왕강우를 대상으로 수리영향 인자 평가를 비교・분석함.

○ 지속시간 2시간의 30, 50, 100년 빈도와 기왕강우의 저류지 설치 전・후를 비교함.

○ 지속시간 2시간의 50년 빈도의 관거 L123을 제외한 모든 그래프에서 저류지 설치후의 유량이 설치 전보다 줄어 든 것으로 나타났음.

○ 지속시간 2시간의 50년 빈도의 관거 L123은 저류지 설치 후의 유량의 설치전보다 피크 전부터 피크까지의 50분 동안 크게 나왔으며 가장 큰 차이 값은 0.17CMS로 나타났으나 차이 값의 폭이 크지 않은 것으로 나타남.

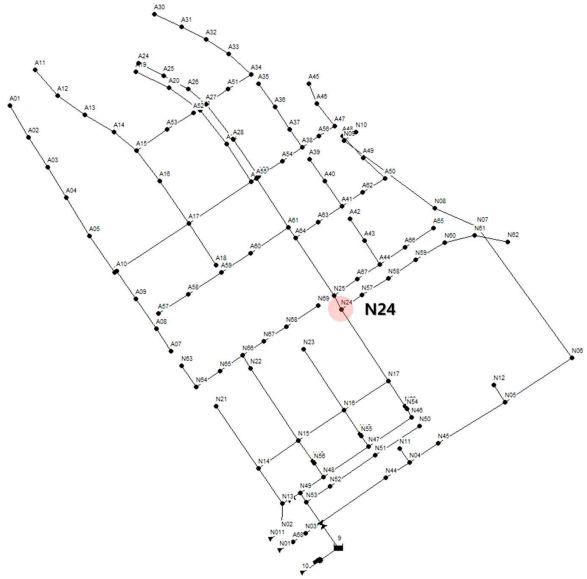
○ 강우가 지속 될수록 저류지 설치 전・후의 유량 흐름이 같은 것으로 나타나 강우 초기의 유량에 미치는 영향이 클 것으로 분석됨.

○ 관거의 유량에 대한 수리 영향 비교에서 저류지 설치 전・후를 비교한 결과 대부분 초기의 유량에서 저류지 설치 후의 유량 값이 설치 전에 비해 작은 것으로 분석되었음.

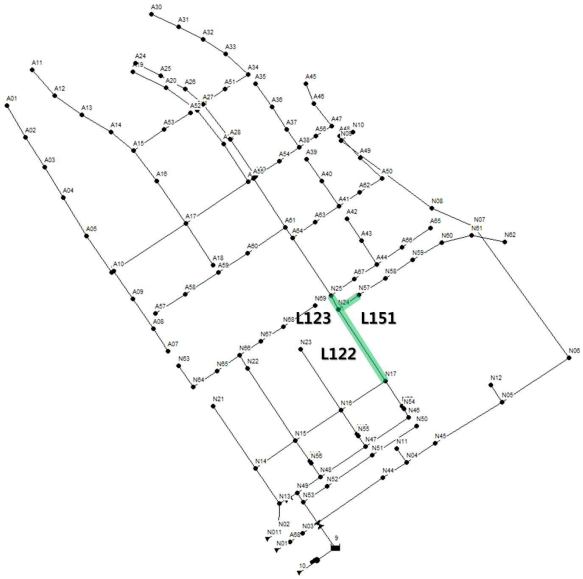
○ 이를 통해 저류지 설치 시 호우가 발생할 경우 초기 유출량에 의한 유량정체가 줄어 침수해소에 도움이 될 것으로 판단됨.

③ 저류지의 수리영향 인자 비교

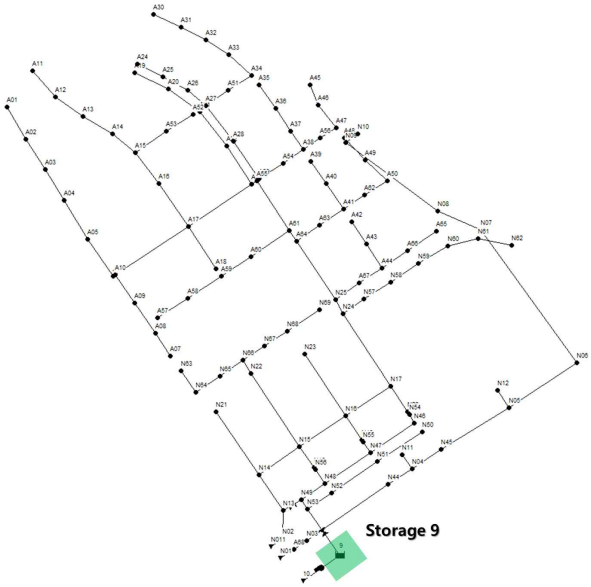
○ 저류지는 상류측 및 중류측의 일부를 제외한 대부분의 우수가 통과되는 곳으로 저류지와 펌프의 수리 영향을 비교할 경우 적합할 것으로 판단되어 이를 적용함.



(a) 맨홀 영향인자



(b) 관거 영향인자



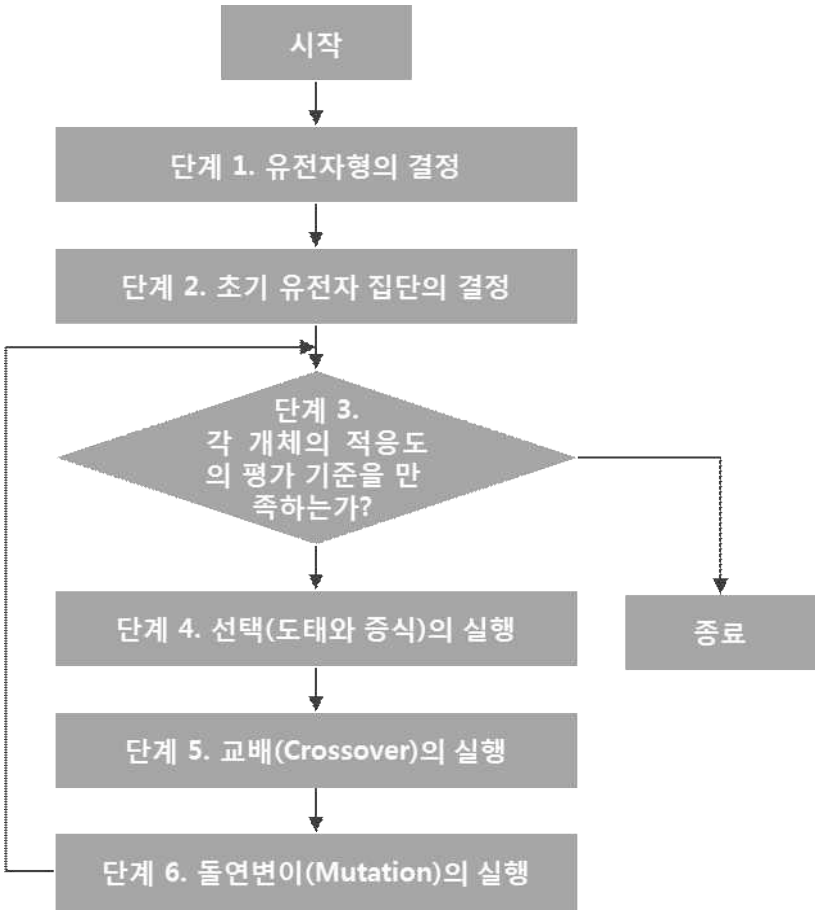
(c) 저류지 영향인자

<그림 3.3.30 맨홀, 관거, 저류지의 수리영향 인자 분석지점>

(나) 유입수를 고려한 지하 저류공동 최적 위치 및 규모 선정 알고리즘의 개발

○ GA(Genetic Algorism)를 이용하여 유입수를 고려한 지하 저류공동 최적 위치 및 규모 선정 알고리즘을 연구하였음.

○ 아래의 그림은 본 연구에 이용된 Genetic Algorism의 과정에 대한 모식도를 나타낸 것임.



<그림 3.3.31 유전자 알고리즘(Genetic Algorism, GA)의 과정>

나. 지하 저류공동의 침수저감효과 분석

(1) 침수저감효과를 고려한 목적함수 도출

(가) 초과우량에 따른 침수저감 효과에 대한 목적함수 도출

○ 초과우량에 따른 침수저감 효과의 도출을 위해 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 알고리즘을 수행하였음.

○ 이를 위해 필요한 목적함수를 설정하게 되며 이때 사용되는 목적함수는 개체가 환경에 적응하여 도태되지 않고 살아남을 수 있는 능력을 말함.

○ 또한 다른 용어로 적합도 함수라고도 함.

○ 목적함수는 각 개체의 적합도를 평가하는 기반이 됨.

○ 실제 문제가 발생하였을 경우 단일 목적인 최적화 문제는 드물며 목적이 상충되는 두 개 이상의 다중 목적으로 최적화 분석을 해야하는 경우가 발생하게 됨.

○ 따라서 유전자 알고리즘의 목적함수를 두 개로 두어 다목적 최적화 알고리즘을 실시함으로써 본 연구의 문제가 되는 내수 침수를 해결하고자 하였음.

○ 본 연구는 다목적 최적화 알고리즘의 목적함수 설정을 위해 집중 호우에 의한 침수 발생지점들을 도시 유출모형을 이용하여 모의하고 침수발생규모가 큰 지점들을 대상으로 저류지 설치 후보지와 저류지의 규모를 선정한 후 최소비용과 월류저감의 최대화를 목적 함수로 취함.

○ 이는 건설비용이 최소가 되며 침수 저감량이 최대가 되었을 경우 적합도가 높은 것이라 할 수 있음.

○ 이에 사용된 식은 아래와 같음.

$$Min\, Q_{fi} = Q_{fi}[L, S] \tag{3.1}$$

○ 위 식의 Q_{fi}는 초과강우사상에 대한 월류량이고 i는 지하저류조 설치가능 개수임.

○ 그리고 이 목적함수를 사용하여 L, S의 조합들 중 최적 해를 찾게 되며 여기서 L은 지하저류지의 위치, S는 지하저류지의 규모를 나타냄.

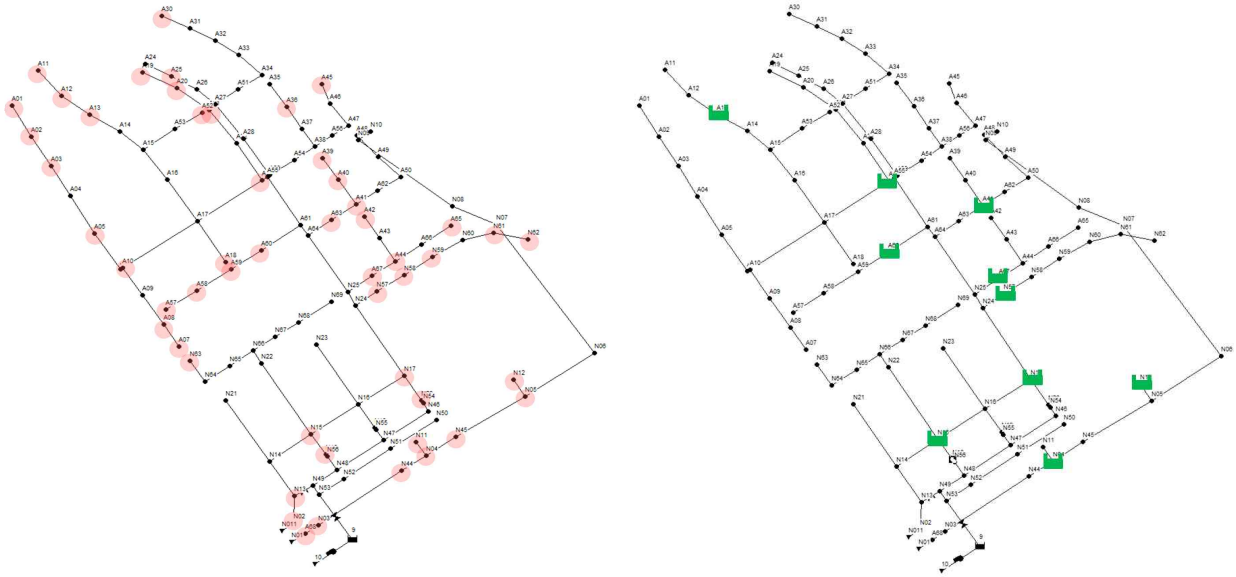
(나) 지하 저류공동 설계를 위한 제약조건 검토

○ 대상유역의 침수 발생원인 및 지점을 선정하여 침수 저감을 최대화 할 수 있는 방안을 설정하여 이를 바탕으로 대상 유역 내의 대상지점의 침수 저감을 최대화 할 수 있는 방안을 모색하였음.

○ 먼저 대상 유역의 전체에 대한 침수 저감을 위해 수리·수문해석을 위하여 대상유역의 유출해석 모형인 SWMM을 이용하여 구성하였음.

○ 이를 바탕으로 침수가 발생한 노드에 침수 저감을 위한 저류지 설치 후보를 설정하였음.

○ 제약조건은 저류지 설치 개소로 하여 침수가 발생한 노드를 중심으로 저감 효과가 클 것으로 분석되는 곳을 선정하여 월류저감량의 최대화와 공사비용의 최소화하며 공사가 용이한 곳을 선정할 수 있도록 하였음.



(a) 대상유역의 침수 현황　　(b) 대상유역의 저류지 후보지 현황

<그림 3.3.32 지하 저류공동 설계를 위한 제약조건>

(2) 지하 저류공동의 최적규모 설계기법

(가) 지하 저류공동 설치 가능위치와 가능규모에 따른 결정변수 산정

① 저류지의 용량 및 위치 선정

○ 최근 이상강우의 증가로 저지대를 중심으로 한 대규모의 내수침수피해가 늘면서 유역의 안정성이 위협받고 있음.

○ 이에 따라 본 연구에서는 유역의 안정성을 우선시함과 동시에 대상유역의 시공이용이한 곳을 중점으로 고려하여 저류지 후보 10곳을 선정하였음.

○ 하수관거의 계획빈도인 30년에서 50년보다 큰 100년 빈도 24시간 확률강우량과 대상 지역의 실제 침수가 발생한 2009년 7월 7일의 강우량을 SWMM에 적용하여 얻은 침수된 노드 정보를 바탕으로 가장 많은 침수량이 발생한 순서를 고려하여 10개 지점을 저류지 위치 후보지로 선정하였음.

○ 대상유역의 유출지점의 관정고와 관저고는 -1.57m와 -3.57m로 무강우 시에도 조위영향을 받는 하천수위가 상승되면 관저고가 수위 이하에 존재하여 집중호우와 만조위가 겹치는 경우 배수에 심각한 문제가 발생하게 됨.

○ 따라서 대상유역의 하류부는 저류지 후보지로 적합하지 않으므로 유출지점 부근은 배제하고 저류지 설치 후보지로 설정하였음.

○ 저류지의 용량은 100년 빈도 지속시간 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 12, 18, 24시간을 SWMM 모형에 적용하여 발생한 대상 유역 전체의 평균 침수량 12,280.6㎥에 대해 800㎡×5m, 1,000㎡×5m, 1,200㎡×5m으로 정하였음.

<표 3.3.34 저류지 설치 전 침수량 (100년 빈도, 24시간 지속기간)>

Node	침수량(㎥)	Node	침수량(㎥)	Node	침수량(㎥)	Node	침수량(㎥)
A01	2	A21	6	A58	2	N13	248
A02	3	**A23**	**22**	A59	4	**N15**	**45**
A03	1	A25	2	**A60**	**70**	**N17**	**18**
A05	1	A30	1	A63	1	N18	6
A07	1	A36	1	A65	8	N20	114
A08	2	A39	2	A67	24	N44	43
A10	1	A40	1	**A68**	**94**	N45	90
A11	1	**A41**	**1**	N02	334	**N57**	**3,362**
A12	2	A42	3	N03	1,008	N58	1
A13	**5**	A44	1	**N04**	**57**	N59	1
A18	1	A45	1	N05	12	N61	1
A19	1	A52	1	N11	122	N62	3
A20	2	A57	4	**N12**	**37**		
침수구역(곳)		51		총 침수량(㎥)		5,774	

② 비용함수 산정

○ 저류지의 최적 위치 및 용량에 영향을 미치는 것은 비용함수라 할 수 있음.

○ 이는 한정되어 있는 공사비용을 이용하여 최적의 위치에 저류지를 설치해 침수의 저감량을 극대화해야하기 때문임.

○ 본 연구에서 저류지 공사비용의 최소화를 위해 토목 공사의 총공사비용은 순공사비용, 제경비, 부가가치세를 합한 것임.

○ 순공사비는 구조물공, 토공, 기계공, 가시설공을 포함한 비용임.

○ 식은 아래와 같으며 각각의 비용의 단가는 2010년 기준 표준품셈에서 참고하여 저류지 높이는 평균 5m로 고정하였음.

○ 가로와 세로의 길이는 부피 값에서 높이를 나누어 그 값의 제곱근을 취한 값으로 가정하여 계산하였음.

$$C_{\text{순공사비}} = C_{\text{구조물공}} + C_{\text{토공}} + C_{\text{가시설공}} + C_{\text{기계순공사비}} \tag{3.2}$$

㉮ 구조물공

○ 구조물공에서는 콘크리트의 타설 및 거푸집, 철근의 가공 조립, 비계공, 동바리, 수팽창지수제, 시공이음면정리 등과 더불어 이형철근과 레미콘 등의 자제대와 철근 운반과 같은 주요자재의 운반에 대한 비용을 모두 포함하여 계산됨.

○ 저류지의 부피를 기준으로 하여 비용 함수의 형태로 나타낸 결과는 아래와 같음.

$$C_{\text{구조물공}} = 71111\,V \tag{3.3}$$

○ 식 3.3에서 C값은 원으로 나타나며 V값은 ㎥의 부피 값.

㉯ 토공

○ 토공 부분에서는 줄파기, 횡줄파기, 흙깍기, 아스팔트 깨기, 토사굴착(리핑), 연암 보통암 굴착, 경암 굴착, 잔토처리, 사토장정지비, 순성토 운반, 유용토 운반, 되메우기, 노체 다짐, 노상다짐, 유곤관설치, 면고르기, 철근콘크리트 깨기 등의 항목이 고려되었음.

○ 위의 항목을 고려하여 나타낸 비용함수는 아래와 같음.

$$C_{\text{토공}} = 23024\,V \tag{3.4}$$

○ 위의 식에서 C값은 원으로 나타나며 V값은 ㎥의 부피 값임.

㉰ 가시설공

○ 가시설공에는 여러 가지 종류에서 CIP방법을 고려하여 산정하였음.

○ 비용 산정에는 토사 천공, 풍화암 천공, 연암 천공, 경암 천공, 케이싱 튜브 설치 및 철거, 철근가공 및 조립, 철근망 근입, 철근 콘크리트타설 등의 흙막이 및 복공에 관한 내용과 H-PILE, 주형보, 사보강재, 복공판, 버팀보, Jack의 설치 및 철거, 버팀보의 제작, 연결, 해체 등의 세부 과정의 단가와 부대공비, 레미콘, 이형철근, 강재 등의 자재비를 포함하여 계산된 것이며 수식은 아래와 같음.

$$C_{\text{가시설공}} = 149336\,V + 387115000 \tag{3.5}$$

○ 위의 식 3.5에서 C값은 원으로 나타나며 V값은 ㎥의 부피 값임.

○ 위의 식에서 부피가 0인 경우에도 비용이 들어가게 됨.

○ 이러한 점을 보완하기 위해서 회귀 분석을 선형이 아닌 거듭제곱의 형태로 실시해

본 결과 아래와 같은 수식을 얻을 수 있었음.

$$C_{\text{가시설공}} = 239250791\,V^{0.15} \tag{3.6}$$

○ 위의 식에서 C값은 원으로 나타나며 V값은 ㎥의 부피 값임.

㉱ 기계 순공사비

○ 기계 순공사비는 저류지에 설치될 펌프의 비용을 나타낸 것임.

○ 이 경우에 저류지 높이 배제 시간은 5시간으로 함.

○ 펌프의 비용은 부피의 범위에 따라 다르게 나타나므로 회귀분석을 하지 않고 가우스기호를 사용하여 나타내며 이렇게 구한 비용함수는 아래의 식과 같음.

$$C_{\text{기계 순공사비}} = \left(\begin{array}{l} \left[\frac{V-20{,}000}{20{,}000}\right]141 + \left[\frac{V-12{,}000}{12{,}000}\right]120 + \left[\frac{V-7{,}000}{7{,}000}\right]75 \\ + \left[\frac{V-5{,}000}{5{,}000}\right]30 + \left[\frac{V-3{,}000}{3{,}000}\right]27 + \left[\frac{V-1{,}000}{1{,}000}\right]12 + 57 \end{array} \right) \times 10^6 \tag{3.7}$$

㉲ 제경비

○ 제경비는 모든 경상비용으로 순공사비를 바탕으로 계산을 하게 됨.

○ 위의 비용함수에서 α 값은 40% 정도를 주로 적용함.

$$C_{\text{제경비}} = \alpha C_{\text{순공사비}} \tag{3.8}$$

㉳ 부가가치세

○ 부가가치세는 순공사비와 제경비의 합에 세금율 β를 곱한 값임.

○ β 값은 주로 10% 정도로 산정하여 사용하게 됨.

$$C_{\text{부가가치세}} = \beta\left(C_{\text{순공사비}} + C_{\text{제경비}}\right) \tag{3.9}$$

㉴ 총공사비

○ 총공사비는 순공사비, 제경비, 부가가치세를 모두 더한 것을 말함.

○ 이를 산정하기 위해 세부적인 항목으로 구조물공과 토공, 가시설공 그리고 기계 순

공사비를 포함하고 있으며 그 외에 제경비와 부가세를 포함하여 최종적인 비용을 계산하게 됨.

○ 아래의 식 3.10은 총공사비에 대한 식을 나타낸 것임.

$$C_{\text{총공사비}} = C_{\text{순공사비}} + C_{\text{제경비}} + C_{\text{부가가치세}} \tag{3.10}$$

③ 저류지 용량에 따른 비용 산정

○ 총공사비는 순공사비, 제경비, 부가가치세를 더한 것으로 아래의 표는 설치한 저류지 용량에 따른 공사비를 나타낸 것임.

○ 본 연구에서는 총공사비를 토대로 하여 최적화 알고리즘에서 비용함수를 적용되어 각 저류지 용량에 따른 최적의 위치에 적용된 효율적인 침수저감량을 구하는 목적으로 사용되었음.

○ 각 항목의 계산방법은 비용함수 산정에서 설명한 바와 같음.

<표 3.3.35 저류지 용량에 따른 공사비>

구분	Case 1	Case 2	Case 3
높이(m)	5	5	5
면적(㎡)	800	1,000	1,200
저류지 용적(㎥)	4,000	5,000	6,000
구조물공(천원)	284,444	355,555	426,666
토공비(천원)	92,096	115,120	138,144
가시설공(천원)	984,459	1,133,795	1,283,131
기계공(천원)	69,000	96,000	126,000
순공사비(천원)	1,429,999	1,700,470	1,973,941
재경비(천원)	572,000	680,188	789,576
부가가치세(천원)	200,200	238,066	276,352
총공사비(천원)	2,202,198	2,618,724	3,039,869

(나) 지하 저류공동 최적규모 설계 알고리즘 개발

① 유전자 알고리즘을 기반으로 한 다목적 최적화 알고리즘

○ GA(Genetic Algorism)를 기반으로 저류지 공사비용의 최소화 및 맨홀에서의 월류저감량 최대화와 같은 하나 이상의 목적함수를 가지고 최적 저류지의 위치와 용량을 결정하여야함으로 다목적 최적화 알고리즘을 이용한 저류지 선정을 하였음.

○ 이를 위해 미 환경청(US Environmental Protection Agency; EPA)에서 제공하고 있는 EPA-SWMM 5.0 engine을 사용하여 도시 우수관망의 해석 및 우수저류지 설치에 따른 월류량을 분석하였으며최적화 알고리즘을 구성 후 SWMM DLL과 연동하여 사용하였음.

○ 다목적 최적화 알고리즘의 선택은 집단 중에서 적응도의 분포에 따라 다음단계로 교배를 수행하는 개체의 생존 분포를 결정하는 것으로 순위방식(Rank)에 의해서 결정하였음. 이는 적응도의 대소 관계만이 고려되기 때문에 적응도 그 자체의 값은 무시됨.

○ GA를 이용한 다목적 최적화 알고리즘은 저류지 설치 후보를 바탕으로 저류지 설치 개수를 지정하며 초기 집단을 생성하게 됨.

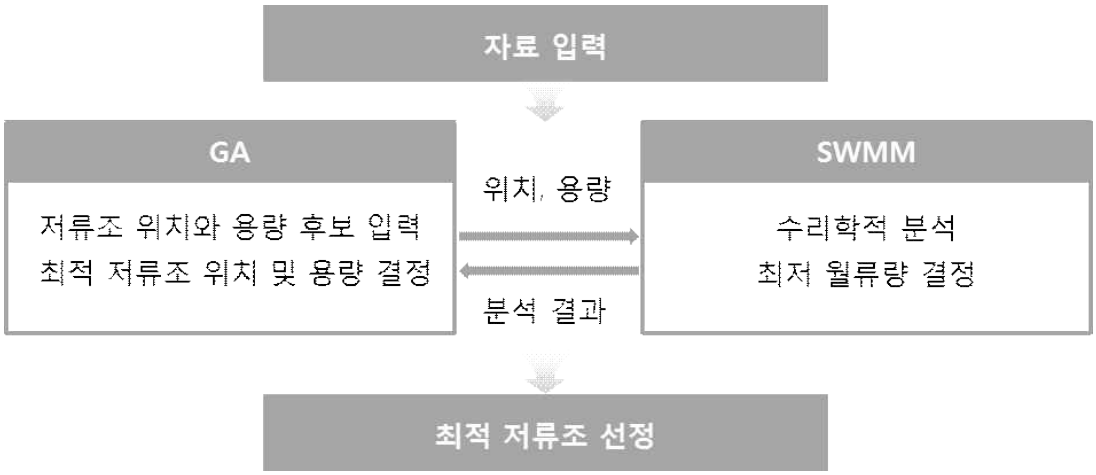
○ 이 과정에서 염색체의 크기, 교배의 확률, 돌연변이 확률 및 세대의 수를 입력하며 초기 집단을 토대로 저류지 설치 지점과 용량을 결정하는 주요 변수를 지정함.

○ 이후 SWMM DLL과 연계되어 입력 자료에 대한 수리학적 분석을 수행하게 되고 이 과정에서 GA로부터 제공된 각각의 저류지 설치 후보에 대하여 최소의 월류량이 발생하는 경우를 선정하게 됨.

○ GA는 다시 SWMM의 결과를 제공받아 적합도 판정 및 다음 세대의 저류지의 위치와 용량을 재생산하게 됨.

○ 지하저류지 설치 개수에 따라 염색체의 크기만큼 발생하는 위치 및 규모의 집합이 생성되며, 이렇게 생성된 집합은 각각의 저류지 설치별로 수리학적 분석을 통해 월류량을 산정하게 됨.

○ 분석된 결과 값 중 가장 최소의 월류량을 발생시키는 저류지 설치 위치 및 용량을 GA로 전달하게 됨.



<그림 3.3.33 다목적 최적화 알고리즘 절차>

② HS(Harmony search)기법을 기반으로 한 최적화 알고리즘

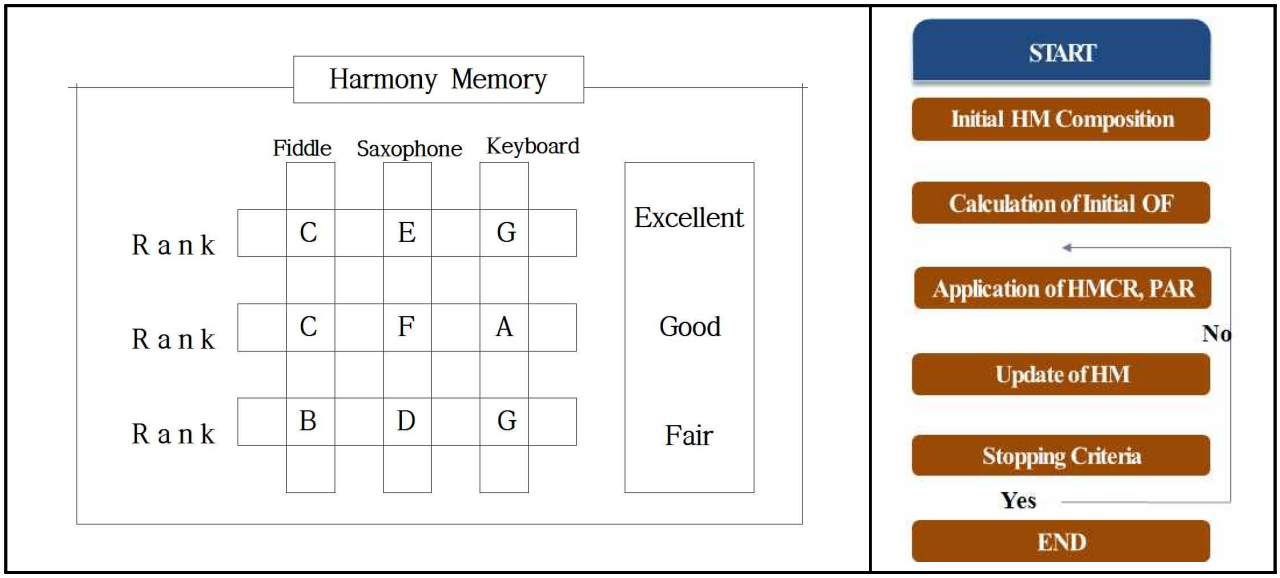
○ HS는 GA와 같이 Heuristic Technic 방법의 하나로 국내학자에 의해 제안된(2001, Zong Woo Geem, Joong Hoon Kim & G.V. Loganathan) 최적화알고리즘이며, 음악의 최적화음에 해당하는 것이 공학에서는 최적해라고 보고 해를 찾아가는 기법임

○ Harmony Search는 SA나 TS와 달리 군탐색을 하며, 각 악기(각 변수)가 어떤 음(어떤 값)을 가짐에 있어서 기존의 많은 경험들이 영향을 미치게 되고 이는 바로 이전의 화음뿐 아니라 과거부터 축적된 상당량의 화음집합이 새로이 만들어 내는 화음에 영향을 미치는 것으로 광대한 영역을 탐색할 수 잇음.

○ 과거의 경험을 축적하고 있다는 측면에서 TS의 특징을 지니며, 또한 해가 꼭 최적이 아니라도 어느 정도 좋은 범위에 들면 경험 집합에 추가한다는 점에서 SA의 특징도 갖는 탐색기법임.

○ 유전자 알고리즘의 경우 새로운 해를 만드는데 있어서 오직 부모세대의 두 유전자가 새로운 유전자에 영향을 미치므로 양 부모의 경험만이 새로운 유전자의 정보가 되는 것에 반해, Harmony Search는 과거의 모든 화음에서부터 경험을 얻기 때문에 새로운 해가 보다 풍부한 정보를 얻게 됨.

○ HS에서 사용하는 인자는 HM(harmony momory)의 크기, HMCR(Harmony Memory Considering Rate), PAR(Pitch Adjusting Rate)등이 있음.



<그림 3.3.34 Harmony Memory의 구조 및 적용절차>

○ HM(Harmony Memory)

HM이란 경험했던 화음 중 좋았다고 생각되는 화음을 모은 집합으로 새로이 나타난 화음이 기존의 HM에서의 최악의 화음보다 좋다면 이 화음이 HM에 추가되고 기존의 화음 중 최악의 것은 HM에서 탈락하게 됨.

○ HMCR(Harmony Memory Considering Rate)

HMCR이란, 새로운 화음을 만들어 내는데 HM에 있는 화음을 기반으로 할 것인지 또는 전체 정의영역에서 무작위로 만들지에 대한 확률이며, HMCR의 기능은 해가 국지해에 빠지지 않고 글로벌 해를 찾을 가능성을 높이는 것으로 GA의 돌연변이율과 같은 기능이라 할 수 있음.

○ PAR(Pitch Adjusting Rate)

PAR은 마치 좋은 화음을 만들기 위해 각 악기의 음조(Pitch)를 조절하는 것과 같은 더 나은 해를 찾기 위해 기존 해와 이웃하는 값을 고려함으로써 HS의 성능을 향상시키는 인자임(Geem, Z. W. et al., 2001).

○ HS의 적용을 위해서는 HM 크기와 HMCR, PAR 등을 결정하며, 목적함수는 Root Mean Square Error 등을 이용하여 상수를 탐색하고, 목적함수의 한계값(보기 0.01)을 입력하여 목적함수 값인 RMSE가 한계 값 이하가 되면 탐색을 중지하고 결과를 출력함. 여기서, x_i는 자료계열의 실측값, $\overline{x_i}$는 결정된 k, x, n 값에 의한 계산값, 최대 iteration수(보기 300번)는 목적함수 값의 변화가 거의 없는 횟수로 제한함.

(3) 지하 저류공동의 최적규모 설계기법에 따른 침수저감 효과 분석

(가) 종합적인 맨홀, 관거, 펌프, 지하 저류공동 연계에 따른 침수저감 효과 평가

① 관거와 관련된 매개변수 조정실시

㉮ 기존 관거에서의 조도계수 적용 : n(조도계수)=0.011~0.015

○ 조도계수의 적용은 콘크리트 관을 기준으로한 최소기준 0.011부터 최대 0.015 까지 5단계별로 적용하였으며, 적용 결과 조도계수의 증가에 따른 월류지점수 및 월류발생량의 거동이 동일하세 증가하는 경향성을 갖는 것으로 나타남.

○ 특징을 보면 기존 n=0.014와 비교하여 조도계수가 작아지면 벡스코 기준 상류단에 밀집되어 발생하는 지역에서의 월류가 감소하였으며, 반대로 조도계수를 기본 조건대비 커질 경우, 마찬가지로 밀집된 지역 주변에서 하나씩 발생하는 것으로 확인되었음.

○ 최상류단에서의 월류량은 벡스코 하류단에서 발생하는 월류량 대비 상대적으로 작으므로 최상류단에 저류조를 설치하는 설치효과가 작아지게 됨.

○ 또한 밀집되어 발생하는 지역의 관거 특성을 살펴보면 관망설계에서 고려해야 될 관경비가 다소 편차가 있는 것으로 보아 결과적으로 최상류단에서 밀집되어 발생하는 월류현상은 저류조의 설계에 앞서 일부 관거의 확장으로 월류현상을 해소하는 것이 적절할 것으로 판단됨.

㉯ 기존 관거에서의 맨홀 유·출입구 손실계수 적용 : k(맨홀손실계수)= 0 ~ 1

○ 일반적으로 표준맨홀은 1개의 유입관과 1개의 유출관이 일직선으로 연결된 중간맨홀과, 유입관, 유출관의 개수가 다르거나 일직선으로 연결이 되지 않은 합류맨홀로 나뉜다. 본 벡스코 주변 관망의 경우 전체 104개의 맨홀중 81개의 중간맨홀과 23개의 합류맨홀로 구성되어 있음.

○ 맨홀에서의 에너지 손실은 유입유량의 변화와 맨홀의 구조변화에 따른 여러가지 요인에 의해 지배됨.

○ 이러한 에너지 손실 발생 요인 중 설계결과에 따라서 달라질 수 있는 조건은 맨홀의 형태, 형상변화, 맨홀 내경/하류 관경 비, 맨홀 내 수심/하류 관경비, 상·하류관 단차의 형상, 관거 접합 상태 등이 있음.

○ 다만, 본 유역의 경우 각 조건들의 비율이 큰 차이가 나지 않는 점을 감안하여 일반적으로 적용되는 에너지 손실계수를 유입구와 유출구에 각각 적용.

○ 맨홀에서의 에너지 손실계수는 주로 관경, 맨홀 폭 비에 따라 적용하고자 하는 수치의 기준이 조금씩 다르나, 국내의 하수도 설계기준 및 국외의 문헌들 중 대표적으로 인용되는 것을 고려하였을 때 손실계수의 범위를 0.0~1.0으로 제한하여 적용.

② 관거변경 : 월류발생 해소를 위한 주요관거 개량

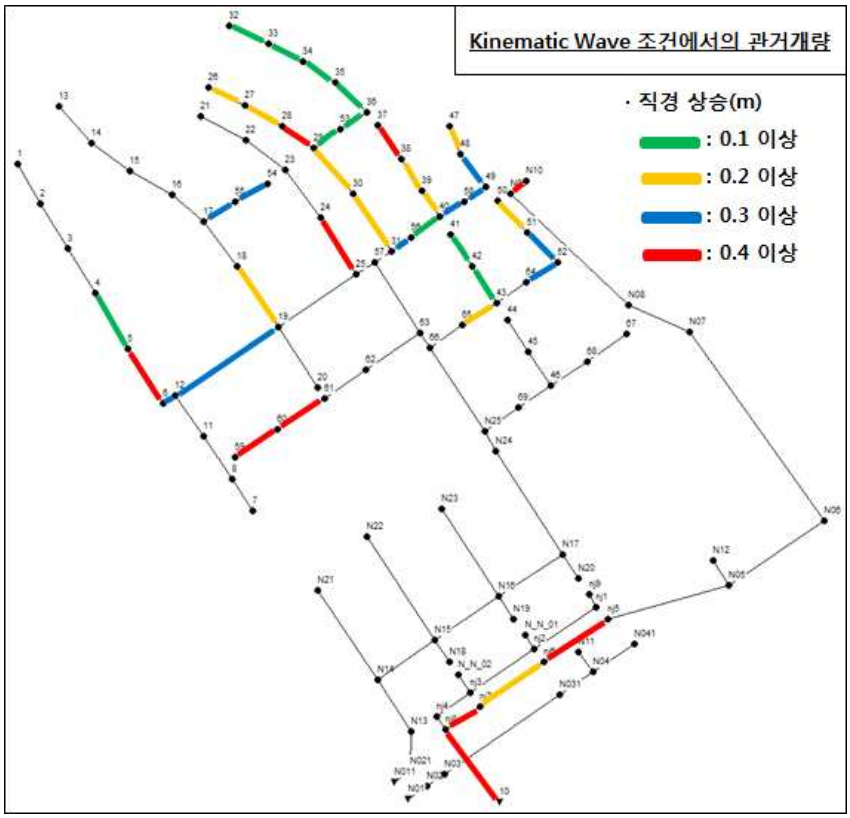
② 관거변경 : 월류발생 해소를 위한 주요 관거 개량

○ 부산시 벡스코 주변의 관망을 전체적으로 살펴보면 관거용량부족은 최상류단에서 주로 확인되었음.

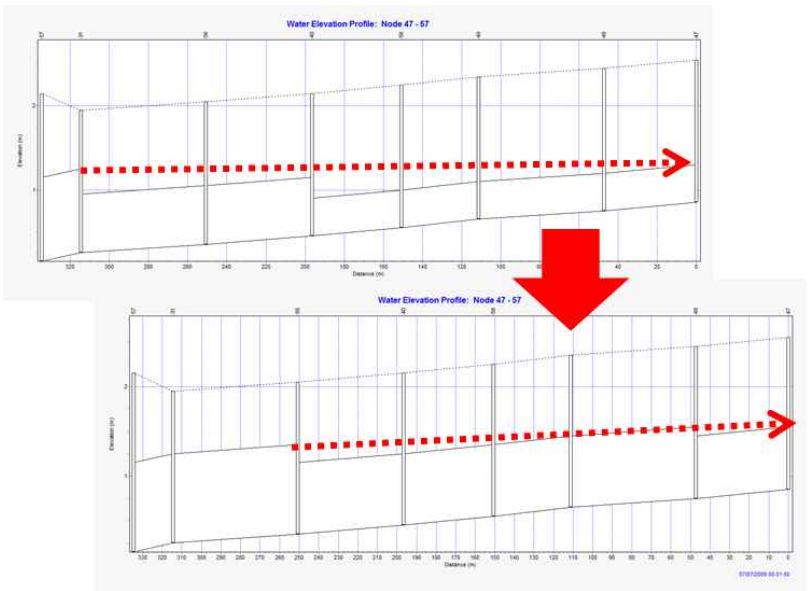
○ 원인을 파악해보면 아래의 그림과 같이 주로 관경비가 일정하게 설계되지 않아서 월류현상이 발생하는 것으로 파악됨.

○ 따라서 관거의 개량 및 맨홀 절점에서의 절·성토를 고려해 해당 관망의 개량을 실시하였음.

○ 전체적으로 살펴볼 때 절점의 높이를 수정하기에 앞서 관거의 직경과 관련된 개량만으로도 충분히 월류현상을 해소할 수 있을 것으로 판단되는 지점은 이를 반영함.



<그림 3.3.35 월류현상 방지를 위한 자체적 관거 개량현황>



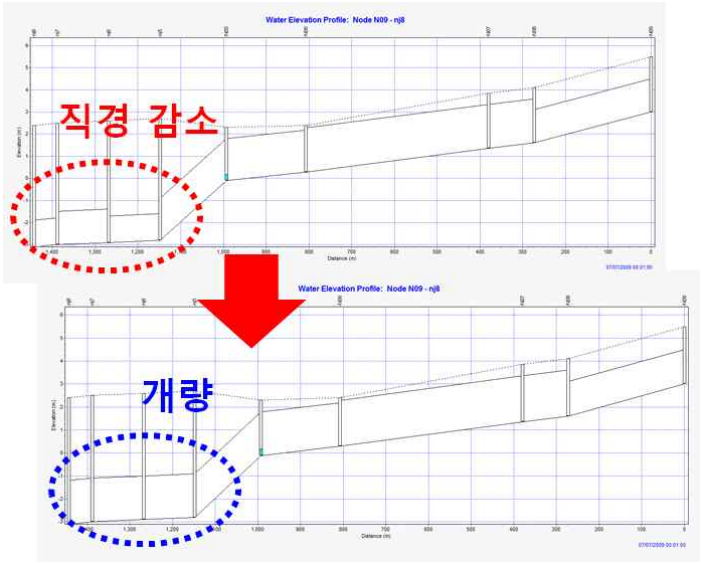
<그림 3.3.36 주요 월류발생 지역의 관거 개량>

○ 관거개량을 실시하면서 전체 발생하는 71,275 m^3의 월류량 중 유출구로 향하는 간선 관거 두 지점에서 절반의 양이 발생하는 것을 확인함.

○ 해당 지점을 살펴보면 최종 유출구로 향하는 관거의 직경이 1.9m로 동일하게 유지되

다가 마지막 유출 직전 3개의 관거에서 직경이 1.2m로 대폭 감소되어 설치되어 있음.

○ 따라서 전체 관거를 개량하기에 앞서 앞서 언급한 3개 관거의 직경을 동일하게 1.9m로 개량한 결과, 해당 3개 관거만 변경한다 하더라도 월류량이 약 64%정도 감소하는 것으로 나타남(71,275m^3→26,239m^3로 감소.).

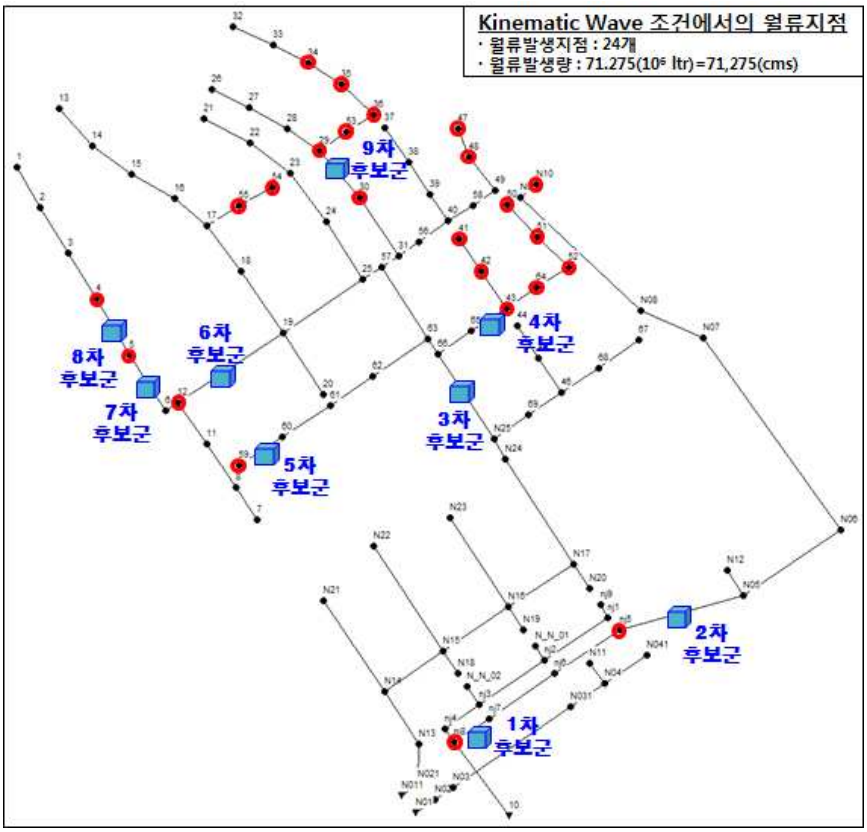


<그림 3.3.37 유출구 주변 문제지역 개량>

(나) 지하 저류공동 최적 위치 및 최적규모설계에 따른 침수저감효과 평가

○ 임의 대상 지역내 지하저류 시설 위치에 대한 적정 위치를 찾고 이에 따른 침수저감효과를 확인하기 위하여 HS 방법에 기반한 최적화 기법을 적용하였음.

○ 대상지역에서 발생하는 월류현상을 해소하고자 저류지 설치를 위해 전체 104개 후보지점중에서 주로 월류가 발생하거나 합류점들을 분석하여 대표적으로 다름 그림과 같이 9개 후보군 지점을 선정하여 적용하였음.



<그림 3.3.38 지하저류지 설치 후보 지점 현황>

① 저류조 1개 설치에 따른 효과 분석

○ 전체 9개 후보지점 중 먼저 1개의 저류조만을 설치할 경우 월류의 최대 저감효과를 확인하고자 분석을 실시하였고, 이때 저류조의 규모는 해당 면적이 4km^{2}가 넘지않는 매우 작은 규모의 소규모 유역에 해당하는 것을 감안하여 500m^{3}가 넘지 않게 적용하여 분석하였음.

<표 3.3.36 저류조 1개 설치에 따른 월류량 종합(관거 개량전)>

	기존	1차	2차	3차	4차	5차	6차	7차	8차	9차
월류량 (m^3)	71,275	37,234	29,983	71,275	71,275	71,275	71,468	70,558	68,086	68,980
감소율 (%)	-	47.8	57.9	0.0	0.0	0.0	-0.3	1.0	4.5	3.2

○ 위의 표와 같이 기존에 월류가 가장 많이 발생하는 nj8과 nj5번 절점과 연결된 관거에 저류조를 설치하면 각각 47.8% 및 57.9%의 월류량 감소폭이 확인되었음.

○ 또한 저류지 2차 설치지점의 경우 벡스코 지역의 정 중앙을 관통하는 간선관거에 해

당하는 지점임에 따라 위험지구에도 속하는 것으로 파악되었음.

○ 따라서 해당 유역에 하나의 저류조 설치를 통한 최대 월류 저감효과를 위해서는 2차 후보군에 설치하는 것이 가장 효과적인 방법이라 볼 수 있음.

○ 추가적으로 밀집되어 월류가 발생하는 상류단의 경우 월류가 발생하는 지점수는 많지만 월류량이 매우 작아 저류조를 설치하는 방법 보다는 일종의 관거개량이 보다 효과적이라 판단됨.

② 저류조 2개 설치에 따른 효과 분석

○ 자체적으로 선정한 전체 9개 지하저류조 설치 후보지점에 두 개씩 설치한다고 가정할 경우 총 45개의 후보군이 선정.

○ 이중 하나씩 설치 하였을 때 효과가 없는 6개 지점을 제외한 1, 2, 4, 5, 8, 9차 지점을 조합하여 월류저감효과 분석을 실시하였으며, 아래의 표에 결과를 종합하였다.

<표 3.3.37 저류조 2개 설치에 따른 월류량 종합(관거 개량전)>

	기존	1차+2차	1차+4차	1차+5차	1차+8차	1차+9차	2차+4차	2차+5차	2차+8차	2차+9차
월류량 (m^3)	71,275	26,402	37,234	37,234	34,045	34,939	29,983	29,983	26,794	27,688
감소율 (%)	-	63.0	47.8	47.8	52.2	51.0	57.9	57.9	62.4	61.2

○ 산정된 결과를 살펴보면 1개씩 설치했을 때 월류가 가장 많이 발생했던 하류단의 두 개지점과 관련한 저류조를 설치한 1차+2차의 조합이 저감율이 가장 크게 나타남.

○ 1차+2차의 조합의 경우는 하류단의 모든 월류량을 배제한 상류단에서의 기존 월류현상이 그대로 반영된 것이라 할 수 있음.

○ 하지만 인접한 관거에 두 개의 저류조를 설치하는 것은 보다 바람직하지 않다는 제언에 따라 추가적으로 확인해보면 저류조 설치시 저감효과가 가장 큰 2차지점을 포함한 2차+8차지점이 최적의 대안이라 할 수 있음.

○ 8차지점의 위치는 부산시 영화의 전당이 위치한 곳이며 해당위치에 지하저류조를 설치할 경우 4, 5, 6번 지점에서 발생하는 월류의 저감양상을 갖는 것으로 나타났음.

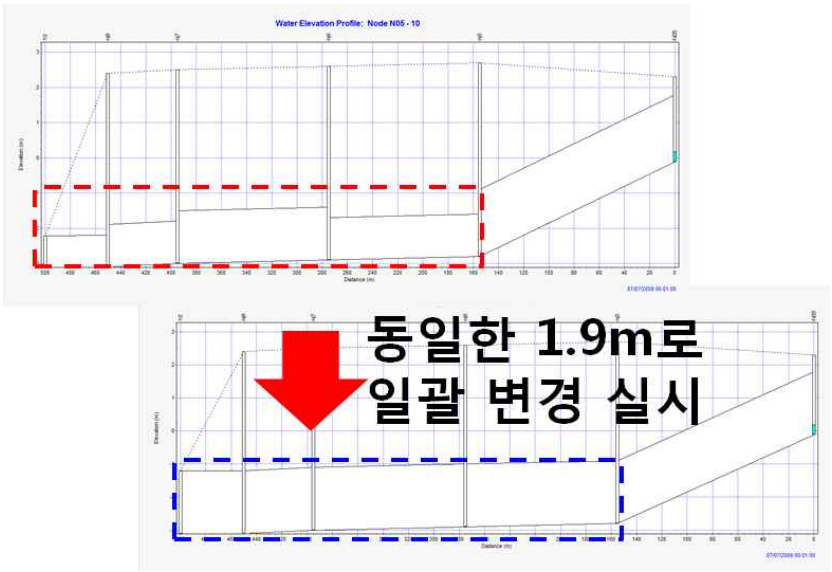
○ 또한 9차지점의 위치는 벡스코 상류단의 주민센터가 위치한 곳이며, 해당 위치에 저류조를 설치할 경우 밀집되어 나타나는 지점에서의 월류량이 저감되는 것으로 파악되었음.

○ 결과적으로 1차+2차의 조합을 제외한 최적의 대안으로는 2차+8차 > 2차+9차 > 1차8차 > 1차+9차순이며 이들 4가지의 조합중 하나를 선택하는 것이 바람직한 것으로 분석되었음.

③ 하류단 관거확장 후 저류조 최적 조합

○ 기본 관망을 확인해보면 앞서 언급한 내용처럼 유출구로 향하는 주요 간선의 관거가 축소되어 설계되어 유출되어야 할 유량이 월류되는 것으로 나타났음.

○ 이를 저류조로만 해결하는 것은 바람직하지 않다는 판단아래 유출구로 향하는 주요 간선을 동일한 직경(1.9m)으로 변경한 후 발생하는 월류량의 저감을 위해 저류조의 설치를 확인하였음.



<그림 3.3.39 주요 월류관거 임의 변경 실시>

○ 기존에 유출구 앞에서 관거의 직경이 급격히 감소된 부분에 대하여 상류단에서의 관거 직경과 동일하게 설치하였을 경우, 월류가 가장 많이 발생하는 1차, 2차 두 개의 지점중 1차 지점에서의 월류현상이 없어지는 것으로 분석되었음.

<표 3.3.38 하류단 관거확장 후 저류조 2개 설치에 따른 월류량 종합(관거 개량후)>

	기존	2차	2차+8차	비고
월류량 (m^3)	71,275	23,555	20,366	조합별 최대의 월류저감 결과
감소율 (%)	-	67.0	71.4	
비고	기존 관거	저류조 1개 설치시	저류조 2개 설치시	

○ 하류단의 관거 크기를 변경한 후 발생하는 월류에 대하여 1개소의 저류조 설치시 2차 지점에서 67%의 저감효과를 가져왔으며, 2개의 저류조 설치시 2차+8차의 조합에 적용할 경우 71.4%의 저감 효과가 나타났음.

○ 따라서 하류단의 문제 관거의 개량 및 2차+8차의 지점에 저류조를 설치할 경우 가장 효과적인 월류 저감효과가 있는 것으로 판단됨.

다. 기존 배수체계와 지하 저류공동의 연계방안

(1) 지하 저류공동 최적규모 설계기법에 따른 배수체계 연계 운영 방안 평가 - 저류지 설치 후 매개변수 변화에 따른 월류현상 분석

(가) 기존 배수체계에 저류지 설치 후 조도계수별 월류량 분석

○ 앞서 월류현상을 해소하고자 기존의 관망에 저류지를 각각 1, 2개씩 설치하였을 경우에 대한 조건에 조도계수를 변화해 가며 월류의 거동을 파악하고자 하였으며 그 결과는 아래의 표와 같음.

<표 3.3.39 최대 월류저감효과의 경우 저류지 설치에 따른 조도계수별 월류량(관거개량전)>

	월류 지점수	월류 발생량	월류 지점수	월류 발생량	월류 지점수	월류 발생량	월류 지점수	월류 발생량	월류 지점수	월류 발생량
	(개)	(m^3)	(개)	(m^3)	(개)	(m^3)	(개)	(m^3)	(개)	(m^3)
	n=0.011		n=0.012		n=0.013		n=0.014		n=0.015	
저류지 1개 설치 (2차지점)	12	17,766	20	21,440	23	25,755	**23**	**29,983**	26	34,551
저류지 2개 설치 (2차+8차)	11	15,162	20	18,166	23	22,497	**23**	**26,794**	26	31,541
※ n:0.014, 굵은부분이 저류지설치 기본 관거에 해당										

(나) 기존 배수체계에 하류단 일부관거 수정 + 저류지 설치 후 조도계수별 월류량

○ 본 절은 유출구 앞에서 관거의 직경감소로 인해 월류현상을 발생시키는 관거를 수정한 후 저류지를 각각 1, 2개씩 설치하였을 경우에 대한 조건에 조도계수를 변화해 가며 월류의 거동을 파악하고자 하였으며 그 결과는 아래의 표와 같음.

<표 3.3.40 기존배수체계의 하류단 관거 개량 후 최대 월류저감효과 가져오는 저류지 설치조건에서의 조도계수별 월류량 분석결과>

	월류 지점수	월류 발생량	월류 지점수	월류 발생량	월류 지점수	월류 발생량	월류 지점수	월류 발생량	월류 지점수	월류 발생량
	(개)	(m^3)	(개)	(m^3)	(개)	(m^3)	(개)	(m^3)	(개)	(m^3)
	n=0.011		n=0.012		n=0.013		n=0.014		n=0.015	
저류지 1개 설치 (2차지점)	11	14,353	19	17,295	22	20,608	22	23,555	25	26,745
저류지 2개 설치 (2차+8차)	10	11,749	19	14,021	22	17,350	22	20,366	25	23,735
※ n:0.014, 회색부분이 저류지설치 기본 관거에 해당										

(2) 연구대상지에서의 적용가능한 LID기법 검토

(가) LID 요소기술 검토

○ LID(Low Impact Development) 기법은 강우유출수 관리에 있어서 기존과 다른 개념으로 강우 유출수에 의한 오염부하를 효과적으로 제어하고 유역, 도시지역, 개발지에서의 수문학적 건전성을 확보하기 위한 목적으로 미국과 유럽에서 최근 주목받고 있는 강우유출수 관리 기법임.

○ LID 기술은 강우유출수의 배제를 위한 획일적, 중앙집중식 관거의 배치, 대규모 지하시설물 등의 기존 강우-유출수 관리시스템과 비교했을 때 비용측면에서도 장점이 있으며, LID 기술은 자연형 시설 및 식생공간의 확보 등을 통한 쾌적한 도시 공간에서 얻을 수 있는 생활공간의 가치향상, 심미적인 측면 등을 통한 삶의 질 향상의 장점을 가지고 있음.

○ 선진국 및 국내에서 적용되는 LID 요소기술 들을 체계적으로 정리하면 다음 그림 및 표의 설명과 같으며, 각 기술 분류에 따른 최적관리기술(Best Practice Management: BMP)기술들을 정리하면 다음 표와 같음.

<표 3.3.41 LID 요소기술의 분류 및 종류>

구 분	시설설명
저류형 (Retention & Detention)	· 강우유출수를 저류 또는 지체시켜 침전, 생물학적 반응 등 물리적 · 생물학적 기작등을 통하여 물순환 건전화 등의 효과를 기대하는 시설
여과 · 침투형 (Filtration & Infiltration)	· 강우유출수를 토양층 또는 특정 여재층 등을 이용해 여과 · 침투시켜 토양 및 여재의 여과, 흡착 기자가에 따라 물순환 건전화 등의 효과를 기대하는 시설
처리 · 장치형 (Treatment)	· 환경공학적 처리 공법과 수리적 기착이 복합된 시설형으로서 유량조절형, 여과형, 와류형, 스크린형, 응집 · 침전형, 생물학적 처리형으로 구분 · 기존에 다양한 방식으로 적용되어 왔으나 그 효용성, 경제성, 유지관리 측면의 문제점을 안고 있는 방식
유역관리기술 (Integrated Management Practice)	· LID 기술의 타당성 검토, 계획 단계에서부터 개발로 인한 영향을 최소화하는 포괄적인 계획기법 · 개발 유역의 최소화, 지형교란 최소화, 불투수면적 최소화, 토양개발, 훼손산림의 재조림, 유역내에서의 근원적 오염예방, 우수배제계획시 도달시간 최적화 기술 등이 포함



<그림 3.3.40 LID 요소기술의 분류 및 종류>

(나) 빗물저감이 가능한 LID기법 검토

○ 대상유역은 상업시설이 밀집해 있고 대형백화점이나 전시장 등이 집중되어 있어 유동인구가 상당히 많은 지역임.

○ 따라서 본 연구에서는 토지이용 특성에 적합하고 발달된 도시지역에 적합하며, 별도의 토지가 필요하지 않은 옥상녹화와 투수성포장을 적용하여 유출저감효과를 분석.

① 옥상녹화(Green Roof)

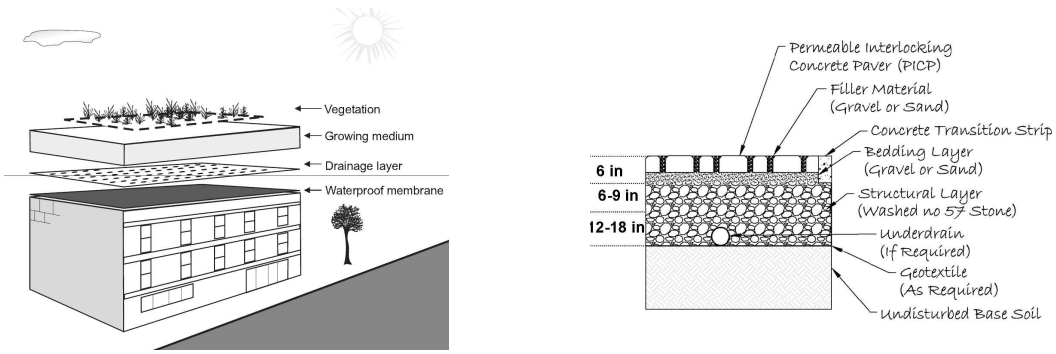
○ 옥상녹화는 옥상을 토양과 식물로 녹화하여 지붕으로 떨어지는 강우를 저장하고 증발시키는 역할을 하여 유출량을 감소시키는데 효과적인 LID기법임.

○ 특히 건물의 미관을 높이면서 서식처로의 역할도 가능하여 녹색 도시재생에서 주목받고 있으며, 지붕의 기대수명의 연장과 단열, 방음의 효과가 있음.

○ 옥상녹화는 식생저류장치(Bio-retention)의 일종으로, 식생을 통한 투수면적 증대와 토양층을 통한 유역의 침투율 증대, 자갈층을 통한 저류가 가능하여 효율이 큼.

② 투수성포장(Parameter Modification)

○ 본 연구에서는 유역 내 2차선 이상 도로의 양 옆 보도에 투수성 포장기법을 적용하였으며 각 소유역 별로 LID 기법의 적용이 가능한 공용주차장, 아파트 단지 내 주차장 및 도로, 건물 앞 공터, 건물광장에 적용하여 검토하였으며 주로 상업밀집지역에 중점적으로 적용되었음.



(a) 옥상녹화 도식도 (b) 투수성포장 도식도

<그림 3.3.41 LID 요소기술의 분류 및 종류>

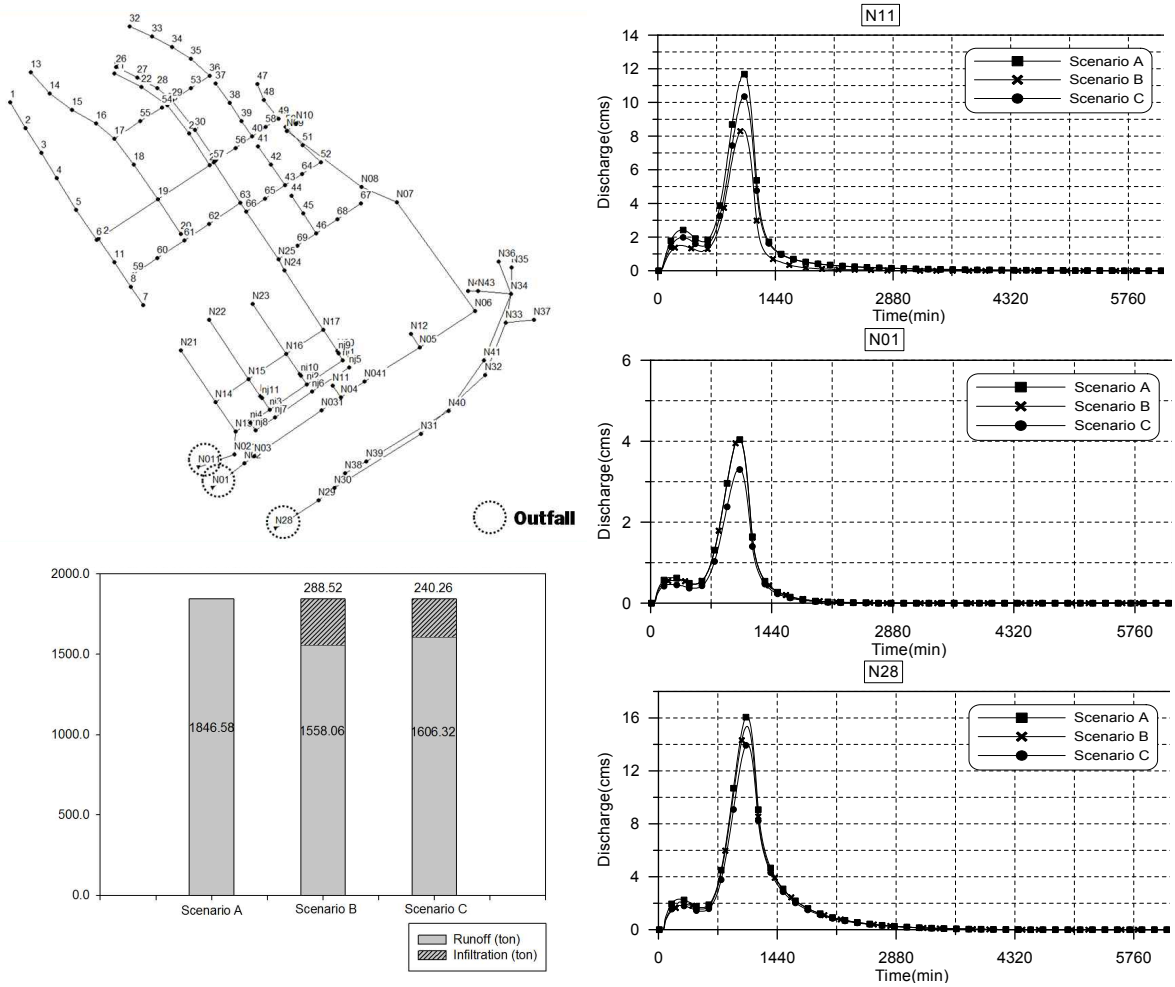
○ 본 연구대상지역의 LID기법의 효율을 검토하기 위하여 3가지의 시나리오별로 유출량 저감효과를 분석함.

<표 3.3.42 LID 기법 유출량 저감효율 분석 시나리오>

구 분	적용 LID기법	적용면적 (㎡)
Scenarios A	없음	0
Scenarios B	옥상녹화	110,100
Scenarios C	투수성 포장	214,900

○ 본 연구 유역은 3개의 유출구로 구성되어 있으며 아래의 그림과 같이 대상유역은 3개의 유출구로 나누어져 있음.

○ N11은 유역면적 648,300㎡ 중 투수성포장 20.05%, 옥상녹화 4.19%, N01은 유역면적 339,200㎡ 중 투수성포장 9.43%, 옥상녹화 1.92%, N28의 경우 유역면적 1,841,900㎡ 중 투수성포장 2.87%, 옥상녹화 4.15%가 LID 기법이 적용되었음.



<그림 3.3.42 LID 요소기술적용 유출량 저감효과 분석결과>

○ 본 대상유역 내 시나리오별 총 유출량을 분석한 결과 시나리오 A의 경우 1,846.58ton, 시나리오 B의 경우 1,558.06ton, 시나리오 C의 경우 1,606.32ton의 결과를 보임.

○ LID 기법을 적용하지 않은 시나리오 A과, 시나리오 B, C의 유출량을 비교한 결과, 시나리오 A에 비하여 시나리오 B는 288.52ton, 시나리오 C는 240.26ton이 저감되었으며 각각 15.62%, 13.01%의 유출량 저감효과를 보였음.

(다) 신규 택지개발시 LID기법 적용을 위한 제도개선방안 제시

○ 제도개선 방안은 각종 시방서 및 설계지침에 유역의 물 순환이 고려되도록 하는 것으로 유역의 물 순환이 방해받지 않도록 토지이용계획 단계에서부터 고려하는 것임.

○ LID는 불투수면을 유역내의 다양한 물 순환 요소와 연계시킨 광역적이고 효율적인 불투수면 관리 기법임.

○ 이는 과거와 같이 문제시되는 한 사건을 보고 해결하는 단편적, 단기적인 해결방안이 아니라, 불투수면과 연계된 다양한 수단을 동시에 고려하는 근원적이면서도 예방적인 기법으로 유역관리의 중요한 진보를 의미함.

○ 본 절에서는 신규 택지개발시 LID기법 적용을 위한 제도개선방안을 위하여 국토부, 환경부, 안전행정부등의 관련법을 검토하여 보완방안을 제시하였음.

<표 3.3.43 국토부 관련법(도시계획시설의 결정구조 및 설치기준에 관한 규칙)>

도시계획시설의 결정구조 및 설치기준에 관한 규칙	
관련법	보 완
· 도로의 배수시설에는 노면의 배수에 지장을 주지 아니하는 범위 안에서 땅속에 스며들게 유도하는 시설 설치(제12조제5호)	· 도로의 배수시설에는 노면의 배수에 지장을 주지 아니하는 범위 안에서 친환경적인 생태여과 또는 땅속에 스며들게 유도하는 시설 설치
· 보행의 쾌적성을 높이기 위하여 녹지체계와의 연관성을 고려할 것(제18조제3호)	· 보행의 쾌적성, 바람통로, 유출수 침투를 위한 보도는 투수성 포장을 지향하고 보도를 따라 선형으로 녹지 설치한다. 또 인도수목 부지를 이용하여 빗물저류도 고려할 것
· 포장을 하는 경우에는 빗물이 땅에 잘 스며들 수 있도록 투수성 재료를 사용(제19조제8항)	· 포장을 하는 경우는 포장면을 따라 녹지를 낮게 위치시키거나 투수성 포장을 할 것
· 광장에 포장을 하는 경우에는 빗물이 잘 스며들 수 있도록 투수성 포장재를 사용할 것(제51조)	· 광장에 포장을 하는 경우는 빗물유출수의 이동을 고려하여 녹지로 빗물유입 후 배수토록 하며 빗물이 스며들 수 있는 투수성 포장재 사용

<표 3.3.44 국토부 관련법(건축기본법 및 건축법)>

건축기본법 및 건축법	
관련법	보 완
· 건축물의 소유자 또는 관리자는 건축물 및 공간환경을 조성하고 사용하는 과정 등에 있어서 환경에 대한 영향을 최소화하고 자원의 재이용과 재생을 촉진함으로써 자연과의 조화가 이루어지도록 하여야 한다(건축기본법 제8조)	· 빗물유출을 저감할수 있도록 유도
· 대지는 인접한 도로면보다 낮아서는 아니되고 대지의 배수에 지장이 없거나 건축물의 용도상 방습(防濕)의 필요가 없는 경우에는 인접한 도로면보다 낮아도 된다.	· 빗물유출을 저감할수 있도록 유도

<표 3.3.45 국토부 관련법(조경기준과 조경공사표준시방서)>

조경기준과 조경공사표준시방서	
관련법	보 완
· 보행포장: 보행자용 통행로의 바닥은 물이 지하로 침투될 수 있는 투수성 포장구조이어야 하며, 허가권자가 인정하는 경우에는 그러하지 아니함 : 투수성의 포장을 권장하며, 보도 및 차도의 녹지를 이용한 침투 및 배수시설의 연계 고려	· 보행포장: 보행자용 통행로의 바닥은 물이 지하로 침투될 수 있는 투수성 포장구조이어야 하며, 허가권자가 인정하는 경우에는 그러하지 아니함 : 투수성의 포장을 권장하며, 보도 및 차도의 녹지를 이용한 침투 및 배수시설의 연계 고려하며 빗물생태체류가 가능한 시설 고려
· 마운딩은 우수의 흐름이 정체되지 않고 배수계통으로 출수되도록 시공, 강우시 토사가 유실되지 않도록 유의한다“ “공사시방서 또는 설계도면 등에 명시되지 않은 경우 마운딩의 경사 기울기는10~30° 를 표준으로 하되 최소 5° 이상을 유지하는 것을 원칙으로 한다.	[추가] · 우수흐름을 유도할 때 식생수로 등을 설치를 고려

<표 3.3.46 국토부 관련법(도시공원및녹지등에관한법률 시행규칙 제18조)>

도시공원및녹지등에관한법률 시행규칙 제18조	
관련법	보 완
· 도시 내의 자연환경의 보전을 목적으로 설치하는 경관녹지의 규모는 해당녹지의 설치원인이 되는 자연환경의 보전에 필요한 면적 이내로 할 것 · 일상생활에 있어서의 쾌적성과 안전성의 확보를 목적으로 설치하는 경관녹지의 규모는 해당녹지의 기능발휘를 위하여 필요한 조경시설의 설치에 필요한 면적 이내로 할 것	[추가] · 지형의 보존, 식재의 보전, 도시녹지를 위하여 LID기술요소의 재조림, 토량개량, 조경기술을 적용
· 연결녹지는 다음의 기능을 고려하여 설치할 것 (1) 비교적 규모가 큰 숲으로 이어지거나 하천을 따라 조성되는 상징적인 녹지축 혹은 생태통로가 되도록 함 (2) 도시 내 주요 공원 및 녹지는 주거지역·상업지역·학교 등 공공시설과 연결망 형성 (3) 산책 및 휴식을 위한 소규모 가로(街路)공원이 되도록 할 것 · 연결녹지의 폭은 녹지로서의 기능을 고려하여 최소 10미터 이상으로 하고 녹지율(도시계획시설면적분의 녹지면적을 말한다)은 70퍼센트 이상으로 할 것	[추가] · 녹지 조성시 LID기법을 활용한 생태저류지 혹은 생태식생수로, 수질정화습지를 조성 유도

<표 3.3.47 국토부 관련법(건설공사 전문시방서 물순환 관련 잔디식재 내용)>

건설공사 전문시방서 물순환 관련 잔디식재 내용	
관련법	보 완
· 잔디식재 시기녹지대 마운딩작업 완료 후 지반이 안정된 후에 조성 · 경사면의 식재는 우수방향 직각으로 식재 · 마운딩조성시 우수흐름이 정체없이 배수계통으로 배제되도록 시공	[추가] · 우수흐름을 유도할 때 식생수로 등을 설치를 고려

<표 3.3.48 환경부 관련법(수도법 및 시행규칙)>

수도법 및 시행규칙	
관련법	보 완
· 빗물이용시설 의무화 대상규정 - 빗물이용시설의 시설기준은 집수시설, 처리시설, 빗물저류조, 송배수시설 등으로 규정 - 종합운동장·실내 체육관 등 지붕의 면적이 넓은 시설물 중 대통령령으로 정하는 규모 이상으로 증축·개축 또는 재축하는 경우, 빗물이용시설을 설치·운영 - 국가와 지방자치단체는 빗물이용시설을 설치한 시설물의 소유자에게 설치비용 보조(제16조).	[추가] · 빗물이용시설의 설치시 첨두유량을 줄일수 있는 LID기법의 적용도 유도할 수 있는 조항 마련이 필요
· 수도법 시행규칙에서빗물이용시설 - 지붕에 떨어지는 빗물을 모을 수 있는 집수시설, 초기강우를 배제할 수 있는 시설, 빗물의 이물질을 제거할 수 있는 여과장치 등 처리시설, 처리시설에서 처리된 빗물을 일정 기간 저장할 수 있는 빗물 저류조(처리 빗물을 화장실 등)빗물을 사용하는 곳으로 운반할 수 있는 펌프·송수관·배수관 등 송수·배수 시설 가짐(제7조).	[추가] · 빗물이용시설의 설치시 첨두유량을 줄일수 있는 LID기법의 적용도 유도할 수 있는 조항 마련이 필요

<표 3.3.49 안정행정부 관련법(우수유출 저감시설)>

우수유출 저감시설	
관련법	보 완
· “우수유출저감시설“은 우수의 직접유출을 억제하기 위하여 인위적으로 우수를 지하에 침투시키거나 저류시키는 시설 · 자연재해예방을 위하여 풍수해 예방과 대비를 위해 우수유출저감시설설치기준을 제정운영. 가뭄대책으로는 가뭄극복을 위한 시설을 관리 및 유지, 빗물모으기 시설을 활용한 가뭄극복대책을 세우도록 한다(제3조).	· “우수유출저감시설“보다는 “우수유출저감방안” 또는 “...저감구조” 등의 단어를 사용하여 “시설”적 방법뿐만 아니라 LID기법과 같은 유역차원에서 효과적이면서 다양한 다목적 우수유출저감방안이 고려되도록 한다.

(3) 저류 빗물의 처리방안 검토

(가) 국내・ 외 저류 빗물의 재이용 방안 수집

① 국내 기술개발 현황

㉮ 빗물이용시설현황

○ 우리나라는 여름철에 집중되는 강우 특성으로 인해 빗물 관리 및 활용에 있어 안정적인 수량 확보와 연중 지속적인 빗물이용이 어려운 실정임.

○ 또한 도시화에 따른 불투수층 면적의 증가로 인해 빗물 유출량이 증가하고 있음에도 불구하고 빗물펌프장과 하수관거를 통한 내수배제 방식의 치수대책이 주를 이루고 있어 도시방재 측면에서 비효율적임.

○ 이와 같은 어려운 상황에도 불구하고 최근 들어 우리나라에서도 향후 예상되는 물 부족에 대비하기 위해서 월드컵경기장, 학교 및 정부청사를 중심으로 화장실 세정용수나 조경용수 등의 잡용수로 이용하는 빗물이용시설이 증가하고 있음.

○ 주요 빗물이용시설로는인천, 대전, 원주, 제주, 수원 등 5개 월드컵 경기장, 한국건설기술연구원 원주 무실아파트단지 등 86개 건축물 및 공동주택(예정 포함), 고양시 소재 주엽초등학교 등 32개 학교 빗물이용시설 등이 있음.

○ 각 지자체별도 광주광역시에서는 공공기관을 위주로 시범사업을 실시한 후, 2008년까지 약 27개소의 빗물이용시설을 확대 추진하도록 계획 중이며, 대구광역시는 2011년까지 공공청사 6개소, 학교 건물 14개소, 경기도는 2011년까지 공공청사 28개소, 학교 건물 109개소, 대형 체육시설 5개소의 빗물이용시설을 계획 중에 있음.

○ 현재까지는 대부분의 시설이 이수용도로 활용되고 있으나 서울시 은평 뉴타운 등의 공동주택 단지를 중심으로 소유역 치수대책으로서 빗물을 저류하고 침투시키는 방안이 계획되고 있음.

○ 향후 관련법령 및 지원체계가 마련되면 시설 적용 사례가 급증할 것으로 예상되며, 이수적 측면에서 뿐만 아니라 호우시 빗물을 저류하고 침투시킴으로써 도시 방재대책, 비점오염 저감대책으로써 활용도가 높아질 것으로 기대됨.

㉯ 빗물이용 기술현황

○ 우리나라는 6월에서 9월에 집중된 강우의 편중과 더불어 최근 이상기후로 인한 국지적 집중호우로 인해 방재 정책은 물론 도시 빗물관리 측면에서 매우 어려운 요건을 갖고 있음.

○ 빗물관리기술은 1980년대 이후 간헐적인 연구가 시작되었으며, 1990년대 이후부터 빗물 저류 및 침투 기술 그리고 이용 기술에 대한 일부 시범적 성격의 모델사업이 추진

되고 있으나 아직까지 관련 제품의 규격화, 실용화가 미흡한 실정임.

○ 우리나라의 빗물저류 및 침투기술에 대한 연구개발 수준은 현재 시작단계를 벗어나고 있는 시점이며, 연구용역의 발주처인 정부 부처 및 지자체 별로 연구용역이 활발히 진행되고 있어 본격적인 도시 빗물관리 기술의 확보에 박차를 가하고 있음.

○ 먼저, 과학기술부와 건설교통부는 프론티어 연구개발사업의 일환으로 1단계에서 진행된 “우수 저류 및 활용 기술 개발” 등을 통해서 시설 확대 적용을 위한 관련 요소기술의 개발, 시설지침 및 유지관리 매뉴얼 작성, 관련 시범사업을 추진하고 있음.

○ “효율적인 빗물관리에 관한연구”를 통해 국토계획법 등 상위법과 건축법 등 개별법령체계 및 지원체계를 개편할 계획에 있음.

○ 특히 행정중심 복합도시, 혁신도시 및 기업도시 등의 신도시 개발이 계획 중에 있으며, 도시 건설시 빗물관리시설을 도입하여 환경친화적인 도시관리 및 도시 안전확보를 꾀하고 있음.

○ 환경부에서는 물 절약 및 비점오염원 관리 차원의 빗물 이용시설 확대를 추진하고 있으며, 특히 “빗물이용시설 보급 확대를 위한 정책방안 연구(2003)”을 통해 현재 종합운동장, 실내체육관 등 지붕면적 2,400㎡ 이상이고, 관람객수가 140석 이상인 시설물의 신축 · 증축 · 개축 또는 재축하는 경우 빗물이용시설 설치 · 운영을 의무화한 수도법 상 규정을 확대하고 제도적 · 행정적 지원 방안을 제시한 바 있음.

○ 또한 “빗물수집 및 활용기술(2004)” 연구 과제에서는 빗물탱크 및 주변기기, 빗물처리 방법, 빗물탱크 설계기법 등을 연구하여 건축물을 대상으로 한 빗물이용 가이드라인, 빗물저장조 용량산정 프로그램, 모니터링 기법을 제시하기도 하였음.

○ 한편, 2010년에는 물 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률을 개정하고 공공청사까지 빗물이용시설 설치 의무화 대상을 확대함.

② 국외 기술개발 현황

㉮ 빗물이용시설현황

○ 최근 들어 국내외적으로 빗물모으기 운동이 많이 소개되어 관심을 끌고 있음.

○ 건축물에서 할 수 있는 빗물모으기 운동은 중소규모의 물탱크를 만들어 강우시 저장하였다가 잡용수나 환경용수로 사용하는 것임.

○ 이렇게 하면 홍수, 가뭄에 대비하고 생활환경의 개선에도 도움이 됨.

○ 최근 들어 외국에서는 건축물을 지어 놓고 빗물을 모으기보다는 빗물을 모아서 어떻게 사용할 것인가를 고려하여 환경에 영향을 적게 미치는 건축물을 설계하는 추세임.

○ 이와 같은 추세는 선진국이나 후진국, 비가 많은 나라나 적은 나라 할 것없이 전 세

계적으로 확산되고 있는 실정임.

○ 또한 이러한 개념은 제2차와 제 3차에 걸쳐 World Water Forum에서 지속적으로 다루고 있는 주요의제 중의 하나임.

○ 따라서 본 연구에서는 국내와 해외의 다양한 빗물이용 사례를 소개하고 대체 수자원으로서의 빗물이용을 확산하기 위한 방안을 모색하고자 함.

○ 미국

- 미국의 경우 최근 점차 증대되는 환경에 대한 관심과 기존 수자원의 고갈이 관계당국의 빗물이용에 대한 관심을 증가시켰고 많은 도시들이 빗물이용에 대한 기술을 적극적으 로 개발하고 있다.
- 그중 가장 처음으로 활발하게 빗물저장설비의 설치를 지원한 곳은 캘리포니아(California)였는데 이곳에서 빗물이용에 대한 관심이 증대된 이유는 급격한 물 수요의 증대와 물 생산비용의 증가, 1976 ~ 1977년의 가뭄 때문이었다.
- 한편 미국의 군도인 괌(Guam), 카롤린군도(Caroline Islands), 마샬군도(Marshall Islands), 푸에르토리코(Puerto Rico) 등의 섬 지역에서 빗물을 이용하는 것이 일반적이며, 특히 대체수자원이 부족한 작은 섬들의 경우에는 그 의존도가 더욱 크며, 하와이의 경우 농업지역이나 상수관로 시스템을 도입하기 어려운 지역의 경우 빗물을 많이 사용함.
- 또한 건조지역에 해당하는 텍사스에서는 중앙 집중식 수도공급시스템이 갖추어지기 전까지 빗물을 이용하는 것이 일반적이었으나 수도공급시스템의 도입으로 빗물이용 시설이 많이 사라졌음.
- 그러나 다시 빗물이용에 대한 관심이 부각되고 있는데 이는 기존의 수도와 우물물에 대한 불신이 증대하는 데 비해 빗물을 이용하는 것이 경제적이라는 생각이 확산되고 있기 때문임.

○ 독일

- 독일은 대부분의 도시가 지하수를 원수로 사용하고 있으나 현재는 가정용수나 그밖의 용도로 빗물이용을 가장 적극적으로 추진하고 있는 나라임.
- 독일에서 빗물이용을 추진하는 주된 이유는 빗물 사용의 증가를 통해 제한된 수자원인 지하수를 보존할 수 있기 때문임.
- 공해로 인한 대기 중의 오염과 새 또는 기타 원인으로 인한 집수면의 오염 때문에 빗물을 음용수로 사용하지 않지만 정원용수, 화장실용수, 또는 세차용수 등으로 사

용하여 많은 경제적 이익을 얻고 있음.

- 독일에서 빗물이용에 관심을 갖게 된 것은 지금으로부터 15~20년 전 일부 환경론자들에 의해서 였으나, 현재는 100여개가 넘는 빗물이용 관련설비 제조업자들이 빗물 관련 상품시장에서 경쟁하고 있음.
- 그리고 빗물의 이용은 학교, 세차장 혹은 산업용으로 범위가 증가하고 있는 추세다. 독일의 대표적인 빗물이용 시설중의 하나인 베를린의 소니센터(Berlin Sony Center)는 저장된 빗물을 Posrdamer Platz 오피스 타워에서 화장실용수나 건물 외부의 조경용수로 사용하며, 오피스타워에 화재가 발생할 경우에도 이 빗물을 사용하고 있음.
- 빗물 저장소가 가득 차게 되면 넘친 물은 합류식 하수도로 유입되고, 비가 오지 않을 경우에는 빗물 대신 수돗물을 사용함.

○ 일본

- 일본은 1985년 도쿄돔에 빗물이용 시설을 설치한 이래 물의 공급과 유출제어를 위해 빗물이용이 효과적이라는 인식이 확산되었음.
- 더욱이 1995년 일본서부에서 대지진이 발생했을 당시 기존 급수체제의 마비로 인해 심각한 물 부족현상이 일어나면서 빗물이용에 대한 관심은 더욱 크게 증가 되었음.
- 일본은 주로 도심지역의 빗물이용에 많은 관심을 쏟고 있는데 도시 외 지역에서의 빗물이용이 주로 용수공급을 목적으로 하는 것과는 달리 일본 도심에서의 빗물이용은 용수공급 이외에 도 홍수제어 효율성의 증대, 수자원 보전, 하천오염 감소, 지하수 함양, 배수관망 시스템의 건설경비 절감 등의 효과를 위한 것임.
- 또한 화재진압과 비상시 물 공급에 대비하기 위해 빗물을 사용하기도 하며 환경교육 측면에서도 빗물이용을 장려하고 있음.
- 동경도 내에 있는 스미다시(Sumida City)의 시청은 일본에서 빗물을 이용하게 된 13번째 공공기관으로 5,000㎡ 면적의 집수면적과 저류용량 1,000㎥ 의 지하저장탱크를 가지고 있음.
- 저류된 빗물은 주로 건물 내의 화장실 용수로 사용되는데 1997년 당시 스미다 시청에서 사용된 화장실 용수의 43.7%가 빗물을 이용한 것 이였음.
- 지역사회의 빗물이용 시설로는 로지손이라 불리는 특이한 빗물이용 시설이 있음.
- 이 시설은 개인주택의 지붕에 빗물을 모아 로지손에 저장하고 평소에는 식물재배와 소방용수로, 비상시에는 음료수로 사용함.
- 그 외 빗물이용시설로는 스모경기장인 코쿠칸(Kokugikan)이 있고, 2002년 월드컵에 사용되었던 축구경기장 요코하마, 사이마타 경기장 등이 빗물이용 시설을 갖추어 환

경친화적인 도시 내 구조물로 이용 되고 있음.

○ 호주

- 호주의 미개척지는 건조한 기후와 농업지역 주민이 많이 흩어져 있다는 특성 때문에 주로 빗물을 이용하고 있음.
- 호주의 약 1,800만 명이며, 그중의 90%가 해안 주변의 대도시나 중소도시에 살고 있음.
- 따라서 농업지역의 적은 인구를 위해 거미줄 같은 수도 공급망을 갖춘다는 것은 비경제적일 수밖에 없음.
- 지하수의 경우 개발하기에 많은 비용이 들고, 수질적인 측면에서도 이용하기에 부적합한 경우가 많음.
- 호주 통계청에 따르면 약 100만 명의 농업지역 사람들이 빗물을 주 수원으로 이용하고 있음.
- 최근에는 도시외곽지역에 취미생활로 농장을 운영하는 사람들이 증가함에 따라 그들을 위한 수원이 필요하게 되었는데 그 중 빗물은 도시외곽지역에서 가장 저렴하거나 혹은 유일한 수원으로 사용되고 있음.

○ 대만

- 대만의 과거역사를 돌이켜 보면 괄목할 만한 경제적 성장이 최근 반세기 동안에 이루어졌다는 것을 알 수 있음.
- 이같이 급속한 경제성장과 함께 대규모 산업단지가 늘어남에 따라 물의 수요는 엄청나게 증가하였고, 이를 충족시키기 위해 대규모 저수지 건설을 강행한 결과 환경생태계에 심각한 악영향을 가져왔음.
- 하지만 국민들의 환경보존의식이 고취됨에 따라 수자원을 확보할 수 있는 방법들이 기존의 대형건설 계획에서 빗물이용, 물의 재사용 등과 같은 작은 규모 또는 비 건설수단을 활용하는 방향으로 변화하고 있음.
- 이러한 움직임과 더불어 대만에서의 빗물이용은 학교, 각종 사업분야 및 다양한 조직에서 볼 수 있음.
- 그 대표적인 예로서 타이베이시 동물원을 들 수 있으며, 이 동물원은 산악지방의 충분한 강우특성을 살려서 9,000톤 가량의 빗물을 수집하기 위한 가양한 형태의 집수시설을 갖추고 있음.
- 수집된 빗물은 정원수 등에 필요한 용수와 동물원 이용객의 화장실 용수 등 다용도

로 이용하고 있음.

○ 영국

- 영국은 1995년 심각한 물 부족을 겪게 되자 물에 대한 인식의 전환이 이루어졌음.
- 거대한 물 공급회사들은 그들이 물을 공급할 수 있는 공급 한계에 도달하게 되었고 신선한 물은 제한된 자원이라는 사실을 모든 이가 깨닫게 된 것임.
- 그 이후 모든 물 공급회사들은 용수를 재활용하기 위한 방법개발에 힘썼음.
- British Water사의 경우 Cranfield 대학에서 열린 국제 컨퍼런스에 영국의 참여를 주도했는데 이 컨퍼런스의 주된 주제는 일본, 독일, 프랑스, 영국에서의 빗물이용과 그 시스템에 대한 현재의 기술에 관한 것들이었음.
- 영국의 대표적인 빗물이용 시설은 밀레니엄 돔(Milennium Dome)인데 이 건물은 10만 m^2 면적의 지붕에서 받은 빗물로 일 500㎥의 화장실 용수 중 20%를 충당하고 있으며 유출수가 발생될 경우 적절한 처리를 거친 후 연못에 저장함.

○ 태국

- 태국은 가정용 빗물집수시스템을 1980년부터 개발해왔고 그 분야에 있어 큰 발전을 보여왔음.
- 특히, 태국 '쟈(빗물저장단지)프로그램(Jar Program)'은 세계에서 가장 잘 알려진 가정용 빗물집수저장조 설치프로젝트로써 정부에 의해 주도되었는데 1980년대 중반 이후 2m 부피의 철근콘크리트로 된 빗물저장조가 가정용으로 수백만 개나 건설되었고, 약 11m의 페로 시멘트(Ferrocement) 빗물저장탱크의 경우 매우 폭넓게 이용되어 태국의 북동부 지역에서 수천 개가 설치되어 있음.
- 태국은 1980년대에 다양한 페로시멘트 빗물저장탱크를 개발하고 설치한 결과 태국의 동북부산악지대를 비롯한 농업지역의 주민들이 보다 쉽게 음용수를 공급받을 수 있게 되었음.
- 이 지역에는 큰 하천이 없고, 바다가 융기해 생성된 토지라 지하수는 염분농도가 높아 마실 물로 적합하지 않아서 옛날부터 빗물을 이용해 왔고 가정용 빗물이용시스템의 이용에 있어서 매우 앞서 있다고 할 수 있음.
- 여기에 2m의 태국식 자(Thai Jar)의 개발은 빗물의 활용에 있어 더욱 커다란 효과를 불러 일으켰음.
- 이 프로그램을 통해 겨우 5년 사이에 약 1,000만개의 빗물저장단지가 만들어졌다는 사실에서 알 수 있듯이 그 결과는 매우 경이적이라 할 수 있음.

- 이 프로그램은 1985년 국가주도의 위원회가 설립되면서 공식적으로 시작되었는데, 설치와 계획에 있어서 재정적인 운영과 건설에 해당마을 사람들이 포함하고 교육, 기술, 조사 및 행정적인 비용에 대해서는 정부가 지원하였음.
- 이러한 방법은 정부 주도의 일방적인 빗물저장시설의 보급보다는 물의 사용을 필요로 하는 국민들의 교육, 홍보 및 참여가 빗물저장시설을 확산시키는 가장 큰 요인이라는 결과를 가져온 것임.

○ 빗물이용 시설은 크게 두 가지 목적에 의해서 이용되고 있음. 하나는 물 부족을 해결하기 위한 용수공급을 위해서이고, 다른 하나는 도시형 홍수와 가뭄을 예방하기 위한 치수용으로 이용하고 있음.

○ 선진국의 경우 중앙 공급식 급수체계가 잘 갖추어진 도심지역에서는 홍수제어 효율의 증대, 화재나 천재지변에 의한 비상용 용수의 급수, 지하수의 함양 등을 목적으로 빗물을 이용하고, 물이 부족한 도서지역이나 건조지역에서는 용수공급을 위해 빗물이 이용되고 있음.

○ 한편 물이 부족하면서도 지하수조차 개발할 수 없는 개발도상국과 빈국들의 경우 물을 얻을 수 있는 유일한 수단으로 빗물을 사용하고 있음.

○ 선진국이나 후진국, 비가 많고 적음에 관계없이 빗물이용에 대한 전 세계적인 관심과 사례와 같이 우리는 측우기를 만들어 빗물을 이용하던 조상들의 지혜를 계승하고, 외국의 사례를 분석 · 적용하여 현재 우리나라의 기상현황과 환경관련 법체계에 적합한 시스템을 개발해야 해야 할 것임.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연구성과 목표 달성도

1. 1차년도 연구 성과목표 대비 실적

가. 연구성과 목표 달성 실적

본 연구개발성과 관련 1차년도 단계에서 설정한 질적•양적 성과지표는 다음과 같음.

<표 4.1.1 연구성과 질적•양적 성과지표 - 1차년도>

성과목표	성과지표	측정방법	목표치	실적치
지하저류공동 및 인접구조물 안정성 확보방안 수립	필라지보 시스템의 이론적 규명	파괴규준-하중메카니즘 연계 이론적 규명 제시 여부	1건	1건
	근접시공에 따른 지하공동의 거동 규명	근접시공의 모형시험 수행 및 거동평가 여부	1건	1건
지하공간 침수위험도 평가방안 수립	지하공간 침수위험도 평가 방안 설정	지하공간 침수위험도 영향인자/평가방안 설정 여부	1건	1건
	지하공간내 유입수 동적거동 평가	수치시뮬레이션을 통한 빗물유입수의 거동평가 여부	1건	1건
지하 저류공동의 개략적 위치선정에 따른 배수시스템 효과 분석	초과우량 대상 강우 분석 및 선정	초과우량 대상 강우분석 방안 절차제시 및 분석여부	1건	1건
	지하 저류공동 설계를 위한 최적화 기법의 도입방안 검토 및 선정	지하 저류공동 설계를 위한 최적화 기법 방안 검토 및 선정여부	1건	1건
질 적 성 과 지 표 소 계				100%
지하저류공동 및 인접구조물 안정성 확보방안 수립	학술회의 발표논문 건수	학술회의에 참가, 발표한 건수	2건	2건
	특허출원 건수	특허출원 건수	1건	1건
지하공간 침수위험도 평가방안 수립	수치해석 건수	총 수치해석 건수	1건	1건
지하 저류공동의 개략적 위치선정에 따른 배수시스템 효과 분석	학술지 게재논문 건수	논문 게재 건수	2건	2건
	학술회의 발표논문 건수	학술회의에 참가, 발표한 건수	2건	3건
양 적 성 과 지 표 소 계				100%

나. 특허 출원

○ 출원일자 : 2011. 04. 27

○ 특허명 : 가압형 내압식 필라부 보강공법

○ 출원인 및 출원번호 : (주)서영엔지니어링 / 10-2011-0039561

○ 출원국 : 대한민국(KR)

○ 개요 : 굴착단계별 가압그라우팅과 프리스트레스를 가할 수 있는 필라부 보강공법으로서 이를 더욱 상세히 설명하면 선행터널과 후행터널 사이를 가압그라우팅에 의해 종방향 응력에 대한 저항성을 향상시키고, 선행터널과 후행터널의 각각 내측에서 양방향으로 프리스트레스를 가함으로써 횡방향 응력에 대한 저항성을 향상시켜 도시 하부 등 필라부가 좁게 형성될 수밖에 없는 시공여건에서도 기존 지반을 그대로 이용하면서 안정된 필라부를 제공할 수 있는 공법에 관한 것임.

다. 국내외 학술지 논문

(1) 최근의 강우유출특성이 반영된 장기유출 모의를 위한 장기강우 사상의 모의기법 개발

○ 한국방재학회 논문집 - Vol.11(NO.4) 2011년 8월

○ 단기강우자료를 이용하여 100년의 장기강우를 모의하고 단기 실측강우와 모의 강우간 비교분석을 통하여 발생 강우자료의 적정성을 검증

(2) Fuzzy C-Means(FCM)를 이용한 도시유역 침수위험도 산정

○ 한국방재학회 논문집 - Vol.11(NO.4) 2011년 8월

○ FCM을 이용하여 여러 가지 인자들을 복합적으로 고려하여 하나의 정량화된 지표로 침수위험도를 산정

다. 국내외 학술발표

(1) 근접시공을 위한 지하저류공동 구조물의 지반보강공법 연구

○ 한국터널지하공간학회 학술발표회 - 2011년 4월

○ 복합지하공간 하부에 근접하여 지하저류공동 구조물이 시공될 때, 근접시공 시 필요한 사전보강에 이은 필라부 보강을 위한 가압그라우팅 및 프리스트레스를 가하는 공법을 제안, 공법 적용시 필라부 주변지반의 거동특성 변화에 대한 개념적 근거를 제시하여 제안된 공법의 타당성을 입증

(2) 연약대층 근접터널의 안정성 평가

○ 한국터널지하공간학회 학술발표회 - 2011년 4월

○ 연약대층이 지표면과 이루는 각도에 따라 신설터널의 거동에 미치는 영향을 검토하고, 연약대층과의 이격거리에 따른 신설터널의 거동양상을 검토하기 위하여 축소모형실험 수행

(3) 상습침수구역 내 하수관거의 통수능력 및 침수분석에 대한 연구

○ 한국물환경학회, 대한상하수도학회 공동 발표회 - 2011년 4월

○ 상습침수구역인 부산 센텀지구에 대하여 재현기간별 확률강우량을 산정하고 유출량을 산정하여 통수능 검토를 실시

(4) 도시지역 침수저감을 위한 수리 및 침수분석에 관한 연구

○ 수자원학회 학술발표회 - 2011년 5월

○ 최근 침수가 잦은 부산센텀지구를 대상으로 모형을 구축하여 기존배수체계의 배수능력을 초과하는 집중호우 발생 시 침수피해를 저감하기 위한 지하저류조의 용량산정

(5) 설계강우량에 대한 소유역에서의 돌발홍수특성 고찰

○ 수자원학회 학술발표회 - 2011년 5월

○ 미계측 소유역 중 시범유역을 선정하고 30년 이상 장기간 실측 강우의 기왕최대 시강우량 자료에 대하여 강우-유출모형을 통한 홍수유출수분곡선을 모의한 후, 빈도별 확률강우량에 대한 수문곡선 특성인자들의 비를 무차원 지수화하여 극한홍수사상에 대한 설계강우의 취약성을 평가하기 위한 홍수위험지수(Flood Hazard Index) 산정방법을 제시

마. 수치해석

○ 목적 : 지하공간 사전 빗물 침수영향 분석, 빗물 유출해석평가 적정성 검토

○ 임의 지하공간 가상 설정 후 침수시나리오를 수립하고, 1D-2D Interface 해석모형에 따른 수치시뮬레이션을 수행함으로써 침수비상시 최대침수심, 위치, 흐름속도, 도달시간 분석이 가능하므로, 홍수 비상시 대피체계, 침수방지대책에 활용 가능

2. 2차년도 연구 성과목표 대비 실적

가. 연구성과 목표 달성 실적

본 연구개발성과 관련 2차년도 단계에서 설정한 질적•양적 성과지표는 다음과 같음.

<표 4.1.2 연구성과 질적•양적 성과지표 - 2차년도>

성과목표	성과지표	측정방법	목표치	실적치
지하 저류공동 건설핵심 요소기술 개발	필라보강 신공법의 지보효과 규명	지보효과 규명의 적정성 (이론20%, 실내 실험40%, 수치 해석40%)	90%	완료
	개착부 굴착공법/시공단계별 상부 구조물 손상도 평가	실내실험 수행 횟수와 결과의 타당성 평가 (70%), 수치 해석적 타당성 증명(30%)	90%	완료
지하공간 침수 위험인자 분석 및 정성적•정량적 평가 기준 수립	신뢰도 있는 지하공간 침수위험도 평가 방안	전문가 설문 조사 응답횟수 (설문 10건 응답조사당 20%)	90%	100%
	지하공간내 유입수 동적거동 평가	수치해석 시 침수위험인자의 민감도분석 수행반영률 (1개 위험인자 적용당 20%)	90%	100%
지하 저류공동 시설 설치 및 연계 시나리오를 고려한 배수시스템 효과 분석	수리모형실험을 통한 지하공간내 유입수의 동적거동 평가	동적거동 평가 결과의 적정성 (침수위험인자를 반영한 수리모형실험 75%, 평가결과25%)	90%	완료
	기존 배수체계 연계 시나리오에 따른 설계 저류량 및 수리영향 인자 분석	분석결과의 적정성 (기존 배수체계 연계 시나리오의 적정성 70%, 기존 배수체계 연계방안 제시30%)	90%	완료
질 적 성 과 지 표 소 계				100%
지하 저류공동 건설핵심 요소기술 개발	학술회의 발표논문 건수	학술회의에 참가, 발표한 건수	2건	3건
	학술지 게재논문 건수	논문 게재 건수	2건	3건
	특허출원 건수	특허출원 건수	1건	1건
지하공간 침수 위험인자 분석 및 정성적•정량적 평가 기준 수립	학술회의 발표논문 건수	학술회의에 참가, 발표한 건수	1건	2건
지하 저류공동 시설 설치 및 연계 시나리오를 고려한 배수시스템 효과 분석	학술지 게재논문 건수	논문 게재 건수	3건	3건
	학술회의 발표논문 건수	학술회의에 참가, 발표한 건수	3건	4건
양 적 성 과 지 표 소 계				100%

나. 특허 출원

○ 출원일자 : 2012. 06. 29

○ 특허명 : 거더지보재와 가압패널을 이용한 필리 지지구조체

○ 출원인 및 출원번호 : (주)서영엔지니어링 / 10-2012-0071266

○ 출원국 : 대한민국(KR)

○ 개요 : 본 기술은 복수개의 공동 또는 터널이 병설되어 건설할 경우, 존재하는 공동 터널간의 필라부에 대한 보강구조체에 관한 것으로, 라이닝층의 구조, 거더지보재 등에 의해 연직방향 응력에 대한 지지성능을 향상시키고, 필라부 양방향으로 가압패널에 의한 프리스트레스 도입으로 원지반 필라부에 횡방향 응력에 가하여 구속압을 적용함으로써, 터널 또는 공동의 굴착에 따른 아칭 및 불안정한 굴착하중에 대하여 저항성을 효율적으로 배가시킬 수 있어 도시 하부 등 필라부가 좁게 형성될 수 밖에 없는 시공여건에서도 기존 지반을 그대로 이용하면서 안정된 필라부 구조체를 제공할 수 있는 시설에 관한 것임.

다. 국내외 학술지 논문

(1) 쏘일네일링과 앵커가 결합된 하이브리드 공법의 하중전이 메커니즘

○ 한국지반공학회 논문집, 제28권 1호, 2012년 1월

○ 필라부 보강공법에 적용되는 PC강연선과 철근을 현장에서 직접 실험을 실시하여 하중전이 메커니즘의 변화를 계측하였음. 또한 주면마찰이론과 하중전이 이론을 통해서 이를 검증하였음.

(2) 쏘일네일링의 세가지 파괴모드를 고려한 설계 최적화에 대한 연구

○ 한국지반공학회 논문집, 제28권 7호, 2012년 7월

○ 쏘일네일링 공법에서 파괴모드를 제시하고 프리스트레스에 따른 지반의 변위와 파괴하중간의 관계를 나타내었으며, 이는 필라부 보강공법의 프리스트레스에 따른 변위와 하중간의 관계를 나타내는데 이용됨.

(3) 축소모형실험을 이용한 연약대층 근접 터널의 거동

○ 한국터널지하공간학회 논문집 - Vol.14(NO.3) 2012년 5월

○ 연약대층을 인접하여 건설되는 터널의 굴착과정에서 발생하는 변위량과 균열발생

양상을 조사함으로써, 연약대층이 지표면과 이루는 각도 및 연약대층과 터널의 이격거리가 터널의 역학적 거동에 미치는 영향을 조사

(4) 유전자 알고리즘을 이용한 도심지하저류조 최적위치와 규모 선정

○ 한국방재학회 논문집 - 제12권 3호, 2012년 6월

○ 복합적인 지하저류조에 관한 최적 설계 모형을 개발하였으며, 개발된 모형은 지하저류조 설치를 위한 적정 위치, 설치 개수 및 규모에 대하여 최적해 도출

(5) 홍수방재능력 향상을 위한 채택 가능한 설계 극한강우량의 결정

○ 한국방재학회 논문집 - 제12권 3호, 2012년 6월

○ 관측강우자료로부터 확률강우량을 초과하여 발생한 강우사상을 극한강우로 정의하고, 극한강우들에 대한 확률밀도함수로부터 설계에 고려할 수 있는 극한강우의 누가발생확률을 나타내는 회귀식을 제시

(6) 수리모형실험을 통한 복합지하공간 침수방지대책 영향 평가

○ 한국방재학회 논문집 - 제12권 4호, 2012년 8월

○ 최근 침수가 잦은 부산센텀지구를 대상으로 모형을 구축하여 기존배수체계의 배수능력을 초과하는 집중호우 발생 시 침수피해를 저감하기 위한 지하저류조의 용량산정

라. 국내외 학술발표

(1) 도심지 지하공간 홍수재해 방지 기술 연구

○ 한국터널지하공간학회 정기학술발표회 - 2012년 4월 25일

○ 고도로 도시화된 도심지의 지하공간 홍수재해 방지 또는 저감대책 설정을 목적으로 도시하공간의 침수위험인자를 분석하여 AHP(analytical hierarchy process) 기반의 침수위험도 평가기법을 제시하였고, 가상의 도시하공간에 대한 1-2차원 연계 수치시뮬레이션 모델을 통하여 도시하공간내 유입수의 유동 및 침수거동을 모사함으로써 우수의 유출속도, 시간 및 침수심 등의 침수영향을 분석함. 또한 도시하공간 및 인근 유역의 효과적인 침수 방지와 경감을 위하여 적극적인 수방대책의 하나로써 지하저류공동의 설치를 전제로, 임의 유역을 설정하여 지하저류공동 설치에 따른

침수저감 영향을 분석함.

(2) Development for Risk Assessment Technology of Flood in Underground Spaces and Its Practical Application

○ World Tunnel Congress (WTC) 2012 - 2012년 5월

○ 우기시 임의 유역내 집중호우에 의한 복합지하공간에 대하여 AHP기법 기반의 지하공간 침수위험에 대한 취약성과 위험성을 평가, 분석하고 위험도 기준을 새로이 제시하였음. 또한 실제 임의 지하철 역사를 가상 시범지역으로 선정하여 지하공간 내의 유입된 빗물의 1차원 및 2차원 연계 표면수 유출 동적거동해석을 통하여, 지하철 역사내 빗물유입 시간과 시간에 따른 침수위 등을 검토, 분석하여 시에 침수재해 대피 체계의 기본적 자료를 제시함.

(3) 근접시공을 위한 락필라 보강공법의 거동특성 연구: 수치해석

○ 한국터널지하공간학회 정기학술발표회 - 2012년 4월 25일

○ 필라부 보강공법 중 전방향 가압 그라우팅과 삼방향 가압그라우팅을 실시하였을 경우, 숏크리트 지보에 비해 필라부 안정성에 얼마나 큰 안정성을 가져 오는 지를 수치해석을 통해 규명함.

(4) A Reinforcing Method for Underground Rainwater Detention Cavern Underneath Existing Structures

○ World Tunnel Congress (WTC) 2012 - 2012년 5월

○ 필라부 보강공법 중 전방향 가압 그라우팅과 삼방향 가압그라우팅을 실시하였을 경우, 숏크리트 지보에 비해 필라부 안정성에 대한 평가를 Mohr-Coulomb 파괴기준을 통해서 제시함.

(5) 벽체 변위 형상에 따른 인접구조물의 손상도 평가

○ 한국터널지하공간학회 정기학술발표회 - 2012년 4월 25일

○ 흙막이벽의 수평 변위량을 강제적인 입력 자료로 하는 강제변위법을 실험적으로 적용하여, 모형토조 내에서 구현함. 10단계의 모형 벽체를 구성함으로써 공법별 가시설에서의 벽체 변형을 적용하여 모형 지반의 침하를 발생시켜 트라프를 측정함. 수치해석상 가상의 구조물에 침하 트라프를 입력하여 구조물의 변형량과 손상도 평가를 수행

(6) 기후변화에 따른 한계강우량 분석에 대한 연구

○ 대한토목학회 학술대회 - 2011년 10월

○ 국내의 주요도시(1개 특별시, 6개 광역시)에 대하여 강우분석을 실시하여 확률강우량을 초과하는 사상에 대하여 분석하고 초과사상에 대한 확률강우를 재 산정

(7) 극대 호우사상의 발생 특성 분석

○ 한국방재학회 학술대회 - 2012년 02월

○ 최근 기후변화로 인하여 다양한 분야에서 나타나고 현상가운데 극한 강우에의 영향을 간접적으로 규명하고자 서울과 부산지역의 1961년부터 2010년까지 50년 동안 관측된 기상청 시강우량 자료를 이용하여 24시간 확률강우량을 산정하고, 산정된 빈도별 확률강우량을 초과하는 강우사상을 추출하여 발생 특성을 분석

(8) 지하저류지 설치에 따른 상습침수지역의 침수저감효과 분석

○ 한국방재학회 학술대회 - 2012년 02월

○ 최근 침수가 잦은 부산센텀지구를 대상으로 SWMM모형을 구축하여 기존배수체계의 배수능력을 초과하는 집중호우 발생시 침수피해를 저감하기 위한 지하저류조의 유무에 따른 침수저감효과를 분석

(9) 유전자 알고리즘을 이용한 도심지하저류지 최적위치와 규모 선정

○ 한국방재학회 학술대회 - 2012년 02월

○ 도시유역에서 지하저류지 사업의 진행시 중요하게 고려해야 할 설치 위치와 규모의 선정을 위해 가상유역에 적용하였으며, 각 위치와 규모의 결정에 따른 최적의 조합을 제안

3. 3차년도 연구성과 목표 대비 실적

가. 연구성과 목표 달성 실적

본 연구개발성과 관련 3차년도 단계에서 설정한 질적•양적 성과지표는 다음과 같음.

<표 4.1.3 연구성과 질적•양적 성과지표 - 3차년도>

성과목표	성과지표	측정방법	목표치	실적치
지하 저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인 개발	필라구조의 형상 및 구조에 따른 안정성 검증	실내실험 및 수치해석에 의한 안정성 검증의 적정성 - 실내실험 (50%) - 수치해석 (50%)	90%	완료
	선정된 저류공동 건설 기술의 타당성 분석	- 복합보강공법 개발기술의적정성 (70%) - 최적의 개착부 굴착공법 방안 제시 (30%)	90%	완료
지하공간의 침수위험도 평가기법 개발	지하공간 침수 위험도 평가가이드라인 완성도	침수위험도 평가가이드라인(안) 적정성 - 침수예상지도 작성가이드라인(안) (30%) - 위험도 평가기준(안) (40%) - 침수억제 및 저감체계(안) (30%)	90%	완료
지하 저류공동의 최적규모 설계기법에 따른 배수 시스템 개발	지하 저류공동의 설계 저류량 및 수리영향인자 평가기법 개발	- 우수배제시스템을 고려한 수리영향인자 분석 (50%) - 평가 기법 개발 및 방향 제시 (50%)	90%	완료
	기존 배수체계와 지하 저류공동의 연계 방안 평가	- 지하저류공동 설계절차 제시 (50%) - 지하저류공동 요소기술별 적용 방안제시 (50%)	90%	완료
질 적 성 과 지 표 소 계				100%
지하 저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인 개발	학술회의 발표논문 건수	학술회의에 참가, 발표한 건수	2건	3건
	학술지 게재논문 건수	논문 게재 건수	2건	2건
	SCI급 학술지 게재논문 건수	SCI급 논문 게재 건수	1건	1건
	특허 출원/등록 건수	특허 출원 및 등록 건수	1 / 1	1 / 1
	지침 및 매뉴얼	가이드라인, 매뉴얼 건수	2건	2건
지하공간의 침수위험도 평가기법 개발	학술회의 발표논문 건수	학술회의에 참가, 발표한 건수	1건	2건
	지침 및 매뉴얼	가이드라인, 매뉴얼 건수	1건	1건
지하 저류공동의 최적규모 설계기법에 따른 배수 시스템 개발	학술회의 발표논문 건수	학술회의에 참가, 발표한 건수	3건	3건
	학술지 게재논문 건수	논문 게재 건수	3건	3건
	지침 및 매뉴얼	가이드라인, 매뉴얼 건수	-	1건
양 적 성 과 지 표 소 계				100%

나. 특허출원, 등록

(1) 특허 등록 : 거더지보재와 가압패널을 이용한 필리 지지구조체 기술

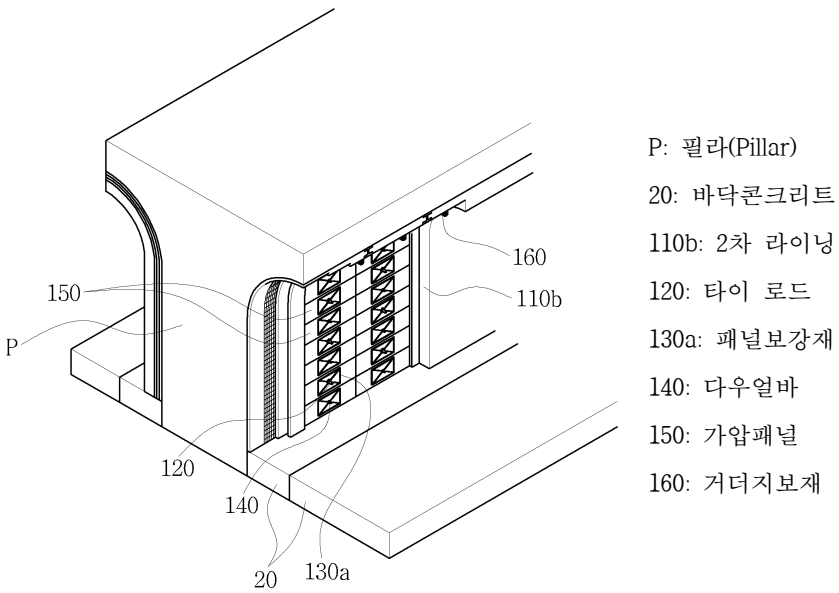
○ 등록일자 : 2013. 07. 09

○ 특허명 : 거더지보재와 가압패널을 이용한 필리 지지구조체

○ 특허권자인 및 등록번호 : (주)서영엔지니어링 / 10-1286306

○ 출원국 : 대한민국(KR)

○ 개요 : 본 기술은 복수개의 공동 또는 터널이 병설되어 건설할 경우, 존재하는 공동 터널간의 필라부에 대한 보강구조체에 관한 것으로, 라이닝층의 구조, 거더지보재 등에 의해 연직방향 응력에 대한 지지성능을 향상시키고, 필라부 양방향으로 가압패널에 의한 프리스트레스 도입으로 원지반 필라부에 횡방향 응력에 가하여 구속압을 적용함으로써, 터널 또는 공동의 굴착에 따른 아칭 및 불안정한 굴착하중에 대하여 저항성을 효율적으로 배가시킬 수 있어 도시 하부 등 필라부가 좁게 형성될 수 밖에 없는 시공여건에서도 기존 지반을 그대로 이용하면서 안정된 필라부 구조체를 제공할 수 있는 시설에 관한 것임.



<그림 4.1.1 필라 지지구조체 개요도>

(2) 출원 : 연직벽체 구조물 및 이의 시공방법 기술

○ 출원일자 : 2013. 01. 25

○ 특허명 : 연직벽체 구조물 및 이의 시공방법

○ 출원인 및 출원번호 : (주)서영엔지니어링 / 10-2013-0008687

○ 출원국 : 대한민국(KR)

○ 개요 : 수직구를 포함한 연직벽체 구조물 및 이의 시공방법에 관한 것으로, 연직벽체 구조물을 구성함에 있어 완충층을 구성하여 토체로부터 토압을 완화시켜 주면서 변위가 발생되도록 하여 연직벽체 구조물에 작용하는 수평하중을 완화시키고, 이에 더하여 필요시 완충층에 충진제를 충진하여 완충층에 변위가 발생된 상태에서 경화시킴으로써 장기적으로 연직벽체 구조물이 강성벽체로서 거동이 가능하도록 하여 구조적 안정성을 향상시킨 연직벽체 구조물 및 이의 시공방법에 관한 것임.

다. 국내외 학술지 논문

(1) 지하공간하부 지하저류공동에서의 필라 보강효과에 관한 수치해석적 연구

○ 한국터널지하공간학회 논문집, 제 14권 제 5호, 2012년 9월

○ 지하공간하부에 지하저류공동을 시공할 때 필라부의 응력집중과 측벽에서의 최소주응력 감소양상을 수치해석을 통해 측정하고, 필라부 보강 공법을 적용하였을 경우 보강효과를 제시함.

(2) Tunnel Reinforcement by Using Pressure-Induced Inflatable Pipes Method

○ Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 138, No. 12, ASCE, 2012. 12

○ 터널 굴착 전 사전 보강공법을 실시할 때, 삼방향 보강을 하였을 경우 그 효과를 이론 및 실험을 통해 검증하였음.

(3) Optimization of Soil Nailing Design Considering Three Failure Modes

○ KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 8, No.3 KSCE, 2014. 03 (게재 확정)

○ 터널 굴착 전 사전 보강공법을 실시할 때, 삼방향 보강을 하였을 경우 그 효과를 이론 및 실험을 통해 검증하였음.

(4) 굴착방법에 따른 구조물의 손상도 평가

○ 한국터널지하공간학회 논문집 - Vol.15(NO.2) 2013년 3월

○ 실내 모형실험을 통하여 여러 가지 형태의 지반 굴착방법에 따른 인접 지반의 지표

면 변위를 산정하고, 이를 수치해석에 적용하여 지표면 침하에 따른 구조물의 변형 양상을 연구함. 구조물 변형 형상 중에서 각 변위와 수평 변형율을 추출하여 최종적인 인접 구조물의 손상 정도를 평가

(5) 국지홍수 심도예측을 위한 새로운 홍수지수의 개발

○ 한국수자원학회 논문집 - 제46권 제1호

○ 새로운 홍수지수와 강우특성과의 회귀분석을 통한 최적관계식 제시

(6) SWMM-LID를 이용한 상습침수유역 내 유출저감효과 분석

○ 한국방재학회 논문집 - 제13권 4호 2013 8월

○ 도시유출해석모형인 SWMM 내 LID 모듈을 이용하여 대상유역내 적용 가능한 LID 기법 기술요소를 분석하여 적용하고 LID 기법에 따른 유출저감효과를 분석

(7) SWMM 매개변수 민감도를 고려한 도시지하저류조 최적위치 선정

○ 한국방재학회 논문집 - 제13권 4호 2013 8월

○ SWMM의 매개변수중 관거의 조도계수 및 맨홀의 손실계수에 따른 월류 발생 양상에 대한 민감도를 분석하였으며 지하저류조 설치 가능 개수를 변화시켜 가면서 각각의 경우에 따른 최적의 위치 선정 및 침수 저감효과를 분석

라. 국내외 학술발표

(1) Disaster Prevention Technology for Urban Flooding Using Rainwater Storage Cavern and Practical Application

○ International Symposium on Tunnelling and Underground Space Construction for Sustainable Development, TU-Seoul 2013, 2013년 3월 18일

○ 도시화된 도심지의 임의 유역내 집중호수 시에 발생하는 침수재해에 대하여 기존 우배수체계를 고려하여 분산식 개념에서의 별도 빗물저류공동을 설치했을 경우, 빗물유출 저감 효과를 해석을 통하여 검토하였고, 또한 임의 위치내 빗물저류공동 시설을 설치하였을 경우 지하공간내 침수저감 효과와 시간에 따른 침수위 변화를 실내축소모형 실험을 통하여 규명하였음. 또한 실내축소모형실험과 연계하여 TUFLOW 프로그램을 이용하여 지하공간 시설내에서의 1D-2D 연계 지표유출 해석

을 실시하여 시간에 따른 유입 빗물의 침수영향을 검토하였음.

(2) Reinforced-pillar system in multi-placed caverns for rainwater detention

○ World Tunnel Congress (WTC) 2013 - 2013년 5월 31일

○ AHP 기법 분석결과에 기초하여 복합지하공간의 침수취약성과 위험정도를 평가하였고, 실제적인 침수구역을 선정하여 빗물저류공동 시설물을 설치함으로써 유역침수 저감효과를 검토하였고, 도심지내 공간적인 입지 조건제한에 의하여 복수 개소의 병설공동 터널을 설치할 경우 병설공동 터널 간에 위치하는 필라부에 대하여 가압패널 및 타이앵터 등을 통한 횡방향 구속압을 도입하여 지하구조물 주요 지지구초체의 기능성을 수치해석적으로 검증하였음.

(3) A study of Pillar-reinforcing Technology Underneath Existing Structures: Laboratory Test

○ International Symposium on Tunnelling and Underground Space Construction for Sustainable Development, TU-Seoul 2013

○ 필라부 보강공법에 대해 숏크리트 지보와 비교하여 실내시험을 실시하였으며, 최대 주응력 감소효과와 최소 주응력 증가효과를 실험을 통해 검증하였음.

(4) 지하굴착 공법 변화에 따른 손상도 변화

○ 한국지반공학회 학술발표회 - 2013년 3월

○ 인접 구조물의 손상도 변화를 파악할 목적으로 실험 및 수치해석적 연구를 수행. 가시설 굴착과 더불어 터널 진입단계를 모사하고자 10단계의 벽체 변위와 더불어 트랩도어를 이용한 하방향 변위도 부여할 수 있는 모형실험 장치를 제작. 벽체와 트랩도어의 거동으로 인한 사질토의 지표침하량을 수치해석 지반의 침하량으로 적용하여 구조물의 변형량 및 손상도 평가 수행

(5) 수리모형실험을 통한 지하저류조의 설치에 따른 침수도달시간분석

○ 대한토목학회 학술발표회 - 2012년 10월

○ 지하공간의 침수 대책 마련을 위해 친환경적이라는 이점과 더불어 홍수제어에 효과적인 저류조를 설치함으로서 침수의 경향을 파악

(6) 저류조 설치에 따른 침수저감효과 분석

○ 대한토목학회 학술발표회 - 2012년 10월

○ 연구대상지역 내 SWMM모형을 구축하여 저류지 설치 전·후의 침수저감효과를 분석

(7) LID 기법별 유역내 유출저감 경향분석

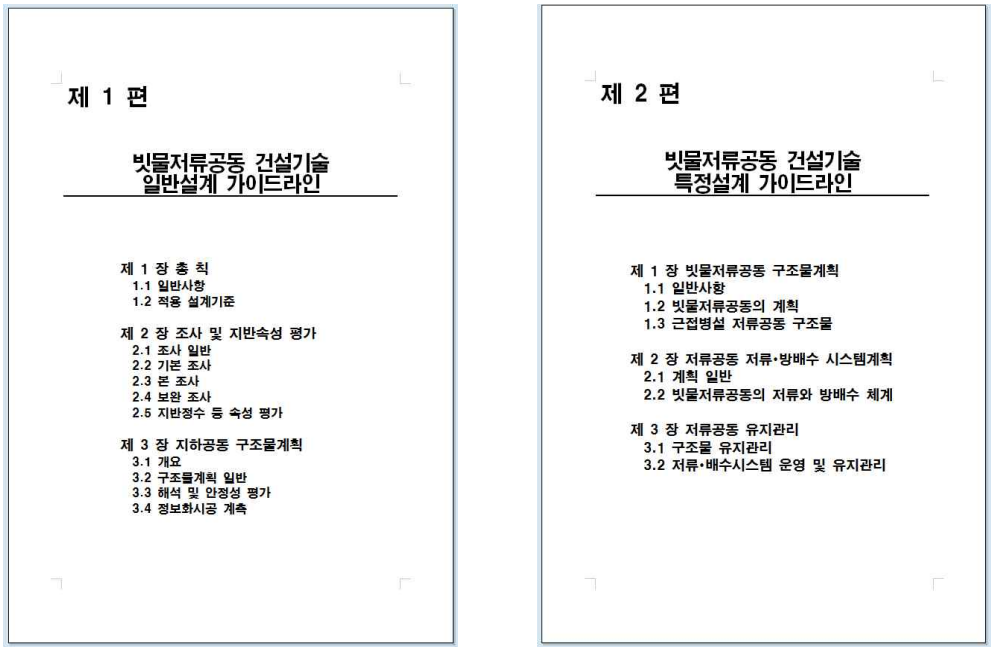
○ 한국방재학회 학술발표회 - 2013년 02월

○ 대상 도시유역을 선정하여 특성자료를 수집·분석후 수문모형인 SWMM을 통해 강우-유출 모의를 실시하였으며, LID기법에 따른 유출저감 경향을 분석하여 LID 기법를 실용화에 활용하기 위한 근거 제시

마. 가이드라인 및 매뉴얼

(1) 지하 저류공동의 건설을 위한 설계 가이드라인(안) 제시

○ 도심지 복합지하공간의 수해방지 목적의 빗물지하저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인(안)을 작성 제시하였음.



<그림 4.1.2 지하저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인(안)>

○ 빗물저류공동 건설기술 일반설계 가이드라인(안)

- 일반 가이드라인 상에는 도심지에서의 일반적인 중대규모 공동이나 터널 건설을 위한 일반적인 사항으로, 과거 20~30년간 도시철도 및 일반철도 공사, 고속도로 공사 사업추진에 따라 국내 터널건설기술은 양적·질적인 측면에서 세계 선진국 수준으로 매우 발전해 있으므로 이러한 기존 기술을 바탕으로 기술사항을 명시하였음.

해당 건설기술 명시내용은 다음과 같음.

- 저류공동 구조물 계획, 안정성 해석 등 일반 설계시공관련 사항
- 지하공간용지 소유권 및 지장물을 고려한 지하 저류공동 건설계획
- 지하저류공동 건설을 위한 기본적인 지반조사 및 분석, 설계 지반정수 설정 등 지반속성 평가
- 시공중 안정성 확인을 위한 Monitoring, 정보화 시공계획

○ 빗물저류공동 건설기술 특정설계 가이드라인(안)

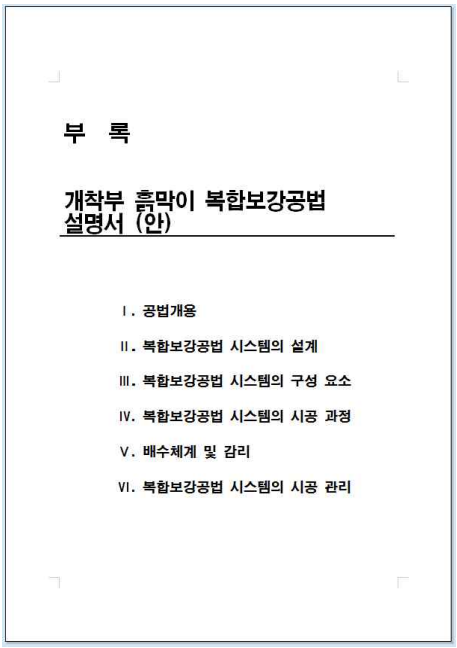
- 특정 가이드라인 상에는 일반 지하시설물의 건설사항 외의 도심지내 불가피하게 계획해야하는 복수개의 (초)근접병설 공동터널 구조물에서의 고려사항, 방배수 시스템 등 빗물저류공동의 특수성을 고려한 건설기술 사항을 명시하였음.
- 수문학적 최적설계기법 및 지하공간 침수위험도 평가기법을 고려한 시설물 위치, 규모 등 빗물저류 공동계획 고려사항
- 저류공동 저류, 배수펌프실, 수문 및 집수시설, 관로 및 펌프 등 건설분야, 기계전기 분야의 시설, 장비 사항 등 방배수 시스템 계획
- 저류공동내외 우수유출입에 따른 공기압, 수압 해소방안
- 빗물저류공동의 구조물 안정성과 저류배수 시스테의 운영·유지관리 사항

(2) 개착부 흙막이 복합보강공법 설명서(안)

①일반사항

○ 건설 기술의 발달과 사회적 요구에 의하여 기초 및 지하 공간 등 지하 구조물을 위한 대심도 굴착이 증가함. 이러한 대심도 굴착의 수요는 사회의 요구에 의하여 계속 증가할 것이라 예견됨. 이러한 미래의 대심도 굴착에 대한 수요는, 기존 굴착 보강 방법에 대한 개량, 또는 저비용이고 시공성, 생산성 증가를 필요로 함.

○ 본 설명서(안)에서 도심지 개착부에서 사용할 수 있는 새로운 개념의 흙막이 가시설 공법복합보강공법 시스템을 제시하였으며, 내용상 관련 공법 및 시스템의 기초적인 설계 또는 시공에 관한 기술사항과 항목을 명시하였음. 복합


부 록

개착부 흙막이 복합보강공법
설명서 (안)

Ⅰ. 공법개요
Ⅱ. 복합보강공법 시스템의 설계
Ⅲ. 복합보강공법 시스템의 구성 요소
Ⅳ. 복합보강공법 시스템의 시공 과정
Ⅴ. 배수체계 및 감리
Ⅵ. 복합보강공법 시스템의 시공 관리

<그림 4.1.3 개착부 흙막이 복합보강공법 설명서(안)>

보강공법 시스템의 일반적인 설명, 복합보강공법 시스템의 설계 및 현장 시공과 성능 검사에 관련된 사항 등이 포함되어 있으며, 본 설명서내 내용들은 기술논문, 설계사에서 제공한 보고서, 연구자료와 미국 FHWA 발간자료 등을 참조하였음.

○ 개착부 흙막이공법에서의 복합보강공법이란 현장 상황에 맞추어 시공중인 벽체 배면에 주동토압과, 필요시에는 수동토압을 복합적으로 적용할 수 있는 새로운 개념의 개착부 흙막이 보강공법으로 정의하여 제시함. 굴착면에 대한 유연한 지보체계의 제공 또는 사면의 안정 등을 목적으로 시공 현장의 변위와 토압에 맞추어 취약구간을 보완할 수 있으며, 굴착 보강법 중에 현장 여건에 적절한 지반 보강 시스템을 선택하여 현장 준비에 들어가는 시간과 비용을 절감할 수 있음.

○ 복합보강공법 시스템의 구성 요소로서는 완충층 및 배수 처리 체계로 이루어지며 간단한 장비를 이용하여 단순한 시공 과정을 거침. 복합보강공법 시스템은 현재 사용되는 많은 대심도 보강 시스템들에 대비, 단계별 시공시 배면 지반을 불교란 상태를 최대한 유지하면서, 지반의 변형을 적절히 허용 또는 조절하는 방식의 도입하였으며, 향후 공법에 대한 구조물 설계 적용과 시공이 구체화되고 활용가능성이 높은 공법으로 평가됨. 기술한 일부 설명서사항은 관련 공법 및 기술의 발전 단계상 본 설명서(안) 작성 단계에서 해당 기술의 현실적인 상황을 반영하지 못한 사항이 있음을 명시함. 그러므로 추후 본 공법에 관련하여 세부 항목에 대하여는 지속적인 기술적용 자료 수집과 수정 보완이 필요함.

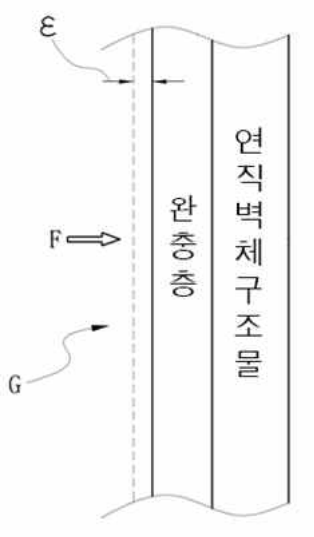
② 복합보강공법 시스템의 개요

○ 흙막이벽 및 수직구에 대한 안정작업의 선행 없이, 보강 없는 대심도 굴착은 매우 위험함. 그러므로 안전 보장을 위하여 적절한 수평 지반 보강재를 설치하는 것은 필수적임. 특히 인구밀도가 높은 지역에서 시공이 이루어지는 경우에는 매우 중요함.

○ 복합보강공법은 굴착에 의한 흙막이벽 및 수직구에 대한 안정성을 확보하기 위하여 인장응력, 전단응력 및 휨 모멘트에 저항할 수 있는 구조체를 안정성 취약구간에 삽입함으로서 과도한 토압을 억제시키는데 주목적이 있음. 굴착공사 도중 및 완료 후 안정성을 향상시키기 위한 현장 지반 보강 공법의 일종에 속함. 일반적인 복합보강공법 구조물 적용을 간략하게 요약하면 1단계 굴착 - 가시설 시공(흙막이벽, 세그먼트) - 복합보강재 시공 - 2단계 굴착과 같이 네 가지 단계로 나누어 질 수 있음.

○ 복합보강공법 시스템은 기본적으로 배치된 완충층과 연직벽체구조물로 이루어짐.

이들 경우에 대한 전형적 타입의 개념도는 다음 그림과 같음. 이 방법은 굴착 중에 변위 및 이완을 한계 변형 이내로 허용함으로써 가설 지반 보강이 이루어지는 시스템으로, 추가적으로 영구 지반보강 시스템에도 그 사용 목적이 있음. 전형적인 복합보강공법 적용의 예로서 직립, 사면 굴착 그리고 소단을 이용한 굴착 등이 있음.



<그림 4.1.4 복합보강시스템 개념도>

○ <표 4.1.4>에서는 지지체 공법중 Earth Anchor, Strut, 복합보강공법에 대한 간략한 비교를 제시함.

<표 4.1.4 지지체공법 특징 비교>

구분	어스앵커(Earth Anchor)공법	버팀대(Strut)공법	복합보강공법
시 공 개 요	· 벽체시공 (H-Pile 건입) · 단계별 굴착후 띠장(Wale)설치 · 어스앵커 시공을 위한 천공 (유압보링기,크롤러드릴), · 앵커체 삽입 · 1차, 2차 및 3차 그라우팅 주입 · 앵커체 인장, 시험, 정착	· 벽체시공 (H-Pile 건입) · 필요한 위치에 중간 말뚝 (Post Pile)시공 · 단계별 굴착후 띠장 설치 · 버팀대거치 · Jack으로 버팀대에 Pre-stress를 가함	· 단계별 굴착 · 굴착후 기 완충층 배면설치 · 흙막이벽(세그먼트) 시공 · 현장상황에 맞는 완충층 시공 가능 (점토팩, 뼈대구조, 슬라이드판, 스프링)
적 용 조 건	· 굴착면적이 넓을 때 · 양호한 앵커체 정착지반이 있고 피압 지하수가 없을때 · 현장 외부 용지에 여유가 있을때 또는 앵커체 영향 범위내의 용지 사용에 대한 승인을 득했을 때	· 굴착규모가 중규모 이하며 평면 형상이 사각형일때 · 주위지반이 연약할 경우에도 적용 가능. · 외부용지에 여유가 없을 때 · 복공의 구간이 대부분일때	· 현장 시공중 취약부 보강에 용이하며 옹벽, 기초 하부 보강, 흙막이 등 다양한 분야에 적용 가능
적 용 토 질	· 거의 전 지층 · 보통 조밀-매우조밀한 상태의 표층에 효과적 · 암반층	· 전지층 · 특히 연약한 점토 또는 느슨한 상태의 매립,퇴적 사질토 지반에 대해서는 특히 적용성이 좋은 공법임.	· 거의 전 지층
장 점	· 작업공간을 최대한 이용할수 있으므로 대형장비에 의한 시공 능률이 좋음. · 국부적인 파괴가 토류구조물의 전체파괴로 이어지지 않음. · Anchor에 Prestress를 주기 때문에 벽체의 변위와 지반 침하를 최소화 할 수 있음. .해체가 간단함. .평면의 형상이 복잡하고 지반이 경사져 있어도 시공 가능	· 벽체의 변형이나 파괴를 조기에 판별할 수 있음. · 시공후 보강이 용이함. · 굴착 면적이 좁으면 앵커 공법보다 저렴 할 수 있음. · 대부분의 자재를 재사용할 수 있어 자재의 소모가 적음. .굴착면적이 좁고 깊을 때 유리하며 연약한 지반도 시공 가능.	· 굴착후 즉각적인 완충층 설치로 원지반의 함수비 및 강도 유지 가능. · 작은 소음과 진동 유발. · 경량의 시공장비 이용. · 현장 여건 파악이 용이하며 적응성이 뛰어남. · 국부적인 파괴가 토류구조물의 전체파괴로 이어지지 않음. · 공기단축을 할수 있음.
단 점	· 이웃 대지까지 앵커체가 침범 할 경우 민원 발생소지가 있음 · 정착지반이 연약한 경우 적합치 않다. .천공시 지하수 유입 .인접구조물과 지하매설물 등에 제약 .배면보강이 어려움	· 넓은지역에서 사용이 곤란. · Strut의 국부적 파괴가 토류구조물 전체에 치명적이다. · 시공 편의상 제때에 버팀대 설치가 어려워 배면 변형을 초래함. · 버팀대를 균형되게 설치해야 하므로 굴착 공사에 어려움이 있음.	· 수평 변위가 상대적으로 클수 있으며 변위 제어 대책 필요. · 지하수위가 높거나 용수가 많을 경우 배수 대책을 강구해야 함.

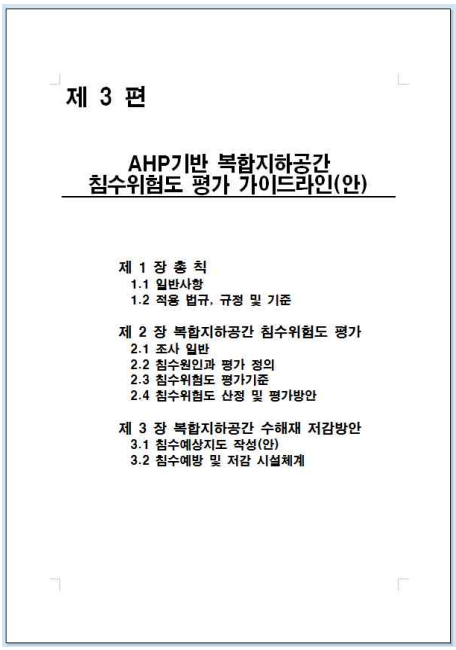
③ 복합보강공법 시스템의 시공 및 감독

○ 복합보강공법 시스템의 가장 기본적인 원리는 굴착이 진행됨에 따라서 현장 토체 배면에 완충층을 설치함으로써 토체를 구속 및 변형을 유도한다는 것임. 결과적으로, 굴착부에 인접한 보강 토체는 완충층의 변형에 따라서 반응함. 이 지반보강 기술의 시공은 실드 터널 시공에서 뒷채움 공법의 개념과 매우 유사하지만, 변위를 조절한다는 입장에 있어 차이점을 보임.

○ 실드 터널 공법은 뒷채움이 완료됨과 동시에 강성벽체로의 역할을 수행하게 되며, 구조물은 정지 및 수동토압의 상태를 유지하게 됨. 복합보강공법은 인공적인 변형이 가능한 4가지의 완충층 모델을 제시함으로써 구조물에 작용하는 토압을 경감시켜 구조물 설계에 이득을 취하고자 함. 주동토압의 상태로 토압을 유지하기 위해서는 완충층과 벽체 배면 사이의 토체의 변위를 지속적으로 측정, 측정된 변위가 허용변위에 대한 설계기준에 적합한지 확인하는 작업이 반드시 필요함. 복합보강공법 시스템의 건설은 재료의 관리와 현장 제반 조건의 고려 및 시방에 기술되어져 있는 시공 과정의 준수 등 제반 여건의 고려와 함께 고품질 시공이 이루어 질수 있음.

(3) 지하공간 침수위험도 평가기법 가이드라인(안)

○ 본 가이드라인(안)은 ‘복합지하공간 수해방지를 위한 지하저류공동 건설기술 개발’ 연구과제의 성과에 따라, 도심지 침수취약성이 큰 복합지하공간에 대한 침수위험도 평가 및 침수재해 저감, 기타 사항 등 평가기법에 대한 가이드라인(안)을 작성, 제시하였음.


제 3 편

AHP기반 복합지하공간
침수위험도 평가 가이드라인(안)

제 1 장 총 칙
1.1 일반사항
1.2 적용 법규, 규정 및 기준

제 2 장 복합지하공간 침수위험도 평가
2.1 조사 일반
2.2 침수원인과 평가 정의
2.3 침수위험도 평가기준
2.4 침수위험도 산정 및 평가방안

제 3 장 복합지하공간 수해재 저감방안
3.1 침수예상지도 작성(안)
3.2 침수예방 및 저감 시설체계

<그림 4.1.5 지하공간 침수위험도 평가기법 가이드라인(안)>

○ 가이드라인(안) 목적대상 시설

도심지 집중호우에 의한 저지대로의 유출과 유역 침수양상에 따라 지표 아래에 위치하고 있는 지하공간시설로 유입될 수 있는 가능성이 있음. 여러 가지 목적별로 건설 또는 계획된 도심지 지하공간 시설 중, 도심지 생활공간으로써 시민의 체류시간이 길어지고 있는 반면에, 폐쇄된 구조의 지하공간은 침수재해 시 인적, 물적(재산) 피해가 상대적으로 클 것으로 예상되므로 폐쇄형 복

합지하공간 시설물을 원칙적 적용대상으로 함.

○ 가이드라인(안) 구성

- 가이드라인(안) 구성은 도심지내 임의 유역의 홍수 발생시 복합지하공간의 침수취약성에 대하여 침수원인과 침수위험인자에 대한 사항을 언급하였고, AHP 기법 기반의 침수위험도 평가 기법 및 기준을 제시하고 관련 침수위험인자 평가에 대한 종합적인 침수위험도 등급과 조사 평가방법을 제시함.
- 침수위험도 평가기법(안)에 근거하여 복합지하공간에서의 침수예상분석과 침수예상지도 작성방안을 제시하였고, 이에 대한 침수예방 및 저감시설, 기타 피난체계 등 비구조적 수방사항에 대하여 명시하였음.

○ AHP기반 복합지하공간 침수위험도 평가 가이드라인(안) 제시

- 복합지하공간 시범위치 침수위험도 평가 결과, 검증에 기초한 침수원인과 침수위험인자 분류
- AHP기법 기반 현장조건에 따른 침수 위험인자선정과 침수위험도 평가기준 및 평가방안

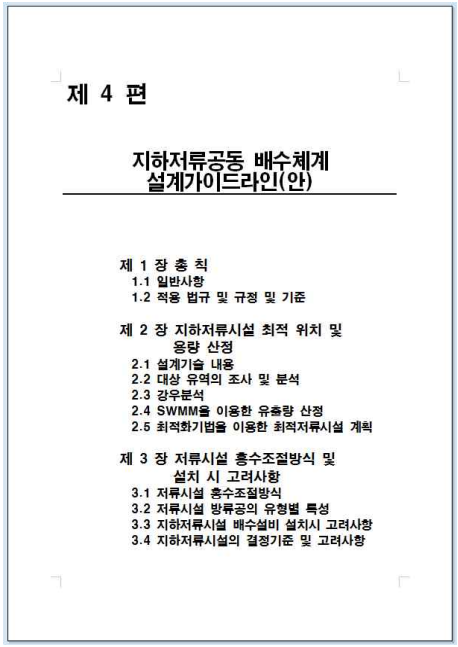
○ 복합지하공간 침수 재해 저감 및 방•배수 처리 방안(안)

- 복합지하공간 1D-2D연계 빗물유출 동적거동분석에 기초한 침수예상분석과 침수예상지도 작성방번(안) 설정
- AHP기법 기반 침수위험도 기법을 고려한 빗물유입수 침수억제, 침수위 저감시설 및 장치, 기타 비구조적 방안 제시
- 지중구조물내로의 우수, 지하수 침투유입수의 방배수 체계, 시설물연결부의 누수취약성, 지반조건 및 지하수 침투특성에 따른 침투유입 방지 처리 방안
- 복합지하공간의 수재해 방지를 위한 적극적인 구조적 수방체계인 빗물저류공동을 계획하였을 경우의 유입수 유도•배수 체계, 운영 및 유지관리에 대한 사항

(4) 지하 저류공동 배수체계 가이드라인(안)

○ 본 가이드라인는 지하저류지 최적위치 및 용량산정 방법 및 적용을 위한 것으로, 대상유역의 조사 및 분석, 대상지역의 강우분석, GA(Genetic Algorism)을 이용한 최적 저류지 선정과 지하저류지 최적위치 및 용량 산정방법의 적용으로 구성하였음.

○ 본 가이드라인를 통하여 지하저류공동 설계시 지하저류지의 최적위치 및 용량을 선정 및 산정할 수 있을 것으로 기대됨.


제 4 편

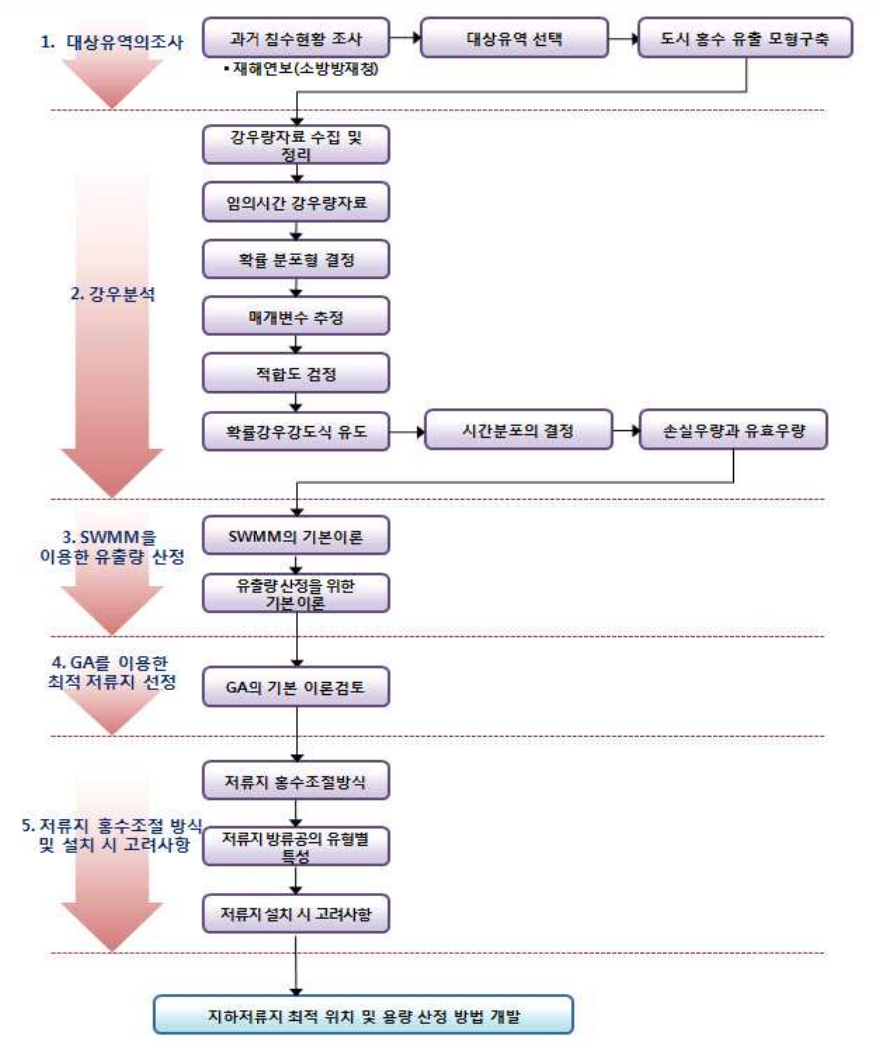
지하저류공동 배수체계
설계가이드라인(안)

제 1 장 총 칙
1.1 일반사항
1.2 적용 법규 및 규정 및 기준

제 2 장 지하저류시설 최적 위치 및 용량 산정
2.1 설계기술 내용
2.2 대상 유역의 조사 및 분석
2.3 강우분석
2.4 SWMM을 이용한 유출량 산정
2.5 최적화기법을 이용한 최적저류시설 계획

제 3 장 저류시설 홍수조절방식 및 설치 시 고려사항
3.1 저류시설 홍수조절방식
3.2 저류시설 방류공의 유형별 특성
3.3 지하저류시설 배수설비 설치시 고려사항
3.4 지하저류시설의 결정기준 및 고려사항

<그림 4.1.6 지하 저류공동 배수체계 가이드라인(안)>



<그림 4.1.7 지하저류지 최적 위치 및 용량 산정 방법 개발 절차>

제 2 절 연구개발 수행진도율 및 목표의 달성도 [3차년도]

구분	과제명 (연구기관)	연구목표	연구목표별 Activity	성과물 (산출물)	1/4			2/4			3/4			4/4			진도율 (%)	달성도 (%)
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1세부	지하 저류공동 건설기술 개발																1세부	1세부
주관	서영 엔지니어링	지하 저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인 개발	지하 저류공동 건설을 위한 설계 가이드라인 수립, 작성	-최종 보고서 -가이드 라인 (안)													100	100
위탁	고려 대학교		필라 지보시스템 검증														100	100
위탁	건국 대학교		구조물 손상도 평가를 통한 개착부 굴착공법 선정 및 보강공법 기술개발														100	100
2세부	지하공간 침수위험도 평가기법 개발																2세부	2세부
주관	서영 엔지니어링	지하공간의 침수위험도 평가기법 개발	지하공간 침수위험도 평가기법의 검증 및 가이드라인 수립, 작성	-최종 보고서 -가이드 라인 (안)													100	100
주관			지하공간 침수억제 및 유입수 유도처리 방안수립														100	100
주관			지표/지하 유입수 방•배수 유도처리 방안 작성														100	100
3세부	지하 저류공동 배수시스템 개발																3세부	3세부
공동	동서 대학교	지하 저류공동의 최적규모 설계기법에 따른 배수시스템 개발	침수저감 효과를 고려한 목적함수 도출	-최종 보고서 -가이드 라인 (안)													100	100
공동			지하 저류공동의 최적규모 설계기법														100	100
공동			지하 저류공동 최적규모 설계기법에 따른 침수저감효과 평가														100	100
공동			지하 저류공동 최적규모 설계기법에 따른 배수체계 연계방안 평가														100	100
공동			지하 저류공동 배수체계 설계가이드라인 제시														100	100

제 3 절 관련 분야에의 기여도

1. 기술적 측면

도심지의 사회기반시설 건설로 인한 굴착공사의 증가는 인접한 구조물의 변형 및 손상의 주요 요인이 되고 있음. 이는 기술 발달로 도심지 건축물이 대형화, 고층화, 지하화되는 현상과 맞물려 나타날 수 있는 많은 민원문제와 심각한 안정성 문제 등을 고려할 때, 지반 개착 및 굴착으로 인한 구조물 손상의 사전 예측과 이에 상응하는 최적의 보강공법 제시는 매우 중요함.

복합 지하공간의 수재해의 위험성을 정성적/정량적으로 평가하여 체계적인 지하공간 수재해 대응 방재 계획 및 비상시 대응 체계 구축이 가능함.

지하 저류공동 시설의 적용을 위한 표준화된 기법을 제시하고, 효과적인 도시침수 저감 시설로서의 지하 저류공동에 관한 이론적 배경을 바탕으로 모형의 구축 및 모의를 통한 근거의 마련과 기술적 완성도를 함양시켜 관련 기술 발전에 기여함.

기존 지하 저류시설의 규모산정을 위한 핵심요소인 설계강우 및 유출량 계산, 저류지의 규모 및 형식에 관한 기술, 저류지에 의한 수위계산 기술에 대한 국내 적용의 문제점을 분석하여 국내 도시유역에 적합한 종합적인 설계기법을 도출하고 현업화가 가능함.

2. 경제 · 산업적 측면

2000년대 들어 연평균 약 2.6조 규모의 기상재해가 발생하고 있으며, 기후변화에 의해 2080년에는 현재의 3배까지 피해규모가 커질 것으로 예측됨. 전체 자연재해의 약 90%가 태풍 및 집중호우에 의한 수재해이므로 수재해가 국가 경제에 큰 손실을 미치는 것을 알 수 있음. 특히, 도시지역의 피해가 전체의 90%를 차지(심우배, 2006)하고 있음을 감안할 때, 도시지역에 지하 저류공동을 설치하여 수재해에 따른 경제적인 손실을 크게 절감할 수 있음.

지하공간은 당면한 도시문제를 해결할 수 있는 효과적인 방안이지만, 화재, 수해 등의 재난에 취약한 문제점과 생활공간으로써 부적합한 환경적 측면 때문에 개발에 걸림돌이 되고 있음. 본 연구를 통해서 지하공간의 수재해에 대한 안정성을 확보방안을 마련함으로써 지하공간 개발이 활성화 될 수 있음.

신규 연구성과의 실용화를 위하여 기존 연구와의 이식성을 높이고, 현업화 과정에서 발생할 수 있는 문제점을 사전에 방지하여, 연구성과의 실용화 기간을 단축함으로써 경제적 절감효과가 기대됨.

도심지 침수 예방 및 복구 대책기술로 활용이 가능하므로 피해 복구비 절감에 기여할 수 있으며, 도심 침수로 인한 교통 및 사회 전반의 원활한 기능 소통에 기여할 것으로 판단됨.

도심 토지이용상황을 적절히 반영할 수 있고, 지하공간의 효과적인 사용에 따른 합리적이고 효율적인 수방대책 수립을 통한 사회 간접비용의 절감효과가 나타날 수 있을 것으로 기대됨.

지하 저류공동의 수문학적·수리학적 용량 산정 및 효과분석기법 개발을 통해 대외 의존도를 획기적으로 탈피하고 홍수피해가 빈번한 동아시아 저개발 국가에 기술 수출이 가능할 것으로 판단됨.

지하 저류시설, 특히 지하공간에 붕괴가 발생하면 복구에 소요되는 재원이 막대하므로 지하의 공간활용이 갖는 매력 못지않게 안정하고 확실한 기술개발과 보급이 요망됨. 따라서 이에 적합한 신기술 개발은 경제•산업적 발전에도 매우 크게 기여하게 될 것임.

국내 지하공동의 필라(Pillar) 보강 기술은 주로 콘크리트 중앙벽체를 통해 지보하는 것에 국한되어 연구가 이루어지고 있으나, 원지반을 이용한 필라(Pillar) 신공법 개발은 국내의 지하공간 건설기술에 활력을 불어넣고 기술의 축적과 장비의 현대화를 가능케 함으로써 외국 의존성 기술분야(막대한 기술비용 지출)를 타파하고 국내기술수출을 통한 외화획득도 증진시키는 효과를 가져오게 할 것임.

기후변화 영향으로 인해 홍수에 대한 취약성이 증가하는 추세에 있으므로 자연재해에

대한 방재산업의 육성은 국가적인 재해대응 역량 강화뿐만 아니라 해외 시장을 통한 고부가가치를 창출할 수 있는 산업이 될 수 있을 것으로 판단됨.

3. 사회·문화적 측면

2010년 9월 서울의 집중호우로 인해 약 1만여 명의 이재민과 1만여 개소의 건물이 침수되는 등 큰 피해가 발생하였음. 지하 저류공동을 건설을 통해 수재해에 안전한 환경을 구축하면 이와 같은 피해를 크게 저감할 수 있으므로 본 연구개발은 국민의 안전과 재산을 보호하는데 크게 이바지 할 수 있음.

본 연구개발을 통해, 복합지하공간의 활용성, 사용성, 안정성을 제고함으로써 도시지역의 지상공간의 과밀현상을 해소하고 도시환경을 개선하여 쾌적한 도시환경 구축에 이바지 할 수 있음.

도시 지역의 국지성 호우로부터 유발되는 홍수는 인명피해와 직결되어 있으므로 강우유출모형을 이용한 침수분석을 통해 도시홍수를 사전에 대비함으로써 인명피해 감소 및 국민 신뢰 확보가 가능함.

최근 들어 기후변화로 인한 이상홍수와 같은 물 관련 재해의 발생빈도 증가에 대한 우려가 사회전반에 인식되어 있는 상황으로 현재의 시점에서 새로운 여건에 합리적으로 대처하고 사회적 합의를 도출할 수 있는 지하 저류공동시설 설계 기반을 마련함.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구성과의 활용방안

1. 활용 분야

세계적으로 녹색성장이 대두되고 있으며 우리정부도 이에 발맞추어 녹색기술과 청정에너지로 신성장동력과 일자리를 창출하는 신국가발전 정책으로 3대전략, 10대 정책과제를 선정하였음. '지하 저류공동의 지보 및 안정성 확보를 위한 핵심 요소기술 개발'연구는 이중 집중호우로 인한 도심지 지하공간의 피해를 예방한다는 점에서 '기후변화 적응 및 에너지 자립 - 기후변화 적응역량강화' 정책에 부합하고, 저류된 물을 적극 활용한다는 측면에서 '신성장 동력 창출 - 녹색기술개발 및 성장동력화' 정책과 흐름을 같이함.

○ 기술적 성과 - 안전성 제고, 실용화 계획

- 지하공간 침수위험도 평가기법과 저류공동 우배수 설계최적화 기법은 기후변화 자연재해 대응 기술로 사회공공적 재해안전성을 높이는 데 활용
- 기술개발 성과 중 필라지지구조체 공법은 개발 기술실시계약 등에 의한 실용화, 사업화를 추진할 계획이며, 본 과제의 종료 후 근접터널부나 필라부 보강구간에 대하여 실제 설계 및 시공 구축에 활용할 수 있도록 기술홍보와 설계반영 및 시범적용 방안, 건설신기술 등록 추진 등의 실용화를 위한 계획을 수립할 예정임.
- 복합구조물이 밀집되어 있는 도심지의 협소한 시공공간에서 필러(Pillar)부 보강 신공법 개발은 다양한 지하구조물의 창출에 기여할 수 있을 것으로 기대됨. 그러므로, 수방재용 목적외에 지하철 등 도로교통인프라와 연계된 지하쇼핑몰, 지하 문화체유시설 등 도시하공간 복합입체 지하공간 컴플렉스(Complex) 건설 시에 필라지지구조체 기술은 미래 도시지하공간 개발분야에 매우 유용하게 활용될 수 있음.

○ 학술적 성과 - 진보성 제고

- 필라지지구조체는 도시하 공간에 설치되는 구조물로써 도심지 지장물 등에 의한 지중의 공간적 제한성을 극복하고, 근접터널 시공 시에 지하공간 필라부에서 건설공종이 단순하여 안전하면서 시공용이성을 얻을 수 있는 신개념의 지하공간 주요 지보 체계로 활용이 가능하여 지하공간개발분야 활성화에 기여할 것으로 예상됨

○ 경제적 성과 - 공사비 10% 절감

■ 개발된 필라지지구조체 기술 성과를 실제 근접 또는 초근접 병설터널 건설 시에 적용할 경우, 2Arch터널 공법 대비 해당 구간 선진터널굴착 및 중앙부 콘크리트 설치 공종을 줄여 단순화할 수 있으므로 공기, 공사비 고려시 10%이상 절감 가능예상

○ 공공적 성과 - 사회안전성 제고

■ 국내 지형 및 도시지역 특성을 고려한 배수 이론 체계의 구축과 도시 우수 배수 시설의 설계 기술에 기반한 지하 저류공동 최적 설계 기술을 확보하여 방재 대책 수립에 기여할 수 있음. 또한 논문, 세미나 발표 및 언론기고 등을 통하여 지하 저류공동의 필요성을 환기시키고 관련 정부부처에 본 연구개발의 성과를 홍보하여 지하 저류공동을 정책적인 도시지역 수방재 대책(안)의 기본자료로 반영함.

2. 기대효과

도시지역의 내수 침수 예방을 위한 지하 저류공동 설계기술의 개발을 통하여 도심지 침수 예방 및 복구 대책기술로 활용이 가능하며, 침수피해에 대한 복구비 절감에 기여할 것으로 판단됨.

○ 지하저류공동 건설기술 개발

■ 국내 도시홍수에 대하여 적극적이고 가장 효과적인 수재해 대응 또는 예방 기술로써, 도시화에 따른 중대형 복합지하공간 시설에 대하여 빗물 지하저류공동 시스템은 도시홍수 침수재해위험 대비, 체계적인 지하공간 수재해대응 방재계획 구축에 필요한 기본 자료를 제시함으로서 보다 안전하고 선진적인 도심 수방 방재대책 수립에 기여

■ 현재 국내외 필라(Pillar)보강 기술은 콘크리트 구조물을 벽체 또는 기둥으로 사용하는 것이 대부분이나, 본 연구에서 원지반을 보강한 신공법의 개발을 통해서 지하 저류공동 시공 시에 굴착공정 및 시공단계가 줄어들어 기술적 경쟁력 향상뿐만 아니라 핵심기술의 수출을 통해서 국내 시공기술의 우수성을 인정받을 수 있을 것으로 기대됨

○ 지하공간 침수위험도 평가 및 최적규모 설계기법에 따른 지하저류공동 배수시스템

- 도시홍수 수재해 대응, 예방 기술로써 중대형 복합지하공간 시설에 대하여 침수재해 위험 대비, 사전 침수위험도의 평가, 체계적인 지하공간 수재해대응 방재, 비상시 대피체계 구축에 필요한 기초자료를 제시
- 국내 지형 및 도시지역 특성을 고려한 배수 이론 체계의 구축과 도시 우수 배수 시설의 설계 기술에 기반한 지하 저류공동 최적 설계 기술의 확보를 통하여 도시수방재 대책 수립과 방재시설물 설계 기준의 기초자료로 활용

3. 타 산업 및 국내외 연계, 협력 가능성

현재 국내외 필라(Pillar)보강 기술은 콘크리트 구조물을 벽체 또는 기둥으로 사용하는 것이 대부분이나, 본 연구에서 원지반 보강 및 지하공간지지 구조체화한 신공법의 개발을 통해서 지하 저류공동 건설 시에 공정과 시공단계가 현저히 줄어들어 국내 기술적 경쟁력 향상시킬 수 있을 것으로 기대됨.

지하 저류공동의 설계 기법의 개발은 도시 우수배제 시설의 계획 및 설계에 적용할 수 있으므로 설계 및 시공사 또는 각 지자체 실무자들이 직접적으로 사용하고 적용하기 위해서는 실무자 및 전문가 자문을 통한 연구결과의 논의가 필요함.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 장에서는 본 연구진이 연구개발과정에서 수집한 해외자료를 시공사례를 중심으로 요약하여 수록함.

제 1 절 대형빗물저장터널 및 지하저류공동 사례 조사

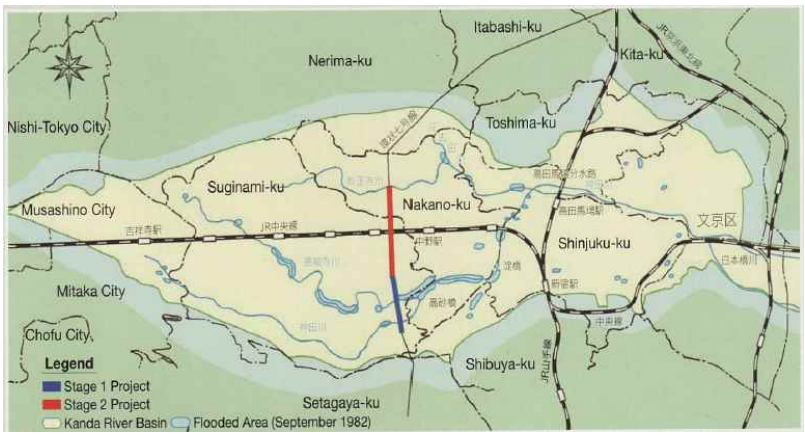
1. 일본 칸다가와 지하조절지

가. 개요

○ 위치 : 일본 동경

○ 저류용량 및 규격

- 직경 및 연장 : 최대 12.5m / 4.5km
- 저장능력 : 540,000m^3
- 심도 : 지표 약 40m하부



<그림 6.1.1 일본 칸다가와 지하조절지 위치도>

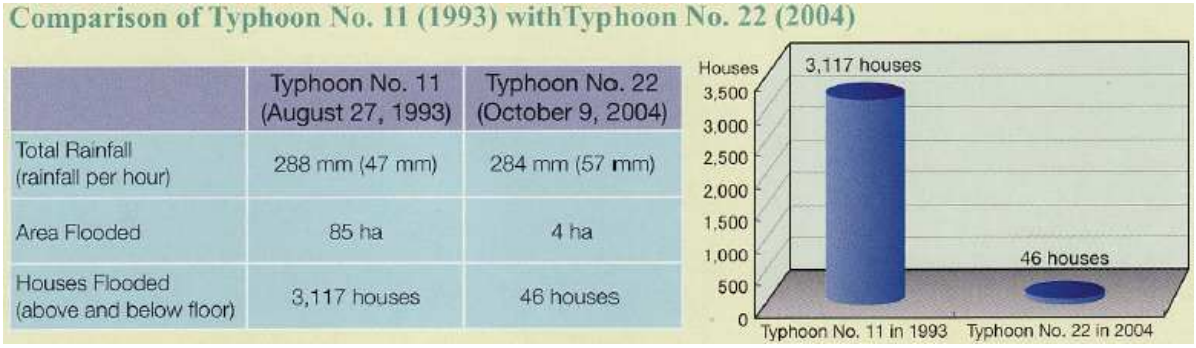
나. 특징

○ 총 2단계로 구분하여 지하조절지 완공

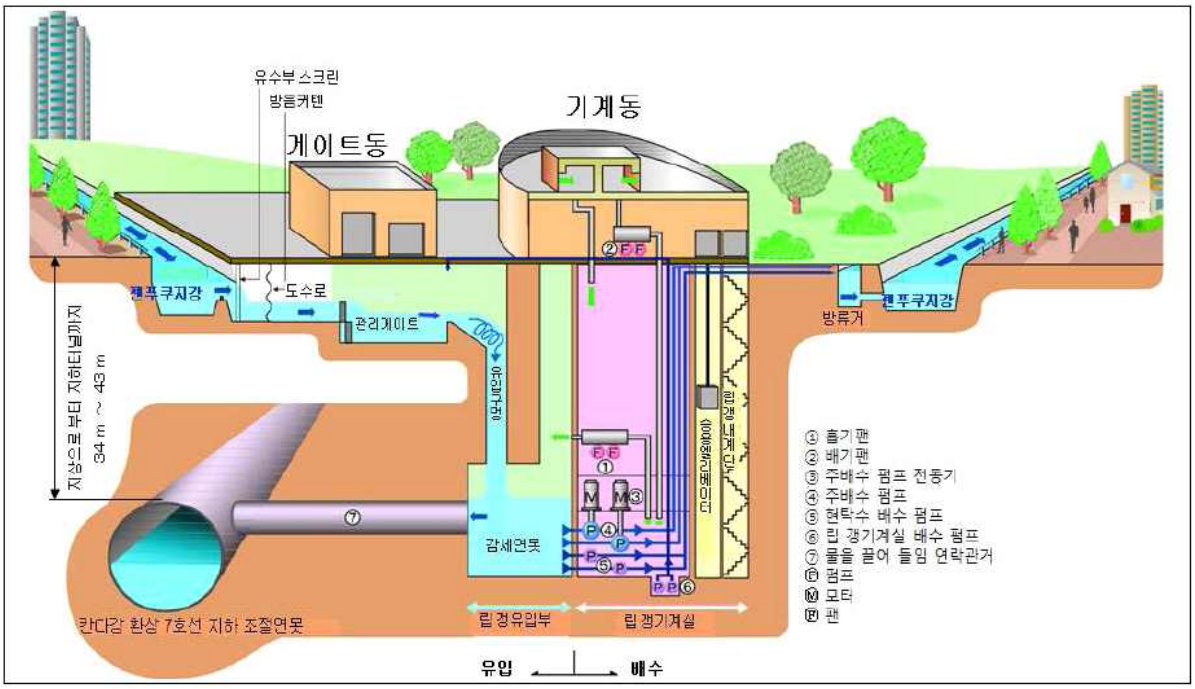
- 1단계 : 2km길이로 240,000m^3 용량으로 건설 (1988~1998 완공)
- 2단계 : 2.5km길이로 300,000m^3 용량으로 건설 (1995~2005.9 완공)
- 지하조절지 시공시 굴착공법 : Shield TBM 적용

○ 지하조절지 운용 효과

- 1997년 취수개시 이후 23회에 걸친 홍수발생시 지하조절지 운용으로 하류지역의 침수피해 감소



<그림 6.1.2 칸다가와 지하조절지 운용 효과>



<그림 6.1.3 일본 칸다가와 지하조절지 구조도>



<평상시> <홍수시(좌측 유입구로 유입)>

<그림 6.1.4 지하조절지 구조도(상) 및 평상시 및 홍수시 지하조절지 운용 전경(하)>

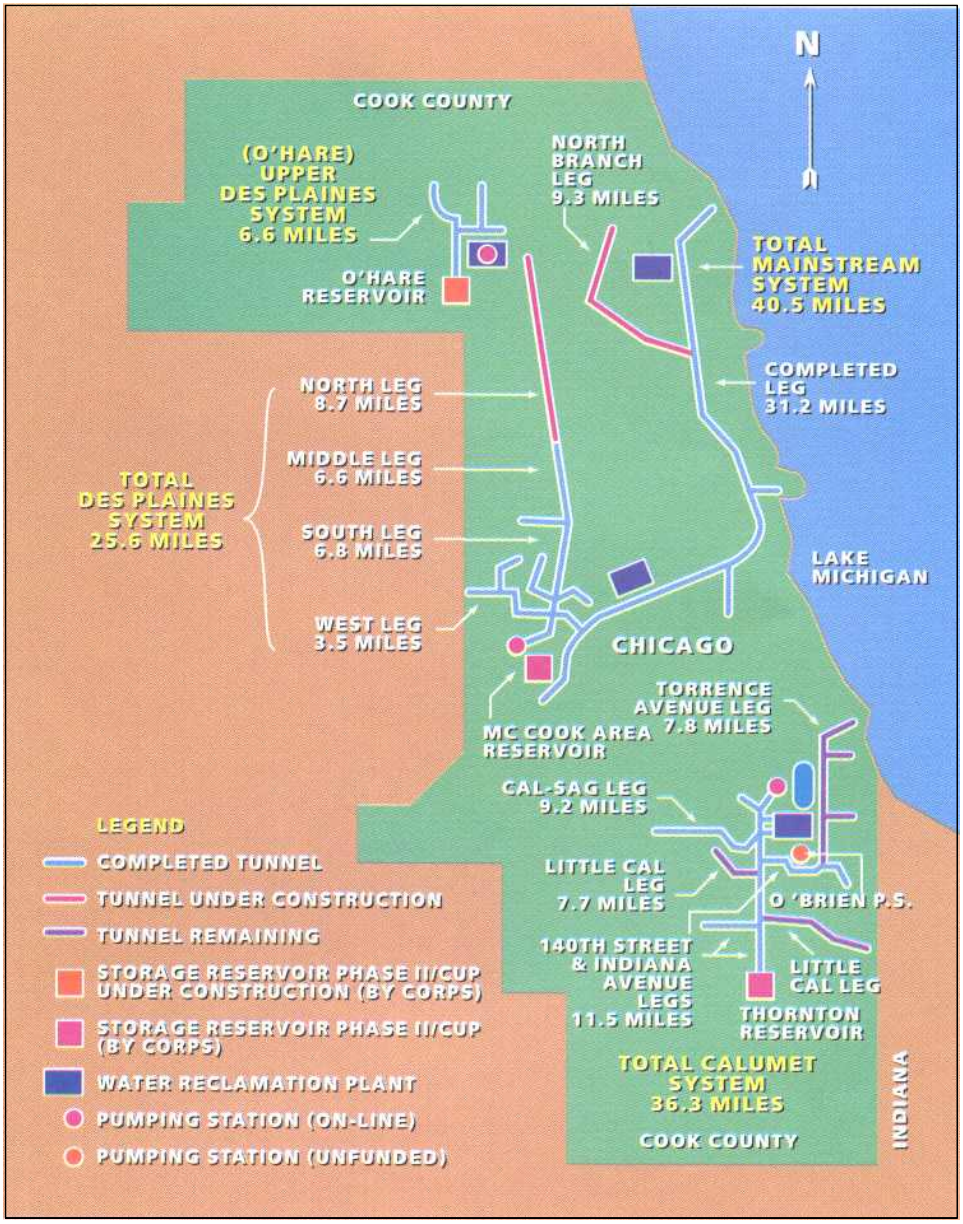
2. 미국 시카고 TARP(Tunnel And Reservoir Plan)

가. 개요

○ 위치 : 미국 시카고의 일리노이주(Lake Michigan 연안)

○ 저류용량 및 규격 : 3개소 저류지(완공시 처리용량 : 6.905×10^9L)

○ 빗물저장터널(하수터널) : 총 4개의 터널로 구분지어지며 총 연장 176.1km



<그림 6.1.5 TARP 시스템 계획도>

나. 특징

(1) Phase Ⅰ(오염통제시설)

합류식 관거에 유입하는 하수를 차집. 낙하갱, 터널 및 펌프장으로 구성

○ 빗물저장(배수) 터널

- 터널 전체 연장 : 176.1km[Mainstream System(65.2km), Des Plaines System (41.2km), Calumet System(59.1km), O'Hare, Upper Des Plaines System(10.6km)]
- 터널 직경 및 심도 : 2.4m ~ 10.8m / 47.7m ~ 109.7m
- 총 970㎢의 지역으로부터 유출되는 우수 및 오수를 처리장까지 운송

○ 펌프

- 6대의 펌프로 구성(총 용량 2.7×106㎥/day의 펌프 4대, 1.2×106㎥/day의 펌프 2대)

○ 유입시설(Drop Shaft) : 240개소

(2) Phase II(홍수범람 통제시설)

Chicago Underflow Plan(CUP)

○ 3개소 저류지(완공시 처리용량 : 6.905×10^9L)

- O'Hare reservoir(1.29×109L) - 완공
- Thornton reservoir(29.9×10^6L) - 2012년 완공예정
- Mc Cook reservoir(38×10^6L) - 2015년 완공예정

(3) 터널시공방법

○ 터널공법 : TBM

- Machine Type : Main Beam TBM(Robbins Company), 장비 직경 : 2.4 ~ 10.8m
- 이판암 및 연약층 지역은 터널 굴착 후 콘크리트 라이닝 경화시까지 갱내 강재보강제 설치
- 면마무리 작업 후 두께 12in 콘크리트 층을 한 번에 타설 : 콘크리트 치기 - 면정리 - 거푸집 전진(다음 콘크리트 치기 작업 준비) 24시간 연속 수행



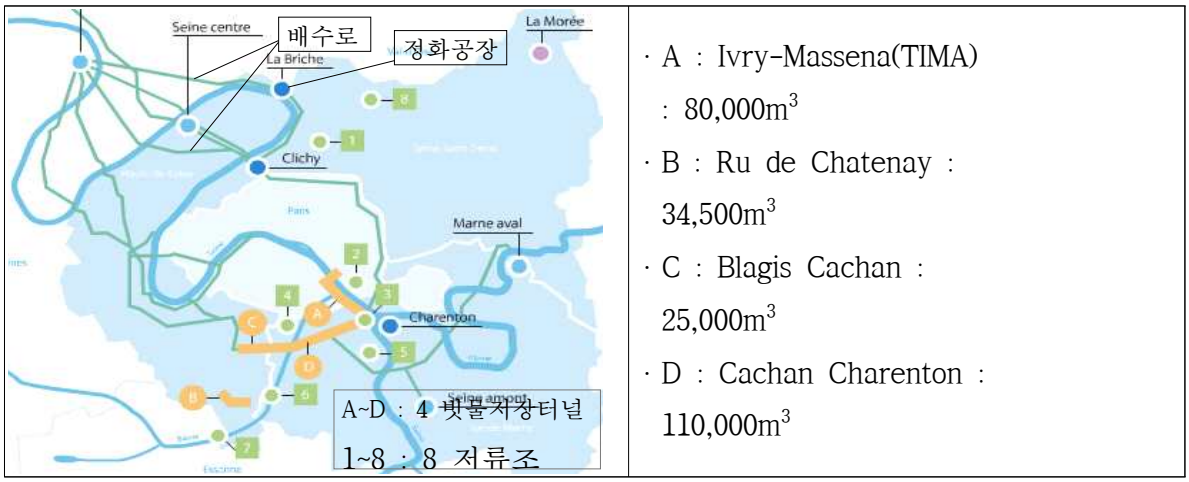
<그림 6.1.6 적용된 TBM 장비(전경)>

3. 프랑스 빗물저장터널(4 tunnels and reservoirs)

가. 개요

○ 위치 : 프랑스 Paris, Sceaux, Cachan 도시에 저류조-빗물저장터널-정화공장-지하배수로 연결

○ 저류용량 및 규격 : 저류조(8개소) 605,200m^3, 빗물저장터널(4개소) 249,500m^3



<그림 6.1.7 프랑스 파리 빗물저장터널 및 저류조 위치도>

나. 특징

(1) 빗물저장터널

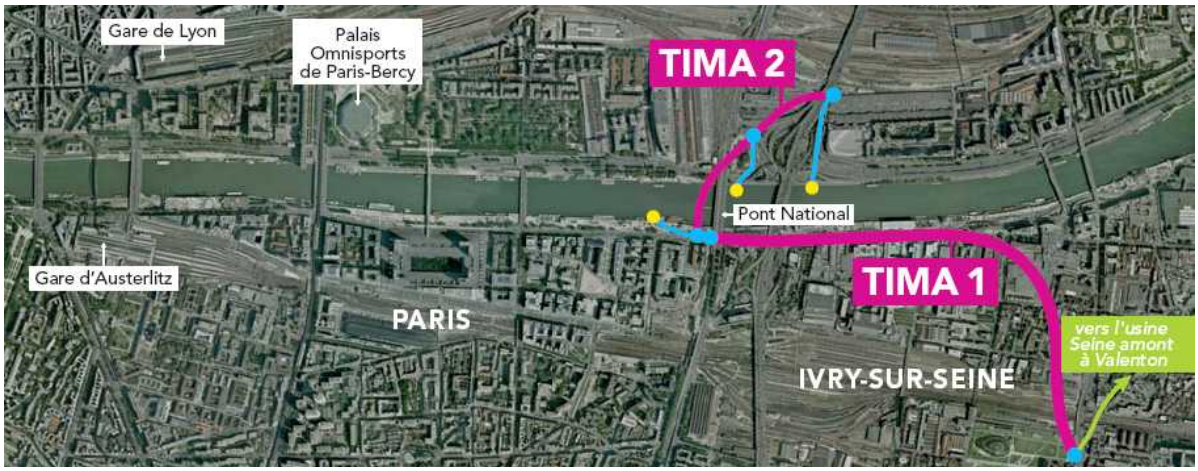
○ 굴착공법 : TBM 등 기계굴착공법 적용

<표 6.1.1 프랑스 파리 빗물저장터널에 이용된 기계굴착공법 종류별 현황>

구 분	장 비	형 태	직 경(m)	연 장(m)
A : Ivry-Massena(TIMA-1)	Herrenknecht	EPB	7.70	1,850
A : Ivry-Massena(TIMA-2)	Herrenknecht	EPB	4.88	750
B : Ru de Chatenay	LOVAT	Open Mode	7.08	1,250
C : Blagis Cachan	BESSAC	Back Actor	3.54	3,500
D : Cachan Charenton	LOVAT	EPB	7.08	4,200

○ Ivry-Massena, TIMA-1, 2 빗물저장터널의 특성

- Ivry-Massena(TIMA-1, 빗물저장터널) : 연장 1.86km, 최대직경 6.8m, 저류용량 80,000m^3, 수직갱도 2개소(직경 17m, 30m 심도)
- Ivry-Massena(TIMA-2, 빗물운송터널, 세느강 하부 통과) : 연장 850m, 최대직경 4.0m, 수직갱도 3개소(배수문과 연결)



<그림 6.1.8 Ivry-Massena, TIMA 위치도>



<Ivry-Massena, TIMA-1 빗물저장터널>



<Ivry-Massena, TIMA-1 수직갱도>

<그림 6.1.9 프랑스 파리 빗물저장터널 및 수직갱도(전경)>

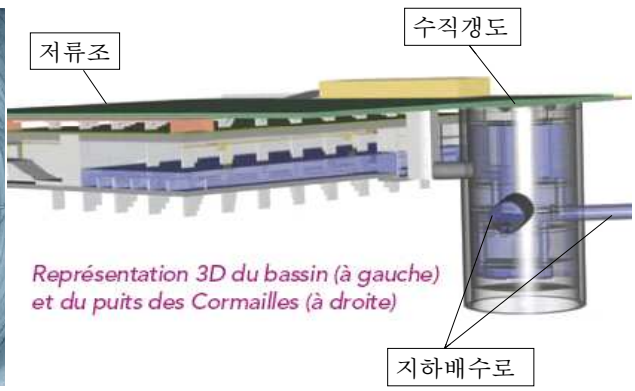
(2) 지하배수로 및 저류조

○ 지하배수로 : 지하 10~100m 심도에 위치, 직경 2.5~6m, 연장 200km

○ 저류조(Basin) : 유입시설(수직갱도, Puit) 및 지하배수로(Emissaire)와 연결



<지하배수로>



<저류조-수직갱도-지하배수로 연결모식도>

<그림 6.1.10 지하배수로(전경) 및 저류조-수직갱도-지하배수로 연결모식도>

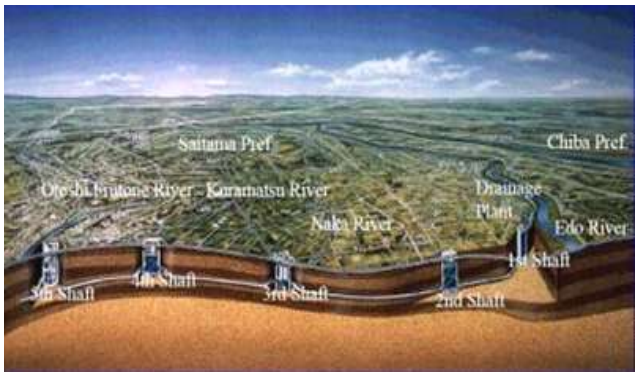
4. 일본 사이타마현 ; 수도권 외곽 방수로

가. 개요

○ 위치 및 목적 : 도쿄 인근의 치바현과 사이타마현을 흐르는 나카천, 쿠라마츠천 등의 작은 하천이 태풍 등으로 인해 홍수 위험이 있을 때, 유역면적이 큰 에도천으로 방수 목적

○ 시설규모

- 유입갱(shaft) : 5개소
- 지하방수로, 저수조 : 총저수용량 670,000mP
- 배수터빈 : 배수능력 200m^3/day

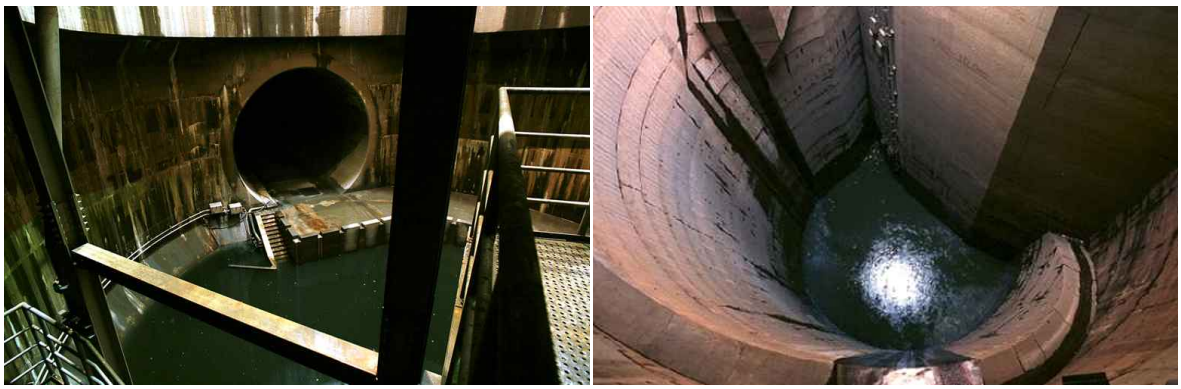


<그림 6.1.11 수도권 외곽 방수로 위치도>

나. 특징

(1) 유입갱(Shaft)

○ 5개소(제1유입갱 ~ 제5유입갱), 직경 30m, 심도 60m



<제2 유입갱> <제3 유입갱>

<그림 6.1.12 수도권 외곽방수로의 대표 유입갱(전경)>

(2) 지하방수로

○ 직경 10m, 연장 6.3km, 저수용량 490,000m^3

(3) 지하저수조

○ 59개의 기둥이 지지하고 있는 대형 압력조절수조, 지하저수조 지상부는 운동장으로 활용 중

○ 연장 177m, 폭 78m, 높이 18m(축구장 2개 크기)

○ 저수용량 180,000m^3(25m 크기의 일반 수영장 900개 분량)

(4) 배수 터빈

○ 14,000마력, 배수능력 200m^3/day



(a.) 지하방수로 (b) 지하저류조

<그림 6.1.13 수도권 외곽방수로의 지하방수로 및 지하저수조(전경)>

5. 말레이시아 스마트터널 사례

○ 말레이시아의 쿠알라룸푸르의 스마트터널은 세계 10대 건축물로서 홍수를 막기 위해 말레이시아 콸라룸프르에 만드는 길이 11.5km짜리 터널이며, 총 길이는 5,400m (길이 : 약 3km, 직경 : 13.m)이고, Ixshield TMB을 사용하며, 무게는 2,800톤이며, 3층 고속도로의 독특한 구조인 이 터널에는 도로와 오수 배출 터널이 따로 설치되어 있으며, 터널 고속도로는 안전의 중요성과 절대 안전을 우선으로 고려하여 설치되었다.

○ 또한, 평상시 1층에는 오수가 흐르고, 2층과 3층에는 차량이 다니지만, 홍수 때에는 비상구로 차들을 대피시키고, 모든 터널을 물로 막고 저수지로 흘려보내는 구조로 고속국도 밑을 통과하고 있다.



(a) Smart 터널 시공시



(b) Smart 터널모형

<그림 6.1.14 Smart 터널 시공 및 모형>

2. 특 징

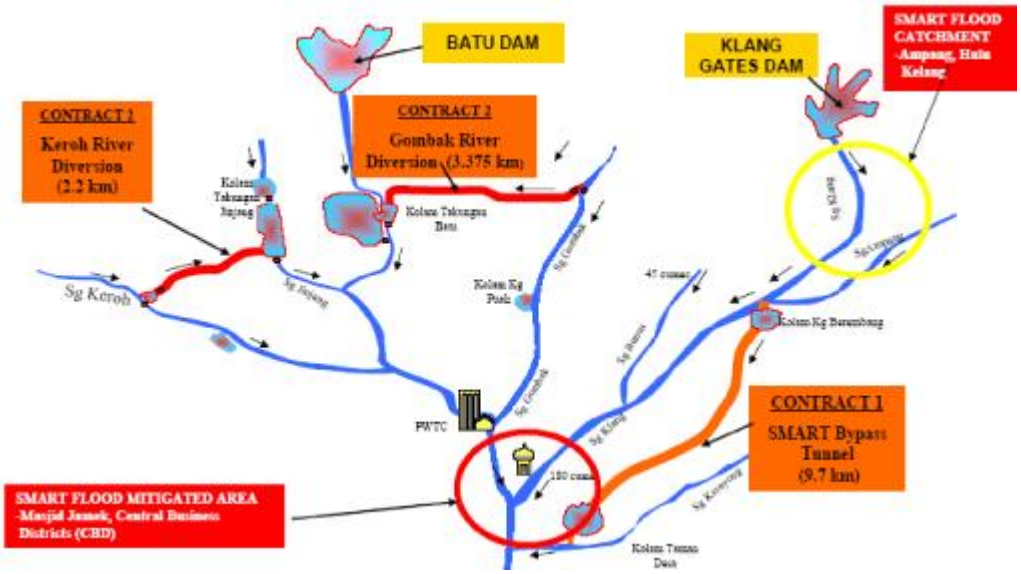
○ 다음의 계획도에서 나타난 것처럼 Sg Ampang 과 Sg Klang이 속한 SMART 유역을 통하여 주요 금융지구인 Masjid Jamek과 그 인근지역의 홍수재해를 경감시킬 수 있다. DID 주관으로 Batu/Jinjang Pond and Related Diversions로 명명된 홍수완화 프로젝트가 지속적으로 수행되고 있다. SMART 프로젝트의 목적은 Sungai Gombak and Sungai Batu 주위지역(예로써 PWTC, Jalan Ipoh, Segambut, Kepong)의 100년빈도 홍수량에 의한 피해를 방지하기 위한것으로서, Sungai Gombak과 Sungai Keroh의 유출량을 개별적으로 Batu 저류지로 유입시켜 도시 내의 유출량을 감소시킨다.

○ SMART 터널은 Kuala Lumpur 도심의 홍수 문제를 완화하기 위한 연방 정부주관

프로젝트로 빗물관리 및 도로터널 약자이다. 이 프로젝트는 MMC 법인 Berhad 및 Gamuda Berhad와 함께 말레이시아 상·하수도 및 말레이시아 고속도로기관의 부서 등 정부 수행기관과 합작 협정을 통해 진행되었다.

○ 연구결과 Sungai Klang과 Sungai Ampang의 합류지점 Sungai Klang과 Sungai Gombak과 SG Klang 합류지점이 홍수가 발생할 수 있는 지역이며, Jalan Tun Perak 다리(Masjid Jamek 근처)에 의해 결과적으로 주변지역의 홍수유발을 초래한다.

○ SMART 시스템은 주요지역으로 유입되는 홍수량을 bypass 터널과 우수지·저류지를 이용하여 저감시킬 수 있으며 이를 통하여 Jalan Tun Perak(Masjid Jamek 근처)의 수위를 낮춰 월류를 방지한다.



<그림 6.1.15 Smart 터널에 의한 유역관리>

○ SMART 터널의 프로젝트는 MMC Corp Berhad-Gamuda Berhad Joint Venture의 지원으로 수행되었으며, 말레이시아의 경제적 상업적 심장부인 Kuala Lumpur에서 계속적으로 발생하는 홍수를 저감하는 것을 주목적으로 하였다.

○ 그러나 지원기관의 아이디어를 통하여 시내 중심부로 통하는 main Southern Gateway의 교통체증을 완화시킬 수 있도록 터널이 자동차 도로의 역할도 할 수 있게 설계하였으며 또한, SMART 프로젝트는 교통체증 완화를 위한 대안으로 사용하여, 터널 내부에 도로를 설계하여 남쪽 게이트웨이를 통하여 시내 중심부로 진입하는 경우 발생하였던 교통체증을 완화시킨다. 예를 들면, 기존의 도로를 이용하여 Jalan Istana 인터체인지에서 Kampung Pandan까지 10~15분 소요되는 주행시간을 4분 정도로 단축할 수 있었다.



(a) Smart 터널내부 모식도



(b) Smart 터널 진입부

<그림 6.1.16 Smart 터널 모식도 및 실제 진입부>



<그림 6.1.17 Smart 터널 방문>

제 2 절 교토대 방재연구소 수방재 연구사례

1차년도 연구과제 수행 중 일본 해외출장시 교토대학교 방재연구소로부터 수집한 수방재 관련 연구분야 중 수리모형실험을 통한 지하공간 침수 시뮬레이션 및 지하공간 침수시 극한피난조건(Critical Evacuation Conditions)에 대한 연구사례 내용은 다음과 같음.

1. 수리모형실험(Hydraulic Model)을 통한 지하공간 침수 시뮬레이션

○ 모델링 대상 장소 : Oike Underground Mall

- 지하1층(B1F) : 주차장, 쇼핑몰, 지하철 승강장과 연결로로 구성
- 지하2층(B2F) : 주차장으로 구성
- 지하3층(B3F) : 지하철 승강장 및 선로로 구성, 승강장에 screendoor 설치조건 고려
- 지하구조물의 기하학적 조건 : 서측의 표고가 동측보다 1.5m 높고, 지하3층(B3F)은 지하1층(B1F)만 연결됨.

○ 실험조건(m : model, p : prototype)

- 축척(Scale) : L_m/L_p = 1/30
- 속도 및 시간 : V_m/V_p = 1/5.48, T_m/T_p = 1/5.48
- 배출유량 : Q_m/Q_p = 1/4,930



(a) 지하공간 개요도 (b) 수리모형실험(전경)

<그림 6.2.1 수리모형실험 대상 지하공간 개요도 및 실험(전경)>

○ 실험결과 분석

- 지하1층~3층까지의 침수과정을 시간(min)-침수심(m) 관계로 표현하고, 지하공간내 임의 위치에 대해 계단을 통한 피난 가능성을 침수시간대별로 분석함.

2. 지하공간 침수시 극한 피난조건에 대한 실규모 시험

가. 계단 및 출입문을 통한 피난 가능성 시험

○ 시험배경

- 지하공간의 면적은 지상공간에 비해 매우 작고 침수상황은 급하게 진전되므로, 지하공간내 설치된 계단 또는 출입문을 통한 피난이 유일한 방법이나 침수조건에 따라 피난조건이 여의치 않을 경우 인명피해를 초래하므로 지하공간 침수시 극한피난조건에 대한 실규모 시험이 필요함.

○ 시험조건

- 계단을 통한 피난조건 : 침수심도 20, 25, 30, 40cm, 피난시험대상자는 청년
- 출입문을 통한 피난조건 : 침수심도 20cm(16kgf/cm^2), 30cm, 35cm, 40cm(64kgf/cm^2), 54cm(약 100kgf/cm^2), 피난시험대상자는 연령대별(어린이 포함) 남성 및 여성



(a) 계단을 통한 실규모 피난시험 조건



(b) 계단을 통한 피난시험전경

<그림 6.2.2 계단을 통한 피난시험 조건 및 시험전경>



(a) 출입문을 통한 실규모 피난시험 조건



(b) 출입문을 통한 피난시험전경

<그림 6.2.3 출입문을 통한 피난시험 조건 및 시험전경>

○ 시험결과 분석

- 계단을 통한 실규모 피난시험 결과 : 건장한 청년을 대상으로 한 시험결과 침수상황 5분 후의 침수심도 40cm 조건에 대해 계단을 통한 피난 곤란
- 출입문을 통한 실규모 피난시험 결과 : 연령대별로 시험한 결과 침수심도 34cm 조건에 대해서는 청년과 50대 연령까지는 피난 가능, 침수심도 54cm 조건에서는 청년을 포함하여 모든 연령대에서 출입문을 통한 피난 곤란

나. 지하도로내 부분침수차량으로부터의 피난 가능성 시험

○ 시험조건

- 차량의 부분침수 가정(측면은 완전 침수되지 않음)
- 차문의 높이는 바닥면과 30cm 이격, 앞좌석 문의 폭은 약100cm 조건(뒷좌석은 폭이 작음)
- 차량의 기계부분은 제거, 좌석은 방수 조건



(a) 차문을 통한 실규모 피난시험 조건 (b) 앞좌석문을 통한 피난시험전경

<그림 6.2.4 차문을 통한 피난시험 조건 및 시험전경>

○ 시험결과 분석

- 문의 폭이 상대적으로 작은 뒷좌석 문을 통한 피난이 앞좌석보다 수월한 것으로 나타났음.
- 차량이 클수록 피난(차량으로부터의 탈출)이 곤란하여 위험함.
- 성인 남성의 경우, 시험실의 바닥면으로부터의 수심 75~80cm가 피난한계로 나타났음

참고 문헌

강두기, 박재범, 신동수, 신현석, 장종경, 조덕준, (2011), 도시지역 침수저감을 위한 수리 및 침수분석에 대한 연구, 한국수자원학회 2011년도 학술발표회, 한국수자원학회, pp. 279-282.

김기욱, 김상단, 김수창, SWMM 모의이력 DB 기반의 도시침수 위험지역 분석모델, 한국방재학회논문집, 한국방재학회, 제 12권, 1호, pp. 217-222.

김도식, 김영근 (2007), 암반필라를 포함한 비대칭 근접병설터널의 안정성평가에 관한 연구, 한국터널공학회논문집, 제14권, 제4호, pp.387-401.

김도형, 박준경, 김영근, 오세준, 이두화 (2003), 대단면근접병설터널의설계및안정성평가기법에관한연구, 봄학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.51-66.

김상환 (2003), 근접터널의설계개념및해석기법에대한연구, 터널기술논문집, 제5권, 제1호, pp.33-42.

김양운, 정상훈, 강세구, 안경철 (2007), 병설터널필라부의텐션볼트보강에따른거동특성및보강효과에관한연구, 2007대한토목학회정기학술대회.

김양운, 정상훈, 안경철 (2008), 병설터널필라부의텐션볼트보강에따른거동특성및보강효과에관한연구(Ⅱ), 2008대한토목학회정기학술대회.

김영수, 권태순, 정일한, 김광일 (2009), 터널의필러부폭에따른터널거동, 한국지반환경공학회논문집, 제10권, 제7호, pp.15-23.

김영주, 한건연, 조완희 (2010), 지하저류조설치에따른침수피해저감효과분석, 대한토목학회논문집, 30(1b), pp.41-51.

김영호, 여창건, 서근순, 송재우 (2011), 기후변화 시나리오에 따른 지역별 확률강우량, 한국방재학회논문집, 제 11권, 3호, pp. 29-35.

김용좌 (2001), 연약지반에서수직구시공을위한대책에관한연구, 영남대학교공학박사학위논문.

김유덕 (1995), 지반굴착에기인한인접건물의영향에관한연구, 영남대학교산업대학원석사학위논문.

김윤종 (2005), 서울시지하공간침수방지대책및대피체계수립방안, 서울시정개발연구원.

김윤종, 이창희, 여창건 (2008), 도시지역지하공간의침수위험도평가와대책, 물과미래, 제41권, No.3pp.49-53.

김윤태, 심재현, 정재학, 안재찬, 수펌프장의 효율적인 운영을 위한 퍼지모형의 적용, 한국방재학회논문집, 한국방재학회, 제 4권, 3호, pp. 51-60.

김종렬, 강희복 (2001), Underpinning 시공시 구조물의 침하특성에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제21권, 제5-C호, pp.567-575.

김종우, 박지용 (2004), 쌍굴터널주변지반의변형거동에관한모형실험연구, 한국암반공학회논문집, 제14권, 제5호, pp.381-390.

김종우, 배우석 (2008), 삼병렬터널의안정성검토를위한모형실험연구, 터널과지하공간, 제18권, 제4호, pp.300-311.

김중훈, 주진걸, 전환돈, 이정호, 우수관거 흐름 제어를 위한 관망 설계에 관한 연구, 한국방재학회논문집, 한국방재학회, 제 9권, 1호, pp.1-7.

김학문 (1997), 쌍굴터널굴진에따른주변지반의거동과간섭효과, 한국암반공학회논문집, 제7권, pp.136-142.

김학문, 황의석 (2000), 흙막이굴착에따른인접건물의손상평가에대한모형실험연구, 한국지반공학회논문집 제16권, 제1호, pp.191-201.

김학문, 황의석 (2003), 도심지흙막이굴착시인접구조물의손상평가연구, 한국지반공학회논문집 제19권, 제6호, pp.351-361.

김홍문, 김찬웅, 홍용희, 이상덕 (2004), 라이닝강성에따른2-Arch터널필러부의거동, 대한토목학회전문학회세미나.

김홍문, 이상덕 (2009), 불연속성암반에서2-아치터널굴착시필러기초부응력분포에대한연구, 제19권, 제2호, pp.123-131.

류승현, 이정호 (2012), 유전자 알고리즘을 이용한 도심지하저류조 최적위치와 규모 선정, 한국방재학회논문집, 제 12권, 3호, pp. 285-290.

박민현 (2011), 호우원인에 따른 자료기간별 확률강우량 산정 및 방법별 IDF 곡선 작성, 서울시립대학교 산업대학원 학위논문.

박병기외 (1993), 건물침하 방지를 위한 Underpinning 사례 연구, 한국 지반공학회 가을학술발표회, pp.57-62.

박정준 (2010), 컴팩션그라우팅개념을도입한터널보조공법연구, 고려대학교석사학위논문.

박정훈, Ho Van Hoa, 이승엽, 김중훈 (2012), 다목적 최적화 알고리즘의 적용을 통한 우수저류조 최적 설치지점 선정기법의 제안, 한국 수자원 학회, 한국수자원학회 2012년도 학술발표회

박지현 (2008), 도시유역의 저류지에 의한 홍수조절능력에 관한 연구, 경희대대학원.

배규진등 (1998), Neural Network을 이용한 터널 설계 적정성평가용 Expert System 개발, 건설기술연구원.

백승철, 장부식, 이태규, 이성민, 황정순 (2009), 병설터널보강필라의안정성평가방법에관한

연구, 한국지반환경공학회논문집, 제10권, 제7호, pp.81-91.

변요셉, 김현기, 이상수, 천병식 (2010), 병렬터널필라부거동에대한수치해석검토, 한국지반환경공학회논문집, 제11권, 제8호, pp.49-55.

서규우, 허준행, 조원철 (1995), 도시하천에서의 재현기간별 설계홍수량 및 도달시간 산정을 위한 유출모형의 비교연구, 연세대학교 산업기술연구소 논문집, pp. 177-191.

서형준, 박성원, 정경한, 최항석, 이인모 (2009), 공팽창이론에의한압력식쏘일네일링의인발저항력산정, 한국지반공학회논문집, 제25권, 제7호, pp.35-46.

서형준, 김현래, 정남수, 이인모 (2010), 쏘일네일링과앵커가결합된하이브리드공법의거동메커니즘, 한국지반공학회논문집, 제26권, 제7호, pp.117-133.

서형준, 한신인, 이인모 (2011), 근접시공을 위한 지하저류공동 구조물의 지반보강공법 연구, 한국터널지하공간학회 정기학술발표회, pp. 137-144.

서형준, 김현래, 한신인, 이인모 (2012), 쏘일네일링과 앵커가 결합된 하이브리드 공법의 하중전이 메커니즘, 한국지반공학회 논문집, 제28권 1호, pp. 55-66.

서형준, 이강현, 박정준, 이인모 (2012), 쏘일네일링의 세 가지 파괴모드를 고려한 설계최적화에 대한 연구, 한국지반공학회 논문집, 제28권 7호, pp. 5-16.

서형준, 한신인, 이인모 (2012), 근접시공을 위한 락필라 보강공법의 거동특성 연구: 수치해석, 한국터널지하공간학회 정기학술발표회, pp. 143-153.

서형준, 이강현, 한신인, 이인모 (2012), 지하공간하부 지하저류공동에서의 필라 보강효과에 관한 수치해석적 연구, 한국터널지하공간학회 논문집, 제 14권 제 5호, pp.453-467

손무락 (2005), 도심지에서의지반및터널굴착에따른지반변위가인접건물에미치는영향및손상도예측.대한토목학회논문집Vol.25, No.3, pp.189-199.

손무락 (2007), 굴착유발지반변위에의한인접구조물의거동및손상도예측.대한토목학회논문집, 제27권, 제2호, pp.149-155.

손무락 (2009), 지반굴착유발진행성지반변위에의한인접구조물의거동분석.대한토.

손무락 (2009), 지반굴착유발진행성지반변위에의한인접구조물의거동분석.대한토목학회논문집, 제29권, 제4호, pp.153-162.

손태석, 강동호, 장종경, 신현석 (2010), SWMM을 이용한 도시지역 내수침수 취약성 평가, 한국방재학회 논문집, 한국방재학회, 제10권, 제4호, pp. 105-117.

송기일, 김주원, 조계춘 (2007), 터널사전보강영역의경시효과를고려한수치해석기법에관한연구, 한국터널지하공간학회논문집, 제9권, 제2호, pp.109-120 .

송동범, 김홍철, 김성근 (2007), 도심지근접공사시흙막이공법선정프로세스, 2007대한토목

학회정기학술대회.
시설안전공단 (2000), 기존터널근접시공매뉴얼.
신영완, 김영근 (2010), 대단면근접병설터널에서의필러부거동특성검토, 터널과지하공간, 제20권, 제3호, pp.131-144.
신창건 (2008), AHP 기법에 의한 절토사면의 합리적 유지관리, 박사학위논문, 서울시립대학교.
신현식 (1973), Underpinning에관한연구, 한국건축공학회논문집, 제17권, pp.27-37.
심우배 (2006), 대형화되는도시홍수!어떻게대응할것인가?, 한국수자원학회지-물과미래, 39(9), pp.59-64.
안정현 (2009), 연약지반상신설구조물시공이인접한기존도시철도구조물에미치는영향, 한국해양대학교석사학위논문.
양구승 (1996), 도심지깊은굴착시인접지반거동에대한분석.서울대학교공학박사학위논문.
양구승 (1996), 도심지깊은굴착시인접지반거동에대한분석서울대학교공학박사학위논문.
왕이완 (2001), 도로에서2Arch터널의적용성, 대한터널협회정기학술발표회, pp.141-152
宇井正和, 安川浩 (1987), 管路接統用チャンバーによるエネルギー損失, 第31回水理講演會.
유충식 (2002), 도심지깊은굴착시주변건물및매설관손상평가, 한국지반공학회, 봄학술발표회.
윤선권, 문영일 (2009), 도시홍수피해저감및응급대책안수립, 한국수자원학회지-물과미래, 42(10), pp.59-65.
윤용남 (2009), 물관련재해대처를위한기후변화적응대책, 한국수자원학회지-물과미래, 42(9), pp.59-67.
이길성, 김성은 (2006), PCSWMM 모형을 이용한 안양천 유역에서 내수침수의 시간적・공간적 해석, 한국수자원학회 2006년도 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 1150-1155.
이나은 (2013), 도시지역의 최적 홍수저류지 설계에 관한 연구, 석사학위논문, 동서대학교
이인모 (2000), 토질역학의원리.
이인모 (2001), 암반역학의원리.
이인모 (2004), 터널의지반공학적원리.
이재수 (2009), 수문학, 구미서관.
이재준, 곽창재, 김호년, 이상원 (2007), 도시유역 저류지의 위치관련 변수의 수문학적 해석, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 1405～1408.
이창희 (2006), 서울시지역안전도평가모형개발연구:홍수재해를중심으로, 서울시정개발연구원.
이창희, 한건연 (2007), 지하공간 침수해석모형과 연계한 도시침수해석 통합모형, 한국수재해학회논문집 40(4) pp. 313-324.

이창희, 한건연, 최규현 (2006), SWMM을 연계한 DEM 기반의 도시침수해석 모형, 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 39(5), pp.383-394

이홍성 (2004), 미고결암반층에서의붕괴터널대책사례, 현대건설2004기술세미나논문집.

이홍성, 김대영, 천병식, 정혁상 (2009), 구조물근접터널시공시최적의보강범위에관한연구 한국터널공학회논문집, 제11권, 제2호, pp.199-211.

장부식 (2006), 근접병설터널필라의거동특성평가에관한연구, 홍익대학교대학원박사학위논문.

장부식, 황정순, 윤배식, 김홍택 (2006), 축소모형실험에의한병설터널필라의거동특성, 2006 대한토목학회정기학술대회.

장석부, 문상조, 권승, 허도학, 배규진 (2002), 대전역사하부통과3-arch터널의설계사례연구(1), 한국터널공학회, 터널기술, 제4권, 제3호.

전병훈 (2013), 도시지역에서의 홍수예경보시스템의 적용성 연구, 석사학위논문, 동서대학교.

정용진, 송한찬, 이승훈, 신성호, 이승복 (2007), 근접터널암반필라의안정성평가및보강방법에관한연구, 2007한국암반공학회특별심포지엄.

조성문 (2009), Huff 方法에 의한 江陵地域 異常降雨의 時間分布 特性硏究, 학위논문, 충남대학교.

조완희, 한건연, 황택진, 손아롱 (2011), 건물 및 도로영향을 고려한 도시지역에서의 2차원 침수해석, 한국방재학회논문집, 제 11권, 5호, pp. 159-168.

조인성 (2010), 가압팽창관을적용한엄브렐러아치공법의터널보강효과, 고려대학교박사학위논문.

조인성, 박정준, 김종선, 이인모 (2010), 천공홀가압팽창개념을도입한터널보조신공법연구, 한국터널지하공간학회논문집, 제12권, 6호, pp.407-416.

최성열 (2004).국외의도시홍수해결을위한방안-일본의특정도시하천침수대책법을중심으로-, 방재정보, 제19호, 제6권, 제3호, pp.35-41.

최원일, 최정환, 문연오, 김선홍, 유호식 (2008), 고속철도터널의정량적위험도분석(QRA)를 위한세부기준에관한고찰, 한국암반공학회지-터널과지하공간, 18(6), pp.393-407.

한건연 (2009), 지하공간등에대한침수해석기법개발, 중과제내배수침수재해저감기술개발의세세부과제, 소방방재청.

한건연, 손인호, 이상엽, 임재태 (2009), 도시침수저감을 위한 지하저류조 용량 산정, 한국수자원학회 2009년도 학술발표회 초록집, 한국 수자원 학회, pp.1007-1011.

한건연, 이종석 (2006a)수공구조물에대한RiskAnalysis기법의적용(I), 한국수자원학회지-물과미래, 39(10), pp.65~70.

한건연, 이종석 (2006b)수공구조물에대한RiskAnalysis기법의적용(Ⅱ), 한국수자원학회지-물과미래, 39(11), pp.70~75.

한건연, 이종석 (2006c)수공구조물에대한RiskAnalysis기법의적용(Ⅲ), 한국수자원학회지-물과미래, 39(12), pp.71~78.

한건연, 이창희, 이경택 (2006), 비정형격자기반 지하공간 침수해석 모형, 2006 대한토목학회 학술대회, pp.2020-2023.

한신인, 이재환, 정영욱, 이인모, 조덕준 (2012), 도심지 지하공간 홍수재해 방지 기술 연구, 한국터널지하공간학회 정기학술발표회, pp. 24-31.

건교부 (1999), 한국 확률강우량도 작성, 1999년도 수자원 관리기법 개발 연구조사 보고서 제 1권.

건교부 (2000), 지역적 설계 강우의 시간적 분포, 1999년도 수자원 관리기법 개발 연구조사 보고서 제 2권 : 별책.

건설교통부 (2003), 도로 배수시설 설계 및 유지관리 지침.

건설교통부 (2007), 안성천 유역 종합치수계획.

국립방재연구소 (2001), 우수유출 저감 시설 설치 기법 연구(Ⅳ).

국무총리 국무조정실 수해방지대책기획단 (2003), 수해방지대책백서, 서울.

국토해양부 (2004), 국내 도시홍수 침수원인 조사 및 분석.

국토해양부 (2008), FFC-G15 다목적 지하저류지 설계 가이드라인.

국토해양부 (2008), 다목적 지하 저류지 설계 가이드라인, FFC-G15(제5차년도 최종)

국토해양부 (2008), 도시 침수피해 방지를 위한 효율적 실행방안 연구.

국토해양부 (2008), 빗물관리 및 활용계획 수립과 저변 확대방안 조사 연구.

국토해양부 (2011), 확률강우량도 개선 및 보완 연구

도시홍수재해관리기술연구단 (2005), 도시유출 해석모형의 실무 적용 지침(안) 및 적용 예제.

도시홍수재해관리기술연구단 (2005), 도시하천의 배수시설 설계기술Ⅰ.

도시홍수재해관리기술연구단 (2007), 도시유역 홍수량 산정 가이드라인(안), 도시홍수재해관리기술연구단

부산광역시(2010), 부산광역시 하수도정비 기본계획 (변경) 보고서

사단법인한국터널공학회 (2002), 터널의 이론과 실무.

사단법인한국터널공학회 (2007), 터널 설계기준.

사단법인한국터널공학회 (2007), 터널의 이론과 실무-도심지 천층 및 근접터널.

사단법인한국터널공학회 (2009), 지하대공간 구조물 설계 및 시공가이드.

서울시정개발연구원 (2005), 서울시 지하공간 침수방지 대책 및 대피체계 수립방안.

서울시정개발연구원 (2007), 서울시 지하공간의 장기 이용 전망과 정책방향.
서울시정개발연구원 (2008), 기후변화에 대응한 서울시 물관리 전략.
서울시정개발연구원 (2008), 재난제로 서울을 위한 방재전략.
서울시정개발연구원, 서울시지역안전도평가기법개발.
서울특별시 (2002), 상습 침수 해소를 위한 하수도 시설기준 재검토.
서울특별시·한국수자원학회 (1999), 1998수해백서, 서울특별시건설기획국치수과.
서울특별시·한국수자원학회 (2002), 2001수해백서, 서울특별시건설기획국치수과.
소방방재청 (2008), 우수 유출 저감시설의 종류·구조·설치 및 유지관리기준.
소방방재청 (2008), 지하공간안전관리시스템구축.
소방방재청 (2010), 2009재해연보.
소방방재청 (2010), 추석 연휴기간 재난관리 종합상황, 2010년 9월 24일.
한국건설기술연구원 (1997), 국내 터널건설의 현황조사 및 교차터널의 설계법 개발연구.
한국상하수도학회 (2005), 하수도시설기준.
한국수자원학회 (2005), 하천설계기준.
한국수자원학회, 서울특별시 (2002), 2001 수해백서
한국지반공학회 (2002), 굴착 및 흙막이공법, 구미서관.
한국지반공학회 (2005), 국내 재래식 터널의 변상현황과 배면공동 보강사례 연구.
행정자치부 (2004), 지하공간 침수방지대책에 관한 연구.
환경부 (2005), 하수도시설기준.
환경부 (2010), 보도자료-정부, 범부처적으로 기후변화 「적응」에 나선다, 2010년10월10일.
荒尾慎司ら (1996), 2方向接合マンホール部のエネルギー損失特性, 日本下水道協會誌, v.33No.396.
ASCE (1992), Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems, ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice No.77.
Boone S. J. (1996), Ground-movement-related building damage, JournalofGeotechnicalEngineering, 122(11).
Boone S. J., Westland, J., and Nusink, R. (1999) Comparative evaluation of building response to an adjacent braced excavation, Can.Geotech.Journal, 36, 210-223.
Boscardin, M. D., and Cording, E. J. (1989) Building response to excavation-induced settlement, JournalofGeotech.Engineering, 115(1), 1-21.
Boscardin, M. D., Cording, E. J., and O'Rourke, T. D. (1979) Case studies of building behavior in response to adjacent excavation, U.S.D.O.T Rep. No.

UMTA-IL-06-0043-78-2, U.S. Department of Transportation, Washington, D. C.

Bulter, D. and David, J. W. (2000), Urban Drainage, E&FNSPON.

Burland, J. B., and Wroth, C. P. (1974) Settlement of buildings and associated damage, Proc. Conference' Settlement of structures', Pentech Press, London, 611-654.

Burland, J. B., Standing, J. R., and Jardine, F. M. (2001) Assessing the risk of building damage due to tunnelling-lessons from the Jubilee Line Extension, Geotechnical Engineering. Meeting society's need, Swetand Zeitlinger, Lisse, 17-44.

C.D. Martin, W.G. Maybee (2000), Twin strength of hard-rock pillars, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 37, pp.1239-1246.

Caspe, M. S. (1966), Surface settlement adjacent to braced open cuts. JSMFD, ASCE, Vol. 92, SM 4, pp.51-59.

Dutta D., H. Takamura H. and Herath (2003), Understanding flood behavior in underground facilities for urban flood risk management, Preceeding of New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, Tokyo.

Economic and Social Commission for Asia and the Pacific(ESCAP) (1991), Manual and Guidelines for Comprehensive Flood Loss Prevention and Management, United Nations Development Programme.

Erich J. (2002) Plate Flood risk and flood management, Journal of Hydrology 267 2-11.

Federal Highway Administration (2001), Urban Drainage Design Manual, HEC 22, FHWA-NHI-01-021.

Federal Highway Administration (2007), Junction Loss Experiments : Laboratory Report, FHWA-HRT-07-036.

Fry, R. H. and Rumsey, P. B. (1983), Prediction and control of ground movement associated with trench excavation, Water Research Centre.

Goldberg-Zoino and Associates (1976), Lateral support systems and underpinning Vol. 1, FHA, PB-257 210, pp.4-22.

Goldberg-Zoino and Associates, (1976), Lateral support systems and underpinning, Vol.1, FHA, PB-257210, pp.4-22.

Ground, D, (1987), Underpinning by grouting, Ground Engineering, pp.21-30.

Han, S.I., Lee, I.M., Lee, J.H., Jung, Y.W., Jo, D.J. (2012), Development for Risk Assessment Technology of Flood in Underground Spaces and Its Practical

Application, World Tunnel Congress 2012, Bangkok, Thailand, pp.865-866.

Han, S.I., Jo, D.J., Lee, J.H., Jung, Y.W., Lee, I.M. (2013), Reinforced-pillar system in multi-placed caverns for rainwater detention, World Tunnel Congress 2013, Geneva, Switzerland.

Hoek E. and Brown, E. T., (1980), Underground Excavation in Rock, Institution of Mining and Metalluargy, London, pp.55-80.

Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawedn, W.F., (1995), Support of Underground Excavation in Hard Rock, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp.110-135.

Huber, W.C and Dickinson, R.3., (1998), Storm Water Management Models; version4, User's manual, U.S Environmental Protection Agency

Jo, D.J., Lee, I.M., Lee, J.H., Jung, Y.W., Han, S.I. (2013), Disaster Prevention Technology for Urban Flooding Using Rainwater Storage Cavern and Practical Application, International Symposium on Tunnelling and Underground Space Construction for Sustainable Development, TU-Seoul 2013, Seoul, pp.401-404.

Kamimura, M., (1997), Discussion on the behaviours of parallel tunnel with a small clearance, 28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress, pp.898-906.

Kobayashi, M., (1994), Observational construction of a large sectional minimum interval twin road tunnel in urban alluvial loose sand soil, Tunnelling and Ground Condition, Abdel Salam(ed.), Balkema, Rotterdam, pp.157-164.

Mana, A. I. and Clough, G. W. (1981), Prediction of movements for braced cuts in clay, ASCE, Vol.107, No. GT6, June, pp.759-777.

Matsuda, T. , Toyosato, E., Igaraghi, M., Nashimoto Y. and Sugiyama, T., (1997), A study on design methods for twin tunnels constructed by the single drift and central pier method, Proceeding of studies on Tunnel Engineering.

Matsuda, T., (1998), Ground Behavior and Settlement Control of Twin Tunnels in Soil Ground, Tunnels and Metropolises, Vol 16, No 2, pp.1193-1198.

Mays, L. W. (2001), Stormwater Collection Systems Design Handbook, McGRAW-Hill.

O'Rourke, T. D. (1975), A study of two braced excavations in sands and interbedded stiff clay. Ph. D. thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign.

Pathirana A., Tsegaye S., Gersonius B., Vairavamoor thy K., (2008), A simple 2-D inundation model for incorporating flood damage in urban drainage planning, Hydrology and Earth System Sciences Discussion, Vol 5, pp. 3061-3097.

Potts, D. M., and Addenbrooke, T. I. (1997) A structure's influence on tunnelling-induced ground movement, Proc. Instn. civ. engrs. Geotech. Engineering, 125, 109-125.

Saaty R. W.(2003), Decision making in complex environments-The analytic hierarchy process for decision making.

Seo, H.J., Han, S.I., Park, J.H., Lee, I.M. (2012), A Reinforcing Method for Underground Rainwater Detention Cavern Underneath Existing Structures, World Tunnel Congress 2012, Bangkok, Thailand, pp.846-848.

Seo, H.J., Lee, I.M. (2013), A study of pillar-reinforcing technology underneath existing structures: laboratory test, International Symposium on Tunnelling and Underground Space Construction for Sustainable Development, TU-Seoul 2013, Seoul, pp.397-400.

Seo, H.J., Lee, I.M. (2013), A Reinforcing Method for Underground Rainwater Detention Cavern Underneath Existing Structures, World Tunnel Congress 2013 Geneva, Switzerland.

Shiu-Shin Lin, Shang-Hsien Hsieh, Jan-Tai Kuo, Ying-Po Liao, Yen-Chang Chen, (2006), Integrating legacy components into a software system for storm sewer simulation, Environmental Modeling & Software, Vol 21, pp.1129-1140.

Smoltczyk, U, (1987), Underpinning, Groud Engineer's Reference Book, pp.54/1-54/3.

Son, M. (2003) The response of building damages to excavation-induced ground movements, Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.

Son, M. R., and Cording, E. J. (2005) Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements, Journal of Geotech. And Geoenv. Engineering, 131(2), 162-177.

Syme W. J., Pinnelll M. G. and Wicks J. M.(2004), Modelling flood inundation of urban areas in the UK using 2D/1D hydraulic models, Proc. of 8th National Conference on Hydraulics in Water Engineering, Australia.

Syme W.(2008), Flooding in urban area - 2D modelling approaches for buildings and fences, Proc. of 9th National Conference on Hydraulics in Water Engineering, Australia.

Takayama T., etc.(2006), Research works for the risk assessment technology of flood in

urban area and its practical application, Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 49 C.

Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967), Soil Mechanics in Engneering Practice. 2nd Ed, John Wiley and Sons. Inc. New York, pp.572.

Tetsuo Matsuda, (1998), Ground behavior and settlement control of twin tunnels in soil ground, Tunnels and Metropolises, pp.1193-1198.

Thorbum S. and Littiejohn G.S., (1993), Underpinning and retention, 2nd Ed., Blackie Academic & Professional, pp.298-303.

Toda K. (2007), Urban Flooding and Measures, Journal of Disaster Research Vol.2 No.3, pp.143-152.

EPA (2005), SWMM USER'S MANUAL Version 5.0

EPA (2009), SWMM APPLICATION MANUAL

UD&FCD (2001), Urban Storm Drainage Criteria Manual, Urban Drainage and Flood Control District.

World Meteorological Organization (2008), Urban Flood Management.

XP-SWMM 프로그램매뉴얼ver (2010).

미국연방도로관리청홈페이지, http://www.fhwa.dot.gov.

미국콜로라도도로배수및홍수조절국홈페이지, http://www.udfcd.org.

일본국토교통성홈페이지, http://www.mlit.go.jp.

일본하수도협회홈페이지, http://www.jswa.jp.

주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술진흥원 주관 건설기술 연구개발사업 (건설기술혁신사업)의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술진흥원 주관 건설기술 연구개발사업 (건설기술혁신사업)의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.

본 보고서와 관련한 문의는 아래로 연락하여 주시기 바랍니다.

■ **문의처 : 국토교통과학기술진흥원** TEL 031)381-6311

(주)서영엔지니어링 TEL 02)6915-7301

R&D / 10기술혁신E04

복합지하공간 수해방지를 위한 저류공동 건설기술 개발

■ **발행일 / 2014. 11.**

■ **주관연구기관 / (주)서영엔지니어링**

경기도 성남시 분당구 황새울로258번길 25 (수내동, 서영빌딩) 6~12층

TEL : 02-6915-7000(대)

■ **발행처 / 국토교통부 국토교통과학기술진흥원**